

01

전기의 세계

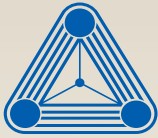
취임사

기획 시리즈 초전도 기기 및 재료 기술

전기공학캠페이스북 전력연구원 차세대송변전연구소 소개

자유 기고문 전기장 센서의 기술동향





전기기술의 **품격향상** 전기공사의 **품질향상**
(주) 진우씨시스템

T : 02-851-8008 F : 02-864-8009

<http://www.utpole.co.kr>

E-mail : utpole@chol.com

대한전기학회

종신회원 : 대표이사 고재완

회원번호 : 201100649



내진형 라이트웨이®

라이트웨이® 제품과 U.T Pole® 제품은 본체와 뚜껑에
 세줄®의 홈이 있습니다. 세줄®의 홈이 없는 제품은
 (주)진우씨시스템 제품이 아니므로 제품 구매시
 유의하시기 바랍니다.

내진시험 성적서

(지진강도 Richter Magnitude 7.0~8.3)

(ICC ES AC156 및 Telcordia GR-63-CORE Zone 4 level)

대한전기협회 기술기준처 내진컨설팅 수행

[지진강도 4(리히터 7.0~8.3) 인증]

[라이트웨이 및 내진시험기 Rig 1]

발행번호 : SGS-R20-0612-KR00
 부록 D
 Page : 2 / 2

Table D-1: Correlation of Earthquake Risks

Earthquake Risk Zone	Richter Magnitude	Modified Mercalli Index (MMI)	Low Frequency Ground Acceleration (% g)	Low Frequency Upper Building Floor Acceleration (% g)
4	7.0-8.3	IX-XII	>48	60-100
3	6.3-7.0	VIII-IX	16-48	40-60
2	5.7-6.3	VII-VIII	8-16	30-40
1	4.3-5.7	V-VII	4-8	20-30
0	<4.3	V	<4	<20

NOTE: For each risk zone, there is a 2% likelihood that an earthquake event of this severity will be exceeded over a 50-year period.



CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

대한전기학회 2022년도 임원 명단 | 2

취임사 | 4

전기계뉴스



한전, 내년 7조7000억원 투자·842명 신규 채용 | 5

제주에너지공사-제주기상청,

국내 최초 기상빅데이터 기반 풍력·태양광 최적입지 선정 추진 | 5

제주도, 재생에너지 적정규모 산정 연구용역 최종보고회 열려 | 6

전기·에너지·자원산업 인자위, 전기공사인재 양성 발판 마련 | 6

기획시리즈 - 초전도 기기 및 재료

기획 시리즈 주제 소개 | 10

초전도 벌크 | 12

수소-초전도 융합 기술 동향 | 18

한국의 초전도 전력기기의 동향 | 24

전기공학랩페이스북

전력연구원 차세대송변전연구소 소개 | 31

자유기고문

전기장 센서의 기술동향 | 36

학회 소식

학회일지 | 42

구독안내 | 44

전기의 세계

KIEE Magazine

Vol. 71, No. 1, January 2022

발행일 2022년 1월 1일
발행인 김재언
편집인 허진
발행처 사단법인 대한전기학회
(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
과학기술회관 (신관)901호
Tel 02-553-0151 Fax 02-566-9957
http://www.kiee.or.kr

학회 본부 임원

회장 김재언
차기회장 이근영
부회장 이병준 노대석 심덕선 이종환 김영근
김태균 박관수 이준호 박부건 김재문
김진태 박경중 박기주 신운용 안승원
오호진 이천구 장창익 최종수 황우현
협동부회장
감사 박정호 송일근
총무이사 차한주 한기선
재무이사 주성관 김미영
기획·정책이사 김경호 김석주 송경빈
편집이사 박종배 남순열 허진
학술이사 김규호 국경수 김명진 김슬기 김용학
이방욱
회원·교육이사 이병국 강세일 배진석 신성수 장용무
사업이사 자평식 강용성 김용상 김한수 안길영
유홍국 윤순일
산학협동이사 손진근 기우경 문경석 박성원 우정욱
이기환 이상호 이상훈 이수연 이을재
임철교 장우석 정호성
국제이사 이교범 강승택 조현종 허진
홍보이사 차준민 김대환 송길목 원동준 유희덕 윤재영

부문의 회장

A부문 회장 김태균 B부문 회장 박관수
C부문 회장 이준호 D부문 회장 박부건
E부문 회장 김재문

전임 편집인

2016년 이병국 2017년~2018년 정인성
2019년~2021년 강승택 2022년 허진

온라인

씨티은행 102-53163-258(대한전기학회)
국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)
지로번호 7510483

편집·디자인 드림기획 031-705-3812

인쇄 드림기획 031-705-3812

표지 2 진우씨스템

표지 3 지화기술단

표지 4 진전기엔지니어링

학회 사무국 직원별 담당 연락처(☎ 02-553-0151~7)

사무국장

김정훈 : 업무총괄, 하계학술대회, D부문의, 산업전기위원회
electran@kiee.or.kr ☎ 0156

경영지원팀

팀장 이상필 : 총무, C부문의
elecproc@kiee.or.kr ☎ 0152

팀원 서영은 : 회원관리, 교육사업, 본부산하 연구회·위원회
account@kiee.or.kr ☎ 0155

팀원 최순례 : 재무회계, 정보화, 본부위원회
member@kiee.or.kr ☎ 0154

편집팀

팀장 송호석 : 국문논문, 국문논문P, E부문의
elecjour@kiee.or.kr ☎ 0153

팀원 전필준 : 학회지, A부문의, 연구용역
jun@kiee.or.kr ☎ 0157

팀원 박소희 : 영문논문(JEET), B부문의, 국제, 여성과학기술위원회
jeet@kiee.or.kr ☎ 0151

대한전기학회 2022년도 임원 명단

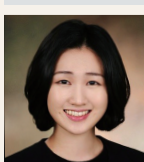
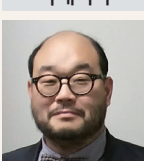
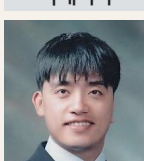
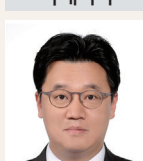
임기 : 2022.1~2022.12(1년)



회장
김재언
충북대학교 교수



차기 회장	부회장	부회장	부회장	부회장	부회장	부회장
						
이건영 광운대학교 교수	이병준 고려대학교 교수	노대석 한국기술교육대학교 교수	심덕선 중앙대학교 교수	이종환 한국전력공사 부사장	김영근 LS Electric 전무이사	김태군 한국전력공사 기술기획처장
부회장	부회장	부회장	부회장	협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장
						
박관수 부산대학교 교수	이준호 호서대학교 교수	박부건 포항공과대학교 교수	김재문 한국교통대학교 교수	김진태 한국전기안전공사 기획혁신처장	박경종 신원기술단 대표이사	박기주 스마트파워 의장
협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장	협동 부회장
						
신운용 지화기술단 대표이사	안승원 나라기술단 사장	오호진 진전기엔지니어링 대표이사	이천구 미래이앤시 대표이사	장창익 우진기전 회장	최종수 제이에스엔지니어링 대표이사	황우현 제주에너지공사 사장
감사	감사	총무이사	총무이사	재무이사	재무이사	기획정책이사
						
박정호 고려대학교 교수	송일근 한국에너지기술연구원 대표이사	차한주 충남대학교 교수	한기선 한전 전력연구원 소장	주성관 고려대학교 교수	김미영 호원대학교 교수	김경호 단국대학교 교수
기획정책이사	기획정책이사	편집이사	편집이사	편집이사	학술이사	학술이사
						
김석주 한국전기연구원분원장	송경빈 송실대학교 교수	박종배 건국대학교 교수	남순열 명지대학교 교수	허진 인천대학교 교수	김규호 한경대학교 교수	국경수 전북대학교 교수

학술이사  김명진 충북대학교 교수	학술이사  김슬기 한국전기연구원 단장	학술이사  김용학 한전 전력연구원 부장	학술이사  이방욱 한양대학교 교수	회원 교육이사  이병국 성균관대학교 교수	회원 교육이사  강세일 한국스마트그리드협회 팀장	회원 교육이사  배진석 국가기술표준원 과장
회원 교육이사  신성수 대한전기협회 팀장	회원 교육이사  장용무 원광대학교 교수	사업이사  지평식 한국교통대학교 교수	사업이사  강용성 우진산전 상무이사	사업이사  김응상 한국전기연구원 팀장	사업이사  김한수 서전기전 대표이사	사업이사  안길영 LS Electric 상무이사
사업이사  유홍국 건일엠에시 사장	사업이사  윤순일 제이비렘-넥스포 대표이사	산학협동이사  손진근 가천대학교 교수	산학협동이사  기유경 유로 컨설팅 대표이사	산학협동이사  문경섭 한국전력거래소 처장	산학협동이사  박성원 제룡전기 이사	산학협동이사  우정옥 한전 전력연구원 처장
산학협동이사  이기환 신우디엔씨 대표이사	산학협동이사  이상호 더콘솔 대표이사	산학협동이사  이상훈 파워맥스 전무이사	산학협동이사  이수연 서울대학교 교수	산학협동이사  이을재 이경산전 대표이사	산학협동이사  임철교 진전기엔지니어링 사장	산학협동이사  장우석 현대엘리베이터 CTO
산학협동이사  정호성 한국철도기술연구원 수석연구원	국제이사  이교범 아주대학교 교수	국제이사  강승택 인천대학교 교수	국제이사  조현종 강원대학교 교수	국제이사  허진 이화여자대학교 교수	홍보이사  차준민 대진대학교 교수	홍보이사  김대환 국제전기자동차엑스포 이사장
홍보이사  송길목 전기안전연구원 부원장	홍보이사  원동준 인하대학교 교수	홍보이사  유희덕 전기신문사 국장	홍보이사  윤재영 한국전기연구원 본부장			

취임사



존경하는 대한전기학회 회원 여러분!

2022년 임인년(壬寅年)의 새해를 맞이하여 대한전기학회 회원 여러분께 건강과 가정의 평강이 함께 하시길 기원합니다.

올해는 대한전기학회가 창립 75주년이 되는 해 이고, 창설 이래 대한전기학회는 회원 여러분의 적극적인 참여와 노력으로 양적으로나 질적으로 많은 발전을 이룩하여 왔습니다. 그러나, 작년에 이은 올해의 코로나19 확산세와 탄소중립이라는 어려운 국내외 정세에서 대한민국의 전기 산업계와 교육계는 새로운 국면을 맞이하고 있어, 저희 대한전기학회

가 이를 극복하기 위한 전기산업발전 방향과 비전을 제시하여야 한다고 생각합니다. 즉, 코로나19 확산세에도 문체없이 산학연 학술활동을 할 수 있는 기반을 마련하고, 국가 2050 탄소중립 달성을 위한 전기산업발전 방향과 전기공학교육 인력양성방안을 제시해야 할 필요가 있습니다.

이와 같은 현안의 솔루션을 제시하고자, 2022년도 대한전기학회 임원진을 산업계, 기관 및 학계를 중심으로 구성하였으며, 그 가운데 특히 협동부회장을 산업계 및 기관을 중심으로 모셨습니다. 전체 임원은 등기이사 포함 역대이래 제일 많은 75명으로 임명하였습니다.

지난해 우리 학회는 김철환 회장님의 헌신적인 노력과 훌륭한 리더십으로 많은 학술성과를 달성하고, 적극적인 대내외 활동으로 학회의 위상을 드높일 수 있었습니다. 학술지 5종 발간, 2,300여명의 참가 등록자 수 최대 하계학술대회 개최를 비롯한 국내 학술대회 17회 개최, ICEMS와 APAP 등의 국제 학술대회 개최 및 국제교류 협력 증진 활동이 이어졌으며, 특히 전문워크숍의 활성화와 5개 부문회의 활발한 학술활동과 회원 여러분의 적극적인 학술참여가 학회 발전에 큰 도움이 되었습니다. 저희 대한전기학회의 각종 학술활동에 참여해 주신 회원 여러분, 그리고 김철환 회장님을 비롯한 학회 임원 및 직원 여러분에게 감사의 말씀을 드립니다.

저희 대한전기학회는 1만명 이상의 우수한 인적자원을 보유하고 있습니다. 저는 이와 같은 인적자원을 효율성 있게 활용하여 선거공약의 사항, 즉 '대한민국 전기산업발전/정책 방향 제시', '무역장벽 및 탄소중립을 위한 KS C IEC & KEC 통합관리 운영 지원', '코로나 19 대응 장기 운영체제 마련', '전기계 산업체 그린뉴딜 및 탄소중립 지원 활성화'의 4개 사항을 실현하고자 합니다.

먼저, 대한민국 전기산업발전/정책 방향제시에 대해서는 저희 학회 A(전력기술), B(전기기기 및 에너지변환시스템), C(전기물성·응용), D(정보 및 제어), E(전기설비)의 5개 부문별 탄소중립 전기산업정책TF팀을 구성하여 정책보고서의 목차에 기반하여 연구를 수행하도록 하고, 그 중간결과를 본부 직하에 구성된 탄소중립 전기산업정책협의회에서 매월로 발표토의하고, 이를 춘계, 하계, 추계 3번에 걸쳐 탄소중립 전기산업정책포럼을 개최하여 의견수렴을 하고, 그 최종 결과를 11월 경에 대외 발표를 할 예정입니다. 정책보고서의 주요 내용으로서는 5개 부문별 탄소중립 정책 및 기술현황분석, 정책 및 발전 방안, 그리고 인력양성이 되겠습니다. 중간 연구결과는 저희 학회지인 전기의 세계에 연재되도록 하겠습니다.

두 번째로 저희 학회가 아직 표준화 및 기술기준 등에 기여한 바가 없어 무역장벽 및 탄소중립을 위한 KS C IEC & KEC 통합관리 운영지원의 한 방법으로서 본부 직하에 있는 기존의 용어위원회를 전기기술표준 및 용어 위원회로 확대변경하여 최근 디지털, 친환경 및 탄소중립 기술의 가속화에 대응하고, 전기산업의 국제화 경쟁력확보를 위하여 국제표준(IEEE Std., IEC), 국가산업표준(KS C IEC) 및 전기기술기준(KEC포함) 등에 대하여 지원하고자 합니다. 이 위원회에는 국가 표준 및 기술기준관련 산업체 전문가를 위원으로 구성하고, 기술표준동향 및 표준시험 기술관련 세미나/워크숍을 관련단체/기관과의 공동협력개최를 통하여 표준/기술의 개발과 적용, 그리고 산학연관 기술정보교류 활성화를 꾀하도록 하겠습니다.

세 번째로는 코로나 19 대응 장기 운영체제 전환에 있어서는 학회내 5개 부문에서 매년 정기적으로 개최하는 춘계, 하계, 추계 학술대회를 대면과 비대면의 혼용개최하는 방식을 정립하여 코로나19 확산 등에도 아무런 문제 및 불편 없이 회원들이 각종 학술대회에 참가하여 유익한 정보를 나눌 수 있도록 하겠습니다. 한편, 현재 복잡하게 연관되어 적용되어 왔던 대한전기학회내 정관, 규칙 및 규정을 대폭적으로 정비하여 학회의 효율적인 운영체제를 갖추도록 재정비하도록 하겠습니다.

네 번째로 전기계 산업체 그린뉴딜 및 탄소중립 지원 활성화에 대해서는 산학연 인력양성지원센터 및 전기계 포럼 활성화를 통하여 산업체지원을 하도록 하겠습니다. 산학연 인력양성지원센터를 통한 산업체 지원은 작년에 이를 대체하여 새로이 만들어진 교육원의 운영규정을 제정하여 산학연 인력양성에 힘쓰도록 하겠으며, 전기계 포럼은 탄소중립 전기산업발전정책 포럼을 통하여 전기산업계 지원을 활성화하도록 하겠습니다. 한편, 작년 학회 회원을 통하여 의견수렴된 산업체 회장 추대방안을 마련하여 정기적으로 산업체 회장을 추대하도록 노력하겠습니다.

작년부터 코로나19의 확산세와 정부의 탄소중립선언으로 전기산업계 및 교육계에도 ESG 경영체제의 중요성이 강조되면서 새로운 국면에 접어들고 있습니다. 올해에는 이와 같은 코로나19의 확산세에 대한 대처와 ESG경영체제의 도입이라는 새로운 도전과 변화를 더욱 실감 있게 느끼면서 기업 및 학교 경영을 해야 할 것으로 생각됩니다. 이와 더불어 2050년 탄소중립을 위한 재생에너지 전원비중 70.8% 달성과 2030년 2018년 대비 온실가스 40% 저감이라는 무거운 목표도 눈 앞에 놓여져 있습니다. 진실로 저희 전기산업계 및 교육계에서는 이의 실현을 위하여 기술개발, 인프라구축, 인력양성 및 정책방향을 제시해야 하는 어려운 상황입니다.

코로나19도 조만간 물결꺾반으로 반드시 극복되고, 그와 동시에 전기산업계 및 교육계에도 탄소중립의 흐름에 맞춘 ESG경영체제로 새로운 발전의 전환점이 되기를 희망합니다. 저희 대한전기학회도 탄소중립 전기산업발전 정책 포럼 개최와 백서발간을 통하여 전기산업계의 새로운 비전을 제시하고, 이와 더불어 전기산업계의 인력양성에 최선을 다하겠습니다.

존경하는 대한전기학회 회원 여러분! 2022년에도 저희 대한전기학회에 많은 관심과 성원을 부탁드립니다, 다시 한번 회원 모든 분들께 하나님의 축복과 평강이 항상 함께 하시길 기원드립니다.

2022년 1월 1일

대한전기학회 회장 김재언

전기계 뉴스



한전, 내년 7조7000억원 투자· 842명 신규 채용 공공기관 기관장 회의 개최...산업부 산하 39개 공공기관, 내년 20조 투자·3200명 채용 계획

한국전력 및 한국수력원자력 등 39개 산업통상자원부 산하 공공기관이 내년 20조7000억원 규모의 시설·설비투자자와 함께 3200여명 규모의 신규채용을 추진한다.

산업부는 지난 12월 21일 문승욱 장관 주재로 서울 무역보험공사에서 산업부 소관 기관장 회의를 열고 경기 활성화를 위해 이같은 내용의 투자 및 채용 계획을 마련했다고 밝혔다.

계획의 세부 내용을 보면 39개 공공기관들은 올해 20조7000억원을 자체 투자한다. 이는 지난해보다 1조원 가량 증가한 액수다. 기관별로는 ▲한국전력공사 7조7000억원 ▲한국수력원자력 3조7000억원 ▲한국가스공사 1조5000억원 ▲중부발전 1조2000억원 등이다.

기관들은 비대면 화상면접, Si면접 등을 활용해 약 3200여명 규모의 신규채용도 추진한다. 기관별 신규 채용 규모는 ▲한전 842명 ▲한수원 400명 ▲한전KPS 315명 ▲강원랜드 208명 등이다.

또한 지역특산물 구입, 중소·소상공인 지원 등의 활동을 통한 지역경제 활성화를 위해 약 9000억원을 지원하기로 했다.

이날 회의에서는 공공기관의 사회적 책임 이행을 통한 공공성 제고와 부산세계박람회 유치에 대한 공공기관의 지원방안 등도 논의됐다.

우선 공공성 제고 방안으로 공공차량 친환경차 구매 확대, 상생결제 사용 활성화, 기관 보유시설 지역주민 개방 확대 등을 실시하고 작업장 안전강화를 위한 중대재해처벌법 시행에 대비해 사전예방적 안전관리시스템을 구축하고 산재방지 노력을 강화하기로 했다.

최근 경쟁이 본격화되고 있는 부산세계박람회 유치를 위해 공공기관의 네트워크·인프라를 활용한 유치 지원활동을 전개하기로 했다.

문 장관은 이날 회의에서 “내년도 예정된 자체투자자와 지역경제 지원방안을 신속히 추진하고 신규채용을 당초 계획보다 추가 확대하는 방안도 적극 검토해 줄 것”을 요청했다.

이어 “연말연시 부당한 청탁 및 향응 수수사례가 발생하지 않도록 각 기관별 강화된 복무기강 확립 활동과 선거법 위반행위 등 국민 눈높이에 맞지 않는 부적절한 활동에 대한 예방·점검을 해달라”고 당부했다.

제주에너지공사-제주기상청, 국내 최초 기상빅데이터 기반 풍력·태양광 최적입지 선정 추진 도내 풍속, 일사량 기상 Map개발로 CFI적기 구축 협력



제주에너지공사와 제주기상청 관계자들이 12월 14일 제주기상청에서 '신재생에너지 기반 에너지시스템 실현을 위한 업무협약'을 체결하고 기념촬영을 하고 있다.

