



사단법인
한국에너지학회
KOREAN ENERGY SOCIETY

www.koes.or.kr

2022년도 한국에너지학회 추계학술발표회

2022년도 한국에너지학회 추계학술발표회

일시. 2022년 10월 19일(수)~10월 21일(금)

장소. 쏘비치 양양

주최. 사단법인 한국에너지학회

후원.



DANSUK



한국아이티오 (주)



고려대학교
KOREA UNIVERSITY



CONSTRUCTION
ENGINEERING SERVICE



인공지능산업융합사업단



사단법인

www.kose.or.kr

한국에너지학회

KOREAN ENERGY SOCIETY

추계학술발표회 참가안내

2022 KOES AUTUMN CONFERENCE

■ 등록

- 사전등록 : 전자계산서 요청, 온라인카드결제, 계좌입금
- 등록대 운영시간 : 10. 20(목) 9:30 ~ 10. 21(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, 10/20(목) 중식 및 만찬, 기념품, 경품행사 추첨권
- 등록시 학술발표회 프로그램북을 배부하며, 발표논문 초록은 파일로 배포합니다.
- 학술대회 등록자를 대상으로 기념품 배부 및 추첨 행사가 준비되어 있습니다.
 (경품) 1등 LG노트북 그램, 2등 삼성 갤럭시워치5, 3등 강원도 황태선물세트
- 10월 20일(목) 중식 및 만찬은 한정된 좌석으로 인하여 선착순 마감 될 수 있습니다.

■ 분과발표 안내

[구두 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. 20일(목) ~ 21일(금) 양일간 진행됩니다.
- 발표시간은 질의응답을 포함하여 15분입니다.
- 노트북과 무선프리젠티는 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 제출 가능)
- 포스터 양식은 자유이며, 필요하실 경우 학회홈페이지에 있는 양식을 사용하시면 됩니다.

2022년도 한국에너지학회 추계학술발표회 총괄일정

■ 일시 : 2022년 10월 19일(수) ~ 10월 21일(금)

■ 장소 : 쓸비치 양양 Tower A 컨벤션센터 (강원 양양군 손양면 선사유적로 678)

▶ 10월 19일(수)

시간	행사내용
16:00~18:00	분과회의 (비공개)

▶ 10월 20일(목)

시간	A 발표장 (B1 릴리)	B 발표장 (1F 루비 I)	C 발표장 (1F 루비 II)	D 발표장 (1F 사파이어 I)	포스터 (1F 그랜드볼룸 II)
9:30~	등록 (컨벤션센터 1F)				
10:00~12:30	-	특별세션1 <한국지질자원연구원> 석탄 발전을 활용한 이산화탄소 감축 및 방폐 처리 활용 기술	-	분과별 논문발표A	포스터발표 I P1 01~22
12:30~	중식				이사회 (1F 사파이어 II)
13:30~			특별세션4 <고려대학교> CCU와 암모니아 수소	분과별 논문발표B	포스터발표 II P2 01~82
14:00~16:30	특별세션2 <한국에너지기술평가원> 수소경제 이행 수소안전 핵심기술 성과 교류회	특별세션3 <한국에너지공과대학교> 차세대 다중접합 박막 태양전지			
16:30~16:50	coffee break				
16:50~18:00	개회행사 : 1F 그랜드볼룸				
	개회사 : 한국에너지학회 한승욱 회장 ((주)단석산업 회장) 축사 : 강원대학교 최성웅 산학연구부총장				
	기조강연 강연주제 : "인연은 소중, 인생은 즐겁게" - 에너지를 받으시려면 강원도에 자주 오세요! - 초청연사 : 강원도 시·군·번영회연합회 정준화 회장				
	2022년도 한국에너지학회 정기총회 및 우수논문시상식				
18:10~	만찬 및 경품추첨				

▶ 10월 21일(금)

시간	A 발표장 (B1 릴리)	B 발표장 (1F 루비 I)	C 발표장 (1F 루비 II)	D 발표장 (1F 사파이어 I)	포스터 (1F 그랜드볼룸 II)
9:30~12:00	등록				
10:00~12:30	-	특별세션5 <강원테크노파크> (액화)수소 제품의 신뢰성 평가 방안 논의	분과별 논문발표C	분과별 논문발표D	포스터발표 III P3 01~82

특별세션 1

- **일 시** : 2022년 10월 20일(목) 10:00~13:00
- **장 소** : B발표장 (1층 루비 I)
- **주 관** : 한국지질자원연구원
- **세션명** : 석탄 발전회를 활용한 이산화탄소 감축 및 방폐 처리 활용 기술

• **좌장** : 최준현 (한국지질자원연구원)

발표 제목	발표자	소속
The leachability of hexavalent chromium by carbonation of coal fly ash	Chaeyeon Lim	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources Hanyang university
Stabilization of heavy metals from Acid Mine Drainage through sequent of coal fly ash, Ca(OH) ₂ , and CO ₂	Lulit Habte	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
Speciation of rare earth elements association with unburned carbon in coal fly ash: implication for heavy rare earth elements recovery	Lai Quang Tuan	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
Recovery of rare earth from fly ash : a mineral processing approach	Moscoso Pinto Fausto Giovanni	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
Cementitious material for radioactive waste immobilization: An overview study	Sing Jethmal Adrian	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

특별세션 2

- 일 시 : 2022년 10월 20일(목) 14:00~16:30
- 장 소 : B발표장 (B1 릴리)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원
- 세션명 : 수소경제 이행 수소안전 핵심기술 성과 교류회

• 좌장 : 오시덕(블루이코노미전략연구원)

테마	발표 제목	발표자	소속
수소 충전소	이동식 수소충전소 성능평가 및 안전관리 핵심기술 개발 성과	김영구 책임	충북테크노파크
	수소 충전소용 고압 저장용기 가동 중 안전검사 시스템 및 기준 개발 성과	김광복 수석	아이디케이
	수소충전소 화재폭발시 피해저감 방호벽 설계 기술 및 안전기준 개발 경과	김광석 차장	한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터
액화수소	액화수소 충전소 안전성 평가/실증 및 안전기준 개발 추진현황	서정수 원장	한국가스기술공사
	액화수소 저장용기 진공·단열 성능평가 기술 및 안전기준 개발 추진현황	김필중 책임	한국가스안전공사 가스안전연구원
	수소 전주기 위험성평가 프로그램 및 액화수소 설비 안전기준 개발 경과	강승규 책임	한국가스안전공사 가스안전연구원

특별세션 3

- 일 시 : 2022년 10월 20일(목) 14:00~16:30
- 장 소 : B발표장 (1층 루비 I)
- 주 관 : 한국에너지공과대학교
- 세션명 : 차세대 다중접합 박막 태양전지

• 좌장 : 윤재호(한국에너지공과대학교)

발표 제목	발표자	소속
인사말	박진호 부총장	한국에너지공과대학교
Lightweight Cu(In,Ga)Se ₂ PV on flexible substrate for high-specific applications	김기환 책임연구원	한국에너지기술연구원
Defect Engineering of Earth-abundant Cu ₂ ZnSnSe ₄ photovoltaic Absorber and Its applications to Flexible and Tandem solar cells	신동협 책임연구원	한국에너지기술연구원
A path toward commercialization for perovskite solar cells: roll-to-roll processing & large-area modules	김영운 선임연구원	한국화학연구원
Performance Comparison Between Vertically Mounted Bifacial And Monofacial PV Modules	박현욱 연구원	한국에너지공과대학교

특별세션 4

abstract p.31~p36

- 일 시 : 2022년 10월 20일(목) 13:30~16:45
- 장 소 : B발표장 (1층 루비Ⅱ)
- 주 관 : 고려대학교 초저에너지 자동차 초저배출 사업단
- 세션명 : CCU와 암모니아 수소

시간	발표 제목	발표자	소속
• 좌장 : 이기봉(고려대학교)			
13:30 - 14:00	암모니아 기반 청정수소 생산기술 개발 동향	정운호 박사	한국에너지기술연구원
14:00 - 14:30	암모니아 분해용 촉매 기술 소개	손현태 박사	한국과학기술연구원
14:30 - 15:00	발전 및 산업 부문 암모니아 연소 기술 개발 동향	이민정 박사	한국에너지기술연구원
15:00 - 15:15	휴식		
• 좌장 : 이관영(고려대학교)			
15:15 - 15:45	롯데케미칼의 탄소중립 전략	서명기 박사	롯데케미칼
15:45 - 16:15	탄소중립을 위한 글로벌 수소사업과 암모니아의 역할	박훈모 박사	현대자동차
16:15 - 16:45	Syngas production by dry reforming reaction with Ni-based catalysts: How to stabilize Ni nanoparticles?	김도희 교수	서울대학교

특별세션 5

- 일 시 : 2022년 10월 21일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : B발표장 (1층 루비 I)
- 주 관 : 강원테크노파크
- 세션명 : (액화)수소 제품의 신뢰성 평가 방안 논의

• 좌장 : 조형환(강원테크노파크)

발표 제목	발표자	소속
강원도 (액화)수소 신뢰성센터 구축 계획	배정은 연구원	강원테크노파크
수소산업전주기제품안전성지원센터 현황 및 주요현안	나희승 센터장	한국가스기술공사
(액화)수소 소재부품 신뢰성 확보 전략	허문범 차장	TUVSUD Korea
(액화)수소를 연료로 사용하는 이동형 시스템의 신뢰성 확보를 위한 시험방법 분석	곽건희 선임	한국건설생활환경시험연구원
금속소재의 극저온 물성평가 기술 소개	박창수 박사	한국생산기술연구원
선박용 극저온 기자재의 성능 및 신뢰성 시험평가 사례 소개	최근철 센터장	한국조선해양기자재연구원
선박용 액화수소 연료공급시스템 신뢰성 시험 설비 구축 계획	유병용 상무	한국조선해양

논문발표 세부일정 A (10.20)

●●● 10월 20일(목) 10:00 ~ 12:30 (1F 사파이어 I)

>>> 에너지정책 / 수소연료전지		좌장 : 안영환(숙명여자대학교)	page
A01 10:00~10:15	전환부문 2050 탄소중립이 발전 비용에 미치는 영향에 대한 몬테카를로 시뮬레이션 장명진 · 이현진 · 안영환* 숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학		39
A02 10:15~10:30	상향식 에너지 모형 기반 국내 그린수소 생산에 따른 전력시스템 영향 분석 이현진 · 장명진 · 안영환* 숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학		40
A03 10:30~10:45	전력화를 통한 산업부문 온실가스 감축 잠재량 평가 : 정량적 모형과 델파이 방법 통합을 통한 추정 양혜영 · 안영환* 숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학		41
A04 10:45~11:00	상용차용 수소충전소 공정설계 및 구축현황 방선혁 · 이경실* 코하이젠주식회사 수소R&D센터장, *코하이젠주식회사 대표이사		42
11:00~11:15	coffee break		
A05 11:15~11:30	루테튬 조촉매가 적용된 수소생산용 CuInS ₂ 광전극 윤노영 · 채상윤* · 박종혁 · 박은덕* · 주오심† 연세대학교 화공생명공학과, *아주대학교 에너지시스템학과, †한국과학기술연구원 청정에너지연구센터		43
A06 11:30~11:45	PEMFC 수소연료전지-배터리 하이브리드 추진 선박 연비 기반 최적제어기 선정 전략 황성현 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 류주열 · 박성호† 고등기술연구원		44
A07 11:45~12:00	동결융해법을 이용한 질소의 슬러시화 실험 이창형 · 류주열 · 황성현 · 박혜민 · 권도현 · 박성호* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		45
A08 12:00~12:15	광전기화학반응 조건 중의 수소생산용 광전극의 표면상태 관찰 채상윤 · 윤노영* · 주오심* · 박은덕 아주대학교 에너지시스템학과, *한국과학기술연구원 청정에너지연구센터		46
A09 12:15~12:30	0.3~10 MW급 액체공기 발전 공정에서 터빈 입, 출구 조건에 따른 영향 이춘식 · 윤문규 · 염충섭 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		47

논문발표 세부일정 B (10.20)

●●● 10월 20일(목) 13:30 ~ 16:30 (1F 사파이어 I)

>> 에너지신산업융합 / 에너지정책		좌장 : 장원석(한국지역난방공사)	page
B01 13:30~13:45	배가스 CO ₂ 포집을 위한 기체분리막 공정연구 이충설 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용 (주)에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원		48
B02 13:45~14:00	분산형 집단에너지 플랫폼 : 기계실 및 바닥난방 복합 스마트운전 제어 실증 김경민 · 이종준 · 오진수 · 이하나 · 장원석 · 신경아 · 오문세 한국지역난방공사 미래개발원		49
B03 14:00~14:15	도심 LNG발전소의 콤팩트 CO ₂ 포집 및 활용공정 실증화와 발전폐열을 이용한 바이오매스 건조기술 개발 장원석 · 신경아 · 장미희 · 김경민 · 이종준 · 신혜현 · 남궁형규 · 신재용 · 강경수 · 유지혜 한국지역난방공사 미래개발원		50
B04 14:15~14:30	수소전소 가스터빈 열병합 시스템의 성능 특성 분석 연구 이종준 · 김경민 · 장원석 · 신경아 · 조은성* 한국지역난방공사 미래개발원, *두산에너지빌리티		51
B05 14:30~14:45	이산화탄소전환 탄산화물의 건설소재 활용을 위한 직접광물탄산화 실증 연구 최창식 · 김성현 · 박동규 · 이해성 · 김태욱 · 장원석* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부, *한국지역난방공사 미래개발원*		52
B06 14:45~15:00	암모니아 공급 시나리오에 따른 혼소 발전의 경제성 평가 이시훈* *전북대학교 자원에너지공학과		53
15:00~15:15	coffee break		
B07 15:15~15:30	공공청사 재생에너지 자체 소비율 의무기준 강화를 위한 대중의 지불의사액 최경란* · 김주희** · 유승훈*** * 서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지정책학과, **서울과학기술대학교 창의융합대학 미래에너지융합학과, ***서울과학기술대학교 창의융합대학		54
B08 15:30~15:45	수소자동차 방호벽 성능기준 개선 연구 류영돈 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터		55
B09 15:45~16:00	수소자동차 용기 화염시험 기준 및 시험 결과 류영돈 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터		56
B10 16:00~16:15	도시가스산업이 국민경제에서 차지하는 역할 : 한국과 일본의 비교 분석 이서영* · 김주희** · 유승훈*** *서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과, **서울과학기술대학교 미래에너지융합학과, ***서울과학기술대학교 창의융합대학		57

논문발표 세부일정 C (10.21)

●●● 10월 21일(금) 10:00 ~ 12:30 (1F 루비Ⅱ)

>>> 원자력		좌장 : 임혁순(한국수력원자력(주))	page
C01 10:00~10:15	원전 기술지원시스템(KONIS) 운영 및 프로세스 개선 <u>정남두</u> · 이경옥 · 김재성 한국수력원자력(주) 중앙연구원		58
C02 10:15~10:30	원자력발전소 국내외 안전기술기준 영향 선제적 검토 <u>김문수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		59
C03 10:30~10:45	APR1000 노심미용융 설계확장조건 사고 완화전략 <u>황도현</u> · 이근성 한국수력원자력(주) 중앙연구원		60
C04 10:45~11:00	열병합원전 지역난방계통 방사능누설 감지방안에 대한 고찰 <u>황도현</u> · 이근성 한국수력원자력(주) 중앙연구원		61
11:00~11:15	coffee break		
C05 11:15~11:30	원전에서 대량 혹은 조기 방사능 방출 실질적 배제의 증명 <u>황도현</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		62
C06 11:30~11:45	국내·외 원자력발전소의 계속운전에 대한 법령 및 사례에 대한 고찰 <u>임혁순</u> · 함태규 · 강종호 한국수력원자력(주) 중앙연구원		63
C07 11:45~12:00	원전 수소제어설비 수소제거율 평가방법론 비교 <u>성제중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		64
C08 12:00~12:15	중수로용 37봉 개량연료의 국내 원전 적용 및 효과 <u>박동환</u> · 김영애 · 류의승 한국수력원자력(주) 중앙연구원		65
C09 12:15~12:30	금속파편 감시계통의 오경보 사례 분석 <u>허용호</u> 한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소		66

논문발표 세부일정 D (10.21)

●●● 10월 21일(금) 10:00 ~ 12:30 (1F 사파이어 I)

>>> 수소연료전지 / 신재생에너지		좌장 : 김진혁(한국생산기술연구원)	page
D01 10:00~10:15	액화수소 저장탱크 누출 및 Pool 형성에 관한 위험성 평가 김수현 · 이민경 · 이재훈 한국가스안전공사 가스안전연구원	67	
D02 10:15~10:30	수소충전소용 고압수소배관 개발 및 수소취성 연구 서호성 · 김정환 · 이민경 · 이화영 · 이재훈* 한국가스안전공사 가스안전연구원	68	
D03 10:30~10:45	수소충전소 거래량 산출 방법에 관한 연구 최진영 · 김민주 · 이화영 · 이재훈 한국가스안전공사 가스안전연구원	69	
D04 10:45~11:00	수소충전소 방호벽 폭발 구조 안전성 평가 시뮬레이션 방안 연구 김정훈 · 김광석* · 이경식 한국가스안전공사 가스안전연구원, *한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	70	
11:00~11:15	coffee break		
D05 11:15~11:30	냉각탑 수로에서 에너지 생산을 위한 저낙차 수차의 설계 및 수치해석 삼수딘 모하메드 무르시드 ^{*,**} · 김진혁 ^{*,**} *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문	71	
D06 11:30~11:45	비속도 별 30MW급 프란시스 수차 주요 구성품 간 상관관계 연구 노민수 ^{*,**} · 김성 ^{**} · 황태규 ^{***} · 김승준 ^{****} · 박준관 ^{****} · 김진혁 ^{*,**} *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문 *** (사)한국수력산업협회 연구사업부 ****한국수력원자력(주) 수력연구교육센터	72	
D07 11:45~12:00	미활용 공간을 활용한 압축공기 에너지 저장 장치 공정 개발 연구 류주열 · 황성현 · 박성호 · 권도현 · 이창형 · 박혜민 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹	73	
D08 12:00~12:15	상사법칙에 기초된 다른 전력 주파수를 갖는 단일채널펌프의 수력학적 설계 느엔 띄엥 ^{*,**} · 노민수 ^{*,**} · 김성 ^{**} · 정순영 ^{**} · 김진혁 ^{*,**} *과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공 **한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문	74	
D09 12:15~12:30	LP가스 환기 양호장소 판단을 위한 전산유동해석 및 환기속도 시험 비교 분석 이민경 · 김수현 · 이재훈 한국가스안전공사 가스안전연구원	75	

포스터발표 I

● ● ● 10월 20일(목) 10:00-12:30

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-1	수소연료전지	양이온 교환막 연료전지 적용을 위한 고성능 철-코발트/탄소 나노 섬유 촉매 연구 손동규 · 이유현 · 여서현 · 김문수 · 이기백 영남대학교 화학공학과	79
P1-2	수소연료전지	포타슘 이온 배터리 적용을 위한 탄소 나노 섬유 지지체 기반의 환원된 산화 그래핀이 코팅된 니켈-셀레나이드 나노 입자 연구 이유현, 손동규, 여서현, 김문수, 이기백 영남대학교 화학공학과	80
P1-3	수소연료전지	해수 분해를 위한 비늘 구조의 구리 코발트 탄산염 수산화물/질소 결핍 부위가 있는 흑연질화탄소 전기 촉매 개발 서린마리아니티아요한 · 손동규 · 이유현 · 여서현 · 이기백* 영남대학교 화학공학과	81
P1-4	원 자 력	APR1000 피동보조급수계통 설계개발 황도현 한국수력원자력(주) 중앙연구원	82
P1-5	원 자 력	소형모듈원자로 최적 증기터빈 조합에 관한 연구 황도현 · 이근성 한국수력원자력(주) 중앙연구원	83
P1-6	원 자 력	웨스팅하우스형 원전 가압기내 가열기 다중오동작 분석 이영승 · 배연경 · 정해영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	84
P1-7	원 자 력	웨스팅하우스형 원전 보조급수계통 유량제어밸브의 다중오동작 분석 이영승 · 김명수 · 정해영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	85
P1-8	원 자 력	APR1400 원자로축소모형 유동유발하중 및 구조응답 측정 요건 개발 김규형 · 고도영 · 장호철* · 문종성* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)	86
P1-9	원 자 력	대형원전 가압기 상부지지구조물 설계 개발 김규형 · 김기석* · 김성민* · 조민기** 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주), **두산에너지빌리티(주)	87
P1-10	원 자 력	혁신형 소형모듈원자로의 비상계획구역 설정에 관한 선행연구 문호립 · 박성현 한국수력원자력주식회사 중앙연구원	88

● ● ● 10월 20일(목) 10:00-12:30

번호	발 표 분 야	주 제 및 발 표 자	page
P1-11	원 자 력	혁신형 소형모듈원자로의 노심손상빈도 민감도 분석 <u>문호립</u> · 박성현 한국수력원자력주식회사 중앙연구원	89
P1-12	원 자 력	SMART100 RG 1.97(Rev. 5) 적용 전원 설계 <u>하체웅</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	90
P1-13	원 자 력	SMART100 소외전력 계통 설계 <u>하체웅</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	91
P1-14	원 자 력	원자력발전소 접지계전기 오동작 원인 분석 및 대책 <u>하체웅</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	92
P1-15	원 자 력	피동형 원전의 안전정지 설계 고찰 <u>서정관</u> · 유승엽* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원	93
P1-16	원 자 력	SMART100의 비안전계통 규제조치 설계 <u>서정관</u> · 유승엽* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원	94
P1-17	원 자 력	SMART100 사고특성을 고려한 비상운전절차서 확인 및 검증방법 개발 <u>권순국</u> · 서정관 · 김현일* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원	95
P1-18	원 자 력	RCS 운전누설 관련 해외 운영기술지침서 개정 내용 분석 <u>조용선</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	96
P1-19	원 자 력	OPR1000 원전 운영기술지침서 적용성 향상 연구 현황 <u>조용선</u> · 이만규 한국수력원자력(주) 중앙연구원	97
P1-20	원 자 력	운영기술지침서에서의 원자로냉각재계통 자연순환 요건 <u>조용선</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	98
P1-21	원 자 력	제어봉구동장치 관통부 파단 사고 시나리오 기반 국내 원자력 안전해석코드 SPACE의 방출 유동 모델 민감도 연구 <u>남경호</u> 한수원(주) 중앙연구원	99
P1-22	원 자 력	제어봉구동장치 관통부 파단 사고 시나리오 기반 열수력 종합효과 실험장치의 열손실 영향 연구 <u>남경호</u> 한수원(주) 중앙연구원	100

포스터발표 II

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-1	수소연료전지	공동현상을 이용한 액체 수소의 고밀도화 현상에 관한 이론적 연구 <u>이창형</u> · 류주열 · 황성현 · 박혜민 · 권도현 · 박성호* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터	101
P2-2	수소연료전지	양성자 교환막 연료 전지용 술폰화 PEEK 및 4차화 폴리(아릴렌 에테르 술폰)을 포함하는 산-염기 혼합 막의 제조 및 전기화학적 특성 <u>김애란</u> ¹ · 박민우 ¹ · Iyappan Arunkumar ¹ · Sengadurai Chitra Karthikeyan ¹ · Subramanian Vijayapradeep ¹ · Sayfiddinov Dilmurod ¹ · 유동진 ^{1,2*} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	102
P2-3	수소연료전지	탁월한 물리화학적 내구성 및 전기화학적 특성을 가진 폴리 아릴렌 피페리디늄(PAP) 음이온교환막과 상승 효과를 위한 GO기반 무기물 충전제 적용 및 특성 분석 <u>박민우</u> ¹ · 김애란 ¹ · 김범호 ¹ · 유동진 ^{1,2*} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	103
P2-4	수소연료전지	Synthesis of Low loading Pt Nanoparticle anchored on Transition nano composite N-doping Graphene Nano fiber used as efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction <u>Subramanian Vijayapradeep</u> ¹ · Milan Babu Poudel ¹ · Karthikeyan Sengadurai Chitra ¹ · Dong Jin Yoo ^{1,2} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University	104
P2-5	수소연료전지	Graphene nanofiber incorporated poly (phenylene oxide) anion exchange membrane for fuel cell application <u>Iyappan Arunkumar</u> ¹ , Ramasamy Gokulapriyan ¹ , Ae Rhan Kim ¹ , Dong Jin Yoo ^{1,2†} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Hydrogen and Fuel Cell Research Center Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Jeonbuk National University	105

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-6	수소연료전지	Copper quantum dots decorated on transition metal sulfide nanosheets for an excellent electrochemical CO ₂ reduction <u>Murugesan Prasanna</u> ¹ · Palanimuthu Naveen Kumar ¹ · Tamilarasi Subramani ¹ · Dong Jin Yoo ^{1,2*} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University	106
P2-7	수소연료전지	Zinc-Cobalt Selenide Nanoparticles Enhancing Oxygen Reduction and Oxygen Evolution Reactions for Zn-Air Battery Performance Investigated by In-situ XRD and Ex-situ XAS Analysis <u>Dong Jin Yoo</u> ^{1,2*} · Ramasamy Santhosh Kumar ¹ · Tamilarasi Subramani ¹ ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University	107
P2-8	수소연료전지	현행 수소충전소 기준개정을 위한 수소혼합가스 폭발 실증시험 설계 <u>이주현</u> · 이현우 · 조재근 · 이재진 · 김광석 한국가스안전공사 화재폭발연구부	108
P2-9	수소연료전지	국내 수소 인프라 안전 확보를 위한 사고 사례 분석에 관한 연구 <u>이재진</u> · 임원섭 · 류영돈 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	109
P2-10	수소연료전지	수소 용기 폭발 시 높이별 폭발 압력의 거동에 관한 연구 <u>이현우</u> , 이주현, 조재근, 김광석 한국가스안전공사 화재폭발연구부	110
P2-11	수소연료전지	액화수소 극저온 펌프 기준 동향 및 안전 인증 기준 개발 현황 <u>김민지</u> · 허승건 · 김대현 · 임원섭 · 류영돈 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	111
P2-12	수소연료전지	개방된 공간에서의 가연성 가스별 누출 폭발압력에 관한 연구 <u>김대현</u> · 임원섭 · 류영돈 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터	112
P2-13	수소연료전지	수소용기 화재폭발 시 거리에 따른 폭발압력 측정 시험 <u>조재근</u> · 이주현 · 이현우 · 이재진 · 양윤영 · 김광석 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 화재폭발연구부	113

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-14	수소연료전지	수소전기차의 수소저장용기의 충전 및 내화성능에 대한 기준 분석 <u>공경식</u> · 임원섭 한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 화재폭발연구부	114
P2-15	수소연료전지	Metal organic frameworks (MOFs) derived zinc cobalt telluride integrated nitrogen doped carbon for high performance supercapacitors <u>Dong Jin Yoo</u> ^{1,2*} · Milan Babu Poudel ¹ · Ae Rhan Kim ¹ ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University	115
P2-16	수소연료전지	A Non-Enzymatic Electrochemical Sensor for Glucose Detection Based on NiO ₂ @PG Nanocomposite <u>Dong Jin Yoo</u> ^{1,2*} · Tamilarasi Subramani ¹ · Ramasamy Santhosh Kumar ¹ · Sayfiddinov Dilmurod ¹ ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, Jeonbuk National University, ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University	116
P2-17	신재생에너지	리튬이온배터리 도전재용 수계 CNT분산액 제조 및 특성평가 <u>박창현</u> · 조성철 · 한도형 주식회사 엔피에너지 탄소섬유연구소	117
P2-18	신재생에너지	기상자료 기반 단기 풍력발전 예측 모형 분석 <u>류주열</u> · 박성호 · 박혜민 · 이창형 · 황성현 · 권도현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹	118
P2-19	신재생에너지	액체공기발전 시스템 발전성능 분석 <u>윤문규</u> , 이춘식, 임동렬, 염충섭 고등기술연구원	119
P2-20	신재생에너지	압축공기 에너지 저장(CAES) 해외기술 동향 분석 <u>권도현</u> · 박성호 · 이창형 · 황성현 · 류주열 [†] 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지IT융합그룹	120
P2-21	신재생에너지	하이브리드 미디어를 기반으로 한 무동력 모듈형 바이오가스 정제설비 개발에 관한 연구 <u>김지은</u> · 강광남 · 김현기 에이티이(주)	121

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-22	신재생에너지	Sputtering power dependent properties of Zn ₂ SnO ₄ films <u>Shin Yeonju</u> * · Ignatius Andre Setiawan · Kim Dong Hyo · Kim Boyeon · Gedi Sreedevi, Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammad · Woo Kyoung Kim** School of Chemical Engineering, Yeungnam University	122
P2-23	신재생에너지	에너지 디지털 트윈의 실시간 데이터 관리를 위한 인터페이스 구조 설계 <u>임정택</u> · 김민호 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	123
P2-24	신재생에너지	성능 저하 비용을 최소화하기 위해 리튬이온 배터리 기반 에너지저장장치와 가역 고체산화물전지의 이용 비율을 강화학습 기반으로 최적화 방법 <u>김민호</u> · 임정택 · 함경선 · 김태형 한국전자기술연구원	124
P2-25	신재생에너지	BTM 내 ESS를 활용한 피크저감에 따른 경제성 분석 <u>홍석재</u> · 임정택 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	125
P2-26	신재생에너지	디지털 트윈을 위한 딥러닝 모델 경량화 및 디버깅 시스템 설계 <u>김민수</u> · 선지영 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	126
P2-27	에너지신산업융합	급속충전 배터리팩 하이브리드 열관리 시스템 연구 <u>임의수</u> *, 김종우, 이주영, 김영선 ^a (재)대구기계부품연구원 에너지산업지원센터, ^a (주)알티엘	127
P2-28	에너지신산업융합	구동 모터의 전원 및 제어모듈에 대한 전도성 전자파노이즈 저감 대책 적용 부품 분석 <u>서현욱</u> · 이주민 · 도수영* (재)대구기계부품연구원, *(주)엔유씨전자	128
P2-29	에너지신산업융합	분산전원용 전력량계 개발 관련 보안기능 도입 방향 연구 <u>이주영</u> · 임의수 · 김해진* (재)대구기계부품연구원, *(주)서창전기통신	129
P2-30	에너지신산업융합	지역난방 사용자설비의 빅데이터 기반 운영실태 분석을 통한 에너지 효율향상 방안 연구 <u>류기윤</u> · 김민영* · 김래현* 서울과학기술대학교 화공생명공학과, *서울과학기술대학교 산학협력단	130

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-31	에너지신산업융합	환경온도에 따른 에너지저장장치용 리튬이온전지 모듈의 열유동 해석 <u>강서희</u> · 이동철, · 신치범 [†] 아주대학교 에너지시스템학과	131
P2-32	에너지신산업융합	리튬이온전지의 셀 간 편차가 모듈의 방전 거동에 미치는 영향 모델링 <u>이동철</u> , 강서희, 신치범 [*] 아주대학교 에너지시스템학과	132
P2-33	에너지신산업융합	이산-유한요소해석에 기초한 오염물질 집진용 하이브리드 필터의 경량 설계 <u>김태형</u> · 이상용 · 이형석 · 김도훈 · 박유진 · 장주혁 · 김정태 청주대학교 항공기계공학전공	133
P2-34	에너지신산업융합	농촌형 열에너지 그리드 모델 타당성 연구 <u>윤시원</u> [*] 백경관 · 오정석 · 윤영직 · 홍성빈 · 정대현 한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실	134
P2-35	에너지신산업융합	산업체 구내 계통에서의 전압 조정에 따른 무효전력 특성 <u>박승현</u> · 권기웅 · 김용호 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	135
P2-36	에너지신산업융합	에너지 빅데이터 활용을 위한 API 설계 및 성능 평가 연구 <u>양동진</u> · 박승현 · 권기웅 · 김용호 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	136
P2-37	원 자 력	Self-aligning Bearing(with tapered bore) 치수 측정 방법에 대한 고찰 <u>김성국</u> · 장범석 · 홍태화 [*] (주)한빛파워, *한국수력원자력(주)	137
P2-38	원 자 력	탄력운전 적용에 따른 LOCA 방법론 개발 현황 <u>이재민</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	138
P2-39	원 자 력	원자력발전소 HVAC 계통 시험 및 조정을 위한 전산모델 타당성 연구 <u>고종욱</u> · 강신철 한국수력원자력 중앙연구원	139
P2-40	원 자 력	경년열화관리를 통한 원전 해수배관 설비 신뢰성 향상 <u>박상규</u> [*] · 김태현 [*] 한국수력원자력 중앙연구원	140
P2-41	원 자 력	GOTHIC 코드를 사용한 고압 응축실험 모사 <u>하희운</u> 한국수력원자력 중앙연구원	141

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-42	원 자 력	디지털기기 일반규격품 검증 기술기준 적용성 고찰 <u>양창석</u> · 홍태화 · 정선철 한국수력원자력(주), 중앙연구원	142
P2-43	원 자 력	인적 오류를 줄이기 위한 가동중검사 결과 입력 방법 개선 <u>유현주</u> , 곽동열, 조찬희* 한수원 중앙연구원, * 세안기술주식회사	143
P2-44	원 자 력	APR-1400 원전 복수기 전열관 와전류 검사의 자동평가 시스템 시범적용 결과 고찰 <u>한경석</u> · 김인철 · 주경문 한국수력원자력 중앙연구원	144
P2-45	원 자 력	혁신형 소형모듈형원자로 통합주제어실 요소 개념설계 <u>이호철</u> · 최선미 한국수력원자력 중앙연구원	145
P2-46	원 자 력	원전 주증기관파단 사고해석시 가변과출력 원자로정지 최소 설정치 분석 <u>성제중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	146
P2-47	원 자 력	원전 1차 및 2차 계통 수화학 운전진단 평가계획 <u>이경희</u> · 조용상 · 김초롱 · 권혁철 · 송규민 · 최진수 한국수력원자력(주) 중앙연구원	147
P2-48	원 자 력	PSR 기준문서 필요성에 대한 고찰 <u>원혜정</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	148
P2-49	원 자 력	가동중 원자력발전소 예비품용 케이블의 화염시험 적용에 대한 고찰 <u>김경덕</u> 한국수력원자력(주), 중앙연구원	149
P2-50	원 자 력	바나듐 노내계측기 신호 동적보상 성능 평가 <u>김도연</u> , 최유선 한수원 중앙연구원	150
P2-51	원 자 력	원자력 품질보증프로그램에서의 일반규격품 수락방법론 고찰 <u>홍태화</u> · <u>양창석</u> * 한국수력원자력(주)중앙연구원	151
P2-52	원 자 력	원자력발전소 복수기 전열관 와전류탐상검사 표준지침서 개정 <u>주경문</u> · 김왕배 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)	152

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-53	원 자 력	좌굴강도 측정을 통한 핵연료집합체 지지격자의 영구변형 특성 평가 <u>김태순</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	153
P2-54	원 자 력	원자력발전소 핵연료집합체 지지격자의 비선형 강성 측정 <u>김태순</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	154
P2-55	원 자 력	파티클 필터를 이용한 HVAC 시스템의 온도제어 <u>이현용</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	155
P2-56	원 자 력	원전해체에 적용가능한 감마선 검출기 사례 연구 <u>유지환</u> · 김민철 · 김기림 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹	156
P2-57	원 자 력	혁신형 소형모듈형원자로의 무봉산 운전에 따른 경제성 영향 고찰 <u>강상희</u> · 하희운 한국수력원자력(주)중앙연구원	157
P2-58	원 자 력	원전 매설배관 최적 검사방안분석 <u>정우근</u> · 주경문 한국수력원자력(주) 중앙연구원	158
P2-59	원 자 력	인공지능을 활용한 비정상 운전지원 시스템 개발 <u>박대승</u> · 유쾌환 한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소	159
P2-60	원 자 력	중수로 원전 운전이력을 반영한 노심 반응도 평가 <u>김영애</u> · 박동환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	160
P2-61	원 자 력	원자력 발전용 증기발생기 성능검증 시험장치의 이차계통 상세 설계 <u>이선일</u> * · 배황* · 윤현기** · 양진화* · 방윤곤* · 서찬중* 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부*, 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단**	161
P2-62	원 자 력	고온고압용 열교환기 성능 시험장치의 상세 설계 <u>이선일</u> * · 박기정** · 박주현*** · 전우진* · 서찬중* · 정종식**** 한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단**, 한국원자력연구원 다목적계통기술개발부***, 한국원자력연구원 하나로운영부****	162

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-63	원 자 력	연구용 원자로 감쇠탱크 설치 규정 및 설계 검토 <u>정민규</u> · 서경우 · 박홍범 한국원자력연구원	163
P2-64	원 자 력	고온고압 시험장치 내 배수라인 오리피스 압력강하 예비 평가 <u>박기정</u> · 이선일 · 박주현 · 전우진 · 서찬중 · 정종식 한국원자력연구원	164
P2-65	원 자 력	연구용 원자로 열교환기 경량화를 위한 요건 및 설계방법론 <u>서경우</u> · 이성민 · 김인국 · 박홍범 · 이동희* 한국원자력연구원, 전북대학교*	165
P2-66	원 자 력	방사선원 보안에 대한 국내외 규제기준 비교 분석 <u>김우철</u> 한국원자력통제기술원 물리적방호실	166
P2-67	원 자 력	경수로원전 저출력 제논 과도상태 시 노심 출력분포 측정 방법론 개발 <u>문상래</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹	167
P2-68	원 자 력	2차측 열교환기 튜브 슬리브 정비 및 검사기법에 대한 고찰 <u>천근영</u> · 지동현 한국수력원자력 중앙연구원	168
P2-69	원 자 력	신월성1,2호기 대비 NUREG-1432 전력계통 운전제한조건 차이 검토 <u>이만규</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	169
P2-70	원 자 력	출력 변화이력 반영 국부주파수제어 성능평가 <u>유극중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	170
P2-71	원 자 력	복합적인 탄력운전 성능평가 <u>유극중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	171
P2-72	원 자 력	피동응축열교환기 성능시험에 대한 SPACE 코드 응축열전달모델 평가 <u>이석호</u> , 천 종 한국수력원자력 중앙연구원	172
P2-73	원 자 력	국내원전 강화가동중검사 현황 <u>김진희</u> · 곽동열 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소 비파괴기술그룹	173
P2-74	원 자 력	원전 복수기 고용존산소 운전에 따른 증기발생기 전열관 건전성 평가 <u>권혁철</u> · 송규민 · 최진수 · 이경희 · 김초롱 · 조용상 한국수력원자력(주) 중앙연구원	174

●●● 10월 20일(목) 14:00~16:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P2-75	자원개발순환	판형 alumina 지지체 도입을 통한 Pt 기반 배기가스 저감 삼원 촉매의 반응 성능과 고온 내열성 증진 <u>우효성</u> ¹ · 이은준 ¹ · 이관영 ^{1,2,*} ¹ 고려대학교 화공생명공학과, ² 초저에너지 초저배출 사업단	175
P2-76	자원개발순환	에탄 탈수소방향족화에서 CNT 생성이 CoZn/HZSM-5 촉매의 비활성화에 미치는 영향 <u>박예림</u> · 김상운 · 주나영 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	176
P2-77	자원개발순환	Effect of noble metal addition to methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 catalysts <u>김상운</u> · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	177
P2-78	자원개발순환	천연가스 탈수소방향족화 반응과 산화적 재생에서 Mo/HZSM-5 촉매에 도입된 실리카 바인더의 효과 <u>주나영</u> · 박예림 · 김상운 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	178
P2-79	자원개발순환	Effect of surface properties of Pd/wrinkled silica catalysts on hydrogenation of furfural <u>김예은</u> · 이관영 · 이만식* 한국생산기술연구원 울산본부, *고려대학교 화공생명공학	179
P2-80	자원개발순환	수소 생산 시 이산화탄소 저장을 연계한 친환경 유·가스전 개발 동향 <u>신효진</u> · 이다영 · 이대모 · 임종세* 한국해양대학교 에너지자원공학과	180
P2-81	자원개발순환	메탄의 수증기/이산화탄소 혼합개질을 위한 Nickel 코어-셸 촉매 <u>지서린</u> · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	181
P2-82	정 책	유럽의 곤경에서 본 우리의 에너지안보 증진 과제 <u>정환삼</u> · 윤성원 · 문기환 · 김승수 한국원자력연구원	182

포스터발표 Ⅲ

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-1	에너지신산업융합	정수압 활용 정압식 압축공기 저장장치의 압축공기 저장용 탄성 용기 설계 황성현 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 박성호 · 류주열† 고등기술연구원	183
P3-2	에너지신산업융합	스마트에너지플랫폼 데이터를 활용한 에너지 사용량 예측 알고리즘 개선 이재민 · 이창교 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	184
P3-3	에너지신산업융합	5G 기반 스마트 팩토리 디지털 에너지 시그널 로그 분석 시스템 개발 박태욱 · 윤만석 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	185
P3-4	에너지신산업융합	효율적인 에너지 관리를 위한 이동통신망 기반 에너지 플랫폼 운영 방안 연구 박제석 · 윤만석 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	186
P3-5	에너지신산업융합	5G 특화망을 활용한 에너지 관리 시스템 동향에 관한 연구 황명진 · 이재민 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	187
P3-6	에너지신산업융합	고성능 알루미늄 배터리 양극재 적용을 위한 NiCo_2S_4 @graphene quantum dot 복합재료 연구 여서현 · 손동규 · 이유현 · 김문수 · 이기백 영남대학교 화학공학과	188
P3-7	에너지신산업융합	칼륨 이온 및 알루미늄 이온 배터리용 페릴렌 다이미드 기반 소형 유기 분자 합성 마이클루비라지 · 여서현 · 손동규 · 이유현 · 이기백 영남대학교 화학공학과	189
P3-8	에너지신산업융합	알루미늄이온전지의 전극재료를 위한 TiO_2 의 설계 및 변형 탕가벨 셀바마니 · 이유현 · 손동규 · 여서현 · 이기백 영남대학교 화학공학과	190
P3-9	에너지신산업융합	고성능 슈퍼커패시터 적용을 위한 3D Ni/Co 이원금속 MOF@탄소 나노섬유 복합체 정현서, Gopinath Sahoo, 정상문 충북대학교 화학공학과	191

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-10	에너지신산업융합	프리스탠딩 MO _x -CNT/S 전극을 이용한 리튬-황 전지의 셔틀 효과 억제 <u>신윤정</u> · 김은미 · 정상문 충북대학교 화학공학과	192
P3-11	원 자 력	정류 다이오드의 건전성 확인 방법에 대한 연구 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	193
P3-12	원 자 력	반도체식 계전기의 FMEA를 통한 건전성 확인 방법에 대한 연구 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	194
P3-13	원 자 력	과전압 보호계전기의 검증 필수특성에 대한 고찰 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	195
P3-14	원 자 력	보조 계전기 소켓의 고장모드 영향 분석 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	196
P3-15	원 자 력	LED 램프의 품질검증 방법에 대한 고찰 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	197
P3-16	원 자 력	온도 전송기의 특성 평가에 대한 연구 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	198
P3-17	원 자 력	내환경 검증 정밀 측정용 케이블 압입 탐침 방법 연구 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	199
P3-18	원 자 력	시간영역 반사파(TDR)을 활용한 케이블 결함 위치 확인 방법 연구 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	200
P3-19	원 자 력	원전 매설 및 지하배관/탱크 관리 프로그램 개발 <u>김태현</u> · 박상규 한국수력원자력 중앙연구원	201
P3-20	원 자 력	배관 확률론적 파괴역학 평가 코드 예비 적용성 연구 <u>김태현</u> · 김만원 한국수력원자력 중앙연구원	202

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-21	원 자 력	Code Case 개정에 따른 배관 누설결합 건전성평가 프로그램 개발 및 예비 적용 <u>김태현</u> · 김만원 한국수력원자력 중앙연구원	203
P3-22	원 자 력	소형경수로용 인쇄기판형 증기발생기 크기 열수력적 예비평가 <u>권진수</u> 한국수력원자력(주)중앙연구원	204
P3-23	원 자 력	국내 표준형 원전의 다중오동작 예방을 위해 설치된 전기 케이블 화재 방호체에 대한 화재 리스크 민감도 분석 <u>이한설</u> · 방기인 한국수력원자력 중앙연구원	205
P3-24	원 자 력	국내 표준형 원전의 안전정지 기능 향상을 위해 설치된 전기 케이블 화재 방호체에 대한 화재 리스크 민감도 분석 <u>이한설</u> 한국수력원자력 중앙연구원	206
P3-25	원 자 력	원전 화재 PSA 모델을 활용한 다중오동작 발생 확률에 따른 화재 리스크 민감도 분석 <u>이한설</u> · 방기인 한국수력원자력 중앙연구원	207
P3-26	원 자 력	확률론적안전성평가 방법론을 활용한 원전의 화재리스크 저감 방안 제안 <u>이한설</u> 한국수력원자력 중앙연구원	208
P3-27	원 자 력	케이블 자켓의 열적노화에 따른 연신률 시험 연구 <u>김한수</u> · 김건태 한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹	209
P3-28	원 자 력	원전용 전력케이블 절연체의 노화 방식에 따른 산화유도시간 변화 <u>김한수</u> · 김건태 한국수력원자력 중앙연구원	210
P3-29	원 자 력	방사선 및 열적 노화가 EPR 절연 케이블의 용융점에 미치는 영향 <u>김건태</u> · 김한수 한국수력원자력 중앙연구원	211
P3-30	원 자 력	계속운전을 위한 원자력발전소 생애주기 관리 방안 국외 현황 조사 <u>박대은</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	212

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-31	원 자 력	계속운전 추진 유럽원전 설계기준초과사고 대비 설비개선 현황 연구 <u>박대은</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	213
P3-32	원 자 력	원전 주기적 안전성평가 위해도분석에 대한 기술기준 차이점 고찰 <u>반재욱 · 김동욱</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	214
P3-33	원 자 력	동일 노형(OPR1000)간 발전정지유발기기 목록 결과 비교 분석 <u>최병필</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	215
P3-34	원 자 력	원전 케이블 화재방호체 및 관통부밀봉재 화재방호 성능요건 고찰 <u>최병필 · 김명수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	216
P3-35	원 자 력	APR1000 노형 30% MOX 연료 장전모형 평가 <u>정병준 · 양원석</u> 한국수력원자력 중앙연구원 성장연구소	217
P3-36	원 자 력	단자유도 지반-구조물 상호작용 해석에 의한 가속도 응답 고찰 <u>김현욱</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	218
P3-37	원 자 력	극한재해 대비 대용량 이동형 발전차 선배치 방안 연구 <u>김용석</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	219
P3-38	원 자 력	국내원전 운영변경허가 관련 경향분석 <u>최우재</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	220
P3-39	원 자 력	상분리모션 발열량 계산 <u>김선민</u> 한국수력원자력 중앙연구원	221
P3-40	원 자 력	상분리모션 냉각시스템의 냉각성능 평가 <u>김선민</u> 한국수력원자력 중앙연구원	222
P3-41	원 자 력	시각화를 통한 배관내 유체기기의 소음원 규명 <u>허용호</u> 한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소	223
P3-42	원 자 력	ATF 사용후핵연료의 붕괴열 평가 <u>정진호</u> 한국수력원자력(주)	224

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-43	원 자 력	한수원 산업기술기준 참여확대 및 관리 개선 방안 <u>김문수</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	225
P3-44	원 자 력	원자력발전소 설비 예방정비 프로그램 개선 방안 <u>염동운</u> · 김희찬 · 김정운 한국수력원자력(주) 중앙연구원	226
P3-45	원 자 력	APR1400형 원자력발전소 계측분야의 기능적중요도결정 전략 수립 <u>김희찬</u> , 김정운 한국수력원자력(주) 중앙연구원	227
P3-46	원 자 력	원자력발전소 정주기시험관련 계측설비의 기능적중요도결정 전략 수립 <u>김희찬</u> · 김정운 한국수력원자력(주) 중앙연구원	228
P3-47	원 자 력	국내원전 기능적중요도결정 표준화 방안 연구 <u>이상대</u> · 김희찬 한국수력원자력(주) 중앙연구원	229
P3-48	원 자 력	국내 신뢰도데이터 품질 향상을 위한 해외 품질검증 연구 고찰 <u>이현교</u> · 황석원 · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	230
P3-49	원 자 력	국내 PSA 적용을 위한 해외 초기사건 분석방법론 고찰 <u>이현교</u> · 김경수 · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	231
P3-50	원 자 력	국내 PSA 적용을 위한 해외 기기 신뢰도데이터 분석방법론 고찰 <u>이현교</u> · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	232
P3-51	원 자 력	중수로 원전 정비기간 중 냉각재 정체조건시 연료피복관 온도 거동 평가 <u>고동욱</u> · 류의승 · 박동환 한수원(주) 중앙연구원	233
P3-52	원 자 력	MSSV 개방시간 변경에 따른 중수로 과도상태 영향 검토 <u>고동욱</u> 한수원(주) 중앙연구원	234
P3-53	원 자 력	고신뢰도 산업계 Near Miss 관리체계 고찰 <u>박정진</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	235
P3-54	원 자 력	2021년 원전 인적행위 관련사례 경향분석 <u>박정진</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	236

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-55	원 자 력	원전 근본원인분석의 원인 유형에 따른 원인분석기법 활용 방법 <u>김형균</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	237
P3-56	원 자 력	제어봉 삽입성 평가 방안 <u>이상설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	238
P3-57	원 자 력	제어봉집합체의 삽입한계 검토 <u>이상설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	239
P3-58	원 자 력	PSA 적용을 위한 최신 신뢰도데이터 평가방법론 및 검증절차 개발 전략 <u>황석원</u> · 이현교 · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	240
P3-59	원 자 력	다중방호대응설비의 PSA 적용을 위한 모델 및 데이터 생산 개발 전략 <u>황석원</u> · 이현교 · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	241
P3-60	원 자 력	최근 3년간 한수원의 해외운전경험 활용 현황 및 경향 분석 <u>최양호</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	242
P3-61	원 자 력	다빈도 사건 선제대응을 위한 운전경험 분석 및 관리시스템 개발 <u>최양호</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	243
P3-62	원 자 력	PSA기법을 활용한 원전조종사 시뮬레이터 교육 훈련 시나리오 적용에 대한 연구 <u>신정욱</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	244
P3-63	원 자 력	제어 계전기 일반규격품 품질검증을 위한 고장모드 영향분석에 대한 고찰 <u>최재훈</u> · 이현용 한국수력원자력 중앙연구원	245
P3-64	원 자 력	중수로 개량연료 개정 임계열속 상관식에 대한 임계채널출력 민감도 분석 <u>오재용</u> · 류의승 · 박동환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	246
P3-65	원 자 력	압력관 크립조건 확장에 따른 37M 연료 임계열속 상관식의 적용성 평가 <u>오재용</u> · 류의승 · 박동환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	247

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-66	원 자 력	원자력발전소 터빈 현황, 검사 및 건전성 평가에 대한 고찰 <u>문균영</u> · 김왕배 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소	248
P3-67	원 자 력	PC-NIPC를 활용한 90° 곡관 하류에 설치된 오리피스 유량계에 대한 불확실도 정량화 <u>이공희</u> · 배재현* · 장경식* 한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *울산대학교 기계공학부	250
P3-68	원 자 력	다양한 RANS 기반 난류 모델을 활용한 TFA 원심펌프 내부의 캐비테이션 유동 수치해석 <u>이공희</u> · 이용갑* 한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *(주)SIMEX	251
P3-69	원 자 력	Flomaster를 활용한 UMSICHT 시험 설비에서 수충격 벤치마크 해석 <u>이공희</u> · 최종인* 한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *플로우마스터코리아	252
P3-70	원 자 력	연구용원자로의 슬로싱 현상 분석 <u>김태진</u> · 정광섭 · 오진호 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단	253
P3-71	원 자 력	하나로 핵연료봉 진지도 측정방법 개선 <u>김호민</u> · 황재준 · 박찬석 · 이규홍 한국원자력연구원 연구로핵연료부	254
P3-72	원 자 력	원전 화재 PSA 모델을 활용한 다중오동작(MSO) 시나리오의 정량적 리스크 평가에 관한 연구 <u>방기인</u> · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	255
P3-73	원 자 력	국내 원전 사고저항성연료 도입으로 인한 PSA 측면의 리스크 영향 검토 <u>방기인</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	256
P3-74	원 자 력	국내 원전 주기적안전성평가 확률론적안전성평가 분야의 차이분석 방법 개선에 대한 고찰 <u>방기인</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	257
P3-75	원 자 력	의미망분석법을 활용한 사업자와 규제기관의 원자력안전문화 모델 비교 분석 <u>고영준</u> 한국수력원자력 중앙연구원	258

●●● 10월 21일(금) 10:00~12:30

번호	발 표 분 야	발 표 주 제	page
P3-76	원 자 력	실무용 운전경험보고서 작성 상세 가이드북 개발 <u>주익덕</u> · 최철승 한국수력원자력 중앙연구원	259
P3-77	수소연료전지	암모니아의 저온합성을 위한 Pyrochlore 촉매의 이중금속 도입효과 <u>김나영</u> · 이석호 · 이성호 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	260
P3-78	수소연료전지	친환경 수소 운반을 위한 암모니아 산화적 분해 촉매 개발 <u>이수항</u> · 이석호 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	261
P3-79	수소연료전지	과산화수소 직접합성을 위한 소수성 리간드의 도입효과 <u>이석호</u> · 한근호 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	262
P3-80	수소연료전지	Nb와 Ta 도입을 통한 Pt/Al ₂ O ₃ 촉매의 homocyclic LOHC 탈수소화 활성 향상에 관한 연구 <u>박태인</u> · 장지수 · 이관영 *고려대학교 화공생명공학과	263
P3-81	수소연료전지	H ₁₂ -benzyltoluene 연속식 수소 생성 반응기에서의 탈수소화 촉매 분석 <u>장지수</u> · 박태인 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	264
P3-82	수소연료전지	Tuning Oxygen Evolution Kinetics and Stability using Hybrid Support: IrRu alloy supported on TiO ₂ -rGO for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers <u>김인걸</u> ^{1,2,3} · 박희영 ² · 장종현 ^{2,4,5*} · 이관영 ^{3*} · 나인욱 ⁶ · 박세규 ^{1*} ¹ 광운대학교 화학공학과, ² 한국과학기술연구원 수소연료전지연구센터, ³ 고려대학교 화공생명공학과, ⁴ 고려대학교 그린스쿨, ⁵ KU-KIST, ⁶ 한국과학기술연구원 환경복지연구센터	265



특 별 세 셴

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

암모니아 기반 청정수소 생산기술 개발 동향

Development trend of ammonia-based clean hydrogen production
technology

정운호 · 구기영 · 박용하

한국에너지기술연구원 수소에너지연구본부

정부는 “수소경제 활성화 로드맵(2019)”와 “제 1차 수소경제 이행 기본계획(2021)”을 발표하며 미래 수소경제로의 방향성과 구체적인 목표를 제시하였다. 탄소배출을 줄이고 궁극적으로는 탄소배출이 없는 사회로의 전환을 의미한다. 이러한 수소경제로의 성공적인 전환을 위해서는 수소의 생산과 공급에 대한 문제가 해결되어야 한다. 국내 청정수소 공급을 해결하기 위한 대안으로 해외에서 값싸게 생산된 수소를 대량으로 이송하는 방안이 논의되고 있다. 수소의 대량 이송을 위한 수소캐리어로는 액화수소, 액상유기화합물, 암모니아 등이 많은 관심을 받고 있다. 이 중에서 암모니아는 상온에서 쉽게 액화되며 단위 부피당 수소저장량이 121 kg/m³으로 액화수소 70.8 kg/m³ 보다 크다는 장점이 있으며 이미 국제인 수출입 및 지역 분배가 선박 및 트럭으로 이루어지고 있는 상황이기 때문에 다른 수소캐리어에 비해 빠른 상용화가 가능할 것으로 예상된다. 이러한 암모니아 수소캐리어를 분해하여 수소를 생산하기 위해서는 암모니아의 촉매분해 공정과 분해가스를 정제하는 공정이 필요하다. 최근 전 세계적으로 많은 기관에서 암모니아를 이용한 수소생산과 이를 활용하는 기술에 대해 연구개발을 수행하고 있다. 이러한 암모니아 기반 청정수소 생산기술의 개발은 국내 수소경제의 활성화 뿐만 아니라 전 세계적인 탄소중립에도 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

암모니아 분해용 촉매 기술 소개

Introduction to Catalyst Technology for Ammonia Decomposition

손현태*

*한국과학기술연구원 (KIST) 수소·연료전지연구센터

2021년 11월에 발표된 정부의 제1차 수소경제 이행 기본 계획에 따르면 정부는 현재 연간 22만 톤인 국내 수소 공급량을 2030년까지 390만 톤으로 늘리겠다는 목표를 제시하였다. 특히, 2030년부터는 이 중 196만 톤을 해외의 재생에너지를 활용하여 생산된 수소로 공급 받게 될 계획이다. 하지만 수소는 부피 대비 매우 낮은 에너지 밀도를 가지기에 대용량의 수소를 수입하기 위해서는 경제성 있는 화학적, 물리적 수소 저장 방법에 관한 연구가 필수적이다. 다양한 수소 저장 기술 중에, 최근 수소를 암모니아의 형태로 저장하고 국가 간에 운송하는 기술이 차세대 수소 운송 방안 중 하나로 주목받고 있다. 암모니아 한 분자는 수소 원자 3개와 질소 원자 1개로 구성되어 있어 수소 저장 물질 중 가장 높은 무게 및 부피 대비 수소 저장용량을 보유하고 있다. 특히, 암모니아를 고온에서 촉매와 함께 분해하면 오직 질소와 수소만이 생성되어 친환경 수소 생산이 가능하다. 암모니아 분해용 촉매는 크게 루테튬 (Ru) 금속 기반 그리고 비귀금속 (Ni, Co, Fe 등) 기반 촉매로 구분할 수 있는데, 루테튬 금속의 경우 암모니아 분해 활성은 매우 좋지만, 가격이 매우 비싸고, 그 반대로 비귀금속의 경우 활성은 루테튬 금속보다 낮지만, 가격이 매우 저렴하다. 본 발표에서는 암모니아 분해의 촉매 표면 반응에 대한 특징을 먼저 소개하고, 높은 암모니아 분해 활성을 얻는 데 필요한 루테튬 금속 기반 촉매의 물리화학적 특성을 설명한다. 현재 국내외에서 개발되고 있는 암모니아 분해용 루테튬 및 비귀금속 기반 촉매를 나열하고, 추가적인 촉매 활성 증진을 위하여 필요한 촉매 합성 전략을 제안한다.

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

발전 및 산업 부문 암모니아 연소 기술 개발 동향

Research and Development Trends in Ammonia Combustion Technology in Power Generation and Industrial Sectors

이민정*

한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부

최근 국내를 포함하여 전 세계적으로 온실가스 감축과 탄소중립을 위한 저탄소 공정으로의 전환이 주요한 이슈로 자리 잡고 있다. 국내에서는 2020년 탄소중립 선언을 기반으로 2021년 2030 NDC 상향안 및 2050 탄소중립 시나리오를 발표함에 따라 발전, 산업 및 수송 등 에너지 산업 전 분야의 온실가스 감축 목표를 할당하고 이에 대한 구체적인 방안을 수립 중에 있다. 온실가스 감축 목표의 기준이 되는 2018년의 온실가스 배출량을 살펴보면, 에너지 부문에서 92%를 차지하고 있으며, 이들 대부분이 연료 연소에 의해 발생하고 있다. 따라서 온실가스 감축을 위해서는 무탄소 연료로의 전환이 필수적이다. 장기적으로는 발전 부문에서 무탄소 전력을 대량으로 생산하여 대부분의 연소 설비를 적절히 전기화하는 방향이 모색되고 있지만, 산업의 기반 시스템을 전부 전기화하는 것은 불가능하기 때문에 현재의 산업 구조 및 시스템에서 무탄소 연료로의 전환은 반드시 필요하다. 무탄소 연료 전환을 통해 온실가스 배출이 없는 지속가능한 연소 시스템 구현이 가능하며, 이를 통해 발전 및 산업 부문의 다양한 고온 공정에 활용이 가능하다. 한편, 무탄소 연료인 수소와 암모니아의 공급 측면에서 살펴보면, 두 연료 모두 대부분 해외에서 수입을 해야 하는 상황이다. 우선 수소의 경우 2030년 연간 390만톤 중 50%를 해외에서 조달해야 하며, 암모니아의 경우 10차 전력수급계획안에 따라 연간 300만톤의 암모니아의 수입이 요구된다. 하지만 암모니아는 수소 캐리어로서 가장 경제적인 수단으로 고려되고 있으므로, 전반적인 수소 공급의 가치사슬에서 암모니아는 연료와 수소 캐리어의 역할을 동시에 수행할 것으로 판단된다. 이에 따라 발전 및 산업 전반에 암모니아를 직접 연료로 활용하고자 하는 연구 개발이 활발히 수행되고 있다. 본 발표에서는 이러한 발전 및 산업부문의 암모니아 연소기술 개발 동향을 소개하고 향후 나아가야 할 방향을 제시하고자 한다.

mjlee@kier.re.kr

042-860-3318

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

롯데케미칼의 탄소중립 전략 Carbon Neutral Strategy of Lotte chemical

서명기

롯데케미칼 기초소재 연구소 이노베이션센터 CCU Project Team

롯데케미칼은 기후 위기에 대응하기 위해서 친환경 목표 및 ESG비즈니스 전략 『Green Promise 2030』 선언을 하였습니다. 롯데 화학군에서 2030년 친환경사업 매출 6조원 달성 및 탄소중립성장 추진을 목표로 하고 있습니다. Green promise 2030은 친환경 사업강화, 자원순환 확대, 기후위기 대응, 그린생태계 조성 등 4대 핵심과제를 바탕으로 약 5조 2천억 원 전략적 투자 및 역량 집중하여 지속가능성장을 바탕으로 유무형 기업가치 제고를 목표로 하고 있습니다. 특히 탄소 중립 실현을 위하여 탄소배출량 절감을 위해 2030년까지 탄소배출량 증가 없는 탄소중립성장 추진하고 있습니다.

탄소 중립 성장을 추진함에 있어서 자원 선순환, 청정수소, 이산화탄소 포집 및 활용 기술의 개발 및 사용화를 목표로 많은 연구 개발을 시도하고 있습니다.

자원 선순환을 위해서 폐플라스틱을 원료로 플라스틱을 생산하는 자원 선순환 공정을 개발하고 있습니다. 대표적으로 폐플라스틱을 열분해하여 생성된 납사 성분을 NCC에 원료로 활용하는 기술 및 PC 및 PS의 해중합 기술을 활용한 모노머 생산 기술에 대한 연구 개발을 수행하고 있습니다. 또한 해외의 재생에너지를 국내 도입하기 위한 청정 수소 생산 기술을 연구하고 있습니다. 해외의 말레이시아 사라왁주에서 재생에너지로 생산한 청정 수소를 암모니아 형태로 국내 도입하여 청정 수소를 생산하는 것에 대한 연구 개발을 수행하고 있습니다. 이산화탄소 포집 및 활용 분야에서는 화학 공장의 배가스를 기체 분리막을 활용하여 포집 하고 있습니다. 포집된 이산화탄소는 1차적으로 자체 공장에 원료로 활용하거나 액화탄산으로 판매를 추진하고 있습니다. 이산화탄소 활용기술에 대해서는 아직 연구 개발 단계이며 광물화, 화학적 전환 및 전기화학적 전환 모두 기술 검토 및 개발을 진행하고 있습니다.

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

탄소중립을 위한 글로벌 수소사업과 암모니아의 역할

박훈모

현대자동차 연구개발본부 수소시스템엔지니어링팀

2022년 현재 세계 137개 국가에서 탄소중립을 선언하였고 우리나라를 포함한 18개 국가에서는 탄소중립 목표의 법제화를 마치고 목표 달성을 위한 전략 수립과 정책을 추진하고 있다. 탄소중립 달성을 위해서는 기존 화석 연료 기반에서 신재생에너지로의 에너지 패러다임 전환이 필요하며 수소는 재생에너지의 지역 불균형 해소와 산업 및 모빌리티 분야의 탈탄소화에 효과적인 해결 수단으로서 역할이 확대될 것으로 전망된다. 이러한 수소를 이용한 탄소중립과 수소경제 체제를 위해서는 수소 생산, 저장/운송, 활용의 전 밸류체인이 구축되어야 하기에 각국 정부들의 정책 추진뿐만 아니라 국내/외 기업들도 본격적인 수소사업 진출을 선언하고 관련 기술개발과 인프라 구축에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 우리나라와 같이 재생에너지가 부족한 곳에서는 향후 대부분의 수소를 해외로부터 도입할 계획을 가지고 있으므로 대규모로 수소를 저장/운송하는 기술 개발이 중요하다. 암모니아는 수소 저장용량이 매우 높고 액체 상태로 운송이 비교적 쉬워 대규모 수소 운송에 적합하고 수소로 전환 시 탄소 배출이 없는 장점이 있기 때문에 해외수소 도입을 위한 그린 암모니아 합성과 암모니아 추진 운반선, 인수기지 및 암모니아 분해 수소 생산 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 발표에서는 글로벌 수소사업 동향과 탄소중립을 위한 현대자동차의 전략과 수소, 암모니아 분야의 활동에 대해 소개하고자 한다.

[특별세션4. CCU와 암모니아 수소]

Syngas production by dry reforming reaction with Ni-based catalysts: How to stabilize Ni nanoparticles?

Jong Wook Bae*

School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU), 2066 Seobu-ro,
Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea

Various reforming reactions such as steam reforming of methane, dry reforming of methane and combined steam and carbon dioxide reforming with various hydrocarbon feedstock have been investigated to produce syngas using Ni-based heterogeneous catalysts [1,2]. In general, the impregnated Ni nanoparticles having a comparable activity can be easily sintered to form less active and bigger agglomerates with more facile coke deposition natures [3]. To increase the thermal and catalytic stability of Ni nanoparticles, many modification methods with proper structural promoters on the various supports or bimetal compositions with oxophilic Co promoter have been widely investigated [4-6]. In addition, the syngas composition (H_2/CO ratio) can be largely changed by the types of reforming reactions such as steam reforming of methane (SRM, $CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$), carbon dioxide reforming of methane (CDR, $CH_4 + CO_2 = 2H_2 + 2CO$), combined steam and carbon dioxide reforming of methane (CSCR, $3CH_4 + CO_2 + 2H_2O = 8H_2 + 4CO$), and steam reforming of propane (SRP, $C_3H_8 + 3H_2O = 7H_2 + 3CO$) and so on. In the present study, the strategies to stabilize the Ni nanoparticles with less coke deposition for carbon dioxide reforming of methane are explained such as the encapsulation methods of Ni nanoparticles and their spatial confinement effects and so on.

References

1. Park, K.S., Son, M., Park, M.J., Kim, D.H., Kim, J.H., Park, S.H., Choi, J.H., and Bae, J.W. Appl. Catal. A: Gen. 549, 117 (2018).
2. Lee, H.Y., Kim, A.R., Park, M.J., Jo, J.M., Lee, D.H., and Bae, J.W. Chem. Eng. J. 280 771 (2015).
3. Wang, N., Shen, K., Huang, L., Yu, X., Qian, W., and Chu, W. ACS Catal. 3 1638 (2013).
4. Liu, C., Ye, J., Jiang, J., and Pan, Y. ChemCatChem 3 529 (2011).
5. Tu, W., Ghossoub, M., Singh, C.V., and Chin, Y.C. J. Am. Chem. Soc. 139 6928 (2017).
6. Park, K.S., Kwon, J.H., Yu, J.S., Jeong, S.Y., Jo, D.H., Chung, C.H., Bae, J.W. J. CO₂ Util. 60 101984 (2022).



구 두 발 표

전환부문 2050 탄소중립이 발전 비용에 미치는 영향에 대한
몬테카를로 시뮬레이션

Monte Carlo Simulation of
2050 Carbon Neutrality and Power Generation Costs in South Korea

장명진 · 이현진 · 안영환*

숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학

본 연구는 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안과 2050 탄소중립 시나리오안을 반영하여, 전환부문 2050 탄소중립에 따른 발전 비용과 평균 발전 단가의 변화를 분석하였다. 2050 탄소중립 시나리오상의 탄소중립 A안과 B안, 그리고 원자력 발전의 발전 비중을 확대하는 탄소중립 C안을 대상으로 하며, 상향식 에너지시스템모형으로 도출된 시나리오별 탄소중립 이행 경로에 대하여 불확실 변수들을 선정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 발전 비용은 전력 수요가 증가하는 2034년 이후에 모든 안에서 증가하다가 2040년대 중후반에 A안과 B안에서는 증가율이 낮아지는 것으로 나타났다. 평균 발전 단가의 분포는 2030년에 A안과 B안이 유사하게 나타났고 C안은 평균 발전 단가가 낮고 분포의 너비 또한 좁게 도출되었다. 2050년경에는 A안과 B안의 차이가 커지고 C안은 2050년에도 가장 낮은 값을 나타내었다. 민감도 분석 결과, A안의 평균 발전 단가는 태양광 CAPEX의 영향을 가장 크게 받으며, B안은 LNG 연료비, C안은 원자력 연료비의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다. 종합하면 평균 발전 단가는 2019년 대비 2030년과 2040년에 최대 50% 내외로 증가할 수 있지만 정점에 도달한 후에는 증가폭이 작아져 2019년 대비 2050년까지 지속적이고 가파르게 상승하지는 않을 것으로 보이며, 이러한 추이는 IEA의 전 세계 평균 발전 비용 전망 추이와 EU의 발전 비용 전망 사례와도 유사한 측면이 있다.

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003560011)

본 연구는 환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 사업으로 지원을 받아 수행한 과제입니다.

상향식 에너지 모형 기반
국내 그린수소 생산에 따른 전력시스템 영향 분석
Analysis on Korean Power System Change
for Domestic Green Hydrogen Production using Bottom-up Energy
Model

이현진 · 장명진 · 안영환*

숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학

정부는 2021년 10월 2050 탄소중립 시나리오의 발표에 이어 작년 말 제1차 수소경제 이행 기본계획('21.11)을 발표했다. 이러한 중장기 국가목표의 추진에 있어 정책 간 정합성 및 정책의 실현가능성을 추정해보는 것은 중요하다. 본 연구에서는 국내 전력시스템을 반영한 상향식 전력시스템 모형을 활용하여 수소정책이 탄소중립 목표 달성 및 전력시스템에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 국내 그린수소 생산가격을 추정한다. 본 분석은 탄소중립 시나리오와 수소생산 시나리오 그리고 기술확산 전체에 따른 추가 시나리오 6가지를 바탕으로 한다. 시나리오 분석 결과, 국내 전력시스템에서 수소생산설비 도입에 따른 잉여전력 활용 증대 효과는 현저하지는 않은 것으로 나타났다. 배출량의 경우 수소생산 시 재생에너지 발전설비 투자가 조기에 이뤄지게 하는 효과가 있어 2050년에 근접할수록 배출량이 더 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 국내 그린수소 생산가격은 2050년 국가목표 공급가격인 2,500원에 근접하는 것으로 분석되어, 탄소중립시나리오와 수소경제 이행 기본계획 간 일정 부분 정합성이 있는 것으로 나타났다. 이에 그린수소의 국내생산은 전력시스템 계통비용 절감에 일부 기여하는 면이 있고 전력시스템의 탈탄소화를 가속시키는 역할을 한다는 점에서는 긍정적이다. 다만 국내 수소생산단가가 국외 생산단가에 비해 높고 생산잠재량이 한정적이라는 점은 고려할 점이다. 국내 그린수소 생산목표 수립에 있어 다양한 시나리오 분석을 통해 전력부문 계획과의 연계성을 제고하고, 수소의 수요처를 구체화하여 수소 생산량에 대해 보수적으로 접근하는 것이 필요할 것으로 보인다.

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003560011)

본 연구는 환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 사업으로 지원을 받아 수행한 과제입니다.

전력화를 통한 산업부문 온실가스 감축 잠재량 평가:
정량적 모형과 델파이 방법 통합을 통한 추정

Evaluation of Greenhouse Gas Reduction Potential in Industrial Sector
through Electrification: Estimation through Integration of Quantitative
Model and Delphi Method

양혜영 · 안영환*

숙명여자대학교 기후환경에너지학, *숙명여자대학교 기초교양대학

본 연구에서는 2050년 탄소중립 이행을 위한 산업부문의 업종별 전력화 비중을 전망하고, 이에 따른 온실가스 감축 잠재량을 분석하는 것이 목적이다. 온실가스 감축 잠재량을 분석하기 위하여 정량적 방법과 정성적 방법을 통합하여 한국 산업부문의 전력화 잠재량을 평가하였다. 우선 에너지수요전망모형을 활용하여 전망한 기준 시나리오와 대체 탄력성 모형을 이용하여 탄소가격 시나리오의 업종별·용도별·공정별 전력화 비중을 도출하였다. 다음으로 이러한 정량적 분석을 통해 도출된 전력화 비중을 설문조사지에 반영하여 업종 전문가를 대상으로 한 델파이 기법을 통해 탄소중립 시나리오 하 전력화 비중에 대한 의견을 수집하였다. 반복적인 피드백을 통해 일정한 수치로 의견을 수렴하여 최종적인 전력화 잠재량을 도출하였다. 최종적으로 델파이 기법을 통해 도출된 전력화 잠재량을 사용하여 2050년 기준 온실가스 감축 잠재량을 산정하였다. 그 결과, 산업부문 온실가스 배출량은 BAU 시나리오 대비 전력화를 통해 21.01%(42,005 ktCO₂eq) 감축될 것으로 전망된다. 업종별로도 살펴보면, 철강업종의 온실가스 배출량은 BAU 시나리오 대비 22.68%(19,849 ktCO₂eq), 비금속업종의 온실가스 배출량은 BAU 시나리오 대비 7.75%(655 ktCO₂eq), 석유화학업종의 온실가스 배출량은 BAU 시나리오 대비 20.06%(13,229 ktCO₂eq) 감축될 것으로 전망된다. 더불어, 경공업에서의 온실가스 배출량은 BAU 시나리오 대비 10.27%(2,837 ktCO₂eq) 감축되는 것으로 전망된다.

This research was supported by the FRIEND (Fine Particle Research Initiative in East Asia Considering National Differences) Project through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT. (2020M3G1A1114623)

본 연구는 환경부 지식기반 환경서비스 특성화대학원 사업으로 지원을 받아 수행한 과제입니다.

상용차용 수소충전소 공정설계 및 구축현황

Process Design and Construction of Hydrogen Refueling Stations for Commercial Fuel Cell Electric Vehicles

방선혁 · 이경실*

코하이젠주식회사 수소R&D센터장, *코하이젠주식회사 대표이사

정부는 지난 2019년 발표한 수소경제활성화 로드맵에서 “2040년까지 수소전기차 290만대의 보급 및 수소충전소 1,200개소의 구축을 목표로 정책을 추진하여 세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약한다”는 비전을 제시한 바 있습니다.

새 정부의 에너지정책 방향에도 “핵심기술자립, 생산·유통·활용 전주기 생태계 조기완비를 통해 청정수소 공급망 구축 및 세계 1등 수소산업육성”이 포함되어 에너지 부문에서 수소의 중요도는 점차 커지고 있습니다.

본 발표에서는 최근까지 국내 수소전기차를 포함한 환경친화적 자동차의 보급현황을 분석하여 수소경제활성화 로드맵과 비교, 분석하였으며 향후 수소 모빌리티(수소 전기차, 수소 Tram, 수소 UAM 등)의 발전방향을 전망하였습니다.

또한 최근까지의 국내 수소충전소 구축현황을 용도별, 지역별 및 운영주체별로 구분하여 제시하였습니다.

다음으로 수소 모빌리티를 대상으로 연료충전서비스를 제공하여야 하는 수소충전소의 주요 설비에 대해서 타 연료 충전소 대비 특수한 요구조건과 수소충전방식별 장단점을 비교 제시하였습니다.

특히 버스, 트럭 등 상용차용 수소충전소에서 요구되는 사항과 특징 등을 상용차용 수소충전소와 비교하여 제시하였습니다.

더불어 코하이젠주식회사가 설계하여 구축 중인 상용차용 수소충전소 설비의 특징을 운영방법과 함께 향후 새로운 기술의 상용화에 따른 수용성 측면에서 설명하였으며 충전설비용량에서 세계 최초, 최대의 시설을 시현한 과정과 충전소의 공정(Process)을 상세히 설명하였습니다.

끝으로 코하이젠주식회사의 설립배경과 추진하고 있는 사업 및 코하이젠주식회사의 미래에 대해 간단히 소개하였습니다.

루테튬 조촉매가 적용된 수소생산용 CuInS_2 광전극
 CuInS_2 photocathode with Ru co-catalysts for hydrogen production

윤노영 · 채상윤* · 박종혁 · 박은덕* · 주오심†

연세대학교 화공생명공학과, *아주대학교 에너지시스템학과, †한국과학기술연구원
청정에너지연구센터

광전기화학적 수소생산은 태양광과 물을 이용하여 수소를 생산할 수 있는 기술로 탄소배출 없이 청정 수소를 생산할 수 있는 이상적인 방법이다. 이를 위해서는 태양에너지를 효과적으로 화학에너지로 전환 할 수 있는 광전극 소재를 개발하여야 한다. 본 연구에서는 p형 반도체인 황화구리인듐 소재를 합성하고 그를 이용하여 광전기화학적 수소생산 성능을 평가하였다. 황화구리인듐의 수소발생 성능을 향상시키기 위해서 황화몰리브덴 이중접합이 도입된 구조를 설계하고 전해질-전극 계면에서 수소생산 효율을 증가시키기 위해 백금 및 루테튬이 귀금속 조촉매로서 도입되었다. 백금은 매우 우수한 전기화학적 촉매임이 알려져 있으나 황화구리인듐 광전극과 결합되었을 때는 루테튬이 백금에 비해 우수한 성능을 나타내었다. 이러한 결과는 광전극 구조 설계시 촉매적 특성 뿐만 아니라 광전극-조촉매 계면의 전자전달 또한 효율적인 태양광-수소 전환에 중요하다는 것을 의미한다.

PEMFC 수소연료전지-배터리 하이브리드 추진 선박 연비 기반 최적제어기 선정 전략

Strategy Development of Optimal Controller for Ship Propulsion Based
on PEMFC-Lithium Ion Battery

황성현 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 류주열 · 박성호†

고등기술연구원

IMO GHC 4차 연구(2020)결과에 따르면, 2018년 기준, 전 세계 온실가스 배출량은 10억 5천만 톤, 국내는 1,181만 톤을 배출하는 것으로 나타났다. 따라서, 2018년 4월 국제해사기구(IMO) 국제 운송에서 배출되는 온실가스를 2050년 온실가스 감축목표를 2008년 대비 50% 이상으로 높였다. 온실가스 감축목표를 달성하기 위해 각국의 해운사, 조선사들은 LNG, 수소, 암모니아 등을 연료로 하는 친환경 추진선박에 대한 수요가 급증하였고, 이에 대한 연구 역시 활발히 이루어지고 있다. 친환경 연료 중 수소연료 선박은 연료전지를 통해 전기모터를 구동시켜 추력을 발생시키는데, 연료전지 매커니즘상 배기가스가 없고, 전기를 생성하기 위해 공기를 흡입하는데, 이 과정에서 필터를 통해 공기를 정화하는 기능을 하기 때문에 선박의 차세대 에너지 공급원으로 주목 받고 있다.

본 논문은 저온형 연료전지인 PEMFC를 선박에 적용하고, 선박에 안정적인 전원공급을 하기 위해 배터리와 하이브리드로 구동할 때, 선박에 전력공급을 수소를 가장 적게 사용하는 방향으로 제어를 하는 최적의 제어기를 선정하는 전략을 제시하고자 한다. Rule-based 제어, MPC, ECMS, PID 등 다양한 제어기를 PEMFC-배터리의 하이브리드 제어를 위한 제어기로 선정 할 수 있다. 하지만, 개인 튜닝과 여러 제어기에 대한 사례연구로는 PEMFC-배터리의 최적에 도달 했는지는 알기 어렵다. 따라서, 연료전지와 배터리의 수학적 모델을 알 때 전역 최적인 해를 찾기 위해 Dynamic Programming(DP)을 사용하였고, 이 해를 통해 제어기가 얼마나 최적에 근접 했는지에 대한 지표로 삼고자 하였다. DP 구동에 필요한, 연료전지와 배터리에 대한 수학적 모델을 정의하고, 출력의 한계를 제약조건으로 넣어, 전역 최적인 에너지 프로파일을 출력하였고, 제어기의 최적성을 판단할 기준을 마련하였다.

