



사단법인
한국에너지학회
KOREAN ENERGY SOCIETY

www.koes.or.kr

2022년도 한국에너지학회 춘계학술발표회

2022년도 한국에너지학회 춘계학술발표회

일시. 2022년 4월 27일(수)~4월 29일(금)

장소. 제주 오리엔탈호텔

주최. 사단법인 한국에너지학회

후원.  **DANSUK**

 한국아이티오 (주)

 **고려대학교**
KOREA UNIVERSITY

 **CONSTRUCTION
ENGINEERING SERVICE**

 **한국전력기술**

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



2022 한국에너지학회 춘계학술발표회 조직위원회

대 회 장 : 한승욱 회장

조직위원장 : 이관영 수석부회장

조직위원 : 김종남, 김철진, 김형순, 김환용, 박영권, 안지환, 유승훈, 정돈영부회장

운영위원 : (학계이사) 김종배, 박종배, 송재천, 안용모, 원장묵, 유동진, 유승호, 윤재호, 이기봉, 이시훈, 이창현, 정상문, 천원기, 허성윤, 홍준희
(연구계이사) 김성수, 명성호, 명승엽, 손정락, 양훈철, 이광호, 이금정, 이상균, 이상학, 이윤빈, 이재설, 이호무, 장원석, 장중철, 장태연, 정기석, 조상민, 최병일, 최정철, 한정민
(산업계이사) 김대룡, 김동섭, 양재구, 오시덕, 유지광, 윤홍식, 이종용, 정희용, 조구현, 조길원, 조승호, 최지영, 황만영
(기관 이사) 김용식, 김우곤, 김한곤, 박영규, 염학기, 유방현, 이상규, 이상훈, 이승현, 최용범, 하종한
(홍보이사) 김완진 (재무이사) 김우경, 유재동 (기획이사) 고상혁, 이기백
(편집이사) 박은덕 (학술이사) 김범석, 김원배, 김태형 (총무이사) 임종세

자문위원장 : 박진호 상임고문

자 문 위 원 :

정근모 명예회장, 박이동, 박원훈, 김상돈, 권영진, 손재익, 최기련, 윤맹현, 박달영, 강주명, 김지윤, 한문희, 김래현, 남인석, 황주호, 윤기봉, 안남성, 이기우, 남기석, 김경원, 곽병성, 박중구 고문

춘계학술대회 참가안내

2022 KOES SPRING CONFERENCE

■ 등록

- 사전등록 : 전자계산서 요청, 온라인카드결제, 계좌입금
- 등록대 운영시간 : 4. 28(목) 12:30 ~ 4. 29(금) 12:00
- 등록비

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

- 등록비 포함사항 : 프로그램북, 기념품, 단행본, 경품행사 추천권
- 발표논문 초록은 홈페이지를 통하여 파일로 배포합니다.
- 학술대회 등록자를 대상으로 기념품 배부 및 추천 행사가 준비되어 있습니다.

(경품) 1등 갤럭시탭S8+, 2등 에어팟 프로, 3등 한라봉5kg

- 4월 28일(목) 만찬은 한정된 좌석으로 인하여 선착순 마감될 수 있습니다.
- 학술대회 등록하시는분들께서는 학회에서 발간한 “국민을 위한 한국 에너지의 미래 아젠다”를 배부하여 드립니다.



■ 분과발표 안내

[구두 발표]

- 발표날짜 및 시간을 확인하시기 바랍니다. 28일(목)~29일(금) 양일간 진행됩니다.
- 발표시간은 질의응답을 포함하여 15분입니다
- 노트북과 무선프리젠테이션은 발표장에 준비되어 있습니다.
- 발표장에 미리 도착하셔서 노트북에 발표자료를 저장해두시기 바랍니다.

[포스터 발표]

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

2022년도 한국에너지학회 춘계학술발표회 총괄일정

- 일시 : 2022년 4월 27일(수) ~ 4월 29일(금)
- 장소 : 제주 오리엔탈호텔 (제주특별자치도 제주시 탐동로 47)

▶ 4월 27일(수)

시간	일정
16:00~18:00	분과회의(비공개)

▶ 4월 28일(목)

장소 시간	A 발표장 (2F 일출홀)	B 발표장 (2F 한라홀 I)	C 발표장 (2F 한라홀Ⅲ)	D 발표장 (2F 사라홀 I)	E 발표장 (2F 사라홀Ⅱ)	F 발표장 (B1 몽블랑)	포스터세션 (2F 한라홀Ⅱ)
12:30~18:00	등록						이사회 (B1 만해정)
13:00~17:00	특별세션1	특별세션2	특별세션3	분과발표	특별세션4	특별세션5	포스터발표 I
	한전 전력연구원 KEPRI TIME 연대와 협력 R&D를 위한 기술설명회	한국에너지기술 평가원 수소 수전해 및 모빌리티 R&D 계획·현황	KIST 탄소중립 미래에너지기술	분과별 구두발표	한국에너지의 미래어젠다	한국전력기술 원전 활용 저탄소 수소생산 포럼	
	coffee break						
17:00~18:00	일출홀 (2F)	개회식 개회사 : 한국에너지학회 한승욱 회장 ((주)단석산업 회장) 축 사 : 제주대학교 김일환 총장					
		기조강연 강연주제 : 원자력, 전망과 과제 — EU Taxonomy를 중심으로 초청연사 : 중앙대학교 정동욱 교수(한국원자력학회 회장)					
		우수논문시상식 및 경품추첨					
18:00~	한라홀 (2F)	만 찬					

▶ 4월 29일(금)

장소 시간	A 발표장 (2F 일출홀)	B 발표장 (2F 한라홀 I)	C 발표장 (2F 한라홀Ⅲ)	D 발표장 (2F 사라홀 I)	E 발표장 (2F 사라홀Ⅱ)	F 발표장 (B1 몽블랑)	포스터세션 (2F 한라홀Ⅱ)
9:30~12:00	등록						
10:00~13:00	특별세션6	특별세션7	특별세션8	분과발표	분과발표	특별세션9	포스터발표Ⅱ
	R&D 전략기획단 에너지분야 MD-PD 워크숍	한국가스안전 공사 가스시설 안전성 향상 연구	한양대학교 글로벌 탄소중립과 자원순환	분과별 구두발표	분과별 구두발표	한국지질자원 연구원 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화	

※ 코로나19 상황에 따라 일정이 변경될 수 있습니다.

특별세션 1

- **일 시** : 2022년 4월 28일(목) 13:30~16:20
- **장 소** : A발표장 (2층 일출홀)
- **세션명** : **KEPRI TIME (연대와 협력 R&D를 위한 기술설명회)**

시 간	내 용		발 표 자
13:30~13:35 (5)	행사안내		사회자
13:35~13:40 (5)	개 회 사		부원장 제갈성
13:40~13:50 (10)	에너지 전환	해상풍력 일괄설치시스템 개발	책임 유무성
13:50~14:00 (10)		재생에너지 수용성 향상 기술	책임 김수열
14:00~14:10 (10)	친환경 기술	석탄화력 CCUS 기술	선임 이동욱
14:10~14:20 (10)		온실가스 저감형 송변전기기	수석 구선근
14:20~14:30 (10)	에너지 효율	빌딩 에너지 종합관리(K-BEMS)	책임 장문종
14:30~14:40 (10)		고효율 송변전 기기	책임 구교선
14:40~14:50 (10)	디지털 재난 / 안전	분산전원 연계 ADMS 플랫폼 개발	책임 정원욱
14:50~15:00 (10)		송전선로 O&M 로봇/드론 개발	책임 최민희
15:00~15:15 (15)	Break Time		
15:15~15:45 (30)	연대와 협력 R&D 설명회	R&D 전주기 업무체계 혁신계획	차장 김주은
15:45~15:55 (10)		공동주택용 냉방·난방·급탕 일체형 히트펌프 개발 및 심야제도 개선	선임 조종영
15:55~16:05 (10)		위험성 평가기반 공사현장 자율안전 솔루션 개발	선임 이동엽
16:05~16:15 (10)		전력분야 5G 특화망 모델 및 공공 선도 전력서비스 플랫폼 개발·실증	책임 김영현
16:15~16:20 (5)	맺음말		사회자

특별세션 2

- 일 시 : 2022년 4월 28일(목) 13:00~16:30
- 장 소 : B발표장 (2층 한라홀 I)
- 주 관 : 한국에너지기술평가원
- 세션명 : 수소 수전해 및 모빌리티 R&D 계획·현황

• 좌장 : 오시덕 (블루이코노미전략연구원)

발표 제목	발표자	소속
2023년도 수소·연료전지 분야 에너지R&D 기획방향	박진남 수소PD/ 정기석 연료전지PD	한국에너지기술 평가원
재생에너지 변동성 대응 MW급 수전해 시스템 운영 최적화를 통한 대규모 그린수소 공급전략	김우현 박사	한국에너지기술 연구원
PEM 수전해용 소재/계면 제어 기술개발	김준영 그룹장	코오롱 인더스트리
AEM 수전해 원천기술 / 상용화 제품기술 및 국내 연구개발 현황	최승목 박사	한국재료 연구원
SOEC 국산화를 위한 핵심 요구 기술 및 국내 기술개발 현황	임경태 대표	케이세라셀
대형 전기/수소 상용차 기술동향과 주행거리 연장을 위한 트레일러형 연료전지 시스템 개발 추진 현황	이범호 박사	한국자동차 연구원
항공모빌리티용 수소연료전지 개발 현황	임승택 책임	현대모비스(주)

특별세션 3

abstract p.35~p.41

- 일 시 : 2022년 4월 28일(목) 13:00~17:00
- 장 소 : C발표장 (2층 한라홀Ⅲ)
- 주 관 : KIST 한국과학기술연구원
- 세션명 : 탄소중립 및 미래에너지 기술 심포지움

• 좌 장 : 손현태, 박전진

발표 제목	발표자	소속
In-situ/Operando analysis for electrochemical energy storage and conversion	오형석	청정에너지연구센터
Toward practical application of the CO ₂ conversion for value added chemical production	이웅	청정에너지연구센터
Nanostructured Materials and Nanoengineering for Hydrogen and Fuel Cell Applications	유성중	수소·연료전지연구센터
LOHC 방식 액상 수소저장 (Hydrogen storage using liquid organic hydrogen carrier)	김용민	수소·연료전지연구센터
태양전지 고유연화 및 3차원 구조 기반 제어 연구	이필립	차세대태양전지연구센터
Strategies to achieve efficient next-generation multivalent ion batteries	임희대	에너지저장연구센터
고효율/장수명 리튬공기전지 전지용 공기극 및 리튬금속 음극 소재 개발	정훈기	에너지저장연구센터
고체산화물 전기화학 전지를 위한 고전도성 이중층 전해질 개발	지호일	에너지소재연구센터
Nonequilibrium energy storage reaction of electrode particles in batteries under high current density	홍지현	에너지소재연구센터
Metastable HCP PdH by liquid cell TEM	천동원	에너지소재연구센터

특별세션 4

abstract p.42~p.51

- 일 시 : 2022년 4월 28일(목) 14:00~16:40
- 장 소 : E발표장 (2층 사라홀 II)
- 주 관 : 한국에너지학회 편집위원회
- 세션명 : 한국 에너지의 미래 어젠다

• 좌 장 : 박은덕(아주대학교)

발표시간	발표 제목	발표자	소속
14:00-14:10	인사말 - 박중구 교수 (한국에너지학회 고문)		
14:10-14:25	기후변화의 과학적 현황과 우리의 대응	권원태	APEC기후센터(전)
14:25-14:40	석탄산업: 화석연료의 운명	이시훈	한국에너지기술연구원
14:40-14:55	연속식 폐비닐 열분해 오일화 플랜트 개발	이경환	한국에너지기술연구원
14:55-15:10	바이오매스 에너지 산업	서동진	한국과학기술연구원
15:10-15:25	원자력산업 현황 및 기술개발 동향	이주연	한국전력기술
15:25-15:40	국내 (소)수력에너지의 연구개발 개요 및 동향	김진혁	한국생산기술연구원
15:40-15:55	한국 에너지의 미래 어젠다 : 풍력발전	김범석	제주대학교
15:55-16:10	미국 중국 희토류 희소금속 패권경쟁	김연규	한양대학교
16:10-16:15	에너지R&D와 기술사업화	이성주	한국에너지기술평가원
16:15-16:30	에너지벤처 발전 동향과 새로운 가치평가구축을 통한 금융지원	김봉균	한국에너지기술평가원
16:30-16:45	전력안보의 확보	이태의	에너지경제연구원

특별세션 5

- 일 시 : 2022년 4월 28일(목) 14:00~16:30
- 장 소 : F발표장 (B1층 몽블랑)
- 주 관 : 경상북도 울진군 • 한국전력기술
- 세션명 : 원전 활용 저탄소 수소생산 포럼

• 사회 : 양인수 (한국전력기술)

시 간	주 요 내 용	
13:30~13:35	개회사 : 김상덕 울진군 원전미래전략실장	
13:35~13:40	환영사 : 한승욱 한국에너지학회 회장	
13:40~14:05	저탄소 수소생산 시장 전망과 경제성 분석	박찬오 서울대 원자력정책센터
14:05~14:30	원전 활용 수소생산 R&D 현황 및 제언	장각수 한국전력기술
14:30~14:55	수전해 R&D 현황 및 추진 방향	양태현 한국에너지기술연구원
14:55~15:20	원자력 청정수소 생산 실증단지 조성사업 준비 현황	전영수 서울대 원자력정책센터
15:20~15:30	휴 식	
15:30~16:30	<패널 토론> 원전 활용 저탄소 수소생산 전략 ☐ (좌장) 박상덕 수석연구위원(서울대 원자력정책센터) ☐ 토론자 ○ 염학기 원장 (한국전력기술(주) 전력기술원) ○ 양태현 본부장 (한국에너지기술연구원 수소에너지연구본부) ○ 박진남 수소PD (한국에너지기술평가원) ○ 박찬오 연구위원 (서울대 원자력정책센터) ○ 장각수 부장 (한국전력기술(주) 전력기술원) ○ 전영수 연구위원 (서울대 원자력정책센터)	
16:30~17:00	종합 토론	



특별세션 6

- **일 시** : 2022년 4월 29일(금) 10:00~12:30
- **장 소** : A발표장 (2층 일출홀)
- **주 관** : 산업통상자원부 R&D전략기획단

2022 에너지산업 MD•PD WORKSHOP
(Closed session)

특별세션 7

abstract p.52~p.59

- 일 시 : 2022년 4월 29일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : B발표장 (2층 한라홀 I)
- 주 관 : 한국가스안전공사
- 세션명 : 가스시설 안정성 향상 연구

• 좌 장 : 최영주 (한국가스안전공사)

발표 제목	발표자	소속
소형 LPG 선박을 위한 LPG 벙커링 실증 기준 마련 연구	최영주	한국가스안전공사 가스안전연구원
LNG 냉열 사용을 위한 국내·외 사례 연구	백지효	한국가스안전공사 가스안전연구원
국내·외 독성가스 허용 농도 및 검지 기준 동향 분석	김민주	한국가스안전공사 가스안전연구원
가스 산업 현장 상황에 따른 유기적 대응을 위한 안전관리 프로세스 연구	위재민	한국가스안전공사 가스안전연구원
국내 LNG 벙커링 산업 활성화를 위한 관련 법령 검토	임정석	한국가스안전공사 가스안전연구원
정량적 위험성 평가를 통한 국내 수소충전소 안전성 향상 방안에 관한 연구	임재용	한국가스안전공사 가스안전연구원
가스·화학 시설의 사고 사례 분석을 통한 사고 시나리오 도출	안수현	한국가스안전공사 가스안전연구원
수소충전소 가스누출 센서 설치 현황 분석을 통한 기준 개선 방안	양유진	한국가스안전공사 가스안전연구원

특별세션 8

abstract p.60~p.63

- 일 시 : 2022년 4월 29일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : C발표장 (2층 한라홀Ⅲ)
- 주 관 : 한양대학교
- 세션명 : 글로벌 탄소중립과 자원순환

• 좌 장 : 김연규 (한양대학교 글로벌기후환경학과)

발표 제목	발표자	소속
탄소중립 이행과 기업 환경의 변화	류하늬	현대경제연구원 산업연구실
미국의 순환경제 정책과 재제조 산업 동향	최혜승* 정윤하**	한양대학교 *글로벌순환경제센터 **글로벌인텔리전스학과
배터리 순환 경제 시대, 기업은 어떻게 변화해야 하는가?	김진환	한양대학교 글로벌기후환경학과
국내 재제조 산업의 탄소중립 우수성 확보를 위한 K-ESG 및 글로벌 ESG 항목 적용 비교 연구	홍은경	한양대학교 글로벌기후환경학과

토론자: 류주한 (한양대학교 국제학부), 노동운 (한양대학교 국제학부)

특별세션 9

abstract p.64~p.73

- 일 시 : 2022년 4월 29일(금) 10:00~12:30
- 장 소 : F발표장 (B1층 몽블랑)
- 주 관 : 한국지질자원연구원
- 세션명 : 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화

• 좌 장 : 최준현(한국지질자원연구원)

순서	발표 제목	발표자	소속
1	Recovery of Nitrogen from Waste Diaper through Alkaline Stabilization: Optimization by response surface methodology	Lulit Habte	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
2	Technological approach for utilization of fly ash and red mud as raw materials of CSA cement in Vietnam: Achieving Net-Zero carbon by 2050	Nguyen Van Duc	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
3	A Case Study of Numerical Analysis to Select the Optimal Injection Locations for the Backfilling in Korean Limestone Mines	Youngmin Yoon	Seoul National University
4	An Empirical Study on CSA Cement and Backfill Material for Abandoned Mine Openings	Hyeon-woo Lee	Kangwon National University
5	Current status and prospect of domestic raw material supply and demand for commercialization of carbon mineralization technology	Eu-Dug Whang	Korea of Mining Industry Association
6	Immobilization of Chromium hexavalent oxyanions in wastewater and coal ash leachate by in situ carbon mineralization	Chaeyeon Lim	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
7	Enrichment and Association of Rare Earth Elements with Unburnt Carbon Obtained from Coal Ash	Mohd Danish Khan	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
8	Novel Alkali Activation Integrated Mineralization towards CO ₂ Sequestration and Rare Earths Enrichment from Fly Ash	Lai Quang Tuan	Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
9	A Study on K-ETS Offset project methodology development of carbon mineralization technology for rare earth element concentration	Eundon Jeon	Korea Research Institute on Climate Change
10	A Study on the Analysis of Emission Sources for Development of Greenhouse Gas Reduction Methodology of Rare Earth Extraction Technology Based on Carbon Mineralization	Wan Cheon	Korea Research Institute on Climate Change

논문발표 세부일정 - D발표장 (4.28)

●●● 4월 28일(목) D발표장 (2F 사라홀 I)

>>> 에너지신산업융합/정책/신재생에너지		좌장 : 장원석 (한국지역난방공사)	page
A01 13:00~13:15	도심 발전소 배가스내 CO ₂ 처리 및 고가물질 생산을 위한 미세조류 광배양 및 발전폐열 건조기술 개발 장원석 · 신경아 · 장미희 · 김경민 · 이종준 · 신혜현 · 남궁형규 · 신재용 · 강경수 · 유지혜 한국지역난방공사 미래개발원		77
A02 13:15~13:30	분산형 집단에너지 플랫폼: 다단 저온 열공급 지역난방 실증 김경민 · 이종준 · 오진수 · 이하나 · 장원석 · 신경아 · 오문세 한국지역난방공사 미래개발원		78
A03 13:30~13:45	질소산화물 저감을 위한 요소 기반 친환경 환원제 개발 남궁형규 · 장원석 · 신재용 · 신혜현 · 장미희 · 신경아 · 이상린* 한국지역난방공사 미래개발원, *(주)에스엠씨케미컬		79
A04 13:45~14:00	DR, 계시별요금 등에 의한 전력수요의 변동성 변화가 구역전기 CP 수익에 미치는 영향 분석 전영신 · 임신영 · 김현철 · 이문희 · 김민해 한국지역난방공사 미래개발원		80
A05 14:00~14:15	LNG 발전 배가스 CO ₂ 포집을 위한 분리막 공정연구 이충설 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용 (주)에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원		81
A06 14:15~14:30	도심 LNG 발전소 대상 컴팩트 CO ₂ 포집 및 액화 공정 연계시 발전 출력에 미치는 영향 이중용 · 이현주 · 장원석* 유진에너지기술(주), *한국지역난방공사 미래개발원		82
A07 14:30~14:45	농축 CO ₂ 를 이용하는 간접 광물탄산화 공정에서의 온실가스 저감량 LCA 평가 최창식 · 김성현 · 박동규 · 조성수 · 장원석* 고등기술연구원 · 한국지역난방공사 미래개발원*		83
A08 14:45~15:00	저온수분포화상태 바이오가스에서의 응축수 발생억제 방법 비교 연구 김훈 · 이중용 · 송봉용* · 김우철* 유진에너지기술(주), *한국지역난방공사 미래개발원		84

논문발표 세부일정 - D발표장 (4.28)

●●● 4월 28일(목) D발표장 (2F 사라홀 I)

>>> 원자력/에너지정책		좌장 : 김태형(청주대학교), 진태영(에너지경제연구원)	page
A09 15:00~15:15	LNG 파이프라인 누출 감시를 위한 사례 연구 <u>이아리</u> · 송석용 · 한윤섭 · 심효민 · 제갈석현 (주)에피텍		85
A10 15:15~15:30	주파수영역반사 측정을 이용한 XLPE절연 케이블 노화 수명 평가 <u>김한수</u> · 김건태 · 박혜성 · 정선철 · 정성윤* 한국수력원자력 중앙연구원, *한국수력원자력 한울본부		86
A11 15:30~15:45	XLPE 절연 케이블의 열화에 따른 비열 변화에 관한 연구 <u>김건태</u> · 김한수 · 박혜성 · 정선철 한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹		87
A12 15:45~16:00	제어봉 삽입이력 반영한 탄력운전 성능평가 <u>유극중</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원		88
A13 16:00~16:15	산화현상을 활용한 케이블 열화수명 평가 <u>박혜성</u> · 김한수 · 김건태 · 정선철 · 박세일 한국수력원자력(주)		89
A14 16:15~16:30	특허정보 분석을 이용한 국내외 수소 산업 현황 비교 및 시사점 <u>최진석</u> · 황영은 특허청 동력기술심사과		90
A15 16:30~16:45	에너지시스템통합 및 섹터커플링에 대한 전세계 연구문헌 키워드 연결망 분석의 시사점 <u>Nyun-Bae Park(박년배)</u> · Mina Sung · Won-Yong Lee R&D Planning and Coordination Division, Korea Institute of Energy Research(한국에너지기술연구원)		92
A16 16:45~17:00	열부문 에너지효율향상 의무화제도(EERS) 현황 및 개선방안 <u>진태영</u> 에너지경제연구원 집단에너지연구팀		93

논문발표 세부일정 - D발표장 (4.29)

●●● 4월 29일(금) D발표장 (2F 사라홀 I)

>>> 수소연료전지		좌장 : 김정환 (한국가스안전공사)	page
B01 10:00~10:15	황화구리인듐/황화몰리브데넘 이중접합 반도체 전극을 이용한 광전기화학적 수소생산 <u>채상윤</u> · 윤노영 [‡] · 박은덕* 아주대학교 에너지시스템 학과, [‡] 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터		94
B02 10:15~10:30	다양한 균열 모드에 따른 수소 압력용기의 수소취성 기반 예상수명 평가 <u>김정환</u> · 이화영 · 이민경 · 이재훈 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원		95
B03 10:30~10:45	액화수소저장탱크 단일시험평가 방법론 및 액화질소→수소 변환에 대한 연구 <u>이민경</u> · 김수현 · 김정환 · 이재훈 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원		96
B04 10:45~11:00	스프레이 기법을 이용한 슬러시 수소 생산 공정에서 공급 조건 변화에 의한 슬러시 수소 생산량과 열역학적 해석에 관한 연구 <u>이창형</u> · 류주열 · 황성현 · 박성호* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		97
B05 11:00~11:15	300 MWe급 수소/천연가스 혼소 복합화력의 경제성분석 <u>박혜민</u> · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 황성현 · 권도현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹		98
B06 11:15~11:30	장주기/대용량 수소저장을 위한 액체/고체기반 slush 수소의 저장 비용 분석 <u>박성호</u> · 이창형 · 류주열 · 박혜민 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹		99

논문발표 세부일정 - D발표장 (4.29)

●●● 4월 29일(금) D발표장 (2F 사라홀 I)

>>> 풍력/태양광발전/신재생에너지		좌장 : 박은덕 (아주대학교)	page
B07 11:30~11:45	풍력발전 예측 모형 개발을 위한 기상정보 적용성 평가 류주열 · 박성호 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹		100
B08 11:45~12:00	반잠수식 부유식 해상풍력 터빈의 계류 연결부 위치에 따른 거동 특성 연구 배윤혁* · 김동은 · 이연빈 *제주대학교 해양시스템공학과, 제주대학교 풍력특성화협동과정		101
B09 12:00~12:15	Status of SnS solar cells Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Gedi Sreedevi · Ignatius Andre Setiawan · Park Hyeseon · Shin Yeonju · Kim Boyeon · Kim Dong Hyo · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)		102
B10 12:15~12:30	Investigating the effect of bicarbonate ion for the photoelectrochemical production of H₂O₂ Adeel Mehmood · 채상윤 · 박은덕* 아주대학교 에너지시스템학과		103
B11 12:30~12:45	경제성 빅데이터를 이용한 일단위(Daily-scale) 전력원가(Levelized Cost of Electricity)분석 및 P2G 운영전략도출 박성호 · 이창형 · 류주열 · 박혜민 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹		104
B12 12:45~13:00	저유량 조건에서 펌프-터빈 모델의 터빈 모드 내 Thoma number가 유동 특성에 미치는 영향 김승준¹ · 양현모 ¹ · 박준관 ² · 김진혁 ^{1,3*} ¹ 한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문 ² 한국수력원자력 수력교육센터		105
B13 13:00~13:15	공기 액화 에너지 저장을 위한 LAES 액서지 분석 윤문규, 이춘식, 임동렬, 염충섭 고등기술연구원		106

논문발표 세부일정 - E발표장 (4.29)

●●● 4월 29일(금) E발표장 (2F 사라홀Ⅱ)

>>> 에너지정책		좌장 : 신동현 (에너지경제연구원)	page
C01 10:00~10:15	시계열 자료를 이용한 지역난방 기반 주택용 열의 수요함수 추정 이서영 · 김주희 · 유승훈 서울과학기술대학교		107
C02 10:15~10:30	산업연관분석을 통한 국내 수소경제의 경제적 파급효과 분석 최수빈 · 김주희 · 유승훈 서울과학기술대학교		108
C03 10:30~10:45	PE100 소재 배관의 도시가스 분야 적용을 위한 용착기준 정립 연구 이화영 · 이민경 · 이재훈 · 유근준 한국가스안전공사 가스안전연구원		109
C04 10:45~11:00	석탄발전 총량제가 국내 전력시장에 미치는 영향 분석 신동현 에너지경제연구원		110
C05 11:00~11:15	탄소배출권 단가의 합리적 책정 방법론의 제안 김덕진* *환경열경제연구소		111
C06 11:15~11:30	초소형 모듈 원전의 효율 계산 및 원가 산정 개요 김덕진 ¹ · 이준석 ² · 조성국 ² ¹ 환경열경제연구소, ² 포항산업과학연구원		112

논문발표 세부일정 - E발표장 (4.29)

●●● 4월 29일(금) E발표장 (2F 사라홀Ⅱ)

>>> 에너지신산업융합/수소연료전지/청정화력		좌장 : 김진혁(한국생산기술연구원)	page
C07 11:30~11:45	스마트설계 플랫폼의 비즈니스 모델에 관한 연구 : 비즈니스 모델의 고도화 <u>이옥현</u> · 이성곤 · 구기관 · 한경진 · 이민규 · 유재경 · *이대근 한국에너지기술연구원		113
C08 11:45~12:00	축류 펌프 수력학적 성능 향상을 위한 최적설계 <u>마상범</u> · 느엔 띄엡 · 김 성 · 김진혁* 한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문, *과학기술연합대학원대학교		114
C09 12:00~12:15	CNN-LSTM 기반의 전이학습을 이용한 캠퍼스 건물의 피크시간 전력 부하량 예측 모델 <u>이하은</u> · 이동훈, 김수희, 김관호* 인천대학교 산업경영공학과융합제조시스템공학과		115
C10 12:15~12:30	연료전지에서 생산된 전기와 열의 원가산정 방법론 <u>김덕진</u> ^{1*} · 최병렬 ² ¹ 환경열경제연구소, ² 에너지경제연구원		116
C11 12:30~12:45	단순 랭킨 사이클에서 주증기 온도 및 압력의 성능 최적화 <u>김덕진</u> ^{1*} · 이준석 ² · 조성국 ² ¹ 환경열경제연구소, ² 포항산업과학연구원		117
C12 12:45~13:00	LNG 화력발전에서 배기가스 조성에 따른 고순도 이산화탄소 액화 효율에 관한 해석 <u>이춘식</u> · 조성수 · 최창식 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터		118

포스터발표 I

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-1	원자력 수전과 알칼라인 수전해기 및 고체고분자전해질 수전해기를 이용한 LCOH 다중 민감도 분석 우종하 · 박채운 · 조하 · 노재형 건국대학교 전기공학과	121
P1-2	Hydrogen generation by ammonia decomposition over Ru/SiO ₂ catalysts 이호진 ¹ · 박은덕 ^{1,*} ¹ 아주대학교 에너지시스템학과, *아주대학교 화학공학과	122
P1-3	수전해 시스템 안전성 향상을 위한 추가 안전기준 개발 타당성 분석 권준열 · 이재진 · 이정운 [†] 한국가스안전공사 가스안전연구원	123
P1-4	국내·외 수소충전소 및 배관망 핵심 부품 기술 동향에 관한 연구 김다인 · 김소현 · 이효렬 한국가스안전공사 가스안전연구원	124
P1-5	암모니아 기반 수소추출설비 안전기준 개발 위한 안전항목 분석 염지웅 [†] · 추지안 · 이정운 한국가스안전공사 가스안전연구원	125
P1-6	드론용 이동형 연료전지 안전기준 개정안 도출 연구 조인록 · 최재욱 · 이정운 [†] 한국가스안전공사 가스안전연구원	126
P1-7	가정용 도시가스의 전기화에 따른 온실가스 배출영향 분석 김태현 · 박종배 · 노재형 · 이다한 · 우종하 건국대학교 전기공학과	127
P1-8	Gas-Phase Selective Oxidation of Methane into Methane Oxygenates Zhenchao Xu ¹ , Eun Duck Park ^{1,2} Department of Energy Systems Research, Ajou University(아주대학교 에너지시스템학과)	128
P1-9	카본 담체에 담지된 Pd 촉매 상에서 직접 합성한 과산화수소를 이용한 메탄 부분산화반응 강종균 · 박은덕 아주대학교 에너지시스템학과	129
P1-10	액상에서 과산화수소와 Cu-Fe/ZSM-5 촉매를 이용한 메탄의 부분산화반응에서 Cu의 영향 양건식 · 박은덕 [*] 아주대학교 에너지시스템학과	130

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-11	Fe-zeolite 촉매 상에서 과산화수소를 이용한 메탄 부분산화반응 <u>황석영</u> · 박은덕* 아주대학교 에너지시스템학과	131
P1-12	광전기화학적 수소생산용 황화구리인듐/황화몰리브데넘 광전극의 활성화 <u>윤노영</u> · 채상윤* · 주오심* 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터, *아주대학교 에너지시스템 학과	132
P1-13	PSO 알고리즘을 통한 태양광 발전기 MPPT 제어 시스템 최적화 <u>김민호</u> · 임정택 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원	133
P1-14	수치예보모델 기반 풍력발전단지 발전량 예측 <u>김태형</u> · 김민호 · 임정택 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	134
P1-15	스마트팜 에너지 소비예측 알고리즘 설계 및 구현 <u>박승현</u> · 권기웅 · 김용호 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	135
P1-16	이미지 딥러닝 적용 High-Polygon Mesh 생성기법에 관한 연구 <u>이상엽</u> · 김영찬 · 이재규 · 함경선 한국전자기술연구원	136
P1-17	재생에너지 데이터 결측값 보정을 위한 산업모델 개발에 관한 연구 <u>이재규</u> * · 이상엽 · 조인표 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터*	137
P1-18	공동주택단지 복합 비즈니스모델 분석 시뮬레이터를 위한 사용자 인터페이스 <u>임정택</u> · 김태형 · 김민호 · 함경선 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터	138
P1-19	에너지 디지털 트윈 플랫폼을 위한 마이크로 서비스 아키텍처 <u>조인표</u> · 이상엽 · 김태형 · 함경선 한국전자기술연구원	139
P1-20	딥러닝 기술을 이용한 기업들의 에너지 사용량 예측 설계 <u>이재민</u> · 윤만석 · 고완진 구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터	140
P1-21	리튬이온전지의 열적거동에 대한 열경계저항의 영향 해석 <u>강서희</u> · 이동철 · 신치범† 아주대학교 에너지시스템학과	141

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-22	탄력운전 적용에 따른 Non-LOCA 안전해석 방법론 개발 이재민 · 유극중 한국수력원자력(주) 중앙연구원	142
P1-23	유전 알고리즘을 활용한 전기자동차용 리튬이온전지의 급속충전 프로토콜 개발 김병목 · 이동철 · 신치범 [†] 아주대학교 에너지시스템학과	143
P1-24	전기자동차용 리튬이온전지의 리튬 석출 영향을 고려한 급속충전 모델 개발 이동철, 김병목, 신치범 [*] 아주대학교 에너지시스템학과	144
P1-25	입형 다단 원심펌프 가속 수명 시험을 통한 성능 및 진동 특성 연구 이상혁 · 강효민 · 박태국 · 김재형 · 김상교 · 정병창 · 윤인식 [*] 한국기계연구원, [*] (주)두크	145
P1-26	수요에 기반한 스마트설계플랫폼 개발을 위한 사용자 수요인식 조사 이민규 · 이성곤 [†] · 이육현 · 구기관 · 유재경 · 이대근 · 박성준 [*] 한국에너지기술연구원, [*] (주)날리지웍스	146
P1-27	계통제약을 위한 고리1호기 설계변경 김정주 · 조현준 · 김학수 · 김초롱 한국수력원자력(주) 중앙연구원	147
P1-28	CSP 재질의 열노화에 따른 경도 변화 평가 박혜성, 김한수, 김건태, 박경흠, 권미자 한국수력원자력(주)	148
P1-29	XLPE 절연 케이블의 열화에 따른 유리전이온도에 관한 연구 김건태 · 김한수 · 박혜성 · 박경흠 한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹	149
P1-30	유기산 종류 및 온도에 따른 니켈합금 산화막 제거율 평가 김초롱 · 김정주 · 이경희 · 조현준 · 김학수 한국수력원자력(주) 중앙연구원	150
P1-31	열중량분석을 통한 XLPE절연 케이블 노화 수명 평가 김한수 · 김건태 · 박혜성 · 박경흠 · 조성윤 [*] 한국수력원자력 중앙연구원, [*] 한국수력원자력 월성본부	151
P1-32	원자력 안전관련 유체계통 및 관련기기의 세정에 대한 일반규격품 검증 적용성 고찰 양창석 · 홍태화 한국수력원자력(주), 중앙연구원	152

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-33	원자력 안전관련 장비의 설치, 검사 및 시험에 대한 국내 일반규격품 검증 적용성 고찰 <u>양창석</u> · 홍태화 한국수력원자력(주), 중앙연구원	153
P1-34	원전 1차 및 2차 계통 수화학 관리 통합 Database 구축 <u>이경희</u> · 조용상 · 김초롱 · 권혁철 · 송규민 · 최진수 한국수력원자력(주) 중앙연구원	154
P1-35	원자력발전소 원자로냉각재(RCS) 아연주입운전에 따른 Co-58 핵종농도 변화 <u>조용상</u> · 이경희 · 김초롱 · 권혁철 · 최진수 · 송규민 한국수력원자력(주) 중앙연구원	155
P1-36	중동지역에서 SMR 연계 수전해의 경제성 검토를 위한 실제 태양광 일사량 정보에 기반한 태양광 전력 생산 단가 모의 계산 <u>하희운</u> 한국수력원자력 중앙연구원	156
P1-37	원전 고정자냉각수계통 전도도와 총유기탄소 상승원인에 대한 근본 원인 분석 연구 <u>권혁철</u> · 송규민 · 최진수 · 이경희 · 조용상 · 김초롱 한국수력원자력(주) 중앙연구원	157
P1-38	원전해체 시 방사선피폭 최소화 이행을 위한 ALARA 회의체 관리범위 고찰 <u>김기림</u> · 서형우 · 유지환 · 김혜인 · 이상현* 한국수력원자력(주) 중앙연구원 원전사후그룹, *한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털혁신부	158
P1-39	국내외 해체원전 주관기관 및 산업 환경 비교 검토 <u>서형우</u> · 이상현* · 유지환* · 김기림* · 김혜인* 한국수력원자력 중앙연구원, *한국수력원자력 디지털혁신추진단	159
P1-40	단계별 접근 방식을 이용한 원자력시설 해체 실행 가이드 분석 <u>유지환</u> · 서형우 · 김기림 · 김혜인 · 이상현* 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹 *한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부	160
P1-41	원전해체 방사성폐기물 추적관리 사례 연구 <u>유지환</u> · 서형우 · 김기림 · 백준기 한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹	161
P1-42	원전 해체사업에 적용 가능한 디지털 시스템 사례조사 <u>이상현</u> · 서형우* · 유지환* · 김기림* 한국수력원자력 디지털혁신추진단, *한국수력원자력 중앙연구원	162

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-43	LQG 제어기를 이용한 과열도 제어 알고리즘 개선 <u>이현용</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	163
P1-44	적용 PID 제어기를 이용한 난방제어 알고리즘 개선 <u>이현용</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	164
P1-45	배선용차단기 일반규격품 품질검증을 위한 고장모드 영향분석에 대한 고찰 <u>최재훈 · 조은일</u> 한국수력원자력 중앙연구원	165
P1-46	신뢰성 평가에 기반한 인버터 및 충전기 커패시터 수명검증에 대한 고찰 <u>최재훈</u> 한국수력원자력 중앙연구원	166
P1-47	Zn으로 도핑된 SnS 필름의 향상된 특성 <u>Yeonju Shin(신연주)</u> · Boyeon Kim · Ignatius Andre Setiawan · Hyeseon Park · Dong Hyo Kim · Gedi Sreedevi · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	167
P1-48	황화인듐 나노입자의 녹색합성 및 광촉매 성능 연구 <u>Hyo Jeong Hwang(황효정)</u> · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	168
P1-49	원자력발전소 유사설비 분류 방안 검토 <u>현진우</u> 한국수력원자력 디지털혁신추진단	169
P1-50	배관 직관부 길이가 제한적인 유체계통에서 펌프 유량 측정 방안 <u>김다용 · 박홍범</u> 한국원자력연구원 수출용신형구로실증업단	172
P1-51	연구용 원자로 적용을 위한 펌프 관성서행유량 모델 개발 <u>김인국 · 광재식 · 정민규 · 윤현기 · 박홍범 · 서경우</u> 한국원자력연구원	173
P1-52	수조형 연구용 원자로의 정상 정지 후 일차냉각계통 가동시간에 따른 수조 온도 예비 평가 <u>박기정 · 박홍범 · 서경우</u> 한국원자력연구원	174
P1-53	수조수상실사고를 고려한 연구용 원자로 일차냉각계통 배관 설계 <u>박홍범 · 서경우</u> 한국원자력연구원 수출용신형연구로 실증사업단	175

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-54	연구용 원자로 플랩밸브의 수조 외부설치 설계를 위한 CFD 해석 <u>서경우</u> · 정민규 · 박기정 · 김인국 · 박홍범 한국원자력연구원	176
P1-55	델파이 기법을 활용한 원전에 대한 폭발물 위험 평가를 위한 모델링 및 시뮬레이션의 신뢰성 평가 <u>김우섭</u> · 김혜승 한국원자력통제기술원 물리적방호실	177
P1-56	생체인식 표준화 연구를 통한 성능평가 방법 및 지표 수립 <u>도태관</u> 한국원자력통제기술원	178
P1-57	원자력시설에 대한 드론방호시스템 도입 시 고려사항 분석 <u>손석우</u> · 김혜승 · 김우섭 한국원자력통제기술원 물리적방호실	179
P1-58	폭발물 및 차량강습 시뮬레이션 모델의 신뢰성 제고를 위한 검증 방안 분석 <u>전어진</u> · 김우섭 · 김혜승 · 최선도 한국원자력통제기술원 물리적방호실	180
P1-59	공격목표집합 식별 규제 관련 핵심요소 현황 분석 <u>차지환</u> 한국원자력통제기술원 물리적방호실	181
P1-60	인쇄기관형 열교환기의 Corrugated Mini 채널에 대한 단상 압력강하 실험 <u>황보원</u> · 노하은 · 이재영 한동대학교 기계제어공학과	182
P1-61	보조급수를 이용한 증기발생기 피동충수 방법에 대한 고찰 <u>신혜영</u> · 서건창 한국수력원자력(주)	183
P1-62	주요국의 기후변화대응 정책 동향 분석 연구 <u>강주현</u> · 배치혜 · 김혜진 · 박민희 한국에너지기술연구원 국가기후기술정책센터	184
P1-63	STEEP-SWOT 분석을 적용한 기후변화대응 기술개발 전략 도출에 관한 연구 <u>배치혜</u> · 강주현 · 김혜진 · 박민희 한국에너지기술연구원 국가기후기술정책센터	185
P1-64	미래 장기전망과 전문가 FGI를 통한 수소분야의 미래 유망기술 도출 <u>유란</u> · 김경택 · 이성곤 한국에너지기술연구원 정책연구실	186

●●● 4월 28일(목) 14:00-16:30

번호	주 제 및 발 표 자	page
P1-65	국가 에너지정책에서 절차적 정의 증진 방안 <u>정환삼</u> · 윤성원 *한국원자력연구원	187
P1-66	Vortex breaker를 적용한 하이드로 사이클론 분리기 유동장 해석 <u>김태형</u> · 이세창* · 장용재* · 전수진* 청주대학교 항공기계공학전공, 지엠테크 기술연구소	188
P1-67	유한요소 진동해석에 기초한 디스크 형상에 따른 밸브의 구조적 안정성에 관한 연구 <u>박유진</u> · 김태형 · 김윤철* 청주대학교 항공기계공학전공, *서광공업(주)	189
P1-68	대용량 오리피스 습식 집진장치의 내부유동분석 <u>이상훈</u> * · 임동균** · 장용재*** 청주대학교 일반대학원*, 청주대학교 항공학부**, 지엠테크 기술연구소***	190
P1-69	석탄더미 자연발화 방지용 방지제의 도포 효과에 대한 수치해석 <u>신동익</u> · 장지훈 · 박석운 · 김재관 · 엄태인* 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 · *한밭대학교 환경공학과	191
P1-70	유동유발진동 현상을 이용한 압전 풍력에너지 하베스팅 <u>노하은</u> · 이재영 한동대학교 기계제어공학과	192
P1-71	가스 시설 사전 위험 예측 기법 동향분석 <u>유지수</u> · 이효렬 한국가스안전공사 가스안전연구원	193

포스터발표 II

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-1	2MW급 PEMFC기반의 연료전지추진선박의 위험식별분석(HAZID) <u>권도현</u> · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 박혜민 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지 IT융합그룹	194
P2-2	PEMFC기반의 액체수소 연료전지추진선박 연구 및 모델링 <u>권도현</u> · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 박혜민 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지 IT융합그룹	195
P2-3	300 MWe급 수소/천연가스 혼소 복합화력의 공정해석 <u>박혜민</u> · 박성호 · 류주열 · 권도현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹	196
P2-4	한국형 고밀도 액체/고체(slush) 수소 생산 시험 설비 구축 <u>이창형</u> · 류주열 · 황성현 · 박성호* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터	197
P2-5	고진공 단열 챔버의 열전도 해석을 위한 퓨리에 열전도 법칙의 보정계수에 관한 이론적 연구 <u>이창형</u> · 류주열 · 황성현 · 박성호* 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터	198
P2-6	2.4MW급 액체수소 연료전지추진선박의 최적운동을 위한 결정적 규칙기반 배터리 운전 전략 <u>황성현</u> · 이창형 · 류주열 · 박성호† 고등기술연구원	199
P2-7	30MW급 액체수소 연료전지추진선박용 PEMFC 모델 개발 <u>황성현</u> · 이창형 · 류주열 · 박성호† 고등기술연구원	200
P2-8	Mo의 도입을 통한 perhydro-benzyltoluene 탈수소화 활성 향상에 관한 연구 <u>박태인</u> · 장지수 · 이관영* 고려대학교 화공생명공학과	201
P2-9	산소 환원 반응 향상을 위한 고성능 전이금속/탄소 나노 섬유 촉매 개발 <u>손동규</u> · 이유현 · 여서현 · 이기백 영남대학교 화학공학과	202
P2-10	고성능 리튬 이온 배터리를 위한 Ti3+ 비율이 증가된 Li4Ti5O12 음극재 연구 <u>여서현</u> · 손동규 · 이유현 · 이기백 영남대학교 화학공학과	203

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-11	탄소 나노 섬유 기반의 환원된 산화 그래핀이 코팅된 니켈-셀레나이드의 포타슘 이온 배터리 음극재 개발 이유현 · 손동규 · 여서현 · 이기백 영남대학교 화학공학과	204
P2-12	연료전지 전극 촉매용 니켈 코어 - 백금 셸 촉매 내 질화 금속 상의 영향에 대한 연구 김동진 · 이은희 · 정혜원 · 주은혜 · 정찬일 · 김필* 전북대학교 반도체·화학공학부	205
P2-13	PEMFC용 SPEEK/GNF, SPEEK/UGNF 및 SPEEK/SO ₃ H-UGNF 멤브레인의 성능 및 장기 내구성 김애란 ¹ · Shanmugam Ramakrishnan ¹ · Iyappan Arunkumar ¹ · 이상혁 ¹ · 박민우 ¹ · 유동진 ^{1,2} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	206
P2-14	우수한 전기화학적 성능과 기계적 성능 및 알칼리 안정성을 갖는 알칼리연료전지용 폴리 아릴렌 피페리딘 기반 음이온 교환막 제조 박민우 ¹ · 김애란 ¹ · 이상혁 ¹ · 유동진 ^{1,2} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	207
P2-15	Improved physicochemical and electrochemical properties of anion exchange membrane for fuel cell application Iyappan Arunkumar ¹ · Ae Rhan Kim ¹ · Dong Jin Yoo(유동진) ^{1,2} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	208
P2-16	우수한 화학적 성능과 안정성을 갖는 펜던트 단위체 유무에 따른 폴리(아릴렌 이써)기반 음이온 교환막의 연구 이상혁 ¹ · 김애란 ¹ · 박민우 ¹ · 유동진 ^{1,2} ¹ 전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR ² 전북대학교, 자연과학대학 생명과학과	209
P2-17	PtNi 중공형 촉매의 제조 방법과 산소환원반응 활성 주은혜 · 김동진 · 정혜원 · 이은희 · 정찬일 · 김필* 전북대학교 반도체·화학공학부, *전북대학교 반도체·화학공학부	210
P2-18	Carbon-Composite의 재료와 첨가제 비율에 따른 PEMFC 분리판 특성 분석 손형주 · 박재형 · *김해성 하이젠파워(주), *(재)대구경북과학기술원	211

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-19	수소화붕소나트륨을 이용한 소형 연료전지 수소 공급 시스템 개발 <u>이재경</u> · 박재형 · *권오성 하이젠파워(주), *계명대학교 타볼라라사 칼리지	212
P2-20	Numerical approximation model을 이용한 실리카-나피온 복합막의 양성자 전도도 분석 <u>차수현</u> · 박재형 · 유준상 · *권오성 하이젠파워(주), *계명대학교 타볼라라사 칼리지	213
P2-21	공기 액화를 위한 열저장 장치 기술 개발 <u>류주열</u> · 박성호 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 황성현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹	214
P2-22	태양광 발전 연계 Power-to-Gas 시스템의 일단위 경제성 분석 <u>박혜민</u> · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 황성현 · 권도현 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹	215
P2-23	Synthesis of ZnSe by Green Chemical Precipitation Method for Photocatalytic Application <u>Muhammad Hanif Ainun Azhar</u> · Salh Alhammadi · Vasudeva Reddy Minnam Reddy and · *Woo Kyoung Kim School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	216
P2-24	새로운 전이금속 에어로겔의 합성, 특성화 및 응용 <u>Hee Yeon Do(도희연)</u> , Ramya Ramkumar, Jae-Jin Shim, Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	217
P2-25	수열법으로 제조된 Ce 도핑 In ₂ S ₃ /rGO 나노복합체의 광촉매 성능 <u>Seong Uk Moon(문성욱)</u> · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	218
P2-26	신재생 에너지 저장 장치 유망 후보로 새로운 전환 금속 에어로겔 <u>Jungbin Park(박정빈)</u> · Ramya Ramkumar · Jae-Jin Shim · Woo Kyoung Kim* Department of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	219
P2-27	Lanthanum doped CoSe ₃ supported on carbon nano tubes as efficient electrocatalysts towards Oxygen Evolution Reaction <u>Karthikeyan S C¹</u> · Natarajan Logeshwaran ¹ · Dong Jin Yoo ^{1,2} ¹ Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea ² Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	220

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-28	Synthesis of core-shell based Pt@MoS₂ supported graphite nanofiber nanocomposites for oxygen reduction reaction <u>Shanmugam Ramakrishnan</u>¹ · Milan Babu Poudel¹ · Ae Rhan Kim¹ · Dong Jin Yoo^{1,2} ¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, ²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	221
P2-29	Rational design of ternary layered double hydroxide and iron oxide on three dimensional hollow and porous carbon nanofibers as binder free electrode for high performance supercapacitors <u>Milan Babu Poudel</u>¹ · Ae Rhan Kim¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo(유동진)^{1,2} ¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, ²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	222
P2-30	Non-noble electrocatalysts on the conducting GNF as an efficient HER electrocatalyst for anion exchange membrane water electrolysis <u>Natarajan Logeshwaran</u>¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo(유동진)^{1,2} ¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, ²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	223
P2-31	Quantum dot copper-based metal sulfides as an excellent cathodic material for CO₂ reduction reaction <u>Murugesan Prasanna</u>¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo(유동진)^{1,2} ¹Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, ²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University(전북대학교)	224
P2-32	리튬이온전지용 탄소 및 TiN 셸이 코팅된 실리콘 음극재의 제조 <u>이은희</u> · 김동건 · 정혜원 · 주은혜 · 정찬일 · 김필* 전북대학교 반도체·화학공학부, *전북대학교 반도체·화학공학부	225
P2-33	리튬이온전지 양극재용 니켈 과잉 전이금속 산화물의 소성 온도에 따른 전극 제조 및 성능 분석 <u>정혜원</u> · 김동건 · 이은희 · 주은혜 · 정찬일 · 김필* 전북대학교 반도체 화학공학부	226

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-34	자동차경유용 촉매제 검사 경향 및 품질특성 <u>주다정</u> · 김재곤 · 김목연 · 민영제 · 이지수 · 홍기연 한국석유관리원 미래기술연구소	227
P2-35	A formation kinetics of HQ clathrate with N ₂ , CH ₄ and CO ₂ <u>Chang Yeop Oh(오창엽)</u> · Ji-Ho Yoon [†] Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Ocean Science and Technology School(OST)(해양과학기술전문대학원)	228
P2-36	Naphthoquinone based colorimetric and fluorescence chemosensor for selective detection of metal ions in aqueous medium <u>Sayfiddinov Dilmurod</u> ¹ · Ramasamy Santhosh Kumar ¹ · Dong Jin Yoo(유동진) ^{1,2} ¹ Department of Biology/Natural science of Graduate school, Jeonbuk National University, ² Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University(전북대학교)	229
P2-37	빅데이터 기반 지역난방 사용자설비 운영 열사용 패턴과 엑서지 분석 <u>류기윤</u> · 김민영* · 김가희* · 김래현* 서울과학기술대학교 화공생명공학과, *서울과학기술대학교 산학협력단	230
P2-38	Visual Studio를 이용한 소프트웨어 단위시험 방법 <u>이동일</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	231
P2-39	제어봉구동장치 교체방안 검토 <u>이상설</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	232
P2-40	원전 저압터빈 동익 루트브 비파괴검사 및 관리방안에 대한 고찰 <u>문균영</u> · 김진희 한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소	233
P2-41	혁신형 소형모듈형원자로의 경제성 향상 방안 고찰 <u>강상희</u> · 박기조* 한국수력원자력(주)중앙연구원, *한국전력기술	234
P2-42	원전 비상디젤발전기 연료분사펌프 고착에 대한 고찰 <u>김명훈</u> 한국수력원자력 중앙연구원	235
P2-43	7,200kW급 비상디젤발전기의 진동분석 사례 <u>김영철</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	236

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-44	습분분리재열기의 2단 재열기 유로분리판 내부 누설 진단 <u>송석윤</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	237
P2-45	밸브 구동기 다이아프램 손상사례 및 방지방안 고찰 <u>이태경</u> 한국수력원자력(주) 중앙연구원	238
P2-46	열교환기 온도 성층화 관련 국내외 기술기준 및 전산유체역학을 활용한 해석 사례 소개 <u>이공희</u> · 함정균* · 조홍현* · 오동욱* 한국원자력안전기술원 규제검증평가실, *조선대학교 산학협력단,	239
P2-47	상류측 축소관에 의한 유동 교란이 버터플라이 밸브 동적성능에 미치는 영향에 관한 전산 유체역학 연구 <u>이공희</u> · 배준호 한국원자력안전기술원 규제검증평가실	240
P2-48	연구용 원자로에서 베릴륨 외부반사체의 냉각성능 평가 <u>정민균</u> · 박기정 · 서경우 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단	241
P2-49	연구용 원자로 보조 배관 파단사고에 의한 유동특성 분석 <u>정민균</u> · 서경우 한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단	242
P2-50	발전정지유발기기(SPV) 예방정비기준(PMT) 개선을 통한 설비 신뢰도 개선 <u>김문수</u> · 염동운 한국수력원자력(주) 중앙연구원	243
P2-51	원자력발전소의 고온관 및 저온관의 선량률 비교 고찰 <u>최진수</u> · 이경희 · 조용상 · 권혁철 · 김초롱 · 송규민 한국수력원자력 중앙연구원	244
P2-52	CdZnTe(CZT)를 활용한 원자력발전소 배관표면 핵종측정 모델링 <u>최진수</u> · 이경희 · 조용상 · 권혁철 · 김초롱 · 송규민 한국수력원자력 중앙연구원	245
P2-53	원자력 안전관련계통의 디지털 기기에 대한 CGID 지침 국내 적용성 고찰 <u>홍태화</u> · 양창석 한국수력원자력(주), 중앙연구원	246
P2-54	원자력 안전관련 교정 및 시험용역에 대한 CGID 적용성 고찰 <u>홍태화</u> · 양창석 한국수력원자력(주), 중앙연구원	247

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-55	ILAC 인정기구에 의한 교정용역의 CGID 적용 방법 고찰 <u>홍태화</u> · 양창석 한국수력원자력(주), 중앙연구원	248
P2-56	원자력발전소 가동중 정비 대상기기 선정에 대한 방법론 연구 <u>이영주</u> · 조경수 한국수력원자력(주) 중앙연구원	249
P2-57	디지털 정비절차서를 활용한 원자력발전소 예방정비 최적화 연구 <u>조경수</u> · 이영주 · 김정운 한국수력원자력(주) 중앙연구원	250
P2-58	CsI를 포함한 수용액에서 세슘 및 요오드 제거를 위한 하이드레이트 기반 담수화 <u>임솔거</u> · 윤지호 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과	251
P2-59	Regenerable Ce added Mo/HZSM-5 catalyst for natural gas dehydroaromatization <u>김상윤</u> · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	252
P2-60	과산화수소 생산을 위한 소수성 알킬리간드의 도입과 이에 대한 효과 <u>이석호</u> · 한근호 · 이관영 고려대학교 화공생명공학과	253
P2-61	사용 후 NCM(LiNiCoMnO ₂)로부터 선택적 수소 환원반응 기초연구 <u>왕제필</u> [†] · 김도희* · 황종하* · 김현중* · 임종덕* 부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공, 마린융합디자인공학과(첨단소재공학), *부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공	254
P2-62	Synthesis of Waste Seashell Derived Nano-calcium Carbonate by Carbonation for the antibacterial activity on Total bacteria and E.coli <u>Geun-Ho Kim(김근호)</u> ¹ · Lulit Habte ¹ · Ji-Whan Ahn ^{1*} ¹ Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources(한국지질자원연구원)	255
P2-63	Carbon Mineralization derived Precipitated Calcium Carbonate as a Filler Material for Polymer Composites: A Circular Economy Approach <u>Kim Tae Hyung(김태형)</u> · Mohd Danish Khan · Ji Whan Ahn Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources(한국지질자원연구원)	256

●●● 4월 29일(금) 10:00~12:00

번호	발 표 주 제	page
P2-64	A Study on the Analysis and Optimum Selection of Heavy Metal Stabilization Methods for Household Waste <u>Yeonho jeong(정연호)</u> ¹ · Mohd Danish Khan ¹ · Ji Whan Ahn ¹ ¹ Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources(한국지질자원연구원)	257
P2-65	기계학습 기반 석유·가스의 생산량 예측 연구 동향 분석 <u>이다영</u> · 이대모 · 신호진 · 임중세* 한국해양대학교 에너지자원공학과	258
P2-66	미활용 원료 활용을 위한 바이오디젤 현황 분석 <u>이미은</u> · 박조용 · 김재곤* 한국석유관리원 미래기술연구소 연구개발팀	259
P2-67	바이오항공유 국내·외 정책 및 개발 현황 <u>이미은</u> · 김재곤* 한국석유관리원 미래기술연구소 연구개발팀	260
P2-68	Physical and Electrical Properties of Zinc-tin-oxide Thin Films Deposited by Combinatorial Approach <u>Ignatius Andre Setiawan</u> · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Sreedevi Gedi · Hye Seon Park · Seok Jin Jang and · *Woo Kyoung Kim School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	261
P2-69	스퍼터링 매개변수가 SnO2 필름의 특성에 미치는 영향 Effect of sputtering parameters on the properties of SnO2 films <u>Kim Dong Hyo(김동효)</u> · Ignatius Andre Setiawan · Park Hyeseon · Shin Yeonju · Kim Boyeon · Gedi Sreedevi · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammadi, and Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	262
P2-70	Sb2S3 필름 특성에 대한 Zn 도핑의 영향 <u>Bo Yeon Kim(김보연)</u> · Shin Yeon ju · Ignatius Andre Setiawan · Park Hyeseon · Kim Dong Hyo · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	263
P2-71	화학침전법으로 제조된 황화주석 완충층을 가진 Cd-free CIGS 태양전지 <u>Eun Hyeok Kim(김은혁)</u> · Salh Alhammadi · Sreedevi Gedi · Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	264
P2-72	스퍼터링 파워가 Zn2SnO4막의 특성에 미치는 영향 <u>Park Hyeseon(박혜선)</u> · Ignatius Andre Setiawan · Kim Dong Hyo · Shin Yeonju · Kim Boyeon · Gedi Sreedevi · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammadi, and Woo Kyoung Kim* School of Chemical Engineering, Yeungnam University(영남대학교)	265

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

Nanostructured Materials and Nanoengineering for Hydrogen and Fuel Cell Applications

유성중*

*한국과학기술연구원 수소연료전지연구센터

A variety of novel composite materials have been used/tested for next-generation energy conversion devices. However, in many cases little is known about their properties and performance, although such fundamental understanding is essential for further advances in energy conversion technologies. Experiments may yield many clues to the behavior of those materials, but the interpretations are often controversial due largely to the difficulty of direct characterization. Under such circumstances, first principles-based computational approaches have emerged as one of the most powerful tools for design and development of new energy materials. This talk will focus on introducing our ongoing efforts in energy conversion materials. In the first part of my talk, I will discuss the properties and performance of Pt-based nanomaterials and composites PEMFCs, particularly the dissolution mechanisms of Pt-based nanomaterials near the surface and interface, with comparisons to those in bulk Pt, as well as the surface and interface effects on the anode and cathode performance, such as oxidation/reduction reaction rate and stability. In the second part, I will present recent progress in our collaborative theoretical and experimental efforts to explore electrolysis catalysts with the stability, costs, and abundance for electro-powered hydrogen/oxygen production.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

태양전지 고유연화 및 3차원 구조 기반 제어 연구 Highly Flexible Solar Cells and Dynamic Three-Dimensional Photovoltaics

이필립*

한국과학기술연구원, 청정신기술연구본부, 차세대태양전지연구센터

기후 변화에 대응하는 탄소중립이 세계적인 화두로 등장한 가운데, 우리나라에서는 ‘재생 에너지 3020’ 정책으로써 2030년까지 신재생 에너지의 비율을 20% 수준으로 끌어올리고, 신규 신재생 에너지 설비 가운데 63%를 태양광 발전으로 대응하는 전략을 수립하였다. 전력생산량은 설치면적에 비례하지만 설치에 필요한 공간에 제약이 있기 때문에 한정된 공간 내에서 전력 생산을 극대화하기 위한 다양한 접근법이 시도되고 있다. 태양전지 효율 향상은 직접적으로 활용공간을 줄일 수 있는 가장 직접적인 접근법이나 이는 단시간 내 달성이 쉽지 않다. 반면에, 태양전지의 효율적인 배치는, 기존의 한정된 효율의 태양전지를 활용하더라도, 전력 생산량에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다.

유연화 기술은 태양전지의 배치 효율을 증가시키는 효과적인 접근법으로, 이를 통해 태양전지를 3차원 곡면 등 다양한 면에 대응할 수 있다. 딱딱한 태양광 패널을 활용할 경우에는, 평지 혹은 도심 내 건물 옥상에서 제한적으로 설치가 가능한 반면, 유연한 태양전지의 경우에는 건물 벽 및 다양한 도심 구조물에도 적용이 가능하기 때문에, 태양전지의 집적률을 다양한 공간에 대하여 효율적으로 대응할 수 있다.

태양전지의 유연화를 위해서 쓰이는 접근법은 두가지가 대표적인데, 첫번째는 태양전지를 이루는 각 레이어를 유연 소재로 대체하여 유연성을 확보하는 방식, 두 번째는 기판의 박막화로 가해지는 응력을 줄이는 방식이 있다. 첫 번째 방식은 확실한 유연화 방안이기는 하나 유연성이 증가되는 대신, 발전효율은 떨어지기 때문에 태양전지 집적도 향상 측면에서는 풀어야 할 난관이 존재한다. 이에 반해서, 태양전지의 기판 두께를 줄이는 접근법은 태양전지의 발전성능을 유지하면서도, 유연화 측면에서 우수한 결과가 보고되고 있다. 굽힘에 따른 응력이 기판의 두께에 비례하기 때문에, 초박막화로 인한 중립면 활용은 소자의 고유연화를 쉽게 유도할 수 있는 접근법이다.

본 발표에서는 태양전지의 유연화에 효율성이 좋은, 초박막 기판 기반의 태양전지 기술과, 3차원 구조화를 통한 태양전지 고유연화 전략에 대해 논의하고자 한다. 이와 더불어 3차원 구조화에 따른 동적 제어를 통해 기대할 수 있는, 태양전지 배치 효율 증가 방안을 소개하고자 한다.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

Strategies to achieve efficient next-generation multivalent ion batteries

임희대 (Hee-Dae Lim)*

*한국과학기술연구원 (Korea Institute of Science and Technology)

Magnesium (Mg) batteries are a promising next-generation power source, due to attractive properties such as double charges of divalent Mg^{2+} ions, high volumetric capacity ($3,832 \text{ mAh cm}^{-3}$), which is almost twice compared to that of Li batteries, and the low price of Mg metal. However, the formation of ion-insulating interphase on the surface of Mg metal in common organic electrolytes impedes transports of multivalent ions, which has been a problematic issue for Mg metal batteries. Herein, to address this issue, we propose two different strategies; (1) chemical tuning of the interphase into Mg^{2+} -conductive film and (2) the use of magnesiophilic scaffold as an anode substrate. Our studies will offer a new insight to understand the role of interphase and provide a guideline to design a better interphase for reversible Mg metal batteries.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

고효율/장수명 리튬공기전지 전지용 공기극 및 리튬금속 음극 소재 개발

정 훈 기*

한국과학기술연구원 에너지저장연구센터

As the increased demands for high energy storage systems to satisfy the requirements of transport and electricity storage, an advance in battery performance is mandatory. In fact, the conventional lithium-ion battery technology is predicted to reach a limit in specific energy of 250 Wh kg^{-1} , thus, achieving a significant improvement in energy storage requires new technologies that differs from Li-ion based systems.

Among the promising, lithium-oxygen (Li-O_2) battery technology was already at the center of attention a few decades due to its excellent intrinsic feature, the very high theoretical gravimetric energy reached to $3,500 \text{ Wh kg}^{-1}$. Despite a steep acceleration in R&D effort, Li-O_2 battery technologies are not established for a commercial product, and the technology roadmap has been extended to a 20 years window due to some as yet unresolved challenges (high charge overpotential, electrolyte and carbon decomposition, anode reactivity, and etc.). Therefore, the choice of an effective catalyst as well as a stable electrolyte and electrode is the most important challenge in the lithium-oxygen battery R&D.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

고체산화물 전기화학 전지를 위한 고전도성 이중층 전해질 개발

지호일* · 김준석

한국과학기술연구원, 에너지소재연구센터

고체산화물 전기화학 전지는 지속 가능한 고효율 전기화학 에너지 변환 소자로 큰 주목을 받고 있으며, 해당 소자의 장기 안정성 및 가격 경쟁력 확보를 위해 작동 온도를 낮추기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위해 doped-zirconia / doped-ceria 로 구성된 이중층 전해질의 도입이 하나의 방안으로 제시되고 있으나, 경제성이 우수한 일반적인 세라믹 분말 공정을 통해서는 구조적/화학적으로 이상적인 이중층 전해질을 구현하기가 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 이중층 전해질의 하부 전해질층에 첨가된 소량의 소결조제가 상부 전해질층으로 자연 확산되는 현상을 최초로 발견, 이중층 전해질 동시소결 온도를 획기적으로 낮춤으로써 이중층 전해질 계면의 고저항 반응층을 최소화하여 높은 전도도의 전해질을 구현할 수 있었으며, 확산된 소결조제는 두 층의 열 수축 거동을 일치시켜 구조적 결함이 없으며 상대밀도 99% 이상의 치밀 전해질 제조를 가능하게 하였다. 그 결과, 해당 전해질이 적용된 고체산화물전지는 매우 낮은 전해질 전기저항을 보이며, 연료전지 운전 및 수전해 운전에서 모두 우수한 전기화학 성능을 나타내었다. 본 소결조제 자연확산 현상 기반의 동시소결 기술은 고체산화물 전기화학 전지 뿐만 아니라 다층 세라믹 소자 분야에 손쉽게 적용 가능하여 그 확장성이 높다는 데에 더욱 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

Nonequilibrium energy storage reaction of electrode particles in batteries under high current density

홍지현

한국과학기술연구원 에너지소재연구센터

A few-minute-long fast charging capability of Li-ion batteries (LIBs) holds the key to the success of electric vehicles. For decades, it has been considered that the Li-ion diffusion in crystalline electrode materials governs the rate capability of LIBs. Extensive efforts, therefore, have been made to lower the activation barrier of Li-ion migration by tuning the chemical composition and lattice parameters and by reducing the length of Li-ion diffusion from bulk active materials to liquid electrolytes. However, recent discoveries show that the enhancement of the rate of solid-electrolyte charge transfer reaction, *i.e.*, exchange current density, *via* surface modification or utilization of different electrolytes drastically improves the rate-capability of electrode materials. The results suggest us revisit the role of the charge transfer reaction which possibly affects the kinetics of (de-)intercalation reaction in batteries.

Here, we focus on lithium layered oxides widely used in LIBs. While the single-phase behaviors are well established near equilibrium, some *operando* diffraction studies have suggested phase separation during delithiation. Notably, the separation is not always observed, and never during lithiation. Using a combination of *operando* diffraction, *ex situ* nanoscale oxidation-state mapping, and a many-particle population model, we unambiguously explain the origin of asymmetric delithiation and lithiation processes of the single-phase material $\text{Li}_x(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ ($0.5 < x < 1$) under high current density. We confirm that the apparent phase separation is a repeatable non-equilibrium process, but not the irreversible phenomenon observed only during the initial delithiation. Our study suggests the importance of population dynamics in battery electrodes, to develop fast-charging batteries.

Reference

J. Park, H. Zhao, S. D. Kang, et al., Nature Materials (2021), 20, 991–999.

[특별세션3. 탄소중립 미래에너지 기술]

Metastable hexagonal close-packed palladium hydride in liquid cell TEM

천동원

KIST 청정신기술본부 에너지소재연구센터

Kinetically favoured metastable phases are ubiquitous in nature. Crystals grown from high-energy precursors often initially adopt metastable structures instead of forming thermodynamically stable ground-state structures, depending on the initial conditions, such as temperature, pressure or crystal size. As the crystals grow further, they typically undergo a series of transformations from metastable phases to lower-energy and ultimately energetically stable phases. Notably, the search for metastable materials has mainly been heuristic, performed on the basis of experiences, intuition or even speculative predictions, namely ‘rules of thumb’.

In this presentation, I introduce a new metastable hexagonal close-packed (hcp) palladium hydride (PdH_x) synthesized in a liquid cell TEM. The metastable hcp structure is formed through a unique environment developed in the liquid cell: a sufficient supply of hydrogen (H) and an insufficient supply of Pd. These findings provide thermodynamic insights into metastability engineering strategies that can be deployed to discover new metastable phases.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

기후변화의 과학적 현황과 우리의 대응

권원태

APEC기후센터(전)

유엔 산하 정부간기후변화협약체(IPCC)는 기후변화에 관한 6차 평가보고서 발간을 진행 중이다. 제1 실무그룹(WGI, Working Group I)에서 작성한 과학적 근거 보고서는 2021년 8월, WGII는 영향, 적응 및 취약성 보고서는 2022년 3월, WGIII는 완화 보고서를 4월에 승인하였으며, 종합보고서(Synthesis Report)는 10월에 승인할 예정이다.

WGI 과학적 근거 보고서에서 확인된 주요 내용은 2019년까지 지구평균기온은 산업혁명(1850-1900년 기준)이후 1.09℃ 상승하였으며, 이산화탄소는 410ppm으로 5차 평가보고서에 비해 20ppm이 증가하였고 메테인, 아산화질소 등 주요 온실가스도 계속 증가 추세에 있다. 2040년까지 지구평균기온은 1.5℃ 상승할 것으로 예상되며, 그 이후에는 온실가스 배출량에 따라 기온 상승이 달라져서 최악의 경우 4.4℃까지 상승할 수도 있다. 국립기상과학원에서 발표한 우리나라 미래 전망은 최악의 경우 우리나라 기온이 현재(1995-2014년 기준) 보다 7.0℃ 상승할 것으로 전망하였다.

이번 WGI 보고서의 주요 메시지는 1) 지구온난화가 발생하고 있음은 이미 알고 있다. 최근 기후변화는 광범위하고, 가속화되고 강해지고 있다. 2) 인간활동이 기후변화의 원인이라는 것은 논란의 여지가 없다(indisputable). 인간활동으로 인해 폭염, 호우, 가뭄 등 극한 기후현상이 더 자주 더 강하게 발생한다. 3) 세계 각지에서 기후변화가 다양하게 영향을 미치고 있다. 우리가 경험하고 있는 변화는 미래에는 더 증가할 것이다. 4) 기후시스템의 변화 중 일부는 돌이킬 수 없다. 그러나 온난화를 제한한다면 이러한 변화 중 일부는 중지되거나 돌이킬 수 있다. 5) 즉각적/대규모 온실가스 감축만이 온난화를 1.5℃ 이하로 억제할 수 있다. 6) 지구온난화를 제한하기 위해서 강하고, 빠르고, 지속적인 이산화탄소, 메탄 및 다른 온실가스 감축은 필수적이다. 이러한 감축은 기후변화에 의한 영향을 완화시키고 더불어 대기질을 개선시킨다.

기후 위기는 이미 진행 중이며, 1.5℃ 온난화는 돌이킬 수 없다. 기후 위기는 식량, 건강, 환경, 에너지, 수자원, 생태계 등 모든 부문에 영향을 미친다. 이러한 기후 위기에 대응하기 위해서 적응(adaptation)과 완화(mitigation) 정책을 동시에 추진해야 한다. 2050 탄소중립을 달성한다면 1.5℃로 온난화를 완화할 수 있다. 전세계적으로 극한현상으로 인한 영향이 나타나고 있으며, 향후 온난화로 극한현상은 더욱 심각해질 전망이다. 그러므로 사회경제 모든 분야에서 적응은 극한현상으로 인한 피해에 줄이고 지속가능한 발전을 위해 필수적이다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

석탄산업: 화석연료의 운명 Coal Industry: Fate of Fossil Fuels

이시훈

한국에너지기술연구원 미세먼지연구실
(한국에너지기후변화학회장)

탄소중립이 글로벌 에너지 분야의 중요 키워드로 등장하면서 석탄뿐만 아니라 가스와 오일 등 화석연료 사용은 줄어들 전망이다. 그러나 석탄을 사용하는 시설들의 수명이 기본적으로 40년 이상으로 길고 중국이나 동남아시아의 석탄발전소와 제철소, 시멘트 생산 시설들이 설치 된지 평균 15년 이하이어서 글로벌 2050 탄소중립은 쉽지 않으며 이러한 이유로 중국은 탄소중립을 2060에 달성하겠다고 발표하였다.

