



The Korean Institute of Electrical Engineers

Vol. 71, No. 3, MARCH 2022

03

전기의 세계

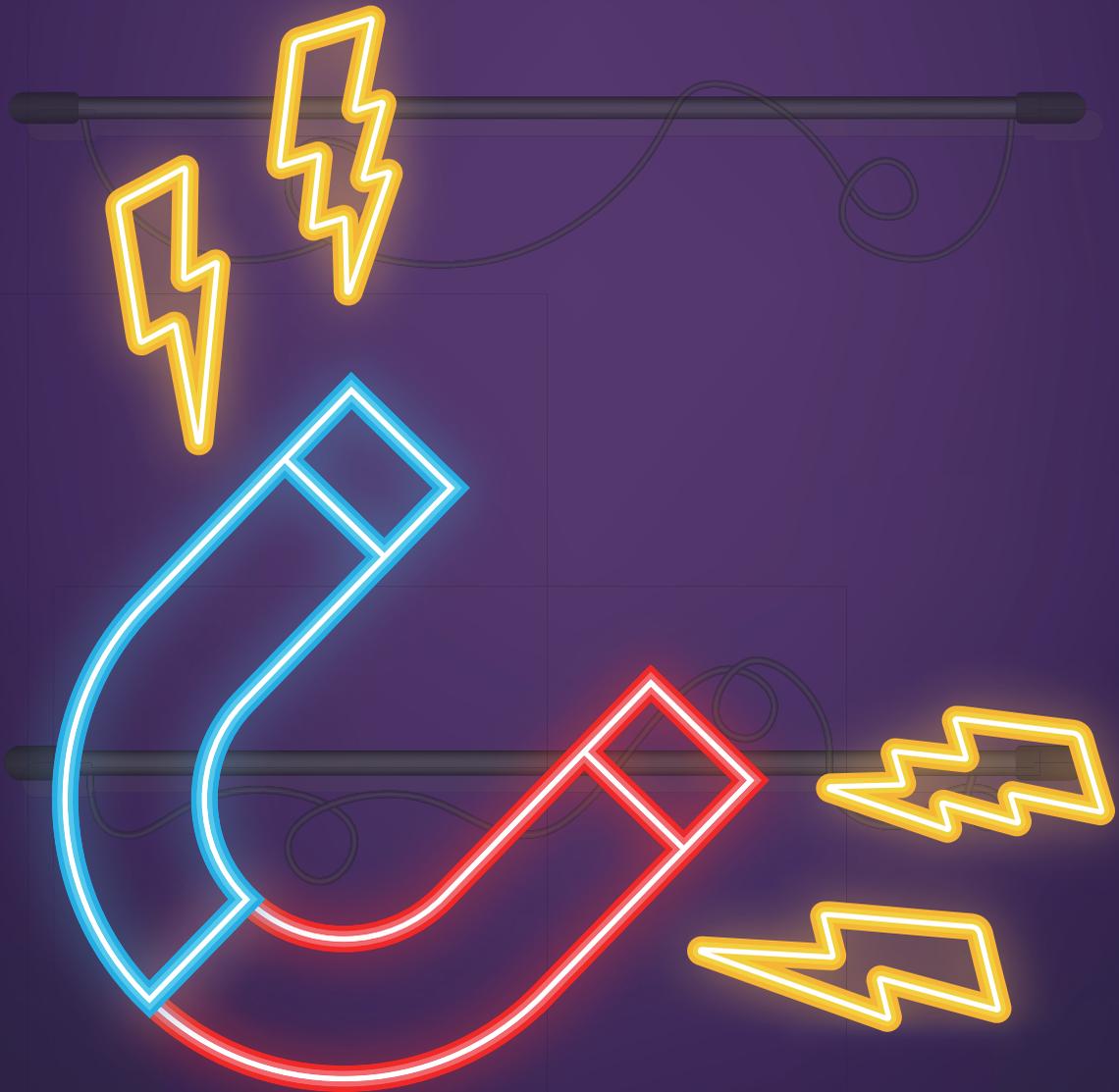
기획 시리즈 전기 및 자기 재료의 연구 동향

전기공학캠페이스북 한양대학교 HVDC 전력연구실 소개

자유 기고문 전력계통 디지털 트윈 구현을 위한 인공지능 기술

공간전하를 고려한 HVDC 시스템의

절연메커니즘 해석



정보통신기술 산업을 선도하는 차세대 정보통신 Leader!

woojoo telecom

유/무선 정보통신

LTE-X(PS-LTE, LTE-R, LTE-M)
5G , GiGa WiFi, LoRa

시스템 통합(SI)

공공기관 통신 인프라 구축 및 고도화
통합전산센터 환경 구축



차세대 ICT

IoT, 엣지, 컴퓨팅
C-ITS,AR/VR

엔지니어링

정보통신 설계
Data 센터 및 인프라 설계

(주) 우주텔레콤



CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

전기계뉴스

“중부발전 - 두산중공업 - 제이씨에너지”

수소에너지 신사업 추진 양해각서 체결

2022년 02월 16일 (수)



- LS·현대 2곳 상반기 중유자격 등록할 듯 | 3
- 중부발전-두산중공업-제이씨에너지, 비대면 업무협약 체결 | 3
- 에너지신산업 활성화포럼, 17일 콘퍼런스 | 4
- 효과적인 데이터 자산관리 플랫폼 마련...발전기술 경쟁력 강화 기대 | 4

기획시리즈 - 전기 및 자기 재료의 연구 동향

- 기획 시리즈 주제 소개 | 7
- HVDC Cable 및 접속재에 관한 견해 | 8
- 미래의 영구자석 기술 전망 | 16
- 전자기파 차폐 응용을 위한 2차원 소재 MXene의 연구동향 | 24

전기공학랩페이스북

한양대학교 HVDC 전력연구실 소개 | 31

자유기고문

- 전력계통 디지털 트윈 구현을 위한 인공지능 기술 | 37
- 공간전하를 고려한 HVDC 시스템의 절연메커니즘 해석 | 42

학회 소식

학회일지 | 47

전기의 세계

KIEE Magazine

Vol. 71, No. 3, March 2022

발행일 2022년 3월 1일
 발행인 김재연
 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 김재연
 차기회장 이근영
 부회장 이병준 노대석 심덕선 이종환 김영근
 김태균 박관수 이준호 박부건 김재문
 김진태 박경중 박기주 신윤용 안승원
 협동부회장 오호진 이천구 장창익 최종수 황우현
 감사 박정호 송일근
 총무이사 차한주 한기선
 재무이사 주성관 김미영
 기획·정책이사 김경호 김석주 송경빈
 편집이사 박종배 남순열 허진
 학술이사 김규호 국경수 김명진 김삼기 김용학
 이방욱
 회원·교육이사 이병국 강세일 배진석 신성수 장용무
 사업이사 지평식 강용성 김용상 김한수 안길영
 유영국 윤순일
 산학협동이사 손진근 기유경 문경섭 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

수협은행 1010-2175-5210(대한전기학회)
 국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)
 지로번호 7510483

편집·디자인 드림기획 031-705-3812

인쇄 드림기획 031-705-3812

내지 히오키코리아

표지 2 산일전기

표지 3 산일전기

표지 2 우주텔레콤

표지 4 LS ELECTRIC

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

메모리 하이코더 사상 최고 스펙

순간을 놓치지 않는 고속 샘플링

- 측정 고속 200MS/s × 절연 측정
- 저장 기존대비 32배 빨라진 고속 실시간 저장
- 조작 대화면 12.1 인치 터치패널로 직감적인 조작



메모리 하이코더 MR6000

무선에서도 1ms 샘플링



무선 유닛

직결 유닛·무선 유닛이 선택 가능한
330 채널 로거.
전압·온도·습도·왜곡·저항 등
각종 측정 유닛을 선택할 수 있습니다.



데이터 하이로거 LR8450

HIOKI

전기계 뉴스



LS·현대 2곳 상반기 중 유자격 등록할 듯 효성, 실부하 운전으로 4개월간 실증 추진 한전 "하반기 발주...탄력적으로 운영할 것"

한전이 도입을 추진 중인 '170kV 친환경개폐기'가 연내 첫 발주될 것으로 전망되면서 신규 시장 진입을 꾀하는 기업들의 움직임이 빨라지고 있다.

최근 업계에 따르면 한전은 올 상반기 중 170kV 친환경개폐기 유자격 등록사가 2곳까지 확보됨에 따라 하반기 중 초도물량을 발주하는 방안을 검토 중이다.

앞서 한전은 신품목 유자격 등록사가 2곳 이상이 되면 신설변전소를 대상으로 단계별 현장 적용을 추진하겠다는 방침을 밝힌 바 있다.

170kV 친환경개폐기는 한전이 도입하려는 친환경 핵심 기자재 중 하나다. 글로벌 시장에서 상용화된 145kV급을 넘어서는 초고압 기자재로, 개발이 완료되면 국내뿐만 아니라 해외 초고압 친환경 시장을 선점하는 효과까지 낼 수 있을 것으로 기대된다.

특히 초고압 수요의 증가로 인해 장기적으로는 연간 2000억원 규모로 추산되는 170kV 가스절연개폐기(GIS) 시장까지 대체할 가능성이 높아 일선 기업들의 움직임에 업계의 이목이 집중되고 있다.

현재 개폐기 업계에서는 일찍이 신품목 개발에 성공한 LS일렉트릭·현대일렉트릭·효성중공업 등 중전 3사가 실증사업을 완료했거나 진행하고 있다.

지난 2020년 2월 국내 기업 중 최초로 개발을 성공한 LS일렉트릭은 지난해 9월 실증사업을 완료한 뒤 유자격사 등록을 위한 절차를 밟고 있다. 또한 현대일렉트릭도 지난해 7월 최초로 실증에 돌입해 오는 3월 완료가 예정됨에 따라 LS일렉트릭과 함께 하반기 물량 수주에 나설 것으로 점쳐진다.



LS일렉트릭이 개발 완료한 170kV 친환경개폐기 제품 사진.

효성중공업도 실증 사업에 속도를 내고 있다. 나주 왕곡변전소에서 실증을 진행한 앞선 2개사와 달리 고창변전소에 자리를 잡은 효성중공업은 4개월가량의 단축된 기간 동안 제품의 기능 및 적합성을 평가받을 예정이다.

한전 관계자는 "올해 초 고창변전소에 실부하를 걸 수 있는 실증시험장이 구축됨에 따라 효성중공업은 실부하 운전을 통해 차단부시험을 받게 됐다"며 "가혹조건을 상정한 시험인 만큼 4개월가량으로 실증기간을 단축할 계획"이라고 설명했다.

초도물량 발주계획과 관련해서는 "상반기 중 유자격 등록사가 2곳이 될 가능성이 크기 때문에 하반기 발주를 검토하고 있다"며 "신품목 사용 개소 및 확대 사용 계획 등은 제작사들의 제품 수준과 적정 설비 보유 여부 등을 종합적으로 검토해 탄력적으로 결정할 것"이라고 덧붙였다.

중부발전-두산중공업-제이씨에너지, 비대면 업무협약 체결 전남 영암군서 100MW부터 1GW까지 단계적 사업 추진키로



16일 한국중부발전과 두산중공업, 제이씨에너지는 수소에너지 신사업추진을 위한 비대면 업무협약을 체결했다. (왼쪽부터) 이호태 중부발전 본부장, 박인원 두산중공업 플랜트 BG장, 문갑사 제이씨에너지 대표.

업추진 업무협약을 체결했다고 밝혔다.

이날 비대면으로 진행된 협약식에는 이호태 중부발전 사업본부장, 문갑사 제이씨에너지 대표, 박인원 두산중공업 플랜트 EPC BG 장이 참석했다.

중부발전은 이번 협약체결을 통해 전남지역에 기반을 둔 에너지 전문 기업인 제이씨에너지, 수소 연료전지 EPC 및 수소터빈 제작 전문 기업인 두산중공업과 각 부문별 노하우를 융합해 정부 탄소중립 이행 및 수소경제 활성화를 목표로 상호 협력할 계획이다.

중부발전이 수소에너지 신사업 추진을 위해 관련 기업과 손잡았다.

16일 한국중부발전(사장 김호빈)은 제이씨에너지, 두산중공업과 탄소중립 달성 및 수소경제 활성화를 위한 수소에너지 신사업

이번 협약으로 전라남도 영암군 대불 국가산업단지에 100MW 규모의 수소연료전지 발전사업의 단계적 추진과 중·장기 최대 1000MW 규모의 수소 혼소-전소 발전사업을 추진할 예정이다.

