



사단법인
한국에너지학회
KOREAN ENERGY SOCIETY

www.koes.or.kr

2023년도 한국에너지학회 춘계학술발표회

2023년도 한국에너지학회 춘계학술발표회

일시. 2023년 4월 26일(수)~4월 28일(금)

장소. 라마다프라자제주호텔

주최. 사단법인 한국에너지학회

후원.  **DANSUK**  한국아이티오 (주)  **고려대학교**
KOREA UNIVERSITY

 **CONSTRUCTION**
ENGINEERING SERVICE  **TORAY**
한국도레이과학진흥재단  **UGPS**
울산지피에스주식회사  **DAHO**
(주)다호 트로닉

사단법인 www.kose.or.kr
한국에너지학회
KOREAN ENERGY SOCIETY

춘계학술대회 참가안내

2023 KOES SPRING CONFERENCE

■ 등록

- 사전등록 : 전자계산서, 온라인카드결제, 계좌입금
- 등록대 운영시간 : 4. 27(목) 9:00 ~ 4. 28(금) 12:00
- 등록비

구 분	정회원·종신회원	비회원	학생회원	학생비회원
사전등록	150,000원	180,000원	110,000원	120,000원
현장등록	170,000원	200,000원	120,000원	130,000원

- 등록비 포함사항 : 프로그램북, 4/27(목)만찬, 기념품, 경품행사 추첨권
- 등록시 학술발표회 프로그램북을 배부하며, 발표논문 초록은 파일로 배포합니다.
- 학술대회 등록자를 대상으로 기념품 배부 및 추첨 행사가 준비되어 있습니다.
- 4월 27일(목) 만찬은 한정된 좌석으로 인하여 선착순 마감 될 수 있습니다.

■ 분과발표 안내

[구두 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. 27일(목) ~ 28일(금) 양일간 진행됩니다.
- 발표시간은 질의응답을 포함하여 15분입니다.
- 노트북과 무선프리젠티어는 발표장에 준비되어 있습니다.
- 발표장에 미리 도착하셔서 노트북에 발표자료를 저장해두시기 바랍니다.

[포스터 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. P1, P2, P3으로 나뉘어 있습니다.
- 발표 시간 전까지 본인번호가 붙어 있는 포스터보드에 자료를 부착하시기 바랍니다.
- 작품 사이즈 : 가로 90cm 세로 120cm (규격외 게시 가능)
- 포스터 양식은 자유이며, 필요하실 경우 학회 홈페이지에 있는 양식을 사용하시면 됩니다.

2023년도 한국에너지학회 춘계학술발표회 총괄일정

■ 일시 : 2023년 4월 26일(수) ~ 4월 28일(금)

■ **장소** : 라마다프라자제주호텔 8층, 2층 (제주특별자치도 제주시 탑동로 66)

▶ 4월 26일(수)

시 간	행사내용
16:00~18:00	분과회의 (비공개)

▶ 4월 27일(목)

시 간	A 발표장 (8F 한라홀)	B 발표장 (8F 아라홀)	C 발표장 (8F 오라홀)	D 발표장 (8F 탐라홀)	E 발표장 (2F 마라홀)	F 발표장 (2F 비양홀)	G 발표장 (2F 추자홀)	포스터 세션
9:30~	등록 (8층 접수처)							
10:00~11:00	한국지질 자원연구원	한국에너지 기술평가원	한국화학 연구원	한국에너지 기술평가원	한국에너지공단	분과별 구두발표 A	분과별 구두발표 B	포스터발표 I
11:00~11:40	기후변화대응 탄소광물화 기술	정부-에너지 공기업 R&D 기술교류회	CCUS 기술·협력 심포지엄	수소 생산기술 및 제도	EERS 추진현황 및 활성화 방안			
11:40~12:00								
12:00~12:30								
12:30~13:00								
13:00~13:20			고려대학교			SK E&S		이사회(2F 우도홀)
13:20~14:00								
14:00~15:00	한국전력기술		이차전지	한국에너지 기술평가원	산업부 전략기획단	가스복합발전 의 탄소포집	분과별 구두발표 D	포스터발표II
15:10~15:25	청정수소 생산 및 활용 미래기술 개발 동향	한전 전력연구원 & SK가스		수소 저장·운송 및 활용 기술	에너지신산업 분야 국내·외 활성화 및 新시장 창출을 위한 기술혁신 방향 토론회			
15:25~16:30		무탄소연료(수 소·암모니아) 생산 및 발전 기술동향						
16:30~17:00								
17:10~18:00	개회행사 : 8층 탐라홀							
	개회식							
	개회사 : 한국에너지학회 이관영 회장 축 사 : 제주특별자치도 오영훈 도지사							
	기조강연							
	초청연사 : 전력거래소 김영환 제주본부장							
18:10~	2022년 추계학술발표회 우수논문시상식 만 찬							

▶ 4월 28일(금)

시간	A 발표장 (8F 한라홀)	B 발표장 (8F 아라홀)	C 발표장 (8F 오라홀)	D 발표장 (8F 탐라홀)	E 발표장 (2F 마라홀)	F 발표장 (2F 비양홀)	포스터세션
9:30~12:00	등록 (8층 접수처)						
10:00~11:00	한국에너지 기술평가원 에너지효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향	한국에너지 기술평가원	산업부 전략기획단	에너지 MD-PD 워크숍	분과별 구두발표 E	분과별 구두발표 F	포스터발표Ⅲ
11:00~11:30							
11:30~12:00							

특별세션 1

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 9:30~14:00
- 장 소 : B발표장 (8층 아라홀)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원
- 세션명 : 2023년 1차 정부-에너지공기업 R&D 전략 기술교류회

• 좌장 : 강근영 센터장

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
09:30~11:30	에너지공기업 R&D 중장기 전략 발표 및 논의- 2023년 공기업 R&D기술개발 전략	각 에너지공기업 실무자	각 에너지공기업
13:00~13:15	청정화력 기술개발전략 발표	장중철 PD	한국에너지기술평가원
13:15~13:30	원자력 기술개발전략 발표	최훈 PD	한국에너지기술평가원
13:30~13:45	청정수소 기술개발전략 발표	박진남 PD	한국에너지기술평가원
13:45~14:00	효율향상 기술개발전략 발표	이윤빈 PD	한국에너지기술평가원

특별세션 2

abstract p.41~p.42

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 10:00~12:30
- 장 소 : C발표장 (라마다프라자제주호텔 8층 오라홀)
- 주 관 : 한국화학연구원
- 세션명 : CCUS 기술·협력 심포지엄; 출연(연) CCUS 연구협의체

• 좌장 : 박지훈 (한국화학연구원)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
10:00~10:10	Opening Remarks	황영규	한국화학연구원
10:10~10:30	CO ₂ 화학전환 기초원료 대체 기술	박지훈	한국화학연구원
10:30~10:50	국내 이산화탄소 지중저장 연구개발 현황	김구영	한국지질자원연구원
10:50~11:10	국내 포집기술 개발 현황 및 재생합성연료(e-Fuel) 생산 기술 소개	윤민혜	한국에너지기술연구 원
11:10~11:30	미세조류 기반 생물학적 CCU 기술의 현황과 전망	김희식	한국생명공학연구원
11:30~11:50	광물탄산화 핵심기술 및 상용화 요건	이승우	한국지질자원연구원
11:50~12:10	CO ₂ 활용형 고인화점 유기카보네이트 제조기술	백자연	한국생산기술연구원
12:10~12:30	이산화탄소 전환을 통한 고부가 가치 화합물 생산기술 개발	이웅	한국과학기술연구원

특별세션 3 (I)

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 10:00~11:40
- 장 소 : D발표장 (8층 탐라홀)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원(수소에너지실)
- 세션명 : 수소 생산기술 및 제도

• 좌장 : 오시덕 원장(블루이코노미전략연구원)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
10:00~10:05	Opening Remarks	안종득 실장	한국에너지기술 평가원
[그린수소 생산1]			
10:05~10:25	대규모(3MW 및 12.5MW) 수전해 R&D 현황 및 제주 그린수소 추진계획	강병찬 센터장	제주에너지공사
[그린수소 생산2]			
10:25~10:45	1.8MW급 차세대 고온수전해(SOEC) 개발현황, 실증 전략	양석준 팀장	SK에코플랜트 (에너지솔루션팀)
[그린수소 생산3]			
10:45~11:05	그린수소 생산비용 분석 및 경제성 확보 전략	김우현 책임연구원	한국에너지기술 연구원
[청정수소 인증제도]			
11:05~11:25	청정수소 인증제도 수립 국내·외 동향	박찬규 센터장	한국산업기술시험 원
[수소 전주기 위험평가기법 및 안전기준]			
11:25~11:45	수소 전주기 통합 위험성 평가 프로그램 및 가이드라인, 안전기준 개발과 활용 방안	강승규 책임연구원	한국가스안전공사

특별세션 3 (Ⅱ)

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 13:20~15:25
- 장 소 : D발표장 (8층 탐라홀)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원(수소에너지실)
- 세션명 : 수소 저장·운송 및 활용 기술

• 좌장 : 박진원 교수(연세대학교)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
[대용량 수소 저장 및 운송1]			
13:20~13:45	액체수소 운송을 위한 3톤급 탱크트레일러 기술 개발 현황	김대성 대표이사	크리오스
[대용량 수소 저장 및 운송2]			
13:45~14:10	고압(100기압급) 수소 이송용 배관 제조 기술개발 현황	정환교 연구위원	포스코
[대용량 수소 저장 및 운송3]			
14:10~14:35	암모니아 기반 청정수소 추출 플랜트 개발 현황 및 실증 전략	최낙운 상무 (연구개발부문장)	롯데정밀화학
[수소 활용처 다양화1]			
14:35~15:00	14톤급 건설 중장비용 수소연료전지 파워 시스템 개발 현황 및 실증 전략	금영범 상무 (연료전지사업실장)	현대모비스
[수소 활용처 다양화2]			
15:00~15:25	100kg급 드론용 15kW급 연료전지 파워팩 시스템 개발현황 및 실증 전략	송정민 부장	두산모빌리티 이노베이션

특별세션 4

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 10:00~12:30
- 장 소 : E발표장 (2층 마라홀)
- 주 관 : 한국에너지공단
- 세션명 : EERS 추진현황 및 활성화 방안

• 좌장 : 김창식 실장(한국에너지공단)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
10:00~10:05	인사 말씀	김창식 실장	한국에너지공단
10:05~10:25	EERS 시범사업 추진성과	한석만 차장	한국에너지공단
10:25~10:55	EERS 해외사례를 통한 시사점 도출	이정배 매니저	KEIC
10:55~11:25	국내 · 외 EERS M&V 현황 및 개선방향	심규한 위원	한국품질재단
11:25~11:55	백색인증제 해외현황 및 시사점	박기현 박사	에너지경제연구원
11:55~12:00	마무리	김창식 실장	한국에너지공단

특별세션 5

- **일 시** : 2023년 4월 27일(목) 14:00~16:30
- **장 소** : A발표장 (8층 한라홀)
- **주 관** : 한국전력기술
- **세션명** : 청정수소 생산 및 활용 미래기술 개발 동향

• 좌장 : 김학용 (한국전력기술)

• 사회 : 양인수 (한국전력기술)

시 간	주 요 내 용	
14:00~14:10	개 회 사 김용수 연구원장 (한국전력기술 전력기술연구원)	
14:10~14:30	기조 강연: 탄소중립시대 청정수소 역할 박상덕 수석연구위원 (서울대 원자력정책센터)	
14:30~14:50	새 정부 수소 활용 정책	정성욱 수소연료전지PD 한국에너지기술평가원
14:50~15:10	원자력 청정수소 경제성 전망과 과제	박찬오 연구위원 서울대 원자력정책센터
15:10~15:30	수소경제시대에서의 원자력 청정수소 생산과제	장각수 부장 한국전력기술
15:30~15:50	청정 암모니아 크래킹 연계 초고효율 수소 복합발전	이강민 부장 두산에너지빌리티
15:50~16:10	수소도시 타운하우스형 주거모델 기술개발 - 통합에너지운영시스템 중심으로 -	정태영 차장 한국전력기술
16:10~16:30	종합 토론	

특별세션 6

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 15:10~17:10
- 장 소 : B발표장 (8층 아라홀)
- 주 관 : 한국전력 & SK가스
- 세션명 : 무탄소연료(수소·암모니아) 생산 및 발전 기술동향

• 좌장 : 홍웅기 연구소장(SK가스)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
15:10~15:15	개회 및 내빈 소개	좌장	
15:15~15:20	인사말	이중호 전력연구원장 / 김철진 연구위원	한국전력공사 / SK가스
15:20~15:25	SK가스의 Net Zero Solution Provider 달성 방향	홍웅기 연구소장	SK가스
15:25~15:45	음폐수 활용 친환경 수소생산공정	김우재 교수	이화여자대학교 화학신소재공학과
15:45~16:05	용융 촉매를 활용한 CO ₂ -free 수소 생산	강도형 교수	서울과학기술대학교 미래에너지융합학과
16:05~16:25	암모니아 혼소 발전 기술	박경일 책임	한국전력공사 전력연구원 발전연구소
16:25~16:45	수소 혼소 발전 기술	박세익 책임	한국전력공사 전력연구원 발전연구소
16:45~17:05	무탄소연료 혼소발전시스템의 열성능 변화 및 설비영향	백세현 책임	한국전력공사 전력연구원 발전연구소
17:05~17:10	총평 및 폐회 (기념촬영)	좌장	

특별세션 7

abstract p.43~p.50

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 13:00~17:00
- 장 소 : C발표장 (8층 오라홀)
- 주 관 : 서울대학교(최장욱), 고려대학교(유승호)
- 세션명 : 이차전지

• 좌장 : 유승호 교수(고려대학교)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
13:00-13:25	Design & development of polyanion based cathode materials toward having high energy density	김민경 교수	광운대학교
13:25-13:50	Design of organic materials for post-lithium-ion batteries	유동주 교수	고려대학교
13:50-14:15	Change in Fe anodes for rechargeable aqueous batteries	이동찬 교수	홍익대학교
14:15-14:40	Strategies for designing high-energy-density aqueous Zn-ion batteries	김찬훈 박사	한국생산기술연구원
14:40-14:55	삼성미래기술육성사업 설명회	김현주 PD 이관영 교수	삼성전자 미래기술육성센터 소재팀장 삼성미래기술육성사업 소재심사위원장
14:55-15:15	Break time		
15:15-15:40	Cathode electrolyte interphase layer for mitigating intertwined chemical and mechanical degradation for sulfide-based solid-state batteries	정성균 교수	UNIST
15:40-16:05	In-situ electrochemical TEM for lithium-based batteries	이승용 교수	한양대학교
16:05-16:30	Research for operation of reversible Li-O ₂ battery	곽원진 교수	아주대학교
16:30-16:55	Multiphysics-based computational science for designing energy materials	김두호 교수	경희대학교

특별세션 8 (Ⅰ)

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 14:00~16:30
- 장 소 : E발표장 (2층 마라홀)
- 주 관 : 산업통상자원 R&D 전략기획단
- 세션명 : 에너지신산업 분야 국내·외 활성화 및 新시장 창출을 위한
기술혁신 방향 토론회

• 좌장 : 김태훈 그룹장(산업통상자원 R&D 전략기획단)

발표 시간	발표 제목	발표자	소속
14:00~14:10	에너지학회장 인사	이관영 학회장	한국에너지학회
14:10~14:40	에너지 안보를 위한 기술혁신 방향	이원용 에너지MD	산업통상자원 R&D 전략기획단
14:40~15:10	차세대 원자력 분야 기술혁신 현황과 방향	최훈 원자력PD	한국에너지기술평가원
15:10~15:40	에너지 저장 분야 기술혁신 현황과 방향	안종보 ESS PD	한국에너지기술평가원
15:40~16:30	자유토론 좌장 : 오시덕 대표(㈜블루이코노미 전략연구원)		

특별세션 8 (Ⅱ)

- 일 시 : 2023년 4월 28일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : C발표장 (8층 오라홀)
- 주 관 : 산업통상자원 R&D 전략기획단
- 세션명 : 에너지MD-PD 워크숍

특별세션 9

abstract p.51

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 13:00~14:00
- 장 소 : F발표장 (2층 비양홀)
- 주 관 : SK E&S
- 세션명 : 가스복합발전의 탄소포집

• 좌장 : 차태병 센터장 (SK E&S)

시 간	특별세션 발표	발표자	소속
13:00~13:05	인사 말씀	차태병 센터장	SK E&S
13:05~13:20	가스복합발전과 탄소포집	오세영 매니저	SK E&S
13:20~13:40	Introduction of GE Carbon Capture Solution	이영석 이사	GE
13:40~14:00	NGCC 발전 전용 최적 CO ₂ 포집 기술 개발 (CT-1)	이윤제 기술이사	(주)씨이텍

시 간	분과발표	발표자	소속
C01 14:00~14:15	LNG 열병합발전에서 CCUS 기술 적용의 한계와 개발 현황	남궁형규	한국지역난방공사
C02 14:15~14:30	도심형 CHP 배가스 추기시스템 에너지사용량 분석 및 최적화 방안	김훈	유진에너지기술(주)
C03 14:30~14:45	배가스 CO ₂ 포집을 위한 기체분리막 공정연구	이충섭	(주)에어레인
C04 14:45~15:00	LNG 발전 배가스 중 CO ₂ 포집을 위한 습식아민 흡수제 성능 연구	이정현	한전 전력연구원
C05 15:00~15:15	배가스의 CO ₂ 분리를 위한 폴리(폴리(에틸렌 글리콜) 메틸 에테르 아크릴레이트) 마이셀 분리막	성문숙	서강대학교 화공생명공학과
C06 15:15~15:30	농축 CO ₂ 를 이용하는 액화 공정의 개발	최창식	고등기술연구원
C07 15:30~15:45	도심발전소 저농도 CO ₂ 배가스의 콤팩트 포집 및 탄소자원화와 발전소 폐열 활용기술 개발	장원석	한국지역난방공사

특별세션 10

abstract p.52~p.57

- 일 시 : 2023년 4월 28일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : B발표장 (8층 아라홀)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원
- 세션명 : 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향

• 좌장 : 이윤빈 효율향상PD (한국에너지기술평가원)

발표 제목	발표자	소속
수열 히트펌프의 난방운전 특성 및 효율 향상 방안	<u>이길봉*</u> , 김기봉, 장기창, 조준현, 최봉수, 오봉성, 나선익, 허재혁	한국에너지연구원
Air-to-water Heat pump로의 난방시장 전환과 적용 기술	<u>신정섭*</u> , 김현중, 권경민, 서범수, 이상현	LG전자
산업공정열 공급을 위한 고온 히트펌프 시스템 개발	<u>김진섭*</u> , 송찬호, 정용, 김정철, 서정민	한국기계연구원
공장에너지관리시스템(FEMS) 기반 산업용 히트펌프 적용 방법론	<u>김민성*</u> , 배수진, 서기정, 김소연, 정민규, 구돈익, 송지원	중앙대학교
반도체 공정에서의 초저온 히트펌프(초저온 냉동기) 효율 향상 기술 개발 현황	<u>이천규*</u> , 이정길, 김진만	한국생산기술연구원
대용량 무급유 히트펌프 소개	<u>김규영*</u> , 김창희	LG전자
에너지 수요부문 효율향상에서 히트펌프 기술 위치와 향후 과제	<u>이윤빈*</u>	한국에너지기술평가원

특별세션 11

abstract p.58~p.63

- 일 시 : 2023년 4월 27일(목) 10:00~12:30
- 장 소 : A발표장 (8층 한라홀)
- 주 관 : 한국지질자원연구원
- 세션명 : Carbon Mineralization Technology in Response to Climate Change

• 좌장 : JiWhan Ahn
 (Carbon Mineralization Center, MSIT)

Session Chair : Junhyun Choi (Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources)			
Time	Title	Authors	Affiliation
10:00~10:20	Opening Ceremony and Group Photo		
10:20~10:40	Development of rare earth elements concentration process via carbonation and mineral processing	<u>Lai Quang Tuan</u> , Jiwhan Ahn	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
10:40~11:00	Enhancing the recovery of rare earth elements from PC fly ash using physical separation and concentration	<u>Fausto Moscoso Pinto</u> , Lai Quang Tuan, Junhyun Choi, Jeongyun Kim, Heeyoung Shin, Jiwhan Ahn	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
11:00~11:20	Towards a circular economy by using carbon mineralization technology to achieve low carbon hydroponic underground abandoned mine farming from acid mine drainage	<u>Van Duc Nguyen</u> , Lulit Habte, Thriveni Thenepalli, Chang Woo Lee, Jiwhan Ahn, Jaeyoung Yoo, Young-ho Kim	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, DL E&C, CARBONCO
11:20~11:30	Break		
11:30~11:50	Recovery of intermediate by-products and recycling of NaOH from alkali-activated solution through carbonation	<u>Lai Quang Tuan</u> , Jiwhan Ahn	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
11:50~12:10	Immobilization of Cesium in Cementitious Material Matrix	<u>Adrian Javier Sing Jethmal</u> , Jeong-Gook Jang, Jiwhan Ahn	Korea of Mining Industry Association
12:10~12:30	Reducing Carbon Footprint: The Social impact of Carbon Mineralization Technology	<u>O Yuna</u> , Lulit Habte, Jiwhan Ahn	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

논문발표 세부일정 A (4.27)

●●● 4월 27일(목) 10:00 ~ 11:30 (2F 비양홀)

>>> 에너지정책		좌장 : 정환삼 박사(한국원자력연구원)	page
A01 10:00~10:15	바이오디젤 의무혼합비율 상향에 대한 대중의 수용성 조사 <u>김준균*</u> · 김주희** · 유승훈*** *서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과 석사과정, **서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 연구교수, ***서울과학기술대학교 창의융합대학 학장	67	
A02 10:15~10:30	유럽과 국내 탄소배출권가격 결정요인 비교 분석: 에너지 가격과 관계 중심으로 <u>박경근</u> · 원두환* 부산대학교 경제학부, *부산대학교 경제학부	68	
A03 10:30~10:45	한국 및 일본 집단에너지사업의 국민경제적 역할 <u>이서영*</u> · 김주희** · 유승훈*** *서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과 석사과정, **서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 연구교수, ***서울과학기술대학교 창의융합대학 학장	69	
A04 10:45~11:00	V2G 양방향 충전소 인프라 구축에 대한 공공의 지불의사액 조사 : 조건부 가치측정법의 적용 <u>현민기*</u> · 김주희** · 유승훈*** *서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지정책학과 석박통합과정, **서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 연구교수, ***서울과학기술대학교 창의융합대학 학장	70	
A05 11:15~11:30	선진 환경규제 극복을 위한 전과정사고 기반 에너지 환경분석 권고 <u>정환삼</u> · 문기환 · 이종희 *한국원자력연구원	71	

논문발표 세부일정 B (4.27)

●●● 4월 27일(목) 10:00 ~ 12:00 (2F 추자홀)

>>> 에너지신산업융합 / 원자력		좌장 : 이시훈 교수(전북대학교)	page
B01 10:00~10:15	하이브리드 추진 선박 해외 기술 동향 분석 황성현 · 이창형 · 류주열 · 박성호 [†] 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		72
B02 10:15~10:30	탄소중립을 위한 기존 소방업무시설의 그린리모델링 기술 실증 조가영 * · 이정훈·임수진 서울기술연구원 주거환경연구실		73
B03 10:30~10:45	선박용 극저온 탄소포집 공정의 효율 분석 박성호 , 이창형, 류주열, 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹		74
B04 10:45~11:00	풍력에너지 및 태양광에너지를 이용한 암모니아 생산에서의 LCA 분석 이하은 ¹ · 이시훈 * ¹ 전북대학교 환경에너지융합학과, *전북대학교 자원에너지공학과*		75
11:00~11:15	coffee break		
B05 11:15~11:30	밸브 중량 증가가 배관계통의 구조 건전성에 미치는 영향 평가 권형도 · 김만원 한국수력원자력(주) 중앙연구원		76
B06 11:30~11:45	APR 원전 비접지 고압전력계통 간헐지락고장 대응 전략 하체웅 · 김정만* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원전기술연구소		77
B07 11:45~12:00	SMART100 소형냉각재상실사고 72시간 해석 서정관 · 이규형* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원		78

논문발표 세부일정 C- I (4.27)

●●● 4월 27일(목) 14:00 ~ 16:00 (2F 비양홀)

>>> 에너지신산업융합		좌장 : 장원석 수석연구원(한국지역난방공사)	page
C01 14:00~14:15	LNG 열병합발전에서 CCUS 기술 적용의 한계와 개발 현황 남궁형규 · 엄태선 · 조영삼 · 장원석 · 장미희 · 신재용 한국지역난방공사 미래사업처		79
C02 14:15~14:30	도심형 CHP 배가스 추기시스템 에너지사용량 분석 및 최적화 방안 김훈 · 이중용 · 장원석* 유진에너지기술(주), *한국지역난방공사		80
C03 14:30~14:45	배가스 CO₂ 포집을 위한 기체분리막 공정연구 이충설 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용 (주)에어레인, *한국지역난방공사		81
C04 14:45~15:00	LNG 발전 배가스 중 CO₂ 포집을 위한 습식아민 흡수제 성능 연구 이정현 · 박종민 · 정진규 · 곽노상 · 심재구 한전 전력연구원		82
C05 15:00~15:15	배가스의 CO₂ 분리를 위한 폴리(폴리(에틸렌 글리콜) 메틸 에테르 아크릴레이트) 마이셀 분리막 성문숙 ¹ , 장원석 ² , 이종석 ^{1,*} ¹ 서강대학교 화공생명공학과, ² 한국지역난방공사 미래개발원		83
C06 15:15~15:30	농축 CO₂를 이용하는 액화 공정의 개발 최창식 · 박수남 · 임용택 · 박동규 · 이혜성 · 김태욱 · 김성현 · 조성수 · 장원석* 고등기술연구원 · 한국지역난방공사 미래개발처*		84
C07 15:30~15:45	도심발전소 저농도 CO₂ 배가스의 콤팩트 포집 및 탄소자원화와 발전소 폐열 활용기술 개발 장원석 · 엄태선 · 조영삼 · 장미희 · 남궁형규 · 신재용 · 유지혜 한국지역난방공사 미래사업처		85
15:45~16:00	coffee break		

논문발표 세부일정 C-II (4.27)

●●● 4월 27일(목) 16:00 ~ 17:00 (2F 비양홀)

>>> 에너지정책		좌장 : 이동훈 수석연구원(한국가스안전공사)	page
C08 16:00~16:15	에너지기술 기후가치평가 방법론 및 녹색금융 적용방안에 대한 연구 김봉균 · 조정래 · 최태환 · 송수원 · 이민정 한국에너지기술평가원 기술사업화실		86
C09 16:15~16:30	도시가스 수소 혼입 안전성 검증 및 제도화 계획 한원국 · 서국진 · 이동원 · 류영조 · 곽채식 한국가스안전공사		87
C10 16:30~16:45	ESG 데이터를 활용하여 탄소중립 선언한 국내 주요 기업의 온실가스 배출량 변화 요인 분석 박년배 한국에너지기술연구원		88
C11 16:45~17:00	액화천연가스 저장탱크의 위상배열 탐상시험 기준 개발 이동훈 · 이정형 · 하기역 · 양윤영 · 김상범 · 송성진* 한국가스안전공사, * 성균관대학교 기계공학부		89

논문발표 세부일정 D- I (4.27)

●●● 4월 27일(목) 13:00 ~ 14:30 (2F 추자홀)

>>> 수소연료전지		좌장 : 김정환 책임연구원(한국가스안전공사)	page
D01 13:00~13:15	MOF derived Cu mediated NiFe double-layered hydroxide electrocatalyst for oxygen evolution reaction in photovoltaic water splitting <u>Debabrata Chanda</u>^{1,2}, Jagadis Gautam^{1,2}, Arjun Behera^{1,2}, Mikiyas Mekete Meshesha^{1,2}, Jang Seok Gwon^{1,2}, Gee Seong Lee³, Dae Won Hong³, Myungsik Choi⁴, Bee Lyong Yang^{1,2*} ¹Kumoh National Institute of Technology, ²GHS Co. Ltd., ³Nano-convergence Technology Division, National Nanofab Center, ⁴SJ Tech. Co., Ltd.	90	
D02 13:15~13:30	수소충전소용 고압용기 실가스 내구성능 실증기술 개발 <u>하기역</u> · 이동훈 · 김태희 · 하창민 · 양윤영 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	91	
D03 13:30~13:45	K_{III}와 da/dN으로부터 구하는 수소 압력용기의 사용수명(cycle) 계산 <u>김정환</u> · 이화영 · 이민경 · 이재훈 · 이진한 한국가스안전공사 가스안전연구원	92	
D04 13:45~14:00	수소충전소 계량 정확도 평가를 위한 복합계량평가장비 개발 연구 <u>이화영</u> · 김정환 · 이재훈 한국가스안전공사 가스안전연구원	93	
D05 14:00~14:15	Zero Boil Off 달성을 위한 액체/고체(slush)기반 수소 생성 및 공정 효율 분석 <u>이창형</u> · 류주열 · 황성현 · 박성호 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹	94	
14:15~14:30	coffee break		

논문발표 세부일정 D-Ⅱ (4.27)

●●● 4월 27일(목) 14:30~ 16:15 (2F 추자홀)

>>> 청정화력 및 원자력		좌장 : 고도영 수석연구원(한수원 중앙연구원)	page
D06 14:30~14:45	수소·암모니아 혼소에 따른 복합화력 열성능 분석 <u>김동균</u> · 백세현 한국전력공사 전력연구원		95
D07 14:45~15:00	Study on the Combustion Characteristics in 0.7MWth Pilot scale Furnace according to Ammonia Co-firing Rate <u>Dongkwon Choi(최동권)</u> · Jiyong Hwang · Sangbin Park · Junhwa Chi 한국전력공사 전력연구원		96
D08 15:00~15:15	내륙 복합화력발전소에 적용되는 열폐기 시스템 최적 진공도 시뮬레이션 <u>장한별</u> · 이중용 유진에너지기술㈜		97
D09 15:15~15:30	MARS-KS 코드를 이용한 APR1400 원전의 다중고장사고 시 운전원 조치 여유시간 분석 <u>유지아</u> · 이연건* 제주대학교 에너지응용시스템학부 에너지화학공학전공, *제주대학교 전기에너지공학과		98
D10 15:30~15:45	APR1400 원자로 축소모델시험의 유체탄성불안정 평가 <u>고도영</u> · 김규형 · 장호철* · 문중성* 한국수력원자력 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발단		99
D11 15:45~16:00	SMART100 전열관 파괴 압력시험 <u>권순국</u> · 조민기* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *두산에너지빌리티(주)		100
D12 16:00~16:15	장기 가동원전 최적 기술지원 수행전략 <u>김문수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		101

논문발표 세부일정 E (4.28)

●●● 4월 28일(금) 10:00 ~ 11:30 (2F 마라홀)

>>> 신재생에너지 / 자원순환개발		좌장 : 이정훈 박사 (한국가스안전공사)	page
E01 10:00~10:15	재생에너지 기반 수전해 설비 안전기준 개발 및 합리화 연구 윤문상 · 이정훈 · 정재환 · 이정운† 한국가스안전공사 가스안전연구원		102
E02 10:15~10:30	디지털 트윈 활용 수소생산설비 위험요소 분석 및 안전기준 적용 방안 이정훈 · 유수연 한국가스안전공사 가스안전연구원		103
E03 10:30~10:45	CFD를 적용한 경사진 축류형 터빈의 다중목적 최적화 삼수딘 모하메드 무르시드***, 노민수**, 모하메드 아부 사저**, 김진혁*** *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문		104
E04 10:45~11:00	경험적 상관관계를 사용한 비속도 170급 프란시스 수차 보간 모델 설계 연구 노민수***, 김성*, 모하메드 아부 사저***, 황태규***, 김승준****, 박준관****, 김진혁*** *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문 *** (사)한국수력산업협회 연구사업부, ****한국수력원자력(주) 수력연구교육센터		105
E05 11:00~11:15	Heterostructure of Cobalt Copper Sulfide /Tungsten Disulfide Nanowire as an Excellent Bifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting Jagadis Gautam ^{1,2} , Jang Seok Gwon ^{1,2} , Mikiyas Mekete Meshesha ^{1,2} , Debabrata Chanda ^{1,2} , Arjun Behera ^{1,2} , GS Lee, ³ DW Hong, ³ Suhee kwon, ^{1,2} Myungsik Choi, ⁴ Bee Lyong Yang ^{1,2*} ¹ Kumoh National Institute of Technology, ² GHS (Green H2 System) Co., Ltd., ³ Nano-Convergence Technology Division, National Nanofab Center, ⁴ SJ Tech. Co., Ltd.		106
E06 11:15~11:30	공기액화 에너지 저장 시스템에서 터빈출구 청정공기 활용에 대한 개념설계 이춘식 · 윤문규 · 염충섭 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		107

논문발표 세부일정 F (4.28)

●●● 4월 28일(금) 10:00 ~ 11:15 (2F 비양홀)

>>> 원자력 / 풍력 / 에너지정책 및 신산업융합		좌장 : 이성곤 책임연구원(한국에너지기술연구원)	page
F01 10:00~10:15	교체된 급수가열기 전열관 손상 원인 분석 송석윤 (Seok Yoon Song) 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)		108
F02 10:15~10:30	지면 거칠기 특성을 고려한 수치예보모형과 기계학습을 활용한 고도화된 풍력 발전량 예측모형 구축 이근민 ^{*/****} · 강희명 [*] · 위진 [*] · 정재훈 [*] · 강창준 ^{**} · 구혜연 ^{**} · 김학민 ^{**} · 박봉준 ^{**} · 이다솜 ^{**} · 김성혁 ^{***} · 임성균 ^{***} · 김정원 ^{****} · 홍진규 ^{****} (주)GS풍력발전 DX실/사업기획실 [*] , (주)GS에너지 알고리즘랩 ^{**} , (주)GS네오텍 클라우드팀 ^{***} , 연세대학교 대기과학과 미기상연구실 ^{****}		109
F03 10:30~10:45	열에너지 다소비 스마트 설계 플랫폼 구축을 위한 기업 현황 분석 및 가치흐름분석 이성곤 [*] , 이민규, 이옥현, 이대근 한국에너지기술연구원		110
F04 10:45~11:00	근사모델에 기반한 축류펌프 임펠러의 다중목적 최적화 느엔 띄엣 ^{*,**} · 김성 ^{**} · 정순영 ^{**} · 김진혁 ^{*,**} *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문		111
F05 11:00~11:15	러너 블레이드 변경에 의한 부분부하 조건에서 프란시스 수차의 수력성능 향상 모하메드 아부 사저 ^{*,**} · 삼수딘 모하메드 무르시드 ^{*,**} · 김성 ^{**} · 노민수 ^{*,**} · 김진혁 ^{*,**} *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문		112

포스터발표 I

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-1	수소연료전지	초순수 제조를 위한 폐열 활용 소수성 중공사막 막중류 공정 수치해석 연구 <u>이정길</u> · 이천규 · 김진만 한국생산기술연구원 청정기술연구소 탄소중립산업기술연구부문	115
P1-2	수소연료전지	친환경 수소 생산을 위한, 산소 공여자리 이용 암모니아 산화적 분해 촉매 <u>이수향</u> · 이석호 · 이성호 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	116
P1-3	수소연료전지	Pt-Nb/Al ₂ O ₃ 를 적용한 H12-Benzyltoluene의 효율적인 탈수소화 <u>유준기</u> · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	117
P1-4	수소연료전지	소수성 리간드의 도입으로 인한 과산화수소 직접합성 반응 효과 <u>이석호</u> · 한근호 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	118
P1-5	신재생에너지	Convolutional LSTM 기반 풍력발전단지 발전량 예측 <u>고은별</u> · 김민호 · 임정택 · 김태형 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	119
P1-6	신재생에너지	스마트그리드 실시간 데이터를 활용한 이상 탐지 시스템 설계 <u>김민수</u> · 김민호 · 임정택 · 김태형 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	120
P1-7	신재생에너지	칼만필터 기반의 폐배터리 에너지 저장 장치 상태 추정 알고리즘 <u>김민호</u> · 임정택 · 김태형 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	121
P1-8	신재생에너지	와류유발진동 현상 기반 풍력에너지 하베스팅 장치의 설계변수에 따른 진폭 변화 분석 <u>노하은</u> · 이재영* 한동대학교 기계제어공학과	122
P1-9	신재생에너지	Computational analysis of chemical species transport of PEM water electrolysis half cells under constant current operating conditions <u>이예은</u> · 오정록* · 엄석기* 한양대학교 미래모빌리티학과, *한양대학교 융합기계공학과	123

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-10	신재생에너지	범용 풍력 터빈 모델링을 위한 데이터 관리 시스템 <u>임정택</u> · 송민석 · 김민호 · 김태형 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	124
P1-11	신재생에너지	하이브리드 모델 기반 재생에너지 예측 서비스를 위한 마이크로 서비스 아키텍처 <u>조인표</u> · 이재규 · 이상엽 한국전자기술연구원	125
P1-12	신재생에너지	발전량 예측 지점의 기상데이터 활용을 위한 데이터 추출 및 전처리 시스템 설계 <u>허성민</u> · 선지영 · 김민호 · 임정택 · 김태형 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	126
P1-13	에너지신산업융합	2상 인터리브드 벡 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 32CH 전기차용 배터리 싸이클러 시제품 실증 <u>서현욱</u> · 이주민 · 김종우 · 정대주* (재)대구기계부품연구원, *지텍(주)	127
P1-14	에너지신산업융합	2상 인터리브드 벡 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 전기차용 배터리 싸이클러 단독 모듈 시제품 성능 분석 <u>이주민</u> · 서현욱 · 김종우 · 정대주* (재)대구기계부품연구원, *지텍(주)	128
P1-15	에너지신산업융합	고전압 양극을 적용한 전고체전지의 전극/고체전해질 계면 개선 연구 <u>김규태</u> ^a · 김고은 ^b · 정재현 ^b · 박한빈 ^b · 박세은 ^c · 정연욱 ^{a,b} ^a 경북대학교 수소 및 신재생에너지학과, ^b 경북대학교 신소재공학부, ^c 경북대학교 화학과	129
P1-16	에너지신산업융합	전고체전지를 위한 고전압 전이금속 산화물 연구 <u>박수현</u> ^a · 윤성환 ^b · 김수현 ^b · 박세은 ^c · 정연욱 ^{a,b} ^a 경북대학교 수소 및 신재생에너지 공학과, ^b 경북대학교 신소재공학부, ^c 경북대학교 화학과	130
P1-17	에너지신산업융합	Computational Analysis of a Lithium-ion Pouch Cell Module for Electric Vehicle Application with a Dielectric Liquid Immersion Cooling Method <u>장성원</u> · 이남권* · 김한수* · 권동재* · 엄석기* 한양대학교 미래모빌리티학과, *한양대학교 융합기계공학과	131
P1-18	정책	건물부문 에너지·온실가스 감축 국가정책 및 공공건축물 그린리모델링 사업 사례 분석 <u>오세민</u> · 김진영 · 이상엽 · 안충원 국토안전관리원 그린리모델링센터	132

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-19	원자력	원자력시설 필수디지털자산 기술적 형상관리 방안 연구 <u>김승민</u> · 이동석 한국원자력통제기술원 사이버보안실	133
P1-20	원자력	ICMP 취약점에 따른 원자력시설에 대한 위협성 및 조치방안 연구 <u>이동석</u> 한국원자력통제기술원 사이버보안실	134
P1-21	원자력	보안 분야 리스크 활용 및 성능기반 규제의 국내 도입을 위한 동향 분석 및 갱분석 연구 <u>이현주</u> · 이동석 한국원자력통제기술원 사이버보안실	135
P1-22	원자력	중수로 안전해석시 연료채널 상류에서의 임계열속 여유도 <u>고동욱</u> 한수원(주) 중앙연구원	136
P1-23	원자력	SMART100 증기발생기 전열관 소용돌이 와류 시험 <u>권순국</u> · 홍두호, 정한식, 조민기* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *두산에너지빌리티(주)	137
P1-24	원자력	핵연료집합체 지진취약도 평가 방법론 최적화 방안 검토 <u>김갑순</u> · 남현석 · 김태순 한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원	138
P1-25	원자력	혁신형 SMR SC모듈 적용을 위한 국내외 설계기준 검토 <u>김갑순</u> · 한승주 한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원	139
P1-26	원자력	화재 다중오동작분석 시 기기 고장모드 반영 중요성 검토 <u>김명수</u> , <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	140
P1-27	원자력	유럽 수출 원전 부지배치 요건 부합성 검토 <u>김용수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	141
P1-28	원자력	해외 수출 노형 이중 원자로건물 개념 소개 <u>김용수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	142
P1-29	원자력	연구용 원자로 감쇠탱크의 기계적 크기 및 두께 설계를 위한 계산 <u>곽민규</u> · 정민규 · 서경우 한국원자력연구원	143

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-30	원자력	수조수상실사고 배제를 고려한 개방수조형 연구로 일차냉각계통에서 펌프 성능곡선을 이용한 정상상태 유량 평가 <u>김다용</u> · 박홍범 한국원자력연구원 수출용신형구로실증업단	144
P1-31	원자력	APR1000 다양성작동계통 설계 규제요건 분석 <u>김용식</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	145
P1-32	원자력	원자력발전소 BIM 기반 3D모델 정보분류체계 개발 <u>김우중</u> , 변수진, 김종명, 김교훈 한국수력원자력(주) 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부	146
P1-33	원자력	연구용 원자로 판형열교환기 계절별 성능해석 <u>김인국</u> · 서경우 한국원자력연구원	147
P1-34	원자력	계속운전 제도개선에 따른 확률론적안전성평가 재평가 방안에 대한 고찰 <u>방기인</u> * · 김현욱 한국수력원자력(주) 중앙연구원	148
P1-35	원자력	AI기반 원자력발전소 규제/기술문서 통합 검토 시스템 적용 방안 <u>신상후</u> · 김우중 · 변수진 · 김교훈 · 김종명 · 이상현 한국수력원자력 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부	149
P1-36	원자력	원전 운전원 훈련용 시뮬레이터의 확대 적용 방안 <u>안성진</u> , 이주열 한국수력원자력 중앙연구원	150
P1-37	원자력	개정 임계열속상관식의 중수로 연료 열적여유도 영향평가 <u>오재용</u> · 류의승 · 박동환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	151
P1-38	원자력	노심열수력코드 업데이트에 의한 드라이아웃 출력 평가 <u>오재용</u> · 류의승 한국수력원자력(주) 중앙연구원	152
P1-39	원자력	침수사건 PSA에서 침수 격리실패 HRA 모델링 영향 분석 <u>오해철</u> , 방기인 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	153
P1-40	원자력	최근 국제에너지 환경하에서 국내 에너지정책 방향 <u>윤성원</u> · 김승수 · 이명호, 이동훈 한국원자력연구원	154

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-41	원자력	건축물 해체계획서와 원자력시설 해체계획서의 화재방호요건 비교 <u>이영승</u> , 정해영 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	155
P1-42	원자력	새울3,4호기 시플레이터 공장인수시험을 통한 성능개선 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	156
P1-43	원자력	새울3,4호기 시플레이터 물리적 충실도 확인 결과 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	157
P1-44	원자력	새울3,4호기 시플레이터 설계변경 반영을 통한 최신설계 적용 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	158
P1-45	원자력	새울3,4호기 시플레이터 설계변경 반영 후 시험을 통한 성능검증 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	159
P1-46	원자력	새울3,4호기 시플레이터 하드웨어 및 네트워크 시스템 구현 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	160
P1-47	원자력	새울3,4호기 시플레이터 현장인수시험을 통한 성능개선 <u>이주열</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	161
P1-48	원자력	원자력규제기관의 업무 품질관리 방안에 대한 연구 <u>장재영</u> 한국원자력통제기술원	162
P1-49	원자력	원자력통제 관련 법령 체계 개선에 관한 연구 <u>장재영</u> · 형상철 한국원자력통제기술원	163
P1-50	원자력	원자력발전소 화재위험도분석 다중오동작 분석 프로세스 <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	164
P1-51	원자력	화재비정상운전절차서 운전원수동조치 현장검증 방법 <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	165

●●● 4월 27일(목) 10:00-12:00

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-52	원자력	표준형 원전에 대한 고리1호기 해체원전 화재위험도분석 개정방안의 적용성 검토 <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	166
P1-53	원자력	WH형 원전 기기냉각해수계통에 대한 다중오동작 시나리오 적용 검토 <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	167
P1-54	원자력	해체원전 절단공정 화재위험성 및 관리방안 <u>정해영</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	168
P1-55	원자력	리스크 정보를 활용한 정비 및 시험 스케줄 관리 최적화 연구 <u>조경수 · 이영주 · 김정운</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	169
P1-56	원자력	원자력 안전·안보 연계 관점에서 U.S. NRC와 NFPA code 상충점 분석 <u>차지환 · 최선도*</u> 한국원자력통제기술원 물리적방호실*	170
P1-57	원자력	Corrugated 미니 채널 인쇄기판형 증기발생기의 단상 압력강하 실험 <u>황보원 · 이재영</u> 한동대학교 기계제어공학과	171
P1-58	에너지신산업융합	5G 기반 중소 제조 공장 에너지 데이터 관리 시스템 기술 <u>박태욱 · 윤만석*</u> 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	172
P1-59	에너지신산업융합	중수로 원전 중성자 활용방안 및 타당성 검토 <u>박동환</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	173

포스터발표 II

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-1	수소연료전지	전력망과 송전혼잡을 고려한 수소 수전해 최적운용 스케줄링 및 입지선정 김태현 · 심상우 · 노재형 · 박종배 건국대학교 전기공학과	174
P2-2	수소연료전지	Electrochemical Sensor for Glucose Detection S Tamilarasi ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering (BK21 FOUR) for Graduate School, Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Jeonbuk National University	175
P2-3	수소연료전지	파이렌 Stacking을 전략적으로 도입한 탁월한 미세상분리와 전기화학적 성능을 갖는 poly(pyreneyl-aryl-piperidinium) 연료전지용 음이온교환막 박민우 ¹ · 김범호 ¹ · 유동진 ^{1,2} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	176
P2-4	수소연료전지	연료전지용 아미노와 불소가 포함된 사슬이 긴 알킬 측쇄 술폰화 폴리(아릴렌 이써) 합성 및 대면적 양이온 교환막 특성 평가 김애란 ¹ · 나타라잔로게쉬바란 ² · 박민우 ¹ · 아이야판 아룬쿠마르 ¹ · 고콜라프리안 ¹ · 유동진 ^{1,2} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	177
P2-5	수소연료전지	동일한 알덴강도로 피닝 처리된 SM45C 강의 피로수명에 관한 연구 김태형 · 박유진* · 김정태 · 장주혁 · 김태희 청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 대학원 기계항공시스템공학과	178
P2-6	수소연료전지	KGS AC111에 따른 수소압축가스설비에 관한 신뢰성 확인 연구 하창민 · 이동훈 · 하기역 · 김태희 · 양윤영 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	179
P2-7	수소연료전지	국내 수소안전 정책 동향: 수소안전관리 종합대책 추진결과를 중심으로 김영훈 한국가스안전공사 수소안전기술원	180
P2-8	수소연료전지	수소산업 전주기 인프라시설 안전성 고찰 박우일 · 이주성 한국가스안전공사 수소안전기술원	181

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-9	수소연료전지	수소충전소 압력용기 이물질 탐상 및 재검사 시스템 정립을 위한 연구 <u>정오현</u> · 김민주 · 이민경 · 이재훈 한국가스안전공사 가스안전연구원	182
P2-10	신재생에너지	수출지향형 소규모 모듈형 바이오가스 정제설비의 제작에 관한 연구 <u>김지은</u> · 김현기 · 강광남 [†] 에이티이(주)	183
P2-11	신재생에너지	스퍼터링 파워가 ZTO 필름의 특성에 미치는 영향 <u>김동효</u> · 신연주 · 김민수 · 김보연 · 안유정 · 이송희 · 김효민 · 바수데바 레디 · 김우경 영남대학교 화학공학부	184
P2-12	신재생에너지	인시츄 고온 x-레이 회절에 의한 Sb ₂ Se ₃ 태양광 흡수체 형성 메커니즘에 관한 연구 <u>안유정</u> · 이송희 · 김효민 · 김동효 · 신연주 · 김민수 · 김보연 · 바수데바 레디 · 김우경 영남대학교 화학공학부	185
P2-13	신재생에너지	Effect of Preparation Routes on the Crystal Purity and Photocatalytic Performance of BiFeO ₃ Nanoparticles <u>Min Jeong Choi</u> , Salh Alhammadi, Woo Kyoung Kim* Yeungnam University, Department of Chemical Engineering	186
P2-14	에너지신산업융합	실내온도 기반 건물 열성능 정밀진단 방법의 한계점 및 개선방안 연구 <u>이정훈</u> · 조가영 · 임수진 서울기술연구원 주거환경연구실	187
P2-15	에너지신산업융합	기존 노후 건축물 그린리모델링에 따른 실시간 에너지 소비량 모니터링 시스템 적용 방안에 관한 연구 <u>임수진</u> · 이정훈 · 조가영 서울기술연구원 주거환경연구실	188
P2-16	에너지신산업융합	반도체 공정 유해가스 저감을 위한 저온 플라즈마 연소 장치의 성능시험 <u>김태형</u> · 이세창* · 김정태 · 남윤걸 · 안정민** 청주대학교 항공기계공학과, *지엠테크 기술연구소, **청주대학교 응용화학과	189
P2-17	에너지신산업융합	수직 그래핀 나노시트 기반 이원금속 MOF 나노 로드 전극을 이용한 고성능 하이브리드 고체 전해질 슈퍼커패시터 <u>Gopinath Sahoo</u> · 정현서 · 정상문* 충북대학교 화학공학과	190

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-18	자원개발순환	은 이온이 교환된 Mo/HZSM-5 촉매를 이용한 천연가스 수소방향족화 반응 <u>김상윤</u> · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	191
P2-19	자원개발순환	지지체 변화를 통한 삼원 촉매 반응에서의 귀금속 기반 촉매의 반응성 및 내열성 향상 <u>우효성</u> ¹ · 이관영 ^{1,2,*} ¹ 고려대학교 화공생명공학과, ² 초저에너지 초저배출 사업단	192
P2-20	자원개발순환	해수유래 산업폐수를 활용한 이산화탄소 흡수 및 광물탄산화 <u>최원용</u> · 이동욱 · 장규민 · 박진원* 연세대학교 화공생명공학과	193
P2-21	자원개발순환	옥상온실-사무실간 이산화탄소 및 열에너지 교환에 관한 연구 <u>강세별</u> · 이현희 · 윤영직 · 최재준* *한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실	194
P2-22	자원개발순환	메탄의 수증기-이산화탄소 복합개질 반응에서 Ni계 촉매 성능에 관한 연구 <u>허동현</u> · 채민주 · 광노상 한국전력공사 전력연구원 에너지환경연구소	195
P2-23	자원개발순환	고갈 유·가스전에서의 이산화탄소 저장 안정성을 위한 주입 조건 분석 <u>이다영</u> · 신호진 · 임종세* 한국해양대학교 에너지자원공학과	196
P2-24	청정화력	가스터빈 블레이드의 고속회전에 대한 구조적 안정성 <u>김태형</u> · 박유진* 청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 대학원 기계항공시스템공학과	197
P2-25	청정화력	Study on the correlation between ammonia mass flow rate and flue gas composition using the Dynamic Time Warping (DTW) technique in a 0.7 MWth coal pilot furnace <u>Sangbin Park</u> * (박상빈) · Dongkwon Choi · Jiyong Hwang · Junhwa Chi *KEPCO Research Institute Power Generation Laboratory	198
P2-26	청정화력	미분탄 발전설비 암모니아 혼소운전에 따른 회분 특성 변화 <u>황지용</u> * · 최동권 · 박상빈 · 지준화 *한국전력 전력연구원 발전연구소 무탄소발전연구실	199
P2-27	태양광발전	4면 부착형 태양광 전기자동차의 발전 잠재량 평가 <u>서장원</u> * 강원대학교 에너지자원화학공학과	200
P2-28	원자력	화재영향분석용 모바일 어플리케이션 개발: FDT* 계산모델 <u>김용재</u> · 한석현 · 오승준 · 정삼원 (주)피엔이	201

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-29	원자력	원전 복수기의 폐열을 이용한 고온수 생산 히트펌프 사이클 설계 연구 <u>김진만</u> · 이천규 · 이정길 한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문	202
P2-30	원자력	Seam Type Titanium Tube의 비파괴검사 결과 고찰 <u>김인철</u> * · 한경석 한국수력원자력(주) 중앙연구원	203
P2-31	원자력	성극지수(PI)를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가 <u>박혜성</u> 한국수력원자력(주)	204
P2-32	원자력	증기발생기 검사 신호 노이즈를 반영한 POD 선도 도출 <u>천근영</u> · 지동현* 한국수력원자력 중앙연구원	205
P2-33	원자력	국내 원전 내 점화원의 수량 산정 방식 변경으로 인한 화재구역별 화재발생빈도 영향 평가 <u>이한설</u> · 이현교 · 김경수 한국수력원자력 중앙연구원	206
P2-34	원자력	원전 근본원인분석의 해외 프로세스 분석을 통한 최적 프로세스 설계 <u>김형균</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	207
P2-35	원자력	Enterprise EDG 윤활유, 냉각수 운전상태 및 온도 설정 고찰 <u>정우근</u> * · 강준승* *한국수력원자력(주) 중앙연구원	208
P2-36	원자력	중수로 연소이력 반영 사용후연료 특성 분석 방법 타당성 검토 <u>김영애</u> · 김도연 · 함태규 · 박동환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	209
P2-37	원자력	APR1400 원전 노외핵계측기 형상처리행렬(SAM) 성능 확인 <u>문상래</u> · 이환수 한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹	210
P2-38	원자력	시간영역반사법(TDR) 시험을 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가 <u>박혜성</u> · 박경흠 · 이정운 한국수력원자력(주)	211
P2-39	원자력	탄력운전 화학 및 체적제어계통 성능 평가 <u>유극중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	212

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-40	원자력	독일 해체원전의 규제해제 및 기술자격을 위한 측정절차 <u>유지환</u> · 서형우 · 김기림 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹	213
P2-41	원자력	상용 설계 및 해석프로그램의 검증 적용성 검토 <u>양창석</u> · 홍태화 · 정선철 한국수력원자력(주), 중앙연구원	214
P2-42	원자력	상용 PLC 설비의 검증 적용성 검토 <u>양창석</u> · 홍태화 · 정선철 한국수력원자력(주), 중앙연구원	215
P2-43	원자력	OPR1000형 1차측 기기 기능적중요도결정 표준화 연구 <u>이상대</u> · 김희찬 · 김재성 한국수력원자력(주) 중앙연구원	216
P2-44	원자력	제어봉구동장치 구동부 교체방안 검토 <u>이상설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	217
P2-45	원자력	발전소 초기시험 시 피동보조급수계통 성능평가 방안 검토 <u>이석호</u> 한국수력원자력 중앙연구원	218
P2-46	원자력	국내 원전 열성충/열피로 배관 가동중검사 고찰 <u>김진희</u> * · 강준승* · 문균영* *한국수력원자력(주) 중앙연구원	219
P2-47	원자력	국내 원전 원자로용기 내부 가동중검사 고찰 <u>김진희</u> * · 강준승* · 문균영* *한국수력원자력(주) 중앙연구원	220
P2-48	원자력	APR1000 증기발생기 성능 최적화 현황 소개 <u>양원석</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	221
P2-49	원자력	설계기준초과조건관련 요건 충족을 위한 APR1000 설계 최적화 현황 소개 <u>양원석</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	222
P2-50	원자력	개방 수조형 연구용 원자로의 일차냉각재 누설감지를 위한 설계요건 검토 <u>박기정</u> · 서경우 한국원자력연구원	223
P2-51	원자력	연구용 원자로 감쇠탱크 유량별 성능평가 검토 <u>정민균</u> · 서경우 · 박홍범 한국원자력연구원	224

●●● 4월 27일(목) 14:00~16:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-52	원자력	우리나라 원자력발전의 환경성능 국제 비교 : 온실가스, 미세먼지, 자원고갈의 관점에서 <u>정환삼</u> · 이종희 · 문기환 *한국원자력연구원	225
P2-53	원자력	위험관리 측면에서 본 한국의 에너지 기반시설에 대한 물리적 보안 최선도 · 김혜승 · <u>장성준</u> 한국원자력통제기술원 물리적방호실	226
P2-54	원자력	국내 주요시설 대드론방어장비 도입사례 분석을 통한 대드론방어장비 성능요건 수립 방안 연구 <u>최선도</u> · 김우섭 · 김혜승 한국원자력통제기술원 물리적방호실	227
P2-55	원자력	드론 대응장비 성능평가 방법론 개발을 위한 드론 탐지 시험 <u>김혜승</u> · 김우섭 · 최선도 한국원자력통제기술원 물리적방호실	228
P2-56	원자력	국내외 원전 사건에 대한 원자력 안전문화 검토결과 비교분석 <u>고영준</u> 한국수력원자력 중앙연구원	229
P2-57	원자력	원전에서의 원자력 안전문화 모니터링 방법 <u>김영갑</u> 한국수력원자력 중앙연구원	230
P2-58	원자력	가동중검사 신뢰성 향상을 위한 PD(Performance Demonstration) 자격관리 적용방법 <u>유현주</u> 한수원 중앙연구원	231
P2-59	원자력	혁신형 SMR 전력계통 설계 <u>하체용</u> · 박진휘* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 전기기술실	232
P2-60	원자력	원자력발전소 증기발생기 전열관 와전류탐상검사 보빈 탐촉자 신호 표류 원인 분석 <u>주경문</u> · 서용범* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *오르비텍(주)	233
P2-61	원자력	원자력발전소 복수기 전열관 와전류탐상검사 결과에 따른 예방적 관막음 수행 <u>장재혁</u> 한국수력원자력(주) 한울원자력본부	234
P2-62	원자력	원자력발전소 액체폐기물처리계통 가열기 가동전 후 전열관 와전류탐상검사 수행결과 비교 <u>장재혁</u> 한국수력원자력(주) 한울원자력본부	235

포스터발표 Ⅲ

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-1	수소연료전지	재생에너지 연계 그린수소 단지 수전해시스템 최적용량 고찰 김한울 · 김희영 한국수력원자력(주)	236
P3-2	수소연료전지	Poly (vinyl alcohol) based blended anion exchange membrane fuel cell application Iyappan Arunkumar ¹ , Jeevitha ¹ Dong Jin Yoo ^{1,2†} Jeonbuk National University	237
P3-3	수소연료전지	Synthesis of Brominated Poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) with Polybenzimidazole Electrolytes for anion exchange membrane fuel cell application Ramasamy Gokulapriyan ¹ , Iyappan Arun Kumar ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2} Jeonbuk National University	238
P3-4	수소연료전지	Transition metal sulphides decorated with CuS nanoparticles for an effective electrochemical CO ₂ conversion reaction Murugesan Prasanna ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2} Jeonbuk National University	239
P3-5	수소연료전지	Iridium oxide nanoparticles coated MnO ₂ nanorods supported on reduced graphene oxide as efficient electrocatalysts towards oxygen evolution reaction in alkaline/seawater Karthikeyan S C ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2} Jeonbuk National University	240
P3-6	수소연료전지	An efficient transition-metal sulfide electrocatalyst for CO ₂ reduction reactions Palanimuthu Naveen Kumar ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2} Jeonbuk National University	241

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-7	수소연료전지	Rational design of LDH/ternary sulfides heterostructure and iron oxide nanorods on three-dimensional hollow porous carbon nanofiber as high energy density hybrid supercapacitor Milan Babu Poudel ¹ , <u>Dong Jin Yoo^{1,2}</u> Jeonbuk National University	242
P3-8	수소연료전지	Rational design of nitrogen-doped, carbon-encapsulated platinum nanoparticles and cobalt oxide nanosheet embedded porous carbon materials for an efficient electrocatalytic hydrogen evolution reaction Mohan Raj Subramaniam ¹ , <u>Dong Jin Yoo^{1,2}</u> Jeonbuk National University	243
P3-9	수소연료전지	메탄의 수증기/CO ₂ 복합 개질 반응의 고활성 및 고내구성을 위한 Al이 도입된 LaMnO ₃ 기반 촉매 개발 강호인 · 지서린 · 우효성 · 이은준 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	244
P3-10	수소연료전지	희토류 산화물 담체를 이용한 암모니아 합성 촉매 연구 김나영 · 이석호 · 이성호 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	245
P3-11	수소연료전지	단일 단계 촉매 기반 탄소나노소재 합성을 통한 도전재 성능 향상 배한얼 · 이석호 · 이성호 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	246
P3-12	수소연료전지	흡착 촉진 수성가스 전환 반응에 적용 가능한 촉매형 흡착제 개발 및 고순도 수소 직접 생산 최예지 · <u>이기봉</u> 고려대학교 화공생명공학과	247
P3-13	수소연료전지	에탄 탈수소방향족화 반응에서 Zr이 도입된 Co/HZSM-5 촉매의 반응 활성 향상 주나영 · 박예림 · 김상운 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	248
P3-14	수소연료전지	수증기-이산화탄소 혼합개질에서 우수한 안정성을 가진 SiO ₂ @Ni@ZrO ₂ 촉매 지서린 · 강호인 · 우효성 · 이은준 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	249

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-15	수소연료전지	중저온 고체산화물연료전지용 고안정성 Co_3O_4 -GDC 나노 복합 공기극 개발 이승복* · Saeed Ur Rehman 한국에너지기술연구원 고온에너지전환연구실	250
P3-16	에너지신산업융합	극저온 탄소포집을 위한 축소-확대 노즐 성능의 수치적 연구 이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹	251
P3-17	에너지신산업융합	정수압 정압식 압축공기 저장 장치의 수직 상향 공기 충방전 탄성용기 설계 황성현 · 이창형 · 박성호 · 류주열 [†] 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터	252
P3-18	정책	공공건축물 에너지 소비량 공개·성능개선 사업 소개 및 사례 분석 임수연 · 오세민 · 이용원 · 안충원 국토안전관리원 녹색건축센터	253
P3-19	정책	국내 수송효율 분야 기술수준 분석을 위한 특허동향 조사 유란 · 이성곤 한국에너지기술연구원 정책연구실	254
P3-20	정책	기하 브라운 운동 모델을 이용한 EU-ETS의 탄소 배출권 가격 예측 이광구 · 박홍래 · 김종현 계명대학교 기계자동차공학부 기계공학전공	255
P3-21	원자력	원전 계속운전 안전성평가 연료유화학 관리에 대한 고찰 김지민 한국수력원자력(주)	256
P3-22	원자력	원전 기기수명평가 수화학 관리프로그램 평가에 대한 고찰 김지민 한국수력원자력(주)	257
P3-23	원자력	원자력발전소 압축공기 감시 경년열화 관리계획 평가에 대한 고찰 김지민 한국수력원자력(주)	258
P3-24	원자력	원전 경년열화관리계획 윤활유 분석 평가에 대한 고찰 김지민 한국수력원자력(주)	259
P3-25	원자력	원자력발전소 경년열화관리계획 봉산부식 분야 운전경험에 대한 고찰 김지민 한국수력원자력(주)	260

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-26	원자력	수소생산을 위한 수전해시스템 위험요소 분석 및 위험성 평가 <u>김희영</u> · 김준호 · 김형태 한국수력원자력(주)	261
P3-27	원자력	APR1400형 원자력발전소 계측설비 기능적중요도결정 표준화 연구 <u>김희찬</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	262
P3-28	원자력	원자력발전소 설비의 정비규정 관리 대상기기 선정시스템 구축 방안 연구 <u>김희찬</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	263
P3-29	원자력	자력발전소 지진원자로정지시스템의 기능적중요도결정 표준화 분석 <u>김희찬</u> · 김재성 한국수력원자력(주) 중앙연구원	264
P3-30	원자력	SMART100 중대사고시 수소생성 분석 <u>서정관</u> · 김종태* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원	265
P3-31	원자력	유전정접(TD) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가 <u>정선철</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	266
P3-32	원자력	부분방전(PD) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가 <u>정선철</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	267
P3-33	원자력	적외선분광법(FTIR) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가 <u>정선철</u> 한국수력원자력(주)	268
P3-34	원자력	단일제어봉 낙하 시 원자로 정지 방지 설계와 운영현황 고찰 <u>김경수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	269
P3-35	원자력	원자력발전소 3D 모델 기반 웹 3D 뷰어의 성능 개선을 위한 기술 연구 <u>김교훈</u> · 김우중 · 변수진 · 신상후 · 김종명 · 이상현 한국수력원자력 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부	270
P3-36	원자력	지진취약도 이론 및 생성 방법론 분석 <u>김현욱</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	271

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-37	원자력	확률론적 지진재해도 평가 이론 분석 <u>김현욱</u> 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소	272
P3-38	원자력	원자력 발전소 예비 및 최종해체계획서내 화재방호 항목 비교 <u>배연경</u> · 김미경 한국수력원자력(주) 중앙연구원	273
P3-39	원자력	원자력 발전소 예비 및 최종해체계획서 비교 <u>배연경</u> · 정해영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	274
P3-40	원자력	중수로 원전 해체시 호기간 공용설비의 운전방법 검토 <u>배연경</u> · 정해영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	275
P3-41	원자력	중수로 해체 원전에 대한 캐나다 화재방호 표준 적용성 검토 <u>배연경</u> · 정해영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	276
P3-42	원자력	고온고압용 열교환기 성능 시험장치의 이차계통에 대한 열역학적 분석 <u>이선일*</u> · 배황* · 윤현기** · 양진화* · 방윤곤* 한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 다목적소형연구로계통개발부**	277
P3-43	원자력	인쇄회로 기판형 열교환기에서 유로막힘으로인한 열전달 성능 평가 <u>이성민</u> · 서경우 · 박홍범 · 김인국 한국원자력연구원	278
P3-44	원자력	탄력운전 영향을 반영한 SLB 정량적 평가 <u>이재민</u> · 최봉오* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발본부	279
P3-45	원자력	탄력운전 영향을 고려한 CCF CEAE 안전해석 평가 <u>이재민</u> · 안형균* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발본부	280
P3-46	원자력	MARS-LMR 코드를 이용한 장주기 선진 소형원자로 비보호 과출력 사고 안전해석 <u>이현우</u> · 이용범 · 한지웅 · 예휘열 · 박준범* 한국원자력연구원, *가천대학교 기계공학과	281

●●● 4월 28일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-47	원자력	계측기 오동작을 고려한 발전정지유발기기 검토 사례 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	282
P3-48	원자력	복수기 신축이음매 발전정지유발기기 선정 사례 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	283
P3-49	원자력	습분분리재열기 배수탱크 수위제어밸브의 잠재적 발전정지유발기기 사례 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	284
P3-50	원자력	원자로냉각재펌프 관련 발전정지유발기기 대상 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	285
P3-51	원자력	4.16kV 스위치기어, 발전정지유발기기 미적용 사례 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	286
P3-52	원자력	소형모듈형원자로의 격납용기 열수력 해석을 위한 모델 구축 <u>하희운</u> 한국수력원자력 중앙연구원	287
P3-53	원자력	연소도 향상을 위한 중수로 핵연료주기 연구 <u>함태균 · 김영애 · 박동환</u> 한국수력원자력(주)	288
P3-54	원자력	산업계 리스크정보활용 활성화를 위한 정책 제언 및 추진방향 <u>황석원 · 김경수 · 방기인</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	289
P3-55	원자력	국내 원전 기술지원 체계 개선 방안 <u>김재성 · 권민혁</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	290
P3-56	원자력	디젤엔진 연료유 이송펌프 전동기의 진동진단 사례 고찰 <u>김영철(Young Cheol Kim)</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)	291

[특별세션2. CCUS 기술·협력 심포지엄]

광물탄산화 핵심기술 및 상용화 요건

이승우

한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부

Key technology of mineral carbonation and requirements for Commercialization

광물탄산화는 이산화탄소 포집·활용(Carbon Capture & Utilization, 이하 CCU) 분야 중 하나로 온실가스 중 가장 많은 양을 차지하고 있는 이산화탄소 저감을 목적으로 국내·외에서 제품 생산을 위한 연구가 활발하게 진행 중이다. CCU 분야는 현재 시장 형성 전단계로 향후 탈탄소·친환경 정책 강화로 인하여 점진적으로 시장이 형성되어 지속 성장할 것으로 전망된다.

본 연구에서는 2030년 국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution)에 기여할 수 있을 것으로 예상되는 광물탄산화 기술들을 중심으로 상용화를 위한 필수 조건과 전제 조건에 대하여 논의하는 시간을 갖고자 한다.

[특별세션2. CCUS 기술·협력 심포지엄]

이산화탄소 활용형 고인화점 유기카보네이트 제조기술

백자연 · 이해진 · 김용진*

한국생산기술연구원

Carbon dioxide valorization via synthesis of dialkyl carbonate applicable
to nonflammable electrolyte

– Carbon capture, utilization and storage (CCUS) is a crucial strategy to put the world on the path to net-zero emissions. Among the CCUS technologies, the application of carbon dioxide to the component of Li-ion batteries is a promising technology that contributes to meeting carbon-neutral goals and improving battery safety. Here, we propose a bis(2-methoxyethyl)carbonate (BMEC) as a practical and safe electrolyte that successfully balances the flammability and ion conductivity to resolve the battery safety issue immediately. Unlike using flame-retardants (e.g., organic phosphates) as additives or adapting fluorine chemistry with a high synthetic cost and inherent toxicity, BMEC merits its suitable electrolyte, including ease of synthesis, economical cost, and compatibility with commercial electrodes. BMEC can be synthesized via carboxylation or oxidative carbonylation of 2-methoxyethanol (MEG). Both approaches will be regarded, and the oxidative carbonylation of MEG is the most feasible reaction owing to high atomic efficacy, and carboxylation of alcohols is the essential emerging technology.

[특별세션7. 이차전지]

**Design for high energy density and high power of lithium polyanion compounds
for high safe lithium-ion batteries**

Minkyung Kim*
Kwangwoon University

Lithium transition metal oxides (LiTMO_2) is popular cathode due to their high energy densities. However, their low structural stability involving oxygen evolution is remaining as a challenge. The oxygen can make the lithium-ion batteries swelling and even exploded. Particularly, as increasing nickel content in lithium transition metal oxides, the issue becomes serious. Unlike LiTMO_2 , Polyanion compounds such as LiTMAO_4 ($\text{TM}=\text{Fe, V, Ti}$ and $\text{A}=\text{P, S}$) has relatively high structural stability due to its strong covalent bonds and three-dimensional framework. Thus, polyanion cathodes have much less oxygen evolution than layered oxides so that they can secure high safety in lithium-ion batteries. Due to its big advantage, Tesla already applies a representative polyanion cathode, LiFePO_4 in their electric vehicles. However, low capacity and energy density of the polyanion compound are weakness due to heavy anion such as P and S and large volume to surface ratio from nano-sizing.

This presentation will introduce a design for high energy density polyanion compounds. Firstly, introduction of fluorine can enhance operating voltage. Fluorophosphates have high energy density among polyanion compounds. Secondly, multi-redox transition metal should be considered to increase energy density effectively. Lithium-rich vanadium fluorophosphate was developed. Lastly, broadening particle size distribution can be another method to increase volume to surface ratio. Using the design strategies, new polyanion cathode with high stability and energy density can be developed.

[특별세션7. 이차전지]

Design of organic materials for post-lithium-ion batteries

유동주*

*고려대학교 기계공학부

Lithium-ion batteries (LIBs), composed of lithium-containing oxide cathodes and graphite anodes, have powered the most mobile devices due to their high power and energy density compared to other battery types. Since the advent of LIBs, there is growing demand for even higher energy density to power mobile devices with increased power consumption and to extend the driving mileage of electric vehicles (EVs). Although battery suppliers have endeavored to increase the energy density of LIBs for past decades, the practical energy density of LIBs is reaching the theoretical limit based on the active materials.

A dramatic increase in the energy density requires new redox chemistries beyond the conventional 'intercalation' mechanism. The redox behaviors caused by new chemistries are distinct from those in the conventional host materials, leading to uncontrolled side reactions and short lifetime. The primary factors responsible for the low reversibility are instabilities during the redox reaction of active materials and uncontrolled side reactions at the electrode/electrolyte interface. I have focused on the development and analysis of novel organic materials for post Li-ion batteries. In this presentation, the concepts of organic molecules and their working principles in Li metal and Al batteries will be discussed.

[특별세션7. 이차전지]

수계 이차전지 내 철 음극의 변화

이동찬

홍익대학교 화학공학전공

Change in Fe Anodes for Rechargeable Aqueous Batteries

안전, 환경친화성 및 비용이 에너지 밀도보다 더 중요한 에너지 저장 분야에 있어서 수계 이차전지는 리튬이온전지의 대체재로 고려되고 있다. 수계 이차전지의 음극재로서 철은 불연성으로 대변되는 수계 전지의 장점과 더불어 풍부한 매장량 및 저렴한 가격을 강점으로 지닌 소재로 여겨진다.

CV (cyclic voltammetry) 및 다양한 소재 분석법을 이용한 연구를 통하여 충·방전 중 철 음극이 ‘발달(development)–유지(retention)–퇴화(fading)–종국(failure)’으로 이루어지는 네 단계의 변화를 거침을 밝혔는데, 각 단계는 철 입자의 형태와 결정구조에 있어서 서로 다른 변화 양상으로 구분된다. 초기 충·방전 시 입자 분열 현상으로 인해 표면적이 증가했고 이는 철 음극의 용량 증가로 이어졌다. 후기에 관찰되는 용량 감소는 낮은 반응성을 가진 maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)의 비가역적 형성에 의한 것임이 밝혀졌다. 본 연구가 철 음극의 안정화 방법에 대한 추가적 고찰을 끌어내고 저비용 수계 이차전지 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[특별세션7. 이차전지]

고에너지밀도 수계아연이온전지 설계 전략

김찬훈*

한국생산기술연구원, *청정웰빙연구그룹

Strategies for designing high-energy-density aqueous Zn-ion batteries

Energy

Chanhoon Kim*

Korea Institute of Industrial Technology, *Sustainable Technology and Wellness R&D Group

Aqueous zinc-ion batteries (ZIBs) have been considered the most promising alternative to lithium-ion batteries for large-scale applications regarding safety, productivity, and economic and ecological aspects. Furthermore, directly employing metallic Zn foil as an anode and using aqueous electrolytes significantly simplifies battery manufacturing. To accelerate the industrialization and commercialization of aqueous ZIBs, high energy density must be achieved. Here, our strategies of stabilizing Zn anodes and utilizing thick cathodes for enhancing the overall energy density of aqueous ZIBs are introduced. We will discuss 3D structuring and introducing functional surface layers for Zn anodes. Furthermore, realizing thick cathodes by controlling the hydrophilicity of binders will also be described. Overall, our findings significantly enhance the energy density and contribute to the development of practical zinc-ion batteries.

[특별세션7. 이차전지]

Cathode electrolyte interphase layer for mitigating intertwined chemical and mechanical degradation for sulfide-based solid-state batteries

Chanhyun Park · Juho Lee · Sangpyo Lee · Yu Jin Han* · Jinsoo Kim** · Sung-Kyun Jung*

School of Energy and Chemical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

*Ulsan Advanced Energy Technology R&D Center, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding Author

In the midst of the replacement of internal combustion engine vehicles with electric vehicles (EVs) in an effort to decarbonize vehicles worldwide by 2050, solid-state batteries (SSBs) are an emerging system beyond current lithium-ion batteries (LIBs) owing to their high energy density and safety. Solid electrolytes are attracting intense attention as lithium metal with high energy density can be used as an anode. Sulfide-based solid electrolytes are particularly in the spotlight due to their high ionic conductivity, excellent mechanical properties, and low gravimetric density. However, these materials inherently have chronic issues at the cathode interface such as the chemical reactivity of sulfur ion (S^{2-}) inducing oxidation decomposition and mechanical-contact detachment with the cathode particles leading to deterioration of the ion-conducting percolation path due to the reversible volume change of the cathode during charge and discharge. Herein, we suggest a strategy to mitigate both the chemical and mechanical degradation simultaneously by incorporating organic-based compounds (lithium difluorobis(oxalato)phosphate, LiDFBOP) that can form an artificial cathode-electrolyte interphase (CEI) layer during electrochemical cycling. The introduction of the cathode coating layer suppressed the kinetics of chemical degradation and the formation of LiCl by oxidative decomposition of the sulfide solid electrolyte at the cathode-solid electrolyte interface. The CEI layer proves the mitigating effect of mechanical contact loss even under low stack pressure (< 1 MPa) by inducing homogeneous void formation in contrast to heterogeneous void formation of the bare sample. The dual functionality of the LiDFBOP-originated organic layer electrochemically translates into significantly stabilized cycling performance ($\sim 35\%$ improvement in the capacity retention). With these findings, we not only suggest the feasibility of organic coating materials as novel coating materials for SSB systems but also provide an in-depth understanding of the degradation behavior at the cathode-solid electrolyte interface.

[특별세션7. 이차전지]

리튬기반 이차전지의 반응 메커니즘 규명을 위한 투과전자현미경 연구

이승용

한양대학교 신소재공학부

전기차의 성장에 수반하여 이차전지의 에너지밀도 향상을 위한 수요가 날이 갈수록 증가하고 있다. 이차전지 전극 소재의 혁신적인 성장을 위해서는 소재의 반응에 대한 근본적인 이해가 매우 중요하며, 투과전자현미경은 이차전지 소재의 구조 및 반응 거동을 나노스케일 이하 수준에서 직접 관찰하고 해석할 수 있다는 점에서 이차전지의 발전에 핵심적인 기여를 하고 있다. 하지만 소재의 극히 작은 부분만을 관찰하기에 발생할 수 있는 일반화의 오류와 나노스케일의 관찰을 위해 요구되는 특별한 샘플링 과정 등으로 인해 투과전자현미경으로 해석된 결과의 실제 적용 가능성에 한계를 보이고 있다.

본 연구진은 이차전지의 실제 환경에 근접한 각종 투과전자현미경 기술의 개발을 통해 기존 투과전자현미경 연구의 한계를 극복함으로써, 다양한 차세대 이차전지 소재의 근본적이고 실제적인 반응 메커니즘을 규명하였다. 특히 실시간 전기화학 액상 투과전자현미경 (in-situ electrochemical liquid phase transmission electron microscopy)을 정교하게 발전시켜 양이온성 고분자 박막 코팅 하에서의 리튬금속전지의 산화/환원 반응 거동을 밝혀내었다. 본 연구를 통해, 주변 환경에 매우 민감하여 지금까지 연구 결과가 극히 제한적이었던 리튬 금속의 성장/탈리 과정과 고체-전해질 계면상(solid-electrolyte interphase; SEI)의 성분 및 분포를 높은 수준의 공간 분해능으로 직접 관찰하는 데에 성공하였고, 이를 기반으로 리튬 금속의 수지상(dendrite) 형성을 억제할 수 있는 창의적인 방법을 제시하였다. 뿐만 아니라, 본 연구진은 주사 나노빔 전자회절(scanning nanobeam electron diffraction)을 기반으로 리튬이온전지 양극재 결정립 내 미세 구조를 명확하게 해석할 수 있는 플랫폼을 구축함으로써, 리튬이온전지용 양극재에서 그동안 알려지지 않았던 미세 구조를 해석하는 데에 성공하였다. 이를 통해 리튬이온전지 양극재의 새로운 열화 메커니즘을 규명하였다. 이번 발표에서는 이와 같이 이차전지 소재 반응 연구를 위해 최적화한 투과전자현미경 기술에 기반한 본 연구진의 최근 결과들을 소개하고 고급 투과전자현미경 기술의 활용 방향에 대해 논의하고자 한다.

[특별세션7. 이차전지]

가역적인 리튬 산소전지 구동 연구

곽원진*

*아주대학교 에너지시스템학과

Research for Operation of Reversible Li-O₂ Battery

리튬이온전지의 에너지밀도 한계를 극복하기 위한 고에너지밀도 차세대 이차전지 중 하나인 리튬산소전지는 높은 이론 에너지밀도라는 장점에도 낮은 가역성 문제로 인해 낮은 기술 성숙도를 가지고 있습니다. 이를 극복하기 위해 최근 리튬산소전지 방전 및 충전 중 형성되는 활성산소 종에 의한 거동 메커니즘 및 관련 열화 반응에 대한 연구들이 진행되고 있으며, 이번 발표를 통해 활성산소종으로 대표되는 일중항산소 및 초과산화물의 형성, 촉진, 제거에 대한 이해를 돕고 어떻게 이러한 문제를 극복해 나갈 것인지, 더 나아가 보다 안정적이고 가역적인 리튬산소전지를 개발하기 위한 향후 전략에 대해 말씀드리고자 합니다.

[특별세션7. 이차전지]

Multiphysics-based computational science for designing energy materials

Duho Kim

Department of Mechanical Engineering (Integrated Engineering Program),
Kyung Hee University

A growing demand for electric vehicles and energy storage systems requires further performance improvement of lithium-ion batteries and development of alternative energy storage technologies. Along this line, many companies and researchers are trying to build energy-related material design platform to reduce the time needed to discover new materials and enhance material properties. Along this line, computational science has been considered a very important approach in designing battery materials and will play a critical role in providing systematic and rational solutions to overcome energy density limitations with cycle life and fast charging properties for the current materials used in rechargeable batteries. In this talk, computational science based on first-principles calculations coupled with machine learning and screening process for designing battery materials such as cathodes and anodes is introduced with various intriguing concepts depending on target physics.

[특별세션9. 가스복합발전의 탄소포집]

NGCC 발전 적용 최적 CO₂ 포집 기술 개발(CT-1)

이윤제 · 김해련 · 김성연 · 우예솔 · 이대희 · 이광순

(주)씨이텍, 기업부설연구소

Development of optimal CO₂ capture process applied to NGCC power generation (CT-1)

Yunje Lee · Hailian Jin · Seongyeon Kim · Yesol Woo · Daehee Kim · Kwangsoon Lee
CE-TEK, Research Institute

기존 석탄 및 NGCC 발전에서 배출되는 CO₂를 저감하기 위한 가장 적극적인 방법은 연소 후 포집공정을 통한 CO₂ 분리기술이다. 연소 후 포집공정 중 아민 스크러빙 공정은 가장 대표적이며 상용화되고 있는 공정기술이다. 본 공정은 흡수탑과 재생탑으로 구성된 간단한 공정으로 공정 구성의 차이는 크지 않아 공정의 성능은 CO₂를 포집하는 흡수제의 성능으로 대표될 수 있다.

본 연구에서는 NGCC 배가스의 특성인 저농도 CO₂(4vol%), 고농도 O₂(12.5vol%) 조건에서도 낮은 재생에너지와 흡수제의 변성을 최소화한 흡수제(CT-1)을 개발하였다. CT-1 흡수제는 흡수탑과 재생탑이 있는 일반적인 포집공정에 적용할 수 있게 설계된 습식 흡수제이며, 재생시 필요한 열 에너지를 최소화하기 위해 흡수제에 포함된 물이 끓어 올라 발생하는 잠열을 줄이기 위해 물이 아닌 용매를 사용하는 저수계 흡수제를 특징으로 하고 있다.