국내의 경우 탈 탄소 정책으로 노후 석탄화력의 가동이 중지되고 신규석탄화력의 설치가 취소되는 등 탄소중립 2050을 위한 노력이 경주되고 있으나 석탄화력 외에 제철이나 시멘트 분야에서 사용하는 석탄을 얼마나 줄일 수 있는지가 관건이다. 제철산업의 경우 기존 코크스 공정을 수소환원공정으로 전환한다고 하나 막대한 양의 수소 공급, 수소환원 기술의 완성도 제고 등 해결하여야 하는 문제들은 산적해 있다. 국제적으로는 석탄이 발전보다는 제철산업에서 오히려 사용량이 증가될 것으로 예상하는 전문가들도 있다. 그만큼 수소환원 기술이 완성도가 아직은 만족스럽지 못하다는 것이다. 전체적으로는 향후 화석연료는 에너지 관련 연료로 사용되기보다 화학제품의 원료로 전환될 전망이다.

탄소중립이 진행되면 미세먼지 문제는 다른 양상으로 전개될 것이다. 산업공정에서 발생하는 미세먼지보다는 실내 환경, 부가가치가 높은 산업에서의 1, 2차 미세먼지가 새로운 이슈로 등장할 것이다.

본 발표에서는 석탄을 포함한 화석연료가 탄소중립 달성에 어떻게 영향을 미치는지를 고찰하고 석탄산업이 축소되면서 제기될 수 있는 문제들, 예를 들어 지역경제에 미치는 영향, 보유하고 있는 고도 석탄발전기술의 활용 방안, 그리고 석탄사용과 CCU(Carbon Capture and Utilization) 기술의 접목 효과 등에 대해 논의하고자 한다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

연속식 폐비닐 열분해 오일화 플랜트 개발

Development of Continuous Pyrolysis Plant on the Oil Production from Vinyl Plastic Waste

이경환 · 전원진 · 김영두 · 최선아

한국에너지기술연구원 기후변화연구본부 에너지자원순환연구실

폐비닐은 에너지원이나 소재 등으로 전환할 수 있는 좋은 대상 원료이지만, 지자체 등에서는 심각한 환경 민원 대상 물질로 신속히 처리해야 할 물질이다. 폐비닐 처리 방법은 소각이나 매립보다는 재사용이나 재활용 방법을 권장하는데, 이 방법 중에서도 친환경적이고 경제적으로 처리할 수 있는 열분해 오일화 방법이 최근에 각광을 받고 있다. 해마다 처리해야 할 폐비닐 양은 연간 수백만톤이지만, 현재 1만톤 내외 미흡한 양을 소규모이고 배치식으로 10여개 업체에서 열분해하여 대체 연료유를 생산하고 있다. 이들 저가 열분해유에 대해 최근에 고부가 가치 생산물인 석유화학공정의 원료나 수소 등으로 전환하기 위해 연구를 활발하게 진행하고 있다.

최근 정부 기관 중에 환경부/산업부에서 열분해 오일화 사업을 적극적으로 추진하고 있는데, '21년에 0.1%(1.1만톤/년)를 처리한 것을 '30년에는 10%(약 90만톤/년)처리를 목표로 크게 잡았다. 이를 위해 관련 재활용 업체뿐만 아니라 올해부터는 석유화학 업체(주로, 대기업)도 본 사업을 진출할 수 있게 하였고, 상당 부분은 지자체에서 해결할 수 있게 하여, '30년까지 열분해 오일화 플랜트를 80개 이상 설치하여 폐비닐을 처리할 수 있게 계획을 세웠다.

이를 위해 선진 기술인 고효율 연속식 열분해 기술을 한국에너지기술연구원에서 '21년에 개발한 하루 2톤 처리 규모의 연속식 폐비닐 열분해 플랜트 전경을 나타내고 있다. 본 플랜트는 선별/파쇄된 폐비닐 원료를 연속적으로 반응기에 투입, 반응 후에 연속적으로 오일을 생산하는 오일 수율 60%이상 달성할 수 있는 기술이다.



[그림 1. 연속식 폐비닐 열분해 오일 생산 플랜트 전경 (2톤/일 처리 규모)]

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

바이오매스 에너지 산업 Biomass Energy Industry

서동진

한국과학기술연구원 청정에너지연구센터

바이오매스(Biomass)는 Bio(생물)와 Mass(물질, 양)가 합성된 용어로서 태양에너지를 받은 식물과 미생물의 광합성에 의해 생성되는 식물체, 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체를 포함하는 유기성 생물체의 총칭이다. 통상적으로는 에너지화할 수 있는 동식물체를 말하지만, 볏짚, 톱밥, 폐목재, 음식물 쓰레기, 하수 슬러지, 축산 분뇨 등 유기성 부산물과 폐기물도 포함된다. 인류가 불을 발견한 이래 바이오매스는 가장 중요한 에너지원이 되고 있으며 지금도 그때와 같이 조리과 난방을 위하여 바이오매스를 사용하고 있다.

재생에너지의 대명사처럼 여겨지는 태양광과 풍력의 가장 큰 문제점은 근본적으로 자연에 의존할 수밖에 없으므로 마음대로 생산을 조절할 수 없는 공급의 불안정성, 간헐성이라고 할 수 있다. 시간, 날씨, 지역 등의 시공간적인 제약이 따르고 불행히도 우리나라는 태양광과 풍력에 그리 유리한 지역은 아닌 것으로 알려져 있다. 이에 반하여 바이오매스는 석탄, 석유, 천연가스와 같은 형태의 화학적 에너지원이므로 화석연료와 전혀 차이 없이 손쉽게 저장, 수송, 활용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 대부분의 재생에너지가 열이나 전기의 형태로 나타나는 것과는 달리 바이오매스는 열과 전기는 물론 고체, 액체, 기체 상태의 연료와 심지어는 화학물질로의 전환도 가능하다. 정부가 2050년 탄소중립을 달성하기 위하여 석탄발전을 중단하거나 최소화하는 방안을 추진 중이지만 최근 폭염으로 전력수요가 급증하면서 오히려 석탄발전 가동률을 오히려 높일 수밖에 없는 상황을 보면 원전 없는 탄소중립에서 다른 재생에너지에 비해 바이오매스 에너지가 가장 현실적인 방안이 될 것이라고 기대하게 된다.

본 발표에서는 바이오매스를 활용한 재생에너지의 종류와 특징에 대하여 간략히 설명하고 국내외 현황 및 전망에 대하여 살펴볼 예정이다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

원자력산업 현황 및 기술개발 동향

Nuclear Industry Status and Technology Development Trend

이주연

한국전력기술(주) 원자력연구실

국내 원자력산업은 1987년 고리1호기를 시작으로 국가 에너지자립에 기여해 왔으며 국내 안정적인 전력공급과 국민경제 발전에 중추적인 역할을 담당해 왔다. 현재 가압경수로형 및 가압중수로형 원전 24기가 운영 중으로, 4기의 가압경수로가 건설 중에 있으며 최근에는 국가 에너지전환정책으로 중단된 신한울 3,4호기 건설 재개여부가 검토되고 있다. 국내 원전 건설 및 운영 경험과 기술 자립으로 UAE에 원전을 수출하는 성과를 이룩했다.

전 세계적으로 기후 위기 대응 및 탄소중립 목표 달성을 위해 전 세계 원자력 선진국들은 원자력 활용을 확대하고 있으며 SMR 등 미래 원자력에 대한 기술개발에 적극 투자하고 있다. 원자력발전은 2025년 전망 발전단가가 가장 저렴하고 연료를 제외한 전반적인 발전과정에서 환경 유해 물질이 배출되지 않는 저탄소 청정발전원이며 증가중인 재생에너지의 간헐성 영향을 최소화하여 국가 전력의 안정성에 기여할 것으로 기대된다.

미래 원자력은 경제성 및 안전성뿐만 아니라 재생에너지와의 연계를 위한 운전 유연성 확대가 필요하므로, 원자력산업계는 이러한 요구에 부응하기 위해 소형모듈원전과 4세대 원전 기술개발 집중하고 있다. 소형모듈원전(Small Modular Reactor, SMR)은 증기발생기, 냉각재 펌프, 가압기 등 주요 기기를 하나의 용기에 일체화하는 소형원자로로 300MW 이하의 출력을 지니고 있다. 소형모듈원전은 모듈 형태로 제작, 이송, 건설이 가능하여 건설 공기를 단축하고 건설비용을 절감할 수 있으며, 기존 원전대비 안전성과 운전 유연성이 향상되고 분산형 전원, 수소생산, 해수담수화 등 다양한 분야에서 활용 가능할 것으로 예상된다. 4세대 원전은 기존 원전대비 안전성, 핵확산저항성, 경제성 등을 향상하고 폐기물발생량을 최소화시키기 위해 표준화 및 개량된 원전으로 소듐냉각고속로(SFR), 납냉각고속로(LFR), 초고온가스로(VHTR), 용융염로(MSR), 가스냉각고속로(GFR), 초임계수냉각로(SCWR)로 분류된다. 소듐냉각고속로는 액체 상태의 나트륨을 냉각재로 사용하며 소각을 통한 방사성핵종 저감, 핵연료 재활용성, 자연냉각에 의한 원전 안전성 증가 등 다양한 이점을 지니고 있으므로 국내외에서 가장 앞서 개발되고 있는 원자로형이다.

국내 원자력산업은 APR1400 원전을 독자 개발, 건설, 수출할 정도로 세계적인 경쟁력을 보유하고 있으며 체코, 폴란드 및 사우디 등에 원전 수출을 위한 노력을 기울이고 있다. 국가 에너지안보 확보를 위한 안정적인 전력공급 뿐만 아니라 전세계적 현안인 탄소중립 목표 달성과 유연성 있는 전력공급 역할을 수행하기 위해서는 기존 원전의 지속적인 활용과 함께 소형모듈원전 및 4세대 원전 등 미래 에너지 시장의 요구에 부합하는 원자로 기술개발에 지속적인 투자가 예상되고 또한 필요하다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

국내 (소)수력에너지의 연구개발 개요 및 동향

Overview and Trend of (Small) Hydropower Energy R&D in Korea

김진혁*,**

*한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

**과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학과(청정공정 및 에너지시스템공학과)

요 약

수력발전(Hydropower)은 신재생에너지원의 하나로서 물이 보유하고 있는 에너지(위치, 압력 및 속도)를 이용하여 전력을 생산하는 발전방식을 말한다. 즉, 수력발전은 물이 지니고 있는 에너지를 이용하여 수력터빈의 주요부품인 러너(Runner)의 날개를 회전시켜 러너와 축으로 연결된 발전기를 통해 전력에너지로 변환시켜 전력을 생산하는 형태를 말한다. 통상적으로 수력발전에 있어서 10MW 발전용량을 기준으로 이하는 소수력으로 분류하고 이상은 중·대수력으로 분류하고 있다. 수력발전은 기동과 정지를 포함한 출력조정 시간이 원자력이나 화력 등 기타 발전설비에 비해 대응이 빨라 부하변동에 대한 속응성이 우수하므로 첨두부하를 담당하여 양질의 전력공급에 기여하고 있다. 최근 탄소중립 실현을 위해 수력발전은 무공해 에너지원으로서 주요한 신재생에너지원으로 각광 받고 있으며, 작동유체의 밀도가 높아 상대적으로 높은 발전출력을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 발전방식에 따른 탄소배출 측면에서 볼 때 탄소중립 실현을 위해서는 반드시 필요한 신재생에너지원으로 분류되고 있다.

수차는 펌프, 송풍기 및 압축기와 같은 여타 터보기계에 비해 구성품이 다소 복잡하고 그로 인해 캐비테이션(Cavitation) 현상을 포함한 매우 복잡한 내부 유체 유동 현상을 가지고 있으나, 최근에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 활용한 유체유동 정밀수치해석기술이 발전함에 따라 이를 활용하여 내부 복잡한 비정상상태의 유체 유동 현상을 규명하고 동시에 손실을 저감하는 고효율 설계가 가능하다. 수차는 대부분 연중 상시 운전을 하기 때문에 약간의 효율 차이가 결국 발전량에 따른 어마어마한 경제적 손실을 가져온다. 그로 인해 많은 연구자들은 현재에도 1%의 효율을 높이기 위해 다양한 연구기법을 토대로 고효율 설계 연구를 수행하고 있다. 본 발표에서는 국내 (소)수력에너지의 연구개발 개요 및 동향에 대하여 현재 중점적으로 수행하고 있는 국가연구과제 및 기획 중인 현황에 대하여 상세히 발표하고자 한다.

사 사

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(2021021010003D, DB기반 수차 개발 공공플랫폼 구축)과 2022년도 정부(기획재정부)의 재원으로 한국생산기술연구원의 지원(EM220003, 부하변동 대응 장주기 활용 펌프터빈 선행원천기술개발)을 받아 수행된 연구임

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

한국 에너지의 미래 어젠다 : 풍력발전

Korea's Future Energy Agenda : Wind Power Generation

김범석*

*제주대학교 대학원 풍력공학부

세계 각국은 팬데믹 이후의 경제회복을 위해 공격적인 그린뉴딜 정책을 전개하고 있다. 미국과 유럽은 2050년, 중국은 2060년까지 탄소중립(Net Zero)을 목표로 발전부문 탈탄소화, 운송수단 전기화, 에너지 수요 저감 등의 공통전략 분야에 집중 투자 계획을 마련하고 있다. 특히, 기후위기 대응과 재생에너지 산업육성을 위한 재정투입 규모를 확대하고 지원 일정을 앞당기고 있으며 RE 100(Renewable Energy 100%), 녹색 공공조달, 탄소 국경세 등의 제도도입을 통한 자국의 녹색산업 보호 움직임을 강화하고 있다. 풍력발전은 2020년에만 93GW의 신규발전설비가 설치되어 누적설비용량이 743GW에 이르며 세계 전기수요량의 5.3%를 공급한다. 풍력발전은 깨끗하고 안전한 에너지공급과 같은 기후변화 대응적 가치 외에도 큰 변화가 예상되는 팬데믹 이후의 세계 경제 질서 재편과정에서 핵심적인 도구로 활용될 것으로 기대된다. 전문가들은 현재 약 154조 원으로 추정되는 연평균 풍력발전 시장규모가 2027년에 이르러 222조 원의 거대시장을 형성할 것으로 예측한다. 본 논문에서는 풍력발전의 역사, 기술개발 및 산업 동향, 이슈 등의 분석을 통해 탄소중립 사회로의 전환을 위해 우리가 나아가야 할 방향에 대한 시사점을 제시한다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

미국 중국 희토류 희소금속 패권경쟁

김연균

한양대학교 국제학부 교수

한양대학교 글로벌기후환경학과 교수

한양대학교 글로벌 순환경제 센터장

한양대학교 에너지거버넌스 센터장

최근 탈석유화와 디지털 전환으로 인해 전 세계 국가들간 희토류, 희소금속 (rare metal)과 같은 전략 광물 확보 경쟁이 치열해지고 있다. 20세기의 냉전과 미·러 강대국 대립은 전통제조업과 그 원료인 석유와 가스를 기반으로 한 것이었다. 21세기 미중간의 경쟁은 재생에너지, 전기차, 드론, 양자컴퓨터, 3D 프린팅, 인공지능과 로봇, 첨단무기를 대상으로 일어나고 있는 만큼 핵심 원료인 희토류와 희소금속 등을 두고 소리 없는 전쟁을 벌이고 있는 상황이다. 본 논문은 전기차와 재생에너지 등 첨단산업 원재료인 희토류 리튬 코발트 등을 둘러싼 미국 중국간의 남미, 호주, 아프리카에서의 경쟁을 분석하고자 한다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

에너지벤처 발전 동향과 새로운 가치평가구축을 통한 금융지원

A Study on the technology valuation frame for energy startup and ventures

김봉균 · 송수원 · 이민정

한국에너지기술평가원, 기술사업화실

2021년 9월 탄소중립기본법이 국회를 통과하면서 2030년 온실가스 감축목표(NDC)도 2018년 온실가스 총 배출량 대비 40% 감축으로 상향되었다. 감축목표 달성과정에서 경제사회의 부담을 최소화하기 위해서는 경제활동의 주체인 기업의 저탄소 사업기반이 구축되어야 한다. 중앙집중식 에너지 공급에서 분산전원, 재생에너지 확대 등 산업 환경 변화로 다양한 사업모델 출현 중이다. 특히, 새로운 비즈니스는 분산, 소규모 방식으로의 시장 분화와 기술기반의 창업, 혁신 벤처기업이 성장하는 토대가 될 전망이다.

탄소중립 이행을 위해서는 공기업·대기업과 그와 관련된 공급망에 있는 중소기업으로 구성된 생태계만으로는 부족하다. 새로운 정책목표에 맞는 새로운 시장이 생기는 만큼 새로운 기업이 유입되고 창업되어야 한다. 탄소중립과 미래 에너지전환 시장에 대응하기 위해 에너지벤처의 육성이 필요하다. 2020년 산업부와 한국에너지기술평가원은 벤처기업협회의 3만7천여개 기업 중 주생산품이 에너지 분야 제품인 기업과 기술특허를 소유하고 있는 기업 2,029개를 도출하여 발표하였다. 분야별로는 에너지효율기기 생산기업(44.5%)이 가장 많고, 신재생에너지(17.5%), 전력/수요관리(16.8%), ESS/전기차(12.2%) 순으로 에너지벤처가 분포되어 있었다. 에너지벤처의 매출은 96억원 수준이며 매출증가율이 9.4%로 빠르게 성장 중에 있다. 에너지시장은 대규모 장치 산업 특성이 있어 신용이 높은 공기업 및 EPC 대기업이 주도하고 있다. 따라서 에너지벤처와 같이 신생기업이 에너지시장에 주도적으로 참여하는 것은 제한적일 수 밖에 없는 상황이다.

탄소중립 등으로 에너지비즈니스가 새롭게 재편되고 있는 상황에서 에너지벤처가 자유롭게 활동하기 위해서는 기술력과 전문성으로 도전할 수 있는 시장환경이 조성되어야 한다. 그린뉴딜 정책의 핵심 주체인 에너지벤처의 생성과 성장을 지원하는 정책을 추진하기 위해서는 기업성장을 지원하는 금융지원이 중요하다. 무엇보다 에너지벤처가 보유하고 있는 기술에 기반한 기술금융을 지원받기 위한 가액산정 및 지원여부를 위해서는 기술가치평가가 필수적이다. 그러나 에너지 분야의 특화된 방법론이 부재한 상황이다.

에너지기술에 기반한 신사업이 확대됨에 따라 금융 측면에서 활용할 수 있는 기술별 온실가스 감축 효과에 대한 정량적인 산정 평가체계가 필요하다. 본 연구는 에너지기술이 가지는 수익적 가치외에, 기술적용을 통해 온실가스 저감 및 기후완화에 기여하는 환경적 가치를 파악하는 이른바 탄소가치평가와 같은 에너지특화 Valuation Model의 기초 프레임워크를 제안한다.

[특별세션4. 한국 에너지의 미래 어젠다]

전력안보의 확보

Securing Korea Electricity security

이태의*

*에너지경제연구원, 울산 중구 중가로 405-11, 44543

Tae Eui Lee*

**Korea Energy Economics Institute, 405-11 Jongga-ro Jung-gu, Ulsan, 44543, KOREA*

Abstract

전 세계적으로 에너지 전환은 기존의 화석연료를 중심으로 공급하던 전력을 재생에너지를 중심으로 공급하도록 변화를 요구하고 있다. 소비에서도 석유 gas와 같은 화석연료의 사용을 낮추고, 이를 전력으로 대체하면서 최종에너지 소비에서 전력이 차지하는 비중이 증가하고 있다. 반면에 급격하게 증가하는 재생에너지와 기후의 변화로 인해 최근 전력공급에 지장이 나타나는 사례가 증가하고 있다. 전력은 지금까지 고민해오던 1차 에너지의 공급안보와는 그 성격이 다르다. 전력은 안정적인 공급이 이뤄지지 않아 수요를 맞출 수 없게 되면 부족한 공급만큼만 영향을 받는 것이 아니라, 광역적인 정전이 발생하게 된다. 우리나라에서 제시하고 있는 탄소중립시나리오에서 2050년 전력의 비중은 2020년의 2배를 초과한다. 이렇게 증가하는 전력공급에 기존의 화석연료 기반의 발전이 아닌 태양광 풍력과 같은 변동성 재생에너지가 중심이 되면서 안정적인 전력계통의 운영에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 전력안보에 대한 정의, 변동성 재생에너지의 증가가 이에 미치는 영향, 그리고 전력안보를 확보하기 위한 방안 등을 분석하였다.

Key words 전력안보, 재생에너지, 계통안정성, 에너지안보

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

소형 LPG 선박을 위한 LPG 병커링 실증 기준 마련 연구

A Study on Standardization of LPG Bunkering Demonstration for Small-scale LPG Vessel

최영주 · 유지수 · 박인애 · 송근호 · 이권태

한국가스안전공사 가스안전연구원

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 SOx, NOx, CO₂ 등 해상에서 선박연료 배출물질 기준을 강화함에 따라, 국내에서도 환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률이 제정·시행('20)되었다. 친환경적인 선박의 개발과 보급확대를 위한 기반이 마련되면서, 해상유를 연료로 사용하는 기존 선박들이 친환경선박으로의 전환 추진이 활성화될 것으로 예상된다. 관련 법령에서는 천연가스, 메탄올, 암모니아, 수소, 전기 등이 모두 포함되었으며, LPG 추진선박 또한 활용가능하다.

현재 LPG를 운반·수송하는 수송선은 전 세계 약 1,500 척이 운용되고 있으며, 국외에서는 LPG를 선박연료로 사용할 수 있도록 IGF Code가 개정('17)되었다. 개정과 함께 벨기에 Exmar사에서 최초로 80,000 m³급 VLGC(Very Large Gas Carriers) 2척(디젤-LPG 혼소)을 발주('18)하였으며, 이 후, BW LPG 등의 글로벌사에서 대형운반선 위주로 개조 및 신규 발주 진행 중이다. 2021년 기준으로 대형 운반선 위주 LPG 추진선박은 약 26척이 운용되고 있으나, 소형 LPG 추진선박은 유럽 일부 지역에서 운용되고 있다. 수송선 등 중대형 선박 연료공급(병커링)은 LPG 터미널에서 진행하며, 국내에서 건조된 LPG 선박도 LPG 기지에서 실시하고 있다. 이에 반해, 어선, 요트 등 소형 선박은 터미널에서 병커링이 불가하여 별도 충전소 구축이 필요하다. 유럽에서는 독일 Constance 호수에서 요트용 LPG 선박 충전소를 건설하고 이탈리아 베니스 Civitas 프로젝트를 통해 소형 LPG 선박 충전소를 구축·운영하고 있다. 국내에서 LPG 충전을 위해서는 액화석유가스의 안전관리 및 사업법에 따라 충전허가를 통해 시설을 구축하여야 하지만 현재 법령 상 선박 충전사업이 법령상 규정되어 있지 않아 선박 내 LPG 충전은 할 수 없다. 현재 법령 상 불가능하지만 중기부 규제자유특구사업(3차)을 통하여 부산 특구지역 내 LPG 병커링 실증을 위한 특례를 부여받았으며, 이에 따른 충전시설을 허가 받기 위한 실증 안전기준을 마련하여야 한다.

본 연구에서는 국내외 LNG, 수소 등 유사사업 기반 자동차, 선박 등 충전시설 비교 및 LPG 병커링과 LNG 병커링 위험성 평가를 비교하여 LPG 탱크로리 이용 및 스킴드 형태 충전설비를 지상에 고정시킨 실증용 LPG 선박 충전시설 안전기준안을 도출하였으며, 안전기준에 따른 실증사이트 내 병커링 가능성 검토를 통하여 소형 LPG 선박의 병커링 실증 기반을 마련하고자 한다.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

LNG 냉열 사용을 위한 국내·외 사례 연구

A Study on Domestic and Foreign Cases for Using LNG Cold Energy

백지효 · 김필종 · 이경식

한국가스안전공사 가스안전연구원

LNG 냉열은 액화천연가스를 기화시키는 과정에서 발생하는 에너지로 공기의 액화분리, 냉열발전, 냉동·냉장창고, 냉열 발전, 저온 분쇄를 이용한 폐기물 처리 등에 활용된다. 특히 일본의 경우 전 세계적으로 가장 많은 LNG를 수입하여 공기 액화시설 8개소, 냉동·냉장창고 3개소 및 냉열발전 16개소 등에서 LNG 냉열을 활용하고 있다. 또한 호주, 프랑스, 대만 등에서는 공기 액화분리에 LNG 냉열 이용하기 위한 사업을 추진하고 있으며, 일부 국가에서는 데이터 센터의 냉각원으로 LNG 냉열을 이용하기 위한 검토를 진행하고 있다. 국내 LNG 연간 소비량은 약 3,235만톤으로 일본, 중국에 이어 세계 3위에 해당하지만 LNG 냉열 이용 사례는 미미한 편으로 공기 액화분리 1개소 및 냉동·냉장창고 1개소가 운영 중에 있다.

LNG 냉열은 그동안 국내에서는 폐에너지로 취급되었지만 친환경 에너지의 중요성이 증대됨에 따라 LNG 냉열 이용에 대한 필요성이 대두되었다. LNG 냉열을 ASU(Air Separation Unit, 공기분리장치) 등에 활용하여 전력 사용량 및 CO₂ 발생량 절감을 예상할 수 있지만, 현재 법제화에 따른 상세기준 부재로 제조소 밖 LNG 배관은 설치가 불가한 상태이다. 따라서 LNG 냉열 이용을 위한 제조소 밖의 LNG 공급배관 법제화 및 기술기준 개정 검토가 필요하며, 세부 기술기준의 안전관리 적용을 통해 다양한 신규 사업 추진이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 국내·외 LNG 냉열 이용 적용사례, 관련 기준 검토 및 활성화 방안을 도출하여 안전관리 기준을 마련하고자 한다.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

국내·외 독성가스 허용 농도 및 검지 기준 동향 분석

An Analysis of Domestic and Foreign Standards for Toxic Gas Detection and Exposure Limits

김민주 · 이경식

한국가스안전공사 가스안전연구원

국내·외에서 활용되고 있는 독성가스 시설의 작업 간 근로자에 대한 노출 허용 농도 기준으로는 기관에 따라 TLV, STEL, Ceiling, ERPG 등을 제시하고 있다. 우리나라에서는 누출로 인한 근로자의 위해 방지를 위해 법적 구속력이 있는 상세기준(KGS CODE FP111)에서 독성가스 누출에 대한 검지기의 경보 농도를 TLV-TWA(Threshold Limit Value-Time Weight Average)로 정하고 있지만, ANSI/ISA에서는 TLV와 REL 중에 적절한 기준을, 한국산업안전보건공단의 KOSHA GUIDE에서는 가스누출경보 농도를 ERPG-2 등의 기준을 경보 농도로 명시하고 있다. 이처럼 국내외 지침의 상이한 기준으로 인해 산업 현장에서는 시설마다 다른 누출 경보 농도를 설정하거나, TLV-TWA 기준 적용 시 검지기의 낮은 정밀도로 인해 오작동이 발생하는 등의 문제점이 발생하고 있다.

현재 독성 가스는 반도체의 제조, 화학플랜트, 석유 및 가스 산업 분야에서 활용되며, 암모니아는 수소 저장체로서 주목받고 있다. 2020년 기준 31,974개의 고압가스 시설이 운영 중이며, 해당 시설에 대한 사고 10건 중 6건이 누출로 인한 사고로 집계되었다. 독성 가스 사고 중 누출에 의한 사고는 작년에 발생하지 않았으나, 2016년부터 2020년까지의 5년간 고압가스 사고 71건 중 독성가스 비율이 약 33%이상의 비중을 차지하고 있다. 독성가스의 누출 검지 및 경보 기준은 근로자의 근로 안전뿐만 아니라 가스 누출의 조기 감지 및 경보를 위해 합리적으로 선정되어야 한다.

본 연구는 산업 현장에서 적용중인 독성가스의 검지경보 농도 기준의 타당성을 판단하는데 목표를 두고 있으며, 국내외 독성가스 경보 농도와 근로 기준 및 법령을 조사하고 분석했다. 또한, 앞으로 국내외 독성가스 검지기의 성능 조사와 위험성 평가를 통해 국내 지침의 누출경보 농도 설정에 대한 타당성을 판단하고자 한다.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

가스 산업 현장 상황에 따른 유기적 대응을 위한 안전관리 프로세스 연구
Reserch On Safety Management Process For Organic Response to Gas
Industry Site Condition

위재민 · 이효렬

한국가스안전공사 가스안전연구원

가스 산업 시설 현장에서는 휴먼 에러, 시설 열화와 부식에 의한 사고 발생 가능성이 항상 잠재되어 있어 화재, 누출, 폭발 등의 안전사고 예방을 위한 활동이 중요하다.

본 연구에서는 가스 산업 현장 상황에 따른 유기적 대응을 위한 안전관리 프로세스를 개발하여 안전관리 및 비상 상황 발생 시 대응 절차의 효율성을 제고하고자한다. 일반적으로 작업자가 사업장 내에 위치하였을 경우 시설로부터 발생하는 위해 요인으로부터 안전거리가 확보되지 않으면 위험도는 상승한다. 특히, 작업을 수행하고 있을 경우 기존의 위험도에 인적오류로 인한 위험도가 더해져 위험도가 상승하는 만큼 작업자의 위치와 작업 여부에 따른 위험도 변화를 감지하여 현장 상황을 반영한 안전관리 프로세스를 제시하였다. 사업장 내 주요 작업에 대한 인적 오류로 사업장 또는 설비에 위해를 발생시킬 수 있는 요소를 확인하기 위해 테스트베드를 선정하고 인간 비신뢰도에 따른 휴먼에러의 정량적률 통해 휴먼에러 발생 확률 값을 산출하여 작업 유무에 따라 차등 적용하여 위험도를 분석하도록 하였다.

또한 사업장 내 단위 설비의 열화와 부식에 따른 상황 정보를 안전관리 프로세스와 연계시키기 위해 P&ID 또는 PFD에 위험도를 색깔로 구분하여 나타내는 부식(열화) 위험 지도 기법을 제시하였고, 주요 설비 및 배관의 부식, 열화에 따른 위험도를 산출하기 위해 손상메커니즘에 따른 고장발생가능성을 적용하고자 하였다. 화학 설비의 손상 메커니즘은 API RP 571을 기준으로 내부부식, 외부부식, 응력 부식 균열, 고온 수소 침식, 취성, 기계적 및 열적 손상으로 분류하여 평가하였다.

향후 사고 통계 및 사례 분석을 통한 일반 상황/위험(긴급)상황에서 발생 가능 시나리오를 제시하고 시설 열화와 부식, 휴먼 에러 등의 현장 정보 기반으로 개연성이 높은 사고 시나리오를 연동하여 안전관리 방안을 제시하는 안전 관리 프로세스를 도출해내고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성사업(P0002072_충북 공공기관연계 지능정보가속화 개방형 생태계조성사업)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

국내 LNG 병커링 산업 활성화를 위한 관련 법령 검토

Review of Laws and Regulations to revitalize domestic LNG Bunkering Industry

임정석 · 최영주 · 정동호*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *선박해양플랜트연구소

현재 LNG(Liquefied Natural Gas) 병커링 산업은 IMO2020 시행 및 국내외 탄소중립 확대와 더불어 점점 확대되고 있으며, 강력한 규제인 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 ‘선박연료유 황산화물 함유량 감축 규제’가 2020년 1월부로 시행되면서 친환경 선박 또한 급부상하고 있다. LNG 병커링이란 LNG를 연료로 사용하는 선박에 LNG를 공급하는 전 과정을 말하며, 공급 방식에 따라 3가지로 구분할 수 있다. LNG를 탱크로리에서 선박으로 공급하는 TTS(Truck to Ship)방식, 저장탱크에서 배관을 이용하여 LNG를 공급하는 PTS(Pipe to Ship)방식, 해상에서 선박에서 선박으로 공급하는 STS(Ship to Ship)방식이 있다.

현재 국내에서는 2011년 도시가스사업법 시행규칙 개정 및 2012년 KGS GC206(고압가스 운반 등의 기준) 개정으로 선박에 LNG를 충전할 수 있는 근거는 마련되어 있으나, 아직까지 TTS방식 LNG 병커링 관련 시설·기술기준만 규정하고 있어 LNG 병커링 산업이 활성화되기에 어려운 실정이다. TTS방식은 저장탱크 용량이 작은 소형 선박에 적합한 방식이기 때문에 중소형 선박 및 대형 선박에 LNG를 충전하기 위해서는 탱크로리를 이용한 동시 충전 대수 완화와 PTS방식 또는 STS방식의 세부 안전기준 마련이 시급하다.

본 연구에서는 국내 육상 및 해상 LNG 병커링 관련 법령, 지침 등을 분석 하였으며, 검토 결과를 토대로 확장된 제도 마련을 통해 국내 LNG 병커링 산업 활성화에 기여하고자 한다.

※ 본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 “LNG병커링 운영체계 및 위험도 평가기반 운영 기술개발”(PMS4680)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

정량적 위험성 평가를 통한 국내 수소충전소 안전성 향상 방안에 관한 연구

A Study on Safety Improvement of Domestic Hydrogen Refueling
Stations through Quantitative Risk Analysis

임재용 · 김소현 · 김필중 · 이경식*

한국가스안전공사 가스안전연구원

국내에서는 2019년 수소경제 활성화 로드맵을 발표한 이후 세계 최초로 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률을 발표하였다. 이에 맞춰 2020년 제1차 수소경제 이행 기본 계획을 수립하였고, 그 일환으로 2050년까지 수소충전소 2000기 설치를 목표로 하고 있어 향후 충전인프라의 보급이 활성화 될 전망이다.

수소는 가장 낮은 분자량을 가지고 있으며, 4~75%의 넓은 가연범위를 가지고 있어 누출 시 확산이 빠르고, 화재 및 폭발의 위험성을 가진다. 따라서 고압가스안전관리법 시행규칙 별표5에서는 수소충전소 설치 시 위험성평가를 법제화 하여 안전성을 제고하고 있다.

본 연구에서는 미국의 SANDIA National Laboratory(SNL)에서 개발한 HyRAM+ 프로그램과 국내에서 개발된 Hy-KoRAM 프로그램을 이용한 새로운 방식의 수소충전소 정량적 위험성 평가 기법을 소개하고자 한다.

HyRAM+를 사용하여 각 사고 시나리오의 설비 별 누출 빈도 분석을 수행할 수 있다. Hy-KoRAM은 HyRAM+의 결과를 기반으로 거리에 따른 개인적 위험성 평가와 F-N 커브 형태의 사회적 위험성 평가를 수행할 수 있어 상호 보완적이다.

위험지점(Risk point)은 수소충전소 이용자의 출입이 가장 많을 것으로 예상되는 디스펜서 앞 충전위치로 설정하고 진행하였다. 정량적 위험성 평가 결과 각 설비 중 고압의 저장 및 압축 모듈이 가장 높은 위험도를 가졌으며, 수소충전소의 총 위험도는 2.85×10^{-6} Fatalities/year로 높은 신뢰성을 가진 HSE(Health and Safety Executive, U.K.)에서 제시한 허용도 기준을 참조하였을 때 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)영역에 해당되어 대상 수소충전소는 안전하다고 판단된다.

HyRAM+와 Hy-KoRAM을 이용한 정량적 위험성 평가 기법은 대상 수소충전소의 P&ID를 기준으로 최적화된 빈도 도출을 통해 신뢰성 높은 위험성평가를 수행할 것으로 기대되어 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

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

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

가스·화학 시설의 사고 사례 분석을 통한 사고 시나리오 도출
Deduction of accident scenarios through accident case of Gas and
Chemical Facilities

안수현 · 이경식 · 김정훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

2011년부터 2021년도까지 가스·화학 시설에서 발생한 사고는 약 800건으로 가스·화학 사고의 경우 인명 피해를 동반한 대규모 사고로 이어질 가능성이 높기 때문에 이에 대한 대책 마련이 필요하다. 이를 위하여 본 연구는 작업자의 위험도를 고려한 통합 위험도 알고리즘 개발을 목표로 수행하고 있으며 일환으로 가스·화학 시설에서 주로 발생하는 사고 시나리오를 도출하였다. 한국가스안전공사의 가스 사고 데이터와 화학물질안전원의 화학 사고 데이터를 기반으로 가스·화학시설에서 발생한 사고의 원인을 세부적으로 분류하였다. 사고 원인은 크게 작업자, 설비 열화, 위험 물질로 분류하였으며 작업자 사고의 원인은 작업자 부주의, 안전수칙 미준수, 설계기준 미준수이고 설비 열화 사고의 원인은 노후화, 고장, 파열, 화재, 반복 하중 등이었다. 노후화의 경우 손상 메커니즘 적용 방안 도출을 위해 부식 손상, 균열 손상 등으로 세분화하였다. 주된 사고 원인의 시나리오는 ‘위험 물질의 이상 반응으로 인한 누출 및 화재 폭발’, ‘작업자의 행동으로 인한 누출 및 화재 폭발’, ‘가스·화학 설비의 열화로 인한 누출 및 화재 폭발’이었다. 향후 연구는 도출한 시나리오 기반 휴먼 에러의 정량적 평가 및 저감 기법(HEART)을 통하여 위험도를 평가할 예정이며 주요 손상 메커니즘을 예측하여 통합 위험도 평가 알고리즘을 개발하는데 활용할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 2020년도 실용화형 융합연구단사업(No. CPC-20-02-KIST)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[특별세션7. 가스시설 안정성 향상 연구]

수소충전소 가스누출 센서 설치 현황 분석을 통한 기준 개선 방안

Measures to improve standards by analyzing the installation status of
gas leak sensors at hydrogen refueling station

양유진 · 이경식 · 김정훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 5년간 국내에서 발생한 수소 관련 화재 및 폭발 사고는 총 11건으로 수소 충전소 사고에 대한 위험성이 증대되고 있다. 사고 예방을 위해 수소충전 시설에 감지시설, 압력안전장치, 환기시설, 방호시설과 같은 안전 대책을 마련하고 있지만, 수소 인프라가 보급된 기간이 길지 않아 이에 대한 세부적인 검토가 필요하다.

안전 관리 방안들 중 수소 감지 센서는 사고 대부분의 초기 단계에 해당하는 누출을 감지한다는 점에서 중요하게 여겨진다. 하지만 센서 기준의 부품별 설치 위치가 명확하지 않다는 것과 사고가 빈번하게 발생하는 압축설비 등과 같은 설비에 비교적 설치된 센서의 개수가 적다는 점이 기술 검토서를 활용한 센서 설치 현황 분석을 통해 확인되었다.

본 연구에서는 현재의 문제점을 실황 분석 결과와 수소 누출 특성을 고려하여 개선안을 도출 후 국내 수소충전소 활성화를 위한 안전기준을 수립하는 참고자료로 이용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 KETEP의 에너지기술 개발 사업(20203040040010, 수소충전소 고장예지 및 안전관리 상용화 기술개발)의 연구결과로 수행되었습니다.

[특별세션8. 글로벌 탄소중립과 자원순환]

탄소중립 이행과 기업 환경의 변화

Challenges for Business in Persuing a Net-zero Carbon Future

류하늬

현대경제연구원

탄소 중립이라는 전향적인 목표가 제시되고 이것의 실현가능성과 수단에 대한 논의가 뜨겁게 이어지고 있다. 과거와는 달리 달라진 글로벌 사업 환경은 ESG 라는 실제적으로 의사결정을 변화시키는 기준이 적용되고 있고, 탄소국경조정제도라는 무역장벽도 직면하게 되었다. 글로벌 기업은 단지 RE100과 같은 재생에너지 도입 뿐만 아니라 진일보한 형태의 목표 수치를 제시하고 있으며, 탄소 중립에 대응하는 체질 개선을 제약이자 기회로 활용하고 있다. 국내 탄소 중립 정책의 일관성이나 실현가능성의 여부와는 별개로 글로벌 사업 환경은 일방향으로 변화하고 있다는 것이다. 국내 기업과 글로벌 기업의 경계가 모호해지는 상황에서 더 이상 탄소 중립은 제약으로서만 받아들일 수 없다는 것이 중장기 전략을 세우는 사업적 의사결정의 방향이기도 하다.

기업에 대한 평가에서 전통적인 재무적인 요소와 함께 환경(Environment), 사회(Social) 그리고 지배구조(Governance)로 이루어진 비재무적 요소를 고려할 것이 요구되고, ESG 공시에 관한 국내외의 요구가 높아졌다. ESG 정보공개 기준에 대한 표준제정을 위해 지속가능표준위원회(International Sustainability Standards Board, ISSB) 설립이 공식화되었고, 2022년 ESG 기준(IFRS 지속가능성 공시 기준)을 공포할 예정이다.

탄소국경조정제도는 탄소 무역 장벽으로 인식되면서 국내기업에 제약인 동시에 탄소배출량 입증의 책임으로 인한 부담을 가중시킬 것으로 전망된다. 국내에서는 좀 더 구체적이면서도 강력한 탄소세법(안)의 필요성이 주장되었고, 이에 따라 제21대 국회에는 온실가스 배출량 감축을 위해 이산화탄소상당량톤을 기준으로 탄소세를 부과하는 법안이 계류중이다. 지속적으로 탄소세제에 구체화에 대한 논의가 이어질 것으로 전망된다.

탄소중립 달성을 위한 기업 환경 조성에 부응하기 위해서는 환경 정책을 넘어 무역 정책, 산업정책으로서의 전체적인 시각에서 조망하여 통합적인 비전을 제시하고 이해관계를 조정해나갈 수 있는 생태계 구현이 필요하다. 지속성장을 위한 탄소중립 대응 전략 모색 및 지속적인 정책 시행을 위해 통합적 거버넌스가 필요하다. 이에 온실가스 감축 목표 설정뿐 아니라 에너지 이용과 산업생산방식, 수송방식 등 산업, 무역, 경제구조 전반에의 영향을 고려한 새로운 프레임워크 구축 논의가 지속되어야 한다.

[특별세션8. 글로벌 탄소중립과 자원순환]

미국의 순환경제 정책과 재제조 산업 동향 U.S. Circular Economy Policies and Recent Developments in the Remanufacturing Industry

최혜승 · 정윤하*

한양대학교 글로벌 순환경제센터, 한양대학교 글로벌 인텔리전스학과

바이든 대통령은 취임 첫날 행정명령 서명을 통해 트럼프 대통령이 탈퇴했던 파리 기후협약(Paris Agreement)에 재가입을 공식화하는 등, 취임 이후 2050년 탄소 중립(Net-Zero)을 목표로 활발한 친환경 정책을 추진하고 있다. 바이든 행정부는 청정에너지혁신(Clean Energy Revolution)을 정의하고 우선 2035년까지 전력부문에서 탄소배출을 획기적으로 줄이고 2050년까지 전 경제부문에서 탄소중립화를 실현하는 것을 주요 국정 목표로 제시하고 있다. 2021년 4월 21일 지구의 날에 열린 기후정상회의에서도 바이든 대통령은 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 재확인했으며 2030년까지 온실가스 배출을 2005년 수준보다 절반으로 낮추겠다는 목표를 제시했다.

바이든 대통령 취임 후 미국이 공격적인 환경정책을 펼치는 것은 실질적으로 미국이 폐기물 관리의 비효율성으로 인해 악명이 높은 나라이기 때문이다. 미국의 1인당 생활폐기물 생산량은 773kg로 세계 최대 쓰레기 생산국이며, 이는 중국의 1인당 생활폐기물 생산량의 3배에 달한다. 세계 전체 인구의 4%를 차지하는 미국이 전 세계 생활폐기물의 12% (약 2억 3800만 톤)를 배출한다는 점과 더불어 재활용 비율은 선진국 중 가장 낮은 수준을 기록한다는 점을 고려하면 미국의 재활용 정책은 타 선진국보다 많이 뒤처져있는 실정이다.

최근 변화하는 국제 정세를 고려해 미국은 재활용의 필요성에 대한 인식을 높이고, 연방 차원에서 재활용 시스템을 체계적으로 구축하고자 2019년에 “미국 재활용 시스템 국가 프레임워크(National Framework for Advancing the U.S. Recycling System)”를 발표했다. 2019년 재활용 프레임워크를 토대로 조금 더 구체적인 “국가 재활용 전략(National Recycling Strategy)”을 2021년 11월에 발표했다. 이 전략은 연방정부 차원의 첫 재활용 정책인 점을 고려하여 본 연구에서는 이 보고서를 주로 다루고자 한다. 또한, 재활용대상 제품은 재제조를 거쳐 제품 수명이 효율적으로 연장될 수 있다는 점을 고려하여 미국 재제조 산업에 대해 논의하고자 한다.

본 연구에서는 순환경제와 관련하여 미국이 자국 내에서 정부 및 산업이 해결해 나가야 하는 현실적인 문제에 대해 고찰하며, 순환경제 정책을 효율적으로 이행하기 위해 미국 정부가 해결해야 할 난제에 대한 방안을 제시한다.

[특별세션8. 글로벌 탄소중립과 자원순환]

배터리 순환 경제 시대, 기업은 어떻게 변화해야 하는가?

Towards a Circular Economy for Batteries:
How Corporations Should Adapt and Survive

김진환

한양대학교 글로벌기후환경과

글로벌 기후환경 변화로 인해 세계 각국은 기후변화 대응에 대한 국제적 공조 필요성을 인식하고, 'Net-Zero 2050' 목표 달성을 위해 순환경제로의 전환과 산업구조의 개편에 착수하였다. 2020년 COVID-19 팬데믹과 세계 최대 자산운용사 블랙록의 CEO의 연례 서한을 통해 기후변화 리스크에 대응한, 기업의 ESG 경영을 강조하면서, 전 세계의 탄소중립 달성을 위한 정책 수립 가속화 및 이행을 촉진시켰다. 또한, 최근 발생되고 있는 전 세계 공급망 대란 및 글로벌 가치사슬의 변화로 인해 각국 정부와 기업들은 자원의존도를 경감시키고 자원을 재사용하는 순환경제에 중점을 두고 탄소중립을 실현중이다.

2050 탄소중립의 실현과 기후 위기를 해결하기 위해 화석연료를 대체할 배터리 산업은 핵심산업 중 하나이다. 탄소배출이 가장 많은 모빌리티 분야에서 무탄소 동력을 제공할 뿐만 아니라 ESS(에너지저장장치)로 활용 가능하기 때문이다. 하지만 전기차 시장의 성장에 따라 수명을 다한 폐배터리의 발생량이 늘어나고 있으며, 이에 따른 폐배터리 처리 문제가 사회적, 환경적 문제로 대두되고 있다. 또한, 현재 가장 많이 사용되고 있는 리튬이온 배터리의 원재료인 리튬, 니켈, 코발트, 망간은 전략금속으로서 글로벌 공급망 의존도가 높고 최근 원재료 가격 급등 및 공급망 유치 경쟁이 심화되고 있다. 이러한 문제 해결하기 위해 폐배터리 순환경제가 주목을 받고 있다.

전기차 확산에 따라 전 세계 전기차 배터리 시장규모는 2020년 282억 3,166만 달러(한화 약 31조 9000억 원)에서 연평균 성장률 18.48%로 증가하여 2025년에는 659억 2,408만 달러(한화 약 74조 4900억 원)에 이를 것으로 전망하고 있다. 또한, 글로벌 폐배터리 시장 규모는 지난 2019년 1조 6,500억원 수준에서 2030년에는 20조 2,000억원, 2050년엔 600조원까지 급성장할 것으로 예상하고 있으며, 이런 신 시장을 선점하기 위해서 글로벌 배터리 제조업체 뿐 아니라 자동차, 에너지 기업들도 뛰어들면서 경쟁이 치열해지고 있다.

본 연구에서는 탄소중립을 위한 차세대 시장인 폐배터리 시장을 선점하고 배터리 순환경제의 주도권을 확보하기 위해 주요 국가별 배터리 정책 분석 및 선도기업 분석을 통해 우리 기업의 대응전략과 글로벌 진출전략을 제시하고자 한다.

[특별세션8. 글로벌 탄소중립과 자원순환]

국내 재제조 산업의 탄소중립 우수성 확보를 위한 K-ESG 및 글로벌 ESG 항목 적용 비교 연구

A Comparative Study on the Application of K-ESG and Global ESG
Indicators to Secure Carbon Neutral Excellence
in Remanufacturing Industry in Korea

홍은경

한양대학교 글로벌기후환경학과

기후변화의 원인이 되는 온실가스를 감축하기 위해 전세계적으로 2050 탄소중립을 선언하는 국가가 증가하고 있다. 탄소중립은 국가 정책뿐만 아니라, 기업의 경영 전략에도 영향을 주어 기후변화로 인해 예측되는 기업 경영의 리스크를 줄이기 위해 ESG 경영 지표가 활용되고 있다. 특히 ESG 환경 분야는 기업의 온실가스 배출 저감과 직결되는 탄소중립 전략 및 활동 이행을 포함하고 있어 투자자 및 소비자가 기업의 지속가능성을 판단하는 기준 항목 중 하나가 되고 있다. 국내 정부도 기업의 ESG 지표 확보 및 정보공시를 돕기 위해 2021년 12월 K-ESG 가이드라인을 발간했다.

온실가스 직접배출량을 줄일 수 있는 자원순환 산업 중 재제조 산업은 자원순환 산업 중에서도 에너지 절감율이 가장 높고, 제품 생산에 투입되는 비용도 가장 낮아 환경적 및 경제적 우수성을 모두 갖춘 산업이다. 하지만 재제조 산업 시장을 이끌어가고 있는 기업의 99% 이상이 50인 미만의 소기업으로 자체 ESG 경영현황 분석 및 탄소중립 우수성 도출에 어려움을 겪고 있다. 최근 발간된 K-ESG 가이드라인에는 중소기업을 위한 ESG 작성 가이드 내용이 별도로 정리되어 있어 활용이 가능하나, 국내 재제조 산업이 저탄소 산업으로서 가지는 우수성 확보 여부에 대한 ESG 평가 항목의 분석이 필요하다.

국내 K-ESG 진단 항목 61개 중 탄소중립과 연관된 ESG 환경분야(17개 항목)에서 재제조 산업이 경쟁력을 가질 수 있는 진단 항목을 분석하고, 일실시예로 재제조 기업의 ESG 환경 영역 진단 지표를 점수화하여 환경적 우수성 반영 여부를 검토한다. 또한 외국의 재제조 기업을 K-ESG 지표로 평가 분석 후, 글로벌 ESG 평가 점수와 비교하여 각각의 결과를 비교 분석한다.

탄소중립 시장에서 재제조 산업은 온실가스 저감 및 경제성이 높아 탄소중립을 위한 ESG 환경 분야의 우수성을 가지고 있음에도 불구하고 ESG 정보공시 준비가 쉽지 않은 중소기업의 여건으로 ESG 지표를 통한 정량화된 환경적 우수성을 보여주기 어렵다. K-ESG 평가 지표는 해당 기업의 과거 경영 이력과 현황을 비교한 것으로 기업의 노력과 변화를 제시하기에는 적합하나, 산업간의 비교를 통해 재제조 산업과 같은 저탄소 산업의 우수성을 표현하는데 제약이 있다. 재제조 산업의 저탄소 우수성과 글로벌 경쟁력을 확보하기 위하여 재제조 기업이 탄소중립에 최적화된 ESG 보고서를 작성하고 정보공시를 할 수 있는 추가적 지원이 필요하다. 또한, 재제조 산업을 포함한 저탄소 산업이 가진 탄소중립에 대한 환경적 우수성이 확보될 수 있도록 ESG 정보공시에 대한 가중치 부여가 가능한 보완된 가이드라인이 제공된다면 국내 재제조 산업 시장의 확대 및 활성화를 기대할 수 있을 것이다.

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Recovery of Nitrogen from Waste Diaper through Alkaline Stabilization: Optimization by response surface methodology

Lulit Habte^{1,2} · Guenho Kim¹ · Jiwhan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources, ² School of Civil and Environmental Engineering Department, Addis Ababa institute of Technology (AAiT), Addis Ababa University

In this study, nitrogen has been recovered from waste diaper through alkaline stabilization as a liquid fertilizer. Nitrogen is one of the most dominant as well as difficult key nutrients to recover from human urine. Urine consists of 90–95% of total nitrogen. However, nitrogen can easily be lost in the form of ammonia gas by enzymatic degradation of urea. One method to prevent this loss is alkaline stabilization that is cheap and easy to operate. As a result, nitrogen recovery from human urine can be maximized. In this work, CaO synthesized from the waste shell was used to prevent the enzymatic degradation of urea. The urine obtained from baby diaper that is considered as one of the environmental concerns in the globe. The exponential growth of the global disposable diaper market has created concern about the management of the wastes produced after use. Environmental problems such as decomposition problems, emission of greenhouse gases, pollution, and release of toxic chemicals are the major impacts of waste disposable diapers which have to be managed properly. In the experiment, three parameters were studied: CaO dosage, liquid/solid ratio (L/S), and temperature. The experimental design has been conducted by response surface methodology (RSM), Box–Behnken. The result highlights that 0.05M, 40 °C, and 5 of CaO dosage, temperature, and L/S ratio respectively were the optimized condition for obtaining maximized nitrogen recovery that is 2048.56 mg/L.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Technological approach for utilization of fly ash and red mud as raw materials of CSA cement in Vietnam: Achieving Net - Zero carbon by 2050

Nguyen Van duc¹, Changwoo Lee², Jiwhan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geoscience And Mineral Resources, ²Department of Energy Resources Engineering, Dong-A University

At the Conference of the Parties (COP26) in 2021, Vietnam's Government had committed to the net-zero carbon emissions target by 2050. This can be considered as a critical goal for Vietnam's Government to respond to climate change. Currently, Vietnam has 25 coal-fired thermal power plants in operation. The total amount of ash and slag disposal is about 13 million tons/year, of which fly ash accounts for 80% to 85%. Based on the Decision No. 452/QD-TTg of the Vietnam Prime Minister in 2017, it has approved the scheme to promote the treatment and use of ash, slag, and gypsum of thermal power plants, chemical plants, and fertilizers as raw materials for production building materials and in construction works. However, after more than five years of implementing the Prime Minister's Decision No. 452/QD-TTg although there have been many efforts, the actual results have not yet reached the set goals. In addition, based on the current plan on bauxite mining in Vietnam, the amount of red mud discharged will reach 23 million tons by 2025; after ten years, it will be 230 million tons. Thus, a massive amount of fly ash and red mud has been discharged into the environment. After COP26, Vietnam's Government issued Decree 06/2022/ND-CP on January 7th, 2022. It regulates the mitigation of greenhouse gas emissions and the protection of the ozone layer. Accordingly, the methods of mitigating greenhouse gas emissions, including technologies, production processes, and services with low greenhouse gas emissions, are encouraged to apply. In this study, it will discuss the CSA cement technology with lower CO₂ emission using fly ash and red mud as raw material by carbon mineralization process. The ultimate aim of this study is to suggest practical technological solutions that contribute to the overall goal of the Vietnamese Government to reduce CO₂ emissions to net-zero by 2050.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the "Infrastructure program for industrial innovation" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

A Case Study of Numerical Analysis to Select the Optimal Injection Locations for the Backfilling in Korean Limestone Mines

Youngmin Yoon · Seokwon Jeon

Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

Backfilling the composite carbonate into abandoned mine cavities has been studied as an alternative to overcome the low economic efficiency and storage limit of the Carbon Capture and Storage (CCS) technique. In this study, we conducted a case study on selecting the optimal injection locations for the backfilling in Korean limestone mines through numerical analysis to establish a reasonable standard for the construction design of backfilling the composite carbonate into abandoned mine cavities. Numerical analysis was performed on the limestone mine in Samcheok, Gangwon-do, South Korea. Point cloud data of the limestone mine cavities were obtained using LiDAR. A 3D model applied to numerical analysis was generated by combining point cloud data with surface topographic data. The strength reduction method was used to evaluate the stability of the mine. To analyze the ground reinforcement effect of the backfilling, we conducted a numerical analysis under the individual and sequential backfilling conditions for the mine cavities and measured the vertical displacement of the surface. The numerical analysis results showed that the factor of safety before the backfilling was 4.2, which is already stable, but the factor of safety after the backfilling increased significantly to 6.6, and the expected ground subsidence area changed. The applicability of this study can be improved in that it is necessary to secure a sufficient factor of safety when considering the abandoned mines and their long-term behavior. In addition, it was found that the vertical displacement of the surface sharply decreased when backfilling the 130 level gangway and the vertical displacement of the surface decreased as the injection volume for backfilling increased. It indicates that the mine cavity volume can be a major factor influencing the ground subsidence. Therefore, the cavity volume as well as the depth of the cavity from the surface should be considered when selecting the injection locations for the backfilling.

Acknowledgment

This research was supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME), and the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE) (NRF-2017M3D8A2085654)

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

An Empirical Study on CSA Cement and Backfill Material for Abandoned Mine Openings

Hyeon-woo, Lee¹ · Byung-ryeol Kim² · Sung-Oong, Choi^{1*}

¹Kangwon National University, ²Korea Institute of Limestone & Advanced Materials

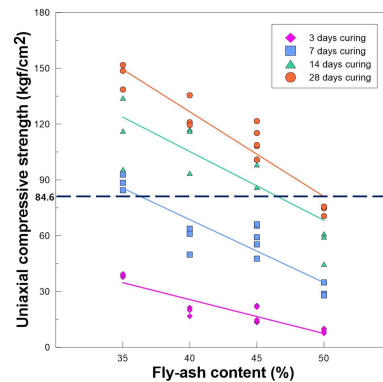
As the demand for electric power increases with the acceleration of electrification at home and abroad, the needs for coal-fired electrical power plants are accordingly increased. However, these coal-fired electrical power plants induce also many environmental problems such as an increase of air pollutants, an increase of possibility of land contamination by reclamation of coal ash, even though these power plants have good economical efficiency. In the case of a by-product of coal-fired electrical power plants, only 70% of them are recycled and the remaining 30% of by-product are fully buried in the surrounding ground. Consequently, this study develops the backfill material using coal ash for abandoned mine openings. The backfill material purposes increasing the coal ash recycling rate as well as secure the mine area stability. ACI(2005) suggested that slump flow 200 mm and uniaxial compressive strength 8.3 MPa or some more must be needed for long-term stability and self-compaction with high-flowability backfill material. This study tests the backfill material's properties(P-wave velocity, moisture content, and uniaxial compressive strength) and finds the optimal mixing proportion of backfill material. The test specimens of backfill material are made by fixing the limestone powder's proportion at 40% and changing the green cement and coal-ash content. As a result, the optimal mixing proportion was derived from limestone powder at 40%, coal-ash at 45%, and green cement at 15% for this study's purpose.



<Backfill material
mixing>



<Property test specimen
curing>



<Uniaxial compressive strength of
coal-ash content and day of curing>

Fig. Making process of test specimen and result of uniaxial compressive strength test

Acknowledge

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

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Current status and prospect of domestic raw material supply and demand for commercialization of carbon mineralization technology

Eu-Dug Whang^{1*}, Changwoo lee²

¹Korea of Mining Industry Association, ²Department of Energy Resources Engineering, Dong-A University

Mineral carbonation is a process in which insoluble carbonate is formed by the reaction of carbon dioxide with a compound containing metals such as calcium (Ca), magnesium (Mg), and iron (Fe). Theoretically, oxides of alkaline earth metals (Ca, Mg, etc.) are required as raw materials for mineral carbonation, but they can also be obtained from some natural minerals such as silicate rocks or alkaline industrial by-products (or wastes). Natural minerals include olivine (Mg_2SiO_4), serpentine ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), and wollastonite (CaSiO_3), which are widely distributed on the surface. It is estimated that more than 13 million tons of carbon dioxide can be treated using these natural minerals that exist in Korea. However, as of 2018, the total domestic carbon dioxide emission was 727.6 million tons, and even if all of these natural silicates are used, the treatment effect is less than 2% of the annual carbon dioxide emission. In addition to natural silicate minerals, industrial by-products containing alkaline earth metal oxides include waste concrete/cement, steel slag generated in steelmaking processes, combustion by-products such as ash and waste asbestos. If calcium and magnesium contained in these industrial by-products are utilized, a significant amount of carbon dioxide can be separated from the atmosphere. More than 100 million tons of by-products from domestic industries are generated every year. When industrial by-products are used for mineral carbonation, energy consumption due to mining, grinding, sorting, and high crystallinity is relatively low, unlike natural minerals. In addition, since it is continuously generated every year, it can be supplied stably and has significant advantages in terms of being able to process industrial wastes/by-products in an environmentally friendly manner. In general, steel slag contains about 30 to 60% of CaO or MgO, and it is expected that carbon dioxide immobilization of more than about 14 million tons per year will be possible if these industrial wastes or by-products are used.

Acknowledgement

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

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Immobilization of Chromium hexavalent oxyanions in wastewater and coal ash leachate by *in situ* carbon mineralization

Chaeyeon Lim^{1,2} · Mohd Danish Khan² · Junhyun Choi² · Heeyoung Shin² · Hyunjung Kim^{1*} · Ji Whan Ahn^{2*}

¹Department of Earth Resources Environment Engineering, Hanyang University, ²Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

The IPCC has envisioned a target of sequestering ~32 Gt of atmospheric carbon dioxide (CO₂) by 2020–2030 to achieve the climate goals (limit warning 1.5 °C). Carbon mineralization is a technology used to sequester atmospheric CO₂ by reacting with alkaline waste to form mineral carbonates and holds immense potential in reducing global warming. However, the alkaline wastes such as coal ash, bauxite residue, and steel slag contain heavy metals that can be hazardous to the environment when leached out. According to the EPA, chromium(VI) oxyanions leaching from coal ash is a serious issue due to its toxicity. Cr(VI) concentration in coal ash leachate can reach 5,000 ppb, much higher than the threshold standard of 100 ppb for surface/ground water. In this study, *in situ* carbonation experiments were conducted for the immobilization of Cr(VI) oxyanions in wastewater and coal ash leachate. Thermodynamic simulations were carried out to identify the reaction possibilities and formation of any Ca–Cr related products. To obtain maximum immobilization efficiency, experimental parameters such as the CaO dosage, solution pH, temperature, and CO₂ flowrate were investigated. Results revealed that the solution pH and CO₂ flowrate affected Cr(VI) immobilization to a greater extent than the other studied parameters. We hypothesized that Cr(VI) immobilization occurs by surface adsorption and incorporation of Cr(VI) within calcium carbonate crystals.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Enrichment and Association of Rare Earth Elements with Unburnt Carbon Obtained from Coal Ash

Mohd Danish Khan¹, Lai Quang Tuan^{1,2}, and Jiwhan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, ²Department of Resources Recycling, University of Science and Technology

Coal is considered as a complex geological mineral comprising both inorganic and organic matter including crystalline and amorphous mineraloids. These minerals incorporate considerable quantity of rare earth elements (REE) associated with both inorganic and organic mineral contents. Plethora of studies are available demonstrating the association and enrichment of REE in coal ash while only meager research focused on the REE association with unburnt carbon content in coal ash. In this study, microflotation was applied to separate unburnt carbon from circulating fluidized bed coal fly ash and ~ 24 wt. % of unburnt carbon was successfully separated. It was observed that around 323 ppm of REE was associated with unburnt carbon which on proper burning enriched by 1.68 times i.e 543 ppm. Transmission electron microscopic images integrated with EDS confirms the presence of REE in unburnt carbon. The distribution of heavy rare earth elements (HREE) in unburnt carbon content significantly increased (~ 28 wt. %) revealing positive attachment of HREE with unburnt carbon. Lastly, molecular dynamic simulation was applied for the identification of C-REE possible interactions based on lowest energy and surface adsorption along with substitution/cation exchange as the possible interaction mechanism was observed. Presented work highlighted an auspicious potential of unburnt carbon to interact REE along with the associated mechanism.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

Novel Alkali Activation Integrated Carbon Mineralization towards CO₂ Sequestration and Rare Earths Enrichment from Fly Ash

Lai Quang Tuan^{1,2}, Mohd Danish Khan¹, and Jiwhan Ahn^{1*}

¹Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, ²Department of Resources Recycling, University of Science and Technology

Coal ash has been a promising source for CO₂ sequestration and rare earths recovery. Combustion of coal in the Circulating fluidize bed boiler produces high-calcium coal ash as limestone (CaCO₃) is added to capture sulfur. Consequently, there is a significant amount of free CaO being available for CO₂ capture. In addition, coal ash has been considered as the alternative source for rare earths. In this study, alkali activation using NaOH was performed to activate the reactivity of rare earths through breakage of amorphous aluminosilicate phase. Rare earths was enriched by significant dissolution of major elements such as Si, Al, and Fe. Furthermore, post alkali activation, carbon mineralization using CO₂ and Ca(OH)₂ was integrated to recycle NaOH, precipitate Si and Al, and promote CO₂ mineralization. Alkali activation comprised of 15 g CFBC coal fly ash mixed with 300 mL NaOH (5 M) for a residence time of 2 h at a temperature of 100 °C. Carbon mineralization process included CO₂ dissolution in alkali activated solution (carbonation step 1) followed by CO₂ mineralization in carbonate mineral (carbonation step 2). The dissolution of Si, Al, and Fe was 54.5 %, 66.76 %, and 6.25 % respectively, which resulted in the enrichment of REEs by 1.49 time i.e. from 385 ppm to 575 ppm. Mineral carbonation precipitated 85.75 % SiO₂, 99.6 % Al₂O₃, and 100 % Fe₂O₃. The sequestered quantity of CO₂ in the product was 37.58 g per 15 g fly ash used, which is equal to 2.505 kg CO₂ can be sequestered per kg of fly ash.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

A Study on K-ETS Offset project methodology development of carbon mineralization technology for rare earth element concentration

Eundon Jeon · Wan Cheon · Chungkook Lee

Korea Research Institute on Climate Change, Carbon Expert Group

Since the 2019 UN Climate Summit, 121 countries have joined the Climate Ambition Alliance and selected 2050 carbon-neutral as the global agenda. Since the president announced the 2050 carbon-neutral plan in his 2020 National Assembly Policy Address, Korea has been establishing specific implementation measures and strategies for carbon-neutral, along with the declaration of carbon-neutral to keep up with climate change trends at the city and corporate level. Carbon-neutral can be achieved by reducing greenhouse gas emissions through technology reduction and offset the rest through carbon credits, raising the need for a greenhouse gas reduction project methodology that can be certified as carbon credits.

In this study, a methodology for reducing greenhouse gases through the Korea emission trading scheme among domestic and foreign policies that can be certified for carbon credits was developed. To this end, a standard process model was selected through analysis of the carbon mineralization technology(Insitu-PCC technology) used as a rare earth concentration technology. A key element of methodology development were derived by analyzing the similar methodology of Clean Development Mechanism (CDM), which has a carbon dioxide reusing reduction project model. Based on this, a methodology for reducing greenhouse gas emissions under the korea emission trading scheme offset project has been developed and approved by the government. Based on the approval of this methodology, it is expected that carbon mineralization technology can be expanded to greenhouse gas reduction projects, and it is believed that it can contribute to achieving carbon-neutral through securing carbon credits.

Acknowledgment

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy(MOTIE), Korea, under the "Infrastructure program for industrial innovation" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT)(P0018011)

[특별세션9. 2050 탄소중립을 위한 탄소광물화 기술 산업화]

A Study on the Analysis of Emission Sources for Development of Greenhouse Gas Reduction Methodology of Rare Earth Extraction Technology Based on Carbon Mineralization

Wan Cheon^{1,2} · Eundon Jeon¹ · Chungkook Lee¹

¹Korea Research Institute on Climate Change, Carbon Expert Group,

²Kangwon National University Graduate School, Environmental Management and Policy Cooperative Course

Since the Paris Agreement adopted at the 2015 UN Climate Change Conference and the 2019 UN Climate Action Summit, 121 countries have joined the Climate Ambition Alliance, and 2050 carbon-neutral plan has emerged as a global agenda. Carbon-neutral refers to confirming the current greenhouse gas emissions, reducing them as much as possible through reduction actions, and offsetting the remaining greenhouse gas emissions. In the Korea 2050 Carbon Neutral Strategy, Korea presented CCUS technology as a key means of carbon-neutral.

In this study aims to develop a methodology for calculating the amount of greenhouse gas reduction by using rare earth elements extraction technology based on carbon mineralization technology. Methodology development proceeds in the order of defining the standard process of greenhouse gas reduction technology, establishing project boundaries and deriving emission sources, setting baseline scenarios and checking additional criteria, and analyzing quantification techniques by emission source.

As a result of the study, rare earth elements extraction technology defined a standard process as a concentration process in 10 stages and an extraction process in 17 stages. The main emission sources for each process were indirect emission sources due to the use of external electricity and external heat, and the greenhouse gases emitted were CO₂, CH₄, and N₂O. The project boundary was set as an area that includes both greenhouse gas emission sources in the concentration process and the extraction process. Based on this study, it is intended to develop a methodology for calculating the amount of greenhouse gas reduction in rare earth elements extraction technology by conducting follow-up studies such as setting baseline scenarios and analyzing quantification techniques for each emission source.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy(MOTIE), Korea, under the "Infrastructure program for industrial innovation" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT)(P0018011)

도심 발전소 배가스내 CO₂ 처리 및 고가물질 생산을 위한
미세조류 광배양 및 발전폐열 건조기술 개발

Development of technology of microalgae culture and drying using waste heat for treatment
of CO₂ and production of high-valued materials on flue gas of urban power plant

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

석탄발전소에 적용된 기존 탄소포집저장(CCS)기술은 CO₂를 액상흡수제(습식)로 포집, 분리한 후 원거리 이동하여 깊은 지반층에 저장하는 것으로 고가의 처리비용(7만원/CO₂톤) 만이 소요되고 가스특성상 지반균열시 누출위험의 문제점을 안고 있다.

하지만 최근에 전세계적으로 CO₂를 포집한 후 이를 활용하여 다양한 물질로 전환하여 경제성을 갖는 탄소자원화(CCU)기술에 관심이 집중되는 추세이다. 특히 대부분의 탄소자원화 기술이 CO₂를 다른 물질로 전환하면서 많은 에너지를 소모하므로 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 있으면서 도심 발전소에서 발생하는 배가스 및 난방수의 발전폐열을 활용하여 온실난방과 바이오매스 건조공정에 활용할 수 있기 때문에 에너지 소모가 거의없는 효과적인 CO₂ 처리기술이라고 판단된다.

도심에 위치한 한국지역난방공사 P지사의 열병합발전설비의 배기가스(CO₂농도 4~6%)를 스택 80m 높이에서 추기설비를 이용하여 광배양기까지 공급하여 미세조류를 광배양하는데 이때 사용된 미세조류는 헤마토코쿠스로 천연 항산화물질인 아스타잔틴을 가장 고농도로 생산할 수 있는 종이며 클로렐라는 건강식품 및 바이오플라스틱 원료를 생산할 수 있는 종이다.

경제적인 PE 또는 PVDF재질로 제작된 광반응기에서는 햇빛, 미세조류, 배기가스내 CO₂ 간의 광합성 반응을 통해 CO₂를 고정화하여 평균 30%정도 처리할 수 있는데 이때 미세조류인 헤마토코쿠스(녹색)는 증식 및 유도단계와 같은 2단 배양단계를 거쳐 아스타잔틴을 고농도로 축적하는 수확단계가 되면 적색으로 색상이 변하고 이때 수확된 biomass는 발전소 폐열(배가스 및 난방수)을 이용하여 효과적으로 건조가 가능하며 이후 초음파나 이온성 액체 추출공정과 생물학적 검화공정을 통해 건강식품, 의약품, 사료 등 고가물질을 생산할 수 있다. 이는 기존 미세조류를 이용하여 바이오디젤(\$1/kg)을 생산하는 공정보다 수천배 높은 수익(\$3000/kg)을 얻을 수 있으며 클로렐라도 건강식품원료로 상당한 매출(\$500/kg)이 가능하다. 실제배가스로 운전한 경제성 평가 결과, 10톤 플랜트 운전시 투자금 회수기간 1.17년, 수익률(DCFROR: 15%이상 경제성有) 45.2%로 확실한 사업성이 있음을 확인할 수 있었다.

또한 본 미세조류 공정은 기존 전기로 건조하는 공정보다 발전소 2가지 폐열(배가스열, 난방수열)을 활용해 난방과 바이오매스 건조가 가능하기 때문에 기존 단순한 개방형 배양공정보다 미세조류를 보다 고밀도로 유지할 수 있고 CO₂ 고정속도가 빠르며 공정제어가 수월하다. 그러므로 균일한 품질이 요구되는 의약품나 건강식품 원료물질 생산에 적합한 공정임을 확인할 수 있었다.

분산형 집단에너지 플랫폼: 다단 저온 열공급 지역난방 실증
Decentralized Intergrated Energy Platform: Empirical Study on Cascade
Sub-Low Temperature District Heating Networks

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

한국지역난방공사 미래개발원

탄소중립국으로 가기 위해서는 화석연료를 줄여 온실가스를 배출하지 않는 신재생에너지를 확대 보급 하여야만 한다. 더욱이 국내 에너지 사용 중 40% 이상은 열에너지 형태로 사용하고 있으나, 현재 재생 전기에너지 보급 확대에 집중하고 있다. 따라서 최근에는 열에너지에 대한 중요성을 인식하고 신재생 열에너지 공급을 위한 다양한 기술과 보급 방안을 제시하고 있다. 그 중 대표적인 기술은 4세대 지역난방 기술로, 저온으로 열을 공급하는 기술이다.