이를 위해 중부발전은 신재생에너지 공급인증서(REC) 구매 및 발전소 운영, 두산중공업은 수소터빈 개발 및 두산퓨얼셀의 연료전지 기자재 공급을 포함한 EPC 수행, 제이씨에너지는 개발사업 인허가 수행 및 사업 부지 제공을 담당하게 된다.

중부발전은 2050 탄소중립 달성 및 친환경에너지 전환을 위해 태양광, 풍력 등 재생에너지 발전사업뿐만 아니라 수소경제 활성화를 위해 노력하고 있다.

그 일환으로 충남 보령에 세계 최대규모 블루수소 생산 플랜트 구축사업과 제주도에 국내 최초 P2G(Power to Gas) 그린수소 생산과 연계한 수소드론 충전소 구축을 추진하고 있다.

또 각 협약사와 긴밀한 협업을 통해 전남 서남해안 지역의 산업경제 부활 및 수소경제의 새로운 패러다임에 대응한 청정 일자리 창출로 지역경제 활성화에 뜻을 함께하기로 했다.

이호태 중부발전 사업본부장은 "2050 탄소중립과 에너지 대전에 있어서는 수소를 활용한 친환경 에너지 신사업은 필수적"이라며 "이번 수소에너지 신사업추진 업무협약을 통해 중부발전이 탄소중립과 수소경제 활성화에 선도적 역할을 할 수 있도록 최선을 다하겠다"고 말했다.

KIEE NEWS



에너지신산업 활성화포럼, 17일 콘퍼런스

스마트그리드 영역을 확대해 전력계통 안정화, 에너지 가격 안정화 영역의 민간 주도 신산업이 육성돼야 한다는 조언이 나왔다.

에너지신산업 활성화 포럼(위원장 조영탁 한밭대 교수)이 한국스마트그리드협회(회장 구자균)의 후원을 받아 17일 오후 서울 인터컨티넨탈 코엑스 비바체룸에서 개최한 '에너지신산업 활성화 콘퍼런스'에서 박종배 건국대 교수는 "현재 탄소중립 정책은 재생에너지 공급확대에 치중하고 있고 우선순위를 뒤야 할 시장가격 기반의 에너지효율화와 수요반응(DR)을 제대로 신경쓰지 못하고 있다"면서 이 같이 지적했다.

그는 "신산업 활성화를 위한 도소매시장 개편 필요성과 방안"을 주제로 한 발제에서 ESS 시장이 활성화되고 있는 북미시장을 예로 들며 스마트그리드 영역 확대를 통한 신산업 육성을 대안으로 제시했다.

또 "차기 정부는 전기요금 결정과 도매전력시장 방향 설정, 전력계통 안정성 검토 등의 기능을 가지는 독립적인 규제기관을 설립해야 한다"고 덧붙였다.

'전력산업의 패러다임 변화와 에너지신산업의 과제'를 주제로 발제에 나선 조영탁 한밭대 교수는 "탄소중립 정책으로 인해 화석연료가 전기에너지로 대체되면서 전기수요가 증가하고 간헐성과 변동성이 큰 재생에너지 보급 확대에 의해 전력 공급 안정성 및 저장 중요성이 확대되고 있다"며 "이와 관련된 새로운 서비스와 비즈니스 모델이 필요한 상황"이라고 말했다.

또 "현재 우리나라의 경직된 전력시장과 규제를 개선해 에너지신산업의 애로사항을 해결해야 한다"고 주장했다.

이학성 LS일렉트릭 자문은 저탄소 기반의 대규모 신산업 시장이 탄생



에너지신산업 활성화 포럼은 17일 오후 서울 인터컨티넨탈 코엑스 비바체룸에서 '에너지신산업 활성화 콘퍼런스'를 열었다.

할 것으로 예측했다.

그는 'RE 100 대응의 위기와 기회'를 주제로 "그린전력 확보가 산업경쟁력의 원천으로 작용할 것"이라며 "저탄소 기반의 전력생산·유통·소비를 위한 대규모 신산업시장이 탄생할 것"이라고 내다봤다.

또 "2020년 기준으로 우리나라의 RE100 대상 기업들이 사용하는 전력량은 전체 전력의 약 37%를 점유하고 있으나, 신재생에너지 발전량은 전체 발전량의 8% 정도밖에 되지 않는다"면서 "이런 추세가 지속된다면 우리나라 기업들은 RE100 이행이 불가능해 불가피하게 해외로 사업장을 옮기는 일이 발생할 수도 있다"고 경고했다.

이번 콘퍼런스는 산업계·학계 및 연구계의 의견을 종합해 새 정부에 관련 정책을 건의하기 위한 것이다.

콘퍼런스에선 또 에너지신산업 활성화를 주제로 강승진 전기위원회위원장 이 좌장을 맡아 발제자 3인과 전영한 홍익대 교수, 박승용 효성 고문, 이유수 에경연 선임연구위원, 박창민 그리드위즈 전무 등이 토론을 진행했다.

이날 콘퍼런스에는 이학영 더불어민주당 국회의원, 이철규 국민의힘 국회의원, 박기영 산업부 제2차관 등이 참석했다.

효과적인 데이터 자산관리 플랫폼 마련... 발전기술 경쟁력 강화 기대

한국남부발전(사장 이승우)은 효율적인 데이터자산 관리를 위해 디지털 도서관 구축에 나선다고 10일 밝혔다.

남부발전은 발전소 업무 전반에서 만들어지는 다양한 기술자료를 한 곳으로 모으고, 해당 자료를 손쉽게 활용할 수 있는 인프라를 구축하기 위해 디지털 도서관 사업을 추진하고 있다.

기존에는 발전소 건설·운영·신재생에너지 등 발전산업에서 생성된 수십만 건의 업무 지식과 노하우가 별도로 저장돼 내부 구성원간 공유가 즉각적으로 이뤄지지 못하는 한계가 있었다.

남부발전은 이번 디지털 도서관 구축으로 흩어진 기술자료를 한 곳에 모으고, 효과적인 분류체계를 적용해 수요자가 쉽고 빠르게 자료를 이용할 수 있도록 해 업무 효율화에 나설 계획이다.

새롭게 발생하는 국내·외 연구자료 등 최신 기술동향을 로봇 자동화 프



남부발전 본사 전경

로세스(RPA)를 활용해 기존 기술자료에 상시 반영함으로써 발전기술 경쟁력 강화에 도움이 될 것으로 남부발전은 기대하고 있다.

이승우 남부발전 사장은 "기술 경쟁력 확보를 위해서는 체계화된 지식 정보체계 구축이 필수적이다"라며 "디지털 도서관을 통해 데이터 자산에 대한 치밀한 생태계를 구축해 업무 효율화를 적극 꾀하겠다"라고 말했다.



전기의 세계 기획시리즈 월별 주제 안내

호	주제	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 선임연구원)
3월호	· 전기 및 자기 재료의 연구동향	· 김명진 위원 (충북대 교수)

기획시리즈

전기 및 자기 재료의 연구 동향

HVDC Cable 및 접속재에 관한 견해
미래의 영구자석 기술 전망
전자기파 차폐 응용을 위한 2차원 소재
MXene의 연구동향



전기 및 자기 재료의 연구 동향



담당 편집위원
김명진 교수
(충북대학교)



담당 편집위원 인사말 및 주제 소개

COVID-19의 충격을 아직 경험하고 있는 가운데, 임인년(壬寅年)의 두번째 달도 지났습니다. 이전에 경험하지 못했던 일상 속에서도 인공지능, 메타버스, 탄소중립 등과 같이 새로운 기술의 개발 및 사회적 요구와 관련된 다양한 키워드(Keyword)가 등장하고 있습니다. 이와 같은 키워드에 대한 분석을 통하여 유행당시의 사회적인 관심과 분위기를 알 수 있음과 동시에 해당 시기에 주목을 받는 과학기술분야에 대한 정보를 유추할 수도 있습니다. 국내 산업계에서 접할 수 있었던 최근의 여러 키워드 중에서 본 편집위원은 “소부장(소재/부품/장비)”에 주목하여 “전기 및 자기재료의 연구동향”이라는 주제로 기획시리즈를 준비했습니다.

이번 기획시리즈는 관련 분야의 전문가들께서 준비해주신 3편의 소중한 기술동향 원고로 구성되었습니다. 세부적으로는, 전기공학분야에서 관심이 많은 물리적인 특성이 절연, 유전, 도전 및 자기특성임을 고려하여 HVDC 케이블, 영구자석 그리고 전자기파 차폐와 관련된 소재 기술에 대한 전문적인 기술원고들입니다.

첫 번째 원고인 “HVDC Cable 및 접속재에 관한 견해”에서는 점차 관심이 증가하고 있는 HVDC 운영에 필요한 케이블과 접속재의 기술현황, 연구동향 및 극복해야 하는 과제에 대하여 소개하고 있습니다. 또한, 두 번째 원고인 “미래의 영구

자석 기술 전망”에서는 전기전자분야에서의 핵심 소재인 영구자석의 기술발전추세와 고급화를 위한 핵심기술의 연구동향에 대하여 소개하고 있습니다. 특히 해당 원고에는 최근 그 중요성이 증가하고 있는 희토류 자석에 대한 의미있는 내용이 소개되어 있습니다. 마지막 원고인 “전자기파 차폐 응용을 위한 2차원 MXene의 연구동향”에서는 전이금속 탄화물을 활용한 전자기파 차폐 소재의 특성 및 연구동향을 소개하고 있습니다.

과거 산업화 시대와 달리 현재 국내 산업의 지속적인 발전과 성장을 위해서는 연구개발 및 제조의 초점이 특정 기능의 단순 구현에 그치는 것이 아니라 경량화, 지능화, 친환경화, 융/복합화 등과 같은 제품 및 서비스의 첨단화로의 확대가 요구되고 있습니다. 동시에, 세계적인 무역규모를 지니고 있는 대한민국의 성장동력 유지를 위해서는 국제경쟁의 심화 속에서 기술적 우위를 선점해야 한다는 필요성도 그 어느 때보다 높은 상황입니다. 이를 위해서는 시스템 단위 기술 뿐만 아니라 산업의 뿌리에 해당하는 소부장 관련 기술의 경쟁력 강화가 필수적이며, 이는 전기 산업분야도 피할 수 없는 냉혹한 현실입니다. 이번에 준비한 전기 및 자기 재료 연구동향 기획시리즈가 전기공학분야의 재료 관련 핵심기술에 대한 대한전기학회 회원분들의 이해증대 및 관심확대에 기여했으면 하는 저의 작은 바람이 이루어지길 기원합니다.

HVDC Cable 및 접속재에 관한 견해

Perspective on HVDC Cables and Accessories

박재준, 이보인, 김병준 | 중부대학교 대학원 스마트전력 IT융합 학과
Park Jae-Jun, Lee Bo-In, Kim Byoung-Jun | Joongbu University



요약

증가하는 재생 및 신에너지의 통합 그리고 국제 전력 거래(international power trades)는 new HVDC 전송 시스템이 건설되고 개발을 가져왔다. 특히 HVDC Cable은 손실이 적고 신뢰성이 높은 해저 송전 및 해양 재생 에너지 통합(offshore renewable energy integration)에 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 HVDC 케이블의 현재 상용화 가능성과 다양한 유형의 HVDC 케이블 및 액세서리(cables and accessories)를 검토하고자 한다. 인가전압, 온도 의존 전도도 및 공간 전하 누적의 원인으로 인한 불균일한 전계 분포가 주로 XLPE Extruded Cable과 접속재(joints)에 검토되어지고 있다.

Abstract

With the increased use of renewable energy sources and international power trades, development of HVDC transmission systems have emerged. In particular, HVDC cable has performed a major role for offshore renewable energy integration thanks to low power loss and high reliability performance. In this article, we will discuss commercialization of HVDC cables and review various type of cables and accessories for HVDC applications. In particular, the issue of inhomogeneous electric field distribution, which is caused by applied voltage, temperature dependance and space charge accumulation, is explored.

1. 서론

1880년대 후반 전력용 변압기의 발명으로 가능해진 전력전송과 배전의 비용절감이 교류(AC) 전력전송의 보급을 확대하였다. 그러나 최근에는 전력 수요의 급격한 증가로, 보다 장거리 전력 전송, 비동기식 교류 그리드(asynchronous AC grids) 간의 전력거래 및 신/재생 에너지 통합에 대한 욕구가 가속화 되었다. 이러한 맥락에서 연구되어 온 고전압직류 (HVDC)송전은 지난 세기에 걸쳐 개발된 교류기술(AC technology)에 대한 보완책이면서 현

재는 경쟁자이자로서 중요한 옵션으로 고려되고 있다.

