

2020년도 한국에너지학회 추계학술발표회

일시. 2020년 11월 11일(수)~11월 13일(금)

장소. 여수엑스포컨벤션센터

주최.



후원.



여수시



전남도 관광재단



한국가스공사

해외자원개발진흥재단



DANSUK



한국아이티오 (주)

2020 한국에너지학회 추계학술발표회 조직위원회

대 회 장 : 박중구 회장

조직위원 : 박진호 수석부회장, 김종남, 김철진, 안지환, 이관영, 한승욱 부회장

운영위원 :

허성운 총무이사, 김태형 재무이사, 박은덕 부편집위원장,

임종세, 윤재호 (이상 기획이사)

김범석, 김진혁, 이창현 (이상 학술이사)

김석민, 김우경, 김종배, 김진영, 김필, 박종배, 백성현, 송재천, 원장묵,

유동진, 유승훈, 정지철, 정진석, 조철희, 천원기, 탁용석, 홍준희 (이상 학계

이사)

김현태, 명성호, 성진기, 송동근, 이광호, 이금정, 이호무, 장원석, 장태연,

조길원, 조상민, 조현춘, 최병일 (이상 연구계 이사)

권기영, 권종택, 김대룡, 김도완, 김동섭, 김성수, 김홍대, 남기웅, 명승엽, 방기연,

송양희, 안용모, 양재구, 오승훈, 오시덕, 이상균, 이종용, 장중철, 정기석, 정돈영,

조승호, 최승환, 탁현수 (이상 산업계 이사)

권오철, 김경재, 고영규, 김한곤, 김호빈, 안관식, 임종원, 이상훈, 정광성, 하종한

(이상 기관 이사)

자문위원장 : 곽병성 상임고문

자 문 위 원 :

정근모 명예회장, 선우현범, 박이동, 박원훈, 김상돈, 권영진, 손재익,

최기련, 윤맹현, 박달영, 강주명, 김지윤, 한문희, 김래현, 남인석, 황주호,

윤기봉, 안남성, 이기우, 남기석, 김경원 고문

추계학술대회 참가안내

2020 KOES AUTUMN CONFERENCE

■ 참가 등록

- 사전등록 : 전자계산서 요청, 온라인카드결제, 계좌입금

전자계산서는 11월 6일까지 학회 메일(kosee@kosee.or.kr)로 요청 메일을 보내 주시면 발급해드립니다.

- 현장등록대 운영시간 : 11. 12(목) 12:30 ~ 11. 13(금) 12:00

- 등록비

구분	정회원·종신회원	비회원	학생회원	학생비회원
사전등록	130,000원	160,000원	90,000원	100,000원
현장등록	150,000원	180,000원	100,000원	110,000원

- 이번 학술대회에는 COVID-19 확산 우려로 만찬을 진행하지 않습니다.
- 학술대회 프로시딩은 행사안내 브로슈어로 대체하며, 발표논문 초록은 파일로 배포합니다.
- 학술대회 등록자를 대상으로 기념품 배부 및 추첨 행사가 준비되어 있습니다.

■ 발표 안내

[구두 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. 구두발표는 12일(목)~12일(금) 양일간 진행됩니다.
- 발표시간은 질의응답을 포함하여 15분입니다
- 노트북과 무선프리젠티어는 발표장에 준비되어 있습니다.
- 발표장에 미리 도착하셔서 노트북에 발표자료를 저장해두시기 바랍니다.

[포스터 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. (P1과 P2로 나뉘어 있습니다.)
- 발표 시간 전까지 본인번호가 붙어 있는 포스터보드에 자료를 부착하시기 바랍니다.
- 작품 규격 : 가로 90cm 세로 130cm이내
- 포스터 양식은 자유이며, 필요하실 경우 홈페이지에 있는 학회양식을 사용하시면 됩니다.

추계학술대회 참가안내

2020 KOES AUTUMN CONFERENCE

■ 코로나바이러스감염증-19 예방을 위한 협조 안내

- 14일 이내 해외를 다녀오셨거나, 발열 및 호흡기 증상이 있는 경우 참석 자제 부탁드립니다.
- 출입구에서 체온 확인 후 손목띠 착용하며, 손목띠가 없을 시 세미나실 내 출입이 거부될 수 있습니다.
- 행사장 내에서 항상 마스크 착용 부탁드립니다.

■ 세미나실 위치

컨벤션센터 1층 컨퍼런스홀로 들어오신 후 계단을 이용하여 한층 내려오시거나, 세미나실 외부 출입구를 이용하여 출입 가능합니다.



2020년도 한국에너지학회 추계학술발표회 총괄일정

■ **일시** : 2020년 11월 11일(수)~11월 13일(금)

■ **장소** : 여수엑스포컨벤션센터 세미나실 (전라남도 여수시 박람회길 1)

▶ **11월 11일(수)**

시간	행사내용
16:00~18:00	분과회의

▶ **11월 12일(목)**

시간	A 발표장 세미나실1	B 발표장 세미나실2	C 발표장 세미나실3	D 발표장 세미나실6	E 발표장 세미나실7	포스터 (컨퍼런스홀1F)
12:30~18:00	등록 (컨벤션센터 B1)					
14:00~16:30	일반세션	특별세션	특별세션	일반세션	일반세션	포스터발표 I (P1)
	분과발표 (원자력)	연구전략본부 정책연구 (한국에너지 기술연구원)	에너지R&D 우수성과발표회 (한국에너지 기술평가원)	분과발표 (에너지정책)	분과발표 (에너지자원)	
coffee break						
16:40~18:00	개회식 (세미나실4) 개회사 : 한국에너지학회 박중구 회장 (서울과학기술대학교)					
	2020년도 한국에너지학회 정기총회 및 우수논문시상식 (세미나실4)					

▶ **11월 13일(금)**

시간	A 발표장 세미나실1	B 발표장 세미나실2	C 발표장 세미나실3	D 발표장 세미나실6	E 발표장 세미나실7	포스터 (컨퍼런스홀1F)
9:30~12:00	등록 (컨벤션센터 B1)					
10:00~12:00		일반세션	일반세션			포스터발표 II (P2)
	-	분과발표 (신재생에너지)	분과발표 (에너지산업) (수소연료전지)	-	-	

특별세션 I

- **일 시** : 2020년 11월 12일(목) 14:00~16:30
- **장 소** : 세미나실2
- **주 관** : 한국에너지기술연구원
- **세션명** : 한국에너지기술연구원 연구전략본부 정책연구

시간	내 용	발표자
14:00 - 14:10	특별세션 소개	최상진(좌장)
14:10 - 14:40	국가 기후변화 대응 기술력 제고를 위한 법·제도 개선 방안	배치혜
14:40 - 15:10	상향식 에너지 시스템 분석 모형을 이용한 재생에너지 보급확대를 위한 ESS 역할 분석	박상용
15:10 - 15:30	Break Time	
15:30 - 16:00	충남 수소기업 대상 국제공동연구 주제 발굴 프로세스 개발	백운호
16:00 - 16:30	특허분석을 통한 국제공동연구 주제 발굴 전략 수립 (수소연구분야 중심)	정지후
16:30 - 17:00	Q&A	

특별세션 II

- **일 시** : 2020년 11월 12일(목) 14:00~16:30
- **장 소** : 세미나실3
- **주 관** : 한국에너지기술평가원
- **세션명** : 에너지R&D 우수성과 발표회

시간	내 용	발표자
14:00~14:30	분산 발전용 고 신뢰성 SOFC 스택 제조 기술 개발	(주)미코 (지준구)
	kW급 건물용 고체산화물 연료전지 시스템 실용화 기술개발	
14:30~15:00	인공지능 기반 원전 기동 및 정지 운전지원 기술개발	한국수력원자력 (김윤구)
15:00~15:30	초고속 충전을 위한 400kW급 전기자동차 충전시스템 개발	시그넷이브이 (원서연)
15:30~16:00	사용 후 리튬이차전지로부터 리튬 회수 및 소재화 상용공정 개발	성일하이텍 (변석현)
16:00~16:30	가스터빈(GT24)의 고압터빈 1단 단결정회전익 개발	한국로스트왁스(주) (정의석)

● ● ● 11월 12일(목) / A발표장

>>> 원자력		좌장 : 이우광 (한국수력원자력)	page
A01 14:00~14:15	비상디젤발전기 출력 변동에 따른 비상정지 사례 <u>김영철</u> (Young Cheol Kim) 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)		31
A02 14:15~14:30	원자로조절계통 탄력운전 성능 평가 <u>유극중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		32
A03 14:30~14:45	가압경수형 원전 환경 변형을 유지 조건에 따른 316 스테인리스강의 피로수명 평가 <u>김태순</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		33
A04 14:45~15:00	인공지능을 활용한 운전지원 시스템 설계 <u>박대승</u> · 김윤구 한국수력원자력(주) 중앙연구원 계진연구소 운전기술그룹		34
A05 15:00~15:15	모터구동벨브 성능평가 스템 마찰계수 특성분석 및 평가방안 <u>이태경</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)		35
A06 15:15~15:30	안전방출벨브 구조 특성에 따른 시트 밀봉력 고찰 <u>오승환</u> · 이태경 · 송석윤 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)		36
A07 15:30~15:45	증기터빈 습분유입과 전기출력 영향고찰 <u>이우광</u> · 최문호 한국수력원자력 중앙연구원		37

● ● ● 11월 12일(목) / D발표장

>>> 에너지정책		좌장 : 임슬예 (한국지역난방공사)	page
D01 14:00~14:15	가격 민감도 추정법을 이용한 주택용 열수요함수 분석 임슬예 · 유승훈* 한국지역난방공사 미래개발원, *서울과학기술대학교 에너지환경대학원		38
D02 14:15~14:30	차세대 지능형교통시스템 확장에 대한 외부편의 추정 이해정 · 최선형 · 허성윤 서울과학기술대학교 에너지정책학과		39
D03 14:30~14:45	조건부 가치추정법을 이용한 그린 리모델링 시행사업에 대한 편의 추정 최선형 · 이해정 · 허성윤 서울과학기술대학교 에너지정책학과		40
D04 14:45~15:00	에너지 기술혁신 벤처기업 현황 및 시사점 김봉균, 이재용, 최태환, 이지희, 송수원, 서성록 한국에너지기술평가원		41
D05 15:00~15:15	조류발전 사업화연계 연구개발을 위한 대중의 지불의사액 분석 최경란 · 김주희 · 유승훈 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과		42
D06 15:15~15:30	산업연관분석을 통한 원자력 발전과 재생에너지 발전의 경제적 파급효과 비교 김신영 · 김주희 · 유승훈 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과		43
D07 15:30~15:45	수소 충전소 건설에 대한 국민 수용도 분석 김주희 ¹ · 이지원 ² · 유승훈 ^{3,*} ^{1,3} 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 ² 서울과학기술대학교 일반대학원 건설시스템공학과		44

● ● ● 11월 12일(목) / E발표장

>>> 에너지산업 및 자원		좌장 : 이동현 (성균관대학교)	page
E01 14:00~14:15	라만분석기를 이용한 LNG 품질 분석 실증연구 주우성 · 고유진 · 모용기 · 이승호 · 이강진 · 김용철 한국가스공사 가스연구원 LNG기술연구소		45
E02 14:15~14:30	국가 온실가스 감축목표에 따른 이산화탄소 저장기술 및 활용방안 연구 한정민 · 우경택 · 정종대 · 유현석 한국가스공사 가스연구원 수소기술연구소		46
E03 14:30~14:45	생물학적 전환공정을 통한 발전배가스내 CO ₂ 저감 및 고가물질 생산 신기술 개발 장원석 · 임종원 · 오문세 · 이종준 · 이현철 · 유지혜 한국지역난방공사 미래개발원		47
E04 14:45~15:00	유동층에서 나노입자 혼합물의 수력학적 특성 허승준 ¹ · 김준영 ^{*2} · 이동현 ^{*1} 성균관대학교 화학공학과 ¹ , 성균관대학교 화공융합기술연구소 ²		48
E05 15:00~15:15	초고속 카메라를 이용한 gas-solid flow 에서의 CPFD modeling 검증 성우창 · 김준영* · 이동현* 성균관대학교 화학공학과		49
E06 15:15~15:30	천연가스관련 이산화탄소 배출 저감을 위한 최적 CCU 기술 연구 우경택 · 정종대 · 한정민 · 유현석 한국가스공사 가스연구원 수소기술연구소		50
E07 15:30~15:45	액화 공기 에너지를 이용한 수소 액화 플랜트 공정 설계 임동렬 · 이춘식 · 윤문규 · 엄충섭 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		51
E07 15:45~16:00	대기안정도와 난류 소산율이 풍력발전단지 연간발전량 변화에 미치는 영향성 연구 김대영 · 김범석* 제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정, *제주대학교 대학원 풍력공학부		52

● ● ● 11월 13일(금) / B발표장

>>> 신재생에너지		좌장 : 김영곤 ((재)차세대융합기술연구원)	page
B01 10:00~10:15	Sorption-enhanced chemical looping reforming 공정 내 화학반응에 따른 oxygen carrier와 CO ₂ sorbent의 분쇄특성 연구 김준영 · 이동현* 성균관대학교 화공융합기술연구소, University of British Columbia, *성균관대학교 화학공학과		53
B02 10:15~10:30	바이오가스 고질화를 위한 기체분리막 공정 적용 이충설 · 임진혁 · 민광준 · 한상훈 · 김세종 · 김홍대 · 하성용 · 장원석* · 오문세* (주) 에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원		54
B03 10:30~10:45	가압 기포탑에서 수력학적 특성에 관한 온도의 영향 배건 · 고강석* · 노남선* · 임영일** · 이동현 성균관대학교 화학공학부, *한국에너지기술연구원 CCP융합연구단, **국립한경대학교 화학공학과		55
B04 10:45~11:00	블록체인 네트워크를 활용한 스마트시티 에너지관리시스템의 소셜 빅데이터 활용에 관한 연구 김영곤 · 최중인 (재)차세대융합기술연구원		56
B05 11:00~11:15	나프타퀴논 기반 알칼리 수계 레독스 흐름 전지 성능 향상 이원미 ¹ · 박균호 ¹ · 권용재 ^{1,2*} ¹ 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과 ² 서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과		57
B06 11:15~11:30	나프타퀴논과 요오드 기반 수계 레독스 흐름 전지 성능 평가 박균호 ¹ · 이원미 ¹ · 권용재 ^{1,2*} ¹ 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과 ² 서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과		58

● ● ● 11월 13일(금) / C발표장

>>> 에너지산업 / 수소연료전지		좌장 : 강승규 (한국가스안전공사)	page
C01 10:00~10:15	부하 패턴이 사업 타당성에 미치는 영향에 대한 고찰 오시덕 · 서석호 · 송정훈* (주)블루이코노미전략연구원, *서울대학교 기계항공공학부		59
C02 10:15~10:30	고망간강식 내조인 저장탱크의 운전 모니터링 김정환 · 이민경 · 길성희 · 유근준 · 김영규 한국가스안전공사 가스안전연구원		60
C03 10:30~10:45	수배관 시스템에서 체크밸브의 슬램으로 인한 수충격 완화 실증연구 양재구 · 서상일 · 맹석주 · 양지석 · 오재욱 · 오세명 플로우테크		61
C04 10:45~11:00	융복합(대수층 계간축열, 수열히트펌프, 목재펠릿보일러) 에너지팜을 위한 온실 생육환경 측정 방법에 대한 연구 오정석^{1)*} · 강새별 ¹⁾ · 장기창 ²⁾ · 최재준 ¹⁾ · 홍성국 ¹⁾ · 이길봉 ²⁾ · 양제복 ³⁾ · 윤시원 ¹⁾ · 윤영직 ¹⁾ · 위덕재 ¹⁾ · 이현희 ¹⁾ · 이찬규 ¹⁾ · 김기봉 ²⁾ 한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실 ¹⁾ , 열변환시스템연구실 ²⁾ , 신연소발전연구실 ³⁾		62
C05 11:00~11:15	CDI*을 이용한 물정화 및 결정화 기술 개발 유장용 · 강위관 · 조호용, 이채수 · 장원석* · 최도현* 두산중공업 기술연구원, *한국지역난방공사		63
C06 11:15~11:30	선박용 수소충전소 위험성평가 및 기준개발 연구 강승규 · 윤진희 · 허윤실 한국가스안전공사 수소연구실		64
C07 11:30~11:45	금속수소화물을 이용한 수소추진선박의 연료공급시스템 김준배 · 최성윤 · 조배석 한국조선해양기자재연구원 가스연료기술센터		65

포스터발표 I

▶ 좌장 : 임중세 (한국해양대학교), 유동진 (전북대학교)

● ● ● **11월 12일(목) 14:00-16:00**

번호	발 표 주 제	page
P1-1	IoT 기반 전력 사용량 분석 시스템 개발 <u>이민호</u> · 김성환 목포대학교 전기및제어공학과	69
P1-2	전기차 충전스테이션 적용 태양광발전 및 전력, 냉난방 삼중발전 에너지공급 시스템의 EMT 시뮬레이션 <u>전성국</u> · 이동호 · 정용민 목포대학교 전기공학과	70
P1-3	기술선도를 위한 분산형에너지 융복합부품 성능시험 및 인증지원 <u>안정훈</u> · 배정섭 · 김종우 (재)대구기계부품연구원	71
P1-4	배터리셀 자가 교체가 가능한 비용접형 볼트 고정식 스마트 모빌리티 배터리팩 개발 <u>안정훈</u> · 서명수* · 성동길* · 김형경* (재)대구기계부품연구원, *(주)씨오알엔	72
P1-5	가솔린엔진용 배기가스 재순환장치 형상 개발 <u>배정섭</u> · 한대성* (재)대구기계부품연구원, *(주)디에이치지	73
P1-6	지역난방 최적 열사용량 산정을 위한 Neural Network 딥러닝을 통한 열수요 예측 <u>김민영</u> · 김래현 · 김호현 · 김가희 · 류기운* 서울과학기술대학교 산학협력단, *서울과학기술대학교 화공생명공학과	74
P1-7	마이크로웨이브를 이용한 하이브리드 가열 시스템의 특성 분석 <u>전원표</u> · 김성일 · 오상현 · 박기호 · 이현구* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부 EMS연구실, *(주)세지테크	75
P1-8	고Mn강 저장탱크 개발 및 초도운전 데이터 분석 <u>이민경</u> · 김정환* · 길성희 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원	76
P1-9	드론을 활용한 도시가스배관 안전점검 관련 제도 분석 및 타당성 검토 <u>이화영</u> · 김정환* · 길성희 · 유근준 · 김영균 한국가스안전공사 가스안전연구원	77

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-10	RF 열플라즈마를 이용한 이차전지 음극재용 Nano-SiO _x 형성 제어 연구 오성택 · 서인규 · 장혜련 · 이순직 · 연정미 · 박원규 · 신명선 · 최선용 철원플라즈마산업기술연구원	78
P1-11	고가역 및 초고속 에너지 저장 응용을 위한 환원된 그래핀 산화물 나노시트의 마이크로웨이브에 의한 합성 장혜련 · 서인규 · 오성택·이순직 · 연정미 · 박원규 · 신명선 · 최선용 · 백승민* 철원플라즈마산업기술연구원, *경북대학교 화학과	79
P1-12	Technical Classification Based on Energy Industry Characteristics in Case of Energy Resource Sector Seongkon LEE ¹ · * · Kyeongtaek KIM ¹ · Woonho BAEK ² · Ran YOO ¹ · Jeeyoung CHOI ¹ · Jiseok AHN ¹ · Gento MOGI ³ ¹ KIER, ² Chungnam National University, ³ The University of Tokyo	80
P1-13	머신러닝 기반 신재생에너지 예측을 이용한 가상발전소의 최적 운영 이정훈 · 이상봉 · 김진오 한양대학교 전기공학과	81
P1-14	코로나19가 국내 전력 부문의 수요 및 공급과 온실가스 배출량에 미친 영향 박년배 *한국에너지기술연구원 연구기획조정실	82
P1-15	On the issues of introducing Green Pricing in South Korea Woo Il Chang ^a · Sung Joong Kima,* · Yong Tae Yoona · Heesu Yunb · Jungmin Hac ^a Seoul National University, ^b Boston College, ^c Lawrence Livermore National Laboratory	83
P1-16	지역난방 냉각수 배관의 용접부 파손 분석 정준철 · 김우철* · 김경민* · 하태백* · 손홍균** · 김정구*** · 이수열**** · 김희산***** 아주대학교 인공지능·데이터 사이언스학과, *한국지역난방공사 미래개발원, **한국부식방식학회, **성균관대학교 신소재공학부, ***충남대학교 신소재공학과, ****홍익대학교 재료공학과	84
P1-17	매체순환건식개질(Cheical looping dry reforming)에서 산소전달입자LaFeO ₃ 에 지지체 CeO ₂ 첨가 연구 강현석 ¹ · 유동진 ^{1,2} · 손정민 ^{1,3,*} 전북대학교	85
P1-18	위상최적 설계된 광폭 임펠러의 유효 회전속도 선정에 관한 연구 김태형 청주대학교 항공학부 항공기계공학전공	86

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-19	P형 이중 도핑을 활용한 그래핀/실리콘 쇼트키 태양 전지 박세원 , 말릭 압둘 레흐만, 하지상, 전성찬* 연세대학교 기계공학과	87
P1-20	대용량 풍력용 발전기 성능시험설비 엔지니어링 이재별 · 이동규 · 조경희 · 김응상 · 안선주* 한국전기연구원 디지털에너지시스템연구센터, 전남대학교 전기공학과	88
P1-21	Nitrogen-doped graphene oxide encapsulated transition metal S. Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo(유동진)¹ * Jeonbuk National University	89
P1-22	Synthesis and properties of sulfonated poly(arylene ether) copolymers containing fluorenyl groups for PEMFCs Sung Kwan Ryu¹ · Ae Rhan Kim² · Dong Jin, Yoo(유동진)^{1,2*} Jeonbuk National University	90
P1-23	Synthesis of trimetallic chalcogenides on supported graphene oxide nanocomposites as sensitive and selective detection of dopamine Santhosh Kumar Ramasamy¹ · Dong Jin Yoo(유동진)^{1,2*} Jeonbuk National University	91
P1-24	Anchoring of MnFeSe on nitrogen doped graphene oxide as an efficient electro catalyst for hydrogen evolution reaction Logeshwaran Natarajan¹ · Dong Jin Yoo(유동진)^{1,2*} Jeonbuk National University	92
P1-25	AEMFC 적용을 위한 수지상 정도에 따른 음이온 교환막의 형태학적 특성 연구 김현진¹ · 유동진^{1,2*} 전북대학교	93
P1-26	실시간 수소가스 모니터링 시스템 개발 권대환 · 신상호 · 최슬기 · 유철희 한국가스안전공사 가스안전연구원	94
P1-27	국내외 수소충전소 안전거리 기준 비교 분석 임재용 · 권대환 · 최슬기 한국가스안전공사 가스안전연구원	95
P1-28	수소충전소 고장예지 및 안전관리 상용화 기술개발에 관한 연구 최영은 · 조충희 · 김동환 · 강승규 · 허윤실 한국가스안전공사 가스안전연구원	96

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-29	액체수소 저장탱크 운영을 위한 정량적 위험성 평가 김수현 · 김정환* · 이민경 · 길성희 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원	97
P1-30	이온 전도도를 높이기 위한 정렬된 수지상 구조의 폴리(아릴렌 이써 설펜)과 폴리(페닐렌 옥사이드)의 블렌딩 비율에 따른 음이온 교환 막의 형성 및 특성분석 김상희 ¹ · 유동진 ^{1,2*} 전북대학교	98
P1-31	연료전지용 STiO ₂ 를 이용한 긴 소수성사슬을 갖는 술펜화 폴리(이써 이써 케톤) 블록공중합체 복합막의 제조 및 특성 김애란 ^{1,2} · 유동진 ^{2,3*} 전북대학교	99
P1-32	질화 금속 코어-백금 셸 촉매의 제조와 산소환원반응 특성 분석 김동건 · 이지호 · 이수진 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필 전북대학교 반도체·화학공학부	100
P1-33	금속-탄소 복합담체를 이용한 백금 촉매의 제조 및 산소환원반응 특성 분석 이은희 · 김동건 · 이지호 · 이수진 · 정성권 · 정혜원 · 김필 전북대학교 반도체·화학공학부	101
P1-34	바이오매스를 사용하여 제조한 산소환원반응용 비귀금속 촉매의 특성분석 이지호 · 김동건 · 이수진 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필* 전북대학교 반도체 화학공학부	102
P1-35	수소충전소 법정계량 표준모델 개발 및 실증에 대한 개요 최진영 · 임상식* · 한원국 · 길성희 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원	103
P1-36	이동식 수소충전소 환기조건에 관한 연구 이수민 · 김동환 · 조충희 · 강승규 한국가스안전공사 가스안전연구원 수소안전연구부	104
P1-37	선박용 수소충전소 해외기술동향 분석 연구 윤진희 · 강승규 · 허윤실 한국가스안전공사 가스안전연구원	105
P1-38	수소기술 국제표준화 기반 구축에 관한 연구 김혜림 · 강승규 한국가스안전공사 가스안전연구원	106

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-39	터널의 연중 부하에 대한 최적 운전을 고려한 신·재생에너지 설비 용량 산정에 관한 연구 <u>김기훈</u> 한국도로공사 도로교통연구원	107
P1-40	탄소 층의 두께에 따른 철산화물의 리튬 이온 배터리를 음극 활물질로의 응용 <u>이수진</u> · 김동건 · 이지호 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필* 전북대학교 반도체화학공학부	108
P1-41	블밀링 처리된 그래파이트로부터 제조된 환원된 그래파이트 옥사이드의 고체 상태의 플렉시블 슈퍼커패시터 전극으로의 응용 <u>정성권</u> · 김동건 · 이지호 · 이수진 · 이은희 · 정혜원 · 김필* *전북대학교 반도체 화학공학부	109
P1-42	도시형 스마트그리드 경제성 검증 시뮬레이션을 위한 분산자원 전력 모듈 구현 <u>임정택</u> · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원	110
P1-43	신재생에너지 발전량 예측 및 분석을 위한 시계열 데이터 분석 소프트웨어 개발 <u>이재규</u> · 김태형* · 이상엽 · 함경선* 한국전자기술연구원 지능융합SW연구센터, 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터*	111
P1-44	바이오중유 물성이 3ton 보일러 배출가스 및 연료 소모량에 미치는 영향 연구 <u>김성우***</u> · 김현진* · 전화연**** · 이민호* · 김종렬* *한국석유관리원 석유기술연구소, **서울대학교 기계공학과, ***고려대학교 환경공학과	112
P1-45	글로벌 석유·가스 기업의 신·재생에너지 사업 동향 분석 <u>정세윤</u> · 임중세 한국해양대학교 에너지자원공학과	113
P1-46	3D 저작툴을 활용한 신재생에너지 디지털트윈 플랫폼 아키텍처 <u>조인표</u> · 이상엽 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원	114
P1-47	수치예보모델을 활용한 XGBoost 기반 하루 전 태양광 발전량 예측 <u>김태형</u> · 박재호 · 임정택 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	115
P1-48	고연소도 사용후핵연료 건식저장을 위한 캐스크 내부압력 측정사례 <u>이동희</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹	116

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-49	원전 급수가열기 누설 판별을 위한 최적 화학지표 선정 검토 <u>이경희</u> · 성기방 · 송규민 한국수력원자력(주) 중앙연구원	117
P1-50	방사성폐기물 처분을 위한 Sr, Tc 핵종분리 분석 연구 <u>최진수</u> · 홍은희 · 이상호 · 정가희 · 손옥 한국수력원자력 중앙연구원	118
P1-51	국내 경수로 원전의 원자로냉각재 pH 관리 현황 고찰 <u>최진수</u> 한국수력원자력 중앙연구원	119
P1-52	원전 열성충/열피로배관 관리현황 및 자동초음파검사에 대한 고찰 <u>문균영</u> · 한경석 · 김왕배 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소	120
P1-53	원자력발전소 원자로 하부헤드 관통관(BMI) Nozzle 관리방안에 대한 고찰 <u>문균영</u> · 이태훈 · 김왕배 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소 비파괴기술그룹	121
P1-54	디젤발전 시스템의 주파수 응답특성을 통한 성능 평가에 관한 실험적 연구 <u>김영철</u> · 이상희 · 강승희 · 김명훈 한국수력원자력(주) 중앙연구원(KHNP-Central Research Institute)	122
P1-55	UV 램프 출력에 따른 유기산 폐액분해 비교평가 <u>김초롱</u> · 김학수 · 김정주 · 이경희 한국수력원자력(주) 중앙연구원	123
P1-56	유기산 종류에 따른 탄소강 산화막 제거율 평가 <u>김초롱</u> · 김학수 · 김정주 · 최진수 한국수력원자력(주) 중앙연구원	124
P1-57	ISO 4037 개정(2019)에 따른 기준 엑스선장 요건 비교 분석 <u>김형진</u> · 원유호 한국수력원자력(주) 중앙연구원	125
P1-58	OH기간 중 발전소정전사고시 중수로 원전의 냉각재 보충 방법 <u>배연경</u> · 김명수 · 이영승 한국수력원자력(주) 중앙연구원	126
P1-59	화재시 안전정지를 위한 운전원 수동조치 문서화 지침 개발 <u>배연경</u> · 이태수 · 정혜영 한국수력원자력(주) 중앙연구원	127

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-60	신고리 5,6호기 건설 4D 시스템 개발 김우중 · 변수진 · 김종명 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	128
P1-61	원자력발전소 스마트플랜트 구현을 위한 무선 솔루션 개발 변수진 · 김우중 · 김종명 · 이수일 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	129
P1-62	우라늄 농축방법별 전과정 물발자국 비교 정환삼 ^a · Nguyen Huu Tiep ^b · 김승수 ^a ^a 한국원자력연구원 미래전략연구본부, ^b VinAtom/INST, Vietnam	130
P1-63	해체원전의 방사성폐기물 처리시설 구축방안 연구 유지환 · 박경록 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 방폐물기술그룹	131
P1-64	원자력시설의 철거로 인해 발생하는 건물과 건물 잔해의 규제해제를 위한 방사선학적 방호기준 분석 유지환 · 조향래 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 방폐물기술그룹	132
P1-65	수출형 원전 탄력운전 성능 요건 유극중 한국수력원자력(주) 중앙연구원	133
P1-66	기기연계모듈 시제품의 가용도 분석 최선미 · 이지훈* · 이윤상** 한국수력원자력 중앙연구원, *한국전력기술, **수산이엔에스	134
P1-67	APR1000 사고감시시스템의 범위 및 안전등급 검토 최선미 한국수력원자력 중앙연구원	135
P1-68	대형원전 사고완화를 위한 피동응축냉각탱크내 잔여냉각수 활용방안 평가 강상희 · 문호림 · 이재민 한국수력원자력 중앙연구원	136
P1-69	MACST 전략 수행을 위한 이동형설비별 인력 가용성 평가 송규상 한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 사고대응그룹	137
P1-70	케이블 사전설치 시 이동형발전차 가용시간 평가 송규상 한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 사고대응그룹	138

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-71	원자력발전소 설비관리프로그램(PMP) 운영시스템 개발 <u>현진우</u> · 엄동운 · 이상대 한국수력원자력 중앙연구원	139
P1-72	열수축 튜브의 기능 확인 방법에 대한 고찰 <u>허희무</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	141
P1-73	교류 리액터의 기능 확인 방법에 대한 연구 <u>허희무</u> · 조은일 · 양창석 한국수력원자력(주) 중앙연구원	142
P1-74	기장연구로 핵연료 품질보증 및 품질관리 <u>김호민</u> · 송화영 · 정용진 한국원자력연구원, 연구로핵연료개발부	143
P1-75	국내 중저준위 방사성폐기물 추적관리 시스템의 현황 및 문제점 <u>박선애*</u> · 장상현** · 이선일*** 충남대학교 컴퓨터공학과*, 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과**, 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부***	144
P1-76	프라이빗 블록체인 기술을 활용한 국내 중저준위 방사성폐기물 추적관리 시스템의 개선 방안에 대한 연구 <u>박선애*</u> · 장상현** · 이선일*** 충남대학교 컴퓨터공학과*, 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과**, 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부***	145
P1-77	대형원전 일체형 원자로상부구조물 Critical Load 분석 <u>한성흠</u> · 이도환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	146
P1-78	대형원전 일체형 원자로상부구조물 제작성 검토 <u>한성흠</u> · 이도환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	147
P1-79	수전해 방식에 따른 원자력발전소 수소생산의 경제성 및 민감도 분석 <u>문종설*</u> · 이종보* · 박찬오** *한국수력원자력(주) 중앙연구원, **서울대학교 원자력정책센터	148
P1-80	경수로 사용후핵연료 운반용기 차폐 민감도 평가 <u>차균호</u> · 정진호 한국수력원자력 중앙연구원	149
P1-81	중수로 사용후핵연료 운반용기(Hi-Star63) 운반사고시 차폐 평가 <u>차균호</u> · 정진호 한국수력원자력 중앙연구원	150

● ● ● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-82	확률론적 방사선수송 전산코드 검증 방법론 윤창연 한수원(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹	151
P1-83	고장률 분포에 따른 커패시터 활성화 에너지 산출 및 검증수명 평가방법 고찰 양창석 · 허희무 · 홍영희 한수원 중앙연구원 검증기술그룹	152
P1-84	낙뢰에 의한 서지로부터 계측제어기기 보호에 대한 고찰 지영화 한국수력원자력(주)	153
P1-85	소형 모듈형 원자로압력용기의 가압열충격 파손확률 민감도 해석 김만원 한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소	154
P1-86	Production of biochar using waste biomass and its potential applications 최용근 건국대학교 생물공학과	155
P1-87	바이오차를 이용한 수계 내 중금속 (Cu) 제거 김지은 · 최용근* · 오경빈* · 강광남 에이티이(주), *건국대학교 생물공학과	156
P1-88	건설산업에서의 3D프린팅을 이용한 그린시멘트의 역할 및 연구 동향 Jung Euntae¹ · Park Joochan² · Ahn Jiwhan(안지환)^{3*} Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM)	157
P1-89	한국·베트남 석회석 특징 및 활용에 관한 고찰 Jung Euntae¹ · Kwak Yujung² · Ahn Jiwhan(안지환)^{3*} Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM)	158
P1-90	포스트 코로나 시대 비대면 산업으로써 글로벌연구 동향 Jung Euntae¹ · Chaeyeon Lim² · Ahn Jiwhan(안지환)^{3*} Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM)	159
P1-91	탄소광물화 기술을 이용한 석회의 항균 및 항바이러스 효능의 질병관리 방역사업으로의 역할 및 해외 동향 연구 정은태¹ · 김유라² · 안지환^{3*} 1,2,3*한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탄소광물화사업단	160
P1-92	Emerging Technologies of Clean Coal for Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) Thenepalli Thriveni¹, Ji Whan Ahn(안지환)^{2*} 1Sri Venkateswara University College of Science, 2KIGAM	161

●●● 11월 12일(목) 14:00-16:00

번호	발 표 주 제	page
P1-93	Seashell Derived Nano-calcium Hydroxide: A Potent Precursor for the Removal of Phosphorus from Aqueous Solution <u>Mohd Danish Khan</u> ^{1,2} , Ji Whan Ahn(안지환) ^{2*} ¹ University of Science and Technology (UST), ² KIGAM	162
P1-94	Characteristic Investigation of CFBC Fly Ash to Promote Rare Earth Elements Extraction and CO ₂ Mineralization <u>Lai Quang Tuan</u> ^{1,2} , Kyung Ho Park ² , Euntae Jung ² , Ji Whan Ahn(안지환) ^{2*} ¹ University of Science and Technology (UST), ² KIGAM	163
P1-95	플라즈마 열원을 이용한 폐슬레이트 무해화 연구 김태욱 · 이규향 · 김형준 · 진예진 · 이수민 · 손병구* 철원플라즈마산업기술연구원	164
P1-96	Highly Stabilized Enzyme-Polymer Composite Material for CO ₂ Conversion and Utilization <u>Han Sol Kim</u> (김한솔) · Seung-Hyun Jun · Jungbae Kim Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University	165
P1-97	CO ₂ Conversion and Utilization by Highly-Stabilized and Magnetically-Separable Enzyme System <u>Yunjae Kim</u> (김윤재) · Han Sol Kim · Jungbae Kim Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University	166
P1-98	원자력발전소 표준작업관리모델 개발 염동운 · 현진우 · 이상대 한국수력원자력(주) 중앙연구원	167
P1-99	원자력발전소 계통성능감시활동 개선 검토 이상대 · 현진우 · 염동운 한국수력원자력 중앙연구원	168

포스터발표 II

▶ 좌장: 장원석 (한국지역난방공사), 김태형 (청주대학교)

● ● ● **11월 13일(금) 10:00~12:00**

번호	발 표 주 제	page
P2-1	12V AGM 납축전지의 환경 온도에 따른 충·방전 모델링 <u>이재우</u> , 신치범, 김성태, 강하현 아주대학교; 아주대학교 에너지시스템학과; 현대자동차; 클라리오스텔코	169
P2-2	비가역적 리튬손실에 따른 리튬이온전지의 충전 거동 예측 모델 개발 <u>이동철</u> , 이재우, 신치범 [†] , 장일찬*, 송진주*, 우중제* 아주대학교 에너지시스템학과; *광주바이오에너지연구개발센터 한국에너지기술연구원	170
P2-3	환경온도에 따른 리튬이온전지 전기적 거동 모델링 <u>김병목</u> , 이동철, 이재우, 신치범 [†] , 장일찬 ¹ , 송진주 ¹ , 우중제 ¹ 아주대학교 에너지시스템학과; ¹ 광주바이오에너지연구개발센터 한국에너지기술연구원	171
P2-4	AI 알고리즘의 발전분야 활용 가능분야 도출 <u>윤태식</u> · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남 한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀	172
P2-5	Decision Tree의 인공지능 학습을 통한 최적 전략 도출 방법 <u>윤태식</u> · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남 한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀	173
P2-6	최소자승법을 활용한 비용 요인 고찰 <u>윤태식</u> · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남 한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀	174
P2-7	Sigmoid 함수를 활용한 기기 예측진단 방법 고찰 <u>윤태식</u> · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남 한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀	175
P2-8	AR(증강현실)의 발전분야 활용에 관한 고찰 김영국 한수원(주) 중앙연구원 디지털융합그룹	176
P2-9	은이 도핑된 망간 산화물을 이용한 PM 저온 연소 반응 <u>김민준</u> · 이재환 · 이은준 · 이재성 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	177

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-10	알루미늄의 결정상 변화에 따른 과산화수소 직접합성반응 활성변화의 규명 <u>이석호</u> · 한근호* · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	178
P2-11	반응용매 조성에 따른 과산화수소 직접합성반응 활성변화 <u>황승연</u> · 한근호 · 이석호 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	179
P2-12	Ga/HZSM-5 촉매를 이용한 메탄 및 경질 탄화수소의 공동 방향족화 반응과 촉매 수명 장기화를 위한 산화적 재생 반응 <u>이현민</u> * · 이병진* · 이관영*, ** *고려대학교 화공생명공학과, **KU-KIST 에너지환경대학원 그린스쿨	180
P2-13	팔라듐-세리아 촉매의 일산화탄소 및 탄화수소 동시산화 활성 개선을 위한 새로운 금속 도입 및 효과 <u>서야은</u> · 이민우 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	181
P2-14	LNG 병커링 운영 관련 LNG 누출 분산 범위 예측에 관한 연구 <u>임정석</u> · 유철희 · 최영주 · 정동호* 한국가스안전공사 가스안전연구원, *선박해양플랜트연구소	182
P2-15	이동식 LNG 충전소 저장설비 가스누출에 따른 피해영향평가 연구 <u>전은경</u> · 최영주 · 김필중 · 유철희 한국가스안전공사 가스안전연구원	183
P2-16	선박용천연가스사업 도입 관련 국내 LNG 병커링 운영 기준 개발 방향 연구 <u>최영주</u> · 김필중 · 이동원 · 유철희 · 정동호* 한국가스안전공사 가스안전연구원, *한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소	184
P2-17	기반시설관리법에 따른 송유설비 기준 마련 연구 <u>김필중</u> · 최영주 · 이동원 · 유철희 한국가스안전공사 가스안전연구원	185
P2-18	가스시설 소방설비 국내 설치 기준 현황 분석 <u>백지효</u> · 최슬기 · 유철희 한국가스안전공사 가스안전연구원	186
P2-19	국내외 LNG 충전 규격 분석을 통한 국내 이동식 LNG 충전 도입 기준 개발 연구 <u>봉선중</u> , 최영주, 김필중, 유철희 한국가스안전공사 가스안전연구원	187

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-20	기반시설관리법에 따른 고압 도시가스배관 기준 마련 연구 유철희 · 최영주 · 김필중 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원	188
P2-21	유니심을 이용한 30Nm ³ 급 생물학적 메탄화 공정 해석 모델링 김예빈 · 이동욱 · 김영국 · 이진향 · 주지선* 전력연구원, 에너지환경연구소 기후변화연구소	189
P2-22	선박용 수소충전소 구축을 위한 해외사례 및 현황 검토 이다은 · 윤진희 · 강승규 · 허윤실 한국가스안전공사 가스안전연구원	190
P2-23	신재생에너지 다중환경제어의 실시간 융합관리 김종만* · 김원섭 전남도립대학교 신재생에너지전기과	191
P2-24	신재생에너지 대전력 마이크로파 발생 장치 개발과 연구 김원섭* · 김종만 전남도립대학교 신재생에너지전기과	192
P2-25	미세한 표면 세척을 위한 마이크로 블라스팅 머신 개념 설계 이승민 · 엄민용 · 남태석 · 정해웅 · 이찬형 · 유승지 · 김태형* 청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 항공학부 항공기계공학전공	193
P2-26	증기발생기 전열관 체적성 결함 크기측정 방법에 대한 고찰 천근영 · 한경석* 한수원 중앙연구원	194
P2-27	원전해체 극저준위 방사성금속폐기물의 제한적 재활용 시나리오 이지훈 한수원 중앙연구원	195
P2-28	원전해체시 바이오실드 절단방법 평가 이지훈 한수원 중앙연구원	196
P2-29	원전해체 방사성 콘크리트폐기물 포장 방안 이지훈 한수원 중앙연구원	197
P2-30	원전해체 방사성 콘크리트폐기물 재활용 방안 이지훈 한수원 중앙연구원	198

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-31	원전해체 방사성폐기물 추적관리시스템 개발 <u>이지훈</u> 한수원 중앙연구원	199
P2-32	원전해체 방사성 콘크리트폐기물 표면제염 방안 <u>이지훈</u> 한수원 중앙연구원	200
P2-33	원전해체 방사성폐기물 처분방안 <u>이지훈</u> 한수원 중앙연구원	201
P2-34	원전해체 슬러지폐기물 발생원 평가 <u>이지훈</u> 한수원 중앙연구원	202
P2-35	원전해체 방사성폐기물의 효율적 관리방안 <u>이지훈</u> 한수원 중앙연구원	203
P2-36	원전 결빙배관 비파괴검사방안에 대한 고찰 <u>조용배</u> · 김왕배 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소	204
P2-37	저장대 내 사용후핵연료 배열에 따른 온도영향 평가 <u>김태현</u> · 김용덕 · 김기영 · 이동희 · 정성환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	205
P2-38	급수가열기 전열관 와전류 탐상 검사 교정시험편의 최적 가공방법에 대한 연구 <u>한경석*</u> *한국수력원자력 중앙연구원	206
P2-39	증기발생기 전열관 자유단의 마모깊이 측정 와전류 평가기술 개발을 위한 결합체적 특성 분석 <u>한경석*</u> 한국수력원자력 중앙연구원	207
P2-40	보빈타입 자기카메라의 교체급수가열기 전열관 적용 실증시험 결과 <u>한경석*</u> 한국수력원자력 중앙연구원	208
P2-41	랑스 원전의 RCC-E 법규 개정 및 현황에 대한 고찰 <u>정선철</u> , 박혜성 한국수력원자력(주) 중앙연구원	209

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-42	프라마툼 원전기기의 내환경검증 방법에 대한 고찰 <u>박혜성</u> , 정선철 한국수력원자력(주) 중앙연구원	210
P2-43	원전 해체 시 발생 슬러지폐기물의 특성에 대한 고찰 <u>조항래</u> · 유지환 · 박경록 · 이지훈 한수원(주) 중앙연구원	211
P2-44	폴리머 콘크리트 고전선성용기 건전성 평가를 위한 기술기준에 대한 연구 <u>이미현</u> · 황영환 · 이지훈 한국수력원자력(주) 중앙연구원	212
P2-45	원자로 내부구조물의 처분에 대한 연구 <u>황영환</u> · 이미현 · 유지환 · 이지훈 한국수력원자력(주) 중앙연구원	213
P2-46	대형원전 가압기 개선 상부지지구조물 건물구조물 적합성 평가 <u>김규형</u> · 김성민* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)	214
P2-47	대형원전 원자로냉각재계통 축소모델 주배관 측정 압력요동 분석 <u>김규형</u> · 정동화* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)	215
P2-48	연소이력을 반영한 사용후핵연료의 임계안전해석 타당성 평가 <u>김도연</u> 한국수력원자력 중앙연구원	216
P2-49	OPR-1000형 재장전 노심설계 장전모형 탐색시스템 개발 <u>김도연</u> 한국수력원자력 중앙연구원	217
P2-50	운영기술지침서를 적용한 원전 상태감시 프로그램 개발 <u>이병오</u> · 김대웅 · 민지호 · 이관율 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	218
P2-51	웹기반의 원전 이상상태 자동통보시스템 고도화 구축 <u>이병오</u> · 김대웅 · 민지호 · 이관율 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	219
P2-52	기상자료 통계전처리방법이 대기확산인자에 미치는 영향 <u>정윤희</u> · 김정미 · 이영주 · 조현준 한국수력원자력 중앙연구원	220

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-53	주기 연소도에 따른 소형냉각재상실사고 파단 스펙트럼 해석 <u>이석호*</u> 한국수력원자력 중앙연구원	221
P2-54	대형원전 주증기파단사고 시 안전주입에 따른 반응도 영향 평가 및 설계 검토 <u>이석호*</u> 한국수력원자력 중앙연구원	222
P2-55	원전 구조물 비선형 상세내진해석을 위한 유한요소해석 요소 타입에 따른 민감도 분석 <u>남현석</u> · 김태순 · 김갑순 · 이상섭 한국수력원자력 중앙연구원	223
P2-56	시료의 기하학적 형상과 물리적 성질이 방사선 계측효율에 미치는 영향 <u>신승수*</u> · 김경호 · 심소정 · 최영구 원전해체연구소(NDRI) 기술개발팀	224
P2-57	터빈 추력베어링 마모감지기 설정오류에 의한 계측기 비정상 지시 고찰 <u>김한울</u> · 정혁진 한국수력원자력 중앙연구원	225
P2-58	원전 제어시스템에 대한 효율적인 보안성평가 방법론 연구 <u>이수일</u> 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	226
P2-59	원전 제어시스템의 사이버 위협 및 취약점 분석 방법론 고찰 <u>이수일</u> 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	227
P2-60	대형원전 제어봉구동장치(CEDM) 가속수명시험 <u>이상섭</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	228
P2-61	대형원전 제어봉구동장치(CEDM) 전력측정시험 <u>이상섭</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	229
P2-62	중수로원전 공칭조건 및 노물리-열수력 평형조건 여부에 따른 대형냉각재상실사고 출력펄스 영향평가 <u>박동환</u> · 최 훈 한국수력원자력주식회사 중앙연구원 안전연구소	230
P2-63	주증기배관파단사고 압력/온도에 따른 요오드핵종 거동에 대한 연구 <u>이승찬</u> · 윤덕주 한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소 안전해석그룹	231

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-64	저압터빈 추기배관 신축이음관 파손 원인 분석 <u>이중훈</u> · 부명환* 한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소	232
P2-65	여자시스템 신호기준접지 접촉 불량에 따른 영향 고찰 <u>강민구</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	233
P2-66	여자시스템 계자차단기 투입 실패 원인 고찰 <u>강민구</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	234
P2-67	예비디젤발전기의 디지털 여자시스템 적용 실증 시험 결과 <u>이상희</u> · 손진흠 한국수력원자력	235
P2-68	원전 다중 무선 통신방식 적용을 위한 인터페이스 방법론 고찰 <u>배재민</u> · 이수일 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	236
P2-69	원전 무선망 설계를 위한 전파모델에 관한 연구 <u>김현기</u> · 이수일 · 최현식 · 배재민 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	237
P2-70	원전 설계요건 추적성 확보를 위한 설계DB-설비정보 연계 <u>김종명</u> · 변수진 · 김우중 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단	238
P2-71	원전 금속구조물 통신기술 적용 방법론에 대한 연구 <u>최현식</u> · 이수일 한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털융합실	239
P2-72	노심 상향유동 연구용 원자로 유체계통 설계 <u>박홍별</u> · 서경우 · 김성훈 한국원자력연구원 연구로공학부	240
P2-73	PSR 안전성능 평가방법에 대한 고찰 <u>강종호</u> 한국수력원자력(주)	241
P2-74	PSR 절차서 관리 및 절차서 명확성 평가방법에 대한 고찰 <u>강종호</u> 한국수력원자력(주)	242
P2-75	PSR 조직행정 평가방법에 대한 고찰 <u>강종호</u> 한국수력원자력(주)	243

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-76	최신기준 주기적안전성평가 수행을 위한 기준문서 개발 <u>할태규</u> · 임혁순 · 강종호 한국수력원자력(주)	244
P2-77	안전 증진사항 우선순위 도출을 위한 PSR 평가 개선 방안 고찰 <u>할태규</u> · 강종호 한국수력원자력(주)	245
P2-78	PSR 기술기준 Gap 분석 방법론 고찰 <u>김정욱</u> 한국수력원자력(주)	246
P2-79	연구용 원자로에서 정상상태 수조수 온도의 민감도 분석 <u>이선일*</u> 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부*	247
P2-80	원자력 발전용 고온고압 열교환기 성능 시험장치의 개념 설계 <u>이선일*</u> · 박주현** 한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 다목적계통기술개발부**	248
P2-81	사고관리계획서(AMP) 화재 PSA 수행현황 및 요소 기술별 방법론 적용현황 <u>이한설</u> · 김창남 · 황석원 한국수력원자력(주) 중앙연구원	249
P2-82	동일 노형(WH)간 정지 · 저출력 화재 PSA 분석 방법 및 결과 비교 분석 <u>이한설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	250
P2-83	화재모델링을 이용한 가상원전의 화재 진압시점에 대한 격실온도 민감도분석 <u>이한설</u> 한국수력원자력 중앙연구원	251
P2-84	OPR형 원전의 화재 리스크 Insight 및 화재 리스크 추세 분석 <u>이한설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	252
P2-85	APR1400 주요 사고경위 중대사고 분석결과 비교 검토 <u>이현교*</u> · 황석원 · 이한설 한국수력원자력 중앙연구원	253
P2-86	극한재해 대처설비의 PSA 평가를 위한 신규 기기신뢰도데이터 개발 및 적용 <u>황석원*</u> · 이현교 · 김창남 한국수력원자력(주) 중앙연구원	254

● ● ● 11월 13일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-87	극한재해 대처설비의 PSA 평가를 위한 신규 인적오류확률 개발 및 적용 황석원* · 이현교 · 이한설 한국수력원자력(주) 중앙연구원	255
P2-88	고리·새울 원자력본부 부지에 대한 통합 대기확산검증 실험 설계 김정미 · 김기정* · 이정수* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국수력원자력(주) 고리원자력본부	256
P2-89	소형냉각재 상실 사고 시 노심냉각계통의 성능에 관한 예비해석 류성욱 · 이선일 · 이성재 한국원자력연구원	257
P2-90	비상대응 방사선량 평가를 위한 방사선원항 수계산 절차 개발 조현준* · 윤상혁 ² ¹ 한국수력원자력 중앙연구원, ² 주식회사 엔에스이	258
P2-91	방사선 비상 초기대응 방사선량평가 프로그램 개발 조현준* · 정윤희 ¹ · 김정미 ¹ · 이영주 ¹ · 박선병 ² · 김현직 ² ¹ 한국수력원자력 중앙연구원, ² 주식회사 엔에스이	259
P2-92	에너지 믹스 고온전기분해 공정과 원자력 연계기술 검토 이종보* · 문종설 · 이도환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	260
P2-93	에너지 믹스 해수담수화 공정과 원자력 연계성 검토 이종보* · 이상섭 · 이도환 한국수력원자력(주) 중앙연구원	261
P2-94	원자력 발전소 가상현실 시스템 개발 현황 임병기 한국수력원자력 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부	262
P2-95	원자력 발전소 플랜트 맵 개발에 관한 연구 임병기 한국수력원자력 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부	263
P2-96	크리드 침적 저감 후보물질 성능 평가 시험 정진호 · 최훈 한국수력원자력(주) 중앙연구원	264
P2-97	사용후핵연료의 건식저장 건전성 평가 김성근 · 장정남 · 박명철 · 권인찬 · 서항석 · 권형문 한국원자력연구원	265

비상디젤발전기 출력 변동에 따른 비상정지 사례

Case Study on emergency stop due to output fluctuation of emergency diesel generator

김영철(Young Cheol Kim)

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

원전(原電)의 비상디젤발전기는 원자로를 안전하게 정지시키기 위한 공학적 안전설비에 전원을 공급하기 위한 설비로서 주기적으로 실제 정격의 100% 부하운전을 실시하여 그 견전성을 입증하고 있다.

비상디젤발전기가 단독 모선 또는 계통에 병입되어 운전 중에 비정상적으로 출력 변동이 발생하는 경우에 급작스러운 운전모드(Iso. 모드 <-> Droop 모드)의 전환이 주요 원인으로 알려져 왔다. 본 논문에서는 비상디젤발전기 출력 변동에 따른 비상정지 사례를 통해 출력 변동을 유발할 수 있는 인자를 식별하고 식별된 인자와 해당 사례의 상관관계를 검토하여 출력 변동의 원인을 분석하였다.

비상디젤발전기의 출력 변동을 유발할 수 있는 인자는 조속기에 입력되는 출력 증/감발(Raise/Lower) 신호, Speed Reference(DRU Output) 신호, 운전 모드(Iso./Droop) 전환 신호, 1st/2nd Dynamic(PID 제어 변수) 전환신호 등이 있다. 출력 변동이 발생한 시점의 신호 분석 결과 운전 모드(Iso./Droop) 전환 신호는 발전출력 변동과 상관없이 일정하게 유지되어 출력 변동의 원인이 아님을 확인하였다. 출력 변동 발생 당시 1st/2nd Dynamic(PID 제어 변수) 전환 신호 및 보조계전기 점검 결과 보조 계전기의 동작 불량으로 인해 1st/2nd Dynamic(PID 제어 변수) 전환이 원활하게 이루어지지 않음을 확인하였다. 1st Dynamic은 기동 시와 무부하 운전 시에 적용되고 2nd Dynamic은 부하운전 중에 적용되는 PID 제어 변수로 비상디젤발전기는 신속한 기동을 위해 1st Dynamic의 Gain 값이 20% 높게 설정되어 있다.

이에 모의시험을 통해 1st/2nd Dynamic의 전환이 불안정한 경우에 비상디젤발전기의 출력 변동이 크게 나타날 수 있음을 확인하였다. 모의시험 장치는 임의 파형 발생 장비, 기록계, 엔진 운전 상태를 모의할 수 있는 시뮬레이션 테스터, 실제 현장에 설치되어 있는 조속기와 동일한 모델의 예비품 조속기로 구성하였다. 문제가 발생한 보조 계전기를 교체한 후 실증 시험을 수행하였으며 정격용량의 100% 부하에서 1시간 동안 정상운전에 성공하였다.

그간 출력 변동의 주된 원인으로 생각되던 Iso./Droop 운전 모드 변화 이외에 1st/2nd Dynamic의 불안정한 전환에 의해서도 극심한 출력 변동이 발생할 수 있음을 조속기 입력신호 평가, 모의 시험 및 실증 시험을 통해 확인하였다.

원자로조절계통 탄력운전 성능 평가

Performance Evaluation on Reactor Regulating System for Flexible Operations

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 탄력운전을 위해 개발된 제어봉 자동제어알고리즘은 출력과 출력분포를 제어하며 APR+(Advance Power Reactor Plus) 초기노심 및 평형노심을 대상으로 다양한 성능평가가 이루어졌다. 그러나 발전소 설계변경 최소화를 고려하면 기존 발전소의 제어봉제어계통을 탄력운전에 활용하는 방법도 하나의 대안이 될 수 있어 본 논문에서는 기존 제어봉제어계통(원자로조절계통)을 활용하여 탄력운전 성능을 평가하고 자동 제어봉제어알고리즘 결과와 비교 및 평가하였다. 원자로조절계통은 탄력운전시 출력만을 자동으로 제어할 수 있으며 출력분포는 운전원이 부분강 제어봉을 사용해 수동으로 조절해야 한다. 이러한 이유로 경험적인 조절방법을 사용해 부분강 제어봉을 조절하면서 탄력운전 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 원자로조절계통에는 출력조절을 위해 사용되는 노심평균온도에 deadband 개념이 적용되고 있어 deadband 변경이 필요한지 확인하기 위한 deadband 민감도 평가도 수행하였다. 한편 출력변화가 느린 탄력운전에는 붕소의 역할이 제어성능에 매우 큰 영향을 미치므로 대표적인 붕소농도변화를 시간에 따른 시나리오로 생산하여 원자로조절계통과 자동제어알고리즘 시뮬레이션에 공통으로 사용하였다. 탄력운전 시뮬레이션은 2시간 동안 50% 출력감발, 6시간 동안 유지, 2시간 동안 50% 출력이 증발하는 전형적인 일일부하추종운전이며 시뮬레이션을 통해 출력(노심평균온도), 축방향출력분포 및 제어봉들의 움직임을 확인할 수 있다. 10시간의 일일부하추종운전 시뮬레이션 평가 결과 동일한 붕소농도 시나리오 조건에서 원자로조절계통의 출력제어성능은 자동제어알고리즘과 유사함을 확인하였다. 그러나 예상대로 축방향출력분포 성능은 자동제어알고리즘보다 부족함을 확인하였다. 이는 단순한 축방향출력분포 제어방법만으로는 일일부하추종운전시 출력변화에 적절하지 않음을 나타내는 것으로 축방향출력분포 제어를 위한 정밀한 알고리즘이 필요함을 나타낸다. 결론적으로 탄력운전시 원자로조절계통 보다 제어봉 자동제어알고리즘의 사용이 더 바람직함을 확인하였다. 향후에는 탄력운전시 중요한 붕소농도를 결정하기 위해 자동 제어알고리즘을 활용한 붕소농도조절 최적화 연구를 수행할 계획이다.

가압경수형 원전 환경 변형을 유지 조건에 따른 316 스테인리스강의 피로수명 평가

Fatigue Life Evaluation of Type 316 Stainless Steel According to Strain Holding Conditions in PWR Environments

김태순

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 가압경수형 원자력발전소의 원자로냉각재 압력경계(reactor coolant pressure boundary)를 이루는 안전등급 1 기기의 피로수명은 운전 중 작용하는 하중뿐만 아니라 1차측 수화학 환경에 의해 크게 좌우된다. 이런 이유로 대부분의 원자력발전소 환경피로(environmentally assisted fatigue) 관련 연구가 용존 산소(dissolved oxygen)나 용존 수소(dissolved hydrogen) 등과 같은 1차 계통 수화학 환경 인자가 기기의 피로수명에 미치는 영향을 확인하는 피로시험에 집중되어왔다. 최근에는 환경피로에 취약하다고 알려진 스테인리스강을 대상으로 아연의 주입 및 용존 수소량이 재료 표면의 산화막 형성에 미치는 영향을 관찰하고 그에 따른 피로거동을 분석하고 평가하는 연구가 진행되고 있다. 이는 원자력발전소 1차 계통의 방사선량을 저감시키기 위해 첨가되었던 아연이 니켈기 합금의 산화막의 형상을 개선함으로써 응력부식균열(primary water stress corrosion cracking, PWSCC)에 대한 저항성을 증가시킨다는 선행 연구결과에 따른 것이다. 산화막의 형상 개선에 기여하는 또 다른 영향인자로 균열 선단에 작용하는 하중의 입력 파형과 유지시간(holding time)을 들 수 있다. 이는 아연이 주입된 수화학 환경에서 하중 입력 시 입력 파형의 형태와 유지시간에 따라 균열 선단에서의 산화막 형성 양상이 크게 달라지기 때문이다. 본 연구에서는 가압경수형 원자력발전소의 수화학 환경에 아연을 주입하였을 경우, 하중 입력 파형을 최고치 변형을 유지(peak strain holding) 조건과 준최고치 변형을 유지(sub-peak strain holding) 조건으로 구분하여 316 스테인리스강을 대상으로 피로시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

인공지능을 활용한 운전지원 시스템 설계 Design for Operations Support System Using AI(Artificial Intelligence)

박대승 · 김윤구

한국수력원자력(주) 중앙연구원 계전연구소 운전기술그룹

4차 산업 혁명은 기존의 산업에 데이터(Data), 네트워크(Network), 인공지능(AI), 빅데이터 등의 여러 기술이 접목되며 산업의 전 과정이 디지털로 변화하는 패러다임의 변화를 말하는 것이다. 여러 분야 중에 특히 인공지능 분야가 교육, 의료, 관광, 국방 등 다양한 분야에 적용되고 있고, 원자력 분야의 경우 새로운 기술을 적용하는 데 보수적인 분야 중에 하나이나 인공지능 기술을 접목시키고자 노력하고 있다. 본 논문은 기존에 개발되어 활용되고 있는 인공지능 기술을 분석하고 운전지원 시스템 설계에 활용 가능성에 대해 고찰 해보고자 한다.

본 논문은 현재 활용되고 있는 인공지능 기술과 관련하여 원자력 발전소의 운전지원에 접목하여 활용하는 설계를 도출하고 향후 해당 설계의 유효성 그리고 활용 방안에 대해 고찰 해보고자 한다. 일반적으로 인공지능 기술을 활용하기 위해서는 학습 데이터가 필요하다. 한국수력원자력은 발전소 운전이력을 가지고 있고 이를 학습 데이터로 활용이 가능했다. 하지만, 모든 데이터를 학습시키기에는 효율적이지 못하였다. 그리하여 가장 중요시 생각되는 부분을 나누어 학습하고 이를 활용하는 방법을 연구하였다.

운전지원을 위해 다양한 방식의 지원이 고려될 수 있다. 운전원이 지켜보고 판단해야하는 부분 중 경보의 종류와 발전소 운전변수의 상태를 보고 비정상의 증상을 즉각 판단해야하며 판단에 따른 비정상 절차서를 적시적기에 수행해야한다. 운전원의 부담을 덜어주기 위해 비정상 상태 판단을 위한 운전지원 시스템 개발이 가능하다.

신고리 3호기의 경우 82개의 비정상절차서가 작성되어 있으며, 하나의 절차서가 다양한 증상의 비정상의 상태 및 해결방안이 작성되어 있다. 발전소 현장에서는 다양한 계통과 기기들의 비정상 작동들이 빈번하게 발생된다. 그러나 증상의 정도에 따라 경보의 종류와 운전변수의 상태 조건이 다양하고, 비정상 상태의 종류가 다양하여 운전원이 비정상 상태 판단을 위해서는 많은 교육과 경험이 필요하다.

이러한 교육과 경험의 시간적 단점을 극복하고 운전원들의 부담을 덜어주기 위해 각 비정상 상황을 모니터링하여 학습시키고 해당 사건의 재발생시에 이를 알려주는 운전지원 시스템을 개발 중에 있다. 현재는 발전소의 운영데이터를 활용하지 않고 시뮬레이터의 운전데이터를 활용하여 시험 중에 있다. 향후 인공지능을 활용한 운전지원 시스템의 발전소 적용을 통해 빠른 비정상 판단을 운전원에게 제공하고 더욱 안전하고 효율적인 발전소 운영 관리에 활용할 계획이다.

모터구동밸브 성능평가 스템 마찰계수 특성분석 및 평가방안

Study on Contact Pressure According to the Structural Characteristics of Safety Relief Valve

이태경

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

모터구동밸브는 발전소 계통의 다양한 운전조건에서 동작이 요구되므로 밸브의 동작성을 확인하기 위해 진단시험을 통해 스템에 부과되는 부하와 스위치 동작상태 등을 평가하게 된다.

모터는 회전운동을 하므로 게이트밸브와 같이 디스크가 수직방향으로 동작되는 밸브유형에는 직선운동으로 변환시켜주는 부품인 스템 너트가 필요하다.

모터의 구동력이 스템 너트를 통해서 스템에 전달될 때 나사산의 형상이나 제작 상태, 마모 등 정비 상태, 윤활 상태에 따라 토크에서 쓰러스트로 전달되는 구동력은 변화할 수밖에 없으므로 밸브의 동작성을 평가할 때 이러한 스템 마찰계수 항목이 포함되고 있으며, 또한 이를 최적으로 유지하기 위한 유지하는 방안도 개발하게 된다.

밸브 스템 마찰계수 특성을 고려한 평가방법에 대해 소개하고, 실제 시간경과를 두고 측정한 스템 마찰계수 분석결과를 통해서 기존의 평가방법에 대한 적정성 및 개선방안을 검토하였다.

기존 평가방법에 따르면, 스템 마찰계수는 윤활성능 저하로 인해 초기 값이 낮은 밸브는 높은 증가율로 초기 값이 높은 밸브는 낮은 증가율로 마찰계수가 증가될 것으로 예상하였다. 826대의 밸브에 대해 10년 동안의 스템 마찰계수 측정결과를 분석한 결과 주기적인 스템 윤활을 통해서 스템 윤활성능이 저하되지 않고 지속 또는 향상되는 것을 확인하였다. 전체 밸브 중 예측값 보다 높게 측정된 밸브는 발생하기 않았으며, 30% 낮게 측정된 밸브도 25%를 차지하고 있었다. 기존의 평가방법이 디스크/시트 마찰계수의 성능저하 방법을 동일하게 적용하였는데, 디스크/시트 접촉면은 마찰계수가 증가하는 환경인 반면, 스템 마찰면은 주기적인 윤활관리가 가능한 환경이므로 마찰계수가 감소될 수 있음에도 이런 요소를 충분히 고려하지 못한 것으로 판단된다. 기존 예측방법에 보수적인 측면이 있음을 확인하였으므로 향후 개선이 필요하다고 하겠다.

안전방출밸브 구조 특성에 따른 시트 밀봉력 고찰

Study on Contact Pressure According to the Structural Characteristics of Safety Relief Valve

오승환 · 이태경 · 송석윤

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

디스크와 시트 밀봉면이 수직하게 설계된 파이롯트 구동 안전방출밸브(POSRV)는 고온, 고압의 증기를 작동유체로 다루므로 밀봉에 우수한 고무 재질을 사용할 수 없고 금속 대 금속 접촉(Metal to Metal Contact)으로 밀봉하므로 운전 중 증기 누설이 종종 발생할 수 있다. 누설 현상은 가압기 기포 형성, 가열/가압 그리고 밸브 동작시험 등 다양한 조건에서 나타난다.

디스크와 시트 밀봉면이 수평하게 설계된 스프링 구동 안전방출밸브(PSV)와 POSRV 열응력해석을 각각 수행하여 구조 특성에 따른 밀봉력 차이를 분석하고 누설에 미치는 영향을 고찰하였다.

PSV는 일정한 스프링의 힘으로 디스크를 눌러 닫힘을 유지하다가 가압기에 과압이 작용하면 스프링의 누르는 힘을 이기고 디스크가 열리면서 해압되는 구조이다. 반면 POSRV는 디스크 전·후 면에 증기압력이 작용하는데 닫힘 방향으로의 가압 면적이 더 커서 정상 시에 닫힘을 유지하게 되며, 증기의 압력이 증가할수록 닫힘 방향 압력이 증가하는 구조이다.

POSRV 및 PSV 3차원 모델을 생성하였고 구조해석 소프트웨어(Abaqus 6.18)을 이용하여 열응력해석을 수행하였다. 모든 해석은 정상상태(Steady State) 조건을 적용하여 과도조건(Transient)을 배제하고 충분히 안정된 상태를 가정하였다.

POSRV 및 PSV 각각 밸브 내부 표면에 온도조건을 입력하였는데, 증기가 접촉하는 영역은 345℃, 시트면 후단에 공기가 접촉하는 영역은 40℃로 입력하였다. 또한 증기의 접촉 영역은 300 W/m^2K , 공기 접촉 영역은 10 W/m^2K 을 입력하였다. 또한 출구 배관 표면은 33℃, 공기의 자연대류 계수 2.5 W/m^2K 를 적용하였다.

열응력해석 결과 POSRV의 최고 온도는 344.83℃, 최저는 36.36℃를 나타내고 있는 반면 PSV의 최고 온도는 310.71℃, 최저는 36.25℃를 나타내고 있는데, 밸브 구조상 POSRV는 디스크 내부 챔버 영역까지 고온의 증기가 접촉하는 반면, PSV는 시트 접촉면까지만 증기가 닿게 되어 온도 분포에 차이가 난다.

PSV는 시트면을 기준으로 좌우의 온도분포가 대체로 대칭을 이룬다. 반면 POSRV는 시트 접촉면을 기준으로 상하부 온도편차가 발생하는데, 이러한 금속 온도 편차에 의해 바다에 열적 불균형이 발생하는 것으로 판단된다.

시트면에서 접촉력 상태를 비교하면 PSV 시트면은 좌우의 접촉 압력(Contact Pressure)이 고르게 대칭을 이루고 있는 반면에 POSRV의 하부 지역은 엇지 형태의 접촉이 발생하고 상부는 면 접촉 형태를 나타낸다. 이러한 접촉압력의 차이는 밸브 열림 시험, 증기 상태변화, 운전 조건 변화 등에 따라 더욱 크게 나타날 수 있으며 누설 발생의 원인으로 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

증기터빈 습분유입과 전기출력 영향고찰

A Study of Influence on Electrical Power Loss due to Incoming Moisture into Steam Turbine

이우광 · 최문호

한국수력원자력 중앙연구원

대형 증기터빈 발전소는 전력계통에서 기저부하를 담당하여 대부분 정격출력 혹은 80% 이상 출력을 유지하는 운전형태를 취하고 있다. 증기터빈 출력을 증기조절밸브로 제어하는 방식으로 통상 4개의 밸브가 동시에 열리고 닫히는 전주분사(Full Arc.) 방식과 순차적으로 하나씩 열리고 닫히는 부분분사(Partial Arc.) 방식을 사용한다. 국내 증기터빈 중 다수가 특정부분부하에서 효율이 좋은 부분분사 방식을 사용하는데, 부분분사 운전방식은 약 85~90%의 터빈출력에서 3개의 밸브가 열려있고 마지막 1개의 조절밸브는 거의 닫혀 있다 가 100% 출력운전 중에는 마지막 밸브가 20~30% 열려있는 상태를 유지한다.

마지막 조절밸브가 닫힌 상태에서 배관내부에 생성된 습분을 제거하기 위한 배수밸브가 정상적으로 동작을 하지 못하는 경우, 출력변화(상승)로 인해 마지막 조절밸브가 열리게 된다면 배관 내부 습분이 터빈 내부로 유입될 수 있다. 터빈에 물이 유입되면 터빈구성품의 손상을 유발하므로 이를 방지하기 위해 미국 기계공학회(ASME)에서는 증기터빈의 설계와 운전분야에 적정 방법을 권고하고 있다. 그럼에도 불구하고 정상운전 중 배수밸브의 고장으로 습분이 발생하여 전기출력이 36MW 감소한 이후 정상출력 대비 28MW가 증가하는 과도현상이 나타나 각 과정에 대한 물리적 원인과 출력변화량의 적정성을 고찰하였다.

상기 언급한 배수밸브 고장에서 미세 출력변화로 마지막 증기조절 밸브가 Crack Open 된다면, 다른 조절밸브에서 Crack Open된 배관으로 유입된 고에너지의 증기가 내부 습분을 증발시키며 엔탈피가 감소하며 증기체적이 급격하게 증가하므로 순간적으로 전기출력이 감소할 것이다. 이때 보일러 증기압력이 상승하게 되는데, 발전소 제어방식이 보일러 압력을 일정하게 유지하는 방식이므로 순간적인 증기압력 증가와 증기유량 감소는 제어밸브를 열리게 하는 신호를 발생시킨다. 이 신호로 증기유량 조절밸브 개도가 증가하며 전기출력이 급격히 상승하게 되고, 점차 배관내부 습분이 감소함에 따라 증기압력이 복구되면 서서히 설정된 전기출력으로 안정화 될 것이다. 배수밸브의 고장 이후 상기와 같은 출력변화에 걸리는 시간과 출력변화량에 대한 분석이 향후 이러한 현상에 대한 발전소 비정상 상태 대비와 발전소 운영에 큰 도움이 될 것이다.

가격 민감도 추정법을 이용한 주택용 열수요함수 분석

임슬예 · 유승훈*

한국지역난방공사 미래개발원, *서울과학기술대학교 에너지환경대학원

주택용 열은 난방 및 온수의 형태로 소비되는 인간생활에 있어 필수적인 재화이다. 주택용 열 수요함수는 수용가의 열 소비행태에 대한 정보를 제공하여 가격과 같은 주요 정책변수의 효과를 사전적으로 진단하고 수요를 예측하는데 유용하게 활용된다. 다만 열요금은 규제대상으로 가격 탄력성을 구하는 데 있어 한계가 존재하므로 가격민감도 추정법(Price Sensitivity Measurement, PSM)을 이용한다. PSM이란 재화의 가격 변화에 대해 해당 재화에 대한 구매행동의 변화가 있는지에 대한 정보를 수집한 후 이 정보들을 활용하여 수요함수를 추정하고, 그로부터 추정된 가격민감도를 가격탄력성의 대용값으로 도출하는 기법이다. 본 논문에서는 전국 1,000가구를 대상으로 한 설문조사 자료를 분석에 이용하여 주택용 열 수요함수를 추정한다. PSM 기법을 적용하여 분석한 결과, 수요의 가격민감도는 -0.3885 로 추정되었으며 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하다. 주택용 열 수요는 가격변화에 대해 비탄력적임을 알 수 있다. 즉 주택용 열은 필수적인 재화로서 가격이 변하더라도 수요가 급격하게 조정되지 않음을 시사한다.

차세대 지능형교통시스템 확장에 대한 외부편익 추정

Estimating the external benefits of expansion of cooperative intelligent transportation system

이혜정 · 최선형 · 허성윤

서울과학기술대학교 에너지정책학과

우리나라는 세계 8위의 대표적 에너지다소비 국가이며 경제성장과 에너지소비 감소를 함께 달성한 선진국과 달리, 에너지 다소비, 저효율 소비구조가 고착화되고 있다. 이에 따라 정부는 2030년까지 최종에너지 소비량을 14.4% 절감하고자 에너지 효율화에 대한 중장기 전략을 담은 「에너지효율 혁신전략」을 발표했다. 그 중 최종에너지의 약 18%를 차지하는 수송부문의 에너지 효율을 개선하기 위해 정부는 차세대 지능형교통시스템(cooperative intelligent transportation system, C-ITS)이 구축된 도로를 2018년 1만5743km에서 2023년 1만7112km로 확대할 계획이다. C-ITS는 2020년 정부가 발표한 「한국판 뉴딜」 종합 계획에서도 그 중요성을 언급하고 있으며 많은 예산을 편성하였다. 따라서 C-ITS 확대에 많은 국비가 투자되는 만큼 외부편익을 조사함으로써 국민의 수용성 및 공공의 가치를 평가할 필요가 있다. 본 연구는 C-ITS 확장에 대한 외부편익으로 교통혼잡 감소, 교통사고 감소, 연비 개선, 미세먼지 배출량 감소, 온실가스 배출량 감소 다섯 가지를 분석 속성으로 선정하였으며 이와 같은 세부 속성에 응답자가 어느 정도의 가치를 부여하는지를 점검하고 정량적으로 분석하였다. 분석 방법은 선택실험법의 혼합로짓모형을 적용하였다. 분석 결과 교통혼잡 1% 감소, 교통사고 1% 감소, 연비 1% 개선, 미세먼지 배출량 1% 감소, 온실가스 배출량 1% 감소에 대해 각각 137원, 181원, 78원, 420원, 76원을 지불할 의사가 있었다. 본 연구 결과는 C-ITS 확대에 대한 외부편익을 파악함으로써 향후 사업 추진 및 정책을 계획하는데 있어서 유용한 정책 자료로 활용될 수 있다.

조건부 가치측정법을 이용한 그린 리모델링 시행사업에 대한 편익 추정
Estimation of Benefits for Implementation of Green Remodeling Projects
Using Contingent Valuation Method

최선형 · 이해정 · 허성윤

서울과학기술대학교 에너지정책학과

전 세계적으로 코로나19로 인해 기후변화 대응과 저탄소 사회로 전환하는 것에 대한 중요성이 부각되고 있다. 해외 주요국은 다양한 정책 지원을 통해 이미 저탄소 경제·사회로 전환 중이며, 우리나라 정부도 국제사회에서 기후논의를 선도하는 그린 선도국가가 되기 위해 그린뉴딜 정책을 발표했다. 정부는 그린뉴딜의 일환으로 도시·생활·공간 인프라의 녹색 전환을 위해 국민 생활과 밀접한 공공시설의 제로에너지화를 확대하는 그린 리모델링 사업을 계획하고 있다. 공공시설의 제로에너지화 사업은 건물의 단열성능을 극대화하여 외부로 유출되는 에너지양을 최소화하고, 태양광과 태양열, 지열 등 신재생에너지를 활용하여 건물 기능에 필요한 에너지를 자체적으로 공급하여 건물 에너지를 절감하고 온실가스를 감축할 예정이다. 이러한 그린 리모델링 사업에 많은 국비가 투자되기 때문에 에너지 전환 정책에 대한 일반 국민의 지불의사액(Willingness to pay)을 분석하고, 편익을 산정하여 본 사업에 대한 경제적 가치를 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 공공건축물에 태양광을 설치하고, 친환경 단열재 교체 등을 통해 에너지 성능을 강화하는 그린 리모델링 사업에 대한 일반 국민의 지불의사액을 조건부 가치측정법을 사용하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과 그린 리모델링 사업에 대해 2,714원을 지불할 의사가 있었다. 본 연구 결과는 향후 정부의 에너지 전환 정책에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

에너지 기술혁신 벤처기업 현황 및 시사점

김봉균 1), 이재용 2) 최태환 3), 이지희 4), 송수원 5), 서성록 6)

초록

최근 정부는 COP21 이후 새로운 기후체제에서 의무적인 온실가스 감축을 이행하면서 동시에 산업을 육성하는 그린뉴딜 정책을 시행하고 있다. 신재생에너지 보급 증가로 에너지산업의 패러다임은 저탄소, 분산화, 디지털화로 전환되고 있다. 이러한 패러다임 변화에 맞추어 새로운 비즈니스와 기업들의 등장이 가속화 되면서 에너지 산업에서도 이른바 ‘에너지벤처’가 등장하고 있다. 에너지벤처들은 전통적인 에너지산업에 ICT, 인공지능 등 이른바 4차 산업혁명 기술을 융복합하여 새로운 비즈니스를 창출하고 있다. 가령 태양광발전의 발전량 및 사고 고장을 인공지능을 통해 사전예측하는 것이 대표적이다.

그린뉴딜 정책의 핵심 주체인 에너지벤처의 생성과 성장을 지원하는 정책을 추진하기 위해서는 기업현황 분석을 통한 정책 대상설정이 필수적이다. 그러나 한국표준산업분류(KSIC)코드 내 에너지 분야의 분류체계와 조사방법 부재한 상황이다.

본 연구는 기업 데이터와 특허를 통해 에너지벤처기업 Pool을 구성하고 기업을 추출하여 기업현황을 조사하였다. 방법론은 국내 벤처등록 DB와 세부기술별 특허 출원·등록 DB를 바탕으로 기업 Pool을 구성하고 기업데이터 전문기관을 통해 주요 정보 파악하였다. 먼저 벤처등록 데이터의 경우 ‘18.12월 기준 국내 확인 벤처기업은 총 3만 7천여 개이며, 매년 기업리스트 및 주 생산품 공개에서 에너지 제품을 매칭하여 기업을 선정하였다. 둘째 특허의 경우 특허청 KIPRIS 데이터에서 에너지-4차산업기술(AICBM, AI, IOT, Cloud, Big Data, Mobile)융합분야를 중심으로 검색 키워드를 반영하여 기업을 추출하였다.

연구를 통해 2,000여개의 에너지벤처 기업을 구성하고 시사점을 도출하였다.