CFI2030을 적기 달성하기 위해서는 신재생에너지 4085GW를 설치해야 한다. 풍력과 태양광 발전설비는 설치 후 20년간 운영하므로 초기 입지 선정이 매우 중요하다. 특히 최대 전력을 생산케 하려면 기상 조건과 해안, 바람의 위치, 고도와 방향을 고려한 설치장소별 사업화 우선순위를 정해 추진할 필요가 있다.

이에 따라, 양 기관은 빅데이터 기반의 보다 체계적이고 과학적인 수치 기준의 입지를 선정해 ▲탄소 없는 섬, 제주 에너지 전환 정책의 적기 추진 지원 ▲제주 스마트에너지시티 사업 추진 협력 ▲신재생에너지 안정적 운영을 위한 기상기후 활용정보 지원 ▲기상관측장비 설치 및 자료수집 등에 관한 기

제주에너지공사(사장 황우현)는 12월 14일 제주지방기상청(청장 전재목)과 30년간 축적된 제주의 기상 데이터를 활용해 CFI 2030 '탄소 없는 섬' 구축을 체계적으로 추진키로 업무협약(MOU)을 체결했다.

술지원과 자료 공동 활용 ▲지역 신재생에너지 거버넌스 구축 및 운영 등에 협력하기로 서명했다.

공사는 앞으로 제주지방기상청과 함께 제주도의 바람과 햇빛을 지역별로 주야간 풍속, 풍향, 풍량, 돌풍은 물론 일사, 일조량 등 세부 특성을 분석해 풍력과 태양광 사업 운영에 최적 입지 기상맵(Map)을 개발할 예정이다.

이맵을 이용해 사전 입지조사는 물론 장기 설비운영 수익성도 산출이 가능하므로 주민참여형 개발사업의 객관적 자료로도 사용할 수 있다. 또한 소규모 재생에너지 사업이나 가정에서도 에너지생산량을 예측해 설치 규모도 산정할 수 있어 신재생에너지에 관심 있는 도민들에게도 유용하게 활용될 전망이다.

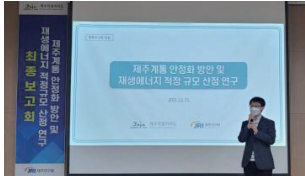
또한 이번 협약으로 양 기관은 각각 축적된 풍력 태양광 발전 데이터와 기상 기후 자료를 연계해 일일, 주간, 월간 단위 신재생에너지 발전량 예측으로 발전출력제어를 대응하고 전력망 운영 안정화와 기후위기 극복도 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

김민호 그린뉴딜사업처장은 “양 기관이 보유한 설비운영과 기상 데이터를 바탕으로 자립형 친환경에너지도시 조성에 노력할 것”이라며 “기상맵은 주민들에게도 공개해 신재생에너지 보급 확산의 활용성을 높이도록 하겠다”고 밝혔다.

KIEE NEWS



제주도, 재생에너지 적정규모 산정 연구용역 최종보고회 열려 출력제어 최소화 위한 2022~2030 태양광 풍력 적정규모 연구용역 진행 연구결과 토대로 출력제어 해소와 탄소중립 실현을 위한 로드맵 수립 추진



‘제주계통 안정화 방안 및 재생에너지 적정규모 산정’ 연구 용역에 대한 최종보고회가 12월 15일 제주연구원 3층 대강당에서 열렸다.

이번 보고회는 재생에너지 사업자에 대한 출력제어를 최소화하기 위해 연도별 적정규모 산정량을 산출하고, 제주형 태양광 가이드라인 등을 마련하는 등 탄소중립 실현을 위한 제주형 로드맵 수립을 위해 개최됐다.

용역 결과, 최근 상향된 정부의 신재생에너지 3030 정책 조기 달성을 위해 출력제어 해소를 위한 공급과 수요 측면의 방안이 병행 추진돼야 한다는 의견이 제시됐다.

지난 10일 정부가 발표한 ‘산업 에너지 탄소중립 대전환 비전과 전략’에서 2030 온실가스 감축목표(NDC) 상향 확정 발표와 더불어 신재생에너지 3020에서 3030으로 목표를 상향한 바 있다.

이번 용역에서는 출력제어 해소와 신재생에너지의 지속 확대를 위해서는 해저 제3연계선 조기 준공, 출력제어 완화용 ESS 설치 등 인프라 구축과 그린수소 기반 수소경제 구축, 데이터센터 유치 등 새로운 전력 수요처 발굴의 필요성이 제기됐다.

인프라 구축과 새로운 전력수요처 발굴 전까지 태양광 풍력에 대한 적정

설비량 규모도 도출했다.

최종보고회에서는 ▲CFI2030 계획추진에 따른 제주지역 출력제어 상황 ▲태양광 풍력의 단기 보급목표 조정(안) ▲중 장기 보급목표 달성을 위한 전력계통 안정화 방안 등이 중점 거론됐다.

분석 결과, CFI2030 계획대로 태양광, 풍력 발전시설 확대 시 2022년도 4.4%, 2023년도 8.6%, 2030년도에는 11.6%까지 재생에너지 출력제어 비중이 증가할 것으로 예측됐다.

2023년 12월 준공 목표인 해저 제3연계선(제주-완도)이 계획대로 준공 시 출력제어 비중이 2% 내외로 감소되나 준공 후 2년 뒤 다시 출력제어 비중이 증가할 것으로 예상했다.

이를 토대로 풍력단독 출력제어 비율 3%를 기준으로 설정해 2025년까지 CFI2030 계획 대비 태양광 풍력에 대한 적정규모를 산출했다.

이날 최종보고회는 재생에너지 적정규모 산정 실무협의체(도, 한국전력공사, 전력거래소, 한국에너지공단, 제주에너지공사)와도 본청 담당자, 발전사업자 등 50여 명이 참석했다.

윤형석 제주도 미래전략국장은 “CFI2030계획에 따라 안정적인 신재생에너지 보급 확대를 위해 이번 연구용역을 추진했다”며 “이를 토대로 출력제어 최소화 위한 해결방안을 도민이 체감할 수 있도록 현실화하는 등 에너지 전환 선도도시로서의 위상을 높여 가겠다”고 말했다.

전기·에너지·자원산업 인자위, 전기공사 인재 양성 발판 마련 특성화고 교육 직무향상 설계기준 등 개발

인력난에 시달리는 전기공사업계계를 도울 인재 양성의 기틀이 마련돼 주목된다. 잠재적 인력인 특성화고 학생들을 현장으로 끌어들이고 현 재직자의 직무능력까지 향상시킬 수 있다는 평가다. 또 기업이 인재를 채용할 때 기준으로 삼을 수 있는 도구도 마련됐다.

이는 최근에 완성된 2021년도 산업인력현황 보고서를 기반으로 했는데, 보고서의 성공적인 작성이 있었기에 가능했다는 평가다. 이에 보고서의 내용도 이목을 끌고 있다.

전기공사업계에 따르면 전기·에너지·자원산업 인적자원개발위원회(대표기관 한국전기공사협회, 인자위)는 최근 ‘특성화고 교육과정 설계 표준’과 ‘직무향상 훈련과정 설계 표준’ 그리고 ‘전기공사 산업 채용 도구’를 개발했다. 이들은 모두 전기공사 인재를 양성하고 전기공사업면허 등록업체들이 보다 우수한 인재를 채용할 수 있도록 돕고자 개발됐다.

협회가 대표기관으로 있는 인자위는 전기·에너지·자원산업계의 인재 양성을 위한 조직으로 관련 정책에 대한 산업계 입장을 전달하는 한

편, 인재 양성을 위한 다양한 사업을 추진한다.

이번 인자위의 성과물을 하나씩 보면 우선 ‘특성화고 교육과정 설계 표준’에서는 특성화고, 마이스터고등학교 등 기술 훈련을 받는 고등학교 학생들이 졸업 후 바로 현장에 투입될 수 있도록 교육과정을 설계했다. 고등학교 전기계열 학과의 교육 커리큘럼을 편성했으며, 특히 2025년 전면 도입되는 고교학점제를 감안, 이에 대비했다는 평가를 받는다.

‘재직자 직무능력향상 훈련과정 설계 표준’은 전기산업계에서 요구하는 직무와 교육과정의 미스매치를 해소하고 교육의 현장성을 강화하기 위해 마련됐다. 크게 ▲전기공사 ▲전기에너지저장시스템 두 개 산업의 훈련과정이 개발됐으며 각 분야 재직자의 직무능력 향상을 위한 훈련과정 설계 시 참고할 수 있는 표준을 제시했다.

‘전기공사 산업 채용 도구’는 전기공사업면허 등록업체들이 각 직무에 적절한 인재를 효율적으로 채용할 수 있는 기준을 마련했다고 평가 받는다. 서류접수부터 면접까지 인력 채용 프로세스를 만들었는데 면접 과정에서 필요한 직무능력과 직업기초 능력에 대한 문항들도 구체적으로 마련했다. 전반적으로 회사 측이 지원자의 직무능력 보유 여부와 숙련도를 파악할 수 있도록 한다는 분석이다.



전기의 세계 기획시리즈

월별 주제 안내

호	주 제	담당위원
'21년 4월호	· 강화학습 기반 계획 및 제어 기술	· 김광기 위원 (인하대 교수)
5월호	· 전기기기 설계기술	· 한기진 위원 (동국대 교수)
6월호	· 에너지 신산업 기술동향	· 이한상 위원 (세명대 교수)
7월호	· 무선전력전송 국제규격 기술 동향	· 이기범 위원 (경북테크노파크 센터장)
8월호	· 전기인프라와 데이터	· 안준호 위원 (서울대 전력연구소 책임연구원)
9월호	· 자율지능시스템을 위한 제어이론 연구동향	· 이상문 위원 (경북대 교수)
10월호	· MVDC 기술동향	· 전진홍 위원 (한국전기연구원 센터장)
11월호	· 전기자동차 기술동향	· 배진용 위원 (동신대 교수)
12월호	· 전기자기 센서기술 기술동향	· 강승택 위원장 (인천대 교수)
'22년 1월호	· 초전도기기 및 재료	· 이상헌 위원 (선문대 교수)
2월호	· 전기재난	· 임용배 위원 (한국전기연구원 책임연구원)
3월호	· 전기재료 연구동향	· 김명진 위원 (충북대 교수)

기획시리즈

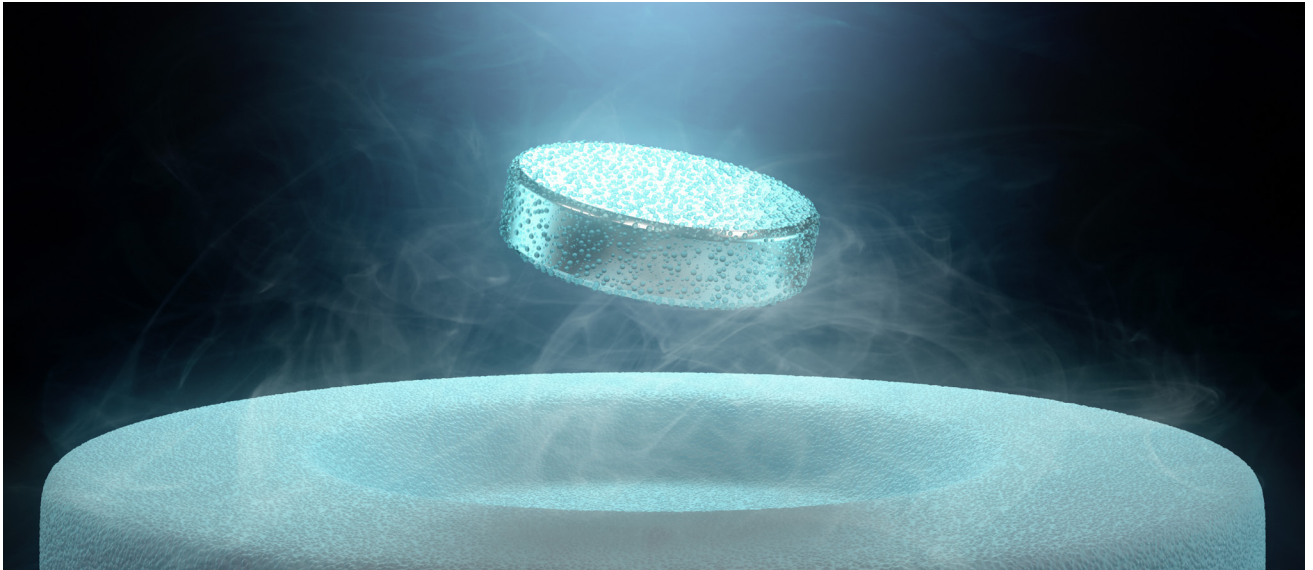
초전도 기기 및 재료

초전도 벌크

수소-초전도 융합 기술 동향

한국의 초전도 전력기기의 동향





초전도 기기 및 재료



담당 편집위원
이상현 교수
(선문대학교 전자공학과)

담당 편집위원 인사말 및 주제 소개

대한 전기학회 회원 그리고 독자 여러분 인사드립니다. 저는 선문대학교 전자공학과에서 전기회로 시스템과 전기재료 물성에 관한 교육과 연구의 일을 하고 있는 이상현입니다.

이번 기획시리즈의 주제는 “초전도 기기 및 재료”입니다. 2022년도 신규 R&D사업으로 초전도 기기 분야의 응용분야가 다시 주목을 받기 시작되며, 고온초전도 마그넷 기술개발 사업의 국책사업이 시작될 예정입니다. 초전도 도체 시험설비 구축을 위한 연구개발이 새로 반영돼 고온초전도 연구에 다시 힘을 실어주는 분위기입니다.

본 기획시리즈에서 이러한 고온 초전도 연구기획을 반영하여 세편의 연구동향 원고를 소개 하고자 합니다. 초빙한 세 편의 초전도 기술은 “초전도 벌크”, “수소-초전도 융합 기술 동향” 그리고 “한국의 초전도 전력기기의 동향”의 원고 제목으로 기고 되어 있습니다. 대한 전기학회 회원분들의 대부분이 국가 인프라인 전력산업에 관련되어 계신만큼, 본 기획 원고에서 소개되는 초전도 케이블 시스템 및 초전도환류기 등 초전도전력기기를 전력 계통에 확대 적용하는 모델 소개와 액체 수소를 초전도 마그넷 냉각재로 활용하는 냉각 계통 유연성 및 안정성 증대를 위한 수소와 초전도의 융합기술, 초전도체와 자기장의 반발력을 이용한 초전도 벌크 마그넷 기술동향



은 초전도 연구소재의 활용과 참고자료로도 기대 할 수 있을 것으로 사료됩니다.

특히 본 기획원고에서는 수소와 초전도 기술의 융합기술을 바탕으로 초전도 소재를 액체 수소 상태로 사용하는 것이 에너지 낭비가 줄어들고 공정과 비용 면에서 더 효율적임을 제시하는 기술이 소개 되고 있습니다. 향후 수소의 사용량이 증가함에 따라 액체 수소가 차지하는 비중이 점점 더 높아질 것으로 판단되며, 액체 수소의 온도는 약 20K로서 고온초전도 마그네틱의 극저온 냉각제로 이용할 수 있다는 장점이 있습니다. 초전도 케이블에서는 77K의 액체 질소가 냉매로 사용이 가능하나, 마그넷 응용에서는 발생하는 자기장 때문에 40 K 이하의 온도가 필요한 조건을 만족시키지 못하지만, 액체 수소를 사용하면 30K~40K 범위의 온도에서 고온초전도 마그네틱을 냉각시킬 수가 있어 초전도 코일의 성능을 충분히 발휘할 수 있을 것입니다. 그리고 기화하는 수소 가스는 연료 전지에서 전기를 생산하는데 사용할 수 있을 것이라, 수소경제와 맞물려 주목을 받는 초전도 신기술로 판단됩니다.

그리고, 한국의 초전도 전력기기의 동향원고에서는 우리나라의 초전도케이블시스템, 초전도 한류기 등 초전도 전력기기 분야는 미국, EU, 일본 등의 초전도 연구 선행 국가들에 비해 20년이상 뒤늦게 연구 개발을 시작하였지만, 산학연의 팔

목할 만한 연구성으로 설계 부터 시험, 생산, 설치 및 운영까지 초전도 전력기기 전 분야에 걸쳐 최고의 기술력을 보유하고 있을 뿐 아니라 실제 전력 계통에 적용하여 상용화에 성공하고 있어, 초전도 전력기기 분야의 선도국으로 진입하는 기술력의 우위를 제시하고 있습니다. 또한 초전도 벌크 소재는 친환경, 고효율 에너지 저장 분야(배터리)에 응용되며, 전기에너지를 회전에너지로 저장하거나, 또는 그 반대로 회전에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치에 활용할 수 있습니다. 전철을 정지시킬 때 사용되는 자기 브레이크에서 발생하는 전기를 저장하거나, 태양광이나 풍력의 전력안정화, 밤 시간에 남은 전기에너지를 운동에너지로 저장, 낮 시간에 재활용하는데 사용될 수 있습니다. 초전도 소재는 에너지 저장장치의 핵심 부품이 되며, 성능 및 전력기기의 단순화, 경제성 등을 고려할 시, 초전도 벌크 마그네틱으로 충분히 전력산업에 적용이 가능한 기술들입니다.

특히 우리나라의 초전도 전력 응용분야는 한국전력, LS ELECTRIC, 한국전기연구원 및 국내유수의 연구기관과 대학의 초전도 연구실등의 산학연을 중심으로한 초소형 초경량 무절연 초전도 마그네틱, 케이블 시스템 및 초전도한류기 등의 초전도전력기기를 전력 계통에 확대 적용하는 연구의 세계적인 선도그룹으로 초전도 기술의 상용화를 주도하고 있습니다.

초전도 벌크

Superconducting bulk

이상헌 교수 | 선문대학교 전자공학과

Sang Heon Lee | Department of Electronic Engineering, Sunmoon University



단결정 벌크형 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체는 높은 자기 부상력과 포획 자력을 갖는다. 단결정형 초전도 벌크는 높은 자기 부상력과 포획자력으로 플라이 휠 에너지 저장과 수테슬라(T) 이상의 자력을 포획할 수 있는 초전도 자석으로 활용할 수 있다.

Abstract

Single crystal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ bulk superconductors have high magnetic levitation force and capture magnetic force. Superconducting bulk can be used as a superconducting magnet capable of energy storage and capture of magnetic force.

1. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ (Y123) 산화물 초전도체

초전도란 특정 임계온도 이하 값에서 저항이 0이 되는 특성을 나타내는 것으로 1911년 네덜란드 물리학자인 오네스(H. Kamerlingh Onnes)에 의하여 발견되었다[1]. 오네스는 액체 헬륨의 냉각 성공으로 인하여 이를 토대로 특정 물질의 온도를 낮추는 실험을 수행하고 있었다. 수은의 냉각에 따른 전기저항의 실험을 진행하던 오네스는, 액체 헬륨의 끓는 온도인 비등점(4.2 K)에서 수은의 저항이 0이 되는 현상을 확인하였다. 이를 초전도 현상(Superconductivity)이라고 하였다. 일반적인 상전도 상태에서, 초전도 상태로 변화하는 온도를 임계온도(T_c)라고 한다. 연구가 진행됨에 따라 임계온도(T_c)가 점점 더 높은 재료의 발견이 이루어졌고[2-8], 그 숫자는 수백 개에 이른다.

오네스의 발견 이후 학자들은, 초전도 현상을 물리학적으로

규명하기 위한 노력에 힘썼다. 초전도가 발견된 이후 20여년 동안 초전도는 단지 저항이 0이 되는 상태에 지나지 않았다. 그러다 1933년 독일의 물리학자인 마이스너(W. Meissner)와 옥센펠드(Ochsenfeld)는 초전도에 매우 중요한 성질이 있다는 것을 추가적으로 발견하였다[9]. 이는 그리 강하지 않은 자장 안에 초전도체를 놓는 경우, 자기력선이 초전도 밖으로 나오는 현상으로, 마이스너 효과라고 명명하였다. 예를 들어, 철로 된 자석의 경우, 자계 안에 놓으면 자력선을 흡수하며 집중시킨다. 하지만, 마이스너 효과는 이와 반대로 자력선을 밖으로 내보낸다. 이와 같은 성질을 완전 반자성이라고 한다.

오네스는 각종 전기기기에 응용을 하기 위하여 초전도 코일에 10만 가우스 정도의 자기장을 발생시키고자 하였다. 하지만 아주 작은 자기장 밖에 발생하지 않는 것을 확인하였고, 초전도가 파괴되는 임계자기장(H_c)이 있다는 것을 발견하게 되었

다. 이후 In, Sn, Pb 등 여러 가지 다른 원소들에서도 초전도 현상이 발견되었으며, 지금까지 발견된 초전도체는 모두 1000 여종에 이른다.