일반적으로 저온 지역난방 네트워크는 회수관의 열을 활용하는 방안이 있다. 즉, 가까운 지점에 중온수 지역난방 열수송관망이 있으면 회수관에 저온 지역난방 열수송관망을 연결하는 것이다. 하지만 이러한 경우 열수송관망의 안전성이 떨어질 수 있다. 따라서 본 연구는 그린허브(또는 변온소)라는 열중계소를 만들어 그린허브를 기점으로 중온 열네트워크와 저온 열네트워크를 구분하는 열네트워크를 사용한다. 저온 열네트워크를 기존과 같이 병렬식으로 사용할 경우, 공급/환수 온도차는 10~15℃로 기존 중온 열네트워크에서의 60℃ 보다 4배나 작기 때문에 배관경은 2배나 커지고 펌프 동력 또한 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 병렬 방식이 아닌 직렬방식으로 캐스케이드 저온 열네트워크를 구성하였다. 즉, 2배로 온도차를 높여 사용하는 방식이다. 즉, 각 건물의 일정한 유량을 분배해서 공급하는 방식이 아닌 전체 유량을 연속적으로 공급하는 방식이다. 이와 같은 방식은 신재생 열에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 방법이다. 이와 같은 캐스케이드 열네트워크 방식은 신재생 열에너지를 가진 건물에서 생산/사용하고 남은 열을 다음 건물로 열을 용이하게 전달할 수 있기 때문이다. 이와 같이 중간마다 소규모의 신재생 열에너지를 생산하는 건물을 연결해준다면 건물에 설치된 신재생 열에너지 설비의 가동률을 높여줄 수 있다. 이와 같은 저온 열네트워크를 구성하고 시험하기 위해 실증설비를 용인시 기흥구에 위치한 한국지역난방공사 미래개발원에 그린허브와 스마트 열그리드를 구성하여 실증하였다.

이와 같은 다단 저온 열공급 지역난방 구성은 신재생 열에너지의 생산과 사용에 대한 정보를 기반으로 운영되어야만 한다. 따라서 실증단지 기계실 내 정보통신 기술을 활용하여 온도/압력/유량 등의 정보를 분석하여 최적 운전을 진행하여 에너지자립률을 향상시켰다.

질소산화물 저감을 위한 요소 기반 친환경 환원제 개발

Development of urea-based eco-friendly reducing agent for nitrogen oxide reduction

남궁형규 · 장원석 · 신재용 · 신혜현 · 장미희 · 신경아 · 이상린*

한국지역난방공사 미래개발원, *(주)에스엠씨케미칼

자동차 등 이동오염원과 발전소, 소각장 등 고정오염원에서 대기중에 배출하는 대기오염물질 중 많은 비중을 차지하는 오염물질은 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x)이다. LNG열병합 발전에서는 사용 연료의 특성상 질소산화물이 대기오염물질 배출량 중 가장 큰 비중을 차지한다. 질소산화물 제거를 위한 대기방지기술로는 선택적촉매환원법(SCR, selective catalytic reduction), 선택적비촉매환원법(SNCR, selective non-catalytic reduction) 등이 있다. 질소산화물을 제거하는데 주로 사용되는 환원제는 25% 암모니아수로서 화학물질관리법 상에서 유해화학물질에 포함되며, 산업안전보건법에서 공정안전관리(PSM, Process Safety Management) 대상물질로도 포함되어 25% 암모니아수 사용 사업장에서는 공정안전관리보고서를 제출해야할 의무가 있다.

최근에는 이와 같은 규제에서 벗어나고자 유해화학물질 기준인 10% 암모니아수 이하인 9% 암모니아수를 사용하거나, 40% 요소수를 적용하는 사례가 많이 있다. 하지만 9% 암모니아수를 적용하려면 같은 양의 질소산화물을 제거하는데 2.5배 이상의 암모니아수 양을 필요로 하며, 그에 따라 발생할 수 있는 기화 온도 저하, 미반응 암모니아 배출 등의 문제를 해결하기 위한 기화기, 환원제 유입설비교체 등의 추가적인 작업을 필요로 한다. 또한 요소수를 사용하기 위해서는 미반응 요소, 부산물 생성에 따른 배관 막힘 등의 문제가 발생하며, 요소수를 지속적으로 사용하기 위해서 온열장치가 부착된 탱크 및 배관 설비를 운용해야 한다.

이와 같은 여러 가지 기존 환원제 사용에 따른 문제를 해결하기 위해서, 요소를 기반으로 하는 환원제를 개발하기 위한 연구를 진행중에 있다. 요소에 첨가물을 추가하여 25% 암모니아수와 동일한 질소산화물을 환원 성능을 갖고, 요소수의 단점이 되는 미반응 요소 및 결정형성 등의 부분을 기술적으로 보완하여 현장 적용에 최적화된 물질을 개발하고자 한다.

DR, 계시별요금 등에 의한 전력수요의 변동성 변화가 구역전기 CP 수익에 미치는 영향 분석

A Study on the Effect of Electricity Demand Volatility Change
according to DR and TOU Rates etc. on CES CP Revenue

전영신 · 임신영 · 김현철 · 이문희 · 김민혜

한국지역난방공사 미래개발원

구역전기사업은 특정 구역 내 전기를 공급하는 사업으로서 현재 모든 사업자가 집단에너지사업을 겸업하고 있다. 19년부터 발전용량에서 구역수요를 제외한 용량이 20MW를 초과하는 구역전기사업장에 CP를 지급하도록 전력시장 운영규칙이 개선되었다. 이에 구역전기사업자는 하루 전에 전력수요를 예측하여 발전용량에서 차감한 후 CP 입찰을 해야 한다. 수요예측의 경우 오차가 발생할 수 있기때문에 일정 수준의 오차율까지는 패널티가 발생하지 않지만, 기준 오차율 이상일 경우에는 위약금이 발생한다. CP 입찰을 낮게 하면 위약금 발생할 확률은 줄겠지만 CP정산 금액 자체가 줄어들게 된다. 따라서 구역전기사업자는 위약금이 발생하지 않는 범위에서 CP 입찰을 하였는지 여부가 수익에 영향을 미친다.

수요예측의 오차는 계시별요금, 국민DR 등의 수요관리제도 도입 이전에도 발생하였다. 하지만 계시별요금 등의 선택형 요금제도가 도입 될 경우 소비자가 전력수요 패턴을 변화하면서 누진요금제에 비해서 전력수요의 변동성이 변화할 것으로 예상된다. 하지만 계시별요금제 등 선택형 요금제가 적용되지 않아 분석할 수 있는 데이터가 부족한 상황이다. 국민DR사업의 경우도 전력수요의 변동성에 영향을 미칠 것으로 예상되지만 데이터가 부족한 것은 선택형 요금제와 마찬가지로 상황이다. 따라서 본 연구에서는 공동주택 내 국민DR, 선택형요금제 등 수요관리제도 도입에 따른 전력수요의 변동성 변화에 대한 가상의 시나리오를 구성하고 그에 따른 구역전기 CP의 수익에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

key word 구역전기사업 CP, 전력수요 변동성, 계시별 요금제, 국민DR

사사

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임(No. 2021202090028D)

LNG 발전 배가스 CO₂ 포집을 위한 분리막 공정연구 Study of CO₂ Capture Membrane Process from LNG Power Plant Flue Gas

이충섭 · 임진혁 · 공동욱 · 백은별 · 장원석* · 하성용

(주)에어레인, *한국지역난방공사 미래개발원

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

국내 CO₂ 배출원 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 발전분야에서 발전설비 수 기준 석탄 기력발전은 30%, LNG 복합발전 26%, LNG 열병합발전 7%로 이미 LNG 발전설비가 33%로 석탄발전보다 많으며 최근 탈원전, 탈석탄 추세로 가스발전이 가속화되고 있다. 그러나 CCUS 기술개발 현황은 석탄발전을 중심으로 진행되었으며 LNG 배가스 특성에 맞는 기술개발은 최근에서야 진행되고 있는 실정이다. LNG 발전 배가스는 Dust와 NO_x 등의 불순물농도는 매우 낮아 CO₂ 포집 전처리공정은 유리하지만 낮은 CO₂농도(3.5~9mol.%)와 높은 O₂의 농도(6~13.5mol.%)의 특성으로 CO₂ 포집에는 많은 어려움이 따르게 된다.

CO₂ 포집 공정 기술개발은 미국의 DOE 산하 NCCC의 경우 흡수 기술과 분리막 기술을 중심으로 진행되어 왔으며 분리막 기술의 경우 2021년 10MWh 발전 배가스 CO₂ 포집공정의 FEED 설계가 완료되어 이후 상세설계 및 제작 설치공사가 진행될 예정이다. 분리막 기술은 CO₂, O₂, N₂ 등의 분리막 투과속도 차이를 이용하여 CO₂를 분리 포집하는 기술로 작은 설치면적과 높은 O₂ 농도에서도 안정적인 공정운전이 가능하여 최적의 LNG 발전 배가스 CO₂ 포집공정으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 기체분리막을 이용하여 LNG 발전 배가스의 특성에 맞는 분리막을 선정하여 CO₂ 포집공정을 개발하였으며 운전압력, 운전온도, Stage cut의 변화에 따른 CO₂ 포집 농도와 CO₂ 회수율을 확인하였다.

도심 LNG 발전소 대상 콤팩트 CO₂ 포집 및 액화 공정 연계시 발전 출력에 미치는 영향

Effect on power generation output of integration of compact CO₂ capture and liquefaction processes for urban LNG CHP plants

이중용 · 이현주 · 장원석*

유진에너지기술(주), *한국지역난방공사 미래개발원

최근 정부에서 국가온실가스저감목표 상향조정 및 탄소중립계획을 발표하면서 발전부문을 비롯한 다양한 산업부문에서 탄소저감 및 탄소중립 목표 달성을 위한 기술 개발이 시급해진 실정이다. 특히, 지역 냉·난방 등 집단에너지를 공급하기 위해 도심지역에 설치, 운영되고 있는 많은 발전소들은 LNG를 연료로 하는 열병합발전소로서 협소한 부지면적에 발전설비들이 매우 콤팩트하게 설치되어 있어 탄소저감 설비 등 추가설비를 설치하기에 매우 불리한 여건이다. 반면, 석탄화력발전소와 같은 대용량 발전소에 적용되어 오고 있는 기존 탄소포집 공정은 연소배기가스내 CO₂를 고온 고압조건에서 흡수제로 포집, 분리한 후 원거리 수송하고 이를 깊은 지반층 저장하는 것으로 고가의 처리비용이 소요되는 공정으로 탄소포집 공정 설치를 위해 넓은 부지가 소요되는 문제점이 있어 도심 LNG 발전소에 설치하기 부적합하다. 또한, 공정 특성상 흡수제의 재사용을 위해 재생탑에서 상당량의 스팀을 사용하여야 함에 따라 발전출력 저하에 큰 영향을 미치고 있다.

따라서, 도심 LNG 발전소는 좁은 공간에 설치 가능하고 발전출력에 미치는 영향이 적으며, 저렴한 비용으로 효과적으로 CO₂를 포집, 분리하고 이를 후처리 공정에서 고가물질로 전환할 수 있는 콤팩트한 CO₂ 포집 및 탄소자원화기술의 적용이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 도시에 위치한 LNG 열병합발전소의 연소배기가스를 대상으로 10톤/일급 CO₂ 포집공정 연계시 기존의 CO₂ 포집공정과 콤팩트 CO₂ 포집공정의 에너지 사용량을 분석함으로써 발전출력에 미치는 영향을 비교해 보고자 하였다. 기존 CO₂ 포집공정은 아민흡수탑(Absorption Tower), 흡수제 재생을 위한 스트리퍼(Stripper), 냉각기(Gas Cooler) 및 CO₂ 압축기를 포함한 CO₂ 액화(Liquefaction) 공정으로 구성하였으며, 콤팩트 CO₂ 포집공정은 가스압축기, 냉각기, 멤브레인 및 CO₂ 압축기를 포함한 CO₂ 액화공정으로 구성하였다.

연구결과, 기존 CO₂ 포집 및 액화공정보다 콤팩트 CO₂ 포집 및 액화공정이 도심 LNG발전소의 출력 저하에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났으며, 협소한 부지 여건을 고려할 때 콤팩트 CO₂ 포집공정에 도심 LNG 발전소의 CO₂ 포집공정으로 더 적합함을 알 수 있었다.

후기

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

농축 CO₂ 를 이용하는 간접 광물탄산화 공정에서의 온실가스 저감량 LCA 평가

LCA evaluation of greenhouse gas reduction in the indirect mineral
carbonation process using concentrated CO₂

최창식 · 김성현 · 박동규 · 조성수 · 장원석*

고등기술연구원 · 한국지역난방공사 미래개발원*

LNG 배가스로부터 CO₂를 포집하여 기체 분리막을 통해 CO₂를 농축하고 이를 간접 광물탄산화 공정으로 연계하여 탄산칼슘을 생산하는 방식으로 탄소를 고정하는 기술 개발이 수행되었으며, 이를 통해 간접 광물탄산화 공정을 수행하는 전과정 단계에서의 온실가스 배출량과 온실가스 저감효과를 산정하였고 최종적으로 발생하는 온실가스 배출량을 분석하였다.

간접 광물탄산화 공정의 온실가스 감축량을 평가한 결과, 배가스내 이산화탄소 1톤을 제거하는데 매우 미미한 수준의 온실가스가 배출되는 것으로 평가되었다. 전과정 단계 중 온실가스 배출에 가장 많은 영향을 차지하는 단계는 전기 사용으로 90% 이상을 차지하며, 다음으로 폐수처리 공정이다.

또한 회피효과로서 실제 자연 광물로부터 탄산칼슘을 생산하는 과정에서 발생하는 온실가스량을, 간접 광물탄산화 공정을 통해 탄산칼슘을 생산할 경우에 전과정 회피효과로서 반영하였을 때, 전과정의 온실가스 배출량은 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

Acknowledgement

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

저온수분포화상태 바이오가스에서의 응축수 발생억제 방법 비교 연구

A study on comparison of the methods to prevent the condensate formation in low temperature moisture saturated biogas

김훈 · 이중용 · 송봉용* · 김우철*

유진에너지기술(주), *한국지역난방공사 미래개발원

최근 정부의 국가온실가스저감목표 상향조정 및 탄소중립계획을 발표하면서 다양한 분야에서 온실가스 저감 및 탄소중립 목표 달성을 위해 화석연료의 사용을 줄이고 신재생에너지로 전환하려는 움직임이 매우 활발하게 일어나고 있다. 특히, 우리나라 온실가스 배출량의 상당 부분을 차지하고 있는 발전 분야에서는 태양광, 풍력, 연료전지 등과 같은 재생에너지를 활용한 전기 생산에 박차를 가하고 있는 한편 바이오매스 또는 바이오가스 등과 같이 탄소중립 연료로의 전환도 다각도로 검토, 활용되고 있다.

바이오가스는 크게 폐기물매립지에서 발생하는 매립가스(Landfill Gas)와 가축분뇨, 음식 폐기물 등 유기성 폐기물의 처리과정에서 혐기성 처리에 의해 발생하는 소화가스(Anaerobic Digestion Gas) 등이 있으며 주로 발전용이나 보일러 연료용으로 활용되고 있다. 혐기성 소화조에서 유기물의 혐기성분해에 의해 발생하는 소화가스는 수분이 포화된 습가스 상태로 발생한다. 이러한 습가스 상태의 바이오가스는 다량의 수분을 함유하고 있기 때문에 포집 및 이송과정에서 바이오가스 내에 포함된 수분을 제거해주지 않을 경우 가스의 활용 과정에서 여러 설비의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 바이오가스를 연료로 활용하기 위해서 일반적으로는 냉각제습 등의 방법을 적용하여 바이오가스의 수분을 제거한다.

본 연구는 바이오가스를 보일러 연료로 이용하는 과정에서 연료의 이송 중 지속적인 응축수의 발생으로 운영에 지장을 초래하는 사례가 있어 그 원인과 해결방안을 도출하기 위한 연구로 진행되었다. 해당 설비에 대한 조사 결과, 냉각제습 방법으로 절대습도를 낮추고 저온으로 바이오가스가 공급되는 상태에서도 보일러 전단의 정압설비 내부에서 응축수가 발생하여 설비운영에 지장을 초래하고 있었다. 바이오가스의 수분 함량을 측정한 결과, 정압설비의 전단과 후단에서 바이오가스의 온도는 일정하였으나 수분 함량은 0.8g/m^3 차이가 있는 것으로 분석되었다. 이는 바이오가스 내부의 수분이 온도 저하에 의해 발생된 것이 아니라 배관 내 가스의 흐름이 곡관부를 지나면서 배관 벽면과의 충돌 및 마찰 등에 의해 발생되었을 것으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같은 물리적 현상에 의한 배관내 수분 응축 현상을 해결하기 위한 방안으로서 추가적인 저온 냉각제습 방법과 가스 온도를 높여 상대습도를 낮춤으로써 응축이 발생하지 않도록 하는 방법에 대해 제습방법별 에너지 사용량 분석 및 장단점을 비교 분석하였다.

LNG 파이프라인 누출 감시를 위한 사례 연구 The Case Study of the Leakage Monitoring in LNG Pipeline

이아리, 송석용, 한윤섭, 심효민, 제갈석현
(주)에피텍

Ahri Lee, Sukyong Song, Yunseob Han, Hyomin Sim, Seokhyeon Jegal
AP Technologies Inc.

요 약

LNG 저장탱크, 밸브, 파이프라인의 안전성은 매우 중요하다. 특히 LNG 선적 또는 하역 시 사용되는 선박 파이프라인의 파열에 따른 LNG 누출은 기반시설에 위협적인 위험요소이다. 일반적으로 저장 탱크는 가스누설 LNG 외부의 열원에 의해 쉽게 증발되므로 저장탱크 주변에 보냉재를 이용하여 온도차를 유지하지만, 열유입에 의한 가스가 지속적으로 발생하므로 가스누출위험성이 높다.

본 연구에서는 LNG 파이프라인의 누출 및 모니터링을 테스트하기 위해서 6m의 LNG 파이프라인을 제작하여 테스트한다. 제작된 파이프라인에 삽입될 가스는 LNG가스와 유사한 질소(N_2)가스를 주입하여 가스의 유출 모니터링을 실시하였다. 제작된 파이프라인은 2겹의 보온재(Insulation), 내부 파이프 그리고 온도를 감지할 광케이블로 구성되어 있다. 광케이블은 온도변화를 감지하기 위해서 DTS(Distributed Temperature Sensing)을 이용하여 온도 변화를 감지한다. 연구단계는 크게 2가지로 구성된다. 파이프라인에 질소 삽입과 파이프라인 질소 누출로 나뉘어진다. 누출 단계에 있어서, 광케이블 설치 유무의 위치에 대한 온도값을 비교 분석한다.

질소 삽입 단계는 압력과 온도를 조절하여 삽입한다. 극저온 질소 삽입에 있어서는 파이프라인의 변형을 방지하기 위해서 질소 삽입시 온도 차이를 각각의 3m지점의 온도 변화가 일정 온도 이상의 온도차 40도(섭씨) 발생시 질소 삽입/중지를 반복하면서 온도를 저하시킨다. 온도는 -196°C 까지 극저온 상태를 유지하면서 질소를 삽입한다. 질소는 내부 탱크지름의 1/6지점까지 삽입하고, 온도는 광케이블을 통해서 온도를 모니터링 한다.

질소 누출은 광케이블 설치 유무에 따라서 구분한다. 파이프라인의 광케이블이 설치되지 않은 끝 부분과 광케이블이 설치된 파이프라인 중심(3m) 지점에 누출을 실시한다. 본 연구는 광케이블 설치 유무에 따른 온도변화와 누출된 장소에서 떨어진 거리에 따른 온도변화 분석한다. 비교 분석된 온도 데이터는 누출된 장소의 알람을 발생시킴으로서 파이프라인 파손에 따른 위험요소를 감지하여 사고를 감소시킬수 있다. 이러한 감지 시스템은 파이프라인의 균열에서 발생하는 가스 누수를 미연에 방지함으로써 대형사고 및 다른 응용분야에서도 효과적으로 적용된다.

본 논문은 2022년 중소기업 기술개발 사업의 과제비에 의하여 지원되었음.

주파수영역반사 측정을 이용한 XLPE절연 케이블 노화 수명 평가

Aging Condition Monitoring of XLPE Insulated Cable Using Frequency Domain Reflector

김한수 · 김진태 · 박혜성 · 정선철 · 정성윤*

한국수력원자력 중앙연구원, *한국수력원자력 한울본부

원자력 발전소의 안전성 관련 케이블은 기기검증 관련 기술기준(KEPIC END, IEEE Standard)에 따라 아레니우스(Arrhenius) 방정식과 같은 모델을 활용하여 정상운전 중의 사용수명을 모의하고 고에너지 배관 파단사고 발생시 고온/고압/고방사선 조건에서 정상적인 작동을 수행하여 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있도록 고온, 방사선, 화학, 기타 응력에 의해 노화되는 것을 가정하여 검증되어 있다. 원전용 케이블은 주기적인 감시 시험을 통한 고장진단은 수행되고 있으나 케이블의 노화상태를 수명기간동안 진단·감시·평가하는 프로그램은 없는 실정이다. 본 연구에서는 대표적인 케이블 노화 상태감시 방법 중 전기적 특성을 분석하고자 하며, 원전용 케이블에 대하여 노화 수명에 따른 주파수영역반사분석을 통한 케이블의 노화 상태 감시 평가를 하였다.

주파수영역반사분석(FDR, Frequency Domain Reflectometry) 기법은 다양한 주파수의 사인파를 시험 대상 케이블로 전송하고 전송된 입사파와 반사파를 모두 측정하는 비파괴 현장 전기 시험이다. 케이블 노화 평가 시스템은 케이블 회로의 측정 끝에서 관리할 수 있는 비파괴 주파수 영역 반사 측정 전기 시험을 수행하여 케이블의 상태와 무결성을 측정한다. 본 연구에서는 주파수영역반사 측정 장비의 $+$, $-$ 신호선을 케이블 코어 및 접지선에 연결하여 일정 주파수를 케이블에 전달하여 입사파와 반사파의 변화를 “Rho”의 관점에서 케이블을 따라 거리의 함수로 제시하여 케이블의 노화 상태를 감시하였다. 대상 케이블에 대한 원자력 기기검증 기술기준에 서술된 열적 노화 검증 시험을 수행하였으며, 10년 단위로 주파수영역 반사분석을 수행하였다. 비노화 시험편의 주파수영역반사 결과와 비교하여 열노화 10년, 20년 노화가 진행됨에 따라 Rho 값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 케이블내부에 침투해 있던 습분이 증발하여 절연저항이 증가하는 것으로 판단된다.

본 논문에서는 케이블 노화 상태감시 기법 연구를 위해 원자력발전소용 샘플 케이블을 대상으로 주파수영역반사 분석 및 열노화 시험을 수행하였다. 시험대상 케이블에 대하여 121℃ 노화 온도를 설정하여 60년 수명을 목표로 노화를 수행하고 있으며 10년 단위로 주파수영역 반사 측정 결과를 비교 분석하여 현재 30년 수명의 데이터를 취득하였다. 노화가 진행됨에 따라 케이블의 Rho 값이 비례적이지는 않지만 점차적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 본 연구를 통하여 주파수영역반사 분석이 케이블 노화 상태감시를 위한 타당한 분석 방법임을 확인했다.

XLPE 절연 케이블의 열화에 따른 비열 변화에 관한 연구

A Study on Specific Heat According to Deterioration of XLPE Insulation Cable

김건태 · 김한수 · 박혜성 · 정선철

한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹

원자력 발전소용 케이블은 수많은 장비에 대해 전력공급, 신호 전달 등의 목적을 가지고 다양한 용도로 사용된다. 원전 내부에 사용되는 금속 재질이 무한한 수명을 갖는다고 취급하는 것과는 달리 케이블과 같은 비금속 재료의 수명은 설계 또는 검증된 환경조건에 따라 수년 동안 신뢰할 수 있는 수동적이고 오래 지속되는 구성 요소로 간주 되고 있다. 따라서 가정된 조건하 일정 범위 내에서 노화되고 있는지 확인하기 위하여 케이블의 노화 추세를 예측, 평가 및 모니터링하는 ‘케이블 노화 상태감시(Cable Aging Monitoring)’ 기술이 필요하다.

본 논문에서는 케이블 열화에 따른 비열 변화에 대하여 확인하기 위해 고분자 화합물인 케이블 절연체 및 자켓에 대하여 시차주사열량계(DSC)를 이용하여 시험을 진행하였고 결과에 대한 내용을 기술하였다. 시험 데이터는 TA Instrument社의 DSC 25를 통해 취득하였고 장비에 대한 상세 사양은 그림1에서 확인할 수 있다. 그림2에는 전반적인 시험 진행 과정을 Flow chart 형식으로 나타내었다. 실제 원전에서 사용되는 케이블을 취득하여 방사선조사를 수행한 후 한국수력원자력 중앙연구원 내환경검증실험실이 보유한 열챔버를 통해 열 노화를 진행하였다. 노화 과정은 아레니우스 방정식을 이용하여 가속인자를 설정하여 진행하였으며 노화 과정이 끝난 시편은 액체질소 분위기에서 동결분쇄하여 분말 형태로 제작하고 취득한 시편을 통해 DSC 장비를 사용하여 비열(C_p)를 측정하였다.

케이블 시편 9종에 대해서 최대 20년까지 노화를 수행하였으며 비열은 노화가 진행될수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

추후 실제 원전의 운전수명을 고려하여 노화 기간을 늘려 연구를 진행하고 결과를 도출해야 할 것으로 사료되며 용융점(T_m)과 산화유도시간(OIT)와 같은 화학적 특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

SPECIFICATION	
항목	성능
Manufacturer	TA instrument
Model	DSC 25
Temperature Range	-90 to 550 °C
Temperature Accuracy	±0.1 °C
Heating Rate	0.01 to 100 °C/min
Pressure Range	Vacuum(1Pa) to 7MPa
Atmosphere	Nitrogen, Oxygen
Dynamic Heat Flow Range	± 500mW
Modulated DSC	0
Auto Sampler	54-position

그림1. DSC 25 Specification

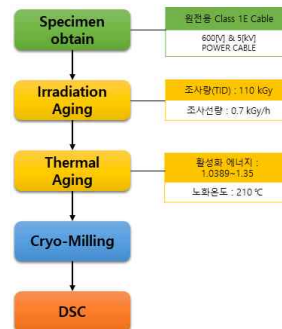


그림2. 시험 진행 과정

제어봉 삽입이력 반영한 탄력운전 성능평가

Performance Evaluation on Flexible Operations based on Control Rods Insertion History

유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 100-50-100% 출력변동인 전형적인 일일부하추종운전과 같이 탄력적인 출력운전을 수행할 경우 제어봉과 봉소농도조절을 이용한다. 이 중 제어봉의 잦은 사용은 핵연료의 불균형연소를 유발시켜 출력분포와 같은 노심의 핵적특성에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 이러한 일일부하추종운전 이력이 반영된 노심연소모델을 이용하여 탄력운전을 수행할 경우 운전성능에 대해 평가하고 기존 원자력발전소 연소모델 결과와 비교/검토를 수행하였다.

일일부하추종운전 이력을 갖는 노심연소모델을 만들기 위해서 초기노심에서부터 제어봉을 사용하여 470MWD/MTU 동안 출력을 50%로 낮추어 연소시키고 530MWD/MTU 동안 100% 출력으로 연소시킨다. 이러한 연소사이클을 각 주기말까지 반복한 후 재장전노심을 설계한다. 재장전노심에서도 같은 사이클로 노심연소를 수행한 후 수차례 재장전설계를 반복하여 평형노심을 설계한다. 그리고 이렇게 생산된 평형노심을 100-50-100% 일일부하추종운전 제어봉 삽입이력이 반영된 노심연소모델이라 선정하였다. 한편 제어봉이 사용되지 않는 100%출력의 노심연소를 갖는 평형노심을 ARO(All Rod Out) 노심연소모델로 선정하였다. 상기 두 노심연소모델의 탄력운전 성능평가를 위해 선행연구에서 개발한 모델예측제어 방법을 사용하는 제어봉/봉소농도 제어알고리즘을 적용하여 일일부하추종운전 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 2시간 동안 50% 출력감발, 6시간 동안 유지, 2시간 동안 50% 출력이 증발하는 전형적인 일일부하추종운전이며 시뮬레이션을 통해 출력, 봉소농도, 축방향출력분포 및 제어봉들의 움직임을 복합적으로 비교 평가하였다. 두 노심연소모델의 성능평가결과 50% 출력에서 제어봉 삽입위치에 작은 차이가 발생하였고 이 차이로 인하여 축방향출력분포도 차이를 발생하였다. 이러한 차이의 근본적인 원인은 제어봉삽입운전으로 인한 중성자누설량 및 축방향 연소도 변화 등에 기인한 것으로 판단된다. 결론적으로 일일부하추종운전 이력이 있는 노심과 전출력 연소이력을 갖는 노심은 탄력운전 성능면에서 큰 차이가 없음을 확인하였다. 향후에는 일일부하추종운전 노심연소모델을 이용하여 다양한 연소도 및 출력감발률 등을 적용하여 탄력운전성능을 평가할 계획이다.

산화현상을 활용한 케이블 열화수명 평가

Evaluation on Thermal Ageing of Cable using Oxidation Measurement

박혜성, 김한수, 김건태, 정선철, 박세일

한국수력원자력(주)

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

원자력발전소는 연료교체 주기인 18개월 마다 중요설비인 경우 점검 및 교체를 수행한다. 저전압 케이블은 절연저항을 측정해 100MΩ 이상 나오는지 확인을 하지만 10MΩ 측정된다고 문제가 있으니 교체하는 것으로 결론 내리기 어렵다. 또한 절연저항 시험은 해상도가 낮아서 노화에 따른 미묘한 변화 추세를 확인하기 어렵다. 주기교체의 경우 퓨즈는 종류에 따라 2주에서 4주기, 밸브 포지셔너는 4주기 등 중요설비는 교체 주기를 가지고 있지만 저전압 케이블은 별도의 기준이 없다.

적외선 분광법은 유기분자의 적외선 특정 주파수를 흡수하는 특성을 활용한 재질분석 장비이다. 산업계에서는 미지 물질의 종류 판독에 사용되고 있다. 분자는 구성 물질과, 결합 종류에 따라 신축진동, 굽힘진동 등 진동 양태가 다르다. 이런 분자에 적외선을 조사했을 때 각 분자는 고유 진동 주파수를 흡수한다. 이 에너지에 대응하는 적외선 파수를 표시하는 장비가 적외선 분광기이다. 흡수율이 증가하는 파수 구간을 확인하면 분자의 종류를 알 수 있고 흡수율의 강도를 확인하면 분자의 농도를 파악할 수 있다.

절연저항, 내전압 등 전통적인 케이블 성능 측정 방식이 아닌 적외선 분광법을 활용하면 케이블의 노화가 진행됨에 따라 성능에 직접적인 영향을 미치는 절연체의 구성 물질의 변화를 측정하여 케이블 성능을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 산소원자와 결합된 분자구조의 농도 증감을 단독으로 확인하거나, 케이블 절연체 주요 분자구조의 농도와 산소원자와 결합된 분자구조의 농도 비율에 대한 변화 추세를 확인하면 열화수명에 관련된 절연체의 산화 상태를 평가할 수 있다.

주요 제작사 케이블을 대상으로 가속 열노화를 통해 인위적으로 10년 단위로 노화를 시킨 후 적외선 분광법으로 측정해 산화상태를 확인하고 이를 케이블의 수명 평가에 활용할 수 있는지 검토하고자 한다.

특허정보 분석을 이용한 국내의 수소 산업 현황 비교 및 시사점

최진석 · 황영은

특허청 동력기술심사과

우리 정부는 2018년 8월 “혁신성장 전략투자 방향”¹⁾에서 수소경제를 선도국가로 도약 가능한 3대 투자 분야 중 하나로 선정한 바 있다. 나아가, 2019년 1월 “수소경제 활성화 로드맵”²⁾, 2020년 2월 “수소경제 육성 및 안전관리에 관한 법률”³⁾을 마련하고, 수소 전주기 원천기술 개발, 수소 충전인프라 구축, 수소차 보급, 수소도시 건설 등을 주요 국정과제로 추진하고 있다.

주요국들 역시 수소 생태계 구축 및 관련 산업의 선점을 위한 치열한 기술 경쟁을 벌이고 있지만, 아직까지 수소산업은 수소연료전지, 수소발전 등의 일부 분야를 제외하면 태동기에 머물러 있다. 기후변화에 대응하기 위한 미래에너지원으로서의 수소에너지의 중요성이 점차 명확해 지고 있는 상황에서 우리나라 또한 수소산업 생태계 조성 및 기술경쟁력 제고를 위해서 정부의 적극적인 지원과 함께 시장 참여자들의 다각적 협력 방안을 마련할 필요가 있다.

한편, WTO는 TRIPs를 통해 지식재산권 보호 기준을 통일하고 권리의 보호를 강화하고 있는데, 연구개발 현장에서 특허정보를 통해 선행기술을 미리 파악하고 미래 유망기술을 탐색하는 특허조사는 기술 개발을 위한 선결조건이 되어가고 있다. 특히, 산업 생태계 구축을 위해서 국가간 협업이 필수적인 수소분야에서 자국의 자원 또는 기술에서의 우위를 활용한 국제적 협업 노력과 동시에 수소산업 주도권을 확보를 통해 연관 산업의 동반성장을 도모하고 있다. 이러한 시점에 방대한 기술정보를 포함하고 있는 특허정보는 이러한 상황의 분석 및 대응에 중요한 지표가 될 것으로 기대된다.

본 연구는 주요국의 수소 관련 정책과 수소 생태계 현황을 점검하고, 국내 산업의 특성과 관련된 특허정보를 추출하여 정책적 관점에서부터 세부 기술개발 방향에 이르는 수소산업의 새로운 분석방법을 제시하고자 한다. 또한, 특허정보를 중심으로 연관 산업의 발전과정을 분석·비교하여 수소산업과의 접목점을 찾아내고, 국내 수소산업의 특성과 수소기술의 개발 방향에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

통상적으로 특허정보 분석은 특정 지표만을 이용하여 국가·산업을 대상으로 하는 거시적인 수준의 평가수단으로서의 한계를 갖는다. 본 연구에서는 산업분석을 기반으로 개별 특허지표인 AIMS+(Patent Activity, Intensity, Market-power, Strength) 분석⁴⁾을 병행함으로

1) 기획재정부, *Innovation Platform : 혁신성장 전략투자 방향*, 2018.

2) 관계부처합동, *수소경제 활성화 로드맵*, 2019.

3) 산업통상자원부, *수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률*, 2021.

4) 서규원, *특허지표(AIMS+)를 활용한 주요국의 기술경쟁력 분석 방법론*, 2010.

써 그러한 한계를 극복하고자 시도하였다. 본 연구를 통해 수소 생태계 조성을 위한 특허정보 활용 및 산업분석과 연계된 특허정보 분석 방법론 구성에 기여할 것으로 기대된다.

표1. AIMS+ 평가항목

평가항목	평가지표 및 내용
특허활동도	▪ (절대적) 특허출원건수 - 연구주체의 출원활동을 통해 R&D 활동 상태를 조사
특허집중도	▪ (상대적) 특허출원건수 - 특정주체가 다른 주체와 비교하여 상대적으로 어떠한 기술분야에 R&D 활동을 집중하고 있는가를 조사 - (특허출원인의 특정기술 전체 특허수/특정기술 전체 특허수)/(특정출원인의전체출원건수/전체특허수)
특허시장력	▪ 패밀리특허수 - 해당출원인 평균 특허 Family 수/전체 평균 특허 패밀리 수
특허경쟁력	▪ 삼극특허수 - EPO, JPO, USPTO에 모두 출원된 특허건수를 통해 특허경쟁력을 조사
특허영향력	▪ 피인용특허건수 - 특허가 얼마나 응용되고 있는가를 통해 특허영향력을 조사(인용한 특허건수/전체 등록 특허건수)

에너지시스템통합 및 섹터커플링에 대한 전세계 연구문헌
키워드 연결망분석의 시사점

Implications of Keyword Network Analysis in Global Research
Literatures on Energy System Integration and Sector Coupling

Nyun-Bae Park · Mina Sung · Won-Yong Lee

R&D Planning and Coordination Division, Korea Institute of Energy Research

As the share of variable renewable energy such as solar and wind power increases, reliable energy system integration or sector coupling becomes an important issue. This paper searched for system integration or sector coupling as keywords in the energy subject using the Scopus database, and analyzed 500 papers from 1993 to 2022. The search date is December 1, 2021. A social network analysis was conducted on the keywords of the literatures. The conclusion is as follows. First, literatures related to system integration or sector coupling are increasing as renewable energy has increased rapidly and is expected to increase further in the future. Second, those literatures are being actively published in China, the United States, and European countries, where the competitiveness and deployment of renewable energy technologies are leading. Third, those literatures deal with a wide range of issues such as maximizing power generation by optimizing various renewable energies, storing excess electricity or converting it into other energy such as hydrogen. Fourth, those literatures are actively researching areas such as energy conversion, energy system modeling, environment, power system, energy storage, and optimal system integration.

Acknowledgements : This work was conducted with the support of the Korea Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (NP2021-0093).

열부문 에너지효율향상 의무화제도(EERS) 현황 및 개선방안
Current status and improvement of heat Energy Efficiency Resource
Standards (EERS)

진태영

에너지경제연구원 집단에너지연구팀

본 연구는 국내에서 2018년에 한국전력공사의 시범사업으로 시작된 에너지효율향상 의무화 제도(EERS)를 대상으로 한다. 국내 EERS 제도는 2021년부터 본사업에 착수할 예정이었으나, 에너지이용합리화법의 개정 난항과 탄소중립 정책 수립의 중요성으로 인해 지연되고 있으며, 다년간의 시범사업을 거치면서 EERS 제도의 국내 도입에 많은 문제점이 관찰되었다. 이러한 상황에서 정책연구를 통해 제도 개선안을 도출하고, 본사업 시행에 앞서 제도 개선안을 도출해야 한다. EERS 제도에는 크게 다섯 가지의 기대효과(①최대부하 경감, ②환경 편익, ③에너지효율 투자환경 조성, ④경제성장 및 일자리 창출, ⑤에너지 안보 개선)가 존재하는 것으로 선행연구들에서 보고하고 있다. 이 중 에너지효율 투자환경 조성이 급선무로, EERS 제도의 정착으로부터 비용효과적인 에너지효율 투자환경이 조성되고, 이로부터 지속가능한 에너지효율화로부터 타 기대효과가 발생하는 선순환 고리가 형성될 수 있다. 전력, 열, 가스에 대해 각각 에너지공급사가 의무대상자로 지정되어 있으나 입지 차이로 인해 제도 이행에 있어 경제적 타당성이 다르며 부작용이 발생하기도 한다. 본 연구에서는 에너지원별 국내 EERS 제도 분석을 통해 이러한 문제점을 확인하고, 목표설정, 인센티브 구성, 가중치 제시 등을 통한 제도개선 방안을 제시한다.

** 본 연구는 2021년도 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었습니다.

황화구리인듐/황화몰리브데넘 이중접합 반도체 전극을 이용한 광전기화학적 수소생산

채상윤 · 윤노영^{*} · 박은덕^{*}

아주대학교 에너지시스템 학과, ^{*}한국과학기술연구원 청정에너지연구센터

광전기화학적 수소생산은 광에너지와 빛의 흡수가 가능한 반도체 광전극을 이용하여 물로부터 수소를 생산하는 기술로, 재생에너지인 태양광과 친환경적인 물을 이용하여 탄소중립을 실현할 수 있는 잠재력을 가진 기술이다. p형 반도체 황화구리인듐 (CuInS_2)은 로서 광전기화학적 수소생산에 적절한 밴드 에너지 위치와 가시광흡수에 유리한 밴드갭을 가지고 있으므로 반도체 광환원전극으로 활용될 수 있다. 그러나 황화구리인듐은 빛에 의해 여기된 전자-전하 쌍이 반도체 내에서 빠르게 재결합 하여 흡수된 광자를 효과적으로 활용하지 못하는 문제가 있으므로 광전기화학적 수소생산의 효율을 높이기 위해서는 이를 해결하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 n-형 반도체인 황화몰리브데넘 (MoS_x) 을 황화구리인듐 박막 표면에 e-beam 혹은 전기증착법으로 증착시켜 이중접합을 형성함으로써 p-n 접합을 유도하여 수소 생산 효율을 높일 수 있음을 확인하였다. 광조사 조건 하에서 무정형의 황화몰리브데넘이 증착된 광전극은 약 300mV 이상의 개시전위 향상을 나타내었고 이는 황화몰리브데넘과 황화구리인듐의 p-n 접합이 추가적인 공핍층을 유도하여 광전극의 광전압을 크게 향상 시킨 것임을 확인하였다. 또한 e-beam 및 황화 과정 후 생성된 황화몰리브데넘은 광전기화학 조건에서 촉매 적 특성이 활성화 됨으로서 활성화된 고유의 우수한 수소 발생 특성으로 인해 조촉매가 없이도 높은 수소 발생이 가능함을 확인하였다. 활성화된 황화몰리브데넘의 구조분석을 통하여 향상된 촉매 특성의 원인을 조사하였다. 이러한 황화몰리브데넘의 특성 및 결과는 향후 수소생산을 위한 광전극의 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

다양한 균열 모드에 따른 수소 압력용기의 수소취성 기반 예상수명 평가

Hydrogen Embrittlement Based Life Expectancy Evaluation of Hydrogen Pressure Vessels according to Various Crack Modes

김정환 · 이화영 · 이민정 · 이재훈 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소 압력용기의 설계에 있어서 수소취성의 영향을 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 수소취성이란 금속이 수소와 다양한 형태로 접촉하여 미세조직이 변형되고 깨지기 쉬운 형태로 되는 것(균열 생성)을 말하며, 일정 이상의 응력조건에서 압력용기 운전 등의 피로조건과 함께하면 균열의 진전이 생기며, 저장 목적의 압력용기에 치명적으로 작용하는 손상기구이다. 현재 국내에 도입된 수소 압력용기 대부분은 심리스(seamless) 압력용기이며, 최대 90MPa의 압력조건에서 운전된다. ASME에서는 41MPa 이상의 고압수소 심리스 압력용기는 수소취성 평가가 필요한 것으로 말하고 있어서, 국내 설치된 압력용기 대부분은 수소취성을 고려한 설계를 해야 한다. 수소취성 평가는 파괴역학과 피로파괴역학을 기본으로 하므로, 균열의 형태를 예상하여 정하고, 평가를 실시해야 한다. 균열 관련하여 API/ASME에서는 55종의 균열 모드를 평가할 수 있으며, 압력용기의 형태에 해당하는 cylinder 모드는 19종에 해당한다. 균열의 방향 길이방향(l-dir)/원주방향(c-dir)의 구분과 균열의 형태 무한크기(infinite)/표면 반타원형(surface semi-elliptical)/심부 타원형(elliptical), 응력의 형태 내부압력(internal pressure)/4차응력(4th polynomial stress) 등으로 구분된다.

수소 압력용기의 내수소취성 설계에 있어서 몸통 부분은 길이방향의 균열이 응력을 가장 크게 받으므로 균열의 길이 방향 모드는 필수로 평가해야 하며, 반타원형 균열 형태로 일반적으로 평가한다. 이 외에 무한크기를 갖는 결함모드도 평가 가능하다. 또한 플랜지와 연결되는 목부분의 나사부 역시 별도로 평가하여, 몸통 부분의 예상수명과 비교하여 더 작은 값을 예상수명으로 한다. 이에 본 연구에서 다양한 균열 형태를 상정하여 수소 압력용기의 예상수명을 평가해보고자 한다. 사용되는 압력용기의 제원은 국내에 설치된 압력용기를 대상으로 하였다.

액화수소저장탱크 단열시험평가 방법론 및 액화질소→수소 변환에 대한 연구
Study on Insulation Performance Test Methodology and Liquefied
Nitrogen→Hydrogen Conversion for Liquefied Hydrogen Storage Tank

이민정 · 김수현 · 김정환 · 이재훈 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 지구온난화 및 화석연료의 고갈 등에 의한 해결 방안으로 친환경 에너지원인 수소에 사용에 대한 관심이 많아지고 있다. 2021년 11월 국내에서는 “제1차 수소경제 이행 기본계획”의 발표를 통해 대량의 청정수소 활용이 예상되는 수소 액화플랜트 구축을 2030년까지 국내기술 확보를 목표로 하고 있으며 관련연구는 산업통자원부 및 국토교통부 등 여러 정부 부처를 통해 진행하고 있다.

본 연구에서는 액화수소플랜트에 적용할 수 있는 액화수소저장탱크를 개발하고 있다. 현재 0.6m³급 격자구조의 저장탱크(LPV: Lattice Pressure Vessel) 개발을 완료하였고, 2023년까지 18m³급 저장탱크 2기를 액화수소플랜트에 적용할 계획을 갖고 있다. 액화수소저장탱크의 원활한 적용을 위해 증발가스(BOG)의 발생량을 조절이 중요한 문제이다. 본 연구에서는 저장탱크의 액화수소플랜트 적용을 위한 단열시험 관련 해외기준을 분석을 통해 시험 방법을 고찰하였고, 증발가스 발생을 최소화하기 위해 저장탱크 내조와 외조사이에 다층단열(Multi Layer Insulation)을 적용한 0.6m³ 격자형 저장탱크의 액화질소에 증발 가스 발생률을 측정하여 단열성능을 확인하였다. 이를 통해 액화수소저장탱크를 적용하기 위한 적절한 단열 성능 시험장치의 구성 및 시험방법을 제시하고자 하며, 액화수소를 저장한 상황을 가정하여 액화질소와 액화수소의 상관관계를 확인하고자 하였다.

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

스프레이 기법을 이용한 슬러시 수소 생산 공정에서 공급 조건 변화에 의한
슬러시 수소 생산량과 열역학적 해석에 관한 연구

Thermodynamic Analysis about Variable Supply Condition on Slush
Hydrogen Production Process Using Spray Method

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

친환경 미래 자원으로 주목받는 수소는 해마다 증가하는 수소 수요를 만족하기 위해 최근 수소를 해외에서 수입하는 과정을 검토 중에 있으나 수소의 밀도가 매우 낮아 적재량이 제한적인 이슈가 있다. 이를 개선하고자 밀도가 800배 이상 큰 액체 수소의 형태로 보관하여 운송하는 방법이 논의되고 있다. 하지만 액체 수소 또한 액화천연가스(LNG)와 비교하여 밀도가 1/6 수준으로 대용량 저장에 불리하며 비등점이 90 K이상 낮아 쉽게 기화되는 특징이 있다. 액체 수소의 낮은 밀도와 비등점은 액체 수소가 대용량 그리고 장주기 저장에 취약하다는 것을 보여준다. 본 연구에서는 기존의 액체 수소보다 밀도가 15%이상 높아 대용량 저장이 가능하며 18% 높은 열용량으로 장주기 저장이 가능한 액체/고체(slush) 수소를 스프레이 기법으로 생산하는 방법을 소개하고 있다. 또한, 액체 수소의 공급 압력과 온도에 따라 공급하는 액체 수소의 단위 질량 당 액체/고체(slush) 수소의 생산량과 상변화에 필요한 총 열량의 변화를 비교하였다.

본 논문에서는 압력과 온도를 각각 1.3 bar부터 6 bar 그리고 삼중점부터 비등점까지 공급 압력과 온도를 변화시켜 단위 질량 당 액체/고체(slush) 수소의 생산량과 생산에 필요한 총 열량을 비교하는 연구를 수행하였다.

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

300 MWe급 수소/천연가스 혼소 복합화력의 경제성분석

Techno-economic analysis on 300 MWe class combined cycle power plant(CCPP) fueled by natural gas/hydrogen mixture

박혜민 · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 황성현 · 권도현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

지난 10년간 대기 중 이산화탄소의 농도는 지속적으로 상승하고 있으며, 400ppm을 넘어 매 년마다 2.4ppm씩 상승하고 있다. 최근 발표된 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 5차 보고서에 따르면 지난 133년간 지구 평균 기온은 0.85 deg.C 상승 하였다. 지난 1만년 동안 지구온도가 1 deg.C 이상 변한 적이 없었던 점을 고려하면 지구온난화가 얼마나 빨리 가속화되는 지 알 수 있다. 특히 우리나라는 지난 100년간 연평균 온도가 1.5 deg.C 상승하였으며, 이는 지구 평균 상승온도의 2배에 달하는 수치이다. 이를 해결하기 위해 친환경 에너지원에 대한 관심이 증대되고 있으며, 특히 수소 연료는 연소과정에서 수분만 배출하기 때문에 친환경 연료로 평가받고 있다. 가스터빈 복합 화력은 현존하는 발전시스템 중 가장 높은 발전 효율을 기대할 수 있는 시스템으로 높은 신뢰도와 함께 빠른 부하추종으로 인해 발전 산업에 큰 기여를 하고 있다. 하지만 기존 가스터빈 복합 화력은 천연가스를 이용하기 때문에 이산화탄소를 지속적으로 배출하고 있으며, 이를 저감하기 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 수소와 천연가스를 혼소하여 300 MWe급 가스 터빈 복합 화력의 발전 출력을 증대시킴과 동시에 배출되는 이산화탄소를 저감하는 기술의 경제성 분석과 사업성 분석을 수행하였다. 기존의 천연가스 복합 화력과 비교하여 수소/천연가스 혼소 복합 화력의 균등화 전력원가에 대한 경쟁력 확보를 위해서는 비교적 저렴한 수소를 확보하는 것이 필요하다. 이에 따라 혼소비율과 수소원가에 따른 사업성 분석을 수행하고, 내부수익률과 순현재가치분석, 투자비 회수기간을 산정하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20213030020280)

장주기/대용량 수소저장을 위한 액체/고체기반 slush 수소의 저장 비용 분석 A Economic Analysis on Slush Hydrogen Containing Liquid and Solid phase for Long-term and large-scale Storage

박성호 · 이창형 · 류주열 · 박혜민 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

탄소중립실현의 세계적인 추세 속에 화석연료기반의 에너지 패러다임을 전환하기 위한 방안으로써 친환경 에너지원인 수소에너지의 활용이 가속화되고 있다. 수소는 에너지밀도가 높고 화석연료로부터 추출하거나 재생에너지원의 전력으로부터 청정하게 생산될 수 있기 때문에 탄소중립실현을 위한 대안으로 평가하고 있다. 하지만 수소는 분자량이 작고 밀도가 상대적으로 낮아 대용량 저장을 위해서는 고압상태로 압축(Compression)하거나 액화(Liquefaction)하여 저장하는 방안이 고려중이다. 기체 압축저장(700bar 기준, 41 kg/m^3)에 비해서 액화저장(71 kg/m^3)은 저장밀도를 증가시킬 수 있지만, 20K의 낮은 비등점으로 인해서 높은 수준의 단열과 증발가스(Boil-off gas)에 대한 처리가 필수적이다. 액체/고체 기반의 slush 수소는 고체가 가지는 융해열(Heat of fusion)로 증발가스 억제와 동시에 저장밀도를 약 15% 이상 향상시키고, 진공단열층을 비교적 줄일 수 있기 때문에 효율적인 수소저장기술로 부각되고 있다.

본 연구에서는 액체/고체 기반의 slush 수소 저장 기술의 대용량/장주기 저장에 따른 비용 분석을 수행하고, 액체 수소가 동일한 조건의 장주기/대용량 저장에 소요되는 에너지 비용을 산정하여 비교하였다. 결론적으로 저장 부피의 경우 최대 15% 이상 탱크 용적을 감소시킬 수 있으며, 뿐만 아니라 시설투자비는 약 27% 이상 감소(재액화 시스템 비용 포함)하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 계산된 단위 질량당 저장비용($\$/\text{kg-H}_2$)은 최대 33%까지 절감되는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 액체수소의 일부를 고체수소로 전환하는데 에너지와 비용이 소요되기는 하지만 저장밀도 증가에 따른 탱크용적감소와 열용량 증가에 따른 진공단열층 감소와 증발가스 저감은 시설투자비와 재액화 등에 소요되는 에너지비용 절감으로 인해 기존 액체수소 저장 방식에 비해서 경제적인 것으로 확인되었다.

감사의 말 : 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제 번호 21CTAP-C163636-01)

풍력발전 예측 모형 개발을 위한 기상정보 적용성 평가

A evaluation of weather information in forecasting model of wind power generation

류주열 · 박성호 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

환경을 보호하고 지속가능한 에너지 시장을 구축하기 위해 세계 많은 국가들이 재생에너지 비중을 급격히 늘려나감에 따라 태양과 바람을 이용한 에너지 생산의 중요성이 부각되고 있다. 특히 IRENA에서는 2050년 재생에너지를 이용한 세계 전력 생산 비중을 61% 수준으로 예측하며 지속적인 성장을 예상하고 있는 상황이다. 이에 따라 많은 연구기관에서 재생에너지의 발전량을 예측하기 위한 다양한 모형을 연구 중에 있으며 시계열 데이터를 이용한 자기회귀이동평균(ARMA, Auto Regressive Moving Average) 모형이나 자기회귀누적이동평균(ARIMA, Auto Regressive Integrated Moving Average) 모형을 대표 모형으로 활용하였다. 또한 바람의 경우 시간의 추이에 따라 변동성이 매우 급격하게 변하므로 이분산성을 고려한 (GARCH, Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedas) 모형을 이용하거나, 다중선형회귀(MLR, Mutiple Linear Regression) 모형을 이용하여 풍력 발전량에 영향을 미치는 다양한 기상 변수를 예측에 활용하는 방식을 보여주었다. 그러나 앞서 소개한 모형들의 경우 월단위에서 시간단위의 전력 생산을 예측하는데 사용되었으나 매순간 출력이 변하는 풍력 발전의 특성을 고려한다면 분단위의 예측 모형이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 풍력 발전기 주변의 기상 정보와 운전 데이터를 이용한 다중선형회귀 모형을 제안하였으며, 10분 단위로 변하는 풍력 발전기의 운전 자료를 활용해 예측 모형의 오차를 검증하였다. 아울러 예측 모형에 사용되는 변수의 민감도 분석과 운전 자료 분석을 통해 예측력을 개선하기 위한 방안에 대하여 논하였다.

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

반잠수식 부유식 해상풍력 터빈의 계류 연결부 위치에 따른 거동 특성 연구
A Study on the Dynamic Behavior of Semi-submersible type Floating
Offshore Wind Turbine by Fairlead Position

배윤혁* · 김동은 · 이연빈

*제주대학교 해양시스템공학과, 제주대학교 풍력특성화협동과정

심해에 설치되는 부유식 해상풍력 터빈은 부유체의 위치 유지를 위하여 다양한 형식의 계류 시스템이 연결 된다. 계류 시스템의 형태는 부유체의 종류, 설치 해역의 수심과 주변 환경, 운용 목적 등에 따라 설계 단계에서 결정하게 되며 부유체의 거동 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 부유식 해상풍력 터빈의 경우, 계류 시스템의 동적 거동 특성은 부유체의 운동, 나아가 상부 풍력터빈의 발전 성능과도 직결되므로 계류 시스템의 설계 단계에서부터 구조 및 피로 안정성과 함께 동적 거동 특성도 면밀히 검토되어야 한다. 전통적인 석유시추용 해양 플랫폼의 경우 계류 시스템은 부유체의 하부에 연결되는것이 일반적이거나, 최근 부유식 해상풍력 터빈의 경우, 저수심 환경과 유지보수의 편의성 등을 고려하여 부유체의 상부에 연결하는 경우도 있다. 이에 본 연구에서는 계류 시스템의 연결부 위치에 따른 부유체 및 상부 풍력 터빈, 계류 시스템의 동적 응답 특성을 확인하기 위하여 시간영역의 연성해석을 수행하였다. 시간영역의 연성해석은 국내 동해 해역에 설치 예정인 반잠수식 부유체를 대상으로 터빈의 운용조건 및 극한조건의 바람, 파도, 조류 조건을 적용하여 수행하였다. 해석 결과 계류 연결부의 위치에 따라 부유체의 거동, 계류선의 강성 특성 및 장력 응답에서 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

Status of SnS solar cells

Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Gedi Sreedevi · Ignatius Andre Setiawan · Park
Hyeseon · Shin Yeonju · Kim Boyeon · Kim Dong Hyo · Salh Alhammadi · Woo Kyoung
Kim*

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

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

Tin monosulfide (SnS) is a promising absorber material for thin film solar cells and it has garnered tremendous interest because of its fascinating properties including suitable band gap, high absorption coefficient, earth abundance, and excellent stability. Over the past several years, intensive efforts have been made to enhance the photovoltaic efficiencies of SnS solar cells using many promising approaches including interfacial engineering, surface passivation, additive engineering, and band-gap engineering of the charge transport layers and active light absorbing SnS materials. Recently, doping strategies in SnS light absorbers have gained attention as they promise to play important roles in controlling band gap, regulating film morphology, and passivating grain boundaries, and thus resulting in enhanced carrier transport, which is one of the most challenging issues in this cutting-edge research field. Here, an overview of SnS thin films and solar cells and their fundamental properties are provided. Recent advances in doping strategies in SnS thin films and solar cells are then discussed to provide in-depth understanding of the effects of various dopants on the photovoltaic properties of SnS materials. In conclusion, the personal perspectives and outlook to the future development of SnS solar cells are provided.

Investigating the effect of bicarbonate ion for the photoelectrochemical production of H_2O_2

Adeel Mehmood · 채상윤 · 박은덕*

아주대학교 에너지시스템학과

In energy and environmental research, hydrogen peroxide has drawn increasing attention due to its wide applications. Compared with the traditional anthraquinone process, the electrochemical (EC) and photoelectrochemical (PEC) synthesis of H_2O_2 is environmentally friendly with renewable energy source. Inspired by the photovoltaic and electrolysis technology, the photoelectrochemical water oxidation system has been tuned to produce a high-value-added product and be a competitive strategy for solar-to-fuel conversion. Water oxidation by two-electron is a promising route for the efficient production of hydrogen peroxide. Most of the recent research work focused on the designing and development of a novel catalyst for two-electron water oxidation. However, the effect of electrolyte species determining the selectivity of water oxidation has not been investigated. Herein, we performed the photoelectrochemical and spectroscopic experiments for the confirmation of HCO_3^- as a redox catalyst for the selective $2e^-$ -water oxidation reaction. The faradaic efficiency of the H_2O_2 peroxide production increases exponentially with decreasing the applied voltage suggesting the involvement of peroxocarbonate species (HCO_4^- or $\text{C}_2\text{O}_6^{2-}$) in $2e^-$ water oxidation reaction in carbonaceous electrolyte system. Our finding establishes that, H_2O_2 production rate significantly depend on the concentration of HCO_3^- ion which serves as redox catalyst at relatively low potential.

경제성 빅데이터를 이용한 일단위(Daily-scale) 전력원가(Levelized Cost of Electricity)분석 및 P2G 운영전략도출

A Analysis on P2G Operating strategies and Levelized Cost of Electricity by Daily scale economic analysis methodologies

박성호 · 이창형 · 류주열 · 박혜민 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

탄소중립사회로의 전환을 위해서 재생에너지원의 확대보급이 가속화됨에 따라 재생에너지원의 간헐적 전력공급 특성은 전력계통의 신뢰도에 영향이 있을 수 있다. 재생에너지원의 간헐적 전력공급 특성으로 인해 전력계통의 신뢰도가 저해되는 문제를 방지하기 위해서 리튬이온 배터리기반의 ESS(Energy Storage System)이 활용되고 있으나, 재생에너지원의 확대 보급이 가속화됨에 따라 대용량/장주기 저장할 수 있는 Power to gas 기술이 각광받고 있다. Power to gas 기술은 급변하는 재생에너지원과 전력계통간의 수용용량차이로 발생하는 잉여전력을 수전해(Water electrolysis)를 통해 수소로 생산/저장한 후 이를 발전용 연료 전지 혹은 수소연료전지 모빌리티 등에 활용하는 대표적인 섹터커플링 기술이다. 하지만 기상 조건에 따라 급변하는 재생에너지원의 출력과 전력계통의 수요와 공급을 고려한 계통 수용성을 즉각적으로 판단하여 Power to gas 설비를 운영하기는 어렵다. 하지만 전력 수요와 공급은 실시간 계통한계가격(SMP)을 통해 간접적으로 예측이 가능하고, 재생에너지원의 실시간 전력원가를 분석한다면 이들의 비교를 통해 Power to gas의 운영전략 도출이 가능하다. 하지만 이러한 가정이 성립하기 위해서는 반드시 연단위(Year-scale)의 총자본회수비용을 일단위로 분할하고 이들을 현가 환산하여 균등화하는 방법론과 연산과정이 필요하다.

본 연구에서는 재생에너지원의 일단위(Daily-scale) 전력원가 도출을 위한 방법론과 연산과정을 개발하고 이들을 통해 재생에너지원의 전력원가 산정이 가능한 경제성 빅데이터 모듈을 개발하였다. 또한 계통한계가격 예측 모델을 통해 예측된 전력 수요/공급의 예측을 통해 시장가(계통한계가격)와 원가의 비교를 통한 운영 전력도출 하였다. 또한 이를 통해 생산된 일단위 수소원가를 분석하여 전략적으로 저렴한 수소를 생산할 수 있는 방안에 대해서 논하였다.

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

저유량 조건에서 펌프-터빈 모델의 터빈 모드 내 Thoma number가 유동 특성에 미치는 영향

Effect of Thoma Number on Flow Characteristics in Turbine Mode of a
Pump-Turbine Model at Low Flow Rate Condition

김승준¹ · 양현모¹ · 박준관² · 김진혁^{1,3*}

¹한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문

²한국수력원자력 수력교육센터

³과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학 전공

펌프-터빈 시스템은 태양광 및 풍력 발전과 같은 간헐성 발전 특성을 가진 신재생에너지의 계통 유입에 대응하여 전력 계통 백업 및 주파수 조정으로 안정적인 전력 공급에 기여하고 있다. 이러한 유연성 발전 담당을 위한 운전 환경의 변화로 탈설계 조건 내 작동이 지속되고 있으며, 특히, 펌프-터빈의 터빈 모드에서 저유량 조건 운전 시 흡출관 유로 내 와류 등 복잡한 유동 특성이 발생하게 된다. 이로 인해 진동 및 소음이 유발되어 시스템의 운전이 불안정해 질 수 있으며, 잦은 고장의 발생으로 설비의 수명감소로 이어질 수 있다. 한편, Thoma number는 유체의 캐비테이션 특성을 나타내는 수이며, 펌프-터빈 시스템의 안정적인 운전을 위해 반드시 고려해야 하는 요소이다. 따라서, 본 연구에서는 Thoma number 변화에 따른 펌프-터빈의 터빈 모드에서 내부 유동 특성 및 비정상 상태 압력 특성 검토를 위해 Laboratory-scale 모델 실험 및 비정상 상태 수치해석을 수행하였다. 축소 모델 실험을 통해 최고효율점의 유량 70% 운전 조건인 저유량 조건에서 Thoma number의 변화에 따라 성능, 비정상 압력 및 흡출관 내 와류 거동 특성을 비교 검토 하였다. 더불어, 실험 결과를 토대로 Thoma number에 따른 경계 조건을 적용하여 작동 유체인 물 및 증기를 고려한 2상 비정상 상태 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 해석을 수행하였다. 실험과 및 비정상 상태 수치해석을 통해 나타난 내부 유동 특성을 체계적으로 검토하였고, 펌프-터빈 모델의 터빈 모드에서 Thoma number에 따라 발생하는 흡출관 내 가시화된 와류 특성을 규명하였다. Thoma number는 저유량 조건 내 펌프-터빈의 베인리스(Vaneless) 및 러너 구간 내 성능 및 유동 특성에 대해 영향을 미치지 않은 반면, 흡출관 내에서는 Thoma number에 따라 가시화된 와류 발생 등 유동 특성의 차이 및 유동 진행방향에 따라 불규칙한 비정상 압력 특성을 나타냈다.

사사의 글 : 본 연구는 기획재정부의 재원인 한국생산기술연구원의 [협력]청정생산시스템핵심기술연구사업(No. EM220003)의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

공기 액화 에너지 저장을 위한 LAES 엑서지 분석 Exergy Analysis of LAES for Liquid Air Energy Storage

윤문규, 이춘식, 임동렬, 염충섭
고등기술연구원

요 약

기후변화문제는 세계적인 관심사로 온난화의 주범인 온실가스 감축을 위한 광범위한 연구가 진행되고 있다. 특히 액화공기 에너지 저장 시스템((Liquid Air Energy Storage system, LAES)은 대용량 에너지 저장 기술로 전기에너지를 액화 공기의 형태로 저장하는 시스템으로 타 에너지 저장장치와 비교하여 보다 안정성이 높고 신재생 에너지 연계가 용이하고 청정공기 및 냉난방 에너지로 활용성이 높아 관련 연구가 급격히 증대되고 있다. 본 연구에서는 엑서지 분석(exergy analysis)을 통해 공기액화 에너지 저장 시스템을 설계하고 열역학적 분석을 수행하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업 “대용량 액체공기 에너지저장 핵심기계기술 개발”의 지원으로 수행되었음. (NK237F)

시계열 자료를 이용한 지역난방 기반 주택용 열의 수요함수 추정 Estimating the demand function for residential heat through district heating system using time series data

이서영* · 김주희** · 유승훈***

*서울과학기술대학교 에너지기술·정책학과 석사과정, **서울과학기술대학교 에너지정책학과
연구교수, ***서울과학기술대학교 미래에너지융합학과 교수

아파트의 대표적인 난방방식 중 하나인 지역난방은 열병합발전을 통해 생산된 열, LNG 복합발전의 여열, 소각장 등에서 발생하는 폐열 등을 이용하여 온수 및 난방을 제공한다. 따라서 지역난방은 타 난방방식보다 온실가스를 적게 배출하고 높은 에너지 효율을 보이는 장점을 가지기에, 정부는 지역난방을 지속적으로 확대 보급하고 있다. 본 연구에서는 지역난방 기반 주택용 열에 대한 수요함수를 추정하여 수요의 가격탄력성 및 소득탄력성을 도출하고자 한다. 이를 위해 국내 지역난방 시장의 대략 절반을 차지하는 한국지역난방공사의 1988년부터 2020년까지의 분기별 주택용 열 판매 시계열 자료를 수요에 영향을 미치는 독립변수를 정의한 후 수요함수의 형태를 설정했다. 열 수요함수 추정을 위해 최소자승법(ordinary least squares)과 최소절대편차법(least absolute deviations)을 각각 적용하였다. Durbin-Watson 통계량으로 판단하건대, 1차 계열상관(serial correlation)이 없다는 귀무가설이 유의수준 1%에서 기각되어 1차 계열상관이 존재하는 것으로 판단된다. 이 문제를 다룸과 동시에 탄력성을 단기 및 장기로 구분하여 구하는 데 활용될 수 있는 내생시차변수모형(lagged dependent variable model)인 일명 코익모형(Koyck model)을 활용하였다. 이 모형의 추정결과에 근거하여 Durbin'h 통계량을 계산한 결과, 1차 계열상관이 없다는 귀무가설이 유의수준 1%에서 기각되지 않는다. 게다가 상수항을 제외한 모든 추정계수가 0이라는 귀무가설 하에서 계산된 F-통계량은 유의수준 1%에서의 임계치보다 크므로 이 귀무가설이 기각되지 않는다. 따라서 추정된 모형은 통계적으로 유의미하다. 코익모형의 추정결과는 모든 추정계수가 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하며 합리적인 부호를 가지고 있음을 시사한다. 한편 주택용 열 수요의 가격탄력성은 단기 및 장기에 대해 각각 -0.6594 및 -1.1568로 추정되었으며 모두 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하여 주택용 열은 수요법칙이 성립한다. 수요의 소득탄력성은 각각 0.4757 및 0.8345로 산정되었기에 주택용 열은 정상재임을 알 수 있다. 이러한 정보는 지역난방 사업자가 향후 계획을 수립하는 데 활용될 수 있을 뿐만 아니라 정부가 지역난방과 관련된 가격 정책 수립, 경제성장에 따른 수요의 변동 예측, 정부 정책수단의 영향 분석 등 다양한 분야에서 참고정보로 이용될 수 있다.

산업연관분석을 통한 국내 수소경제의 경제적 파급효과 분석

Measuring the economic impacts of hydrogen economy in South Korea:
An input-output approach

최수빈¹ · 김주희² · 유승훈³

¹서울과학기술대학교 일반대학원 에너지기술·정책학과

²서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지정책학과 연구교수

³서울과학기술대학교 창의융합대학 미래에너지융합학과 교수

정부는 2019년 1월 수소경제 활성화 로드맵을 발표하는 등 수소 산업을 일자리를 창출하고 한국 경제의 성장을 견인하는 부문으로 키우겠다는 비전을 발표하였다. 이후 많은 기업이 수소 산업에 투자를 확대하고 있고 정부는 구체적인 정책적 지원 방안을 설계하고 있다. 이에 수소 산업의 경제적 파급효과에 대한 정량적 정보가 공공 부문에서뿐만 아니라 민간 영역에서도 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 한국은행의 2019년 산업연관표를 이용한 투입산출분석을 적용하여 수소경제의 경제적 파급효과를 정량적으로 분석하고자 한다.

산업연관표에 수소 산업이 별도로 표시되어 있지 않기 때문에, 다음의 과정을 통해 수소경제 관련 부문이 정의되었다. 먼저 ‘수소경제 활성화 로드맵’에 근거하여 수소 산업의 가치사슬을 생산, 저장, 운송, 활용의 4단계로 식별하였다. 다음으로 2019년 산업연관표의 381개 기본부문 표에서 수소 산업의 가치사슬 각각에 해당하는 부문을 추출하여 분석 대상을 설정하였다. 마지막으로 한국은행의 33부문 대분류 방식에 따라 수소경제를 34번째 부문으로 추가하고, 산업연관분석을 적용하여 수소 산업의 4개의 세부 부문별로 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과, 임금유발효과의 4가지 측면에서 경제적 파급효과를 도출하였다. 주요 분석 결과는 다음과 같다. 첫째, 수소 산업에 1원 투자 시 타 산업에 대한 생산유발효과는 가치사슬의 단계 순으로 1.8310원, 1.9192원, 2.0517원, 2.0235원이었다. 둘째, 수소 산업의 부가가치 유발효과는 4개의 세부 부문에서 각각 0.5989원, 0.6358원, 0.6614원, 0.6288원으로 분석되었다. 셋째, 수소 산업의 생산이 10억 원 증가하였을 때, 그 산업을 제외한 타 산업의 취업유발 인원은 각각 5.9106명, 6.4983명, 16.0073명, 9.0141명이었다. 넷째, 수소 산업에 대한 투자가 1원 증가하였을 때 타 산업에 유발하는 임금액은 각각 0.2752원, 0.3030원, 0.3344원, 0.2978원이었다. 이상의 정보는 수소경제 활성화를 위한 정책 수립 및 수소경제 실현의 경제적 파급효과의 사전적인 예측에서 유용하게 활용될 수 있다.

PE100 소재 배관의 도시가스 분야 적용을 위한 용착기준 정립 연구

A Study on the Establishment of Fusion Standards for Application of PE100 Material Pipe to City Gas Field

이화영 · 이민경 · 이재훈 · 유근준

한국가스안전공사 가스안전연구원

도시가스사업법에서는 지하 매설용으로 사용하는 배관에 대해 4bar 이하에서는 플라스틱 소재의 PE배관을 사용할 수 있도록 하고 있다. 현재는 PE 중 PE80소재를 이용한 배관만 도시가스 지하매설 배관으로 이용할 수 있도록 되어있으나, 관련 업계에서는 PE80보다 강도가 높은 PE100을 이용한 배관 도입에 대한 요구가 지속적으로 건의되고 있다. PE100의 경우, 국내어세는 수도분야에서 주로 사용되고 있는 소재이다. 해당 소재를 도시가스사업에 적용하기 위해서는 안전성 검토 및 배관 연장을 위한 용착 과정에서 충분히 기밀 및 배관 성능을 유지할 수 있는지 확인이 필요하다.

따라서 본 연구를 통해 도시가스분야에 PE100 소재의 배관 도입 시 적정한 용착 성능이 확보될 수 있도록 국제기준 조사 및 PE100 용착성능 실험 및 물성테스트를 통해 안전성이 확보 가능한 용착기준을 알아보고자 한다.

본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업(지역특화산업육성+(R&D)-지역스타기업육성) 지원에 의한 연구임 [S3087113]

석탄발전 총량제가 국내 전력시장에 미치는 영향 분석

An Analysis of the Impact of Coal Power Cap on Electricity Market in Korea

신동현

에너지경제연구원

본 연구는 석탄발전 총량제가 전력시장에 미치는 영향을 분석하기 위해 M-Core를 활용하여 전력시장 시뮬레이션을 수행하였다. 석탄발전 총량제는 온실가스 감축목표를 위해 석탄발전량 상한을 설정하는 것으로 제9차 전력수급기본계획에서 발전 부문 온실가스 감축을 위한 수단으로 제시되었다. 제9차 전력수급기본계획의 목표수요와 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안을 반영하여 2021년부터 2025년까지 전력시장의 계통한계가격(SMP), 전원별 발전량, 발전비용, 연료사용량 등을 분석하였다. 분석결과, SMP는 2022년까지 상승하다가 2023년부터 다수의 고효율 및 저단가의 신규 발전기가 진입함에 따라 하락하는 것으로 나타났다. 전원별 발전량 분석결과에 따르면 기력과 복합 발전량이 감소하고 신재생 발전량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 단, 원자력 발전기는 신규 건설되는 발전기로 인해 총발전량이 증가할 것으로 예상되었다. 전원별 발전비용은 기력이 가장 높게 나타났고, 2023년까지 상승하다가 이후 소폭 하락하는 추세를 보였다. 발전기에 사용된 연료사용량은 발열량 기준으로 원자력, 기력, 복합 등의 순으로 나타났다.