CT-1 흡수제는 기-액 상평형장치, Wetted Wall Column, 열-산소 변성 테스트, 간이 부식 테스트를 통해 흡수제의 성능 및 물성 결과를 확보하였다. 또한 배가스 8.5Nm³/h를 처리할 수 있는 실험실규모 포집테스트 장치를 통해서 CT-1흡수제의 종합적인 성능을 확인하고 흡수제의 공정운전 안정성 및 내구성을 평가하였다.

본 연구의 CT-1흡수제는 최종적으로 미국 켄터키대학교의 Center for Applied Energy Research가 운영하는 석탄 화력발전 기준 0.7MW급 파일럿 포집공정에서 실증 운전 테스트를 수행하였다. 파일럿 실증은 석탄화력 및 NGCC 배가스 2가지 조건에서 수행되었으며, 대표적인 O₂변성인 암모니아의 대기 배출에 관련하여 US EPA 방식을 통해 가스 샘플링 및 정량분석을 진행하였다.

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

수열 히트펌프의 난방운전 특성 및 효율 향상 방안

이길봉 · 김기봉 · 장기창 · 조준현 · 최봉수 · 오봉성 · 나선익 · 왕은석 · 허재혁
한국에너지기술연구원

Operational Characteristic of Heating Operation of Water Source Heat Pump System and Approaches to Efficiency Improvement

Gilbong Lee, Kibong Kim, Kichang Chang, Junhyun Cho, Bongsu Choi, Bong Seong Oh,
Sun Ik Na, Eunseok Wang, Jaehyeok Heo

- 최근 수열을 이용한 냉난방 히트펌프는 재생에너지에 추가되며 높은 관심을 받고 있다. 수열의 온도는 대기 온도보다 여름철에는 낮고 겨울철에는 높아서 히트펌프 효율에 이점을 가지고 있다. 본 연구에서는 수열 히트펌프의 난방 운전, 특히 열원수의 온도 변화에 따른 운전 특성을 분석하고 효율 개선 방안을 제시하려 한다. 운전 특성 분석을 위해 20 kW_{th} 규모의 수절환 방식으로 냉/난방 절환이 가능한 실험 장치를 구축하였다. 저온 열원을 위한 전략에는 역사이클운전, 축열조 연계운전, 열원 보상 운전 등이 있으며 여기서는 이 중 역사이클운전과 열원보상 운전에 대한 성능 결과와 운전 특성 분석을 제시하려 한다. 실험실 환경에서의 운전 분석 결과는 향후 실제 건물에 도입될 시 히트펌프 최적의 운전 제어 패턴 설계에 활용이 가능하여 운전 효율 향상에 기여할 수 있게 된다.

(본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (20208901010010))

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

Air-to-water Heat pump로의 난방시장 전환과 적용 기술

신정철 · 김현중 · 권경민 · 서범수 · 이상헌

LG전자 에어솔루션사업부

Research and Development Trends in Air-to-water Heat pump Market

탄소 배출량을 줄이기 위한 노력이 전 세계적으로 가속화되고 있다. 전체 CO₂ 배출량 중에서 가정과 상업용 건물에서 배출하는 비중이 28%로 대단히 큰데 이 중에서 냉난방 운전이 절대적인 영향을 주고 있다. 그래서 냉난방 시 발생하는 탄소 배출량을 줄이기 위한 가장 효과적이고 필수적인 방법은 히트펌프라는 공통 인식하에 많은 국가에서는 화석연료 보일러 사용을 억제하고 히트펌프 보급을 위한 적극적인 정책을 펼치고 있다. 특히 난방 수요가 많고 생활 수준이 높은 유럽에서는 전체 탄소 배출량 중에서 가정용 난방에서의 비중이 10%를 차지하고 있어서 히트펌프로의 전환을 강력하게 추진 중이다. 그래서 현재 유럽은 공기열원으로 냉온수를 생산하는 Air-to-water Heat pump 시장의 각축장이 되어 어려운 경제 환경 속에서도 매년 두 자릿수의 성장 중인데 2030년엔 가정용 난방시장의 80% 정도가 히트펌프로 전환될 전망이다.

Air-to-water Heat pump를 이용해서 탄소 배출량을 줄이기 위해서는 사용하는 냉매가 가급적 친환경 물질이어야 하고, 전기를 생산하는 효율을 고려했을 때 다른 열원의 방식보다 운전효율이 높아야 하는데, 그 정도에 따라서 정부에서의 지원 여부나 수준이 달라진다. 또한, 기존 보일러를 대체할 수 있는 성능과 기능을 가져야 하고, 신축 건물만이 아니라 구축 건물에도 적용할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 기존의 공조용 에어컨 및 히트펌프와는 다른 공간난방 및 급탕에 특화된 기술이 필요하다.

본 발표에서는 히트펌프의 보급 현황 및 향후의 전망과 함께, 현재 Air-to-water Heat pump 업체들이 적용하고 있는 친환경 냉매 및 고난방 시스템 기술들을 소개하고자 한다.

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

산업공정열 공급을 위한 고온 히트펌프 시스템 개발

김진설 · 송찬호 · 정용 · 김정철 · 서정민

한국기계연구원 고효율에너지기계연구부

High Temperature Heat Pump for Industrial Heat Supply

온실가스 배출로 인한 환경 문제의 심각성이 높아지면서, 화석연료 중심의 에너지 생태계를 재생에너지 중심의 친환경적인 시스템으로 바꾸려는 노력이 이어지고 있다. 산업공정은 대표적인 온실가스 배출원으로서, 탄소중립 달성을 위해서는 산업공정의 탈탄소화가 무엇보다 중요하게 여겨지고 있다. 국내 산업공정에 사용되는 에너지의 약 70% 이상이 열에너지 형태이고, 이러한 열에너지의 91%는 화석연료로부터 공급되고 있기 때문이다. 고온 히트펌프는 산업공정 열에너지의 탈탄소화 수단으로서 가장 주목받고 있다. 히트펌프는 전기 에너지를 활용하여 낮은 온도의 열에너지를 높은 온도로 상승시키는 열에너지 공급 수단이다. 화석연료가 아닌 전기로부터 열을 생산하기 때문에 대표적인 전기화 기술로 고려할 수 있다. 또한, 일반적으로 공급받는 전기에너지보다 많은 양의 열에너지를 생산하기 때문에 에너지 효율이 높은 효율향상 기술이기도 하다. 따라서, 히트펌프는 탄소중립에 있어 중요한 키워드인 전기화와 효율향상을 동시에 만족시키는 유일한 장치로서 자리매김하고 있다. 하지만, 히트펌프에 사용되는 일반적인 합성냉매의 임계 온도는 150 ~ 200℃ 사이로서, 그 이상 온도에서는 히트펌프 사이클을 구성할 수 없게 된다. 또한, 200℃ 이상의 고온에서는 압축기 오일이 열화되는 문제도 있어, 히트펌프의 고온부 온도를 그 이상 높이는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 히트펌프의 한계를 뛰어넘는 300℃급 고온 히트펌프를 개발하는 데 목표를 두고 있다. 이를 위해서, 기존의 합성냉매가 아니라 자연냉매인 공기를 작동유체로 사용하고, 압축기 오일이 필요 없는 무급유 베어링을 적용하고자 한다. 이러한 공기를 이용한 고온 히트펌프는 가스터빈에 적용되는 브레이튼(Brayton) 사이클의 역과정으로서 역브레이튼(Reverse-Brayton) 사이클을 통해 작동된다. 고온 히트펌프 시스템의 주요 구성요소로는 압축기와 팽창기를 포함하는 터보기기, 고온부 및 저온부 열교환기, 그리고 산업공정 열공급의 부하변동에 대응하는 열저장 시스템을 들 수 있다. 터보기기에서는 고온에서 압축기의 신뢰성을 확보하는 다양한 냉각 기술이 중요한 요소이고, 고온부 열교환기에서는 높은 열교환 효율을 가지면서도 콤팩트하게 만드는 기술이 중요하다. 300℃ 이상 고온 열저장을 위해서 고온에서도 안정성을 가지면서 가격경쟁력이 높은 콘크리트 열저장을 적용하고자 한다. 이 구성요소들을 결합한 300℃급 고온 히트펌프 시스템은 식품·제지·섬유·화학 등 다양한 산업 분야에 열에너지를 공급하는 수단으로 활용될 것으로 기대된다.

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

공장에너지관리시스템(FEMS) 기반 산업용 히트펌프 적용 방법론

김민성^{*,**} · 배수진^{**} · 서기정^{**} · 김소연^{**} · 정민규^{**} · 구돈익^{**} · 송지원^{*}

^{*}중앙대학교 에너지시스템공학부, ^{**}중앙대학교 지능형에너지산업학과

Application of Industrial Heat Pumps Based on Factory Energy Management System (FEMS)

Minsung Kim^{*,**} · Soyeon Kim^{**} · Minkyu Jung^{**} · Donik Ku^{**} · Gijeong Seo^{**} · Soojin
Bae^{**} · Jiwon Song^{*}

^{*}School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University

^{**}Department of Intelligent Energy and Industry, Chung-Ang University

히트펌프는 열에너지의 탄소중립에서 핵심기기로 자리매김하고 있다. 산업용 냉난방 시스템으로 히트펌프가 대표적으로 고려되는 것과는 달리 가정용과 산업용에서는 그 적용이 매우 느리다. 이 중 제도의 영향을 크게 받는 가정용 히트펌프와는 달리 산업용 히트펌프는 기술적인 개선과 아울러 비즈니스 방향을 적절히 수립하는 것이 훨씬 중요하다. 특히 산업부문의 에너지 소비가 국내 전체 소비 비중의 60%를 차지함을 고려하면 산업용 히트펌프를 적용하기 위한 효과적인 방법을 발굴하는 것은 매우 중요한 것이다.

그러나 실제 산업용 히트펌프를 적용하기 위해서는 공정에 영향을 미치지 않으면서 동시에 에너지 흐름을 바꾸는 어려운 작업이 요구된다. 본 연구에서는 공장에너지관리시스템(FEMS)가 적용되는 공장을 대상으로 에너지밸런스를 산정하고 이로부터 산업용 히트펌프를 적용할 수 있는 방법론을 제안한다. 이로부터 산업부문의 열에너지 탄소중립의 방향을 개괄적으로 파악하고자 한다.

후기 : 본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지국제공동연구(20228500000010)와 에너지기술개발사업(20202020900290)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 국제에너지기구 히트펌프기술 협력프로그램(IEA HPT TCP)의 지원에도 감사드립니다.

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

반도체 공정에서의 초저온 히트펌프(초저온 냉동기) 효율 향상 기술 개발 현황

이천규 · 이정길 · 김진만

한국생산기술연구원 청정기술연구소 탄소중립산업기술연구부문

Cryogenic heat pump(refrigerator) efficiency improvement status in
semiconductor manufacturing process

Cheonkyu Lee · Jung-Gil Lee · Jin Man Kim

Carbon Neutral Technology R&D Department, Research Institute of Clean Manufacturing
System, Korea Institute of Industrial Technology

반도체 제조공정에서는 다양한 부분에 초저온 공정(-80°C 이하)을 요구하고 있다. 특히, 반도체 식각 공정에서 가장 고난이도 식각으로 여겨지는 고종횡비 식각(High Aspect Ratio etching)은 높이와 너비의 비율이 30:1 이상을 의미하며, 선폭 미세화 및 반도체 시스템의 고단 적층으로 인하여, 점차 기술 난이도가 높아지고 있는 실정이다. 극저온 식각은 식각 공정 후 나오는 부산물인 SiF_4 등이 자체로 벽면에 얼어붙을 수 있는 온도인 -100°C 이하를 만들어 식각하는 기술이다. 고난도 공정을 해결한 대안으로, 극저온 식각이 대두되고 있으며, 상대적으로 낮은 RF power에도 고종횡비 식각을 가능하게 하는 신규 공정기술로 새롭게 주목받고 있다. 그러나, 아직 반도체 장비에 적용할 수 있는 초저온 칠러 시스템의 개발이 없어, 공정을 개발하지 못하고 있는 상황이며, 초저온 냉동의 특성 상 에너지 소모가 매우 높아, 고효율의 냉동 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는, 극저온 식각을 수행할 수 있는 초저온 히트펌프(냉동기) 들의 종류 및 시스템 개발 현황 및 이슈에 대해 언급하고, 반도체 공정에 적용될 수 있는 방안에 대해 논의한다.

사사의 글 : 본 연구는 2021년도 산업통상자원부 기계·장비산업기술개발사업"냉각용량 2 kW급 반도체 식각 공정(Etching Process)용 초저온 냉각 시스템 개발"의 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 20014817)

[특별세션10. 에너지 효율향상을 위한 히트펌프 기술 현황과 연구개발 방향]

에너지 수요부문 정책 관점에서의 히트펌프 기술 위치와 향후 과제

이윤빈

한국에너지기술평가원

Current address of heat pump technology and near future challenges:
from the perspective of energy efficiency policy

Yoon Been LEE

Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning

탄소중립과 관련된 국제에너지기구의 발표와 각국의 행보에 있어서 히트펌프는 효과적인 방안으로 인식되면 중요도를 높이고 있다. 화석연료 기반의 안정적인 설비를 무탄소 또는 저탄소화 하는 과정은 수소나 암모니아와 같은 연료전환이나 전기화로 이해할 수 있으며 히트펌프 사이클의 열역학적 특성상 전기화 과정을 고효율로 구현할 수 있어서 적용처를 넓히기 위한 기술개발이 진행 중이다. 하지만 효율 향상, 한냉지 능력과 신뢰성 개선, 작동온도의 확장과 같은 연구주제들이 히트펌프 부문의 오랜 연구과제로 다루어져 왔으며 더욱이 최근에는 작동유체인 냉매의 규제 문제도 추가되면서 기술개발의 난이도가 높아진 것으로 알려져 있다.

국내의 사정을 살펴보면 상업용 히트펌프 시스템의 경우 초반기에 일부 어려움도 있었으나 다년간의 경험을 축적한 기업과 학계 및 연구계의 노력을 통해 다양한 제품들이 시장에 선보이며 국내 시장의 규모가 비교적 단기간에 크게 성장하였고 수출에서도 주목할 만한 성과를 내고 있다. 하지만 상업용과 비교하였을 때 산업부문 열에너지 활용에 있어서 히트펌프는 아직 뚜렷한 역할을 하고 있지는 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 최근 관심이 높아진 히트펌프 기술의 의미를 정책 관점에서 살펴보고 산업용 히트펌프 시스템을 중심으로 향후 풀어나가야 할 과제들을 제시하였다.

Key words: 산업용 히트펌프(industrial heat pump), 에너지정책(energy policy), 에너지 효율(energy efficiency), 탄소중립(carbon neutrality)

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Development of rare earth elements concentration process via carbonation and mineral processing of Circulating fluidized bed coal fly ash

Lai Quang Tuan^{1,2} . Fausto Moscoso-Pinto². Jiwhan Ahn^{2*}

¹Department of Resources Recycling, University of Science and Technology, Korea

²Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Korea

Coal fly ash has been produced in a vast volume in the world to produce heat and electricity. Coal fly ash disposal and management has become a concern of coal-fired power plants and the environment. However, to some extent, coal fly ash contains significant content of rare earth elements. Recovery of rare earth elements from coal fly ash could release the stress on the disposal and management practices, and produce the benefit from the recovered rare earth elements. This investigation developed a process to concentrate the rare earth elements content in circulating fluidized bed coal fly ash via integration of carbonation and mineral processing. The characterization results showed that the rare earth elements are more concentrated in the low-C, non-magnetic, and small particle sizes. There is also significant CaO content in the fly ash due to the addition of CaCO₃ for desulfurization. The carbonation method is employed to carbonate the free CaO and this carbonate mineral will be separated with a Denver flotator. Finally, a sequential concentration process includes classification, magnetic separation, and carbonation using Denver flotator followed by carbon removal and carbonate separation. As a result, the concentration of rare earth elements of CFBC fly ash increase from 393 ppm to 445 ppm with a recovery rate of 80 %

Acknowledgement

This research was supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Enhancing the recovery of rare earth elements from PC fly ash using physical separation and concentration

Fausto Moscoso-Pinto¹ · Lai Quang Tuan¹ · Jiwhan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research,
Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Korea

Rare earth elements (REE) are crucial for new technology; however, do not have effective substitutes and are scarce in the earth's crust. Furthermore, China controls the production and exports of rare earth. Consequently, new alternatives to the exploration and exploitation of rare earth from primary and secondary resources are required. Among secondary resources, pulverized coal boiler (PCB) fly ash has been proposed as a potential source. Conventional REE recovery methods from coal fly ash imply the leaching using strong acids or alkalis at high temperatures. Nevertheless, physical separation aims to separate the target minerals from the gangue using their physical properties, concentrating the minerals, and reducing the use of acids in the post-pretreatment stages. The main minerals contained in PCB fly ash are quartz ($d = 2.7$) and mullite ($d = 3.2$). Gravity separation using shaking table was made for separating these metals and analyzed where REE are attached as a way to enhance the recovery of them. Our sample has 534.51 ppm of REE. Besides, the content of REE in unburned carbon is negligible (4.09 %). The $d_{80} = 42$ μm . Furthermore, mullite is attached to quartz so it is necessary a grinding pre-step for a better separation degree. The initial quartz/mullite ratio is 1.70. However, a gravity separation improved the ratio to 1.95. Finally, when the sample is grinded during 30 min using a rod mill, the ratio increased until 2.95. The REE were concentrated using this physical separation technique, too. When the sample was not grinded the REE increased to 592.41 in the concentrate. However, 30 min grinding improved the yield to 888.15. Even at 2 hr. of grinding the quartz is not separated from mullite. Therefore, pretreatment is required for better physical separation..

Acknowledgement

This research was also supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

* Corresponding author: Jiwhan Ahn (ahnjw@kigam.re.kr)

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Towards a Circular Economy by Using Carbon Mineralization Technology to Achieve Low Carbon Hydroponic Underground Abandoned Mine Farming from Acid Mine Drainage

Van Duc Nguyen¹ · Lulit Habte¹ · Thriveni Thenepalli¹ · Ji Whan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Acid mine drainage (AMD) has been identified as the mining industry's most serious environmental issue. AMD currently uses an active water treatment method with a neutralizer to precipitate the metal and a passive water treatment method with many limitations. Carbon mineralization technology in this study could allow for AMD treatment. Heavy metals can be treated within the standard and have a high efficiency in discharging AMD. The technology aims to achieve several goals simultaneously: AMD treatment for environmental protection, CO₂ emission reduction for climate change mitigation, and the use of AMD wastewater to achieve low-carbon hydroponic farming in an underground abandoned mine are all possibilities. Many abandoned underground mines are now being used as storage or landfill sites. This study is an opportunity to reexamine how it might deal with situations, such as taking advantage of existing infrastructure, in a productive manner. A novel low-carbon underground farming approach is innovative for utilizing abandoned underground coal mines to contribute to low carbon in business activities. Low-carbon underground agriculture is another viable option for changing the mining district's economy. The extraction industry's limited lifespan can be transferred to the generative industry's infinite lifespan. This research could aid in the resolution of a significant issue confronting today's economies and cultures: growing urban populations, climate change, and food production sustainability. The ultimate goal of this work is to promote circular economy growth and collaborative engagement in the post-mining industry.

Keywords: Carbon Mineralization; AMD treatment; Hydroponic farming; Underground abandoned mine; Circular economy

Acknowledgement

This research was also supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Recovery of intermediate by-products and recycling of NaOH from alkali-activated solution through carbonation

Lai Quang Tuan^{1,2} . Fausto Moscoso-Pinto². Jiwhan Ahn^{2*}

¹Department of Resources Recycling, University of Science and Technology, Korea

²Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, Korea

Coal fly ash has become the most promising alternative source for rare earth elements. The amorphous aluminosilicate is the most abundant association of rare earth elements in fly ash. Therefore, alkali activation including roasting or leaching was employed to break the bond between the amorphous aluminosilicate matrix and rare earth elements to make rare earth elements more soluble in the subsequent acid leaching. The utilization of alkali activators could create environmental issues and increase costs. In this investigation, we developed a process to recycle the alkali activator via carbonation and NaOH regeneration. In the carbonation step, CO₂ is injected into the alkali-activated solution to precipitate Si and Al and form NaHCO₃/Na₂CO₃. At the pH of 10.5, almost all Si and Al were precipitated. In the next step, Ca(OH)₂ is added to the carbonated solution. The pH of the solution was increased from 9.7 to 13.8 simultaneously with the precipitation of CaCO₃. The CaCO₃ precipitate is separated from the regenerated NaOH by filtration. The recycled NaOH is partly evaporated and then could be used in the next cycle of activation of fly ash before leaching with acid.

Acknowledgement

This research was supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Radioactive waste immobilization: Cesium solidification technique using cementitious materials

Adrian Javier Sing Jethmal^{1,2}. Thenepalli Thriveni². Lulit Habte². Ji-Whan Ahn^{2*}

¹Department of Resources Recycling, University of Science and Technology, South Korea

²Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, South Korea

The increasing radioactive waste poses an environmental challenge and is demanding improvement of conditioning processes and materials used for the management and final disposal/storage. Cementitious materials have been widely used as infrastructure construction material as well as an environmental screen intended to protect the surroundings. Concrete and cement composites are mainly used due to their good physical, chemical, and mechanical properties with the factor of their low price included. Hence making cementitious materials a versatile solution towards suitable and efficient processes like solidification of radioactive waste, and performing an important role in the nuclear waste management system. Confinement performance of the cementitious material needs to take into account the factor of possible interaction between waste constituents and cement phases, which may affect cement hydration, and thus compromise the durability of materials obtained. To address such drawbacks, new cement systems formulations such as geopolymers, calcium sulfoaluminate (CSA) cements can be used to create reliable immobilizing elements for safe storage and disposal of wastes. Included a case review of immobilization mechanism of cesium using geopolymers. Characterization of geopolymer binder for solidification and leaching behaviour are shown for performance review purpose. As well, encapsulation case of cesium using calcium sulfoaluminate where the radioactive waste was encapsulated in the matrix stably by physical effect. And, finally a glance to carbonation of cementitious material used in disposal of radioactive waste. The chemical and physical changes due to CO₂ reacting with main alkaline phase (Ca(OH)₂) in the cementitious material.

Acknowledgement

This research was also supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

[특별세션11. 기후변화대응 탄소광물화 기술]

Reducing Carbon Footprint: The Social Impact of Carbon Mineralization Technology

O Yuna¹ · Lulit Habte¹ · Thenepalli Thriveni² · Ji Whan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Carbon mineralization technology is gaining attention as a promising solution for reducing the carbon footprint of various industries. The process involves capturing carbon dioxide emissions and converting them into stable carbonates, which can be stored for long periods of time. This technology has the potential to mitigate climate change and promote sustainable development. However, the social impact of carbon mineralization technology is often overlooked. This paper aims to explore the social impact of carbon mineralization technology and its potential benefits for local communities. The paper will review case studies from around the world to assess the social, economic, and environmental implications of carbon mineralization technology.

The study will focus on the positive social outcomes of the technology, including the creation of new jobs, the reduction of air pollution, and the improvement of local environmental conditions. Additionally, the paper will examine potential challenges to implementing carbon mineralization technology, such as the need for infrastructure development, stakeholder engagement, and financing.

Overall, this paper aims to raise awareness of the social impact of carbon mineralization technology and its potential to contribute to sustainable development. The findings of this study will provide valuable insights for policymakers, industry leaders, and researchers working towards reducing the carbon footprint of various sectors while promoting social and economic benefits for local communities.

Acknowledgement

This research was also supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752).

바이오디젤 의무혼합비율 상향에 대한 대중의 수용성 조사

김준규* · 김주희** · 유승훈***

*서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과 석사과정, **서울과학기술대학교
미래에너지융합학과 연구교수, ***서울과학기술대학교 창의융합대학 학장

2020년 기준 한국의 에너지 수입의존도는 92.8%이고, 그 중 석유의존도는 37.7%이다. 따라서 정부는 국내 에너지안보 제고의 일환으로 화석연료를 대체할 친환경 바이오연료의 사용을 확대하고자 한다. 친환경 바이오연료 중 가장 널리 활용되고 있는 바이오디젤은 현재 신재생에너지연료혼합의무제도(RFS, Renewable Fuel Standard)에 따라 의무적으로 경유에 3.5% 혼합되고 있고, 2030년 기준 5%로 계획되었다. 당초 겨울철 시동결함이라는 기술적 한계로 인해 경유에 대한 바이오디젤의 의무 혼합 비율이 최대 5%까지 확대 가능했으나 최근 기술 개발을 통해 차세대 바이오디젤이 도입되었고, 정부는 2030년 기준 의무혼합 비율을 8%로 기존 목표 대비 3%p 상향시키고자 한다. 의무혼합비율이 0.5%p 상향되면, 연간 약 33만 톤의 이산화탄소 배출량의 저감이 기대된다. 본 연구는 바이오디젤 의무혼합 비율의 2030년 기준 목표를 3%p 상향하는 것에 대한 대중의 수용성과 비용 부담에 대해 살펴보고자 한다. 이를 위해, 조건부 가치측정법(CV, contingent valuation method)이 적용되었고 2030년 기준 바이오디젤의 의무혼합비율을 3%p 상향하는 것에 대한 대중의 지불의사액(WTP, willingness to pay)이 조사되었다. CV 설문조사는 전국의 1,000가구를 대상으로 한 일대일 개별면접을 통해 수행되었고, 지불수단은 가구당 연 소득세, 지불의사 유도방법으로 양분선택형 1.5경계 모형을 적용하되 0의 WTP를 반영하기 위해 스파이크 모형(Spike Model)이 채택되었다. 전체의 60.5%에 해당하는 605가구는 추가적인 WTP가 0이라고 응답했으며, 나머지 39.5%는 의무혼합비율을 3%p 상향을 위한 연 소득세의 인상을 수용했다. 추가적으로, 1.5경계 모형에서 발생할 수 있는 반응 효과를 고려하여 수집된 WTP 응답 자료 중 첫 번째 응답 자료만 활용하여 단일경계 모형도 추정했다. 그 결과 1.5경계 모형과 단일경계 모형의 추정 결과가 서로 유의하게 다른 것으로 나타났고, 1.5경계 모형에서 반응 효과가 심각하게 발생한 것으로 판단되므로 단일경계 모형의 추정결과가 채택되었다. 가구당 연간 WTP의 평균은 5,052원으로 추정되었으며, 그 값은 통계적으로 유의했다. 이 값을 전국으로 확대하면 연간 총편익은 1,113억 원에 이른다. 즉 한국 가구는 정부의 바이오디젤 의무혼합비율 상향에 상당한 가치를 부여하는 것으로 나타났다. 이 값은 향후 정부가 바이오디젤 의무혼합비율 상향을 위한 연구 및 정책 수행 시 필요한 예산을 책정하는데 중요한 참고자료가 될 수

유럽과 국내 탄소배출권가격 결정요인 비교 분석: 에너지 가격과 관계 중심으로

박경근 · 원두환*

부산대학교 경제학부, *부산대학교 경제학부

국내 탄소배출권 거래제는 기후변화에 대응하기 위한 주요한 탄소중립 정책 중 하나로써 2015년부터 시행되어 왔지만, 그 효과에 대해서는 많은 논의가 진행되어 왔다. 이 정책에 기대하는 효과가 나타나기 위해서는 탄소배출권가격은 에너지 가격과 연계가 중요하기에, 본 연구는 가장 규모가 큰 유럽 탄소배출권시장과 국내 시장을 비교하여 VECM(Vector Error Correction Model)과 Granger Causality 방법으로 탄소배출권 가격과 에너지 가격과의 관계를 분석했다. 그 결과, 유럽 시장에서는 탄소배출권가격과 에너지 가격과의 Granger 인과관계가 나타났지만, 국내 시장에서는 그렇지 못 했다. 또한, 유럽 시장의 전력가격은 다른 에너지 가격과 밀접한 관계를 보이는 반면, 국내 전력가격은 그렇지 못 했다. 이러한 결과는 국내 전기요금의 독특한 체계로 인해 국내 탄소배출권가격과 에너지 가격과의 연계가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

한국 및 일본 집단에너지사업의 국민경제적 역할

이서영* · 김주희** · 유승훈***

*서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과 석사과정, **서울과학기술대학교
미래에너지융합학과 연구교수, ***서울과학기술대학교 창의융합대학 학장

한국 정부는 2023년까지 지역난방 보급률 20.9% 달성을 목표로 하는 제5차 집단에너지 공급 기본계획을 수립하였다. 집단에너지사업은 에너지 이용 효율성 증대 및 온실가스 배출량 절감이라는 장점을 갖기 때문에 정부는 지속적으로 그 사업을 확대하고자 한다. 그러므로 정부는 집단에너지사업에 대한 투자가 국가 전체에 미치는 경제적 파급효과에 대한 정량적 분석 결과도 요구하고 있다. 이에 대응하여 본 연구는 한국과 일본을 대상으로 투입-산출 분석을 적용하여 집단에너지사업이 국민경제에서 차지하는 역할을 규명한다. 일본이 비교 연구 대상지역으로 채택된 이유는 3가지로 요약된다. 첫째, 지리적으로 인접해 있으면서 대부분의 에너지원을 해양 운송을 통해 수입한다는 공통점이 있다. 둘째, 두 국가에서 집단에너지의 주요 연료인 천연가스의 공급 여건이 유사하다. 셋째, 두 국가의 열에너지 사용구조가 유사하다. 따라서 본 연구의 가장 중요한 목적은 한국과 일본의 집단에너지사업의 국민경제적 역할 비교 분석을 통해 시사점을 도출하는 것이다. 이를 위해 한국은행 및 일본 통계청에서 각각 발표한 2019년 한국 산업연관표 및 2015년 일본 산업연관표를 이용하여 집단에너지사업 부문의 생산유발효과, 부가가치유발효과, 임금유발효과, 취업유발효과, 공급지장효과, 물가파급효과를 분석하였다. 결과적으로, 집단에너지사업에 대한 한 단위 투자로 인한 생산유발효과, 부가가치유발효과, 임금유발효과는 한국에서보다 일본에서 각각 1.3배, 1.4배, 3.1배 더 크게 나타났다. 이러한 차이는 한국과 일본의 집단에너지사업 운영 방식의 차별성에서 기인한 것으로 판단되며 이에 대한 해석과 시사점이 도출되었다. 한국의 집단에너지사업은 대규모의 열원에서 상당히 넓은 구역에 열을 공급하는 형태인 반면, 일본은 소규모 분산형 열원에서 도심 및 인근 상업 단지에 열을 공급한다. 취업유발효과는 한국에서보다 일본에서 21배 더 크게 나타났고, 특히 자기 부문에서의 취업유발효과가 크게 나타났다. 그 이유는 한국의 대규모 사업과 달리 일본에서는 소규모 사업이 운영되므로 한국 대비 많은 취업인원이 필요하기 때문인 것으로 판단된다. 공급지장효과는 한국에서보다 일본에서 1.45배 크게 나타났다. 즉 집단에너지사업의 열 공급에 차질이 발생할 경우 국가 경제 전체에 야기되는 부정적인 영향은 한국에서보다 일본에서 더 크다. 반면 물가파급효과는 일본에서보다 한국에서 8배 크게 나타났다. 한국은 집단에너지사업이 대부분 대규모 공공주택에 열을 공급하므로 도심지 위주로 열을 공급하는 일본 보다 열 요금 상승으로 인한 파급효과가 큰 것으로 보인다. 본 연구의 결과는 향후 정부의 집단에너지사업 관련 정책 수립 시 유용한 참고자료가 될 수 있다.

V2G 양방향 충전소 인프라 구축에 대한 공공의 지불의사액 조사 : 조건부 가치측정법의 적용

현민기* · 김주희** · 유승훈***

*서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지정책학과 석박통합과정,

서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 연구교수, *서울과학기술대학교 창의융합대학
학장

정부는 전력 피크 수요 절감 및 재생에너지의 간헐성 문제를 보완하기 위해 V2G(Vehicle to Grid) 시스템의 도입을 고려하고 있다. V2G란 전기차 배터리에 충전되어 있는 전력을 다시 그리드로 공급하는 기술을 의미한다. 그 시스템의 도입을 위해서 전기차와 전력망을 연결하는 양방향 충전소가 필요하며, 정부는 공공재원을 투입하여 그 인프라를 구축하고자 한다. 이와 관련하여 본 연구는 조건부 가치측정법을 사용하여 그 인프라 구축에 대한 공익적 가치를 정량적으로 추정하고자 하였다. 이를 위해, 전국 1,000가구를 대상으로 한 설문조사가 시행되었으며, 이 때 지불의사 유도방법으로 1.5경계 양분선택형 모형이 활용되었다. 수집된 자료에 반응 효과가 존재하는지 확인하기 위해, 1.5경계 양분선택형 모형 질문의 응답을 부분적으로 활용하는 단일경계모형도 적용되었다. 게다가, 영의 지불의사액(WTP, willingness to pay) 응답을 다루기 위해 스파이크 모델이 함께 사용되었다. 전반적으로, 설문조사는 적절하게 수행되었으며 응답자들은 유효한 답변을 제공했다. 1.5경계 양분선택형 모형으로 유도된 WTP 응답에서는 반응효과가 나타났으므로, 단일경계 모형의 추정 결과가 채택되었다. 선택된 모형으로부터 계산된 가구당 연평균 지불의사액은 4,017원이고 이는 통계적으로 유의하였다. 이 값을 전국으로 확장시켜 계산된 양방향 충전소 인프라 구축에 대한 연간 총 편익은 854.8억원이다. 본 연구에서 편익은 2022년부터 2031년까지 10년 동안 매년 발생하는 것으로 가정되었다. 사회적 할인율을 4.5%로, 현재가치화 시점은 설문조사를 시행한 2022년으로 가정하여 향후 10년간 발생하는 총 편익의 현재가치를 계산하면 KRW 676.4 billion (USD 590.7 million)이다. 이 값은 정부의 양방향 충전소 인프라 구축 사업에 대한 편익으로 해석될 수 있으며 그 값이 작지 않기에 국민들은 그 구축사업을 상당히 지지하는 것으로 보인다.

선진 환경규제 극복을 위한
전과정사고 기반 에너지 환경분석 권고

Usefulness of Life Cycle Thinking in Energy Policy to
Cope with Advanced Environmental Barriers

정환삼 · 문기환 · 이종희

*한국원자력연구원

최근 30여 년 동안 기후변화는 인류의 생존을 위협하는 대표요인으로 여겨져 왔다. 그 중에서도 화석에너지 사용에 따른 온실가스 배출은 총배출의 73.2% 정도를 차지하여 각국은 저탄소 에너지로의 전환에 노력하고 있다. 인류는 이미 화석연료 사용에 취해있어, 자신의 활동에 숨겨져 있는 화석 에너지 소비와 이에 초래되는 온실가스 배출 기여에 둔감해져 있다.

본 연구는 우리의 일상 활동에서 의식 있는 환경 친화적 의사결정, 환경단체의 상식적 주장, 국가의 기후변화 대책 그리고 세계화로 인류공영의 가치 구현과 같은 21세기의 건강한 도덕적 활동 속에 잠겨있는 상식적 착각의 사례를 제시한다. 이어 이 사례들에서 애써 드러내지 않는 에너지 측면의 과학적 사실을 보여 우리의 착각을 인지하게 하고 이를 통해 활동의 의미를 숙고할 논거를 소개한다. 우리의 착각을 인정하여 결국 에너지정책에서 인류가 극복하려는 대책의 효과를 높일 수 있는 단초를 제공하고자 한다.

결국, 선진국 환경장벽에 대처하기 위해 우리의 에너지정책이 가져야 할 관점으로 전과정 사고(Life Cycle Thinking)의 도입을 권고한다. 더불어 교토협약과 파리협정을 넘어 실효성 있는 기후변화 저감을 위해 지금까지 화석연료 사용으로 경제적 부를 축적해 온 온실가스 누적에 책임있는 국가들의 책임감 있는 리더십 필요성과 이의 실행 방안을 제안한다.

참고문헌

- (1) 관계부처 합동, 2030 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정본, 2018. 7.
- (2) 관계부처 합동, 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안, 2021. 10. 18.
- (3) 관계부처 합동, 2050 탄소중립 시나리오안, 2021. 10. 18.
- (4) 마이클 쉘렌버거 (노정태 옮김), 지구를 위한다는 착각, 부·키, 2021. 10.
- (5) 앤서니 기든스 (홍옥희 옮김), 기후변화의 정치학, 에코, 2009. 11.
- (6) <https://earth.org/the-biggest-environmental-problems-of-our-lifetime/> (2023.03.23.)
- (7) <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector> (2023.03.23.)
- (8) https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/sustainable-finance/eu-taxonomy_en (2023.03.23.)

하이브리드 추진 선박 해외 기술 동향 분석

Analysis of International Trends in Hybrid Propulsion Ships Technology

황성현 · 이창형 · 류주열 · 박성호[†]

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

2018년 국제해사기구(IMO)에서 해양 환경 보호와 지속 가능한 해양 산업을 발전시키기 위해 황산화물, 질소산화물, 이산화탄소 등에 대한 선박의 배출 가스 규제를 발표하였고, 유럽 연합 및 북미뿐만 아니라 국내 특정 지역에서 더욱 강도 높은 규제(ECA, Emission Control Area)를 적용하고 있으며, 규제 지역 수가 점점 늘어나는 추세이다. 이에 따라, 국내외에서 규제에 대응하기 위한 친환경 선박에 대한 수요가 급속도로 증가 되고 있고, 친환경 선박 관련 신조/개조 시장 개척과 정책적 지원, 기술 연구 등이 활발히 이루어지고 있다.

선박의 오염 배출 가스를 줄이는 방법은 주로 오염물질을 여과하는 방법, 에너지 효율을 높이는 방법, 친환경 연료로 추진하는 방법, 전기 에너지 추진 방법 등이 있다.

본 연구에서는 하이브리드로 동력원을 사용하여 에너지 효율을 높이는 방식에 관한 기술 동향을 분석하였다. 하이브리드 선박에 대한 기술력을 주로 많이 확보한 기업은 Kongsberg, ABB, Wartsila, General Electric, Siemens 등이 있으며, 동력 및 전력 스위칭 장비, 에너지 저장 시스템, AC/DC 버스 등을 포함한 솔루션 형태로 하이브리드 시스템을 판매하고 있고, 동력원 및 추진 체계에 대한 토폴로지를 표준화하며 실증 사례를 점차 늘려가고 있다. 국내는 높은 선박 건조 기술을 보유하고 있지만, 전기 인버터/컨버터, 추진 전동기, 전력 제어모듈 등 핵심부품에 대한 기술력이 부족하여 관련 실증사업을 추진하여 관련 부품 개발에 대한 적극적 지원이 필요하고 경쟁력을 키워야 하는 실정이다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030290, 액체수소 연료전지추진선박 설계 및 검증기술 개발)

탄소중립을 위한 기존 소방업무시설의 그린리모델링 기술 실증 Empirical Study on the Green Remodeling Technology of Existing Fire Services Facilities for Carbon Neutrality

조가영* · 이정훈 · 임수진

서울기술연구원 주거환경연구실

정부는 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획을 통해서 2030년 국가온실가스 감축 목표 달성을 위한 세부 이행방안을 발표하였다. 건물 부문에서는 '18년 기준으로 '30년까지 32.8%(35.0백만톤CO₂e) 온실가스 감축 목표를 세웠으며, 감축 정책으로 신축 부문에서는 제로에너지 건축물을 확대하고 기존 건축물은 그린리모델링 지원 확대를 목표로 하였다. 국내 전체 건축물 724만동 중에서 15년 이상 노후화된 건축물은 약 540만동으로 전체의 74%를 차지하여 노후 건축물에 대한 성능개선 및 건물 에너지 효율 향상을 통해 온실가스 증감기 감축 정책에 대응할 수 있어야 한다. 따라서 공공부문에서 탄소배출을 최소화하며, 지속 가능한 환경에 기여하기 위하여 기존 건축물 중 24시간 운영되어 에너지를 소비하는 소방 업무시설을 대상으로 실증연구를 통해 저탄소 에너지 효율화 및 리모델링 실증 기술 적용방안을 제안하고자 한다.

실증연구의 추진과정으로는 첫 번째 단계로 실증 대상 선정은 24시간 운영 에너지 소비형 공공건축물 중에 준공연도가 2000년 이전이며, 연면적 1,000m²내외의 건물을 대상으로 지자체와 협의를 통하여 서울시 소재의 서대문 소방서 홍은 119안전센터로 결정하였다. 두 번째 단계로 예비 에너지 진단을 진행했으며, 세 번째 단계로 본 진단과 기본설계를 통하여 배치, 패시브, 액티브, 신재생에너지 기술을 적용하여 리모델링 효과 예측을 분석하였다. 네 번째 단계로는 실시 설계를 통하여 부위별 시방서 및 상세도를 작성하고 리모델링 패시브 요소 및 액티브 기술 시공을 하였으며, 현장 감리 업무를 진행하였다. 패시브 리모델링 기술로는 화재위험에 취약한 드라이버트 철거하고 PF보드 단열재를 적용하려는 기존 계획에서 RC 외벽 건식 외단열 시스템을 적용하여 단열성능을 강화하였으며, 창호의 경우 열관류율 0.989 W/m²K, 기밀성능은 0.21 m³/h m²의 고성능 3중 알루미늄 프레임 창호를 적용하였다. 소방차가 상시 출동하는 전면부에는 진공단열재 및 소방서 차고에는 내단열 뿔칠 기술을 적용하여 단열성능을 강화하였다. 액티브 리모델링 기술로는 IoT 기반 환기장치와 신재생에너지 기반 히트펌프 시스템을 적용하여 샤워시설의 급탕과 내부 실공간의 냉·난방에 활용하였다.

본 그린리모델링 실증연구의 마지막 단계로 이후 리모델링 전·후 에너지 소비량과 실내환경 모니터링을 통하여 발생 문제 피드백과 에너지 성능 유지관리 체계 구축을 통해 리모델링 이행점검 방안을 마련하고자 한다.

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제임.
(과제번호 : 20202020800360, 기존 공공건물 에너지 효율 진단 및 리모델링 기술개발 실증)

선박용 극저온 탄소포집 공정의 효율 분석

박성호, 이창형, 류주열, 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

The analysis of CO₂ penalty on board CO₂ carbon capture based on cryogenic carbon capture process

IMO는 해양분야 탄소중립실현과 대기 중 배출되는 이산화탄소를 저감하기 위해서 온실가스 규제 정책을 확대해 나가고 있다. 이로 인해 2030년 이후 수소, 전기, 암모니아 선박 발주량 비중 증가 전망이나 낮은 경제성 문제 및 연료공급 안정성 확보가 필요한 상황이다. 이러한 문제로 인해서 선박 내에서 CO₂를 포집하고 저장할 수 있는 기술(Onboard CCS)이 각광받고 있다. 현재 거론되고 있는 아민 흡수제를 이용한 CO₂ 포집 공정은 흡수 및 재생 공정 이루어져있고, 기체상태로 배출되는 CO₂를 저장하기 위해서는 별도의 액화/저장 공정이 필요하여 선박 내 제한된 공정에 설치가 어렵고, 흡수 및 재생 과정에서 배출된 아민은 환경오염 물질 배출로 인해서 문제가 되고 있다. 극저온 탄소 포집(Cryogenic carbon capture)공정은 선박의 추진시스템에서 배출되는 12% 농도의 이산화탄소를 어는점에 도달시켜 드라이아이스(Solid CO₂)로 만들어 기체상태의 N₂/O₂와 분리시켜 포집함으로써 별도의 아민공정 및 액화공정 없이 CO₂를 포집/분리 저장할 수 있어 공간 효율적이다. 뿐만 아니라 재열공정과 액화공정과 같이 간접적으로 열을 전달하여 CO₂ 분리 및 액화하는 공정과 달리 초음속 노즐을 통한 분사를 통해 직접적으로 동결시켜 열효율 측면에서도 유리하여 낮은 CO₂ 포집 에너지가 요구된다. 본 연구에서는 ASPEN HYSYS를 활용하여 극저온 동결포집 공정을 모사하고, 선박 내에 CO₂ 포집을 위해 소요되는 에너지를 비교하였다.

감사의 글 : 이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수소운송선박 적하역 및 수소추진선박 연료공급 통합제어 안전기준 개발)”

풍력에너지 및 태양광에너지를 이용한 암모니아 생산에서의 LCA 분석

이하은¹ · 이시훈*

¹ 전북대학교 환경에너지융합학과, *전북대학교 자원에너지공학과*

Life Cycle Assessment (LCA) Analysis of Ammonia Production Utilizing Wind and Solar Energy

The use of renewable energy has become an inevitable factor in addressing climate change and resource depletion caused by the use of fossil fuels. For this reason, many alternatives are being proposed to reduce CO₂ emissions, and among them, co-combustion of ammonia is gaining attention as a good substitute as it reduces CO₂ emissions while having a high calorific value. In this study, the environmental impact of producing 1kg of ammonia is quantitatively analyzed for each power source. The system boundary is set from raw material acquisition to ammonia production and deliver (Cradle to Gate, CtG). The raw material acquisition stage includes nitrogen production and hydrogen production processes. SimaPro, a program for performing Life Cycle Assessment (LCA), was used in this study, and Eco-Invent was used as the database. In addition, weighting and normalization were conducted to comparatively evaluate their environmental impacts. This study provides guidelines for better decision-making from an environmental impact perspective in ammonia production.

밸브 중량 증가가 배관계통의 구조 건전성에 미치는 영향 평가

권형도 · 김만원

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Evaluation of the effect of increasing the weight of a valve on the structural integrity of piping system

가동 중인 발전소의 배관계통에서 밸브 교체 시 기존에 설치된 밸브보다 신규로 설치될 밸브의 중량이 증가하는 것을 가정할 수 있다. 이 경우 기존 밸브 대비 신규 밸브의 중량 증가가 배관계통의 구조적 건전성에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다.

일반적으로 배관계통의 구조적 건전성을 확인하기 위한 응력 해석에서 전체 배관계통을 한 번에 해석하지 않고 부계통(subsystem)으로 적절히 분할하여 수행한다. 본 평가에서는 한 밸브의 중량이 14% 증가하는 것으로 가정하여 고정점(anchor) 사이의 배관을 부계통으로 설정하였다. 평가 대상 부계통은 ASME BPV Code, Section III, NB-3600 설계기준에 따라 구조적 건전성 평가를 수행하였다. NB-3600은 일차하중 또는 일차응력에 대한 설계기준 뿐만 아니라 피로 설계기준을 제시하고 있다. 본 평가에서는 밸브 중량 증가 영향을 확인하는 것이 목적이므로 중량과 관련된 정하중과 동하중의 영향만 고려한다.

하중으로 압력, 자중, 지진을 적용하였다. 압력에 의한 응력은 배관 벽에 작용하는 내부압력에 의해 배관 내에서 발생하며, 설계압력과 운전압력으로 분류된다. 배관 자체의 하중을 포함한 배관 내의 유체중량, 보온재, 밸브 및 지지대의 중량을 자중으로 고려한다. 원자로건물 지진응답 스펙트럼이 배관계통에 작용하는 것으로 간주하여 배관, 밸브 및 내용물의 관성효과를 고려한다. 해석에 적용된 배관의 온도에 따른 재료물성은 ASME BPV Code, Section II를 참조하였다.

평가 대상 배관계통은 건설 당시 설계사가 자체적으로 개발한 배관응력해석 프로그램인 PIPSYS를 사용하여 해석하였다. 하지만 현재 PIPSYS를 보유하고 있지 않기 때문에 본 해석에서는 범용 배관응력해석 프로그램 PepS를 사용하였다. PepS를 사용한 해석에서 주요 인자는 원칙적으로 건설 당시 사용한 PIPSYS와 동일한 값을 적용하였다. 압력 및 자중 해석에서는 설계조건 및 Level B 운전조건에서 배관 내부의 압력에 의해 발생하는 일차응력을 고려한다. 또한 밸브, 유체 등을 포함하는 배관 자중에 의해 발생하는 모멘트와 관련된 일차응력을 고려한다. 지진해석에서는 밸브 중량 증가에 따른 영향을 검토하기 위해 Level B 운전조건에서 지진해석을 수행하였다.

해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해 건설 당시 설계응력보고서의 해석결과와 현재 재해석 결과가 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다. 밸브 중량 증가 전후 일차응력강도의 차이는 미미하였다. 반면 중량이 증가한 밸브와 인접한 지지대에 작용하는 하중은 10 % 가량 증가하였다. 이는 인접 지지대가 증가된 중량을 대부분 지지하여 중량 증가 영향을 흡수함으로써 밸브에서 떨어진 지점에서의 응력강도는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. 따라서 밸브의 중량이 14% 가량 증가하더라도 관련 설계기준을 만족하며 배관계통의 구조적 건전성에 영향을 미치지 않는 것으로 확인하였다.

APR 원전 비접지 고압전력계통 간헐지락고장 대응 전략

A Strategy on the Phenomenon of Intermittent Earth Faults in Ungrounded Systems for APR NPP

하체웅 · 김정만*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원전기술연구소

비접지 고압전력계통에서 간헐지락은 발전기, 전동기 및 케이블 선로 등에서 문제가 되는 고장이다. 간헐지락이 발생하는 일반적인 원인은 전기적, 기계적 스트레스에 의하여 절연성능이 떨어지기 때문이다. 비접지 계통에서 지락 고장이 발생하면 상-대지 간 정전용량을 통해 지락전류가 흐르므로 설비의 손상을 일으킬 정도로 충분히 큰 고장전류가 흐르지 않는다. 그래서 통상적으로 비접지 계통에서의 지락 발생 시 계통을 차단하지 않고 운전을 수행하면서 단지 운전자에게 경보만을 주게 된다. 비접지 계통에서 발생하는 간헐지락은 과도 과전압 문제를 일으킬 수 있을 정도로 충분한 전류가 흐를 수 있고, 이러한 현상이 지속된다면 발전기, 전동기 및 케이블 선로 등에서 절연 파괴에 의한 지락 및 화재 등이 발생할 우려가 있다. 국내 원자력발전소에서는 발전기, 전동기 및 지중 케이블 선로 등에 대하여 최신기술을 적용하여 주기적인 진단 및 정비를 수행하고 있으며 전기적, 기계적 스트레스의 발생을 사전에 차단하고 있어 간헐지락 사례는 발생하거나 보고되고 있지 않다. 우리가 수출을 추진하고 있는 유럽형 APR 원전의 APR1000 EUR Rev. E 요건 또는 비접지 고압전력계통을 고려한 간헐지락 대응 전략 수립을 위하여 “유럽 사업자요건을 적용한 APR 원전 비접지 고압전력계통 기술개발” 과제의 일환으로 우선 피더보호 계전기 제작사와 모터 보호 계전기 제작사의 간헐지락 보호기능 구비여부를 검토하였다. 피더보호 계전기는 ABB, Siemens, Schneider, SEL, GE 등 5개사, 모터 보호계전기는 ABB, Siemens, Schneider, SEL 등 4개사 보호계전기를 대상으로 선정하였으며, 그 결과 피더 보호계전기는 ABB, Siemens, Schneider 등 3개사 보호계전기가 간헐지락 보호기능을 구비하고 있는 것을 확인하였고, 모터 보호계전기의 경우 Siemens, Schneider 등 2개사 보호계전기가 간헐지락 보호기능을 보유하고 있는 것으로 확인하였다. 향후 간헐지락 보호기능을 보유한 보호계전기에 대해 간헐지락 검출 능력, 동작속도 및 동작감도 등의 시험을 통해 성능을 평가하고 성능이 우수한 2개 사의 보호계전기를 비접지계통 간헐지락 보호계전기로 선정할 계획이다.

또한 간헐지락은 아주 짧은 시간 고장이 발생하였다가 자연 소멸되는 현상을 반복하므로 고장을 정확하게 검출하는 것이 무엇보다 중요한데 본 연구에서는 간헐지락고장의 일반적인 현상, 실계통에서 측정된 간헐지락 파형, 보호계전기 제작사의 추천 및 설비에 미치는 영향 등을 고려하여 간헐지락 현상이 2회 또는 3회 켜 발생하여 지락 전압이 검출 되었을 경우 바로 차단 신호를 내보내고, 운전자에게 경보를 전송하는 것으로 내·외부 전문가와 협의를 통하여 결정할 예정이며, 향후 추가 연구를 통해 간헐지락 발생 지점, 크기 및 형태 등에 따른 차단기 성능에 대한 후속 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20217810100030).

SMART100 소형냉각재상실사고 72시간 해석 Analysis on the SMART100 SBLOCA during 72 Hours

서정관 · 이규형*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원

2021년 7월부터 중소형 원전인 SMART100에 대한 국내 규제기관의 표준설계인가 본심사가 착수되었다. 2012년에 표준설계인가를 받은 SMART 원전은 안전계통이 완전 피동형으로 변경됨에 따라 재인가의 필요성이 제기되었기 때문이다. 완전 피동형으로 설계됨에 따라 소형냉각재상실사고(SBLOCA) 등 가상 사고시 72시간 동안 운전원 조치 없이 발전소를 안전정지 상태로 유지한다. 본 논문에서는 SMART100 SBLOCA 시 72시간 동안 발전소 주요 거동을 분석한 결과를 기술한다.

SMART100은 증기발생기, 가압기 및 원자로냉각재펌프가 원자로압력용기 내에 설치되는 일체형원자로이며, 설계적으로 대형배관이 제거되어 소형배관 파단사고만 가능하다. 원자로 압력용기와 연결된 최대 크기 배관은 50 mm이며, 안전주입배관 파단사고의 제한적인 파단크기에 대하여 72시간 사고결과를 분석하였다. 발전소 주요 거동 변수는 노심출력, 가압기압력, 파단유량, 원자로냉각재유량, 압력용기 냉각재수위, 노심 평균온도, 안전주입유량, 침투피복재온도, 노심보충탱크 수체적, 안전주입탱크 수체적, 비상냉각탱크 수위 및 비상냉각탱크 수온 등이다.

분석결과 발전소 주요 변수는 72시간 동안 안전정지 상태를 유지한다. 발전소의 안전정지 상태는 1) 원자로가 발전소 운영기술지침서에 제시된 정지여유도 이상을 가지고 미임계로 유지되는 상태, 2) 노심이나 원자로냉각재계통이 열적 제한치를 초과하지 않고 유지되도록 하는 노심의 붕괴열 제거가 충분히 제어되는 상태, 3) 이러한 상태를 유지하는 데 필요한 기기나 계통이 설계 한도 내에서 운전되고 있는 상태, 4) 방사선 피폭값을 정해진 한도 이내로 유지시키는 계통이나 기기가 정상 작동되고 있는 상태를 말한다.

50 mm의 안전주입배관 파단 해석결과, 72시간 동안 안전정지 상태유지를 확인한 근거는 다음과 같다. 노심의 붕괴열 제거는 원자로냉각재 온도의 지속적인 감소 및 안전정지조건 유지, 피복재 침투 온도의 지속적인 감소 확인, 비상냉각탱크의 냉각수 재고량 확보를 통해 확인되었다. 노심노출 방지는 원자로냉각재 수위 회복 및 노심노출 방지여부 확인, 냉각재 방출유량 대비 많은 양의 피동안전주입유량 확인, 안전주입탱크의 냉각재 재고량 확보 등을 통해 확인되었다. SBLOCA 시 안전정지상태를 확인하기 위한 주요 변수는 노심지지배럴 내부의 액체환산수위, 방출유량 및 피동안전주입유량, 원자로냉각재 평균온도, 노심보충탱크 및 안전주입탱크 냉각재 재고량 등이다.

SMART100 SBLOCA 해석을 위해 가장 제한적인 사고를 안전주입배관 50 mm 파단으로 설정하고 정량적인 해석을 수행하였다. 해석결과 72시간 동안 안전정지조건이 유지될 수 있음을 파단유량 및 안전주입유량, 원자로냉각재 온도 및 피동안전주입계통 냉각재 재고량 거동 등을 통해 확인하였다.

LNG 열병합발전에서 CCUS 기술 적용의 한계와 개발 현황 Limitations of CCUS Technology Application and Status of Research in LNG CHP

남궁형규 · 임태선 · 조영삼 · 장원석 · 장미희 · 신재용

한국지역난방공사 미래사업처

최근 관계부처 합동으로 발표한 ‘국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(안)(‘23.03)’에서는 2050년 국가 및 부문별 온실가스 배출량을 761.4백만톤CO₂e로 전망하고 있다. 이 중 전환(에너지)에서의 배출량은 284.9백만톤CO₂e로 전체 배출량의 37.4% 비율을 차지하고 있다. 특히 온실가스 배출을 줄이기 위해 ‘30년까지 노후 석탄발전기 20기를 폐지하는 것을 계획으로 하고, 대체에너지 생산을 위해 원전과 재생에너지의 비중을 늘리고자 한다. 산업부에서는 전환 계통의 세부과제로 탈탄소 에너지 공급믹스 달성을 위한 석탄발전 감축을 목표로 2036년까지 석탄발전 28기 폐지 및 LNG발전으로의 전환을 추진하고자 한다. 특히 LNG열병합발전은 기존 화력발전의 에너지 효율이 40~50%인데 비해 약 80%이상의 에너지 효율을 보임으로써 에너지활용도 면에서 우수하고, 온실가스 배출계수로 보면 에너지당 배출량이 낮아 탄소중립에도 유리하다.

LNG열병합발전과 화력발전의 가장 큰 차이점은 배가스 성상에 있다. 석탄화력발전의 배출가스에는 CO₂ 14~15%, O₂ 4~6%가 포함되어 있으며, 그 밖에 미세먼지, SO_x, NO_x 등 다양한 대기오염물질을 배출하고 있다. 반면 LNG열병합발전에서는 CO₂가 4~6%, O₂ 12~15%, 주요 대기오염물질로는 NO_x를 배출한다. CCUS 적용의 관점에서 LNG 열병합발전의 가장 한계는 CO₂ 농도가 낮아서 분리, 농축하는데 많은 절차와 비용이 소요된다는 점이고, 장점은 상대적으로 석탄보다 청정한 연료인 LNG를 사용함으로써 연소과정에서 생성될 수 있는 대기오염물질의 종류와 양이 적다는 점이 있다. 또한 배가스에 포함된 산소 농도가 높아 기존 석탄화력발전에서 선제적으로 개발한 습식, 건식 포집기술을 적용하면 흡수제가 쉽게 산화되어 수명이 짧다. 또 하나의 큰 차이점은 발전소 위치에 있다. 석탄화력발전은 연료의 수급이 원활하게 이루어질 수 있으며, 민원이 적게 발생할 수 있도록 해안가에 위치하고 있는 것이 일반적으로 설치 면적에 여유를 두고 부지를 확보할 수 있었다. 하지만 LNG열병합발전은 지역난방수의 공급을 위해 대도시 또는 신도시 내부에 위치할 수 밖에 없었고, 부지확보에 어려움이 있어 규모가 큰 설비를 새로 설치할 수 없는 실정이다.

본 논문에서는 이러한 LNG열병합발전에 CCUS 기술을 적용하는데 노출되는 한계점을 보완하고 CCUS 기술의 최적 적용을 위해 한탄에서 수행한 연구와 각 기술별 특징을 설명하고자 한다.

도심형 CHP 배가스 추기시스템 에너지사용량 분석 및 최적화 방안

김훈 · 이중용 · 장원석*

유진에너지기술(주), *한국지역난방공사

An analysis and optimization of energy consumption of extraction system
for exhaust gas from urban CHP plant

최근 국내 발전설비는 정부의 탄소중립 정책과 국가온실가스 저감목표 상향에 의해 석탄 발전에 비하여 LNG 복합화력 발전설비가 증가하는 추세에 있으며, 이러한 가스발전설비는 주로 도시의 협소한 공간에 위치하고 있어 배가스의 CO₂를 포집하기 위한 CCS 설비 또한 협소한 공간에서도 설치가 가능한 컴팩트한 기술의 필요성이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 도시에 위치한 LNG 열병합발전소의 배가스를 대상으로 발전 배가스에서 20톤/일의 CO₂를 포집, 활용하기 위한 실증설비 구축시 필요한 배가스 추기시스템을 구성하고, 발전설비의 연돌에서 분리막까지 배가스 이송 및 냉각과 CO₂ 포집을 위한 압축과정에서의 에너지사용량을 분석하였다. 또한 고온 배가스의 냉각을 위한 방안으로서 냉각탑 적용 방안과 열병합발전소에서 발생하는 폐열을 활용한 흡수식 냉동기 적용방안에 대해 배가스 추기시스템의 에너지 사용량을 비교 분석하였다.

각 방안별 배가스 추기시스템 구성은 상용프로그램인 Thermoflex(Thermoflow사, 미국)를 활용하여 전산모사를 위한 모델을 구성하고, 블로워와 배가스 압축기 및 냉각탑의 에너지 사용량을 분석하였다. 분석결과, 발전 폐열을 활용한 흡수식 냉동기를 적용하는 방안이 냉각탑을 활용하는 방안에 비해 약 4.9%의 전력사용량 절감효과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 추기시스템의 구성 요소 중 단순히 전력 사용설비에서의 에너지사용량만을 분석한 것이며, 추기배가스 온도의 저하에 의해 발생하는 부가적인 절감효과는 고려되지 않았다. 따라서 향후 배가스 추기시스템과 CCUS 설비의 Scale-up을 고려할 경우 흡수식 냉동기 적용에 의한 에너지 사용량의 절감효과는 증대할 것으로 기대되어 최적화 방안으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 20212010200110)

배가스 CO₂ 포집을 위한 기체분리막 공정연구 Study of CO₂ Capture Membrane Process from Flue Gas

이충설 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용

(주)에어레인, *한국지역난방공사

전 세계는 선진국을 중심으로 지구온난화의 가속화 문제 해결을 위해 기후변화 협약을 통한 탄소배출 감소방안을 마련하고 실천하고 있다. IPCC의 Global Warming of 1.5°C 보고서에 따르면 현재 평균온도는 산업화 이전 수준보다 1°C 상승했고 이대로라면 2030년에 산업화 이전 대비 1.5°C 상승을 예상하고 있다. 지구 평균온도 1.5°C 이내로의 제한을 위해서는 2030년까지 2010년 대비 이산화탄소 배출량을 최소 45% 감축해야 하며, 2050년까지 탄소 중립 달성이 필요하다고 보고되었다. 이에 우리나라 정부는 IPCC 보고서 내용에 따라 2050년까지 탄소 중립을 선언하였으며, 경제구조의 저탄소화를 위하여 CCUS 기술개발을 통한 온실가스 감축 정책을 추진 중이다.

CO₂ 포집 공정 기술개발은 미국의 DOE 산하 NCCC의 경우 흡수 기술과 분리막 기술을 중심으로 진행되어 왔으며 분리막 기술의 경우 2021년 10MWh 발전 배가스 CO₂ 포집공정의 FEED 설계가 완료되어 이후 상세설계 및 EPC가 진행될 예정이다. 분리막 기술은 CO₂, O₂, N₂ 등의 분리막 투과속도 차이를 이용하여 CO₂를 분리 포집하는 기술로 SO_x, NO_x 등의 높은 내구성으로 전처리가 간단하고 설치면적 작은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기체분리막을 이용하여 다양한 배가스의 특성에 맞는 분리막 CO₂ 포집공정을 개발하여 운전압력, 운전온도, Stage cut 등의 다양한 운전조건에 따른 CO₂ 포집 성능을 확인하였다.

LNG 발전 배가스 중 CO₂ 포집을 위한 습식아민 흡수제 성능 연구

이정현 · 박종민 · 정진규 · 곽노상 · 심재구
한전 전력연구원

A study on the performance of amine-based absorbents for capturing
CO₂ from natural gas combined cycle plants

전 세계 대규모 탄소포집의 대부분은 천연가스 생산, 비료생산, 에탄올 생산, 수소생산 등 산업부문과 관련되어 있다. 발전부문은 석탄화력발전소에서 이산화탄소를 포집하는 캐나다 SaskPower의 Boundary Dam 3 CCS 실증설비가 가동되고 있지만, 운영 중인 LNG 발전(가스복합화력)에서의 탄소포집 실증사업은 없다. 그러나 우리나라에서는 석탄에서 LNG로의 전력생산 연료전환 정책과 2030 온실가스감축목표 강화 정책이 맞물려 석탄화력 뿐만 아니라 LNG 발전의 CCS 기술 적용이 시급한 상황이다.

LNG 발전소는 산업부문은 물론 석탄화력과 비교하여 연소 배가스 중 CO₂ 분압이 매우 낮아 CCS 기술을 적용하기 어렵고 이에 따른 비용 증가로 인하여 에너지 사용을 최소화 하기 위한 흡수제 개발과 포집성능 검증을 위한 실증이 필요하다. 본 연구에서는 LNG 발전소의 낮은 CO₂ 분압을 가지는 배가스 조건(30~40 kPa)에서 90% 이상의 포집율과 포집에 필요한 에너지사용량을 저감하기 위한 습식아민 흡수제를 개발하고 Lab-scale 시험설비(배가스 처리용량 1 Nm³/hr)에서 그 성능을 평가하였다. 그 결과 90% 이상의 포집율을 확인하고 그 조건에서 상용흡수제(모노에탄올아민) 대비 흡수제 재생에너지가 약 25% 저감됨을 확인하였다. 또한 LNG 발전의 CO₂ 포집 실증을 위하여 울산복합화력과 연계하여 하루 10톤의 CO₂를 포집할 수 있는 실증설비 구축을 추진 중에 있으며 이를 위한 기본설계를 완료하였다.

향후 흡수제 조성에 대한 최적화를 통해 에너지 저감 효과의 향상, 산화성 열화 저감을 위한 첨가제 선정 및 CO₂ 포집설비의 안정적 운영을 위한 추가 연구를 수행하고, LNG 발전소와 연계된 소규모 실증설비에서 그 성능을 검증할 계획이다.

*본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20212010200030)

배가스의 CO₂ 분리를 위한 폴리(폴리(에틸렌 글리콜) 메틸 에테르
아크릴레이트) 마이셀 분리막

Poly(poly(ethylene glycol) methyl ether acrylate) micelles membranes
for CO₂ separation on flue gas

성문숙¹, 장원석², 이종석^{1, *}

¹서강대학교 화공생명공학과, ²한국지역난방공사 미래개발원

Net zero emissions should be reached to limit global temperature rise to 1.5 °C. To this end, CO₂ capture needs to be extended from coal-fired power plants to various industries. Flue gas emissions from liquified natural gas (LNG)-fired power generation system contain 15 vol% of O₂ and 5 vol% of CO₂, respectively. A low concentration of CO₂ in LNG-fired flue gas requires highly CO₂-permeable membrane materials. Also, CO₂/O₂ separation is very challenging because the kinetic diameter difference between CO₂ and O₂ is less than 5% (3.30 Å versus 3.46 Å). Here, we report a highly CO₂ permeable membrane by blending poly(ether block amide) (Pebax®) with in-situ self-assembled micellar structured poly(poly(ethylene glycol) methyl ether acrylate) (PPEGMEA) for CO₂/O₂ separation. A series of Pebax/PPEGMEA membranes with either different PPEGMEA molecular weights or different PPEGMEA concentrations were prepared. Interestingly, the Pebax®/PPEGMEA (30/70 w/w) blend membrane showed CO₂-philic PPEGMEA micelles, which significantly enlarged the fractional free volume of the Pebax® matrix. As a result, it exhibited unprecedented improvement in CO₂ permeability by 1054% compared to the Pebax® membrane. In addition, it showed a good CO₂/O₂ selectivity of 19.7. With the material design for CO₂/O₂ separation, I will briefly discuss the fabrication method for enlarging the membrane area.

농축 CO₂를 이용하는 액화 공정의 개발

최창식 · 박수남 · 임용택 · 박동규 · 이해성 · 김태욱 · 김성현 · 조성수 · 장원석*
고등기술연구원 · 한국지역난방공사 미래개발처*

LNG 배가스로부터 기체 분리막을 통해 CO₂를 농축하여 포집한 CO₂를 이용하여 고순도화 기술 검토 및 액화 실증 시스템 개발을 위한 기본설계 및 상세설계를 수행하였다.

설계 기준으로는 열병합발전소 배가스에서 멤브레인을 이용한 CO₂ Capture Pilot에서 포집되는 CO₂ 농도 80% 이상의 농축된 포집 가스를 대상 기준으로 반영하였다. 다양한 운전 조건에서의 공정 모사를 수행하여 공정모사 Case 2 조건(온도 -30℃, 압력 40bar)에서 순도 및 회수율의 최적효율 확보가 가능함을 확인하였고, 상세설계 수행은 여유율을 고려한 Case 3 조건(온도 -40℃, 압력 40bar)를 기준으로 수행하였다.

상세 설계 수행 결과로 PFD/물질수지, P&ID, Equipment List, Instrument List, Pipe Line List를 확보하였고, 주요 구성 설비(CO₂ 버퍼탱크, Compressor, CO₂ Dryer, CO₂ Distillation, CO₂ Refrigerator, CO₂ Storage tank, Plot Plan)의 설계 도면 및 data sheet를 확보하였다. 이를 통해 도심형 LNG 발전 공정 및 CO₂ 분리막 포집 전처리 공정을 연계하여 CO₂ 고순도화 실증 시스템의 개발에 적용할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 2021년도 산업통상자원부/한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 20212010200110)

도심발전소 저농도 CO₂ 배가스의 콤팩트 포집 및 탄소자원화와 발전소 폐열 활용기술 개발

장원석 · 엄태선 · 조영삼 · 장미희 · 남궁형규 · 신재용 · 유지혜

한국지역난방공사 미래사업처

Development of technology of application using waste heat and compact CO₂ capture and utilization process on flue gas of urban power plants

도심발전소는 협소한 공간 때문에 기존 CCUS설비를 설치하기 매우 어려운 상황이며 배가스내 CO₂농도도 석탄발전소 대비 상대적으로 매우 낮기 때문에 이러한 좁은공간과 저농도 CO₂라는 악조건에서도 효과적인 CO₂포집을 하고 이를 이용하여 다양한 고가물질들을 전환할 수 있는 혁신적인 콤팩트 포집 및 탄소자원화 공정개발이 필요하다.

본 연구에서는 도심에 위치한 LNG 열병합발전소의 저농도 CO₂배가스에 대해 협소한 공간에서도 설치가 가능하며 빠르고 효과적인 처리를 할 수 있는 콤팩트 분리막 공정을 적용해서 배가스내 CO₂ 농도를 처리전 5~7%에서 3단 처리후 90%까지 농축되는 성공적인 결과를 확인하였다. 또한 농축된 배기가스(CO₂ 90%)에 대해 탄소자원화 기술인 광물화 공정을 통해 18%까지 저감(처리율 80%)시킬수 있었으며 이때 생성된 칼슘분말에서는 고함량(30~60%)을 확인하였고 이를 활용하여 전자재 몰탈 및 압축패널을 제작하여 양생한 결과 압축강도가 6kgf까지 측정되었는데 이는 기존 상용제품과 유사한 결과값으로 상용화 가능성을 확인할 수 있었다.(고칼슘재: 30만원/톤, 전자재: 1.5만원/톤)

또한 광물화공정 처리후 배기가스와 분리막 처리후 처리가스를 혼합하면 CO₂농도가 5% 정도를 유지하게 한후 이를 후처리인 미세조류 광배양공정에 공급하면 광합성 반응을 통해 CO₂를 고정화하면서 평균 30%이상의 처리율을 보였으며 이때 배양된 미세조류 네오클라리시스(*Neochloris oleoabundans*)는 100L광배양기를 통해 192~280 gCO₂/m³/d의 단위면적당 CO₂ 고정능을 보였고 현장균주 성능이 4.16~5.60 gCO₂/L/d 임을 확인할 수 있었다. 한편 고가물질을 생산할 수 있는 헤마토코쿠스는 2단 배양공정을 통해 항산화물질인 아스타잔틴(7000달러/kg)을 생산할 수 있는데 이는 기존 바이오디젤(1달러/kg)을 생산하는 미세조류 공정에 비해 수 천배 높은 수익을 얻을 수 있기 때문에 충분히 사업성이 있을 뿐만 아니라 최종적으로 배출되는 처리가스의 CO₂농도는 1%이하로 맞출 수 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 도심 발전소에서 발생하는 고온의 배가스(85°C) 및 지역난방수(100°C) 등의 발전폐열을 이용하여 광배양을 위한 온실난방과 바이오매스 건조공정에 활용할 수 있는데 특히 가장 많은 에너지를 소모하는 건조공정에 기존 전기식설비와 비교해서 전기를 거의 사용하지 않는 발전폐열을 주로 활용한 결과, 건조전 함수율 93%에서 건조후 함수율 10%을 충족하는 건조효과를 나타냄으로서 친환경 공정의 가능성을 확인할 수 있었으므로 의약품나 건강식품 원료물질 생산에 적합한 공정임을 확인할 수 있었다.

에너지기술 기후가치평가 방법론 및 녹색금융 적용방안에 대한 연구

김봉균 · 조정래 · 최태환 · 송수원 · 이민정

한국에너지기술평가원 기술사업화실

A Study on the climate valuation frame for green climate finance

국제사회에서 저탄소 경제는 바꿀 수 없는 큰 흐름으로 자리 잡고 있다. 이미 주요국은 정책적 목표와 인센티브를 구비하고 시장과 자본도 맞추어 동참하고 있는 상황이다. 바이든 행정부는 2022년 IRA를 발표하면서 저탄소 경제 구축을 위한 기술혁신을 지원하는 인센티브를 책정 발표한 바 있다. 우리나라도 2030년 온실가스 감축목표(NDC)를 2018년 온실가스 총 배출량 대비 40% 감축으로 상향하였다. 국회 예산정책처의 ‘2023 경제현안 분석’에 따르면 주요국의 2020년 기준 2030 NDC 목표 달성률(EU 62%, 일본 39.8%, 미국 38%) 대비 한국은 27.4%에 그치는 것으로 조사되었다. 예산정책처는 대응방안으로 혁신적 저탄소 기술개발 투자가 중요하며 특히, 기후금융을 활성화해 민간 부문의 투자를 유도할 필요가 있다고 발표했다.

기후대응 정책의 핵심 주체인 에너지벤처의 탄생과 성장을 지원하는 정책을 추진하기 위해서는 금융지원이 중요하다. 우리 정부도 2021년 녹색금융 추진계획을 발표하고 K-텍사노미를 마련하는 등 금융활성화 방안을 마련하였으나, 저탄소 기후기술에 대한 금융투자 방법론은 아직 미비한 상황이다. 실리콘밸리식 기술금융은 기본적으로 기술에 대한 미래가치를 측정하는 Technology Valuation 모델에 기반한다. 무엇보다 에너지벤처가 기술금융을 지원받기 위해서는 보유기술에 대한 미래가치가액을 산정하는 기술평가가 필수적이다. 에너지기술에 기반한 신사업이 확대됨에 따라 금융 측면에서 활용할 수 있는 기술별 온실가스 감축 효과에 대한 정량적인 산정 평가체계가 필요하다. 그러나 에너지기술에 특화된 방법론은 부재한 상황이다.

한국에너지기술평가원은 문제인식을 가지고 2022년 에너지기술에 특화된 기후가치평가 모델을 구축하고 시범평가를 진행하였다. 나아가 민간VC와 연계를 통해 평가결과를 투자유치에 고려하는 등 그 적용방안도 확대하여왔다. 본 연구는 에너지기술을 통한 수익적 가치에서 나아가 그 파급효과라 할 수 있는 이산화탄소 저감의 환경적 가치를 평가하는 이른바 기후가치평가 모델 및 실증적 적용사례를 제시한다.

도시가스 수소 혼입 안전성 검증 및 제도화 계획

한원국 · 서국진 · 이동원 · 류영조 · 곽채식
한국가스안전공사

Plan of Safety Verification and Institutionalization for Hydrogen Blending in City Gas

2050년 탄소중립 달성을 위해 각종 정부의 정책이 추진되고 있다. 도시가스 분야에서는 수소 혼입을 통한 온실가스 감축 계획이 대안으로 제시되었고 제1차 수소경제 이행계획과 현 정부 110대 국정과제 이행계획에 포함되어 이에 대한 계획 수립이 진행되었다.

하지만 도시가스에 수소를 혼입하여 사용할 시에는 수소의 특성에 의한 수소 취성, 연소기 역화현상, 고층배관에서의 층분리 현상 등 안전성 문제와 수소 혼입에 따른 열량 감소, 기존 검지기의 사용 불가 등 호환성 문제가 예상된다. 또한 현행 도시가스사업법에서 수소 혼입 행위, 혼입시설의 설치를 금지하고 도시가스 품질기준에서 수소 검출을 금지하는 등 제도적 문제도 존재한다. 이에 따라 도시가스에 수소를 혼입할 시 발생할 수 있는 문제에 대해 사전 검증하고, 검증 결과를 근거로 제도화하기 위한 연구과제가 기획되어 올해부터 진행 예정이다.

본 발표에서는 도시가스 수소 혼입에 따른 영향을 분석하고 연구 추진 계획을 공유하여, 안전하고 효과적인 도시가스 수소 혼입을 위한 방향에 대해 논의해보고자 한다.

ESG 데이터를 활용하여 탄소중립 선언한 국내 주요 기업의 온실가스 배출량 변화 요인 분석

박년배

한국에너지기술연구원

Analysis of changes in greenhouse gas emissions of major domestic
companies that have declared carbon neutrality using ESG data

Nyun-Bae Park

Korea Institute of Energy Research

탄소중립 목표를 설정하는 국내 기업들이 증가하고 있다. 탄소중립을 선언한 국내 주요 기업들, 즉 포스코, 현대제철, 삼성전자, LG화학, SK 이노베이션 계열, 롯데케미칼, 현대자동차의 ESG(환경, 사회, 지배구조) 통계 자료를 활용하여 2018~2021년 기간의 온실가스 배출량 변화 요인을 분석하였다. 방법론은 로그 평균 디비지아 지수(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI) 분해분석법을 이용하였다. 분석 대상 기업 가운데 온실가스 배출량이 2018년 대비 감소한 기업은 3개 기업이었다. 온실가스 배출량이 감소한 3개 기업의 배출량 변화에 대한 요인별 영향을 보면, 에너지집약도 효과는 공통적으로 배출량 감소를 유발하였다. 온실가스 배출량이 2018년 대비 감소한 3개 기업 중에서 1개 기업은 배출량 감축 수준이 자사의 탄소중립 목표를 달성하기 위한 연간 감축노력 수준에 크게 못 미치며, 2개 기업의 배출량 감축 수준은 자사의 탄소중립 목표를 달성하기 위한 감축노력 수준을 상회하고 있었다. 온실가스 배출량이 2018년 대비 증가한 기업은 4곳이었으며, 배출량 증가 추세로부터 탄소중립 경로로 전환하기 위해서는 에너지집약도 개선과 배출계수를 저감하기 위한 노력을 동시에 강화할 필요가 있다. 기업별로 배출량 추세가 달랐는데, 동일 업종의 경우 배출량 감축 우수사례를 공유하고, 공통으로 개발이 필요한 기술에 대해 협업이 요구된다.

사사 : 본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업으로 수행한 결과입니다(에너지기술 R&D 기획 연구, C3-2445).

액화천연가스 저장탱크의 위상배열 탐상시험 기준 개발

이동훈 · 이정형 · 하기역 · 양윤영 · 김상범 · 송성진*

한국가스안전공사, * 성균관대학교 기계공학부

A Development of Inspection Guideline of Phased Array Ultrasonic Testing(PAUT) on Liquefied Natural Gas Storage Tank

국내에 설치되는 액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas)의 저장탱크의 경우에는 한국가스안전공사의 검사기준인 KGS AC 115“ 액화천연가스용 저장탱크 제조의 시설·기술·검사 기준”에 따라 국내에 설치 및 검사되고 있다. 하지만 해외의 인정기준에 따라 제작된 것에 한하여서는 설치를 인정하고 있으며, API 625(Tank System for Refrigerated Liquefied Gas Storage)에 따라 설치한 것 역시 인정을 하고 있다.

하지만, 해외기준 인정에도 불구하고 API에서 허용하는 LNG 저장탱크의 비파괴 검사방법은 그간 방사선투과시험에만 한정되어 왔으며, 위상배열 초음파를 이용한 검사에 대해서는 이를 인정해 줄 수 있는 검사기준이 국내에 부재하여 이에 대한 적용이 불가능 한 것이 현실이었다. 이에 한국가스안전공사에서는 LNG 저장탱크에 한하여 방사선 투과시험을 대체할 수 있는 위상배열 탐상시험법을 제시하고자 하였다.

이를 위하여 API 620, ISO 22825, ISO 13588, ISO 1712등 해외의 초음파 시험기준 및 초음파시험법의 신뢰도를 향상할 수 있는 검사자의 기량검증 방법을 분석하여, LNG 저장탱크에 대한 한국형 위상배열 초음파 검사지침을 개발하였다.

본 논문에서는 한국가스안전공사에서 개발한, LNG 저장탱크의 위상배열 초음파 탐상시험을 표준절차서 및 검사자의 검사 신뢰도 향상을 위한 기량검증 절차서를 소개하고자 한다.

MOF derived Cu mediated NiFe double-layered hydroxide electrocatalyst for oxygen evolution reaction in photovoltaic water splitting

Debabrata Chanda^{1,2}, Jagadis Gautam^{1,2}, Arjun Behera^{1,2}, Mikiyas Mekete Meshesha^{1,2}, Jang Seok Gwon^{1,2}, Gee Seong Lee³, Dae Won Hong³, Myungsik Choi⁴, Bee Lyong Yang^{1,2*}

¹ School of Advanced Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongbuk, 39177, Republic of Korea

²GHS Co. Ltd. Gumi-Si, Republic of Korea

³Nano-convergence Technology Division, National Nanofab Center, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon City 3441, Republic of Korea

⁴SJ Tech. Co., Ltd, 1026-1 Daecheon-Dong, Dalseo-Gu, Daegu City, Republic of Korea

*Corresponding author: Tel: +82-(54)-478-7741, E-mail:blyang@kumoh.ac.kr

Abstract

Dedicated design of nanocages architectures for oxygen evolution reaction (OER) electrocatalysts is an important game changing strategy to accelerate overall water splitting kinetics. In this study, we adopt a unique facile route to prepare copper-mediated layered double hydroxide NiFe (CuNiFe-LDH) nanocapsules architectures for excellent oxygen evolution reaction (OER) overpotential (η) of 201mV at current density (j) 10 mA cm². This result demonstrate that the electronic coupling and coordination of Cu ions stabilize the initial structures of the conductive NiFe MIL-88A metal-organic frameworks (MOFs). Moreover, a photovoltaic electrochemical-water splitting (PV-EC) device without wiring has been fabricated with CuNiFe-LDH/Ni mesh (NM) OER electrode, demonstrating direct solar to hydrogen production (STH) of 11.08 % with 20 h stable operation. Also, exhibits excellent OER activity for anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE) with j of 974 mA cm⁻² at 1.85 V. This study provides information on new MOF based architectures for electrochemical applications.

수소충전소용 고압용기 실가스 내구성능 실증기술 개발

하기역 · 이동훈 · 김태희 · 하창민 · 양윤영

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

Development of real gas durability demonstration technology for high pressure vessel for hydrogen refueling stations

전 세계적인 환경오염 규제로 인해 저탄소 기조의 일환으로 친환경 연료인 수소 에너지 수요가 증대되고 있으며 수소충전소의 보급도 확대되고 있다. 국내에서도 수소전기차에 70MPa 이상의 고압 수소를 충전할 수 있는 수소충전소를 2022년 310개소에서 2030년 620개소까지 확대할 예정이다.