오늘날 사용되는 전력 전송 매체(power transmission mediums)에는 두 가지 유형이 있다. 일반적으로 육상 장거리 송전용으로 사용되는 나 도체 기반 가공선(naked conductor-based overhead lines)과 지하 및 해저(underground and undersea) 송전용으로 사용되는 케이블이다. HVDC는 HVAC 전송에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다.

첫째, HVDC 전선은 더 낮은 비용(bipolar lines vs three phase lines)과 장거리 전력 전송에서 더 낮은 에너지 손실을 포

함하고 있다.

둘째, 동기화되지 않은 AC 네트워크 간의 전력 전송 및 안정화 능력은 물론 “방화벽” 측면에서 연결된 AC 그리드 간의 오류 전송을 방지하는 기능이 있다.

셋째, HVDC 전력 흐름이 완전히 제어 가능하고 그리고 빠르고 정확 하다. 또한 VSC HVDC(Voltage source converter HVDC)의 저전압 라이드 스루 기능(low voltage ride-through capability)은 재생 에너지 통합에 더 적합 하다.

넷째, 고정 회랑(fix corridor)의 경우, 머리 위 HVDC 전송 시스템 증가된 용량을 제공한다. 다섯 번째, 케이블 방식의 경우 길이는 충전 전류에 의해 제한되지 않으며, AC 전송 시스템의 경우와 같이 종단 스테이션(end stations) 및 중간 지점(intermediate points)에서 무효 보상(reactive compensation) (케이블 자체에 대한)이 필요하지 않다.

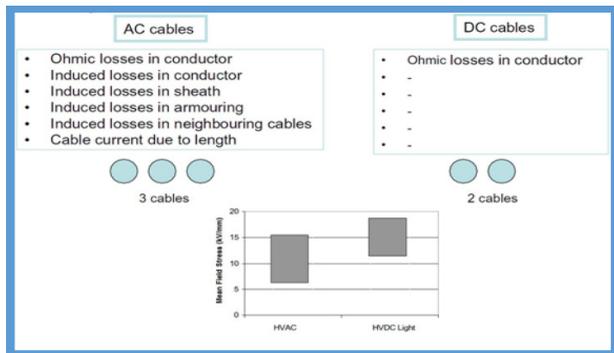


그림 1 AC and DC cable 비교 [1].

(1) HVDC 기술

1950년대에 Dr. AU Lamm에 의해 고전압 수은 아크 밸브가 개발되고, 1970년대 초에 English Electric과 ASEA에 의해 사이리스터 밸브(thyristor valve)가 개발된 후, 둘 다 DC 전력전송의 대량생산이 필요하게 되었고 또한 HVDC 기술은 꾸준한 관심과 중요성을 얻게 되었다. 작동 원리에 따르면, 오늘날 HVDC 변환기 기술은 라인 전류변환(line commutated converter:LCC) 또는 전류 소스변환(current sourced converter:CSC) 기술과 전압 소스 변환(voltage sourced converter:VSC)로 구분할 수 있다. LCC는 스위칭 장치로 절반 제어 가능한 사이리스터를 사용하는 반면, VSC(Voltage source converter)는 IGBT(insulated gate bipolar

transistors), GTO(gate turn-off thyristor) 또는 IGCT(insulated gate cate commutated thyristor)와 같은 완전히 제어 가능한 장치를 스위칭 장치로 사용 한다. 사이리스터 기반 LCC는 정류를 하기 위해 강력한 AC 시스템이 필요하다. LCC HVDC에서 소비하는 무효 전력을 보상하려면 많은 양의 무효 전력 보상이 필요하다. (일반적인 LCC HVDC 시스템의 경우 무효 전력의 양이 전송되는 실제 전력의 최대 76% 일 수 있음).

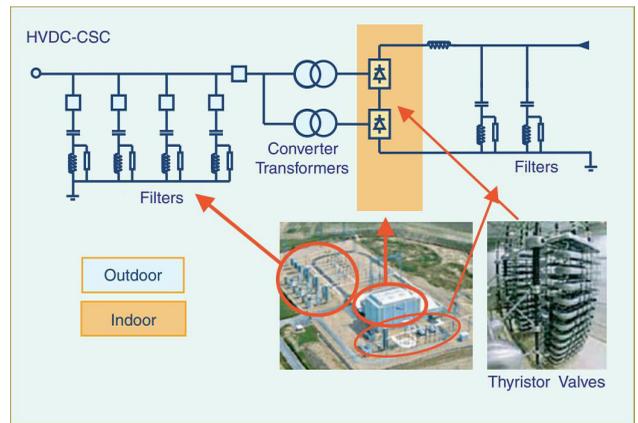


그림 2 전류 소스 변환기(CSC)가있는 종래 HVDC [2].

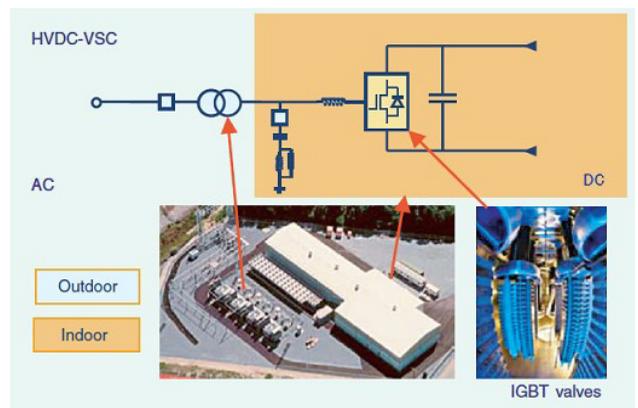


그림 3 전압소스 변환기(VSC)를 갖는 HVDC [2].

펄스 폭 변조(PWM) 기반 VSC와 모듈식 다중 레벨 VSC(MMC)의 두 가지 VSC 토폴로지가 있다. PWM 기반 VSC는 1990년에 처음 제안되었고, MMC VSC는 2010년에 처음으로 상용화되었다. 두 VSC 기술 모두 IGBT, GTO 또는 IGCT와 같은 완전히 제어 가능한 장치를 사용 한다. 모듈식 특성과 낮은 스위칭 손실로 인해 MMC VSC 기술은 점차 PWM 기반 VSC 기술을 대체했으며 VSC HVDC 애플리케이션의 주요 컨버터 기술이 되었다. VSC HVDC

는 활성 및 무효 전력을 독립적으로 빠르게 제어할 수 있으며 블랙 스타트도 허용 한다. AC 시스템에서 가상 동기 발전기로 사용하여 전반적인 시스템 안정성과 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 풍력 발전소의 저전압 라이드 스루 이벤트가 연결된 AC 그리드에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

(2) HVDC Cable 응용

HVDC 시스템의 핵심 컨버터 기술 외에도 고전압 케이블은 해양 재생 에너지 통합을 포함하여 지하 또는 해저 HVDC 전력 전송에 종종 적용 된다. 에너지로 인한 재생 가능자원에 대한 수요증가와 기후 문제로 인해 전 세계적으로 풍력발전 단지의 수가 증가했다. 유럽에서는 다음을 포함하는 유럽 기후 및 에너지 20/20/20 목표를 달성하기 위해 영국과 북해의 해상 풍력 발전소가 건설되거나 계획되었다.

- 1) 1990년 수준에 비해 20%까지 온실 가스 배출량 감소.
- 2) 재생 가능 에너지의 최종 형태 소비의 몫을 20% 증가.
- 3) 에너지 효율 20% 향상.

해상 및/또는 해상 풍력 발전 단지를 가로지르는 장거리 전력 전송(70km 이상)은 일반적으로 HVDC 해저 케이블에 의존한다. 지중 DC 케이블은 도시 지역의 통행권 문제를 처리하고 전력 수요의 급격한 증가에 대응하는 데 추가로 바람직하다. 비용 상승과 함께, 또한 지중 케이블은 가공선과 비교하여 일반 대중의 미적감성과 생활환경에도 이점이 있다.

2. HVDC Cable 그리고 Accessories

(1) 각기 다른 절연시스템

유전 물질의 다른 특성은 일반적으로 케이블의 전기적, 기계적 및 열적 성능을 다르게 한다. 따라서 다른 유전체를 기반으로 한 주요 유형의 HVDC 케이블은 다음과 같이 간략하게 소개할 수 있다.

① Oil-Filled DC Cable

유체 충전 케이블이라고도 하는 오일 충전 케이블(OF)은 일반적으로 오일 채널에 압축 오일로 채워져 있다. 다층 함침 Kraft 종

이(Multi-layer impregnated Kraft papers)가 주요 절연체로 사용된다. 오일 충전 케이블에는 두 가지 유형이 있다.

첫 번째 유형은 오일에 형성될 수 있는 기포를 피하기 위해 케이블의 높은 오일 압력을 유지하기 위해 압력 공급 장치와 오일 리필 탱크가 필요한 저점도 오일로 채워진다. 따라서 이러한 유형 케이블의 최대 실제 길이는 케이블에 충분한 오일 흐름을 유지하기 위해 30~60km에 불과하다. 두 번째 유형의 경우 케이블을 따라 평평한 압력을 유지하기 위해 케이블에 고점도 오일이 채워진다. 따라서 소위 자체 내장형 OF 케이블은 추가 급유 장치가 필요하지 않으며 이론적으로 이러한 유형 케이블의 길이는 무제한일 수 있다. OF 케이블은 케이블의 절연 매트릭스로 PPLP (Polypropylene-laminated-Paper)를 적용하여 개선할 수 있으며, 그림 4와 같이 더욱더 높은 DC 및 임펄스 파괴강도에 기인한다.

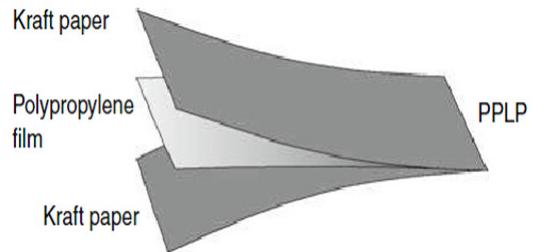
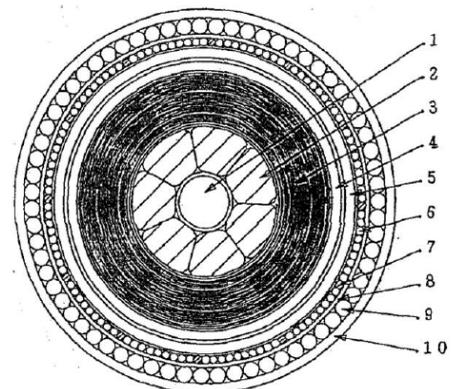


그림 4 Layers of PPLP [3].



- 1. Oil passage (25 mm Φ)
- 2. Copper conductor (7 segmental, 3000 mm²)
- 3. Insulation (t=22.5 mm)
Kraft : 0.5 mm
PPLP : 19.5 mm
Kraft : 2.5 mm
- 4. Lead alloy sheath
- 5. Polyethylene jacket
- 6. Spacer
- 7. Optical fiber units
- 8. Bedding
- 9. Armour, zinc wire
- 10. Serving

Overall diameter : Approx. 190 mm
Weight : Approx. 100 kg/m

그림 5 Construction of 500 kV DC PPLP oil-filled cable [4]

② Mass-Impregnated Cable

OF 케이블과 유사하게 MI 케이블의 주 절연체도 크래프트지(Kraft paper)이다. 그러나 MI 케이블은 다음과 같이 케이블에 자유 오일이 포함되어 있지 않기 때문에 일반적으로 “고체” 절연이 있는 것으로 정의할 수 있다.

그림 6. 고밀도 용지(1000kg/cm³)는 일반적으로 가능한 높은 유전 특성을 달성하기 위해 선택되며, 이 용지는 고점도 화합물 기반 광유를 함침 시키면서 세심한 환경 제어 및 초 정정조건에서 랩핑(lapped)된다. MI 케이블은 60년 이상 HVDC에 대한 입증된 케이블 기술로, 최대 500kV DC 전압은 현재 사용 중인 HVDC 케이블 프로젝트에 대한 가장 높은 HVDC 전압이다. 외부 압력 및 급유 시스템이 필요하지 않기 때문에 원칙적으로 MI 케이블의 길이는 무제한일 수 있다. 절연성은 PPLP와 같은 적층 고분자 필름과 종이를 적용하여 잠재적으로 향상될 수 있다.