1) 주저자 : 한국에너지기술평가원, 기술사업화실장 (kibon@ketep.re.kr)

2) 한국에너지기술평가원, 기술사업화실 책임연구원

3) 한국에너지기술평가원, 기술사업화실, 선임연구원

4) 한국에너지기술평가원, 기술사업화실, 선임연구원

5) 한국에너지기술평가원, 기술사업화실, 선임연구원

6) 교신저자 : 한국에너지기술평가원, 기술사업화실 선임연구원 (slseo8604@ketep.re.kr)

조류발전 사업화연계 연구개발을 위한 대중의 지불의사액 분석

An analysis of the public willingness to pay for tidal current energy
research and business development

최경란 · 김주희 · 유승훈

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과

삼면이 바다로 이루어진 우리나라의 특성상, 해양에너지는 온실가스 및 각종 대기오염물질을 발생시키는 기존 화석연료 에너지를 대체할 수 있는 재생에너지원이다. 특히, 조류발전은 해양에너지 중 가장 상용화된 기술로서 해수의 흐름을 이용하여 전력을 생산한다. 조류발전은 방파제를 건설할 필요가 없으므로 비용이 적게 들고, 주변 생태계에 영향을 주지 않기에 환경 친화적인 기술로 평가된다. 이에, 우리나라 정부는 2021년까지 조류발전 상용화 기술을 개발하고 4.5MW 용량의 조류발전 시험장을 구축하며, 2030년까지 500MW 용량의 조류발전단지를 조성하는 것을 계획하고 있다. 500MW 규모의 조류발전단지가 조성된다면 연간 발전량은 1,650GWh이며, 약 17만 가구에 전력공급이 가능하고 연간 이산화탄소 136만톤을 감축하는 효과가 있다. 다만 이러한 조류발전 사업화연계 연구개발은 많은 비용이 소요되며 그 비용은 국민의 세금으로 충당된다. 따라서 정부는 조류발전 사업화연계 연구개발이 국민들에게 주는 경제적 가치에 대한 정량적인 정보를 필요로 한다. 본 연구는 조류발전 사업화연계 연구개발의 경제적 가치 추정을 위해 비시장재의 가치를 추정하는 기법 중에서 조건부 가치측정법(CV, contingent valuation)을 적용하였다. 이를 위해 2019년 7월 전국 1,000가구를 대상으로 CV 설문조사를 실시하였고 1.5 양분선택형 질문법을 통해 조류발전 사업화연계 연구개발을 시행하는 것에 대한 국민들의 지불의사액(WTP, willingness to pay)을 평가하였다. 설문에 응한 가구 중 상당수는 WTP를 0으로 응답하였고 이를 반영하고자 스파이크모형을 적용하였다. 분석 결과 조류발전 사업화연계 연구개발에 대한 평균 WTP는 가구당 연간 4,290원(USD 3.65)으로 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이 값에 2019년 추계 가구 수를 적용하여 전국으로 확대하면 863억 3천만원(7344만 달러)이다. 이 값은 조류발전 사업화연계 연구개발을 시행하는 것에 대한 경제적 가치로 해석될 수 있으며 향후 필요한 예산 책정을 위한 기초자료가 될 수 있을 것이다. 또한, 조류발전 사업화연계 연구개발을 추진하는 것의 타당성을 평가하기 위한 경제성 분석에 중요한 정보로 활용될 수 있다.

산업연관분석을 통한 원자력 발전과 재생에너지 발전의 경제적 파급효과 비교

Comparison of the economic effects of nuclear power and renewable energy deployment in South Korea

김신영 · 김주희 · 유승훈

서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과

우리나라 정부는 미세먼지 및 온실가스의 저감, 기후변화 대응, 탈탄소 사회로의 전환, 에너지 안보 등에 대한 국민적 요구와 시대적 흐름에 맞춰 에너지전환 정책을 추진하고 있다. 에너지전환 정책은 에너지의 소비, 공급, 전달, 유관 산업을 포괄하는 에너지 시스템 전반의 혁신적 전환을 추진하는 정책을 의미한다. 우리나라 에너지전환 정책의 주요 내용은 원자력 발전(이하 원전) 비중의 단계적 감축과 재생에너지 발전 비중의 확대에 구성된다. 구체적으로 원전과 재생에너지 발전 용량 비중을 각각 2020년 기준 19.2%, 15.1%에서 2034년 기준 9.9%, 40%로 변화시키는 것을 목표로 한다. 그러나 환경적 측면에서 원전과 재생에너지는 모두 온실가스 배출이 적은 발전원이기에 비교적 전력 단가가 비싼 재생에너지를 확대하는 것에 대한 비판의 의견도 있다. 또한 아직 경제성을 확보하지 못한 재생에너지 비중을 확대하고 세계 최고의 기술을 보유한 우리나라의 원전을 단기간에 축소하는 것은 자칫 우리나라 경제에 적지 않은 사회·경제적 비용을 치르게 할 수 있다는 우려의 의견도 존재한다. 본 연구에서는 산업연관분석을 통해 원전과 재생에너지 발전이 국내경제에 미치는 경제적 파급효과를 분석하고 비교하였다. 원전과 재생에너지 발전이 국내경제에 미치는 경제적 파급효과 중 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 임금유발효과, 공급지장효과, 물가파급효과를 분석하기 위해 2018년 산업연관표에 기반한 수요유도형 모형, 공급유도형 모형, 레온티에프 가격모형이 활용되었다. 주요 분석결과는 다음과 같이 요약된다. 첫째, 원자력 발전과 신재생에너지 발전 1원 투자의 생산유발효과는 각각 2.0079원 및 2.5133원으로 후자가 전자보다 크게 분석되었다. 부가가치 유발효과는 각각 0.8098원 및 0.7373원으로 전자가 후자보다 더 크며 임금유발효과는 각각 0.2573원 및 0.2914원으로 후자가 전자보다 더 크게 도출되었다. 또한 공급지장효과는 각각 1.6691원 및 1.5063원으로 전자가 후자보다 더 컸으며, 물가파급효과는 각각 0.0367원 및 0.0119원으로 전자가 후자보다 더 크게 분석되었다. 도출된 결과들 살펴보면 재생에너지부문이 원전부문보다 공급지장효과와 물가파급효과가 작고 생산유발효과 및 부가가치 유발효과의 경제적 파급효과는 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 중장기적으로 재생에너지 비중을 높이고 원전 비중을 낮추는 에너지전환 정책은 국내경제에 긍정적인 파급효과를 미칠 것으로 기대할 수 있다.

수소 충전소 건설에 대한 국민 수용도 분석

Public Acceptance of Hydrogen Stations Construction in Korea

김주희¹ · 이지원² · 유승훈^{3,*}

^{1,3}서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과

²서울과학기술대학교 일반대학원 건설시스템공학과

우리나라 정부는 2018년 8월 ‘혁신성장전략 투자방향’에서 수소경제를 3대 전략투자 분야로 선정한 데 이어 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표했습니다. 수소경제란 수소를 중요한 에너지원으로 사용하는 경제산업구조를 의미합니다. 수소경제 활성화 로드맵의 핵심은 수소차 보급 및 수소 충전소 확충 사업이며 주요 목표는 2040년까지 수소차를 620만 대 보급하고 현재 32개소인 수소충전소를 1,200개소로 확충하는 것입니다. 이러한 정책의 추진으로 온실가스 및 대기오염물질을 배출하며 대부분 수입에 의존해야 하는 화석연료 대신 고갈우려가 없고 친환경적이며 국내생산이 가능한 수소를 주요 에너지원으로 활용할 수 있게 될 것으로 기대됩니다. 그러나 지난해 강릉에서 발생한 수소저장탱크 사고와 노르웨이 수소 충전소 사고 등으로 인해 수소충전소의 안정성에 대한 면밀한 검증이 필요하다는 의견이 제기되면서, 현재 수소 충전소 건립에 대한 찬·반 양론이 대립하고 있는 상황이다. 이에 본 연구에서는 무작위로 추출된 전국 1,000명에게 기존의 주유소 또는 LPG 충전소가 수소 충전소로 변경되는 것을 찬성하는지 여부에 대해 조사를 한 후 이에 대한 결정요인들을 분석하고자 한다. 종속변수는 9점 척도로 조사된 수소 충전소 건립에 대한 찬반 의견을 사용하며 독립변수로는 성별, 연령, 교육수준, 소득수준, 수도권 거주여부, 수소경제 활성화 로드맵에 대한 사전 인지 여부, 수소차에 대한 사전 지식 여부, 수소차 구매 의향 여부, 거주지 또는 직장 인근에 수소 충전소가 있는지 여부, 그리고 안전과 환경에 대한 인식을 사용하였다. 분석방법으로는 서열 프로빗 모형을 이용하였다. 분석결과 성별, 교육수준, 소득수준, 수도권 거주여부, 수소차 구매 의향 여부, 거주지 또는 직장 인근에 수소 충전소가 있는지 여부, 안전과 환경에 대한 인식은 응답자의 수소 충전소 건립에 대한 의견에 유의미한 영향력을 행사하는 요인임을 확인하였다. 구체적으로는 응답자가 남성일 경우, 교육 수준이 높을수록, 소득이 월 300만원 미만인 경우, 수도권에 거주하지 않을수록, 수소차 구매의향이 있는 경우, 거주지 또는 직장 인근에 수소 충전소가 있는 경우, 안전보다 환경을 더 중시할수록 수소 충전소 건립에 더욱 찬성하는 것으로 분석되었다.

라만분석기를 이용한 LNG 품질 분석 실증연구

Demonstration for LNG Quality Analysis Using Raman Spectroscopy

주우성 · 고유진 · 모용기 · 이승호 · 이강진 · 김용철

한국가스공사 가스연구원 LNG기술연구소

전 세계적으로 LNG 거래물량이 급속히 늘어나고 있다. 로얄 더치셸(Royal Dutch Shell)이 최근 발표한 연간 “LNG 전망(LNG Outlook)” 보고서에 따르면, 2017년 수요가 전년 대비 2,900만 톤 증가한 2억 9,300만 톤을 기록한 것으로 나타났다. 지난 수십 년간 글로벌 에너지 시스템에서 LNG의 비중은 갈수록 높아지고 있는데 2000년 이후 LNG 수입국의 수가 4배가량 증가했으며 생산국의 수는 2배가량 늘었다. LNG 거래량은 2000년 1억 톤 규모에서 2017년 289백만톤 규모로 증가했다. 이러한 증가는 아시아 및 유럽지역의 기존 수입국에서 꾸준한 수요가 있으며, 이외 다른 국가에서도 유연하고 안정적이며 청정한 에너지로써 LNG가 공급되고 있다.

LNG 성분 분석 방법과 관련하여 현재 관련 표준인 ISO 8943 (2007년) “Refrigerated light hydrocarbons fluids - Sampling of liquefied natural gas - Continuous and intermittent methods”에서 제시하는 방법은 크게 2가지로, 첫 번째는 LNG 하역 또는 선적 과정 동안 가스 홀더를 이용한 연속포집 형태의 대표 샘플 채취방법이고, 두 번째는 On-line 가스분석기(Gas Chromatography)를 이용하는 방법이다. 두 가지 방법 모두 기본적으로 샘플 가스 기화기를 통해 일정 LNG를 기화시켜야 하는데 이 과정에서 일부 LNG가 부분 기화 등을 통해 대표성 있는 샘플가스를 얻지 못하면 최종적으로 LNG 물량 산정 시 큰 오차가 발생하기 때문에 적정 기화기 선택 및 운영 상태를 확인하는 단점이 있다.

최근 LNG 거래 시, 열량 거래에 따른 정확한 열량측정법으로 GIIGNL(국제 LNG 수입자 그룹)에서는 “LNG CUSTODY TRANSFER HANDBOOK“에 Raman Spectroscopy를 추천하고 있다. 또한 Shell사와 Fluxys사는 GERG(The European Gas Research Group)의 프로젝트로 “Raman method for determination and measurement of LNG composition“ 적극적으로 검토 하였다.

따라서 한국가스공사에서는 여러 가지 장점과 새롭게 시도되고 있는 라만분석기를 도입하여 LNG 분석 경험과 기술 내재화를 극대화 하고자 라만분석기를 도입 운영하고자 한다.

국가 온실가스 감축목표에 따른 이산화탄소 저장기술 및 활용방안 연구
Study of Carbon Capture and Storage Technologies
with Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies

한정민 · 우경택 · 정종태 · 유현석
한국가스공사 가스연구원 수소기술연구소

한국판 뉴딜 종합계획(2020.7.14.)에서 발표된 그린뉴딜정책은 친환경·저탄소 등 그린경제로의 전환을 가속화하는 것을 목표로 추진된다. 탄소저감과 관련된 국가 감축목표는 2020년 543 백만 톤, 2030년 536 백만 톤으로 국제기구에 공식적으로 제출된 바 있다. 또한 2050년의 국가 감축목표를 설정하기 위하여 관계부처가 추진한 전문가 100여명의 전문가 검토안을 20년 2월 환경부에 제출한 바 있다.

2018년 7월 파리 총회에서 Utilization AHG(전환임시위원회) 보고의 중요 내용은 1) 효과적인 이산화탄소의 감축을 위해서는 지중저장과 활용기술 병행이 필수적이며 2) 경제성 측면에서 활용기술이 우수하고 3) 다양한 활용기술이 실증 또는 상용화되었다는 것이다. 정부는 온실가스 감축을 위하여 대규모 CCUS 통합실증 및 상용화 기반 구축 등을 장기적인 과제로 추진하기 위하여 준비중이다.

CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage, 이산화탄소 포집, 활용 및 저장) 연구 분야에 대한 활용기술이 다양한 분야에서 개발되고 있으나 상용화 되기까지에는 다소 시간이 소요될 것으로 보인다. 이 중 이산화탄소 지중저장을 위해 국내에서는 고갈을 앞둔 동해 가스전에 저장하는 방안 등이 매우 적극적으로 검토되고 있다. 온실가스 감축목표 등을 종합적으로 고려하여 지중저장과 활용기술을 병행하여 적용할 필요가 있을 것으로 판단되며 이에 대한 지속적인 사회적 논의가 필요한 상황이다.

생물학적 전환공정을 통한 발전배가스내 CO₂ 저감 및 고가물질 생산 신기술 개발

Development of novel technology for reduction of CO₂ within flue gas and production of high-valued materials by biological conversion process using microalgae

장원석 · 임종원 · 오문세 · 이종준 · 이현철 · 유지혜

한국지역난방공사 미래개발원

기존 탄소포집저장(CCS)기술은 발전소 배기가스내 CO₂를 흡수제로 포집, 분리한 후 원거리 수송하고 이를 깊은 지반층 저장하는 것으로 고가의 처리비용이 소요되며 저장시 지층특성이나 인위적인 주입에 의해 지반균열이나 가스누출과 같은 문제점이 발생할 수도 있다.

그러므로 최근에 전세계적으로 CO₂를 포집한 후 이를 이용하여 고가 유용물질로 전환하는 경제적이며 효율적인 탄소자원화(CCU)기술 개발에 관심이 집중되는 추세이다. 특히 대부분의 탄소자원화 기술이 CO₂를 다른 물질로 전환하기 위해 많은 에너지를 소모하며 이를 통해 더 많은 CO₂를 발생하는 모순된 문제가 발생하기도 하나 미세조류를 이용한 생물학적 전환기술은 에너지 소모가 거의 없이 광합성 반응을 통해 CO₂를 고가물질로 전환할 수 있기 때문에 실질적인 CO₂ 저감기술이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 한국지역난방공사 P지사의 LNG 열병합발전설비의 배기가스(평균 CO₂농도 5%)를 스택 80m 높이에서 추기하여 하부에 설치된 공급설비를 이용하여 미세조류를 배양하고 있는 폐쇄형 광반응시스템에 공급하였다. 이때 사용된 미세조류는 헤마토코쿠스라는 종으로 건강식품이나 의약품에 사용되는 고가의 항산화물질인 아스타잔틴을 가장 고농도(4%이상)로 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 배기가스의 균일한 공급을 위해 V자형으로 개발된 광반응기를 통해 햇빛, 미세조류, 배기가스내 CO₂ 간의 광합성 반응을 통해 CO₂를 고정화하여 현장 운전기간 동안 평균 20~30%정도 제거효율을 보였다. 미세조류 배양방법은 1단계는 배양액에 미량의 헤마토코쿠스를 접종후 빠르게 성장시키는 증식단계(녹색)와 이후 2단계는 특정 배양조건을 통해 아스타잔틴을 고농도로 축적하는 유도단계(적색)를 거쳐 수확단계가 되면 광반응기에서 침전·농축 시킨 후 회수하여 원심분리기로 탈수시킨다.

특히 기존 회분식 배양법은 한번 30일 배양후 다시 처음부터 진행하여 많은 시간이 소요되었으나 본 연구에서는 반연속 배양을 통해 배양기간을 1/2이상으로 감소시키는 효과를 확인하였으며 이후 Down-stream공정을 통해 추출분리 한후 정제공정을 수행하면 건강식품, 의약품, 사료, 고급유일 등 고가물질을 생산할 수 있었는데 분리정제시 약품을 사용하는 화학적 검화보다는 효소를 이용한 생물학적 검화기술을 통해 친환경적인 정제방법을 개발하였으며 이러한 결과를 통해 기존 미세조류를 이용하여 바이오디젤(\$1/kg)을 생산하는 공정에 비해 본 연구의 공정은 친환경적으로 항산화물질을 생산하면서 수천배 높은 수익(\$3000/kg)을 얻을 수 있다는 결과를 얻었기에 충분한 사업성이 있음을 확인할 수 있었다.

유동층에서 나노입자 혼합물의 수력학적 특성
Hydrodynamic Characteristics of Nanoparticle Mixtures in a Fluidized
Bed

허승준¹ · 김준영*² · 이동현*¹

성균관대학교 화학공학과¹, 성균관대학교 화공융합기술연구소²

리튬이온전지의 양극을 만들 때 리튬산화물의 전도성을 높이기 위한 도전재의 재료로 탄소 나노튜브와 카본블랙이 사용된다. 탄소나노튜브는 음극재의 소재로도 사용되며, 이러한 탄소나노튜브의 대량생산 방법으로는 유동층 반응기가 적합하다. 탄소나노튜브를 생산하기 위해서 카본블랙이 촉매로 사용될 수 있으며, 따라서 반응기 설계를 위해서 생성물과 촉매 혼합물의 유동특성을 파악하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 탄소나노튜브와 카본블랙의 질량비율에 따른 flow regime를 확인하였다. 실험은 내경이 0.04 m 높이가 1.2 m인 아크릴로 제작된 cylindrical column에서 수행되었다. 분산판은 sintered metal 재질의 porous plate를 사용하였고, 유동기체는 공기를 사용하였다. 실험에 사용된 입자는 평균입도 220 μ m, 밀도 384 kg/m^3 인 탄소나노튜브(CNT_J)와, 평균입도 4.57 μm , 밀도 1877 kg/m^3 인 카본블랙 (CB_P) 입자를 사용하였다. 이성분 입자를 1:0, 0.7:0.3, 0.5:0.5, 0.3:0.7, 0:1의 질량비율로 넣어 주었을 때 flow regime를 확인하였다. 기체유속을 변화시켜 주면서 차압을 측정하였고, 무게대비 압력강하, 층높이를 확인하였다. Channeling 구간에서는 압력강하 값이 낮아지며, 압력강하의 standard deviation이 갑자기 감소한 유속을 기준으로 turbulent 구간이 시작되는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Jeong, S. W., Lee, J. H., Kim, J. & Lee, D. H. Fluidization behaviors of different types of multi-walled carbon nanotubes in gas-solid fluidized beds. J. Ind. Eng. Chem. 35, 217 - 223 (2016).
2. Yu, H. et al. Hydrodynamics and gas mixing in a carbon nanotube agglomerate fluidized bed. AIChE J. 52: 4110 - 4123 (2006).

초고속 카메라를 이용한 gas-solid flow 에서의 CPFD modeling 검증
Validation of CPFD model in simulating gas-solid flow with high speed
camera

성우창· 김준영*· 이동현*
성균관대학교 화학공학과

본 연구에서는 초고속 카메라를 이용하여 gas-solid flow에서 CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics) modeling의 drag model을 검증하였다. CPFD simulation 은 Barracuda[®]를 이용하였고, validation을 위한 실험은 상온 상압에서 내경이 0.04 m, 높이가 0.6 m 인 아크릴장치에서 진행되었다. 본 연구에서는 CNT (Carbon Nano Tube) 입자를 사용하였고, 입자의 Sauter mean diameter 는 182 μm 이며, particle density는 384.7 kg/m^3 이다. 실험은 입자가 34cm 만큼 자유낙하 했을 때 입자의 크기에 따른 입자의 하강속도를 초고속 카메라 (HHC X9 Pro)로 측정하였다. CPFD simulation은 실험 조건과 동일하게 모사하여 진행하였고, 34cm 에서의 입자의 크기에 따른 입자의 하강속도를 실험결과와 비교하였다. Simulation 은 simulation 시간 기준 1초만큼 진행되었고, 5가지의 drag model 과 drag force coefficient constant(k) 값을 변경해가며 입자의 크기에 따른 입자의 하강속도를 실험결과와 비교하여 simulation 결과들을 검증하였다. 비교 결과, gas-solid의 drag force와 입자의 하강속도와의 관계를 도출할 수 있었으며, gas-solid flow에서 CPFD modeling에 적합한 drag model을 제시할 수 있었다.

천연가스관련 이산화탄소 배출 저감을 위한 최적 CCU 기술 연구
Study of Optimizing CCU Technology for Reduction CO₂ Emission in The
Natural Gas Field

우경택 · 정종태 · 한정민 · 유현석
한국가스공사 가스연구원 수소기술연구소

우리나라는 현재 세계 3위의 LNG 도입국이고 그 수요가 증가추세에 있으며 동절기의 수요가 집중되는 현상을 보이고 있다. -162°C 의 천연가스를 공급하기 위해서는 기화공정을 거쳐야 하는데 현재 한국가스공사에서는 해수식기화기(ORV), 공기식기화기(AAV) 그리고 연소식기화기(SCV)등이 사용되고 있다. ORV와 AAV는 해수와 대기의 온도차를 이용하여 기화하는 방법으로 봄부터 가을까지 활용기 가능하나 해수 및 대기의 온도가 4°C 이하로 떨어질 경우 기화효율이 급격하게 감소하고 동절기 수요를 감당하기 위해 SCV를 추가적으로 구동하고 있다. SCV는 천연가스 연소열을 이용해 수조를 가열하여 LNG를 NG로 기화하는 방식으로 천연가스연소로 인해 CO₂가 발생되고 있으며 이는 한국가스공사 전체 배출량의 약 20%를 차지한다. 본 연구에서는 SCV에서 발생하는 CO₂를 포집하기 위해 습식, 건식 그리고 분리막 등 다양한 기술들을 나열하여 현재 한국가스공사의 상황에 적합한 기술을 선택하고 그에 따른 적용성 여부를 판단하는 것이다. 그리고 포집된 CO₂의 활용방안 또한 검토 중이고 최종적으로 탄소저감을 달성하기 위한 기술성 및 경제성을 평가하는 것이다.

액화 공기 에너지를 이용한 수소 액화 플랜트 공정 설계

Process Design of Hydrogen Liquefaction Plant Using Liquefied Air Precooling

임동렬 · 이춘식 · 윤문규 · 염충섭

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

영국 뉴캐슬대학이 1977년 세계 최초로 액화공기를 이용하여 에너지를 저장하고 필요한 경우에 액화 공기를 기화시켜 발전을 한다는 개념을 제안하였다. 20세기 말부터 현재까지 영국, 일본 및 독일 등의 주도로 액화 공기를 이용한 에너지 저장 시스템이 개발되고 있는데, 중대형 규모로 시스템 구축이 용이하고 설치 지역의 제한이 거의 없으며 시스템 수명이 길고 신재생에너지의 간헐적 발전 특성을 보완할 수 있다는 특징이 있다.

수소는 1776년에 발견되었고 1898년에 최초로 액화가 이루어 졌다. 수소 분자는 두 원자핵의 스핀 방향에 따라 Ortho 수소와 Para 수소의 두 가지 형태로 구분되는 특징이 있는데, 상온(300 K)에서는 Ortho 수소와 Para 수소의 평형 비율이 약 3:1 정도이며 온도가 상온보다 낮아지면 Ortho 수소에서 Para 수소로의 변환이 일어난다. 미국에서는 1953년 대량의 수소를 액화하는 시설을 구축하였으며, 고에너지 상태의 Ortho 수소가 저에너지 상태의 Para 수소로 변환되는 것을 촉진하는 전용 촉매를 개발하여 사용하였다. 한편 대량의 수소 액화를 위한 다양한 공정이 개발되었으며 수소 클로드(Claude) 사이클을 이용한 공정과 헬륨 역브레이튼(Reverse Brayton) 사이클을 이용한 공정 등이 주로 적용되고 있다. 밀도가 높은 초저온의 액체 수소는 안전한 저장이 가능하고 먼 거리에 있는 수요처에 탱크로리 등을 이용하여 운반될 수 있으며 수소차량, 연료전지 발전소, 수소 추진 선박 및 우주선 등의 연료로 사용될 수 있다.

본 연구는 상용 코드인 Aspen HYSYS v.10을 이용하여 헬륨 역브레이튼 사이클이 적용된 0.5 ton/day의 액체 수소 생산 능력을 가진 수소 액화 공정이 액화공기 에너지 저장 시스템 인근에 위치하여, 액화공기 에너지 저장 시스템에 저장된 액화 공기가 공기 발전이나 초청정 저온 공기를 이용한 건물 공조를 위해 기화될 때 발생하는 냉열을 수소와 헬륨의 에냉에 사용한다는 조건에서 수소 액화 공정에 대한 정적 공정 해석을 수행하였다. 공정 해석 조건은 현재 국내에서 구축 준비 중인 실제 수소 액화 플랜트와 유사한 경계조건과 회전기기 운전 조건을 반영하였으며, 작동유체의 물성치는 각 작동유체에 적절한 상태방정식을 선정하여 구하였다.

공정 해석 결과를 보면, 수소 액화 공정에서 소비되는 전력의 대부분은 헬륨 압축기에 사용되고 있으며 액화 공기의 압력을 높이는 초저온 펌프의 소비전력은 상대적으로 매우 적다. 그리고 액화 공기를 이용하여 에냉을 마친 수소를 20 K 내외의 초저온 액화 온도까지 냉각하는 헬륨 역브레이튼 사이클에 적용된 저온 팽창기(Cold expander)가 발전기와 연계되었을 때 생산 가능한 발전량은 수소 액화 공정에서 소비되는 전력의 약 3.1%로 낮은 수준을 나타낸다. 한편 수소 액화 공정의 경제성을 논의할 때 주로 언급되는 1kg의 액체 수소를 생산하는데 필요한 에너지 소비량(Specific energy consumption)은 대략 13.9 kWh/kg-H₂로 예측되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.(과제번호 19IHTP-B151617-01-000000)

대기안정도와 난류 소산율이 풍력발전단지
연간발전량 변화에 미치는 영향성 연구

A Study on the effect of atmospheric stability and
turbulence dissipation rate on AEP change in wind farm

김대영 · 김범석*

제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정, *제주대학교 대학원 풍력공학부

풍력발전단지 발전량은 단지가 위치한 사이트의 외부환경 조건에 따라 변동성을 보인다. 외부환경 조건과 발전량 사이의 보편적인 상관성을 이해하기 위해서는 다양한 대기 요인에 기초한 풍력터빈의 출력특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 2가지 대기 요인인 대기안정도와 난류 소산율의 체제에 따라 풍력발전단지의 연간발전량 차이를 중점적으로 분석하였다. 연구 사이트인 제주도 동북·북촌 풍력발전단지는 2MW 풍력터빈 15기와 80m 높이 기상측정탑이 설치되어있고, 여기서 수집된 SCADA의 출력 자료와 기상자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 이 중에서 대기안정도와 난류 소산율은 2기(50m와 75m 높이)의 3차원 풍향·풍속계에서 취득된 자료를 이용하였고, 이들 대기 상태를 몇 가지 체제로 분류하여 풍력터빈 간의 출력 변동성을 분석하였다. 분류된 체제에 따라 출력 변동성은 평균적으로 약 25%를 보이며, 변동성이 가장 심한 안정 대기 상태에서는 약 35%를, 변동성이 가장 낮은 약한 불안정 대기 상태에서는 약 15%를 보였다. 특히, 난류 소산율이 강화될수록 풍력터빈 간의 출력 차이는 감소 경향을 보이며, 안정과 약한 불안정 대기 상태 사이에 뚜렷한 난류 소산율 차이를 확인하였다. 최종적으로 연구 사이트의 연평균풍속인 6.02m/s에서 중립과 기타 대기 상태 사이에 약 5~7%의 AEP 차이를 보였다. 대기 요인에 기인한 풍력터빈 출력의 변동 특성을 이해한다면, 풍력자원평가 및 풍력발전단지 발전량 예측에 있어 실용성을 제공할 것으로 기대한다.

* 본 연구에 도움을 주신 한국종합에너지기술(주)의 관계자분들께 감사의 뜻을 표합니다.

Sorption-enhanced chemical looping reforming 공정 내 화학반응에 따른
oxygen carrier와 CO₂ sorbent의 분쇄특성 연구

Effect of chemical reactions on attrition of oxygen carrier and CO₂
sorbent in sorption-enhanced chemical looping reforming

김준영, 이동현*

성균관대학교 화공융합기술연구소, University of British Columbia, *성균관대학교
화학공학과

The effects of chemical reactions on the attrition of oxygen carrier particles and CO₂ sorbent based on a chemical looping reforming (CLR) process with intrinsic CO₂ capture were analyzed. Iron/hematite as an oxygen carrier, and limestone/lime as a CO₂ sorbent were tested in a jet attrition apparatus. Particle attrition was measured as a function of temperature and gas concentration, with and without reactions. Iron oxidation and limestone calcination increased the particle attrition, whereas hematite reduction and lime carbonation reduced particle attrition due to changes in the mechanical properties of particles. Attrition was shown to depend on the fuel, CH₄ concentration, as well as temperature. The presence of binary solid species increased the attrition due to the increased number of particle collisions.

참고문헌

1. Kim, J. Y., Ellis, N., Lim, C. J., and Grace, J. R., "Effect of calcination/carbonation and oxidation/reduction on attrition of binary solid species in sorption-enhanced chemical looping reforming," *Fuel*, 271, 117665 (2020).
2. Kim, J. Y., Ellis, N., Lim, C. J., and Grace, J. R., "Attrition of binary mixtures of solids in a jet attrition unit," *Powder Technology*, 352, 445-452 (2019).
3. Kim, J.Y., "Jet attrition characteristics of chemical looping oxygen carriers and CO₂ sorbents," *Ph.D. Thesis*, University of British Columbia, Canada

바이오가스 고질화를 위한 기체분리막 공정 적용

Application of Gas Separation Membrane Process for Biogas Upgrading

이충섭 · 임진혁 · 민광준 · 한상훈 · 김세종 · 김홍대 · 하성용 · 장원석* · 오문세*

(주) 에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원

Biogas is a clean and environmentally friendly fuel produced by bacterial conversion of organic waste under anaerobic conditions. Raw biogas contain about 60~70% methane (CH₄), 30~40% carbon dioxide (CO₂), traces of hydrogen sulfide(H₂S), Siloxane and water vapour. In order to remove CO₂ and other impurities, the biogas upgrade technologies have been developed by scrubbing (absorption) process, pressure swing adsorption process, membrane process.

In this study, polymeric hollow fiber membrane was applied to biogas upgrading process. The membrane process test was focused on enhancing methane concentration from biogas with various operating conditions. To reduce the loss of methane, multi-stage process was designed and tested and the result showed more than 97% purity of methane with less than 2% loss of methane.

This paper describes the membrane process design for biogas upgrading and its optimized operating conditions were also described.

가압 기포탑에서 수력학적 특성에 관한 온도의 영향
Effect of Temperature on Hydrodynamic Characteristics in a Pressurized
Bubble Column

배 건 · 고강석* · 노남선* · 임영일** · 이동현

성균관대학교 화학공학부, *한국에너지기술연구원 CCP융합연구단,

**국립한경대학교 화학공학과

가압 bubble column에서 열매유의 온도 증가에 따른 수력학적 특성의 변화를 분석하기 위해 진행되었다. 내경 0.097 m, 높이 1.8 m의 cylindrical stainless column에서 실험이 수행되었다. 실험에 사용된 액체는 열매유 (SK Therm 300)를 사용하였으며, 기체는 air를 사용하였다. Distributor의 opening fraction은 0.128 % 이며 hole size는 1 mm, 개수는 12개로 설계되었다. 압력은 상압(0.1 MPa)에서 3.5 MPa 까지 변경하였고, 기체유속은 12.3 ~ 31.7 mm/s 까지 변화시켜 실험을 수행하였다. 하단 chamber 내부 3 kW 의 전열기를 설치하여 column 내부의 온도는 상온 (21.9°C), 50°C, 70°C, 80°C 으로 점차 상승시켜 실험을 진행하였으며 각 온도에서 gas holdup 측정, optical probe를 이용한 bubble chord length 측정을 진행하였다. 상온에서는 열매체유의 높은 viscosity에 의해 중심부로 크게 함치되어 상승하는 기포가 관찰되었다. 이러한 원인으로 인해 gas holdup은 상당히 낮게 측정되었으며 반면 온도가 증가함에 따라 viscosity가 낮아지며 기포의 bubble dispersion이 원활히 일어났다. Bubble chord length는 상온에서는 압력 증가에 따라 12 mm부터 6 mm 까지 감소하였고, 높은 온도조건에서는 압력 변화에 따른 bubble size는 2 mm 내외로 변화가 거의 없었다.

**블록체인 네트워크를 활용한 스마트시티 에너지관리시스템의 소셜 빅데이터
활용에 관한 연구**

A Study on the Application of Social Big Data in Energy Management
System Using BlockChain Network for SmartCity

김영곤 · 최중인

(재)차세대융합기술연구원

이 논문은 전국적으로 산재하는 에너지 사용자들로부터의 온도, 습도등의 체감 쾌적지수 및 전력사용량 데이터를 에너지에 특화된 빅데이터 플랫폼에 적용한 후, 블록체인 네트워크 기술을 적용한 소셜 빅데이터 활용함으로써, 에너지 사용량절감, 수요 분석, 분산거래 활성화, 효율향상 등에 기여 하는 방법에 관한 연구이다. 또한 전기 및 열에너지 제어실, 계량기 및 댁내 각방에 설치된 IoT 센서로부터 유입되는 방대한양의 데이터 처리에 있어 비정형적인 데이터특성을 가지는 에너지 분야에 특화되어 개발되어진 빅데이터 플랫폼 시스템과 소셜 빅데이터 게시판을 적용한 스마트시티 통합관리시스템에 대하여 소개 한다.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음.(과제번호 20PIYR-B153277-02)

나프타퀴논 기반 알칼리 수계 레독스 흐름 전지 성능 향상
Performance Evaluation of Alkaline Aqueous Redox Flow Batteries by
Naphthoquinone Derivatives

이원미¹ · 박균호¹ · 권용재^{1,2*}

¹서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과

²서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과

Alkaline aqueous redox flow batteries (AARFB) have been studied over last few years because high solubility and cell voltage are accomplished by a facile change of the organic active materials and based on that, high energy density and power density are achieved. Among various organic materials that have excellent redox properties in alkaline supporting electrolyte, naphthoquinone (NQ) and ferrocyanide can be selected for AARFB. To increase the energy density of AARFB, the solubility of NQ should be increased. To enhance its solubility, the hydrophilic functional groups are used. However, this method is too complicated and toxic. Therefore, in this study, the solubility of NQ is enhanced by only mixing the two NQ derivatives (1,2-naphthoquinone-4-sulfonic acid sodium salt (NQ-S) and 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (Lawsone)). NQ-S is initially transformed to NQ-OH that has the same chemical structure with Lawsone under KOH, and the process leads to a higher solubility of the mixture of NQ-S and Lawsone (NQ-SO) than the individual solubilities of Lawsone and NQ-S. Regarding cell voltage, that of AARFB using NQ-SO and ferrocyanide is 1.01 V. The charge efficiency, discharge capacity, and power density of AORFB using 0.6 M NQ-SO and ferrocyanide under 100 mAcm⁻² are 099%, 23 AhL⁻¹, and 90 mWcm⁻². Furthermore, the concentration of NQ-SO was increased to 1.2 M and its discharge capacity increases to 40.4 AhL⁻¹.

References

- [1] Lee, W., Park, G., & Kwon, Y. (2020). Alkaline aqueous organic redox flow batteries of high energy and power densities using mixed naphthoquinone derivatives. *Chemical Engineering Journal*, 386, 123985.
- [2] Tong, L., Goulet, M. A., Tabor, D. P., Kerr, E. F., De Porcellinis, D., Fell, E. M., Aspuru-Guzik, A., Gordon, R. G., & Aziz, M. J. (2019). Molecular Engineering of an Alkaline Naphthoquinone Flow Battery. *ACS Energy Letters*, 4(8), 1880-1887.

나프타퀴논과 요오드 기반 수계 레독스 흐름 전지 성능 평가

Performance of Aqueous Redox Flow Batteries using Naphthoquinone and Iodide

박균호¹ · 이원미¹ · 권용재^{1,2*}

¹서울과학기술대학교 에너지환경대학원 신에너지공학과

²서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과

Because of the promising prospect of organic redox active species, organic materials based redox flow batteries are intensively investigated, especially in aqueous environment. In this study, 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (NQ-OH) and potassium iodide (KI) are applied as active materials for aqueous organic redox flow battery (AORFB). NQ-OH is one of the quinone derivatives that have excellent electrochemical properties. In addition, the solubility of KI in water is high. NQ-OH dissolved in potassium hydroxide (KOH) was applied as the negative electrolyte (negolyte) and KI dissolved in potassium chloride (KCl) was utilized for the positive electrolyte (posolyte). Combined with Nafion 117 membrane which is permeable to K^+ ions, OCV of 1.15 V was achieved. In this combination, two types of electrolyte featuring different pH values were used, this occurs increasing of pH value in KCl solution, which induce the irreversible chemical reaction of KI. But this pH imbalance can be suppressed by applying the carbon felt doped with carboxylic acid functionalized multi-walled carbon nanotube (CA-CNT@CF) on the positive electrode. The functional groups of CA-CNT react with hydroxide ions transferred from the negolyte maintaining the pH value of posolyte stable. As the result, the cycle durability of the full cell with CA-CNT@CF showed twice as long as that with pristine carbon felt (P-CF). Discharge capacity of $4.83 \text{ Ah}\cdot\text{L}^{-1}$, Utilization of 90.16%, coulomb efficiency (CE) of 98.57%, and EE energy efficiency (EE) of 64.21% were shown with current density of $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ and cut-off voltage of 0.2 ~ 1.7 V over 50 cycles. According to cyclic voltammetry (CV) study and proton nuclear magnetic resonance (H-NMR), no electrochemical and chemical degradation were observed in negolyte after full cell operation. This approach may establish a precedent application of functional group on electrode to control pH value of electrolyte.

부하 패턴이 사업 타당성에 미치는 영향에 대한 고찰

A Study on the Effect of Load Patterns on the Feasibility of Business

오시덕 · 서석호 · 송정훈*

(주)블루이코노미전략연구원, *서울대학교 기계항공공학부

1. 연구 목적

기후변화에 대한 대응 요구와 4차 산업혁명이라는 사회·경제적인 요구로 에너지 산업 분야에서의 에너지 전환은 청정화(Decarbonization), 분산화(Decentralization), 디지털화(Digitalization) 및 수요 단의 파괴적 변화(Demand Disruption) 등 4D 메가 트렌드의 영향으로 세계적으로 가속화되고 있다. 이러한 변화에 대응하여 전 세계적으로 에너지 산업에서의 혁신은 기존 산업 내·인접 산업 간의 융합에서 이중 산업 간의 융합으로 혁신의 방향이 전환되어 산업의 경계가 확장되고, 경쟁 관계도 기존의 제품 간 경쟁에서 생태계 간 경쟁으로 전화되어 새롭고 다양한 사업모델이 등장하고 있다. 새롭게 등장하는 사업모델의 실현 가능성은 실제 산업 생태계에서 반복적으로 테스트하는 등으로 시간과 비용이 많이 투입되는 단점이 있다. 따라서 부하 패턴이 사업 타당성 결과에 미치는 영향의 분석을 통하여 에너지 신산업 사업모델의 효과적인 검증 대안에 대하여 논의해 보고자 한다.

2. 연구 내용

발전출력이 1,437kW, 열출력이 1,712kW인 열병합발전기 2대, 열출력이 7,472kW인 보일러 3대로 백화점에 에너지를 공급하는 경우에 백화점의 전력 부하 패턴은 수요처의 I-Smart 정보를 활용하고, 열부하 패턴을 시간 단위로 다르게 모델링하는 경우와 총량의 평균으로 균일하게 모델링하는 경우에 연간 이용률, 연간 에너지 비용 절감액, 투자회수 기간 등 사업모델의 검증 또는 타당성의 판단기준에 미치는 영향을 분석하였다. 열부하 패턴을 제외한 에너지시스템 성능, 가스 및 전기 등 에너지 요금은 동일하게 적용하고, 시뮬레이션은 (주)블루이코노미전략연구원이 보유하고 있는 SES(Smart Energy Solution) 모델을 활용하여 수행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

열부하 패턴의 모델링 방법에 따라서 연간이용률은 2.9%, 연간 에너지 절감 비용은 약 26백만원, 투자회수기간은 약 2.3년 차이가 발생하여 열부하패턴의 모델링 결과가 사업 타당성에 영향을 미친다는 것을 확인하였다..

표 1 열부하 패턴의 모델링 방법에 따른 열병합발전시스템 사업모델의 사업 지표 변화

구분	불균일 열부하 패턴(①)	균일 열부하 패턴(②)	차이(②-①)
연간 이용률(%)	20.7	23.6	2.9
연간 에너지 비용절감액(원)	146,752,716	172,316,301	25,863,585
투자회수 기간(년)	12.1	9.8	-2.3

따라서 새로운 사업모델의 검증을 통한 시행착오를 줄이고 실현 가능성의 제고를 위하여 신뢰성 있는 에너지 데이터 및 모델링 방법, 검증 Tool의 개발 및 확보가 중요하다.

고망간강식 내조인 저장탱크의 운전 모니터링
Monitoring Research of LNG Storage Tank comprised of
Inner Container by High Manganese Steel

김정환 · 이민경 · 길성희 · 유근준 · 김영규

한국가스안전공사 가스안전연구원

포스코 광양사업소 내 LNG저장을 목적으로 완전방호식 저장탱크가 설치되었다. 최근 5호기(20만 m³급)을 KGS AC115 및 API620을 토대로 설계 및 제작하여 지난 2019년 12월부터 쿨다운을 포함한 LNG 충전까지 정상 운전에 돌입하였다. 특기할 점은 저장탱크의 내조를 포스코에서 개발한 고망간강을 사용한 점과 운전 상황에 따른 고망간강식 내조의 거동을 살펴보기 위하여 내조 외면에 스트레인 게이지 x축 14개, y축 14개를 11단에 골고로 분포하여 설치한 점이다.

한국가스안전공사 가스안전연구원은 쿨다운 시점부터 초도 운전에 걸쳐서 스트레인 데이터 뿐만 아니라 온도, 압력, 액위 데이터를 받아 분석하였다. 최초 적용된 고망간강 내조를 갖는 완전방호식 LNG저장탱크의 운전상황을 모니터링하여, 실제 운전상황이 내조 재료인 고망간강 탱크에 미치는 영향을 면밀히 분석하여 향후 안정적인 저장탱크 운용에 일조하고자 한다.

수배관 시스템에서 체크밸브의 슬램으로 인한 수충격 완화 실증연구 An Empirical Study on the Mitigation of Water hammer due to the Check Valve Slams in the Water piping System

양재구 · 서상일 · 맹석주 · 양지석 · 오재욱 · 오세명
플로우테크(주)

상하수도를 포함하는 수배관시스템에서의 수충격은 배관시스템의 정상운전 중 펌프의 급정지, 밸브의 급개폐 또는 배관내 에어포켓 등에 의해 유체의 급격한 속도변화가 압력변화로 나타나는 현상으로서 배관에 가해지는 급격한 압력변화는 배관에 스트레스를 가중시키고 그 충격과 피로의 누적으로 배관이 파손되고 누수가 발생하는 등 피해가 발생되므로, 적절한 수충격완화(수충격해석 및 완화장치 설치 등)가 필요하다.

여기서 수충격의 완화를 위한 첫 단계는 해당관로의 수충격을 분석하는 수충격 해석(Surge Analysis) 으로서 그 해석시나리오는 펌프의 급정지 또는 밸브의 급개폐를 검토하는 것이며, 그동안 수충격 완화의 대부분을 차지하였다. 그러나 수충격을 해석하고 적절한 완화장치가 설치되었어도, 심한 수충격이 발생되어 배관의 파손과 누수가 발생되어 펌프실이 침수되거나 매립배관이 파손되는 사고가 끊임없이 이어지고 있는 것이 현실이다. 이는 그동안 검토하지 않았던 체크밸브의 슬램(Slam, 펌프 급정지 등으로 역류에 의해 체크밸브 디스크가 팡! 하는 진동과 소음 및 심한 충격압력파를 동반하는 현상)을 적절히 검토하고 대책을 세워야 함을 나타낸다고 할 수 있다.

그동안 대부분의 체크밸브 선정은 수충격 해석에 의한 슬램의 영향을 고려하여 선정되지 않고 관례적으로 펌프관경에 비례하게 선정되어, 설계단계에서 체크밸브의 중요성이 간과되는 경향이 많았다. 또한 대부분의 체크밸브 제조사들은 유량과 마찰손실표, 역류속도와 감속도 특성, 디스크의 단힘과 속도특성 및 채터링현상 등에 대한 자료를 제시하지 못하고 있었다. 이는 동일한 모델의 체크밸브라 하더라도 배관마다 다른 동적 역류특성을 고려하여 슬램의 발생을 검토하고, 그 특성에 맞는 체크밸브를 선정-설계-제작-납품하여 배관공사가 완료된 후 수충격 시험을 실제로 실시하여, 시험당시 체크밸브의 슬램영향을 검증하고 수충격이 적정범위에 있는지의 유무를 판단하는 것은 현존하는 기술로는 쉽게 접근하지 못하는 영역에 있었기 때문이다. 본 수충격 시험연구는 그동안 자사에서 500여회 넘는 수충격 시험DB를 분석하여 실용배관(예, 체크밸브 400mm, 관로직경 1000mm, 배관길이 10km 이상 등)에서 체크밸브의 개폐특성(열린 체크밸브 디스크가 시간의 경과에 따라 개도가 완폐되는 과정의 특성 등)과 각기 다른 배관마다의 역류특성의 상호작용으로 발생하는 슬램을 수충격 해석으로 예측하고, 그 해석결과에 따라 체크밸브를 제작하고 설치한 후, 실제 수충격 시험을 실시하여 슬램완화를 검증하였다(공인시험기관 입회포함).

이 시험연구의 보고서에는 실제 운전중인 대형 배관시스템에서 체크밸브의 슬램으로 계속적인 파손과 누수사고로 더 이상 운전이 불가능한 국내외 각각 1개 현장의 완전한 해결사례를 담았으며, 이 보고서가 앞으로의 배관수충격 해결의 새로운 방향을 제시하여 배관시스템의 운전이 보다 더 신뢰성을 갖도록 하는데 있다.

융복합(대수층 계간축열, 수열히트펌프, 목재펠릿보일러) 에너지팜을 위한
온실 생육환경 측정 방법에 대한 연구

Measurement method of growth environment in a greenhouse for a convergence (aquifer thermal energy storage, hydrothermal heat pump, wood pellet boiler) energy farm

오정석^{1)*} · 강새별¹⁾ · 장기창²⁾ · 최재준¹⁾ · 홍성국¹⁾ · 이길봉²⁾ · 양제복³⁾ · 윤시원¹⁾ ·
윤영직¹⁾ · 위덕재¹⁾ · 이현희¹⁾ · 이찬규¹⁾ · 김기봉²⁾

한국에너지기술연구원 에너지네트워크연구실¹⁾, 열변환시스템연구실²⁾, 신연소발전연구실³⁾

한국에너지기술연구원 융복합 에너지팜 연구그룹은 한국지질자원연구원, (주)지엔에스엔지니어링, (주)센도리, 숙명여자대학교, 전라북도농업기술원과 함께 농림식품기술기획평가원이 관리하는 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발사업을 수행 중이다. 본 과제에서는 신재생에너지 지원인 대수층 계간축열(Aquifer thermal energy storage; ATEs), 수열히트펌프(Hydrothermal heat pump), 목재펠릿보일러(Wood pellet boiler) 기술을 융복합하여 원예시설에 적용함으로써 농촌에너지 자립화 방안을 실증할 계획이다. 이를 통해 기존 농사용 전기 및 면세 유류 이용에 대한 의존을 개선하고자 한다. 본 논문에서는 원예시설 냉온열에너지 공급에 있어 최적의 생육환경을 제공하기 위한 온습도 및 이산화탄소 측정방법에 대한 그간 수행 연구결과들을 정리하여 발표하고자 한다. 온실 생육환경 조성을 위해 근권부와 생장점에 대한 냉난방 조건을 가정하여 유선과 무선 측정방안에 대해 검토하였고 적정기술을 고려하여 온도, 습도, 이산화탄소에 대한 선택적 측정방법에 대해 고찰하였다.



그림 1. 원예시설 생육환경 측정 개요: (가) 융복합 에너지팜 기술, (나) 온실 온습도 및 이산화탄소 측정예시

CDI*을 이용한 물정화 및 결정화 기술 개발

The Development of water purification and crystallization technology by using Capacitive De-Ionization processs

유장용 · 강위관 · 조호용, 이채수 · 장원석* · 최도현*

두산중공업 기술연구원, *한국지역난방공사

발전 및 산업분야 수처리방식(이온교환, 멤브레인 등)은 물속의 오염물질을 처리한 후 재생공정에서 다량의 고농도 유해화학약품(HCl, NaOH)을 사용한다. 이는 고가의 화학약품 비용 부담과 폐수 유발에 따른 환경오염뿐만 아니라 작업자와 인근 주민의 안전을 위협하는 문제점이 공존하는 어려운 상황을 유발하곤 한다. 특히 화학물질관리법(이하 화관법)등에 의한 제재로 설비 운영 안정성 및 손익등 사업 추진 시 커다란 걸림돌이 될 수 있다. 그러나 CDI 기술은 화학약품관리법 및 PSM(공정안전관리) 등 정부 규제에 대해 친환경적이며 합리적인 대안으로 다양한 문제점을 타개할 수 있을 것으로 전망된다.

전기흡착식 탈염화 기술(Capacitive Deionization)은 전기화학적 원리를 이용해 물속 불순물(이온)을 제거하는 기술이다. 다양한 이온이 포함된 원수를 양이온(+), 음이온(-)으로 충전된 탄소전극으로 통과시키면 원수 내 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 같은 (+)이온은 (-)전극에 흡착되고 CO_3^{2-} , SO_4^{2-} 와 같은 (-)이온은 (+)전극에 흡착되고 이를 제거함으로써 이온이 없는 깨끗한 처리수를 생산할 수 있게 된다. 그리고 흡착된 (+)이온과 (-)이온을 제거하는 원리는 흡착된 탄소 전극의 극을 바꿔 (+)·(-)로 방전시키면 탄소전극에서 이온들이 탈착돼 별도로 농축수를 제거(배출)할 수 있으며 이후 탄소전극을 (-)·(+)로 교체해 충전시키면 다시 이온이 제거된 생산수를 얻을 수 있는 원리이다. 특히 대상원 수에 따라 차이가 있으나 염(이온)제거율은 평균 80~90%를 항상 유지하며 생산수와 농축수의 수량은 최대 5:1 정도로 생산수량이 훨씬 많은 것이 이번 기술의 특징이다.

본 연구는 차세대 핵심 탈염화 기술인 CDI 기술을 발전 및 산업분야 대상 지하수, 시상수 및 공업용수를 이용한 순수 생산과 난방수 및 냉각탑 BD수 재이용에 적용할 수 있다. 특히 기존 CDI 기술과 차별화된 “Horizontal Type의 회전형 CDI”을 연구개발 중에 있으며 '21년 상반기 유가자원 회수 및 결정화 공정(전자폐수 Ca_2SO_4 , 2차전지 리튬 회수 탄산리튬 및 수산화리튬)에 적용 가능한 대형화 모듈 개발을 목표로 하고 있다. Horizontal Type의 회전형 CDI기술 대형 모듈 개발 성공 시 배터리 Recycle 및 전자폐수 무방류 분야에 단계적 실증화 사업을 추진 예정이다.

결론적으로 발전 및 산업분야 대상 순수 제조와 냉각탑 BD수 및 DH수 재이용을 위한 CDI 시스템을 한국지역난방공사 화성지사에 현장 실증에 성공하였으며, 시장 다변화를 위해 결정화 공정에 에 맞는 경제적이고 간편한 친환경적인 수처리 방식을 도출해 처리 비용 절감과 수익창출 상용화 모델도 도출할 계획이다.

선박용 수소충전소 위험성평가 및 기준개발 연구

A Study on Risk Assessment and Standard Development for Hydrogen Fuel Cell Ship Fueling Station

강승규 · 윤진희 · 허윤실

한국가스안전공사 수소연구실

전 세계적으로 환경규제가 강화되면서 이산화탄소 배출을 감축하기 위한 노력들이 활발히 추진되고 있다. CO₂ 배출의 상당부분을 차지하는 수송분야에서도 친환경연료를 사용하는 모빌리티 개발에 박차를 가하고 있으며, 자동차를 중심으로 수소연료전지를 이용한 무공해 차량개발이 활발하다. 그 밖에도 열차, 선박, 대형트럭 등에 수소연료전지 시스템의 적용을 위한 연구개발이 수소 선진국을 중심으로 진행 중이다. 국내에서도 수소 모빌리티의 확대 적용을 위해 열차, 선박, 트럭, 지게차 및 건설기계 등으로 다양한 수소 모빌리티를 개발하고 있다. 이러한 모빌리티의 확대 보급을 위해서는 충전시설이 필수적이나 현재 국내의 수소충전 기준은 자동차에 한정되어 있어 자동차 이외의 모빌리티에 대하여는 충전이 불가능한 상황이다. 본 연구는 울산 수소모빌리티 규제특구 사업으로 진행 중인 수소연료전지 선박의 실증을 지원하기 위한 선박용 수소충전소에 대하여 위험요인 분석 및 정성적/정량적 위험성 평가를 진행하고, 이를 토대로 안전기준을 제정하고자 한다. 이를 위해 해외 사례를 조사 분석하고, 선박 충전시설 및 충전환경에서의 안전관리 사항을 도출하여 선박용 수소충전소에 대한 특례기준을 제정한다. 특례기준에 따라 실증 사업을 진행하고 안전성이 확인 된 후 상업용 선박 수소충전소를 위한 KGS 코드(안)을 도출하여 수소연료전지 선박의 상용화를 지원하게 될 것이다.

※ 본 연구는 중소벤처기업부 및 한국산업기술진흥원의 수소그린모빌리티 규제자유특구혁신사업의 지원으로 수행되었습니다.(P0012865, 수소연료전지 선박용 수소충전소 구축 및 실증)

금속수소화물을 이용한 수소추진선박의 연료공급시스템
Fuel Gas Supply System for Hydrogen Propelled Ships using Metal
hydride

김준배 · 최성윤 · 조배석

한국조선해양기자재연구원 가스연료기술센터

국제해사기구(IMO)의 배출가스 규제에 선제적으로 대응하고, 에너지 효율 향상 기술이 적용된 미래친환경 선박의 연료공급시스템(FGSS)에 대한 연구개발과 실증사업이 전세적으로 활발히 진행되고 있다. 수소연료 추진시스템은 연료전지(PEMFC), 에너지저장시스템(ESS)등 육상 적용이 가능한 기술들이 일부 개발되었으나, 선박 적용을 위해서는 시스템 설비의 용량 증가, 선박 운항 환경이 함께 고려되어야 한다. 특히, 수소는 기체, 액체 및 고체 상태의 연료로 선박에 사용할 수 있으며, 수소 저장방식에 따른 연료공급시스템의 운용방법이 다르기에 이와 관련된 수소연료추진 시스템의 기술개발이 필요하다. 고체수소 저장방식의 경우 금속수소화물을 사용하여 수소를 저장하므로 체적당 수소저장 밀도가 높고 폭발의 위험이 적으므로 더 안전한 장점이 있다.

금속수소화물을 통해 수소를 흡착 및 방출할 경우, 연료전지의 요구사항에 맞도록 각 화학 반응에 적절한 온도 및 압력 조건을 구성하여야 하며 이를 위해 적절한 열관리 시스템이 요구된다. 또한, 압력을 승압하는 최적 방안에 대한 연구도 함께 진행되어야 하며 그 결과를 바탕으로 한 연료공급시스템 구성이 필요하다.

본 연구에서는 수소추진선박의 고체수소 연료공급시스템의 통합자동 제어시스템의 개념설계(GM)를 위해 금속수소화물(Metal Hydride)을 이용한 수소연료의 저장방법과 공정모사를 통한 연료공급시스템의 최적화, 그리고 선박 적용시 우선적으로 고려되어야 할 사항을 중심으로 연구되었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 수소선박 안전기준개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 20200456, 수소운송선박 적하역 및 수소추진선박 연료공급 통합제어 안전기준 개발)

IoT 기반 전력 사용량 분석 시스템 개발

Development of IoT-based power facility usage analysis system

이민호 · 김성환

목포대학교 전기및제어공학과

최근 에너지 다소비 업종을 중심으로 이산화탄소 배출 규제 등 사회적인 이슈들의 부상과 함께 에너지 절감 및 효율화에 관한 관심이 높아지고 있다. 또, 최근 4차 산업혁명기반의 ICT를 활용한 에너지 절감 기술 등에 대한 논의가 활발히 진행되고 있으며 국내 에너지 절감 시장은 가파른 성장세를 보인다. 이에 따라, 에너지 절감 및 사용량 분석을 위해 전력 ICT 및 IoT 기술을 활용하여 기존 계측제어 시스템 및 에너지 사용원에 대한 전력 설비 사용량 분석 및 수집 시스템을 개발하고 에너지 및 다각적 현황분석을 통한 종합적인 정보를 기반으로 에너지 소비, 분석 시스템 개발이 필요하다. 본 연구에서는 에너지 소비 효율화 및 전력기기의 수명 증가를 위한 IoT 기반 전력 사용량 분석 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템은 크게 전력 수집시스템과 사용량 분석 관리시스템으로 구성된다. 전력 수집시스템은 기존 계측제어 시스템의 수집항목에 대한 확장성 및 통신방식을 개선하기 위해 무선기반 IoT(LTE 모뎀 등) 네트워크를 이용한 데이터 수집 및 감시 가능한 TM, 하드웨어 기반 Gateway 연동을 통한 시스템 운영관리 및 효율성 제고를 위한 수집시스템, 그리고 수집한 데이터 DB 구축으로 구성하였다. 또, 사용량 분석 관리시스템은 전력 사용량 관리 및 분석이 가능하도록 하며, 날씨 및 계절 요인, 시간대별 전력 사용량을 반영한 수요관리 시스템으로 구성하였다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (N0002325, 2020년 산학융합지구 조성사업)

전기차 충전스테이션 적용 태양광발전 및 전력, 냉난방 삼중발전 에너지공급 시스템의 EMT 시뮬레이션

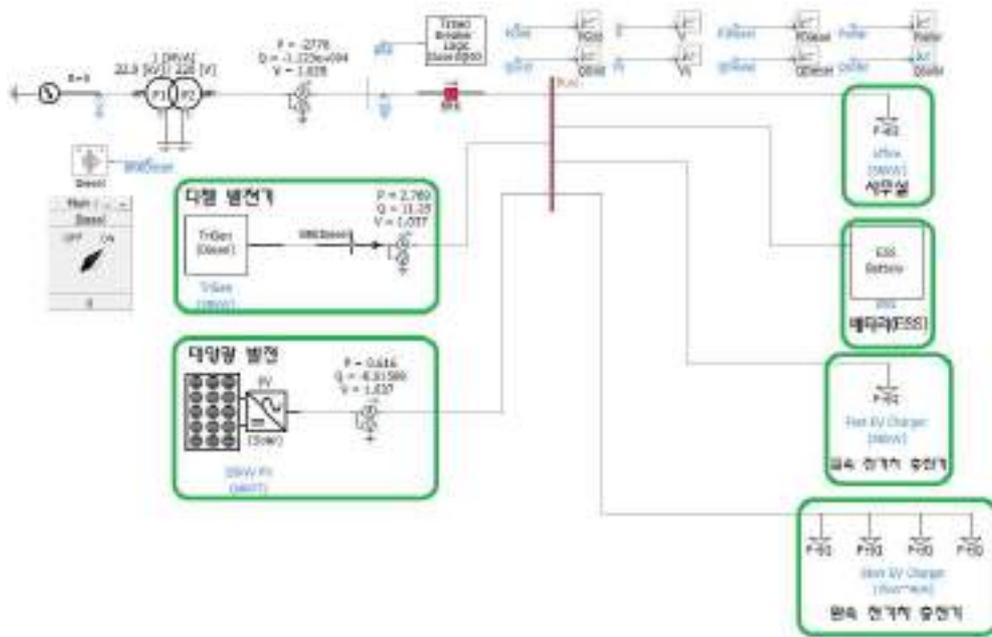
EMT simulation of energy supply system combined with photovoltaic and trigeneration for electric vehicle charging station application

전성국 · 이동호 · 정용민

목포대학교 전기공학과

최근 화석연료의 고갈 및 이산화탄소 배출규제 등의 영향으로 신재생에너지의 보급이 세계적으로 증가하고 있다. 국내에서도 신재생에너지의 보급을 위해 탈원전, 그린뉴딜 정책 등에 힘입어 태양광 보급을 지속적으로 추진 중이다. 본 연구는 지역 편의시설에 설치되는 전기차 충전소에 태양광 발전을 적용하여 전기의 발생에서 소비의 전 과정에 공해의 발생이 최소화 되는 시스템을 실증 한다. 그러나 태양광 발전은 기상조건에 따라 발전량 변동이 심하여 전기차 충전시스템에 적용 시 사용자 대기시간이 길어지거나 전력품질 저하로 사용자가 불편함을 받을 수 있다. 따라서 천연가스 소형발전을 추가하여 전기차 사용자가 기상조건에 의한 불편함 없이 충전시스템을 이용할 수 있도록 한다. 태양광 발전에 추가된 천연가스 소형발전은 전력/난방/냉방을 동시 또는 개별적으로 공급할 수 있는 삼중발전(TriGen.)을 사용한다. 추가적 기능으로 TriGen.에서 발생하는 냉열로 태양광 모듈을 냉각하여 태양광 발전 효율을 개선하고 충전소와 주변 편의시설에 필요로 하는 전력뿐 아니라 냉난방을 공급한다. 본 논문은 태양광 및 삼중발전 연계 시스템의 전력부분을 EMT 시뮬레이션으로 모의하여 과도현상 및 고조파평가를 비교, 검토한다.

감사의 글 : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20172010106100)



<EMT 시뮬레이션 예시>

기술선도를 위한 분산형에너지 융복합부품 성능시험 및 인증지원
 Performance testing and certification support of distributed energy
 convergence parts toward technical leadership

안정훈 · 배정섭 · 김종우
 (재)대구기계부품연구원

대구지역 에너지산업 육성은 2004년부터 시작된 지역전략산업(나노신소재-에너지소재)을 시작으로 현재는 지역산업진흥계획 내 주력산업으로 이어지며 지속적인 지원을 하고 있다. 지역산업진흥계획에서는 분산형에너지산업을 주력산업으로 선정하여 기존 태양광, 연료전지 같은 신재생에너지에서 에너지저장시스템(ESS), 스마트그리드에 이르기까지 지원영역을 확대하여 최근의 주요 산업 트렌드인 에너지신산업 분야로의 산업육성을 지원하고 있다.

2019년 지역주력 기업지원사업의 분산형에너지 분야의 성능시험 및 인증지원은 개발완료 시제품(단기간 개발완료 가능 시제품 포함)을 보유한 기업의 지원을 바탕으로 2018년 지원된 대구테크노파크 나노융합실용화센터의 제품고급화 지원에 대한 성과물과 2017년 모바일융합센터에서 지원된 시제품제작 지원결과물을 지원 대상으로 기업지원의 연속성을 유지하도록 구성하였다. 금년도인 2020년 기업지원사업은 2019년에 지원된 제품 고급화 실적과 대구지역 에너지기업이 보유한 기술로 개발한 시작품 혹은 시제품에 대한 성능시험과 인증지원을 수행하고 있다.



< 성능시험 및 인증지원을 위한 업무 흐름도 >

분산형에너지 요소 부품 및 제품에 대한 시험인증은 크게 KC 인증과 CE 인증이 대표적이다. KC 인증과 CE 인증 모두 전기안전성 시험과 전자파 적합성 시험을 완료 후 시험성적서와 함께 인증 신청서를 제출해야 한다. 위의 그림처럼 전기안전성 시험과 전자파 적합성 시험전 선행 시험(Pre-Test)를 실시하여 무결성이 확인된 부품 및 제품에 대하여 인증시험을 신청함으로써 인증을 위한 소요시간을 단축하고 있다.

본 연구는 중소벤처기업부, 지역특화산업육성사업 비R&D 기업지원사업으로 수행된 내용입니다. 지원 해주신 기관, 관계자분들께 감사 드립니다.

배터리셀 자가 교체가 가능한 비용절형 볼트 고정식 스마트 모빌리티 배터리팩 개발

Development of smart mobility battery pack with battery cell self
replaceable non welding type assembled fixing bolt

안정훈 · 서명수* · 성동길* · 김형경*

(재)대구기계부품연구원, *(주)씨오알엔

지구온난화의 주원인인 이산화탄소 배출을 억제하고자 전세계적으로 이차전지 및 관련 산업이 확대되고 있으며, 이산화탄소 배출을 억제하는 다양한 대안 중 핵심적인 것으로 스마트 모빌리티와 전기차 보급이 언급되고 있다. 새로운 1인용 교통수단인 스마트 모빌리티에 대한 수요는 급격히 증가하나 관련 법령 및 안전대책은 이를 반영하지 못하고 있는게 현실이며, 노후된 배터리팩에서는 리튬 등 중금속이 함유되어 있지만 무분별하게 폐기되어 환경 문제를 야기할 수 있다.

증가하는 스마트 모빌리티의 사용량에 따라 장착되어 판매되는 리튬이온 배터리팩도 함께 증가하고 있으며, 특히 1인용 스마트 모빌리티의 경우, 용량이 적고, 충방전 횟수가 많다 보니 배터리팩의 노후가 빠르게 진행되며, 일부 중소기업은 중국산 저급 배터리를 이용한 배터리팩을 공급하여 그 수명이 매우 짧아 스마트 모빌리티에 대한 부정적 의견을 키우는 현실이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 배터리팩에서 자주 발생하는 불량요소의 배터리 셀 한 개가 배터리팩 전체를 못쓰게 하는 경우가 빈번하여, 불량 요소의 배터리 셀 한 개만 교환할 수 있는 새로운 비용절형 볼트 고정식 스마트 모빌리티용 배터리팩의 필요성이 높아지고 있어, 이에 대한 연구를 수행하였다.



< 배터리 팩의 PCM 회로에 대한 전자파 측정 시험과 복합환경 진동시험 사진 >

가솔린엔진용 배기가스 재순환장치 형상 개발

Development on Shape of Exhaust Gas Recirculation Device for Gasoline Engine

배정설 · 한대성*

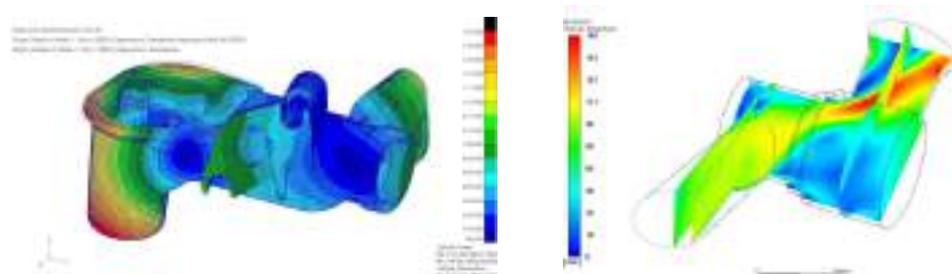
(재)대구기계부품연구원, *(주)디에이치지

본 기술은 가솔린엔진용 배기가스 재순환장치 형상 개발에 관한 내용이다. 배기가스 재순환장치는 가솔린 엔진에서 발생하는 배기가스를 재순환하여 흡기장치에 다시 공급시켜 연소 시킴으로써 연료 효율 향상 및 배기가스를 저감시키는 역할을 한다. 고온의 배기가스를 효과적으로 재순환하여 연비를 향상시키고, 유해성분을 저감시키는 배기가스 재순환장치의 형상을 개발하였다. 플라스틱 소재를 이용한 3D프린터로 형상 시제품을 제작하고, 전산해석적인 방법으로 형상의 구조 안정성 및 유동 흐름 분석을 통하여 형상을 검증하였다.

본 연구는 중소벤처기업부 구매조건부신제품개발사업(S2702846)으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.



< Fig. 1 Shape of Exhaust Gas Recirculation Device >



< Fig. 2 Structural Analysis & Flow Analysis through Computer Simulation >

지역난방 최적 열사용량 산정을 위한
Neural Network 딥러닝을 통한 열수요 예측

Heat Demand Prediction through Deep Learning of Neural Network for
Estimating Optimal Heat Consumption for District Heating

김민영 · 김래현 · 김호현 · 김가희 · 류기윤*

서울과학기술대학교 산학협력단, *서울과학기술대학교 화공생명공학과

본 연구에서는 지역난방 최적 열사용량 산정을 위한 Neural Network의 딥러닝을 통해 여러 가지 조건에서 지역 열수요 예측 모델을 개발하였다. 이를 위해 한국지역난방공사 지역 열공급 실제 실적과 외기온도 등의 자료를 수집하여 열공급 패턴을 분석하고 요일별, 시간대별 열공급 패턴을 분석하였다.

그 결과 외기온도에 따른 열공급 변화 패턴은 요일별 보다 시간대별로 상관관계가 높은 것을 알 수 있었다. 분석 결과를 바탕으로 도출된 입력변수를 MATLAB Neural Network에 적용하여 열수요 예측 네트워크를 구성하였으며, 모델의 학습 결과로 Regression 값이 0.99를 나타내었다. 상기 모델로 예측된 열수요량과 열공급 실적을 비교한 결과 만족할 수준의 결과를 얻을 수 있었다. 향후 변화 하는 생활 환경에 따라 실시간 빅데이터를 계속적으로 수집·분석하고 온라인 시스템에 적용할 수 있는 바탕을 마련한다면 최적의 열공급 운영시스템을 구축하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

마이크로웨이브를 이용한 하이브리드 가열 시스템의 특성 분석 Characteristics Analysis of Hybrid Heating System using Microwave

전원표 · 김성일 · 오상현 · 박기호 · 이현구*

한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부 EMS연구실, *(주)세지테크

마이크로웨이브(Microwave) 가열기술은 기존 기술(연소 또는 전기히터 방식)과 달리 물질내부로부터 가열되어 열이 외부로 전도, 확산되므로 승온속도가 빠르고 가열시간이 짧으며 물질의 변형, 변질 및 변성이 적어 활용 면에서 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 목적물을 선택적으로 가열할 수 있으며, 복잡한 형상이라도 균일한 가열이 가능하고 운전 조작 및 제어가 용이하며, 소음이나 열기 및 배기가스가 생기지 않으므로 친환경 가열기술이라 할 수 있다. 최근에는 산업부문 에너지효율성 제고 및 환경문제를 해결하기 위한 방법으로 마이크로웨이브 가열기술이 주목 받고 있다. 마이크로웨이브 가열기술이 응용되는 산업분야는 식품(건조, 조리, 해동, 살균, 멸균 등), 신약의 합성, 고분자 중합, 바이오디젤 합성, 염색, 요업 및 금속분말(소성, 용융, 경화, 분해 등), 중금속 폐기물의 안정화 처리 등에 다양하게 응용되고 있다.

본 연구에서는 마이크로웨이브 가열기술의 산업분야 이용현황을 파악하고 마이크로웨이브 이용 하이브리드 가열 시스템(Hybrid heating system)의 적용기술을 분석하였다. 특히, 열풍과 마이크로웨이브를 조합한 건조 시스템과 유전발열체를 이용한 마이크로웨이브 가열 시스템의 유용성을 분석하였다. 먼저 열풍+마이크로웨이브 복합건조 시스템의 적용 가능성을 파악하기 위해 석고보드 등에 대한 건조 특성 실험을 수행하였다. 실험장치의 열풍발생기는 전기히터(12kW)를 사용하였으며, 마이크로웨이브 발생기는 주파수 2,450MHz, 출력 12kW의 마그네트론(3kW×4set)을 사용하였다. 대상 시료의 건조스케줄에 따른 다양한 실험을 통해 건조시간이 기존 통기 건조방식에 비해 1/4정도로 감소하였으며, 20~30%의 에너지 효율향상이 기대되었다. 또한 높은 온도가 요구되는 재료의 가열 및 소성공정의 적용성을 파악하기 위해 유전발열체를 이용한 고출력 마이크로웨이브 가열 시스템에 대한 실험을 수행하였다. 실험장치의 구조는 캐비티 내의 가열부 상단에 유전가열판(SiC, Al₂O₃, ZnO 및 기타 첨가제)을 설치하고 마이크로웨이브 발생기는 주파수 915MHz, 출력 75kW의 마그네트론을 설치하였다. 실험은 유전가열판의 승온속도, 가열부 내부의 온도균일도 및 금속분말의 소성실험을 수행하였다. 실험결과 유전가열판의 승온속도는 초기 10분동안에 1,000℃까지 빠르게 상승하였다. 가열부 내부의 온도 분포는 20분 이후부터 안정적으로 진행되었으며, 온도균일도는 6.6~10.3%로 나타났다. 실험결과 기존 전기 히터 방식에 비해 가열시간이 1/2정도로 감소하였으며, 금속 분말(Metallic powders)의 소성실험 결과도 양호한 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 마이크로웨이브 하이브리드 가열 시스템에 대한 유용성을 확인하였으며, 친환경 가열공정 및 첨단소재 제조분야에 적용이 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172010105940)

고Mn강 저장탱크 개발 및 초도운전 데이터 분석

High Manganese Steel(HMS) storage tank development and initial
operation data analysis

이민경 · 김정환* · 길성희 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

포스코에서는 세계 최초로 고Mn강 생산기술 상용화에 성공하였다. 기존 고Mn강은 강재에 Mn이 7% 정도 함유된 것을 뜻하였으나, 이번에 상용화된 기술은 Mn 함유량이 23% 이상인 재료이다. 이를 활용하여 기존 9%Ni강을 이용한 완전방호식 저장탱크의 사용 재료를 고Mn강을 이용하여 제작하였다. 저장탱크는 KGS CODE AC115 및 API620을 바탕으로 설계 및 제작하였다. 고Mn강은 Ni강에 비해 가격의 안정적이고 Ni강과 비슷한 성질을 갖고 있는 장점이 있다. 또한 국제해사기구(IMO)에 고Mn강 재료가 등재되어 선박에 사용하는 저장탱크의 재료로 고Mn강이 적용되고 있으며 IMO에 가입되어 있는 전세계 항만시설 어디든 해당 선박이 취항할 수 있다.

본 연구에서는 고Mn강과 기존 강재(Ni강)의 성질 비교 및 완전방호식 저장탱크 건설 시점에 탱크 내부에 부착한 스트레인게이지를 통해 쿨다운 및 초도운전에 따른 탱크 내조의 온도, 압력, 레벨 변화에 대한 분석을 실시하였다. 기존 강재와 비교한 고Mn강의 적합성을 평가하고자 하며 이를 통해 신재료 개발에 따른 국가 경쟁력 강화 및 우리 기술의 우수성을 알리고자 한다,

드론을 활용한 도시가스배관 안전점검 관련 제도 분석 및 타당성 검토
A Review and Analysis related to Safety Inspection of City Gas
Pipelines Using Drone

이화영 · 김정환* · 길성희 · 유근준 · 김영규

한국가스안전공사 가스안전연구원

현재 매설된 도시가스배관의 안전관리의 일환으로 도시가스사업법에서는 도시가스사업구역에서 굴착공사 진행 시 굴착공사정보지원센터에 사전 신고하여 해당 토지에 도시가스 배관이 매설되어 있는지 확인하는 절차를 통해 굴착공사 시 발생할 수 있는 배관 파손 사고를 예방하고, 도시가스사업자는 배관순찰차량 1대당 안전점검원 2명을 배치하여 1일 1회 도시가스배관의 순회점검을 실시하여 미신고 굴착공사 감시 및 도시가스배관 이상여부를 확인하고 있다. 그러나 차량 순회점검의 경우, 안전점검원이 운전과 점검을 동시에 진행해야하므로 운전자의 점검 시야가 좁아지며, 차량이 진입할 수 없는 골목길, 시장 등은 점검이 어려운 경우로 인한 안전관리 사각지대가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구를 통해 매설된 도시가스배관 점검 방법으로 드론을 도입하는 방법에 대해 관련 제도들을 분석하고, 드론을 활용한 안전점검이 가능한지 검토하여 도시가스배관의 안전관리의 효율성을 높이는 데 기여하고자 한다.

RF 열플라즈마를 이용한 이차전지 음극재용 Nano-SiO_x 형성 제어 연구
Study on the control of Nano-SiO_x formation for anode materials of
secondary battery using RF thermal plasma

오성택 · 서인규 · 장혜련 · 이순직 · 연정미 · 박원규 · 신명선 · 최선용
철원플라즈마산업기술연구원

고용량 리튬이차전지 개발을 위해서는 고에너지 밀도 구현이 가능한 실리콘 소재의 사용이 필수불가결한 상황이나, 실리콘의 경우 충방전시 부피팽창(~300%) 문제로 인하여 상용화에 문제점이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 RF 열플라즈마를 이용하여 실리콘의 구조적 안정화 문제점 해결을 위해 Core-Si, Shell-SiO_x 구조를 갖는 Nano-SiO_x 소재를 합성하였다. 제조한 SiO_x 나노소재는 입자크기 30~50nm 크기 분포를 보이는 것으로 나타났다. 또한, SiO_x의 산화수값 제어를 위해 공급되는 산소유량, 수분 함량제어를 통해 SiO_x의 산화농도를 제어하였다. 최종적으로 전지특성 평가를 통해 1,100~2,000mAh/g의 SiO_x 음극재의 용량값을 확인하였으며, 97~98%(@25cycle) 수명특성 결과 값을 확인하였다.

고가역 및 초고속 에너지 저장 응용을 위한 환원된 그래핀 산화물
나노시트의 마이크로웨이브에 의한 합성

Microwave-Assisted Synthesis of Reduced Graphene Oxide Nanosheets
for Highly Reversible and Ultrafast Energy Storage Applications

장혜련 · 서인규 · 오성택 · 이순직 · 연정미 · 박원규 · 신명선 · 최선용 · 백승민*

철원플라즈마산업기술연구원, *경북대학교 화학과

The graphene based materials with high electrical conductivity and mechanical or chemical stability are known to be promising novel materials that can be applied in any field. Particularly, it is attracting considerable attention as a anode material of a secondary battery. In this study, we successfully synthesized the MRGO in a top-down method using microwave radiation from the GO. The morphology and physicochemical properties are characterized by XRD, SEM, TEM, FT-IR, RAMAN and BET analysis. The SEM and TEM images showed that the MRGO was exfoliated a thin layer of graphene sheet and the overlapped pore inside the sheet or edge were observed. The pore also confirmed the open structure conformation interconnected with the graphene sheet. The galvanostatic charge/discharge experiments showed excellent reversible capacity and stable cycling even at a high current density of 20 A/g. The rigid framework of MRGO can be solved the problem of long-term performance deterioration. In addition, the porous structure possessed an additional storage site. And the highly reversible and rate capability was enhanced over the other reduced GOs due to the excellent ion accessibility by minimizing the ion path.

Technical Classification Based on Energy Industry Characteristics in Case of Energy Resource Sector

Seongkon LEE^{1, *} · Kyeongtaek KIM¹ · Woonho BAEK² · Ran YOO¹ · Jeeyoung CHOI¹ ·
Jiseok AHN¹ · Gento MOGI³

¹ Energy Policy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, South
Korea

² Department of Political Science and Diplomacy, Chungnam National University,
Daejeon, South Korea

³ Department of Technology Management for Innovation, Graduate School of
Engineering, The University of Tokyo, Japan

* corresponding author (sklee@kier.re.kr)

Energy technology's importance and role have been increasing to cope with the crucial issue of global climate change, implementing the Government's RE3020 agenda, and sustainable development. As the importance of energy technology increases, the amount of information about energy technology has been steadily increased. In order to establish more effective energy R&D policies, the Korean government intends to investigate and analyze data on the status of industrial ecosystems in energy technology. This research propose technical classification of energy resource sector reflecting energy industry characteristics. We also investigated technical classifications related to domestic and international cases based on value chain classification. This research shows the pipeline of energy resource sector composed of provider, demander, complementary product and service provider, associated energy industry, and global competitor. The results will be used as a basic frame for implementing a data warehouse for managing energy technology data including corporate status, sales status, workforce status, technology level status, law and regulation status.

Acknowledgement

This research is carried out by KETEP's R&D funds(B9-4353) and KIER's basic project fund(C0-2431-01).