수소충전소에서 수소를 충전하는 방식은 수소압축기에서 자동차로 수소를 충전하는 다이렉트 필링(direct filling) 방식과 충전소의 고압 저장용기에 자동차에 충전해야 하는 압력(70MPa)보다 높은 압력(89MPa 이상)을 저장하였다가 자동차에 차압 방식으로 충전하는 캐스케이드 필링(cascade filling) 방식이 있는데 국내에 구축되고 있는 대부분의 충전소는 차압 충전방식을 차용하고 있다. 국내에 대부분 적용되는 차압 충전방식 수소충전소의 경우 고압 저장용기가 충전소의 핵심이라고 할 수 있다.

고압 저장용기에 대한 안전한 제작 및 사용을 위해 국내 수소충전소용 type-1 고압 저장용기는 “고압가스 안전관리법” 제3조 제5호에 따른 특정설비 중 압축가스 설비(압력용기)와 관련된 한국가스안전공사의 검사기준인 KGS AC 111 “고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설 · 기술 · 검사 기준”에 의하여 검사된 용기만 수소충전소에 사용 가능하다.

KGS AC 111은 일반적인 고압가스에 대한 규정으로 최근 수소충전소 증대로 인해 수소 압축가스설비에 대한 수소 실가스를 사용한 검사기준을 KGS AC 111에 추가하여 국내 수소충전소용 type-1 고압 저장용기에 대한 신뢰성을 높이고자 하였고 원활한 수소충전소 구축을 위해 수소 실가스를 사용한 검사기준에 따른 압축가스설비 내구성능 실증기술을 개발하였다.

본 논문에서는 KGS AC 111의 수소충전소용 압축가스설비의 내구성 검사 기준인 부록 L3.1에 대한 내용 및 한국가스안전공사에서 개발한 수소충전소용 고압용기에 대한 수소 실가스 내구성능 실증기술 내용을 전반적으로 소개하고자 한다.

Acknowledgement : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20015893)

K_{IH} 와 da/dN 으로부터 구하는 수소 압력용기의 사용수명(cycle) 계산

김정환 · 이화영 · 이민경 · 이재훈 · 이진한

한국가스안전공사 가스안전연구원

- 미국 ASME, 국내 KGS 등의 압력용기 제조기준에서는 41MPa 이상의 고압에서 수소에 노출되는 강(steel)은 수소취성(hydrogen embrittlement)의 우려가 있으므로 내수소취성에 대한 평가가 필요하다고 말하고 있다. 내수소취성평가의 기본 개념은 손상허용(damage tolerance) 설계 개념에 따라서, 비파괴검사에 의해 발견되지 않는 초기균열이 있다고 가정하고, 피로균열성장율(da/dN)에 따라서 균열의 성장이 한계균열에 해당하는 값(K_{IH} , stress intensity factor for hydrogen)까지 가면 압력용기가 위험해지는 것으로 보는 것이다. 위험해지는 순간의 한계사용횟수의 절반 또는 위험해지는 순간의 한계균열값의 1/4이 되는 시점의 사용횟수 중 더 작은 값을 허용사용횟수(예상수명) 또는 재검사 기한으로 보고 압력용기를 관리하는 방식이다.
- 여기서, K_{IH} 와 da/dN 으로부터 한계균열깊이와 한계사용횟수를 계산하는데, 일부 업체에서 매우 단순화한 방식으로 한계사용횟수를 구하여 실제 허용되는 횟수보다 값이 크게 나오는 경우가 생겨, 수소압력용기의 안전관리에 치명적일 문제점이 최근 발견되어, 이에 본 발표에서 오류가 생기는 원인과 대책방안을 논의하고자 한다.

수소충전소 계량 정확도 평가를 위한 복합계량평가장비 개발 연구

이화영 · 김정환 · 이재훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

A Study on Development of Complex metering Evaluation Equipment for Metering Accuracy Evaluation at Hydrogen Refueling Station

'21년 11월 발표된 제1차 수소경제 이행 기본계획에 따라 국내 수소 인프라 보급 목표가 2050년까지 수소충전소 2,000기 이상, 수소 승용차 515만 대, 수소 상용차 11만 대로 설정되었다. 수소 인프라의 활용범위 확대 및 사용자 증가에 따라 수소 충전량 거래에 대한 신뢰성 확보가 필요한 시점이다. 이와 관련하여 국제법정계량기구(International Organization of Legal Metrology, OIML)에서는 유량계의 최대허용오차를 정확도 등급에 따라 권고하고 있다. 유럽에서는 MetroHyVe 프로젝트를 통해 프랑스, 독일 등 수소충전소의 계량 정확도를 평가하는 장비 개발 및 실증을 추진하였다. 우리나라 또한 수소 거래에 대한 투명성 확보를 위한 수소 충전량 정확도 평가 기술 및 제도가 필요하다.

현재 국내 수소충전소에서 사용되는 계량기는 해외 수입품을 사용하고 있으며, 교정 시 물을 이용한 교정을 실시하기 때문에 실제 수소 사용환경에서도 정확한 유량인지 파악하기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 수소충전소의 계량 정확도를 판단할 수 있는 장비를 개발하여 국내 수소충전소의 계량 오차를 평가해보고자 한다.

Zero Boil Off 달성을 위한 액체/고체(slush)기반 수소 생성 및 공정 효율 분석

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

Analysis of producing liquid/solid(slush) hydrogen and process efficiency for achievement of Zero Boil Off

수소는 지구상 수자원에서부터 얻을 수 있는 친환경 에너지원으로 고갈의 염려가 없어 차세대 친환경 에너지로 주목받고 있다. 하지만 재생에너지로 수소를 생산하여 공급할 수 있는 나라는 한정적이며 대한민국도 국내에서 공급하는데 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다. 이에 수소의 공급량을 증가시키기보다 기존의 에너지원과 같이 해외로부터 수입하는 방안을 검토 중에 있다. 그러나 수소는 우주에서 가장 가벼운 원소로 저장 밀도가 매우 낮아 700기압으로 가압하여 저장하더라도 1m³당 41kg의 수소를 저장하는데 그친다. 액체로 보관 시 대기압 저장에 비해 800배나 고밀도로 저장이 가능하지만, 액화천연가스 대비 1/6의 밀도와 110℃ 낮은 비등점으로 선박 운송으로 인한 낮은 밀도와 많은 기화량은 여전히 극복해야할 과제로 남겨져 있다.

본 논문에서는 수소의 낮은 밀도와 많은 기화량을 개선할 수 있는 액체/고체(slush) 수소 생성 공정에 대해 소개하고 기존의 수소 액화 공정으로 소요되는 에너지와 액체/고체(slush) 수소 변환으로 소요되는 에너지를 비교하고 재액화에 필요한 에너지와 액체/고체(slush) 수소의 Zero Boil Off로 얻는 장점을 정량적으로 비교하였다.

“이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수소운송선박 적하역 및 수소추진선박 연료공급 통합제어 안전기준 개발)”

수소·암모니아 혼소에 따른 복합화력 열성능 분석

김동규 · 백세현

한국전력공사 전력연구원

Performance analysis for hydrogen and ammonia co-firing in Combined Cycle Power Plant

Donggyu Kim · Sehyun Baek

전 지구적인 기후변화를 막기 위해 세계 각국에서는 탄소중립실현을 목표로 다양한 연구개발을 수행하고 있다. 우리 정부는 2050 탄소중립을 선언하고 이를 실현하기 위한 중간목표로 상향된 2030 NDC를 설정하였다. 탄소배출의 92%를 차지하는 에너지 분야중에서도 가장 큰 배출원인 발전분야에서도 '30까지 40% 수준의 탄소배출 저감이 이루어져야 하며, 이를 위해 현재사용되는 탄소기반의 석탄 및 LNG 등의 연료원을 수소·암모니아와 같은 무탄소 연료원으로 전환이 필요한 상황이다. 정부에서 발표한 10차 전력수급기본계획에는 '30까지 수소·암모니아 발전비중 2.1%(13TWh) 달성을 계획하고 있고, 이에 따라 '27까지 발전소 실증을 목표로 하는 수소·암모니아 혼소 연구과제 및 실증사업 착수를 준비 중에 있다. 수소·암모니아 발전이 상용화 되기 위해서는 취급 인프라 설비 및 기존 발전설비 개조라는 설비투자 관점의 장애물과 기존의 화석연료대비 최소한 수배이상 비싼 연료비용에 따르는 운영비 증가라는 걸림돌이 있다. 국내의 연료수급여건상 기존 화석연료와 마찬가지로 그린 수소·암모니아 역시 해외로부터 수급을 받아야 하는 형편이며 연료 수송비용에 따라 증가하는 연료비 문제는 전력생산 단가 상승을 수반할 수 밖에 없다. 연료비 증가에 따르는 발전효율의 비용 민감도는 더욱 상승하기 때문에 설계, 운영 단계의 성능개선을 위한 노력이 미치는 비용효과는 연료비 증가에 비례하여 커지게 된다. 따라서 안정적인 무탄소 연료로의 전환을 위해서는 발전소 열성능에 대한 체계적인 분석 및 연료전환에 따르는 성능변화 효과를 확인하고 이를 최적화하기 위한 연구가 필요하다. 무탄소 연료를 사용함에 따르는 성능변화는 성능계산에 있어 기준이 되는 발열량값(고위/저위)에 따르는 차이가 크고, 연소온도 및 연소 생성물의 변화로 인한 부가적인 성능변화들이 수반된다. 본 발표에서는 복합화력 발전에 있어 무탄소연료 적용에 따르는 열성능 변화를 시뮬레이션 결과를 통해 확인하고, 연료전환시 발생하는 발전사이클상의 특징을 확인하여 수소·암모니아 혼소 적용시 주요 고려사항에 대해 살펴보고자 한다.

dg.kim@kepeco.co.kr

042-865-5631

Study on the Combustion Characteristics in 0.7MWth Pilot scale Furnace according to Ammonia Co-firing Rate

Dongkwon Choi · Jiyong Hwang · Sangbin Park · Junhwa Chi

As the world attempts to address climate change, energy transition is a key focus of carbon neutrality policies, with research and technological development of renewable energy sources that can produce energy without emitting carbon being essential. While research on renewable energy sources such as solar and wind power, which can replace existing coal-fired power, is actively ongoing, the immaturity and incompleteness of these technologies in terms of intermittency of energy production and production costs make it difficult to completely replace existing energy production methods. Therefore, in the early stages of energy transition, reducing carbon emissions in the energy production process of conventional power generation through research is crucial, and research on co-firing fossil fuels and zero-carbon fuels is actively underway to address this issue. Hydrogen and ammonia are representative gaseous fuels that can be selected as zero-carbon fuels, and research on the co-firing of ammonia and pulverized coal is actively ongoing due to the ease of transportation and storage compared to hydrogen and the similar combustion rate to solid carbon.

In this study, basic research on the co-firing characteristics of ammonia-pulverized coal was conducted using the 0.7MWth pilot combustion facility owned by the Korea Electric Power Research Institute (KEPRI). The existing pulverized coal burner was modified to allow simultaneous injection of ammonia and pulverized coal, and basic co-firing tests were performed. Additionally, CFD were performed to predict the flame shape during co-firing and to compare the composition of exhaust gases. The ammonia co-firing rate was divided into three conditions based on the calorific value, i.e., 10%, 20%, and 30%, and the fuel injection rate, combustion temperature, and exhaust gas concentration were compared. The need for modification of the existing test facility and an ammonia co-firing burner were evaluated. Based on the study results, optimal co-firing conditions in the facility according to the ammonia co-firing rate were proposed, and the results were used as the basic data for designing a co-firing burner.

내륙 복합화력발전소에 적용되는 열폐기 시스템 최적 진공도 시뮬레이션

장한별 · 이중용

유진에너지기술㈜

Simulation of Optimal Vacuum Pressure about Heat Rejection System in Inland Combined Cycle Power Plant

복합화력발전소는 가스터빈-배열회수 보일러-증기터빈의 형식으로 구성된다. 배열회수 보일러에서 만들어진 증기는 증기터빈을 구동하여 전기를 생산한 후 복수기에서 응축되어 보일러 급수로 재순환된다. 증기터빈 최종단으로부터 배출된 증기는 복수기에서 냉각수와의 열교환을 통해 응축되어 물로 전환된다. 증기의 응축열을 흡수하여 대기 중으로 방출하는 시스템을 열폐기 시스템이라 하며, 일반적으로 복수기와 냉각탑 및 냉각수 순환 펌프 등으로 구성된다. 국내 내륙에 위치한 복합화력발전소는 대부분 인구가 밀집한 도시에 위치하고 있으며, 담수를 냉각수로 이용하는 수냉식 복수기와 하이브리드식 백연저감형 냉각탑을 채용한 열폐기 시스템이 적용되고 있다.

복합화력발전소는 증기터빈의 배압, 즉 복수기 진공도에 따라 발전출력과 효율이 변하게 되므로 발전소 설계 시 최적의 복수기 진공도를 선정하는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 냉각탑에서 복수기로 공급하는 냉각수의 온도 및 유량, 냉각탑에 영향을 미치는 외기온도와 습도 등 열폐기 시스템 전체의 성능을 분석하고, 경제성 분석을 통해 최적 열폐기 시스템의 설계가 이루어져야 한다.

본 연구는 내륙 복합화력발전소에 적용되는 복수기의 최적 진공도를 선정하고자 하였다. 복수기 진공도 범위를 1.3inHg.A~2.0inHg.A로 선정하고 각 복수기 진공도별 외기조건(온도 및 습도)과 냉각탑의 approach 및 cooling water temperature rise 변화에 따른 열폐기 시스템의 성능을 분석하였으며, 복수기 진공도별 연간 발전량과 발전소 건설공사비 및 경제성 등을 비교·검토하였다.

연구 결과 복수기 진공도가 증가할수록 연간 발전량과 발전소 건설공사비는 감소하였다. 경제성의 경우 복수기 진공도가 1.3inHg.A에서 1.8inHg.A로 증가할수록 경제성이 좋아지는 것으로 나타났고, 복수기 진공도가 1.8inHg.A에서 2.0inHg.A로 증가할수록 경제성은 안 좋아지는 양상을 보였다. 따라서 수냉식 복수기와 하이브리드식 냉각탑 등을 포함한 열폐기 시스템이 적용된 내륙 복합화력발전소의 복수기 진공도는 1.8inHg.A일 때 가장 경제성이 우수한 것을 알 수 있었다.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었음.
(과제번호 : 202170100050)

MARS-KS 코드를 이용한 APR1400 원전의 다중고장사고 시 운전원 조치 여유시간 분석

유지아 · 이연건*

제주대학교 에너지응용시스템학부 에너지화학공학전공, *제주대학교 전기에너지공학과

Evaluation of allowable operator action time for multiple failure accident of APR1400 using MARS-KS code

2015년 개정된 국내 원자력안전법의 사고관리범위 및 사고관리능력평가 세부기준에 관한 규정에 따르면 9개의 다중고장사고를 필수적으로 고려해야 하는 사고로 규정하고 있다. 다중고장사고 시 사고가 진행되는 동안 운전원은 노심을 냉각하기 위해 사고관리절차에 따라 완화 조치를 취하는데, 이때 운전원 조치시간은 사고 결과에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문에 운전원 조치시간의 타당성을 검증하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 MARS-KS 코드를 이용하여 APR1400의 다중고장사고 중 안전주입(SI) 상실을 동반한 소형냉각재상실사고(SBLOCA)와 급수완전상실사고(TLOFW)시 운전원 조치시간에 따른 계통 열수력 거동과 노심의 건전성을 평가하기 위한 분석을 수행하였다. SI 상실을 동반한 소형냉각재상실사고 시 사고 완화를 위한 조치로 주증기대기방출밸브(MSADV) 개방과 정지냉각계통(SCS) 주입운전이 있다. 2인치 파단의 경우 주증기대기방출밸브 개방 지연 시간에 따라 4가지 조건을 분석하였고, 파단발생 이후 58분 이전에만 밸브를 개방해준다면 피복재 최대온도(PCT)가 노심 손상 제한치인 1204°C를 넘지 않는 것을 확인했다. 파단 크기가 6인치 이상일 경우 MSADV 개방 없이 SIT 주입이 가능하나 정지냉각계통에 의한 냉각수 주입이 이루어지지 않을 경우 PCT가 제한치를 초과함을 확인하였고, 파단 크기를 소형파단의 상한선인 10인치로 하여 분석을 진행하였다. 10인치 파단의 경우 정지냉각계통 주입 지연 시간에 따라 4가지 조건을 분석하였는데, 사고 이후 2100초(SCS 작동 가능 조건 도달 후 1337초) 이전에만 SCS를 작동시켜준다면 노심 건전성을 확보할 수 있다는 결과를 얻었다. 급수완전상실사고 시 급속감압을 위한 조치로 각각 지연시간에 대해 단일유로 주입방출운전과 최대용량 주입방출운전 분석을 진행하였다. 원자로 정지 후 631초에 가압기 파이로트구동 안전방출밸브(POSRV)가 처음 자동 개방되고 이후 열림과 닫힘을 반복하나, 운전원 수동 개방 없이는 SI 주입이 불가능한 것을 확인하였다. 단일유로 주입방출운전 시 2700초, 최대용량 주입방출운전 시 2900초가 경과하기 이전에만 수동 개방해준다면 PCT 온도가 제한치를 초과하지 않음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 현 기준보다 완화된 노심 손상을 일으키지 않는 운전원 조치 여유시간을 도출할 수 있었다. 이는 사고 경위에 대한 자세한 이해와 운전원 조치시간 설정을 위한 근거로 사용될 수 있다.

APR1400 원자로 축소모델시험의 유체탄성불안정 평가

고도영 · 김규형 · 장호철* · 문종성*

한국수력원자력 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발단

원전(nuclear power plant) 기술고유화는 해외에 원전을 수출하기 위한 주요 요건이다. 국내 원전 산업계는 기술고유화의 주요 과제 중 하나로 원자로내부구조물(reactor internals)의 유효원형(Valid Prototype) 수립을 바라왔다. 국내 유일의 원전 건설 및 운영사인 한국수력원자력(주)은 이를 위해 U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC), Regulatory Guide(RG) 1.20 (Rev.4)에 근거하여 APR1400 원자로 축소모델시험(SMT, scale model testing) 연구과제를 수행하였다. 원자로의 유효원형 개발을 위해서는 원전의 건설 및 시운전 단계에서 원형(Prototype) 종합진동평가(CVAP, comprehensive vibration assessment program)를 수행함에 있어, 사전에 원자로 SMT를 통한 필수적인 기술 확보가 요구된다.

원자로내부구조물 CVAP의 영향을 주는 가진원은 크게 유동유발진동(FIV, flow-induced vibration), 음향유발진동(AIV, acoustic-induced vibration), 음향공진(AR, acoustic resonance), 그리고 기계유발진동(MIV, mechanical-induced vibration)으로 구분된다. FIV는 세부적으로 유동난류(TB, turbulent buffeting), 와류방출(VS, vortex shedding) 및 유체탄성불안정(FEI, fluid-elastic instability)이 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 본 논문은 APR1400 원자로 SMT 기술개발에서 원자로내부구조물의 가진원 중 FEI 평가에 관한 것이다. FEI와 VS는 가늘고 긴 구조물에 교차 유동(cross flow)이 있는 경우에 발생한다. 원자로내부구조물에서 FEI와 VS는 하부지지구조물(LSS, lower support structure)의 노내계측기안내관(ICIGTs, in-core instrumentation guide tubes)과 상부안내구조물(UGS, upper guidet structure)의 제어봉집합체안내관(CEAGTs, control element assembly guide tubes) 두 곳에서 발생 가능성이 있다. 그러나, 구조물간 간격이 일정하지 않고 간격이 큰 튜브군에서는 FEI가 발생하지 않는다는 선행 연구에 따라⁽¹⁾⁻⁽²⁾ 본 논문에서는 FEI의 발생 가능성이 있는 곳으로 CEAGTs를 평가 대상으로 하였다. FEI를 평가하기 위해서 모달 해석결과와 실험 경험식을 이용한 임계속도(critical velocity)와 실험 경험식에 의한 실제속도를 비교하였다. 비교결과, 임계속도와 실제속도는 차이가 큰 것으로 나타나 FEI는 발생하지 않을 것 평가되었다. 또한, 구조응답 해석을 수행하여 변위 및 응력을 산출하여 원자로 SMT로부터 얻은 측정값과 비교하였다. 본 논문의 FEI에 대한 평가는 APR1400 SMT 종합진동 시험평가를 위한 고유 해석방법론 개발 및 확인에 활용되었다. 향후 APR1400 건설 원전에서 원자로 설계 유효원형 수립을 위한 원형 CVAP에 적용될 것으로 사료된다.

⁽¹⁾ B. T. Lubin, Response of a Tube Bank to Turbulent Crossflow Induced Excitation, 77-DET-142, ASME Design Engineering Technical Conference, Chicago, 1977.

⁽²⁾ M. K. Au-Yang, Flow-Induced Vibration of Power and Process Plant Components: A Practical Workbook, ASME Press, New York, 2001.

SMART100 전열관 파괴 압력시험

권순국 · 조민기*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *두산에너지빌리티(주)

A Study on Steam Generator Tube Burst Test of SMART100

SMART100은 소형 모듈형 가압경수로이다. 상용원전과 달리 증기발생기, 가압기 및 원자로냉각재펌프가 원자로압력용기에 위치하도록 설계되었다. 이를 통하여 대형냉각재상실사고를 유발하는 대형배관을 설계에서 배제하여 안전성을 제고하였다. 증기발생기는 카세트 형식으로 압력용기 내 8개가 원주방향으로 배치되어 있다. 각 증기발생기는 전열관 바깥쪽으로 원자로냉각재가 흐르고 급수관으로 들어온 2차측 냉각재가 나선형 전열관 안쪽으로 흘러 열전달이 이루어진다. 전열관 내의 급수는 원자로냉각재측으로부터의 열전달에 의해 가열되면서 과냉단상유동에서 이상유동을 거쳐 과열증기로 상변화된 후 증기발생기 증기헤더를 거쳐 터빈으로 방출된다.

미국 전력연구원(EPRI)의 증기발생기관리지침서(SGMP)에 따르면 증기발생기 전열관의 구조안전성을 위하여 정상운전조건과 사고조건에서 적절한 여유도를 가지는 최소한의 전열관 벽두께를 제시하도록 하고 있다.

SMART100의 증기발생기 전열관은 내·외측이 기존 상용원전과 달리 설계되어 있으므로 사고시 거동은 다를 것으로 예측할 수 있다. 냉각재상실사고나 증기배관 파단을 예로 들면 전열관 내측압력이 외측 압력을 초과하여 파열을 야기할 수 있으므로 이에 대한 평가가 필요하며, 이와 반대로 급수관 파단시 전열관 내측 압력 상실로 인한 붕괴 위험을 평가해야 한다. 따라서 각 조건에 대한 파열과 붕괴조건 시험을 통한 평가가 수행되어 한다.

본 연구에서는 전열관 내부에 압력을 인가하여 파괴조건시험을 수행하였고 그 거동을 검토하였다.

장기 가동원전 최적 기술지원 수행전략

Optimal technical supporting strategies for nuclear power plant under long-term operation

김문수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한수원(주)는 '23년 현재 25기의 원전을 운용중에 있으며 약 30%의 기저전력을 담당하고 있다. 발전소 운용중 발생하는 여러가지 기술 현안 해결을 위해 중앙연구원은 보유하고 있는 장비와 분야별 전문 기술 및 연구개발 성과를 활용하여 주요 설비의 고장진단, 성능시험, 재료분석 등을 수행하고 발전소에 직접적인 경영기여를 하고 있으며 이러한 결과를 통해 인허가 및 규제 영역까지 대응 역량을 확장하고 있다. 또한 한수원(주) 중앙연구원은 발전소 현장 기술지원의 체계적 대응 및 관리를 위해 자체적으로 내부 인트라넷에 '사내 기술지원 시스템(KONIS)'을 2004년 3월 최초 개발하여 운영하고 있으며, 이에 따라 사내기술지원에 대한 중앙연구원의 역할이 지속적으로 크게 증대되고, 특히 최근 5년의 통계를 통해 2017년 이후 기술지원 수요가 지속적 증가되고, 요구되는 기술수준이 상향되고 있는 추세임이 확인된다. 그러나, 중앙연구원의 한정적인 기술지원 수행인력으로 적기수행 및 만족도 중심의 기술지원 관리에 한계가 있어, 지속적으로 관리체계 개선, 품질향상 등 기술지원 개선방안 수립이 요구되어 왔다. 그동안 문제점으로 지적되어온 개별적인 발전소 기술지원 요청, 긴급 기술지원에 대한 능동적 체계 부재 및 기술지원 품질의 관리 미흡 등 피동적인 기술지원 대응을 개선하기 위해 다음과 같이 크게 3가지 부분에 걸쳐 전략적인 기술지원체계를 수립하였다.

- 현안위주 가동원전 상시 기술지원 확대 및 계속운전 협력, 재가동 기술지원
- 복합현안 및 자연재해를 대비한 선제적 긴급 기술지원
- 발전소 맞춤형 기술지원 및 기술지원 품질향상

특히, 장기 가동원전의 경우에는 현안위주 기술지원 확대를 추진하여 20년 이상 가동원전에 대해서 지난 '21년부터 계획예방정비(OH : Overhaul)전 해당 발전소의 현안 분석 후 설비 진단 자료를 발전소에 제공하고, 직접 현장을 찾아 설명회를 개최하는 등 집중지원을 수행하고 있다. '23년 올해 발전소 설비종합진단 제공계획은 한울 2호기를 비롯하여 총 9개 호기이며, OH전 현장기술지원 설명회는 고리3,4호기 등 20년 이상 가동원전 중 총 5개 호기에 대해 실시할 예정이다.

지난 3년간 현안위주, 현장 밀착형 및 발전소 맞춤형 기술지원 수행전략으로 추진한 장기 가동원전에 대한 이러한 노력의 결과는 사내 기술지원 시스템인 KONIS를 통해 기계, 전기, 계측, 방사선·화학 등 총 29개 분야에서 배관진동분석, 전자회로해석 및 화재방호 등 217개 역무에 대한 기술지원이 통계에서 확인되고 있으며, 기술지원 총 수행결과는 '20년 2,695건, '21년 2,544건, '22년은 2,414건으로 사내 기술지원 총수가 지속 감소하는 반면 기술지원 만족도 및 적기수행율이(99.6%) 상승하는 결과로 나타났다. 또한, 매 분기마다 중앙연구원 내 주요 기술지원 수행부서와 함께 '기술지원협업 회의체'를 구성하여 기술지원 품질 향상 및 효율화를 위한 KONIS 시스템 개선과 기술지원 수행전략에 대한 협의를 진행하고 있으며 이를 통해 더욱 효과적인 현장 기술지원 수행능력을 증진할 수 있고 결과적으로 발전소 안전성 및 이용률 향상에 크게 기여 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

재생에너지 기반 수전해 설비 안전기준 개발 및 합리화 연구

윤문상 · 이정훈 · 정재환 · 이정운†

한국가스안전공사 가스안전연구원

Development and Rationalization of Safety Standards for Water Electrolysis Facility Based on Renewable Energy

MoonSang Yun · JeongHoon Lee · JaeHwan Jung · JungWoon Lee†

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

전 세계적으로 신재생에너지가 주목받고 있는 가운데, 현재 가장 친환경적인 에너지라고 불리는 그린 수소를 생산할 수 있는 수전해 설비에 대한 연구가 적극적으로 이루어지고 있다. 현재 국내 MW급 대규모 수전해 실증사업부터, 해외 GW급 대규모 수전해 단지 조성 등 각국 정부의 적극적인 지원을 통해 대규모 수전해 설비가 구축되고 있으며, 향후 재생에너지를 연계한 수소 생산 및 활용이 주 에너지원으로써 자리잡을 것으로 전망된다.

국내 수전해 설비는 수소법에 따른 상세 기준 시행에 따라 KGS Code AH271(수전해설비 제조의 시설·기술·검사 기준)에 따른 재료, 구조 및 치수, 장치, 성능에 대한 안전기준을 만족하도록 규정하고 있다. 수전해 설비의 궁극적인 목적은 재생에너지를 연계하여 운전하는 방법이나, 현재 재생에너지는 계절, 기상 등 다양한 요인으로 인하여 간헐적 부하 변동이 발생하여 전력공급에 대한 위험 요소가 도출되었다. 재생에너지 연계 중 수전해 스택의 위험 요소와 수전해 형태별 운전 특성을 반영한 안전기준 개발이 필요한 실정이다.

본 연구를 통해 재생에너지 기반 수전해 설비의 추가 위험 요소를 분석하고, 국내외 수전해 안전기준에 대한 분석 및 관련 연구자료를 분석하여 추가 안전기준의 방향성을 도출하였으며, 스택 및 운전 특성에 따른 다양한 형태의 수전해 설비 안전 성능에 대응하기 위하여 KGS Code AH271에 대한 새로운 개정 항목을 제시하고자 한다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 20203030040030, 재생에너지 기반 알칼라인 수전해 장치 고안전성 확보를 위한 핵심기술 개발 및 실증)

디지털 트윈 활용 수소생산설비 위험요소 분석 및 안전기준 적용 방안

이정훈[†] · 유수연

한국가스안전공사 가스안전연구원

Analysis of Risk Factors for Hydrogen Production Facilities Using Digital Twin System and Application of Safety Standards

JeongHoon Lee[†] · SuYeon Yu

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

최근 대형화·고도화된 수소생산설비(수전해설비 및 수소추출설비)의 실증 및 보급이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

기존 상용화된 알칼라인 수전해(AEC)에서 저온 전해질 기술인 고분자 전해질막 수전해(PEMEC)과 고온 수전해 기술인 고체산화물 수전해(SOEC) 등의 다양한 형태로 발전하고 있고, 재생에너지(풍력·태양광)를 운전 동력으로 활용한 시스템을 통해 수전해 설비의 수소 생산 효율을 높이는 실증연구가 진행되고 있다. 수전해설비의 수소 발생량을 극대화하기 위한 대형화된 현장 제조형 수소 생산 플랜트의 연구도 진행 중이며, 이러한 과정을 통해 국내 수소생산 산업이 더 높은 수준의 발전을 할 것으로 전망된다.

본 연구에서는 초기 단계이지만 재생에너지 연계 수전해 시스템의 디지털 트윈 활용에 있어 안전 요소 및 안전기준 프로토콜 적용 방안을 제시하고자 한다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 20207200000070, 디지털 트윈을 활용한 재생에너지 연계 수소 생산 시스템 성능 표준화 및 운영 안전성 평가 기술 개발)

CFD를 적용한 경사진 축류형 터빈의 다중목적 최적화

삼수딘 모하메드 무르시드^{*,**}, 노민수^{*,**}, 모하메드 아부 사저^{*,**}, 김진혁^{*,**}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

Multi-Objective Optimization of an Inclined Axial Turbine using CFD

Shamsuddeen Mohamed Murshid^{*,**}, Min-Su Roh^{*,**}, Mohammad Abu Shahzer^{*,**},

Jin-Hyuk Kim^{*,**}

^{*}Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science & Technology

^{**}Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

요 약

An inclined axial turbine concept designed for energy production by converting a ‘no-head’ water channel into an ‘ultra-low head’ channel without the construction of a dam is developed. The turbine is designed for installation in rivers, streams, canals, and irrigational and industrial water channels where a natural head is unavailable. The initial turbine design performance was analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation models by solving transient, multi-phase, buoyant, open-channel, free-surface, and turbulence equations. The internal flow field of the initial design performance obtained through CFD showed a few regions of pressure losses on the runner surfaces. A multi-objective optimization is employed to mitigate the pressure losses at the runner and thereby enhance the hydraulic performance of the turbine. The runner inlet blade angle distribution at the mid and shroud span was selected as the design variables while the hydraulic efficiency, head, and power output were selected as the objective function. The sample points for the design space were generated using 2^k factorial and Latin hypercube sampling techniques. The radial basis neural network model, which is an artificial neural network, was used as the surrogate model and trained to improve prediction accuracy. The pressure losses at the runner inlet decreased by 56% thereby increasing the hydraulic efficiency of the optimized turbine by 2.72%. The optimization improved the turbine performance by diminishing the pressure losses at the runner inlet.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20217410100010, 중대형 CHP 냉각탑 미활용 에너지 활용 기술 개발).

경험적 상관관계를 사용한 비속도 170급 프란시스 수차 보간 모델 설계 연구

노민수^{*,**} · 김성^{**} · 모하메드 아부 사저^{*,**} · 황태규^{***} · 김승준^{****} · 박준관^{****} · 김진혁^{*,**}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

^{***}(사)한국수력산업협회 연구사업부

^{****}한국수력원자력(주) 수력연구교육센터

요 약

본 연구에서는 국내 수력 발전 설비 시장을 활성화하고 프란시스 수차 설계 연구에 대한 기반을 마련하고자 과거 연구를 통해 도출한 경험적 상관관계를 사용하여 프란시스 수차 보간 모델 설계 연구를 수행하였다. 고효율로 작동하는 비속도 170급 프란시스 수차 설계를 목표로 프란시스 수차의 주요 구성품인 스파이럴 케이싱, 스테이 베인, 가이드 베인, 러너 및 드래프트 튜브를 설계하였다. 보간 모델 설계를 위하여 기존에 정의된 각 구성품의 설계 변수에 비속도 별 데이터베이스를 적용하였으며, 비속도 170급 프란시스 수차의 형상 설계 값을 예측하였다. 이후 도출된 모델에 대하여 수치해석을 통해 수력학적 성능을 예측하였다. 수치해석을 위해 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 기반으로 상용 프로그램인 CFX-21.0을 사용하였다. 프란시스 수차 벽 근처에서 발생하는 유동 박리를 비롯하여 그 외 영역에서 발생하는 복잡한 유동을 정밀하게 예측하기 위하여 Shear Stress Transport 난류 모델을 사용하였다. 격자 수에 따라 수치 해석 결과가 의존적으로 변화하는 수치 해석의 문제점을 해소하기 위해 Grid Convergence Index 기법을 적용하였으며, 그 결과 매우 낮은 수치적 불확실성을 확인하였다. 경계조건으로는 입출구에 각각 전압력 및 대기압을 설정하였으며, 회전하는 프란시스 수차의 실제 운전 환경을 구현하기 위해 고정자 및 회전자 사이에 Stage-averaged 기법을 적용하였다. 또한 계산 시간을 줄이기 위하여 주기성을 가지는 스테이 베인, 가이드 베인, 러너에 주기 조건을 적용하였다. 이후 전체 도메인과의 정량적·정성적 비교를 통해 해당 연구의 타당성을 입증하였다. 수치 해석 결과 효율 93% 이상 및 출력 30MW급의 목표 수력학적 성능을 달성하였으며, 내부 유동장 분석 결과 안정적인 특성을 가진 상태로 운전하는 프란시스 수차를 설계할 수 있음을 확인하였다.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021021010003D, DB기반 수차 개발 공공플랫폼 구축).

Heterostructure of Cobalt Copper Sulfide /Tungsten Disulfide Nanowire as an Excellent Bifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting

Jagadis Gautam^{1,2}, Jang Seok Gwon^{1,2}, Mikiyas Mekete Meshesha^{1,2}, Debabrata Chanda^{1,2}, Arjun Behera^{1,2}, GS Lee,³DW Hong,³ Suhee kwon,^{1,2} Myungsik Choi,⁴ Bee Lyong Yang^{1,2,*}

¹School of Advanced Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongbuk, 39177, Republic of Korea.

²GHS (Green H₂ System) Co., Ltd. Gumi-si, Republic of Korea.

³Nano-Convergence Technology Division, National Nanofab Center, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea.

⁴SJ Tech. Co., Ltd, Vice president, 1026-1 Daecheon-Dong, Dalseo-Gu, Daegu City, Republic of Korea.

*Corresponding author: Tel: +82-(54)-478-7741, E-mail: blyang@kumoh.ac.kr

Abstract— Incorporation of different components into a single heterostructure is a novel approach that stimulates the number and type of active centers to enhance the catalytic activity of hydrogen evolution reactions (HER) and oxygen evolution reactions (OER). Here, a novel, hierarchically porous one-dimensional nanorod array of copper cobalt sulfide and tungsten disulfide (CuCo₂S₄-WS₂/NF) was synthesized on Ni foam substrate via an efficient and facile hydrothermal synthesis strategy. The nanorod array of copper cobalt sulfide and tungsten disulfide (CuCo₂S₄-WS₂/NF) with fine-tuned electronic structures and multiple integrated active sites exhibited small overpotentials of 202 mV and 299 mV for HER and 60 mV and 240 mV for OER at 20 and 50 mA cm⁻² respectively, in 1.0 M KOH medium. The electrolyzer formed by CuCo₂S₄-WS₂/NF requires only an operating voltage of 1.54 V at 10 mA cm⁻², which exceeds that of commercial catalyst-based systems as well as previously reported catalysts. The remarkable performance is attributed to an extended electroactive surface area and good charge transfer ability created by the formation of heterostructure of CuCo₂S₄ and WS₂. These results demonstrate that CuCo₂S₄-WS₂ in NF is an excellent dual-function electrocatalyst for electrochemical water splitting for hydrogen production.

Keywords— *electrocatalyst;hydrogen evolution reaction; oxygen evolution reaction.*

References

1. D. T. Tran, V. H. Hoa, H. T. Le, N. H. Kim, J. H. Lee, Appl. Catal. B: Environ., 253 235-245(2019).
2. M. Q. Yang, J. Wang, H. Wu, G. W. Ho, Small, 14, 1703323 (2018).

공기액화 에너지 저장 시스템에서 터빈출구 청정공기 활용에 대한 개념설계

이춘식 · 윤문규 · 염충섭
고등기술연구원 플랜트엔지니어링 센터

Conceptual Design for Utilization of Clean Air at Turbine Outlet in Liquid Air Energy Storage System

Chunsik Lee · Munkyu Yun · Choongsub Yeom
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

공기 중에는 질소, 산소, 아르곤 외 소량의 이산화탄소와 희소 가스 그리고 수분과 미세먼지 등이 존재한다. 이 중 이산화탄소, 수분, 미세먼지 등을 공기를 액화하는 중간과정에서 제거하여 액체공기 상태로 만들어서 저장하는 것이 LAES(Liquid Air Energy Storage, 공기액화 에너지 저장) 시스템이다. 저장된 액체공기는 펌프가압, 재기화, 가열, 팽창 과정을 통해 발전하게 되며, 주로 첨두부하 시간대에 2~4시간 정도 전력을 생산하여 전력망(Grid)에 공급하게 된다. 발전공정의 터빈출구에서 배출되는 공기는 청정공기로 볼 수 있으며, 온도는 5~25도씨 범위에서 조정이 가능하다. 터빈 출구의 청정공기는 데이터 센터, 지하철역사, 사무 공간 등에 냉방 및 공조를 위해 사용될 수 있다. 대한민국의 기후 특성 상 대부분의 사무공간에서 4월 중순~10월 중순 범위에서 약 6개월 동안 냉방을 위한 에어컨 가동을 하고 있으며, 데이터 센터 등은 시기에 상관없이 냉방이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 발전공정 가동 시간을 1일 2~4시간 정도 고려하고, 터빈 출구 청정공기를 냉방에 사용했을 때 기존 냉방시스템에 절약되는 전력량을 개념설계를 통해 수행하였다. 그 결과 평균적으로 25% 이상 전력이 절약되고 냉방 피크 시간대의 부하를 고려하면 30~40% 수준까지도 가능한 것으로 분석되어졌다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00143652)

교체된 급수가열기 전열관 손상 원인 분석

송석윤(Seok Yoon Song)

한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)

Analysis of Tube Damage Cause for Replaced Feedwater Heaters

1. 서론

원자력발전소에서 급수가열기는 재생사이클을 담당하는 핵심 기기이다. 일반적으로 급수가열기는 주어진 온도, 압력 및 부식 환경에 견디고 발전소 수명기간동안 사용이 가능하도록 설계되지만 예기치 못한 원인으로 손상되어 누설이나 파손이 발생할 가능성이 있다. 침식, 부식 및 진동에 의한 전열관(tube)의 손상으로 인한 누설과 동체(shell) 내부 및 구성품 감육(wall thinning)이 급수가열기의 주된 고장이다. 최근 신규 고압 급수가열기의 전열관 손상이 자주 보고되고 있다. 일부 고압급수가열기는 관막음을 파다로 조기에 교체되었다. 따라서 본 논문에서는 고압급수가열기 교체 현상을 파악하고, 전열관 손상 원인을 분석하였다.

2. 교체된 고압급수가열기 전열관 손상 원인 분석

원전에 설치되어 운전되는 급수가열기는 많은 급수측 유량과 동체측에 많은 유량의 습증기가 흐르는 환경에서 운전되고 있다. 조기 교체된 고압급수가열기 튜브 손상 근본원인 분석을 수행하였다. 가동중검사 결과를 검토하여 발관대상 튜브를 선정하였고, 동체 내부 육안검사와 발관튜브를 보빈탐촉자와 회전형탐촉자를 사용하여 와전류탐상검사를 수행하여 상세분석 대상튜브를 선정하였다. 상세분석 대상튜브에 대한 재료분석을 수행하고, 가동중검사와 발관검사 결과를 비교하였다.

교체된 고압 급수가열기 동체 내부 육안검사 및 동체 내부 관다발과 발관튜브 육안검사 결과 튜브 상태는 전반적으로 양호하였다. 튜브 균열결함 유무는 육안검사로는 판별할 수 없었다. 동체 내부 육안검사 결과 주기증기 유입부 충돌판 측면에 유동가속부식으로 국부 감육이 진행중임을 확인하였다.

발관튜브의 모든 시험편은 규정된 화학조성 요구치를 만족하나 일부 튜브는 축방향 단면부의 경도값은 본 재료의 요구 경도값을 초과하고 있다. 미세구조 분석 결과는 결정립계를 따라 다량의 석출물이 관찰되었으며, 용체화 열처리를 재수행한 결과 결정립계 석출물은 대부분 기지에 고용되어 제거되었다. 따라서 튜브 제작공정에서 충분한 열처리가 수행되지 않은 것으로 판단된다. 잔류응력 측정 결과 일부 시험편은 축방향으로 100 MPa 초과하는 잔류응력이 존재하는 것으로 나타났다. 시험편에 있는 대부분의 균열은 결정립을 관통하는 입내응력부식균열을 보여준다. 따라서 튜브 외면의 균열은 튜브 제작과정에서 불충분한 열처리와 잔류응력이 기여한 것으로 추정된다.

지면 거칠기 특성을 고려한 수치예보모형과 기계학습을 활용한 고도화된 풍력 발전량 예측모형 구축

이근민^{*/****} · 강희명^{*} · 위진^{*} · 정재훈^{*} · 강창준^{**} · 구혜연^{**} · 김학민^{**} · 박봉준^{**} · 이다솜^{**} ·
김성혁^{***} · 임성균^{***} · 김정원^{****} · 홍진규^{****}
(주)GS풍력발전 DX실/사업기획실^{*}, (주)GS에너지 알고리즘랩^{**},
(주)GS네오텍 클라우드팀^{***}, 연세대학교 대기과학과 대기상연구실^{****}

Advanced Forecasting of Wind Power with Machine Learning and Numerical Weather Prediction Model considering Surface Roughness Characteristics

탄소중립을 실현하고 1.5도 시나리오로 지구온난화를 제어하기 위해서는, 에너지 시스템에서 가장 많은 비중의 온실가스 저감이 이뤄져야 한다. 2030년까지 온실가스 순 배출량을 줄일 수 있는 잠재력과 효율성을 평가해 보았을 때, 풍력과 태양광 발전으로의 전환이 가장 주요하다고 평가받고 있으며, 세계 각국에서는 재생에너지의 비중을 적극적으로 확대해 나가고 있다. 우리나라도 2030년까지 2018년 온실가스 배출량 대비 약 35% 저감 하는 강화된 NDC 목표를 발표하였으며, 10차 전력수급기본계획을 통해 현재 7%인 재생에너지 비중을 2030년 21.5%까지 확대하고, 현재 재생에너지 발전 중 약 8%에 불과한 풍력발전 비율을 2036년까지 33%로 확대할 예정이라고 발표하였다. 이처럼 풍력 에너지의 비율이 증가하고 있는 상황에서, 효율적인 전력 공급 계획을 수립하고 전력 계통의 안정성을 확보하기 위하여, 풍력 에너지의 간헐적인 특성을 보완할 수 있는 풍력 발전량 예측 기술의 중요성이 점차 커지고 있다.

본 연구에서는 전력거래소의 재생에너지 발전량 예측제도에 기반하여 익일의 정확한 풍력 발전량 예측을 수행하고자, 현업에 적용 가능하며, 타 단지 범용성을 갖춘 고도화된 풍력 발전량 예측모형을 구축하였다.

풍력발전의 에너지원인 바람은 발전기가 위치한 지역의 지리적 및 지형적 조건에 의해 영향을 많이 받기 때문에, 통계적인 기계학습만으로는 익일의 바람을 정확하게 예측하기 어려운 한계를 가지고 있다. 같은 단지라고 하더라도 발전기별 바람 특성이 다른 점을 고려하여, 물리적인 접근 방식인 수치예보 모형을 통한 풍력 발전기별 고해상도 익일의 기상 예측을 수행하고, 이를 기계학습을 통해 후처리하는 방식을 활용하였다.

또한, 제주 지역을 제외하면 90% 이상의 풍력발전 사업이 산악지형에서 이뤄지고 있는 국내 특성을 반영하여, 발전단지가 위치한 산악지형에서의 복잡한 지형 특성을 고려하고자, 수치예보 모형 내의 지면의 거칠기 특성, 산악지형의 경사도 등의 정보를 반영하여 지면층 스킴(surface layer scheme)을 개선함으로써 지면의 바람 예측 정확도를 향상시켰으며, 바람의 연직 변화 특성을 반영하는 기계학습 모델을 통해 발전기가 위치한 높이에서의 정확한 바람을 예측하였다. (주)GS풍력발전에서 운영하는 83MW급 영양풍력발전 단지의 25개 풍력발전기 자료를 활용하여 익일의 시간당 풍력발전량을 예측한 결과, 2022년(1년) 평균 오차율(NMAE; Normalized Mean Absolute Error) 7.32%를 달성하였다.

열에너지 다소비 스마트 설계 플랫폼 구축을 위한 기업 현황 분석 및 가치흐름분석

이성곤^{1*}, 이민규¹, 이욱현¹, 이대근^{1*}

¹한국에너지기술연구원 34129 대전광역시 유성구 가정로 152

Corporate Status and Value Stream Analysis for Implementing a Smart Thermal Energy Design Platform (STED)

Seongkon Lee¹, Mingyu Lee¹, Wookhyun Lee¹, Daekeun Lee^{1*}

¹Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Daejeon, 34129, KOREA

*Corresponding Author: dklee@kier.re.kr

Abstract

에너지 다소비 산업설비는 산업부문의 제조업측면에서 열 발생, 이용, 회수라는 전주기 관점에서 핵심 설비로 사용되고 있으며, 특히, 열에너지 다소비 산업설비는 산업부문 에너지 소비의 약 77%로 매우 높은 비중을 차지하고 있다. 본 연구는 산업부문의 에너지효율 향상과 에너지 다소비 산업의 산업생태계 활성화를 위해 온라인 기반의 열에너지 다소비 스마트 설계 플랫폼을 구축하고, 중소/중견기업의 설계 및 제품화 역량을 강화하고자 한다. 이를 통해 해당 중소/중견기업이 해당 산업생태계내에서 활동을 활성화하고, 매출액 증진에 기여하고자 한다. 본 연구는 열에너지 다소비 산업설비중심의 스마트 플랫폼을 최초로 구축하기 위하여 시장의 현황, 열에너지 다소비 핵심기술관련 기업 현황 분석, 가치흐름 분석을 통한 기업과 매핑에 대한 연구를 수행하였다. 기업현황분석의 경우 표준산업분류, 기업 매출 및 수출 현황, 재무분석을 중심으로 추진하였다. 가치흐름분석의 경우 가치흐름용 가치사슬 분류에 따른 주요 유관 기업 매핑 분석을 추진하였다.

본 연구결과는 추후 열에너지 다소비 스마트 설계 플랫폼의 자생적 독립 및 비즈니스 모델 수립을 위한 주요 핵심자료로 활용할 예정이다.

Key words 열에너지 다소비 산업, 가치흐름분석, 기업 현황 분석, 비즈니스 모델

사사

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 지원(20202020800200)을 받아 수행한 연구결과입니다.

근사모델에 기반한 축류펌프 임펠러의 다중목적 최적화

느엔 띄엡^{*,**}, 김성^{**}, 정순영^{**}, 김진혁^{*,**}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

Multi-Objective Optimization of an Axial-Flow Pump Impeller based on the Approximation Model

Duc-Anh Nguyen^{*,**}, Sung Kim^{**}, Soon-Young Jeong^{**}, Jin-Hyuk Kim^{*,**}

^{*}Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science & Technology

^{**}Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

요 약

Enhancing the hydraulic performance of an axial-flow pump is essential for increasing the working efficiency and reducing the costs of the pump. This work was carried out to simultaneously improve the total efficiency and total head of the axial flow pump with the impeller optimization. The internal flow field was obtained by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with shear stress transport reattachment modification turbulence model ($k-\omega$ SST RM). The structure hexahedral mesh was used in the grid system with a small y^+ value at all of the walls. In the present study, the total efficiency and the total head were chosen as objective functions in multi-objective optimization. The main influencing factors were screened through a 2k factorial design analysis and the design points were then created in the design space using Latin hypercube sampling. After the screening procedure, four main design variables were selected: shroud chord length, hub chord length, middle inlet blade angle, and middle stagger angle. The impeller was optimized by constructing an approximation function based on three models: response surface approximation (RSA), Kriging meta (KRG), and a radial basis neural network (RBNN). The total efficiency and total pressure head of the optimized impeller increased by 0.974% and 21.028% compared to those of the reference impeller, respectively. The hydraulic performance was notably improved by redistribution of the velocity field at the outlet and low-pressure suppression in front of the impeller.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021202080026A, 가변형 운전 중대형 펌프기술 개발).

러너 블레이드 변경에 의한 부분부하 조건에서 프란시스 수차의 수력성능 향상

모하메드 아부 사저^{*,**}, 삼수딘 모하메드 무르시드^{*,**}, 김성^{**}, 노민수^{*,**}, 김진혁^{*,**}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

Improvement of the hydraulic performance of a Francis Turbine at Part Load condition by modifying the Runner Blade

Mohammad Abu Shahzer^{*,**}, Shamsuddeen Mohamed Murshid^{*,**}, Sung Kim^{**}.

Min-Su Roh^{*,**}, Jin-Hyuk Kim^{*,**}

^{*}Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science & Technology

^{**}Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

요 약

Francis Turbine is a well-known turbine due to its extremely effective features. At the best efficiency point (BEP), the turbine exhibits maximum efficiency while at low flow rate operating conditions often called part load (PL) conditions, the performance of the turbine reduces due to improper energy conversion, hydraulic losses and downstream swirl instabilities. In hydraulic turbomachinery, runner shape optimization based on thorough CFD research has proven to be a beneficial design technique. The optimization of the runner blade for energy improvement at PL condition is performed numerically in the present research. The reference model is generated using CAD software for which numerical calculations are performed and validated with the experimental results. The meridional shape of the runner blade is considered for choosing the design variables. Within the maximum and minimum ranges of these variables, the factorial design of experiment methodology is utilized for the parametric study of the runner blade which opt out the most insensitive variable. The Latin hypercubic sampling (LHS) is executed for the remaining variables and the numerical calculations are performed. Out of several surrogate models, the response surface approximation is implemented for the optimization using design points from LHS. The deviation of the predicted and numerical efficiencies is about 0.4% at PL as well as at BEP. The optimized model exhibits an increase of about 1.23% in efficiency at PL condition while at BEP, an insignificant drop in efficiency is observed. The low-pressure regions are improved in the optimized model which can prevent the turbine from cavitation-induced instabilities. Towards the whole low flowrate region, the performance improves using the optimized model. The domain losses of the runner and draft tube are reduced by about 19% and 12% respectively.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021021010003A, 유연화 운전 대응 부분부하 구간 고효율 수력발전 시스템 개발).

초순수 제조를 위한 폐열 활용 소수성 중공사막 막증류 공정 수치해석 연구

이정길 · 이천규 · 김진만

한국생산기술연구원 청정기술연구소 탄소중립산업기술연구부문

Numerical analysis of hydrophobic hollow fiber membrane distillation process
utilizing waste heat for manufacturing ultrapure water

Jung-Gil Lee · Cheonkyu Lee · Jin Man Kim

Carbon Neutral Technology R&D Department, Research Institute of Clean Manufacturing
System, Korea Institute of Industrial Technology

반도체 제조공정의 세정 공정은 웨이퍼 표면의 잔류물 제거를 위해 대량의 초순도 공정을 요구한다. 현재 초순수를 제조하는 공정은 현재 여러 가지 필터 (MF, NF, UF) 및 분리(RO, EDI 등) 기술을 이용한다. 공정의 개수가 증가할수록 에너지 소비가 늘어나며 큰 공정 공간을 요구하는데 최근 연구 동향을 보면 에너지 소비를 줄이고 공정 공간을 줄이는 연구들이 진행 중이다. 막증류공정은 온도차에 의한 수증기분압에 의해 순수한 수증기만을 통과시키는 소수성 막을 사용하는 공정으로 공장에서 배출되는 폐열수준의 열원과 상온수 수준의 투과수온도를 요구하는 순수 생산공정이다. 본 공정의 가장 큰 장점은 단일 공정으로도 방향족 원소를 제외한 염의 제거율이 99.99%이며, 기존의 역삼투법(RO) 공정과 달리 고압을 요구하지 않기 때문에 압축기 및 부대설비로 인한 공간을 절약할 수 있다. 순수 생산량을 증가시키기 위해서는 동일한 체적의 생산 모듈에서 막 면적을 극대화하여 생산성을 증가시켜야 하고, 막을 통해 열 에너지가 교환되기 때문에 최적 운전조건을 설정해 주어야 한다. 반도체 제조공정의 배열을 회수하여 순수 생산의 열원으로 사용한다면 에너지 절감이나 탄소배출량 저감 목표를 달성하는데 주요할 수 있다. 본 연구에서는 소수성 중공사막 및 모듈을 사용하는 직접 접촉식 막 증류 공정에 대한 수치해석을 수행하였으며 운전조건 및 중공사막 모듈의 형상에 따른 용수 생산량을 분석하였다.

사사의 글 : 본 논문은 산업통상자원부 기계장비산업기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(연구개발 과제번호: 20018410)

친환경 수소 생산을 위한, 산소 공여자리 이용 암모니아 산화적 분해 촉매

이수향 · 이석호 · 이성호 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

수소는 파리 협정의 목표인 탄소중립 사회를 위한 가장 유망한 에너지원으로, 단위 질량당 휘발유의 4배, 천연가스의 3배의 에너지를 저장할 수 있다. 하지만 단위 부피 당 저장할 수 있는 에너지가 적어 대용량 저장 및 장거리 운송에 한계를 갖는다.

그러므로 효율적으로 수소를 저장하여 운반할 수 있도록 하는, 수소 운반체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 암모니아의 경우, 탈수소화 과정에서 수소와 질소만을 생산하는 친환경 수소 운반체이며, 단위 부피 당 수소 저장량이 LOHC 및 액화수소 등 타 수소 운반체에 비해 매우 높고, 상온에서 액체 상태로 운반이 용이하여 큰 주목을 받고 있다.

암모니아 분해 반응은 높은 온도를 필요로 하여 많은 외부 에너지가 필요하기 때문에 최근, 암모니아 분해 반응에 산화 반응을 도입한 자열개질 반응인 암모니아 산화적 분해 반응 시스템이 제안되었다. 이 반응 시스템은 반응기에 공급되는 암모니아의 일부를 산화시켜 발생하는 열을 이용하여 분해 반응을 진행하므로 지속적인 외부 열 공급을 필요로 하지 않는다.

산소 공여자리(Oxygen vacancy)는 금속 산화물 담체에서 산소가 제거된 결함 자리로, 암모니아의 산화와 분해에 활성점으로 작용한다. 그리고 수소 스퍼오버(Hydrogen spillover) 현상을 통해 활성 금속의 수소 피독을 방지할 수 있어, 다량의 수소가 생산되는 암모니아 탈수소화 반응의 활성을 더욱 증진할 수 있다.

이러한 이유로, 산소 공여자리를 생산할 수 있는 금속 산화물 담체에, 암모니아 분해에 가장 좋은 활성을 갖는 루테튬(Ru) 금속을 담지한 촉매를 암모니아 산화적 분해 반응 시스템에 적용하였다. 또한, 다양한 촉매 전처리를 통해 가장 좋은 활성을 얻을 수 있는 전처리 방법을 확립하고, XRD, XPS, TEM 등의 특성화분석을 통해 해당 촉매 활성의 활성인자를 규명하였다.

Pt-Nb/Al₂O₃를 적용한 H12-Benzyltoluene의 효율적인 탈수소화

유준기 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

- <폰트 10, 한컴바탕체, 줄간격160%> 한국에너지학회 학술대회 초록작성예시입니다.

최근 환경에 대한 사회 인식 변화에 따라 수소를 활용한 에너지 생산 및 저장기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 액상 유기수소 운반체 (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC)에 수소를 저장하는 기술도 그중 하나다. LOHC는 고리형 탄화수소에 수소화 반응과 탈수소화 반응을 통해 가역적으로 수소를 저장할 수 있는 매체인데, 이 중 탈수소화 과정은 높은 탈수소화 엔탈피로 많은 에너지를 소모한다. 이에 LOHC를 이용한 수소 저장시스템의 효율성을 높이기 위해 높은 탈수소화 활성을 갖는 촉매를 개발할 필요가 있다.

다양한 연구 결과로 LOHC 물질 중 H12-Benzyltoluene(H12-BT)가 그 장점이 크게 부각되어 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 H12-BT의 탈수소화 반응에서 널리 이용되는 Pt/Al₂O₃ 촉매에 나이오븀 (Nb)을 조촉매로 도입하여 촉매의 활성을 평가하고 그 원인을 분석하였다. Nb의 도입은 촉매의 활성을 크게 향상하고, 촉매 제법의 차이에 따라 촉매들 간 뚜렷한 일련의 경향성을 나타내었다. XRD, ICP-AES 등의 분석으로 촉매의 기본적인 물성을 검증하고 그 외의 특성화 분석을 통해 촉매의 상태를 규명하였다.

소수성 리간드의 도입으로 인한 과산화수소 직접합성 반응 효과
Effect of introduction of hydrophobic ligand for direct synthesis of
hydrogen peroxide

이석호 · 한근호 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

과산화수소는 수소와 산소로 이루어진 간단한 분자로서 다른 분자와 반응하여 산화시키는 능력이 있는 산화제로 사용되는 물질이다. 특히 과산화수소는 다른 산화제들과 다르게 산화 반응 후에도 오직 물을 부산물로 생산하여 친환경적인 측면이 중요한 현대사회에서 중요하게 여겨지고 있다. 이러한 과산화수소는 Anthraquinone Oxidation Process (AOP)라고 불리는 상용공정에서 주로 생산되는데, 방향족 유기화합물의 산화와 환원 공정을 거치며 과산화수소가 생산되는 방식이기 때문에, 에너지와 유독한 폐수가 다량 방출된다는 문제점이 존재하여 이를 대체할 수 있는 공정을 개발하기 위한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.

이러한 대체 공정 중 하나로 과산화수소의 직접합성공정이 떠오르고 있는데, 이는 말 그대로 수소와 산소의 직접반응을 통한 과산화수소를 생산하는 공정이다. 이 공정은 단순한 반응시스템을 사용하기 때문에 AOP에 비해 훨씬 공정 및 가동비용이 적게 들며, 친환경적이라는 장점이 존재하지만, 현재까지는 기존 공정에 비해 선택도 및 수율이 다소 부족하여 상용화에는 이르지 못하고 있다. 따라서 이러한 선택도를 향상하기 위한 연구의 일환으로 소수성 물성을 도입한 촉매를 시도하였으며, 이를 통해 유의미한 과산화수소 생산성 및 선택도 향상을 이루어낼 수 있었다. 해당 촉매는 반-회분식 반응시스템을 통해 향상된 활성이 확인되었으며, 여러 가지 특성화 분석을 통해 촉매의 물성이 확인되었다.

Convolutional LSTM 기반 풍력발전단지 발전량 예측 A Wind Farm Power Prediction based on Convolutional LSTM

고은별 · 김민호 · 임정택 · 김태형

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

세계적으로 기후위기에 맞서 재생에너지의 계통 비율이 증가하고 있다. 우리나라도 2030년 온실가스 40% 감축, 50년 탄소중립 실현을 공표한 상태로 적극적인 온실가스 감축과 신재생에너지 발전 비중을 30.2%까지 늘리는 것을 목표로 하고있다. 이에 따라 신재생에너지 설비 증가가 필수적인 상황이 올 것이며 설비 용량 증가에 맞춰 효율적이고 안정적으로 신재생에너지를 확보하기 위한 다양한 기술 연구가 필요하다.

신재생에너지 중에서도 풍력 에너지는 설치 면적이 좁고 설비 이용률이 높다는 장점이 있어 대형화되며 빠르게 성장하고 있는 추세이다. 그러나 태양광 발전보다 발전량이 불규칙적이고 변동이 커서 안정적인 에너지 확보가 어렵고 발전소의 운영 측면에서도 어려움이 존재한다. 따라서 효율적이고 안정적인 에너지 확보를 위한 풍력 발전량 예측 기술이 필요하다.

본 연구에서는 수치예보모델(Numerical Weather Prediction, NWP)를 입력으로 하고, 대형화된 풍력 발전 단지의 공간 특성과 기상 데이터의 시계열 특성을 모두 반영할 수 있는 Convolutional LSTM 알고리즘을 이용하여 풍력 발전량을 예측하는 모델을 만들어 CNN, LSTM, ANN 등 다른 딥러닝 알고리즘 모델들과 성능을 비교하였다.

본 연구의 대상 단지는 경상북도의 풍력 발전 단지이며, 2020년 8월부터 2021년 11월까지 약 1년 4개월을 학습데이터로 2021년 12월부터 2022년 11월까지 약 1년 데이터를 검증 데이터로 이용하였다. 모델의 평가 척도는 발전량 예측제도의 기준인 nMAPE(Normalized Mean Absolute Percentage Error)를 사용했다. 그 결과 전체 알고리즘의 평균 오차율은 11.52%이고, 그 중 Convolutional LSTM이 가장 낮은 오차율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 기상 데이터의 시계열 특성 뿐 만 아니라 공간적 특성 또한 반영하는 것이 풍력 발전량을 예측할 때 도움이 됨을 알 수 있다.

본 연구는 시간해상도가 1시간 단위인 수치예보모델만을 이용하여 1시간 단위 예측을 보였다. 향후 수치예보모델 뿐 만 아니라 실측 실시간 기상 데이터와 운영 정보 등을 함께 이용하여 시간 해상도를 조밀하게 하고 예측 오차율을 낮출 수 있을 것이다.

< 풍력발전단지 발전량 예측 결과 >

구분	ANN	CNN	LSTM	ConvLSTM
nMAPE(%)	14.22	10.91	11.52	9.47

이 논문은 2022년도 한국남동발전(KOEN)의 지원을 받아 수행된 연구임(제2022-현장(그린)-01호, 풍력발전단지 적응형 발전량 예측 시스템 개발)

스마트그리드 실시간 데이터를 활용한 이상 탐지 시스템 설계

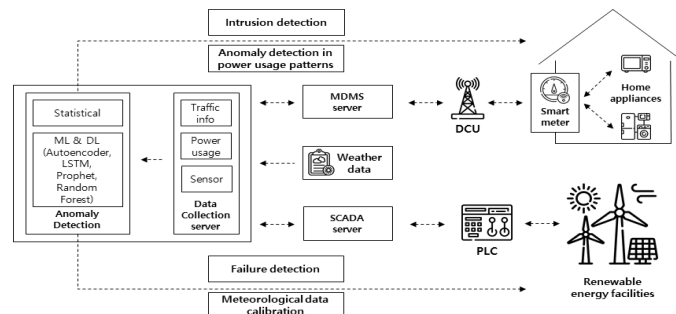
김민수 · 김민호 · 임정택 · 김태형

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

Design of Anomaly Detection System Using Real-time Data from Smart Grid

스마트그리드는 전력 공급자와 소비자가 실시간으로 정보를 주고받음으로써 에너지 이용 효율을 증진하기 위해, 스마트 계량기와 MDMS 간 양방향 통신을 제공하는 AMI를 포함한다. 또한, 전력의 안정적인 공급과 효율적인 사용을 위해서 재생에너지를 활용해야 한다. 이렇게, 스마트그리드를 구성하는 AMI와 재생에너지 설비에서 수집되는 실시간 데이터로부터 이상치를 식별해야 하는 경우들이 존재한다. AMI 네트워크에서 스마트 계량기 또는 DCU에 침입하여 정보를 추출하는 공격에 노출될 수 있으며, 재생에너지 설비의 고장으로 안정적인 계통 운영과 정보 확보가 어려워지는 상황이 발생한다. 침입 탐지와 고장 예측 문제를 해결하는 방법으로 이상 탐지 알고리즘이 효과적이다. 따라서, 본 논문에서는 실시간 데이터를 수집하고 이상 탐지 알고리즘을 활용하여 보안 및 설비 고장 문제 등을 해결하는 시스템을 설계한다.

제안된 시스템은 스마트 계량기와 다양한 센서로부터 전력 사용량과 진동, 온도, 소음 데이터, 네트워크 패킷, 기상 데이터를 수집한다. 다음으로, 수집된 데이터를 대상으로 결과 피드백의 종류에 적합한 이상 탐지 알고리즘을 수행한다. 3 시그마 규칙과 같은 통계적 기법뿐 아니라, LSTM과 Auto-Encoder와 같은 딥러닝, Prophet, Random Forest와 같은 기계학습 기반의 이상 탐지 알고리즘이 사용된다. 이상 탐지의 결과를 통해, 전력 소비자에게 AMI 네트워크의 침입 탐지와 전력 이상 사용 패턴을 감지 정보를 제공할 수 있다. 그리고 재생에너지 설비의 고장 예측과 돌풍같이 발전량 예측의 오차를 높이는 기상 이상치를 보정하여, 안정적인 전력 공급을 가능케 한다. 다양한 형태의 결과 피드백으로 전력 소비자는 에너지 절약과 비용 절감을 이룰 수 있으며, 재생에너지의 효율적인 활용을 통해 친환경적인 전력 생산을 촉진할 수 있다.



< 실시간 데이터를 활용한 이상 탐지 시스템 구조 >

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20194310100060, 도시형 스마트그리드기반 에너지 공유공동체 신(新) 서비스 실증 및 운영기술개발)

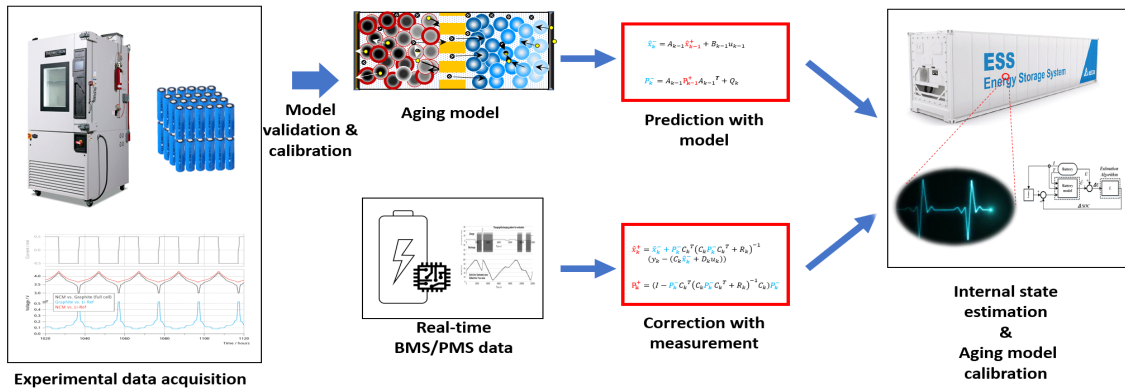
칼만필터 기반의 폐배터리 에너지 저장 장치 상태 추정 알고리즘

김민호 · 임정택 · 김태형

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

State estimation algorithm for used battery energy storage system(UBESS) based on Kalman filter

본 논문에서는 폐배터리 에너지 저장 장치 상태 추정을 위한 칼만 필터 기반 알고리즘을 제안한다. 재활용 가능한 폐배터리를 이용한 에너지 저장 시스템에서 사용될 수 있는 이 알고리즘은, 상태 추정 정확도를 높이고 잔여 수명을 추정할 수 있다. 제안된 알고리즘은, 폐배터리의 모델링과 모델 파라미터 추정에 대한 방법을 제안하는 것으로 시작된다. 폐배터리의 모델은, 전기화학적 특성, 내부 저항, 효율 등의 파라미터를 고려하여 구성된다. 이를 위해, 최소 자승법을 이용한 파라미터 추정 방법을 제안하고, 이를 이용하여 폐배터리의 모델을 구축한다. 모델링된 폐배터리 모델을 이용하여, 상태 추정 알고리즘을 개발한다. 이 알고리즘은 확장된 칼만 필터(Extended Kalman filter) 기반으로 구성되며, 잔여 수명 추정을 위해, 추정된 내부 상태 값을 기반으로 재구성된 정보를 구하여 추정을 수행한다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해, 실험을 수행한다. 실험 결과, 제안된 알고리즘이 상태 추정 정확도를 높이는데 효과적이며, 잔여 수명을 추정하는 데에도 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 폐배터리를 재활용한 에너지 저장 시스템의 안정성과 효율성을 향상시키는데 기여할 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과는, 재활용 가능한 폐배터리의 가치를 높이는 기술적 진보로 해석될 수 있다. 따라서, 이러한 알고리즘의 적용을 통해, 폐배터리를 적극적으로 활용하는 에너지 저장 시스템의 개발과 보급이 가능해질 것으로 예상된다.



와류유발진동 현상 기반 풍력에너지 하베스팅 장치의 설계변수에 따른 진폭 변화 분석

노하은 · 이재영*

한동대학교 기계제어공학과

Analysis of Vibration Amplitude depending on Modeling Parameters of Wind Energy Harvester based on Vortex-Induced Vibration Phenomenon

본 연구에서는 와류유발진동 현상을 기반으로 한 풍력에너지 하베스팅 장치의 설계변수에 따른 진폭 변화를 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 와류유발진동(Vortex-Induced Vibrations, VIV) 현상은 유체와 구조물 사이의 상호작용으로 인해 발생한다. 바람이 원통형 구조체를 지나갈 때 생기는 압력 차로부터 발생한 vortex shedding으로 인해 구조체가 진동하는 원리이다. VIV 현상은 에너지 하베스팅 분야에서 에너지원으로 꾸준히 개발되고 있는바, 최근에는 낮은 에너지 회수 효율을 높이기 위해 다양한 연구가 진행 중이다. VIV 에너지 회수 효율을 높이기 위해서는 구조체가 가진 고유 진동수와 풍속에 따라 변하는 vortex shedding frequency를 최대한 넓은 범위에서 일치시켜 공진을 유발해야 한다. 본 연구에서는 실제 장치를 제작하기에 앞서 설계된 장치에 공진이 효과적으로 일어나는지를 확인하기 위해, 단일 탄성 봉에 고정된 실린더의 구조를 가진 기존의 하베스팅 장치의 설계변수에 따른 진폭 변화를 수치해석을 통해 예측하였다. 기존 하베스팅 장치의 실린더 지름은 50[mm], 질량은 20[g], 고유 진동수는 10[Hz]이다. 이를 기반으로 와류유발진동 현상에 대한 무차원 유체-기계적 결합 모델을 유도하였으며, 해석은 MATLAB을 이용하여 수행하였다. 기존 장치의 설계변수를 기준으로 각 변수 값에 대한 변화를 주어 0-10[m/sec] 풍속 범위에서 와류유발진동 현상으로 인한 실린더의 무차원 진폭 변화를 관찰하였다. 계산 결과, 실린더 질량 10-50[g]에 대하여 실린더 질량이 가벼워 질수록 진폭이 커지는 것이 확인되었으며, 이때 최대 진폭은 실린더 10[g]에 대하여 10.2[mm]였다. 실린더 직경 10-50[mm]의 변화에서는 실린더 지름이 클수록 진폭이 커지고 공진 영역이 풍속이 높은 쪽으로 옮겨가는 경향이 확인되었다. 실린더 지름 50[mm]에서 최대 진폭 8.56[mm]이 관찰되었다. 고유 진동수 범위 5-25[Hz]에 대한 진폭 변화를 관찰한 결과, 진폭 크기는 8.56[mm] 근처에서 큰 차이가 없었으나, 공진 영역의 범위가 고유 진동수가 높을수록 넓어지는 것을 확인하였으며, 실린더 지름에 변화를 주었을 때와 마찬가지로 고유 진동수가 높아질수록 높은 풍속에서 공진 영역이 관찰되었다. 이러한 수치해석 결과를 통해 VIV 기반의 하베스팅 장치의 전반적인 VIV 출력 특성을 확인하였다. 이는 추후 하베스팅 장치 설계에 있어 최대 진폭을 가지는 설계변수 최적화 단계에 적용할 예정이다.

Aknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No.20214000000010)과 한국수력원자력(주)의 지원을 받아 수행된 연구과제임.
이 논문 또는 저서는 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구임. (2021)

Computational analysis of chemical species transport of PEM water electrolysis half cells under constant current operating conditions

이예은 · 오정록* · 엄석기*

한양대학교 미래모빌리티학과, *한양대학교 융합기계공학과

This study has developed to a computational fluid dynamics which can investigate multi-phase mass transport properties of polymer electrolyte membrane (PEM) water electrolysis half cell. The paper features fluid flow and species concentrations in flow channel, porous transport layer, and catalyst layer by coupling chemical species transport and electrochemical reaction. The numerical model is performed in constant current mode. Multi-phase transport occurs in liquid-phase water with gas-phase oxygen generation at anode catalyst layer in which reaction proceeds uniformly. Computational results indicate that the mass transport characteristics are closely associated with concentration distribution of reactants and products.

범용 풍력 터빈 모델링을 위한 데이터 관리 시스템

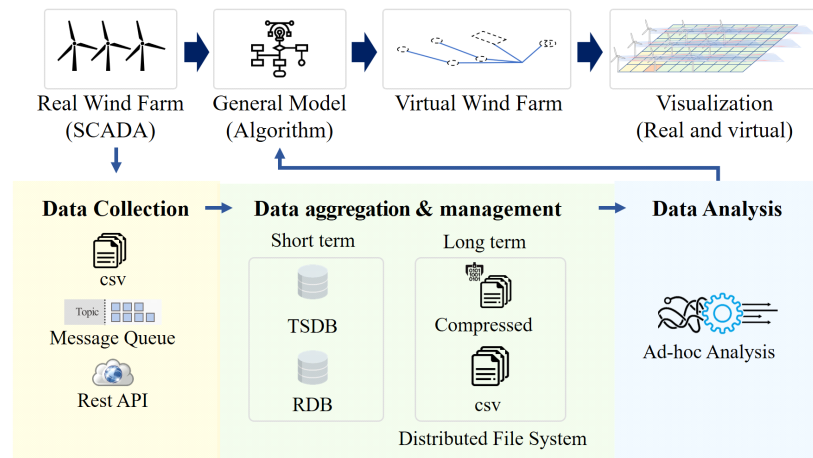
Data Management System for General Purpose Wind Turbine Modeling

임정택 · 송민석 · 김민호 · 김태형

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

풍력 터빈 모델은 Full, Simple, 범용으로 구분된다. 그 중 범용 풍력 터빈 모델은 GH Bladed 프로젝트 파일에 기반을 두지 않는 모델로, 대부분의 풍력발전단지 내 터빈 모델링에 활용할 수 있다. 본 논문에서는 범용 풍력 터빈 모델링에 사용되는 데이터 관리 시스템 구조를 제안한다.

풍력발전단지에서 생성되는 데이터는 SCADA 운영 방식에 따라 다양한 해상도로 저장된다. 1초의 높은 해상도부터 1분 정도의 비교적 높지 않은 해상도의 데이터가 풍력 터빈 모델링에 활용 가능하다. 이때 1초 단위 높은 해상도의 데이터는 용량이 크기 때문에, 일반적인 RDB에 적재가 어려우며 TSDB를 활용하는 경우도 저장 비용이 비싸다. 따라서 범용 풍력 터빈 모델링을 위한 전용 저장 시스템 구조가 필요하다. 이를 위해 수집, 집계 및 관리(단기 저장 및 장기 저장), Ad-hoc 분석의 구조로 구분하여 시스템 구조를 설계할 필요가 있다. 데이터 수집은 크게 csv 등의 파일을 통한 수동 데이터 적재 방식과 메시지 큐, RestAPI 등을 활용한 자동 데이터 적재 방식으로 구분된다. 수집된 데이터는 TSDB에 적재하며 일 단위, 주 단위 배치작업을 통해 모델링에 필요한 데이터를 집계하여 제2의 TSDB에 재작성한다. 집계가 끝난 데이터는 파일 형태의 장기 저장소로 이동시켜 데이터 보관에 대한 효율을 높인다. 파일 형태로 데이터를 관리하는 장기 저장 시스템은 Ad-hoc 분석이 필요한 경우 언제든지 범용 파일 형태로 데이터를 추출할 수 있는 기능을 필요로 한다. Ad-hoc 분석을 위한 데이터 추출 시간은 최소 1일~최대 3일이며, 파일의 형태는 csv 등의 범용 형태로 반환한다. 제안된 데이터 관리 시스템을 통해 실제 풍력 발전단지를 범용 모델화 하여 가상 풍력 발전단지로 구현하고, 이를 가시화 할 수 있을 것으로 예상된다.



< 범용 풍력 터빈 모델링을 위한 데이터 관리 시스템 구조도 >

이 논문은 2022년도 한국동서발전(EWP)의 지원을 받아 수행된 연구임(가상풍력발전단지 기반 풍력 제어 기술 개발 및 검증시스템)

하이브리드 모델 기반 재생에너지 예측 서비스를 위한 마이크로 서비스 아키텍처

Micro-Service Architecture for Hybrid Model-Based Renewable Energy Prediction Services

조인표 · 이재규 · 이상엽

한국전자기술연구원

초록

이 논문은 재생 에너지 분야에서 예측 서비스를 제공하기 위해 마이크로 서비스 아키텍처를 사용하는 방법을 제안한다. 재생 에너지의 예측 정확도는 에너지 관리 및 사용 계획에 중요한 역할을 하며 이를 통해 기존 전력 계통에 문제를 발생시키지 않으면서도 재생에너지 사용 비율을 높일 수 있는 에너지 밸런싱을 실현 한다. 따라서 정확한 예측을 위해 다양한 데이터 소스와 모델링 기술을 결합하여 하이브리드 모델링 기반 예측 서비스를 구현한다. 기존의 과거 데이터들만을 활용한 데이터 기반의 기계학습 예측 모델들에 비하여 더 높은 정확도를 달성할 수 있도록 CFD 분석 결과를 함께 활용하는 하이브리드 모델이 필요하며 이에 따른 아키텍처가 필요하다. 또한, 예측 모델들의 검증을 위해서 모델링 단계에서 HILS의 결과를 함께 확인할 수 있어야 한다. 각 모델과 검증 서비스의 입출력을 효율적으로 관리하고 접근할 수 있는 아키텍처를 갖추어야 한다. 각 마이크로 서비스 간에 적합한 메시징 방법도 함께 제안되어 진다. 이를 위해 각 모델링과 검증 단계에 대한 작은 서비스로 분할하여 마이크로 서비스 아키텍처를 적용하고, 각 서비스는 서로 독립적으로 배포될 수 있다. 따라서 이러한 아키텍처는 유연성, 확장성 및 유지 보수성을 향상시키며, 서비스 중단 시 해당 서비스만 다시 시작하여 전체 시스템의 가용성을 유지할 수 있다. 이 논문은 하이브리드 모델 기반 재생 에너지 예측 분야에 대한 새로운 마이크로 서비스 아키텍처 접근 방식을 제시합니다.

감사의 글

이 논문은 2022 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022-0-00074, 에너지 디지털 트윈을 위한 고해상도 하이브리드 모델링 프레임워크 개발)

발전량 예측 지점의 기상데이터 활용을 위한 데이터 추출 및 전처리 시스템 설계³⁾

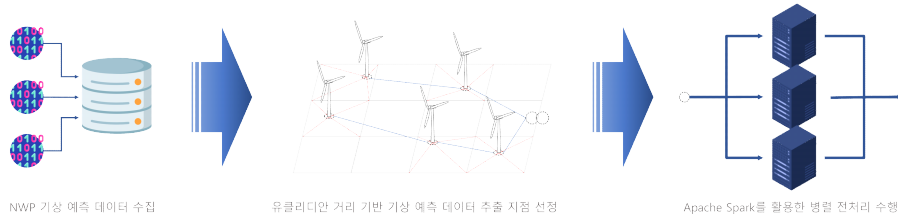
허성민 · 선지영 · 김민호 · 임정택 · 김태형
한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

정부와 기업들은 지속 가능한 발전을 위해 재생에너지 기술에 대한 관심을 높이고 있으며 그 중, 전력 계통의 변동성 관리를 위한 발전량 예측 연구도 다방면으로 진행되고 있다. 본 연구는 발전량 예측 모델 개발을 위해 수학적 모델으로 다양한 미래 기상 예측 데이터를 제공하는 NWP(수치예보모델)를 활용한다. 하지만, NWP는 데이터 제공 지점과 발전량 예측 지점의 불일치 문제와 단일 컴퓨터 자원으로 처리 불가능한 대규모 데이터라는 문제점이 있다. 이에 본 논문은 위 두 문제를 해결하기 위한 알고리즘과 시스템 구조를 제안한다.

첫 번째 문제는 NWP의 예측 데이터 제공 지점과 발전량 예측 모델의 예측 지점이 다르다는 점이다. 재생에너지는 사소한 지형 차이에 따라 발전 출력이 차이를 보이기 때문에 모델링에 활용하는 데이터도 가능한 발전 사이트에 최적화된 데이터를 수집해야 한다. 유클리디안 거리를 활용한 지점별 거리 측정 및 데이터 선별을 문제의 해결법으로 선정했다. 유클리디안 거리는 두 점 사이의 거리를 측정하는 척도 중 하나로 간결한 해석이 가능하다는 장점을 가진다. 발전량 예측 지점과 그 주변 네 곳의 NWP 기상 예측 지점 간 유클리디안 거리를 측정하여 가장 가까운 곳의 데이터를 활용하는 방안으로 해결이 가능하다.

NWP 활용에서 겪은 두 번째 문제는 단일 컴퓨터 자원으로 처리가 불가능한 대규모 데이터라는 점이다. 하루에 약 92,000,000행의 데이터가 발생하며, 이를 모델링에서 요구하는 형태로 단일 컴퓨터로 전처리하는 경우 처리가 멈추는 문제가 발생한다. 이 문제는 Apache Spark(아파치 스파크)로 해결이 가능하다. 스파크는 중간 결과를 메모리에 유지하며 태스크를 다수 노드에 분산해 병렬로 처리하기 때문에 빅데이터 프로세싱에 채택되는 기술이다. 단일 컴퓨터 자원으로 불가능했던 데이터 전처리를 스파크를 통한 분산 처리로 모델링에 요구되는 형태로 전처리 수행이 가능했다.