기존의 MI 케이블(55°C)보다 도체 온도(85°C)가 낮다. 이는 MI 케이블의 전력 용량이 잠재적으로 확대될 수 있음을 의미 한다. 또한 MI 케이블은 완전한 절단이 발생하더라도 환경으로 오일이 누출되지 않으므로 환경 영향은 무시할 수 있다. 385km의 질량 함침(PPLP로 개선) 해저 케이블은 2200MW 전력 용량으로 세계 최초의 600kV 해저 HVDC 케이블 전송 프로젝트의 Westernlink 프로젝트에 적용되었다.



그림 6 HVDC MI cable.[5]

③ Extruded DC Cable

종이로 절연된 케이블에 비해, 압출 HVDC 케이블(그림 7)은 압출고분자 재료를 주 절연체로 사용하여 DC 케이블에 비교적 새로운 개념이다. 주된 절연체는 가교 폴리에틸렌(XLPE)이며, HVAC 및 HVDC 케이블에 자주 사용되었다.

수십 년 동안 절연재, 압출 케이블은 다음과 같은 많은 중요한 이점을 제공할 수 있다고 널리 알려져 있다.

- 1) 압출 케이블은 MI 케이블보다 주어진 도체 단면에 더 많은 전력을 전달할 수 있도록 더 높은 온도(최대 90°C)를 견딜 수 있다.
- 2) 케이블은 일반적으로 기계적으로 견고하고 무게가 더 가볍다.
- 3) 쉬운 접합 프로세스로 인해 설치가 더 간단하고 빠르다.
- 4) 압출 케이블은 오일 누출로 인한 환경 문제를 피할 수 있으며 재활용이 가능하다.

이러한 이점은 압출 케이블의 지속적이고 급속한 개발로 이어진다. 압출 HVDC 케이블은 최대 정격전압 320kV 및 최대 정격 전력 1000MW 에서 다수의 HVDC 프로젝트에 성공적으로 적용되었다.

2002년 일본의 연구원들은 실험실에서 500kV, 3000MW(바이폴라 단일 회로) 압출 HVDC 케이블 시스템을 개발했다.

최근 ABB는 정격 전력이 최대 2600MW인 최초의 525kV 압출 HVDC 케이블 시스템을 발표했다. 향상된 XLPE 소재를 활용하여 압출 케이블은 UHVDC 전력 전송에서 큰 가능성을 보여준다. 그러나 압출 케이블의 주요 단점은 공간 전하 현상으로 인한 영향이다. 누적된 공간 전하는 전기장 분포를 왜곡할 수 있다. 열화를 촉진하는 절연재, 전기장은 크게 향상될 수 있으며 극성 반전 동안 또는 극성반전 직후에 절연에 영구적인 고장을 일으킬 수 있다. 따라서 압출 케이블은 일반적으로 HVDC DC 전압의 극성을 변경하지 않고 전력 흐름 방향의 역전을 허용하는 전력 흐름의 완전히 제어 가능한 기능으로 VSC HVDC 기술에서만 사용된다. 공간 전하 거동 및 억제, 열화, 온도 및 전계 종속 전도도와

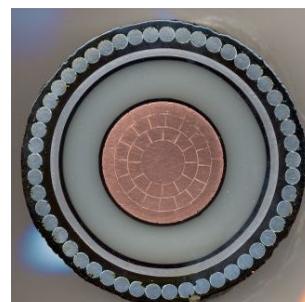


그림 7 HVDC extruded cable.[5]

관련된 문제는 모두 유전 및 열 특성을 개선하여 압출 HVDC 케이블의 신뢰성과 수명을 향상시키기 위해 추가 조사를 받았으며 계속해서 연구되었다.

④ Gas Insulated Cable

가스 절연 케이블은 오일 대신 가압 절연 가스가 적용된다는 점에서 오일충전 케이블과 유사하다. 가압된 가스는 외부 수압에 대해 해저 케이블을 지지할 수 있으며, 동시에 전력을 제한 없이 증가시킬 수 있다고 믿어진다. 1960년대에 설치된 여러 개의 가스절연 해저 케이블은 그림 8과 같이 최대 250kV DC 전압에서 작동되었다. 이후 이러한 유형의 HVDC 케이블은 거의 사용되지 않았다.

가스 절연 송전 케이블 기술의 다른 유형은 그림 10과 같이 가스 절연 라인(GIL) 시스템이라고 한다. 이러한 시스템에서는 높은 정격 전력과 낮은 손실을 보장하기 위해 큰 단면적의 도체가 사용된다. 도체가 주로 질소와 더 적은 비율의 SF₆(육불화황)로 채워진 절연 가스 혼합물로 채워진 외부 튜브의 스페이서에 의해 지지되기 때문에 GIL 시스템은 견고한 기계적 및 전기적 차단으로 지지된다. GIL 시스템은 지상에서 가공선을 대체하는 데 사용할 수 있다. 또한 공간이 덜 필요하고 환경 문제도 덜 발생한다. GIL도 케이블과 유사한 방식으로 사용할 수 있지만 영구 지하 터널이 필요하다. HVDC 프로젝트에 상업적으로 적용되지 않았다.

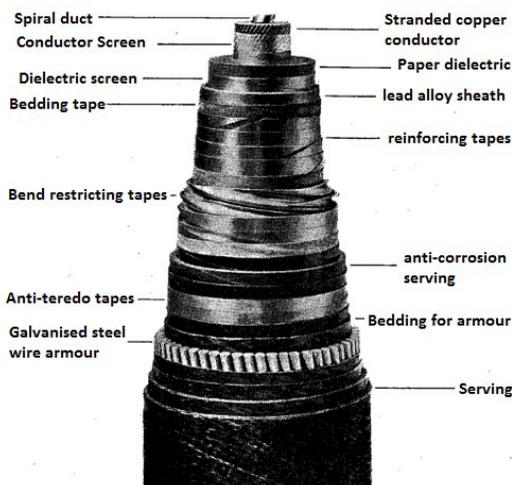


그림 8 Structure of gas filled cable [6].



그림 9 Gas insulated line used for HVDC systems [7].

⑤ Superconducting Cable

초전도 물질의 개발은 오랜 역사를 가지고 있다. 독특한 전기 및 열적 특성을 지닌 초전도 물질은 상당한 관심을 끌고 있다. 보다 실용적인 솔루션 HVDC 초전도체 케이블은 고온 초전도체 (HTS) DC 케이블이다. 그림 10과 같은 냉각 방식으로 액체 질소를 사용하며 케이블이 배치되는 극저온 인클로저(enclosure)를 일반적으로 저온 유지 장치라고 한다. 외부 실드와 극저온 인클로저 사이의 공간은 일반적으로 초절열층을 포함하는 진공이다. DC 초전도체의 냉각 요구 사항 케이블 자체는 열을 생성하지 않기 때문에 케이블은 케이블을 통해 흐르는 전력과 무관하다. HTS(high temperature superconductor) 케이블의 길이 제한은 냉각 및 액체 질소 흐름을 위한 냉장 스테이션의 요구 사항이다.

현재 상용화된 HTS DC 케이블은 없지만 HTS 케이블 연구 및 개발이 여전히 필요하다. 많은 연구에서는 200kV에서 5~20GW 범위의 매우 높은 연속 전력 용량 HTS DC 케이블 시스템을 제안했다. 따라서 전력 전송 솔루션으로 HTS DC 케이블을 적용하는 것은 매우 높은 전력 전송 상황에 더 적합하다.

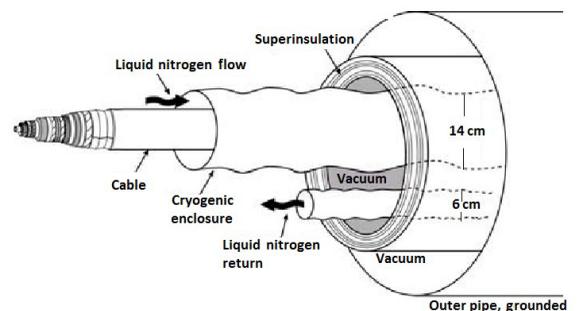


그림 10 Typical structure of HTS DC cable [8].

(2) HVDC Cable의 Accessories

완전한 HVDC 케이블 시스템의 일부인 케이블 액세서리, 즉 연결부 및 종단은 환경오염 및 설치자 오류의 높은 위험과 함께 이러한 구조의 복잡한 전기, 열 및 기계적 설계로 인해 때때로 가장 중요한 부품이 되고 있다. 따라서 안정적으로 작동하고 쉽게 설치할 수 있는 액세서리는 견고한 케이블 전송 시스템에서 중요한 역할을 한다. 장거리 전력 전송을 위한 HVDC 케이블 시스템에는 조인트(Joints)가 자주 적용된다. 케이블 경로에는 여러 유형의 이음새가 사용될 수 있다. 예를 들어 생산 방법에는 공장 이음새(factory joints)와 조립식 이음새(prefabricated joints)가 있으며 다른 용도에는 수리 이음새(repair joints)와 전환 이음새 (transition joints)가 있다. 유사하게, 육상 케이블 시스템과 해상 케이블 시스템에 사용되는 조인트(joint)의 수는 매우 다르다. 육상 압출 케이블 루트(onshore extruded cable routes)의 경우 1~1.5km를 초과하는 케이블의 무게와 크기로 인한 운송 문제로 인해 현장에서 쉽게 설치할 수 있도록 설계된 많은 조립식 조인트가 사용된다.

이와는 반대로 더욱더 많은 공장 이음새(joint) (케이블과 같은, 전계 그리고 기계적 특성을 갖는 공장 조건하에서 생산된) 것이 사용되고, 그리고 전체 이음새의 수는 반대로, 더 많은 공장 이음새 (공장 조건에서 동일한 전기 및 케이블과 같은 기계적 특성) 이 사용되며, 이음새의 전체 수는 대용량 케이블의 부설선박에 기

인하여 크게 감소된다.

또 다른 케이블 액세서리는 케이블을 다른 장비와 연결하기 위해 케이블 경로의 끝에서 사용되는 종단이다. 가공선, 부스바 및 개폐 장치. 케이블 유형에 따라 종단 구조가 다르다. 오일 충전 케이블의 경우 종단에 오일 공급 주입구가 필요하다. 유사하게, 대량 함침 케이블의 경우 오일 확장을 위한 조그마한 선박만 필요하다.

AC 시스템용 액세서리(accessories)와 달리 HVDC 액세서리는 공칭 DC 스트레스(nominal DC stress)를 견디는 데 필요하다. LCC에 대한 서지, 낙뢰 서지 및 극성 반전 스트레스 HVDC 기술. 디자인에서 가장 중요한 작업 중 하나가 액세서리 내의 전계분포의 최적화이다. 그렇지만, 이것은 전계와 온도의 변화가 논의된 유전 전기전도도의 특성에 기인한다.

더욱이, 공간 전하 축적(space charge accumulation) 및 그 영향은 케이블 절연체와 조인트 절연체 사이의 인터페이스와 같은 인터페이스의 특성뿐만 아니라 액세서리의 복잡한 기하학적 모양 및 구조로 인해 훨씬 더 예측할 수 없게 된다. 따라서 이러한 국부적인 현상으로 인해 HVDC 케이블 액세서리의 설계에 더 많은 주의를 기울여야 한다. 고전압 DC 케이블, 특히 최대 500kV의 압출 케이블이 개발됨에 따라 액세서리에 대한 관련 설계 및 테스트 도에 보고되었다. 그림 11과 같이 FGM (Resistive Field Grading Material)을 적용하여 균일한 전계 분포를 위한 특수 설계를 구현

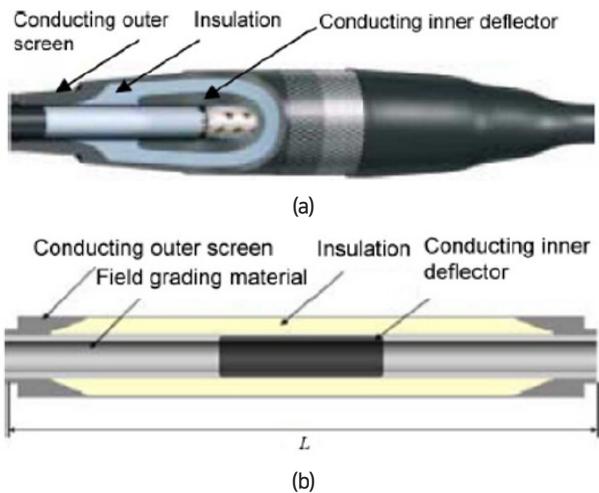


그림 11 일반적인 조립식 joint design
(a) 종단FGM이 없는 것 (b) 종단 FGM이 있는 것 [9].