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

동결융해법을 이용한 질소의 슬러시화 실험

The Experimental Study of Producing Liquid/solid(slush) Nitrogen
using Freeze-thaw method

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박혜민 · 권도현 · 박성호*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

차세대 친환경 에너지로 주목받는 수소는 해마다 증가할 것으로 예상되는 수요를 충족하기 위해 수소를 해외에서 수입하는 과정을 검토 중에 있다. 하지만 수소는 기체 상태로 보관할 때 밀도가 매우 낮아 밀도가 기체보다 800배 이상 큰 액체 수소의 형태로 보관하여 운송하는 방법이 논의되고 있다. 하지만 순수한 액체 수소는 액화천연가스(LNG)와 비교하여 밀도가 1/6 수준밖에 되지 않으며 액체 수소를 장주기 저장하는데 어려움이 뒤따른다. 본 연구에서는 기존의 액체 수소보다 밀도가 15% 이상 높아 대용량 저장이 가능하며 18% 높은 열용량으로 장주기 저장이 가능한 액체/고체(slush) 수소를 동결융해 방법을 이용하여 생산하는 메커니즘과 생산하기 위한 설비를 소개한다. 동결융해법은 유체를 삼중점까지 감압하여 유체를 고상화하는 일반적인 방법으로 용융점이 낮은 극저온 유체에 주로 사용된다.

본 실험에서는 액체/고체(slush) 수소 생산 장치를 이용하여 액체/고체(slush) 수소를 생산하기에 앞서 액체 질소를 액체/고체(slush) 질소로 변환하는 실험을 진행하였다. 액체 질소는 삼중점에서 압력이 120 mbar 수준으로 액체 수소의 삼중압인 70 mbar와 가까우며 화학적으로 매우 안정적이고 폭발성, 유독성이 없어 실험을 진행하였다. 실험을 시작하기에 앞서 극저온 유체를 장시간 저장하기 위해 $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-4}$ mbar 수준의 높은 고진공 단열을 유지하였으며, 액체 질소는 삼중점(120 mbar, -210°C)을 900초 동안 유지하였다.

감사의 말(사사) : 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음
(과제번호 22CTAP-C163636-01)

광전기화학반응 조건 중의 수소생산용 광전극의 표면상태 관찰

Investigation of Chemical state of Photocathode under Photoelectrochemical Reaction Condition

채상윤 · 윤노영* · 주오심* · 박은덕

아주대학교 에너지시스템학과, *한국과학기술연구원 청정에너지연구센터

— 광전기화학전지는 광에너지를 화학에너지로 변환 할 수 있는 전지로 청정에너지인 태양광을 이용하여 화학물질을 합성할수 있는 중요한 기술이다. 대표적으로 태양광을 이용하여 물을 분해하고 수소가스를 생산하는 방법이 오래전부터 제안되어왔다. 그러나 태양광을 흡수하여 화학에너지로 전환하는 광전극의 효율이 높은 전자-정공쌍의 재결합으로 인하여 제한되는 문제가 있다. 그러므로 고효율의 태양광-화학물 전환효율을 달성하기 위해서는 광전극 표면의 화학상태를 이해하는 것이 중요하다. 특히, 전극-전해질 계면에서의 화학상태를 실제 반응 도중에 관찰하는 것으로 광전극의 광전기화학적 반응기작을 이해 할 수 있다. 본 연구에서는 황화몰리브덴/황화구리인듐 이중접합 광전극의 표면상태를 실제 광반응중에 라만 분광법을 이용하여 얻은 결과를 논의한다.

0.3~10 MW급 액체공기 발전 공정에서
터빈 입, 출구 조건에 따른 영향

Effect of Turbine Inlet and Outlet Conditions
in 0.3~10 MW Class Liquid Air Power Generation Process

이춘식 · 윤문규 · 염충섭

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

LAES(Liquid Air Energy Storage, 공기액화 에너지 저장) 시스템은 공기를 액화하는 공정과 액체공기 발전 공정으로 구분되며, 발전 공정은 액체공기를 기화시킨 후 가열하여 터빈을 회전시키는 과정이다. 세부적으로는 액체공기 기화 과정에서 극저온 냉열을 저장하고 액화 공정 압축과정에서 저장한 온열을 활용하여 가열하며, 터빈 출구 공기 온도 조절을 통해 냉방에 활용하는 것을 특징으로 한다. 본 연구에서는 0.3, 2, 10 MW급으로 구분하여 발전 공정의 Scale-up에 따른 특성을 분석하였으며, 그 결과 발전출력 제어는 공기 유량 변화를 통한 제어 방식이 타당하고, 동일한 출력에서 터빈 입구온도 증가에 의한 유량 감소는 30% 범위로 한정하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 그리고 발전공정에서 민감도 분석을 수행한 결과 터빈 입구 압력 상승은 발전 출력을 증가시키지만 동시에 냉열 저장량 감소를 유발함을 알 수 있었고 터빈 입구 온도 증가를 통한 발전 출력 상승은 200도씨 이상에서는 효율이 감소하였다. 끝으로 액체공기 발전 과정에서 부수적으로 얻을 수 있는 터빈 출구 공기 온도를 통한 냉방은 온열 사용량과 냉열 저장량을 고려할 때 0도씨 이상으로 유지하는 것이 적절한 것으로 분석되어졌다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant of the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials (grant number : NK237F)

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

이충철 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용

(주)에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원

인류는 산업화 이후 화석연료의 급격한 소비로 인해 지구온난화의 가속화로 최근 급격한 기후변화를 경험하고 있다. 선진국을 중심으로 UN에서 기후변화 협약을 통한 탄소배출 감소방안을 마련하고 실천하고 있으며, IPCC의 Global Warming of 1.5°C 보고서에 따르면 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. 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 NCCC가 흡수 기술과 분리막 기술을 중심으로 주도해 왔다. 분리막 기술의 경우 1MW 발전 배가스 CO₂ 포집공정 실증이 완료되었으며 10MW 포집공정 실증이 준비중에 있다. 분리막 기술은 CO₂, N₂가스의 분리막 투과속도 차이를 이용하여 CO₂를 분리 포집하는 기술로 경쟁기술보다 설치면적 작고 공정운전이 용이하여 다양한 배가스로 CO₂ 포집공정 실증이 진행되고 있다.

본 연구에서는 다양한 배가스부터 CO₂를 포집하기 위한 기체분리막공정을 개발하여 공정 운전변수에 따른 CO₂ 포집성능을 고찰하였다.

분산형 집단에너지 플랫폼 : 기계실 및 바닥난방 복합 스마트운전 제어 실증 Decentralized Intergrated Energy Platform: Complex Smart Operation Controls of Sub-station and Underfloor Heating

김경민 · 이종준 · 오진수 · 이하나 · 장원석 · 신경아 · 오문세

한국지역난방공사 미래개발원

최근 자연재해가 빈번히 일어나고 있는 상황에서 기후변화에 대응하기 위해서는 화석연료를 줄여 온실가스를 배출하지 않는 신재생에너지를 확대해야 한다. 국내외 에너지 사용 중 40~50%은 열에너지 형태로 사용함에도 불구하고, 재생 전기에너지 보급 확대에 집중하고 있었으나 최근에는 열에너지에 대한 중요성을 인식하고 미활용 및 신재생 열에너지 공급을 위한 다양한 기술과 보급 방안과 효율 향상 기술을 제시하고 있다.

사용자 측에서의 기계실에서 각 세대로 분배되는 배관에서의 열손실을 줄여 효율을 높이면 공통관리비를 줄일 수 있다. 열손실을 줄이기 위해서는 열을 사용하지 않는 시간에 공급온도를 낮추는 것이 가장 좋은 방법이다. 여기서 해결해야할 문제는 열을 사용하지 않는 시간을 어떻게 파악하는지가 가장 중요한 문제이다. 열을 사용하지 않는 시간을 찾는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째가 열공급 데이터를 기반으로하여 통계적인 방법을 사용해 열사용 패턴을 예측하여 공급온도를 결정하는 방법이고, 두 번째가 환수온도를 측정하여 열사용량을 예측하고 공급온도를 변화시키는 방법이다. 첫 번째 방법이 예측을 통해 미리 온도를 변화시키기 때문에 실시간으로 대응을 할 수 있다는 장점이 있지만 통계를 통한 예측이 필요하다는 것과 일정시간대와 일정요일, 외기온도 등에 일정한 패턴으로 주민들이 생활한다는 가정이 필요하다. 그리고 두 번째 방법은 환수온도를 측정하여 공급온도를 변화시키기 때문에 유체가 배관을 통해 이동하는 시간차와 열교환 시간만큼 시간차가 발생하는 단점은 가지고 있으나, 현재 사용자의 열사용패턴을 바로 반영하고 있다는 장점이 있다. 이 둘 중 본 연구에서는 환수온도를 통해 공급온도를 결정하는 방법을 채택하였다. 왜냐하면 건물은 콘크리트 등 열용량이 큰 물질로 구성되어 있어 건물에서의 시간차 정도는 세대에서의 온도 변화가 크지 않기 때문이다.

그리고 본 연구에서는 각 세대에 바닥 복사난방 온도조절기의 온도조절 방법을 변화시켜 난방품질을 향상하고자 하였으며, 열손실과 펌프 동력을 줄이는 연구를 복합적으로 사용하였다. 바닥 복사난방 온도조절기에서 우선적으로 사용자가 원하는 실내온도가 도달하기까지는 온도조절밸브를 열어 열을 공급하고 실내온도가 도달한 후부터는 바닥온도가 실내온도보다 일정온도(사용자 설정) 높게 유지하도록 환수온도를 일정간격으로 측정하여 비례제어와 온-오프제어를 동시에 사용하는 방법을 통해 열품질을 높이고 열손실을 줄이는 연구를 진행하였다.

이와 같은 복합 스마트운전 제어 실증을 통해 10%의 효율을 향상시킬 수 있었다. 실증단지 기계실과 각 세대 내 정보통신 기술을 활용하여 온도/압력/유량/밸브개도 등의 정보를 분석하여 최적 운전을 진행하여 에너지 효율을 향상시켰다.

도심 LNG발전소의 콤팩트 CO₂포집 및 활용공정 실증화와
발전폐열을 이용한 바이오매스 건조기술 개발

Development of technology of biomass drying using waste heat and demonstration of compact
CO₂ capture and utilization process on flue gas of urban LNG CHP plants

장원석 · 신경아 · 장미희 · 김경민 · 이종준 · 신혜현 · 남궁형규 · 신재용 · 강경수 · 유지혜
한국지역난방공사 미래개발원

도심 LNG발전소는 공간이 협소하여 기존 CCS설비를 설치하기 매우 어려운 상황이기 때문에 좁은 공간에서도 효과적인 CO₂포집을 하고 후처리로 이를 이용해 고가물질로 전환할 수 있는 새로운 콤팩트 포집 및 활용기술의 융복합공정 개발과 실증이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 도심에 위치한 LNG발전소의 배가스에 대해 협소한 공간에서도 설치가 가능하며 빠르고 효과적인 처리가 가능한 콤팩트 분리막 공정을 적용하여 배기가스내 CO₂ 농도가 처리전 6~8%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%)시키는 결과를 얻었고 이때 반응을 통해 생성되는 칼슘분말의 고함량(30~60%)을 확인하였으며 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)

한편 광물화공정 처리후 배기가스와 분리막 처리후 처리가스를 (1:3)비율로 혼합하면 CO₂농도가 5%정도를 유지되고 이를 미세조류 광배양공정으로 처리하면 광합성 반응을 통해 CO₂를 고정화하여 평균 30%정도 처리할 수 있으며 이때 배양된 미세조류인 헤마토코쿠스는 증식 및 유도단계와 같은 2단 배양공정을 통해 아스타잔틴이라는 고가(3000달러/kg)의 천연 항산화물질을 생산할 수 있는데 이는 기존 미세조류 공정에서 생산되는 바이오디젤(1달러/kg)에 비해 수천배 높은 수익을 얻을 수 있기 때문에 충분히 사업성이 있을 뿐만 아니라 최종적으로 배출되는 처리가스의 CO₂농도는 1%이하로 맞출 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 도심 발전소에서 발생하는 배가스 및 지역난방수 등의 발전폐열을 이용하여 광배양을 위한 온실난방과 바이오매스 건조공정에 활용할 수 있으면 에너지 소모가 거의없는 효과적인 CO₂ 처리가 가능하기 때문에 기존 전기 건조공정보다 에너지 절감율이 훨씬 높고 기존 개방형 배양공정보다 미세조류를 훨씬 고밀도로 유지할 수 있으므로 CO₂ 고정속도가 빠르며 공정제어가 수월하다. 그러므로 균일한 품질이 요구되는 의약품나 건강식품 원료물질 생산에 적합한 공정임을 확인할 수 있었다.

수소전소 가스터빈 열병합 시스템의 성능 특성 분석 연구

A Study of performance analysis for Combined Heat and Power System
based on the Hydrogen turbine

이중준 · 김정민 · 장원석 · 신경아 · 조은성*

한국지역난방공사 미래개발원, *두산에너지빌리티

기후변화에 대응하기 위한 다양한 방안이 연구되고 있는 가운데 탄소가 없는 연료를 활용하여 에너지를 생산하고자 하는 노력이 범세계적으로 지속되고 있으며, 이러한 노력들의 하나로 수소를 활용하는 방안이 논의되고 있다. 수소는 가스의 연소 호환성이 천연가스과 유사하여 현존하는 천연가스 기반의 에너지 시장에서 좋은 대안으로 활용될 가능성이 높은 연료이며, 신재생에너지 기반의 수전해를 통하여 수소를 생산할 때는 이론적으로 이산화탄소 배출이 전혀 없는 청정 연료이며, 지구상에 존재하는 물질 중 가장 많은 양을 차지하는 물질이지만 수소 분자로 존재하는 비율보다 화합물로 존재하는 양이 많고, 빠른 화염속도와 점화에 필요한 에너지가 상대적으로 적은 특징으로 인한 위험성도 내포하고 있다. 이에 따라 수소를 직접 연소하여 터빈을 구동하기 위하여 연소안정성을 확보하고, 기존 가스터빈에 연소기 적용 시 발생 가능한 성능 특성을 분석하기 위한 연구가 진행되고 있다. 수소는 분자가 매우 작고 가벼운 특징을 가지고 있고, 이에 따라 단위 질량당 발열량이 메탄 대비 약 2배 이상 높은 특성을 가지고 있기 때문에 적은 양으로 동일한 터빈입구온도를 유지할 수 있어서 터빈으로 유입되는 가스의 양이 줄어들게 된다. 터빈과 압축기의 매칭을 고려하면 터빈의 가스량이 줄어들어 따라 작동 압력은 다소 증가하게 될 것을 예상할 수 있으며 이에 따라 전체 가스터빈 운전특성이 변화하게 되고, 이는 하부사이클에도 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 두산에너지빌리티와 함께 연구 중인 5MW급 수소전소 가스터빈 성능을 분석하고, 수소를 연료로 하였을 때의 성능변화를 분석하였다. 또한 수소터빈 배열을 활용하는 열병합 발전시스템의 성능을 예측하였다. 5MW규모의 소형 가스터빈을 대상으로 하였기 때문에 하부사이클의 열회수 압력은 단일압력(Single Pressure)으로 가정하여 시스템을 구성하였다. 연료 내 수소의 물분율이 증가할수록 가스터빈의 배기가스 유량과 온도는 감소하고, 압축기 작동점이 변화하는 결과를 확인하였으며, 출력과 효율은 다소 증가하는 효과를 확인하였다. 또한 열병합 발전시스템을 구성하는 경우 열전비는 약 1.2:1~1.3:1로 예측되었으며 열효율은 약 82~88% 수준의 시스템 구성이 가능할 것으로 예측되었다. 추후 외기온도의 변화 등 수소터빈의 작동조건 변화에 따른 전체 시스템 해석과 수소생산과 열병합 발전시스템의 결합 등 다양한 시스템 해석을 수행하고, 이에 대한 경제성 분석을 통하여 최적의 수소터빈 트라이젠(수소-전력-열) 생산시스템의 성능특성을 분석할 예정이다.

후기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20206710100060, 분산발전 가스터빈용 수소전소 저 NOx 연소기 개발)

이산화탄소전환 탄산화물의 건설소재 활용을 위한 직접광물탄산화 실증 연구

Demonstration of direct mineral carbonation for use of carbon dioxide
conversion capture materials as construction materials

최창식 · 김성현 · 박동규 · 이해성 · 김태욱 · 장원석*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부 · 한국지역난방공사 미래개발원*

소각장 배가스에 포함된 이산화탄소 가스를 직접광물탄산화 설비를 통해 포집한 후 형성된 이산화탄소전환탄산화물을 탈수 및 건조하여 2차제품의 건설소재로 활용할 수 있는 방안을 실증 연구하였다. 현재 이산화탄소전환탄산화물은 법적 폐기물로서 이를 자원화하기 위해 규제자유특구를 통하여 수행하였으며, 동시에 이산화탄소전환탄산화물을 2차제품의 건설소재 및 재료로 사용할 수 있도록 정부부처에서는 규제해소를 위한 조례제정을 추진 중에 있다.

반응 전후의 배가스 유량 및 배가스내 CO₂의 농도를 측정하고, 반응제로 사용되는 산업 부산물 내에 포함된 CaO함량의 분석 등을 통해 이산화탄소의 포집규모와 배출가스 처리량, CO₂ 포집효율 등을 설계 사양에 반영하여 1일 5t-CO₂ 감축 규모의 실증 설비를 구축하여 운영하였다.

실증 연구를 통하여 CO₂ 포집 및 공정최적화 실험을 진행하였고, 실제 포집된 CO₂량과 배출가스 처리량 등을 측정하여 포집효율을 확인하였고, 향후 1일 100t-CO₂ 감축을 위한 scale-up 설계인자를 확보하였다.

본 실증 설비를 통하여 이산화탄소 포집량 200kg/h 이상, 배출가스 처리량 1500Nm³/h 이상, CO₂ 포집 탄산화효율 80% 이상 등의 정량 지표를 달성하였고, 장기적으로 CO₂ 포집 및 저순도 탄산칼슘 포집물을 생산하여 탄소배출권 확보 및 건설소재로의 판매 수익 가능성을 검토하였다.

Acknowledgement

본 연구는 중소벤처기업부 및 울산시규제자유특구의 지원으로 수행되었습니다.(과제번호:P0016558)

암모니아 공급 시나리오에 따른 혼소 발전의 경제성 평가

A Guideline on Abstract for Presentation of The Korean Society for Energy

이시훈*

*전북대학교 자원에너지공학과

기존의 발전소는 대부분 석탄, 천연가스 등의 화석연료들을 사용하고 있어 대기중의 온실가스 농도 증가의 주범으로 인식되고 있다. 따라서 온실가스 농도 증가에 따른 지구 평균 온도 증가 속도를 감소시키기 위하여 다양한 온실가스 배출 저감 기술들이 개발 및 적용되고 있다. 화력 발전소와 같이 온실가스를 대량으로 발생시키는 공정에 적용된 기술은 대부분 포집에 집중되어 있었다. 그러나 최근 연소 반응에서 이산화탄소 배출이 전혀 없으면서도 기존의 석탄 또는 천연가스를 대체할 수 있는 열량을 가지는 암모니아를 화력 발전 설비에 이용하기 위한 노력이 증가하고 있다. 특히 암모니아의 혼소는 기존의 화력 발전 설비에 이산화탄소 포집과 같은 고비용의 설비를 추가로 설치하지 않으면서도 온실가스 배출을 대량으로 저감할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이로 인해서 안정적인 전력을 공급하면서도 온실가스 배출을 저감시키려는 세계 각국의 유틸리티 회사들은 암모니아 혼소의 적용을 적극적으로 검토하고 있다. 하지만 전통적인 하버보쉬 공정에 따른 암모니아 생산은 온실가스를 대량으로 배출하고 있기에 온실가스 배출 저감이 적용되는 블루 암모니아 또는 재생에너지 기반의 그린 암모니아만이 온실가스 저감에 효과적인 것으로 인정받고 있다. 이에 본 연구에서는 상용급 화력 발전소에서 블루 암모니아 또는 그린 암모니아 이용에 따른 기술 경제성을 검토하였다.

공공청사 재생에너지 자체 소비율 의무기준 강화를 위한 대중의 지불의사액

최경란* · 김주희** · 유승훈***

* 서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지정책학과 박사과정, ** 서울과학기술대학교
창의융합대학 미래에너지융합학과 연구교수, *** 서울과학기술대학교 창의융합대학 학장

정부는 2018년 기준 국가 온실가스 배출량의 7.2%를 차지하는 건물 부문의 온실가스 배출량을 저감하고자 한다. 그 첫 단계로 정부는 2020년에 연면적 1000㎡ 이상인 공공청사에 대해 총 에너지 소비량 중 30%를 건물 내 재생에너지 설비에서 생산된 전기로 충당할 것을 의무화했다. 향후 정부는 공공청사 재생에너지 자체 소비율 의무화 기준을 2030년까지 40%로 강화할 계획이다. 그 강화 정책이 시행된다면 건물 부문의 온실가스 배출량이 줄고 화석연료로 생산된 에너지 사용량 감소로 인해 에너지 안보가 제고된다. 그러나 공공청사 재생에너지 자체 소비율을 높이기 위해서는 재생에너지 발전 설비의 추가 설치 및 기존 설비의 효율 향상을 위한 조치가 수행되어야 한다. 그러므로 상당한 비용이 투입되어야 하며 그 비용은 국민의 세금으로 충당될 것이다. 이에, 본 연구는 공공청사 재생에너지 자체 소비율 의무기준 강화에 대한 대중의 지불의사액(WTP, willingness to pay)을 추정하고자 비시장재의 가치 평가에 널리 활용되는 조건부 가치추정법(CV, contingent valuation)을 적용하였다. 이를 위해 2021년 3월 전국 1,000가구를 대상으로 CV 설문조사를 실시하여 자료를 수집했으며 이때 지불의사 유도방법은 1.5경계 모형을 적용하였다. 설문 결과에서 적지 않은 응답자들이 0의 WTP를 응답하였고, 이를 모형 내에서 명시적으로 포함하는 스파이크 모형을 적용하였다. 또한, 본 연구에서는 1.5경계 모형에서 발생할 수 있는 반응 효과를 점검하기 위해 1.5경계 모형으로부터 얻은 응답 중에서 첫 번째 것만 이용하는 방식으로 단일 경계 모형을 적용하였다. 분석 결과 두 모형의 추정결과 사이에 유의한 차이가 없었으므로 반응 효과는 유의하지 않은 것으로 판단된다. 1.5경계 모형 분석 결과, 대중의 공공청사 재생에너지 자체 소비율 의무기준 강화에 대한 평균 WTP는 가구당 연간 2,712원(USD 2.40)으로 5% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이 값에 2022년 추계 가구 수를 적용하여 계산된 총 편익은 연간 863억 3천만원(7,344만 달러)에 이른다. 이 값이 전체 편익 발생기간 10년 동안 매년 발생하는 것으로 가정하고 사회적 할인율 4.5%를 적용하여 2022년 기준 가격으로 계산하면 그 기준 강화에 대한 총 편익의 현재가치는 577억 1천만원(5,080만 달러)이다. 반면 공공청사 재생에너지 자체 소비율을 10%p 강화하기 위해 수반되는 비용의 현재가치는 405억원(3,565만 달러)으로 산정되었다. 본 연구에서 산정된 편익과 비용 정보를 적용한 경제성 분석 결과, 그 기준 강화에 대한 순현재가치 및 편익/비용 비율은 각각 172억 1천만원(1,515만 달러) 및 1.42이다. 따라서 공공청사 재생에너지 자체 소비율을 10%p 강화하는 것은 경제적 타당성을 확보하는 것으로 판단된다.

수소자동차 방호벽 성능기준 개선 연구

A Study on the Amendment of Protection Wall Criteria for Hydrogen Vehicle Refueling Station

류영돈

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

수소자동차 충전소의 안전기준은 「고압가스 안전관리법 시행규칙」 별표 5에서 규정하고 있으며, 제조식 수소자동차 충전기준과 저장식 수소자동차 충전기준으로 구분하여 규정하고 있다. “제조식 수소자동차 충전소”는 수소를 제조·압축하여 자동차에 충전하는 충전소이며, “저장식 수소자동차 충전소”는 배관 또는 저장설비로부터 공급받은 수소를 압축하여 자동차에 충전하는 자동차충전소를 말한다. 수소 자동차 충전과 관련한 상세기준(KGS Code)은 KGS FP216(제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준)과 KGS FP217(저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준)에서 규정하고 있다.

또한, 기존의 도시가스·LPG 자동차충전소, 주유소 등에 수소충전소 병행 설치 및 패키지형 수소자동차 충전소 설치를 허용하였으며, 산업통상자원부고시 제2018-179호(‘18.10.1; “융·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준”에서 융합충전소 및 복합충전소에 대하여 규정하고 있다.

현재 제조식 및 저장식 수소자동차 충전소 방호벽 기준은 기존의 가스 3법에서 규정하고 있는 방호벽의 종류와 규격이 같고, 융복합 충전소에 방호벽을 설치하는 경우에는 기존의 이격거리 기준을 완화해 주고 있다.

그런데, 강릉 과학단지 수소탱크 폭발사고에서 보는 바와 같이 수소충전소에서 폭발사고가 발생하는 경우 대형사고로 이어 질 수 있으므로 현재의 방호벽 기준이 700기압이 넘는 수소충전소에서 발생하는 폭발 사고에도 견딜 수 있는지 실증시험을 통해 검증할 필요가 있다. 이에 따라 정부에서는 2021년 5월부터 2025년 4월까지 4년간 약 130억원의 연구개발비를 투자하여 한국가스안전공사를 주관으로 “수소 충전소 화재폭발시 피해저감을 위한 방호벽 설계기술 및 안전기준 개발”이라는 연구를 수행하고 있다.

본 연구에서는 방호벽 기준을 분석하고, 방호벽의 종류 및 방호벽의 높이 등 연구 및 개선이 필요한 부분에 대하여 알아보고, 실증시험 방법에 대하여 알아보았다.

수소자동차 용기 화염시험 기준 및 시험 결과

Hydrogen Vehicle Container Flame Test Standards and Test Results

류영돈

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

서울 행당동에서 2010년 8월9일 발생한 압축천연가스(CNG) 폭발사고를 계기로 화재 폭발 사고를 재현하고 초고압 시험 및 실증시험을 통한 원인규명 및 대책 마련을 목적으로 강원도 영월군 주천면 송학주천로에 위치한 에너지안전실증연구센터에 국내 최초로 자동차용 기 화염시험 설비가 구축되었다.

에너지안전실증연구센터는 부지면적 13만제곱미터, 연면적 5천5백제곱미터의 규모로 초고압, 화재 폭발 및 방호시설분야 시험장비 140종을 갖추고 수소자동차에 설치되는 초고압 수소부품 및 방호제품의 시험·인증을 실시하고, 실증시험을 통한 가스시설 및 가스 제품의 안전성 강화를 위한 연구를 수행하고 있다.

수소자동차 인증대상으로는 용기, 충전구 및 연결구, 센서, 필터 및 체크밸브, 압력조정기, 용기밸브 등이 있다. 수소충전소 인증 대상은 고압용기, 체크밸브, 수동밸브 및 유량조절밸브가 있다.

수소자동차에 설치되는 용기의 화염시험은 국토교통부 고시 제2020-1018호(자동차용 내압용기 안전에 관한 규정) 별표 4(압축수소가스 내압용기 제조관련 세부기준, 검사(시험)방법 및 절차)의 3.1.3.8 “화염노출시험”에 따라 실시하고 있다.

본 연구에서는 수소용기 화염시험 관련 규정에 대하여 알아보고, 국토교통부 고시에 따라 실시한 화염노출시험 결과에 대하여 분석하였다.

도시가스산업이 국민경제에서 차지하는 역할 : 한국과 일본의 비교 분석

이서영* · 김주희** · 유승훈***

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

최근 세계 각국은 탄소중립을 선언하고 온실가스 배출량을 줄이고자 노력하고 있다. 특히 석탄 대비 온실가스 배출량이 절반 수준인 가스는 재생에너지로의 전환을 위한 가교 에너지로 주목받고 있다. 예를 들어, 정부는 온실가스 감축을 위해 노후 석탄발전소를 액화천연가스(LNG) 발전소로 대체하는 것을 추진하고 있다. 또한 LNG는 도시가스 난방 및 열병합발전 기반 지역난방의 원료로도 사용된다. 따라서 국내 LNG에 대한 수요는 당분간 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 이미 국내 LNG 수입량은 전체 LNG 수입국 중 상위권에 속한다. 지리적으로 인접한 일본도 LNG 수입량이 높고 향후 전망도 우리나라와 유사하다. 즉 우리나라와 일본에서 LNG 가격 변화는 다른 산업에 미치는 영향이 클 수 있다. 이러한 배경 아래에서 본 연구는 우리나라와 일본을 대상으로 도시가스산업의 경제적 파급효과를 분석하고자 한다. 이를 위해 한국은행 및 일본 통계청에서 발표한 2019년 한국 산업연관표 및 2015년 일본 산업연관표를 사용하였다. 그리고 수요유도형 모형, 공급유도형 모형, 레온티에프 가격모형을 적용하여 각국의 도시가스산업의 생산유발효과, 부가가치유발효과, 임금유발효과, 취업유발효과, 공급지장효과, 물가파급효과의 6가지 경제적 효과를 분석하였다. 분석 결과, 일본의 생산유발효과, 부가가치유발효과는 우리나라의 그것들 보다 크게 나타났다. 그 이유는 각국의 LNG 수입 현황을 근거로 추론할 수 있다. 일본은 LNG 시장이 개방되어 있어 430여 개의 도시가스 회사가 자유롭게 LNG를 수입한다. 반면, 우리나라는 전체 LNG 수입량 중 공기업이 80%, 민간 직수입자가 20%를 수입하고 있다. 따라서 우리도 시장개방을 통하여 LNG 시장의 유연성과 탄력성을 확보할 필요가 있다. 반면 우리나라 도시가스산업의 임금유발효과는 일본의 그것보다 크게 나타났다. 즉, 국내 도시가스산업은 일본 대비 고임금구조를 가지고 있다는 것이다. 하지만 우리나라 도시가스산업의 취업유발효과는 일본의 그것보다 작게 나타났다. 그 이유는 일본이 2015년부터 LNG 허브를 준비하여 현재 성공적으로 구축하였기 때문인 것으로 판단된다. 마지막으로 도시가스산업의 공급지장효과와 물가파급효과는 우리나라가 일본에 비해 큰 값을 가진다. 즉, 도시가스 공급에 차질이 발생할 경우, 경제에 미치는 부정적 영향은 우리가 일본보다 크다. 또한 국내 도시가스 가격의 변화는 일본 대비 국가 전체 물가수준에 큰 영향을 미친다. 따라서 정부는 도시가스 공급중단에 대비하여 관리 시스템을 구축하고 도시가스 가격변동이 국민경제에 미치는 파급효과를 예측하고 대비할 정책적 대안을 마련할 필요가 있다.

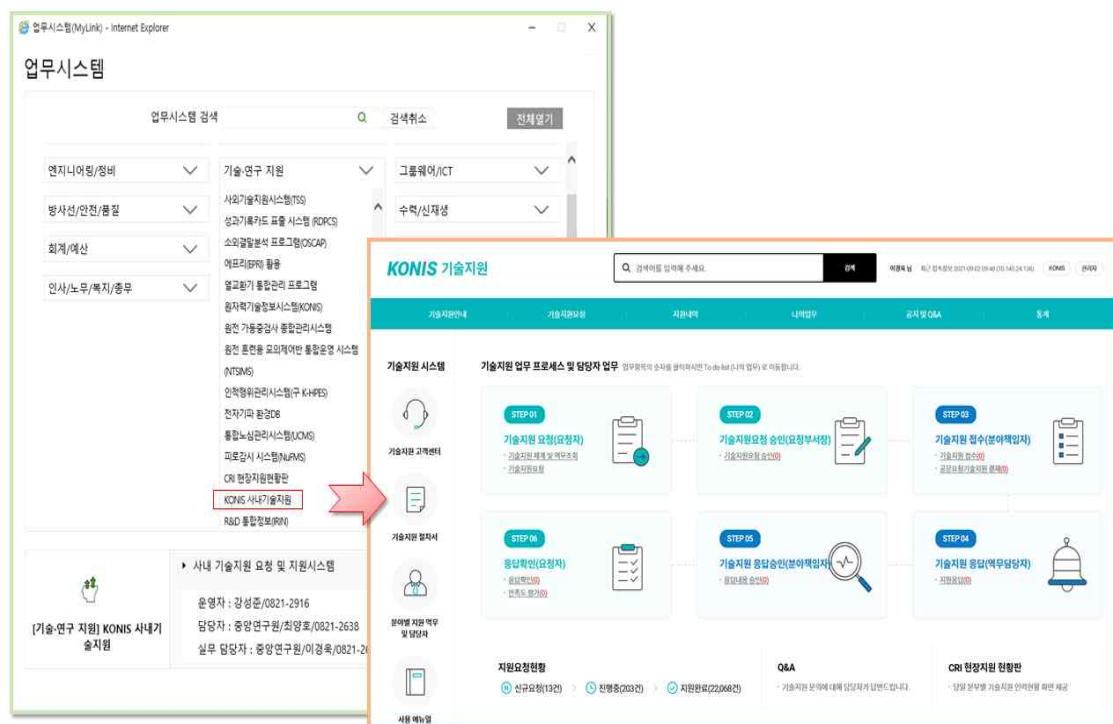
원전 기술지원시스템(KONIS) 운영 및 프로세스 개선 NPP Technical Support System Operation & Process Improvement

정남두, 이경옥, 김재성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한수원(주) 중앙연구원은 발전소 현안 해결을 위해 연구원이 보유하고 있는 전문분야 기술 및 연구개발 성과를 활용하여 설비 고장진단, 성능시험, 재료분석, 규제대응 및 인허가 등을 지원하여 기술지원의 Control Tower로서 중추적인 역할을 하고 있다. 기술지원의 원활한 수행과 발전소 현안에 대한 신속한 기술지원 및 효율적인 운영이 될 수 있도록 기술지원 시스템을 2004년 3월 처음으로 개발하여 운영하고 있다. 최근, 기술지원시스템의 사용자 편의성 향상을 위해 스마트 검색기능을 개발하여 기술지원 누적 수행 2만여 건 및 유사 기술지원 중복수행 사례가 다수 발생하여 스마트 검색기능을 통해 기 수행한 기술지원 결과물 활용성 향상 및 기술지원 요청자가 지원분야 및 지원자를 신속히 검색하고 요청할 수 있도록 편의성을 개선하였다.

사내 기술지원 시스템은 기계, 전기, 계측, 방사선·화학 등 총 29개 분야에서 배관진동분석, 전자회로해석, 화재방호 등 217개 역무에 대한 기술지원을 수행하고 있다. '21년 기술지원 건수는 2,544건으로 사내 기술지원 시스템 스마트 검색, 프로세스 개선 등으로 '20년 대비 152건 감소하여 국내 원자력발전소 운영에 많은 기여를 하고 있다.



원자력발전소 국내외 안전기술기준 영향 선제적 검토

Technical Review on Domestic and Foreign Safety Standard for Nuclear Power Plants

김문수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한수원(주)의 규제대응 역량은 기존 인허가 현안의 기술적 해결에 집중되어 있어 원자력 규제환경을 면밀히 감안한 안전기준 등의 규제에 대한 전략적 대응이 요구되고 있으며, 규제기관에 의한 안전기준 제·개정 등이 원전 사업자인 한수원에 ‘규제현안’이라는 중요한 이슈로 사후 대응의 큰 부담이 되는 것을 사전에 감지하기 위한 노력이 더욱더 필요한 시점이다. 따라서, 국내 원전운영에 적용되는 전반적인 기술기준에 대한 원천 기술배경 추적 및 전문성 강화를 위해 국내·외 기술기준을 사전에 체계적으로 검토하여 우리 회사에 미치는 영향뿐만 아니라 향후 대응책 마련을 위해 전문적인 조직과 인력을 구성하여 국내·외 안전기준 영향에 대한 체계적 검토 및 현안대응이 필요하다. 이를 위해, 한수원(주) 중앙연구원은 예기치 못한 기술기준 규제현안에 따른 가동원전 O/H(계획예방정비) 장기화 및 재가동 지연 문제 등 사손 및 대외 안전이미지에 크게 영향을 줄 수 있는 사항에 대해 적극해결을 위한 본사와 연구원의 유기적 관계를 구축하고 규제현안 전담대응 및 지원조직을 운영중('19.1~)이다. 또한 '19년부터 매년 제·개정된 국내 안전기준 및 국외 참조기준에 대해서 변경사항을 도출하였고, 변경내용에 대한 국내사업 영향평가를 수행하였다. 검토된 결과를 토대로, 발전소 영향범위 및 기술개발(상세검토) 필요여부에 따라 잠재리스크를 High, Medium, Low로 분류하였다.

안전기술기준 제·개정 사안의 잠재현안 평가를 시작한 '19년 이후 '20년에는 전체 잠재현안 도출 개수는 같으나 원자력안전기술원의 규제지침에서 잠재현안이 3배 이상 증가하였고, '21년에는 이전 년도 대비 전체적으로 감소하는 추세를 보였다. 특히, 21년은 원자력안전기술원의 규제지침과 미국 NRC의 Reg. Guide에서 각각 3건이 잠재현안으로 분류되어 분석되었으나 전체 현안 개수는 '19년과 '20년 대비 절반으로 감소하였다. 잠재현안의 내용적인 면은 '19년에는 원자로안전/안전해석/피동안전계통 등에서 현안이 도출되었고, '20년도에는 원자력안전기술원 규제지침의 확률론적 안전성평가 부분에서 많은 잠재현안이 도출되었으나, '21년에는 격납건물과 원자로 시설 등의 재료, 설계제한치 및 성능시험 방법론 개발에 대한 현안이 주로 도출 되었다. 가장 최근인 2021년 제·개정된 41개의 국내 안전기준 및 국외 참조기준에 대한 상세 검토결과는 다음과 같다. 발전소 영향범위 및 기술개발(상세검토) 필요여부에 따라 잠재리스크를 High, Medium, Low로 분류 하였으며, 최종 잠재리스크 분류 결과는 High 3건, Medium 3건, Low 35건이다. 잠재리스크가 High, Medium으로 분류된 건은 회사내 관련부서에 해당 사안에 대한 정보를 직접 제공하여 후속조치 계획수립에 활용하도록 조치하였다.

국내외 안전기준 제·개정 사안에 대한 상기 기술검토 결과를 통해 우리 회사가 관심을 갖고 대응해야 할 부분을 찾을 수 있었으며, 이를 바탕으로 발전소 기술기준 현안에 대해 좀 더 선제적으로 대처 해야할 것으로 판단된다.

APR1000 노심미용융 설계확장조건 사고 완화전략

DEC-A Mitigation Strategy for APR1000

황도현 · 이근성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한국수력원자력(주)은 국제원자력기구(IAEA) 및 서유럽규제자협회(WENRA)의 최신 규제 지침, 그리고 최신 유럽사업자요건(EUR) 등을 반영하여 중형급(1,000 MWe급) 3세대 원자로 수출형 원전 노형으로 APR1000 개발을 진행하고 있다. 이 논문에서는 APR1000 노심미용융 설계확장조건 사고(DEC*-A) 완화전략에 관한 내용을 제시하고자 한다.

APR1000은 5단계(Level 1~5) 심층방어(Defense in Depth, DiD) 개념을 토대로 설계되는데, 여기서 Level 3는 설계기준사고(DBA)에 대처하는 DiD-3a와 DEC-A에 대처하는 DiD-3b로 다시 세분화된다. 각 DiD 수준에 할당된 안전목표, 물리적 방벽에 대한 허용기준, 방사선 허용기준을 충족하도록 설계가 수행된다. APR1000 설계에서 특정 DiD 단계에 활용되는 안전계통은 합리적으로 실행가능한 한 다른 DiD 수준에 활용되는 안전계통과 독립적으로 설계된다.

APR1000에서 고려하는 DEC-A사고는 보수적으로 한국, IAEA, WENRA, EUR에서 제시한 총 13개의 DEC-A 사건을 모두 포함하며, 이 사건들은 아래의 3개의 그룹으로 분류된다.

- 예상운전과도(AOO) 또는 가장 빈번한 DBA 사고와 결합된 필요한 다중계열의 안전계통의 공통원인고장(CCF)
- 정상운전 중 기본적인 안전기능을 수행하는데 필요한 계통의 CCF를 포함하는 복잡한 특정 시나리오
- 초기사건(PIE)의 결과로 유발된 추가적인 고장을 포함하는 복합사고

APR1000의 DEC-A 사고 완화전략은 단일고장요건(SFC), 안전등급분류, 그리고 운전원 조치, 최종열침원, 전원공급 등에 관한 autonomy 요건을 만족하도록 개발되었다. DEC-A 사고 완화전략은 기본적으로 DEC-A 사고(DiD-3b) 전용 안전계통을 사용하여 발전소를 안전상태(Safe State)에 도달 및 유지시키는 것이나 특정 DEC-A 사고에 대응하는 설계기준 사고(DiD-3a) 대처용 안전계통이 사용 가능한 경우 사용할 수 있다. 예를 들어 완전급수상실사고(TLOFW)의 경우 안전주입계통(SIS)을 충전 및 유출운전(Feed and Bleed Operation)에 사용할 수 있으며, 여러 DEC-A 사고에 DBA사고 대처설비인 피동보조급수계통(PAFS)을 사용할 수 있다.

* DEC (Design Extention Condition): 설계확장조건

DEC-A는 노심미용융사고, DEC-B는 노심용융사고(중대사고)를 의미함

AOO (Anticipated Operation Occurrence), CCF(Common Cause Failure),

PIE(Postulated Initiating Event)

열병합발전 지역난방계통 방사능누설 감지방안에 대한 고찰

Study on Methods to monitor radioactivity leakage in Cogeneration Nuclear Power Plants

황도현 · 이근성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한국수력원자력(주)은 해외 원전수주 노력의 일환으로 지역난방이 가능한 원전에 대한 수요를 충족시키기 위해 국내 최초로 열병합발전소에 대한 기술개발을 진행하고 있다. 특히 2016년 체코는 신규 원전건설을 위한 기술정보요청서(RFI)에서 열병합발전 적용 설계에 대한 기술요건을 제시한 바 있고 2022년 듀코바니 5호기 원전 입찰요건에도 여전히 지역난방이 가능한 열병합발전 설계를 요구하고 있는 상황으로 향후 수출을 위해 열병합발전소에 대한 기술 확보가 필요할 것으로 예상된다.

열병합발전소는 2차측 터빈 추기의 일부를 지역난방용 열원으로 활용하는데 방사선 방호 측면에서 2차측에서 지역난방계통으로의 방사선 누출에 대한 설계 검증이 필수적으로 요구된다. 이 논문에서는 APR1000 노형에서 개념설계 중인 지역난방계통 방사선감시기의 위치, 측정범위, 설정치 수립을 위해 체코 Temlin 원전, 핀란드 Loviisa 원전에 대한 방사선감시기 해외설치 사례를 검토하고 감시기 위치, 종류 및 자동연동기능(Auto-Interlock)을 비교 검토하였다.

체코 Temline 원전에는 방사선감시기가 터빈 추기라인에 설치되어 있으나, 지역난방계통으로의 방사선누설을 실시간으로 감시하기 매우 어렵다. 반면 핀란드 Loviisa 원전에는 지역난방계통에 설치된 방사선감시기가 없다. 만약 액체방사선감시기가 지역난방계통 열교환기 출구측에 설치된다면 방사선누설에 대한 실시간 감시가 가능하며 필요시 자동연동신호에 의해 유로를 폐쇄시키도록 설계할 수 있다. 하지만 기존 원전에 설치된 2차측 방사선감시기가 사용된다면 위에서 설명한대로 실시간 감시가 어려워 자동연동기능 작동이 바람직하지 않으므로 운전원에 의한 수동 격리가 바람직하다.

지역난방계통에 대한 방사선감시기 측정 범위를 국내원전의 폐수처리계통을 기반으로 수립하고, 방사선감시기 설정치에 대한 예비계산을 수행하였다. 감시기 측정범위는 $3.70\text{E}-3 \sim 3.70\text{E}+3$ Bq/cc로 하한 제한치가 공정 및 유출물 방사선감시기(Process and Effluent Radiation Monitoring System)보다 10배 낮도록 설정하여 민감도 평가를 수행한 결과, 유출농도제한치(ECL)를 사용하여 계산된 설정치는 $2.60\text{E}-1$ Bq/cc로 측정범위 이내였으나, 지역난방계통 열평형도의 최대유량을 기준으로 추계통의 누설율을 사용하여 계산한 결과 하한 제한치를 만족하기 위한 최소 누설율이 최대유량의 56.7%로 계산되어 굳이 방사선감시기가 없어도 판단할 수 있는 수준으로 평가되었다. ECL을 사용하여 계산된 설정치인 $2.60\text{E}-1$ Bq/cc에 도달하기 위해서도 일반인의 연간선량한도를 고려할 경우, 지역난방수를 연간 730 kg을 마셔야 달성할 수 있는 수치로 기술적으로는 방사선감시기가 없더라도 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

원전에서 대량 혹은 조기 방사능 방출 실질적 배제의 증명
Demonstration of Practical Elimination of Large or Early Radioactive
Releases in Nuclear Power Plants

황도현

한국수력원자력(주) 중앙연구원

우리나라가 원전 수출을 추진하고 있는 체코, 영국, 폴란드 등의 유럽 국가뿐만 아니라 사우디, 요르단 등의 중동 및 아프리카 국가들도 원전 최상위 요건으로 국제원자력기구(IAEA) 및 서유럽규제자협의회(WENRA)의 안전요건 준수를 요구하고 있다.

최신 유럽사업자요건(EUR Rev.E)에서는 IAEA의 최신 안전기준(SSR-2/1) 및 기술문서(TECDOC-1791)의 개념을 그대로 수용하여 대량 혹은 조기 방사능 방출의 가능성을 실질적 배제(Practical Elimination)를 요구하고 있으며 EUR 2.1.2.5.B에서는 10가지 사고현상들(수소폭발, 대형 증기폭발, 원자로건물 직접가열, 대량 방사능 주입, 압력용기 고압파손, 사용후연료저장조 연료손상, 원자로건물 과압, 후기 원자로건물 손상, 원자로건물 우회사고 및 정지저출력상태에서의 중대사고)을 구체적으로 제시하여 그러한 현상을 포함하는 사고가 실질적으로 배제됨을 보여야 한다고 기술하고 있다.

이러한 현상들의 실질적 배제를 위해 일차적으로 각각의 현상에 대한 대처설비가 구비되어야 하며 실질적 배제의 성공 여부는 특정 물리적 현상에 대한 지식의 한계를 고려한 불확실성을 고려하여 결정론적 분석 및/혹은 확률론적 분석을 통해 물리적으로 발생 불가능(Physical impossibility)하거나 확률적으로 매우 희박(Extremely unlikely)하다는 사실을 증명해야 한다. 실질적배제의 증명 방법으로 두가지 방법 중 물리적 불가능성의 증명이 선호되며, 이것이 불가능한 경우 확률적 희박성에 대한 증명을 사용할 수 있다.

물리적인 불가능에 대한 증명은 아래의 고려사항들을 토대로 수용될 수 있다.

- 적절한 설계 혹은 조치로 인한 불수용 하중의 완전한 제거
- 최대 하중이 관련 구조물·계통·기기의 최소 저항력보다 현저히 낮음을 증명
- 실패할 수 없는 피동 고정설비

확률적 희박성은 결정론적 및 확률론적 분석을 통해 증명될 수 있는데, 결정론적 분석에서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- 실질적 배제는 대처설계가 1차적으로, 그에 따른 운전은 2차적으로 고려되어야 함
- 인적요인에 대한 고려
- 시나리오와 관련 불확실성
- 실질적배제를 달성하기 위한 대처는 내·외부 재해위험에 의한 사고에도 유효해야 함

국내·외 원자력발전소의 계속운전에 대한 법령 및 사례에 대한 고찰

A Review on Legislation and Case for Continued Operation of Nuclear Power Plants in Korea and USA

임혁순 · 함태규 · 강종호

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 주기적안전성평가(Periodic Safety Review, PSR)은 경년열화, 시설변경, 운전 경험 및 기술발전 등의 누적된 영향을 다루고 원자로 운영기간 동안 고도의 안전성을 보증하기 위해 일정 주기마다 14개 안전 인자에 대하여 원자력발전소의 안전성 평가를 수행하고 있다. 국내 원전의 경우 2030년 기준 10개 호기 원자력발전소가 설계수명이 완료되어 계속운전을 추진 중에 있다. 이를 위해 유효한 기술기준을 활용한 안전성관련 계통·구조물·기기에 대하여 운전경험 및 연구결과 등을 반영한 현행 기술기준을 적용하여 평가를 수행하여야 한다. 또한, 국내·외 계속운전의 관련 법령 비교 분석 등을 참조하여 계속운전의 인허가 조기 심사 및 승인 과정 중 활용하여 계속운전의 최적 안전성평가, 경제적 및 효율적인 설비 투자가 필요하다.

국내원전의 계속운전 안전성평가는 원자력안전법 시행령 제36조(주기적 안전성평가의 시기 등) ④항에 의거 원자로시설의 설계수명기간이 만료된 후에 그 시설을 계속하여 운전하는 경우에 대한 사항을 규정하고 있으며 주기적안전성평가 내용은 원자력안전법 시행령 제37조 ①항 및 시행규칙 제20조에 따른 14개 안전인자 68개 세부평가, 계속운전기간을 고려한 주요 기기에 대한 수명평가, 운영허가 이후 변화된 방사선환경영향 평가를 수행하여야 한다.

미국원전의 계속운전은(License Renewal, LR) 10 CFR Part 54(Requirement for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants)에 의하여 운영원전의 운영허가 만료 후 계속운전을 시행하고 있다. 계속운전을 승인받기 위해서는 계속운전 적기 신청은 10CFR Part 2, §2.109(Effect of Timely Renewal Application)에 의해, 발전사업자가 운영허가 만료일로부터 5년 전까지 계속운전을 신청하여야 한다. 이 절차에 의거 계속운전 신청서를 제출하는 경우 최종적으로 결정 될 때까지 기존 면허가 만료된 것으로 간주하지 않는다. 계속운전 신청 문서는 계속운전 인허가 갱신대상의 계통, 기기, 구조물에 대해 현행인허가기준(Current License Basis, CLB)의 준수여부, 경년열화평가 및 계속운전 기간 동안 현행인허가기준 준수 여부 등에 대한 발전설비 종합평가, 계속운전 신청서 검토 중 발생하는 현행인허가기준의 변경에 대한 사항, 설비수명평가, 계속운전과 설비개선 등에 대한 조치의무, 1회 계속운전 신청 시 20년을 초과하여 운영허가를 연장할 수 없음으로 계속운전 운영허가 기간, 발전사업자는 계속운전 운영허가 및 계속운전 관련법령에서 요구하고 있는 정보, 문서 등의 기록을 보존할 의무에 대한 기록 보존 의무 등을 평가하고 규제기관의 승인을 받아 계속운전을 수행하고 있다.

2020년 4월, 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)는 Reg. Guide 1.188(Standard Format and Content for Applications to Renew Nuclear Power Plant Operating Licenses)을 개정하면서 2차 계속운전 신청(Subsequent License Renewal for 20 years, SLR)에 관한 지침을 반영하였다. 현재, 미국 내 운영 중인 원전의 90% 이상이 계속운전 승인을 통해 60년으로 운영허가기간이 갱신되었으며 관련 법령에 따라 2차 계속운전 신청하여 80년 운영허가 승인된 원전은 Turkey Point 3,4호기(2019년 12월 승인) 등 6개호기 이다.

본 논문에서는 한국·미국 원자력발전소의 계속운전 관련 정의 및 용어, 국내원전의 계속운전 수행 시 관련법, 안전성평가 내용, 미국원전의 계속운전 관련 규정, 계속운전 신청서 서류 및 계속운전 사례 등 비교분석하여 기술하였다.

원전 수소제어설비 수소제거율 평가방법론 비교

A Comparison of Hydrogen Depletion Rate evaluation methodology on the Passive Autocatalytic Recombiner

성제중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 수소폭발을 예방하고 효율적으로 대응하기 수소제어설비가 필요하며, 국내 원전의 경우 후쿠시마 후속조치 및 계속운전 안전성 증진사항 등을 근거로 피동촉매형 수소재결합기(PAR, Passive Autocatalytic Recombiner)가 설치되었다. 원전에서는 설계기준사고(DBA, Design Basis Accident) 및 중대사고(SA, Severe Accident) 발생시 급속과 물 등의 화학반응으로 수소가 생성되어 원전 격납건물 내부의 수소농도가 증가할 수 있다.

이러한 사고발생으로 원전 내부의 수소농도, 온도 및 압력이 반응조건 도달시 PAR는 촉매 반응에 의해 수소를 수증기로 전환하고, 피동적으로 촉매체의 발열반응 및 온도차에 의한 자연대류로 수소의 지속적인 제거가 전원없이 가능하므로 원전 안전성 향상에 유용하다.

PAR의 수소제거율 평가방법에는 PAR의 입출구 농도변화를 이용하는 실험식 및 이를 바탕으로 구성된 회기방정식, 수소질량의 변화량의 합을 이용하는 방법 등이 있다. 특히 수소질량의 변화량을 이용하는 방법은 평균수소농도를 이용한 초기 실험챔버내 주입된 수소질량에서 PAR에 의해 제거되고 남은 잔여 수소질량과 수소농도 측정용 샘플링 가스량을 제외하면 해당 실험챔버내에서 PAR에 의해 제거된 수소제거율이 계산가능하다.

원전 적용설계의 경우는 수소제어분석시 설계 여유도를 확보하도록 가장 보수적인 수소제거율 상관식을 이용하나, 실제 원전에서는 PAR 고유의 수소제거율에 따라 수소농도가 감소하므로 정확한 수소제거율 평가방법론을 적용하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 PAR 공급사 및 해외사의 수소제거율 평가방법론을 분석하여, PAR 입구 및 출구 수소질량 변화량을 통한 수소제거율을 이산화하여 수소농도 변화량을 통한 수소제거율 평가방법과 동일함을 보였으며, 실제 수소제거율 실험을 통하여 취득된 데이터를 이용하여 평가하였다. 평가결과는 PAR 수소제거율 신뢰성 향상 자료로 활용될 예정이다.

중수로용 37봉 개량연료의 국내 원전 적용 및 효과

Application and Improvement of Modified 37 Element Fuel Bundle in Domestic CANDU 6 Reactor

박동환, 김영애, 류의승

한국수력원자력(주) 중앙연구원

천연우라늄을 연료로 사용하고 중수를 냉각재 및 감속재로 사용하는 중수로 원전은 전 출력운전 중 연료의 장전 및 인출이 가능하며, 평균 2개 채널 16개 연료다발을 노심에 장전하고 인출한다. 연료장전 및 인출을 용이하게 하기 위하여 가압경수로의 압력용기에 해당하는 칼란드리아는 수평으로 배치되며, 칼란드리아 내에 380개의 튜브형 연료관이 구성된다. 1개의 채널당 총 12개의 연료다발이 채워지며, 채널당 교체되는 연료다발은 8개다발이다. 중수로원전은 운전이력이 증가함에 따라 고온고압의 냉각재와 고에너지의 중성자 조사에 따라 연료가 장전되는 연료관에 재료적 변형이 발생한다. 조사크립이 대표적인 연료관 변형 중에 하나인데 최초 설치 대비 경년열화이후 연료관의 직경이 운전연수에 따라 선형적으로 증가한다. 이러한 경년열화 현상의 영향으로 연료를 냉각시키는 냉각능력이 감소하고, 이에 따라 연료손상방지를 위한 여유도가 축소되어 발전소의 전출력운전에 영향을 끼친다.

상기의 경년열화에 따른 연료의 냉각능력 개선을 위하여 2012년부터 경년열화조건에서 냉각능력이 향상되는 중수로용 개량연료(37M, Modified 37 Element)를 도입, 개발하였다. 캐나다의 온타리오전력사(OPG)와 공동으로 수행된 본 연구는 연료관 직경방향 확관에 따라 연료를 냉각시키는 냉각재가 연료 상부로 우회하는 것을 개선하여 연료의 냉각능력을 향상시키는 연료로서, 다양한 확관크기에 대하여 임계열속시험을 수행하고 임계열속상관식을 개발하였다. 본 결과를 활용하여 국내 중수로원전을 대상으로 연료교환기 양립성 평가, 시범연료장전 및 장전 후 연료다발 육안검사, 안전해석을 수행하였다. 원자력 규제기관의 수년간에 걸친 시험결과 분석, 기술적 검토를 통하여 최종적으로 2019년 12월 본 중수로용 개량연료의 안전성분석 결과에 대하여 인허가를 득하였다. 또한 2021년 6월 개량연료의 중수로원전에 대한 추가적인 안전여유도 평가결과에 대하여 규제기관의 승인을 완료하였다. 2019년 12월 최초 중수로용 개량연료를 장전한 이후로 2022년 7월에 국내 모든 중수로원전에 장전을 완료하였다. 본 성과를 통하여 국내 중수로원전은 3개호기 각각에 대하여 연간 1% 이용율을 추가 확보할 것으로 평가되었다.

금속파편 감시시스템의 오경보 사례 분석

Analysis on the false alarm cases of loose part monitoring system

허용호

한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소

원자력발전소의 금속파편 감시시스템(LPMS, Loose Part Monitoring System)은 핵증기공급시스템의 구조물에 금속 이물질에 의한 충격이 발생시 이를 감지하기 위한 설비이다. 충격신호의 측정에는 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프에 설치된 가속도 센서를 이용하며 일정 이상의 충격이 발생시 내부의 판별 알고리즘의 통과 여부를 판별하고 필요시 경보신호를 발생시키게 된다. 경보신호가 발생하게 되면 운전원들은 경보신호의 진위여부 확인 및 후속조치를 수행하게 된다.

발전소의 기동 및 정지, 시험 수행 등 원자로 냉각재의 온도와 압력이 변하거나 기기나 시스템의 운전조건이 변하는 경우 실제 금속파편이 아닌 다양한 요인에 의해 충격신호가 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 오경보 사례들을 소개하고 경보신호의 발생 조건 및 신호분석을 수행하였다. 원자로 냉각재의 온도 및 압력 변화, 증기발생기 급수유로 변경, 원자로 냉각재 펌프의 기동 및 정지 등의 다양한 요인들에 의한 금속파편감시시스템의 오경보 사례들을 소개하였다. 경보가 발생한 채널의 시간파형, 인접한 채널들의 시간파형 전파 특성, 주파수 스펙트럼, 시간-주파수 분석 등의 기법을 적용하였으며, 실제 충격에 의해 발생한 경보신호와의 비교분석을 수행하였다.

액화수소 저장탱크 누출 및 Pool 형성에 관한 위험성 평가

A Risk Analysis for Leakage and Pool Formation of Liquefied hydrogen Storage Tank

김수현 · 이민정 · 이재훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

천연가스의 경우 액화기체의 도입은 필수적이었다. 초기에는 천연가스가 기체 상태로 활용되었으나 점차 LNG로 대체하여 사용되어지고 있다. 이와 같은 관점에서 보자면, 수소 경제가 성장하기 위해서는 액화수소(LH₂)의 대규모 생산, 저장 및 활용이 필수적이다. 액화수소는 현재 인류가 당면하고 있는 에너지 문제와 환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 에너지원으로서 주목받고 있으며 기체수소에 비해 대용량의 수소를 저장할 수 있다는 장점을 지닌다. 또한 대기압 조건에서 저장이 가능하기 때문에 고압 기체 저장 방식에 비해 안전성이 높고, 화학적 방법에 비해 고 순도로 저장할 수 있다는 장점이 있다.

수소액화 파일럿 플랜트(0.5ton/day)에서 생산된 액화수소를 저장 및 공급하기 위해 액화수소 저장탱크를 개발 중에 있다. 현재 개발 중인 액화수소 저장탱크는 기존 압력용기 형상(실린더형, 구형)의 한계점인 낮은 공간효율성을 극복하여 인프라 구축비용을 포함한 경제성 측면에서 큰 장점을 지닌다. 그러나 수소액화 플랜트에서 액화수소 저장탱크는 가장 많은 유체를 저장하기 때문에 저장탱크 및 주변 설비에서 누출이 발생할 경우 위험도가 가장 큰 시스템이라 할 수 있다. 따라서 액화수소 저장탱크 운전 시 발생 가능한 모든 위험성(Hazards)을 정성적 및 정량적으로 평가하여 분석하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 액화수소 저장탱크 주변부에서의 누출 시나리오를 구성하였고 상용으로 개발된 3D 위험성 평가 해석 프로그램을 활용하여 액화수소 누출 시 Pool 형성 거동과 폭발범위를 예측하였다.

본 연구는 2019년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (19IHTP-B153609-03)

수소충전소용 고압수소배관 개발 및 수소취성 연구
Study of Hydrogen Brittleness and High Pressure Hydrogen Pipe
Fabrication for Hydrogen Station

서호성 · 김정환 · 이민경 · 이화영 · 이재훈*

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소충전소에서 사용되는 고압수소배관의 제조기술 확보와 국산화 및 안전성 확보를 위하여 개발된 합금의 수소취성도 및 수소취화에 따른 물성평가를 진행하였다. 수소취성도의 경우 고압수소를 이용한 디스크파열시험을 진행하였으며, 수소취성지수 값을 계산하여 내수소취성에 만족하는지 확인하였다. 수소취화에 따른 물성평가의 경우 전처리 작업을 통해 시편에 수소를 주입시키고, 인장시험을 진행하여 기계적 성질인 인장강도 및 항복강도(변형률-응력 그래프의 0.2%), 연신율 등을 측정하였다. 또한, 수소취화의 정도를 확인하기 위해 주사전자현미경을 이용하여 인장시험 이후 시편의 파단면을 측정하였으며, 개발된 배관의 물성평가를 위하여 수압시험을 진행하였다. 디스크파열시험을 통하여 개발된 배관의 수소취성지수는 내수소취성을 만족하는 것을 확인할 수 있었으며, 인장시험으로 얻은 Strain-Stress 곡선의 인장강도 값은 수소취화에 따른 차이는 크게 보이지 않았으나, 파단면의 분석결과 시편의 끝 부분에서 수소취화에 따른 취성파괴를 확인 할 수 있었다. 수압시험의 경우, 개발강종과 비교군 모두 2000bar까지 견디는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (N 20203030040020)

수소충전소 거래량 산출 방법에 관한 연구

A Study on the Method of Calculating the Transaction Quantity in Hydrogen Charging Station

최진영 · 김민주 · 이화영 · 이재훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

국내 수소충전소 구축량은 2019년 대비 2020년 31% 증가하였으며, 2020년 대비 2021년에는 25% 증가함으로써 증가 추세를 유지하고 있다. 수소충전소 인프라 확대에 대응하여 수소 거래의 투명성을 유지하기 위해서는 수소의 계량 오차를 최소화하여 공급자와 소비자 간의 신뢰도를 확보해야 한다. 또한 수소의 특성상 대기 중 폭발범위는 4~75%로 매우 넓고, 최소 점화 에너지는 약 0.02 mJ로 매우 낮기 때문에 과충전으로 인한 폭발사고를 예방하기 위해서도 수소의 계량 정확도를 높이는 것이 중요하다.

현재 수소충전소의 상거래는 사업자와 사업자 간 거래 및 사업자와 개인 간 거래 2가지의 형태로 이루어지고 있다. 사업자 간 거래는 체적 기반 산출 방식을 활용하고, 사업자와 개인 간 거래는 질량 기반 산출 방식을 활용하는 등 두 거래 방식이 상이함에 따라 수소 거래량의 오차가 우려된다. 이와 관련하여 국제법정계량기구(OIML)에서는 수소충전소의 계량에 관한 허용 오차 범위를 제시하였으며, 미국, 일본 등 해외에서도 수소 계량 정확도 향상을 위해 OIML의 허용 오차 범위를 준수하거나 기준을 개발 및 적용하고 있다. 반면 국내에서는 관련 기술 및 장비의 부재로 국내에 적합한 오차 범위를 도출하지 못한 상황이다.

이에 본 연구에서는 국내 수소충전소의 거래 현황을 조사하고, 수소 거래량 오차를 줄이기 위하여 새로운 유형의 수소 거래량 산출 방법을 제시하였다. 해당 산출 방법을 질량 유량계 측정 결과와 비교 분석함으로써 수소 거래의 기초 가이드라인을 제공하고자 하며, 최종적으로 보다 정확한 거래량 산출 방법을 정착시키고자 한다.

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20202910100060)

수소충전소 방호벽 폭발 구조 안전성 평가 시뮬레이션 방안 연구

A Study on the Safety Evaluation Simulation Method for the Explosion Structure of the Barrier at a Hydrogen Refueling Station

김정훈 · 김광석* · 이경식

한국가스안전공사 가스안전연구원, *한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

수소 경제 활성화 및 수소충전소 보급이 확대됨에 따라 수소충전소 구축이 빠르게 증가하고 있어 국민생활 안전과 관련된 충전소의 안전성을 향상하기 위해 사고예방을 위한 안전관리체계 강화의 필요성이 있다. 방호벽은 수소충전소의 폭발 사고를 대비한 피해저감 설비로 충전소 이용자, 근무자 등을 보호하기 위해 충전소 내 보호시설이 주요설비로부터 30m 이내 있거나 사람을 수용하는 건축물이 있는 경우 주요 가스설비 주변에 방호벽을 설치하도록 했고 제기능이 가능하도록 구조적 성능이 확보되어야 한다. 하지만 현재 수소충전소의 방호벽 설치 기준은 과학적 근거가 부족한 상태로 충전소 내에서 발생 가능한 폭발하중에 대한 구조 안전성 평가 검증이 필요하다.

본 연구에서는 수소충전소 방호벽의 구조안전성 평가를 위해 폭발 실증시험과 폭발구조 안전성 평가 시뮬레이션을 수행하고 있다. 이 논문에서는 다양한 폭발 시나리오를 검토할 수 있는 폭발 구조해석 시뮬레이션으로 방호벽의 구조 안전성 평가를 할 수 있는 방안에 대한 연구내용이다. 폭발 구조 안전성 평가 시뮬레이션은 정성적 위험성평가 시나리오를 도출하여 폭발 하중이력을 해석이나 피해영향해석으로 예측한다. 예측 된 폭발 하중이력은 구조해석 하중조건으로 입력이 되어 폭발 구조해석을 수행하게 된다. 폭발 구조해석에 최적화된 LS-Dyna 소프트웨어를 이용하여 폭발 구조해석 시뮬레이션을 실시하기 위해 필요한 해석 대상 방호벽 체원 설정, 폭발하중에 대한 고려 방안, 폭발하중에 의한 구조물 거동 등을 검토 및 분석을 수행하였다.

향후 다양한 방호벽 폭발 실증시험과 폭발 구조해석 시뮬레이션을 통한 구조 안전성 검증을 통해 방호벽 설계 기준을 개선 할 계획이다.

본 연구는 한국에너지기술평가원의 연구비 지원으로 수행되었습니다 (과제번호 : 20215810100020).

냉각탑 수로에서 에너지 생산을 위한 저낙차 수차의 설계 및 수치해석
Design and Numerical Analyses of Low-head Hydro Turbines for
Energy Production from Cooling Tower Canal

삼수딘 모하메드 무르시드^{***}, 김진혁^{**}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

요약

Hydrokinetic energy is an easily available source of renewable energy that can be generated from run-off-the river, agricultural and industrial waterways, tailwater channels, and other shallow water passages using low-head hydraulic turbines. The hydrokinetic energy available at the cold water canal of cooling towers is exploited by developing and testing several hydraulic turbine designs using Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling. A horizontal-axis screw turbine, horizontal and vertical axis savonius turbine, tubular axial turbine, ducted axial turbine and a inclined kaplan turbine are studied for their design feasibility and performance. The turbines are designed based on the installation site operating conditions and the constraints on head and turbine diameter for a safe operation of the cooling tower. The inclined Kaplan turbine design is selected based on its efficient performance by meeting all the site constraint conditions and targeted power. The presented turbine designs can be considered for power production based on the available site conditions and economical viability.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20217410100010, 중대형 CHP 냉각탑 미활용 에너지 활용 기술 개발).

비속도 별 30MW급 프란시스 수차 주요 구성품 간 상관관계 연구
A Study on the Correlation of Major Components for Francis Turbine at
Various Specific Speeds of a 30MW-Class

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

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

^{***}(사)한국수력산업협회 연구사업부

^{****}한국수력원자력(주) 수력연구교육센터

요 약

본 연구는 국내 수력발전소 내 프란시스 수차의 수명 연한이 도래함에 따른 대규모 교체 수요에 대비하고 국산화를 통한 국내외 수력 시장 개척을 위해 수행되었다. 국내 수력 발전소에 설치된 프란시스 수차의 비속도 범위는 약 90에서 330이며 각 수력 발전소의 비속도 범위는 상이하다. 따라서 노후화된 프란시스 수차의 교체 수요를 대비하기 위해서는 전 비속도 구간에 대응할 수 있는 데이터베이스를 구축하여야 한다. 이를 위해 프란시스 수차의 주요 구성품인 스파이럴 케이싱, 스테이 베인, 가이드 베인, 러너, 그리고 드래프트 튜브의 형상 변수를 정의하였다. 이후 국내에서 보유하고 있는 비속도 120, 210, 300급 프란시스 수차 정보를 형상 변수로 변환하고 이를 무차원화하여 상관관계를 구축하였다. 비속도 별 프란시스 수차 주요 구성품의 상관관계에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 수치해석을 통하여 수력학적 성능을 검토하였다. 수치해석을 위해 상용 코드인 Ansys CFX-21.1을 사용하였으며, 삼차원 Reynolds averaged Navier Stokes (RANS) 방정식을 사용한 정상상태 유동해석을 수행하였다. 난류 모델은 Shear Stress Transport (SST)을 사용하여 주요 구성품의 벽면 및 그 외 영역에서 발생하는 유동을 정밀하게 예측하였다. 격자 수에 따라 수치해석 결과가 변하는 문제를 해결하기 위해 Grid Convergence Index (GCI) 기법을 통해 격자의 존성이 제거된 최적의 격자계를 도출하였으며 이를 사용한 수치해석을 수행하였다. 상관관계를 통해 구축된 데이터베이스 기반 비속도 120, 210, 300급 프란시스 수차의 수치해석 결과 약 90%의 수력학적 효율 및 30MW급 출력으로 프란시스 수차가 작동함을 확인하였다. 이때 프란시스 수차의 비속도 범위 중 양 끝에 인접한 비속도 120, 300급의 수차보다 중간에 위치한 비속도 210급 수차가 더 높은 효율로 작동하였다. 비속도에 따른 프란시스 수차 주요 구성품 간 상관관계 특성을 분석한 결과 비속도가 커질수록 유량은 증가하고 낙차는 감소함에 따라 프란시스 수차의 모든 구성품의 크기와 가이드 베인의 개도가 증가하였으며 러너의 경우 자오면의 형상이 원심에서 사류형으로 변화하였다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021021010003D, DB기반 수차 개발 공공플랫폼 구축)

미활용 공간을 활용한 압축공기 에너지 저장 장치 공정 개발 연구

A study of Compressed Air Energy Storage (CAES) process development using unused space

류주열 · 황성현 · 박성호 · 권도현 · 이창형 · 박혜민

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

최근 대외 정세 변화에 따라 액화천연가스 및 석유 가격 변동으로 에너지 자원의 물리적 공급에 차질이 발생함에 따라 국내 에너지 안보가 위협받고 있어 에너지 자립을 위한 연구 개발의 필요성이 강조되고 있다. 또한 국내 태양광, 풍력 등과 같은 친환경 재생에너지 보급의 확산으로 분산 전원의 필요성과 함께 에너지 수요 관리를 위한 에너지 저장 장치의 필요성이 지속적으로 논의됨에 따라 국내에서도 단기, 중기 및 장기 에너지 저장 장치를 개발하기 위한 노력을 이어 나가고 있다. 대표적인 단기 및 중기 에너지 저장장치로 슈퍼캐패시터, 바나듐레독스흐름전지 (VRFB) 등의 연구 개발과 실증이 진행 중이지만, 장주기 (Long-Duration) 에너지 저장 장치의 경우 지형적 제약 있거나 대규모 투자가 필요하여 연구 개발에서 실증까지 연계 하는데 많은 어려움이 존재한다. 따라서 국내의 지형적 환경과 석탄 발전의 점진적 폐쇄에 다른 좌초자산을 활용한 장주기 에너지 저장 장치의 개발을 통해 실증 범위를 순차적으로 확대해 나갈 필요성이 있다. 대표적인 장주기 에너지 저장장치로 양수발전이 존재하나 지형적 제약이 존재하며, 외부로부터 천연자원을 대부분 수입하는 국내 에너지 산업의 자립도를 개선하기 위해서는 유용성이 뛰어난 공기를 이용한 에너지 저장 장치가 적합하다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 심야 전기 또는 재생에너지를 이용해 공기를 압축 저장한 뒤, 첨두부하시 압축된 공기로 전력을 생산하는 방식의 에너지 저장 장치를 개발하기 위해 국내에서 사용하지 않는 미활용 공간(터널)을 이용한 공정 개발을 수행하였다. 고압의 공기를 터널 또는 암반에 저장할 경우 공기 투과(Leak) 현상으로 장시간 저장에는 한계가 발생할 수 있기 때문에 이를 보완 할 수 있는 방안이 필요하다. 따라서 공기를 특수 제작한 용기에 저장하고, 공기보다 상대적으로 입자가 큰 물의 이동을 통해 공기의 투과를 최소화 할 수 있는 공정을 적용하였다. 제안 공정의 개발을 통해 충/방전 효율(Round Trip Efficiency, RTE)을 60% 까지 상승시키는 동시에 국내 미활용 국토의 효율성을 증대시키는 친환경 장주기 에너지 저장장치의 개발 가능성을 확인하였다.

감사의 말 : 이 논문은 2022년도 중부발전의 지원을 받아 수행된 연구임(미활용 터널 사용을 위한 압축공기 에너지저장장치 개발)

상사법칙에 기초된 다른 전력 주파수를 갖는 단일채널펌프의 수력학적 설계
Hydrodynamic Design of a Single-channel Pump with the Different
Power Frequency based on the Similarity Law

느엔 특영^{***}, 노민수^{***}, 김성^{**}, 정순영^{**}, 김진혁^{***}

^{*}과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학전공

^{**}한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

요약

Recently, single-channel pumps have become popular for wastewater treatment in Korea. To be able to use this kind of pump in other countries with a different power frequency, this study employs the similarity law to redesign the impeller shape of the Single-channel pump optimized from the previous work. The numerical simulations are carried out by using steady and unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the shear stress transport reattachment modification (SST $k-\omega$) turbulence model. The hydraulic efficiency curves and internal flow field including contours and streamlines are carefully investigated and analyzed. An experiment based on the 11th API610 standard is used to validate numerical simulation results. The new pump model satisfies the design criteria with a minimum total head coefficient at the design flow rate. When compared to the reference model, the new model's hydraulic performance is decreased under low flow rate conditions but its efficiency is increased under high flow rate conditions. At low and design flow rates, the sweep area of the unsteady radial force distribution in the new model is slightly larger than that of the reference model while at high flow rate condition shows the opposite. However, as compared to the reference model, the distance between the center of the radial force and the origin of the new model is significantly reduced, particularly at the design flow rate condition. Furthermore, the unstable radial force values are consistent with the steady radial force results. Moreover, the pressure oscillation of the new model is decreased as compared to the reference model. The new model clearly suppresses the non-uniform high-pressure zone induced by the rotor-stator interaction around the impeller outlet. The new model's improvements are mostly due to the enlargement of the cross-sectional areas of both the impeller and volute channels.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(기획재정부)의 재원으로 한국생산기술연구원의 지원(JB220011, 해외진출형 오페수 이송용 고성능 수중펌프 개발)을 받아 수행된 연구임

LP가스 환기 양호장소 판단을 위한 전산유동해석 및 환기속도 시험 비교 분석

Comparative Analysis of CFD and Ventilation experiment for Determination of Good Place for LP Gas Ventilation

이민정 · 김수현 · 이재훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

전통시장 및 상점가 육성을 위한 특별법의 상업기반시설의 현대화 사업에 따라 정부와 지방자치단체를 중심으로 전통시장 현대화 사업을 통한 개량사업이 활발히 진행되고 있다. 전통시장 현대화 사업의 대표적인 사례로 시장골목에 아케이드(지붕)을 설치하는 것이 있으며, 최근 주변 전통시장에서 어렵지 않게 볼 수 있다. 기존 전통시장 내부는 실외 구역으로 볼 수 있었으나, 아케이드 설치에 따라 실외와 실내의 구분이 모호해졌다. 액화석유가스(이하 LPG)의 안전관리 규정에 해당하는 KGS CODE FU431 ‘용기에 의한 액화석유가스 사용시설의 시설, 기술, 검사 기준’에 의하면 LP용기는 용기의 보호를 위하여 화기를 취급하는 장소를 피하여 환기가 양호한 옥외에 설치하도록 규정하고 있다. 이에 따라 한국가스안전공사에서 실시하는 LP용기의 완성검사에서 아케이드가 설치된 전통시장 내부에 설치된 LP용기의 설치 가능여부에 대한 이슈가 발생되었다. 전통시장의 환기는 자연환기 주로 발생할 수 있음에 따라 본 연구에서는 환기구의 위치에 따른 환기 속도를 측정하여 환기가 적절한 장소를 확인하고자 하였다. 이를 위해 전통시장 현장조사를 통한 현장 파악, 환기 속도 측정을 위한 전산유동해석, 환기구의 위치를 조절하였을 때의 환기속도를 측정하여 환기 양호한 구조에 대해 파악하였다. 이를 통해 환기구의 높이차가 클수록 자연환기가 활발히 이뤄질 수 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 전통시장 내부에 환기의 효과성을 확인하였다. 전통시장은 서민 경제의 기반 중 하나로 무조건적으로 LP용기 설치를 제한할 수 없음에 따라 효과적이 대안책을 제시하고자 하였다. 본 연구를 통해 전통시장 내부에서 사용되는 LP용기의 안전관리 효율 증가에 기초자료로 활용될 수 있도록 기대한다.



포 스테 발 표

양이온 교환막 연료전지 적용을 위한
고성능 철-코발트/탄소 나노 섬유 촉매 연구

A high electrochemical performance of N,S co-doped FeCo nanoparticles
encapsulated three-dimensional (3D) porous carbon nanofibers for
application of PEMFC

손동균 · 이유현 · 여서현 · 김문수* · 이기백*

영남대학교 화학공학과

The depletion of fossil fuels, CO₂ emission, and other environmental awareness intensively propel the progress of hydrogen society. In particular, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are the most promising attention to obtain the clean hydrogen energy. Currently, Pt-based electrocatalyst is regarded as the benchmark for ORR side in the PEMFCs. However, the high cost, scarcity, and poor durability of this electrocatalyst limits the large-scale application and commercialization. Of course, state-of-art non-Pt-based electrocatalysts is being consistently studied to overcome aforementioned problems.

Herein, we intensively developed a N, S co-doped FeCo NPs supported on the carbon nanofibers (CNFs) via a 2-step process: electrospinning and carbonization techniques. In addition, the catalyst was co-doped with N and S, which lead to highly improving the electrochemical performance, thereby impressively displaying 5.32mA cm⁻² @ 0.4V vs. RHE of the half-cell.

포타슘 이온 배터리 적용을 위한 탄소 나노 섬유 지지체 기반의 환원된
산화 그래핀이 코팅된 니켈-셀레나이드 나노 입자 연구

Study on the rGO-coated NiSe_x NPs supported by carbon nanofiber for
application of potassium-ion battery

이유현, 손동규, 여서현, 김문수*, 이기백*

영남대학교 화학공학과

Globally, alternative Li-ion batteries (LIBs) as a key solution to hold a lead for the resources war have been still required on account of the depletion of the resources. Among the next-generation batteries, potassium-ion battery (PIBs) is the most promising energy storage and conversion system as an alternative attention with earth-abundance and reasonable energy density. However, it cannot be still commercialized since the larger ionic radius of potassium (1.38 Å) than that of lithium (0.76 Å) leads to poor electrochemical performance.