1960년대까지는 주로 초전도 현상을 규명하기 위한 물리학적 발견이 이루어졌는데, 마이스너(Meissner), 런던(London) 등의 연구에 의하여 체계적인 이론을 갖추었으며, 1957년에 바든(Bardeen), 쿠퍼(Cooper), 스크리퍼(Schrieffer) 등이 초전도 현상의 양자론의 기초라고 말할 수 있는 BCS 이론이 정립되었다. 초전도 상태는 금속의 전도 전자들이 질서 있는 상태(Ordered state)로 연관된 전자쌍으로 형성되어 있어서, 그 중 하나가 격자와 충돌을 일으켜 진로가 바뀌면 또 하나의 전자가 그 진로를 즉시 수정하여 전체로서는 아무런 영향을 받지 않아 저항이 없는 운동을 계속할 수 있다. 전자가 양자와 충돌한다는 것은 양자로부터 에너지를 얻게 되는 것인데 이 경우의 격자진동의 양자를 포논(Phonon)이라 부르고, 전자와 양자 사이에서 주고받는 포논을 전자기리 주고받으면 상호인력이 생긴다는 이론으로 Bardeen, Cooper, Schrieffer의 첫 자리를 인용하여 BCS 이론이라 정의하였다. BCS 이론은 많은 전자와 전자 사이에 순수한 인력이 작용하고 이 두 전자가 쿠퍼 쌍(Cooper pair)을 이룰 때 초전도 현상이 나타나고, 마이스너 효과와 완전 도전성을 잘 설명한다[10].

1986년 베드노르(Bednorz)와 뮐러(Müller)가 발견한 La-Ba-Cu-O 초전도체는 기존의 금속 또는 금속간 화합물과는 전혀 다른 산화물계 초전도체로, 초전도 임계온도 또한 30 K의 높은 값을 나타내었다[11]. 산화물 초전도체의 발견 이후 많은 연구들이 진행 되었으며, 1987년 초전도 전이온도가 약 90 K를 나타내는 Y-Ba-Cu-O계 고온초전도체가 등장하게 되었다[12]. 이어 Bi-Sr-Ca-Cu-O와 Tl-Ba-Cu-O계의 고온초전도체가 발견되었으며, 수은계열의 Hg-Ba-Ca-Cu-O 초전도체가 133 K이라는 지금까지의 가장 높은 전이온도를 나타내었다[13-14]. 초전도는 1종과 2종으로 구분한다. 1종 초전도체의 경우 하나의 원소로 되어있는 단원소 초전도체가 보통 그 예시이다. 2종 초전도체는 여러 원소의 조합으로 된 합금형 초전도체이다.

긴즈버그(Vitaly Ginzburg)와 알렉세이 아브리코소프(Alexei

A. Abrikosov)는 초전도성과 자성을 동시에 수용할 수 있는지에 주목했고, 이를 입증했다. 즉 1종 초전도체와 같은 단원소 물질은 에너지의 안정성을 추구하기 위해 내부로 자기장이 들어오는 것을 거부하지만, 2종 초전도체는 자기장이 일정 수준을 넘으면 내부로 들여보내는 것이 안정하기 때문에 보다 큰 자기장에서도 초전도 현상을 유지할 수 있다. 임계온도 이상에서는 모두 초전도 현상이 사라지지만, 초전도와 상전도를 혼합한 상태를 유지하는 2종 초전도체가[15] 수십 테슬라 이상을 견딜 수 있기에 현재 연구나 상용화가 널리 되고 있다.

YBa₂Cu₃O_{7-y}(Y123) 산화물 초전도체는 초전도 전이온도(T_c)가 93~93.5 K 인 대표적인 고온 초전도체이다. Y:Ba:Cu 의 조성비가 1:2:3 이고, 측면에 수직인 c 축, 측면 내 2개의 직교하는 축을 a, b 축이라 했을 때 그림 1와 같이 a, b, c 축의 길이가 서로 다르고, c 축이 a, b 축에 비해 3배나 긴 이방성(Anisotropic) 적층구조이며, 페로브스카이트(Perovskite) 구조[4]를 갖는다. YBCO초전도체의 결정 구조는 두 개의 Ba-O 층 사이에 위치한 Cu-O 결합의 산소 배열에 의해 결정된다. Cu-O 결합의 산소 배열은 a 축 방향에는 산소 원자가 존재하지 않고, 오직 b 축 방향으로만 산소 원자가 존재한다. 따라서 Y123 상안에 있는 Cu-O 결합의 b 축의 산소격자 안에 산소가 불충분 할 경우 b 축의 길이와 a 축의 길이와 같아져 정방정 구조를 갖고, 산소가 충분 할 경우 b 축의 산소 원자의 주입으로 인하여 b 축의 길이가 더 큰 사방정 구조를 갖게 된다. 그래서 정방정구조는 초전도특성을 나타내지 않고, 온도-저항특성이 반도체와 비슷한 경향을 보이는 반면 사방정구조를 가질 경우에는 초전도특성을 가지고, 임계 전이온도 이상에서 온도-저항특성이 금속과 비슷하다. 이것은 산소의 함량이 증가하게 되면 Cu-O 평면에서의 초전도 전류 운반자의 수가 증가하기 때문이다. Tc값 또한 초전도 운반자농도에 의존하기 때문에 y값(산소함량)이 변함에 따라 Tc가 변하게 된다[5].

Y123 재료는 소결방법과 용융성장방법 등을 통해 일반적으로 정방정상의 Y123를 얻을 수 있다. 즉, 초전도성을 나타내는 사방정 결정구조를 가지는 Y123 초전도체는 서냉을 하거나 열처리 후 산소열처리를 통해 높은 Tc값을 갖게 된다.

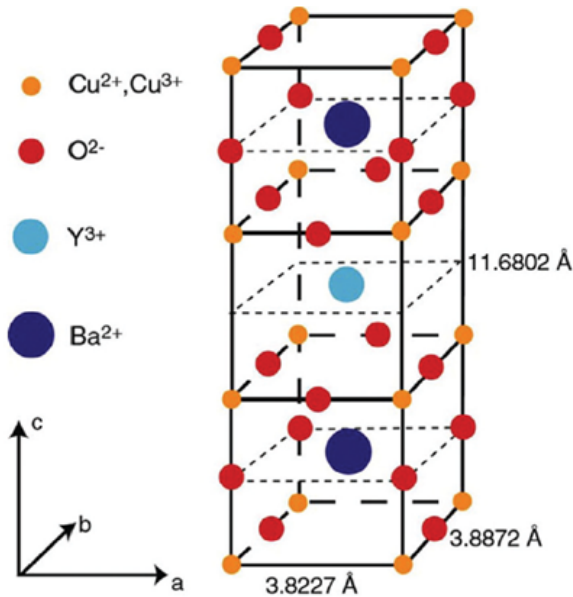


그림 1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductor structure

초전도 단결정 벌크체는 초전도 에너지저장장치의 기본 설계 개념을 제공하고 에너지저장 효율을 결정하는 핵심소재이다. 에너지저장장치의 개념이해와 설계의 최적화를 위해서는 물성이 최대화된 초전도체가 필요하며 100kW급 에너지저장장치와 같이 다량의 초전도 벌크가 필요한 시스템에서는 초전도의 물성확보가 중요하다. 초전도체의 자기부상력과 자력특성을 극대화하려면 초전도체의 결정크기와 초전도내에서의 전류밀도를 높여 주어야 하고 이는 단결정성장공정의 개발로 가능하다. 단결정 성장공정은 종자확보기술, 종자성장기술, 미분말 첨가기술, 복합체 제조기술과 가공 및 균열억제기술 등의 다양한 공저기술을 포함한다. 더불어 대량생산공정과 물성측정기술이 확보되어야 제품의 성능을 보유했던 초전도체를 제조할 수 있다. 고온 초전도체를 이용하여 전기기기 제품을 제조하기 위해서는 높은 임계전류밀도를 가진 초전도체를 부품소재의 특성에 맞게 적합한 형태로 만들어야 한다. 현재까지 초전도체 제조 관련 연구들이 임계전류밀도 향상과 가공기술개발에 집중되어 왔으나 아직까지 고온 초전도 벌크를 전기 응용분야에 적용하기에는 임계 전류의 개선 및 초전도 벌크의 자력 강화가 필요한 실정이다. 최근 전기적 특성의 향상을 위한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도벌크를 제조하는 신공정들이 개발되고 있으며, 초전도 모터용 벌크체로서 수 백 kW급의 다양

한 초전도 전동기의 개발에 활용 되고 있다. 초전도 벌크의 자력 향상에 밀접한 관련이 있는 Pinning center는 첨가제의 doping에 의해서 만들어지며, 첨가제의 양과 분포 상태에 따라 초전도 특성도 향상될 수도 있고 적정상태에서 벗어나면 악화될 수도 있다. 따라서 초전도 벌크를 초전도 자석으로 사용할 경우, 초전도체를 복잡하고 고가의 제작공정을 적용하여 선재로 제작할 필요가 없으므로 초전도 가공공정의 단순화를 가능하게 할 수 있다 [6-7]. 초전도 벌크 자석은 비자성체나 약자성체에 균일한 자력을 공급하여 반응 자장을 측정하는 MRI(Magnetic resonance image)와 같은 장비에도 적용될 수 있을 것이다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체를 간편한 열 확산 프로세스에 적용하여 임계전류밀도의 향상을 시도하였다. 또한 전이 온도의 변화, 자화 특성 및 미세 구조의 연구도 병행하여 실용성 있는 초전도 벌크 개발을 위한 기초 자료를 획득할 것이다. 초전도 분말 분위기에서 열처리가 가능한 열 확산 프로세스를 제안하여, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체를 세라믹 분말 중에 위치시킴으로서, 세라믹 입자가 flux pinning center로서 초전도 내부로 열 확산되는 프로세스를 시도할 수 있다.

초전도 벌크를 알루미늄이나 내화재 위에 놓고 열처리를 시도하면 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 성형체 내부로 내화재가 흡수되어 버리는 현상이 발생하므로, 성형체를 보호하기 위하여 초전도 벌크를 MgO 단결정 위에 놓는다. 그 위에 Yb_2O_3 를 밑면에 바른 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 성형체를 올린다. 이때 Yb_2O_3 는 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 밑에 있는 MgO판에서 단결정이 자라는 것을 방지해주고, Yb_2O_3 로 인하여 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 성형체가 MgO 판에 녹아 붙어버리지 않게 도와준다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 보다 더 높은 1060 °C의 포정온도를 갖는 단결정 Sm 종자를 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 성형체의 정 가운데에 올려둔다. 그후 1050 °C에서 950 °C까지 냉각 속도를 다르게 하여 단결정의 핵 생성과 성장속도가 제어된다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 의 포정온도보다는 높고 Sm 종자의 포정온도보다는 낮은 온도 1020 °C에서 Sm 종자와 동일한 방향성을 가지고 단결정이 자라게 된다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 벌크의 전자기 특성은 초전도 결정 내부에 존재하는 결함의 종류와 형태에 따라 변화한다. 초전도 특성의 향상을 위하여 종자 결정 성장법으로 제조한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 단결정 벌크를 세라믹 분말로 채운 도가니에 넣어 950 °C에서 열처리하여 Pinning center로

서 세라믹 분말의 초전도 벌크 표면 내부로 확산되는 열처리 프로세스가 제안되고 있다.

중자결정으로 성장한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체를 세라믹 분말 분위기에서 950°C , 10시간의 열처리를 수행함으로써 세라믹 분말의 열 확산 효과가 제안되고 있다. 그림 2에서 직경 20mm의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크를 세라믹 분말 위에 올려 놓은 후, 열처리를 수행하여 세라믹 분말의 열 확산을 통해 인위적인 flux pinning의 도입을 시도할 수 있다. 그림 2 (a)는 확산 열처리 전의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크이며, (b)는 세라믹 분말을 이용하여 열처리를 수행한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크이다. 그림 2(b)는 열확산 처리 후에서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크가, 세라믹 분말과 반응한 상태를 나타낸다.

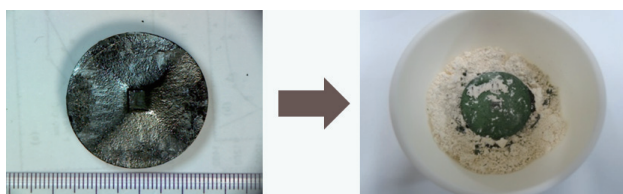


그림 2 Thermal diffusion $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconducting bulk

초전도체의 전이온도를 확인하기 위해 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크를 직육면체 형태로 만들어 MPMS(Magnetic Property Measurement System)를 사용하여 81~97 K 범위 내에서 초전도 벌크의 임계온도를 측정하였고, 임계전류 밀도의 측정에는 시편의 온도를 액체질소 온도로 하여 0~5 T까지의 자기장(H)을 인가하면서 초전도 벌크의 전류밀도를 측정하였다. 열처리중 중자 부근

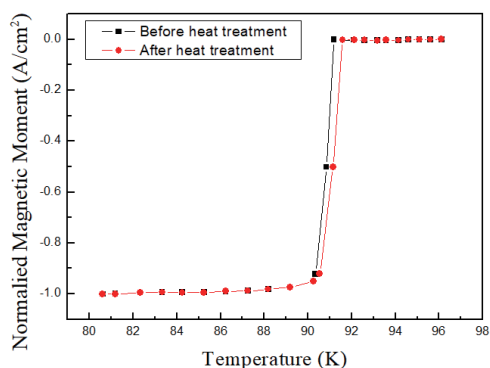


그림 3 Temperature curves of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconducting bulk before and after thermal diffusion treatment

에세라믹 분말 확산이 있을 수 있기 때문에, MPMS 측정용 초전도 벌크는 중자와 초전도 벌크의 가장자리 사이에서 시편의 표면으로 부터 3mm 떨어진 부근에서 초전도 벌크를 측정한다.

그림 3은 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 전이온도 측정결과이다. 그림에서 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계온도(T_c , onset)는 91 K 이었고, 세라믹 분말로 열 확산 처리를 수행한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계온도(T_c , onset)는 약 91.5 K 부근으로 전 시편의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크와 유사한 결과를 나타냈다. 본 결과는 열 확산을 실시함으로써 세라믹 분말 입자들이 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 격자 내부로 확산되어 미세조각이 치밀해져서 산소원자가 초전도 결정내부로 유입되기 어렵게 되어 초전도 전이온도의 변화는 나타나지 않은 것으로 판단된다.

세라믹 분말 열확산 처리 공정을 수행한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크로 MPMS를 통해 임계전류밀도를 측정하여 flux pinning 효과를 검토할 수 있다. 그림4는 열확산 처리 전, 후의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계전류 측정결과이다. 그림에서 자장이 증가할수록 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계전류밀도 J_c 는 감소하는 결과를 나타낸다. 0 T에서 세라믹 분말 열확산 처리를 수행한 초전도 벌크의 임계전류밀도(J_c)는 열확산 처리를 수행하지 않은 초전도 벌크의 J_c 에 비해 약 3배 정도 증가 하였고, 0 T ~ 3.5 T 사이의 자기장 영역에서의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계전류밀도 J_c 도 열확산 처리를 수행하지 않은 초전도 벌크의 J_c 에 비해 높게 나

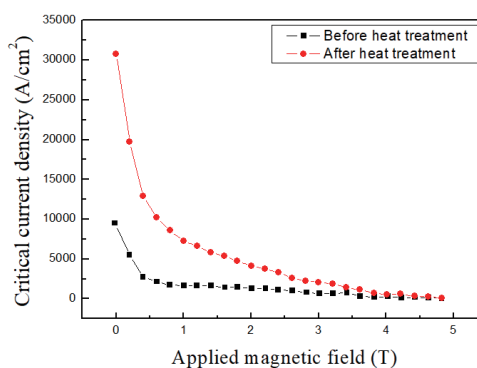


그림 4 J_c -B curves of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconducting bulk before and after thermal diffusion treatment

타났다. 이 결과는 세라믹 분말 열확산 효과가 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 임계전류밀도 J_c 를 향상하는데 기여하고 있음을 의미하고 있으며, 열 확산을 통하여 초전도 벌크 내부로 유입되는 세라믹 분말 입자가 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체의 표면 기공을 채우거나 자속고정점 역할을 수행하고 있는 것으로 판단된다. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 결정 내부에 포획되는 자력의 크기를 측정하고자 표면 자력 3.80 kG의 Nd-B-Fe 영구자석을 이용하여 초전도 벌크를 field cooling 상태에서 액체질소 온도까지 냉각시킨 다음 영구자석을 제거한 후 Hall probe로 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크 내부에 포획된 자력을 시도한다.

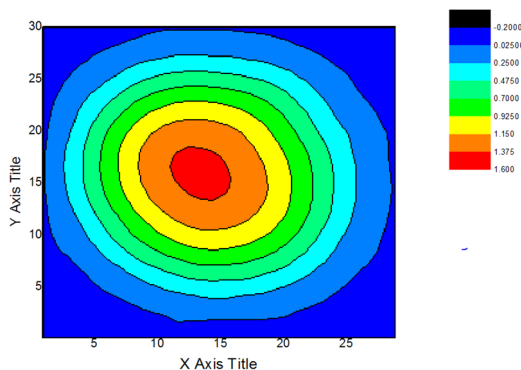


그림 5 Capture magnetic force of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconducting bulk after thermal diffusion treatment

그림 5는 세라믹 분말 열확산 처리를 수행한 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크를 자력냉각법으로 77 K에서 초전도 벌크의 표면에 대해 측정된 포획자력 분포이다. 세라믹 분말 열확산 처리된 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도 벌크의 결정형태를 추정할 수 있다. 초전도 벌크에 대해 측정된 포획자력 곡선의 특징은 포획자력 특성의 중앙에서 최대값을 가지며 동심원 형으로 외곽으로 갈수록 포획자력 값이 감소하고 있다. 이런 형태의 포획자력 곡선은 이 초전도 벌크들이 단결정 형태로 성장 되었음을 의미한다. 포획자력 측정 결과, 열확산을 수행한 초전도 벌크의 포획자력 최대값(H_{max})은 초전도 벌크의 중앙에서 비교적 높게 측정되며, 열확산 프로세스를 적용하면 초전도 물성이 크게 개선되어 초전도 벌크 자석에 적용이 가능한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구 결과는 고자장의 초전도 벌크 자석을 제작하기 전에 초전도 특성 향상을 기획하는 중

요한 프로세스의 일환으로도 제안 될 수 있다.

초전도 벌크 내부로 유입되는 플럭스 입자가 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체의 표면 기공을 채우거나 자속고정점 역할을 수행하고 있는 것으로 판단된다. 이 자료는 초전도체의 내 자장성을 향상시킬 수 있는 적절한 제조 방안이 검토되며, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 초전도체의 미세조직을 체계적으로 제어할 수 있으며, 고 자장에서 우수한 자기적 특성을 제시하는 초전도 자석 연구의 기초적인 자료로 충분히 활용될 수 있다.

[참고문헌]

- [1] H. K. Onnes: Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 120b, 122b, 124c, 1911.
- [2] F. C. Moon(ed.), Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation (Germany : John Wiley & Sons) (1994).
- [3] Murakami M, Oyama T, Fujimoto H, Taguchi T, Gotoh S, Shiogara Y, Koshizuka N and Tanaka S, Japan. J. Appl. Phys., 29 L1991, 1990.
- [4] Teshima H, Sawamura M, Morita M and Tsuchimoto M, Cryogenics, 37 505, 1997.
- [5] D. A. Cardwell, N. Haribabu, Physica C, 445-448 pp.1-7, 2006.
- [6] J. Hull, S. Hanany, T. Matsumura, B. Johnson and T. Jones, Supercond. Sci. Technol, 18 pp.S1-S5, 2005.
- [7] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujine, A. Chiba and K. Noto, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.13 pp.1592-1595 2003.
- [8] S. Nariki, N. Sakai, M. Matsui, M. Murakami, Physica C 378-381, 774-778, 2002.
- [9] W. Meissner and R. Oschenfeld, Naturwiss. 21, pp.787-788, (1933).
- [10] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev., 108, 1175, 1957.
- [11] G. Bednorz and K. A. Müller, Z. Phys. B, 64, 189, 1986.
- [12] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. K. Hor, R. L. Meng, L. Gao,

- Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett., 58, 908, 1987.
- [13] H. M. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys., 27, L209, 1988.
- [14] Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature, 332, 55, 1988.
- [15] V. L. Ginzburg, L. D. Landau, On Superconductivity and Superfluidity, pp 113-137, 2009.