탄소배출권 단가의 합리적 책정 방법론의 제안

Suggestion of a Methodology for Rational Costing of Certificated Emissions Reduction

김덕진*

*환경열경제연구소

저자는 자연보전의 환경학, 에너지 계산의 열공학, 그리고 인류발전의 경제학이 융합된 환경열경제학이라는 새로운 학문을 제안한 바 있다. 탄소배출권은 시장 거래 상황에 따른 배출권거래제도, 국가가 결정하는 탄소세, 수입품에 관세를 매기는 탄소국경세로 구분된다. 여기서, 탄소배출권의 합리적 단가는 어느 정도가 되어야 하는가의 문제는 전 세계적으로 아직 해결되지 않고 있다. 생산 제품의 원가가 합리적으로 산정되어야 매매가격이 거래 당사자 간에 합리적으로 협상되는 것이다. 탄소배출권 역시 그 원가가 합리적으로 산정되어야, 시장의 거래 및 정부의 정책이 합리성을 갖게 된다.

인터넷으로 위키백과 광합성을 검색하면, 글의 중간 정도에, 광합성은 열역학적 개념인 엔탈피, 엔트로피, 자유 에너지의 변화로 설명할 수 있다는 글이 있다. 탄소는 광합성의 재료이므로, 이것은 자연의 환경학을 열공학으로 계산할 수 있다는 뜻이다. 공기 중에 탄소 1 kg을 포집하기 위해 소요되는 최소일 [kJ]은 열역학적 수식 $w_{CO_2} = R_{CO_2} \cdot T_0 \cdot \ln(y_{CO_2}/100\%)$ 으로부터 계산된다. 여기서, R_{CO_2} 는 이산화탄소의 기체상수 0.1889 kJ/kgK, T_0 는 환경의 절대온도 약 288 K, y_{CO_2} 는 공기 100%의 물질 중 탄소가 차지하는 물분율 약 0.041%이다. 따라서, 공기 중 탄소 1 kg을 포집하기 위한 최소일은 424 kJ로 계산된다.

자연의 화석연료가 투입되어 인간의 경제가 창출되는 곳이 열공학적으로 가동되는 발전소이므로, 발전소는 환경학, 열공학, 경제학의 융합 매개체로 볼 수 있다. 이것이 합리적이라 판단 된다면, 탄소배출권의 합리적 단가는 다음과 같이 계산될 수 있다. 우리나라에서 산업용 전기 단가는 약 80원/kWh 정도이며, 전기는 일과 동급이다. 따라서 탄소 1 ton을 포집/제거하기 위해 소요되는 전기 비용은 절대적 최소 9.400 원 (= 424 kJ/kg · 80 원 / 3600 kJ) 으로 계산된다. 그 최소 전기 비용이 탄소배출권의 최소 합리적 단가이다. 일반적으로 70% ~ 80%는 탄소방출이 허가되며, 그보다 높은 수치가 규제 대상이다. 따라서 이와 같은 조건으로 위 단가를 재조정하면, 탄소배출권의 합리적 단가는 허가제 최소 3.1 ~ 4.7 만원이다. 우리나라는 2015년 8,640원부터 시작하여, 현재 2만원 ~ 4만원 정도 거래된다. OECD 평균 전기 단가는 우리나라의 약 2배 정도이며, 유럽에서의 탄소 거래가격 역시 우리나라의 약 2배 정도이다. 열공학적 계산값과 거래값이 매우 유사함을 볼 수 있다.

탄소배출권의 목적은 기후변화 완화이며, 이것은 전 인류의 의무이다. 전 인류의 의무가 거래소에서 흥정으로 사고 팔려진다는 것이 이해되지 않는다. 인류는 이미 지구 자연으로부터 막대한 이득을 얻고 있다. 탄소배출권 금액은 인간의 이윤 창출 수단이 아니라 자연의 권리 향상에 투입되어야 한다. 이것이 기후변화 완화에 대한 인류의 올바른 가치관이다.

초소형 모듈 원전의 효율 계산 및 원가 산정 개요

Overview of Efficiency Calculation and Cost Estimation for Micro Modular Reactor

김덕진^{1*} · 이준석² · 조성국²

¹환경열경제연구소, ²포항산업과학연구원

에너지시스템 해석의 열역학과 비용계산의 경제학이 혼합된 학문을 열경제학이라 한다. kJ당 1원의 연료 100 kJ이 투입되어, 40 kJ의 전기 W가 생산될 때, 발전 효율은 $40 / 100 = 40\%$ 로 간단히 계산되고, 원가산정 공식 $100 \text{ kJ} \cdot 1 \text{ 원/kJ} = 40 \text{ kJ} \cdot C_W \text{ 원/kJ}$ 에 의해, 전기 원가 C_W 는 2.5 원/kJ로 간단히 계산된다. 그러나 시스템에서 전기 W가 30 kJ 생산되고 열 Q가 50 kJ 생산될 때, 전기 W와 열 Q는 더하기를 할 수 없으므로 효율은 계산될 수 없다. 엑서지 효율이 제안될 수 있으나, 전기 W는 실제 생산된 전기이고, 열 Q의 엑서지는 이론적으로 생산 가능한 최대일로서, 전기와 엑서지의 합 역시 엄밀한 관점에서 오류이다. 그 원가산정 공식은 $100 \cdot 1 = 30 \cdot C_W + 50 \cdot C_Q$ 로서, 하나의 방정식에 미지수가 2개 존재하므로, 원가산정은 수행될 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해, 전 세계적으로 다양한 열경제학적 방법론이 제안되고 있고, 저자 또한 선행연구(한국에너지학회, 2020, 열병합발전에서 비용배분 방법론의 합리성 검토)에서 방법론을 제안한 바 있다.

100 kJ의 에너지가 발생하는 초소형 모듈 원전에서, 여름철일 때, 전기 W가 30 kJ, 수소 에너지 H가 20 kJ, 난방열 Q가 5 kJ, 그리고 냉방열 R이 25 kJ 생산된다고 가정한다. 원전 효율 $(30 + 20 + 5 + 25) / 100 = 80\%$ 는 오류라는 것을 누구라도 인정할 것이다. 위의 4종류 제품을 생산하는 초소형 모듈 원전은 발전 전용 원전 효율 약 40%보다 좋은 시스템인가? 좋지 않은 시스템인가? 만약 좋은 시스템이라면 얼마만큼 더 좋은가? 위의 원가산정 공식은 $100 \cdot 1 = 30 \cdot C_W + 20 \cdot C_H + 5 \cdot C_Q + 25 \cdot C_R$ 이다. 생산 제품의 원가가 계산되어야, 합리적인 판매단가가 책정되는 것이다. 그러나, 위의 수식으로만으로도 각 제품의 생산원가 산정은 불가능하다. 이 문제는 열병합발전에서 생산된 전기와 열의 원가는 어떻게 책정되어야 하는가의 문제로부터 출발하며, 전 세계적으로 다양한 방법론이 제안되고 있으나, 아직 공식적으로 인정받은 방법론은 존재하지 않고 있다.

선행 연구에서 어떠한 복합 생산 시스템일지라도 각 생산 제품의 원가를 산정할 수 있고, 시스템의 효율을 계산할 수 있는 방법론을 제안한 바 있다. 여기서, 본 문제는 근본적으로 정답이 존재할 수 없으므로, 가정이 추가되어야 한다. 전 세계적으로 다양한 방법론이 제안되고 있으며, 그 제안의 핵심적 차이는 가정의 개수이다. 가정이 적을수록 방법론의 합리성은 높아질 것이다. 저자의 방법론은 단 하나의 가정으로부터 모든 시스템을 범용적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서 초소형 모듈 원전의 효율 계산과 원가 산정에 문제점이 존재함을 알리고자 하며, 본 시스템의 열역학적 열평형선도가 주어졌을 때, 향후 연구에서 복합 생산에 대한 효율 계산 및 원가 산정을 구체적인 수치로 계산하고자 한다.

스마트설계 플랫폼의 비즈니스 모델에 관한 연구
: 비즈니스 모델의 고도화

A Study on Business Model of Smart Design Platform
: Business Model Advancement

이욱현 · 이성곤 · 구기관 · 한경진 · 이민규 · 유재경 · *이대근

한국에너지기술연구원 기업협력실, *한국에너지기술연구원 신연소발전연구실

Abstract

탄소중립 2050의 국가적 목표를 달성해야 하는 과정에서 우리나라의 최종에너지소비 비중을 살펴보면, 산업원료용 소비를 제외하면 74.8%가 열에너지가 차지하며, 전기 비중은 25.2%이다. 이중 산업부분의 최종에너지 소비 비중은 61.8%로 수송(18.6%), 가정 및 상업(17.3%) 그리고 공공(2.3%)에 비해 그 비중이 매우 높다(2020년 에너지통계연보). 특히, 산업부분 총 에너지 사용량의 70% 이상이 열에너지 다소비 핵심설비(보일러, 연소기, 공업로, 건조기, 히트펌프 및 열교환기 등) 사용에서 나오는 상황이며(약77%, 53,000천TOE/년, 2017년 산업부분 에너지사용량 및 온실가스배출량 통계, KEA, '18.04), 이러한 에너지 다소비 산업설비의 효율향상기술은 에너지 수요관리 및 온실가스 저감 등 탄소중립 목표달성에 꼭 필요한 가장 현실적이고 효과적인 해법이다.

그동안 이 분야에 대한 정부주도의 기술개발 및 보급·확산 노력에도 불구하고, 이러한 열에너지 다소비 산업설비에서의 실질적인 기술보급 및 생산 유발 효과가 낮은 이유는 관련 산업 기업들이 대부분 중소, 중견기업으로 해당분야의 기술특성상 표준화된 설계 및 제조 프로세스 대신 수요맞춤형 주문 생산 방식을 대부분 채택, 운영하고 있기 때문인 것으로 분석되고 있으며, 기술력과 전문 인력의 부재와 사업화 능력의 부족 등으로 주도적인 기술개발이 어렵기 때문이다. 이러한 배경에서 열에너지 다소비 핵심설비 기술의 보급 및 확산 촉진을 위해 설계 수월성, 공공성, 개방성, 확장성, 신뢰성 및 지속 가능성을 갖춘 온라인 기반 설계 플랫폼을 도입하고자 기술개발 및 실증에 노력하고 있다.

본 연구에서는 고효율 에너지기기의 스마트설계 플랫폼의 효과적인 시장진입 및 보급을 통해 관련 기업의 설계능력 향상 및 전문 인력 양성을 위한 비즈니스 모델의 수립 및 고도화 과정을 소개하고자 한다. 주요내용으로는 시장수요점검, 비즈니스 모델 프레임 워크, 혁신유형 조사 및 분석, 사업적합성 평가 등 비즈니스 모델을 고도화 하는 과정을 포함하였다.

Key words

열에너지 다소비 산업설비, 스마트 설계 플랫폼, 비즈니스 모델

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20202020800200)

축류 펌프 수력학적 성능 향상을 위한 최적설계

Optimization for Improving Hydraulic Performances of an Axial Pump

마상변 · 느엔 특앵 · 김 성 · 김진혁*

한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문, *과학기술연합대학원대학교

융합제조시스템공학과(청정공정 및 에너지시스템공학과)

본 연구는 유압 및 배수 펌프장 등에서 상대적으로 많은 유량을 이송하기 위해 사용되는 축류 펌프를 대상으로 가변 입구 가이드 베인을 적용한 고효율 설계를 통해 탄소중립을 실현하기 위한 국책과제의 일환으로 수행되었으며, 축류 펌프의 수력학적 성능을 향상시키기 위한 최적설계를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 최적설계는 삼차원 정밀 유동해석을 기반으로 하였고, 축류 펌프의 내부 유동장 분석을 통해 개선해야 할 요소들을 분석하였다. 이를 위하여 상용코드인 ANSYS-CFX 19.0을 사용하여 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 수행하였다. 계산의 수렴성과 경제성을 향상시키기 위하여 축류 펌프의 단일 유로를 대상으로 계산영역을 선정하였고, RANS 해석의 난류단합 문제를 위하여 Shear stress transport (SST) 난류 모델을 사용하였다. 아울러, 격자의 이산화 오류를 최소화하기 위하여 Richardson 외삽법 기반의 Grid convergence index (GCI) 방법을 적용한 격자 의존성 테스트를 수행하였다. 최적설계는 축류 펌프의 임펠러와 디퓨저 베인을 대상으로 순차적으로 진행하였으며 2k factorial analysis를 통해 각각 4개의 설계변수를 선정하였고, Latin Hypercube Sampling (LHS)을 활용하여 설계 영역 내 각각 48개의 실험점을 구성하였다. 축류 펌프 설계점에서의 수력학적 성능을 극대화하기 위하여 효율과 전양정을 목적함수로 선정하였고, Response surface approximation (RSA), Kriging 및 Radial basis neural network (RBNN)을 활용하여 대리 모델을 구축하고 유전 알고리즘을 사용하여 효율과 전양정을 동시에 향상시킬 수 있는 최적점을 탐색하였다. 본 다중 목적 최적설계를 통해 축류 펌프의 효율과 전양정이 각각 13.9% 및 3.0% 향상되었다.

사 사

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(NS220016, 가변형 운전 중대형 펌프기술 개발)과 기획재정부의 재원으로 한국생산기술연구원의 지원(EM220003, 부하변동 대응 장주기 활용 펌프터빈 선행원천기술개발)을 받아 수행된 연구임

CNN-LSTM 기반의 전이학습을 이용한 캠퍼스 건물의 피크시간 전력 부하량 예측 모델

CNN-LSTM using transfer learning based the electricity power load
prediction model in a peak time for campus building

이하은 · 이동훈, 김수희, 김관호*

인천대학교 산업경영공학과

최근 온실가스 배출 증가로 인한 전력 사용량 절감에 관심이 증가함에 따라 대규모 건물로 구성되어 있는 캠퍼스의 전력 부하량 예측이 매우 중요하다. 특히, 하루 중 대부분의 전력 부하량은 피크시간에 발생하기 때문에 전력 사용량 절감을 위해서는 피크시간의 전력 부하량 예측은 필수적이다. 그러나, 캠퍼스 내에서 계절, 기후, 시간, 각 건물의 특성에 따라 전력 부하량이 동적으로 변하기 때문에 피크시간 전력 부하량 예측은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 각 건물의 피크시간 전력 부하량을 예측하기 위해 전이학습을 이용한 CNN-LSTM 기반 피크시간 전력 부하량 예측 모델을 제안한다. 본 연구에서 제안한 모델은 시간에 따른 전력 부하량에 대한 공간적 특성과 시계열적 패턴을 학습할 수 있도록 설계되었다. 실 데이터를 이용한 실험 결과, 본 연구에서 제안한 모델은 기존의 딥러닝 모델보다 더 나은 성능을 보였다.

본 연구는 2017년도, 2021년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20173010140840, No. 20212020900090)

연료전지에서 생산된 전기와 열의 원가산정 방법론

Cost Estimating for Electricity and Heat Produced from Fuel Cell

김덕진^{1*} · 최병렬²

¹환경열경제연구소, ²에너지경제연구원

에너지 시스템 해석의 열역학과 비용계산의 경제학이 혼합된 학문을 열경제학이라 한다. kJ당 1원의 연료 100 kJ이 투입되어, 60 kJ의 에너지 제품 A가 생산될 때, 원가산정 공식 $100 \text{ kJ} \cdot 1 \text{ 원/kJ} = 60 \text{ kJ} \cdot A \text{ 원/kJ}$ 에 의해, 생산된 제품의 원가 A는 1.67 원/kJ로 간단히 계산된다. 그러나 시스템에서 제품 A가 45 kJ 생산되고 제품 B가 35 kJ 생산될 때, 그 원가산정 공식은 $100 \cdot 1 = 45 \cdot A + 35 \cdot B$ 가 되며, 하나의 방정식에 미지수가 A와 B 2개 존재하므로, 원가산정은 수행될 수 없다. 이를 위해 어떤 가정 하나가 전제되어야 하며, 그 가정으로 인해 복합 생산 시스템의 원가산정은 정답이 아니라 방법론이 된다. 이것은 크게 경제학적 방법론과 공학적 방법론으로 구분될 수 있으며, 그 하위에 전세계적으로 다양한 방법론이 제안되고 있으나, 아직 전세계적으로 공식적으로 인정받은 방법론은 없다.

선행연구(한국에너지학회, 2020, 열병합발전에서 비용배분 방법론의 합리성 검토)에서 각 방법론의 장단점에 대해 세부적으로 서술된 바 있다. 어떤 현장의 연료전지에서, Gcal 당 단가 5만원의 LNG 1,000 kJ/s가 투입되어, 400 kJ/s의 전기, 200 kJ/s의 고위열, 그리고 250 kJ/s의 저위열이 생산될 때, 전체적인 비용 흐름 수식은 $1,000 \cdot 50,000 / 4,186.8 = 400 \cdot A + 200 \cdot B + 250 \cdot C$ 이다. 난방 고위열의 원가 B는 1 Gcal 당, Heat 방법 W59,783, Power 방법 W23,810, E.Shulz 방법 W41,796, E.Shuly 방법 W45,161, Finish 방법 W37,037, Energy 방법 W58,824, Carnot 방법 W20,717로 계산되었다. 각 결과들의 편차가 너무 크다는 것을 볼 수 있다. 위의 결과 중 거래 당사자에 가장 합리적인 것을 하나 선택해야 하며, 그 선택 기준은 다음과 같다. 1) 근거가 약한 경제학적 방법론과 열역학 법칙에 근거한 공학적 방법론을 이해한다. 2) 생산자는 판매를 희망하고 구매자 역시 구매를 희망하면, 생산원가는 합리적으로 산정될 수 있다. 3) 생산자는 판매를 희망하나 구매자는 생각이 없다면, 생산원가는 낮아진다. 4) 생산자는 생각이 없으나 구매자가 구매를 희망하면 생산원가는 높아진다. 5) 정부의 강력한 정책 추진 사항이면, 생산원가는 높아진다.

지역난방공사가 연료전지에서 생산된 열의 구매를 희망하지 않는다면, 열원가가 가장 낮은 Carnot 방법 W20,717이 협상으로 제안될 수 있다. 위의 방법들 중 Carnot 방법 이외의 것은 경제학적 방법론으로서 심히 임의적인 결과라는 것에 주의해야 할 것이다. 연료전지는 정부의 강력한 정책 추진 사항이라는 것이 구매 당사자간에 합의 된다면, 열원가가 Carnot 방법보다 높게 책정되는 Exergy 방법(어려운 열역학 계산이 필요)이 제안될 수 있다.

다양한 방법론이 제안되고 있으나, 그 어떤 것도 공식적으로 인정받은 방법론이 아직 존재하지 않는 이유는 생산 제품의 거래 상황에 따라 가장 합리적인 방법론이 달라지기 때문이다. 시장 상황에 따라 거래 당사자가 방법론을 직접 선택할 수 있게끔, 저자의 선행연구와 같이 모든 방법론이 통합된 원가산정 메뉴얼이 전세계 표준으로 채택되어야 할 것이다.

단순 랭킨 사이클에서 주증기 온도 및 압력의 성능 최적화 Performance Optimization of Main Steam Temperature and Pressure at Simple Rankine Cycle

김덕진^{1*} · 이준석² · 조성국²

¹환경열경제연구소, ²포항산업과학연구원

화력발전소의 성능에 영향을 끼치는 인자는 다양하며, 그중 가장 큰 인자는 주증기 온도와 주증기 압력이다. 즉, 주증기 온도와 압력을 알면 그 발전소의 대략적인 성능을 파악할 수 있다. 엑서지는 어떤 유체가 주어진 상태에서부터 환경상태로 변할 때까지 얻을 수 있는 최대일이며, 엑서지율은 엑서지와 엔탈피의 비로서 주어진 에너지의 가치를 나타낸다.

단순 랭킨 사이클을 쉽게 계산하기 위해, 복수기 온도는 외기온도 T_0 로 취급할 수 있다. 따라서 보일러에서 받은 열량은 주증기 엔탈피와 외기온도의 엔탈피의 차 $h-h_0$ 이다. 펌프에서 받은 일은 생산된 일의 약 2% 정도이므로, 무시할 수 있다. 복수기는 등온과정이므로, 방출된 열량은 엔트로피 수식으로 변환될 수 있고, 100% 효율의 터빈에서 터빈 입구와 터빈 출구의 엔트로피는 동일하므로, 방출 열량은 $T_0 \cdot (s-s_0)$ 이다. 따라서, 터빈에서 생산된 일은 $h-h_0 - T_0 \cdot (s-s_0)$ 로 간결화된다. 이것은 엑서지 e_X 의 정의와 같다. 발전효율은 생산일 / 투입열량이며, 이것은 엑서지율 ϵ 의 정의와 같다. 정리하자면, 단순 랭킨 사이클을 간결화시키면, 주증기의 엑서지는 발전량과 같고, 주증기의 엑서지율은 발전효율과 같다.

그림 1의 온도-엔트로피 선도 상에 증기의 엑서지(빨간선)와 엑서지율(파란선)이 도시되어 있다. 그 선을 살펴보면, 포물선의 꼭지점이 나타나 있다. 그 꼭지점이 최대 발전량 및 최대 발전효율의 주증기 상태점이다. 그림 1의 꼭지점을 연결한 것이 그림 2의 온도-압력 선도이다. 주증기 온도 및 압력에 따라, 최대 발전량(빨간선)과 최대 발전효율(파란선)은 서로 다르다는 것이 파악된다. 각종 발전 시스템의 주증기 온도 및 압력이 도시되어 있으며, 최적화 정도가 한눈에 파악된다. 주증기 온도 800℃의 발전소가 건설된다면 주증기 압력이 최소 400 bar 이상이 되어야 함을 이해할 수 있다. 본 차트는 발전소 입문자에게 성능 분석의 기초 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

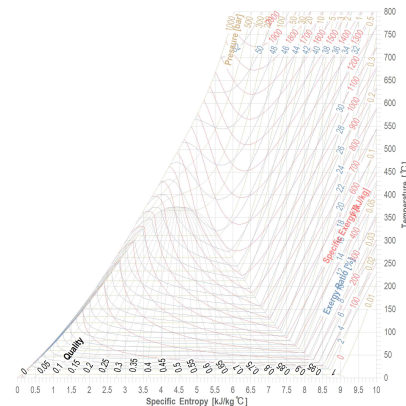


그림 1 엑서지와 엑서지율

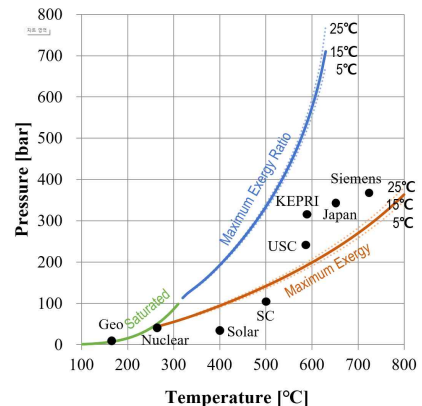


그림 2 성능 최적화 곡선

**LNG 화력발전에서 배기가스 조성에 따른
고 순도 이산화탄소 액화 효율에 관한 해석**

The Analysis of High Purity CO₂ Liquefaction Efficiency by the
Composition of Exhaust Gas in LNG Fueled Thermal Power Plant

이춘식 · 조성수 · 최창식

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

LNG(Liquefied Natural Gas) 화력발전에서 필터링 후 배출되는 가스 조성비는 대략 80%의 CO₂와 O₂, N₂ 그리고 나머지 성분이 약 20%를 차지한다. 배출되는 이산화탄소를 고 순도로 분리함에 있어서 특히 산소와의 분리가 쉽지 않으며, 비용과 효율 면에서 흡착제의 사용도 제한적이라 할 수 있다. 이에 대한 대안으로서 이산화탄소만을 액화시키고 나머지 성분은 가스 상태로 분리하는 방법을 택할 수 있는데 3가지 정도의 요구사항을 만족해야만 된다. 우선 액화된 이산화탄소 순도는 적어도 99% 이상이고 둘째, 이산화탄소 회수율은 95% 이상 되어야 하며, 마지막으로 효율이 높아야 된다. 순수한 이산화탄소를 액화할 경우 Linde-Hampson Cycle을 적용하면 이론적으로 0.125 kWh/kg 수준의 고 효율을 얻을 수 있다. 그러나 불순물이 함유된 가스의 분리 액화는 Linde-Hampson Cycle과 같은 Closed Loop를 적용할 수 없기 때문에 조성비에 따라 차등이 있지만 1.3~2.5배의 많은 에너지를 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 배기가스 중 이산화탄소 외 불순물의 농도를 3~25%까지 변화시키면서 이산화탄소 액화효율을 비교 분석하였다. 그 결과 불순물의 농도와 이산화탄소 액화효율이 반비례 관계에 있다는 것과 액화공정에서 요구되는 온도에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 발견하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음.(No. 20212010200110)

원자력 수전과 알칼라인 수전해기 및 고체고분자전해질 수전해기를 이용한 LCOH 다중 민감도 분석

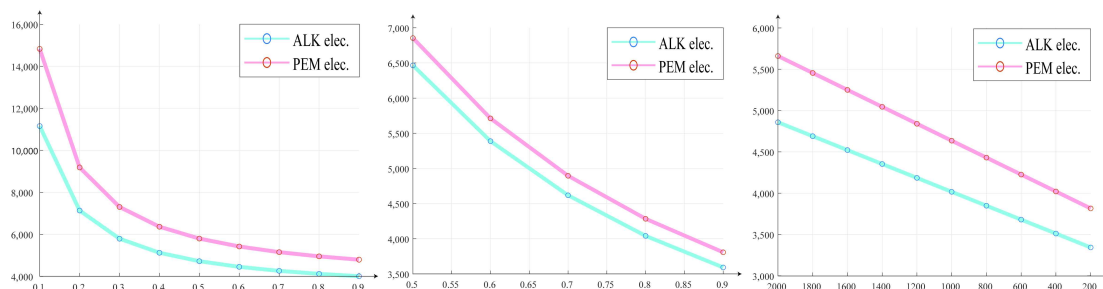
Nuclear based Multi Variable Sensitivity Analysis of ALK and PEM Electrolysis

우종하 · 박채운 · 조하 · 노재형

건국대학교 전기공학과

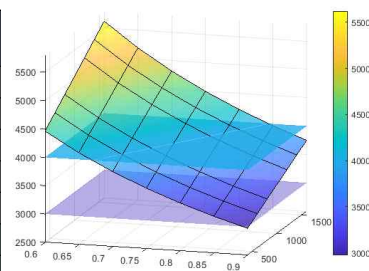
수소 단가의 경제성 분석방법으로는 균등화발전원가(LCOE, Levelized Cost of Electricity)의 계산법과 유사하게 균등 총비용에 균등 총 수소 생산량을 나누어 계산하는 균등화 수소 원가(LCOH, Levelized Cost of Hydrogen)를 사용한다. 본 논문에서는 LCOH 방식을 활용하여 ALK 및 PEM 수전해기의 수소 단가 경제성 및 민감도 분석을 수행한다. 수전해기는 2020년 기준 원자력 정산단가와 망 이용요금을 고려하여 전력을 수전한다고 가정하며, 민감도 분석을 통해 여러 가지 투입 파라미터가 변할 때 선형계획 모델의 목적함수 값이 어떤 영향을 받는지 [그림 1]에 도시한다. LCOH의 목적함수에 영향을 미치는 투입 파라미터의 선정 및 선정범위는 IEA Hydrogen 2020 보고서를 참조하였다.

수전 시 전력 단가, 수전해기 이용률 및 그 외 운영비용을 상수값으로 고정시킨다면, LCOH에 가장 큰 영향을 끼치는 요소는 수전해기 효율, 고정비용, 스택의 수명이다. 따라서, 효율 및 고정비용 관련 다중 민감도 분석을 통해 기술 수준 발전에 따른 수소생산단가를 확인할 수 있다. ALK 수전해기 다중 민감도 분석의 결과표 및 그래프는 [그림 2]에 도시하였다. 현재 80% 안팎의 수전해 장치 기술을 보유하고 있고, 기저 발전기 전력 정산단가 변동 폭이 크지 않을 것을 가정하면, 2030년 내 4,000원/kg 수준의 LCOH는 가능하다. 또한, IEA Hydrogen 2020에 따르면 2040년까지 효율 90%, 고정비 단위가격 400,000원/kW의 기술 발전을 전망하고 있으므로, 국내 2040년 수소생산 단가 목표인 3,000원/kg 수준도 맞출 것이다. 뿐만 아니라, 재생에너지 등 잉여전력 활용방안을 마련하여 수전해기 수전 전력 단가를 낮춘다면 목표 시점을 앞당길 수 있을 것이다.



[그림 1] 수소 생산단가 [kg/원] 민감도 분석. 왼쪽부터 이용률, 효율, 고정비용 (1,000원/kW)

고정비 효율	400	600	800	1000	1200	1400
0.6	4,436	4,617	4,797	5,158	5,339	5,520
0.65	4,095	4,262	4,428	4,762	4,928	5,095
0.7	3,802	3,957	4,112	4,422	4,576	4,731
0.75	3,549	3,693	3,838	4,127	4,271	4,416
0.8	3,327	3,463	3,598	3,869	4,004	4,140
0.85	3,132	3,259	3,387	3,642	3,769	3,896
0.9	2,958	3,078	3,198	3,439	3,560	3,680



[그림 2] ALK 수전해기 다변수 민감도분석. 수전해기 스택 효율 및 고정비용 (1,000원/kW)

Hydrogen generation by ammonia decomposition over Ru/SiO₂ catalysts

이호진¹ · 박은덕^{1,*}

¹아주대학교 에너지시스템학과

*아주대학교 화학공학과

지난 100년 동안 세계의 에너지 수요는 석유, 화석 연료의 기술 발전과 경제 발전으로 인해 지속적으로 증가해 왔다. 화석연료에서 나오는 이산화탄소와 질소 산화물은 지구온난화를 유발하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 깨끗하고 풍부한 에너지로 수소에너지가 주목받고 있으며 수소경제의 사회로 전환이 관심을 끌고 있다. 수소 에너지는 단위 부피당 낮은 밀도를 갖아 대량으로 저장·운송하는 것이 어렵다. 따라서 대체 수소 저장 기술로 수소 운반체가 고려되고 있으며 그 중 암모니아가 적합한 물질로 주목받고 있다. 암모니아는 단위 부피당 수소 저장 밀도가 높고, 저장이 용이하며 분해 시 탄소 발생 없이 수소와 질소만 생성된다는 특징이 있다. 하지만 암모니아 분해 반응은 흡열반응으로 450℃ 이상의 높은 온도 조건에서 일어나며 많은 에너지를 요구한다. 따라서 저온에서 수소를 효율적으로 생산하기 위한 고효율 촉매의 개발이 필요하다. 본 연구는 서로 다른 온도에서 소성한 SiO₂에 담지된 Ru 촉매에서의 암모니아 분해의 활성을 비교해보았다. 결과에서는 소성온도별로 각기 다른 Ru 분산도가 확인되었고 이에 따라 암모니아 분해 반응의 활성에서도 다른 결과를 보였다. 각 촉매의 특성은 BET, TEM, CO chemisorption 분석법을 수행하여 특성화하였고, 이를 바탕으로 분산도, 입자의 크기의 상관관계를 이용하여 암모니아 분해에 고효율을 보이는 촉매를 제조할 수 있는 방향성을 제시하고자 한다.

수전해 시스템 안전성 향상을 위한 추가 안전기준 개발 타당성 분석

Feasibility analysis of development of additional safety code
to improve water electrolysis system safety

권준엽 · 이재진 · 이정운^{*}

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률이 제정되고 상세기준인 KGS Code가 2022년 2월부터 시행됨에 따라 수소 용품 안전관리에 대한 관심이 고조되었다. 수소용품 중 수전해 설비는 KGS AH271(수전해 설비 제조의 시설·기술·검사 기준)에 따라 산성 및 염기성 수용액을 이용하는 수전해 설비, AEM(음이온교환막) 전해질을 이용하는 수전해설비, PEM(양이온교환막) 전해질을 이용하는 수전해 설비에 대하여 재료, 구조 및 치수, 장치, 성능 등 안전기준을 만족해야 한다. 수전해 설비는 특징에 따라 크게 다공막을 사용하는 알카라인 수전해, 음이온 교환막을 사용하는 AEM, 양이온 교환막을 사용하는 PEM 수전해 방식이 있는데 각 타입 별 추가 안전기준 개발이 필요하다.

본 연구는 수전해 설비의 안전성능을 향상시키기 위해 수전해 타입 별 위험요소를 분석하여 추가 안전기준 개발에 대한 필요성과 타당성을 분석하고자 한다. 이를 위해 위험요소를 도출하였고, 관련 연구 자료를 분석하여 수전해 시스템별 추가안전기준 항목을 도출하였다. 본 연구과제를 통해 수전해 설비의 추가 안전기준 개발의 방향성을 도출하고 검증하여 수전해 설비의 안전성을 향상시키고 제품의 확산·보급에 이바지하고자 한다.

국내·외 수소충전소 및 배관망 핵심 부품 기술 동향에 관한 연구
A Study on the Technology Trends of Core Parts for Hydrogen Charging
Stations and Piping Networks in Korea and abroad

김다인 · 김소현 · 이효렬
한국가스안전공사 가스안전연구원

신에너지 중 수소는 지구상의 70%를 차지하는 물질로 CO₂ 배출이 없는 친환경 에너지로 각광받고 있다. 우리나라 또한 ‘수소 경제 활성화 로드맵 2019’를 발표하여 주요 에너지원을 친환경 수소 에너지로의 전환을 추진하고 있다. ‘수소 전기차’와 ‘연료전지’를 양대 축으로 수소 경제를 선도할 수 있는 산업 생태계 구축을 위해서는 경제적 · 안정적인 수소 생산 및 공급 시스템이 조성되어야 한다. 정부는 2050년까지 연간 2790만톤의 청정수소 체계 구축을 목표로 하고 있으며, 21년 12월 기준 수소 전기차는 19,404대, 발전용 연료전지 공급 현황은 737.11 MW로 꾸준히 증가하고 있다. 특히, 수소 전기차의 보급, 확산에는 무엇보다 충전 인프라의 확보가 중요하며 21년 12월 기준으로 140기의 수소 충전소가 구축되었으며, 22년 310기 구축 목표 달성을 향해 적극 추진하고 있다. 하지만 수소 충전소의 구성 부품 중 약 54%만 국산 제품이며, 이를 제외한 부품은 외국산을 사용하고 있다. 최근, 코로나 19 상황이 장기화됨에 따라 늦어지는 조달기간과 유지보수, 관리 측에도 지연이 생겨 충전소 구축 일정에 영향을 미치고 있다. 본 연구는 수소충전소 및 배관망 주요 부품의 국산화 기술 개발을 목표로 두고있으며, 수소충전소 국내·외 기술 동향, 주요 설비 및 부품의 점유 비율, 연료전지의 구축현황을 분석하여 기술 국산화 우선 순위를 파악하고자 하였다. 나아가, 수소 충전소 운영 중 안전 현황 파악과 관리의 효율성 제고를 위해 부품 기술에 IT 기술을 접목하여 수소 배관의 누출 및 모니터링 시스템을 개발하여 차세대 수소안전관리 체계 구축의 토대를 마련하고자 한다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030040380, 수소충전소 및 배관망 안전 제고를 위한 필수 장비 국산화 기술 개발)

암모니아 기반 수소추출설비 안전기준 개발 위한 안전항목 분석

Analysis of safety items for the development of safety code
for hydrogen generator based on ammonia

염지웅[†] · 추지안 · 이정운

한국가스안전공사 가스안전연구원

수소경제 활성화 로드맵에 따르면 오는 2030년 연간 194톤, 2040년 연간 526만톤의 수소가 필요하나, 국내 그린수소 생산능력과 기술적 한계, 부생수소 공급 여력, 추출수소의 온실가스 배출 등의 문제들로 인해 수소생산 계획에 차질이 있을것으로 보여진다. 국내 수소 수요 증가에 대비하여 2030년부터는 해외 생산 그린수소를 국내로 도입하는 방안이 필요하며, 해외 그린 암모니아 기반 대량 수소 추출 및 공급을 위해 대용량 장거리 수소 저장·운송을 위한 여러 기술이 고려되고 있다. 이 중 액상 암모니아가 주요 방안으로 제시되고 있고 이에 따라 암모니아 기반 수소추출설비 인프라 확보를 위한 안전기준 개발이 필요하다. 수소법 시행에 따라 '21년 7월에 수소추출설비 검사기준인 KGS AH171가 제정되었으나, 도시가스, 액화석유가스, 탄화수소, 알콜류로 적용원료를 한정하고 있고, 암모니아는 적용범위에 포함되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 암모니아를 활용하여 수소를 생산하는 방식의 수소추출설비에 대한 안전기준 개발에 대해 진행하고자 한다. ISO 16110 등 수소추출설비와 관련된 국제표준 및 국내·외 기준을 비교분석하고, 노드별 위험요소 분석 등을 통해 암모니아 기반 수소추출설비 안전항목을 분석하였다. 그 결과를 활용하여 안전기준 개발의 방향성을 설정하고 안전기준 개발을 통해 암모니아 기반 수소추출설비의 안전보급 및 상용화를 달성하고자 한다.

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원에서 지원하는 신재생에너지핵심기술개발-수소(20213030040550)에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

드론용 이동형 연료전지 안전기준 개정안 도출 연구

A Study on the Revision of the safety codes for Portable Fuel Cells for Drone

조인록 · 최재욱 · 이정운*

한국가스안전공사 가스안전연구원

최근 급격한 산업발전으로 미세먼지와 지구온난화가 가속되면서, 정부는 탄소 중립을 위한 수소 경제 활성화 로드맵을 수립하였다. 미래 성장 동력원으로 꼽히고 있는 수소용품은 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」이 시행되면서 제44조에 의해 검사 받은 제품들만 판매될 수 있으며, 이 인증은 KGS Code를 바탕으로 시행한다. 수소용품 중 이동형 연료전지의 검사대상은 건설기계, 드론, 선박 등이 있으며, 현재까지 KGS AH372(지게차용, '21.8 제정)과 KGS AH373(드론용, '22.1 제정) 총 2건의 안전기준이 제정되었다. 하지만 KGS AH373(드론용)과 관련하여 국내외 실제 수소사고 사례(4종) 등 분석 결과, 수소취성, 진동 등 위험요소가 도출되었다.

이에 본 연구에서는 RTCA DO-160, KS W 9001 등 드론과 관련된 국제표준과 국내·외 안전기준 비교 및 실제사고사례 분석, 위험요소 분석을 진행하여 드론용 이동형 연료전지 안전기준 개정 항목을 도출하였다. 이를 통해 드론용 이동형 연료전지의 안전보급을 통한 국민수용성을 증대하고 수소경제 활성화에 기여하고자 한다.

가정용 도시가스의 전기화에 따른 온실가스 배출영향 분석 Analysis Greenhouse Gas Emission Electrification Household City Gas

김태현 · 박종배 · 노재형 · 이다한 · 우종하
건국대학교 전기공학과

우리나라는 기후변화 문제를 해결하기 위하여 2015년 채택된 파리기후협약과 NDC사항안(Nationally Determined Contribution, 국가 온실가스 감축목표)에 따라 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축할 것을 선언하였다. 뿐만 아니라 2050년까지 탄소배출량을 '0'으로 만드는 2050 탄소중립을 달성할 것을 목표로 세웠다. 이에 대한 실행방안으로 온실가스 배출의 주된 원인으로 꼽히는 석탄과 같은 화석연료 발전에의 의존도를 줄이기 위하여 신재생에너지와 LNG(Liquefied Natural Gas)의 발전비중을 점차 늘려가고 있다. LNG는 연소시 다른 화석연료에 비해 온실가스와 대기오염물질을 적게 배출하는 것으로 알려져있다. 이러한 점을 인정받아 탄소중립을 위한 전원전환의 브릿지 역할로 LNG 발전방식이 K-택소노미에 포함되었다. 하지만 LNG발전 또한 이산화탄소를 배출하기 때문에 지구온난화 등 기후 문제로부터 자유롭지 않다.

LNG는 발전용 연료, 가정용 도시가스 등으로 활용된다. 가정에 공급되는 도시가스는 주로 가스레인지와 가스보일러를 통해 조리나 열을 공급할 목적으로 사용되고 있다. 도시가스의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 줄이기 위하여 미래에는 가스 시설이 점진적으로 '전기화(Electrification)' 될 것으로 예상된다. 가스레인지와 가스보일러의 대체품으로 설치될 전기레인지와 전기보일러는 열을 전달하는 과정에서 직접 생산하는 이산화탄소가 없다는 장점이 있다. 그러나 전기화로 인해 전력수요가 증가하므로 이로 인하여 발전량이 늘어나 탄소배출량이 증가할 수 있다. 본 논문에서는 세가지의 시나리오를 구성하여 시나리오 별 탄소배출량의 증감을 시뮬레이션을 진행하였다. 첫 번째 시나리오는 증가한 수요를 제9차전력수급계획의 전원믹스의 발전원 별 비중과 일치시켜 분배하였다. 두 번째 시나리오에서는 증가한 수요 전체를 LNG 발전량을 증가시켜 충족시켰다. 마지막 세 번째 시나리오에서는 증가한 수요를 태양광·풍력과 같은 신재생에너지를 통하여 충족시켰다. 각 시나리오 별 2020년 가정용 도시가스 시설의 전기화로 인한 탄소배출량의 증감을 비교하였다. 시나리오1은 이산화탄소 배출량이 17,220천톤 증가, 시나리오2는 21,552천톤 증가, 시나리오3은 29,121천톤이 감소하였다.

<시나리오 별 이산화탄소 배출 변화량>

[단위 : 천톤]

	시나리오1 (제9차수급계획)	시나리오2 (LNG발전)	시나리오3 (신재생에너지)
이산화탄소 배출 변화량	+17,220	+21,552	-29,121

Gas-Phase Selective Oxidation of Methane into Methane Oxygenates

Zhenchao Xu¹, Eun Duck Park^{1,2}

아주대학교 에너지시스템학과

Department of Energy Systems Research, Ajou University

Methane is an abundant clean resource and its direct conversion into value-added chemicals has been an attractive subject for its efficient utilization. This method can be more efficient than the present energy-intensive indirect conversion of methane via syngas, a mixture of CO and H₂. Among the various approaches for direct methane conversion, the selective oxidation of methane into methane oxygenates (e.g., methanol and formaldehyde) is particularly promising because it can proceed at low temperatures. Nevertheless, due to low product yields this method is challenging. Compared with the liquid-phase partial oxidation of methane, which frequently demands for strong oxidizing agents in protic solvents, gas-phase selective methane oxidation has some merits, such as the possibility of using oxygen or H₂O as an oxidant and the ease of scale-up owing to the use of heterogeneous catalysts. Based on above background, herein, we summarize recent advances in the gas-phase partial oxidation of methane into methane oxygenates, focusing mainly on its conversion into formaldehyde and methanol, and elucidate the key role played by catalysis in this process.

카본 담체에 담지된 Pd 촉매 상에서 직접 합성한 과산화수소를 이용한 메탄 부분산화반응

Partial oxidation of Methane Using H_2O_2 synthesized *in situ* over Carbon
Supported Pd Catalysts

강종규 · 박은덕*

아주대학교 에너지시스템학과

메탄의 직접 전환은 많은 화학 반응 중에서도 가장 어려운 반응으로 알려져 있다. 산업적으로 이용되는 메탄 전환 공정은 고온·고압에서 일산화탄소와 수소의 혼합물인 합성가스로서 전환한 뒤 유용한 탄화수소 화합물로 전환하는 다단계 공정으로 이루어져 간접적 방법으로 분류할 수 있다. 이러한 높은 온도와 압력의 공정은 장치 및 운용 비용을 높이며, 따라서 저온에서 메탄의 직접 부분 산화, 이량화, 염소화 등의 반응을 통해 메탄의 부가가치화를 시도하는 연구가 이어지고 있다. 하지만 안정한 메탄의 특성 때문에 저온·저압에서 C-H 결합을 활성화하거나 목적 생성물에 대한 높은 선택도를 얻기 어렵다.

기존 액상 회분식 반응기에서 메탄의 부분산화반응은 과산화수소를 산화제로 하여 철이 이온 교환된 제올라이트를 이용하여 수행되었다. 이 촉매 시스템은 수용액 상에서 메탄의 낮은 용해도에도 불구하고 높은 메탄 산화체 수율을 보였다. 해당 연구에 이어 Cu를 이용한 메탄을 선택도 증진, 유기 용매를 이용한 메탄 용해도 증진 등 Fe-zeolite 촉매 시스템에서 다양한 반응 변수를 바꿔 메탄 부분산화반응을 수행하는 연구들이 주를 이루었다.

이번 연구에서는 과산화수소보다 경제적 이득이 큰 산소(공기)를 산화제로 이용하여 메탄 부분산화반응을 수행하였다. 직접 과산화수소를 사용하지 않고 수소와 산소로부터 과산화수소를 직접 합성, 이를 메탄 부분산화반응에 이용하였다. 촉매로는 $PdCl_2$ 을 탄소 물질에 함침하여 만든 Pd/support 가 사용되었고 추가적인 산이나 기타 첨가물은 사용하지 않았다. 담체로는 graphite, carbon black, activated carbon을 이용했고, 그 중 활성이 가장 우수한 Pd/graphite 에 대해 Pd 전구체, 반응 온도 및 시간, 반응 액상의 pH에 따른 실험을 수행하였다. 반응 후 생성물을 정량하기 위해 1H -NMR, 메탄화기가 장착된 GC-FID을 이용하였고 촉매 특성 분석으로 XRD, XPS, TEM-EDS 등이 사용되었다.

액상에서 과산화수소와 Cu-Fe/ZSM-5 촉매를 이용한 메탄의 부분산화반응에서 Cu의 영향

양건식 · 박은덕*

아주대학교 에너지시스템학과

메탄을 메탄 산화체로 선택적 산화시키는 것은 산업계와 학계에서 중요한 주제이다. 메탄 산화체 중 메탄올은 산업계에서 경제적 가치가 높은 화학 원료이다. 그러므로 높은 메탄올 선택성 달성은 촉매 설계에서 중요하다. 메탄 전환의 연구에서 지지체로 ZSM-5를 사용하고 Fe 금속을 합성하여 만든 촉매가 메탄의 부분산화 연구에서 활성이 좋은 것으로 보고되었다. 또한 Cu 금속을 합성하여 만든 촉매에서는 메탄올 선택성이 높다는 연구 결과가 보고되었다. 본 연구에서는 액상에서 과산화수소를 사용하여 메탄을 메탄올로 선택적으로 산화시키는 촉매로 잘 알려진 Cu-Fe-ZSM-5 촉매를 실험하여 이러한 반응에 대한 Cu 종의 역할을 밝혀냈다. Cu-ZSM-5, Cu-Fe-ZSM-5 및 Fe-ZSM-5 촉매는 WI, SIE, IE방법으로 제조되었다. Cu-Fe-ZSM-5 촉매의 메탄올 선택성 상향 효과가 확인되었다. 이온교환촉매가 성능에 미치는 영향이 가장 크고 효과적이다. 그러나 이 반응 동안 Cu 종의 침출이 관찰되어 ¹H-NMR로 포름산의 정량화에 영향을 미칠 수 있다. 불균일한 Cu 종은 메탄의 부분산화 반응에서 선호되지 않는 방향으로 과산화수소의 분해를 증가시키고 이산화탄소의 선택성 역시 증가시킨다.

Fe-zeolite 촉매 상에서 과산화수소를 이용한 메탄 부분산화반응
Partial oxidation of methane with hydrogen peroxide over Fe-zeolite

황석영 · 박은덕*

아주대학교 에너지시스템학과

천연가스의 주요 성분 중 하나인 메탄은 깨끗한 연료와 화학 원료로서 관심을 받고 있다. 가까운 미래에 대한 메탄 하이드레이트를 채굴할 수 있는 잠재력은 화학 산업에서 메탄의 가치를 높여 주고 있다. 또한, 1차 탄소-수소 결합의 선택적 산화는 화학, 제약 및 농업 산업 부문에서 사용하기 위한 중간체 및 최종 제품을 형성하기 위해 원료를 활성화하는 점에서 매우 중요하다. 그러나, 현재의 메탄 기반 화학 산업은 SRM(Steam reforming of methane)을 통해 메탄이 이산화탄소와 수소의 혼합물인 합성가스로 전환되는 메탄의 간접적인 전환에 기초한다. 이러한 간접 경로의 한계를 극복하기 위해 메탄을 부가가치 화학물질로 직접 전환하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 메탄이 메탄올, 포름알데히드, 포름산을 포함한 메탄 산소로 선택적으로 부분 산화되는 것이 활발하게 연구되어 왔다. 수용액에서 과산화수소를 산화제로 하여 Fe-zeolite을 이용한 메탄 부분산화반응이 높은 메탄 산화체의 수율을 보였다. 또한 Fe-ZSM-5의 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비율과 준비 방법은 수용액에서 메탄의 부분 산화를 위한 촉매 활성에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 이번 연구에서는 Fe-ZSM-5의 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비율에 따른 촉매와 다른 Fe-zeolite의 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비율에 따른 저온에서의 과산화수소를 이용하여 메탄 부분산화반응을 수행하였다.

광전기화학적 수소생산용 황화구리인듐/황화몰리브데넘 광전극의 활성화

윤노영 · 채상윤[‡] · 주오심^{*}

한국과학기술연구원 청정에너지연구센터, ^{*}아주대학교 에너지시스템 학과

p형 반도체 황화구리인듐 (CuInS_2)은 광전기화학적 수소생산에 적합한 물리적 성질을 가지고 있으므로 이상적인 반도체 광전극 후보물질로 예상된다. 그러나 황화구리인듐은 빛에 의해 생성된 전자-정공 쌍이 재결합하여 빠르게 소멸되는 문제가 있어 광-수소 전환 효율이 낮은 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 n형의 황화몰리브데넘과 이종접합구조를 이루어 전자-정공쌍이 효과적으로 분리되는 것을 유도하였다. 황화몰리브데넘은 전자 빔 증착법으로 몰리브데넘을 증착 후 이황화수소 분위기하에서 열처리를 하여 제조되었다. 이러한 이종접합 광전극은 초기에는 광활성이 매우 낮았지만 수소생성반응을 하는 도중 in-situ 조건에서 표면이 개질되어 광반응성이 크게 활성화됨을 확인하였다. 이러한 이황화몰리브데넘의 특성은 추후 황화구리인듐뿐만 아니라 다양한 반도체 광전극에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

PSO 알고리즘을 통한 태양광 발전기 MPPT 제어 시스템 최적화
Optimization of MPPT control system for PV generator using PSO
algorithm

김민호 · 임정택 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원

PV generators are usually installed with inverters to generate AC power. The voltage-current relation is determined by PV module Weather conditions including irradiance and ambient temperature. Electrical generation power is finally determined by the inverter control system that are made of several sub-control systems. Of all sub-control system for the inverter, maximum power point tracking (MPPT) control system has the greatest effect on the electrical generation power. Optimal MPPT control algorithm setup varies by the installation place and time. Therefore, Optimization of MPPT control algorithm is necessary to maximize the PV generation power. In this paper, we propose a novel method for finding the optimal parameter of the MPPT algorithm using particle swarm optimization (PSO) algorithm, which is one of the powerful evolutionary search algorithms, and the proposed method is validated with the simulation of PV system. The validation result shows the proposed method can maximize the generation power effectively.

수치예보모델 기반 풍력발전단지 발전량 예측

A Wind Farm Power Prediction based on Numerical Weather Prediction Model

김태형 · 김민호 · 임정택 · 함경선

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

태양광, 풍력 등 재생에너지 발전설비의 증가로 인한 출력 변동성이 커지면서 계통 안정화 및 효율화 운영을 위해 불규칙적인 재생에너지 발전량을 예측하는 기술의 필요성이 증가하고 있다. 특히 풍력발전은 대용량, 대형화되면서 태양광에 비해 단일 발전소의 출력 편차가 커서 발전량 예측에 대한 중요도가 더욱 높아지고 있으며, 풍력발전 운전을 위한 입력 에너지인 바람의 풍속, 풍향 등 풍황 변화가 심해 정밀한 기상 모델이 필수적이다.

본 연구에서는 기상 오차에 따른 발전량 예측의 오차를 줄이기 위해 대기물리과학 기반의 수치예보모델(Numerical Weather Prediction, NWP)을 입력 파라미터로 사용하였으며, 제주 지역 풍력발전단지를 대상으로 2년 이상의 운영 데이터를 활용하여 CNN, LSTM, XGBoost, ANN 등을 기반으로 한 다양한 예측 모델을 개발하고 성능을 비교하였다.

트레이닝 셋은 2018~2020년 사이 약 2년 가량의 데이터이며, 검증 셋은 2021년 중 약 10개월의 데이터를 대상으로 하였다. 모델 평가 방법은 재생에너지 발전량 예측제도에 따른 전력시장 입찰을 고려하여 발전일 하루 이전 10시에 시간대별로 예측한 발전량을 실제 발전량과 nMAPE(Normalized Mean Absolute Percentage Error)를 기준으로 산출하여 평가하였다.

발전량 예측 모델은 평균적으로 12%의 예측 오차 성능을 보였다. 특히 시계열적 패턴이 일관된 일반적인 수요자원 모델과 달리 풍력발전자원은 기상 변화에 영향을 많이 받으므로 LSTM같은 시계열 모델이 아닌 모델에서 더 우수한 결과를 보였다.

본 연구에서 사용한 수치예보모델은 시간 해상도가 1시간으로 해상도가 낮은 수준이다. 풍력발전은 1시간 평균 풍속이 동일하여도 시간 내 풍속 변화 형태에 따라서 발전량의 편차가 큰 편이다. 따라서 향후 수치예보모델 및 실측 기상 정보를 활용하여 시간 해상도를 높임으로써 발전량 예측 정밀도를 높이고자 한다.

< 풍력발전단지 발전량 예측 결과 >

구분	CNN	LSTM	XGBoost	ANN
nMAPE(%)	9.75	17.93	9.56	10.51

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

스마트팜 에너지 소비예측 알고리즘 설계 및 구현

Design and Implementation of Demand Forecast Algorithm in Smart Farm

박승현 · 권기용 · 김용호

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

최근 농가에서는 농가인구의 감소와 고령화 등의 문제를 해결하기 위해 ICT 기술을 접목한 스마트팜 기술이 확대 보급되고 있다. 스마트팜이 농업 효율 및 생산성을 높이는 대신 추가적으로 설치되는 ICT 기기들로 인해 농업용 전기사용량 증가를 발생시키고 있고 그중 인공광원을 활용하여 작물의 생산성을 향상 시키는 연구가 활발히 진행되고 있는데 전기에너지를 기반으로 하는 인공광원의 특성으로 농업용 전기사용량은 더욱더 증가할 것으로 예상된다. 이렇게 증가하는 전력 소비를 충족하기 위해 전력 인프라 증설 대신 태양광·ESS·연료 전지 등의 신재생에너지를 기반으로 하는 마이크로그리드 형태의 전력원 구성이 이루어지고 있어 효율적인 마이크로그리드 운영이 스마트팜에서 필요하다.

따라서 본 논문에서는 마이크로그리드 형태의 스마트팜에 필요한 전력 사용계획의 기본이 되는 에너지 소비예측 알고리즘 설계 및 개발에 관한 연구를 소개한다. 알고리즘은 15분 단위의 향후 24시간을 예측하는 것으로 아래 그림과 같이 클러스터링기반 예측모델과 인공신경망 예측모델이 결합한 형태이다. 이렇게 예측된 에너지량은 태양광의 계통 내 사용여부, ESS의 충방전 스케줄 그리고 연료전지의 발전 스케줄 생성에 활용된다.

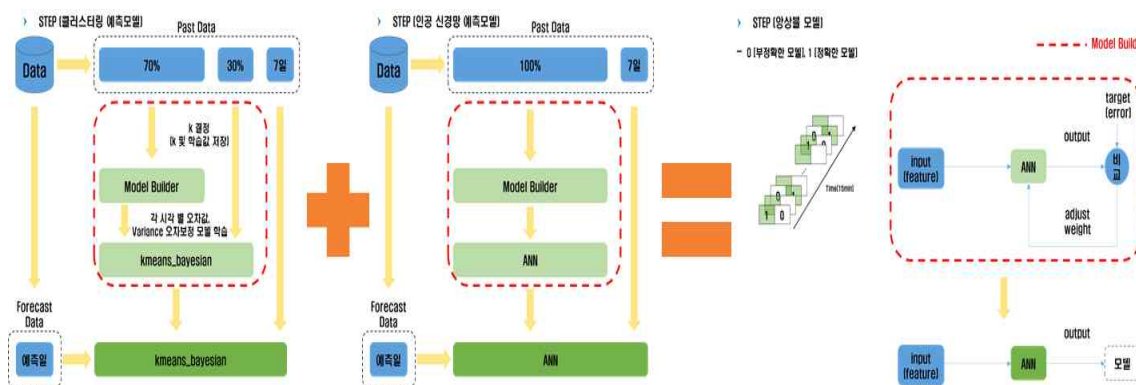


그림. 에너지 소비예측 알고리즘 구조

현재는 건물 에너지 기보유 데이터로 알고리즘 설계 및 구현했고, 작물에 따른 스마트팜의 에너지 데이터로 추가 연구를 진행할 계획이다. 향후 에너지 소비예측을 통한 효율적인 마이크로그리드 운영은 스마트팜과 같은 농촌의 전력 수급 안정성 확보, 에너지 나눔·이익 공유 기반 농가소득 증대에 도움이 되며, 신재생에너지 사용을 통해 온실가스 배출을 억제함으로써 2050 탄소중립 달성에 필요한 수요지 인근의 분산에너지 시스템 구축에도 도움이 될 수 있을 것이다.

이미지 딥러닝 적용 High-Polygon Mesh 생성기법에 관한 연구

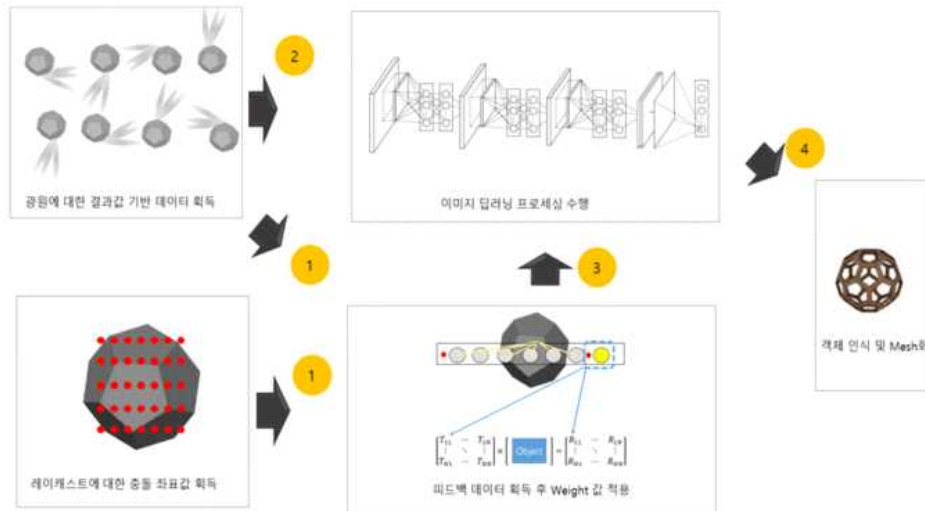
A Study on High-Polygon Mesh Generation Techniques Applied by Image Deep Learning

이상엽 · 김영찬 · 이재규 · 함경선

한국전자기술연구원

초록

본 논문에서는 객체 스캔 후 객체의 형태를 유추할 수 있는 Mesh를 생성하는 방법으로 기존의 적용했던 Raycast 방법에서 공간 내 객체의 조명을 이용, 그림자 이미지를 생성하여 Raycast 데이터와 그림자 이미지 데이터를 딥러닝을 통해 Mesh 생성 정확도를 높이는 방법을 제안한다. 3D 객체를 활용한 시스템 기술이 발전함에 따라, 3D Auto CAD나 Blender, REVIT과 같은 편집 프로그램을 이용하여 High-Polygon Mesh를 생성하게 된다. 이 경우 vertex나 polygon이 불규칙적으로 분포하기 때문에, 사용자나 개발자가 직관적으로 이해하기 어려우며 연산 복잡도가 높아 고사양의 컴퓨팅 리소스를 사용하여 Polygon을 생성하고 있다. 이 경우 실시간으로 Mesh를 생성할 수 없으며, 다양한 응용에 적용하기 위해서는 Mesh를 쉽게 수정할 수 있도록 세분화되어야 하는데 이러한 문제를 해결하기 어렵다. 또한, 객체 내 홀이 있거나 객체의 형태가 Raycast를 통해 스캔이 어려운 경우, 수정가능한 Mesh 생성이 어렵다[6-8]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자, Raycast 방식과 이미지 프로세싱 방법을 동시에 활용하고 이를 위한 딥러닝 구조를 제안한다.



딥러닝기반 Mesh 생성 아키텍처

감사의 글

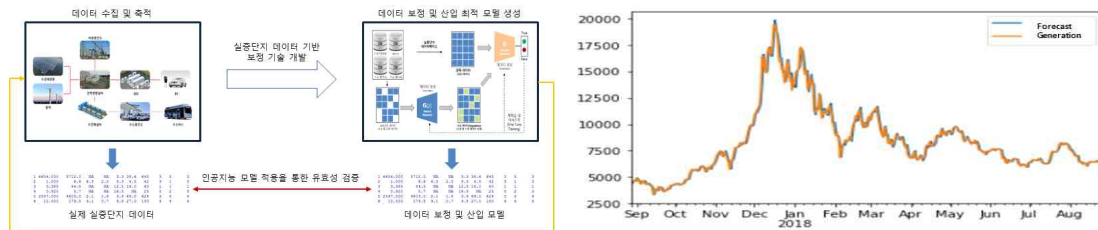
이 논문은 2020 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20207200000010, 재생에너지 디지털 트윈 시스템 및 운영 플랫폼 개발)

재생에너지 데이터 결측값 보정을 위한 산입모델 개발에 관한 연구 A Study on the Development of Imputation Models for Correcting Missing Values in Renewable Energy Data

이재규* · 이상엽 · 조인표 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터*

본 논문에서는 재생에너지 데이터의 결측값 보정을 위한 산입모델 개발에 관한 연구를 수행했다. 재생에너지 실증단지로부터 수집된 손상 및 누락 데이터를 보정하는 기술과 산입(Imputation) 모델에 관한 연구를 수행했다. 결측치(Missing Value)는 수집된 데이터에서 누락된 값 또는 비어있는 데이터를 의미한다. 재생에너지 실증단지로부터 수집되는 데이터는 수집 과정에서 발생하는 오류 등으로 인해 다양한 결측 데이터가 포함되어 있다. 결측 데이터가 포함된 재생에너지 데이터는 정제(Data Cleansing) 과정을 거쳐야만 고품질의 데이터를 확보할 수 있으며, 왜곡이 없는 분석결과를 얻을 수 있다. 결측 데이터 보정기술에는 단순 임의보정법과 회귀 보정법 및 Hot-Deck 보정법 등 다양한 보정방법이 있다. 재생에너지 데이터는 시계열 데이터이므로 평균값 보정법 및 회귀 보정법으로만 재생에너지 결측 데이터를 보정하는 것은 다소 한계가 있다. 최근에는 인공지능 기술을 사용해 결측 데이터를 보정하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.



재생에너지 데이터 수집 및 산입모델 개발

산입모델 테스트 (ARIAM Model)

본 논문에서도 생산적 적대 신경망(GAN, Generative Adversarial Networks)과 ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) 모델을 이용해 재생에너지 결측 데이터 산입 모델을 생성했다. 생산적 적대 신경망을 이용한 모델 생성에서 결측 데이터는 MCAR (Missing Completely At Random)로 가정했으며, 단일 예측값이 아닌 예측된 데이터 분포를 모델링하여 산입된 데이터의 불확실성을 보완하도록 설계했다. 또한, ARIMA 모델은 AIC(Akaike Information Criterion) 기준을 이용해 최적 파라미터(P,D,Q) 값을 산출하여 산입 모델을 생성했다. 왼쪽 그림은 재생에너지 데이터의 수집과 산입모델 생성 및 유효성 검증 절차를 나타낸 것이며, 오른쪽 그림은 ARIMA 모델을 이용한 예측 테스트 결과를 나타낸 것이다. 학습 및 테스트에 사용된 데이터는 태양광 발전단지에서 수집한 발전량 데이터이다.

공동주택단지 복합 비즈니스모델 분석 시뮬레이터를 위한 사용자 인터페이스 A User Interface for Apartment Complex Business Model Analysis Simulator

임정택 · 김태형 · 김민호 · 함경선

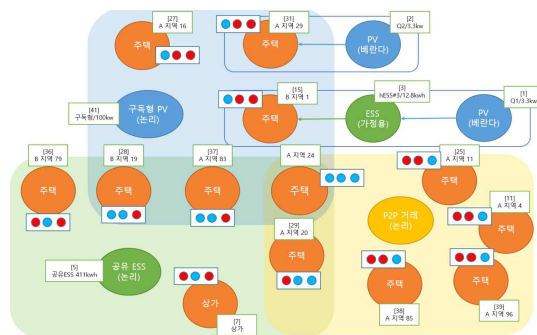
한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

최근 재생에너지에 관한 관심이 높아지고 있다. 정부는 2030년까지 재생에너지 발전량 비중을 20%까지 확대하는 정책을 이행하고 있으며, 민간이나 정부 주도의 다양한 연구개발이 이루어지고 있다. 전체 에너지 사용 비중이 상대적으로 높은 산업용 에너지원에 관한 연구뿐만 아니라 일반 주거용 에너지 효율화에 대한 시도도 다양하게 이루어지는 추세이다.

주거용 에너지 효율화의 대표적인 사례로 공동주택단지의 재생에너지 활용을 예로 들 수 있다. 공동주택단지에 단지소유의 태양광 발전기 또는 ESS를 설치하거나, 개별세대의 베란다 등에 소형 태양광 발전기를 설치하여 단지 수준의 에너지 효율을 개선하는 방식이다. 한국전력과의 직접적인 계약이 관리사무소 수준에서 이루어지기 때문에, 전체 계통에서 단독수용가로 취급 가능하여 단독주택 밀집 지역 등의 다수 개별 계약자 대비 실증이 용이하다.

공동주택단지에서 재생에너지 자원을 활용하여 전기 소비 비용을 감축하는 비즈니스모델은 크게 두 가지로 구분된다. 물리적으로 개별세대에 연결하여, 연결된 세대의 전력 소비액을 감축하는 방법과 논리적으로 구독 서비스 및 세대 간 P2P 거래 등을 통해 전체세대의 전력 소비액을 감축하는 방법이다. 비즈니스모델 분석 시뮬레이터는 공동주택단지를 구성하는 주택 세대와 상가 상업 세대 구성 요소의 물리 및 논리적 연결 관계를 고려하여 경제성을 효율적으로 분석하는 시스템을 의미한다. 본 논문에서는 비즈니스모델 분석 시뮬레이터에서 공동주택단지 구성 요소들의 연결 관계, 물리 및 논리적 연결 관계 등을 사용자에게 효과적으로 표기하는 사용자 인터페이스에 관하여 연구하였다.

임의 주택 및 상가 세대는 방향 그래프(Directed Graph) 형태로 가시화하였다. 각 구성 요소들은 원형 그래프의 노드 형태로 형상화하였다. 물리적으로 연결된 재생에너지 자원을 설치하여 운영하는 경우, 방향 연결 실선으로 연결하여 전기 에너지의 흐름을 표현하였다. 구독형 PV, 공유 ESS, 세대 간 P2P 거래 논리 연결 관계의 경우, 방향성을 가지지 않는다는 점과 방향 연결 실선과 동시에 표기되어야 한다는 점을 고려하여 방향 그래프의 배경에 벤다이어그램 형태로 표기하는 방식을 채택하였다. 또한 논리 연결에 대한 시인성을 높이기 위해, 각 노드에 신호등과 같은 형태로 임의 논리 연결에 대한 별도 표시를 추가하였다.



방향 그래프 형태 사용자 인터페이스

에너지 디지털 트윈 플랫폼을 위한 마이크로 서비스 아키텍처 Microservices Architecture for Energy Digital Twin Platform

조인표 · 이상엽 · 김태형 · 함경선

한국전자기술연구원

초록

풍력 및 태양광을 포함한 신재생에너지 분야는 수요와 공급에 대한 추측과 잉여 전력에 대한 활용이 주요한 분야이다. 신재생에너지는 그러나 기상 기후와 소비패턴에 대한 예측이 주요하기에 정확도 높은 데이터 기반 예측 모델과 3D 형상을 활용한 전산응용해석이 반드시 필요하다. 이런 모델들을 유연하게 운영하기 위해서는 마이크로서비스 아키텍처가 필요하다. 서비스 마다 독립된 자원공간을 활용하는 마이크로 서비스 아키텍처는 리눅스 컨테이너 기법을 활용하여 구현된다. 제안하는 재생에너지 마이크로 서비스 아키텍처의 주요 서비스로 데이터 기반 모델, 전산응용해석 결과 분석 모델, 데이터베이스 서비스, 서비스간 통신 서비스, 컴퓨팅 리소스 모니터링 서비스, 모델 분석 결과 시각화 서비스로 구성된다. 데이터 기반 모델은 머신러닝과 딥러닝과 같은 인공지능 모델들을 운영하는 서비스이며 기상데이터를 활용하여 풍력과 태양광의 에너지 생산량을 예측하고 주요 전력 소비 단지들의 예상 소비량을 예측한다. 전산응용해석 서비스는 전산응용해석의 표준 바이너리 FMU를 활용하여 변경된 입력값들에 대한 출력값들을 연산하고 출력 값들의 표준화를 수행한다. 데이터베이스 서비스는 발생하는 출력들을 데이터 베이스에 축적시키는 인터페이스와 공간을 제공한다. 서비스간 통신 서비스는 서비스간의 임의 메시지 통신을 위해 MQTT, Kafka와 같은 메시지 통신 서비스를 제공한다. 컴퓨팅 리소스 모니터링 서비스는 제공하는 컴퓨팅 리소스들의 현황을 가시화 하여 확인할 수 있는 서비스 이다. 모델 분석 결과 시각화 서비스는 데이터 기반 모델 혹은 전산응용해석 서비스로부터 발생하는 출력들을 시각화 하여 사용자에게 보여줄 수 있는 서비스 이다.

감사의 글

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

딥러닝 기술을 이용한 기업들의 에너지 사용량 예측 설계 Predicting Energy Consumption by Companies Using Deep Learning Technology

이재민 · 윤만석 · 고완진

구미전자정보기술원, 미래이동통신연구센터

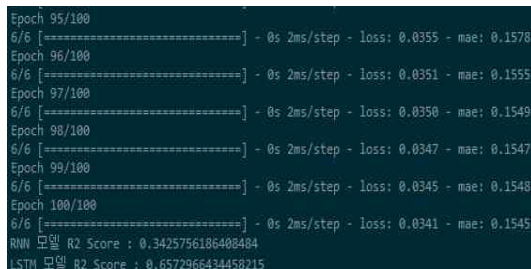
국내에서의 에너지 소비량은 매년마다 증가하는 추세이지만, 대부분의 에너지를 자체 생산이 아닌 해외에서 수입을 해오는 우리나라의 경우 효율적인 에너지 관리가 필수적이다. 2020년에 에너지 수입 의존도가 약 91%까지 내려가 가장 낮은 수치를 기록했지만 그래도 여전히 90% 이상의 에너지를 수입해오기 때문에, 기업들은 지속적으로 에너지 사용량을 점검 및 확인하여 불필요한 에너지 소모를 줄이는 것이 필요한 상황이다.

최근 딥러닝과 머신러닝 관련 연구가 주목을 받으면서 효율적인 에너지 관리를 위한 딥러닝 알고리즘 연구들이 활발히 진행되고 있다. 딥러닝의 알고리즘을 통해 기존 데이터 분석을 활용하여 데이터 사용량을 예측한 후, 해당 결과 기반의 효율적 관리 방안을 마련한다.

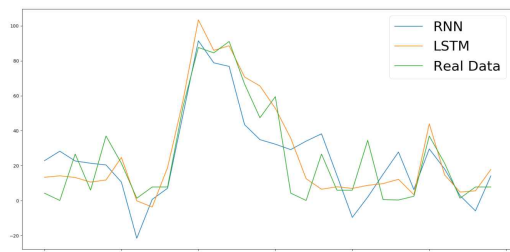
본 논문에서는 RNN(Recurrent Neural Networks) 알고리즘 중에서 LSTM(Long Short-Term Memory) 모델을 활용하여, 구미전자정보기술원에서 구축한 스마트에너지 플랫폼에서 수집한 제조 기업들의 에너지 사용량 데이터 분석을 통한 기업 별 에너지 사용량 예측 설계 방안을 제시한다.

딥러닝 모델 학습을 진행하기 위해 스마트 에너지 플랫폼에서 수집한 기업별 에너지 사용량 데이터를 정리한다. 각 데이터는 기업들의 에너지 총량, 구역 별 에너지 사용량 들을 일별로 정렬한 후 데이터 분석을 시작한다.