In this study, we pioneered the way to overcome the limitation, considering rGO- NiSe_x -CNF composite prepared by several steps. At the first time, carbon nanofibers were prepared with Ni and GO as potentialities to be developed to rGO-coated Ni NPs on the CNF by the carbonization, subsequently synthesized as the rGO- NiSe_x -CNF composite by the selenization. In terms of physicochemical /electrochemical characteristics, rGO- NiSe_x -CNF composite displayed that it led to the improvement of specific capacity and durability of PIBs (276 mAh g^{-1} @50 mA g^{-1}) during 30cycles.

해수 분해를 위한 비늘 구조의 구리 코발트 탄산염 수산화물/질소 결핍
부위가 있는 흑연질화탄소 전기 촉매 개발

A novel copper cobalt carbonate hydroxide needles on graphitic carbon
nitride with nitrogen deficient sites as an ultra-stable electrocatalyst for
sea water splitting

서린마리아니티아요한 · 손동규 · 이유현 · 여서현 · 이기백*

영남대학교 화학공학과

Scaling up electrochemical water splitting is nowadays affordable for hydrogen economy implementation. The most advantageous electrocatalytic water splitting has considerable potential to produce clean H₂ with zero carbon emissions. The overall water splitting electrolysis can be divided into two half-cell reactions: the anodic oxygen evolution reaction (OER) and the cathodic hydrogen evolution reaction (HER). Both reactions are slow and to overcome the limitations, electrocatalysts is the only way to boost the kinetics of OER and HER. Todate, Ru/Ir and Pt are the state art of materials for the OER and HER but their high cost, scarcity and poor stability limit their large-scale application. Recently, metal oxide and carbon based polymer composite have been reported as potential material to maintain stability for long term.

In this work, novel copper cobalt carbonate hydroxide and graphitic carbon nitride (CuCo-CH)/g-C₃N₄ were developed by facile hydrothermal method. The morphology of the sample were characterized by filed emission transmission electron microscopy (FE-SEM), transmission electron microscope (TEM). The crystallinity and chemical properties are studied by the X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). As expected, when serving as an OER and HER catalyst in 1 M KOH aqueous solution, the CuCo-CH/g-C₃N₄ presents a high activity with lower overpotential at a current density of 20 mA cm⁻² and a small Tafel slope, as well as a high durability observed at 24 h of a chronopotentiometric tests. Their excellent performance was also investigated under artificial sea water (ASW). Furthermore, an efficient and stable alkaline-electrolyzer using the CuCo-CH/g-C₃N₄/NF as both the cathode and anode achieve a low voltage at the current density of 10 mA cm⁻² and maintain robust stability for about 100h.

APR1000 피동보조급수계통 설계개발

Development on Passive Auxiliary Feedwater System for APR1000

황도현

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한국수력원자력(주)은 국제원자력기구(IAEA) 및 서유럽규제자협회(WENRA)의 최신 규제 지침, 그리고 최신 유럽사업자요건(EUR) 등을 반영하여 중형급(1,000 MWe급) 3세대 원자로 수출형 원전 노형으로 APR1000 개발을 진행하고 있다. APR1000에는 공학적안전설비(ESF)로서 기존의 능동형 보조급수계통 대신 피동보조급수계통(Passive Auxiliary Feedwater System, PAFS) 설계가 도입된다.

PAFS의 계통 구성은 각 증기발생기당 물리적으로 독립된 2개 Division으로 구성되고, 각 Division에는 50% 용량의 열제거 성능을 가지는 피동응축열교환기(Passive Condensation Heat exchanger, PCHX)를 포함한다. PAFS 각 계열은 주증기배관 내 주증기격리밸브(Main Steam Isolation Valve, MSIV) 전단에서 분기되어 증기를 공급하는 증기공급관, 공급된 증기를 냉각시켜 응축하는 PCHX, PCHX 튜브를 통하여 증기를 응축시키기 위한 피동응축냉각탱크(Passive Condensation Cooling Tank, PCCT), 주급수 배관과 연결되어 PCHX에서 회수되는 응축수를 증기발생기 하부에 연결된 이코노마이저(Economizer) 노즐로 공급하는 피동보조급수공급관, 그리고 정상운전 시 PAFS 계통을 차단하고 사고 시 계통 운전을 기동하는 격리밸브 및 체크밸브 등으로 구성된다. 또한 계통 신뢰도 향상을 위해 비안전 능동설비로서 각 증기발생기당 대체보조펌프(Alternative Auxiliary Pump, AAP) 1대와 PCCT 및 응축수저장탱크(CST)와 연결된 흡입/토출관, 증기발생기 직접 주입관이 제공된다.

사고시 PAFS가 기동되면 증기발생기 튜브를 통해 1차측으로부터 전달된 붕괴열이 PCHX에서 PCCT 저장수로 전달된다. PCCT 체적은 AOO, DBA, DEC-A* 발생 시 원자로냉각재계통의 온도/압력을 14시간 이내에 정지냉각진입조건인 177°C(350°F)/3.1 MPa(450 psia)까지 도달하도록 하는데 충분하도록 설계된다. PCHS는 한 계열당 2개의 열교환기 번들로 이루어져 있으며, 각 번들은 45개의 수평 U-자형 튜브의 입출구 헤더로 구성된다. PAFS 증기공급관에는 두 개의 증기격리밸브가 설치되어 열교환기 튜브 누설 시에 계통을 차단한다. 피동보조급수공급관은 보조건물 내의 주급수차단밸브 및 주급수관의 체크밸브의 후단의 주급수 배관에 연결되며, 증기발생기 이코노마이저 노즐을 통하여 증기발생기로 회수된다. 피동보조급수공급관에는 서로 다른 작동방식을 갖는 두 개의 응축수격리밸브가 병렬로 연결되어 있어 정상운전 시 증기발생기로의 급수공급을 차단하고 체크밸브는 증기발생기로부터 PAFS 계통으로의 역류를 방지한다.

* AOO (Anticipated Operation Occurrence): 예상운전과도

DBA (Design Basis Accident): 설계기준사고,

DEC (Design Extention Condition): 설계확장조건, DEC-A는 노심미용융사고

소형모듈원자로 최적 증기터빈 조합에 관한 연구

Study on Optimal Combination of Steam Turbine for Small Modular Reactors

황도현 · 이근성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전기출력 300~500 MWe 이하로 기존 중·대형 원전에 비해 출력이 낮고, 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등 원자로를 구성하는 주요 기기들을 단일 원자로 압력용기 내에 배치하는 일체형 원자로 개념의 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)가 최근 탄소중립의 대안으로 주목을 받고 있다. SMR은 기존 원전보다 건설 기간이 짧고, 건설 비용도 상대적으로 저렴하며, 피동 안전장치 설계를 통해 운전원의 개입이나 조치를 최소화함으로써 고장의 위험을 낮추어 안전성이 향상된 장점이 있다. 이 논문에서는 단일 혹은 복수의 SMR 출력 및 연계방법에 따른 최적 증기터빈 조합에 관한 연구내용을 제시하고자 한다.

SMR을 포함한 원전의 열출력 및 전기출력이 정해지면, 그에 따라 증기발생기 출구에서의 증기 매개변수(터빈입구 증기 매개변수)들이 정해진다. 증기발생기 출구 매개변수들은 SMR 설계방식에 따라 다양한데 주기(cycle)의 냉각중단 매개변수들은 발전소 경계 특정 조건(예: 수냉/공냉 복수기, 냉각수 온도 등)에 영향을 받으며, 이러한 것들이 터빈 출구의 증기 매개변수들을 결정한다.

원자로 열출력이 150~300 MWt인 단일 SMR의 경우 증기발생기 출구 압력은 30~40 bar 이고, 터빈 입구에서의 증기는 과열증기일 것으로 예상된다. 이러한 경우 습분분리재열기는 적용되지 않으며 증기터빈은 단류(single flow) 및 단일 케이싱으로, 터빈 출력은 원자로 출력에 따라 50~90 MWe으로 제시된다. 100 MWe을 넘는 터빈에 대해서는 단일 케이싱보다 복수 케이싱이 선호된다.

원자로 열출력이 150~300 MWt인 두 개의 SMR이 병렬로 연결되어 한 대의 증기터빈과 연계되는 경우, 터빈 입구에서의 증기는 과열증기일 것으로 예상되며, 이러한 경우 습분분리재열기를 적용하고, 단류형 고압터빈과 복류(double flow)형 저압터빈으로 복수의 케이싱을 갖는 증기터빈 조합이 최적이다. 복류의 저압터빈은 부하추종 운전에 잇점을 갖는 짧은 최종단 블레이드를 적용할 수 있다. 이러한 증기터빈 조합에 대한 출력 한계는 원자로 출력에 따라 전기출력 250 MWe 정도이다.

마지막으로, 원자로 열출력이 250~450 MWt인 세 개의 SMR이 병렬로 연결되어 한 대의 증기터빈과 연계되는 경우, 터빈 입구에서의 증기는 포화증기일 것으로 예상되며, 이러한 경우 습분분리재열기를 적용하고, 복류의 고압터빈 1대와 복류의 저압터빈 2대를 연계하는 증기터빈 조합이 최적이며, 이러한 증기터빈 조합에 대한 출력 한계는 전기출력 500 MWe 정도이다.

웨스팅하우스형 원전 가압기내 가열기 다중오동작 분석

Analysis of Multiple Spurious Operation of Heaters in Pressurizer for Westinghouse Nuclear Power Plant

이영송 · 배연경 · 정해영

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 화재방호를 위한 심층방어개념을 적용하여 설계되었다. 심층방어개념은 화재예방, 화재 신속감지 및 진압, 화재 안전정지기능 유지 등이며, 특히 화재가 발생하여도 안전정지기능을 확보하는 것이 중요하다. 안전정지기능에는 반응도 제어, 원자로냉각재계통 압력제어, 붕괴열 제거, 발전소 프로세스 감시, 전력·냉각수 등과 같은 지원계통이 안전정지기능에 해당되며, 원자로냉각재계통의 압력제어 기능을 유지하기 위해서는 가압기의 기능을 만족해야 가능하다.

원자력발전소에 설계된 가압기는 공기층과 유체층(냉각재)으로 구분되어 있어 압력서지를 완충하며, 일정하게 압력을 유지하기 위해서 압력이 감소되면 가압기내에 설치된 가열기를 작동하여 압력을 상승시키고, 가압기내의 압력이 상승되면 가열기는 작동을 멈추고 가압기내에 냉각재를 살수하여 압력을 감소시킨다. 살수상태에서도 압력이 계속 증가하게 되면 가압기 압력방출밸브가 개방되어 압력 상승을 방지하도록 설계되었다. 즉 가압기내에 가열기와 살수밸브를 사용하여서 원자로냉각재계통의 압력을 일정하게 유지하는데, 만약 화재로 인해 가열기 제어케이블의 절연물이 손상되면 전기적으로 오동작신호가 발생할 수 있어 설계적으로는 압력상승에 따라 가열기가 정지하여야 하지만 계속하여 가열기가 작동될 수 있다. 이 경우에 원자로냉각재계통의 압력을 유지하지 못하게 되어 안전정지기능이 상실되게 된다. 이와 같이 화재가 발생하여 다수의 케이블이 손상되고 전기적으로 기기가 오동작하여 안전정지기능에 영향을 주는지 확인하는 것이 다중오동작 분석이며, 화재안전성 향상을 위해 다중 오동작분석을 수행하였다.

다중오동작 분석을 위해 MAAP 코드를 사용하여 가압기 가열기가 오동작하였을 경우를 시뮬레이션하였다. 먼저 가열기가 오동작한 상태에서 가압기 살수밸브가 동작하지 않은 경우에는 약 7분 후에 가압기 압력방출밸브가 개방되었으며, 가압기 가열기 오동작과 함께 1분뒤에 원자로를 수동으로 정지하면, 가압기 압력방출밸브가 약 36분에 개방되었다. 또한 가압기 가열기가 오동작한 상황에서 압력상승에 의해 가압기 살수밸브가 가압기 압력에 따라 자동동작하도록 시뮬레이션을 수행한 경우에는 약 3분 뒤에 가압기 살수밸브가 개방되어 가압기 압력을 감소시켜 가압기 압력방출밸브는 개방되지 않았다. 즉 가압기 가열기가 화재로 인해 다중오동작이 발생하더라도 가압기 살수밸브가 건전하여 압력감소를 위해 작동하면 안전정지기능을 유지하는 것으로 나타났다. 화재 시 발전소의 안전성평가를 위해 다중 오동작분석을 수행하였고, 수행결과를 활용하여 필요한 조치를 마련하면 발전소의 안전성은 향상할 것으로 기대한다.

웨스팅하우스형 원전 보조급수계통 유량제어밸브의 다중오동작 분석 Analysis of Multiple Spurious Operation of Flow Control Valves of Auxiliary Feedwater System for Westinghouse Nuclear Power Plant

이영송 · 김명수 · 정해영
한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 화재방호는 심층방어개념으로 순차적으로 화재를 예방하고, 화재가 발생하면 즉시 감지하여 진압하며, 화재가 신속하게 진압되지 않더라도 원자로 안전정지를 달성해야 한다. 이런 측면에서 하나의 방화지역에서 화재가 발생하더라도 원자로의 안전정지를 달성할 수 있는지 확인해야 한다. 특히 방화지역 내에 설치된 안전정지관련 기기뿐만 아니라 화재로 인한 케이블의 전기적인 고장으로 화재가 발생한 방화지역 외에 설치된 기기의 오동작이 안전정지에 영향을 주는지 확인하는 것이 다중오동작(Multiple Spurious Operation) 분석이다.

보조급수계통은 원자로가 정지되었을 때 원자로의 붕괴열을 제거하기 위해 증기발생기 2차측에 냉각수를 공급하는 계통으로 원자로 안전정지를 달성하기 위해 필수적인 계통이다. 즉 보조급수계통의 주요 구성은 보조급수펌프와 증기발생기 수위를 유지하기 위한 유량제어밸브로 구성되며, 주요 구성기기는 전기적인 신호에 의해 동작하므로 다중오동작 분석의 대상기기가 된다.

웨스팅하우스형 원전의 보조급수계통은 50% 용량의 모터구동 보조급수펌프 2대와 100% 용량의 터빈구동 보조급수펌프 1대로 증기발생기 3대에 노심 붕괴열 제거를 위한 냉각수를 공급하며, 모터구동 보조급수펌프와 연결된 증기발생기당 1대의 유량제어밸브(총 3대 밸브)와 터빈구동 보조급수펌프와 별도로 터빈구동 보조급수펌프에 연결된 증기발생기당 1대의 유량제어밸브(총 3대 밸브)가 있어 원자로 안전정지를 위한 붕괴열을 제거할 수 있게 설계되어 있다. 만약 증기발생기 유량제어밸브가 화재로 오동작하여 완전히 개방되면 보조급수펌프는 고유량으로 고장(Runout)날 수 있기에 오리피스 설치, 증기발생기를 통한 냉각물 등 설계사항을 고려하여 펌프고장 가능성을 유량제어밸브의 오개방 개수에 따라 분석을 수행하였다.

설계자료분석 결과로 모터구동 보조급수펌프 1대만 운전하는 경우에는 1대의 유량제어밸브가 완전개방하여도 펌프의 고장을 야기하지 않으며, 2대의 유량제어밸브가 완전개방된 경우에는 약 35분~1시간20분의 여유시간이 있으며, 3대 유량제어밸브가 완전개방되면 약 25분의 여유시간이 있다. 또한 터빈구동 보조급수펌프 1대가 운전하는 경우에는 2대의 유량제어밸브가 완전개방하여도 펌프의 고장을 야기하지 않으며, 3대의 유량제어밸브가 완전개방되는 경우에는 약 3시간15분의 여유시간이 있다. 즉 터빈구동 보조급수펌프에 연결된 유량제어밸브의 설치위치를 고려하면 최대 2대의 유량제어밸브만 하나의 방화지역에 설치되어 있어 터빈구동 보조급수펌프가 운전 중인 경우에는 유량제어밸브가 오개방이 되어도 안전정지를 달성할 수 있는 것으로 분석되었다. 분석결과를 활용하여 화재발생 시 비정상 운전 절차서에 고려함으로써 발전소 안전운전에 기여할 것으로 기대한다.

APR1400 원자로축소모형 유동유발하중 및 구조응답 측정 요건 개발
Development of Flow-Induced Load and Structural Response
Measurement Requirements for APR1400 Reactor Scaled Model

김규형 · 고도영 · 장호철* · 문중성*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)

신규 설계 및 건설하는 원자로는 미국 규제지침 NRC R.G. 1.20 원자로내부구조물 종합 진동평가프로그램(RVI CVAP) 및 국내 규제지침 KINS/GR-N05.02에 따라 원형 또는 비원형으로 분류하고 그에 따라 해석, 측정, 검사 프로그램을 수행한다. 해석프로그램은 이론적으로 원자로내부구조물의 구조적 건전성을 평가하고, 측정 및 검사 프로그램에서 감시할 위치 선정에 대한 근거를 제공한다. 측정프로그램은 정상운전 및 과도상태에서의 예측값을 검증하기 위한 데이터를 확보하고 검사프로그램은 해석값 및 측정결과를 확인한다. 최초 설계 원자로는 설계와 설계검증에 필요한 유동유발하중을 측정하기 위해 원자로 축소모형시험을 수행할 수 있고, 축소모형시험장치로 구조응답을 측정하여 CVAP 사용되는 해석방법론을 검증한다. APR1400 원자로내부구조물을 가진하는 하중 및 구조응답해석 방법론을 검증하고자 원자로축소모형 시험장치 구축 및 시험을 위한 요건을 다음과 같이 개발하였다. 원자로축소모형 시험장치의 축소비는 1/7로 결정하였고 원자로, 노심지지배럴(CSB), 하부지지구조물(LSS), 노심슈라우드(CS), 상부안내구조물(UGS), 내부배럴집합체(IBA)로 구성되는 원자로내부구조물(RVI)를 최대한 기하학적 유사성이 유지되도록 설계 및 제작한다. 축소모형의 재료는 스테인리스강을 사용하고, 배관 및 순환펌프(RCP) 등은 APR1400 원자로냉각재계통의 배치와 동일하게 설계한다. 계측기는 유동유발하중을 측정하기 위한 동압계, 구조응답을 측정하기 위한 변형률계 및 가속도계로 각 구조물에 설치되고 온도계, 정압계, 유량계 등으로 시험조건을 확인할 수 있다. 시험 중 온도가 일정하게 유지될 수 있도록 냉각 및 가열장치가 있다. 유량 변화에 따른 유동유발하중의 변화를 확인할 수 있도록 유량 조절이 가능하고, 신호의 건전성을 확인하기 위해 5회 반복시험을 수행한다. 원자로 및 원자로내부구조물 해석모델의 모드형상 및 고유진동수와 비교하기 위해 원자로 및 원자로내부구조물 축소모형별 모드시험 및 조립 모드시험을 공기중 및 수중에서 수행한다.

대형원전 가압기 상부지지구조물 설계 개발

Design Development of APR+ Pressurizer Upper Support Structure

김규형 · 김기석* · 김성민* · 조민기**

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주), **두산에너지빌리티(주)

원자로냉각재계의 운전압력을 유지하며 부하 변동 시 원자로냉각재의 체적변화를 보상하는 가압기의 상부지지구조물은 키 형상으로 정상운전 중에는 키웨이와 일정한 간극을 유지해야 하고, 가압기가 동하중을 받을 경우에 지지할 수 있어야 한다. 따라서 키와 키웨이의 간극은 가압기 설치, 시험 및 운전 시 최소한으로 유지될 수 있도록 설계된다. 대형원전 가압기 설치 시 원활하게 키 간극 요건을 충족시킬 수 있도록 키 위치를 초기설계 보다 24.5인치 하부로 이동을 결정하였다. 이로 고온간극 요건에 최대 54%의 여유를 확보하였다. 가압기 키 설치 위치를 변경함에 따라 가압기 및 상부지지구조물, 내부구조물 및 키웨이 어셈블리, 콘크리트 지지구조물 등은 정상 및 사고조건에서 구조적 건전성이 평가되어야 한다. 가압기 상부지지구조물의 설치 위치를 반영하여 상부지지구조물, 스커트 형상의 하부지지구조물 및 내부구조물의 상세해석모델을 개발하고, 정하중 및 지진, 안전방출밸브작동, 원자로건물내 재장전수탱크방출, 분기관파단 동하중을 입력하여 KEPIC MN-3200에 따른 응력 및 피로평가로 구조적 건전성을 확인하였다. 또한 가압기 상부 키의 위치 변경에 따라 설계하중이 증가하여 키웨이 어셈블리를 변경하였다. 상부 기초구조물에 대한 해석모델을 생성하고 정상상태 및 사고하중 등에 대해서 구조해석을 수행하여 KEPIC MNF 3220 및 MNZ F 1332에 따른 지지대의 응력한계 검토하였다. 일부 키웨이 어셈블리의 판 두께를 0.5인치 증가시켜 허용응력을 충족하는 가압기 상부 기초구조물을 설계하였다.

혁신형 소형모듈원자로의 비상계획구역 설정에 관한 선행연구 A Study on Emergency Planning Zone for Innovative Small Modular Reactor

문호림 · 박성현

한국수력원자력주식회사 중앙연구원

혁신형 소형모듈원자로(SMR; small modular reactor)의 특징은 1) 대형원전 대비 열출력이 작고 2) 대형냉각재상실사고의 발생확률이 매우 작으며 3) 방사능누출이 “0”에 가깝다는 등이다. 따라서, 혁신형 SMR의 기본 설계특성을 반영하여 비상계획구역(EPZ; emergency planning zone)을 설정할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 혁신형 SMR 비상계획구역 설정에 관한 선행연구를 수행하는 데 있다. 이를 위해서 비상계획구역 설정에 대한 국내외 법규의 차이와 평가사례를 고찰, 분석하였다. 특히, 미국 테네시 밸리社(TVA; Tennessee Valley Authority)는 미국 테네시주 클린치 리버 부지에 SMR 건설을 위한 조기부지승인신청(ESPA; early site permit application)을 하였고 2019년 승인을 취득하였다. TVA社는 EPZ를 부지경계 내로 설정하여 제출하였고 그 방법론을 제시하였다.

TVA社가 제시한 사고시나리오 선정 및 방사선원항평가 방법론은 다음과 같다.

기준 명	설명	선량평가 만족 여부
A: Design Basis Accidents	Nuscale DCD 15장 DBA 중 선택	EPA ¹⁾ PAG ²⁾ 선량: 1 rem/4 days
B: Less Severe Core Melt Accidents	CDF: 1.0E-6/yr 이상	
C: More Severe Core Melt Accidents	CDF: 1.0E-7/yr 이상	

1) EPA; Environmental Protection Agency

2) PAG; Protective Action Guides

TVA社의 선량평가 결과는 부지경계(약 반경 335.8m) 내에서 총 유효선량당량(TEDE; total effective dose equivalent)가 4일 동안 1 rem 미만으로 평가되었다.

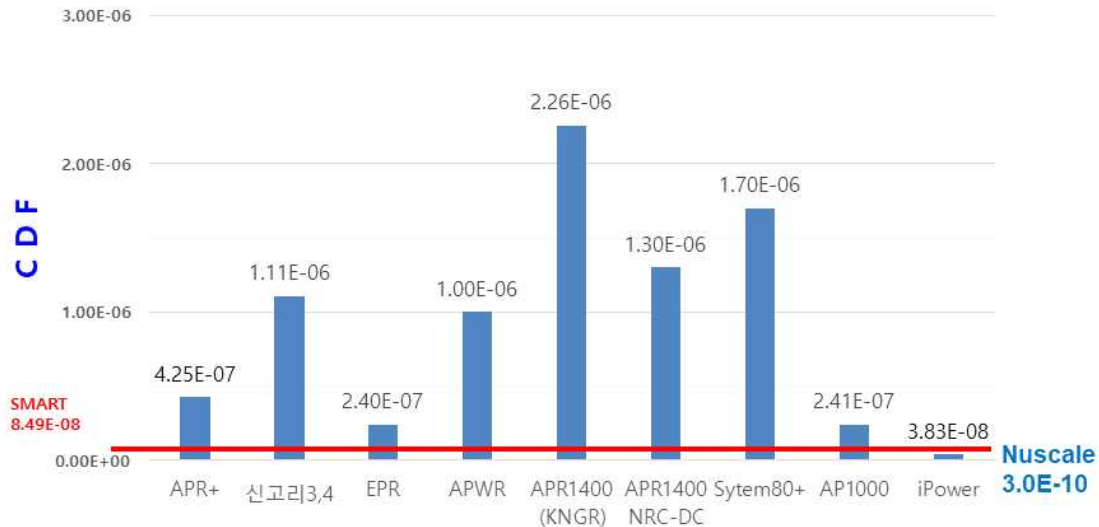
선행연구 결과와 국내법 및 규제요건 등을 고려하여 혁신형 SMR의 EPZ 평가를 위한 방법론을 개발할 예정이다.

혁신형 소형모듈원자로의 노심손상빈도 민감도 분석 A Sensitivity Analysis of Core Damage Frequency for Innovative Small Modular Reactor

문호림 · 박성현

한국수력원자력주식회사 중앙연구원

혁신형 소형모듈원자로(SMR; small modular reactor)의 장점은 먼저, 대형 원전과 비교하여 열출력이 작고 이로 인해서, 대형 냉각재 상실사고가 발생할 확률이 희박하다는 것이다. 본 논문의 목적은 현재 개념 설계개발 중인 혁신형 SMR의 최상위요건 중 하나인 안전성 목표/노심손상빈도의 만족 여부를 민감도 분석하는 데 있다. 이를 위해서 선행 노형의 사건 수목 및 사고경위 평가사례 등을 고찰, 분석하였다. 마지막으로 안전계통 설계안별로 안전성 설계목표의 달성 가능여부를 평가하였다.



국내외 노형 CDF 비교

혁신형 SMR의 안전성목표는 전출력/내부사건기준 노심손상빈도(CDF; Core Damage Frequency) 1.0E-9/년 이하이다. 혁신형 SMR의 CDF 민감도분석결과 안전성목표를 달성 가능한 것으로 분석되었다. 현재는 개념설계 단계이며 향후에 확률론적안전성평가 모델 개발 및 상세분석을 수행할 예정이다.

SMART100 RG 1.97(Rev. 5) 적용 전원 설계

Applying RG 1.97(Rev. 5) of Electrical Power System for SMART100

하체웅

한국수력원자력(주) 중앙연구원

SMART100에 2019년에 개정된 RG 1.97(Rev.5)을 반영하기 위해 중대사고변수(Type F)를 선정하였으며, 중대사고변수(Type F)를 위한 전용(Stand Alone) 전력계통(예, 배터리 및 DG 등) 및 표시 장치의 설계를 요구하고 있다. 따라서 사고후 기존의 비안전등급 축전지를 우선 활용하고, 2시간 이후, SDG를 기동하여 7일까지 전력공급 방안을 검토하였으나 변수추가에 따른 추가 부하로 기존의 축전지 용량을 초과하게 되어, 축전지실 추가 확보가 필요하다는 결론에 도달하였다. 따라서 기존의 전력계통내에서는 수용이 불가하여, 중대사고 변수 전용 전력계통의 구성 방안을 수립하였다.

SMART100 비안전등급 DC 및 IP 계통의 경우 사고 후 SDG 기동 전까지 2시간 정격의 축전지에서 전력을 공급받으며, SDG 기동 후 7일까지 SDG(대기디젤발전기)를 통해 교류전력을 공급받아 충전기를 거쳐 직류 전원으로 작동하게 된다. 따라서 Type F 중대사고 변수에 대한 IEEE 497-2016 제시된 요건을 만족하는 비안전등급 전기계통을 공급하기 위해서는 대기디젤발전기 계통 및 보조전물에 배치되는 비안전등급 축전지를 이용해야 한다. 또한 축전지 추가에 따른 AE 직류 계통 설계 및 SDG 설계 영향 및 추가 전력에 설계 영향은 아래와 같다.

부하 추가 시 축전지 용량 계산은 3489.6 AH에서 5244.6 AH로 증가하여 기존 비안전급 축전지 용량 4000 AH (2000 AH x 2)에서 6000 AH (2000 AH x 3)로 변경이 필요하며, 이에 따라 추가 축전지를 수용할 공간 확보 필요하다.

중대사고 변수를 위한 부하 추가 시 충전기 용량은 1398.7 A에서 1945.9 A로 증가하여 기존 충전기 용량 1500 A에서 2000 A 변경이 필요하다. 그러나 용량 증가에 따른 충전기 크기 변경은 충전기가 배치되어 있는 전기실내에서 수용 가능할 것으로 검토되었다. 충전기 용량 증가에 따라 SDG 용량이 약 70 kW 증가되며, 이에 따라 기존 용량 7500 kW에서 7600 kW로 변경이 필요하나 기기 크기 증가 영향은 없을 것으로 판단되었다.

마지막으로 추가되는 비안전급 축전지를 수용하기 위해서는 현 보조구역 내 축전지실의 크기가 약 1.5배 증가가 필요할 것으로 예상되어 추가 축전지를 보조구역에 배치하는 불가능하다. 따라서 SDG 빌딩에 중대사고변수(Type F)를 위한 전용 축전지실을 구축해야 할 것으로 판단된다. 단, 충전기 및 SDG 에 따른 추가 공간은 필요 없을 것으로 예상된다. 아울러, 추가적인 Cable에 대한 배치 요건이 적용될 경우 해당 설계는 건설/운영 단계에서 수행이 가능할 것으로 예상된다.

SMART100 소외전력 계통 설계 Offsite Power System Design of SMART100

하체웅

한국수력원자력(주) 중앙연구원

SMART100 소외 전력계통은 230 kV 단일 스위치야드로 구성되며 물리적 독립성을 갖추지 않은 2회선 송전선로로 전력이 공급된다. 230 kV 스위치 야드와 연결된 송전선로는 생산된 전력을 소외 전력망으로 보내고 보조 부하에 소외 전력을 공급한다. 송전망 계통은 충분한 용량을 갖는 전력공급원으로 상시 가압되어 있고, 모든 설계운전조건에서 1E급과 비1E급 부하의 요건을 만족 시킬 수 있도록 용량이 선정되어 있다.

230 kV 스위치야드 기기와 모선은 오염에 의한 섬락을 최소화하기 위해 금속 외함에 내장되며 절연에 효율적인 육불화황(SF6) 기체로 채워진 가스절연 개폐설비로 구성된다. 230 kV 스위치야드는 가스 절연 모선과 지중에 포설되는 가교 폴리에틸렌 절연 비닐시스(XLPE) 케이블을 통해 주변압기와 예비보조변압기에 연결된다.

국내 일반설계기준 17의 요건에 따라 충분한 용량과 이용성을 가지는 소외전력이 공급되도록 설계되어 있다. SMART00 설계는 노심 냉각 및 격납영역 건전성에 대한 안전급 피동형 계통을 가지고 있으므로 일반설계기준 17에 따른 물리적인 독립성을 갖춘 2개의 소외전원 요건은 면제된다. 따라서 IEEE 765에서 요구되는 발전 상실, 부하 상실, 송전선로 상실과 같은 상정사고 시 우선전력공급계통이 저하되지 않음을 입증하는 분석은 필수사항에 해당하지 않는다.

SMART100의 전력계통은 국내 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제1조에 따라 원자로 및 관계시설에 적용된다. 그러나 피동형 원자로는 그 설계특성상 안전관련 기능 수행을 위한 교류전원이 필요하지 않기 때문에 외부 전력망으로부터 수전을 받기 위한 전력계통 시설은 원자로의 안전에 관계되는 “관계시설”로 분류되지 않는다.

APR1400 등 능동형 원자로에서는 안전정지를 위해 외부로부터의 교류전원이 필요하여 전력계통시설은 “관계시설”로 분류되고 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제24조를 준수하여 적합하게 설계되어 있다. 따라서 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제24조에 따른 독립된 2개의 회로를 갖추는 요건은 안전정지를 위해 외부 교류전원을 필요로 하는 능동형 원자로의 전력계통시설에 적용되는 요건이며, 원자로 안전정지에 외부 교류전원을 필요로 하지 않는 피동형 원자로의 전력계통시설에는 적용되지 않으므로 물리적 독립에 관한 요건을 적용하지 아니한다. 참고로 미국 규제지침에 NUREG 0800 82. Acceptance Criteria 4에는 피동설계의 경우 하나의 소외전력으로 요구하고 있으며 미국 소형원전인 Nuscale 원전의 소외계통 설계도 단일계통으로 구성되어 있다.

원자력발전소 접지계전기 오동작 원인 분석 및 대책 Analysis and Countermeasure for Malfunction of Insulation Monitor in Nuclear Power Plant

하체웅

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 비접지 소내전력계통에 설치되어 있는 접지계전기는 차단 기능이 없이 경보용으로 사용되고 있으며 소내전력계통에서 절연저항 값이 설정값 이하로 낮아지면 경보를 발생하게 구성되어 있다. 경보는 2단계로 이루어지며 2차 경보 절연저항 설정값을 1차 경보 절연저항 설정값 보다 낮게 하여 지락고장의 진행을 인식하도록 한다. 1차 경보의 설정범위는 200[k Ω], 2차 경보 설정범위는 50[k Ω]으로 설정되어 있다. 1차 경보는 리셋버튼이 따로 없고, 바로 정상화 되고, 2차 경보는 리셋버튼이 있다. 이러한 방식은 지락검출장치에 의해 경보가 발생할 경우, 운전을 계속하면서 경보에 대한 조치를 절차에 따라 수행하도록 되어있다. 운전원과 정비원은 발전소 운전을 계속하며 정비할 것인지 또는 정지시킨 후 정비할 것인지 결정해야 하며, 정지시킬 경우는 정지 일정 등을 결정하도록 되어있다.

하지만 원자력발전소 비접지 소내전력계통에서 대체교류비상디젤발전기 관련 시험 중 차단기 개방 시 접지계전기가 오동작 하는 사례가 수차례 발생하여 이에 대한 대책이 요구되었다. EMTP(Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 소내전력계통 및 접지계전기를 모델링 하였다. 이때, 주발전기 및 보조변압기 1차 측 접지 저항값은 1,000 Ω 으로 하였고, 대체교류비상디젤발전기 접지는 비접지로 구성하였다. 또한 접지계전기의 설정은 200[k Ω]로 설정하였다. 대체교류발전기 투입 및 차단에 따른 접지계전기 동작 시뮬레이션 분석 결과 접지계전기가 오동작 하는 이유는 차단기 개방 시 개방 시간에 따라 스위칭 썬지 등의 원인으로 접지계전기 설치점에서의 측정 전압이 낮아지거나 측정 전류가 높아져 일시적 과도 전압, 전류값에 의한 절연저항 값이 설정값 보다 낮아져 접지계전기가 지락 사고로 판단하여 경보를 발생 하는 오동작을 일으킨 것으로 분석되었다. 위와 같은 오동작을 피하기 위하여 접지계전기에 1초 Time Delay 기능을 추가하여 1초 동안 200[k Ω] 이하로 절연저항이 낮아지는 경우에 1차 경보가 발생하거나, 1초 동안 50[k Ω] 이하로 절연저항이 낮아지는 경우 2차 경보를 발생하도록 설비 개선이 필요하다. 만약 Time Delay 기능의 설비 추가가 어려운 경우에는 절차를 개정하여 절차서 해당 부분을 "전기부에 연락해서, 점검 후 이상이 없으면 일시적 과도 전압, 전류값에 의한 절연저항 값 저하로 판단하고, 필요 시 리셋 하고, 정상 운전 한다."로 개정이 필요하다.

원자력발전소에 비접지 소내전력계통에 설치되어 있는 접지계전기의 오동작을 방지하기 위한 Time Delay 설비 적용 및 절차서 개정을 통해 오동작에 영향을 최소화할 수 있는 불필요한 인력 낭비 및 안정적인 발전소 운전을 할 수 있다.

피동형 원전의 안전정지 설계 고찰

Study on the Safe Shutdown Design of a Passive Nuclear Power Plant

서정관 · 유승엽*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원

한국수력원자력(주)는 2019년 12월, 중소형 원전인 SMART100에 대한 국내 규제기관의 표준설계인가를 신청하였다. 2012년에 표준설계인가를 받은 SMART 원전은 안전시스템이 부분 피동형에서 완전 피동형으로 변경됨에 따라 재인가의 필요성에 제기되었기 때문이다. 2021년 7월부터 본심사가 착수되었으며 다양한 기술분야에 대한 심사질의 및 답변이 진행되고 있다. 본 논문에서는 그중 피동원전인 SMART100의 안전정지 설계에 대한 심사현안 및 답변내용에 대해 기술한다.

원자력발전소의 안전정지는 다음 조건을 모두 만족시키는 원자로의 정지상태를 말한다.

1) 원자로가 발전소 운영기술지침서에 제시된 정지여유도 이상을 가지고 미임계로 유지되는 상태, 2) 노심이나 원자로냉각재계가 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 상태.

국내 원자력안전법에서는 안전정지 온도를 정의하고 있지 않으나, 하위 규정인 한국원자력안전기술원의 '경수로형 원전 규제지침'에서 안전정지 온도를 상온정지 온도인 93.3 °C로 규정하고 있다. 그러나, 해수나 냉각탑 등을 최종 열제거원으로 하는 능동형 원전에서는 이러한 안전정지 온도가 적용가능하나, 비상냉각탱크를 최종열제거원으로 하는 피동원전에는 적용하기 어렵다. 다만, 상온정지까지 냉각할 수 있는 능력은 점검 및 보수가 가능한 온도까지 냉각하기 위해 요구된다.

상온정지만이 안전정지 상태를 구성하는 유일한 조건은 아니며, 충분한 시간 동안 원자로 미임계와 원자로심 잔열제거 기능 및 방사성물질의 격납기능이 유지되는 상태를 안전정지 상태로 판단할 수 있다. 피동형 잔열제거계가 적용된 원자로시설의 경우, 안전등급의 피동계통으로 냉각하여 충분한 시간 동안 상기의 상태를 유지할 수 있는 모드를 안전정지 상태로 정의할 수 있다.

피동형 원전은 사고 후 노심 및 격납건물을 냉각하는 피동 안전계통을 갖추고 있다. 사고 후 72시간 이내에 교류전원 및 운전원 조치없이 원자로를 안전정지 상태로 도달 및 유지시킬 수 있도록 설계된다. 또한, 능동형 펌프를 갖춘 계통은 비안전등급으로 설계되며, 사고 72시간 이후 피동 안전계통의 심층방어 기능을 제공하거나 발전소의 유지보수를 위해 사용된다. 이에 추가하여, SMART100은 사고 후 유지보수를 위한 상온정지 도달을 위해 이동형 냉각설비를 구비하였다.

이에 따라, SMART100의 안전정지 기능은 국내 원자력 안전법령 및 한국원자력안전기술원의 심사지침을 모두 충족한다.

SMART100의 비안전계통 규제조치 설계

Regulatory Treatment of Non-Safety System Design of the SMART100

서정관 · 유승엽*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원

한국수력원자력(주)는 2019년 1월부터 중소형 원전인 SMART100에 대한 국내 규제기관의 표준설계인가를 추진하고 있다. 2012년에 표준설계인가를 받은 SMART 원전은 안전계통이 부분 피동형에서 완전 피동형으로 변경됨에 따라 재인가의 필요성에 제기되었기 때문이다. 본 논문에서는 피동형 원전의 설계개념과 안전에 중요한 비안전 발전소 구조물, 계통, 및 기기(SSC: Structure, System, and Component)에 대한 선정 및 신뢰도 유지 방법론에 대해 기술한다.

SMART100의 안전계통은 사고 후 72시간 동안 내/외부 교류전원 없이 자연력에 의해 발전소를 안전정지 상태에 도달하고 유지하게 설계되어 있다. 사고 72시간 이후에는 비안전계통 규제조치(RTNSS: Regulatory Treatment of Non-Safety System) 설계에 의해 사고 전기간 동안 발전소를 안전정지 상태로 유지하게 된다. RTNSS 분석 수행 절차는 피동형 원전의 사고완화 및 안전정지 유지를 위해 운전이 요구되는 비안전 SSCs를 결정론적 및 확률론적 방법으로 선정한다. 이때 신뢰도 및 가용성 요건을 달성하기 위한 조치를 선정하고 이행조치를 준비한다.

결정론적 접근방법으로 RTNSS 적용대상 SSCs를 선정하기 위해 검토한 요건은 원자로 정지불능 사고(ATWS: Anticipated Transients Without Scram), 소내정전(SBO: Station Black Out), 72시간 이후 조치, 지진 등이 있다. ATWS 완화를 위해 다양성보호계통 및 관련 SSCs가 RTNSS에 포함된다. 소내정전 시 발전소가 안전하게 정지할 수 있는 능력을 갖기 위해 비안전 소내 디젤발전기 및 보조디젤발전기와 관련 계통이 RTNSS에 포함된다. 72시간 이후 조치를 위해 비상냉각탱크 냉각유지, 격납건물내재장전수조 냉각유지, 주제어실 거주성/사고후 모니터링/사용후핵연료저장소 냉각유지를 위한 SSCs가 RTNSS에 포함된다. 지진 고려사항으로 지진여유도분석 결과에 따라 비안전 SSCs가 RTNSS에 포함된다.

확률론적 접근방법으로 PSA(Probabilistic Safety Assessment) 민감도 분석을 수행하였으나, RTNSS 적용 대상 비안전 SSCs는 결정론적 방법론으로 선정된 SSCs 외에 추가적으로 도출되지 않았다.

RTNSS로 선정된 SSCs는 신뢰도 및 가용성 요건 유지를 위해 운영기술지침서의 계획서 및 지침서에 적용하여 관리한다.

SMART100 사고특성을 고려한 비상운전절차서 확인 및 검증방법 개발 Development of Validation and Verification Method for Emergency Operation Guideline Considering Accident Sequence of SMART100

권순국 · 서정관 · 김현일*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국원자력연구원

본 논문에서는 SMART100 사고특성을 고려한 비상운전절차서·지침서 작성의 확인 및 검증방법에 대하여 각 검증 항목별로 준비단계, 평가단계, 문제해결단계, 문서처리단계를 거치는 검증방법을 제시한다.

SMART100 발전소 운전 및 비상운전절차서는 표준설계안전성분석보고서 14.2.10절 ‘발전소 운전 및 비상절차서의 시험 사용’에 따라 가동전 시험을 수행하는 동안 입증된다. 운전 및 비상운전절차서는 초기시험을 통하여 다수의 예상운전과도에 대하여 적용을 시도하며 시험 중 보완 사항이 도출되면 절차를 개선하여 절차서에 반영한다.

이러한 SMART100의 비상운전절차서/지침서는 초기시험전에 확인 및 검증될 예정이며 다음과 같이 수행될 예정이다. SMART100의 비상운전절차서/지침서는 ‘사용적합성’ 및 ‘운전적합성’으로 검증원칙을 나눌 수 있다.

사용적합성 관련하여 운전원의 자질과 훈련, 경험 수준에 비추어 제공하는 정보가 충분히 상세한지를 판단하는 ‘상세정도’ 검증항목이다. ‘상세정도’에 대한 검증방법은 참조발전소, 토의, 현장답사, 시뮬레이터를 활용하여 검증이 가능할 수 있다.

운전적합성 측면에서는 검증하는 항목은 운전원의 혼동을 일으키지 않을 수 있도록 하는 ‘이해 가능성’, 주제어실의 각종 설비, 발전소 물리적 반응, 현장설비 및 그 반응과 일치를 확인하는 ‘발전소 설비 일치성’ 및 운전교대조의 인적능력 및 행정 체계와 일치하는지를 확인하는 ‘운전원적합성’이 있다. ‘이해 가능성’ 검증항목은 토의, 현장답사, 시뮬레이터를 활용하여 검증이 가능하다. 주제어실의 설비와 일치여부는 토의로는 불가하여, 현장답사 및 시뮬레이터를 활용한다. 발전소의 물리적 반응 관련해서는 시뮬레이터를 활용한다. 아울러, 참조발전소를 통하여 위 사항들에 대한 부분적 검증이 가능하다. 다만, 현장설비에 대한 반응과 일치성은 현장답사 및 시뮬레이터를 통하여 부분적으로 검증할 수 있다. 운전교대전의 인적능력 및 행정 체계관련 해서는 현장답사와 시뮬레이터를 활용할 수 있으며 참조발전소 및 토의를 통하여 일부 부분적인 검증을 수행할 수 있다.

RCS 운전누설 관련 해외 운영기술지침서 개정 내용 분석

Analysis of the Revision of RCS Operational LEAKAGE in NUREG-1432

조용선

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 수명기간 동안 원자로냉각재계통(RCS, Reactor Coolant System) 및 연결된 계통의 접속부와 밸브 연결부위에서 정상운전 중의 마모 또는 기계적인 열화에 의해 다양한 양의 RCS 누설이 발생할 수 있다. 원전 운영기술지침서에서의 RCS 운전누설에 관련된 운전제한조건의 목적은 이들 누설원으로부터의 누설이 안전을 저해하지 않는 범위 내에 있도록 계통의 운전을 제한하는 것이다. 운영기술지침서에서 RCS 운전누설은 확인누설, 미확인누설, 압력경계누설로 구분하여 관리한다. 각 누설에 대한 정의는 운영기술지침서 ‘용어의 정의’에 자세히 기술되어 있다.

미국 Byron 원자력발전소에서 격리밸브 후단의 압력경계재질 손상으로 인한 압력경계누설이 발견되었고, NRC 및 PWROG간 압력경계누설 정의에 대한 이견이 발생하였다. 이후 TSTF를 통해 압력경계누설에 대해 NRC 및 PWROG간 논의가 아래와 같이 이루어졌다.

일자	주요내용
2011.9.19	(사업자) 압력경계누설 정의에 “격리기기를 통해 누설량이 밸브허용누설량 이하로 제한된 경우 격리된 것으로 본다” 문구추가
2012.6.6	(NRC) 누설의 결과로 인해 추후 예상되는 원자로냉각재압력경계의 건전성 저하에 대해 분석해야함.
2014.3.9	PWROG/NRC 임원회의, TSTF/NRC 회의 수행 • 압력경계누설을 적용받지 않으려면 결함은 ‘격리가능’이 아닌 ‘격리’되어야함. • 결함은 두 개의 격리밸브로 격리되어야 함.
2015.1.28	(사업자) NRC 규제입장에 대해 우려사항 표명 • 관련규정에 “차단된”이 아닌 “차단불가능한”으로 명시되어 있으므로 사업자 동의 없이 용어를 확대해석 할 수 없음. • “차단불가능한”용어를 “두 개의 격리밸브로 차단됨”으로 해석할 수 없음
2019.5.7	(사업자) TSTF-554 제출 누설 정의 변경 및 압력경계누설에 대한 불만족상태 추가
2020.1.16	(사업자) TSTF-554(개정 1) 제출 NRC 검토의견 반영하여 압력경계누설에 대한 불만족상태 제한시간 변경 (즉시→4시간)
2020.10.30	(NRC) TSTF-554(개정 1)에 대한 안전성평가보고서 작성 누설정의 변경 및 RCS 운전누설 TS 변경사항 수용 가능

최종적으로 NUREG-1432(개정 5)에 RCS 운전누설 변경사항이 반영되어 개정되었고, RCS 운전누설 용어 정의 및 내용 개정사항 분석을 통해 RCS 운전누설에 대한 의미, 범위 등에 대해 국내 원자력발전소에서도 재검토가 필요하다.

OPR1000 원전 운영기술지침서 적용성 향상 연구 현황

Status of the Study on improving the applicability of Technical Specifications in OPR1000 Nuclear Power Plants

조용선 · 이만규

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원전 운영기술지침서는 원전의 안전성을 확보하기 위한 사항들을 규정한 문서로, 원자력 안전법령에 따라 이를 준수하기 위해 발전소 운영 중 운전제한조건(LCO : Limiting Condition of Operation)이 만족되는지 점검·감시하고 만족되지 않는 경우에는 적합한 조치를 수행해야 한다. 다양한 발전소 상황에서 운영기술지침서의 올바른 적용을 위해서는 운전 제한조건에 대한 명확한 해석이 요구된다.

국내 OPR1000 원전 운영기술지침서는 미국의 ISTS(Improved Standard Technical Specifications)인 NUREG-1432(CE형, Rev.1, 1995)를 참고하여 작성되었다. 미국은 사업자와 규제기관 간의 지속적인 논의를 통해 운전제한조건(LCO) 적용에 혼선이 있거나, 의미가 불명확한 부분들을 지속적으로 ISTS에 반영하여 최근 Rev.5(2021)에 이르고 있다. 반면, 국내는 약 20년간 Rev.1 기준으로 개발된 ITS(Improved Technical Specifications)에서 크게 벗어나지 못하였다. 국내 원전 사업자인 한국수력원자력은 OPR1000 원전을 대상으로 운전제한조건(LCO)의 해석 및 적용에 대한 현장 적용성 향상을 목적으로 연구를 수행 중이다.

본 연구개발은 총 94개의 운전제한조건(LCO)에 대하여 다음과 같은 내용으로 수행되고 있다. 첫째, 관련 국내 및 해외 기술자료를 수집하여 검토한다. 국내자료는 최종안전성분석 보고서, 설계문서, 운영절차서, 규제기관 지침 등이 있고, 해외자료로는 NUREG-1432, NRC LER(License Event Report), TSTF(Tech. Spec. Task Force), 미국 CE형 원전 인허가서류(TS, TS Bases, FSAR), NRC Inspection 매뉴얼 등이다. 둘째, 운전제한조건(LCO)별 현장 요구사항을 분석하고, 적용성 향상 필요사항을 도출한다. 셋째, 이를 기반으로 운전제한조건(LCO)의 명확한 적용을 위한 세부지침을 개발한다. 넷째, 운영기술지침서 중 일부 불명확하거나 개정이 요구되는 사항에 대한 운전제한조건(LCO) 및 기술배경서의 개정안을 개발한다. 다섯째, 운전제한조건(LCO) 세부지침 및 개정안 등 개발 문서에 대한 심층 검토를 수행한다.

본 연구수행을 통해 안전해석에 기반한 운영기술지침서 적용논리를 개발하고, 원전 운영 기술능력을 제고할 수 있다. 향후 본 연구가 완료되면 신속하고 명확한 운영기술지침서 적용을 통해 원전 안전성 증진에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

운영기술지침서에서의 원자로냉각재계통 자연순환 요건 Nature circulation requirements of Reactor Coolant System in Technical Specifications

조용선

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원전 운영기술지침서의 목적은 원자력발전 안전에 중요한 특성을 파악하고, 특정 운전 조건을 설정함으로써 공중의 안전에 위협을 가할 수 있는 이상 상황 또는 사건의 가능성을 방지하기 위해 필요한 원자로 운전 시 조건 또는 제한을 부과하는 것이다.

운영기술지침서 제3.4절 원자로냉각재계통(RCS, Reactor Coolant System)은 RCS 운전 에 필요한 운전제한조건(LCO : Limiting Condition of Operation)이 정해져 있다. 이중 노심냉각 기능을 유지하기 위한 RCS 유로의 운전가능성이 요구된다. RCS 유로는 운전모드 별로 요구되는 사항이 다르며, RCS의 강제순환(RCP 또는 잔열제거펌프 이용) 또는 자연순환을 통하여 노심냉각 및 수용성 중성자 독물질인 붕소를 운반하는 역할을 한다.

운전모드 5에서 RCS 유로가 충수 상태인 경우에만 RCS 유로의 운전제한조건으로 정지냉각펌프를 이용한 강제순환 유로 또는 증기발생기를 통한 자연순환 유로가 요구된다. 운전모드 5(원자로냉각재 유로가 충수된 상태)에서 강제순환 중지가 허용되는 배경은 자연순환을 이용하여 노심 붕괴열 제거가 가능하고, 반응도제어에 영향을 주는 붕소 성층화 발생이 예상되지 않기 때문이다. 해당 기능을 유지하기 위해서는 RCS의 과냉각상태 유지가 반드시 요구된다.

증기발생기를 통한 자연순환 기능을 유지하기 위한 조건에 대해서 미국 원전(Vogtle Unit 1) 실제 운전경험 사례등을 통하여 재검토가 이루어졌고, 검토결과를 바탕으로 NRC Information Notice 95-35가 작성되었다. 국내에서도 운영기술지침서에서 요구되는 증기발생기를 통한 RCS 자연순환 기능을 유지하기 위한 요건 확인이 필요하고, 운영기술지침서 적용에 필요한 주요 참고자료로 활용하고자 한다.

제어봉구동장치 관통부 파단 사고 시나리오 기반 국내 원자력 안전해석코드 SPACE의 방출 유동 모델 민감도 연구

Break flow model sensitivity study based on CEDM penetration break
accident scenario using SPACE code

남경호

한수원(주) 중앙연구원

방출 유동 모델에 대한 선정은 원자력발전소에서 파단에 의한 냉각재 상실 사고를 예측하는데 있어 중요한 열수력 문제로 다루어져 왔다. SPACE 코드에는 사용자의 선택에 따라 최적 평가 방법에 적용되는 Ransom-Trapp (1982) 모델, 보수적 평가를 위한 Moody (1965) 모델을 선택할 수 있다. Moody 모델은 유동 조건을 이상유체로 가정한 모델이기 때문에 과냉각 액체 임계유동 모델의 연계가 필요하고, SPACE 코드에서는 Moody 모델과 연계할 모델로 열적 비평형을 고려한 Henry-Fauske (1971) 모델을 선정하였다. 추가적으로 2상 유동을 균질한 상태로 가정하여 가장 단순하게 임계유량을 예측하는 HEM(Homogeneous Equilibrium Model)도 포함이 되어 있어, 전체 유동 영역에 대해서 사용할 수 있다. 본 연구에서는 파단에 의한 방출 유량을 실험 결과를 기준으로 적절하게 예측하는 것이 필요하므로, Ransom-Trapp 모델, H-F-Moody 모델, 그리고 H-F-HEM 모델 3가지 옵션에 대해 민감도 계산을 수행하였다.

사고 시나리오는 원자로용기 상부헤드의 제어봉구동장치 관통부에서 파단이 발생하는 시나리오를 선정하였다. 원자로용기 상부에서 발생하는 파단은 초기 과냉 액체가 방출되는 기간이 냉각재 배관에서 발생하는 파단보다 상대적으로 짧고, 파도 전반에 걸쳐 증기와 액체가 함께 방출되는 2상 유동이 지배적이다. 따라서 모델에 대한 민감도 계산과 더불어 방출 계수에도 변화를 주면서 민감도 계산을 수행하였다. 방출 계수는 SPACE코드의 평가 매뉴얼에서 방출 유량 예측에 권고되는 값들을 선정하였다.

Ransom-Trapp 모델에 대해서 계산한 결과, 2상 유동 방출 계수에 1.2를 적용한 케이스는 실험 결과에 비해 더 큰 누적 질량을 예측하였다. 방출되는 파단 유량이 더 많기 때문에, 시나리오 전반에 걸친 사건 전개도 더 빨리 발생하였다. 과냉 액체 방출 계수에 차이를 준 케이스는 방출 누적 질량이나 사건 전개의 시간에는 큰 차이가 없었다. H-F-Moody 모델과 H-F-HEM 모델을 적용한 케이스 중에서는 평가 매뉴얼에서 적용한 가장 작은 2상 유동 방출 계수인 0.57을 적용한 케이스도 실험 결과에 대비하여 다소 크게 예측하는 결과를 나타냈다.

본 연구에서는 제어봉구동장치 관통부 파단이 발생하는 사고를 바탕으로 방출 유량을 적절히 예측하기 위해, SPACE 코드에서 사용할 수 있는 방출모델인 Ransom-Trapp 모델과 Henry-Fauske and Moody 모델, 그리고 HEM 모델에 대한 모델 민감도와 방출 계수에 대한 민감도 계산을 수행하였다. 민감도 계산 결과, Ransom-Trapp 모델을 사용하였을 때 실험 결과에 근접하게 예측하였고, 방출 계수는 SPACE 코드의 평가 매뉴얼에서 권고하는 1.0을 단상 유동과 이상 유동에 전부 적용하였을 경우 가장 잘 예측하였다.

본 연구는 아틀라스 국내표준문제-06 (ATLAS DSP-06)의 일환으로 수행되었습니다.

제어봉구동장치 관통부 파단 사고 시나리오 기반 열수력 종합효과 실험장치의 열손실 영향 연구

Heat loss effect on integral test facility based on CEDM penetration
break accident scenario using SPACE code

남경호

한수원(주) 중앙연구원

열손실은 열유체 실험에 있어서 압력, 온도, 수위 등을 예측하는데 불확실도를 증가시키는 주요 변수 중 하나이다. 실험을 수행하는 주변 환경에 영향을 많이 받기에 열손실을 최소화 하는 환경을 유지하는 것이 중요하고, 특히 고온, 고압의 조건에서 수행하는 실험일수록 열손실이 더 커지기 때문에 열손실에 대한 예측이 중요하다. 원자력발전소의 전체 계통을 모사하여 국내에서 수행하고 있는 원자력 열수력 종합효과 실험장치는, 한국원자력연구원에서 운영하고 있는 ATLAS가 유일하다. 본 연구에서는 ATLAS로 수행한 실험을 대상으로 국내 원자력 안전해석코드인 SPACE 코드를 이용하여 열손실이 실험 거동에 미치는 영향에 대해 계산을 수행하였다.

사고 시나리오는 원자로용기 상부헤드의 제어봉구동장치 관통부에서 파단이 발생하는 시나리오를 선정하였다. 실험 시작은 원자로용기 상부에 연결된 파단부의 급속개방밸브가 개방되어, 냉각재가 방출되면서 시작된다. 파단부를 통해 냉각재가 방출되면서 1차측 압력이 급격하게 감소하고, 가압기 저압력 신호에 의해 원자로 정지가 발생한다. 원자로 정지 후, 주증기와 주급수가 차단되고, 방출 유량과 1차측 압력이 일정하게 유지되는 포화 상태에 도달한다. 지속적인 냉각재 방출로 수위는 감소하고, 노심 상부가 노출되면서 피복재 온도가 급격하게 상승하면, 시나리오에서의 운전원 조치인 2차측 대기방출밸브가 개방된다. 2차측 대기방출밸브의 개방으로 급격한 열전달로 1차측 압력이 감소하고, 안전주입탱크에 의한 안전 주입이 개시된다. 안전주입탱크를 통한 안전주입으로 1차측은 과도가 종료되고, 2차측 또한 증기발생기 수위 감소로 인한 보조급수주입으로 실험은 종료된다.

열손실 효과가 사고 시나리오에 미치는 영향을 확인하기 위해, 1차측에는 총 약 90 kW, 2차측에는 52 kW의 열손실이 발생하도록 모델링을 수행하였다. 모델링은 계산 격자와 연결된 열구조체에 열전달 계수와 대기 온도를 적용하여 열손실 모델링을 수행하였다.

계산 결과, 열손실 모델링을 수행하지 않은 케이스에서는 2차측 대기방출밸브가 개방되기 전 포화 상태가 지속적으로 유지되었다. 반면, 열손실을 고려한 케이스에서는 실험 결과와 유사하게 어느 정도 포화 상태를 유지하다가 1차측 압력이 2차측 압력보다 더 낮아지면서 천천히 압력이 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 방출 누적 유량이 거의 동일한 점을 보아 포화상태에서 열손실을 반영한 케이스는 열손실로 인해 실험 결과와 같이 압력이 천천히 감소하는 것으로 판단하였다. 본 계산을 통해 전산코드를 이용한 계산 수행 시 열손실 데이터를 입력에 반영하여 계산을 수행하여야 좀 더 현실적인 예측 결과를 얻을 수 있다는 결론을 내렸다.

본 연구는 아틀라스 국내표준문제-06 (ATLAS DSP-06)의 일환으로 수행되었습니다.

공동현상을 이용한 액체 수소의 고밀도화 현상에 관한 이론적 연구

A Theoretical Study on Supercooled Hydrogen Densification using Ultrasonic Cavitation

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박혜민 · 권도현 · 박성호*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

수소는 산소와 반응하여 오직 열과 물을 배출하는 차세대 친환경 에너지원으로 널리 알려져 있다. 이에 수소의 사용량은 해마다 점점 증가할 것으로 예상되며 수소의 수요를 충족하기 위해 해외로부터 수소를 수입하는 방안을 검토 중에 있다. 수소는 기체 상태로 보관할 때 대기압에서 입방미터 당 81 g으로 매우 가벼우며 700 bar로 가압하여 저장하더라도 입방미터 당 41 kg으로 대용량 저장에 매우 제한적인 취약점이 있다. 이러한 취약점에 대한 해결책으로 수소를 액화하여 저장하는 방법이 있으며 액화하여 저장 시 입방미터 당 71 kg의 수소를 저장할 수 있어 수소의 고밀도 저장 방법 중 가장 유력한 방법으로 검토되고 있다. 하지만 액체 수소라 할지라도 액화천연가스(LNG)와 비교하여 밀도가 1/6 수준밖에 되지 않으며 비등점이 낮아 액체 수소를 장주기 저장하는데 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 액체 수소의 취약점을 보완하기 위하여 액체와 고체가 섞인 슬러시(slush) 형태로 수소를 저장하는 방법을 제안한다. 기존의 일반적인 액체/고체(slush) 생산 방법은 나사송곳, 동결융해, 분사 방식이 대표적이나 차별화된 방법인 과냉각 수소를 액체/고체(slush) 수소로 변환하는 이론적 메커니즘을 소개하고 있다. 여기서 과냉각이란 유체의 온도가 어는점보다 낮은 온도에서 액체 상태를 유지하는 과냉각된 상태를 말한다. 이러한 과냉각된 수소에 초음파를 전달하게 되면 액체 내부에서 수축과 팽창을 반복하며 공동현상을 유도한다. 본 논문에서는 수축과 팽창에 노출된 불안정한 상태의 과냉각 수소는 내부에서 결정핵(Nucleus)을 중심으로 결정핵(Nucleation)이 빠르게 전파되어 액체 수소는 액체/고체(slush) 수소 상태로 변환되는 메커니즘을 설명하고자 한다.

감사의 말(사사) : 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음
(과제번호 22CTAP-C163636-01)

양성자 교환막 연료 전지용 술폰화 PEEK 및 4차화 폴리(아릴렌 에테르 술폰)을 포함하는 산-염기 혼합 막의 제조 및 전기화학적 특성

Preparation and electrochemical properties of acid-base blended membranes containing sulfonated PEEK and quaternized poly(arylene ether sulfone) for proton exchange membrane fuel cell

김애란¹ · 박민우¹ · Iyappan Arunkumar¹ · Sengadurai Chitra Karthikeyan¹ · Subramanian Vijayapradeep¹ · Sayfiddinov Dilmurod¹ · 유동진^{1,2*}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

고분자 전해질 연료 전지(PEFC)는 뛰어난 에너지 밀도, 감지할 수 없는 오염 물질 배출 및 시스템 단순성으로 인해 깨끗하고 효율적인 전기화학 에너지 운반체로서 상당한 주목을 받고 있습니다. 그들의 적용 범위는 고정 전기 장치에서 자동차에 이르기까지 다양합니다. 이에 가습기 등 고가의 보조 부품의 사용을 줄이기 위해 낮은 상대습도에서의 성능 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 4차 암모늄화 폴리(아릴렌 설폰)(QNPAES)을 설계하고 전형적인 친핵성 방향족 중축합 반응을 사용하여 합성했습니다. 그런 다음 손쉬운 용액 주조를 사용하여 설폰화된 폴리(에테르 에테르 케톤)(SPEEK)으로 구성된 혼합 멤브레인을 개발했습니다. SPEEK와 혼합된 QNPAES의 중량%를 변화시켜 일련의 2, 4, 6, 8 및 10wt% 혼합 멤브레인(SPEEK/QNPAES)을 준비했습니다. FE-SEM, AFM, TGA, DSC, DMA 및 UTM을 포함한 다양한 실험을 통해 SPEEK/SO₃H-UGNF 형성을 확인하고 물 접촉각, 수분 흡수, 수분 흡수, IEC 및 Fenton의 테스트와 같은 물리화학적 특성을 평가했습니다.

key words: fuel cell, sulfonated poly(ether ether ketone), proton exchange membrane, ammonium polyarylene ether sulfone, hydrogen cation conductivity

탁월한 물리화학적 내구성 및 전기화학적 특성을 가진 폴리 아릴렌
피페리디늄(PAP) 음이온교환막과 상승 효과를 위한 GO기반 무기물 충전제
적용 및 특성 분석

Application and characterization of polyarylene piperidinium (PAP) anion
exchange membrane with excellent physicochemical durability and
electrochemical properties and GO-based inorganic filler for synergistic
effect

박민우¹ · 김애란¹ · 김범호¹ · 유동진^{1,2*}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장·변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

연료전지용 고분자 전해질막 중 하이드록시 이온을 통과시키는 음이온 교환막은 양성자 교환막과는 다른 이점을 지니고 있어 최근 활발한 연구가 진행되었다. 그 결과, 거의 모든 특성 부문에서 뛰어남을 보이는 폴리 아릴렌 피페리디늄(PAP) 고분자 구조가 대두되었다. 이후 단량체의 변형과 가교구조, 분지구조 등의 변형연구가 많이 진행되었고 뛰어난 성과들이 보고되었다. 하지만 PAP에 무기충진제를 추가하여 특성을 향상시키는 유무기 복합막 전략은 아직 거의 시행되지 않은 연구이다. 따라서 그래핀옥사이드(GO)를 기반으로 하는 각종 무기물을 적용하여 이온전도도 및 Single Cell Test 출력을 향상시키는 연구를 진행하였다. GO는 Hummers method를 통해 Graphite powder에서 합성되었고, 이후 rGO와 SGO를 추가로 합성하였다. PAP 고분자는 초강산을 촉매로 하는 중축합 반응을 통해 주사슬을 합성하였고 이후 Menshutkin reaction을 통해 작용기를 4차화 시켰다. GO를 비롯한 무기물들의 합성 진행 확인은 XRD를 통해 구조를 확인하였으며 고분자의 경우 ¹H NMR을 통해 확인되었다. 막 구조는 1wt%의 무기물들을 적용시켜 주조되었으며, 이후 4probe 이온전도도 테스트 기기를 사용하여 각각 전기화학적 특성을 측정하였다.

Synthesis of Low loading Pt Nanoparticle anchored on Transition nano composite N-doping Graphene Nano fiber used as efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction

Subramanian Vijayapradeep¹ · Milan Babu Poudel¹ · Karthikeyan Sengadurai Chitra¹ · 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

*Corresponding Email ID: djyoo@jbnu.ac.kr

Hydrogen is studied as a promising clean energy source and developing highly active and longer durable, cost-effective electrocatalysts have become inevitable for energy storage and conversion application. Herein, we synthesized a Pt - Nanoparticle core-shell anchored to transition nanocomposite by the hydrothermal method and then calcined it at 600 °C for 2 h with the Pt-aniline complex. The prepared electrocatalyst was characterized by various analytical methods such as field emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), high-resolution transmission electron microscope (HR-TEM), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA). The prepared electrocatalyst shows a lower hydrogen evolution reaction (HER) overpotential of 32 mV at a current density of 10 mA cm⁻² as compared to Pt-C and long-term durability of 36 h at a current density of 10 mA cm⁻². Furthermore, the prepared electrocatalyst shows we improved HER performance in alkaline water /seawater.

Keywords: Hydrogen Evolution Reaction, hierarchical flower-like electrocatalyst, Pt Core-shell,

Graphene nanofiber incorporated poly (phenylene oxide) anion exchange membrane for fuel cell application

Iyappan Arunkumar¹, Ramasamy Gokulapriyan¹, Ae Rhan Kim¹, Dong Jin Yoo^{1,2†}

¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School (BK21 FOUR), Hydrogen and Fuel Cell Research Center Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

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

Abstract:

Anion exchange membrane fuel cells (AEMFCs) are considered as 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 for their application in AEMFCs. This work evaluates a series of quaternized poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (QPPO) incorporated with GNF for improving ionic conductivity, water uptake, mechanical stability and fuel cell performance. The bromomethylated polymer was synthesized from bromomethylation of poly (phenylene oxide) (PPO). Finally, the (QPPO)/GNF blended membrane was fabricated via simple solution casting method by varying the amount of GNF 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). Thermal stability of the blended membranes was analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). Electrochemical performance was certainly investigated by comparing pristine and blended membranes. The obtained results were indicated that the water uptake, water contact angle and hydroxide conductivity and mechanical stability was enhanced with the addition of GNF. The overall result concluded that anion exchange membrane blended with GNF would be the efficient electrolyte for fuel cell application.

Key words : Anion exchange membrane fuel cell, inorganic filler, graphene nano fiber, ionic conductivity

Copper quantum dots decorated on transition metal sulfide nanosheets for an excellent electrochemical CO₂ reduction

Murugesan Prasanna¹ · Palanimuthu Naveen Kumar¹ · Tamilarasi Subramani¹ · 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

*Corresponding Email ID: djyoo@jbnu.ac.kr

Abstract: Electrochemical reduction is the finest pathway to overcome the hurdles in CO₂ reduction reactions. To date, this is the most promising tool and effortless. The product generations at the potential window (−0.33 to −1.90 V vs. RHE) are thermodynamically stable CO₂ molecules. Developing a well-designed electrocatalyst to attain higher faradaic efficiency, stability, and selectivity is essential. Nevertheless, copper-based electrocatalysts show better results despite the observed lack of selectivity and stability obstacles. In this regard, transition metal sulfides have unique properties such as high surface area and facile electron transportation. Here, we have developed quantum dots decorated on transition metal sulfide nanosheets. It can enhance the CO₂ reduction reaction with high faradaic efficiency. Moreover, we have confirmed the material formation with various analyses such as XRD, XPS, FE-SEM, EDAX, and HR-TEM.

Keywords: Transition metal sulfides, Quantum Dots, Electrocatalyst, CO₂ Conversion, Selectivity.

Zinc-Cobalt Selenide Nanoparticles Enhancing Oxygen Reduction and Oxygen Evolution Reactions for Zn-Air Battery Performance Investigated by In-situ XRD and Ex-situ XAS Analysis

Ramasamy Santhosh Kumar¹ · Tamilarasi Subramani¹ · 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

*Corresponding Email ID: djyoo@jbnu.ac.kr

Zn-air batteries are becoming promising energy sources for environmentally friendly energy storage devices and hybrid/electric vehicles due to their high specific energy density and low cost for next-generation green and sustainable energy technologies. An air electrode integrated with an oxygen electrocatalyst is the most important component and inevitably determines the performance and cost of a Zn-air battery. This article presents exciting advances and challenges related to air electrodes and their relatives. After a brief introduction of the Zn-air battery, the architectures and oxygen electrocatalysts of air electrodes and relevant electrolytes are highlighted in primary and rechargeable types with different configurations, respectively. Moreover, the individual components and major issues of flexible Zn-air batteries are also highlighted, along with the strategies to enhance the battery performance. Finally, a perspective for the design, preparation, and assembly of air electrodes is proposed for the future innovations of Zn-air batteries with high performance.

Keywords: Spinel nanoparticles, Redox reactions, Zinc-air batteries, In-situ XRD, Density functional theory

현행 수소충전소 기준개정을 위한 수소혼합가스 폭발 실증시험 설계
Design of Hydrogen explosion test for Revision of Current Hydrogen
Refueling Station Standards

이주현 · 이현우 · 조재근 · 이재진 · 김광석

한국가스안전공사 화재폭발연구부

국제 사회의 탄소중립화 선언에 발맞춰 국내 수소경제 활성화 로드맵에 따른 그린 모빌리티 보급 확대에 의한 수소충전소 구축이 속도감 있게 진행되면서 수소충전소 안전성 확보 및 사고예방을 위한 수소충전소의 안전관리체계 강화가 요구되고 있다.

현행 수소충전소의 방호벽 설치기준은 일반 고압가스 제조시설에 적용된 기준을 변경 없이 도입하여 제정 및 시행되고 있어, 수소충전소 화재폭발 사고로부터 인명 및 재산피해 확산을 방지하고, 수소충전소에 대한 주민수용성 확보를 위해 수소충전소 방호벽 설치기준의 개정의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라, 수소충전소 방호벽 기준개정에 앞서 현행 기준을 검증하기 위한 실증시험을 설계하고, 실시하고자 한다.

본 시험에서는 일정한 공간 내에 수소혼합가스를 누출 및 폭발시켜, 현행 기준상의 방호벽 피해저감 성능 및 건전성, 거리에 따른 폭발압력 등을 측정하고자 한다.

본 시험을 통해 측정된 데이터는 향후 수소충전소 방호벽 설계 및 설치에 활용될 DB 및 시뮬레이션 프로그램 개발 및 수소충전소 안전기준의 개정의 기초자료로서 활용하고자 한다.

본 연구는 한국에너지기술평가원의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 20215810100020).

국내 수소 인프라 안전 확보를 위한 사고 사례 분석에 관한 연구
A Study on the Analysis of Accident Cases for Securing Safety of
Hydrogen Infrastructure in Korea

이재진 · 임원섭 · 류영돈

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

전 세계 탄소 중립 선언에 발맞춰 국내에서는 수소경제 활성화 로드맵을 발표하고, 정부는 자동차 및 선박 등 수송 분야와 전기·열 생산 등 에너지 분야까지 광범위한 분야 등 새로운 시장에서의 산업창출이 가능하다고 판단하며, 이를 새로운 미래 성장산업으로 삼아 세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약하려 하고 있다.

이에 따라, 2040년까지 모빌리티 구축으로 수소차 620만대, 수소충전소 1,200개소 구축, 연료전지 발전용 15GW 및 가정·건물용 2.1GW 보급, 그린수소 공급량 526만톤/년 등 목표로 하고 있다.

수소는 가장 가볍고 반응성이 높아 연료로서 매우 뛰어나다. 하지만 넓은 폭발범위(4 vol% ~ 74 vol%)와 다른 가스 연료(LNG, LPG)에 비해 6배 빠른 화염속도(325 cm/s)를 가진 점화 및 폭발사고 위험성이 높은 가스로서, 화염을 육안으로 식별하기 어렵기 때문에 안전관리에 만전을 기해야 한다.

수소자동차 보급 확대에 따른 신규 수소 인프라의 확충으로 산업에서 본격적으로 수소를 사용하게 됨에 따라 수소 관련 사고가 증가하고 있고, 이에 따른 수소안전관리체계가 요구되고 있다. 본 연구에서는 최근 10년간 국내외에서 발생한 수소 사고 사례 및 시나리오를 분석하여, 향후 수소안전관리체계의 정립을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 22HSCT-C157921-03).

수소 용기 폭발 시 높이별 폭발 압력의 거동에 관한 연구

Study on the Behavior of Explosion Pressure by Height in Explosion of Hydrogen vessel

이현우, 이주현, 조재근, 김광석

한국가스안전공사 화재폭발연구부

전 세계적으로 수소는 탄소중립과 관련하여 각광받고 있는 친환경 연료로 화석연료를 대체할 차세대 에너지로 주목받고 있다. 이에 현재 정부에서는 수소경제 활성화 로드맵에 따라 세계 최고 수준의 수소경제 선도 국가로 도약을 제시하고 있다. 또한 수소 교통 인프라 확대를 하고자 수소자동차의 수요와 공급이 늘어났고, 수소충전소의 구축의 필요성이 증대하고 있다. 이에 따라 수소충전소를 대폭 보급하기로 하였으나 수소탱크 폭발사고 등으로 인해 수소충전소 안전에 대한 우려가 커지게 되었다. 이에 따라 수소충전소의 방호벽 높이에 관한 기준을 제정하기 위하여 수소 용기 폭발 시 높이에 따른 폭발압력 측정이 필요했고, 본 시험을 실시하였다.

본 시험에서는 47 L 용량의 수소 용기(12 MPa, Type 1)의 하단부를 LPG버너로 국부가열하여 수소용기를 폭발 시켜 지면으로부터 높이에 따른 폭발 압력을 측정하였다. 폭발 원점으로부터 각 2 m(좌, 우 측면), 2.7 m(용기 축방향) 떨어진 위치에서 지상으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m 지점에서 입사압력을 측정하였다. 본 시험에서는 용기의 높이와 가장 유사한 0.5 m 지점에서 가장 압력이 높게 측정됨을 확인하였고, 최대 2m이상 폭압이 전달됨을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20215810100020)

액화수소 극저온 펌프 기준 동향 및 안전 인증 기준 개발 현황
Liquid Hydrogen Cryogenic Pump Standard Trend and Safety
Certification Standard Development status

김민지 · 허승건 · 김대현 · 임원섭 · 류영돈

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

2015년 파리협정 이후로 탄소중립 시대를 선언함에 따라 국내·외적으로 수소 경제가 확대되고 있다. 이에 따라 산업 시설, 운송시설 등 다양한 곳에 수소를 기반으로 한 에너지 적용에 대한 연구가 활발히 수행중이며, 앞으로 수소경제가 더욱 활성화될 것으로 전망된다. 현재 국내에서는 기체수소를 고압 압축하여 저장, 운송, 충전하고 있으나, 기술적, 환경적, 경제적 측면을 고려하였을 때 미래에는 기체수소에 비해 액체수소를 사용할 경우 효율성이 높을 것으로 판단된다. 해외에서는 대표적으로 독일 Linde사에서 액화수소 충전소용 극저온 펌프를 상용화해 공급중이며, 이에 발맞춰 국내에서도 많은 기업들이 액화수소 충전소용 극저온 왕복동 펌프를 개발 중에 있다.

국내·외 대부분의 극저온 펌프 관련 기준은 액화산소(-183°C)와 액화질소(-196°C)를 표준으로 만들어졌기 때문에 액화수소(-253°C)로 제정된 기준 분석에 관한 연구는 매우 제한적으로 수행되었다. 본 연구에서는 국내·외 극저온 펌프 기준에 대한 기존 동향을 세부적으로 검토 및 분석하고 향후 수행 연구에 대한 기초 자료로 활용하고자 한다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20203010040020)

개방된 공간에서의 가연성 가스별 누출 폭발압력에 관한 연구

A Study on the Analysis of Leakage Explosion Pressure by Combustible Gas in an Open Space

김대현 · 임원섭 · 류영돈

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

석유화학, 정유, 가스시설의 기술은 날로 발전하고 있으나, 노후된 배관 등으로부터 가연성가스가 누출 될 경우 점화원에 의해서 폭발할 가능성을 항상 상존하고 있다. 산업시설의 밀집된 가스시설들은 누출된 가연성 가스에 의해 폭발이 발생할 경우 주변으로 확산될 수 있다. 적정한 폭발안전거리는 인명·재산의 피해를 방지할 뿐만 아니라 연쇄 폭발을 지연 또는 방지할 수 있다.

산업현장에서 누출 폭발이 일어났을 경우에는 폭발압력은 폭발과압, 충격파, 폭풍파 등으로 표시될 수 있다. 폭발압력이 인체 및 주변 시설물에 미치는 영향을 폭발압력(Blast)을 계산할 수 있는 방법은 여러 가지가 있지만, 대표적인 TNT당량에 의한 계산방법에 따라 계산할 수 있다.

본 연구는 대표적인 가연성 가스(수소, LPG, LNG)가 개방된 공간에서 폭발 할 경우 폭발압력의 정도를 실증실험 결과와 계산결과를 비교하고자 하였다. 실증실험은 2.4m×2.4m×1.5m(약 8.64m³ 체적)의 폴리에틸렌 비닐 텐트안에서 가연성가스의 최대 폭발 과압으로 예상되는 농도(수소(40%), LPG(5.8%), LNG(9.5%))에서 스파크 점화에 의한 폭발이 발생했을 때, 폭발압력의 전파양상을 확인 하였다. 폭발압력의 측정 위치는 일반적인 사람의 심장 높이인 1.5m 높이로 폭발텐트 중심부로부터 2.5m, 5m 거리에서 측정하였다.

본 실험에서 측정된 데이터는 향후 누출 폭발 시 가스 별 안전거리 기준산정의 D/B 자료로 기초자료로 활용하고자 한다.

본 연구는 한국가스안전공사 가스안전연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: A-2020-024).