본 연구는 발전량 예측 모델링을 진행하며 NWP 활용에서 직면한 두 가지 문제의 해결 방안을 제안했다. 데이터 제공 지점과 예측 지점이 상이한 첫 번째 문제는 유클리디안 거리가 가장 가까운 지점의 데이터를 활용하는 방안으로 해결이 가능했다. 또한, 큰 용량으로 인해 단일 컴퓨터 자원으로 전처리가 불가능했던 두 번째 문제는 인-메모리 병렬 처리 엔진인 아파치 스파크를 도입하여 문제를 풀어냈다. 향후 연구에서는 발전량 예측 지역 근처 데이터를 융합하여 각 지점에 최적화된 기상 데이터를 생성하는 방법론과 기상데이터 처리를 위한 스파크 클러스터 최적화 방법에 대한 연구를 진행하고자 한다.



< Figure 1. 기상데이터 활용을 위한 추출 및 전처리 시스템 구조 >

3) 이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(20207200000010, 재생에너지 디지털 트윈 시스템 및 운영 플랫폼 개발)

2상 인터리브드 벅 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 32CH 전기차용 배터리 싸이클러 시제품 실증

서현욱 · 이주민 · 김종우 · 정대주*

(재)대구기계부품연구원, *지텍(주)

Demonstration of a Prototype for 32CH Electric Vehicle Battery Cyclers applied with a 2-Phase Interleaved Buck Converter and Merge Function

최근 전기자동차용 이차전지 시장의 수요에 따른 이차전지 성능평가 장비의 수요가 증가되는 추세이다. 이차전지 성능평가 장비에는 배터리의 성능평가 개선을 목적으로 하는 전기화학적 분석기기와 제조공정에 따른 중간 완제품의 성능평가를 위한 충·방전기, 최종 완제품인 배터리의 성능평가를 위한 장비 등으로 분류할 수 있다. 따라서 자동차용 이차전지의 국내 기업의 경쟁력을 확보하기 위한 평가 장비의 국산화 및 연구개발이 시급하며, 중소기업의 특화업종으로 성장시키기 위한 정책적 지원과 대기업과의 협업과 전기차 시장 성장으로 인한 투자 수혜를 입는 산업으로는 우선적으로 중대형 이차전지 배터리 장비산업이 될 것으로 예상된다. 이러한 시장의 변화성에 따라 전기자동차용 싸이클러 기기는 Battery Cell 출하 전 전수검사에 필요한 장비로써 자동차 실주행 환경상의 Battery 부하 테스트부터 용량 Check, Battery 성능평가 등을 하는 Battery & Capacitor 제조사의 필수 장비이다. 전기차용 배터리 싸이클러 장치에 5V/400A용 양방향 컨버터에 대한 제어기술과 전력에너지 회생 기능 알고리즘을 적용하기 위해 2단 인터리브드 벅 컨버터기술 및 Merge 기능을 적용하여 기존 경쟁사의 싸이클러보다 개선되고 정밀한 싸이클러 장치를 개발하기 위해 대상기술을 적용한 시제품에 대한 실증확인이 필요하다.

본 연구에서는 32CH 전기차용 배터리 싸이클러 장비를 개발하고 이를 실증을 위한 시제품의 모듈별 최적화를 확인하고 아래 그림과 같이 인터페이스 채널개수, 전압제어범위, 정류 제어범위, 최대출력용량, 역률 등 실증 분석을 수행하였다.



그림. 32CH 전기차용 배터리 싸이클러 시스템

본 연구는 과학기술정보통신부 연구개발특구진흥재단 2022년 연구개발특구육성(R&D) (특구 연구성과 사업화) 과제인 “2상 인터리브드 벅 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 전기차용 배터리 싸이클러 기술개발”(연구개발과제번호:2022-DG-RD-0060)을 통해 수행되었음.

2상 인터리브드 벅 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 전기차용 배터리 싸이클러 단독 모듈 시제품 성능 분석

이주민 · 서현욱 · 김종우 · 정대주*

(재)대구기계부품연구원, *지텍(주)

Performance analysis of a Single Module Prototype for Electric Vehicle Battery Cyclers applied with a 2-Phase Interleaved Buck Converter and Merge Function

최근 자동차부품의 이차전지 생산량이 증가하면서 이차전지 후공정의 충·방전기 및 BMS(Battery Management System) 시뮬레이터 등의 개발수요가 증가하고 있다. 싸이클러 기기와 같은 이차전지 장비는 이차전지 시장의 성장에 따른 직접적인 영향을 받을 수밖에 없으며 특히 전기자동차용 이차전지와 같은 특수 목적용 이차전지는 대상 시장의 성장 판도에 따라 제조 및 검사장비가 연동되어 영향을 받게 된다. 따라서 전기차 시장 성장으로 인한 투자 수혜를 입는 산업으로는 우선적으로 중대형 이차전지 배터리 장비산업이 될 것으로 예상된다. 이러한 시장의 변화성에 따라 전기자동차용 싸이클러 기기(Battery Cycle Tester)는 Battery Cell과 Capacitor의 출하 전 전수검사에 필요한 장비로써 자동차 실주행 환경상의 Battery 부하 테스트부터 용량 Check, Battery 성능평가 등을 하는 Battery & Capacitor 제조사의 필수 장비이다.

본 연구에서는 고효율 및 고신뢰성 이차전지 성능평가 장비인 싸이클러 장비를 개발하고 이를 검증하기 위한 시제품 단독모듈 최적화를 확인하고 아래 그림과 같이 구성하여 전압제어범위, 정류 제어범위, 최대출력용량, 역률 등 성능 분석을 수행하였다.



그림. 채널간 Merge 기능이 적용된 5V/800A 배터리 셀 충·방전기

본 연구는 과학기술정보통신부 연구개발특구진흥재단 2022년 연구개발특구육성(R&D) (특구 연구성과 사업화) 과제인 “2상 인터리브드 벅 컨버터기술과 Merge 기능이 적용된 전기차용 배터리 싸이클러 기술개발”(연구개발과제번호:2022-DG-RD-0060)을 통해 수행되었음.

고전압 양극을 적용한 전고체전지의 전극/고체전해질 계면 개선 연구

김규태^a · 김고은^b · 정재현^b · 박한빈^b · 박세은^c · 정연욱^{a,b}

^a경북대학교 수소 및 신재생에너지학과, ^b경북대학교 신소재공학부, ^c경북대학교 화학과

리튬이온 배터리가 현재 전기자동차 산업의 발전으로 활발히 연구되고 있으며 에너지 밀도 향상의 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라 고체전해질의 연구가 활발해지고 있고, 기존의 액체전해질이 분해되는 문제 때문에 적용이 어려웠던 고전압 양극의 적용이 용이해졌다.

본 연구에서는 고전압 양극과 고체전해질을 적용한 전고체 전지의 전극/고체전해질 계면 구조를 개선하였고, 개선된 전고체 전지의 전기화학적 특성을 연구하였다. X-ray Diffraction(XRD)을 통해 합성된 시료가 단일상인 것을 확인하였다. 이후 합성된 시료로 복합 양극을 다양한 비율로 제작하여 최적의 비율을 선정하였고, 전극/고체전해질 계면 구조를 설계하여 적용한 뒤 Scanning Electron Microscopy(SEM) 측정을 통하여 제작된 극판 표면과 단면을 관찰하였다. 또한 전기화학적 특성을 측정하기 위해 고체전해질을 적용한 coin cell을 제작하여 Electrochemical Impedance Spectroscopy(EIS)와 Charge/Discharge profile 결과를 분석하였다.

전고체전지를 위한 고전압 전이금속 산화물 연구

박수현^a · 윤성환^b · 김수현^b · 박세은^c · 정연옥^{a,b}

^a경북대학교 수소 및 신재생에너지 공학과, ^b경북대학교 신소재공학부, ^c경북대학교 화학과

Study on high voltage transition metal oxide for all-solid-state-batteries

이차전지의 사용 범위가 확장되는 가운데, 기존 리튬 이온 전지의 단점을 보완하기 위해 안전성과 안정성이 높은 전고체전지에 대한 연구가 활발해지고 있다. 특히 고체전해질은 액체전해질보다 비교적 높은 전압(4.6V 이상)에서도 안정적인 특성을 보인다는 장점이 있다.

본 연구에서는 전이금속 산화물을 고체전해질에 적용하여 다양한 실험적 기법을 통해 고전압 구동 특성 및 성능을 평가하였다. 우선 XRD와 SEM을 통해 합성된 활물질의 단일상 여부 및 표면 형상을 관찰하였다. 이후, 전기화학적 특성을 측정하기 위해 coin cell을 제작하여 charge/discharge profile, cyclic voltammetry 등의 데이터를 분석하였다. 추가로, cell의 성능 향상을 위해 양극과 고체전해질 사이의 계면 형상을 변화시켰으며 동일한 측정 장비를 통하여 기존의 cell과 성능을 비교하였다.

Computational Analysis of a Lithium-ion Pouch Cell Module for Electric Vehicle Application with a Dielectric Liquid Immersion Cooling Method

장성원 · 이남권* · 김한수* · 권동재* · 엄석기*

한양대학교 미래모빌리티학과, *한양대학교 융합기계공학과

This study was conducted to figure out the cooling performance of an Electric vehicle lithium-ion battery module with an immersion cooling method under rapid discharge conditions. A battery module was composed of 19.6 Ah lithium iron phosphate pouch cells (1P14S) connected in series. The computational model predicted heat transfer phenomena of the module, which consisted of cells, and was validated by experimental results. An immersion cooling system was assumed to be cooled with a single-phase dielectric liquid and governing equations were solved numerically using a commercial computational fluid dynamics software ANSYS FLUENT®. Temperature rise of a bottom cooling battery module was compared to that of an optimized immersion cooling module in a previous study. Numerical results showed that the immersion cooling system lowered the maximum module temperature by 28% when compared to the bottom cooling system.

건물부문 에너지·온실가스 감축 국가정책 및 공공건축물 그린리모델링 사업 사례 분석

오세민 · 김진영 · 이상엽 · 안충원

국토안전관리원 그린리모델링센터

A Study on Building Energy·Greenhouse Gas Reduction Government Policy and Case Analysis of Public Building Greenremodeling Business

Oh, Se-Min · Kim, Jin-Young · Lee, Sang-Yeop · Ahn, Chung-Won

Department of Green-Remodeling Center of Korea Authority of Land & Infrastructure Safety

우리나라는 최근 '2050 탄소중립'을 선언하고 국제사회에 2030년 국가온실가스감축목표와 2050 장기 저탄소 발전전략을 제출하고, 2050년 까지 탄소중립을 위한 장기 비전과 국가전략을 제시하였다. 건물부문은 우리나라 온실가스 배출의 24.6%('18년 기준)를 차지하며, 상향된 국가온실가스감축목표('23.3월)에 따라, '30년까지 '18년 배출량 대비 32.8%를 감축해야 하는 상황이다.('18년(기준연도), 52.1 백만톤CO₂eq → '30년, 35.0백만톤CO₂eq)

이에 따라, 정부는 건물부문 에너지·온실가스 감축을 비롯한 기후변화와 2030 국가온실가스감축목표, 2050 탄소중립 등 대·내외 여건변화에 대응하기 위해 다양한 녹색건축관련 정책·사업을 추진하고 있다. 정부의 건물부문 에너지·온실가스 감축을 위한 주요 수단으로서 신축건물에서는 '제로에너지건축물', 기존건물에서는 '그린리모델링' 사업을 추진하고 있다. 그린리모델링 사업은 공공·민간부문으로 구분되어 추진되고 있으며, 본 연구에서는 공공부문 그린리모델링 사업의 주요내용과 함께 실제 사례를 중심으로 그린리모델링 에너지·온실가스 감축효과, 분석방법론, 현장조사 내역 검토·분석 등 다양한 결과물 등을 분석 하여 향후 추진방안에 대하여 고찰해보고자 한다. 이를 위하여, 정부에서 '20년~'22년 동안 추진되었던 '공공건축물 그린리모델링' 사업의 주요현황 등을 소개하고, 그린리모델링 사업 추진을 위한 현장조사 및 결과등을 분석하여 사업 추진방향에 대한 제언과 함께, 사업의 활성화 및 정책 고도화를 위한 개선방안을 제시하여 향후 기술 및 정책·제도 개선의 기초자료로 활용하고자 한다.

원자력시설 필수디지털자산 기술적 형상관리 방안 연구

A Study on the Technical Configuration Management for Critical Digital Assets for Nuclear Facilities

김승민 · 이동석

한국원자력통제기술원 사이버보안실

한국원자력통제기술원은 기술기준(KINAC/RS-015)을 통해 국내 원자력사업자에게 사이버보안 측면에서 필수디지털자산의 최신 기본형상, 네트워크 연결구성, 보안 설정, 연결된 기기 현황 등을 파악하고 문서화하도록 요구하고 있다. 원자력사업자는 주기적인 점검을 통해 필수디지털자산의 형상관리를 하고 있으나, 일부 원자력시설에서는 기술적인 방법을 통한 형상관리보다 관리대장 비교 등을 통해 비기술적 점검을 수행하여 인적오류가 발생할 가능성이 크다. 이에 본 연구에서는 자동화 스크립트 활용, 형상관리 도구를 활용, SCAP를 활용한 기술적인 형상관리 방안에 대해 제시하였다.

첫 번째 기술적 형상관리 방법은 스크립트 기반 형상관리로 스크립트 실행을 지원하는 Windows 및 Unix 계열 등의 운영체제를 사용하는 필수디지털자산에서 가능하다. 스크립트 기반 형상관리는 형상 항목을 식별 및 설정하고 스크립트를 통해 형상 감사(audit) 및 통제 관점에서 형상관리 업무 대부분을 자동화 할 수 있다. 예를 들어, RS-015에서 요구하는 '계정 관리(불필요 계정)'의 경우 파워셸 또는 배시 스크립트 코드를 통해 자동화된 점검이 가능하며, 로그 기록 및 용량 확인 또한 자동으로 관리가 가능하다.

두 번째 기술적 형상관리 방법은 형상관리 도구를 활용하는 방법으로 형상관리 도구는 필수디지털자산의 기본형상 정보와 자산항목별 형상관리 항목을 지정할 수 있으며, 식별된 형상관리 항목에 대한 변경 통제, 감사, 문서화 등의 작업을 수행할 수 있다. 상용화된 형상관리 도구는 편의성이 높지만 보안측면에서 개발자 보안테스트, 인수테스트 등을 실시하여 보안 문제가 없어야 한다.

세 번째 기술적 형상관리 방법은 SCAP을 활용한 방법이다. SCAP(Security Content Automation Protocol)은 NIST에서 주도적으로 개발 중인 정보보안을 위한 표준화된 프레임워크로, 다양한 시스템 및 도구에 적용되어 보안 취약점과 관련된 데이터를 수집, 분석 및 보고하는데 사용되고 있다. SCAP의 XCCDF(eXtensible Configuration Checklist Description Format)은 소프트웨어 보안형상 점검을 자동화하기 위해 개발된 XML 기반 표준으로, SCAP을 구현한 오픈소스 도구인 OpenSCAP 도구를 활용하면 자동으로 필수디지털자산의 보안형상관리(보안 설정, 취약점, 패치 정보)를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 기술적 형상관리 방안 세 가지를 제시하였다. 제시한 기술적 형상관리 방안 적용을 통해 필수디지털자산에 대한 형상 통제 및 감사 자동화를 수행할 수 있으며, 이를 통해 형상관리 업무의 효과성 및 효율성이 증대할 것으로 기대된다.

ICMP 취약점에 따른 원자력시설에 대한 위협성 및 조치방안 연구

이동석

한국원자력통제기술원 사이버보안실

A Study on the Threat to Nuclear Facilities by ICMP Vulnerability

The National Institute of Standards and Technology (NIST) announced an ICMP protocol vulnerability. It is classified as CVE-2023-23415 and has a high risk of 9.8/10 points. The targets include Microsoft Windows 10, 11, and Windows Server 2008-2022, which provides for most Windows products. Although no precise attack method has been disclosed, it is assumed that specific applications containing vulnerable code using ICMP execute remote code through vulnerable code in the socket when using ICMP.

To solve the ICMP vulnerability, it was confirmed that it was possible with Microsoft's March regular security update file and that Windows servers existing at the Korea Atomic Energy Control Technology Institute could be taken action through the security update, and through the update it was confirmed that there were no problems with availability and vulnerability measures. A number of Windows servers are also running in nuclear facilities and are exposed to such threats. If a malicious hacker penetrates a nuclear facility through an ICMP vulnerability, it can cause severe problems with reactor operation. Although a closed network environment has been configured and communication with the outside is difficult, invisible air gaps may exist, and it cannot be judged to be completely safe against hacking. To respond to ICMP threats in this environment, shape management of digital assets (CDAs) essential to nuclear facilities must be continuously implemented, and based on this, the vulnerability target must be handled through security updates. Updates to nuclear facilities should be carried out in preparation for abnormal situations when updating with availability, especially ICMP vulnerability server updates should be thoroughly analyzed, and phased updates should be considered.

Keywords: ICMP, Vulnerability, Nuclear, security

보안 분야 리스크 활용 및 성능기반 규제의 국내 도입을 위한 동향 분석 및 갭분석 연구

이현주 · 이동석

한국원자력통제기술원 사이버보안실

공공의 보건과 안전을 위해 원자력시설에 대하여 안전한 규제가 이행되어야 하나, 규제자원이 한정적이라는 한계점이 존재한다. 이에 따라, 한정된 규제 자원을 활용하여 효과적으로 안전한 규제를 이행하기 위한 방안으로, 원자력시설에 대한 리스크활용(risk-informed)·성능기반(performance-based) 안전규제 방안이 제안되어져 왔다. 리스크활용·성능기반 안전규제란, 위험도가 높은 시설 및 안전성능이 저하되는 시설에 규제를 집중하는 규제 방안으로, 미국에서는 원자로감독체계(Reactor Oversight Process, ROP) 내에 도입 및 이행되고 있다.

국외 여러 국가에서 리스크활용·성능기반 안전규제 방안을 도입하고 있다. 대표적으로 미국의 규제기관 NRC는 원자로감독체계 내에서 주요 성능분야인 원자로 안전(Reactor Safety), 방사선 안전(Radiation Safety), 안전조치(Safeguards)에 대하여 검사 확인사항 및 성능 결과를 기반으로 종합적으로 평가하고, 그 결과에 따라 규제를 차등화하는 방안을 도입하였다. 일본의 경우, 규제기관인 NRA가 미국의 규제 체계를 벤치마킹하여 유사한 리스크활용·성능기반 원자로감독체계를 도입하였다. 다만, 보안 분야에 대한 정보는 공개하지 않고 있는 미국과 달리 일본은 물리적방호 관련 지표에 대해서는 공개하고 있다. 이 밖에도 프랑스 및 캐나다에서는 미국, 일본과 같은 원자로감독체계를 운영하고 있지는 않으나, 규제활동에 리스크를 활용하고 성능 결과를 기반으로 하는 규제방식을 적용하고 있는 현황이다.

국내의 원자력시설 규제체계에는 리스크활용·성능기반 규제 방식을 도입하고자 하는 연구만 진행되어있는 실정이다. 국내에서는 1995년 원자력시설의 성능지표에 관한 연구가 최초로 시작되었고, 현재는 전원전에 공통으로 적용될 수 있는 성능지표가 개발되었다. 리스크 정보를 활용하는 규제방안에 관한 연구는 크게 리스크 정보를 정확히 분석하는 연구와 리스크 정보를 규제 기술에 적용하는 방안에 관한 연구로 두 분류로 진행되어져 왔다. 그러나, 원자력시설에 대하여 개발된 성능지표와 리스크정보 활용 방안에 대한 연구는 안전분야에서 중점적으로 진행되어져왔고, 보안분야는 물리적방호 분야에 대하여 연구 필요성이 제기된 바만 있고, 구체적인 연구가 진행된 바가 없다.

본 연구에서는 국내 원자력시설에 대한 보안 규제에 대하여 리스크활용·성능기반 규제 방식을 적용하기 위해 국외 보안분야에 대한 리스크활용·성능기반 규제방식에 대해 상세히 분석하였고, 국내 규제 현황과의 갭분석을 진행하였다. 또한, 이러한 결과를 기반으로, 해당 규제 방식의 국내 도입시 필요한 제도 및 체계 요소에 대해 제시하고 있다. 제시한 제도 및 체계 요소는 추후 보안분야의 리스크활용·성능기반 규제 방식 도입 연구 진행시 고려사항의 기반이 되어줄 것으로 기대된다.

중수로 안전해석시 연료채널 상류에서의 임계열속 여유도

고동욱

한수원(주) 중앙연구원

Fuel Channel Upstream CHF Margin in Safety Analysis for CANDU Reactor

중수로 안전해석에서 피복관 온도 예측시 임계열속(Critical Heat Flux) 상관식은 매우 중요한 역할을 한다. 안전해석의 주요결과 중 하나인 피복관온도는 임계열속 현상 발생 이후에 상승하기 시작하기 때문이다. 임계열속을 정확히 예측해야 피복관 온도 상승도 적절히 예측될 수 있다.

중수로 안전해석시 임계열속 현상은 다양한 사고에서 발생하며, 이러한 임계열속 현상은 주로 연료채널 하류에서 발생한다. 연료채널 상류에서는 하류보다 냉각재 온도가 낮고, 과냉각도는 높으며, 열적학적 건도는 음수로서 더욱 작다. 또한 상류에서는 압력관 크립이 채널 중앙부 보다 작으므로 채널유량이 일정하다 하더라도 질량유속이 커지는 효과도 있다. 이러한 이유로 연료채널 상류에서는 임계열속 여유도가 크다고 예상할 수 있다. 그래서 안전해석시 상류에서는 연료온도가 상승하지 않으므로 관심을 두지 않는 경우가 많으나, 임계열속 여유가 어느정도 되는지 점검할 필요는 있다.

본 논문은 중수로 설계기준 사고 중 일부 사고에 대해 연료채널 상류에서의 CHF 여유도를 정량적으로 검토하였다. 이러한 사고들에 대해 37M 연료 CHF 상관식을 적용하여 CHF 여유도를 계산하였고, 또한 이와 같이 계산된 CHF 여유도와 경향을 비교하기 위해 37봉 연료에 대해 적용할 수 있는 Groeneveld-Leung CHF Lookup Table(HW-B-2001)을 적용한 경우도 분석하였다. 연료채널의 CHF 여유도 분석에는 고출력 채널(O6mod)을 활용하였다.

분석결과, 37M 임계열속 상관식으로 계산된 임계열속 여유도는 일부 임계열속이 발생하지 않는 안전해석 조건에서 상류로 갈수록 임계열속 여유도가 상승하는 경향을 보여주었고, 이러한 경향은 Groeneveld-Leung CHF Lookup Table을 사용하였을 때와 유사하였다. 즉, 37M 임계열속 상관식을 적용한 경우의 연료채널 상류 CHF 여유도는 Lookup Table을 적용한 경우와 유사한 CHF 여유도 경향을 나타내었다. 이는 방대한 실험자료의 집합인 Lookup Table과 특정 연료를 대상으로 한 실험자료를 토대로 만든 37M 임계열속 상관식이 연료채널 상부에서 동일한 경향을 보이는 것이다. 또한, 연료채널의 상류에서 연료채널의 중앙부나 하류부분 보다 정량적으로 큰 임계열속 여유도를 확인하였다.

SMART100 증기발생기 전열관 소용돌이 와류 시험

권순국 · 홍두호, 정한식, 조민기*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *두산에너지빌리티(주)

A Study on Vortex Shedding Test of SMART100 Steam Generator Tube

SMART100은 단일 원자로용기에 증기발생기 및 원자로냉각재펌프 등이 부착되어 있는 구조로 설계되었다. 특히, 증기발생기는 나선형 전열관을 채용하여 효과적인 열전달을 위하여 표면적의 극대화를 실현하였다.

현재 운영중인 상용원전은 오랜 기간 운전경험을 통해 발전소와 원자로내부구조물에 유해한 영향을 줄 수 있는 유동유발진동이 검증되어 왔다. SMART100은 원형(Prototype)으로 분류되어 미국 원자력안전위원회 규제요건 RG 1.20에 따라 종합진동평가프로그램(Comprehensive Vibration Assessment Program, CVAP)을 통하여 유효원형(Valid Prototype)이 되기 위하여 원자로 내부구조물의 진동평가가 요구된다.

본 시험은 증기발생기 전열관을 대상으로 하며 실험은 발전소 운전조건의 유속을 포함한 다양한 유속에 다양한 배열의 전열관 시편을 노출시켜 거동을 확인하였다. 검토 대상은 기존 문헌과 비교를 위하여 단일 전열관(직관 및 곡관) 시험을 수행하였고, SMART100 증기발생기 전열관 배치를 구현하기 위하여 곡관규칙배열(Curved Regular Array)과 곡관불규칙배열(Mixed Irregular Array) 조건과 같이 3가지 조건의 전열관 배열형상에 대하여 시험을 수행하였다.

핵연료집합체 지진취약도 평가 방법론 최적화 방안 검토

김갑순 · 남현석 · 김태순

한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

A Study on the Optimization of Seismic Fragility Assessment

Methodology of Nuclear Fuel Assembly

Kap Sun Kim · Hyun Suk Nam · Tae Soon Kim

확률론적 지진안전성 평가방법론에 기반을 둔 지진취약도 평가기술은 원전 내진설계에서 결정론적 내진성능 평가방법론의 보수성 및 불확실성을 보완하기 위한 방법으로 개발되어 왔다. 여기서 지진 취약도란 주어진 지진 강도에서 특정 파괴모드가 발생할 조건부 확률을 말하는데, 이는 일반적으로 변수분리법(SOV)으로 알려진 지진취약도 평가방법론에 의해 산정될 수 있다. EPRI에서 발간한 기술보고서에서는 변수분리법을 적용하여 원전 구조물 및 기기에 대한 지진취약도를 평가하는 상세 절차를 제시하고 있다. 본 연구의 선행 연구에서는 EPRI 보고서에서 제시하고 있지 않은 핵연료집합체에 대해 기존 EPRI 방법론을 적용한 지진취약도 평가방법론을 수립하고 상세평가절차를 제시하였다.

본 연구에서는 기존방법론을 적용한 핵연료집합체 지진취약도 평가방법을 기반으로 하여 기존 평가에서의 보수성을 제거하고 평가방법론의 정확성을 향상시켜 핵연료집합체에 대한 추가적인 내진 여유도를 확보하고자 지진취약도 평가 방법론의 최적화 방안에 대한 검토를 수행하였다. 먼저 기존방법론에서 사용한 NUREG/CR-0098 스펙트럼 대신 부지특성을 반영한 등재해도 스펙트럼(UIHS)을 지진취약도 평가에 적용하는 방안에 대한 영향을 분석하였다. 다음으로 기존의 집중질량 모델 대신 상세 3D 내진해석 모델 적용에 대한 영향을 분석하였으며, 핵연료집합체 비탄성에너지 흡수계수 적용 방법에 대한 영향을 분석하였다. 또한 핵연료집합체 자체의 비선형성에 대한 영향을 분석하였다. 각각의 영향변수가 핵연료집합체 지진취약도 평가 결과에 미치는 영향을 개별적으로 분석한 결과 부지고유 지진특성(UHS)을 반영한 영향이 가장 지배적인 것으로 나타났으며, 나머지 변수들도 핵연료집합체의 내진성능 향상에 도움이 되는 것을 확인하였다. 최종적으로 검토된 모든 변수들을 적용하여 각각의 파손모드에 대한 핵연료집합체 지진취약도 평가를 수행한 결과 전체적으로 기존 방법론에 의한 결과보다 내진성능(HCLPF) 값이 크게 향상되는 결과를 확인할 수 있었다.

혁신형 SMR SC모듈 적용을 위한 국내외 설계기준 검토

김갑순 · 한승주

한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

Review of SC Structure Design Criteria for Innovative SMR Application

Kap Sun Kim · Seung Ju Han

현재 국내에서 개발 중인 소형모듈형 원전인 혁신형 SMR에는 건설공기 단축을 위해 일부 구조물에 강판콘크리트(Steel-Plate Concrete, SC)모듈을 적용할 예정이다. 따라서 본 연구에서는 혁신형 SMR SC 모듈 적용을 위해 국내외 SC구조 설계기준 현황을 검토하였다. 국내 SC구조 설계기준으로는 KEPIC SNG와 규제기관으로부터 승인을 받은 2건의 특정기술주제보고서가 있다. KEPIC SNG는 2010년에 최초로 발행된 이후 매년(2011년, 2012년, 2013년 및 2014년) 추록이 발행되었다. 개정 발행된 2015년판은 2010년판과 2011년부터 2014년까지의 추록을 기준으로 ANSI/AISC N690s1-15의 발행에 따른 내용을 일부 수용하였으며, 국내의 자체 실험결과를 반영하고 있다. KEPIC SNG 2020년판은 2015년판을 기준으로 2016년과 2019년 추록을 적용한 최신판이다. TR-KHNP-0027 보고서는 2011년 10월에 발행되었으며, 원자력 안전관련 구조물의 특성을 반영한 가상의 시범건물을 KEPIC SNG 2010년판에 따라 SC구조로 설계하여 원전구조물에 대한 SC구조 설계기준의 적용성을 검토하고, 관련 실험내용을 바탕으로 설계기준의 타당성을 검토한 내용을 수록하고 있다. TR-KHNP-0038 보고서는 2020년 7월에 발행되었으며, KEPIC SNG 2015년판 부록 4와 추가 연구결과를 바탕으로 SC구조 이종부재간의 접합부 설계방법을 제시하고 있다.

미국 강구조학회에서는 SC구조 설계기준을 AISC N690-12 및 AISC N690s1-15의 Appendix N9에 수록하였으며, 2018년도에 AISC N690-18로 개정하였다. 미국 원자력규제 위원회에서는 2021년 8월에 Regulatory Guide(RG) 1.243 규제지침을 발행하였으며, SC구조 설계요건을 포함한 AISC N690-18의 규제지침을 승인하였다. 하지만 AISC N690 App.N9은 SC구조 설계를 위한 일부 요건을 포함하고 있지 않아 단독으로 SC구조 설계요건으로 적용하기에는 어려움이 있는 실정이다.

상기와 같이 국내외 SC구조 설계기준 현황 분석을 통해 혁신형 SMR SC모듈 적용을 위한 설계기준 적용방안에 대한 검토를 수행하였다. 검토결과, 현재 원전 안전관련 구조물에 SC구조 적용을 위해서는 규제기관으로부터 승인을 받은 2건의 특정기술주제 보고서를 근간으로 설계요건 수립이 필요하지만, 특정기술주제보고서는 각각 KEPIC 2010년판과 2015년판을 기반으로 작성되었으므로 제시된 설계 요건은 KEPIC SNG 2020년판을 기준으로 변경하여 최신 설계 요건 반영이 필요할 것으로 검토 되었다.

화재 다중오동작분석 시 기기 고장모드 반영 중요성 검토

Review on importance of component failure modes for fire induced Multiple Spurious Operation analysis

김명수, 정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

원전 화재방호의 가장 중요한 목표 중 하나는 화재후안전정지(Post-fire Safe Shutdown) 능력의 확보이다. 미국뿐 아니라 국내 원전에서도 Browns Ferry 원전 화재 이후 수행된 기존 안전정지 능력 평가에 더하여 다중오동작(Multiple Spurious Operation, MSO) 분석과 관련된 다양한 노력을 하고 있다. 본 논문에서는 MSO 분석 시 고장모드 적용 필요성과 그 시점이 분석결과에 어떠한 영향을 주는지 확인하였다.

MSO 분석은 크게 4단계로 구성되어 있다. (1) 화재 시 안전정지 기능을 중심으로 대상 계통 및 기기 선정, (2) 대상 기기의 오동작에 관여하는 케이블 선택, (3) 기기 및 설비 위치 정보 조합, (4) 격실별 요건 만족 검토가 각각의 단계이다. 국내에서는 일반적으로 첫 번째 단계에서 안전기능별 대상 계통과 기기를 선정하고, 해당 기기간의 조합을 확인한다. 하지만 이때 선정되는 기기들에 대한 고장모드를 명시하지 않고, 대상기기만을 선정한다면 잠재적으로 후속 프로세스에 문제를 유발할 수 있다. 두 번째 단계인 케이블 선택 시에는 고장모드를 고려해야만 적절히 대상 케이블 선정이 가능하다. 고장모드에 따라 관여하는 대상 케이블이 달라지기 때문이다. 모터구동밸브를 예로 들면, 초기 상태가 개방상태인데, 안전정지를 위한 운전 조건에서도 개방을 유지해야 하는 경우에는 “단힘 신호”를 유발 할 수 있는 신호제어 케이블만을 식별하여 해당 케이블을 적절히 방호하면 된다. 그에 반해 처음에 개방상태의 밸브가 화재 후 안전정지를 위하여 닫혀야 되는 경우에는 단힘 신호를 보내주는 케이블과 함께, 모터구동밸브에 전원을 공급하는 케이블까지 그 기능을 확보할 수 있어야 한다. 즉, 모터구동밸브에 대하여 초기상태와 동일한 상태를 요구하는 경우에는 신호 케이블만을 대상으로 하고, 기기의 동작(예, 개방에서 단힘으로, 또는 단힘에서 개방)이 필요한 경우 신호와 전원 케이블이 다중 오동작 분석의 대상이 된다. NEI 00-01에서 제안하는 가압형경수로에 공통적으로 적용될 수 있는 일반 시나리오 중 몇 가지는(예, 시나리오 1번~5번) 동일한 또는 유사한 범주의 기기를 다루고 있으나, 고장모드를 고려하는 시점에 따라 분석이 필요한 대상케이블이 달라질 가능성을 가지고 있다.

원전 화재 시에도 안전정지를 확보할 수 있도록 발생 가능한 모든 오동작의 조합을 검토하는 것이 다중오동작분석의 목적이다. 안전기능-대상계통-관련기기-해당 케이블에 이르는 분석 프로세스 중 기기의 고장모드를 반영하는 절차가 적절히 관리되어야 분석의 효율성과 함께 분석결과의 적정성을 확보할 수 있다. 이를 통해 필요한 후속조치를 도출하거나 불필요한 설비 개선 등을 수행하지 않을 수 있게 될 것이고, 궁극적으로 원전의 화재위험을 낮출 수 있을 것이다.

유럽 수출 원전 부지배치 요건 부합성 검토

김용수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Review of Requirements Conformity for SPP of Europe Export Npps

Kim Yongsoo

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

현재 국내에서 개발 중인 유럽 수출형 원전의 부지배치도는 유럽사업자요건(European Utility Requirements, EUR)을 기반으로 배치 대상 구조물의 수량 및 크기, 보안 구역 설정, 터빈 미사일 구역 설정, 항공기 충돌 대처, 냉각탑 구역 설정 등 물리적 격리 요건과 내·외부 재해 방지, 부지 특성 등을 고려하여 개발하고 있다.

신규 발전소의 특정 부지 특성을 고려한 수출용 부지배치도는 사업주 요건에 따른 필요 건물 및 설비를 확인한 후 입찰 요청서의 발전소 배치 요건 및 관련 법령 등을 고려하여 구조물의 배치를 확정하게 된다.

보안 구역 설정 요건에서는 인접한 가동원전과는 별도의 제한구역을 설정하도록 요구하고 있으며 부지배치도에는 요건에 따라 폭 20 m의 보안 구역을 설정하였고 발전소 보조설비 배치계획에 따라 확정하도록 하였다.

내부재해 고려 대상인 터빈 미사일 방지 요건에서는 터빈 날개 파단에 대비하여 구조물을 배치하도록 요구하고 있으며 안전성 관련 건물 및 구조물은 터빈 미사일의 타격에 의해 영향을 받는 구역 바깥으로 배치하도록 설계하였다.

외부재해 고려 대상인 항공기 충돌 대처 요건에서는 항공기 충돌에 대비하여 구조물을 배치하도록 요구하고 있으며 다중성 설계 원칙에 따라 안전성 관련 건물 및 구조물은 보조건물을 중심으로 좌우에 분리 배치하도록 설계하였다. 또한 원자로건물 및 보조건물은 구조물 설계 시 방벽보호 개념을 적용하였으며 원자로건물은 항공기 충돌에 대비하여 이중 콘크리트 구조물로 설계하였다.

냉각탑 구역 이격 요건에서는 냉각탑의 높이 및 추가 이격거리를 고려하도록 요구하고 있으며 안전성 관련 건물 및 구조물은 냉각탑으로부터 충분히 분리하여 배치함으로써 지진 발생에 따른 냉각탑의 전도 붕괴 사고에 대비하도록 설계하였다.

기타 사업주 요건으로 정비실, 비상대응센터, 사용후연료 중간저장 시설 등의 지원설비를 위한 구역을 제공하도록 요구하고 있다.

유럽 수출형 원전의 부지배치도는 APR1400, OPR1000 노형 등의 운전경험을 바탕으로 EUR 요건, IAEA 안전지침, 입찰요건에 충분히 부합하도록 개발되었으며 향후 체코, 폴란드 등 유럽 지역의 수출 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

해외 수출 노형 이중 원자로건물 개념 소개

김용수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Introduction to Double Containment Building of Export NPPs

Kim Yongsoo

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

현재 국내에서 개발 중인 해외 수출 노형의 원자로건물 설계는 유럽사업자요건(European Utility Requirements, EUR)을 기반으로 물리적 격리, 방사선 차폐, 안전성, 건설성, 운전 및 정비 편의성, 경제성, 시험 가능성 및 종사자 안전 등의 설계기준을 고려하여 개발하고 있다.

수출형 원전은 크게 Nuclear Island(NI), Turbine Island(TI), 부속건물 및 보조 설비로 구성된다. NI는 원자로건물, 보조건물, 복합건물, 비상디젤발전기건물, 대체교류디젤발전기건물, 기기냉각수 열교환기건물 등으로 구성되어 있으며 TI는 터빈발전기건물과 스위치야드 설비를 포함하고 있다.

특히, 원자로건물은 생물학적 차폐를 통해 핵분열 생성물질의 건물 내 제한 및 항공기 충돌 대처를 위해 이중 원자로건물로 구성되어 있다. 그리고 단일고장 및 가동중정비를 고려하여 4-계열로 설계된 안전계통은 전기적·물리적으로 격리되어 사분면으로 분할 배치되도록 설계하였다.

1차 원자로건물은 Post-tensioned 콘크리트 구조물으로써 정상운전 및 사고상황에서 방사성 물질의 차폐 및 기밀 유지기능을 제공한다. 또한 지진 발생 시 안전등급 계통의 기기를 보호하며 구조물의 건전성을 보증한다. 그리고 원자로냉각재 상실사고 시 고온·고압으로부터 구조물의 건전성을 보증하는 역할을 수행한다. 추가로 기밀 유지기능을 보증하기 위해 강철판을 콘크리트 구조물과 함께 사용하고 있다.

2차 원자로건물은 철근 콘크리트 구조물으로써 방사성 계통 및 기기에 대한 추가적인 방사선 차폐 기능을 제공하고 터빈 미사일, 토네이도와 같은 내·외부 재해로부터 원자로 용기를 보호하며 항공기 충돌에 대한 대처 기능을 제공하도록 설계되어 있다.

1차 원자로건물과 2차 원자로건물 사이에는 Post-tensioned 콘크리트 구조물(텐돈) 설치를 위한 환형 공간을 제공하고 있다.

APR1400, OPR1000 노형 등의 운전경험과 EUR 요건, IAEA 안전지침 등을 충분히 만족하도록 개발된 수출형 원전의 이중 원자로건물 설계는 체코, 폴란드 등 유럽의 기술기준을 적용하는 지역의 수출 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

연구용 원자로 감쇠탱크의 기계적 크기 및 두께 설계를 위한 계산 Calculation for Mechanical Sizing and Thickness Design of Decay Tank for Research Reactor

곽민규 · 정민규 · 서경우

한국원자력연구원

연구용 원자로 일차냉각계통(Primary Cooling System)은 정상출력운전 동안 노심에서 발생하는 열을 제거하는 역할을 수행한다. 일차냉각재는 핵연료가 장전된 원자로 노심을 통과하면서 방사화되며, 발생된 많은 종류의 방사성핵종 중에 특히 고에너지의 감마선을 방출하는 N-16이 포함되어 있다. N-16의 반감기는 7.13 초로 매우 짧아 일정 시간이 지나면 방사능이 크게 감소하게 된다. 감쇠탱크(Decay Tank)는 안전등급 3, 품질등급 Q으로 설계하였으며 원자로 노심 출구를 통과한 일차냉각재가 펌프 및 열교환기까지 도달하기 전에 일정 시간 체류하게 하여 해당 기기실에서 N-16 방사능을 크게 저감시키는 역할을 수행한다. 이를 위해 감쇠탱크는 매우 큰 부피를 갖도록 설계되었으며, 원통형 몸체와 상, 하부 2:1 타원형 경판으로 구성되어 있다. 상부 타원형 경판에는 배기배관 노즐 1개가 위치하며, 하부 타원형 경판에는 입구배관 노즐 1개와 출구배관 노즐 2개가 위치한다. 원통형 몸체 내부에는 유입되는 냉각재가 오래 잔류하도록 3개의 다공판을 위치하였다.

본 연구에서는 요구 체류시간에 따라 설계된 감쇠탱크의 크기 및 두께가 원자력 안전등급 기기 요건인 KEPIC-MND에서 요구하는 최소 요건을 충족하는지 평가하였다. 1) 감쇠탱크 설계압력, 부식여유를 제외한 안지름, 최대허용응력, 그리고 접합효율을 고려하여 경판의 최소 요구두께를 도출하였다. 또한 2) 하부 타원형 경판 중심에 위치한 24인치 입구배관 노즐과 측면에 위치한 18인치 출구배관 노즐 각각의 최소 요구 두께와 3) 구멍에 대한 보강면적을 계산하여 보강요건을 만족하는지 평가하였다. 또한 24인치 배관에 인접한 2개의 18인치 배관이 복수구멍으로 위치함으로 두 구멍에 대한 보강의 유효한계가 겹치는지 평가하였다. 반면 상부 타원형 경판에 위치한 1인치 배기배관 노즐은 지름이 2인치 이하인 단일 구멍으로 보강이 요구되지 않으므로 평가에서 제외하였다.

후기

이 논문은 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과임 (522110-23).

수조수상실사고 배제를 고려한 개방수조형 연구로 일차냉각계통에서 펌프 성능곡선을 이용한 정상상태 유량 평가

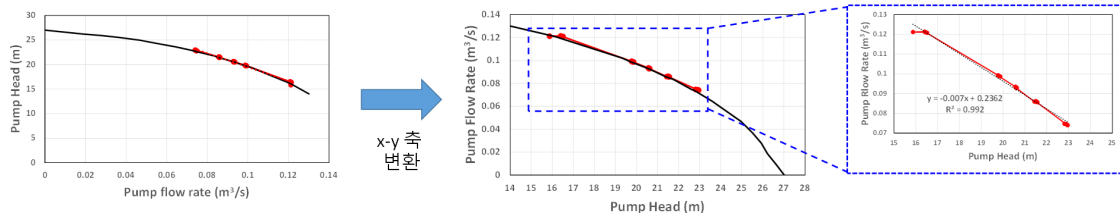
김다용 · 박홍범

한국원자력연구원 수출용신형구로실증업단

일차냉각계통의 배관 파손으로 발생하는 수조수상실사고의 방지는 개방수조형 연구로 안전 성과 관련된 가장 중요한 요소 중 하나이다. 만일, 수조수상실사고 대처 설비가 없다면 지속적인 수조 수위의 하락으로 노심이 공기 중에 노출되어 방사성 핵분열생성물이 대기로 직접 방출되는 심각한 상황에 놓이게 된다. 그러므로 일차냉각계통 배관 파손사고를 방지하는 것이 연구로 안전에 매우 중요하다.

미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 발간한 원자로 배관 파손 크기별 빈도 보고서에 따르면 저온·저압 배관에 대한 파손 크기 및 확률은 배관 길이가 길수록 증가한다. 그러므로 일차냉각계통의 배관 길이 감소는 연구로의 수조수상실사고 방지에 매우 중요하다. 하지만 일차냉각계통의 배관 길이가 감소하면 유량계 전단 및 후단에 충분한 배관 직관 길이의 확보가 어려우므로 유량 측정값에 대한 불확도가 증가된다. 그러므로 수조수상실사고 방지를 위한 배관 길이가 감소된 개방수조형 연구로의 일차냉각계통 유량 측정은 펌프 성능곡선 및 열평형을 이용한 간접 측정 방식이 도입된다.

일차냉각계통 유량은 출력운전 중 원자로 안전 상태를 유지할 위해 중요한 요소이므로 운전제한조건으로 관리되며 운전원에 의해 열적설계유량 이상으로 유지되고 있는지 주기적으로 확인된다. 그러므로 본 논문은 수조수상실사고 방지를 위해 배관 길이가 감소된 개방수조형 연구로 경량화 일차냉각계통의 설계에서 유량 간접 측정 방식 중 하나인 펌프 성능을 이용한 정상상태 유량 평가를 수행하였다. 본 논문에서는 해당 연구로의 설계가 요르단 연구로의 설계와 같다고 가정하고 유량 불확도에 대한 평가를 수행하였다. 즉, 연구로의 계측기 불확도와 일차냉각계통 설계 및 연구로 운전 범위 등은 요르단 연구로와 같되, 일차냉각계통 배관 길이만 감소한 것으로 가정하였다. 펌프 성능곡선을 이용한 유량 평가 결과 일차냉각계통 유량 불확도는 약 4.5(%) 이내로 나타났다. 이는 직접 유량 측정 시 유량불확도 3(%) 이내보다 약간 큰 값이나 펌프 성능곡선 시험 시 불확도 감소 및 펌프 차압계 설치로 인해 충분히 감소시킬 수 있는 값이다.



후 기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020M2D5A1078131)

APR1000 다양성작동계통 설계 규제요건 분석

김용식

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Analysis of the Regulatory Design Requirements for APR1000 Diverse Actuation System

Kim, Yong Sik

The Central Research Institute of Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

체코, 폴란드 등 다수의 유럽 국가들이 최근 신규원전 사업을 추진하고 있으며, 한국수력 원자력(이하 한수원)은 유럽에 원전을 수출하기 위해 서유럽규제자협회, IAEA, 유럽사업자 요건 등 최신 요건들을 반영하여 APR1000 표준설계를 개발하고 있다. APR1000 표준설계 내용을 바탕으로, 최근에 한수원은 체코에너지공사에서 발주한 Dukovany 5호기 입찰에 참여하였고, 발주사에서 요구하는 내용을 입찰서에 충실히 반영하였다. 하지만, 일부 설계내용과 관련하여 입장차이가 존재하며 이를 해결하기 위해 설계 규제요건을 분석할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 다양성작동계통(Diverse Actuation System)에 집중하여 설계 규제요건을 분석하였다.

APR1000의 다양성작동계통은 크게 다양성보호계통과 다양성기기제어계통으로 구성되며 안전등급 2로 분류된다. 각각의 계통은 원자로보호계통, 공학적안전설비작동계통의 백업시스템에 해당되며, 원자로정지불능 과도상태(Anticipated Transient Without Scram)의 결과를 완화하는 역할을 수행한다. EUR Rev.E의 안전등급에 따른 설계요건에 의하면, 단일고장 기준이 다양성작동계통에 적용될 수 있다고 명시하여 강제 적용사항이 아님을 보인다.

그러나, 체코의 초기안전성평가보고서(Initial SAR) 3.7.1.8항에 따르면 동 계통에도 다중성(redundancy)이 적용되어야 한다고 기술되어 있다. 체코측은 이를 근거로 입찰요건서에 계통 신뢰도 충족을 위해 단일고장기준을 반드시 만족하도록 요구하고 있다. 여기서 계통 신뢰도는 전체 노심손상빈도(CDF) 목표값을 만족하기 위한 해당계통의 신뢰도를 의미한다.

하지만, 규제요건 우선순위(Hierarchy of the Rules)에 의해 ISAR와 동급인 체코 규제기관(State Office for Nuclear Safety) 문서 BN-JB-1.0 37항에서는 Beyond-Design Accidents에 대응하는 계통(다양성작동계통)에 대해 다음과 같이 규정하고 있다. “beyond-design accidents 분석을 위해서 덜 보수적인 기준들을 결정할 수 있고, 현실적인 분석 가정들이 적용될 수 있다. 소위 best estimate approach라 칭하는데 단일고장기준을 적용할 필요가 없다.” 이를 통해 같은 레벨의 기준문서들 사이에서 일관되게 요구하지 않는 내용이 있음을 알 수 있다. 따라서, 단일고장기준을 적용하지 않은 현 다양성작동계통 설계 내용이 계통 신뢰도 목표값을 충족하는 조건이라면, 다양성작동계통에 단일고장기준 적용없이 규제기관을 설득할 수 있을 것으로 판단한다.

원자력발전소 BIM 기반 3D모델 정보분류체계 개발 Development of 3D Model Information Classification Structure based on BIM for Nuclear Power Plant

김우중, 변수진, 김종명, 김교훈

한국수력원자력(주) 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부

국내 원전산업에 적용된 3D모델은 설계단계 간접검토용 3D모델이 주를 이루고 있으며 건설이 완료됨에 따라 운영단계를 고려한 3D모델의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 설계 3D모델을 기반으로 운영 3D모델 개발이 필요하며 운영단계 정보연계를 위한 BIM기반의 정보분류체계 개발이 필요하다. 원전 BIM 기반의 3D모델 정보분류체계는 기존 PBS분류체계를 다각화하여 공간분류체계(Building Breakdown Structure)와 계통분류체계(System Breakdown Structure)를 분리해서 분류체계를 구성하고 객체분류체계(Object Breakdown Structure)를 추가로 구성해야 한다. BBS와 SBS는 설비의 기능위치 기반으로 하위정보가 통합되어야 하며 OBS는 설비번호를 기준으로 하위자재정보가 통합되어야 한다.

이러한 3D모델의 정보분류체계 개발을 통해 설계, 건설, 운영 단계의 모든 정보가 통합될 수 있으며 BIM 기반의 업무프로세스가 운영단계에도 활용가능할 것으로 사료된다.

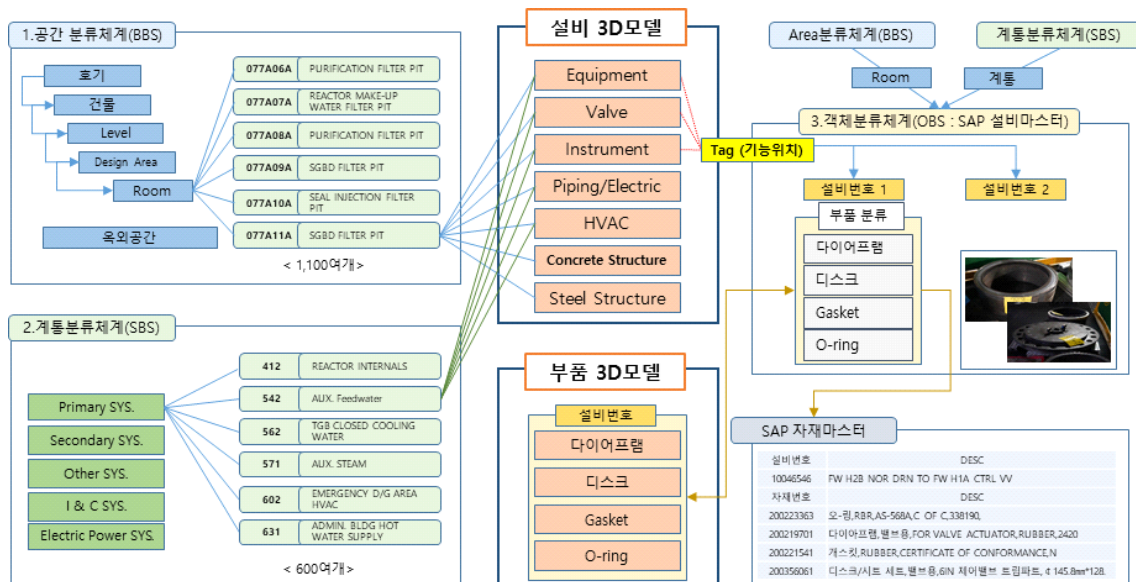


그림 12 원전 BIM 기반 3D모델 정보분류체계 구성(안)

연구용 원자로 판형열교환기 계절별 성능해석

Seasonal Performance Analysis of Research Reactor Plate Heat Exchanger

김인국 · 서경우

한국원자력연구원

연구용 원자로의 판형열교환기는 노심에서 발생하는 핵분열 반응열을 일차냉각계통에서 이차냉각계통으로 전달하는 역할을 수행한다. 이차냉각계통으로 전달된 열은 냉각탑을 통해 최종열침원인 외기로 빠져나가게 된다. 따라서, 이차냉각계통의 계절별 외기온도의 변화는 판형열교환기의 냉각성능에 영향을 주게 된다. 최근, 지구온난화로 인해 온도가 상승함에 따라 계절별 판형열교환기의 냉각성능 및 운전조건을 만족할 수 있는지 확인이 필요하다.

참조 연구용 원자로를 선정하여 20년 동안의 기온 및 습도 정보를 열교환기 성능해석에 반영하였다. 원자력 분야에서 열수력해석 및 안전해석을 위해 사용하는 MARS-KS 코드를 이용해 계산을 수행하였으며, 외기 환경조건의 변화에 따른 냉각성능, 계통 운전 조건 등의 변화를 분석하였다. 판형열교환기 모델은 축소화 모델의 열전달 성능시험결과를 반영하여 검증하였다. 외기온도에 따른 냉각탑 성능변화는 이론계산을 통해 보수적 결과를 사용하였다. 계산결과를 통해 월간 습구온도 및 일간 습구온도를 기반으로 계산한 판형열교환기 성능은 운전제한조건과 비교할 때 충분한 마진을 가지고 있음을 확인하였다. 그러나 일간 최대 습구온도를 기준으로 계산할 때, 7~8월 동안 운전온도가 크게 상승하는 것을 확인하였다. 상세 계산을 위해 습구온도가 가장 높은 10일을 선정하여 24시간동안 판형열교환기의 성능과 운전온도 변화를 과도해석을 이용해 분석하였다. 그 결과, 최대습구온도가 나타나는 시간동안 냉각재의 온도가 일시적으로 상승하지만 운전제한조건 이내에서 운전됨을 확인하였다.

계산결과는 향후 연구용 원자로 운영 중 판형열교환기의 계절별 성능예측을 위해 활용할 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과임 (522110-23).

계속운전 제도개선에 따른 확률론적안전성평가 재평가 방안에 대한 고찰

방기인* · 김현욱

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Study on the Update of the Probabilistic Safety Assessment in accordance with reforming of the PSR system for Continuous Operation

국내 원전은 설계수명에 따라 운전되며 매 10년 주기로 주기적안전성평가(PSR)를 통해 기존 설계의 유효성과 안전성을 확인하고 있다. 2014년부터는 확률론적안전성평가를 포함한 3개의 인자를 추가하여 총 14개 안전인자에 대해 주기적안전성평가의 대상에 포함하여 심사를 수행하고 있다. 원전 운영사업자는 계속운전을 위해서 수명종료일로부터 2~5년 이전까지 주기적안전성평가와 더불어 주요기기 수명평가(LER)와 방사선환경영향평가(RER) 결과를 제출해야 한다. 최근에 이러한 계속운전을 위한 서류제출 시점이 수명종료일로부터 5~10년 이전에 제출가능하도록 관련 법령이 개정되었다. 따라서 모델 및 결과 보고서를 개정하는데 많은 시간이 드는 확률론적안전성평가에 대한 재평가 방안에 대한 고찰이 필요하다.

'22년도 9월에 원안위에서 의결된 원안법 시행령 개정안에 따르면 계속운전을 위한 PSR 보고서의 제출시기를 평가기준일 이전으로 앞당겨 규제기관의 충분한 심사기간을 확보하고 설비개선 등 개선조치사항을 조기에 수행하여 안전성 제고를 하고자 한다. 이 경우 발전소의 수명 종료일로부터 한 주기 이전에 수행된 PSR 결과가 제출되고 심사가 진행되는 시점에 계속운전을 위한 PSR 보고서가 제출될 수 있다. 이러한 경우 현재 법률상으로는 이전 주기의 PSR 결과를 그대로 계속운전 PSR로 신청하여 제출할 수 있는 상황이다. 확률론적안전성평가의 특성상 평가기준일을 기준으로 발전소 현 상태를 반영한 전반적인 평가 모델의 업데이트가 필요한 경우에는 인허가 신청서류 제출시점, 심사소요기간 등을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 주기적안전성평가의 유효성 확인, 발전소의 현 상태 반영의 취지를 만족시키면서 발전소의 수명이 종료되는 시점에서 안전성을 확인할 수 있는 확률론적안전성평가의 수행 방안을 제시하고자 한다.

AI기반 원자력발전소 규제/기술문서 통합 검토 시스템 적용 방안

신상후 · 김우중 · 변수진 · 김교훈 · 김종명 · 이상현
한국수력원자력 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부

Practical Plan of Integrated Review System for Nuclear Power Plant Regulation/Technical Documents

이 논문은 인공지능을 기반으로 한 원자력발전소의 각종 규제/기술문서를 통합 검토하는 시스템의 구현 방법과 적용 방안을 위한 기술 연구를 다루고 있다. 원자력발전소 FSAR (Final Safety Analysis Report, 최종안전성분석보고서) 등 각종 규제/기술문서 요건의 누락으로 원전 가동률이 저하되는 사례가 빈번하게 발생함에 따라 해당 시스템의 필요성이 대두되었다. 해당 시스템은 설계요건(법규/법령, 규제요건, 발주자요건, Code & Standards 등)과 설비형상정보(설계자료, 구매/설치 관련 자료, 절차서/지침서 등), 물리적 형상 정보를 각각 Database화하고 설비 기준으로 추적성을 부여함으로써 사용자가 손쉽게 원하는 설비와 관련된 규제/기술문서를 탐색할 수 있도록 한다. 이와 더불어 검색 프로세스에 자연어처리 기능 등을 융합함으로써 사용자 편의성을 한층 증대시킬 수 있는 실질적인 연구 방향을 제시하고자 한다.



그림 13 시스템 추적성 관련 Data Base 개요

원전 운전원 훈련용 시뮬레이터의 확대 적용 방안

안성진, 이주열

한국수력원자력 중앙연구원

The Enlargement Application Method of Operators Training Simulator for Nuclear Power Plant

원전 시뮬레이터는 주제어실 운전원의 면허 취득, 면허 보수교육, 발전운전원 재교육 실습 과정, 발전소 운전경험의 재구현 등 주로 주제어실 운전원을 대상으로 개발된다. 시뮬레이터를 활용한 실습교육에서 현장운전원의 역할은 강사조작반의 Malfunction 기능을 통해 현장 역할을 대신 수행하였다. 그러나, 최근 현장운전원을 위한 시뮬레이터가 현장설비 일부 범위에 국한되어 개발 되어지고 있다. 본 논문에서는 현장운전원 뿐 아니라 주제어실 운전원도 활용 가능한 발전소 현장설비 적용 확대 방안에 대하여 기술하고자 한다.

발전소 주제어실은 시뮬레이터 개발 국제표준인 ANSI/ANS3.5에 따라 발전소 주제어실과 동일한 형상으로 개발 되어진다. 주제어실 이외에 추가로 원격정지제어반과 유지보수패널 일부를 하드웨어로 구성된다. 훈련용 시뮬레이터 건물의 제한적 크기로 발전소의 많은 설비를 실물과 동등 크기로 구현하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 터치기능의 모니터를 통해 조작이 가능한 Glasstop 방식의 시뮬레이터 개발이 현장설비의 시뮬레이션 방식으로 자주 활용되고 있다. 기존 개발된 현장운전원용 시뮬레이터는 현장 밸브, 차단기, 패널 등 운전원이 자주 사용하는 설비 위주로 개발되었다. 교육 훈련 활용도를 높이기 위해서는 이에 추가로 현장에 설치된 BAC, 방사성액체 및 기체폐기물처리계통, Gas Stripper와 같은 단독설비 운전 및 정지에 관한 개발이 필요하다. 주제어실과 독립적으로 유지운영되는 이들 설비는 현장운전원 조작만으로 작동되므로 교육이 부족한 현장운전원에게 인적실수 예방과 반복학습의 기회를 제공할 수 있다. 그리고 M/A Station과 같은 복잡한 현장밸브 조작방식에 대한 시뮬레이션을 통해 운전원의 조작방법 숙달과 조작시 미치는 영향을 직간접적으로 시뮬레이터를 통해 실시간 확인이 가능할 수 있다. 발전소 계통 설비로는 계통을 Full Scope로 시뮬레이션하기 어려운 취수구 계통, 가스저장계통, 순환수정화계통 등의 현장설비 시뮬레이션을 통해 간접적으로 계통 제어가 가능하도록 구현할 수 있다. 이 외에도 시뮬레이터의 주된 활용자인 운전원과 교육강사의 의견을 반영하여 하드웨어로 구축하기에 비용의 한계, 물리적 제한, 개발기간 등의 제약요소를 개선할 수 있을 것으로 보인다.

원전 운전원용 시뮬레이터는 발전소의 인적오류 저감, 기존 시뮬레이터의 기능의 한계, 개발비용 저감 등을 고려하여 발전소 현장에 설치된 설비에 대해 운전원이 시뮬레이터를 통해 숙련도를 향상시키는데 활용될 수 있을 것으로 보인다.

개정 임계열속상관식의 중수로 연료 열적여유도 영향평가

오재용 · 류의승 · 박동환
한국수력원자력(주) 중앙연구원

Impact Assessment on CANDU Fuel Thermal Margin by Application of Updated CHF Correlations

Jae Yong Oh · Euseung Ryu · Donghwan Park
KHNP Central Research Institute

원자력발전소 노심열수력해석은 원자로 내부 노심에서 발생하는 고온의 열이 연료로부터 냉각재로 전달되는 현상을 분석하고 노심 주변 냉각재의 유동상태 및 열수력현상을 예측한다. 임계열속은 피복관 표면에서 막비등이 발생하면서 냉각재 단상유동 또는 핵비등상태에 비해 열전달 효율이 급격히 떨어져 연료손상을 일으키는 현상으로, 중수로에서는 임계열속이 발생하는 조건의 연료채널 출력을 임계채널출력 혹은 드라이아웃 출력으로 고려한다. 현재 국내 중수로인 월성 2,3,4호기는 37M 개량연료를 장전하여 사용한다. 기존의 37R 연료와 비교하면 중심연료봉 1개의 직경을 축소하여 연료채널 내 냉각재 유량분포를 재조정하여 열수력학적 안전성을 확보하였다. 37M 연료를 대상으로 노심열수력 특성을 해석할 때는 일차냉각재계통의 열수력조건을 바탕으로 임계열속, 기포발생시작지점 상관식 등을 활용한다. 37M 연료 관련 상관식은 캐나다 Stern Laboratories의 연료 압력관 크립에 따른 열유동시험 결과를 근거로 생산한다. 과거에는 압력관 크립조건이 0%, 3.3%, 5.1%를 대상으로 상관식을 생산하였으나, 최근 압력관이 기존 시험의 최대크립인 5.1%를 초과할 것으로 예측되면서 크립조건을 확장하여 상관식을 개정하였다. 개정 상관식은 기존 상관식과 5.1% 크립까지는 시험자료를 동일하게 사용하여 생산하고, 신규로 시험된 확장된 압력관 내경 시험자료를 포함한다. 따라서, 개정 상관식은 기존 상관식에 비해 동일 시험자료 범위 구간에서는 미미한 편차를 발생 시킬 수 있고, 신규 시험된 크립 확장조건까지 사용할 수 있다. 노심열수력분야 안전해석에 활용할 상관식이 개정되거나 신규로 생산될 경우에 검증이 필요하므로, 본 연구에서는 국부과출력보호(ROP) 정지설정치가 가장 낮은 운전조건들을 대상으로 임계채널출력 평가결과를 개정 상관식과 기존 상관식을 사용한 결과와 비교 검증하였다.

본 연구에서 상관식 간의 비교 검증을 위한 모델의 주요 가정사항은 일반적인 중수로 원전 내 37M 연료가 장전된 상태로 전체 채널의 평균 압력관 크립은 3.86%이다. 임계채널출력 평가모델의 주요 열수력조건은 경년열화조건에 따라 모관온도, 압력 및 모관 간 압력강하 등을 적용하여 임계채널출력을 평가하였다. 본 평가에는 중수로 노심열수력해석코드 NUCIRC를 사용하였으며 두 상관식을 모두 적용할 수 있는 최신버전을 이용하였다. ROP 정지설정치가 낮게 나오는 조건에서 평가한 결과, 기존 상관식을 이용한 임계채널출력은 평균 7,185 kW, 최저 V6 채널의 4,490 kW로 나타났고, 개정 상관식을 이용한 결과는 평균 7,178 kW, 최저 V6 채널의 4,454 kW로 평가하였다. 이에 따라, 개정 상관식의 임계채널출력은 기존 상관식 대비 약 0.82 % 가량 낮은 보수적인 결과를 보였으며, 이 편차는 코드의 불확실도 범위 내에 존재한다. 본 연구결과는 ROP 정지설정치 평가의 기초자료로 활용하며, 추후 국내 월성원전 운전조건 및 실측데이터를 반영한 현실적인 열수력모델에 적용하여 정확한 열적여유도를 확보하는데 기여할 것으로 기대한다.

노심열수력코드 업데이트에 의한 드라이아웃 출력 평가

오재용 · 류의승

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Dryout Power Assessment by Updating PHTS Thermalhydraulics Code

Jae Yong Oh · Euiseung Ryu

KHNP Central Research Institute

노심열수력해석은 원전 일차열수송계통 내 고온의 노심 연료봉으로부터 냉각재로의 열전달을 고려하는 안전해석 분야이다. 연료피복관이 높은 출력에 의해 고온이 지속됨에 따라 임계열속에 도달하고 열전달율이 감소하여 손상되는 메커니즘을 방지하는 것이 노심열수력해석이다. 이를 위해 실제로 중수로 발전소는 경년열화에 따라 임계열속 여유도를 고려하여 원자로출력을 감발한다.

중수로 원전은 노심열수력해석 목적으로 NUCIRC 코드를 사용한다. 수치해석 전산코드 NUCIRC는 중수로 일차열수송계통 내 열유동 지배방정식을 계산하여 결과를 도출하는 일차원 해석코드이며, 발전소 주요 계통 및 노심의 열수력조건을 반영하여 연료채널 압력강하 및 연료의 임계열속 발생을 예측한다. 기존의 NUCIRC 2.3.3 버전은 Stern Laboratories의 실험결과를 토대로 압력관 크립이 5.1%까지의 상관식들을 적용하여 중수로 연료채널의 드라이아웃 출력을 평가했다. 그러나, 중수로 원전의 운영이 지속됨에 따라 경년열화에 의하여 압력관 크립이 증가할 것으로 예측됨에 따라 기존 압력관 크립 5.1%까지 수행된 임계열속시험을 확장된 크립 조건을 대상으로 수행하였다.

상기의 확장된 시험자료를 반영한 NUCIRC 신규버전 2.3.5는 2.3.3 버전과 달리 크립 조건을 추가로 확장하여 신뢰도있는 평가를 계산할 수 있으며, 일부 형상모델 계산 등을 개정하였다. 본 연구는 NUCIRC가 2.3.3 버전이 2.3.5 버전으로 개정된 주요 변경사항을 감안하여 일반적인 중수로 노심 드라이아웃 출력의 민감도를 평가하여 신규버전의 적정성을 확인하였다. 민감도평가는 중수로 정상운전을 대상으로 5.1% 크립까지의 중수로 개량연료 37M 상관식을 동일하게 사용하되, 두 NUCIRC 버전을 사용하여 버전에 따른 차이를 확인하기 위함이다. 두 버전의 계산결과를 정확하게 비교하기 위해 압력관 크립이 5.1% 이하인 연료채널들을 공통의 평가대상으로 수행하였다. 각각의 드라이아웃 출력 평가결과를 확인하고 비교하여 NUCIRC 개정에 따른 드라이아웃 출력 결과 차이를 민감도로 평가하였다.

NUCIRC 2.3.3 계산 결과, 전체 채널 평균 드라이아웃 출력값은 7,478 kW, 최저값은 V06 채널의 4,590 kW, 최고값은 L18 채널의 9,061 kW로 나타났다. 동일하게 계산한 NUCIRC 2.3.5의 전체 채널 평균 드라이아웃 출력값은 7,424 kW, 최저값은 V06 채널의 4,523 kW, 최고값은 M14 채널의 8,995 kW이다. 이들의 오차는 약 0.73%이었다. 결과적으로, NUCIRC 2.3.5는 NUCIRC 2.3.3과 비교하여 상관식의 오차 범위 내에서 보수적인 드라이아웃 출력을 평가함을 확인할 수 있었다.

NUCIRC 신규버전의 드라이아웃 출력 평가결과가 NUCIRC 기존버전의 드라이아웃 출력과 비교하면 오차 범위 내 보수적인 수준으로 거의 유사함을 확인하였다. 다만, 주요 변경요소가 오차에 미치는 세부적인 영향은 향후 추가연구를 통해 파악할 계획이다.

침수사건 PSA에서 침수 격리실패 HRA 모델링 영향 분석

Analysis of the Impact of Flooding Isolation HRA in Flooding PSA

오해철, 방기인

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

침수사건 PSA는 침수사건이 발전소 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하고, 발전소 설계 또는 운전에서 침수사건으로 인한 발전소 취약성을 찾아내고 필요한 경우 안전성 향상방안을 제시하기 위해 수행된다. 이때 침수사건은 발전소 내부에 위치하고 있는 기기의 고장 또는 부적합한 운전으로 인해 발생하는 내부 침수사건을 의미한다.

국내에서 적용하고 있는 침수사건 PSA 수행 절차는 침수 구역 내에 존재하는 침수원과 분석대상기기의 기능 및 위치를 고려하여 침수사건 시나리오를 개발한 후 각각의 침수 시나리오에 대해 침수성장평가를 고려하여 침수손상단계를 구분한다. 침수손상단계의 발생빈도, 각 침수손상단계에서의 조건부 노심손상확률, 각 침수손상단계에 도달하기 전에 침수사건 진행을 차단할 운전원 조치 확률 등을 고려하여 해당 침수구역의 노심손상빈도를 계산함으로써 침수사건에 의한 발전소 전체 노심손상빈도를 계산한다.

어떤 침수구역에서 침수사건의 초기사건 발생시 전개되는 시나리오는 해당구역에서 발생할 수 있는 내부사건 초기사건 사고시나리오와 유사하기 때문에 해당되는 내부사건 초기사건 수목을 수정하여 구역별 조건부 노심손상확률(CCDP)을 구한다. 일반적으로 침수사건시 원자로 정지 및 해당 계통의 유체 거동 이상, 즉 압력, 온도, 유량 등의 이상 신호가 발생하고 해당 침수 구역의 배수조 또는 배수펌프의 이상 또는 기동 신호 등이 발생한다. 운전원들은 이런 신호들을 종합적으로 판단하여 침수사건을 진단하게 된다. 침수 격리조치 확률을 평가함에 있어서 침수발생 감지수단 (경보, 구역 상주율 등), 침수원의 감지 및 격리수단 유무, 기기가 손상받기 전에 침수원을 격리시킬 수 있는 시간을 고려하여 운전원 실패확률을 계산하고 있다.

주요 구역에서 침수사건 발생시 원자로 정지가 대부분 수반되기 때문에 운전원은 원자로 정지에 따른 비상운전절차서(EOP) 수행절차를 따르게 될 것이고, EOP에 별도로 명시되지 않은 침수 격리를 위한 운전원 조치는 운전원 판단에 의해서 비상운전절차서(EOP)에서 요구하는 절차와 병행하여 수행되거나 또는 우선순위가 밀리게 될 가능성이 존재한다. 따라서 침수사건 PSA에서는 사고완화를 위해서 필요한 계통(즉, EOP에서 다루어지는 운전원 조치)과 동일한 계통을 대상으로 침수 격리조치가 수행되어야 할 경우, 운전원 조치간 종속성 영향을 고려할 필요가 있다.

본 논문에서는 침수사건 정량화시 내부사건 시나리오에서 고려된 사고 완화를 위한 운전원 조치들과 침수 격리 운전원 조치들 간 종속성을 고려하는 방법을 제시하고 종속성을 고려하였을 경우 리스크 변화 영향을 살펴보았다.

최근 국제에너지 환경하에서 국내 에너지정책 방향

윤성원 · 김승수 · 이명호, 이동훈
한국원자력연구원

Domestic Energy Policy under the Recent International Energy Environment

최근 전 세계적으로 기후변화 대응, 러시아의 우크라이나 침공, 각국의 에너지자원 무기화 등으로 인해 국제 에너지 환경에 대한 불확실성이 증대되고 있으며, 에너지 가격이 급등하는 등 심각한 에너지 수급문제가 발생하고 있다. 또한 범지구적인 2050년까지의 탄소중립 목표 달성을 위해 각 국에서의 온실가스 배출을 줄이기 위한 에너지 사용의 규제환경이 강화됨에 따라 에너지 특히 전력공급의 역할 및 중요성은 높아지고 있다. 이러한 국제환경하에서 에너지 해외의존도가 92% 이상이 되는 우리나라는 장기적·합리적인 에너지(특히 전력)정책을 수립하는 것은 지속적인 경제성장을 견인하는 주축이 된다. 이러한 가운데 국내에서도 탄소중립 목표를 달성하기 위해 가정 및 산업전반의 수요 및 공급에 있어서 높은 전력화(electrification)가 요구되고 있어 전력에너지의 중요성 및 비중이 높아지고 있다. 이를 위해 국내 신재생에너지의 기술개발 고도화와 더불어 차세대 원자력기술의 산업전반에 걸친 확대 적용이 무엇보다 필요하고, 이를 위한 전력부문의 구체적인 정책방향 수립이 요구되고 있다.

건축물 해체계획서와 원자력시설 해체계획서의 화재방호요건 비교 Comparison of Fire Protection Criteria for Building Demolition Plan and Nuclear Power Plant Decommissioning Plan

이영승, 정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

원자력발전소를 영구정지한 후 원자력시설을 해체하기 위해서는 원자력안전위원회고시에 따라 최종 해체계획서를 작성하고 승인받아야 한다. 반면에 원자력발전소 건축물과 대비되는 일반 건축물의 해체를 하기 위해서는 국토교통부 고시에 따라 건축물해체계획서를 작성하고 해체대상 건축물의 규모에 따라 승인 또는 신고를 해야 한다. 즉 일반 건축물의 해체와 원자력이용시설의 해체는 방사성물질 측면, 해체기간 등의 차이가 있을 수 있으나 해체방법과 수단은 비슷하여 일반 건축물의 화재방호요건을 검토함으로써 추가로 원전해체에 적용할 화재방호 요건을 확인할 수 있을 것으로 판단하였다. 이를 위해 국토교통부고시에서 제시한 일반 건축물 해체계획서의 화재방호 적용요건과 원전 해체 시 작성해야 할 최종해체계획서의 화재방호요건을 비교검토하였다.

건축물관리법(국토교통부고시 제2022-1539호, 건축물 해체계획서의 작성 및 감리업무 등에 관한 기준)에는 건축물 해체사전준비로 인접 건축물 영향, 전기, 가스 등의 지하매설물에 있는 사회기반시설의 영향을 검토한 후 해체 대상건축물의 전기, 소방, 설비시스템의 설계도면을 확인하여 위치 및 상태를 파악하고 사전 차단조치를 통해 해체작업 중 감전 등의 안전사고를 방지하여야 한다. 또한, 해체시 안전관리를 위해 감리자는 화재 및 감전 위험작업 시 작업현장을 수시로 입회하여 지도·감독하여야 한다. 또한 건축물 해체 시에는 화재방지를 위한 소화기 운용 및 대피로계획을 요구하고 있다.

반면에 원자력안전법(원자력안전위원회고시 제 2021-10호 원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정)에는 화재방호계획에 대해 최종해체계획서에 기술하도록 요구하여 건축물 해체계획서보다 더 엄격히 요구하고 있다. 즉 원자력이용시설 해체과정에서 화재로 인한 방사성물질의 환경 누출 가능성을 최소화하기 위하여 화재 예방·감지 및 진화를 위한 화재방호계획을 수립해야 한다고 요구하고 있다.

건축물과 원자력이용시설간의 해체계획서 중 화재방호측면에서 가장 큰 차이는 방사성물질 방출 가능성을 최소화하기 위한 목적으로 일반 건축물 해체 시에는 고려하지 않아도 되지만 원자력이용시설에는 반드시 고려해야 한다. 또한 일반적으로 일반 건축물의 해체작업을 시행할 때 소요기간이 단기간(최대 약 6개월)이지만 원자력이용시설의 해체는 최소한 부지복원 때까지 10년 이상이 소요될 것으로 예상되기 때문에 해체 중에도 최대한 화재방호시설의 작동 가능성을 유지해야 하며 화재예방과 감지 및 진화를 고려해야 할 요소로 규정하고 있다.

지금까지 일반 건축물의 해체계획서와 원자력이용시설의 해체계획서의 화재방호측면에서 요구하는 규정을 확인하였으며 이를 통해서 원자력이용시설의 해체 시에는 방사성물질 누출 최소화 관점 외에도 일반 건축물 해체계획서에서 요구하는 내용을 확인하였으며 이를 통해 새롭게 시작하는 원자력발전소의 해체사업에 화재안전을 확보함으로써 해체사업의 성공을 기대해 본다.

새울3,4호기 시뮬레이터 공장인수시험을 통한 성능개선

Performance Improvement through the Factory Acceptance Test of the Simulator Saeul#3,4

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법 및 규제기관의 규제지침 요구에 따라 새울3,4호기 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2022년 12월 준공을 완료하였다. 한 기의 원전 시뮬레이터 개발을 위해서 개발 단계에 따라 성능 확인을 위한 시험이 요구된다. 본 논문은 새울3,4호기 시뮬레이터의 첫 성능시험인 공장인수시험 중 발생한 시뮬레이터 오류사항 및 오류사항 수정을 통한 시뮬레이터 개선내용을 기술하고자 본 주제를 선정하였다.

새울3,4호기 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2건의 용역을 통해 계통별 소프트웨어 개발을 진행한 후 소프트웨어 단위시험, 하드웨어 시스템과 통합 및 연계 작업을 완료하고 전체 시스템에 대한 공장인수시험을 착수하였다. 공장인수시험은 시뮬레이터 국제기준 ANSI/ANS-3.5-2009의 기준에 따라 작성된 시나리오 기반으로 진행하였으며, 원전 교육훈련부 교수를 포함하여 발전부 운전원 14명이 시험에 참여하였다. 2020년 8월부터 11월까지 약 4개월에 걸쳐서 진행된 공장인수시험의 시나리오는 공통, 정상, 비정상, 비상, 안정상태, 과도상태, 24시간 연속운전 시험으로 구분되며 크게 시뮬레이터의 거동 확인을 위한 기능적 충실도와 설계에 대한 형상 확인을 위한 물리적 충실도 두 가지 관점에서 평가하였다. 시나리오는 총 106건을 진행하였으며, 시험을 진행하면서 시뮬레이터 불일치보고서(DR, Discrepancy Report) 714건이 발행되었다. DR 분석 결과 시뮬레이터 화면 구현의 단순 오기/오타가 많은 부분을 차지했으며 제어로직, 속성, 구현 화면 내 기기 사이즈, 미표시, 설계, 시뮬레이터 거동 오류 등으로 구분되었다. DR은 설계문서 대비 시뮬레이터 구현에 차이가 있을때 발행되는 보고서로서 발행된 714건 중 설계오류 사항 233건은 DR에서 제외되었다. 최종 481건만 DR로 인정되어 시뮬레이터 수정작업을 진행하였으며 명확한 오타/오기, 제어로직, 속성값 변경 등 단순한 작업은 수월하게 진행할 수 있었으나 시뮬레이터의 거동 오류 등 고 난이도의 DR은 수차례에 걸친 Tunning 작업과 Tunning 후 거동 확인을 반복하는 고된 작업을 통해서 오류를 해소할 수 있었다. 시뮬레이터 전체 개발 공정 준수를 위해 최종 처리 완료된 DR 466건 미해결 DR 15건 상태에서 공장인수시험을 마무리 하였다. 미해결 DR 15건 이후 진행된 현장인수시험에서 해소할 수 있었다. 공장인수시험을 통해 시뮬레이터의 많은 부분이 수정되어 보다 충실도 높은 시뮬레이터로 개선될 수 있었다. 시뮬레이터의 품질 향상은 발전소 운전원 훈련의 질을 높이게 되며 최종 발전소 안전 운전에 기여할 것으로 판단된다.

서울3,4호기 시뮬레이터 물리적 충실도 확인 결과 Results of Physical Fidelity Check of the Saeul#3,4 Simulator

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한 기의 원전 시뮬레이터 개발을 위해 개발 단계에 따라 시뮬레이터의 성능을 확인하고 검증하기 위한 각종 성능시험이 요구된다. 성능시험을 통해 시뮬레이터의 기능과 물리적 형상을 확인하게 되며, 본 논문은 서울3,4호기 시뮬레이터의 개발과정에서 물리적 형상이 국제기준, 규제기관 규제지침과 설계에 만족하는지 그 확인한 결과를 기술하였다.

서울3,4호기 시뮬레이터는 국제기준 ANSI/ANS-3.5-2009 및 규제기관 규제지침 KINS/RG-N17.08을 기준을 적용하여 개발하였다. 시뮬레이터의 물리적 충실도 확인은 각 패널 및 대형정보표시반에 대한 규격, 사이즈, 색상 등은 하드웨어 납품 시 검수 결과 설계자료에 만족함을 확인하였으며, 운전화면 구현에 대한 충실도 확인은 현장인수시험 중 진행하였다. 현장인수시험은 원전 교육훈련부 교수를 포함하여 발전 운전원 15명이 참여하였으며 시뮬레이터 기준에 따라 작성된 총 115건의 시나리오를 기반으로 진행하였다. 이중 물리적 충실도 확인을 위한 시나리오는 'IPS MMIS 기능시험'을 포함한 11건의 시나리오가 해당되며 각 시나리오는 발전소 계통 및 화면의 물리적 구성으로 구분하였다. 구현 화면의 공통 확인 항목은 화면의 전환상태, 화면의 그래픽 상태, Soft Control의 그래픽 상태, Alarm의 그래픽 상태 등을 확인하며, 세부적으로 각 화면에서는 Symbol의 크기/색상, Label의 크기/색상, Alphanumeric data의 크기/색상, Graphic Display의 크기/색상, Display 할당/배치의 적절성, Mimic Line의 간격/굵기, Alarm의 우선순위/색상, 오타/오기, 미구현 등을 확인하였다. 확인 작업은 2주에 걸쳐서 진행됐으며 총 1800여건의 화면에 대해서 물리적 충실도를 확인하였다. 현장인수시험을 진행하면서 시뮬레이터 오류 사항으로 구분되는 불일치보고서(DR, Discrepancy Report)는 총 241건이 발행되었다. 발행된 DR 중 물리적 충실도에 관련되는 사항은 약 190건으로 구현 화면 내 오타/오기, 기기 사이즈, 기기 위치, 미표시, 글자 간격, 글자 겹침, 표현 누락, Mimic Line의 간격/굵기, 색상 불일치 등으로 확인되었다. 물리적 충실도를 만족시키기 위해 발행된 오류에 대한 수정작업을 진행하였으며 현장인수시험 중 확인된 약 190건의 오류 사항을 모두 처리할 수 있었다. 이로써 서울3,4호기 시뮬레이터는 시뮬레이터 개발자료 동결일(DFD, Data Freezing Date) 기준의 설계자료에 대해서 시뮬레이터 국제기준 및 규제기관 규제지침의 물리적 충실도를 만족함을 확인하였다.