머신러닝 기반 신재생에너지 예측을 이용한 가상발전소의 최적 운영
Optimal operation of virtual power plants using machine learning-based
new and renewable energy prediction

이정훈 · 이상봉 · 김진오

한양대학교 전기공학과

환경에 대한 문제의식이 높아지면서 최근에 신재생에너지는 국내·외에서 큰 관심을 끌고 있다. 특히, 재생에너지 3020 이행계획을 발표한 이후 그 중요성은 더욱 증가하고 있으며, 신재생에너지 중 태양광과 풍력 발전의 비율이 점점 증가 되었다. 그러나 태양광과 풍력발전은 출력량이 일정하지 않는 고유한 특성으로 전력 시스템에 상당히 불안정성을 가져와 원활한 전력 공급을 위해 이를 하나로 묶어 관리할 필요가 있다. 가상발전소(Virtual Power Plant, VPP)는 신재생에너지와 소형발전기 및 에너지저장장치 (Energy Storage System, ESS)를 하나로 묶어 마치 하나의 발전소처럼 작동하는 개념이다. 이러한 가상발전소는 전력계통에 부담이 되었던 신재생에너지가 체계적으로 동작하여 오히려 외부 상황을 반영하여 동작해 전력계통 운영에 도움을 줄 수 있다. 결국, 하나의 발전소처럼 동작하기 위해서 신재생에너지의 출력을 정확히 파악하여 에너지저장장치의 최적 스케줄링이 실시되어야 한다. 본 논문에서는 신재생에너지의 출력을 결정론적인 방법, 확률론적인 방법, 머신러닝을 이용한 방법으로 미리 산정하여 에너지저장장치를 운영하였을 때 가상발전소의 역할을 충실히 수행할 수 있는지 확인한다. 즉, 신재생에너지가 포함된 배전계통 내 부하의 전력을 가상발전소 설비들이 공급을 잘 할 수 있는지 EENS(Expected Energy Not Served)로 판단하며 외부 전력계통에 낮은 ramp-rate로 전력을 공급할 수 있는지 분석하였다. 본 논문에서 제시한 머신러닝 기반 가상발전소 운영을 할 경우 가장 낮은 EENS와 ramp-rate가 나왔으며 에너지저장장치를 효과적으로 운영할 수 있음을 확인하였다.

코로나19가 국내 전력 부문의 수요 및 공급과 온실가스 배출량에 미친 영향
Corona 19's Impact on Supply and Demand in the Domestic Electric
Power Sector and Greenhouse Gas Emissions

박년배

*한국에너지기술연구원 연구기획조정실

‘전력통계속보’ 자료를 이용하여 코로나19가 발생한 이후 국내 전력의 수요(판매량)와 공급(발전량), 발전 부문의 온실가스 배출량을 분석하였다. 2020년 1~7월 전력 판매량(누계)은 전년 동기 대비 2.8% 감소하였다. 부문별로는 산업용 5.1% 감소, 서비스용 1.9% 감소, 공공용 4.8% 감소한 반면, 가정용은 거주 시간이 증가하면서 5.5% 증가하였다. 월별 전력판매량은 2020년 5월에 전년 대비 5.8% 감소하여 가장 큰 감소폭을 나타냈으며, 7월에는 전년 대비 2.1% 감소하여 감소율이 줄어들고 있다. 산업 부문의 업종별 전력 판매량은 2020년 1~7월 기간 전년 동기 대비 사무기기 업종이 가장 크게 감소(-15.9%)하였으며, 그 다음으로 1차금속 업종이 14.8% 감소하였다. 하지만 비대면 활동이 증가하면서 식료품 업종 2.9% 증가, 영상·음향·통신 업종 2.3% 증가하였다. 2020년 1~7월 기간 지역별 전력 판매량은 경북이 가장 크게 감소(-10.6%)하였으며, 경북의 산업용 전력 판매량은 14.3% 감소하였다. 2020년 1~7월 기간 에너지원별 발전량은 전년 대비 3.1% 감소하였으며, 원자력 4.7% 증가, 신재생 18.3% 증가한 반면, 석탄은 10.4% 감소하였다. 월별 발전량은 2019년 대비 5월에 가장 크게 감소(-6.2%)하였다. 2020년 1~7월 기간 발전 부문의 연료 소비(한전, 한전 자회사, 민간4개사 기준)에 따른 온실가스 배출량은 전년 동기 대비 13.0% 감소한 것으로 분석되었다. 발전 부문 온실가스 배출량 감소의 주요 원인은 전력 수요의 감소와 저탄소 발전 비중의 확대에 구분할 수 있다. 전력 수요의 감소는 코로나19 발생으로 인해 생산활동이 둔화되고, 제조업의 전력소비량 증가를 견인하는 업종이 중화학 에너지다소비업종에서 디지털 업종 중심으로 바뀌고, 사회적 거리두기 등으로 인해 서비스 용 및 공공용 전력 소비의 감소 등이 영향을 미쳤다. 또한 원자력과 신재생에너지의 발전량 비중이 증가하고, 석탄화력 발전이 감소하면서 온실가스 배출량 감소에 기여하였다. 그러나 최근 국내 코로나19 발생이 다소 둔화되면서 전력 판매량이 서서히 예년 수준으로 회복되고 있어, 경제 회복 및 온실가스 배출량 감소를 위하여 전력 수요 관리와 에너지전환 관련 그린 뉴딜 조치들이 지속적으로 이행될 필요가 있다.

사사 : 본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다 (C0-2454-03).

On the issues of introducing Green Pricing in South Korea

Woo Il Chang^a . Sung Joong Kim^{a,*} . Yong Tae Yoon^a . Heesu Yun^b . Jungmin Ha^c

^aDepartment of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

^bBoston College: Psychology BA

^cLawrence Livermore National Laboratory

The government mainly conduct the attempt to increase proportion of renewable energy power source by a national renewable energy policy based on Energy White Paper (England, 2003, 2007), Climate Action Plan (USA, 2013), Energiewende (Germany, 2010), Renewable Energy 3020 (South Korea, 2017). However, ① the increased awareness of the climate change severity, ② the fall of LCOE(Levelized Cost of Electricity) of renewable energies, ③ the increased consumer's willingness-to-pay for green-products and ④ the growth of corporate's responsibility on environmental problems have enabled private sectors to run renewable energy campaigns. Among many, the RE100 initiative is the principal private-led renewable energy campaign, which global companies including Apple, Google, and Amazon participate in by implementing self-generation, green certificate purchase, green pricing, third-party PPA, and corporate PPA.

The spread of the RE100 campaign could also influence South Korea's export-oriented industry and economy as many global companies in the campaign require suppliers such as Samsung Electronics and LG Chem to use renewable energy electricity. Also, as the number of domestic companies seeking to participate in the RE100 campaign increases, the Korean government has designed a procurement system exclusively for renewable energy electricity to allow companies to obtain renewable energy electricity. The Ministry of Trade and Industry proposed the first renewable energy electricity procurement system, the Green Pricing, in September 2019, but Voluntary REC system's absence and Korea's unique Carbon Emissions Trading Scheme raised many systematic issues such as double-counting of certificates and emission exemption from renewable energy usage. These issues have postponed the introduction of Green Pricing has for more than a year.

Britain's diverse Green Pricing under a privatized electric power industry could be a reference to possible issues from Korean Green Pricing designs. Specifically, the issues from Britain's early Green Tariff, the price structure founded on various certificates such as REGO, ROC, and LEC, is currently repeated in the process of introducing Korean Green Pricing. Thus, this research focus on the early Green Tariff and OFGEM(The Office of Gas and Electricity Markets)'s response to it.

Funding: This research was funded by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and planning, grant number 0668-20190244.

지역난방 냉각수 배관의 용접부 파손 분석

Failure analysis of weld material in cooling water pipeline of district heating system

정준철 · 김우철* · 김경민* · 하태백* · 손홍균** · 김정구*** · 이수열**** · 김희산*****

아주대학교 인공지능·데이터 사이언스학과, *한국지역난방공사 미래개발원,

한국부식방식학회, *성균관대학교 신소재공학부, ****충남대학교 신소재공학과,

*****홍익대학교 재료공학과

Abstract: Failure analysis on the type 304 pipe used for the cooling water piping of the district heating primary side was conducted. For the goal, Inorganic elements and bacterial in the cooling water and corrosion products were analyzed, and weldment was inspected by microscopy and test for sensitization. Corrosion damages were observed at the heat affected zone (HAZ), stagnant zone nearby weldment induced by improper butt welding, and 6 o'clock along the pipe axial direction. In spite of sensitization of weldment, the concentration of chloride as low as 80 ppm is not able to corrode type 304 steel, implying that the other corrosive factor is required. The results on analysis of bacteria and corrosion products provides that the cooperation of several types of bacteria produced proton, sulfide, and biofilm, causing to corrode type 304 even in the cooling water containing the concentration of chloride as low as 80 ppm.

매체순환건식개질(Chemical looping dry reforming)에서 산소전달입자 LaFeO_3 에 지지체 CeO_2 첨가 연구

A study on the addition of CeO_2 as a support to oxygen carrier LaFeO_3
in chemical looping dry reforming

강현석¹ · 유동진^{1,2} · 손정민^{1,3,*}

¹전북대학교 대학원, 공과대학 에너지저장·변환공학과, 연료전지시스템 전주기R&D
인력양성사업단,

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과,

³전북대학교, 공과대학 자원에너지공학과

CO_2 는 지구온난화의 주범으로서 CO_2 를 줄이려는 연구가 여러 분야에서 진행 중이다. 허나 CO_2 는 준-비활성가스로 불릴 만큼 반응성이 낮아 CO_2 활용방안이 부족한 현실이다. CO_2 를 활용하기 위한 방법으로서 매체순환건식개질이 주목을 받고 있다. 매체순환건식개질 공정에서 산소전달입자(금속산화물 촉매)의 역할은 매우 중요하며 산소전달량이 크고 산소전달속도가 빠를수록 좋은 성능을 가졌다고 할 수 있다. 산소전달입자 LaFeO_3 와 10wt% CeO_2 - LaFeO_3 를 고상법으로 합성하였다. LaFeO_3 는 페롭스카이트 구조로서 열적안정성을 가지며 CeO_2 는 환원가능한 지지체로서 산소전달량을 증가시켜준다. LaFeO_3 와 10wt% CeO_2 - LaFeO_3 의 산화환원량을 확인하기 위해 산화성가스는 15% CO_2/N_2 , 환원성가스는 15% CH_4/N_2 를 사용하였다. CH_4 가스로 산소전달입자를 환원하면 탄소침적이 발생하는데 지지체 CeO_2 의 첨가에 따른 탄소침적량의 변화를 확인하기 위해 위 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 LaFeO_3 와 10wt% CeO_2 - LaFeO_3 의 단일상이 잘 합성되었는지 결정구조 분석을 위해 X-선 회절분석(XRD)을 수행하였다. 또한 LaFeO_3 와 10wt% CeO_2 - LaFeO_3 의 매체순환건식개질에서의 산소전달량과 산화환원시간을 확인하기 위해 900°C에서의 열중량분석(TGA)을 수행하였다. X-선 회절분석을 통해 단일상이 합성된 것을 확인하였다. CeO_2 를 첨가하였더니 산소전달량이 7%에서 8%로 증가하고 탄소침적도 억제된다는 것을 열중량분석을 통해 확인하였다.

위상최적 설계된 광폭 임펠러의 유효 회전속도 선정에 관한 연구
A Study on the Selection of Effective Rotation Speed of the Wide
Impeller Designed by Topology Optimization

김태형

청주대학교 항공학부 항공기계공학전공

통상적으로 발전설비의 주기적인 기동정지 및 다양한 에너지 환경설비의 운전 후 미세한 분진이나 굳은 찌꺼기, 녹 등을 주변 주요 부품들 표면에서 쉽게 발견된다. 설비의 예방정비 또는 계획정비 등을 위해 설비가 정지된 후 이들을 제거하기 위해 블라스팅 공정이 채용된다. 그러나 보통 블라스팅 공정은 한 개 또는 수 개의 노즐을 사용하므로 노즐의 잦은 마모 및 작업시간의 장기화로 작업효율이 떨어진다. 따라서 임펠러형 블라스팅 공정이 선호되고 있으나 임펠러의 폭이 좁아 표면처리 공정의 효율성에 한계를 가진다. 이에 본 연구에서는 짧은 시간에 넓은 면적의 표면처리가 가능한 광폭 임펠러 부품을 설계하였다. 이때 폭이 넓어지는 만큼 무게 또한 증가하므로 이를 경감시키기 위해 위상최적화에 의한 경량 설계를 수행하였다. 그리고 임펠러 폭을 기준으로 회전축의 길이가 긴 만큼 회전에 의한 진동 및 공진 회피를 위한 모달 해석을 수행하였다. 이를 위해 경량 임펠러 모델에 중력과 모터의 최대 회전수를 반영하여 유한요소해석을 수행하였으며 해석 후 광폭 임펠러의 축 길이에 대한 최대변형량을 확인하였다. 해석 후 설계 허용 변형량인 0.474mm보다 작은 값을 주어 안정된 범위에 포함됨을 확인하였다. 뿐만아니라 고속회전에 의한 유효 운전속도의 범위를 결정하기 위해 진동해석 후 1차 모드 고유진동수 153.2Hz를 얻었다. 그리고 설계 시 이보다 25% 높은 191.5 Hz를 확보하였다. 이 값을 고유진동수와 위험속도의 관계식에 대입하여 설비의 유효 운전속도(RPM)를 1829.7 RPM 이상으로 선정하였다.

후기

이 연구는 2019년도 중소벤처기업부 창업성장기술개발사업(S2804197)의 지원에 의해 수행되었음.

P형 이중 도핑을 활용한 그래핀/실리콘 쇼트키 태양 전지
Co-doping effect of p-type dopant on graphene/silicon solar cells

박세원, 말릭 압둘 레흐만, 하지상, 전성찬*

연세대학교 기계공학과

그래핀이 발견된 이후 2차원 물질에 대한 관심이 커지면서 2차원 물질의 응용에 대한 심도있는 연구들이 보고되었다. 그 중 p-n 접합 실리콘 태양 전지의 한계를 2차원 물질 기반의 태양 전지로 극복하려는 시도가 있었다. 대표적인 것이 그래핀 태양전지인데 낮은 표면 굴절도로 인해 광자 흡수를 촉진하고 빛의 넓은 파장 범위에서도 에너지를 생산하는 것이 가능하다는 대표적인 장점이 있다. 또한 투명도가 크기 때문에 추후 유리 소재의 물질에 활용될 수 있다는 가능성도 존재한다. 그래핀을 활용해 대면적 태양전지를 만들 때 주로 습식 트랜스퍼 방식을 활용하는데 이 때, 표면의 불균일성 문제로 인한 저하 현상과 실질적인 활용 면적이 감소함으로 인해 효율이 크게 저하하는 현상이 많았다. 본 연구에서는 실리콘 기판에 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 장비로 그래핀을 성장시켜서 트랜스퍼 공정을 생략하였고 그래핀의 성능을 향상시킬 수 있었다. 또한 atomic layer deposition (ALD) 장비로 그래핀 위에 산소 계면층(oxide interfacial layer)을 제작해 전자와 정공의 재결합률 감소시켰다. 또한, 계면층의 상단에 perfluorosulfonic acids (PFSA)를 도핑하여 9.27%의 효율을 보였고 추후 HNO₃를 이중 도핑함으로써 10.44%의 효율을 달성하였다.

대용량 풍력용 발전기 성능시험설비 엔지니어링

Engineering of MW generator test facility for wind turbine

이재범 · 이동규 · 조경희 · 김용상 · 안선주*

한국전기연구원 디지털에너지시스템연구센터, 전남대학교 전기공학과

요약 - 정부의 '재생에너지 3020 이행 계획'에 따라 2030년까지 14GW 해상풍력 공급목표 달성 및 해외에서 상용화되고 있는 해상 풍력터빈들에 대한 경쟁력을 갖추기 위해 해상풍력용 대용량 풍력발전시스템 개발이 시급한 실정이다. 국내의 경우 8MW이상 대용량 풍력터빈용 발전기의 설계, 제작, 운반, 시험 관련 기반기술 연구가 진행되고 있고 더 나아가 10MW 12MW 등 대용량 시스템 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 대용량 풍력용 발전기를 국내 시험설비를 통해 성능 및 신뢰성을 검증하고자 한다. 성능시험 설비의 구성은 발전기, 크레인, 변압기 및 전원공급용량 및 회로도, 발전기 드라이브 등으로 구성된다. 이 설비들을 통하여 대용량 발전기에 대한 성능시험 및 방법을 제시하고자 한다. 성능시험에는 외관검사, 계통조건 연속운전, 온도상승시험, 내전압, 단락시험 등외에 코킹토크, 전압불평형, 공극측정 시험 등으로 이루어져 있다. 해상풍력용 발전기 개발 시 활용할 수 있도록 시험기준을 표준화하고 이를 기반으로 구축된 최대 용량의 인프라를 공유하여 이용할 수 있도록 하고자 한다.

Nitrogen-doped graphene oxide encapsulated transition metal sulfides used as electrocatalyst in overall water splitting

S. Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo¹ *

¹ Department of Life Science and, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896,
Republic of Korea

Electrolysis of water is one of the sustainable and green approaches to generate hydrogen gas, which is more suitable renewable alternative way for reduce the fossil fuel usage in future. Herein, we have developed Nitrogen-doped graphene encapsulated transition metal sulfides by one-step hydrothermal method at 180°C for 12. The optimized NG- transition metal sulfides nanohybrids have been characterized with various analytical techniques such as Raman analysis, high-resolution transmission electron microscopy, field emission scanning electron microscopy and X-ray photoelectron spectroscopy analysis. The optimized electrocatalyst shows lower overpotential 245 mV and 145 mV at current density of 10 mA cm⁻² were oxygen evolution reaction (OER) and hydrogen evolution reaction respectively. Further optimized NG- transition metal sulfides nanohybrids used as anode and cathode catalyst in overall water splitting device and device achieves a cell voltage of 1.60 V at 10 mA cm⁻². Additionally, overall water splitting device shows excellent durability. This present work provides new pathway for development of highly durable and active electrocatalysts for water splitting and metal-air battery applications.

Synthesis and properties of sulfonated poly(arylene ether) copolymers containing fluorenyl groups for PEMFCs

Sung Kwan Ryu¹ · Ae Rhan Kim² · Dong Jin, Yoo^{1,2*}

¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering, R&D Education Center for Whole Life Cycle R&D of Fuel Cell Systems, Graduate School, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, ² Department of Life Science, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Perfluorinated poly(arylene ether) copolymer including phosphotungstic acid (PWA) was synthesized by nucleophilic aromatic substitution reaction of BPFL, DFBP, and 6F-BPA in DMAc solvent. Thin, ductile films are fabricated by the solution casting method, which resulted in membranes with a thickness of approximately 50–55 μm . And the composite membranes were prepared by mixing the block copolymer with a commercial PWA. The chemical structure of the block copolymers was characterized by FT-IR, ¹HNMR and TGA. The crystalline phases and morphologies of composite membrane was observed with X-ray diffraction (XRD) and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The composite membranes shown appropriate ion exchange capacity (IEC) and good proton conductivity especially at elevated temperature. Block-3/PWA-5 composite membrane shown the maximim conductivity of 152 mS/cm-1 at 90 °C under 100% relative humidity (RH).

Synthesis of trimetallic chalcogenides on supported graphene oxide nanocomposites as sensitive and selective detection of dopamine

Santhosh Kumar Ramasamy¹ · Dong Jin Yoo^{1,2*}

¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering, R&D Education Center for Whole Life Cycle R&D of Fuel Cell Systems, Graduate School, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, ² Department of Life Science, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

The trimetallic chalcogenides supported graphene oxide composites were prepared by hydrothermal synthesis method and followed by electrochemical detection of dopamine. The effects of alternating voltage, alternating frequency and the detachment between electrodes were sensibly discovered. In the trimetallic nanocomposite was characterized by transmission electron microscopy (TEM), energy-dispersive X-rays spectroscopy (EDX), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The sensor based on the obtained NCM/rGO nanostructure was used to sensitive and selective detect of dopamine(DA). The electrochemical investigation showed that the sensor had had excellent selectivity and wide linear ranges for the detection of DA. The detection limit could be down to 0.35 μM .

Anchoring of MnFeSe on nitrogen doped graphene oxide as an efficient electro catalyst for hydrogen evolution reaction

Logeshwaran Natarajan¹ · Dong Jin Yoo^{1,2*}

¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering, R&D Education Center for Whole Life Cycle R&D of Fuel Cell Systems, Graduate School, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, ² Department of Life Science, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Hydrogen is considered one of the most important green and clean energy, which aimed to be ruled the energy industry in future. Water electrolysis is a widely convenient route for hydrogen production process. Recently, transition metal-metal chalcogenides, especially manganese-based chalcogenides such as manganese-sulfides, selenoids have attracted much research attention because of their much earth crust availability, eco-friendly green, and longer stability. However, the limited active sites and significantly lower electron conductivity of transition manganese selenoid materials hinders their activity on HER and OER applications. As a result, the combination of bimetal selenoids and conductive materials is supposed to enhance the electrical conductivity here in we prepared manganese iron selenoids anchoring on conducting NrGO substrates MnFeSe-NG as an efficient catalyst for HER applications. Detailed characterization techniques of field emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy dispersive X ray spectroscopy (EDS), high-resolution transmission electron microscope (HR-TEM), atomic force microscopy (AFM), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES), Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectrometer (XPS) were analyzed.

AEMFC 적용을 위한 수지상 정도에 따른 음이온 교환막의 형태학적 특성 연구

A study of morphological characteristics of anion exchange membranes according to the degree of branching for AEMFC application

김현진¹ · 유동진^{1,2*}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장·변환공학과, 연료전지시스템 전주기R&D 인력양성사업단, ²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)는 낮은 온실가스 배출과 높은 에너지 효율로 인하여 유망한 에너지 자원으로서 각광받고 있으나 물관리, 귀금속 촉매 사용 등의 단점으로 비귀금속 촉매를 사용하는 AEMFC(Anion Exchange Membrane Fuel Cell)의 개발 필요성이 대두되고 있다. AEMFC의 필수적 성분으로서 AEM은 anode와 cathode를 나누면서 수산화이온을 전도시키는 역할을 하며 이는 연료전지 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 현재 AEM은 PEM에서 이용되는 수소 이온보다 큰 크기의 수산화이온으로 인해 수송 속도가 느림에 따라 발생하는 낮은 이온 전도도 및 알칼라인 공격 메커니즘에 의한 양이온 그룹 분해로 나타나는 전기적/화학적 안정성의 불충분함을 극복하기 위해 광범위하게 연구되고 있다.

본 연구에서는 낮은 이온 전도성을 보완하기 위해 고분자 주사슬에 수지상 구조를 도입하여 수지상 정도를 조절함으로써 친수성/소수성이 잘 정렬된 구조를 형성하여 이온 클러스터의 형성을 용이하게 하고자 하였다. 먼저 비스페놀a, 비스(4-하이드록시페닐)설펀, 데카플루오로비페닐을 이용하여 친핵성치환반응을 통해 폴리(아릴렌 이써 설펀)(PAES) 랜덤공중합체를 합성하였다. 이후 준비된 랜덤공중합체는 4,4',4''-트리하이드록시트리페닐메탄과의 합성을 통하여 블록공중합체와 유사한 정렬된 수지상 형태의 고분자를 합성하였다. 합성된 폴리(아릴렌 이써 설펀)은 ¹H NMR, 겔 투과 크로마토그래피(GPC) 측정을 통해 구조 분석을 진행하였고, 추후 TGA, 이온 전도도 등의 막의 열적/전기 화학적 성능평가를 통해 음이온 교환막으로서의 유망함을 입증하고자 한다.

실시간 수소가스 모니터링 시스템 개발

The development on Real-time hydrogen gas monitoring system

권대환 · 신상호 · 최슬기 · 유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소경제 사업이 부각되면서 수소가 국가경제, 사회전반, 국민생활 등에 변화를 초래하여, 경제성장과 친환경 에너지의 원천이 될 것으로 전망하고 있다. 특히, 탄소경제와 비교하였을 때 국내 생산으로 에너지 자립에 기여 및 기술경쟁력 확보를 통해 경제적·산업적 파급효과가 큰 미래 성장 동력으로 각광받고 있다. 전 세계적으로 수소 수요가 급증하여 2050년 수소산업은 연간 2.5조 달러의 부가가치와 누적 3,000만개의 신규 일자리를 창출할 것으로 전망했다. 특히, 2019년 수소경제 활성화 로드맵에서는 전국 LNG 공급 망에 추출기를 설치하여 추가적인 인프라 투자 없이도 안정적인 수소 생산 및 공급이 활용 가능함을 제시하였다.

안정적이고 경제적인 수소 생산 및 공급을 위해 한국가스안전공사에서는 「고압가스안전관리법 시행규칙」 일부개정령(안)을 입법예고 하였고, 그 중 수소자동차 충전소에 대한 실시간 모니터링 시스템 구축을 통해 현행제도의 운영상에 나타난 일부 미비점을 보완·개선하고자 한다. 본 연구에서는 수소센서 모듈을 이용한 LabVIEW 기반의 어플리케이션 개발을 통해 안전관리 방안을 제시하고자 한다. LabVIEW의 코딩을 이용하여 무선 통신 모니터링 시스템을 개발하였고, 감도의 Linearity를 위해 추가적인 코딩을 계속적으로 업데이트 중이다. 개발한 모니터링 시스템으로 수소농도 1,000ppm에 대한 감응특성을 분석하였고, 감도가 약 5% 나타남을 확인 할 수 있었다. 고용노동부고시의 가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침에는 가연성 가스누출감지경보기 경우 감지대상 가스의 폭발하한계(수소의 경우 LEL 4%) 25% 이하에서 경보가 울리도록 설정해야한다. 향후계획은 저농도의 영역인 0~10,000ppm의 농도에서 감도, T-90에 대한 반응속도, 회복 등을 분석하여 정확도를 가진 모니터링 시스템을 개발하고자 한다.

※ 본 연구 내용은 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “지능형 통합에너지플랫폼 기반 복합에너지 허브 시범구축 및 기술실증(과제번호 2019351010040)”의 지원으로 진행됨.

국내의 수소충전소 안전거리 기준 비교 분석

Analysis on Comparison of Safety Distance of Domestic and Overseas Hydrogen Refueling Station

임재용 · 권대환 · 최슬기

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 정부의 수소경제 활성화 로드맵 발표와 함께 친환경 에너지로서 수소에 대한 관심이 높아짐에 따라 수소차 및 수소 충전소의 수요가 점차 증가하는 추세이다. 특히, 전국의 도시가스 배관망을 통해 수소 생산 연료 확충 등에 있어 유리한 위치를 가진 우리나라의 경우 수소 에너지의 개발에 투자를 아끼지 않고 있는 상황이다. 하지만 매년 증가하고 있는 수요만큼 다양한 형태의 충전소사고 또한 다양하게 발생하고 있기 때문에 그에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 국내외 수소충전소에서 준수하는 안전거리를 비교 분석 하였다. 비교 분석은 한국의 'KGS FP 217' 및 '융·복합 및 패키지형 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례 기준 제정' 고시와 일본의 '고압가스보안법', 그리고 미국의 'NFPA2' 기준을 대상으로 진행 하였다. 특히, 국내의 경우 저장설비 및 저장설비와 그 외면으로부터 보호시설까지의 거리, 가스설비의 외면으로부터 전선, 화기와의 거리, 충전시설의 고압가스설비의 외면으로부터 다른 가연성가스 제조시설의 고압가스설비와의 거리 등과 방화벽 설치 유무에 따른 예외사항에 차이가 있음을 확인하였다. 그리고 일본과 미국의 기준을 비교하여 수소충전소 안전거리를 정리하였다. 또한, 노르웨이 수소 충전소 폭발과 같은 사례를 예방하고자 정부에서 세계 최초로 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(수소법)을 제정하였다. 이에 수소법에서 정하는 수소 충전소 및 수소 가스 전반의 안전에 대한 분석을 함께 소개하였다.

※ 본 연구 내용은 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “지능형 통합에너지플랫폼 기반 복합에너지 허브 시범구축 및 기술실증(과제번호 20193510100040)”의 지원으로 진행됨.

수소충전소 고장예지 및 안전관리 상용화 기술개발에 관한 연구

Development of Commercialization Technology on Fault Prediction and Safety Management for Hydrogen Refueling Stations

최영은 · 조충희 · 김동환 · 강승규 · 허윤실

한국가스안전공사 가스안전연구원

요 약

수소연료를 공급하는 수소충전소(Hydrogen Refueling Station, HRS)의 건전성과 안전성을 확보하여, 수소충전소 인프라 확충을 목적으로 하였다. 친환경 수소전기차(FCEV)의 공급이 활성화 되는 것에 비해, 수소충전소의 운영 수가 작을 뿐만 아니라 잦은 고장 및 무리한 사용으로 인한 안전사고 등의 문제가 있다. 수소충전소의 운영중단 및 유지보수 일정 지연 등의 문제로 수소경제에 대한 불신과 무리한 운영으로 인한 안전사고 증가 우려를 해소하기 위한 근본적 대책마련이 필요하게 되었다.

이를 위해, 한국가스안전공사 가스안전연구원에서는 올해 5월부터 ‘수소충전소 고장예지 및 안전관리 상용화 기술개발’에 관한 연구를 시작하여, 다수의 수소충전소 빅데이터를 기반으로, 고장유형 및 빈도 분석을 하였다. 빅데이터를 활용하여, 충전소의 고장예지기술, 수명진단기술, 안전관리기술을 개발하여 정상운동을 위한 수소충전소 고장 사전진단 가능 시스템 개발을 위한 연구를 소개하고자 한다.

본 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(20203040040010, 수소충전소 고장예지 및 안전관리 상용화 기술개발)

액체수소 저장탱크 운영을 위한 정량적 위험성 평가
A study on Quantitative Risk Assessment for the
Operation of Liquid Hydrogen Storage Tank

김수현 · 김정환* · 이민경 · 길성희 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

온실가스 배출로 인한 지구온난화 및 기후변화는 인류가 당면한 주요문제 중 하나이다. 전 세계적으로 온실가스 감축을 위한 노력이 계속되고 있으며 이에 대한 대체 에너지로 수소의 필요성이 증대되고 있다. 수소를 에너지원으로 활용하기 위해서는 수소의 생산/저장/이송/활용을 위한 사회 인프라 구축이 필수적이다. 수소의 저장은 기체, 액체 등의 물리적 방법과 암모니아, LOHC 등을 활용한 화학적방법이 가능하다. 액체수소 저장방식은 기체 수소를 극저온에서 액화하여 약1/800으로 부피를 감소시키는 것으로 기체수소에 비해 높은 저장 밀도로 대용량의 수소를 저장할 수 있다.

본 연구에서는 수소액화 플랜트에 적용 가능한 $0.6m^3$, $35m^3$, $350m^3$ 의 고용적률 내압 구조 액체수소 저장탱크를 개발하여 이에 대한 단열성능 및 위험성 평가를 진행하고자 한다. 1단계로 $0.6m^3$ 규모의 저장탱크를 제작하였으며, 해당 저장탱크에 액화질소 사용을 가정한 단열성능평가 절차를 제시하였다. 위험성평가는 저장탱크 실사용을 가정하여 정상운영 중 발생할 수 있는 가스 누출을 가정하여 미국 샌디아랩에서 개발한 HyRAM 및 한국가스안전공사에서 자체 개발한 KGS HAC를 이용하여 수소 누출에 대한 확산거리 비교 및 거리 계산을 통한 위험구역설정을 진행하였다.

이온 전도도를 높이기 위한 정렬된 수지상 구조의 폴리(아릴렌 이써 설폰)과 폴리(페닐렌 옥사이드)의 블렌딩 비율에 따른 음이온 교환 막의 형성 및 특성분석

Fabrication and characterization of anion exchange membrane according to the blending ratio of ordered dendritic structure of poly(arylene ether sulfone) and poly(phenylene oxide) to increase ionic conductivity

김상희¹ · 유동진^{1,2*}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 변환공학과, 연료전지시스템 전주기 R&D
인력양성사업단, ²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

다양한 연료전지 중 음이온 교환 막 연료전지(Anion exchange membrane fuel cell, AEMFC)는 공기극에서 빠른 산소환원 반응속도로 비금속 촉매를 이용할 수 있어 기존의 귀금속 촉매를 이용하는 양이온 교환 막 연료전지(Cation exchange membrane fuel cell, CEMFC)와 비교하여, 연료전지 시스템 단가를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, AEMFC는 CEMFC에 비해 낮은 전기화학적 성능을 가지며, 이를 개선하기 위하여 연료전지의 성능을 결정하는 핵심 부품인 음이온 교환 막(Anion exchange membrane, AEM)의 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

본 연구에서는 음이온 교환 막의 주요 문제점인 낮은 이온 전도도 성능을 향상시키기 위하여 친수성/소수성 뚜렷한 상 분리를 통해 넓은 이온 채널을 형성을 유도하는 정렬된 수지상 구조를 가지는 블록 공중합체 형태의 폴리(아릴렌 이써 설폰)과 높은 클로로메틸화 정도를 가져 이온 전도도를 향상시키는 폴리(페닐렌 옥사이드)를 블렌딩하여 제작하였다.

먼저, 정렬된 수지상의 구조를 가지는 블록 공중합체의 합성을 위하여 2,2-Bis(4-hydroxy-3-methylphenyl)propane과 Bis-(4-chlorophenyl)sulfone을 이용하여 친수성 프리커서를 합성한 후, 1,1,1-Tris(4-hydroxyphenyl)ethane과 Bis-(4-chlorophenyl)sulfone을 이용하여 소수성 올리고머를 합성한다. 이후 준비된 친수성 프리커서와 소수성 올리고머를 공중합 반응을 통하여 블록 공중합체를 합성하였다. 다음으로 N-bromosuccinimide와 Benzoyl peroxide를 이용하여 브로미네이션 반응을 진행하였다. 또한, chloromethyl methyl ether 및 $ZnCl_2$ 를 이용하여 폴리(페닐렌 옥사이드)에 클로로메틸기를 도입하였다. 마지막으로, 브롬기가 도입된 폴리(아릴렌 이써 설폰)과 클로로메틸기가 도입된 폴리(페닐렌 옥사이드)를 중량 퍼센트 비율 별로 블렌딩하여 제작한 후 TEA를 이용하여 4차화 반응을 진행하였다.

비율별로 제작된 막들은 ¹H NMR, FT-IR을 통하여 고분자 구조분석을 수행하였으며, AFM을 통하여 막의 표면 분석을 진행하였다. 또한, 전기화학적 성능을 확인하기 위하여 이온 전도도 및 이온교환능력 측정을 진행하였으며, 물 흡수량 및 막의 팽창률 측정을 통하여 막의 물리적 특성을 확인하였다. 마지막으로 TGA를 통하여 열적 특성을 확인하였다.

연료전지용 STiO₂를 이용한 긴 소수성사슬을 갖는 술폰화 폴리(이써 이써 케톤) 블록공중합체 복합막의 제조 및 특성

Preparation and characteristics of sulfonated poly(ether ether ketone) block copolymer composite membrane with long hydrophobic chain using STiO₂ for fuel cell

김애란^{1,2} · 유동진^{2,3*}

¹전북대학교, 생물환경화학과, 캔유택 연구개발센터, ²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과, ³전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장·변환공학과, 연료전지시스템 전주기R&D 인력양성사업단

본 연구에서는 술폰화된 폴리 에테르 에테르 케톤 (SPEEK)과 긴 소수성 사슬을 갖는 폴리 (아릴렌 에테르 술폰) (PAES)로 구성된 디블록공중합체를 합성하고 합성된 TiO₂ (STiO₂) 을 무기충전제로서 사용하였다. STiO₂ 충전제의 분자 골격은 결합된 물을 많이 함유하고 있어 습도가 낮은 조건에서도 멤브레인의 전도성을 효과적으로 향상시킵니다. 본 연구에서는 친수성 고분자는 SPEEK, 소수성고분자는 탄화수소화된 PAES 및 저가습성 양자교환막으로 작용하는 STiO₂ 로 이루어진 복합체를 간편한 솔루션 캐스팅 방법으로 합성하였다. 제조된 멤브레인은 연성, 투명, 유연성, 유전성, 가공성, 강성, 열적 안정성 및 기계적 인성과 같은 유기 부분 및 무기매트릭스의 특성을 모두 갖기 때문에 엄청난 주의를 기울여야 합니다. 이 연구에서는 전례가 없는 것은 기존의 친핵성 방향족 치환 폴리 축합반응 및 후속적으로 STiO₂ 입자를 중합체 매트릭스에 혼입시킨 유기블록공중합체의 합성으로써 현재까지 보고된바 없습니다. 제작된 복합체의 양이온 전도도는 다양한 온도에서 30 % 및 100 % RH 로 평가되었습니다. 제작된 멤브레인의 양이온 전도도는 Nafion-212 멤브레인의 전도도와 비교되었습니다.

질화 금속 코어-백금 셸 촉매의 제조와 산소환원반응 특성 분석
Preparation and characterization of metal nitride core-Pt shell
catalysts and oxygen reduction reaction

김동건 · 이지호 · 이수진 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필
전북대학교 반도체·화학공학부

화석연료를 사용하는 기존의 내연기관은 환경 문제의 원인으로 지목되고 있으며, 대체 할 에너지 변환 장치 개발 필요성이 높아지고 있다. PEMFC는 환경 오염 물질의 배출이 없고 높은 에너지 변환 효율을 가져 대체 에너지 변환장치로서 각광받고 있다. 하지만 전극반응을 위해 사용되는 다량의 백금 촉매로 인하여 시스템의 비용이 높다는 단점이 존재하며, 백금의 사용량을 줄이고 성능을 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 니켈이나 코발트와 같은 금속을 이용한 코어 - 백금 셸 구조의 나노입자 촉매는 높은 산소환원반응 활성을 나타낼 수 있다는 것은 이전의 다양한 연구를 통해 알려져 있다. 하지만 연료전지 구동 조건에서 코어를 구성하는 금속의 용출로 인한 성능 저하가 발생하며, 이를 개선하기 위한 코어 금속 내구성 강화에 대한 다양한 방법들이 제안되었다.

본 연구에서는 탄소에 담지된 금속의 질화를 위한 열처리를 진행하고 백금 셸을 형성하였다. 합성된 촉매는 단일 반응기를 이용하여 제조하였고 특성 분석 및 과염소산 용액에서의 산소환원반응 성능을 평가하였다.

금속-탄소 복합담체를 이용한 백금 촉매의 제조 및 산소환원반응 특성 분석
Synthesis and characterization of Pt catalysts using metal-carbon
composite support and oxygen reduction reaction

이은희 · 김동건 · 이지호 · 이수진 · 정성권 · 정혜원 · 김필
전북대학교 반도체·화학공학부

연료전지는 기존의 내연기관을 대체할 차세대 친환경 에너지 변환장치로써 많은 기대를 받고 있다. 하지만 전극에 사용되는 백금 촉매에 의한 높은 비용은 단점으로 지목되고 있으며, 촉매의 높은 활성과 내구성 증대를 통해 연료전지 시스템의 비용을 낮추려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 금속-탄소 복합담체를 이용한 백금 촉매는 담체를 구성하는 금속과 백금 입자의 강한 상호작용으로 인하여 높은 활성을 나타낼 수 있다. 또한 복합 담체를 활용함으로써 기존의 촉매가 가지는 담체 부식에 의한 내구성 저하를 억제할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 Nb과 Ti를 이용한 금속-탄소 복합담체를 합성하고 백금 나노입자를 복합 담체에 담지하여 산소환원반응용 촉매를 합성하였다. 담체의 금속 조성 조절 및 다양한 열처리 환경에 따라 촉매를 제조하였고 산성 용액에서의 산소환원반응의 성능 평가 및 물성 분석을 진행하였다.

바이오매스를 사용하여 제조한 산소환원반응용 비귀금속 촉매의 특성분석
Preparation and characterization of non-precious catalyst by using
Biomass for oxygen reduction reaction

이지호 · 김동건 · 이수진 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필*

전북대학교 반도체 화학공학부

기후협약에 따라 화석연료 에너지의 사용을 대체하기 위한 수단이 요구된다. 수소연료전지는 친환경적이며 에너지 변환 효율이 높아 화석연료 기반의 에너지 시스템을 대체할 유력한 후보로 제시된다. 연료전지의 양극에서는 산소환원반응이 일어나는데 과전위가 크고 반응이 느려 활성이 높은 백금 기반 전극 물질이 사용된다. 백금 기반 전극 물질의 사용에 따라 시스템의 가격경쟁력이 약화 된다. 시스템의 상용화를 위해 백금 기반 촉매를 대체 하기 위해 저 비용 고효성 촉매의 설계가 요구된다. 비 귀금속계 전이금속 질화물 촉매 (M-N-C, Metal-nitrogen-carbon)는 산소환원반응에 높은 활성을 나타내기 때문에 백금 기반 물질을 대체하기 위한 유력한 후보로 제시된다. 바이오매스는 주위에서 쉽게 구할 수 있는 친환경적인 자원으로 매장량이 많고 단가가 낮으며 특정 바이오매스는 M-N 구조를 포함하는 거대고리 분자인 HEME, Chlorophyll, cobalamin 등을 포함하기 때문에 바이오매스는 M-N-C 촉매의 전구체로 유용하다. 특히, 도축 돼지 혈액은 산소환원반응에 대해 활성이 높은 Fe-porphyrin를 높은 농도로 포함하며 심각한 환경오염 물질이다. 따라서 도축 돼지 혈액을 사용하여 백금 기반 촉매를 대체할 전극 촉매를 제조하는 것은 비용적·환경적 측면에서 유용하며 그 부가가치가 매우 크다.

본 연구에서 도축 돼지 혈액을 사용하여 고효성의 산소환원반응용 촉매를 제조하는 방법을 제시하였다. 도축 돼지 혈액의 적절한 전처리 방법을 통해 전구체를 제조하고 이를 활성화 하여 촉매를 제조하였다. 특히, 수열처리 온도에 따라 촉매를 제조하고 그 특성을 분석하였다. 수열처리 조건에 따라 제조된 촉매의 TEM, XRD, ICP, XPS 분석을 수행하고 반쪽전지 조건에서 촉매의 전기화학적 특성을 분석하였다. 이를 통해 도축 돼지 혈액을 사용하여 제조된 촉매의 수열처리 조건에 따른 물리적-전기화학적 특성 간 고찰을 제시하였다.

수소충전소 법정계량 표준모델 개발 및 실증에 대한 개요

Development and Empirical study of legal metrology standard model in hydrogen station

최진영 · 임상식* · 한원국 · 길성희 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소경제 활성화 로드맵 등 정부 차원에서 수소충전소의 인프라 확충을 목표로 수소충전소가 가파른 속도로 전국 곳곳에 설치되고 있다. 또한 수소자동차 역시 인프라 확대와 더불어 공급 및 수요가 맞닿아 점차 확대일로에 있는 중이다. 그러나 현재 수소충전소의 수소자동차에 대한 충전량 제어는 SAE J2601[미국 자동차 기술자 협회에서 발간한 수소연료전기차에 대한 충전 프로토콜]에 기반한 온도와 압력에 기반하고 있으나 측정값의 불확실성으로 여러 가지 사고의 우려가 있다.

이에 본 과제에서는 충전시 발생할 수 있는 사고를 정의하고, 사고예방을 위하여 충전 프로세스 검증장치[복합계량평가 장치]개발 및 실증으로 향후 수소 충전소의 안전한 운영과 합리적인 계량 방법을 건의하고자 한다.

이동식 수소충전소 환기조건에 관한 연구

A study on ventilation conditions of mobile hydrogen charging station

이수민 · 김동환 · 조충희 · 강승규

한국가스안전공사 가스안전연구원 수소안전연구부

근래에 들어 친환경에너지 사용의 필요성이 대두됨에 따라 신재생에너지기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서도 수소기술은 전 세계적으로 이슈가 되고 있으며, 우리나라에서도 산업부 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 통해 탄소사회에서 수소사회로의 변화를 위한 계획을 수립하고 이행하고 있다. ‘수소경제 활성화 로드맵’의 주요 내용에 따라 수소 모빌리티 분야에서 ‘40년까지 수소전기차 620만대 생산을 목표로 두고 있으며, 수소충전소는 ’22년까지 310개소, ‘40년까지 1200개소 구축을 목표로 하고 있다. 수소충전소 구축을 가속화 하기 위하여 용·복합 및 패키지형, 이동식 수소충전소를 구축하는 방안이 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.

이동식 수소충전소의 경우 설비가 밀집되어 있는 특성이 있어 이를 반영한 위험성 및 안전성에 대한 평가가 필요하다. 이에 대하여 본 연구에서는 이동식 수소충전소의 설비 배치 및 방호벽을 고려하여 환기 조건을 설정하였고 누출사고 모사 후 환기 적정성을 평가하여 이동식 수소충전소에 적합한 환기모델을 제시하고자 한다.

선박용 수소충전소 해외기술동향 분석 연구

A Study on Overseas Technology Trends Analysis of Hydrogen Refueling Station for Fuel Cell-powered Ship

윤진희 · 강승규 · 허윤실

한국가스안전공사 가스안전연구원

세계 주요국에서는 글로벌 공통과제인 기후변화와 지구온난화 방지를 위하여 현재의 화석 연료 중심의 에너지 시스템에서 태양광, 풍력 등을 활용하는 재생에너지 시스템으로의 에너지 패러다임 전환을 목표로 하고 있다. 재생에너지의 종류로는 태양광, 풍력, 수력, 지열, 조력 등 다양한 에너지가 존재하지만 그 중에서도 수소는 에너지 밀도가 높은 에너지 원료로서 차세대 미래 청정 연료로 각광 받고 있다. 특히, 국제해운 분야에서도 의미있는 온실가스 감축이 필요하다고 판단하여 선박에서의 수소 활용을 위한 대응책을 적극적으로 마련하고 있다. 그러나 현재 수소에너지 관련 선도국 및 국제해상기구(IMO)에서도 수소선박과 관련된 기술기준 및 안전관리체계는 미흡한 상황이다. 또한 국내에서도 수소선박에 대한 기준이 부재한 바, 안전하고 친환경적인 수소선박 시장의 조기정착을 위해서는 선박용 수소충전소 구축이 선행되어야 하며 이를 위해 선박용 수소 충전시스템에 대한 안전성 검토 및 안전 기준 제정이 필요할 것이다.

본 연구에서는 선박용 수소충전소의 구축 및 실증연구를 위한 안전기준을 마련하고자 한다. 이를 위해 수소에너지 분야를 선도하고 있는 유럽의 선박용 수소충전소 현황, 정책동향 및 기술개발 현황을 분석하였으며, 또한 연구개발용으로 구축한 독일 함부르크의 선박용 수소충전소 현장조사를 실시하였다. 이를 통해 국내 선박용 수소충전소를 설치하기 위한 안전 기준 마련의 기초자료로 활용하고자 한다.

※ 본 연구는 중소벤처기업부 및 한국산업기술진흥원의 수소그린모빌리티 규제자유특구혁신사업의 지원으로 수행되었습니다.(P0012865, 수소연료전지 선박용 수소충전소 구축 및 실증)

수소기술 국제표준화 기반 구축에 관한 연구

Research on the establishment of the international standard for hydrogen technology

김혜림 · 강승규

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 에너지와 환경문제를 동시에 해결할 미래 에너지원으로 수소가 주목을 받으며 이를 기반으로 한 수소경제가 부상하고 있다. 수소경제시대에 대비해 수소에너지 핵심기술시장을 선점하기 위한 정부지원 연구와 시범사업이 활발히 진행되고 있으며, 국내기술을 국제표준화하기 위한 기반구축 작업이 이루어지고 있다. 하지만 현재 국내에서는 국제표준 주도를 위한 종합적인 전략 부재로 R&D 과제가 표준화로 연계되지 못하고 일부 분야에서 산발적으로 전개되고 있다. 특히, 수출이 중심인 우리나라의 경우에 향후 지속적으로 국내 기술 및 기준 등이 국제표준으로 채택될 수 있도록 하기 위해서는 국제표준화 작업을 주도할 수 있는 기반이 마련되어야 한다.

본 연구에서는 국내·외 표준 동향 및 표준 제정 현황 등을 분석하여 국제표준화 기반구축의 방향을 제시하고자 한다. 조직적이고 지속적인 국제표준 기반 구축을 통해 산업체 보유 기술의 국제표준화를 통한 글로벌 경쟁력을 확보하고 선도기술을 국제표준으로 반영한다면 세계시장 선점기회를 창출할 수 있다. 따라서 수소·연료전지 기술의 국제표준화 기반 구축 연구를 통해 제품의 국산화 촉진 및 경쟁력을 강화하고 국민이 제품·서비스를 안심하고 활용할 수 있는 환경을 조성하고자 한다.

“본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 국가표준기술력향상기술개발사업 지원으로 수행되었습니다. (NO. 20011745, 수소·연료전지 기술 국제표준화 기반 구축)”

터널의 연중 부하에 대한 최적 운전을 고려한 신·재생에너지 설비 용량 산정에 관한 연구

A study on the Capacity Estimation of New & Renewable Energy
Facilities considering Optimal Operation

김기훈

한국도로공사 도로교통연구원

본 연구에서는 가로등 및 일반용 전기요금에 적용되는 전기부하를 갖는 터널에 대하여 신재생에너지 추가 설비 후보군으로 태양광, 풍력, 에너지저장장치(ESS)를 고려하고 서로 다른 시간별 연중 전기 부하 패턴에 대하여 신재생에너지별 설치비와 전기요금의 합이 최소화 가 될 수 있는 신재생에너지 설비의 조합 및 용량을 각각 최적운전을 통하여 산정하고자 하였다.

신재생에너지 설비의 조합 및 각 용량을 산정하기 위해서는 대상 터널과 관련된 시간별 연중 자원 및 부하, 성능, 비용 정보가 요구된다. 해당 터널의 시간별 연중 전기부하 패턴에 대하여 연간 변동비용과 고정비용이 합이 최소화되는 신재생에너지 설비의 조합과 용량을 산정하며 목적함수는 연간 변동비용(Z_v)과 연간 고정비용(Z_f)의 합으로 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 연간변동비용(Z_v)은 연간 전기요금의 합을 의미하고 연간 고정비용(Z_f)은 다음 식(2)와 같다.

$$Z = \min(Z_v + Z_f) \quad (1) \quad Z_f = \sum_{k=1}^n (CRF(i, n_k) + \gamma_k) I_k \quad (2)$$

여기서, k 는 각 신재생에너지설비, $CRF(i, n_k)$ 는 자본회수계수, i 는 할인율, n_k 는 수명, γ_k 는 초기투자비에 대한 연간유지보수비율, I_k 는 초기투자비 이다.

계산된 신재생에너지 설비의 조합 및 용량은 다음 표와 같으며 일반용 전기부하에 태양광 49kW를 설치하는 경우에 투자회수기간 14년으로 가장 우수함을 확인하였다. 또한 어느 부하에 대해서도 높은 초기투자비로 풍력과 ESS는 선정되지 않았고 가로등1부하의 경우 신재생에너지설비를 설치하지 않는 것이 더 유리하고 전기부하(가로등(1+2))가 증가하더라도 복합부하패턴에 따라 태양광설치용량은 감소함을 확인하였다.

표 1. 신재생에너지 설비 조합 및 용량 산정 결과

항목	단위	단일부하			복합부하	
		가로등1	가로등2	일반용	가로등(1+2)	
설치 용량	태양광	kW	0	11	49	9
	풍력	kW	0	0	0	0
	ESS	kWh	0	0	0	0
전기절감량		kWh	0	17,142	76,361	14,025
초기투자		백만원	0	19.800	88.200	16.200
현금흐름		백만원	0	1.625	8.731	1.330
투자회수기간		년	-	19	14	19

탄소 층의 두께에 따른 철산화물의 리튬 이온 배터리를
음극 활물질로의 응용

Application of iron oxide with various carbon layer thickness to
lithium-ion batteries anode material

이수진 · 김동건 · 이지호 · 정성권 · 이은희 · 정혜원 · 김필*

전북대학교 반도체화학공학부

리튬 이온 배터리는 다양한 휴대용 전자 기기에 사용되는 높은 에너지밀도를 가지는 에너지 저장 장치로 각광받고 있다. 그러나 최근 전기 자동차의 개발에 있어 긴 거리를 주행 할 수 있는 고용량의 이차전지 개발이 필요하다. 리튬 이온 배터리의 상용화 이후로 음극활물질로써 흑연(Graphite) 등의 탄소 재료가 주로 사용되었으나 리튬의 이론적 저장용량이 제한된다는 단점으로 인해 전지의 에너지 밀도를 크게 향상시킬 수 없다. 보다 큰 이론용량을 가지는 알루미늄, 주석, 실리콘 등을 기반으로 하는 새로운 음극활물질 등의 연구가 이루어지고 있으나 전지의 구동 시에 금속이 팽창하거나 석출되어 전지의 성능과 내구성을 현저히 감소시킨다.

본 연구에서는 FeOOH에 탄소 층을 형성하고 열처리를 진행하여 철 산화물을 제조하였다. 제조된 음극활물질의 탄소 층은 충방전 시에 금속의 팽창과 석출을 막아 향상된 성능과 내구성을 나타내었다. 또한 제조한 음극 활물질의 탄소 층의 두께에 따른 리튬저장용량을 비교하였다. 제조한 음극활물질은 TEM, XRD 등의 물성분석과 충전과 방전 사이클에 따른 캐패시터를 측정하였다.

볼밀링 처리된 그래파이트로부터 제조된 환원된 그래파이트 옥사이드의
고체 상태의 플렉시블 슈퍼커패시터 전극으로의 응용

Preparation of reduced graphite oxide prepared by using ballmilled
graphite for solid-state flexible supercapacitor

정성권 · 김동건 · 이지호 · 이수진 · 이은희 · 정혜원 · 김필*

*전북대학교 반도체 화학공학부

플렉시블한 전자기기의 필요성이 증대됨에 따라 더 작고, 더 가벼운 플렉시블 슈퍼커패시터에 대한 연구가 진행되었다. 그중에서도 높은 화학적/열적 안정성과 높은 전도특성을 지닌 환원된 그래파이트 옥사이드는 슈퍼커패시터의 전극물질로 가장 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 겹겹이 쌓여있는 환원된 그래파이트 옥사이드 판 사이로의 이온 확산이 어렵기 때문에 전기 이중층 슈퍼커패시터의 영향을 주는 전극과 전해질 사이의 계면 형성이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 고에너지 볼밀 처리된 그래파이트로부터 제조된 판의 크기가 작아진 환원된 그래파이트 옥사이드를 제조하고 고체상태의 슈퍼 커패시터의 전극물질로서 그 특성을 평가한다.

도시형 스마트그리드 경제성 검증 시뮬레이션을 위한 분산자원 전력 모듈 구현 Implementation of Distributed Resource Power Module for Economic Verification Simulation of Urban Smart Grid

임정택 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원

도시형 스마트그리드는 재생에너지 발전과 유연한 수요관리를 주요기능으로 하며, 공동주택 단지를 대상으로 태양광 및 ESS(Energy Storage System) 등의 분산자원을 설치하여 수용가에게 공유 전력서비스를 제공하고, 전력계통 내 가상집합발전소 역할을 수행하는 형태가 대표적이다. 스마트그리드 운영 측면에서 분산자원을 설치하고, 새로운 분산자원 운용로직을 적용하기 이전에 구성원들의 이해관계를 포괄적으로 고려한 경제성 분석이 필수적이다. 그러나 전통적인 경제성 분석은 CAPEX, OPEX 및 전력 요금제 등의 정적 조건을 기반으로 일정 시간 주기(년, 분기, 월)의 현금흐름을 계산하는 방식으로 이루어지기 때문에 정밀도가 떨어진다.

따라서 TOU(Time Of Use), Net Metering, 공유 전력서비스, 가상집합발전소 개념을 고려한 현금흐름을 산출하기 위하여 스마트그리드의 PV(Photovoltaics), ESS, DR(Demand Response) 등을 시스템상에 분산자원모델로 구현하고 이를 시뮬레이션 하며 경제성을 분석하는 방식의 접근이 필요하다.

분산자원모델은 CAPEX, OPEX 등 정적인 경제성 요소를 반영하는 경제성 모듈과 시뮬레이션 내 운용로직에 의해 분산자원의 출력을 모사하는 전력 모듈로 구성되며, 본 논문에서는 PV, ESS, DR 분산자원의 전력 모듈을 설계 및 구현하였다.

PV 분산자원은 모듈 스펙, 서버어레이 개수, 모듈 설치 방향, NWP(Numerical Weather Prediction) 수치예보모델 등을 반영한 물리모델과 특정 태양광발전소의 발전량 데이터에 기반한 데이터모델을 구현 및 검증하였다. ESS 분산자원의 경우 온도, 방전률, DOD(Depth Of Discharge) 변화 등을 고려한 배터리 수명 분석을 기반으로 Li-ion 계열 배터리 방전가능 용량을 예측하는 물리모델을 구현하였고, BMS 및 PCS 등의 ESS 구성 개별 설비의 평균 고장 빈도, 평균 고장 지속 등을 고려하여 ESS 동작 신뢰도를 평가하는 로직을 추가함으로써 ESS 물리모델의 비용계산 정확도를 높이고자 하였다. DR 분산자원은 iSmart 전력 사용량 데이터에 DNN, RNN(LSTM), SVR 등의 기법을 사용하여 데이터모델을 구현하였다.

구현된 전력 모듈은 분산자원의 스펙정보나 과거 운영데이터를 입력으로 하여 현재 시점에 대한 발전량 또는 충·방전량을 계산하여 반환한다. 임의의 제어로직으로 전력 모듈을 제어하며 특정 시점의 전력 흐름에 따른 손익을 산출하는 형태로 시뮬레이션에서 활용한다.

본 논문에서는 분산자원모델의 전력 모듈에 대하여 연구하였다. 향후 경제성 모듈을 설계 및 구현하고, 이를 전력 모듈과 결합하여 경제성을 산출하는 시뮬레이션에 대한 연구를 진행할 예정이다.

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

신재생에너지 발전량 예측 및 분석을 위한 시계열 데이터 분석 소프트웨어 개발 Development of Time Series Data Analysis Software for Prediction and Analysis of Renewable Energy Power Generation

이재규 · 김태형* · 이상엽 · 함경선*

한국전자기술연구원 지능융합SW연구센터, 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터*

저탄소 녹색성장 및 그린 뉴딜(Green New Deal) 정책을 기반으로 신재생에너지 관련 연구가 활발히 수행되고 있다. 수소에너지와 풍력에너지 및 태양에너지 등 신재생에너지는 발전량이 불규칙적인 변동성을 가지고 있으며, 신재생에너지의 확산을 위해서는 이러한 변동성에 대응하는 기술이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 신재생에너지의 발전량을 분석하고 예측할 수 있는 시계열 데이터 분석 소프트웨어 개발에 관한 연구를 수행했다. 풍력과 태양열 발전 등 신재생에너지 데이터를 수집 및 축적할 수 있는 데이터베이스와 서버 그리고 분석 소프트웨어를 포함한 신재생에너지 분석 빅데이터 시스템을 설계했으며, 신재생에너지 관련 시계열 데이터를 분석하기 위한 분석 엔진을 개발했다. 그림 1에서 왼쪽은 신재생에너지 데이터 수집 및 축적을 위한 플랫폼의 구조를 나타낸 것이며, 그림 1의 오른쪽은 신재생에너지 시계열 데이터 분석을 위한 분석 엔진을 나타낸 것이다. 시계열 데이터 분석 엔진에는 다양한 시계열 데이터 분석 알고리즘이 포함되어 있다.

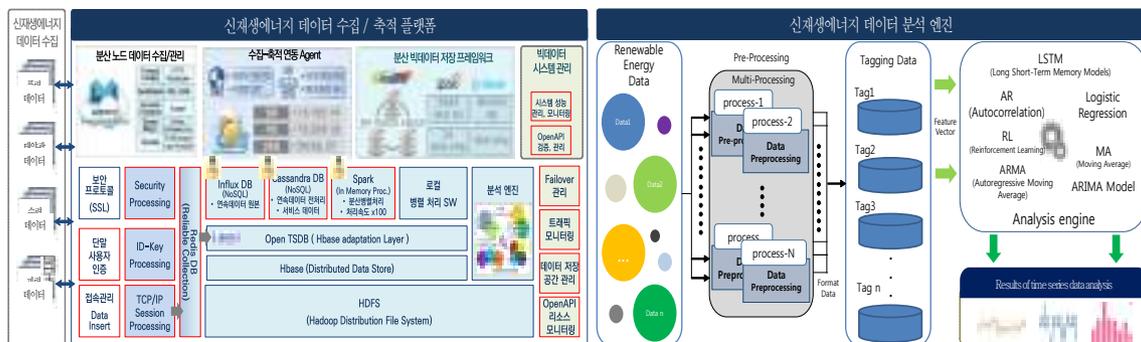


그림 13. 신재생에너지 수집 축적 플랫폼(좌) 및 분석 엔진(우)

본 논문에서 신재생에너지의 발전량을 예측하기 위해 LSTM(Long Short-Term Memory Models)과 ARIMA(Auto Regressive Integrated Moving Average) 모델 그리고 강화학습(Reinforcement Learning) 알고리즘을 설계 및 구현했다. 현재는 다양한 공공데이터를 이용해 설계 및 구현된 시계열 데이터 알고리즘을 검증하고 있으며, 신재생에너지 관련 장단기 발전량 예측 및 분석을 위한 알고리즘을 추가로 구현하고 있다. 본 논문에서 제안하는 분석 및 예측 소프트웨어는 신재생에너지의 변동성을 줄이고 전력계통의 안정성을 유지하는데 활용될 수 있을 것이다.

이 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20183010025440, 대용량 풍력터빈 및 단지 연계형 통합제어시스템 실시간 시뮬레이터 기술개발)

바이오중유 물성이 3ton 보일러 배출가스 및 연료 소모량에 미치는 영향 연구

A Study about Impact of Characteristics of Bio Heavy Oil Fuel on Emission and Fuel Consumption of the Three-Tonne Boiler

김성우** · 김현진* · 전화연**** · 이민호* · 김종렬*

*한국석유관리원 석유기술연구소, **서울대학교 기계공학과, ***고려대학교 환경공학과

바이오중유는 바이오디젤 생산 부산물, 동·식물성 유지, 바이오매스 등 주로 버려지는 원료를 혼합 및 정제 등의 과정을 통하여 얻어지며 트라이글리세라이드를 주성분으로 한다. 바이오중유는 중유 사용 발전기의 대체 연료로 사용을 위하여 2014년부터 2019년까지 시범 보급사업을 통하여 실증평가를 하고 2019년 3월부터 석유 및 석유대체연료 사업법의 석유 대체연료(발전용 바이오중유)로 인정되어 상용화되었다.

바이오중유는 중유 대비 황 함량이 낮고 발열량이 적으며 점도가 낮은 것이 특징이다. 이에 따라 바이오중유 전용 발전기는 연료 펌프, 노즐 등 관련 부품을 최적화하여 사용해야 하고 연료 소모량이 다소 증가하지만 적은 황산화물 및 질소산화물의 배출량의 이득을 얻을 수 있어 탈황·탈질 시설의 가동량을 줄일 수 있다. 이 결과는 일반 산업용 보일러에서도 동일한 경향을 나타낸다.

본 연구는 일반적으로 알려진 바이오중유가 배출가스 및 연료 소모량에 미치는 영향을 바이오중유의 물성에 따라 어떠한 경향을 보이는지 명확히 하기 위하여 바이오중유와 일반 C 중유를 포함한 27종의 연료를 대상으로 배출가스 및 연료 소모량을 평가하였다. 연소시험에 사용된 보일러는 3톤 노통연관식 보일러이며 부하율 50%에서 가동될 때 배출가스 분석기 및 연료 유량계 등의 시험기기에서 획득된 데이터를 활용하였다.

데이터 분석 결과 연료 소모량과 질소산화물 배출농도 연료의 발열량과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며 황산화물 배출농도는 연료의 황 함량과 밀접한 관계를 나타냈다. 반면 연료 소모량에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었던 연료의 밀도는 서로 유의미한 관계를 나타내지 않았다.

글로벌 석유·가스 기업의 신·재생에너지 사업 동향 분석
Analysis on Trends of Renewable Energy Business
in Global Oil & Gas Companies

정세윤 · 임종세

한국해양대학교 에너지자원공학과

과거의 에너지전환은 새로운 에너지원 발견에 따라 더 많은 에너지를 얻으려는 과정에서 비롯되었다. 하지만 현대의 에너지전환은 화석연료 사용에 의한 대기오염과 온실가스 문제에 대응하고, 에너지 안보를 확보하기 위한 움직임이라 볼 수 있다. 현재 신기후 체제를 배경으로 세계 각국 정부는 기후정책을 강화하며 관련 규제를 확대해나가고 있다. 또한, 기후위기가 심각해짐에 따라 기업에도 적극적인 대응을 촉구하기 시작했다. 그에 따라 기후위기에 긴밀히 대응하고 포스트 코로나 시대에 신성장 동력을 확보하고자 글로벌 석유·가스 기업들은 앞다투어 신·재생에너지 사업에 투자하고 있다. 국내 석유·가스 기업 또한 신·재생에너지 사업 확대를 위한 에너지 전략 수립의 필요성이 증가하고 있다. 따라서 이 연구에서는 국내 석유·가스 기업의 신·재생에너지 사업 전략을 제시하기 위해 글로벌 석유·가스 기업들의 신·재생에너지 사업 사례와 동향을 분석하고자 하였다.

글로벌 석유·가스 기업들은 기업이 보유한 인프라 활용, 지분 매입, 자국 내 프로젝트 수행 등을 통해 신·재생에너지 사업을 진행하고 있다. 주요 신에너지 사업으로는 물 전기분해를 이용한 수소에너지 사업이 있으며, 재생에너지 사업에는 태양광, 풍력, 바이오연료 등이 있다. 특히, 해상 풍력발전 전력을 활용한 E&P 사업 및 수소에너지 생산에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있으며, E&P 사업에서의 탄소 집약도를 낮추고 그린 수소를 효율적으로 생산하기 위해 향후 이와 관련된 사업이 확대될 것으로 사료 된다. 국내 석유·가스 기업의 신·재생에너지 사업은 초기 단계이며, 국내 내수시장과 신·재생에너지 사업의 규모가 작기에 국내 프로젝트 수행 및 국외 신·재생에너지 기업의 프로젝트 인수 등에 한계가 있다. 이러한 한계점과 국외 신·재생에너지 시장 동향을 반영하여 향후 국내 신·재생에너지 사업 활성화를 위한 에너지 전략 수립이 필요할 것이다.

3D 저작물을 활용한 신재생에너지 디지털트윈 플랫폼 아키텍처

A Renewable energy digital twin platform architecture using 3D authoring tools

조인표 · 이상엽 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원

신재생에너지 분야는 수요와 공급에 대한 추측과 잉여 전력에 대한 활용이 주요한 분야이다. 이러한 수요, 공급 예측의 정확성을 위해서는 실시간으로 상태를 확인하고 이에 대한 모니터링 및 시뮬레이팅을 수행할 수 있는 디지털트윈 플랫폼이 필요하다. 본 논문에서는 3D 저작물(유니티)을 활용한 신재생에너지 디지털트윈 플랫폼의 아키텍처를 제안하고 제안한 아키텍처에 필요한 외부 인터페이스와 이를 활용한 최종 예측, 모니터링 응용들을 제안한다.

1. 연구 목적

본 논문에서는 신재생에너지(풍력, 태양열) 설비의 생산, 수요, 공급, 관리에 대하여 직관적이고 효율적인 모니터링과 시뮬레이팅 기능을 탑재한 3D 디지털 트윈 플랫폼 아키텍처를 제안한다. 제안되는 플랫폼 아키텍처를 응용하여 실시간 예외 상황 감지, 공급/수요 예측과 같은 응용 개발과 연계한다.

2. 신재생에너지 디지털 트윈 플랫폼

그림1과 같이 UX/UI는 3D 저작물(유니티, 언리얼 등)을 활용하여 3D 기반으로 개발되어진다. 각각의 신재생에너지와 관련된 설비들에 대하여 데이터 대쉬보드를 실시간으로 표시해준다.

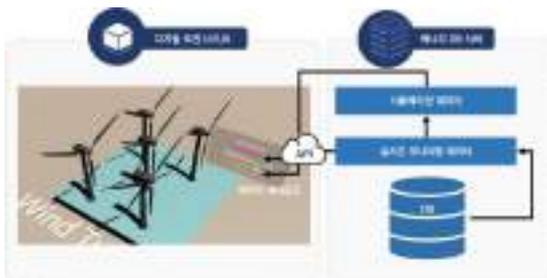


그림 15 . 디지털 트윈 UX



그림 16. 신재생에너지 동적 구성

실시간 데이터 표시를 위하여 DB와의 연동을 위한 API 모듈이 필요하다. 구현 예시에서는 JSON을 통한 OpenAPI 형태로 DB와 디지털 트윈 UX 서비스가 통신하도록 구성하였다. 그림2와 같이 실제 혹은 가상의 신재생에너지 플랫폼을 구성하고 실시간 데이터 모니터링을 수행한다.

실시간 데이터들에 대한 사용자의 피드백을 지속적으로 수집하여 추후 추가적인 예측 분석 데이터로 활용하고 이를 본 플랫폼의 모니터링 요소로 추가한다.

감사의 글

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

수치예보모델을 활용한 XGBoost 기반 하루 전 태양광 발전량 예측
A Day-ahead Solar Power Generation Prediction based on XGBoost
using NWP(Numerical Weather Prediction)

김태형 · 박재호 · 임정택 · 함경선

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

제3차 국가에너지기본계획, 재생에너지 3020 이행 계획 등 재생에너지 보급 확대를 위한 정책이 지속되면서 기존 화석에너지에서 클린 에너지로의 전환이 가속화되고 있다. 특히 태양광은 풍력에 비해 설치 및 운영 유지가 수월하여 전국적으로 많은 발전소가 지어지고 있다. 태양광 발전소 등 재생에너지가 증가하면서 재생에너지의 발전 변동성으로 인한 계통 수용성 한계 문제와 폭증하는 소규모 재생에너지에 대한 효과적인 자원관리 및 전력시장 참여를 위해 소규모 분산자원 중개시장이 개설되었다.

소규모 분산자원 중개시장은 2018년 6월 개설된 이후 2020년 3월 예측제고 정산금 운영 제도를 통해 사업자가 시장에 참여할 수 있는 조건 및 정산금 지급 기준을 마련하였다. 중개시장에 참여하기 위해서는 다음날 발전량을 예측하여 입찰해야 하므로 하루 전 발전량 예측 기술이 매우 중요하다. 본 논문에서는 태양광 발전소를 대상으로 수치예보모델을 활용하여 XGBoost 기반의 태양광 발전량의 하루 전 예측을 연구하였다.

태양광 발전량은 기상 변화에 매우 밀접한 영향을 받으며, 본 논문에서는 기상 위성 데이터를 기반으로 생성된 수치예보모델(NWP)를 활용하여 예측 모델 구성을 위한 파라미터를 도출하였다. NWP는 약 140여개의 데이터로 구성되어 있으며 상관관계 분석을 통해 태양광 발전량과 관계가 높은 NDNSW(순 표면 단파복사) 외 6개의 변수를 도출하였다.

모델 개발 및 검증에는 서울시 내 고덕, 도봉, 지축 차량 기지 4 곳의 1년치 태양광 발전량을 활용하였다. 중개시장 예측 발전량 입찰 시점은 하루 전 10시까지이다. 따라서 예측을 9시에 수행한다고 가정했을 때 예측모델은 T+15에서 T+39까지의 발전량을 예측해야 한다. 모델 트레이닝은 XGBoost 모형을 기반으로 예측 대상시점을 기준으로 하여 실측 데이터와 수치예보모델을 활용하여 개발하였다.

중개시장은 시장 참여 및 정산금 지원 조건을 위한 오차율 기준으로 nMAPE(Normalized Mean Absolute Percentage Error)를 사용한다. 실제발전량에서 예측량을 뺀 값을 설비용량으로 나누어 평균한 값으로 이용율(설비용량 대비 발전량) 10% 이상을 평가 대상으로 한다. 예측모델 평가 방법은 1년치 발전량 데이터 중 11개월을 트레이닝으로 1개월을 검증으로 사용하였으며, 하루 전 태양광 발전량 예측 오차율은 약 7.8%이다.

예측 오차의 경우 사이트의 특성 및 계절에 따라 편차가 큰 편이다. 향후 다양한 모델을 앙상블하고, 사이트의 현장 기상 센서 데이터를 반영하여 모델 최적화를 수행할 예정이다.

이 논문은 서울시 산학연 협력사업에 의해 수행된 연구임(SE180001, 건물 적용 태양광(BAPV)과 태양광 가상발전 R&D 및 실증).

고연소도 사용후핵연료 건식저장을 위한 캐스크 내부압력 측정사례
A Case of Internal Pressure Measurement of Cask
for Dry Storage of High Burnup Spent Fuel

이동희

한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 노심해석그룹

현재 국내 원자력발전소 부지 내 사용후핵연료 습식저장조의 포화가 도래함에 따라 사용후 핵연료의 건식저장에 대한 필요성이 점차 증가하고 있으며, 저연소도 연료(<45 GWD/MTU) 뿐만 아니라 고연소도 연료(>45 GWD/MTU)에 대한 건식저장이 필요한 시점이다.

실제로 고연소도 사용후핵연료의 건식저장을 위한 연구가 활발히 진행중에 있으며, 미국 EPRI가 주관하는 ESCP(Extended Storage Collaboration Program)는 2010년 고연소도 연료에 대한 장기 데모 프로그램 계획을 개발하기 시작했다. 이 프로젝트의 목적은 실제 건식 저장 조건에서 고연소도 연료에 대한 데이터를 제공하여 고연소도 연료의 건식저장을 연장하기 위한 기술적으로 검토하는 것을 목적으로 한다.

건식저장 캐스크에 저장된 고연소도 연료는 건전성을 유지하여야 하며, 해당 프로젝트에서는 캐스크의 내부압력을 측정함으로써 연료의 건전성 및 캐스크의 기밀성을 확인하였다. 캐스크 내부압력은 진공건조시험 및 헬륨충진 후 측정하였으며, 진공건조시스템 게이지를 사용하여 30분간 유지하는 테스트를 진행했다. 진공건조시스템 압력변환기는 +0.12%의 정확도를 가지며 헬륨충진 압력을 측정하는데 사용되는 게이지의 정확도는 +0.05%를 갖는다.

진공건조시험에서 캐스크의 압력을 5.5×10^{-5} MPa로 낮췄으며, 30분 유지 후 측정된 캐스크의 압력은 1.29×10^{-4} MPa였다. 진공건조검증이 완료된 후 캐스크는 0.222 MPa의 압력으로 헬륨을 충전시켰으며, 헬륨 충전 후 내부압력을 주기적으로 모니터링 하여 안전성을 검증하였다.

위와 같이, 안전한 고연소도 사용후핵연료의 건식저장을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고연소도 연료의 거동을 확인하기 위해 캐스크의 압력과 기밀성을 확인하였다. 추가적으로 캐스크의 열평형 기간 동안 압력을 측정하여 시간에 따른 압력거동과 기밀성을 확인하였다. 이러한 선행적인 연구결과는 추후 국내 사용후핵연료 건식저장시설을 구축하는데 활용될 예정이다.

- [1] EPRI, "High Burnup Dry Storage Research Project Cask Loading and Initial Results", 3002015076, 2019.
- [2] DOE, "EPRI/DOE High-Burnup Fuel Sister Rod Test Plan Simplification and Visualization," S. Saltzstein, et. al., SAND2017-10310R, 2017.
- [3] EPRI, High-Burnup Used Fuel Dry Storage System Thermal Modeling Benchmark: Round Robin Results. Palo Alto, CA: 2019.

원전 급수가열기 누설 판별을 위한 최적 화학지표 선정 검토

A Review on the Selection of Optimal Chemistry Parameters for Discrimination of Leaked Feedwater Heaters in Nuclear Power Plants

이경희 · 성기방 · 송규민

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 2차계통에서 급수가열기는 열교환기로서 복수를 순차적으로 가열하여 열 충격없이 증기발생기에 고온의 급수를 공급하는 기능을 한다. 국내 원전 급수계통은 6단 또는 7단의 저압 및 고압 급수가열기로 구성되어있으며, 튜브측으로는 가열하고자 하는 복수가 흐르고 셸측으로는 가열원으로 고온의 추기 증기가 공급된다. 발전소 정상운전 중 급수가열기에 튜브 파열이 발생하여 제 기능을 수행하지 못할 경우 급수 공급 제한으로 발전 출력을 저감시켜야 하기 때문에 결함 부위를 신속히 판별하고 정비하여야 한다. 급수가열기 누설 시에는 셸측 압력 증가, 급수유량 감소, 증기발생기 수위 감소 등의 다양한 증상이 나타나며 이의 확인을 통해 급수가열기 누설여부를 판별한다. 이때 화학 분석법은 적합한 화학종을 선정하여 급수가열기 셸측 및 튜브측의 농도를 비교함으로써 이의 비정상적인 농도 변화를 통해 누설여부를 판별하고 누설량 또한 정량적으로 산정할 수 있다. 하지만 원전 2차 계통수 중에는 다양한 화학종이 존재하기 때문에 이의 판단을 위해서는 적합한 화학 지표를 선정함이 중요하다. 본 연구에서는 급수가열기 누설 판별을 위한 최적 화학 지표의 선정에 대해 분석하였다. 분석대상으로는 하이드라진(Hydrazine)과 에탄올아민(Ethanolamine)을 선정하였다. 해당 화학종의 급수가열기 셸측 및 튜브측 농도 분포를 비교 분석함으로써 급수가열기 누설 판별에 보다 효과적으로 사용 가능한 화학 지표를 선정하였다.

원전 2차계통 급수에 주입된 하이드라진과 에탄올아민은 증기발생기에서 휘발 또는 습분 동반되어 증기에 분포하며 추기계통을 통해 급수가열기 셸측에 또한 존재한다. 하지만 이 과정에서 농도가 감소하여 급수가열기 튜브측에 비해 셸측에 낮은 농도로 존재하며, 튜브측과 셸측이 적정 농도 편차를 유지하기 때문에 이의 비정상 유무 판단을 통해 급수가열기의 누설여부를 판별할 수 있다. 이때 보다 적합한 판단 지표로 활용되기 위해서는 셸측과 튜브측의 농도 편차가 커서 튜브 누설시 농도 변화가 명확히 구분되어야 할 것이다. 이의 평가를 위하여 EPRI의 원전 2차계통 수화학 평가 툴인 Plant Chemistry Simulator(PCS)를 사용하였다. 해당 툴을 사용하여 특정 발전소를 대상으로 2차계통의 화학종 분포를 살펴보았으며 하이드라진과 에탄올아민의 급수가열기 셸측 및 튜브측의 농도 분포를 비교 평가하였다.

그 결과, 하이드라진의 급수가열기 셸측 대비 튜브측 농도 편차가 매우 크게 나타났다(3~9배). 따라서 셸측 하이드라진 농도가 정상수준 대비 증가할 경우 튜브측 누설로 인한 고농도 급수의 유입으로 판단함으로써 급수가열기의 누설여부를 판정할 수 있을 것이다. 에탄올아민의 경우 하이드라진과 동일한 분포 경향을 나타냈으나 급수가열기 셸측과 튜브측의 농도 편차가 비교적 크지 않았다(1.2~2.6배). 따라서 국내 원전 2차계통에서 급수가열기 누설여부 판별에 사용 가능한 화학지표는 하이드라진이 보다 적합한 것으로 평가되었다.

방사성폐기물 처분을 위한 Sr, Tc 핵종분리 분석 연구

최진수 · 홍은희 · 이상호 · 정가희 · 손욱

한국수력원자력 중앙연구원 (jinsoochoi@khnp.co.kr)

방사성폐기물 처분장 운영(준공(2014.12))에 따라서 방사성폐기물 처분 인도 시 방사능 특성/농도 평가를 위한 방사화학분석을 요구하고 있다. 이러한 방사화학분석은 고리 1호기(2015.6.19.) 및 월성 1호기(2019.12.24.) 해체결정에 따른 방사성폐기물의 증가로 수요가 급증할 것으로 예측된다.

원전에서 발생하는 방사성폐기물을 처분하기 위해서는 중·저준위 방사성폐기물 인도규정 및 방사성폐기물 인수방법 등에 관한 규정에 따라 폐기물의 총 방사능량 및 규명대상 핵종별 농도가 평가되어야 한다. 폐기물 내 방사능 농도는 일부 핵종을 제외하고 극미량으로 분석을 위해서는 해당 핵종에 대해서 개별적으로 분리/추출되어야 농도 측정이 가능하다. 이중 방사성폐기물 시료에서 [원안위고시_중·저준위 방사성폐기물 인도규정]의 필수 핵종규명 항목인 난분석 베타핵종 ^{90}Sr 및 ^{99}Tc 에 대한 시료에서 분리하는 전처리 방법에 대해서 추출 크로마토그래피법을 활용하여 분석하고자 하는 Sr 및 Tc를 개별 분리한 후 회수율을 측정하는 분석방법을 연구하였다. 실제 분석에서도 Carrier로 주입되는 안정동위원소 Sr 및 Tc(Re)를 활용한 모의시료를 제작하였다. 준비된 시료는 산추출방법으로 Sr과 Tc(Re)을 분리한 후, Sr 및 TEVA resin을 이용해 추출크로마토그래피법으로 Sr, Tc(Re)별 불순물을 제거하여 Sr, Tc(Re)을 분리하였다. 개별분리된 시료에 대해서 핵종 분리과정의 회수율 측정을 위해 ICP-OES로 최종 시료의 Re 농도를 측정하여 회수율을 측정하였다

Sr, Tc의 회수율은 100 ~ 102%로 안정되게 분리 및 회수되었으며, 핵종분리법에 대해서 유효성을 검증하였다. 본 연구는 방사성폐기물의 자체처분을 위한 방사성폐기물 시료, 중·저준위 방사성폐기물의 처분장 인도, 원자력이용시설 주변 환경감시를 위한 시료 중 방사능 분석/화학분석에 활용할 예정이다.