수소용기 화재폭발 시 거리에 따른 폭발압력 측정 시험

Measurement Test of Explosion Pressure for Distance on Fire Explosion of Hydrogen Vessel

조재근 · 이주현 · 이현우 · 이재진 · 양윤영 · 김광석

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 화재폭발연구부

최근 수소 경제 활성화 로드맵과 연계한 수소충전소 구축이 빠르게 진행됨에 따라 수소의 안전성 확보 및 사고 예방을 위한 안전관리 기준 강화가 요구되고 있다. 한편, 강릉 수소탱크 폭발 사고, 노르웨이 수소충전소 사고 등으로 인해 국민들의 수소충전소 설비의 안전성에 대해 문제점을 제기하고, 위험 시설로 인식이 증가하고 있다. 따라서 수소충전소의 안전성을 확보하고 인명 피해를 최소화하기 위해 수소충전소 주변에 설치되는 방호벽의 구조적 성능을 평가하고 사고 예방 기술 및 안전 기준을 개정하기 위한 기초 연구가 활발하게 수행될 필요가 있다.

본 연구에서는 Type 1 수소용기를 이용하여 국부 화재(Localized fire) 조건에서 화재 시험을 수행하였고, 수소 용기 화재폭발 시 거리에 따른 폭발압력(예를 들면, 입사압, 반사압)을 측정하였다. 이후 본 시험에서 확보한 실험 데이터를 토대로 거리에 따른 폭발압력을 비교 및 분석하고 인명 피해에 대한 위험성을 검토하였다. 본 연구 결과는 수소충전소 화재폭발 시 피해 저감을 위한 방호벽의 구조적 성능 검토 및 화재폭발 피해 영향 예측 전산 시뮬레이션 프로그램 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words: Fire Explosion, Explosion Pressure, Hydrogen Vessel

감사의 글 : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20215810100020)

수소전기차의 수소저장용기의 충전 및 내화성능에 대한 기준 분석 Analysis of Standards for Fueling and Fire-Resistance Performance of Hydrogen Tanks for Electric Vehicles

공경식 · 임원섭

한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터 화재폭발연구부

화석연료의 사용으로 발생된 배기가스 및 이산화탄소로 인해 인류는 지구온난화라는 위기에 직면했고, 이를 해결하기 방안 중 하나로 친환경 에너지원인 수소에 관심이 높아지고 있다. 수소는 공기 중의 산소와 반응하여 이산화탄소의 배출이 없는 에너지원으로 세계적 탄소중립과 관련하여 친환경 연료로 화석연료를 대체할 차세대 에너지로 관심받고 있다. 이에 현재 국내에서도 수소경제 활성화 로드맵을 발표하는 등 수소 관련 사업에 관심을 기울이고 있다.

수소전기차는 수소를 연료로 사용하며 전기를 생산, 모터를 구동하는 자동차로 범세계적인 내연기관 상용차 배기가스/이산화탄소 규제가 지속됨에 따라 수소 상용차 기술 개발이 필요한 상황이다. 이러한 수소전기차에서 핵심부품으로 연료를 저장하는 수소저장용기의 기술 개발이 중요시되고 있다. 이 충전 및 내화성능의 발전이 중요하게 여겨지고 있다.

따라서 본 연구에서 ECE R134 및 GTR No.13 등 해외의 수소전기차 관련 테스트 규정을 조사하였다. 그중에서도 수소저장용기의 충전, 방전 및 내화성능에 초점을 맞추어 해당 기준을 분석하였고, 이를 토대로 수소전기차의 수소저장용기의 고속 충전 및 내화성능의 생산성 향상 기술 개발에 이바지하고자 한다.

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)연구비 지원에 의한 연구임(200153646)

Metal organic frameworks (MOFs) derived zinc cobalt telluride
integrated nitrogen doped carbon for high performance
supercapacitors

Milan Babu Poudel¹ · Ae Rhan Kim¹ · 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

*Corresponding Email ID: djyoo@jbnu.ac.kr

The synchronous improvement of ionic diffusivity and electronic conductivity of electrode materials is of enormous significance for boosting its electrochemical performance. Transition bimetallic compounds are exploited as high-capacity electrode materials for supercapacitors due to their abundant electroactive sites and electrical conductivity. However, it remains grand challenge to construct supercapacitor devices that deliver high energy density. This work reports the fabrication of metal organic framework derived zinc cobalt telluride integrated nitrogen doped carbon (ZnCoTe-N-C) on nickel foam as a binder free electrode for supercapacitors. Specifically, ZnCoTe-N-C cathode exhibited high specific capacity as well as excellent long-term stability. The excellent electrochemical activity of the electrodes is attributed to the incorporation of redox rich bimetallic components and nitrogen rich carbon directly grown on the current collector, which reduces the dead volume and avoids volume expansion during charge discharge process. This study expands a way to construct a hybrid supercapacitor with well-designed structure and superior performance for clean energy storage technologies utilizing minimum resources.

Keywords: Metal organic frameworks, zinc cobalt telluride, N-doped carbon, supercapacitors, specific capacity

*Corresponding Author: **Dong Jin Yoo** (djyoo@jbnu.ac.kr)

A Non-Enzymatic Electrochemical Sensor for Glucose Detection Based on NiO₂@PG Nanocomposite

Tamilarasi Subramani¹ · Ramasamy Santhosh Kumar¹ · Sayfiddinov Dilmurod¹ · 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

*Corresponding Email ID: djyoo@jbnu.ac.kr

Abstract: Nickel oxide-phosphorous doped graphene (NiO₂@PG) has developed as a stimulating earth rich catalysts for electrochemical glucose sensor. There are variety of factors that impact glucose sensor activity and selectivity, including the catalyst surface structure morphology, composition the choice of electrolytic ions and P^H, and the electrochemical cell design. Many of these factors are often intertwined, which can complicate catalyst discovery and design efforts. Here we take a bored and historical view of these different aspect and their complex interplay in glucose sensor catalysis on Nickel oxide with the propose of providing new insights, critical, evaluations, and guidance, to the field with regard to research directions best practices. First, we describe the various experimental probes and electrochemical applications that have been used to discern the mechanism by which products are formed, and next we present our current understanding of the redox reaction network for NiO₂@PG. we then analyze two key method that have been used in attempts to alter the activity and selectivity of NiO₂@PG nanostructure and the formation of NiO₂@PG/Glu electrode. Finally, we offer some prospective on the future outlook for electrochemical glucose sensor.

Keyword: Nickel oxide, Phosphorous doped graphene, Glucose sensor, Real sample analysis, Electrochemical sensor.

리튬이온배터리 도전재용 수계 CNT분산액 제조 및 특성평가
Manufacturing and characterization of aqueous CNT dispersion for
lithiumion battery conductive materials

박창현 · 조성철 · 한도형

주식회사 엔피에너지 탄소섬유연구소

탄소나노튜브(CNT: carbon nano tube)는 탄소구조체의 대표적인 나노소재로서, 뛰어난 전기적 특성으로 인하여 전자재료, 이차전지, 슈퍼커패시터, 연료전지 및 나노복합체와 같은 다양한 분야에 응용될 수 있다. 하지만 CNT는 각각의 튜브들 사이에서 작용하는 강한 반데르발스인력(Van der Waals force)로 인한 응집현상이 발생하고, 이러한 응집현상은 다양한 응용분야에 방해요인으로 작용하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 초음파 또는 볼밀링을 이용하여 CNT bundle 간의 공유결합을 끊어내는 물리적 방법과 산 또는 유기용매에 의한 표면개질을 통해 CNT의 분산성을 향상시키고 매트릭스와의 접촉각을 줄여 계면 접착력을 증가시키는 화학적 방법이 있다.

본 연구에서는 WAB社의 DYNO-MILL을 활용하여 이차전지 도전재용 수계 CNT 분산액을 제조하였다. Milling 과정에서 CNT의 분산성을 향상시키고, 분산 이후 CNT의 재응집을 방지하기 위하여 PVP(Polyvinyl pyrrolidone)와 같은 고분자 첨가제를 분산제로 활용하였다. 제조된 분산액은 면저항을 측정하기 위하여 유리기관 위에 40mm*40mm 크기로 도포하여 Film을 제작하였으며, SEM 분석을 통해 CNT 표면의 미세구조와 분산형태를 관찰하였다. 또한 이차전지 음극재용 도전재료써의 활용가능성을 평가하기 위하여 2032 Coin Cell을 제작하여 방전용량 및 내구성 평가를 진행하였다.

기상자료 기반 단기 풍력발전 예측 모형 분석

An analysis of Short-Term Wind power forecasting model based on
weather information

류주열 · 박성호 · 박혜민 · 이창형 · 황성현 · 권도현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

탄소중립을 실천하기 위한 노력의 일환으로 세계 각국에서는 친환경 재생에너지의 비중을 확대하기 위한 에너지 정책 및 법안을 통과시키고 있으며 이에 따라 재생에너지 발전량을 예측하는 기술의 중요성이 점차 증가하고 있다. 대표적인 재생에너지 발전으로 태양광 발전과 풍력발전이 존재하며 시간 단위 예측부터 분단위 예측까지 다양한 범위에서 예측 모델이 개발되고 있다. 특히 풍력발전 예측 모델의 경우 시시각각으로 변하는 풍향, 풍속으로 인해 태양광 발전보다 예측에 어려움이 있어 모형 개발을 위한 다양한 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 기상자료와 2.3MW 영광 백수 풍력 발전기 1기의 1년간 운전 데이터를 이용해 풍력 발전량을 예측할 수 있는 다양한 모형을 검토하였다. 대표적인 시계열 모형인 ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)부터 GARCH (Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity), MLR (Multi Linear Regression) 그리고 SVM(Support Vector Machine) 모형을 활용하여 풍력 발전량 예측 결과를 검토하였다. 2020년 1월부터 2020년 11월까지의 데이터는 모형 학습(Train)에 사용하였으며, 2020년 12월(1개월) 10분 단위 출력값을 예측(Test)하였다. 모형의 평가는 NMAE (Normalized Mean Absolute Error)를 이용하여 평가하였으며 피치각 제어 등의 인위적인 출력제한 운전 데이터를 정제한 뒤 분석을 수행한 결과 각 모형은 3% 내외의 오차를 가짐을 확인하였다. 결과적으로 예측력이 좋은 모형을 사용하는 것이 중요하지만 데이터의 전처리를 방해되는 값을 제거할 경우 기본 모형에서도 좋은 예측력을 가질 수 있음을 확인하였다.

감사의 말 : 이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030020280, 풍력발전 계통 수용성 극대화를 위한 대용량 P2X 기술의 경제성 평가 및 운영 통합 솔루션 개발)

액체공기발전 시스템 발전성능 분석

Performance Analysis of Liquid Air Power Generation system

윤문규, 이춘식, 임동렬, 염충섭

고등기술연구원

요 약

전 세계적으로 탄소 발생량을 줄이기 위한 연구는 지속되어 왔다. 특히 재생에너지의 발전 비율을 확대함으로써 온실가스 감축 노력을 추진하고 있다. 하지만 재생에너지는 간헐성이라는 특수성으로 인하여 전력수급에 불일치가 발생하여 전력계통 안정도가 저하되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 대용량 에너지 저장 기술인 액화공기에너지 저장기술을 통한 신재생 연계 발전 시스템에 대한 관련 연구가 급격히 증대되고 있다. 본 연구에서는 최근 관심이 집중되고 있는 액체공기저장 발전 시스템에 대한 Open Rankine Cycle을 구성하여 모델링하고 공정 변수들의 민감도 분석을 통해 공정 최적화를 수행하였다.

후 기

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

압축공기 에너지 저장(CAES) 해외기술 동향 분석
Compressed Air Energy Storage(CAES) Overseas Technology Trend
Analysis

권도현 · 박성호 · 이창형 · 황성현 · 류주열[†]

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지IT융합그룹

압축공기 에너지 저장장치는 에너지 저장(Energy Storage System : ESS) 기술 중 하나로 심야전력, 풍력, 태양광 등 신재생에너지를 이용하여 압축공기를 저장하고 저장된 압축공기를 이용하여 터빈을 구동하여 전력을 발생시키는 기술이다. 압축공기 에너지 저장(Compressed Air Energy : CAES) 기술은 1970년경에 제안된 개념이지만 공기 저장을 위한 대규모 지하 공동구와 같은 지형적 요건과 낮은 충/방전 효율로 확대 보급에 어려움이 발생하였다. 그러나 최근 기후 위기 대응을 위해 국내에서도 탄소중립 2050 및 재생에너지 3020 등의 에너지 정책이 추진되고 재생에너지 비중이 증가함에 따라 장주기(Long-Duration) 에너지 저장장치 기술로 주목을 받고 있다. 재생에너지는 간헐적 특성으로 인해 전력을 안정적으로 공급하기 위해 에너지 저장 장치 기술과의 연계 및 운영 방안 수립이 중요하다.

압축공기 에너지 저장장치는 설비 구성에 따라 비단열, 단열 및 등온 공정으로 구분이 가능하다. 높은 충/방전 효율을 얻기 위해서는 공기를 압축하는 과정에서 발생하는 에너지 손실을 최소화 하여야 한다. 2000년도 이전에는 압축된 공기를 연소 과정에 비단열 방식을 활용하여 약 40%의 낮은 충/방전 효율을 보여준다. 그러나 2000년 이후 압축과정에서 발생하는 압축열을 열저장장치와 연계한 단열 압축공기 에너지 저장장치와 수차를 활용한 등온 압축공기 에너지 저장장치는 약 70%의 이론적 효율을 보이며 장주기 에너지 저장 장치로의 가능성을 보여주었다. 본 연구에서는 해외에서 진행된 압축공기 에너지 저장장치 실증현황과 지형적 한계를 극복하기 위해 시도한 다양한 연구 결과를 소개하고자 한다.

감사의 말 : 이 논문은 2022년도 중부발전의 지원을 받아 수행된 연구임(미활용 터널 사용을 위한 압축공기 에너지저장장치 개발)

하이브리드 미디어를 기반으로 한
무동력 모듈형 바이오가스 정제설비 개발에 관한 연구
Development of Non-Powered Module Type Biogas Purification System
based on Hybrid Media

김지은 · 강광남 · 김현기

에이티이(주)

인도네시아, 베트남 등과 같은 동남아시아 국가에서는 가정용 취사연료원으로서의 사용을 위한 소형 혐기성 소화조를 공급 및 설치하고 있다. 그러나 취사연료원으로 보급되고 있는 바이오가스는 전처리 공정없이 공급되어 바이오가스 내 H_2S 등 유독가스를 함유하고 있어 인체 위해요인이 발생될 뿐만 아니라 미정제 바이오가스는 대기오염의 가속화 요인(SO_x , NO_x 등)이 되는 등의 문제점이 있다. 이러한 이유로 취사용 스토브나 전력용으로 사용중인 바이오가스는 on-site 소규모 전처리 기술이 요구되어 소형화, 가격 경쟁력, 고내구성, 운전 안정성 및 교체 용이성이 필수적으로 구비되어 있는 컴팩트한 소형 바이오가스 정제설비의 모듈화 기술이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 화학적, 생물학적 기작에 의해 H_2S 를 효율적으로 제거할 수 있는 하이브리드 미디어를 기반의 $15m^3/일$ 규모의 바이오가스 정제 시스템을 CAE해석을 통해 최적 조건으로 설계 및 개발하였다. 개발된 설비의 성능평가를 위해 실험실 규모의 테스트를 진행한 후, 약 60일간 현장 테스트를 수행하여 각 운전 조건에 대한 성능평가 시험을 실시하였다. 그 결과, 하이브리드 미디어의 화학적, 생물학적 기작이 동시에 이루어졌을 때, 90% 이상의 바이오가스 정제 효율이 나타났으며, 미디어의 정제 기능 유지 기간 또한 비교적 길게 나타났다. 이는 기존의 산화철 미디어와 활성탄 미디어보다 뛰어난 정제 효율(최대 50배) 및 성능 유지 기간(최대 35배)을 나타내는 것으로 판단된다. 또한 개발된 설비를 현장에 설치하여 60일간 모니터링 한 결과, 바이오가스 내 H_2S 에 대해 평균적으로 97.52%의 H_2S 제거 효율을 나타내었다. 이러한 결과는 국내 포화상태인 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]

Sputtering power dependent properties of Zn₂SnO₄ films

Shin Yeonju* · Ignatius Andre Setiawan · Kim Dong Hyo · Kim Boyeon · Gedi Sreedevi, Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammad · Woo Kyoung Kim**

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, 280 Daehak-ro, Gyeongsan 38541, Korea.

* Presenting author (tls6780@naver.com)

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

This work presents the effect of sputtering power on the properties Zn₂SnO₄ thin films deposited by the RF magnetron sputtering technique varying the sputtering power. As the sputtering power increases, it was observed that the thickness of Zn₂SnO₄ thin films increases. The structural, electrical, and optical properties of the film are studied using various characterization techniques. Hall-effect measurements revealed n-type conductivity with carrier concentrations of $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. The films show transmittance over 85%. Surface morphology of Zn₂SnO₄ thin films is observed by SEM.

에너지 디지털 트윈의 실시간 데이터 관리를 위한 인터페이스 구조 설계 Interface Structure Design for Real-time Data Management of Energy Digital Twin

임정택 · 김민호 · 김태형 · 함경선

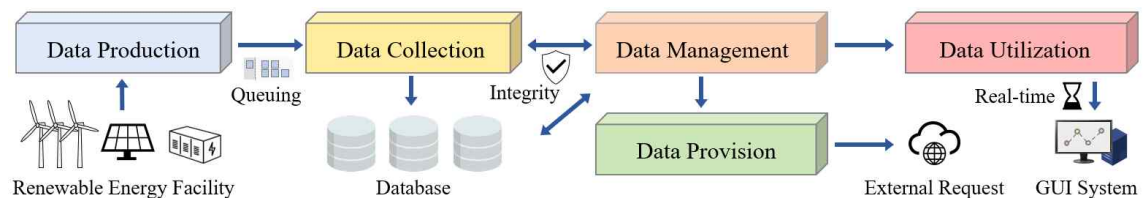
한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

디지털 트윈의 개념에 대한 다양한 정의가 있지만, 핵심은 적절한 동기화 속도로 대상의 물리 상태와 가상 상태의 상호작용을 표현하는 개념이라고 할 수 있다. 에너지 분야의 디지털 트윈의 적절한 동기화 속도란 디지털 트윈의 가상 상태를 표현하는데 필요한 데이터 통신 속도를 의미한다. 에너지 디지털 트윈의 데이터 관리 구성 요소는 데이터의 위치 및 용도에 따라 크게 발생부, 수집부, 관리부, 사용부, 개방부로 구분할 수 있다. 발생부는 풍력발전기, 태양광발전기, ESS 등의 최초 데이터 발생원을 의미한다. 수집부 및 발생부는 데이터를 데이터 저장소에 저장하고 관리하는 기능을 수행한다. 사용부는 저장된 데이터를 사용자에게 표기하거나, 인공지능 모델 개발 등을 위해 분석 목적으로 사용하는 관련 기능 일체를 의미한다. 개방부는 저장된 데이터를 외부에 제공하는 역할을 수행한다.

디지털 트윈의 모든 데이터는 관리 구성 요소에 의해 목적에 맞는 실시간성을 보장해야 한다. 실시간의 물리적 소요 시간은 사용부의 요구사항에 따라 상이할 수 있다. 단순 사용량 종합을 위한 계량 데이터라면 10분 단위 종합을 실시간이라 할 수 있으며, 정상 동작 상태 파악을 위한 모니터링 데이터라면 1초 또는 그 이하 단위 종합을 실시간이라 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 다양한 용도의 활용을 위한 데이터 관리의 실시간성 및 무결성을 보장하기 위해서는 이를 보장하는 전용 인터페이스 구조를 제안한다. 발생부-수집부 인터페이스는 실시간 데이터 수집을 원칙으로 하지만, 수집하는 주기가 밀리초 단위와 같이 짧은 경우 데이터베이스 기록 속도 최적화를 위해 수집 인터페이스는 내부적으로 대기 큐 기반의 구조 설계가 필요하다. 수집부-관리부 인터페이스는 데이터의 무결성을 확인하는 기능에 대한 추가 설계가 필요하다. 관리부-사용부 인터페이스는 사용자의 응답이 있는 말단 구성 요소이므로 데이터 조회에 대한 1초 이내의 실시간성이 보장되어야 한다.

향후 본 논문에서 설계된 인터페이스 구조를 바탕으로 재생에너지의 디지털 트윈에 대한 실시간성을 보장하는 시스템 및 인터페이스의 사용 기술을 선정하고, 기 구현된 시스템의 실시간성을 보완하기 위한 데이터베이스 구조 및 시스템 구조를 설계 및 적용 예정이다.



< 에너지 디지털 트윈의 실시간 데이터 관리를 위한 인터페이스 구조 >

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

성능 저하 비용을 최소화하기 위해 리튬이온 배터리 기반 에너지저장장치와
가역 고체산화물전지의 이용 비율을 강화학습 기반으로 최적화 방법¹⁾

A reinforcement learning-based method of optimizing the usage ratio of
Li-ion battery-based ESS and Reversible Solid Oxide Electrolyser to
minimize the performance degradation cost

김민호 · 임정택 · 함경선 · 김태형

한국전자기술연구원

국제적 이상 기후 문제가 대두되면서 탄소중립 사회로의 움직임이 강해지고 있다. 그에 따라 화석연료 에너지가 아닌 신재생에너지의 적극적인 활용이 더이상 피할 수 없는 인류의 임무가 되었다. 하지만 신재생에너지의 출력은 기후에 따라 바뀌므로 사람이 직접 제어할 수 없다. 따라서 전기에너지를 저장하고 방출할 수 있는 에너지 저장장치를 이용하여 전력망에 공급되는 전력을 안정화하는 기술들이 많이 연구 되고 있다. 이러한 에너지 저장 장치로는 리튬이온 배터리 기반의 ESS와 가역 고체산화물전지가 각광받고 있다. 하지만 이 두 에너지 저장장치는 전기 에너지를 화학에너지로 저장을 하며 그 과정에서 성능을 저하를 유발하는 여러 가지 화학반응이 일어난다. 이러한 성능 저하가 촉진되면 에너지 저장장치의 교체 주기가 짧아지거나 심하면 전력망에 심각한 문제를 야기할 수 있어 결과적으로 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 성능 저하로인한 비용을 최소화 하기 위해서 강화학습 기반으로 ESS와 가역 고체산화물 간의 에너지 공급 및 흡수 비율을 최적화하는 방법을 제안한다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20226210100020, 전기자동차 배터리 활용 스테이션 구축 및 스마트 충방전 시스템 개발 실증)

BTM 내 ESS를 활용한 피크저감에 따른 경제성 분석
Economic Analysis according to Peak Reduction with ESS
in Behind the Meter

홍석재 · 임정택 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

최근 세계적으로 다양한 신재생에너지의 발전과 관련 신기술 및 ICT의 융합을 통해 에너지효율 향상에 관심이 높아지고 있다. 특히, 전력량계 이후 고객 측에 있는 소규모 분산발전 설비나 ESS 등을 활용하여, 자가소비와 전력거래를 통해 에너지효율을 높이는 BTM(Behind-The-Meter)이 주목받고 있다. BTM 내 분산자원은 공동주택, 상가건물 등 수용가 측면에서 사용을 목적으로 구성된 내 분산자원을 의미하며, 다른 자원과의 통합, 기존 전력시장과의 통합이 가능하며, 도매시장, 피크감축, 부하이전 등에 활용될 수 있다. 국내에서는 FTM(Front-The-Meter)을 중심으로 분산자원 보급이 활발하게 이루어졌지만, BTM 분산자원에 대한 보급은 낮은 편이며, 특히 BTM 내 ESS에 대한 설치비 지원이나 요금체계가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 BTM 내 ESS를 활용한 피크저감을 위한 운영모델을 제시하고, 이를 활용한 공동주택단지와 상가건물의 피크저감에 따른 수익성에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 국내 대다수 공동주택은 사용량 구간별로 요금이 증가하는 누진형 요금제를 사용하여 월별로 요금이 책정되며, 상가건물은 사용시간대로 구분되어 단가가 책정되는 일반형 요금제를 사용한다. 제시하는 ESS를 활용한 운영모델은 평일에는 상가건물을 대상으로 경부하 시간에 충전을, 최대부하 시간에 방전하여 전력량 요금을 절감시킨다. 주말에는 공동주택을 대상으로 누진 구간 이하의 전력량을 사용한 세대는 충전하고, 누진 구간 이상의 전력량을 사용한 세대는 방전하여, 누진 구간이 낮아짐으로써 전력량 요금을 절감시킨다. 본 연구에서 제시하는 운영모델을 활용하여 공동주택단지를 대상으로 경제성 분석을 수행하고, ESS의 설치비에 대한 지원금을 변동해 가면서, BTM 내 ESS 운영에 대한 타당성을 비교 및 분석한다.

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

디지털 트윈을 위한 딥러닝 모델 경량화 및 디버깅 시스템 설계 Deep Learning Model Compression And Debugging System Design for Digital Twin

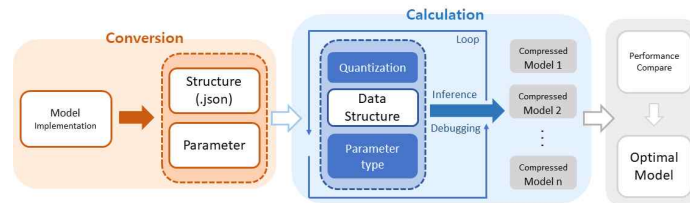
김민수 · 선지영 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

디지털 트윈을 통해 인간의 개입 없는 자율화를 위해서는 개별 디지털 트윈 간의 실시간 연동과 방대한 양의 수집 데이터를 처리할 수 있는 딥러닝 모델이 필요하고, 이를 효율적으로 처리하기 위해 에지 컴퓨팅을 활용할 수 있다. 에지 컴퓨팅(Edge Computing)은 데이터 생성 위치와 가까운 말단 기기를 활용하여 데이터 처리를 하기 때문에, 지연시간을 감소시키고 실시간 연동 및 연산을 가능하게 한다. 하지만 성능에 제한이 있는 말단 기기에서 딥러닝 모델을 사용하기 위해서는 파라미터의 크기를 줄이면서 정확도 손실은 최소화하는 모델 경량화 기법이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 모델을 경량화하는 기술과 모델 추론 중 파라미터 값을 확인하며 구현 단계의 오류를 개선할 수 있는 디버깅 시스템을 설계한다.

시스템의 구조는 크게 변환부와 연산부로 나뉜다. 변환부에서 TensorFlow 프레임워크로 구현 및 학습한 모델의 구조와 파라미터 값을 각각 JSON 파일과 바이너리 파일로 변환한다. 연산부에서는 변환부에서 전달받은 모델 관련 정보로 자료구조를 구축하고 계층 별로 사용자가 정의한 옵션을 적용한다. 적용할 수 있는 옵션에는 양자화 기법 및 파라미터 자료형이 있다. 양자화는 32bit 부동소수점 타입의 파라미터를 더 낮은 해상도의 데이터로 변환하는 방식이며, 선형 양자화와 KL-Divergence 등의 기법이 활용된다. 그리고 파라미터의 자료형 옵션으로 계층 별 양자화 후 데이터 해상도를 선택할 수 있다. 양자화 기법을 적용하여 정확도의 손실을 줄이고 추론 속도를 높여 경량 모델을 얻을 수 있다.

구축된 자료구조에서 추론을 수행할 때 디버깅 시스템을 통해, 계층 별로 중단점과 반복, 롤백 기능과 함께 실시간으로 파라미터 값을 확인함으로써 적용한 옵션이 유효한지 판단할 수 있다. 또한, 동일 모델에 대해 상이한 옵션을 적용하며 추론을 반복함으로써 다수의 경량 모델을 생성할 수 있고 경량 모델간의 정확도 및 연산 속도와 같은 성능 지표를 시각화하여 보여주는 GUI를 통해 최적의 모델을 선정할 수 있다. 본 논문에서 설계된 시스템의 구현을 통해, 적은 용량을 가지고 빠르게 추론을 수행하는 경량 모델을 얻을 수 있다. 또한, 다양한 데이터에 대한 경량화 및 디버깅 작업을 반복함으로써, 활용 목적에 따른 최적의 모델을 얻기 위한 방법론을 연구할 수 있다.



< 딥러닝 모델 경량화 디버깅 시스템 구조 >

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

급속충전 배터리팩 하이브리드 열관리 시스템 연구

A study on a hybrid thermal management system for fast charging
battery packs

임의수*, 김종우, 이주영, 김영선^a

(재)대구기계부품연구원 에너지산업지원센터, ^a(주)알티엘

대용량 배터리 시스템을 탑재한 전기차의 고율 충전은 배터리 시스템 성능, 수명, 안전성 등에 영향을 미치게 되어, 보다 고도화된 BMS 기술을 요함. 고율 충전으로 셀간 전압 편차가 보다 빠르고 큰 폭으로 발생하게 되어 셀 밸런싱이 성능과 안전성 확보를 위해 중요한 제어인자가 기술요소가 되며, BMS 고도화를 통해 효율적인 셀 밸런싱 기술 구현이 요구된다. 본 연구에서 간접 수냉식 냉각시스템과 냉매식 냉각시스템을 접목시켜 하이브리드형 냉각시스템 기술을 개발하고 이를 적용한 배터리 모듈을 설계하였다. 고효율 충전에 따른 셀과 전장부품의 발열을 제어하기 위한 냉각 시스템 구현은 성능과 수명, 안전성에 중대한 영향을 미치는 요인으로 팩을 구성하는 모듈 설계단계부터 셀의 발열량을 토대로 한 효과적인 냉각방식을 구현하였다. BMS 및 배터리팩의 전자파 시험을 통해 적합성 검증하고 배터리 모듈 전기적 성능평가를 진행하였다.

구동 모터의 전원 및 제어모듈에 대한 전도성 전자파노이즈 저감 대책 적용 부품 분석

Analysis of applied parts to reduce conductive electromagnetic noise for
power supply and control module of drive motor

서현욱 · 이주민 · 도수영*

(재)대구기계부품연구원, *(주)엔유씨전자

최근 웰빙 열풍, 건강에 대한 소비자들의 관심 증가로 인해 건강주스, 음료, 요리 등을 만들 수 있는 소형 주방가전이 주목받고 있다. 하지만 대부분의 제품들이 각각의 기능에만 특화되어 있으므로, 건강을 유지하기 위해서는 여러 대의 제품을 구매해야 한다는 단점이 있음. 여러 대의 소형 주방가전 사용 시 주방공간을 협소하게 만들어 소비자들이 불편함을 호소하고 있다. 이에 개발하게 될 제품은 다양한 기능을 하나로 합친 복합 조리기구인 All-in-one 멀티쿠커 개발하여 주방의 공간적 제약을 해소할 필요성을 가지고 있다. 개발될 제품은 모터 및 제어기, 인덕션 레인지로 구성되는 멀티쿠커로 전자기적 적합성 검증 및 국내외 전자파 인증획득을 위해 전원모듈에 적용될 전원노이즈필터의 구성소자에 대한 코어 재질, 코일권선방법, 커패시터 부품 특성을 분석하여 최종 적용될 수 있는 모듈에 신뢰성이 향상될 수 있는 부품 적용을 하고자 한다.

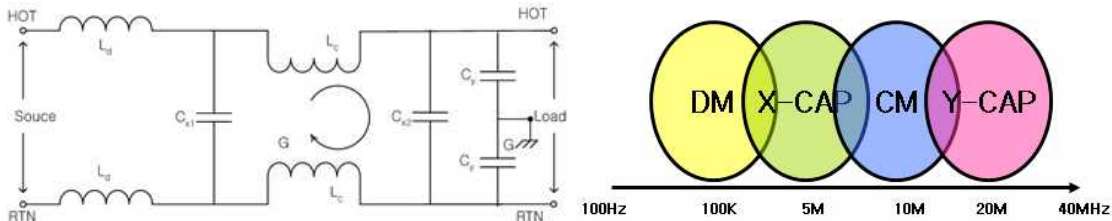


그림 1. 전원필터구성 및 주요 구성소자의 주파수 특성 대역

기호	명 칭	주 역 할
CM	Common mode Inductor	저주파대역 Common mode 노이즈 제거
DM	Differential mode Inductor	고주파대역 Normal mode 노이즈 제거
X-Cap	Line Cross Capacitor	저주파대역 Normal mode 노이즈 제거
Y-Cap	Line Bypass Capacitor	고주파대역 Common mode 노이즈 제거

표 1. 전원 필터의 EMC대책 구성소자 명칭 및 역할

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술혁신개발사업(수출지향형) “글로벌 시장 경쟁력 강화를 위한 프리미엄 IoT All-in-one 멀티쿠커 개발”(과제번호:S3265805)을 통하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

분산전원용 전력량계 개발 관련 보안기능 도입 방향 연구

A study on the introduction direction of security functions related to the development of watt-hour meters for distributed power

이주영 · 임의수 · 김해진*

(재)대구기계부품연구원, *(주)서창전기통신

최근 기후환경 변화와 환경에 대한 국제적 관심은 고조되고 있으며 한국도 2050년까지 탄소배출제로를 목표로 신재생 에너지 발전(분산전원)에 박차를 가하고 있으며, 이에 전 세계는 ‘스마트 그리드 에너지 기술’에 집중하고 있다. 스마트 그리드란 정의된 일정한 전기적 범위 안에서 상호 연결된 ‘수용가’와 ‘분산 전원(Distributed Energy Resource, DER)’의 그룹을 의미하고 이는 계통에 대하여 하나의 제어 가능한 개체이며, 계통으로부터 연결 및 독립이 자유로워야 한다. 다시 말해 스마트 그리드는 지역화된 전력망으로 수용가와 풍력, 태양광 등의 분산 전원을 연결한 것으로 전체 전력 계통과 독립적으로 동작하여 전력의 자급자족이 가능하며, 필요에 따라 계통과 연계되어 동작할 수도 있는 전력망이다. 최근 국내 및 해외 여러 전력회사에서 스마트 그리드라는 개념의 전력망 구축을 위한 활동이 활발하게 이루어지고 있다. 스마트 그리드는 분산전원과 같은 중소규모의 전력망에 ICT 기술을 접목하여 전력 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환하게 함으로써 에너지 효율을 최대화하는 기술이다.

하지만 전력망과 ICT 기술과의 융합은 에너지 측면에서는 효과적일 수 있으나, 보안 측면에서는 여러 위협 요인들을 증가시킨다. 증가되고 있는 분산전원과 계통망과의 전력 공급 및 수요 상황 예측뿐만 아니라 원격 관제가 가능하기 때문에 스마트그리드 네트워크를 통한 사이버 해킹에 의해 정전이 발생할 수 있고 전력량계를 조작하여 금전적인 이득을 취할 수 있으며 이는 사회적 경제 손실로 이어질 수 있다.

따라서 본 연구를 통해 급속도로 증가되고 있는 분산전원 AMI에 사용되고 있는 전력량계의 보안 취약 요인들을 분석하고, 사이버 테러에 대한 전력량계의 보안체계 솔루션 적용 및 개발 상황을 검토하여 전력량계의 보안을 높이는데 기여하고자 한다.

본 논문 중소벤처기업부, 지역특화산업육성+(R&D)사업 (S3084046)으로 수행되었으며, 지원해 주신 모든 분들에게 감사의 뜻을 전합니다.

지역난방 사용자설비의 빅데이터 기반 운영실태 분석을 통한 에너지 효율향상 방안 연구

A study on energy efficiency improvement plan through big data-based
operation condition analysis of district heating user equipment

류기윤 · 김민영* · 김래현*

서울과학기술대학교 화공생명공학과, *서울과학기술대학교 산학협력단

우리나라 집단에너지 지역난방은 열원시설에서 생산된 80~120℃ 온수를 열수송 배관망을 통하여 지역난방 열사용시설로 공급하고 있다. 지역난방 사용자 기계실에서는 열사용시설에 필요한 난방, 냉방 및 급탕수를 열교환설비를 통해 공급하고 온도가 낮아진 중온수는 다시 열원시설로 보내진다. 지역난방 사용자가 열을 사용하기 위해서는 지역난방 열사용 시설기준에 따라 지역난방 열사용시설을 구비하여야 한다. 지역난방 열사용 시설기준에는 난방, 급탕 및 냉방부하의 산정기준, 열교환설비의 기기용량 산정기준, 계통구성방법, 열교환설비의 장치용량 설계 기준, 기기제어장치의 구비 요건 등 지역난방 사용자가 갖추어야 할 기술요건이 명시되어 있다.

본 연구에서는 공급지와 사용자의 접점인 기계실의 수년간의 빅데이터를 수집하여 운영의 최적화와 에너지 효율 향상 방안을 도출하고자 한다. 또한 본 연구에서는 사용자설비의 1차 측의 실시간 온도 유량과 지역설비 관련 데이터를 종합 분석하여 현재 기계실 운영 실태와 열사용 패턴을 분석하였다. 이들 결과를 종합하여 사용자설비 에너지 효율 진단과 기계실의 운영과 유지보수 대책을 통해 정밀 진단서비스를 확장하는 기반을 마련하고자 한다.

환경온도에 따른 에너지저장장치용 리튬이온전지 모듈의 열유동 해석

강서희 · 이동철, · 신치범†

아주대학교 에너지시스템학과

리튬이온전지는 전력 변환 효율이 우수하고 수요에 따라 에너지 저장 시간을 조절할 수 있어 최근 가장 주목받고 있는 에너지저장장치이다. 하지만 리튬이온전지를 저온에서 고속충전 할 경우 음극에 리튬이 석출되어 내부 단락으로 인한 안정성 문제가 발생할 수 있고, 리튬이온전지를 고온에서 작동시키면 SEI(Solid-Electrolyte Interface)를 증가시켜 열화를 촉진시킨다. 따라서 리튬이온전지의 열관리는 에너지저장장치의 안전운동을 위해 필수적이며, 실제 리튬이온전지의 운용조건을 반영할 수 있는 모델링 방법론을 개발하는 것은 중요하다.

본 연구에서는 환경온도에 따른 리튬이온전지 모듈의 열유동을 해석하기 위하여 3차원 모델링을 수행하였다. 리튬이온전지 모듈은 63Ah의 파우치형 셀 28개가 14S2P로 연결되어 있으며 모듈 내 공기는 전면부의 유입구로 들어와 후면부의 출구로 배출된다. 전극의 전위 및 전류 밀도 분포 계산을 기반으로 한 수학적 모델을 통해 리튬이온전지의 열적 거동을 계산하였다. 에너지저장장치의 작동 조건을 반영하기 위해 다양한 환경온도에 따른 리튬이온전지 모듈의 온도분포를 예측하였다. 모델링 결과는 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하였다.

리튬이온전지의 셀 간 편차가 모듈의 방전 거동에 미치는 영향 모델링

이동철, 강서희, 신치범*

아주대학교 에너지시스템학과

신재생에너지의 사용이 증가하면서 생산된 전기에너지를 저장하였다가 필요 시 사용하는 에너지저장장치에 대한 관심이 커지고 있다. 높은 에너지 밀도와 고출력의 장점을 가진 리튬이온전지를 전력저장원으로 사용한 에너지저장장치는 전력수급의 균형, 피크 감축, 안정적인 전력계통을 운영하기 위한 솔루션으로 선호된다. 리튬이온전지를 직렬 또는 병렬로 연결했을 때 셀 간 불균형으로 인해 과방전과 조기 방전 종료가 일어날 수 있으며 이로 인해 모듈의 성능 저하와 안전 문제가 발생할 수 있다. 따라서 에너지저장장치의 전력 품질 신뢰성을 높이고 효율적인 에너지시스템 운용을 위해서는 수학적 모델을 통해 리튬이온전지 모듈의 셀 간 편차를 계산하는 것이 필요하다.

본 연구에서 사용한 리튬이온전지 모듈은 2개의 셀이 병렬로 연결되어 단일 가닥을 구성하고 14개의 가닥이 직렬로 연결되어 있다. 리튬이온전지 2개가 연결된 가닥의 용량, 내부 저항, 방전 깊이(Depth of discharge) 분포를 계산하였다. 모듈의 지배방정식으로 전극에서의 분극 특성에 기초하여 옴의 법칙과 전하 보존법칙을 사용하여 단일 가닥에서의 방전 거동을 계산하였다. 리튬이온전지 단일 가닥의 모델링 파라미터를 기반으로 Particle swarm algorithm을 통해 14개의 가닥의 방전 용량, 내부 저항, 방전 깊이 분포를 추정하였다. 모델링 결과는 실험 결과와의 비교를 통하여 모델의 타당성을 검증하였다.

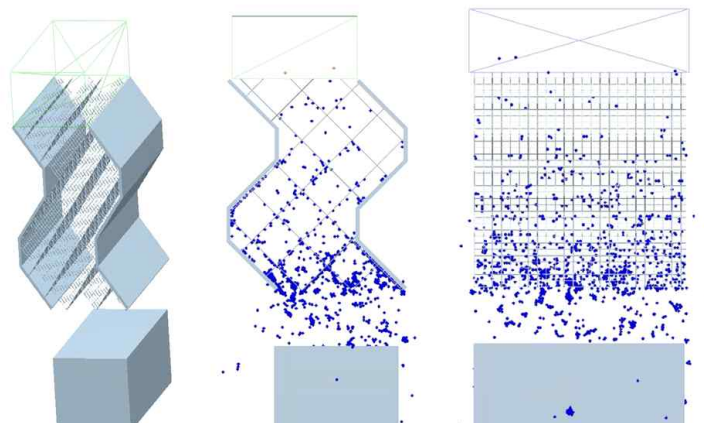
이산-유한요소해석에 기초한 오염물질 집진용 하이브리드 필터의 경량 설계

Lightweight Design of Hybrid Filter for Dust Collection based on Discrete-Finite Element Analysis

김태형 · 이상용 · 이형석 · 김도훈 · 박유진 · 장주혁 · 김정태

청주대학교 항공기계공학전공

에너지 환경설비 및 전력생산 설비의 안정적 운영을 위해서는 청정한 환경을 상시 유지해야 한다. 따라서 미세분진 및 오염된 미스트 등을 포집하기 위한 집진설비가 설치된다. 이와 같은 집진설비에는 다양한 필터 패드가 사용되는데 보통 스테인리스 와이어를 직조하여 제조한 패드형 필터가 채용된다. 그러나 직조형 상용 와이어 필터는 직조된 간격이 넓어 다층의 패드를 쌓아 사용하기 때문에 결국 집진설비의 크기도 커져야 하며 그만큼 효율도 낮다. 따라서 이를 대신하여 베인형 필터 패드를 사용하는데 베인형 필터는 일정한 각도로 강판을 굽혀 촘촘한 간격으로 배열하여 격막구조로 제작하기 때문에 격막 개수가 상당하여 그 무게 또한 무거워 유지보수 등의 어려움을 갖는다. 이에 본 연구에서는 기존 베인형 필터의 격막 간격을 최적화하여 격막 사이에 와이어 패드를 삽입한 하이브리드 구조의 경량 필터를 설계하였다. 설계된 모델을 이용하여 미세입자 거동해석을 수행하였고 입자의 투과 성능이 가장 우수한 형상을 최적 집진 필터로 선정하였다. 입자 거동해석 후 필터에 가해진 압력을 유한요소 모델에 반영하여 구조해석을 수행하였으며, 해석결과 격막 사이에 삽입된 스테인리스 와이어의 휨이 극히 미미하였고 와이어 해석 항복강도 또한 충분히 낮아 구조적으로 건전함을 확인하였다. 본 연구를 통해 이산-유한요소 해석에 기초한 하이브리드 집진 필터의 경량화를 위한 설계기법이 유효함을 확인하였다.



Acknowledgement

본 논문은 2020년도 중소기업벤처부 수요기반기술이전사업(S2963240)의 지원에 의해 수행되었음.

농촌형 열에너지 그리드 모델 타당성 연구
Feasibility Study on Rural Thermal Energy Grid Model

윤시원* · 백경관 · 오정석 · 윤영직 · 홍성빈 · 정대현

한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실

- 농가에서 사용하는 비용 중 약 30% 이상이 냉·난방비에 사용되고 있으며 농가 수익 증대 및 온실가스 저감을 위해 냉·난방비의 절감이 절실히 필요하다. 건물을 대상으로 한 에너지 그리드 연구는 다수 진행되었고 이에 대한 효용성이 입증되었으나, 농촌 지역을 대상으로 하는 열에너지 그리드 설계 및 구축 연구는 부족하여 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 농촌지역을 대상으로 열에너지 그리드 모델을 설계하고 이에 대한 타당성 연구를 수행하였다. 효율적인 열에너지 그리드 운영을 위해 설계 시설원에 난방 및 냉방부하를 산출하고 이에 대응할 수 있는 설비 용량 산출 및 배관 네트워크를 설계하였다. 분산형 열에너지 생산 장치(PVT, 열병합발전, 지열 히트펌프, 공기열 히트펌프 등)이 설치되고 수요처에 비용 최소화를 위한 최적화 스케줄링을 수행한다. 이러한 농촌형 열에너지 그리드 구축 및 보급은 농촌 지역 열에너지의 안정적 공급 뿐 아니라 온실가스 배출을 저감에 기여함으로써 탄소 중립에 기여할 수 있을 것이다.

- 감사의 말: 본 성과물은(논문, 산업재산권, 품종보호권 등)은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ0162122022)의 지원에 의해 이루어진 것임

산업체 구내 계통에서의 전압 조정에 따른 무효전력 특성

Reactive Power Characteristics according to Voltage Regulation in Industrial Premises System

박승현 · 권기웅 · 김용호

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

최근 산업체에서는 에너지 효율 향상을 목적으로 부하 설비를 최적 효율 전압에서 운전이 가능하도록 제어하는 보존전압감소 기술에 대한 수요가 늘어나고 있다. 기존에는 송·배전 계통에서 주로 피크 저감을 위해 활용되던 기술이지만 신재생 에너지 보급 증가와 산업체의 고품질 전원이 요구되는 부하 증가로 배전단에서의 전압 조정 필요성 또한 증가하게 되었다. 이때 전압 조정으로 전력 절감 장점을 살리면서 부하의 운전 특성을 유지하는 것 또한 중요하다.

따라서 본 논문에서는 산업체 구내 계통에서의 전압 조정에 따른 무효전력 특성에 대한 연구를 소개한다. 산업체 구내 계통은 산업현장에서 가장 널리 사용되는 유도전동기를 대표적으로 선정했으며 유도전동기의 자계 형성에 필요한 전력이 부하의 무효전력이다. 부하는 정임피던스 부하와 정토크 부하 2가지의 경우로 구분해 시뮬레이션 했으며 구성은 아래 그림과 같다. 이때 22.9kV를 400V로 강압해 사용하며 10%의 전압 조정을 통해 360V로 제어하는 경우 200kW 출력의 유도전동기가 구동되는 구내 계통의 조건이다.

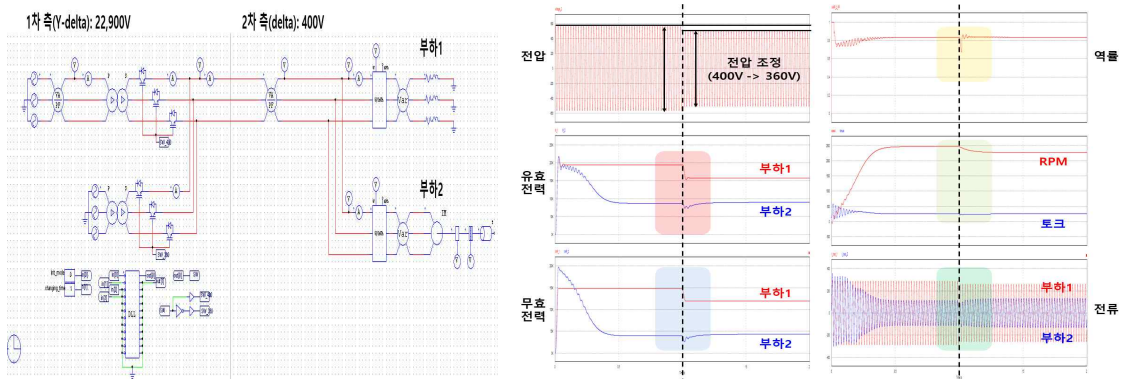


그림. PSIM 시뮬레이션 회로도(좌) 및 결과 그래프(우)

시뮬레이션 결과 전압 조정이 이루어지고 정임피던스 부하에서는 유효전력이 감소하는 이 점을 확인할 수 있다. 정토크 운전의 유도전동기의 경우는 무효전력이 증가하는데 이는 일정한 토크를 유지하기 위해 무효분 전류가 증가해 나타나는 특성이다. 이렇게 증가하는 무효전력으로 인해 구내 계통 전체의 역률이 나빠질 수 있어 전압 제어가 이루어지는 변압기 단에서 동시에 무효전력 공급이 필요하다는 것도 알 수 있다. 더 나아가 무효전력을 부하의 가까운 곳에서 공급할 수 있다면 운전 특성을 유지하고 전원 측에서 공급하는 피상전력을 줄일 수 있어 구내 계통 전체의 전력 절감에도 도움이 될 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. 202220290010B).

에너지 빅데이터 활용을 위한 API 설계 및 성능 평가 연구 API design and performance evaluation study for energy big data utilization

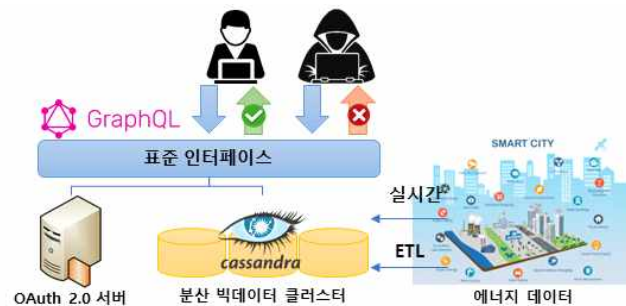
양동진 · 박승현 · 권기용 · 김용호

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

최근 정부는 ‘제6차 에너지이용 합리화 기본계획’을 통해 합리적인 에너지 사용을 위한 ‘에너지 빅데이터 개방, 공유 플랫폼’ 구축을 추진하고 있으며 에너지 환경변화에 대응하는 국가시범도시를 통해 현장 에너지 데이터를 수집하여 활용하는 방안을 진행 중이다. 에너지 소비정보를 분석함으로써 수요관리 예측을 하게 되면 합리적인 에너지 사용을 통해 경제 성장을 추구할 수 있고 다양한 산업 모델을 창출할 수 있다. 이를 위해선 누구나 손쉽게 에너지 빅데이터에 접근하여 활용할 수 있는 플랫폼이 필요하다.

본 논문에서는 데이터 분석 및 활용을 위한 빅데이터 API 설계 방법과 그에 따른 성능 평가 연구를 소개한다. 우선 Kafka, Spark를 이용해 실시간으로 데이터를 수집, 분석, 처리 과정을 거쳐 카산드라 기반 분산 데이터베이스에 저장하여 에너지 빅데이터 환경을 구축한다. 기존 REST API 방식이 아닌 GraphQL을 사용하여 API 설계한다. 쿼리 언어를 통해 데이터를 리소스 서버로부터 가져오기 때문에 필요한 데이터만 요청하는 게 가능하여 오버페칭과 언더페칭을 줄일 수 있으며 하나의 엔드포인트만을 관리함으로써 설계와 관리가 수월하다는 장점이 있다. 이는 많은 양의 에너지 데이터를 활용해야만 하는 미래산업 모델에 적합하다. 또한, OAuth2.0 서버를 구축하여 사용자 접근 통제가 가능하므로 에너지 소비정보에 따른 개인정보 노출의 위험성을 예방할 수 있다.

에너지 수요가 늘어남에 따라 데이터의 양이 많아지고 있기 때문에 요청에 따른 응답속도가 중요하다. 본 연구의 실험은 데이터베이스, Public_API, Secret_API 세 가지 항목으로 나누어 성능 평가를 진행하였으며 세 가지 항목 모두 사용자 관점에서 수용 가능한 수준임을 확인하였다.



에너지 빅데이터 활용 플랫폼

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO. 20213030160300).

Self-aligning Bearing(with tapered bore) 치수 측정 방법에 대한 고찰

A study on the measurement method of Self-aligning Bearing(with tapered bore) Dimensions

김성국 · 장범석 · 홍태화*

(주)한빛파워, *한국수력원자력(주)

원전 설비에서 사용되는 안전성 등급의 베어링의 주요 기능은 발전소의 정상운전 또는 설 계기준사고(DBE)시에 안전관련설비 전동기 또는 펌프의 축(Shaft) 고정, 축 하중 지지기능 및 회전축의 마찰저항을 감소 시켜 회전력을 전달하는 안전 기능을 수행하므로 원자력 품질 보증 프로그램에 의해 설계, 제작되어야 한다. 하지만 베어링은 대부분 일반규격품으로 생 산되기 때문에 안전관련설비에 베어링 사용하기 위해 CGID(Commercial Grade Item Dedication) 기술평가(Technical Evaluation)를 수행하여야 한다. 품질검증을 위해 선정된 베어링의 필수특성 중 치수는 제작사의 품질 등급에 따라 제작공차가 달라지는데 동일 제작 사 동일 모델인 경우에도 1/10mm 이상 차이가 발생하게 된다. 따라서 공차를 고려하지 않 고 여러 모델을 혼합하여 사용할 경우 측정될 불량, 고진동 등의 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 원전의 안전관련설비에 사용되는 베어링 중 특수 제작 된 Self-aligning Ball Bearing with tapered bore(자동조심볼베어링-내륜 테이퍼 가공)의 치수 측정 방법의 문제점과 해결방안에 대해 고찰하고자 한다.

일반적인 볼베어링, 롤러베어링의 지름은 2/3점식 마이크로미터 사용하거나 빛의 투과방 식의 광학식 비접촉측정기를 사용하여 측정하고, 나비의 경우 2점식 마이크로미터 혹은 블 록게이지 & 다이얼 게이지를 이용하여 측정한다. 하지만, 내륜이 테이퍼 가공된 베어링 내 륜의 경우 측정 대상 지점이 체결성 향상을 위해 챔버 가공으로 소실되어 측정이 불가능하다.

제작사의 경우 테이퍼 베어링의 치수 측정은 챔버 가공전 이루어지거나, 특수 제작된 지 그를 이용하여 확인하게 되는데, 시험실의 경우 지그 제작 시 지그에 대한 검증이 필요하고 베어링의 사이즈 및 형상에 따라 다양한 지그를 준비해야 하기때문에 사실상 불가능하며 정 밀가공 베어링의 경우 공차가 마이크로(μm) 단위까지 확인해야 하므로 부적합하다.

특히 테이퍼 베어링에 대한 테이퍼 면의 치수, 각도 등을 측정할 수 있는 장비가 없어 치 수 측정이 가능한 전문기관에 의뢰하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다각적인 방법으로 접촉식 3차원 측정장비가 원뿔형상의 치수 측정이 가능함을 확인 하였다. 측정방식은 원뿔 임의의 높이 2지점 (A, B지점)에서 각각 4 지점 이상의 기준점 선택 후 A/B지점간 원뿔면을 나선형으로 회전측정하여 원뿔 각도를 계산하여 원뿔의 임의 의 높이에서 지름값을 표시하는 방식이다.

접촉식 3차원 측정기를 이용하여 테이퍼 베어링 내륜에서 챔버가공이 되지 않은 임의 높 이 두 지점의 기준점 선택 후 베어링 내륜 면을 나선식으로 접촉시켜 측정하여 각도를 계산 하였으며, 챔버가공으로 소실된 내륜 지름 값을 확인하게 되었다.

특수 베어링에 대한 품질검증을 수행하는 기관에서 본 논문 사례를 바탕으로 품질검증 업 무에 활용할 경우 많은 시행착오를 줄이고 업무 효율을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

탄력운전 적용에 따른 LOCA 방법론 개발 현황

Development Status of LOCA Methodology according to Flexible Operation

이재민

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전통적으로 원자력발전소는 저렴한 발전단가에 따라 기저부하 역할을 담당해왔다. 근래에는 태양광발전과 같은 신재생에너지 발전설비 및 발전량의 증가로 원전의 탄력적인 운영이 요구되고 있다. 또한, 이러한 전력망(grid)의 경향은 유럽 등의 수출대상국에서도 나타나고 있고, 프랑스 등의 원전 선진국에서는 이미 부하추종운전 등을 통해 원전의 탄력적인 운영을 수행하고 있다. 탄력운전을 수행하게 되면 주로 전출력에서만 운영하던 원전을 50%, 80% 등의 부분 출력으로의 변동이 불가피하게 되고, 그에따라 부분 출력을 반영한 LOCA 평가 등을 통해 안전성을 확인해야 한다. 본 논문에서는 탄력운전을 고려한 LBLOCA 방법론 및 예비평가 결과에 대해 기술하였다.

탄력운전을 고려한 LOCA 평가를 위해 사고 초기조건 및 기존 방법론 적용의 타당성이 검토되어야 한다. 일일부하추종운전 요건인 '100-50-100(%)' 출력변동 조건을 고려하면 탄력운전으로 제어되는 노심 출력의 증/감발율은 0.00694%/sec 수준으로 핵연료 및 계통 거동에 미치는 영향은 미미할 것이라 판단할 수 있다. 또한, ECCS 성능평가 규제지침에 따라 보수적인 노심 열출력을 고려한 설계자료를 적용하였으므로 예비평가를 위한 초기조건 등의 설정은 타당하다고 볼 수 있다.

예비평가는 기존 LBLOCA 방법론('SPACE 코드를 이용한 APR1400형 원전 LBLOCA 안전해석방법론(안)')에 따라 수행하였다. 본 평가 모델을 적용한 LBLOCA 해석에서는 파단 크기와 형상에 대한 민감도 분석을 출력별로 4가지 연소도에 대해 수행하였다. 출력별 4가지 연소도에 대해 파단크기 및 형상 민감도 분석을 수행하여 가장 보수적인 PCT (Peak Clad Temperature) 및 피복재 PLO (Peak Local Oxidation) 값을 도출해냈다. 민감도 분석은 100%, 80%, 50% 출력에서 수행하였고, 그 결과 전출력 조건에서 가장 보수적인 결과(PCT 및 PLO)를 나타내는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 현행 SPACE 평가방법론으로 탄력운전을 고려한 LBLOCA 평가의 적절성을 확인하였고, 탄력운전 시에도 원전의 안전성이 확보되는 것을 보이기 위해 예비평가를 수행하였다. 향후 핵연료 및 연료봉에 대한 최종 연계자료를 반영하여 최종평가를 수행할 예정이다.

원자력발전소 HVAC 계통 시험 및 조정을 위한 전산모델 타당성 연구 Feasibility Study of Computational Model for Testing and Adjusting of a HVAC System in a Nuclear Power Plant

고종욱 · 강신철

한국수력원자력 중앙연구원

원자력발전소의 공기조화설비(이하 HVAC, Heating, Ventilating and Air-Conditioning)는 발전소내 방사선 피폭선량의 제한치 이내로 유지하고 작업자 및 핵심 기기에 적합한 환경을 제공하기 위해 설계되고 발전소 정상 운전중 또는 설계기준사고시 필수적으로 작동되어야 한다. 주요 HVAC 계통 중 정상운전중 대기 상태에 있으나 설계기준사고시에만 작동되는 계통의 경우 사고시 운전성이 보장되어야 하므로 주기적인 현장시험을 통하여 계통의 운전성을 확인하여야 한다.

발전소의 제한된 계획예방정비기간 내에 현장시험을 수행하고 운전성을 확보하여야 하므로 시험시간을 최소화하기 위한 노력이 필수적이다. 본 연구의 목적은 시험 및 조정에 소요되는 시간을 줄이기 위해 발전소의 HVAC 계통에 대한 전산모델을 구축하고 구축된 모델의 타당성을 검증하는 것이다.

이를 위해 원자력발전소의 주요 계통 중 하나인 핵연료건물의 HVAC 계통을 선정하고 선정된 계통에 대한 전산해석 모델을 구축하였다. 모델 구축에 사용된 코드는 EPRI에서 배포한 GOTHIC v8.3이다. GOTHIC v8.3 코드에 해당 계통의 송풍기, 댐퍼, 및 공기조화설비의 필터류 등의 세부기기와 덕트를 모델링하고 온도, 압력, 체적유량 등을 계산하였다. 계통의 설계유량과 계산결과를 비교 분석하고 구축된 전산모델의 타당성을 검증하였다. 검증 결과, 구축된 전산모델의 체적 유량은 계통의 설계유량과 유사하게 나타났다.

시험 수행에 적합한 조건을 사전에 분석하고 댐퍼의 개도각을 최적화하는데 본 연구의 결과를 활용함으로써 현장시험 소요시간을 최소화하는데 기여할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구에서 구축된 모델을 이용한 전산해석 결과와 현장 시험결과를 비교함으로써 현장시험시 유량 불만족 상태에 대한 해결방안 도출에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

경년열화관리를 통한 원전 해수배관 설비 신뢰성 향상
Improvement of Reliability of NPP Sea Water Piping by Aging
Management Program

박상규* · 김태현*

한국수력원자력 중앙연구원

원자력발전소에서 해수배관은 주기기기의 열제거 수단으로 사용되고 있다. 해수배관이 1차측의 냉각재계통, 2차측의 증기사이클 계통 등의 배관에 비해 압력, 온도 등 운전조건이 가혹하지 않지만, 해수를 내부유체로 사용하는 운전특성으로 부식손상 가능성이 높아 열화관리가 필요하다.

해수배관은 주로 탄소강이나 스테인리스강으로 제작되며 일부는 모넬 재질이 사용되는 발전소도 있다. 탄소강 배관은 해수에 취약하기 때문에, 해수가 직접적으로 금속표면에 접촉하는 것을 방지하기 위하여 에폭시(Epoxy), 고무(Rubber), 폴리에틸렌(PE; Poly-Ethylene), 폴리에스터(Polyester) 등의 방식 피복재가 사용되고 있다. 하지만, 가동원전에서 방식피복재 손상으로 인한 누설사례가 일부 보고되고 있어 한수원에서는 설비신뢰성을 향상시키는 프로그램과 절차를 수립하여 이행하고 있다. 해수배관 누설예방과 안전하고 신뢰성 있는 설비관리를 위하여 검사방법 개선, 담당자 교육 및 기술교류 강화, 국내외 경험사례 분석 및 적용, 취약부위에 대한 원인분석 및 설계변경 등 다양한 개선활동을 수행하고 있다.

본 논문에서는 한수원에서 효율적으로 해수배관을 관리하기 위해 이행하고 있는 해수배관 경년열화관리 프로그램(AMP)과 설비신뢰도 향상을 위한 내부피복재 특성분석, 취약부도출 및 설비개선 내용을 정리하였다.

GOTHIC 코드를 사용한 고압 응축실험 모사

Simulation of high pressure condensation experiment using GOTHIC code

하희운

한국수력원자력 중앙연구원

한수원은 '21년부터 전력 생산 이외에 수소생산 등 다양한 분야에서 활용 가능한 일체형 원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발 추진 필요성에 따라 기존 국내 개발 SMR인 SMART원전 보다 안전성 및 경제성이 향상된 혁신형 SMR 기본설계과제를 수행하고 있으며, '23년부터 '28년까지 「혁신형 소형모듈원자로 기술개발사업」을 통해 차세대 SMR 개발을 추진할 예정이다. 본 연구는 혁신형 SMR 격납용기 열수력 해석과 관련하여 고압 환경하에서 발생하는 증기응축 현상 모사에 원자로건물 열수력 해석 코드인 GOTHIC 코드가 어느 정도 신뢰성이 있는지 확인하기 위해 KAIST에서 수행된 고압 증기 응축실험¹⁾에 대해 GOTHIC 모델을 작성하고 해석을 수행하였다. 이후 해석 결과는 실험 결과 및 타 코드(NRELAP5, RELAP-3D)를 활용한 해석 결과²⁾와 비교 검토를 수행하였다.

KAIST 실험장치는 증기발생기, 비응축성가스 공급 탱크, 열교환기, 전열기, 실험면(Test section)등으로 구성되어 있다. 실험은 증기발생기에서 고온고압의 증기가 생성되고 이 증기는 실험면에 위치한 원형 단면 단일 튜브를 지나면서 튜브 외부 면에 접해 있는 냉각수에 의해 응축된 후 응축수와 증기 일부는 하부로 이동하고 열교환되어 재순환 되는 방식으로 진행된다. 실험은 서로 다른 조건에서 약 540여 회 수행되었으며 본 연구에서의 해석은 관심 영역 조건에 해당하는 14개 실험에 대해 실시하였다. 해석모델은 응축튜브 및 냉각수로 구성된 실험면만 모사하였으며 증기발생기와 응축 튜브 후단의 기기는 경계조건으로 구성하였다. 응축 튜브는 길이 방향으로 9개의 node로 나누고 계산자원을 효율적으로 사용하기 위해 1/8 축대칭 모델을 사용하였다.

결과는 열전달 계수를 기준으로 검토하였다. 조건별 검토 결과 압력 45.6~66.6bar 범위에서 NRELAP5 코드와 유사하게 오차범위 이내에서 실험결과를 잘 예측하는 것을 확인하였다. 30bar 이하 압력 범위에서 저압 조건으로 갈수록 응축튜브 하단에서 실험값 대비 하향 예측하는 경향을 보였다. 끝으로 GOTHIC, RELAP-3D 및 NRELAP5의 결과를 실험값과 통합 비교한 결과 RELAP-3D는 오차범위 밖에서 하향 예측하는 경향을 보이지만, GOTHIC과 NRELAP5의 경우 전반적으로 오차범위 이내에서 잘 예측하는 것으로 분석되었다. 해석 결과는 혁신형 SMR 격납용기 열수력 해석에 활용할 예정이다.

참고문헌

- 1) S.J. Kim, "Turbulent Film Condensation of High Pressure Steam in a Vertical Tube of Passive Secondary Condensation System," Ph.D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, KAIST, February 2000.
- 2) Pravin Sawant, John Marking, and Claudio Delfino, "NRELAP5 Predictions of KAIST High Pressure Condensation Data Using Existing and Extended Shah Condensation Correlation" 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, August 30–September 4, 2015, Chicago, Illinois, USA.

디지털기기 일반규격품 검증 기술기준 적용성 고찰

A Study on Standard Application related to Digital Equipment Commercial Grade Item Dedication

양창석 · 홍태화 · 정선철

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

원자력발전소에서 안전등급 품목(Safety-Related Item)을 공급하는 방법은 원자력품질보증절차(Nuclear Quality Assurance Program)를 가진 공급자가 해당 절차에 따라 제작 및 공급하는 방법과 일반규격품 검증(Commercial Grade Item Dedication)을 통하여 공급하는 두가지 방법이 있다. 그 중 디지털기기의 일반규격품 검증을 위해서는 신인성(Dependability)에 대한 추가적인 검증을 요구한다.

2. 디지털기기 일반규격품 검증 기술기준 요건

미국 NRC는 규제지침서 Reg. guide 1.152(2011), "Criteria for Use of Computers in Safety Systems of Nuclear Power Plants"를 통하여 EPRI TR-106439(1996) "Guideline on Evaluation and Acceptance of Commercial Grade Digital Equipment for Nuclear Safety Applications"를 적용하고 있다. 국내 요건은 규제지침 KIN/RG-N17.12(2015) "안전성관련품목 대체사용을 위한 일반규격품의 품질검증" II.7항에 디지털 일반규격품은 EPRI TR-106439를 충족해야함을 명시하고 있어 미국과 동일한 기준이 적용되고 있음을 확인할 수 있다. 해당 기술기준에서는 디지털기기 일반규격품 검증을 위해서 신인성(Dependability)을 확인해야 하며, 신인성은 프로그램 개발과정에 대한 실사(Survey)를 통하여 확인할 수 있다고 명시한다. 그러나 디지털기기 공급자들이 지적재산권 등 기술유출에 대한 우려로 실사방문을 꺼려하고, 방문을 하더라도 프로그램 개발관련 문서는 열람만 가능하며, 검증문서 내 첨부가 불가한 경우가 대부분이다. 따라서 실제 검증 수행사례(Practice) 수집이 어려워 정형화된 심사기준을 제시하기 어렵다. 따라서 미국 원전사업자들은 IEC 61508(2010), "Functional Safety of Electric/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems"에 근거한 SIL인증(Safety Integrity Level Cert.)절차 적용을 검토하고 있다. SIL인증은 운송, 철도, 석유화학 등 다양한 산업분야의 디지털기기 검증의 글로벌 표준이며, 인증기관 및 인증자가 국제표준에 근거하여 디지털기기의 신뢰성을 확인하고 인증을 수행하여 기존의 심사보다 명확한 기준을 가질 수 있다. 따라서 미국원전사업자들은 SIL인증기준을 원전산업에 적용하기 위하여 EPRI TR-3002011817(2019), "SIL Efficacy for Nuclear Power Plant" 및 NEI 17-06(2021), "Commercial Grade Digital Equipment based on 3rd Party SIL Certification"를 작성하였으며, 해당 내용을 미국 규제기관(NRC)에서 검토 중이다.

4. 결론

현재 국내 원자력 발전소의 각종 아날로그 기기들은 디지털기기로의 변환이 요구되고 있으므로, SIL인증체계 도입을 위한 검토가 필요하다. 상기 검증방안은 국내 원자력 발전소의 일반규격품 검증 기술개발, 정책수립 및 검토체계 구축에 기여하며 디지털기기 안전성 및 신뢰성 향상에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

인적 오류를 줄이기 위한 가동중검사 결과 입력 방법 개선

Improvement of Input Method of In-Service Inspection Results to Reduce Human Error

유현주, 곽동열, 조찬희*

한수원 중앙연구원, * 세안기술주식회사

한수원 중앙연구원은 가동중검사 종합 관리시스템(i-databox)을 개발·운영하여 가동중검사결과 이력을 신뢰성 있게 관리하고, 검사된 결과정보의 품질을 높이기 위하여 전 원전을 대상으로 효율적인 디지털 가동중검사 결과 정보관리를 하는 노력을 기울이고 있다.

한수원은 산업계와 협업으로 i-databox를 운영하여 원자력법령에 따라 시행하는 법정검사인 원전 가동중검사의 설비 건전성을 확인하고 있다. 현재까지 약 3년동안 실시간 디지털 검사결과를 입력고 있으며, 이는 신뢰할 수 있는 원자력발전소의 건전성을 표현하는 중요한 지표이다. 이를 통해 발전소운영과 관련한 다양한 정보를 원하는 사람들에게 원하는 디지털 정보를 제공하고 있으며, i-databox의 운영은 점차 비중이 높아지고 있는 실정이다.

가동중검사 시 추가검사, 다른 검사일정의 지연 등의 다양한 현안에 의하여 현장에서는 디지털데이터 입력 상황의 변화가 발생되고 있고, 디지털 입력 편의성에 의하여 실시간 온라인으로 검사 결과를 입력하지 않고, 모아 둔 검사결과지 결재본을 한꺼번에 batch 입력 처리하는 문제가 발생하고 있다. 이는 결재본을 한꺼번에 입력한 후 이를 검토하는 업무가 빠지게 되어 인적오류가 일어날 가능성이 매우 높다. 가동중검사의 근간이 되는 검사결과 정보는 발전소 운영과 관련된 가동중검사 정보가 결집되어 있는 아주 중요한 정보이므로 이에 대한 철저한 관리가 필수적이다. 따라서 CRI에서는 인적오류를 줄일 수 있는 방법을 연구하고 이를 시스템에 반영하여 운영하고자 한다.

본 논문에서는 위에서 기술한 사유로 인한 인적오류를 줄이기 위해 검사결과기록지 결재시스템 채택하고, 이와 관련한 i-databox의 개략적인 시스템 구성 및 기능에 대한 설명을 서술하였다. 본 연구를 통해서 원자력발전소의 운영 신뢰성 향상으로 원자력 에너지의 효율적 생산 효과를 기대할 수 있다.

APR-1400 원전 복수기 전열관 와전류 검사의 자동평가 시스템
시범적용 결과 고찰

A Review on the Result of Pilot Application of ECT Automatic Evaluation
for APR-1400 Nuclear Power Plant Condenser Tube

한경석 · 김인철 · 주경문

한국수력원자력 중앙연구원

원자력 발전소 복수기 전열관은 주기적으로 보빈탐촉자 와전류검사를 수행하여 설비의 건전성을 확인하고 있으며 최근 복수기 가동중 검사는 1단계 평가에서 평가오류로 인한 결함 검출 누락을 방지하기 위하여 2단계 평가를 적용하고 있다.

한국수력원자력 중앙연구원에서는 복수기 전열관의 2단계 평가 시스템의 평가효율을 향상시키고 평가자의 평가 오류를 최소화 하고자 자동평가 소프트웨어를 활용한 자동평가 시스템을 개발하고 있으며 국내 원전 복수기 가동중검사 데이터를 기반으로 자동평가 알고리즘을 설계하였다.

본 연구에서는 설계된 자동평가 알고리즘을 활용하여 국내 APR-1400 노형 복수기 가동중검사에 시범 적용을 하여 검출 변수의 유효성을 확인하였으며, 검사 환경 및 데이터 품질이 설계 변수에 미치는 영향을 분석, 자동평가 효율을 높이기 위한 최적의 알고리즘 도출하였다.

혁신형 소형모듈형원자로 통합주제어실 요소 개념설계 Concept Design of Elements of Integrated Main Control Room for Innovative Small Modular Reactor

이호철 · 최선미

한국수력원자력 중앙연구원

혁신형 소형모듈형 원자로는 안전성 향상뿐만 아니라 경제성을 높여 수출의 교두보를 마련해야 한다. 용량이 소형화됨으로써 대형화전 대비 전력 생산단가에서 경제성이 떨어질 것으로 예상되기 때문에, 설계 및 운영비용 최적화를 통한 경제성 향상이 필요하다. 피동 설계, 자동화 설계, Fail-safe 설계 등을 도입하여 안전성이 획기적으로 향상된 계통설계와 통합주제어실을 통해 발전소 운영비용을 줄이고자 한다. 통합주제어실은 4개의 원자로를 3명의 운전원이 하나의 주제어실에서 원자로를 운전하는 개념으로 운전원 직무가 획기적으로 줄어 운전원 오류가 유발될 확률이 감소하고, 여러 모듈을 개별로 운영하는 것보다 통합 관리함으로써 다수모듈의 효율적 운전이 가능할 것으로 예상된다.

기존의 상용원전의 주제어실과 단순 비교하면 주제어실을 구성하는 운전원콘솔, 대형표시지시계통, 안전제어반을 각각 4배로 구성하여 하나의 통합주제어실로 배치 및 구성되어야 하지만, 공간의 제약, 배치, 관리 그리고 원자로 운전이 쉽지 않을 수 있다. 4개의 원자로를 3명의 운전원으로 발전소를 하나의 통합주제어실 운영이 가능하게 하고자 운전원 직무를 최소화하는 계통설계(피동설계, 자동화 설계, Fail-safe 설계 등 도입)와 더불어 주제어실에 요구되는 기능을 최적화하여 배치해야 한다. 즉, 발전소 주제어실 운전원 직무가 최적화되어 운전원은 해당 최적 역무에 집중하고, 시험 및 정비 등의 직접 운전과 관련성이 낮은 요소들은 다른 공간으로의 이동이 필요하다.

또한, 상용원전에서는 디지털 주제어실의 도입으로 운전원에게 정확한 판단을 위해 핵심 정보를 구분하여 제공하는 것과 더불어 종합적인 상황판단을 위한 많은 지원 정보를 제공하고 있다. 하지만 소형모듈형 원자로에서는 만약 운전원이 수행해야 할 역무가 상용원전과 같은 조건이라면, 4개의 원자로를 하나의 통합주제어실에서 운영해야 하므로 발전소의 상황판단을 지원하기 위해 제공되는 정보가 오히려 운전원에게는 업무 부담을 초래할 수도 있다. 따라서 4개의 소형모듈형원전을 안전성이 향상된 상태에서 운전할 수 있도록 운전원 인적수행도를 고려하고, 정제된 정보를 제공하여 운전원의 업무부담을 저감할 수 있는 통합주제어실 요소 개념 설계를 개발하였다.

원전 주증기관파단 사고해석시 가변과출력 원자로정지 최소 설정치 분석 Analysis of the minimum setpoints of the variable over power trip for evaluation of Steam line break accident in nuclear power plant

성제중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 설계, 건설, 품질보증 그리고 운전 등에서 공정변수의 교란, 설비 오작동 및 고장이 발생하지 않도록 다중방어 방안이 고려되어있으며 이러한 가상사건들의 거동과 결과를 분석함으로써 발전소내 설치된 안전제어계통 및 설비의 성능을 평가하고 결과적으로 발전소의 안전성을 입증하기 위하여 사고해석이 수행된다. 이때 사고해석에는 다양한 입력값이 적용되며 이중 원자로보호계통에 의한 원자로 정지 설정값은 사고해석 결과의 주요 영향요인이므로 보수적이며 포괄적 해석이 될 수 있도록 설치된 안전계측기 설정값에 불확실도를 반영한다. 특히 원전 전출력 운전중 소외전원상실을 수반한 대형 주증기관파단 사고해석의 경우, 원자로 정지후 노심 반응도가 최대가 되도록 보수적으로 조기 원자로 정지를 가정해야 하므로 원자로정지 분석 설정치인 가변과출력에 의한 원자로정지 설정치 평가는 매우 중요하다.

본 연구에서는 대형주증기관 파단사고의 원자로 정지 설정치 평가시 가변과출력 공칭트립 설정치가 양의 채널불확실도에 의해 설정치 최소값까지 변경될 수 있음을 고려하여 최대 안전해석 설정치로부터 총채널불확실도 및 여유도를 반영하여 계산하였다. 원전 원자로보호계통 및 공학적안전설비작동계통 안전계측기의 주요 설정값은 원자력발전소 고유설계특성 및 미국 원자력규제기관(NRC)의 규제지침(Regulatory Guide) 1.105 인허가 요건에서 위임된 ANSI-ISA 67.04 기술기준을 적용한다. 표준형원전 최종안전성분석보고서 15장의 사고해석 최대 또는 최소 트립설정치(표준형원전 기준 최대116%Power, 최소 103.5%Power 원자로 출력)를 기준으로 총채널불확실도와 인허가 여유도를 고려하여 설정치를 평가하였으며, 기존 설정치의 유효성은 안전제한치와 현재 트립설정치와의 차이 값인 설정치 총허용범위에서 총채널불확실도 값을 제외한 여유도가 양의 값을 가질 경우 유효하다고 판단하였다.

설정치 최소값 103.0%Power를 고려한 표준형원전의 주증기관 파단사고 사고해석에서는 전출력 운전을 가정하므로 $\pm 2.0\%$ Power의 열출력 불확실도 적용이 가능하였으며, 이를 반영한 원자로정지 가변과출력 설정치 최소값은 104.7%Power로 평가되었다.

따라서 기존 주증기관 파단사고 원자로 정지 가변과출력 설정치 103.5%Power는 재평가된 설정치 최소값 104.7%Power 보다 낮은 출력이므로 기존 사고해석 결과가 유효함을 확인하였다.

원전 1차 및 2차 계통 수화학 운전진단 평가계획

이경희 · 조용상 · 김초룡 · 권혁철 · 송규민 · 최진수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법 개정(2013.6)에 따라, 원전 1,2차계통 수화학 운전 및 분석결과는 경년열화관리프로그램(Aging Management Program, AMP) 등에 필수 반영되고 있으며, 규제기관 정기검사 항목으로 관리되고 있다. 또한, 원자력 기술자립을 통한 독자수출을 위해 APR1400 설계에 사용되는 일부 수화학 기본설계 입력자료인 미국 원전 측정자료를 국내 수화학 운전자료로 대체가 시급하며, 이를 위해 공식 자체 수화학 Data 개발이 요구되고 있다. 향후 소형모듈원전(Small Modular Reactor, SMR) 개발에 있어서도 수화학 설계를 위해서는 기존 원전의 고유 수화학 Data의 활용이 필수적이다. 현재 전원전 수화학 분석 대용량 Data는 SAP 기반으로 입력되어 빅데이터로 구축되어 있으나, 수화학자료의 활용 관점에서 빅데이터(1호기당 1주기 약 3.5 만개 Data)의 추출/가공 및 자산화 기술개발 필요하다. 4차 산업혁명 기술 선도에 있어 이러한 빅데이터의 활용 자산화 개발은 사내외 정책상 매우 중요시 되며, 현재 관련 개발이 실질적으로 진행되고 있다. 이와 연계하여 본 연구에서는 국내 원전에 누적된 수화학 빅데이터를 활용하여 고유 수화학 운전진단 평가체계 개발을 위한 평가계획을 수립하였다.