LSTM은 RNN 알고리즘의 한 종류로 RNN의 은닉층에서 셀 상태를 추가해서 개선한 모델로 예측 문제에서 더 높은 성능을 보이는 학습 모델이다. 기업 별로 얻은 데이터의 경우 공장의 규모에 따라 에너지 사용량이 차이가 나므로 Min-Max Scaler를 통해 데이터의 정규화를 진행한 후, 해당 데이터를 기반으로 에너지 사용량을 비교한다. 데이터는 2021년 1월부터 12월까지의 데이터를 사용하여 훈련을 진행하였으며, RNN 모델과 LSTM 모델 모두 100번의 에폭을 거쳐 학습을 시켜주었다. 구현한 모델의 정확도를 비교하기 위해 R2 Score를 측정하였으며, RNN 모델은 0.34, LSTM 모델은 0.65로 LSTM 모델에서 성능이 향상된 것을 확인하였다. 표본값이 적어 정확도가 낮은 것으로 판단되며, 임의값을 추가하여 데이터의 양을 늘렸을 때 정확도가 향상된 것을 확인하였다. 지속적인 스마트에너지 플랫폼 운영을 통해 기업들의 데이터 값을 늘려나가면 더 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.



<그림 1> LSTM 학습 과정 및 R2 Score



<그림 2> RNN 모델·LSTM 모델과
실제 에너지 사용량 그래프

리튬이온전지의 열적거동에 대한 열경계저항의 영향 해석

강서희 · 이동철, · 신치범†

아주대학교 에너지시스템학과

리튬이온전지는 높은 에너지 밀도와 긴 사이클 수명 등의 장점으로 에너지저장장치 시장에서 큰 인기를 얻고 있다. 하지만, 에너지 저장 용도에 적합한 범위 내에서 리튬이온전지를 운영하기 위해서는 리튬이온전지의 열관리는 필수적이다. 리튬이온전지는 양극 및 음극 전극 물질이 번갈아 쌓인 층과 알루미늄과 구리 집전체, 전해질이 포함된 다공성 분리막으로 구성된다. 리튬이온전지의 안전한 작동을 위해서는 각각의 셀 구성 요소의 열적 특성 뿐 아니라 구성 요소 간 경계면에서의 열 경계 저항을 고려한 모델링 방법이 필요하다.

본 연구에서는 열 경계 저항이 리튬이온전지의 열적 거동에 미치는 영향을 해석하였다. 각 셀 구성 요소의 밀도와 비열은 체적평균치를 사용하여 구하며, 유효 열전도도는 셀 구성 요소의 열 경계 저항을 포함한 병렬 및 직렬 열 저항 등가 회로에 기초하여 추정된 값을 사용해 계산하였다. 전극 내의 열 발생 속도는 전극의 전위와 전류 밀도 분포의 전산 모사 결과에 근거하여 계산하였다. 리튬이온전지 셀의 열 모델링 결과는 실험값과의 비교를 통해 검증하였다.

탄력운전 적용에 따른 Non-LOCA 안전해석 방법론 개발

Development of Non-LOCA Safety Analysis Methodology according to Flexible Operation

이재민 · 유극중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소는 낮은 발전단가에 따라 기저부하를 담당해왔으나 신재생에너지원의 전력시장 도입이 확대되면서 원전의 탄력적인 운영 필요성이 증대되고 있다. 이러한 전력망(grid)의 변화에 따라 해외원전 건설에서도 탄력운전에 대한 요건이 크게 강화되어 있다. 탄력운전은 크게 부하추종운전과 주파수제어운전으로 구분된다. 정해진 기간, 특히, 하루동안의 전력수요 계획에 따라 부하를 변화하는 출력변화 운전을 일일부하추종운전이라 하고, 전력망의 주파수변화에 따라 자동적으로 부하가 변동하는 경우를 주파수제어운전이라 한다. 탄력운전, 특히, 일일부하추종운전의 영향 분석이 필요한 대표적인 분야로 안전해석이 있는데, 기본적인 검토를 위해 Non-LOCA 안전해석 방법론을 고려해야 한다. 본 논문에서는 개발 진행중인 Non-LOCA 안전해석 방법론에 대해 기술하였다.

기존 Non-LOCA 안전해석은 운전제한 조건(limiting condition operation, LCO) 범위에서 대부분 전출력(95~102%) 혹은 영출력을 고려하여 해석을 수행하는 보수적인 방법론을 적용하고 있다. 이를 위해 전 제어봉 인출(all-rod-out, ARO) 상태에서의 연계자료를 적용한다. 일일부하추종운전의 영향을 반영하기 위해 앞서 언급된 두가지, 즉, 초기조건 및 연계자료를 고려하였다. 먼저 기존 초기조건의 유효성을 검토하여 부분출력 평가가 필요한 사건들을 구분하였고, 일일부하추종운전을 고려한 저출력 범위에서 평가를 수행할 예정이다. 부분출력 운전시 고려한 사항으로는 출력운전삽입한계(power dependent insertion limit, PDIL), 축방향출력분포(axial shape index, ASI), 제어봉가 등이 있다. 두 번째로 일일부하추종운전의 영향으로 변경되는 연계자료를 검토하였고, 기존 결과에 제한되지 않는 사고를 선정하여 평가를 수행할 예정이다. 연계자료에는 핵설계, 열수력, 연료봉 분야 등의 자료가 있다.

상기와 같은 요소들을 적용하여 탄력운전에 따른 Non-LOCA 안전해석 방법론을 개발하였다. 향후 본 연구에서 개발된 안전해석 방법론을 이용하여 각 사건들에 대한 정량적인 평가를 수행할 예정이다.

유전 알고리즘을 활용한 전기자동차용 리튬이온전지의 급속충전 프로토콜 개발

김병목 · 이동철 · 신치범[†]

아주대학교 에너지시스템학과

화석연료에 대한 에너지적인 측면과 환경 문제로 인한 우려가 시간이 지날수록 커지면서 전기자동차(EV)에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 전기자동차(EV)의 상용화에 있어 충전 속도 및 성능은 매우 큰 영향을 미친다. 많은 연구들을 통해 충전 시간 단축, 용량 및 에너지 손실 최적화를 위한 다양한 충전 전략들이 제시되었다. 그러나 충전 시간 단축만을 목적으로 고전류 충전 시 많은 열이 방출되면서 전해질의 분해나 전지 내부의 부반응으로 인해 급격한 용량 감소와 같은 전지의 성능 저하를 유발하는 원인이 된다. 따라서 충전 시간과 전지 내부의 발열량을 고려하여 전지의 수명을 보존할 수 있는 새로운 급속충전 프로토콜을 개발할 필요성이 있다.

본 연구에서는 최적화 기법 중 하나인 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 활용하여 급속충전 프로토콜을 개발하였다. 온도와 충전시간에 따라 파라미터를 조정하여 급속충전 프로토콜을 선정하였으며 리튬이온전지의 전기적 거동과 열적 거동에 미치는 영향을 모델링하였다. 전극에서의 분극 특성에 기초한 옴의 법칙과 전하 보존의 법칙을 지배방정식으로 사용하였다. 실험을 통해 63Ah 리튬이온전지에 대한 급속충전에 따른 전압, 전류, 온도 데이터를 얻었다. 모델을 이용하여 얻은 계산 결과는 실제 시험과 유사한 결과를 나타냈고 이를 통해 모델의 유효성을 검증하였다.

전기자동차용 리튬이온전지의 리튬 석출 영향을 고려한 급속충전 모델 개발

이동철, 김병목, 신치범*

아주대학교 에너지시스템학과

기후변화협약 이후 지구온난화에 대응하기 위해 전기자동차의 보급 확대와 관련 기술개발이 활성화되고 있다. 전기자동차의 주행거리 증가를 위해 리튬이온전지가 고용량·고에너지화에 따라 급속충전 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 급속충전 시에 음극에서 리튬이 석출되는 현상은 전지의 수명 감소에 크게 영향을 미칠 수 있다. 특히 리튬이 석출되면서 발생하는 덴드라이트의 성장은 전지의 내부단락으로 이어질 수도 있다. 따라서 리튬이 석출되는 현상을 방지하는 조건 하에서 최적의 급속충전 알고리즘 개발하여 수명 영향성이 낮고 안전성을 확보하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 충전이 진행되는 SOC 구간에서 리튬 석출 라인을 도출하고, 일정한 안전 마진 값을 가지는 안전 한계 라인을 따라 급속충전을 수행하는 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘이 리튬 석출에 미치는 영향을 검증하기 위하여 안전 한계 라인에 따른 수명 성능 시험을 진행하였다. 또한 개발한 급속충전 알고리즘이 리튬이온전지의 전기적 거동과 열적 거동에 미치는 영향을 모델링하였다. 모델은 전하 보존 방정식과 옴의 법칙을 지배방정식으로 한다. 전산 모사 결과에 근거한 전극의 전위와 전류 밀도 분포를 통하여 온도 분포를 예측하였다. 모델링 결과는 실험 결과와의 비교를 통해 정확성을 검증하였다.

입형 다단 원심펌프 가속 수명 시험을 통한 성능 및 진동 특성 연구

A Study on Performance and Vibration Characteristics
in Accelerated Life Test of Vertical Multistage Centrifugal Pump

이상혁 · 강효민 · 박태국 · 김재형 · 김상교 · 정병창 · 윤인석*

한국기계연구원, *(주)두크

대용량 급수용 및 산업용 펌프 시스템에서 널리 사용되고 있는 기존 구조 방식 펌프에서 임펠러와 디퓨저의 제조 공차와 표면 거칠기를 최소화하고 내식성을 향상하기 위하여, 최근 프레스 기법으로 제작되는 스테인리스 입형 다단 원심펌프의 활용 범위가 커지고 있다. 이에 입형 다단 원심펌프의 성능 및 진동 특성에 대한 연구^(1~2)가 이루어지고 있지만, 장시간 운전에서 따른 입형 다단 원심펌프의 내구 신뢰성을 파악하기 위한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 입형 다단 원심펌프에 대한 가속 수명 시험을 통해 성능 및 진동 특성을 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해, 설계 유량 150 m³/h와 설계 양정 105 m를 갖는 정격 용량 55kW인 입형 다단 원심펌프를 대상으로 보증 수명(B10 수명) 5,000 시간을 목표로 설정하여 가속 수명 시험을 수행하였다. 시험 대상 펌프 1대에 대해 신뢰 수준 80%로 형상 모사(β)가 2.8인 와이블(Weibull) 분포를 갖는 수명 분포를 기반으로 보증 수명에 대한 무고장 시험 시간인 13,238시간을 산출하였으며, 입형 다단 원심펌프 신뢰성 평가 기준인 RS B 0069:2004⁽³⁾에서 제시한 GLL(General Log-Linear) 가속 모델을 기반으로 가속 시험조건에 대해 산출한 가속계수 23을 적용하여 도출된 576시간에 대해 가속 수명 시험을 수행하였다. 이 때, 해당 가속 수명 시험 동안 시험 대상 펌프는 정격회전수 운전을 하고 설정한 최대 전양정의 100%와 50%에 해당하는 운전 조건을 5분 동안 유지하고 1분 동안 변화하도록 구성된 반복 운전 사이클 환경에 노출하였다. 이러한 가속 수명 시험 전/후에 시험 대상 펌프에 대한 성능 시험을 수행한 결과, 가속 수명 시험에 따른 장시간 운전 후에도 유량 범위 전반에 걸쳐 양정 및 효율에 대한 성능 저하가 발생하기 않은 것을 확인하였다. 또한, 펌프 부하 변동에 따른 진동을 측정된 결과, 펌프 진동이 설계 운전 조건에서 최소값을 보이며 설계 운전 조건을 벗어남에 따라 증가함을 보였으며, 가속 내구 시험 동안 펌프 진동은 적용한 유량 범위에 따른 진동 크기가 유사하게 유지됨을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 향후 입형 다단 원심펌프의 내구 신뢰성 향상 및 상태 감시/진단 기술 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20011387)

참고문헌

- (1) Park, S.-J., Lee, M. and Kim J.H., 2020, "A Numerical Study on Performance Characteristics of 55kW Vertical Multistage Fire Pump," *Proceedings of the KSME2020 Annual Meeting*, pp.1823-1825.
- (2) Walter, T.J., Marchione, M.M. and Shugars, H.G., 1988, "Diagnosing Vibration Problems in Vertically Mounted Pumps," *Journal of Vibration Acoustics Stress and Reliability in Design*, Vol. 110, No. 2, pp.172-177.
- (3) RS B 0069, 2004, 입형 다단 원심펌프 신뢰성 평가 기준, 산업자원부 기술표준원.

수요에 기반한 스마트설계플랫폼 개발을 위한 사용자 수요인식 조사 An Investigation of User Demand for Developing a Need-based Smart Design Platform

이민규 · 이성곤† · 이옥현 · 구기관 · 유재정 · 이대근 · 박성준*

한국에너지기술연구원

*㈜날리지웍스

우리나라는 세계 8위의 대표적인 에너지 다소비 국가로 에너지 다소비, 저효율의 소비구조가 고착화되어 있으며 이에 대한 개선 노력이 매우 시급하다. 특히 제조업 분야에서 석유화학, 1차금속 등 에너지다소비 업종의 에너지 소비 비중이 지속적으로 증가하여 공업로, 연소기, 히트펌프 등 에너지 다소비 기기의 에너지 효율 개선이 중요하다. 에너지다소비 기기분야의 에너지 효율 향상 및 맞춤형 설계 서비스 제공을 통한 기업의 기술적 애로사항을 해결하는 스마트 설계 플랫폼(Smart Design Platform) 구축을 본 사업을 통하여 추진하고 있다.

고효율 에너지기기 설계의 수월성 제공을 목표로 하는 스마트 설계 플랫폼이 다수의 사용자에게 활용되려면, 기술공급자와 수요자의 니즈를 플랫폼 개발 시 충실히 반영되어야 하고, 개발된 플랫폼이 지속성 있게 운영되기 위해서는 수요에 기반한 비즈니스 모델 수립이 필요하다. 본 연구는 수요자의 니즈를 정확하게 분석하기 위해서 스마트 설계 플랫폼의 잠재고객을 대상으로 수요 및 인식조사를 실시하였다. 수요인식조사는 공업로, 건조기, 흡수식 히트펌프, 압축식히트펌프, 공업로용 연소기 및 열교환기 산업설비 기업을 대상으로 설문조사 및 심층인터뷰를 통하여 진행되었다. 분야별 기술전문가 논의 및 기업 정보 검색 등을 통하여 설문조사 모집단 총 630개 기업을 도출하였으며, 활용 서비스, 활용 장점, 활용 의향 등 플랫폼 활용에 관한 질문으로 조사를 실시한 결과, 총 84개 기업(회신율 13.3%)이 응답하였다. 주요 응답 내용은 활용수요 100%, 실증참여 수요 71.1%에 달하며, 2/3 기업이 기기설계 기본도면, 공정해석 결과를 플랫폼을 통하여 얻고자 하였다. 더욱 상세한 의견 청취를 위하여 기술공급자 10개사 및 수요자 10개사를 대상으로 심층인터뷰를 진행한 결과, 데이터 신뢰 및 기술보안 이슈, 문제해결형 기술공급-수요 매칭 시스템, 높은 자율성을 확보한 설계 플랫폼, 최적 제품 선정 시스템 구축 의견이 도출되었고, 이를 향후 비즈니스 모델 수립 시 반영할 계획이다.

Acknowledgement

본 사업은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행한 사업입니다.(No. 20202020800200)

계통제염을 위한 고리1호기 설계변경

Design Change of Kori Unit 1 for Full System Decontamination

김정주 · 조현준 · 김학수 · 김초룡

한국수력원자력(주) 중앙연구원

‘경수로 원전 계통제염 실증기술 개발’ 정부과제 성과물인 계통제염상용설비(CIDF: Chemical Injection and Decomposition&Treatment Facility)의 고리1호기 계통연결과 운전 을 위해 필요한 설계변경 사항을 도출하고 이 사항들이 계통에 미치는 영향에 대해선 한국 전력기술과 함께 평가하였다. 현 규제기관은 원전해체를 위한 계통제염을 발전소 운영의 일 환으로 규정하고 가능한 한 현재 발전소 상태를 유지토록 주지하고 있다. 위의 입장을 고려 하여 발전소 계통 및 기기의 물리적 형상에 대해 원설계 개념을 벗어나지 않는 범위 내에서 한시적으로 임시변경하거나 영구정지 안전성분석보고서(DSAR: Defueled Safety Analysis Report)의 경미한 사항 변경으로 가능한 설계변경(안)을 도출하였다.

CIDF를 기존 계통에 연결하기 위해서는 기존 설비의 설계변경이 필요하다. 계통에서 CIDF로 유입되는 유량의 연결지점은 잔열제거 열교환기 후단에서 분지되며, 연결지점 후보 는 VCS-9663, 9664, VCS-HCV-133으로 선정하였다. CIDF에서 계통으로 주입되는 유량 의 연결지점은 잔열제거펌프 전단으로 VRH-9403A/B, Spool Piece, Strainer로 선정하였 다.

계통제염 운전을 위한 설계변경(안)은 공정변수인 압력, 온도, 체적 제어 관점에서 도출 하였다. 압력제어용 기체로는 계통제염 운전압력 이상으로 공급이 가능하며 별도의 설비가 필요없는 질소로 선정하였고, 압력제어를 위한 설비로는 가압기 또는 Accumulator를 선정 하였다. 가압기는 질소공급배관이 없어 추가적인 배관의 연결이 필요하며 입구압력조절밸브 연결은 VRC-902 후단, 출구압력조절밸브는 VRC-8093 후단을 선정하였다. Accumulator 는 질소공급배관이 연결되어 있어 추가적인 배관의 연결은 불필요하나 수위를 자동으로 제 어하는 설비가 없어 운전원의 운전피로를 줄이기 위한 수위자동제어설비의 추가를 검토해야 한다. 온도제어는 기존의 발전소 계통으로 가능하여 설계변경이 필요 없으며 체적제어는 CVCS 유출수계통을 사용하며 충분한 유출수량 확보를 위해 오리피스를 우회하는 배관을 연결해야 한다. 오리피스 전단 연결 후보 지점으로 VCS-9700, 9692, 9690을 선정하였으 며, 후단 연결 후보 지점으로 VCS-9703, 9704, 9705, 8117을 선정하였다.

추가적으로 산화제염공정 수행 중 RCP Seal 보호를 위해 순수의 밀봉주입수를 공급하는 별도 장치인 RSSS(Reactor Seal water Supply System)은 기존 계통인 순수공급계통에서 순수를 받아 화학및체적제어계통 배관에 RCP 밀봉주입수를 공급하며, 연결위치로 XFL-7A/B 전단 및 VCS-9680 후단을 선정하였다. 주입된 순수에 따른 계통영향평가는 순수주입량에 따른 유출수 수용은 기존 2대의 수용탱크에서 가능하며 산화제 회석효과에 따른 방안을 강구할 필요가 있다.

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

CSP 재질의 열노화에 따른 경도 변화 평가 Evaluation on Hardness Change of CSP due to Thermal Aging

박혜성, 김한수, 김건태, 박경흠, 권미자

한국수력원자력㈜

일반적으로 유기체 및 폴리머 재료는 노화가 진행됨에 따라 단단해진다. 케이블의 절연체 및 외피의 재료는 EPR, XLPE, CSP 등 폴리머로 이 역시 노화가 진행됨에 따라 단단해짐을 경험을 통해 알고 있다. 경도라고 불리는 단단한 정도를 정량적으로 측정하기 위해 압입 시험기를 제작하여 시험을 수행하였다.

압입시험은 경도를 측정하기 위한 비파괴적인 방식으로, 가해진 힘 대비 압축된 길이(g/mm)를 측정한다. 본 시험은 케이블의 노화가 진행됨에 따라 경도가 일정하게 변하고, 절연체와 자켓의 경도 변화가 비슷한 양태로 진행됨을 가정해 자켓의 경도 변화를 측정하였다. 시험 방법 및 시험기구의 제작은 IEC 62582-2(2016, Instrumentation and control important to safety-Electrical equipment condition monitoring methods - Part 2: Indenter modulus)을 준용하였다.

시험 순서는 크게 가속 열노화 계획 수립, 시편 제작, 가속 열노화 수행, 압입시험 순으로 수행하였다. 인위적인 노화시편을 만들기 위해 IEEE 323에서 제시된 아레니우스 방법론을 활용하였다. 대상케이블의 활성화에너지(제작사 제공), 운전가정온도(케이블 발열을 고려해 90℃로 설정), 가속 열노화 시험온도(166℃) 변수를 아레니우스 식에 적용해 10년, 20년, 30년, 40년, 50년, 60년, 80년, 100년에 해당하는 노화시편 시간표를 작성하였다. 2개 제작사의 케이블을 40cm 길이로 절단 후 제작사별로 10년부터 100년까지 8개의 시편을 제작하였다. IEC 62582-2에 따라 60mm 이상의 간격을 두고 각 시편당 9회 측정하였다.

선형성이 높은 구간을 취하기 위해 전체 측정구간 중 가해진 힘의 약 100g에서 400g에 대응되는 변위 측정값을 이용해 모듈러스(g/mm)를 산출하였다. 시편 1개당 측정된 9개의 모듈러스 중 최저·최고값을 제외한 평균값을 연도순으로 나열하여 노화 진행에 따른 모듈러스 변화를 산출하였다.

압입시험 결과를 케이블 노화평가에 활용 가능한지 확인하였다. 문턱 압입력은 노화에 따른 경향성을 확인할 수 없었다. 1000g 가압시 최대변위 측정값은 노화 진행에 따라 일정한 추세를 이루고 있어서 노화평가에 사용 가능할 것으로 판단된다. 기술기준에 명시된 모듈러스의 경우 포화 시기가 늦고(A社 40년, B社 60년) 모듈러스 값 변화폭이 크고(A社 8.6배, B社 13.2배), 선형적 이어서(A社 40년까지, B社 50년까지) 노화 모델을 만들 수 있을 것으로 판단된다.

XLPE 절연 케이블의 열화에 따른 유리전이온도에 관한 연구 A Study on Glass Transition Temperature According to Deterioration of XLPE Insulation Cable

김건태 · 김한수 · 박혜성 · 박정흠

한국수력원자력 중앙연구원 계전연구소 검증기술그룹

케이블은 원자력 발전소를 안정적으로 운용하는데 있어 필수적인 구성 요소이다. 최근에는 발전소 수명이 늘어남에 따라 발전소 수명기간 동안 케이블의 건전성을 유지하는 것에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 케이블 노화상태 감시기술을 사용하여 설치수명 동안 케이블의 노화상태를 감시하고 평가하기 위한 기술 개발이 시급하다. 또한 가동원전 주기적 안전성 평가(PSR) 관련 법규 ‘기기검증에 관한 사항’에서는 ‘가혹한 환경으로부터 검증된 기기의 보호대책’에 대한 평가를 요구하고 있어 내환경검증 대상 케이블에 대한 감시 프로그램 개발의 필요성이 대두되고 있다.

본 논문에서는 케이블 노화 상태감시 기술개발의 일환으로 고분자 화합물인 케이블 절연체 및 자켓에 대하여 시차주사열량계(DSC)를 이용한 열화에 따른 유리전이온도의 변화에 대하여 기술하였다. 시험장비는 TA Instrument社의 DSC 25를 사용하였고 상세 사양은 그림1에서 확인할 수 있다. 그림2는 DSC 장비로부터 취득한 시험 결과 일부를 나타내었다. 노화 과정을 거치지 않은 케이블(00Y)에 비해 노화가 진행된 케이블(10Y, 20Y)의 유리전이온도는 감소하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 보이는 이유는 노화에 따라 고분자 재료의 주쇄가 일부 절단 및 분해되었다고 해석할 수 있다. 하지만 10년과 20년의 시험 결과를 비교해보면 알 수 있듯이 노화가 진행됨에 따라 유리전이온도가 비례하여 감소하는 것은 아니며 이는 시험장비의 민감도에 따른 시험 오차일 경우도 배제할 수 없기 때문에 반복적인 시험을 통해 결과를 판정해야 할 것으로 사료된다. 향후 최대 60년까지 케이블의 노화를 진행하여 데이터를 수집하고 결과를 분석할 계획이다.

추가적으로 또 다른 종류의 열분석장비인 TGA(Thermogravimetric analyzer)를 사용한 열중량분석 및 활성화에너지 산출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

SPECIFICATION	
항 목	성 능
Manufacturer	TA instrument
Model	DSC 25
Temperature Range	-90 to 550 °C
Temperature Accuracy	±0.1 °C
Heating Rate	0.01 to 100 °C/min
Pressure Range	Vacuum(1Pa) to 7MPa
Atmosphere	Nitrogen, Oxygen
Dynamic Heat Flow Range	± 500mW
Modulated DSC	○
Auto Sampler	54-position

그림1. DSC 25 Specification

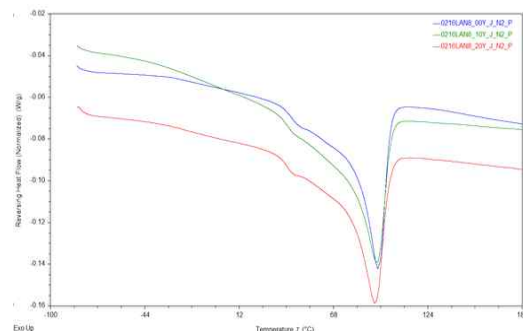


그림2. DSC 시험 결과

유기산 종류 및 온도에 따른 니켈합금 산화막 제거율 평가

Evaluation of oxide film removal rate of nickel alloy according to organic acid type and temperature

김초룡 · 김정주 · 이정희 · 조현준 · 김학수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전세계적으로 중수로 원전은 48기가 운영중에 있으며, 월성1호기를 포함하여 10기가 영구 정지 된 것으로 보고되어 있다. 현재까지 영구정지된 중수로 상용원전들은 지연해체 방식으로 관리되고 있어, 해체사례가 전무한 상태로 안전하고 효과적인 중수로 원전해체를 위한 기술 개발에 대한 관심이 증대되고 있다. 중수로 원전의 경우 경수로 원전과 다르게 냉각재계통과 감속재계통이 분리되어 있다. 냉각재계통의 경우 주유키기 및 배관 등이 탄소강으로 구성되어 있으며, 증기발생기의 경우 초기에는 증기발생기 튜브가 Monel-400으로 주로 구성되었으나, 최근에 재료건전성 등의 문제로 Ni-Fe-Cr 합금인 Alloy800으로 주로 구성되어 있다. 이와 같이 중수로 원전 냉각재계통은 경수로 원전과 달리 주로 탄소강으로, 증기발생기는 Alloy800으로 구성되어 있어 중수로 해체원전에 적용할 수 있는 계통제염 기술이 필요하다.

본 논문에서는 증기발생기 튜브에 침적된 산화막을 제거하기 위해 유기산 종류 및 온도에 따른 산화막 제거율 평가 결과를 기술하였다. 실험조건은 온도의 경우 80℃와 95℃에서 8시간동안 수행하였으며, 제염제의 부피는 1L로 하여 실험을 수행하였다. 이때 사용한 모사 시편은 Alloy800이며, 제염제 농도는 시트르산의 경우 0.05%, 0.1%, 옥살산의 경우 0.1%, 0.2%로 하였다. 산화막 제거율 실험결과, 80℃에서 0.05%와 0.1% 시트르산에 대한 산화막 제거율은 1% 이하로 나타났으며, 0.1%와 0.2% 옥살산의 산화막 제거율은 8% 이하로 나타났다. 95℃에서 0.05% 시트르산의 산화막 제거율은 1% 미만으로 나타났고, 0.1% 시트르산은 5.3%, 0.1% 옥살산은 30%, 0.2% 옥살산은 41%로 나타났다. Alloy800의 경우 실험 온도가 고온임에도 불구하고 산화막 제거율이 낮게 나타났는데, 이는 Alloy800의 경우 니켈 합금으로 내식성을 가지고 있으며, 산화막 내 크롬산화물로 인해 산화막 제거효율이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 그러므로 향후 화학제염 시 고온에서 옥살산을 사용하여 환원공정을 수행하며, 추가적으로 산화공정-환원공정을 수행할 필요가 있다고 판단된다.

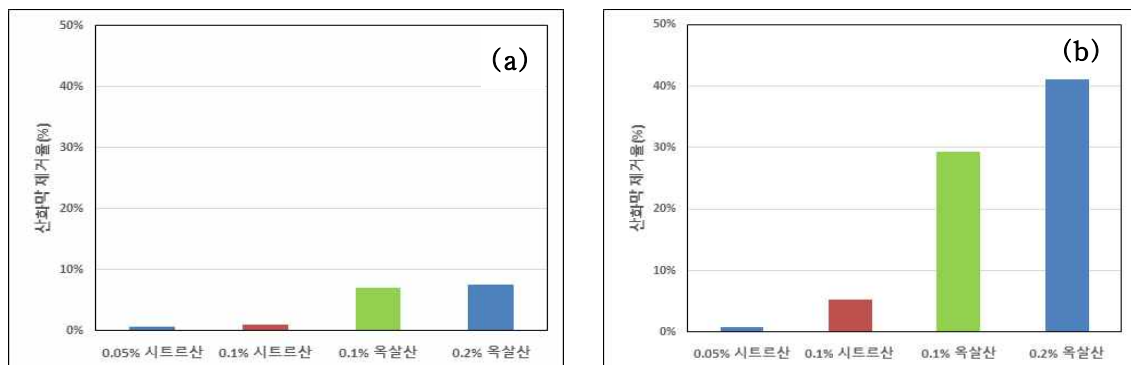


그림 1. 유기산(시트르산 및 옥살산) 농도 및 온도에 따른 산화막 제거율 결과((a)80℃, (b)95℃)

열중량분석을 통한 XLPE절연 케이블 노화 수명 평가 Aging Condition Monitoring of XLPE Insulated Cable Using Thermal Gravity Analysis

김한수 · 김건태 · 박혜성 · 박경흠 · 조성윤*

한국수력원자력 중앙연구원, *한국수력원자력 월성본부

원자력 발전소용 케이블은 전기 장비를 작동하는 데 필요한 전력을 제공하고 원자력 발전소의 안전 기능 및 사고 완화를 수행하는 데 사용되는 다양한 장치와 신호를 전송하기 때문에 원자력 발전소의 중요한 구성 요소임에도 불구하고 케이블은 설계 또는 검증된 환경조건에 따라 수년 동안 신뢰할 수 있는 수동적이고 오래 지속되는 구성 요소로 간주되고 있다. 본 논문은 원자력 발전소용 XLPE 재질 케이블에 대한 열중량분석을 수행하여 케이블 노화의 경향을 파악하고 예측할 수 있는 초기 시험 데이터를 획득하였다.

열중량분석은 시험대상에 대한 열분해에 따른 휘발성 고체, 액체, 가연성 물질 등의 질량변화, 반응온도, 반응속도 등을 측정하여 시험 대상의 고유 특성을 평가하는 기법이다. 이 기법은 열분해에 따른 비금속 재료의 노화를 평가하는데 보조적으로 사용될 수 있다. 열중량분석은 Ozawa법을 사용하여 통계학적인 방법으로 시험 대상을 평가하고 열중량분석에서 얻어지는 질량변화, 반응온도, 반응속도를 통하여 활성화에너지를 산출하게 된다. 대상 케이블에 대하여 원자력 기기검증 기술기준에 서술된 열적 노화 검증 시험을 수행하였으며, 10년 단위로 시험편을 제작하였다. 시험편 제작을 위해 노화된 케이블 절연체를 분리하였으며, 액체질소 분위기에서 시험편을 분쇄하였다. 아레니우스 방정식에서 규명하는 노화수명에 따라 열노화를 수행한 노화 시험편을 대상으로 5 °C/min의 승온속도를 선정하여 Modulating 열중량분석을 수행하였으며 열중량 분석에 따른 시험편의 중량변화가 나타남을 확인하였다. 노화수명이 늘어남에 따라 열중량 분석시 중량변화가 적게 일어남을 확인하였으며 이는 노화가 진행될수록 비금속 재료에 산화가 진행됨을 의미한다.

본 논문에서는 케이블 노화 상태감시 기법 연구를 위해 원자력발전소용 샘플 케이블을 대상으로 열중량분석 및 열노화 시험을 수행하였다. 시험대상 케이블에 대하여 121°C 노화 온도를 설정하여 60년 수명을 목표로 노화를 수행하고 있으며 10년 단위로 열중량분석 측정 결과를 비교 분석하여 현재 30년 수명의 데이터를 취득하였다. 노화가 진행됨에 따라 케이블의 5%중량손실 시 온도변화는 크게 변화가 없는 것으로 확인하였나 활성화에너지가 점차 증가하는 경향을 확인하였다. 본 연구를 통하여 열중량분석이 케이블 노화 상태감시를 위한 타당한 분석 방법임을 확인했다. 추가적인 데이터를 취득하여 케이블 재질에 대한 열중량분석 경향을 파악하고 분석하여 노화 상태감시에 유효한 데이터를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

원자력 안전관련 유체계통 및 관련기기의 세정에 대한 일반규격품 검증 적용성 고찰 A Study on Domestic Commercial Grade Item Dedication Application for Cleaning of Fluid System and Associated Components in Nuclear Safety Related Equipment

양창석 · 홍태화

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

미국 NRC는 규제지침서 Reg. guide 1.164('17)를 통해 Commercial Grade Item Dedication (이하 CGID)가이드라인인 EPRI-3002002982(EPRI NP-5652 Rev.1 + EPRI TR-102260)를 승인하였다. 이에 최신 CGID 가이드라인에 대한 국내 적용성 검토를 통해 CGID 관련 제반 문서(원자력안전법, 시행령, 규제지침 및 절차서 등)에 반영이 필요하다.

Reg. Guide 1.37은 EPRI-3002002982의 참조문서 중 하나로 미국 규제지침 사항이 어떻게 CGID 지침에 반영되었는지를 검토하고 국내 관련 법규와의 호환성에 대한 평가가 필요하다.

2. 미국 규제지침 요건

Reg. guide 1.37-2007, "Quality Assurance Requirements for Cleaning of Fluid Systems and Associated Components of Water-Cooled Nuclear Power Plants"는 ASME NQA-1-1994, Part II, Subpart 2.1 "Quality Assurance Requirements for Cleaning of Fluid Systems and Associated Components for Nuclear Power Plants"를 승인(endorse)하고 있다.

3. 국내 규제지침 적용기준 및 현황

원자력안전위원회 고시 제2016-13호 "원자로시설의 품질보증 세부요건에 관한 기준"에 따라 KEPIC QAP-2 원자력 품질보증 기술요건 II.1항 "원자력발전소 유체계통 관련기기의 세정에 관한 품질보증 요건"을 적용한다. 국내 발전소 시운전 건설 인수시험 단계에서 시공기술규격서 (Construction Package)등에 해당 기술기준을 적용하고 있다.

4. 기본기기(Basic Component)에 대한 정의

국내 기본기기에 대한 정의는 EPRI NP-5652에 따라 10CFR50 Appendix.B에 따른 품질보증 프로그램 하에서 설계 및 제작한 품목 또는 CGID과정을 성공적으로 수행한 일반규격품목으로 안전기능 수행에 영향을 미치는 구조물, 계통, 기기 또는 부품을 의미한다. 미국은 EPRI-3002002982(EPRI NP-5652 Rev.1)에 따라 국내 기본기기 요건뿐만 아니라, 안전성관련 설계, 분석, 검사, 시험, 제작, 부품교체, 그리고 하드웨어 설계인증, 설계승인 등에 대한 컨설팅 서비스를 포함한다.

5. 결론

미국의 CGID 지침이 EPRI NP-5652에서 EPRI-3002002982로 개정되면서 기본기기 정의의 적용범위가 변경되었다. 이로 인해 국내 CGID지침에서 사용하고 있는 안전관련 설비에 대한 용어정의 변경을 통해 최신 기술기준 도입이 요구된다. EPRI-3002002982 국내 도입을 통하여 기본기기 정의에 유체계통 및 관련기기의 세정관련 내용을 반영하고, 일반규격 서비스 적합성 확인절차를 통하여 안전관련 장비의 설치, 검사 및 시험에 대한 CGID 지침을 수립 할 수 있다.

원자력 안전관련 장비의 설치, 검사 및 시험에 대한 국내 일반규격품 검증 적용성 고찰 A Study on Domestic Commercial Grade Item Dedication Application for Installation, Inspection and Testing in Nuclear Safety Related Equipment

양창석 · 홍태화

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

미국 NRC는 규제지침서 Reg. guide 1.164('17)를 통해 Commercial Grade Item Dedication (이하 CGID)가이드라인인 EPRI-3002002982(EPRI NP-5652 Rev.1 + EPRI TR-102260)를 승인하였다. 이에 최신 CGID 가이드라인에 대한 국내 적용성 검토를 통해 CGID 관련 제반 문서(원자력안전법, 시행령, 규제지침 및 절차서 등)에 반영이 필요하다.

Reg. Guide 1.30은 EPRI-3002002982의 참조문서 중 하나로 미국 규제지침 사항이 어떻게 CGID 지침에 반영되었는지를 검토하고 국내 관련 법규와의 호환성에 대한 평가가 필요하다.

2. 미국 규제지침 요건

Reg. guide 1.30-1972, "Quality Assurance Requirements for the Installation, Inspection, and Testing of Instrumentation and Electric Equipment"는 IEEE 336-1971 "Installation, inspection, and Testing Requirements for Instrumentation and Electric Equipment During the Construction of Nuclear Power Generating Station"를 승인(endorse)하고 있으며, 추가로 건설단계(Construction Phase) 뿐 아니라, 운전단계(Operation Phase)에서도 적용할 것을 언급하고 있다.

3. 국내 규제지침 적용기준 및 현황

KEPIC QAP-2 원자력 품질보증 기술요건 II-4항 "원자력 시설의 전력공급 및 계측제어 장비에 대한 설치, 검사 및 시험요건"에서 IEEE-336에 대응하는 KEPIC ENE1100, ENF 1100을 적용한다. 국내 발전소 건설 및 운전에 관한 품질보증계획서와 시공기술규격서(Construction Package) 등에 해당 기술기준을 적용하고 있다.

4. 기본기기(Basic Component)에 대한 정의

국내 기본기기에 대한 정의는 EPRI NP-5652에 따라 10CFR50 Appendix.B에 따른 품질보증 프로그램 하에서 설계 및 제작한 품목 또는 CGID과정을 성공적으로 수행한 일반규격품목으로 안전기능 수행에 영향을 미치는 구조물, 계통, 기기 또는 부품을 의미한다. 미국은 EPRI-3002002982(EPRI NP-5652 Rev.1)에 따라 국내 기본기기 요건뿐만 아니라, 안전성관련 설계, 분석, 검사, 시험, 제작, 부품교체, 그리고 하드웨어 설계인증, 설계승인 등에 대한 컨설팅 서비스를 포함한다.

5. 결론

미국의 CGID 지침이 EPRI NP-5652에서 EPRI-3002002982로 개정되면서 기본기기 정의의 적용범위가 변경되었다. 이로 인해 국내 CGID지침에서 사용하고 있는 안전관련 설비에 대한 용어정의 변경을 통해 최신 기술기준 도입이 요구된다. EPRI-3002002982 국내 도입을 통하여 기본기기 정의에 장비의 설치, 검사 및 시험관련 내용을 반영하고, 일반규격 서비스 적합성 확인절차를 통하여 안전관련 장비의 설치, 검사 및 시험에 대한 CGID 지침을 수립 할 수 있다.

원전 1차 및 2차 계통 수화학 관리 통합 Database 구축

이경희 · 조용상 · 김초롱 · 권혁철 · 송규민 · 최진수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

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

이와 연계하여 한수원 중앙연구원에서는 SAP에 누적된 약 1.1천만건의 수화학 Data를 추출하여 『원전 수화학 통합 DB 프로그램』을 개발하였다. 먼저 엑셀의 매크로와 피벗테이블 기능을 사용하여 DB의 활용목적에 맞춘 기본 구성을 도출하였으며, 발전소 1,2차계통을 대상으로 엑셀 형식의 수화학 DB 프로그램 총 19건을 개발하였다. 이를 기반으로 통합 Data 활용의 단점(엑셀 형식에 따른 Data 저장용량 한계, Data의 수동 업데이트 필요 등)을 보완하여 웹(web) 기반의 수화학 통합 Database로 확장하여 개발을 수행하였다. 1 TB 용량의 가상서버에 DB를 구축함으로써 수화학 빅데이터의 저장이 원활하도록 하였으며, 웹페이지 형태로 구현함으로써 전사 화학기술부 담당자들의 접근 용이성과 사용 편의성을 증대시켰다. 개발된 DB의 강화된 데이터 조회 및 차트 기능을 통해 발전소 데이터의 직관적인 비교분석이 가능하며, 특히 발전소별 EFPD(Effective Full Power Days)에 따른 운전주기 단위의 데이터 비교분석이 가능해짐으로써 수화학 운전진단 평가를 위한 기본 틀을 구축하였다. 본 수화학 DB 프로그램 개발을 통해 강화된 데이터 비교분석 기능과 데이터 추출의 편의 기능을 제공함으로써 화학운전, 경년열화, 노심운전, 방사선안전관리를 위한 다양한 목적의 Data 활용에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

원자력발전소 원자로냉각재(RCS) 아연주입운전에 따른 Co-58 핵종농도 변화

조용상 · 이경희 · 김초롱 · 권혁철 · 최진수 · 송규민

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소의 화학 및 체적제어계통(CVCS)은 원자로냉각재(RCS)의 부피조절, 정화, 화학제어 등의 기능을 한다. 1차계통의 수질관리 목적은 원자로 압력경계 건전성확보와 핵연료 건전성 및 기능유지로 방사선 준위 최소화하는데 있다. 특히 수질관리기술 중 아연주입운전은 원자로냉각재계통(RCS)에 미량의 아연을 주입함으로써, 금속 산화막 구조를 안정시켜 1차계통 방사선량 저감 및 재질 내식성 향상 등을 목적으로 하고 있다. 1차계통의 설비 재질은 스테인리스강과 및 니켈 합금이 주재료이며, 이는 Ni, Fe이 주성분으로 구성되어 있다. 아연주입운전을 통해 1차계통 내 아연이 주입되면 아연은 냉각재, 구조재료에 흡착된 산화물(스테인리스강 및 니켈 합금), 핵연료에 분포하게 된다. 여기서 원자로냉각재와 접촉된 구조재료는 산화막을 형성하고 니켈 합금의 경우 Ni이 대부분을 차지하며(70~90%), 스테인리스강에서는 Fe가 대부분을 차지한다(~80%). 1차계통 재질이 부식하면서 방사화 부식생성물이 생성되며, 이중 계통선량에 주된 영향을 미치는 것은 $[Ni-58 (n, p) Co-58]$ 이다. 이에 따라 원자로냉각재(RCS) 아연주입운전기술을 적용함으로써 냉각재의 방사화 부식생성물인 Co-58 핵종분석을 동반하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

아연주입운전기술을 적용한 A발전소를 대상으로 관련 운전자료 및 수질분석자료를 분석한 결과, 감마핵종분석장비를 이용하여 측정한 Co-58 핵종농도가 주입 전 운전주기에 비해 약 3배 증가하였다. 특히 이는 A발전소에서 운전하고 있는 두 개의 호기에서 동일한 현상이 나타났으며 아연주입운전기술에 대한 계통 내 Co-58의 핵종농도 변화를 확인할 수 있었다. 금속산화막에 아연이 침투 $[NiFe_2O_4 + Zn^{2+}]$ 하여 산화막의 구조를 변화 $[NiFe_2O_4 \rightarrow ZnFe_2O_4]$ 시켜 안정된 산화막 형태로 변화 $[ZnFe_2O_4]$ 한다. 이로써 상대적으로 불안정한 금속산화막을 형성하고 있던 Ni, Co, Fe 성분이 비교적 안정적인 Zn산화물 형태로 치환되었고, 냉각재내로 용출되어 계통 내 Co-58 핵종농도의 상승으로 귀결된 것으로 판단된다. 이처럼 금속산화막에서 아연이온(Zn^{2+})과 치환되어 냉각재로 유입된 방사화 부식생성물은 1차계통 내 정화계통 수지에 필터링 되어 발전소의 전반적인 선량을 저감시키는 요인으로 작용했을 것으로 판단된다. 실제 A발전소의 계획예방정비 중 측정한 주요작업별 피폭방사선량이 아연주입운전기술 적용 이전 주기에 비해 감소하는 효과를 보였다.

중동지역에서 SMR 연계 수전해의 경제성 검토를 위한
실제 태양광 일사량 정보에 기반한 태양광 전력 생산 단가 모의 계산
Calculation of unit cost of electricity generation based on actual solar
radiation data for economic feasibility study of SMR-water electrolysis
linked system in the middle east

하희운

한국수력원자력 중앙연구원

APR1400 원전 이후 신성장 동력 창출 차원에서 발전사업 이외에 다양한 분야에서 활용 가능한 일체형원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발 추진 필요성에 따라 기존 국내 개발 SMR인 SMART원전 보다 안전성 및 경제성이 향상된 혁신형 SMR개발을 추진하고 있다. 본 연구에서는 혁신형 SMR의 활용 방안의 일부인 신재생 연계 및 원전 수출시장 다변화 관련 사전 연구로 중동의 대표적인 나라인 UAE를 대상으로 혁신형 SMR연계 수전해의 경제성 검토를 위한 해당 지역의 실제 태양광 일사량 정보에 기반한 균등화 발전단가(Levelized cost of electricity, LCOE)를 계산하였다. 경제성 검토를 위해 발전단가를 비교하는 이유는 동일 지역 및 저온수전해 시스템에서 수소생산을 가정할 때 발전단가가 수소생산 가격에 미치는 영향이 지배적이기 때문이다. 실제 태양광 일사량에 의한 발전량 및 LCOE는 신재생에너지 발전시스템 발전량 예측 프로그램인 SAM(System Advisor Model)을 이용 계산하고 현재 혁신형 SMR의 LCOE는 가용하지 않으므로 기존 대형 원자력 발전의 알려진 LCOE와 비교하였다.

연구 대상 지역은 앞서 언급한 바와 같이 APR1400이 건설중이며 중동의 대표적인 나라인 UAE로 상정하였고 상세지역은 아부다비와 두바이를 선정하였다. 태양광 발전량 도출을 위한 태양광 복사 데이터는 미국 신재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)에서 제공하는 데이터를 사용하였다. 이를 바탕으로 결과를 도출하기에 앞서 SAM 프로그램의 정확도를 선행연구의 결과와 비교하였고 연평균 발전량에서 5.8%의 오차를 보여 신뢰도를 확인하였다. 이후 혁신형 SMR 1기의 용량과 같은 170MW_p의 태양광 발전 시스템 입력을 작성하여 발전량 및 경제성을 모의하였다.

모의 결과, 아부다비의 경우 \$52.3/MWh, 두바이는 \$43.6/MWh의 LCOE를 보였으며 지역별 일사량에 따른 편차가 있는 것을 확인하였다. 한편, 국제에너지기구에서 발간된 '전력 생산 비용 전망'보고서(2020)에 따르면 원자력발전의 LCOE는 \$42~\$101/MWh(7% 할인율, OECD 국가 기준)의 범위를 보였다. 지역별로 편차가 있지만, 두바이를 기준으로 할 때 원자력 발전 대비 유사한 발전단가를 보였다. 따라서, 수출 대상 국가별 여건을 면밀히 분석하여 수출 전력을 마련하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 분석 결과는 혁신형 SMR의 신재생 연계 및 원전 수출시장 다변화 전략 마련에 활용할 예정이다.

원전 고정자냉각수계통 전도도와 총유기탄소 상승원인에 대한 근본 원인 분석 연구

The Study of Root Cause Analysis about Increasing Conductivity and
TOC(Total Organic Carbon) of Stator Cooling System at Nuclear Power Plant

권혁철 · 송규민 · 최진수 · 이경희 · 조용상 · 김초룡

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전기를 생산하는 설비인 발전기는 크게 회전자, 고정자, 부싱으로 구성되어 있다. 운전 중에는 고정자 권선에서 열이 발생하는데, 생성열을 제거하기 위해 순수를 순환시켜 냉각시킨다. 순수는 고정자 권선 재료부식 최소화를 위해 두가지 방법으로 처리하는데, 첫째는 용존산소를 이용하여 산화피막을 생성시켜 방식을 하거나, 외부 산소유입을 차단함으로써 방식하는 방법이다. 국내 원전은 용존산소를 이용하여 고정자 표면에 산화피막을 생성시켜 방식하고 있다.

국내 A발전소는 기동초기에 냉각수계통 펌프를 교체 운전을 하였으며, 이로 인해 전도도와 총유기탄소(TOC; Total Organic Carbon, 이하 TOC)가 점차적으로 상승하는 현상이 발생하였다. 이에 본 연구에서는 전도도와 TOC 상승의 원인을 규명하고 장기적으로 안전한 원전 운영에 기여하는데 그 목적이 있다. 원인분석을 위해 계통을 구성하고 있는 재료에 대해 알아보았고, 파악된 구성재료와 계통수 운전환경에서 반응 메커니즘에 대해 검토하였다. 검토 결과를 이용하여 종합적으로 전도도와 TOC의 상승원인에 대해 규명하고, 이에 대한 방지 방안도 마련하였다.

고정자냉각수와 접촉하는 재료는 크게 고정자권선, 계통구성재료, 이온교환수지, 필터이다. 고정자권선은 구리(Cu)이고, 계통구성재료는 스테인리스강(Stainless Steel)이며 이온교환수지는 고분자, 필터는 면재질인 것으로 파악되었다. 계통수질 환경은 pH 6.0~6.3이고 용존 산소농도는 4 ppm, 운전 온도는 45~55℃인 것으로 파악되었다. 이러한 환경에서는 고정자 권선 재료인 구리가 부식이 증가될 가능성이 높은 것으로 파악되었다. 구리에 대한 포메다이어그램은 구리재료는 Cu^{2+} 로 용해될 가능성이 높은 것으로 파악되었기 때문이다. 또한 구리재료는 온도가 낮을수록 부식률이 높아지는 본 발전소는 저온에서 장기간 대기함으로써 부식이 가속되었으며, 이로 인해 전도도가 상승한 것으로 파악되었다. TOC 상승의 원인으로는 필터인 것으로 파악되었다. 일반적으로 필터는 섬유를 결합하여 생산하는데 섬유결합을 위해 접착제를 사용한다. 이후 접착제를 제거하기 위해 열로 휘발시키는데 비록 접착제를 열로 휘발시키더라도 필터 내에는 잔류 유기물이 남기 마련이다. 따라서, 필터를 사용하기 위해서는 사전에 세척한 후 사용해야하는데 본 발전소에서는 이러한 과정을 생략하고 바로 사용함으로써 TOC가 상승한 것으로 파악되었다.

고정자냉각수계통 전도도와 TOC 상승원인에 대해 규정함으로써 향후 이에 대한 방지 방안을 마련하였다. 이를 위해 전도도 상승원인인 계통수 저온 환경을 최소화하고 TOC 상승원인인 사용전 세척절차를 마련하였다.

원전해체 시 방사선피폭 최적화 이행을 위한 ALARA 회의체 관리범위 고찰

Consideration of ALARA Committee management scope for the
implementation of Radiation protection optimization during NPP
decommissioning project

김기립 · 서형우 · 유지환 · 김혜인 · 이상현*

한국수력원자력(주) 중앙연구원 원전사후그룹,

*한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털혁신부

규제지침 KINS/RG-N13.04(Rev.1)에서 정의하는 ALARA 회의체(위원회)는 “의사결정자를 보좌하여 포괄적 방호 정책이나 특정 작업에 대한 방호최적화 판단을 지원하는 자문조직”을 말한다. 원자력 관계법령에 따라 국내 원자력발전소에서는 방사선방호 등에 관한 안전조치를 이행하기 위해 상설조직인 ALARA 회의체를 운영하고 있다. 위원회의 구성원은 발전소 안전운전 및 방사선방호 등 필요한 검토 분야의 전문가들로 구성된다.

현재 운영 중인 발전소의 ALARA 회의체는 ALARA 위원회와 ALARA 실무위원회로 구분된다. 이들은 방사선작업을 수행하는 개인 및 집단의 선량을 가능한 최소화하기 위한 절차를 규정한다. ALARA 위원회의 경우 방호최적화 프로그램, 긴급작업 및 계획예방정비의 방사선안전관리계획, 단위 작업별 예상집단선량이 50 man-mSv 이상인 작업의 방사선안전관리계획 등을 검토한다. ALARA 실무위원회는 예상집단선량이 10 man-mSv 이상이고 50 man-mSv 미만인 단위작업 등, ALARA 검토가 요구되는 단위작업들의 방사선안전관리계획을 검토한다.

해체 시에도 원자력관계법령이 적용되므로, 해체가 진행되는 원자력발전소에서도 ALARA 회의체를 운영한다. 스페인 Jose Cabrera 원자력발전소 해체 사업의 경우에도, ALARA 회의체를 ALARA 위원회(정책 실행과 관리에 관한 측면)와 ALARA 그룹(기술적 측면)으로 구분하여 관리하였다. 이 두 회의체는 방사선방호 전문가인 ALARA coordinator가 참여하고 관리한다.

해체 사업에서의 ALARA 위원회의 개최 범위나 역할은 운영 중의 관리기준과 거의 동일하다. 또한 ALARA에 관한 철학이나 정책은 운영·해체 모두 동일한 사항을 적용하므로, 관리나 실행 측면에서의 회의체 운영은 유사한 주제를 다룰 것이다. 그러나 회의체에서 다루어야 할 세부적인 전문지식은 운영 중과 차이가 있다. 운영 중의 ALARA 실무위원회는 핵연료 교체나 발전설비의 주기적 정비·보수와 관련된 방사선작업을 다루는 반면, 해체 사업에서의 ALARA 실무위원회는 설비 및 건물의 제염·철거 단위작업을 중점으로 다룰 것이다. 그리고 이를 총괄하기 위한 ALARA 위원회의 구성원은 해체 사업을 이해하고 있어야 한다.

그러므로, 해체 사업에서의 ALARA 회의체를 구성하기 위한 전문인력이 필요하다. 또한 회의체에 참여하는 구성원은 해체 작업이나 절차 등을 충분히 숙지하고 있는 상태로 참여해야 하므로, 관리자는 이들에게 해체 단위작업에 대한 정보와 교육훈련을 제공해야 할 필요성이 있다.

국내의 해체원전 주관기관 및 산업 환경 비교 검토

A Review of Domestic and Foreign Decommissioned Nuclear Power Plants and Industrial Environment

서형우 · 이상현* · 유지환* · 김기림* · 김혜인*

한국수력원자력 중앙연구원, *한국수력원자력 디지털혁신추진단

국내 최초의 상업용 원전인 고리1호기가 2017년 영구정지 되었고, 현재 안전냉각 기간 중에 있다. 국외는 2020년 기준 전 세계 189기의 원전이 영구정지 되었고 그 중에서 21기의 원전이 해체 완료되었다. 고리1호기는 해체 인허가가 되기 전 안전냉각 기간에 해체 준비 및 관련 해체 기술개발 및 엔지니어링이 이루어지고 있다. 국내 첫 상업용 원전의 해체가 준비 중임에 따라 성공적인 해체를 위해서는 여러 가지 준비가 잘 되어야 하겠지만 해외의 해체사업 추진의 산업 현황 및 국내의 실정을 파악하는 것 또한 사업관리 측면에서 중요한 정보가 될 것이다. 따라서 본 연구는 국내외 해체 원전들의 전담기관의 현황과 각 국가의 해체산업 기반 현황을 파악하고자 한다.

미국의 경우 원전 해체는 민간 원전운영자가 사업을 주도적으로 추진하는 민간주도형 시장이 형성되어 있다. 원전 운영자는 계획수립, 기금확보 및 민간자원을 활용한 해체사업 추진까지 수행하는 실질적인 주체이며, 원자력규제위원회(NRC)와 에너지부(DOE)는 각각 안전성과 환경안전 분야를 관리 및 감독하고, 이를 원전 부지 소재지 관할 주정부 및 시의회를 통해 공유한다.

프랑스 원전 해체산업은 이해관계자가 모두 국영기업이나 공공기관으로 구성된 정부주도적 일원적 추진체계를 갖추고 있다. 프랑스 내 전체 원전을 독점적으로 운영하는 프랑스전력공사(EDF)는 프랑스 원자력 및 대체에너지청(CEA)과 함께한 해체 전담조직인 CIDEN을 설립하였다. CIDEN은 EDF 소유 원전에 대한 해체와 환경복원, 폐기물처리 전략을 수립하고 EDF 해체사업에 대한 내부인증 역할을 담당한다.

영국의 원전 해체 산업환경은 프랑스와 유사하게 국가가 직접 컨트롤 타워 역할을 직접 수행한다는 점에서 강력한 국가 주도형이라 볼 수 있다. 공공 원전 해체 전담기구인 원자력해체청(NDA)은 해체계획 및 추진전략 수립, 해체기금 관리, 방사성폐기물 처리, 환경복원까지 사업단계 전반에 걸쳐 해체사업을 주관한다.

독일의 경우는 철저하게 민간 원전 운영자의 재원을 통해 추진되고 정부는 해체사업 추진에 대한 규제법규 및 관련 지침 등 제도적 방향성을 정립하며, 원전시설 관할 주정부는 이에 따라 해체사업에 대한 계획승인과 허가 업무를 맡아서 진행한다. 주정부는 해체사업 추진에 있어 주요 단계별 허가 권한을 보유하는데, 이를 통해 민간차원의 사업추진을 규정하고 제도화할 수 있는 핵심 규제 역할을 수행한다.

마지막으로 일본은 국가주도형과 민간주도형의 장점을 수용하고 단점을 보완한 절충형이다. 해체 사업의 주체를 민간 원전 운영업체가 맡아 해체계획 수립, 기금관리 및 사업추진을 주도적으로 수행하는 점에서 민간주도형과 유사하나, 폐기물처리 관리 책임에 있어 국가가 일부 개입한다는 점에 차이가 있다.

해외 사례의 해체 전담기관 및 산업 환경을 고려하였을 때 고리1호기의 해체사업은 공공기업인 한수원의 주도하에 해체가 예상된다. 즉 정부기관과 공공기관이 주도하는 정부주도형 혹은 일부 절충형으로 판단할 수 있다. 국내 해체사업 환경 및 전망으로 2018년 “에너지전환 후속 조치 및 보완대책”과 2019년 “원전 해체산업 육성전략”에 기반하여 고리 1호기를 해체를 시작으로 해체사업이 본격화될 것으로 판단된다.

단계별 접근 방식을 이용한 원자력시설 해체 실행 가이드 분석 Analysis of Implementation Guide Using a Grade Approach to Decommissioning a Nuclear Facility

유지환 · 서형우 · 김기림 · 김혜인 · 이상현*

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹

*한국수력원자력(주) 디지털혁신추진단 디지털융합실 디지털혁신부

미국 에너지부(U.S Department of Energy(DOE))에서는 수명이 완료된 원자력 시설 등에 대해 해체 활동을 계획하고 실행하는데 도움을 주기 위하여 시설 전환 중 감시 및 유지 관리를 위한 실행 가이드, 비활성화 실행 가이드, 해체 실행 가이드, 전환 실행 가이드를 개발하였다. 이중 해체 실행 가이드는 LCAM(Life Cycle Asset Management)에서 제시되는 절차에 따라 해체 요건이 마련되고 실행되어야 함을 명시하고 있다. LCAM에 따라 모든 수준의 관리 및 작업 관행은 안전관리 시스템을 체계적으로 통합하기 위해 충분한 계획이 이루어져야 한다. 이를 위해 해체 프레임워크를 제안하며 실행하기 위한 요구사항은 단계별 접근법 적용, 추가 데이터를 포함한 특성화 데이터 수집, 시설 조건에 해당하는 S&M 활동, 대안을 식별, 평가, 선택하는 방법, 특정 시설을 지정하는 엔드 포인트 프로세스가 필요하다. 이러한 프로세스를 시작하고 종료하기 위한 필요한 엔드 포인트 지정 및 활동, 세부 엔지니어링 계획 및 계획 문서화 방법, 해체 접근 방식으로 시간이 중요하지 않은 제거 조치 이용, 프로젝트 최종 보고서, 통합 안전 관리 및 시설 처분 정책과 일치하는 해체 활동이 지정된다.

LCAM 프로토콜에 따르면, 특정 활동을 구분할 수 있는 엔드 포인트를 설정하는 단계가 필요하며 대상은 해체되는 시설의 공간, 시스템 및 주요 기기이다. 이러한 엔드 포인트가 지정된 후 단계별 접근방식은 1 단계-지속적인 감시 및 유지 관리 수행, 2 단계-발견된 문제 식별, 3 단계-해체의 필요성/적절성 평가, 4 단계-해체 수행여부 판단, 5 단계-적절한 S & M 지속, 6 단계-해체 프로젝트 범위 지정 문서 준비, 7 단계-조치 범위를 결정하기 위한 데이터 검토, 8 단계-샘플링 및 분석과 HASP를 포함한 특성화 계획 개발, 9 단계-특성화/문서화 결과 수행, 10 단계-위험 평가 수행, 11 단계-안전 분석 수행, 12 단계-이해 관계자에게 알리고 참여시키기 위한 활동 정의 및 수행, 13 단계-대안 평가, 대응 제안 및 해체 대안 분석 문서화, 14 단계-공개 의견에 응답, 15 단계-최종 결정 문서화로 계획을 마련하고 엔지니어링 및 자세한 작업계획을 마련하기 위해 16 단계-HASP를 포함한 해체 프로젝트 계획 준비, 17 단계-수행 및 문서 준비 검토가 수행된다. 마지막으로 현장에서 해체 작업을 수행하기 위한 18 단계-해체 시설에 대한 조치 실행, 19 단계-S & M 단계적 폐기 수행, 20 단계-프로젝트 마감 및 프로젝트 종료 최종 보고서 완료, 21 단계-필요시 추가 조치, 22 단계-장기 모니터링 설정 및 시정 조치로의 이전으로 종료된다.

이처럼 원전의 운영에서 전환시기를 거쳐 해체실행을 준비하기 위한 단계를 분석하였으며, 통합 프로세스의 지침을 단계별로 분석하여 제시하며, 이는 해체 전환단계에서 이루어지는 비활성화 활동의 업무 그룹을 도출하는 데 도움이 되기를 기대한다.

원전해체 방사성폐기물 추적관리 사례 연구

A Case Study of Radioactive Waste Tracking Management of Decommissioning of Nuclear Power Plant

유지환 · 서형우 · 김기림 · 백준기

한국수력원자력(주) 중앙연구원 방사선해체연구소 원전사후그룹

원자력 발전소 해체기간 동안 발전소 철거 단계에서는 많은 양의 방사성 및 재래식 폐기물이 발생한다. 폐기물은 일반적으로 초기 생성 시점부터 최종 처리를 위해 포장 및 운송될 때까지 여러 번 처리된다. 폐기물 처리 활동은 분할, 재포장, 같은 폐기물을 공통 포장으로 결합하거나 제염과 같은 처리와 같이 물리적 형태나 방사선학적 특성이 크게 변경된 활동이 포함된다. 추적관리에 필요한 기능은 작업 흐름을 효과적으로 모니터링 및 계획하고, 최종 폐기물 패키지의 방사능 내용을 정확하게 설명하고, 폐기물 특성화 샘플링 요구 사항을 최소화하려면 원래 생성 지점에서 최종 처분까지의 폐기물을 추적하는 것이 중요하다. 방사성 폐기물 운송 및 폐기에 대한 WAC(Waste Acceptance Criteria, 폐기물 허용 기준)에 대한 규제 요구 사항은 특성화와 관련된 기록 유지 및 보고에 대한 IAEA 지침에 따라 폐기물 출처(즉, 구성 요소, 시스템, 방 등), 질량 및 부피, 방사선학적 특성, 분류와 같은 폐기물 속성을 추적해야 한다고 결정되었다. 이와 같은 추적성을 충족하기 위해 폐기물 생성자는 외부로 운송하기 전에 구성(물리적 특성), 방사성 특성 및 폐기물 양을 포함하는 기록을 준비해야 한다. 이 연구의 주제는 원자력 발전소 해체 폐기물의 생성 지점에서 최종 처분까지 철저하고 효율적인 추적을 위한 프로세스에 대한 기술적 사양을 개발하기 위해 시작되었다. 폐기물 구성 및 방사선 특성과 같은 정보의 정확한 기록을 유지하기 위해 필요한 정보 중에서 운송을 위해 포장하기 전에 폐기물에 적용될 수 있는 모든 중간 처리 단계를 통해 발전소 내에서 발생 지점부터 폐기물을 추적해야 하는 경우를 위해서 모든 가능한 속성정보를 도출하였다. 이러한 요구를 만족하기 위해 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 해체 폐기물의 상세한 추적을 용이하게 하는 웹 기반 Software 애플리케이션을 개발하는 프로젝트를 시작했다. EPRI에서 개발한 Decommissioning Waste Tracker는 다음과 같은 핵심 기능이 있다. 폐기물 및 용기의 상세한 재고 관리, 폐기물 처리 단계 추적, 최종 폐기물 패키지와 원래 폐기물 항목 간의 완전한 추적성 유지, 특성화 및 분류와 관련된 데이터 캡처, 폐기물 패키지 문서화 및 규제 보고와 관련된 데이터 캡처 등이다. 시스템에서 요구하는 목표는 폐기물 특성화 및 분류 활동을 지원하는 것이다. 폐기물 추적 시스템의 가용성은 주어진 폐기물 항목을 특성화하는 데 필요한 방법은 폐기물에 대한 정보의 가용성에 크게 의존한다. 폐기물의 출처에 대한 신뢰할 수 있는 지식은 폐기물 특성(예: 예상되는 방사성 핵종의 혼합)에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있으며, 이를 통해 보다 간단한(저비용) 특성화 방법을 선택할 수 있다. 또한, 폐기물의 조기 분리 및 특성화 및 최종 폐기물 패키지에 대한 특성화 결과의 적용은 특성화 비용을 줄이기 위한 잠재적 전략으로 확인되었다. 이렇게 하면 초기 특성화보다 자원 집약적일 수 있는 패키징 프로세스의 마지막에 추가하는 특성화의 필요성을 제거할 수 있다. 폐기물 추적 소프트웨어 시스템은 초기 특성화 활동과 최종 폐기물 패키지 사이의 완전한 추적성을 제공하는 효과적인 기록 보관 시스템을 제공함으로써 이 전략의 구현을 도울 수 있다. 마지막으로 초기 특성화 및 개선된 폐기물 흐름 분리로 인한 특성화 정확도의 개선은 폐기물 패키지를 분류할 때 보수적인 가정을 할 필요성을 줄여줄 것이다. 이로 인해 고준위 폐기물로 처리되는 폐기물의 양을 줄여 포장, 운송 및 처분 비용을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

원전 해체사업에 적용 가능한 디지털 시스템 사례조사

A Case Study of Digital System Applicable to Nuclear Power Plant Decommission Project

이상현 · 서형우* · 유지환* · 김기림*

한국수력원자력 디지털혁신추진단, *한국수력원자력 중앙연구원

원전 가동 년수 증대에 따라 원전 해체 대상 시설이 증가할 것으로 예상하고 있으며, 해체 단계는 해체준비에서부터 최종 부지개방까지 해체계획의 수립, 제염·절단 기술 선정, 해체폐기물의 분류·처분, 부지복원, 규제해제 등으로 구분 할 수 있다. 원자력발전소 시설의 운영을 영구적으로 정지한 후 작업자의 안전과 주변 주민의 안전성 확보를 전제로 방사성 오염 물질을 제거하고 시설을 철거하여 원전 부지를 복원하는 모든 기술적, 관리적인 행위를 포함한다.

해체 전 과정에서 작업자의 안전성 확보와 해체 대상시설 및 폐기물에 대한 방사선학적 정보관리, 해체 폐기물의 감량 등이 주요 관심사이다. 해체폐기물은 운영단계와 달리 다양한 종류가 폐기물이 단기간에 대량으로 발생하는 특성이 있으며, 방사성폐기물의 안전한 처분 및 자체처분을 위해서는 폐기물 발생단계부터 처리이력 정보관리가 필수적이다. 해체 시설정보, 해체 작업자 정보, 방사선학적 정보, 폐기물 정보 등을 시스템을 활용하여 관리할 필요가 있다.

원자력발전소 운영과정 중 장비 오염, 오염도가 높은 장비는 원격 조종도구로 해체하거나 기타 로봇장비 등을 활용하는 연구가 진행 중이며, 해체 환경에서 가장 적합한 해체 장비 및 공법을 선정하기 위하여 디지털 환경에서 해체 공정을 선정할 수 있도록 해체 공정에 필요한 주요 요소기술들을 적용한 시뮬레이션 연구 등도 수행되고 있다. 기술이 발전함에 따라 가상의 디지털 환경에서 해체작업 수행 시 작업자의 안전성 확보, 최적의 해체공정 선정, 해체 폐기물량 감량 이를 통하여 해체 사업의 비용 절감 등 여러 목적을 적정 수준으로 지켜나가기 위한 방안으로 도출하고자하는 요구가 높아지고 있다.

해체 프로세스에서 BIM기반의 상호 운용가능한 애플리케이션 기반 플랫폼(PLEIADES)을 구축하기 위한 프로젝트를 유럽에서 진행하고 있다. 7개 국가(프랑스, 독일, 노르웨이, 스페인, 핀란드, 벨기에, 슬로바키아)의 14개 파트너사가 각자 개발한 12개의 시스템(3DScanPF, DIM, Bimsync, iUS IMS, RadPIM, VRdoes, DEMplus, Aquilia costing, iDROP, LLWAA-DECOM, ALVAR, INTERACR)간 협력을 통해 표준화한 데이터 세트를 활용하여 시스템의 활용성을 높이려는 시도로 보인다. 각 시스템은 독립실행형이지만 BIM 또는 3D정보를 활용하여 국제 표준을 위한 온톨로지를 제안하고 있다. 정의된 데이터 인터페이스를 활용하여 동일한 데이터세트를 각 시스템에서 활용하도록 하여 모델과 시나리오를 통하여 각 시스템의 주요기능(엔지니어링, 방사선학적정보 계산, 원가계산, 시나리오 분석 등)을 사용하도록 장려하고 있다.

해체 사업에 적합한 시스템을 개발하기 위해서는 시스템 목적에 따른 사용 대상, 개발 기능, 데이터 생성시기 등을 고려해야 한다. 기존 운영시스템에서 연계되어야 할 데이터에 대한 검토와 해체사업의 특성을 고려하여 필요한 데이터베이스 관리, 향후 정해될 국내기준과 규정에 부합하도록 데이터관리가 중요하며, 이를 가시화할 3D모델 구축 범위에 대한 검토가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

LQG 제어를 이용한 과열도 제어 알고리즘 개선

The Improvement of Superheat Control Algorithm using LQG Controller

이현용

한국수력원자력(주) 중앙연구원

최적의 실내 환경은 여러 가지 매개변수의 조합으로 형성되고, 이때의 매개변수는 공기온도, 공기속도, 상대습도 등을 포함하는 실내온도와 다른 변수들에 의해 생성된다. 최적의 실내 환경제어를 위해서 HVAC(Heating, Ventilation, Air Conditioning)를 이용하여 온도, 습도 공기 흐름 속도에 대한 최적의 설정값을 유지한다. 외부의 열의 변화 및 실내 부하변동을 고려하여 에너지 절감 및 부하변동에 적합한 멀티 압축기, 증발기 등을 적용한 복합적인 시스템으로 구성된다. 이러한 제어특성을 만족하기 위해 제어변수 변화에 따라 과열도 설정값을 선정하여 명령추종(Command Following) 특성을 가져야 한다. 공조시스템의 안전성과 제어성능을 향상시키기 위한 과열도 제어 알고리즘을 제안한다.

공조시스템은 압축기 용량제어와 증발기 과열도 제어를 통해서 AHU(air handling unit) 공급(supply) 공기온도를 제어한다. 변동하는 전체부하를 고려하여 되돌림(return) 공기온도를 제어 변수로 설정하여 전체 부하에 대한 제어가 가능하다. 하지만 되돌림 공기온도의 늦은 응답속도 때문에 과열도 및 용량 제어 시 실제 온도 및 압력의 헌팅이(Hunting) 발생할 수 있다. 온도 제어 성능을 향상시키기 위해 핫 가스(Hot Gas) 제어방법, 멀티 압축기의 용량제어, 과열도(Super heat degree)제어로 서로 영향을 주는 복합적인 시스템 형태로 구성되어 있다. 그래서 과열도 제어는 증발기의 과열도 뿐만 아니라 압축기 및 핫 가스 제어의 변수값을 고려하여 과열도 설정 알고리즘이 필요하다. 되돌림 온도 변화에 따라 공급 온도 설정값을 변화 시켜 최적의 과열도 목표값을 재설정하여 정밀한 온도제어, 압축기로의 액냉매 유입을 방지, 냉각 시스템의 안전을 확보할 수 있다. 과열도 설정 조정 알고리즘을 적용하면 되돌림 온도의 늦은 응답성 때문에 파라미터가 헌팅하는 현상을 줄일 수 있다.

공조시스템은 다변수 시스템으로 구성되어 있고, 이를 제어하기 위해서는 모든 상태변수를 측정해야 하지만 현실적 구현이 불가능하다. 그래서 시스템이 안정가능, 검출가능하다면 최적 추정과 제어 이론인 LQG (Linear Quadratic Gaussian)제어 방법을 이용하여 다변수 제어가 가능하다. LQG 제어시스템의 설계는 최적제어 이론에 기반을 둔 설계파라미터 $\mathbf{G}$ 와 최적추정 이론에 기반을 둔 Kalman필터를 포함한 설계파라미터 $\mathbf{H}$ 를 선정한다. 센서 잡음과 외란 등 입력에 대한 Kalman필터를 설계하여 시스템의 공칭안정도와 가격함수를 최적화한다. 설계된 LQG 제어시스템은 최적 추정과 최적제어를 적용하여 압력 파라미터를 추정하고 압력 헌팅을 감소시켜 성능 및 안전성을 높일 수 있다. 제안한 압력제어 알고리즘을 실험을 통해서 효율성이 검증된다면 공조시스템의 외부환경 변화 및 부하변동에 따라 최적제어를 함으로써 시스템의 제어 성능과 에너지 효율을 높일 것으로 기대된다.