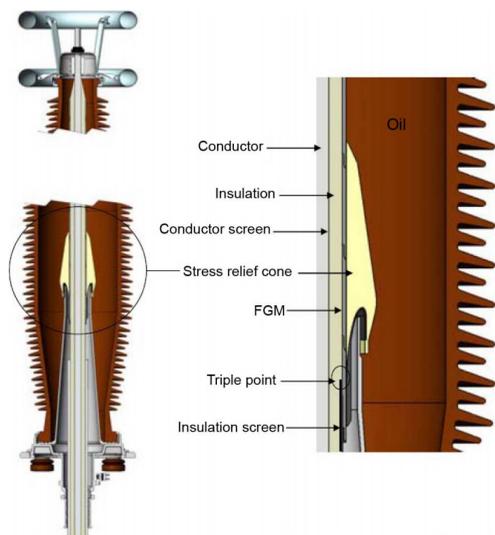


그림 12 FGM이 있는 HVDC 케이블 종단의 개략적인 단면도[9].

한다. 그림 11 및 그림 12. FGM에서 간단히 소개한다.

3. 결론

이 기술 논단은 다음과 같은 관찰과 함께 최신 HVDC 케이블 전송 기술에 대한 간략한 검토를 제공하였다.

- 1) 전력 거래를 위한 재생 가능 에너지 통합 및 강력한 상호 연결된 전력 네트워크에 대한 수요 증가로 인해 글로벌 전력 산업에서 HVDC 케이블의 중요성이 높아졌다.
- 2) 글로벌 HVDC 상업 프로젝트에 따르면 광범위한 상용 응용 프로그램을 가진 HVDC 케이블의 두 가지 주요 유형은 MI 케이블과 압출 XLPE 케이블이다. 입증된 기술인 MI 케이블은 장거리에서 최대 500kV의 DC 전원을 제공한다. 압출 XLPE 케이블의 적용, 한편으로 제조, 설치, 운송 및 유지 보수 측면에서 상당한 이점으로 인해 최근 몇 년 동안 급격히 증가했다. 525kV 압출 XLPE HVDC 케이블은 현재 상업적으로 이용 가능하지만 320kV는 지금까지 운영 프로젝트에서 가장 높은 전압 수준이다.
- 3) 이 기고는 HVDC 케이블과 관련된 두 가지 주요 문제, 즉 응력 반전과 공간 전하 효과를 다루었다. 이 두 가지 문제는 유전체 재료에서 온도 및 전기장 종속 전도도의 중요성을 반영한다. 공간 전하 축적으로 인한 결정적인 영향은 고분자 절연체에서 영구적일 수 있으며 극성 반전 후 높은 전기장 향상으로 이어질 수 있다.
- 4) HVDC 케이블의 성능을 향상시키기 위한 몇 가지 방법, 특히 공간 전하 억제에 대해서도 검토하였다. 나노복합체와 초정밀 XLPE의 적용은 모두 초고전압 정격의 미래 HVDC 케이블에서 가능성을 보여준다.

[참고문헌]

- [1] M. Jeroense, "HVDC, the next generation of transmission: highlights with focus on extruded cable systems," IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 5, no. 4, pp. 400-404, 2010.
- [2] M. P. Bahrman and B. K. Johnson, "The ABCs of HVDC transmission technologies," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 32-44, 2007.
- [3] H. Ghorbani, M. Jeroense, C.-O. Olsson, and M. Saltzer, "HVDC cable systems—highlighting extruded technology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 414-421, 2014.
- [4] A. Fujimori, T. Tanaka, H. Takashima, T. Imajo, R. Hata, T. Tanabe, S. Yoshida, and T. Kakihana, "Development of 500 kV DC PPLP insulated oil-filled submarine cable," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 43-50, 1996.
- [5] T. Worzyk, Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects. Springer Science & Business Media, 2009.
- [6] A. Williams, E. Davey, and J. Gibson, "The +/- 250 kV DC submarine power-cable interconnection," New Zealand Engineering, vol. 21, no. 4, p. 145, 1966.
- [7] SIEMENS, "Gas-insulated transmission line," Siemens AG, 2012.
- [8] J. McCall, B. Gamble, and S. Eckroad, "Combining superconductor cables and VSC HVDC terminals for long distance transmission," in 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES). IEEE, 2010, pp. 47-54.
- [9] H. Ghorbani, M. Jeroense, C.-O. Olsson, and M. Saltzer, "HVDC cable systems—highlighting extruded technology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 414-421, 2014.

저자소개

박재준(Park Jae-Jun)

1985 B.S. in Electrical Engineering,
Kwangwoon University

1987 M.S. in Electrical Engineering,
Kwangwoon University

1993 Ph.D. in Electrical Engineering,
Kwangwoon University

1997~ present Professor, Department of Electrical
and Electronic Engineering, Joongbu University

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr



이보인(Lee Bo-in)

1988년 광운대학교 전자공학과 졸업
1990년 동 대학교 대학원 졸업(석사)
1992년~2006년 현대중공업 기계전기전자연구소
근무
2020년 중부대학교 대학원 (박사과정 수료)
현재 디이시스(주) CTO / 대표
주 연구분야: 전력 예방진단 제어기,
IED 전력품질 진단기술 개발



김병준(Kim byoung-jun)

2009년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업
2011년 서울과학기술대학교 대학원
전기공학과 졸업(석사)
현재 중부대학교 스마트전력IT융합학과
박사과정 재학 중
1995년~2013년 한국전기안전공사 근무
2013년~2019년 삼성엔지니어링 근무
2019~현재 서원엠이씨 재직
2019년~현재 한국화재감식학회 국제이사



미래의 영구자석 기술 전망

Prospect for permanent magnet technology in future

김동환 CTO/사장 | 성림첨단산업(주)

Donghwan KIM | CTO/president, SGI co., LTD



요약

친환경 녹색성장을 위한 탄소중립 정책이 세계적인 공통 이슈로 부각하면서, 희토류 등과 같은 전략물자의 독점적인 중국 의존도가 심각한 이슈로 대두되고 있다. 국내에서는 지난 10 여년 동안 관련 기업 및 연구기관에 의해 친환경 희토정련과 중희토저감 희토자석 기술개발을 지속적으로 추진한 결과, 최근에는 희토자원 보유국인 호주 등과 사업 협력을 통해 독자적으로 희토정련공장 및 희토영구자석 공장 건설을 추진 중에 있고 조만간 국내에서도 희토자원에 대한 Out of China 밸류체인 형성이 가능할 것으로 예상된다.

Abstract

As the carbon neutrality policy for eco-friendly green growth has emerged as a global common issue, the exclusive dependence of strategic materials such as rare earth on China has emerged as a serious issue. Over the past 10 years, there were many continuous development of eco-friendly rare earth refining and rare earth magnet technology in Korea and it is expected that rare earth refining and rare earth permanent magnet factories will be built in Korea soon.

1. 서론

저탄소/녹색성장사회를 실현하기 위한 환경친화형 자동차, 저에너지소비형 가전제품, 풍력 혹은 태양열발전산업 등에 사용되는 핵심소재 중에 하나가 영구자석이다. 영구자석은 주로 모터, 액츄에이터, 발전기 등에 사용되면서 에너지변환(전기 \leftrightarrow 기계에너지)의 핵심적인 역할을 수행하는 기능성 소재로서, 1900년대 초반 영구자석이 처음 개발된 이후 성능이 지속적으로 향상되면서 산업 전반에 걸쳐 에너지 절감 및 기기의 소형화에 기여한 바가 크다. 특히, 최근 자동차산업에서는 화석원료를 사용하는 내연기

관을 모터와 병행하여 사용하는 하이브리드차 혹은 환경친화형 에너지원인 수소 등을 대체에너지로 활용하여 전기를 발생시키고 모터를 구동하는 연료전지차 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 환경친화형 자동차들은 전기에너지를 이용하여 구동되기 때문에 영구자석형 모터 및 발전기가 필연적으로 채용되므로 영구자석 측면에서는 에너지 효율을 더욱 향상시키기 위해 우수한 경자기 성능을 나타내는 희토류 영구자석에 대한 수요가 증가하는 추세이다.

보다 상세히 설명하자면, 자동차, 가전, IT, 의료산업 등 다양한 응용 분야에서 우수한 영구자석 소재로 사용되기 위해서는

높은 잔류자속밀도와 안정적인 보자력이 동시에 요구되고 있다. 이론적으로 영구자석의 잔류자속밀도는 소재를 구성하는 주상의 포화자속밀도 및 결정립의 이방화 정도, 자석의 밀도 등의 조건에 의해 결정되며, 잔류자속밀도가 증가할수록 자석은 외부로 보다 센 자력을 발생시킬 수 있기 때문에 다양한 응용분야에서 기기의 효율과 성능을 향상시키는데 효과적이다. 또한, 영구자석의 자기적 특징 중에 보자력은 열, 반대방향 자장, 기계적 충격 등 자석을 탈자 시키려는 환경에 대응하여 영구자석의 고유성능을 유지하게 하는 역할을 하므로 보자력이 클수록 내환경성이 양호하여 고온 응용기기, 고출력기기 등에 사용 가능할 뿐만 아니라, 자석을 얇게 제조하여 사용할 수 있기 때문에 사용 자석의 무게를 감소시켜 재료비를 절감하는 경제적인 효과를 얻을 수 있다.

이와 같이 희토류자석에 대한 기술적, 산업적 수요가 계속적으로 증가하는 반면에 지구상에 희토류자원은 한정되어 있고, 부족한 희토류자원마저도 중국에 집중되어 있다는 자원편중 및 고갈 문제와 미래형 영구자석은 보다 열악한 환경(고온, 고출력)에 사용되어야 하므로 획기적인 기술적 진보가 이루어져야 하는 등의 다양한 도전과제들이 도출되고 있다. 본 논문에서는 저탄소/녹색 성장사업의 핵심기술로 사용될 희토류자석의 산업적 가치를 재고해 보고, 이 분야에서 해결해야할 주요 이슈사항과 이를 극복하기 위한 국내/외 기술동향을 살펴봄으로서 향후 국내 희토류소재산업의 기술적, 산업적 발전방향을 제시하고자 한다.

2. Nd계 희토 영구자석의 발명과 기술발전 과정

인류가 천연자석을 사용하는 수준에서 탈피하여 인위적으로 영구자석을 제조하기 시작한 역사는 불과 100 여년 남짓한 짧은 기간이지만, 20세기 접어들면서 양자역학의 발전에 의해 원자의 전자구조 및 자기구조의 해석이 가능하게 되면서 보다 우수한 성능의 자성소재 발명이 가능하게 되었다. 예를 들어 영구자석의 자기특성은 소재의 에너지 변환능력, 즉 최대자기에너지적, $(BH)_{MAX}$ 크기로 비교가 가능한데, 1940년 발명된 페라이트자석의 경우, Fe-O-Fe 원자 간의 페리자성 원리를 이용하고 있고 $(BH)_{MAX}$

= 3~5 MGOe에 불과한 반면, 1960년대 희토류-철계 화합물의 강력한 결정자기이방성에너지를 이용하여 개발한 SmCo 희토 자석의 경우, $(BH)_{MAX}$ = 30~33 MGOe로 약 10배의 자기특성이 향상되는 기술적 진보를 이루게 되었다. 이와 같은 고특성 희토 자석의 발명은 HDD의 VCM 액츄에이터, 전기자동차의 구동모터 등과 같이 신제품의 개발이 가능하게 함으로서 컴퓨터, 자동차 산업 등의 기술발전 기여도가 매우 컸던 사례로 설명될 수 있다.