본 수화학 운전진단 평가를 위해 국내 경수로 및 중수로 가동원전 13개 발전소(총 24개 호기)를 대상으로 누적된 약 1.1천만건의 수화학 Data를 활용하여 원전 노형별 및 주기별 운전진단 평가를 계획하였다. 1차 및 2차 계통의 설계특성에 맞춰 각 운전진단 평가항목을 도출하였으며 호기별 EFPD(Effective Full Power Days) 기간에 연계하여 진단항목별 평가자료를 추출하여 전체 원전을 대상으로 운전주기 단위의 평가를 계획하였다. 1차 계통의 경우 크게 3개 분야로 구분하여 재료 건전성, 연료 건전성 및 계통 방사선장 관련 수화학 영향평가를 계획하였다. 재료 건전성 관련 pHt, 용존수소, 용존산소, Fe/Ni/Cr 등 총 12개 항목의 수질 평가항목을 도출하였으며, 연료 건전성 관련 Si/Al/Ca/Mg 등 총 4개 항목의 수질 평가항목 및 총/액체/기체/크리드 방사능 항목을, 그리고 계통 방사선장과 관련한 Co-58, Co-60, Fe-59 등 총 21개 주요 핵종 방사능을 평가항목으로 도출하였다. 2차 계통의 경우 증기발생기 전열관 건전성, 계통 부식 건전성으로 구분하여 수화학 영향평가를 계획하였다. 증기발생기 전열관 건전성 관련 Na/Cl/SO₄, Fe/Cu 등 총 12개의 수질 평가항목을 도출하였으며, 계통 부식 건전성 관련 pH, 용존산소, Fe/Cu 등 총 7개의 수질 평가항목을 도출하였다.

향후 도출한 평가항목에 기준하여 원전 호기별 및 주기별 평가결과를 산출하고 노형별 비교평가를 수행함으로써 국내 원전의 수화학 관리현황 및 적정성을 평가할 계획이다. 본 연구를 통해 보다 체계화된 수화학 운전진단 평가 기반을 구축함으로써 수화학 관리 고도화를 추진하고, 차세대 원전 설계와 관련한 국내 원전 고유의 주요 수화학 운전자료를 구축함으로써 수화학 빅데이터 자산화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

PSR 기준문서 필요성에 대한 고찰

A Study on the necessity of Periodic Safety Review Basic Document

원혜정

한국수력원자력(주) 중앙연구원

주기적 안전성 평가(PSR, Periodic Safety Review)란 “가동중인 원자로시설에 대해 경년 열화, 시설변경, 운전경험, 기술발전 등의 누적된 영향을 다루고, 운전기간 동안 고도의 안전성을 보증하기 위하여 일정 주기로 수행되는 체계적인 안전성 재평가”로 정의되어 있다. 국제원자력기구(IAEA)는 1996년 10월 발효된 “원자력안전협약”에서 주기적 안전성 평가를 회원국에 의무화하였다.

이에 우리나라는 1999년 12월 고리1호기 시범 적용을 시작으로 국내 가동원전에 대한 주기적 안전성 평가를 수행하고 있으며 2002년 1월 원자력법(현재의 ‘원자력안전법’) 개정을 통해 주기적 안전성 평가를 법제화하였다.

원자력안전법(이하 원안법)에 따르면 원안법 시행령 제36조(주기적 안전성평가의 시기 등), 제37조(주기적 안전성평가의 내용), 제38조(주기적 안전성평가의 방법 및 기준)이 정해져 있다. 주기적 안전성 평가의 시기와 내용은 법이 개정되기 전까지 변동되지 않지만 주기적 안전성 평가는 보고서 작성 기간부터 심사까지 최소 3년 이상 소요되기 때문에 주기적 안전성 평가를 수행하는 동안 주기적 안전성 평가의 적용 기술기준이 변동되는 문제가 있다.

반면 해외 원전 주요 국가의 경우 규제기관과 사전 합의된 기준문서를 토대로 주기적 안전성 평가를 수행하고 있다. 이는 국제원자력기구(IAEA)의 최신 안전지침 SSG-25(PSR for NPPs)를 근거로 한다. 안전지침 SSG-25에 따르면 PSR 4단계가 있으며 1단계는 Basic Document이다. 이 단계는 PSR 기본계획으로 적용될 최신 기술기준과 범위, 방법론(SFR, GA, IIP) 등을 정의한다. 우리나라도 국제 동향을 반영하기 위하여 지난 2020년 4월 주기적 안전성 평가 심사지침을 개정하였지만, 아직 PSR 수행에 필요한 기준문서는 작성되지 않았다.

본 논문에서는 국내 주기적 안전성 평가 기술기준 문서 부재에 대한 주기적 안전성 평가 장기화에 따른 파생 문제점 및 국내·외 PSR 수행현황을 비교·검토해보았다. 그 결과를 토대로 PSR 기술기준 문서작성에 대한 기대효과를 도출하고 PSR 작성 시 필요한 기준을 제시하고자 한다.

가동중 원자력발전소 예비품용 케이블의 화염시험 적용에 대한 고찰

A Study on Application for Flame Test of Spare Cable for Operational NPPs

김경덕

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

원자력 발전소에 설치되는 케이블은 사람으로 비유하면 혈관에 해당될 만큼 가장 중요한 기기중의 하나이다. 발전소 전역에 걸쳐 설치되지 않은 곳이 없으며, 케이블이 없으면 어떠한 기기도 운전될 수가 없다. 따라서 원자력 발전소에 공급되는 케이블은 수없이 많은 성능시험을 합격해야만 설치가 가능하며, 그중에서 가장 중요한 검증의 하나가 내환경 검증과 화염시험검증이다. 최근들어 화염시험검증은 규제기관의 가장 큰 관심사항으로 부각되어 각 발전소 현장에서는 설계변경서 작성시부터 구매규격서 작성, 품질검사까지 중점 검토사항이다.

시험절차와 방법, 합격기준은 IEEE 323(2003ed)과 IEEE1202(1991ed), UL 1581 VW-1에 상세한 기준이 정량화 되어 있고 시험기관에서도 이 기술기준에 맞추어 셋팅된 시험설비를 갖추고 있으므로 한국원자력 안전재단에 등록된 시험기관을 통해서 시험을 수행하면 화염시험 검증의 결과에 대해서는 의심의 여지가 없다. 그러나 발전소에 공급되는 수많은 종류의 케이블에 대해서 전수시험이 불가능하므로 케이블 제작사 별로 대표시편을 선정하여 시험을 수행하는데, 이부분에서 대표시편의 선정 및 수행해야 하는 시험의 종류에 대한 규정이 모호하므로 이에 대해 검토하고자 한다.

2. 본론

건설원전의 경우 신한울#1,2까지는 케이블의 화염시험에 대해서 케이블 기술규격서에도 기술기준(IEEE383-1974)의 요건만 기술하고 있을 뿐 검증시편에 대해 정확하게 기술되어 있지 않았다. 실제로 IEEE383(1974ed)을 적용해도 대표시편을 정확히 적용하기란 거의 불가능에 가깝다. 또한 수직트레이 화염시험(VTFT)과 수직화염시험(VFT)시험도 어느 케이블에 적용해야하는지에 대해서도 정확히 표현된 곳이 없어 건설원전의 경우는 케이블의 종류, 설치형상, 설치장소에 무관하게 안전, 비안전등급 구분 없이 모든 케이블에 대해 수직트레이 화염시험(VTFT)과 수직화염시험(VFT)을 수행하도록 기술되어 있다. 신고리#5,6이후 이러한 어려움을 해결하기 위해 규제기관, 한수원, 한기가 참여하여 화염시험검증을 위한 대표시편을 확정하여 기술규격서에 반영하였으며, 수행해야 될 화염시험의 종류도 기술규격서에 반영하였다. 그러나 가동원전의 경우는 건설원전과 달리 한번에 다량의 케이블을 구매하지 않는다. 또한 신한울#1,2까지 적용된 화염시험 검증 기술기준이 현재 적용되는 기술기준과 차이가 있어 규제기관의 규제요건도 변화되었다. 따라서 가동원전에서 케이블 구매시 기술규격서에 반영해야 하는 규제요건과 기술기준을 명확히 적용하는 것이 중요하다. 가동원전용 예비품 또는 설계변경용 케이블 구매시 적용해야 하는 검증시편의 종류는 건설원전과는 동일할 수 없으며 본 연구를 통해서 가동원전에 적용가능한 대표시편선정 방법 및 화염시험의 대상을 명확히 하고자 한다.

4. 결론

본 연구를 통하여 현재 가동중인 원자력 발전소의 케이블 교체 및 추가 시 적용해야 하는 규제요건과 기술기준을 명확히 하고, 이에따라 안전등급별, 용도별, 설치 형상별, 설치위치별로 검증을 위한 대표시편의 기준을 확정하고, 수행해야 하는 시험의 종류를 명확히 함으로써 검증의 신뢰도를 높이고 정성적으로 표현되어 있는 기술기준을 보다 정량화 할 수 있을 것으로 기대한다.

바나듐 노내계측기 신호 동적보상 성능 평가
Performance Evaluation of Dynamic Compensation
for Vanadium Self-Powered Neutron Detector

김도연, 최유선
한수원 중앙연구원

현재 국내 원전 중 최다 호기인 표준형 원전은 노내계측기를 기반으로 노심감시계통이 구성되어 있으며, 중성자 반응률이 큰 로듐이 노내계측기 에미터로 사용되고 있다. 원전 운전주기가 장주기화 되면서 로듐 노내계측기는 기계적 수명이 충분함에도 불구하고 연소수명에 먼저 도달하기 때문에 잦은 계측기 교체와 작업자 피폭을 증가시키고 있다. 이에 노내계측기 수명 연장을 목적으로 장수명 노내계측기를 개발하고 있으며, 상용 원전 현장 양립성 및 노심감시계통 적용성 확인을 위해 장수명 노내계측기는 참조 발전소에서 실증장전 시험이 진행 중에 있다. 또한 장수명 노내계측기 연소 수명 및 동적특성 자료 취득을 위해서 연구로 연소시험이 진행 중에 있다.

바나듐검출기는 기존 로듐검출기에 비해 연소수명이 길고 단순한 붕괴식을 갖는 특성으로 인해 장수명 노내계측기 에미터로 선정되었다. 표준형 원전에서는 로듐검출기의 (n, β) 반응을 통해 생성된 전자에 비례하는 전류신호가 노심감시계통 입력신호로 사용되고 있다. (n, β) 반응이 지발 반응이기 때문에 원시 전류신호는 동적보상후에 노심감시계통 입력신호로 사용될 수 있다.

동적보상식 결정을 위해서 즉발 검출기, 지발 검출기, 기저신호 측정용 검출기를 연구로에 동시에 설치하였다. 다양한 크기의 로듐, 바나듐, 코발트, 인코넬 계측기가 캡슐 형태로 설치되었으며 연구로 출력 상승 및 하강에 따라 계측기별 전류신호를 동시에 취득하였다. 취득된 각 검출기 신호의 동적보상은 Dustin Pol 방법과 H_{∞} 방법이 사용되었다.

연구로에서 취득된 코발트 계측기 신호는 즉발신호이므로 동적보상 기준신호로 사용되었으며, 로듐 및 바나듐 계측기 동적보상식은 취득된 각기 신호가 코발트 즉발신호와 유사한 거동을 보이도록 최적화 계산 과정을 통해 결정되었다. 계측기별 즉발 분율은 5%를 가정하여 동적보상식을 유도하였고, 즉발 분율은 취득신호 분석을 통해서 타당한 값을 검증하였다.

Dustin Pol 및 H_{∞} 방법에 의한 동적보상식은 참조 발전소가 사용하는 형태와 동일하게 구성하였으며, 평가결과로 두 방법론에 의한 동적보상식은 유사한 수준의 성능을 보임을 확인하였다. 향후 동적보상식을 활용한 참조 발전소 적용성 평가 및 검증이 상세히 수행될 예정이다.

원자력 품질보증프로그램에서의 일반규격품 수락방법론 고찰

A Study on Acceptance Methodology of Commercial Grade Item under the Nuclear Quality Assurance Program

홍태화 · 양창석*

한국수력원자력(주)중앙연구원

1. 서론

일반규격품품질검증(CGID, Commercial Grade Item Dedication)에 대한 최초 가이드라인은 미국 전력연구소(EPRI) 보고서 NP-5652(1988년)이며, 보충 지침으로 EPRI TR-102260(1994년)이 발행되었다. EPRI는 2014년 위 두가지 지침서를 통합하여 EPRI 3002002982를 발행하고 2017년 미국 규제기관(NRC)은 NRC RG-1.164를 발행하여 승인하였다. 최신 지침서 중 가장 중요한 이슈는 원자력 기기 제작자가 일반규격품 관리를 통해 CGID 방법론을 적용하지 않고 기본기기에 조립 및 성능시험을 통해 발전소에 공급할 수 있는 다양한 방법론을 적용한 것이다. 하지만 국내 원전 산업에 적용하고 있는 지침서는 1988년 발행된 EPRI NP-5652 및 KINS RG/N-17.12(CGID 규제지침서)이기 때문에 국내 원자력 기기 제작자는 일반규격품에 대한 품질관리를 통해 안전관련설비에 적용하기 힘든 상황이다.

본 논문에서는 미국 EPRI 지침서 및 NUPIC 보고서 등을 참조한 사례 분석을 통해 본 방법론의 적용가능성에 대해 고찰하고자 한다.

2. EPRI 지침서의 일반규격품 관리 방법

EPRI 3002002982 부록 F.4.1(원자력 품질보증 계획하에서의 부품관리)과 F.4.2(원자력 품질보증 계획하에서의 조립품 또는 전체 기기관리)에서는 일반규격품을 구매하여 원자력 품질보증프로그램 7장에 설명된 구매품목 수락방법(공급자 평가 및 선정, 인수검사, 품질서류 검토, 공장검사)중 하나 또는 그 이상을 적용하여 수락하는 방법론과 사례를 제시하고 있다. 즉 밸브시스템을 제작하는 업체가 하위 구성품을 일반등급으로 구매하여 7장 하나 이상을 적용하고, 조립품에 대해 설계특성, 자재특성 및 성능특성을 확인할 수 있는 시험에 대한 신뢰성 있는 데이터를 제공할 때 수락할 수 있다. 따라서 원자력 품질보증계획서 설계관리, 구매관리, 구매품목 및 역무의 관리, 시험관리, 검사, 측정 및 시험장비 관리 등을 품질보증요건에 적합하도록 관리해야 달성될 수 있음을 보여준다.

3. NUPIC AUDIT Report 분석

Fluid Components International(FCI) 감사보고서(25068, 2022.1월) 검토한 결과 FCI는 유체수위, 유량, 온도 및 압력전송기 설계 및 제작업체로서 일반규격품을 구매하여 섹션 3(Commercial Grade Dedication)에서 RTV162 Silicon, Resistor, Relay를 CGID 수행하였다. 섹션6(Fabrication/Assembly Activities Material Control, Handling, Shipping and Storage)에서는 Flow Element, Circuit Board, Flow Element Subassembly를 수락한 후 조립하였다고 기술되어있다. 섹션8(Test, Inspection, Calibration)에서는 Voltage Transmitter Module을 Final Acceptance Test를 수행하였다. 따라서 EPRI 3002002982 지침서에서와 같이 일반규격품을 품질보증계획서 7장에 따라 인수검사 및 공장검사를 통해 수락관리하여 조립품에 대한 설계관리, 구매관리, 시험관리 등을 통해 기본기기로 공급하였다.

4. 결론

EPRI CGID 지침서에서 제시한 일반규격품 관리를 통한 수락절차는 최초 지침인 EPRI NP-5652에서는 제시한 방법은 아니지만 EPRI TR-102260에는 해당 방법론이 소개되어 있다. 국내 규제지침 및 현행 적용 EPRI 지침에는 반영된 방법은 아니지만 해외에서는 선택적으로 적용하고 있어 국내 원자력 제조업체가 동일한 선상에서 경쟁할 수 있도록 제도 보완이 필요한 시점이다. NUPIC Audit Report 분석을 통해서 살펴본 바와 같이 많은 해외 원자력 제작자들도 위 방법을 통해 많은 시간과 인력낭비를 줄이고 제조업체의 설계능력을 활용하여 품질제고를 위해 노력하고 있다. 국내 원자력 제조업체가 해외 진출시 CGID 방법론을 모두 활용할 수 있도록 규제기관 및 사업자의 적극적인 대처가 필요하다.

원자력발전소 복수기 전열관 와전류탐상검사 표준지침서 개정

Revised Standard Guideline for Eddy Current Testing of Condenser Tubes in Nuclear Power Plants

주경문 · 김왕배

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

1. 서론

복수기는 직관 형태의 전열관이 설치되어 있으며, 전열관 내부에 흐르는 해수와 셸 측으로 유입되는 배기 증기가 열교환하여 응축된 복수를 급수 계통에 공급한다. 전열관 손상으로 해수가 급수 계통으로 유입되면 급·복수 계통의 기기 및 배관에 부식 결함을 초래한다. 무엇보다 방사선이 함유된 원자로 냉각재의 압력경계 역할을 하는 증기발생기 전열관에 심각한 영향을 줄 수 있다. 전열관 건전성 확인을 위해 주기적으로 와전류탐상검사를 수행하고 있으며, 검사는 신호 수집 및 평가 기술이 표준화된 지침서에 따라 수행된다. 최근에 신호 품질 강화와 평가 일관성 유지를 위한 세부 지침 등이 마련된 표준검사지침서가 개정되었다. 본 논문에서는 개정된 지침서에 대하여 소개하고자 한다.

2. 개정 표준검사지침서

표준검사지침서는 검사수행 업체가 변경되더라도 검사기술 품질 수준을 일정하게 유지하기 위하여 신호 수집과 평가 절차, 그리고 책임 사항 등이 포괄적으로 기술되어 있는 문서이다. 검사수행 업체는 표준검사지침서를 기준으로 하여 검사 절차를 작성한다. 개정된 표준검사지침서의 주요 내용으로는 신호 수집 데이터 품질 강화, 신호 수집 및 평가 지침 상세 제공, 관막음 기준 및 사용 주파수 일부 변경 등이다. 수집된 신호는 반드시 Level III 평가자가 품질기준 만족 여부를 확인해야 하며, 신호 수집 Summary를 작성하여 검사 대상 기기 및 신호 수집과 관련된 정보가 기록되도록 하였다. 또한 신호 수집이 수동으로 이루어지는 것을 고려하여 전열관 식별을 신호 수집 교정 그룹마다 1회 확인하도록 하였다. 일관된 신호 평가 기록을 위해 “I” 코드 신호는 정비가 요구될 때, “S”코드는 정비기준 미만이지만 지속적인 추적 관리가 필요한 신호에 대하여 기록하도록 하였다. 신호 진폭 교정 절차를 ASME 100%에서 20% FBH(Flat Bottom Hole) 인공 결함으로 변경하였으며, 진폭값 설정은 4Volts로 동일하게 유지하였다. 특히 미국전력연구원의 최신 기술을 반영하여 증기침식으로 인한 열화 신호는 절대 코일에서 “WLL”로 보고하고 검출된 신호의 시작과 종료위치에서 결함 지시가 차동코일에서 추가로 검출되면 “DFI”로 보고하도록 하였다. 검사 대상 전열관의 재질과 두께가 동일하면 검사 작동 주파수를 동일하게 사용하도록 하였다.

3. 결론

복수기 전열관 와전류 탐상검사에 활용되는 표준검사기술지침서는 신호 수집 품질 강화 절차 및 신호 평가 기준 명확화 그리고 미국전력연구원 최신 기술 등을 반영하여 최근에 개정하였다. 개정된 문서는 발전소 현장 검사에 적용되어 복수기 전열관 건전성 심층 관리에 기여할 것으로 판단된다.

좌굴강도 측정을 통한 핵연료집합체 지지격자의 영구변형 특성 평가
Characteristics of Permanent Deformation of Nuclear Fuel Assembly
Spacer Grid by Using Buckling Strength Measurement

김태순

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소를 구성하는 주요 기기 중에서 핵연료집합체는 출력 발생을 위해 원자로 내부로 장입되는 핵연료를 지지하는 구조체이다. 따라서 원자력발전소의 가장 핵심기기인 동시에 안전성 측면에서 매우 중요한 부품으로서 정상 운전 시 뿐만 아니라 지진 및 냉각재상실사고와 같은 가상사고 발생 시에도 안전 정지 기능과 냉각성능 유지가 보장되어야 한다. 따라서 핵연료집합체는 원자력발전소 내 압력경계를 이루는 다른 안전등급기기 관련 계통, 구조, 부품과 같이 높은 보수성을 기반으로 설계가 되어야 한다. 최근 세계적으로 지진 발생 빈도가 높아지고 한반도에서 비교적 높은 수준의 지진이 발생됨에 따라 원자력발전소 내진설계 기준에 대한 상향 요구가 높아지고 있다. 또한 국내·외 규제기관에서는 수명말(end-of-life, EOL) 조건에서의 지지격자 충격강도 저하에 따른 구조적 변화와 기계적 특성을 추가로 고려하도록 규제요건을 강화하고 있다. EOL 조건에서 핵연료집합체의 내진 및 구조건전성 평가를 위한 중요 시험 항목 중 하나인 지지격자 좌굴강도는 CE사(Combustion Engineering)가 개발한 방법론에 근거한 유압식 충격 시험을 통해 측정된다. 하지만 지지격자가 과도한 충격을 받거나 좌굴이 발생할 경우 하중과 직각을 이루는 방향(횡방향)으로 변형이 발생하게 되어 지지격자의 영구 변형이 발생한다. 이러한 영구 변형이 크게 발생하면 핵연료집합체 구성품인 안내관 간의 상대적인 위치가 변하므로 결국 제어봉 삽입성에도 영향을 미칠 수 있다. 핵연료집합체 지지격자의 횡방향 영구 변형량을 규명하기 위한 구체적인 방법으로는 충격지속시간 변화가 좌굴강도에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 CE사의 유압식 충격시험 방법을 통해 수명말 조건의 핵연료집합체 지지격자에 가해지는 충격지속시간에 따른 좌굴강도를 측정함으로써 핵연료집합체 지지격자의 횡방향 영구 변형 특성을 평가하였다.

원자력발전소 핵연료집합체 지지격자의 비선형 강성 측정
Measurement of Nonlinear Stiffness of Fuel Assembly Spacer Grid
in Nuclear Power Plants

김태순

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 핵연료집합체는 출력 발생을 위해 원자로 내부로 장입되는 핵연료와 이를 지지해주는 구조물인 지지격자로 이루어진 원자로 중심부를 구성하는 핵심 부품이다. 또한 원자력발전소의 궁극적인 기능인 출력 발생을 담당하는 핵심기기인 동시에 1차 방사능 방호기능을 수행하는 기기로 안전성 측면에서도 매우 중요한 부품일 수밖에 없다. 따라서 핵연료집합체는 정상 운전 시 뿐만 아니라 지진 및 냉각재상실사고와 같은 가상사고 발생 시에도 안전 정지 기능과 냉각성능 유지가 보장되어야 한다. 이런 이유로 핵연료집합체는 원자력발전소 내 압력경계를 이루는 다른 안전등급기기 관련 계통, 구조, 부품과 같이 높은 보수성을 기반으로 설계되고 있다. 최근 한반도를 비롯해 전 세계적으로 지진 발생 빈도가 높아지고 있고 그 규모 또한 점차 높아짐에 따라 원자력발전소 내진설계 기준의 상향과 함께 설계여유도를 향상시켜야 한다는 목소리가 크게 힘을 얻고 있다. 급기야 이러한 분위기는 국내·외 규제기관이 수명말 (end-of-life, EOL) 조건에서의 지지격자 충격강도 저하에 따른 구조적 변화와 기계적 특성을 추가로 고려하도록 규제요건을 강화하도록 하는 역할을 했다. 핵연료집합체 지지격자의 내진 및 구조건전성 평가 시 기존의 방법대로 선형 강성만을 고려한 평가방법은 과보수성이 항상 수반되어 설계 여유도가 매우 작아 설계기준초과 지진 발생 시 적절하지 않을 수 있다. 따라서 이러한 과보수성을 개선할 수 있는 비선형 강성연계자료가 필요하다. 일반적으로 수명 초기 및 수명 말기 핵연료집합체의 좌굴강도를 측정하기 위해서는 만능재료시험기를 사용한다. 본 시험에서 사용한 만능재료시험기는 크로스헤드에 로드셀이 장착되어 있으며, 지지격자 시편의 상부 면은 상부치구에 고정되고, 반대쪽 면은 하부치구의 움직임에 의해 하중을 받게 되는 구조이다. 본 연구에서는 좌굴강도 측정 시험을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 국내에서 사용되는 핵연료집합체 중간 지지격자의 충격지속시간 변화에 따른 하중 및 변위 값을 도출하고 비교 분석하였다.

파티클 필터를 이용한 HVAC 시스템의 온도제어 Temperature Control of HVAC System using Particle Filter

이현용

한국수력원자력(주) 중앙연구원

HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning)는 쾌적한 실내 환경과 에너지 절감 등을 고려하여 여러 가지 제어방법이 연구되고 있다. 실내 부하변동 및 에너지 절감을 위하여 각각의 최적의 설정 값을 선정하고 명령추종(Command Following) 특성을 가져야 하며, HVAC제어에 필요한 제어변수의 정확한 값을 알기위해서 온도 및 압력 등 물리적 값을 정확하게 계측해야 한다. 본 논문에서는 제어에 필요한 여러 가지 상태변수의 측정오차를 최소화 하여 최적의 온도 설정 값을 유지하는 제어 알고리즘을 제안한다.

일반적인 HVAC시스템은 압축기 용량제어와 증발기 과열도 제어를 통해서 AHU(air handling unit) 공급(supply) 공기온도를 제어함으로써 최적의 온도 환경을 만들어 사용하고 있다. 이러한 제어방식은 시스템의 변동하는 전체 부하를 고려하여 자동적으로 제어되지 않고, 고정된 전체부하를 고려하여 공급 공기온도 설정을 조절하여 제어하는 방식이다. AHU(DX coil)방식인 경우 냉매와 공기가 직접 열 교환 하는 유형으로 전체 부하를 고려하여 되돌림(return) 공기온도를 제어 변수로 설정 할 경우 전체 부하에 대한 제어가 가능하지만 되돌림 공기온도의 늦은 응답속도 때문에 용량 제어와 과열도 제어 시 실제 온도 및 압력의 헌팅이(Hunting) 예상된다. 용량 제어와 과열도 제어에 필요한 압력과 온도 등을 계측하는데 필터를 이용하여 센서의 측정잡음을 제거함으로써 제어에 필요한 상태변수 값을 정확하게 측정 및 추정할 수 있다. HVAC시스템에 설치된 여러 개의 센서를 통해서 측정된 값을 파티클 예측, 가중치 갱신, 추정값 계산, 재샘플링 과정을 거쳐서 필요한 상태변수의 추정값을 얻을 수 있는 파티클 필터 알고리즘을 적용하여 시스템의 노이즈를 제어하고 상태변수를 추정할 수 있다.

파티클 필터를 적용하여 HVAC시스템의 여러 가지 상태변수가 추정할 수 있고, 이를 바탕으로 PID제어 설계 및 최적의 P, I, D 파라미터 값을 설정하는 것이 중요하다. 최적조건에 따라 파라미터의 고정적인 값보다 셀프 튜닝이 가능한 파라미터 알고리즘을 적용하면 상태변수의 헌팅을 감소시키고 안전성을 높일 수 있다. 제안한 제어알고리즘을 실험을 통해서 효율성이 검증된다면 HVAC시스템의 부하변동에 따라 최적제어를 함으로써 에너지 절감에 크게 기여할 것으로 기대된다.

원전해체에 적용가능한 감마선 검출기 사례 연구 A Case Study of Gamma-ray Detectors Applicable to Decommissioning NPP

유지환 · 김민철 · 김기림

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹

원전의 해체작업 및 부지개방을 수행하는데 방사선 데이터는 매우 다양한 용도로 필요하다. 방사성폐기물 관리를 위한 SSCs(Structures, Systems and Components)의 특성평가, 방사선방호 관리, 제염작업 중 사전 및 사후 비교 분석, 잔존건물 및 부지의 복원활동을 지원하는 특성평가 등에 방사선 측정을 이용한 데이터 수집이 필요하다. 이러한 방사선 측정에는 요오드화 나트륨(NaI), 고순도 게르마늄(HPGe), 카드뮴-아연-텔루라이드(CZT)등의 세 가지 주요 검출기가 사용된다. NaI 검출기는 저비용 및 보수관리가 쉬운 장점으로 여전히 원자력 시설 및 운영원전에서는 주로 사용되지만, HPGe 및 CZT 검출기는 에너지 분해능 및 비용편익이 개선되어 원자력 시설에서 활용이 점차 확대되고 있다. 본 연구에서는 NaI 검출기의 에너지 분해능보다 향상된 HPGe 와 CZT 검출기를 비교하고 CZT 검출기의 장점과 한계 및 해체원전의 적용가능성에 대해 분석하였다.

HPGe 검출기는 일반적으로 Ge(Germanium) 검출기의 냉각을 위한 저온 유지장치(Cryostat), 진공용기(Dewar) 및 증폭기(Amplifier)로 구성된다. 과거 HPGe 검출기는 저온 유지장치를 액체질소로 냉각이 필요하고 NaI와 CZT 검출기보다 상당히 무거운 단점을 가지고 있다. HPGe는 검출기 중 가장 높은 에너지 분해능을 제공하나 CZT 검출기의 지속적인 연구개발로 차이가 줄어들고 있다. CZT 검출기는 HPGe와 달리 질소 냉각이 필요없이 상온에서 작동하고 NaI에 비해 에너지 분해능이 월등히 높다. HPGe와 CZT를 활용한 방사선 측정의 설정 및 분석을 위해 두 검출 시스템은 모두 숙련된 감마 분광 분석 전문가가 필요하며 데이터의 유효성을 보장하기 위해 엄격하고 표준적인 품질 보증을 거쳐야 한다. 전 세계적으로 HPGe 검출기의 대체제로 CZT 연구가 활발해지고 있으며, 좋은 품질의 CZT가 생산되고 있다. 최근 CZT 검출기는 광학 카메라와 접목하여 방사성핵종별 스펙트럼 이미지를 시각적으로 표시할 수 있게 되었다. 이러한 감마 카메라 시스템은 감마선원의 위치를 인식하는데 유용한 도구이다. 요약하면, CZT 검출기는 HPGe 대비 저비용, 경량화로 해체원전에서 활용성이 높은 것으로 판단된다. 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에 의한 KPS(Kewaunee Nuclear Power Station)에서 현장 특성평가 기술의 시연의 일환으로 두 개의 CZT 감마 이미징 스펙트럼을 테스트한 기록과 같이 CZT 검출기를 이용한 최신 휴대용 감마 검출 시스템 사용으로 해체원전 적용 가능성을 보여주었다. 특히, CZT 검출기는 액체 질소나 기타 냉각이 불필요한 상온 작동, 내장 배터리를 이용한 최소한의 전력 요구, 작동 용이성, 원격 모니터링 기능, 광학 이미지 정합, 우수한 에너지 해상도 등 현장 사용에서 많은 이점을 제공한 것으로 보고되었다. 이러한 장점을 가진 CZT 검출기는 국내 해체원전에서 방사선 위치 탐지 및 시각화, 방사능 오염도 정량화, 현장 작업자 선량 추정에 활용할 수 있으며, 감마선 측정 영상정보와 해체원전의 구조적 3D 레이저스캔 영상정보와 정합하는 시각화 장비 연구개발이 진행되고 있으며 해체원전의 방사성 오염으로 인한 폐기물 최소화, 피폭 최소화의 가치를 높이는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

혁신형 소형모듈형원자로의 무붕산 운전에 따른 경제성 영향 고찰
A Study on Economic Enhancement of Innovative Small Modular Reactor
by Boron-free operation

강상희* · 하희운

한국수력원자력(주)중앙연구원

최근 탈탄소화, 분산화, 디지털화와 같은 글로벌 에너지 산업 트렌드가 변화함에 따라 기존 대형원전 중심의 원전에서 소형원전에 대한 선호도가 증가하고 있다. 이는 후쿠시마 원전 사고와 같은 대형원전 사고 후 원전의 안전성에 대한 요구가 증가하고, 탈탄소화 정책의 하나의 대안으로 소형모듈형원전을 제시함에 따라 소형원전에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 세계 소형모듈형원자로 시장의 글로벌 경쟁력을 확보하기 위해 기존 검증 기술에 혁신 기술을 더해 안전성, 경제성 및 유연성이 향상된 혁신형 소형모듈형원자로(Innovative Small Modular Reactor, 이하 i-SMR)을 개발 중이다.

i-SMR의 경제성 목표는 해외 경쟁노형 및 타발전원과 동등 수준으로 3,500USD/kWe (NOAK, N-th of a kind)로 설정하였다. 본 목표를 달성하기 위해서 최적 설계가 병행되어야 하며, 본 논문에서는 무붕산 운전에 따른 경제성 영향을 고찰하였다.

i-SMR은 무붕산 운전을 채택함에 따라 기존 화학 및 체적제어 계통 (Chemical and Volume Control System, CVCS)의 기능이 축소 변경됨에 따라 계통 최적화 현황을 검토하였다. 무붕산 운전에 따라 관련 계통을 기본적으로 제거함에 따라 계통 부피는 약 23% 감소하고, 기기 수는 약 25% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 탱크 및 관련 기기와 동일 기능 기기의 계통 통합 및 설계 단순화 과정을 통한 모듈화설계 적용으로 예비평가 결과 최종적으로 계통의 부피는 약 91% 감소, 기기 수는 약 77% 감소할 것으로 평가되었다. 이는 구조물의 체적과 기기수의 감소로 인한 건설비 뿐 아니라, 설비가 단순화 됨에 따라 추후 설비 교체비, 예방정비기간 단축 등과 같은 운영비도 절감될 것으로 판단된다. i-SMR의 경제성 목표를 달성하기 위해 무붕산 운전 적용에 따른 계통 최적화 검토를 수행하였고, 계통 부피와 기기수의 감소를 확인하였다. 향후 이를 반영한 경제성 분석을 수행하고, 설계 개선 사항을 도출하여 설계에 반영함으로써 i-SMR의 경제성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

원전 매설배관 최적 검사방안분석

Analysis of Optimal Inspection Methods for Buried Piping in Nuclear Power Plant

정우근* · 주경문*

*한국수력원자력(주) 중앙연구원

해외 원자력발전소에서 매설배관누설 사례가 보고되고 일부 원전에서 방사성물질이 누출되는 등 매설배관 관리가 미국 원자력 산업계의 주요 현안으로 대두되고 있으며 관리 강화가 요구되고 있다. 배관 및 배관계는 일반적으로 누설이나 압력유지 건전성을 확보할 수 있는 안전율을 갖도록 Code & Standards 등에 따라 설계 및 시공되며, 운전 중 배관 손상을 유발할 수 있는 외부 위협에 노출되어 안전 여유가 감소하게 될 경우를 대비하여 주기적으로 검사를 수행하여 건전성을 확인한다. 그러나 매설배관의 경우 물리적으로 접근이 곤란하여 직접 검사가 곤란하며 주기적 비파괴검사가 곤란하다. 국내 원자력발전소도 매설배관 관리의 필요성이 대두되어 매설배관 관리를 위한 매설배관의 경년열화관리표준기술 체계 개발하기 위하여 매설배관 현황 및 적용 가능 검사, 위협요소 및 제한사항 등을 분석하여 최적의 검사방안을 분석하고 도출하여 원전 매설배관 건전성 확보에 기여하고자 한다.

인공지능을 활용한 비정상 운전지원 시스템 개발
Development of Operator Support System(Abnormal Status)
using Artificial Intelligence

박대승 · 유쾌환

한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소

본 연구의 목표는 인공지능 비정상 상태 판단 시스템 개발 및 활용이다. 원전에서 비정상 상황은 정보와 운전원의 판단에 의해 비정상 상황을 판단하게 된다. 비정상 상황을 판단하기까지 운전원은 다양한 교육 및 훈련 그리고 경험을 필요로 하게 된다.

비정상 상태 판단 시스템 개발을 위해서 본 연구에서는 학습용 데이터를 시뮬레이터를 통해서 생성하게 되었다. 시뮬레이터를 통해 학습용 데이터를 생성하게 된 이유는 발전소에서 비정상을 일으킬 수 없으며 향후 발전소에서 비정상이 발생 하게 된다면 해당 데이터를 통해서 학습 데이터의 생성 및 활용이 가능하기 때문이다.

학습된 인공지능 모델을 통해 비정상 판단이 가능해졌으며, 이를 통해 특정 비정상의 경우 정확하게 판단이 가능해졌다. 해당 시스템의 활용을 위해 기존 운전원 화면을 개선하여 활용해 보았다.

그리고 비정상 운전지원시스템 화면을 새로 구성하였으며 이러한 비정상 상태 판단을 통해 판단되어진 비정상과 이와 연관된 절차서, 그리고 관련 정보를 한눈에 알아볼 수 있게 개발하였다.

이러한 화면을 통해 기존에는 절차서를 보고 해당 비정상의 정보와 정보를 운전원 화면에 직접 찾아보아야하는 수고가 있었으나, 운전지원 시스템 개발을 통해 절차서의 내용을 한 화면에 표시하여 증상 및 정보 그리고 추이를 볼 수 있게 되었다.

본 연구에서는 비정상상태 판단을 활용하여 비정상 운전지원시스템을 개발하고 이를 운전원에게 제공하여 기존의 운전원 화면보다 필요한 정보를 한 눈에 볼 수 있게 제공하고 절차서의 내용을 간추려 보다 직관적으로 비정상 판단이 용이한 시스템을 개발 및 제공이 가능하게 되었다. 해당 시스템의 개발을 통해 향후 운전원의 교육 또는 지원시스템으로 활용이 가능할 것이라 예상된다.

중수로 원전 운전이력을 반영한 노심 반응도 평가

Impact Assessment of core reactivity

due to the operated period of Pressurized Heavy Water Reactor

김영애 · 박동환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

중수로 원전은 운전이력이 증가함에 따라 고온, 고압의 냉각재 및 고방사선의 영향으로 노심 내 구조물인 압력관(또는 연료관)에 반경방향 조사크립이 발생한다. 압력관 크립은 최초 설계 대비 연료와 냉각재의 비율이 달라지게 하므로, 이에 대한 영향평가가 필요하다. 본 연구에서는 운전시점에 따른 압력관 크립을 고려한 노심에 대해서 대표적인 반응도계수인 기포반응도 및 온도 반응도를 평가하여 그 영향을 평가하고자 하였다.

중수로 노심해석은 연료, 냉각재, 압력관, 칼란드리아관, 감속재를 단위 격자모델로 생산하고 전체 380개 연료채널, 12개 연료다발로 구성된 노심은 단위격자모델을 이용해 모사한다. 경년열화로 인해 압력관 내경이 증가하는 크립 현상을 고려한다면 격자모델에서 냉각재 영역의 면적이 증가하므로 크립으로 인한 냉각재 기포 반응도의 변화를 예상할 수 있다. 냉각재 기포반응도는 안전해석 시 고려해야하는 주요 변수 중에 하나로 중수로의 경년열화에 따른 냉각재 기포반응도 변동 경향에 대한 분석이 필요하다. 압력관 내경 증가율은 중성자 조사 등에 의한 열화현상으로 출력분포와 연료채널내 유량 조건에 따라 노심 영역별로 상이하고 동일한 연료채널 내에서도 장전되는 12개 연료다발의 위치에 따라 차이가 있다. 임의 시점 4560개 다발 위치에서의 내경증가율은 내경예측 산출식을 통한 계산 결과와 정기검사로 측정한 대표 연료채널의 압력관 내경측정값을 기반으로 예측할 수 있다. 연료채널 내에서 내경증가율은 연료다발이 장전되는 입구로부터 9번째와 10번째 다발위치에서 최대인 기울어진 종모양 분포를 갖는다. 4,560개 연료다발 위치에 대하여 각각의 격자모델을 생산하여 노심을 모사하는 것은 비효율적이므로 전체 노심의 내경증가율 분포와 최대 증가율을 고려해 단위격자모델을 위한 내경증가율을 선별한다. 우선 380개 연료채널을 출력분포와 연료채널 위치의 높이를 고려해 7개 그룹으로 구분하고 동일 그룹에 속한 연료채널들 중 다발위치별 최대 내경증가율을 도출하였다. 7개 그룹별 12다발 각각에 대해서 최종 84개의 단위격자모델을 생산하고 이를 이용해 3차원 경년열화 평형노심모델을 수행하였다. 내경증가율 진행에 따른 기포반응도와 온도반응도 변화를 비교하기 위해 압력관 내경증가율이 평균 2.7%와 평균 3.5%인 두 개의 경년열화 평형노심을 각각 모델링하고 반응도를 평가하였다. 경년열화 평형노심 모델에 사용된 단위격자모델을 기반으로 크립에 따른 냉각재 기포반응도 변화를 분석한 결과 내경증가율에 따라 기포반응도가 비례해서 증가하는 경향을 보였으며, 노심모델에서도 내경증가에 따른 기포반응도가 증가함을 확인할 수 있었다. 연료온도 및 냉각재 온도 반응도도 내경증가에 따라 반응도가 양의 방향으로 증가하였다. 즉, 운전이력에 따라 압력관 크립이 증가하는 중수로 경년열화 조건은 노심의 반응도를 증가시키는 영향을 미치므로 안전해석용 노심모델 생산 시 해당 해석시점의 압력관 내경증가를 고려하는 것이 타당하다.

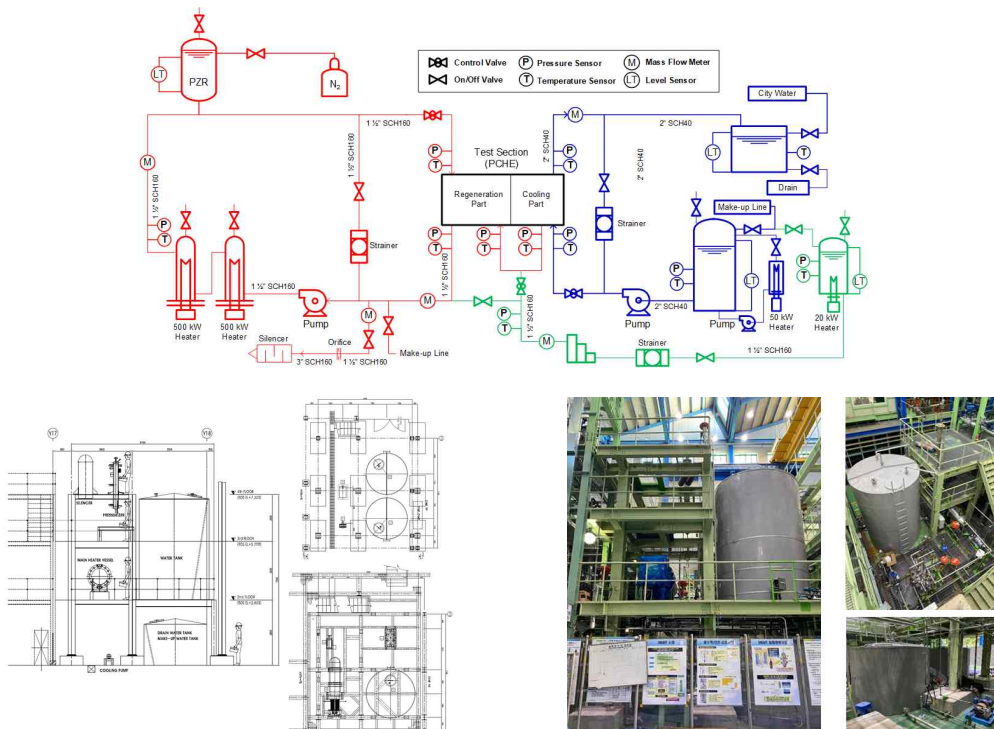
고온고압용 열교환기 성능 시험장치의 상세 설계

Detailed Design on Test Loop for High Temperature and Pressure Heat Exchanger

이선일* · 박기정** · 박주현*** · 전우진* · 서찬중* · 정종식****

한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단**, 한국원자력연구원 다목적계통기술개발부***, 한국원자력연구원 하나로운영부****

상용 원자력 발전로에는 다양한 계통들이 존재하며, 각 계통들에는 다양한 열교환기가 사용되고 있다. 이런 열교환기들은 고온고압 조건부터 저온저압까지 다양한 작동조건에서 작동하게 되며, 이들의 성능 검증은 안전 및 성능 검증 측면에서 매우 주요한 이슈가 되고 있다. 특히 고온고압조건에서 충수기능까지 포함된 열교환기 성능 검증은 그 성능 시험장치의 설계 및 구축에 있어 상당한 기술이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 한국원자력연구원 내 종합엔지니어링동에 구축된 고온고압용 열교환기 성능검증 시험장치에 대한 설계를 소개하고자 한다. 고온고압용 열교환기 성능검증 시험장치는 각 열교환기 입출구의 경계조건을 제공하며, 또한 온도, 압력, 유량 등을 측정함으로써 열교환기의 열적 성능을 파악할 수 있도록 제작되었다. 시험장치의 구성은 그림 1과 같으며, 크게 1차계통, 2차계통, 충수계통으로 나뉘어진다. 그림에서 붉은색으로 표시된 부분은 1차계통, 파란색으로 표시된 부분은 2차계통, 녹색으로 표시된 부분은 충수계통을 의미한다. 나머지 검은색으로 표시된 부분은 성능검증 대상인 재생정화 열교환기를 나타낸다. 그림 2 와 그림 3은 구축된 시험장치의 설치도 및 사진을 나타낸다.



연구용 원자로 감쇠탱크 설치 규정 및 설계 검토

Review on Decay Tank Installation Regulation and Design for Research Reactor

정민규 · 서경우 · 박홍범

한국원자력연구원

연구용 원자로는 발전용 원자로와 다르게 일차냉각계를 활용하여 노심에서 발생하는 열을 직접적으로 제거한다. 일차냉각재는 노심을 통과하면서 다수의 방사성 핵종 (냉각재에 의한 방사화 생성물, 알루미늄 방사화 생성물, 핵분열 생성물 등)을 포함하게 된다. N-16은 고에너지 감마선을 발생하기 때문에 원자로 출구에서의 방사선 준위 대부분을 차지하며, 차폐요건을 결정하게 된다. N-16의 반감기는 7.13초로 매우 짧아서 원자로 출구 배관에 감쇠탱크를 설치하여 일차냉각계통 주요 유체기기실 차폐를 효율적으로 설계할 수 있다. 반면 감쇠탱크 설치에 따라 기기실 차폐는 효율적으로 경량화할 수 있으나, 감쇠탱크 자체는 매우 큰 부피를 가지게 됨에 따라 많은 공간이 필요하며, 감쇠탱크실 차폐는 매우 두꺼워지게 된다.

IAEA Safety Standards Safety of Research Reactor에서는 방사선 방호 목표에 따라 방사성 물질에 대한 차폐, 환기, 여과 및 붕괴시스템에 대한 적절한 준비가 필요하다고 명시하고 있다. KINS의 연구용 및 교육용 원자로시설 안전심사지침을 확인해보면 작업자의 피폭을 통제하기 위해서는 N-16의 양과 농도를 고려하여야 하며 그에 대한 대책을 마련해야 함을 명시하고 있다. 반감기가 짧으므로 냉각재를 차폐구역 내에 오래 머물게 함으로써 방사선량을 감소시킬 수 있다고 명시하고 있다. 직접적으로 감쇠탱크를 설치하라는 문구는 없으나 N-16 제어계통으로 별도 구분하고 있는 만큼, 안전심사지침에서 요구하는 허용기준, 검토절차 및 평가결과에 합당한 설계 내용을 보여야 한다.

본 연구에서는 N-16 제어가 필요한 냉각계통 설계에 있어서 감쇠탱크 필요성을 검토하며, 이에 따른 냉각계통 효율성을 평가하였다. 해외 연구용 원자로 감쇠탱크 활용 현황을 검토하여, N-16 제어계통 설계의 적절성을 검토하였다.

후기

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020M2D5A1078131)

고온고압 시험장치 내 배수라인 오리피스 압력강하 예비 평가

Preliminary Evaluation of Pressure Drop on Drainage Line Orifice in High-Temperature and High-Pressure Test Loop

박기정 · 이선일 · 박주현 · 전우진 · 서찬종 · 정종식

한국원자력연구원

원자력 발전로는 전기 생산을 목적으로 건설되며, 이를 다양한 계통들이 설계되어 유기적으로 연결된다. 유체가 적용되는 각 계통에는 펌프, 밸브, 탱크, 열교환기 등을 포함한 다양한 유체기기가 설치되며, 이 유체기기들은 고온, 고압 조건에서부터 저온, 저압까지 다양한 작동 조건에서 운전하게 된다. 이 유체기기들을 현장에 적용하기 전에 설계자의 요건을 만족하는지 검증하기 위한 기기 성능 검증은 매우 주요한 이슈가 되고 있다. 이에 본 연구에서는 원자력 발전로의 고온, 고압의 운전조건을 모사하여 검증시험을 수행할 수 있는 시험장치를 설계하기 위한 연구를 수행하고 있다. 여기에는 고온, 고압 운전조건에서 계통 충수 및 배수 기능까지 포함되어야 하며, 운전조건을 유지하기 위해 시험장치는 폐루프로 설계되어야 한다. 폐루프로 설계된 시험장치에 일정 유량을 충수하게 되면 계통의 질량평형을 유지하기 위해 공급된 유량만큼 배수해주어야 한다. 이 배수 유량은 루프 내에서 고온, 고압 상태이기 때문에 루프 외부 대기압 조건으로 방출될 때, 큰 소음 및 진동 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 유량 배수 시 시험장치 구조건전성 유지를 위해 오리피스를 설치하여 외부 압력 조건까지 낮춘 후 외부로 방출해야 한다. 이에 본 연구에서는 고온, 고압 시험장치의 배수 계통에 설치될 오리피스의 압력강하에 대한 예비 평가를 수행하였다.

시험장치의 고온, 고압 조건은 각각 350도, 15MPa이고 외부 유출 조건은 대기압이다. 시험장치 내 15 MPa의 고압에서 외기로 방출 가능한 수준의 압력강하를 위해서 1개의 오리피스를 설치할 경우, 오리피스 후단에는 급격한 압력강하로 인한 캐비테이션 및 플래싱 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 유체의 온도조건에서 캐비테이션이 발생하지 않는 압력강하 수준을 산정하고 2~4단의 오리피스를 고려하였으며, 일반적으로 압력강하를 위한 오리피스로 많이 사용되는 Square Edge type 오리피스로 선정하였다. 예비 평가 결과, Fig. 1에서 제시한 4단의 오리피스 설계를 통해 오리피스 최 후단의 압력을 0.24 MPa까지 낮출 수 있었으며, 그 후단에는 On/Off 컨트롤 밸브를 설치하여, 고압의 유량을 외기로 방출할 수 있도록 설계하였다.

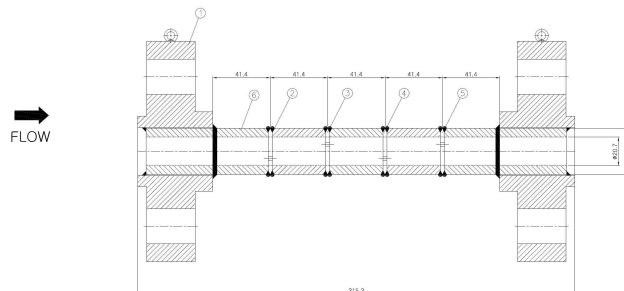


Fig. 1 4-stage orifice in High-Temperature and High-Pressure Test Loop

연구용 원자로 열교환기 경량화를 위한 요건 및 설계방법론 Requirement and Design Method for a New Heat Exchanger of a Research Reactor

서경우 · 이성민 · 김인국 · 박홍범 · 이동희*

한국원자력연구원, 전북대학교*

중성자 이용을 목적으로 설계되는 연구용 원자로는 정상 출력 운전시 일차냉각계통 열교환기 및 냉각탑등을 이용하여 원자로에서 발생 되는 열을 제거한다. 이러한 이유로 대부분의 연구용 원자로는 발전용 원자로에 비해 상대적으로 낮은 출력으로 운전하게 되며 일차냉각계통의 운전온도 또한 상대적으로 낮게 설계된다. 기존의 연구용 원자로 일차냉각계통의 열교환기는 냉각성능이 우수하며, 저온저압 시스템에 적합한 판형 열교환기를 채택한다. 판형 열교환기의 패턴의 특성을 이용하여 각 연구로의 LMTD (Log Mean Temperature Difference) 및 압력강하 요건에 적합하도록 설계한다. 기존 판형 열교환기는 정상 출력 및 설계 유량에 따라 80-130kPa의 압력강하를 유지한다. 판형 열교환기의 장점으로는 쉘-튜브형 열교환기에 비해 크기가 상대적으로 작으며 가스켓 타임을 적용함으로써 유지보수가 용이하다. 또한 일차냉각계통에 사용되어야 하므로 안전등급 및 내진범주 I급으로 설계되어야 하는데, 기존 판형 열교환기에 있어 관련 구조해석 및 내진해석의 경험 이 풍부하다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 매우 낮은 LMTD를 요구하는 연구용 원자로에서는 판형열교환기의 적정크기 또는 압력강하 요건을 만족시키기 어렵다. 연구용 원자로의 특성상 냉각탑을 통해서 열을 외부로 방출하게 되는데, 이 냉각탑은 설치되는 지역에 따라 최대습구온도에 영향을 받게 된다. 국내를 포함하여 국외에 설치되는 지역의 최대습구온도는 상대적으로 악조건이 많으며, 또한 근래의 기상악화로 인하여 보수적인 최대습구온도를 요구한다. 최대습구온도가 증가함에 따라, 기존의 냉각탑 설계를 적용하면 일차냉각계통 열교환기의 2차측 설계입구온도가 상승하게 된다. 또한 대부분의 연구용 원자로는 수조내에 개방형으로 설치되어 있으며, 이에 따라 일차냉각계통 열교환기 1차측 출구온도는 수조 상부 설계온도 한계 (45°C-50°C)와 수조 상부와 원자로 근처 수조수의 온도차이, 원자로입구온도 한계등에 의해 제약된다. 즉, 열교환기의 2차측 설계 입구온도와 1차측 설계 출구온도에 의해 2°C 보다 낮은 LMTD의 요건이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이의 조건에도 사용 가능하며 기존의 열교환기 부피보다 경량화된 새로운 형태의 열교환기를 개발하고 이를 적용하기 위한 연구를 진행하고 있다. 20MW 출력이상의 새로운 형태의 연구용 원자로에 적용할 수 있으며, 2°C 보다 낮은 LMTD에 적용가능한 열교환기를 설계하기 위해 Dittus-Boelter를 포함한 열전달계수 상관식과 채널 형상에서 사용 가능한 압력강하식을 적용하여, 새로운 형태의 부피 계산을 수행하여, 기존의 상대적으로 높은 LMTD 에서 설계된 판형열교환과의 부피 비교를 수행하였다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020M2D5A1078131).

방사선원 보안에 대한 국내외 규제기준 비교 분석

Comparative Analysis of Domestic and Foreign Regulatory Standards for the Security of Radioactive Sources

김우섭*

한국원자력통제기술원 물리적방호실

멸균, 재료 변형 등의 다양한 목적을 위하여 전 세계적으로 대규모 감마선 조사시설들이 설치 및 운용 중에 있다. 이로인 목적에서 조사시설이 도입되었음에도 방사선원을 목표로 한 테러 가능성이 존재하고, 이는 기술이 발전함에 따라 증대되고 있다. 국제원자력기구의 “방사선원 물질의 안전과 안보에 관한 행동지침”에 따르면 모든 국가는 선원에 대한 통제를 상설할 수 있는 악의적 행위를 정의하고 그 가능성을 평가하도록 명시하고 있다. 이에 우리나라는 18.5 PBq 이상 방사성동위원소에 대해 “물리적방호규정등과 국제 운송방호계획의 작성내용의 항목별 세부 작성기준” 고시에 따라 물리적방호규정을 수립 및 이행토록 규제하고 있다. 본 연구에서는 우리나라의 18.5 PBq 이상 방사성동위원소 보안에 대한 개선점 도출을 위하여 규제 항목을 크게 침입차단체계, 침입탐지설비, 잠금 및 봉인체계, 출입관리, 기록 및 보고, 그리고 문서 및 정보의 관리로 구분하고 각 항목별 고시의 내용과 국외 규제기준들을 비교 분석하였다. 해당 비교 분석을 위하여 국제원자력기구의 “방사성물질 및 관련 시설에 관한 핵 안보 권고(NSS No.14)” 문서, 미국의 “카테고리 1 및 2 분량의 방사성물질에 대한 물리적방호(10 CFR Part 37)” 문서 그리고 캐나다의 “핵 물질의 방호: 밀봉 선원 그리고 카테고리 1,2 및 3 핵물질(REGDOC-2.12.3)” 문서들이 참고되었다. 본 연구결과는 18.5 PBq 이상 방사성동위원소 보안에 대한 물리적방호 규제업무의 효과성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

경수로원전 저출력 제논 과도상태 시 노심 출력분포 측정 방법론 개발

문상래

한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹

경수로 원전 교체노심의 원자로특성시험은 노심의 운전변수가 설계된 예측값과 잘 일치하는지를 확인함으로써 핵연료 재장전 후 전출력 상태에 도달하기 전에 노심이 정확하게 재구성되었는지를 확인하고, 운전 중 노심이 설계된 대로 운전이 될 지를 판단하기 위해 수행된다. 미국 국가표준협회에서는 교체노심의 원자로특성시험 기준을 ANSI/ANS-19.6.1로 제공하고 있으며, 국내에서는 이를 참고하여 원자로특성시험의 측정항목을 선정하고 그에 대한 시험절차, 허용기준 등을 설정하였다.

최근 ANSI/ANS-19.6.1이 개정된 바, 최신 기술기준에 맞도록 원자로특성시험을 수행할 필요성이 대두되었다. 과거에는 0~30% 출력의 저출력에서 중성자속 대칭성 시험만을 권고하고 있었지만, 최신판에서는 0~30% 출력의 저출력에서 중성자속 대칭성 시험 또는 직접 출력분포 측정시험을 수행하고, 50% 출력을 초과하기전 반드시 출력분포 측정시험을 완료할 것을 권고하고 있다.

중성자속 대칭성 시험은 측정 시 노심 내 대칭위치 집합체들의 상대출력을 주로 비교하기 때문에 시험 초기조건으로 제논의 상태를 정의하지 않은 반면, 출력분포 측정시험은 핵연료 집합체 상대출력의 측정값과 예측값을 비교하기 때문에 출력변동 후 출력분포에 영향을 주는 제논의 상태를 시험 초기조건으로 규정하고 있다. 따라서, 현재 수행되고 있는 중성자속 대칭성 시험을 출력분포 측정시험으로 대체할 경우, 출력분포의 예측값 생산 시 시험 초기조건인 제논의 상태에 따른 영향을 살펴보아야 한다.

일반적으로 저출력에서 제논 안정화를 위해서는 약 26시간 이상의 대기시간이 필요하다. 그러나 현재 원자로특성시험은 목표 출력 도달 후 약 12시간 후에 수행하므로, 개정된 ANSI/ANS-19.6.11의 시험 초기조건 중 제논 평형상태를 사용하여 출력분포 측정시험을 수행할 경우 약 14시간 이상의 추가 대기가 필요하여 발전소 이용률을 저하시킬 수 있기 때문에 제논 과도상태에서의 출력분포 측정 방법론을 개발하게 되었다.

출력변동 시 축방향 노심온도의 변화로 인해 반경방향보다는 축방향의 출력분포가 더 큰 영향을 받기 때문에, ^{135}Xe 도 반경방향보다는 축방향으로 더 큰 과도상태를 겪게 된다. 원자로특성시험에서는 출력상승 후 목표출력을 유지하고 나서 출력분포를 측정하게 되는데, 출력상승 시 축방향 출력분포가 상부에서 하부로 이동하고 목표출력 유지 시에는 제논 과도상태의 출력분포를 거쳐 제논 평형상태 출력분포에 이르게 된다. 즉, 출력분포 측정 시 출력분포는 ^{135}Xe 의 상태에 따라 다르므로, 노심 출력분포 측정을 위해 예측값으로 제공되는 출력분포 생산 시 측정조건의 제논 상태와 서로 일관성 있는 제논 상태를 사용하여야 정확한 시험이 가능하다고 할 수 있다.

저출력 제논 과도상태 출력분포 측정시험을 위한 설계자료는 평균 2%p/hr의 출력상승률로 30% 출력까지 상승시킨 후 제논 과도 12시간에서 생산하였다. 30% 출력 도달 12시간 이후에는 출력상승이력에 따른 영향이 적기 때문에, 저출력 제논 과도상태에서는 제논 과도상태 출력분포 생산 방법론에 따른 설계자료와 30% 출력 도달 12시간 후 측정자료를 비교하여 판정기준이 만족됨을 확인하였다.

2차측 열교환기 튜브 슬리브 정비 및 검사기법에 대한 고찰

A Study on BOP the Maintenance and Inspection Methods of Tube Sleeve in BOP Heat Exchanger

천근영· 지동현*

한국수력원자력 중앙연구원

발전소 운전 연수가 증가함에 따라 2차측 열교환기 튜브의 열화 증가로 운전중 예상치 못한 튜브 누설 사고가 발생되고 있다. 이를 방지하고자 주기적으로 가동중 비파괴검사를 수행하여 결함 의심 튜브에 대해 관막음 정비를 수행하여 관리해 오고 있다. 비파괴검사 방법으로는 튜브내면에 보빈탐촉자를 삽입/인출하면서 취득한 와전류신호를 이용하여 열화를 평가하는 와전류탐상검사 기법을 현장검사에 적용하고 있으며 튜브 정비방법으로는 켄기형 금속메탈을 타격하여 관을 폐쇄하는 방법을 사용중에 있다.

이러한 관리방법에도 불구하고 운전 중 예상치 못한 누설사고가 빈번히 발생되고 있다. 누설을 경험한 발전소의 경우 운전 중 불시 출력감발에 따른 경제적 손실을 예방하고자 보수적으로 누설관 유사 신호에 대해 다량의 예방관막음 정비를 수행하고 있으며, 이로 인해 열교환기 열성능이 저하하여 조기에 열교환기 또는 튜브 교체가 필요한 상황이 발생하고 있다. 이에 해외 일부 발전소의 경우 지나친 관막음 정비에 따른 조기 교체 문제를 해결하고 수명 기간 동안 안정적인 사용을 위해 관막음 정비 대신 튜브 모재 결함부위에 직경이 작은 튜브를 삽입 및 확관하여 새로운 압력경계를 형성하는 슬리브 정비 방법을 도입하여 활용하고 있다. 그러나 슬리브 확관부는 기하학적 형상변화가 커 기존 와전류탐상검사 방법으로 열화 탐지능이 낮아 슬리브 튜브 건전성을 확인하는 데 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 미국 전력연구원(EPRI)을 중심으로 새로운 검사기법인 배열형(Array)와전류탐상검사 기법을 연구 개발하였으며 일부 현장검사에 적용하고 있다.

국내 운영중인 발전소의 일부 2차측 열교환기에서도 짧은 운전주기에 다량의 열화 발생에 따른 예상치 못한 튜브 관막음 증가로 열성능이 감소하여 열교환기 또는 튜브를 교체한 사례가 발생하고 있다.

본 연구에서는 향후 국내 발전소에서 예상치 못한 급격한 관막음 정비 발생으로 한주기 운전을 장담하지 못할 이벤트가 발생할 경우를 대비하고자 관막음 정비를 대체 할 수 있는 관재생 방법인 슬리브 정비 및 이에 대한 건전성을 확인할 수 있는 검사방법에 대해 고찰하였다.

신월성1,2호기 대비 NUREG-1432 전력계통 운전제한조건 차이 검토
Preliminary Analysis of Limiting Condition of Operation of ShinWolseong
Units 1&2 compared to NUREG-1432

이만규

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원전 안전 운영에 있어 발전소 상태가 운영기술지침서에서 규정하는 운전제한조건(LCO : Limiting Condition of Operation)에 만족되는지 점검 및 감시하는 것은 필수적인 항목이다. 국내 1000MWe급 표준형 원전의 운영기술지침서는 미국의 ISTS(Improved Standard Technical Specifications)인 NUREG-1432를 참고하여 개발되었으며, 운전제한조건 항목 구성 또한 유사하다.

원전 전력계통은 운전제한조건의 일부로, 사고 등 비상상황에서도 공학적안전설비(ESF : Engineered Safety Features) 등에 전원을 공급함으로써 발전소를 안전한 상태로 유지할 수 있도록 독립성, 다중성을 지닌 가진다. 전력계통 운전제한조건은 우선 전원 공급계통과 배전계통으로 구분할 수 있으며, 각 계통은 다시 교류, 직류 및 교류필수 전원으로 구분된다. 국내 1000MWe급 표준형 원전인 신월성 1,2호기 대비 NUREG-1432 (Rev.5, 2021)의 전력계통 운전제한조건은 크게 다음과 같은 차이가 있다.

첫째, 일부 조치요구사항에 대한 제한시간 및 점검주기에 유연성을 부여하고 있다. 이것은 미국 원전에 적용 중인 Risk Informed Completion Time Program 및 Surveillance Frequency Control Program에 따른 것으로 운전불가능 비상디젤발전기에 대한 운전가능 조치요구사항에 대한 제한시간 등이 대표적이다. 둘째, 정지 중(Shutdown) 운전제한조건(교류전원, 직류전원, 인버터, 배전계통)의 적용모드가 모드 5,6 및 조사된 핵연료집합체 이동 중으로 국한하고 있다. 셋째, 신월성 1,2호기와 일부 불만족상태 및 점검요구사항이 상이하다.

위 내용을 포함한 미국 ISTS(Improved Standard Technical Specifications)와의 전력계통 예비 Gap 분석은 향후 다른 운전제한조건에 대해서도 수행될 예정이며, 국내 운영기술지침서 개선을 위한 연구의 주요 참고자료로 활용하고자 한다.

출력 변화이력 반영 국부주파수제어 성능평가

Performance Evaluation on Local Frequency Control based on Power Change History

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

일일부하추종운전과 같은 원자력발전소의 계획적인 출력변동은 원자로내의 제어봉과 붕소농도조절을 이용하여 원자로 및 발전기출력을 조절한다. 이 중 제어봉의 잦은 사용은 핵연료의 불균형연소를 유발시켜 출력분포와 같은 노심의 핵적특성에 영향을 줄 수 있다. 한편, 국부주파수제어는 전력망의 작은 주파수변화에 대응하기 위하여 빠르게 발전기 출력을 변화시켜 주파수를 안정상태로 유지시키는 방식으로 원전에서는 일일부하추종운전처럼 제어봉 및 붕소농도의 제어를 통해 출력을 조절할 수 없다. 이러한 이유로 원전에서는 국부주파수제어시 터빈증기유량에 따른 증기발생기 및 RCS계통의 온도변화를 이용하여 원자로 출력을 피동적으로 제어한다. 본 논문에서는 선형연구에서 개발된 부하추종운전 제어봉 자동제어알고리즘을 변경하여 $\pm 2 \sim 3\%$ 출력변동의 국부주파수제어 운전이 가능한지 평가하고 계획적인 출력변동 이력을 반영한 제어봉사용 노심연소모델 적용에 따른 영향도 평가하였다. 평가를 위해 국부주파수제어운전시 가용이 불가한 붕소농도시나리오는 성능 평가시 사용을 배제하였고 현 부하추종운전 제어봉 자동제어알고리즘 내에 적용된 원자로 출력(T_{avg})과 출력분포(ASI) 제어 가중치들을 국부주파수제어운전에 적합하도록 민감도 계산을 수행하여 변경하였다. 이렇게 변경된 부하추종운전 제어봉 자동제어알고리즘을 이용하여 $\pm 2 \sim 3\%$ 터빈 출력변동시 국부주파수제어운전을 평가한 결과, 주기 초와 주기 말 모두 터빈증기량변화가 야기하는 노심의 냉각재온도 변화가 필요한 노심반응도량을 보상하여 국부주파수제어시 제어봉 구동금지 요건을 만족하는 것으로 확인되었고 제어봉이 움직이지 않아 노심출력분포 변화도 거의 없는 것으로 확인되었다. 또한 계획적인 출력변동 이력이 국부주파수제어운전에 미치는 영향을 평가해보기 위하여 출력변동 이력이 반영되지 않는 전출력운전시 국부주파수제어운전 결과와 비교한 결과 그 차이가 미미한 것으로 확인되었다. 결론적으로 현재 부하추종운전 제어봉 자동제어알고리즘의 알고리즘 내 일부 가중치 변경을 수행하면 국부주파수제어운전에도 적용할 수 있음을 확인하였다. 향후에는 일일부하추종과 국부주파수제어가 함께 적용된 운전방식을 적용하여 운전성능과 부하추종운전 제어봉 자동제어알고리즘의 적용성을 확인할 예정이다.

복합적인 탄력운전 성능평가

Performance Evaluation on Compound Flexible Operations

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

복합적인 탄력운전이라 함은 전력망의 다양한 출력/증감발 요구에 대응할 수 있는 운전방식으로 본 논문에서는 일일부하추종운전과 국부주파수제어운전을 동시에 수행하는 경우로 가정한다. 즉, 100-50-100%의 계획적인 일일부하추종운전 출력변화 시나리오대로 출력변화를 수행하고 출력변화가 없는 50%출력구간 6시간과 100%출력구간 14시간 동안에 $\pm 2\sim 3\%$ 국부주파수제어운전을 수행하는 것을 복합적인 탄력운전 시나리오로 가정한다. 본 논문에서는 이러한 복합적인 탄력운전을 모사하고 그 성능을 평가하기 위하여 선행연구에서 개발한 부하추종운전 제어용 자동제어알고리즘을 적용하고 출력변동 이력을 고려한 노심연소특성이 반영된 노심연계변수를 사용하였다. 복합적인 탄력운전 모사에 사용된 발전소 계통입력은 일일부하추종 모사조건 입력과 동일하게 사용하였으며 국부주파수제어운전 구간에서 요구되는 터빈출력만 기존 출력에서 $\pm 2\sim 3\%$ 변화하도록 출력입력을 변경하였다. 이러한 출력변화 시나리오와 입력변수들을 이용하여 복합적인 탄력운전을 모사한 결과 일일부하추종운전중 출력변화 없는 50, 100% 국부주파수제어운전 기간동안 제어봉의 잦은 움직임이 발생하였다. 이는 국부주파수제어 요건인 제어봉구동 금지요건을 만족하지 못하는 결과이므로 제어봉 구동 민감도를 낮추기 위해서 제어봉 자동제어알고리즘의 제어봉 및 출력(T_{avg})과 출력분포(ASI) 가중치를 변경하여 연소도 별로 주기초부터 주기말까지 다시 모사계산을 수행하였다. 그 결과 국부주파수제어운전 구간에서 최대 출력(T_{avg}) 편차가 증가하는 경향을 제외하고는 전반적인 노심거동 특성이 일일부하추종운전만 수행할 경우와 유사함을 확인하였다. 이는 국부주파수제어운전 요건인 제어봉 미구동요건을 만족시키기 위해 어느 정도 출력(T_{avg})의 변화를 허용하는 제어알고리즘의 특성이 나타난 것으로 판단된다. 그리고 일일부하추종운전과 동일하게 주기말인 17,000MWD/MTU 연소구간에서 탄력운전 성능이 저하되는 것도 확인하였다. 한편 일부 연소도 구간에서 제어봉의 최대삽입위치가 일일부하추종운전만 모사한 경우와 상이한 부분이 있으나 이는 가중치의 변경과 연소도 특성으로 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 따라서 복합적인 탄력운전시에도 출력/출력분포 제어를 위해 개발된 부하추종 제어용 자동제어알고리즘이 적용 가능함을 확인하였다.

피동응축열교환기 성능시험에 대한 SPACE 코드 응축열전달모델 평가 Assessment of Condensation Heat Transfer Model built in SPACE Code for PCHX Performance Test

이석호, 천 종

한국수력원자력 중앙연구원

기존 중대형 원전의 안전성을 강화하기 위하여 주요 안전계통에 대한 피동화 및 설계 채택이 증가하는 추세이다. 이와 관련하여 국내에서는 능동형보조급수계통을 증력, 응축현상, 자연순환 등의 자연력을 이용하여 피동형으로 대체 설계한 피동보조급수계통(PAFS, Passive Auxiliary Feedwater System)이 대표적 설비이다. 동 계통은 APR+에 최초로 채택되었으며, 수출전략형 중형원전인 APR1000의 계통구성에도 도입하여 현재 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 수행하였다. 동 논문에서는 PCHX의 냉각성능에 대하여 SPACE3.22 전산코드에 내장되어 있는 응축열전달모델의 예측성능에 관한 내용을 기술한다.

LAPLACE(LARge Scale PAFS Loop for Assessment of Condensation Effectiveness)로 명명된 성능시험설비는 원형 PAFS를 축소 모의한 시험장치로써 열출력은 최대 10MW, 높이/길이비 1:1, 열교환기 튜브 축소비 15/240, 열교환기 계열 축소비 1/4, 증기유량 축소비 1/16, 계통 차압비 1:1 등을 주요 설계기준으로 하며, 크게 증기발생기, 피동응축냉각수조, 피동응축열교환기 및 배관(증기관, 응축수 회수관)으로 구성된다. SPACE3.22 코드로 모의한 시험수행 전 예비해석에서는 기준 열출력인 8.1MW를 인가하는 준정상상태에 대해, PCHX의 응축열전달 효율이 낮을수록 평형상태에 도달하는 증기의 조건이 높음에 따라 해당관점에서 평가가 수행되었으며, 증기생성량과 열교환기 응축량의 평형도달이 원활히 이루어짐을 확인한 바 있다. SPACE3.22 응축열전달모델 평가 관점에서 수행된 동 논문에서는 인가된 출력별(8.1MW~1.75MW) 냉각성능의 비교를 위해 기본 응축모델(Default Model)과 PAFS 응축열전달모델을 각각 적용하여 비교평가가 수행되었으며, 평가결과 PAFS 응축열전달모델은 주요 열수력 변수들을 적절하게 예측함과 동시에 시험자료를 아주 잘 예측하는 것으로 평가된다. 반면, 내장된 기본모델의 경우 냉각측면에서 응축열전달계수가 상대적으로 낮게 예측되어 비보수적인 결과를 보인다. 동 평가를 통해 SPACE내 PAFS 응축열전달모델의 전반적인 예측성능을 확인할 수 있었으며, 추가적인 local 변수에 대한 상세 비교평가를 수행함으로써 APR1000 표준설계에 적용되는 PAFS 계통에 대한 전산코드 모델링의 검증에 활용코자 한다.

국내원전 강화가동중검사 현황

A Status of Augmented In-service Inspection in Domestic NPPs

김진희 · 곽동열

한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소 비파괴기술그룹

국내 원전은 최종안전성분석보고서(FSAR), 원전 운전경험 등을 확인하여 강화가동중검사 대상을 선정한다. 선정된 대상은 장기가동중검사계획서(LTP)에 수록되며 차수별 검사계획에 따라 가동중검사를 수행하고 있다.

주요 강화가동중검사 대상은 격리불가 소구경 배관 용접부, Alloy 600 이중금속 용접부, 파단면제구역(break exclusion zone) 고에너지 배관 용접부, 열성층/열피로 배관 용접부, 열전달 완충판(thermal sleeve) 검사 등이 있다. 결함 발생 확률이 높은 Alloy 600 이중금속 용접부와 열성층/열피로 배관은 검사주기를 10년에 1회에서 3회로 단축하고 검사 전에 검사범위 및 검사 절차에 대한 숙지를 위해 검사자 사전교육을 실시하고 있으며, 소구경 Alloy 600 용접부에서 누설이 검출된 사례가 있었다. 파단면제구역 고에너지 배관 용접부는 FSAR에 따라 원주방향 및 축방향 용접부에 대하여 100% 체적검사를 수행하고 있으며, 현재까지 결함이 검출되지 않았다. 미국 원전의 검사 사례를 조사한 결과, 이 검사대상에 RI-ISI 방법론을 적용하여 약 10% 샘플링 검사를 수행하고 있었다.

이 논문에서는 국내 및 미국 원전의 강화가동중검사 현황을 비교 설명하였고 시사점을 도출하였다.

원전 복수기 고용존산소 운전에 따른 증기발생기 전열관 건전성 평가 A Integrity Assessment of Steam Generator Tubing in the High Dissolved Oxygen Environments of Condenser during the Operating at NPP

권혁철 · 송규민 · 최진수 · 이경희 · 김초룡 · 조용상
한국수력원자력(주) 중앙연구원

A 원전에서 원자로 출력 100% 도달 후 복수펌프 출구에 용존산소가 높게 감지되었다. 근본 원인을 찾기 위해 현장에서는 용존산소 유입 가능 설비 및 기기 점검을 수행하였으며, 복수기 수질 A1쪽(복수기 수실은 A1,A2,B1,B2,C1,C2로 물리적으로 분리) 용존산소가 높아 복수펌프 출구 용존산소 상승에 기여한 것으로 확인하였으나, 유입원을 찾을 수 없었다. 하지만 용존산소 농도가 관리기준치 이내이고 계통에 미치는 영향이 미미할 것이라는 기술적 평가로 주이 감시를 강화하여 한주기를 운전하였다. 비록 복수기 용존산소가 관리범위 이내이기는 하지만 이전 주기보다 높은 상태로 운전되었기 때문에 주요 계통인 증기발생기 전열관 건전성에 미치는 영향 평가가 필요하다. 본 연구는 이러한 평가 목적으로 수행되었다.

증기발생기 전열관 건전성 영향평가를 위해 3가지 방법을 고려하였다. 첫째는 문헌 검토를 통해 2차 계통수의 용존산소 제어 목적과 용존산소 관리기준에 대한 기술 배경에 대해 검토하였다. 둘째는 복수기 수실 내 시료를 채취하여 용존산소가 높게 운전된 수실과 정상적으로 운전되었던 수실의 산화물 성장과 성분을 비교 검토하였다. 마지막으로 국외 사례와 수질 자료를 검토하여 종합적으로 증기발생기 전열관 재료 건전성에 미치는 영향을 평가하였다.

문헌검토 결과, 원전 2차 계통수 용존산소 제어 목적은 증기발생기 수질을 환원 상태로 제어하기 위함인 것으로 파악되었다. 환원 상태란 전열관 재료의 전기화학전위(ECP; ElectroChemical Potential, 이하 ECP)가 부동태 영역에서 제어되는 것으로, 복수기 용존산소가 높아도 증기발생기 급수에서 용존산소가 제거되어 ECP가 부동태 영역까지 낮아지면 전열관 재료 건전성에 미치는 영향은 없다는 것이다. ECP가 부동태 영역까지 낮아졌음을 확인하는 방법으로는 급수 하이드라진 농도가 관리기준치(하이드라진 농도: $<8 \times$ 급수공급원[DO] or $<20\text{ppb}$) 이내이면 ECP가 낮아졌다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 채취한 시료의 성장 분석결과, 용존산소가 높았던 산화물과 용존산소가 낮았던 산화물모두 대부분 다면체 형태를 보였으며 일부는 입자, 판상, 침상 형태가 혼재된 것을 확인하였으며 크게 차이가 나지 않았다. 성분분석 결과, 대부분 철 산화물이며 나머지는 2차계통 구성재료가 포함하고 있는 미량의 성분이 분석되었다. 화학성분 역시 용존산소가 높았던 시료와 용존산소가 정상적이었던 시료와 크게 차이를 보이지 않았다. 다만, 산화물의 상태를 약간 차이를 보였다. 즉, 용존산소가 높았던 수실의 시료는 산소로 인해 생성되는 산화물인 헤마타이트(Fe_2O_3)와 지오타이트($\alpha\text{-FeOOH}$)가 용존산소가 정상적이었던 시료보다 약 4%정도 더 생성된 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 이정도 생성량이 증기발생기 전열관 재료 건전성에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 판단된다. 국외원전 사례 검토 결과, 일부 원전에서는 증기발생기 수질을 환원상태를 유지하면서 나머지 계통 재료 부식저감을 위해 의도적으로 산소농도를 높게 유지하기도 하였다. 종합적으로 검토하면, 비록 복수기 수질 용존산소가 높더라도 급수에서 용존산소가 제어된다면, 증기발생기 전열관 재료 건전성에 미치는 영향은 없는 것으로 평가되었다.