저자소개**이상현(Sang Heon Lee)**

1989년 일본 TOKAI University

전기전자공학과 졸업

1994년 동 대학교 대학원 졸업(공학)

1994년 일본 ISTECSRL 책임연구원

1997년 선문대학교 전자공학과 교수

2015년~2016년 미국 University Southern
California 방문교수

현재 당 학회 전기의 세계 편집위원

주 연구분야: 전기재료, 초전도기기 등



수소-초전도 융합 기술 동향

Hydrogen-superconductivity fusion technology trend

하동우 센터장 | 한국전기연구원 초전도연구센터

Ha, Dong-woo | Korea Electrotechnology Research Institute

고락길 책임연구원 | 한국전기연구원 초전도연구센터

Ko, rock-kil | Korea Electrotechnology Research Institute



트럭과 같은 부하가 큰 상용차에서는 에너지의 밀도가 높고 가벼운 액체 수소를 연료로 사용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 기사에서는 한국전기연구원에서 개발 중인 액체 수소로 초전도 코일을 냉각시키고 연료 전지를 초전도 코일의 전원으로 사용하는 기술을 소개한다. 이 기술은 향후 작고 가벼우면서도 강력한 파워팩 또는 추진 장치를 개발하는 데 사용될 것이다.

Abstract

In a commercial vehicle with a heavy load, such as a truck, research to use liquid hydrogen, which has high energy density and is light, as a fuel is being actively conducted. This article introduces a technology that cools a superconducting coil with liquid hydrogen and uses a fuel cell as a power source for the superconducting coil, which is being developed by KERI. This technology will be used in the future to develop small, light yet powerful power packs or propulsion devices.

1. 서 론

수소경제(hydrogen economy)는 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 경제산업구조를 말한다. 즉 화석연료 중심의 현재 에너지 시스템에서 벗어나 수소를 에너지원으로 활용하는 자동차, 선박, 열차, 기계 혹은 전기발전, 열 생산 등을 늘리고, 이를 위해 수소를 안정적으로 생산-저장-운송하는 데 필요한 모든 분야의 산업과 시장을 새롭게 만들어내는 경제 시스템이다 [1]. 글로벌 자동차 및 에너지기업 등이 참여하는 수소위원회는 'Hydrogen, Scaling up (수소 시장의 확대)' 보고서를 통해 수소에너지가 2050년에 전 세계 에너지 수요량의 대략 20%를 담당하며 이를 바탕으로 이산화탄소가 매년 약 60억톤이 감축될 것으로 전망했

다. 또한 2050년까지 수소와 관련된 산업 분야에서 연간 3000 규모의 시장가치 유발효과 및 3,000만개 이상의 일자리 창출이 가능할 것으로 예측했다. 수소 수요는 지속적으로 증가하여 2050년에는 현재의 약 10배 이상 증가할 것으로 예측된다. 특히 2050년까지 수송부문은 전체 수소 수요에서 가장 큰 비중을 차지할 것으로 전망하고 있다. 즉 향후 수송용 연료전지가 연료전지 시장 성장을 주도할 것으로 전망하고 있다 [2].

현재 수소는 350bar 또는 700bar 수준으로 고압가스 형태로 저장하고 있으며, 향후 트레일러로 이송하는 가스의 압력을 높일 계획을 하고 있지만 보통 200bar 수준으로 이송하는 시스템으로 구축되어 있다. 이 정도의 고압가스 형태로 저장할 경우, 가스 용기가 무겁고 저장 밀도가 낮아 자주 이송해야 하는 문제점이 있

다. 그리고 무엇보다 고압이기 때문에 폭발할 위험이 높아 주민들이 충전소를 받아들이기가 쉽지 않은 실정이다. 이에 반해 액체수소는 1.3bar 정도의 낮은 압력에서 보관하여 안정성이 뛰어난 것뿐만 아니라 고밀도 상태로 저장하기 때문에 고압 수소에 비해 공간을 차지하는 면에서도 유리하다. 또한 이송 과정에서도 장점을 지니고 있다. 수소의 -253°C (20K)까지 냉각하는 액화 공정이 압축 공정에 비해 에너지가 더 많이 들기는 하지만 이후의 이송 공정에서 많은 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다. 즉, 하루 1,500 kg의 수소를 사용하는 충전소의 경우, 200bar의 고압 수소 트레일러가 하루에 3번씩 이송하여야 한다. 액체 수소를 이송할 경우에는 고압 수소에 비해 고밀도화가 가능하여 액체 수소 컨테이너가 일주일에 3번만 이송하면 되기 때문에 운송 효율이 무려 7배 이상 높기 때문에 경비를 많이 줄일 수 있는 장점이 있다.

또한 드론, 트럭, 선박, 기차 등의 모빌리티에서 수소 연료 용기를 포함한 부피와 무게 면에서 액체 수소가 고압 수소에 비해 2.3배 정도 유리하며, 2차 전지에 비해서도 훨씬 유리하다. 따라서 향후 부하가 크고 장거리 운전이 필요한 상용차와 장시간 운행을 필요로 하는 드론을 중심으로 액체 수소를 연료로 사용하고자 하는 개발이 활발히 진행되고 있다. 따라서 부하가 큰 상용차의 주행거리 향상을 위해 액체수소 적용이 예상되며 Hydrogen Council에 의하면 '25년부터 수소 상용차 시장이 형성될 것으로 전망하고 있다 [3].

따라서 이런 점을 고려하여 캐나다의 Emergen Research는 2027년까지 액체수소 시장의 세계적인 규모가 6조 원이 될 것으로 전망하고 있으며 [4], 우리나라에서도 2030년부터 액화 수소가 상용차 모빌리티에 사용되기 시작하면서 2040년에는 상용차 연간 35천 대가 생산될 것이며, 액체 수소 시스템은 5,200억원의 시장이 형성될 것으로 전망하고 있다 [5].

액체 수소 상태로 사용하는 것이 에너지 낭비가 줄어들고 공정과 비용 면에서 더 효율적이기 때문에 향후 수소의 사용량이 증가함에 따라 액체 수소가 차지하는 비중이 점점 더 높아질 것이다. 액체 수소의 온도는 약 20K로서 고온초전도 마그네틱 극저온 냉각제로 이용할 수 있다는 장점이 있다. Self field가 작은 초전도 케이블에서는 77K의 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있으나, 마

그넷 응용에서는 발생하는 자기장 때문에 40 K 이하의 온도가 필요한 조건을 만족시키지 못한다. 액체 수소를 사용하면 30K~40K 범위의 온도에서 고온초전도 마그네틱을 냉각시킬 수가 있어 초전도 코일의 성능을 충분히 발휘할 수 있게 된다. 그리고 기화하는 수소 가스는 연료 전지에서 전기를 생산하는 데 사용할 것이다. 일반적으로 초전도 냉각에 사용되는 헬륨의 가격이 지속적으로 상승하거나 불규칙한 공급 때문에 최근에 헬륨 사용에 많은 제약이 있어 왔으며, 이를 대체할 극저온 냉매가 요구되고 있다. 그리고 네온은 헬륨보다도 더 비싼 가격 때문에 경제적이지 못하다.

2. 액체 수소를 초전도 마그네틱 냉각재로 활용

액체 수소에 의한 초전도 코일의 직접 냉각은 수소 가스 누출에 의한 발화 위험성이 있을 수 있으므로 액체 수소 내에 헬륨 가스를 충전한 열교환기를 이용하여 차가운 헬륨 가스로 초전도 코일을 냉각시키는 간접 액체 수소 냉각을 고려하고 있다. 그림 1처럼 액체 수소에 채워진 극저온 용기로부터 열 교환기를 통해 헬륨 루프를 통해 초전도 자석을 냉각시킬 수 있다.

연료 전지(FC; Fuel Cell)는 산화 환원 반응을 통해 연료의 화학 에너지를 전기로 변환할 수 있는 전기 화학 에너지 변환기이다. 단위 전지의 전압은 일반적으로 개방 회로에서 1V에 가깝고 공칭 발전 조건에서는 0.6V 정도이다. 연료 전지는 본질적으로 저전압 소스이므로 대부분의 실제 응용 분야에서 사용하기 위해서는 전력 변환기를 사용하여 전압을 일반적인 응용 수준으로 높이고 있다. 그런데 초전도 코일은 낮은 전압과 높은 dc 전류 공급을 필요로 하고 전원의 전류 리플이 낮아야 하는 특성 때문에 연료 전지를 직접 직류 전원으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 따라서 전원이 공급되지 않거나 이동하는 상황과 같은 전류 공급이 곤란한 환경에서도 연료 전지가 자체 발전의 기능과 정밀 전원의 기능을 모두 할 수 있다는 것이다. 실제로, 저전압과 수소 유량을 통해 전류를 제어할 수 연료 전지의 가능성을 이용하는데, 특히 초전도 코일은 고분자 전해질 연료 전지 (PEMFC)의 느린 동력 특성 과도 잘 어울린다. 그리고 초전도 코일 및 선재에서의 손실은 가변 전류에 대해서도 발생하므로 가능한 한 느리게 변화하는 것이

좋다. 따라서 연료전지의 이와 같은 특성은 초전도 코일의 전원으로 사용할 수 있는 것으로 판단하였으며, 액체 수소로 냉각한 초전도 코일에 연료 전지 전원으로 직류를 인가하는 수소-초전도 융합 기술을 이용하면 궁극적으로는 소형의 독립적인 추진 장치를 개발할 수 있을 것이라는 목표를 가지고 한국전기연구원에서 연구를 수행하였다.

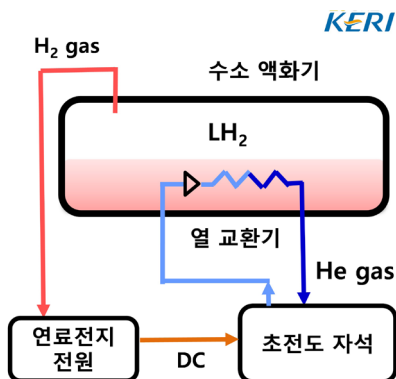


그림 1 액체 수소 냉각 초전도 코일 및 연료전지 전원

3. 수소 액화기 제작

수소 액화에 대한 연구와 수소 액화기를 설치하는 사업이 국내에서 많이 진행되고 있으나 액체 수소를 볼 수 없는 것이 현실이다. 즉, 응축형 수소 액화기에 의한 소량 수소 생산은 대부분 드론 시험 비행에 사용되면서 지속적인 액체 수소 공급이 이루어지

지 않고 있다. 그리고 대기업을 중심으로 한 대량 액체 수소 생산 방식인 터보 확장기(Turbo Expander)에 의한 수소 액화기는 선진국의 기술에 의존하고 있을 뿐만 아니라 현재 설치 공사 중이어서 액체 수소를 사용할 기회가 없다. 또한 액체 수소를 이송하는 법규도 제대로 갖추어져 있지 않아 현실적으로 액체 수소를 이송하기에 어려움이 많다. 이러한 상황 때문에 한국전기연구원 초전도연구센터에서는 응축형 수소 액화기를 직접 제작하기로 하였고, 초전도 코일을 냉각하는 데 초점을 맞추었기 때문에 액체 수소의 장기 보관 기술을 개발하고자 하였다.

그림 2는 본 기관에서 설계한 수소 액화기 및 이를 이용한 초전도 코일의 냉각 장치의 도면을 나타내고 있다. 한국전기연구원에서는 헬륨의 액화와 네온의 액화 등의 경험과 기술이 있기 때문에 수소 액화 공정에 쉽게 접근할 수 있었다. 다만 수소는 상온에서 20K 액화 온도까지 내리는데 다른 가스에 비해 엔탈피가 크기 때문에 냉동기만으로는 부하를 감당하기 어렵기 때문에 액체 질소를 사용하여 예냉 과정을 거쳐야 한다는 점과 수소의 상전이 현상을 이해하고 축매에 의한 상전이가 잘 이루어지도록 해야 한다는 것을 고려하였다. 상온의 수소는 ortho 대 para의 비율이 75:25 이지만 77K에서는 50:50, 20K에서는 99.8%가 para 구조로 존재한다. ortho에서 para로 상전이는 발열 반응이며, 축매가 없으면 상전이가 잘 진행되지 않기 때문에 수소를 액화시키더라도 상전이가 완전히 이루어지지 않으면 액체 수소를 장기간 저장하

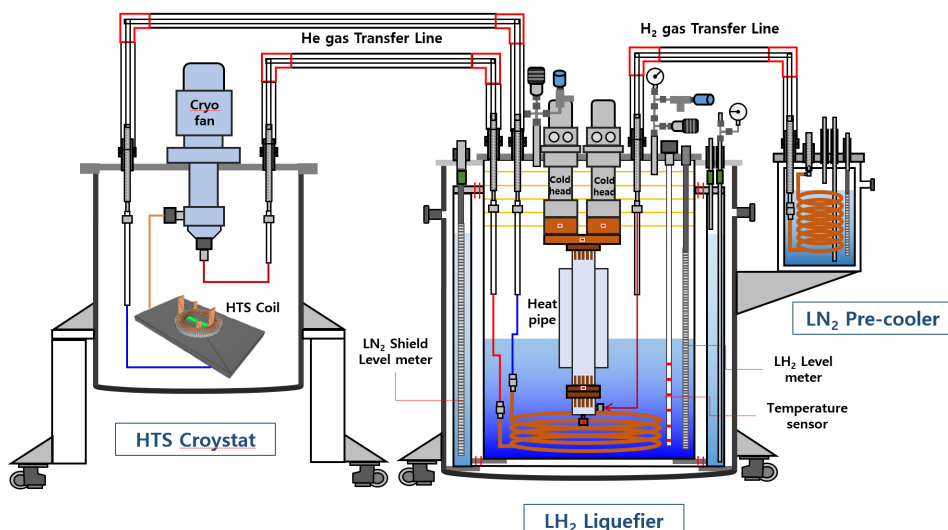


그림 2 수소 액화기 및 초전도 코일 냉각장치 도면

는 과정에서 상전이에 의한 발열 반응에 의해 액체 수소가 기화하여 쉽게 증발하게 된다.

본 수소 액화기에는 Cryomech 사의 AL325 극저온 냉동기 2대를 사용하였다. 사양에는 20K 온도에서 40W의 냉동능력을 나타내나, 본 장비는 이미 많이 사용하던 것이어서 약 36W의 냉동능력을 가진 것을 확인하였다. 플랜지에 2 대의 cold head를 설치하고 챔버 내부에서 함께 연결하는 구조로 만들었고 아래에는 열교환기인 히트 파이프를 연결하였다. 이중 진공 구조의 액체 수소 저장 용기의 내조는 슈퍼 인슐레이션인 MLI(Multi Layer Insulation)를 여러 겹 감아서 단열하였으며 플랜지 아래의 baffle도 MLI로 단열 성능을 높였다. 액체 수소 조의 온도 및 액체 수소의 수위를 측정하기 위해 극저온 온도 센서와 액체 수소 레벨계를 장착하였다.

300K의 가스 수소가 20K의 액체 수소가 되기 위해서는 4,461.3 J/g의 에너지(엔탈피)를 제거해 주어야 하며, 300K에서 77K까지의 엔탈피는 3,185.2 J/g이나 차지하기 때문에 액체 질소의 역할이 중요하다는 것을 알 수 있다. 본 장치에서는 상온의 수소가 수소 액화기로 들어가기 전에 액체 질소 예냉 장치를 거쳐서 지나가도록 설계하였다. 이중 진공 구조의 예냉 장치에는 수소가 흘러갈 수 있게 구리 튜브가 설치되어 있으며 구리 튜브가 액체 질소에 잠기는 구조의 열교환기로 제작하였다. 이때 구리 튜브 내에 산화철계의 촉매를 넣어 온도가 내려가면서 상전이라도 동시에 진행될 수 있도록 하였다.

초전도 코일을 냉각시키기 위해서 액체 수소조 내에 헬륨 가스가 순환하면서 차가워질 수 있는 구조의 열교환기를 설치하였다. 차가운 헬륨 가스가 초전도 코일 아래에 있는 구리판 열교환기를 거치면서 구리판의 온도를 내릴 수 있는 구조로 제작하였으며, 초전도 코일은 구리판 위에 전기적으로 절연하면서 열적으로는 전도도가 좋은 물질이 위치하게 하였다. 헬륨 가스 순환 장치에 극저온 팬을 설치하여 헬륨 가스의 압력과 유량을 조절할 수 있도록 설계하였으며, 차가운 헬륨 가스의 순환으로 초전도 코일의 온도를 내리도록 하였다.

그림 3은 한국전기연구원에서 제작한 응축형 수소 액화기를 나타내고 있다. 극저온 냉동기 2대를 사용한 플랜지로 구성된 콜

드 박스에는 각종 온도 센서, 압력 센서, 유량계 및 극저온 수위계를 장착하였다. 그리고 이들 신호를 모니터를 거쳐 컴퓨터에서 랩뷰를 사용하여 가스 콘트롤의 왼쪽에 DAQ 시스템을 구축하였다. 그리고 오른쪽에 냉동기의 콤프레서 2대가 배치되어 있다. 수소 액화기의 액체 수소 생산량은 3.2 l/h 정도임을 확인하였다.



그림 3 한국전기연구원의 수소 액화기

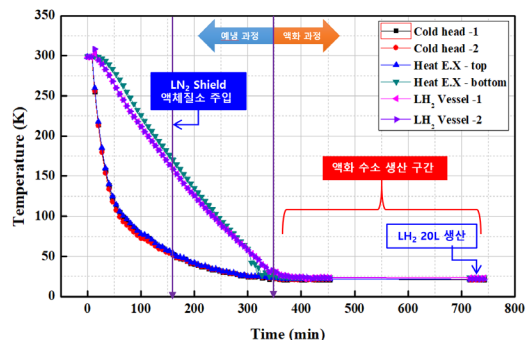


그림 4 수소 액화기의 초기 냉각 과정 및 액체 수소 생산 과정에서의 온도 변화

그림 4는 수소 액화기의 초기 냉각 과정과 액체 수소가 생산되는 과정에서의 온도 변화를 나타내고 있다. 수소 가스를 채운 열교환기인 히트 파이프와 액체 수소 조의 온도가 냉동기를 가동하면서 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 콜드 헤드 부분의 온도가 먼저 떨어지고 챔버의 온도는 일정하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 챔버의 온도를 낮추는 과정에서 액체 질소 쉴드층의 냉각을 위해 150분이 경과한 시점에 액체 질소를 주입하였다. 300분이 경과한 시점부터 히트 파이프의 작동이 원활하게 이루어지기 시작하여 약 350분이 경과한 시점부터 액체 수소가 생산되는 것을 알 수 있었다. 액체 수소가 만들어져 액체 수소조의 바닥부터 차기 시작하

는 것을 온도 센서와 액체 수소 수위계를 통해서 알 수 있었으며 740분이 경과한 때에 20리터의 액체 수소가 생산된 것을 확인하였다. 단위 시간당 액체 수소의 생산량은 히트 파이프의 수소 충전 양과 챔버로 보내는 수소 가스 양에 따라 변하게 되는 데 지속적인 연구를 통해 최적의 생산 조건을 찾아가고 있다.

그림 5는 극저온 냉동기의 on-off 제어에 의한 액체 수소의 증발량을 없앨 수 있는 Zero Boil Off 공정을 나타내고 있다. 본 액화기는 2 대의 콜드 헤드 that 설치되어 있으며 냉동기를 2대 혹은 1대만 가동하여 액체 수소 생산량을 조절할 수 있도록 하였다. 여기에 더해 수소 가스가 공급되지 않는 상태에서 냉동기 2대를 on-off 제어하면서 기화하는 수소 가스를 재액화하는 공정을 개발하여 액체 수소조 내의 침입 열에 의한 액체 수소의 증발량을 제로로 유지할 수 있는 기술을 개발하였다. 이 기술은 액체 수소를 장기간 보존할 수 있는 기술로 현재 한국전기연구원에서 유일하게 보유하고 있다. 현재, 수소 액화기를 이용하여 그림 2에서의 극저온 팬(Cryo-blower)과 열교환 장치로 구성된 초전도 코일 냉각 장치를 제작 중인데, 2022년에 액체수소 냉각에 의한 초전도 코일을 선보이게 될 것이다.