적응 PID 제어를 이용한 난방제어 알고리즘 개선 The Improvement of Heating Control Algorithm using Adaptive PID Controller

이현용

한국수력원자력(주) 중앙연구원

주거건물의 쾌적한 환경을 만들기 위해 적용되는 냉난방시스템은 건물에너지 소비의 약 50%이상이 사용된다. 건물전체의 에너지 절감은 냉난방시스템의 에너지 효율을 높이는 것이 필요하고, 이를 위해 건축시스템 최적화와 제어알고리즘 개발 등 에너지 절감을 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 본 논문에서는 난방시스템은 에너지 효율을 증가를 위한 연구로 외기온도의 변화와 건물내부의 부하량 변화를 고려하여 최적의 상태로 운전함으로써 에너지 성능향상 증가시킬 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다.

난방시스템은 구조는 외부공기와 실내 되돌림(Return) 공기를 혼합시켜 AHU(air handling unit)의 입력에 사용되고, 출력은 난방코일(Heating Coil)에 전기 또는 가열된 오일이나 물을 이용한 열 교환을 통해 난방에 필요한 실내 공급(Supply)공기이다. 에너지 절감을 위해 외기와 되돌림 공기의 혼합비를 조절하여 가열된 되돌림 공기를 최대한 이용하면 에너지 효율을 높일 수 있다. 그러나 실내 이산화탄소 수치를 조절하기 위해 적절한 외기를 유입해야 한다. 외기온도 및 유입량 변화에 따라 실내 공급온도 및 되돌림 공기 설정 값을 보상하는 제어시스템이 필요하다. 외기공기의 유입과 내부 부하의 변화에 따라 공급온도 설정값의 최적화가 필요하고 이러한 불확실성은 상대적으로 느리게 변화기 때문에 온도 설정값의 명령 추종 및 제어성능이 뛰어난 제어알고리즘이 필요하다.

난방시스템에 사용하는 제어시스템은 구조가 간단하고 안정성 보장 때문에 PID제어가 많이 사용되고 있다. PID 제어기의 설계는 일반적으로 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)방법을 이용하여 적절한 게인 값을 선정하고 입출력의 반복적인 실험을 통해서 개선된 PID 게인 값을 조절한다. 외기온도와 건물내부의 부하량이 변화는 경우 PID 게인 값을 시스템의 파라미터를 추정 및 PID값을 게인 값을 조절하는 방법이 필요하다. 적응 PID제어기는 시스템 파라미터 값을 추정하여 PID 제어기의 파라미터를 상태변화에 따라 적응(adaptation)시키는 형태로 PID 게인 값을 적절하게 조절할 수 있다. 난방시스템의 불확실성 및 외란의 영향으로 외기, 실내부하 변화에도 명령추종 성능 향상을 위해 적응 PID 제어를 적용하면 파라미터의 헌팅을 감소시키고 안전성을 높일 수 있다. 제안한 제어알고리즘을 실험을 통해서 효율성이 검증된다면 외부환경 변화 및 부하변동에 따라 최적제어를 함으로써 에너지 효율을 높일 것으로 기대된다.

배선용차단기 일반규격품 품질검증을 위한 고장모드 영향분석에 대한 고찰 A Study on Failure Mode Effect Analysis for Commercial Grade Item Dedication of Molded Case Circuit Breaker

최재훈 · 조은일

한국수력원자력 중앙연구원

배선용차단기(MCCB, Molded Case Circuit Breaker)는 개폐기구, 트립장치 등을 절연물의 용기 내에 일체로 조립한 것으로 통전 사용 상태의 전로를 수동 또는 절연물 용기 외부의 전기 조작장치 등에 의해 개폐할 수 있다. 또한 과부하 및 단락 등의 이상 상태 발생 시 자동으로 전로를 차단하는 부품이다. 본 논문에서는 저압기기(600V 이하)에 사용되는 배선용 차단기에 대한 일반규격품 품질검증 기술평가의 기초가 되는 고장모드 영향분석(FMEA, Failure Mode Effect Analysis)에 대해 살펴보고자 한다.

일반규격품 품질검증이란(CGID, Commercial Grade Item Dedication), 안전관련 설비를 대체하기 위하여 일반규격품을 구매하여 사용해야 할 때 일반규격품이 해당 안전관련 설비에 적용되는 안전등급 및 등급별 규격에 따라 설계 및 제작된 것과 동등한 수준으로 의도된 안전기능을 발휘할 것이라는 합리적인 보증을 제공하기 위해 수행되는 수락과정이다. 따라서 원전용 일반규격품 품질검증은 기술평가(Technical Evaluation)와 수락(Acceptance)으로 구성된다. 배선용차단기에 대한 고장모드 영향분석을 수행하기 위해 고려해야 할 사항으로 배선용차단기가 정상적인 차단기능을 수행하지 못할 경우, 배선용차단기가 투입기능을 수행하지 못할 경우, 배선용차단기가 절연이 파괴된 경우를 고려해야 한다. 배선용차단기에 대한 첫 번째 확실한 고장모드는 차단실패가 있으며 이에 대한 영향분석은 과전류 트립장치 고장, 접점 용착, 수동조작 장치의 변형 등의 원인으로 차단기능을 수행하지 못하며 이에 따라 과전류나 단락전류로부터 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템을 보호하지 못하여 전기적 손상을 발생시킨다. 두 번째 확실한 고장모드는 잘못된 차단으로 과전류 트립장치 고장이나 수동조작 장치의 변형 등의 원인으로 전류가 차단되지 않아야 하는 상황에서 차단될 수 있다. 세 번째 확실한 고장모드는 투입실패로 접점의 기계적 마모나, 수동조작 장치의 변형 등으로 투입기능을 수행하지 못하는 것이다. 네 번째 확실한 고장모드는 절연파괴로 온도나 고전압에 의해 절연이 파괴되어 극간격리 기능을 수행하지 못하는 것이다. 따라서 이러한 고장모드는 주변기기 구성요소, 부품 및 시스템에 전기적 손상을 발생시킨다.

원전 배선용차단기 일반규격품 품질검증을 위한 확실한 고장모드와 영향분석을 통해 안전관련 설비에 적용되는 안전등급 및 등급별 규격에 따라 설계 및 제작된 것과 동등한 수준을 확인할 수 있는 적합한 필수특성을 도출할 수 있을 것이다.

신뢰성 평가에 기반한 인버터 및 충전기 커패시터 수명검증에 대한 고찰 A Study on Capacitor Life Verification for Inverter and Charger Based on Reliability Evaluation

최재훈

한국수력원자력 중앙연구원

국내 원자력발전소는 수많은 기계·전기·계측 설비로 구성되어 있다. 각 설비는 원자력안전위원회 고시 제2018-6호 ‘원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정’에 따라 안전과 비안전등급으로 구분된다. 안전등급은 고장이나 결함 발생시 일반인에게 직접 및 간접으로 방사선 장애를 미칠 가능성이 있는 원자로와 원자로의 안전에 관련된 설비로 일반 산업계보다 엄격한 품질보증(KEPIC QAP) 요건을 적용받는다. 전기설비의 경우 1E급, 비1E급로 구분되며 1E급의 경우 격납건물 격리, 원자로 비상정지, 노심 냉각, 격납건물과 원자로 열제거에 필수적인 전기설비 및 계통과 방사성 물질이 외부환경으로 대량 방출을 방지하는데 필수적인 전기설비와 계통을 말한다. 안전등급 전기 및 계측설비에 제어전원을 공급하는 기기는 필수전원(VBPSS) 인버터, 안전주입(SI) 인버터, 충전기 등으로 구성되어 있다. 안전등급 전기설비는 다양한 부품과 유기체 재질로 구성되어 있고, 심각한 경년열화 메커니즘을 보유한 부품은 원자력안전위원회 ‘경수로형 규제기준 제3장 설계공통 및 3.5 기기검증’과 ‘규제지침 3.11 안전등급 1E 축전지용 충전기 및 인버터에 대한 검증’에 따라 기기검증을 통한 검증수명을 평가한다. 규제지침에서 제시한 기술기준 IEEE Std. 323에서는 기기 수명보다 짧은 심각한 경년열화 메커니즘을 갖는 부품은 수명을 평가하여 부품의 교체주기를 수립하고 수명 도달 전에 교체할 것을 규제하고 있다. 인버터와 충전기는 안전등급 1E급에 해당되며 심각한 경년열화 메커니즘을 가지고 있는 알루미늄 전해커패시터가 사용된다. 따라서 규제지침에 따라 수명을 평가하고 교체주기를 수립해야 한다.

안전등급 인버터 및 충전기에 대한 검증은 규제지침 3.3 ‘안전관련 계측 및 전기기기에 대한 내환경 검증’과 전력산업기술기준 END-1100/ IEEE Std. 323의 기술표준을 만족해야 한다. 상세한 검증방법은 IEEE Std. 650-2006 또는 전력산업기술기준 END-3600을 적용한다. 따라서 인버터와 충전기를 원자력발전소에 설치하기 위해서는 설비 제조사는 한국원자력안전재단에서 인증한 성능검증기관에서 기기검증을 수행해야 한다. 검증은 형식시험, 운전 경험 또는 해석과 같은 여러 가지 방법으로 개별적 또는 조합하여 검증할 수 있다. 일반적으로 성능검증기관은 커패시터 수명 평가를 위해 해당 원자력발전소의 설계조건을 적용하여 가속수명 또는 가속 열노화시험을 통해 검증수명 평가를 수행한다. 설계조건을 적용하는 관계로 실제 커패시터의 환경조건보다 가혹한 조건을 적용하는 것이다. 이러한 시험은 오랜 시험기간과 많은 비용이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 커패시터의 실제 환경조건을 고려하여 합리적이고 효율적인 수명산출 방법을 고찰하고 제시하고자 한다.

Zn으로 도핑된 SnS 필름의 향상된 특성

Enhanced properties of SnS films doped with Zn

Yeonju Shin • Boyeon Kim • Ignatius Andre Setiawan • Hyeseon Park • Dong Hyo Kim • Gedi Sreedevi • Vasudeva Reddy Minnam Reddy • Salh Alhammadi • Woo
Kyoung Kim*

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

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

SnS is a currently investigating light-absorbing material for solar cells because it possessing high stability in ambient environment, high absorption coefficient in the visible range, and abundant elemental storage. To improve the power conversion efficiency of SnS-based solar cells, Zn was doped with various concentrations. The introduction of ZnCl in SnS film is also found to regulate the film growth for enhanced crystallinity. Further, Zn doping effect on properties such as the optical bandgap, crystallinity, chemical composition, morphology, and carrier concentration of SnS films is studied. Zn doped SnS films showed polycrystalline nature. The results indicate that Zn doping is effective way to enhance the properties of SnS films.

황화인듐 나노입자의 녹색합성 및 광촉매 성능 연구
Green Synthesis of Silver Doped Indium Sulfide Nanoparticles and
Investigation of their Photocatalytic Performance

Hyo Jeong Hwang • Salh Alhammadi • Woo Kyoung Kim*

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk
38541, Republic of Korea

*Corresponding author's e-mail: wkim@ynu.ac.kr

The effect of Silver (Ag) doping on In_2S_3 nanoparticles properties and on the corresponding photocatalytic degradation activity of the organic pollution has been investigated. In this work, In_2S_3 doped with Ag with different concentration were prepared using conventional chemical solution process. All the prepared In_2S_3 nanoparticles were characterized using several analysis techniques. The XRD results demonstrated that's all the prepared nanoparticles have a polycrystalline cubic crystal. Further, the Ag-doped In_2S_3 XRD peaks were shifting to lower 2θ indicating the success incorporation of Ag inside the In_2S_3 crystal lattice. The chemical bonding states and composition of the prepared nanoparticles were confirmed from XPS results, which the results showed all the samples has identical structure of In_2S_3 . The photocatalytic ability of the pure In_2S_3 and Ag-doped In_2S_3 nanoparticles were investigated systematically and compared for the decomposition of methylene blue dye (MB) and rhodamine b (RhB) under visible light illumination. Overall, the result showed an excellent improvement of In_2S_3 photocatalytic performance after doping with silver.

원자력발전소 유사설비 분류 방안 검토 Review of similar equipment classification of Nuclear Power Plant

현진우

한국수력원자력 디지털혁신추진단

원자력발전소는 약 300만개의 부품과 6만여개의 설비로 이루어져 있는데 이러한 설비에 대한 체계적인 분류는 설비신뢰성 프로세스 구현을 위한 기반이며 출발점이라 할 수 있다. 국내 원전은 설비관리(PM) 체계에 따라 설비에 대한 기준정보를 관리하고 있으며 이를 기준으로 모든 작업처리(정비, 구매 등)가 이루어지고 있다. 설비기준정보(Equipment Master)는 기능이 수행되는 장소로서의 기능위치(Functional Location)와 기능위치에 설치되어 독립적으로 기능이 수행되어야 할 대상 설비(Equipment)로 구분된다.

- 기능위치(Functional Location) : 발전설비, 구조물 등을 위치 및 기능별로 분류한 논리적 계층으로 체계적인 자산관리의 기준이 되며, 본부, 발전소, 호기, 계통 및 태그번호로 분류하여 비용집계 및 운전정비이력 등 운영정보 및 통계분석의 기준이 된다.

- 설비(Equipment) : 기능위치에 탈 부착되어 기술적으로 기능이 수행되고 정비활동의 대상이 되는 물리적인 개별 대상으로 가동, 고장, 정비, 순환 등 운전 및 정비 이력분석의 체계적인 관리 수단을 제공하는 기준이 된다.

설비기준정보를 기반으로 발생 되는 수많은 데이터(예방정비결과, 고장기록 등)에 대한 체계적이고 효과적인 분석을 위해서는 동일 또는 유사설비에 대한 비교분석이 가능해야 한다. 하지만 현재 설비기준정보에는 이러한 비교분석을 위한 그룹핑 정보가 따로 정의되어 있지 않기 때문에 설비를 분류하고 비교분석 하기 위한 체계적인 방안에 대한 검토가 필요하다.

설비의 종류로는 크게 Pump, Valve, Tank, Fan, Chiller 등 약 60여 개로 나눌수 있는데 각각의 설비는 특성(형식, 용량 등) 또는 기능에 따라 세부적으로 나누어질 수 있다. 설비특성의 적절한 기준을 가지고 분류하면 같은 노형간의 설비비교, 다른 노형간의 유사설비 비교 등이 가능하게 될 것이다. 이러한 설비분류를 위해서는 다양한 정보가 필요한데 본 논문에서는 시간과 인력이 많이 필요한 별도의 문서를 통해 찾는 방법은 제외하고 ERP에서 쉽게 가져올수 있는 설비기준정보를 중심으로 효과적으로 분류가 가능하고 활용이 가능한 항목에 대하여 검토하여 보았다

1) 기능위치명 : 발전소구분코드를 제외한 기능위치명을 활용하면 동일노형간의 동일기능을 수행하는 설비를 분류 할 수 있다

2) PMT 설비클래스 : 총 257개의 예방정비기준 설비 클래스를 운영하고 있으며 설비종류별로 비교적 상세하게 분류하고 있다. 따라서 PMT 설비클래스만 가지고도 유사설비에 대한 1차적인 분류가 가능하다.

☞ PMT : Preventive Maintenance Template (예방정비기준)

3) 설비클래스 : 기계(19개), 전기(23개), 계측(24개)분야로 총 66개의 설비분류코드로 구성되어 있으며 PMT설비 클래스와 조합하여 사용하면 효과적이다

4) 설비특성정보 : 설비클래스별로 설비규격정보에 대한 속성을 정의하고 있으며 설비에 대하여 세부적으로 특성을 구분할 수 있다

클래스명	클래스내역	설비규격 항목(데이터, 변수)
E_001	Valve	발전소표기코드
E_001	Valve	밸브유형
E_001	Valve	구동방식1
E_001	Valve	사용유체
E_001	Valve	설계압력
	:	:
E_002	Pump	발전소표기코드
E_002	Pump	펌프형식
E_002	Pump	구동방식
E_002	Pump	사용유체
E_002	Pump	소요동력
E_002	Pump	일반단위
	:	:
E_003	필터	발전소표기코드
E_003	필터	형식
E_003	필터	사용유체
E_003	필터	설계압력-출구
	:	:

Table 1 설비클래스특성정보 항목 사례

5) 기타 : 이밖에도 설비별 제작사정보, 설비명(description), 중요도, 품질정보 등을 조합하면 좀더 세부적으로 분류가 가능할 것이다

Fig. 1은 위에서 설명한 설비기준정보의 항목정보를 활용하여 펌프설비의 분류체계도를 작성한 사례이다. 1차적으로 설비클래스를 가지고 모든 펌프를 추출하고 PMT 설비클래스를 활용하여 밀폐형펌프, 기어펌프 등 6가지 종류로 구분할 수 있다. 또한 설비특성정보를 활용하면 구동방식별로 추가 분류할 수 있음을 보여주는 사례이다

추가적으로 동일기능에 대한 분류방법도 고려되어야 한다. 다양한 정보에 대한 요구 중 동일기능을 수행하는 설비에 대한 비교분석이 필요하기 때문인데 이를 위해 시스템(PBS NO)코드와 설비명(description)을 활용하면 가능할 것으로 생각한다. 본 사례에서는 계통코드를 통해 우선적으로 분류할 수 있음을 보여주고 있다.

설비클래스	PMT 설비클래스	설비특성정보 (구동방식)	기능측면
펌프	밀폐형펌프	전동기	복수펌프 (531계통)
	기어 펌프	터빈	순환수펌프 (551계통)
	수평원심 펌프	엔진	기기냉각수펌프 (451계통)
	용적식펌프	유압	필수냉각펌프 (461계통)
	수직펌프	기타	사용후연료냉각펌프 (463계통)
	원자로냉각재펌프		보조급수펌프 (541계통)
			: :

Fig 1 펌프 분류표 사례

이와 더불어 실제 데이터가 제대로 들어있는가가 설비분류에 매우 중요하다. 아무리 속성항목이 잘 구분되어 있어도 실제 속성에 대한 데이터가 없다면 분류가 어렵기 때문이다. 현재 국내 원자력발전소의 설비데이터에는 속성정보 입력률이 다소 저조한 경우가 있는데, 효과적인 설비분류를 위해서 속성정보 데이터 입력률 등을 조사, 검토하고 활용 가능한 속성정보 데이터를 제공할 수 있도록 한다면 향후 데이터 기반의 설비신뢰도 분석 프로세싱에 많은 도움이 될 것으로 기대한다.

배관 직관부 길이가 제한적인 유체계통에서 펌프 유량 측정 방안 Method for Measurement of Pump Flow Rate in Fluid System with limited Pipe Straight length

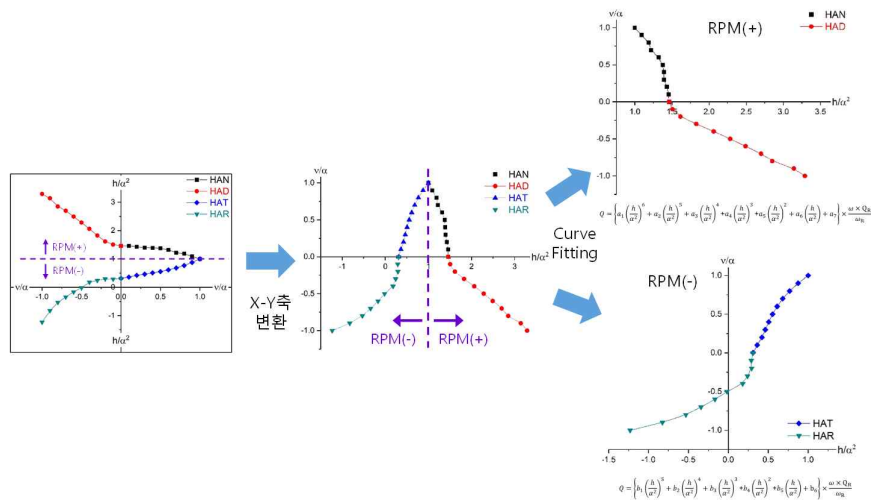
김다용 · 박홍범

한국원자력연구원 수출용신형구로실증업단

일반적으로 계통의 유량 측정은 배관에 설치된 오리피스, 플로우 노즐 또는 벤츨리관 등의 유량 측정기를 통과하는 유체의 차압으로 측정하여 유량을 확인한다. 이러한 방법은 유량계 전단 및 후단에 충분한 배관 직관부가 필요하므로 계통 내 배관의 충분한 여유 공간이 없는 경우에는 간접적인 측정으로 유량을 확인해야 한다.

펌프 차압을 이용한 측정 방법은 펌프 양단의 압력 차이와 유량 사이의 상관식을 이용하여 간접적으로 유량을 확인하는 방법이다. 해당 유량 측정 방법은 펌프 정격 유량지점에서는 비교적 정확하나 펌프 정격지점을 벗어나면 불확도가 급격히 증가하는 제한 사항이 존재한다. 열평형을 이용한 유량 측정 방법은 열교환기 등이 설치된 계통의 유량 간접 확인 시 사용된다. 이는 양측의 열평형을 통해 1차측 유량 계산하는 방법으로 계통 내 열전달 매개체가 존재하여야 하며, 2차측 유량이 직접 측정이 가능해야만 하는 제한 사항이 존재한다. 펌프 호모로그스 곡선을 이용한 유량 확인 방법은 그림과 같이 축 변환된 펌프 호모로그스 곡선을 피팅하여 펌프의 특정 차압에 대한 유량 값을 확인하는 것이다. 펌프 호모로그스 곡선을 이용한 방법의 경우 펌프 역회전을 포함하여 전 운전 범위에서의 유량값을 확인할 수 있는 장점이 있으나, 전반적인 불확도가 다른 두 가지 방법보다 크다. 그러므로 펌프 차압 및 열평형을 이용한 유량 측정값을 이용하여 보정을 수행하여 불확도 값을 감소시킨다.

최종적으로 배관 직관부 길이가 제한적인 유체계통의 유량 측정은 펌프 차압, 열평형 또는 펌프 호모로그스 곡선을 이용한 방법을 계통에 맞게 혼합하여 사용한다.



후 기

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

연구용 원자로 적용을 위한 펌프 관성서행유량 모델 개발

Development of Pump Coastdown Flow Model for Research Reactor Application

김인국 · 박재식 · 정민규 · 윤현기 · 박홍범 · 서경우

한국원자력연구원

연구용 원자로 냉각재펌프는 정상운전시 노심의 핵분열 반응열을 냉각하는 역할을 수행한다. 연구용 원자로에서 전원상실사고가 발생하면 제어봉(Control rod)이 노심에 삽입되어 출력이 감소하게 되며, 노심에서 발생하는 잔열(Decay heat)로 인한 핵연료손상 방지를 위해 냉각재 펌프는 충분한 냉각유량을 공급해야 한다. 따라서, 냉각재펌프는 잔열제거를 위해 관성바퀴(Flywheel)를 포함하고 있으며 잔열제거계통 또는 자연순환으로 잔열을 냉각할 수 있는 구간까지 관성서행유량(Coastdown flow)을 공급한다. 관성서행유량은 사고시 원자로 안전에 직접적인 영향을 주기 때문에 다양한 선행연구가 진행되어 왔으며 대부분의 선행연구는 사고초기 높은 잔열로 인한 핵연료손상 방지를 목적으로 초기유량을 예측하는 것에 초점을 맞추었다. 따라서, 선행예측모델들은 관성서행 후기 구간에서의 유량오차가 증가하는 경향을 보이는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 관성서행 후기구간에서의 예측성능을 향상시킨 관성서행유량 예측모델을 개발하고 소형 실험장치를 이용한 검증을 수행하였다. 계통 내 유량에 의한 압력손실과 펌프 양정, 펌프 유량변화에 따른 영향을 고려하여 지배방정식을 제안하고 펌프와의 상관관계를 기반으로 예측모델을 개발하였다. 제안모델은 선행모델들이 과도상태에서 마찰력에 의한 펌프 효율변화를 고려하지 않은 것과 달리, 유량이 감소함에 따라 기계적 마찰력이 펌프 효율에서 차지하는 비율이 커지는 것을 모델에 반영하였다. 물리적 현상을 기반으로 펌프 효율상관식을 제안하여 과도상태에서 기계적 마찰력에 의한 펌프 효율변화를 정규화(Normalization)된 양정과 각속도에 관한 함수로 제안하였다. 제안모델의 검증을 위해 축소화 척도법(Scaling law)을 고려한 실험 장치로 검증을 수행하였다. 선행이론모델들과 실험결과를 이용해 검증을 수행하여 제안모델이 관성서행유량 전체 구간에서 높은 예측성능을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 정상상태 유량의 20%(관성서행유량 후기)가 되는 시간이 선행문헌들이 평균적으로 10.5%~14.5%의 오차를 보이는 것에 비해 제안모델은 3.8%의 오차를 보이며 저유량에서의 예측성능이 높게 나타났다.

연구 결과로 펌프 관성서행 조건에서 발생하는 펌프 효율의 변화를 모델에 반영하여 향상된 관성서행유량 예측모델을 개발하였으며, 예측모델 및 실험결과는 연구용 원자로 펌프설계시 관성서행유량을 예측할 수 있는 기초자료로 활용할 예정이다.

후기

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

수조형 연구용 원자로의 정상 정지 후 일차냉각계통 가동시간에 따른 수조 온도 예비 평가

Preliminary Evaluation of Pool Temperature according to Operation Time
of Primary Cooling System after Normal Shutdown in Pool Type
Research Reactor

박기정 · 박홍범 · 서경우

한국원자력연구원

일반적으로 중성자 이용 및 동위원소 생산을 목적으로 하는 연구용 원자로는 원자로 노심 냉각과 차폐 관점에서 유리한 개방 수조형(Open-pool type)으로 설계된다. 연구용 원자로의 정상 운전(Normal operation) 시, 원자로 노심을 냉각하기 위한 일차냉각계통(Primary cooling system)이 원자로구조물집합체에 연결되어 노심에서 발생하는 열을 제거한다. 원자로 정상 정지(Normal shutdown) 시, 원자로 노심은 방사선 붕괴로 인한 잔열(Decay heat)이 장시간 생성되고, 이 잔열을 적절하게 제거되도록 설계해야 한다. 만일 노심의 잔열이 적절하게 제거되지 않는다면, 노심 및 수조의 온도가 상승하여 핵연료, 원자로 구조물 및 수조의 건전성을 위협하게 되므로 후쿠시마 원전사고와 같은 대형 사고가 발생 할 수 있다. 수조의 냉각과 정화를 위해 일차냉각계통과 독립적으로 설치되는 수조냉각계통(Pool cooling system)에서 이 붕괴열을 제거하도록 설계되나, 초기의 큰 붕괴열을 고려하여 설계할 경우 수조냉각계통 열교환기가 과대해 질 수 있어, 원자로 정상 정지 초기의 큰 노심 붕괴열은 일차냉각계통의 추가적인 가동을 통해 제거하도록 설계하는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 가상 연구로 모델을 설정하여, 수조 사이즈와 수조냉각계통의 냉각 용량 및 수조 제한 온도를 정하고, 일차냉각계통의 가동시간을 변수로 하여 수조 온도 변화를 평가하였으며, 이 결과를 바탕으로 일차냉각계통의 추가 가동시간을 최적화하였다. 평가 결과, 일차냉각계통을 추가로 가동시킬 경우, 수조 온도는 지속적으로 증가하지 않고 일정 온도까지 상승하고 다시 감소하게 된다. 이는 노심 잔열이 시간이 지남에 따라 점차 줄어들게 되어 초기에 발생하는 큰 열량을 제거할 경우 점차 수조 온도는 감소하는 추세가 된다. 또한, 일차냉각계통의 가동시간을 증가시키게 되면 상승하는 수조 최고 온도가 비례적으로 줄어들게 되어 수조 사이즈와 수조냉각계통의 냉각 용량을 고려하여 수조 온도를 제한치 이하로 유지하기 위한 가동시간을 최적화할 수 있다.

본 평가는 일차냉각계통의 추가 가동 가능시간과 설계마진을 포함한 수조 온도 제한치 설정에 대한 상세 검토가 추가로 필요하며, 평가 결과는 연구용 원자로 일차냉각계통 운전 절차와 수조냉각계통의 냉각 용량 설계에 반영할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과입니다.

수조수상실사고를 고려한 연구용 원자로 일차냉각계통 배관 설계

Pipe design of primary cooling system against LOCA in a research reactor

박홍범 · 서경우

한국원자력연구원 수출용신형연구로 실증사업단

개방수조형 연구용 원자로에서 수조수상실사고는 연구용 원자로의 안전성과 관련된 중요한 이슈 중의 하나이다. 개방수조형 연구로에서 수조수상실사고가 발생하면 대처설비가 없을 경우 기기배치의 특성으로 인해 원자로수조수가 대부분 상실되며, 노심이 공기중에 노출되어 손상될 수 있다. 대부분의 연구로에서는 공학적안전설비를 설치하여 수조수상실사고에 대처를 하는데, 공학적안전설비는 안전 기능을 수행하기 때문에 설계단계에서 운영단계까지 높은 품질 등급, 검증 시험, 정주기시험 등의 다양한 요건 및 이를 수행하기 위한 소요시간이 필요하고 이와 연결되는 고가의 안전등급 보조 설비들과 설치 공간이 요구되므로 추가할 경우 건설 및 유지 비용이 크게 증가한다. 수조수상실사고 대처를 위한 공학적안전설비의 추가는 비용에 큰 영향을 미치게 되어 연구로의 수출 경쟁력을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 근본적으로 수조수상실사고를 최소화하여 공학적안전설비를 경량화 함으로써, 연구로의 수출 경쟁력을 늘리는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 연구로 일차냉각계통을 개선하여, 수조수상실사고를 최소화하고 수조수상실사고 대처를 위한 공학적안전설비를 제거할 수 있는 일차냉각계통 개념에 대하여, 펌프의 유효흡입수두를 고려하여 배관 설계를 수행하였다. 또한 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 발간한 배관파손 크기별 빈도 예측 방법에 따라 사고해석 시 배관 파손의 크기를 감소시키기 위해서 배관 길이가 최소화되어야 한다는 요건을 만족시키기 위해 일차냉각계통의 배관 길이를 최소화 하였다.

배관 크기 설계를 위해 배관 크기별 일차냉각계통 냉각재 속도를 다른 연구용 원자로의 일차냉각계통 냉각재 속도와 비교하였으며, 일차냉각계통의 압력손실을 고려한 펌프의 유효흡입수두를 만족시키고 수조수상실사고를 고려한 높이에 일차냉각계통 유체기기와 배관 설치를 결정하였다. 배관길이를 최소화하기 위해 원자로출구에서 일차냉각계통 펌프, 열교환기까지의 거리는 최소화하였다.

본 연구를 통해 결정된 일차냉각계통은 향후 고출력 연구용 원자로 수출 시 사용될 예정이다.

후 기

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

연구용 원자로 플랩밸브의 수조 외부설치 설계를 위한 CFD 해석 Numerical Analysis for the Installation Design of Flap Valves outside the Research Reactor Pool

서경우 · 정민규 · 박기정 · 김인국 · 박홍범

한국원자력연구원

연구용 원자로는 정상 출력 운전시 일차냉각계통의 일차냉각계통 펌프와 열교환기등을 이용하여 원자로에서 발생 되는 열을 제거한다. 일반적으로 이러한 연구용 원자로는 원자로를 수조내에 개방형으로 설치하여, 정상 출력 운전 후 정상적인 shutdown 후 또는 사고시 원자로가 자동정지 후에는 노심의 잔열을 제거하기 위해서 수조내의 수조수로 인한 자연대류를 이용함에 따라서 연구로의 안전정지의 핵심 기능을 수행한다. 출력 운전을 위한 펌프정상운전시에는 이 유로를 차단하고, 펌프 정지 후 자연대류 유로가 필요할 시에는 이 유로를 개방할 수 있도록 수조내에 flap valve와 같은 특수 밸브를 설치한다. 일반적으로, 수조표면으로부터 5m 이상의 수조내에 설치되는 이러한 특수밸브는 설계도 어려울 뿐 아니라 상당한 비용을 요구하게 된다.

본 연구는 수조내에 설치되는 flap valve의 특수성을 완화시키면서 기존의 정상운전과 모든 사고시에 수조수를 이용하여 자연대류를 형성시킬 수 있도록 flap valve를 수조외부에 설치를 위한 개념 설계를 수행하는 것을 목적으로 한다. 정상운전시 기존의 flap valve를 수조수 외부에 설치함에 따라 일반적인 체크밸브로 설계하지만 본래의 기능을 수행하여 자연대류를 형성시키도록 밸브의 전후단 배관을 수조를 관통하도록 설치하였다. 또한 수조외에 설치된 배관이 파손되었을 때 수조수가 노심 상부까지 유출되지 않도록 설계하였다. 이렇게 새로 고안된 flap valve의 위치에서 기존의 연구로 잔열제거를 위한 수조내 자연대류가 잘 형성되는지에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 수조내 자연대류를 해석하기 위해 원자로 및 수조내부를 간략화 모델링을 수행하였으며, 수조내 일차배관에서 연장되어 수조외부로 통해 다시 수조로 들어가는 flap valve 및 배관을 모델링하였다. 해석초기조건은 수조하부온도를 27°C로 유지하였으며, 수조상부에는 수조상부로 들어오는 고온의 물이 온도층을 형성하도록 모델링 하였다. 잔열을 위한 heat source는 80kW로 유지된다고 가정하였으며, 노심을 모사하기 위해 porous media 모델링을 통해 노심차압이 형성되도록 하였다. 수조 벽은 adiabatic 모델을 사용하였으며, 수조상부와 플랩밸브 외부 배관에는 20°C 온도로 강제대류를 통해 열전달이 형성되도록 하였다. Unsteady 해석을 수행하기 위한 time step size를 평가하여 time step size를 적용하였으며, 수조 및 플랩밸브 배관에서의 mass flow rate 및 온도계산을 수행하였다.

후 기

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

델파이 기법을 활용한 원전에 대한 폭발물 위협 평가를 위한 모델링 및 시뮬레이션의 신뢰성 평가

Credibility Assessment of Modeling and Simulation for the Evaluation of
Explosive Threats to Nuclear Power Plants Using the Delphi Method

김우철 · 김혜승

한국원자력통제기술원 물리적방호실

최근 해외에서는 제조가 용이한 급조폭발물 또는 드론을 이용한 폭발물 테러가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 폭발물 위협은 인명 살상뿐 아니라 국가중요시설에 대한 피해를 야기할 수 있다. 폭발물을 이용한 물리적방벽의 파괴는 테러리스트가 시설 내부로 빠르게 침입하는 것을 가능하게 하고 적절한 시기에 대응하는 것을 제한한다. 원전에 대한 사보타주 시도 시 폭발물을 사용할 경우 테러의 저지 가능성을 약화시킨다. 이에 따라 원전에 대한 폭발물 위협의 대상이 되는 물리적 방벽들의 성능 데이터베이스를 구축하고, 관련 규제기준을 마련하는 것이 시급한 실정이다. 해당 데이터베이스 구축을 위한 모델링 및 시뮬레이션(M&S)의 신뢰성을 제고하기 위해서는 실제로 발생 가능한 위협 시나리오를 설정하고 다양한 고려사항들을 합리적으로 가정하여야 하며, 이에 대한 전문가들의 검토 및 합의가 필요하다.

본 연구에서는 델파이 기법을 활용하여 M&S의 신뢰성 평가를 위한 델파이 수행 절차, M&S 평가서식, 전문가협의체 구성 및 운영방안 등을 개발하였다. 델파이 수행 절차는 크게 M&S 평가항목 정의, 평가항목별 신뢰성 수준 산정, M&S 평가서식 설계, 중립적인 전문가 협의체 구성, 전문가 평가의견에 대한 통계 분석, 전문가 평가의견 수렴을 위한 조사 반복으로 구성된다. 본 연구결과를 활용하여 원전에 대한 폭발물 위협 평가 시 객관성이 확보된 전문가의 평가의견을 반영하고 M&S를 수행하는 연구개발팀의 자기 판단으로 인한 맹점, 편견 등을 해소하여 M&S의 신뢰성을 보장할 것으로 기대된다.

* 본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 2106014)

생체인식 표준화 연구를 통한 성능평가 방법 및 지표 수립
Establishment of Performance Evaluation Method and Index by
Standardization Study on the Biometric Recognition System

도태관

한국원자력통제기술원

The purpose of this study is to establish a biometric system performance evaluation method and index. Therefore, in this study, standardization guidelines were investigated focusing on ISO/IEC 19795, which is the basis of biometric test standards in international. KISA, TTA and KS standardization guidelines in Korea were investigated. According to ISO/IEC 19795, biometric performance evaluation can be divided into three categories: technology evaluation, scenario evaluation and operation evaluation. In the case of nuclear power plants, the group was not specified because various members such as employees, workers, foreigners and students enter, so operation evaluation were excluded in this study. When designing a technology evaluation, the target group should determine whether it is suitable for the evaluation purpose. Other factors (temperature, light, humidity, etc.) known or suspected to affect biometric performance when collecting target group can be controlled. In addition, data that is not suitable for the evaluation purpose should be removed through validation of the target group. When designing a scenario evaluation, target group should be selected so that their distribution is similar to the user population to use the system. The experimenter shall report the composition of the target group, including age and gender distribution. Since the experimenter cannot evaluate all environmental factors, environmental factors must be selected in the design stage before the test. At this time, the environmental factors (lighting, background, temperature, humidity, etc.) should be obtained with a sufficient time difference so that temporary environmental conditions can be characterized. A 'robustness test' can be used to quantify the degree of performance impact. Performance evaluation index are divided into major items and minor items. The major items include FTE (Failure To Enroll rate), FTA (Failure To Acquire rate), FNMR (False Non-Match Rate), FMR (False Match Rate), FRR (False Rejection Rate), FAR (False Accept Rate), EER (Equal Error Rate), ROC curve, DET curve, etc. The minor items include template creation average time, test template creation average time, average self-comparison time, average time compared to others, extraction time, matching time, throughput, maximum template size, etc. The results of this study could contribute to enhancing the level of physical protection of nuclear power plants. This work has been supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation of Nuclear Safety(KOFONS), using the financial resource granted by the Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) of the Republic of Korea. (No. 2106014)

원자력시설에 대한 드론방호시스템 도입 시 고려사항 분석
Analysis of requirements for Adopting Counter Unmanned Aerial
Systems in Nuclear Facilities

손석우 · 김혜승 · 김우섭
한국원자력통제기술원 물리적방호실

With the recent development of the drone industry, the spread of commercial drones has expanded, and the use of drones in various fields is increasing. Accordingly, not only the use of drones for peaceful purposes, but also the use of drones as combat vehicles in conflict zones are frequently occurring. A typical example is the attack on an oil refinery in Saudi Arabia. With this as an opportunity, interest in building a drone protection system for national important facilities has increased, and research is underway to establish a drone protection system for one of the important national facilities, a nuclear power plant.

In this paper, the factors to be considered when introducing a drone protection system to a nuclear facility are analyzed. Unmanned aerial vehicle threats can be broadly classified into three categories: commercial drone threats, cargo-loading threats, and weaponization threats. A commercial drone threat is a threat to drones classified for hobby or business use, a cargo-loading threat is a case where the drone is equipped with an object that can become a threat, such as an explosive, and a weaponization threat is a case where the drone is modified or used as a weapon. Most commercial drones are rotary-wing drones, and even if a multi-drones of a kind are used as a threat, it is unlikely to cause significant damage to nuclear facilities. Neutralization of rotorcraft drones is also relatively easy compared to fixed-wing drones. In reality, drones that can cause sabotage attacks are fixed-wing drones that are being used in a number of terrorist attacks. Fixed-wing drones are much faster than rotary-wing drones and, unlike rotary-wing drones that produce noise from propellers, the gliding method also generates less noise. In order to prevent this, accurate and fast detection and neutralization processes are essential. Currently, nuclear facilities are considering protection against the threat of unmanned aerial vehicles (drones), and unmanned aerial vehicles (UAVs) legally refer to unmanned aerial vehicles weighing 150 kg or less. In general, the unmanned aerial vehicle can have a payload weight of about 60 to 70% of its own weight, meaning that it can theoretically carry an object weighing about 100 kg. This is beyond the scope of general commercial drones, and it is necessary to consider the threat to the level of flight equipment when introducing protective equipment.

폭발물 및 차량강습 시뮬레이션 모델의 신뢰성 제고를 위한 검증 방안 분석 Analysis of Verification Methods to Improve Credibility of Simulation Models for Explosives and Vehicle-ramming Attack

전어진 · 김우섭 · 김혜승 · 최선도

한국원자력통제기술원 물리적방호실

최근 다양한 수법으로 전 세계에서 지속적인 테러가 발생하고 있으며 원자력발전소는 국가 중요시설로서 피해가 발생할 경우 피해 규모를 고려하였을 때 테러 위협에 각별한 주의가 필요하다. 다양한 테러 방법 중 폭발물 및 차량을 이용한 위협을 중심으로 원자력발전소의 방호시설 성능을 평가하고 이를 방호성능 개선 및 규제기준 수립에 활용하고자 한다. 성능 평가를 위해 LS-DYNA를 사용하여 폭발물과 차량강습 위협에 따른 방호 성능 시뮬레이션 모델을 개발하고 시뮬레이션 신뢰성 제고를 위해 시뮬레이션 검증을 수행할 예정이다. 동일한 조건의 실험과 시뮬레이션을 비교하여 확인하는 것이 시뮬레이션의 신뢰성을 높일 수 있지만 폭발 실험 및 차량강습 실험에 요구되는 비용과 제한적인 환경으로 인해 실험을 통한 검증 및 확인에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 모델 자체의 신뢰성 제고를 위해 코드 구현 검증과 계산 검증 방법을 분석하여 본 연구에 적절한 절차와 방법을 제시하고자 한다. 구현 검증은 사용한 코드가 요구문서 기능대로 구현이 되었는지, 코드가 일관되고 규칙적으로 작성이 되었는지, 오류 및 경고 사항들이 수정되었는지 등을 평가하기 위한 검증으로 필요한 검증 항목을 리스트 화하였다. 계산 검증은 이산화로 인해 발생할 수 있는 오류의 양을 추정하는 검증 방법이다. 특히, 폭발물과 차량 충돌을 모사하는 시뮬레이션 모델은 복잡한 접촉 현상 모사와 짧은 시간동안 대변형 발생으로 불확실성이 증가할 수 있기 때문에 불확실성 요소를 분석하여 왜곡된 결과를 방지하고 신뢰성을 갖는 시뮬레이션 임을 검증할 필요가 있다. 이를 위해 LS-DYNA 결과가 검증을 위한 평가 항목의 기준 범위를 만족하는지 검증하고 평가 항목에 영향을 미치는 요소를 검토하였다. 분석 결과를 기반으로 검증 절차를 제시하였고 향후 위협 시나리오 시뮬레이션 모델에 활용하여 신뢰성을 확보하는데 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다. (No. 2106014)

공격목표집합 식별 규제 관련 핵심요소 현황 분석
Analysis of Current status of Key Elements for Regulation of Target
Set Identification

차지환*

한국원자력통제기술원 물리적방호실

For the physical protection of nuclear power plants, need to identify target sets and establish the guidelines for protection equipments of target sets. Lack of legal and regulatory basis for target set identification and vital area identification in Republic of Korea.

In this study, the current status was analyzed by deriving 3 key elements necessary for the regulation of identification of target sets through the results of R&D tasks related to the target set and the experience of the vital area identification review.

IAEA Nuclear Security Series No. 20 (category: principles, subject: objectives and key elements of the national nuclear security system), No. 13 (category: recommendations for physical protection of nuclear materials and nuclear facilities), In No. 27-G (category: implementation guidelines, title: physical protection of nuclear materials and nuclear facilities), target sets are identified, potential impact is evaluated in case of damage to the target, and graded approach and depth of the target is applied.

Regarding regulatory key element 1 (assumption), KINAC/RS-107 applied the IAEA Nuclear Security Series No. 16 to the policy considerations before the vital area identification process, but more specific and practical standards for target sets identification are insufficient.

Regarding regulatory key element 2 (radiation impact criteria), the terms 'unacceptable radiological consequences' and 'high radiological consequences' are used in the Radioactive Disaster Prevention Act, but there is no specific standard.

Regarding regulatory key element 3 (facility operation status), KINAC/RS-107 required the operation of light-water reactor type nuclear power plants to be operated by changing the core area based on mode 4, but there is no standard for heavy-water reactor and other nuclear facilities.

인쇄기관형 열교환기의 Corrugated Mini 채널에 대한 단상 압력강하 실험 Single phase Pressure drop experiment of Corrugated Mini Channel in Printed Circuit Heat Exchanger

황보원 · 노하은 · 이재영

한동대학교 기계제어공학과

인쇄기관형 열교환기는 현재까지 연구된 열교환기 중 가장 고효율/고집적의 열교환기이다. 증기발생기로 사용하기 위해서는 단상뿐만 아니라 이상유동 영역의 열수력 성능평가가 요구된다. 이를 통해 소형 모듈형 원자로, 원자력 잠수함 등의 제약된 공간에서 사용될 수 있다. 화학적 식각을 통해 채널 형상을 제작 후 확산접합을 통해 plate끼리 결합한다. 확산접합을 하기 위해서는 plate 사이에 40% 이상의 접촉면적이 요구되며, 접촉면적을 높임과 동시에 전열면적 또한 증가함으로써 열교환에 장점이 있다.

이를 고려한 형상으로 2가지의 Corrugated 채널을 설계하였다. 유동방향으로 5mm, 15mm의 사각형태의 유로 이후 갈라지며, 이웃하는 유로들과 혼합되도록 설계했다. 이상유동 실험에 앞서 단상유동 압력강하 실험을 통해 마찰계수 특성을 실험했다. 레이놀즈 수 기준으로 $400 < Re < 3000$ 에서 실험을 진행했다. 차압센서의 고압측은 입구로부터 400mm, 저압측은 1400mm에 설치하여 총 1000mm의 길이에 해당하는 차압을 측정했다. 저압측 포트의 위치는 완전발달영역을 고려하여 수력직경의 167배에 해당하는 높이에 포트를 설치했다. 본 실험 영역 내에서는 천이영역을 확인할 수 없었다. 이를 통해 반복적인 혼합, 갈라짐을 통해 난류화가 발생했음을 알 수 있다.

소형 사각직관의 길이가 5mm, 15mm의 실험관에서 5mm의 단상압력강하 마찰계수 값이 15mm의 마찰계수 보다 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 동일한 길이 내에서 5mm의 실험관 형상이 더욱 많은 주기를 가짐으로 인해 큰 압력강하를 유발하기 때문이다. 15mm의 경우 반복주기는 40mm로써 차압측정 길이인 1000mm 내에서 25번의 주기를 가지지만, 5mm는 반복주기가 20mm로써 50번의 차압측정 길이 내에서 50번의 혼합, 갈라짐 현상을 가지기 때문이다. 5mm 실험관은 $f_5 = 3.545Re_5^{-0.4264}$ 을 확인하였으며, 15mm 실험관은 $f_{15} = 4.972Re_{15}^{-0.4849}$ 의 상관식을 파악할 수 있었다.

Corrugated 채널의 주기성을 변화시킨 후 압력강하 특성을 파악했다. 열교환기 내부 유체의 혼합을 최대화 하여 설계한 결과 난류화 특성을 파악했으며, 한 주기 내에서 직관의 길이가 긴 15mm 실험관이 상대적으로 적은 단상마찰계수를 가지는 것을 확인했다. 이를 통해 Corrugated 채널의 핀 길이에 관하여 설계 시 참고할 수 있으며, 본 연구에서 사용한 실험관의 핀 크기를 참고하여, 다양한 치수의 실험관을 통해 실험함으로써 Corrugated 채널에 대한 설계변수를 도출할 수 있다.

보조급수를 이용한 증기발생기 피동충수 방법에 대한 고찰

Study on Methods for Passive Supply of Auxiliary Feedwater to Steam Generator in Nuclear Power Plants

신혜영 · 서건창
한국수력원자력(주)

원자력발전소는 다양한 안전설비를 갖추고 단계적 대응전략을 통해 만일에 발생할지 모르는 가상사고와 재해 및 재난에 대비하고 있다. 원자력발전소의 정상운전 중에 비상상황이 발생할 경우 대응을 위해서는 초기 대응단계인 1단계가 가장 중요하며 대응수단으로서 보조급수계통이 그 역할을 담당한다. 다양한 공학적안전설비계통 중의 하나인 보조급수계통은 정상운전 중 주급수펌프 고장 등과 같이 주급수가 상실되는 상황이 발생하여 증기발생기 전열관에서의 열전달을 통한 일차측 냉각이 불가능한 상태에서 초기에 긴급하게 투입되어 주급수를 대체할 냉각수로서 보조급수를 증기발생기 2차측에 적절히 공급함으로써 원자로냉각재의 온도 및 압력이 대략적으로 정상운전 온도 및 압력의 각각 1/2 및 1/5 정도로 떨어질 때까지 원자로냉각재계통 내 잔열과 붕괴열을 냉각시킨다. 이렇게 보조급수계통은 어떠한 가상사고로 인해 주급수계통이 작동하지 못할 경우 즉시 투입되어 원자로의 고온대기상태 유지와 정지냉각계통으로의 연결시점까지 작동하여 원자력발전소의 제1방벽인 핵연료 펠렛과 피복재를 안전하게 보호함으로써 중대사고의 발생 가능성을 초기에 차단하고 이후 정지냉각계통으로 기능을 넘겨줌으로써 원자로를 끝까지 안전하게 냉각시킬 수 있도록 역할을 담당한다. 본 논문에서는 원자력발전소의 정상운전 중 대형지진 등 갑작스런 가상의 재해 발생으로 증기발생기 2차측 압력이 해제되어 대기압 상태가 되면 주급수계통의 작동이 불가하게 되고 급격한 증기 방출에 따른 증기발생기 2차측 수위 저하로 보조급수계통 작동이 필요한 상태에서 보조급수펌프와 이동형발전차 등 모든 동력구동원이 이용 불가능한 상황을 가정하여 보조급수저장탱크에 저장된 물을 피동적인 방법으로 증기발생기 2차측에 적기 공급함으로써 원자로냉각재계통을 정지냉각계통 운전가능 영역까지 적절히 냉각시키기 위한 보조급수의 증기발생기 2차측 피동충수 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 중력을 이용한 충수 방식과 질소기체를 이용한 보조급수저장탱크 가압 방식을 고려하였고, 기존 계통 유로를 이용하는 경우와 직접 주입 유로 신설을 가정하는 등 충수를 위한 유로 조건을 달리하여 검토 및 평가함으로써 적용 가능한 최적 방안을 모색하였다. 이상기체의 상태방정식과 에너지 보존 법칙을 응용하여 평가모델에 적용할 구성방정식을 도출하였으며 유로 내 마찰손실에 따른 압력강하를 고려하기 위해 Darcy's formula를 적용하였다. 본 연구에서 도출한 평가방법론과 평가결과는 가동 원전의 설계변경이나 신규 원전의 피동안전성 강화를 위한 안전설비 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요국의 기후변화대응 정책 동향 분석 연구

A Study on Global Policy Trends on Climate Change Mitigation and Adaption

강주현 · 배치혜 · 김혜진 · 박민희

한국에너지기술연구원 국가기후기술정책센터

전 세계적인 온실가스 배출 증가와 기후위기 심각에 따라 세계 각국은 탄소중립 선언과 함께 관련 법제화를 추진 중이다. 해외 주요국은 탄소중립 및 온실가스 감축목표를 중심으로 기후변화대응을 위한 정책·전략을 구체화하고 추진 중에 있으며, 기후위기를 기회로 활용하고자 저탄소 경제구조 전환을 통한 녹색성장을 강조하며 에너지 시스템 전환, 산업·수송 및 건물분야의 탈탄소화 등을 위한 혁신기술 개발을 강조하고 있다. 우리나라도 기후위기에 적극 대응하고자 2050년 탄소중립을 공식 선언하고('20.10.28), '능동적(Proactive) 대응'으로 경제성장·삶의 질 향상을 동시 달성하기 위한 '2050 탄소중립' 추진전략을 발표했다('20.12.10). 본 연구에서는 해외 주요국별 기후변화대응 관련 주요 정책 및 기술개발 방향을 조사·분석했으며, 연구 결과물은 2050 탄소중립 달성을 위한 혁신기술 개발 관련 5년 단위 법정계획인 「기후변화대응 기술개발 기본계획」 수립 시 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

Acknowledgements: This research was supported by the A Study on the Establishment Direction of Basic R&D Plan for Coping with Climate Change through National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science and ICT(2021R2A1A1103420)

STEEP-SWOT 분석을 적용한 기후변화대응 기술개발 전략 도출에 관한 연구 Study on the Development Strategy for Climate Change Technology using STEEP-SWOT Analysis

배치혜 · 강주현 · 김혜진 · 박민희

한국에너지기술연구원 국가기후기술정책센터

국제사회의 기후변화 대응 정책이 본격적으로 추진됨에 따라 우리나라 역시 '2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)' 상향 및 '2050 탄소중립 시나리오'를 통한 주요 부문별 정책방향 제시로 기후변화에 대한 정부의 강력한 의지를 표명하고 있다. 또한 기후변화대응을 위한 기술개발의 중요성이 확대됨에 따라 「기후변화대응 기술개발촉진법('21.10시행)」이 제정되었으며, 이 법에 근거한 「기후변화대응 기술개발 기본계획」이 2022년 수립될 예정이다. 본 연구에서는 우리나라 과학기술 분야 중 '기후변화대응'분야에서의 최상위 계획인 「기후변화대응기술개발 기본계획」 수립 시 기술개발 전략을 보다 과학적으로 도출하기 위한 방법으로 STEEP-SWOT연계 분석방법을 적용한 사례연구를 수행하여 그 유용성을 확인하고자 한다. STEEP 분석은 주요 사안에 대한 거시적 환경 분석을 사회적(Social), 기술적(Technology), 경제적(Economic), 환경적(Environmental), 정책적(Political)요인으로 분류하여 분석하는 방법으로, 본 연구에서는 이와 같은 STEEP 분석을 통해 도출된 내용을 SWOT과 직접적으로 연계하여 기후변화대응 기술개발 주요 전략을 도출하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 보다 과학적인 기술개발 전략 수립을 위한 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements: This research was supported by the A Study on the Establishment Direction of Basic R&D Plan for Coping with Climate Change through National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science and ICT(2021R2A1A1103420)

미래 장기전망과 전문가 FGI를 통한 수소분야의 미래 유망기술 도출 Selecting Promising Hydrogen Technologies Reflecting Energy Long-term Forecast and Expert' s FGI

유란¹, 김정택¹, 이성곤^{1*}

Ran Yoo¹, Kyungtaek Kim¹, Seongkon Lee^{1*}

¹한국에너지기술연구원 정책연구실, 34129 대전광역시 유성구 가정로 152

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

*Corresponding Author: sklee@kier.re.kr

Abstract

글로벌 기후변화 대응, 탄소중립 실현 및 지속가능한 발전을 위한 핵심 수단으로 에너지 기술의 중요성 및 역할은 더욱 더 증가하고 있다. 2050 탄소중립 목표의 경우 도전적 목표로 국가차원의 견인을 위해서는 법, 규제, 제도뿐만 아니라 기술성과 경제성 담보를 통한 에너지산업 생태계 육성 및 지속적 견인이 필요하다. 재생에너지의 간헐성 극복, 재생에너지 발전을 통한 잉여전원의 저장을 위해 수소에너지를 활용하는 방안에 관심이 증가하고 있다. 수소기술 산업의 생태계를 육성하고 선도하기 위해 미래 에너지 환경변화를 예측한 주요 장기전망을 바탕으로 미래 수소기술분야 유망기술을 도출해야 한다. 또한 해당 유망기술에 대한 정책 및 연구개발 등 투자 확대를 수소경제 선점을 주도해야 할 시점이다.

본 연구는 에너지 산업의 현황 및 변화에 따라 국가차원의 전략적 선택과 집중을 위해 수소기술분야의 미래 유망 후보기술을 도출하고, 전문가 FGI를 통해 유망기술 도출 및 기술의 실현시기를 분석하였다. 체계적 분석을 위해 1단계에서는 IEA, IRENA, BNEF 등 글로벌 에너지분야 전문기관의 장기전망보고서를 분석하고, 이를 통한 에너지 산업의 전망, 수소에너지기술의 현황, 이슈, 미래전망을 도출하였다. 2단계에서는 수소기술분야 산·학·연 전문가 설문 및 FGI(포커스 그룹 인터뷰)를 통해 수소기술분야 미래 유망기술 후보 및 유망기술 선정기준에 따른 평가를 통해 미래 유망기술을 도출하였다. 3단계에서는 선정된 유망기술에 대해 에너지 장기전망 시나리오를 기반으로 유망기술별 기술실현 시기를 도출하였다. 본 연구의 결과는 추후 수소기술분야 기술 정책 및 R&D 기획을 위한 주요 핵심자료로 활용될 예정이다.

Key words 수소 유망기술, 유망기술 실현시기, 장기전망분석, 전문가 FGI

사사

본 연구는 한국에너지기술평가원 에너지기술정책수립사업인 “에너지산업 생태계 조사 및 기술수준조사 분석(B9-4353)” 과 한국에너지기술연구원 주요사업인 “에너지기술 R&D 기획연구(C2-2443-01) 과제의 재원을 통해 수행한 결과입니다.

국가 에너지정책에서 절차적 정의 증진 방안 A Proposal for Procedural Justice Enhancement in National Energy Policy

정환삼 · 윤성원

*한국원자력연구원

국가 에너지정책의 중요성과 막대한 사회적 영향에 비추어 최근 공리(utility)의 사회적 가치와 사적(privatal) 가치간 간극을 좁히기 위해 정의(justice)란 개념이 도입되고 있다.

임기의 막바지에 이르고 있는 현정부에서 에너지 전환정책의 기조로 담겼던 탈원전 정책은 5년 내내 사회적 논란의 중심에서 벗어난 적 없었다. 2017년의 탈원전 정책은 국정운영 5개년 계획으로 이미 확정지었고 다만 신고리 5·6호기 건설은 예외적으로 공론화위원회를 운영해 국민 여론을 추가로 듣겠다는 것이 정부의 입장이었다.

신고리 5·6호기 건설재개를 두고 도입했던 숙의(deliberation)의 과정은 우리 사회 거대갈등 분야 정책결정의 좋은 사례로 여겨지고 있음에도 불구하고, 공론화위원회의 기능과 이후 정책이행 과정의 모호함에 대한 의구심을 불식시키지는 못하였다.

이러한 경험을 바탕으로 본 연구는 공론화 활동과 이후 정책수립 전과정을 절차적 정당성(procedural justice)의 관점으로 경영할 구조를 제안하였다. 절차적 정당성의 달성요건을 준비단계에서 위원과 대표의 위촉부터 운영단계에서 정보제공, 자문과 협의, 의견수렴 그리고 공동결정의 단계로 구분하고, 각 단계별 내용과 활동방식을 정리해 달성의 틀을 설계하였다.

제안된 구조들이 국가적 공공사업을 대하는 이해관계자들의 시민의식을 한 단계 성숙시키는 골격이 되기 바란다. 신고리 5·6호기 공론화위원장이 당시 언급했던 “좋은 절차가 정의일 수 있다.”가 향후 에너지정책 수립과정에서 중요한 가치로 자리하기 바란다.

참고문헌

- (1) Benjamin K. Sovacool 외, Energy decisions reframed as justice and ethical concerns, Science Policy Research Unit, University of Sussex, 2019.
- (2) Kirsten E.H. Jenkins 외, Synthesizing value sensitive design, responsible research and innovation, and energy justice: A conceptual review, Energy Research & Social Science, Volume 69, November 2020.
- (3) 박태순, 신고리 5,6호기 공론화의 네 가지 문제와 한계, 프레시안 사회갈등연구소, 2017.11.06. <https://www.pressian.com/pages/articles/174711#0DKU>
- (4) 신고리 5·6호기 공론화위원회, 신고리 5·6호기 공론화 시민참여형조사 보고서, 2017.10.20.

Vortex breaker를 적용한 하이드로 사이클론 분리기 유동장 해석 Numerical Analysis of Hydro Cyclone Separator with Vortex Breaker

김태형 · 이세창* · 장용재* · 전수진*

청주대학교 항공기계공학전공, 지엠테크 기술연구소

본 연구에서는 하이드로 사이클론 분리기 언더플로우(underflow)에 상승류 발생을 위한 Vortex breaker를 장착하여 내부유동을 분석하였다. 이를 수행하기 위해 Solidworks flow simulation을 이용하였다. 해석 모델은 유입구, 오버플로우(overflow), 언더플로우, 원통부, 원추부, Vortex breaker으로 구성되어 있는 사이클론 분리기이다. 해석 조건에서는 비압축성, 비정상 상태(unsteady), 좋은 수렴성을 가지고 있는 다상 유동 기법인 VOF 기법을 적용하였다. 난류 모델에서는 표준 k-e를 적용하였다. 입구 경계조건에는 230L/min의 물의 유량과 난류 강도 및 길이를 적용하였다. 출구 경계조건에는 대기압 조건으로 적용하였다. Vortex breaker에 의한 영향성을 분석하기 위해 원추부와 Vortex breaker에 대한 거리를 변수로 두었으며 90mm, 95mm, 100mm, 105mm 거리에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과 중심 단면에 대한 압력장 크기를 비교하였을 때 90mm에서 압력장의 크기가 가장 크게 나타났으며 105mm에서 압력장의 크기가 작게 나타난 것으로 보아 거리가 멀어질수록 외부 선회류의 크기가 점차 줄어드는 것으로 판단된다. 물의 체적분율을 등위면으로 나타내어 비교하였을 때 90mm와 95mm에서 내부 선회류로 인해 오버플로우로 물이 빠져나가는 것을 확인하였으며 100mm와 105mm에서는 언더플로우로 모든 물이 유출됨을 확인하였다. 하지만 90mm의 경우 언더플로우로 유출되는 물의 양이 다른 형상에 비해 적어 입자가 역류하여 오버플로우로 빠져나갈 것으로 예상되며 이를 고려하였을 때 95mm가 가장 우수하다고 판단하였다. 향후 실제 제작 후 실험을 통해 해석 결과와 비교하여 검증할 예정이다.

Acknowledgement

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

유한요소 진동해석에 기초한 디스크 형상에 따른 밸브의 구조적 안정성에 관한 연구

Structural Stability of Valve due to Disc Shape based on Finite Element Vibration Analysis

박유진 · 김태형 · 김윤철*

청주대학교 항공기계공학전공, *서광공업(주)

전력 및 에너지산업용 대형 강관 및 배관을 따라 유체가 흐르는 경우 배관의 불연속 구간 및 기하학적 형상 등에 의해 난류가 발생하며 이로 인해 유체 유발 진동이 발생하고 내부 유동 흐름에 따라 수직 현상이 발생하기도 한다. 이는 배관 및 밸브에 진동을 발생시키는 원인이 된다. 특히 배관계통에 연결된 밸브에서는 유체 유발 진동의 영향으로 전달된 가진 주파수가 밸브의 고유진동수와 일치할 경우 공진을 발생시킬 확률이 높아져 궁극적으로 밸브의 균열 발생 및 변형으로 파손된다. 소프트 실 제수 밸브의 경우 밸브 디스크가 유체의 통로를 수직으로 개폐하고 유체 흐름을 일직선으로 유지해주는 역할을 한다. 밸브 개방 시 하단에 접해있던 디스크가 상승하면서 외팔보 구조의 경계조건을 가지므로 유체가 흐를 때 진동이 커진다. 본 연구에서는, 유체의 흐름에 의한 진동을 감소시켜 밸브의 손상을 방지하기 위해 디스크 좌우 측에 사다리꼴 형상의 돌출부가 부착된 3점 지지형 구조의 디스크-시스템 모델을 제시하였다. 상용 소프트웨어인 ANSYS Workbench 2021 R1을 사용하여 유한요소해석에 기초한 진동 모드 해석 및 과도 응답 해석을 수행하였다. 진동 모드 해석을 수행한 결과, 3점 지지형 해석모델의 진폭이 0에 근접하여 1점 지지형 해석모델보다 공진을 발생시킬 확률이 낮음을 확인하였다. 또한, 과도 응답 해석을 수행한 결과, 3점 지지형 해석모델의 최대변형량이 1점 지지형 해석모델보다 약 66배가 낮음을 확인하였다. 이를 통해 3점 지지형 밸브 디스크 형상이 유체 유발 진동을 충분히 감소시킬 수 있음을 해석적으로 검토하였으며 구조적으로 안정성이 유효함을 확인하였다.

Key words : Valve Disc(밸브 디스크), Natural Frequency(고유진동수), Finite Element Analysis(유한요소해석), Modal analysis(진동 모드 해석), Harmonic analysis(과도응답해석)

대용량 오리피스 습식 집진장치의 내부유동분석 Internal Flow Analysis of Large-Capacity Orifice Wet Dust Collector

이상훈*, 임동균**, 장용재***

청주대학교 일반대학원*, 청주대학교 항공학부**, 지엠테크 기술연구소***

본 연구에서는 스크롤을 장착한 습식집진장치의 유동 분석 결과를 바탕으로 형상에 Mist Separator를 포함하여 내부유동분석을 수행하였다. 물과 공기 혼합물을 고려하기 위해 수렴성이 좋은 다상유동기법인 VOF 기법을 적용하였으며, 스크롤 영향성을 고려하기 위해 200mm, 400mm, 600mm의 피치를 적용하였다. ansys fluent로 해석을 진행하여 중심 단면에서의 물-공기 체적비율(VOF)과 와도, 난류 운동 에너지를 비교하였다. 이를 통해 아래와 같이 3가지의 결론으로 요약하였다.

1. 400mm 피치가 제작비용과 VOF 결과를 볼 때 성능면에서 우수할 것으로 예상된다.
2. 와도 분포를 통해서 스크롤 피치 200mm의 경우 스크롤 전체를 덮는 과도한 와도 발생으로 집진 성능이 저하될 것으로 예상되며 스크롤 피치 400mm, 600mm에서 와도 분포가 집진 성능면에서 상대적으로 우수할 것으로 판단된다.
3. 스크롤 중심부에서 강한 난류 운동 에너지 분포가 나타날 것으로 예상된다.

Acknowledgement

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

본 논문은 2022년도 청주대학교 연구장학 지원에 의해 수행되었음. .

석탄더미 자연발화 방지용 방지제의 도포 효과에 대한 수치해석
A Numerical Study on the Effects of Surface-inhibitors for the
Prevention of Spontaneous Combustion of the Coal Stockpile

신동익 · 장지훈 · 박석운 · 김재관 · 엄태인*

한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 · *한밭대학교 환경공학과

In this paper, the effects of the spontaneous combustion inhibitor on the surface of the coal stockpile in the coal yard was investigated by numerical analysis. First, the numerical analysis method of the present study was compared with the results of the previous study by analyzing the case in which the spontaneous combustion inhibitor was not applied, while the effects of spraying the spontaneous combustion inhibitor for the prevention of spontaneous combustion onto various areas and positions was also analyzed.

The validity of the result from the numerical interpretations was verified in comparison with the results from the experimental and numerical interpretations which had been previously reported without using the inhibitor. The configuration of the coal stock pile for the interpretation was triangular (15 m of height and 40 m of width) to be approximately the same as that of conventional coal yards, and the interpretation conditions such as the direction of the wind and physical properties were the same before and after applying the spontaneous combustion inhibitor. The region in the incline of the coal stockpile to which the spontaneous combustion inhibitor had not been applied was set up for the air and heat to be passed under the interior boundary condition, while the region to which the inhibitor had been applied was designated as the wall boundary condition of the adiabatic conditions in order to prevent the permeation of air and the heat transfer to the surface of the coal stockpile. For the comparative analysis of the effect on preventing spontaneous combustion by designating various application regions, the incline of the coal stockpile was equally divided to 10 regions to carry out the interpretation. A function of the width and height of the coal particle was generated by considering the size distribution, which was applied to the interpretation tool as a user-defined function. The continual change of the particle size was given so that the particle size becomes larger as it becomes higher in height, and closer to both of the end edges.

As a result, the larger the application area of the spontaneous combustion inhibitor, then the more effective it is for preventing spontaneous combustion as it blocks the oxygen inflow into the coal stockpile, while, when spraying the spontaneous combustion inhibitor from the bottom of the coal stockpile, then the greater the effect it has on the prevention of spontaneous combustion. In conclusion, it was most effective to spray the spontaneous combustion inhibitor from the bottom of the coal stockpile up to about 30% of the height of the coal stockpile, when considering the economic aspect.

유동유발진동 현상을 이용한 압전 풍력에너지 하베스팅
Piezoelectric Wind Energy Harvesting(PWEH) using Vortex-Induced
Vibrations (VIVs)

노하은 · 이재영

한동대학교 기계제어공학과

The realization of a carbon-neutral society in preparation for global warming is inevitable, and there is high expectation for green energy, especially for wind power generation. Apart from large wind power generation technology, this study is an innovative wind energy technology without blades, which focused on converting the vibration caused by the vortex flow past a cylinder into electrical energy. Unlike free vibration, the main purpose of this study is to combine the resonance with an energy harvesting device and to convert the mechanical energy into usable electrical energy using piezoelectric film. Single layer of a polyvinylidene-fluoride (PVDF) film with silver electrode on both side was used. In order to make the resonance occur, the natural frequency of the device should be close to the vortex shedding frequency. Since the wind tunnel for this study has a wind speed of 3 to 10 m/s, the vortex shedding frequency can be calculated using Strouhal number of 0.21. Considering both the vortex shedding frequency and the size of the wind turbine, the harvesting device was designed with a cylinder with the diameter of 50mm and a center carbon rod with the diameter of 2mm. Around the cylinder, four PVDF films were attached to a carbon rod with the diameter of 0.8mm and spaced with 90 degree. The open-circuit voltage of the PVDF film with the thickness of 80 was measured by using a shaker and power amplifier. The testing frequency was fixed at 15Hz, which is close to the natural frequency of the device. For the closed-circuit test, the load resistance were varied from $1M\Omega$ to $10M\Omega$. The power was then calculated and the experimental data was compared to the theoretical values. Using the wind tunnel, the piezoelectric energy harvesting device was tested by varying the wind speed and the results was compared with the results from closed-circuit test.

가스 시설 사전 위험 예측 기법 동향분석

Gas facility advance risk forecasting techniques trend analysis

유지수 · 이효렬

한국가스안전공사 가스안전연구원

국내 중소형 에너지 시설(LPG 집단 공급 시설, 배관 등)의 안전관리는 KGS Code FS331, FS334 등에 따라 일일점검, 정기점검, 안전 진단 등 검사 인력에 의한 작업으로 진행되고 있으며, 검사 공백, 검사 인력의 인적 오류와 같은 요인으로 인해 안전 관리 사각 지대 발생의 우려가 있다. 따라서, 안전관리 사각지대 해소, 체계성 확립 및 효율성 제고를 위해 고성능 센서 및 IT 기술을 결합한 지능형 안전관리 기법의 개발, 도입의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 중소형 에너지 시설의 안전관리 현황 및 실태 조사, 가스 안전 분야에 IT 기술을 활용한 도입 사례를 분석하여 현장 적용성이 강화된 지능형 안전관리 시스템을 개발하고자 한다.

현재 지능형 기법을 적용한 가스안전관리의 국내·외 기술 동향을 살펴보면, 지하 매설 배관 위치 정보 관리 및 증강현실 기반 가시화 기법, 가상 현실 기반 가스 안전 교육 훈련 기법, 광섬유를 통한 가스 저장 탱크와 배관의 누출 및 변형 감시 기법, 드론을 이용한 대형 가스 시설 및 배관 진단 기법, 형상 정보 기반 위험 예지 및 보전 기법, 양자 기반 가스 검지 및 가스 누출 영상화 기법 등이 개발 및 현장 적용되고 있다. 이러한 지능형 기법과 기존 검사 인력 중심의 전통적 기법을 결합하여 중소형 에너지 공급 시설에 적용하기 위해서는 타당성 검토, 신뢰성 확보가 필요하다. 향후 개발 기술 검증에 위해 테스트베드 구축 및 실증을 통한 트랙 레코드를 확보하여 중소형 에너지 공급 시설에 적용하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 “전자부품산업기술개발사업(20017259_생활 속 안전시설을 위한 IT 융합 기술 기반 스마트 안전센서 및 운영 시스템 기술 개발)”의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

2MW급 PEMFC기반의 연료전지추진선박의 위험식별분석(HAZID)
Hazard Identification Analysis(HAZID) of Fuel Cell Propulsion Ship
Based on 2MW Class PEMFC

권도현 · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 박혜민 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지 IT융합그룹

국제 해상 운송 분야에서 온실가스 배출 저감을 위한 노력으로 기술적 조치(Technical measures), 운항 관련 조치(Operational measures), 경제학적 수단(Economic instrument)을 구분하여 운영 중에 있으며 선박의 대형화 및 운영의 효율화를 통해 화석 연료 사용으로 인한 온실가스 배출량을 줄이기 위한 노력을 이어나가고 있다. 그러나 화석연료의 효율적 사용만으로 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 제시한 '08년 배출량 (11억 35백만톤) 대비 50% 감축 목표 달성은 한계가 있기 때문에 친환경 연료를 사용한 온실가스 저감 방안이 함께 고려되어야 하는 시점이다. 따라서 친환경 연료를 선박에 활용하기 위해서는 운영에 필요한 다양한 안전 기준 확립이 반드시 필요한 실정이다.