판형 alumina 지지체 도입을 통한 Pt 기반 배기가스 저감 삼원 촉매의 반응 성능과 고온 내열성 증진

우효성¹ · 이은준¹ · 이관영^{1,2,*}

¹고려대학교 화공생명공학과, ²초저에너지 초저배출 사업단

환경오염 문제가 시간이 흐를수록 전 세계적으로 주목을 받는 문제가 되어가고 있고 이에 따라 환경오염의 주 원인들 중에 하나인 자동차 배기가스에서의 유해가스 문제를 해결해야 하는 상황이 필요해졌다. 특히 가솔린 자동차의 경우 유해가스인 일산화탄소, 탄화수소, 질소 산화물 등이 배출되기 때문에 이를 저감하기 위한 연구가 계속 진행되어왔다.

이러한 유해가스 저감을 위해서 대표적으로 사용하는 촉매로는 귀금속 Pt를 기반으로 하는 alumina 지지체를 갖는 촉매이다. 하지만 점점 강화되어가는 배출가스 규제에 맞추기 위해 좀 더 고성능, 고내열성의 촉매가 필요하게 되었다. 이에 따라 alumina를 판 모양으로 합성하게 되면 일반 alumina보다 열적으로 더 안정한 성질을 이용하여 이를 지지체로 사용하였다. 본 연구에서는 일산화탄소, 탄화수소, 질소 산화물의 혼합 반응물을 온도를 높여가며 촉매 반응 실험을 진행하여 전환율이 얼마나 나오는지를 관측하였고 판형 alumina를 지지체로 사용함으로써 기존 촉매들보다 높은 성능과 내열성을 관측하였고 이를 여러 가지 촉매 분석을 통하여 이에 대한 원인을 파악하였다.

에탄 탈수소방향족화에서 CNT 생성이 CoZn/HZSM-5 촉매의 비활성화에 미치는 영향

An influence of CNT formation on deactivation of CoZn/HZSM-5 catalyst for ethane dehydro-aromatization

박예림 · 김상윤 · 주나영 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

세일가스와 천연가스 추출 기술의 발전으로 천연가스의 구성성분 중 두 번째로 많은 양을 차지하는 에탄의 생산량이 증가하고 가격이 하락했다. 에탄으로부터 올레핀, 방향족 화합물 등 고부가가치 물질을 생산하는 공정이 주목받고 있다.

본 연구에서는 Zn/HZSM-5 촉매에 Co를 도입하여 에탄 탈수소방향족화 성능을 평가하였다. Co 함량이 증가함에 따라 활성 안정성이 증가하였으나 Co 함량이 적정량을 초과하면 과도한 C-C cracking으로 인해 BTX 수율이 감소하였다. TG 및 질소 흡탈착 분석을 통해 코크 전구체가 CNT로 전환되고 graphite 코크의 양이 감소하면서 미세기공 막힘이 억제됨을 확인하였다. 그 결과 활성 부위의 양이 유지되고 비활성화가 지연되었다.

Effect of noble metal addition to methane dehydroaromatization over Mo/HZSM-5 catalysts

김상윤 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

천연가스의 주 성분인 메테인을 비롯한 여러 경질탄화수소들에서 방향족 화합물을 만드는 탈수소방향족화 반응은 현재 납사 개질공정을 통한 BTX 생산을 대체하기 위해 여러 연구가 진행되고 있는 분야이다. 여러 촉매들 중 Mo/HZSM-5 촉매가 주로 사용되며, 낮은 활성과 안정성을 극복하기 위해 여러 방안이 모색되고 있고, 그 중 귀금속을 이용한 방법을 통해 높은 활성을 얻을 수 있다.

여러 귀금속들의 도입을 통해 Mo/HZSM-5 촉매의 낮은 활성을 극복하고자 하였고, 높은 안정성이 나타나는 이유에 대해 분석 및 탐구하였다. 반응 실험과 촉매 특성화 분석을 이용하여 원리를 규명하고자 하였다.

천연가스 탈수소방향족화 반응과 산화적 재생에서 Mo/HZSM-5 촉매에 도입된 실리카 바인더의 효과

Effect of Silica Binder introduced to Mo/HZSM-5 Catalyst on Natural
Gas Dehydroaromatization Reaction and Oxidative Regeneration

주나영 · 박예림 · 김상윤 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

주요 국가들의 천연가스 생산량이 증가하고 있으며, 고부가가치 화합물인 BTX를 포함한 Biochemicals의 수요 또한 증가하고 있다. 이에 따라, 천연가스를 사용하여 BTX를 합성하는 공법에 대한 필요성이 증가하였다. 천연가스를 활용한 직접 전환 공법으로 BTX를 생산하는 공정은 천연가스를 분리하는 공정을 거칠 필요가 없어서 비용 효율적이며 기존 공정보다 친환경적이다.

Mo/HZSM-5 촉매의 MFI 제올라이트는 TBTX와 비슷한 크기의 pore size를 지니고 있어서 높은 선택성을 지닌다. 하지만 천연가스 탈수소방향족화 반응 중 누적되는 coke와 Mo 금속 sintering으로 인해 제올라이트 channel blocking, 산점 감소가 발생하고 촉매 비활성화 현상으로 이어진다. 누적된 coke를 제거하기 위해 고온 산화적 재생 방법을 도입할 경우, dealumination으로 인한 촉매 구조 파괴로 인해 더 빠른 비활성화가 나타난다.

이 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자, Mo/HZSM-5에 실리카 바인더를 도입하여 촉매 재생 후 촉매의 구조 파괴 현상을 억제하고자 하였다. SEM, BET, XRD 분석을 통해 바인더가 도입된 Mo/HZSM-5 촉매의 구조와 기존 촉매의 구조를 비교하였다. 또한 천연가스 탈수소방향족화 반응을 통해 촉매 활성 비교를 진행하였다.

Effect of surface properties of Pd/wrinkled silica catalysts on hydrogenation of furfural

김예은 · 이관영 · 이만식*

한국생산기술연구원 울산본부, *고려대학교 화공생명공학

With improving the demand for sustainable and renewable materials, many researchers have reported utilization and conversion of biomass-derived materials due to the depletion of fossil fuels. Tetrahydrofurfuryl alcohol is an organic material obtained from hydrogenation of furfural or furfuryl alcohol, which were used as a green solvent and synthetic intermediate. To improve hydrogenation of furfural or furfuryl alcohol, the acid-base properties need to be modulated. Herein, surface properties of wrinkled silica was modulated by different concentration of organosilanes. The functional organosilanes were chemically anchored to wrinkled silica surface by hydrolysis reaction. Then, Pd supported catalysts were synthesized by chemical reduction method and their catalytic activities were tested via hydrogenation of furfural under mild temperature. The results indicated that the catalytic activity was dependent on surface properties due to the nature of functional groups bonded to wrinkled silica. Compared to Pd supported on pristine wrinkled silica, Pd nanoparticles supported on the pretreated wrinkled silica were highly dispersed due to the induction of functional groups as anchor sites, leading to higher activity.

수소 생산 시 이산화탄소 저장을 연계한 친환경 유·가스전 개발 동향
Development Trend of Eco-Friendly Oil and Gas Fields
with Carbon Dioxide Storage in Hydrogen Production

신효진 · 이다영 · 이대모 · 임종세*

한국해양대학교 에너지자원공학과

탄소중립 시대에서 수소경제의 실현을 위해서는 안정적인 청정수소의 생산이 필요하나, 현재 생산되고 있는 수소의 98%는 화석연료에 기반한 탄소 집약적 수소이다. 이처럼 재생에너지 기반의 그린수소 생산이 상용화되기까지 과도기적 단계에서 블루수소의 비중이 클 것으로 전망되며, 수소경제 초기 단계에서는 다양한 공급원에 대한 검토가 수반되어야 한다. 이 연구에서는 블루수소 공급원으로 고갈된 유·가스전 활용을 위한 개발 동향을 파악하고자 하였으며, 추가적인 유체 생산과 더불어 이산화탄소 저장 기술 적용 가능성을 확인하고자 한다. 생산이 이루어진 유·가스전을 대상으로 석유회수증진(enhanced oil and gas recovery, EOR/EGR)과 이산화탄소 저장을 위한 전산수치해석 연구가 수행되고 있으며, 현장 실증을 위한 파일럿 프로젝트가 진행 및 계획되고 있다. 유·가스 저류층에서 효과적인 이산화탄소 주입과 저장을 위해 저류층 내 유체와의 유동도비(mobility ratio), 치환효율(displacement efficiency), 저류층 온도 및 압력 등의 물성 조건에 대한 영향을 파악한 바 있으며, 조기에 이산화탄소가 생산정에 도달하지 않기 위한 최적의 주입조건 설계가 필요함을 시사하였다. 이산화탄소 주입 후, 저장의 안정성을 파악하고자 장기간의 시뮬레이션으로부터 유체 거동을 모니터링하고 포획기작(trapping mechanism)을 파악한 바 있다. 또한, 현장 적용을 위해서는 경제성 분석이 필수적이므로 이산화탄소 분리에 따른 비용을 추가적인 석유 생산으로부터 보완 가능함을 파악하였다. 향후 생산최적화를 목표로 하는 석유회수증진 기술에서 이산화탄소 저장을 연계한 CSEOR 및 CSEGR을 위해서는 주입된 이산화탄소 거동과 저장 모니터링 등을 고려할 수 있는 최적화 기술의 확장이 필요할 것으로 보인다.

사 사

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

메탄의 수증기/이산화탄소 혼합개질을 위한 Nickel 코어-셸 촉매

지서린 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

산업화 이후 발생한 다량의 온실가스로 인해 기후변화가 세계적인 문제로 대두되고 있으며 문제 해결을 위한 지속적인 노력이 이루어지고 있습니다. 메탄의 수증기/이산화탄소 혼합개질은 메탄과 이산화탄소라는 두 온실가스를 동시에 사용하여 합성가스를 생산할 수 있는 반응으로, 온실가스를 줄이는데 큰 도움을 줄 수 있습니다. 다만 메탄의 수증기/이산화탄소 혼합개질은 코크 생성으로 인한 촉매 비활성화 문제가 발생하기 때문에 코어-셸 구조를 도입하여 금속 소결과 코크 생성을 방지하고자 하였습니다.

본 연구에서는 SiO_2 에 Nickel 나노입자를 단분산성으로 담지한 후 ZrO_2 셸을 도입하여 촉매 비활성화를 방지하고자 하였습니다. 본 연구는 $\text{SiO}_2@\text{Ni}@\text{ZrO}_2$ 구조를 통하여 기존 촉매보다 활성 및 안정성이 우수한 촉매를 합성하고, 다양한 분석을 통해 원인을 조사하였습니다.

유럽의 곤경에서 본 우리의 에너지안보 증진 과제
A Strong Message to Enhance Energy Security of
Korea from European Countries in Trouble

윤성원 · 정환삼 · 문기환 · 김승수
한국원자력연구원

2022년 2월 24일 러시아가 우크라이나를 전격적으로 침공하였다. 이로 인해 유럽 국가들은 극심한 에너지 부족과 함께 높은 물가상승의 곤경에 처하게 되었다. 이에 대해 유럽 각국은 해외 에너지 확보와 국내 공급역량 극대화에 전력투구하는 외에도 형재세 부과나 도입가격 상한제와 같은 극약 처방을 내세우고 있지만, 조만간 닥칠 동계 열에너지 수요 급증을 앞두고 그 효과는 낙관하기 어렵다. 또한 러시아의 에너지 금수조치들로 인해 유럽을 중심으로 세계는 에너지 곤경에 대해 새로운 경각심을 갖기 시작했다.

이 연구는 세계가 예상 못한 원인에서 촉발된 최근의 글로벌 에너지 위기를 맞아 국가 에너지안보에 대한 진지한 재인식 필요성을 일깨우고자 한다. 이를 위해 우선 에너지안보에 대한 정의와 객관적인 평가범주를 조사하고, 이를 바탕으로 글로벌 에너지 불확실성 속에서 우리나라 에너지안보 증진을 위해 필요한 고려범주와 관리인자들을 제시한다. 과거의 정권에 따라 번복되었던 해외 자원개발이나 국내 탈핵 에너지전환 정책에서 보았듯, 에너지 문제가 더 이상 정치공학적 변수나 혹은 대국민용 레토릭이 되어선 안되기 때문이다.

더불어 우리나라의 에너지 공급특성을 감안할 때 국가 에너지안보 증진을 위한 정치·경제적 조달능력 못지않게 국내 (준)자립의 에너지 기술개발로 국내 공급역량을 높여야 한다. 이를 위해 우리나라 에너지안보 대책에는 에너지 과학기술 전문가들의 기여가 절실하다. 또한 러시아 촉발 글로벌 에너지 위기를 보며 다양한 에너지안보 위협을 탐지하는 감시장치(watchdog)을 두어야 한다. 이를 위해 국가 에너지안보 상황과 함께 에너지 기술별 안보 기여도 역량도 공신력 있게 평가해 주기적으로 발표하는 사업이 착수되어야 한다.

정수압 활용 정압식 압축공기 저장장치의 압축공기 저장용 탄성 용기 설계
Design of Elastic Container Material for Compressed Air Storage of
Static Pressure Compressed Air Energy Storage using Hydrostatic
Pressure

황성현·이창형·박혜민·권도현·박성호·류주열†

고등기술연구원

온실가스 증가에 따른 환경파괴 및 이상기후 발생에 따라 세계적으로 탄소중립을 이행하기 위해 재생에너지를 확대 하려는 노력에 동참하고 있다. 하지만, 태양광, 풍력 발전 등 재생 에너지의 경우, 출력 변동성이 크기 때문에 부하 변동성에 대응하기 까다롭다는 문제점이 있다. 그래서 과부하를 대비해 잉여 전력을 에너지 저장 장치에 저장함으로써, 출력 손실을 완화하려는 노력을 하고 있다. 다양한 에너지 저장 기술 중, 압축공기 저장장치(Compressed Air Energy Storage, CAES)는 장주기 에너지 저장장치로 고용량에서 높은 효율을 내는 저장장치이다. CAES 는 압축공기를 저장하기 위한 충분한 공간이 필요한데, 공동구(터널, 폐광, 암염 등)를 활용하면 비교적 적은 비용으로 에너지 저장소로 활용할 수 있다.

본 논문은 미활용 터널을 활용한 정수압 정압식(10bar) 압축공기에 사용 될 탄성 용기의 재료를 선정하고 이에 알맞은 형상을 설계하였다. 먼저 탄성 용기는 외부로 부터는 정수압, 내부로는 공압으로 응력이 발생하기 때문에 물과 공기에 대한 내식성이 좋아야 하며, 공기 침투율이 낮아야 하고, 정압을 유지하기 위해 형상이 빈번히 변하기 때문에 내구성이 좋아야 한다. 단, 형상 변화에 대한 내구성이므로 인장강도 및 신축성을 지표로 삼았다. 이미 널리 사용 중인 합성 고분자를 기준으로 본 CAES에 가장 알맞은 재료는 IIR(Isobutene-Isoprene Rubber)로 해당 고무는 팽창 탱크, 자동차 타이어 튜브 등으로 매우 낮은 침투율(Permeability)이 요구되는 환경에서 사용된다.

탄성 용기의 형상을 결정하기 위해 설치 환경을 분석하였다. 탄성 용기는 물에 완전히 잠기고 바닥에 고정 된다. 하지만 공기에 의한 부력과 수두 때문에 재료에 가해지는 응력 분포가 불균형해 진다. 이에 따라, 재료의 단위 면적에 가해지는 응력을 균일하게하기 위해 ZPNS(Zero-Pressure Natural Shape) 형상으로 설계를 하였다.

감사의 말 : 이 논문은 2022년도 중부발전의 지원을 받아 수행된 연구임(미활용 터널 사용을 위한 압축공기 에너지저장장치 개발)

스마트에너지플랫폼 데이터를 활용한 에너지 사용량 예측 알고리즘 개선 Improvement of Energy Usage Prediction Algorithm Using Smart Energy Platform Data

이재민 · 이창교

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

세계 주요국들은 지구온난화가 가속화됨에 따라 기후변화 문제를 해결하고 저탄소 사회를 구현하기 위한 정책들을 수행하고 있다. 기업들이 사용하는 에너지를 모두 재생에너지를 이용하여 생산한다는 RE100 등이 전세계적으로 퍼져나가고 있으며, 대한민국 정부에서도 탄소중립을 공약으로 내세우며 다양한 전략을 추진하고 있다. 하지만 당장 모든 기업들이 RE100을 바로 이행할 수는 없으므로 재생에너지로 바꾸기 전에, 에너지 사용량을 지속적으로 확인하고 에너지 소모를 줄이는 것이 중요하다.

본 연구에서는 이전에 진행하였던 RNN 알고리즘을 활용한 에너지 사용량 예측 설계를 보완하여 더 높은 정확도를 구현할 수 있도록 연구하였다. 먼저 기존에 사용하였던 스마트에너지플랫폼에서 기업별 에너지 사용량의 데이터량을 증가시키기 위해 에너지 데이터를 시간 단위로 수집하였다. 데이터는 2022년 8월의 데이터를 사용하였으며, 데이터 셋에서의 Overfitting 값을 최소화하기 위해 L1 Regularization과 L2 Regularization을 적용하여 더 높은 정확도를 보이는 것을 사용한다. 이후 RNN 모델과 LSTM 모두 100번의 에폭으로 동일하게 훈련을 진행하였으며, R2 Score로 정확도를 측정하였다.

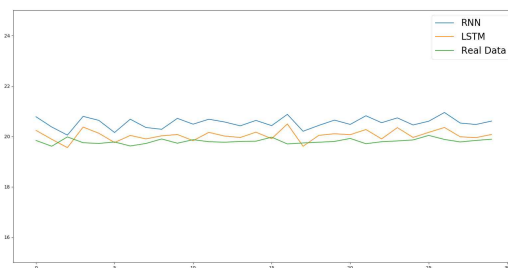
측정한 결과 RNN 모델은 0.34에서 0.89로, LSTM 모델은 0.65에서 0.9로 이전 결과값에 비해 높은 폭으로 향상된 모습을 확인하였다. 향후 연구에서는 추가적인 Regularization을 통해 데이터 학습을 규제하여 모델의 알고리즘을 개선해나갈 예정이다.

```
Epoch 100/100
6/6 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 0.0341 - mae: 0.1545
RNN 모델 R2 Score : 0.3425756186408484
LSTM 모델 R2 Score : 0.6572966434458215

Epoch 100/100
342/342 [=====] - 1s 2ms/step - loss: 0.0022 - mae: 0.0214
RNN 모델 R2 Score : 0.8907585946353447
LSTM 모델 R2 Score : 0.9085624684606105
```

<그림 1>

이전 학습 모델과 R2 Score 비교



<그림 2>

RNN 모델·LSTM 모델을 적용한
에너지 사용량 예측 그래프

5G 기반 스마트 팩토리 디지털 에너지 시그널 로그 분석 시스템 개발 Development of 5G-based Smart Factory Digital Energy Signal Log Analysis System

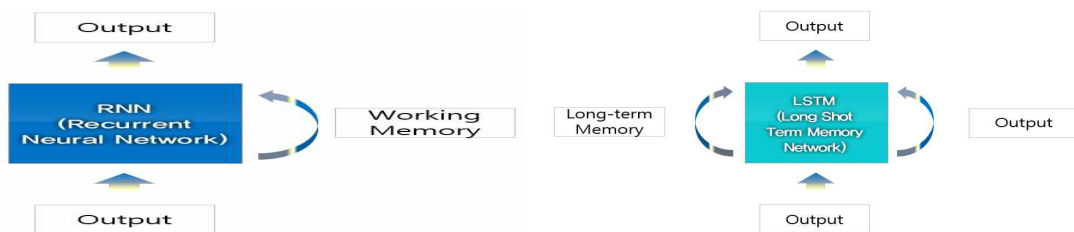
박태욱 · 윤만석

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

최근 전세계 주요 국가들은 기후 위기 대응을 위해 산업구조 혁신 일환으로 디지털 에너지 기술을 활용한 그린경제시대로의 전환을 추구하고 있다. 탄소 배출량을 최대한 감축 시키고, 흡수량은 증대 시켜 순 배출량 '0'인 상태로 만드는 탄소 중립 정책에 힘을 기울이고 있다. 우리나라는 글로벌 제조업 중심으로 탈탄소화를 위해 산업 부문의 에너지 전환 및 절감을 위한 노력을 강화하고 있다. 그린경제 시대에는 에너지, 데이터, AI, 5G가 융합된 에너지 효율화 혁신으로 지능 정보화 기반 에너지 산업 창출이 가능해졌다. 이에 따라 기업의 경영 환경에서는 과거 단순히 에너지를 절감하는 차원을 넘어서 중장기적 경영전략에 에너지를 밀착시키며, 전략적인 에너지 사용과 관리의 필요성이 제고되고 있다. 또한 글로벌 기업을 필두로 RE100 참여가 본격화되고, 탄소중립을 위한 탄소세, 탄소국경세 등이 본격적으로 논의됨에 따른 대응책 마련이 시급하다.

본 논문에서는 ICT 융합 기술 기반 초연결, 초저지연 기술을 활용한 공장 내 생산설비 진단 모니터링 및 에너지 분석·관리가 가능한 5G 기반 스마트 팩토리 디지털 에너지 시그널 로그 분석 시스템 개발 방안을 제시한다.

에너지 관련 시그널 로그를 분석하기 위해서는 제조공장 내 전량량 계측이 가능한 전력계측 모니터링 시스템을 개발하고, 전기 신호의 미세 변화량을 감지하여 설비진단, 안전진단, 용접진단, 2차전지 진단 등 진단검사를 지원해야한다. 또한 관리 데이터를 수집하여 딥러닝, 빅데이터 기술을 활용하여 이상징후(과전류, 과전압, 온도 변화, 진동 변화, 액온도/주변온도 이상 등)을 감지하여 관리자에게 상황전파로 대응할 수 있는 스마트팩토리용 서비스를 구현할 수 있다. 이를 통해 수작업에 의존하여 에너지 관리·점검하는 방식에서 IoT 기기를 통한 디지털화하여 실시간 에너지 관리·분석이 가능해진다. 에너지 사용량 예측 알고리즘 기술 설계를 위해 딥러닝 모델 학습을 통한 에너지 예측 알고리즘 설계를 한다. 이는 RNN과 LSTM 기반의 에너지 사용량 예측 알고리즘 설계를 통해 만들 수 있다. 시간별, 계절별로 구분하여 에너지 데이터를 정리하고, 산업별 그룹을 설정하여 에너지 데이터 베이스 스키마를 구성할 수 있다. 산업단지 에너지 데이터를 활용한 기업별, 업종별, 일별 데이터 그룹을 모두 합산한 에너지 데이터 정규화를 진행해야 한다. 본 시스템 개발을 통해 대규모 제조공장 환경에서 수집되는 에너지 데이터 전송에 고성능 통신 인프라 환경을 시범 적용한다면 글로벌 그린경제시대에 다가설 계기가 될 것으로 판단된다.



<그림 1> RNN 모델·LSTM 모델 데이터 처리 비교

효율적인 에너지 관리를 위한 이동통신망 기반 에너지 플랫폼 운영 방안 연구

A Study on the Operation Method of Energy Platform Based on Mobile
Communication Network for Efficient Energy Management

박제석 · 윤만석

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

에너지가 생산되고 소비 되는 과정에서 낭비되고 있는 상황이 많이 발생하고 있다. 이러한 환경 개선을 위해 최근에는 IT융합기술을 접목하여 효율적으로 에너지를 관리하기 위한 시스템이 각광받고 있다. 특히 대규모의 제조공장을 가동하고 있는 기업 입장에서는 효율적인 에너지 관리 시스템은 필수적으로 필요한 상황이다. 대규모 공장과 각종 발전소에는 에너지의 사용량과 발전량 등을 확인하고 관리하기 위한 에너지 관리 시스템이 갖추어져 있다. 구미산업단지의 경우 제조기업을 대상으로 스마트 에너지 플랫폼을 통해 에너지를 효율적으로 관리하기 위한 인프라를 갖추어가고 있다. 본 논문을 통해 기 구축 운영중인 에너지 플랫폼과 이동통신망을 연계하여 효율적으로 에너지를 관리하기 위한 방안에 대해 연구하고자 한다. 현재는 유선 인터넷을 활용하여 데이터를 수집하고 활용하고 있지만 에너지 사용 계측 장비에 이동통신 기술을 사용하면 송수신 되는 데이터의 양과 질이 개선될 것이다. 실시간으로 수집된 데이터를 통해 현재 에너지 사용량과 소비되는 총량을 확인하여 낭비되고 있는 포인트를 확인하고 유실되는 원인을 개선한다면 효율적으로 에너지를 관리할 수 있다고 생각한다.

5G 특화망을 활용한 에너지 관리 시스템 동향에 관한 연구

A Study on the Trend of Energy Management System Using Private 5G

황명진 · 이재민

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

4차 산업혁명에 따라 IT기술이 발전하면서 데이터 사용량이 급격히 증가하였으며, 대용량 데이터를 초고속, 초저지연으로 처리할 수 있는 통신 기술로 5G(5세대 이동통신)가 각광받고 있다. 5G는 초고속, 초저지연, 초연결이라는 핵심 KPI를 특징으로 현재 다양한 산업분야에 적용되고 있다. 특히, 산업 특징에 맞춰 자가망을 구축하고 운용할 수 있는 5G 특화망은 보안이 강하고 기업 내부 데이터를 안전하게 수집/관리할 수 있어 많은 기업에서 인프라 도입을 고려하고 있다.

현재 에너지 산업분야에서도 5G 특화망을 구축함으로써 5G 기술을 활용한 빅데이터 분석, 현장 실시간 영상 관제, 실시간 에너지 설비 제어 등을 포함한 에너지 관리 시스템 개발이 활발히 진행되고 있다. 국내에서는 한국전력공사에서 선제적으로 전기 에너지 발전소 및 변전소에 5G 특화망을 구축하여 실시간 변전소 관리 시스템, 사족보행 로봇을 이용한 변전소 점검 등 IoT 기술을 활용한 에너지 관리 시스템 도입할 계획을 밝혔다. 또한, 한국수자원공사는 5G 특화망과 XR, 디지털트윈 기술을 융합하여 스마트 정수장 운영 관리 시스템을 개발함으로써 정수장 정보를 실시간 이미지, 데이터화하여 점검자의 안전 확보 및 점검의 효율성을 극대화시킬 계획이라고 밝혔다. 글로벌 시장에서는 일본, 독일이 5G 특화망 시장을 선도하고 있으며, 일본의 신이키 발전소는 5G 특화망 기반 발전소 관리 시스템을 개발하여 5G 로봇 운용을 통한 AI 기반 누수, 누유, 설비 부식 조기 발견 등 발전소 순시점검에 활용하고 있다.

이렇듯, 5G 특화망은 자가망으로 구축·운영이 가능하기 때문에 보안성이 강하고 데이터를 자유롭게 활용하여 독자적인 에너지 관리 시스템을 정립할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 전 세계적으로 에너지 분야 뿐만아니라 다양한 산업군에 5G 특화망이 적용되고 있으며, 관련 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 5G 특화망을 활용한 에너지 관리 시스템 기술개발 및 산업 동향에 대해 알아보았다.

고성능 알루미늄 배터리 양극재 적용을 위한
NiCo₂S₄@graphene quantum dot 복합재료 연구

Study on the NiCo₂S₄@graphene quantum dot composite as a cathode for
application of high-performance aluminum-ion batteries

여서현 · 손동규 · 이유현 · 김문수* · 이기백*

영남대학교 화학공학과

Despite the undeniable fact that Li-ion batteries (LIBs) are still widely considered to deal with extremely increasing energy demand, the requirement of next-generation batteries may be constantly proposed as long as the crisis of energy and resources exists. To solve the aforementioned issue, herein, we have studied on rechargeable aluminum-ion batteries (RAIBs), focusing on the way to overcome the current limitation via smart designing and constructing NiCo₂S₄@graphene quantum dot (GQD) composite materials. As a result, it is able to be discovered for improving electrochemical performance that well-prepared chestnut-shaped hollow NiCo₂S₄@GQD displayed a large surface area and short diffusion length, further minimizing the irreversible dissolution of sulfur during the cycle.

칼륨 이온 및 알루미늄 이온 배터리를
페릴렌 디이미드 기반 소형 유기 분자 합성

Perylene Diimide-Based Small Organic Molecule for Potassium-ion and
Aluminum-ion Batteries

마이클루비라지 · 여서현 · 손동규 · 이유현 · 이기백*

영남대학교 화학공학과

Small organic molecule can independently store electrons and counter metal ions during electrochemical redox reaction in various metal-ion batteries owing to high capacity, and fast kinetic performance. However, the serious dissolution problem in liquid electrolytes during cycling limited their universal capability for organic electrodes. In this context, we report a small organic compound based on the redox-active carboxylic acid functionality substituted perylene diimide (PDI-AB) through a thermal condensation reaction between perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydride (PTCDA) and 4-amino-benzoic acid (4-AB). With considerable insolubility against (ionic) liquid electrolytes, PDI-AB can deliver the redox potential window of 1.2 to 3.5 V (vs. K^+/K) and 2 to 0.1 V (vs. Al^{3+}/Al). Specifically, PDI-AB at $0.1 A g^{-1}$ provided the discharge capacity of $65 mAh g^{-1}$ (Vs. K^+/K) and $98 mAh g^{-1}$ over 100 cycles with excellent rate capability and better long-term stability over 1000 cycles at $1 A g^{-1}$. These excellent electrochemical redox performance makes PDI-AB a promising small organic cathode based on both K-ion and Al-ion chemistries of large-scale energy-storage system.

알루미늄이온전지의 전극재료를 위한 TiO_2 의 설계 및 변형

Design and modification of TiO_2 as electrode material for aluminium-ion battery

탕가벨 셀바마니 · 이유현 · 손동규 · 여서현 · 이기백*

영남대학교 화학공학과

The developments of aluminium-ion battery are extremely attractive in energy storage system due to very high theoretical specific capacity, abundant and protected. Herein, the lack of reversible electrode materials are hinder to use the metallic Al in battery configuration either cathode or anode for aqueous or non-aqueous electrolyte systems. To date, numerous cathode materials (TiO_2 , CuHCF , V_2O_5 , MoO_3 , graphite, $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ and MnO_2) are studied for aluminium-ion batteries. Among them, the TiO_2 is an excellent material for energy storage devices with low-cost, stable and environmentally affable. Further, the developments of modifications into the TiO_2 are treated with various metal/metal oxide doped for composites or heterostuctures as improved in electrochemical activity. In this regards, were sonochemically modified Mg and La co-doped with commercial TiO_2 (Degussan P25) as a candidate for cathode materials with $\text{AlCl}_3/1\text{-Ethyl-3-methylimidazolium chloride}$ ionic liquid as electrolyte for aluminium-ion battery. The results exhibits significantly enhanced initial discharge specific capacity of 40 mAh g^{-1} at 100 mA g^{-1} of current density. Further, the value of discharge specific capacity of 22 mAh g^{-1} was achieved after 100 cycles.

고성능 슈퍼커패시터 적용을 위한
3D Ni/Co 이원금속 MOF@탄소 나노섬유 복합체
Three-dimensional Ni/Co bimetallic MOF nano-rods@carbon nanofibers
composite for high-performance supercapacitor

정현서, Gopinath Sahoo, 정상문*

충북대학교 화학공학과

슈퍼커패시터 (Supercapacitors, SCs)는 이차전지에 비해 높은 출력밀도 ($\sim 10\text{kW kg}^{-1}$), 긴 사이클 수명 ($\sim 500,000$ 사이클) 특성으로 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 전통적인 슈퍼커패시터 (Electric double-layer capacitor, EDLC)는 물리적인 흡탈착에 의한 에너지 저장 메커니즘과 수계 전해질 사용으로 인한 낮은 에너지 밀도 ($5\sim 10\text{Wh kg}^{-1}$)를 가진다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 기존의 활성 전극 대신 높은 에너지 밀도를 갖는 배터리용 전극 소재에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 최근 많이 연구되고 있는 금속 유기 프레임워크 (Metal organic framework, MOF)는 풍부한 활성 작용기 제공으로 인하여 구조 제어가 용이하고 다공성 특성으로 인하여 우수한 성능을 나타낸다. 이러한 MOF의 특성으로 인하여 다양한 조성을 갖는 새로운 다공성 재료에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 탄소 나노섬유 (Carbon nanofiber, CNF)는 넓은 비표면적과 우수한 전기전도도로 인하여 슈퍼커패시터 뿐만아니라 에너지 저장장치의 전극 재료로 널리 알려져 있다.

본 연구에서는 전기방사 및 수열합성방법을 이용하여 MOF와 CNF를 슈퍼커패시터의 전극 재료로 사용하였고, 니켈 (Ni)과 코발트 (Co) 전이금속을 첨가하여 고용량 다공성 Ni/Co MOF@CNF 하이브리드 전극 재료를 성공적으로 합성하였다. 합성된 전극 재료는 10A g^{-1} 의 전류밀도에서 62%의 율속 특성을 보였고, 1A g^{-1} 의 전류밀도에서 995 F g^{-1} 의 높은 정전용량 및 25 A g^{-1} 의 전류밀도에서 4,000 사이클 기준 약 85%의 용량 유지율을 보였다.

프리스탠딩 MO_x-CNT/S 전극을 이용한 리튬-황 전지의 셔틀 효과 억제 Suppressing shuttle effect of lithium sulfur battery using freestanding MO_x-CNT/S electrode

신윤정 · 김은미 · 정상문*

충북대학교 화학공학과

리튬이온 전지 (Lithium-ion batteries, LIBs)는 높은 작동 전압과 에너지 밀도, 긴 수명으로 유망한 에너지 저장 장치로 주목받고 있다. 하지만 최근 고에너지밀도와 고출력의 에너지 저장 장치에 대한 요구가 높아짐에 따라 한계에 다가가고 있다. 예를 들어, 전기 자동차의 경우 현재 LIBs의 에너지 밀도 ($<250 \text{ Wh kg}^{-1}$)의 두 배 이상을 요구한다. 리튬-황 전지 (Li-S batteries)는 리튬을 음극재로, 황을 양극재로 사용하는 전지로, 가격이 저렴하고 이론 용량 (1675 mAh g^{-1})과 에너지 밀도 (2600 Wh kg^{-1})가 높아 LIBs의 대체제로서 주목받고 있다. 그러나 전기화학 반응 중 전해질에 쉽게 용해되는 리튬 폴리설파이드 ($\text{Li}_2\text{S}_8 \rightarrow \dots \rightarrow \text{Li}_2\text{S}_2$)의 용출로 발생하는 셔틀 반응과 리튬 덴드라이트 현상으로 인해 수명이 짧은 단점이 있다. 양극활물질로 사용하는 황은 절연체에 가까운 약 $5 \times 10^{-30} \text{ S cm}^{-1}$ 의 낮은 전기전도도를 나타내고 있어 도전성 물질과 함께 사용해야 하며, 또한 부피 팽창으로 인해 전극 구조의 붕괴 현상으로 배터리의 성능 저하와 고장으로 이어진다.

본 연구에서는 간단한 진공여과 방법으로 바인더와 집전체가 없는 탄소 나노튜브 (CNT)를 이용하여 경량의 유연한 프리스탠딩 전극을 제조하여 부피 팽창 현상을 억제하고, 셔틀 효과를 발생시키는 중간 생성물인 리튬 폴리설파이드의 전해질로의 용출을 억제하고자 금속 산화물 (NiO, Co_3O_4 , Fe_3O_4 , MgO)을 첨가하였다. 금속 산화물의 첨가가 리튬 폴리설파이드의 용출이 억제된 것으로 확인되었고, 금속 산화물을 첨가한 전극은 첨가하지 않은 전극에 비해 한 31%의 용량 증가를 보였다. 또한 금속 산화물 중 NiO를 첨가한 NiO-CNT/S 전극을 이용한 리튬-황 전지가 가장 우수한 전기화학적 특성을 나타내었고, 780 mAh g^{-1} 의 초기 방전 용량과 100 사이클 기준 약 91%의 용량 유지율을 보였다.

정류 다이오드의 건전성 확인 방법에 대한 연구

A Study on the Verification Method for Rectifier Diode

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전류를 한 방향으로만 흐르게 하고 그 역방향으로 흐르지 못하게 하는 성질을 가진 반도체 소자를 다이오드라 하며 다이오드의 전류를 한 방향으로 흐르게 하는 작용을 정류라 한다. 정류 다이오드는 보통 교류를 직류로 변환 할 때 사용되며 실리콘 또는 게르마늄의 단결정 속에서 PN형을 접합하여 P형 쪽에 애노드, N형 쪽에 캐소드의 두 단자로 구성된다. 본 논문에서는 이러한 정류 다이오드의 건전성 확인 방법에 대해 기술하고자 한다.

정류 다이오드는 순방향으로만 전류를 도통시키는 반도체 부품으로 보통 전원공급기(Power Supply)에서 교류 전류를 직류 전류로 바꾸는 정류기의 용도로 사용된다. P형 반도체와 N형 반도체를 접합하게 되면 P형의 정공과 N형의 전자가 접합영역에서 결합하여 정공이나 전자와 같은 캐리어가 없는 절연영역인 공핍층(Depletion Layer)을 생성하고, 접합영역을 통과하는 캐리어의 이동을 방해하게 된다. 이때, 전자나 정공이 공핍층을 통과하기 위해서는 일정 이상의 전압이 필요하며, 이 전압을 무릎전압(Knee Voltage 또는 전위장벽)이라고 하며, 무릎전압은 다이오드 소재에 따라 순방향으로 전류를 흐르게 만드는 전압이 다르다. 일반적으로 게르마늄(Germanium) 다이오드는 0.3V 수준이고 실리콘(Silicone) 다이오드는 0.7V 이다.

정류 다이오드의 고장 원인으로는 과전압, 열손상, 열화, 전기적 충격 등으로 인한 단락과 개방을 들 수 있다. 정류 다이오드가 단락된 경우, 역방향 바이어스에도 역방향 누설전류 이외의 전류가 흐르게 되어 역방향 전압을 차단하지 못하게 되며 이로 인해 정류기능을 수행하지 못하게 된다. 따라서 정류 다이오드의 단락을 확인하기 위해 역방향 전압과 역방향 누설 전류를 확인하여야 한다. 또한 정류 다이오드가 개방된 경우, 순방향 바이어스에도 전류가 흐르지 않아 주변기기 및 시스템에 전원을 공급할 수 없게 되며 이를 확인하기 위해서는 순방향 전압을 측정하여야 한다.

반도체식 계전기의 FMEA를 통한 건전성 확인 방법에 대한 연구

A Study on the Verification Method for Solid State Relay by FMEA

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

반도체식 계전기는 출력부에 기계적 접점이 없는 반도체 소자를 사용한 무접점 스위칭 소자이다. 기계적 접점이 없으므로 접촉 시 발생하는 노이즈나 아크가 없어 내구성이 우수하며 코일을 사용하는 계전기에 비해 매우 작은 전류를 소모함에 따라, 고빈도 개폐가 필요한 곳이나 화기에 대해 폭발 위험이 있는 곳에서 스위칭을 필요할 때 사용할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 반도체식 계전기의 FMEA를 통한 건전성 확인 방법에 대해 기술하고자 한다.

반도체식 계전기는 입력부와 출력부로 나뉘며 입력부와 출력부는 물리적으로 절연되어 있다. 입력부는 커플링 방법에 따라 발광다이오드를 이용한 커플링 방법과 Oscillator와 Transformer를 이용한 방법이 있는데, 발광다이오드를 이용한 커플링의 경우, 입력부에 전압이 인가되면 입력부 발광다이오드는 빛이 발생되고, 빛에 반응하는 소자와 Output 회로 등으로 구성된 출력부는 발광다이오드에서 발생한 빛을 입력 신호로 인식하여 스위칭 기능을 수행한다. 이와 달리 Oscillator와 Transformer를 이용한 커플링의 경우, 입력부에 전압이 인가되면 Transformer의 2차측에 전압이 발생되고 필터회로와 Output회로 등으로 구성된 출력부는 Transformer 2차측 전압을 입력 신호로 인식하여 스위칭 기능을 수행한다.

FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)를 통한 반도체식 계전기의 고장모드에 따른 건전성 확인방법으로는, ‘입력부 손상’으로 스위칭 기능 불능으로 다른 기기나 시스템에 원하는 출력을 제공하지 못할 경우를 확인하기 위한 ‘내전압’, ‘스위칭 동작’과 시스템에 원하지 않는 출력을 제공하여 오동작을 유발하는 ‘출력부 손상’을 확인하기 위한 ‘누설전류’, ‘전압강하’, ‘최대부하전류’, 그리고 입력부의 동작과 관계없이 다른 기기나 시스템에 원하지 않는 출력을 제공하게 되는 ‘방열 성능저하’를 확인하기 위한 ‘누설전류’, ‘전압강하’, 마지막으로 규정된 시간 내에 다른 기기나 시스템에 원하는 출력을 제공하지 못하여 목표하는 제어 동작을 수행할 수 없게 되는 ‘규정된 시간 내에 동작하지 않는 경우’를 확인하기 위한 ‘스위칭 동작시간’이 고려되어야 한다.

과전압 보호계전기의 검증 필수특성에 대한 고찰

A Methodology Study on Verification Critical Characteristics of Over Voltage Protection Relay

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

과전압 보호계전기는 변압기 2차 측에 장착되어 기기 또는 선로의 과전압을 검출하여 회로를 차단하는 차단기 또는 보호기에 접점신호를 제공하는 계전기이다. 과전압을 검출하는 방법에 따라 전자식 과전압 보호계전기와 유도형 과전압보호계전기로 구분된다. 본 논문에서는 원판을 회전시켜 접점신호를 제공하는 유도형 과전압 보호계전기에 대해서 기술하고자 한다.

한편, 과전압 보호계전기는 기기나 선로의 과전압을 검출하지만 과전압을 차단하지 못한다. 그러므로 기기나 선로에 차단기 또는 보호기를 설치하고 과전압 보호계전기가 설정값 이상의 전압을 검출하여 차단기나 보호기에 동작 접점을 제공하여 과전압을 차단한다.

과전압 보호계전기의 코일이 개방된 경우, 과전압 발생 시에 접점신호를 출력하지 못하여 부하에 전기적 손상을 발생시키므로 코일 개방 고장을 확인하기 위한 검증 필수특성으로 접점 동작을 고려하여야 한다. 또한 과전압 보호계전기의 단자가 개방된 경우 과전압 발생 시 접점신호를 출력하지 못하여 부하에 전기적 손상을 발생시키게 되므로 단자 개방 고장을 확인하기 위한 검증 필수특성으로 접점 동작이 고려되어야 하며, 과전압 보호계전기의 접점이 용착된 경우에는 과전압을 차단 후 복귀가 되지 않아 부하에 전원을 공급하지 못하게 되며 과전압 보호계전기가 규정된 범위에서 접점신호를 출력하지 못하는 경우에도 과전압 검출 시 접점신호를 출력하지 못하고 과전압이 인가되어 부하에 전기적 손상을 발생시키게 되므로 이를 확인하기 위해서는 접점 동작을 확인하여야 한다. 또한, 과전압 보호계전기가 규정된 시간 내에 접점신호를 출력하지 못하는 경우 과전압 검출 시 접점신호를 출력하지 못하고 과전압이 인가되어 부하에 전기적 손상을 발생시킨다. 따라서 규정된 시간 내에 접점이 출력되지 않는 경우를 확인하기 위해서는 접점 동작 여부, 동작 시간을 측정하여야 한다. 과전압 보호계전기의 절연 성능이 저하된 경우에는 누설전류가 증가하고 누전이 발생되어 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시키게 되는데, 이때 절연 성능 저하를 확인하기 위한 검증 필수특성으로 절연 저항, 내전압을 들 수 있다.

보조 계전기 소켓의 고장모드 영향 분석

Failure Mode Effect Analysis for Aux. Relay Socket

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

보조 계전기 소켓은 보조 계전기의 교체 및 배선작업이 쉽도록 보조 계전기 핀이 삽입될 구멍을 만들고, 보조계전기 핀과 단자를 연결하여 전류가 흐를 수 있도록 만든 커넥터의 일종이다. 이러한 구조로 인해 보조 계전기 소켓의 고장은 보조 계전기 고장과는 별개로 시스템의 성능 저하로 이어진다. 본 논문에서는 이러한 보조 계전기 소켓의 고장모드 영향 분석(FMEA, Failure Modes and Effects Analysis)을 통한 건전성 확인 방법에 대해 기술하고자 한다.

보조 계전기 소켓은 보조 계전기의 핀 모양에 따라 원형과 일반형으로 구분된다. 원형 소켓은 보조 계전기와 결합하기 위하여 보조 계전기 핀의 개수와 위치가 동일하게 구성되어 있으며 보조 계전기를 보조 계전기 소켓에 결합하여 사용한다. 원형 보조 계전기 소켓은 보조 계전기와 잘못된 결합을 방지하기 위하여 기구적으로 중앙에 방향을 달리하는 홈이 있다. 일반형 소켓 또한 보조 계전기와 결합하기 위하여 보조 계전기 핀의 개수와 위치가 동일하게 구성되어 있으며 보조 계전기를 보조 계전기 소켓에 결합하여 사용된다. 일반형 보조계전기 소켓은 보조 계전기와 잘못된 결합을 방지하기 위하여 구조적으로 보조 계전기 핀의 일부의 축방향을 달리하여(일부를 직각 방향으로) 잘못된 방향으로의 결합을 방지한다.

보조 계전기 소켓의 고장모드 영향 분석을 수행해 보면, 보조 계전기 소켓의 단자 간에 단락이 발생한 경우, 잘못된 폐회로가 형성되어 원하지 않는 접점출력을 제공하여 오동작을 유발할 수 있으며, 보조 계전기 소켓의 단자와 보조 계전기 핀이 개방된 경우, 원하는 접점출력을 다른 기기나 시스템에 제공하지 못하여 목표로 하는 제어동작을 수행할 수 없게 된다. 또한 보조 계전기 소켓의 절연 성능이 저하된 경우, 누설전류가 증가하거나 누전이 발생되어 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시키게 된다.

고장모드 영향 분석을 통하여 검증 필수특성을 도출해 보면, 보조 계전기 소켓의 단자 간 단락 및 보조 계전기 소켓의 단자와 보조 계전기 핀의 개방 고장은 전압 강하, 보조 계전기 소켓의 절연 성능 저하는 절연 저항과 내전압 시험을 그 필수특성이라 결론지을 수 있으며 이를 통해 보조 계전기 소켓의 건전성을 확인할 수 있다.

LED 램프의 품질검증 방법에 대한 고찰 A Methodology Study on Verification for LED Lamp

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

LED(Light Emitting Diode) 램프는 갈륨의 화합물인 갈륨비소(GaAs), 갈륨인(GaP) 등 발광하기 쉬운 성질의 재료로 접합되어 있으며, 이 다이오드에 순방향 전압이 인가되면 전자와 정공이 재결합하여 발광하는 현상을 이용한 기기이다. 본 논문에서는 제어 판넬의 상태 표시 목적으로 사용되는 LED 램프의 품질검증 방법에 대한 내용을 기술하고자 한다.

LED 램프의 기본구조는 에폭시 수지렌즈/케이스(Epoxy lens/case), 본딩 와이어(Wire bond), 반사면(Reflective cavity), 반도체(Semiconductor), 캐소드·애노드 리드 프레임(Cathode·Anode Lead frame), 절단면(Flat spot) 등으로 구성되어 있으며, P-N 접합을 가지는 소자이다. LED 램프의 동작원리는 순방향 전압이 인가되면 N형 영역에서는 전자(-)가 이동, P형 영역에서는 정공(+)이 P-N 접합부로 이동하여 재결합하며, 이때 전자(-)가 가지고 있는 에너지를 빛으로 방출하는 원리이다.

LED 램프의 다이오드 및 케이스 손상 등이 발생하는 경우 LED 램프가 정상적인 발광 기능을 수행하지 못한다. 따라서 발광 기능 상실을 확인하기 위한 필수특성으로 점등 동작을 고려하여야 한다. LED 램프에 전원을 공급/차단하여 발광 기능을 확인하는 동작을 점등 동작이라 하며, LED 램프의 발광 기능 상실을 확인하기 위하여 이를 수행·확인한다.

또한, LED 램프의 절연체 사이의 절연 성능 저하가 발생하는 경우 누전이 발생하여 주변 기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시킨다. 따라서 절연 성능 저하를 확인하기 위한 필수특성으로 절연저항을 고려하여야 한다. LED 램프의 절연체에 인가된 전압이 절연체를 통해 흐르는 누설전류로 나눈 값을 절연 저항이라고 하는데, LED 램프의 절연 성능 저하를 확인하기 위하여 도체와 절연체 사이의 시험 전압을 인가하여 절연 저항을 측정 확인하여야 한다.

온도 전송기의 특성 평가에 대한 연구
A Study on the Evaluation of Characteristics
for Temperature Transmitter

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

온도 전송기는 온도 센서를 이용하여 온도를 측정하고 해당 온도값을 아날로그 및 디지털 전기 신호로 변환하여 출력하는 기기이다. 온도 전송기는 일반적으로 온도 센서와 일체로 구성되어 측정현장에 설치된다. 온도 센서의 측정 원리에 따라 일반적으로 열전대(Thermocouple)와 측온 저항체(Resistance Temperature Detector - RTD)로 분류한다. 본 논문에서는 열전대 및 측온 저항체 온도 센서를 이용한 온도 전송기의 특성 평가에 대한 내용을 기술하고자 한다.

온도 전송기의 기본구조는 측정부의 온도 센서, 신호 처리부 및 출력부의 온도 전송기로 구성되며, 보통 현장에서 주로 사용되는 방식은 온도 전송기와 온도 센서를 일체형으로 구성하는 방식과 온도 전송기와 온도 센서를 분리하여 구성하는 방식이 있다. 온도 전송기 측정부의 온도 변화가 발생하면 측온 저항체 온도 센서에서는 저항의 변화가 생기고 열전대 온도 센서에서는 열기전력에 따른 전압의 변화가 생긴다. 이와 같은 변화를 이용하여 해당 온도값을 온도 전송기에서 검출, 증폭 및 변환하여 아날로그 및 디지털 전기 신호로 출력한다.

온도 전송기의 온도 센서 손상, 내부 회로 손상 및 단자 연결부 손상 등이 발생하는 경우 온도 전송기가 측정 온도에 해당하는 정상적인 신호 출력 기능을 수행하지 못한다. 따라서 잘못된 신호 출력을 확인하기 위한 필수특성으로 정밀도를 고려하여야 한다. 여기서 정밀도는 온도 전송기의 출력값이 해당 온도의 참값에 얼마나 근접하는가를 나타내는 표시를 뜻하는데, 온도 전송기의 잘못된 신호 출력을 확인하기 위하여 기준이 되는 측정점을 사전에 정해놓고 해당 측정점의 계산값과 측정값을 비교하여 정밀도를 확인한다.

또한, 온도 전송기의 절연체 사이의 절연 성능 저하가 발생하는 경우, 누전이 발생하여 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시킨다. 따라서 절연 성능 저하를 확인하기 위한 필수특성으로 절연저항과 내전압을 고려하여야 한다. 여기서 절연저항은 온도 전송기의 절연체에 인가된 전압이 절연체를 통해 흐르는 누설전류로 나눈 값을, 내전압은 온도 전송기의 절연체가 일정시간동안 절연파괴 없이 견딜 수 있는 전압을 말하는데, 온도 전송기의 절연 성능 저하를 확인하기 위하여 도체와 절연체 사이의 시험 전압을 인가하여 절연 저항을 측정·확인하고, 내전압 시험 전압을 인가하여 절연 파괴, 섬락의 반복, 파손 흔적이 없는지 확인하여야 한다.

내환경 검증 정밀 측정용 케이블 압입 탐침 방법 연구
A Study on the Cable Press-Fit Probe method
for Precision Measurement of Environmental Qualification

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

케이블 열화진단용 압입 시험기는 케이블 절연체의 노화에 따른 경도를 특정하기 위한 비파괴 방식의 시험 설비이며, 케이블 열화진단을 위해 압입 시험 시 케이블의 정중앙을 측정하여야 하나 압입 탐침 보호봉의 구조상(평면) 정중앙을 측정하는데 어려움이 있었다. 본 논문에서는 케이블의 열화진단을 위한 압입 시험시 탐침봉을 정중앙에 위치시켜 보다 정밀한 압입시험을 가능하게 하는 정밀 측정용 압입 탐침 방법에 대해 논하고자 한다.

케이블의 열화 압입 시험 시, 탐침봉을 보호하고자 압입 탐침 보호봉이 탐침봉 보다 먼저 케이블에 도달하고 이후에 탐침봉으로 시험을 실시하게 되는데, 압입 탐침 보호봉과 케이블에 이격거리가 있어서 압입 탐침 보호봉의 케이블 도달시, 탐침봉의 중심이 케이블의 정중앙에 위치되기에 어려움이 있었다. 이 현상은 시험장비 사용 연수가 오래될수록 장비의 노후로 탐침과 케이블의 중심의 이격거리 발생 가능성이 더 높아지게 되는데 이러한 문제점을 해결하고자 압입 탐침 보호봉의 구조를 기존의 평면에서 구형으로 가공시키게 되면 구형인 케이블의 구조상 그 중심이 탐침의 중심과 정확히 일치 하게 되어 정밀 측정 실시가 가능하게 된다. 또한 압입 탐침 보호봉의 구조를 삼각형으로 가공시키면 탐침봉과 케이블의 중심이 보다 정확히 일치하게 되어 더 정밀한 시험이 가능하게 된다. 이는 삼각형 구조의 경우 꼭지점 방향으로 케이블이 고정되게 되어 구형보다는 삼각형 구조가 더 정교하게 중심측과 일치되기 때문이다.

본 논문에서 제안한 구형 및 삼각형 구조의 압입 탐침 보호봉의 경우 다양한 굵기를 가지는 케이블에 모두 적용이 가능하며, 케이블의 굵기가 가늘 경우에는 삼각형 가공 압입 탐침 보호봉의 경우가 더 정확한 중심 일치가 가능하여 보다 정밀한 압입 탐침이 가능하다.

시간영역 반사파(TDR)을 활용한 케이블 결함 위치 확인 방법 연구

A Study on the method of Determining the Location of a Cable Defect using TDR

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

반사파는 SWR(Standing Wave Ratio), 반사계수 등 다양한 형태로 표시가 가능하며, 타임 도메인에서 임펄스 응답을 확인하는 TDR(Time Domain Reflectometer)은 네트워크 분석기와 역고속푸리에변환(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)이 가능한 소프트웨어로 구현이 가능하다. 본 논문에서는 TDR을 이용하여 케이블의 결함위치를 확인하는 방법에 관해 논하고자 한다.

케이블의 건전성이 유지가 되는 경우, 케이블의 한쪽 끝단에 신호를 주입하면 반대쪽 끝단에서 반사파가 발생하는데, 케이블에 결함이 발생하면 그 위치에 임피던스가 변하고 이때 케이블의 끝단에서 신호를 주입하면 건전성이 유지 되었을 때 발생하지 않았던 반사파가 결함 부위에서 발생하게 되어 평상시 보다 더 빠른 시간에 반사파가 도달하게 된다. 이를 감지하면 케이블 결함 여부를 감지해 낼 수 있다. 또한 케이블의 임피던스에 따른 매칭(Matching) 로드(Load)를 반대쪽 끝단에 결함시키면 케이블 반대쪽 끝단에서 발생하는 반사파도 제거할 수 있게 되어 보다 정확한 측정이 가능하다.

케이블 최초 설치 시 반대쪽 끝단에서 발생하는 반사파 도달(왕복)시간을 미리 측정해 놓는다면, 케이블 길이에 따른 비례식을 이용하여 결함의 위치를 확인할 수 있게 되고, 케이블의 결함 위치를 정확히 알고 있다면 복구 시간을 상당히 절약할 수 있게 되어 시스템의 안전성에 큰 기여를 할 수 있다. 향후, 반사파형의 분석을 통해 결함의 상태분석 및 전파속도에 미치는 케이블 노화간의 연구도 이루어진다면 보다 정확한 케이블 결함의 종류와 위치 확인이 가능하게 될 것이다.

원전 매설 및 지하배관/탱크 관리 프로그램 개발

Development of Management Program for Buried and Underground Piping/Tanks in NPP

김태현* · 박상규*

한국수력원자력 중앙연구원

지상의 배관과 달리 매설배관은 배관 내부의 유체와 외부의 토양으로부터 기계적, 화학적 손상을 동시에 받고 있으며, 배관 누설이 발생할 경우에는 누설의 원인 파악이 어렵고 접근도 용이하지 않기 때문에 체계적이고 분석적인 관리방식 마련이 요구된다.

한수원에서는 2012년부터 현재까지 가동년수 20년 초과 원전, 후속 원전 및 건설 원전 순서로 매설 및 지하배관/탱크에 대한 경년열화관리 체계 구축을 지속적으로 진행하고 있다. 매설 및 지하배관/탱크에 대한 관리 절차는 미국의 매설배관 경년열화관리 심사지침인 USNRC의 NUREG-1801(GALL Report)과 이에 대한 사업자 완화조건을 다루는 LR-ISG 및 미국 원전 사업자들의 매설배관 관리 강화를 위한 자체 이행 요건인 NEI 09-14 보고서를 기반으로 개발되었다. 또한 BAUGER(Buried and UnderGround piping/tanks Engineering Resolver) 프로그램을 개발하여 매설 및 지하배관/탱크의 3D 형상정보 확인, 경년열화관리, 검사 및 교체시기 관리, 검사데이터 관리 등의 업무를 통합 수행할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 효율적인 매설 및 지하배관/탱크의 관리를 위해 개발된 BAUGER 프로그램을 소개하고, 국내 원전의 매설배관 관리 절차에 따라 BAUGER 프로그램에서 수행할 수 있는 기능과 활용방안을 정리하였다.

배관 확률론적 파괴역학 평가 코드 예비 적용성 연구
Preliminary Applicability Study of
Probabilistic Fracture Mechanics(PFM) Evaluation Code for Piping

김태현* · 김만원*

한국수력원자력 중앙연구원

1980년대 이후 결정론적 파괴역학에 기반한 원전 주요 기기 및 배관 건전성 평가의 불확실성을 해소하고자 확률론적 파괴역학 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 특히 2000년대에 들어 파단전누설 개념이 적용된 배관 이중금속융접부에서의 일차수응력부식균열 발생 사례에 따라 파손 확률이 극히 낮음을 입증할 필요성이 대두되었다.

미국 원자력규제위원회(USNRC)는 2002년부터 10 CFR 50.46의 비상노심냉각계통 재평가 요건과 파단 크기에 따른 파단 빈도 평가를 위한 PFM 평가 코드인 PRO-LOCA (PRObabilistic Loss Of Coolant Accident)를 개발하였다. 현재까지 MERIT 및 PARTRIDGE 국제공동연구 등을 통해 지속적으로 개선 연구가 진행되고 있다.

한편 미국 전력연구원(EPRI)은 2009년부터 USNRC와의 공동 프로젝트를 통해 일차수응력부식균열 평가를 위하여 xLPR(eXtremely Low Probabiltiy of Rupture) PFM 평가 코드를 개발하고, 전산 코드 활용에 대한 규제지침 등을 발간하였다.

두 PFM 코드는 일반적인 PFM 코드로서의 기능과 배관 결함에 따른 파단, 누설 평가 목적 등 유사점이 많지만 활용성 측면에서 몇 가지 차이점이 있다. PRO-LOCA 코드는 xLPR 코드와 달리 규제 환경에서 사용하는데 필요한 QA/QC 요건은 없는데 비해, xLPR 코드 개발 과정을 거쳐 구축된 많은 해석 모델이 포함되어 있다. 또한, 효율적이고 상대적으로 짧은 해석 시간으로 xLPR 해석을 보완하는데 사용할 수 있어, xLPR을 포함한 다른 PFM 코드의 벤치마크에 활용성이 높다.

본 연구에서는 파단전누설 평가 연구보고서에 제시된 xLPR 코드 해석 문제를 기반으로 PRO-LOCA 코드를 활용하여 벤치마크 해석을 수행하고, 여러 인자들의 영향 및 불확실성을 반영한 민감도 해석을 통해 PRO-LOCA 코드 적용성을 고찰하였다.

Code Case 개정에 따른 배관 누설결함 건전성평가 프로그램 개발 및 예비 적용
Development and Preliminary Application of
Pin-holed Piping Integrity Assessment Program in NPP

김태현* · 김만원*

한국수력원자력 중앙연구원

국내 원전의 안전 2,3등급 중에너지 배관에서 결함이 발견되는 경우에는 ASME Code Case N-513-3에 따른 구조건전성 평가를 통해 차기 계획예방정비까지 임시 사용을 허용하는 절차를 따르고 있다. 평가를 위해서는 먼저 배관의 축방향 및 원주방향으로 결함을 형상화하고 평가결함 길이를 결정해야 한다. 이 축방향 및 원주방향 평가결함 길이를 각각의 허용결함 길이와 비교하여 건전성을 확인하는데 이때 각각의 허용결함 길이를 산정하는 방법으로 ASME Code Sec. XI에 따라 한계하중법, 탄소성파괴역학법 및 선형탄성파괴역학법 중 한 가지를 결정하여 수행하게 된다.

한수원에서는 배관 누설결함 발생 시 현장에서의 즉각적인 평가 및 후속조치 필요성에 따라 상기 Code Case에 따른 평가 절차를 단독 프로그램(PIAP, Pin-hole Integrity Assessment Program)으로 개발하였다(2021년). 또한 직관만 평가하던 기존 개정3에서 곡관, 확대 및 축소관, 티에 대한 평가 절차 등이 추가된 개정4를 반영하여 프로그램을 개선하였다(2022년).

본 논문에서는 누설 배관 건전성평가 프로그램에 사용된 Code Case의 개정 내용을 분석하고, 이를 프로그램 개발에 반영한 내용을 정리하였다. 또한, 배관 누설결함 사례를 기반으로 프로그램을 활용한 건전성평가를 수행하여 현장 적용성을 고찰하였다.

소형경수로용 인쇄기관형 증기발생기 크기 열수력적 예비평가
Preliminary Thermal-hydraulic Evaluation on Printed Circuit Steam
Generator Size for Small Pressurized Water Reactor Application

권진수

한국수력원자력(주)중앙연구원

최근 경수형 소형원자로의 크기를 줄이기 위해 인쇄기관형 증기발생기에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 소형원자로의 크기를 줄임으로써 모듈형으로 제작되는 소형원자로의 운송성을 확보할 수 있으며 이에 따라 경제성이 향상될 수 있기 때문이다. 인쇄기관형 증기발생기는 판형 열교환기의 한 종류로 화학적으로 식각된 유로를 가진 금속판을 적층하여 확산접합을 통해 제작된다. 제작과정 특성으로 고온고압 운전조건에서 우수한 구조적 건전성을 가지고 있다. 또한, 직경 2mm 정도의 반원형 미세유로를 통해 열전달이 발생하므로 넓은 열전달면적을 확보할 수 있다. 따라서 동일한 열 성능을 가진 쉘 앤 튜브 열교환기와 비교하여 부피가 15% 수준으로 축소되는 장점이 있다.

인쇄기관형 증기발생기의 장점을 바탕으로 본 연구에서는 소형경수로용 증기발생기 적용을 목적으로 인쇄기관형 증기발생기의 부피를 예비적으로 추산하고자 한다. 증기발생기의 크기는 열저항 회로를 이용한 일차원 인쇄기관형 증기발생기 열설계 코드를 이용하여 평가하였다. 증기발생기의 크기는 형상 변수(유로 직경, 유로 길이, 유로 개수)와 열수력 변수(유량, 압력, 차압)에 따라 변하기 때문에 민감도를 파악하기 위해 다양한 변수 조건에서 증기발생기 설계를 진행하였다. 해당 연구를 통해 소형경수로용 인쇄기관형 증기발생기 부피를 예비적으로 추산할 수 있었고, 형상 변수 및 열수력 변수에 따른 증기발생기 부피의 민감도를 파악할 수 있었다. 해당 결과는 추후 개발될 다양한 종류의 소형경수로에 대해 증기발생기 선정 시 활용될 수 있다.

국내 표준형 원전의 다중오동작 예방을 위해 설치된 전기 케이블 화재 방호체에 대한 화재 리스크 민감도 분석

A Fire Risk Sensitivity Study on Electrical Cable Fire Protection
Installed to Prevent Multiple Malfunctions in Domestic OPR 1000
Nuclear Power Plants

이한설 · 방기인

한국수력원자력 중앙연구원

국내 원전에서는 안전성 확보를 위해 동일한 기능을 수행하는 기기를 다중으로 설치하는 다중성 개념을 도입할 뿐만 아니라 다중의 기기들이 전기적, 물리적으로 격리되도록 설계하여 화재가 발생하여도 최소한 한 계열 (Train)의 안전 관련 기기의 건전성을 확보하여 해당 안전 관련 기능이 보장되도록 노력하고 있다.

원전 내 임의의 구역에서 화재가 발생하면 해당 구역 내 설치된 전기 케이블이 화재에 의하여 손상될 수 있고, 손상된 전기 케이블이 안전 정지 기능을 수행하는 기기의 이용 불능을 유발하여 원전의 안전 정지에 영향을 줄 수 있다. 또한, 전기 케이블의 화재손상 유형에 따라 손상된 전기 케이블 관련 기기의 오동작을 유발할 수 있다.

최근, 미국 NRC 주관으로 수행된 케이블 화재실험과 화재 발생 사례 조사 연구 등에서 화재 발생 시 전기 케이블 손상으로 인해 두 개 이상 다중 기기의 오동작 발생 가능성이 보고되고 있으며, 실제 화재로 인해 다중의 기기가 동시에 오동작하는 사례도 발견되고 있다. 따라서 다중 오동작 (MSO: Multiple Spurious Operation) 분석이 요구되고 있다.

국내 표준형 원전의 다중 오동작 분석은 NEI-00-01 방법론을 적용하여 수행되었다. NEI-00-01 방법론은 미국의 EPRI & NEI에서 수행한 고온 단락 (Hot-short)으로 유발되는 오동작 실험 결과, 화재로부터 유발되는 회로고장, 화재 후 안전정지에 영향을 주는 다중 오동작 가능성에 관한 내용을 포함하고 있다.

국내 표준형 원전에서는 NEI-00-01 방법론에 제시된 62개의 다중 오동작 시나리오 중에서 총 39개의 분석 대상 다중 오동작 시나리오가 도출되었고, 도출된 분석 대상 다중 오동작 시나리오를 “고온정지 필수”와 “안전정지 중요”로 분류하여 케이블 재배치/재설계, 케이블 보호 및 운전원 수동조치, 화재모델링 등의 다중 오동작 해결방안을 수립하였다.

본 논문에서는 다중 오동작 해결방안 중 전기 케이블 보호를 위해 설치된 화재 방호체에 대하여 화재사건 확률론적안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) 관점에서의 화재 리스크 영향을 평가하기 위해 화재 방호체 설치 대상 전기 케이블 및 관련기기 목록과 해당 전기 케이블의 포설 경로 (Cable Routing)를 검토하였고, 검토 결과로 도출된 화재 방호체 설치 대상 전기 케이블 관련 기기를 PSA 모델 내 고장수목 (FT: Fault Tree)에 반영하여 화재 리스크 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 민감도 분석 수행 방법 및 절차, 분석 결과 및 분석 결과에 대한 해석을 다루었다.

국내 표준형 원전의 안전정지 기능 향상을 위해 설치된 전기 케이블 화재 방호체에 대한 화재 리스크 민감도 분석

A Fire Risk Sensitivity Study on Electrical Cable Fire Protection
Installed for Enhancement of Safe shutdown capability in Domestic OPR
1000 Nuclear Power Plants

이한설

한국수력원자력 중앙연구원

국내 원전에서는 발전소 내 임의의 방화지역에서 화재가 발생했을 때, 화재 발생 장소와 무관하게 다른 방화지역에 위치하는 다중계열의 기기를 사용하여 안전정지 (Safe Shutdown) 을 달성하고 유지할 수 있음을 보이기 위해 화재안전정지분석을 수행하고 있다.

화재안전정지분석은 분석 목적과 방법에 따라 방화지역별 안전정지분석, 연계회로분석, 기기오동작분석 등으로 분류한다. 방화지역별 안전정지분석은 화재재해분석의 결과 다중 계열의 안전정지 기기가 동일 구역 내에 위치한 경우 안전정지기능에 미치는 영향과 해결방안을 분석하는 것이다. 연계회로분석은 안전정지에 직접적으로 사용되지는 않으나 두 개의 다중 계열 안전정지회로와 물리적으로 인접한 지역에 위치하여 간접적인 영향을 미칠 수 있는 현상에 대한 분석이다. 기기오동작분석은 화재로 인해 기기의 전기회로에 이상이 발생하여 기기가 안전정지 운전에 악영향을 미치는 방향으로 작동하는 현상을 분석하는 것이다.

일반적으로 화재안전정지분석에서는 안전정지 기능 정의, 안전정지 계통 선별, 안전정지 기기 선정, 안전정지 케이블 선정, 연계회로 분석, 다중오동작 분석, 안전정지 영향 평가 등을 수행한다.

화재안전정지분석 결과 중 하나로, 임의의 방화지역에 화재가 발생하여도 다른 방화지역에 위치하는 다중계열의 기기를 사용하여 안전정지를 달성하고 유지할 수 있도록 원자로냉각재계통 재고량 및 압력 조절 기능 상실 방지, 증기발생기 열제거 유로 확보, 보조급수 공급 상실 방지, 비상디젤발전기 안전정지 등의 기능을 수행하는 기기 관련 전기케이블에 화재방호체를 설치하여 원전의 화재안전정지 능력을 향상시키기 위한 개선사항들이 도출되었다.

본 논문에서는 화재안전정지분석 결과 중 하나로 도출된 화재안전정지 관련 개선사항들에 대하여 화재사건 확률론적안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) 관점에서의 화재 리스크 영향을 평가하기 위해 화재 방호체 설치 대상 전기 케이블 및 관련기기 목록과 해당 전기 케이블의 포설 경로 (Cable Routing)를 검토하였고, 검토 결과로 도출된 화재 방호체 설치 대상 전기 케이블 관련 기기를 PSA 모델 내 고장수목 (FT: Fault Tree)에 반영하여 화재 리스크 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 민감도 분석 수행 방법 및 절차, 분석 결과 및 분석 결과에 대한 해석을 다루었다.

원전 화재 PSA 모델을 활용한 다중오동작 발생 확률에 따른 화재 리스크 민감도 분석

A Fire Risk Sensitivity Study on Probability of Multiple Spurious Operation Using a Fire PSA Model of Nuclear Power Plant

이한설 · 방기인

한국수력원자력 중앙연구원

원전 내 임의의 구역에서 화재가 발생하여 해당 구역에 있는 전기 케이블이 손상되면, 손상된 전기 케이블과 연결된 기기의 오동작을 유발할 수 있다. 화재로 인한 기기의 오동작 분석은 보편적으로 단일 기기를 대상으로 수행되었다. 그러나 미국 원자력안전규제위원회 주관으로 수행된 케이블 화재실험과 화재 발생 사례 조사 연구 등에서 화재 발생 시 전기 케이블 손상으로 인해 두 개 이상 다중 기기의 오동작 발생 가능성이 보고되었으며, 실제 화재로 인해 다중의 기기가 동시에 오동작하는 사례도 발견되었다. 국내의 경우, 현행 원자력안전법과 관련 규제지침에 따라 다중 오동작 (MSO: Multiple Spurious Operation)을 결정론적안전성평가인 화재위험도분석 (FHA: Fire Hazard Analysis)으로 평가를 수행하고 있으나, 화재 확률론적안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment)에 이를 반영한 정량적 리스크평가가 지속적으로 요구되고 있다.

본 논문에서는 결정론적안전성평가인 화재위험도분석 결과로 도출된 다중 오동작 시나리오에 대해 화재 PSA 모델을 활용하여 다중 오동작 발생 확률에 따른 화재 리스크 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석 수행을 위해 화재위험도 분석 결과로 도출된 다중 오동작 시나리오를 검토하여 다중 오동작을 유발하는 기기 조합을 도출하였고, 도출된 기기 조합에서 다중 오동작이 발생할 경우 초기사건을 유발하는 경우와 완화계통의 이용불능 유발로 인한 영향을 구분하여 화재 PSA 모델에 반영하였다. 다중 오동작 시나리오 반영 시 분석 대상 화재 구역의 화재모델링 결과와 같은 케이블 손상 여부 및 손상 확률을 평가할 수 있는 정보의 부재로 해당 화재구역에서 화재 발생 시 다중 오동작은 100% 발생하는 것으로 가정하였다.

다중 오동작 시나리오를 반영한 화재 PSA 모델을 활용하여 다중 오동작 시나리오별 조건부노심손상확률 (CCDP: Conditional Core Damage Probability)를 계산하고 다중 오동작 시나리오 발생 구역에 대하여 기존 화재 PSA 결과로 도출된 화재구역별 화재발생빈도를 곱하여 화재구역별 및 다중 오동작 시나리오별 노심손상빈도를 산출하였고, 다중 오동작 발생 확률을 0.1(Base case), 0.2, 0.3, 0.4로 적용하여 화재 리스크 민감도 분석을 수행하였다.

화재위험도분석 결과로 도출된 다중 오동작 시나리오를 화재 PSA 모델에 반영하기 위해 고려된 보수적인 가정사항과 화재모델링 및 회로분석 결과의 부재로 인해 다중 오동작에 대한 정확한 정량적 리스크평가는 현실적으로 어려우나, 다중 오동작 확률에 따른 화재 리스크 민감도 분석을 통해서 다중 오동작 발생이 화재 리스크에 미치는 영향을 확인하고, 발생 확률에 따른 화재 리스크 변화 추세를 예측해 볼 수 있을 것으로 기대한다.

확률론적안전성평가 방법론을 활용한 원전의 화재리스크 저감 방안 제안 A Suggestion of Reduction Method for Fire Risk of Nuclear Power Plant Using a Probabilistic Safety Assessment Approach

이한설

한국수력원자력 중앙연구원

본 논문에서는, 확률론적안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) 방법론을 활용하여 국내 원전의 화재리스크 저감 방안을 제시하고 저감 효과를 분석하였다. 화재리스크 저감 방안 도출을 위해 국내 원전 중 1개 원전을 분석 대상 원전으로 선정하고 화재사건 PSA 결과를 검토하였다. 화재사건 PSA 결과로 도출된 화재구역 중 노심손상빈도 (CDF: Core Damage Frequency) 기여도가 가장 높은 화재구역을 분석 대상 화재구역으로 선정하고, 화재리스크가 가장 높게 평가된 원인을 파악하기 위해 타 화재구역 평가 결과와 비교 및 검토하였다. 검토 결과, 분석 대상 화재구역에는 안전 및 비안전관련 전동기제어반, 공조기기 등이 설치되어 있고 해당 구역 상부에는 타 화재구역에 위치한 안전 관련 주요 기기들 (고압안전주입펌프, 저압안전주입펌프, 원자로건물살수펌프, 충전펌프, 1차측 기기냉각수펌프 및 격리 밸브 등)의 전원 및 제어케이블이 포설되어 있는 것을 확인하였다. 분석 대상 화재구역에서 발생한 화재로 인하여 상부에 포설된 안전 관련 주요 기기의 전원 및 제어케이블이 손상되어 안전 관련 주요 기기가 이용 불능 되는 사고 시나리오가 가장 높은 CDF 기여도를 차지하는 사고 시나리오로 확인되었다.

분석 대상 화재구역의 화재리스크를 효과적으로 줄이기 위해 두 가지 방안을 제안하였는데, 첫 번째는 해당 화재구역 전역을 소화할 수 있는 자동소화설비 신설하는 것이고, 두 번째는 해당 화재구역에 대한 화재모델링을 수행하여 화재로 인한 공학적 안전 관련 주요 기기의 전원 및 제어케이블의 손상 여부를 확인하는 것이다. 두 번째 제안은 화재모델링 분석 방법, 분석에 고려한 가정사항 및 기술 근거에 대한 규제기관과의 의견 차이가 존재할 수 있어 분석 결과에 대한 규제기관과의 공감대 형성이 어려울 수 있고, 분석 시 활용된 PSA 방법론에 직접 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 첫 번째 제안은 분석 대상 화재구역 내 자동소화설비의 현장 시공 가능 여부를 우선 검토해야 하지만, 시공이 가능할 경우 분석 시 활용된 PSA 방법론에 직접 적용하기 쉽고 분석 결과에 대하여 규제기관의 공감대를 얻기 쉽다는 장점이 있다. 이러한 이유로, 첫 번째 제안에 대하여 화재리스크 저감 효과를 분석하였다. 분석 대상 화재구역 내 자동소화설비를 신설하면 분석 대상 화재구역 CDF가 각각 약 61.89% (A계열), 79.55%(B계열) 감소하는 것으로 평가되었고, 분석 대상 원전의 전체 화재 CDF는 약 47.85% 감소하는 것으로 평가되었다. 본 논문에서 제안된 화재리스크 저감 방안은 사고관리전략 및 화재 정량적 선별 제거 기준 등과 같이 PSA 방법론에 고려된 가정사항들이 변경될 경우 화재리스크 저감 효과가 일부 변동될 수 있다는 제한점이 있지만, PSA 방법론을 활용하여 원전 내 화재리스크가 높은 구역을 체계적으로 도출하고, 화재리스크 저감 효과를 효과적으로 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

케이블 자켓의 열적노화에 따른 연신률 시험 연구

A Study on The Elongation Test of Cable Jacket with Thermal Aging

김한수 · 김건태

한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹

원자력 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 있다. 그럼에도 불구하고 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 않은 노화 스트레스에 노출되므로 검증과정에서 가정된 노화조건 이내에서 운전되고 있는지 확인하는 것이 필요하다. 케이블 상태감시 기술을 활용한 주기적인 케이블 테스트를 수행함으로써, 기기검증에서 가정하였던 케이블의 노화상태와 비교하여 경향을 확인하게 되므로 케이블 노화상태 감시 평가를 위한 실험이 필요하다.