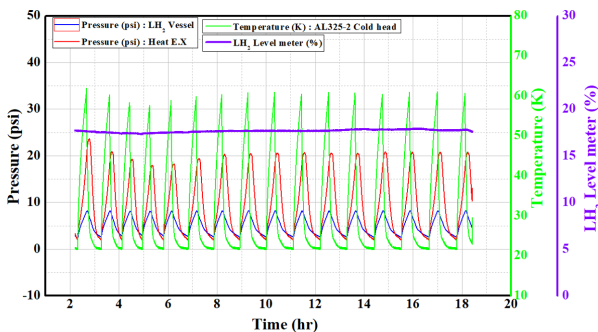


그림 5 냉동기 on-off 제어에 의한 증발양제로 운전 과정에서의 온도 및 수위 변화

4. 초전도 코일 전원용 연료 전지

연료 전지를 초전도 코일용 직류 전원으로 활용하기 위해 고분자 전해질 연료 전지(PEMFC)를 제작하였다. 그림 6에 100 cm²의 멤브레인에 촉매를 접착시킨 전극합체(MEA)를 직접 제작하여 만든 단위 전지를 나타내고 있다. 연료 전지의 저전압 대전류

발생 특성이 초전도의 전기 저항 제로 특성과 잘 어울리기는 하지만 일반 전원처럼 전류 상승 속도를 조절할 수 있어야 한다. 이를 위해 연료 전지에 흘리는 수소의 양과 산소의 양을 잘 조절하여야 원하는 상승속도의 전류 출력 곡선을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 수소와 산소의 유량 제어 실험을 통해 원하는 전류인가 속도로 60A까지 초전도 코일에 dc 전류를 흘릴 수 있었으며, 이 결과를 그림 7에 나타내었다. 초전도 코일에 인가하는 전류의 크기에 비례하여 초전도 코일에서 발생하는 자기장의 값이 증가하였다. 이러한 연구 결과는 향후 모빌리티 장치의 전원 및 추진 장치로 응용할 수 있다는 가능성을 보였다.

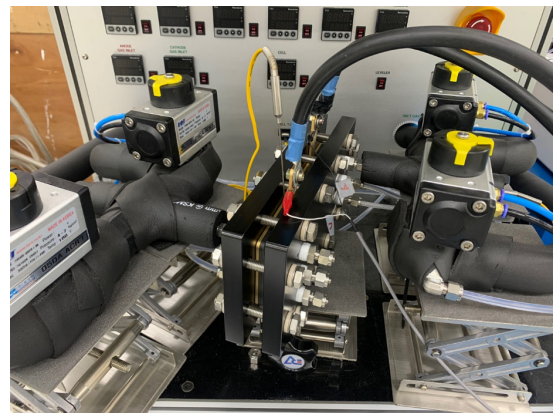


그림 6 100 cm² MEA 크기의 PEMFC 단위 전지

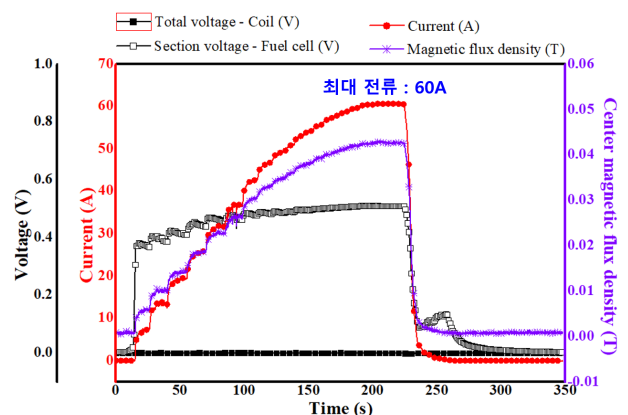


그림 7 초전도 코일에 60A dc 전류 인가 및 자기장 발생

5. 결 론

고온초전도 케이블은 self field에 의한 특성 감소 영향이 작아

서 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있지만 마그넷 응용을 위해서는 40K 정도로 온도를 낮추어야, 더 큰 전류를 흘려 원하는 정도의 자기장을 발생시킬 수 있다. 액체 수소는 네온이나 헬륨에 비해 값이 싸기 때문에 냉각 비용을 크게 낮출 수 있는 장점이 있으나, 연소성 가스이기 때문에 안전에 매우 유의하여야 한다. 안전성을 확보하기 위해 액체 수소조 내에 헬륨 가스 열교환기를 장착하여 초전도 코일을 냉각시키는 기술 동향과 연료 전지를 초전도 코일의 전원으로 응용하는 기술을 소개하였다. 수소 액화기의 액체 수소 생산량은 3.2 l/h 였다. 본 수소 액화기에 냉동기의 on-off 제어기술, O-P 상전이 촉매 기술, 77K 쉘드층 기술 등 액체 수소의 장기 저장 기술을 적용하여 향후 안정적으로 초전도 코일을 냉각할 수 있는 기술을 개발하였다. 이러한 수소-초전도 융합 기술은 현재 초전도의 냉각 비용의 한계를 극복하여 향후 초전도 마그넷의 활용 가능성을 높였다.

[참고문헌]

- [1] 대한민국 정부, 수소경제 활성화 로드맵 발표(2019년)
- [2] MaKinsey & Company, Hydrogen Insights, Feb. 2021
- [3] Hydrogen council, Hydrogen Insights 2019, 2019
- [4] Emergen Research, Green Hydrogen Market by Region Forecast to 2028, 2017
- [5] 대한민국, 한국 미래 자동차 산업 발전 전략 (2019년)

저자소개

하동우(Ha, dong-woo)

1985년 경북대학교 금속공학과 졸업
 2001년 연세대학교 대학원 졸업(공학)
 1987년~현재 한국전기연구원 초전도연구센터 센터장
 2004년~2005년 미국 NHMFL 방문연구원
 현재 당 학회 평의원
 주 연구분야: 초전도, 수소, 연료전지 등



고락길(Ko, rock-kil)

2011년 부산대학교 물리학과 박사수료
 1997년~현재 한국전기연구원 초전도연구센터 수소에너지TFT 팀장
 현재 당 학회 평의원
 주 연구분야: 초전도, 수소, 연료전지 등



한국의 초전도 전력기기의 동향

Status of HTS Power Apparatus in Korea

조전욱 책임연구원 | 한국전기연구원
 양형석 수석연구원 | 한국전력 전력연구원
 류철휘 초전도팀 차장 | LS Cable & System
 김민지 책임연구원 | LS ELECTRIC



요약

본 특집에서는 우리나라에서 연구개발을 진행하고 있는 초전도전력기기 중 초전도케이블 시스템 및 초전도한류기에 대한 세계적 수준의 개발 성과 및 사업화 현황과 전망에 대하여 소개한다.

Abstract

In this special feature, the world-class development achievements and commercialization status and prospects for High Temperature Superconducting cable systems and High Temperature Superconducting current limiters are introduced among HTS power apparatus that are being research and development in Korea.

1. 서론

전기는 항상 인류와 함께 존재해 왔지만 이를 산업적으로 이용하기까지는 불과 200년이 채 되지 않았으며, 20세기 이후 전력 전송 방식에 대해 에디슨과 테슬라에 의해 촉발된 소위 전류전쟁(Current war)은 아직도 진행 중이다. 현재는 대부분 전력 계통에서는 막대한 송전 손실을 감수하면서도 변성(Transformation)이 용이한 교류송전 방식을 채택하고 있으며, 수 GW급의 대용량 송전 또는 장거리 계통 연계에서는 직류송전 방식을 채택하고 있지만 점차 직류송전 방식의 비중이 확대되고 있는 상황이다.

만약 교류송전시스템 중 이러한 송전손실을 획기적으로 줄여 장거리 송전이 가능하게 하고, 전자기장 발산을 막을 수 있는 시

스템이 존재한다면 어떨까? 이에 대한 해답이 바로 초전도케이블 시스템에 있다. 초전도케이블 시스템은 일반 케이블의 구리나 알루미늄과 같은 도전성 금속 대신 초전도체를 도체로 사용하는 케이블시스템이다.

초전도체를 전력시스템에 적용하면 일반 케이블에 비해 극히 작은 손실만으로 장거리 송전이 가능하고(초전도케이블), 전기에 에너지를 저장할 수 있으며(SMES, Flywheel), 기존 도체로는 발생시킬 수 없는 큰 자기장 특성을 이용한 의료 설비(MRI, NMR)을 만들 수 있다. 또한 한발 더 나아가 자기부상열차, 초전도추진 항공기 및 선박 등의 차세대 수송시스템 또는 핵융합 발전(TOKAMAK) 및 양자컴퓨터 등 그 산업적 응용 분야가 무궁무진하다.

이와 같이 초전도는 생각보다 인류 기술의 전반에 걸쳐 그 응

용 분야가 집중 연구되고 있으며 그 일부는 이미 상용화되어 우리의 곁에 존재하고 있다.

특히 초전도 전력기기 분야는 타 분야에 비해 인류에 미치는 파급 효과가 크기 때문에 그 시장 잠재력을 바탕으로 급속한 발전을 이루어 왔고, 그 중 가장 괄목할 만한 성과는 초전도케이블 시스템에서 찾을 수 있다. 초전도케이블시스템은 일반 상전도 케이블에 비해 저전압으로 고효율의 전기를 대용량으로 송전할 수 있는 친환경적인 차세대송전시스템으로서 현 전력 계통에 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 무궁한 잠재력과 파급효과를 가지고 있다.

우리나라는 1990년대 초부터 저온초전도도체를 이용한 초전도케이블, 초전도에너지저장장치(SMES) 등 초전도전력기기의 연구를 진행하였으나 액체헬륨의 사용에 따른 운전비용, 시스템의 복잡성 등으로 실용화 연구보다는 기초적인 연구가 진행되었다. 그러나 고온초전도재료의 발견과 함께 2001년부터 21세기 프론티어 사업 중 “차세대 초전도 응용기술 개발사업”에 의하여 초전도전력기기에 대한 연구 개발이 본격적으로 시작되었다. 차세대 초전도 응용기술 개발사업에서 2세대 고온초전도선, 초전도 전력케이블, 초전도 한류기, 초전도 전동기, 초전도 변압기 등의 초전도 전력기기 개발을 진행하였다.

2001년 사업의 시작 시점 초전도 전력기기에 대한 우리나라 수준은 미국, 유럽연합, 일본 등 초전도 연구의 선진국에 비하여 평균적으로 선진국의 70~80% 수준이라고 평가되었지만, 현재 초전도선, 초전도케이블, 초전도한류기 등은 세계 최고 수준의 기술력을 확보하는데 성공하여 이 분야에서 기술을 선도하고 있다고 할 수 있다.

본 특집에서는 세계적 수준의 한국의 초전도 케이블 시스템 및 초전도한류기의 개발 성과 및 사업화 현황과 전망을 소개한다.

2. 초전도 케이블 시스템

가. 초전도케이블 시스템의 연구 개발

한국의 초전도케이블 시스템은 21C 프론티어 사업을 시작으로 한국전력 및 LS전선의 적극적인 투자와 산학연 협력의 연구개발을 통해 세계 최고 수준에 도달하였다. 또한 초전도 케이블의 장선화 기술이 확보되면서 기존의 변전소를 소형 개폐소로 전환하여 운영할 수 있고, 변전소의 신설을 억제할 수 있으며, 나아가서는 초고압의 대용량 가공 선로를 대체할 수도 있다. 이와 같은

장점은 전력 설비에 대한 국민적 우려를 극복하여 사회적 수용성을 높이고 국민 편익을 증대하는데 기여할 수 있으며, 미래의 국가 간 핵심 경쟁 기술 중 하나인 에너지 전력망 사업에도 큰 도움을 줄 것이라 예상된다.

현재까지의 기술 개발 성과를 통하여 초전도케이블시스템은 지중 매설이 어려운 도심에 별도의 토목 공사 없이 기존의 전력구나 관로를 활용하여 기존 케이블을 대체함으로써 전력 공급량을 몇 배로 증가시킬 수 있으며, 중장기적인 측면에서 기존의 변전소 신설을 억제함으로써 토지 사용을 최소화하고, 낮은 운영 및 유지 보수비용으로 효율성을 높일 수 있다는 큰 기술적 진보를 이루었다.

이러한 초전도케이블시스템의 장점을 바탕으로 미국, 유럽, 일본, 중국 등을 중심으로 초기 상용 사업이 기획 또는 진행되고 있으며, 한국에서도 한국전력을 중심으로 관련 사업이 기획되고 있으며, 이미 세계 최초로 초전도케이블 상용 선로가 운영되고 있다. 이와 같은 초전도케이블시스템의 상용화는 21세기 전력 분야의 핵심 화두인 저탄소 녹색 성장 및 스마트 그리드의 연장선상에 있으며, 특히 전력 전송 분야에서 고효율, 저손실, 대용량, 장거리 송전을 위한 핵심 기술로 각광받고 있다.

초전도케이블시스템은 그림 1과 같이 크게 케이블시스템과 극저온 냉각시스템으로 구성되어 있다. 세부적으로 케이블시스템은 전력 수송을 담당하는 초전도케이블과 케이블 간을 연결하는 중간접속함 그리고 전력차단설비 또는 가공선로 등의 외부 전력기기와 케이블 간을 연결하는 종단접속함 등으로 구성되어 있으며, 극저온냉각시스템은 냉각 방식에 따라 차이는 있으나 액체 질소 냉각설비, 압력제어설비, 상태감시설비 및 제어시스템 등으로 구성되어 있다.

초전도케이블시스템 개발 프로그램은 교육과학기술부의 ‘21C 프론티어 연구개발 사업’의 일환으로 2001년부터 진행된 ‘차세대 초전도 응용기술 개발사업’인 DAPAS (Development of Ad-

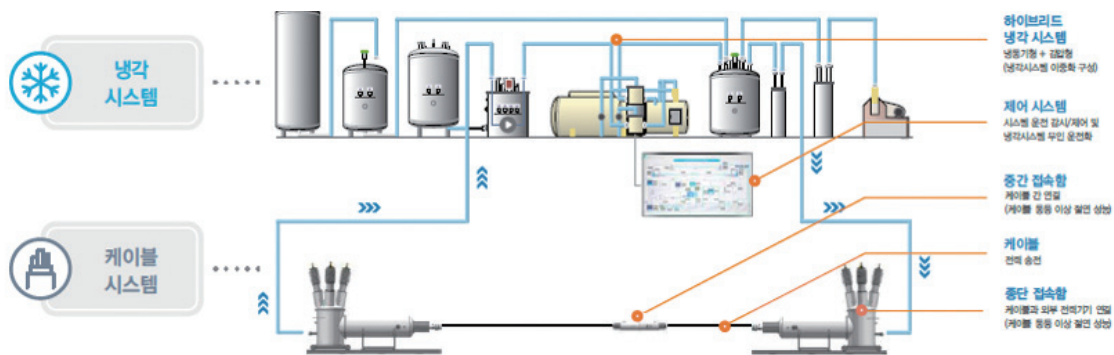


그림 1 초전도케이블시스템의 구성

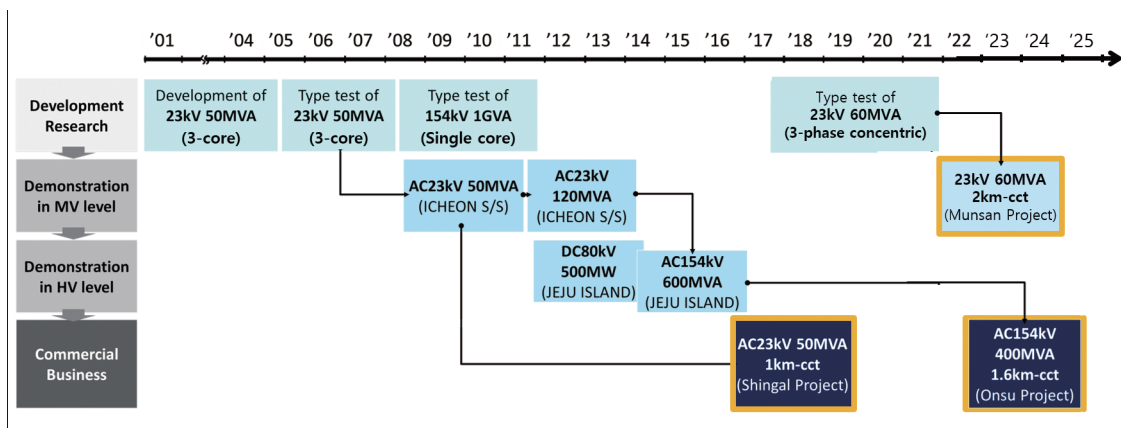


그림 2 한국 초전도 연구 개발 사업 및 상용 사업 진행 현황

vanced Power Apparatus by applying Superconductivity) 사업으로서 본 연구에는 한국전기연구원, 한국전력연구원, 한국기계연구원, 한국기초과학지원연구원과 대학 및 LS전선, 서남 등과 같은 산업체들이 공동으로 참여하여 2011년까지 총 10년간 3단계로 나뉘어 진행되었다.

본 프로젝트의 1단계 사업을 통해 2004년 23kV 급 초전도 전력케이블을 개발하였으며, 이는 세계적으로 미국, 일본에 이은 3번째의 성과였다. 뒤 이은 2단계에서 2005년 미국에 이어 세계 2번째로 초전도케이블의 장기 실증테스트를 통과했으며, 초전도케이블 개발 이후 약 1년간 케이블의 기본 성능 테스트와 이상 전압, 전류 상태에서의 장시간 통전 시험, 극저온과 상온 간의 온도 변화에 대한 제품의 구조적 충격 정도를 검증하는 열충격 시험 등을 진행되었다.

당시 개발에 성공한 초전도케이블은 이상 전압에서도 안정적

인 송전능력을 보유하고 있었으며, 액체 질소 투입 시 발생하는 기계적 열충격으로 인한 극저온 냉매의 누설이나 전기적 문제 등이 전혀 발생하지 않아 장기 실증테스트를 통과할 수 있었다.

2007년에는 한국전력의 고창전력시험센터에서 교류 23kV 50MVA 초전도케이블 100m와 중간 접속함을 설치하여 해외공인시험을 완료하여 세계 최초로 국제 인증을 받는데 성공하였다. 당시에는 초전도케이블시스템의 인증시험 관련 국제규격이 제정되지 않은 상태였으며, 국내 기술과 연구 경험으로 초전도케이블 평가규격(안)을 정립하여 국제 공인 인증기관 및 IEC 위원회에 제안하는 등 초전도 케이블 관련 규격 제정의 활성화에 이바지 하였다.

본 프로젝트의 마지막 3단계에서는 2008년 제품의 신뢰성 확보를 위해 극저온 및 상온 상태에서의 제품 구조 및 성능을 검증하는 장기신뢰성 시험인 열충격 시험을 총 6회 실시하였다. 케이

블 수명을 30년으로 볼 때 상온 및 극저온간의 열충격 시 열수축/팽창에 의한 기계적 스트레스가 약 3회 정도 있을 것으로 예상되어 이보다 심한 수준의 시험 조건을 통과하였다. 이와 더불어 일반 케이블의 송전 용량의 4배에 달하는 AC154kV 1GVA급 대용량 초전도 케이블시스템의 개발에도 성공하였다.

또한 한국전력과 LS전선은 ‘차세대 초전도 응용기술 개발사업’ 성과 중 일부인 AC23kV 50MVA급 초전도케이블시스템의 실계통 실증 및 동일 전압에 기존 개발품의 2.5배에 달하는 송전용량을 가지는 120MVA급 시스템의 개발과 실계통 실증을 위한 두 번째 정부지원과제를 2008년부터 2013년까지 5년 간 진행하였다. 우선 AC23kV 50MVA급 시스템의 실계통 실증을 위해 그림 3과 같이 2010년 한국전력의 경기도 이천 변전소에 410m의 시스템이 설치되어 준공시험을 통과하였다.

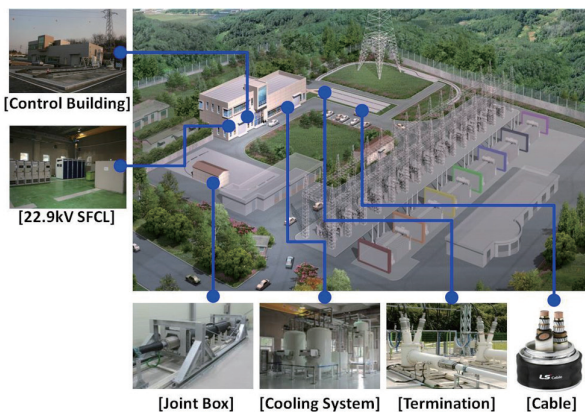


그림 3 AC23kV 50MVA 초전도케이블시스템 실계통 실증

본 시스템의 실증은 여러 가지 큰 의미를 갖는다. 우선 앞서 소개한 바와 같이 실계통 실증에 적용된 시스템은 당시 세계 최장 선로임과 동시에 세계 최초로 케이블 간을 연결하기 위한 3상 일괄형 중간접속함이 설치 적용되었다. 또한 가장 주목할 만한 성과는 단일 제조사에서 케이블시스템을 비롯한 냉각시스템, 제어시스템 등을 일괄 설치하여 준공에 성공한 세계 최초의 사례였다는 것이다. 특히 20 여개월간 무사고 운전 실적을 바탕으로 우리나라의 기술력을 전 세계에 증명하는 계기가 되었다. 특히 실증 기간 중 12개월간 무인화 운전이 성공함으로써 우리나라에서도 초전도케이블 상용화를 위한 본격적 첫 걸음을 내딛는 계기가 되었다.