새울3,4호기 시뮬레이터 설계변경 반영을 통한 최신설계 적용
Application of the Latest Design by Reflecting the Design Change of the
Simulator Saeul#3,4

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법 및 규제기관의 규제지침 요구에 따라 새울3,4호기 원자력발전소 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2022년 12월 준공을 완료하였다. 새울3,4호기 시뮬레이터는 건설 원전 시뮬레이터 최초 기준발전소의 설계변경사항을 반영하여 개발한 모델이다. 본 논문은 새울3,4호기 시뮬레이터에 설계변경사항을 반영한 내용에 대해 다루고자 한다.

원전 시뮬레이터를 기준발전소 운전원 교육훈련에 활용하기 위해 원전 건설 초기에 개발을 착수하고 기준발전소 핵연료 장전 1~2년 전에 개발을 완료하여 운전원 교육 및 면허시험에 활용한다. 시뮬레이터를 개발하는 기간에도 발전소 설계는 계속해서 변경되므로 시뮬레이터 개발을 위해 자료 동결 기준일을 정하고 그 시점에 발행된 발전소 설계자료까지 반영하여 개발하게 된다. 개발 완료 시점에서 기준발전소와 설계상 차이가 존재하는 부분에 대해서는 시뮬레이터 형상 관리를 위해 기준발전소의 상업 운전일 또는 시뮬레이터 준공일 중에서 더 늦은 날을 기준으로 18개월 이내에 발전소 설계변경사항을 시뮬레이터에 반영하게 된다. 하지만 새울3,4호기 시뮬레이터는 기준발전소인 새울3호기 1차 설계변경사항까지 시뮬레이터에 반영하여 개발을 완료하였다. 즉 1차 설계자료 동결일(2019. 7. 31) 기준 발행된 설계자료를 반영해 개발을 수행하고 이후 2차 설계자료 동결일(2021. 7. 15, 새울3호기 1차 설계변경사항 포함) 기준 발행된 설계자료를 추가로 반영해 시뮬레이터 개발을 완료한 것이다. 선행 개발한 건설 원전 시뮬레이터에 비해 약 2년 정도의 최신설계가 시뮬레이터 개발 단계에서 추가 반영된 것이다. 설계변경사항의 주요 내용은 운전화면, 계통도면, 제어로직도면, 제어계측도면 변경이 주된 내용이었으며 전체 1900여건의 변경사항을 시뮬레이터에 반영하게 되었다. 현장인수시험을 완료한 시뮬레이터에 대대적 변경작업이 진행되면서 원전 시뮬레이터 국제기준 ANSI/ANS-3.5-2009에 따라 추가 성능시험이 요구되어 설계변경사항 반영 작업 후 약 5주에 걸쳐 추가 성능시험을 수행하여 시뮬레이터 성능을 추가로 검증하였다. 시뮬레이터 개발공정에서 기준발전소의 설계변경사항을 반영하여 조금 더 최신설계가 반영된 시뮬레이터 개발을 완료하였으며 보다 충실도 높은 시뮬레이터로 개선될 수 있었다. 시뮬레이터는 새울3호기 1차 설계변경사항 반영이 완료되었지만 건설 원전 특성상 추가 설계변경사항은 지속 발생이 예상되며 이에 따라 시뮬레이터 형상관리를 위해 추가 설계변경사항은 지속적 관리 및 반영이 필요할 것으로 예상된다.

새울3,4호기 시뮬레이터 설계변경 반영 후 시험을 통한 성능검증 Performance Verification by Testing after Reflecting Design Change of the Simulator Saeul#3,4

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법 및 규제기관의 규제지침 요구에 따라 새울3,4호기 원자력발전소 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2022년 12월 준공을 완료하였다. 새울3,4호기 시뮬레이터는 건설 원전 시뮬레이터 최초 기준발전소의 설계변경사항을 반영하여 개발한 모델이다. 본 논문은 새울3,4호기 시뮬레이터에 설계변경사항을 반영한 후 성능시험을 통한 시뮬레이터 검증 내용을 기술하였다.

새울3,4호기 시뮬레이터는 기준발전소인 새울3호기 1차 설계변경사항까지 시뮬레이터에 반영하여 개발을 완료하였다. 원전 시뮬레이터 국제기준 ANSI/ANS-3.5-2009 및 규제기관 규제지침 KINS/RG-N17.08은 기준원전과의 유사성에 영향을 중 수 있는 모델 변경이나 개선 시 시뮬레이터를 성능을 입증할 수 있는 시험을 요구한다. 새울3,4호기 시뮬레이터는 현장인수시험 이후 기준발전소인 새울3호기의 1차 설계변경사항 약 1900여건을 추가 반영하였으며, 반영 후 시뮬레이터 성능을 입증하기 위해 5주에 걸친 성능시험을 진행하였다. 성능시험은 한국수력원자력(주) 중앙연구원의 원자로조종감독자(SRO, Supervisor Reactor Operator) 3명을 포함하여 연구원 5명이 참여하였다. 성능시험 방식은 시나리오 기반으로 진행하였으며 성능시험 시나리오는 ANSI/ANS-3.5-2009 기준을 적용하여 작성한 공통, 정상, 비정상, 비상, 과도상태, 안정상태, 24시간 연속운전, 원자로특성시험, 중대사고 시험으로 구분된 115건 중 설계변경 반영사항과 관련이 없는 공통, 원자로특성시험, 중대사고 시험 시나리오 18건을 제외한 97건을 선정하였다. 정상운전 시험은 100%에서 2%까지 출력감발 시험과 2%에서 고온대기까지 정지운전 및 RCS 배수 및 부분충수 운전 등 15건의 시험을 수행하였으며, 비정상 및 비상운전 시험은 증기발생기 튜브 파열, 원자로냉각제 상실, 가압기 살수밸브 고장열림, 충전 유량조절밸브 후단 누설, 재생열교환기 전단 충전유로 누설, 유출유로 누설, 유출유로 배압조절밸브 전단 누설 등 66건의 시험을 수행하였다. 과도상태 시험은 원자로 수동정지, 모든 주급수펌프 정지, 모든 MSIV 닫힘, 모든 RCP 정지, RCP 1대 정지, 터빈정지, 출력 최대율 감발 및 증발, 소외전원 상실을 동반한 대형 LOCA 등 11건의 시험을 수행하였으며, 안정상태 시험 4건 24시간 연속운전 시험 1건을 끝으로 시험을 완료하였다. 시험 중 발견된 시뮬레이터 오류 사항에 대한 수정은 Stand-by 서버에 설치된 시뮬레이터 소프트웨어를 이용하여 시험과 동시에 진행할 수 있었으며 시험이 완료된 시점에서 모두 해소할 수 있었다. 이로써 시뮬레이터는 설계변경 반영에 대해 최종 성능검증을 완료하였다.

새울3,4호기 시뮬레이터 하드웨어 및 네트워크 시스템 구현 Implementation of Hardware and Network System with Simulator for Saeul#3,4

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법 및 규제기관의 규제지침 요구에 따라 새울3,4호기 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2022년 12월 준공이 완료되었다. 본 논문은 새울3,4호기 시뮬레이터의 하드웨어 및 네트워크 시스템 구현에 대한 내용을 기술하였다.

원자력발전소 시뮬레이터의 하드웨어는 시뮬레이터 국제기준 ANSI/ANS-3.5 및 KINS/RG-N17.8에 따라 발전소와 동일한 형상으로 제작된다. 실제 발전소 주제어실을 제작하는데 사용되는 설계 도면이 대부분 적용되었으며, 시뮬레이터 건물 공간의 제약에 따라 정비시험반(Maintenance Test Panel)만 별도 제작 설치하였다. 시뮬레이터 시스템은 시뮬레이터 서버를 기준으로 MMIS 및 H/W 패널의 조작을 통해 시스템이 작동된다. 하드웨어 패널은 LDP, 운전원 콘솔(RO, TO, EO, SS, STA), 안전제어반, 원격제어반, 정비시험반 패널로 구성되며 각 패널의 스위치, 지시계, 제어기, 스피커 등은 I/O 시스템으로 연결되어 2대의 Main PC에 의해 제어된다. 하드웨어 Main PC와 시뮬레이터 소프트웨어를 제어하는 환경 프로그램(3Key-Master)이 설치된 서버와는 TCP/IP 방식의 데이터 통신이 사용되었다. 소프트웨어 시스템은 모의제어반 S/W 프로그램인 3Key-Master를 통한 조작, MMIS 프로그램을 통한 조작, 강사조작반 조작에 따라 작동된다. MMIS는 LDP, 운전원 콘솔의 IPS, 기타계통(AID), QIAS-N/P로 구성하였으며 각각의 콘솔에는 운전조작이 가능한 MMIS 프로그램이 설치되었다. 안전제어반은 QIAS-N/P, QIAS-N Mini-LDP, MARK-VIe, EXCITER, OM(PPS, RCOPS, ESF-CCS)으로 구성하였다. 원격제어반은 운전원 콘솔(RO, TO)의 IPS 및 기타계통(AID), ALARM, QIAS-N Mini-LDP로 구성하였다. 정비시험반은 채널별 4개의 캐비넷으로, 4면을 이용한 PPS (A/B/C/D), RCOPS(A/B/C/D), ESF-CCS(A/B/C/D), QIAS-P(A/B) 계통으로 나뉘어 구성하였으며, 각 패널에 대해 MMIS 프로그램이 설치되어 있다. 시뮬레이터 컴퓨터 및 디스플레이 환경은 서버로부터의 정보를 LDP Panel, 운전원 콘솔, 안전제어반, 정비시험반(MTP)과 강사조작반으로 송/수신할 수 있게 구성하였다. 서버는 Host와 Standby로 구분되며, Host 서버 고장 및 점검 시 Standby 서버를 통하여 모의제어반 운영이 가능하도록 구성하였다. 선행 시뮬레이터와 차이점은 하드웨어 I/O 제어 프로그램의 개선으로 스위치, 지시계, 제어기, 스피커 등의 변수 삭제, 추가, 변경 등이 개선되었으며, 유지보수 편의성을 증가시켰다. 총 2,772 포인트에 대한 입출력 시스템 동작 확인시험을 수행하여 기능을 확인하였으며, 두 차례에 걸친 통합시스템검증을 통해 ANSI/ANS-3.5 및 KINS/RG-N17.8에 만족함이 검증되었다.

새울3,4호기 시뮬레이터 현장인수시험을 통한 성능개선 Performance Improvement through the Site Acceptance Test of the Simulator Saeul#3,4

이주열*

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한 기의 원전 시뮬레이터 개발을 위해 개발 단계에 따라 성능 확인을 위한 각종 시험이 요구된다. 본 논문은 새울3,4호기 시뮬레이터를 현장 교육훈련부에 최종 설치 후 수행한 첫 성능시험인 현장인수시험에 대해 다루고 있으며 시험 중 발생한 시뮬레이터 오류사항 및 이의 수정을 통한 시뮬레이터 개선내용을 기술하였다.

새울3,4호기 시뮬레이터는 2018년 4월 개발을 착수하여 2건의 용역을 통해 계통별 소프트웨어 개발을 완료한 후 소프트웨어 단위시험, 소프트웨어 및 하드웨어 통합, 공장인수시험(FAT, Factory Acceptance Test)을 2020년 11월 완료하였다. 이후 전체 시뮬레이터 시스템을 최종 설치장소인 새울3,4호기 교육훈련부로 이전 설치하여 2021년 6월 현장인수시험(SAT, Site Acceptance Test)을 완료하였다. 현장인수시험은 시뮬레이터 국제기준 ANSI/ANS-3.5-2009의 기준에 따라 작성한 시나리오 기반으로 진행하였으며, 원전 교육훈련부 교수를 포함하여 발전 운전원 15명이 시험에 참여하였다. 2021년 2월부터 6월까지 약 5개월에 걸쳐 진행된 현장인수시험의 시나리오는 공통, 정상, 비정상, 비상, 안정상태, 과도상태, 24시간 연속운전, 중대사고 시험으로 구분되며, 크게 시뮬레이터 거동 확인을 위한 기능적 충실도와 설계에 대한 형상 확인을 위한 물리적 충실도 두 가지 관점에서 평가하였다. 시나리오는 총 115건을 진행하였으며, 시험을 진행하면서 시뮬레이터 불일치보고서(DR, Discrepancy Report) 241건이 발행되었다. DR 분석 결과 시뮬레이터 화면 구현의 단순 오기/오타가 대부분을 차지했으며 제어로직, 속성, 구현 화면 내 기기 사이즈, 미표시, 설계, 시뮬레이터 거동 오류 등으로 구분되었다. DR은 설계문서 대비 시뮬레이터 구현에 차이가 발견되면 발행되는 보고서로서 발행된 241건 중 설계오류 사항 75건은 DR에서 제외되었다. 최종 166건만 DR로 인정하여 시뮬레이터 수정작업을 행하였으며 명확한 속성값 변경, 제어로직 오류, 오타/오기, 미표시 등 단순한 작업은 수월하게 진행할 수 있었으나, 시뮬레이터 거동 오류 등 고난이도의 DR은 수차례에 걸친 수정 작업과 수정 후 거동 확인을 반복하며 DR을 해소할 수 있었다. 현장인수시험 기간 중 수정 처리한 DR은 162건이며 미해결 DR 4건인 상태에서 시험을 종료하였다. 미해결 DR 4건은 이후 용역 A/S 기간 중 처리할 예정이다. 주요 변수에 대한 트렌드는 공장인수시험 결과보다 부드러운 거동을 확인할 수 있었다. 약 5개월간 진행된 현장인수시험을 통해 시뮬레이터의 많은 부분이 수정되어 보다 충실도 높은 시뮬레이터로 개선될 수 있었다. 이는 시뮬레이터 품질 향상으로 이어지며, 운전원 교육훈련의 질 향상에 기여할 것으로 생각된다.

원자력규제기관의 업무 품질관리 방안에 대한 연구

장재영

한국원자력통제기술원

A Study on performance quality management measures of nuclear regulatory authority

Nuclear Regulation in Korea is conducted by the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). The area requiring expertise are delegated to the Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) and the Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control (KINAC), under the jurisdiction of NSSC, to carry out the regulatory activities. As these activities directly impact nuclear operators and the entire nuclear industry, they must be conducted fairly and objectively. Moreover, recent policy trends have focused on improving the efficiency and quality of work in public institutions, leading to research on enhancing the overall regulatory quality. Building on previous studies, we conducted a case study on the quality management system of KINS, a regulatory expert organization with characteristics similar to KINAC. Based on the derived institutional quality requirements, we developed practical ways to improve quality in each area. Among them, we analyzed the effectiveness of plagiarism detection programs introduced as a fundamental quality management strategy for work products arising from regulatory activities and R&D, and proposed a systematic approach for its implementation. Additionally, we researched the methodology for establishing a reporting system for internal core business management and managing outsourced projects for external clients. We redefined critical concepts in quality management system establishments such as traceability, transparency, retrievability, reproducibility, and reliability, tailored to the institution's duties, and established 18 specialized quality requirements. Based on this study, we will set a continuous IQC-EQA-TQM quality management system to ultimately improve the quality of regulatory work.

원자력통제 관련 법령 체계 개선에 관한 연구

장재영 · 형상철

한국원자력통제기술원

A Study on Improvement of the Legal System Related the Nuclear Control

Currently, various legal frameworks related to nuclear control, including the Nuclear Safety Act, the Foreign Trade Act, and the Act on Physical Protection and Radiological Emergency, have been established. However, there have been several legal issues that have arisen in the process. Previous studies have suggested the need for a comprehensive law encompassing both nuclear control and radiation protection or the division of these two areas for legal regulation, etc. Nonetheless, due to various problems, substantial revisions have not been made.

In this study, we conducted a case study on the issues raised in the aforementioned nuclear control legislation, with a particular focus on the research conducted by KINAC (Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control) using both internal and external resources. Based on this result, we propose a direction of improvement in legal revision that allows nuclear regulation to proceed appropriately following the current situation where next-generation nuclear power plants such as Small Modular Reactor (SMR) are emerging.

원자력발전소 화재위험도분석 다중오동작 분석 프로세스

An Analysis Process for Multiple Spurious Operation in Fire Hazard Analysis of Nuclear Power Plants

정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

다중오동작(이하 MSO)이란 화재 시 복사열에 의해 케이블에 통전단락 등의 고장이 발생하여 안전정지 관련 기기가 하나 또는 다수의 오동작으로 기능을 상실하는 것을 의미한다. 미국 규제기관은 2009년 R.G 1.189 Rev.2 발행 이후 6개월 내에 MSO 불만족사항을 도출하고 조치 계획을 수립, 3년 내에 MSO 불만족사항 조치를 완료할 것을 요구하였다. 국내의 경우에도 고시의 개정을 통해 MSO 분석을 요구하고 있다.

MSO 분석을 수행하기 위해서는 첫 번째 단계로 MSO 시나리오 검토를 수행하여야 한다. 화재안전정지분석에 대한 지침 NEI 00-01에 포함된 Generic MSO 시나리오를 기반으로 분석하고자 하는 발전에 적용이 가능한지 확인함과 동시에 발전소의 고유 MSO 시나리오를 도출한다. 이 때에는 여러 분야의 지식과 운전경험이 필요하기 때문에 화재방호, 전기, PSA 및 운전원 등 Expert Panel을 구성하여 MSO 시나리오 적용성을 평가하여야 한다. MSO 적용 시나리오를 도출한 후 고장수목을 이용하여 기기조합을 만든다. 각 기기의 제어 및 전원 케이블 중에서 회로분석을 통해 오동작을 발생시킬 수 있는 케이블을 선정한다. 선정된 케이블과 기기조합을 고려하여 방화지역 분석을 통해 격리요건을 만족하는지 검토하고 해결방안을 제시한다. 일반적으로 고온정지 필수기기는 케이블 재배치, 재설계, 내화방벽으로 격리 및 화재방호체로 해결하고 안전정지 중요기기의 경우 운전원수동조치, 화재모델링, 화재PSA의 방법을 통해 해결한다.

현재 국내 원전에서는 화재위험도분석 주기 도래시 MSO 분석을 수행하고 있다. MSO 분석시 발전소 고유의 현황을 반영하고 명확한 방법론을 근거로 분석을 수행하면 일관적인 분석이 가능함과 동시에 화재안전성을 크게 증진시킬 수 있을 것이다.

화재비정상운전절차서 운전원수동조치 현장검증 방법

On-site Verification Method for Operator Manual Action of Fire Abnormal Operation Procedure

정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

다중오동작이란 화재 시 복사열에 의해 케이블에 단락 등의 고장이 발생하여 안전정지 관련 기기가 하나 또는 다수의 오동작으로 기능을 상실하는 것을 의미한다. 미국원자력규제위원회는 안전정지 중요기기의 경우 다중오동작의 해결방안으로 운전원수동조치를 인정하고 있으며 NUREG-1852 Demonstrating the Feasibility and Reliability of Operator Manual Actions in Response to Fire를 통해 운전원수동조치가 이행가능한지 확인하고 있다.

NUREG-1852는 작업수행 시간 및 그 신뢰도, 환경적 요인, 장비, 계기 및 계측기, 통신, 개인보호 장구, 절차서 및 훈련, 가용인원 등에 대해 전반적으로 고려하는 것을 요구하고 있으며 최종적으로는 현장검증을 통해 화재비정상운전절차서에 기술된 운전원수동조치가 실제로 수행가능함을 확인하여야 한다. 즉, 운전원수동조치의 제한시간이 운전원이 수행하는 진단시간, 실행시간, 여유시간의 합보다 클 경우 운전원수동조치가 수행가능하다고 할 수 있다. 현장검증 시 운전원수동조치를 수행할 경우 소요되는 시간을 가능한한 모두 측정할 필요가 있으며 실제로 시연할 수 없는 경우 운전원 면담 등 다른 방법으로 조사를 수행한다. 운전원수동조치 수행시 가장 많은 시간이 소요되는 것이 이동시간이므로 운전원사무실부터 운전원수동조치를 수행하는 장소까지 실제로 운전원이 이동하는 시간을 측정하는 것이 필요하다. 이동시 화재로 인한 온도나 연기의 영향, 관리구역, 조명 등 환경적 요인이 이동시간을 지연시키는 않는지 검토한다. 이외에 보호장비, 관리구역 작업복, 방호복 등의 착용시간 또한 실행시간에 영향을 주는 인자이므로 측정을 통하여 확정한다. 실제 운영중인 발전소에서 현장검증을 수행하기 때문에 기기를 직접 조작하는 것에 한계가 있다. 차단기 개방이나 밸브 조작 등 운전원수동조치를 수행할 수 없을 경우 운전원 면담을 통해 시간을 확정할 수 있다. NUREG-1852에서는 일반적으로 주제어실에 보고하는 시간은 1분, 차단기 개방은 3분, 밸브조작은 4분으로 제시하고 있으나 운전원 면담을 통해 적절성에 대한 확인이 필요하다. 현장검증시 운전원이 사용해야 하는 장비가 갖추어져 있는지 확인하고 구비하도록 해야한다.

현장검증을 통해 운전원수동조치의 진단시간, 실행시간 및 여유시간이 확정가능하며 이것이 제한시간 이내임을 확인하였을 경우 현장검증을 통한 운전원수동조치 이행가능성을 확인하였다고 할 수 있다. 만약 제한시간을 초과하였을 경우 새로운 운전원수동조치를 도출하여야 하며 그것에 대한 현장검증을 재수행해야 한다.

표준형 원전에 대한 고리1호기 해체원전 화재위험도분석 개정방안의 적용성 검토

A Study on the Application for Fire Hazard Analysis Revision Method of
OPR1000 in comparison to Decommissioning Kori Unit 1

정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

원자력안전위원회 고시 제2020-8호 원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정에 따라 최종해체계획서 11장에 화재방호 분야를 포함하여야 하며 원자력이용시설 해체과정에서 화재로 인한 방사성물질의 환경 누출 가능성을 최소화하기 위하여 화재·감지 및 진화를 위한 화재방호계획을 수립하는 것을 요구하고 있다. 이에 한국수력원자력은 영구정지 중인 발전소를 대상으로 화재위험도분석 개정방안을 개발하였고 추후 해체될 표준형 원전에도 적용가능한지 확인하였다. 국내 원자력발전소는 건설 시점에 따라 적용되는 설계 기술기준 적용시점이 다르고 노형 별로 각 나라의 기준을 참조하므로 현재 영구정지된 원전을 대상으로 개발된 화재위험도분석 개정방안이 각 노형별로 개발될 화재위험도분석에 적용될 수 있는지 비교·검토할 필요가 있다.

원자력안전위원회 고시 2018-9호 화재위험도분석에 관한 기술기준은 화재방호구역의 구분, 가연성물질의 종류 및 크기, 화재위험성 평가, 소방시설, 설계기준화재의 범주, 방사성물질 유출방지 능력에 대해 화재위험도분석보고서를 작성하도록 요구하고 있으므로 해당 항목을 기준으로 고리1호기에서 개발한 화재위험도분석 개정방안이 표준형 원전의 화재위험도분석에 적용가능한지 검토하였다. 화재방호구역 변경 검토 방법을 통해 화재방호구역의 추적관리가 가능하였고 각 화재방호구역별 내화심각도를 확인하는 화재재해분석도 기존과 동일한 방법론으로 관리할 수 있다. 기술기준에 따라 설치된 화재방호시설은 해체 단계별로 방호대상물의 유무, 점화원 및 가연성물질의 화재심각도에 따라 철거 및 이설이 가능하다. 방사성물질의 유출방지 능력은 기체·액체폐기물, 공기조화계통의 기능 및 구조물의 건전성 평가를 통해 확인할 수 있다.

표준형 원전의 경우 BTP CMEB 9.5-1 및 NFPA 등에 따라 설계되었고 고리1호기 역시 동일한 기술기준 및 미국 규정에 근간을 두었기 때문에 차이점이 거의 없으며 화재위험도분석을 개정하는 방안이 각 내용을 포괄하고 있기 때문에 고리1호기 기준으로 작성된 화재위험도분석 개정방안은 표준형 원전에 확대적용이 가능할 것으로 판단된다.

WH형 원전 기기냉각해수계통에 대한 다중오동작 시나리오 적용 검토 Application of Multiple Spurious Operation Scenario for Essential Service Water System of Westinghouse Nuclear Power Plants

정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

다중오동작(이하 MSO)이란 화재 시 복사열에 의해 단락, 지락 등 케이블 고장이 발생하여 동시에 하나 또는 다수의 안전정지기기가 상실되는 것이다. 다중오동작이 발생하여 발전소의 기기가 원하지 않는 방향으로 동작이 되어도 안전정지에 영향이 없도록 분석하고 사전에 조치를 취해야 한다. 국내 원전은 NEI 00-01 Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Analysis의 방법론으로 다중오동작분석을 수행하고 있으며 부록 G를 기반으로 일반적인 다중오동작 시나리오 적용을 검토한다.

적용 시나리오로 선정되면 논리도, 단선도, 배선도 등을 검토하여 영향을 미치는 케이블을 선정하고 Hot short 등 화재로 인한 케이블 영향을 Hot Probe 방법을 통해 분석한다. 영향이 있는 케이블의 루트를 파악하고 방화지역분석을 수행하여 고온정지 필수기기의 경우 설계변경 등 물리적인 방법, 안전정지 중요기기에 대해서는 운전원 수동조치 및 화재모델링 등의 방법을 이용하여 해결하여야 한다. 시나리오에서 제외된다면 회로 및 방화지역 분석을 수행하지 않아도 될 뿐만 아니라 해결책 역시 제시하지 않아도 되어 분석을 위한 여러 스텝을 거치지 않아도 되어 효율적이다. 따라서, 다중오동작 시나리오에 대한 면밀한 검토가 수행되어야 한다.

본 논문에서는 기기냉각해수계통(이하 ESW)과 관련된 시나리오 중 44번, 45번에 대한 시나리오 적용성을 검토하였다. 44번은 오동작으로 인해 기기냉각수 열교환기, 비상디젤발전기 냉각 등에 ESW가 공급되지 않는 시나리오이다. NEI 00-01에서는 ESW의 차단으로 인해 양측의 비상디젤발전기가 냉각이 되지 않는 경우를 예를 들고 있다. 45번 시나리오는 오동작으로 인해 안전정지기기의 냉각수가 전환되어 비안전정지기기에 공급되어 안전정지기기에 영향을 미치는 경우이다. NEI 00-01에서는 전기적 신호 등에 의해 유로가 우회되는 경우에 대해 제시하고 있다. WH형 원전은 ESW가 연결되어 열교환이 이루어지는 유로에는 모두 수동밸브만이 존재하고 있고 비안전정지기기와 연결되는 유로는 존재하지 않아 44번, 45번 시나리오 검토결과 두 가지 시나리오 모두 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

해체원전 절단공정 화재위험성 및 관리방안 Fire Risk Mangement for Cutting Process of Decommissioning Nuclear Power Plants

정해영

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

원전의 구조물, 계통 및 기기가 오랜 기간 방사화되거나 제염의 효과가 없는 경우 재활용할 수 없으므로 각 방사선 준위에 맞게 폐기물 처리를 해야한다. 방사성 폐기물 드럼이 많아질수록 처리 비용은 증가하고 추후 해체될 원전까지 고려하였을 경우 방사성폐기물 처분장의 용량을 고려하여야 하기 때문에 방사성 폐기물 드럼의 수량을 줄이는 것이 필요하다. 절단공정은 자르거나 베어서 끊어내는 작업단계로 오염된 설비를 제거하거나 부피를 축소하기 위해 사용된다. 절단이 많이 이루어질수록 같은 크기의 드럼에 처분할 수 있는 폐기물의 양이 많아지기 때문에 해체 중 절단공정은 아주 잦은 빈도로 수행될 예정이다.

화재위험성은 빈도와 심각도의 함수로 심각도는 해체가 진행될수록 가연물이 제거되어 점차 낮아지나 절단과 같은 점화원을 유발하는 작업의 빈도가 증가하므로 화재안전성을 확보하기 위해서는 점화원 유발작업을 관리하여야 한다. 화재는 점화원, 가연물, 산소가 동시에 존재할 때 발생하므로 이 중 하나 이상의 요소를 제어하여 화재를 예방할 수 있다. 가연성물질이 존재하는 장소에서의 절단 등의 작업은 화재·폭발 위험이 높은 작업으로 화재예방조치가 필요하다. 주변에 가연성 물질이 존재하지 않더라도 고온의 불꽃, 불티가 비산하여 화재를 일으킬 수 있다. 비산불티는 1,600℃ 이상의 고온체로 절단, 용접작업시 수천개의 불티를 발생시키고 절단속도 및 방향에 따라 비산불티의 양과 크기가 달라질 수 있기 때문에 주의가 필요하다. 절단수행 전 불티를 발생하지 않는 유압전단기, 공압식 쇠톱, 연마입자 워터제트 절단 등 저온절단법이 적용가능한지 검토하고 적용한다. 작업조건, 작업장소 주변에 인화성, 가연성 물질을 파악하고 위험성 평가 및 화재안전 작업허가를 통해 작업전 위험요인을 제거하고 방염시트 등으로 방호조치 수행한다. 작업장소에 근접하여 다른 작업을 하거나 통행하는 근로자의 위험을 예방하기 위해 작업구역 설정하고 출입통제용 안전울타리 및 화기작업 경고표지 설치가 필요하다. 화재에 대처하기 위한 화재감시인을 배치하고 화재시 조치방안 및 대피방법을 교육하고 취급되는 물질 및 작업에 필요한 설비 및 구조물 정보에 대한 교육을 실시하도록 한다.

국내 최초로 원자력발전소의 해체를 수행하기 때문에 각 공정별 화재예방을 위한 사전검토와 철저한 준비로 화재를 예방하여야 한다. 본 논문은 예방측면에서 절단공정의 화재위험성을 검토하였고 전술한 방법으로 원자력발전소 화재안전성을 크게 증진시킬 수 있을 것이다.

리스크 정보를 활용한 정비 및 시험 스케줄 관리 최적화 연구

A Study on Optimizing Maintenance & Test Schedule Using Risk Informed at Nuclear Power Plant

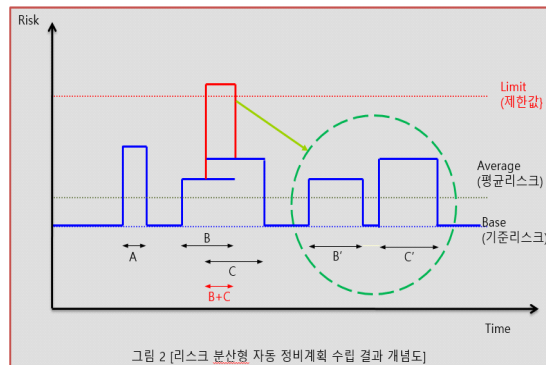
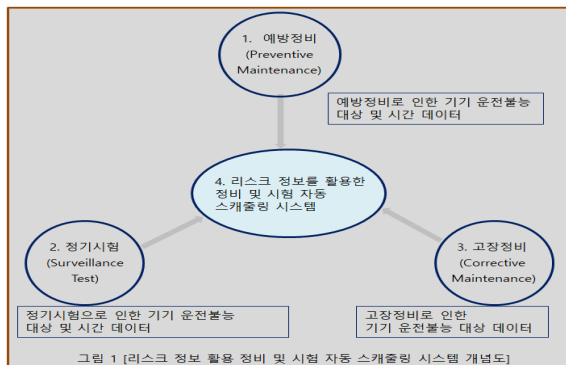
조경수 · 이영주 · 김정운

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 설비의 건전성을 확보하기 위해 설비고장전 예방정비(Preventive Maintenance), 고장이 발생한 이후 정비를 위한 고장정비(Corrective Maintenance) 및 설비 성능상태를 보증하기 위한 정기시험(Surveillance Test)을 수행하고 있다. 이러한 예방정비, 고장정비 및 정기시험 일정을 수립할 때 각 부서별 담당자가 발전소 안전성에 영향을 주는 전체 리스크를 파악할 필요가 있다. 리스크를 반영하여 일정을 수립함으로써 발전소 리스크 분배 및 자원을 효과적으로 활용할 수 있다. 따라서 리스크정보를 활용한 정비를 위해 정비 및 시험으로 인한 운전불능 기기 및 시간을 입력하면 자동으로 발전소 리스크를 평가하여 최적 작업시점을 제시하는 스케줄링 자동화 적용방안 연구가 필요하다.

리스크 정보를 활용한 정비 및 시험 자동 스케줄링 시스템에 대한 개념도는 그림1과 같다. ①예방정비(Preventive Maintenance), ②정기시험(Surveillance Test) 및 ③고장정비(Corrective Maintenance) 수행을 위해서 기기 운전불능상태가 된 대상기기 및 예상 불능시간 데이터는 ④리스크 정보를 활용한 정비 및 시험 자동 스케줄링 시스템에 등록된다. 정비 및 시험대상 기기정보 데이터를 기반으로 발전소 리스크평가프로그램을 활용하여 리스크를 평가한 후 발전소 리스크가 어는 특정기간에 집중되지 않도록 리스크 리밸런싱을 수행한다. 그림 2에 도시한바와 같이 정비작업 A, B, C를 수행하기 위해 리스크를 평가한 결과 정비작업 B와 C가 일부 중첩되어 리스크가 기준치를 초과한 경우 리스크를 분산하기 위해 자동으로 정비작업 일정 B와 C를 분리하여 스케줄링 하도록 한다.

이와같이 정비 및 시험에 따른 발전소 리스크 평가 후 최적 작업시점 정보를 활용하여 정비 및 시험담당자는 일정을 조율할 수 있으며, 스케줄러(Scheduler)는 단기계획 뿐만 아니라 중장기 계획을 미리 수립할 수 있어 발전소를 안전하고 예측가능한 상태로 운영할 수 있다. 향후 국내원전 가동중정비 적용시 발전소 최적 리스크 관리를 통해 정비계획을 자동으로 수립하여 발전소 안전운전에 기여할 수 있다.



원자력 안전·안보 연계 관점에서 U.S. NRC와 NFPA code 상충점 분석

차지환 · 최선도*

한국원자력통제기술원 물리적방호실*

Analysis of Conflict Point of U.S. NRC and NFPA Code for Nuclear Safety and Security Interface Perspective

One potential conflict point between the National Fire Protection Association (NFPA) codes and nuclear security regulations is that NFPA codes are primarily concerned with fire safety and may not always take into account the unique security considerations of nuclear facilities. This can create a tension between the need to maintain a safe and secure facility and the need to comply with fire safety regulations.

For example, NFPA 805, the Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants, allows for certain fire protection measures that may be in conflict with the security requirements of Nuclear Regulatory Commission (NRC) regulations. Specifically, the standard allows for fire barriers to be breached in order to install security features such as cameras or access control measures. However, NRC regulations require that fire barriers be maintained in order to prevent the spread of fire and smoke.

In such cases, facility operators must carefully balance the competing requirements of fire safety and security to ensure that the facility remains both safe and secure. This may require a case-by-case analysis and the development of tailored solutions that take into account the unique characteristics of the facility and the specific risks it faces.

The National Fire Protection Association (NFPA) develops and publishes a wide range of codes and standards related to fire protection and life safety. These codes and standards are widely adopted by regulatory authorities, including the Nuclear Regulatory Commission (NRC), and are used by many nuclear facilities in the United States to help ensure safe and effective fire protection.

In addition to NFPA 805, nuclear facilities may also use other NFPA codes and standards related to topics such as emergency response, hazardous materials management, and electrical safety. While compliance with NFPA codes and standards is not explicitly required by the NRC, these codes and standards are often used as a benchmark for evaluating the adequacy of fire protection measures at nuclear facilities.

Overall, the relationship between NFPA and nuclear facilities is one of collaboration and mutual reliance, with NFPA providing guidance and standards to help ensure the safe and effective operation of these critical facilities.

Corrugated 미니 채널 인쇄기판형 증기발생기의 단상 압력강하 실험

황보원 · 이재영

한동대학교 기계제어공학과,

Experimental Study of Single Phase Pressure Drop of Corrugated Mini Channel Printed Circuit Heat Exchanger

인쇄기판형 증기발생기에 대한 최근 연구는 설계 최적화 및 재료 선택을 통해 성능을 향상시키는 데 초점을 맞추고 있습니다. 탄소 섬유 강화 폴리머가 인쇄 회로 기판의 새로운 재료로 개발되어 열전도율과 강도를 높였습니다. 인쇄기판형 증기발생기에서 열 전달 효율을 향상시키기 위해 나노 유체의 적용을 연구하거나 다양한 형상에 대하여 설계 최적화하기 위해 전산 유체 역학(CFD) 시뮬레이션이 사용되고 있습니다.

Corrugated 형상의 인쇄기판형 증기발생기 채널을 설계했습니다. 2개의 판에 지그재그 형상의 유로를 새긴 후 대칭성을 이용해 겹쳐지는 형상이며, 채널의 형상을 통해 유체의 강제 혼합을 유도했습니다. 이는 높은 열전달 계수를 기대할 수 있으며 채널 사이의 판에 의해 인쇄기판형 증기발생기의 제작과정 중 접촉면적 40%이상 조건을 만족시키는데 장점이 있습니다.

증기발생기로 사용하기 위한 이상유동 영역의 검증 실험 전에 단상유동에서의 압력강하 특성을 파악했습니다. 혼합부의 길이(5mm, 15mm)가 다른 2개의 실험관을 통해 단상유동 경향성을 파악했습니다. 또한 널리 알려진 파이프 관내에서의 단상 압력강하 마찰계수와 비교했습니다. 차압계를 사용해 압력강하를 측정했으며 차압계의 고압포트는 입구로부터 400mm 높이에 위치하여 수력 직경보다 100배 이상 차이 나는 위치로써 완전발달영역이라고 가정할 수 있습니다. 저압포트는 입구보다 1400mm 높이에 위치하여 총 1000mm에 해당하는 차압을 측정했습니다.

실험결과 5mm 혼합부 실험관의 경우 $f_5 = 3.547 \times Re_5^{-0.4264}$, 15mm 혼합부 실험관은 $f_{15} = 4.975 \times Re_{15}^{-0.485}$ 의 결과를 확인했습니다. 동일한 길이 내에서 5mm 혼합부 실험관의 판이 더욱 밀도있게 배치되어 있으므로 높은 마찰계수를 가지는 것이 타당하며 실험으로 확인할 수 있었습니다. 또한 $f = 64/Re$ 의 파이프 내 유동보다 마찰계수가 큰 값을 가짐을 확인했습니다. 실험관의 반복되는 혼합 구조로 인해 실험영역($Re_5=407\sim4025$, $Re_{15}=414\sim4216$) 내에서는 층류 영역을 확인할 수 없었습니다.

본 연구에서 실험한 5mm, 15mm 외에 혼합부 판의 길이를 달리한 추가적인 실험을 통해 혼합영역의 길이에 따른 corrugated 형상에서의 단상 압력강하 특성 관계식을 도출할 예정입니다.

사사문구

이 논문 또는 저서는 한국수력원자력(주)의 지원으로 수행된 연구임. (2021)

5G 기반 중소 제조 공장 에너지 데이터 관리 시스템 기술

5G -based small and medium-sized manufacturing factory energy data management system technology

박태욱 · 윤만석*

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

본 논문에서는 중소 제조 공장에서 사용될 수 있는 5G 기반 에너지 데이터 관리 시스템에 대한 설계와 구현에 대해 다룬다. 이를 위해, 5G 네트워크 기반으로 지능화된 알고리즘을 통해 전력 사용량 데이터를 수집, 분석하고, 전력 사용량 최적화 및 에너지 비용 절감을 위한 시스템을 제안한다. 5G 기반 에너지 데이터 관리 시스템은 5G 네트워크를 기반으로 한 IoT 기술을 활용하여 제조 공장 내부의 센서와 장비 등을 고정밀 전력 측정 장비와 연동하여 전력 사용량 데이터를 수집한다. 또한, 에너지 플랫폼을 활용하여 수집된 데이터의 저장, 분석, 처리하는 것을 통해 에너지 효율성을 개선하고 에너지 비용을 절감할 수 있도록 지원하는 것을 목표로 한다. 수집되는 모든 데이터는 클라우드 플랫폼에 저장되며, 데이터 분석·처리를 위해 사용된다. 빅데이터 분석, 인공지능, 기계 학습 및 예측 모델링 기술을 활용하여 에너지 사용 패턴을 파악하고, 에너지 효율성을 개선하는 전략 수립이 가능하다. 이를 통해 사용자는 실시간으로 에너지 사용 패턴, 에너지 사용에 대한 정보 시각화, 전력 사용량 데이터 등을 모니터링 할 수 있으며, 관리자가 보다 효율적으로 에너지를 관리하여 전력 사용량을 최적화할 수 있다. 또한, 최근 이슈가 되고 있는 탄소 배출량 감축에도 도움을 줄 수 있다. 개인 또는 단체가 직 간접적으로 발생시키는 온실 기체의 총량을 의미하는 ‘탄소 발자국’이라는 지표를 통해 에너지 관리를 넘어 RE100 캠페인에 동참할 수 있을 것이다. 탄소 발자국을 구하는 공식은 아래와 같다.

$$\text{탄소 발자국} = (\text{총 에너지 소비량} \times \text{배출계수}) / \text{생산량}$$

에너지 데이터를 관리하며, 관련 지표들을 정리해나가면 ESG 경영을 넘어 탄소배출 관련 규제에 대한 대응일 수될해질 전망이다.

마지막으로 시스템의 성능을 검증하기 위해 중소 규모의 제조 공장에서의 실험 결과, 정확하고 효율적으로 전력 사용량 데이터를 실시간으로 수집·분석하여 에너지 사용패턴을 파악할 수 있는 것을 확인하였다.



<그림 1> 에너지 데이터 관리 시스템 기본 구성

본 논문에서는 5G 기술을 이용한 에너지 데이터 관리 시스템이 중소 규모의 제조 공장에서도 적용 가능하며, 이를 통해 에너지 사용량을 효율적으로 관리하고, 비용을 절감할 수 있음을 보여준다. 본 시스템은 중소 규모의 제조업체가 지속 가능한 생산을 위해 중요한 역할을 할 수 있으며, 지속 가능한 산업 생태계를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

중수로 원전 중성자 활용방안 및 타당성 검토

박동환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Feasibility Study on the Neutron Application of CANDU Reactor

Donghwan Park

KHNP Central Research Institute

기존 산업용 및 의료용 방사성동위원소 생산은 연구용 원자로와 가속기를 이용하여 생산하였다. 한편, 방사선 진단 및 치료기기, 의료용 동위원소 및 방사성의약품 시장은 전체 방사선 시장에서 70% 이상을 차지하고 있으며 2030년에는 80% 이상을 차지할 정도로 급속한 성장을 할 것으로 전망되고 있다. 이에 연구용원자로 및 가속기외에도 상용원전을 활용한 방사성동위원소 생산이 증가하고 있다.

캐나다의 경우 최근 상용원전을 활용하여 의료용 동위원소인 Mo-99, Lu-177을 규제기관의 인허가를 득하여 상용생산을 시작하였으며, 산업용 동위원소인 Co-60을 지속적으로 생산하고 있다. 중수로 원전의 노심은 고온고압에서 운영되는 경수로형 원전과는 달리 연료가 장전되는 냉각재가 연료채널을 통하여 감속재와 분리되어있다. 감속재는 저온 상압에서 운전되기 때문에 동위원소 표적 조사를 위한 장비의 운용이 경수로에 비해서는 자유롭다. 출력운전 중 높은 중성자속 준위와 운전 중 접근이 가능한 장점을 활용하여 세계 각국의 중수로 운영회사에서는 다양한 방사성동위원소를 생산하고 있다.

국내 중수로 원전에서도 과거부터 산업용 동위원소인 Co-60의 생산연구를 지속적으로 고려하고 있었으며, 최근 세계적인 트렌드에 따라 의료용 방사성 동위원소의 생산을 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 중수로의 중성자를 활용하기 위한 일환으로서 생산이 가능한 방사성동위원소와 그 타당성을 검토하였다.

상용원전을 활용한 방사성동위원소의 생산은 그 목적이 연구용원자로 및 가속기와 다르기 때문에 생산하고자 하는 동위원소의 종류, 생산량 등에 따라 원자로 노심운영, 구조의 건전성, 방사선감시, 계측, 사고 시 영향평가등 다양한 부분에서의 검토가 필요하다. 또한 주기적으로 생산되는 동위원소의 차폐, 운송 및 보건물리에 추가적인 보강설계가 요구된다. 최근 상용원전에서 상업생산하고 있는 방사성동위원소인 Mo-99, Lu-177, Co-60을 대상으로 국내 원전에 적용 시 장단점을 검토하고 및 사업화 시 검토 및 분석이 필요한 사항을 도출하였다.

전력망과 송전혼잡을 고려한 수소 수전해 최적운용 스케줄링 및 입지선정

김태현 · 심상우 · 노재형 · 박중배

건국대학교 전기공학과

Optimization of electrolysis operation schedule and site selection considering transmission congestion

대기중 온실가스 농도의 증가로 인하여 지구의 기온이 빠르게 올라가는 이른바 ‘지구온난화’ 현상이 범지구적 사회문제로 대두되고 있다. 각국의 정부는 2015년 파리에서 열린 제21차 UN 기후변화협약 당사국 총회(COP21)에 참가하여 지구 평균온도의 상승률을 낮추기 위하여 탄소감축 목표를 발표하였다. 그러나 재생에너지 발전원의 용량이 풍력과 태양광에 편중되어 있어 덕커브(Duck Curve) 등 전력수급에 어려움을 겪고 있다. 이를 극복하기 위해 서로 다른 에너지 섹터를 연계하는 섹터커플링 기술이 연구되고 있으며, 이 중 전력을 수소와 같은 가스 형태로 바꾸어 저장하는 P2G 기술이 청정수소 공급에 중요한 역할을 할 것으로 전망된다. 섹터커플링은 수요에 비하여 과도하게 발전되어 출력제한(Curtailment)된 전력량을 줄일 것으로 기대된다.

수소 수전해는 물을 전기분해하여 수소와 산소로 분리하는 기술이다. 전기를 수소가스의 형태로 변환하여 장기간 저장할 수 있는 P2G는 기존의 전력산업이 수요와 공급이 동시에 이루어지는 특성과는 다른 특성을 갖게 된다. 이는 수소의 실시간 생산이 실시간 소비로 이어지지 않음을 의미하며, 일정기간의 목표 생산량에 대하여 스케줄링이 가능함을 시사한다. 전력계통에서 수소 수전해기를 운용할 경우, 기존의 전력부하 패턴에 수소 수전해로 인한 전력부하가 추가적으로 발생하게 된다.

본 논문의 전력계통 모델은 5개의 노드에 각각 하나의 발전기와 전력수요지가 존재함을 가정하였다. 수소 수전해기를 5개의 노드에 설치함에 따라 시나리오를 5가지로 구분하였으며, 1주일간 150톤의 수소생산으로 인한 전력부하를 최적분배하여 계통의 송전 혼잡을 고려한 발전기 기동정지계획(Unit Commitment)를 최적화 및 수행하였다.

구분	BUS1	BUS2	BUS3	BUS4	BUS5
결과값 (1천원)	3,894,494	4,216,547	4,129,243	4,154,139	4,106,047
순위	1	5	3	4	2
출력제한 (MWh)	8,724.4	8698.9	8,558.1	8590.9	5,640.4
순위	5	4	2	3	1

Electrochemical Sensor for Glucose Detection

S Tamilarasi¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering (BK21 FOUR) for Graduate School, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Many enrichment techniques for phosphopeptides usually rely on the interaction of phosphate groups with metal ions or metal oxides. Based on this, we innovatively designed and fabricated an electrochemical sensor based on NiO₂@PG hierarchical nanostructure. Which can sensitively and rapidly detect glucose in protein samples pretreated with NiO₂@PG can be linked to the glucose via the hydroxyl group at the tail of the glucose. When NiO₂@PG are specifically bound to the glucose group on the modified NiO₂@PG can improve the electron conduction ability of the electrode to detect the glucose. The designed electrochemical sensors had the advantages of high sensitivity, selectivity, and repeatability, and it showed a wide linear concentration range and a lower limit of detection for glucose. We found that the uniformly dispersed anisate crystal NiO₂ and PG composite-modified electrode showed a lower detection limit. This sensing strategy is expected to provide a novel solution for the direct detection of hydroxyl groups in glucose in complex environments.

파이렌 Stacking을 전략적으로 도입한 탁월한 미세상분리와 전기화학적 성능을 갖는 poly(pyreneyl-aryl-piperidinium) 연료전지용 음이온교환막

박민우¹ · 김범호¹ · 유동진^{1,2}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

Poly(pyreneyl-aryl-piperidinium) anion exchange membrane for fuel cells with excellent microphase separation and electrochemical performance by strategically introducing pyrene stacking

파이렌은 4개의 벤젠고리로 이루어진 분자로써, 분자 양면에 커다란 π 전자구름면을 갖고 있습니다. 이는 파이렌의 양면이 마이너스로 대전되어있음을 나타내며, π 전자구름면이 크기 때문에 π 상호작용을 효과적으로 할 수 있고 대표적으로 파이렌 Stacking(쌓음 현상)을 보여줍니다. 따라서 파이렌을 단량체로 사용함으로써 분자 배열에서 파이렌 Stacking으로 인한 파이렌끼리의 뭉침 현상이 생겨날 수 있고 이는 고분자막의 미세상분리를 촉진할 수 있다고 판단되어 미세상분리 전략으로써 파이렌을 도입한 Poly(pyreneyl-aryl-piperidinium) 음이온교환막을 보고합니다. 합성된 고분자는 2가지 반응 결과에 대하여 NMR 측정과 FT-IR 측정을 통한 분자 구조 분석이 진행되었으며 이후 실질적인 성능테스트인 이온전도도 측정과 SEM 형태학, TGA, DSC, DMA 등 기계적 · 열적 안정성과 특성 등을 측정하였습니다.

연료전지용 아미노와 불소가 포함된 사슬이 긴 알킬 측쇄 술폰화 폴리(아릴렌 이써) 합성 및 대면적 양이온 교환막 특성 평가

김애란¹ · 나타라잔로게쉬바란² · 박민우¹ · 아이야판 아룬쿠마르¹ · 고쿨라프리얀¹ · 유동진^{1,2}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

Synthesis of long-chain alkyl side-chain sulfonated poly(arylene Ether)
containing amino and fluorine for fuel cells and evaluation of large-area
cation exchange membrane properties

수소연료전지의 필수 구성요소인 고분자 전해질막은 연료전지의 성능을 직접적으로 결정한다. 최근 높은 양성자 전도도, 우수한 기계적 특성, 현저한 화학적안정성 및 저렴한 비용등과 같은 연료전지의 필요성을 충족시키기 위해 많은 수의 양성자 교환막이 연구되어왔다. 과불소술폰산 고분자막으로 잘 알려진 미국 듀폰회사의 나피온이 개발되어 현재 상용화를 위해 적용되고 있다. 본연구에서는 아미노 및 삼불소메틸이 포함된 일련의 폴리(아릴 이써)(AFPAE)을 친핵성 치환 중축합에 의해 합성하였습니다. 이어서 AFPAE의 아미노기를 반응 부위로 사용하여 알킬 설포네이트 측쇄를 조밀하게 그래프트하는 설폰화된 폴리(아릴 이써)(SAFPAE) 멤브레인을 제조하였습니다. 삼불소메틸 그룹과 친수성 골격의 특별한 구조는 나노 크기의 양성자 채널을 생성합니다. 합성된 고분자와 연료전지용 대면적 수소 양이온 교환막의 분석을 위해 ¹H-NMR, ¹³C-NMR, IR, TGA, DSC, XRD, XPS, FE-SEM, TEM 등으로 물리화학적 특성을 평가하였습니다.

key words: hydrogen fuel cells, long-chain alkyl side-chain, sulfonated poly(arylene Ether), large-area cation exchange membrane

동일한 알멘강도로 피닝 처리된 SM45C 강의 피로수명에 관한 연구

김태형 · 박유진* · 김정태 · 장주혁 · 김태희

청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 대학원 기계항공시스템공학과

A Study on the Fatigue Life of SM45C Steel Peened with the Same Almen Intensity

Taehyung Kim · Yujin Park* · Jeongtae Kim · Juhyeok Jang · Taehee Kim

Department of Aeronautical & Mechanical Engineering, Cheongju University

*Department of Mechanical & Aerospace Systems Engineering, Graduate School,
Cheongju University

본 연구에서는 스테인리스 강재의 수소취성에 대한 가장 우수한 저항성을 갖는 최적의 샷 피닝 실험연구가 수행되었다. 먼저 샷피닝 공정시 피닝의 세기 즉 피닝강도를 가늠하는 알멘선도를 확보하였다. 다양한 샷볼의 투사 속도 50m/s, 60m/s, 70m/s를 적용하였으며, 각 투사속도에 대해 투사시간의 증가에 따른 아크하이트를 측정하여 알멘선도를 완성하였다. 알멘선도로부터 동일한 0.30mmA의 알멘강도를 갖는 3종의 피닝공정 조건을 선정하였으며, 피로시편을 가공하여 샷피닝 처리하였다. 투사 속도 50m/s일 때 투사 시간 245.0초, 60m/s일 때 111.6초, 70m/s일 때 67.7초 조건으로 피닝처리된 3종 시편과 피닝처리 하지 않은 1종 시편으로 4절점 회전굽힘 피로시험을 실시하였다. 이때 적용응력은 389.9MPa이며 피로시험 후 시편의 파단수명을 얻어 산술평균하였다. 실험 결과, 피닝처리된 3종 시편 모두 피닝처리 하지 않은 시편보다 수명이 증가하여 확실한 피닝효과를 주었다. 한편 동일한 알멘강도의 세 피닝공정 조건에 대해서는 서로 수명 차를 보인다. 가장 우수한 파단수명을 주는 50m/s, 245초 조건을 기준으로 60m/s, 111.6초의 경우 피로수명이 17% 낮았고, 70m/s, 67.7초의 경우 피로수명이 30.7% 낮았다. 궁극적으로 알멘강도가 동일하더라도 피로수명은 차이를 보일 수 있다는 점에서 수소취성에 대한 저항성 또한 차이를 보일 수 있기 때문에 피닝공정 시 고려해야 한다. 추후 동일한 알멘강도를 갖는 경우에 대해 피로수명, 압축잔류응력, 경도, 조도 등을 종합적으로 고려한 최적피닝 연구를 수행할 계획이다.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1F1A1074178).

KGS AC111에 따른 수소압축가스설비에 관한 신뢰성 확인 연구

하창민 · 이동훈 · 하기역 · 김태희 · 양윤영
한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

A Study on the Reliability of Hydrogen Compressed Gas Facilities by KGS AC111

Ha Chang Min · Lee Dong Hoon · Ha Gi Yeok · Kim Tae Hee · Yang Yun Young
Institute of Gas Safety R&D, Energy Safety Empirical Research Center

현재 전 세계적으로 문제가 되고 있는 기후변화로 인해 국제사회는 파리협정에서 한 걸음 더 나아가 2050년에 탄소중립을 달성할 수 있도록 2030년 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution)를 더 강화하고 있으며 우리나라 또한 국제사회의 일원으로서 적극 동참하여 탄소중립 시나리오를 수립하였다. 탄소중립 시나리오에는 산업, 수송, 폐기물 등 여러 부문이 있으며 특히 수송부문에서 내연기관 중심의 수송 체계를 무공해차 중심 체계로의 전환을 진행하고 있다. 이에 따라 2030년까지 무공해차 450만 대 보급을 추진하고 있다.

무공해차 도입을 위해서는 인프라 구축이 중요하다. 하지만 수소차 충전소는 전기차 충전소에 비해 2022년 현재 200기 정도로 많이 부족하며 지속적으로 확충을 위한 노력을 하고 있으나 고압용기는 모두 미국과 일본에서의 수입에 의존하고 있다. 이에 따라 수소충전소 핵심부품 중 하나인 100MPa급 수소충전소용 압력용기 제작 및 평가 기준 구축이 필요한 실정이다.

수소충전소용 저장용기는 현재 KGS AC111 고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설, 기술, 검사 기준에 의하여 검사된 용기만 수소충전소에서 사용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 수소충전소의 핵심부품 중 하나인 수소압축가스설비(압축기로부터 압축된 수소가스를 저장하기 위한 것으로 설계압력이 41MPa를 초과하는 압력용기)의 KGS AC111에 따른 신뢰성 확인 연구를 위한 시험방법을 소개하고자 한다.

Acknowledgement : 이 연구는 2023년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(수소충전소용 100MPa급 저장용기(Type1.) 기술개발 및 실증, 20015893)

국내 수소안전 정책 동향: 수소안전관리 종합대책 추진결과를 중심으로

김영훈

한국가스안전공사 수소안전기술원

Hydrogen Safety Policies Trend: Focusing on Results of the Comprehensive Plan for Hydrogen Safety

Yeonghun Kim

Institute of Hydrogen Safety Engineering, Korea Gas Safety Corporation

정부는 탄소중립 이행 및 경제산업구조 변혁을 통한 수소경제 선도국가로의 도약을 위해 수소경제 활성화 로드맵('19.1) 발표하였으며, 수소 안전과 산업의 균형발전을 위해 수소안전관리 종합대책('19.12월)을 수립하였다. 한국가스안전공사는 지난 3년간 종합대책에 따라 수소 전주기에 걸친 안전기준 신설, 전문인력 양성 등 수소산업 전반에 걸쳐 다양한 정책·제도 마련 및 추진 중에 있다. 이에, 현재까지의 수소안전관리 종합대책 추진현황 및 액화수소, 수소혼입 등 수소 신산업 발전에 따른 새로운 안전정책 개발 동향에 대해서 공유하고자 한다.

감사의 글 : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 2020년 산업기술혁신사업 지원으로 수행되었습니다. (No.20227310100010, 액화수소 충전소 구축 연계 안전성 평가/실증 및 안전기준 개발)

수소산업 전주기 인프라시설 안전성 고찰

박우일 · 이주성

한국가스안전공사 수소안전기술원

수소경제는 1970년대 전기화학자인 존 보크리스(John O'M Bockris) 교수가 제너럴모터스 기술센터 강연에서 ‘수소가 석유를 대체하여 에너지 수요를 충족시키는 에너지시스템 및 경제’라는 의미로 처음 사용되었다. 대한민국은 수소경제 활성화를 위해 수소에너지 기술 개발, 안전관리 정책 수립과 더불어 수소법 세계 최초 제정 등을 통해 수소경제 선도국가로서의 면모를 보여주고 있다. 또한, 국내 수소 시설은 해외 선진국과 비교하여도 세계 최고 수준의 안전관리를 통해 안전한 수소에너지 사용이 이루어지고 있다. 하지만, 액화수소 도입과 같은 빠른 기술개발과 다변화되는 수소 산업의 안전성을 고도화하기 위해선 일부 제도 개선 등이 필요하다. 이에 따라 선제적 안전대책 수립을 위해 대표시설 13개소에 대한 안전점검을 실시하고 안전성 향상 방안을 마련하고자 한다.

감사의 글 : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “수소 전주기 통합 위험성평가 프로그램 및 액화수소 설비 안전기준 개발” 연구 과제입니다. (No.20215810100060)

수소충전소 압력용기 이물질 탐상 및 재검사 시스템 정립을 위한 연구

정오현 · 김민주 · 이민경 · 이재훈
한국가스안전공사 가스안전연구원

Research for the Establishment for Detection and Reinspection System of Foreign Substances in Hydrogen Charging Station Pressure Vessels

O-Hyun Chung · MinJoo Kim · MinJyung Lee · JaeHun Lee
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

온실가스 감축을 위한 노력의 일환으로 2018년 정부에서는 수소경제를 핵심 전략투자 분야로 선정했다. 이에 따라 정부에서는 수소경제 활성화 로드맵과 기본계획을 발표하고, 관련 산업의 본격적인 증가와 더불어 2017년 이전 연평균 1건에 불과하던 수소 관련 화재나 폭발, 누출 사고가 3~5건으로 증가하는 등 사고 사례도 증가하고 있다. 이에 수소 안전분야에 대한 선제적인 대책 마련이 시급한 실정이다.

국내 수소 압력용기는 「고압가스안전관리법」에 따라 특정설비로 분류되며, 재검사 기준을 만족하기 위해 KS B 6755에 따라 내부검사와 압력시험을 수행한다. 이는 수소충전소의 가동 중지로 인해 운영에 지장을 초래하며, 현재 가동 중 검사는 대부분 육안검사에 의한 외부검사가 진행되고 있어 압력용기의 건전성을 평가할 수 있는 기준이 필요하다.

본 연구에서는 수소 압력용기의 수명을 해석하여 재검사 주기를 제안하고, 건정성을 확보할 수 있는 비파괴 검사기법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 수소충전소 압력용기와 동일한 소재의 시험편을 제작하였으며, 추후 실증 실험을 통해 재검사 개선안을 도출하고자 한다.

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었습니다. (No.20215810100040)

수출지향형 소규모 모듈형 바이오가스 정제설비의 제작에 관한 연구

김지은 · 김현기 · 강광남[†]

에이티이(주)

Development of Biogas Purification System of Small Scale Module Type for Export

본 연구는 동남아시아 시장을 타겟으로 하는 수출지향형 소규모 모듈형 바이오가스 정제설비 제작에 관한 연구이다. 대부분의 동남아시아 국가는 바이오가스 분야 개발에 유리한 조건을 갖추고 있음에도 불구하고 바이오가스 공장 운영 및 유지기술상의 장벽, 바이오가스 개발을 위한 전략 부족 등의 문제로 아직까지 제대로 개발 및 활용되지 못하고 있는 실정이다. 이로 인해 가정용 취사연료원으로 보급되고 있는 바이오가스는 전처리 공정없이 공급되어 바이오가스 내 H_2S 와 같은 유독가스 함유로 인해 인체 위해요인이 발생하는 문제에 직면해있다. 본 연구에서는 이를 해결하고자 지난 선행연구를 기반으로 소형화, 가격 경쟁력, 고내구성, 운전 및 운반 안정성 및 교체 용이성 등이 내재된 $20m^3/일$ 급의 수출지향형 소규모 모듈형 바이오가스 정제설비를 제작하고자 하였다. 선행연구를 통해 제작되었던 기존의 바이오가스 정제 모듈은 유입 바이오가스의 조건에 따라 3L, 5L 또는 8L 규모로 운전될 수 있도록 제작된 $587.8\text{ mmW} \times 395.0\text{ mmH} \times 897.0\text{ mmD}$ 크기의 설비이다. 그러나 해당 설비는 터치 패널, MFM, 전원장치 등을 위한 동력 설비가 내재되어있어 그 무게가 상당하고 에어 펌프의 작동을 위해서는 콘센트 연결이 필수로 요구되어져 이에 대한 보완 설계의 필요성이 대두되었다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 바이오가스 정제 모듈 내 동력설비를 마이크로 컨트롤러로 대체하여 무게를 크게 줄이고 충전식 배터리를 사용하여 콘센트 연결없이도 설비의 운영이 가능토록 개선하였다. 또한 기존의 3L, 5L, 8L pathway를 모두 유지하기보단 범용성이 높은 3L의 단일 pathway를 구성하여 전체적 모듈 시스템의 무게 및 크기 감량에 기여하도록 하였다. 탈황탑에 충전된 하이브리드 탈황 매디아는 최대 99.82%의 바이오가스 정제 효율을 나타내었고 여재 수명이 약 90일에 도달하는 것을 확인하였다. 정제 모듈 설비는 현재 베트남 현장에 적용하여 현지 환경에 대한 성능 검증을 진행중이다. 또한 지속적인 연구를 통해 충전식 배터리를 태양전지로 대체하는 등의 방안을 마련하여 완전한 무동력 설비로 개선 예정이다. 본 연구를 통해 포화상태인 국내 바이오가스 정제설비 시장의 돌파구로서 동남아시아의 취사용 소용량 정제설비 틈새시장을 개척하고 대용량 바이오가스 정제시장 진출을 위한 기반을 구축하는데에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 산연협력(사업화 R&D)사업 지원에 의한 연구임 [S3085809]

스퍼터링 파워가 ZTO 필름의 특성에 미치는 영향

김동효 · 신연주 · 김민수 · 김보연 · 안유정 · 이송희 · 김효민 · 바수테바 레디 · 김우경

38541 대한민국 경상북도 경산시 영남대학교 화학공학부

* Corresponding author (wkim@ynu.ac.kr)

Sputtering power dependent physical properties of ZTO films

Metal oxide thin film have shown high potential for various applications due to their attractive properties such as high carrier mobility, excellent large-area uniformity, and favorable processing versatility. Among the metal oxides, zinc-tin-oxide (ZTO) is a promising transparent conduction oxide material. In this work, RF Sputtering is a appropriate method in order to deposit ZTO films. In this work, ZTO films were deposited by RF sputtering with different target powers. The optical, structural and electrical properties of the films are then characterized by UV-Vis-NIR spectroscopy, GI-XRD, and Hall-effect measurement, respectively.

인시츄 고온 x-레이 회절에 의한 Sb_2Se_3 태양광 흡수체 형성 메커니즘에 관한 연구

안유정 · 이송희 · 김효민 · 김동효 · 신연주 · 김민수 · 김보연 · 바수데바 레디 · 김우경
38541 대한민국 경상북도 경산시 영남대학교 화학공학부

Investigation on the formation mechanism of Sb_2Se_3 photovoltaic absorber by in-situ high-temperature X-ray diffraction

The reaction pathway, kinetics, mechanism, and phase evolution of Sb-Se precursor films were investigated by in-situ high-temperature X-ray diffraction analysis. For deposition of glass/Mo/Sb/Se precursors, metallic-Sb layers were deposited by dc magnetron sputtering and Se layers were added by effusion cell evaporation. The deposited precursor layers and excess selenium were loaded into the high temperature reactor. Based on the results of isothermal reactions at different set temperatures, the kinetic parameters for the transformation of the Sb_2Se_3 phases were estimated. At room temperature, only Sb and Mo related diffraction peaks were observed. Over 150 °C, amorphous selenium was crystalized. The formation of Sb_2Se_3 phase was noticed in the temperature range of 350 – 450 °C. From the 500 °C, only Mo peaks were observed due to the evaporation of Se and Sb (loss of Sb and Se).

Effect of Preparation Routes on the Crystal Purity and Photocatalytic Performance of BiFeO₃ Nanoparticles

Min Jeong Choi, Salh Alhammadi, Woo Kyoung Kim*

Yeungnam University, Department of Chemical Engineering

In the study, a hydrothermal method was used to prepare a bismuth ferrite(BiFeO₃) NPs. The BiFeO₃ was prepared with single phase and mixed phase by controlling the pH and the reducing agent type. The structural, morphological and optical characteristics of the BiFeO₃ NPs were characterized by several analysis techniques. The photocatalytic performance of the single and mixed phase BiFeO₃ in the photodegradation of different organic effluents were tested and evaluated. The results showed that the BiFeO₃ prepared with mixed phase(e.g., Bi₂O₃, Bi₂Fe₄O₉) showed a great performance for the decomposition of methyl orange (MO) and methylene blue (MB) compared to that performance achieved with single phase BiFeO₃. The mixed phase BiFeO₃ photocatalyst had the ability to decompose 10 ppm of MB completely within 24 min. The high photocatalytic performance of mixed phase BiFeO₃ could be related to the presence of oxygen vacancies in its crystal system.

실내온도 기반 건물 열성능 정밀진단 방법의 한계점 및 개선방안 연구

이정훈 · 조가영 · 임수진
서울기술연구원 주거환경연구실

A Study on Limitations and Improvement Strategy of Detailed Building Thermal Performance Diagnosis based on Indoor Temperature

JungHun Lee · GaYoung Cho · SuJin Im
Living Environment Research Division, Seoul Institute of Technology

건물의 에너지 성능 진단은 에너지비용 절감, 효율 향상, 온실가스 감축 및 지속 가능한 건물 관리를 위해 중요하다. 진단 결과에 따라 에너지비용 예측, 냉난방시스템 제어 전략 등이 도출되므로 정확한 건물 열성능 진단은 에너지개선 프로세스 중 가장 핵심적인 요소에 해당하며, 이로 인해 건물 외피 열성능의 정밀진단 방법에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

다만 정밀진단 방법론을 통해 건물의 부위별 열성능을 정확하게 측정하더라도, 부위별 열성능 진단값의 합이 건물의 종합 열성능과 다를 수 있음은 인지해야 한다. 건물에는 1)방대한 양의 요소들이 존재하므로 모든 조건들에 대한 진단을 수행하기 어렵고 2)요소들간의 복잡한 상호작용과 불확실성 등이 존재하므로, 일부 건물 요소들의 진단 결과를 합산한 값이 건물의 종합 열성능과 일치하다고 판단하기 어렵다. 또한, 3)정밀진단 방법을 적용하기 위해서 상당한 시간, 비용, 노력, 전문성 등이 요구되는 것에 반해 건물은 재실자의 수, 건물 용도, 에너지사용 패턴, 주변 환경 등이 변화할 수 있으므로 정밀진단 방법을 통해 산출한 결과물의 지속가능 기간은 길지 않다. 따라서 건물의 성능을 지속적으로 모니터링하기 위해서는 정밀진단 프로세스가 주기적으로 반복 수행되어야 하지만 이는 현실적으로 분명한 한계가 존재한다. 무엇보다 현재까지는 건물의 종합 에너지 성능, 에너지 비용 등을 예측하기 위해 가장 먼저 건물의 부위별 요소들에 대한 정보를 수집하기 위해 많은 노력을 기울이지만 에너지비용에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 실내온도이다. 건물 냉난방시스템의 작동유무는 실내온도와 실내 설정온도의 차이에 따라 결정되므로 결국 실내온도 조절장비 부근의 온도를 측정하는 것이 건물의 에너지성능을 예측하는 1단계라고 볼 수 있다.

따라서 본 논문에서는 고가의 진단장비와 전문가의 투입을 통한 부위별 정밀진단 결과와 실내온도 측정을 통한 저비용/간소화 프로세스의 결과값을 비교하고, 건물의 종합 열성능 진단 시 발생할 수 있는 정밀진단 방법의 한계점과 실내온도 진단법의 활용성을 검토해보고자 한다. 이를 통해 건물의 종합 에너지 성능 진단, 에너지비용 예측, 그리고 냉난방시스템 제어전략 도출 등의 연구사업 수행 시 효율적인 건물 에너지 진단 및 관리에 도움을 주고자 한다.

후 기 : 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호:20202020800360, 기존 공공건물 에너지 효율 진단 및 리모델링 기술개발 실증)

기존 노후 건축물 그린리모델링에 따른 실시간 에너지 소비량 모니터링 시스템 적용 방안에 관한 연구

임수진 · 이정훈 · 조가영

서울기술연구원 주거환경연구실

Research on the Application plan of the Real-Time Energy Consumption
Monitoring System after the Green Remodeling of Existing Old Buildings

Su Jin Im, Junghun Lee, Ga Young Cho

전국 준공 후 20년 이상 경과한 노후 건축물은 전체 건축물의 58.2%로 과반 이상을 차지하고 있다. 이러한 기존 노후 건축물의 에너지 소비량은 전기, 가스 고지서로 매월 총 사용량 정도만 알 수 있기에 리모델링 등을 통한 에너지 효율 개선 후 리바운드 효과의 정확한 원인을 파악하기 어려워 기존 건축물에 적용할 수 있는 에너지 소비량 모니터링이 필요하다. 서울시 내 기존 건축물 중 가장 큰 비중을 차지하는 소방 업무시설은 24시간 내내 에너지를 소비하는 건물이기에 이에 대해 지속적으로 에너지 사용·관리 방안이 필요하다. 본 연구에서는 1992년도에 준공하여 노후 된 서울시 소재 서대문 홍은 119안전센터를 대상으로 에너지효율 실증연구를 진행중이며, 그 일환으로 실시간 에너지 소비량 모니터링 시스템 구축방안을 제시하고자 한다. 건물 에너지 모니터링은 에너지원별, 용도별, 구역별로 나누었으며 에너지원별은 전기, 가스 소비량 용도별은 냉난방, 조명, 급탕으로 모니터링 요소를 설계하였다. 건물 에너지원 중 가스 사용량은 원격 시스템을 설치하였고 전기 사용량은 건물 전체 소비량과 각 층별 소비량을 알 수 있도록 시스템을 구축하였다. 소방업무시설은 보통 사무실, 진압·구급 대기실, 센터장실 등으로 구성되어 있으며 홍은 119안전센터는 3층짜리 건물로 재실인원이 가장 많고 24시간 에너지를 소비하는 공간을 기준으로 온습도를 측정하였다. 2018년부터 2021년 5개년간 평균 월별 난방에너지 소비량과 에너지 효율 리모델링 기술 적용 후 난방기간 에너지 소비량 데이터를 분석한 결과 동절기 홍은 119안전센터의 가스 에너지 사용량은 5개년 평균 대비 가장 적었으나 전기 에너지 소비량은 가장 많았으며 특히 난방을 가장 많이 사용한 1월의 경우 5개년 평균 대비 가스 사용량은 52%로 가장 많이 감소하였으나 전기 사용량이 97%로 가장 많이 증가하였다. 본 연구는 홍은 119안전센터를 대상으로 진행되는 실증연구로서 추후 시간대별, 일별, 월별 등 여러 에너지 소비량 모니터링 결과를 기반으로 사용량에 대한 원인을 파악하고 개선 방안을 제시하고자 한다. 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : 20202020800360, 기존 공공건물 에너지 효율 진단 및 리모델링 기술개발 실증)

반도체 공정 유해가스 저감을 위한 저온 플라즈마 연소 장치의 성능시험

김태형 · 이세창* · 김정태 · 남윤걸 · 안정민**

청주대학교 항공기계공학과, *지엠테크 기술연구소, **청주대학교 응용화학과

Performance Test of Low-temperature Plasma Combustion Device for Reducting Harmful Gas in Semiconductor Process

Taehyung Kim · Sechang Lee* · Jeongtae Kim · Yungeol Nam · Jungmin Ahn**

Department of Aeronautical & Mechanical Engineering, Cheongju University

*R&D Center, GM Tech

**Department of Applied Chemistry, Cheongju University

본 연구에서는 반도체 생산 공정 중 발생하는 휘발성유기화합물을 효율적으로 감소시킬 수 있는 저온 플라즈마 연소장치의 성능시험을 수행하였다. 이 연소장치는 빔 인버터 제어 방식의 플라즈마 발생기와 분사노즐, 그리고 연소챔버로 구성된다. 휘발성유기화합물의 연소 전후 농도 측정을 위한 센서를 설치한 후 실제 휘발성유기화합물의 확보가 사실상 불가능하기 때문에 벤젠 가스를 실험에 대체 사용하였다. 시험조건으로써 플라즈마 분사압력 및 분사온도를 2Bar 및 180℃로 하였고, 가스 흡입 유속을 34m/s로 수행하였다. 벤젠 가스가 연소챔버에 유입된 후 일정량 채워지면 2분 뒤에 연소 전 농도를 측정하였으며, 저온 플라즈마가 노즐에 점화된 후 2분 뒤에 연소 후 농도를 측정하였다. 그리고 각각의 농도 변화를 관찰하였다. 실험결과 저온 플라즈마에 의해 연소되기 전 벤젠 가스의 농도는 20,943ppm이었으며, 저온 플라즈마에 의해 연소된 후 농도는 400ppm이었다. 이로부터 약 98%의 벤젠 가스가 제거되는 효과를 보였다. 궁극적으로 본 연구에서 개발한 저온 플라즈마 연소장치가 반도체 생산 공정 중 발생하는 유해가스를 획기적으로 제거할 수 있음을 검증하였다.

후기

이 논문은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P1311933, 2022년 산학융합지구구성사업)

수직 그래핀 나노시트 기반 이원금속 MOF 나노 로드 전극을 이용한
고성능 하이브리드 고체 전해질 슈퍼커패시터

Gopinath Sahoo · 정현서 · 정상문*

충북대학교 화학공학과

Bimetallic MOF nano-rods supported vertical graphene nanosheets as
high-performance hybrid solid-state supercapacitors

Gopinath Sahoo · Hyeon Seo Jeong · Sang Mun Jeong*

Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University

Vertical graphene nanosheets (VGN) or carbon nanowalls emerge recently for different energy storage devices by virtue of their interesting properties that enable them to bring out as excellent current-collector and templates for the growth of different nanostructures. In the current research, we design the facile synthesis of nano-sized bimetallic NiCo MOF on VGN (NiCo MOF/VGN) to achieve improved storage performance. The enhanced capacitive contribution, wetting nature, and charge-transfer kinetics of NiCo MOF/VGN facilitate improving the storage performance in the case of a solvothermal method than the drop-cast method. Further, the comparison also confirmed that VGN acts as an excellent current-collector for NiCo MOF than carbon paper. Due to the unique morphology of VGN and nano rod-like structure of NiCo MOF, the composite delivered a specific capacitance of 950 F g^{-1} at 1 A g^{-1} with a high rate capability of 93.2% at 10 A g^{-1} . Moreover, the assembled hybrid solid-state supercapacitor (NiCo MOF/VGN//PVA+KOH//activated carbon) showed a high energy density of 58.1 Wh kg^{-1} at a power density of 1170 W kg^{-1} and a high power density of 7 kW kg^{-1} at an energy density of 36.5 Wh kg^{-1} with a cycle stability of 88.5% after 10,000 cycles of charge-discharge.

은 이온이 교환된 Mo/HZSM-5 촉매를 이용한 천연가스 탈수소방향족화 반응

김상윤 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

천연가스는 최근 시추 기술의 발달로 인해 매장량과 사용량이 증가하고 있다. 이런 천연가스를 활용하는 여러 방법 중 방향족 화합물을 직접 합성하는 탈수소방향족화 반응이 각광받고 있다. 이 반응에는 몰리브데넘이 담지된 제올라이트 촉매가 주로 사용되는데, 이 촉매는 천연가스의 주 성분인 메탄의 전환율이 낮게 나타난다. 이를 해결하고자, 은 이온을 촉매에 이온교환을 통해 도입하여 높은 활성을 나타내는 촉매를 개발하고자 하였다.

메탄, 에탄, 프로판이 혼합된 가스를 이용하여 탈수소방향족화 반응을 진행하였고, 여러 특성화 분석을 통해 활성에 대한 이유를 규명하고자 하였다.

지지체 변화를 통한 삼원 촉매 반응에서의 귀금속 기반 촉매의 반응성 및 내열성 향상

우효성¹ · 이관영^{1,2,*}

¹고려대학교 화공생명공학과, ²초저에너지 초저배출 사업단

환경오염이 전 세계적으로 주목을 받고있고 이에 따라 환경오염의 주 원인들 중에 하나인 자동차 유해 배기가스에서의 문제를 해결해야 한다. 특히 가솔린 자동차의 경우 유해가스인 일산화탄소, 탄화수소, 질소 산화물 등이 배출되기 때문에 이를 저감하기 위하여 이를 저감하는 삼원 촉매에 대한 연구가 계속 진행되어왔다. 또한 환경오염 해결 및 전 세계적 배출가스 규제를 피하기 위해 고성능, 고내열성의 촉매가 필요하게 되었다.

삼원 촉매는 주로 귀금속을 사용하기 때문에 이를 기반으로 하는 촉매에 대하여 새로운 지지체를 도입하는 연구를 진행하고자 하였다. 귀금속 Pd, Pt, Rh을 기반으로 하는 Ce, Y, Zr, Al 등을 이용해 여러 가지 지지체를 합성하여 촉매를 제조하였다. 본 연구에서는 일산화탄소, 탄화수소, 질소 산화물의 촉매 반응 실험을 통한 저감을 관측하였고 여러 가지 지지체를 사용함으로써 여러 촉매의 성능 및 내열성을 관측하였으며 이를 여러 가지 촉매 분석을 통하여 이에 대한 원인을 파악하였다.

해수유래 산업폐수를 활용한 이산화탄소 흡수 및 광물탄산화

최원용 · 이동욱 · 장규민 · 박진원*

연세대학교 화공생명공학과

CO₂ absorption and mineralization using NaOH derived from
seawater-based industrial wastewater Energy

Won Yong Choi · Dongwook Lee · Kyumin Jang · Jinwon Park*

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University

본 연구에서는 해수유래 산업폐수에서 유래된 흡수제를 활용하여 이산화탄소를 선택적을 포집 및 자원화 하는 공정을 제안하였다. 천연 해수와는 달리 산업폐수 내에는 금속 이온이 풍부하여 더욱 효율적인 공정의 운용이 가능하다. 먼저 해수 유래 물질 내에 금속이온들을 분리하기 위해 pH-swing 기술을 통해 칼슘과 마그네슘을 수산화물의 형태로 분리수득하게 된다. 이때 칼슘과 마그네슘의 침전 pH가 상이함에 따라 각각 고순도의 수산화물 형태로 분리가 가능하다. pH-Swing 공정 후 발생하는 여액은 Chloro-Alkali 전기분해 공정에 Seed 물질로서 투입되게 된다. 전기분해 공정에서 생산된 NaOH는 CO₂ 흡수에 사용되게 되는데, 기체 상태의 CO₂는 안정적이고 반응성이 낮지만 알칼리 흡수제인 NaOH는 산성 CO₂ gas와 중화 반응을 일으켜 NaHCO₃과 Na₂CO₃의 생성을 유도하게 된다. 이렇게 생산된 이온화된 이산화탄소는 이전 공정에서 생성된 마그네슘 수산화물 및 칼슘 수산화물과 반응하여 각각 탄산마그네슘 및 탄산칼슘을 생성하게 된다. 최종 생성물의 산업적 적용성 연구를 위해 각 침전물을 Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES), X-ray Diffraction (XRD, Rigaku의 Ultima IV), Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL, Ltd.의 JSM-7001F) 및 thermogravimetry/derivative thermogravimetry (TG/DTG, TA Instruments의 SDT Q600)을 통해 분석하였으며, 이를 통해 흡수액의 매질 내에 존재하는 탄산염 이온 농도에 따른 결정특성에 대해 관찰할 수 있었다. 최종생성물의 물리적 특성의 변화는 산업적 적용성 증대를 위해 필요한 연구로서 공정의 경제성평가를 위해 중요한 정보로서 활용이 가능하다. 이에 더 나아가 제안된 프로세스의 기술적 경제적 타당성을 평가하기 위해 Aspen Plus 시뮬레이션 Tool을 활용하여 제안 공정의 모사를 진행하였다. 본 연구는 폐기물 기반 금속이온원을 활용하여 대기오염물질을 제거하는 공정을 제안함에 따라, 지속가능성을 지향하는 기술이라는 점에 의의가 있다.