본 연구에서는 케이블 노화 상태감시 기술개발의 일환으로 고분자 화합물인 케이블 자켓에 대하여 파단연신률(EAB : Elongation at Brake)를 이용한 열화에 따른 자켓 인장률을 검토하였다. 기술기준 ASTM D412에는 가황고무에 대한 인장·신율 시험기준, 시험방법 및 시험편 규격이 서술되어 있다. 덤벨형 시험편과 스틱형 시험편으로 구분되며 본 시험에서는 Die C 규격에 따라 스틱형 시험편을 제작하였다. 본 연구에서는 케이블 파단연신율 시험편을 제작하여 151℃로 열노화를 계획하였으며 노화온도에 따른 노화 수명 40년의 영향을 알아보고자 하였다. 시험편은 10년 단위 노화 수명이 도달하였을 때 채취하여 파단연신률 실험을 시행하였다. EPR재질은 가속 열 노화 전 연신율 대비 노화 후의 연신율이 50%에 못 미치는 것을 확인하였다. 또한 노화 수명이 늘어날수록 시험편의 연신율 측정이 불가 하였다. 이는 재료의 노화에 따른 결과와 EPR 재질 인장거동 특성이 불규칙하게 소성 변형된다는 것과 시험편 제작시 시험편에 가해진 응력 및 표면상처에 의한 것의 종합적인 결과로 판단된다. 기술기준 ASTM D412에서 제시하고 있는 덤벨형 시험편을 제작하여 반복적인 실험을 통하여 데이터를 획득한다면 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구를 확장하여 원자력발전소에 실제 설치되는 케이블의 시험편을 확보하고 자연노화에 따른 시험편을 확보한다면 케이블 노화 수명에 따른 인장 강도, 항복 강도등을 통하여 케이블의 노화 경향을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

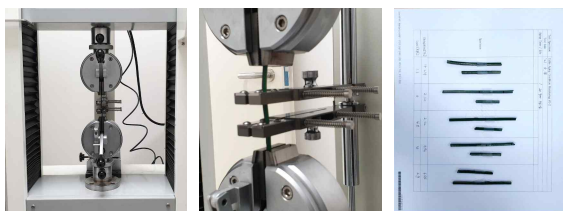


그림 1. 케이블 시험편에 대한 파단연신률 시험

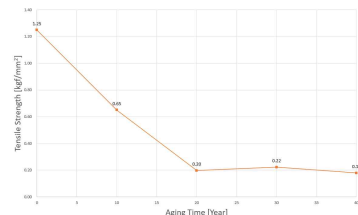


그림 2. 노화수명에 따른 인장 강도 변화

원전용 전력케이블 절연체의 노화 방식에 따른 산화유도시간 변화 Changes in Oxidative Induction Time(OIT) by Aging Method of Power Cable Insulation for Nuclear Power Plant

김한수 · 김진태

한국수력원자력 중앙연구원

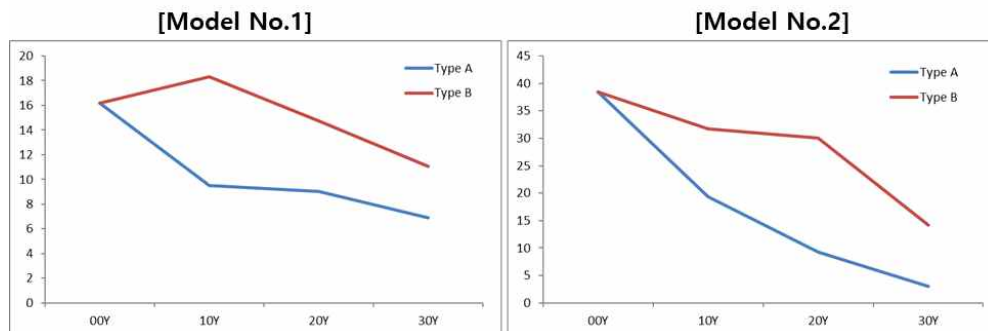
원자력 발전소에 설치된 케이블은 다양한 환경 매개 변수나 예기치 않은 노화 스트레스에 노출될 가능성이 있으므로 최초 도입 시 엄격한 검증과정을 거치게 된다.

발전소를 안정적으로 운영하기 위해서는 케이블의 특성을 분석하고 그 결과를 바탕으로 발전소의 실제 운전 조건하에서 사용되는 케이블의 노화 상태 예측 및 감시하는 과정이 반드시 필요하다.

본 논문은 원자력 발전소에서 사용되는 600V 전력케이블 절연체의 노화 방식에 따른 산화유도시간(OIT)의 변화를 확인하였다. 산화유도시간이란 케이블이 산소분위기에 노출되었을 때 산화가 시작되는 데까지 걸린 시간을 의미한다. 두 가지 모델에 대하여 시험을 실시하였으며 노화 방식은 각각 열노화와 방사선 노화를 함께 진행한 시험(Type A)과 열노화만 진행한 시험(Type B)으로 구분한다.

TypeA에 비해 TypeB의 산화유도시간 감소가 빠르게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이는 방사선 노화 과정이 추가되어 케이블에 첨가된 산화방지제의 탈락이 가속화되었음을 의미한다. 따라서 실제 발전소 운전을 위한 케이블 설치 전 케이블이 노출되는 환경을 반드시 고려해야한다.

일반적으로 노화가 진행될수록 산화유도시간은 감소하는데 Model No.1의 경우 TypeB 시험에서 00Y대비 10Y의 시험 결과가 오히려 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 열 노화 과정에서 산화방지제의 분자 사슬이 경화되어 분자간 결합도가 강해져 산화까지 걸리는 시간이 일시적으로 증가하였다고 판단한다. 또는 시험장비의 민감도에 따른 시험 오차일 경우도 배제할 수 없기 때문에 반복적인 시험을 통해 결과를 판정해야 할 것으로 사료된다. 향후 최대 60년까지 케이블의 노화를 진행하여 데이터를 수집하고 결과를 분석할 계획이다.



방사선 및 열적 노화가 EPR 절연 케이블의 용융점에 미치는 영향 Effects of Radiation and Thermal Aging on the Melting point of EPR Insulated Cable

김건태 · 김한수

한국수력원자력 중앙연구원

EPR 재질의 절연 케이블은 원자력 발전소 내부 곳곳에 설치된다. 따라서 발전소의 안정적인 운전을 위해서는 이러한 케이블의 특성을 파악하고 케이블에 대한 열화 평가 및 수명 예측 기법을 개발하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 원전에 사용되는 EPR 절연 케이블의 열화를 평가하기 위한 실험적 데이터를 확보하는 차원에서 주요 열화인자인 열 및 방사선에 의한 가속열화 시험을 수행하였고 특히, 케이블 용융점(T_m)이 가속 열화 시험으로부터 받는 영향에 대해 기술하였다.

IEEE Std 383-1974의 절차에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식을 기준으로 노화 전 시편부터 시작하여 최대 30년 노화까지 가속열화 시험을 진행하였다. 고분자 화합물의 화학적 특성을 파악하기 위해 일반적으로 널리 사용되는 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC)를 사용하여 케이블 열화에 따른 용융점을 측정하였다. 시험에 사용된 장비는 TA社의 DSC25 모델이다. 고순도 질소 분위기에 승온속도 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 를 기준으로 설정하였으며 시험 온도 범위는 -90°C 부터 300°C 다.

케이블 시편별 노화에 따른 용융점 결과는 아래 표1 및 그림1과 같다. 노화가 진행될수록 케이블의 용융점이 낮아지는 경향을 확인할 수 있는데 이는 고분자화합물의 주쇄(main chain)의 결합 강도가 약해졌기 때문으로 판단된다. 또한, 모든 시편에서 공통적으로 30년 노화 직후 큰 폭으로 감소하는데 추가적으로 최대 60년까지 노화를 진행하면서 노화에 따른 용융점 추이를 살펴볼 계획이다. 이 시험 결과는 케이블 노화에 따른 상태 감시 및 수명 예측에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 일부 시편에서는 10년 노화 대비 20년 노화시 용융점이 일부 증가한 것을 확인할 수 있으나 이는 시험오차로 판단되며 최소 3회 이상의 반복 시험을 통해 이를 검증하는 과정이 필요하다. 추후에는 EPR 재질 이외에 XLPE, XLPO와 같이 고분자화합물로 구성된 케이블에 대해서 동일한 시험을 수행하여 평가할 계획이다.

표1. 노화기간에 따른 시편별 용융점

노화 기간	EPR 케이블 용융점 ($^{\circ}\text{C}$)				
	A	B	C	D	E
00년	44.14	44.14	44.13	43.7	44.36
10년	43.03	43.48	42.59	42.15	42.4
20년	42.21	42.81	42.74	42.88	43.19
30년	38.98	39.05	38.97	38.5	38.86

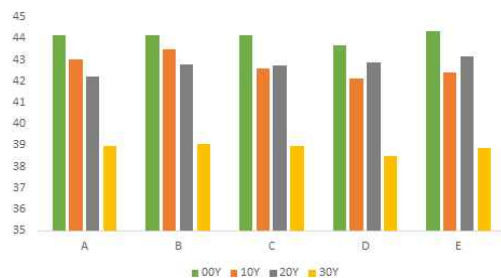


그림1. 케이블 시편별 노화기간에 따른 용융점 변화

계속운전을 위한 원자력발전소 생애주기 관리 방안 국외 현황 조사
A Research on International Nuclear Power Plant Life Management
Status for Long Term Operation

박대은

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 건설되어 준공이 되는 과정에서 운영허가를 위한 서류를 제출하고 일반적으로 40년의 운영허가를 받게 되고, 운영허가기간이 만료되기 이전 별도의 절차를 통해 계속운전 여부를 규제기관에서 심사하게 된다. 국내의 경우 고리1호기와 월성1호기가 운영허가 기간이 종료된 후 10년의 운영기간을 연장하여 운전을 한 사례가 있으며 고리2호기를 비롯하여 운영허가 기간이 만료되는 후속호기들도 계속운전을 위한 절차를 진행하고 있다. 국외에서는 미국의 경우 20년씩 운영허가기간을 연장하도록 제도화되어 있으며 유럽의 많은 국가들이 10년 주기의 주기적안전성평가를 계속운전을 위한 안전성평가 방안으로 활용하고 있다.

발전소 생애주기관리프로그램(Plant life management programme, PLiM)은 계속운전을 위한 원자력발전소의 안전성을 확보함과 동시에 경제성과 신뢰성을 유지하는데 필수적인 요소이다. 이 프로그램의 목표는 발전소의 생애주기 동안 관리가 필요한 모든 요소들(factors)과 요건들(requirements)을 도출해내고 이를 관리하는데 있다. 대부분 국가에서 계속운전을 위한 PLiM을 운영 중에 있으며 이를 통해 경년열화와 경제성 문제를 종합적으로 고려하여 안전성과 이용률을 높이고 수명연장기간동안의 기기수명문제, 정비, 교육훈련 등의 현안들을 효과적으로 해결하고 있다. 특히 원전의 설계수명 이후의 계속운전 여부를 결정하기 위한 의사결정과정에 큰 도움을 주고 있다.

본 연구에서는 원전을 운영 중인 세계 각국의 PLiM 현황을 조사하고 이와 관련하여 계속운전 여부를 결정하기 위한 의사결정 시 참고하는 경제성평가 항목들을 확인하였다. 특히, 계속운전 고려 시 가장 큰 비용을 차지하는 주요기기 교체현황과 후쿠시마 원전사고 이후 강조되고 있는 중대사고를 포함한 설계기준초과 사고에 대한 각국의 규제요건 및 사업자의 대처현황을 조사하였다.

계속운전 추진 유럽원전 설계기준초과사고 대비 설비개선 현황 연구 A Study on European Nuclear Power Plant Facility Improvement Status against Beyond Design Basis Accidents

박대은

한국수력원자력(주) 중앙연구원

후쿠시마 원전사고 이후, 원전을 운영하는 세계 각국은 에너지정책을 재검토하고 국가별 원전 정책을 수정하였다. 특히, 체르노빌 원전사고를 겪었던 유럽의 일부 국가들은 원전 운영을 축소하거나 조기 폐쇄하고 원전 도입 결정을 폐기하는 등 원자력 이용에 대해 보수적인 의사결정을 내린 반면 일부 국가에서는 원전 안전성을 강화하고 계속운전을 추진하기도 하였다. 후쿠시마 원전사고가 발생한 지 10년 이상 지난 현 시점에서 원자력발전소의 계속운전 추진을 결정한 현 정부 정책에 부합하기 위해서는 유럽 각국의 에너지 정책을 재확인하고 중대사고를 포함하는 설계기준초과사고에 대한 설비개선 현황을 확인하는 것이 필요하다.

EU에서는 후쿠시마 원전사고 이후 원전을 운영 중인 국가를 대상으로 스트레스테스트(Stress Tests)를 수행하고 원전의 안전성을 재확인하도록 하였다. 이 평가의 핵심요소는 설계기준초과 자연재해가 발생한 경우에도 필수대처기능(Fundamental Safety Functions)이 복구 및 유지됨을 확인하는 것이다. 필수대처기능은 ①반응도제어 ②노심 및 사용후연료 냉각 ③방사능물질 방출제어이며, 기존 설비들만으로는 이 기능들을 복구 및 유지할 수 없으므로 설비개선 및 추가를 포함한 안전성증진사항의 도출이 필수적인 상황이었다.

이에 따라, 유럽 각국들은 사업자 별로 스트레스테스트를 수행하고 국가별 보고서를 작성한 이후 국가별로 상호점검을 하는 절차를 통해 결과를 확인하였으며, 안전성증진사항(Action Plan)을 도출하고 조치를 수행하였다.

본 논문에서는 국내원전과 유사한 노형을 운영 중인 스웨덴(Ringhals), 슬로베니아(Krsko), 루마니아(Cernavoda) 원전의 계속운전 추진현황과 주요 설비개선 현황을 조사하였다. Ringhals와 Krsko 원전의 경우 Bunkered Building으로 대표되는 고정형설비를 설치하여 설계기준초과사고에 대비하였으며 Cernavoda 원전의 경우 이동형설비를 이용한 대응전략을 수립하였다. 또한, 스웨덴의 일부 원전은 비용증가에 따라 계속운전을 포기하였으며, 슬로베니아의 경우 20년 운영허가기간 연장을 보장하는 것을 전제로 설비투자를 계획하는 등 국가별 계속운전 정책이 다양하였다. 중대사고 대처설비의 경우, 스웨덴은 체르노빌 사고 이후 격납건물정화배기계통(Containment Filtered Vent System)과 피동형 수소제거장치(Passive Autocatalytic Recombiner)를 설치하였으며 슬로베니아와 루마니아의 경우 후쿠시마 사고 이후 해당 설비들을 설치하였다.

본 연구를 통해 유럽국가 중에서도 가장 보수적인 요건을 적용하여 계속운전을 추진한 국가 사례를 검토하였다. 기존 계속운전에서는 고려대상이 아니었던 설계기준초과사고와 중대사고가 비중있게 다뤄지고 있으며, 안전성을 획기적으로 향상하기 위해서는 20년 이상의 계속운전을 보장하는 등 비용과 편익 그리고 정부 정책 측면에서 과감한 결정이 필요하다는 점도 확인하였다.

원전 주기적 안전성평가 위해도분석에 대한 기술기준 차이점 고찰
A Gap Consideration for Code and Standard of Hazards Analysis of the
Periodic Safety Review in Nuclear Power Plant

반재욱 · 김동욱

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소(이하 원전)는 원자력안전법 시행령 제36조(주기적 안전성평가의 시기 등)에 따라 원자로시설의 운영허가를 받은 날부터 10년마다 안전성을 종합적으로 평가하여야 하며, 원자력안전법 시행규칙 제20조(주기적 안전성평가의 세부내용) 위해도 분석에 관한 사항에서 현행 분석방법 및 기술기준을 고려하여 내·외부 위해에 대한 원자로시설 안전성을 확인하여야 한다. 또한, 원전 주기적 안전성평가 안전심사지침(KINS-GE-N018)에서는 해당 원자로시설의 유효한 기술기준과 현행 기술기준 등과의 비교를 통해 잠재적 안전성증진사항을 도출하는 차이 분석(Gap Analysis) 수행을 요구하고있다.

차이 분석이란 최신기술, 운전경험, 연구결과 등을 반영한 현행 기술기준과 해당 원전에 설계시 적용된 기술기준과의 차이에 대한 분석을 통하여 원전의 운영과정에서 Update된 기술기준의 차이의 내용과 정도를 확인하고 이를 통해 원전이 현행의 기술기준을 통해서도 그 안전성이 유지되고 있는지를 확인하는 것이다.

현행 기술기준은 가장 최근에 국내 인허가받은 원전에서 적용된 기술기준을 적용하며 위해도 분석에는 화재, 폭발, 살수를 포함한 침수, 배관파단, 비산물 방호, 독성 액체 및 기체, 홍수, 강풍, 지진, 항공기 충돌 등에 대하여 각각의 현행 기술기준이 제시되었다.

본 논문에서는 최근 주기적 안전성평가를 실시한 원전에 대하여 유효한 기술기준과 현행 기술기준 차이 분석을 수행하였으며 그 결과 화재의 경우 안전정지분석 관련한 기준이 추가됨을 확인하는 등의 차이(Gap)를 확인하였다. 기술기준 차이 분석 결과는 종합검토(Global Assessment)를 통해서 안전성 증진이 필요한 항목으로 선정할 수 있도록 종합검토의 입력으로 제공되었다.

위해도 분석 기술기준에 대한 차이 분석 수행을 통하여 원자로시설의 안전성을 향상시키고 향후 10년간 지속적인 운전을 위한 토대를 마련하였다.

동일 노형(OPR1000)간 발전정지유발기기 목록 결과 비교 분석

A Comparison Analysis for Results of Single Point Vulnerability List for OPR1000 Type Nuclear Power Plants

최병필

한국수력원자력(주) 중앙연구원

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.

가동원전의 경우 안전 및 비안전 설비를 포함한 모든 기기에 대하여 최초의 발전정지유발기기를 선정 후 주기적으로 해당 발전소 및 중앙연구원의 검토를 통해 추가, 삭제 및 유지 등 업데이트를 하고 있다. 발전정지유발기기 대상 선정은 계통의 구성요소에 대한 고장모드를 식별하고 이러한 고장모드 발생 시 그 결과를 평가하는 체계적인 절차인 고장모드영향분석(FMEA, Failure Mode and Analysis) 방식을 사용한다. 계통 선정 및 친숙화, 계통별 분석대상 기기 및 고장모드 식별, 기기 모드별 발전정지 가능성 평가 단계로 수행한다. 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.

본 논문에서는, 가동원전 중 가장 많이 운전 중인 OPR1000 노형의 발전정지유발기기 목록을 분야별, 계통별 비교, 검토하여 추가할 기기와 삭제할 기기 등 상호 적용가능한 통찰력을 찾고자 한다. 발전소의 기기분야는 기계, 전기, 계측, 연료(중수로)로 구분하는데 연료 분야는 중수로만 해당된다. 계통은 크게 1차계통, 2차계통, 순수전기분야계통, 순수계측분야계통 등인데 각 계통내 다수의 세부계통으로 구성되어 있다. 각 계통내 기기들은 고장모드영향분석을 통하여 발전정지 중요도를 정하고 이를 정리하여 발전정지유발기기 대상으로 선정 하였다.

동일노형 발전소이지만 분야별로도 편차가 있고, 세부 계통으로도 큰 차이가 있다. 이는 발전소를 운영하면서 설계변경, 운전원 조치 절차서 유무, 중요도에 대한 인식 등의 차이로 대상을 선정하기 때문이다. 이러한 편차를 분석하고 상호 타발전소에 피드백을 줌으로써 발전소 안전운전에 기여할 수 있을 것이다.

원전 케이블 화재방호체 및 관통부밀봉재 화재방호 성능요건 고찰 A Review on Electric Raceway Fire Barrier System and Penetration Seal Fire Protection Performance Requirements

최병필 · 김명수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소에서 수행하는 다양한 안전성평가 중 화재방호는 공학적 상상이 아닌 실제 발생한 사례로부터 얻은 교훈을 바탕으로 동일한 사건이 재발하지 않기 위한 방법을 개발하였다는 특징이 있다. 그 결과 화재의 발생을 예방하고 발생 시에도 적절히 대처할 수 있는지에 대한 확인뿐만 아니라, 미국 Browns Ferry 원전 화재사고와 같은 최악의 상황에서도 안전정지능력을 확보할 수 있는지에 대한 평가를 수행하는 명확한 기준이 만들어졌다. 안전정지에 필요한 최소 한 계열 이상이 화재로부터 안전하게 방호되어야 한다. 이것을 이루는 구체적인 방법으로 제시된 것은 (1) 3시간 방화성능을 갖는 물리적방벽으로 분리, (2) 1시간 방화성능을 갖는 물리적방벽으로 분리하되 화재감지설비와 자동진압설비 설치, (3) 동일 격실내에서 계열간 중간 가연물 없이 20ft를 격리하고 화재감지와 자동진압설비를 설치하는 방법이 있다. 이를 달성하기 위하여 적절한 화재방호체를 설치하였고, 격실의 관통부에는 밀봉재를 설치하였다.

본 논문에서는 피동형 화재방벽으로 사용되고 있는 화재방호체와 관통부밀봉재에 대한 규제요건의 변천과정과 현재의 성능요건을 고찰하였다. 성능시험 시 화재 상황을 모사한 표준 온도 곡선을 활용하여 시험장치 내부를 가열하고 화재로 인한 손상이 발생하는지를 확인한다. 화재방호체는 가열이후 주수시험을 통해 구조적 건전성을 유지하는지도 확인하는데, 이는 수많은 화재현장에서 화재진압 시 소방관들의 안전을 위협했던 사례를 반영한 기준이며 원자력발전소 뿐 아니라 일반적인 구조물에도 적용되는 요건이다. 관통부밀봉재의 경우 초기에는 벽, 천장 등과 같이 구조물의 일부로 판단하여 불연성물질을 사용하도록 규정하였으나, 실제로는 화재에 대한 내화성능만을 확보하면 된다는 미국 원자력 규제기관의 판단이 있었다. 이후 화재방호체와 관통부밀봉재는 그 자체의 불연성 보다는 내화성능을 확보하고 있는지에 대한 것을 성능만족 확인의 기준으로 사용하고 있다.

본 논문을 통해 국내 원전의 화재에 대한 안전성확보에 필요한 피동형 화재방벽 중 화재방호체와 관통부밀봉재에 대한 성능 요건 및 그 기준에 대한 변화를 확인해보았다. 국내 다양한 시설에서 화재가 대형화되고 그 피해도 증가하는 등 안전에 대한 사회적 요구가 증대하고 있다. 화재안전 분야의 적극적인 대응을 통해, 국가 주요 에너지원인 원자력발전소의 안전성을 향상 시킬 수 있을 것이다.

APR1000 노형 30% MOX 연료 장전모형 평가

Evaluation of 30% MOX Fuel Loading Pattern in APR1000

정병준 · 양원석

한국수력원자력 중앙연구원 성장연구소

유럽사업자요건(EUR)은 노심의 30%까지 MOX 연료를 사용하여 적정한 열적 여유도를 얻을 수 있는 능력을 갖추도록 요구하고 있다. 이에 따라 APR1000 계통의 MOX 연료 적용에 대해 검토하였으며, 그 결과 계통에 영향을 주는 설계 변경 없이 30% MOX 연료를 장전 가능한 것으로 평가되었다.

MOX 연료 장전모형은 100% UO₂ 연료를 장전하는 18개월 주기평형노심을 대상으로 연료 교체주기마다 순차적으로 노심에 30% MOX 연료를 장전하는 모형으로 설계되었다. MOX 연료 형태는 UO₂ 연료(HIPER16)와 동일하며, 플루토늄 함량 및 조성은 방출연소도가 46,000 MWd/MTU인 사용후연료를 통해 결정되었다.

ASTRA/KARMA/ECHO코드를 사용하여 적합한 열적 여유도를 가진 30% MOX 연료 장전모형을 생산하였다. 핵설계 주요 노심인자인 침투출력인자, 감속재온도계수, 최대 연료봉 연소도, 정지여유도 및 축방향출력편차 등을 100% UO₂ 연료 장전모형의 값과 비교하였으며, 평가결과 30% MOX 연료 장전모형은 핵설계 주요노심인자에 대한 설계기준을 만족하였다.

그 결과 핵설계분야 측면에서 APR1000의 100% UO₂ 연료 장전노심에 30% MOX 연료 장전이 가능한 것으로 평가되었으며, 향후 MOX 연료 장전의 관련 계통 및 기기에 대한 건전성 분석이 필요하다.

단자유도 지반-구조물 상호작용 해석에 의한 가속도 응답 고찰 Discussion on the acceleration response from SDOF SSI analysis

김현욱

한국수력원자력(주) 중앙연구원

지진 입력운동의 변화와 함께 구조물을 둘러싼 지반의 유연성과 감쇠의 영향을 의미하는 지반-구조물 상호작용(SSI, Soil-Structure Interaction) 효과를 고려하기 위해 구조물 기초 설계기준(2015) 내진설계편과 EPRI Engineering Technical Training Modules for Nuclear Plant Engineer-Soil Structure Interaction(1010808)(2005)에서는 단자유도 지반-구조물 상호작용 모델을 활용한 내진해석 사례를 다루고 있다. 단자유도 지반-구조물 상호작용 모델은 수평방향 가진시 구조물-지반 시스템의 병진, 회전과 구조물의 병진 이동 총 3자유도의 움직임을 수평 1자유도 움직임으로 응축시킨 모델로서 구조물 특성, 지반 특성 및 설계응답 스펙트럼만 있으면 손쉽게 구조물의 가속도 응답을 산정할 수 있는 방법이다. 그러나, 단자유도 지반-구조물 상호작용 모델이 구조물과 지반의 거동을 더욱 현실적으로 나타내는 다자유도 지반-구조물 모델에 비해 어느 정도의 정확성을 갖는지에 대한 비교 연구가 부족한 실정이므로 본 연구에서는 건조 모래지반 상에 놓인 단자유도 지반-구조물 상호작용 해석결과를 원심모형실험 결과와 함께 3자유도 지반-구조물 상호작용 해석결과와 비교하였다. 그 결과, 다양한 지진입력 운동에 대한 구조물의 가속도 응답은 단자유도 지반-구조물 모델이 다자유도 지반-구조물 모델 및 원심모형실험과 유사한 구조물 가속도 증감 경향을 보였으나, 구조물의 응답 가속도 값에 있어 다자유도 지반-구조물 모델과 원심모형실험에 비해 덜 보수적인 결과를 나타냈다. 이는 구조물 병진, 지반 병진, 지반 회전 3가지 모드에 대한 모드 참여율과 각 모드 감쇠에 대한 가중치 또는 참여율이 동일하게 고려되어 1가지 모드 움직임과 감쇠비로 응축되는 단자유도 지반-구조물 모델의 한계에서 비롯된 것이라 판단된다.

극한재해 대비 대용량 이동형 발전차 선배치 방안 연구

A Study of Mobile Generator Preposition against Natural Hazards

김용석

한국수력원자력(주) 중앙연구원

후쿠시마 원전에서 설계기준을 초과하는 극한 자연재해 발생으로 원전 부지 내 다수 호기에서 장기간 모든 교류전원 상실이 발생하였고, 이로 인해 노심냉각기능 상실, 사용후 연료 저장조 냉각능력 상실 및 격납건물 건전성 유지불능 상태로 이어졌다.

이에 미국 원자력 위원회는 행정명령을 통해 설계기준을 초과하는 외부사고 대처를 위한 3단계 접근방법을 이행토록 요구하였고, 미국의 NEI(Nuclear Energy Institute)는 외부 재난사건을 평가하고 사고완화전략을 이행하기 위한 지침서(NEI-12-06)를 발행하였다.

국내 원자력안전법 제20조(운영허가) 제2항을 통해 원자력안전위원회에 사고관리계획서를 제출할 것을 요구했고, 규제기관은 사고관리계획서 안전심사지침을 통해 극한재해 및 중대사고 시 사고관리에 사용되는 설비에 대한 설명을 요구하고 있으며, 필요시 소내 이동형 설비와 소외자원이 고려될 수 있음을 언급하였다.

국내 원전은 극한 자연재해 발생으로 인한 장기 교류전원 상실(ELAP, Extended Loss of All AC Power)에 대비하기 위해 크게 3단계 대응전략을 마련하였고, 그 중 2단계(8시간), 3단계(72시간) 대응전략으로 대용량 이동형 발전차를 통해 안전관련 설비에 전원을 공급하는 방안을 마련하였다.

하지만, 국내 규제요건은 야간의 극한재해 발생에도 부지별 모든 호기 ELAP 조건에서 초기 6시간은 소내 인력만으로 사고대응을 요구하고 있으나, 발전차 운전은 도로이동 및 전력선 포설에 대규모 인력동원이 요구되어 ELAP 대응 활용이 제한적이며, 대용량 이동형 발전차의 확률론적 안전성 평가(PSA) 분석 반영시 안전기준 만족을 위해 ELAP 발생 후 1.5시간 이내 전력공급이 가능해야 하므로 전원공급 전략의 개선이 요구되었다.

극한재해에 의한 ELAP 상황에서 대용량 이동형 발전차의 운영인력과 전력공급 시간의 문제를 해결하기 위해 대용량 이동형 발전차의 선배치 방안이 연구중에 있다. 이는 원전부지 내에 선배치 부지를 선정하고 대용량 이동형 발전차를 사전 배치하며, 선배치 부지에서 부지내 각 발전소까지 상시 설치된 전력용 케이블을 통해 최소인력과 짧은 시간에 소내 안전급 모선에 전원을 공급하는 방안이다.

결론적으로 국내 규제기준을 충족시키기 위해 ELAP 대응 설비인 대용량 이동형 발전차를 선배치하므로써 발전차 이동에 따른 불확실성을 해소하여 전원공급의 신뢰성을 높이고, 나아가 원전 안전성 향상과 중대사고 예방에 기여할 것으로 기대한다.

국내원전 운영변경허가 관련 경향분석

The Trend Analysis of the Korean Nuclear Power Plants for Operating License Renewal

최우재

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원전은 원자력안전법 제20조(운영허가) 1항에 따라 허가받은 사항을 변경하려는 때에는 원자력안전위원회의 허가를 받아야 한다. 운영허가를 위한 제출 서류에는 운영기술지침서, 최종안전성분석보고서, 사고관리계획서(중대사고관리계획을 포함한다), 운전에 관한 품질보증계획서, 방사선환경영향평가서, 발전용원자로 및 관계시설의 해체계획서, 액체 및 기체 상태의 방사성물질등의 배출계획서 및 총리령으로 정하는 서류가 있다. 한편, 발전소 정지 중 작업이 가능한 안전등급 설비의 운영변경허가가 필요한 경우에는 적시에 규제기관의 승인을 받아야 계획예방정비 공정이 지연되지 않고 재가동할 수 있으며, 실제 인허가 일정에 의해 주공정이 영향을 받는 사례가 종종 발생하였다. 본 논문에서는 국내원전의 운영변경허가(최종안전성분석보고서 및 운영기술지침서 개정에 한함)에 관련하여 유의미한 경향성을 보이는지 파악하고 규제기관 심사에 보다 효율적으로 대응할 수 있는 방안을 강구하는데 활용하고자 한다.

인허가업무에 대한 체계적이고 효율적인 이력 관리를 위해 ㈜한국수력원자력은 자체 시스템을 운영하고 있다. 해당 시스템 데이터베이스에 근거하여 최근 6년간(2016년 1월 ~ 2021년 12월) 운영변경허가 관련(경미한사항 변경신고 제외) 신청 사유, 연간 신청 빈도, 신청 이후 규제기관의 심사절의 건수 및 승인되기까지 소요 기간 등으로 분류하여 분석하였다. 이 기간 운영변경허가 신청 건수는 총 319건이며 이 중 175건이 승인되고 63건이 신청 철회되었으며 나머지는 현재 심사 중이다. 운영변경허가 신청(심사 중 철회된 건수 제외)에 대한 승인 비율을 살펴보면, 신청 당해로부터 시간 경과에 따라 승인 비율이 증가하여 3년 시점에 약 80%까지 상승하는 것으로 확인되었다. 신청으로부터 3년 이후 승인 비율은 거의 증가하지 않았다. 한편, 신청 철회 비율은 조사기간 중 약 20%로 나타났다. 연간 인허가 신청 빈도는 최소 35건(2020년)에서 최고 78건(2019년)으로 나타났다. 규제기관의 질의 건수는 운영변경허가 신청관련 설비나 사유에 편차가 있으나 승인완료 또는 심사 진행중인 사항을 포함하여 최대 7회이다. 신청 사유는 설비개선, 사고해석 등 발전소 각종 평가나 재해석에 따른 후속조치(설비교체 없는 인허가문서 행정처리 포함), 규제기관 요구사항 반영 등이 있었다.

인허가문서 개정에 해당되는 설비 변경의 복잡성, 선행호기 기반영 여부 등에 따라 심사 소요기간에 편차가 있고, 연도별 변경허가 승인 비율을 고려할 때 운영변경허가 최초 신청에서 규제기관 승인까지 일반적으로 3년 이내에 가능함을 유추할 수 있다. 원전 정책 흐름의 변화에 따라 추진 중인 설비개선 계획의 중단 등 인허가 변경에 다양한 변수가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 인허가 추진 기간을 여유 있게 확보하고, 정책적 변동 사항발생 시 동일 사유로 추진 중인 타 사업소 및 본사와 연계하여 효율적으로 대응할 필요가 있다.

상분리모선 발열량 계산

Generated Heat Calculation of Isolated Phase Bus

김선민

한국수력원자력 중앙연구원

상분리모선은 발전소에서 생산한 전기가 외부로 전달되는 통로이다. 상분리모선은 전기적 열저항으로 인한 손실로 인해 발열이 발생하게 되는데 적절한 냉각 여부에 따라 발전소 출력이 제어되므로 상분리모선 냉각시스템의 적절한 냉각 성능 평가는 중요하다. 상분리모선 냉각시스템의 냉각 성능 평가를 위해서는 상분리모선에서 발생하는 발열량에 대한 정확한 추정이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 상분리모선에서의 전기적 손실로 인한 발열량 추정을 위해 IEEE Std 37.23에서 제안하는 방법론을 적용하여 발열량을 계산하였다. 계산은 상분리모선의 도체 부분과 외함 부분으로 나누어 수행되었으며 온도에 따른 저항 변화 및 스킨 효과(skin effect)가 고려되었다. 외함의 형태에 따른 외함 온도효과가 적용되었으며 강제 냉각시스템을 적용하였다. 또한 도체와 외함의 형태에 따라 손실 계수가 적용되어 손실 계산에 사용되었다.

결과적으로, 상분리모선의 발열량이 IEEE Std 32.23에서 제시하는 방법론에 따라 계산되었으며 도체의 분기에 따른 발열량 변화 및 외함의 배치 형태에 따라 상분리모선에서의 발열량 변화를 파악할 수 있었다. 또한 이를 합산한 전체 발열량이 파악되어 상분리모선 냉각 시스템 설계에 활용되었다.

상분리모선 냉각시스템의 냉각성능 평가

Evaluation on the Cooling Performance of Isolated Phase Bus Cooling System

김선민

한국수력원자력 중앙연구원

상분리모선은 발전소에서 생산한 전기가 외부로 전달되는 통로이며 주발전기, 주변압기 및 소내 변압기 등을 연결한다. 이러한 상분리모선은 전류가 직접 흐르게 되는 도체 부분과 도체를 보호하기 위하여 도체를 둘러싸고 있는 외함으로 크게 나뉘는데, 이들이 가진 전기적 저항으로 발열하게 된다. 이러한 상분리모선에서 일어나는 발열을 적절하게 제거하지 않으면 열적 스트레스 증가로 계통에 손실을 주기 때문에 상분리모선의 냉각은 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 이러한 상분리모선을 냉각하는 냉각시스템의 성능을 평가하기 위해 열전달 해석을 수행하였다. 상분리모선 전체를 절점으로 나누어 각 절점에서 일어나는 여러 가지 열전달 현상에 대한 지배방정식을 세우고 상분리모선의 도체, 외함 및 냉각용 공기의 온도를 미지수로 두어 열평형 방정식을 세워 해를 구하였다. 그리고 각 절점에서의 해를 종합하여 상분리모선 냉각시스템의 온도 분포를 구하였다.

결과적으로, 상분리모선의 온도 분포는 IEEE Std 32.23에서 제시하는 제한치를 만족하는 것으로 확인되어 계산에 사용된 상분리모선 냉각시스템은 상분리모선을 냉각하는데 적절한 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

시각화를 통한 배관내 유체기기의 소음원 규명

Noise source identification of fluid machinery in pipes by visualization

허용호

한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소

저소음 유체기기의 설계를 위해서는 유체기기의 소음 발생 메커니즘을 규명하고 동작 조건에서의 소음원들을 명확하게 규명하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 음장을 시각화하여 주된 소음원의 위치 및 강도를 규명하기 위한 방법을 제안하였다.

회전하는 유체기기를 높은 분해능으로 시각화하기 위해서는 고차 음향 모드들, 난류 유동에 의해 발생된 비상관 유동 소음, 도플러 효과 모델링을 통한 회전 고려, 다채널 측정된 신호들의 신호처리 방법등이 고려되어야 한다. 이를 위해 진행파와 감쇠파를 모드 합성법에 고려하여 공간 분해능을 높였으며 난류 유동장에서 측정된 음압신호에서 유동 자체의 소음을 제거하기 위해 회전 픽업 신호와 원거리 음장에서 측정된 신호를 이용하였다. 또한, 음원과 함께 회전하는 회전 좌표계를 도입하여 명확하게 소음원을 시각화하는 방법을 제안하였다. 그 결과, 회전하는 유체기기 소음원을 시각화하여 주된 방사 소음원의 위치와 강도를 규명할 수 있었으며 제시된 방법론이 설계변수들의 실험적 튜닝을 위한 목적으로 사용될 수 있음을 보였다.

ATF 사용후핵연료의 붕괴열 평가 Decay heat Analysis of ATF spent fuel

정진호

한국수력원자력(주)

2011년 일본 후쿠시마 원전사고 이후, 미국 의회에서는 미국 에너지부에 사고저항성핵연료(Accident tolerance fuel, ATF)를 개발할 것을 지시하였다. 세계 각국에서는 다양한 개념의 ATF를 제안하였으며 개발 난이도에 따라 단기·중장기 기술로 구분할 수 있다.

단기 적용 기술은 기존 핵연료 구성인 UO_2 -Zr 체계를 유지하며 소결체에 미량의 첨가물을 추가하거나, 피복재에 이종금속을 코팅하는 기술이 고려되었다. 핵연료 소결체의 경우 핵연료의 고온 크립변형 특성 향상, 핵분열생성기체 방출 저감, 소결체의 열전도도 증가 등을 목적으로 Mo, Cr, Al_2O_3 , Si_2O_3 등의 첨가제가 함유된 소결체를 제작하는 기술을 개발하고 있다. 피복재는 고온산화 지연에 따른 수소 발생 저감을 목적으로 크로뮴(Cr), 몰리브덴(Mo), CrAl 합금을 코팅하는 기술이 고려되었다. 중장기 적용 기술은 기존 핵연료 구성에서 벗어나, 고밀도 핵연료소결체인 U_3Si_8 , 철계 피복재인 FeCrAl 합금, 세라믹 피복재인 SiC 등이 제안되었다.

핵연료의 구성물질이 변경되면 핵연료 및 피복재의 특성이 변경된다. 특히, 핵연료집합체의 연소특성, 사용후핵연료의 핵종 분포 등에서 차이가 발생한다. 따라서, 현재의 시스템이 이러한 차이를 수용할 수 있는지 확인하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 ATF의 사용후핵연료 관점에서 특성 변화에 대해 분석하였으며, 특히 사용후핵연료 붕괴열을 변화를 비교하였다. 원자력발전소에서는 사용후핵연료저장조의 냉각상실 시 조치시간을 관리하고 있는데, 이 조치시간은 사용후핵연료의 붕괴열에 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 동일한 조건에서 연소 및 방출되었을 때 기존 핵연료와 ATF의 붕괴열을 비교하고자 한다.

본 연구에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 PLUS7 핵연료를 기준으로 설정하였다. 비교 평가에 사용되는 ATF는 3가지로 아래의 표 1에 기술하였다. 붕괴열 계산은 Origen-ARP 코드를 이용하여 수행하였으며, 저연소도(20GWd/tU), 중연소도(40GWd/tU), 고연소도(60GWd/tU)를 각각 비교하였다. 이 결과를 바탕으로 ATF가 SFP 저장조의 조치시간에 미치는 영향을 도출할 계획이다.

표 11. 분석 조건에 따른 ATF 핵연료 및 피복재 구성

구분	핵연료	피복재
기준(PLUS7)	UO ₂	Zirconium 합금
ATF-1	UO ₂	HANA + Cr 코팅
ATF-2	LAS	HANA
ATF-3	LAS	HANA + Cr 코팅

이 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 2021780100050)

한수원 산업기술기준 참여확대 및 관리 개선 방안

Expansion of Participation in Power Industry Code(Standard) Committee,
and Management Improvement Plan

김문수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

2011년 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 안전에 대한 국민의 관심이 그 어느 때 보다 높아짐에 따라 원전 주기적 안전성평가, 지진 및 극한재해에 대한 대처, 사고관리 등 주요 안전 현안에 대한 설계·운영 측면의 안전성 강화 뿐 아니라 규제기준의 정비도 아울러 요구되어 왔다. 이와 같은 규제수요의 증가로 원자력안전법부터 규제지침까지, 관련 규정의 빈번한 개정이 이루어졌으며 한수원(주)는 국내유일 원자력사업자로서 규제준수에 보다 집중 해야 하는 현실이다. 국내 원자력 관련법은 원자력안전법, 시행령, 시행규칙, 원자력안전위원회 규칙(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙, 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙) 및 원자력안전위원회 고시로 구성되어 있다. 이를 바탕으로 원자력 산업계의 규제기준이 정립되고 세부적으로 규제지침과 심/검사 지침이 정의되어 이를 충족하기 위한 원자력산업의 적용 기술기준 요건이 대응하는 구조이다. 국내 원전은 원전 설계/유지보수/품질 등 산업기술기준 준용이 필수 사항이며, 각 발전소 설계시 적용하고 있다. 과기부 고시 1996-32호에 의거 발전용 원자로 및 관계시설 기술기준(건설,운용)으로 한울 5,6호기(1994년) 부터 KEPIC(전력산업기술기준)이 주요 기술기준으로 명시되어 적용되어 있다.

발전소 코드 및 기술기준 관련 요건 불만족이 발생시 가동원전 장기 정지를 발생 할 수 있어, 현안으로 매우 중요한 사항이며, 최근 원전 안전에 대한 다양한 규제수요 증가 및 정확한 기술기준 준수 요구가 증가하는 추세이다. 따라서 한수원에서 활용중인 국내외 기술기준 및 유관단체(KEPIC, ASME, IEEE)에 대한 능동적 대응역량 증대가 필요함에 따라 CRI(한국수력원자력 중앙연구원)의 기술기준 참여인력 Pool DB 구축 및 전담관리 방안을 계획하고 추진 중이며 관리개선 방안을 요약하면 아래와 같다.

[현안발생 대응체계] 기술기준 현안발생 → 주관부서 접수 및 원내 유관 직원 통보 등 신속 대응
→ 현안대응 발생/대응/종결 모니터링 및 후속조치 총괄 관리

[기술기준 역량강화] 중요 기술기준 능동적 참여(추가 참여) 및 발생현안(코드개정/발전소 적용오류 현안 등) 체계적 관리를 위한 내부 시스템(본사와 유기적 협력, 규제기관과의 정기 업무회의 개최 등) 구축

[기술기준관리 일원화] 기존 기술기준 활동(위원참여, 현장기술지원)시 참여위원 개별 활동으로 능동대처 및 전사적 예방 대응능력 집중 관리체계 구축을 통한 기술기준 대응 역량의 극대화

상기, 주요 기술기준 참여역량 강화를 위한 사내 의견수렴 및 기술기준 추가 참여자 조사를 완료하고 유관기관(KEPIC, ASME(KIWG) 등)과 미참여분과 신규참여 추진 등을 협의 완료하였으며, 향후 확대된 주요 산업기술기준 위원 참여 및 한수원의 관리강화방안에 따라 원전사업자 입장에서 기술기준 합리화 증대 및 운용중인 발전소의 기술기준 현안대응력도 한층 향상될 것으로 판단된다.

원자력발전소 설비 예방정비 프로그램 개선 방안

An Improvement of Preventive Maintenance Program for Operating Nuclear Power Plants

염동운 · 김희찬 · 김정운

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소에서는 발전소별로 약 15만개 이상의 설비들을 등록 관리하고 있으며, 설비별 기능적중요도(FID¹⁾)를 기반으로 예방정비 프로그램을 개발 및 이행하고 있다. FID는 원자력발전소의 안전성, 신뢰성 및 운전가능성 측면에서 설비별 특성을 분석하고, 일정한 기준에 따라 중요도를 분류하는 것이며, 예방정비 프로그램은 FID에 따라 설비의 운전 성능이 설계기준 범위 내에서 유지될 수 있도록 고장 예방을 위해 사전에 주기적으로 수행하는 체계적인 정비활동이다.

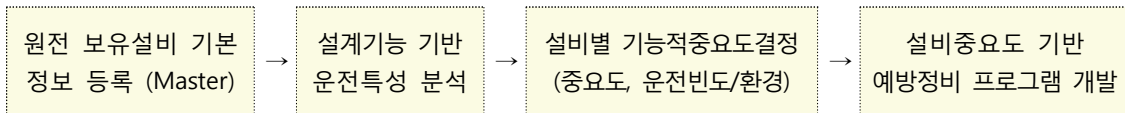


그림 1 원전 주요설비 예방정비 프로그램 개발 체계

국내 원자력발전소의 예방정비 프로그램은 유사 발전소 같은 설비들에 대해서는 동등한 수준으로 적용하는 것이 바람직하나 운영특성 및 엔지니어의 판단 기준에 따라 일부 차이가 있는 경우가 있으며, 미국원전에서 운영 중인 정비개선 프로그램은 미적용하고 있는 실정이다.

이에 따라 한수원(주)에서는 APR1400 원전을 대상으로 안전 및 비안전 관련 설비들에 대한 FID 표준화를 수행하였다. 아울러, 미국원전에서 운영 중인 작업전상태코드(AFCC²⁾) 활용 예방정비 프로그램 개선 체계를 구축하고 있다. AFCC는 그림 2에서 보는 바와 같이 예방정비 전 설비의 상태를 진단하고, 예방정비 시 나타난 실제 상태와 비교한 결과를 입력하는 것이며, 누적된 결과를 활용하여 예방정비 프로그램을 최적화하는 프로세스이다.

F	심각한 성능저하 (CAP 발행)	C	예상과 같은 성능저하 (유지)
	○ 기기 고장 ○ 심각한 마모 또는 성능저하 ○ 기기에서 경보 또는 비정상 지시 상태		○ 기기 기능 정상 수행 ○ 허용범위 밖이나 범위 내 조정 ○ 직무 요구 외 부품 교체 불필요
D	예상보다 성능저하 (경향분석)	A	예상보다 성능양호 (경향분석)
	○ 비정상적 또는 예상보다 마모 심함 ○ 기기 성능저하, 부품교체 필요 ○ 허용 범위 벗어나 범위 내로 조정 불가		○ 신품 상태 (주기 교체) ○ 조정 불필요 또는 약간 조정 필요 ○ 예상보다 양호한 마모, 부품 교체 불필요

그림 2 예방정비 후 입력 작업전상태코드 (AFCC)

한수원(주)에서는 2023년까지 계측 및 전기설비들에 대한 FID 표준화를 추가적으로 수행할 예정이며, AFCC 운영 지침서 및 관련 시스템 개발을 추진할 예정이다. 따라서 향후 예방정비 개선 체계가 구축된다면 원전의 설비 신뢰성이 한층 향상될 것으로 사료된다.

¹⁾ FID : Functional Importance Determination (기능적중요도결정)

²⁾ AFCC : As Found Condition Code (작업전상태코드)

APR1400형 원자력발전소 계측분야의 기능적중요도결정 전략 수립

A Study of Functional Importance Determination(FID) Process Application On I&C System in APR1400 Nuclear Power Plants

김희찬, 김정운

한국수력원자력(주) 중앙연구원

기능적중요도결정(FID, Functional Importance Determination) 프로세스는 원자력발전소를 구성하는 전체 설비에 대한 안전성, 신뢰성 및 운전가능성 측면에서 일정한 기준에 따라 설비를 분석 및 분류하는 프로세스이다. APR1400형 원전 계측분야는 MMIS(Man Machine Interface System)와 같은 최신 디지털설비들의 추가 등으로 아날로그 방식의 시스템에서 많은 변화가 일어나고 있다. 이러한 최신 디지털설비들의 특성을 반영한 발전소 계측분야의 기능적중요도 결정에 대한 전략 수립이 필요하다.

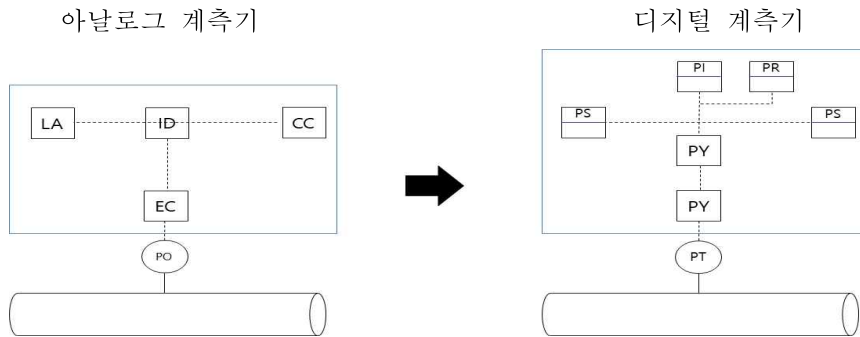


그림1. 발전소 계측기 구성도

아날로그 계측기의 경우 발전소 계측기 신호값을 전송하는 시스템이었으나, 현재의 디지털 설비는 현장 아날로그신호의 디지털 변환 및 디지털 데이터의 활용이 증가하고 있는 추세이다.

APR1400형 원전 디지털설비의 기능적중요도결정은 아래와 같은 분류기준을 수립하고 적용하여 결정하였다.

표1. 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

이러한 기능적중요도결정 전략을 기반으로 APR1400형 원자력발전소의 계측분야 디지털 설비에 대한 중요도, 운전환경 및 운전빈도를 수행하였다. 계측분야 디지털 설비의 특성을 반영한 FID 분석 및 분류는 최신설비에 대한 적합한 정비활동 수행에 도움이 될 것으로 사료된다.

원자력발전소 정주기시험관련 계측설비의 기능적중요도결정 전략 수립

A Study of Functional Importance Determination Strategy for Surveillance Test I&C Component in Nuclear Power Plants

김희찬, 김정운

한국수력원자력(주) 중앙연구원

기능적중요도결정(FID, Functional Importance Determination) 프로세스는 원자력발전소를 구성하는 전체 설비에 대한 안전성, 신뢰성 및 운전가능성 측면에서 일정한 기준에 따라 설비를 분석 및 분류하는 프로세스이다. 일반적으로 원자력발전소에서는 안전성, 비안전성 여부에 따라 계측기의 중요도를 결정하고 이를 기준으로 절차서 수행 일정, 교정주기 결정 및 유지보수품목 관리를 하고 있다. 정주기 시험관련 계측기는 발전소 안전성 관련설비의 성능을 측정하는 중요한 역할을 수행하고 있으며, 이러한 기능적중요도결정을 통한 정주기 시험관련 계측설비의 철저한 관리를 위해 별도의 FID 결정 근거 및 분류기준을 정립할 필요가 있다.

발전소 정주기 시험관련 계측설비의 기능적중요도결정을 위해 아래와 같이 주제어실(MCR) 계측기 및 현장 계측기로 분류하였으며, 그러한 설비들의 특성을 고려하여 결정근거를 수립하였다.

표1. 정주기시험 관련 계측기 FID 분류 및 결정근거

계측기분류		결정근거
정주기시험 MCR계측기		교정을 수행하는 안전관련 계측기(주로 MCR 신호제공 계측기)는 계통의 중요도를 기준으로 FID 결정
현장 계측기	안전성설비	안전성관련 계통 절차서를 참조하여 판정기준에 영향을 미치는 계측설비는 Critical B 이상을 부여함
	비안전성설비	정기시험 관련 계측기에 대해서 Minor이상으로 분류 규제 위해요소가 없는 계측기의 경우 No-impact로 관리

특정 설비를 대상으로 수행되는 정기 시험 혹은 주기 시험에 따라 FID 중요도 등급은 구분 하였으며, 정주기 시험 계측기는 안전관련 혹은 비안전관련 계측기로 구분하여 FID 등급을 부여 하였다

표2. 정주기시험에 따른 계측기 FID 등급 부여

분류		FID 등급	비고
정기시험	안전관련 계측기	Critical A 혹은 B	
	비안전관련 계측기	Minor 이상	일반적으로 Minor
주기시험	안전관련계측기	Minor 이상	Critical 부여 가능
	비안전관련 계측기	Minor 이상	현장용 : No-impact
MMIS 관련 계측기		No-impact	디지털 설비

이러한 정주기 시험관련 계측기에 대한 기능적중요도결정 전략을 기반으로 발전소 안전에 중요한 계측설비에 대한 체계적인 설비 감시 및 예방정비 활동 이행을 통해, 발전소 설비신뢰성을 향상에 기여할 것으로 사료된다.

국내원전 기능적중요도결정 표준화 방안 연구

A Study of Standardization about Functional Importance Determination Process in Nuclear Power Plants

이상대 · 김희찬

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 기능적중요도결정(FID) 결과물은 설비관리의 우선순위 결정 및 효율적인 예방 정비 시행을 위해 설비관리 프로세스로 활용되고 있다. 발전소 시스템엔지니어는 담당 계통의 모든 설비를 대상으로 안전성, 신뢰도, 운전가능성 측면에서 중요한 설비를 일정한 기준에 따라 분석 및 분류하고 있다. 각 발전소에서 수행한 기능적중요도결정 결과물에 대해 동일 계통 FID 결과물을 분석한 결과, 중요도결정 결과물에 차이가 발생하고 있는 것으로 나타나고 있다. 본 논문에서는 이러한 기능적중요도결정 결과물의 차이점을 해소하기 위한 표준화 방안을 제시하고자 한다.

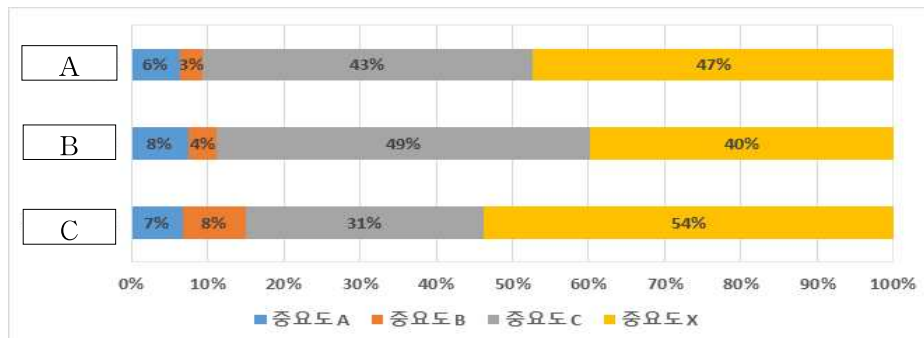


그림 1 발전소별 기능적중요도결정 결과 분포

국내 원전에서는 미국 원자력발전협회(INPO)에서 발행한 설비신뢰도 프로세스(AP-913 process) 중 기능적중요도결정 프로세스를 활용하여, 각 발전소에서 시스템 엔지니어들이 담당 계통의 설비에 대한 기능적중요도결정을 평가하고 있다.

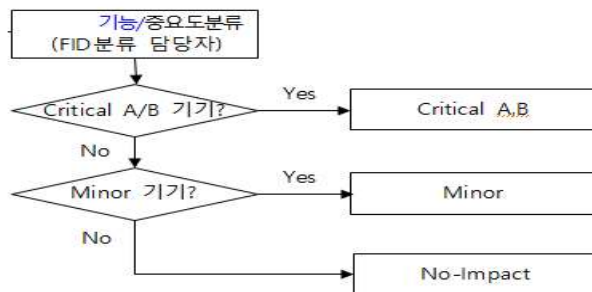


그림 2 INPO AP-913의 기능적중요도결정 프로세스

동일 노형 FID 결과물 표준화는 동일 노형 동일 설비의 FID 차이로 발생하는 예방정비 직무 선정, 직무 수행주기에 대한 일치화 및 중요 설비 필수유지품목의 동일한 정수책정에 활용될 수 있을 것이다. 또한, 이러한 FID 표준화는 다수 호기 원전을 운영하는 국내 원전의 설비관리 능력을 향상시키는데 기여할 것이다.

국내 신뢰도데이터 품질 향상을 위한 해외 품질검증 연구 고찰
A Review on Overseas Quality Verification Research to Improve the
Quality of Korean Reliability Data

이현교 · 황석원 · 이한설
한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 정책 및 규제는 원전의 안전성을 제고하기 위하여 지속적으로 강화되는 방향으로 개정 또는 추가되고 있다. 국내 원전 신뢰도데이터 생산은 국내 규제에 따라 수행되는 PSA 모델 개정 및 인허가를 위한 필수 의무이다. 국내 PSA 모델의 신뢰성 향상 및 품질을 확보하기 위해서는 신뢰도데이터의 품질확보가 우선적으로 확보되어야 한다. 본 논문에서는 해외의 신뢰도데이터 생산과정에서 수행되는 여러 품질 검증 절차 및 관련 연구를 고찰하여, 국내 신뢰도데이터 품질 확보를 위한 검증 절차를 개발하는데 적용성을 검토하고자 한다.

해외에서도 특히 미국에서는 규제기관을 중심으로 미국내 원전의 사고/고장데이터를 수집하고 있으며, 수집/분석과정에서 다양한 검증을 수행하고 있다. 미국은 다양한 사업자가 원전을 운영 중에 있으며, 사고/고장 발생 시 규제기관인 NRC(Nuclear Regulatory Commission) 등에 사고/고장 보고서를 제공한다. 보고서를 통하여 신뢰도데이터를 생산하는 것은 미국 아이다호 국립연구소에서 전담하여 수행하고 있으며, 2009년 발행된 보고서 “Data Quality Assurance Program Plan for NRC Division of Risk Analysis Programs at the INL, INL/EXT-09-16156, 2009)을 주요 참조문서로 하여 미국의 신뢰도데이터 품질 관련 내용을 고찰하였다. 사고 보고서를 수집/분석하는 과정에서 NRC는 자동화된 소프트웨어, 수동 프로그램 사용하여 총 8단계로 주기적으로 누락된 데이터나 오분석된 데이터를 확인하고 있다. 또한 최종적으로는 관리자가 직접 검토를 통하여 수집된 데이터의 품질을 확인하는 과정을 거쳐 기초자료 수집을 수행하고 있다. 수집된 데이터 분석 단계에서도 각 분석 지점마다 독립적으로 검토 담당이 지정되어 분석 내용을 검토하고 피드백하는 과정이 포함되어 있는 것을 확인하였다. 또한 데이터 수집/분석 지침이 문서화되어 관리 중이며 해당문서를 바탕으로 수집된 데이터의 품질 및 분석된 최종데이터의 품질을 확인하는 것으로 확인되었다.

본 논문을 통해 검토된 내용을 바탕으로 국내 신뢰도데이터 수집/분석방법론을 검토하여 각 절차별로 적용성을 검토할 예정이다. 미국의 사례와 같이 각 절차별로 검토된 내용을 바탕으로 문서화를 진행하여 신뢰도데이터를 수집단계에서부터 최종 분석 결과물까지 전 과정에 대한 품질을 확보할 수 있도록 검증절차를 개발하고 이를 지침서 형태로 완성할 예정이다. 이를 통하여 국내 고유 신뢰도데이터의 생산 및 품질관리 체계가 구축될 것으로 기대한다.

국내 PSA 적용을 위한 해외 초기사건 분석방법론 고찰
A Review on Overseas Initial Event Analysis Methodology for Korea
PSA Application

이현교 · 김정수 · 이한설
한국수력원자력(주) 중앙연구원

확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)는 원자력발전소에서 발생할 수 있는 다양한 사고 중 노심손상을 일으켜 최종적으로 소외로 방사성물질이 방출되는 영향을 평가하는 것이다. 잠재적으로 노심손상을 일으킬 수 있는 사고를 초기사건이라고 하며, 초기사건의 빈도를 정확하게 분석하고 적용하는 것은 PSA 분석의 기본이라고 할 수 있다. 국내에서는 일부 실제로 발생하였던 사건들은 이력 데이터를 수집하여 사용하고 있으나, 발생하지 않았던 사고들에 대해서는 해외 특히 미국의 일반데이터를 사용하여 PSA 분석을 수행하였다. 미국의 초기사건 분석 방법론은 과거부터 많은 방법론이 연구되어 왔다.

본 논문에서는 미국의 PSA 분석에 활용되는 초기사건 빈도 분석 방법론을 과거로부터 고찰하여 방법론의 변경을 검토하였다. 국내 최초로 수행된 PSA에서 적용된 방법론은 NUREG/CR-5750에 제시된 방법으로 미국내 1987년부터 1995년까지의 데이터를 분석하여 초기사건 빈도를 산출하였으며, 시간에 따른 트렌드, 호기 간 동질성 등을 고려하여 여러 가지 빈도 추정방법을 제시하였다. 최근에 사용되는 초기사건 빈도는 2007년 발행되어 최근까지 계속 업데이트 되고 있는 NUREG/CR-6928이다. 현재까지 총 3개의 버전이 발행되었으며, 가장 최근은 1988년부터 2015년까지의 초기사건을 분석한 2015업데이트 버전이다. NUREG/CR-6928에서는 미국내 전 발전소에서 수집되는 사건보고서를 검토하여, 초기사건별로 시간에 따른 발생빈도의 증가 또는 감소추세가 없는 기간을 찾기 위해 트렌드 분석을 수행한다. 본 분석을 통해서 초기사건 별로 최적의 분석대상 기간(Baseline period)이 선정되면, 해당 기간에 대한 초기사건 빈도를 추정한다. NUREG/CR-6928에서는 발전소 수준의 데이터를 경험적 베이스 분석을 수행한다. 그러나 초기사건의 발생 건수가 적을 경우 경험적 베이스 분석을 통해 의미있는 분포가 도출되지 않으므로, 이런 경우는 산업체 수준에서 초기사건 빈도를 추정하게 된다.

본 고찰을 통해 국내 초기사건 빈도 추정 방법과의 차이점을 도출하였다. 국내에서는 현재 수집된 모든 사건에 대하여 초기사건 빈도를 산정하고 있으나, 미국에서처럼 트렌드 분석 등 초기사건 빈도의 적절성을 분석하는 단계가 생략되어 있으며, 발전소 수준의 초기사건 빈도 생산은 하지 않고 있다. 본 논문을 통해 검토된 미국의 방법론을 국내 초기사건 빈도 분석 및 생산에 적용하여 국내 고유의 초기사건빈도를 도출하고, 장기적으로 초기사건빈도 생산 체계를 구축한다면 이를 국내 PSA 분석에 활용하여 고품질의 PSA 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

국내 PSA 적용을 위한 해외 기기 신뢰도데이터 분석방법론 고찰 A Review on Overseas Equipment Reliability Data Analysis Methodology for Korea PSA Application

이현교 · 이한설

한국수력원자력(주) 중앙연구원

확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment) 수행에서 가장 기본이 되며 중요한 부분이 모델에 사용되는 기기들의 신뢰도데이터이다. 기기 신뢰도데이터의 신뢰성이 확보되어야만 전체 PSA 분석 결과의 신뢰성을 담보할 수 있다. 국내에서는 한국수력원자력(주)에서 개발한 “원전 신뢰도DB 관리 시스템(PRinS: Plant Reliability Information System)을 통해 기기 신뢰도데이터를 생산/관리하고 있다. 국내 신뢰도데이터는 국내에서 수집된 기기 신뢰도데이터에 미국에서 사용하고 있는 데이터를 일반데이터원으로 하여 베이지안 처리로 사용하고 있다. 최근 미국에서는 이 신뢰도데이터를 최신 통계기법 및 분석방법을 적용한 신규 데이터를 사용하고 있으며, 국내에서도 이에 따른 신뢰도데이터 분석체계의 변화가 필요하다.

본 논문에서는 현재 미국에서 최신으로 발행된 데이터원인 NUREG/CR-6928에 대하여 심도있는 검토를 통해 국내 신뢰도데이터 수집/분석체계의 적용성을 확인하고자 하였다. 첫 번째 개별 기기에 적용되는 고장모드를 검토하였다. 과거 171개 었던 고장모드는 최근(2015년 발행) 약 300개 이상으로 증가하였으며, 상세 검토결과 2가지의 개선점을 발견하였다. 먼저, 대기중인 기기와 운전 중인 기기의 기본사건을 구분하였고, 운전 중인 기기에 대해서는 처음 한 시간의 운전 실패와 그 이후의 운전실패로 구분한 것이다. 이를 전부 국내에 적용할지 여부는 반드시 검토가 필요한 부분이다. 두 번째는 기기 신뢰도데이터의 분포 추정 방법이다. 기존 분석에서는 기기 신뢰도데이터에 내재되어 있는 불확실성을 나타내기 위해 주로 대수정규분포(Lognormal Distribution)을 사용하였다면, 신규 방법론을 사용한 NUREG/CR-6928에서는 요구데이터에는 베타 분포, 시간관련데이터는 감마 분포로 구분하여 적용하였다. 이는 수집되는 데이터가 각각 이항분포와 포와송분포를 따른다는 것에 착안하여 추후 베이지안 통계처리를 보다 용이하게 할 수 있도록 결정된 것이다. 각 분포의 모수는 수집되는 데이터원에 따라 개별적으로 적용한 것도 새로운 방법론의 특징이다.

본 논문을 통해서 미국의 최신 신뢰도데이터 분석방법론을 고찰하였다. 현재 국내 신뢰도데이터 수집/분석 체계는 과거 미국의 신뢰도데이터 분석방법론에 맞추어져 있어, 최신의 방법론을 적용하기에는 무리가 따르는 것으로 검토되었다. 미국과 같이 국내에 적용가능한 고장모드 확정 및 해당 고장모드에 맞추어 데이터 수집체계를 구축하고 운전 방법에 따른 기기 신뢰도데이터 통계분석 분포를 다르게 적용할 수 있도록 시스템 수정을 수행한다면, 보다 높은 신뢰성을 가진 기기 신뢰도데이터 생산이 가능할 것으로 기대된다.

중수로 원전 정비기간 중 냉각재 정체조건시 연료피복관 온도 거동 평가 Fuel Sheath Temperature Evaluation under Stagnant Coolant Condition during an Outage in CANDU 6

고동욱 · 류의승 · 박동환

한수원(주) 중앙연구원

국내 월성 중수로는 계획예방정비 중 증기발생기 또는 냉각재펌프 정비 등의 이유로 1차 열수송계통의 냉각재를 모관까지 배수하는 절차를 수행한다. 이 조건에서 발전소는 원자로를 정지냉각계통과 연결하여 정지냉각펌프로 냉각재를 순환시키고 정지냉각계통 열교환기를 통해 원자로 내 연료의 잔열을 냉각시킨다. 이러한 운전조건에서 정지냉각계통에 대한 정비 필요성이 발생할 경우 이중화된 계통회로를 순차적으로 정비를 하는 것이 원칙이다. 그러나, 가상의 조건으로 1개 회로를 정비하는 도중 대응 회로의 작동이 불능한 경우 원자로 내의 연료는 정지냉각계통 회로를 통한 강제순환 냉각방식이 불가능하며, 원자로모관까지 냉각재가 배수되어 증기발생기를 통한 자연순환 냉각도 불가능하다. 본 논문은 이러한 상황을 가정하여 원자로 내 연료가 강제순환 또는 자연순환 냉각이 모두 불가능한 상황을 전산프로그램으로 모사하여 연료의 잔열에 의한 냉각재 및 연료피복관 온도 거동을 평가하였다.

1차계통이 모관까지 배수된 상황에서는 증기발생기를 이용한 1차계통 자연순환 냉각이 불가능하며, 발생가능성이 희박하지만 정지냉각계통 2개 루프를 일시적으로 사용할 수 없는 경우를 가정하면 정지냉각계통을 통한 강제순환 냉각도 불가능하다. 이러한 조건을 모사하기 위해 연료가 장전되는 채널 내 냉각재가 완전히 정체된 상황을 가정하여 분석하였다. 계산에 사용한 전산프로그램은 CANDU 6형 원전의 계통해석을 위해 사용하는 CATHENA 코드이고, 해석모델은 보수적 피복관 온도 예측에 사용되는 고출력 단일채널 모델(O6mod)을 활용하였다. 단일채널 모델에서 모관과 연료채널 사이의 유동정체를 반영하기 위해 입·출구 모관과 첫 번째 자관 노드 사이의 저항을 인위적으로 상당히 큰 값으로 조정하고, 연료채널 내 각 노드사이의 초기 냉각재 유속 또한 정체조건으로 입력하였다. 채널 출력은 채널의 제한출력값을 반영하였으며, 발전소 운전출력조건과 원자로 정지 이후 냉각기간동안의 붕괴열 발생율을 반영하여 산출하였다.

상기 분석모델을 바탕으로 냉각재 초기온도를 발전소 정비 시 설정온도 수준인 약 35℃로 가정하여 계산을 수행한 결과, 1시간 후 냉각재 및 피복재의 최대온도는 각각 71.9℃ 및 72.3℃였고, 냉각재가 100℃에 도달하는 데는 약 2시간 이상이 소요되는 것을 확인하였다. 결론적으로 상기 평가조건에 근거하여 냉각재를 모관까지 배수한 조건에서 정지냉각계통을 일시적으로 이용할 수 없을 경우, 연료손상을 방지하기 위하여 2시간 이내에 연료냉각을 위한 조치 수행이 필요한 것으로 확인되었다.

MSSV 개방시간 변경에 따른 중수로 과도상태 영향 검토

Effect of MSSV's Opening Time Change on CANDU 6 Transient Condition

고동욱

한수원(주) 중앙연구원

국내 중수로원전의 주증기안전밸브(MSSV)는 두 가지 기능을 한다. 한 가지는 설정된 압력에서 개방되어 2차 계통을 보호하는 기능이고, 다른 하나는 냉각재상실사고 등의 사고 시 비상노심냉각수 주입을 용이하게 하기 위해 1차계통의 압력을 낮출 목적으로 개방하는 급속냉각 기능이다. 국내 중수로원전 MSSV의 급속냉각을 위한 개방시간은 설계자료에 따라 2초 이내에 개방되도록 안전해석시 가정된다. MSSV의 급속냉각을 위한 개방은 냉각재상실사고 등이 발생시 1차 계통으로의 비상노심냉각수 주입과 관련되므로 2초 이내에 개방되어야 기존 안전해석이 유효하다 할 수 있다. 본 논문에서는 급속냉각 기능을 위한 MSSV 개방시간이 2초 이상으로 다소 지연될 경우 발전소 과도상태 중 기존 안전해석에 어떤 영향이 있는지 냉각재상실사고를 대상으로 검토하였다.

MSSV의 급속냉각을 위한 개방시간이 다소 지연될 경우 영향을 받는 사고를 선별하고자 국내 중수로 냉각재상실사고 분석결과 전체 범위를 정성적으로 검토하였고, 그 결과 ‘안전계통 가용시 IV등급 전원상실을 수반하는 일차계통 내 소형파단’ 사고 및 ‘비상노심냉각계통 손상 및 IV등급 전원상실을 수반하는 일차계통내 소형파단’ 사고(회로격리고장의 경우만 해당)의 극소형파단의 경우가 MSSV 개방 지연의 영향으로 피복관 온도상승이 조금 더 지속되는지 확인할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 이러한 두 경우의 극소형파단을 대상으로 급속냉각을 위한 MSSV 개방시간 변경의 영향을 확인하고자 전산코드를 이용한 상세 분석을 수행하였다. 분석에는 국내 중수로원전 대상 CATHENA 코드 모델을 이용하였고, 급속냉각관련 MSSV 개방시간에 약간의 지연을 가정하여 2초에서 5초로 변경하여 분석하였다. MSSV 개방시간 지연이 계통거동에 미치는 영향을 보기 위한 계통분석과 연료 피복관 온도를 확인하기 위한 고출력 단일채널(O6mod) 분석을 수행하였다.

분석결과, MSSV 개방시간을 변경함에 따라 단순히 피복관 온도가 증가하지는 않았고, 피복관 온도는 채널의 유량에 민감하게 반응하였다. 최대 피복관온도는 MSSV 개방시간이 5초인 경우 ‘비상노심냉각계통의 회로격리고장과 IV등급 전원상실을 동반한 0.3% 원자로입구 모관 극소형파단’에서 발생하였고, 이 경우에서 피복관 최대 온도는 개방시간 변경 전 511.1℃에서 개방시간 변경 후 763.7℃까지 상승하였다. 그 외의 경우에서 최대피복관 온도가 급속냉각 이전에 발생하여 영향이 없거나, 개방시간 변경으로 최대 피복관온도가 낮아진 경우도 있었다. 이와 같이 비록 일부 경우에서 MSSV 개방시간 변경으로 피복관 온도가 증가하기도 했으나, 모든 경우 피복관 온도는 800℃ 미만으로 건전성에는 영향이 없는 것으로 나타났다. 결론적으로 국내 중수로원전을 대상으로 급속냉각을 위한 MSSV 개방이 다소(5초 이내) 지연되더라도 냉각재상실사고시에는 연료 건전성에 문제가 없는 것으로 나타났다.

고신뢰도 산업계 Near Miss 관리체계 고찰

A Review of Near Miss Management System in High Reliability Industry

박정진

한국수력원자력(주) 중앙연구원

하인리히의 법칙에 따르면 하나의 중대한 사건이 발생하기까지는 29개의 경미한 사건이 존재하고, 300건의 Near Miss나 경미한 사례가 존재한다고 한다. 다양한 보호계통 및 다중성, 다양성을 기반으로 심층방어 개념으로 안전설계가 된 현대의 고신뢰도 산업계에서는 이 때문에 중대한 사건발생이 거의 없다. 이로 인해 중대한 사건으로부터 배우는 경험의 기회가 적은 편이다. 하지만 심각한 결과가 발생되지 않은 경미한 사건이나 Near Miss는 지속적으로 발생되고 있다. 이러한 경미한 사건이나 Near Miss는 중대한 사건과 원인과 상황이 동일하나, 적절한 방벽이나 신속한 조치 등으로 중대한 사건으로 이어지지 않은 경우가 대부분이다. 따라서 경미한 사건이나 Near Miss가 관리되지 않고 방치된다면 중대한 사건은 언제든 발생할수 있다. 이점이 우리가 경미한 사건과 Near Miss를 지속적으로 관리하고 개선을 해야하는 이유이다.

원자력발전소에서는 중대한 사고를 사전에 예방하기 위해 Near Miss 사례 발굴, 보고, 전파, 분석, 활용하고 있다. 산업안전측면에서 개인의 안전만을 목적으로 한 아차사례 관리는 원자력산업계에서도 유사한 수준으로 관리하고 있으나, 원자력발전소 전체의 안전성과 신뢰성을 기준으로 Near Miss에 대하여 체계적인 접근은 부족한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 현재 원자력발전소에서의 Near Miss 관리체계를 진단하고 취약점을 찾아 개선방향을 제시한다.

2021년 원전 인적행위 관련사례 경향분석

Trend Analysis of Human Performance at Nuclear Power Plants in 2021

박정진

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원전이나 대형플랜트와 같은 고신뢰도 시스템에서 설비는 지속적인 개선으로 그 신뢰도가 증가하나, 인적행위에 대한 신뢰도는 쉽게 개선할수 없다. 따라서 이러한 종사자 인적행위를 주기적으로 평가하여 취약분야를 발굴하고 이를 개선하는 등의 관리가 지속적으로 요구된다. 원자력발전소에서는 이러한 인적행위 관리를 위해 인적행위 관련사례들의 원인 기반으로 경향분석 주기적으로 수행하고 있다. 본 논문에서는 2021년 전사 발행된 CAP(Corrective Action Program)의 중요도 1,2,3등급 통지 29,841건 중 인적행위 관련 통지에 대하여 경향을 분석하였다.

CAP의 원인요소 코드는 크게 4가지 대분류로 설비신뢰도, 인적신뢰도, 운영/관리, 절차서/문서로 구성되어 있으며, 이중 인적행위 관련 원인은 설비신뢰도를 제외한 3분야로 한정되었으며, 경향분석을 위해 먼저 파레토 차트를 활용하였다. 이와 더불어 최근 5년간 원인별 추이분석을 통해 주요원인을 선정하고, 주요원인에 대한 P-control Chart를 통한 관리상한(UCL: Upper Control Limit) 초과여부를 분석하였다, 관리상한값은 평균값의 3σ 로 지정하였으며, 관리상한 초과값에 대해서는 추가 분석을 수행하였다. 또한 발전소/노형별 주요원인 검토를 통해 경향을 확인하였으며, CAP와 운전경험(Operation Experience)보고서에서의 인적행위 관련사례를 비교분석하였다.

분석결과, 관리상한을 초과하는 값 및 해당 발전소에서는 이벤트 발생 등의 원인으로 특정 기간에 해당 통지가 자주 발생한 것으로 나타났으며, 관리상한 초과에 대한 추가적인 원인 분석은 불필요한 것으로 나타났다. 또한 발전소/노형별 유사성은 유의미한 결과를 나타내지 않았으며, 운전경험과 CAP 원인코드와의 비교결과는 전반적으로 유사한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 주요 원인 및 기타 관찰 경향분석을 통해 현장점검 등에 대해서 지속적인 개선활동이 필요한 것으로 나타났으며, 경향분석 방법론에 대해서도 일부 개선이 요구된다. 도출된 취약분야에 대해서는 전사 피드백되었으며, 이를 통해 경향분석의 완결성을 높이고 보다 많은 Insight를 제공한다면 원전의 신뢰도 향상에 많은 도움이 될 것이다.

원전 근본원인분석의 원인 유형에 따른 원인분석기법 활용 방법 Selection Methods of Cause Analysis Tools by Cause Category in Root Cause Analysis of a Nuclear Power Plant

김형균

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소에서는 발전정지와 같이 발전소 운영에 지장을 줄 수 있는 사건이 발생하였을 때는 사건의 재발을 방지하기 위하여 근본원인분석(Root Cause Analysis)을 수행한다. 근본원인분석은 동일하거나 유사한 사건의 방지를 위하여 수행하는 일련의 프로세스로서 ‘사건조사’, ‘원인분석’, ‘시정조치’, ‘유효성평가’를 수행하게 된다. 원인분석기법(Cause Analysis Tool)은 근본원인분석 수행에 도움이 되는 방법들으로써 ‘사건조사’ 및 ‘원인분석’ 단계에서 사건을 정확히 파악하고 원인을 도출하거나 이를 검증하는 데 활용한다.

원인분석기법에는 ‘왜 수목분석(Why Tree Analysis)’, ‘특성요인도(어골도)’, ‘고장모드 분석(Failure Mode Analysis)’ 등이 있으며 약 12개 정도의 원인분석기법 중에서 적합한 기법을 선정하여 분석에 활용하게 된다. 원인분석기법은 사건의 종류와 특성에 따라서 적절한 기법을 선정하는 것이 중요하며 적합한 기법을 선정하기 위해서는 원인분석자의 지식과 역량이 가장 핵심적인 요소이다. 이 때문에 근본원인분석을 배우는 초심자나 수행 경험이 적은 분석자는 원인분석기법의 선정에 어려움을 겪는다. 따라서 본 연구에서는 원인분석기법을 선정하고 활용하는 데 도움이 되도록 원인분석기법을 원인의 유형에 따라서 분류하여 원인분석기법을 선정하는 방법을 제시하고자 한다.

원인분석기법의 분류는 크게 ‘사건조사’와 ‘원인분석’ 단계별로 활용되는 기법으로 나눌 수 있으며 ‘원인분석’ 시에 활용하는 기법은 설비 문제에 활용하는 기법과 인적행위 문제에 활용하는 기법 그리고 조직차원의 문제에 활용하는 기법으로 나눌 수 있다. 또한 상기한 범주 외의 원인분석기법은 범용적으로 활용할 수 있는 기법이기 때문에 공통 분석기법으로 분류할 수 있다. 이와 같이 분류하면 분류별 2~3개의 기법으로 선택 대상이 압축된다. 여기에 사건 및 기법의 특성을 고려한 활용 조건을 도출하여 기법 선택을 용이하게 하였다. 그리고 이와 같은 기법 선정방법의 타당성을 검토하기 위하여 미국 원전의 근본원인분석 보고서 41건에 대한 검토를 수행하였으며, 상기와 같은 분류 및 조건을 적용하여도 근본원인분석 수행에 문제가 없음을 확인하였다.

근본원인분석에서 원인분석기법 분류를 통한 활용방법은 근본원인분석 초보자가 쉽게 원인분석기법의 활용방법을 습득하는데 도움을 준다. 또한 근본원인분석 수행 시에 적합한 원인분석 기법을 활용하도록 함으로써 근본원인분석의 품질을 향상시키는데 기여할 것으로 기대된다.