이후 2012년부터 AC23kV 120MVA급의 개발에 착수하여 2013

년 100m의 실증 선로를 50MVA와 동일하게 이천변전소에 설치하고 무사고 운전이 성공함으로써 최고의 기술력을 확보하였다.

2011년부터는 지식경제부 지원 하에 ‘송전급 초전도케이블 시스템 실계통 적용기술 개발’ 사업에 착수하여 2016년 10월 사업을 성공적으로 완료하였다. 본 사업은 DC80kV 500MW급과 AC154kV 600MVA급 초전도케이블시스템의 개발 및 실계통 실증이 주목적이었으며, 사업을 통해 한국전력과 LS전선은 2013년에 세계 최초로 직류 초전도케이블시스템의 인정시험을 성공하였고 실계통 적용을 위해 제주도 한림읍 금악리에 위치한 초전도 실증단지인 ‘제주초전도센터’에 500m 선로를 설치하였다.

시스템은 DC80kV 가공선로 및 변환설비와 연결되어 2014년 11월부터 실계통 운전을 시작하였으며 2개월 동안 실계통 상에서 쌍극(Bi-pole) 운전이 성공하였다. 또한 2015년 5월 한국전력의 고창전력 시험센터에서 AC154kV 600MVA급 초전도 케이블시스템의 형식시험에 성공하였다. 그림 4와 같이 ‘초전도제주센터’에 송전급 세계 최장 길이인 1 km의 선로를 설치하여 2016년 10월까지 실계통 실증을 실시하였다.

또한 이 사업에서 세계 최고 용량의 기계식 냉각시스템을 자체 구성하여 안정적 운전 실적을 확보하였다. 이와 같은 연구 개발의 노력을 통해 우리나라는 교류와 직류케이블시스템의 기술력 뿐 아니라 냉각시스템을 포함한 상용 프로젝트를 Turn-key 수행할 수 있는 역량을 확보한 세계 유일의 국가가 되었다.

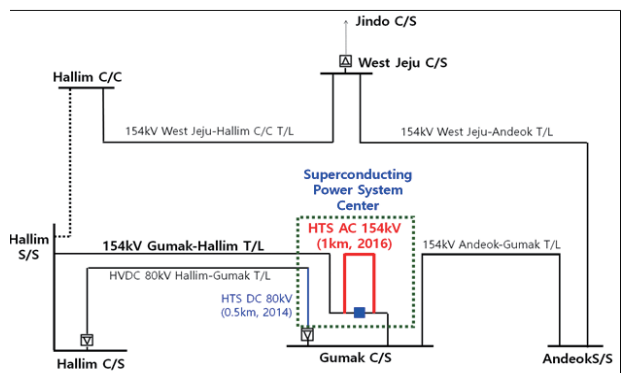


그림 4 DC80kV 500MW 및 AC154kV 600MVA 초전도케이블시스템 실계통 실증 계통도

나. 한국의 초전도케이블 시스템 사업 모델 구축 및 사업화

초전도케이블시스템 기술은 세계적으로 한국, 미국, 일본, 독일

4개국이 선도하고 있는 고부가가치의 미래 핵심 기술 분야이며, 전력 송전 분야 전반에 걸쳐 새로운 계통 연계 패러다임을 제시하고 있는 기술 중 하나로서 대용량 부하를 충족하기 위해 고효율로 안정적인 전력 공급을 할 수 있고, 나아가 전력 계통 간 대용량 송전 등에 핵심적 역할을 할 수 있는 차세대 송배전 기술로서 에너지산업에 이끔 혁신적인 기술임에 틀림없다. 특히 유럽에서는 국가 간 계통 연계 또는 대도시 내 전력계통 강화를 목적으로 상용 사업이 진행되고 있다. 이에 한발 앞서 우리나라는 그 약 20년간의 선행 연구 개발 사업을 축적된 기술력을 바탕으로 세계 시장 진출에 박차를 가하고 있으며, 세계 시장 선점을 위한 첫 걸음으로서 그림 5와 같이 AC23kV 50MVA급 시스템의 실계통 실증 성공 이후, 2016년 한국전력을 중심으로 세계 최초의 초전도케이블 상용 사업에 착수하여 2019년 7월에 준공 완료하였으며 현재까지 실제 계통에서 무사고 운전 중이다. 이 세계 최초의 상용 사업은 AC 154kV 신갈변전소와 홍덕변전소의 23kV 모선 간에 1km 길이의 동일 전압 초전도케이블시스템을 설치 운영하는 사업으로서 대용량 초전도케이블을 계통에 적용함으로써 안정적 부하 공급 확대를 위한 도심 내 추가 변전소 건설을 억제함은 물론 초전도케이블의 사업성을 증명하는 시험 무대가 되었다. 더불어 본 사업을 통해 한국전력은 첨단 산업 육성을 위해 국내기업 간 상생협력과 동반성장을 이끌어 그 사업적 더 크다고 할 수 있으며, 특히 2020년에 IEA (International Energy Agency, 국제에너지기구)에 세계 최초의 초전도케이블 상용 사업으로 기록되어 세계적으로 우리나라의 첨단 전력 사업의 위상을 높이는 기회가 되었다.

한국전력은 신갈 사업에 이어 세계 최초의 초고압 초전도케이블 상용 사업을 추진 중이다. 이 사업은 도심의 간일 계통 보강을 위해 양 변전소 간의 지하 전력구에 상전도케이블 2회선 대신 대용량의 초전도케이블 1회선을 설치하는 사업으로서 기존 도심 전력구 내 회선 증설 여력을 확보하여 추가 전력구 건설을 억제하는 등 증설 사업비를 감축하고 사업 기간을 대폭 단축할 수 있어 상전도케이블 대비 초전도케이블의 또 다른 모델이 될 것으로 전망된다.

또한 한국전력은 2021년 11월에 AC 23kV급 60MVA 3상 동



그림 5 세계 최초 상용사업: 신갈-홍덕 AC23kV 초전도케이블 건설 사업

축형 초전도케이블 개발에 성공하였는데 해당 제품은 2019년에 제정된 IEC국제 시험 규격을 세계 최초로 준용하여 개발되었다. 23kV급 초전도케이블로 도심 내 신규 부하 공급 대상 지역의 인근 변전소 간 배전 모선을 연계하고 전력 공급 대상 지역에 기존 형태의 변전소를 신설하는 대신 소규모의 초전도 스테이션을 설치함으로써 전력 계통을 간소화하고 계통 안정성을 증대할 수 있다. 한국전력에서는 앞의 두 가지 사업 모델과 더불어 그림 6과 같이 이러한 초전도 플랫폼을 실계통에서 실증하여 관련 사업 모델을 구축함으로써 그림 7에서 보여주는 초전도 전력 계통 구축을 추진하고 있다.

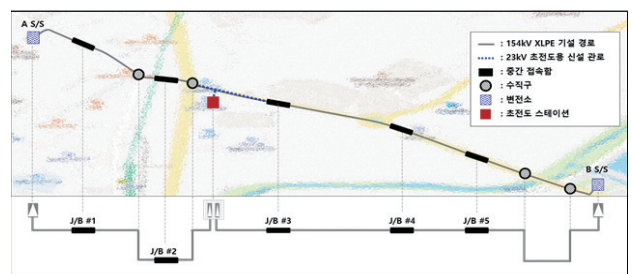


그림 6 초전도 스테이션 실증 사업 개요

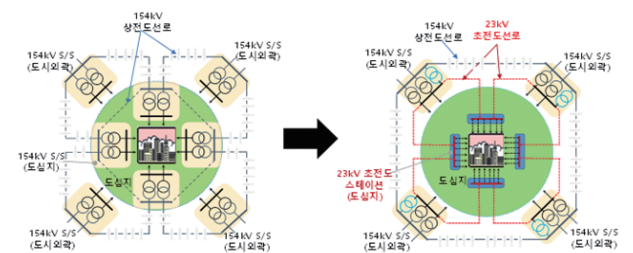


그림 7 초전도 스테이션 사업 모델

3. 초전도 한류기

초전도 한류기는 전력계통에 고장이 발생했을 때, 차단기로도 막지 못하는 초기 고장전류를 초전도체의 켄치현상을 이용하여 고장전류 발생 즉시 그 크기를 한류하는 신개념의 전력시스템이다. 초전도 한류기는 큰 고장전류를 신속하게 저감시켜 주기 때문에 전력기기의 기계적, 열적 스트레스를 감소시켜 전력설비의 파손 방지 및 수명 연장을 가능하게 하며, 기존 연계운영방식의 비효율적인 요소를 완벽하게 제거함과 동시에 연계 운영의 모든 장점을 누릴 수 있게 해주기 때문에 전력 사용 증가와 신재생 에너지 확대 등 점차 대형화, 복잡화되고 있는 전력계통의 솔루션으로 그 중요성이 더욱 높아지고 있다. 더불어 고장전류 쏠림으로 발생하는 인근 계통의 Voltage sag와 같은 문제들도 해결해 주기 때문에 전력품질 향상도 가능하다.

현재 LS ELECTRIC은 21세기 프론티어 사업 이후 한국전력에서 추진 중인 초전도스테이션 사업의 적용을 위하여 연구개발을 진행 중에 있다. 이러한 시장의 수요와 추세를 반영하여 그림 8과 같이 22.9 kV / 2.0 kA의 저항형 초전도 한류기(R-SFCL)를 LS Electric에서 설계 및 제작하였고, LS ELECTRIC의 공인인증시험 기관인 PT&T에서 성공적으로 테스트하였다. 이 R-SFCL은 2022년 한전 서고창 변전소 내 154/22.9kV 변압기 2대 사이 22.9kV 모선연계 구간에 설치되어, 한쪽 계통에서 발생하는 고장전류가 연계된 계통에 영향을 미치지 않도록 고장전류를 빠르게 저감시켜 상호 연계된 전력계통이 안정적으로 운영될 수 있도록 기여할 계획이다.



그림 8 LS ELECTRIC 22.9kV / 2,000A 초전도 한류기

LS ELECTRIC에서 개발한 R-SFCL은 아래와 같은 특징을 갖는다.

첫째, R-SFCL은 고장 전류 첫 피크의 전류의 한류를 담당하는 초전도 한류부와 첫피크 이후의 고장전류 한류를 담당하는 고속임피던스부 (고속 고장 검출장치(Fast Fault Detector, FFD), 고속 스위치(Fast Switch, FS), 한류저항(Current Limiting Resistor, CLR))로 구성된다. 그리고 초전도 한류부와 고속임피던스부는 정션 판넬을 이용하여 좌우 또는 상하로 설치될 수 있도록 개발하였다. 이러한 특징으로 두부분이 변전소 건물의 다른 층에도 설치될 수 있다. LS ELECTRIC은 배전급 최대용량임에도 최소사이즈의 R-SFCL 개발에 성공했다.

둘째, 핵심부품은 그림 9와 같이 다양한 정격과 개소에 유연하게 적용될 수 있도록 모듈화 설계되었다. 초전도 모듈의 경우 3kV 및 500Arms 사양의 단일 바이필라 코일의 직렬과 병렬 조합으로 설계되었으며, CLR의 경우 1옴 단위 모듈의 직렬 조합으로 제작하였다.

셋째, 특히 초전도 모듈 (High Temperature Superconductor module, HTS module)과 극저온냉각시스템 (Cryogenic Cooling System, CCS)은 고신뢰성을 갖도록 개발하였고, 초전도 모듈의 경우 단일 바이필라 코일에 고장 전류를 100회 인가해도 열화 되지 않도록 개발하였다. 각 바이필라 코일은 SuNAM의 2세대 (2G) HTS 도체를 사용하여 권선하였다.

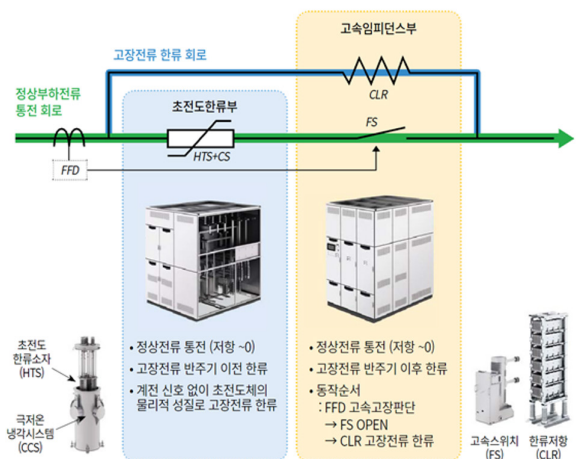


그림 9 초전도한류기 회로도 및 구성

최근 공인인증기관인 KERI에서 단락시험, 임피던스시험, 온도 상승시험, 전기절연시험 등을 진행했고, 성공적으로 통과되었다. (그림 10 참조)

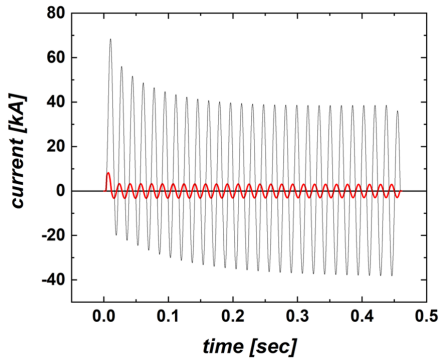


그림 10 초전도 한류기 25kArms 비대칭 고장전류 한류파형 (KERI 시험)

4. 결 론

우리나라는 초전도케이블시스템, 초전도 한류기 등 초전도 전력기기 분야에서 미국, 유럽, 일본 등의 선행 국가들에 비해 20년 이상 뒤늦게 연구 개발을 시작하였지만, 불과 20 여년 만에 설계부터 시험, 생산, 설치 및 운영까지 전 분야에 걸쳐 최고의 기술력과 노하우를 보유하고 있을 뿐 아니라 나아가 이를 실제 전력 계통에 적용하여 상용화에 성공하였다.

우리나라는 지금까지의 성과에 안주하지 않고 한국전력, LS 전선, LS ELECTRIC 등 기업을 중심으로 초전도 케이블 시스템 및 초전도한류기 등 초전도전력기기를 전력 계통에 확대 적용하여 계통 유연성 및 안정성 증대를 위한 여러 가지 사업 모델을 실현해 나가고 있어 이 분야에서 First mover로서의 입지를 확고히 하고 있다.

[참고문헌]

- [1] Current status of demonstration and commercialization of HTS cable system in grid in Korea, IEEE ASEMD, 2013
- [2] Installation and Power Grid Demonstration of a 22.9 kV, 50 MVA, High Temperature Superconducting Cable for KEPCO. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2012

저자소개

조전욱 (Cho, Jeon Wook)

1983년 한양대학교 전기공학과 졸업
2001년 연세대학교 대학원 졸업(공학박사)
1990년~현재 한국전기연구원 책임연구원
주 연구개발 분야: 초전도 케이블, 전력 케이블



양형석 (Yang, Hyung Suk)

2001년 Tsukuba대학교 졸업(공학박사)
2001년 한국기초과학지원연구원 선임연구원
2009년~현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원
주 연구개발 분야: 초전도 송전기술



류철휘 (Ryu, Cheol Hwi)

2002년 한양대학교 전자공학과 졸업
2011년 한양대학교 대학원 졸업(공학박사)
2009년~현재 LS 전선 책임연구원
주 연구개발 분야: 초전도 케이블



김민지 (Kim, Min Jee)

2005년 홍익대학교 기계공학과 졸업
2011년 홍익대학교 대학원 졸업(공학박사)
2011년~현재 LS ELECTRIC 책임연구원
주 연구개발 분야: 초전도 한류기



전력연구원 차세대송변전연구소 소개

소장 한기선, 책임 오승열, 선임 김민주

연구실 개요

차세대송변전연구소는 지난 수십 년부터 지금까지 '값싸고 질좋은 전력의 무정전 공급'이라는 회사의 임무를 달성하는 데 필요한 선진 기술의 도입 및 적용, 국산화 연구개발에 매진하여 전력산업 현장에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 해결함은 물론, 단계적인 기술혁신을 통해 우리나라 전력산업 발전에도 크게 이바지하고 있다.

그러나, 전력산업의 패러다임이 변하고 있는 작금의 시대에는 전통적인 전력회사의 임무와 함께, 미래 100년 지속성장을 위한 혁신적이고 파괴적인 기술개발을 요구하고 있다. 이에 기술 추격자(catching-up)가 아닌 기술 선도자(first-mover)의 입장에서 고도의 불확실성에 도전하는 전략을 새롭게 수립하고, 과거와는 다른 조직운영과 혁신방식의 구축을 통하여 전력기술 선도자로 '한글탈태'하고자 '전력망 운영 고도화', '고효율 친환경 송전 기술 선도', '친환경 변전기기 개발 및 변전설비 운영 스마트화', '전력구조물 재난대응 및 건설 안전 기술 확보'를 목표로 기술 혁신에 정진하고 있다.

1. 전력망 운영 고도화

인류가 만든 시스템 중 가장 복잡한 시스템이라고 하는 전력망을 안정적으로 운영하여 고객에게 전기를 정전 없이 공급하기 위해서는 전력망의 상태를 항상 정밀하게 감시하고 정확하게 진단하는 것이 필수적이다. 또한, 과거와는 다르게 최근의 전력망에는 대용량 전력전자 기반의 다양한 특수 제어설비(HVDC, FACTS)들의 설치가 증가 되고 있어, 이런 설비들의 고장이나 오동작은 광역정전을 발생시킬 수 있는 위험을 항상 가지고 있다.

따라서, 차세대송변전연구소에서는 전력망의 상태를 보다 정밀하고 정확하게 감시하고 분석하기 위해 기존의 EMS/SCADA보다 수백 배 정밀한 데이터를 기반으로, 전력망의 각종 상태를 감시하고 인공지능을 이용해 이상 징후를 판단할 수 있는 광역감시 시스템(WAMS')을 개발하였다. 또한, 우리나라 전력망 전체를 실시간으로 모의할 수 있는 실시간 시뮬레이터(A-KEPS')를 활용하여 특수제어설비들의 성능을 현장과 동일한 환경 하에서 검

증할 수 있도록 함으로써, 전력망의 신뢰도를 향상시키는 연구를 수행하였다.



그림 1 대규모 실시간 전력계통 시뮬레이터

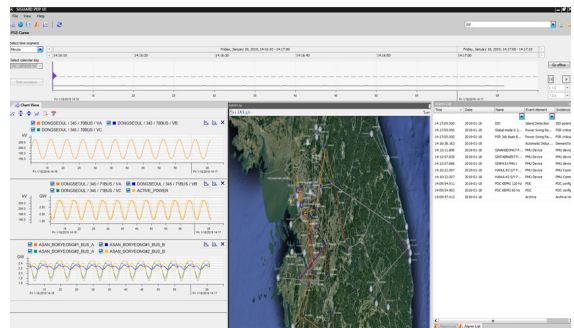


그림 2 광역계통감시시스템(WAMS)

1. WAMS(Wide Area Monitoring System): 시각동기 광역전력계통 감시 시스템 (본사 및 전력연구원 설치)
2. A-KEPS(Advanced Kepco Enhanced Power System Simulator): 대규모 실시간 전력계통 시뮬레이터 (전력연구원 운영 중)

향후 신규 교류(AC) 전력망설비의 확충이 더욱 어려워 질것으로 예상됨에 따라, 대규모 전력전송 목적의 대용량(GW급) 계통 솔루션 개발 연구를 수행하고, 전력망에서 늘어나는 재생에너지원을 최대한 수용할 수 있는 기술을 개발하여 전력망의 유연성을 제고할 계획이다.