Keywords : 방사성폐기물, 난분석 베타핵종, ^{90}Sr , ^{99}Tc , 추출 크로마토그래피

국내 경수로 원전의 원자로냉각재 pH 관리 현황 고찰

최진수

한국수력원자력 중앙연구원 (jinsoochoi@khnp.co.kr)

경수형 원자력발전소에서 1차계통 원자로냉각재의 pH는 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System) 구조재료의 일반부식율(General Corrosion Rate) 저하 및 크러드의 노내 침적 최소화를 위해 각 발전소 화학기술부에서 주요하게 관리하고 있는 항목 중 하나이다. 경수로 원전에서 원자로냉각재의 pH는 리튬과 붕소 농도 및 RCS 온도의 함수로 표현된다. 여기서 RCS 온도는 발전소별로 특별한 경우(예: ORT(Operation at Reduced Temperature) 운전, 출력증강 운전 등)를 제외하면 거의 일정한 값을 유지한다. 붕소 농도의 변화는 화학 관리의 목적보다는 노심 반응도 제어를 위해 매주기별로 핵설계보고서(NDR : Nuclear Design Report)에서 규정된 값을 참조하여 발전소 운전환경에 따라 제어를 하고 있다. 따라서 원자로냉각재 pH 관리는 주로 리튬 농도의 조절을 통해 이루어진다고 할 수 있다.

원자로냉각재의 pH 관리방안은 크게는 Constant pH 운전, Modified pH 운전으로 구별된다. Constant pH 운전방안은 한 주기 동안 원자로냉각재 pH를 일정하게 운영하는 방식을 말하고, Modified pH 운전방안은 일정 리튬농도 운영구간과 일정 pH 운영구간 등 2가지 운영구간을 갖는 관리방식을 말한다.

본 논문에서는 이러한 용어 체계를 준용하여 국내 원전의 pH 관리방안을 구분하였으며, 이렇게 구분된 국내 원전의 pH 관리방안을 검토하였다. 현재 국내 대부분의 발전소에서는 Modified pH 7.1 또는 7.2 (Max. Li 3.5 ppm) 운전방안을 적용하고 있으며, 고리1호기의 경우만 Modified pH 6.9 ~ 7.4 (Constant Li 2.2 ppm) 운전방안을 적용하고 있음을 알 수 있었다. pH 운전은 상기 범위 내에서 원자로냉각재의 pH는 현행보다 상향하여 운전하는 방식이 연료 크러드 재고량 감소 및 계통 선량을 감소 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.

Keywords : 원자로냉각재, pH, 리튬, 붕소, RCS 온도

원전 열성층/열피로배관 관리현황 및 자동초음파검사에 대한 고찰

A Study on the Management Method of Automated ultrasonic Testing for Thermal stratification & Thermal fatigue in pipes for Nuclear Power Plants

문균영 · 한경석 · 김왕배

한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소

1. 개요

- 열성층¹⁾은 배관 내부 유체 온도변화에 따라 배관 재료의 팽창과 수축이 발생하고 반복적인 열피로²⁾에 의해 미세균열이 발생, 진전되는 현상으로 발전소 계통 내에서는 가압기 밀림관(Surge Line), RCS 분기관 및 잔열제거계통(또는 정지냉각계통) 열교환기 후단의 Mixing Tee 에서 발생되고 있다.
- 잔열제거계통 열교환기 후단에는 열교환기를 통과한 저온의 유체와 열교환기를 통과하지 않은 고온의 유체가 혼합되지 않고 온도 경계층을 이루는 영역이 존재하며, 온도경계층의 변동에 의해 고주기 열피로가 발생할 수 있다.

2. 국외 열성층/열피로배관 손상사례

- 원전의 경우 운전 및 정지시 마다 계통의 온도변화를 동반하기 때문에 기기, 배관 및 구조물에 열피로 발생 위험이 상존 가능하여 건전성에 영향을 미치므로 설계시 배관 재료별 피로한계를 정하여 발전소 수명기간 중에는 피로한계를 초과하지 않게 설계되어 있지만, 국소적으로 기기, 배관이 설계시 고려되지 않은 열피로를 받음으로써 손상되어 운전에 지장을 초래한 사례가 해외원전에서 발생되었다.

3. 국내의 규제현황

- 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 원전 주요 배관들을 대상으로 열성층화(열피로) 현상의 존재여부 검토 및 평가를 수행하여 배관의 건전성을 확인하고 설계 수명기간중의 건전성 유지 방안을 요구하였으며 특히, 가압기 밀림배관에 국한한 열성층화 현상에 대해서는 건전성 평가 수행을 요구하였다.
- 국내 규제기관(KINS)에서도 해외 원전의 각종 사고사례 및 NRC의 권고사항을 근거로 각 발전소 정기검사를 통해 검사를 강화하고 있다.

4. 열성층/열피로배관 대응 및 검사

- 국내원전에서는 “원전 열성층/열피로 배관 정밀검사 부위 선정” 과제를 수행하여 평가 결과에 따라 ‘가동원전 열성층/열피로 배관 검사표준(안)’을 도출하여 2012년 4월부터 전 가동원전에 적용하고 있다.
- 열성층/열피로 배관 평가 및 평가결과에 따른 검사 부위/주기를 선정하여 장기가동중검사계획서(LTP)에 반영 하여야 한다.
- 또한 보유기술을 활용하여 현장 가동중검사 기간중 수행되는 “열성층 및 열피로배관 자동초음파검사” 제반 검사업무에 대하여 기술지원요청에 의거 관련 절차 및 규정에 따라 유효성 확인 및 초음파신호에 대해 신호평가를 수행 중에 있다.

1) 열성층 현상 : 배관 내에 서로 다른 온도의 유체가 층이 분리되어 존재하는 현상

2) 열피로 현상 : 배관에 작용하는 응력의 원인으로서는 진동 등 기계적인 것과 온도변화에 기인하는 열적인 것이 있으며, 온도변화에 기인하는 피로 현상

원자력발전소 원자로 하부헤드 관통관(BMI) Nozzle 관리방안에 대한 고찰 A Study on the Management Method of Bottom Mounted Instrument Nozzle for Nuclear Power Plants

문균영 · 이태훈 · 김왕배

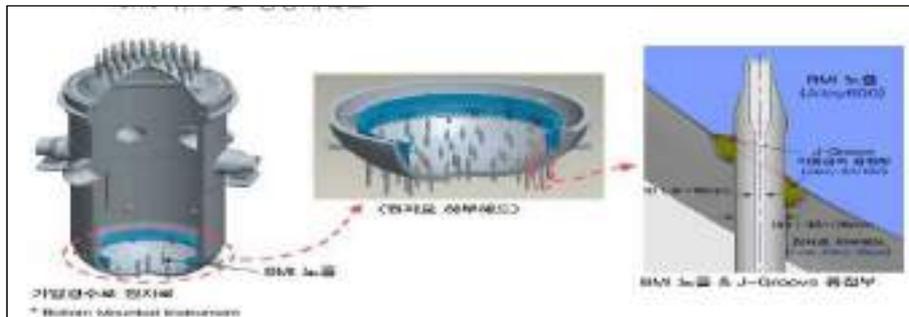
한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소 비파괴기술그룹

1. 개요

- 원자로 하부헤드 관통관(BMI³⁾) Nozzle 은 운전온도가 낮아 균열발생 가능성이 원자로 상부헤드 관통관보다 낮은 것으로 분류되나, 일부 해외원전의 Alloy-600재질 관통노즐 균열사례가 발생되었고 국내 원전에서도 동일재질 및 유사부위에 결함검출 사례가 있어, 체계적인 대책 수립 및 건전성 제고가 필요하다.

2. 국내·외 현황 및 대응

- 국외 원전에서 부각되는 BMI Nozzle 문제에 효과적으로 대응하기 위해 미국 EPRI에서는 BMI Nozzle Handbook을 발간하였고, 프랑스에서도 결함발생 원인 및 대책연구 중에 있다.
- 국내 원전에서는 '13년에 “가동원전 I-600재질 원자로 하부 관통관 종합관리대책“을 마련하여 I-600재질 관통관 사용호기에 대하여 기술기준(Code Case N-722-1)에 따라 육안누설검사(2주기마다) 이외에 추가 일회성 체적검사를 수행하였다.



3. 향후대책

- Code Case N-729-4 기술기준에 의거 주기적 체적검사를 하는 원자로 상부 헤드관통관 검사에 비해, BMI Nozzle 결함 검출 사례 및 교체 불가한 설비관리 취약성 등을 고려하여 최근 작성된 종합 관리방안대책 및 향후 하부 관통관검사 기량검증체계 도입 등 지속적인 관리가 필요하다.
- 또한 육안검사(VT)와 체적검사(UT)는 해외원전의 손상사례 및 I-600재질 사용관통관의 기초 데이터 취득을 위해 현재까지 1회성으로 해당호기에 대하여 검사를 수행하였으나, '19년에 “I-600 재료 용접부 건전성 관리 개선방안”에 따라 10년마다 체적검사를 계속 수행토록 가동중검사 관리 개선되었다.
- 향후, 해외 원전의 BMI Nozzle 검사 및 보수사례 등 지속적인 모니터링 및 기술정보 동향과악으로 국내원전에 대한 지속적인 적용/관리가 필요하며, 해외 결함발생 원인분석 및 정비방법 공유를 통해 국내 원전 결함발생시 긴급정비보수에 활용이 필요하다.

3) BMI(Bottom Mounted Instrument) : 원자로 내부 상태를 모니터링 하는 노심계측기기를 안내하는 역할을 하며, 내경이 약 10~20mm의 관통관으로, 그 수는 호기당 36~50개로 구성되며, 주위 운전온도는 약 290℃ 정도임. ※원자로 상부헤드 관통관 주위온도(약310℃~320℃)보다 낮음

디젤발전 시스템의 주파수 응답특성을 통한 성능 평가에 관한 실험적 연구 Experimental study on performance evaluation through frequency response characteristics of diesel power generation system

김영철 · 이상희 · 강승희 · 김명훈

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

원자력 발전소(원전, 原電)의 비상디젤발전기는 원자로를 안전하게 정지시키기 위한 기기에 전력을 공급하므로 원자로의 안전 유지를 위해 중요한 역할을 수행하고 있다.

원전(原電) 비상디젤발전기의 요구 성능 요건은 미국원자력협회(NRC)의 Reg. guide 1.9의 요건이 국제적으로 통용되고 있다. 우리나라에서는 원자력안전위원회 산하의 한국원자력안전기술원(KINS)이 NRC의 Reg.guide 1.9요건을 준용하여 규제 지침 “KINS/RG-N09.03, 안전관련 디젤발전기 사용 및 시험”을 제정 및 적용하고 있다.

KINS/RG-N09.03의 주요 성능 요건은 기동정격 주파수(회전수)가 순차부하 투입 간격의 60%(3초) 이내에 정격의 $\pm 2\%$ 범위 안에 있으며 어떠한 경우라도 95% 이하로 감소되지 않을 것, 내구력 및 부하여유시험 중 2시간동안 연속정격의 105%~110% 부하를 그리고 22시간은 연속정격의 90~100% 부하를 걸고 운전할 수 있을 것을 요구하고 있다.

이러한 성능 요건은 조속기의 동작 성능에 크게 영향을 받는다. 그러나 최근까지도 산업 현장에서는 조속기 및 설비의 운전 상태를 관리함에 있어 해당 설비를 기동하여 실제 부하를 급격하게 변경하면서 Bumping test를 통해 운전 특성을 평가하는 등 그 방법이 현대화되지 못하고 있다.

본 논문은 주파수 응답 시험을 이용하여 비상디젤발전기 시스템의 운전 성능을 평가하는 실험적 연구를 수행하였다. 조속기는 실제 현장에 설치되어 있는 모델과 동일한 제품을 사용하였고 디젤발전기는 2301/EGM SPEED LOOP TESTER를 대신 사용하여 모의 디젤발전 시스템을 구성하였다. 모의 디젤발전 시스템에 SWEEP⁴⁾ 형태의 주파수 신호를 입력하고 그에 따른 응답 신호를 취득하기 위해 HIOKI社의 기록계 MR8827 모델을 사용하였다.

동일한 입력 신호에 대해 조속기의 PID 설정값 및 입력되는 SWEEP 신호의 변화에 따라 모의 디젤발전 시스템의 응답특성 변화 신호를 취득하고 가독성을 향상시키기 위해 Matlab을 이용해 신호처리를 하였다.

모의 디젤발전 시스템에 대한 SWEEP 신호와 PID 설정값 변화에 따른 응답 특성을 확인할 수 있었다. 해당 시스템에서는 SWEEP 신호의 변화 보다는 갑작스러운 PID 설정값의 변화가 디젤발전 시스템의 성능에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다.

향후 본 논문에서 모의 디젤발전 시스템에 적용한 응답특성 및 성능 시험 방법이 현장 시험의 현대화에 기여할 것으로 기대된다. 이러한 기법을 현장에 적용하기 위해서는 시험 절차, 시험 장비 및 판정 기준값을 포함한 디젤발전기 시험 시스템 개발이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

4) 일정 시간 동안 주파수를 연속적으로 변화시켜 주는 것.

UV 램프 출력에 따른 유기산 폐액분해 비교평가

Comparison of waste liquid decomposition of organic acid according to
UV lamp output value

김초롱 · 김학수 · 김정주 · 이경희

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 해체작업 시 1차 계통 내 기기 및 배관등의 내부표면에 고착되어 있는 방사성 오염물질을 계통제염을 통해 제거함으로써 해체작업자의 방사선 피폭을 저감시킨다. 계통제염 수행 시 화학제염제에 의해 유기폐액이 발생하게 되며, 발생한 유기폐액을 처리하기 위해 크롬산과 같은 산화제를 이용하는 방법, 이온교환수지를 이용하는 방법 등 다양한 방법들이 사용되고 있다. 하지만 최종 처리액 내 금속이온이 잔류하거나, 처리약품이 과다하게 소요되어 2차폐기물이 과량으로 발생하는 문제가 있다. 이에 반해 UV 램프를 사용하여 유기폐액을 분해 처리하는 방법의 경우 유기폐액이 이산화탄소와 물로 분해됨에 따라 2차 폐기물 양이 저감되는 장점이 있다.

본 연구에서는 UV/H₂O₂ 처리법을 활용하여, UV 램프 출력에 따른 유기산 분해율을 비교·평가하였다. 상기 실험을 수행하기 위해 폐액분해 실험장치를 제작하였으며, UV 반응조, Mixing Tank, 순환펌프 정량펌프로 구성하였다. UV 램프 출력의 경우 A 반응조에 대해서는 120 W의 UV 램프 6개를 사용하였으며, B 반응조의 경우 320 W의 UV 램프 7개를 사용하였다. 폐액조건은 22.2 mM의 옥살산과 22.2 mM의 과산화수소 혼합한 용액에 2 mM의 철산화물을 첨가하여 제조하였으며, 5 L/min의 속도로 폐액 분해공정을 수행하였다.

실험결과 A 반응조의 경우 2시간 이후 유기산 분해율이 90% 이상으로 나타났으며, B 반응조의 경우 10분 후 유기산 분해율이 90% 이상으로 나타났고, 1시간 이후 95% 이상으로 나타났다. 두 반응조에 대해 시간에 따른 pH 변화를 분석한 결과, pH가 1.7에서 2.5까지 상승한 것으로 나타났다. 상기 실험결과를 통해 UV 램프 출력값이 클수록 유기산 분해속도가 빨라짐을 확인 할 수 있으며, pH 변화를 통해 유기산 분해율 정도를 예측할 수 있다.

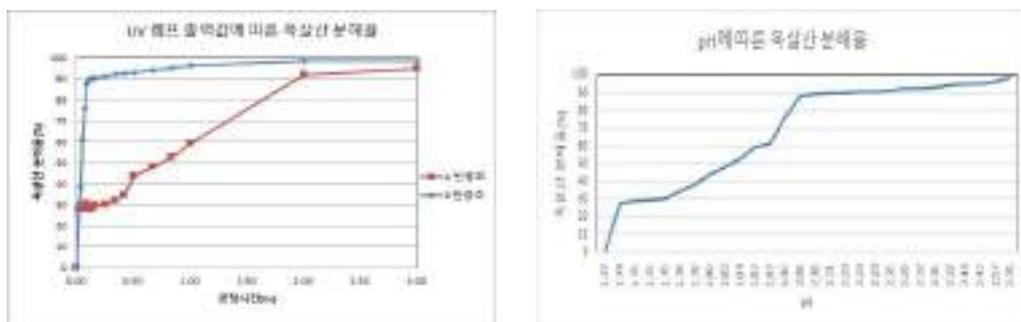


그림 1. UV 램프 출력값에 따른 옥살산 분해율

사사 : 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20191510301310)

유기산 종류에 따른 탄소강 산화막 제거율 평가

Evaluation of carbon steel oxide film removal rate according to the type of organic acid

김초룡 · 김학수 · 김정주 · 최진수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 최초 중수로 원전인 월성1호기가 2019년 12월 영구정지되어 중수로 해체원전에 대한 제염기술의 관심이 증대하였다. 경수로 해체원전의 경우 다양한 계통제염 기술이 발달되어 실제 해체원전에 적용되고 있으나, 중수로 해체원전에 대한 계통제염 사례는 없는 실정이다. 경수로 원전 원자로냉각재계통의 경우 대부분 스테인리스강과 Alloy 계열로 구성된 반면 중수로 원전 열수송계통은 주로 탄소강으로 이루어져 있어 기존 경수로 해체원전에 적용되는 계통제염 공정 및 기술을 적용하는데 한계가 있다. 중수로 원전 열수송계통의 경우 경수로 원전과 달리 산화막 구성성분 및 산화막 두께가 다르며, 주로 탄소강으로 구성되어 있어 중수로 해체원전에 적용할 수 있는 계통제염 공정 및 기술이 필요하다.

본 연구에서는 중수로의 탄소강 배관에 침적된 산화막을 제거하기 위해 유기산 종류에 따른 산화막 제거율 평가를 수행하였다. 탄소강의 경우 산화막 층에 크롬 산화막이 존재하지 않기 때문에 산화공정이 불필요하며, 환원공정을 통한 화학제염이 가능하다. 실험조건으로 95°C에서 8시간 동안 모사시편의 산화막 제거실험을 수행하였다. 이때 사용한 모사시편은 SA508이며, 환원제염제로 0.1% 옥살산, 0.1% CITROX(시트르산+옥살산), 0.1% 시트르산을 사용하였다. 상기 제염제의 경우 캐나다의 영구정지된 중수로 원전(Douglas Point, Pickering 등)에서 가동 중 제염 시 사용된 제염제를 기반으로 선정하였다. 산화막 제거율 실험결과, 산화막 제거율의 경우 0.1% 옥살산에 대해서는 23%, 0.1% CITROX의 경우 41%, 0.1% 시트르산의 경우 100% 이상 산화막이 제거된 것으로 나타났다. 용출된 철 농도를 측정된 결과, 0.1% 시트르산이 247 ppm으로 가장 크고, 0.1% CITROX, 0.1% 옥살산 순으로 나타났다. 본 실험결과를 통해 0.1% 시트르산이 탄소강 외벽에 형성된 산화막 제거에 가장 효과가 좋은 것으로 나타났지만, 모재의 손상을 줄이기 위해 제염제의 적정 농도를 도출하기 위한 추가실험이 필요할 것으로 판단된다.

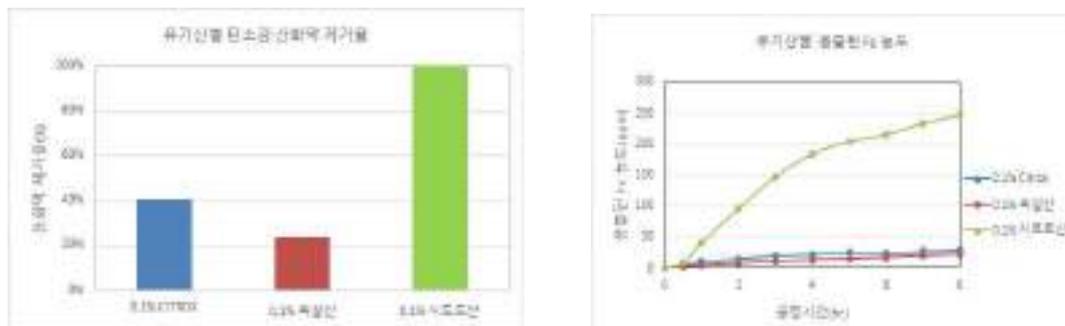


그림 1. 유기산별 탄소강 산화막 제거율 및 용출된 Fe 농도

ISO 4037 개정(2019)에 따른 기준 엑스선장 요건 비교 분석

Analysis of Requirements for reference X radiation fields in accordance with the International Standard ISO 4037 in 2019

김형진 · 원유호

한국수력원자력(주) 중앙연구원

한수원 중앙연구원에서는 2015년부터 3년간 ISO 4037(1996년) 규격에 따른 엑스선 조사시설을 구축하고 NIST 기준 엑스선장을 구현하였다. 또한 규제 변화에 대비하여 후속과제로 ISO 기준 엑스선장 구축과제를 수행하고 있다. 이후 2019년 ISO 4037 개정판이 발간됨에 따라 해당 규격에 따른 엑스선장의 적용가능 여부를 검증하고자 중앙연구원 내 엑스선 조사시설과 ISO 기준 엑스선장 요건을 재검토하였다. 2019년 개정판의 주요 골자는 다음 세 가지로 기술된다. 첫째, 본 규격에 명시된 선량환산인자 적용 가능 여부에 따라 두 종류의 기준엑스선장(Matched reference radiation, Characterized reference radiation)으로 분류하였으며 둘째, 기준 엑스선장의 요건으로 두 종류의 기준 엑스선장에 의해 평가된 개인선량당량의 확장 불확도($k=2$)가 ($6\sim 10$) % 이내 수준이 되도록 엑스선장 발생과 관련된 변수(관전압, 필터 순도와 두께 등)에 대한 허용오차를 도입하였다. 셋째, 본 규격의 선량환산인자를 사용할 수 있는 Matched reference radiation의 경우 반가층 측정, 스펙트럼 분석, 선량 평가 등의 유효성 검증을 수행하여야 하며 Characterized reference radiation의 경우 해당 엑스선장의 선량환산인자를 평가하여야 한다. 현재 중앙연구원이 보유하고 있는 엑스선조사장치를 포함한 시설 및 새로 구현코자 하는 14개 엑스선장(HK 계열 7개, WS 계열 7개)에 대한 반가층 측정 결과를 토대로 본 규격에 기술된 요건을 비교한 결과는 다음과 같다.

평균 관전압의 편차(ΔU_{rel}), 불확도, 안정도가 1 ~ 5 % 이내여야 하며 또한 리플은 상기 기준의 2배 이내 수준이어야 한다. 중앙연구원 엑스선관의 경우 안정도 및 정확도가 1 % 미만, 리플이 최대 0.17 %로 해당 요건을 만족한다. 엑스선관 타겟 재질은 텅스텐이어야 하며, 각도는 30 kV 이하에서 20도, 30 kV 이상에서 15도 ~ 40도 사이여야 한다. 중앙연구원 엑스선관 타겟은 텅스텐 재질이며 각도가 20도로 해당 요건을 만족한다. 고유필터는 선질에 따라 1 mm Be, 4 mm Al 등 가여야 하며 각각의 경우에 해당하는 엑스선관의 창 두께는 1 mm Be이하, 10 mm Be이하여야 한다. 중앙연구원은 선질에 따라 최대 관전압 160kV, 320kV의 엑스선관을 운영하고 있으며 각각 엑스선관 창 두께는 각각 0.8 mm Be, 3 mm Be이고 320 kV의 경우 고유필터 조건을 만족하기 위해 4 mm Al 필터를 추가하였다. 엑스선관 창과 추가된 필터 두께가 선질 구현에 영향이 없음을 확인한 바 있다. 부가필터 두께는 명목값이 아닌 실측값을 사용하여 오차를 포함한 두께를 적용함으로써 부가필터 오차 요건을 충족시켰고 순도는 99.9 % 이상이다. 또한 빔 영역 내 균질도, 산란선 등 각각 5 % 이내로 요건을 만족한다. 반가층 평가를 통해 13 개의 Matched reference field(HK 계열 6개, WS 계열 7 개)를 구현 및 검증하였으나 HK30 엑스선장의 경우 matched reference field가 불가능하기 때문에 ISO 4037(1996) 반가층 요건을 만족시킨 후, 전산모사를 통해 엑스선장의 평균에너지(19.3 keV)가 명목값(19.5 keV)의 3 % 이내임을 확인하였다. 또한 선량 환산인자를 산출하였으며 향후 비교평가를 통해 유효성을 검증할 예정이다.

OH기간 중 발전소정전사고시 중수로 원전의 냉각재 보충 방법

Reactor Coolant Supply Method for PHWR plants When Station Blackout occurs during Overhaul

배연경 · 김명수 · 이영승

한국수력원자력(주) 중앙연구원

중수로 원전은 계획예방정비기간 중 소외전원상실로 인한 등급4전원 상실이나 등급 3,4 전원이 상실될 경우를 대비하여 비정상운전절차서를 구비하고 있다. OPR1000형 원전의 경우 계획예방정비기간 중 전원상실에 대응할 수 있는 별도의 절차는 없다. 사고가 발생하면 우선-02(사고진단)를 통해 안전기능 상태점검을 수행하고 소외전원이 상실되면 비상-06(소외전원/강제순환 상실)으로 진입하고 비상디젤발전기가 기동에 실패하면 비상-07(교류전원 완전상실)로 진입하여 조치한다.

중수로와 경수로 모두 계획예방정비기간 중에 소외전원이 상실되면 예비디젤발전기(경수로의 경우 비상디젤발전기)를 기동하여 전원을 공급하거나 비상전원계통(경수로의 경우 대체교류전원발전기)을 기동하는 등 전원을 공급하기 위해 노력한다. 특히 운전모드 4,5,6에서는 노심냉각을 위해 정지냉각계통을 사용하는데, 이 계통은 전원공급이 필수적이기 때문이다. 운전모드 5는 원자로냉각재가 배수되고 증기발생기 Manway가 개방되는 단계로 정지냉각계통에 의한 냉각이 상실되면 냉각재 온도가 올라가고 결국 노심이 손상될 수 있다. 이를 방지하기 위해 전원이 상실될 경우 전원을 복구하기 위한 노력을 수행하지만, 복구가 지연될 경우를 대비하여 냉각재를 보충해야 노심손상을 방지할 수 있다.

계획예방정비기간 중 정지냉각계통을 이용하여 노심냉각을 수행중인 중수로 원전에서 소외전원과 예비디젤발전기가 상실되는 발전소정전사고가 발생하면 비상전원계통을 이용하여 고압비상노심냉각탱크와 살수탱크 내의 냉각수를 노심에 주입할 수 있다. 또한 비상노심냉각계통의 냉각수가 고갈되면 비상급수펌프를 이용하여 비상급수저장조의 냉각수를 공급할 수 있다. 위에서 가정한 상황보다 더 심각하여 비상전원계통마저 상실되면 운전원이 수동으로 밸브를 개방하여 고압비상노심냉각탱크 및 살수탱크의 냉각수를 노심에 주입할 수 있다.

상기 검토 결과를 토대로 중수로 원전의 계획예방정비기간 중 발생 가능한 전원상실에 대비하여 노심냉각을 수행하는 절차를 확인하였고, 이를 통해 계획예방정비기간 중에 필수안전설비를 확인할 수 있었다.

화재시 안전정지를 위한 운전원 수동조치 문서화 지침 개발

Development of Documentation Guidance for Operator Manual Actions to Achieve and Maintain Fire Safe Shutdown

배연경 · 이태수 · 정해영

한국수력원자력(주) 중앙연구원

화재위험도분석 재평가 주기가 도래하는 원자력발전소의 운영자는 원안위 고시에 따라 다 중요동작을 포함한 화재안전정지분석을 수행하고 있으며, 화재로 인해 원자로의 안전정지 및 유지기능에 영향이 있는 방화지역에 대해 운전원 수동조치를 개발하고 있다.

운전원 수동조치는 화재시 운전원이 주제어실 밖 현장에서 수행하는 안전정지 및 유지를 위한 일련의 행위를 의미한다. 미국에서는 화재안전정지 격리요건을 불만족하는 안전정지 기기 중 운전원 수동조치가 규제기관의 인정을 받기 위해서는 NUREG-1852 (Demonstrating the Feasibility and Reliability of Operator Manual Actions in Response to Fire)의 요건들을 필수적으로 만족시켜야 하지만, 국내에서는 화재안전정지 격리요건을 불만족하는 안전정지 중요기기에 대해서 운전원 수동조치를 개발하기 위해서 해당 문서를 참조하였다. 운전원 수동조치 개발을 위해서는 작업수행이 가능한 시간 및 신뢰도, 환경적 요인, 장비 기능 및 접근성, 사용 가능한 지시 장치, 통신수단, 휴대용 장비, 보호장비, 절차서 및 훈련, 가용 인원, 현장검증의 11가지 항목을 평가하고 검토해야 한다. 특히 현장검증을 통해 수동 조치에 대한 타당성과 신뢰성을 검증하여야 한다.

최근 다수의 발전소에서 화재위험도분석 재평가를 수행하고 있지만, 특히 안전정지 분석에 대한 분석자들의 경험, 전문성, 관행 등 다양한 이유로 생산되는 문서는 운전원 조치를 구체적으로 기술하고 있지 않다. 특히, 화재위험도분석 재평가가 종료되고 상당기간 지나면 화재 비정상운전절차서와 관련 기술배경서 개발에 필요한 운전원 조치에 관한 정보를 찾기가 더욱 어려워진다.

본 논문에서는 NUREG-1852에서 제시된 항목을 이용하여 화재 비정상운전절차 개발에 활용하기 용이하도록 운전원 수동조치 문서화 지침을 마련하고자 하였다. 상기 제시된 11가지 항목을 검토하여 배경, 조치사항, 조치가 필요한 기기와 그 방화지역에 대한 위치와 접근성 여부, 조치시간과 근거, 관련 절차나 지침의 유무 확인, 조치 이행에 필요한 도구와 의사소통 요건, 조치시 환경측면에서 고려사항 및 개인보호장구 필요 여부 등 7가지 항목으로 구성된 표준 작성 지침을 제시하고자 한다. 해당 지침은 향후 수행되는 화재위험도분석 재평가지 활용될 수 있도록 관련 지침 개정시 반영할 예정이다.

신고리 5,6호기 건설 4D 시스템 개발

Development of 4D System for Construction Project in Shin-Kori Unit 5 and 6 Nuclear Power Plants

김우중, 변수진, 김종명

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

건설산업 프로세스는 사업기획에서부터, 설계, 시공, 유지관리의 연속적인 단계를 포함하며 각 단계마다 건축, 토목, 설비, 전기, 통신 등 다양한 전문분야가 참여하게 된다. 하지만 각 단계별 업무의 분절로 인해 해당 업무에서 발생하는 데이터를 전달하는 과정에서 발생하는 정보의 불확실성, 부정확성, 표현에 대한 인식 오류 등으로 인해 타 산업에 비해 낮은 생산성을 가지고 있다. 이를 극복하고자 국내 건설 산업에서는 3D 모델 설계가 도입되었으며, 생성된 3D 모델을 활용하여 설계 및 시공의 간섭검토, 3D모델을 활용한 공정검토, 시행착오 등 3D기반의 공정지연요소 검토 프로세스가 조성되고 있다.

해외 프로젝트에서는 생성된 3D모델을 바탕으로 4D 시뮬레이션뿐만 아니라 공정계획과 공정관리 실무, 공법 및 자재, 인력, 위험도에 따른 분석을 통하여 대안 공법을 도출하여 발생된 문제에 대한 해결방안 및 의사결정을 지원하는 등 국내기술대비 상당부분 앞서있다.

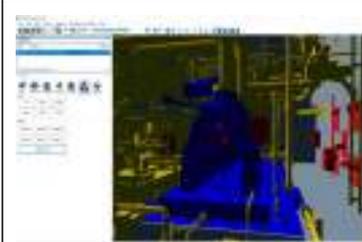
원전건설의 경우 방대한 설계정보와 대형 사업관리 특성으로 원전전체에 대한 4D CAD 시스템을 구축하기에는 한계가 있고 국내외 상용프로그램과의 연계 또한 제약요소가 많다. 따라서 원전 건설 4D 시스템 개발을 통해 공정지연요소 검토 및 효율적인 시공관리를 위한 시스템 개발의 필요성이 대두되었다. 원전 건설 현장 필요요건 분석에 따라 ¹⁾공정최적화, ²⁾실시간 시공현황 모니터링, ³⁾기기 이동경로 모니터링, ⁴⁾시공작업(안전 및 용접분야) 시뮬레이션 기능모듈을 개발하였다. 개발된 기능은 원전 3D 모델과 연계하여 직관적인 업무활용 및 업무 효율성 향상이 기대된다.



공정 최적화 기능



기기 설치 모니터링 기능



기기 이동경로 모니터링 기능

원자력발전소 스마트플랜트 구현을 위한 무선 솔루션 개발

Development of Wireless Solutions for Implementing Digital Smart Plant in Nuclear Power Plants

변수진 · 김우중 · 김종명 · 이수일

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

최근 4차 산업혁명 기술의 발전과 더불어 원자력발전소에도 신기술을 도입해 발전소 안전성과 신뢰성을 향상시키기 위한 노력을 하고 있다. 발전소 내에서 사용 가능한 무선통신 인프라를 구축하고 이를 활용한 다양한 무선 솔루션을 개발하고 있으며, 점차 활용 분야를 넓혀 스마트플랜트를 구현하고자 한다.

국내 원전은 한빛6호기를 대상으로 스마트플랜트 구축 시범사업을 수행하였다. 2012년 유무선통신망 구축 사업을 착수하였으며, 1,2단계에 걸쳐 무선통신망 구축 및 보강을 완료하였다. 이후 사내 4차 산업혁명 추진 조직 신설 이후, 한빛6호기 스마트플랜트팀을 발족하여 무선통신망 기반의 다양한 무선 솔루션 개발을 진행하였다. 개발 무선 솔루션은 ①현장과 주제어실 간 실시간 영상통화 솔루션, ②현장에서 실시간 도면/자료 조회 솔루션, ③현장 사진촬영 후 업무망 전송/관리 솔루션, ④실시간 운전변수 입력/관리 솔루션, ⑤QR코드 활용 현장 기기 정보 검색 솔루션, ⑥주요기기의 아날로그 게이지를 스마트 카메라로 촬영해 디지털 데이터로 변환하는 I-게이지 솔루션 등 총 6종이 개발되어 현장 활용되고 있다. 이 중에서 도면/자료 실시간 조회, 사진전송 등 활용빈도가 높은 솔루션은 실시간 업무망 연계 기능을 구현하여 활용성을 높이는 작업이 진행 중이다.

원자력발전소에서 무선 솔루션을 활용함으로써 운전원이나 정비원들에게 효율적이고 정확한 정보를 보다 빠르게 제공할 수 있을 것이며, 주제어실과의 협업이 용이해짐으로써 인적 오류 예방 등이 기대된다. 또한 현장에서 실시간으로 업무망에 연계하여 필요한 자료를 찾아보고, 현장상황을 전송/기록 하는 등 기존 업무의 프로세스 혁신을 가능하게 할 것이다.

모바일 솔루션 활용이 정착되기 위해서는 현장의 Needs 반영한 솔루션 개발이 필수적이다. 이를 위해 시범구축 이후에도 지속적으로 현장적용 솔루션에 대한 사용자 Feedback을 받고, 이를 기반으로 신규 솔루션 발굴을 진행하고 있다. 최근에는 모바일을 활용한 자료의 조회보다 한발 나아가 현장에서 자료 조회 후, 기록/점검을 할 수 있는 솔루션 개발을 진행하고 있다. 정비작업에서 기존 종이 절차서 대신 모바일을 이용하여 결과를 기록하여 데이터화하고, 이를 업무망으로 실시간 전송/관리 한다. 현재 운전 절차서 1종에 대한 시범 개발을 완료하여 현장 적용 테스트를 계획하고 있으며, 발전소에서 자주/반복적으로 일어나는 업무 또는 데이터 기록관리가 중요한 분야 중심으로 모바일절차서 범위를 확대해 나갈 것이다.

우라늄 농축방법별 전과정 물발자국 비교

A Comparative Life cycle Assessment of Uranium Enrichment Processes

정환삼^a · Nguyen Huu Tiep^b · 김승수^a

a 한국원자력연구원 미래전략연구본부, b VinAtom/INST, Vietnam

원자력발전을 도입하고 있는 국가들에서 원자력발전의 물발자국 평가가 주목받고 있다. 이는 수자원이 국가의 지속가능한 발전에 중요한 제약으로 자리하는 가운데, 주요 선진국들에서 전력부문의 물 사용이 농업부문에 이어 두 번째로 많기 때문이다. 그 중 개별 발전기술들 간 수자원 사용률 비교에서, 원자력발전도 매우 큰 값을 갖는 것으로 평가되고 있다.

예를 들어, 프랑스는 2003년 자국의 원자력발전소 가동을 중단하였다. 그 원인은 극심한 고온과 가뭄으로 인해 냉각수가 배수온도 기준보다 높았고, 그 수위도 취수하한에 미치지 못하여 냉각수 취수가 불가능했기 때문이었다. 이로 인해 프랑스 내 17기의 원자로들이 출력감소 혹은 정지하였다. 미국과 스위스도 비슷한 상황을 겪은 바 있고, 이후 이러한 상황을 경험한 국가들은 일 년 정도의 기간을 앞서 선조치를 취하고 있다.

최근 들어 환경적 지속가능성은 전과정분석(Life Cycle Analysis)의 관점 도입이 중요성을 더하고 있다. 이는 국가간 교역되는 재화와 용역에 수반되는 수자원 사용을 가상수(virtual water) 개념으로 평가하려는 분석 추세와 맥을 같이한다. 본 연구는 원자력 발전 전과정에서 다른 발전기술들에 없어 가장 특이성을 갖는 우라늄농축 단계에 사용되는 기술들의 물발자국을 평가하였다. 비교 결과 원심분리법(centrifuge process)에 비해 기체확산법(gas diffusion process)의 수자원 사용이 건설과 농축작업에서 각각 8배와 20배 정도 더 많은 것으로 분석되었다.

해체원전의 방사성폐기물 처리시설 구축방안 연구

A Study on Establishing Radioactive Management Waste Facilities for Decommissioning NPP

유지환 · 박경록

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 방폐물기술그룹

원자력발전소의 해체시 발생이 예상되는 대량의 방사성폐기물(방폐물)은 방폐물 종합처리 시설을 건설하여 방폐물의 수집, 분류, 측정, 제염, 처리, 임시저장 공간을 마련하여 처리하는 방법을 고려할 수 있다. 구축방안은 실현가능성, 장단점, 안전성, 경제성을 다각적으로 검토하여 타당성을 마련해야 한다. 운영목적은 해체현장에서 발생하는 방폐물을 소외 확산 방지, 방폐물 발생 최소화를 통한 처분비용의 감소, 처분 여유기간 확보를 목적으로 한다.

해외사례 중 미국의 경우에는 방폐물의 원형처분 가능, 자체처분 기준 미운영으로 대부분 감용처리를 하지 않고 처분하며, 유럽의 경우에는 이미 운영 중인 방폐물 처리 사업자를 두어 위탁처리하거나 스페인에서는 소내의 터빈건물을 방폐물 처리설비로 활용한 사례가 있다. 또한 벨기에에서는 별도로 원전해체를 대비한 처리시설 건설을 계획하고 있다. 국내에서는 고리1호기뿐만 아니라 인접호기의 해체를 대비하여 고리1호기 부지에 방폐물 처리시설을 두어 후속호기의 해체 방폐물의 처리를 대비하는 계획을 가지고 있다. 따라서 방폐물 처리시설은 해체 시 발생하는 양과 종류에 따라 해체 방폐물을 수용하여 처리할 수 있어야 하며 처리 전 방폐물 저장, 분류, 특성분석, 분배의 기능을 가지고 후속공정으로 제염, 절단, 용융, 압축, 고형화, 포장 등 방폐물 처리가 필요하다. 처리 후에는 방폐물 저장 및 처분인도 준비를 위한 완충(Buffer)역할도 필요하다. 기본적으로 방폐물을 취급하기 위한 필수적인 방사선 안전관리의 기능도 필수적이다. 이와 같은 기능을 가진 설계기준은 미국 연방법 10 CFR 20, 10 CFR 50 등과 미국 규제지침서 RG 1.21, RG 1.109등을 준수하며, 국내 산업 규격 및 표준은 KEPIC Code를 준수하는 국내의 원자력 관련 법규 및 산업표준을 적용하여야 한다.

이 논문에서는 해외의 방폐물 처리시설 활용사례를 조사하여 기술하였으며, 국내외 설계기준을 적용한 주요 구성설비를 선정하여 기술하였다. 선정된 구성설비는 기존의 처리기술 뿐만 아니라 향후 개발되는 국내외 새로운 처리기술을 지속적으로 파악하여 해체시점에서 적용가능성을 검증하여 적용하여야 한다. 이후 활용방안을 수립하여 해체원전 방폐물 처리시설 설계, 건설, 방폐물 종합관리 계획, 최종해체계획 수립, 해체사업 홍보에 도움이 될 것으로 기대한다.

원자력시설의 철거로 인해 발생하는 건물과 건물 잔해의 규제해제를 위한 방사선학적 방호기준 분석

A Detailed Analysis of Radiological Protection Criteria for The Clearance of Buildings and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations

유지환 · 조항래

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 방폐물기술그룹

스페인 José Cabrera(Zorita) 원자력발전소 해체에 앞서 규제해제 기준으로 준용한 RP(Radiation Protection) 113(원자력시설의 철거로 인해 발생하는 건물과 건물잔해의 규제해제를 위한 방사선학적 방호기준의 권고사항을 요약하여 제시하고자 한다.

유럽연합에서는 1999년 규제해제의 개념과 선량기준을 명시한 EU Directive 96/29(기본 안전기준)을 회원국별 법령체계에 반영하도록 결정하였으며, 유럽회원국들은 EU Directive의 이행을 위해 각종 방사선방호에 관한 현안과 관련하여 유럽위원회(European Commission)를 통해 Radiation Protection Reports(EC RP)를 발간하여 적용하는 노력을 하고 있다. 특히 물질의 규제해제(국내에서는 자체처분)를 위한 핵종별 농도 또는 준위를 권고한 IAEA-TECDOC-1000을 통해 의학, 연구, 산업분야에서 발생하는 방사성물질에 대한 규제해제 농도를 발표하였다. 이와 마찬가지로 EC에서는 RP 122(Practical use of the concepts of clearance and exemption Part I: Guidance on general clearance levels for practices)를 마련하여 유럽회원국의 법령에 일부 반영되고 있다. 또한 유럽에서는 원자력시설의 해체에 적용하도록 RP 113이 2000년 발행되어 스페인 Zorita 원전 건물의 재이용 및 파쇄를 위한 규제해제 기준으로 준용되었는데, 이 기준 역시 연간 10 μ Sv 이하의 계산된 개인선량을 기반으로 하고 있음을 알 수 있다.

현재 유럽의 원전 건물에 대한 규제해제 기준 설정 정보를 활용하여 국내의 건물 규제해제 근거와 국내 원전 해체계획서 작성에 참고자료로 활용할 예정이다. 서론에서는 유럽위원회의 기본 안전 표준 BSS(Basic Safety Standards)를 설명하며, 방사선 방호 기준이 IAEA 안전시리즈 89의 주요 내용과 동일함을 명시하고 있다. 본론에서는 해체옵션으로 사용할 수 있는 재이용 또는 파쇄의 모든 목적을 위한 건물 규제해제, 파쇄만을 위한 건물 규제해제, 건물잔해에 대한 규제해제의 3가지 옵션을 제시하고 각 옵션에 대해 도출한 준위 값을 제시한다.

이와 같이 스페인의 José Cabrera(Zorita) 원자력발전소 해체 과정에서 건물 규제해제 기준으로 준용한 사례를 분석하여 국내 원자력시설의 효율적인 해체와 인허가 활동에 기여하고자 한다.

수출형 원전 탄력운전 성능 요건

Performance Requirements for Flexible Operations of Export-type Nuclear Power Plants

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

현재 한수원은 체코를 비롯해 영국, 폴란드, 사우디아라비아, 불가리아 등에 한국형 원전 수출을 추진하기 위해 수출형 원전을 개발하고 있다. 이들 원전 발주국들은 원전의 발전량이 전력망의 요구에 응동 할 수 있는 탄력운전 성능을 요구하고 있는데 현재 한국형 원전은 탄력운전기술이 설계에 반영되어 있지 않아 탄력운전을 설계에 적용하는 기술개발이 필요하다. 탄력운전기술은 발전소의 출력변경능력을 나타내는 기술로 그 성능요건에 따라 필요한 기술의 내용과 범위가 크게 달라진다. 따라서 수출형 원전을 위한 탄력운전 기술개발을 수행하기 전에 수출형 원전에 요구되는 탄력운전 성능요건이 선결되어야 한다. 본 논문에서는 그 동안 수행되었던 대형원전(APR+) 탄력운전 선행연구 결과를 바탕으로 한국형 원전의 성능을 정성적으로 분석하여 개발 가능한 설계변경 및 평가방법론 등을 통해 수출형 원전에 구현 가능한 탄력운전 성능요건을 제시하였다. 탄력운전은 일반적으로 일일부하추종운전에 기반을 둔 계획/비계획 부하추종운전과 주파수제어운전으로 구분된다. 계획/비계획 부하추종운전의 주요 요건으로는 출력 증/감발률과 최대 출력 증/감발량 및 한 주기 내에 가능한 최대 운전기간이다. 출력 증/감발률은 증/감발량과 관련이 있어 선행연구에서 수행한 일일부하추종운전 시뮬레이션 결과를 근거로 최대 50%까지 출력이 증/감발할 경우 시간당 25%로, 10%미만으로 출력이 증/감발할 경우에는 분당 3%로 출력변화률을 제시하였다. 또한 주기말 붕소희석의 어려움을 고려해 주기초 부터 주기말 90%까지를 부하추종운전 최대 기간으로 제시하였다. 주파수제어운전은 다시 출력변화 속도와 변화량에 따라 국부주파수제어와 원격주파수제어로 나눌 수 있는데 원격주파수제어는 원자로 조종사(Operator)가 아닌 전력계통운영자가 발전소 외부에서 출력을 조절하는 방식으로 필수 요건이 아닌 선택사항으로 제시하였다. 마지막으로 국부주파수제어운전은 초 당 $\pm 0.5\%$ 출력변화률로 최대 $\pm 2.5\%$ 출력범위에서 일부 제어계통 설계변경만으로 가능한 것으로 판단되어 이 값을 요건으로 제시하였다. 요컨대 그 동안 APR+를 대상으로 수행한 선행연구결과의 정성적 평가를 바탕으로 수출형 원전의 탄력운전 성능요건을 제시하였다. 향후에는 수출형 원전의 탄력운전 설계/평가를 통하여 성능요건 만족여부 평가 및 성능요건 개선 연구를 수행할 계획이다.

기기연계모듈 시제품의 가용도 분석

Unavailability Analysis for Prototype of Component Interface Modules

최선미 · 이지훈* · 이윤상**

한국수력원자력 중앙연구원, *한국전력기술, **수산이엔에스

원자력발전소의 안전등급 기기를 제어하기 위하여 공학적설비기기제어계통, 다양성보호계통 및 다양성공학적안전설비수동작동스위치 신호간의 우선순위를 부여하는 기기연계모듈을 TTL(Transistor Transistor Logic) 및 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)의 하드웨어 기반의 시제품을 제작하였다. 제작된 기기연계모듈의 시제품은 안전등급 기기로 정량적 신뢰도 분석이 필요하다. 기기연계모듈의 신뢰도 분석은 계층구조 분류 및 부품에 대한 신뢰도 예측, 시스템 신뢰도 및 평균 수리시간(Mean Time To Repair, MTTR) 예측 결과를 기반으로 시스템 가용도를 분석하였다. 신뢰도 분석에 필요한 신뢰성 요건은 환경 요건을 기반으로 분석하며, 기기연계모듈에 대한 정량적 분석 척도는 고장률, MTBF(Mean Time Between Failure) 및 MTTR을 기초로 산출한다.

신뢰도 예측을 위한 각 부품의 고장률 데이터는 부품의 실제 운영정보 또는 제조사에서 제공한 데이터 기반으로 10^6 운영시간 당 고장건수의 형태로 사용한다. 실 운영정보, 제조사 데이터, 과거 경험 데이터 및 유사제품 데이터 등과 같은 가용한 정보가 없는 경우 MIL-HDBK-217를 기준으로 고장률을 산출하였다. 고장률 산출시 주변온도는 40°C , 환경 조건은 Ground/Benign, 전기적 피로도는 50% 및 품질조건은 소자별로 다른 조건을 가정하였다.

기기연계모듈에 대해 모듈 부품의 수명을 지수분포, 부품은 직렬연결, 각 부품은 통계적 독립을 가정하여 신뢰도 예측을 수행하였다. 기기연계모듈은 보드 형태의 모듈로서 고장발생 시 모듈 전체를 교체하도록 설계되어 현장 경험을 토대로 기기연계모듈 모듈 교체에 걸리는 평균시간을 1시간으로 산정하였다. 기기연계모듈은 보드 형태의 모듈로서 고장 시 모듈 교체를 전제로 설계되어 기기연계모듈의 부품 고장은 기기연계모듈 모듈고장으로 가정하였다. 이에 따라 기기연계모듈의 가용도 예측은 정상상태의 가용도(Steady-State Availability)를 기준으로 예측하였다.

APR1000 사고감시계통의 범위 및 안전등급 검토

Review Coping Range and Safety Classification of Accident Monitoring System for APR1000

최선미

한국수력원자력 중앙연구원

IAEA에서 결정론적 방법을 기준으로 확률론적 방법과 공학적 판단으로 보완했던 기존의 안전등급 분류 관련 가이드(IAEA NS-R-1)를 리스크 기반 안전등급분류 가이드로 개정(IAEA SSG-30) 하였다. 또한 IEC 61226-2020에서 계측제어 및 전기계통의 안전등급 분류 기준을 IAEA SSG-30을 반영하여 리스크기반 안전등급 분류 기준으로 변경하였다. 유럽 사업자요건에서도 IAEA SSG-30에 기초한 리스크 기반 안전등급 분류를 요구한다. 이는 안전에 중요한 기능을 식별하고 안전중요도에 따라 등급을 구분하는 것이다.

발전소 계통 기능을 식별하고, I&C 아키텍처 최적화 관점에서 계측제어계통 사고 후 주요 변수 지시 및 감시계통-PAMI(QIAS-P)의 대처 범주에 대한 확대 필요성이 대두 되었다. QIAS-P는 노심출구온도와 원자로냉각재 수위 및 냉각재 포화여유도 감시를 통한 부적절한 노심 냉각 감시, 발전소 안전기능 수행/안전계통의 동작확인/방사능물질의 누출 등을 감시하는 계통이다.

주요변수 지시 및 감시계통과의 기능 구분, 구현의 적정성, 요건 부합성 등 다각도의 평가를 통해 APR1000 사고 후 주요변수 지시 및 감시계통-PAMI 감시 범위를 선정하였다. 사고 감시변수에 대한 요건인 IEC 62137에서 요구하는 사고 감시 변수의 Type D 변수 목록 중에 안전정지 상태달성과 유지에 필요한 계통의 성능표시를 위한 필수 목록을 QIAS-P에 추가하였다. 이를 통해 QIAS-P는 controlled state에서 safe state사이에 존재하는 중요 운전원 행위에 대한 지시를 제공하기 때문에 IEC 61226-2002 Category B 기능을 수용하게 된다. 또한 리스크 기반 안전등급 분류를 위해 할당된 기능 실패에 따른 결과 심각도 평가를 기준으로 안전등급을 결정하였다.

향후, 예비검토 결과를 바탕으로 좀 더 상세 설계가 이루어지는 표준설계 단계에서 사고감시계통의 전반적인 구성 및 요건 부합성 등을 고려하여 지속적으로 적절성을 검토할 것이다.

대형원전 사고완화를 위한 피동응축냉각탱크내 잔여냉각수 활용방안 평가
Evaluation of the Use of Residual Coolant in Passive Condensation
Cooling tank for Mitigating Accidents of Advance Nuclear Power Plant

강상희, 문호림, 이재민
한국수력원자력 중앙연구원

후쿠시마 원전사고 이후, 안전성이 더욱 강화된 원전의 개발이 요구됨에 따라 자연력에 의해 작동하는 피동안전계통이 개발되었고, 원전 설계에 적용되었다. 국내 대형 원전인 APR+(Advanced Power Reactor Plus)는 피동보조급수계통(Passive Auxiliary Feedwater System, PAFS)을 적용하였고, 이는 발전소정전사고(Station Blackout, SBO)시 안전성 향상에 기여하였다. PAFS는 독립된 2계열로 각 계열은 2대의 열교환기(passive condensation heat exchanger, PCHX)와 1대의 피동응축냉각탱크(passive condensation cooling tank, PCCT)로 구성되며, 모든 설계기준 사고 시 작동하여, 별도의 운전원 조치 없이 발전소를 안전하게 냉각시킬 수 있다. 사고 발생 후 PCHX를 냉각하기 위한 냉각수를 지속적으로 PCCT에 충수할 수 있다면 PAFS를 이용한 원자로의 장기 냉각이 가능하다. 그러나 PCCT의 충수가 불가능한 경우, PAFS의 대체 역할을 수행하는 대체보조펌프(Alternative Auxiliary Pump, AAP)를 이용하여 직접 증기발생기를 충수하여 원자로의 냉각을 지속할 수 있다. 본 연구에서는 AAP로 증기발생기에 공급하기 위한 수원확보 측면에서 PCCT내 PCHX 하부에 존재하는 잔여 냉각수의 활용방안을 평가하였다. APR+ 원전 모델에 증기발생기 전열관 파단사고(Steam Generator Tube Rupture, SGTR)사고 발생으로 1대의 PAFS가 가용하고, 1대의 증기발생기는 사고발생 후 격리되는 것으로 사고 시나리오를 구성하였고, 미국 NRC에서 개발된 열수력계통 최적해석 코드인 RELAP5/MOD3.3을 이용하여 평가하였다. 평가 결과 PAFS 작동으로 장기냉각 후 PCCT내 냉각수의 고갈로 PCHX가 노출되어, 더 이상 냉각이 진행되지 않는 시점에 PCCT 하부의 잔여냉각수를 AAP의 냉각수원으로 활용하여 추가 냉각을 수행할 경우, 최대 4.6시간의 냉각시간을 추가 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 PCCT 하부의 잔여냉각수의 활용 시 추가 냉각시간의 확보되어 사고 시 원전의 안전성을 더욱 향상시킬 수 있음을 확인하였고, 본 결과를 원전 사고대처를 위한 운전 전략 수립 시 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

MACST 전략 수행을 위한 이동형설비별 인력 가용성 평가 Evaluation of Manpower availability for each MACST facility to implement MACST Strategy

송규상

한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 사고대응그룹

MACST 전략 수행을 위한 이동형설비는 본부 통합보관고에서 현장으로 이동되어 배치되고 단자함 또는 외부주입유로 등 발전소 연결부위와 연결이 이루어진 후, 사고대응에 활용되어 진다. 이런 목적을 수행하기 위해서, 각 설비별 혹은 단계별로 적절한 수의 인력이 요구되어 지고, MACST 전략에 따라 사용되는 시기도 상이하기 때문에 이동형설비별 인력 가용성을 평가하였다.

MACST 전략이 요구되는 사고상황 발생 시에는 방사선비상이 발령되어 발전소 교대근무자(9~10명) 및 비상기술지원실(54명), 비상운영지원실(55명) 및 이동형설비의 운용을 주관하는 재해대응안전센터요원(8명) 등 정규비상대응조직이 구성된다. 또한 MACST 전략 수행을 위한 이동형설비 활용시에는 재해대응안전센터 요원을 기본으로 하며 이동형 설비의 연결 작업과 관련하여 기계/전기 정비 담당자들이 지원해준다. 담당자(13명)들은 발전소 복귀가 가능한 지역 내 대기하고 있다가 소내로 집결하며, 3개조로 운영되고 있기 때문에 가용한 것으로 평가하였다.

이동형 설비는 MACST 전략의 다중방호개념이 반영된 것이며, 사용되는 Phase(시점)에 따라 설비가 이동/배치/연결이 각기 다르게 요구된다. MACST 전략의 Phase1은 기본적으로 기설치된 고정형설비를 사용하므로 이동형설비 인력 가용성 평가에 포함되지 않아 제외할 수 있지만, 다목적통신중계설비는 사고대응을 위한 원활한 통신환경 구축을 위해 Phase1 내에 현장 배치를 하는 것으로 분류하였고, 트랙터는 이동형설비의 이동경로 상 발생할 수 있는 장애물이나 도로유실 등의 복구를 위해 Phase1 설비로 포함하여 분석하였다. Phase2 설비는 1MW 발전차, 이동형펌프차, Phase3 설비는 3.2MW 발전차이고, MACST에 전략에 따라 사용되는 시점에 따른 인력 가용성을 평가하였다.

이동형 설비중에는 별도의 지원 없이 차량 운전자 또는 발전팀 현장근무자가 직접적인 사용이 가능한 설비(다목적통신중계설비, 트랙터) 도 있는 반면, 그와 다르게, 이동형 발전차 및 펌프차의 경우 관련 기계 또는 전기 담당자의 지원을 통해 별도의 연결이 요구된다. 1MW 및 3.2MW 이동형 발전차의 경우 설비이동 1명, 발전차와 발전소 단자함 사이의 전력 케이블 연결을 위해 6명, 발전차로의 연료 공급을 위해 3명, 기동 및 운전을 위해 1명이 공통적으로 요구됐으며, 3.2MW 이동형 발전차의 경우 전력케이블, 연료이송배관 및 연료이송 펌프를 운반 및 하차하기 위해 2명의 추가 인원이 필요한 것으로 평가되었다. 또한 이동형 펌프차의 경우 설비이동 1명, 펌프차와 외부주입구 연결을 위해 7명, 기동 및 운전을 위해 1명이 요구되었다. 그러므로 MACST 전략을 수행하기 위해 이동형 설비의 이동, 배치 및 연결하는데 있어 가용한 인력이 충분히 있는 것으로 평가되었다.

케이블 사전설치 시 이동형발전차 가용시간 평가

Evaluation of Mobile Generator Available Time Considering Cable pre-installation

송규상

한국수력원자력(주) 중앙연구원 안전연구소 사고대응그룹

설계기준을 초과하는 극한 자연재해로 동일 부지 내 다수호기에서 장기교류전원상실과 최종열제거원상실 사고 발생 시 지진 등 외부사건으로 인해 이동형발전차(1 MW 및 3.2 MW)의 이동에 따른 불확실성을 해소하고 전원공급 신뢰성을 증대하기 위하여 이동형발전차의 사전 케이블 설치안이 제시되었고, 각 본부별 현장실사를 통해 사전포설 케이블 경로를 선정하여 이동형발전차의 전력을 공급할 수 있도록 소내 전력계통 연계 방안을 마련하였다. 이렇게 도입된 케이블 사전설치 방안은 사고완화 및 안전성 증진에 많은 기여를 할 것으로 판단되기 때문에 각 발전소별 케이블 사전설치에 따른 이동형발전차 가용시간을 평가하였다.

발전소별 이동형발전차 가용시간 분석은 다음과 같은 사항을 가정하였다. 첫 번째, 사고발생 후 사고 진단 소요시간을 15분으로 설정, 두 번째, 사고 재해대응센터 직원이 통합보관고로 직접 이동, 세 번째, 재해대응센터 직원은 사고 진단 후 즉시 출발, 네 번째, 지진사건 시에만 이동경로상 제약조건 발생, 다섯 번째, 이동형발전차 모션가압 완료 시 가용, 마지막으로 보수적 관점 추가시간을 지진이 아닌 경우 15분, 지진의 경우 45분이 소요되는 것으로 가정하였다.

전력 케이블 사전포설 시, 지진을 제외한 전출력 내·외부사건(침수 및 홍수)의 경우 사고 진단시간 15분이 경과한 후 발전소 외부로부터 재해대응센터 직원이 자동차를 이용하여 55분쯤에 통합보관고로 이동하고 전차 이동형발전차 실증시험 결과 기준 설비기동 및 부하가압 시간이 사고 후 75분 시점에 완료되는 것으로 평가되었다. 반면 전출력 외부사건 중 지진을 고려한 경우, 발전소 외부로부터 재해대응센터 직원이 통합보관고로 이동하여야 하고 이동경로 상 제약조건 발생 및 추가적인 보수적 시간을 반영하여 약 1시간에 시간이 더 소요되는 것으로 평가되었다.

케이블 사전 포설을 한 경우, 전출력 내·외부사건에 대해서는 1.5시간이 소요되는 것으로 확인되었다. 반면 지진이 발생한 경우에는 통합보관고까지의 이동시간으로 인해 총 소요 시간이 2.5시간으로 평가되었다. 이는 통합보관고에서 발전소로 이동형발전차를 이동한 경우보다 약 1.5시간의 시간이 단축되어 중대사고 예방 및 완화 측면에서 안전성이 증대될 것으로 판단된다.

원자력발전소 설비관리프로그램(PMP) 운영시스템 개발 Development of Plant Management Program of Nuclear Power Plant

현진우 · 염동운 · 이상대
한국수력원자력 중앙연구원

국내 원자력발전소는 필수적으로 관리하여야 하는 원전 핵심설비에 대하여 설비신뢰도 향상 및 유지를 목적으로 설비관리프로그램(PMP : Plant Management Program)을 작성하여 이행하고 있다. 설비관리프로그램은 주요밸브(MOV/AOV)의 성능여유도를 관리하는 프로그램 등 총 31개의 프로그램으로 구성되어 있으며 각각의 PMP 대상 프로그램별 도출결과에 대해서는 상태맵(Status Map)으로 분류하여 평가하고 있다.

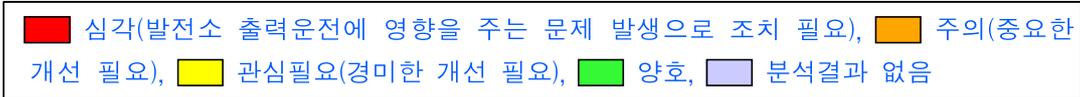


Fig. 1 PMP Status Map

PMP 통합관리는 최종적으로 상태맵(Status Map)을 통해 이루어지고 있으나 상태맵 결과를 도출하기 위한 운영실적을 수기로 작성하도록 되어 있고 상태맵 결과도 별도로 계산하여 입력하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 운영실적 자동연계기능, 전체적인 통계분석 기능 등 추가 개발이 요구되는데 주요 개발내역은 다음과 같다.

- (1) PMP관리 프로그램의 운영실적 자동연계 기능 개발
 - 수기로 입력하는 실적에 대하여 자동연계/입력 기능 개발
 - 입력실적에 대하여 상태맵(Status Map)기준에 따라 자동평가 기능 추가
- (2) PMP관리 시스템의 통계 분석 기능 개발
 - 호기별, 기간별 설비건전성 경향분석을 위한 통계분석 기능 개발
 - 발전소별 기기건정성평가 보고서 작성 기능 추가 등

운영실적 자동연계 기능에 대하여는 31개 프로그램별로 조건과 상황이 다르므로 모든프로그램에 대한 조사와 분석이 필요한데 프로그램별로 크게 다음과 같이 4가지 경우가 있는 것으로 분석되었다.

- (1) 자동연계 불가
 - 사례 : SGMP(증기발생기의 건전성을 확보하기 위한 검사, 건전성평가, 정비, 운영 등의 상태를 평가하고 감시하는 프로그램)
 - 전문가의 전문적분석 및 판단이 필요하여 데이터 연계/평가 자동화 불가
- (2) 자동연계 가능
 - 사례 : MOV/AOV(능동 MOV/AOV의 성능여유도를 관리하는 프로그램)
 - 밸브성능평가 전산시스템에 결과 입력하면 PMP상태맵에 따라 계산 가능
- (3) 자동화를 위한 별도기능 개발 필요
 - 사례 : FAC(배관의 감육현황을 효율적으로 관리하기 위한 프로그램)
 - 해당 전산프로그램에 PMP연계 기능 추가 필요

열수축 튜브의 기능 확인 방법에 대한 고찰

A Study on the Method of Functional Verification of Heat-Shrinkable Tube

허희무

한국수력원자력(주) 중앙연구원

열수축튜브는 열을 가하면 기억했던 기존 형상에 따라 미리 정해진 비율로 수축되어지는 고분자 합성수지를 사용한 튜브이다. 열수축튜브는 대상물에 밀착되어 절연, 보호, 방수, 부식 방지 등을 위해 사용된다. 본 논문에서는 저압케이블에 사용되는 열수축튜브의 기능 확인 방법을 도출을 위해 FMEA(Failure Mode Effect Analysis, 고장모드에 대한 영향분석)를 실시한 결과를 기술하고자 한다.

열수축튜브는 가열된 합성수지를 연신(Elongation, 물질을 물리적으로 늘이는 것)시킨 상태에서 급속 냉각하여 제조한 것이다. 열수축튜브의 재료로 사용되는 합성수지는 가열된 상태에서 급속 냉각을 시키면 고온에서의 불안정한 분자 구조를 유지하며 고화되어 있는 상태가 되고 다시 열을 가하면 불안정한 분자 구조가 안전한 분자 구조로 변화하면서 연신 전 기존 형상으로 수축된다. 이 원리를 이용하여 열수축튜브를 전선, 전기 장치의 커넥터 등의 대상물에 밀착시켜 사용한다.

열수축 튜브의 고장모드는 크게 파손과 절연 파괴로 구분된다. 경화, 부적절한 튜브 재질, 열화, 충격 등의 원인으로 열수축튜브의 파손이 발생하면 열수축튜브가 목표로 하는 부식 방지, 보호, 방수 기능을 수행하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 열수축튜브의 파손을 확인하기 위해 인장 강도와 재질 시험을 수행하여야 한다. 또한 열오염, 열화, 충격 등의 원인으로 열수축튜브의 절연 성능 저하 또는 파괴로 열수축튜브의 절연 성능이 저하 또는 파괴되면 누설전류가 증가하거나 누전이 발생하여 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시킬 수 있다. 이에 절연 성능 저하 및 파괴를 확인하기 위해 내전압 시험을 고려하여야 한다.

향후 해외 및 국내의 열수축 튜브에 대한 고장 유형들을 추가적으로 확보할 수 있다면 다양한 품목들에 대한 보다 정확한 기능 확인을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

교류 리액터의 기능 확인 방법에 대한 연구

A Study on the Method of Functional Verification of Alternating Current Reactor

허희무 · 조은일 · 양창석
한국수력원자력(주) 중앙연구원

교류 리액터는 부하와 직렬로 연결되어 부하의 전류위상을 보정하여 운전전류를 줄이고 고조파 발생을 억제하여 진동, 소음 및 발열을 감소시키기 기능을 수행하는 부품으로 자성체 철심과 권선으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 인버터 입·출력단에 설치되는 교류 리액터에 대한 FMEA(Failure Mode Effect Analysis, 고장모드에 대한 영향분석)를 실시하고 그 결과로써 도출된 기능 확인 방법에 대해 살펴보고자 한다.

교류전원을 권선(코일)에 인가하면 권선은 저항 성분을 띄며 전류의 흐름을 방해한다. 이를 유도리액턴스라고 하며 단위는 옴(Ω)을 사용한다. 이때 권선을 통과하는 전류의 위상은 전압에 비해 90° 늦게 흐른다. 이러한 원리를 이용하여 교류전류의 급격한 변화에 대해서 큰 유도리액턴스에 의해 무효전력을 흡수하기 위해 사용되는 기기를 리액터라 한다. 모터를 인버터로 운전할 경우 진동 및 고조파음(Harmonic Wave Noises)이 발생된다. 이에 대한 대책으로 인버터 입력에 교류 리액터를 설치하여 전류위상을 보정하고 역률을 개선하고, 인버터 출력단에 설치하여 고조파에 의한 진동, 소음 및 발열을 감소시킨다.

교류 리액터의 고장모드는 크게 권선 개방, 절연 파괴(권선 턴간, 권선-외함, 권선-철심)로 구분된다. 이러한 고장모드로부터 발생하는 결과를 가지고 그 고장이 교류 리액터에 주는 영향을 분석할 수 있다. 과전압, 부식, 충격 등의 원인으로 교류 리액터의 권선이 개방되면 부하에 전원이 공급되지 않아 목표로 하는 동작을 수행할 수 없게 되며, 충격, 오염, 부식 및 열화에 의해 권선 턴사이를 보호하는 절연이 파괴되면 권선 턴 사이의 누설전류가 증가하거나 누전이 발생되어 주변기기 구성 요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시킨다. 또한 충격, 오염, 부식 및 열화에 의해 권선과 외함 또는 권선과 철심사이의 절연이 파괴되면 권선과 외함 또는 권선과 철심사이의 누설전류가 증가하거나 누전이 발생되어 주변기기 구성 요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시키게 된다. 이러한 고장을 확인할 수 있는 방법을 도출해 보면, 정격 인덕턴스, 내전압, 절연 저항 확인 등을 생각해 볼 수 있다.

건전성 확인하기 위해 교류 리액터의 기능을 중심으로 고장원인 및 고장모드 영향을 분석하였으며, 고장 유무를 확인할 수 있는 기능 확인 방법들을 도출하였다. 본 논문에서는 일반적인 교류 리액터에 대해서만 다루었으나 리액터별 특성을 고려하여 적용한다면 추후 논문의 보다 심도 있는 검증 수행에 크게 기여할 것으로 사료된다.

기장연구로 핵연료 품질보증 및 품질관리

김호민 · 송화영 · 정용진

한국원자력연구원, 연구로핵연료개발부

KAERI는 차세대연구로용 핵연료로 판형핵연료 제조기술을 개발하였다. 이는 부산 기장군에 설치될 수출용신형연구로(기장연구로)에 사용될 예정이다. 기장연구로 판형핵연료 제조는 전력산업기술기준 원자력 품질보증(KEPIC QAP) 2005년판 (ASME NQA-1 1994년판 및 1995년 추록)에 따라 수행해야 한다. KEPIC QAP에 따른다는 것은 업무를 수행하는 조직 구성에서부터 설계관리, 구매서류 관리, 불일치품목의 관리, 품질보증기록 등 KEPIC QAP에 명시된 18장의 요건을 만족하며 업무를 수행하는 것을 의미한다. 기장연구로 핵연료 품질관리를 위해서 품질보증계획에 따라 3가지 조건을 갖춰 수행해야 한다. 첫째, 검사원 자격을 부여받은 인원 검사 업무를 수행한다. 둘째, 모든 업무 수행은 사전에 승인받은 절차와 문서에 따른다. 셋째, 모든 검사는 검/교정된 계측기와 측정장비를 사용하여 수행한다. 품질검사는 구매문서 검토, 원자재 및 부품 인수검사를 시작으로 공정검사, 집합체 최종검사에 걸쳐 수행된다. 끝으로 핵연료 제조가 완료되면 품질증빙서류 목록에 따라 원자재성적서, 비파괴검사 보고서, 치수검사 보고서를 비롯한 품질을 보증하는 각종 서류가 포함된 품질보증이력서를 작성하여 제품과 함께 고객에게 인도한다. 원본은 품질보증기록 관리 절차에 따라 품질보증기록 서류의 종류에 따른 보존기간 동안 보존한다.

국내 중저준위 방사성폐기물 추적관리 시스템의 현황 및 문제점

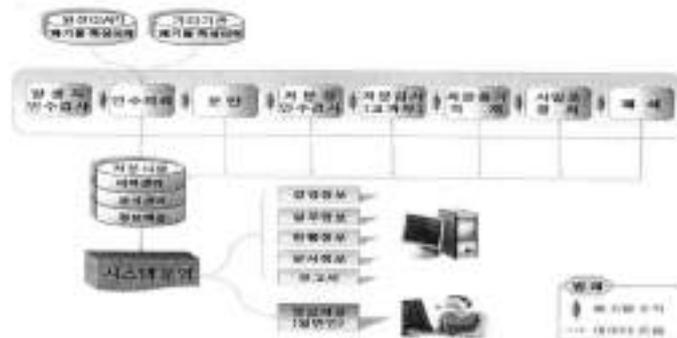
Overview and Issues of Domestic Tracking Managing System for Low- and Intermediate-level Radioactive Waste

박선애* · 장상현 · 이선일*****

충남대학교 컴퓨터공학과*, 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과**,
한국원자력연구원 혁신계통안전연구부***

국내 방사성폐기물처리장은 중저준위 방사성폐기물 처분시설에서 폐기물을 인수하는 시점부터 처분시설의 폐쇄후 제도적 관리기간에 이르기까지 폐기물에 대한 이력정보와 폐기물 처분과 관련된 모든 문서들을 실시간으로 종합 관리할 수 있는 폐기물추적관리시스템(Waste Tracking System, 이하 WTS)이 개발하여 운영하고 있다. 이러한 중·저준위 방사성폐기물 처리장의 운영 경험은 향후 사용후핵연료 관리방안 마련에도 귀중한 노하우가 될 것이라고 주장하고 있다. 하지만, 가장 기본적인 핵종 오류 분석 등의 사고로 처분시설의 무결성이 확보가 되지 않을 경우 국민의 신뢰가 한순간에 무너질 수 밖에 없으며 차후 사용후핵연료 정책 결정에도 큰 영향을 미칠 것이다. 따라서 본 논문에서는 차후 무결성 및 공공성 확보를 위한 방사성폐기물 추적관리 시스템의 개발을 위한 선행연구로서, 우리나라 방사성폐기물 추적관리 시스템의 현황을 살펴보았으며, 또한 기 구축된 WTS의 문제점에 대하여 분석하였다.

WTS는 이력관리모듈, 문서관리모듈, 정보제공모듈로 이루어져 있다(그림 참조). WTS에서는 발생지로부터 인수되는 각 폐기물포장물에 대한 정보는 Barcode, 운반용기와 밀봉선원에 대한 정보는 무선주파수 인식방식(RFID)를 통해서 인식되어 이력관리 모듈을 통하여 DB화되어진다. 또한 인수된 폐기물을 사일로에 정치하고 처분시설 폐쇄후의 제도적 관리기간까지 수행되는 처분장 인수검사, 처분요기 적재, 사일로 정치 등의 과정에서 생산되는 모든 정보들도 DB화 되어 진다. 그리고 정보제공 모듈을 통하여 규제기관, 일반국민, 그리고 국가통합전산망(WACID)에게 처분정보를 종합적으로 제공하게 된다. WTS는 2008년 설계 및 도입 이후 큰 변화 없이 지속 운영되고 있다. 약 12년이 지난 현재 시점에서 당시 도입된 하드웨어는 여러 가지 취약점이 발견되었다. 도청 및 변조 공격에 취약하고 안전성이 담보되지 않은 인터넷과 무선랜 환경을 사용중이었으며, 핵심 폐기물 정보 또한 도청 및 변조, 서비스 거부 공격에 대한 취약점을 가지고 있는 RFID 기술이 이용되고 있었다.



프라이빗 블록체인 기술을 활용한 국내 중저준위 방사성폐기물 추적관리 시스템의 개선 방안에 대한 연구

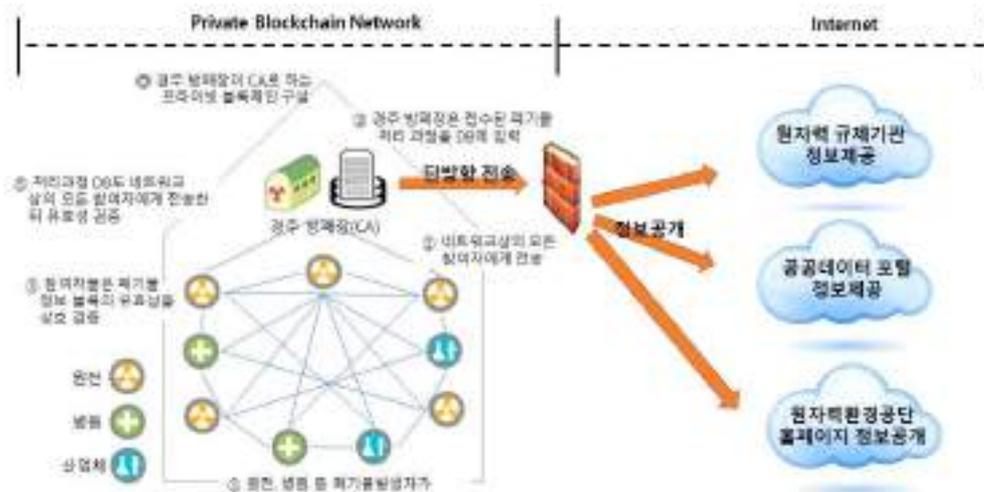
A Study on the Improvement plan of Domestic Tracking Managing System for Low- and Intermediate-level Radioactive Waste Using Private Blockchain

박선애* · 장상현** · 이선일***

충남대학교 컴퓨터공학과*, 숭실대학교 대학원 IT정책경영학과**, 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부***

경주 방사성폐기물처리장은 원전 가동 37년만에 원자력 에너지의 발전부터 폐기물 처분까지 국민 안전 확보에 필요한 핵주기 대책을 모두 완비하였으나 최근 가장 기본적인 핵종 오류 분석 등의 사고로 처분시설의 무결성 확보가 되지 않는 등 국민 신뢰가 무너지게 되었다. 따라서 방사성폐기물 추적관리 시스템의 무결성 및 공공성 확보를 최종 목표로 하는 블록체인 기반의 방사성폐기물 추적관리 시스템을 제안하여 현재 구축된 방사성폐기물 추적관리 시스템의 문제점을 개선하고자 한다.

본 논문에서는 선형 공공분야 블록체인 구축 사례를 참조하여 방사성폐기물 추적관리시스템의 보안 취약점을 보완할 수 있는 블록체인 기반 방사성폐기물 추적관리 시스템 메커니즘을 제안하였다(그림 참고). 데이터는 일반적인 데이터베이스에 방사성폐기물 추적관리 기록을 암호화 하여 저장 및 관리하는 방식에 블록체인을 적용하여 방사성폐기물 추적관리 시스템 데이터의 위·변조를 방지하는 등 무결성을 보장하게 된다. 경주 방폐장을 운영하는 한국원자력환경공단 중심으로 원전, 병원, 산업체 등 방사성폐기물 발생자를 네트워크에 참여시키는 프라이빗 블록체인 네트워크를 형성한다. 이때 방사성폐기물 처분을 수행하고 있는 한국원자력환경공단이 CA가 되고 원전, 병원, 산업체 등 방사성폐기물 발생자를 인증하는 역할을 수행하게 된다. 참여자 등록은 방사성폐기물 처분자, 방사성폐기물 발생자, 시스템 관리자 등 세가지 역할로 구분하여 인증과 접근을 통제하게 된다.



대형원전 일체형 원자로상부구조물 Critical Load 분석 Critical Load Analysis of IHA for Large NPPs

한성흡 . 이도환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

대형원전 IHA설계 최적화가 필요한 항목을 도출하고자 APR1400 IHA와 한국표준형원전(OPR1000, Optimized Power Reactor 1000) IHA를 분석하고 이에 대하여 critical load를 분석하였다. 이를 이용하여 대형원전 IHA 최적화설계를 위한 정보를 제공하고 대형원전 IHA의 최적화설계를 수행에 반영 하였다. 본 논문은 IHA critical load 분석에 대하여 소개하고자 한다.