이와 같이 SmCo 희토자석은 독보적으로 우수한 자기특성을 나타내고 있다는 강력한 이점이 있는 반면에, 자석을 구성하고 있는 원소인 Sm은 희토광물 중에 함유량이 적음(= 1~3% of total rare earth) 희토류 이고, Co 역시 자원이 일부 국가에 편중된 전략물자로 분류되어 산업전반에 사용이 용이하지 않다는 자원부족의 문제를 갖고 있었다. 따라서 이후 많은 연구자들은 보다 풍부한 희토류인 Nd or Pr(= 20~25% of total rare earth) 및 Fe로 구성된 새로운 형태의 희토자석을 개발하고자 지속적인 연구를 진행하였고, 결과적으로 그림 1에서 보는바와 같이 1982년 Sumitomo metal mining(일)의 M. Sagawa 및 General motors(미)의 J. Croat에 의해 Nd-Fe-B 원소를 기본 구성으로 하는 Nd계 희토소결자석 및 본드자석이 발명되었다. 이들 자석은 기존에 알려졌던 Nd_2Fe_{17} 결정구조에 비금속인 B를 첨가함으로써 Fe-Fe 원자간 거리를 증가시켜 강력한 결정자기이방성을 형성하는 $Nd_2Fe_{14}B$ 상을 합성하면서 가능하게 되었다. 또한, 이들 강자성상인 $Nd_2Fe_{14}B$ 주상과 더불어 주상 주변에 Nd-rich 보조상이 균일하게 분포하면서 주상-주상 간 자기적 de-coupling 개선 및 자기적 결합 제거에 의해 자석의 보자력을 급격히 증가시키는데 중요한 역할을 한다.

1982 일본의 M. Sagawa에 의해 처음으로 $(BH)_{MAX}$ = 35 MGOe 성능의 Nd-Fe-B 자석 개발이 발표된 이래 2005년까지 이 기술분야 개발트렌드를 한마디로 요약하자면 “세계 최고 수준의 최대 자기에너지적을 갖는 영구자석을 제조하는 기술경쟁 과정” 이라고 표현할 수 있다, 1987년 M. Sagawa 등은 low oxygen process에 의해 세계 최초로 50 MGOe를 넘는 고특성 자석 개발을 발표하였고, 이어 일본, 독일 등의 여러 연구그룹에 의해 경쟁적으로 고특성 자석 관련 다수의 논문들이 발표되었다. 이와 같은 기

슬 경쟁은 2005년 까지 지속 되었고, 2005년 Y. Matsuura 등에 의해 $(BH)_{MAX} = 59.6 \text{ MGOe}$, $Br = 15.55 \text{ kG}$, $H_{cj} = 8.2 \text{ kOe}$ 수준의 세계 최강의 초고특성 희토자석 개발에 도달하게 된다. 이와 같은 고평성 자석을 개발하는 과정에서 strip casting, new jet mill, pulse pressing technology 등 매우 우수한 공정기술 개발이 수반되기도 하였지만, 최대자기에너지적 특성만을 지나치게 높이다 보니 잔류자속밀도 대비 보자력 크기가 약 50%에 불과한 값이 얻어지게 되었고, 이와 같은 특성조건(Br in kG > H_{cj} in kOe)의 자석은 현실적으로 산업에 사용될 수 없기 때문에 잔류자속밀도 향상에 대한 자존심 경쟁은 여기서 마치게 된다.

한편, 2005년 이후 현재까지 희토자석이 널리 사용되는 산업 분야는 상온 환경의 액츄에이터에서 고온 환경의 고평력 모터로 급격한 변화가 진행 중에 있고, 이와 같은 자석 사용온도 환경 변화에 부응하기 위해 고보자력 희토자석을 제조하는 기술을 개발하는 것이 합리적인 기술트렌드 라고 할 수 있다. 당시 보자력을 증가시키는 유일한 방법은 경희토인 Nd or Pr → 중희토인 Dy or Tb으로 치환하는 방법인데, 이와 같은 방법은 경제적 및 자원적 측면에서 두 가지 문제점이 존재한다. 첫째, 중희토는 지구상 부존자원이 극히 부족하고 중국의 일부 지역에서면 출도 되는 한정적 자원이라는 문제점 이고, 둘째, 중희토는 경희토 대비 가격이 10~15배 고가이므로 다량 사용하게 되면 희토자석의 제조원가가 급격히 증가한다는 경제적 문제점 이다. 따라서 2000년대 중반 이후 시기에 모든 연구자들의 고민은 “중희토 사용량을 최소화 하면서 보자력을 증가시키는 기술을 개발하는 것” 이었고 이와

같은 목표의 연구과정을 통해 개발된 자석이 중희토저감형 희토자석(HRE reduced magnet) 이다. 현재 인류에게 희토자석 이외에 다른 대체 영구자석이 존재하지 않는 현실에서 소재 및 모터 분야에서 연구 및 개발을 진행하는 엔지니어들은 중희토저감 희토자석의 개념과 트렌드를 명확히 이해할 필요가 있다. 따라서, 본 논문의 3절에서는 희토자원 현황 및 주요이슈에 대해 또한 4절에는 중희토저감 희토자석 미래시장과 기술전망에 대해 보다 구체적인 설명을 진행하고자 한다.

3. 희토류 자원현황과 주요 이슈

희토류는 일반적으로 Lanthanides 라고 불리며 3B족인 Sc(21), Y(39)과 원자번호 57(La)~71(Lu)까지 란탄계열 원소 15개를 포함한 총 17개 원소군 으로 구성된다. 현재 희토류가 세계 각국에 의해 중요한 전략자원으로 주목 받고 있는 이유는 “소량을 사용하여도 독특한 화학적, 전기적, 자성적, 광학적 특징 및 탁월한 방사선 차폐 효과를 가지고 있어서 친환경자동차, 석유정제, 신재생에너지, 군수무기산업 등 다양한 첨단산업 분야에 필수적으로 사용”되고 있기 때문이다.

희토류 원자들은 최외곽 4f 궤도 전자각에 전자를 채워가는 과정에 해당하므로 각각 원자들의 화학적 성질이 매우 유사하고, 희토광물이 처음 발견된 시기에는 희토류를 원소별로 분리하는 것이 용이하지 않아 Rare earth element 라고 불리게 되었다. 하지만, 그 이후 다양한 분리 및 정제기술의 발전으로 희토류 원소별 분리가 쉽게 진행되게 되었고 광물 탐사기술의 발전으로 세계 곳곳에서 새로운 희토광산이 발견되기도 하였다. 2018년 기준 세계 희토류 매장량은 약 1.2억 톤이고, 동시에 희토류 생산량은 17만톤 정도 이므로 이와 같은 속도로 희토류를 소비한다고 가정하면 인류가 약 700년 이상 사용할 수 있는 매우 풍부한 자원에 해당한다. 이와 같이 일반적인 선입견과는 달리 희토류 부존자원은 매우 풍부하다는 긍정적 측면 있는 반면, 희토류를 함유한 여러 종류의 광물로부터 채광, 정광, 정제 및 정련하는 과정에서 다량의 폐수, 대기오염, 방사능 방출 등의 심각한 환경오염이 발생하기 때문에 대부분 선진국들은 점차 희토류 생산을 기피하게 되었고 결

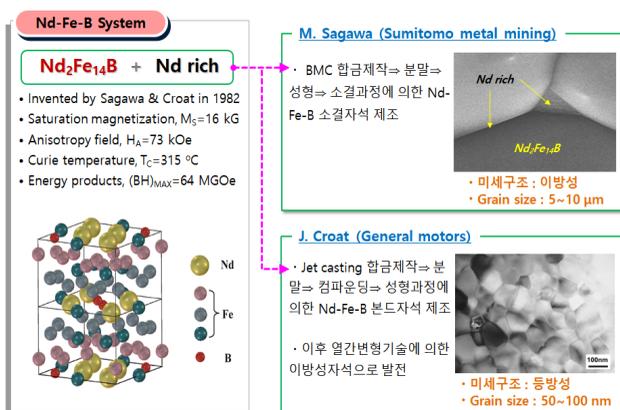


그림 1 Nd-Fe-B 희토자석의 발명과 본드 & 소결자석의 특징

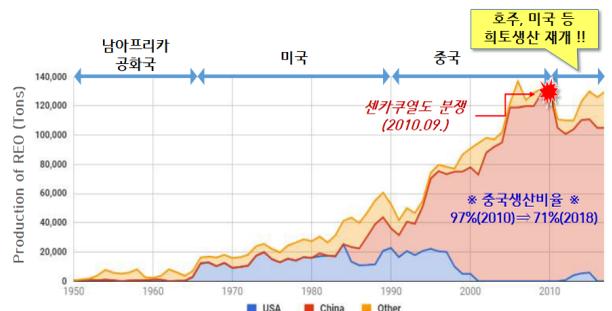
과적으로 최근에는 세계 희토류 생산의 대부분을 중국에 의존하는 상황이 되어버렸다. 그림 2는 1950년 이후 전 세계 희토류 생산량 변화추이를 보여주는 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 1960~1980년대 중반까지는 미국을 중심으로 희토류 생산이 활발히 진행되던 시기도 있었지만 그 이후 미국은 희토류 생산과정에서 발생하는 환경오염 등에 대한 부담으로 인해 생산량이 점차 감소하였고 2000년 이후에는 중국 대비 가격경쟁력 부족을 감당하지 못하고 생산이 완전히 중단되었다. 반면에, 세계 희토류 부존자원의 36.7% 및 고농도 희토광물을 보유하고 있는 중국은 내몽고자치구 포두지역을 중심으로 생산을 지속적으로 증가시키면서 2010년에는 세계 희토류 생산량의 97%를 점유하게 된다.

2010년 이후 중국이 세계 희토류 생산의 대부분을 점유하면서 희토류를 둘러싼 여러 분쟁이 시작되는데 대표적 무역분쟁 사례는 센카쿠열도 영토분쟁(2010년 9월), 중국의 희토류수출쿼터 감소 및 수출관세 강화(2010년 11월), 미-중국 무역분쟁에 희토류 자원 활용가능성 암시(2019년 5월), 중국 전략물자 관련 수출관 리법 통과(2020년 10월) 등이 있다. 중국이 이와 같은 희토류 관련 여러 무역분쟁을 일으키면서 주권자 하는 메시지는 한마디로 “중국은 모든 국가들을 대신하여 국토의 심한 오염을 감수하면서 희토류를 생산하는데, 더 이상은 희토류 생산량을 증가시키지 않고 중국이 사용하는 만큼의 희토류를 생산 하겠다” 라고 정리될 수 있다. 또한, 이와 같이 확보된 희토류라는 전략자원을 토대로 하여 친환경자동차, 풍력발전기, 군수산업 등에 경쟁력을 키워나가겠다는 것이 중국의 사업발전 전력이라고 판단된다.

따라서, 일본, 유럽, 미국 등 선진국에서는 첨단산업의 중요한 전략물자에 해당하는 희토류가 중국에 의존하는 산업구조를 탈피하는 것이 가장 시급한 과제가 되었고, 희토류 및 희토 관련 소재 공급에 대한 탈중국(out of China)을 위해 다양한 정책이 시도되고 있다. 예를 들어 희토류를 가장 많이 소비하는 국가 중 하나인 일본은 희토류 안정공급을 위한 4대 정책을 실시 중에 있는데, 그 내용을 간략히 요약하자면 다음과 같다. 호주, 인도, 베트남 등 희토류부존자원을 보유하고 있는 개도국의 희토광산 확보, 자동차 등에서 발생하는 폐희토 재활용을 위한 공장건설, 희토류 사용량 저감기술 개발 및 가격변동에 대비한 희토류 비축 등이

다. 이와 같은 정부 및 민간의 공동 노력으로 일본은 2012년 이후 현재까지 중국의 희토류 수입비중을 83%→ 49% 로 감소시키면서, 향후 진행될 가능성이 높은 중국의 해외 판매량 감축정책에 대비하고 있다. 또한, 중국 이외 국가 중 희토류 생산 활동에 가장 주목할 만한 변화는 호주의 적극적인 희토광산 개발활동 이다. 호주에는 수년 전부터 자국에서 5~6 개의 희토광산 개발 프로젝트를 진행 중에 있는데, 호주의 라이너스사의 경우 이미 말레이시아에 2 만톤/년 규모의 희토류 정련공장을 가동하여 생산을 진행하면서 중국의 희토류 독점시장을 방어하고 있다. 또한, 2019년에는 호주의 모업체가 참여하여 미국의 희토광산인 마운틴 패스 광산을 재가동하는 공장건설을 진행 중이므로 조만간 미국에서도 일 정량의 희토류 생산이 가능할 것으로 예상된다. 더욱이 미국의 경우 2021년 바이든 정부가 들어서면서 반도체, 배터리, 희토류, 바이오 등 핵심 4대 전략물자를 중심으로 이들 물자의 탈중국 공급망을 구축하고자 새로운 정책을 시도하고 있는데, 그 전략의 개략적 요약은 그림 3과 같다. 결론적으로 미국은 현재 미국 내 소재 관련 제조기반이 열악하기 때문에 호주, 일본, 한국 등 동맹국의 자원과 기술을 활용하여 희토류 및 희토류를 이용한 소재산업을 활성화 하고자 하는 것이 전략의 핵심이다.