옥상온실-사무실간 이산화탄소 및 열에너지 교환에 관한 연구

강새별 · 이현희 · 윤영직 · 최재준*

*한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실

Research on Rooftop Greenhouse-to-Office Carbon Dioxide and Thermal Energy Exchange

도심내 스마트팜(smart farm) 예를 들어, 건물내 인도어팜(indoor farm), 옥상 온실(rooftop farm) 및 컨테이너팜(container farm)등은 여러 가지 이유로 최근 연구개발 및 설치가 많이 이루어지고 있다. 특히 옥상 온실은 도심 빌딩에서 사용되고 있지 않는 옥상에 온실을 설치하여 유휴 공간을 효과적으로 사용하고 생활에 필요한 식자재를 생산하고 낮은 배송 비용으로 소비자에게 공급할 수 있다는 장점이 있다. 온실에서 과채류를 재배할 때 탄산가스(이산화탄소)를 공급하게 되면 광합성을 촉진되어 식물의 성장을 증가시킨다고 알려져 있다. 작물별 최적 이산화탄소 농도를 보면 엽채류와 장미의 경우 700 ~ 1,500ppm, 오이와 파프리카는 700 ~ 1,200ppm, 멜론과 딸기는 500 ~ 1,000 ppm으로 알려져 있다. (농업진흥청, 농사로) 일부 온실에서는 탄산가스 봄베나 화석연료의 직접 연소를 통해 온실내 이산화탄소를 높이고 있다. 이러한 경우 탄산가스를 지속적으로 구매해야되는 비용 문제와 화석연료 연소시 발생하는 일산화탄소와 질소산화물로 인한 안전 문제가 발생할 수 있다.

상업용 건물 사무실의 경우 이산화탄소를 1,000 ppm 미만으로 유지되도록 관리지침에 되어 있으며 근로자 1인당 필요한 최소 외기 공기량은 0.57m³/분이며, 환기횟수는 시간당 4회 이상이다.(고용노동부 사무실 공기관리 지침 제2020-45호) 이는 대기중 이산화탄소 농도가 현재 약 405 ppm으로 사무실 공간에서 근무하는 근로자가 호흡할 때 발생하는 이산화탄소로 인해 이산화탄소가 높아지는 것을 방지하는 지침이다.

본 연구에서 사무실이 있는 건물 옥상에 설치되어 있는 온실에 사무실에서 농축되는 이산화탄소를 공급하는 연구이며, 실제 사무실 공간과 옥상 온실을 환기 덕트로 연결하여 재실 인원 유무 및 환기 상태에 따른 이산화탄소 및 온도변화를 측정하였다.

메탄의 수증기-이산화탄소 복합개질 반응에서 Ni계 촉매 성능에 관한 연구

허동현 · 채민주 · 곽노상

한국전력공사 전력연구원 에너지환경연구소

Enhancement of Performance on Ni-Based Catalyst in Combined Steam and Dry Reforming of Methane (CSDRM)

DongHyun Heo · MinJu Chae · NoSang Kwak

KEPCO KEPRI Energy & Environment Lab.

Recently, climate change has occurring all over the world due to global warming. It is important to reduce carbon dioxide emissions that cause global warming. The utilization technology among Carbon Capture & Utilization(CCU) is a useful technology that recycles carbon dioxide as a useful resource and turns it into a material with high value. One of the CCU technologies, dry reforming of methane(DRM) has the advantage of consuming two types of greenhouse gases, methane and carbon dioxide, to produce syngas. Combined steam and dry reforming of methane (CSDRM) can compensate for the disadvantages of DRM such as coke deposition and low H₂/CO ratio. In CSDRM, a study was conducted to prevent coke deposition by using a Ni-based catalyst and to improve thermal stability for high temperature sintering. The prepared Ni-based catalyst was tested under various reaction conditions in a fixed bed reactor. CH₄ and CO₂ conversion, H₂/CO ratio, yields and production amount were compared through the CSDRM reaction, and optimal reaction conditions were established to minimize sintering and carbon deposition. In addition, coke formation in the used catalyst was observed while maintaining it for 50 hours for long-term stability tests. From the results, the effects of reaction conditions and catalysts on the conversion of CH₄ and CO₂ were suggested.

고갈 유·가스전에서의 이산화탄소 저장 안정성을 위한 주입 조건 분석

이다영 · 신호진 · 임종세*

한국해양대학교 에너지자원공학과

Analysis of injection conditions for the stability of carbon dioxide storage in depleted oil and gas fields

지구온난화로 인한 기후변화의 심각성이 대두되며 2016년부터 세계 각국은 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 목표를 수립하였다. 대량의 고농도 이산화탄소(CO_2)를 포집한 후 저장하는 CCS(Carbon Capture and Storage)는 목표 달성을 위한 기술적인 대안으로써 주목받고 있으며, 특정한 지질구조를 가지는 지층에 주입하여 오랜기간 동안 누출되지 않도록 격리시키는 지중저장을 활용하고 있다. 저장 유형으로는 심부 염수층, 고갈 유·가스전, 석탄층 등이 있으며, 그 중 고갈 유·가스전은 다른 저장 유형에 비해 기존의 인프라 구조를 활용할 수 있고, 높은 무결성을 지니어 CO_2 저장에 용이하다. 그러나 연구 대상 지역으로 심부 염수층을 활용한 사례가 주를 이루고 있으며, 이는 고갈 유·가스전에서의 제한된 데이터 가용성, 현장 프로젝트의 부재 등에 의한 것으로 파악하였다. 따라서 해당 저장 유형에서의 주입 조건을 분석하여 저류층 모델링 시 활용 가능한 주요 매개변수를 설정하여야 한다.

이를 위하여 시뮬레이션 기반의 지중저장 사례를 파악하였으며, CO_2 저장 관련 매개변수를 저류층 물성 및 주입 운영조건으로 분류하였다. 그 결과 저류층 물성에서 유체포화율, 유체투과도, 공극률이 CO_2 주입 시 저장용량 및 주입성 평가에 주로 반영되었으며, CO_2 저장용량 증대를 위해 주입 운영조건 중 CO_2 온도, 최대 주입 압력, 주입정 수가 주요 매개변수로 활용됨을 파악하였다. 이러한 주입 조건 분석 결과는 향후 고갈 유·가스전에서의 지중저장 연구 시에 적절한 저류층 모델 구축 및 주입 설계를 위한 기초 자료로써 활용할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20216110100050, 소형발전 연계 중소규모 가스전 개발/생산 현장 운영기술 개발).

가스터빈 블레이드의 고속회전에 대한 구조적 안정성

김태형 · 박유진*

청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 대학원 기계항공시스템공학과

Structural Stability of High-speed Rotating Gas Turbine Blades

Taehyung Kim · Yujin Park*

Department of Aeronautical & Mechanical Engineering, Cheongju University

*Department of Mechanical & Aerospace Systems Engineering, Graduate School,
Cheongju University

본 연구에서는 고온 환경에서 가스터빈 블레이드의 고속회전에 대한 구조적 안정성을 살펴보고자 블레이드-디스크 조립체의 정적 구조해석을 수행하였다. 유한요소해석 모델은 블레이드 4개 90° 등간격으로 장착되도록 설계하였으며, 이들 블레이드는 여러 단의 도브테일 형상을 갖는 각각의 홈에 직접 삽입되어 있으며, 디스크 휠 양 측면에 블레이드가 이탈되지 않도록 지지하기 위한 평면 브라켓이 체결되어 있다. 유한요소해석의 효율성을 위해 해석모델은 1/4 회전 대칭으로 수립하였다. 블레이드의 재질은 Inconel 738, 디스크 휠 재질은 Inconel 718, 그리고 디스크와 축을 연결하는 브라켓 및 회전 축의 재질은 STS422이다. 해석에 반영된 블레이드 및 휠의 회전속도는 5,040rpm이다. 그리고 해석모델에 중력이 작용함을 고려하였다. 구조해석 후 회전속도가 블레이드의 변형 및 조립부에서의 응력변화를 주는지 살펴보았다. 해석결과, 디스크 휠과 블레이드 모두 회전에 의한 변형량은 미미하였으며, 최대유효응력 또한 각 재질의 항복강도보다 현저히 낮아 구조적 안정성을 확인하였다.

Study on the correlation between ammonia mass flow rate and flue gas composition using the Dynamic Time Warping (DTW) technique in a 0.7 MWth coal pilot furnace

Sangbin Park* · Dongkwon Choi · Jiyong Hwang · Junhwa Chi

*KEPCO Research Institute Power Generation Laboratory

The widespread implementation of regulations on carbon dioxide emissions resulting from the combustion of fossil fuels has prompted research and development efforts to replace coal-fired power generation with alternative fuels. Hydrogen, biomass, and ammonia have been identified as promising alternatives to coal. However, the use of hydrogen for transportation, particularly by ships, poses significant challenges. Ammonia, on the other hand, is a carrier gas for hydrogen and has similar heat value to coal. Therefore, it is being recognized as a promising fuel due to its ease of storage and transportation.

This study aimed to investigate the effects of ammonia flow rate fluctuations on exhaust gas during an experiment involving co-firing ammonia at approximately 30% based on the heat value of the amount of coal input into a 0.7 MWth single-burner coal-fired power generation test combustion at KEPCO Research Institute. To inject ammonia into the coal furnace in its gas state, a vaporizer was used. However, pressure instability during this process caused by the phase change can lead to instability in the mass flow rate of ammonia. Thus, this work conducted a review of the instability model caused by phase change and utilized the Dynamic Time Warping (DTW) technique, which is one of the time series analysis methods, to investigate the correlation between ammonia flow rate and NO_x concentration in the flue gas. The analysis results will be used to predict the influence of the fluctuation of flue gas composition that can occur when using ammonia in a coal power plant.

미분탄 발전설비 암모니아 혼소운전에 따른 회분 특성 변화

황지용* · 최동권 · 박상빈 · 지준화

*한국전력 전력연구원 발전연구소 무탄소발전연구실

탄소중립, 친환경 에너지 수요에 따른 변화가 요구되는 세계적인 흐름에 따라 에너지 산업에는 지속적인 변화가 이루어지고 있다. 하지만 세계적인 노력에도 불구하고 2020년 기준 전세계 전력생산의 63.3%는 화석연료로 이루어졌으며 화석연료 사용량 중 57.9%는 석탄이 차지하고 있다. 따라서 신재생, 원자력, 수력 등 발전량이 성장했음에도 불구하고 단기간에 석탄화력발전소의 발전설비를 곧바로 대체하기 어렵다. 또 이러한 현황에서 기존발전설비를 운용하지 않게된다면 고비용을 투자하여 구축한 발전설비에 대한 비용적인 손실이 막대하게 작용할 수 있다. 그 결과 기존 화력발전설비의 발전량을 유지하되 탄소배출량을 줄이기위한 다양한 연구결과가 제시되고 있다. 설비의 개조를 포함한 바이오매스, 수소, 암모니아 등 대체연료의 개발 및 혼소 등 분야에 관심이 높아지고 있다.

본 연구에서는 한전 전력연구원의 0.7MWth급 싱글버너 석탄화력발전 시험연소로에 암모니아 공급라인을 구성하여 투입 석탄량의 발열량을 기준으로 약 30% 까지 암모니아 가스를 혼소한 실험을 기술한다. 실험 중 각 연소조건에서 저회 및 비회를 포집하고 연소조건 별 연소효율, 회분의 입자상태 및 조성을 확인하기위해 강열감량시험법, 전자주사현미경, 에너지분산분광법을 활용하였다. 또 혼소율에 따라 연료량, 노내온도, 공기량, 스월비 등 연소조건과 배가스의 조성을 측정하여 이를 바탕으로 연소생성물의 특성변화를 분석하였다. 실험결과를 통해 조건별 연소성능 및 연소생성물의 특성 변화의 상관관계를 도출하고 연소조건 및 발전설비의 안정성, 연소생성물의 처리 및 활용 등 발전설비의 암모니아 혼소 활용 시 설비구성 및 운용방식에 미치는 영향을 예측하는데 활용하고자 한다.

4면 부착형 태양광 전기자동차의 발전 잠재량 평가

서장원*

강원대학교 에너지자원화학공학과

Evaluation of the power generation potential of a four-sided
photovoltaic-powered electric vehicle

Jangwon Suh, Kangwon National University

본 연구에서는 태양광 전기자동차의 이동시각과 주행경로에 따른 모듈의 발전 잠재량을 평가하고, 검증 실험을 수행하였다. 이를 위해 차량의 4면(지붕, 뒷유리, 좌측문, 우측문)에 동일 용량의 모듈을 부착하고, 다양한 경사와 방위각을 갖는 17개의 도로(구간)를 하루 3회(9시, 12시, 15시) 주행하는 시나리오를 설정하였으며, 주변 지형과 건물에 의해 형성되는 그림자 효과를 반영하였다. 이로부터 동일 구간 또는 경사/방위각이 다른 두 구간에서의 모듈별 발전 잠재량의 차이와 원인을 효과적으로 분석할 수 있었다. 1회 주행시(약 10분) 0.0158 kWh, 1년(하루 6시간 기준; 9~15시) 주행시 221 kWh의 전력을 생산할 수 있는 것으로 평가되었다. 모든 시간대에서 차량 지붕 모듈의 발전 잠재량이 가장 높게 나타났으며, 뒷유리, 옆면 순으로 나타났다. 차량 뒷유리와 양측면에 부착된 모듈의 발전 잠재량은 지붕 모듈 발전 잠재량의 각각 약 42%, 약 27%에 해당하는 것으로 계산되었다. 이외에도 미래의 태양광 전기자동차 기술 발전 시나리오에 따른 발전 잠재량을 예측하고 확대 가능성에 대해 논의하였다. 본 연구결과는 향후 태양광 전기자동차의 발전량 예측 알고리즘과 내비게이션용 솔루션 개발 등에 기초 자료로써 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

화재영향분석용 모바일 어플리케이션 개발: FDT^s 계산모듈

김용재 · 한석현 · 오승준 · 정삼원

(주)피엔이

Development of a fire influence analysis application: FDT^s Module

화재영향분석을 위한 다양한 전산 프로그램들이 있으나, 신속성과 휴대성이 고려된 규제 기관(AHJ)의 검사 지원을 전문으로 하는 전산 프로그램은 아직 국내에는 없다. 따라서 본 연구에서는 화재방호검사의 품질 향상과 검사자에게 화재 역학에 대한 통찰력을 제공하기 위한 목적으로 국내 고유의 화재영향분석용 모바일 어플리케이션을 개발하고자 하며, 화재 시나리오를 간략하게 구성할 수 있고 계산 시간이 짧은 대수모델(Algebraic models)을 사용하여 원전 현장에서 빠르고 효율적으로 화재영향분석을 지원할 수 있도록 한다. 화재영향 분석용 모바일 어플리케이션은 ‘ZOI(Zone of Influence) 계산모듈’, ‘FDT^s(Fire Dynamics Tools) 계산모듈’ 등의 핵심 요소들로 구성된다.

본 논문에서는 모바일 어플리케이션의 핵심 요소 중 개발 완료된 FDT^s 계산모듈의 주요 개발 결과를 소개하고 휴대용 기기를 통해 시연함으로써 현장 적용성을 확인하고자 한다. FDT^s 계산모듈의 주된 목적은 SFPE Handbook에 수록되어 있는 경험식들을 중심으로 빠르고 간편하게 선별목적의 기초분석을 수행하는 것이다. FDT^s 계산모듈의 UI&UX는 HTML, CSS, 자바스크립트를 사용하여 사용자가 쉽고 간단하게 계산을 수행할 수 있도록 직관적인 인터페이스(UI)와 사용자가 프로그램 사용법을 빠르게 익힐 수 있도록 단순 명료한 경험(UX)을 제공한다. 기존 NUREG-1805 FDT^s 스프레드시트의 계산 기능에 덧붙여, 무차원 수 검증범위(NUREG-1824 & NUREG-1824 Supplement 1) 계산을 통한 입력변수 검증 기능과 계산결과의 후처리 기능을 추가하였다.

향후 본 연구에서 개발 완료될 화재영향분석용 모바일 어플리케이션은 원전 화재방호 검사 지원에 특화된 어플리케이션이지만 규제기관의 검사자에게만 국한되지 않고 화재영향분석을 수행하는 모든 분석가들에게 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words: Fire protection, Fire influence analysis, FDT^s (Fire Dynamics Tools)

감사의 글: 본 논문은 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다.(No. 2105031)

원전 복수기의 폐열을 이용한 고온수 생산 히트펌프 사이클 설계 연구

김진만 · 이천규 · 이정길

한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

Study on the design of heat pump cycles for high-temperature water production using waste heat from the condenser in a pressurized water reactor

Jin Man Kim, Cheonkyu Lee, Jung-gil Lee

Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

히트펌프 시스템은 탄소를 배출하지 않으면서도 보일러와 같은 열원기기와 비교할 때 더 높은 효율을 낼 수 있기 때문에 친환경 열원기기로 주목받고 있다. 본 연구에서는 가압경수형 원자로 내의 복수기(condenser)에서 발생하는 폐열을 이용해 주변 산업에 고온수를 공급하기 위한 히트펌프 사이클 기초 설계 연구를 수행하였다. 냉매의 종류에 따른 사이클의 성능을 비교하기 위해 4종의 냉매(R245fa, R365mfc, R1233zd(E), R1336mzz(Z))를 선정하였고, 사이클 구성에 따라 4가지(Single-stage(S), Single-stage with an IHX(SI), Two-stage with a flash tank(TF), Two-stage with an economizer and an IHX(TEI))의 히트펌프 사이클을 제시하여 성능을 분석하였다. 냉매의 GWP와 사이클 구성에 따른 히트펌프의 성능을 비교한 결과 R1233zd(E)가 본 연구에서 제시한 사이클에 가장 적합한 냉매로 분석되었다. 따라서, 제시한 히트펌프 사이클에 원전의 복수기에서 발생하는 폐열을 활용한다면, 주변 산업의 탄소 배출량을 줄임과 동시에 열원기기의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

사사의 글 : 본 연구는 2023년도 산업통상자원부 기계·장비산업기술개발사업 “냉각용량 2 kW급 반도체 식각공정(Etching Process)용 초저온 냉각 시스템 개발”의 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 20014817)

Seam Type Titanium Tube의 비파괴검사 결과 고찰

김인철* · 한경석

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Study on Non-Destructive Test Results of Seam Type Titanium Tube

Inchul Kim* · Kyeongseok Han

KHNP CRI

원자력발전소 주북수기(Main Condenser)는 원자력발전소 계통을 구성하는 핵심기기 중 하나로, 각각의 동체는 저압터빈 아래에 위치하며 동체 내부의 전열관은 직관형으로 설치되어 있다. 정상운전 중에 저압터빈 배출증기는 주북수기로 하향 유입되어 응축되고 전열관측은 순환수계통으로 해수(Sea Water)가 공급된다.

주북수기 전열관은 40,000개에서 100,000개가 설치되어 있으며 외경과 두께가 발전소별로 동일하지는 않으나 대부분 외경은 25.4mm, 두께 0.71mm의 얇은 두께의 티타늄 재질 (ASTM B338 Gr.2)을 사용하며, 용접부가 존재하는 Seam Tube 이다.

전열관은 주기적으로 비파괴검사로 건전성을 확인하고 있으며 검사방법은 전열관 수량이 많고 검사장소가 대부분 협소하기 때문에 검사속도가 빠르고 장비설치가 용이한 보빈 (Bobbin) 탐촉자를 이용한 와전류검사(ECT ; Eddy Current Test)를 수행하고 있다.

본 논문에서는 용접부가 존재하는 티타늄 전열관 와전류검사에서 결함이 용접부와 모재부에 존재하는 경우, 결함 깊이 측정 결과 차이점 및 용접으로 인한 결함 신호의 왜곡이 존재하는지 실험을 통하여 와전류신호 특성을 고찰하였다.

성극지수(PI)를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가

박혜성

한국수력원자력(주)

Aging Status Evaluation of Nuclear Power Plant Cables using Polarization Index(PI) Test

케이블은 원자력 발전소에서 중요한 부품 중 하나로, 안정적인 운영을 위해 정기적인 검사와 유지보수가 필요합니다. 이에 따라 케이블의 상태감시 기술의 중요성이 대두되고 있습니다.

발전소의 안전성 관련 케이블은 기기검증 관련 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 중의 사용수명을 모의하고 고에너지 배관 파단사고 발생시 고온/고압/고방사선 조건에서 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 방사선, 화학, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증되어 있습니다. 그럼에도 불구하고 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 않은 노화 스트레스에 노출되므로 검증과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 필요합니다.

이번 연구에서는 원전용 케이블의 노화상태 평가를 위해 절연저항(IR) 성극지수(PI) 시험을 제안합니다. 절연저항 시험기는 양단이 개방된 전기기기의 +, - 회로에 전압을 가하고 전류를 측정하는 방식으로 절연저항($\frac{\text{전압}}{\text{전류}}$)을 측정합니다. 성극지수는 전압인가 10후 저항을 1분 후 저항으로 나눈 값입니다. XLPE, EPR 재질의 신품, 10년 간격으로 60년까지 열/방사선 노화된 상태 케이블을 대상으로 시험을 진행했습니다.

아쉽게도 5kV EPR 절연체 케이블에서만 유의미한 결과가 확인되었습니다. 40년 측정결과만 측정 오류로 판단해 성극지수를 기준으로 10분 저항을 $2.03 \rightarrow 15T\Omega$ 으로, 10분 저항 보정 비율만큼 1분 저항을 $1.21 \rightarrow 8.94T\Omega$ 으로 보정하면 0년부터 60년까지 1분 저항값이 꾸준히 증가됨을 확인할 수 있었습니다. 노화에 따라 1분 동안 측정한 절연체의 절연저항값이 지속적으로 증가하는 추세가 확인됐는데, 다시 말해 흡수전류가 감소가 확인됐는데 이는 구성물질(열가소성)의 분해를 의미합니다. 케이블 상태감시에서 중점적으로 보고 있는 절연체의 물리적, 화학적 변화화가 측정된 것입니다.

본 연구는 성극지수 시험을 활용하여 원전용 케이블의 노화상태를 정확하게 평가할 수 있는 상태감시 기술을 개발함으로써, 원전의 안전성과 운영 효율을 향상시키는 데에 기여할 것으로 기대됩니다.

증기발생기 검사 신호 노이즈를 반영한 POD 선도 도출

Derivation of POD Curve Reflecting the Noise of the Steam Generator Inspection Signal

천근영, 지동현*

한국수력원자력 중앙연구원

원전 증기발생기 전열관에는 다양한 열화가 발생되고 있다. 정비기준을 초과한 전열관은 정비를 수행한 후 유형별 열화에 대해 정량적으로 전열관 건전성 평가를 수행하여 다음 검사 주기까지 증기발생기 전열관이 건전성을 유지하는지 확인하고 있다.

건전성 평가의 핵심 입력변수 중 하나로써 열화 탐지확률(POD, Probability of Detection) 선도의 95%에 해당하는 열화 크기가 사용되며, 본 열화크기는 실제 노이즈의 분포 여부에 따라 영향을 받는다. 이에 열화 탐지확률 선도는 실제 발전소 현장 노이즈가 반영된 것을 사용함이 가장 이상적이나 열화평가에 적용중인 POD 선도는 미국 EPRI에서 제공하고 있는 열화별 검사지침서(ETSS)내의 인공결합시험편과 현장 인출데이터 세트로부터 도출된 POD 선도로 실제 발전소 현장 노이즈를 반영하지 못하고 있다.

본 연구에서는 실제 발전소 증기발생기 노이즈가 반영된 POD 선도를 도출하고자 자동 평가프로그램(RevospECT)을 이용하여 국내 운영중인 OPR-1000형 모델의 증기발생기를 대상으로 각 열화발생 관심영역별 노이즈를 측정하였으며 EPRI MAPOD 소프트웨어를 사용하여 측정한 노이즈값과 EPRI ETSS Ahat값(열화 깊이별 진폭값) 두 입력변수를 지정 현장 노이즈가 반영된 POD 선도를 도출하였다.

국내 원전 내 점화원의 수량 산정 방식 변경으로 인한 화재구역별 화재발생빈도 영향 평가

이한설 · 이현교 · 김경수
한국수력원자력 중앙연구원

A Effect Assessment for Fire Ignition Frequency by Fire Compartments due to Change the Counting Method for Ignition Sources in Domestic NPPs

국내 원전의 화재사건 확률론적안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment)에서는 원전 내 주요 건물을 화재구역으로 구획하고, 화재구역 내 PSA 대상 기기와 관련 케이블 포설 경로를 설계 자료와 현장 조사를 통해 확인한다. 임의의 화재구역에서 화재 발생 시 일어날 수 있는 사고를 파악하고 사고 완화에 요구되는 기기의 가용성과 해당 화재구역에 설치된 기기들의 손상을 고려하여 화재로 인한 해당 화재구역의 노심손상빈도(CDF: Core Damage Frequency)를 계산한다. 여기에는 초기 화재 진압에 실패하여 이웃 화재구역으로 화재가 전파된 경우도 포함된다.

국내 원전의 화재사건 PSA에서는 원전 내 화재구역별 화재발생빈도를 평가하기 위해 장기간에 걸쳐 수집된 미국 원전의 화재 발생 경험데이터인 NUREG-2169를 활용하고 있다. NUREG-2169에는 미국 원전에서 점화원으로 분류된 원전 내 기기, 가연성 물질, 화기 작업 등에 대하여 점화원별 화재발생빈도가 제시되어 있다.

화재사건 PSA 분야의 최신 분석 방법론인 NUREG/CR-6850에서 NUREG-2169에 제시된 점화원에 대하여 점화원별 수량 산정 방식을 제공하고 있으며, NUREG/CR-6850은 원전 운영 사업체가 각기 다른 미국 산업계 현황을 고려하여 원전 운영 사업체에 따라 점화원 수량 산정 결과에 불일치가 발생하는 것을 방지하고 원전 운영 사업체 간 점화원 수량 산정 결과의 일관성을 확보하기 위해 점화원 수량 산정 방식에 대한 지침을 제공하고 있다.

NUREG/CR-6850에서 제공하는 점화원 수량 산정 방식 지침은 NUREG-2169에 제시된 점화원 유형별로 정리되어 있으며, 미국 내 점화원 수량 산정 관행을 종합하고 수량 산정 기준이 모호한 부분을 보완하여 분석자들에게 명확한 점화원 수량 산정 방식을 제공한다. NUREG/CR-6850에서 제공하는 점화원 수량 산정 방식 지침에서 이전의 화재사건 PSA 방법과 비교하였을 때, 가장 눈에 띄게 달라진 점은 전기캐비닛과 임시점화원(가연성 물질, 화기 작업 등)에 대한 수량 산정 방식인데, Wall-mounted Panel과 Well-sealed Panel에 대해 상세한 점화원 선별기준이 추가되었고 이전에는 Breaker Cubicle 단위로 Panel의 수량을 산정하던 방식에서 Vertical segments로 나누어 Panel의 수량을 산정하는 방식으로 변경되었다. 또한, 대형 Panel에 대하여 Standard Panel 규격에 따라 나누어 Panel의 수량을 산정하는 방식이 추가되었다.

본 논문에서는 전기캐비닛과 같은 고정점화원에 한하여 점화원 수량 산정 방식을 변경 적용하였고 그에 따른 화재구역별 화재발생빈도 영향 평가 결과를 다루었다.

원전 근본원인분석의 해외 프로세스 분석을 통한 최적 프로세스 설계 Optimized Process Design of Root Cause Analysis with Process Analysis of Overseas Organization

김형균

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소에서 수행하는 근본원인분석(Root Cause Analysis, 이하 RCA)은 일련의 원인 분석과 관련된 활동을 최적화하여 프로세스화 하였으며 근본원인 도출을 위해 5 Whys 기법 등 품질경영분야에서 활용하는 분석기법을 도입하였다. 근본원인분석의 수행 프로세스는 미국 INPO(Institute of Nuclear Power Operations)에서 전파한 프로세스를 기반으로 각 발전사에서 자신들에 맞는 방법으로 발전시켜 왔다. 본 연구에서는 미국의 발전사 및 정부기관, 국제기구에서 제시하는 RCA 프로세스를 분석하여 최적의 수행 프로세스를 도출하고자 한다.

미국의 발전사는 원자력발전을 대표하는 Exelon 및 Entergy의 프로세스와 미국 정부기관인 DOE(Department OF Energy), 국제기구인 IAEA(International Atomic Energy Agency)의 RCA 프로세스를 비교/분석하였다. 각 기관의 RCA 수행 프로세스는 전체 프로세스를 나열식으로 설명하고 있어서 상호 비교하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 전체 프로세스를 각각의 특성에 따라서 그룹화하여 프로세스를 비교/분석하였다. 그룹화는 수행단계별로 '준비', '사건조사', '원인분석', '시정조치', '보고/전파'로 5단계로 나누었다. 그룹별로 각각의 프로세스를 비교분석을 하였으며 이를 기반으로 프로세스 중 우수사항과 전체 프로세스 수행의 효율성을 고려하여 국내에 적합한 수행 프로세스를 도출하였다. 도출한 프로세스 중 '사건조사' 및 '원인분석' 단계의 세부 프로세스를 보면 다음과 같다. '사건조사' 단계에서는 사건의 문제가 무엇인지를 정의하는 것을 시작으로 사건과 관련된 다양한 정보를 수집하고, 유사상태 확대검토를 수행하여 유사한 문제가 발생하는 것을 예방하기 위한 검토를 수행한다. 그리고 이전에 동일하거나 유사한 사건이 있는지 국내외 자료를 검토하는 운전경험 검토를 수행하고 이를 기반으로 사건을 종합적으로 분석하여 사건을 완전히 재구성하게 된다. '원인분석' 단계에서는 원인분석 기법 등을 활용하여 원인을 도출한 다음, 원인들의 근거 및 증거를 확인하여 원인여부를 검증한다. 그 다음 원인과 문제 또는 원인과 원인 간의 관계를 고려하여 기여원인과 근본원인을 결정한다. 근본원인이 결정되면 이를 대상으로 유사한 원인에 의해 다른 사건이 발생할 가능성이 있는지를 평가하는 유사원인 확대검토를 수행한다.

본 연구에서는 최적화된 근본원인분석 프로세스를 도출하기 위해 미국 및 국제기관의 RCA 수행 프로세스를 분석하였다. 큰 틀에서 각 기관의 수행 프로세스는 차이가 크지 않았다. 하지만 RCA와 같이 민감한 프로세스에서는 사소한 차이로 인해 분석의 성패가 갈릴 수도 있으므로 세밀한 프로세스 검토 및 최적 프로세스 설계가 필요하다.

Enterprise EDG 윤활유, 냉각수 운전상태 및 온도 설정 고찰
Study for Temperature Setting and Operating Condition of Lubricating
Oil and Jacket Coolant of Enterprise EDG

정우근* · 강준승*

*한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자로시설의 안전관련 디젤발전기(EDG, Emergency Diesel Generator)는 모든 소외 교류전원상실 시 발전소 안전정지에 필요한 설비에 비상전력을 공급한다. 비상디젤발전기는 비상 기동이 요구되면 즉시 기동되고 수분 이내에 전출력에 도달하여 안전 관련 기기에 필요한 전력을 공급해야만 하는 매우 가혹한 “신속, 저온(cold)” 기동 및 운전이 요구된다. 따라서 EDG의 지속적인 운전 중일 때, 특히 냉각수와 윤활유 온도의 유지는 EDG 운전 건전성에 큰 영향을 미치는 요인이다. 냉각수의 온도 변화는 윤활유 온도 변화에 직접적인 영향을 미치고 윤활유 과냉각 또는 지나친 온도 상승을 초래할 수 있다. 이는 윤활유 품질을 떨어뜨릴 수 있고 과도한 마모로 인해 엔진의 대형 사고를 초래할 수 있으므로 냉각수 및 윤활유 온도 관리는 매우 중요하다. 비상디젤발전기의 엔진 냉각수 및 윤활유 온도 관리는 비상디젤발전기 계통 점검 및 성능시험 절차서에 따라 수행되는데 윤활유 및 냉각수 온도 정상범위를 설정하기 위하여 설계자료와 4년간의 운전 데이터 및 제작사 권고사항 등을 기반으로 적정 유지 온도를 검토하고 관리온도를 결정하고자 한다.

중수로 연소이력 반영 사용후연료 특성 분석 방법 타당성 검토

A Study of Characteristic Analysis of CANDU Spent Fuel Reflecting Irradiation History

김영애 · 김도연 · 함태규 · 박동환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

중수로 노심은 380개 연료채널로 구성되며 최적화된 설계 출력분포를 유지하도록 운전 중 연료교체를 수행한다. 평균적으로 매일 약 16개 신연료를 장전하고 동시에 사용후연료를 방출한다. 한 개 채널에는 12개 연료다발이 장전되는데 채널당 8개 연료다발만 교체하며 입구에서 신연료를 장전하면 출구에서 사용후연료가 방출되는 방식이다. 따라서, 입구에서부터 연료다발 위치에 번호를 부여하면 1~4번 위치에 장전되어 있던 연료는 연료교체 시 해당채널 9~12번 다발위치로 이동해 두 번째 연소를 하게 된다. 중수로 사용후연료는 사용후연료저장조에서 최소 6년이상 냉각된 이후에 건식저장시설로 이동 저장할 수 있다. 건식저장을 위해서 사용후연료는 바스켓에 60다발씩 담아서 운반용기를 이용해 운반하는데 운반용기의 차폐 성능을 고려해 바스켓에 저장되는 사용후연료의 평균 연소도를 제한한다. 노심에서 방출되는 연료의 방출연소도를 기준으로 하며 이때 해당 연소도의 연소이력은 별도로 고려하지 않고 있다. 장전위치에 따른 평균 방출연소도를 비교하면 방출되는 8개 다발 중 채널중심부에 장전되었던 다발 4개는 채널출구쪽에 장전되었던 다발 4개보다 방출연소도가 낮다. 출구쪽 연료다발은 중심부보다 상대적으로 낮은 출력으로 연소되지만 두 번 연소되기 때문에 방출연소도가 더 높은 경향을 보인다. 일반적으로 평균 출력으로 일정기간 연소되는 것을 가정해서 방출연소도를 기준으로 사용후연료의 특성을 분석하게 되는데 동일한 연소도의 사용후연료라도 연소이력에 따라 특성에 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 사용후연료의 장전위치에 따른 연소이력 반영 유무에 따른 특성 차이를 비교하고 특성평가 방법의 타당성을 검토하였다. 향후 사용후연료 특성자료 생산 시 타당성 검토 결과를 활용하고자 한다.

APR1400 원전 노외핵계측기 형상처리행렬(SAM) 성능 확인 Performance Check of Excore Detector Shape Annealing Matrix(SAM) for APR1400 Plant

문상래, 이환수

한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹

APR1400 원전의 노심보호연산기(CPC, Core Protection Calculator)는 총 4개의 채널로 구성되어 있으며 각 채널은 축방향 노심을 기준 상·중·하로 구성된 3개의 노외계측기를 통해 출력분포를 계산하고 있다. CPC 출력분포 계산을 위한 출력분포 합성은 노내계측기를 이용한 노심 외곽출력(Core Peripheral Power)과 노외계측기신호(Excore Detector Signal)의 상관관계를 행렬로 나타낸 형상처리행렬(SAM, Shape Annealing Matrix)을 사용하여 계산된다. SAM은 매 주기초 출력상승시험(FPA: Fast Power Ascension)시 측정하는 20 ~ 40 개의 Snapshot 자료를 이용하여 결정되며 CPC에 입력 후 한주기 동안 사용된다. 과거의 SAM 결정 방법론은 Gauss가 이미 200년 전에 발견하여 광범위하게 사용되어 왔던 “최소 제곱법”(Least Squares Method)을 사용하였으나 주기말 CPC 축방향 출력분포 RMS(Root Mean Square) 오차가 증가하는 문제 때문에 국내 원자력발전소는 개선된 방법으로 역행렬 제한조건을 이용한 SAM 측정 방법론(Simulated Annealing SAM)을 적용하고 있다.

APR1400 원전은 OPR1000형 원전에 비해 더 큰 열출력을 가져야 하기 때문에 노심 크기가 반경방향으로 1.36배 증가하였다. 반경방향 노심크기 증가로 인해 장전모형 형태 그리고 운전 중 노심 연소도에 따라서 노외계측기에서 계측되는 누설 중성자가 OPR1000형과 동일할 수는 없다. 역행렬 제한조건을 이용한 새로운 SAM 결정 방법과 기존 SAM 결정방법과의 차이점을 요약하면, 새로운 방법론은 Ill-Posed 최소제곱법을 사용하여 SAM을 결정할 때 제한조건(Constraint Conditions)을 부여하고 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 방법으로 SAM 값을 결정한다는 점이다. 이는 과거 Ill-Posed 최소제곱법의 결점을 개선하기 위해 물리적으로 의미있는 제한조건과 기존 산업계에 범용적으로 사용되고 있는 수리적 방법인 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 방법을 추가한 형태이다.

본 논문에서는 노심 크기가 커진 APR1400 원전에 대해서 발전소에서 측정 및 결정된 개선된 SAM 결과가 과거의 SAM 결정 방법론 대비 얼마만큼 정확성이 유지되는지를 정량적으로 확인하였다. SAM 정확성 지표로서 SAM 측정시점의 Test Value, Inverse Matrix 그리고 주기말 CPC RMS 오차를 분석한 결과 개선된 SAM 방법론이 APR1400 원전에 대해서도 정확성이 보장됨을 확인하였다.

축방향 노심 출력분포는 노심연소 및 운전 조건에 따라서 상시 변경될 수 있기 때문에 부정확한 SAM 값이 결정되어 CPC에 설치될 경우 주기말 CPC RMS 오차를 증가시킬 수 있다. CPC RMS 오차가 8%를 초과할 경우 CPC 핵비등이탈율(DNBR) 및 선출력밀도(LPD) 계산 시 벌점(Penalty)이 부가되어 발전소 운전여유도 감소를 초래할 수 있기 때문에 SAM 결정 시 많은 주의가 필요하다. 개선된 SAM 결정 방법론은 국내 고유 핵심기술로서 해외 원전에서도 많은 관심을 보이고 있으며, 향후 해외 원전 수출 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

시간영역반사법(TDR) 시험을 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가

박혜성 · 박경흠 · 이정윤

한국수력원자력(주)

Aging Status Evaluation of Nuclear Power Plant Cables using Time Domain Reflectometry (TDR) Test

케이블은 원자력 발전소에서 중요한 부품 중 하나로, 안정적인 운영을 위해 정기적인 검사와 유지보수가 필요합니다. 이에 따라 케이블의 상태감시 기술의 중요성이 대두되고 있습니다.

발전소의 안전성 관련 케이블은 기기검증 관련 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 중의 사용수명을 모의하고 고에너지 배관 파단사고 발생시 고온/고압/고방사선 조건에서 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 방사선, 화학, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증되어 있습니다. 그럼에도 불구하고 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 않은 노화 스트레스에 노출되므로 검증과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 필요합니다.

이번 연구에서는 원전용 케이블의 노화상태 평가를 위해 시간영역반사법(TDR) 시험을 제안합니다. 원전에서는 안정적인 운영을 위해 케이블의 상태감시와 유지보수가 필수적입니다. 그러나 기존의 상태감시 방법은 케이블의 손상을 감지하는 것에 그치고 있어, 케이블의 노화 상태를 정확하게 평가하는 것은 어렵습니다. TDR은 전송선로에서 발생하는 신호 파형의 반사를 측정하여 케이블 절연체의 노화 상태를 파악하는 방식으로, 저전압 신호를 사용하여 케이블 손상 우려가 없으며 빠르고 손쉽게 검사가 가능합니다.

이 연구에서는 XLPE, EPR 재질의 신품, 10년 간격으로 60년까지 열/방사선 노화된 상태 케이블을 대상으로 TDR의 전파속도(V_p) 변수, 입사파대 반사파의 전압 진폭 비율(ρ) 변수를 측정했습니다. V_p 측정결과 절연체가 XLPE이고, Core to Core 연결방식에서만 노화 진행에 따른 전파속도 하락 추세를 확인할 수 있었습니다. ρ 측정 결과 절연체에 상관없이 Core to Shield 연결방식에서만 노화 진행에 따른 ρ 상승 추세를 확인할 수 있었습니다.

실험을 통해, TDR 시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 케이블의 노화 진행 추세를 파악할 수 있음을 확인하였습니다. 또한, TDR 시험을 통해 측정된 데이터를 분석하여 케이블의 예방적인 교체 및 보수를 계획할 수 있어, 원전의 안전성과 운영 효율을 높일 수 있음을 확인하였습니다.

본 연구는 TDR 시험을 활용하여 원전용 케이블의 노화상태를 정확하게 평가할 수 있는 상태감시 기술을 개발함으로써, 원전의 안전성과 운영 효율을 향상시키는 데에 기여할 것으로 기대됩니다.

탄력운전 화학 및 체적제어계통 성능 평가 Performance Evaluation on CVCS for Flexible Operations

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원전의 일일부하추종운전시 화학 및 체적제어계통의 성능수준을 평가하였다. 평가를 위해 100-50-100% 부하추종운전 출력변화를 매일, 그리고 주기말 90%까지 수행하는 것으로 가정하였다. 또한 원자로냉각재계통의 정상적인 유출/주입량을 화학 및 체적제어계통 성능평가의 제한사항으로 설정하여 부하추종시 화학 및 체적제어계통이 수용해야 할 붕산수와 탈염수량을 평가하였다. 평가결과 부하추종운전을 매일 수행함에 따라 붕산수는 붕산수 저장탱크에서 계속 소모되고, 탈염수는 원자로보충수탱크에서 계속 축적되는 것으로 평가되었다. 결과적으로 현재 탱크용량의 여유분을 고려할 때, 붕산수저장탱크와 원자로보충수탱크는 추가 용량이 필요한 것으로 평가되었다. 따라서 매일 100-50-100% 출력변화를 주기말 90%까지 수행하기 위해서는 화학 및 체적제어계통 붕산수저장탱크와 원자로보충수탱크의 용량 증대가 필요하다. 한편, 이 결과는 부하추종운전시 출력변화량과 횟수와 직접관련이 있으므로 출력변화량과 횟수가 감소되면 저장탱크의 용량 증대 없이 운전을 수행할 수 있다. 즉, 현재 붕산수저장탱크와 원자로보충수탱크의 여유용량을 고려해 볼 때, 한 주기동안 부하추종운전 횟수를 제시된 요건보다 현저히 낮출 경우 추가적인 탱크 용량증대는 필요없을 것이다. 그러나 이러한 부하추종 요건의 완화나 붕산수저장탱크와 원자로보충수탱크의 용량증대가 어려운 경우에 다음과 같은 운전방법도 고려해 볼 수 있다. 즉, 붕산수저장탱크의 추가적인 붕산수는 운전 중 주기적인 붕산 혼합을 통하여 붕산혼합탱크에서 붕산수저장탱크로 공급하고 축적되는 원자로보충수탱크의 탈염수는 붕소재생계통 운전으로 재처리되어 돌아오는 탈염수를 액체폐기물처리계통으로 보내어 탈염수의 축적을 막는 운전방법이다. 또한 화학 및 체적제어계통의 대용량 탱크중 하나인 붕소재생계통의 수용탱크가 제시된 부하추종운전을 수용할 수 있는지 평가를 수행한 결과 현재 붕소재생계통의 연속 처리 용량을 고려할 때 주기말 90% 연소시점까지 처리가 불가능한 것으로 평가되었다. 하지만 처리가 불가능 기간동안 붕소재생계통 처리용량을 초과하여 수용탱크에 축적되는 양이 현재 수용탱크의 여유분 보다 적기때문에 붕소재생계통의 수용탱크는 제시된 부하추종운전 성능을 만족할 것으로 평가되었다.

독일 해체원전의 규제해제 및 기술자격을 위한 측정절차

유지환 · 서형우 · 김기림

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹

원전해체에서 규제해제는 원자력 및 방사선 보호법에 따라 감독으로부터 잠재적인 방사능 물질을 방출하기 위한 행정 행위이다. 해체에서 발생하는 모든 물질에 대한 규제해제를 위해 충족되어야 하는 전제 조건은 두 가지 기본 규제해제 경로(무제한적 및 특정 규제해제)를 포함하는 독일의 방사선 방호 조례(Radiation Protection Ordinance)에 규정되어 있다. 이 두 규제해제 경로의 주요 차이점은 무제한 규제해제 수준을 준수하는 물질은 일상 생활의 모든 영역에서 제한 없이 사용할 수 있다는 것이다. 그러나 특정 규제해제 영역의 물질 관리를 위해 명확하게 정의된 경계 조건을 준수해야 하며 규제해제 절차 내에서 준수 여부를 입증해야 한다. 원전해체를 위한 규제해제 절차 내에서 방사성 물질의 소유자인 해체 면허 소유자는 규제해제를 위한 측정 절차를 실행할 책임이 있다. 면허 소지자나 지시를 받은 다른 당사자(예: 공인된 서비스 제공 회사)가 측정을 수행할 수 있다. 위탁된 전문가의 지원을 받는 주 관할 당국은 측정에 대한 감독을 담당한다. 측정 장비가 규정 및 규제해제 통지에 따른 측정 목적 및 규제해제 프로세스의 요구 사항을 충족하는지 확인하고 정기적으로 장비를 유지 관리하고 신뢰성을 확인하는 것은 면허 소지자의 책임이다. 규제해제 과정에서 방사성 물질에 대한 여러 측정이 수행되며 각각은 규제해제 과정의 단계와 관련된 특정 목표를 가지고 있다.

측정은 사전 측정, 예비 측정 및 결정 측정으로 구분된다. 사전 측정은 물질 또는 계통의 운영 이력에 대한 정보를 사용하고 후속 분석 또는 직접 측정과 함께 샘플링으로 구성되며 주로 다음 용도로 사용된다. 예비 측정은 일반적으로 후속 결정 측정을 위한 전제 조건이 될 수 있는 표면 측정이다. 이들은 전처리 공정의 성공 여부를 관리하는 데 사용된다. 제염 조치를 수행하고 표면 오염의 균일한 분포에 대한 증거를 제공하여 높은 수준의 지역 오염(핫스팟)을 제외할 수 있다. 결정 측정은 방사능 핵종분석이다. 그 결과는 방사선 방호 조례에서 발견된 규제해제 제한값과 비교하여 고려된 물질 배치에 대한 규제해제 달성 여부를 결정을 판단한다. 이때 결정측정에는 다음 측정 절차가 사용된다. 표면 오염 모니터로 오염 측정, 현장 감마 분광법, 물질 샘플의 감마 분광법, 총 감마 방사능 측정이다. 방사선 방호 조례의 규제해제 값을 준수하려면 면허 보유자가 적절한 측정을 수행하거나 의뢰해야 하며, 측정 방법과 측정 장비가 규제해제 측정에 적합한지 확인해야 한다. 표면 오염 모니터, 현장 감마 분광법, 물질 샘플의 감마 분광법 및 총 감마 방사능 측정을 통한 오염 측정은 규제해제 프로세스의 주요 측정 방법이다.

규제해제되는 물질에 허용되는 연간 10 μSv 선량 수준은 이미 매우 낮지만 독일에서는 항상 규제해제 규정을 준수하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 많은 규정이 수립 및 검토되었으며, 가능한 한 안전하고 신뢰할 수 있는 규제해제를 위해 경험을 바탕으로 향후 추가로 개발될 것이다.

상용 설계 및 해석프로그램의 검증 적용성 검토

A Study on Application related to Commercial Grade Design and Analysis Computer Program Dedication

양창석 · 홍태화 · 정선철

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

원자력발전소에서 안전등급 품목(Safety-Related Item)을 공급하는 방법은 안전등급 업체로부터 기본기기로 구매하거나 일반규격품(Commercial Grade Item, 이하 상용품) 검증(Dedication)을 통하여 공급하는 두 가지 방법이 있다. 국내 상용품 검증 기술기준은 KINS RG N17.12에 따라 EPRI NP-5652 Rev.0(1988)를 적용하고 있으며, 디지털 품목은 EPRI TR-106439(1996)를 적용중이다. 미국의 상용품 검증 기술기준은 NRC RG 1.164에 따라 EPRI 3002002982(2014, EPRI NP-5652 Rev.1)을 적용하고, 디지털 품목은 EPRI TR-106439(1996) 및 EPRI 3002002289(2013)를 적용하고 있다. 이에 디지털 상용품검증 관련 신규지침(EPRI 3002002289)에 대한 국내 적용성 검토를 수행하고자 한다.

2. 본론

상용품검증 신규지침(EPRI 3002002982)에서 디지털 제품을 발전소 SSC¹⁾에 필수적인 디지털 기기 및 컴퓨터 프로그램과 발전소 SSC에 필수가 아닌 컴퓨터 프로그램으로 나뉘 진자는 기존 디지털 상용품 지침인 EPRI TR-106439를 적용하고, 후자는 EPRI 3002002289를 적용한다. 신규 기술지침(EPRI 3002002289)에서는 안전관련 결과물을 생성하는 상용 컴퓨터 프로그램의 안전기능을 분류하고 기술평가(Technical Evaluation)와 수락과정(Acceptance Process)에 대하여 자세하게 설명하고, 실제 조달 사례(Procurement Example)를 제시한다. 기술평가를 통하여 도출한 필수특성으로는 업데이트(형상)관리, 플랫폼 호환성, 하드웨어 호환성, 내장품질, 설계 및 구현품질, 기능/어플리케이션, 범위, 정확성, 일관된 반복성 등이 있으며, 특수시험/검사(검증방법1) 및 공급자 실사(검증방법2)를 통하여 적합성을 평가할 수 있다. 기존 디지털 상용품검증 기술기준은 유/무형의 디지털 기기 및 컴퓨터 프로그램에 대한 내용을 다루었다면, 신규 기술기준은 안전관련 결과물을 생성하는 무형의 컴퓨터 프로그램에 대한 검증 기술내용을 자세하게 다루었다. 해당 기술기준을 국내 원전에 적용한다면, 안전관련 결과물을 생성하는 프로그램(배관 스트레스 해석, 전력계통 분석, 사고해석 등)중 안전등급 업체로부터 안전등급 품목으로 구매가 불가능한 프로그램의 경우, EPRI 3002002289를 적용하여 상용품검증을 통하여 안전등급 품목으로 공급이 가능해진다.

3. 결론

현재 미국에서 적용중인 상용품검증 신규 기술기준(EPRI 3002002982) 및 상용 설계 분석 프로그램 검증기술기준(EPRI 3002002289)에 대한 적용사례를 조사하여 국내 적용방안을 검토중이다. 해당 기술기준이 국내에 도입된다면 안전관련 디지털기기 안전성 및 신뢰성 향상에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

1) Structures, Systems, or Components : 구조, 시스템 및 구성요소

상용 PLC 설비의 검증 적용성 검토

A Study on Application related to Commercial Grade Programmable Logic Controller Qualification

양창석 · 홍태화 · 정선철

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론(상용 PLC 설비의 안전등급 품목 공급을 위한 기술기준)

PLC(Programmable Logic Controller)는 전통적으로 전자기계 및 단일 기능 전자장치를 사용하여 구현되었던 일련의 사용자가 정의한 제어 작업을 수행하도록 특별히 설계된 하드웨어 및 소프트웨어 모음이다. 원자력발전소에서 안전등급 품목(Safety-Related Item)을 공급하는 방법은 안전등급 업체로부터 기본기기로 구매하거나 일반규격품(Commercial Grade Item, 이하 상용품) 검증(Dedication)을 통하여 공급하는 두 가지 방법이 있다. 이 중 상용품 PLC를 안전등급 품목으로 공급하기 위해서 EPRI TR-107330(Generic Requirements Specification for Qualifying a Commercially Available PLC for Safety-Related Applications in Nuclear Power Plants)에 따라 설계 및 제작되어야 한다.

2. 본론(EPRI TR-107330 관련 국내외 규제기관 승인현황 및 기술내용)

미국에서는 신규 CGID 지침(EPRI TR-3002002982, EPRI NP-5652 Rev.1)에 디지털 기기 및 컴퓨터 프로그램 검증과 관련된 요건은 총 6가지 EPRI 기술기준이 제시되었으며, Reg Guide 1.164에서는 이 중 두가지 기술기준(EPRI TR-107330 및 106439)을 승인(Endorse)하였다. 한국은 경수로형 원전 안전심사지침 7장 부록 7-1.4 “디지털 컴퓨터 기반 I&C 계통에서의 PLC 사용에 대한 평가지침”에 발전소 개별 요구사항에 대한 검증 전에 일반적인 검증에 대하여 EPRI TR-107330 및 106439를 적용할 것을 요구한다. 해당 기술기준에서는 1) 필수 기술 특성요건(예: 입출력 포인트 및 옵션, 스캔 속도, 소프트웨어 기능 등), 2) 기기검증 관련 특성요건(예: 환경 내성 기능, EMI/RFI 기능, 안전/비안전 간 분리(Isolation) 기능, 서지 내성 기능 및 충격/진동 내성 기능 등), 3) 소프트웨어 확인 및 검증 요건을 요구한다. 이 중 소프트웨어 확인 및 검증을 위해서는 원자력 품질보증 프로그램 관리 하에 IEEE 7-4.3.2, IEEE 1012-1986에 따라 수행하고, 원자력 품질보증 프로그램을 가지고 있지 않다면 EPRI TR-106439로 대체 수행할 것을 요구한다. 실제 일반 PLC시스템 검증을 수행한 제조사 및 플랫폼은 Triconex의 Tricon PLC, Westinghouse의 AC160 PLC Common Q, RRNC(Rolls-Royce Civil Nuclear)의 Spinline3 및 두산에너지빌리티의 POSAFE-Q PLC가 있다.

3. 결론

현재 국내 발전소 중 노후화 된 발전소들의 안전등급 제어시스템을 PLC 제어기기로 교체하고자 한다면 EPRI TR-107330에 따라 검증 후 제작해야 한다. 또한 현재 개발 중인 국내 소형 모듈형 원자로(SMR) 개발과정에서도 안전등급 제어시스템을 PLC로 적용하고자 한다면, 해당 기술기준을 참조해야 한다. 현재 해외 수출한 국내 원전의 안전등급 제어시스템은 Westinghouse의 PLC 플랫폼이다. 국내 가동원전 최초로 적용한 POSAFE-Q의 PLC 플랫폼이 앞으로 많은 운전경험을 가지고 EPRI TR-107330관련 기술력을 축적해 나간다면 향후 국내 원전 PLC 플랫폼 수출에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

OPR1000형 1차측 기기 기능적중요도결정 표준화 연구

A Study of Standardization of Functional Importance Determination(FID) in Nuclear Power Plants of Same Reactor Type

이상대 · 김희찬 · 김재성
한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 기능적중요도결정(FID) 프로세스는 발전소를 구성하는 모든 설비를 대상으로 안전성, 신뢰도, 운전가능성의 유지관리에 중요한 설비를 분류하는 것이다. 국내 원자력발전소 중 동일 노형으로 건설 및 운전 중인 발전소들에도 기능적중요도결정 프로세스가 적용되어 전체 설비의 중요도를 결정해 오고 있다. 그러나, 최근 국내 원전에서는 발전소 설비관리 효과성 측면에서 노형이 동일하다고 설비가 모두 동일한 것은 아니나, 동일 노형의 발전소 중 동일 계통내의 동일 설비들은 최소한 동일 기능적중요도결정 결과를 유지하는 것이 유리하다는 판단하에 기능적중요도결정 표준화에 대한 필요성이 대두되었다. 이에, 본 논문에서는 국내 발전소 노형 중 다수호기를 차지하고 있는 OPR1000형 발전소를 대상으로 수행한 기능적중요도결정 표준화 방법에 대해 소개하고자 한다.

표. 발전소별 4xx 계통의 기능적중요도결정 연계 현황

발전소명	기능위치 수량	기준발전소와 연계가능 설비	기준발전소와 FID 중요도 불일치
기준 발전소	2,200	-	-
A 발전소	2,220	2,100	200(10%)
B 발전소	2,500	1,800	1,000(55%)
C 발전소	2,400	1,700	850(50%)
D 발전소	2,200	1,800	1,020((57%)

OPR1000형 발전소의 기능적중요도결정 표준화를 위해 아래와 같이 주요 설비별 특성을 고려하여 평가기준을 수립하여 적용하여, 이는 추후 발전소 엔지니어들이 각종 설비에 대해 기능적중요도결정 표준화 작업의 일관성 유지를 용이하게 하기 위함이다.

- Relief Valve : SSCs 기능 중요도와 동일하게 분류, 운전 빈도는 High(Energized)
- 고압배전반(4.16/13.8KV)에서 전동기 부하에 전원을 공급하는 차단기
 - 대형전동기 부하에 전원을 공급하는 차단기는 원칙적으로 부하와 동일하게 평가
- 정주기 시험에 활용되는 계측기
 - 정기시험 + 안전관련 계측기 : Critical B 이상

동일 노형·동일 기기 간 기능적중요도결정 표준화를 위해 각 발전소별 동일기능·동일기기에 대해 매칭작업을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 설비 중요도·운전빈도·운전환경 비교표를 작성하였으며, 최종적으로 각 설비별 표준안을 제시하여 발전소 검토를 거쳐 최종 표준안을 도출하였다. 이러한 동일 노형발전소의 기능적중요도결정 표준화 활동은 발전소 설비 예방 정비 및 설비관리 활동을 최적화하여 설비 건전성을 향상에 기여할 것이다.

제어봉구동장치 구동부 교체방안 검토

A Review of Replacement Plan

for Driving Parts of Control Element Drive Mechanism(CEDM)

이상섭

한국수력원자력(주) 중앙연구원

신재생에너지 기술이 발전하고 보급이 활발해짐에 따라 전력원간 역할이 변화하고 있으며, 새로운 에너지 환경이 형성되고 있다. 지금까지 원전은 기저부하 역할을 수행하였으나 향후에는 그 비중이 점차 변화될 것으로 예상된다. 이에 원전은 신재생에너지와 연계를 위해 탄력운전을 요구받고 있다. 탄력운전은 원전이 전력망이 요구하는 전력량에 따라 발전소 출력을 제어하는 운전형태이며, 이러한 운전에서는 원전 출력제어를 위해 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, CEDM)의 사용빈도가 증가하여 CEDM 교체가 필요할 수 있다. 본 연구에서는 CEDM 구동부인 모터집합체 교체를 중심으로 검토하였다.

CEDM은 원자로용기의 원자로헤드 노즐에 용접되어 있으며 출력제어를 위해 원자로 내부 제어봉을 삽입 및 인출한다. CEDM 모터집합체는 모터하우징 내부에 위치하고 있으며, 모터하우징은 모터집합체를 감싸고 있다. 모터하우징은 상부압력하우징에 오메가 씰 용접되어 원자로 압력경계를 형성하며, 모터하우징 내부에서 모터집합체는 원자로냉각재와 접촉한다. 모터집합체를 교체하기 위해 우선 고려할 사항은 방사선량 및 작업자의 방사선 방호이다. CEDM 구동부 교체작업은 원자로헤드가 원자로건물 내 저장대로 이동된 이후 진행되며, 교체작업 전 작업자를 위한 방사선량 확인 및 저감조치가 필요하다. 첫째 작업자가 원자로헤드에서 상부슈라우드 및 코일집합체를 인양하면, 상부압력하우징과 모터하우징이 남게 된다. 둘째 작업자가 상부압력하우징과 모터하우징이 연결된 용접부를 절단한 후, 상부압력하우징과 모터하우징 상부를 체결하고 있는 나사를 풀고 상부압력하우징을 제거한다. 마지막으로 상부압력하우징이 제거된 상태에서 작업자가 모터하우징 내부에 위치한 모터집합체를 인양하여 기존 모터집합체를 신품으로 교체한 후, 상기 순서의 역순으로 조립한다. 기존 모터집합체는 방사선차폐용기에 보관한다. 본 연구에서 검토한 CEDM 구동부 교체방안은 수출형 원전의 탄력운전 기술개발에 활용되고, 국내 원전산업의 기술력 향상에 기여할 것이다.

발전소 초기시험 시 피동보조급수계통 성능평가 방안 검토

Performance evaluation method of passive auxiliary feedwater System in initial test of nuclear power plant

이석호

한국수력원자력 중앙연구원

피동보조급수계통(PAFS, Passive Aux. Feedwater System)은 APR+ 원전에 최초로 채택되었으며, 현재는 수출전략형 중형원전인 APR1000의 계통구성에도 도입되어 표준설계가 진행 중에 있다. 최근에는 이러한 PAFS 계통의 핵심기기인 피동응축열교환기(PCHX, Passive Condensation Heat eXchanger)의 냉각성능을 평가하기 위해 대용량 10MWth 규모의 시험설비를 구축하여 성능시험을 성공적으로 수행한 바 있다. 동 계통은 개별적인 기기의 성능확인 뿐만 아니라 기준원전에서 수행될 초기시험 결과로부터 PAFS 계통의 정상적인 작동여부를 판단할 수 있어야 한다. 동 논문에서는 기 수행된 실험과 전산해석 결과를 통해 초기시험 시 PAFS 계통의 정상작동 및 성능만족 여부를 판단할 수 있는 방안을 제시하고 자 한다.

성능시험 결과에서는 현재 설계된 PCHX가 보수적인 측면에서 최대 열제거 요구 조건을 충족시키고 있음을 보였고, 증기발생기 전열기 열출력에 대한 민감도 분석 시험을 통해 PAFS의 압력, 유량, 온도가 열출력과 상관관계가 있음을 또한 확인하였다. 이러한 성능시험과 더불어 SPACE 전산코드 분석을 통한 결과, 초기시험 시 측정된 자연순환 유량이 계측기 불확실도를 고려한 이상적인 자연순환 유량 값 범위 내에 있으면, PAFS 계통이 설계대로 정상적으로 작동하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 초기시험 시 관찰된 준정상상태에서의 압력이 성능실험 결과값보다 낮거나 같게 유지되면 이 역시 정상적으로 작동한 것으로 판단할 수 있다. 적절한 안전 여유도를 가정하여 초기시험의 준정상상태 압력이 안전해석코드에 의해 예측된 값보다 낮으면 PAFS 계통의 성능이 만족되는 것으로 가정할 수 있을 것이다. 이 때 코드예측은 100% 출력조건에서 성능실험값을 잘 예측하거나 보수적인 압력을 예측하여야 한다. 향후 압력 및 자연순환 유량을 통한 이러한 성능평가 방안은 기준원전에 대해 확정된 전산해석코드의 스케일업 능력평가가 추가적으로 선행되어야 할 것이다.

국내 원전 열성층/열피로 배관 가동중검사 고찰

김진희* · 강준승* · 문균영*

*한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Study of In-service Inspection for Thermal Stratification/Thermal Fatigue Piping in Domestic NPPs

Jin Hoi Kim* · Jun Seung Kang* · Gyoong Young Moon*

*Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

열성층 현상에 의한 배관 손상이 처음으로 알려진 것은 1979년 미국 PWR형인 D.C. Cook 급수배관의 누설이다. 원전 배관시스템에서 열성층 현상은 배관 이상변형, 지지구조물과의 접촉, 지지대 손상 등을 유발할 수 있으며 열성층 현상의 반복 또는 열성층 온도 경계층의 변동 등은 열피로를 초래할 수 있다. 열성층 현상은 배관 내에 서로 다른 온도의 유체가 층이 분리되어 존재하는 현상으로 대표적인 열성층 현상 중 반복적인 열성층 현상(thermal cycling)은 격리되지 않은 원자로냉각재계통(RCS)의 분기관(branch line)에서 발생한다. EPRI는 2005년에 MRP-146 revision 1, 2016년에 MRP-146 Revision 2를 발행하여 검사 대상 및 검사범위에 대하여 설명하였다. 국내 원전은 경수로형 원전 열성층배관 평가 및 특정기술주제보고서를 통해 2014년 가동원전 열성층/열피로 배관 검사표준(안)을 개발하여 검사대상 및 검사주기를 선정하였으며 검사영역은 MRP-146을 적용하고 있다. 본 논문에서는 국내 원전 열성층/열피로 검사 이력, 배관 형상 및 검사 대상, 검사범위 및 결함 형상 등에 대하여 고찰하였다.

국내 원전 원자로용기 내부 가동중검사 고찰

김진희* · 강준승* · 문균영*

*한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Study of In-service Inspection for Interior of Reactor Vessel in Domestic NPPs

Jin Hoi Kim* · Jun Seung Kang* · Gyoong Young Moon*

*Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd.

국내 원전 원자로용기 내부에 대한 가동중검사 요건은 전력산업기술기준 원전 가동중검사 (KEPIC MI) 표 MIB-2500-1(10)에 따라 각 검사 단주기(약 3.3년)별로 검사방법으로 육안검사를 수행한다. 원자로용기 노즐 내측 반경부는 장주기(약 10년)별로 검사방법으로 체적검사를 수행해야 하나 대체 검사방법인 ASME Code Case N-648-1을 적용하여 강화 육안검사를 수행한다. 육안검사는 검사 시작 전에 카메라의 분해능을 문자표와 색상표를 활용하여 점검하며 분해능이 확인된 거리 내에서 검사를 수행하여야 한다. 육안검사 기준점은 원자로용기 또는 노즐의 0° 위치로 정하고, 눈부심을 최소화하며 세밀한 관찰을 위해 조명과 카메라 위치를 최적화한 상태에서 검사를 수행한다. 유관 상태가 발견된 경우, 카메라의 줌 및 팬/틸트 기능과 측정 기구를 사용하여 추가 정보를 얻는다. 본 논문에서 원자로용기 구조 및 검사방법, 검출 가능한 지시, 검사 중요인자와 국내외 원전 원자로용기 내부 검사 현황에 대하여 고찰하였다.

APR1000 증기발생기 성능 최적화 현황 소개

양원석

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Introduction on the Performance Optimization of APR1000 Steam Generator

Yang Wonseok

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

현재 수출 경쟁력 제고를 위해 서유럽규제자협회(Western European Nuclear Regulatory Association, WENRA), IAEA, 유럽사업자요건(European Utility Requirements, EUR) 등 유럽에서 적용 중인 최신 요건을 충족하는 1000MWe급 원전인 APR1000 표준설계를 개발 중이다.

APR1000의 주요 기기는 용량과 형상이 유사한 OPR1000 기기 설계를 활용하여 설계개발을 하고 있으나 수출경쟁력 강화를 위해 설계 최적화를 진행 중이다. 본 논문에서는 원자로 냉각재계통 증기발생기의 운전 여유도 확보 및 안전성 개선을 위한 성능 최적화 방안을 살펴보고자 한다.

증기발생기는 노심에서 발생하는 열에너지를 전력생산을 위한 기계에너지로 변환을 시키는 역할을 하고 방사성물질의 유출 방지를 위한 방벽 기능을 하는 원전의 주요 기기 중 하나이다. 하지만, 열전달을 통한 에너지 형태의 변환과 환경보호 방벽 기능의 핵심 요소인 증기발생기 전열관은 결함에 의한 누설 또는 파손의 가능성이 있어 주기적으로 결함 여부를 확인하고 있다.

따라서, 전열관에 결함이 발생하거나 또는 발생 가능성이 있는 전열관을 사전에 막음으로써 주변 환경에 영향을 끼치는 것을 막는다. 이러한 상황을 고려하여 증기발생기의 전열관은 필요한 열전달면적보다 여유있게 설계를 하는데 이를 관막음물이라고 한다. APR1000 증기발생기의 참조설계인 OPR1000 증기발생기의 경우는 8%의 여유를 가지고 있다. 하지만, 최근에 개발된 노형들은 8%보다 높은 관막음률을 적용하는 추세이므로 APR1000 증기발생기는 참조설계 대비 변경이 크지 않는 범위내에서 관막음률 상향을 고려하여 성능 최적화를 추진하였다. 이를 위해 참조 원전 설계 시 적용된 성능 변수를 가능한 유지하는 범위에서 전열관 다발수와 전열관 길이 증가 방안을 도출하였으며 적정성 확인을 위한 성능평가를 통해 비정상상태 시 증기발생기 운전 변수 등의 영향이 미미함을 확인하였다.

상기와 같이 증기발생기 성능 최적화를 통해 유럽의 기술기준을 적용하는 체코, 폴란드 등 신규원전 사업 추진 시 APR1000의 수출 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

설계기준초과조건관련 요건 충족을 위한 APR1000 설계 최적화 현황 소개

양원석

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Introduction on the APR1000 Design Optimization for the requirements related to Design Extension Conditions

Yang Wonseok

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.

수출 상품 다양화를 통한 수출 경쟁력 제고를 위해 서유럽규제자협회(Western European Nuclear Regulatory Association, WENRA), IAEA, 유럽사업자요건(European Utility Requirements, EUR) 등 최신 유럽요건을 충족하는 APR1000 표준설계를 개발 중이다.

한편, 후쿠시마 사고 이후, 원전설계 요건으로 설계기준사고(Design Basis Accident, DBA)뿐만 아니라 설계기준초과조건(Design Extension Condition, DEC)을 대처를 위한 전용 설비를 갖추도록 요구하는 추세이다. 따라서, 본 논문에서는 DEC 전용 계통 설계관련 요건을 검토하고 APR1000 최적 설계 방안을 고찰해보고자 한다.

APR1000 최적화 방안 수립을 위해 검토한 유럽 기술기준은 WENRA 안전보고서, IAEA 안전요건(SSR 2/1), 체코 초기안전성분석보고서(ISAR) 및 EUR이다. 전술한 유럽 기술기준의 DEC 대처 설계관련 요건 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 안전계통의 공통원인고장 대처를 위한 다양성 안전계통과 중대사고 대처 전용 계통 구비 (모든 요건)
- 2) DEC 대처계통은 가능한 DBA 대처계통과 가능한 독립적으로 설계 (모든 요건)
- 3) DEC 대처계통의 신뢰도 확보를 위해 다중성 설계 원칙 고려 가능 (모든 요건)
- 4) DEC에서 가용한 DBA 대처계통은 DEC 안전해석 시 신뢰 가능(WENRA)
- 5) ATWS 대처 계통은 단일고장 적용 요구 (ISAR)

상기 기술기준을 충족하기 위한 APR1000 설계방안은 DEC 대처를 위해 DBA 대처를 위한 계통과 독립적인 다양성 계통을 신규로 도입했으며 해당 다양성 계통은 단일계통으로 설계하더라도 확률적안전성목표는 만족함을 확인했으므로 다중성 설계 원칙을 미적용하는 것을 채택하였다. 다만, 체코 ISAR에 요구하는 ATWS 대처 계통에 대해서만 단일고장기준을 적용하여 다중성 설계 원칙을 적용하였다.

상기와 같이 DEC 대처 설계관련 요건을 검토 및 충족을 위한 설계 최적화 방안을 수립을 통해 체코 등 최신 유럽 기술기준을 적용하는 신규원전 사업 참여 시 APR1000의 수주 가능성을 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

개방 수조형 연구용 원자로의 일차냉각재 누설감지를 위한 설계요건 검토

Review of Design Requirements for Primary Coolant Leakage Detection in Open-Pool Type Research Reactor

박기정 · 서경우

한국원자력연구원

중성자 이용 및 동위원소 생산을 목적으로 하는 연구용 원자로는 원자로 노심 냉각과 차폐 관점에서 유리한 개방 수조형(Open-pool type)으로 설계된다. 개방 수조형 연구용 원자로에서 원자로 노심은 원자로 수조에, 그리고 사용후핵연료는 사용후핵연료저장조에 잠겨 있으며, 수조수 자체가 최종 열제거원 역할을 한다. 또한 수조수는 원자로 노심 및 사용후핵연료에서 발생하는 방사선의 차폐 역할도 한다. 이와 같이 연구로에서 수조수는 원자로 안전의 핵심이기 때문에, 수조수 재고량을 노심보다 높게 유지하는 것이 안전성 관점에서 중요한 설계 중 하나이다. 수조수 재고량 확보를 위해 수조수 및 일차냉각재의 누설을 항상 감시하고 운전원이 대응 가능한 시간 이내에 누설량을 정량적으로 측정하여 원자로의 안전성을 확보해야 한다. 이를 위해 미국 원자력규제위원회(NRC)에서는 누설 감지를 위한 규제지침(RG 1.45)을 제시하고 있다. 규제지침에는 발전용 원자로에 적용되어야 할 누설탐지 방법과 누설 탐지 감응도 및 응답시간 요건 등이 기술되어 있다. 본 연구에서는 개방 수조형 연구용 원자로에 적용 가능한 누설감지 방법 및 설계요건을 검토하였다.

일반적으로 연구용 원자로는 상온, 상압 조건에서 운전되기 때문에 고압상태에서 누출을 감지하는 방법은 적용이 어렵다. 수조 외벽이나 일차냉각계통에서 누설이 발생할 경우 상온의 액상으로 누출되게 된다. 따라서 수조 외벽의 균열이나 파손에 의한 누출수 포집을 위한 라인과 일차냉각계통 배관 파단에 의한 누출수를 포집할 수 있는 배관을 각각 설치하고, 누설량을 측정할 수 있는 계측기를 설치해야 한다. 미국 원자력규제위원회(NRC) 규제지침(RG 1.45)에서는 미확인누설원에 대한 누설감지 제한치와 1시간에 1GPM의 누설률을 감지하도록 계측기 정밀도 및 응답시간 요건을 제시하고 있다. 또한 원자로 가동중 지진이 발생할 경우에도 누설이 발생하거나 증가할 수 있기 때문에 안전정지지진에서도 기능을 할 수 있도록 내진검증 요건을 제시하고 있다. 누설 감지를 위한 측정장치의 다중성, 다양성 요건도 기술되어 있다.

본 연구는 개방 수조형 연구용 원자로에서 수조 외벽의 누설과 일차냉각계통의 누설을 포집하여 규제지침에서 요구하는 누설 감시 및 누설 유량을 측정하기 위한 측정장치 설계 요건을 검토하였고, 검토 결과는 연구용 원자로 누설감지장치 설계에 반영할 예정이다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020M2C1A1061014).

연구용 원자로 감쇠탱크 유량별 성능평가 검토

Flow-Dependent Performance Evaluation of a Decay Tank for Research Reactor

정민규 · 서경우 · 박홍범

한국원자력연구원

연구용 원자로는 전기 생산을 목적으로 하는 상용 원자로와 다르게 방사성 동위원소 생산을 목적으로 한다. 원자로 노심에서 발생하는 열을 제거하기 위해 일차냉각계를 설치하며, 일차냉각재 내 N-16에 의한 고방사선 준위를 낮추기 위해 감쇠탱크를 설치하게 된다. 감쇠탱크는 일차냉각계통 원자로 출구에 설치되며, N-16의 짧은 반감기 (약 7초)를 토대로 충분한 체류시간을 갖도록 설계된다. 감쇠탱크 이후에 설치되는 일차냉각계통 주요기기인 펌프 및 열교환기 기기실의 경우 충분히 낮아진 N-16 방사선 준위에 의해 효율적인 차폐 설계가 가능하다.

원자로 노심을 냉각하기 위해 최소한으로 요구되는 냉각유량이 열적설계유량 (TDF, Thermal Design Flow)이다. 일차냉각계통을 설계에 있어 각 유체기기의 차압, 배관 차압, 열적설계유량 등이 우선 고려되며, 각 계측기들의 불확도 등을 감안하게 된다. 이를 통해 실제 일차냉각계통의 경우 열적설계유량에서 10~15% 가량의 유량 여유도를 갖도록 설계되며, 이는 각 기기에서의 차압 및 설계요건의 변화를 가져오게 된다. 감쇠탱크의 경우 충분한 체류시간을 갖도록 설계되는데 열적설계유량에서 가장 오랜 체류시간을 갖는 반면, 유량 여유도를 포함하게 되면 체류시간이 짧아지게 된다. 반면, 감쇠탱크 차압의 경우, 유량이 증가함에 따라 차압은 속도 제곱에 비례하여 증가하게 된다.

본 연구에서는 설계된 감쇠탱크 형상에 대해서 열적설계유량을 기준으로 유량 여유도를 갖는 케이스에 대해서 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 통해 각 유량에서의 유동 특성, 차압 변화, 체류시간 변화 등을 평가하였다. 해석을 통해 충분한 유량 여유도를 포함한 최대 유량에서 체류시간 평가를 수행하였으며, 유량에 따른 차압 특성을 평가하였다.

후기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020M2D5A1078131)

우리나라 원자력발전의 환경성능 국제 비교:
온실가스, 미세먼지, 자원고갈의 관점에서

A Comparative Study on Environmental Performance of Nuclear Power
Plants in Korea: from the Perspective of Greenhouse gases, Fine dust,
and Resource depletion

정환삼 · 이종희 · 문기환

*한국원자력연구원

최근의 국제정세는 1980년대 중반 시작된 세계화와 자유무역의 시대에서 다시 자국과 연계의 이익을 보다 중시하는 지역화와 보호무역으로 패러다임이 바뀌고 있다. 미국과 같이 직접적으로 기술패권과 리쇼어링(reshoring)을 강제하거나 혹은 안보와 환경이란 명분 있는 공동의 가치를 주도해 간접적으로 외부경제들에 비해 차별적 우위를 유지하려는 유럽 등이 그런 예이다.

유럽은 제품별 CBAM(Carbon Border Adjustment Mechanism)을 추진하여 단계적으로 에너지 다소비 업종인 시멘트, 철강, 석유화학에 적용할 계획이어서, 향후 국제무역에서 탄소문제가 산업 경쟁력은 물론 국가 경제에 큰 영향을 끼치게 될 것이다. 모든 경제활동에는 에너지가 수반되는데, 앞으로는 깨끗하고 편리한 전기수요가 꾸준히 증가할 전망이어서 전기를 생산하는 방식에서의 환경성능이 산업과 국가 경쟁력을 결정짓는 주요 요인이 될 것이다.

이에 본 연구에서는 국제적으로 시급히 대책을 마련해야 하는 온실가스, 미세먼지, 자원고갈의 관점에서 우리나라 원자력발전소들의 환경성능을 세계 원전시장에서 경합이 예상되는 중국, 프랑스, 러시아, 일본, 그리고 미국과 비교하였다.

비교 결과, 기후변화 관점에서 중국의 원전들이 우리나라 원전보다 1.21배 더 많은 온실가스를 배출하고, 대기오염 측면에서도 역시 중국 원전들이 미세먼지를 1.24배 많이 배출하였다. 그리고 자원고갈 범주에서도 중국 원전들이 1.20배의 비-우라늄 무생물 자원(non-uranium abiotic resource)을 보다 많이 소모하는 것으로 나타났다. 이 밖에 프랑스, 러시아, 일본, 미국의 원전들과의 비교에서도 모든 범주에서 우리나라 원전이 우수한 환경성능을 나타냄을 알 수 있었다.

6개국 비교에서 나타난 우리나라 원전들의 절대 우위 환경성능은 글로벌 원전시장에서 주목받지 못했던 장점이다. 아직 우리나라 원자력계가 이러한 분석에 대한 인식이 부족하지만, 점차 우리의 데이터베이스를 개발하여 비교분석의 완성도를 보완한다면 우리나라 원자력 기술의 글로벌 우수성 입증과 설계 및 가동의 개선요소 탐색 역량 강화에 활용할 수 있을 것이다. 이 부분 역량개발을 제안한다. 더 나아가 타 발전원 특히 태양광, 풍력 등 미래의 주 에너지원과의 비교도 필요해 보인다.

위험관리 측면에서 본 한국의 에너지 기반시설에 대한 물리적 보안

최선도 · 김혜승 · 장성순
한국원자력통제기술원 물리적방호실

Physical Security of Korean Energy Infrastructures from a Risk Management Perspective

멀게는 9.11테러, 가깝게는 사우디 정유시설 공격을 계기로 사람들은 에너지 기반시설들에 대한 테러 위협에 관심을 기울이고 있다. 악의적인 개인, 집단으로부터 주요 에너지 자원을 보호하는 것을 물리적 보안이라고 부른다. 물리적 보안은 출입관리소, 경비인력, 울타리, 드론 제머 등 시설과 인력, 보안 절차 등으로 구성된다. 물리적 보안은 전통적인 경제적, 정치적 에너지 안보(Energy security) 분야에서는 매우 생소한 개념이나 꼭 필요한 요소이다.

우리나라 역시 이를 위한 법적 체계가 구축되어 있다. ‘국가정보원법’ 및 ‘보안업무규정(시행령)’, ‘공공안전을 위한 테러방지법’ 시행령에 따라 전력, 산업 등 주요 에너지 시설을 중요성에 따라 세 가지 등급(가, 나, 다) 국가보안시설로 지정하여 관리하고 있다. 국가보안시설의 예로 원전, 석유공사 지사, 가스공사 기지, 발전 본부 등 에너지의 생산, 제조 시설에 물리적 보안 체계가 구축되어 있다.

여기서는 한국의 에너지 기반시설에 대해 위험도 측면에서 분석하고, 위험관리를 위한 개선 방향을 고찰해보고자 한다. 물리적보안 위험도는 시설이 공격에 의해 파괴되었을 때 미치는 에너지 수급적 피해(consequence), 악의적 개인 및 집단의 위협 수준(threat), 시설에 대한 물리적보안 취약성(vulnerability)에 따라 결정된다.

국내 주요시설 대드론방어장비 도입사례 분석을 통한 대드론방어장비
성능요건 수립 방안 연구

A Study on Establishing Performance Requirements for Anti-drone
System through Analysis of Cases of Introduction in Important National
Facilities

최선도 · 김우섭 · 김혜승

한국원자력통제기술원 물리적방호실

As drone-based terrorist threats increase worldwide, major domestic energy facilities are introducing counter-drone systems to prepare for drone attacks. Since there is no official performance test or certification system for counter-drone systems, energy facilities that wish to introduce such systems must independently select and implement suitable systems for their facility.

Based on published purchase specifications, we investigated and analyzed introduction cases of counter-drone systems in domestic important national facilities. The study included ten facilities that pursued the purchase of counter-drone systems between 2019 and 2022. The investigation focused on RF scanners, drone detection radars, EO/IR cameras, and drone neutralization equipment such as jammers.

In addition, this study derived procedures and considerations for establishing performance standards for counter-drone systems. To introduce counter-drone systems, setting the defense objectives of the facility and identifying the performance of drones that could threaten those objectives is necessary. For facilities located in urban or tourist areas, it is essential to distinguish whether or not the drone holds a threat to the facility. Furthermore, considering the topographical features of the facility and the surrounding environment, a threat scenario should be established. Including the approach route of the drone, vulnerable routes should be identified. Finally, the minimum detection distance for the drone detection system must be set to ensure that response personnel can secure response time when threat drones approach the facility. Also, detection performance standards must be required to detect all approach routes in the threat scenario.

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation of Nuclear Safety (KOFONS) and the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (Grant No. 2106014).

드론 대응장비 성능평가 방법론 개발을 위한 드론 탐지 시험

김혜승 · 김우섭 · 최선도
한국원자력통제기술원 물리적방호실

UAV Detection Test for C-UAV Performance Test Methodology Development

As UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) is one of the emerging threat in security field, national security facilities have established C-UAV (Counter-UAV) to protect the facilities against UAV threat. KINAC has tried to develop a performance test methodology and standard/guideline of C-UAV. As a part of developing a performance test methodology and standard/guideline of C-UAV, KINAC established UAV threat scenarios to evaluate physical protection system including C-UAV. In order to assess UAV threat scenarios, KINAC conducted tests in Go-heung drone center to verify the factors in the scenarios: (1) visual UAV detection by human (2) auditory UAV detection by human (3) UAV detection by RF scanner.