OPR1000 타입과 APR1400 타입의 IHA 분석에는 IHA의 구조적 형상과, 무게, 재질을 기준으로 비교분석 하였다. APR1400 IHA는 OPR1000 IHA와 비교하여 구조건전성 관점에서 마진 10% 이내 항목이 감소함에 따라 구조적으로 개선되었다고 볼 수 있다. 이에 따라 설계최적화가 필요한 부분은 APR1400에서 마진 10% 이내의 항목으로 설정하였다.. IHA는 많은 기기들과 연계되어 다양한 부품들을 가지고 있기 때문에 IHA의 구조건전성 평가 마진 10% 이내의 항목들을 분석하기 위해서 그 항목들과 관련된 부품들도 같이 확인하여야 critical load 분석에 의미가 있다. Critical Load 분석을 위한 항목들을 크게 세 가지 분류로 나누어 보면 lower cooling shroud assembly, seismic support system, Lifting System 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 각각의 집합체에 많은 영향을 주는 하중을 분석해보면, 설계최적화가 필요한 설계마진 10% 항목에 크게 작용하는 하중이 집합체에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

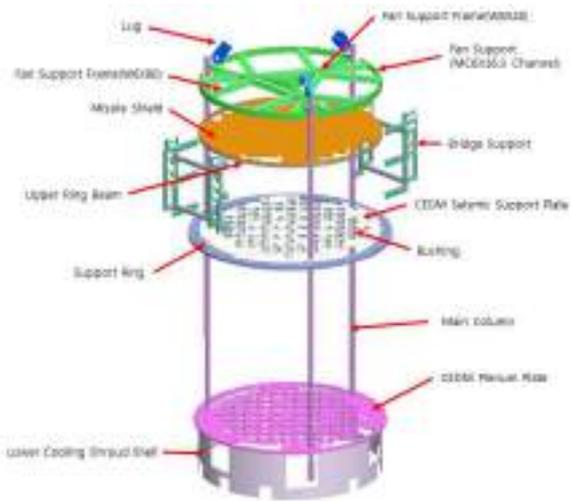


그림1 APR1400 IHA의 구조건전성평가 마진 10% 이내 항목

lower cooling shroud assembly와 관련된 부품은 B급 운전조건에서 마진이 적게 나왔고, seismic support system과 관련된 부품은 D급 운전조건, lifting system과 관련된 부품은 인양조건에서 마진이 적게 나왔다. 따라서, 대형원전 IHA의 구조건전성 평가가 불만족 할 가능성이 있으며 설계최적화가 필요하다. seismic support system의 경우는 안전정지지진(SSE; safe shutdown earthquake)하중이 증가된 부분도 있고 감소된 부분도 있기 때문에 정확한 판단을 내리기는 어렵지만 일부 부품은 증가된 하중이 대부분인 경우도 있기 때문에 SSE 하중을 최적화 할 필요가 있다고 판단된다.

대형원전 IHA 설계최적화가 완료되면 IHA의 운전 편리성 증진 및 내진성능 향상은 물론 안전성능 향상이 가능할 것으로 기대하고 있다.

대형원전 일체형 원자로상부구조물 제작성 검토 Manufacturing Review of IHA for Large NPPs

한성흠 · 이도환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

대형원전 일체형 원자로상부구조물(integrated reactor head assembly; IHA)은 증량의 증가로 IHA 지진하중이 증가하였고, CEDM(core element drive mechanism) 용접부 검사의 편리를 위한 IHA 설계최적화 연구를 수행하였다. IHA 제작성 검토 단계에서는 설계최적화된 IHA 주요 자재의 상세사양 확인 및 요구되는 재료요건을 확인하였고, 주요품목들은 자재의 절단, 벤딩, 가공 및 조립 공정에 대한 IHA 집합체별 제작성, 검사 적합성 및 조립성을 검토하였다. 본 논문은 IHA 제작성 검토 내용에 대하여 소개하고자 한다.

IHA에는 압연 강판, 형강, 봉강 및 단조품의 다양한 원소재가 사용되며 이러한 소재들은 절단 공정을 통해 IHA 품목에 알맞은 크기로 절단되도록 절단 계획이 수립되어야 한다. 절단된 소재들은 각 부품의 형상에 맞도록 가공 공정을 거치게 된다. 각 부품은 공정 시에 치수를 불만족하지 않도록 용접 변형 관리 및 누적 공차 관리가 필요하다. 최종 가공된 단품들은 용접 공정에 따라 조립되어 집합체로 완성된다. 이를 위하여 용접 공정 수립 및 적합한 용접자재 선정, 임시 러그 사용과 공정별 조작 횟수 등을 줄여서 공정을 줄여야 한다.

○ 냉각슈라우드집합체

냉각슈라우드집합체를 구성하는 각 단품들은 절단 및 형상 가공시 별다른 어려움은 없을 것으로 보이며 각 용접부의 접근성이 확보되어 용접 공정 및 용접부 검사에 어려움은 없다.

○ 인양집합체

인양집합체를 구성하는 각 단품들은 절단 및 형상 가공시 별다른 어려움은 없을 것으로 보이며 각 용접부의 접근성이 확보되어 용접 공정 및 용접부 검사에 어려움은 없다.

○ 내진지지집합체

내진지지집합체를 구성하는 각 단품들은 절단 및 형상 가공시 별다른 어려움은 없을 것으로 보이며 각 용접부의 접근성이 확보되어 용접 공정 및 용접부 검사에 어려움은 없다.

○ 케이블지지집합체

케이블지지집합체를 구성하는 각 단품들은 절단 및 형상 가공시 별다른 어려움은 없을 것으로 보이며 각 용접부의 접근성이 확보되어 용접 공정 및 용접부 검사에 어려움은 없다.

한국수력원자력(주)에서는 설계최적화된 IHA를 수출형원전에의 적용을 추진하고 있다. IHA의 운전 편리성 증진 및 내진성능 향상은 물론 안전성능 향상이 가능할 것으로 기대하고 있다.

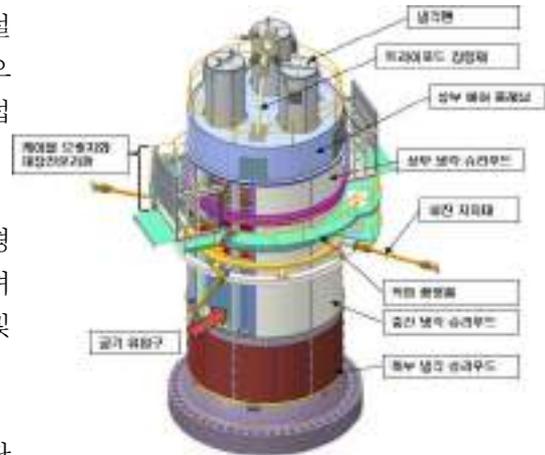


그림1. 대형원전 IHA 기본설계

수전해 방식에 따른 원자력발전소 수소생산의 경제성 및 민감도 분석 Economic and Sensitivity Analysis of Hydrogen Production in Nuclear Power Plants by Water Electrolysis

문종철* · 이종보* · 박찬오**

*한국수력원자력(주) 중앙연구원, **서울대학교 원자력정책센터

수소는 전원의 버퍼, 산업용 에너지, 건물 난방, 이송 등 다양한 분야에서 활용가능하다. 수소위원회(Hydrogen Council)는 수소가 미래 중요 청정에너지로써 지구 온난화 방지를 위한 탈탄소화(Decarbonizing) 추진 및 에너지전환 시 주요 역할을 할 것으로 전망하였다. 국내 정부 또한 2019년 1월 “수소경제 활성화 로드맵”을 발표하였으며, 2040년까지 연간 526만 톤의 수소를 3,000원/kg 의 가격에 공급하는 것을 목표로 하고 있다.

수소는 화석연료(석탄, 천연가스 등), 재생에너지(태양광, 풍력 등), 원자력 등의 각기 다른 에너지원으로부터 다양한 방식을 통해 생산될 수 있다. 원자력을 이용한 수소생산은 대량의 CO₂ free 수소생산이 가능하며 재생에너지 이용 수소생산의 간헐성 문제를 해결 할 수 있다는 장점이 있는 반면 아직까지 전 세계적으로 원자력을 이용하여 수소를 생산한 실증사례는 없다. 하지만 원자력을 이용한 수소생산을 현실적인 수소생산 대안으로 적용하고자하는 연구가 꾸준히 수행되어왔다. 원자력을 이용한 수소생산에는 수전해(Water Electrolysis) 기술을 적용 할 수 있다. 수전해는 작동 온도 및 전해질의 종류에 따라 저온 수전해(알칼라인, 고분자전해질 이용)와 고온 증기전해(고체산화물 이용) 방식으로 구분된다. 알칼라인 방식은 장수명, 고용량, 저비용의 특성을 지니며 고분자전해질 방식은 콤팩트하고 빠른 부하 대응이 가능하여 넓은 운전 범위를 갖는다. 이 두 방식은 저온에서 전기 에너지만을 사용하여 수소를 생산한다. 저온 수전해의 효율 업데이트 버전인 고온 증기전해는 열과 전기를 모두 사용하여 물(증기)을 산소와 수소로 분해한다.

본 연구는 향후 원자력발전소 수소생산의 기초자료로 활용하고자 국내 전력거래소에 공시된 원자력 정산단가와 국외 보고서 자료 등을 기반으로 하여 각 수전해 기술 특성에 따른 원자력 수소 생산단가를 분석하였다. 또한 시설 이용률, 효율, 투자비, 전력요금 등에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과 고온 증기전해 원자력 수소생산 방식이 저온 수전해 방식보다 경제성 있는 것으로 나타났다. 각 방식에 있어 수소 생산 단가는 낮은 시설 이용률 영역에서 높은 시설 이용률 대비 민감도가 큰 것으로 나타났다. 시설비 단가 인하효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 전력요금 단가와 환율은 수시로 변동하며, 향후 기술발전에 따른 수전해 효율 개선과 건설비 저감이 예상된다. 따라서 본 연구를 토대로 수소 생산단가에 영향을 미치는 입력변수 변화 값을 반영하여 원자력 수소 생산단가의 지속적인 업데이트를 수행해 나갈 예정이다.

경수로 사용후핵연료 운반용기 차폐 민감도 평가 Shielding Evaluations of PWR Spent Fuel Transportation Casks

차균호 · 정진호

한국수력원자력 중앙연구원

MAVRIC 코드를 이용한 차폐해석을 위하여 경수로 사용후핵연료 운반용기 (KN-12, KN-18) 를 모델링하였으며[1], SCALE6.2부터 소개되는 SAMPLER 코드를 이용하여 KN-12 및 KN-18 운반용기의 높이에 따른 선량 민감도평가를 수행하였다.[2]

MAVRIC 코드는 MONACO with Automated Variance Reduction using Importance Calculations의 약자로 고정선원에 대하여 다군 및 연속에너지 핵자료를 사용하며 주된 모듈은 MONACO 차폐해석 코드를 이용하여 몬테칼로 방법으로 방사선 수송계산을 수행한다. KN-12 운반용기는 WEC형 PWR 사용후핵연료 집합체 12다발을 수용하며, KN-18 운반용기는 CE형 PWR 사용후핵연료 집합체 18다발을 수용한다. 차폐해석을 위한 모델에 사용된 반응단면적은 최신 라이브러리인 ENDF/B-VII인 v7-200n47g 으로서, 200군 중성자에너지군과 47군 감마에너지군을 이용하였다.

SAMPLER 코드는 입력값을 통계적으로 표본 추출하고 결과를 분석함으로써 일반적인 불확실도 분석을 수행한다. 표본 추출되는 입력인자 중에는 다군 핵자료, 연소자료 및 농축도와 온도 같은 모델 입력인자 등이 있다. SAMPLER는 Monte Carlo 표본추출 기법을 사용하여 입력되는 값을 무작위로 표본 추출하고 섭동(perturbation) 시킴으로서 계산을 수행한다.

MAVRIC 차폐 계산을 SAMPLER를 이용하여 두 운반용기에 대하여 높이에 따른 선량(dose)을 region tally 방법을 이용하여 계산하였다. 차폐계산에 일반적으로 사용되고 있는 point detector 방법은 거리가 떨어진 산란물질에 대하여 적용되며, 용기표면 선량평가지 convergence test를 통과하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이를 극복하기 위하여 용기표면에 작은 영역을 두어 tally하는 이른바, region tally 기법을 사용하여 선량을 평가하였으며 대부분의 convergence test를 통과하여 결과의 신뢰성을 확보하였다.

MAVRIC 및 SAMPLER를 이용하면 차폐계산시 다양한 민감도 평가 및 불확실도 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

[1] D.E. Peplow and C. Celik, "MAVRIC: MONACO with Automated Variance Reduction using Importance Calculations in SCALE6.2," 2016

[2] M. L. Williams, et al., "SAMPLER: A Module for Statistical Uncertainty Analysis with SCALE Sequences," 2016

중수로 사용후핵연료 운반용기(Hi-Star63) 운반사고시 차폐 평가 Shielding Evaluations for Transportation Accidents of Hi-Star63 Cask

차균호 · 정진호

한국수력원자력 중앙연구원

중수로형 사용후핵연료 Candu37을 이송하기 위한 Hi-Star63 운반용기는 중수로 사용후핵연료 다발을 60개씩 2단으로 저장한다. Hi-Star63 운반용기에 대한 선원항 평가는 ORIGEN-ARP 코드를 이용하였으며, 차폐평가는 MAVRIC 코드를 사용하였다.[1] 이 두 코드들은 모두 SCALE의 한 모듈로 SCALE6.1을 기준으로 평가하였다. 정상조건은 물로 채워진 경우와 He 기체로 채워진 경우에 대해 평가하였고 사고조건은 핵연료 손실과 핵연료집합체 이동을 고려하였다.

그림은 MAVRIC으로 모델링된 Hi-Star63 용기의 수평 및 수직 단면을 보여주고 있다. 총 120개 핵연료다발이 상하부로 균질하게 분포하고 있다고 가정하여 원통형으로 모델링을 단순화 하였다. 핵연료 바스킷은 스테인리스 스틸로 구성되고 외부 용기 부분은 카본스틸로 구성되어 있다. 핵연료 부분은 우라늄 소결체와 피복재를 포함하고 밀도를 3.466 g/cc로 조정하여 균질화하였다.

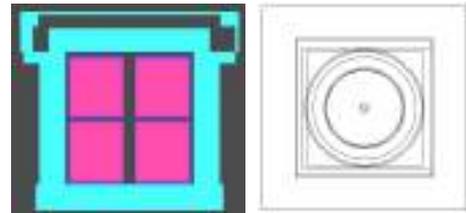


그림. Hi-Star63 MAVRIC 모델링

표면선량률 평가를 위해서 MAVRIC 코드로 입력된 모델을 활용하여 정상조건에서 용기내부에 물로 채워진 경우와 He 기체로 채워진 경우에 대해 평가하였다. 중성자 및 감마선 선량률 환산인자는 널리 이용되는 ICRU-57를 이용하였고 MAVRIC 코드에서는 최신 라이브러리인 ENDF/B-VII.0인 ‘v7-200n47g’를 이용하였다.

MAVRIC 코드에서 계산의 효율을 향상하기 위해 CADIS 옵션을 사용하였는데, 이 방법은 3차원 SN 수송계산인 Denovo를 통해 Forward 및 Adjoint 해를 순차적으로 구한 뒤 그 결과를 이용하여 Importance 값으로 변환하여 주어진 mesh에 대해 자동적으로 가중치를 결정하여 Monte Carlo 코드인 Monaco 계산을 효율적으로 하는 방법이다.

본 논문의 Hi-Star63 운반용기 조사선량률 평가에서 용기 내부는 진공상태로 가정하였고 운반사고시 차폐평가는 균질화된 사용후핵연료의 영역에 손상이 생긴 경우로 사고조건을 고려하였다. 이 경우 선원항 감소에 따른 외부 조사선량이 감소하게 되며 균질화된 핵연료 영역 밀도는 손실량에 따라 비례적으로 감소한다고 가정하였다. 총 5%, 10%, 20% 핵연료봉이 손실된 경우를 가정하여 평가하였다.

[1] D.E. Peplow and C. Celik, “MAVRIC: MONACO with Automated Variance Reduction using Importance Calculations in SCALE6.2,” 2016

확률론적 방사선수송 전산코드 검증 방법론

Probabilistic Radiological Transport Code Verification Methodology

윤창연

한수원(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹

원자력 발전 등 방사성 물질을 사용하는 작업의 경우 종사자는 필연적으로 방사선 피폭에 노출된다. 방사선은 무색무취하며, 눈에 보이지 않으므로 방사선을 계측하는 장비를 소지하지 않으면 방사선의 위험을 바로 파악하기 어렵다. 또한 방사선은 모든 방향으로 퍼져나가며, 매질을 지나갈 때 에너지를 잃거나, 산란되거나, 투과하는 등 다양한 상호작용을 한다. 이러한 방사선의 특성을 반영하여 검출 및 영상화를 수행해야 방사선 작업 종사자의 정확한 피폭선량을 계산할 수 있다.

피폭선량 최소화 작업계획을 수립하고, 방사선 피폭이 우려되는 작업 시 종사자의 안전을 확보하기 위하여 실제 작업을 수행하기 전 방사선수송 전산코드로 피폭선량 예측 시뮬레이션을 진행할 수 있다. 널리 쓰이는 대표적인 방사선수송 전산코드는 MicroShield, Monte Carlo N-Particle(MCNP) 등이 있으며 결과를 계산하는 방법에 따라 결정론적 전산코드와 확률론적 전산코드로 나뉜다. MicroShield는 결정론적 전산코드로서, 계산속도가 빠르다는 장점이 있지만 산란선에 의한 영향을 반영하지 못하기 때문에 복잡한 구조물이 존재하는 경우 그 결과 값이 매우 부정확하다는 단점이 있다. 하지만 MCNP는 Monte Carlo 방법인 무작위 추출 난수를 이용하여 원하는 함수의 값을 계산하는 확률론적 전산코드이기 때문에 계산속도는 상대적으로 느리지만, 난수를 사용하여 방사선의 모든 입자에 대한 개별 추적 시뮬레이션이 가능하고, 방사선과 물질과의 모든 상호작용을 반영할 수 있기 때문에 구조물의 형태와 상관없이 그 결과가 매우 정확하다. 따라서 종사자의 안전을 위해 확률론적 방사선수송 전산코드인 MCNP로 시뮬레이션을 진행하는 것이 바람직하다.

이상적인 상황을 가정한 이론과 다양한 변수가 존재하는 시뮬레이션은 결과값의 차이가 존재하며, 그 차이가 작을수록 높은 정확도의 시뮬레이션이다. 따라서 MCNP의 정확성을 평가하기 위하여 동일한 조건에서 계산한 이론 결과와 MCNP 전산코드 결과를 비교하였다.

시뮬레이션은 Cs-137 면 선원을 사용하여 진행하였으며, 흡수체는 공기와 납 두 종류를 사용하였다. 방사선이 매질을 지날 때 각 매질 고유의 감쇠계수를 기반으로 감쇠되므로 계산에 공기와 납의 감쇠계수를 반영하였다. 이러한 과정을 통해 각각의 흡수선량을 계산하였으며, 그 결과는 아래와 같다. 공기가 흡수체일 경우에는 이론과 시뮬레이션이 거의 동일한 결과를 나타내었으며, 납이 흡수체일 경우에는 감쇠에 따른 다양한 오차가 발생할 수 있음에도 불구하고 약 15%의 매우 낮은 오차를 보였다.

흡수체	이론(mGv/h)	시뮬레이션(mGv/h)	오차(%)
공기	5.74E-02	5.67E-02	1.36
납	1.20E-01	1.04E-01	15.38

고장률 분포에 따른 커패시터 활성화 에너지 산출 및 검증수명 평가방법 고찰 A Study on Activation Energy Calculation and Qualification life Evaluation of Capacitor Based on Failure Rate Distribution

양창석 · 허희무 · 홍영희

한수원 중앙연구원 검증기술그룹

일반적으로 전자 부품 등의 고장률은 와이블-지수-대수정규 분포 등을 따른다는 가정 하에 신뢰성 시험을 설계하고 수행한다. 전기-계측기기에 사용하는 커패시터는 와이블 분포에서 수락검사를 통하여 초기제품 불량률을 제거하고 주기적 점검을 한다. 커패시터 수명설정은 노후제품 불량률을 제거하여 지수분포를 따른다는 전제하에 MIL-STD-217(전자기기에 대한 신뢰성 예측)을 적용하여 신뢰성 평가할 수 있다. 그리고 신뢰성 시험의 샘플링 수량과 시험시간은 MIL-STD-690(고장률 샘플링 계획 및 절차)을 이용하고, 신뢰수준(Certainty Level)은 95%를 적용하여 고장수량별 시험시간을 계산할 수 있다.

현재 산업계는 Minitab 등의 통계분석 소프트웨어를 사용하여 전자 부품이 스트레스(온도, 전압 등)-수명에서 부품의 고장률을 먼저 정하지 않고, 3점(Point)이상의 온도에서 가속수명 시험(ALT)을 통하여 부품의 수명종료 시간을 도출하고, 수명분포와 스트레스-수명 연관성을 확인한다. 그리고 통계분석 소프트웨어로 온도별 평균고장시간(MTTF)을 회귀분석하여 선형성이 맞는지 확인하고, 기울기(Slope) 및 절편(Intercept)을 구한 후 활성화 에너지를 산출한다. 즉 가속수명시험(ALT)를 통하여 부품의 수명분포와 활성화 에너지를 정확히 구한다면, 일반적인 내환경검증(EQ) 데이터베이스에서 제공하는 활성화에너지 적용과 비교 시 정확한 커패시터의 예상수명을 확인할 수 있다. 가속수명시험을 통한 커패시터 활성화 에너지를 산출하고, 현장의 커패시터 운전온도를 아레니우스 방정식에 대입하면 예상수명을 산출 후 시험(Test) 방법으로 검증수명을 평가하고자 할 경우 샘플링 수량을 고려한 시험시간을 결정하여야 한다. 즉 가속수명시험(ALT)에서 확인한 수명분포를 바탕으로 샘플링 수량과 시험시간을 결정할 수 있다. 커패시터의 수명분포가 지수분포를 따르는 경우 샘플링 방법은 MIL-STD-690 적용할 수 있고, 와이블 분포를 따르는 경우는 DOD TR-4(와이블 분포에 따른 수명 및 신뢰성 시험의 샘플링 절차, Department of Defence Technical Report)에 따라 시험한다.

규제지침과 관련 기술기준을 적용하지 않는 부품의 검증수명 평가를 위한 내환경검증 시험은 수명분포에 따라 신뢰도 수준, 샘플링 수량을 고려한 시험시간을 결정하여 시험할 수 있다. 따라서 향후 통계분석 소프트웨어와 MIL 규격의 계산결과를 비교 분석하여 원자력 기기검증 엔지니어링에 적용하기 위한 추가연구가 필요하며, 이는 발전소 신뢰성과 안전성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

낙뢰에 의한 서지로부터 계측제어기기 보호에 대한 고찰

A Study on the Protection of I&C Equipments from Surge caused by Lightning

지영화

한국수력원자력(주)

최근의 전기, 통신 및 계측제어기기는 대부분 집적회로로 된 반도체부품을 이용하여 기기의 소형, 경량, 다기능화를 추구하고 있다. 그러나 이들 기기는 낙뢰 등의 서지 전압에 매우 민감하여 기기의 오동작이나 혹은 소손을 초래하기도 한다. 이러한 피해는 직접적인 손실 이외에 설비의 고장으로 인해 발생하는 신호/통신 및 제어불능의 장애는 더 큰 간접적인 손실을 유발할 수 있다. 지금까지는 낙뢰에 의한 서지로부터 계측제어기기 보호 조치로는 일반적으로 사후에 대한 조치가 주로 이루어졌고 보호기의 설치나 접지저항의 저감 방법이 기본적으로 적용되고 있으나, 보호기 설치로 인해 계측제어기기의 정상적인 동작하지 않거나 요구되는 성능을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 많다. 본 논문에서는 낙뢰에 의한 서지로부터 계측제어기기 보호하기 위해 서지유형 및 발생 메커니즘, 뇌서지 보호, 서지보호기 적용 등 서지유형별 보호에 대해 고찰해 보고자 한다.

서지유형은 대지전위 상승, 유도결합(Inductive Coupling), 용량결합(Capacitive Coupling)으로 크게 3가지로 형태로 분류할 수 있다. 대지전위 상승은 일반적으로 건물 피뢰침 뇌격으로 발생된 전류가 피뢰도선 및 접지극을 통해 대지로 방전될 때, 피뢰도선 및 접지극의 인덕턴스와 접지저항으로 인해 발생한다. 유도결합에 의한 서지는 낙뢰에 의해 발생된 전류가 피뢰도선 또는 도전체를 통해 흐를 때, 피뢰도선 또는 도전체 주위에 형성되는 자기장 영역에 신호선 등이 교차되어 발생한다. 용량결합에 의한 서지는 낙뢰에 의해 발생된 전류가 피뢰도선 또는 도전체를 통해 흐를 때, 피뢰도선 주변 절연금속체(신호선 및 계측기 등)와 정전결합에 의해 발생한다. 이러한 서지는 피뢰침이 설치된 건물은 피뢰도선으로, 피뢰침이 설치되지 않은 건물은 도전체(철재빔 또는 기기접지)로 유도되어 유입되며, 후자일 경우 절연과피 등 손상정도가 훨씬 크게 나타난다. 뇌 서지를 보호하기 위해서는 서지 유형별 보호전략을 다르게 수립하는 것이 중요하며, 적절한 대안으로 반응속도가 빠르고 서지 제어능력이 우수한 서지보호기 설치가 권장되고 있다.

뇌서지가 교류전원이나 신호/통신선을 통하여 침입시에는 고압기기에 비해 상대적으로 절연내력이 매우 낮은 계측제어기기와 같은 전자기기는 제어불능 또는 파손 등 큰 손실을 초래할 수 있다. 이를 예방하기 위해서는 서지유형별 뇌서지에 의한 영향을 분석하고 유형별 적절한 조치방안을 수립하는 것이 중요하며, 계측제어기기로 유입되는 뇌서지를 억제하고 감쇠시킴으로써 기기를 보호하고 설비운영의 신뢰성을 높일 수 있다.

소형 모듈형 원자로압력용기의 가압열충격 파손확률 민감도 해석
Sensitivity Analysis of Failure Probability of Small Modular Reactor
Vessel under Pressurized Thermal Shock

김만원

한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소

최근 소형 모듈형 원자로에 대한 연구가 국내외에서 활발히 추진되고 있다. 국내에서는 100MWe급 중소형원전인 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)가 2012년 7월에 표준설계인가를 취득하였고, 미국 NuScale Power사는 2020년 8월에 60MWe 급 소형 원자로 모듈을 12 개까지 장착할 수 있는 원전설계에 대한 미국 규제기관의 설계인가 6단계를 통과함으로써 전 세계적으로 소형 모듈형 원자로에 대한 관심이 증폭되고 있다. 소형 모듈형 원자로는 원자로용기의 크기가 작고 원자로용기 내에 증기발생기, 가압기, 내부구조물 등이 포함되어 있으며 장수명으로 설계되는 것이 특징이다. 따라서 소형 모듈형 원전의 운전환경 특성을 반영한 가압열충격 민감도 분석을 통해 원자로용기 파손 확률에 미치는 변수들의 영향을 살펴볼 필요가 있다.

본 논문에서는 소형 모듈형 원자로압력용기의 파손확률에 미치는 확률 변수로서 원자로용기 형상의 영향(반경과 두께 비), 장수명 운전에 따른 재료가 받는 영향(중성자조사량, 재료 내 구리 함량), 균열의 방향(원주방향과 축방향 균열)의 영향에 대하여 파손확률 민감도 평가를 수행하였다. 파손확률 계산을 위해 확률론적 파괴역학 건전성평가 프로그램인 VISA-II를 사용하였다. 기준 Case로 SMART 원자로압력용기의 설계를 기준으로 하여 구리 함량을 0.03, 0.1, 1.0 Wt%로 변화시켰으며, 중성자 조사량을 $1.0E16$, $1.0E18$, $1.0E20$ n/cm²로 변화시켰다. 또한 원자로용기의 반경과 두께 비를 8.2, 10, 12로 변화 시켰다. 각각의 경우에 대하여 균열의 방향을 축방향과 원주방향으로 가정하여 평가하였다. 가압열충격 조건(시간에 따른 온도와 압력 변화)은 SMART의 Large MSLB(Main Steam Line Break)와 IAEA 가압열충격 평가용 시간천이 온도-압력곡선을 입력으로 사용하여 비교하였다. 파손확률 계산을 위해 몬테카를로 시뮬레이션으로 변수를 발생시켜 각 조건 별 1×10^7 회를 수행하였다.

기준 Case에서는 원자로 파손확률은 0으로 나타났으며, 구리함량의 증가, 원자로 반경 증가, 중성자 조사량이 증가할수록 파손 확률이 높게 나타났고, 원주방향 균열 보다는 축방향 균열인 경우 더 높은 파손확률이 나타났다. 또한 IAEA 가압열충격곡선을 사용한 경우 더 높은 파손확률이 나타났다.

Production of biochar using waste biomass and its potential applications

최용근

건국대학교 생물공학과

Biochar (BC) is a solid carbonaceous material produced during the thermochemical decomposition (e.g., pyrolysis) from various waste biomass (e.g., leaf, wood, grass, sludge, manure, macroalgae, microalgae, etc.). BCs produced from wastes have many advantages such as cost-effectiveness, high potential, and recyclable. Hence, these BCs can be easily applied for various environmental application fields, including adsorbent, catalyst, soil amendment, supercapacitor, fuel cell, and so on. Herein, we focus on the treatment of wastewater (i.e., microcystin-LR) as adsorbent and the bio-diesel production from cooking oil as catalyst. The grass- and coffee residues-derived biochar were prepared at different pyrolysis temperature (350, 550, and 750°C) and these BCs were evaluated its physicochemical characteristics. Among them, the grass-derived biochar as adsorbent revealed maximum adsorption capacity of microcystin-LR (i.e., microalgal toxin in aqueous phase) with hydrophobic π - π interaction, and electrostatic attraction. The grass-derived biochar was fitted to Freundlich as isotherm model and Elovich as kinetic model. Furthermore, the coffee residues-derived biochar was used for the transesterification of cooking oil. The coffee residues-derived biochar appeared the maximum fatty acids methyl esters (FAMES) conversion with metal complexation. Also, the biodiesel made from cooking oil was mainly consisted of C16 and C18. Therefore, BCs produced from various waste sources can be applied as a potential material for industry.

바이오차를 이용한 수계 내 중금속 (Cu) 제거

Removal of heavy metal (Cu) in aqueous solution by biochar

김지은 · 최용근* · 오경빈* · 강광남

에이티이(주), *건국대학교 생물공학과

In this study, the removal of heavy metal (i.e., Cu(II)) was investigated using various biochars produced from plant based-, wood based, and microorganism based-biomass such as Kentucky bluegrass (KB), maple leaf (M), microalgae(*Spilrulina* sp.)(SP), rice husk (RH), coffee residues (CF), grape pomace (GP). In addition, these biomasses were pyrolyzed at the different pyrolysis temperature (e.g., 350, 550, 750°C). The physico-chemical properties of biochars were evaluated and associated with Cu adsorption. Among those biochars, the results showed that the Cu adsorption capacity of maple leaf-derived biochar was the higher than it of others. In particular, Cu adsorption capacity of M-BC produced at 750°C was 20.1 mg Cu/g BC owing to possible mechanisms such as functional groups. M-BCs possessed the higher Cu adsorption capacity could be applied as low-cost environmental adsorbents for Cu removal due to those were produced from the waste fallen maple leaves.

건설산업에서의 3D프린팅을 이용한 그린시멘트의 역할 및 연구 동향
The Research Trend of Green Cement Using 3D Printing in the
Construction Industry

Jung Euntae¹ · Park Joochan² · Ahn Jiwhan^{3*}

^{1,2,3*}Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract

Currently, 3D printing technology is an innovative manufacturing process that can be used to make solid objects in three dimensions with digital film. This 3D printing technology actively spread to production parts (57%), bridge production (39%), tools, fixtures, jigs (37%), repair and maintenance (38%). The application of 3D printing is expanding into the defense, aerospace, medical, and automobile industries. Raw materials play a key role in 3D printing. Various added materials such as plastic, polymer, resin, steel and metal are used in 3D printing to create various designs. The main advantage of green cement for 3D printing is that it increases mechanical properties and durability in line with high-quality materials used in construction. The advantages of 3D printing are limited waste generation, eco-friendly, cost-effective, 20 times faster and less time consuming. This research reveals the role of green cement as an additive material for 3D printing.

The role of green cement for 3D printing in future construction industry and the characteristics of 3D printing technology were reviewed.

In particular, It is expected to increase the role of green cement in reducing CO2 emissions is expected to increase in the future, as described above. In addition, it is also expected that construction industry will apply construction methods that are differentiated from existing construction methods by developing 3D printing technologies. I hope this research, which analyzes green cement and 3D printing technology, will be basis for the changing future construction industry.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP-18-09-KIGAM).

한국·베트남 석회석 특징 및 활용에 관한 고찰

A Study on the Characteristics and Utilization of Limestone in Korea and Vietnam

Jung Euntae¹ · Kwak Yujung² · Ahn Jiwhan^{3*}

^{1,2,3*}Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract

Precipitated calcium carbonate (PCC) can be used in energy efficient paper production. Limestone is a raw material that synthesizes PCC. Since PCC production yield depends on the physical chemistry characteristics of limestone, a basic investigation of raw stone is needed. This study briefly examines the characteristics of limestone, limestone distribution and the origin of limestone deposits in Korea and Vietnam. Most of our country's limestone was formed in the Paleozoic Era. On the other hand, Vietnam's Remeston has a wide range of ages, from Freambria to Triass. Limestone is the most produced mineral in Korea, but Vietnam has five times more limestone reserves than Korea.

For efficient PCC synthesis, crystallinity and quality of limestone should be investigated, and its efficiency can be quantified through sign language activity. The geological age of limestone is estimated to be related to the crystallinity of limestone in previous studies. Therefore, further research on this will be needed. This study examined the properties of limestone deposits in Korea and Vietnam, which could be used to select PCC materials. As a result, Vietnam is expected to be a good source of limestone producing PCC. The study will be the cornerstone of the Vietnam–Korea joint study.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP-18-09-KIGAM).

포스트 코로나 시대 비대면 산업으로써 글로벌연구 동향
Global Trend as Non-Contact Industry in Post-Corona

Jung Euntae¹ · Chaeyeon Lim² · Ahn Jiwhan^{3*}

^{1,2,3*}Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract

The cement industry has been regarded as an energy-consuming industry since ancient times, with a large amount of CO₂ being emitted as a construction material used. As the production and demand of cement products increases in the global cement industry, including Korea, various strategies are needed to minimize the warming phenomenon and economic damage caused by climate change. Currently, cement industry is making efforts to build a resource-circulating industry and society by utilizing cyclical resources as alternative materials and fuels. Although the types and utilization of the circulating resources used by domestic cement companies are different for each company, the analysis shows that the utilization of the circulating resources is increasing year by year. In the case of overseas cement industry, advanced countries such as Japan, the U.S., and Europe made practical use of the technology for recycling of circulating resources using cement furnaces from 20 to 30 years ago, and enhanced the role of the cement industry to establish a resource-circulating society. Accordingly, the role of the cement and concrete industries will become more important in line with social demands for efficient use of cyclical resources and reduction of environmental wastes, making it important to develop technology as an eco-friendly material.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP-18-09-KIGAM).

탄소광물화 기술을 이용한 석회의 항균 및 항바이러스 효능의 질병관리 방역사업으로의 역할 및 해외 동향 연구

정은태¹ · 김유라² · 안지환^{3*}

^{1,2,3*}한국지질자원연구원 광물자원연구본부 탄소광물화사업단

Abstract

기후변화에 적응 및 대응하기 위해 온실가스를 저감시키기 위한 연구가 장구되고 있다. 탄소 광물화 기술은 단순히 이산화탄소를 포집하여 저감시킬뿐만 아니라 이를 다양한 분야로 응용할 수 있다. 특히 탄소광물화 기술이 적용된 석회를 토대로 박테리아 및 바이러스에 대한 항균과 항바이러스 효능을 파악할 수 있다. 선행 연구에서 생석회는 여러 가지 반응을 통해 소석회(Ca(OH)₂), 탄산염(CaCO₃)등 알칼리성 물질들로 전환이 되어 소독효과가 나타남을 규명하였다. 이미 조류인플루엔자나 구제역이 발병할 경우 방역사업에 석회를 많이 사용하고 있으며 세계보건기구(WHO)에서는 에볼라바이러스 발병 시 위생시설 관리에 대한 석회사용지침을 내리고 있다. 염소기반 소독제의 경우 고농도의 고형물 함량에서 소독 효과가 현저하게 감소하는 것으로 나타내기 때문에 에볼라바이러스 감염의 위험성이 있는 배설물 처리에는 석회의 사용이 더 효과적인 것으로 보인다. 석회는 가축이나 가금류에게서 발병하는 감염병의 원인균뿐만 아니라 인간에게 위험성이 있는 대장균, 살모넬라, 노로 바이러스 등에 대한 항균, 항바이러스 효능도 가지고 있다. 그러나 일부 내성이 있는 박테리아도 있기 때문에 다양한 조건에서의 연구가 필요하며, 신종 코로나바이러스에도 석회의 항바이러스 효능이 있는지에 대한 검증의 요구된다. 따라서 본 연구는 석회의 항균 및 항바이러스의 규명에 앞서 국내외 연구 동향을 분석했으며, 향후 질병관리 방역사업 연구에 활용될 수 있는 초석이 되기를 희망한다.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. CAP-18-09-KIGAM).

Emerging Technologies of Clean Coal for Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)

Thenepalli Thriveni¹, Ji Whan Ahn^{2*}

¹ Department of Chemistry, Sri Venkateswara University College of Science, Tirupati, 517502, A.P., India.

²Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract: Coal is an abundant major non renewable energy resource in the world. Currently, worldwide 890 billion tonnes of coal resources are estimated. In 21st century, clean coal plays a critical role in the energy sectors. Anthracite coal is the highest quality of coal among than other coals such as bituminous, sub bituminous and lignite. The impurity coal when burned, lot of green house gases (GHG) are emitted that was contributed to global warming. Clean coal technologies are required for sustainable coal power plants to reduce the air emissions and pollutants from those power plants. Many developed countries seeking for advanced, reliable, efficient, and zero emitted clean coal technologies. The main advantage of these clean coal technologies are more economic, cost reduction for Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). Both CCS and CCUS are the permanent solutions for the global warming particularly from energy sectors. Here we reported the requirement of clean coal technologies and their vital role in the Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). Clean coal technologies provide tremendous benefits to the sustainable energy sectors.

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

Seashell Derived Nano-calcium Hydroxide: A Potent Precursor for the Removal of Phosphorus from Aqueous Solution

Mohd Danish Khan^{1,2}, Ji Whan Ahn^{2*}

¹ Resources Recycling Department, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, South Korea

² Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract: Eutrophication is one of the severe environmental consequences which can occur when phosphorus content in aquatic environment rises above threshold limit. Continuous dependency on industrialization and agricultural sectors has created imbalance in the phosphorus cycle and therefore phosphorus removal is becoming a challenge. In this work, nano-calcium hydroxide was first synthesized from waste bivalve seashells through wet chemical precipitation method and subsequently used for the removal of phosphorus from the aqueous solution. The synthesized nanoparticles were hexagonal in shaped with average size of around 350 nm. Moreover, the phosphorus removal efficiency recorded from the treatment with synthesized nanoparticles from different type of seashells showed similar removal efficiencies. Box-Behnken design derived optimization study revealed that when reaction parameters were maintained at 2.16 (calcium to phosphorus mass ratio), 25.5 °C (temperature), and 10.2 (pH), a phosphorus removal efficiency of ~ 99% can be achieved. In addition, the analysis of diluted and ureolyzed human urine under same optimized conditions exhibited a phosphorus removal efficiency of ~ 95%. This study highlights the probable potential of waste bivalve seashells derived nano-calcium hydroxide for phosphorus treatment.

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

Characteristic Investigation of CFBC Fly Ash to Promote Rare Earth Elements Extraction and CO₂ Mineralization

Lai Quang Tuan^{1,2}, Kyung Ho Park², Euntae Jung², Ji Whan Ahn^{2*}

¹ Resources Recycling Department, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, South Korea

² Center for Carbon Mineralization, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, South Korea

Abstract: Coal fly ash has made up the second largest waste source beyond mining wastes. Disposal and storage of coal fly ash in nature without practical reutilization have triggered economic lost and environmental damages. Simultaneously, coal fly ash has been universally perceived as a potential source for recovering rare earth elements due to the extraordinary enrichment in it and the critical positions of rare earth elements to advanced technologies. In addition, numerous studies have demonstrated that coal fly ash has the great ability to capture carbon dioxide (CO₂) gas and turn it into valuable products. This study investigates the characteristics of a coal fly ash sample, which is received from coal-fired power plant in Korea with respect to the abundance and the occurrence mode of rare earth elements as well as the CO₂ fixation capable.

Keywords: Coal fly ash, rare earth elements, occurrence mode, CO₂ capture capacity

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

플라즈마 열원을 이용한 폐슬레이트 무해화 연구

Study for Detoxification of Asbestos-Containing Slate using Plasma Heat Source

김태욱 · 이규항 · 김형준 · 진예진 · 이수민 · 손병구*

Tae-Wook Kim, Kyu-Hang Lee, Hyoung-Jun Kim, Ye-Jin Jin, Soo-Min Lee,
Byung-Koo Son*

ABSTRACT

석면(Asbestos)은 길이 5 um 이상, 종횡비가 3:1 이상인 섬유상의 천연광물로써 단열성, 내구성, 절연성, 내마모성 등 우수한 물리 화학적 특성으로 건축 내외장재 및 공업용 원료로 널리 사용되어왔다. 반면, 폐슬레이트에 함유되어있는 석면은 폐중, 폐암, 악성중피종 등을 유발하는 것으로 알려져 있으며 1977년 세계보건기구 산하 국제암연구소(IARC)에서는 1군 발암물질로 지정하였다. 현재 폐슬레이트는 지정폐기물로서 폐기물 관리법에 따라 지정매립장에 매립하여 처리하고 있으나 매립장의 부족 및 외부환경 노출에 의한 매립장 주변의 2차 환경오염 등의 위험성이 있어 석면을 원천적으로 무해화 하여 안전하게 처리할 수 있는 방법이 필요하다.

시멘트 소성로는 내부 온도가 약 2,000 °C에 이르러 석면의 무해화 처리에 용이한 고온 환경을 제공 할 수 있으며 무해화된 폐슬레이트는 시멘트 부원료로 활용이 가능하다. 이에, 본 연구에서는 열 플라즈마를 이용한 시멘트 소성로의 고온 환경을 모사하여 폐슬레이트의 무해화 가능성을 평가하였다. 열 플라즈마는 플라즈마 제트의 온도가 약 6,000 °C로써 수백~수천도의 고온환경을 빠르게 구현할 수 있다. 시멘트 소성로 내부 온도인 2,000 °C까지의 온도 범위에서 폐슬레이트의 무해화 평가를 통해, 1,500 °C 이상의 온도에서 30분간 노출시 석면이 모두 무해화 되었으며, 열처리 촉진제를 이용할 경우 1,100 °C 이상의 온도에서 30분간 노출시 석면 본래의 섬유 결정구조가 사라진 것이 확인되어 시멘트 소성로내부의 고온 환경이 석면의 무해화 처리에 용이한 환경을 제공할 수 있음을 확인하였다

Key Words : 폐슬레이트, 석면, 열 플라즈마

Acknowledgements

이 연구는 한국환경산업기술원 환경산업선진화기술개발사업(과제번호 : 2019000140002)의 재정지원으로 수행되었습니다.

Highly Stabilized Enzyme–Polymer Composite Material for CO₂ Conversion and Utilization

Han Sol Kim · Seung–Hyun Jun · Jungbae Kim

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

Carbonic anhydrase (CA) is an enzyme that can catalyze the interconversion between CO₂ and HCO₃[−] with a high turnover rate up to 10⁶ s^{−1}. HCO₃[−] can be further utilized for the expedited growth of microalgae as a C1 nutrient. However, the poor stability of the enzyme should be resolved before the practical use of CA. Herein, CA has been immobilized onto electrospun polymer fibers in the form of enzyme precipitated coating (EPC). EPC of CA (EPC–CA) showed remarkable stabilization of CA activity, retaining 65.3% of initial activity after 868 days of incubation under 200 rpm shaking. Metal leaching experiments and molecular dynamic simulations were performed to elucidate the stabilization mechanism of EPC–CA. Highly stabilized EPC–CA was employed for enzymatic CO₂ conversion. Enzymatically converted CO₂ in the form of HCO₃[−] was subsequently utilized to cultivate microalgae, *Dunaliella tertiolecta*. The addition of EPC–CA resulted in 2.3–fold enhanced microalgae growth. EPC–CA has shown unprecedented stabilization of enzyme activity while enabling the successful demonstration of enzymatic CO₂ conversion and utilization for microalgae cultivation. It is believed that stabilized enzymes via EPC approach can be employed for various energy and environmental venues where enzymes' poor stability has hampered their successful demonstration.

CO₂ Conversion and Utilization by Highly-Stabilized and Magnetically-Separable Enzyme System

Yunjae Kim · Han Sol Kim · Jungbae Kim

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

Carbonic anhydrase (CA) can convert carbon dioxide (CO₂) to bicarbonate via its catalytic reaction at a high turnover rate up to 10⁶ per second. However, the successful application of CO₂ conversion by CA requires the stabilization of CA activity and the development of appropriate bioprocess. Here, we developed the highly-stabilized and magnetically-separable enzyme system, based on enzyme precipitate coating (EPC) approach for the immobilization of CA onto the surface of carboxylated polyaniline nanofibers (cPANFs). CA was covalently attached on the cPANFs, followed by the enzyme precipitation and crosslinking with amine-functionalized magnetic nanoparticles (Mag-EPC). Mag-EPC showed a good stabilization of enzyme activity with a half-life of 236 days under shaking condition. Mag-EPC was also stable under the sterilization with 70% ethanol, maintaining 90% of its initial activity after 300 min sterilization. Mag-EPC was employed for one-pot CO₂ conversion and utilization, where the atmospheric CO₂ was converted to bicarbonate under the catalysis of Mag-EPC, and the resulting bicarbonate was subsequently utilized for the growth of microalgae as carbon feeds. In the presence of Mag-EPC, the growth of microalgae was increased by 1.8-fold than control samples without Mag-EPC. Mag-EPC could be recovered from the microalgae culture via a facile magnetic separation. Biocatalytic performance of Mag-EPC was maintained after three times of recycled uses for one-pot CO₂ conversion and utilization. Highly-stabilized and magnetically-separable enzyme system can potentially contribute to the development of CO₂ conversion and utilization, such as accelerating of microalgal growth. Such enzyme system has a great potential to be used for the various enzyme applications, where the poor enzyme stability inhibits their practical applications, such as microbial decontamination, biosensors, and biofuel cells.

원자력발전소 표준작업관리모델 개발 A Development of Standard Work Management Model for Operating Nuclear Power Plants

염동운 · 현진우 · 이상대
한국수력원자력(주) 중앙연구원

미국에서는 원자력에너지협회(NEI), 전력사업자원가그룹(EUCG) 및 원자력발전협회(INPO)가 공동으로 원자력발전소에서의 업무프로세스가 반영된 원전운영표준모델(SNPM)을 개발하여 원전을 체계적으로 관리, 운영함으로써 경영환경 변화에 적절히 대응하고 우수한 성능을 유지할 수 있는 기반을 구축하였다. 한수원도 과거에 원자력발전소의 체계적인 설비관리를 위해 표준설비관리 모델(SEMM¹⁾)을 개발하였으나 실효성 있게 현장에 적용하지는 못하였다. 하지만 체계적인 고장 작업관리를 통해 설비의 성능을 지속적으로 유지하고자 경상 및 계획예방정비 시의 작업대상 선정, 작업 계획 수립, 작업수행 및 시험관리 등의 업무프로세스를 분석한 후 표준작업관리모델을 개발하였다.

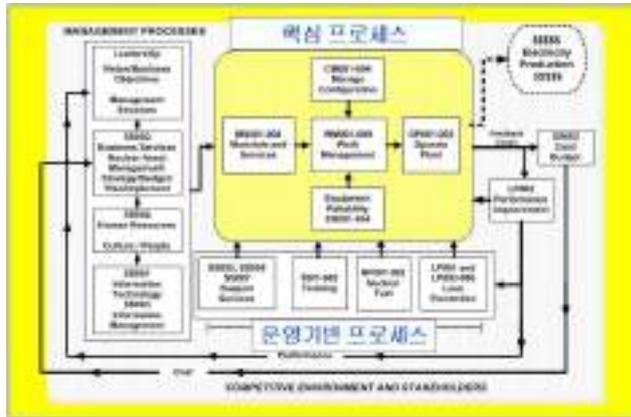


그림 1 SNPM (Standard Nuclear Performance Model)

표준작업관리모델은 그림 2에서 보는 바와 같이 형상관리 등 7개의 주요 업무와 연계되고 있다. 그림 3에서 볼 때 표준작업관리모델은 작업대상 선정 등 총 7개의 주요 프로세스 및 총 10개의 세부 프로세스로 구성되었으며, 각 세부 프로세스별로 상호 연계도 및 프로세스 기술서를 개발하였다.



그림 2 작업관리 업무 연계도



그림 3 표준작업관리모델 주요 프로세스

현재 한수원에서는 2020년 말까지 표준작업관리모델 운영시스템 개발을 추진 중에 있으며, 향후 현장의 체계적인 작업관리, 직원역량 강화 및 해외 수출 등에 적극 활용할 경우 설비 신뢰도 제고 및 업무 효율성 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

¹⁾ SEMM : Standard Equipment Management Model

원자력발전소 계통성능감시활동 개선 검토 A Study of System Performance Monitoring Plan Improvement of Nuclear Power Plant

이상대 · 현진우 · 염동운
한국수력원자력 중앙연구원

국내 원자력발전소는 계통의 신뢰성과 안전성 확보를 목표로 중요 계통의 성능을 감시하고, 계통의 성능저하 요인과 잠재된 문제점을 사전 발견하여 제거하기 위한 성능감시계획을 수립하고 이에 따라 현장점검 및 설비상태감시를 수행하고 있다. 이러한 활동을 수행하기 위해 국내 발전소는 중요 계통 선정 및 해당 계통에 대한 성능감시계획을 수립하고 이를 이행하고 있는데, 기속적 개선활동의 일환으로 해외원전의 계통성능감시활동 사례를 분석하여 우수사례를 국내원전 성능감시계획에 반영하고자 한다.

계통성능감시는 주기시험, 검사, 측정, 성능경향분석을 통해 감시범위 내 설비에 대한 현재, 향후 성능유지, 잠재적 기능고장을 나타내는 물리적 특성의 경향을 분석하는 엔지니어링 활동이다. 계통엔지니어는 계통의 신뢰성과 안전성 확보를 목표로 담당 계통의 성능을 감시하고, 계통의 성능저하 요인과 잠재된 문제점을 사전 발견하여 제거하기 위해 성능감시계획을 수립하고 그에 따라 계통성능감시를 수행한다. 계통성능감시활동 결과는 주기적으로 보고서로 작성되어 관리자에게 보고되고 발견된 문제점은 시정조치활동으로 개선된다. 또한, 계통성능감시계획은 주기적인 자체진단 평가를 통해 국내외 성능감시 우수사례를 반영하여 개선된다.

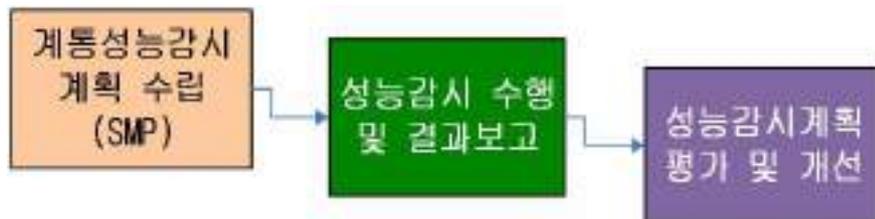


Fig. 1 A Process of System Performance Monitoring Activity

국내 발전소 계통성능감시계획서의 평가 및 개선하기 위해 해외 PLNGS 발전소(캐나다 New Brunswick에 위치한 660MW급 Candu형)의 계통성능감시계획의 주요 항목을 검토하였으며 주요 계통성능감시 항목은 다음과 같다.

- 계통기능, 주요 구성기기, 고장모드, 감시 범위
- 감시활동요건
 - 계통수준 감시, 중요기기 감시, 규제대상 기기 감시
 - 현장점검시 체크리스트
 - 발전정지유발기기(SPV) 감시 및 영향 저감 활동
 - 성능감시 주기 요건 등

위와 같은 해외 원전의 계통성능감시계획 구성항목 및 내용을 분석하여 국내 원전의 계통 성능감시계획과 차이점을 분석하고 개선점을 도출한 후 계통성능감시계획에 반영할 예정이며, 계통엔지니어의 계통성능감시활동의 원활한 이행을 지원하고자 실시간 발전소 설비상태감시 시스템을 구축할 것이다.

12V AGM 납축전지의 환경 온도에 따른 충·방전 모델링

이재우, 신치범, 김성태, 강하현

아주대학교; 아주대학교 에너지시스템학과; 현대자동차; 클라리오스텔코;

자동차의 시동용 배터리로 쓰이는 납축전지는 넓은 온도 범위에서의 거동과 저렴한 가격이 장점이다. 사용되는 종류로는 크게 SLA(Sealed lead acid), EFB(Enhanced Flooded Battery), AGM(Absorbent Glass Mat) 등이 있다. 기존 차량에 납축전지가 SLI(Starting, Light, Ignition) 기능 위주로 사용되었으나, 최근 들어 다양한 연비 신기술(공회전 제한장치, 회생제동 등)이 개발되고, 차량의 전자화로 인하여 배터리에 요구 및 기대되는 성능 수준이 높아지게 되었다. 특히, 고온 환경의 엔진 룸에 배터리가 노출되면서 발생하는 양극 그리드 부식, 수분 증발 등의 배터리 열화 현상은 배터리의 전기적 거동에 크게 영향을 미친다. 실제 차량 주행 환경에서 이런 요소는 배터리의 신뢰성을 약화시키게 되므로, 환경에 따른 배터리의 상태를 예측할 수 있는 기술의 확보가 필요하다.

본 연구에서는 차량용 12V AGM 납축전지의 환경온도에 따른 충·방전 거동을 예측 할 수 있는 수학적 모델을 개발하였다. 각각 10°C, 25°C, 50°C, 75°C 조건에서 CC 방전 및 CC-CV 충전으로 진행하였으며, C-rate 및 충전 전압을 달리하여 배터리의 거동을 관찰하였다. 또한, 이를 토대로 실험 데이터와 모델링 결과를 비교 및 검증하였다.

비가역적 리튬손실에 따른 리튬이온전지의 충전 거동 예측 모델 개발

이동철, 이재우, 신치범[†], 장일찬*, 송진주*, 우중제*

아주대학교 에너지시스템학과; *광주바이오에너지연구개발센터 한국에너지기술연구원

리튬이온전지의 노화로 인한 성능 감소는 내부의 복합적인 전기화학적 메커니즘의 상호작용으로 인해 발생한다. 리튬이온전지의 대표적인 열화현상은 리튬 플레이팅, 전해질 분해, 전극 활물질 용해, 전극 물질의 상변화, 전극 표면의 필름 형성 및 집전체의 부식 등이 있다. 특히, 전기자동차용 리튬이온전지의 노화현상은 용량 및 출력 감소에 따른 주행거리 감소와 주행성능 저하를 유발한다. 따라서 전기자동차 전지 시스템의 최적의 설계 및 관리를 위해 리튬이온전지의 모델링 및 시뮬레이션에 다양한 열화요인을 고려하여 리튬이온전지의 성능 저하를 예측하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 비가역적인 리튬손실이 $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ 양극, 천연흑연 음극, 유기 전해액으로 구성된 리튬이온전지의 성능 저하에 미치는 영향을 연구하기 위한 수학적 모델을 개발했다. 지배방정식으로 전극에서의 분극 특성에 기초한 옴의 법칙과 전하 보존법칙을 사용하여 비가역적 리튬손실에 따른 충전 거동을 계산했다. 모델을 이용하여 얻은 계산 결과는 시험 결과와 잘 일치하는 것을 확인했다. 검증된 모델을 기반으로 파라미터를 넓은 범위의 비가역적 리튬손실에 대해 함수로 계산하였다. 모델링 결과는 시험 결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

환경온도에 따른 리튬이온전지 전기적 거동 모델링

김병목, 이동철, 이재우, 신치범[†], 장일찬¹, 송진주¹, 우중제¹

아주대학교 에너지시스템학과; ¹광주바이오에너지연구개발센터 한국에너지기술연구원

리튬이온전지는 높은 에너지 및 전력 밀도, 충·방전 효율, 장수명 등의 장점으로 전 기자동차(BEV)와 에너지저장시스템(ESS) 등 다양한 분야에서 우선 전력원으로 선호된다. 주변의 온도는 리튬이온전지 내부에서 일어나는 전기화학 반응에 영향을 미치기 때문에 리 튼이온전지의 충전 및 방전 거동 역시 온도에 의존하게 된다. 리튬이온전지의 작동 및 환경 조건에 따라 최적의 성능을 구현하기 위해서 리튬이온전지의 전기적 거동을 온도의 함수로 예측하는 모델을 개발하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 환경온도에 따른 리튬이온전지 전기적 거동에 관한 모델링 방법을 제시한다. 지배방정식으로 전극에서의 분극 특성에 기초한 옴의 법칙과 전하 보존법칙을 사용하여 단일 셀에서의 충전 및 방전 성능을 계산하는 방법으로 접근하였다. 환경온도를 15°C, 25°C, 35°C로 변화시켜 리튬이온전지 전기적 거동의 온도의존성을 확인하였다. 온도 의존성을 위한 핵심 모델링 매개 변수는 화학반응속도론의 Arrhenius 방정식과 전기화학적 열역학의 Nernst 방정식을 기반으로 하여 온도의 함수로 나타내었다. 모델링 결과의 타당성은 시험 결과와의 비교를 통해 검증하였다.

AI 알고리즘의 발전분야 활용 가능분야 도출 Exploration of AI Algorithms to the Utility Industry

윤태식 · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남
한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀

인공지능은 이미 우리 사회와 각자의 생활이 깊숙이 스며들고 있다. 심지어는 활용하고 있는 App.이 인공지능인지도 모르는 경우도 많다.

본 논문은 현재 활용되고 있는 인공지능 관련 수학적 알고리즘(그림1)을 발전소 운영 시 어떤 분야에 활용될 수 있는 분야를 도출하고 향후 그 가능성을 시험하고자 한다. 일반적으로 인공지능을 위한 학습은 데이터를 기반으로 회귀분석(Regression), 가동 또는 고장분석(Logistics) 그리고 최적결정을 위한 Decision Making 방법들이 있다. 이들 수학적 모델은 최소자승법을 활용한 Cost 최소화 방법에 의해 학습 후 활용될 수 있음을 미리 적시해둔다. 먼저 회귀분석법은 정비시간과 기기건전성 향상, 운영시간과 비용, 불필요업무 증가에 따른 비용상승, 그리고 Logistics는 정비 시 기기 및 부품을 더 사용할것인가에 대한 판단을 Sigmoid 함수를 통하여 판단하게 된다. 마지막으로 NLP(Natural Language Program)과 Decision Making 알고리즘은 다수의 전략 대안 중에서 최적 대안은 Indication Binary 함수를 활용하여 도출될 수 있다.



그림 1 : 인공지능 수학적 알고리즘

상기의 수학적 알고리즘은 기본적으로 아래와 같은 기반이 갖추어져야 한다는 가정하여 최적의 성능을 발휘하게 된다. 먼저 가용한 많은 데이터, 수학적 알고리즘, 그리고 학습의 성능향상을 위한 Deep Learning 알고리즘(CNN, RNN, LSTM, ETL, Google Analytics)즘 등이 이에 해당되며, 이들은 VR, AR, Management, Marketing, Strategy 등의 구현으로 발전분야의 현장업무 향상은 물론 전체 경영 향상에도 다양하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.(그림 2)

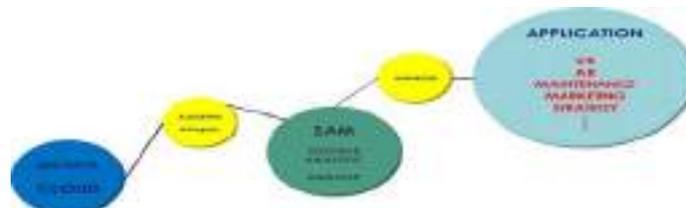


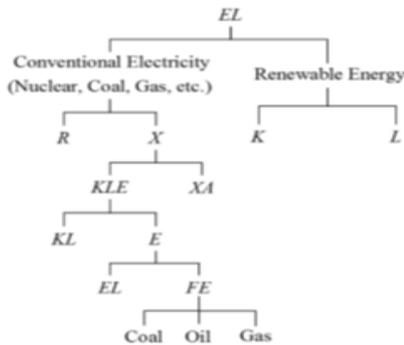
그림 2 : 인공지능 활용을 위한 기반 구축 필수 요소

Decision Tree의 인공지능 학습을 통한 최적 전략 도출 방법 A Method of Optimal Strategy using Decision Tree Learning

윤태식 · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남
한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀

과거부터 사용하여온 방법인 Decision Tree는 다수의 대안들 중 최적 전략을 도출하기 위해 활용되어 왔다. 하지만, 인공지능이 활성화되면서 전략적 상황도 인공지능으로 해결하려는 시도가 여러 산업들에서 시도되고 있다. 물론 동 방법은 발전소 기기진단, 예측 및 최적안 도출을 위해 활용되고 있다.

인공지능을 활용한 Decision Tree의 대표적인 특징은 Indication Function의 활용으로 이진 환경으로 전제하여 다수의 안중에서 가장 효과 또는 경제성이 뛰어난 방법을 선택하게 된다. 아래 그림은 여러 가지 전력생산 에너지원중에서 최적안을 도출하기 위한 Decision Tree를 예시하였다. 이렇게 Mapping된 도표를 기준으로 수식에 제시된 Indication 함수를 이용하여 미래 건설할 에너지원을 도출한다.



$$Y = \sum_{i=1}^n C_i \times I(x_1, x_1)$$

C : 결정계수

I : 이진조건 (0 or 1)

Decision Tree 예시 및 Indication Algorithm

상기의 방법은 에너지원의 비용, 그들이 미치는 경제적 파급효과 등을 고려하여 Indication 함수에 적용하고 최종적으로 결정계수가 최대가 되는 안을 선택하는 것으로 설계하였다. 아래의 도표와 수학적 알고리즘의 성능은 향후 더욱 정밀 조정하여 실제 계획수립 시 활용할 계획이다.

최소자승법을 활용한 비용 요인 고찰

Review of Efficiency using the Least Square Method

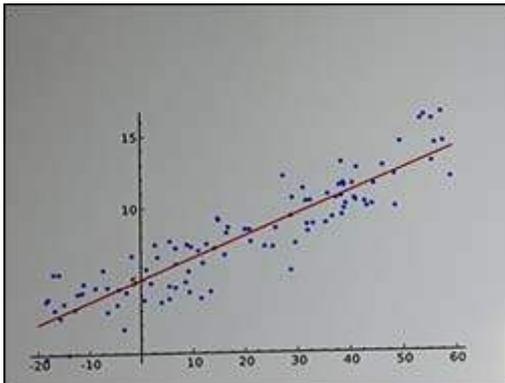
윤태식 · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남

한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀

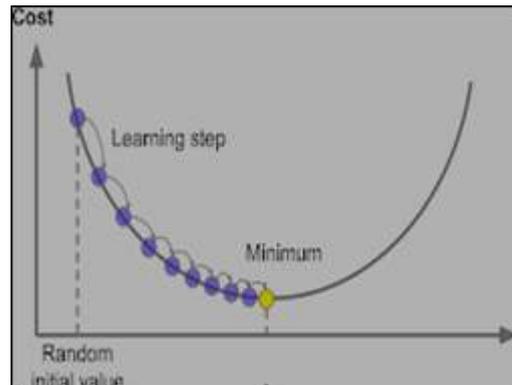
4차 산업혁명, 디지털혁명 등 빅데이터, 인공지능 등으로 대변되는 최근의 가장 주목받는 분야이며, 향후 미래 먹거리는 물론 개별 국가의 생존을 위한 필수 기술로 인식하고 있다. 따라서 산업 전 분야는 Digitization을 통한 비용절감, 수익개선을 위해 사활을 걸고 있다. 그러나 원자력발전소는 경제성보다는 안전성을 우선해야 하므로, 상기의 기술들을 적용하기에는 다소 시기상조라고 생각하고 있는 것도 사실이다. 따라서 해외 적용사례를 고찰하고 국내 원전에 응용분야를 도출하고 활용하여 안전성이 저해되지 않는 범위내에서 경제성도 제고할 수 있는 모델들을 제시하고자 한다.

본 논문은 발전소의 정비분야의 예측진단 분야에서 활용해온 회기분석 또는 범률적 고시에 의한 방법들에 최소자승법을 활용한 모델을 적용하여 동 분야의 최적화까지 가능한 수학적 모형을 알아보하고자 한다.

현재의 축적된 기기사용 데이터를 관찰하여 보면 시간이 지날 수록 또는 발전소 가동시간이 증가할 수록 마모, 파손 등 고장을 일으키는 요소들이 증가한다. 이들을 그래프로 표현하여 보면 그림(1)과 같이 선형회기분석으로 표현된다. 선형회기분석 그래프의 Parameter를 도출하는 가정에서 그림(2)와 같이 최소자승법을 활용하여 학습을 시키는 인공지능 방법을 적용하면 기존의 방법보다 정확도와 최적 예측진단을 할 수 있다.



그림(1) 선형회기분석 그래프



그림(2) 선형회기분석 그래프

또한, 여러 가지 비용 및 수익요소에도 적용하여 업무개선을 통한 경영향상에도 다양하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Sigmoid 함수를 활용한 기기 예측진단 방법 고찰

A Method of Diagnosis and Estimation with the Sigmoid Function

윤태식 · 김승진 · 신동철 · 윤정식 · 오영택 · 김선민 · 문효남

한수원(주) 디지털혁신추진단 스마트시티추진팀

최근 우리는 인공지능 없이는 생활할 수 없는 사회에 이미 진입했다고 판단된다. 구글맵, 네이버데이터랩, 알파고 등 그야말로 인공지능을 모르면 미래사회에 도태되는 그룹으로 전락되지 않나 하는 불안감마저 들게 한다. 이는 원자력발전소에 근무하고 있는 우리들에게도 피해갈 수 없는 상황이다. 기본적으로 원자력발전소는 경제성보다는 안전성을 우선해야 하므로, 인공지능들을 적용시 안전에 저해될 수 있다는 생각으로 다소 머뭇거리고 있는 것이 사실이다. 따라서 해외 적용사례를 고찰하고 국내 원전에 응용분야를 도출하고 활용하여 안전성이 저해되지 않는 범위내에서 경제성도 제고할 수 있는 모델들을 제시하고자 한다.

본 논문은 발전소의 정비분야의 예측진단 분야에서 활용해온 확률론적 방법, 즉 이진수 (0,1)로 판단해야 하는 대상 기기의 진단, 예측 및 최적화에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 현재의 축적된 기기사용 데이터를 관찰하여 보면 시간이 지날수록 또는 발전소 가동 시간이 증가할수록 마모, 파손 등 고장을 일으키는 요소들이 증가한다. 이때 더 사용할 것인가 아니면 교환 할 것인가의 판단은 확률적으로 판단해야 한다. 이를 위해 가장 흔히 활용되고 있는 것이 아래 그림과 같이 0과 1사이의 값으로 정의할 수 있는 Sigmoid 함수이다.

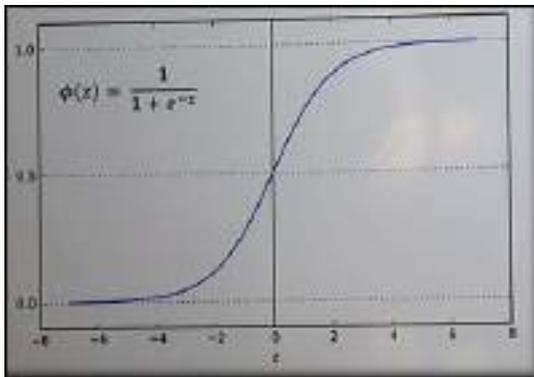


그림: Sigmoid 그래프

$$\text{Ln}\left(\frac{p}{1-p}\right) = a_i x + b_i$$

$$z = a_i x + b_i$$

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

수식 : Sigmoid 함수

물론 Sigmoid 함수도 손실(IOSS) 최소화 방법을 활용한 학습을 통해 데이터의 회귀식의 Parameter를 결정하여 실제 활용되고 있다.

AR(증강현실)의 발전분야 활용에 관한 고찰 Case Study of Augmented Reality to practical use for Generation Area.

김영국

한수원(주) 중앙연구원 디지털융합그룹

4차 산업의 일환으로 증강현실 기술이 게임, 동영상, 생방송, 부동산, 공학, 교육, 의료, 관광, 국방, 유통 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 본 논문은 기 개발되어 활용되고 있는 증강현실 기술 현황을 분석하고 발전분야 활용에 관하여 가능성을 고찰해보고자 한다.

증강현실의 구현 기술은 대표적으로 마커가 필요한 경우와 마커가 불필요한 경우가 있으며 그 외에는 프로젝션 기반, 중첩기반 증강현실 등의 기술이 있다.

마커기반 증강현실은 객체 또는 이미지의 인식 기반이라고도 불리며 이 기술은 증강현실 기기에 장착된 카메라를 사용하여 결과를 구현한다. 마커를 이용해서 상대적 좌표를 측정하고 가상의 그래픽 이미지 객체를 실제 영상에 합성하는 형태이다.

마커리스 증강현실은 증강현실의 구현방법 중 가장 널리 사용되는 기술 중 하나로 장소기반, 위치기반 그리고 GPS기반으로도 불린다. 마커리스 증강현실은 별다른 인식 시스템을 사용하지 않으며 이 기술은 올바른 결과의 제공을 위해 다양한 위치 도구를 사용하여 디바이스의 위치를 인식한다. 마커리스 증강현실은 다양한 유형의 트리거를 통해 작동하며 이 트리거는 지리정보 또는 공간 인식과 결합된 유저의 입력일 수도 있다.

프로젝션 기반 증강현실은 컴퓨터 비전기술의 프로젝터로 물체를 인식하고 이에 맞는 증강현실을 구현하는 방법이다. 즉, 프로젝터를 통해 빛을 현실 세계의 표면에 띄우고 센서를 통해서 사용자가 추가적인 입력을 할 수 있다.

중첩기반 증강현실은 객체 인식을 사용하며 증강된 이미지는 원본이미지를 부분적 또는 전체를 완전하게 대체한다. 실시간으로 다변화 하는 현실 세계에 주요 정보들을 사용자가 보는 현실에 부수적인 정보제공 형태로 표현한다.

발전소 현장에서는 빈번하게 계통, 기계, 장비 등의 설치, 운영, 정비/보수, 교체등의 활동이 진행된다. 이때 대상기기의 교체주기, 정비이력, 운영상태, 운영절차, 정비절차 등 다양한 정보가 현재는 문서화되어 관리되고 있다. 이를 증강현실 기술을 접목하여 활용한다면 실제 작업이 이루어지는 현장에서 별도의 절차서나 이력관리 문서 없이도 대상기기의 현황과 취하고자 하는 활동에 대한 정보를 얻고 활용할 수 있을 것이다. 또한 실시간으로 현장작업자-주관리실 담당자 사이의 의사소통을 통해 실시간 유지관리, 현장작업 모니터링, 각종 이벤트에 대한 대응 수행이 가능 할 것이다. 향후 증강현실 기술의 발전소 적용을 통해 Paperless work, Real-time communication, Accumulate experience 등을 구현하고 더욱 안전하고 효율적인 발전소 운영 관리에 활용할 계획이다.

은이 도핑된 망간 산화물을 이용한 PM 저온 연소 반응

김민준 · 이재환 · 이은준 · 이재성 · 이관영

고려대학교 화공생명공학과

전 세계적으로 일산화탄소, 질소산화물, 미연 탄화수소, 입자상 물질 (PM) 등의 배기가스 후처리 시스템 개발이 필수적인 상황이다. 또한 지구온난화를 해결하기 위해서는 이산화탄소 배출량의 감소가 필요하다. 따라서 이 두가지 목표를 동시 달성하기 위해서는 저온에서 배기가스 저감을 할 수 있는 촉매의 개발이 필요하다.

PM은 입자상 물질 필터를 통해 제거될 수 있는데 이 때 PM을 저온에서 산화시켜야 차량의 연비가 증진될 수 있다. 따라서 필터에는 PM 저온 산화 촉매가 코팅이 되어야 하며 특히 가솔린 직분사 차량의 경우 디젤에 비하여 산화제가 부족한 환경이기 때문에 고효성의 PM 산화 촉매 개발이 필요하다.

본 연구에서는 은이 도핑된 망간 산화물을 수열 합성법을 통해 합성하였으며 soot 산화 활성을 GPF 조건하에서 평가하였다. 또한, 촉매의 활성 경향을 다양한 특성화 분석을 통해 설명하였다.

알루미나의 결정상 변화에 따른 과산화수소 직접합성반응 활성변화의 규명

이석호 · 한근호* · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

과산화수소는 다양한 분야에서 쓰이는 굉장히 중요한 산화제 중 하나로, 현재는 AO 공정이 라고 하는 유기용매를 이용하는 공정에서 대규모로 생산되고 있다. 하지만, 이 AO 공정은 유기용매를 사용한다는 점이 환경적으로 굉장히 유해하게 작용하기 때문에, 해당 공정을 대체하기 위해 여러 가지 연구가 전세계적으로 진행되고 있다.

그중 가장 가능성 있는 대안 중 하나로, 과산화수소 직접합성 (Direct Synthesis of Hydrogen Peroxide, DSHP) 반응이 활발하게 연구되고 있는데, 이 반응은, 유기용매 대신, 메탄올, 에탄올 물과 같은 용매를 사용하여 수소기체와 산소기체로부터 바로 과산화수소를 합성하는 반응을 말한다. 해당 촉매는 90년도부터 활발하게 연구가 진행되었지만, 두 가지 문제로 인해서 현재까지 상용화에 이르지 못하고 있다. 한가지는, 직접합성 반응이, 기체반응물, 액체용매, 고체촉매라는 3상 반응기 상태로 이용이 되기 때문에 상당한 물질전달저항이 발생하여, 충분한 생산성을 보이지 못한다는 점이며, 다른 문제는 과산화수소를 합성하기 위해서는 산소분자의 결합은 끊어지지 않고, 수소분자의 결합만 선택적으로 해리가 되어야 하는데, 이와 같은 작용을 할 수 있는 촉매를 개발하는 것이 어렵다는 점에 있다. 첫 번째 문제점은 반응기의 개선을 통해 해결할 수 있는데 반해, 두 번째 문제는 촉매 자체에 의한 문제점이므로, 본 연구에서는 직접합성 반응의 선택도를 올리기 위해 촉매를 개선하는 방향으로 연구를 진행하였다.

따라서 본 연구는 더 나은 과산화수소 선택도를 갖는 촉매를 개발하기 위해 직접합성 분야에서는 자세하게 연구된 바 없는 Alumina를 이용하여 연구를 수행하였다. Alumina는 열적으로 매우 안정한 담체이며, 과산화수소 합성촉매에 담체로 많이 이용되는 Silica나 Titania에 비해 여러 장점을 가지고 있고 특히 산점효과와 SMSI 효과등으로 좋은 촉매활성을 기대할 수 있다.

특히 본 연구에서는 여러 결정상의 Alumina를 담체로 이용하여 Pd/Al₂O₃를 제작하였고, 제작한 촉매의 과산화수소 합성능력을 비교해본 결과, gamma Alumina를 담체로 사용한 경우가 다른 결정상의 Alumina를 담체로 사용한 경우보다 과산화수소 생산성과 선택도가 더 높았으며, SiO₂, TiO₂를 담체로 사용한 경우보다도 높았다. 이 높은 활성의 원인을 규명하기 위해 여러 특성화 분석을 진행하여 해당 연구를 수행하였다.

반응용매 조성에 따른 과산화수소 직접합성반응 활성변화

황승연 · 한근호 · 이석호 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

현재 과산화수소를 생산하는 대부분의 공정에서는 Auto Oxidation Process (AO Process)라고 불리는 방식을 이용하여 과산화수소를 대량 생산하고 있다. 하지만, 이 AO Process는 환경문제와 운송문제 등의 문제점을 가지고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 H_2 와 O_2 로부터 과산화수소를 직접 합성하는 공정이 활발하게 연구되고 있다. 이 AO Process에도 단점이 존재한다. 공정에서 사용하는 촉매는 H_2O_2 를 분해하는 활성을 나타내기 때문에 AO Process에 비해 선택도가 낮고, 3상 반응으로 인한 물질 전달의 제한으로 과산화수소의 수율이 낮다. 이 문제를 해결하기 위해 새로운 촉매와 공정에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

과산화수소 직접합성 연구에서는 주로 촉매 Activity를 향상시키고 촉매 메커니즘을 연구하는데 중점을 두는데, 우리는 촉매의 Activity를 향상시키는 반응 조건에 대해 연구하였다. 우리는 물과 알코올의 조합이 알코올만을 사용한 것에 비해 더 높은 촉매 활성을 나타냄을 발견했다. 알려진 바와 같이 알코올은 높은 수소 및 산소 용해도를 가지기에 반응물의 물질 전달이 향상될 것이라고 예상하는 것이 합리적이다. 예상과는 반대로, 물과 알코올의 혼합물이 과산화수소 직접합성의 활동을 향상시키기 위한 최적의 상태가 될 수 있음을 관찰했다. 본 연구에서는 다양한 특성 및 활동 테스트를 통해 이러한 사실을 규명하기 위해 해당 연구를 진행하였다.

Ga/HZSM-5 촉매를 이용한 메탄 및 경질 탄화수소의 공동 방향족화 반응과
촉매 수명 장기화를 위한 산화적 재생 반응

Coaromatization of Light Alkane with Methane on Ga/HZSM-5 : Detailed
Analysis of Reaction-Oxidative Regeneration

이현민* · 이병진* · 이관영* **

*고려대학교 화공생명공학과, **KU-KIST 에너지환경대학원 그린스쿨

세일가스 및 천연가스의 조성은 대부분 메탄으로 이루어져 있으며, 세일가스의 가체매장량은 천연가스의 확인매장량과 비슷한 수준으로 알려져 있다. 메탄을 고부가가치 생산물인 방향족 화합물(Benzene, Toluene, Xylene, BTX)로 직접 합성하기 위해 메탄 탈수소방향족화 반응(Methane Dehydroaromatization, MDA)을 이용한 촉매 기술이 각광받고 있다.

본 연구에서는 메탄, 에탄, 프로판의 공동 방향족화(co-conversion)를 활용하여 방향족 화합물 수율을 높이기 위하여 메탄에 경질 탄화수소인 에탄, 프로판을 추가하였다. 메탄, 에탄, 프로판의 조성은 천연가스를 모사하여 85:10:5로 정하였다. 반응 과정에서 생성되는 코크의 제거를 통한 촉매 수명 장기화를 위해 산화적 재생 과정을 도입하였다. 반응에 대한 촉매로 경질 탄화수소의 탈수소화 효과가 뛰어난 Ga/HZSM-5를 사용하였다.

메탄, 에탄, 프로판 모사가스를 반응물로 이용한 Ga/HZSM-5 촉매의 수명 및 방향족 화합물 수율을 확인하는 실험을 진행하였다. 탈수소방향족화 반응이 진행된 Ga/HZSM-5 촉매를 in-situ의 산소 조건으로 촉매 재생을 진행하여 재생 온도별 방향족 화합물 생성물 결과를 비교하였다. 재생 전, 후 촉매의 XRD, BET, NH₃-TPD, TGA·DTG 분석을 이용하여 반응 과정 및 재생으로 인한 촉매 및 코크의 특성 변화를 확인하였다.

팔라듐-세리아 촉매의 일산화탄소 및 탄화수소 동시산화 활성 개선을 위한 새로운 금속 도입 및 효과

서야은 · 이민우 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

기후변화에 따른 환경규제가 강화됨에 따라 자동차 분야에서는 배기가스 정화촉매 개발이 진행 중이다. 디젤 자동차에서 배기가스 정화 장치 촉매는 200°C 이상의 온도에서 활성을 보이기 때문에 cold start 구간에서 불완전 연소된 일산화탄소와 탄화수소가 대기중으로 그대로 배출된다. 따라서 저온에서 일산화탄소와 탄화수소를 산화시킬 수 있는 촉매 개발이 필요하다. 본 연구에서는 산화촉매로 흔히 사용되는 팔라듐-세리아 촉매에 은을 doping하여 새로운 금속 도입 효과에 대해 연구하였다.

세리아 (CeO_2)는 대기중 산소를 저장하고 내뿜는 능력인 Oxygen Storage Capacity (OSC)가 우수하여 산화촉매의 지지체로 활용된다. 세리아에 은을 doping하는 합성법으로 Ag-CeO₂ 지지체를 합성함으로써 세리아의 산소저장능력을 개선시키고, 팔라듐의 전자상태를 변화시킴으로써 일산화탄소와 프로필렌 산화반응 활성 개선을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 은을 doping한 세리아 담체에 Pd를 담지한 Pd/Ag-CeO₂ 촉매를 합성하고 일산화탄소 및 프로필렌 동시 산화반응에 적용하였다. 본 촉매로 일산화탄소 및 프로필렌 반응 활성 실험과 더불어 XRD, N₂ physisorption, CO chemisorption, DRIFT, XPS, TPR 등의 특성화 분석을 수행하여 은이 촉매에 주는 효과를 분석하였다.

LNG 병커링 운영 관련 LNG 누출 분산 범위 예측에 관한 연구
A Study on the Prediction of Dispersion Range in LNG Leakage for LNG
Bunkering Operation

임정석 · 유철희 · 최영주 · 정동호*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *선박해양플랜트연구소

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 선박배출가스 규제가 강화됨에 따라 선박연료로 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 사용 증가가 예상되고 있으나 국내 LNG 병커링 인프라 부족 등으로 인한 LNG 병커링 활성화에 한계가 있어 이를 해소하기 위해서는 먼저 제도적 기반이 마련되어야 한다.