본 연구에서는 해안 주변에서 2MW급 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell) 수소 연료전지를 추진 시스템으로 운영되는 250톤급 선박을 기본 모델로 선정하여 수소 연료의 공급에서부터 안정적인 운영에 필요한 안전 기준을 확립하고자 위험도식별(Hazard Identification, HAZID) 분석을 수행하였다. 운영 측면과 시스템 설계를 고려하여 총 9개의 위험을 평가했으며 총 10개의 권장 사항으로 PEMFC기반의 추진선박 시스템 운영의 잠재적 위험을 예방하거나 완화하기 위한 조치 방안을 도출하였다. 또한 식별된 잠재적 실패 시나리오 및 보호 장치의 세부 사항과 함께 이러한 조치에 대한 응답을 바탕으로 안전 관점에서 설계 및 작동성의 개선할 내용을 논하였다.

사사

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

PEMFC기반의 액체수소 연료전지추진선박 연구 및 모델링 Modeling Liquid H₂ Fuel Cell Propulsion Based on PEMFC

권도현 · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 박혜민 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지 IT융합그룹

국제 수출입 물량의 90%는 국제해상운송에 의존하고 있으며, 2012년 세계 해운업 활동을 통해 발생하는 CO₂ 배출량은 7억 9,600만 톤으로 세계 배출량의 2.2%를 차지함에 따라 해운업에서도 온실가스 배출량을 줄이기 위한 인한 노력에 동참하고 있다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 2050년 선박에서 배출되는 연간 총 온실가스 수준을 2008년 대비 50% 이상 감축하는 계획을 발표하는 등 환경규제를 강화하기 위해 노력 중이다. 기존의 선박 연료는 화석연료(HFO)에 의존도가 매우 높음에 따라 탄소 배출량을 줄이기 위한 노력으로 선박의 대형화와 저속 운항 등 효율 운항을 통해 탄소 집약도를 꾸준히 개선해왔다. 하지만 2050년 목표 달성을 위해서는 기존의 화석연료를 친환경 연료로 전환하는 노력이 동반 되어야만 목표 달성이 가능할 것으로 보고 있다. 따라서 많은 국제 기관들이 저탄소, 탈탄소 배출 기술 개발을 위한 연구 개발을 추진 중에 있다.

본 연구에서는 온실가스 배출량을 줄이기 위한 방안으로 친환경 연료인 수소를 선박 연료로 활용하기 위한 안전 기준을 도출하고자 한다. 따라서 수소를 안정적으로 공급하기 위한 연료공급시스템(Fuel Gas Supply System, FGSS)과 저장된 액화수소의 기화가스(Boil-Off Gas, BOG)를 활용하기 위한 통합 제어 시스템 모델을 안정적으로 운영할 수 있는 방안에 대하여 연구를 수행하였다.

사사

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

300 MWe급 수소/천연가스 혼소 복합화력의 공정해석

Process analysis on 300 MWe class combined cycle power plant(CCPP)
fueled by natural gas/hydrogen mixture

박혜민 · 박성호 · 류주열 · 권도현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

장기간 국내 발전 부분에서 주요 발전원으로 큰 역할을 수행한 발전용 가스터빈은 천연가스 연료 특성상 석탄 대비 낮은 온실가스 배출 특성을 가지며, 석탄, 원자력 등 대용량 타 발전원 대비 짧은 기동시간, 높은 출력의 특성을 가지고 있다. 하지만 천연가스를 지속적으로 이용하기 때문에 온실가스를 배출하고 있기 때문에 이를 낮추기 위해서 천연가스 가스터빈에 수소를 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 수소는 28.836 J/mol-K 의 열용량을 가지고 있으며, 산화과정에서 수소 1 mol은 산소 0.5 mol과 결합하여 반응열과 함께 순수 물을 반응 생성물로 발생시키기 때문에 청정 연료로 평가된다. 이러한 수소를 이용한 수소발전에서는 수소 자체를 연소시켜 공기 중의 산소와 격렬한 화학반응을 일으키게 하여 그 에너지로 터빈을 돌려 전기 에너지를 만들게 되는데, 기존의 화력발전소와 원리가 같기 때문에 수소와 천연가스(NG), LNG, 석탄 등 다른 연료와 함께 태우는 '수소혼소 발전'이 가능하다.

본 연구에서는 수소와 천연가스를 혼소하여 300 MWe급 가스 터빈 복합 화력의 발전 출력을 증대시킴과 동시에 배출되는 온실가스를 저감하는 시스템의 공정해석을 진행하였다. 이를 통해 대용량 가스터빈 발전소의 친환경 활용성을 강화하고 온실가스 배출을 저감함으로써 수소경제 활성화의 든든한 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 수소혼소 발전을 통한 에너지원 다변화는 연료전지, 재생에너지 발전 보완 등 에너지전환 정책의 이행과 기후변화 대응기술 개발에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다. 수소에너지가 활성화될 경우 장기적으로는 화석연료 사용 일부를 대체하여 이산화탄소 배출이 감소될 것으로 기대된다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20213030020280)

한국형 고밀도 액체/고체(slush) 수소 생산 시험 설비 구축 Test Facility Construction for Liquid/solid(slush) Hydrogen Production

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

친환경 미래 자원으로 주목받는 수소는 현재 천연가스 개질이나 산업공정에 나오는 부생 수소를 활용해 주로 얻어지고 있기 때문에 재생에너지를 이용한 친환경 수소 제조에 많은 연구가 진행되어지고 있다. 재생에너지 기술의 발달은 수소 제조 단가의 감소로 인한 수소 사회진입의 가속과 제조 공정이 친환경적이라는 장점이 있다. 하지만 재생에너지 발전이 가지는 출력변동성으로 지리적 위치와 기후에 따라 성능에 다소 차이가 있을 수 있으며 이를 극복하고 수소 공급량을 안정화시키는 것은 수소 사회로의 진입을 위해 반드시 필요하다. 해마다 증가하는 수소 수요를 만족하기 위해 최근 수소를 해외에서 수입하는 과정을 검토 중에 있으나 수소의 밀도가 매우 낮아 적재량이 제한적인 문제가 있다. 이를 해결하고자 기체 수소에 비해 밀도가 800배 이상 큰 액체 수소의 형태로 보관하여 운송하는 방법도 논의 되어지고 있으나 액체 수소 또한 액화천연가스(LNG)와 비교하여 밀도가 1/6 수준으로 대용량 저장에 불리하며 비등점이 90 K이상 낮아 쉽게 기화되는 특성 때문에 장주기 저장 또한 취약한 단점을 가진다.

본 연구에서는 기존의 액체 수소보다 밀도가 15%이상 높아 대용량 저장이 가능하고 액체 수소보다 높은 열용량으로 장주기 저장이 가능한 액체/고체(slush) 수소를 생산하는 기법을 소개한다. 또한, 이러한 기법을 활용하여 액체/고체(slush) 수소의 생산이 가능한 한국형 액체/고체(slush) 수소 생산 설비의 공정 작동 원리와 설비의 생산량에 대해 논하고자 한다.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22CTAP-C163636-01)

고진공 단열 챔버의 열전도 해석을 위한 푸리에 열전도 법칙의
보정계수에 관한 이론적 연구

Theoretical Study of Fourier Conduction Law's Correction Factor
for Analyzing Heat Conduction at High Vacuum Insulated chamber

이창형 · 류주열 · 황성현 · 박성호*

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

친환경 미래 자원으로 주목받는 수소는 밀도가 매우 낮아 밀도가 800배 이상 큰 액체 수소로 보관하여 운송하는 방법도 논의되어지고 있다. 하지만 액체 수소는 액화천연가스(LNG) 대비 비등점이 90 K이상 낮아 쉽게 기화되는 단점을 가지고 있다. 액체 수소를 장주기 저장하기 위해 복합 다층 단열재(MLI, Multi Layer Insulation)와 복사차폐물(Radiation shield) 그리고 높은 진공도를 가지는 챔버를 가지는 진공 단열 용기의 사용하는 방법이 있다. 고진공 단열층 형성으로 외부 대기에서 내부 챔버까지 전도나 대류 열전달을 내부까지 전달되지 못하게 차단하는데 효과가 있으며 보통 진공 단열층에서는 대류 열전달은 무시할 수 있다. 따라서 진공 단열층 내에서는 열전도와 열복사만 고려하게 되며, 일반적인 대기압에서 열전도 해석의 경우 지배방정식인 푸리에 열전도 법칙을 이용하여 열전도를 계산하고 기화량을 예측한다. 하지만 압력이 1×10^{-6} torr이하로 유지되는 고진공 영역의 경우 분자 단위에서의 에너지 전달을 고려하여야 하므로 푸리에 열전도 해석의 정확도가 떨어지게 된다.

본 논문에서는 한국형 고밀도 액체/고체(slush) 수소 생산 설비의 고진공 단열층에서 푸리에 열전도 방정식의 적용 가능 압력의 범위를 구분하고 적용 불가능한 압력 범위에서 분자 단위의 열전도 해석을 이론적으로 수행하였다. 분자 열전도 해석을 통하여 푸리에 열전도 방정식과 비교하고 진공도에 따른 푸리에 열전도 방정식의 보정계수를 결과로 제시하고자 한다.

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

2.4MW급 액체수소 연료전지추진선박의 최적운동을 위한 결정적 규칙기반 배터리 운전 전략

Deterministic Rule-based Battery Operation Strategy to Optimize the
Operation of 2.4 MW Class Fuel Cell Propulsion Ship Fueled by Liquid
Hydrogen

황성현 · 이창형 · 류주열 · 박성호[†]

고등기술연구원

국제해사기구(IMO)의 온실가스 규제강화와 EU의 배출권거래제(EU-ETS) 시행 등에 따라 전 세계 조선 및 해운시장은 온실가스 배출량이 적은 선박에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 친환경 선박에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 친환경 연료로 주목 받고 있는 수소는 연료전지로 부터 에너지를 얻어 모터를 구동해 추진력을 만들어 낼 수 있다. 수소는 산소와의 반응과정에서 물만 배출되어 친환경적인 동시에 내연기관의 비해 진동소음이 적고 높은 효율로 운영이 가능하다는 장점이 있다. 기체수소는 밀도가 낮고, 안전성 문제로 추진연료로 적용 어렵다는 문제점이 있다. 이에 따라 액체수소를 사용하는 연구가 진행되고 있으며 대형 선박 운영에 유리하다.

액체수소 연료전지추진선박의 추진 모터에 안정적인 에너지를 공급하기 위해 출력을 보조하는 대용량 배터리 설치가 요구되었다. 그래서 이를 효율적으로 에너지를 운영하기 위한 최적의 운전 전략이 필요했다. 액체수소 연료전지추진선박은 추진력을 만들기 위한 주 출력 장치와 배터리가 동시에 있다는 점에서 하이브리드 자동차와 유사하다는 점을 주목하였다. 그래서 하이브리드 자동차에서 사용되는 SOC(State of Charge) 제어 방법으로 연료전지추진선박의 연료전지와 배터리의 운영 방법에 대하여 접근하였다. 하이브리드 자동차에 사용되는 SOC 제어 방법 중 결정적 규칙 기반 운전법으로는 MAX SOC 제어, Thermostat 제어, Base-line 제어, State-machine 제어 등이 있다. 각 제어법에 대해서 연료전지추진선의 연료전지와 배터리에 적용하기 위한 전략을 제시하고 문제점을 확인하였다.

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

30MW급 액체수소 연료전지추진선박용 PEMFC 모델 개발
PEMFC Model Development for Propulsion Ship of 30 MW Class Fuel
Cell Fueled by Liquid Hydrogen

황성현 · 이창형 · 류주열 · 박성호[†]

고등기술연구원

IMO EEDI 규제에 따른 친환경 선박의 필요성이 대두되면서 전 세계 조선 및 해운시장에서 온실가스 배출량이 적은 선박에 대한 수요가 증가하고 있다. 친환경 선박 중, 연료전지로부터 에너지를 얻어 추진력을 만드는 선박에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수소는 연소와 반응과정에서 물만 배출되어 친환경적이며 연료전지를 구동할 경우, 선박 내에서 진동, 소음을 저감 하고 높은 효율로 운영이 가능하다는 장점이 있다. 기체수소는 밀도가 낮으며, 고압으로 저장하여도 액체수소에 비해서 밀도가 낮다. 뿐만 아니라 안전성 문제로 추진 연료로 적용이 어렵다는 문제점이 있다. 이에 따라 액체수소를 사용하는 연구가 진행되고 있으며, 특히 대용량 선박 운용에 필수적이다.

실제 액체수소 추진선에 들어갈 PEMFC 개발에 앞서, 선박에 설치될 수소 연료전지의 안정성과 동특성을 추정하고 평가하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발했다. 연료전지 모델은 PEMFC 기반으로 MATLAB/Simscape를 통해 구현되었고, 30MW급 출력을 만들기 위해 여러 연료전지를 병렬로 연결하였다. 연료전지 모델의 유효성을 검증하기 위해 Nedstack 사의 연료전지 제품과 동특성을 비교하였다. 마지막으로, 30MW급 선박의 추진에 필요한 에너지 프로파일을 기반으로 필요한 연료전지 수량을 결정짓고, 선박 추진에 필요한 에너지에 대한 모델 연료전지 출력의 추종 성능을 확인하였다.

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

Mo의 도입을 통한 perhydro-benzyltoluene 탈수소화 활성 향상에 관한 연구

박태인 · 장지수 · 이관영*

고려대학교 화공생명공학과

2021년 교토의정서 체제가 만료되고 신기후 체제가 출범함에 따라 친환경 에너지에 대한 중요성이 더욱 증가하고 있다. 하지만 친환경 에너지로 주목받는 신재생에너지는 기후와 같은 통제 불가능한 요소에 영향을 받는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 에너지 저장기술이 요구되며 특히 수소를 이용한 에너지 저장기술에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 수소저장기술 중 하나인 액상유기수소저장체(liquid organic hydrogen carrier, LOHC)는 높은 수소 저장 능력 및 안정성을 가지고 있으며 기존의 석유화학인프라를 사용할 수 있다. Perhydro-benzyltoluene은 homocyclic LOHC의 일종으로 백금-알루미나 촉매를 사용할 경우 260도 이상의 고온에서 높은 탈수소화도를 보인다. 고온에서 탈수소화 반응을 할 경우 cracking과 같은 부반응으로 인해 수소 순도가 감소하고 액상유기수소저장체가 분해된다는 문제가 있다. 그러므로 높은 순도의 수소 생산, 액상유기수소저장체의 반복적인 사용을 위해 저온에서 높은 활성을 지닌 탈수소화 촉매를 만드는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 Mo를 알루미나에 담지하여 저온 활성을 높였으며 Mo의 함량 변화에 따른 활성 변화를 확인하였다.

산소 환원 반응 향상을 위한 고성능 전이금속/탄소 나노 섬유 촉매 개발
High-performance N,S doped transition metals (Fe,Co) based on carbon
nanofibers as electrocatalyst for oxygen reduction reaction

손동균 · 이유현 · 여서현 · 이기백

영남대학교 화학공학과

The increase in carbon dioxide emissions has been a direct cause of climate change in recent years. Hydrogen energy is one of the eco-friendly energy that does not emit harmful substances. One of the ways to utilize such hydrogen energy is to convert chemical energy into electrical energy through fuel cells. Among them, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) is spotlighted for transportation due to its short start time. The oxygen reduction reaction (ORR) is also a particularly important reaction in the energy conversion system of fuel cells. The catalyst for ORR uses generally a Pt catalyst supported on carbon materials, which has disadvantages of high price and low durability. Therefore, it is necessary to develop a catalyst to replace it. Today, many researchers are conducting a study to reduce the catalyst price dramatically by using platinum alloys or non-platinum-based transition metals.

In this study, we synthesized a metal hybrid nitrogen doped carbon nanofiber catalyst (M-N-C, M = Fe, Co) via the electrospinning method. The synthesized catalyst has a large surface area of nanofibers with evenly distribution of transition metals, leading to an increase in active sites and then an improvement in ORR. In addition, nitrogen and sulfur were codoped by using thiourea, leading to the improvement of electrical conductivity and the high performance. The developed M-N-C catalyst exhibits the high performance not only in acid media but also in alkali media. The as-prepared M-N-C catalyst was characterized by SEM, TEM, XRD, Raman, and XPS analysis. The effect of M-N-C for ORR activity and PEMFC performance has been systematically investigated. For the electrochemical characteristics, CV, LSV, and EIS were measured using rotating disk electrode (RDE) with the overpotential, half-wave potential, and limiting current.

고성능 리튬 이온 배터리를 위한 Ti^{3+} 비율이 증가된 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 음극재 연구
Designing a Zeolitic $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ anode with enhanced Ti^{3+} defects for high
performance lithium-ion batteries

역서현 · 손동규 · 이유현 · 이기백
영남대학교 화학공학과

Rechargeable Lithium-ion battery (LIB) with high energy density, long cycling life, and full potential operating window has great demand in our life. Currently, LIBs with graphite anode cannot fully meet the requirements of energy storage applications due to poor stability at high current density and some serious safety concerns. To overcome the limitations of the graphite, many researches on a promising alternative lithium titanate oxide (LTO) material are being carried out, which offer superior cycling stability and high operating voltage (1.55V vs. Li/Li^+). However, LTO also has intrinsic disadvantages of reaction kinetics and low theoretical capacity (175 mAhg^{-1}) originated from its poor electrical conductivity and low diffusion coefficient. In this study, zeolitic porous LTO structures were synthesized by hydrothermal process using high concentration of lithium hydroxide solution. The sample color changes from white to blue through the calcination process, indication an increase in Ti^{3+} defects. Therefore, the electronic and ionic conductivity of LTO can be improved by increasing the ration of Ti^{3+} and changed structure, leading to make the movement of lithium ions easier and the to enhance the capacity. The crystallinity and chemical properties of zeolitic LTO are studied by the X-ray diffusion (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and Raman Spectroscopy. The changed structure was performance confirmed through field-emission scanning electron microscope (SEM) and Transmission electron microscopy (TEM). Nitrogen adsorption-desorption measurements to measure Brunauer-Emmett-Teller(BET) surface areas and porous structures. The electrochemical performance of zeolitic LTO was investigated by the cyclic voltammetry (CV) and charge/discharge cycle test.

탄소 나노 섬유 기반의 환원된 산화 그래핀이 코팅된 니켈-셀레나이드의
포타슘 이온 배터리 음극재 개발

Optimization of anode electrospun rGO coated NiSe nanostructure on
carbon nano fibers for potassium-ion battery anode materials.

이유현 · 손동규 · 여서현 · 이기백

영남대학교 화학공학과

Potassium-ion battery (PIBs) are considered as promising alternatives to lithium-ion/sodium-ion battery (LIBs/SIBs). Potassium has a wide potential window of -2.93 V similar to that of standard reduction potential of lithium (-3.05 V vs. SHE). However, the size of potassium ion (1.38 Å) is larger than that of lithium ion (0.76 Å), leading to the sluggish diffusion rate. This problem causes low capacity and poor cycling performance.

In this study, we develop metallic materials as anode in PIBs for performance improvement. At the first, a low-cost preparation method of electro spun nanofibers containing nickel and graphene oxide (GO-Ni-NF, nickel nanofibers containing graphene oxide) were synthesized and followed by the calcination process, GO-Ni-CNF (nickel carbon nanofibers containing graphene oxide) was gotten. Finally rGO-Ni_{0.85}Se-CNF (nickel selenide coated rGO carbon nanofiber) was synthesized using selenium powder through the selenization process, leading to the increasing capacity and stability during cycles. The surface morphology of materials were studied using a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The physical properties of samples were also investigated by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy analysis. Their electrochemical characteristics of PIBs were carried out to measure the long cycle life and capacity via cyclic voltammetry and charge/discharge cycle test.

연료전지 전극 촉매용 니켈 코어 - 백금 셸 촉매 내
질화 금속 상의 영향에 대한 연구

Research about the effect of metal-nitride phase in nickel core -
platinum shell for fuel cell electrode catalyst

김동건 · 이은희 · 정혜원 · 주은혜 · 정찬일 · 김필*

전북대학교 반도체·화학공학부

비귀금속 코어- 백금 셸 구조의 촉매는 높은 산소환원반응 활성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 널리 알려진 비귀금속 코어 물질로 니켈이 있으며, 백금 셸과의 상호작용을 통해 높은 산소환원반응 성능을 나타낸다. 그럼에도 열악한 연료전지 구동 환경은 촉매의 코어를 구성하는 니켈의 용출을 야기한다. 활성 성분의 용출은 촉매의 성능 저하를 발생시킨다. 니켈 코어의 낮은 전기화학적 안정성을 극복하기 위하여 코어 물질의 안정화 및 성능 개선에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 조건에서 니켈 입자의 암모니아 열처리를 통해 질화 니켈을 형성하였으며, 백금 전구체와의 치환반응으로 질화 니켈 코어 - 백금 셸 촉매를 제조하였다. 제조된 질화 니켈 코어 - 백금 셸 촉매에 대한 물성 분석과 전기화학적 특성 평가가 진행되었다.

PEMFC용 SPEEK/GNF, SPEEK/UGNF 및
SPEEK/SO₃H-UGNF 멤브레인의 성능 및 장기 내구성

Performance and long-term durability of SPEEK/GNF,
SPEEK/UGNF, and SPEEK/SO₃H-UGNF membranes for PEMFC

김애란¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Iyappan Arunkumar¹ · 이상혁¹ · 박민우¹ · 유동진^{1,2}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

PEMFC 작동 조건에 따라 필요한 PEM 속성이 크게 달라질 수 있습니다. 감소된 RH에서 PEM은 높은 양성자 전도도를 보여 내부 저항에 대한 붕괴를 줄이고, 연료 가스 교차를 방지하는 가스 장벽 특성을 강화하고, 장기간 PEMFC를 유지하기 위한 높은 기계적 무결성을 보여야 합니다. 페닐설폰산 기능화 및 압축이 해제된 흑연 나노섬유(SO₃H-UGNF)는 고분자 전해질 연료용 양성자 교환막(PEM)을 생성하기 위해 설폰화된 폴리(에테르 에테르 케톤)(SPEEK)에 내장할 수 있는 잠재적인 양성자 전도성 물질로 연구되었습니다. 우리는 GNF를 UGNF에 적응시키기 위해 압축 해제제로 암모늄 플루오라이드를 사용한 다음 SO₃H-UGNF를 얻기 위해 4-벤젠 디아조늄 설포네이트로 UGNF를 기능화했습니다. 이어서 SPEEK에 SO₃H-UGNF를 통합하여 나노하이브리드 멤브레인을 제조하였다. SPEEK/SO₃H-UGNF 나노하이브리드는 60°C 및 20% RH에서 SPEEK 멤브레인보다 높은 전력 밀도를 전달했습니다. SO₃H-UGNF를 SPEEK 멤브레인에 통합하면 연료 전지 내구성도 확장되었습니다. SEM 측정을 통해 얻은 결과로부터 SPEEK/SO₃H-UGNF가 화학적 분해를 억제할 수 있음을 확인하였다. 따라서 SO₃H-UGNF는 PEMFC 응용 분야에서 원시 SPEEK와 관련된 현재 문제를 부분적으로 극복할 수 있는 PEM 개발을 위한 유망한 새로운 나노충전제가 될 수 있습니다.

우수한 전기화학적 성능과 기계적 성능 및 알칼리 안정성을 갖는
알칼리연료전지용 폴리 아릴렌 피페리디늄 기반 음이온 교환막 제조
Synthesis of poly(arylene piperidinium)-based anion exchange membrane
for alkaline fuel cell with excellent electrochemical performance,
mechanical performance and alkali stability

박민우¹ · 김애란¹ · 이상혁¹ · 유동진^{1,2}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

음이온 교환막은 양이온 교환막과 비교하여 비 귀금속 촉매가 사용 가능하다는 점에서 비
용적 면에서 이점이 있고 따라서 연구과제로 남아있는 이온전도도와 알칼리 안정성을 해결
하면 빠른 실용화의 길을 걸을 수 있는 유망한 분야이다. 따라서 짧은 기간 동안 연구가 매
우 활발히 진행되며 동시에 탁월한 연구진척도를 보이고 있다. 특히 알칼리 안정성이 우수
한 고리형 암모늄인 피페리디늄과 알칼리 공격을 받지 않을 수 있는 벤젠고리만을 이용한
구조인 p-Terphenyl을 반응시켜 만든 폴리 아릴렌 피페리디늄(PAP)은 그 전까지의 음이
온 교환막 연구 결과들을 무색하게 할 만큼 거의 모든 성능 지표에서 상위호환으로 자리매
김하였고, 이에 대한 연구가 지금도 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 핵심 반응인
초강산 촉매 Friedel - Craft 반응을 통해 새로운 아릴화합물을 이용하여 성능적으로 향상된
음이온 교환막을 합성할 계획이다. 1-Methyl-4-piperidone과 p-Terphenyl의 중합반응을
통해 PAP의 가장 기본적인 구조가 되는 고분자를 합성하였고, NMR의 레퍼런스 데이터와
의 비교를 통해 정확한 구조 및 데이터를 파악하였다. GPC 데이터 피드백을 통해 적절한
분자량을 가지는 고분자를 합성하였고, 이후 Methyl iodide를 이용한 고리형 암모늄의 4차
화 반응 이후에 막의 제작을 진행하였다.

Improved physicochemical and electrochemical properties of anion exchange membrane for fuel cell application

Iyappan Arunkumar¹ • Ae Rhan Kim¹ • Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

The increasing demand for clean sustainable energy resources directed the attempts to find an alternative to fossil fuels. One of the promising alternatives is hydrogen, which is not readily available as H₂ but can be produced from a variety of abundant substances including water. Fuel cells are efficient devices to convert the fuel (H₂) and an oxidant (O₂) directly into electricity without harming the environment. Anion exchange membrane fuel cells (AEMFCs) are beneficial compare to proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) that are potentially operable with transition metals (c.a., Ni, Ag, Co) as electrocatalysts to promote sluggish oxygen reduction reaction at high pH. Anion exchange membrane (AEM) plays vital role as promising electrolyte in several next-generation electrochemical devices. High ionic conductivity and physicochemical stability are highly needed properties for commercialization of AEMs. In this study, acid functionalized graphene nano fiber (GNF) was used as filler to improve aforementioned properties. A series of GNF incorporated anion exchange nanocomposite membranes were prepared by simple solution casting method with the different wt.% of GNF. The structural, morphological, electrochemical performance were certainly studied. The obtained results were indicated that the water uptake, water contact angle and hydroxide conductivity was enhanced with the addition of GNF in the polymer matrix. The overall result concluded that anion exchange membrane with functionalized GNF nano filler would be the promising electrolyte for fuel cell application.

우수한 화학적 성능과 안정성을 갖는 펜던트 단위체 유무에 따른
폴리(아릴렌 이써)기반 음이온 교환막의 연구

A study of poly(arylene ether)-based anion exchange membranes
according to pendant units existence and nonexistence having excellent
chemical performance and stability

이상혁¹ · 김애란¹ · 박민우¹ · 유동진^{1,2}

¹전북대학교 대학원, 공과대학교 에너지저장 · 변환공학과, BK21 FOUR

²전북대학교, 자연과학대학 생명과학과

고분자 전해질형 연료전지(PEMFC)는 기계적 특성 및 치수 안정성과 같은 물리화학적 안정성에서 매우 우수한 특성을 보이며, 높은 이온전도도로 인하여 매우 각광 받고 있으나, 고가의 촉매 사용으로 인한 높은 제조비용 때문에 문제가 되고 있다. 이에 반해 음이온 교환막 연료전지(AEMFC)는 비 백금 촉매의 사용과 빠른 산소 환원 속도를 가지기 때문에 PEMFC를 대체 할 수 있는 잠재력이 있다. AEMFC의 중요한 요소 중 하나인 음이온 교환막은 낮은 이온전도도와 알칼리 안정성 문제로 AEMFC의 상용화를 지연시키고 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해서 주사슬 및 겔사슬 구조, 가교결합, 작용기, 유/무기 복합막 등 광범위하게 다양한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 음이온 교환막의 전기화학적 성능 및 물리적/화학적 특성을 조사하기 위해 펜던트 단위체 유무에 따른 고분자 주사슬과 작용기를 도입하여 4차화 과정을 진행해 음이온 교환막을 제조하였다. hydroquinone, decafluorobiphenyl, 4,4'-(9-fluorenylidene)diphenol을 이용하여 펜던트 단위체를 갖지 않는 poly(arylene ether)(PAE)를 준비했고, 2-phenylhydroquinone, decafluorobiphenyl, 4,4'-(9-fluorenylidene)diphenol을 이용하여 펜던트 단위체를 갖는 pendant poly(arylene ether)(PPAE)를 준비했다. 이후 준비된 각각의 고분자에 chloromethylation을 진행하였고, 이후 작용기를 도입하였다. 합성된 고분자들은 GPC, ¹H NMR, TGA를 통해 구조 분석을 진행하였고, 펜던트 유무에 따른 전기화학적 성능 및 물리적 특성은 세세하게 조사되었다.

PtNi 중공형 촉매의 제조 방법과 산소환원반응 활성

Preparation of PtNi hollow catalyst and oxygen reduction reaction activity

주은혜 · 김동건 · 정혜원 · 이은희 · 정찬일 · 김필*

전북대학교 반도체·화학공학부, *전북대학교 반도체·화학공학부

전통적인 화석연료 기반의 에너지 시스템은 원료의 가격변동 및 환경문제에 대한 문제점이 크다. 기존 시스템의 문제점을 해결하기 위한 에너지 변환 기술 개발이 필요하다.

PEMFC는 친환경적인 에너지 변환장치이며 효율이 높고 작동 환경이 단순한 장점을 가진다. 하지만 PEMFC는 전극에 귀금속 촉매를 사용하여 시스템의 비용이 높은 단점을 가진다. 이러한 높은 가격은 연료전지의 상용화를 방해하기 때문에, 백금 금속의 사용량을 줄이거나 저가의 다른 금속으로 대체하는 방법에 대한 연구가 계속해서 진행 중이다.

높은 산소환원반응 활성을 나타내는 촉매로 중공형 구조의 전이금속-백금 합금 촉매에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 전이금속의 불안정한 상태는 중공 형상의 제어를 어렵게 하기 때문에, 중공형 촉매를 생산하기 위한 제조 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 방법으로 PtNi 중공형 촉매를 제조하였으며 물성 분석 및 전기화학적 분석을 진행하였다. 촉매의 구조 및 촉매 활성을 비교함으로써 제조 방법이 촉매에 미치는 영향을 확인하였다.

Carbon-Composite의 재료와 첨가제 비율에 따른 PEMFC 분리판 특성 분석 Characterization of PEMFC Separator by Carbon-Composite Material and Additive Ratio

손형주 · 박재형 · *김해성

하이젠파워(주), *(재)대구경북과학기술원

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후 변화에 관한 정부간 협의체)는 제 48회 총회를 통해 2050년까지 탄소중립(Net Zero)를 목표로 각국의 동의 하에 안을 통과하였고, 이에 신재생에너지인 수소를 핵심 기술로 선정하여 지속적으로 연구개발을 진행하고 있다. 연료전지는 수소를 이용하여 높은 에너지 밀도를 가지고 있고 24시간 안정적인 전원 공급을 할 수 있는 친환경 발전시스템이라 할 수 있으나, 무게와 비용과 같이 해결해야 될 문제점도 가지고 있다. 본 연구에서는 연료전지 중 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 내부 핵심 부품 중 하나인 분리판의 재질에 따른 특성을 분석하고, 이를 통해 기존 흑연 분리판 대비 무게 및 부피가 절감된 형태의 스택을 제작하였다. Carbon-Composite은 전도성 흑연(TIMREXR KS 150 Graphite) 100~80wt%을 비율로 Bisphenol-F형 열경화성 수지(Epoxy Resin) 및 경화제를 각 시료 흑연 분말의 비율에 맞추어 혼합분말을 제조, 100cm²을 갖는 분리판을 제작하여 각각의 비저항을 측정하였고, 전도성 흑연 100%의 비율을 중심으로 열경화성 수지의 비율이 증가하면 비저항(길이방향XY, Ω/cm)이 약 7(Ω/cm)에서 14(Ω/cm)로 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 또, 무게의 경우 같은 형상 기준 기준 115.64g 대비 113.42로 2g(2%) 감소했다. 결론적으로 본 연구를 통해서 PEMFC 스택의 무게 대비 전력밀도를 향상할 수 있다.

수소화붕소나트륨을 이용한 소형 연료전지 수소 공급 시스템 개발 Developing hydrogen supplying system for a mini fuel cell by using NaBH₄

이재경 · 박재형 · *권오성

하이젠파워(주), *계명대학교 타볼라라사 칼리지

고분자 전해질 연료전지는 높은 에너지 밀도를 가지며 탄소를 배출하지는 않는 그린 에너지 시스템의 핵심이다. 또한, 수 와트부터 수 백 킬로와트 까지의 다양한 전력 범위에서 대응 가능하다. 수 십 와트 정도의 소형 연료전지의 경우 모바일 디바이스의 전원으로 잠재력을 가지고 있으나 수소의 저장 및 공급에서 어려움이 존재한다. 수소화붕소나트륨은 10.6 wt% 정도의 높은 밀도의 수소를 저장하고 있으며 가수 분해 반응을 통하여 즉시 수소를 발생시킨다. 이러한 수소화붕소나트륨의 우수한 특성은 소형 연료전지의 수소 공급원으로 적용하기에 적절하다고 할 수 있다. 본 연구는 20 와트 연료전지 수소 공급 시스템을 위한 수소화붕소나트륨의 최적 발생조건을 찾는 것을 목적으로 한다. 또한, Ru 및 Co 계열의 다양한 촉매를 평가하고 최적의 촉매를 선정하는 것을 목적으로 한다. 실험은 20 wt% 수용액에 Ru-Co-C 촉매, CoCl₂, 그리고 Co 분말 촉매를 각각 첨가하여 총 수소 발생량 및 분당 수소 발생량을 측정하였다. 또한, 가수 분해반응의 효율을 높이고 안정성을 확보하기 위해 수산화나트륨을 1 wt% 부터 5 wt% 까지 변화시켜가며 각 촉매에 대하여 총 수소 발생량 및 분당 수소 발생량을 측정하였다. 측정 결과는 모든 촉매는 5 wt%의 수산화나트륨 농도에서 95% 이상의 우수한 수소 발생 수율을 보여 주었으며 그리고 가장 높은 분당 수소 발생량을 보여 주었다. 그러나 Ru-Co-C촉매와 CoCl₂ 촉매의 경우 최소 분당 수소 발생율과 최대 분당 수소 발생율의 차이가 컸으며 수소 발생 과정에서 분당 발생율은 비선형적인 경향을 보여 주었다. Co 분말 촉매는 가수분해 과정에서 최소 분당발생량과 최대 분당 발생량과의 차이가 가장 적었으며 또한 이들 사이에서 선형적인 변화를 보여주었으며 이는 가수 분해 반응을 위한 촉매로 사용하기에 적합한 특성이다. 본 연구를 통하여 20 와트 연료전지의 수소 공급원으로 적용하기 위한 수소화붕소나트륨의 최적 발생 조건을 결정할 수 있었으며 또한 상대적으로 저렴한 Co 분말의 촉매 적용 가능성을 검증할 수 있었다.

Numerical approximation model을 이용한 실리카-나피온 복합막의 양성자 전도도 분석

Proton conductivity analysis of silica-napion complex membrane using the Numerical approximation model

차수현 · 박재형 · 유준상 · *권오성

하이젠파워(주), *계명대학교 타볼라라사 칼리지

이온교환막은 소수성의 PTFE backbone에 친수성의 술폰산기로 이루어진 이온 채널이 형성되어 있는 구조이다. PTFE와 채널의 분포는 이온교환막의 성능을 결정하는 중요한 요소이며 이로 인해 SAXS, WAXS, AFM 등의 다양한 방법을 통하여 분석되어 왔다. 그중 AFM의 확장형태인 정전기력 현미경의 경우 표면 전하의 분포를 측정 지점들의 위상 변화 통해 보여줄 수 있는 방법으로 이온교환막의 표면 전하분포에 적절하다고 할 수 있다. 그러나, 측정된 위상 변화를 구성된 위상 지도의 경우 다양한 전기력의 합력으로 이 중 표면 전하에 의한 전기력을 분류하고 이를 분석하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 이에 본 연구 그룹에서는 numerical approximation model을 개발하였으며 이를 통하여 나피온 표면 전하에 의한 전기력과 외부 전기장에 의한 전기력을 분류할 수 있었으며 근사적으로 표면의 전하 분포를 측정할 수 있었다. 본 연구에서는 실리카-나피온 복합막을 정전기력 현미경을 이용하여 측정하고 numerical approximation model을 사용하여 표면 전하분포를 분석하였으며 더 나아가 이온 전도도의 변화를 분석하였다. 본 연구를 통해 나피온에 비해 상대적으로 우수한 특성을 보이는 실리카-나피온 복합막에 대한 양성자 전도도의 증가를 수치적으로 제시할 수 있었다. 또한, 무기물-나피온 복합막 혹은 강화 복합막의 양성자 전도도 변화 분석 도구로서 numerical approximation model의 적절함을 보여 줄 수 있었다.

공기 액화를 위한 열저장 장치 기술 개발

A development of heat storage system for air liquefaction

류주열 · 박성호 · 이창형 · 박혜민 · 권도현 · 황성현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경 IT융합그룹

재생에너지를 이용한 전력 발전 비중이 급속하게 성장함에 따라 에너지 저장 장치 개발의 중요성이 지속적으로 부각되고 있다. 더욱이 재생에너지의 간헐적 특성으로 발생하는 다양한 전력계통의 불안정성 극복하고 출력제한으로 인한 경제적 손실을 줄이기 위해 장주기 에너지 저장 장치 기술 개발이 반드시 필요한 실정이다. 장주기 에너지 저장장치는 MW급 용량과 수 시간의 연속 운전이 필요한 설비로 양수 발전(PHS, Pumped Hydro energy Storage)과 비단열 압축공기 에너지 저장 장치(D-CAES, Diabatic Compressed Air Energy Storage system) 등이 대표적이다. 그러나 제시된 장주기 에너지 저장장치의 경우 에너지를 저장하기 위한 지형적 제약과 오랜 공사 기간으로 확대 보급에 어려움이 발생하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 공기의 저장 부피를 줄이기 위한 액화 공기 에너지 저장 장치 기술이 개발 중에 있다. 공기를 액화할 경우 대기압 상태의 기체 공기 대비 부피를 약 700배 수준으로 줄일 수 있어 지형적 제약 조건으로부터 자유로워질 수 있으며 공정에 사용되는 유체가 공기이므로 친환경 장주기 에너지 저장 장치로 기대를 받고 있다.

본 연구에서는 액화공기 에너지 저장 장치의 핵심 기술인 현열 및 잠열 저장 장치의 적용 방안과 극저온 에너지를 회수 및 공급하기 위해 내부에 사용된 충전재의 기술적 특성에 대하여 기술하고자 한다.

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

태양광 발전 연계 Power-to-Gas 시스템의 일단위 경제성 분석
Daily scale economic analysis of Power-to-Gas system combined with
Solar power system

박혜민 · 박성호 · 류주열 · 이창형 · 황성현 · 권도현

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 에너지환경IT융합그룹

재생에너지 3020 및 탄소중립 2050 등 신재생에너지원 보급 정책이 발표됨에 따라 태양광, 풍력 등 재생에너지 설비가 크게 증가하고 있다. 하지만 재생에너지원은 기상 변화에 따라 변동성이 크기 때문에 재생에너지원의 국가 전력 공급 기여도가 증가할수록 기존의 전원설비에 경제적 영향을 미치게 되는 문제가 발생할 수 있다. 재생에너지원의 간헐성 및 출력 변동성에 따른 에너지 생산의 불균형 문제를 해결할 수 있는 에너지 저장 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Power-to-Gas(P2G) 기술은 에너지 저장 기술 중 하나로서 재생에너지 사용 비율이 늘어날 경우 필연적으로 증가하는 잉여 전력을 수소로 전환하여 저장하는 기술이다. P2G 기술은 에너지 저장 밀도가 높고 장주기적으로 저장이 가능할 뿐만 아니라 생산 연료인 수소와 부산물인 열에너지 및 산소의 다양한 활용성으로 인해 주목받고 있다.

본 연구에서는 태양광 발전원에서 발생한 전력을 이용하는 P2G 시스템의 일단위 경제성 분석을 진행하였다. 신재생에너지 기술개발과 보급 확대를 위해서는 신재생에너지 전력 원가에 대한 정확한 분석 시스템 구축이 필요하다. 태양광발전원은 간헐적이고 변동성이 큰 특성을 가지고 있기 때문에 연간 혹은 월간 단위의 분석을 하게 되면 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 더 짧은 주기의 경제성 분석이 필요하기에 일단위 경제성 분석을 진행하였다. 일단위 전력원가 추정을 통해 우리나라 실시간 전력거래 시스템에 적용하여 전력 수요/공급 간 균형을 유지시키는데 도움을 줄 수 있다. 또한, 본 경제성 분석 결과를 이용하여 신재생에너지 사용에 대한 소비자의 의사 결정에 도움을 주거나 정부의 지원수준을 결정하는데 사용될 수 있다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20213030020280)

Synthesis of ZnSe by Green Chemical Precipitation Method for Photocatalytic Application

Muhammad Hanif Ainun Azhar · Salh Alhammadi · Vasudeva Reddy Minnam Reddy and ·
*Woo Kyoung Kim

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk, 38541,
Republic of Korea

The usage of semiconductor materials for photocatalytic application have been developed more in the past few decades because of their versatility and promising potential. Zinc selenide (ZnSe), one of the more earth-abundant semiconductor, has been studied as photocatalyst for photodegradation use. In this work, ZnSe nanoparticles (NPs) was fabricated by using a simple, cost effective, and reproducible chemical precipitation method to further enhance its ecological friendliness potential. The prepared ZnSe NPs was then characterized by using several analysis techniques. The XRD characterization showed that the ZnSe NPs have a cubic crystal structure and preferred orientation on the (111) plane, while SEM imaging revealed spherical ZnSe NPs with the size of about 80 nm. XPS observation confirmed that the ZnSe NPs have an almost identical ratio of 1:1. The measurement of ZnSe NPs photocatalytic performance was evaluated by photodegradation of several different organic pollutants and showed an excellent performance.

새로운 전이금속 에어로겔의 합성, 특성화 및 응용
Synthesis, Characterization and Applications of Novel transition metal
aerogels

Hee Yeon Do, Ramya Ramkumar, Jae-Jin Shim, Woo Kyoung Kim*

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541,
Republic of Korea

*Corresponding Author E-mail: wkim@ynu.ac.kr

Aerogels are an emerging field of interest, especially metal aerogels have gained much attention in the past few years. This is due to their unique properties such as ultra-low densities, high surface area and high porosity, in comparison to their bulk and nano counterparts. Here in we have successfully synthesized transition metal aerogels with rich properties for applications in energy and sensor sectors. The as-synthesized aerogels were characterized using SEM, TEM, BET, FTIR and XRD techniques to ascertain their morphological and physical properties. The aerogels were effectively applied as active electrode materials for energy storage applications. The aerogels performed much better than their nano equivalents. Hence these aerogels can be employed for fabricating working two-electrode energy storage devices in the future applications.

Keywords : Aerogels, ultra-low densities, energy, sensor, energy storage.

수열법으로 제조된 Ce 도프 In₂S₃/rGO 나노복합체의 광촉매 성능
Photocatalytic Performance of Ce doped In₂S₃/rGO Nanocomposite
Prepared by Simple Hydrothermal Process

Seong Uk Moon • Salh Alhammadi • Woo Kyoung Kim*

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk
38541, Republic of Korea

*Corresponding author's e-mail: wkim@ynu.ac.kr

In this work we report the simple and green synthesis of Ce doped In₂S₃/rGO nanocomposite by hydrothermal process. The prepared Ce doped In₂S₃/rGO nanocomposite was characterized by several analysis techniques. The SEM results showed the successful grown of In₂S₃ at the surface of graphene sheets with flakes morphology. The XRD results showed that, all the prepared Ce doped In₂S₃/rGO nanocomposite has cubic crystal structure regardless of Ce dopant concentration. The chemical composition and surface structure of the prepared Ce doped In₂S₃/rGO nanocomposite were investigated by XPS. The XPS survey spectra showed the elements including In, S, C, Ce, and O were observed in the survey scan spectrum for all the samples, and no impurities were detected. Further, The XPS analysis results confirmed the successful formation of In₂S₃ and the transformation of graphene oxide to reduced graphene oxide by hydrothermal process. The photocatalytic ability of the Ce doped In₂S₃/rGO nanocomposite with different Ce dopant concentration was investigated systematically and compared for the decomposition of Rhodamine b (RhB) under visible light illumination and showed an excellent performance.

신재생 에너지 저장 장치 유망 후보로 새로운 전환 금속 에어로겔
Novel transition metal aerogels as promising candidates for renewable
energy storage devices

Jungbin Park · Ramya Ramkumar · Jae-Jin Shim · Woo Kyoung Kim*

Department of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan-si, Daegu,
South Korea

*Corresponding Author E-mail: wkim@ynu.ac.kr

ABSTRACT

In the field of energy storage and conversion, there is a high demand for a device delivering high energy and power density. In search of this device, transition metal aerogels and the annealed metal aerogels were employed to design and fabricate a two-electrode supercapacitor device. Transition metal oxide aerogels are a fascinating class of compounds that have gained a lot of attention in the last decade due to their exceptional and unique properties such as high porosity, high surface area and ultralow density. The physicochemical properties of the as-synthesized aerogels were characterized by XRD, SEM, TEM, BET and XPS studies. The annealed metal aerogels show interesting high specific capacitance with good cycling stability (up to 1000 cycles). The supercapacitor also exhibited a high energy density and a power density at a moderate current density. The practical application of the aerogel was demonstrated by fabricating a two-electrode device.

Keywords: supercapacitor; metal aerogels; porosity; surface area; energy storage.

Lanthanum doped CoSe₃ supported on carbon nano tubes as efficient electrocatalysts towards Oxygen Evolution Reaction

Karthikeyan S C¹ · Natarajan Logeshwaran¹ · Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

As hydrogen emerging as one of the cleanest and reliable future fuel in replacing the typical fossil fuels. To make this much more efficient present efficient and expensive noble metals like Platinum, Ruthenium and Iridium based catalysts are to be replaced with economical transition metals. This will improve the wide commercialization of the Hydrogen fuel based economy. OER, the cathodic reaction for batteries and water electrolyzers, still remains as an enigma due to their reaction kinetics. Many of the contemporary researches are focused on developing a cheap and effective electrocatalyst without compromising their activity towards oxygen evolution reaction (OER). In this work, we developed a lanthanum doped cobalt based electrocatalyst supported on a carbon matrix as a promising electrocatalyst and studied their electrochemical performance towards the HER. Physico-chemical characterization such as XRD and FE-SEM analysis confirmed the formation of the Iridium oxide decorated Manganese oxide rods. The Electrochemical characterizations such as cyclic voltammetry, linear sweep voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy and chronoamperometry demonstrates its superior electrocatalytic activity with very low overpotentials and high stability in 1M KOH electrolyte. This study provides a potential non noble electrocatalyst with significant electrochemical performance in replacing the present noble metal based electrocatalysts.

Synthesis of core-shell based Pt@MoS₂ supported graphite nanofiber nanocomposites for oxygen reduction reaction

Shanmugam Ramakrishnan¹ · Milan Babu Poudel¹ · Ae Rhan Kim¹ · Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

The development of highly durable and efficient energy storage conversion and storage devices is an essential task for the research community. Therefore, it is very important to design and synthesize a highly durable core-shell based electrocatalyst for fuel cell and metal-air battery applications. Herein, we have synthesized hierarchical structured MoS₂ on graphite nanofiber (GNF) by using a hydrothermal method at 180 °C for 12 h. Furthermore, the Pt-aniline complex was coated on MoS₂/GNF and calcination at 500 °C. Finally, the resulting Pt-C core-shell based electrocatalyst was characterized by various analytical techniques such as Scanning and Transmission electron microscopy (SEM and TEM), X-ray diffraction method, Raman, and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). The optimized electrocatalysts provide an enhanced half-wave potential (V vs RHE) in the oxygen reduction reaction. These synthesis strategies provide the new pathway to the development of core-shell electrocatalyst for ORR, to improve the electrochemical performance of fuel cell and metal-air battery devices.

Keywords: Hierarchical Structure, Electrocatalyst, Oxygen evolution reaction, Core-shell.

Rational design of ternary layered double hydroxide and iron oxide on three dimensional hollow and porous carbon nanofibers as binder free electrode for high performance supercapacitors

Milan Babu Poudel¹ · Ae Rhan Kim¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

The rational design of advanced structures consisting of multiple components with excellent electrochemical capacitive properties is one of the crucial hinderance to be overcome for high performance supercapacitors. The performance of the supercapacitor electrodes depends primarily on the materials of the electrodes. In the state of art intriguing ternary layered double hydroxide (LDH) with iron oxide (Fe_2O_3) with conductive layer is one of the efficient approaches to improve the electrical conductivity of electrodes, which could largely boost energy density and power density of the supercapacitors. As a result, the combination of bimetal LDH and conductive materials is supposed to enhance electrical conductivity. This work presents the fabrication of binder-free electrode composed of ternary layered double hydroxide and Fe_2O_3 anchored three dimensional porous and hollow carbon nanofiber ($\text{ZnMgAl-LDH/Fe}_2\text{O}_3\text{-HPC}$) nanostructure and used as an efficient electrode for supercapacitor applications. Various characterization techniques like, Field emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), high-resolution transmission electron microscope (HR-TEM), X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectrometer (XPS) were analyzed. Moreover, taking to the advantage of the multidimensional rational nanostructures, unique porous networks, and excellent intrinsic conductivity, the $\text{ZnMgAl-LDH/Fe}_2\text{O}_3\text{-HPC}$ significantly boost the capacitive performance and long-term stability.

Non-noble electrocatalysts on the conducting GNF as an efficient HER electrocatalyst for anion exchange membrane water electrolysis

Natarajan Logeshwaran¹ · Shanmugam Ramakrishnan¹ · Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Increasing fossil fuel depletion seeks immediate focus and needs to develop alternative renewable resources for future generations. Water electrolysis is the predominant way for hydrogen production among numerous viable renewable energy resources. Recently, the anion/proton exchange membrane used in water electrolysis applications played a vital study in practical hydrogen production developments. Transition metal-metal dichalcogenides, such as manganese or iron-based chalcogenides such as manganese/iron-sulfides and selenoids, have attracted much attention because of their abundant availability, eco-friendly green, and more extended stability properties. However, the limited active sites and significant electron conductivity of transition manganese sulfide-based materials hinder their performance in hydrogen evolution reaction (HER) and oxygen evolution reaction (OER) applications. Here, we developed bimetal supported (manganese-iron) based sulfides on the conducting carbon substrates (MnFeS₂-GNF) as an efficient catalyst for HER applications. Further, we carried out detailed characterization techniques such as 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) to confirm the successful formations bimetal MnFeS₂-GNF as an efficient HER electrocatalyst for anion exchange membrane used water electrolysis.

Quantum dot copper-based metal sulfides as an excellent cathodic material for CO₂ reduction reaction

Murugesan Prasanna¹ • Shanmugam Ramakrishnan¹ • Dong Jin Yoo^{1,2}

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

²Department of Life Science, Hydrogen and Fuel Cell Research Center, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Electrochemical CO₂ reduction reaction (CO₂RR) is the most promising and effortless remediation to crack the challenges in the CO₂ conversion method. This can lead to generating value-added products in the potential range of -1.90 to -0.33 V. Still, it is far from selectivity, higher efficiency, and high energy density. Due to its sluggish proton-coupled electron transfers and multiple secessions of reaction intermediates. Developing the high overpotential and elegant morphology and structural electrocatalysts is necessary. Copper-based materials are the unique family of electrocatalysts capable of converting CO₂ into diverse valuable products. Though, Cu-based electrocatalyst suffers from selectivity and long-term stability. Here we have prepared bimetal copper-based sulfides (Cu-XS₂) as an efficient electrocatalyst for the electrochemical CO₂ reduction reaction. Further, we have carried out XRD, RAMAN, UV-VIS, SEM, and EDAX analyses to confirm successful material preparation.

리튬이온전지용 탄소 및 TiN 셸이 코팅된 실리콘 음극재의 제조

Preparation of silicon coated with carbon and TiN shell
for the anode of Lithium ion battery

이은희 · 김동건 · 정혜원 · 주은혜 · 정찬일 · 김필*

전북대학교 반도체·화학공학부, *전북대학교 반도체·화학공학부

최근 전기 전자 및 정보통신분야의 급격한 발전으로 리튬이온배터리에 대한 수요가 증가하고 있으며, 수송기기에 적용하려는 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 장거리 주행을 위해 큰 용량과 급속 충·방전이 중요하다. 따라서 흑연에 비해 10배 정도 우수한 이론 용량을 가지는 실리콘 음극재가 주목받고 있다. 하지만 리튬이온의 삽입·탈리 과정에서 실리콘의 부피팽창으로 인해 불안정한 고체전해질 계면이 형성된다. 이는 활물질의 파쇄를 일으키기 때문에 개선이 필요하다. 따라서 최근에는 실리콘의 부피팽창 억제를 위해 탄소와 금속 산화물 및 질화물을 코팅하는 방법이 연구되고 있다. 특히, TiO_2 는 우수한 내구성 및 정적 용량을 가지고 있지만, 낮은 전기전도성을 갖는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 암모니아 소성 과정을 거쳐 TiN으로 변형시켰다. 이는 높은 전기전도성과 함께 성능을 증대시킬 수 있다.

본 연구에서는 100nm의 실리콘 표면에 탄소, TiO_2 , TiN을 코팅한 구조의 음극재를 제조하였다. 제조한 음극재로 TEM, XRD 분석을 통해 구조를 확인하였고, 충·방전 평가를 통해 TiN 도입효과를 알 수 있었다. 연구 결과, 전기전도성이 높은 TiN 셸을 가질 때 높은 방전 용량과 안정성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

리튬이온전지 양극재용 니켈 과잉 전이금속 산화물의 소성 온도에 따른 전극 제조 및 성능 분석

Preparation and Performance analysis of Electrodes according th heat
treatment temprature of high-nickel transition metal oxide for
lithium-ion battery cathode materials

정혜원 · 김동건 · 이은희 · 주은혜 · 정찬일 · 김 필*

전북대학교 반도체 화학공학부

리튬이온전지는 양극과 음극물질의 산화환원 반응으로 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치이다. 양극물질은 리튬이온전지의 반응에서 가장 느리게 반응하며 용량이 작기 때문에 배터리의 용량, 출력, 수명을 결정하는 데 가장 큰 역할을 하는 물질이다. 니켈 과잉 전이금속 산화물은 니켈 함량이 80% 이상으로 포함된 전이금속 산화물을 의미하며 많이 활용되는 전이금속은 니켈, 코발트, 망간이다. 니켈은 가수를 2에서 4개로 바꿀 수 있기 때문에 니켈함량을 증가시키면 리튬 층으로 들어올 수 있는 리튬 개수가 2배로 증가하게 되어 용량이 향상되는 장점을 지니고 있다.

본 연구는 니켈 과잉 전이금속 수산화물을 다양한 온도조건으로 소성을 진행하여 니켈 과잉 전이금속 산화물로 전환시켰다. 제조한 양극물질을 이용을 이용하여 제작한 전지의 성능 평가와 양극물질의 형상구조를 확인하고 결정성 분석을 진행하였다.

자동차경유용 촉매제 검사 경향 및 품질특성

Inspection trends and quality characteristics of catalysts for diesel fuel

주다정 · 김재곤 · 김목연 · 민영제 · 이지수 · 홍기연

한국석유관리원 미래기술연구소

요소수는 자동차용 경유를 연료로 사용하는 차량에서 배출되는 질소산화물을 저감하기 위하여 사용되는 화학물질로 대기환경보전법 시행규칙에서 촉매제로 규정하고 있다. 요소수의 주원료인 요소는 석탄 또는 가스에서 암모니아를 추출 후, 이산화탄소와 반응하여 만들어진 다. 그 과정에서 뷰렛, 트리우렛 등의 불순물이 생성되며, 이는 SCR(Selective Catalyst Reduction, 선택적 환원 촉매) 장치의 고장 원인이 되기도 한다. 따라서 촉매제를 제조, 수입하여 사업을 하고자 하는 경우 법정 검사를 통한 KS R ISO 22241에 따른 18개 항목의 품질 기준을 모두 충족하는 인증이 필요한 실정이다. 2021년 10월 요소 수입의 97% 이상 차지하는 중국이 요소 수출을 제한하면서 국내 요소 부족으로 인해 요소수 제품 수입이 증가하였다. 약 2달 동안 350건의 사전 검사 진행하여, 기존 연 10건 내외에 비해 검사 건수가 크게 증가하였다. 2021년 요소수 수급 불균형 시기 350건의 검사 경향 및 품질특성을 분석하면, 요소수 수입 제품 322건(92%), 제조 제품 28건(8%)이 사전검사를 신청하였다. 수입 제품 국가는 중국 56%, 베트남 16.3%, 미국 2.6%, 인도 2.3% 등의 순이었다. 검사 결과는 적합 82%, 부적합 18% 비율을 보였다. 부적합 요소수의 제조지를 살펴보면, 수입 제품 중에서는 베트남 25건(39.7%), 중국 17건(27%), 국내 제조 제품은 9건(14.3%) 등의 비율을 보였다. 부적합 항목으로는 나트륨 함량 23.2%, 알데히드 19.9%, 요소(urea) 함량 17.2%, 굴절지수 12.6% 순으로 나타나는 특성을 확인하였다.

A formation kinetics of HQ clathrate with N₂, CH₄ and CO₂

Chang Yeop Oh · Ji-Ho Yoon[†]

Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Ocean
Science and Technology School(OST)

Clathrates are crystalline inclusion compounds formed by interactions between host and guest molecules that form cavities or channels where guest molecules can reside. Among the various organic hosts, HQ has three common crystalline variations, designated α -, β -, and γ -forms. Pure α -form HQ (α -HQ) is a stable form that reacts with guest molecules to convert its structure to a β -form HQ (β -HQ) clathrate. Various guest molecules such as O₂, N₂, CO₂, H₂S, CO, and CH₄ can easily be trapped in the cages of a β -HQ clathrate framework. This β -HQ clathrate has cavities suitable for capturing various guest molecules over a wide range of temperature (up to ~ 353 K) and under moderately low pressure-conditions (<1 MPa). Recently, HQ clathrates, have been reported as a potentially good medium for storage and gas separation because HQ has some advantages over water molecules when forming clathrate compounds. In this study, a constant pressure condition of 4 MPa was formed using a ISCO syringe pump at 293K, and the HQ samples and each gas (N₂, CH₄ and CO₂) were reacted in a high pressure cell by a gas-phase reaction method. Using a syringe pump, it is possible to accurately measure the inclusion behavior for each gas by reacting under constant pressure conditions. We investigated the formation kinetics, gas uptake and cage occupancy of the HQ clathrates formed with N₂, CH₄ and CO₂. This study presented that it is useful to be aware of guest behaviors of HQ clathrates formed from various gas (N₂, CH₄ and CO₂) in order to extend the new technologies of storage and separation of target gas through HQ.

Naphthoquinone based colorimetric and fluorescence chemosensor for selective detection of metal ions in aqueous medium

Sayfiddinov Dilmurod¹ • Ramasamy Santhosh Kumar¹ • Dong Jin Yoo^{1,2}

¹Department of Biology/Natural science of Graduate school, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

²Department of Energy Storage/Conversion Engineering of Graduate School, BK21 FOUR, Jeonbuk National University, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

Industrialization has resulted in the release of a large number of heavy metals into the environment, seriously threatening human life. Excess consumption of these metal ions may lead to various neural disorders. Hence, heavy metal ions are the most relevant and significant metal ions to study about its biological and environmental impacts. Several analytical techniques have been reported for the detection and quantitative analysis of metal ions. Among various optical sensors available today, fluorescence chemosensing probes have attracted increasing attention and are recognized as the promising tool for the detection of specific targets because of their simple operation, rapid response, and ability to bioimage live human or animal cells. Therefore, we report an easily accessible colorimetric and fluorescence probe 2-(phenylthio)-3-((2-(pyridin-2-yl) ethyl) amino) naphthalene-1,4-dione for the selective and sensitive detection of heavy metal ions in an aqueous solution. The chemosensor will be synthesized in two steps via Michael-like addition and nucleophilic substitution reactions. The binding mechanism of probe for metal ions will be confirmed by Fourier transform infrared analysis, NMR titrations, and mass (electrospray ionization) spectral analysis. Properties of the probe such as sensitivity, reversibility and the limit of detection for metal ions will be examined. Moreover, bioimaging studies will be executed to demonstrate that the chemosensing will be an effective fluorescent marker for the detection of metal ions in living cells and zebrafish. Importantly, the probe will be being predicted to be able to discriminate between metal ions in human cancer cells and metal ions in normal cells.

빅데이터 기반 지역난방 사용자설비 운영 열사용 패턴과 엑서지 분석

Operational heat use pattern and exergy analysis of district heating user
equipment based on big data

류기윤 · 김민영* · 김가희* · 김래현*

서울과학기술대학교 화공생명공학과, *서울과학기술대학교 산학협력단

집단에너지 시설은 열원시설, 열수송시설과 사용자설비분야로 구분 할 수 있다. 집단에너지 시설이 효율적으로 운전되려면 이들 각 구성분야가 설계, 시공 및 운전단계에서 서로 유기적으로 연계가 되어야 한다. 그러나 사용자 기계실 1차측 회수온도 저감(Δt 증대)을 위한 사업을 추진하는 경우에 열생산시설 소유자와 열사용자인 사용자 기계실설비의 소유자가 다른 점과 사업 추진결과 그 성과를 열생산시설 소유자가 대부분 얻는다는 점 때문에 어려움이 따른다. 정부는 에너지 수요 관리, 에너지효율 향상 및 설비 관련 민원해소를 지역난방 공급자가 해결해 주기를 요구하고 있으나, 공급사업자에 의한 사용자 설비 관리에는 한계가 있다. 현재 지역난방 공급회사들은 공급규정에 따라 사용자 기계실에 대한 안전점검 서비스만을 제공하고 있으며, 한국지역난방공사의 경우에는 사용자설비 에너지진단서비스를 통해 공급배관 전체에 걸쳐 정밀 진단서비스까지도 제공하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 사용자설비의 1차측의 공급과 출구 온도와 유량 데이터를 분석하여 현재 기계실 운영 패턴과 엑서지 분석을 통해 사용자설비 에너지진단과 공급배관 전체에 걸쳐 정밀 진단서비스를 확장하고자한다. 따라서 그 성과를 서로 나누어 가질 수 있는 방안이 마련된다면 사용자 기계실 1차측 회수온도 저감(Δt 증대)에 동력을 부여할 것으로 판단된다.

Visual Studio를 이용한 소프트웨어 단위시험 방법 Software Unit Test Method using Visual Studio

이동일*

*한국수력원자력(주) 중앙연구원

기동중인 원자력 발전소의 계통변경은 소프트웨어 변경을 수반한다. R.G 1.152 rev2 에서 유지보수 단계의 소프트웨어 수정은 개발단계에 준하는 소프트웨어 확인 및 검증 (V&V, Verification and Validation)을 요구한다.

IEEE 1219-1998에서는 유지보수 단계에서의 소프트웨어 수정은 수정, 이전, 폐기 3가지로 나누고 있다. IEEE 1219가 폐기되고 새로 나온 IEEE 14764-2006에서는 오류수정, 설비강화로 나누고 있으며, 오류수정은 수리정비, 예방정비로 나누어진다. 그리고, 설비강화는 적응정비, 완전정비로 나누어진다. 표현 방법과 분류는 조금씩의 차이를 가지고 있으나, 소프트웨어의 변경은 의미적으로 정리를 하면 소프트웨어의 수정(교정, 전면개정) 및 환경변경(운영체제의 변경)으로 나눌 수 있다.

소프트웨어의 변경은 반드시 소프트웨어 확인 및 검증을 수행해야 한다. 원자력 발전소 설비의 대표적인 소프트웨어는 EDD (Embedded Digital Device) 의 펌웨어가 있다. 원자력 발전소의 소프트웨어 변경은 대부분 설계사의 제어로직도면(CLD, Control Logic Diagram)에서 검토되어 제작사의 제어로직도면(VLD, Vendor Logic Diagram)으로 구현되어 펌웨어로 다운로드한다.

원자력 발전소의 소프트웨어 변경은 VLD의 변경으로 생각할 수 있다. 따라서 VLD의 소프트웨어 V&V는 반드시 수행되어야 한다. VLD의 V&V를 수행하기 위한 검증 프로그램이 존재하지 않기 때문에 설계변경서의 적절성을 분석 평가하고, 사람이 직접 VLD를 분석하고 Hot-panel 또는 실제 설비에서 제어 출력부의 신호를 차단 후 단위 시험을 수행하고, 최종적으로 시스템 시험을 한다.

단위시험의 편의성을 확보하고 신뢰도를 가지기 위해서는 정량적인 평가가 가능한 검증 소프트웨어가 필요하다. 그리고 검증 소프트웨어 역시 IEEE 1012-2004에 따라 소프트웨어 V&V가 수행되어 개발된 소프트웨어이어야 한다. 신뢰할 수 있는 소프트웨어가 검증을 수행하여야 신뢰할 수 있는 검증을 할 수 있기 때문이다.

검증 소프트웨어는 대부분 C++, C#, python으로 개발한다. 이 논문에서는 테스트 코드에 대해 범용적으로 사용되는 Microsoft 사의 Visual Studio를 활용하여 단위시험을 수행한다. 그리고 수행 방법을 설명하고, 수행하였을 때의 장점을 기술한다.

제어봉구동장치 교체방안 검토
A Review of Replacement Plan
for Control Element Drive Mechanism(CEDM)

이상철

한국수력원자력(주) 중앙연구원

전 세계적으로 기후변화 대응, 탄소중립 실현 등을 위해 태양광, 풍력 등의 신재생에너지의 역할이 중요해짐에 따라 전력시장에서 기존 발전원간 역할이 변화하고 있다. 원전은 지금까지 낮은 발전단가로 전력망에서 기저부하를 담당하였으나, 신재생에너지의 비중이 확대되어 원전과 타 발전원간의 연계 운전 필요성이 증대되고 있다. 이러한 에너지 환경변화에 따라 원전은 100% 전출력 운전부터 전력망 요구에 따라 출력을 제어할 수 있는 탄력운전까지 요구받고 있다. 체코 등 신규원전 도입을 희망하는 국가에서는 탄력운전 요건을 제시하고 있다. 일반적으로 원전의 탄력운전은 운전특성에 따라 일일부하추종운전 및 주파수제어운전으로 구분할 수 있으며, 원전이 탄력운전을 수행할 경우 신속한 원자로 출력제어를 위해 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, CEDM)의 잦은 노심 삽입 및 인출로 CEDM 구동거리가 증가된다. 본 연구에서는 수출형 원전의 설계시 탄력운전이 CEDM에 미치는 영향을 파악하고, 필요할 경우 CEDM을 교체하기 위한 방안을 수립하고자 한다.

CEDM은 개발과정에서 성능시험을 통해 확인된 구동거리를 기반으로 설계수명(구동거리)이 결정되며, 탄력운전 영향으로 구동거리가 증가될 경우 설계수명을 초과하기 전 교체되어야 한다. 본 연구는 원전 설계수명 동안 탄력운전 성능요건을 바탕으로 일일부하추종운전 및 주파수제어운전시 예상되는 제어봉 움직임을 고려하여, CEDM 구동거리 예측 및 CEDM 교체 필요성을 먼저 검토하였다. CEDM 구동거리는 탄력운전시 정지제어봉, 조절제어봉 및 부분강 제어봉 중 영향을 많이 받는 제어봉의 CEDM을 대상으로 노심 주기에 따른 영향을 고려하여 평가하였다. 또한 구동거리 관점에서 CEDM 교체가 필요할 경우 교체방안을 수립하기 위해 CEDM 기기와 연계된 일체형원자로상부구조물(Integrated Head Assembly, IHA), 원자로냉각재배기계통 등 관련 기기 및 계통을 확인하였으며, 기기 사양, 특성, 설치조건/위치 등을 분석하였다. CEDM 교체는 원자로헤드 상부의 IHA에 연결된 배관, 지지대, 케이블 등 부속기기 분리, IHA 인양, CEDM 구동부 교체 및 재조립과 관련하여 세부절차 및 방안을 검토하였다. 본 연구에서 검토한 CEDM 교체방안 결과는 변화하는 에너지 환경에 부응하고 신재생에너지 비중 확대와 연계하여 수출형 원전의 탄력운전 능력 제고 및 국내 원전산업의 기술 경쟁력 강화에 기여할 것으로 예상된다.

원전 저압터빈 동익 루트브 비파괴검사 및 관리방안에 대한 고찰 A Study on Nondestructive examination & Management Method of Low Pressure Turbine Roots area in Nuclear Power Plant

문균영 · 김진희

한국수력원자력(주) 중앙연구원 기계연구소

1. 개요

원자력/화력 발전소에서 터빈은 증기발생기(Steam generation)에서 발생하는 증기로 터빈 블레이드(동익)를 회전시켜 발전기를 이용하여 전기를 생산하는 매우 중요한 핵심 설비이다. 증기를 이용한 터빈은 원전의 경우 1800rpm의 높은 속도로 회전을 하게 되는데, 터빈의 로터 디스크에 부착된 동익은 이때 많은 응력을 받게 된다. 따라서 발전소 운전년수 증가에 따라 동익루트부에 대한 건전성 확보를 위해 저압터빈 동익 루트부에 대한 비파괴검사 및 체계적인 대책 수립 및 건전성 제고가 필요하다.

2. 국내·외 사항

'70년대 말 해외(미국)에서는 저압터빈 동익에서 SCC¹⁾(응력부식균열)사례가 발견되어 보수 및 교체되어 저압터빈 동익의 건전성 유지가 매우 중요하게 대두되었다. 이후 '95년 경 EPRI 조사에 의하면 미국내 운전 중인 발전소 몇 곳의 터빈에서 균열이 발생한 것으로 보고되었다. 국내 발전소의 운전년수가 증가됨에 따라 저압터빈의 손상 가능성도 증가되고 있다.

3. 저압터빈 동익 손상 원인

부식 환경에서 운전될 때 재료의 피로강도 이하에서 파손이 발생하는데, 증기내 불순물 등 환경이 부식피로를 가속시킨다. 또한 부식성 분위기는 주로 복수기관 누설이 인한 오염 해수, 저압단에서 습증기 습분에 의해 침식이 발생된다. 운전중 유입 이물질 혹은 탈락 부품이 동익에 충격을 가할 수도 있다. 동익이 잘 설계되고 제작되어도 동익 조립이 불량하면 고유진동 주파수가 변하여 공진을 유발할 수도 있다. 그리고 장기간 운전에 따른 재료 열화로 기계적 성질이 취약해져서 균열이 발생할 수도 있다.

4. 저압터빈 동익루트부 검사방법

저압터빈 동익 루트부 비파괴검사는 초음파탐상검사(UT), 자분탐상검사(MT), 또는 액체 침투탐상검사(PT), 와전류탐상검사(ECT) 등의 수동검사가 제작사 매뉴얼에 따라 적용되고 있으나, 동익 루트부 형상은 기하학적 형상의 복잡성으로 인해 수동초음파검사 방법으로는 접근성 어려움 및 검사데이터 저장 등의 문제가 있어, 여러 연구과제를 통해 위상배열자동초음파검사(PAUT)방법이 개발되어 일부 검사가 이루어지고 있다.

5. 향후대책

향후, 해외 원전의 저압터빈 동익 루트부 검사 및 보수사례 등 지속적인 모니터링 및 기술정보 동향 파악으로 국내 원전에 대한 지속적인 적용/관리가 필요하며, 해외 저압터빈 동익 루트부(Root area)에 대한 결함 발생 원인분석 및 정비 방법 공유를 통해 국내 원전 결함 발생 때 긴급 정비보수에 활용이 필요하다.

1) SCC(Stress Corrosion Crack) : 응력부식 균열은 응력이 작용하는 곳에 부식성 환경이 존재하면 균열이 발생하는 현상이다. 터빈에서 발생하는 부식성 분위기는 주로 복수기관 누설로 인한 오염 및 해수에 기인한다.

혁신형 소형모듈형원자로의 경제성 향상 방안 고찰

A Study on Economic Enhancement of Innovative Small Modular Reactor

강상희* · 박기조*

한국수력원자력(주)중앙연구원, *한국전력기술

최근 전력구성의 기저부하를 담당하는 대형원전보다 소형원전에 대한 선호도가 증가하고 있다. 이는 후쿠시마 사고 이후 대형원전 사고의 파급력을 경험함에 따라 원전의 안전성에 대한 요구가 증가하고, 대형원전 건설시 발생할 수 있는 투자비용에 대한 리스크로 인해 이를 보완할 수 있는 소형원전에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 세계 소형모듈형원자로 시장의 경쟁우위를 확보를 위해 안전성, 경제성 및 유연성이 향상된 혁신형 소형모듈형원자로 (Innovative Small Modular Reactor, 이하 i-SMR)을 개발 중이다.

i-SMR의 경제성 목표는 4,000USD/kWe(NOAK, N-th of a kind)로 경쟁노형 및 타발전원과 동등 수준의 본 목표를 달성하기 위해서는 최적 설계가 병행되어야 한다. i-SMR의 일체형 설계에 따라 계통 단순화로 계통수가 감소되고, 피동안전계통의 채택으로 안전등급 기기가 감소한다. 이로 인해 구조물의 체적이 감소하여 건설비 뿐 아니라 설비 교체비, 예방정비기간 단축 등과 같은 운영비도 절감된다. 모듈화 설계와 공장제작 및 운송으로 제작 및 시공 기간 단축으로 현장 시공의 단순화를 추구하고, 기존 기술 기준을 유지하면서 기술변경을 최소화해야 한다. 또한 시운전 및 운영 기술을 최적화하고 원전 운영의 효율성을 향상시켜야 한다. i-SMR의 경제성 목표를 달성하기 위해서는 설계 개발 단계부터 협력이 필요하며, 개발 단계별 경제성 분석을 통해 설계 개선사항을 도출하여 설계에 반영함으로써 i-SMR의 경제성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

원전 비상디젤발전기 연료분사펌프 고착에 대한 고찰

Study of Fuel Injection Pump sticking for the Emergency Diesel Generator at Nuclear Power Plant

김명훈

한국수력원자력 중앙연구원

원자력발전소 사고발생 시 비상전원을 공급하는 비상디젤발전기(이하 EDG)의 실린더 내 연료유를 공급하는 연료분사펌프(이하 FIP)는 각 실린더 당 1대가 설치되어 있고, FIP는 용적형 캠구동방식 펌프로 엔진 2회전 당 1회 분사한다.