For visual and auditory detection test, people who did not know where UAV came from were placed at the test point. UAV flew down from 2 km distance to the test point and then the distance where the people found and heard UAV was recorded. Likewise, for RF scanner detection test, RF scanner was set at the test point and UAV flew down from 2 km distance. In order to identify RF scanner's detection and tracking performance, detection tests were conducted under several conditions: sequential/simultaneous connection of several UAVs and high altitude (400m)/low altitude (20m).

The purpose of this test was to determine the key factors for assessing C-UAV system. The results suggest the surrounding conditions such as village, buildings, noise are key variables for the probability of visual and auditory detection. The results will be used to establish performance requirements of C-UAS and would support to design and evaluate the C-UAV system.

국내외 원전 사건에 대한 원자력 안전문화 검토결과 비교분석

Comparative Analysis for the Nuclear Safety Culture Assessment of the events in Nuclear Power Plants

고영준

한국수력원자력 중앙연구원

미국은 1979년 TMI 사고 이후 유사사고 방지 및 원전 안정성과 신뢰성 증진을 위한 목적으로 원자력발전운영협회(INPO, Institute of Nuclear Power Operations)를 설립하였다. INPO는 활동 우수사례(Best Practice)로 근본원인분석(RCA, Root Cause Analysis) 방법을 전파하였고 원전에서 발생한 중요사건 분석을 위해 널리 활용하고 있다. 이 RCA 보고서에는 원전 사건에 대해 원자력 안전문화(이하, 안전문화) 측면의 검토결과를 기술하고 있다. 이를 통해 사건이 발생하게 된 근본적인 원인을 더 잘 이해하고, 미진한 안전문화로 인해 유발되는 문제를 해결하기 위한 조치를 강구할 수 있다.

국내에서는 원전에서 주요사건 발생에 따른 RCA 수행 중에 안전문화 측면에서의 검토를 위한 지침이 최근 개발되었고, 관련 업무를 현업에 본격적으로 적용할 환경이 마련되었다. 하지만, 사건에 대한 이해의 정도와 검토자의 경력과 지식 수준 등에 따라 안전문화 검토 역무 수행에 애로점이 예상된다. 이를 해결하기 위해 현장 실무자들을 위한 안전문화 검토용 참고사례집이 만들어졌다. 이 과정 가운데 Dominion 등 미국 유수의 원전운영사가 발행한 RCA 보고서를 입수하였고, 사건의 원인에 대한 안전문화 측면의 검토내용을 확인하였다. 이를 바탕으로 사건 발생에 영향을 미친 안전문화 속성을 구분하고 그 판단근거를 확인하였다. 국내는 안전문화 검토 초창기인 관계로 미국 원전 사례와 직접적 비교가 가능한 자료가 빈약하다. 대신 독립적 안전감독(NOS, Nuclear Oversight) 역무를 통해 생산된 데이터를 그 대체 자료로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 대로 미국 RCA보고서와 국내 독립적 안전감독 결과물에서 명시하고 있는 주요사건의 미진한 속성을 분석하였다. 분석내용을 바탕으로 해당 속성을 분류하고, 고빈도순 나열 및 건수 비율 등을 산출하여 비교검토를 수행하였다. 그리고 안전문화 모델을 개인, 관리자 및 관리시스템으로 나눌 수 있는데 각 분야별로 미진한 속성이 어떻게 분포하는지 비교검토하였다. 주요사건에 대한 원전 선진운영사의 안전문화 검토결과와 국내의 검토결과 비교분석을 통해 확인되는 미진한 안전문화 속성의 분포확인, 안전문화 증진을 위해 어디에 중점을 두어야 하는지 판단할 수 있는 근거자료와 시사점을 제공한다는 측면에서 큰 의미가 있는 것으로 사료된다.

원전에서의 원자력 안전문화 모니터링 방법

The methods for nuclear safety culture monitoring in nuclear power plants

김영갑

한국수력원자력 중앙연구원

최근 국내 산업계에서는 안전에 대한 관심이 매우 높아졌다. 이는 “안전한 작업환경”과 작업자의 안전을 지키기 위해 시행된 “중대재해 처벌 등”과 관련된 법률이 시행되었기 때문이다. 이전에도 안전을 확보하기 위한 법률들은 존재하였지만 최근 이렇게 관심을 받는 이유는 처벌의 강도가 더 커졌기 때문일 것이다. 그러나 안전을 법률에만 의존해서는 완전한 안전을 확보하기 어렵다. 법률에 명시된 최소한의 안전만 달성하면 되기 때문이다. 완전한 안전은 구성원들의 안전에 대한 인식과 태도가 정착되고 사업장에 뿌리내려야 한다. 결국 완전한 안전은 직원들의 안전을 위한 문화를 통해 달성할 수 있다. 원전에서의 원자력 안전문화는 국민의 생명과 환경 보존을 위해 원자력 안전을 어떠한 목표보다 우선시하는 조직 구성원들의 핵심가치와 행동으로 규정하고 있다(표준안전-1078A). 원자력 안전을 중시하는 인식과 태도는 원전에 종사하는 직원들에게 항상 강조 및 교육하고 있으며 주기적으로 안전문화를 진단하고 개선 활동을 수행하고 있다. 본 논문에서는 원전에서의 원자력 안전문화 상시 모니터링 방법에 대해 소개하고자 한다.

원전에서의 원자력 안전문화는 1) 안전문화 저하 경향 진단 2) 안전문화 관점의 원인·경향 분석 3) 안전문화의 주기적 평가의 세 가지 방법을 통해 모니터링하고 있으며 이것들은 발전소에서 수행하는 업무 프로세스를 기반으로 한다. 첫째, 발전소의 안전문화 저하 경향 진단의 방법은 발전소에서 상시적으로 수행하는 일상 업무를 통해 수행하는데, 운영개선프로그램(CAP)과 자체진단(Self Assessment)에 해당한다. CAP은 발전소 운영 중 발생할 수 있는 취약점을 진단하고 해결하는 프로세스이고, SA는 발전소 자체적으로 성과를 평가 및 분석하여 개선하는 프로세스이다. 둘째, 안전문화 관점의 원인·경향분석 방법은 고장 및 사고에 대한 근본원인 분석을 통해 수행한다. CAP을 통해 발행된 통지(1~4등급) 중 1등급에 대해서는 근본원인분석을 수행하는데, 이때 안전문화 관점의 원인을 분석하며 근본원인 및 기여원인에 대해 어떤 취약요소가 영향을 미쳤는지 평가한다. 셋째, 안전문화의 주기적 평가방법은 평상시 발전소 종사자들의 안전문화 인식을 측정하는 방법으로 매년 설문조사 및 면담을 통해 수행하고 개선사항을 도출하고 있다.

원전에서의 안전성은 견고한 설계 및 심층방어(5단계) 개념을 통해 보장되고 있다. 그러나 발전소의 완전한 안전을 위해 직원들의 안전문화 인식과 태도를 항상 강조 및 교육하고 있으며 일상업무 중 안전문화 모니터링을 통해 지속적인 개선활동을 수행하고 있다.

가동중검사 신뢰성 향상을 위한 PD(Performance Demonstration) 자격관리 적용방법

A Application Method of PD Qualification Management to Improve Reliability of In-Service Inspection

유현주

한수원 중앙연구원

원전 가동중검사는 원자력 관계법령 요건에 따라 원자력발전소의 안전성기기의 건전성을 주기적으로 확인하기 위한 법정검사이며, 검사대상 기기의 검사이력은 해당 기기의 건전성 관리 및 평가에 중요한 자료로 활용되고 있다. 그리고 기기의 접근성, 검사제한 사항, 지시 이력 등의 가동중검사 결과는 신규 원전설계에 반영되어 설계개선을 유도함으로써 궁극적으로 원전의 안전성 향상에 이용되고 있다.

가동중검사 용접부 검사는 필요한 자격을 보유한 검사자만 검사를 수행 할 수 있고 이를 검증하기 위해 협력업체에 속한 검사자의 자격을 발전소에 제출하고 이를 최종 승인받는 일련의 절차를 수행하지만, 자격 기안이 완료된 검사자가 계속 검사를 수행하는 등의 무자격 검사 문제가 발생한 사례가 있어 우려를 나타내고 있다.

그러므로 한수원 중앙연구원에서는 보다 신뢰성 있는 가동중검사를 수행하기 위해 기존에 운영하고 있던 원전 가동중검사 종합 관리시스템(i-databox)에 무자격자가 검사에 들어가는 것을 방지하기 위한 자격관리시스템을 추가 개발 중에 있다.

이를 통해 국내 원자력발전소 검사를 위한 자격에 대한 자격관리시스템의 다양한 정보를 실시간으로 비교 검증하여 원전을 대상으로 가동중검사결과 이력을 신뢰성 있게 관리하고, 검사된 결과정보의 품질을 높이기 위하여 노력을 기울이고 있다.

본 논문에서는 위에서 기술한 사유로 개발 중인 i-databox에서 기량검증 자격관리 부분에 대한 개략적인 시스템 구성 및 기능에 대한 설명을 서술하였다. 본 연구를 통해서 원자력발전소의 운영 신뢰성 향상으로 원자력 에너지의 효율적 생산 효과를 기대할 수 있다.

혁신형 SMR 전력계통 설계 Electrical Power System Design of i-SMR

하체웅 · 박진휘*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 전기기술실

혁신형 SMR의 주전력 계통은 발전기와 주변압기, 발전기와 주변압기를 연결하는 상분리모선, 주변압기와 소내보조변압기(UAT) 고압측 및 소내 스위치야드까지 연결하는 가스절연모선(GIB)로 구성되어 있다. 해당 계통의 주요 기능은 발전기에서 교류전력을 생산하고, 생산한 전력은 주변압기를 통해 일부는 소내보조변압기(UAT)를 거쳐 소내 부하에 공급하고, 나머지는 소내 스위치야드로 송전한다. 발전기에서 생산된 전력은 주변압기와 154/6.9 kV 소내보조변압기(UAT)를 통해 6.9 kV 보조전력 계통에 공급된다.

각 6.9 kV 모션에는 IPC(Integrated Power Cell) 1개 모듈이 접속되며, 발전기 1대에 해당하는 IPC는 2계열로 구성한다. 즉, 혁신형 SMR(발전기 4대)의 6.9 kV 보조전력 계통은 총 8대의 소내보조변압기(UAT)와 비안전급 스위치기어로 구성되며, IPC 외에 대용량 비안전급 전동기 부하에 전력을 공급한다. 480 V 보조전력 계통은 6.9 kV 보조전력 계통에서 6900/480 V 변압기를 통해 전력을 공급받는다. 480V 보조전력 계통은 대용량 저압 전동기, 전열기, 480 V 전동기제어반(MCC) 등이 해당한다. 480V 전동기제어반은 터빈발전기건물, 원자로건물, 제어건물, 복합건물에 위치할 수 있으며, 특히 백업 디젤발전기(BDG)에 의해 백업전원을 받는 전동기제어반의 경우 원자로건물과 제어건물에 위치한다. BDG에 의해 백업전원을 받는 전동기제어반은 각 IPC당 2계열로 구성되어 있고, 별도의 계획에 따라 관리를 받는 직류전력 및 계측/제어전력 계통(IPC, 공용)과 리스크 중요도에 기반한 대상 기기 부하에 전력을 공급한다. 백업 디젤발전기(BDG)의 백업전원을 받는 부하에는 설계기준사고 시, 이에 대응하는 별도의 계획에 따라 관리를 받는 직류전력 및 계측/제어전력 계통(IPC, 공용)이 있으므로 초기 72시간 동안 전원을 공급할 필요는 없다. 하지만 백업 디젤발전기(BDG)는 6.9 kV 스위치기어 모선의 저전압이 확인되면 자동으로 기동하며, 수 분 내에 운전원이 수동으로 전원 공급할 수 있도록 한다. 자력기동 디젤발전기(BSDG)는 발전소 외부 송전망으로부터 공급되는 전원 및 소내 정상 전원이 공급 불가 상태일 때, 어느 IPC 1개를 기동시켜 소내 전체 전력공급을 회복시킬 수 있도록 전원을 공급한다. 따라서 자력기동 디젤발전기는 IPC 1개를 기동시킬 수 있는 용량을 갖도록 설계된다. 정전 발생 시, 자력기동 디젤발전기를 통해 IPC 1개를 우선 기동하고 기동 완료한 IPC에 해당하는 발전기를 가동하여 소내 스위치야드를 통해 나머지 소내 전체 전력공급 경로를 확보하고자 한다. 따라서 자력기동 디젤발전기의 위치는 소내 스위치야드로 결정하며, 이는 IPC 8개 중 어느 것을 기동 대상으로 선택하여도 전원 공급할 수 있다는 이점이 있다.

원자력발전소 증기발생기 전열관 와전류탐상검사 보빈 탐촉자 신호 표류 원인 분석 Cause Analysis of Bobbin Probe Drift Signal for Eddy Current Testing of Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants

주경문 · 서용범*

한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)

*오르비텍(주)

1. 서론

증기발생기 내부에 $\cap$ 자형 형태로 설치된 수많은 전열관은 방사선이 함유된 원자로 냉각재의 압력 경계 기능을 수행한다. 전열관은 높은 온도, 압력, 유체 유동률 그리고 재료 특성이 열악한 환경에 노출되면 기계적 마모 및 응력부식균열 등이 발생한다. 전열관에 발생하는 결함의 존재 여부를 확인하기 위하여 주기적인 비파괴검사를 수행하고 있다. 비파괴검사 방법으로는 와전류탐상 검사를 적용하고 있으며 신속한 검사가 가능한 보빈탐촉자를 기본 검사에 사용하고 있다. 신호수집 데이터 품질은 신호 평가에 많은 영향을 미치므로 데이터 품질 기준을 엄격하게 적용하고 있다. 품질기준은 만족하지만, 평가 스트립차트 중심점에서 벗어나는 데이터가 일부 있어 이에 대한 원인을 4가지로 구분하여 분석하였다.

2. 보빈 탐촉자 신호 표류 원인분석

원자력발전소 증기발생기 ECT 신호는 수실에 탐촉자 위치 조정 장비를 설치하고 탐촉자를 이송시키는 장비로 자동 수집된다. 수집된 데이터 중 일부가 신호 평가화면에서 표류하는 현상이 나타나 발생 원인을 ① 전열관 건조상태에 따른 탐촉자 미끄러짐에 의한 현상 ② 탐촉자 이송 장비의 단일 또는 이중 검사에 따른 현상 ③ 검사 수량 증가에 탐촉자 헤드 마모에 따른 현상 ④ 전열관 고유 제작 품질에 따른 현상 4가지로 구분하여 와전류탐상 신호를 분석하였다. 전열관 건조상태에 따른 탐촉자 미끄러짐에 의한 현상을 확인하기 위하여 건조상태에 따라 검사 초기, 중반, 중반에 수집된 데이터를 상호 비교하였으나 연관성은 확인되지 않았다. 또한 탐촉자 이송 장비의 단일 또는 이중 검사에 따른 현상 확인은 단일검사와 이중검사로 수집된 데이터를 비교하였으나 특이점을 찾지 못했다. 그러나 검사 수량 증가에 따라 신호가 표류하는 현상이 발생함을 알 수 있었다. 이것은 탐촉자 헤드가 마모되어 탐촉자가 흔들려서 발생한 것으로 보인다. 마지막으로 전열관 고유 제작 품질에 따른 현상을 분석하기 위해서 동일 전열관에 대하여 검사 차수별 신호를 상호 비교하였으나 특이점을 찾지 못했다.

3. 결론

보빈 탐촉자 신호 표류 원인은 탐촉자 검사 수량이 증가함에 따라 탐촉자 헤드가 마모되어 나타나는 현상으로 분석되어 졌다. 이러한 신호 표류 현상은 데이터 품질 기준은 만족하지만, 탐촉자를 교체하여 신호 품질을 확보하는 것이 필요하다고 판단된다.

원자력발전소 복수기 전열관 와전류탐상검사 결과에 따른 예방적 관막음 수행

장재혁(Jae-Hyuk Chang)

한국수력원자력(주) 한울원자력본부(KHNP-Hanul Nuclear Power Central)

Preventive Plugging by the Result of the Eddy Current Test of the Condenser Tubes in Nuclear Power Plants

1. 서론

증기발전기에서 발생한 증기는 터빈을 돌리고 복수기로 이동하며 복수기는 해수펌프를 통해 외부에서 들어온 차가운 냉각수와 뜨거운 증기가 열교환을 하여 증기에서 물로 상변화를 시키는 역할을 수행한다. 복수기 전열관은 큰 온도 구배와 유체의 유동, 해수 등의 영향으로 마모와 침식, 열화가 발생되며 기기의 건전성을 확보하기 위해 주기적으로 비파괴검사를 수행하고 있다. 본 논문에서는 복수기 전열관 와전류탐상검사 결과와 그에 따른 예방적 관막음 수행을 살펴 보고자 한다.

2. 복수기 전열관 와전류탐상검사

이번에 살펴볼 주기의 복수기 전열관 검사수량은 총 98,650개이다. 복수기 전열관은 Impact Tube와 Normal Tube로 나뉘며 두께는 각각 0.6mm와 0.5mm이다. 검사 결과에 따른 관막음 기준은 체적성 결함에 의한 두께감육이 Impact Tube는 41.5% 이상, Normal Tube는 56.0% 이상이 관막음 대상이 되며, 변형 및 손상에 의하여 전열관의 기능을 발휘할 수 없는 전열관, 심한 Dent나 전열관 상태 불량으로 검사가 불가능한 전열관, 이물질 등에 의하여 탐촉자 삽입이 불가능한 전열관 등이 관막음 대상이 된다.

와전류탐상검사 결과 관막음 대상으로 평가된 전열관은 총 68개이며 다음과 같다. 스팀에 의한 전열관 외면 침식(WLL, Wall Loss Long) 42개, Support 및 Free Span 부위 내경축소 지시(DNT & DNG, Dent & Ding) 21개, 탐촉자 삽입불가 전열관(OBS, Obstructed) 3개, 두께감육 지시(DFI, Differential Free span Indication) 2개이다. WLL로 판정된 42개 전열관 중 70%이상 두께감육 지시는 총 7개이며, 최대 두께감육 지시는 83% 감육으로 확인되었다.

3. 예방적 관막음 수행 및 결론

이번 검사에서 관막음 대상으로 평가된 전열관 68개소는 전량 예방적 영구 관막음을 실시 하였으며 예방적 관막음을 통해 기기 건전성 및 다음 주기 운전의 안전성을 확보하였다. 또한 관막음 수행 뿐만 아니라 기록기준을 초과하는 지시들은 모두 기록하여 다음 주기 검사 데이터로 활용하여 검사 신뢰도를 높이고 있다.

원자력발전소 액체폐기물처리계통 가열기 가동전 후 전열관 와전류탐상검사 수행결과 비교

장재혁(Jae-Hyuk Chang)

한국수력원자력(주) 한울원자력본부(KHNP-Hanul Nuclear Power Central)

A Comparison of the Result of the Pre-Service and In-Service Eddy Current Test of the Heater Tubes of Liquid Waste Treatment System in Nuclear Power Plants

원자력발전소에서는 사용 후 폐기할 원자로냉각재 계통수를 포함하여 발전소에서 발생하는 액체폐기물을 증발기(Evaporator)로 증발시켜 방사능을 제거하고 응축된 증류수를 수집한다. 이때 액체폐기물을 증발온도까지 가열시키는 열원으로 열교환기인 가열기(Heater)를 사용한다. 가열기 전열관은 유체의 유동, 높은 붕소농도, 침전물 등의 영향으로 마모와 침식, 열화가 발생되며 설비 건전성 확보 및 발전소 안전운전을 위해 비파괴검사를 수행하고 있다.

시험체의 사양이 A213 TP316L 재질과, 외경 50.8mm, 내경 48.3mm, 공칭두께 1.25mm, 길이 5,500mm이므로 비파괴검사 방법으로는 체적검사와 시험체 전체에 대해 신속한 검사가 가능한 와전류탐상검사를 적용하고 있다. 와전류탐상검사는 전자기 유도현상을 이용하는 방법으로 코일이 감긴 탐촉자를 검사체인 열교환기 전열관 내부에 삽입하고 코일에 교류전류를 인가시키면 전열관에 와전류가 생성되며 와전류는 전열관 전기전도도의 변화를 측정하여 결함을 검출하는 원리이다. 본 논문에서는 액체폐기물처리계통 가열기 가동전 후 전열관 와전류탐상검사 수행결과를 살펴보고자 한다.

가동전 와전류탐상검사를 수행한 결과 가운데에서부터 우측 3열 10번째 전열관에서 Free span 부위에서 전열관 두께의 감육없이 내측으로 수축한 신호(DNG, Ding)가 검출되었으며 우측 5열 8번째 전열관, 우측 6열 6번째 전열관에서 절대 채널 수직성분의 비정상적 이동 신호(ADS, Absolute Drift Signal)가 검출되었고, 우측 6열 8번째 전열관에서 Free span 부위의 차동신호(DFS, Differential Free span Signal)가 검출되어 총 4개의 신호가 기록되었다.

운전 재개 18개월 후 와전류탐상검사를 재수행하였으며 수행결과 가열기 가동전 와전류탐상검사에서도 검출된 4개의 신호 모두 이전 검사에서 기록된 지시가 금번 검사에서 기록할 필요가 없는 신호(INR, Indication Not Reportable)로 평가되었다.

이와 같이 액체폐기물처리계통 가열기 가동 전후로 전열관 와전류탐상검사를 수행함으로써 가열기 설비신뢰도를 확보하였다. 또한 전열관 와전류탐상검사 결과를 기록 및 관리하여 전열관의 개별적인 경향분석이 가능해져 향후 설비 운영 계획의 예측 가능성을 높였다.

재생에너지 연계 그린수소 단지 수전해시스템 최적용량 고찰

김한울 · 김희영

한국수력원자력(주)

Study on Optimizing Rated Power of Water Electrolysis in Green Hydrogen Integrated System using Renewable Energy

HANUL KIM · HEEYOUNG KIM

Korea Hydro & Nuclear Power

본 연구에서는 풍력·태양광 등의 재생에너지를 수소 생산 전력원으로 활용하는 그린수소 P2G(Power to Gas) 단지 구축 시 재생에너지 용량 대비 최적 수전해시스템 용량을 고찰하고 한다. 또한 한국수력원자력 그린수소 실증연구센터의 200kW급 설계 및 실험결과를 활용하여 설비구성, 운전개념, CAPEX 등을 고려하고 재생에너지와 수전해설비의 최적 비율제시를 통해 향후 MW급 설계 시 고려해야 할 인자를 제시하고자 한다.

간헐성을 가지고 있는 재생에너지를 활용하여 수소를 생산할 때는 수전해 정격용량에 따라 설비구성 및 운전개념, 수전해설비 이용률이 달라질 수 있다. 재생에너지와 수전해설비의 용량을 1:1 비율로 P2G 단지를 구축할 경우에는 재생에너지 발전량에 관계없이 간헐성을 수전해설비에서 흡수할 수 있지만, 수전해설비 이용률이 감소하고 CAPEX가 증가한다. 반면, 재생에너지와 수전해설비 용량을 2:1, 3:1로 수전해설비의 용량을 줄일 경우 CAPEX 감소 및 수전해설비 이용률이 높아지지만 재생에너지 판매 또는 간헐성 흡수를 위한 전력저장, 수전해설비 전력원 등 설비구성 및 운전개념이 복잡해 질 수 있다.

본 연구에서 재생에너지와 수전해설비의 최적 비율을 확인하고, 연구결과를 토대로 향후 MW급 실증단지를 구성할 경우 설비구성, 운전개념 제시 및 실증단지 구축 시 고려해야 할 인자를 확인하였다.

Poly (vinyl alcohol) based blended anion exchange membrane fuel cell application

Iyappan Arunkumar¹, Jeevitha ¹ Dong Jin Yoo ^{1,2†}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, R&D Education center for whole life cycle R&D of fuel cell systems, Hydrogen and fuel cell Research center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Anion exchange membrane fuel cells (AEMFCs) have received widespread attention as promising renewable energy materials for future energy demand. However, enhancing its hydroxide ion conductivity and mechanical stability is highly challenging for profitable commercialization of AEMFCs. Therefore, in this study high performance, cost-effective, bio degradable, synthetic membrane was investigated using poly (vinyl alcohol) (PVA) blended with ion-conducting polymer/inorganic material as novel anion exchange membrane. A series of chemically stable and high ion conducting PVA/FAA/P-GNF semi-interpenetrating polymer network (s-IPN) membranes are prepared by simple solution casting method. Initially, the piperidinium functionalized graphene nanofiber was synthesized by direct grafting on the nanomaterial surface. Then the PVA blend membranes are prepared in the weight ratio of 90:10–10:90 % with 10 wt. % glutaric acid (GA) as cross-linker. The structural characterization of polymer and membrane are analysed by ^1H NMR and FTIR. Surface morphology of the membrane was analysed by field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and atomic force microscopy (AFM). Ionic conductivity and mechanical stability of resulting PVA/FAA/P-GNF membranes are studied and discussed briefly. Further, Alkaline stability, oxidative stability, swelling ratio, elongation at break, thermal stability, and water uptake studies depict the utilization of these polymer membrane in alkaline anion exchange membrane fuel cell.

Synthesis of Brominated Poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) with Polybenzimidazole Electrolytes for anion exchange membrane fuel cell application

Ramasamy Gokulapriyan¹, Iyappan Arun Kumar¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Anion exchange membrane fuel cells (AEMFCs) are considered beneficial to their counterpart proton exchange fuel cells (PEMFCs) due to their outstanding advantages. Both fuel cells use membranes as polymer electrolytes to improve fuel cell properties and peak power densities. However, the low hydroxide conductivity and poor chemical stability of the AEMs are the current major challenges to their application in AEMFCs. This work evaluates a series of Brominated Poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (Br-PPO) blended with Polybenzimidazole (PBI) for improving ionic conductivity, water uptake, mechanical stability, and fuel cell performance. The Br-PPO was synthesized from Poly (phenylene oxide) (PPO) with NBS/AIBN. Finally, the (Br-PPO)/(PBI) blended membrane was fabricated via a simple solution casting method by varying the amount of PBI in the membrane. The structural changes were analyzed by nuclear magnetic resonance (¹H NMR) and Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR). morphological changes were analyzed by field emission-scanning electron microscope (FE-SEM) and atomic force microscopy (AFM). The thermal stability of the blended membranes was analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). The electrochemical performance was certainly investigated by commercial FAA3 with Synthesized membranes. The obtained results indicated that the water uptake, water contact angle, hydroxide conductivity, and mechanical stability were enhanced with the addition of PBI. The overall result concluded that a Br-PPO with a PBI membrane would be the efficient electrolyte for fuel cell application.

Transition metal sulphides decorated with CuS nanoparticles for an effective electrochemical CO₂ conversion reaction

Murugesan Prasanna¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

The best technique to get around the obstacles in CO₂ reduction reactions is through electrochemical reduction. This is the easiest and most promising tool available right now. The thermodynamically stable CO₂ molecules are the product generations at the potential window (−0.33 to −1.90 V vs. RHE). To achieve improved selectivity, stability, and faradaic efficiency, a well-designed electrocatalyst must be created. Despite the reported lack of selectivity and stability barriers, copper-based electrocatalysts produce better outcomes. Regarding this, transition metal sulfides offer special qualities including a large surface area and simple electron transport. Here, we have created transition metal sulfide nanosheets adorned with nanoparticles. It has a high faradaic efficiency and can speed up the CO₂ reduction reaction. Also, we have utilized other investigations, including XRD, XPS, FE-SEM, EDAX, and HR-TEM to confirm the material formation.

Iridium oxide nanoparticles coated MnO₂ nanorods supported on reduced graphene oxide as efficient electrocatalysts towards oxygen evolution reaction in alkaline/seawater

Karthikeyan S C¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, R&D Education center for whole life cycle R&D of fuel cell systems, Hydrogen and fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Clean hydrogen becomes a promising candidate for the next generation fuel requirements replacing traditional fossil fuels. But the high cost and limited availability of noble electrocatalyst materials like Platinum, Ruthenium and Iridium limits the widespread usage and commercialization. Recent researches are focused on providing a suitable low cost electrocatalyst with non-compromised electrocatalytic activity for oxygen evolution reaction. OER, the cathodic reaction for batteries and water electrolyzers, still remains as an enigma due to their reaction kinetics. It becomes inevitable to overcome the sluggish reaction kinetics in order to enhance the water splitting and other renewable techniques. In this work, we demonstrated a hydrothermal synthesis of Iridium oxide nanoparticles decorated over the MnO₂ nanorods with rGO substrate as an efficient electrocatalyst and analyzed their electrochemical activity towards Oxygen evolution reaction. Physio-chemical characterization such as XRD, FE-SEM, TEM and Raman analysis confirmed the formation of the Iridium oxide decorated manganese oxide rods supported on the reduced graphene oxide substrate. The Electrochemical characterizations such as cyclic voltammetry, linear sweep voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy and chronoamperometry demonstrates its superior electrocatalytic activity with very low overpotentials, faster reaction kinetics and high stability in alkaline/seawater electrolyte.

An efficient transition-metal sulfide electrocatalyst for CO₂ reduction reactions

Palanimuthu Naveen Kumar¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Electrochemical carbon dioxide reduction reaction (eCO₂RR) is a promising method to control environmental pollution and geothermal reduction. Producing highly selective and active electrocatalyst is a challenging task for peculiar conversion pathway. Transition-metal sulfide (TMS) has gained considerable attention as a promising metallic catalyst for CO₂ reduction reactions. TMS can also improve electron and ion transport during the reactions, and this property leads to ultimate stability. A porous copper foam conducts interlayers on metal sulfide ZnS₂ through in-situ hydrothermal process which can be used as an efficient cathode electrode for electrochemical carbon dioxide reduction reactions. As part of the feature characterization techniques, we have been carried such as X-ray diffraction techniques (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), field emission transmission electron microscopes (FE-SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), high-resolution transmission electron microscopes (HR-TEMs), atomic force microscopy (AFM), X-ray photoelectron spectroscopy and inductively coupled plasma optical emission spectroscopy to identify the successful formation of in-situ ZnS₂.

Rational design of LDH/ternary sulfides heterostructure and iron oxide nanorods on three-dimensional hollow porous carbon nanofiber as high energy density hybrid supercapacitor

Milan Babu Poudel¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School (BK21 FOUR), Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk-do, 54896, Republic of Korea

The critical challenge of supercapacitors lies in sluggish kinetics of electrodes and undesirable specific capacitance during charge discharge process including large volume change and inferior cyclic stability. Herein we designed three dimensional hierarchical heterostructure comprising ternary metal sulfides completely covered by nickel cobalt layered double hydroxide (NiCo-LDH@ZNCS) core shell arrays on electrospun three-dimensional porous carbon nanofiber and used as free-standing electrode material for supercapacitors. The original built-in interfacial potential between NiCo-LDH and ZNCS on conducting three dimensional hollow PCF can acquire multidimensional channels for ion/electron transfer and validate to be a highly capacitive cathode material with a high specific capacity maintaining outstanding rate performance. The iron oxide nanorods (Fe₂O₃-PCF) anode match well to the cathode. Benefiting from the powerful synergistic effect, the assembled quasi solid state asymmetric supercapacitor can deliver ultrahigh energy density and power density and extra ordinary life cycle. Such superior electrochemical performances are attributed to the multidimensional nanostructures, porous carbon networks, improved conductivity, and synergistic interaction between the active components of NiCo-LDH/ZNCS arrays. This approach provides a new perspective for rational design of high energy density hybrid supercapacitors, holding unbounded possibilities in this energy dependent world.

Rational design of nitrogen-doped, carbon-encapsulated platinum nanoparticles and cobalt oxide nanosheet embedded porous carbon materials for an efficient electrocatalytic hydrogen evolution reaction

Mohan Raj Subramaniam¹, Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Efficient electrocatalysts are essential for the generation of green hydrogen from water electrolysis. In the present work, nitrogen-doped, carbon-encapsulated platinum nanoparticles and cobalt oxide (CoO) nanosheet-embedded porous carbon materials (PtCo@NPC) are applied as an efficient catalyst in hydrogen evolution reaction (HER). The formation of good crystalline cubic phase CoO nanosheet and cubic phase Pt nanoparticles was confirmed through the X-ray diffraction (XRD) technique. The CoO nanosheet morphology and carbon encapsulated Pt nanoparticles embedded in porous carbon materials morphology were confirmed through scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) analysis. The electrochemical properties of the CoO nanosheet and PtCo@NPC were measured in an alkaline medium of 1.0 M KOH. The CoO nanosheet provided a current density of 10 mA/cm² at an overpotential of 274 mV for the HER in 1.0 M KOH. The PtCo@NPC delivered a current density of 10 mA/cm² at an overpotential of 36 mV for the HER in 1.0 M KOH, which is better than the commercial 20 wt % Pt/C catalyst. Moreover, stability is one of the main factors in defining the feasibility of electrocatalysts in industrial applications. Both synthesized cobalt nanosheet and PtCo@NPC catalyst materials show more than 100 continuous hours of stability, which is recorded in 1 M KOH at 10 mA/cm² current density using chrono-potentiometry.

메탄의 수증기/CO₂ 복합 개질 반응의 고활성 및 고내구성을 위한 Al이 도입된 LaMnO₃ 기반 촉매 개발

강호인 · 지서린 · 우효성 · 이은준 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

Introducing Al into exsolved La_{0.9}Mn_{0.8}Ni_{0.2}O₃ perovskite
with enhanced catalytic activity and stability
for combined steam and dry reforming of methane

최근 기후 변화에 대응하기 위하여 주된 온실가스인 CO₂와 CH₄의 배출을 억제하기 위한 국제 사회의 노력이 계속되고 있다. 여러 대응 방안 중 하나로써 CO₂와 CH₄를 산업적으로 가치 있는 합성 가스인 H₂와 CO로 전환시킬 수 있는 Dry Reforming of Methane(DRM) 반응이 많이 연구되어 왔지만 위 반응의 경우, 촉매 표면에 coke가 형성되어 deactivation이 빠르게 진행된다는 문제점을 갖고 있다. 이를 해결하기 위해 DRM 반응에 steam을 첨가한 Combined Steam and Dry Reforming of Methane(CSDRM) 반응이 주목받고 있다. CSDRM 반응을 통해 생성되는 H₂/CO 비는 2로써 Fisher-Tropsch 반응을 통해 유용한 화합물로 전환되기에 유리하다. 기존의 Ni doped LaMnO₃ 기반 perovskite의 경우, exsolution을 통해 표면에 Ni 입자가 고르게 분포됨이 알려져 있다. 본 연구에서는 exsolution을 이용한 A-site deficient La_{0.9}Mn_{0.8}Ni_{0.2}O₃ perovskite에 Al을 도입하여 열적 안정성 및 비표면적을 증가시킴으로써 기존의 Ni 촉매가 갖는 coke 형성 및 sintering 현상에 의한 촉매 deactivation 문제를 해결하고자 하였다.

LaMnO₃ 기반 perovskite를 EDTA와 CA를 complex agent로 사용하여 합성하였으며 환원 온도를 조절하여 본 촉매가 갖는 열적 안정성을 확인하고자 하였다. 이를 확인하기 위하여 촉매 구조 분석을 실시하였다. XRD, TEM 등의 분석을 통해 다양한 환원 조건에서 합성된 촉매의 구조를 확인하였다. 분석 결과, Al를 도입한 촉매가 800 °C의 고온 조건에서도 perovskite 구조를 유지하였으며 표면에 Ni이 고르게 분포함을 확인하였다. 800 °C 반응 온도에서 Al가 도입된 촉매를 기반으로 CSDRM 반응에 활성을 평가한 결과, 기존 촉매 대비 높은 활성과 안정성을 보이는 촉매임을 확인하였다.

희토류 산화물 담체를 이용한 암모니아 합성 촉매 연구

김나영 · 이석호 · 이성호 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

암모니아는 수송의 용이성, 높은 수소 함량, 높은 에너지 등의 장점으로 인해 수소 운반체로서 점점 더 중요한 물질이 되고 있다. 현재 상용화된 암모니아 합성법은 고온 고압 반응 조건에서 암모니아를 합성하여 N_2 분자의 높은 해리 에너지를 극복하는 하버-보쉬 (Haber-Bosch)법이다. 이 반응은 에너지를 많이 소모하기 때문에 온화한 조건에서 암모니아를 합성하기 위한 촉매 연구가 필요하다.

이번 연구는 산화물계 지지체 중 열적 안정성이 높고 성능이 우수한 것으로 알려진 $La_2Ce_2O_7$ 을 이용하여 수행하였다. 본 연구는 $La_2Ce_2O_7$ 의 La 또는 Ce이온 부위에 이중금속을 도핑하여 oxygen vacancy를 통한 암모니아 합성 활성을 향상시키는 것을 목적으로 한다. Oxygen vacancy는 암모니아 합성의 속도 결정 단계인 N_2 해리 및 N-H 형성 반응을 촉진할 수 있으며 H-poisoning을 완화시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 합성된 촉매가 암모니아 합성 반응에서 양호한 활성을 보였으며, 다양한 특성화 분석을 통해 그 구조와 특성을 밝혀냈다.

단일 단계 촉매 기반 탄소나노소재 합성을 통한 도전재 성능 향상

배한열 · 이석호 · 이성호 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

Single-stage catalyst-based carbon nanomaterial synthesis to improve
conductive additive performance

저탄소 시대를 앞두고 전기자동차의 활용이 많이 늘어날 것이 예측되는 가운데, 산업계는 이를 뒷받침하기 위한 높은 주행거리를 필요로 하고 있다. 따라서 전기자동차 업계는 배터리 업계에 배터리의 성능향상을 요구하고 있다. 이때, 이를 이루기 위한 방안 중 하나가 도전재 물성의 개선이다. 도전재란 양극, 음극 활물질 사이에서 전자의 이동을 촉진하는 물질이다. 도전재 물성 향상을 통해 더 적은 양의 도전재를 사용하여 같은 수준의 전기화학적 물성을 얻으면, 이를 통해 주행거리 향상에 필요한 더 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있다. 동시에 적절한 도전재의 사용은 이차전지 수명을 높여줄 수 있고, 이차전지 사용 시 나타나는 여러 가지 문제점들을 완화 시켜줄 수 있어 도전재에 대한 관심이 올라가고 있다.

현재, 도전재의 주재료로 사용되는 물질은 카본블랙과 같은 탄소 나노소재로, 이를 개질하거나 새로운 물질을 도입하는 방식으로 도전재의 반응 안정성 혹은 전기전도도 등의 물성을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 전기전도도를 높이기 위해 기존 물질에 비해 더 넓은 접촉 면적을 가질 수 있는 새로운 물질을 도입할 때, 기존 도전재에 비해 뛰어난 전기화학적 물성을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한, N이 포함된 방향족 탄소화합물로부터 탄소나노소재를 생성할 경우 pyrrolic N으로부터 N-doped carbon을 얻을 수 있다. N-doped carbon의 경우 친수성을 갖기 때문에 도전재가 분산매에서 분산성이 개선되고, 이는 도전재 성능을 증가시킬 수 있다.

이에 본 연구에서는 저렴하게 N-doped 탄소 나노소재를 얻을 수 있도록 도전재의 분산제로 사용되는 방향족 탄소화합물로부터 N-doped 탄소 나노소재를 합성하려 한다. 제올라이트, 귀금속 등의 다양한 촉매를 이용하여 합성을 진행하였고, 이를 통해 다양한 종류의 탄소나노소재들을 얻었다. 또한, 도전재 성능 평가 및 특성화 분석을 통해 촉매를 통한 도전재 성능향상의 원인을 밝힐 수 있었다.

흡착 촉진 수성가스 전환 반응에 적용 가능한 촉매형 흡착제 개발 및 고순도 수소 직접 생산

최예지 · 이기봉

고려대학교 화공생명공학과

수성가스 전환 반응(Water gas shift reaction)은 천연가스 개질 혹은 가스화 공정에서 생산된 합성가스에 포함된 일산화탄소가 고온의 스팀과 반응하여 이산화탄소와 수소로 전환되는 반응이다 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$). 고순도의 수소를 생산하기 위해서는 미반응된 일산화탄소와 부산물인 이산화탄소를 제거하는 분리·정제 공정이 요구된다.

흡착 촉진 수성가스 전환 반응(Sorption-enhanced water gas shift reaction)은 기존의 수성가스 전환 반응에 이산화탄소 흡착제를 도입한 개념이다. 수성가스 전환 반응에서 생성되는 이산화탄소를 흡착하여 제거하면 르 샤틀리에의 원리(Le Chatelier's principle)에 의해 정반응이 촉진되어 일산화탄소의 전환율을 증가하고 고순도의 수소를 직접 생산할 수 있다. 흡착 촉진 반응의 성능을 증진하기 위해서는 촉매와 흡착제가 반응 장비 내에 균일하게 혼합되어 있어야 하지만 입자의 크기, 모양, 밀도 등이 상이하여 반응 과정에서 균일한 혼합 상태를 유지하는 것이 쉽지 않다.

본 연구에서는 하이드로탈사이트 계열의 물질(Hydrotalcite-like compounds)을 이용하여 흡착 촉진 수성가스 전환 반응에 적용할 수 있는 촉매형 흡착제를 개발하였다. 촉매형 흡착제는 하나의 물질이 수성가스 전환 반응을 촉진하는 동시에 이산화탄소를 흡착하는 물질로 두 가지 기능을 동시에 수행하는 양기능성 소재(Bifunctional material)이다. 수성가스 전환 반응의 촉매 물질로 이용되는 구리 금속을 이용하여 하이드로탈사이트 구조를 합성하였으며, 이산화탄소에 대한 흡착 성능을 증진하기 위해 알칼리 금속을 추가로 도입하였다. 개발한 소재는 흡착 촉진 수성가스 전환 반응을 통해 고순도의 수소를 생산하는데 성공하였으며 10번의 반복 공정에서도 성능을 유지하였다.

에탄 탈수소방향족화 반응에서 Zr이 도입된 Co/HZSM-5 촉매의 반응 활성 향상

주나영 · 박예림 · 김상운 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

현재, 대부분 BTX를 생산하는 공정은 납사 크래킹 공정으로, 부반응물 생성과 crude oil 가격 변동에 영향을 많이 받는다는 단점이 있다. 반면, 천연가스 자원의 개발 및 석유 정제에서 얻어지는 에탄의 양이 늘어남에 따라 에탄을 이용하여 고부가 가치 화합물인 BTX를 생산하는 공법에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라, 에탄을 BTX로 효율적으로 전환하기 위한 촉매를 개발하는 연구가 진행 중이다.

HZSM-5 촉매는 HZSM-5 제올라이트가 지니는 BTX와 비슷한 pore size로 인한 높은 선택도로 인해 Ethane Dehydroaromatization 과정에서 많이 사용되고 있다. 또한 HZSM-5 제올라이트에 Co를 도입할 경우, 높은 수율을 보인다는 연구 결과가 있었다. 하지만 다량의 Co가 도입될 경우, inactive site인 Co₃O₄의 비율이 높아져 BTX 생성 속도가 감소하고 coke가 증가한다는 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 조촉매로써 Zr을 도입하여 Co/HZSM-5의 안정성과 BTX 선택도를 증가시키고자 하였다.

촉매의 성능 확인을 위하여 촉매 활성 실험과 TGA, 질소 흡탈착 분석, XPS 등의 분석을 실행하였고 Zr이 Co/HZSM-5의 안정성을 증가시켜 더 낮은 비활성화 속도와 더 높은 BTX 수율을 보이는 것을 확인하였다.

수증기-이산화탄소 혼합개질에서 우수한 안정성을 가진 $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 촉매

지서린 · 강호인 · 우효성 · 이은준 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

Highly stable $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ catalyst for combined steam and carbon dioxide reforming of methane

수소 에너지는 다양한 유형의 에너지원에서 생산이 가능한 에너지 운반체로 대용량 장기간 에너지 보관이 가능하며 다양한 형태로 저장이 가능하다는 장점을 가져 다방면에 활용될 수 있는 대체 에너지원입니다. 메탄의 수증기-이산화탄소 복합 개질(CSDRM)은 수증기, 이산화탄소와 메탄을 반응시켜 수소와 일산화탄소를 만드는 반응으로, 두 온실가스(CO_2 , CH_4)를 사용하여 합성 가스를 생산할 수 있다는 장점을 가지고 있습니다. 또한 메탄의 건식 개질(DRM)에 비해 코크 형성 문제가 적다는 장점도 가지고 있습니다.

CSDRM 반응은 싼 가격과 우수한 활성으로 Ni 기반 촉매가 주로 사용되고 있으나, 낮은 코크 저항성과 소결 문제 해결이 필요합니다. core-shell 구조는 shell을 이용하여 Ni 입자를 물리적으로 고정하여 금속 소결 및 코크 형성을 방지할 수 있습니다. 따라서 저는 Ni 기반 촉매에 core-shell 구조를 도입하여 메탄의 수증기-이산화탄소 개질에서 우수한 안정성을 보이는 촉매를 개발하고자 하였습니다.

CSDRM 반응은 $\text{CH}_4:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}=10:8:4$ 의 반응 가스 조성으로 800 °C에서 진행되었습니다. $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 촉매를 20 시간동안 CSDRM 활성을 확인한 결과 core-shell 구조를 도입하지 않은 촉매에 비해 우수한 활성을 보이는 것을 확인할 수 있었습니다. XRD 분석으로 reference 촉매에 비해 $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 촉매의 Ni 입자 크기가 더 작은 것이 확인되었습니다. TEM 분석을 통해 $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 촉매와 reference 촉매의 반응 전후 형상을 확인할 수 있었으며, core-shell 촉매에 비해 reference 촉매의 Ni 입자가 더 많이 소결된 것을 확인하였습니다. 따라서, 본 연구를 통해 $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 의 core-shell 구조가 CSDRM 반응에서 촉매 안정성을 향상시켰음을 알 수 있습니다.

중저온 고체산화물연료전지용 고안정성 Co_3O_4 -GDC 나노 복합 공기극 개발

이승복*, Saeed Ur Rehman

한국에너지기술연구원 고온에너지전환연구실

A highly stable Co_3O_4 -GDC nanocomposite cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells

Seung-Bok Lee*, Saeed Ur Rehman

High Temp. Energy Conversion Lab., KIER

Here, we report a cobalt spinel oxide (Co_3O_4) and gadolinium-doped ceria (GDC) nanocomposite cathode to achieve superior performance and durability in solid oxide fuel cells. A simple sol-gel process was used to create the Co_3O_4 -GDC nanocomposite, which allowed for separate precipitation of the Co_3O_4 and GDC phases during calcination. HR-TEM revealed the nanocrystalline nature of the composite, consisting of nanocrystallites ranging in size from 5 - 10 nm. XRD and HAADF-STEM showed the formation of two distinct phases. The SOFC, consisting of a Co_3O_4 -GDC nanocomposite cathode, showed high durability while operating at 800°C for 300 h under a galvanostatic load of 1 A cm⁻². The SOFC exhibited a continuously increasing performance, achieving a maximum power density of 1382 mWcm⁻² after a 300 h operation. The findings demonstrate the efficacy of using Co_3O_4 -GDC nanocomposite cathode for superior electrochemical performance as well as durability for the advancement of SOFC technology.

극저온 탄소포집을 위한 축소-확대 노즐 성능의 수치적 연구

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

Numerical study on cryogenic carbon capture performance
with convergence-divergence nozzle

19세기 산업혁명 이후 화석연료의 사용이 점차 늘어나자 인류가 배출하는 연간 온실가스(CO₂ 등)는 10억 ton 수준에서 370억 ton까지 37배 증가하여 지구온난화와 기후 변화의 주요 원인으로 주목받고 있다. 인구가 증가함에 따라 에너지 수요량은 과거와 비교하여 꾸준히 증가하는 추세이다. 이에 화석연료를 이용한 발전을 전면 중단하기보다 발전량의 일부를 재생에너지로 대체하고 나머지는 화석연료의 배출가스 중 온실가스를 포집하여 저장하고 활용하는 CCUS(Carbon Capture Utilize Storage)기술이 주목받고 있다. 탄소포집 기술은 순산소연소와 연소 전/후 포집기술이 있으며 특히 연소 후 포집 중 흡수/흡착제를 이용한 탄소포집 기술이 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 이산화탄소를 포집한 후 흡수/흡착제를 재생하는 과정과 이산화탄소를 액화하기 위해 압축하는 과정에서 많은 에너지가 소모되는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 탄소포집 공정에 많은 에너지가 소모되는 취약점을 개선할 수 있는 극저온 탄소 포집 기술을 소개하고 해당 기술의 주요 장치인 축소-확대 노즐의 입구 압력/온도 조건과 형상에 대해 수치적 연구를 진행하였다. 축소-확대 노즐로 유입되며 가속된 유동은 노즐 형상과 입구조건에 따라 이산화탄소 포집율이 결정되게 되며, 220K부터 180K까지 입구조건을 변화시키며 포집율을 90% 이상까지 포집할 수 있는 노즐에 대해 해석을 진행하고 축소-확대 노즐에서의 유동 특성을 분석하였다.

“이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수소운송선박 적하역 및 수소추진선박 연료공급 통합제어 안전기준 개발)”

정수압 정압식 압축공기 저장 장치의 수직 상향 공기 충방전 탄성용기 설계

Design of a Vertical Upward Air Charge and Discharge Elastic Container for a Hydrostatic-pressure and Fixed-pressure Compressed Air Energy Storage System

황성현 · 이창형 · 박성호 · 류주열[†]

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

전 세계적으로 지구 기후에 변화를 초래하는 지구온난화를 대비하기 위해 탄소중립을 위한 정책을 수립 및 실천하고 있으며, 태양광 및 풍력을 중심으로 한 친환경 에너지 기술에 대한 공급과 수요가 급속도로 커지고 있다. 그러나 태양광 및 풍력을 활용한 발전 기술들은 날씨에 따라 출력 변동성이 크다는 문제점이 있어 ESS(Energy Storage System)를 통해 안정적으로 전력을 공급하는 기술에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 대용량 장주기 에너지 저장에 적합한 CAES(Compressed Air Energy Storage) 기술 중, 정수압 정압식 압축공기 저장 장치에 설치할 수 있는 탄성용기를 설계하였다. 탄성용기의 재료는 고압(내외부 동압)에서 반복적인 수축/팽창을 견디며, 공기 및 물이 침투하지 않고, 가공이 쉬우며, 비교적 경제적인 우레탄으로 선정되었다. 캐나다 Hydrostor 에서 개발된 압축공기 저장 탄성용기(ZPNS, Zero-Pressure Natural Shape)와 달리, 수축 팽창 시 모든 압축공기를 사용하기 위해서 수직 상향을 보도록 설계되었고, 재료의 부력에 의해 탄성용기의 아랫부분이 떠올라 충전이 원활하지 않을 것을 예상하여 바닥에 끈으로 고정 또는 추를 설치할 수 있도록 설계하였다.

설계 및 제작된 탄성용기의 성능을 평가하기 위해 10bar로 압축공기 충방전 실험을 시행하였으며, 최대 11.25bar까지 재료 파괴가 일어나지 않음을 확인하였다.

감사의 말 : 이 논문은 2022년도 중부발전의 지원을 받아 수행된 연구임(미활용 터널 사용을 위한 압축공기 에너지저장장치 개발)

공공건축물 에너지 소비량 공개·성능개선 사업 소개 및 사례 분석

임수연 · 오세민 · 이용원 · 안충원
국토안전관리원 녹색건축센터

A Case Study of Energy Consumption Disclosure and Performance Improvement of Public Building Business in South Korea

Lim, Su-Yeon, · Oh, Se-Min · Lee, Young-Won · Ahn, Chung-Won

Department of Green-Building Center of Korea Authority of Land & Infrastructure Safety

강화된 2030 국가온실가스감축목표 달성(건물부문 '30년 온실가스 배출전망치 35백만톤 CO₂eq('18년 배출량(52.1백만톤 CO₂eq)대비 32.8% 감축))및 건축 산업 활성화를 위해 건축물의 에너지·온실가스 관리의 중요성이 증대되고 있다. 노후화된 건축물이 급격히 증가하는 상황에서 기존 건축물에 대한 에너지·온실가스 감축 수단인 녹색건축물로의 전환 필요하며, 녹색건축물에 대한 민간의 관심·의식을 제고하고 조기에 녹색건축 시장의 확대를 도모하기 위해서는 공공부문의 선도적 역할이 필수적이다. 이를 위해, 정부는 기존건물에 대한 다각도의 정책·사업(국정과제 86-6. 공간과 이동의 탄소중립 등)을 추진하고 있으며, 「녹색건축물 조성 지원법」 제13조 및 제13조의2에 따라 '공공건축물 에너지 소비량 보고·공개 및 성능개선 사업(이하 "성능개선 사업")'을 추진 하고 있다. 성능개선 사업은 크게 공공건축물 에너지 소비량 보고·공개 사업, 공공건축물 성능개선 사업 으로 나누어서 추진 되고 있다. 본 연구에서는 공공건축물 성능개선 사업을 중심으로 사업의 주요내용과 함께 실제 사례를 중심으로 노후 공공건축물의 녹색건축물 전환을 위한 현장조사 결과, 검토·분석, 분석방법론 등 다양한 결과물을 분석 하여 향후 추진방안에 대하여 고찰해보고자 한다. 이를 위하여, '16년~'22년 동안 추진되었던 성능개선 사업의 주요현황 등을 소개하고, 사업 추진을 위한 현장조사 및 결과등을 분석하여 사업 추진방향에 대한 제언과 함께, 사업의 활성화 및 정책 고도화를 위한 개선방안을 제시하여 향후 기술 및 정책·제도 개선의 기초자료로 활용하고자 한다.

국내 수송효율 분야 기술수준 분석을 위한 특허동향 조사

유 란¹, 이성곤^{1*}

¹한국에너지기술연구원 정책연구실

A Study on Patent Trends for Analysis of Technology Level in
Transportation Efficiency in Korea

Ran Yoo¹, Seongkon Lee^{1*}

¹Energy Policy Research Team, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro,
Daejeon, 34129, KOREA

*Corresponding Author: sklee@kier.re.kr

진행중인 심각한 기후위기 극복을 위해 글로벌 에너지 전환은 가장 중요한 해결방법으로 전 세계적으로 화석연료에서 재생에너지로의 전환이 가속화되는 추세이다. 국내 상황 역시 잔존자원이나 에너지 상황을 고려할 때 에너지전환은 필수불가결한 과정이다. 이러한 대전환을 기점으로 각국은 산업경쟁력과 에너지안보를 확보할 수 있는 계기를 만들고자 총력을 기울이고 있다. 따라서 2050 탄소중립을 실현하고 국가경쟁력을 확보하기 위해 국가차원의 주도하에 기술성과 경제성을 기반으로 한 에너지산업 생태계 육성 및 지속적인 견인이 필요하다.

수송 분야는 민·관이 모두 수소와 전기차를 포함하여 탄소배출을 저감하는 수송 기술을 개발하는 데 집중하여 급증하는 수요에 대응하고 글로벌 시장을 선점하고자 지속적으로 노력해왔다. 본 연구는 수송효율 분야의 기술현황과 기술수준을 분석하여 국가 중장기 투자전략 수립에 기여하고자 한다. 본 연구는 수송효율 분야의 특허 분석을 통해 정량·정성적인 기술수준 분석을 수행하였다. 특히 세부 기술 분야 별 기술수준이 우수한 국가와 타 국가의 기술수준을 파악하여 기술수준의 차이를 발생시키는 주요 원인을 분석하였다.

기하 브라운 운동 모델을 이용한 EU-ETS의 탄소 배출권 가격 예측

이광구 · 박홍래 · 김종현

계명대학교 기계자동차공학부 기계공학전공

Prediction of Carbon Allowance Prices in the EU-ETS Using a Geometric Brownian Motion Model

Gwang Goo Lee · Hongrae Park · Jonghyun Kim

Department of Mechanical Engineering, Keimyung University

In order to achieve carbon neutrality, major countries and regions (such as EU, Western Climate Initiative, Regional Greenhouse Gas Initiative and so on) are allocating a part of greenhouse gas (GHG) emission allowance to auction systems to strengthen the efforts to develop GHG reduction technologies. The stable operation of the carbon trading market is of great help in improving the cost competitiveness of GHG reduction technologies. Recently, the cost of carbon capture facilities in large-scale plants has been reduced to a level close to the price of carbon allowance. Accurately predicting when the cost of GHG reduction technologies will become lower than the price of carbon allowance could be important information not only for engineers but also for policy makers. In this study, the geometric Brownian motion (GBM) model was used to analyze the price behavior of carbon allowance in the EU-ETS (Emission Trading scheme), which accounts for 90% of the global carbon markets. Using the daily price data for 10 years from 2013 when EU-ETS Phase 3 began, it was verified whether the price pattern for the latter 3 years could be predicted from the statistics for the first 7-year historical data. According to the analysis results, it was confirmed that the GBM model can predict the upper and lower bounds of the actual carbon price in the market. Based on the predictive ability of the GBM model, simulations were performed using the price change of carbon allowance over the past 10 years, showing that the carbon price would reach a level of at least 200 EURO/tCO₂ by the end of 2025. It is higher than the installation and operation costs of carbon capture facilities currently in the demonstration stage in various plants. It means that the development of carbon capture technologies should be accelerated because they can be sufficiently competitive in price within the next three to four years.

원전 계속운전 안전성평가 연료유화학 관리에 대한 고찰

A Study on the Fuel oil Chemistry management in the Safety Assessment of NPP for Continued operation

김지민

한국수력원자력(주)

원자력발전소(이하 ‘원전’)의 계속운전을 위해서 원전 운영자는 계속운전 기간을 고려한 주요기기에 대한 수명평가보고서를 제출해야 하며, 이 보고서는 원자력안전위원회 고시와 미국 NUREG-1801(Rev.2)에 명시된 약 46개 인자에 대해 경년열화 관리계획을 평가 한다. 평가인자의 하나로 연료유 화학이 포함되며, 연료유 및 저장탱크 등의 관리계획 프로그램의 유효성을 평가한다. 원전의 안전성평가에는 해외 기술기준 및 운전경험을 참조하는 것이 매우 중요하며, 이에 연료유 화학에 관련된 미국 원전의 안전성평가 보고서 및 안전성증진사항을 분석하여 국내 원전 계속운전 안전성평가 중 연료유 화학관리에 대해 고려할 사항에 대해 고찰하고자 한다.

원전에서 경년열화 관리의 연료유 화학 프로그램은 대상 설비의 부식을 완화하기 위한 감시 및 유지관리 절차와 와화조치의 효과를 확인하고 열화의 영향이 미미함을 확인하기 위한 조치들로 구성된다. 발전소의 기술사양에 따라 연료유 오염을 모니터링하고 제어하여 연료유 품질을 유지한다. 연료유관리의 대상은 보통 비상디젤발전기 연료유 저장탱크, 일일공급탱크, 대체교류전원 디젤발전기 연료유 저장탱크, 일일연료유탱크, 소방펌프 디젤엔진 연료유저장탱크 등이 포함된다. 물, 미생물 유기체와 같은 연료유의 오염물질에 대한 노출은 연료유 저장탱크를 주기적인 청소와 배유, 새 오일을 충유하기 전 품질관리를 통해 최소화 할 수 있다. 하지만 탱크 바닥과 같이 오염물질이 쌓일 수 있는 위치에서는 부식이 발생할 수 있으므로 프로그램의 유효성을 검증하여 계속운전 기간동안 설비가 성능저하 없이 기능이 유지되도록 해야 한다.

미국 일부 원전(Sequoyah 원전, Riverbend 원전, Byron 원전, Braidwood 원전)의 계속운전(License Renewal) 신청서류에 대한 NRC의 안전성평가 보고서(Safety Evaluation Report)를 검토한 결과, 연료유 화학 프로그램의 관리에 대한 평가내용 및 개선이 요구되는 공통적인 사항을 보여준다. 주요 개선사항에는 주요 연료유 저장탱크의 침적물, 미생물유기체 등의 수준을 주기적으로 모니터링하고 추세를 관리하는 등의 공통적인 개선사항들을 포함하고 있다. 또한 계속운전을 위한 조치사항으로는 저장탱크 표면의 벗겨짐, 기포, 박리 징후가 포착됐을 때로 확인되었다.

원전의 안정적인 운영 및 관리를 위해서는 해외사례 및 운전경험을 참고하는 것이 매우 중요하다. 계속운전 안전성평가에서도 국내의 절차서, 지침서, 규제요건을 갖추고 있지만, 지속적인 검토와 개선이 필요하다. 국내원전 계속운전을 위한 경년열화 관리계획의 연료유 화학 프로그램에 대해서도 미국원전의 평가결과를 참고한다면 규제기관의 심사 및 사업자의 조치가 보다 효율적으로 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

원전 기기수명평가 수화학 관리프로그램 평가에 대한 고찰

A Study on the Evaluation of Water chemistry program in Lifetime Evaluation of NPPs

김지민

한국수력원자력(주)

원자력발전소의 계속운전 심사과정에서 계속운전 기간을 고려한 주요기기에 대한 수명평가보고서가 작성되어야 하며, 이 보고서는 규제기관에 의해 검토 및 승인되어야 한다. 주요기기 수명평가 보고서는 원자력안전위원회 고시와 미국 경년열화 관리 보고서에 명시된 약 46개 인자에 대해 경년열화 관리계획을 평가 한다. 평가인자의 하나로 원전의 수화학 프로그램에 대해 미국 원전의 안전성평가 보고서 및 안전성증진사항을 분석하여 국내 원전의 수화학관리에 적용할 수 있는 사항을 고찰하고자 한다.

원전에서 경년열화 관리의 수화학 프로그램의 목적은 부식으로 인한 설비, 기기의 재료손실, 응력 부식균열 발생 및 관련된 메카니즘, 침적물에 의한 설비의 열전달 감소 등을 완화하는 것이다. 이 프로그램에서는 재료손실 혹은 균열의 개시 및 성장을 유발하는 화학물질 즉, 염화물, 불화물, 용존산소, 황산염 등의 성분에 대한 주기적인 감시와 제어를 포함하고 있다. 수화학 프로그램이 적용되는 1차측의 계통은 원자로냉각재계통, 화학 및 체적제어계통, 사용후연료저장조 냉각 및 정화계통, 연료재장전수계통, 1차기기냉각수계통 등의 계통이 해당되며 2차측은 주증기계통, 주급수계통, 증기발생기 취출수계통, 필수냉각수계통 등의 계통 및 보조계통이 해당된다. 수화학 프로그램은 일반적으로 중간 및 고유량 영역의 분순물 관리에 효과적이며 유량이 적거나 정체된 지역에서는 효과적이지 않을 수 있다. 수화학 프로그램의 유효성을 검증하여 계속운전 기간동안 설비가 성능저하 없이 기능이 유지되도록 해야 한다.

미국 NRC에서 작성한 원전 계속운전(License Renewal) 신청서류에 대한 안전성평가 보고서(Safety Evaluation Report)를 검토하여 한 결과, 수화학 프로그램의 다양한 운전경험 및 개선사항 들을 확인할 수 있다. Sequoyah 원전은 HVAC 시스템 냉각수 부식 억제제 주입, 밀폐계통 경계 개방시 마다 검사수행 절차 반영, 부동액 냉각계통 샘플링 및 분석 등의 개선사항이 도출되었으며, Riverbend 1호기에서는 노화영향감지를 위해 밀폐계통 개방시 재료손실, 균열, 열전달 감소에 대한 관리절차 개정이 도출되었다.

국내원전도 설계수명 만료에 따른 계속운전 심사가 이어질 것으로 예상되며, 경년열화 관리의 많은 분야들이 검토될 것이다. 이에 미국 원전의 수화학 프로그램 평가결과 및 도출된 개선사항을 검토한다면 국내 원전의 계속운전을 위한 경년열화 관리계획의 수화학 프로그램 평가에도 참고가 될수 있을 것으로 판단된다.

원자력발전소 압축공기 감시 경년열화 관리계획 평가에 대한 고찰 A Study on Aging Management Review for the Compressed Air Monitoring of NPP

김지민

한국수력원자력(주)

원자력발전소의 안정적인 운영 및 관리를 위해서 주요 구조물, 계통 및 기기에 대한 경년열화 관리계획이 수립된다. 경년열화 관리계획은 원전 계속운전 시 주요기기 수명평가보고서에 포함되어 규제기관의 검토를 받는다. 경년열화 관리계획의 항목중에는 압축공기 감시가 포함되며, 압축공기계통의 유효성을 평가한다. 원전의 안전성평가에는 해외사례 및 운전경험을 참조하는 것이 매우 중요하며, 이에 압축공기 감시에 관련된 미국 원전의 안전성평가 보고서 및 안전성증진사항을 분석하여 국내 원전 계속운전 안전성평가지 고려할 사항에 대해 고찰하고자 한다.

원전의 압축공기계통 경년열화 관리 프로그램의 목적은 계속운전 기간동안 경년열화의 영향으로부터 압축공기계통의 건전성을 확보하는 것이다. 압축공기 모니터링 프로그램이 습기 및 오염물질에 대한 공기 시료채취를 주기적으로 수행하고 압축공기 시스템 내부 표면을 검사하여 시스템의 재료손실을 관리한다. 원전의 압축공기 계통은 계기용공기계통(IA : Instrument Air), 작업용공기계통(SA : Station Air)으로 구성되어 있으며, 경년열화 관리계획은 안전과 관련된 계기용공기계통을 대상으로 한다. 계기용공기계통은 안전관련 공기구동밸브 등 발전소 안전운전 및 안전정지에 영향을 미치는 기기 작동에 직접적인 기능을 지원한다. 계기용공기계통 프로그램은 부식 및 오염물질에 의한 계기용공기계통 고유기능에 미치는 공기품질 점검을 다루는 예방정비 프로그램을 포함한다. 계기용공기계통의 고장 원인인 부식, 오일, 수분, 녹 및 오염 등이 발생할 수 있는데 이는 계기용공기 품질관리를 통하여 관리하며, 계기용공기계통 감시에 대한 시험방법, 시험주기, 측정 및 평가 항목, 허용기준, 시정조치는 ASME OM-S/G-1998 Part 17) 및 ANSI/ISA-7.0.01-1996 등을 따른다.

해외사례 검토를 위해 미국 원전의 안전성평가 자료를 확인하였다. Sequoyah 원전 계속운전 안전성평가 검토사례에서는 압축공기 관리프로그램에 대기 디젤발전기가 포함되도록 개정하였으며, 시동용 공기 보조시스템에 수분, 미립자의 관리에 관한 절차서 개정이 추가되었다. Braidwood 원전의 경우 공기건조기 채취 공기시료에서 이슬점 온도가 불만족하여 조치를 취한 운전경험이 있으며, 설비 내부표면 육안검사를 수행하도록 프로그램 절차가 강화되었다.

이미 해외에서도 계속운전을 위한 안전성평가가 다수 수행되었으며, 국내 원전의 안정적인 운영을 위해 해외사례 및 운전경험을 참고하는 것이 매우 중요하다. 경년열화 관리항목 중 압축공기 계통 관리에 대해 미국 원전의 계속운전 안전성평가 심사결과를 검토하였으며, 도출된 개선사항 및 운전경험을 참고하는 것이 계속운전 심사를 앞두고 있는 국내원전의 경년열화 분야 검토에 도움이 될 것으로 판단된다.

원전 경년열화관리계획 윤활유 분석 평가에 대한 고찰

A Study on Evaluation of the Lubricating Oil Analysis in the Aging Management Program of NPP

김지민

한국수력원자력(주)

원자력발전소의 구조물, 계통 및 기기들은 사용기간이 경과함에 따라 노후화가 진행되며, 경년열화 현상을 완화시켜 설비수명을 늘리고 경향분석, 수명평가를 통해 최적 교체시점 예상 및 사전조치를 수행하는 것이 경년열화 프로그램이다. 경년열화 대상의 하나로 원전의 윤활유 분석 프로그램이 포함되다. 원전의 안전성평가에는 해외 기술기준 및 운전경험을 참조하는 것이 매우 중요하며, 윤활유 분석 프로그램 또한 해외원전의 운전경험 및 평가사례를 검토할 수 있다. 이에 윤활유 분석에 관련된 미국 원전의 안전성평가 보고서 및 안전성 증진사항을 분석하여 국내 원전의 윤활유 분석관리에 적용할 수 있는 사항을 고찰하고자 한다.

원전에서 윤활유 분석 프로그램의 목적은 기계 시스템의 오일 환경이 프로그램의 범위 내에서 구성요소의 노후화와 관련된 성능 저하를 방지하거나 완화하도록 품질을 유지하는 것이다. 윤활유 분석의 대상기는 고압터빈, 저압터빈, 주증기차단밸브, 주급수차단밸브, 원자로냉각재펌프, 잔열제거펌프, 충전펌프, 비상디젤발전기 등 주요 기기들이 포함된다. 이 프로그램은 오일 시스템의 물, 미립자와 같은 오염물질의 양을 허용수준 이내로 유지하여 재료의 손실이나 열전달 감소 등을 유발하는 환경을 방지한다. 윤활유 테스트 활동은 해로운 오염 물질에 대한 윤활유 샘플링과 분석이 포함된다. 분석을 통해 물이나 미립자의 존재 또는 누출 및 부식생성물의 축적을 확인할 수 있다. 윤활유 분석 프로그램은 일반적으로 샘플링을 통해 불순물을 모니터링하고 효과적으로 제어한다. 이를 통해 계속운전 기간동안 설비가 성능저하 없이 기능이 유지되도록 해야 한다.

미국 NRC에서 작성한 원전 계속운전(License Renewal) 신청서류에 대한 안전성평가 보고서(Safety Evaluation Report)를 검토하여 윤활유 분석 프로그램의 운전경험 및 개선사항들을 확인할 수 있다. Sequoyah 원전은 161kV 오일 충전 케이블 시스템의 오염물질을 모니터링하고 산업표준, 제조업체 권장사항 등에 따라 주기적 샘플링이 필요함이 도출되었고, Braid wood 원전에서는 충전펌프 기억박스 오일에서 35ppm의 구리(허용기준 30ppm)이 확인되어 모니터링 및 원인 확인을 수행한 운전경험이 있다.

이와 같은 미국 원전의 경년열화 관리계획 평가보고서 및 운전경험은 국내 원전에도 참고할 수 있다. 국내 원전도 설계수명 만료에 따른 계속운전 심사가 이어질 것으로 예상되며, 윤활유분석 프로그램에 대해 미국 원전의 사례들을 참고한다면 경년열화 관리계획의 검토 및 평가가 더 효율적으로 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

원자력발전소 경년열화관리계획 부산부식 분야 운전경험에 대한 고찰 A Study on Operating Experiences of Boric Acid Corrosion Evaluation for Aging Management Review of NPP

김지민

한국수력원자력(주)

원자력발전소의 경년열화 관리계획은 주요 구조물, 계통 및 기기에 대하여 수립되며 규제 기관은 경년열화 관리계획의 적절성에 대해 검토를 수행한다. 경년열화 관리계획의 항목중에는 부산부식 평가에 대한 항목이 포함되며, 부산부식 관리프로그램의 유효성을 평가한다. 원전의 안전성평가에는 해외사례 및 운전경험을 참조하는 것이 매우 중요하며, 이에 압축공기 감시에 관련된 미국 NRC의 안전성평가 보고서를 참조하여 국내 원전 계속운전 안전성 평가시 고려할 사항에 대해 고찰하고자 한다.

원전에서 경년열화 관리의 부산부식 프로그램의 목적은 부산수가 누출될 수 있는 기기 재질손실 관리 및 모니터링을 통해 원자로냉각재계통 및 보조계통 설비의 건전성과 운전가능성을 보장하는 것이다. 부산수를 포함하는 계통의 누수로 인해 부산 부식에 취약한 기계적, 전기적 및 구조적 구성요소를 관리하며, 전기적 접점의 저항 증가 등을 관리한다. 계통에서 부산수 누출 및 부식의 증거를 찾기 위해 인접한 구조물, 구성요소 및 지지대를 정기적으로 검사하는 것이 요구된다. 이 프로그램은 부산수 누설 시 영향을 받을 수 있는 탄소강, 저합금강 구조물, 기기 또는 전기기기를 대상으로 한다. 미국 NRC Generic Letter 88-05에서는 부산을 포함한 냉각재 누설로 인한 부식 영향이 누설원(Leak Source)과 주변 구조물 및 기기의 손상을 유발시키지 않는다는 것을 보증하기 위해 체계적인 경년열화 관리계획을 제시하고, 원자로냉각재 압력경계의 급격한 손상 증가 및 전체적인 파손 또는 비정상적인 누설확률이 매우 낮다는 것을 입증하도록 요구하고 있다.

경년열화 관리계획에는 국내외 관련자료를 수집하여 계획에 반영하는 것이 요구된다. 미국 원전의 계속운전 심사과정에서 작성된 사업자의 신청서 및 NRC 보고서를 통해 부산부식에 관한 운전경험을 확인하였다. Sequoyah 원전 계속운전 안전성평가 검토사례에서는 원자력발전 운영협회(INPO)의 권고사항 등을 반영하여 부산부식 누설평가 주기 대한 절차서 개정 및 관리자 교육을 수행하였다. Byron 원전에서는 부산수부식을 확인하기 격납건물 내에 로봇 크롤러를 사용하여 원자로냉각재 배수밸브의 누설을 확인하여 조치하였다. Braidwood 원전은 RCS 재고량 감시를 통해 가압기 스프레이 우회밸브의 누설을 찾아 조치한 경험을 기술하고 있다.

원자력발전소의 경년열화 관리는 수립 이후 종료되는 것이 아니라, 계속 발전시켜가는 프로그램이다. 종사자, 산업계 및 이해관계자는 경험을 통해 교훈을 얻고 안전성유지, 효율성향상, 규제부담 완화에 기여한다. 경년열화 관리계획 중 부산부식과 관련하여 미국 원전의 계속운전 평가보고서를 검토하였으며, 운전경험 사례를 확인하였다. 국내 원전의 계속운전 심사 및 경년열화 관리계획 평가시 해외원전의 개선사항 및 운전경험이 도움이 될 것으로 판단된다.

수소생산을 위한 수전해시스템 위험요소 분석 및 위험성 평가

김희영 · 김준호 · 김형태

한국수력원자력(주)

Risk Factor Analysis and HAZOP(Hazard and Operability) of Water Electrolysis System for Hydrogen Production

HEEYOUNG KIM · JOONHO KIM · HYUNGTAE KIM

Korea Hydro & Nuclear Power

“2050 탄소 중립”을 위하여 전 세계적으로 석유, 석탄 등의 전통적인 화석에너지를 대신하여 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지를 활용한 전력 생산 확대를 추진하고 있다. 재생에너지의 경우 날씨 등 외부요인에 좌우되는 간헐성 문제와 전력계통 연결에 대한 안정화 문제 등의 이슈가 있다. 이에 대한 해결책으로 ‘수소 에너지원’이 거론되고 있다.

다만, 현재 수소생산을 위한 수전해 시스템은 연구개발 진행 중으로 수소누출, 산소와 수소의 혼입, 수소폭발 등 안전성에 대한 문제가 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 소규모 수소생산 수전해 시스템의 유량, 압력, 온도 등 변수에 따른 유해·위험 요소 도출하고 각 요소별 위험도를 분석하여 허용 가능한 위험도와 허용 불가 위험에 대한 각각의 조치방안을 제시하였다.

본 연구에서 소규모 수전해 시스템의 위험도 분석 결과에 대한 조치 계획을 기반으로 향후 MW급 P2G사이트의 수전해 시스템에 대한 높은 안전성 확보를 위한 방안을 모색하였다.

APR1400형 원자력발전소 계측설비 기능적중요도결정 표준화 연구

A study of Standardization of Functional Importance Determination(FID) in I&C Components of Nuclear Power Plant

김희찬

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 기능적중요도결정(FID, Functional Importance Determination) 프로세스는 발전소를 구성하는 설비에 대해서 안전성, 신뢰도 및 운전가능성의 일정한 기준에 따라 설비를 분석하고 분류하는 과정이다. 국내에서 운전 중인 APR1400형 원자력발전소의 계측설비에도 기능적중요도 결정 프로세스가 적용되어 설비를 관리하고 있다. 그러나 동일 노형의 발전소도 일부 설비가 기능적중요도결정의 중요도, 운전빈도 및 운전환경 항목이 상이하게 등록되어 관리되고 있다.

APR1400형 발전소 계측분야의 동일 설비에 대해서 기능적중요도결정이 동일하게 관리하는 것이 적절하므로 기능적중요도결정 표준화가 필요하다. 본 논문에서는 국내 APR1400형 발전소를 대상으로 수행한 계측분야의 기능적중요도결정 표준화 방법에 대해 소개하고자 한다.

표1. APR1400형 계측설비 기능적중요도 설비현황

발전소	전체설비	단독설비	표준화대상설비
중앙연구원	12,576개	2,144개	10,432개
A발전소	16,530개	5,496개	
B발전소	13,632개	11,603개	

APR1400형 발전소 계측분야의 기능적중요도결정 표준화를 위해 아래와 같이 주요 설비별 특성을 고려하여 평가기준을 수립하고 표준화의 기준을 정하였다.

표2. 계측설비 FID 분류기준

설비유형	FID 분류기준
PE/TE/FE	설비중요도에 따라 FID A, B, C 결정
PT/FT	설비중요도에 따라 FID A, B, C 결정
FUSE	신뢰도를 향상시킬 예측/예방정비가 존재하지 않을 경우 RTF로 분류
Thermo-Well	Inherently Reliable Component이므로 RTF로 분류
Panels	Passive Structural Component이므로 RTF로 분류
Programs	RTF로 분류

※ RTF : Run To Failure

APR1400형 발전소의 계측설비 표준화를 위해 발전소 설비에 대해 매칭 작업을 수행하고 그 결과를 이용하여 각 발전소별 기능적중요도결정 항목들에 대한 비교하였다. 비교데이터에 대한 설비별 표준안 생성 및 적용하고 발전소 엔지니어의 검토를 통해 최종 표준화하였다. 이를 바탕으로, 건설 중인 APR1400형 원자력발전소의 중요도, 운전빈도 및 운전환경 결정에 반영하여 APR1400형 발전소 계측분야의 동일 설비에 대해 일관성 있는 설비유지보수 및 설비운영 최적화에 기여할 것이다.

원자력발전소 설비의 정비규정 관리 대상기기 선정시스템 구축 방안 연구

A study of Selection System of Management Components Structure Method

For Maintenance Rule In Nuclear Power Plant Components

김희찬

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 설비의 성능이 실제 의도대로 기능을 발휘하는지 성능감시가 필요하다. 설비 성능 감시 도구 중 하나인 정비규정은 2000년초에 도입한 성능감시 도구로 정비규정을 사업자가 자발적으로 도입하여 설비성능감시에 활용되고 있다. 정비규정의 대상범위는 통지/오더 성능감시 평가시 기능고장(MRFF) 및 이용불능(OOS) 유발 가능성이 높은 기기(펌프, AOV, 전자카드, 차단기 등의 능동기기)들이 포함되어 있다. 그러나 정비규정 관리 대상기기 선정기준이 명확하지 않아 같은 노형 발전소의 동일 기능을 수행하는 기기에 대해 관리가 상이하게 이루어지고 있는 경우가 있다. 이러한 문제점을 해결하고 대상기기 들의 적절한 관리를 위한 선정기준이 필요한 것으로 판단된다. 정비규정 관리 대상기기 선정의 작업수행은 아래와 같이 구성되어 있으며, 관리 대상기기 선정분야에 시스템 개발이 필요하다.

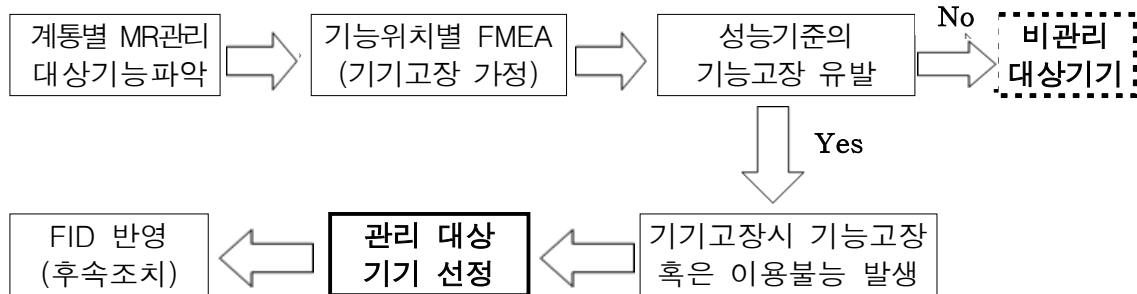


그림. 정비규정 관리 대상기기 선정 작업

원자력발전소 설비 중 발전소 출력감발여부, 대상기기의 기능고장 또는 이용불능 등을 고려하여 아래와 같은 정비규정 관리 대상기기 선정기준을 구축하였다.

표. 정비규정 관리 대상기기 선정기준

기준	항목
관리 대상기기	- 능동기기(Pump, MOV, AOV, 냉동기, 팬 및 체크밸브) - 열교환기, 탱크 압력방출밸브, 오리피스, 스트레이너 - 차단기, 계전기, 제어카, 전원공급기 및 주제어실 핸드스위치 - 제어 및 보호용 계측기(사고대처, 중요 정보/경보 제공 계측기) - 기기보호를 위한 기기
비관리 대상기기	- 정상 운전시 개방상태 유지 수동밸브 및 공기조화계통 수동 댐퍼 - 주제어실 및 현장제어반의 단순 정보제공용 계측기 - 운전상태에서 고장 발생하더라도 기능에 영향을 주지 않는 기기 - 다중으로 구성되어 있는 스트레이너 및 필터 - 정비 및 시험만을 목적으로 사용되는 기기

위의 기준을 바탕으로 정비규정 관리 대상기기 선정시스템을 활용하여 정비규정 대상기기 선정이 체계적으로 된다면 원자력발전소의 설비들에 대한 성능감시의 객관성 및 정확성을 향상시킬 수 있을 것이며, 안정적인 발전소 운영에 효과가 있을 것이다.

원자력발전소 지진원자로정지시스템의 기능적중요도결정 표준화 분석

A Study of Functional Importance Determination(FID) Standardization Analysis on Automatic Seismic Trip System in Nuclear Power Plant

김희찬 · 김재성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

기능적중요도결정(FID, Functional Importance Determination) 프로세스는 원자력발전소를 구성하는 설비에 대한 안전성, 신뢰성 및 운전가능성 측면에서 일정한 기준에 따라 설비를 분석 및 분류하는 프로세스이다. 지진원자로자동정지시스템은 후쿠시마 원전 후속조치로 설치된 설비이며 원자력발전소에 설계치이상 지진이 발생하면 자동으로 원자력발전소를 정지시키는 시스템이다.

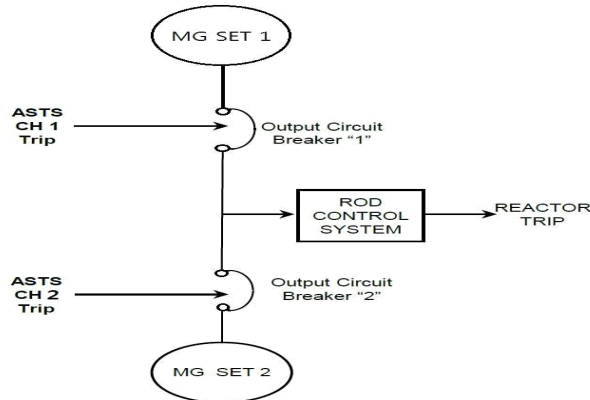


그림. 지진원자로자동정지시스템 동작원리

APR1400형 지진원자로자동정지시스템의 설비들이 아래 표와 같이 상이하게 등록되어 있으므로 동일 노형의 설비에 대해 일관성 있는 관리를 위하여 기능적중요도결정의 표준화하여 예방정비가 일관성있게 적용되도록 해야 한다.