현재 국내 병커링 운영은 탱크로리를 이용한 TTS(Truck to Ship)방식 LNG 병커링을 통해 LNG 연료를 공급하고 있다. 또한, 도시가스사업법 시행규칙 별표 6의6 선박용천연가스 사업의 가스공급시설의 시설·기술기준에서 천연가스를 선박에 충전하기 위한 자동차의 설치 대수는 2대 이하로 규정하고 있어 소형 선박이라도 병커링 작업 시간이 오래걸리는 상황이다. 병커링 작업의 효율 증대를 위한 3대 이상의 탱크로리를 이용한 TTS방식 LNG 병커링이 가능하도록 하기 위해 한번에 더 많은 유량, 더 짧은 시간으로 병커링을 운영할 경우를 대비한 LNG 누출 분산 범위 예측 관련 위험성 평가가 필요하다.

LNG 병커링 과정에서 LNG 누출이 발생하였을 시 분산 범위를 수평·수직 상향 분산, 육상에서의 하향 분산, 해상에서의 하향 분산 세 가지로 예측하는 SGMF(Society of Gas as Marine Fuel)의 BASIL Gas Dispersion Tool을 사용하였으며, 누출 범위 비교분석 시나리오로는 각각 다른 두 가지의 이송 유량, 이송 시간, 이송 수단(호스 또는 로딩암)으로 가정하여 총 8가지의 시나리오를 구성하였다. 이송 유량은 탱크로리 1대를 이용한 이송 유량인 30m³/h와 3대를 이용한 이송 유량인 90m³/h로 설정하였으며, LNG 이송 시간은 에코누리호 연료탱크 용량 20m³ 기준으로 이송 유량 30m³/h일 때 90분, 90m³/h일 때 14분으로 설정하였다.

본 연구를 통해 LNG 병커링 작업 시 안전구역 설정에 기초 자료로 활용할 예정이며, 향후 국내 LNG 병커링 산업 활성화에 기여하고자 한다.

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 “LNG병커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영기술개발” (PMS4310)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

이동식 LNG 충전소 저장설비 가스누출에 따른 피해영향평가 연구

A Study of Consequence Analysis for Gas Leakage of Mobile LNG Filling Station

전은경 · 최영주 · 김필중 · 유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

전 세계적으로 기존 내연기관 중심의 자동차산업에서 친환경적 연료중심의 액화도시가스(LNG, Liquefied Natural Gas), 수소차 등의 자동차산업으로 패러다임이 변화하고 있다. 국내 차량 중 중대형 상용차는 배출되는 오염물질이 크며, 질소산화물 및 미세먼지를 유발하고 있다. 특히 경유차는 공해의 47 % 를 차지하며 환경오염의 주축에 있다. 2018년 기준 국내 경유 화물차는 359만 대이며, 이중 5톤 이상 차량은 16만 대로 5톤 이상 경유 화물차 10 % 가 LNG로 전환될 시 경유 절감량은 약 297,600 toe, 30 % 전환 시 경유 절감량은 892,000 toe으로 석유의존도 완화 효과가 있다. 기존 경유 연료에서 LNG로 전환을 함으로써 사회적 문제인 미세먼지 배출가스 저감과 석유의존도 완화를 통한 환경문제를 해결할 수 있다. 이러한 친환경 연료인 LNG를 사용하기 위해서는 충전 인프라 구축이 필요하다.

LNG 충전소는 도시가스사업법에 따라 지정된 위치에서 고정식으로 설치해야한다. 현재 고정식 충전은 증발가스(BOG, Boiled off gas)발생으로 인한 경제성 문제가 크다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이동식 LNG 충전소가 필요하며, LNG 중대형 상용차 보급 및 확산을 위한 이동식 LNG 충전 사업의 안전성을 검증해야한다.

본 연구에서는 이동식 LNG 충전 사업의 안전성 검증을 위해 LNG 충전소 저장설비 중 저장탱크의 가스누출에 대한 피해를 예측하고 안정성 평가를 실시하였다. 그 결과를 통해 향후 이동식 LNG 충전소의 안전기준 개발에 활용할 예정이다.

Acknowledgements

본 연구 내용은 중소벤처기업부 규제자유특구혁신사업의 일환으로 수행 중인 “전북 친환경 자동차 규제자유특구 이동식 LNG 충전소 실증(과제번호 P0012425)”의 지원으로 진행된다.

선박용천연가스사업 도입 관련 국내 LNG 병커링 운영 기준 개발 방향 연구
A Study on the Directions of LNG Bunkering Operation Standard
Development related to the Introduction of LNG Business for Marine

최영주· 김필중· 이동원· 유철희· 정동호*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

최근 국제해사기구의 선박 배출가스 환경규제 강화 및 국내 환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(친환경선박법)에 따라 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas), 전기, 수소 등 친환경 연료를 사용하는 선박의 수요가 증가하고 있다. 특히, 기존 선박연료유의 약 20%(약 200만톤)가 LNG로 전환될 경우 연간 1.7조원 규모의 환경 편익이 기대된다. 이에 따라, 세계적으로 2019년 39척의 신규 LNG 추진선이 발주되었으며, 2020년 이후 매년 40척 내외의 LNG 추진선이 발주될 것으로 전망된다.

LNG 추진선박 건조 및 발주 증가로 인하여, LNG 연료 공급을 위한 병커링 인프라 또한 확대되고 있으며, 항만에 LNG 병커링 인프라가 구축되면 30년간 약 296조원의 생산유발 효과와 121만여 명의 고용유발 효과가 기대된다. 이에 따라, 정부에서도 LNG 병커링 활성화를 위한 도시가스사업법 내 선박용천연가스사업을 신설하여 LNG 병커링 운영 체도를 도입하였다. 하지만, 아직까지 국내에서는 병커링 인프라가 활성화되지 못하여 LNG 추진선박의 병커링을 TTS(Truck-to-ship) 방식만 활용 중이며, 선박용천연가스사업 도입 관련 LNG 병커링 운영 관련 시설·기술·검사기준 또한 TTS 방식만 명시하였다.

본 연구에서는 도시가스사업법 내 선박용천연가스사업 도입 관련 제도 분석을 통하여 국내 LNG 병커링 운영 기준 개발 방향에 대하여 모색하였으며, 연구결과를 토대로 TTS 방식과 저장탱크를 활용한 PTS(Pipe-to-ship) 방식 등 육상 LNG 병커링 제도 마련에 기여하고자 한다.

※ 본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 “LNG 병커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영기술개발”(PMS4310)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

기반시설관리법에 따른 송유설비 기준 마련 연구

A Study on Standardization of Oil Pipeline based on the Sustainable Infrastructure Management Act

김필중· 최영주· 이동원· 유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 고양 저유소 화재, 아현동 KT 통신구 화재, 백석역 운수배관 파열 등 지하시설물을 포함한 기반시설 관련 사고가 빈번하게 발생함에 따라 국가 기반시설 노후화에 대한 관심 및 기반시설 안전에 대한 국민요구가 증대되고 있다. 이에 따라, 독립적으로 관리되는 기반시설들을 종합적·선제적 유지관리 계획 체계를 정립하여 기반시설관리법 대상 15종 기반시설의 안전·유지관리를 합리화하고, 생활안전 사각지대 해소, 지하 기반시설 안전관리 강화를 목적으로 「지속가능한 기반시설 관리 기본법(기반시설관리법)」이 제정 및 시행되었다.

기반시설관리법 대상 15종 시설에 대해서는 기반시설관리법에 따라 일관된 관리체계를 마련하여야 한다. 이를 위하여, 기반시설 관리 기본계획에 따라 관리감독기관의 장이 관리계획을 수립하여야 하며, 최소유지관리 및 성능개선 공통 기준에 따른 기반시설별 최소유지관리와 성능개선 기준을 마련하여야 한다.

지하 기반시설에 속하는 송유설비는 송유관 안전관리법 제3조에 따른 공사계획의 인가를 받은 자가 설치한 같은 법 제2조제2호에 따른 송유관으로 정의되어있으며, 기반시설관리법 대상으로 송유설비 관리계획을 수립하고, 송유설비 관계법령인 송유관 안전관리법 내 최소유지관리 및 성능개선 기준을 마련하여야 한다.

본 연구에서는 송유설비의 관리그룹 구분, 관리그룹에 따른 관리수준의 설정 및 정밀안전진단 제도 도입 방향 검토하고, 기반시설관리법에서 고시한 최소유지관리 공통기준 및 성능개선 공통기준을 분석하여 송유설비 특성에 맞는 최소유지관리 및 성능개선 기준을 마련하는데 기여하고자 한다.

가스시설 소방설비 국내 설치 기준 현황 분석

An analysis of Domestic Install Standardization of Fire Protection System for Gas Facility

백지효 · 최슬기 · 유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

가스는 다양한 분야에서 사용되는 연료로 연소효율이 높고 저장 및 운반이 용이하다는 점 등 우수한 장점을 가지고 있다. 가스의 공급 및 사용 관련 가스시설이 늘어남에 따라 관련 사고가 지속적으로 발생하고 있으나, 2019년 기준 총 118건의 가스사고가 발생하여 2018년도(143건) 대비 17.5 % 감소함을 확인할 수 있다.

국내 소방시설은 화재 등으로부터 인명 및 재산을 보호하기 위해 화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률(이하 소방시설법)에 따라 소방대상물에 설치되며, 소방대상물은 소방기본법에 따라 건축물, 차량, 선박, 선박 건조 구조물, 산림, 그 밖의 인공 구조물 또는 물건을 말한다. 소방시설은 소화설비, 경보설비, 피난구조설비, 소화용수설비 및 소화활동설비로 구성되고 소방시설법 시행령 별표 5에 따라 설치가 필요한 소방시설을 확인할 수 있다. 가스시설은 소방시설법에 따라 소방시설을 설치하여야 하는 소방대상물인 특정 소방대상물에 해당되며, 일부는 화재 등 재난이 발생한 경우 사회·경제적으로 피해가 큰 시설인 소방안전 특별시설물로 구분된다.

본 연구에서는 가스시설에 적용되는 국내 소방 관련 법과 기준에 대해 비교·분석하였고, NFPA, EN 등 국외 소방시설 설치 및 안전관리 기준을 검토하고자 한다. 이와 더불어 가스시설의 소방설비에 대한 위험성 평가를 진행하여 가스시설의 화재 및 열복사 등에 대해 검토하고자 한다.

국내외 LNG 충전 규격 분석을 통한 국내 이동식 LNG 충전 도입 기준 개발 연구

A Study on the Development of Domestic Mobile LNG filling Standard for analysis of Domestic and Foreign Mobile LNG filling standards

봉선중, 최영주, 김필중, 유철희

한국가스안전공사 가스안전연구원

제3차 에너지기본계획이 수립됨에 따라 미세먼지를 저감할 수 있는 친환경 연료가 주목받고 있다. 경유를 주로 사용하는 화물차의 배기가스는 황산화물, 질소산화물 및 미세먼지 등 대기오염의 주원인으로, 이를 대체할 수 있는 친환경 연료인 LNG(Liquified Natural Gas) 연료가 있다. LNG 중대형 상용차의 경우, LNG 연료를 사용할 수 있는 엔진 개발이 이미 이루어져 상용화가 가능하지만, 2019년 기준 국내의 고정식 LNG 충전소는 전국 8개소뿐으로 LNG 상용차의 보급 및 확산하기에는 인프라가 부족한 상태이다.

현재 도시가스사업법상 LNG 충전소는 저장탱크를 설치하는 고정식으로만 설치가 가능하며, 이동식 LNG 충전사업은 제도가 부재하다. 경제성이나 LNG 초기 충전 사업 시 인프라 구축 등에 대한 문제를 유럽·미국 등지에서 이동식 LNG 충전소를 운영하여 해결하였다. 이에 따라, 해외에서 운영 중인 이동식 LNG 충전소 기준을 분석하여 국내에 이동식 LNG 충전 사업에 적용이 가능한 운영 및 작업 등의 기준 검토가 필요하다.

유럽은 ISO 16924(Natural Gas Fuelling Station)를 참고하여 LNG 충전소 설계, 건설, 운영, 유지·보수 및 검사에 대한 기준을 운영하고 있으며, 이 기준은 이동식 LNG 충전만이 있는 것이 아닌 고정식과 이동식 충전소에 대한 내용을 함께 다루고 있다. 미국은 NFPA 52(Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code)를 통해 고정식 및 이동식의 충전 기준을 운영하며, CNG(Compressed Natural Gas) 및 LNG 차량 등의 충전 기준을 제시하고 있다. 현재 국내에서는 일반 자동차에 대한 이동식 LNG 충전소에 대한 기준은 마련되지 않았지만, 항만에서 사용되는 야드 트랙터의 충전 기준이 도입되었다.

본 연구에서는 국내외 이동식 LNG 충전소의 기준을 분석하여 국내에 적용이 가능한 이동식 LNG 충전소 기준에 대한 도입 타당성을 검토하였으며, 향후, 이동식 LNG 자동차 충전 사업에 대한 기준 마련에 활용하고자 한다.

기반시설관리법에 따른 고압 도시가스배관 기준 마련 연구

A Study on Standardization of High Pressure Urban Gas Pipeline based on the Sustainable Infrastructure Management Act

유철희 · 최영주 · 김필종 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

아현동 지하 통신구 화재, 고양 열수송관 파열 등 지하시설물 사고가 빈번하게 발생함에 따라 기반시설 중 지하시설물 노후화에 따른 안전관리가 요구되고 있다. 지하시설물(상·하수도, 가스관, 송유관 등) 중 30년 이상 경과된 시설 비중은 14.9%('18.12 기준)이며, 20년 후에는 63.1%로 급증 할 전망으로 이에 따른 노후화 지하시설물에 대한 국민 관심이 증대되고 있다. 이러한 이유로 독립적으로 관리되던 기반시설들을 종합적으로 관리하기 위하여, 「지속가능한 기반시설 관리 기본법(이하 '기반시설관리법')」이 제정되었으며, 도로, 철도, 항만 및 유통·공급설비 등 15 종의 기반시설 대상 체계적인 유지관리와 성능개선을 통하여 국민이 보다 안전하고 편리하게 기반시설을 활용할 수 있도록 하였다.

기반시설관리법 대상 중 가스공급설비는 「도시가스사업법」 제2조제5호에 따른 가스공급시설 중 가스배관시설(최고사용압력이 1 MPa 이상인 본관 및 공급관으로 한정)로서, 기반시설관리법에 따라 일관된 관리체계를 마련하여야 한다. 이에 따라, 국토교통부장관이 5년 단위로 수립 및 시행하는 기반시설 관리 기본계획에 따른 관리계획을 5년마다 수립하여야 한다, 또한, 국토교통부장관이 고시하는 최소유지관리 및 성능개선 공통기준에 따른 최소유지관리 및 성능개선에 대한 기준이 마련되어야 한다. 이에 따라 가스공급설비의 체계적인 유지관리 및 성능개선을 위하여 관리계획을 수립하고, 관련 기준 마련을 통하여 종합적·선제적인 가스배관의 안전관리가 이루어지도록 하여야 한다.

본 연구에서는 기반시설관리법에 적용되는 가스공급설비의 관리그룹을 구분하여, 관리그룹에 따른 정밀안전진단, 배관 건전성 평가 등의 관리수준의 설정 방향을 검토하고, 안전등급 부여 의무화 방안, 성능개선 검토 대상 유형 및 세부실행 방안 등을 구분하여 가스공급설비 특성에 맞는 최소유지관리 및 성능개선 기준을 마련하는데 기여하고자 한다.

유니심을 이용한 30Nm³급 생물학적 메탄화 공정 해석 모델링
Modeling of 30Nm³CH₄/h Biological Methanation simulation using Unisim

김예빈 · 이동욱 · 김영국 · 이진향 · 주지선*
전력연구원, 에너지환경연구소 기후변화연구실

최근 에너지-환경 문제를 해결하기 위한 노력 중 전력가스화(Power to Gas)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전력가스화는 에너지 저장 방법의 하나로, 재생에너지 미유용 전력을 사용하여 수소 또는 이산화탄소를 메탄으로 전환하는 기술이다. CO₂ 메탄화 기술에는 생물학적 메탄화 기술과 열화학적 메탄화 기술이 있다. 생물학적 메탄화 기술은 메탄을 생성하는 미생물을 이용하는 기술로서, 운전온도가 낮고(60-65℃) 선택도가 높은 이점이 있다.

본 연구에서는 메탄화 공정 개념 설계안을 공정 시뮬레이션 툴인 Unisim R470을 이용하여 모델로 구성하였다. 모사한 해석 모델의 출구가스 메탄 생성율을 이론적 메탄 생성값과 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 이용하여 Sensitivity Study를 수행하였으며 시스템 제작을 위한 기본설계 자료를 도출하였다.

선박용 수소충전소 구축을 위한 해외사례 및 현황 검토

A study on review of building of ship hydrogen refueling station

이다은 · 윤진희 · 강승규 · 허윤실

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소연료선박은 미래 선박기술로서 세계적인 관심과 각국의 기술경쟁이 활발하게 이뤄지고 있으나 수소연료선박 충전을 위한 충전시스템에 대한 시설 및 안전기준이 없다. 현행 기준 수소충전소의 충전 대상이 자동차로 국한되어 있어 자동차에 포함되지 않는 선박에 대한 안전기준은 적용이 불가능한 실정이다. (고압가스안전관리법 시행규칙 제62조:용복합,패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설 기준 등에 관한 특례기준(산업통상자원부고시 제2018-179호)) 수소충전소 인프라가 확충되지 못한 이유로 신기술의 발전에 상응하는 법 규범의 대응이 신속적으로 이루어지지 못한 것에 기인한다. 규제개혁의 수단으로 규제 샌드박스의 개념이 제시되고 있다. 이에 효율적이고 경제적인 선박용 수소연료 충전인프라 구축을 위해 특례고시 제정이 필요하다.

본 연구는 선박용 수소연료 충전시설에 대한 특례고시와 안전성 검토 및 안전 기준 제정을 위해 해외기준(시설, 기술)적용내용을 조사하고 해외사례를 분석하였다.

※ 본 연구는 중소벤처기업부 및 한국산업기술진흥원의 수소그린모빌리티 규제자유특구혁신사업의 지원으로 수행되었습니다.(P0012865, 수소연료전지 선박용 수소충전소 구축 및 실증)

신재생에너지 다중환경제어의 실시간 융합관리
Realtime Convergence Management system for Active-Control in Various
renewable energies

김종만*, 김원섭

전남도립대학교 신재생에너지전기과

Abstract : 신재생에너지 발전과 응용을 위한 통합관리시스템과 신속한 유지·보수(O&M) 인프라 구축이 산업현장에 필요하다. 또한 신재생에너지 시장에서 모니터링 시스템은 필수가 되어가고 있는 산업현장에서 실시간과 더불어 더 설치가 간단하고 비용이 저렴한 모니터링 시스템을 요구하고 있다. 최근 농촌 온실하우스의 태양광에너지를 이용한 온도, 수분센서 등의 다양한 환경에서의 실시간 융합관리는 생산성 향상을 위하여 절실히 필요한 실정이다. 본 연구에서는 태양광에너지 응용을 위하여 인공지능형 온도, 수분센서의 데이터를 지능형 제어보드와 센서보드를 통해서 자동순환형 냉온관리시스템을 개발하였다. 또한 연구에서 원격지에 다양한 환경의 에너지의 흡수율을 높여 겨울 밤 내내 환경내부의 낮아진 온도를 보상 가능한 열량으로 확보하고, 지속적으로 보강 열원-지열을 더 찾아 부족한 열량을 추가하여, 추운 날씨에 자동으로 열원제어가 이루어질 수 있도록 하는 신재생에너지 원격제어장치를 추가하였다. 본 연구에서는 신재생에너지 농가 응용사업의 확대/보급을 위하여 전력수배전, 인버터, PCS, 배터리 등 발전효율 향상에 영향을 미치는 실시간 인버터 모니터링기반 유지관리장치를 융합하여 설계하였다. 제안 시스템은 원격 유지관리를 위한 송수신기기를 내장하여 신재생에너지 유지관리시스템의 원격 거리에 있는 데이터를 수집 및 처리(가공) 기능을 가능케 하는 장치로 에너지 효율성이 극히 떨어지는 농가 온실환경에 본 개발에서 자동 순환형 시퀀스 제어 방식을 사용하여 실시간 제어됨을 확인함으로 기존의 단점을 극복하는 특징을 보였다. 연구결과 이 제안시스템은 원격 태양광 전력계통을 실시간으로 원격관리를 함으로 농가형 재생에너지 모니터링 자동화 분야에 다양하게 응용됨을 확인하였다.

Key Words : 모니터링 자동화, 자동순환형 제어관리, 지능형 제어보드, 열원제어

후 기 :

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 에너지밸리산학융합 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

신재생에너지 대전력 마이크로파 발생 장치 개발과 연구
Research and development of new and renewable energy microwave
generation devices

김원섭*, 김종만

전남도립대학교 신재생에너지전기과

Abstract : 신재생에너지의 개발에서 차세대 대전력 마이크로파 출력장치를 개발하였다. 이것은 장차 고갈되고 있는 화석연료를 대신하고 미래에 충분한 에너지원의 확보를 위하여 매우 중요한 자원이라 하겠다. 대전력 마이크로파 발생장치는 여러 가지가 있으나 전자사이클로트론 공명을 이용한 것과 입자가속 시스템, 또한 마이크로파와 미립자의 에너지 전달 시스템등 많은 발전을 거듭하여 왔다. 우리는 고체의 상태에서 진단과 물질의 화합물등 여러 가지 마이크로파 대전력을 얻기 위한 연구를 하였다. 오늘 연구는 요즘 많이 이루어지고 있는 초전도 코일과 같은 여러 가지 기술의 발달로 인하여 많은 결과를 가져왔다. 자이로트론과 자유전자 레이저 그리고 짧은 파장의 방사 출력을 발생시키는 것이 가능하게 되었다. 최근 다중 파장을 이용한 체렌코프 발진기는 대전력 마이크로파원으로서 매우 중요하게 각광 받고 있다. 여기서 우리는 이것에 의하여 마이크로파 발생을 하여 대전력을 얻었다. 본 연구는 상대론적 대전력 마이크로파 발진기를 이용하며 이것은 진행파관, 후진파 발진기, 자유전자레이저등에 많이 이용 되었다. 본 연구에서는 발진파장보다 짧은 것을 이용하였으며 이것을 활용하여 성능의 증대를 가져온 것을 알았다. 여기서 파장 보통보다 짧은 1밀리미터 이하인 짧은 파장을 이용하여 보다 콤팩트한 대전력 마이크로파 출력장치를 개발하여 신재생에너지 에너지원으로서 매우 유용하게 이용되리라 여겨진다. 도파관을 이용하여 보다 빠르고 쉽게 발진이 이루어져 마이크로파 출력을 발생시키며 이에 따라 새로운 신재생에너지 원으로서 중요한 결과를 가져왔다고 할 수 있다. 오늘 전자빔과 전자파 및 발진하는 마이크로파를 이용하여 보다 좋은 양질의 대전력을 발생시킬수가 있는 것을 확인하였고 앞으로 다양하게 활용할 수 있는 것을 확인하였다.

Key Words : 신재생에너지, 대전력 마이크로파, 상대론적 발진장치, 발진 파장과 주파수,

후 기 :

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 에너지밸리산학융합 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

미세한 표면 세척을 위한 마이크로 블라스팅 머신 개념 설계 Concept Design of Micro Blasting Machine for Fine Surface Cleaning

이승민 · 엄민용 · 남태석 · 정해용 · 이찬형 · 유승지 · 김태형*

청주대학교 항공기계공학과, *청주대학교 항공학부 항공기계공학전공

일반적으로 발전설비에 사용되는 블라스팅 머신은 규모가 큰 중대형기계로 분류된다. 그러나 발전설비에 사용되는 부품들은 정밀하면서도 소형의 것들도 많다. 이러한 소형 부품들을 기존 중대형 블라스팅 머신으로 가공하면 과도한 변형이나 심한 표면 손상을 초래할 수 있기 때문에 원하는 목적에 부합되지 않을 수 있다. 따라서 부품 손상이나 변형이 거의 없으면서도 미세한 표면 세척작업이 가능한 소형 규모의 블라스팅 장비 개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 마이크로 블라스팅 장비의 국산화 개발을 위한 개념 설계를 수행하였다. 먼저 2차원 개념 설계도면을 바탕으로 주요 3차원 부품들을 모델링하였고 이후 이들 부품들을 서로 조립하는 어셈블리 과정을 거쳤다. 주요 부품들로서 몸체, 지지대, 분사 노즐, 원심분리장치, 압축기 등이 있는데 몸체는 수동방식의 세정이 가능한 상부에 챔버를 구성하였고 하부에는 사용된 연마재가 재순환되도록 한 곳에 집진될 수 있는 구조로 설계하였다. 분사 노즐은 내부로 공기와 연마재가 흡입되어 노즐 출구 측으로 분사되도록 하였다. 원심분리장치는 몸체 상단에 설치되며 공기와 연마재가 혼합된 상태로 유입되어 비중차로 인해 원심력으로 분리되는 구조이다. 또한 소형의 블라스팅 장비인 만큼 이동이 간편하게 되도록 하였으며 전기계장을 구성하여 개념 설계 후 부품제작 및 조립을 완성하였다. 이와 같은 개념 설계연구는 섬세한 표면처리를 위한 마이크로 블라스팅 머신의 국산화 개발에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

증기발생기 전열관 체적성 결함 크기측정 방법에 대한 고찰

A Study on the Measurement of Volumetric Defects in Steam Generator Tubes

천근영 · 한경석*

한수원 중앙연구원

증기발생기 전열관 체적결함 형태는 다양한 위치에서 다양한 형태로 검출되고 있다. 대다수 검출되고 있는 체적결함은 유체유발 진동 저감을 위해 설치된 관지지 구조물과의 접촉에 의해 발생하는 fretting 마모가 주를 이루고 있으며, 이외 제작 및 운전중 유입된 이물질과의 접촉 마모, 전열관 제작 및 설치 과정 중 생성된 찍힘 등이 있다.

이러한 체적 결함이 운전중 전열관 누설 이벤트 없이 건전성 유지 여부를 평가하기 위해 정확한 결함에 대한 깊이정보가 필요하며 이를 위해 발생 결함과 유사하게 깊이별로 가공한 대비시험편이 필요하다.

구조물 접촉 fretting 마모는 전열관과 구조물간의 접촉형태를 알고 있으므로 발생 마모 형태와 유사한 대비시험편을 제작할 수 있으나 다른 체적결함은 전열관과 접촉물질의 형태가 다양하여 체적결함 형태를 유추할 수 없어 대비시험편을 제작하기가 어려운 실정이다. 이에 미국의 경우 이물질 마모에 대해 EPRI 연구기관을 중심으로 미국 내 모든 원전의 이물질 마모 형태를 조사 및 분류하여 발생 마모 형태와 유사한 대비시험편을 제작하여 활용중에 있다. 국내 또한 현재 이와 유사한 연구가 진행중에 있다.

최근 일부 발전소에서 증기발생기 열전달 효율과 열화발생 저감을 위해 전열관 외벽의 고착성 슬러지 제거를 위해 저농도 화학세정이 수행되었으며 그 후 전열관 와전류검사서 다양한 형태의 체적성 지시가 검출되었다. 발생 원인을 파악하기 위해 일부 전열관이 인출되어 파괴분석이 이루어졌다.

본 연구에서는 대비시험편 제작이 어려운 화학세정후 검출된 와전류검사 체적성 지시에 대해 전열관 건전성 평가의 필수인자인 결함 깊이 정보를 도출하기 위해 EPRI의 인정된 다양한 와전류검사기술을 활용하여 깊이 평가를 수행하였으며 인출 전열관의 파괴분석 결과 값과 비교 분석하여 최적의 와전류검사기술을 도출하였다. 도출된 와전류검사기술은 회전형 탐촉자 검사기법을 활용한 EPRI 검사기술사양서(volumetric indication depth sizing within the freespan area) 측정방법으로써 파괴분석 결과값과 유사한 깊이값을 보였다.

추후 본 측정방법을 활용하여 체적성결함의 성장추이를 계속 분석하여 전열관 건전성을 관리해 나갈 예정이다.

원전해체 극저준위 방사성금속폐기물의 제한적 재활용 시나리오 Restricted Recycle Scenario of Very Low Level Radioactive Metal Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

원전 해체시 대량의 방사성 금속폐기물을 방출하며, 방사능 오염 정도에 따라 중준위, 저준위, 극저준위 방사성폐기물로 분류되어 금속폐기물 관리방안에 따라 처리될 것이다. 이중 극저준위 방사성 금속폐기물은 제염 후에 용융처리하여 잉곳에 대한 방사선학적 평가를 수행하고 자체처분 등으로 처분량을 최소화시키는 전략을 도입할 수 있다. 다양한 준위의 방사성폐기물 중에서 극저준위 방사성 금속폐기물은 표면오염된 방사성폐기물로 오염 정도가 상대적으로 매우 낮아서 제염 또는 용융시켜 만든 잉곳에 대해 방사선학적 평가를 수행하여 자체처분, 제한적 재활용, 장기저장 후 자체처분 및 제한적 재활용 등의 시나리오를 구성할 수 있다. 제한적 재활용은 방사성 금속폐기물을 처리하여 방사선 관리구역에서 활용하는 방안으로 원자력시설의 건설에 재활용금속을 철근콘크리트 구조물의 철근, 방사성폐기물의 운반 또는 처분 용기, 방사선원의 차폐재 등으로 활용할 수 있다. 이러한 활용 방안을 고려하여 10가지의 시나리오를 도출하였다.

시나리오 1: 사용후핵연료 저장시설 철근콘크리트 구조물 철근

시나리오 2: 방사성폐기물 처분장 천층처분 철근콘크리트 구조물 철근

시나리오 3: 방사성폐기물 드럼

시나리오 4: 방사성폐기물 처분용기 (콘크리트 컨테이너 철근, 탄소강주물용기)

시나리오 5: 방사성폐기물 운반용기 (ISO 운반 컨테이너)

시나리오 6: 사용후핵연료 처분 구리용기

시나리오 7: 고준위방사성폐기물 알루미늄 보관용기

시나리오 8: 방사성폐기물 처분용기 채움재 (금속 골재, 철망)

시나리오 9: 고정형 차폐벽 (방사선원 차폐 보강재)

시나리오 10: 방사성폐기물 운반용기 차폐 보강재

원전의 해체로 방출되는 극저준위 방사성 금속폐기물의 관리방안은 정책과 규제 환경에 따라 변화할 수 있지만, 방사성폐기물 처분장의 처분용량과 극저준위 방사성 금속폐기물로 방출되는 탄소강, 스테인리스강, 구리 및 알루미늄의 가치를 고려할 때 제한적 재활용 전략은 방사성폐기물 처분량의 감축과 자원의 재활용에 의한 이득을 줌으로써 원전 해체로 방출되는 방사성폐기물의 관리방안으로 활용될 수 있을 것이다.

원전해체시 바이오실드 절단방법 평가

Assessment of Bioshield Segmentation for Decommissioning of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

바이오실드 콘크리트 해체를 위해 적용할 절단방법 중 Disk Saw, Wire Saw 및 Hammering의 장단점과 적용성에 대하여 검토하였다. Disk Saw 방법의 적용 사례를 보면 정밀 절단이 가능하고 1m 이내의 절단에 주로 적용되었다. 최대 1m의 절단 작업을 수행하기 위해서는 Saw Blade의 크기가 최대 3m 이내여야 한다는 것으로 Disk Saw 장치가 거대해진다는 것을 의미한다. Japan Power Demonstration Reactor(JPDR)에 적용되었던 Disk Saw 장치의 경우도 매우 부피가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 장치의 부피가 크다는 것은 공간 제약이 있을 경우 적용이 어렵다는 것을 의미한다. 또한 1m 이상의 두께를 절단 시에는 대형 Saw Blade를 개발해야 하고, 이는 작업 공간 적용에 대한 문제가 발생할 가능성이 높다. 따라서 Disk Saw의 경우 원자료가 해체된 공동 내부를 이용한다는 조건 하에서 보면 두께 1m 이상에 적용하는 것은 공간 제약 문제로 어려울 수 있다고 판단된다. Wire Saw 방법의 적용 사례를 보면 절단 두께에 제약이 없고, 여러 형태로 장치의 구성이 가능하여 바이오실드 콘크리트 절단/해체 작업에 효율적으로 적용할 수 있다. 즉, 이 방법은 공간적인 조건에 따른 최적화된 장치 설계를 통해 적용성에는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다. Hammering 방법의 적용사례를 보면 콘크리트를 파쇄방법을 기반으로 하기 때문에 두께에 크게 제약을 받지 않으나, 내부에 설치된 Steel Bar의 절단이 어렵기 때문에 Shear, Disk Saw 등과 같은 추가적인 절단/해체 방법이 필요한 단점이 있다. 또한 작업 시 발생하는 진동, 소음에 대한 문제가 타 방법보다 크기 때문에 산업 안전 측면에서 고려해야 할 사항이 많은 단점이 있다. 세 가지 방법 모두 바이오실드 콘크리트를 절단/해체 시 발생하는 분진 등으로 인한 방사성 오염물질의 확산을 방지해야 한다. 이를 위해 이전 해체 사례에서는 모두 물을 사용하였다. 하지만 물을 사용하면 발생하는 분진의 확산을 방지하는 것에는 효율적이나 이차 폐기물이 많이 생성되고, 해체 시 삼중수소가 사용된 물에 녹는 문제와 함께 슬러지 폐기물이 발생하기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 따라서 삼중수소 및 슬러지 폐기물 등과 같은 부가적인 문제를 해결하기 위해서는 건식 작업을 적용하는 것이 보다 더 효과적인 방법일 것으로 판단된다. 하지만, 건식 작업 시 발생하는 분진을 처리해야하기 때문에 분진 포집 장치가 절단 작업 시 적용되어야 한다. 따라서 건식 작업 시에는 분진 포집 장치 설계가 중요하다. 따라서 바이오실드 콘크리트 해체를 위해 적용되는 장치 설계 시 고려해야 하는 사항은 공간 제약 요건을 반영하여 작업이 가능한 최적화된 절단 장치 설계, 건식 작업 시 분진 포집을 위한 포집 장치 설계, 습식 작업 적용 시 물의 재사용 방안 및 슬러지 처리 방안 등이다. 이러한 절단방법의 효율적인 설계 및 제작을 하여 국내에 적용한다면 원전해체시 바이오실드 콘크리트의 절단을 보다 효율적으로 할 수 있을 것이다.

원전해체 방사성 콘크리트폐기물 포장 방안

Packaging Concept of Radioactive Concrete Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈 · 박경록 · 조항래 · 황영환 · 이미현 · 홍성훈

한수원 중앙연구원

방사성 콘크리트폐기물 포장용기의 적정 제원을 도출하기 위해서는 포장물의 포장/운반/처분 방법 등을 검토하였다. 원전해체 폐기물의 포장/운반/처분 시스템을 고려하여 포장물을 대형화하고, 국내 경주처분장의 2,3단계 처분시설의 인수기준도 변경되는 것으로 가정하여 방사성 콘크리트폐기물의 포장방안을 수립하였다. 방사성폐기물 형태는 극저준위 콘크리트 블록과 스캐블드 콘크리트(분진형태)를 고려하였다. 극저준위(VLLW) 방사화 조각 콘크리트는 건설 계획 중인 3단계 매립 처분 시설에 처분하는 것으로 가정하였다. 따라서 별도의 처분용기 없이 포장/운반/처분 겸용용기를 고려하였다. 방사성 콘크리트폐기물의 운반·처분에 적용하는 금속 용기는 기존 운영폐기물 운반에 사용되는 IP-2형 강재용기와 Half ISO 용기를 설계 변경한 중대형 금속용기를 선정하였다. 방사성 콘크리트폐기물의 절단 및 연마 작업 시 발생하는 스캐블드 콘크리트는 분진형태의 물질로서 비산성이 강하기 때문에 방사성물질의 확산을 방지하기 위해 고정화 요건이 필요한 경우 해체부지 내 종합처리시설에서 고정화작업을 수행하여 포장하는 방안을 고려하고 있다. 매립처분 대상인 극저준위 폐기물(VLLW)의 고정화는 비경제적인 것으로 판단하여 고정화하지 않은 것으로 가정하여 포장용기 개발방안에 반영하였다. 상기 사항등을 반영하여 표 1에 방사성 콘크리트폐기물 포장용기 설계에 적용될 고려사항을 기술하였다. 원전 해체시 발생하는 대규모 및 대량의 방사성 콘크리트폐기물을 효율적으로 포장, 운반 및 처분하기 위한 대용량 포장용기의 개발은 향후 국내 원전 해체 사업의 효율적인 폐기물 관리에 기여할 것이다.

표 1. 방사성 콘크리트폐기물 포장용기 설계에 적용된 고려사항

항 목	고려사항
포장용기 외부제원 [m]	2.44 × 6.06 × 1.32H 이하
최대 중량 [tons]	35 이하 (포장용기 + 내용물 포함) (콘크리트 절단물 포장용기 총중량 10톤 이하)
채움물	85% 이상 (처분시설 인수요건 변경 이후 상기 채움물 만족 요구 시 절단콘크리트 블록 사이에 스캐블드 콘크리트를 혼합하여 공극 채움)
재료	스테인리스강 및 탄소강 등
처분 시 설계특성	부식에 따른 영향

원전해체 방사성 콘크리트폐기물 재활용 방안

Recycle Scenario of Radioactive Concrete Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

원전 해체시 대량의 콘크리트폐기물을 방출하며, 방사능 오염 정도에 따라 콘크리트폐기물 관리방안을 수립하여야 한다. 방사성 콘크리트 폐기물은 방사선적 특성으로 볼 때 방사화 콘크리트와 표면오염 콘크리트로 구분된다. 방사화 콘크리트는 노심부근의 콘크리트로 대부분이 생체차폐체(Bioshield) 콘크리트이고, 표면오염 콘크리트는 표면의 오염된 부분을 제거하면 오염도는 극히 낮다. 방사화 콘크리트는 중성자에 의한 콘크리트 내에 방사성핵종이 노심 인근부터 가장자리까지 농도가 점차 낮아지며 고루 퍼져 있다. 반면에 표면오염 콘크리트는 주로 표면에 오염이 집중되므로 이를 제거하면 콘크리트의 자체처분 또는 재활용 가능성이 매우 높다. 따라서 이들 콘크리트의 특성을 고려하여 재활용 가능성을 충분히 보고 최종관리방안을 결정하는 것이 바람직하다. 방사화 콘크리트는 품질이 균질하고 골재를 재활용시 구조적 건전성이 확보되므로 이를 적극적으로 재활용하는 것이 바람직하다. 극저준위 콘크리트는 재활용을 위해서는 극저준위 상태로 활용하거나 규제해제를 한 후 재활용 할 수 있다. 예로 극저준위 콘크리트로부터 회수한 골재를 저준위폐기물의 고품화를 위해 사용할 수 있다. 또는 방사선관리구역 내의 차폐벽이나 구조물 설치 등 콘크리트의 골재로 사용할 수 있다. 이외에 스캐블 콘크리트(Scabbled Concrete)는 감용을 위하여 콘크리트 조각(Concrete Debris)을 포장할 때 뒤채움재로 사용할 수 있고 일부는 저준위 스캐블 콘크리트와 블렌딩하여 극저준위폐기물로 처분할 수 있다. 특히 무제한 자체처분 대상 콘크리트는 분쇄하여 골재를 회수하면 일반적인 건설폐기물의 재순환 골재와 같이 도로, 성토, 복토, 구조물에도 활용할 수 있다. 원자력산업계에서 사용할 수 있는 방안으로 극저준위 콘크리트 중 농도가 높은 콘크리트는 제외하고 분쇄하여 굵은 골재만을 활용할 경우 경주 처분시설에서 사용하고 있는 처분용기의 골재로서 재활용하는 방안을 고려할 수 있다. 즉 해당 콘크리트를 방사선구역에서 분쇄 및 체분리하여 굵은 골재만을 회수하여 규제해제하고 처분용기 제작업체에 보내 골재로 활용한다. 한편으로 생체차폐체 콘크리트를 포함하여 다른 콘크리트폐기물을 고리1호기 해체 부지내 지하공간의 매립재로 활용하는 방안을 고려할 수도 있다. 동 부지는 복구 후 산업용지(Brown Field)로 활용할 경우 방사선적 평가로 안전성을 확인한 후 대량의 무제한 자체처분 대상 콘크리트 및 제한적 자체처분 대상 콘크리트 등을 매립할 수 있을 것이다. 이 경우 제한적 자체처분 대상 콘크리트를 극저준위폐기물로 처분하지 않으므로 처분비용을 대폭 절감할 수 있다.

원전해체 방사성폐기물 추적관리시스템 개발

Waste Tracking System for Decommissioning Radioactive Waste of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

해체폐기물은 단기간에 많은 종류의 방사성폐기물이 대량 발생하므로 이를 추적관리할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 해체폐기물 추적관리시스템은 크게 해체폐기물 DB를 통합 관리하기 위한 소프트웨어 부분과 폐기물 및 포장물의 입·출입 관리를 위한 하드웨어로 구성된다. 시스템의 개발 범위는 소프트웨어 측면에서 해체대상설비/해체구역 정보, 폐기물 정보, 처리공정 정보, 방사선적 특성 정보, 포장/운반 정보, 이력 정보, 폐기물 저장/처리 구역 정보, 해체폐기물 관리 인터페이스, PDA 인터페이스, RFID 인터페이스 관리 프로그램과 RFID 태그 리더기 통신 프로그램 개발이며, 하드웨어 부분은 폐기물과 포장물의 정보 및 구역별 입·출입 정보를 관리하기 위한 RFID 태그 및 태그 리더기 등이 있다. 그림 1에 해체폐기물 DB 관리 프로그램 및 하드웨어의 개발범위를 나타내었다.

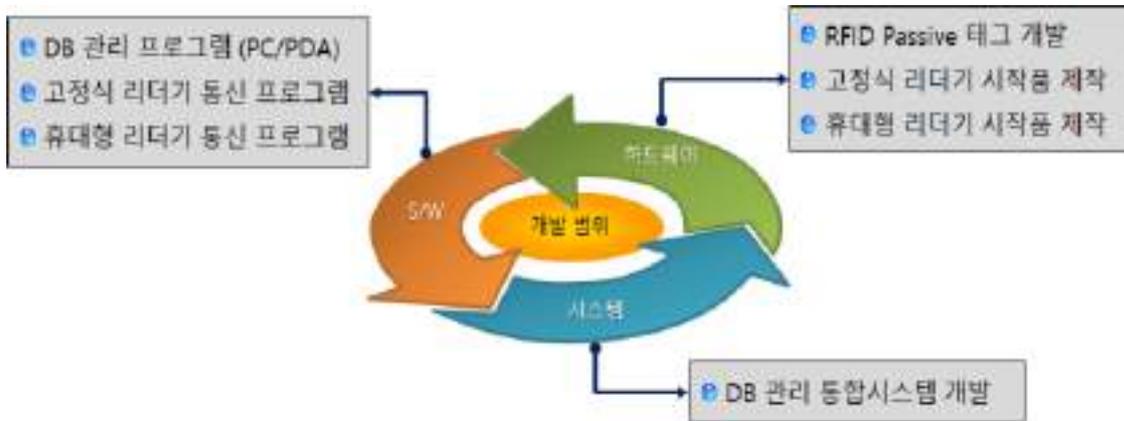


그림 8 해체폐기물 DB 관리 프로그램 및 하드웨어 개발 범위 개요

해체폐기물 추적관리시스템은 DB 서버, 관리실 및 현장 관리구역 내 DB 관리 PC, RFID 태그 리더기가 부착된 현장작업자 PDA 및 네트워크 장비들로 구성된다. 본 DB 관리 프로그램은 인터넷기반으로 개발하였다. 따라서 개발환경은 인터넷기반 서비스에 적합한 하드웨어 및 소프트웨어로 구성하였다. 이러한 해체추적관리시스템의 개발을 통하여 향후 고리 1호기 등 국내의 원전 해체시 다량 발생하는 방사성폐기물을 효율적으로 관리할 수 있을 것이다.

원전해체 방사성 콘크리트폐기물 표면제염 방안
 Surface Decontamination Methods of Radioactive Concrete Waste for
 Decommissioning of NPPs

이지훈
 한수원 중앙연구원

해체 원전의 방사성폐기물의 감용 목표를 달성하기 위해서는 해체 전반에 걸쳐 방사성 콘크리트폐기물을 제염하기 위한 다양한 노력이 필요하다. 원자력 발전소 격납건물 내부와 격납건물 외부 중 안전등급에 해당하는 구역은 방호도장이 되어 있다. 방호도장은 일반적으로 부식방지, 콘크리트 표면의 방사능 오염방지, 제염 시 방사능을 포함한 오염물의 용이한 제거, 효과적인 도막형성을 통한 안전기능 확보를 목적으로 사용된다. 방사성 콘크리트 피복(에폭시, 페인트 등) 제거기술은 콘크리트 내부가 아닌 피복으로 고려되는 방호도장만 방사성 오염이 되었을 때 오염부분을 제거함으로써 방사성 콘크리트를 제염하는 방법이다. 방사성 콘크리트 표면제염 기술은 콘크리트 피복뿐만 아니라 피복 내부로의 오염침투, 콘크리트 균열, 배관 관통부에서의 방사성 오염 등의 이유로 콘크리트의 표면에서 일정 깊이까지 방사성 오염이 된 경우에 오염된 표면을 제거함으로써 방사성 콘크리트를 제염하는 기술이다. 표 1에 방사성 콘크리트 피복제거 기술을 요약하였으며, 대부분의 콘크리트 피복제거 기술은 방사성 콘크리트 표면제염 기술에도 적용이 가능하다.

표 1. 방사성 콘크리트 표면제염 기술

구 분	피복 및 표면제염 기술
Scarifying technique	Needle scaling
	Scabbling
	Shaving
Abrasive blasting technique	Abrasive blasting(wet)
	Abrasive blasting(dry)
	Sponge blasting
Laser technique	Laser cleaning
Other technique	CO2 ice blasting
	NitroJet

Scarifying technique은 오염된 콘크리트 피복 등을 물리적으로 마멸시켜서 비오염 표면 깊이까지 제거하는 기술이다. Abrasive blasting기술은 제염 목적에 따라 플라스틱, 유리구슬, 그리트, 산화알루미늄 등 다양한 종류의 연마제를 사용할 수 있다. 그러나 연마제가 방사성물질과 접촉하는 순간 2차폐기물로 간주되므로 시스템 적용시에 연마제 회수 및 재활용이 필수적으로 고려되어야 한다. Laser 기술은 높은 에너지 밀도의 Laser를 이용하여 콘크리트 피복제거를 하는 것으로 파장의 지속시간이 낮은 경우에는 제염이 잘 되지 않으며 너무 긴 경우에는 모재가 열에 의해 변형이 올수 있으므로 적절한 파동 지속시간을 선택하는 것이 중요하다. 이러한 방사성콘크리트의 표면제염이나 피복제거시 표면오염 및 피복 특성을 고려하여 적절한 기술을 적용한다면 해체시 다량 발생하는 콘크리트 폐기물의 자체처분 물량을 극대화하여 방사성폐기물 감량에 기여할 것이다.

원전해체 방사성폐기물 처분방안

Disposal Strategy of Radioactive Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

원전 해체시 금속 및 콘크리트 방사성폐기물 등이 여러 구역에서 다양한 방사능과 형태로 다량 발생하게 된다. 해체시 발생하는 방사성폐기물을 효율적으로 처분하기 위해서 폐기물 종류에 따른 처분방안을 수립할 필요가 있다. 해체폐기물은 일부 중준위폐기물을 제외하면 대부분 저준위 및 극저준위폐기물이다. 경주처분시설은 1단계 처분시설부터 3단계 처분시설 까지 계획된 복합처분시설로서 저준위폐기물은 2단계 표층처분시설에 처분가능하며 극저준위폐기물은 3단계 매립형처분시설에 처분이 가능하다. 그러나 현재 1단계 처분시설만 인수기준이 설정되어 있고 2단계, 3단계에는 인수기준을 수립중에 있다. 해체폐기물의 대부분은 저준위 및 극저준위로서 다량 발생하기 때문에 효율적인 처분을 위해 2, 3단계 처분장에는 폐기물 포장물의 무게 및 크기 제한 요건을 현재 200L용기의 수십여배 이상으로 상향조정 중에 있다. 또한 극저준위 토양 및 스케블링 콘크리트에 대한 고정화 적용여부나 대용량 크기의 포장 및 처분용기내 폐기물의 핵종 규명 방안을 제시하는 등 합리적인 폐기물 인수절차를 마련하여야 한다. 해체폐기물은 향후 여러 그룹으로 분류하고 각 그룹의 폐기물은 특성에 따라 해체폐기물 처리시설로 이동되어 절단, 제염, 용융 및 압축 등의 과정을 거쳐 처분시설로 운반되어 폐기물의 방사선 준위에 따라 처분될 예정이다. 즉 원자로 내부구조물 일부 또는 일차계통의 폐수지 같은 해체폐기물 등은 별도의 저장시설 혹은 원전 내에 임시저장되고, 그이외의 모든 저준위 해체폐기물은 1단계 동굴 또는 2단계 친층처분시설에 처분되며 극저준위 해체폐기물은 1,2단계 처분시설에 처분도 가능하지만 대부분 3단계 매립형 처분시설에 처분되는 것이 효율적이다. 표 1에 방사성폐기물 종류별 처분 가능한 처분시설을 나타내었다.

표 8 방사성폐기물 종류별 처분방안

해체폐기물 준위	해체폐기물 종류	처분가능 처분시설
중준위방사성폐기물	원자로 내부구조물 일부	임시저장시설/동굴처분시설
	일차계통 제염 폐수지	임시저장시설/동굴처분시설
저준위방사성폐기물	상기 폐기물 이외의 모든	동굴/표층처분시설
극저준위방사성폐기물	방사성폐기물	동굴/표층처분시설/ 매립형처분시설

이와 같이 방사성폐기물의 종류와 준위별로 적절한 처분시설에 처분함으로써 해체시 발생하는 방사성폐기물을 보다 효율적으로 처분할 수 있을 것이다.

원전해체 슬러지폐기물 발생원 평가

Characteristics of Sludge Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈 · 박경록 · 조항래 · 황영환 · 이미현 · 홍성훈

한수원 중앙연구원

해체시 발생하는 슬러지폐기물은 일종의 습윤 상태에 있는 고체입자로서 원전 운영이나 원전 해체과정에서 발생하는 제2차 또는 제3차의 부산 폐기물(secondary waste)로 발생된다. 이들은 원전 운영과정에서 원자로냉각재계통(RCS)의 누설로 인한 오염제거나 액체방사성폐기물처리계통(LRS)에 의해 발생될 것이며, 통상적인 운영폐기물 처리과정과 원전 유지보수과정에서 발생하게 된다. 원전 해체과정에서는 원전 운영과정에서 발생하는 것 이외에 오염된 콘크리트 구조물의 표면제염, 원전 구성물의 절단, 제염공정 그리고 토양의 오염으로 발생될 것으로 파악하고 있다. 슬러지의 화학적 및 방사선학적 특성은 사용된 화학제와 발생 장소에 따라 크게 달라질 것으로 판단된다. 슬러지는 모재(base material)에 따라 철, 마그네슘, 칼슘 및 알루미늄 등의 수산화물로 구성되고, 증발 농축폐액은 대부분이 붕산 화합물로서 핵분열 핵종 및 방사화 핵종들이 포함되어 있을 것이다. 또한 원전의 유지보수과정에서 장치의 그리스를 제거하거나 세척하는 과정에서 유기 용매가 발생되고, 제염으로 인하여서는 유기화합물 등도 발생된다. 원전 운영이나 해체과정에서 발생이 예측되는 슬러지의 발생원에 대해 표 1에 기술하였다. 원전 해체시 발생이 예상되는 슬러지폐기물의 특성을 분석하여 향후 슬러지폐기물의 효율적인 처리 및 처분방안에 활용할 것이다.

표 1. 고리1호기 발생 예측 슬러지 종류 및 발생원

구분	발생원	비고
부식성폐기물	○ 증기발생기 2차측에서 발생된 부식성 슬러지 ○ 배관 하부에 침전된 부식성 슬러지	S/G 2차측
바닥 슬러지	○ 구조물 등의 바닥 아래 침전된 슬러지	Floor Drain Tank 등
Sump 슬러지	○ Sump 하부 침전된 슬러지	
탱크 슬러지	○ 탱크류 내 하부에 침전된 슬러지	Waste Holdup Tank 등
오일 슬러지	○ 오일/윤활유 탱크 등 하부 슬러지	Oil Tank 등
유기성 슬러지	○ 화학세정 등으로 발생된 유기물질함유 슬러지	EDTA 세정
콘크리트슬러지	○ 콘크리트 해체 제염작업 시 발생 슬러지	Fine Concrete 류
토양 슬러지	○ 액체폐기물 계통 등에서 방출되어 침사지에 침전된 토사 슬러지	Soil류,안트라사이트류
혼합슬러지	○ 여러 성분의 슬러지가 혼재된 슬러지 (오일, 유기성, 활성탄 등)	

원전해체 방사성폐기물의 효율적 관리방안

Effective Management of Radioactive Waste for Decommissioning of NPPs

이지훈

한수원 중앙연구원

영구 정지 중에 있는 고리 1호기의 예상 해체 방사성폐기물량은 약 8만 드럼 정도 발생할 것으로 예상하고 있다. 해체 원전 1호기 당 방사성폐기물의 감용 목표를 14,500 드럼으로 하고 있으며 이를 달성하기 위해서는 해체계획에서부터 해체공사에 이르기까지 해체 전반에 걸쳐 폐기물을 최소화하기 위한 다양한 노력이 필요하다. 해체 방사성폐기물을 최소화하기 위해서는 발생지점에서 폐기물의 발생을 줄이기 위한 노력과 함께 발생된 폐기물에 대한 적절한 분리(Segregation)가 중요하다. 방사성폐기물을 최소화하기 위해서는 폐기물의 발생 지점에서부터 분리를 시작하는 것이 매우 중요하다. 따라서 해체폐기물의 분리는 해체 현장에서와 해체 방사성폐기물 처리시설 내에서의 분리로 구분하였다.

표 해체 방사성폐기물 분리 개념

구분	분리 방안	폐기물 종류	
해체현장 분리	자체처분 대상 폐기물, 처리 여부에 따라 분리, 처리 대상 폐기물은 처리공정을 고려하여 폐기물 특성별 분리	자체처분 대상 폐기물	
		처리 대상 폐기물	·금속류 ·비금속류 ·초고압 압축 (SG tube 등) ·원자로 압력용기/내부구조물
		비처리(현장포장) 대상 폐기물	·방사화 콘크리트 ·콘크리트 조각 ·중준위 폐수지/폐필터
해체방사성 폐기물 처리시설 내 분리	상세분리	방사성폐기물	·제염으로 자체처분이 가능한 폐기물 ·제염으로 분류변경이 가능한 폐기물 ·제염으로 분류변경이 불가능한 폐기물

폐기물의 분리는 현장 여건 및 상황 등을 종합적으로 고려하여 폐기물을 최소화하면서 경제성을 확보하는 방향으로 방안을 설정하여야 한다. 이와 함께 방사성폐기물의 식별을 용이하게 하기 위한 방안으로 식별기호를 제시하였다. 제안한 폐기물의 식별기호는 처리대상, 비처리대상 및 자체처분대상의 분리를 용이하게 하도록 하여 처분 해체폐기물의 적절한 처분방안 및 자체처분 방안에 활용될 것이다.

원전 결빙배관 비파괴검사방안에 대한 고찰

A Study on Non Destructive Examination of Ice Plugging Piping in Nuclear Power Plants

조용배 · 김왕배

한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소

1. 서론

- 원자력 발전소 기기, 배관 및 구조물의 건전성확인을 위해 발전소 계획예방정비시 정기적으로 비파괴검사를 수행하고 있으나 격리 불가 계통 및 계통 내부의 유체를 배수할 필요성이 있을 경우 배관 주위에 결빙할 수 있는 냉동자켓을 부착하고 자켓 내부로 냉매를 유입시켜 배관내부의 유체를 결빙하여 흐름을 차단하는 배관결빙(Ice Plugging)기술을 활용하여 배관을 정비 할 수 있다.
- 결빙 차단기술은 플러그(얼음) 형상, 플러그-배관 간 마찰력 및 접합력 등 세가지 요소로 이루어지며 결빙된 플러그는 배관 벽에서 링 형상으로 형성되어 배관을 중심으로 진전된다. 배관 냉각시 직경이 감소되어 자켓 중앙부에 수축현상이 발생되며 플러그의 형상이 모래시계와 유사하게 나타나는 형상으로 플러그 이동이 제한되고 내부유체의 흐름을 차단할 수 있다.

2. 결빙배관의 결함

결빙배관에 발생할 수 있는 결함은 용접부가 아닌 배관 모재의 경우 일반적으로 결함은 없다고 보며 만약 있더라도 균열성 결함이 아닌 기공, 내재물 정도임. 결빙배관에서 작고 둥근 기공, 내재물 및 점 부식 같은 결함들은 형상면에서 극히 위험한 결함은 아니나 균열성 결함들 특히 축방향 결함은 응력분포로 볼 때 가장 위험하다. 그리고 용접부는 모재에 비하여 많은 용접 결함이 발생하므로 용접부 및 용접부 주위에 배관결빙(Ice Plugging)을 해서는 안된다.

3. 결빙배관의 비파괴검사 방법 및 대응방안

결빙배관의 건전성을 확인하기 위해 결빙 전후에 비파괴검사가 요구되며 국내의 경우 일부 발전소에서 육안 및 체적검사를 수행하고 있으나 미국 원자력규제위원회(NRC) 및 전력연구소(EPRI)의 보고서 검토결과 육안 및 표면검사를 수행하고 있고 내부 침식이 우려되는 배관에 대해 초음파 두께측정을 수행하여 구조적 건전성을 평가하고 있다. 결빙배관의 초음파검사를 위해서는 교정시험편이 필요하며 교정시험편은 검사대상 배관과 동일한 재료, 생산형태, 재질로 제작되어야 하나 정비대상 결빙배관이 다양하게 발생할 수 있어 교정시험편 사전 준비가 현실적으로 매우 어려워 국내 결빙배관의 비파괴검사는 육안 및 표면검사를 수행하고 필요시 초음파 두께검사를 수행하는 것이 적절할 것으로 판단됨.

저장대 내 사용후핵연료 배열에 따른 온도영향 평가

Evaluation of temperature effects

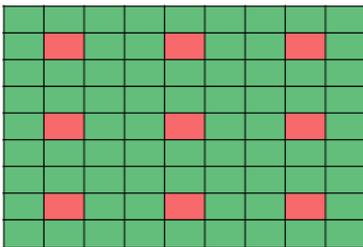
according to the arrangement of spent fuel in storage pool

김태현 · 김용덕 · 김기영 · 이동희 · 정성환

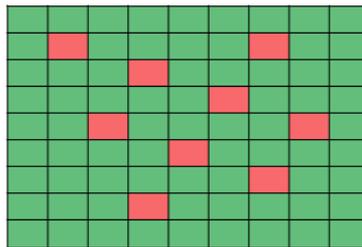
한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자로에서 방출된 사용후핵연료(Spent Fuel, SF)는 중간저장 또는 처분 전까지 발전소 내에서 보관된다. 우리나라의 경우 경수형 원자로에서 방출된 모든 SF는 원자로 내 사용후핵연료저장조(Spent Fuel Pool, SFP)에 습식으로 보관하고 있다. 정상적인 습식저장 조건에서는 SF의 저장에 문제가 없으나, 2011년 후쿠시마 사고 이후 외부전원상실조건에서 저장조에 보관된 SF의 안전성에 대한 우려가 대두되었다. 이에 Organisation for Economic Co-operation and Development(OECD)의 Nuclear Energy Agency(NEA)에서는 현재의 SF 저장개수를 유지하면서 최근에 배출된 뜨거운 연료의 배치를 조절하는 방법으로 외부전원상실조건에서 SFP의 비등이 일어나기까지의 시간을 조사하여 비상시 운전원의 조치시간이 얼마나 확보되는가를 연구하였다.

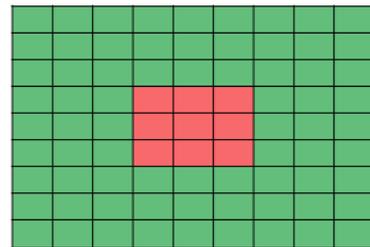
본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 활용하여 SFP 내 고열원의 SF 배열이 저장조 전체 및 국부온도에 미치는 영향을 평가하였다. 평가방법은 SF가 균일하게 분포된 Case 1, 불균일하게 분포된 Case 2, 중앙에 집중하여 분포된 Case 3로 나누어 각각의 온도를 평가하였으며, 이를 수계산 결과와 비교하였다. 또한, 각 해석조건에서 비등이 발생하기까지 걸리는 시간을 계산하였다. CFD 평가 결과, 불균일하게 분포하는 Case 2가 수계산 결과와 가장 비슷하게 나타났으며, Case 1과 3에 비하여 평균 1도 이상 낮은 값을 보였다. 또한 수면에서의 비등 발생시간도 Case 2가 394분으로 Case 1의 384분, Case 3의 386분에 비하여 약 10분가량 늦어 비상시 운전원의 조치시간을 추가 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 OECD NEA의 보고서와 동일한 결과로서, 발전소 SFP 내 SF의 배열을 불균일하게 섞는 방향으로 조정하는 것이 SF 관리측면에서 문제가 없다면 비상시에 도움이 될 것으로 판단된다.



Case 1



Case 2



Case 3

급수가열기 전열관 와전류 탐상 검사 교정시험편의 최적
가공방법에 대한 연구

A Study on Optimal Processing Method of Calibration Tube for Eddy
Current Inspection of Heat Exchanger Tube

한경석*

*한국수력원자력 중앙연구원

발전소 급수가열기 및 복수기 등의 열교환기의 전열관은 고온 고압의 부식 환경에 적합한 내열, 내식성 소재가 적용되며 가동 기간 및 가혹한 운전환경에 따라 응력 부식균열 등의 열화가 발생한다. 이를 감시 및 관리하기 위하여 와전류 탐상검사를 주기적으로 수행하여 발생하는 결함을 검출하고 평가하여 적합한 정비를 수행한다.

와전류 탐상 검사에서 검출된 결함의 크기를 평가하기 위하여 인공결함이 부여된 교정시험편을 통하여 교정곡선을 취득하며 이때 무엇보다 실제 결함을 평가하기 위한 교정시험편 인공결함의 건전성이 중요하다.

본 연구에서는 건전한 급수가열기 전열관의 와전류검사 평가용 교정시험편 제작을 위한 적절한 가공방법을 검증하기 위하여 대표적인 STS304L 재질의 두께 0.03, 0.05inch 규격 전열관을 대상으로 밀링과 EDM 가공방법으로 교정시험편 인공결함을 가공하여 각 변수에 따른 와전류 신호 왜곡 유무를 분석하였다. 그 결과 EDM으로 가공한 인공결함의 경우 모든 두께 전열관에서 와전류 신호의 왜곡이 발생하지 않았으나 기계적 밀링으로 가공한 인공결함에서 위상각 변화의 신호 왜곡이 발생함을 알 수 있었다. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 가공부의 파괴분석을 통한 영향요소를 추가적으로 분석 하였다.

두 가지 방법으로 가공한 인공결함의 표면 XRD 분석결과 밀링 가공한 인공결함의 표면에서 상자성체의 국부적인 변형 조직이 관찰된 반면 EDM으로 가공한 인공결함 시편은 변형 조직이 관찰되지 않았다. 이는 밀링가공으로 시편표면에 소성 변형력이 작용하여 투자율 변화를 유발하는 변형조직이 발생하였으며 이로 인하여 와전류 위상각의 왜곡이 발생한 것으로 분석되었다. 또한 변형조직에 의한 위상각 왜곡은 전열관의 두께가 얇을수록 영향이 큼을 알 수 있었다.

결론적으로 급수가열기 전열관 와전류 탐상 검사용 교정시험편의 가공방법에 따른 제작 및 실험을 통하여 건전한 와전류 교정곡선 취득을 위한 적합한 가공방법을 검증하였고 이를 통하여 최적의 제작 방법을 수립 할 수 있었다.

증기발생기 전열관 자유단의 마모깊이 측정 와전류 평가기술 개발을 위한 결합체적 특성 분석

Analysis of Defect Volume Characteristics for Development of Eddy Current Evaluation
Technique on Wear Depth Measurement at Freespan of SG tube

한경석*

한국수력원자력 중앙연구원

국내 운전 중인 원자력 발전소 증기발생기의 전열관에 적용중인 Alloy 690TT 재질의 현존 열화기구는 지지구조물과 잔류물질에 의한 전열관 마모가 있다. 지지구조물에 의한 마모는 간섭되는 지지구조물을 알 수 있고, 마모 형상이 예측가능하나 외부에서 유입된 잔류물질에 의한 마모는 유입되는 잔류물질이 다양하고 예측 불가능하여 그 마모형상이 마모를 유발하는 잔류물질에 따라 다양하게 나타날 수 있다.

전열관의 마모 및 그 깊이는 와전류 탐상검사를 통하여 검사 및 평가 되며 전열관 두께 기준 40% 이상의 결함에 대하여 관막음 조치를 취하고 있다. 현재 국내 증기발생기 전열관의 이물질에 의한 마모 깊이는 Flat Bottom Hall 형태의 모사시험편을 통하여 평가 곡선을 취득하여 평가하고 있다. 그러나 전열관의 마모에 의한 와전류 신호 왜곡은 그 불연속부의 형상과 체적에 영향을 받고, 잔류물질에 의한 마모형상이 다양하므로 마모부위에서 평가되는 와전류 왜곡에 의한 강도는 대비시험편의 Flat Bottom Hall 형태와의 차이에 따라 부정확하게 평가 될 수 있다. 이에 EPRI에서는 해외 원전에서 관찰된 여러 잔류물질에 의한 마모형상을 바탕으로 Axial groove, Circ groove, Flat, Football shape, Tapered hole, tapered, 45° tapered의 7가지 형태로 분류하고 각 형상을 깊이를 달리하여 교정시험편을 제작하고 깊이 평가 성능 검증을 통하여 검사기술사양서를 개발하였다.

본 연구에서는 국내 적용 증기발생기의 이물질에 의한 마모 평가기술을 개발하기 위해 이물질 마모 깊이 평가 기술사양서를 개발하기에 앞서 EPRI 검사기술사양서에 사용된 마모 형상별 표준시험편의 깊이평가 곡선의 적합성 여부를 판단하기 위하여 와전류 검출신호에 영향을 줄 수 있는 불연속부의 체적특성을 분석하였다.

표준시험편의 깊이별 진폭교정곡선 도출에서 깊이 외에 신호진폭의 변수로 작용할 수 있는 불연속부의 체적변화는 마모깊이에 따라 선형으로 증감하는 것이 가장 바람직하며 이를 확인하기 위하여 EPRI 검사기술의 교정시험편 결함부의 체적을 깊이에 따라 3D 설계를 통해 산출하고, 체적변화 추세선의 결정계수를 분석한 결과 일부 형상에서 0.9이하로 분석되었다.

결론적으로 EPRI 이물질 마모깊이 교정시험편 결함부의 와전류 신호 진폭을 사용하여 깊이측정 교정곡선을 취득할 경우 진폭에 영향을 주는 체적변화의 비선형성으로 인하여 교정곡선의 선형 특성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 추후 보다 정확한 이물질에 의한 마모깊이 측정을 위하여 깊이에 따른 결함 형상을 개선하여 마모체적의 선형특성을 보완할 예정이다.

보빈타입 자기카메라의 교체급수가열기 전열관 적용 실증시험 결과
Demonstration Test Applied to Replacement Feedwater Heater
Tube of Bobbin Type Magnetic Camera

한경석*

한국수력원자력 중앙연구원

원자력 발전소 2차측 급수가열기는 터빈으로부터 추출된 증기 열을 이용하여 급수를 가열하고 증기발생기 2차측에 부과되는 급수 온도차에 의한 열응력을 완화시켜 열충격을 방지하여 발전소 효율을 증대시키는 기기로서 전열관 누설 시 발전소 출력감발을 야기시킬 수 있는 주요 발전 설비중 하나이다. 고압급수가열기는 주어진 운전환경에서 발전소 수명 기간 동안 손상 없이 사용이 가능하도록 설계되었지만, 열교환기를 구성하는 핵심 부품인 전열관에서 잔류응력의 잔존으로 인한 균열 결함이 검출되어 관막음 정비 또는 교체되는 사례가 발생되고 있다. 이에 현재 보빈형 와전류 검사기법을 적용하여 주기적으로 검사를 수행하고 있지만 보빈형 와전류 검사 특성상 균열과 체적성 결함의 검출능 한계가 존재한다. 이에 본 연구원에서는 기존 검사방법의 한계점을 극복하기 위하여 자기장 분포의 왜곡을 감지할 수 있는 거대자기저항소자를 사용하여 체적과 균열 결함을 판별할 수 있는 보빈형 자기카메라 검사시스템을 연구 개발 하였으며 여러 실험을 통하여 증기발생기 검사에 적용되고 있는 보빈과 회전형 검사기법과 비교하여 결함 형상별 검출성능을 확인하였다.

본 연구에서는 실험을 통해 검증된 보빈형 자기카메라의 검출능 특성의 현장 적용성 검증을 위하여 현장에서 교체된 고압급수가열기를 대상으로 실증시험을 수행하였다. 실제 고압급수가열기 전열관의 결함 확인을 위하여 증기발생기에 적용되고 있는 보빈과 회전형 탐촉자 검사기법과 비교하여 신호를 취득하였으며 자체 개발된 자기카메라 검사기술 지침서에 의해 평가하였다.

그 결과 실제 고압급수가열기 전열관에서 발생한 결함에 대하여 기존의 검사기법과 비교하여 모든 결함의 검출이 가능하였고 자기카메라 신호형태 분석을 통하여 결함의 형태 또한 구분이 가능하였다.

결론적으로 보빈타입 자기카메라는 실제 발전소 급수가열기를 대상으로 한 실증시험 결과 검사기법 성능을 확인할 수 있었으며 향후 추가적인 실증시험을 통하여 다양한 실제 결함에 대한 검출 및 평가 성능을 확인하여 적용성을 높일 예정이다.

프랑스 원전의 RCC-E 법규 개정 및 현황에 대한 고찰

The Study of Revision and Current State of RCC-E Code in France Type NPP

박혜성, 정선철

한국수력원자력(주) 중앙연구원

RCC-E는 프랑스 가압경수로형 원전에서 전기기기와 I&C 시스템 및 관련 장비의 설계, 제작, 설치를 위한 법규이다. 본 법규는 산업계, 엔지니어링 회사, 제조업체 및 발전소 운영자와 협력하여 작성되었으며 IEC 표준을 추종하고 있다. 본 코드의 범위는 건설과 연관 시스템, 재료 설계, 정상 및 사고 환경조건에 대한 검증절차, 품질보증 요구사항을 포함한다.

RCC-E는 최초 1981년부터 2002년까지 Generation II 원자로 설계 관련된 개정판들이 발간되었다. 2005년 개정판에는 EPR 기술기준으로 계획 및 전기분야에 초점을 맞춘 I&C와 ETC-1, ETC-E와 관련된 설계 코드에 규정된 요구사항이 통합되어 있다. 2005, 2012 및 2016 개정판은 Generation II 및 III 원자로에 관련된 것으로 RCC-E의 법규를 보완 및 구현하고, 프로젝트에서 코드를 사용할 수 있도록 작성되어 있다. 또한 2005년 개정판은 CGN 감독하에 중국어로도 번역되어 발간되었다.

RCC-E 2016년 개정판은 Generation II, III와 IV 원자로, 연구용 원자로와 해군 원자로를 대상으로 작성되었다. 개정된 내용은 모니터링, 시스템, 장비 및 구성 요소와 시스템 설치를 보다 쉽게 식별하고 명확성을 확인할 수 있도록 모든 라이프사이클 활동을 포괄하였다. 또한, 코드의 범위에는 IAEA 요구사항이 포함되었으며, I&C 시스템에 대해 선택된 IEC 표준의 요구사항도 기술되었다.

RCC-E 법규 및 관련 기술기준을 개정하는 이유는 첫번째로 IAEA 요구사항에 대한 변경사항, 제도 공정에 대한 입력값으로 사용되는 전기 및 I&C 시스템의 설계 구축하기 위한 권장사항, 새로운 원자로의 설계에 관한 사항, 기술위원회 및 IEC 산업 표준과 관련된 IEC 표준에 대한 변경, 전기 및 I&C 시스템에 대한 일반적인 설계평가의 안전 당국의 조사에 따른 교훈, 후쿠시마 사고에 따른 운전경험에 대하여 피드백을 하는 것이다.

현재 RCC-E의 최신 개정판은 2016년판으로 건설 및 가동 운영중인 발전소의 운전경험, 원자력 안전당국 조사결과, 사용자 요구사항, 현재 적용된 기술기준 진보에 따른 IAEA의 요구사항, 산업계 성숙도의 변화가 반영되어 있다.

본 연구는 프랑스 원전의 RCC-E 법규에 대한 1981년부터 2016년까지의 개정사항을 확인하고, 전기기기의 설계, 검증, 설치 및 유지관리의 기술적 내용 및 안전조치 변경 내용을 확인하여 주기적인 안전성 향상을 할 수 있는 토대를 마련하고자 하였으며, 향후 프랑스형 발전소에 최신 개정판 적용을 위한 안전성 평가에 많은 도움을 줄 것으로 기대한다.

프라마툼 원전기기의 내환경검증 방법에 대한 고찰

The Study on Environmental Qualification Method of Nuclear Equipment in Framatome NPP

박혜성

한국수력원자력(주) 중앙연구원

RCC-E는 프라마툼 원자력발전소의 전기기기와 I&C 시스템의 설계, 검증 및 설치를 위한 법규이다. RCC-E 코드는 프랑스 발전소, 중국 발전소(M310, CPR-1000) 및 영국 발전소(HInkley Point의 EPR 원전) 건설에 적용되었다. 본 법규는 산업계, 엔지니어링, 제조업체 등 회사 및 운영자와 협력하여 작성되었으며, 원전기기의 설계, 제작, 내환경검증 절차 및 방법도 포괄하여 기술되었다.

내환경검증의 상세 기술기준으로 RCC-E에서 NF M64-001을 참고하고 있으며, 본 내용에 따라서 기기가 검증되어야 할 운전 환경조건, 검증대상 기기확인, 검증시험 절차 및 허용기준을 설정하여 체계적으로 수행한다. 검증방법은 시험검증, 분석검증, 조합검증 등이 있으며, 미국 발전소의 검증방법과 유사하다. 시험검증은 대표적인 검증방법으로 기기가 사용될 환경조건에 시편을 노출시켜 그 성능을 보장하는 것이다. 시편 수는 하나 또는 그 이상으로 다양하게 설정할 수 있고, 시편 선정은 샘플링 방법으로 선정할 필요는 없다.

검증시험 중 기기의 고장 또는 불만족한 시험결과가 발생할 수 있다. 이런 사건에 대한 불일치, 부적합사항 처리가 수반될 수 있으며, 이의 결과로 기기의 모델 변경이 요구되거나, 설계에 문제가 없을 시 모델을 변경하지 않고 수리 후 시험을 계속하거나, 또는 명시된 운전 환경조건 재검사가 수반될 수 있다. 만약 기기 모델을 변경하기로 결정하면, 검증 절차 재개 조건을 명시해야 한다. 검증시험 재개는 처음부터 전체 시험 재개, 변경된 기기에 대한 절차 계속, 보완적 검사 또는 시험 수행 등이다. 만약 운전 조건을 재검사해야 할 경우는 특정 검증 계획서에서 상응하는 허용기준을 변경해야 한다.

검증결과는 시험절차를 확인할 수 있도록 구성하고, 기기 식별, 검증 규정문서, 검증 절차, 검증 계획서, 각 단계별 시험결과, 시험보고서, 설계 주의사항, 검증시험 시 발생한 사건에 대한 불만족한 결과, 기기의 고장 및 이의 조치에 대한 요약 보고서를 추가하여야 한다.

본 연구는 국내 원전 현장에서 사용되고 있는 내환경검증 방법에 있어서 미국, 캐나다 등의 검증방법과 비교하여 원전의 안전성 증진에 향상할 수 있는 시험방법을 찾아서 보완 적용을 추진하고자 하였으며, 향후 원전기기의 성능검증과 안전성 확인에 도움을 줄 것으로 기대된다.

원전 해체 시 발생 슬러지폐기물의 특성에 대한 고찰
Review on the Characteristics of Sludge Waste Generated during
Dismantling of Nuclear Power Plant

조항래 · 유지환 · 박경록 · 이지훈

한수원(주) 중앙연구원

영구정지가 결정된 고리1호기가 2023년부터 해체작업이 시작될 것으로 로드맵이 수립되어 있다. 원전 해체 시에는 콘크리트, 토양, 금속, 혼합물 등의 형태로 처리처분이 곤란한 다양한 유기 및 무기 해체 슬러지폐기물이 다량 발생할 것으로 예상된다. 원전 해체 시 발생하는 슬러지폐기물은 발생원에 따른 바닥슬러지, Sump 슬러지, 탱크슬러지 등과 물리화학적 특성에 따른 콘크리트 슬러지, 토양슬러지, 유기성 슬러지, 혼합슬러지로 분류될 수 있다. 해체 슬러지폐기물은 원전 해체 시 수행되는 제염 및 해체공정을 통해 발생하는 부수적인 폐기물이므로 제염 및 해체공정의 종류와 특성을 먼저 파악함으로써 해체 슬러지폐기물의 발생특성에 대한 이해가 용이할 것이다. 먼저 배관 및 기기의 제염공정에서 물리적 연마에 의해 부식생성물이 발생하고 화학적 제염에 의해 부식성 슬러지가 발생한다. 콘크리트 제염공정에서는 스케블링과 셰이빙 작업에 의해 콘크리트 슬러지가 발생한다. 거의 모든 제염공정은 분진저감 및 화학약품 회석을 위해 물을 사용하기 때문에 다소 많은 수분을 함유할 수 있다. 바닥슬러지는 방사선관리구역 콘크리트 구조물의 바닥에 존재할 수 있는 슬러지로서 소량이지만 물리화학적 특성이 다양할 것이다. Sump(집수정) 슬러지는 기기배수, 바닥배수 배관을 통해 물, 오일, 제염용액, 세척수 등과 함께 침전된 고형물로서, 부식생성물, 미셀, 난용성 화합물 등이 포함될 수 있다. 탱크 슬러지는 액체방사성폐기물 등을 수집 저장하는 탱크 등을 장기간 운영함에 따라 비중이 큰 부식생성물, 미셀, 미네랄 성분에 의한 난용성 화합물(수산화물, 황산염, 탄산염, 인산염, 실리카, 규산염, 붕산염 등)이 침전될 수 있으므로 해체 시 탱크 바닥에서 발생할 수 있다. 부식성 슬러지는 화학제염을 통해 발생하는 제염을 위한 부식성 화학약품이 첨가된 제염액과 부식생성물이 혼합되어 발생할 것이다. 부식생성물 슬러지는 기기 및 배관의 물리적 연마 시 분진 저감용 물과 제거된 부식생성물이 혼합되어 발생할 것이다. 유기성 슬러지는 1차측 기기의 해체 및 철거 과정에서 발생하는 킬레이트제, 부동액, 윤활유 등의 유기성 물질이 Sump로 수집되어 입자성 물질과 혼합될 경우 발생할 수 있을 것이다. 오일 슬러지는 일종의 유기성 슬러지로서 1차측 기기의 해체 및 철거 과정에서 다량 발생하는 방사성 물질로 오염된 제어유, 윤활유 등의 오일이 다량의 부식생성물, 먼지 등의 입자성 물질과 혼합되지 않은 경우에 발생하며, 오일만 단독으로 존재할 경우에는 오일의 산화 및 열화에 의해 발생된 슬러지가 존재할 수 있으나 슬러지 폐기물로 분류될 수 없을 것이다. 혼합슬러지는 위에서 언급한 슬러지 중 2가지 이상이 혼합된 슬러지를 말한다. 따라서 소량이지만 다양하게 발생하는 해체 슬러지폐기물을 고감용 및 안정화시키고, 처분적합성을 확보할 수 있도록 슬러지 특성을 반영한 맞춤형 모듈형 패키지 기술의 개발이 필요할 것으로 보인다.

폴리머 콘크리트 고건전성용기 건전성 평가를 위한 기술기준에 대한 연구
A Study on the technical criteria for the evaluation of the integrity of
polymer concrete high integrity containers

이미현 · 황영환 · 이지훈
한국수력원자력(주)중앙연구원

원자력 산업에서 발생하는 방사성폐기물 중 고준위방사성폐기물을 제외한 극저준위방사성폐기물, 중·저준위방사성폐기물은 경주 처분장 방사성폐기물 인수기준에 따라 처분할 수 있다. 국내규정에서 폐기물은 고체형태이고 물리·화학적으로 안정하고 유동성이 없어야 한다. 농축폐액 및 폐수지는 처분 시 처분안정성을 추가적으로 확보하기 위해 고건전성용기를 적용할 수 있다.