이와 같이 간략히 희토류 자원환경 변화와 이를 대응하는 국가별 정책을 검토한 결과가 시사하는 점은 “대한민국은 희토자원을 보유하고 있지는 않지만, 우수한 정련기술과 희토영구자석 기술을 확보하고 있으므로 호주 등 희토류 자원보유국과 긴밀한 사업협력을 통해 Out if China 희토소재 밸류체인을 형성한다면 오히려 미국, 유럽 등 새로운 시장을 확보할 수 있는 중요한 기회가 된다” 라고 판단된다.



*자료 출처: Hobart M. King, "The demand for rare earth elements has grown rapidly, but their occurrence in minable deposits is limited", Geology.com

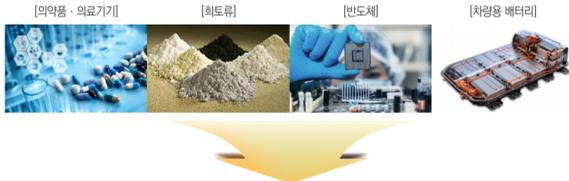
그림 2 연도별 희토류 생산량 변화 추이

표 1 국가별 희토광물 부존자원 및 생산현황(2018년 기준)

No.	국가	부존량(t)	비중(%)	No.	국가	생산량(t)	비중(%)
1	중국	4,400만	36.7	1	중국	120,000	70.6
2	브라질	2,200만	18.3	2	호주	20,000	11.8
3	베트남	2,200만	18.3	3	미국	15,000	8.8
4	러시아	1,200만	10	4	러시아	2,600	1.5
5	인도	690만	5.8	5	인도	1,800	1.1
6	호주	340만	2.8	6	브라질	1,000	0.6
7	미국	140만	1.2	7	베트남	400	0.2
8	기타	830만	6.9	8	기타	9,200	5.4
소계		1억 2천만	100	소계		170,000	100

* 자료출처 : 2018 희토부존자원 & 생산량/미국지질조사국(USGS)

√ 2021년 2월 24일, 바이든 대통령은 “반도체, 배터리, 핵심광물(희토류 등), 바이오” 등 4개 품목의 공급망을 100일 이내에 분석하여 대응방안을 마련하라는 행정명령에 서명.



√ 2021년 6월 8일, 미 국방부, 100일간 백악관 주도 공급망 실태조사(21.224 바이든 대통령 행정명령)에 따른 주요광물과 핵심전력소재의 공급수요 측면 대책 발표(21.6.8)

- 확보전략 I : 동맹국 전략_ 핵심전력소재 공급망 보장을 위한 동맹국 자원/기술활용
- 확보전략 II : R&D 전략_ 지속가능한 핵심전력소재 개발

그림 3 미국 바이든 정부의 전략물질 확보전략 요약
(자료: KISTEP 정책브리핑, 2021-2호)

4. 중희토저감 희토자석 기술개발 전망

일본의 사례에서 살펴본 바와 같이 현재 중국이 지배하고 있는 희토류 공급망에서 벗어나 독자적인 희토류 및 희토영구자석 벨류체인을 형성하기 위해 해외 희토광산 투자, 국내 폐희토 리사이클, 희토류 사용량 저감기술 개발, 희토류 비축 등의 정책들에 정부-민간의 긴밀한 공동 협력이 필요한데, 본 논문에서는 이들 희토류자립화 주요 정책들 중 희토류 사용량 저감기술개발 분야에 대해 핵심기술의 개념, 국내/외 기술개발 현황 및 향후 전망 등을 중심으로 논의하고자 한다.

앞서 2장에서 언급한 바와 같이 지구상에 희토류 부존자원은 비교적 풍부하지만 이를 정련하여 소재로 사용하는 과정에서 많은 환경오염이 발생하므로 이와 같은 문제를 극복하기 위한 기술적 방안은 희토자석 제조시 희토류 사용량을 최소화하는 기술개발 이고, 이 기술은 다시 1단계 : Dy, Tb 등 중희토 사용량 최소화 및 2단계 : Pr, Nd→ La, Ce 대체자석 개발 등 두 단계로 나누어 진행된다. 현재 시점에서 기술수준은 중희토저감기술이 성공적으

로 개발되어 사업화 진행이 시작되는 단계가 진행 중 이고, 향후 5년 이내에 보다 값싸고 풍부한 희토자원을 활용한 La-Ce 대체 자석이 출시될 수 있을 것으로 예상된다.

2005년 이후 희토자석의 사용 환경이 상온→ 150℃의 고온조건으로 변화됨에 따라 보자력을 개선하기 위해 중희토 사용량이 점차 증가하였고, 고갈위험이 높고 가격도 고가인 중희토 사용 부담을 줄이고자 여러 희토자석 제조사 및 연구그룹에 의해 중희토저감자석 개발이 활발히 진행되고 있다. 현재까지 중희토저감자석 제조에 적용되고 있는 개발 기술을 정리해 보면 그림 4와 같다. 먼저, 최근 3~5년 전부터 상용화가 진행되고 있는 입계확산 기술은 “중희토를 사용하지 않고 자석소결체를 제작하여 적절한 크기로 가공한 후, 자석표면에 중희토 화합물을 균일하게 도포하고 고온으로 가열함으로써 중희토가 결정립계면을 따라 자석 내부로 확산되도록 유도하는 기술”로서 상대적으로 기술적 난이도가 적고, 중희토저감 효과가 크다는 장점이 있는 기술인 반면, 물질의 확산은 항상 표면으로부터 내부로 향하면서 진행된다는 메카니즘 상의 한계로 인해 자석 표면과 내부에서 중희토 조성 차이가 발생하고 이와 같은 원인에 의해 자석의 부위별 성능편차가 존재하는 단점이 있다. 입계확산기술은 2005년 부터 일본의 신네츠사를 중심으로 개발이 시작되었고, 이후 일본 및 중국의 주요 자석업체에 의해 중희토분말슬러리 덩핑, 중희토금속 증착 등의 방식으로 도포 및 확산기술에 대한 활발한 연구가 진행된 결과로서 현재는 세계적으로 친환경 자동차의 구동모터에 적용되는 자석 대부분 입계확산기술이 적용된 중희토저감자석이 채용되고 있는 실정이다. 한편, 국내에서는 2011년 부터 재료연구원, 고려대학교, 부경대학교, 선문대학교 등의 연구기관과 성림첨단산업, 자화전자 등의 기업 중심으로 활발한 신기술개발이 진행되었고, 특히 성림첨단산업의 경우 수년간의 적극적 개발투자를 통해 독자적 기술과 특허를 확보하고 2018년 부터 국내 최초로 입계확산기술을 적용한 친환경자동차 구동모터용 자석 개발에 성공하여 양산에 진입하는 성과를 얻기도 하였다. 그림 5는 성림첨단산업의 개발기술을 적용하여 입계확산자석을 제조할 경우 중희토사용량 저감 수준을 보여주는 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 두께가 2.4 ~ 6.0 mmt의 자석모재를 사용하여 1% Tb을 도

포하고 확산반응을 통해 자석으로 제조한 결과, 자석두께에 따라 보자력이 14.5~12.0 kOe 범위로 증가하였고, 최종 결과적으로 중희토사용량을 75~79% 까지 절감이 가능함을 알 수 있다. 이와 같은 기술은 희토자석의 제조원가를 30% 이상 절감시키면서 동시에 자석 성능을 5~8% 증가시키는 획기적 기술수준에 해당하고, 신네츠사 등의 해외 자석 선진사 대비 동등 이상의 우수한 기술로 판단된다.

한편, 입계확산기술은 중희토 사용량을 획기적으로 줄일 수 있는 매우 유용한 기술이지만 중희토를 소량 사용해야 한다는 자원적 한계를 완전히 탈피하지는 못하고 있고, 중희토를 완전히 사용하지 않은 HRE free 자석을 제조하기 위해서는 결정립 미세화기술이 적용되어야 한다. 이 기술은 “자석의 결정립크기를 단자구크기(0.3 μm)에 근접하도록 점차 작게 제조함으로써 분말을 구성하는 자구가 다자구→ 단자구 구조가 되도록 구성하면 탈자과정에서 자벽이동을 억제하는 효과에 의해 보자력이 증가한다” 라는 원리를 이용한다. 예를 들어, 중희토를 사용하지 않는 조성의 합금을 이용하여 분말입도를 현재 상용화 수준인 3~4 μm→1 μm로 감소시키면 보자력은 14→ 25 kOe로 증가하게 되므로 현재 사용 중인 희토자석 전체의 약 90% 이상 대체가 가능하다. 이와 같은 원리는 수십년 전부터 많은 자성이론 전문가에 의해 제시되고 있다. 하지만, 희토자석 분말은 산화에 매우 취약하여 분말의 크기를 감소시키면서 안정적 조

성을 유지하기 어렵고 sub-micron 크기로 분쇄하기 위한 장비 기술의 한계가 있어 상용화를 위한 기술적 진보가 다소 느리게 진행되고 있는 실정이다. 그림 6은 성립첨단산업에서 개발한 입자미세화기술의 대표적 사례인데, HRE free 조성의 합금을 이용하여 2.0~4.5 μm 크기의 분말을 제조한 후 소결자석을 제조하여 자기특성을 측정된 결과, 분말입도 4.5~2.5 μm 범위까지 보자력은 이론치와 일치하는 경향으로 증가하였고, 이 조건에서 잔류자속밀도, Br과 보자력, Hcj는 각각 14.2 kG, 17 kOe가 얻어졌다.

결론적으로 향후 미래산업에 다양하게 사용될 희토자석의 기술트렌드를 예측해 보면, 중희토 저감 혹은 중희토 완전배제 자석 제조를 위한 기술로서 현재의 입계확산기술 중심에서 향후 3~5년 이후에는 입자미세화 기술 중심으로 전환될 것이 예상되고, 반면에 20 kOe 이상의 고보자력이 요구되는 자석의 경우에는 입자미세화 기술+경희토 확산기술의 융합에 의해 자석이 제조될 것으로 예상된다. 또한, 정확한 시점은 예측할 수 없으나 향후 분말 제조설비의 기술적 발전과 더불어 1 μm 급 희토자석 분말을 이용한 입자미세화자석기술이 개발되고, 이들 소재가 사용되는 모터에서도 냉각효율을 현재 수준 대비 약 20% 개선 가능하다면 완전한 HRE free 희토자석의 시대가 도래하면서 희토자석 완전한 탈중국에 의해 안정적 공급이 가능할 것으로 예상된다.