표1. 각 발전소별 기능적중요도결정 설비 구성

대상	설비구성
A발전소	지진원자로자동정지센서 등 18개 설비로 구성
B발전소	지진원자로자동정지 캐비닛 등 44개의 설비로 구성

APR1400형 원자력발전소 2개 발전소 등록설비에 대해 표준화가 진행되었으며, 발전정지 유발, 설비의 이중화 여부등을 고려하여 설비특성을 분석하고 기능적중요도결정 항목들을 선정하는 방식으로 표준화를 진행하였다. 검토결과 지진원자로정지센서 등 총 16개의 설비로 표준화 대상으로 지정되었으며, 지정된 16개의 설비에 대해 중요도, 운전빈도 및 운전환경을 동일하게 적용하였다. 지진원자로자동정지시스템의 FID 분석 및 표준화는 설비에 대한 적절한 정비활동 및 건설 중인 APR1400형 원전 지진원자로자동정지시스템의 기능적중요도결정에 반영하여 일관성 있는 최적의 설비관리가 이루어질 것이다.

SMART100 중대사고시 수소생성 분석

Analysis on the Generation of Hydrogen during Severe Accidents of the SMART100

서정관 · 김종태*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원

2021년 7월부터 완전 피동형 원전인 SMART100에 대한 국내 규제기관의 표준설계인가 본심사가 착수되었다. SMART100은 상용원전의 격납건물살수계통을 대체하여 격납건물 압력 및 방사능 저감계통(CPRSS)이 설치되어 있다. 격납건물은 하부영역과 상부영역으로 구분되어 있으며, 하부영역으로 방출된 증기 및 방사능 물질은 격납건물내재장전수조(IRWST) 및 방사능제거탱크(RRT)를 거쳐 상부로 이동한다. 이때 증기는 IRWST에서 응축되고 방사능 물질은 RRT에서 제거된다. 결국 하부영역에 존재하던 비응축가스가 상부영역으로 이동하며 중대사고시 발생하는 수소도 이러한 경로로 이동하게 된다. 중대사고시 발생하는 수소는 사고완화 시나리오에 따라 하부영역에서 상부영역으로 직접 방출되기도 하며, 본 논문에서는 이와 같이 다소 복잡한 구조의 격납건물 및 수소이동 경로에서의 수소생성을 분석한 결과를 제시한다.

중대사고 대처설계는 격납건물 건전성을 위협하는 요소들을 제거할 수 있도록 설계에 체계적으로 반영하거나, 위협요소들에 대한 대처능력이 있음을 보여야 한다. 핵연료피복재 금속의 100%와 물의 반응에 의해 생성된 수소가 방출되는 중대사고 기간과 그 후에 격납건물 내부의 균일분포를 가정할 경우 수소농도가 10%를 초과하지 않아야 한다. 그리고 격납건물 내의 가연성기체 연소에 의해 격납건물이 손상되지 않도록 하는 설비와 수소농도를 감시하기 위한 설비를 구비하여야 한다. SMART100은 100% 핵연료피복재금속-물반응(MWR) 시 평균 수소농도가 4% 이하로 되도록 격납건물 자유체적이 설계되어 있다. 또한 발생한 수소를 제어하기 위해 피동축매형 수소재결합기(PAR)가 설치되어 있다.

수소 안전성 평가전략으로 불확실성의 보수적 접근, 평가방법론의 보수적 접근 및 수소제어설비를 보수적으로 설계하였다. 이를 위해 100% MWR 수소생성 모델을 적용하였고, CFD 상세해석 시 수소 생성률 선형증가 방법을 적용하였다. 또한, MELCORE 종합해석 기반 CFD 해석을 보완하였고, PAR의 수소 제거율은 22 g/s로 보수적인 값을 사용하였다.

수소생성률은 중대사고 종합해석 코드인 MELCORE를 사용하였다. 원자로 파손 전 반응 노심 지르칼로이의 약 50% 전후 산화를 가정하고, 원자로 파손 후에는 용융코틀-피복재반응(MCCI)에 의해 수소가 발생한다고 가정한다. 이러한 모델링에서 노심 변형 이후(노심 재배치, 방출, MCCI) 수소생성 모델이 없고, MCCI 대응에 따라 수소 생성량 및 생성률이 달라지는 문제점 등이 있다. 이에 따라 수소 생성률에 대한 보수적 모델링이 필요하였다. SMART100 수소 생성률 모델링에서 CFD 상세해석 결과 수소확산 관점에서 수소 생성률이 선형적으로 증가하는 모델링이 가장 보수적인 것으로 나타났다.

유전정접(TD) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가

정선철

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Aging Status Evaluation of Nuclear Power Plant Cables using Power Factor Test

케이블은 기기류에 전력공급, 운전환경 변수인 진동/온습도 등 계측 및 공정제어를 수행하기 위한 중요한 부품 중 하나로써 원전의 안정적인 운영을 위해 정기적인 검사, 유지관리 및 보수가 필요하다. 이에 따라 케이블의 현상태 감시 기술의 중요성이 대두되고 있다.

발전소 안전성 케이블은 기기검증 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 중의 사용수명을 모의시험하고, 설계기준사고 발생시 고온/고압/고방사선/화학살수 등 열악한 조건에서도 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 고압, 방사선, 화학약품, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증시험하고 있다. 그럼에도 불구하고 케이블은 사용환경의 다양한 환경 매개 변수나 예상치 못한 노화 스트레스에 노출되므로 검증시험 과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 주기적으로 필요하다.

금번 연구에서는 케이블의 노화상태 평가를 위해 유전정접(TD) 실험 장비를 활용한 노화상태평가 시험을 제안하고자 한다. 원전의 안정적인 운영을 위해 케이블 상태감시와 유지보수가 필수적이다. 그러나 기존의 상태감시 방법은 케이블의 손상을 감지하는 것에 그치고 있어서 케이블의 노화 상태를 정확하게 예측하거나 평가하는 것은 매우 어려웠다.

유전정접은 케이블 절연물에 인가전압을 가압하여 절연물의 흡습, 손상 등에 의한 부분방전 발생 시 생기는 손실각을 측정하는 비파괴적인 시험방법으로 절연물 전체의 평균적인 열화 상태를 확인하는데 사용할 수 있다.

본 시험은 XLPE, EPR 재료의 신품, 10년 간격으로 60년까지 열/방사선 노화된 상태 케이블에서 발생하는 유전정접 평균값, 표준편차, △유전정접을 열화진단 시험 지침에 근거 측정하여 결과를 분석하였다. 평균값 측정결과 일부 오차는 있지만 노화 진행에 따라 측정값이 선형적으로 증가함을 확인하였다. 표준편차 측정결과 분석에 따르면 60년까지는 선형적인 증가 추세를 확인할 수 없지만, 일부 케이블 50년 노화 시편에서 측정값 증가 현상이 확인되었다.

본 연구의 분석결과에 따르면, 유전정접 평균값 14종 측정 데이터 중 12종에서 케이블 노화 상태를 평가할 수 있는 선형적인 신뢰성 있는 데이터를 얻었으며 향후 조금 더 발전시키면 원전용 케이블의 노화상태를 정확하게 평가할 수 있는 상태감시 기술로 개발할 수 있고, 원전의 안전성과 운영 효율성을 향상시키는 데에 기여할 것으로 기대된다.

부분방전(PD) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가

정선철

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Aging Status Evaluation of Nuclear Power Plant Cables using Partial Discharge(PD) Test

케이블은 원전에서 중요한 부품 중 하나로써 원전을 신뢰성 있고 안전하게 운영을 위해서 정기적인 검사와 유지보수가 필요하다. 이에 따라 케이블의 상태감시 기술의 중요성이 대두되고 있다.

발전소의 안전성 관련 케이블은 기기검증 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 중의 사용수명을 모의시험하고, 설계기준사고 발생시 고온/고압/고방사선 등 열악한 조건에서 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 방사선, 화학, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증시험되고 있다. 그럼에도 불구하고 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 못한 노화 스트레스에 노출되므로 검증시험 과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 필요하다.

이번 연구에서는 원전용 케이블의 노화상태 평가를 위해 부분방전(PD) 실험 장비를 활용한 시험을 제안한다. 원전에서는 안정적인 운영을 위해 케이블의 상태감시와 유지보수가 필수적이다. 그러나 기존의 상태감시 방법은 케이블의 손상을 감지하는 것에 그치고 있어, 케이블의 노화 상태를 정확하게 평가하는 것은 어렵다.

부분방전은 케이블 열화 등으로 절연체 내부에 공극이 발생하면 공극의 절연강도보다 인가된 전계강도가 높을 때 발생하는 지속시간이 매우 짧은 국부적인 방전을 말한다. 본 시험은 XLPE, EPR 재질의 신품, 10년 간격으로 60년까지 열/방사선 노화된 상태 케이블을 대상으로, 시험 프로파일에 따라 케이블 정격전압의 1.8배의 전압을 10분동안 가압, 정격전압의 1.3배의 전압을 1분동안 가압 후 부분방전 측정값을 기록하는 방법으로 실험을 진행하였다.

케이블 재질별 15종 측정 데이터 중 12종에서 노화 진행에 따른 연속 3회 이상의 선형적인 측정값 증가를 확인할 수 있었다. 다만 증가량이 약 1pQ 정도로 미미하고, 노이즈에도 취약해서 추세감시에 활용하기는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 절연체 재질이 XLPE 이고 두께가 1.1mm 제어용 케이블에서는 노화가 진행될수록 방전량이 서서히 증가하다가 50년 시점부터 완전방전이 발생하는 현상을 확인하였는데, 추세감시보다는 완전방전 발생 여부를 기준으로 케이블의 양호·불량 판정에 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

본 연구는 부분방전 시험을 활용하여 원전용 케이블의 노화상태를 정확하게 평가할 수 있는 상태감시 기술을 개발함으로써 원전의 안전성과 운영 효율을 향상시키는 데에 기여할 것으로 기대된다.

적외선분광법(FTIR) 실험 장비를 활용한 원전용 케이블 노화상태 평가

정선철

한국수력원자력(주)

Aging Status Evaluation of Nuclear Power Plant Cables using Fourier Transform
Infrared Spectrometer(FTIR) Test

케이블은 원전에서 중요한 부품 중 하나로써 원전을 신뢰성 있고 안전하게 운영을 위해서 정기적인 검사와 유지보수가 필요하다. 이에 따라 케이블의 상태감시 기술의 중요성이 대두되고 있다.

발전소의 안전성 관련 케이블은 기기검증 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 환경조건에서 사용수명을 모의시험하고, 설계기준사고 발생시 고온/고압/고방사선 등 열악한 환경조건에서 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 방사선, 화학, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증시험되어 있다. 그럼에도 불구하고 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 못한 노화 스트레스에 노출되므로 검증시험 과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 필요하다.

이번 연구에서는 원전용 케이블의 노화상태 평가를 위해 적외선분광법(FTIR) 실험 장비를 활용한 시험을 제안한다. FTIR은 재질 유기분자에서 적외선 특정 스펙트럼을 흡수하는 특성을 이용한 장비이다. 케이블 재질의 분자는 구성되는 물질과 결합 종류에 따라 진동 양태가 다르고, 이런 분자에 FTIR로 적외선을 조사했을 때 각 분자는 고유 진동 주파수를 흡수하여 이 에너지에 대응하는 적외선 스펙트럼을 표시한다. 케이블은 재질 분자별 흡수율이 증가하는 스펙트럼 구간을 확인하면 분자의 종류를 알 수 있고 흡수율의 강도를 확인하면 분자의 상대적 농도를 파악할 수 있다. 본 시험은 XLPE, EPR 재질의 신품, 10년 간격으로 60년까지 열/방사선 노화된 상태 케이블을 대상으로, C=O 결합에 해당하는 1719 cm^{-1} 영역 흡수율을 CH₃ 결합에 해당하는 1377 cm^{-1} 영역 흡수율로 나눈 산화지수를 산출하여 노화 진행에 따른 산화지수 변화 추세를 확인할 수 있었다.

대부분 시험대상 케이블에서 노화가 진행함에 따라 연속 3회 이상의 선형적인 측정값 증가를 확인할 수 있었다. 특정 케이블의 경우는 연속 7회 이상의 선형성을 보여주기도 하였다. 이 케이블의 60년의 산화지수는 0년 값에 비해 약 49% 증가하였다. 케이블 종류별 15개 측정 데이터 평균을 살펴보면 60년 산화지수는 0년 값에 비해 약 14% 증가하였으며, 향후 케이블 상태감시 측정 변수로 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 FTIR 시험을 활용하여 원전용 케이블의 노화상태를 정확하게 평가할 수 있는 상태감시 기술을 개발함으로써 원전의 안전성과 운영 효율을 향상시키는 데에 기여할 것으로 기대된다.

단일제어봉 낙하 시 원자로 정지 방지 설계와 운영현황 고찰

김경수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Study on the Design and Operational Status of Prevent Reactor Trip in the Event of a Single Control Rod Drop

국내외의 원자로시설 운영을 위한 법규에서는 원자로의 반응도를 제어하기 위해 제어봉제어계통 등의 반응도 제어계통을 설치하도록 요구하고 있다. 한편 설계특성 상 단일제어봉의 낙하는 빈번히 발생할 수 있으며, 이에 따른 원자로 정지가 발생할 경우에 가동률 및 운영신뢰도에 영향을 줄 수 있다. 실제로 국내외에서 동 고장에 따른 원자로 정지 사례가 다수 발생하여 원자로 정지 방지를 위한 방법론 및 설계 개선을 수행한 것으로 확인되었다.

본 논문에서는 단일제어봉집합체 낙하 시 원자로 정지를 방지하기 위한 설계의 적용현황을 확인하고, 단일제어봉집합체 낙하 시의 원자로 정지 경험 및 개선 현황을 검토해 보고자 한다. 이를 위해 국내 원전의 참조원전인 미국 내 웨스팅하우스형 및 컨버스천 엔지니어링(CE)형 원전과 국내 경수로 원전의 설계현황을 검토하였다. 미국내 웨스팅하우스형 원전의 운영 초기에는 단일제어봉집합체 낙하에 의한 원자로 정지가 다수 발생한 것으로 확인되었다. 이에따라 웨스팅하우스오너그룹에서는 개선된 열적여유도를 이용하여 동 사고 시 원자로 정지를 유발하는 음의 중성자속 변화율 트립(Negative Flux Rate Trip, NFRT)을 제거하는 방법론을 인허가받았으며, Vogtle 발전소 등에서 NFRT를 제거하여 운영 중이다. 국내 웨스팅하우스 원전에도 동 방법론 적용을 위한 연구가 진행되었으며, 열적여유도 확보 등과 연계하여 NFRT를 제거한 것으로 확인되었다. CE형 원전은 제어봉집합체가 12발과 4발로 분류되어 있다. 최초 설계 시에는 어떠한 단일제어봉집합체 낙하 시에도 원자로정지가 발생토록 설계되어, 이로 인한 원자로 정지가 다수 발생하였다. 미국에서는 제어능이 비교적 작은 4발에 대해서 웨스팅하우스와 유사한 방법론을 적용하여 사고 시 출력벌점을 제거하고 원자로 정지를 방지하였으나, 12발 낙하에 대한 벌점은 유지되었다. 이를 참조원전으로 고려한 한빛3,4호기 및 APR1400을 포함한 국내 후속 원전 또한 12발 단일제어봉집합체 낙하에 따른 원자로 정지가 발생 가능하였으며, 실제로 2000년 이후에 10회의 원자로 정지가 발생한 것으로 확인되었다. 한편, 국내원전에는 열적여유도의 개선이 지속적으로 이뤄졌으며, 이를 활용하여 12발 단일제어봉집합체 낙하 시에도 원자로 정지 없이 안전성을 확보할 수 있는 방법론을 2007년에 개발하였다. 동 방법론은 2009년부터 적용되었으며, 적용이 완료된 2015년 이후에는 동 고장으로 인한 원자로 정지가 발생하지 않은 것으로 확인되었다.

원자력 발전소의 과도상태 발생 시 열적여유도를 확보하고 안전성을 전제로한 원자로 정지를 방지하는 것은 운영 신뢰도 및 가동률 제고 그리고 전력계통 신뢰도 확보 측면에서 중요하다. 국내의 단일제어봉 낙하 시 원자로 정지 방지 방안은 다년간의 운영경험을 통해 설계의 유효성과 안전성을 입증하였다. 또한, 12발 낙하 시 정지 방지 방안이 적용되지 않은 APR1400 NRC DC에 동 방법론을 적용하여 수출 경쟁력을 제고할 것으로 기대된다.

원자력발전소 3D 모델 기반 웹 3D 뷰어의 성능 개선을 위한 기술 연구

김교훈 · 김우중 · 변수진 · 신상후 · 김종명 · 이상현
한국수력원자력 기술혁신처 디지털변환실 디지털혁신부

A Technical Study on Performance Improvement of Web 3D Viewer based on 3D Model of Nuclear Power Plant

이 논문은 원자력발전소 기반의 웹 3D 뷰어의 성능 개선을 위한 기술 연구를 다루고 있다. 고용량 원자력발전소 3D 모델을 웹 환경에서 서버 사이드 기반 렌더링 및 WebGL2, node.js, Babylon.js 등의 기술을 사용하여 3D 뷰어를 구현하고, 이를 이용하여 렌더링 성능, 로딩 속도, 메모리 사용량, 사용자 인터페이스 등의 성능을 분석하였다. 그리고 성능 개선을 위한 기술로 렌더링 성능 개선 기술, 로딩 속도 개선 기술, 메모리 사용량 최적화 기술, 사용자 인터페이스 최적화 기술 등을 제안하였다. 이를 적용하여 실험을 진행하고, 개선 효과를 분석하였다. 이 연구는 웹 기반 3D 뷰어의 성능 개선을 위한 실질적인 개선 방안 및 향후 연구 방향을 제시한다.

지진취약도 이론 및 생성 방법론 분석

Analysis of the theory and development methodology on seismic fragility

김현욱

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

개별 원자력발전소의 지진 안전성평가(IPE, Individual Plant Examination)에는 내진여유도 평가(SMA, Seismic Margin Assessment)와 확률론적 지진 안전성평가(SPRA, Seismic Probabilistic Risk Assessment)가 이용되며, 지진사건에 의한 노심손상빈도를 정량적으로 평가해야 할 때에는 확률론적 지진 안전성평가를 수행한다.

확률론적 지진 안전성 평가의 입력자료로 이용되는 지진취약도는 기기의 실제적인 성능과 응답을 고려하기 위한 계수, 기준지진값 및 랜덤성과 불확실성에 의한 대수 표준편차에 의해 정의된다. EPRI TR-103959(1994) 지진취약도 개발방법론, EPRI TR-1019200 지진취약도 적용 지침 Update, EPRI TR-3002012994(2018) 확률론적 지진 안전성평가를 위한 지진 취약도 및 내진 여유도 지침에 따르면, 지반가속도(a)-구조물/기기의 비허용 성능 발생확률(P_f) 간 관계는 대수 정규분포로 가정되며 이를 누적분포함수로 나타낸 것을 지진 취약도 곡선으로 정의한다. 즉, 각 지반가속도에서의 비허용 성능 발생확률은 $P_f(a)=\Phi(u)$ 로 정의됨을 의미한다. 여기서, u 는 해당 지반가속도(a), 대수정규분포의 모수인 중앙값 지반가속도(a_m)와 대수표준편차(β)에 의해 정의되는 표준화 정규확률변수이다. 지진취약도에서는 지식·자료부족에 의한 불확실성 변동성(β_u)과 추가적인 실험·연구로도 감소시킬 수 없는 무작위성 변동성(β_r)의 두가지 변동성이 존재하는데, 무작위성 변동성은 확률분포의 분산 즉, 누적분포함수인 취약도 곡선의 기울기에 영향을 끼치며, 불확실성 변동성은 중앙값 성능에 영향을 끼친다. 따라서, 지진 취약도에서는 두가지 변동성을 모두 고려하는 이중 대수정규분포(Double lognormal distribution) 모델을 이용한다. 본 취약도 모델에서 중앙값 지반가속도(a_m)와 함께 무작위성 대수표준편차와 불확실성 대수표준편차의 평균 제곱근 값인 복합대수표준편차(β_c)를 모수로 누적분포함수를 생성하여 평균 취약도 곡선을 정의할 수 있으며, 내진여유도평가에서 이용되는 HCLPF(High Confidence Low Probability of Failure) 내진성능은 95% 신뢰도의 중앙값 성능과 5% 비허용 성능 발생확률을 고려하여 $a_m \cdot \exp[-1.65(\beta_r + \beta_u)]$ 로 계산할 수 있다. 만일, 불확실성 혹은 무작위성 대수표준편차 중 한가지만을 아는 경우에는 두가지 대수표준편차(β_r , β_u)와 복합 대수표준편차(β_c)의 관계를 원의 방정식과 접선의 방정식으로 변환하여 $a_m \cdot \exp(-2.3\beta_c)$ 의 최소 HCLPF값으로도 계산할 수 있다.

지진취약도를 계산하는 가장 보편적인 방법인 변수분리법(SOV, Separation of Variables)에서는 앞서 언급한 중앙값 지반가속도(a_m)를 산정할 때 기준 지진값(PGA_{RE})에 성능계수(F_{CA}), 기기 응답 계수(F_{ER}) 및 구조물 응답계수(F_{RS})를 고려한다. EPRI TR-3002012994(2018)에 따르면, 해석에 의한 기기 취약도의 경우 성능계수, 기기응답계수 및 구조물 응답계수를 고려하고, 시험에 의한 기기 취약도의 경우는 성능계수와 구조물 응답계수를 고려한다. 무작위성 대수 표준편차와 불확실성 대수 표준편차는 일부 변수에 있어서는 모두 고려 되지만, 특정 변수들에 대해서는 무작위성 혹은 불확실성 대수 표준편차 한가지만 고려하도록 정의하고 있으므로 해당 지침을 면밀히 참고하여 지진취약도를 생성할 필요가 있다.

확률론적 지진재해도 평가 이론 분석

Analysis of the theory on Probabilistic Seismic Hazard Assessment

김현욱

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소

확률론적 지진재해도 평가(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Assessment)는 지진자료에 내재된 불확실성을 반영하여 특정 부지에서 발생될 수 있는 지진동의 세기와 연초과 빈도와 관계를 정의하는 방법으로 지진동 세기는 일반적으로 최대지반가속도로 표현된다. 실무에서는 다수의 지진 지체 모델과 감쇄식이 가중치와 함께 고려되며, 다수의 지진자료에 의한 지진 재해도의 불확실성을 고려하기 위해 평균 지진재해도와 함께 다수의 백분위수 지진재해도가 함께 도시된다. 그러나, 확률론적 지진재해도 평가에 필요한 기본적인 이론은 Gutenberg and Richter(G-R) 관계에 의한 지진발생 빈도, 특정규모의 지진 발생확률, 진앙거리 및 지진동 세기의 불확실성(변동성)을 고려한 하나의 지진재해도 곡선을 산정하는 과정으로 설명될 수 있다.

먼저, 지진규모의 불확실성으로 인한 지진발생 빈도는 지진원에 대한 규모(m)와 연초과 빈도(λ)의 관계로 표현되는 G-R 관계를 이용하여 산정된다. G-R 관계의 주요 변수인 a 는 해당 지역 또는 지진원의 전반적인 지진 발생빈도, 기울기 b 는 작은 규모와 큰규모 지진 발생빈도의 상대적인 비율을 의미한다.

다음으로 지진규모의 불확실성으로 인한 특정 규모의 지진발생 확률은 ‘하한 규모를 고려한 지진 발생빈도($\lambda_{m_{min}}$)’에 대한 ‘하한 규모로부터 고려 대상 규모까지의 지진 발생빈도($\lambda_{m_{min}} - \lambda_m$)’의 비율로 산정한다. 즉, 특정 규모의 지진 발생확률은 ‘하한규모’보다 크고 ‘고려 대상 규모’보다는 작은 구간에서의 누적 확률이 된다. 경우에 따라 지진원의 상한규모(m_{max})를 고려하여 Bounded G-R 관계로써 특정 규모의 지진발생 확률을 구하기도 한다.

진앙은 뚜렷한 단층 지진원이 존재하지 않는 경우 면적 지진원으로 정의하며, 뚜렷한 단층 지진원이 존재하는 경우 선형 지진원으로 정의하는데, 각 경우마다 진앙거리의 불확실성을 고려하는 방법이 다르다. 먼저, 면적 지진원의 경우 진앙이 부지로부터 거리 r 이내 있을 확률은 ‘최대반경의 원면적’ 대비 ‘임의반경 r 의 원면적’의 비율로 산정한다. 선형 지진원의 경우, 진앙은 선형 지진원 상 임의의 한 점에 존재하는 것으로 고려되며, 진앙 지점이 부지로부터 거리 r 이내 존재할 확률은 ‘거리 r 이내 선형 지진원의 길이’ ÷ ‘총 선형 지진원의 길이’로 계산할 수 있다.

확률론적 지진재해도 분석에서 지진동 세기 척도(I.M., Intensity Measure)는 최대지반가속도(P.G.A., Peak Ground Acceleration)와 특정 주파수에서의 응답 가속도인 스펙트럼가속도(S.A., Spectral Acceleration)를 의미하는데, 일반적으로 최대지반가속도를 의미한다. 지진동 세기 척도(이하 지진동 세기)는 지진의 규모와 거리 및 기타변수(단층발생 메커니즘, 지표조건 및 단층의 방향성 등)를 입력변수로 하는 지진동 감쇠식(G.M.P.E., Ground Motion Prediction Equation)에 의해 계산되며, 그 결과는 평균값 가속도를 나타낸다. 특정 규모와 거리에서의 지진동 세기 또한 불확실성이 존재하며 이는 대수정규분포 등 확률분포에 의한 분산으로 고려한다.

상기 네가지 불확실성 인자에 대해 독립사건 가정, 결합확률분포 및 조건부 확률을 이용한 전확률의 법칙을 적용하면 확률론적 지진재해도 곡선을 산정할 수 있다.

원자력 발전소 예비 및 최종해체계획서내 화재방호 항목 비교

Comparison of Fire Protection Items in Initial and Final Decommissioning Plan for Nuclear Power Plant

배연경 · 김미경

한국수력원자력(주) 중앙연구원

2015년 1월 20일 원자력이용시설의 해체와 관련하여 원자력안전법이 개정되고 시행규칙에서 위임된 해체계획서 작성에 관한 규정을 마련하기 위해 원자력안전위원회(이하 “원안위”이라 함) 고시 “원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정”이 개정 공포되었다. 개정된 원자력안전법에서는 원자로시설의 건설 및 운영을 위한 허가 신청시 예비해체계획서를 제출하고 주기적으로 갱신하도록 규정하고 있다. 영구정지 후 해체를 위한 승인 신청시에는 최종해체계획서를 작성하여 규제기관에 제출하도록 규정하고 있다.

해체계획서는 원안위 고시 제5조에(해체계획서의 구성 및 작성요령) 따라 해체계획의 개요, 사업관리, 부지 및 환경현황, 해체전략과 방법, 해체용이성을 위한 설계특성과 조치방안, 안전성평가, 방사선방호, 제염해체활동, 방사성폐기물 관리, 환경영향평가, 화재방호, 참고문헌으로 구성된다. 참고문헌을 제외한 세부 항목은 최종해체계획서에서 구체화되지만, 해체를 위한 화재방호측면에서 기술하는 내용은 동일하다. 규제기술기준에서 요구하는 예비해체계획서 11장 화재방호에 수록되어야 하는 내용은 원자력이용시설 해체과정에서 발생 가능한 화재의 예방, 감지 및 진화를 위한 화재방호계획을 개략적으로 기술하도록 요구한 반면 최종해체계획서는 화재방호계획을 수립하여 기술하되 가동원전에 적용하는 화재방호계획에 관한 규정을 참조하여 기술하도록 제시하고 있다.

본 논문은 현재 해체계획서를 모두 보유하고 있는 고리1호기의 예비해체계획서와 최종해체계획서의 화재방호 항목을 비교하였다. 두 종류의 해체계획서는 모두 화재위험도분석과 화재방호운영계획으로 구성된다. 예비해체계획서는 화재시 방사성물질 누출가능성이 최소화됨을 입증하기 위해 위험도분석을 수행하고, 수시로 변화하는 해체 환경을 고려하여 화재예방 관리, 감지 및 진압, 소방대 운영, 화재확산 방지, 인명 안전 등을 통해 화재방호운영계획을 유지하고 관리한다. 최종해체계획서도 해체 전반에 걸쳐 화재시 방사성물질 누출 최소화 및 인명 안전을 위해 화재위험도분석보고서와 화재방호운영계획서를 구성된다. 화재위험도분석은 화재재해분석과 사용후연료저장조가 운전 중인 기간에 대해 화재안전성분석을 수행한다. 화재방호운영계획에서는 화재예방, 대응, 그리고 소방시설의 설치, 철거, 운영, 유지보수에 관한 내용을 기술하고 있다.

본 논문에서는 예비 및 최종해체계획서의 화재방호분야 구성 내용을 검토하였으며, 해체원전의 화재방호는 해체 단계와 특성을 고려하여 화재방호운영계획과 화재위험도분석을 통해 유지관리될 예정이다.

원자력 발전소 예비 및 최종해체계획서 비교

Comparison of Items in Initial and Final Decommissioning Plans of Nuclear Power Plants

배연경 · 정해영

한국수력원자력(주) 중앙연구원

2015년 개정된 원자력안전법에서는 원자로시설의 건설 및 운영을 위한 허가 신청시 예비 해체계획서를 제출하고 주기적으로 갱신하도록 규정하고 있다. 원자로시설의 영구정지 후 해체를 위한 승인 신청시 최종해체계획서를 작성하여 규제기관에 제출하도록 규정하고 있다. 그리고 원자로시설의 건설 또는 운영 중에 있는 사업자는 이 법의 시행일(2015.7.21.)로부터 3년 이내에 이 법에 따라 해당 시설의 해체계획서를 규제기관에 제출하여 승인을 받아야 한다. 이에 따라 전 원전에 대한 예비해체계획서를 제출하였다.

해체계획서는 원안위 고시 제5조(해체계획서의 구성 및 작성요령)에 따라 내용을 구성하고 작성한다. 예비해체계획서에서 작성되는 항목은 12가지로 해체계획의 개요, 사업관리, 부지 및 환경현황, 해체전략과 방법, 해체용이성을 위한 설계특성과 조치방안, 안전성평가, 방사선방호, 제염해체활동, 방사성폐기물 관리, 환경영향평가, 화재방호, 참고문헌 등이다. 그리고 최종해체계획서에는 최종해체계획서 초안 작성에 참여한 기관 및 참여자, 소요기간 등을 기술하는 기타 항목이 추가된다.

해체계획서의 항목 중 해체계획의 개요, 해체전략과 방법, 안전성평가, 방사선방호, 제염해체활동, 방사성폐기물 관리 분야는 최종해체계획서에서 기술되는 내용이 증가한다. 해체계획의 개요에는 해체사업의 개요, 시설현황, 시설운영이력, 사고 및 방사능 누출이력 등을 기술한다. 해체전략과 방법에는 해체 일정이 추가되며, 안전성평가 항목은 원칙과 기준, 피폭시나리오, 선량평가, 잔류방사능, 비정상사건, 위해도 등의 6가지를 포함한다. 방사선방호 분야는 ALARA 적용, 방사선방호 설계특성, 선량평가, 방사선방호계획 등의 4가지 항목을 포함하여 작성해야 한다. 이 중 직접적인 해체 과정 및 특성을 반영하는 것은 제염해체활동과 방사성폐기물 관리 항목이다. 제염해체활동은 제염해체방법, 구조물 계통 및 기기의 제염 및 해체, 토양, 지표수 및 지하수 복원에 대한 내용을 기술하며, 방사성폐기물 관리 분야는 방사성폐기물의 발생 및 특성, 고체·액체·기체·혼합·운영중 발생 폐기물 관리에 대해서 기술하도록 요구한다. 상기 항목 외에도 각각의 항목은 예비해체계획서와 최종해체계획서에 따라 동일한 기술사항이라도 그 내용의 상세 정도는 달라진다.

본 논문에서는 해체계획서 작성 항목과 기술사항에 대해 검토하였고, 이는 해체측면에서 해체계획서의 전체적인 구성을 검토하고 각 분야별 작성시 필요한 사항을 참고하고 연계하는 데 도움이 될 것이다.

중수로 원전 해체시 호기간 공용설비의 운전방법 검토

Review of Operating Methods for Shared Facilities between units during the Decommissioning CANDU Reactor

배연경 · 정해영

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원전은 1개의 발전소에 2개 호기가 설치되어 있고 2개의 호기 간에는 공용설비들이 존재한다. 한 개 호기는 해체를 계획하고 다른 호기는 운전 중이라면 해체 활동으로 인해 운전 중인 발전소의 안전 운영에 영향이 없도록 해야 한다. 미국 해체원전의 규제지침인 Regulatory Guide 1.191은 공용설비에 대해서도 화재위험도분석을 수행하도록 하고 있으며, 해체 활동으로 인해 운영 중인 발전소의 소화수 공급에 영향을 받지 않아야 한다고 기술하고 있다. 캐나다 기술기준 CSA/N293(2012)은 해체 발전소와 운전 중인 발전소 간의 공용설비에 대해 해체시 운전 중인 발전소에 미치는 영향을 검토해야 한다고 기술하고 있다.

월성1호기는 국내 중수로 최초로 영구정지되어 해체를 준비중이다. 중수로와 경수로는 원자로 특성과 계통 설계 측면에서 많은 차이가 있으며 경수조에 비해 공용설비가 다양하게 존재한다. 호기간 공유 계통으로는 비상급수계통, 비상전원계통, 중수공급/세정/승급계통, 소화수계통, 용수/순수/물처리계통, 보조증기계통, 작업용/호흡용 압축공기계통, 폐기체/폐수 처리계통 등이 있다. 공용설비의 대부분은 1호기의 보조건물이나 터빈건물에 설비가 설치되어 있고 관련 배관을 통해 2호기에 분배되도록 설계되어 있다. 용수계통이나 물처리계통의 경우 1호기를 해체하는 경우 2호기에 필요한 용수는 3호기와 연결하여 사용하도록 해야 한다. 보조증기계통은 1호기에 설치되어 있으며 2,3,4호기가 모두 사용하므로 해체를 할 경우 별도로 신설해야 한다. 작업용 공기계통은 2호기에 작업용 공기압축기와 탱크를 신규로 설치해야 한다. 호흡용 공기계통은 신규 설치된 작업용 공기계통으로부터 수동으로 공급할 수 있도록 설비를 설치해야 한다. 폐수처리계통은 폐수처리장과 연결된 배관을 절단 후 막음 조치를 수행한다. 소화수계통은 해체 기간 중 화재를 대비하여 해체가 완료될 때까지 활용한 후에 해체한다. 계통 압력이 감소하면 자동 기동되는 소화수펌프는 1호기 주제어실과 현장에서 기동이 가능하지만 2호기 주제어실에서는 기동할 수 없다. 따라서 1호기가 해체될 경우 2호기에서 기동할 수 있도록 설계변경이 필요하다. 소화수펌프 기동시 정보는 1,2호기 주제어실에서 모두 확인 가능하므로 별도의 조치는 필요하지 않다. 이외에도 현장에서 기동하는 설비의 경우 해체중인 1호기와 운전중인 2호기에 영향이 없도록 필요한 조치를 수행해야 한다.

본 논문은 월성1,2호기를 공유하는 계통에 대해 호기간의 특성을 고려하여 검토하고 2호기에 영향을 주지 않도록 계통측면에서 검토하였다. 그리고 2호기에서 해당 계통을 지속적으로 사용할 수 있는 대체 방안에 대해 검토하였다. 1호기에 위치하고 2호기로 분배되는 공유설비는 해체에 따른 대체방안으로는 격리, 설계변경, 또는 신설 등이 도출되었으며, 해체 과정에서 상세하게 검토하여 가동중인 원전의 안전운영에 영향을 주지 않도록 해체를 수행할 예정이다.

중수로 해체 원전에 대한 캐나다 화재방호 표준 적용성 검토
Review of Applying CSA N293 to Fire Protection Plan for the
Decommissioning CANDU Reactor

배연경 · 정해영

한국수력원자력(주) 중앙연구원

중수로 상업용 원자로로는 최초로 월성1호기 해체를 위한 최종해체계획서를 개발 중이다. 최종해체계획서에는 원안위 고시 「원자력이용시설 해체계획서 등의 작성에 관한 규정」에 따라 13가지 항목으로 작성된다. 그 중 11장은 화재방호로 원자력발전소 해체 과정에서 화재로 인한 방사성 물질의 환경 누출 가능성을 최소화하고 화재예방, 감지 및 진화를 위한 화재방호계획을 기술해야 한다. 국내에는 해체 원전의 화재방호를 위한 상세한 지침이 없어 미국 해체 원전의 화재방호 규제 지침인 Regulatory Guide 1.191을 준용하고 있으며, 중수로의 경우 캐나다의 화재방호 규제지침(REGDOC-2.10.2)을 추가로 고려해야 한다. 2019년에 발간된 캐나다 화재방호 규제지침은 현재 Draft 상태이며, 중수로 화재방호는 캐나다표준협회의 화재방호표준인 CSA N293을 준수하고 있으므로 최종해체계획서의 화재방호 분야에 CSA N293이 적절히 반영될 수 있도록 검토가 필요하다.

CSA N293은 원자력발전소의 설계, 건설, 시운전, 운영, 해체 기간에 대한 최소한의 화재방호 요건을 제공한다. CSA N293은 1987년에 제정된 후 1995년, 2007년, 2012년에 개정되었고, 2012년에 발간된 것은 2017년에 업데이트 되었다. CSA N293(2012)의 주요 항목은 일반요건, 화재방호개념, 화재 예방과 완화를 위한 설계 요건, 화재방호시스템의 설계 및 설치 요건, 화재방호프로그램의 이행, 해체를 위한 화재방호 요건, 화재대응능력, 화재방호평가로 구성된다. 이 중 화재방호개념, 화재방호프로그램 이행, 해체를 위한 화재방호 요건, 화재대응능력, 화재안전정지를 제외한 화재방호평가 지침을 검토하여 해체원전 화재방호계획 개발에 고려해야 한다.

본 논문에서는 CSA N293의 내용을 검토하였고 월성1호기 최종해체계획서에서 요구되는 화재방호계획인 화재방호운영계획서와 화재위험도분석에 반영할 예정이다.

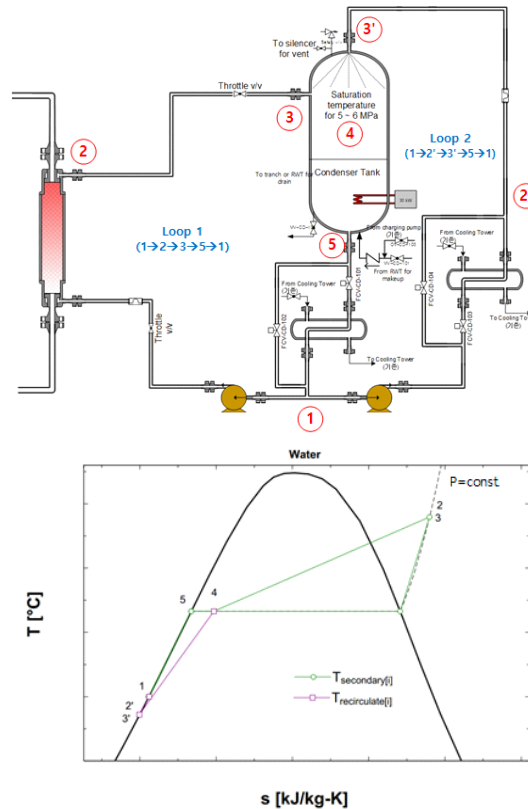
고온고압용 열교환기 성능 시험장치의 이차계통에 대한 열역학적 분석 Thermodynamic Analysis on Secondary System of Test Loop for High Temperature and Pressure Heat Exchanger

이선일* · 배형* · 윤현기** · 양진화* · 방윤곤*

한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 다목적소형연구로계통개발부**

이차계통은 일차계통으로부터 전달된 열에너지를 제거하고, 시험의 초기조건 및 시험항목에 규정된 실험을 모의하기 위해 필요한 경계조건을 제공하는 기능을 수행한다. 이차계통은 터빈을 포함하는 원자력 발전소의 이차계통 전체를 모의할 필요가 없고, 단지 경계조건만 제공하도록 설계하였으며, 크게 Loop 1(증기계통, 급수계통), Loop 2 (응축 및 냉각계통)으로 구성된다. 각 Loop의 특성은 하기와 같으며, 열역학적 상태는 하기 P-h 선도에서 확인 할 수 있다.

- 1-2-3 : SG를 통한 과열증기 생성과정, 유량제어를 통해 열제거량 제어
- 1-2'-3' : SS 압력유지를 위한 분할 냉각수 제어 및 순환
- (3+3')-4 : 과열증기와 냉각순환수의 혼합과정, Main steam을 포화액 상태로 변환
- 4-5 : 생성된 포화액을 탱크 내부에 축적, 충분한 체적의 포화액을 축적하고 있으므로 과정4에서 유입되는 mixture에 의한 급격한 온도/압력 변화를 방지하는 역할
- 5-1 : LOOP 1과 LOOP 2로 분할되기 직전까지의 과정이며, 탱크에 축적된 포화액의 냉각량 조절(HX-CD-01 냉각수 및 우회유량제어)을 통한 SG 유입온도 제어



인쇄회로 기판형 열교환기에서 유로막힘으로 인한 열전달 성능 평가

이성민 · 서경우 · 박홍범 · 김인국

한국원자력연구원

Heat transfer evaluation of flow blockage in a printed circuit heat exchanger

인쇄회로식 열교환기(PCHE)는 효율이 높고 부피를 작게 설계할 수 있어 다양한 산업에서 주목받고 있는 열교환기 유형 중 하나다. 원자력발전소에서 PCHE를 적용할 때, 열전달, 압력 강하, 입출구 온도, 유량 등 설계된 성능이 장기적으로 보장되어야 한다. 그러나 PCHE 내부의 채널은 이물질, 입자, 부식 생성물 등으로 인해 막힐 수 있으며, 열전달 성능이 감소할 수 있다. 또한, 설계된 PCHE의 성능이 보장되지 않을 경우, 구조물의 국소적 손상, 냉각 용량 감소, 온도 상승 및 원자로 정지로 이어질 수 있으며, 이로 인해 발전소를 가동할 수 없어 경제적으로 큰 손실로 이어질 수 있다. 따라서 이물질의 유입이 PCHE 성능에 미치는 영향을 평가하는 것은 안정적인 원자력 발전소 운영과 깊게 연관되어 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 연구용 원자로에서 유체로 물을 1차측과 2차측에 사용하는 경우 PCHE 내부 이물질이 열전달 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 1차측 및 2차측 유량은 각각 565 kg/s 이며, 역류형 방식으로 1차측에서 2차측으로 10 MWth의 열을 전달할 수 있는 열교환기를 해석 모델로 선정하였다. 반지름 0.2 cm, 길이 5.5 m의 반원형 직선, 채널 간격은 채널 지름의 1.2배로 설정하였다. 1차측 유체의 입구 온도는 41 °C, 2차측 유체의 입구 온도는 31.5 °C로 설정되었다. 1차측과 2차측 각각 5만개의 채널개수를 가지고 있어서 설계된 열전달 성능을 보장한다. 채널의 형태는 반원형태이며 직선유로에서 채널이 이물질 유입으로 막혔을 때 해당 채널에서 열전달은 열전도를 통해 계산되었다.

정상 운전 조건에서 채널 직경이 0.2 cm일 때 전체 열전달계수는 $2391 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이며, fouling resistance 는 $0.00042 \text{ m}^2\text{K/W}$ 였다.. 이물질이 유입되어 채널이 막히면 전체 열전달계수가 $2391 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 감소하고 fouling resistance 는 $0.00248 \text{ m}^2\text{K/W}$ 로 약 5배 이상 증가하였다. 이것은 이물질 유입 없이 대류로 인해 전달되던 열이 이물질 유입으로 인해 전도로 열이 전달되어 막힌 채널의 주변 채널에서 전체 열전달계수가 급격히 감소하기 때문이다. 이물질로 인해 막힌 채널의 개수가 적을 때 유량분포에는 큰 영향을 미치지 않는 것이라 예상되지만, 국소적 열전달 성능을 급격히 저하시키는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 추후 연구에서 이물질 유입으로 다중 채널 막힘 현상 및 열전달 성능을 평가하고, 국소적 온도증가와 내부 응력의 변화 등 다양한 영향을 평가할 필요가 있으며, 3차원적 해석 도구를 통해 상세 해석이 필요해 보인다.

후기

이 논문은 2023년도 점부(과기정통부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020M2D5A1078131).

탄력운전 영향을 반영한 SLB 정량적 평가

이재민 · 최봉오*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발본부

Safety analysis evaluation for SLB considering the influence of flexible operation

세계적으로 신재생에너지 설비 및 비중이 확대되면서 원자력발전 등 기존 전력원의 탄력운전이 요구되고 있다. 또한, 신규 원전 발주국들도 탄력운전을 기본적으로 요구하고 있다. 탄력운전을 적용하면 지속적인 출력 변화로 노심 등의 설계자료의 변경이 예상되고, 그에 따라 변경된 연계자료를 반영한 안전해석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 핵설계 연계자료가 변경되는 대표사건인 증기관파단(Steam Line Break, SLB)에 대한 정량적 평가를 수행하였다.

노심설계분야에서 탄력운전을 반영한 노심 모델을 구축하여 안전해석 연계자료를 생산하였다. 탄력운전으로 변경되는 SLB 사고 관련 핵설계자료는 감속재 냉각반응도곡선과 역붕소 제어능가이다. 해당 연계자료를 반영하여 안전해석 평가를 수행하였으며, 국내 고유 안전해석 코드인 SPACE를 활용하였다. 분석된 case는 SAR에 기술되어 있는 6가지로 재임계 도달 가능성이 큰 4가지 case와 핵연료성능 저하를 고려한 2가지 case이다. 평가 결과, 변경된 감속재냉각반응도 곡선의 영향으로 동일한 온도 변화량 대비 더 많은 양의 반응도가 주입되어 SLBFLOOP에서 재임계가 발생하였다. 하지만 이는 핵연료 변경(PLUS7 → HIPER16)에 따른 영향으로 판단된다. 핵설계자료의 지나친 보수성을 배제하여 평가를 수행한 결과, 재임계 도달이 발생되지 않음을 확인하였다.

본 연구에서는 탄력운전의 적용으로 변경되는 감속재 냉각반응도곡선 및 역붕소제어능가 등의 핵설계 연계자료를 반영하여 SLB 사고에 대해 안전해석을 수행하였다. 평가 결과, 핵설계자료의 보수성을 제외하면 재임계 도달이 발생되지 않는 것을 확인하였다. 향후, 탄력운전 영향을 고려하여 Non-LOCA 사고 전체에 대한 안전해석을 수행할 계획이다.

탄력운전 영향을 고려한 CCF CEAE 안전해석 평가

이재민 · 안형균*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주) 원자로설계개발본부

Evaluation of safety analysis for CEAE accompanied by CCF considering the impact of flexible operation

전통적으로 원자력발전소는 비교적 저렴한 발전단가로 전력망(grid)의 발전용량 중에서 기저부하 역할을 담당해왔다. 근래에는 탄소중립과 같은 에너지정책의 일환으로 신재생에너지 발전설비 및 발전량이 증가하였고, 그에따라 원전의 탄력적인 운영이 요구되고 있다. 또한, 유럽 등의 수출대상국에서도 원전의 탄력적인 운영을 요구하고 있다. 탄력운전 수행에 따라 원전의 부분 출력으로의 변동이 불가피하게 되는데, 이를 반영한 안전해석 평가가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 탄력운전의 영향을 고려하여 공통원인고장(CCF)을 동반한 설계기준사고에 대한 안전해석을 수행하였다.

탄력운전을 수행할 경우 저출력에서 제어봉삽입한계(PDIL), 운전제한조건(LCO)과 연관되어 부분 출력이 제한적인 경우가 발생 가능한데, 제어봉 삽입에 따라 영향이 가장 클 것으로 판단되는 제어봉집합체 이탈사고(CEAE)를 대상으로 설계기준초과사고 평가를 수행하였다. APR1400 노형에 대해 탄력운전의 영향이 반영된 핵설계 연계자료를 적용하여 50%, 100% 출력 조건을 고려하였다. 국내 고유 안전해석 코드인 SPACE를 활용하여 설계기준초과사고 방법론을 개발하였고, 핵설계자료는 EOC의 자료를 적용하였다. 평가결과, 전출력의 경우 약 3% 수준의 출력증가 이후 안정적인 상태를 유지하고 핵비등이탈률(DNBR)도 연료허용손상 한계(SAFDL) 기준 대비 충분한 안전여유도를 확보하였다. 50% 출력의 경우 사고 초기에 출력이 58%까지 증가하지만, 수초 이내에 안정적인 상태로 복귀 후 유지하게 된다. 마찬가지로 DNBR 값이 SAFDL로부터 충분한 안전 여유도를 확보하여 핵연료 건전성에 이상이 없음을 확인하였다.

탄력운전 영향을 고려하여 설계기준초과사고인 CEAE를 평가하였고, 충분한 안전여유도가 확보됨을 확인하였다. 향후 탄력운전 영향을 확인하기 위한 평가대상 선정기준을 마련하고, 평가대상 사고에 대한 안전해석 평가를 수행할 예정이다.

MARS-LMR 코드를 이용한 장주기 선진 소형원자로 비보호 과출력 사고 안전해석

이현우 · 이용범 · 한지웅 · 예휘열 · 박준범*

한국원자력연구원, *가천대학교 기계공학과

Safety Analysis of Unprotected Transient Overpower Accidents in the SALUS(Small, Advanced, Long-cycled and Ultimate Safe SFR) using the MARS-LMR Code

Hyunwoo Lee · Yong-Bum Lee · Ji-Woong Han · Huee-Youl Ye · Junbeom Park*

Korea Atomic Energy Research Institute, *Gachon University Department of Mechanical
Engineering

- 한국원자력연구원에서는 장주기 선진 소형원자로 SALUS(Small, Advanced, Long-cycled and Ultimate Safe SFR)를 개발 중에 있다. 설계된 SALUS는 다양한 과도상태에 대한 안전성 평가를 수행하여야 하며 이를 위하여 검증된 MARS-LMR 전산코드를 사용하여 SALUS 선진 소형원자로에 대한 운전제한조건(LCO, Limiting Conditions for Operation) 민감도 평가 및 안전성 평가를 수행하였다.
- 운전제한조건 민감도 평가는 노심의 주기 초, 중간 주기와 주기 말을 대상으로 수행하였으며 민감도 변수는 노심 출력($100 \pm 2.0\%$), 노심 입구 온도($360 \pm 4.0^\circ\text{C}$), 노심 출구 온도($510 \pm 4.0^\circ\text{C}$)로 하였다. 민감도 평가를 위해 총 21가지 정상상태를 설정하였으며 이를 이용하여 대상 사고에 대한 민감도 평가를 수행하였다.
- 민감도 평가 결과 노심 입구 온도에 대한 민감도는 매우 작으며 노심 출구 온도에 대한 민감도가 가장 크다. 주기 말, 노심 출력 100%, 노심 입구온도 364°C , 노심 출구온도 514°C 의 초기 조건에서 노심 냉각재 최대 온도가 가장 높게 계산되어 가장 보수적으로 평가되었다.
- 가장 보수적인 조건을 초기상태로 과출력 사고의 대표 초기사건인 비보호 단일제어봉 인출 사고에 대한 안전해석을 수행하였다. 냉각재의 최고 온도는 사고 발생 25초 후 최고 온도 560.3°C 에 도달한 후 점차 감소하며 이때 최고 온도는 소듐의 비등 온도보다 현저히 낮은 온도로 충분한 안전여유도가 확보됨을 확인하였다.
- 약 3,710초 이후에는 노심 잔열과 잔열제거계통을 통한 열제거의 균형이 이루어지며 이후 잔열제거계통을 통한 열제거량이 노심 잔열보다 커지므로 원자로는 안정적인 상태를 유지한다.

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021M2E2A1037871).

계측기 오동작을 고려한 발전정지유발기기 검토 사례

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Case Study on the Single Point Vulnerability Considering the Malfunction of the Instrument

100만개가 넘는 부품/설비로 이루어진 원자력 발전소는 원자핵이 분열할 때 발생하는 에너지를 이용해 물을 끓이고 이 증기로 터빈/발전기를 구동하여 전기를 생산하고 있다. 원자력발전소는 발전용량이 커서 전력시장에서 기저 공급원으로 계획에 따라 정지/운전하며 전력을 공급하고 있다. 하지만 설비 고장으로 발전소가 불시정지 될 경우 발전용량이 커서 전력시장에 미치는 영향도 크다. 발전소를 안전하게 운전하는 것이 국내 발전시장에 안전성을 높이는 것이기도 하다.

국내 원자력발전소는 기기의 오동작 및 고장으로 발전소 불시정지를 예방하기 위하여 발전정지유발기기(SPV, Single Point Vulnerability)를 선정하고 관리하고 있다. 발전정지유발기기란 단일기기의 오동작 및 고장으로 원자로정지, 터빈 및 발전기 정지 및 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비(교체가능하고, 설비마스터로 관리중인 세부기기)를 말한다. 발전정지유발기기로 선정된 설비는 설계변경, 예방정비 개선, 절차서 개정 등 집중관리를 수행하여 설비의 신뢰도 향상 및 발전소 안전운전을 기대할 수 있다.

본 논문에서는, 계측기 오동작을 고려하여 발전정지유발기기 대상여부를 검토하였다. 위에 언급한 바와 같이 단일기기 고장에 의해 발전기 출력이 50%이상 감발할 경우 SPV 대상으로 선정, 관리하고 있다. 발전소 설비는 주기능을 담당하는 밸브, 펌프 등의 기계설비와, 이를 구동할 전원을 공급하는 전기설비, 그리고 설정된 값에 운전 및 고장보호하는 제어설비 등으로 이루어져 있다. 발전정지유발기기는 주기능을 담당하는 기계설비 뿐만 아니라 이들을 제어하고 정지시킬수 있는 전기, 계측설비까지 포함한다.

검토 사례는 순환수펌프 운전조건인 모터 윤활수 저-저유량 오신호에 의해 운전중인 펌프가 정지되고 대기중인 순환수펌프가 기동되지 않은 것이다. 계측기는 정상적인데 신호 제어카드 오동작으로 오신호 발생 및 펌프가 트립되었다. 6대로 구성된 순환수펌프는 하절기 5대 이상, 동절기 4대 운전되며 대기중인 펌프가 있어서 1대가 트립되어도 발전소 출력감발이 발생하지 않아 펌프는 발전정지유발기기가 아니며 이에 연결된 전원설비, 계측설비도 해당이 없다. 이러한 분석을 통해 발전정지유발기기 선정을 하고 선정된 대상을 중심으로 집중관리하여 발전소 안전운전에 기여할 수 있을 것이다.

복수기 신축이음매 발전정지유발기기 선정 사례

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Case Study on the Selection of Single Point Vulnerability for Condenser Expansion Joint

안전을 최우선 가치로 운영중인 원자력발전소는 수백만개의 설비로 구성되어 전력을 생산하고 있다. 원자력발전소의 안정적인 전원공급이라 하면 시장에서 요구하는 전력을 일관성 있게 공급하는 것이며, 이를 위해 급격한 출력의 변동 없이 또는 불시 정지 없는 운전이 요구된다. 수많은 설비 중 일부 기기의 고장시 출력감발 또는 발전정지를 유발 할 수 있어 원자력발전소는 이를 집중관리 하고 있다.

우리 회사는 단일기기의 오동작 및 고장으로 원자로정지, 터빈 및 발전기 정지 및 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비에 대하여 발전정지유발기기(Single Point Vulnerability, SPV)로 정의 하고 선정 및 집중관리 하고 있다. 또한 선정된 목록들을 대상으로 유사노형과 비교분석, 타호기 확대적용 절차서 개정, 설계변경, 운전경험 전파 등을 통해 목록을 꾸준히 개선 및 개정하여 설비 신뢰도를 향상 시키고 있다.

발전정지유발기기 선정은 절차서에 따라 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비로 정의하였지만 너무 많은 대상이 선정되어 집중관리를 위해 몇가지 예외사항을 두었다. ‘주기적으로 점검이 가능한 절차가 있는 피동기기’ 단, 국내외 발전정지 경험이 있는 피동기기는 포함한다고 정하였다.

본 논문에서는, 복수기 진공도에 영향을 줄 수 있는 복수기 신축이음매의 발전정지유발기기 대상여부를 검토하였다. 복수기 진공이 상실할 경우 터빈정지 및 원자로 정지가 되므로 복수기 진공을 유발하는 단일 기기는 발전정지 유발기기에 해당한다.

해당 사례는 복수기 ‘A’ 신축이음매 손상으로 복수기 진공이 저하되어 발전정지된 경우를 재검토 하였다. 신축이음매는 점검주기가 있는 피동기기로 그동안 발전정지유발기기이지만 예외대상으로 대상에서 삭제되어 관리 되고 있었다. 하지만 상태 점검이 아닌 기능 점검으로 고장을 예측할 수 없고 감시설비가 없어 기능상실을 빨리 확인 할 수 없었다. 이번 사례를 통해 PMT 권고주기를 고려하여 점검 및 교체 계획을 수립하고 밀봉수 수위를 감시할 수 있는 수위계측기를 추가설치하는 설계변경을 하였다. 이러한 분석 등을 통해 발전정지유발기기 선정을 재검토하고 집중관리하여 안정적인 발전소 운영에 이바지 할 것이다.

습분분리재열기 배수탱크 수위제어밸브의 잠재적 발전정지유발기기 사례

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

A Case Study of Potential Single Point Vulnerability for Moisture Separator Reheater Drain Valve

핵분열 에너지를 이용하여 전력을 생산하는 원자력발전소는 안전을 최우선으로 운영하고 있다. 안정적인 전력공급을 위해 출력 급감발 또는 불시 정지를 줄이기 위해 노력하고 있고 유사한 상황이 발생하여도 안전하게 원자로 열제거를 위해 수백만개의 설비가 유기적, 논리적으로 연계, 운전되고 있다.

대용량의 발전을 하는 원전은 전체전력에서 차지하는 비중이 커서 발전출력을 큰 변동 없이 일관성있게 공급해야 한다. 하지만 수백만개의 기기들로 구성된 발전소는 언제든지 예기치 못하게 정지될 수도 있다. 이에 우리 회사는 단일기기의 오동작 및 고장으로 원자로정지, 터빈 및 발전기 정지 및 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비(교체가능하고, 설비마스터로 관리중인 세부기기)를 발전정지유발기기(Single Point Vulnerability, SPV)로 정의하고 다양한 방식을 통해 그 대상을 선정하여 집중적으로 관리하고 있다. 이러한 체계는 발전소의 불시정지를 예방하는 효과가 있다.

발전정지유발기기 대상 선정은 계통의 구성요소에 대한 고장모드를 식별하고 이러한 고장 모드 발생 시 그 결과를 평가하는 체계적인 절차인 고장모드영향분석(FMEA, Failure Mode and Analysis) 방식을 사용한다. 특히 기기 고장모드별 발전정지 가능성 평가에서는 분석대상 기기의 고장모드별 기기의 고장이 파급되어 나타나는 영향을 설계 및 운전 자료에 근거하여 평가한 후 그 기기고장에 따른 발전정지 중요도(TC, Trip Criticality)의 등급으로 정의하여 분류한다. TC1은 단일기기 고장에 의한 발전정지 유발기기, TC2는 2개의 기기 동시 고장에 의한 발전정지유발기기 등 TC3와 NC로 나누어 관리하고 있다.

본 논문은 고압터빈을 거쳐 나온 증기의 습분을 제거하고 주증기로 가열하여 건조한 재열 증기를 저압터빈으로 공급하는 습분분리재열기(MSR)의 배수탱크 수위제어밸브 고장 사례를 검토하였다. MSR의 응축수는 MSR 배수탱크에 수집되고 정상운전중 정상배수밸브(NDV)를 거쳐 급수가열기로 배수되고 (비정상)고수위에서는 비상배수밸브(EDV)를 거쳐 복수기로 배수된다. NDV, EDV 동시 고장시 MSR 배수탱크 고수위에의해 발전정지 가능하여 TC2, 즉 잠재적 발전정지유발기기에 해당된다.

검토된 운전경험은 발전소 정상운전 중 경험한 운전사례로 NDV 이상을 확인하고 EDV를 통해 배수탱크 수위를 제어하여 발전소 안전운전을 유지한 경우이다. 이런 분석들을 통해 발전정지 중요도를 구분하고 중요도에 따라 관리방식을 달리 하여 효율적으로 발전소 운영을 하고 있다.

원자로냉각재펌프 관련 발전정지유발기기 대상

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

List of Reactor Coolant Pump related Single Point Vulnerability

수백만개의 부품으로 구성된 원자력발전소는 핵분열 에너지를 활용하고 있어 안전 최우선으로 운영되고 있다. 예측/계획 운전을 목표로 안정적인 전력공급을 하며 고장 및 이상 발생시 원자로의 열을 안전하게 제거하고 하도록 다양한 설비들이 동작하고 있다.

국내 원자력발전소는 단일기기의 오동작 및 고장으로 원자로정지, 터빈 및 발전기 정지 및 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비(교체가능하고, 설비마스터로 관리중인 세부기기)를 발전정지유발기기(Single Point Vulnerability, SPV)로 정의하고 여러 과정을 거쳐 대상을 선정후 집중 관리하고 있다. 또한 이들 대상을 줄여나가기 위해 유사노형과 비교, 운전경험 공유, 설비 개선 등을 꾸준히 시행하고 있다.

원자로냉각재펌프는 핵분열에 의해 생긴 열을 증기발생기에 전달하고 원자로를 냉각하는 원자력발전소에서 매우 중요한 설비이다. 표준형원전에는 4개의 펌프가 있으며 1대만 정지되어도 원자로정지, 발전정지를 일으키는 발전정지유발기기이다. 유사 노형을 포함하여 타 발전소와 비교 검토하여 대상을 선정하고 있다.

이번 논문은, 원자로냉각재펌프와 관련된 발전정지유발기기 대상을 검토하였다. 세부적으로 보면 원자로펌프, 원자로펌프 전동기, 전동기 구동전원, 보호계전기, 케이블, 열교환기, 전동밸브, 압력제어밸브, 공기식밸브, 열교환기 등 원자로펌프와 관련된 설비가 많이 있다. 펌프와 모터를 대체, 다중화 할 수 없으므로 발전정지유발기기 대상이며, 전원공급 차단기도 이에 해당된다. 단, 전기관련 보호계전기는 설계변경을 통해 2/3로직으로 변경하여 잠재적 발전정지유발기기로 낮추었다.

위 운전경험 사례는 원자로냉각재펌프와 관련하여 그동안 검토되었던 발전정지유발기기 목록에 개선할 부분이 있음을 확인해주는 경우이다. 모든 설비에 대해 발전정지가 발생 가능 여부를 확인하고 세부적으로 검토하여 발전정지유발기기로 선정하여 집중관리 하고 있지만 운전경험을 통해 다른 관점에서, 보수적으로 추가 분석이 필요함을 확인 할수 있었다. 이런 추가적인 분석을 통해 발전정지유발기기 대상 선정 방법을 개선하여 신뢰성을 높이는 것은 발전소 안전운전에 선한 영향을 미칠 것이다.

4.16kV 스위치기어, 발전정지유발기기 미적용 사례

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

4.16kV SWGR, Non-application of Single Point Vulnerability

원전의 안전성을 최우선으로 추구하는 원자력발전소는 수백만개의 설비로 구성되어 있지만 중요설비를 구분하여 집중 관리하고 있다. 한 호기별 전력용량이 큰 원자력발전소는 전력계통에 미치는 영향도 커서 안전운전이 중요하다.

우리 원전은 단일기기의 오동작 및 고장으로 원자로정지, 터빈 및 발전기 정지 및 50%이상의 출력감발을 유발하는 설비(교체가능하고, 설비마스터로 관리중인 세부기기)를 발전정지유발기기(Single Point Vulnerability, SPV)로 정의하고 여러 방법을 통하여 대상을 선정하여 집중관리 하고 있다. 안정적인 운전을 위해 발전정지유발기기 설비들에 대해 유사발전소와 비교검토, 설계변경, 운전경험 공유, 절차서 개정 등을 통하여 그 대상을 줄이는 노력을 꾸준히 하고 있다.

발전소내 전력계통은 전기로 구동되는 설비에 전원을 공급하는 기기로 고장이든, 오동작이든, 정상 작동이든 전원 상실 시 해당 기기는 기능을 상실하며 논리적 전개로 발전소 불시정지가 발생 할 수 있다. 본 논문은 소내전력계통에서 안전계통 필수부하를 포함한 다양한 부하에 전원을 공급하는 고전압 4.16kV 스위치기어 모선의 발전정지유발기기 미적용 사례를 검토하였다. 고압차단기 스위치기어는 대형부하 및 중요부하들로 구성되어 있어 각각적으로는 발전정지유발기기 대상에 포함되어야 할 것 같다. 하지만 2개 계열로 구성되어 1개의 스위치기어가 나가더라도 다른 계열에서 부하에 전원을 공급하여 해당 부하별 기능을 수행한다.

본 사례는 원자로건물 냉방수 등의 부하를 가진 비안전 4.16kV 스위치기어가 정전되어도 발전정지유발기기로 적용되지 않음을 확인한 것이다. CEDM FAN, RCFC, RX CAVITY FAN, CV Chiller 등의 부하 전원이 상실되어 정지되었지만 다른계열의 대기부하들로 교체 운전하여 발전소 출력감발 없이 안전운전을 유지하였다. 이는 해당 스위치기어가 발전정지유발기기가 아닌 잠재적 발전정지유발기기임을 확인한 사례이다. 이러한 분석들을 통해 발전정지유발기기 선정을 세밀하게 하고 그 선정된 대상들을 집중관리 하여 발전소 안전운전에 기여하고 있다. 우리 원자력발전소는 해당 목록들은 더욱 정확한 분석을 통하여 꾸준히 개정, 검토되어 대상 선정에 신뢰도를 높이고 있다.

소형모듈형원자로의 격납용기 열수력 해석을 위한 모델 구축

Building a model for thermal hydraulic analysis of SMR containment vessel

하희운

한국수력원자력 중앙연구원

한수원은 '21년부터 다양한 분야에서 활용 가능한 일체형원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발 추진 필요성에 따라 기존 SMR보다 안전성 및 경제성이 향상된 혁신형 SMR 개발을 목표로 기본설계를 수행하고 있으며, '23년부터 「혁신형 SMR 기술개발사업」을 통해 혁신형 SMR 연계 기술개발을 추진할 예정이다. 본 연구에서는 혁신형 SMR 격납용기 열수력 해석을 수행하기 위해 원자로건물 열수력 해석 코드인 GOTHIC 코드를 활용하여 관련 GOTHIC 모델을 작성하고 예비 해석을 수행하였다.

모델 구축에 사용된 형상 정보는 현재까지의 개발정보를 기본적으로 활용하였으나, 질량 및 에너지 방출 데이터는 혁신형 SMR의 특성을 고려하여 단일 체적의 원자로용기를 구성하였고 이를 통해 격납용기로 방출되도록 하였다. 해석모델은 원자로건물과 관련 연계 계통을 고려하여 24개의 제어체적과 39개의 유로로 구성되었다. 모델의 상세사항은 다음과 같다. 원자로건물은 운전층 상부를 단일 체적으로 작성하고 2개의 유로를 통해 원자로건물 배기를 구성하였다. 이외에도 원자로건물에서 격납용기가 차지하는 격실공간, 격납용기, 원자로용기, 외부 대기공간등도 계산시간과 자원 등을 고려하여 단일 체적으로 작성하였다. 중요 피동 열제거원인 피동보조급수계통 및 피동 격납용기 냉각계통은 subdivided 모델을 이용하여 작성하였다. 피동 열침원은 7개를 고려하였으며 열전달 면적은 개발정보를 참고하였다. 예비 계산은 대형 냉각재상실사고에 대해 PCCS가 작동되는 조건에서 사고 후 10,000초까지 실시하였다. 격납용기 초기조건은 설계 사항등을 참고하여, 압력 2kPa, 온도 150℃, 그리고 상대습도 0%로 설정하였다.

예비 계산 결과, 격납용기 압력이 10,000초에 설계압력을 넘어서는 것으로 예측되었으나, 해당 결과는 유사한 모델을 사용한 타 코드 해석 결과와 상이한데 이는 해석에 사용된 응축 열전달 상관식에 따른 차이로 판단된다. 이와 관련하여 적절한 응축 열전달 상관식을 GOTHIC 코드에 적용하는 것으로 목표로 후속 연구를 진행해 나갈 계획이다.

연소도 향상을 위한 중수로 핵연료주기 연구

함태균 · 김영애 · 박동환
한국수력원자력(주)

Study on CANDU Fuel Cycle to Increase Fuel Burn

Taekyu Ham·Youngae Kim·Donghwan Park
KHNP Central Research Institute

중수로는 감속재대비 연료 비율이 높게 설계되어 연료 유형과는 무관하게 충분히 열화된 중성자를 사용하고 있다. 중수로에서는 높은 열화 중성자를 효율적으로 사용하여 천연 우라늄을 연료로 사용하고 있고 매일 주기적인 연료 교체를 하고 있다. 또한 중수로의 연료 사용에 대한 유연성을 활용하여 안전성 향상을 위한 CANFLEX연료 개발 및 경수로 사용 후 연료를 활용한 DUPIC연료 개발 등 다양한 핵주기 개발을 하고 있다. 최근 중수로 소유자그룹(COG)에서는 천연우라늄의 U-235 0.715%보다 높은 U-235의 구성비 0.78%의 연료를 사용하여 연소도를 약 20% 향상 시킬 수 있음을 보였지만 초기 출력 안정을 위해 사용한 독물질로 인해 연소도의 손해가 발생하였다.

고연소도의 장점은 연료 교체를 줄여 연료비의 절감과 연수 후 발생하는 폐기물의 처리비용 절감이다. 중수로 발전에서 연료비가 점유하는 비율은 경수로 대비 높지 않은 상황에서 U-235의 비율을 높인다면 천연우라늄을 사용하는 중수로의 장점이 없어지기 때문에 본 논문에서는 천연 우라늄을 사용하면서 연소도를 향상 시킬 수 있는 핵연료 주기를 연구하였다. 이를 위해 운전 중 연료 교체가 가능한 중수로의 특성을 이용하여 교체하는 연료에 토륨을 포함시켜 독물질 사용을 줄이고 연소 중 생성된 U-233을 통해 지속적인 임계도를 유지 할 수 있는 연료 주기를 개발하였다.

산업계 리스크정보활용 활성화를 위한 정책 제언 및 추진방향

황석원* · 김경수 · 방기인

한국수력원자력(주) 중앙연구원

Industry Proposals for the Revitalization Strategy of Risk-informed Application(RIA) in Korea

리스크정보활용(RIA)은 원전의 운전 및 정비업무에 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA)를 적극 활용하여, 안전관리를 강화하고, 과도하게 보수적인 운영요건의 개선을 통해 운영 효율성을 제고하기 위한 원전 운영기술이다. 미국은 TMI 원전 사고 이후, NRC 주도로 1980년대 PSA 결과 활용을 위한 기반을 구축하였으며, 이와 더불어 과도한 규제완화와 경제성 제고를 추구하고자 규제기관과 산업계간의 지속적인 협의를 통해 리스크정보활용 규제환경이 정착화 되었다. 국내는 중대사고 정책성명으로 개발된 PSA를 활용하여, RIA 기반을 마련하였으나, 후쿠시마 사고이후 국내 규제정책의 강화로 리스크정보활용 분야는 지금까지 크게 위축되었다.

본 논문에서는 리스크정보활용 국내 재활성화를 위한 문제점을 파악하고 추진방향에 대한 제언을 기술하고자 한다. 우선 문제점에 대해서는 크게 국내 규제의 환경적 측면과 기술적 측면으로 나누어 기술해보고자 한다. 규제 환경적 측면에서는 사업자와 규제기관 사이의 PSA 품질적용에 대한 이견이 존재한다. 규제기관은 Peer Review 수행과 최신 기술을 적용한 PSA 품질확보를 요구하고 있으나, 사업자는 미국과 같이 단계별 규제도입 이력과 배경을 기반으로 RIA에 대한 요건별 차등 적용이 필요함을 주장하고 있다. 그리고, 리스크정보활용 규제 도입 체계에 대해서도 결정론적인 규제에서 확률론적 규제로 전환시 규제 철학과 프레임의 전환이 아닌 추가적인 규제강화의 형태로 요구되는 것에 부담이 커질 수 있다는 우려도 있다. 다음으로 기술적 측면에서는 리스크정보활용시 PSA 모델은 "as-is, as-operated" 상태를 반영해야 하는데, 신규 안전목표 부합과 상세설계가 진행중인 이동형 설비에 대한 모델 반영 등에 대한 제한사항으로 분석의 완결성 문제가 상존하고 있다. 이에 대한 사고관리계획서 및 주기적안전성평가 PSA 모델에 대한 최종 승인과 종결시점도 리스크정보활용 추진을 위한 중요한 문제점중 하나이다.

RIA에 대한 정책제언과 추진방향에 대해 간략히 기술하고자 한다. 첫 번째로, 리스크정보활용 제도적 기반 확립을 위한 유관기관과의 소통 및 협력 채널을 확대할 필요가 있다. 국내 산·학·연 리스크연구부회 등 대외 협력 채널을 강화하고, 규제기관 및 전문가들과 상시 기술현안 논의 및 소통을 위한 협력 채널역시 필요하다. 두 번째로, 단계적인 PSA 품질확보를 위한 노력이 필요하다. 현시점에서 적용 가능한 리스크정보활용 항목을 도출하고 해당 항목별로 부분적인 품질확보를 단계적으로 추진하여, 점진적 확대 개발을 위한 종합적인 리스크관리 체계를 수립할 필요가 있다. 마지막으로, Option 1 재추진을 통한 가동중정비 기반을 확보하되, RI-ILRT 주기연장, STI/AOT 연장과 같이, 국내에서 이미 기반기술을 구축한 순서부터 우선 추진하는 것이 현실적일 것으로 판단된다. 이와 연계하여, 리스크정보를 활용한 가동중정비(On-Line Maintenance) 추진을 위해 가장 최근에 승인받은 최신 원전에 대해 우선 시범 추진하고, PSA 품질측면에서 필요한 사항이 있다면 분야별 연구를 통해 보완하는 방법이 현실적일 것으로 사료된다. 세계 최고의 PSA 기술과 품질을 보유한 국가로서 상기에서 제시한 범위내 단기 추진은 기술적으로 큰 문제는 없다고 판단되며, 정책적인 면에서도 자신감을 가지고 적극 추진해야 할 것이다.

국내 원전 기술지원 체계 개선 방안

A Study of Improvement of Technical Support Process for Nuclear Power Plant

김재성, 권민혁

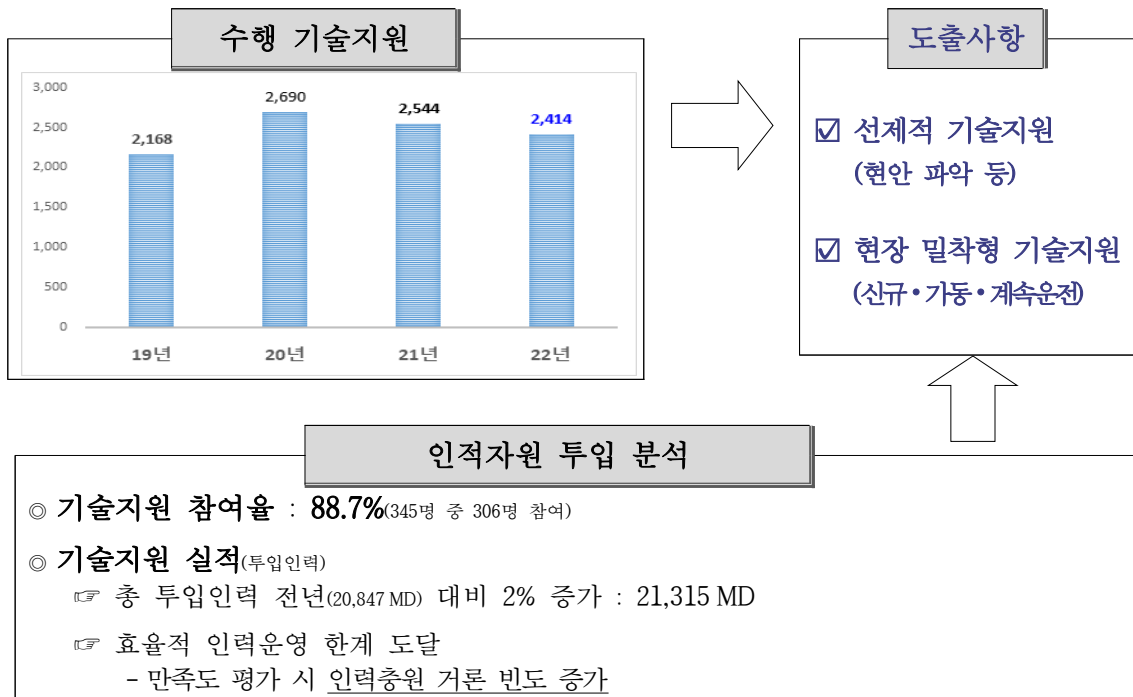
한국수력원자력(주) 중앙연구원

한수원(주) 중앙연구원은 원자력 발전소 현안 해결을 위해 연구원이 보유하고 있는 전문 분야 기술 및 연구개발 성과를 활용하여 설비 고장진단, 성능시험, 재료분석, 규제대응 및 인허가 등을 지원하고 있다. 특히, 발전소 현장의 기술 현안 발생 시 적기에 해결하기 위해 지원되는 토타터 역할을 수행하고 있다.

중앙연구원은 2022년 기준 기계, 전기, 계측, 방사선·화학 등 총 29개 분야, 총 206개 직무에 대하여 약 2,400여건의 현장 기술지원을 수행하고 있다. 또한 발전소 현장은 더욱 고품질의 기술지원에 대한 적기 수행과 함께 현안 발생 후 지원이 아닌 선제적으로 기술지원을 기대하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 기술지원 현황분석을 통한 관리 효율성 향상 방안 모색하여 기술지원을 선제적으로 수행하기 위한 체계 개선 및 현장 밀착형 기술지원 방안을 아래와 같이 제시하고자 한다.

- 체계 개선: 요청에 의한 기술지원에 탈피하여 원전 현안 관리를 통한 능동적 기술지원 제공
- 현장 밀착형 기술지원: 신규,가동,계속운전 원전에 대한 기술지원 이력 검토 및 요구에 만족하는 TF 구성



발전소를 안전하고 효율적으로 운영하기 위해서는 설비고장 발생 즉시 조치 및 선제적인 조치가 중요하다. 이에 기술지원 요청에 의한 지원에서 탈피하여 발전소 중요 현안에 대한 선제적 기술지원 수행 및 발전소 상태에 따른 맞춤형 기술지원으로 연구원 역량을 집중한다면 발전소의 안정적 운영과 설비 신뢰도 향상에 기여할 것이다.

디젤엔진 연료유 이송펌프 전동기의 진동진단 사례 고찰

김영철(Young Cheol Kim)

한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)

A case study of diesel engine fuel transfer pump diagnosis

1. 서론

디젤엔진이 연속적으로 운전되기 위해서는 연료를 안정적으로 공급하여야 한다. 디젤엔진으로 연료를 안정적으로 공급하기 위해서 Daily Tank에서 디젤엔진으로 연료를 공급하며 Daily Tank의 유위가 감소되면 연료유 이송펌프(Transfer Pump)를 사용하여 연료유 저장조에서 Daily Tank로 연료유를 이송한다.

연료유 이송펌프는 전동기 구동방식이며 분해정비 후 전동기의 수평방향 진동값이 0.9 mm/s(rms)에서 4.1 mm/s(rms)로 상승하였으며 이는 기준값인 1.3 mm/s(rms)과 허용범위는 3.25 mm/s(rms)를 초과한 값이다. 현재 진동값에 대한 원인분석 및 조치방안을 도출하기 위해 진동진단을 수행하였다.

2. 연료유 이송펌프 전동기의 진동 분석

Impact Test를 통한 FRF로써 연료유 이송펌프 전동기의 동특성을 확인한 결과 111.25 Hz에 고유 진동수가 있으며 대역폭이 넓고 Q factor가 작은 특성을 가지는 진동계(System)인 것으로 확인되었다.

유도 전동기 명판에서 확인되는 전동기의 동기속도는 1,800rpm(30Hz)이며 정격회전속도는 1,725 rpm(28.75 Hz)이다. 실측된 운전 주파수는 1,779 rpm(29.65 Hz, 1X) 나타났으며 명판의 회전속도와 실측된 회전속도의 차이가 발생하는 이유는 전동기 및 펌프에 경부하(Smal Load)가 인가되어 슬립이 감소하였기 때문인 것으로 보인다.

운전 중 진동측정 결과 120Hz 성분이 주요 진동성분으로 확인되었으며 이는 전원주파수(60Hz)의 2배 성분($2F_L$, 120 HZ)에 해당된다. 이는 연료유 이송펌프 전동기의 전원 주파수에 대한 2배 성분($2F_L$, 120 HZ)이 진동계의 동특성에 영향을 받아 증폭되었기 때문인 것으로 판단된다. 운전 주파수의 4배 성분인 118.6 Hz은 영향이 없는 것으로 판단된다.

운전 중 펌프의 출구 압력은 50 ~ 51 kPa이며 토출 유량은 0.221 ~ 0.236 L/S(허용범위 : 0.213~0.259 L/S)로 진동 측정값 증가 전후와 상관없이 정상 범위 내에 있는 것으로 확인되었다. 따라서, 운전 중 진동 측정값이 증가하였으나 펌프의 성능은 정상적으로 유지되고 있다고 판단된다. 다른 호기에 설치된 동일 타입의 연료유 이송 펌프 전동기의 허용범위가 8.225 mm/s(rms)이고 해당 전동기의 정비 후에 진동값이 증가한 것을 감안하면 해당 전동기의 진동 기준값 및 허용범위를 정비 후의 초기 측정값을 감안하여 재설정하고 지속적으로 진동값을 감시하여도 무방할 것으로 판단된다.

한국에너지학회 2023년도 춘계학술발표회

발 행 : 사단법인 한국에너지학회
06603 서울시 서초구 서초중앙로24길 55, 208호
전화. 02-451-3630 팩스. 02-451-3631
홈페이지. www.koes.or.kr 이메일. kosee@kosee.or.kr

발행일 : 2023년 04월 26일

발행인 : 이 관 영

인 쇄 : 동신인쇄사

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥
기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.