고건전성용기는 자체용기 및 해당 포장물을 적절히 관리하고 건전성을 저해하지 않도록 성능과 물리·화학적 특징들을 갖추어야 한다. 고건전성용기의 재질로는 금속, 콘크리트, 고밀도 폴리에틸렌 등이 있다. 고건전성용기는 부식에 견딜 수 있어야 하며, 취급상황, 처분예상 압력 및 온도에서 구조적 건전성을 유지할 수 있도록 충분한 기계적 강도가 요구된다.

본 연구에서는 폴리머 콘크리트 고건전성용기의 장기건전성, 운반 및 취급에 대한 국내·외 기술기준에 대해 비교 평가 하였다. 국내 고건전성용기에 적용할 수 있는 기술기준인 원자력안전법의 중·저준위방사성폐기물 인도규정 및 방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정을 검토하였다.

고건전성용기의 건전성 평가에 대한 기술기준은 크게 재질기준과 물리적특성, 격납성으로 구분할 수 있다. 재질기준 항목에서는 압축강도(ASTM C39), 인장강도(KS F 2480) 등을 활용한 구성 재료의 물성시험 등이 요구된다. 처분환경에서 방사성핵종의 격납성능을 평가하기 위한 투수저항성은 투수시험(KS F 2597)과 이온확산특성평가(KS F 2711)의 기술기준을 적용할 수 있다. 고건전성용기의 주요 재질은 화학적·생물학적저항성·방사선안전성이 확보되어야 한다. 미국 NRC와 프랑스에서는 폐기물에 대한 방사선 열화를 검증하기 위해 누적 방사선량을 기준으로 폐기물 고화체에 대한 발생 가스의 특성과 양을 평가하도록 권고한다. 물리적특성 항목은 기본 내구성, 누설시험, 배기성능에 대해 평가한다. 기본 내구성은 A형 운반용기의 기술기준의 낙하시험, 적층시험, 관통시험, 인양시험 등을 적용한다. 누설시험에서는 고건전성용기의 설계수명기간 동안 밀봉체계에 대한 시험이 요구된다.

원자로 내부구조물의 처분에 대한 연구

A Study on Disposal of Reactor Vessel Internal Segment Packages

황영환 · 이미현 · 유지환 · 이지훈

한국수력원자력(주) 중앙연구원

지난 2017년 6월에 영구정지 상태가 된 고리1호기는, 우리나라에서 최초로 해체되는 상용 원자력발전소이다. 영구정지 이후로 해체계획서 마련 및 인허가, 사용후핵연료 냉각 및 인출, 시설물 해체, 부지복원 및 해체완료의 순서로 해체공정이 진행될 것으로 예상된다.

- 영구정지: '17.6.18
- 해체계획서 마련 및 인허가: ~ '22.6
- 시설물 해체: '22.6 ~ '30.12
- 부지복원 및 해체완료: '31.1 ~ '32.12

원자로와 내부구조물의 절단해체 공정은 시설물해체 단계에서 주요 공정중 하나로 분류된다. 오랜 시간의 운전을 통해 다량의 중성자에 노출된 원자로와 내부구조물은 방사화되어 있어 처리 및 취급 공정에서 세밀한 관리가 요구된다. 또한, 해체원전의 대부분의 방사능이 원자로와 내부구조물에 분포하므로 적절한 처분 전략의 수립이 필요하다.

본 논문에서는 절단해체 공정을 통해 생성된 원자로 내부구조물 절단물을 방사성폐기물 처분시설에 처분하기 위해, 발생한 포장물의 처분적합성에 대해 연구하였다. 방사화 된 원자로와 내부구조물의 방사선학적 특성을 평가하기 위해 MCNP와 ORIGEN 코드를 활용해 계산하였다. 계산된 방사화평가 결과를 바탕으로 원자로와 내부구조물 절단물의 물리적특성, 방사선학적 특성을 고려하여 폐기물 분류를 수행했다. 원자로 외부에 위치하는 insulation은 위치에 따라 저준위, 극저준위, 자체처분 대상폐기물로 분류되었다. 원자로는 저준위, 극저준위로 분류되었고, 교체된 원자로 헤드의 경우 일부를 제외하고는 자체처분 대상 폐기물로 분류되었다. 핵연료와 근접한 내부구조물의 경우 다양한 준위의 폐기물로 분류되었다.

중성자에 가장 많이 노출되는 노심 측면 구조물의 경우 중준위로 분류되었다. 노심 하부의 구조물은 저준위, 노심상부 구조물은 일부를 제외하고는 극저준위로 분류되었다. 가장 방사화된 정도가 큰 내부구조물 노심측면 영역의 중준위 폐기물 관리는 방사성폐기물 처분시설의 효율적인 활용을 고려해 신중하게 접근할 필요가 있다. 이외의 영역에서 발생한 저준위와 극저준위 폐기물을 대상으로 처분적합성을 평가 하였다. 절단공정에서 발생한 절단물과 이차폐기물이 적재된 포장물은 인수기준의 일반요건을 만족하는 것으로 평가되었다. 일부 비방사능이 높은 비균질폐기물(절단물 등)의 경우 현재 인수기준을 고려할 때 추가적인 고정화가 필요할 것으로 예상된다. 또한, 절단공정에서 발생하는 일부 입자성 이차폐기물의 경우 비분산성이 되도록 포장공정을 설계할 필요가 있을 것으로 분석된다.

대형원전 가압기 개선 상부지지구조물 건물구조물 적합성 평가
Evaluation of Building Structure Applicability of Improved Upper Support
Structure of APR+ Pressurizer

김규형 · 김성민*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)

원자력발전소의 원자로냉각재계통은 핵연료로부터 발생하는 열에너지를 수용하고, 전기를 생산하는 2차계통으로 전달하는 역할을 한다. 원자로냉각재계통의 중요한 기기인 가압기(pressurizer)는 원자로냉각재계통의 운전압력을 유지하며 부하 변동 시 원자로냉각재의 체적변화를 보상한다. 가압기의 상부 지지구조물은 가압기가 지진, 안전방출밸브작동, 원자로 건물내 재장전수탱크방출 및 분기관파단으로 발생하는 동하중을 받을 때 가압기를 지지한다. 가압기 상부지지구조물은 키 형상으로 정상운전 중에는 키웨이와 일정한 간극을 유지해야 하기 때문에 간극은 가압기 설계, 설치, 시험 및 운전 시 최소한으로 유지될 수 있도록 설계된다. APR1400 건설시 가압기 키-키웨이 간극 측정 시험 결과를 반영하여 대형원전 가압기 설치시 원활하게 키 간극 요건을 충족시킬 수 있도록 가압기 키 위치를 하부로 변경하였다.

본 논문에서는 대형원전 가압기 상부 지지구조물인 키 위치 변경에 따른 상부 기초구조물의 영향을 평가하였다. 키 위치가 하향으로 변경됨에 따라 keyway assembly(철골 구조물) 및 콘크리트 지지구조물 등의 가압기 상부 기초구조물도 위치 변경이 필요하다. 이에 따라 가압기 상부 지지구조물의 위치 변경 가능 여부 및 주변 계통설비와의 간섭 영향에 대해 검토하였다. 검토결과 콘크리트 지지구조물의 하향 조정에 따른 간섭은 없으나 keyway support의 설계변경에 따라 주변 대구경 배관과의 간섭이 예상되어 추후 상세 설계과정에서 관련 배관의 재배치가 필요한 것으로 평가되었다. 또한 가압기 상부 키의 위치 변경에 따라 설계하중이 증가하여 가압기 상부 기초구조물을 설계하였다. 상부 기초구조물에 대한 해석 모델을 생성하고 정상상태 및 사고하중 등에 대해서 구조해석을 수행하여 KEPIC MNF 3220 및 MNZ F 1332에 따라 지지대의 응력한계를 검토하였다. 응력평가 결과 일부 2.0" 및 2.5" 두께의 plate에서 허용응력을 초과하여 2.5" 및 3.0" 두께로 변경하여 허용응력을 충족하는 가압기 상부 기초구조물을 설계하였다.

대형원전 원자로냉각재계통 축소모델 주배관 측정 압력요동 분석
An Analysis of Pressure Fluctuation Measured in Main Piping of APR+
Reactor Coolant System Scale Model

김규형 · 정동화*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국전력기술(주)

원자력발전소 원자로냉각재계통은 원자로, 원자로냉각재펌프, 가압기, 주배관, 증기발생기 등으로 구성되고 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프 등 각 기기의 전후단에서 측정된 차압은 원자로냉각재계통을 감시 또는 보호하는 장치의 입력으로 사용하기 때문에 중요한 변수이다. APR1400 시운전시험에서 각 기기별 차압을 측정한 결과 압력요동이 OPR1000 원자로냉각재계통의 압력요동보다 크게 발생되었다. 대형원전 주배관은 APR1400과 동일하나 유량이 약 3.5% 증가 및 유속이 APR1400보다 크게 증가하였다. 따라서 유속에 따른 압력요동의 적정성 평가가 필요하여 대형원전 축소모델 시험장치를 구축하고 유량에 따라 압력요동의 크기를 측정하였다.

본 논문에서는 대형원전 1/5 축소모델 시험장치의 고온관과 저온관에서 유량의 변화에 따라 측정된 압력요동의 경향을 분석하였다. 시험장치는 원자로, 2대의 증기발생기, 4대의 순환펌프, 가압기, 고온관 및 저온관 등으로 구성하였다. 시험유량은 대형원전 정상유량의 1/42의 유량을 100%의 유량으로 설정하고 60% 유량부터 10% 유량 간격으로 110% 유량 까지 시험하였다. 난류의 크기를 나타내는 압력 파워스펙트럼밀도를 주배관에서 측정된 결과, 압력 파워스펙트럼밀도는 대략 3.4배에 비례하는 것으로 측정되었고 이는 주배관에서 발생하는 냉각재의 압력요동이 대략 유속의 2.2배에 비례함을 보여준다.

연소이력을 반영한 사용후핵연료의 임계안전해석 타당성 평가

Feasibility Evaluation of Spent Fuel Criticality Analysis applying the Burnup History

김도연

한국수력원자력 중앙연구원

국내 사용후핵연료저장조 임계안전해석시 사용후핵연료의 연소도이득효과를 적용하고 있다. 연소도이득효과는 핵연료집합체의 연소에 따른 반응도감소를 임계안전해석시 반영하는 것이다. 이러한 반응도의 감소는 핵분열생성물의 감소, 액티나이드와 중성자를 흡수하는 핵분열생성물의 증가에 기인한다. 연소도이득효과를 고려하기 위해서는 사용후핵연료의 누적연소도, 냉각기간, 평가핵종 등을 결정해야한다. 현재 임계안전해석 방법론은 누적연소도의 경우, 연소이력을 고려하지 않고 임계안전해석을 수행하고 있다. 본 평가에서는 기존 방법론을 이용한 경우와 실제 연소이력을 적용한 경우를 비교하여 임계안전해석에 미치는 영향을 분석하였다.

국내 원전의 핵연료집합체는 일반적으로 3주기 동안 노심에서 연소한다. 핵연료집합체가 연소하여 발생하는 핵종 중 반감기가 낮은 핵종의 경우 연소이력에 따라 계산 결과에 영향을 미친다. 일반적인 핵연료집합체는 1,2주기에 대부분이 연소된다. 따라서 연소이력을 적용한 핵연료집합체의 선원항 및 임계도 평가를 통하여 연소이력 영향에 대한 타당성 평가가 필요하다.

표 11 핵연료집합체 정보

사용후핵연료 제원	
집합체 타입	ACE7
U-235 농축도 (wt%)	4.5
1주기 누적연소도 (MWD/MTU)	20,000
2주기 누적연소도 (MWD/MTU)	35,000
3주기 누적연소도 (MWD/MTU)	45,000
냉각시간 (hours)	100

본 평가는 SCALE 6.1.2 코드의 ORIGEN과 KENO를 사용하였다. ORIGEN-S 모듈을 사용하여 대상 핵연료집합체의 연소이력을 포함한 계산을 수행하였다. 이후 KENO 모듈을 이용하여 임계안전해석을 수행하였다.

표 1은 대상 사용후핵연료의 연소이력을 나타낸 것이다. 1주기와 2주기에 핵연료집합체가 대부분 연소가 진행되며, 마지막 3주기의 경우 연소도가 약 10,000 MWD/MTU정도 연소하게 된다.

임계안전해석시 사용하는 핵종은 미국 NRC의 ISG-8.rev03 보고서에서 권고하는 28개 핵종(Actinides + Fission Product)을 사용하였다. 임계안전해석 결과, 연소이력을 반영한 케이스는 $k_{eff} : 0.86211 \pm 0.00037$ 를 가지며, 연소이력을 반영하지 않은 케이스는 $k_{eff} : 0.86171 \pm 0.00040$ 로 평가되었다. 연소이력을 반영한 결과 약 40pcm 차이의 보수적인 결과를 갖는 것을 확인하였다. 향후 다양한 연소이력 케이스를 고려한 계산 및 각 핵종이 미치는 영향을 분석 할 예정이다.

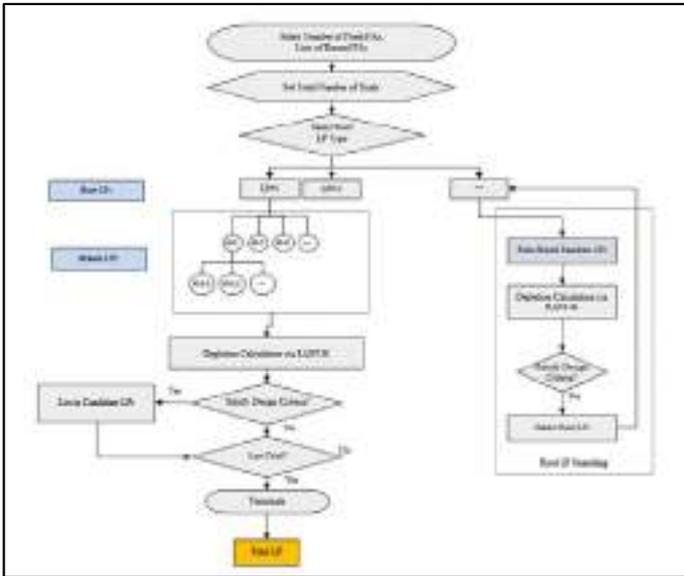
OPR-1000형 재장전 노심설계 장전모형 탐색시스템 개발

Loading Pattern Searching System for OPR-1000 Reload Reactor Core Design

김도연

한국수력원자력 중앙연구원

노심 장전모형 설계는 노심의 안전성과 경제성을 증진하고자 노심해석코드를 이용하여 연소중의 노심반응도 변화, 주기길이, 노심 안전인자, 출력분포 및 연소도 분포 변화 등을 예측하면서 우라늄 농축도, 신연료집합체 장전수, 핵연료집합체 및 가연성흡수봉 배치 등이 최적화된 장전모형을 생산한다. 중앙연구원에서는 기계학습 및 모의냉각법을 이용한 다주기 최적 노심 장전모형 탐색 기술을 개발중에 있다. 기계학습을 위해선 수만에서 수십만에 달하는 다양한 노심장전모형의 연소계산결과가 필요하다. 본 논문에서는 STREAM/RAST-K 2단계 노심해석체계를 이용하여 국내 OPR-1000형의 재장전노심에 대한 장전모형을 탐색하는 시스템을 개발하였다. 탐색시스템은 OPR-1000형의 노심장전모형 빅데이터 생산 및 자체 경수로 재장전 노심설계에 활용될 것이다.



노심설계 경험기반 장전모형 탐색시스템은 발전소를 운영하며 축적된 노심설계경험과 데이터베이스를 기반으로 한 노심 장전모형 자동탐색 시스템이다. 그림 1은 탐색시스템의 흐름도를 보여주고 있다. 장전모형 탐색시스템 내에 사용되는 노심설계코드체계는 한수원 중앙연구원이 개발 중인 STREAM/RAST-K 2.2다. 노심설계 경험기반 장전모형 탐색 모듈은 Python 언어를 통하여 프로그램을 구현하였다.

그림 1 노심설계 경험기반 장전모형 탐색시스템 흐름도

현재까지는 특정한 입력(OPR-1000, 신연료 69다발, 단일주기)범위에서 작동하도록 구현되어 있다. 향후 입력 범위를 우리 회사가 보유한 전체 노형 및 다주기로 기능을 확장할 예정이다. 또한 벤치마크 문제를 생산하여 노심설계 장전모형 탐색시스템에 대한 검증 계산을 수행할 계획이다.

운영기술지침서를 적용한 원전 상태감시 프로그램 개발
Development of Condition Monitoring Program for Operating Nuclear
Power Plants applying Technical Specification

이병오·김대웅·민지호·이관율
한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

한수원은 2016년부터 가동중인 원전전의 운전상태를 원격지에서 집중 감시할 수 있는 온라인 상태감시 및 조기경보 시스템을 운영하고 있다. 원격감시센터인 원전종합상황실 구축 운영으로 원전전 상태감시 및 통합관리에 대한 운영기술이 획기적으로 발전할 것으로 기대된다. 원전종합상황실은 현재 2인 1조로 근무하는 4조 2교대로 원전전의 운영 상황을 실시간 감시 및 관리하는 막중한 역할을 수행하고 있기 때문에 소수인원으로 원전전을 효과적으로 감시할 수 있도록 시스템의 개선사항 및 관련기술을 도출하여 단기간에 운영 효과를 향상시킬 수 있도록 해야 한다. 이에 원전종합상황실 근무자의 의견을 수렴하여 운영기술지침서를 적용한 상태감시 운영 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 운영기술지침서를 적용한 상태감시 프로그램 개발내역을 소개하고자 한다.

운영기술지침서 적용 상태감시 프로그램은 주요기능은 아래와 같으며, 구성로직에 따라 이상상태 발생 시 경보가 발생할 수 있도록 설계하였으며 신규 도입된 PI Vision Tool을 활용하여 웹기반으로 구현하였다.

- 알람/소리 경보 및 설정 기능
- Blinking 경보 및 단위시간당 변화율 경보값 설정 기능
- Hi/Low 경보값 및 인지 경보 설정 기능
- 태그 검색 및 운전정보 태그별 추이 분석 기능

따라서 운영기술지침서 적용한 상태감시 프로그램을 통해 원전종합상황실 운영 효율성을 향상시킬 뿐만 아니라 원전전 통합 감시 및 관리 기능을 제고될 것으로 사료된다.

웹기반의 원전 이상상태 자동통보시스템 고도화 구축

Establishment of Advanced Web-based Nuclear Event Warning System

이병오·김대용·민지호·이관율

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

2012년 2월초 고리1호기 정전사건을 계기로 보고 누락 또는 은폐를 근원적으로 방지하기 위한 정부의 원전 안전성 증진 종합대책으로 구축되어 2013년 1월부터 운영되고 있는 원전 이상상태 자동통보시스템(NEWS, Nuclear Event Warning System)으로 인해 인적요소 개입 없이 원전의 이상상태 발생 시 관련 사내직원 및 대외기관에 SMS 자동 발송으로 투명하고 신속한 원전 이상상태 상황이 관리되고 있다. 하지만 기존의 NEWS는 C/S기반의 ActiveX 기술로 개발되어 보안성에 취약하고 시스템의 각종 정보를 이용하기 위해선 매번 로그인이 필요하며, 경보이력 및 사용자 문자전송 이력관리도 취약하였다. 이에 전사 활용도 제고와 체계적 관리에 대한 사용자 요구사항 및 보안성이 강화된 웹 브라우저 인터넷 익스플로러11과 호환되는 실시간 정보관리시스템(PI System) 신규 Tool 도입과 같은 IT환경 변화를 고려하여 최신 웹기반의 원전 이상상태 자동통보시스템을 구축하였다. 이를 통해 통합인증 SSO(Single Sign On) 적용을 통한 시스템 로그인 정보 개선 및 이상신호 발생 시 관련신호 추이 감시와 경보 이력관리가 용이하도록 하였다. 이에 본 논문에서는 웹기반 원전 이상상태 자동통보시스템 고도화 구축내역을 소개하고자 한다.

상기 시스템은 이상상태 발생 시 자동통보 되도록 발전소 주요 운전변수를 수정 및 생성을 통해 실시간 이상상태를 감시할 수 있도록 설계하였으며, 신규 도입된 PI Vision Tool을 활용하여 웹기반으로 구현하였다.

따라서 웹기반 원전 이상상태 자동통보시스템 운영을 통해 대내외 이미지 제고와 신뢰성 향상에 기여할 뿐만 아니라 사용자에게도 포괄적인 정보 및 관리 편의 제공이 가능할 것으로 사료된다.

기상자료 통계전처리방법이 대기확산인자에 미치는 영향
 Influence of Statistical Compilation of Meteorological Data on
 Atmospheric Dispersion Factors

정윤희 · 김정미, 이영주, 조현준

한국수력원자력 중앙연구원

원자력시설 사고시 환경으로 방출되는 방사성물질에 의한 주민피폭선량평가를 위해 기상 특성을 파악하고 방사성물질의 거동을 예측하는 것이 필요하다. 사고시 방사성물질이 확산 되는 정도를 나타내는 대기확산인자를 평가하기 위해 USNRC의 Regulatory Guide 1.145를 근거로 개발된 PAVAN 코드를 사용하고 있으며, 이 코드는 대기안정도, 풍향 및 풍속의 발생빈도분포를 나타내는 결합빈도분포를 사용하여 방향 및 시간대별로 지표면에서의 상대적 방사능 농도를 계산한다.

대기확산인자는 통계적 수치를 근거하여 계산되므로 기상자료 처리방법에 따라 대기확산 인자 값은 차이를 나타낼 수 있다. 이러한 영향을 분석하기 위해 한빛부지에서 2009년부터 2017년까지 관측된 기상자료를 이용하여 통계처리기간(1년, 2년, 5년, 9년)에 따른 대기확산인자를 비교하였으며, 2017년 기상자료를 이용하여 발단풍속 설정 방법에 따른 대기확산인자를 비교하였다. 대기확산인자는 PAVAN 코드를 사용하여 구하였다.

기상자료 분석기간에 따른 대기확산인자는 최대 1.3배 이상 차이를 보였으며, 발단풍속 설정 방법에 따른 대기확산인자는 최대 1.7배 이상 차이를 보였다. 따라서 대기확산인자를 평가함에 있어 기상관측기간 및 발단풍속설정에 신중해야 할 것으로 판단된다.

표 12 기상자료 분석기간에 따른 대기확산인자 비교

기간 (y)	해당년도	대기확산인자(s/m^3)					
		0-2hr	0-8hr	8-24hr	1-4day	4-30day	annual
1	2017	1.29E-03	8.23E-04	6.58E-04	4.05E-04	2.02E-04	8.59E-05
2	2016-2017	1.24E-03	7.79E-04	6.18E-04	3.74E-04	1.82E-04	7.55E-05
5	2013-2017	1.08E-03	6.78E-04	5.38E-04	3.26E-04	1.59E-04	6.58E-05
9	2009-2017	1.16E-03	7.30E-04	5.78E-04	3.49E-04	1.69E-04	6.94E-05

표 13 발단풍속 설정에 따른 대기확산인자 비교

발단풍속 (m/s)	대기확산인자(s/m^3)					
	0-2hr	0-8hr	8-24hr	1-4day	4-30day	annual
0.1	1.10E-03	6.75E-04	5.29E-04	3.12E-04	1.50E-04	6.08E-05
0.2	1.16E-03	7.20E-04	5.67E-04	3.37E-04	1.62E-04	6.72E-05
0.25	1.16E-03	7.20E-04	5.67E-04	3.37E-04	1.62E-04	6.72E-05
0.3	1.17E-03	7.24E-04	5.70E-04	3.44E-04	1.68E-04	6.95E-05
0.4	1.15E-03	7.26E-04	5.77E-04	3.52E-04	1.73E-04	7.22E-05
0.5	8.24E-04	4.99E-04	3.88E-04	2.25E-04	1.03E-04	4.04E-05

주기 연소도에 따른 소형냉각재상실사고 파단 스펙트럼 해석
Code Analysis on the break spectrum depending on cycle burnup
during SBLOCA event

이석호*

한국수력원자력 중앙연구원

냉각재상실사고에 대한 신규 허용기준(안)이 핵연료의 성능과 특성을 기반으로 미국으로 부터 제정되었으며, 국내에서도 이에 대한 법제화가 추진 중에 있다. 이와 더불어 해당 기준을 만족할 수 있는 평가모델의 개발이 사업자에 의해 수행되었으며, 현재는 이를 보완하기 위한 상세모델의 개발이 국내 표준형 원전에 대해 이루어지고 있다. 동 논문에서는 신규 요건이 기반으로 하고 있는 핵연료의 성능특성과 관련하여 소형냉각재상실사고 시 주기 연소도에 따른 배관의 파단 스펙트럼 분석 내용을 제시하고자 한다.

기 인가된 SPACE 기반 평가 방법론으로부터 신규 허용기준에 따른 요구모델이 반영된 개선된 전산코드가 평가에 사용되었으며, APR1400형 원전의 다양한 연소도 모의를 위해 수력채널 및 열구조 모델을 상당부분 변경하였다. 파단 크기는 0.02 ft^2 부터 DVI관 노즐 직경에 따라 최대 파단 면적인 0.4 ft^2 로 제한하였다. 노심의 경우 고온 연료봉은 3개의 그룹(신연료, 1회 연소 연료, 2회 연소 연료)으로 모델링하고 각 고온 연료봉은 2개의 Pseudo rod를 연결하여 최대와 최소 연소도를 고려할 수 있도록 9개의 고온 연료봉으로 모사되었다. 가장 보수적인 핵연료피복재온도와 산화율 결과를 도출하는 제한 파단을 선정하기 위해 5개의 주기연소도 (0, 5, 10, 15, 20 GWD/MTU)에 대해 평가가 수행되었으며, 가장 높은 핵연료피복재온도와 산화율을 예측하는 파단이 결정되었다. PCT의 경우 0.07 ft^2 에서 1,162.4 K값을 보였으며, 이 때 주기연소도는 0 GWD/MTU, 최대 핵연료피복재온도 여유도가 가장 적은 고온 연료봉의 연소도는 13.0 GWD/MTU이었다. 또한, 가장 제한적인 산화율을 나타낸 경우 역시 0.07 ft^2 파단에서 0.413%로써, 이 때 주기연소도는 20 GWD/MTU이며, 산화율의 여유도가 가장 적은 고온 연료봉의 연소도는 60.0 GWD/MTU이다. 이는 현행 허용기준인 핵연료피복재온도($< 2,200^\circ\text{F}$)와 산화율 ($< 17\%$)을 적용할 경우 허용기준을 만족한다. 그러나, 신규 요건에 따른 산화율 제한치와의 비교 시 노심자료의 선정 방식에 따른 제한치의 변경에 의해 만족여부가 상이한 것으로 평가됨에 따라 이에 대한 상세평가 방안의 수립이 필요한 것으로 분석된다.

대형원전 주증기파단사고 시 안전주입에 따른 반응도 영향 평가 및 설계 검토

Evaluation of total reactivity by safety injection during SLB for NPPs
having large capacity

이석호*

한국수력원자력 중앙연구원

APR1400형 원전의 후속 노형으로 개발된 1500MWe급의 대형원전은 기존 노형 대비 안전 기능 수행을 위한 고유 설계특성을 채택하고 있으며, 그 중 안전주입펌프와 관련하여 출력 증가의 영향으로 약 30%의 증대된 용량을 가지게 되었다. 동 논문에는 최근 대형원전 안전 해석 수행 시 선행된 해당 안전주입 용량의 적절성에 관한 최종평가 결과와 반응도 허용기준 만족을 위한 추가적인 설계 검토 내용을 기술한다.

대형원전에 대해 30% 감소된 안전주입 유량에 따른 반응도 영향을 분석하기 위하여 가장 제한적인 설계기준사고 중 하나인 주증기파단사고 분석이 수행되었으며, 전산코드로는 CESEC-III와 SPACE가 사용되었다. 안전주입계통은 보수적으로 가압기 압력이 최저설정치인 1,555 psia에 도달하면 자동으로 원자로냉각재계통에 안전주입을 하도록 가정하며, 전출력 및 영출력 조건에서의 소외전원상실 유무에 따른 모든 경우에 대한 평가를 통해 노심 내 총 반응도의 변화를 확인하였다. 두 전산코드 모두 사고 후 계통 내 거동 및 사건 시간은 유사하게 예측되었으며, 영출력의 소외전원상실을 고려한 경우에 가장 낮은 부(-) 반응도를 나타내었다. 최종적인 결과로 SPACE의 경우 최대 총 반응도는 $-1.16232\% \Delta\rho$ 이며, CESEC-III의 결과는 $-0.266451\% \Delta\rho$ 로써 두 경우 모두 재임계가 발생하지 않아 출력증가에도 불구하고 기존 안전주입용량의 적용으로 대형원전의 안전성은 확보될 수 있는 것으로 평가된다. 또한, 설계 관점으로 부터 정지여유도 변경($-5.5\% \Delta\rho \sim -6.0\% \Delta\rho$), 저압안전주입작동설정치 변경(1,555psia \sim 1,700psia), 증기발생기 저수위 신호 추가(LSGP에 의한 안전주입작동), 그리고 IRWST 붕소농도 변화(4,000ppm \sim 15,000ppm) 등 노심 총 반응도에 미치는 다양한 설계 영향이 정량적으로 평가되어 제한사고인 주증기파단사고 시 재임계 발생을 제한할 수 있는 설계변경 항목들이 도출되었다.

원전 구조물 비선형 상세내진해석을 위한 유한요소해석
요소 타입에 따른 민감도 분석

Sensitivity Analysis of FE Element Type for Detailed Nonlinear Seismic
Analysis of Nuclear Power Plant Structures

남현석* · 김태순* · 김갑순* · 이상섭*

*한국수력원자력 중앙연구원

2011년 동일본 지진 이후 설계기준을 초과하는 지진, 해일 등 외부사건에 대한 원전 설비의 구조건전성 평가 및 추가적인 안전 여유도 확보는 중요한 현안으로 부각되었으며, 특히 원자력발전소 주요기기에 대한 내진평가관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 설계기준지진을 고려한 원자력발전소의 원자로 및 배관 등 주요기기에 대한 내진설계는 탄성해석을 기반으로 수행되었으며, 대다수의 내진해석에 사용되는 유한요소해석 모델의 경우 해석시간 및 수치해석 계산상의 편의를 위해 Beam요소를 적용 하였다. 그러나 설계기준을 초과하는 대형지진 조건에 대한 내진 여유도 확보를 위해서는 재료의 비선형성을 고려한 평가가 수행되어야 하며, 이와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 재료의 비선형성을 고려한 내진평가법을 적용할 경우, 탄성해석 대비 유한요소해석 결과로 추출해야 하는 정보가 많아 보다 복잡한 유한요소해석 모델이 요구된다. 그러나 시간이력 해석을 수행해야하는 비선형 상세내진해석 특성상 3차원 Solid 요소만을 고려한 모델을 평가에 사용할 시에는 해석시간 및 수치해석 수렴성의 문제가 발생할 수 있어, 이에 대한 해결방안이 필요하다.

이를 위해 본 논문에서는 원전 구조물 비선형 상세내진해석에 사용될 수 있는 최적의 유한요소해석 모델을 선정하기 위한 민감도 해석을 수행하였다. 각 변수에 따른 영향을 확인하기 위해 간략한 해석모델을 토대로 요소 크기, 요소 타입에 따른 민감도 해석을 수행하였으며, 해석 결과로 추출되는 삼축응력, 소성변형률 등을 비교하여 최적의 해석모델을 선정하였다.

시료의 기하학적 형상과 물리적 성질이 방사선 계측효율에 미치는 영향

신승수* · 김경호 · 심소정 · 최영구

원전해체연구소 기술개발팀

원자력 발전소의 해체과정에서 발생하는 다량의 시료에 대한 감마선 분광분석법에서는 분석대상 시료의 기하학적 구조와 동일한 교정용 표준선원을 이용하여 검출기의 에너지에 따른 효율 교정작업이 선행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 교정용 표준선원과 분석대상 시료의 입도 및 밀도가 다를 경우 발생하는 자체 감쇠(Self Attenuation) 보정과정에서 계측 효율에 영향을 주는 몇 가지 변수들에 대해 비교 분석하였다. 그리고 해체 시 발생할 수 있는 금속 폐기물, 토양 및 콘크리트 등 다양한 시료를 측정하는 상황을 상정하였다. 이러한 조건에서 방사선 측정에 왜곡을 불러일으키는 원인을 분석하는 것에 초점을 맞추고, 그 인자가 방사선 계측효율에 영향을 미치는 정도에 대해 조사하였다.

부피가 큰 시료의 경우 점선원과 다르게 시료에 의한 계측값의 왜곡이 일어나게 되는데, 이러한 왜곡이 방사선 계측에 어떤 영향을 미치는지에 대해 조사하였다. 시료의 기하학적인 형상과 입자의 크기 자체 또한 계측효율에 영향을 주는 변수로 작용하는데, 부피가 클수록 자기 감쇠 효과가 커짐을 확인하였다.

본 연구에는 이러한 변수들에 대한 물리적 변수들과 기하학적 형상이 방사선 계측효율에 미치는 영향을 분석하고 향후 시행될 원전 해체시료와 토양시료에 적용하고자 한다. 본 연구의 결과로 해체폐기물 방사선 계측 정확도 향상이 기대되며, 이를 응용하면 각종 교정선원의 신뢰성 확보에도 도움이 될 것으로 예상된다.

터빈 추력베어링 마모감지기 설정오류에 의한 계측기 비정상 지시 고찰

A Study of Abnormal value from Installation error of Thrust Bearing Wear Detector in Steam Turbine

김한울, 정혁진

한국수력원자력 중앙연구원

증기터빈의 추력베어링 마모감지기는 비정상적 축추력으로 인한 추력베어링 패드 손상을 감시하기 위해 설치된다. 증기터빈의 추력베어링 마모감지기는 일반적으로 비접촉식 센서(Proximity Probe)를 활용하여 패드 손상을 감시한다. 패드 손상이 심각해질 경우 마모감지기 지시값으로 인해 경보가 발생할 수 있으며, 보다 심각해진다면 발전소 정지를 유발할 수 있다. 이 논문에서는 비접촉식 센서(Proximity Probe)를 사용하는 추력베어링마모감지기의 설정오류로 인해 발생한 비정상 지시 사례를 고찰하였다.

추력베어링은 고압터빈과 저압터빈 사이에 설치되어 전체 축계의 축방향 위치 고정과 추력 흡수 역할을 하게 된다. 해당 발전소의 정상조건 추력베어링 마모감지기 지시값은 $-0.13 \sim -0.09\text{mm}$ 수준이었으나, 계획예방정비 기간 중 계측기 설정 이후 지시값이 $-0.55 \sim -0.53\text{mm}$ 을 나타내어 이에 대한 원인을 분석하였다.

해당 발전소의 추력베어링 마모감지기는 추력베어링의 링(Ring)에 설치되고 축을 지시하여 추력베어링 패드 손상을 감시한다. 추력베어링 마모감지기 기준값 설정은 축정렬 및 추력베어링 조립이 완료된 상태에서 수행하며, 추력베어링과 축 사이 존재하는 간극으로 인해 터빈 축을 한 방향으로 밀어놓은 상태에서 계측기를 설정한다. 이 때 마모감지기가 기준값(0mm)으로 지시하는 지점을 설정하기 위해 축이 쓰러스트 칼라(런너)면 사이에서 이동 가능한 거리의 절반을 계측기 전압변동값으로 보상하게 된다.

계획예방정비 기간 중 계측기 설정 과정에서 계측기 전압변동값으로 보상하는 값을 케이싱과 링의 변형에 의한 영향을 제외하고 순수한 축 이동량만 반영하였으며, 추가로 계측기 설정 시 실제 축을 밀어놓은 방향이 반대로 되어 있어 $-0.55 \sim 0.53\text{mm}$ 비정상 지시값이 측정된 것으로 판단된다.

전압변동값에 보상되는 값을 축 이동량 전체로 반영하고 축을 밀어놓은 방향을 고려하여 보정값을 적용하면 $-0.09 \sim -0.07\text{mm}$ 로 정상 범위 내인 것으로 분석되었다.

본 논문을 통해 터빈 추력베어링 마모감지기 설정 시 축의 위치를 정확히 확인하고 축의 이동량을 적절하게 보상해야만 이번 사례와 같은 비정상 지시 발생을 예방할 수 있으며, 불필요한 경보 발생 및 발전소 정지를 막을 수 있음을 확인하였다.

원전 제어시스템에 대한 효율적인 보안성평가 방법론 연구

A Study on Security Assessment Methodology for Control Systems in Nuclear Power Plants

이수일

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

신형 국내원전은 컴퓨터 기반의 시스템 등 많은 첨단 디지털 기술을 적용하고 있으며, 4차 산업혁명 시대에 IoT 기술 등의 적용에 대한 요구가 많은 상황이다. 하지만, 이러한 디지털 기술 적용에 따라 원전에 대한 사이버보안 취약점이 커진 반면, 지능형지속위협(APT, Advanced Persistent Threat) 등 사이버위협 기술이 고도화됨에 따라, 원전은 제어시스템의 안전기능 등에 대한 악영향이 없도록 사이버보안 프로그램을 이행하도록 요구받고 있다.

미국 원자력규제위원회(U.S. NRC)는 2009년에 10CFR73.54를 개정하여, SSEP(Safety, Security and Emergency Preparedness) 기능에 대해 사이버보안을 이행하도록 요구하였고, 2010년에 Reg. Guide 5.71을 발행하였다. 또한, 국내 원자력안전위원회는 2013년에 KINAC/RS-015 기술기준서를 제정하여 국내 원전에 대한 사이버보안계획 이행을 요구하고 있다.

국내 원전 사이버보안계획 이행을 위해서는 발생 가능한 사이버 위협으로부터 원전 제어시스템을 체계적으로 보호하는 보안성 평가 방법을 통한 적절한 보안조치 이행이 필수적이다. 보안성평가에 위험관리 모델을 적용할 수 있는데, 예로 NIST 모델 및 IAEA Security No.17에서 제시한 모델을 들 수 있다. 국내에서는 원전 내 대상 시스템의 중요도 점수(importance score)와 보안조치 우선순위에 따라 보안수준(security level) 계산을 통해, 보안수준을 가장 빠르게 높일 수 있는 대상 시스템과 보안조치를 우선 적용할 수 있는 위험기반 보안성 평가 모델이 개발되었다. 하지만, Reg. Guide 5.71, RS-015 등은 모든 대상 자산(assets)의 위험도에 상관없이 동일한 수준의 보안조치 적용을 요구하고 있으므로, 위험관리 모델을 직접 적용할 수 없는 제약이 존재한다. 이에 미국 원전사업자협회(Nuclear Energy Institute)는 중요도기반 접근법(consequence-based approach)을 적용하여 보안조치 프로세스의 간소화와 효율화에 초점을 둔 NEI 13-10 지침을 개발하였고, 미국 원자력규제위원회는 이를 승인하였다. 미국 EPRI는 대상 자산의 특성을 분석하여 공격 가능한 경로를 도출하고, 효과가 있는 보안조치를 적용 및 평가할 수 있는 기술적 평가 방법론(Technical Assessment Methodology)을 개발하였다. 국내에서는 유형평가(type assessment), 공격벡터(attack vector) 필터링 등을 통한 보안성평가 방법론과 자산의 다양한 속성정보를 이용한(공통 보안조치, 보안조치 상속특성, 자산의 특성 분석, 물리적방호를 이용한 대안조치 등) 보안이행 방법론에 대한 연구가 있었다.

국내 원전은 NEI 13-10 지침에 기반한 단계적보안조치 방법론 개발하고 유효성 검증을 통해, 현재 보안성 평가 및 이행에 적용하고 있다. 이는 원전의 대상 자산 중 핵심기능을 수행하는 자산에 집중적으로 보안조치를 적용하는 중요도기반 접근법으로서, 자산의 중요도 평가를 수행하고, 기존 원전의 안전설계 특징, 사이버침해 경로, 설비 기능 등을 고려하여 가장 효율적인 보안조치 집합을 도출한다. 결과적으로, 원전의 보안조치 적용 프로세스를 최적화하는 장점(단기간 소요, 동등수준 보안조치 유지 등)이 있는 것으로 판단된다.

원전 제어시스템의 사이버 위협 및 취약점 분석 방법론 고찰

A Study on Cyber Threat and Vulnerability Analysis Methodology for Control Systems in Nuclear Power Plants

이수일

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

디지털 계측 및 제어시스템이 전범위적으로 적용되면서 국내 신형원전은 사이버 취약성이 증가하고 있으며, 스텍스넷(Stuxnet) 같은 지능형지속위협(APT, Advanced Persistent Threat) 등으로 사이버 위협은 점차 고도화 되어가고 있다. 이에 원전 제어시스템은 다양한 규제기준에 맞는 보안조치를 통해 적절한 보안수준을 유지하여야 한다.

미국 원전사업자협회(Nuclear Energy Institute)는 중요도기반 접근법(consequence-based approach)을 적용하고 있고, IAEA 등은 위험기반 접근법(risk-based approach)을 적용하고 있다. 위험기반 접근법은 위협의 크기와 취약점의 크기를 이용하여 위협 가능성(Likelihood)을 구하고 자산의 중요도(또는 영향성, 심각도, Consequence)를 함께 계산하여 위험도(Risk)를 산정하는 방식으로 현재 국내원전에 직접적으로 적용되고는 있지 않다. 하지만, 본 위험기반 접근법에서 다루는 사이버 위협의 크기는 현재 적용되고 있는 규제기반 접근법(compliance-based approach)의 각 보안조치에 해당하는 위협 유형 및 크기를 정의하는 경우에 활용될 수 있다.

본 논문에서는 원전에 적용 가능한 제어시스템 사이버 위협 및 취약점 분석 방법론을 제안하고자 한다. 위협 및 취약점 분석은 산업용 제어시스템(특히 원전 제어시스템)의 위협요소가 무엇인지를 찾아내기 위해 규제기준, 위협 사례, 과거 위협분석 자료 등을 통해 위협 분석을 수행하고, 원전 제어시스템에 어떤 취약점이 주로 존재하는 지를 과거 통계데이터로부터 분석하는 역무이다. 본 논문의 위협 및 취약점 분석 방법론은 규제기준으로 IAEA, NIST, NEI 문서를 참고하였고, 주요 정보통신기반시설 취약점 평가 결과, 시범 적용된 위협 및 취약점 분석 결과를 참고하여 개발되었다. 위협분석 이전에 자산분석 단계를 통해 자산의 중요도가 도출되어야 하며, 위협분석 단계에서는 발생빈도에 따른 공격방법 식별, 위협 식별, 위협 발생빈도 도출, 위협 용이성을 우선 도출한다. 이를 통해 위협 발행 가능성과 위협에 따른 심각성을 도출하고, 위협등급 계산식에 의해 위협등급이 결정되게 된다. 취약점 분석 방법은 NIST 800-53을 기반으로 개발하였고, 결국 사이버 위협과 취약점의 매핑을 통해 위험도가 산정될 수 있다.

시간에 따라 위협 발생빈도는 변경될 수 있고 대상 설비의 취약점도 변경이 가능하므로, 이를 대입하여 해당 위협의 발생빈도 변경과 대상설비 변경에 따른 위험을 즉각적으로 추정 또는 관리할 수 있게 된다. 본 논문에서 제안하는 사이버 위협 및 취약점 분석 방법론은 원전 제어시스템에 대한 사이버 위협의 변화를 모니터링하고, 규제기반 접근법 이행 시 위협 유형 및 크기 정의 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

대형원전 제어봉구동장치(CEDM) 가속수명시험

The Accelerated Life Test of Control Element Drive Mechanism(CEDM) for Large Nuclear Power Plants

이상섭

한국수력원자력(주) 중앙연구원

대형원전 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, CEDM)는 기 개발된 APR+ CEDM을 바탕으로 운전성능을 더욱 향상시키기 위해 설계를 개선한 CEDM이다. CEDM은 원자로 내 중성자를 흡수하기 쉬운 재료로 제작되어 원자로용기 상부에 위치하며, 제어봉 삽입시 중성자를 흡수하여 노심의 핵분열을 감소시킨다. CEDM은 제어봉의 삽입, 인출 등을 통해 원자로 출력을 조절하고 비상시 제어봉의 신속한 삽입으로 부반응도를 주입하여 원자로를 안전하게 정지시킨다. 본 연구는 대형원전 CEDM 개발 과정 중 성능검증을 위해 수행된 가속수명시험을 대상으로 한다.

일반적으로 CEDM 가속수명시험은 정상운전시 CEDM 모터집합체의 구동수명거리를 검증하기 위한 목적으로 발전소 운전압력 및 온도 조건에서 수행된다. 또한 실제 발전소 운전상태를 모사하기 위해 CEDM 냉각용 공기는 공급된다.

본 연구는 대형원전 CEDM 가속수명시험을 위해 제어봉 구동을 모사하는 별도의 시험설비를 구축하였으며, 성능시험을 위한 시험요건서를 작성하였다. 해당 시험요건서에 따라 가속수명시험은 발전소 정상운전 조건(온도 및 압력)에서 제어봉을 고속 운전모드로 구동시키면서 2종류의 제어봉모사추를 기준으로 진행 중에 있다. 시험시 제어봉의 삽입 및 인출을 위한 행정거리는 실제 노심길이을 모사한다. 또한 가속수명시험은 대형원전 CEDM 개발시 수행하는 타 성능시험과 연계하였으며, 시험과 관련하여 취득하는 자료는 누적구동거리 및 마모상태 확인을 위한 주요 부품의 치수측정이다.

대형원전 CEDM 개발을 위해 안전성 및 성능을 검증하기 위한 다양한 시험이 진행 중 또는 완료되었으며, 모든 성능검증 시험이 성공적으로 마무리될 경우 원전 안전성 향상 및 기술 경쟁력 제고에 이바지할 것으로 기대한다.

대형원전 제어봉구동장치(CEDM) 전력측정시험

The Power Measurement Test of Control Element Drive Mechanism(CEDM) for Large Nuclear Power Plants

이상섭

한국수력원자력(주) 중앙연구원

대형원전은 세계 원전시장에서 기술 경쟁력을 강화하고 안전성 및 경제성을 향상시키는 동시에 원천기술을 확보하기 위해 APR1400 후속노형으로 개발되어 표준설계인가를 획득한 1500MWe급 원전이다. 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, CEDM)는 원전의 노심출력을 제어하고 비상시 제어봉의 신속한 삽입을 통해 원자로 정지에 필요한 부반응도를 제공하는 기기이다. 본 연구에서 개발 중인 대형원전 CEDM은 기 개발된 CEDM 설계를 최적화하여 구동거리를 증가시키고, 기기 성능을 더욱 향상시키는 것이 목표이다.

대형원전 CEDM 전력측정시험은 CEDM 개발에 따른 성능검증 시험의 일환으로 수행되었으며, Cold 상태 및 Hot 상태 운전조건시 CEDM 모터집합체 운전에 요구되는 자료를 취득하기 위한 목적으로 이뤄졌다. 전력측정시험은 온도, 제어봉모사추 무게 및 CEDM 운전형태에 따른 다양한 조건을 모사한다.

본 연구에서 수행된 전력측정시험은 CEDM 운전시 모터집합체 구동에 요구되는 전력, 전류 등 전력 Data를 온도조건(상온/대기압, 원전 운전온도/압력), 제어봉모사추 무게(3종) 및 제어봉 운전형태(인출, 삽입)에 따른 세부 시험조건에서 측정하였다. 시험시 냉각을 위한 CEDM 냉각온도 및 풍량은 성능시험요건서에 기술된 운전조건이다. 시험은 측정장비로 Power Quality Analyzer(PQA)를 사용하였으며, CEDM 전력함에 PQA를 결선하여 전력 Data를 취득하였다. 시험절차는 CEDM 구동상태 및 PQA 결선상태 확인 후, CEDM 인출 또는 삽입 운전 중 Data를 취득하고 그 유효성을 확인하는 순서이다. 본 시험을 통해 개발 중인 대형원전 CEDM에 필요한 전력 Data가 확보되었으며, 이 자료는 CEDM 설계에 활용될 예정이다.

본 연구에서 개발 중인 대형원전 CEDM과 관련하여 다양한 성능검증시험이 완료 또는 진행 중이며, 관련 성능검증시험이 성공적으로 마무리될 경우 국내 원전의 안전성 제고 및 성능향상에 기여하고 향후 원전수출에도 이바지할 것으로 예상된다.

중수로원전 공칭조건 및 노물리-열수력 평형조건 여부에 따른
대형냉각재상실사고 출력펄스 영향평가

Impact Assessment Nominal and Steady State Modeling between Physics
and Thermal-hydraulic Model in CANDU Reactor

박동환 · 최 훈

한국수력원자력주식회사 중앙연구원 안전연구소

가압중수로형 원자력발전소는 가상의 대형냉각재상실사고 해석을 위하여 노물리 및 열수력 모델의 평형상태 계산을 수행한다. 기본 노물리 모델 시 공칭 냉각재온도, 냉각재 밀도, 연료온도 값은 다발의 위치와 연소도에 관계없이 유효평균값으로 사용하며, 이에 따라 산출된 출력분포를 28개의 연료관 그룹으로 평균화하여 열수력계통모델에 전달한다. 기본 열수력모델은 앞서 기본 노물리 모델에서 생산된 출력분포를 이용하여 28개 연료관 그룹에 대하여 축방향으로 냉각재 온도, 냉각재 밀도, 연료온도를 계산하여 모델한다. 노물리코드와 계통열수력 코드가 연계되지 않는 사고해석의 경우 기본 계통열수력모델을 바탕으로 해석을 수행하며, 통상 노물리 모델은 점동특성방정식을 이용하여 원자로출력을 1차원적으로 해석하고, 그 결과를 받아 열수력모델에 반영한다. 반면, 짧은 시간안에 원자로 출력이 급변하는 대형냉각재 상실사고의 경우 보다 정확한 계산을 위하여 3차원 노심해석 노물리코드(RFSP)와 계통열수력코드(CATHENA)를 연계하여 출력펄스 계산을 수행하는데 과도상태 해석에 앞서 출력 및 열수력조건 동기화를 위한 평형상태 모델을 수행한다. 이에 평형상태 모델 수행여부에 따른 출력펄스를 비교하고, 그 영향을 평가하였다.

영향평가 결과 최초 출력분포는 큰 차이가 없으나, 그림 1에서와 같이 출력펄스는 침두값이 약 341%에서 396%로 증가하였다. 원인으로서는 그림 2에서 보는 바와 같이 최초 약 1초까지 사고에 따른 반응도 주입이 증가하였음을 확인할 수 있다. 반응도 증가의 이유는 평균값을 입력값으로 사용한 공칭조건 노물리 모델에서 상대적으로 기포반응도가 더욱 많이 주입되었음을 의미한다. 결론적으로 사고해석 모델 시 최초 평형조건을 정확히 모델하지 않는 경우, 수반하는 해석의 결과에 불확실성이 상당히 반영될 수 있음을 확인할 수 있다.

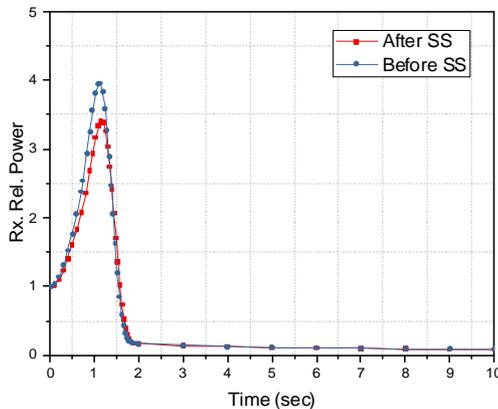


그림 1. 상대출력 과도현상 (RIH 40% 파단)

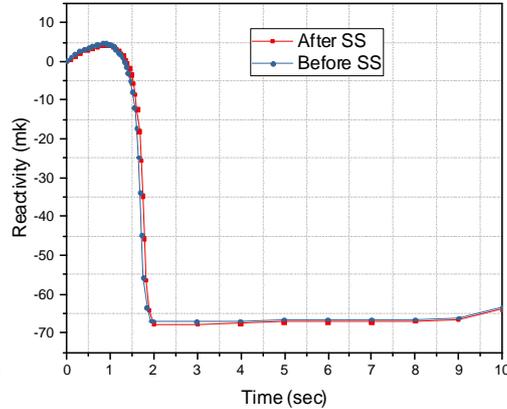


그림 2. 반응도 과도현상 (RIH 40% 파단)

주증기배관파단사고 압력/온도에 따른 요오드핵종 거동에 대한 연구

The Study of Fission Product Iodine Behavior depending on Pressure/Temperature in MSLB Case

이승찬 · 윤덕주

한국수력원자력 중앙연구원 안전연구소 안전해석그룹

- 본 연구는 이차측 제한사고인 주증기관파단사고에 대하여, 격납건물의 압력, 온도, pH조건에 의한 요오드핵종의 거동을 살펴보고, 선량학적 저감요인을 찾아보는 것이 목적이다. 따라서 격납건물내부의 압력 및 온도를 분석하고 요오드핵종의 화학적 물리적 거동에 대한 반경험적 상관식을 이용하여 MSLB조건에서의 요오드핵종의 거동을 선량학적으로 평가하고 그 영향인자를 소개한다.

- 사고케이스는 주증기관파단사고 중 비교적 선량학적 영향을 크게 미칠 수 있는 것으로 보이는 MSIV단일고장을 선택하였다. 웨스팅하우스형 원전에서는 NUREG-0588에 따라서, 격납건물 압력 온도분석에서 격납건물 하부의 집수조의 재증발률을 고려한다. 재증발률은 압력 및 온도분석에서 영향을 줄수 있는 요인이며, 재증발률을 일정간격으로 조정하면서, 요오드의 거동을 살펴보았다.

요오드 핵종에 의한 갑상선 선량평가를 위하여, RADTRAD 3.03코드를 사용하였으며, 압력 온도 분석에서는 CONTEMPT-LT/028버전을 사용하였다. 집수조의 화학적 성분은 SRP 6.5.2에 따라서 pH 7이상을 유지하는 것으로 가정하였고, pH에 대한 분석요건도 7~9까지의 범위에 대하여, pH값을 일정 간격 증가시키면서 민감도분석을 진행하였다. 집수조의 pH 조건, 압력/온도 조건, 재증발률은 2% ~ 10% 범위를 적용하여 집수조 재증발률에 따른 민감도분석을 수행하였다. 분석결과를 이용하여, 요오드의 최종거동 지표인 갑상선 선량값을 계산하였다.

- 민감도분석 및 거동평가결과는 갑상선 선량이 주요지표가 된다. 평가결과 pH에 대해서는 증가할수록 갑상선의 선량이 감소하는 경향을 나타냈으며, 압력 및 온도에 대해서는 압력에 대해서는 반비례의 경향을 나타내었고, 온도에 대해서는 정비례하는 경향을 보였다. 재증발률에 대해서는 과열구간을 제외하면 대체로 갑상선의 선량이 근소하게 감소하는 경향을 보였다.

- 본 연구결과로부터, 방사성핵종인 요오드가 격납건물의 화학적 물리적 환경 및 압력 온도에 따라서 영향을 받는 것을 확인하였으며, 그 중 가장 크게 영향을 미치는 부분은 온도와 pH조건이었으며, 온도가 높을수록 pH가 낮을수록 그리고 격납건물의 압력은 낮을수록 갑상선 선량이 증가하는 특성을 보였다.

저압터빈 추기배관 신축이음관 파손 원인 분석

Failure Analysis for Bellows of Bleed Pipe in Low Pressure Turbine

이종훈 · 부명환*

한국수력원자력 중앙연구원 기계연구소

원자력발전소 저압터빈의 추기배관은 발전소 운전/정지에 따라 열응력 및 변위의 변화가 큰 배관이기 때문에 신축이음관이 설치되어 있다. 신축이음관은 인장이나 압축응력이 가해져도 일반 배관에 비해서 팽창과 수축에 유리하여 응력 완충작용이 가능한 구조이기 때문에 열응력에 의해 변위가 크게 발생하는 배관에 종종 활용된다. 비록 신축이음관이 변위에 유리한 구조이기는 하지만 가혹한 환경에 적용되기 때문에 가동범위 이상의 응력이나 변위가 가해지면 파손될 위험이 크다. 본 연구에서는 원자력발전소 저압터빈 추기배관의 신축이음관이 파손된 사례를 대상으로 파손 원인을 분석하였다. 분석을 위해서 먼저 파손된 신축이음관의 형상을 관찰하였고, 소성변형이 발생한 부위의 변형량을 측정하였다. 다음으로 신축이음관에 높은 응력이 가해진 원인을 추정하기 위해서 신축이음관과 주변 배관의 구조를 분석하였으며, 구조적 간섭 흔적의 존재 유무를 조사하였다. 결과적으로 신축이음관의 일부 피치가 약 20mm가량 압축되어 소성변형 된 흔적이 관찰되었으며, 배관과 슬리브가 접촉된 흔적이 발견되었다. 이러한 변형이나 흔적은 신축이음관을 설치할 당시에 주변 배관들의 축 정렬 상태나 간격이 적절하지 않은 상태에서 설치하였기 때문에 배관과 신축이음관에 압축응력이 존재하였고, 열응력에 의해 구조적으로 특정 방향에 높은 응력이 가해졌기 때문에 발생한 것으로 추정하였다.

여자시스템 신호기준접지 접촉 불량에 따른 영향 고찰

A Case Study of the effects of contact failure of the excitation system Signal Reference Ground

강민구

한국수력원자력(주) 중앙연구원

접지는 가정, 전기 및 전력, 자동화 설비 등 모든 분야에서 낙뢰, 과전류 및 과전압으로 부터의 보호와 전자시스템을 안정적으로 동작을 위해 설치되어있다. 만약 접지 결선부가 접촉 불량, 파손 등으로 접지를 상실하게 된다면 설비의 손상, 감전, 비정상 동작 등 여러 가지 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서는 여자시스템 제어카드의 기준전위 제공을 위한 신호기준접지(Signal Reference Ground)의 접촉 불량으로 비정상 동작이 발생하였고, 이에 대해 원인을 분석하였다.

여자시스템 운전 중 제어기의 SQVO¹⁾와 GPVO²⁾의 LED가 순간적으로 깜빡이면서 스너버 회로³⁾ Off-On 동작과 함께 3대의 정류기 중 한대가 정지되는 상황이 발생되었다. 정류기 정지 원인으로는 냉각팬 입력전원상실 및 모터 고온 감지 신호 발생, DO(Digital Output)신호 상실 등으로 인해 발생 가능하고, 스너버회로의 경우는 정류기 제어신호 상실, 스너버회로 고장, DO신호 상실 등으로 인해 발생할 수 있다. 정류기와 스너버회로 문제 발생 가능성을 토대로 점검결과 특이사항은 없었지만, 둘 다 DO신호로 동작한다는 것이고 DO신호에 문제가 있게 되면 이와 같이 동작 될 수 있다. DO신호의 흐름을 보면 3중화 된 제어기의 DO카드에서 발생된 신호를 SQVO로 보내고 SQVO에서 하나로 취합 후 2 out of 3 Voting 한 신호를 내보내게 되는데, 문제 발생 가능성이 높은 곳은 SQVO이다. 실제 여자시스템 운전 중 SQVO의 LED가 순간적으로 Off 되었고 이때 DO신호가 상실되어 냉각팬 정지 및 스너버회로 Off-On이 되었던 것이다. SQVO의 LED가 Off된 근본원인은 제어기판넬 뒷면의 Rack에 결선되어 있는 신호기준접지선의 PG압착단자가 케이블심과 서로 물리는 곳이 아닌 케이블 피복쪽이 압착된 상태였고, 제어기 냉각팬 진동으로 압착부위에서 접촉 불량이 발생되었다. 이로 인해 접지가 플로팅 되어 기준전위를 상실하였고, SQVO의 기능인 DO신호를 출력하지 못한 것이다. 조치사항으로 압착단자 교체 및 시스템 내의 모든 압착단자 상태 확인 후 정상화 하였다.

본 논문에서와 같이 여러 산업분야에서도 압착단자 접촉 불량이 많이 발생하고 있으며 이를 예방하기 위해서는 기본적인 압착 방법, 케이블 굵기에 따른 압착단자 사용, 전용 툴을 이용한 압착 등 절차를 숙지하고 작업을 수행하여야 한다. 또한 설비 점검 중 내부에 결선 된 케이블 압착 상태를 다시 확인함으로써 설비의 신뢰도를 높일 수 있다.

1) SQVO(Sequential Voter Board) : Digital Output 신호를 Voting

2) GPVO(Gate Pulse Voter Board) : SCR을 효과적으로 Turn-On하기 위해 제어기에서 발생된 구형파 Firing Signal을 Pulse 형태로 변환

3) 스너버 회로 : 사이리스터를 On/Off시킬 때 발생하는 과도전압을 억제시키기 위해 사용

여자시스템 계자차단기 투입 실패 원인 고찰

A Case Study of the cause of close failure of the excitation system field breaker

강민구

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 2008년부터 순차적으로 아날로그방식의 여자시스템을 G사의 고속형 DC차단기(계자차단기)가 설치된 디지털여자시스템으로 개선하였지만, 개선된지 10년 이후부터 계자차단기 투입 실패로 인해 발전소 계통연결 지연이 발생하여, 본 논문에서는 차단기의 이상 동작에 대해 원인을 분석하였다.

여자시스템은 여자변압기로부터 AC전원을 입력받아 사이리스터를 이용한 위상전과정류 후 발전기 계자에 DC전원을 공급하고 제어하여 발전기 전압을 일정하게 유지하는 기능을 하고 있다. 시스템 내부에는 전압을 정상적으로 유지하기 위해 여러 가지 소자 및 기기들이 있으며, 이 중에서 계자차단기는 정류된 DC전원을 최종적으로 발전기 계자에 공급 및 차단하는 중요한 역할을 하고 있다. 여자시스템에 설치된 계자차단기는 G사의 고속형 DC차단기 모델로 발전기 계자의 “+”측, “-”측을 차단하기 위해 2개가 설치되어 있다. 동작 시퀀스는 여자시스템 기동 신호 발생 시 투입, 여자시스템 정지 신호 발생 시 개방을 하는데, 10년 이상 된 발전소에서 계자차단기 투입 실패로 인해 여자시스템 기동이 지연되는 사례가 발생하고 있다. 현상은 여자시스템이 기동 하면서 계자차단기가 투입 신호를 받고 정상적으로 투입 하였으나 계자차단기 하나가 바로 개방되면서 여자시스템은 기동 실패 조건이 되었고, 이에 따라 나머지 계자차단기도 개방되었다. 원인은 계자차단기를 정상개방하기 위한 shunt trip 메커니즘 불량이었다. Shunt trip의 메커니즘은 계자차단기 투입 시 slow latch가 shunt trip의 핀을 아래로 밀고 shunt trip 구동부가 움직여 핀을 latch 시킨다. 개방 시 shunt trip 구동부가 뒤로 빠지면서 latch가 풀리고 핀이 slow latch를 치게 되면 계자차단기는 개방된다. 하지만 shunt trip 구동부의 윤활유가 오래되면서 고착이 발생 하였고, 이로 인해 구동부의 움직임이 느려지게 되면서 shunt trip 핀이 아래로 내려왔을 때 구동부가 핀을 latch하지 못하고 튕겨나가 slow latch를 치면서 계자차단기가 개방되었으며 계자차단기 교체 후 정상화 하였다.

현재 화력, 복합 발전소에서도 동일 모델의 계자차단기를 사용하고 있는 곳이 있으며, 본 논문과 같은 현상이 발생할 가능성이 있다. 이를 예방하기 위해서는 shunt trip의 교체주기를 8~10년 사이로 정하고 시기에 맞춰 교체를 해야 한다. 또한, 여자시스템 기동전 계자차단기의 동작을 몇 차례 수행하게 된다면 계통연결에 대한 지연 요소를 제거 할 수 있다.

예비디젤발전기의 디지털 여자시스템 적용 실증 시험 결과 Application test result of Standby Diesel Generator Digital Excitation System

이상희, 손진흠
한국수력원자력

국내 원자력발전소의 예비디젤발전기(SDG)는 전원 상실 시 비상전원을 공급하는 핵심설비이며 구성기기 중 여자시스템은 발전기 계자 권선에 직류 전류를 공급하여 발전기 출력단자 전압을 일정하게 유지 또는 조정하는 것으로 목적으로 하고 있으며 발전기 전압제어 기능을 수행하는 제어기, 제어신호를 받아서 필요한 계자 전류를 공급하는 위상제어 정류기, 커패시터·저항으로 구성된 필터, 출력 제어를 위한 릴레이 등으로 구성되어 있다.

일반 산업계의 디젤발전기의 여자시스템은 디지털 및 아날로그 타입의 제어기를 다양하게 적용하고 있으나 범용 PLC(Programmable Logic Controller)를 적용한 사례는 많이 없다. 원자력 발전소에서도 대부분 안전성 및 기능이 검증된 아날로그 타입의 제어기를 주로 적용하고 있다. 본 논문에서는 노후된 아날로그 여자시스템이 설치되어 있는 예비디젤발전기를 설비 개선하여 범용 PLC를 활용한 디지털 여자시스템을 현장 적용한 내용과 시험 결과를 기술하고자 한다.

예비디젤발전기에 신규 적용되는 PLC Type의 디지털 여자시스템의 건전성을 확인하기 위하여 다음과 같은 시험을 실시하였다.

- 디젤발전기 전압확립 시험, 자동/수동 전압조정 운전 시험, 자동/수동 모드 전환 시험, 계단 응답 및 보호회로 시험, 비상부하 투입시험

현장 시험 결과 기동 시 발전기 전압의 안정적인 확립 및 제한된 기동 시간 이내로 기술요건을 만족함을 확인하였으며 자동 및 수동 모드 전환 및 전압 조정, 보호 및 제한 기능 시험 등 주요 기능 시험 결과 양호함을 확인하였다. 기동 및 모의 계단 응답 시험을 통해 제어기 설정값 튜닝을 실시하였고 비상부하 투입 시험을 통해 설정값의 건전성을 입증하였다. 현장 시험 과정에서 기존 아날로그 시스템 대비 기동 시간이 증가하여 초기 여자 저항 조절을 통해 기동 시간을 단축하였고 비상부하 투입 시험 결과 최대 전압 강하가 기술요건 이내로 양호하였으나 아날로그 및 디지털 제어기의 응답시간 시간 차이로 기존 아날로그 시스템 대비 발전기 전압 강하가 최대 +7% 정도 증가함을 확인하였다.

본 논문에서는 예비디젤발전기 범용 PLC를 적용한 디지털 여자시스템의 성능과 건전성을 시험한 내용을 기술하였다. 시험 결과를 바탕으로 PLC 제어기를 사용하는 디지털 여자시스템 적용 시 발생할 수 있는 위험성을 사전에 제거할 수 있어 개발 및 현장 적용 시 크게 도움이 될 것으로 기대된다. 끝.

원전 다중 무선 통신방식 적용을 위한 인터페이스 방법론 고찰 A Study on Interface Methodology for Applying Multiple Wireless Communication Protocols in Nuclear Power Plant

배재민, 이수일

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

산업현장의 4차 산업혁명 기술 적용에 대한 요구가 증가함에 따라 국내 원전에서도 안전, 운영 및 정비효율 등의 문제해결에 다양한 무선 애플리케이션과 무선센싱 기술의 적용을 계획하고 있다.

지난 수십 년간 원전은 무선통신에 의한 안전성 영향검증 및 불명확성에 대한 우려가 무선통신 적용의 제약사항이 되어왔다. 하지만, 원전 무선 영향검증 방법에 대한 규제기준이 확립되고 4차 산업혁명 기술의 핵심 인프라에 대한 요구에 따라, 원전 무선플랫폼 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 제한된 무선통신 인프라를 활용하여 다양한 통신방식을 가진 활용니즈를 만족할 수 있는 다중 무선 통신방식에 대한 인터페이스 방법론을 제안하고자 한다.

현재 국내원전에 적용 가능한 전범위적인 무선플랫폼 기술을 개발하기 위해서 ① 국내외 무선통신 적용현황 분석, ② 원전 무선통신 제약사항 분석, ③ 4차 산업혁명 관련 무선 활용니즈 분석, ④ 원전에 활용 가능한 무선통신 기기 시장 분석, ⑤ 무선통신 규제 분석 및 대응방안 개발, ⑥ 원전 방사선구역 무선통신 설계방법 개발 등을 수행하고 있다.

원전 무선통신 활용니즈는 주로 무선 센싱(예 : 주요기기 상태감시, 비상시 계측 등)과 다양한 무선 애플리케이션(예 : 주요기기 영상감시, 절차서 실시간 확인 등) 적용 분야에 해당되는 것으로 분석되었다. 또한, 무선통신 기기 시장분석 결과, 무선센서는 배터리 지속시간 유지와 저속데이터 전송을 위해 WirelessHART, ISA100, LoRa 등의 통신방식을 주로 사용하고 있으며, 무선 애플리케이션은 지식기반(Knowledge-based) 정보제공을 위해 Wi-Fi, LTE 등의 통신방식이 적용되고 있다.

따라서, 활용니즈를 만족하는 무선통신 기기와 무선 설계방법을 고려하기 위해서 다음과 같은 다중 무선 통신방식 인터페이스 방법론을 제안한다. 첫째, 넓은 대역폭, 전송속도 및 전파 성능을 위해 백본 통신망은 LTE급 이상을 기준으로 한다. 둘째, 무선 애플리케이션은 LTE와 Wi-Fi를 적용하고, Wi-Fi 적용을 위해 컨버터(LTE to Wi-Fi)를 적용한다. 셋째, 무선센싱은 Wi-Fi, WirelessHART, ISA100, LoRa 등을 적용하고, 무선연결을 위해 컨버터(Wi-Fi to WirelessHART/ISA100/LoRa)를 적용한다. 넷째, 필요 시, 적용성 향상을 위해 메쉬(Mesh) 네트워크를 적용한다.

본 논문에서 제안하는 다양한 무선 통신방식 적용 인터페이스 방법론은 현재 원전 환경에서 성능검증과 설계가 진행 중에 있으며, 적용성이 확인되면 원전 최적 무선통신 아키텍처 설계에 활용될 예정이다.

원전 무선망 설계를 위한 전파모델에 관한 연구

A Study on Propagation Model for the Wireless Network Design in Nuclear Power Plants

김현기· 이수일· 최현식· 배재민

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

국내 원전에서는 이용률 제고, 안전성 증진, 인적실수 예방 등을 위해 무선통신망 확대적용을 추진 중에 있다. 원전의 산업 환경은 실외 무선 환경과 달리 격벽, 구조물 등으로 구성되어 전파에 열악한 환경을 가지고 있어 실내 무선망 설계를 위해서는 원전에 적합한 전파모델 선정이 필요한 상황이다.

본 논문에서는 Wi-Fi 및 LTE (Long Term Evolution) 대용량 기반의 원전 실내 무선망 설계를 위한 전파모델의 종류와 특징을 분석하고, 원전에 적합한 모델을 제시하여 전송거리 100m 기준의 경로손실 및 전송손실을 예측하였다.

전파모델은 송수신기 사이에 발생하는 전파의 손실을 주파수, 안테나의 높이, 송수신기 간의 거리, 출력 등을 수식화하여 나타낸다. 전파는 송수신기 간의 거리에서 전파될 때, 주변 환경에 따라 다양한 경로를 거치게 되므로 정확한 예측이 어려워 전파손실을 근사적으로 예측하기 위한 여러 가지 모델이 발표되었고, 경로손실(Path Loss)은 무선중계기의 위치, 출력세기, 주파수 대역 등의 주요 파라미터로 결정되는데 실내 무선망 설계에서 가장 기본이 되는 파라미터로 전파모델 예측에 주로 사용되고 있다.

Okumura-Hata 모델의 경로손실은 도심지나 장애물이 많은 지역의 신호를 예측할 때 가장 광범위하게 사용되는 전파모델로 150~1,500 MHz 주파수 대역, 1~20 km 거리, 안테나 높이는 30~300 m 범위에서 사용할 수 있다. Cost 231-Hata 모델은 1.5 GHz에서 2 GHz 주파수 대역에서 사용할 수 있도록 보정하였으며, 반경 1 m에서 10 m 까지 범위에 적용할 수 있다. Longly-Rice 모델은 불규칙한 지형에 주로 적용하며 20 MHz~20 GHz 주파수 대역, 1~2,000 km 거리, 0.5~3,000 m 범위에서 사용 될 수 있다. Egli 모델은 이론적 평면 전송 손실에 지형계수를 고려한 실험적인 모델이며, 60 km 이내 거리에서 40~900 MHz 주파수 대역에서 사용한다.

원전 현장을 고려해 볼 때, Wi-Fi(2.4 GHz/5.7 GHz) 및 LTE(700 MHz)에 적합한 모델은 각각 Cost 231-Hata, Okumura-Hata 모델로 볼 수 있다.

Cost 231-Hata 모델 적용 시 100m 전송거리 기준 2.4 GHz 대역 Wi-Fi의 경로손실은 약 80 dB로 예상되며, 5.7 GHz 대역에서는 약 87 dB의 손실이 예상된다. 그리고 Wi-Fi의 Cost 231-Hata 전파모델의 전송손실은 약 104 dB(2.4 GHz), 116 dB(5.7 GHz)로 예상된다.

Okumura-Hata 모델 적용 시 100m 전송거리 기준 700 MHz 대역 LTE의 경로손실은 약 69 dB로 예상되며, Okumura-Hata 전파모델의 전송손실은 약 87 dB로 예상된다. 이는 주파수가 낮을수록 파장이 길어 전송손실이 낮은 특성을 가지기 때문이다. RF 전송손실은 전파, 흡수, 회절의 메카니즘으로 구성되는데 파장은 전송손실에 가장 큰 영향을 준다.

본 논문에서는 Wi-Fi 및 LTE 무선망 설계에 적합한 전파모델로 각각 Cost 231-Hata, Okumura-Hata 모델을 선정하였고, 경로손실 및 전송손실을 예측하였다. 전파모델 연구결과는 원전 표준 무선망 설계에 활용할 예정이다.

원전 설계요건 추적성 확보를 위한 설계DB-설비정보 연계
Linkage of Design Requirements DB-Facility information(TAG) for
Tracking Design Requirements of Nuclear Power Plants

김종명· 변수진· 김우중

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단

원전산업계에서는 1990년대 전후로 설계와 결과물의 불일치에 의한 사건사고가 많이 발생하였다. 이를 방지하기 위해 미국 원자력규제위원회(U.S. NRC)/ 국제 원자력기구(IAEA) 등에서 원전 형상관리의 개념이 생겨났고, 이를 법제화/규제화 하였다. 우리나라에서는 2016년부터 원안위고시가 제정되었고, 2018년 규제지침이 제정되어 국내 건설/운영 원전에도 형상관리 이행 의무를 가지게 되었다. 국내 건설/운영원전에서는 이를 대비하여 신한울 1,2 원전부터 건설형상관리 체계를 준비하였고, 현재 신고리5,6 원전에서는 세계최초로 데이터기반 형상관리시스템을 개발하고 있다.

형상관리는 설계기준 및 코드 등을 포함하는 설계요건(Design Requirement)과 설비 마스터, 설계 데이터, 구매/설치 가이드 등을 포함하는 설비형상정보(Facility Configuration Information) 및 실제발전소, 3D모델, 태그 등을 포함하는 물리적 형상(Physical Configuration) 간의 일치성을 유지하면서, 발전소의 구조물, 계통 및 기기(SSCs)들의 특성을 식별, 문서화 및 변경을 수행하기 위한 체계적인 접근방법이다. 신고리5,6 형상관리시스템에서는 위 3요소간의 연계/일치성 확인에 대한 데이터기반 연계기능을 골자로 하고 있는데, 본 논문에서는 설계요건과 설비형상정보 중 설비정보(태그)에 대한 연계방법에 대해 고찰하였다. 데이터기반으로 설계요건-설비정보(태그)를 연계하기 위해, 첫번째로 설계요건 DB 구축의 설비대상범위를 정하였다. 원전 전체 대상설비범위로 하기엔 원전은 방대한 분량이므로 구축금액 및 시간의 한계로, 점진적 접근방법을 채택하여 원전의 51개 계통/5개 구조물/5개 특정주체를 대상으로 하였다. 두번째로, 원전 설계요건 중 설계요건의 계층/중요도에 따라 설계요건DB화 할 문서를 정하였다. 설계문서는 1번째(Top-tier)단계 원안위고시, 10CFR, Code&Standard 등, 2번째(Plant) 단계 GDC, IR, 계약서, 3번째(SSC) 단계 SDC, PO SPEC, CP SPEC으로 단계에 따라 구성 하였다. 세번째로, 각 문서별 주요 챕터를 정하여 해당 챕터에서 모든 장/절 요건을 발췌하여 DB화 하였다. 네번째로, 발췌된 DB요건을 각 계통/분야별 엔지니어가 검토하여 해당 요건이 상하위 연계에 필요한 설계요건인지 판단하여 설계요건/비요건화를 진행하였다. 다섯번째로, Plant, SSC 단계에 해당하는 설계요건과 설비정보(TAG)를 연계하였다.

위 방법론에 따라 설계요건DB-설비정보(TAG)와 연계한 결과, 설비기준으로 해당 설비의 하위 제작지침/설계요건에서부터 이에 대한 원안위고시와 같은 상위 요건까지 확인 할 수있어 원전의 설계불일치 사고 등을 미연에 방지할 수 있고, 신입사원 및 운영직원의 설비 이해도 향상, 설비의 설계변경시 검토 누락 방지에 도움을 줄 수 있다. 신고리5,6 원전은 현재 건설중인 원전으로 준공을 23.10월에정도로 하고 있으므로, 연계구축대상 61개 계통/분야에는 준공전까지 업데이트할 계획이며 준공시에 As-built 시점 업데이트를 진행할 계획이다.

원전 금속구조물 통신기술 적용 방법론에 대한 연구

A Study on Application Methodology of Communication Technology based on Metal Structure in Nuclear Power Plants

최현식 · 이수일

한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털융합실

원전에 무선통신 기술을 적용하기 위해서 일반적으로 AP와 무선감지기를 활용하여 무선 시스템을 구축한다. EPRI에서 CCP(Centrifugal Charging Pump)의 가동성을 향상시키고 유지보수 비용 절감을 위해 기어박스에 스마트 무선 센서와 무선 통신기술을 적용한 사례가 있고, SRNL(Savannah River National Lab)은 핵물질 취급을 위한 기존 핫셀 시설에 Glove Box를 추가 증설하면서 무선 센서망으로 구축하였다. 원전에서의 무선통신의 활용도를 높이기 위해 격납건물과 같이 폐쇄적이고 보조건물로 이어지는 공간이 협소하여 무선통신의 성능이 저하되거나 통신이 불가능한 경우를 극복하기 위해 본 적용방법론을 제안한다.

원전의 복잡한 구조, 설비 등에 의한 전과장해로 무선통신 음영지역이 발생하더라도 전과장해 개소의 백업망으로 활용하기 위해 AP로부터 송출되는 전파와 금속체간의 연속성을 배관 구조에 접목시키는 방법이 필요하다. 원전 계통 중에서 이러한 배관 구조를 활용할 수 있는 계통으로는 계기용공기계통, 압축공기계통이 있는 것으로 분석되었다. 격납건물과 보조건물 사이에 설치되어 있는 배관을 활용한다면, 무선통신의 연속성을 유지할 수 있다. 최근에 개발된 EMPacT(Evanescent Mode Power Transfer and Communication Technology) 기술을 적용하면, 특정 주파수 및 구조로 설계된 안테나의 전자기파가 두꺼운 금속에서도 금속표면을 따라 전달되는 성질을 이용한 Metal-Wave 방식으로 구조물에 의해 발생된 음영지역을 감소시킬 수 있다. 또한, 원자결맞음 현상을 활용한 전자기 유도 투과(EIT, Electromagnetically Induced Transparency) 현상을 활용하여 매질 내부의 펄스 속도를 제어, 저장 및 재생이 가능하므로 무선통신의 성능을 확보할 수 있다.

원전에 적용시킬 금속구조물 통신기술의 적용방법론은 다음과 같다. 우선적으로 상시 운영설비 개념 외에 비상대응 시 운영 목적을 동시에 충족하기 위해 금속구조물 통신장치는 탈부착이 용이하고 즉시 가능해야 한다. 또한, Wi-Fi 등 표준 무선통신 규격 기술과 연계가 가능해야 한다. 최종적으로 원전 비방사선 구역과 방사선 구역 간 금속구조물의 거리, 특성인자에 대한 통신성능을 충족해야 한다. 원전 방사선구역 금속구조물 특성인자(배관직경, 금속표면적, 금속구조물 형상, 도장두께 등 도장상태, 금속종류, 온도, 금속매체 탈부착 간극 등)에 따른 시험과 적용성 평가를 수행하여 원전 현장에서의 금속구조물 통신기술의 적용성을 확보하는 것이 필요하다.