2. 고효율 친환경 송전 혁신 기술 선도

(1) HVDC 케이블 감시진단 및 건전성 평가 기술 개발

미래의 전력 네트워크는 신재생에너지의 연계와 국가간 전력연계를 위한 직류송전선로의 적용이 점차 증가하고, 또한 사회적 수용성을 높이고 친환경 송전을 위해 가공과 지중선로가 복합적으로 구성되는 다변화된 건설 및 운영환경을 요구하고 있다. 이러한 미래 송전망의 신뢰성 확보를 위하여 초고압 직류 해저케이블과 직류와 교류가 복합적으로 구성되는 하이브리드 송전선로의 운영기술을 개발하였다. 세계 최고 수준을 갖는 정밀한 HVDC 해저케이블 고장점 탐지기술을 개발하여 기존 3%대의 오차를 1% 이내로 낮추어 북미와 유럽 등 선진국을 대상으로 지속적인 해외 기술사업화를 추진하여 초기의 성과를 이루었으며 향후 개발되는 다양한 자체 확보기술의 사업화 기반을 마련하였다. 이렇게 복잡해지는 송전망의 효율과 신뢰성은 더욱 높이고 환경문제를 야기하는 요인을 최소화하는 신개념 송전설비를 지속적으로 개발하기 위하여 세계 최고 수준의 가공 및 지중송전선로 실증 및 인증 인프라를 구축하고 국제표준화를 추진하고 있다. 또한 AI 기반의 송전설비 자율 감시진단 기술 등 4차 산업 혁신기술과의 융합 개발을 통하여 세계 최고 수준의 미래 송전시스템의 기술개발을 선도하고자 한다.

(2) $\pm 500\text{kV}$ HVDC 송전시스템의 운영기술 개발

도체귀로(중성선) $\pm 500\text{kV}$ Double Bi-pole HVDC 송전은 전 세계적으로 적용 사례가 없는 방식으로써, 초고압 직류가공선로 운영경험이 없는 국내에서 성공적인 상용화를 위해서 기존과 차별화된 구조의 철탑설계, 절연설계, 환경설계 및 신규 기자재 개발을 수행하였다. 이를 통해 국내 실정에 적합한 직류송전방식에 대해 자체 설계기준을 수립하고 고창에 실규모 실증선로를 구축하

여 다양한 실증연구를 수행하여 설계기준을 검증하였다.



그림 3 HVDC 케이블 실시간 고장점탐지

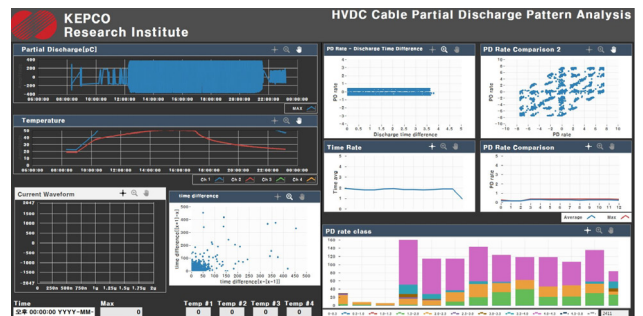


그림 4 HVDC 케이블 부분방전 진단 기술



그림 5 고창 $\pm 500\text{kV}$ HVDC 실증시험장

내·외부로부터 발생 가능한 이상과전압에 대해 공기절연거리 검증시험, 각종 센서를 통한 전기환경장해량 측정 및 분석, 신규 기자재 장기간 실증을 통한 신뢰성 검증 등을 수행하였으며, 지금도 실선로 운영 시 발생 가능한 사고나 민원을 방지하기 위한 직류가공선로의 운영기술 개발과 친환경성을 지속적으로 평가하고 있다.

한국원자력안전기술원, 한국지질자원연구원 등이 참여하는 “지진·지진해일 및 화산활동 관측기관협의회”를 통해 관측 정보를 공유하는 한편, 매년 지진관측기록을 수록한 지진연보를 발간하고 있다.

한편, 차세대송변전연구소에서는 국내 최고 수준의 진동대를 갖춘 내진시험동을 운영하고 있으며, 산업체에서 개발, 요청한 전력기자재 등이 실제 지진 발생 시 제대로 작동하는 지를 확인하는 내진검증시험(Seismic Qualification Test)을 수행하고 있다. 또한, 다양한 내진성능평가 실험결과를 송배전 내진설계 실무자집서, 건축물의 내진성능평가 세부기준 수립 및 내진 보강시스템 개발 등의 연구개발에 활용하고 있으며, 시험설비를 산학연이 내진 관련 연구와 제품 개발에 활용할 수 있도록 개방하여 제품과 기술경쟁력을 높이는 데 이바지하고 있다.



그림 8 전력설비 지진피해 대응을 위한 지진 모니터링 시스템



그림 9 내진검증시험용 진동대 시스템

(2) 차세대 능동형 지진대응기술 개발

기존 내진기술이 지진력이 구조물에 전달되었을 때 구조물을

튼튼하게 보강하는 수동적인 기술인 반면, 이제는 구조물에 전달되는 지진력 자체를 흡수하여 저감시키는 면진(Seismic Isolation)과 지진감쇠(Damper) 기술을 연구하여 국내의 내진기술을 선도하고 있다. 면진 기술은 지반과 설비사이에 면진장치를 설치하여 지반과 설비를 격리시키는 원리로서 지진력을 최대 90%까지 감소시킬수 있는 기술이며, 최근 YTN에 기술을 홍보하고 국내 업체와 기술이전을 체결 추진중에 있으며, 전력연구원에 건설 중인 전력 ICT 대전센터의 전산실에 적용하여 현재 국내 내진설계 기준인 규모 6.6보다 큰 규모 7.0 지진발생시에도 통신 및 제어 설비의 기능작동 확보가 가능하도록 하였다.



그림 10 면진장치 개념도

5. 향후 계획

향후 차세대송변전연구소의 보유기술을 기반으로 기술혁신을 추진함으로써 사업화를 위한 지속적인 노력을 하겠으며, 신재생 에너지원 확대 및 기술 환경변화 등과 같은 전력사업의 새로운 패러다임의 위기에서 송변전기술을 타분야로의 적용을 확대함으로써 새롭게 도약할수 있는 기회도 추구해 나갈 것이다.

전력산업은 빅데이터, 로봇, IoT 및 사이버 보안 등의 융합 기술을 통해 전기차, GTB(Grid To Battery) 및 마이크로 그리드(Micro Grid) 등의 비즈니스 분야로 더 큰 확장을 시작하였다.

이에 누구보다 먼저 미래사업을 발굴하여 준비(First)하고, 신속한 업무처리(Instant)와 적기의 타이밍(Timing)으로 미래기술을 선도하는데 적합한(FTT) 연구개발을 수행할 것이며, 우공이산(愚公移山)의 우직한 마음으로 연구소 구성원들과 손을 맞잡고 『세계 정상의 연구소』 구축을 위해 끊임없는 노력을 지속할 것이다.

저자소개**한기선(Han Ki-sun)**

1993~1998 한국전력공사 제주지사 및
본사 송변전운영처 직원
1998~2005 한국전력공사 전력계통건설처 및
본사 송변전운영처 차장
2005~2011 한국전력공사 전력연구원
선임연구원
2011~2019 한국전력공사 전력연구원
책임연구원
2019~현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원
(현 차세대송변전연구소장)
주 연구분야: 송변전기기 기술
e-mail : hankisun@kepc.co.kr

**오승열(Oh Seungryle)**

2001~2010 LS산전 선임연구원
2010~2013 한국전력공사 전력연구원
일반연구원
2014~2021 한국전력공사 전력연구원
선임연구원
2022~현재 한국전력공사 전력연구원
책임연구원
주 연구분야: 송변전기기 기술
e-mail : exp0510@kepc.co.kr

**김민주(Kim Min-ju)**

2010~2013 한국전력공사 전력연구원
일반연구원
2014~현재 한국전력공사 전력연구원
선임연구원
주 연구분야: 송변전기기 기술
e-mail : kepkmj@kepc.co.kr



전기장 센서의 기술동향

Trend of electric field sensors

김재희 교수 | 한국기술교육대학교
Jae Hee Kim | Korea University Technology and Education



요약

본 고에서는 전기장 센서의 원리와 기술동향에 대해서 소개한다.

Abstract

In this article, principle and trends of electric field sensors are introduced.

1. 서론

최근 전기를 생산, 운반, 소비하는 과정에서 정보통신기술을 접목하는 지능형 전력망이 스마트 그리드 기술의 시장이 커지고 있다. 스마트 그리드 시스템을 확대하기 위해서는 실시간으로 송전되는 전류 및 전압을 측정할 수 있는 센서기술이 필수적이다. 일반 가정에서 사용하는 전원은 경우, 비교적 낮은 전압이기 때문에 전압을 측정하기 위하여 직접 센서를 연결한다. 하지만, 고전압 환경에서는 직접 연결하는 것이 불가능 하다. 왜냐하면 직접 연결할 경우, 공기 중 혹은 매질간 절연파괴로 인하여 단락 사고가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 이와 같이 높은 전압을 측정할 때는 비접촉 방법을 사용하여야 한다. 일반적으로 자기장을 측정할 수 있는 센서의 경우 소형화가 많이 되어 있고, 제품으로도 출시가 되고 있다. 하지만, 전기장 센서의 경우 제품을 찾기가 쉽지 않다. 왜냐하면 단순히 작은 칩으로 구현하기 힘들기 때문이다.

본 고에서는 전기장 센서의 기본 원리에 대해서 이해를 할 수 있도록 살펴보도록 한다. 그리고 몇 가지 사례를 소개하여 향후 고전압 환경에서 발생할 수 있는 다양한 응용분야에 대해서 이해할 수 있도록 한다.

2. 전기장 센서의 기본원리

소형안테나 이론에 의하면, 소형루프 안테나는 주변에서 자기장을 강하게 만들고 소형 다이폴 안테나는 주변에 전기장을 강하게 만든다. 여기서 강하게 만든다는 의미는 거꾸로 생각하면 주변의 전기장이 있으면 소형다이폴 안테나가 잘 수신을 하고, 자기장이 있으면 소형 루프 안테나가 잘 수신을 한다는 것을 나타낸다. 왜냐하면 전파의 경우, 가역성(Reciprocity theorem)이 성립하기 때문이다[1]. 기본적인 소형다이폴 안테나와 소형 루프 안테나의 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 점선으로 나타낸 것

은 전기장과 자기장을 의미하며, 수신하기 적합한 방향을 표현한 것이다. 전기장을 수신하기 위해서는 소형 다이폴 안테나 구조를 사용해야한다. 소형 다이폴 안테나는 두 개의 금속을 이용하며 하나는 위쪽으로 금속이 위치하고 다른 하나는 아래쪽으로 위치하는 것을 말한다. 구조는 굉장히 단순한 장점을 가지지만, 전기장을 잘 수신하기 위해서는 다이폴의 길이 (h)가 길어져야 하는 점이 있다.

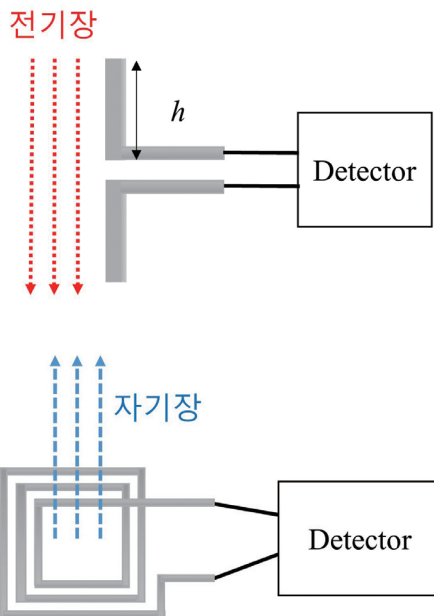


그림 1 소형 다이폴 안테나(위)와 소형 루프안테나(아래)

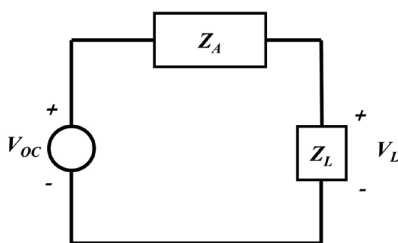


그림 2 소형 다이폴 안테나의 등가회로

전계의 방향과 나란히 소형 다이폴 안테나를 위치시키면 소형다이폴 안테나에 유기되는 전압은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다. [2, 3]

$$V_{OC}(\omega) = hE(\omega) \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $V_{OC}(\omega)$ 는 다이폴 안테나에 유기되는 전압이며, h는 다이폴 안테나 전체길이의 반을 나타낸다. $E(\omega)$ 는 주파수에 따른 전기장의 세기를 나타낸다. 수식으로부터 다이폴안테나에 측정되는 전압은 전기장이 강할수록 높게 측정이 되고, 다이폴 안테나의 길이가 길수록 높게 측정이 되는 것을 알 수 있다. 다만 여기서 주의할 것은 $V_{OC}(\omega)$ 는 다이폴에서 유기되는 전압으로 실제 측정이 되는 전압을 의미하는 것은 아니다. 소형 다이폴 안테나에 대해서 등가회로 모델을 그리면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 Z_A 는 안테나 임피던스 $Z_L(\omega)$ 은 측정하는 계측기(부하)의 임피던스를 나타낸다. 실제 측정이 되는 전압은 계측기에 걸리는 전압이 된다. 따라서 $Z_L(\omega)$ 임피던스에 걸리는 전압인 $V_L(\omega)$ 이 실제 측정이 되는 전압이다. 회로이론에 의해서 직렬회로에서 임피던스 $Z_L(\omega)$ 에 걸리는 전압 $V_L(\omega)$ 은 다음과 같은 수식으로 표현을 할 수 있다.

$$V_L(\omega) = V_{OC}(\omega) \frac{Z_L(\omega)}{Z_A(\omega) + Z_L(\omega)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

이 수식이 의미하는 바는 계측기(혹은 부하)의 임피던스가 클수록 다이폴 안테나에 순수하게 걸리는 전압을 수신할 수 있음을 의미한다. 달리 표현을 한다면 만약 계측기 임피던스가 고정되어 있다면, 안테나 임피던스에 따라서 수신되는 전압은 결정이 된다.

소형 다이폴 안테나의 임피던스는 안테나 이론에 의해서 다음과 같이 표현을 할 수 있다. [3]

$$Z_A(\omega) = -j \frac{\eta_0}{2\pi\beta h} (\Lambda - 2 - \ln 4) \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서 β 는 전파상수를 의미하고 $\beta = 2\pi/\lambda_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 의 관계에 있다. λ_0 공기중에서의 파장을 의미한다. ϵ_0 는 공기중에서의 유전율, 그리고 μ_0 는 공기중에서의 투자율을 나타낸다. η_0 는 공기중에서는 전파의 임피던스를 말하고 일반적으로는 약 377Ω 에 해당이 된다. h는 다이폴 안테나 길이의 반이다. Λ 는 안테나 두께 요소라고 표현을 하며, $\Lambda = 2\ln(2h/a)$ 의 관계식으로 표현을 할 수 있다. a는 다이폴 안테나 도선의 반경이 된다. 식(3)은 복

잡하게 표현이 되어 있지만, 안테나의 구조가 고정이라면 대부분의 값이 상수가 되기 때문에 아래와 같이 간단한 비례식으로 표현이 가능하다.

$$Z_A(\omega) \propto -j/\omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 ω 는 각주파수를 의미하며, $\omega = 2\pi f$ 의 관계식이 있다. f 는 주파수를 의미한다. 이의 결과로부터 소형 다이폴 안테나의 임피던스는 커패시터 성분만을 갖는 것을 알 수 있다. 만약 소형 다이폴 안테나의 구조가 정해져있고, 계측기의 임피던스가 주파수에 따라서 일정하고, 주파수에 따라서 전계가 일정하다면, 결론적으로 안테나의 임피던스는 주파수에 반비례하기 때문에 식(4)로부터 계측기에 유기되는 전압을 다시 계산해 보면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_L(\omega) = V_{OC} \frac{\omega Z_L}{-jA + \omega Z_L} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 A 는 비례상수이다.

상기의 수식으로부터 만약 주파수가 0이면, 즉 DC 전원의 전기장이 형성되어 있다면 다이폴에 유기되는 전압은 0임을 알 수 있다. 따라서 DC의 전기장에서 대해서 다이폴 안테나는 그 값을 측정할 수 없게 된다. 만약 AC 전원이라면 동일한 전기장의 세기이더라도 주파수가 높을 수록 값이 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 만약 주파수가 엄청 높게 된다면 일정한 값이 된다. 주파수에 관계없이 일정한 전압을 수신하고 싶다면, 계측기(부하)의 임피던스를 커패시터로 결정하게 되면 된다. 일반적으로 FET(Field Effect Transistor)의 경우에는 입력단이 커패시터와 유사한 임피던스를 가지므로, 소형 다이폴 안테나 뒷단에 FET를 연결하면, 계측기 임피던스 $Z_L(\omega) = -j/(\omega C_L)$ 가 되어, 식(5)는 결국 상수가 된다. 따라서 일반적으로 전기장센서를 디자인 할 때 부하단에 FET 소자를 많이 사용한다.

지금까지 간단하게 전기장 센서의 구조 및 측정원리에 대해서 살펴보았다. 결론적으로 전기장 센서를 만들고 싶을 경우, 다이폴 안테나의 구조를 사용하면 된다. 또한 만약 관심 주파수가

단순히 한 개일 경우, 부하단에 큰 저항(약 $1M\Omega$) 정도를 연결하고 저항에 발생하는 전압을 측정함으로써 전기장 센서로 활용할 수 있다. 만약 여러 주파수 영역에서 전기장 값을 측정해야 한다면 FET 소자를 부하단에 연결하여 사용하는 것이 바람직하다.

전기장 센서를 활용할 때 한 가지 주의해야하는 것은 전기장의 값이 벡터라는 것이다. 고압선에 의해서 전기장이 형성되면, 전기장이 단순히 한 방향으로만 만들어 지지는 않는다. 따라서 다이폴 안테나의 위치에 따라서 전기장을 잘 수신할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 그림 3을 살펴보자. 그림 3의 왼쪽은 다이폴 안테나와 전기장이 평행하게 있는 것이고 오른쪽은 수직으로 있는 것이다. 만약 다이폴 안테나를 전기장과 평행하게 위치시키면 다이폴에 유기되는 전압이 발생하게 된다. 반면에 전기장에 수직으로 다이폴 안테나를 위치하게 되면 전기장의 강하게 형성이 되어 있더라도 다이폴에 유기되는 전압은 없다. 이는 가역성 이론에 의해 다이폴 안테나에 전원을 공급하면 다이폴 안테나와 수직으로 전기장을 형성할 수 없기 때문이다. 결론적으로 실생활에서 전기장을 정확하게 측정하기 위해서는 다이폴 안테나를 3개를 사용해야 하며, 각각 x, y, z 축 방향으로 위치를 시켜야 함을 의미한다.