근래 국내 표준형 원전의 동일한 형식의 EDG FIP에서 플런저와 바렐이 고착되는 사례가 다수 발생하였다. 해당 원인분석을 위해 고착된 플런저, 바렐의 손상표면을 분석결과 금속의 양 표면이 마찰로 인해 경도가 약한 재질의 금속이 뜯겨져나간 형태인 Galling 현상이 확인되었다. FIP는 내부 연료유의 윤활성에 따라 금속 마찰을 최소화하는 윤활방식으로, 내부 고착을 방지하기 위해 사용 연료유 윤활성의 기준은 400 μm 이하로 규정되어 있다.

원전 EDG의 FIP 고착이 발생한 바렐을 점검한 결과 연료유 입출구인 Spill Port 좌우측에서 유속에 의해 마모된 형태가 관찰되었다. EDG 운전 시 플런저와 바렐의 동작에서 연료유가 고압으로 분사된 후 남은 연료유가 Spill Port로 빠져나가게 되는데 이때 고압상태에서 저압으로 급격한 압력변화로 연료유는 Spill Port로 빠른 유속으로 나가게 된다. 이때 모서리 부분은 연료유의 빠른 유속에 의해 침식된 것으로 확인되었다.

설계 상 Spill Port의 모서리 부분은 "Sharp Edge"로 가공하도록 되어 있으며, 이는 플런저가 연료유를 압축될 때 정확한 시점에 Spill Port가 닫히기 위한 목적이다.

해외 원전 EDG에서도 동일한 사례가 발생된 되었으며, 분석결과 배럴표면 경화처리방식에 따른 문제로 모서리 손상 시 발생한 미세입자가 플런저, 바렐 간극사이로 유입되어 고착된 것으로 확인되었다.

국내 동일한 타입의 원전 EDG의 고착된 FIP의 바렐 Spill Port를 점검한 결과 동일한 손상형태가 나타났으며, 고착이 발생하지 않은 EDG 바렐 Spill Port에서도 모서리가 손상된 것을 확인하였다.

이는 바렐 Spill Port 손상 시 발생한 미세입자가 플런저와 바렐 간극 내로 침투하여 발생한 고착으로 추정되며 Spill Port 손상에도 불구하고 고착되지 않은 FIP의 경우 미세입자가 Port 출구로 빠져나가 손상되지 않은 것으로 예상된다. 또한, 이미 배럴 모서리가 손상된 운전되는 EDG의 상태로 보아 모서리부분의 손상은 EDG 운전에 큰 영향을 미치지 못하여 모서리 부분의 손상 방지를 위한 설계변경이 가능할 것으로 보인다.

상기와 같은 현상에 대한 조치로 Spill Port 모서리 가공 시 "Round" 형태로 가공 또는 바렐의 경도를 높이기 위한 표면 코팅 등이 고려되어야 한다.

7,200kW급 비상디젤발전기의 진동분석 사례

A Study on Vibration Analysis of the 7,200kW class Emergency Diesel Generator

김영철(Young Cheol Kim)

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

7,200kW급 비상디젤발전기의 진동 측정값이 24.9 mm/sec, 0 to peak로 기준값 21 mm/sec, peak을 초과하는 값이 계속되었다. 이때 측정값은 단순히 진동의 크기만을 고려한 값으로 진동의 방향(수직, 수평, 축) 및 주효 주파수 성분이 포함되지 않은 값으로 설비의 정확한 상태를 판단할 수 없었다. 또한, 진동값이 높게 측정된 부위는 발전기의 반부하측이었다. 설비의 상태진단을 수행하기 위해 3축(수직, 수평 및 축) 방향의 진동 스펙트럼 신호를 취득 및 분석하였다.

비상디젤발전기는 바닥의 탄성지지대(Resilient Mount) 위에 일체형의 강성(Rigid) 베이스 프레임을 설치하고 그 위에 디젤엔진과 발전기가 직결되어 설치되어 ISO 8528-9, part 9의 분류기준으로 A.3에 해당된다. 발전기의 동특성을 확인하기 위해 Impact Test를 수행하였으며 20Hz 성분의 고유 주파수를 확인하였다.

비상디젤발전기 운전 중 축방향의 주요 진동 주파수는 2X(17Hz), 3.5X(30Hz) 성분이며 2X 성분이 탁월(Dominant) 주파수임을 확인하였다. 수평 방향 진동은 1.5X(13.0Hz), 2.5X(21.36Hz) 성분 측정되었으며 2.5X 성분이 탁월(Dominant) 주파수임을 확인하였다. 전체적으로 0.5X의 배수성분(Harmonics)이 나타났으며 이는 엔진 2회전 당 1회 폭발하는 4행정 사이클 기관인 설비의 고유 특성인 것으로 파악되었다. 고유 주파수(20Hz)와 운전 탁월 주파수가 이격되어 있으므로 공진 현상은 발생하지 않는 것으로 판단되었다.

부하가 증가함에 따라 수직방향과 수평방향의 진동 크기가 상승하였고 수평방향의 진동은 계통 병입 후 발전기 출력과 상관없이 어느 정도 유지되었다. ISO 10816-3의 3항에 따르면 수평으로 설치된 비상디젤발전기는 축방향의 축력이 발생하지 않으므로 축방향 진동값은 참조용일뿐 필수적으로 고려하는 변수는 아니다. 따라서, 서두에 기준값을 초과한 것으로 측정되었던 진동값은 축방향 성분으로 판단되며 수평 방향으로 설치된 상태에서 추력이 발생하지 않는 비상디젤발전기의 관점에서는 필수적으로 고려할 변수가 아니다.

서두에 측정되었던 비상디젤발전기 운전 중 진동 주파수와 발전기의 고유 주파수(20Hz)가 이격되어 있고 추력이 발생하지 않는 상태의 축방향 진동이므로 현재 진동 상태가 설비의 건전성에 악영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 다만, 운전 중 지속적으로 진동 추이를 감시하여 진동의 크기가 추세적으로 증가지 않음을 확인할 필요가 있다.

습분분리재열기의 2단 재열기 유로분리판 내부 누설 진단 An Internal Leakage Diagnosis of Partition Plate on MSR 2nd Reheater

송석윤(Seok Yoon Song)

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

1. 서론

습분분리재열기(Moisture Separator Reheater)는 원전 계통을 구성하는 핵심기기 중 하나로써, 주어진 온도, 압력 및 부식 환경에 견디고 발전소 수명기간동안 사용이 가능하도록 설계되지만 가동년수가 증가함에 따라 예기치 못한 원인으로 인하여 손상이나 파손이 발생할 수 있다. 국내의 원자력발전소에서 운전되고 있는 습분분리재열기는 30년 이상 사용됨에 따라 운전 및 정비 비용이 증가되고 있다.

본 논문에서는 발전소 출력운전 중 재열기 유로분리판 내부 누설을 진단하는 방법에 대해 기술하고자 한다. 이를 위해 실제 발전소 누설 경험사례의 운전변수 변화를 분석하였다.

2. 재열기 유로분리판 내부 누설 사례 분석

관관에 용접되어 있는 증기실은 유로분리판(pass partition)에 의해 상하 두 부분으로 나누어져 있으며, 상부 증기실은 가열증기가 유입되는 곳으로 1개의 증기 유입구가 있으며, 하부 증기실은 열 교환된 응축수가 모여 배수배관을 통해 저장탱크로 회수된다. 2단 재열기는 주증기가 공급되어 전열관(tube) 외면을 흐르는 계통증기를 가열하며, 재열기의 가열증기 전열관 유로 구성은 4 pass로 구성되어 있으며, 전열관 내부를 흐르는 가열증기는 전열관 외부에 흐르는 계통증기에 열을 전달하면서 응축하고 배수되어 6단 고압급수가열기에 공급된다.

2단 재열기 가열증기 공급/응축수 배수 유량이 증가하였으며, 1 pass로 공급되는 가열증기가 2,3 pass로 우회되어 하부 챔버 압력을 상승시켜 전열관(tube) 내부로 흐르는 가열증기 유동을 방해하여 가열증기 유동정체 현상에 의해 응축수 배수온도가 감소되었다. 2단 재열기 유로분리판의 가스켓 손상으로 가열증기가 입구(고온부)에서 출구(저온부)로 우회되었다. 가열증기가 전열관을 우회하여 2단 재열기 성능이 저하되어 저압터빈 공급 계통증기 온도가 1~3℃ 감소되어 운전되었다.

3. 결론

유로분리판은 가열증기 입구와 출구를 분리하는 역할을 한다. 유로분리판이 누설되면 가열증기가 전열관을 통과하면서 가열되지 않기 때문에 재열기 성능이 저하되게 된다. 유로분리판 누설 유량이 증가할수록 전기출력은 감소하는 추세를 나타낸다. 재열기 운전 중에는 유로분리판에서 내부 누설을 탐지하기가 어렵다. 위와 같이 재열기 유로분리판 내부 누설을 조기에 진단함으로써 발전소 전체 계통으로 과도상태가 확산되는 것을 막을 수 있다.

밸브 구동기 다이어프램 손상사례 및 방지방안 고찰
Study on Valve Actuator Diaphragm Failure Cases and Prevention
Measures

이태경 (Tae Kyung Lee)

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

공기구동밸브는 자동밸브 유형 중 산업계에서 가장 많이 사용되는 타입이며, 공기구동밸브의 구동기 타입은 다이어프램 방식과 실린더 방식으로 분류된다.

다이어프램식 구동기는 설계 및 제작의 용이성, 경제성 측면에서 더 보편적으로 사용되고 있지만, 고무재질의 특성상 고압력에 취약하고 과도한 부하에 손상될 가능성이 존재하므로 조립 등에 주의가 필요하며, 시간경과에 따른 다이어프램 재질의 경화를 고려해 더 짧은 주기적 교체가 요구된다는 점에서 불리하다.

정상운전 중 구동기 다이어프램이 손상되는 경우, 구동기의 기능상실이 발생하게 되고 스프링에 의해 안전위치로 복귀하게 되므로 고장정비가 요구되는 사항이다.

다이어프램이 손상되는 경우는 다양하지만 다이어프램 자체에 결함이 없는 상태인 경우, 손상은 조립과정에서 발생할 수 있는데 손상 특성을 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 다이어프램 케이싱 체결 홀을 기준으로 외경방향으로 변형되어 손상되는 형태이며, 두 번째는 케이싱 체결 홀에서 내경방향으로 변형되어 손상되는 형태이다. 다이어프램 케이싱 홀 외경방향 손상은 케이싱 체결볼트의 체결력 부족에 따른 다이어프램 고정미흡으로 발생하는 반면, 다이어프램 케이싱 홀 내경방향 손상은 케이싱 체결볼트의 과도한 체결반복에 따른 케이싱 플랜지 면의 변형을 야기하고 이로 인해 다이어프램 고정력이 일부 지점에 집중됨에 따라 발생하게 된다.

본 고찰에서는 밸브 구동기 다이어프램 손상유형에 따른 손상 메커니즘을 분석하였고 이를 방지하기 위한 방지방안을 제시하였다.

열교환기 온도 성층화 관련 국내외 기술기준 및 전산유체역학을 활용한 해석 사례 소개

Review of Domestic and International Technical Standard Related to the Temperature Stratification of Heat Exchanger and Simulation Case Using Computational Fluid Dynamics

함정균* · 조홍현* · 오동욱* · 이공희

*조선대학교 산학협력단, 한국원자력안전기술원 규제검증평가실

국내 원자력발전소에서는 안전기능을 수행하는 기기들을 대상으로 가동중시험(in-service testing)을 통해 주기적으로 성능을 확인하고 시간 경과에 따른 취약화 정도를 감시 및 평가하고 있다. 대표적인 가동중시험 관련 계통인 1차측 기기냉각수계통 및 사용후연료저장조 냉각 및 정화계통에는 열부하 제거를 위해 판형(plate) 열교환기가 설치되어 있다. 고유한 설계 특성으로 인해 판형 열교환기 출구 배관에서 온도 성층화(불균일한 온도 분포)가 발생할 수 있는데 성능시험시 이를 고려하지 않고 온도 측정기를 부적절한 위치에 설치할 경우 시험 결과에 상당한 오차가 발생할 수 있다. 이와 관련하여 국내외 기술기준에서는 열교환기 출구 배관에서 온도 성층화로 인해 발생할 수 있는 성능시험 결과의 불확실도를 최소화하기 위한 온도감지기 설치 위치, 측정 기법 등에 관한 지침을 제공하고 있다. 일례로 KEPIC MOR(열교환기 가동중 성능시험) 부록B B3000 [온도 성층화]에서는 대부분의 온도 성층화 문제가 출구 유체온도를 측정하는데서 발생하며, 이 문제는 열흐름을 일부러 혼합시키고서 혼합이 일어나는 곳으로부터 하류에서 온도를 측정하여야 최소화할 수 있는 것으로 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 열교환기 온도 성층화 관련 국내외 기술기준 검토 내용을 설명한다. 한편 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 소프트웨어가 제공할 수 있는 3차원 상세 열유동 정보는 온도 성층화 현상에 대한 이해도를 향상시킴으로써 원자력발전소 안전규제 업무 수행과정에서 판형 열교환기 성능과 관련된 규제 의사 결정의 오류를 저감하는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 국내 원전에 설치된 판형열교환기와 유사한 형태의 해석 모델을 대상으로 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 활용해서 수행한 온도 성층화 해석 사례를 소개한다. 일례로 채널(전열관) 개수의 증가는 출구 배관으로 유입되는 채널별 유량의 불균일성을 악화시킴으로서 온도 성층화를 해소하는데 추가적인 배관 길이를 필요로 하였다. 한편 온도감지기 설치를 위한 충분한 거리를 확보할 수 없는 경우에는 다수의 온도감지기를 설치함으로써 온도 성층화로 인한 온도 측정 오차를 저감할 수 있었다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805007).

상류측 축소관에 의한 유동 교란이 버터플라이 밸브 동적성능에 미치는 영향에 관한 전산유체역학 연구

CFD Study for the Effect of Flow Disturbance due to Upstream Reducer
on the Dynamic Performance of a Butterfly Valve

이공희* · 배준호

한국원자력안전기술원 규제검증평가실

버터플라이 밸브는 대표적인 가동중시험 관련 밸브 유형 중 하나로서 유로 개폐 및 유량 제어와 같은 다양한 용도로 저압/저온 용수계통(예: 기기냉각수계통, 격납건물 환기 및 배기계통)에 주로 사용되고 있다. 유동 교란인자(예: 곡관부, 오리피스, 축소관 등) 하류의 직관 길이가 충분히 길지 않으면 완전 발달된 유동과는 다른 왜곡된 속도 형상의 유동이 버터플라이 밸브로 유입되어 비정형화된 하중 및 응력이 작용할 수 있다. 미국 상수도협회(American Water Works Association)가 발간한 M49 매뉴얼(Quarter-Turn Valves: Head Loss, Torque, and Cavitation Analysis)에서는 우수한 밸브 동적성능을 위해서 버터플라이 밸브 상류측 직관 길이를 배관 직경의 2배 이상 확보하도록 권고하고 있다. 저자는 선행 연구에서 ANSYS CFX R19.1에서 이용 가능한 수치모델링이 직관에 설치된 버터플라이 밸브 주변의 복잡한 유동(유동 박리 및 와류 포함)을 신뢰할 정도로 예측할 수 있는지 검증하기 위해 Lin & Schohl(2004)의 벤치마크 문제를 해석한 후 밸브 각도에 따라 계산된 방출계수(discharge coefficient)를 측정 데이터와 정량적으로 비교한 바 있다. 또한, 상류측 곡관부에 의한 유동 교란이 버터플라이 밸브 동적성능에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 본 연구에서는 선행 연구에서 사용했던 ANSYS CFX를 포함한 동일 수치모델링을 활용하여 상류측 축소관(reducer)에 의한 유동 교란이 버터플라이 밸브 동적성능에 미치는 영향을 평가하였다. 해석 모델로 사용된 버터플라이 밸브의 디스크 직경은 3.53 m, 밸브 닫힘 각도는 0~70°, 입출구 배관 직경은 3.66 m, 축소관 직경은 1.5배, 축소관 각도는 10.5°(동심형), 축소관 종료 지점으로부터 버터플라이 밸브 사이의 직관 길이는 배관 직경의 0.1배~3.1배의 크기를 가진다. 작동 유체는 온도 25℃인 물로 가정하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다. (1) 축소관 하류에 설치된 버터플라이 밸브에 작용하는 항력, 양력, 토오크 크기는 밸브 닫힘 각도가 70°인 경우에 직관에 설치된 밸브 대비 가장 큰 차이를 나타내었다. (2) 축소관 종료 지점으로부터 버터플라이 밸브 사이의 직관 길이는 밸브 닫힘 각도가 0°인 경우에 항력 및 양력, 밸브 닫힘 각도가 70°인 경우에 토오크 크기에 가장 큰 영향을 미쳤다. (3) 버터플라이 밸브 상류측 직관 길이에 따른 밸브 하류에서 발생하는 역류 영역 및 속도 크기는 일관된 경향성을 나타내지 않았다.

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력 안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1805007).

연구용 원자로에서 베릴륨 외부반사체의 냉각성능 평가

Evaluation of Cooling Performance of Beryllium Out-Core Reflectors in Research Reactors

정민균 · 박기정 · 서경우

한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단

연구용 원자로에서 노심외부 반사체는 중성자핵변환도평 및 고속중성자조사를 위한 공간을 제공하며, 대표적으로 흑연, 알루미늄, 베릴륨 등이 반사체 재료로 활용되고 있다. 베릴륨은 산란단면적이 커서 반사체로서의 성능이 우수하며, 조사에 따른 성장 및 열전도도 유지 측면에서도 흑연보다 우수하다고 알려져 있다. 원자로 가동에 따라 노심외부 반사체는 발열량이 발생하게 되는데, 냉각을 위해 반사체 주변에 유로를 설계하게 된다. 충분한 유로크기는 반사체 냉각에 유리하지만, 중성자핵변환도평 성능저하가 발생하게 된다. 중성자핵변환도평을 고려한 유로 폭은 약 1~2mm의 매우 짧은 거리로 설계되었다. 한편 베릴륨이 타 재료에 비해 조사에 따른 성장이 작아 유리하지만 그럼에도 팽윤(swelling)은 발생하며 이에 따라 유로가 좁아지거나 최악의 경우 유로가 막히는 상황이 발생할 수 있다. 베릴륨은 열전도도가 높아 유로가 매우 좁은 상태에서도 충분한 냉각유량이 존재한다면 냉각이 가능하지만, 비중이 낮아서 고정장치가 없는 반사체의 경우 부유가능성 또한 고려해야 된다.

본 연구에서는 정상상태에서 베릴륨 외부반사체의 냉각성능을 평가하며, 부유가능성을 고려하여 유량을 결정하였다. 또한 팽윤에 따른 다양한 반사체 및 냉각재 유로 형상에 대해 냉각평가를 수행하였다. 냉각성능 평가를 위해 ANSYS Fluent를 활용하였으며, 반사체의 온도분포 및 압력분포 등을 고려하여 안전성을 평가하였다.

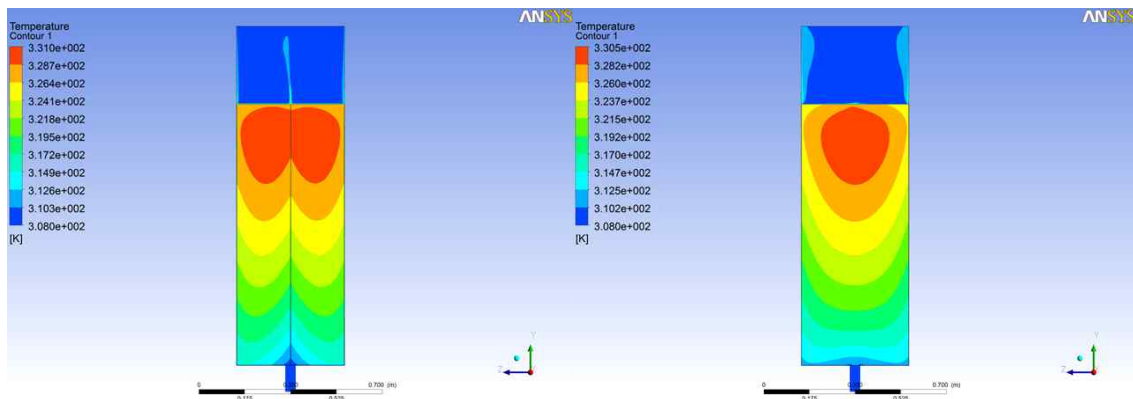


그림. 정상상태 및 팽윤 시 베릴륨 외부반사체 온도분포

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과입니다.

연구용 원자로 보조 배관 파단사고에 의한 유동특성 분석 Flow Characteristics Analysis by Auxiliary Pipe Breakage Accident in Research Reactors

정민규 · 서경우

한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단

원자로에서 배관 파단 사고는 일반적으로 LOCA (Loss Of Coolant Accident)를 의미하며, 외부 대기압보다 배관이나 기기의 압력이 높아 핵연료의 냉각을 담당하는 냉각재가 배출되는 사고를 의미한다. 하지만 일부 높은 위치에 설치된 배관의 경우 수두압에 의해 대기압보다 낮은 압력을 유지할 수 있으며, 해당 배관의 파단은 LOCA와 다르게 외기가 냉각계통으로 유입되는 현상이 발생하게 된다. 외부 공기가 계통 내에 유입되면 냉각을 담당하는 주요 기기에 영향을 주게 되는데 특히 펌프의 경우 일정 수준 (정상상태에서 2%의 공기 분율)을 넘어서는 공기가 유입되는 펌프의 작동성 및 건전성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 정상상태에서 원자로의 냉각을 담당하는 주 배관이 아닌 보조 배관의 파단 사고를 모사하였다. 파단 전 정상상태 조건은 주 배관의 경우는 대기압보다 높은 압력을 유지하는 반면, 상부에 있는 보조 배관의 경우 대기압보다 낮은 압력이 분포되었다. 냉각계통의 유체기기의 작동성에 영향을 미치기 위해서는 보조 배관을 통해 유입된 공기가 주 배관으로 유입되어야 한다. 부압을 유지하는 보조 배관의 파단을 모사하기 위해 상용 유동 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT를 활용하였다. 정상상태 해석을 수행한 이후 파단을 모사하기 위해 transient 해석을 수행하였다. 물과 공기의 2-유체 해석은 물과 공기의 계면을 보다 정확하게 모사하기 위해 VOF (Volume Of Fluid) 방법을 활용하였다. 그림은 파단 후 공기 분율을 나타내고 있다. 부압의 영향으로 공기가 유입되지만, 대기압 이상을 유지하는 주 배관의 압력의 영향으로 더 이상의 공기유입이 사실상 발생하지 않는 결과를 확인할 수 있다.

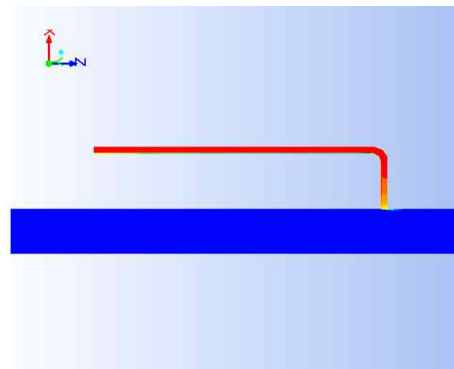


그림. 보조 배관 파단 후 공기 분율

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 연구로 공학기술 연구과제의 연구개발 성과입니다.

발전정지유발기기(SPV) 예방정비기준(PMT) 개선을 통한 설비 신뢰도 개선 Improvement of Equipment Reliability through Application of PMT for Single Point Vulnerability Component of NPP

김문수, 염동운

한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소는 계획예방정비를 통해 핵연료 교체 주기별로 정기적인 설비 점검을 수행하고 있다. 아울러 발전소 운전 중에 고장을 예방하고 건전성을 유지하기 위해 예방정비(Preventive Maintenance, PM) 프로그램 등을 최적화하여 발전소 설비의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 그러나 발전소 수명기간 동안 장기간 운영에 따라, 각 설비들의 점검 주기에 따른 예방정비(PM) 활동에도 불구하고 경년열화에 따른 간헐적인 기능 고장의 발생과 기상이변으로 태풍, 염해 및 기타 예기치 못한 자연현상에 의한 원전 발전정지 가능성에 대해서도 철저히 대처해야 한다. 그 중 원전의 발전정지유발기기는(Single Point Vulnerability Component, SPV) 설비 자체의 단일 고장으로 과도상태(원자로 정지, 발전정지 또는 50% 이상 출력 감발)를 유발하는 기기로서 발전소의 안전운전을 위한 최우선적인 집중관리 대상이며, 이를 위한 방안으로 원전에서 운영 중인 각 기기 정비 시 활용되고 있는 예방정비기준(Preventive Maintenance Template, PMT)의 예방정비 직무/주기를 SPV 대상 예방정비(PM) 프로그램에 필수 적용하여 원전 설비들의 신뢰도 제고 및 PMT 운영 활성화를 추진하고 있다. 추진 주안점은 기존 PMT와 예방정비프로그램, 정비절차서를 비교 검토하여 차이점을 PMT에 종합 반영하고, 특히 설비가 아닌 부품단위로 PMT가 개발되어 있는 계측분야의 경우 계통(판넬)단위로 “터빈감시 제어계통” 등을 신규 개발하는 것이다.

PMT 필수 적용을 위한 개선 연구시 도출된 문제점은 정비절차서 직무와 오더 직무리스트 그리고 PMT 간의 불일치 사항에 대한 검토와 계측분야 PMT와 발전소 예방정비 프로그램의 단위 불일치(PMT는 부품 단위, 예방정비 프로그램은 판넬 단위)이다. 따라서 발전정지 유발기기에 대한 PMT 필수적용 추진 중이며, 1단계(기계, 전기, 계측분야 총 15종) 및 2단계(총 21종)가 완료되었고, 현재 총 41종(기계:4, 전기:5, 계측:32)에 대해 3단계 개선계획을 추진 중이다.

본 개선 연구를 통해 개선이 완료되면 발전정지유발기기(SPV) PMT의 현장 정비업무 적용에 따라 SPV에 대한 기기 예방정비 체계 개선으로 발전소 불시정지를 최소화하여 원전 운영 안전성을 높일 수 있을 것으로 판단되며 이를 위해 발전소 현장에서 지속적인 개선 및 관리가 체계적으로 이루어져야 할 것이다.

원자력발전소의 고온관 및 저온관의 선량을 비교 고찰

최진수, 이경희, 조용상, 권혁철, 김초롱, 송규민

한국수력원자력 중앙연구원 (jinsoochoi@khnp.co.kr)

원자력발전소의 원자로냉각재 계통은 폐순환계통으로 노심의 열을 전달하여 증기발생기를 통해 격리된 외부 2차계통 급수를 가열하여 증기를 발생시킨다. 원자로냉각재 계통은 원자로 압력용기에 대칭으로 연결된 원자로냉각재 루프로 구성되어있다. 연료집합체에서 핵반응에 의해 생성된 열은 원자로냉각재펌프에 의해 원자로 → 고온관 → 증기발생기 내부 수직 인코넬 U-튜브 → 저온관 → 원자로의 순서로 순환하게 된다. 이러한 열전달 과정에서 원자로냉각재 계통의 냉각수 온도는 258 ~ 325℃의 편차를 가지게 되며 이러한 온도 편차가 계통선량률에 미치는 영향에 대해서 검토할 필요가 있다.

해외 원자력발전소의 계통선량률은 저온관의 선량률이 고온관에 비해서 높다고 보고되고 있으며, 이는 증기발생기의 고온관측 수실 및 저온관측 수실에서 유사한 형태를 보이고 있다. 국내 원전에서도 고온관 및 저온관 간의 계통의 선량률에 대한 측정값의 비교를 통해 수화학적 환경에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 국내 원전대상으로 고온/저온 상태의 계통선량률 비교를 위해 증기발생기 수실의 저온관측과 고온관측 수실 선량률을 비교 대상으로 선정하여 평가를 수행하였다. 선량률 측정은 미국 EPRI Standard Radiation Management Program에서 권고하는 Teletector (6112MH)로 증기발생기의 고온관측 수실(HL) 및 저온관측 수실(CL)에서 수행하였다. 고온관 및 저온관측의 온도, pH에 대한 연관성 검토를 위해 EPRI pH Calculator를 이용하여 pH_t를 검토하였다. 측정결과 계통선량률은 CL/HL Ratio가 0.94 ~ 1.6 으로 저온관측 수실의 계통선량률이 높게 나타났다. 이러한 차이는 고온관과 저온관의 pH_t 편차(6.95 ~ 7.36)로 pH_t가 낮은 저온관에서 방사성부식생성물 침적이 상대적으로 활발하게 일어나는 것으로 평가되었다. 본 연구 결과는 국내 원자력발전소의 계통선량률 관리 및 저감 기술개발 연구에 활용될 예정이다.

Keywords : 원자로냉각재, 고온관, 저온관, 계통선량률, pH_t

CdZnTe(CZT)를 활용한 원자력발전소 배관표면 핵종측정 모델링

최진수, 이경희, 조용상, 권혁철, 김초룡, 송규민

한국수력원자력 중앙연구원 (jinsoochoi@khnp.co.kr)

원자력발전소의 가동 년 수 증가에 따라 계통내 방사성물질의 축적 등으로 운전원의 방사선 피폭량에 대한 관리가 중요해지고 있다. 원자력발전소 1차계통의 부식생성물 방사화 전 주기는 ① 계통표면 부식생성물 용출 ② 노심표면 부식생성물 방사화 ③ 방사화 부식생성물 계통표면 재침적으로 볼 수 있다. 이렇게 원자력발전소의 계통 선량률 증가 및 변화를 정확히 판단하기 위한 선량측정 시점, 지점, 측정자, 측정기 등에 따른 측정 오차 최소화한 표준화된 계통선량 측정법으로 미국전력연구원(EPRI)의 표준선량측정법(Standard Radiation Monitoring Program, SRMP)을 적용하고 있다.

EPRI SRMP의 측정기로 CZT를 활용하고 있으나, 실험실에서 액체시료를 분석하는 활용이 일반적이다. CZT를 직접적으로 배관에 부착하여 핵종별 농도를 측정하는 분석법은 Davis-Besse 원전에서 최초로 수행되었으며, 국내에서는 기존에 수행되지 않았다. 따라서 CZT를 활용하여 계통 핵종별 농도를 측정하기 위해서는 CZT 반도체 선량검출기의 특성을 고려하여 핵종별 선량측정법 및 측정조건(지점, 거리, 측정배관 두께 등)에 대한 정확한 모델링이 사전에 수립되어야 한다.

본 연구에서는 EPRI SRMP의 CdZnTe(CZT)를 활용하여 계통 배관표면의 핵종별 선량측정법에 적용하기 위한 모델링 개발을 수행하였다. CZT 검출기 조건(크기, Housing 두께/밀도(Tungsten), Collimator 직경 등), 배관조건(두께/밀도, 내경/밀도 등), 및 내부 방사능시료 등을 고려하여 모델링을 수행하였다. 모델링 결과를 반영하여 MicroShield® 전산프로그램을 통해 % Energy Activity를 계산하여 평가를 수행하였고, 교정결과 및 실측값 비교 시 0.14 ~ 0.21 % 범위로 측정되어 Standard peak position의 불확도 ± 1 ch 이내로 모델링 결과가 적합하다고 판단되었다. 본 연구 결과는 후속 국내 원전 원자로냉각재 아연주입 기술적용에 따른 계통선량률 평가에 활용될 예정이다.

Keywords : CZT, 부식생성물, 표준선량측정법, 계통선량률, 아연주입

원자력 안전관련계통의 디지털 기기에 대한 CGID 지침 국내 적용성 고찰 A Study on Domestic CGID Applicability of CGID Guidelines for Digital Equipment in Nuclear Safety Related Systems

홍태화 · 양창석

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

미국 EPRI는 일반규격품품질검증(CGID, Commercial Grade Item Dedication) 지침서를 1988년에 EPRI NP-5652(1988년)를 발행하여 원자력안전관련계통에 사용되는 계통, 구조물, 기기에 적용하였다. 1996년 10월 10CFR21 개정본을 통해 CGID 정의에 대해 명확화하고 유연성을 추가함으로써 아날로그, 디지털 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어, 서비스 및 시스템 등을 CGID 대상으로 포함시켰다. 이를 반영하여 1996년에 EPRI는 상용 디지털 기기에 대한 CGID 지침으로 EPRI TR-106439를 발간하였고 NRC가 SER(Safety Evaluation Report)를 발행하여 10 CFR 50 부록 B 품질보증 프로그램에 따라 설계 제작된 디지털 기기와 동등하다 판단하여 1997년 7월에 승인하였다. 많은 CGID 전문기관 및 사업자가 사용하는 CGID 지침인 EPRI NP-5652에는 CGID 방법론 4가지를 제시하고 있지만 디지털 기기에 대한 구체적인 CGID 지침을 제공하지 않는다. NRC는 2017년 Reg. Guide 1.164을 근거로 최신 CGID 지침인 EPRI 3002002982(2014년)을 승인하였으며 지침에는 디지털기기에 대한 CGID 지침이 반영되어있다. 국내 원전의 경우 일부 발전소를 제외하고는 디지털기기에 대한 CGID 지침이 반영되어 있지 않다. EPRI 3002002982 국내 도입을 앞둔상태에서 국내·외 적용현황 평가 및 개선사항에 대해 고찰하고자 한다.

2. EPRI TR-106439 특징

디지털 기기에 대한 지침인 EPRI TR-102348, "Guidelines on Licensing Digital Upgrades", IEEE 7-4.3.2-1993, "Standard Criteria for Digital Computers in Safety Systems of Nuclear Power Generating Stations"는 디지털 기기의 평가를 위한 표준지침이지만 Dedication 방법과 소프트웨어 기반기기에 대한 Dedication시 해결되어야 할 문제에 대해 설명하고 있지 않다. TR-106439는 Dedication시 문제점을 보완하고 기존지침(EPRI NP-5652, NP-6406, TR-102260, IEEE 7-4.3.2-1993, EPRI TR-102348)과 일치하게 해결할 수 있는 방법을 제공한다.

3. 국내·외 적용현황 분석

앞서 언급한 바와 같이 미국은 EPRI 3002002982를 CGID 지침으로 채택하고 있어 디지털 기기에 대한 EPRI TR-106439를 적용하고 있다. 국내원전에서 TR-106439를 적용하는 발전소는 4개가 있고 나머지는 Reg. Guide 1.152(IEEE Std. 7-4.3.2-2003의 부록 B~F는 미승인) 또는 Reg. Guide 1.152 소개에서와 같이 10 CFR 50.55a(h)(2)의 규정에 따라 IEEE Std. 279, "원자력 발전소 보호 시스템에 대한 기준"을 적용하고 있다.

4. 결론

국내 원자력발전소 안전계통의 디지털 기기에 대한 CGID 신뢰성 확보 및 급격한 디지털 기기로의 전환 요건 충족을 위해 최신 CGID지침인 EPRI 3002002982 도입이 필요한 시점이며 이를 위해 국내 FSAR의 인허가 요건과 국내외 규제요건과의 불일치 사항 해소를 위한 평가 및 지침 개발이 필요하다.

원자력 안전관련 교정 및 시험용역에 대한 CGID 적용성 고찰

A Study on the Applicability of CGID Guidelines to Nuclear Safety Related Calibration and Test Services

홍태화 · 양창석

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

EPRI 3002002982, 11장(Commercial Grade Services)에서 언급된 바와 같이 시험·교정 용역이 일반규격품질검증 대상에 포함되어 있고 공급자 실사 방법 등을 통해 CGID를 수행하도록 요구하고 있다. 12장(Use of Dedication to Accept Accredited Calibration Services)은 공급자 실사 방법 대신 ILAC-MRA 상호인정협정 기구를 통해 인정받은 인증기관으로부터 시험·교정용역을 CGID로 인정하고 있다. U.S.NRC가 승인한 NEI 14-05(Guidelines for the Use of Accreditation in lieu of Commercial Grade Survey for Procurement of Laboratory Calibration and Test Service) 검토를 통해 국내·외 ILAC 상호인정협정 기구로부터 CGID 수행을 위한 주요 방법론을 검토하고 KOLAS를 통한 시험·교정용역시 CGID 적용성에 대해 평가하고자 한다.

2. NEI 14-05 의 주요내용

1) 시험실 인증기관은 ISO/IEC 17025:2005 및 ISO/IEC 17011:2004 준수, 추가 기술 및 품질요건 준수, 품질보증프로그램 보유, 교육훈련 및 자격부여 등 ILAC 인정기구에 의해 승인된 시험실 인증기관 자격요건 준수가 필요하다. 2) 구매자는 CGID 기술평가서 작성을 통한 필수특성 관리 및 표준(Standard)요건에 필수특성 포함여부 확인, CGID 계획서에 적합성 확인방법 기재, 구매시방서에 ILAC에서는 요구하지 않는 용역수행 관련 추가 기술요건 및 품질요건 포함, 구매전에 ISO/IEC-17025:2005로부터 인증받은 기관인지 검토 등이 필요하다. 3) 구매자는 구매시방서 작성시 NEI 14-05의 부록 A(QA Program Template)와 같이 구매서류 요건 및 품질요건을 제시하여야 한다. 4) 인증기관은 ILAC 프로세스 이행여부에 대해 주기적(3년단위) 점검을 받는다. 5) 미국 원전산업계의 평가를 통해 ILAC 프로세스와 CGID 실사방법(Nupic 감사활동)이 동등하다 결론을 내렸다.

3. KOLAS 인정현황 및 ILAC 인정기준과의 호환성 평가

1) 한국인정기구는 WTO-TBT(World Trade Organization-Technical Barriers to Trade)에 따라 ILAC-MRA 상호인정협정기구와 적합성 평가(Conformity Assessment)에 관한 협정을 체결하고, 국가표준기본법 제14조, 제15조, 제21조, 제23조 ‘시험·검사기관 인정 등’, 국가표준기본법 시행령 제16조 ‘시험·검사기관의 인정’, 적합성 평가 관리 등에 관한 법률 제7조 (인정기구의 설치 등)와 같은법 시행령 제4조(인정기구의 설치) 및 국제기준(ILAC-MRA)에 따라 ISO/IEC 17000 ‘적합성평가 용어 및 일반원칙’, ISO/IEC 17011 ‘적합성평가기관 인정 기구의 요구사항’, ISO/IEC 17025 ‘시험·교정기관의 역량 요건’ 등 인정협정기구 기준을 적용하고 있다.

4. 결론

국내 원자력발전소 안전관련설비 관련 교정 및 시험용역은 안전성등급으로 분류되어 유자격 공급자만 수행할 수 있다. 하지만 NEI 14-05를 적용할 경우 ILAC-MRA 인정기구인 KOLAS 인정기구로부터 수행이 가능하다. 공급자 실사를 통한 등록심사, 감사 및 공장검사 입회 등 없이 교정용역을 수행할 경우 업무 효율성이 증가할 것으로 판단된다.

ILAC 인정기구에 의한 교정용역의 CGID 적용 방법 고찰

A Study on the Method of CGID Applicability of Calibration Services by International Laboratory Accreditation Cooperation

홍태화 · 양창석

한국수력원자력(주), 중앙연구원

1. 서론

10CFR21(4)의 기본기기에 대한 용어 정의에 포함된 용역에는 교정용역을 포함하고 있다. 기본기기를 일반 상용품으로 구매할 경우 CGID 요건에 따라 적합성 확인방법인 공장검사, 공급자 실사 등을 통해 용역 수행이 가능하다. 하지만 미국 APS사는 팔로버디 원전 1,2,3호기에 대한 품질보증 프로그램에 대한 변경 제안서를 제출하여 NVLAP(National Voluntary Laboratory Accreditation Program) 및 A2LA(American Association for Laboratory Accreditation)와 같은 국가실험실 인정기구를 통한 교정용역 수행에 대해 인정해 줄것을 제안하였고 NRC는 이를 2005년 9월에 승인하였다. 미국 국가실험실 인정기구가 안전관련설비와 관련된 교정용역을 ILAC-MRA 인정기구로 결정한 사유에 대해 살펴보고 국내 적용을 위한 방법에 대해 논하고자 한다.

2. 미국 교정기관에 대한 NRC 인정 배경

APS사는 10CFR50.54(a)(4) 규정에 따라 팔로버디 원전 1,2,3호기에 대한 품질보증 변경건을 NRC에 제출하였다. NRC는 변경사항 “ANSI/ISO/IEC 17025, "시험 및 교정시험실에 대한 인정 일반요건"을 적용하는 국제인정기구에 의해 CGID 수행방법을 기존 공급업체 감사, 공급자 실사 또는 제작중 입회검사를 대신하며, 10 CFR Part 21에 정의된 상업용 등급 교정 서비스에만 적용된다는 내용”에 대해 NRC가 안전성평가보고서를 통해 승인하였다. SER을 통한 승인이후 NVLP, A2LA 이외에 ANSI/ISO/IEC 17025, "시험 및 교정 실험실의 능력에 관한 일반사항"을 적용하고 있는 ILAC-MRA 협정기구인 Accreditation Services (2007.12월), Laboratory Accreditation Bureau(2008.4월), International Accreditation Service(2008.5월), Perry Johnson Laboratory Accreditation(2010.1월)을 교정서비스 기관으로 인정하였다.

3. 국내 KOLAS 기관에 대한 적용성 평가

국내는 CGID 대상을 안전관련설비(계통, 구조물, 기기)로 한정하고 있으며 기본기기 용어 정의에서 사용되는 용역(Service)에 대해서는 아직 CGID 대상으로 포함시키지 않고 있지만 EPRI 3002002982 적용을 위해서는 KOLAS 기관에 대한 규제기관의 평가가 필요하다. 미국의 국제 실험실 인정기구로부터 협정을 체결하고는 있지만 CGID 지침 적용을 위해서는 구매시방서 요건 및 품질요건에 대한 추가요건이 필요하다.

4. 결론

안전관련 설비의 교정 및 시험용역에 대해 CGID를 수행할 경우 소수의 유자격 공급자에 의존하거나 부족에 따른 조달 애로사항을 해소하는데 도움이 될 것으로 판단된다. ILAC-MRA 국제인정기구로부터 협정을 체결한 미국의 인정기관과 같이 KOLAS 인정기관에 대한 추가적인 규제기관 평가가 필요하고 CGID에 대한 전반적인 업무이해도 확산을 위한 산업계전반에 걸친 노력이 필요하다 판단한다.

원자력발전소 가동중 정비 대상기기 선정에 대한 방법론 연구

A Methodology Study on Selection of Equipment for Preventive Maintenance During Operation at Nuclear Power Plants

이영주 · 조정수

한국수력원자력(주) 중앙연구원

원자력발전소 구조물, 계통 및 기기(SSCs)에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 고장전 예방 정비(Preventive Maintenance) 수행이 필수적으로 요구되고 있으며, 미국원전의 경우 연방법 10CFR50.65, "Requirements for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plant"에 따라 주요 안전계통에 대하여 가동중 정비(On-line Maintenance)를 수행하고 있다.

가동중 정비 대상계통은 그림 1과 같이 발전정지 또는 출력감발과 직접 관련이 없는 설비, 운영기술지침서에 명시된 허용정지시간(Allowed Outage Time)내 정비수행 가능한 설비, 다중성이 있는 설비인 경우이다, 허용정지시간이 충분하지 않는 경우 리스크 정보 활용을 통하여 연장 후 가능하며, 방사선구역 또는 고소작업 등으로 정비가 불가능한 경우 제외한다. 대상계통이 선정되면 세부적으로 정비대상 기기를 선정해야 하는데 이때 그림 2와 같은 설비 기능적중요도결정(Functional Importance Determination) 프로세스를 활용하여 체계적으로 가동중 정비 대상기기를 선정할 수 있다. 중요도결정 결과가 No Impact인 경우 별도의 고장전 정비가 불요하며, Minor, Critical인 경우에만 가동중 정비를 수행하여 발전소 안전성 및 경제성을 향상시킬 수 있다.

본 연구를 통해 계획예방정비 물량감소를 통한 정비자원의 효율적 활용 및 정비품질을 향상시켜 향후 원자력발전소 설비신뢰도 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

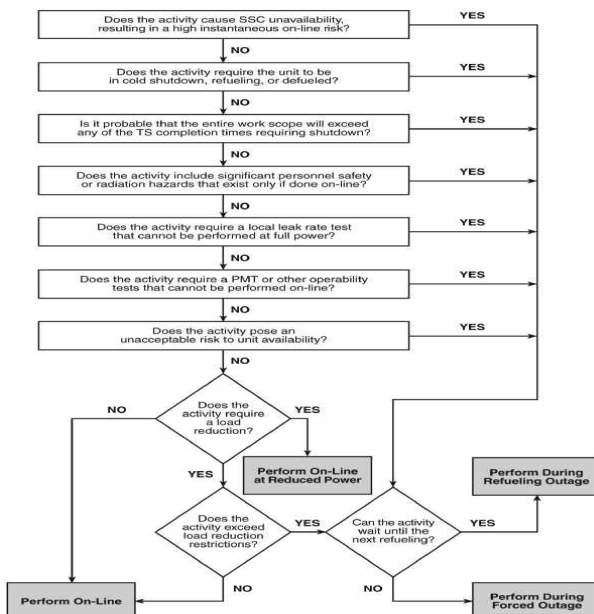


그림 1 가동중 정비 대상계통 선정 프로세스

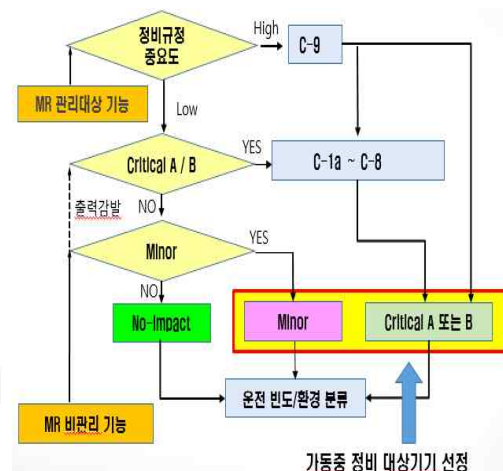


그림 2 기능적중요도결정 프로세스

디지털 정비절차서를 활용한 원자력발전소 예방정비 최적화 연구

A Study on Optimizing Preventive Maintenance of Nuclear Power Plant Using Digital Maintenance Procedures

조경수 · 이영주 · 김정운
한국수력원자력(주) 중앙연구원

국내 원자력발전소에서는 설비에 대한 안전성 및 건전성을 확보하기 위한 수단으로 주기적인 예방정비(Preventive Maintenance)를 수행하고 있다. 현재 예방정비 수행을 위해 종이기반 정비절차서(Paper-based maintenance procedure)를 사용하고 있으나 작업항목별 투입시간과 인력, 실시간 공정관리 및 계획대비 작업수행 시간을 정확히 측정할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 현재의 종이기반 정비절차서를 디지털화하여 설비정보 데이터베이스 연계를 통한 4차산업 기술활용, 예방정비 공정프로그램과 연계한 실시간 공정관리를 통하여 발전소 리스크를 효과적으로 관리할 수 있는 방안이 필요하다.

디지털 정비절차서는 그림과 같이 예방정비 수행을 위해 사전에 준비해야 할 액티비티를 공정관리프로그램에 연계하여 해당작업을 위해 소요되는 사전 준비작업 시간을 관리한다. 또한 종이기반 예방정비 작업항목을 디지털화 하여 공정관리프로그램과 연계하여 실시간 공정관리 및 계획대비 실적을 확인할 수 있다. 예방정비 수행을 위해 필요한 데이터는 실시간으로 데이터망에 접속하여 3D 설비분해정보, 설비 및 자재정보 등 필요한 자료를 확인하고, 측정된 시험값은 자동으로 판정하고 데이터베이스화하여 트렌드를 파악할 수 있도록 한다. 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷과 같은 4차 산업혁명 기술을 접목하여 종이기반 정비절차서를 디지털화하면 미래 예측가능한 예방정비를 수행할 수 있다.

본 연구를 통해 디지털 정비절차서 활용으로 정비의 효과성을 분석하고 예측가능한 설비상태를 유지시키기 위한 기반기술에 대한 지속적인 기술연구가 필요할것으로 사료된다.

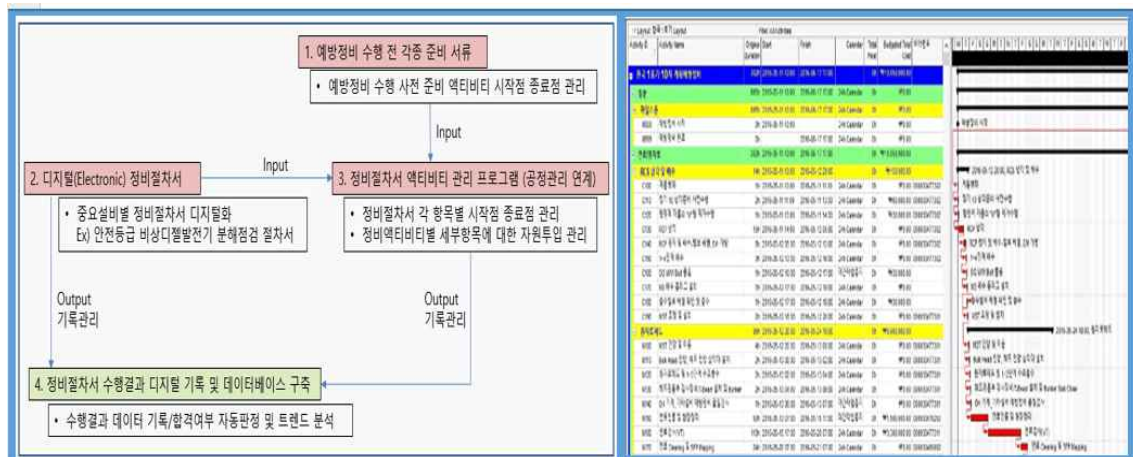


그림. 디지털 정비절차서 개념 및 예방정비 공정관리 프로그램 연계(안)

CsI를 포함한 수용액에서 세슘 및 요오드 제거를 위한 하이드레이트 기반 담수화

Hydrate-Based Desalination for Cesium and Iodine Removal from CsI-containing Solution

임솔거 · 윤지호

Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Ocean
Science and Technology (OST) School, Korea Maritime and Ocean University, Busan
49112, Korea

In this study, a hydrate-based desalination (HBD) technology is proposed for treatment of radioactive wastewater, especially from CsI-containing solutions. CHClF_2 was selected as a hydrate former for HBD process at relatively mild conditions. The thermodynamic effects of CsI on CHClF_2 hydrates were investigated with phase equilibria. The dissociation phase curves of CHClF_2 hydrate with CsI (0, 5, 10, and 20 wt%) were shifted to higher pressures and lower temperatures as the concentration of CsI increased. To identify the crystal structure and guest occupation, X-ray diffraction and Raman spectroscopy measurements were performed. The results obtained showed that CsI did not affect the original structure of hydrate but weaken the stability of gas hydrate formed with CsI compared to pure CHClF_2 hydrate. The formation kinetics of CHClF_2 clathrate hydrate with CsI show that the properties of formation kinetics, such as apparent rate constant derived from a new kinetic model and initial reaction rate, depend on the sub-cooling temperature and the concentration of CsI solution. We also confirmed the validity of the HBD process for Cs^+ and I^- ion exclusion via hydrate formation with comparing the calculated results for Cs^+ and I^- concentrations in the liquid phase during multi-stage formation of hydrate at high and low initial concentration of CsI with the experimental results. These results provide useful information for freshwater recovery from radioactive wastewater by HBD process.

Regenerable Ce added Mo/HZSM-5 catalyst for natural gas dehydroaromatization

김상윤 · 이관영*

*고려대학교 화공생명공학과

메테일로 벤젠, 자일렌, 톨루엔을 직접 합성하는 탈수소방향족화 반응은 축적되는 코크로 인해 촉매의 활성을 잃게 된다. 최근에는 메테인뿐만 아니라 천연가스 자체를 탈수소방향족화 반응에 이용하기도 하고, 본 연구에서는 천연가스 탈수소방향족화 반응에 대해 연구하고자 한다. 산화 활성이 높은 Ce 금속의 도입을 통해 코크 산화를 이용한 재생 효율이 높은 Mo/HZSM-5 촉매의 개발을 하고자 한다.

실제 천연가스의 조성을 모사한 모사 가스로 반응 진행하였고, 산소를 이용하여 재생 반응 진행하였다. Mo/HZSM-5 촉매에 여러 가지 방법으로 Ce 금속을 도입하여 최적 도입 방법과 조성에 대해 연구하였다. 그 결과로 이어지는 촉매의 특성과 활성에 대해 분석을 진행하여 효과를 규명하고자 하였다.

과산화수소 생산을 위한 소수성 알킬리간드의 도입과 이에 대한 효과

이석호 · 한근호 · 이관영*

*고려대학교 화공생명공학과

과산화수소는 수소와 산소로 이루어진 간단한 분자로, 강한 산화능력을 갖는 수산화라디칼을 형성하는 특성으로 인해 많은 반응에서 산화제로 쓰일 수 있는 물질이다. 특히 과산화수소는 이러한 강력한 산화능력과 부산물로 물만을 생성한다는 친환경적인 장점 덕분에 현대 사회에서 중요한 벌크 화학물질 중 하나로 여겨지고 있다.

이러한 과산화수소를 생산하는 기존 공정은 Anthraquinone 공정이라 불리는 공정으로 유독한 유기용매를 사용한다는 점과 복잡한 다단계의 공정으로 이루어져있다는 단점 때문에 이를 대체하기 위한 여러 가지 과산화수소 생산반응이 연구되고 있다. 특히 대체 공정 중 하나로 가장 활발하게 연구되고 있는 것은 수소와 산소 반응물로부터 과산화수소를 곧바로 합성하는 과산화수소 직접합성반응 (Direct Synthesis of Hydrogen Peroxide)이다. 과산화수소 직접합성반응은 반응구조가 간단하고 친환경적으로 생산할 수 있다는 점으로 인해 각광받고 있지만, 현재까지는 기존 공정대비 낮은 선택도와 수율을 보인다는 점 때문에 상용화되지 못하고 있다.

이에 따라 과산화수소 직접합성반응의 낮은 선택도를 해결하기 위해 알킬 리간드를 이용한 소수성 촉매를 도입하였으며, 이에 대한 활성과 촉매에 대한 특성화 분석을 진행하였다. 그 결과, 높은 활성을 위해서는 특정 정도의 소수성이 필요함을 알 수 있었으며, 이에 대한 결과는 실제 상용공정과 유사한 반응조건에 적용되어 해당촉매가 기존 촉매 대비 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

사용 후 NCM(LiNiCoMnO₂)로부터 선택적 수소 환원반응 기초연구
A Basic Study of Selective Hydrogen Reduction from End-of-Life of
NCM(LiNiCoMnO₂)

왕제필* · 김도희* · 황종하* · 김현중* · 임종덕*

부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공, 마린융합디자인공학과(첨단소재공학),

*부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공

ABSTRACT : 본 연구에서는 사용 후 NCM(LiNiCoMnO₂)로부터 Ni-Co 합금 분말을 회수하기 위해 CO₂ 건식 열반응 후 선택적 수소 환원 반응 기초 연구를 진행하였다. NCM 15g을 900℃, CO_{2(g)} 300cc/min에서 1시간 반응시켜 탄산리튬(Li₂CO₃)과 금속산화물(NiO, CoO, MnO)로 상분리 하였다. 반응 후 산물은 탄산리튬과 금속산화물의 물에 대한 용해도 차이를 활용하여 분리하였다. 수침출 조건은 증류수와 1:30의 고액비로 5시간 동안 진행하였고 감압 여과를 통해 탄산리튬 용액과 금속산화물을 분리하였다. 리튬이 제거된 금속산화물은 선택적 수소환원 반응을 통해 Ni, Co와 MnO의 상으로 회수하였다. 수소환원 조건은 금속산화물 15g을 수평로에 장입하여 H_{2(g)} 300cc/min에서 1시간 반응시켰다. 이때 반응온도는 500℃, 700℃, 900℃로 변화시켜 실험을 진행하였다. 반응 후 산물은 XRD 및 XRF 분석을 실시하였다.

키워드 : NCM(LiNiCoMnO₂), 선택적 수소 환원, Ni-Co 합금 분말

† Corresponding author, E-mail: jpwang@pknu.ac.kr

사사 : 본 논문(저서)는 부산광역시 및 (재)부산인재평생교육진흥원의 BB21플러스 사업으로 지원된 연구임

Synthesis of Waste Seashell Derived Nano-calcium Carbonate by Carbonation for the antibacterial activity on Total bacteria and E.coli

Geun-Ho Kim¹ · Lulit Habte¹ · Ji-Whan Ahn^{1*}

¹Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Improvements in nanotechnology in the past decade has created various opportunities for the evaluation of biologic effects such as antibacterial effects of nanoparticles. In this study, Nano-calcium carbonates (aragonite and calcite) were synthesized waste shell through a simple and low-cost wet carbonation method. Waste shell was first calcined at 900°C for 2hrs to produce calcium oxide. Aragonite nanoparticle was then synthesized by varying molar ratios (i.e., 1-3) of magnesium chloride hexahydrate and calcium oxide (Mg:Ca). Whereas, calcite nanoparticle was synthesized by injecting CO₂ gas into a Ca²⁺ slurry at optimized conditions. The purpose of this study was to evaluate the antibacterial activity of calcium carbonate nanoparticles on E.coli and total bacteria. Synthesized calcite and aragonite nanoparticles were applied on aged SCG with different weight percentage. Bacterial count was conducted by mixing the spent coffee ground (SCG) and NaCl solution (0.85wt%), and diluted to 10⁻¹~ 10⁻⁶. Then, 1 mL diluted samples were poured on 3M petrifilm and incubated in an oven at 37°C for 48hr. As a result, calcium carbonate nanoparticles showed very good antibacterial effect on both total bacteria and E.coli. 2wt% of calcium carbonate nanoparticle was the optimum dosage to deactivate the bacteria. Therefore, the use of calcium carbonate nanoparticles as anti-microbial agent is recommended in different fields of food industry and agriculture.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

Carbon Mineralization derived Precipitated Calcium Carbonate as a Filler Material for Polymer Composites: A Circular Economy Approach

Kim Tae Hyoung· Mohd Danish Khan· Ji Whan Ahn

Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Globally, plastics are being consumed in large quantities owing to its plethora of applications such as in households, automobiles, agriculture, packaging materials etc. Since 1990, the demand for plastics has surged by 5% annually. With the ongoing covid-19 pandemic situation, the use of plastics has increased further and hence the associated plastic waste. Additionally, on exposure to direct sunlight, plastic not only emits methane, ethylene, etc. and contributing to greenhouse gas but also degrade into microplastic in seawater due to photochemical phenomena thereby multiplying its adverse affects and participate in food chain of aquatic microorganisms and humans. Therefore, in order to tackle the plastic waste associated problems, the linear economic cycle of 'production-consumption-disposal' must be replaced with the circular economic cycle of 'production-consumption-recovery-recycling'. According to the worldwide COP26 International Methane Pledge, the world seeks to reduce methane emissions by 30% until 2030. Carbon mineralization derived precipitated calcium carbonate (PCC), a polymer filler material holds the potential to considerably solve aforementioned issues by valorizing plastics into polymer composites. In addition, these polymer composites can be employed in manufacturing automobile parts that consecutively reduce total automobile weight and associated carbon emission. The precipitated calcium carbonate (PCC) technology not only engage carbon dioxide and waste plastics, but also provide economic value that makes it a critical technology for achieving a circular economy and carbon neutrality.

Acknowledgement

This research was also supported by the National Strategic Project-Carbon Mineralization Flagship Center of the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), the Ministry of Environment (ME) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2017M3D8A2084752). This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the "Infrastructure program for industrial innovation" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

A Study on the Analysis and Optimum Selection of Heavy Metal Stabilization Methods for Household Waste

Yeonho Jeong¹ · Mohd Danish Khan¹ · Ji Whan Ahn¹

¹Center for Resource Recovery Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Extensive research on municipal solid waste incineration (MSWI) ashes has been conducted over the last few decades in order to develop more effective recycling and waste management systems. Despite comprehensive investigation and the consequent improvements to MSWI ashes, recycling programs for MSWI ashes are limited due to the existence of high heavy metal contents. A novel carbon mineralization technology that has the potential to extensively immobilize heavy metal ions in MSWI and be used in a variety of applications is receiving global interest. In addition, due to high calcium and magnesium concentration, MSWI can potentially sequester a substantial amount of carbon dioxide, contributing in climate change mitigation. Carbon mineralization technique should be applied to large-scale plants in order to adapt it to the real world. Therefore, in this study the application scenarios and research trends linked to heavy metal stabilization by carbonation of MSWI ash were reviewed.

Acknowledgement

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

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE), Korea, under the “Infrastructure program for industrial innovation” supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT)(P0018011).

기계학습 기반 석유·가스의 생산량 예측 연구 동향 분석

Analysis of Research Trends in Prediction of Oil and Gas Production Based on Machine Learning

이다영 · 이대모 · 신호진 · 임종세*

한국해양대학교 에너지자원공학과

에너지 산업에서 4차 산업혁명의 일환인 디지털 전환을 통하여 에너지자원 생산의 효율성과 안정성을 제고하고자 하였다. 그 중 석유·가스 개발 산업은 생산광구에 빅데이터와 사물인터넷 등을 적용하는 디지털 오일필드 기술을 기반으로 기계학습을 활용한 생산량 예측 기술을 발전시켜왔다. 기존에는 과거의 생산이력만으로 생산량을 예측할 수 있는 생산감퇴곡선분석법을 활용하였으나, 저류층 물성과 유정완결 방식 등의 생산관련 인자를 고려할 수 없어 생산기간이 짧거나 생산감퇴 경향이 나타나지 않은 신규 생산정에 대한 적용에 한계가 존재하였다. 이러한 어려움을 극복하고자 최근에는 기계학습을 통해 생산관련 인자를 이용하여 석유·가스 생산량을 예측하였지만, 입·출력 데이터의 특성이나 수에 따라 예측 정확도의 차이를 보였다. 이에 따라 기계학습을 기반으로 다양한 생산관련 인자 중 생산량에 비교적 큰 영향을 미치는 주요인자를 분석하고 이를 입력자료로 활용하여 궁극가채량과 누적생산량 등의 생산량을 추정하는 연구가 수행되고 있다.

이 연구에서는 석유·가스 자원의 생산량 예측에 있어 기계학습이 적용된 사례를 조사하였으며, 다양한 생산관련 인자를 활용하여 생산량 예측의 신뢰성을 확보하기 위한 연구 동향을 분석하고자 한다. 기계학습 활용 시, 다수의 선행연구에서는 입력인자 간의 상관관계를 이해하고 주요인자를 도출하기 위하여 퍼지 패턴 인식, 주성분 분석 등의 전처리 과정뿐만 아니라 특이값 분해와 같은 통계학적 기법을 함께 사용하였다. 이와 같은 과정을 통해 도출된 주요인자를 바탕으로 근래에는 지도 학습의 일종인 인공신경망, 서포트 벡터 머신, 랜덤 포레스트 등을 적용하여 기존 생산정의 누적생산량 또는 궁극가채량과 주요인자 간의 관계를 학습하고, 학습한 기계학습 모델을 이용하여 생산정의 생산량 예측에 활용하고 있는 추세이다. 이외에도 생산량과 생산운영 조건 등의 시계열 자료를 바탕으로 순환신경망 기반의 기계학습을 적용하여 연속적인 생산량을 추정하는 연구가 진행된 바 있으며, 이러한 조사 결과는 향후 석유·가스 생산량 예측 시에 기계학습 기반의 생산량 예측 모델 개발과 적절한 입력인자 선정에 위한 기초 자료로써 활용할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 해외자원개발협회의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2021060002, 디지털 오일필드 전문인력 양성).

미활용 원료 활용을 위한 바이오디젤 현황 분석 Analysis of biodiesel status to utilize non-used materials

이미은 · 박조용 · 김재곤*

한국석유관리원 미래기술연구소 연구개발팀

국제사회의 파리협정에 따라 우리나라를 포함한 51개 국가(2021년 12월 기준)가 2050년까지의 장기 저탄소 발전 전략(Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies, LEDS)을 국제연합(United Nations, UN)에 제출하였다. 우리나라는 탄소 순배출량 제로를 목표로 하는 탄소중립(Net Zero)을 선언하며, ‘2050 탄소중립 추진전략(2020.12.7.)’을 발표하였고, 수송 부문에 신재생에너지 보급을 위해 혼합의무자에게 일정 비율 이상의 신재생에너지 연료(바이오디젤)를 수송용 연료(자동차용 경유)에 혼합하여 공급하도록 의무화하는 신재생에너지 연료 혼합의무화(Renewable Fuel Standard, RFS) 제도가 운영되고 있다. 2021년 7월부터 연간 혼합비율이 3.5%로 상향되었으며, 이에 따라 추가적으로 15만톤의 바이오디젤 원료 확보가 요구된다. 정부는 단계적으로 2030년까지 5%로 상향할 계획이며, 현재 국내 바이오디젤 원료의 국산화 비율은 약 24%이다. 이미 수거 및 사용이 포화된 폐식용유가 대부분을 차지하고 있어 원료의 국산화율이 정체되고 있으므로, 국내 미이용 폐유지인 음식물 폐유(최대 10만톤/년), 식물성 잔사유(acid oil, 4만톤/년), 탕유(설령탕 기름 등), 어유 등을 활용하여 원료 국산화율을 높일 수 있는 기술개발이 필요하다. 본 연구에서는 저급의 미활용 원료를 활용하기 위한 바이오디젤 원료 시장 및 정책 등 현황을 분석하고, 국내 미활용 유지 발생량 등 시장 분석을 통한 원료 확보 방안을 검토하였다.

바이오항공유 국내·외 정책 및 개발 현황

Policy and development status of sustainable aviation fuel(SAF)

이미은 · 김재곤*

한국석유관리원 미래기술연구소 연구개발팀

2020년 이후 탄소중립 성장이라는 세계적 목표를 달성하기 위해 국제민간항공기구(ICAO)는 국제항공 탄소 상쇄 및 저감 계획(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA)을 2021년부터 자발적 참여부터 단계적으로 시행한다. 온실가스 감축 수단 중 하나인 바이오항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF)는 기존 석유계 항공유 대비 온실가스를 최대 80% 감소시키는 효과가 있다. 바이오항공유란 재생가능한 원료 또는 폐자원을 다양한 공정을 통해 합성한 항공 대체연료이며, 기존 석유계 항공유에 최대 50% 혼합하여 사용할 수 있다. 미국재료시험협회(ASTM)에서 Fischer Tropsch, HEFA 등 9가지 합성공정을 승인하였으며, 각 합성공정에 해당하는 품질기준이 명시되어 있다. 현재 바이오항공유를 급유할 수 있는 공항은 LA 국제공항을 포함하여 7곳이며, 바이오항공사와 연료제작사 간의 계약(Offtake)을 통해 거래되고 있다. 국내에서는 미세조류 및 팜유로부터 HEFA 공정을 통해 바이오항공유를 생산하는 연구가 수행되었고, 최근 열분해 오일로부터 바이오항공유를 생산하는 기술 개발 연구가 진행 중이다. 따라서 본 연구에서는 바이오항공유의 국내·외 정책과 개발 동향에 대해 알아보았다.

Physical and Electrical Properties of Zinc–tin–oxide Thin Films Deposited by Combinatorial Approach

Ignatius Andre Setiawan · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Sreedevi Gedi · Hye
Seon Park · Seok Jin Jang and · *Woo Kyoung Kim

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Bifacial solar cell (BFSC) configuration is expected to provide better conversion efficiency when mounted vertically as building–integrated photovoltaics or as noise barriers. Even though the CIGS solar cell is a promising technology to be used in a BFSC configuration, one of the hindrances of its development is the lack of a suitable transparent layer to be used as a back contact. The electrical performance of the contact layer usually deteriorates when the temperature of the substrate is ramped up to 550 – 650 °C during deposition of the CIGS absorber layer. Zinc stannate in both perovskites (ZnSnO_3) and inverse spinel (Zn_2SnO_4) forms was reported as compounds that are chemically and thermally stable and therefore might be a suitable candidate to be used as a transparent back contact for the CIGS–BFSC. A combinatorial approach with two separate targets of ZnO and SnO_2 was used to sputter deposit the stoichiometric composition of ZnSnO_3 and Zn_2SnO_4 films. The deposition process was held for 1 h at a substrate temperature of 300 °C and rotational speed of 60 rpm. Target powers during sputtering was then adjusted to achieve the stoichiometric composition. The film properties were then characterized by GI–XRD, SEM, and Hall–Effect measurements. All deposited films ranging from Zn_2SnO_4 to ZnSnO_3 compositions were found to have an amorphous nature despite being subjected to 300 °C temperature during 1 h of the deposition process. A resistivity of around $1.68 \times 10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ was achieved by a film with composition near to ZnSnO_3 stoichiometric.

스퍼터링 매개변수가 SnO₂ 필름의 특성에 미치는 영향

Effect of sputtering parameters on the properties of SnO₂ films

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

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

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

Nowadays, lots of efforts have been devoted to exploring electron transport oxide materials. Among various electron transport materials, SnO₂ is an effective electron transport material for perovskite solar cells because of its high electron mobility, wide bandgap, long chemical stability, and suitable energy level. To date, various fabrication techniques have been proposed to synthesize SnO₂ electron transport layer, the PSCs with SnO₂ films still show an unsatisfactory photovoltaic performance compared with TiO₂-based PSCs. Sputtering is promising technique to prepare SnO₂ film. Therefore, we deposited SnO₂ films on glass substrates by sputtering at different conditions. With creasing the substrate temperature, power and time, the thickness of SnO₂ films increases. The crystallinity of SnO₂ films is also improved with increasing substrate temperature. At lower temperature, SnO₂ films are amorphous.

Sb₂S₃ 필름 특성에 대한 Zn 도핑의 영향

Effect of Zn doping on the properties of Sb₂S₃ films

Bo Yeon Kim · Shin Yeon ju · Ignatius Andre Setiawan · Park Hyeseon · Kim Dong
Hyo · Vasudeva Reddy Minnam Reddy · Salh Alhammadi · Woo Kyoung Kim*

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, 280 Daehak-ro, Gyeonsan
38541, Republic of Korea

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

Sb₂S₃ is a promising materials for extremely thin absorber (ETA) solar cells. To improve the performance of Sb₂S₃ solar cells, Zn was doped with different amount. Molecular precursor ink is prepared using SbCl₃, ZnCl₂, and thioacetamide. The prepared ink is used to deposit the films on glass substrate by spin-coating process. The structural, optical, and electrical are studied using various characterization techniques. The deposited Zn-doped Sb₂S₃ films exhibited the orthorhombic crystal structure. Change in the surface morphology of Zn-doped Sb₂S₃ films is observed by scanning electron microscopy. The band gap of Zn-doped Sb₂S₃ films is evaluated from optical transmitted data. The electrical properties of Zn-doped Sb₂S₃ films is also studied.

화학침전법으로 제조된 황화주석 완충층을 가진 Cd-free CIGS 태양전지
Cd-free Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells with SnS₂ Buffer Layer Prepared by
Simple Chemical Precipitation Method

Eun Hyeok Kim • Salh Alhammadi • Sreedevi Gedi • Woo Kyoung Kim*

School of Chemical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk
38541, Republic of Korea

*Corresponding author's e-mail: wkim@ynu.ac.kr

Currently, as an alternative buffer layer to the toxic cadmium sulfide (CdS), the tin disulfide (SnS₂) has been investigated due to its suitable wide band gap (~2.9 eV) to transmit most of the solar light spectrum to the Cu(In, Ga)Se₂ light absorber. Further, the SnS₂ consists of low-cost, earth abundant, and non-toxic elements. This work presents the successful synthesis of SnS₂ nanoparticles using a facile chemical precipitation method. The prepared SnS₂ nanoparticles were used to deposit the SnS₂ thin film by spin coating technique. The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) results showed that synthesized SnS₂ nanoparticles has a stoichiometric composition of Sn and S. The Raman spectroscopy has showed a characteristic peak at 316 cm⁻¹ that corresponding to the hexagonal SnS₂ phase. The calculated band gap energy from absorbance spectra of SnS₂ film is found to be ~2.8 eV. The fabricated CIGS device with SnS₂ as buffer showed the conversion efficiency (~5%) close to the efficiency (~7%) of device fabricated with CdS as reference buffer layer.

스퍼터링 파워가 Zn₂SnO₄막의 특성에 미치는 영향

Effect of sputtering power on the properties of Zn₂SnO₄ films

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

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

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

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