4차 산업혁명과 관련하여, 원전에서의 무선기술 적용이 요구되고 있다. 금속구조물 통신기술을 원전 격납건물, 보조건물 등의 전과장해가 예상되는 지역에서 구조적 제약을 극복하기 위해 배관 구조의 시뮬레이션을 통해 현장 적용 가능성을 사전에 검토해야 한다. 금속체통신 프로토타입을 개발하여 금속체통신 단말기의 송수신율, 통신 거리, 무선통신 인터페이스 장치의 EMI 시험, EMS 시험 등으로 검증할 예정이다.

노심 상향유동 연구용 원자로 유체계통 설계

Concept Design of Fluid System with Core Upflow Research Reactor

박홍범 · 서 경우 · 김성훈

한국원자력연구원 연구로공학부

최근 요르단에 수출된 JRTR 및 현재 건설 중인 기장연구용 원자로는 노심 하향유동이다. 노심 하향유동에 대한 유체계통의 설계 경험은 풍부한 반면 노심 상향유동에 대한 유체계통의 설계 경험은 오래전 하나로까지 거슬러 올라가야하는 상태이다. 노심의 필요 출력이 상승할 경우 원자로 정지 후에도 노심 잔열의 크기가 크기 때문에 노심 냉각에 유리한 노심 상향유동으로 설계가 되어야 한다. 최근 해외에서는 고출력 연구용 원자로에 대한 수요도 존재하기 때문에 노심 상향유동에 대한 설계가 필요하다. 본 연구에서는 노심 상향유동 유체계통에 대한 개념 설계를 수행하였다.

노심상향유동 일차냉각계통은 노심의 필요 유량과 차압에 따라 일차냉각계통 유량이 설계되고 필요 냉각 용량에 따라 온도가 설계된다. 일차냉각계통의 요건은 다음과 같다. 노심은 일차냉각계통에 의해 냉각되어야 한다. 일차냉각계통은 닫힌 계통이 아니어야 한다. 원자로 냉각재는 핵연료로부터 생성된 방사성 물질을 제거하는 시설이 있어야 한다. 원자로는 과도 및 사고 후 어떠한 행위도 없이 적어도 15일 동안 안전한 상태를 유지하여야 한다. 일차냉각계통의 요건에 따라 유량과 온도를 설정하고 이를 따라 펌프와 열교환기를 설계하였고 펌프 정지 시 자연대류를 통한 냉각을 위해 플랩밸브를, 냉각재 상실사고 시 수조수의 상실을 막기 위해 사이폰차단기를 설치하였다.

수조수관리계통은 각 수조의 냉각 유량 및 정화 유량을 고려하여 펌프를 설계하였다. 필터와 이온교환기는 필요 정화량을 고려하여 설계하였다.

고온층계통은 고온층의 유지와 정화를 고려하여 펌프를 설계하였고 수조수 하부에 위치한 높은 방사능을 가진 수조수의 상승을 막기 위해 수조수 하부보다 높은 온도를 갖도록 히터를 설계하였다.

본 연구를 통한 노심 상향유동 일차냉각계통의 개념설계는 개념설계와 상세설계를 거쳐 향후 노심 상향유동 연구용 원자로 해외 입찰 및 건설에 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 2020년도 정부(과기정통부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020M2D5A1078131)

PSR 안전성능 평가방법에 대한 고찰

A Study on Methodology of Safety Performance Evaluation in PSR

강종호

한국수력원자력(주)

원자력안전법 시행령 제37조 제1항 제8호 ‘안전성능에 관한 사항’ 및 제38조 ‘주기적 안전성평가의 방법 및 기준’, 시행규칙 제20조 제1항 제8호 ‘안전성능에 관한 사항’에 따라 PSR(Periodic Safety Review, 주기적 안전성평가)에서는 원자로시설의 안전성능 평가를 수행한다. PSR 안전성능 평가의 범위는 안전관련 사고 및 고장, 시험/검사 및 정비, 운전자료의 관리체계 및 경향분석 적절성 평가, 안전성능지표 평가 등 4가지로 구성된다.

사고·고장에 대한 평가는 원자력이용시설의 사고·고장 발생 시 보고·공개 규정(원자력안전위원회 고시 제2014-17호)에서 사고·고장에 대한 보고와 관리체계, 사고·고장의 등급과 원인 및 조치사항 등에 대하여 전반적으로 분석, 평가함으로써 해당 원자로시설의 안전성이 충분히 확보되었는지를 확인한다.

시험/검사 및 정비체계에 대한 적절성 평가는 발전소 주요기기의 정·주기 시험체계와 그 결과를 분석하여 안전등급 기기의 성능이 요구기준에 만족하는지 확인하는 시험에 대한 평가, 규제기관의 검사에 따른 지적/권고사항에 대한 이행조치체계, 그리고 그 결과 등을 분석하는 검사에 대한 평가 및 발전소의 정비체계와 주요 정비이력 등을 분석하는 정비에 대한 평가를 수행한다.

운전자료의 관리체계 및 경향분석에 대한 평가는 발전용 원자로 및 관계시설의 운영에 대한 기록 및 비치(원자력안전법 제25조 및 동법 시행규칙 제145조)에서 요구하고 있는 운전기록의 유지, 관리체계와 그 기록된 운전이력자료의 경향분석을 통하여 발전소 운전에 관련된 주요 운전변수들이 운영기술지침서에서 요구하고 있는 제한치 내에서 거동하는지의 여부를 분석, 평가함으로써 해당 원자로시설의 안전성이 확보되었는지를 확인한다.

안전성능지표에 대한 평가는 원자력안전위원회 안전성능지표와 세계원전사업자협회(WANO)에서 운영하고 있는 성능지표를 활용하여 발전소의 원자로 안전영역, 방사선 안전영역에 대하여 분석 및 평가를 수행한다.

이와 같은 일련의 체계적이고 종합적인 평가를 통하여 발전소 원자로시설의 성능추이와 운전/정비/시험이력에 관한 기록을 조사, 분석하여 안전성능의 확보여부와 변화경향을 확인함으로써 기술기준에서 요구하고 있는 발전소의 안전성능이 안전하게 유지되고 있음을 입증하고, 이를 유지하고 향상시키기 위한 방안을 도출하여 반영하도록 하는 것이 PSR 안전성능 평가의 목적이다. 본 논문에서는 PSR 안전성능 평가 관련하여 앞서 언급한 4가지 평가 범위에 대해 상세히 기술하고자 한다.

현재 안전성능지표 분석체계의 적절성을 명확히 하기 위해 자료수집, 경향분석, 평가자료 관리, 평가결과 관리 측면에서 평가방법을 보완중에 있으며, 분석체계의 구성요소와 요소들 간의 상관관계를 정립하여 PSR 안전성능 평가방법에 대한 신뢰성을 높이고자 한다.

PSR 절차서 관리 및 절차서 명확성 평가방법에 대한 고찰

A Study on Methodology of Procedures Management and Adequacy Evaluation in PSR

강종호

한국수력원자력(주)

원전 PSR(Periodic Safety Review, 주기적 안전성평가)에서는 14개 안전인자에 대해 평가를 수행하는데, 이중 하나인 운영 및 보수 절차서 분야에서는 PSR 절차서 관리방법과 절차서 명확성에 대한 평가를 수행한다.

발전소가 운전을 시작할 때 절차서는 모두 구비된 상태로 활용되지만 시간이 경과하면서 변화가 발생하고, 이에 따라 신규절차서가 생성되거나 폐기되기도 하며, 일부 절차서는 개정되기도 한다. 경우에 따라서 똑같은 절차서를 그대로 사용하기도 하지만 절차서를 관리하는 방법이 변경되기도 하는데, PSR 운영 및 보수절차서 분야의 '절차서 관리'에서는 이러한 변경사항을 평가한다. 주요 평가 내용은 안전 관련 절차서 수립 및 유지관리/개정체계와 절차서에 대한 주기적 검토 및 보완 계획 등인데 표준절차서와 운영절차서를 모두 다룬다. 절차서 관리체계 평가는 제도의 구축단계, 이행 단계, 효과 단계로 나누어 진다. 제도 구축 단계는 절차서를 관리하기 위한 제도들이 구축되어 있는지, 혹은 구축된 제도들이 기술 기준과 부합하는지를 평가한다. 제도의 이행 단계는 제도에 부합하게 주기적으로 절차서가 관리되고 있는지를 확인하며, 제도의 효과 단계는 발전소 종사자들이 어떠한 제도가 실제로 발전소 안전 운전에 긍정적인 효과를 가져오고 있는지를 평가한다. 이러한 세 가지의 단계를 평가하기 위해 문서검토와 발전소 현장 실사를 수행한다. 절차서에 대한 주기적 검토 및 보완 계획은 '절차서 작성, 개정 및 관리'에 관한 표준절차서의 요건을 따르는데, 모든 절차서는 시스템을 통해 관리되고 있으며, 승인된 문서는 구별되어 저장되어 있다.

PSR 운영 및 보수 절차서 분야에서는 절차서 관리뿐만 아니라 절차서 명확성에 대한 평가도 수행한다. 절차서가 여러 번 개정되면서 논리의 명확성이 훼손되지 않았는지, 주제어실에 설치된 계기의 명판 변경에 따라 절차서도 제대로 개정되었는지, 절차서의 작성 지침 변경으로 인해 개별 절차서의 변경 필요성은 없는지, 발전소 운영 초기부터 사용된 절차서이지만 아직도 인간공학 현안이 남아 있는지 등을 평가한다. 발전소에서는 PSR 이외에도 자체적으로 절차서를 주기적으로 검토/개정하는 작업을 수행하고 있는데, 주기 검토는 주로 해당 분야의 개별 절차서만 검토하기 때문에 해당 절차서의 기술적 내용의 정확성에 초점이 맞추어져 있다. 이를 보완하기 위해 PSR에서는 인적요소를 고려하여 약 900여개의 절차서를 문서 평가, 모의제어반을 이용한 평가, 운전경험 사례 평가, 현장의견 반영 등의 방법을 사용하여 종합적으로 평가한다.

현재 PSR 절차서 관리 보고서에서는 절차서 구비성평가 시 Reg.Guide 1.33을 유효한 기술기준으로 하여 평가를 수행해 왔는데, 품질관점에서 유효한 기술기준인 ANS/NS-1994를 사용하여 평가방법을 수정해야 하는 이슈가 있어, 이를 위한 검토가 진행중이다. Reg.Guide 1.33 과 ANS/NS-1994 은 평가항목에서 차이가 있으며, 각 기술기준의 개정이력에 따른 평가항목의 차이점들을 파악하고 보수성 여부를 판단하여 평가방법을 개선하고자 한다.

PSR 조직행정 평가방법에 대한 고찰

A Study on Methodology of Organization and Management System Evaluation in PSR

강종호

한국수력원자력(주)

PSR(Periodic Safety Review, 주기적 안전성평가)에서 조직행정 분야의 평가는 원자력발전소의 조직행정 요소들이 원전의 안전운전을 위해 적절한지의 여부를 판단하기 위한 것으로서, 평가대상 발전소의 조직 및 행정요소들이 적합하게 구성되어 운영되고 있는지를 평가하는 것이다.

PSR 조직행정 평가는 해당 발전소의 조직과 행정 요소가 건설허가 및 운영허가 요건, 현행 법령, 관행 등에 비추어 적합한 절차 및 규정에 따라 안전하게 운영되고 있는지를 파악하기 위해 수행한다. 원자력안전법 시행규칙 제20조 11호에 따라 개인과 단체의 역할 및 책임에 관하여 정한 문서, 원자로시설 운영의 유기적 구성을 유지하기 위한 방법, 외부 인력 및 전문가 활용을 위한 체제, 직원의 교육훈련 시설 및 계획, 독립된 평가자가 포함된 정규 품질보증감사와 품질보증계획 등 5가지 항목을 평가범위로 정하여 수행한다. 각 항목에 대한 세부평가항목 및 평가지표 등은 IAEA, OECD/NEA, WANO, INPO 등에서 출간한 문헌과 조직행정에 관련된 사회과학분야의 연구결과를 참고기술기준으로 활용한다. 위 5가지 항목에 대한 세부평가를 위한 방법으로 문서검토, 설문조사, 현장점검 등의 방법이 사용된다. 세부평가지표와 관련된 전반적인 현황을 파악하고 기본적인 정보를 수집하기 위하여 문서검토와 현장점검을 실시하며, 이를 바탕으로 세부평가지표에 대한 구성원의 인식 및 태도를 파악하기 위해 설문 및 면접조사를 실시한다. 평가방법 중 각 세부평가지표의 성격 및 점검목표의 특성을 고려하여 평가방법을 선별적으로 적용하는데, 특히 동일한 세부평가지표의 경우에도 평가의 적정성과 신뢰성을 확보하기 위하여 다수의 상이한 평가방법을 상호보완적으로 활용한다. 설문의 내용은 조직행정 분야 중 구성원의 의식과 태도를 살펴볼 필요가 있는 사항을 선별하여 실시하며, 설문의 구성은 평가항목마다 설정된 세부평가지표에 대해 문서검토 이외에 직원들을 상대로 조사할 필요가 있는 내용을 중심으로 문항을 구성한다. 설문지는 리커트 척도법에 따라 각각의 문항을 ‘전혀 그렇지 않다’, ‘대체로 그렇지 않다’, ‘보통이다’, ‘대체로 그렇다’, ‘전적으로 그렇다’의 다섯 가지로 측정한다. 이 경우 다섯 가지 응답별로 각각 1점에서 5점까지 점수가 부여되고, 해당 질문에 대한 산술평균값이 3.0 이상인 경우 긍정적인 상태로, 3.0 미만인 경우에는 부정적인 상태로 평가하는 방식을 사용한다. 그러나 관대화 경향때문에 대부분의 문항의 평가점수가 3.0보다 높을 경우에는 다른 문항들과의 평가점수를 비교하여 상대적으로 점수가 낮은 경우로부터 안전성 문제를 도출할 수도 있다. 본 논문에서는 위에서 언급한 5가지 항목의 평가범위 내 세부지표들에 대하여 평가하는 방법을 상세히 기술하고자 한다.

현재 PSR 조직행정 평가에서 사용하는 설문조사 결과는 평가기준점수 3.0을 기준으로 긍정 또는 부정적인 결과로 판단하고 있는데, 이는 상대적인 점수로서 도출해야 할 안전성 문제를 간과할 수 있는 가능성을 갖고 있어, 보다 객관적인 판단기준 정립을 위한 방안을 제시하고자 한다.

최신기준 주기적안전성평가 수행을 위한 기준문서 개발

Development of a Basis Document for Requirements and Outcome in PSR

함태균 · 임혁순 · 강종호

한국수력원자력(주)

1979년 TMI-2 원전사고 및 1986 체르노빌 원전사고 이후 원자력 시설의 사고를 방지하고 피해 완화 대책을 위한 국제협력 필요성이 제기되었다. 이에 국제원자력기구(IAEA)는 주기적안전성평가(PSR, Periodic Safety Review) 시행 권고를 포함하여 협약국의 의무사항을 규정한 원자력안전협약(CNS, Convention on Nuclear Safety) 채택('94.6)하였다.

우리나라도 가동중인 원전에 원자력 기술발전, 운전경험반영, 기기 노화대책을 수립하기 위해 10년 주기로 종합적인 안전성평가 수행을 골자로 11개 인자에 대하여 평가를 착수('94.11) 하였으며 2014년에는 추가로 발전소 설계, 위해도분석, 확률론적안전성평가 3개 인자를 추가하여 평가를 수행중에 있다.

원전의 주기적안전성평가(PSR, Periodic Safety Review)는 가동원전에 대해 경년열화, 시설변경, 운전경험 및 기술발전 등의 누적된 영향을 다루고, 원전 운전기간 동안 고도의 안전성을 보증하기 위하여 운영허가 받은 날로부터 매 10년이 되는 날로 기준일로 하여 1년 6개월 이내에 평가보고를 제출하기 위해 매 10년마다 수행되는 원자력발전소의 안전성을 체계적으로 평가하는 것이다.

최신 IAEA 안전지침 SSG-25(PSR for NPPs)에서 제시하는 PSR 수행 4단계는 ① PSR 기준문서(BD, Basis Document : 기술기준, 범위, 방법론(SFR, GA, IIP) 등을 정의), ② 개별평가 (SFR, Safety Factor Review : 14개 안전인자별 PSR 평가), ③ 종합평가(GA, Global Assessment : 개별평가 결과를 상호 연계하여 심층방어, 안전기능인 반응도 제어, 노심냉각, 방사성물질 격납 등 요건 충족 등의 관점에서 종합평가하여 안전성증진사항 도출), ④ 종합개선계획 (IIP, Integrated Improvement Plan : 증진사항에 대해 완료 기준/기한을 포함한 합리적이고 실행 가능한 개선계획 수립) 이다.

기존 국내 PSR에서는 ② 개별평가(SFR, Safety Factor Review)와 ④ IIP 종합개선계획(Integrated Improvement Plan) 적용하고 있어 최근에 IAEA 안전지침 SSG-25를 참조하여 규제기관의 PSR 심사지침서를 개정('20.6)하여 신규로 PSR를 평가하는 원전에 대하여서는 ① PSR기준문서(Basis Document) 및 ③ GA(Global Assessment)포함하여 평가를 수행할 예정이다.

본문에서는 PSR 수행하기 위한 기준문서로 기술기준, 범위, 방법론(SFR, GA, IIP) 등을 결정하는 PSR 기준문서인 BD(Basis Document)에 기술 될 일반사항, 안전인자 및 PSR 사업 계획 등 기준문서에 포함되어야 할 내용에 대하여 기술하였다. 향후에 PSR 수행시 PSR 수행범위, 요구 및 결과물 생산에 기준이 될 수 있는 내용을 제시함으로써 주기적안전성평가 결과에 대한 신뢰성을 제고하고자 한다.

안전 증진사항 우선순위 도출을 위한 PSR 평가 개선 방안 고찰
Review of Improvement Measures to Develop Priorities of PSR Safety
Enhancement Items

함태규, 강종호

한국수력원자력(주)

주기적 안전성평가(Periodic Safety Review, PSR)는 TMI, 체르노빌 원전사고 이후 원전의 안전을 체계적으로 검증해야 할 필요성이 제기되어 유럽을 중심으로 1990년대 시작되었다. IAEA는 원전 안전의 광범위성에 의한 국제 공동대처에 관심이 증대되면서 원자력 안전을 위한 국제적인 공동노력을 위해 회원국의 PSR 수행 촉구를 포함하는 원자력안전협약을 1996년 공식 발효하였으며 우리나라는 1999년 PSR제도 도입 및 2001년 PSR관련 법령을 개정하였다.

원자력 발전 사업자인 한국수력원자력은 원안법령에 따라 운영허가를 받은 날로부터 10년마다 원전의 PSR평가를 통해 안전성을 종합적으로 평가하고 있다. 2000년 고리1호기를 시작으로 현재까지 해당 원전 PSR 평가를 수행하였으며 PSR도입 취지에 맞게 원전 안전성 향상을 위해 지속적으로 노력하고 있다. PSR 평가는 도입초기 11개 안전인자에 대한 평가를 수행하였으며, 2014년 부터는 IAEA회원국의 PSR 수행경험을 반영하여 추가된 3개인자를 포함한 14개 안전인자에 대한 종합적인 평가를 수행하고 있다. 이는 국내 규제환경을 반영한 최적의 평가체계이긴 하지만 최신 IAEA 지침 SSG-25에서 제시하는 4단계 PSR 수행 체계와의 차이가 있다.

본 논문에서는 2014년 원안법 개정이후 국내외의 PSR 수행경험을 분석하여 국내 PSR평가의 개선점을 도출하고자 한다. 특히 PSR평가를 통해 도출한 증진사항에 대해 총괄적으로 평가하고 우선순위를 도출하여 합리적이고 실현가능한 안전 증진사항 도출 방안을 마련하고자 한다.

PSR 기술기준 Gap 분석 방법론 고찰

A Study on Methodology of PSR Gap Analysis for Technical Standards

김정욱

한국수력원자력(주)

최근 몇 년동안 PSR(Periodic Safety Review, 주기적 안전성평가)이 원전안전분야에서 최대 현안으로 대두되었다. 국회와 정부 유관부처 등에서 PSR 평가주체 변경과 PSR 승인 제 도입 등을 골자로 하는 PSR 강화방안을 제시하고 있으며, 원전운영 사업자는 해외 PSR 수행체계 조사와 사례 분석 등을 통해 최적의 개선방안을 도출하고자 노력하고 있는 상황이다. PSR 강화방안의 핵심은 원전 운영허가시 적용된 유효한 기술기준 대비 어떠한 현행기술기준을 어떻게 적용할 것 인지라고 볼 수 있다. 본고에서는 현행기술기준 적용 Gap 분석을 위해 추진 중인 방법론에 대해 고찰해보고자 한다.

PSR 현행기술기준에 대한 정의, 범위에 대해 국가별, 국내 유관기관별로 해석을 달리 하고 있었으나 '20년에 들어 이에 대해 어느 정도 공감대가 형성되었으나, 그 적용범위, 방법 등에 대해서는 기술기준의 내용이 광범위하여 명확하게 구분짓기가 어려운 상황이다. 현행 기술기준을 ASME와 같은 일반산업기준으로 할 것인지 특정 원전에 적용된 기술기준으로 할 것인지가 먼저 정해져야 하는 데 본 방법론에서는 특정 원전 설계시 적용된 기술기준을 조사, 분석하여 목록화하여 이를 현행기술기준으로 정하고 이 현행기술기준과 비교할, 즉 Gap 분석대상 원전을 정하여 마찬가지로 적용된 기술기준을 목록화해 보았다. 목록화된 현행기술기준과의 Gap 분석방법은 설비, 계통 등의 단위로 하는 방법이 있으나 이 보다는 양 원전에 적용된 기술기준 자체의 비교를 통해 Gap을 확인하는 방법이 향후 다른 원전에 활용하기에 유용할 것으로 보이며, 기술력 확보라는 측면에서도 더 가치가 있을 것으로 보여진다. 아울러 ASME, IEEE, ACI 등과 같은 산업표준 뿐 아니라 원전에 적용되는 Reg. Guide 등도 같이 목록화하여 비교하는 것이 Gap 분석의 정밀도를 높이는 방법으로 보여진다. 또한 PSR 14개 평가인자별로 기술기준을 정리하여 분야별 Gap 분석을 통해 향후 국내 도입 예정인 종합평가(Global Assessment)에도 활용하는 것이 바람직하다. Gap 분석을 위해 목록화된 모든 기술기준을 비교해 보니 최신원전에 신규 추가된 기술기준도 있고 오히려 삭제된 기술기준도 있으며, 설계개념상 적용이 어려운 기술기준도 있는 등 전체 기술기준을 Gap 분석하기에는 무의미하다고 판단된다. 교육·훈련과 관련된 변경사항, 신규 또는 대체 재료를 허용하는 변경사항, 규칙 또는 계산방법을 통합하는 변경사항, 대체 시험방법을 허용하는 변경사항 등이 이에 해당한다고 보인다. 보다 공신력 있는 분석을 위해서 해외원전의 사례를 참조하여 원전 안전성을 증진한다는 측면에서 Gap 분석이 유의미하다고 판단되는 기술기준간의 비교가 필요하다. 또한 Gap이 확인되었을 때 이의 해결과 관련하여 가동 중인 원전에서의 적용성 측면에서 의미가 있는 기준을 분석 대상으로 도출하여야 한다.

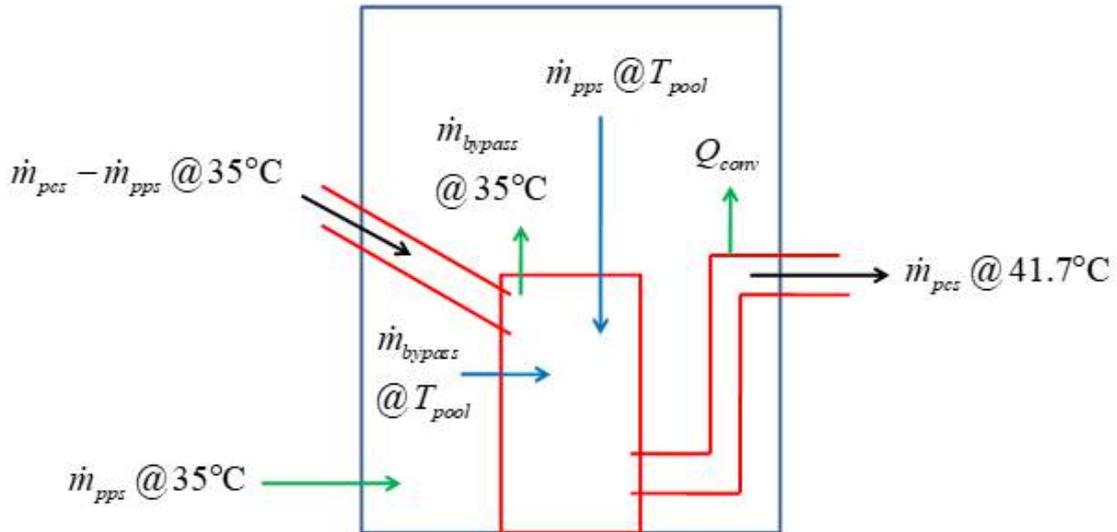
PSR 현행기술기준 정립 및 Gap 분석을 위해 유관기관간 많은 논의가 이루어지고 있으며 개념, 정의, 원칙을 먼저 정하고 이에 따라 기술기준의 범위 확정과 Gap 분석을 통해 실질적인 원전 안전성이 증진되는 방향으로 방법론 개발 및 적용이 추진되어야 할 것으로 보인다. 아울러 Gap 분석방법에 더해 종합적인 평가방법을 같이 도입하여 합리적으로 실현가능한 안전성 증진이 이루어질 수 있도록 병행 추진이 필요할 것으로 판단된다.

연구용 원자로에서 정상상태 수조수 온도의 민감도 분석
Sensitivity Analysis on Steady state Pool Water Temperature in
Research Reactor

이선일*

한국원자력연구원 혁신계통안전연구부*

연구용 원자로의 정상상태 수조수 온도를 결정하기 위해 설계변수(관외측 열전달계수, 우회 유량)에 민감도 분석을 진행하였다. 대상인 연구용 원자로는 개방수조형으로 핵반응이 일어나는 노심이 개방수조의 물속에 잠겨져 있으며, 노심 냉각을 위한 일차냉각계통(PCS), 수조수 정화계통과 연결되어 있다. 수조에서 발생하는 유량 및 온도조건은 다음 그림과 같다.



위 그림에서 Pool water를 Control Volume으로 하여 에너지 평형식을 세우면 다음과 같다.

$$(\dot{m}_{pps} + \dot{m}_{bypass})h_{35^{\circ}C} - (\dot{m}_{pps} + \dot{m}_{bypass})h_{T_{pool}} + Q_{conv} = 0$$

관외측 열전달계수 및 우회유량에 따른 을 구하면 다음과 같다.

h_o (kW/m ² °C)	m_bypass (kg/s)		T_pool (°C)
	0.474 (자연대류)	1	
2			36.04
3			35.95
6.9			35.71
1.715 (V=0.5m/s)	1		36.97
	2		36.81
	3		36.67
	6.9		36.29

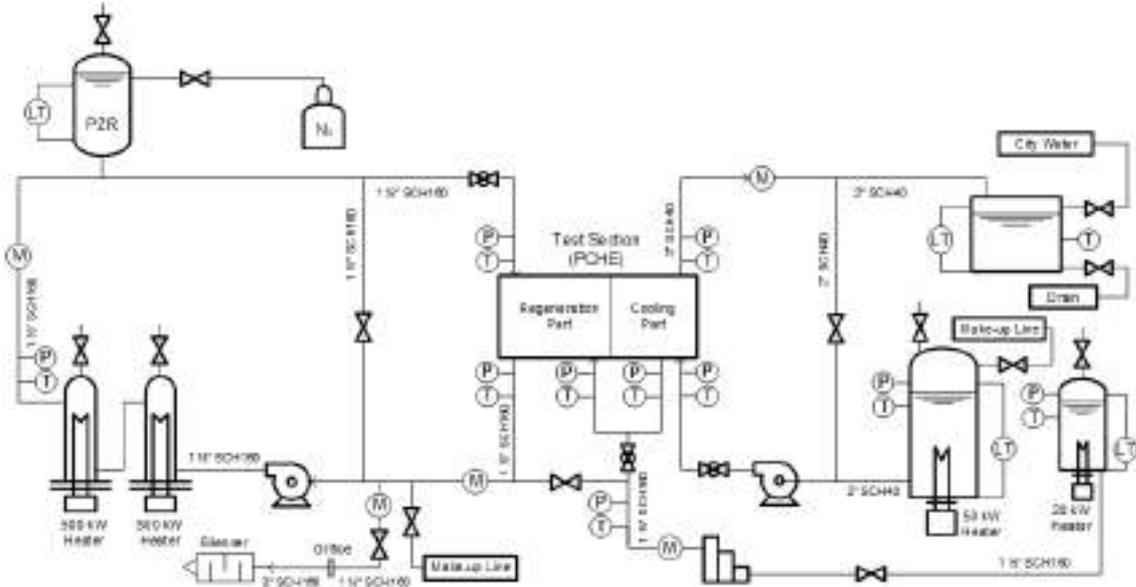
원자력 발전용 고온고압 열교환기 성능 시험장치의 개념 설계 Conceptual Design on Test Loop for High Temperature and Pressure Heat Exchanger in Nuclear Power Plant

이선일* · 박주현**

한국원자력연구원 원자로계통안전연구부*, 한국원자력연구원 다목적계통기술개발부**

발전용 원자력 발전로에는 다양한 계통들이 존재하며, 이 계통들에는 다양한 열교환기가 사용되고 있다. 이 열교환기들은 고온고압 조건부터 저온저압까지 다양한 작동조건에서 작동하게 되며, 이들의 성능 검증은 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 특히 고온고압조건에서 증수기능까지 포함된 열교환기 성능 시험은 그 성능 시험장치 설계에 있어서도 어려움이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 증수계통이 포함된 고온고압 열교환기 성능 시험장치의 개념 설계를 소개하고자 한다.

고온고압 열교환기는 크게 1차계통, 2차계통, 증수계통으로 이루어져 있다. 1차계통은 다시 주라인(펌프, 히터, 가압기, 밸브, 배관), 우회라인(밸브, 배관), 배수라인(오리피스, 밸브, 배관), 충전라인(밸브, 배관), 계측기로 이루어진다. 2차계통은 급수라인(급수탱크, 히터, 펌프, 밸브, 배관), 회수라인(회수탱크, 밸브, 배관, 배수라인, 물공급라인), 우회라인(밸브, 배관), 계측기로 이루어진다. 마지막으로 증수계통은 급수라인(급수탱크, 히터, 펌프, 밸브), 증수우회라인(밸브, 배관), 계측기로 구성된다.



사고관리계획서(AMP) 화재 PSA 수행현황 및 요소 기술별 방법론 적용현황 A Current Status of Fire PSA in AMP and Application of Methodology by Element Technology

이한설 · 김창남 · 황석원
한국수력원자력(주) 중앙연구원

2000년대 초반에 개발된 화재 확률론적 안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment, 이하 "PSA") 이후, 사고관리계획서(AMP: Accident Management Plan, 이하 "AMP") 법제화에 따라 원자력안전법(법률 제13389호, 2015.6.22) 부칙 제3조(사고관리계획서에 관한 경과조치) 및 규제기준 16장(중대사고 및 리스크평가)에 의거하여, 기존(가동) 원전 및 신규(건설)원전에 대한 PSA 제출범위가 명확화 되고, 신규 안전목표가 추가되었다.

가동 및 건설원전에 대한 PSA 규제 요구사항 이행을 위해, 2017년부터 AMP 대상원전에 대해 진출력 화재 PSA 모델의 개정 평가와 정지·저출력 화재 PSA 모델의 신규 개발이 수행되었다. AMP 대상원전에 대한 화재 PSA 모델의 개정 평가 및 신규 개발은 2000년대 초반에 개발된 화재 PSA 모델과, 사고관리전략 및 MACST(Multi-Barrier Accident Coping Strategy) 설비가 반영된 AMP PSA 내부사건 모델을 기반으로 수행되었으며, 미국 EPRI FPRAIG(Fire PRA Implementation Guide) 방법론이 적용되었다. AMP 법적 제출기한 내 최신 화재 PSA 방법론(NUREG/CR-6850)을 적용하기 위해 NUREG/CR-6850의 요소 기술별 적용 가능한 항목들을 검토하였으며, 화재 발생빈도, 수동 화재 진압실패확률, 화재 심각도(임시점화원), 화재 인간 신뢰도 분석, 주제어실 소개 실패확률 등이 도출되었다.

화재 발생빈도의 경우, 점화원 분류체계는 기존 방법론을 유지하고 미국 원전의 화재 발생 경험데이터(NSAC-178L)를 신규 화재 발생 경험데이터(NUREG/CR-2169)로 변경하여 적용하였다. 수동 화재 진압실패확률의 경우, NUREG/CR-6850에서 제공하는 화재구역 및 화재유형별 Split Fractions을 고려하고 기존 수동 화재진압실패확률(NSAC-179L)을 신규 수동 화재 진압실패확률(NUREG/CR-2169)로 변경하여 적용하였다.

화재 심각도(임시점화원)의 경우, 발전소의 현행 임시점화원 관리 체계를 반영하고 임시점화원의 화재특성(NUREG/CR-1934) 및 열방출율(NUREG/CR-6850) 등을 고려하여 개정하였다. 화재 인간 신뢰도 분석의 경우, 내부사건에서 다뤄진 인적오류사건에 대해 화재로 인한 영향(직무 성공기준시간, 스트레스 수준)을 반영하여 추가하였다. 주제어실 소개 실패확률의 경우, FAQ-13-0002 및 NUREG/CR-1921 등 주제어실 소개 실패확률 추정과 관련된 최신 국외 문건을 검토하여 적용하였다.

노형 및 호기간 분석방법 차이로 인해 화재 리스크 Insight/Profile 차이가 발생하는 것을 방지하기 위해, 앞서 언급한 요소 기술들을 AMP 대상원전에 일관되게 적용하였다. 일관되게 적용된 최신 화재 PSA 요소 기술들은 분석시점과 방법론의 차이로 유발되는 노형 및 호기간 화재 리스크 Insight/Profile 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

동일 노형(WH)간 정지 · 저출력 화재 PSA 분석 방법 및 결과 비교 분석 A Comparison Analysis for Results of Fire PSA and Fire PSA Analysis Method for Westinghouse Type Nuclear Power Plants at Low Power Shutdown

이한설

한국수력원자력(주) 중앙연구원

사고관리계획서(AMP: Accident Management Plan, 이하 "AMP") 법제화에 따라 원자력 안전법(법률 제13389호, 2015.6.22) 부칙 제3조(사고관리계획서에 관한 경과조치) 및 규제 기준 16장(중대사고 및 리스크평가)에 의거하여, 기존(가동)원전 및 신규(건설)원전에 대한 PSA 제출범위가 명확화 되고, AMP 대상 전원전에 대해 법적 기한 내 제출이 요구되었다.

가동 및 건설원전에 대한 PSA 규제 요구사항 이행을 위해, 2017년부터 AMP 대상 원전에 대해 저출력 화재 PSA 모델의 개정 평가와 정지 · 저출력 화재 PSA 모델의 신규 개발이 수행되었다.

본 논문에서는, AMP 대상 원전의 화재 PSA 품질 향상과 유사 원전의 설계 특성이 화재 리스크에 미치는 영향을 적절히 평가하고자 동일 노형(WH형)간 정지 · 저출력 화재 PSA 결과 및 리스크 Insight를 비교 분석하였다. 이를 위해, AMP 대상 전원전의 저출력 및 정지 · 저출력 화재 PSA 결과를 검토하여 상세 비교 분석 대상 노형 및 원전을 선정(WH형 2기)하였다. 또한, 정지 · 저출력 화재 리스크 결과 차이의 원인 파악을 위해 선정된 원전의 PSA 모델 및 분석 방법을 상세 검토하였다.

일반적으로 정지 · 저출력 PSA에서는, 출력감발 및 증발을 포함한 저출력운전과 원자로 정지 후에 수행되는 핵연료 교체, 안전/비안전 등급 기기의 정비 및 시험 등의 공정을 발전소 운전 상태(POS: Plant Operational States, 이하 "POS")로 구분하고 POS 공정 별 CDF를 평가한다.

POS 공정 별 화재 리스크 Profile을 검토하여 화재 리스크 편차가 큰 POS 공정을 도출하고, 도출된 POS 공정에서 발생될 수 있는 초기사건, 리스크 기여도가 높은 화재구역 및 해당 화재구역의 화재시나리오, 화재 리스크 계산인자 등에 대한 상세 비교 분석을 수행하였다. 비교 대상 원전의 POS 3, 13에서 화재 리스크 편차가 크게 나타났으며 POS 3, 13 공정 중 보조건물 A, B계열 전기기기실에서 화재 리스크 기여도가 가장 높게 평가되었고, 화재 리스크 편차도 가장 크게 나타났다. 해당 화재구역의 조건부 노심손상빈도(CCDP: Conditional Core Damage Probability, 이하 "CCDP")가 리스크 편차의 원인으로 확인되었으며, CCDP에 대한 민감도분석을 추가로 수행하여 리스크 편차의 증감을 살펴보았다.

WH형 노형과 더불어 타 노형에 대해서도, 동형 원전간 화재 리스크 Insight 비교 분석을 통해 화재 PSA 결과의 신뢰성을 확보하고 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

화재모델링을 이용한 가상원전의 화재 진압시점에 대한 격실온도 민감도분석
A Compartment Temperature Sensitivity Study for Fire Suppression
Time of Virtual Nuclear Power Plant by using Fire Modeling

이한설

한국수력원자력 중앙연구원

국내 원전에서는 화재로부터 원전의 안전을 도모하기 위해 점화원 및 가연성 물질의 최소화, 화재 진압능력 및 화재 전파 억제능력 개선 등 화재 발생 가능성을 최소화하고 화재 발생 시 안전관련 기기에 대한 영향을 줄이기 위해 화재방호체계를 갖추고 주기적으로 화재방호 관련 교육 및 훈련을 실시하고 있다.

국내·외에서 미국을 중심으로 확률론적 안전성평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment 이하 "PSA") 방법론을 활용하여 원전의 화재 위험도를 정량적으로 평가하고 있고 화재 PSA 방법론 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는, 미국의 화재 PSA 방법론(NUREG/CR-6850)에서 제시하는 화재모델링 기법을 이용하여 가상원전의 화재 진압시점에 대한 격실온도 민감도 분석을 수행하였고, 민감도 분석 결과를 바탕으로 격실온도 상승 정도와 화재케이블 손상기준 온도를 비교하여 격실 내 케이블의 손상가능성을 살펴보았다.

가상원전의 격실에 대한 화재모델링을 위해 미국 국립표준기술연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 CFAST(Consolidated Fire and Smoke Transport) 전산코드를 이용하였다. CFAST 전산코드의 입력 자료로 요구되는 격실의 기하학적 정보는 국내 OPR형 원전의 스위치기어실 구조를 준용하였으며, 화재의 특성은 미국의 화재모델링 가이드라인(NUREG/CR-1934) 및 NUREG/CR-6850 등의 국외 자료를 활용하였다.

격실온도 민감도 분석 및 케이블 손상분석을 위한 화재 시나리오 및 가정사항 다음과 같다. 1)스위치기어실 내 전기캐비닛에서 화재가 발생하여 40분 동안 연소하고, 열방출률은 12분 동안 t^2 형태로 성장, 8분 동안 정점 유지, 20분 동안 감소, 2)전기캐비닛에서 발생한 화재가 전기캐비닛 상부 1단 케이블트레이 1단으로 전파, 3)1단 케이블트레이에서 상부 2,3단 케이블트레이로 화재 전파를 가정, 4)스위치기어실 내 2개의 문을 통해 화재 발생 후 15분 후부터 화재 진압을 수행(15분, 20분, 25분 등 5분 단위로 민감도분석 수행), 5)1,2,3단 케이블트레이 중 화재로 인한 영향이 가장 큰 케이블트레이를 케이블 손상분석 대상으로 선정.

격실온도 민감도 분석 및 케이블 손상분석을 통해 화재 발생 시, 격실 내 화재케이블의 손상을 방지하기 위한 적정 화재 진압시점을 간접적으로 확인하였다. 격실 내 기기 중요도를 고려하여 격실 별 적정 화재 진압시점을 평가하고 분석 범위를 확대하여 화재 방호체계의 효율적 이행 및 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

OPR형 원전의 화재 리스크 Insight 및 화재 리스크 추세 분석 A Fire Risk Trend and Insight Analysis of OPR Type NPPs

이한설

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원전에서는 화재 확률론적 안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment, 이하 "PSA") 방법론을 활용하여 화재에 대한 위험도를 정량적으로 평가하고, 화재 리스크 주요 기여 인자를 도출하여 원전의 화재 안전성 향상을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 국내 화재 PSA는 운영허가 취득을 목적으로 운영허가 신청 시기에 따라 원전별로 수행되었고 운영허가 취득 후, 사고관리계획서(AMP: Accident Management Plan, 이하 "AMP") 법제화에 따라 AMP 대상 전원전에 대하여 수행되었다.

본 논문에서는, OPR형 원전을 대상으로 화재 PSA 수행시기 별 화재 리스크 Insight 및 화재 리스크 추세 분석을 수행하였고 수행결과를 바탕으로 화재 리스크 Insight 및 추세의 변화에 대한 원인분석을 추가로 수행하였다.

분석 대상 원전은 운영허가 취득, 후쿠시마 후속조치 이행, AMP 법적 제출 등을 목적으로 약 2010년도부터 지금까지 세 차례 화재 PSA가 수행되었다. 화재 PSA 모델의 근간이 되는 분석 대상 원전의 내부사건 PSA 모델을 우선 검토하여 내부사건 리스크 추세를 살펴 보았고 수행시기별 내부사건 리스크가 감소하는 추세를 확인하였다. AMP 법제화에 따라 다중고장사고, 극한재해, 중대사고 등을 예방하고 완화하기 위해 사고관리 전략과 MACST(Multi-Barrier Accident Coping Strategy) 설비가 도입되어 내부사건 리스크가 감소된 것으로 판단된다.

화재 PSA 수행시기별 화재 리스크 Profile을 검토하여 주요 화재 리스크 기여 인자 및 화재구역을 도출하였고 수행시기별 화재 리스크 편차가 크게 나타난 주요 화재구역에 대해서는 편차의 원인분석을 수행하였다. AMP 화재 PSA 결과에서 주 제어실의 화재 리스크가 큰 폭으로 감소하여 화재 PSA 수행시기 별 편차가 가장 크게 나타났다. 최신 화재 발생빈도 경험데이터의 적용과 주 제어실 소개 후 안전정지 실패확률 개선 등이 주요 원인으로 분석되었다. 주 제어실의 화재 리스크가 감소됨에 따라 화재구역 별 화재 리스크 편중(bias) 현상이 감소되었다.

화재구역 별 편차를 보이지만 전반적으로 화재 리스크가 감소되는 추세를 확인하였고 화재 리스크 편중 현상도 일부 해소된 것을 확인하였다. MACST 설비의 도입, 화재방호 및 훈련체계 강화, 최신 화재 경험데이터의 적용 등이 화재 리스크 감소 요인으로 판단된다.

APR1400 주요 사고경위 중대사고 분석결과 비교 검토 Comparison of Severe Accident Analysis Result for APR1400

이현교* · 황석원 · 이한설

한국수력원자력 중앙연구원

중대사고 시 사고현상과 소외결말분석은 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)를 포함한 국내외 원자력 산업 및 연구 커뮤니티의 중요한 연구 대상이 되어왔다. 2013년에 NRC에서 발간된 NUREGR-1935, “State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis 프로젝트” 보고서에 따르면 NRC의 규제와 발전소 안전성 평가를 통하여 축적된 연구 결과들을 기반으로 하여 중대사고 진행 및 소외결말에 대한 최신 분석이 완료되었다. 국내에서도 한수원에서 해당연구와 유사한 연구를 진행하였으며, 미국의 SOARCA 프로젝트를 벤치마킹하는 본 연구에서도 MELCOR를 활용하여 중대사고 분석을 수행하였으며, 국내 사업자가 주로 활용하는 중대사고 분석 도구인 MAAP5를 이용한 분석을 병행하여 수행하였다.

MELCOR 전산코드 및 MAAP5 전산코드는 모두 노내 및 노외에서의 중대사고 현상 모의가 가능하며, MELCOR의 경우 주로 규제기관에서의 활용도가 높고, MAAP5의 경우 산업계에서의 중대사고 분석에 널리 활용되어 왔다. 중대사고에 대한 전반적인 발전소 거동은 두 코드가 서로 유사하게 예측하지만, 특정 중대사고 현상들에 대해서는 각 전산코드에 적용된 내부 모델 및 발전소를 모델링하는 수준 및 기법 등의 차이에 의해 상이한 결과가 도출될 수 있다. 본 연구에서는 APR1400의 주요 사고경위를 대상으로 두 코드를 비교검토 하였다.

먼저 분석결과의 비교검토를 위하여 사고경위를 선정하였다. 분석 사고경위는 확률론적 관점에서 높은 노심손상빈도를 보인 발전소 정전사고와 조기대량방출을 유발할 수 있는 사고경위 중 상대적으로 높은 노심손상빈도를 보인 저압경계부냉각재상실사고를 선정하였다.

MELCOR 및 MAAP5를 통하여 중대사고를 분석한 결과 전반적인 발전소 거동 측면에서는 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 하지만, 최적 분석을 수행한다는 관점에서 고압 사고경위 시의 원자로냉각재계통 내에서의 자연순환 유동, 이에 의한 고온관, 가압기 밀림관 및 증기발생기 세관의 크립 파손등의 거동에 일부 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히, 발전소정전사고 및 저압경계부냉각재상실사고의 사고경위 모두에서 노심용융물, 원자로건물 및 보조건물 내에서의 핵분열생성물 거동에 상당한 차이가 있는 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 APR1400의 중대사고 분석 결과의 활용성을 증대하기 위하여 MELCOR와 MAAP5 분석결과를 비교하였다. 본 연구를 통하여 추후 중대사고 최적 분석 시 고려해야 할 주요한 사항들이 도출되었으며, 이를 통해 최적 분석 결과의 불확실성 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

극한재해 대처설비의 PSA 평가를 위한 신규 기기신뢰도데이터 개발 및 적용
Development of New MACST(Multiple Barrier Accident Coping Strategy)
Component Reliability Data and PSA Application for nuclear power plants

황석원* · 이현교 · 김창남
한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력안전법, 원자력안전위원회 규칙 및 고시에 의거하여 규제기관은 사업자에게 국내 원전의 사고관리계획서 제출을 요구하였다. 사고관리계획서내 확률론적안전성평가(PSA) 분야는 KINS 규제지침 16장에 PSA 평가범위와 안전목표를 명시하고 있다. PSA 안전목표의 경우, Cs-137 방출량이 100TBq을 초과하는 사고발생 빈도의 합은 $1.0E-06$ /년 미만이어야 한다는 규정이 신규로 추가되었다. 기존 PSA 분석에서는 고려하지 않았던 신규 안전목표의 도입과 더불어 PSA 수행범위 확대로 인해, PSA 안전목표를 부합하기 위하여 리스크 측면에서 고려하여야 할 많은 어려움이 산재해 있다.

최신 설계변경사항 반영, 신뢰도데이터 개정 등을 제외하면 기존 PSA 모델과 사고관리계획서 PSA 모델의 가장 큰 차이는 MACST 설비의 고려 유무이다. 본 논문의 목적은 내부사건과 지진사건에서 적용할 수 있는 MACST 설비의 기기 신뢰도데이터를 생산 및 적용하고 해당 기술근거를 개발하는 것이다. 전 출력 내부사건, 정지저출력 내부사건 및 지진사건에서의 기기 신뢰도데이터 생산을 위해 아래와 같은 평가 결과를 도출하였다.

첫째, 최신 기기 일반데이터인 미국의 NUREG/CR-6928(2015)을 기반으로 하여, MACST 기기에 적용 가능한 데이터를 우선 선별 조사하였다. 각 MACST 설비의 구동원, 유사성 및 고장모드 등을 검토하여 적용 가능한 기기신뢰도데이터를 우선 도출하였다. 둘째로, 선별 도출된 고정형 설비 데이터에서 MACST 기기 데이터 생성을 위해 PWROG에서 제시한 4가지 주요 보정인자를 검토하였다. 주요 인자에 대한 정의를 활용하여 각 기기별 선배치, 구동형식, 펌프의 경우 수질 및 시험·정비 인자를 고려하여 내부사건 MACST 설비에 대한 최종 값을 도출하였다. 세 번째로 지진사건시 지진 PSA 모델에서 고려하는 지진구간(Bin 1,2,3,4)을 기반으로 각 지진 구간별 가중인자를 고려한 지진 활용 MACST 설비의 기기신뢰도 값을 최종 산정하였다. 마지막으로 각 MACST 설비의 다중성을 모델링하기 위해, 공통원인고장(CCF: Common Cause Failures) 인자와 적용 지침을 제시하였다.

본 연구로부터 나온 결과는 국내 최초로 도입된 MACST 설비의 기기 신뢰도데이터이다. 이 기기 신뢰도데이터는 국내 고유 MACST 기기 신뢰도데이터 수집을 위한 기반자료로 활용하고, 인적오류확률 평가시에도 근거자료로 활용이 가능할 것이다. 또한, 향후 개발 예정인 주기적 안전성평가 PSA 개발, 사고관리계획서 PSA 개발 및 개발 예정인 국내 고유 데이터 복 개발 등에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

극한재해 대처설비의 PSA 평가를 위한 신규 인적오류확률 개발 및 적용
Development of New MACST(Multiple Barrier Accident Coping Strategy)
Human Reliability Data and PSA Application for nuclear power plants

황석원* · 이현교 · 이한설
한국수력원자력(주) 중앙연구원

확률론적안전성평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)에서 인적요인의 중요성은 실제 발생했던 사건, 사고에 대한 분석결과를 통해 그 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 국내의 경우, 사고관리계획서 PSA 이행시 기존 PSA와의 가장 큰 차이점은 MACST 설비의 도입과 이를 PSA 모델에 반영한 것이라 할 수 있다. 통계적인 기법으로 구하는 기기신뢰도데이터와는 달리 인적오류 사건은 계통의 고장수목이나 사건수목에서 기기의 고장과 같이 하나의 사건으로 정의되며, 인간신뢰도분석(HRA: Human Reliability Analysis) 기법을 통하여 확률값을 계산한다. MACST 설비에 대한 인적오류확률을 구하기 위해서는 MACST 설비 각각의 진단오류, 수행오류에 대한 직무의 정의가 매우 중요하다.

사고관리계획서에 적용된 인적오류확률 평가 방법은 진단오류의 경우는 CBDTM(Caused Based Decision Tree Method) 방법론, 수행오류의 경우는 THERP(Technique for Human Error Rate Prediction)방법론을 각각 적용하였다. 본 논문에서는 전출력, 정지저출력, 지진시 인적오류 확률값을 계산하고, 기술적 평가 근거마련을 위해 아래와 같은 평가를 수행하였다.

첫째, 진단오류 확률 평가를 위해 해당 설비는 다중(EOP, MOG) 절차서를 따르는 것으로 가정하여 인적오류확률을 평가하였다. 둘째로, 수행오류 평가를 위해 MACST 설비의 사전준비 사항, 차단기 조작 및 케이블 결선 정보, 기동 및 안전모션등의 부하연결, 배열 및 상태확인 등 여러 수행절차에 따른 행위들을 세분화 하였다. 그리고 세분화된 행위별로 EOM(Error of Omission), EOC(Error of Commission)과 같은 오류형태를 확정하고 수행오류에 대한 인적오류 확률값을 계산하였다. 세 번째로 각 행위별로 회복조치를 각 단계별 행위에 대해 구분하여 각 MACST 기기별 인적오류 최종값을 도출하였다. 이 단계까지가 전출력 내부사건에 대한 인적오류 산정방법이며, 이를 기반으로 정지저출력시에는 MACST 기기의 선배치 개념을 도입하여 별도 계산하였다. 마지막으로 지진 인적오류확률 계산을 위하여 Surry 원전에서 지진시 적용한 인적오류 평가 방법론을 활용하여, 운전원행위 시작시간(Time after seismic event)에 대한 개념을 적용하였다. 각 MACST 기기별로 통합부지 보관고에서 이동, 선배치 및 사전포설의 기기운영 개념이 적용되는 설비로 구분하여 지진시 인적오류 확률값에 대한 HEP Shaping Factor를 도출하였다.

본 연구로부터 도출된 결과는 사고관리계획서 PSA 적용을 위한 MACST 기기의 인적오류 확률은 사고관리계획서 PSA에 적용이 가능하며, 기기고장데이터, 인적오류 확률값을 포함한 MACST 설비에 대한 신뢰도데이터는 PSA 수행범위와 다중성을 고려한 PSA 모델링시 기술적 일관성을 유지하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

고리·새울 원자력본부 부지에 대한 통합 대기확산검증 실험 설계

김정미· 김기정*· 이정수*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, *한국수력원자력(주) 고리원자력본부

국내 원전에서는 발전소 운영 시 환경으로 배출되는 기체 방사능 물질의 대기확산 평가에 직선케적 Gaussian plume 모델에 기반한 XOQDOQ 프로그램을 사용하고 있다. 방사능 대기 확산 평가와 관련된 국내 기술기준인 원안위 고시 제2017-26호 '원자로시설 부지의 기상 조건에 관한 조사·평가 기준'에서 '기체 방사성물질의 대기 중 확산·회석 특성은 부지의 기후학적 및 지형학적 특성에 적합한 확산·회석 모델을 이용'할 것을 요구하고 있다. 이에 따라 한수원은 국내 원전 대기확산평가에 사용 중인 확산모델에 대해 각 원전부지 고유 환경 조건에서의 적용 타당성을 검토해 오고 있으며, 2017~2018년 한울원자력 본부, 2019~2020년 한빛원자력 본부 부지에서 야외추적자 확산실험과 난류 관측을 통해 현재 적용 중인 대기확산모델의 부지 적합성을 검증한 바 있다.

이러한 선행 검증 실험 경험을 바탕으로 한수원은 고리원자력본부(이하 고리본부) 부지 및 인접한 새울원자력본부(이하 새울본부) 부지에 대한 대기확산모델 부지 적합성 실험을 수행하고자 실험계획(안)을 수립하였다. 특별히 고리본부와 새울본부는 부지가 인접해 있으나, 별도의 기상탑을 운영하고 있는 특성으로 인해 부지 통합 대기확산검증 실험이 가능한지에 대한 타당성 검토를 수행하였다.

일차적으로 고리본부와 새울본부 별도 지점에서 야외추적자 실험을 수행할 수 있는 여건을 분석하였다. 각 부지 내 추적자 방출이 가능한 3개의 후보 지점을 도출하고, 각 후보 지점에 대해 추적자 포집망 구성 여건, 풍향 발생 빈도 등을 조사하였다. 이를 통해 고리본부와 새울본부의 중간지점에 위한 새울 기상관측소가 추적자 방출 및 포집망 구성 등 실험 조건에 부합하는 것으로 판단하였다. 이와 더불어 고리 부지와 새울 부지의 과거 3년간 기상자료 분석을 통해 계절별 주 풍향 등 유사한 기상조건이 형성됨을 확인하여 두 부지의 중간 지점에서 통합 대기확산검증실험을 수행할 수 있을 것으로 판단하였다.

이러한 지형 및 기상 이력 검토를 통해, 고리/새울 부지는 지형이 인접하여 연간 기상이 유사하므로 실험을 통합하여 실시하며, 고리/새울 부지의 경계에 인접한 새울기상관측소 기상탑 주변을 방출점으로 선정하고 기상관과 울주군을 포함할 수 있도록 북동방향으로 동심원의 포집라인을 설계하는 것으로 실험안을 확정하였다.

향후 계획된 실험안에 따라 1년간 총 8회의 야외추적자 확산실험을 수행하고, 현재 고리본부와 새울본부 주민선량평가에 사용하고 있는 대기확산계수의 사용 적합성을 검증할 계획이다.

소형냉각재 상실 사고 시 노심냉각계통의 성능에 관한 예비해석 Preliminary Analysis on the Performance of Emergency Core Cooling System under the SBLOCA

류성욱 · 이선일 · 이성재
한국원자력연구원

원자력발전소 비상노심냉각계통의 사고 시 냉각성능을 파악하기 위해서는 종합열수력검증 시험장치를 이용한 사고모의시험이 요구된다. 이에 앞서 시험에서의 주요 현상 예측 및 적절한 시험방안을 도출하기 위해서 안전해석코드(MARS-KS 코드)를 이용한 예비해석이 수행되었다. 예비해석에서는 비상노심냉각계통의 각 요소 별 성능을 확인하기 위해 1차 측 make-up 운전이 필요한 사고인 냉각재상실사고를 시나리오로 선정하였다. 저온관 상부에서 2 inch에 해당하는 면적인 0.024 ft² 크기의 파단이 발생하는 것으로 소형냉각재상실사고예비해석 시나리오를 고려하였다. 비상노심냉각계통 안전주입탱크의 계면 응축을 상세하게 모의하기 위하여 그림 1과 같이 압력평형배관과의 연결 노드를 탱크 최상단 노드가 아닌 냉각재 수위 계면으로 모델링을 하였다. 그림 2는 예비해석에서의 계통 압력 변화를 표현한 것이다. 파단 사고 발생 직후 1차 계통 압력은 급격하게 감소하다가 11 MPa 부근에서 감소율이 급감하여 일정시간 동안 유지하게 되는데 이는 파단 유량의 상이 단상에서 이상 유체로 변화하면서 발생하는 것으로 판단된다. 이 후 다시 압력이 하락하고 증기발생기 포화압력인 8 MPa 부근에서 약 3,000 초 까지 압력이 일정하게 유지되는 Plateau 구간이 나타났다. 이 후 SIT가 주입되면서 압력이 차츰 감소하기 시작하고 자동감압밸브가 개방되면서 급속하게 감소하여 대기압 수준까지 하락한다. 그림 3은 예비해석에서의 SIT 주입 유량을 나타낸 것이다. 냉각수 주입 유량은 일정하게 생성되지 않고 2차 계통 압력 변화에 따른 1차 계통 압력의 변화로 간헐적으로 주입되는 것으로 판단된다.

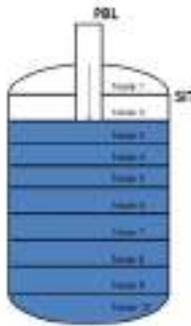


그림 1. 안전주입탱크 노드

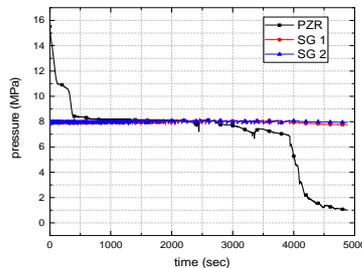


그림 2. 계통 압력 변화

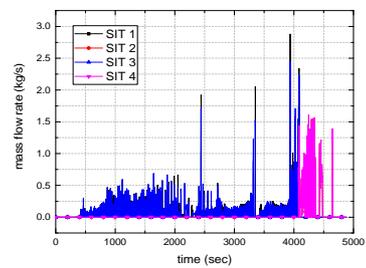


그림 3. SIT 유량 변화

Acknowledgement: 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 201315101670)

비상 대응 방사선량 평가를 위한 방사선원항 수계산 절차 개발

Development of the Manual Calculation Procedure of a Source Term for a Dose Assessment of Nuclear Power Plant Emergency Response

조현준^{*1} · 윤상혁^{*2}

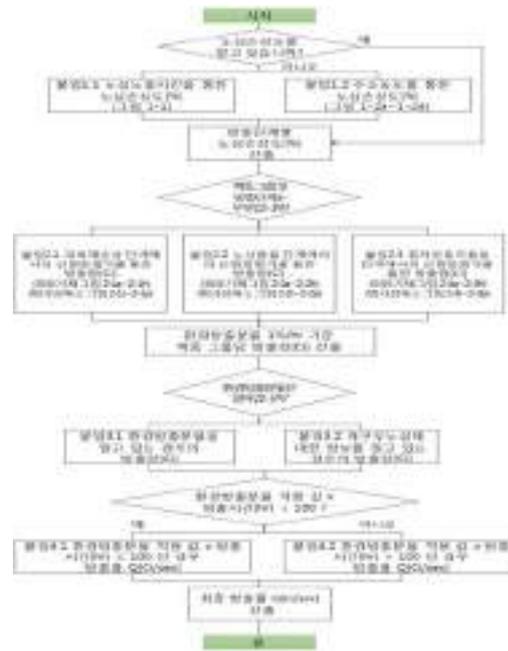
¹한국수력원자력 중앙연구원

²주식회사 엔에스이

원자력발전소는 방사선 비상 시 신속하고 효과적인 주민보호조치를 권고하기 위해서 방사선량을 예측 평가할 수 있는 전산 프로그램을 사용하고 있다. 그러나 후쿠시마 원전 사고와 같이 장기간 전원과 통신설비가 상실되어 전산 프로그램을 이용한 방사선량 평가가 불가능할 경우에 대비하여 수계산 평가절차를 개발하여 사용 중이다. 이 절차는 실제 방출된 방사능이나 방사선 측정 자료가 있어야 가능하다. 그러나 이러한 측정 자료가 없을 경우에 대비하여 사고 시 방사능 방출량을 계산할 수 있는 수계산 절차가 필요하게 되었다.

사고 시에 방사선원항을 평가할 수 있는 방법은 노심노출시간, 과냉각 여유도, 냉각재 주입 요구량, 원자로건물 방사선감시기, 수소농도, 사고 후 시료채취 자료 등의 변수를 이용하여 평가할 수 있다. 그러나 수계산 절차에는 이런 모든 변수를 사용할 수는 없으며, 노심노출시간과 원자로건물 수소농도를 사용하였다. 수계산 절차는 ‘사고시 주민보호조치 권고를 위한 방사선량 평가 통합시스템(S-REDAP)’의 방사선원항 평가 알고리즘을 사용하여 피복재손상, 노심손상, 원자로용기용융의 방출단계별 방사성물질의 방출량을 산출할 수 있도록 도식과 계산식을 이용하여 개발되었다.

또한 환경방출분율과 방출시간을 고려하여 최종적으로 단위시간당 방출량을 구할 수 있는 절차로 구성되어 있다.



<방사선원항 수계산 흐름도>

방사선 비상 초기대응 방사선량평가 프로그램 개발

Development of the Dose Assessment Program for a Early-phase Radiological Emergency Response of Nuclear Power Plant

조현준^{*1} · 정윤희¹ · 김정미¹ · 이영주¹ · 박선병² · 김현직²

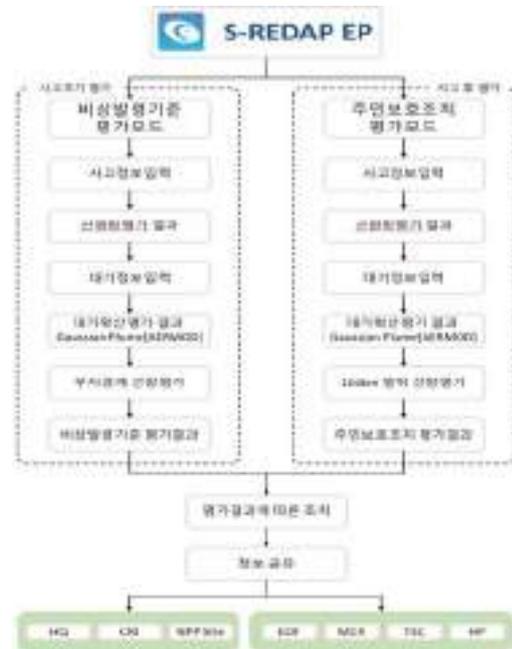
¹한국수력원자력 중앙연구원

²주식회사 엔에스이

원자력발전소의 방사선비상대응을 위해 ‘사고시 주민보호조치 권고를 위한 방사선량 평가 통합시스템(S-REDAP)’을 운영하고 있다. 기상청의 실시간 기상예보자료를 사용하여 네트워크 체계에서 운영되는 S-REDAP 시스템은 비상발령 후 비상기술지원실 등 정규비상대응 조직이 발족한 이후 사용된다. 그러나 부지경계에서의 방사선량을 예측하여 방사선 비상을 발령하고 정규비상대응조직이 발족되기 이전에 주민보호조치 권고를 할 수 있는 시스템이 필요하게 되었다. 따라서 초기비상대응을 위해 독립 컴퓨터에서 빠르게 구동되는 프로그램인 방사선 비상 초기대응 방사선량평가 프로그램(S-REDAP EP)을 개발하였다.

S-REDAP EP 프로그램은 방사선원항 평가, 대기확산 평가, 방사선량 평가 등의 알고리즘은 S-REDAP과 동일하나, 신속한 평가와 독립 운영을 위해 지리정보를 단순화하고 대기확산평가 모델은 가우시안 플럼모델을 사용하였다. 평가모드는 부지비상발령기준 평가모드와 주민보호조치 평가모드로 구성되어 있다.

비상발령기준 평가모드를 이용하면 방사선사고 시 신속하게 부지경계의 방사선량을 예측하여 방사선비상을 발령하고 비상대응 조치를 수행할 수 있다. 또한 주민보호조치 평가모드에서는 원자력발전소 주변 100km까지의 주민 방사선량을 예측 평가하여, 신속한 주민보호조치 권고를 할 수 있다.



S-REDAP EP 구성도

에너지 믹스 고온전기분해 공정과 원자력 연계기술 검토 A Review of Interaction Technology for Nuclear Power Plant and High Temperature Steam Electrolysis on the Energy Mix

이종보* · 문종철 · 이도환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

세계 각국에서는 2030년 이산화탄소 제로화(중립) 목표를 선언하고 사회적, 경제적 체계 개선책을 마련하고 있다. 본 연구에서는 소형원자로 등 미래 원전에 적용 가능한 수소생산 기술 검토를 수행하였다. 미래 원전에는 저온 수전해(알칼라인 수전해, 고분자전해질 수전해) 또는 고온 수전해(고체산화물을 이용한 고온 증기전해) 방식의 수소생산 기술을 적용할 수 있다. 각 수전해 방식에 따른 기술 특성 및 경제성 분석을 통해 고온 증기전해를 이용한 원전 수소생산 방식이 가장 경제성이 높은 것으로 나타났다.

원자력 수소 생산단가는 원전 이용률, 전력요금, 시설 투자비에 따라 변동한다. 이 값은 시설 투자비와 전력요금에 비례하며, 수소생산시스템의 이용률이 동일한 경우 시설 투자비보다 사용 전력요금으로부터 받는 영향이 더 크게 나타난다. 또한 낮은 이용률에서는 수소 생산단가가 급격히 증가한다. 현재 미래 원전의 전력단가는 가용하지 않기 때문에 가용한 국내 전력요금 실적 단가를 활용하였다. 향후 환율과 시설 투자비 등의 값은 변동할 수 있다. 따라서 미래 원전의 전력요금 자료, 기술 발전에 따른 수전해 기술 성능향상, 모듈화 및 개량 콘크리트 성능개선에 따른 건설비 저감, 환율 변동, 할인율 변화 등을 반영하여 미래 원전의 수소 생산단가를 지속적으로 감소시킬 필요가 있다.

미래 원전 수소생산의 안전성 및 인허가 고려사항, 추진단계 및 방안에 대해 검토하였다. 원자력을 이용한 수소생산기술은 원전의 열과 전기를 이용하기 때문에 수전해 시설은 원자력 발전소에 인접하여 배치된다. 따라서 수소 안전성, 수소 폭발이 원전에 미치는 영향 등이 인허가의 핵심 이슈 사항이 될 것이다. 또한 미래 원전의 수소생산의 실질적인 단계별 추진(안)을 마련하고, 세부계획은 시행단계에서 검토할 필요가 있다.

- 단계 1 : MW급 저온 수전해 시설 구축 및 시범 운영
- 단계 2 : MW급 실증용 고온 증기전해 시스템 인허가, 설치 및 시험운영
- 단계 3 : 미래 원자력 고온 증기전해 시설 인허가, 설치 및 운영

원자력을 이용한 수소생산시스템 모델은 전 세계적인 수소경제 정책에 부응하고 재생에너지의 간헐성 문제에 대한 현실적인 해결 대안이 될 수 있다. 그러나 아직까지 전 세계적으로 상업용 원자력 수소생산 시스템은 운영된 바는 없다. 따라서 미래 원전의 경우 수전해 수소생산 기술 및 효율성 입증 필요하며 이 과정은 단계적, 전략적으로 추진되어야 할 것이다.

에너지 믹스 해수담수화 공정과 원자력 연계성 검토

A Review of Interaction Technology for Nuclear Power Plant and Seawater Desalination Plant on the Energy Mix

이종보* · 이상섭 · 이도환

한국수력원자력(주) 중앙연구원

최근 기후변화, 산업화, 인구증가, 환경오염 등의 다양한 요인으로 지구 수자원 고갈이 전 세계적으로 심화되는 동시에 수자원 수요는 급격하게 증가하고 있다. 이러한 상황을 해결하고자 신규 수자원 확보 방안으로서 해수담수화 기술이 주목받고 있다. 중동 등 물 부족 국가에서 운영 중인 해수담수화설비는 수자원 공급을 위한 실제적인 방안인 동시에 다양한 용도를 충족시킬 수 있는 실행 가능한 옵션으로 인식되고 있다.

본 연구는 원전-해수담수화 플랜트 연계기술 관련으로서 화석연료설비 대비 이산화탄소 배출이 거의 없기 때문에 지구 온난화 문제로부터 자유로우며 다음의 장점이 예상된다.

- 원자로는 제공하는 열의 온도범위가 넓어, 모든 담수화 공정에 적용 가능
- 복수기를 통해 담수화 공정에 적절한 온도의 폐열 공급 가능
- 담수화 공정은 에너지 집약 과정으로서 장기적 관점에서 연료비가 싼 원자력이 화석연료 대비 경쟁력이 있을 것이며, 향후 산업발전, 인구증가, 식량자원 활성화 등 담수의 수요는 더 증가할 것이므로 경제성 향상 예상

본 연구과정에 해수담수화 기술 중 이미 잘 확립되어 있고 또 상용화 측면에서 입증된 증발법의 MSF(Multi-Stage Flash; 다단증발법) 기술 및 MED(Multi Effect Distillation; 다중효용법) 기술과 막분리법의 RO(Reverse Osmosis; 역삼투압법) 기술에 대해 기술성 및 경제성을 평가하였다. 잠정평가 결과 현재 해수담수화 RO 기술이 최적의 성능을 보이고 있다. RO 기술은 전 세계 담수화 시장에서 약 70%의 점유율을 차지하고 있으며, 가장 경제적으로 담수를 생산할 수 있다. 또한 별도의 열에너지원이 필요 없고 에너지 소비량이 가장 적은 기술이다. 원전을 막분리법 RO 해수담수화 플랜트와 연계시에 증발법(MSF 및 MED) 대비하여 별도 증기공급 없이 원전에서 전기공급만으로 담수생산이 가능하다.

원전 연계 해수담수화 플랜트는 세계적으로 카자흐스탄, 일본, 파키스탄, 중국, 인도 등에 위치하고 있으며, 카자흐스탄 Aktau시의 해수담수화 설비는 발전용수, 산업용수 및 음용수로 80,000~145,000 m³/일 담수를 생산하였다. 원전-해수담수화 플랜트 연계는 기술적으로 어려운 것은 아니라고 판단되나, 원자력 연계 RO 해수담수화 플랜트 구성시 유입수(해수) 수질, 플랜트 생산수(담수) 수질 및 환경에 미치는 영향을 고려하여 하여야 한다.

원자력 발전소 가상현실 시스템 개발 현황

Status on Virtual Reality system development for Nuclear Power Plant

임병기

한국수력원자력 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부

1. Abstract

신고리 5·6호기 건설재개 관련하여 우리회사는 원전 안전 건설·운영 대책('17. 11)를 통해 3D·가상현실 기술을 활용한 사이버 발전소를 구축하고 있다. 3D·가상현실 기술을 활용, 실제와 동일한 사이버 발전소를 구축하고 건설단계에서 설계오류·시공간섭 등 문제점을 사전에 예방하여 건설품질 향상을 목적으로 우선적으로 개발하여 신고리 5·6호기 조기 적용 후 쏘 원전에 확대를 계획하고 있다. 본 연구는 국내 원전산업에 최초로 적용되는 가상현실 기술 개발 내용 및 현황을 소개하고 기술개발 완료에 따른 주요 기대효과 및 향후 추진계획에 대한 내용이다.

2. 기술개발 내용



3. 기대효과 및 향후계획

가상현실 기술의 최고의 장점은 실제와 가상 유사한 환경의 구축을 통해 사용자에게 보다 더 실감나는 정보제공이 가능함에 따라 설계단계에서 3D 형상기반의 설계 간섭체크를 통한 설계오류 최소화로 안전성 제고, 건설단계에서 원자로 등 주기기 시공전 시뮬레이션을 통한 시공성 및 경제성 향상, 정비기간동안에는 주기기 분해/조립 시뮬레이션 구현을 통한 발전정비 최적화가 가능하며, 터빈 계통의 운전 원리 구현을 통한 발전소 운전 신뢰도 향상이 가능하고, 기술개발이 완료되는 즉시 건설단계에 우선 적용 후 운영 및 정비단계에서 단계적으로 적용할 계획이다.

원자력 발전소 플랜트 맵 개발에 관한 연구

Study on Nuclear Power Plant Map development

임병기

한국수력원자력 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부

1. Abstract

원자력 발전소 설계, 건설, O&M 단계 동안에 활용하고 있는 GA(General Arrangement) 도면은 원자력 발전소 건물별, 레벨별 해당되는 구조물, 계통, 기기에 대한 위치를 표기하는 도면, 즉 일반 기기배치 도면으로 정의 할 수 있다. GA 도면은 공기조화설비, 전기, 계측, 기기, 그리고 기계장치 등 발전 설비가 위치해 있는 해당 건물의 해당 층에 기기위치, 기기 목록과 해당 좌표로 구성되어 있다. 해당되는 건물(층)에 많은 발전설비의 목록과 위치가 표기됨에 따라 발전 설비 검색이 불편하며, 정확한 위치 검색을 위한 많은 시간이 발생하고 있다. 따라서 본 연구는 발전소에 사용되고 있는 해당 GA 도면의 해당되는 설비목록 DB, 해당되는 기기를 객체화 형태로 변환하여 개별 기기에 대한 검색을 용이하게 하고 탐색 경로 설정 등 시물레이션 등 부가기능을 추가하여 GA 도면의 활용성을 향상시키는 목표로 기술개발을 수행하고 있다.

2. 기술개발 방법 및 내용



3. 기대효과 및 향후계획

원자력 발전소 GA(General Arrangement) 도면은 건설단계 설계변경, 가동 원전 동안에 설비 변경에 따른 설계검토, 설비 위치 검색, 운전원 로깅 전 사전 시물레이션, 신입 직원의 기기 위치 파악 등에 활용하는 중요한 도면중의 하나이다. 원자력 발전소 생애주기동안에 활용되는 GA 도면은 발전소 설비의 데이터화를 통해서 설비위치 검색 용이, 설계변경 업무 등이 활용이 가능하며 향후 무선기술 적용 시 Mobile 장치에 활용가능한 Application 개발까지 확대할 계획이다.

크러드 침적 저감 후보물질 성능 평가 시험

Experiment about performance of crud reduction candidate material

정진호 · 최훈

한국수력원자력(주) 중앙연구원

크러드는 원자로 구조재, 증기발생기 세관 등 금속 물질이 냉각재에 의해 산화되어 발생하는 부식생성물을 통칭한다. 부식생성물이 냉각재를 통해 노심으로 유입되어, 핵연료집합체에 침적되면 노심 출력분포 및 핵연료 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 크러드는 주로 과냉각핵비등이 발생하는 지점에서 침적이 발생하기 때문에 주로 핵연료 상단에서 크러드의 두께가 두껍게 관찰된다. 크러드에 의해 발생하는 문제는 주로 축방향 출력분포 비정상(AOA)와 크러드에 의한 국부산화이다. 핵연료 상단에 비정상적으로 높은 수용성 붕소 농도로 인해 상부출력이 억제되어 노심 출력이 하부로 치우치며 노심의 운전여유도를 감소시킬 수 있다. 또한 크러드의 낮은 열전도도로 인해 피복관 온도를 증가시키며 이로 인해 산화속도가 증가하여, 피복관의 산화막 두께가 설계치보다 증가할 수 있다.

원자력발전소에서는 크러드에 의한 영향을 방지하기 위해 다양한 운전전략을 수립하여 적용하고 있다. 화학세정운전 및 연료집합체 초음파 세정을 수행하며, 발전소 운전 중 아연을 주입하여 크러드 생성량을 저감시키는 전략을 사용하기도 한다. 최근에는 사고저항성 핵연료 개발과 관련하여 크러드 침적을 저감시킬 수 있는 핵연료 피복관 코팅물질에 관한 연구도 수행되었다. 본 연구에서는 기존 연구에서 알려진 크러드 침적 저감 능력을 가진 후보물질을 코팅한 피복관을 이용하여 크러드 침적 저감 모사시험을 수행하였다.

본 연구에서는 한국원자력연구원에서 사고저항성핵연료의 개념을 토대로 개발한 CrAl과 EPRI에서 제시한 물질 중 ZrN 및 TiN을 코팅한 피복관, 그리고 Zircaloy-4 피복관으로 실험을 수행하였다. 크러드 침적 모사 시험은 Auto-clave를 이용하여 수행하였다. Auto-clave chamber에 증류수와 Fe_2O_3 분말과 NiO 분말을 혼합하여 주입하였다. 금속 산화물 분말은 크러드의 역할을 하며, 주입된 양은 실제 원전내 금속이온 농도에 비해 매우 높은 값이나 가속시험을 위해 해당 농도를 사용하였다. 온도 및 압력은 실제 원전 조건과 유사한 $360^{\circ}C$, 2250 psia를 유지하였다. 실험은 20일 동안 수행되었으며, 종료 후 시편을 인출하여 크러드 침적량을 분석하였다.

시험 결과 ZrN 및 TiN 코팅은 균열이 관찰되었으며, 부분적으로 코팅이 박리된 곳도 발생하였다. 이는 세라믹 재질의 코팅이 고온환경에서의 열팽창을 수용하지 못하여 발생한 것으로 판단되었다. Zircaloy-4 피복관 및 CrAl 코팅을 비교한 결과, 육안 및 현미경 단면 사진, SEM-EDS 분석으로는 크러드 침적량의 비교는 어려운 것으로 판단되었다.

향후 실제 채널유동을 모사한 루프 실험을 수행하여 크러드 침적 두께 비교를 통해 CrAl 코팅 물질의 크러드 침적 저감 능력을 평가하고자 한다.

참고문헌

- [1] Fuel Cladding Surface Modification for Crud Formation Resistance: Screening of Candidate Materials. EPRI, Palo Alto, CA: 2015. 3002005414.
- [2] H.G Kim, et al, Out-of-pile performance of surface-modified Zr cladding for accident tolerant fuel in LWRs, Journal of Nuclear Materials, 500, 93-99, 2018

사용후핵연료의 건식저장 건전성 평가

Integrity Evaluation of Spent Fuel under Dry Storage Condition

김성근 · 장정남 · 박명철 · 권인찬 · 서항석 · 권형문

한국원자력연구원

한국원자력연구원 조사후연료시험시설은 국내 원자력발전소에서 조사된 핵연료를 평가하는 국내 유일 시험시설로서 운전연료 연소성능 평가, 손상연료 원인규명 등 원전 안전성 확보를 위한 다수의 연구를 약 30년간 수행해 오고 있다. 최근 사용후핵연료 중간 건식저장이 활발하게 논의됨에 따라 건식저장 조건에서의 사용후핵연료 열화거동 평가, 예측이 중요시 되었으며 사용후핵연료 핫셀시험 및 시험자료 확보가 필수적으로 요구되었다. 본 연구에서는 사용후핵연료 피복관의 물성을 저하시키는 주요 열화기구인 수소화물재배열 및 크립 특성과 지지격자체의 조사취화에 의한 충격특성 등을 건식저장 모사 조건에서 평가하였다. 수소화물재배열은 저장 과정에서 피복관의 반경방향으로 수소화물이 재배열되어 피복관의 연성을 저하시키는 현상으로 이를 모사하기 위하여 사용후핵연료 피복관을 대상으로 온도, 응력, 냉각속도 등의 영향인자를 고려하여 수소화물재배열처리를 수행한 후 압축시험, 미세조직관찰, 수소함량분석 등을 수행하여 취화정도를 평가하였다. 건식저장 중 고온의 사용후핵연료는 핵분열생성기체로 인한 내부 압력에 의해 피복관에 크립 변형이 발생되어 건전성에 영향을 받는데 이를 평가하기 위해 사용후핵연료 피복관을 고온으로 가열한 뒤 장기간 일정 내압을 가하여 크립 변형률을 측정하였고 건전성 유지여부를 확인하였다. 핵연료집합체 구조부품인 지지격자체는 저장 중 사고 시 외부충격으로부터 연료봉의 손상 및 이탈을 방지하는 역할을 하는데 본 연구에서는 진자식 충격시험을 수행하여 지지격자체의 좌굴충격력 및 좌굴형상 등을 평가하였다.

한국에너지학회 2020년도 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 : 2020년 11월 11일

발행인 : 박 중 구

인 쇄 : 동신인쇄사

이 학술지는 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로
한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 발간되었음