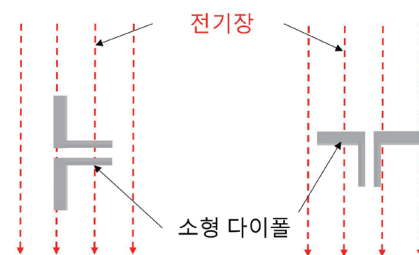


그림 3 전기장의 방향에 따른 소형 다이폴 안테나의 위치
(왼쪽: 평행, 오른쪽: 수직)

그림 4는 실제 전기장 센서의 제품을 분해한 것이다. GM3120 Electromagnetic Radiation Tester 란 제품이다. 그림 4의 오른쪽은 분해된 사진을 보여주고 있는데, 상단에 얇은 금속판이 있는 것을 확인할 수 있다. 이 금속판은 다이폴 안테나의 한쪽 면으로 볼 수 있고, 다른 면은 PCB의 그라운드 면을 사용하는 것이다. 구조가 다이폴 안테나와 동일하지는 않지만, 제품화를 위하여 이와 같은 구조도 사용할 수 있다. 그리고 그림에는 자세히 나와 있

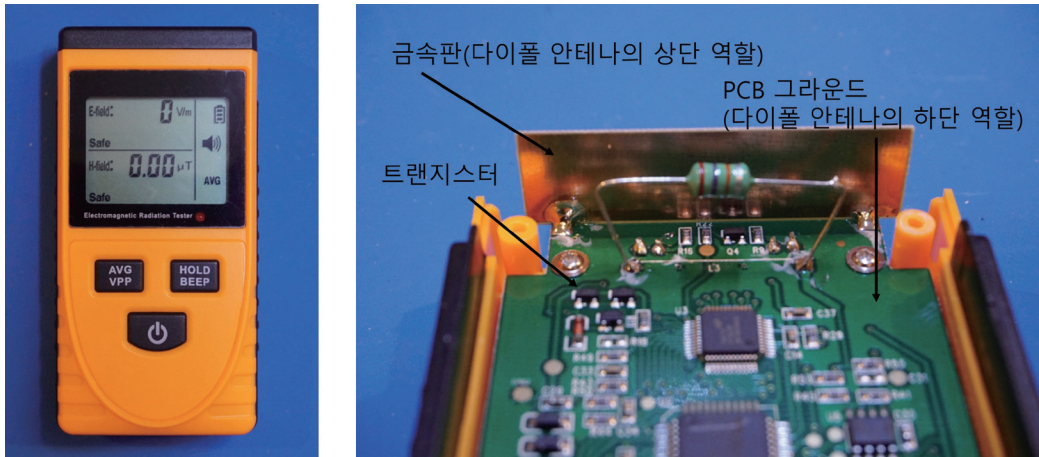


그림 4 전기장 계측기의 분해도 [4]

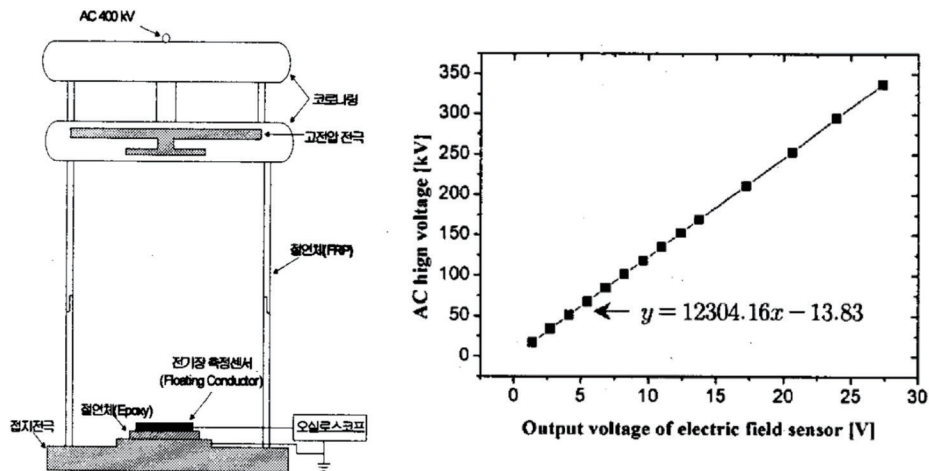


그림 5 400 kV 이상의 전압을 측정하기 위한 전기장 센서의 활용(왼쪽: 구성도, 오른쪽: 인가전압에 따른 전기장센서의 유기전압) [5]

지는 않지만, 상단의 금속판과 연결된 신호선을 따라가 보면 트랜지스터와 연결된 것을 확인 할 수 있다. 이는 다양한 주파수에서 전기장 값을 일정하게 받기 위한 수신단 설계로 판단이 된다.

3. 전기장 센서의 활용사례

특고압의 전원선의 경우, 직접적으로 전압을 측정할 수가 없다. 하지만 전기장 센서를 이용하여 교류 400 kV의 고전압 분압기를 평가한 경우가 있다 [5]. 고압 전극이 있고 아래쪽에 접지전극이 있게 되면 고압전극과 접지전극 사이에 전기장이 강하게 형성된다. 전기장이 형성되는 지점에 전기장 센서를 위치시키게 되면 센서에서 전압이 유기가 된다. 센서에 유기되는 전압의 경

우, 고전압 전극에 인가된 전압과 비례 관계에 있기 때문에 센서의 전압으로부터 실제 고전압 전극에 유기된 전압을 측정할 수 있게 된다. 이와 같은 구조를 사용하면 400 kV 이상에서도 평가가 가능하게 된다. 또 다른 예시는 그림 6에 나타내었다 [6]. 3상 고압선로에 대해서 고압선에 인가된 전압을 측정하기 위하여 전기장 센서를 활용하는 것이다. 특이한 점은 전기장 센서를 1개를 활용하는 것이 아니고, 전계 분포를 고려하여 3개의 전기장 센서를 사용하며, 측정된 값을 활용하여 고압선에 인가된 전압을 추정하는 방법이다. 그림 6의 왼쪽은 전기장 센서의 구조를 보여주고 있으며, 오른쪽은 고압선의 전압을 예측하기 위한 센서의 위치등을 보여주고 있다. 여기서 특이한 점은 다이폴 안테나를 사용하지 않고, 스파이럴 모양의 전극을 가지는 센서로 구현한 점이다.

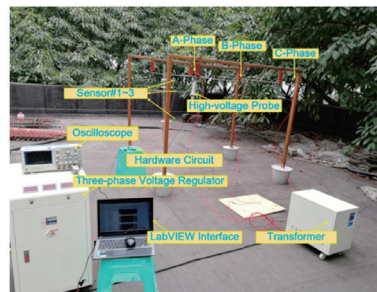
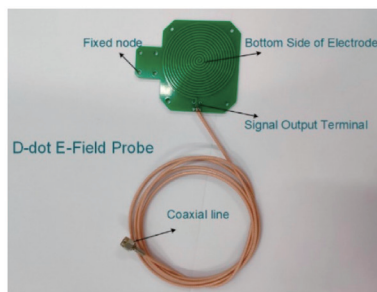
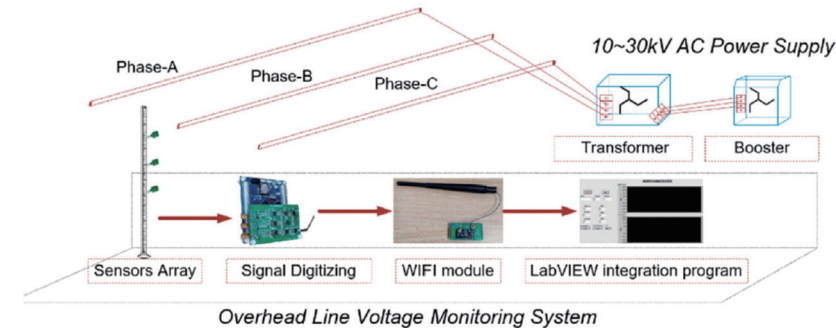


그림 6 3상 고압선에 대해서 전압을 모니터링 하기 위한 시스템 (상단: 시스템 구성도, 하단 왼쪽: 전기장 센서, 하단 오른쪽: 실험사진) [6]

실제 다이폴 안테나의 경우 사이즈에 따른 공간제약이 있기 때문에 활용성 측면에서는 PCB로 평면형태로 다양한 모양으로 전기장 센서를 제작한다.

마지막 예시는 DC 전압에 대해서 전기장을 측정하는 방법을 제안하는 것이다. DC의 경우, 전력선에 전압이 인가되어 전기장이 형성이 되더라도 센서에서 값을 측정할 수가 없다. 따라서 강제적으로 AC로 만들어서 측정하는 법이 필요하다. 이러한 방법이 그림 7에 나타내었다 [7]. 센서에 모터를 부착하게 되면 모터가 회전함에 따라서 수신기가 전기장을 받기도 하고 안받기도 한다. 따라서 일정한 회전수로 돌게 되면 마치 교류의 전기장이 센서에도달하는 것과 같다. 따라서 이러한 방법을 사용하면, 실제 전력선에는 DC가 공급되더라도 센서는 AC의 전기장을 받는 것과 같기 때문에 전기장을 측정할 수 있게 된다. 그림 7의 상단 왼쪽은 전기장 센서의 구조를 보여주고 있으며, 상단 오른쪽은 제작한 사진의 모습, 그리고 하단에는 실제 고전압 DC 환경에서 측정하는 모습을 보여준다.

지금까지 본 예제와 같이 전기장 센서는 고압선의 전압을 측정하는데 유용하게 사용될 수 있다. 본 고에서는 고전압 측정을 위한 전기장 센서의 응용에 대해서만 언급을 하였지만, 전기장 센

서의 기본원리를 이해한다면 단순히 고전압을 측정하는데 활용할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 다른 분야에서의 적용도 가능할 것이라고 생각한다.

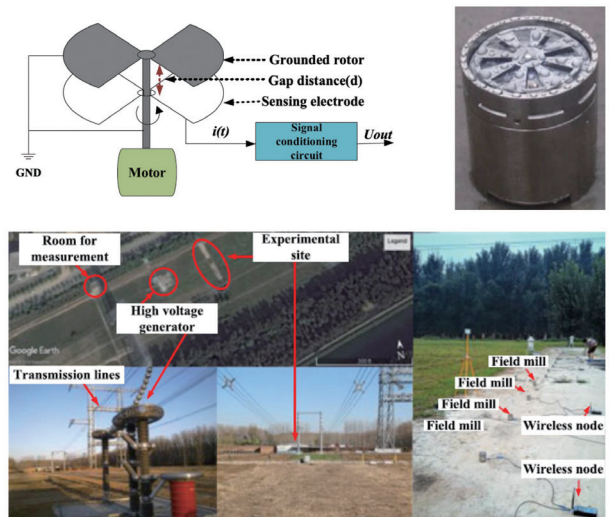


그림 7 DC 전압을 측정하기 위한 방법 (상단 왼쪽: 센서구조, 상단 오른쪽: 센서사진, 하단: 필드테스트 사진) [7]

4. 결 론

본 고에서는 전기장 센서의 기본원리와 응용방법에 대해서

제시를 하였다. 전기장 센서는 자기장 센서와는 달리 완제품을 파는 경우는 흔하지 않다. 따라서 전기장 센서를 활용하기 위해서는 기본원리를 이해하고 이를 적용해야한다. 본 고에서는 기본적인 전기장센서이 소형 다이폴 안테나 구조에 대해서 제시를 하였고, 이론적인 수식을 설명을 하였다. 그리고 전기장 센서를 이용하여 고압선의 전압을 측정하는 몇 가지 예시에 대해서 제시를 하였다. 최근에 스마트그리드 등의 기술이 적용이 되면서 전압을 측정하고 이를 기록해야 하는 상황들이 많이 발생하는데, 본 고에서 제시한 내용들이 많은 도움이 될 수 있을 것이라 생각한다. 또한 단순히 고압선 측정을 넘어서 전기장의 형태가 변화하는 것을 감지하여 주변의 움직임을 인식 방법들로도 확대될 수 있을 것이라 생각한다.

[참고문헌]

- [1] Pozar, D. M., "Microwave Engineering 3rd Ed.", Wiley, 2005
- [2] Bassen, H., Smith, G., "Electric field probes—A review". IEEE Trans. Antennas Propag, 31(5), 710-718, 1983.5

- [3] Kanda, M., "Standard probes for electromagnetic field measurements", IEEE Trans. Antennas Propag. 41, 1349-1364, 1993
- [4] <http://www.kerrywong.com/2018/05/20/teardown-of-a-gm3120-electromagnetic-radiation-tester/>
- [5] 이상화, 한상길, 정재갑, 강전홍, 김윤형, 정진혜, 한상옥, "전기장 센서를 이용한 교류 400 kV 고전압 분압기의 제작 및 평가", 전기학회 논문지 P권, 57(3), 265-269, 2008
- [6] Wang, J., Yan, X., Zhong, L., Zhu, X., "Simulation and Test of a Contactless Voltage Measurement Method for Overhead Lines Based on Reconstruction of Integral Node Parameters", Sensors, 20, 246, 2020
- [7] Cui, Y., Yuan, H. W., Song, X., Zhao, L. X., Liu, Y. M., Lin, L. W., "Model, Design, and Testing of Field Mill Sensors for Measuring Electric Fields Under High-Voltage Direct-Current Power Lines", IEEE Trans. Ind. Electron, 65, 608-615, 2018

저자소개

김재희(Kim Jae Hee)

2004년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업
 2010년 포항공과대학교 대학원 졸업(공학)
 2010년~2012년 삼성전자 무선사업부
 책임연구원
 2012년~2020년 한국철도기술연구원
 선임연구원
 2020년~현재 한국기술교육대학교 조교수
 주 연구분야: 딥러닝 응용, 안테나, EMI 등



학회 소식

2021년도 제71회 정기총회

일 시 2021년 12월 10일(금) 18:00~19:45

장 소 한국과학기술회관 12층 "아나이스홀"

참석자 김철환 회장 외 194명

주요 회의 내용

1. 개회(박철원 총무이사)
2. 국민의례
3. 학회장 인사(김철환 회장)
4. 학회상 시상
 - 공로상(4명) / 학술상(15명) / 산학협동대상(3명) / 산학협동상(11명)
 - 특별공로패(4명) / 제1회 젊은 연구자 학술대상(3명)
 - 산업통상자원부장관 표창 및 논문상(2명)
5. 심의의안
 - 제1호 : 2021년도 사업실적 및 수지현황(가결산) 승인 : 원안 승인
 - 제2호 : 2022년도 사업계획 및 수지예산(안) 승인 : 원안 승인
 - 제3호 : 정관 일부 개정(안) 승인 : 원안 승인
 - 제4호 : 2022년도 임원 인준 : 원안 인준
6. 2022년도 김재연 신임 회장 인사
7. 폐 회



편집위원

강승택(편집위원장, 인천대학교)	한기진(동국대학교)	김광기(인하대학교)	유희덕(전기신문)
김홍준(경북대학교)	김재혁(원광대학교)	정구민(국민대학교)	이상현(선문대학교)
허 돈(광운대학교)	김태영(가천대학교)	임용배(한국전기연구원)	구교선(한전 전력연구원)
전진홍(한국전기연구원)	김명진(충북대학교)	안준호(서울대 전력연구소)	김재준(SJ엔지니어링)
이한상(세명대학교)	하민우(명지대학교)	이기범(대진대학교)	이학주(한전 전력연구원)
배진용(동신대학교)	이상문(경북대학교)	김재희(한국기술교육대학교)	정재성(아주대학교)



학회 소식



2021년도 제12차 이사회

일 시 2021년 12월 10일(금) 16:30-18:00

장 소 한국과학기술회관 신관 12층 아나이스홀 및 사이버회의

참석자 [대 면 회 의] 김철환, 김재언, 김중겸(감사), 이난숙(감사), 이병준, 이개명, 노대석, 이준호, 김호찬, 김한수, 안승원, 이천구, 강승택, 김경호, 김광호, 김태균, 김효진, 박건우, 박종배, 박철원, 손진근, 신윤용, 양성배, 오호진, 이교범, 이정호, 정형석, 조현중, 주성관, 차준민, 허 건

[사이버회의] 장창익, 김길동, 남기범, 박강서, 안상필, 정상용, 허 진

(이상 38명 / 대면회의 31명, 사이버회의 7명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인 : 원안 승인함.
: 개인회원 40명 (정회원 17명, 준회원(석사) 2명, 준회원(학부) 13명, 종신 2명, 다수년 5명, 제후회원 1명)
2. 2021년 잉여금 중 이월금 처리 및 기금 적립[안]
: 차준민 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
3. 회관 준비위원회 위원 인준 : 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 본 건은 부결하기로 함.
4. 학회 사무국 국내여비 지급 기준 개정[안]
: 차준민 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
5. 용어위원회명 변경 및 규정 개정[안]
: 김재언 차기회장으로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
6. 직선평의원 후보 선출 절차 규정 개정[안]
: 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 본 건은 부결하기로 함.
7. 차기회장 및 부회장 선출 절차 규정 개정[안]
: 박철원 총무이사의 제안 설명을 듣고 본 건은 부결하기로 함.
8. 한국과학기술단체총연합회 [이하"과총"] 국제학술대회 지원금 배분 기준 [안]
: 차준민 재무이사의 제안 설명을 듣고 본 건은 부결하기로 함.

학 회 일 지

2021.11.20~12.19

11.24(목)

전력정책위원회 (학회 회의실+화상회의)

11.25(목)

학술위원회 (학회 회의실)

11.26(금)

제7차 기획정책위원회 (학회 회의실)

12.1(수)

회지「전기의 세계」 70권 12호(12월호) 발간
전기학회 국문논문지 70권 12호(12월호) 발간
전기학회 국문논문지P 70권 4호(12월호) 발간

12.2(목)

영문편집위원회 (학회 회의실+화상회의)

12.3(금)

A부문 제7차 이사회 (과총 아나이스홀)
D부문 제6차 이사회 (학회 회의실)

12.10(금)

제71회 정기총회 (과총 아나이스홀+화상회의)
본부 제12차 이사회 (과총 아나이스홀+화상회의)
B부문 제6차 이사회 (학회 회의실)
전기산업정책협의회 (학회 회의실)

12.15(수)

무선전력전송기술 단기강좌
(KERI 안산분원+온라인)

12.16(목)

산업전기위원회 운영회의 (학회 회의실)

12.17(금)

E부문 제9차 이사회 (학회 회의실)
제4차 산학협동위원회 (단국대학교)

탄소중립을 선도하는 대한전기학회

구독 안내

회원 가입 안내

회원의 구분 및 자격

구분	자 격
정회원	① 4년제 대학교를 이수한 분 (박사과정 포함) ② 2~3년제 대학 졸업한 후 실무 경력 2년 이상인 분 ③ 고교 졸업 후 실무경력 4년 이상인 분 또는 전기공학 분야의 학술 및 그 응용에 관하여 상당한 경력이 있는 분
준회원(석사)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학원 전일제 석사과정 재학 중인 분
준회원(학부)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학교 학부생으로 재학 중인 분

입회비 및 연회비

입회비 및 연회비

구분	입 회 비	연 회 비	합 계
정회원	15,000원	70,000원	85,000원
준회원(석사)	10,000원	40,000원	50,000원
준회원(학부)	면제	10,000원	10,000원

다수년 회원 및 종신 회원 : 정회원으로써 다수년 회비 또는 종신회비 납부를 희망하는 분

구분	입회비	3년	5년	7년	합 계
다수년 회원	15,000원	140,000원	210,000원	350,000원	3년 : 155,000원 5년 : 225,000원 7년 : 365,000원
종신 회원		1,050,000원 [15년분 연회비]			1,065,000원

회원의 혜택

1. 학회지 "전기의 세계" PDF 파일 매달 이용 제공
2. 전자도서관 : 전기학회 국문논문지(통합권), 전기학회 논문지 P권, 영문논문지 2종 (JEET, IJCAS), 학술대회 논문 등 열람 권한 부여
3. 학회 및 유관 기관의 각종 행사 및 주요 소식 등 정보 제공
4. 하계학술대회 및 부문회 춘 추계 학술발표대회와 각종 학술행사에 참가 및 발표기회 부여
5. 학문 분야별 연구회(36개 연구회) 각종 행사 활동 기회 부여와 각종 학술행사에 참가 및 발표기회 부여
6. 대한전기학회 교육원 교육강좌 수강시 회원 자격 부여
7. 전기공학 및 기술발전에 업적이 있는 회원에게 학회상 수여 : 공로상, 학술상, 논문상, 기술상, 표창 등
8. 회원의 학술활동(논문 및 원고)을 학회 발간물에 게재(심사완료 이후) 및 다른 회원에게 홍보할 기회 부여
9. 국내외 학술활동에 관한 정보제공
10. 일정한 자격을 갖춘 회원의 경우 대한전기학회 시니어 회원, 대한전기학회 펠로우(석학)회원 신청자격 부여

회원 가입 절차 및 회비 납부

1. 회원 가입 절차 :
 - ① 대한전기학회 홈페이지에서 온라인 가입(https://www.kiee.or.kr/pages_members/join.vm) →
 - ② 입회비와 연회비 송금 → ③ 이사회에서 신규 회원 승인 → ④ 회원으로 활동
2. 회비 납부 방법 및 문의처
 - ① 입회비와 연회비 납부는 a. 온라인 자동 결제시스템(신용카드) 또는 b. 개인 무통장 입금 또는 c. 개인 인터넷 뱅킹 등을 이용하여 신속하게 결제 가능
 - ② 은행 온라인 입금 정보
계좌번호 : 씨티은행 102-53163-258 / 국민은행 349401-04-009338
예 금 주 : 대한전기학회
 - ③ 담당 및 문의처 : 경영지원팀 서영은 팀원 / 02-553-0151 / account@kiee.or.kr



정확한 설계 완벽한 감리

JH 지화기술단

주식회사
J E E H W A

전기

전기설계(전문 1종)
전기종합감리
전기안전점검

정보통신

정보통신설계
정보통신종합감리

소방

소방설계
소방시설물감리

친환경연구

전략기술연구개발
친환경관리방안연구



인간을 중심으로 연구한 공간설계와 최첨단기술,
풍부한 경험을 바탕으로 고객과의 신뢰를 최우선으로 생각하는 기업

(주)진전기엔지니어링 과 함께하십시오

- 전력시설물 종합설계업
- 전력시설물 종합감리업
- 엔지니어링 활동주체 (정보통신)
- 일반소방시설설계업
- 전문소방공사감리업
- ISO9001 인증업체



(주) 진전기엔지니어링
JIN Electrical Engineering Co.,Ltd

04799 서울특별시 성동구 아차산로 17길 49, 데시앙 플렉스 4층 (성수동2가, 280-6)

Tel 02 501 7855 Fax 02 0499 9060