제어봉 삽입성 평가 방안

A Evaluation Method for Control Rod Insertability

이상섭

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 제어봉은 노심 내 중성자 흡수를 통해 핵분열을 조절하여 발전소 출력을 제어한다. 또한 지진 등 비상 상황이 발생할 경우 제어봉은 원자로 내부로 신속하게 삽입되어 노심에 부반응도를 주입하여 발전소를 안전하게 정지시킨다. 이와 같이 제어봉은 발전소 출력제어 및 안전정지 기능을 수행한다. 일본의 후쿠시마 지진 이후 설계기준초과지진과 관련하여 발전소 안전성에 대한 관심이 높아짐에 따라 일본, 프랑스 등 해외에서는 제어봉 삽입성에 대한 연구가 수행되었으나, 국내에서는 미흡한 실정이다. 본 연구는 발전소 설계시 고려된 설계기준을 초과하는 지진조건에 대한 제어봉 삽입성을 평가하기 위해 제어봉 낙하 시간 데이터를 확보하는데 의미가 있다. 연구는 발전소 노심조건을 모사할 수 있도록 핵연료집합체 1다발을 대상으로 수중 조건에서 제어봉집합체가 낙하할 수 있는 시험설비 구축 및 제어봉 낙하시험으로 수행되었다. 시험설비 구성은 실제 발전소의 노심조건을 가능한 동일하게 구현하는데 중점을 두었으며, 노심을 제외한 제어봉집합체 상부의 제어봉 연장축은 시험설비의 한계로 간략하게 반영되었다. 시험에 사용된 핵연료집합체는 상용 원자력발전소의 핵연료집합체와 동일한 제작 절차에 따라 제작되었으나, 연료봉에 장입되는 우라늄 펠렛은 동일한 무게의 재질로 대체되었다. 제어봉집합체는 상용 원자력발전소에 적용되는 제어봉집합체 중 가장 가벼운 제어봉집합체 제원을 기준으로 제작되었으나, 일부 부품은 대체 또는 공간적 제약으로 길이가 변경되었다. 제어봉 낙하시험은 다양한 조건을 모사하기 위해 정상, 진동 및 굽힘 변형의 3가지 조건에서 진행되었으며, 각 조건에서 제어봉 낙하시간을 측정하였다. 모든 시험에서 유속은 고려되었으며, 진동시험은 액추에이터를 통해 핵연료집합체에 물리적 변형을 가한 후 제거한 상태에서, 굽힘 변형시험은 물리적 변형이 가해진 상태에서 진행되었다. 제어봉 낙하시간 관련 요건은 제어봉이 인출된 상태에서 90% 삽입까지 지연시간 0.5초를 포함하여 4초 이내 삽입되어야 한다. 굽힘 변형시험은 C형 변형 및 S형 변형 조건에서 수행되었다. 제어봉 삽입성 평가를 위해 수행된 제어봉 낙하시험 결과는 제어봉 낙하 시뮬레이션 프로그램 개발에 활용될 예정이며, 개발된 시뮬레이션 프로그램을 통해 설계기준초과지진이 제어봉 삽입성에 미치는 영향을 평가할 계획이다.

제어봉집합체의 삽입한계 검토

A Review of Insertion Limits of Control Rod Assemblies

이상섭

한국수력원자력(주) 중앙연구원

신재생에너지를 통한 발전 비중이 높아짐에 따라 전력시장에서 원자력발전의 역할이 변화하고 있다. 지금까지 원자력발전은 경제성을 바탕으로 전력망에서 기저부하를 담당하였으나, 향후에는 태양광 발전, 풍력 발전 등 신재생에너지 발전원과 연계한 원자력발전의 탄력운전이 요구될 것으로 예상된다. 원자력발전은 신재생에너지 발전량이 많은 시간대에는 출력을 줄이고, 신재생에너지 발전량이 적은 시간대에는 출력을 올리는 탄력적인 운전전략이 필요하며, 그에 따른 관련 기기의 영향 검토가 수반되어야 한다. 특히, 원전이 탄력운전을 수행할 경우, 발전소 출력조절을 위해 제어봉집합체의 잦은 구동으로 제어봉집합체의 사용량은 많아지고 삽입 깊이도 증가한다. 제어봉집합체 삽입은 노심출력분포에 직접적인 영향을 미치므로, 원전은 노심 설계첨두출력 제한치에 의해 제한된 출력분포가 유지됨을 보장하기 위해 제어봉집합체의 삽입한계를 설정하고 있으며, 출력운전 동안 감시한다. 원전은 조절 제어봉집합체 및 부분강 제어봉집합체의 삽입한계를 발전소 운영기술지침서에 따라 관리한다. 본 연구는 전형적인 탄력운전 전략에 따른 조절 제어봉집합체 및 부분강 제어봉집합체의 단기 및 장기 삽입한계의 영향을 검토하였다. 가정한 발전소 탄력운전은 100%-50%-100%(2시간-6시간-2시간-14시간) 운전조건이며, 단기 및 장기 삽입한계의 기준은 각각 30 EFPD(Effective Full Power Day) 및 365 EFPD이다. 또한 운전 중 제어봉집합체 삽입한계를 감시하기 위한 프로그램 개발도 검토하였다. 감시 프로그램은 EFPD, 조절 제어봉집합체 위치 및 부분강 제어봉집합체 위치를 입력으로 활용한다. EFPD를 계산하기 위해서는 원자로출력이 필요하며, 조절 및 부분강 제어봉집합체의 위치는 각 해당 제어봉집합체 그룹 위치에 대한 정의와 연계한다. 제어봉집합체 그룹의 위치는 “그룹 내 모든 제어봉 위치 평균값”, “그룹 내 최저 및 최고 위치를 제외한 나머지를 평균한 값”, “그룹 내 최저 위치값” 등 다양한 정의를 고려할 수 있다. 본 연구에서 수행한 탄력운전에 따른 제어봉집합체의 삽입한계 검토결과는 국내 원전의 탄력운전 기술개발 및 운전 전략수립에 활용될 예정이다.

PSA 적용을 위한 최신 신뢰도데이터 평가방법론 및 검증절차 개발 전략
Development Strategy of the Latest Reliability Data Assessment
Methodologies and Verification Procedures for PSA Application

황석원* · 이현교 · 이한설

한국수력원자력(주) 중앙연구원

확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)를 수행함에 있어 가장 기본적인 근간이 되는 것이 신뢰도데이터이다. PSA 적용을 위한 신뢰도데이터는 기기고장 및 이용불능도, 초기사건, 공통원인고장, 인적오류 등이 있으며, 본 논문에서는 주로 기기고장 데이터에 대한 평가방법론 및 검증절차 개발과 관련한 주요 개발 전략에 대해 다루고자 한다. 주기적안전성평가(PSR: Periodic Safety Review)내 PSA와 사고관리계획서(AMP: Accident Management Program) PSA가 법제화됨에 따라 신뢰도데이터에 대한 품질과 적용에 대한 기술근거 확보가 매우 중요한 현안으로 대두되고 있다.

본 연구에서는 최신 신뢰도데이터 평가방법론 도입과 데이터에 대한 체계적인 검증절차 개발을 위하여 다음의 몇 가지 개발 전략을 제시하고자 한다. 첫 번째로 최신 신뢰도데이터 평가방법론 도입을 위하여 美 NRC, INPO 및 아이다호 국립연구소(INL: Idaho National Lab)에서 주기적으로 발행되는 NUREG/CR-6928 품질 수준의 신뢰도데이터를 개발하고자 한다. 이를 위해 벤치마킹 및 방법론에 대한 상세검토를 우선적으로 수행하고, 국내 적용을 위한 기술적으로 주요한 개선 항목들을 정리하였다. 두 번째로 현재 국내 원전의 신뢰도데이터 수집에 적용되는 원전 신뢰도DB 시스템(PRinS: Plant Reliability Data Information System)의 개선을 위해 현재 도입이 진행 중인 다중방호대응설비(MACST: Multi-Barrier Accident Coping Strategy) 추가 및 통계분석을 위한 기본 입력값 생성, 전 원전의 기기 신뢰도데이터 생산 및 NUREG/CR-6928을 참조로한 국내 고유 데이터 북을 개발하고자 한다. 국내 기기 신뢰도데이터는 PWR노형 전체에 대한 통계분석을 통해 기기고장 및 이용불능도 데이터를 생산하여 공통으로 적용 하고자하며, CANDU 노형은 해당 노형에 대해서만 종합하여 베이지안 처리 후 국내 PSA 모델에 적용할 계획이다. 마지막으로 생산된 신뢰도데이터의 품질확보와 신뢰성 제고를 위해서는 데이터 검증 단계가 매우 중요하다. 이러한 데이터의 품질확인을 위해서는 ASME PRA Standard에 의거하여 자체평가를 수행할 예정이며, 검증절차의 체계화를 위해 신뢰도데이터 검증 절차서를 개발하여 시범적용 할 예정이다.

본 연구를 통해 도출된 결과는 신고리5,6호기 건설인허가 PSA, 10년 주기로 개정되는 PSR내 PSA 및 계속운전 PSA 모델에 직접 적용될 예정이다. 또한 NUREG/CR-6928 수준의 국내 고유 데이터 북 개발을 통하여 PSA에 적용되는 데이터의 품질 제고와 기기별 고장 기준 표준화 제시를 통하여 객관성과 일관성이 확보된 고유 기기 신뢰도데이터가 생산되고 관리 될 것으로 기대한다.

다중방호대응설비의 PSA 적용을 위한 모델 및 데이터 생산 개발 전략
Development Strategy of MACST Modeling and Reliability Data
Production for PSA Application

황석원* · 김경수 · 이한설
한국수력원자력(주) 중앙연구원

2011년 후쿠시마 원전사고 이후, 국내 원자력의 안전성과 대국민 신뢰 확보를 위해 전 원전 후쿠시마 후속조치, 스트레스테스트 이행 및 원자력 안전법 강화조치에 따라 사고관리계획서(AMP: Accident Management Program) 개발 등이 주요 현안으로 제시되었으며, 현재 이행 중에 있다. 국내 원전에서는 중대사고 예방측면에서 다중방호대응설비(MACST: Multi-Barrier Accident Coping Strategy)가 도입되어, 상세설계 및 절차서 개발이 진행 중에 있으며, PSA 측면에서는 이러한 MACST 설비를 모델링하고 리스크 평가를 위한 기기고장데이터 생산이 중요한 현안으로 대두되었다.

본 논문에서는 참조원전의 PSA 범위별 MACST 설비 고려 항목을 정리하였으며, 장기교류 전원상실사고(ELAP: Extended Loss of All AC Power)와 최종열제거원 상실사고(LUHS: Loss of Ultimate Heat Sink) 사건수목 표제에 고려를 위한 전략을 수립하였다. 첫 번째로 ELAP 대처전략으로 발전소정전사고(SBO: Station Black-Out)와 소외전원상실사고 비상디젤발전기 실패 적용시, 이동형 발전차와 저압이동형 펌프 등을 사건수목과 고장수목에 모사하는 전략을 수립하였다. 두 번째로 LUHS 대처전략으로 1차기기 냉각수완전상실사고에 원자로냉각재계통 재고량 유지를 위해 고압이동형 펌프를 고려하는 전략을 수립하였다. 세 번째로 장기재고량제어를 위한 대처전략으로 증기발생기세관파단사고에 원자로 건물내 재장전수탱크 재고량 유지를 위한 저압이동펌프를 고려하는 전략을 수립하였다. 마지막으로 MACST 설비의 지진구간별 PWROG 보정인자를 활용하여, MACST 설비의 기기고장데이터를 생산하였다. 또한 전출력과 정지저출력시 MACST 설비의 인적오류 확률값을 도출하였으며, 특히 지진 사건에 대한 Shaping Factor 적용시 美 Surry 원전의 PSA 방법론에서 제시된 방법을 활용하였다. 이는 지진 발생사건 이후 각 시간 구간을 단기, 중기, 장기로 구분하여 지진 크기에 따라 MCR과 Local에 대해 HEP Shaping Factor를 적용하는 방법(Time after seismic event)이다. 그리고 HEP Shaping Factor 적용은 MACST 설비의 선배치 전략에 따른 시간 정의와 노심손상방지용 및 중대사고 대처 목적에 따라 별도 고려하였다.

본 연구에서 도출된 결과는 현재 진행 중인 AMP PSA, 주기적안전성평가(PSR: Periodic Safety Review) PSA, 계속운전 PSA 및 신규원전 PSA에도 적용 가능하며, 향후 모든 MACST 설비에 대해 상세설계 완료 후에는 "As-is, As-operated"된 PSA 모델이 완성될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 중장기적으로 MACST 설비에 대한 국내 고유데이터 수집을 통하여, 기기고장률 및 이용불능도도 생산하여, PSA 모델에 반영하고 주기적으로 개정시에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

최근 3년간 한수원의 해외운전경험 활용 현황 및 경향 분석

A Study on the Use of External Operating Experience and Trend Analysis in Korea hydro & Nuclear Power Inc. in the last three years

최양호

한국수력원자력(주) 중앙연구원

1979년 TMI 원전사고를 겪으면서 원자력 발전운영 협회(INPO: Institute of Nuclear Power Operations, 이하 INPO)가 탄생하였고, 1989년 체르노빌 원전사고를 계기로 세계원전사업자협회(WANO: World Association of Nuclear Owners, 이하 WANO)가 탄생하였다. 전 세계의 원자력발전사업자를 포함한 원자력산업계는 이러한 국제기구를 통해 원자력발전의 안전성과 성능향상을 위한 여러 가지 활동을 수행하고 있으며, 원자력발전소의 사건·사고 보고서인 운전경험보고서를 공유하고 활용하는 것 또한 이러한 활동의 일환이다.

원자력 발전소 운영사는 원전 내 사건, 사고가 발생하면 WANO 운전경험 프로그램 지침서에 제시한 양식을 이용해 운전경험보고서를 작성한 후 해당 발전소가 소속된 4개의 WANO 지역 사무소(애틀란타, 파리, 모스크바, 도쿄)에 작성한 운전경험보고서를 제출한다. WANO 지역센터의 운전경험담당자는 각 발전소에서 제출한 보고서를 검토 한 후 특이사항이 없는 경우 해당 보고서를 WANO 런던 본사에 제출한다. 지역센터에서 제출된 운전경험보고서는 WANO 런던 본사 성과분석(PA: Performance Analysis)의 최종 승인을 거쳐 WANO 운전경험 데이터베이스에 저장된다. 원전사업자들은 WANO 운전경험 데이터베이스에 저장된 전 세계 원전의 운전경험보고서를 검토하고 교훈을 도출하여 발전소에 잠재되어 있는 취약점을 제거하는 활동을 한다. 이를 통해 타 발전소에서 경험한 동일한 사건, 사고가 자신의 발전소에서 재발하는 것을 예방하고 있다.

본 연구에서는 지난 3년간 WANO에서 발행한 해외운전경험보고서를 한국수력원자력(이하 한수원)이 어떻게 활용하였는지를 소개하고자 한다. 한수원의 운전경험관리프로그램인 원자력기술정보시스템(KONIS: KHNP Nuclear Informaion System)와 운영개선프로그램(CAP: Corrective Action Program)에 등록된 최근 3개년(2019년~2021년)의 데이터를 분석하여 활용결과를 ① 절차서 개정, ② 운영방법 개선, ③ 설비점검/개선, ④ 교육훈련, ⑤기적용, ⑥ 비적용, ⑦ 기타의 7개 유형으로 분류해 보고 운전경험정보가 실질적으로 활용(① 절차서 개정, ② 운영방법 개선, ③ 설비점검/개선)된 비율을 기간별로 분석해 보았다.

지난 3년간 국내원전에서 활용한 해외운전경험보고서 활용 건수(OE CAP 기준)는 917건으로 확인되었으며, 연도별 실질활용률은 2019년 19.47%, 2020년 22.93%, 2021년 29.43%로 점진적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 즉, 한수원의 해외운전경험 실질적 활용률은 시간에 따라 전반적인 증가 추세를 보이고 있었다. 이러한 결과를 통해 한수원의 해외운전경험 활용성고가 점진적으로 개선되고 있으며, 발전소의 안전성과 성능향상에 기여하고 있음을 알 수 있었다.

다빈도 사건 선제대응을 위한 운전경험 분석 및 관리시스템 개발 Operating Experience Analysis and Management System Development for Preemptive Response to Frequent Incidents

최양호

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소의 운영 회사인 한국수력원자력(이하 한수원)이 운영 중인 원자력발전소는 운영 중 사건, 사고가 발생할 경우 원자력기술정보시스템(KONIS)을 통해 운전경험보고서를 작성하고 있다. 또한 작성된 운전경험보고서를 타 발전소와 공유함으로써 동일 또는 유사한 사건이 재발되는 것을 예방하기 위한 노력을 하고 있으며, 이를 통해 원전의 안전성과 신뢰성을 제고하고 있다. 하지만 운전경험 활용이 미흡하여 유사한 사건이 재발되는 경우도 발생하고 있어 한수원에서는 자주 발생하는 다빈도 사건을 파악하고 사전에 이를 예방 또는 예측할 수 있는 운전경험 기반의 분석체계를 갖추고 관리하는 시스템에 대한 필요성이 제기되었다. 이에 운전경험의 분류체계를 기반으로 취약분야를 예측, 분석 및 관리할 수 있는 시스템을 개발 완료하였다.

운전경험 분석 및 관리시스템 개발을 통해 기존의 운전경험처리 프로세스에 ‘통계산출 및 분석’ 과정이 추가되었다.

기존 프로세스: ① 운전경험보고서 작성 ⇒ ② 운전경험분류 ⇒ ③ 데이터베이스에 운전경험보고서 저장

개선 프로세스: ① 운전경험보고서 작성 ⇒ ② 운전경험분류 ⇒ ③ 데이터베이스에 운전경험보고서 저장 ⇒ ④ **운전경험분류 코드 통계산출 및 분석**

운전경험 분석 및 관리시스템은 크게 ‘사건발생 경향 분석’을 하는 부분과 ‘취약분야 도출’하는 부분, 크게 2개 부분으로 구분된다. ‘사건발생 경향 분석’ 부분에서는 국내원전에서 발생하는 중요한전경험(보고대상사건, CAP 1등급사건, E&I 보고서)의 발생빈도를 계량화(점수화)하여 특정기간 중 전사 및 발전소별 사건발생 현황과 경향을 파악할 수 있다. ‘취약분야 도출’ 부분에서는 사건 분석을 위해 Questioning Method(사건 파악을 위해 반드시 필요한 6가지 원칙인 5W-1H : WHO, WHEN, WHERE, WHAT, WHY, HOW)기반으로 기존의 438개의 WANO 운전경험 분류 코드를 재분류하여 사건의 취약분야(다발생 분야)를 도출할 수 있도록 하였다.

운전경험 분석 및 관리시스템을 통해 추후 가동원전의 성능저하 징후를 조기에 발견하고 효과적으로 관리하여 해당 발전소의 사건 발생을 예방하여 잠재적인 사고의 확대 방지에 많은 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 운전경험 데이터를 활용한 웹 기반의 관리시스템을 통해 사건의 취약분야를 효율적으로 파악할 수 있어 발전소 성능개선 및 안전성 제고에 기여할 수 있을 것이다.

PSA기법을 활용한 원전조종사 시뮬레이터 교육 훈련 시나리오 적용에 대한 연구 A Study for Training Program for Nuclear Power Plant Operators using PSA

신정욱

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소에서 근무하는 원전조종사는 비정상 및 비상사고 발생 시 대처 능력을 유지하기 위해 매년 정해진 시간동안 중앙제어실과 동일한 형태의 시뮬레이터를 활용한 실습 교육을 이수하고 있다. 그리고, 운전원의 훈련시간은 법정교육 시간을 만족시키는 범위 내에서 운영되므로, 훈련 시나리오에 대한 선정은 실습 훈련의 효과를 극대화하기 위해서 대단히 중요하다. 이 훈련시나리오 선정을 위한 도구로서 확률론적 안전성평가(PSA)를 활용하는 것을 제안하고자 한다.

확률론적 안전성평가(PSA)는 원전의 기기 고장, 운전원 오류 및 외부 환경 요인까지 포함하는 종합적 안전성평가 도구로서 원전에서 발생할 수 있는 모든 중요한 사고 시나리오들을 파악하고 그 발생 가능성 및 결과를 정량적으로 계산함으로써 대상 원전의 안전성을 평가하는 도구로 활용되고 있다.

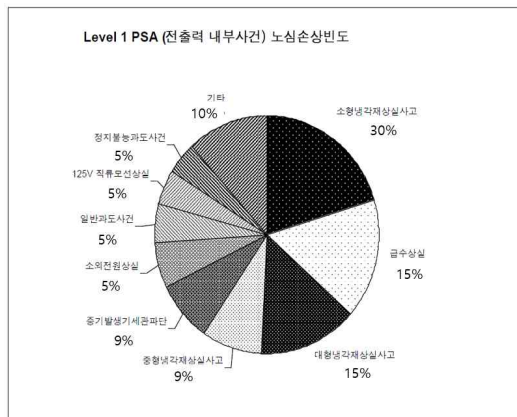


그림1. Level 1 PSA 노심손상빈도

그림1.은 PSA 결과로부터 도출된 사고별 노심손상빈도를 예시적으로 작성하였다. 노심손상에 영향을 주는 사고 중 그 확률이 높은 소형냉각재상실사고(30%), 급수상실(15%), 대형냉각재상실사고(15%)는 다른 사고들에 비해 더 훈련이 요구될 것이다. 그리고 약 5% 노심손상빈도를 가지는 사고라 할지라도 훈련에서 배제해서는 안될 것이다. 그러므로 비슷한 사고 유형을 묶고, 확률에 따른 훈련 우선순위를 적절히 선정하는 것이 필요하다. 그리고 복합적으로 발생 가능한 사고에 대한 대처 훈련도 필요하므로 이를 고려하여야 한다.

상기 기준에 따라 비상운전절차 훈련 시나리오를 예시적으로 선정해보면 다음과 같다.(가정 사항: 훈련기간동안 총 12회의 시뮬레이터 실습 수행). ①단순원자로정지: 1회, ②냉각재상실사고: 3회 (소형, 중형, 대형, 각1회씩), ③증기발생기세관파단: 2회, ④증기과단: 1회, ⑤모든급수상실: 2회, ⑥소외전원상실: 2회, ⑦모든교류전원 상실: 1회, (*)정지불능과도사건은 모든 사고에서 중복하여 훈련 가능함. 노형별 PSA 노심손상빈도는 상이하므로, 노형에 최적의 커리큘럼을 위의 예시와 같이 선정 가능하다.

위와 같이 PSA결과로 도출된 노심손상빈도 정보를 시뮬레이터 훈련 커리큘럼에 적용하고, 이를 운전원 훈련에 활용한다면, 실습 훈련의 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

제어 계전기 일반규격품 품질검증을 위한 고장모드 영향분석에 대한 고찰 A Study on Failure Mode Effect Analysis for Commercial Grade Item Dedication of Control Relay

최재훈 · 이현용

한국수력원자력 중앙연구원

제어 계전기(Analog Control Relay)는 전압, 전류, 상(Phase), 온도, 레벨 등을 감시하여 설정값 이상 또는 이하인 상황이 발생하는 경우 다른 기기나 시스템이 손상을 받지 않도록 접점 출력을 제공하는 기능을 수행한다. 제어 계전기는 감시변수를 측정하고 설정치와 비교하는 기능을 수행하는 측정 회로부와 코일을 여자시켜 접점 신호를 출력하는 제어회로부로 구성되어 있다. 본 논문에서는 원자력발전소의 전기 1급(Class 1E) 계측제어설비에 사용되는 제어 계전기에 대해 일반규격품 품질검증의 기술평가 기초가 되는 고장모드 영향분석(FMEA, Failure Mode Effect Analysis)에 대해 살펴보고자 한다.

일반규격품 품질검증이란(CGID, Commercial Grade Item Dedication), 안전관련 설비를 대체하기 위하여 일반규격품을 구매하여 사용해야 할 경우, 그 일반규격품이 안전관련 설비에 적용되는 안전등급 및 등급별 규격에 따라 설계 및 제작된 것과 동등한 수준으로 의도된 안전기능을 발휘할 것이라는 합리적인 보증을 제공하기 위해 수행되는 수락 과정이다. 따라서 원전용 일반규격품 품질검증은 기술평가(Technical Evaluation)와 수락(Acceptance)으로 구성된다. 제어 계전기에 대한 첫 번째 확실한 고장모드는 코일 손상이다. 이에 대한 영향분석은 코일의 절연 손상 등 코일에 여자전류가 흐르지 않아 접점을 출력하지 못한다. 이에 따라 제어 동작을 위한 접점 출력을 다른 기기나 시스템에 제공하지 못하여 목표하는 제어 동작을 수행할 수 없다. 두 번째 확실한 고장모드는 접점 접촉 실패가 있다. 코일의 성능 및 절연성능이 저하되어 간헐적으로 접촉을 실패하게 된다. 세 번째와 네 번째 확실한 고장모드는 정상 운전범위에서 접점이 출력되지 않는 경우와 비정상 운전범위에서 접점이 출력되는 경우이다. 다섯 번째 확실한 고장모드는 규정된 시간 내에 접점이 출력되지 않는 경우이다. 이에 대한 영향분석은 측정부의 기능 저하, 여자전류 손실로 인한 전자석의 자력 부족 및 기계적 노화로 접점의 단락 및 개방 시간이 늦어져 원하는 접점 출력을 규정된 시간 내에 다른 기기나 시스템에 제공하지 못하여 목표하는 제어 동작을 수행하지 못하는 결과를 가져온다.

원전 제어 계전기의 일반규격품 품질검증을 위한 확실한 고장모드와 영향분석을 통해 안전관련 설비에 적용되는 안전등급 및 등급별 규격에 따라 설계 및 제작된 것과 동등한 수준을 확인할 수 있는 적합한 필수특성을 도출할 수 있을 것이다.

중수로 개량연료 개정 임계열속 상관식에 대한 임계채널출력 민감도 분석 Critical Channel Power Sensitivity Analysis using Updated Critical Heat Flux Correlation for CANDU6 37M Fuel

오재용 · 류의승 · 박동환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원전의 노심열수력 분야는 출력운전 중 일차계통 냉각재가 고온상태인 연료와 접촉하는 열전달 매커니즘을 분석하여 연료피복관에서의 임계열속 발생 여부를 해석한다. 임계열속 발생은 원전 연료 손상에 주요한 영향을 미치므로, 충분한 열적여유도 유지 여부를 검증하는 노심열수력 해석은 안전한 원전운영 및 노심관리를 위해 매우 중요한 요소이다. 임계열속은 고온의 연료피복관 표면에서 발생하는 핵비등이 막비등으로 전환하는 드라이아웃이 발생하는 순간의 열속이나 출력에 해당하며, 냉각재가 피복관 표면을 접촉하여 냉각시킬 수 없어 표면 온도가 급격히 상승되면서 피복관 손상으로 이어질 수 있으므로 발전소 운전상태를 반영한 정확한 분석이 필요하다. 중수로 노심에서는 임계열속이 발생하는 연료채널의 출력을 임계채널출력으로 정의하며, 중수로 노심열수력 전산해석코드인 NUCIRC를 사용하여 발전소 운전상태를 모델링하여 임계채널출력을 계산한다. 계산된 임계채널출력은 열적여유도 해석 및 국부과출력보호 정지설정치 평가 등 노심 안전설계 및 인허가 등에 활용하므로 평가에 활용되는 열수력 상관식, 전산해석코드 등의 개정시는 변경에 따른 주요인자들의 변화량 등의 민감도 분석이 필요하다.

본 연구는 NUCIRC 코드 신규 버전이 개발됨에 따라, 중수로 정상운전조건에서의 일반적인 유량, 입구모관온도, 모관간차압 등의 열수력 조건을 가정하여 신규 버전으로 발전소를 모델링하였다. NUCIRC 코드는 중수로 노형, 연료에 따라 다양한 상관식 및 관련 인자를 적용하여 평가할 수 있으며, 신규 버전은 최근 수행된 임계열속 등의 열수력 시험자료를 반영하였다. 임계열속 및 기포발생 시작지점 상관식은 캐나다 CNL(Canada Nuclear Laboratory)에서 생산하였으며, Stern Laboratories가 유량, 온도, 압력 및 압력관 크립 등 다양한 조건에서 시험을 수행하였다. 최신 NUCIRC 코드는 국내 중수로에서 사용하는 연료인 37M 대상으로 경년열화를 고려한 최대의 압력관 크립을 반영하여 개정 상관식을 추가하였다. 본 연구에서는 최신버전의 노심열수력 전산코드를 이용하여 37M 연료에 대한 기존 및 개정 임계열속 및 기포발생 시작지점 상관식을 적용한 임계채널출력을 산출하여 신규 상관식 개정에 따른 민감도 평가를 수행하였다.

정상운전조건에서 평가된 임계채널출력은 기존 상관식에 대하여 전체채널 평균 7,424kW, 최소 임계채널출력은 V06 채널의 4,523kW로 계산되었다. 개정 상관식으로 평가한 결과는 전체채널 평균 7,423kW, 최소 임계채널출력은 V06 채널의 4,487kW로 계산되었다. 상관식 개정에 따른 임계채널출력 민감도는 전체채널 평균 약 0.002 % 감소, 최소 임계채널출력은 약 0.793% 감소하였다. 따라서, 개정 상관식은 기존 상관식에 비해 중수로 정상운전조건에서 임계채널출력을 오차범위 내에서 유사하거나 보수적으로 평가함을 확인하였다.

향후 중수로의 안전성 분석을 위해 운전과도상태, 사고조건 및 비정상운전조건에서의 상관식 개정이 임계채널출력에 미치는 영향을 파악이 필요하므로, 다양한 조건에서의 민감도 평가를 추가 수행할 계획이다.

압력관 크립조건 확장에 따른 37M 연료 임계열속 상관식의 적용성 평가 Applicability of 37M Critical Heat Flux Correlation for Condition beyond the Range of Pressure Tube Creep

오재용 · 류의승 · 박동환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

압력관 크립은 중수로 원전을 운영하는 동안 지속적으로 금속 재질의 압력관이 고온의 열 출력 및 방사선조사에 노출됨에 따라 내경이 증가하여 확관되는 현상이다. 크립으로 인한 압력관 내경이 증가하면 냉각재 중 일부 유동이 연료다발을 우회하여 연료냉각 효율을 감소시키고 임계열속을 감소시킨다. 임계열속에 미치는 영향을 고려하면 압력관 크립은 연료냉각 감소에 따른 원전연료 손상에 직접적인 영향을 주므로 노심열수력 분석과 안전해석에 중요하게 고려되는 요소이다. 중수로 원전은 계획예방정비 중에 압력관 내경확관을 측정하여 압력관 크립의 진행 정도를 지속적으로 확인한다. 기존의 노심열수력 해석에 적용된 임계열속 및 기포발생지점 상관식은 압력관 크립이 최대 약 5%까지의 확관되는 조건에 대하여 캐나다 Stern Laboratories의 실험 결과를 바탕으로 생산하였다. 캐나다 Bruce 원전을 비롯한 일부 중수로 원전은 계속운전에 따른 경년열화가 진행되면서 미래에 압력관 크립이 5.1%를 넘는 상태까지 진행할 수 있다고 평가하였다. 이에 본 연구에서는 37M 연료의 압력관 크립을 5.1%까지 고려한 기존 상관식을 활용하여 5.1% 이상 압력관 크립조건을 평가하는 것이 타당한지 평가한다. 비록 최근 Stern Laboratories가 37M 연료를 대상으로 압력관 크립이 더욱 확관된 조건으로 실험하여 데이터를 생산하고 신규 상관식을 생산했지만, 상황에 따라 기존 상관식을 압력관 크립이 5.1%를 초과하는 범위까지 적용 가능한지 확인이 필요하다.

임계채널출력 등의 비교를 통한 상관식 확장 적용타당성 평가는 중수로 노심열수력해석코드인 NUCIRC의 최신버전을 활용하였으며, 일반적인 중수로 정상운전조건의 유량, 입구모관 온도, 모관간차압 등의 열수력 조건을 동일하게 가정하여 모델링하였다. 최신 NUCIRC 전산 코드는 압력관 크립 5.1%까지 고려한 기존 상관식 및 6.8%까지 확관된 압력관 조건을 고려한 신규 상관식을 포함한다. 따라서, 기존 상관식을 적용하여 압력관이 5.1% 이상 확관된 조건의 임계채널출력을 계산하고, 동일한 크립에 대하여 신규 상관식을 적용하여 계산할 수 있다. 기존 상관식을 적용하여 5.1% 이상의 크립이 진행된 경년열화조건의 임계채널출력을 신규 상관식을 적용한 결과와 비교하여 기존 상관식을 적용한 결과가 유효한지 확인하였다.

5.1% 이상의 크립이 발생한 경년열화상태인 중수로의 정상운전조건에서 신규 상관식을 적용한 임계채널출력은 전체채널 평균 7,158kW, 최소 임계채널출력은 4,372kW(V06 채널)로 평가되었다. 동일한 조건에서 기존 상관식을 적용한 임계채널출력은 전체채널 평균 7,147kW, 최소 임계채널출력은 4,403kW(V06 채널)로 평가되어 평균 임계채널출력은 약 0.15%, 최저 임계채널출력은 약 0.71%의 편차가 나타났으며, 이는 신규 상관식의 오차 범위 내에 존재하는 것으로 확인되었다.

기존 상관식의 평가값이 신규 상관식의 평가값과 오차 범위 내 유사하게 나타나 기존 상관식 적용은 산술적 보수적인 결과를 나타내는 것으로 평가되었다. 그러나, 5.1%를 초과하는 크립조건에 대하여 개정된 임계열속 상관식을 적용할 수 없는 조건을 제외하고는 신규로 개발된 임계열속 상관식을 적용하는 것이 타당하다.

원자력발전소 터빈 현황, 검사 및 건전성 평가에 대한 고찰

A Study on the Current Status of Nuclear Power Plant Turbine, Nondestructive Inspection & Soundness Assessment.

문균영 · 김왕배

한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소

1. 개요

터빈은 원자력 및 화력 발전소에서 증기발생기(Steam generation)를 통해 생산되는 증기로 터빈 블레이드를 회전시켜 열에너지를 운동에너지로 변환 위해 발전기를 사용하여 전기를 생산하는 매우 중요한 설비이다. 터빈 설계수명 동안 예측하기 어려운 조건(출력감소에 따른 기동횟수, Steam 조건, 수질관리, 습분침식 등)으로 터빈 건전성에 영향을 주게 되어 발전소는 주기적인 분해점검과 공급사 메뉴얼을 지침으로 하여 터빈 주요 구성품에 대하여 비파괴검사 등을 통해 해당 부위의 건전성을 확인 및 점검을 수행하고 있다.

2. 국내 원전 증기터빈 현황

표.1 호기별 터빈 공급사 현황

노형 형식	발전소	터빈공급사	제작사별/건설현황
OPR1000	한빛/한울 3,4	두중(GE)	지멘스(통웨스팅하우스) 2
	한빛/한울 5,6	두중(GE)	
	신고리/신월성 1,2	두중(GE)	
APR1400	신고리 3,4	두중(GE)	ALSTOM 2
위 노형 외	고리 2,3,4	고압터빈:GEC 저압터빈:ABB	ALSTOM(통GEC) 3
	한울 1,2	고압터빈:ALSTOM 저압터빈:ALSTOM	두산중공업(700MW) 3
	한빛 1,2	고압터빈:ALSTOM 저압터빈:Siemens	두산중공업(표준원전) 12
	월성 2,3,4	두중	두산중공업(APR1400) 2 4

*원전 터빈 원공급사는 GEC, Parsons, ALSTOM(프랑스),Westinghouse, GE(두산중공업)로 다양한 설계의 증기터빈이 운전되고 있으며, 현재 이들 공급사 중 GEC, ABB, ALSTOM은 GE로 합병되었으며, Westinghouse는 SIEMENS로 합병되었다.

3. 터빈 손상 원인 및 손상사례

- 가. 응력부식균열(Stress Corrosion Crack): 높은 항복강도를 가진 재료와 인장응력이 높게 걸리는 지점, 습한 환경에 노출될 경우 응력부식균열이 발생 될 가능성이 크다.
- 나. 피로 및 부식피로: 부식 환경에서 운전될 때 재료의 피로강도 이하에서 파손이 발생하는데, 증기 내 불순물 등 환경이 부식피로를 가속시킨다.
- 다. 외부 유입물질: 증기터빈 외부에서 증기 유로 내부로 유입된 물체들이 증기터빈 구성품과 충돌하여 발생하는 손상을 FOD(Foreign Object Damage)라 한다.
- 라. 터빈 손상사례

- 1) Donald C. Cook 1호기 터빈 사고(미국): '08.9.20 일 저압터빈 최종단 동익3개가 파단되어 터빈-발전기축, 지지대, 관련 보조계통의 손상을 초래하는 사고 발생.
- 2) Susquehanna 1,2호기 저압터빈 최종단 동익 균열 발견(미국): 저압터빈로터 자분탐상검사서 저압터빈 전기축 최종단 동익2개의 루트부에서 균열이 발견함.
- 3) Pickering B7호기 고압터빈 중공축(Hollow Shaft)내 균열발견: '16.11.10 예방정비중 고압터빈 중공축(Hollow Shaft)과 스터브축(StubShaft)을 체결하는 탭 볼트 홀과 고

정핀홀에서 균열이 발견됨.

4. 일반적인 공급사별 터빈 점검(검사)주기 및 비파괴평가

표.2 공급사별 터빈정비(점검) 및 검사(점검)주기 현황

공급사	점검방법	점검주기	비고
GE 社(두중)	일반점검	3년	EOH : Equivalent Operating Hours
	분해점검	6년	
ALSTOM	고압 터빈	일반점검	
		50,000 EOH(약6년)	
		분해점검	
		100,000 EOH(약12년)	
Siemens	저압 터빈	일반점검	
		25,000 EOH(약3년)	
		분해점검	
		100,000 EOH(약12년)	
Siemens	일반점검	25,000/75,000/125,000 EOH	
	부분 분해점검	50,000/150,000 EOH	
	분해점검	100,000/200,000 EOH	

표.3 터빈 비파괴검사 범위 및 방법(두중 터빈 로터 NDE기준)

구분	검사범위	검사방법	검사주기
고압 터빈	전체표면	MT, VT	터빈 완전분해 정비시
	-로터, 블레이드,패킹,저널, 커플링	MT, VT	10년
	로터 중심공	MT, UT	
	블레이드 체결부	UT	
저압 터빈	전체표면	MT, VT	터빈 완전분해 정비시
	-Shaft, Wheel, 블레이드, 패킹, 저널, 커플링, 기어		
	Pinned Finger 형식 블레이드의 핀	UT	6년
	블레이드 체결부		
Wheel -Wheel Bore, Keyway표면, Bore 인접부			

5. 비파괴검사 방법

터빈 비파괴검사는 원전 계획예방정비기간(O/H)중 제작사 매뉴얼에 따른 정해진 주기로 표면검사인 육안검사(VT), 자분탐상검사(MT), 액체침투탐상검사(PT) 또는 와전류탐상검사(ECT)가 대부분 적용되고 체적검사가 필요한 부위는 수동초음파검사 또는 자동초음파탐상검사(UT)를 적용/수행하고 있다. 동익 루트부 형상은 기하학적 형상의 복잡성으로 인해 수동초음파검사 방법으로는 접근성 어려움 및 검사데이터 저장 등의 문제가 있어, 위상배열 자동초음파검사(PAUT)방법이 개발되어 일부 검사가 이루어지고 있다.

6. 향후대책

원전 발전소마다 터빈 형식에 맞는 비파괴검사 방법과 주기를 선정하여 터빈 건전성을 확보를 위해 노력하고 있지만, 해외 원전의 터빈 검사 및 보수사례 등 지속적인 모니터링 및 기술정보 동향 파악으로 국내 원전에 대한 지속적인 적용/관리가 필요하며, 해외 원전 터빈에 대한 결함 발생 원인분석 및 정비 방법 공유를 통해 국내 원전 결함 발생 때 긴급 정비보수에 활용하여, 현재 수행되는 비파괴 검사방법, 검사 절차 및 결과 평가가 유효하게 수행되는지를 지속해서 진단할 필요가 있다.

[참고자료]

1. EPRI 1025331, "Turbine Generator Auxiliary Systems, Volume 1 : Turbine Generator Lubrication System Maintenance Guide, 2012
2. EPRI 1013462, "Turbine-Generator Auxiliary Systems, Volume 2: Turbine Steam Seal System Maintenance Guide, 2006
3. 원자력발전소 증기터빈 설비편람, 2015-50218165-전-0508TR, 2015
4. 제2기 터빈설비 전문(터빈 손상 및 건전성 평가)과정 한수원 교육 교안
5. "원전 터빈 운전상태 감시 및 진단 가이드" 기술지원보고서(정혁진)
6. 터빈 OM매뉴얼(GEK72178, In-Service Inspection of 1500 and 1800rpm Nuclear Turbine Rotors, 1991)

PC-NIPC를 활용한 90° 곡관 하류에 설치된 오리피스 유량계에 대한 불확실도 정량화

Uncertainty Quantification for the Orifice Flowmeter Downstream of 90°
Bend Using PC-NIPC

배재현* · 장경식* · 이공희

*울산대학교 기계공학부, 한국원자력안전기술원 규제검증평가실

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 코드는 1차원 계통 코드를 이용한 열수력 해석에서는 얻을 수 없는 3차원 상세 열유동 정보를 제공함으로써 원자력발전소 인허가 심사 과정에서 의사 결정의 오류를 저감하는데 기여할 수 있다. 다만, 실제 원자력 안전 관련 계통은 불확실성이 내포된 운전 조건에서 작동되기 때문에 이에 따른 계통의 응답과 성능을 예측하는데 있어 불확실성을 고려한 해석적 방법이 필요하다. 또한, 현재 인허가에 활용되고 있는 전산유체역학 코드의 경우 기존 모델링 및 수치기법의 제한사항 등으로 인해 해석 결과에 상당한 불확실도가 포함될 수 있으므로 이러한 예측 불확실도를 저감하기 위한 노력이 필요한 실정이다. 따라서, 해외 동향을 참고하여 국내 원자력 규제체계에서도 전산유체역학 코드를 활용한 인허가 문서에 대한 확인(verification)·검증(validation)·불확실도 평가 방법론 수립에 적극적인 관심을 가져야 할 필요가 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 90° 곡관 하류에 설치된 펌프 가동중시험(in-service testing)에 사용되는 판형 오리피스 유량계에서 랜덤 입력변수로 선정된 유량과 배관 곡률 반경의 불확실도에 따른 유출계수(discharge coefficient)의 확률적 분포를 예측하였다. 구체적으로 질량 유량은 기준값 5kg/s(레이놀즈수 72,000에 해당)에서 $\pm 10\%$ 의 변동을 가진 가우시안 분포로, 곡률 반경은 배관 직경의 1~2배 범위에서 균일 분포로 가정하였다. 추가적으로 곡관부와 오리피스 유량계 사이의 배관 길이의 변화(배관 직경의 5, 15, 25, 40배)도 고려하였다. 이는 원자력발전소의 공간 제약성 및 경제성 등의 이유로 충분한 직관 길이를 확보할 수 없어 펌프에서 토출된 유동이 완전 발달되지 않은 형태로 오리피스 유량계로 유입될 수 있는 점을 반영한 사항이다. 결정론적 해석자(deterministic solver)로 ANSYS Fluent를 사용하였다. Point Collocation Non-Intrusive Polynomial Chaos (PC-NIPC) 기법을 활용하여 해석 결과의 불확실도를 평가한 결과, 곡관부와 오리피스 유량계 사이의 배관 길이가 증가함에 따라 유출계수의 평균값은 증가하여 완전 발달된 유동일 때 유출계수 크기인 0.617에 수렴하였으며, 불확실도(표준편차)는 감소하였다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805007).

다양한 RANS 기반 난류 모델을 활용한 TFA 원심펌프 내부의 캐비테이션 유동 수치해석

Numerical Analysis for the Cavitation Flow Inside the TFA Centrifugal
Pump Using Various RANS-Based Turbulence Models

이공희 · 이용갑*

한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *(주)SIMEX

가동중시험(in-service testing) 대상 펌프 중에서 대표적인 유형인 원심펌프에서 캐비테이션(cavitation) 유동은 주로 회전차(impeller) 블레이드의 흡입면(suction surface) 부근에서 발생한다. 이는 회전차로 유입된 유동이 해당 위치에서 가속되면서 국부 정압(static pressure)이 작동 유체의 포화증기압 이하로 감소하기 때문이다. 이러한 캐비테이션 유동으로 인해 회전차 블레이드가 손상되거나 펌프 성능이 저하될 수 있다. 한편, 난류와 캐비테이션 사이에는 강한 상호 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 난류가 캐비테이션 개시(onset)에 일정 부분 기여하는 것과 유사하게 캐비테이션은 와류(vorticity) 생성과 난류 및 경계층 두께의 상당한 변화를 동반할 수 있다. 따라서, 적절한 난류 모델 선정은 원심펌프 내부에서 발생 가능한 캐비테이션 유동에 대한 유의미한 정보를 확보하는 데 필수적이다. 이에 본 연구에서는 상용 전산유체역학 소프트웨어인 ANSYS CFX 2022R1에서 이용 가능한 레이놀즈 평균 Navier-Stokes(RANS) 기반 난류 모델에 따른 원심펌프 내부의 캐비테이션 유동에 대한 예측 결과를 비교하였다. 해석 모델은 독일 Darmstadt 기술 대학교의 Hofmann 등이 제작한 TFA 원심펌프 설비이다. 동 펌프의 회전차 블레이드는 근사적으로 2차원 유동장을 얻고 측정을 위한 우수한 접근성을 확보하기 위해 2개의 단순한 형태의 원호(circular arc)로 구성되었으며, 회전차 출구에서 원주방향으로 균일한 압력 분포를 발생시키기 위해 베인(vane)이 없는 방사형 디퓨저(diffuser)를 사용하였다. 회전차 입,출구 직경은 각각 130 mm와 278mm, 회전 속도는 2,160 rpm, 두께 6.5 mm의 블레이드 5개로 구성되어 있다. 작동 유체는 20℃ 물로 가정하였다. 정상(steady), 비압축성, 난류 및 다상(multi-phase) 유동 조건하에서 약 2백만개의 비정렬 혼합(hybrid) 계산 요소(element)를 사용해서 캐비테이션 유동을 해석하였다. RANS 기반 난류 모델인 $k-\epsilon$, ReNormalization Group(RNG) $k-\epsilon$, Shear Stress Transport $k-\omega$ (재부착 또는 곡률 옵션 추가 고려) 및 Baseline 레이놀즈응력 모델을 적용해서 캐비테이션 유동을 해석한 결과, 설계 유량조건에서 $k-\epsilon$ 계열 난류 모델로 계산한 압력계수는 $k-\omega$ 계열 난류 모델에 비해 크기가 감소하였다. Baseline 레이놀즈응력 모델은 레이놀즈 응력 텐서의 개별 성분들에 대한 복잡한 수송 방정식을 계산함에 따라 2방정식 난류모델이 비해 계산 시간이 증가한 반면 저유량 조건에서 계산이 발산하였다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805007).

Flomaster를 활용한 UMSICHT 시험 설비에서 수충격 벤치마크 해석 Benchmark Analysis for Water Hammer in the UMSICHT Test Facility Using Flomaster

이공희 · 최종인*

한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *플로우마스터코리아

원자력발전소에서 안전기능을 수행하는 기기들이 설치되어 있는 가동중시험(in-service testing) 관련 계통에서 발전소 기동 및 정지, 기기 고장, 그리고 유량 변동 등으로 인해 압력 서지(surge)가 발생할 수 있다. 이러한 압력 서지는 닫힘 밸브 상류 및 하류에서 수충격(water hammer)과 캐비테이션 해머를 유발하여 배관 및 지지 구조물의 건전성을 손상시킬 수 있다. 따라서, 압력 서지에 의한 수충격과 캐비테이션 해머 관련 현상 발생시 타당한 규제 의사 결정을 지원할 수 있도록 최신 기술에 기반한 다양한 1차원 계통해석코드의 예측 정확도에 대한 검증이 필요하다. 이와 관련하여 본 연구에서는 상용 1차원 계통해석코드인 Flomaster를 활용하여 독일 Fraunhofer UMSICHT 시험 설비(Dudlik, 2003)에서 확인된 수충격과 캐비테이션 해머 현상을 해석하였고 해석 결과를 측정값과 비교하였다. UMSICHT 설비는 가압 용기, 펌프, 밸브, 배관 등으로 구성되어 있다. 펌프 하류에 위치한 편심형 버터플라이 밸브의 급속 닫힘시 밸브 상류 및 하류에서 수충격과 캐비테이션 해머가 발생하며, 이로 인해 일부 배관(10 m 높이의 수직 배관, U자형 수평 배관 등)에서 압력과 유체-구조물 상호작용으로 횡방향 또는 수직방향 변위가 발생하는 것이 실험적으로 확인된 바 있다. Flomaster를 활용한 정상상태(steady state) 해석은 펌프와 배관 마찰 손실 사이의 동적 평형(dynamic equilibrium)에 도달시 까지 수행되었으며, 해석 결과는 다른 1차원 계통해석코드인 RELAP5와 TRACE와 유사한 경향성을 나타내었다. 한편, 개방된 버터플라이 밸브를 통해 약 131 m³/h의 유량이 배관을 흐르는 초기 정상상태에서 버터플라이 밸브가 0.01 s만에 닫히는 조건을 적용해서 수행한 수충격과 캐비테이션 해머의 과도(transient) 해석 결과는 버터플라이 밸브 하류 부근(P3 지점)에서 압력 첨두를 측정값 대비 크게 예측하였다. 또한, 예측된 압력 첨두의 감쇠는 측정값 대비 느리게 진행되었다. 상기와 같은 측정값과 해석 결과 사이의 경향성 차이는 Flomaster에서 제공하는 수충격 해석 모델인 특성곡선법(method of characteristics)과 이산화 증기 공동 모델(discrete vapor cavity model) 조합의 적용 제한성 때문인 것으로 추정된다. 또한, 배관과 수충격의 상호작용에 따른 배관 움직임(movement)을 고려할 경우 해석 결과의 정확도가 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805007).

연구용원자로의 슬로싱 현상 분석

Investigation on Sloshing effect for Research Reactor Pool

김태진 · 정광섭 · 오진호

한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단

슬러싱은 탱크 등의 내부의 수면이 지진 등의 외부하중에 의해 출렁거리는 현상을 나타내며, 원자로 설계에 있어 고려해야할 요소 중 하나이다. 지진하중 하에서 수조수의 넘침 현상이 발생하게 된다면, 사용후핵연료 수조 수위의 감소에 의해 열원 제거에 어려움을 겪을 수 있다. 또한, 슬러싱 현상에 의해 발생하는 국부적인 하중에 의해 기기, 구조물 및 계통의 손상을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연구용원자로에서의 슬러싱 현상을 분석하기 위해, 가상 지진 조건에서의 연구용원자로의 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 원자로 운전조건 별 수조수위 변화와 외부 지진 하중의 방향별 영향을 분석하였다.

해석에 사용된 하중은 가상지진을 가정하였다. 방향별 영향을 살펴보기 위해, EW · NS · EW+NS · EW+NS+VT 4개의 하중조건을 고려하였다. 또한 연구로의 운전조건 및 사고조건에서의 수조수 수위의 영향을 평가하기 위해, H/L ratio (H : Height of Pool Water / L : Pool Height)를 각각 선정하였다. 표 1은 슬러싱 현상에 의해 발생하는 넘침수 비율을 하중조건 및 운전조건에 따라 나타내었다. 하중조건이 추가될수록, 넘침수 비율이 증가하는 것을 확인하였으며, 수조수 높이가 낮은 조건(H/L ratio = 0.710)에서 현저히 낮음을 확인하였다. 또한 벽체에 발생하는 압력분포를 분석하였다.

본 연구에서는 연구용원자로 수조에서 발생하는 가상 지진에 의한 슬러싱 현상을 분석하였다. 수조수위 변화 및 압력 분포를 분석하였으며, 추후에는 사고 조건에서의 슬러싱 현상을 분석하여 인자별 영향 평가를 수행할 예정이다.

표 1. 운전조건 및 하중조건 별 넘침수 비율

	H/L ratio = 0.810				H/L ratio = 0.710
	EW	NS	EW+NS	EW+NS+VT	EW+NS
Overflowed Water Volume (%)	1.35	0.01	2.75	3.23	0.09

후 기

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020M2C1A1061043)

하나로 핵연료봉 진직도 측정방법 개선

김호민 · 황재준 · 박찬석 · 이규홍

한국원자력연구원, 연구로핵연료부

KAERI는 하나로 핵연료 집합체 국산화 이후, 하나로 핵연료집합체를 전량 자체생산하여 하나로에 공급하고 하나로 핵연료집합체는 18개봉 또는 36개봉의 핵연료봉으로 이루어지며, 제조 공정 중에 다양한 품질검사가 이루어진다. 핵연료봉 제조 중 품질검사는 부품 원소재 및 최종 치수검사, 우라늄 분말화학적성분 검사, 핵연료 심재 Gamma Scanning 검사, 봉단마개 조립 후 치수검사, 피복압출 후 치수검사, 봉단가공 후 치수검사, 와전류탐상검사, 용접 후 방사선투과검사, 침투탐상검사, 집합체 조립 전 표면검사로 이루어진다. 본 연구에서는 핵연료봉 봉단가공 후에 수행하는 핵연료봉 진직도 측정방법을 개선하였다. 기존에는 도면 요건에 따라 제작된 Go-No go 게이지를 활용하여 합부 판정만 하였다. 이때, 합격한 핵연료봉의 구체적인 진직도 치수 정보를 알 수 없었고, 핵연료봉 fin 부위에 스크래치가 발생하는 단점이 있었다. 이러한 점을 개선하기 위해 얇고 길다란 형상의 핵연료봉 진직도 측정이 가능하도록 핵연료봉을 따라 다이얼게이지가 수평이동 가능한 진직도 측정 지그를 개발하였다. 진직도 측정방법은 핵연료봉의 좌측 끝단부에서 0점으로 세팅된 다이얼게이지를 진직도 측정지그의 LM가이드를 따라 핵연료봉의 우측 끝 단부 까지 이동하며 다이얼게이지에 표시된 최대 변위의 절댓값을 기록한다. 다이얼게이지 눈금 값이 0점 기준으로 시계방향과 반시계방향으로 이동한 경우 각각의 최대 변위의 절댓값을 더하여 기록한다. 개선된 측정방법은 핵연료봉의 정확한 진직도 값을 얻을 수 있으며, 핵연료봉 fin 부위 손상도 막을 수 있다.

본연구는 KAERI 주요사업의 지원을 받아 수행되었습니다.(과제번호 522210-22)

원전 화재 PSA 모델을 활용한 다중오동작(MSO) 시나리오의 정량적 리스크 평가에 관한 연구

A Study for the Quantitative Risk Evaluation for Multiple Spurious Operation Scenarios Using a Fire PSA Model of Nuclear Power Plant

방기인 · 이한설

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소는 결정론적 화재방호 요건을 기반으로 안전정지기기 및 필수 케이블에 대하여 화재 안전정지 분석을 수행하여 안전 여부를 평가하고 있다. 국내 원전의 화재 사건에 대해 과거에는 단일 오동작만을 다루어 왔지만, 2015년도 원자력안전위원회 고시에 따라 최근에는 다중오동작(Multiple Spurious Operation: MSO)을 포함한 화재위험도분석을 수행하고 있다. 가장 최신의 신규원전에서는 회로분석을 통한 다중오동작 모델링을 고려한 화재 PSA를 수행하고 있지만, 가동 원전의 경우에는 미국의 NRC 등에서도 인정한 EPRI의 방법론을 활용한 PSA 모델을 활용 중에 있으며 이 방법론은 일부 다중오동작 가능성만 반영된 수준이다.

현행 원자력안전법과 관련 규제에 따라 다중오동작을 결정론적분석인 화재위험도분석으로 평가를 수행하고 있으나 화재 PSA에 이를 반영한 리스크평가가 지속적으로 요구되고 있다. 따라서 회로분석을 반영한 NUREG/CR-6850 기반의 화재 PSA 모델링의 대안으로 기존 화재 PSA 모델을 활용하여 화재위험도분석(Fire Hazard Analysis: FHA)에서 도출된 다중오동작 시나리오에 대해 정량적인 리스크 수준을 확인할 수 있는 평가 방법을 도출하였다. NEI 00-01은 원전 화재발생시 케이블로 인한 다중오동작 시나리오를 약 60여 개 일반목록(Generic List)으로 제공하고 있다. 이를 기반으로 발전소의 화재위험도분석 시 설계변경이 필요한 항목과 주제어실 또는 현장 운전원 조치 항목을 통하여 다중오동작을 예방하는 조치방안을 수립한다. 각각의 시나리오별 다중오동작을 유발하는 기기조합 목록을 도출하고 이러한 조합의 기기들로 인해 다중오동작이 발생할 경우 초기사건을 유발하는 경우와 완화계통의 이용불능 유발로 인한 영향을 구분하여 평가를 수행하였다. 다중오동작 시나리오별로 조건부노심손상빈도(Conditional Core Damage Probability)를 계산하고 기존의 화재 PSA 모델에서 도출한 시나리오 발생 구역의 화재발생빈도를 고려하여 방화구역별, 시나리오별 노심손상빈도를 계산하였다.

대체 리스크 평가 방법을 활용하여 참조원전인 OPR1000 원전의 다중오동작으로 인한 리스크 영향은 단일 오동작만을 고려한 기존 평가 결과인 노심손상빈도의 5% 수준인 것으로 확인되었다. 회로분석을 통한 다중오동작 기기조합을 PSA 모델에 반영하는 것은 현실적으로 많은 비용 및 인력이 소요되기 때문에 기기조합과 초기사건 선정시 기본적으로 보수적인 가정이 포함되었지만 이러한 평가 방법을 통해 다중오동작의 영향을 확인한 부분은 현실적인 대안이라 판단된다.

국내 원전 사고저항성연료 도입으로 인한 PSA 측면의 리스크 영향 검토 A Review of Risk Impact on PSA due to apply Accident-Tolerance Fuel in Domestic Nuclear Power Plants

방기인

한국수력원자력(주) 중앙연구원

후쿠시마 원전 사고 이후 원전 산업계에서는 기존연료 대비 중대사고 발생시 보다 안전성이 향상된 사고저항성연료(ATF : Accident-Tolerance Fuel) 개발을 추진 중이다. 최근 EU Green Taxonomy 승인시 사고저항성연료 사용을 의무로 부과함에 따라 국가별로 다양한 대응방안을 검토 중에 있다. 사고저항성연료는 현재 운영 중인 핵연료에 비해서 냉각 기능이 상실된 상태에서 피복재의 수소발생량을 억제하고 소결체의 중심온도를 감소시켜 중대사고 대응시간을 추가로 확보할 수 있는 핵연료를 말한다. 해외에서는 미국 웨스팅하우스社와 프랑스의 프라마툼 社 등이 '26년 이후 상용화를 위해 시험연료봉의 상용로 시험 및 소결체 인허가를 신청 중에 있다. 국내는 '29년 상용화를 목표로 시험연료봉 연구와 상용로 연료시험 등 성능시험 자료를 준비하여 인허가 신청을 준비 중이다. 본 논문에서는 이러한 사고저항성연료 도입으로 인한 PSA 측면의 정량적인 리스크 영향을 고찰하고자 한다.

미국의 EPRI는 참조 발전소를 대상으로 가용한 자료를 활용하여 설계기준사고와 설계기준초과사고 등 사고 시나리오를 대상으로 안전-편익 분석을 수행하여 보고서를 발간한 바가 있다. PSA 측면에서는 재료 물성치에 따른 노심손상 지연으로 인하여 PSA 성공기준에 영향을 미칠 수 있으며, 사고저항성연료가 소결체 온도 감소효과가 있기 때문에 추가적인 사고 대처시간에 여유가 생겨 운전원 조치 여유시간을 확보할 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로 민감도 분석 수행한 결과, 내부사건 PSA의 노심손상빈도의 저감효과는 미미한 것으로 확인되었다. 또한, 미국에서 설계기준초과사고를 대비한 FLEX 설비 가용여부를 추가로 고려할 경우에도 PSA 분석의 제약 조건상 그 기여도는 최대 10~20% 수준의 노심손상빈도 감소 효과가 있다고 평가하고 있다.

국내 원전은 중대사고 정책으로 수행된 PSA에서 후쿠시마 후속조치와 MACST 설비를 반영한 사고관리계획서를 개발하면서 이러한 조치로 인한 노심손상빈도의 저감을 확인하였다. 국내 PSA 모델에 사고저항성연료의 도입을 고려할 경우에 급수완전상실사고, 소내정전사고 등에서 1~3시간 정도의 추가 대처시간 확보가 예상되지만 이러한 조치는 운전원조치의 여유시간 확보차원으로 고려되어 인적오류확률에 영향을 미치지 않기 때문에 다른 안전설비의 변경과 비교하였을 때 노심손상빈도를 저감 효과는 크지 않을 것으로 판단된다.

국내 원전 주기적안전성평가 확률론적안전성평가 분야의 차이분석 방법 개선에 대한 고찰

A Study on the Improve of Gap Analysis Method in the Probabilistic
Safety Assessment for Periodic Safety Review of Nuclear Power Plant

방기인

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소는 운영허가를 받은 날로부터 매 10년 주기로 주기적안전성평가(PSR : Periodic Safety Review)를 수행함으로써 설계의 유효성 및 안전성을 확인하고 있다. 2014년부터는 확률론적안전성평가(PSA : Probabilistic Safety Assessment)를 포함한 3개 인자가 추가되어 총 14개 안전인자에 대한 평가가 수행되고 있다. 현재 가동 원전의 주기적 안전성평가에서 확률론적안전성평가를 활용한 차이분석(Gap Analysis)이 국제적으로 활용되는 방식과 차이가 있어서 이러한 문제점과 개선방안을 제시하고자 한다.

국제 원자력 기구인 IAEA는 원자력발전소 주기적안전성평가에 대한 지침을 SSG-25 문서로 발간하였다. 이 지침에서 확률론적안전성평가의 검토는 발전소의 설계 및 운전에서 취약점을 확인하고 제안된 안전성 개선사항을 평가하는 것을 목적으로 기술하고 있다. 즉, 기존 PSA 연구의 유효성 정도, PSA의 결과가 모든 가상 초기사건과 현재 운전상태에서 위험이 충분히 낮고 균형이 유지되는지 여부, PSA 범위와 방법론이 국제 기준에 부합하는지 등을 검토하도록 하고 있다. 방법론에 대해서는 PSA 모델링이 운전특성과 현재설계를 잘 반영하고 있는지 여부, 평가 결과가 초기사건 및 재해의 적절한 조합에 대해 완전성을 유지하는지 여부와 규제기관에서 제시하는 안전목표에 부합하는지 등을 확인하도록 하고 있다.

종합평가를 통해서 필요시 결정론적 분석, PSA, 공학적 판단, 비용-편익분석 등을 기반으로 안전성증진사항을 도출하도록 하고 있다. 안전요소별 부정적 영향이 발견된 경우에는 PSA를 활용하여 이로 인한 리스크를 평가하는데 PSA가 상대적인 리스크 제공을 통해 유용한 통찰력을 제공할 수 있지만 단순한 수치적인 접근으로 안전성증진사항을 결정해서는 안 된다.

PSR의 차이분석시 최신 기술기준의 정의는 국가별로 상이한데 국내에서는 최근 인허가를 받은 원전에 적용된 Code & Standard로 정의하고 있다. 국내 심사기준에서 가정사항, 초기사건, 평가방법론, 컴퓨터 코드를 기술 분야로 정의하고 있어서 평가대상 원전의 제출된 PSA 모델과 최신 인허가 원전 간의 세부적인 PSA 요소기술 방법을 비교하고 있다. 여기서 부정적 영향으로 판단된 사항을 안전성증진사항 대상으로 선정하는 현재 방법은 기존에 유효함을 확인한 기존의 PSA 결과의 유효성을 부정하는 것으로 비춰질 수 있으므로 적절치 않다고 판단된다. 따라서 캐나다와 유사하게 PSA 수행과 관련된 규제지침에서 최신 연구동향 등을 반영하여 평가시 필수적으로 반영되어야 하는 사항을 정의하고 사업자는 만족여부를 확인하는 것이 적절하다. 필요시 사업자가 안전성 증진을 위해 향후 추가적으로 반영되어야 할 기술적 내용을 안전성 증진사항으로 선정하고 이의 적절성을 규제기관에서 판단한다면 이미 유효성을 입증하였던 PSA 결과를 점진적으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

의미망분석법을 활용한 사업자와 규제기관의 원자력안전문화 모델 비교 분석 Comparative Analysis for the Nuclear Safety Culture Model of Licensee and Regulator Using Semantic Network Analysis

고영준

한국수력원자력 중앙연구원

1986년 체르노빌 원전사고를 경험하면서 국제원자력기구(IAEA)는 원자력 안전문화(이하, 안전문화)라는 개념을 도입하게 된다. 이후, IAEA는 안전문화 모델 개발, 평가방법 정립 등 안전문화 증진을 위한 많은 노력을 기울여 왔다. 미국의 경우 1989년 원자력규제 위원회(NRC)에서 원전운영에 관한 안전문화 관점의 첫 번째 정책성명을 공표한 이후에 원자력산업계와 규제기관은 별도의 안전문화 모델을 운영해오다가 2011년부터 상호 간에 논의를 시작하여 2014년에 안전문화 공통언어를 정립하여 안전문화에 대한 일관성 있는 기준을 공유하고 있다.

국내의 경우, 원자력발전 사업자인 한국수력원자력(이하, KHNP)과 원자력 안전규제 전문 기관인 원자력안전기술원(이하, KINS)이 각각 기관의 고유 안전문화 모델을 보유 중이다. KHNP는 ‘국민의 생명과 환경보존을 위해 원자력 안전을 어떠한 목표보다 우선시하는 조직 구성원들의 핵심가치와 행동’으로 안전문화를 정의하고 있고, 10원칙 40속성의 안전문화 모델을 현업에 적용하고 있다. KINS는 안전문화를 ‘원자력 안전의 중요성에 대해 조직의 구성원들이 공유하는 행동양식, 핵심가치와 기본 신념을 말하며, 이와 더불어 규제 업무 및 그 지원 업무를 수행함에 있어 안전을 최우선으로 하는 자세 또는 태도를 의미한다’고 정의하고 있으며, 5개 분야 16개 항목으로 규제감독 안전문화 모델을 운용 중에 있다.

본 연구에서는 국내 원자력 사업자와 규제기관 각각의 안전문화 모델이 어떤 단어들로 구성되어 있고 그 구성단어들이 어떻게 유기적으로 연관되어 있는지 등 관련 내용을 분석하였다. 이를 위해 단어빈도, 의미망분석(Semantic Network Analysis) 등 통계분석 프로그램인 R을 이용하여 두 모델을 비교분석해 보았다. 이는 미국과 같이 산업계와 규제기관 간의 안전문화 공통언어 정립을 위한 첫걸음으로서 의미가 있을 것으로 사료된다.

실무용 운전경험보고서 작성 상세 가이드북 개발
Development of the detailed Operating Experience Writing Guidebook
for Working-level Staff

주익덕, 최철승

한국수력원자력 중앙연구원

운전경험(Operating Experience)은 "새로운 유형의 사건은 없고 반복하여 발생한다."는 교훈이 있습니다. 그러니, 운전경험을 서로 공유 및 활용한다면 유사한 또는 동일한 사건이 다시 발생하지 않도록 예방할 수 있지 않을까? 1979년 미국 쓰리마일 아일랜드 사건, 일명 TMI 사건이 발생했고 미국 내 운전경험 정보 공유를 위한 기관이 탄생하게 되었다. 바로 미국발전사업자협회(INPO)가 그것이다. 이때까지만 해도 원전 사고는 한 국가 내(in) 정도까지만 영향을 미치게 된다고 생각했던 모양이다. 그 후 1986년 체르노빌 사건을 경험하면서 이제 원전 사고는 세계 여러 나라에 영향을 미치게 된다는 인식이 생기기 시작했고 세계 원전발전사업자협회(WANO)라는 국제기관이 탄생하게 되었다. 두 줄기의 큰 사건을 경험하면서 전 세계 원전 사업자들은 큰 교훈을 얻게 되었다. 운전경험을 서로 공유하고 활용한다면 대형사건을 예방할 수 있겠구나!하는 공감대가 형성된 것이다. 그러니까 운전경험을 서로 공유 및 활용하여 취약점을 찾아 미리 개선한다면 "유사한 또는 동일한 사건의 재발을 방지할 수 있겠구나!"라고 생각하게 된 것이다. 동일 또는 유사한 사건의 재발 가능성 최소화 및 대형사건 발생 예방을 위한 전 세계원전의 운전경험의 공유 및 활용의 중요성 강조되고 있는 가운데 이를 위해 국내원전 간뿐만 아니라 원자력 국제기관인 WANO를 통해 전 세계원전 간에도 운전경험을 공유하고 있으나 운전경험 작성자별 품질 편차가 커 보고서 품질 개선의 필요성이 지속적으로 제기되었다.

'03년 이후 국내운전경험보고서 누적 발행건수는 약 1만 여건이며, 년 평균 발행건수는 약 900여건에 달하는 방대한 경험자료가 생산되고 있다. 그러나 운전경험보고서는 업무보고용 개조 식 문서에 가까워 경험내용의 전후 상황·배경이 생략되어 있고 과거 경험 활용 측면에서 축적된 빅-데이터(Big Data)의 활용성이 저하되는 문제점이 있다. 또한 사건 발생에 따른 문제의 정의, 원인분석(직접원인, 근본/표면원인 등 분석) 및 시정조치 내용 등 전반적인 보고서의 논리성 미흡으로 운전경험보고서의 전반적 품질 낮아 보고서 품질 확보에 많은 자원의 할애가 필요한 실정이다. 따라서 ISSUE TREE 기법을 활용하여 운전경험 활용도 향상」을 위한 해결방안을 모색하고 Man, Material, System 차원에서 검토 후 Material 측면에서 집중 해결방안(보고서-품질확보-가이드북 개발)을 선정하였다. 문제기술 및 상황분석을 통해 현재의 문제점, 회사 비전과의 관계, 기대효과 및 고객의 니즈들을 담았고 구체적인 실제 유형별 고장 사례를 활용하여 사내고객의 이해도를 높이고 Good&Bad 사례를 참고할 수 있도록 Full Text 사례를 첨부하였다. 또한 MZ 세대 독자층이 증가하는 추세를 고려하여 딱딱하지 않고 친근감 있는 블로그(Blog) 형식의 디자인을 도입하여 가이드북을 개발하게 되었다.

개발된 운전경험 작성 상세 가이드북은 축적된 운전경험 Big-data의 활용성 향상, 정보 공유·활용에 대한 사내고객의 인식 개선, 보고서 품질 확보를 통한 운전경험 활용도 향상 및 국제 신인도 제고에 기여할 것으로 기대된다.

암모니아의 저온합성을 위한 Pyrochlore 촉매의 이종금속 도입효과
Effect of Pyrochlore Catalyst on the Introduction of Different Metals for
the Low-Temperature Synthesis of Ammonia

김나영 · 이석호 · 이성호 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

암모니아는 운송의 용이성, 높은 수소함량, 높은 부피 당 에너지 밀도 등의 장점으로 인해 수소운반체 역할로서 중요성이 증가하고 있다. 현재 상용화되고 있는 암모니아 합성법은 하버보슈법으로, N_2 분자의 높은 해리에너지 때문에 고온 고압의 반응조건에서 합성하고 있으며, 이는 많은 에너지를 소비하기 때문에 보다 저온저압에서 암모니아를 합성할 수 있는 촉매 연구가 필요하다. 현재까지 연구된 암모니아 합성 촉매 중에서 CaFH를 활용한 Ru 촉매 (Ru/CaFH)가 가장 높은 저온활성을 보이고 있으나, 대기중에서 불안정하고 쉽게 분해되는 등의 문제가 있어 촉매의 대량 취급에는 어려움이 있다는 단점이 있다. 촉매의 높은 활성과 더불어 안정한 담체의 중요성이 증가함에 따라 안정성이 높은 oxide계 담체 중 열안정성이 높고 성능이 좋다고 알려진 $La_2Ce_2O_7$ 을 도입하여 연구를 진행하였다. $La_2Ce_2O_7$ 은 CeO_2 에 La_2O_3 를 도입한 물질로, perovskite와 유사한 구조를 가지고 있고 결함을 가지고 있어 촉매의 담체로 사용했을 때 보다 높은 활성을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 $La_2Ce_2O_7$ 구조의 La^{3+} site에 이종금속을 치환함으로써 oxygen vacancy를 증가시켜 암모니아 합성 활성을 증진하고자 한다. Oxygen vacancy는 암모니아 합성반응의 속도결정단계인 N_2 해리와 N-H 형성반응을 촉진할 수 있는 것으로 알려져 있어 해당 촉매는 실제로도 암모니아 합성반응에서 좋은 활성을 보였으며, 여러 특성화분석을 통해 그 구조와 특성을 알아보고자 한다.

친환경 수소 운반을 위한 암모니아 산화적 분해 촉매 개발

Development of Novel Catalyst for Ammonia Oxidative Decomposition to Transport Eco-Friendly Hydrogen

이수항 · 이석호 · 이성호 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

수소는 파리기후협약의 목표인 탄소중립 사회를 실현하기 위해 가장 유력한 대체 에너지 후보로 거론되고 있다. 수소는 질량 당 가솔린보다 4배, 천연가스보다 3배 많은 에너지를 낼 수 있으며, 연료로 사용 시 탄소를 발생하지 않는다. 그러나 수소 기체는 부피 당 저장할 수 있는 에너지가 적어, 대용량 저장 및 장거리 운송에 한계가 존재한다. 그래서 수소를 효율적으로 저장 및 운반할 수 있는 수소 운반체가 활발히 연구되고 있다. 암모니아는 분해 시 수소와 질소만 생성하기에 매우 친환경적이며, 액화수소 및 LOHC 등 다른 수소 운반체에 비해 부피 당 수소 저장량이 크고, 상온에서 쉽게 액화된다는 장점을 가지고 있다.

하지만 수소 생성을 위한 암모니아 분해 반응은 흡열반응으로 대규모 공정에서 이중층 반응기나 멀티튜브 반응기 등을 사용해야 한다는 점, 그리고 높은 반응 온도가 필요하다는 점에서 한계가 있고, 최근 이를 보완하기 위하여 암모니아 산화 반응을 분해 반응에 도입하는 ‘암모니아 산화적 분해 반응’이 제안되었다. 암모니아 산화적 분해 반응은 암모니아 분해 반응에 필요한 고온 환경을 암모니아 산화 반응의 반응열을 통해 충족하여 외부 열 공급 없이 암모니아 분해를 통해 수소를 생산할 수 있고, 발열반응이므로 Scale-Up이 용이하다. 하지만 이 반응은 산화 반응에 사용되는 암모니아의 비율이 많아질수록 분해 반응에 사용되는 암모니아의 양이 상대적으로 적어져 반응으로부터 얻을 수 있는 수소의 수율이 낮아진다는 단점이 존재한다. 이러한 단점 보완을 위해서 암모니아의 산화적 분해반응을 통해 더 많은 수소 수율을 보일 수 있는 촉매의 개발이 필요하며, 또한 더 낮은 온도에서도 기존 촉매와 유사한 분해 활성을 나타낼 수 있는 촉매 개발이 필요하다. 본 연구에서는 암모니아의 분해 반응과 산화 반응에서 가장 높은 활성을 보이는 금속을 선정하여 이중금속으로 이루어진 촉매를 개발하였으며, 이는 암모니아의 산화적 분해 반응의 2개 반응(산화 및 분해 반응)에서 모두 높은 활성을 보이는 것을 확인하였고, 다양한 특성화 분석을 통해 그 구조와 물성이 밝혔다.

과산화수소 직접합성을 위한 소수성 리간드의 도입효과

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.

Nb와 Ta 도입을 통한 Pt/Al₂O₃ 촉매의 homocyclic LOHC 탈수소화 활성
향상에 관한 연구

The Pt-Nb and Pt-Ta catalysts for homocyclic LOHC dehydrogenation

박태인 · 장지수 · 이관영*

*고려대학교 화공생명공학과

2021년 교토의정서 체제가 만료되고 신기후 체제가 출범함에 따라 친환경 에너지에 대한 중요성이 증가하고 있다. 하지만 신재생에너지는 기후와 날씨와 같이 통제불가능한 요소에 많은 영향을 받는 한계를 가지고 있어 에너지를 연속적으로 사용하기 위해선 에너지를 저장하고 방출할 수 있는 에너지 저장 기술이 필요하다. 액상유기수소저장체(liquid organic hydrogen carrier, LOHC)는 에너지 저장 기술 중 하나로 분자 내부에 수소를 저장하는 물질이다. LOHC는 높은 수소 저장 능력 및 안정성을 가지고 있으며 기존의 석유화학인프라를 사용할 수 있어 에너지를 장기적으로 보관하는데 적합하다. Homocyclic LOHC 물질의 탈수소화 반응에는 Pt 촉매를 사용하며, 일반적으로 고온에서 반응을 진행한다. 본 연구에서는 Pt 촉매에 Nb와 Ta를 도입하여 탈수소화 활성을 증진하였다. 그리고 담지 순서와 열처리 조건 변화에 따른 활성 변화를 확인하였으며 특성화 분석을 통해 활성 증진 원인에 대해 분석하였다.

H₁₂-benzyltoluene 연속식 수소 생성 반응기에서의 탈수소화 촉매 분석
Analysis of Dehydrogenation Catalyst in Continuous Reactor Using
H₁₂-benzyltoluene as a LOHC material

장지수 · 박태인 · 이관영*
고려대학교 화공생명공학과

Renewable energy is emerging to reduce carbon emissions worldwide. In order to overcome these disadvantages of renewable energy, research on hydrogen storage technology as an energy storage is also attracting attention. In particular, as storage technology that can store hydrogen stably is required, LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) is evaluated as a promising hydrogen carrier because it is efficient in unit volume and mass and the stability of the material itself is high.

Benzyltoluene (BT), which has been recently studied as a third-generation LOHC material, has stable properties and high hydrogen storage capacity, but has disadvantages in energy efficiency and selectivity because of the high temperature required for the dehydrogenation reaction. Also, side reactions are easy to proceed due to the structural characteristics of the material, which acts to deactivate the catalyst. Therefore, we plan to check the behavior of catalysts and materials under continuous gas phase reaction conditions for dehydrogenation of perhydro-benzyltoluene (H₁₂-BT).

Tuning Oxygen Evolution Kinetics and Stability using Hybrid Support: IrRu alloy supported on TiO₂-rGO for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers

김인겸^{1,2,3} · 박희영² · 장종현^{2,4,5*} · 이관영^{3*} · 나인욱⁶ · 박세규^{1*}

¹광운대학교 화학공학과, ²한국과학기술연구원 수소연료전지연구센터, ³고려대학교
화공생명공학과, ⁴고려대학교 그린스쿨, ⁵KU-KIST, ⁶한국과학기술연구원 환경복지연구센터

To retain the oxygen evolution reaction (OER) activity in proton exchange membrane water electrolyzers (PEMWEs) during extended operation under highly oxidizing environments, unsupported OER catalysts have been employed, resulting in increased noble metal loading in PEMWE stacks. This study presents the unprecedented high OER performance of binary Ir and Ru nanoparticles on TiO₂ decorated reduced graphene oxide (rGO) in acidic media. IrRu alloy electrocatalysts supported on TiO₂-rGO (denoted as IrRu/TG) were fabricated from ultra-sonic spray pyrolysis, followed by the polyol method. TiO₂-rGO (TG) support material is found not only to disperse IrRu nanoparticles effectively but also to induce the electronic modulation of Ir by downshifting its d-band center compared to unsupported IrRuO_x. IrRu/TG shows highest OER performances and superior stability when the weight ratio of TiO₂:rGO is 90:10 (=T₉₀G₁₀). The synthesized IrRu/T₉₀G₁₀ shows outstanding OER activity, requiring a lower overpotential of 254 mV to reach 10 mA cm⁻² compare with the unsupported IrRuO_x (372 mV), IrRu/rGO (325 mV), and commercial Ir black (340 mV). Moreover, TiO₂-rGO (TG) restrains the aggregation and oxidative dissolution of IrRu species, thereby enhancing the acidic media stability. In proton exchange membrane water electrolyzer (PEMWE) tests using membrane electrode assemblies (MEAs), IrRu/T₉₀G₁₀ presents more than twice the mass activity of commercial IrO₂ catalyst.

한국에너지학회 2022년도 추계학술발표회

발 행 : 사단법인 한국에너지학회
06038 서울시 강남구 도산대로8길 12(논현동) 305호
전화. 02-451-3630 팩스. 02-451-3631
홈페이지. www.koes.or.kr 이메일. kosee@kosee.or.kr

발행일 : 2022년 10월 19일

발행인 : 한 승 욱

인 쇄 : 동신인쇄사

이 발표논문집은 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로
한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음