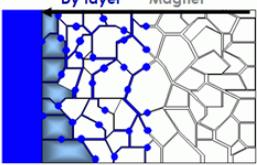
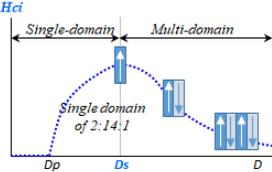
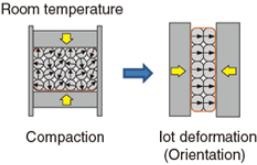
	입계확산기술	결정립미세화기술	열간변형자석기술
기술 컨셉			
기술 수준	54SH 0.5% Dy	42SH or 52H Dy free	42SH Dy free
장점 / 단점	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 기술적 난이도가 적음 - 공정비용이 비교적 저렴 - High Br magnet ▶ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 소량 중희토 사용이 필수 - 자석 내/외부 성능편차 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 완전 중희토 free 가능 - 자석 내/외 성능편차 양호 ▶ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 기술적 난이도 다소 높음 - 설비비용이 비교적 고가 - Medium Br magnet 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 완전 중희토 free 가능 - 보자력 온도특성(β) 양호 ▶ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 기술적 난이도 매우 높음 - 공정비용이 비교적 고가 - Low Br magnet

그림 4 중희토저감자석 제조에 적용되는 기술의 종류 및 비교

< 중희토 사용량 저감수준의 정량적 비교 >

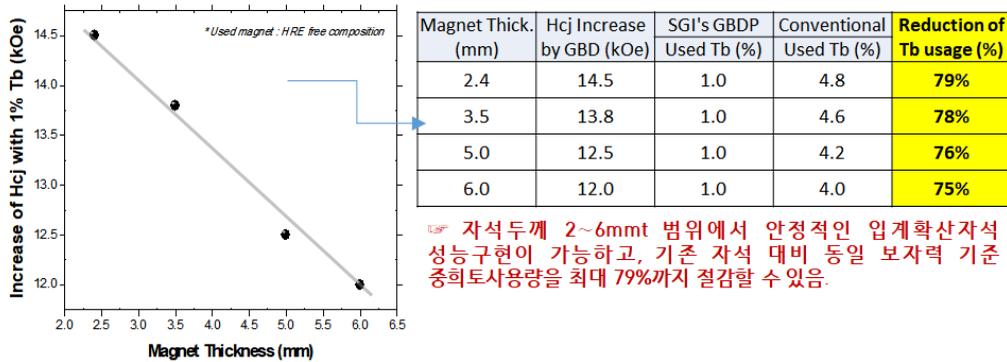


그림 5 중희토 입계확산기술 적용에 의한 중희토 사용량 저감 효과

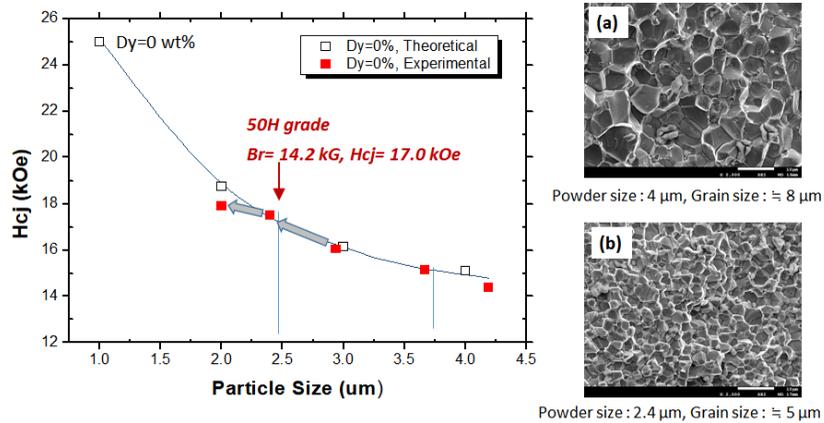


그림 6 입자미세화기술에 의한 HRE free 희토자석 기술 수준

5. 결 론

미래에 도래하게 될 산업화 사회는 환경과 에너지가 가장 큰 이슈로 부각될 것이 명확하기 때문에 희토류 및 희토영구자석 등과 같은 환경친화형 전락소재기술의 확보가 매우 중요하다. 또한, 국가별 무역관계가 상호간에 경제적 가치를 나누며 부가가치를 창출해 가는 협력시대에서 자원 내지는 핵심보유 기술을 전략적으로 활용하는 무한경쟁시대로 변화되고 있음을 주의 깊게 관찰하여야 한다. 이와 같은 맥락에서 희토류자원에 대한 고갈문제 해결하고, 미래의 첨단산업 발전의 토대가 되는 핵심 희토소재를 안정적으로 공급하기 위해 국가차원에서 다각적인 대책수립이 요구된다. 즉, 정부 및 대기업 차원에서는 해외 희토류광산개발 및 전락물자 비축사업 등 자원에 대한 인프라 구축사업을 체계적으로

추진하고, 학계-연구계에서는 희토류 사용량 저감 및 대체품개발에 의해 자원의 사용량을 최소화/다변화 하고 소재에 대한 기술 경쟁력을 강화하는 것이 중요하다.

다행스러운 것은 지난 10 여년 동안 국내 연구기관 및 관련기업에 의해 희토정련 및 중희토저감 희토자석 개발이 꾸준히 진행되어 왔고, 최근에는 호주의 A사의 투자에 의해 국내 처음으로 희토정련공장이 설립되어 가동을 준비 중에 있고, 동시에 국내 독자기술로 국내 희토영구자석 공장 건설을 시작하는 등 이 분야에 대한 새로운 도전이 시작되고 있다. 해결해야할 많은 과제들이 도출된 만큼 국내 기업 및 연구기관의 새로운 아이디어를 도전적으로 시도는 집중적인 연구와 사업화를 진행함으로써 향후 이 분야에서 세계기술을 선도하고 국가의 이익에 기여할 수 있는 결과가 얻어지길 기대한다.

[참고문헌]

- [1] M. Sagawa et. al, J. Appl. Phys., 55 (6), 2083 (1984)
- [2] J. J. Croat, Technical Report of Magnequench (1990)
- [3] Y. Luo, BM News, No. 33, 122 (2005)
- [4] Y. Luo, Magnews, Winter, 32 (2008)
- [5] Y. Luo, Magnews, Summer, 20 (2008)
- [6] S. Sugimoto, 일본금속학회. 춘기대회, S3.1, 113 (2009)
- [7] S. Hirose et. al, 일본금속학회 춘기대회, S3.2, 113 (2009)
- [8] M. Sagawa, Proc. 21th Int. Workshop on REPM and their Applications (2010)
- [9] S. Sugimoto et. al, Proc. 21th Int. Workshop on REPM and their Applications, 16 (2008)
- [10] F. Bittner et. al, J. of Magnetism and Magnetic Materials, 426 (2017)
- [11] 2020 한중 희토소재 기술발전 세미나, 생산기술연구원 (2020)
- [12] Jiayi He et. al, : Appl. Phys. Lett. 120, 042405 (2022)

저자소개**김동환(Donghwan KIM)**

1989년 충남대학교 금속공학과
 1996년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
 2011년 자화전자, 연구소 팀장
 2014년 포스코, 법인장
 2014~현재 성림첨단산업, CTO/사장
 주 연구분야: 희토류영구자석 및 응용소재



전자기파 차폐 응용을 위한 2차원 소재 MXene의 연구동향

Recent advances in two-dimensional materials MXenes for electromagnetic interference shielding

김슬기, 황혜원, 이동주 | 충북대학교

Seulgi Kim, Hyewon Hwang, Dongju Lee | Chunguk national university



요약

고성능의 전자기기의 발전과 더불어 이로 인해 전자부품에서 발생하는 전자기파에 대한 문제 및 차폐 필요성이 점차 증가하고 있다. 따라서 본 고에서는 전자기파 차폐 응용을 위한 2차원 전이금속 탄화물 (MXene)을 이용한 EMI 차폐 소재 제조공정 및 특성 연구동향에 대해 소개하고자 한다.

Abstract

With the development of high-performance electronic devices, the problem and the need for shielding against electromagnetic waves generated from electronic components are gradually increasing. Herein, we introduces a recent study on MXene, a two-dimensional nanosheet, for electromagnetic wave shielding materials.

1. 서론

현대 전자기기 및 회로의 소형화, 고성능화는 시스템 작동 속도의 급격한 증가를 가져왔다. 이로 인해 인체 및 전자기기에 해로운 영향을 미칠 수 있는 전자기파 간섭 (electromagnetic interference; EMI) 발생이 늘어나고 있다. 인간이 EMI에 장기간 노출되면 메스꺼움, 두통, 압, 유아 뇌 발달 문제를 유발하여 인체 건강에 해로운 영향을 미친다. 또한 개별 소자에서 발생하는 전자기파로 인해 각 부품 간의 신호 간섭 및 성능 저하, 기기 오작동 등이 발생할 수 있다. 따라서 EMI를 차단하기 위한 흡수 및 차폐 소재의 필요성이 점차 증가하고 있다.

EMI 차폐를 위한 소재는 높은 전기전도도를 가져야 하며 넓

은 표면적을 확보하는 것이 유리하기 때문에 차폐재의 소재 종류 또는 차폐재의 구조 설계를 개발하는 것이 중요하다. 기존에 주로 사용된 차폐재의 소재는 Cu, Al, Ag 등 우수한 전기전도도를 갖는 금속이 널리 사용됐다. 하지만 금속 소재는 고밀도, 어려운 가공성 및 높은 부식성의 문제를 가지기 때문에 차폐 효율을 높이기 위한 구조 설계에 한계가 있으며, 저주파수 대역에서만 차폐가 가능하여, 최근 5G (450 MHz-52 GHz) 통신 상용화와 주파수 부족 현상에 대응하기 위한 고주파수 대역에서의 응용이 불가능하다는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 들어 저주파 및 고주파 대역에서 전자기파를 모두 차폐할 수 있도록 전기전도도가 우수한 전도성 탄소 소재 및 나노 소재를 활용한 연구가 크게 대두되고 있다.

2. 2차원 전이금속 탄화물 MXene

그 중에서 2차원 전이금속 탄화물 소재인 MXene은 높은 전기전도도와 우수한 가공성으로 인해 차세대 전자기와 차폐를 위한 재료로 주목받고 있다. MXene은 전구체인 MAX phase (M: 전이금속, A: 13족 또는 14족 원소, X: 탄소 또는 질소)를 에칭하여 제조되는데, 이 때 제조 공정 중에서 표면에 -OH기와 같은 친수성의 표면 기능기 형성으로 인해 다양한 극성 용매를 이용한 수용액 공정이 원활하여 이종 물질과의 복합화 또는 구조체로 제조하기 용이하다는 특징을 갖는다. 또한, 현재 다양한 종류의 전이금속으로 이루어진 약 60여가지가 넘는 조성의 MAX phase가 연구되어 있어 MXene의 종류에 따라 밀도, 열전도도, 열팽창계수 등 다양한 물리적인 특성을 선택할 수 있으며, 전기전도도 역시 필요에 따라 조절할 수 있다.

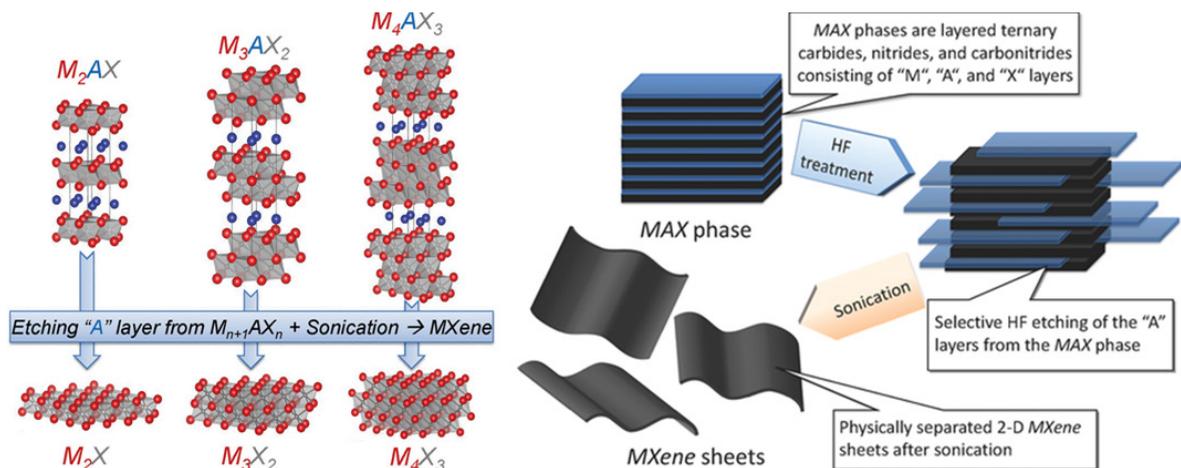
MXene은 M, X의 조성 및 표면 기능기에 따라 다른 밴드 구조를 갖기 때문에 금속에서부터 반도체 특성까지 전기적 특성을 다양하게 조절할 수 있다. $Ti_3C_2T_x$ 와 $Mo_2TiC_2T_x$ MXene의 경우 동일한 전이금속과 탄화물의 조성임에도 불구하고 이종의 전이금속 첨가로 인해 밴드갭이 형성되어 금속 특성에서 반도체 특성으로 변화된 것을 확인할 수 있다. 이 외에도 다양한 전이금속의 조성으로 구성된 필름 형태 MXene의 전기전도도를 나타낸 표에서

확인할 수 있듯이 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 경우 대략 8570 S/cm의 우수한 전도도를 보여 차폐기능이 우수한 소재임을 확인할 수 있다.

이러한 특성을 바탕으로 2016년에 최초로 Yuri gogotsi 그룹에서 MXene의 EMI 차폐 특성을 평가했으며, 관련 연구가 빠르게 증가하고 있다. MXene을 이용한 EMI 차폐소재 연구는 크게 1) 소재 자체의 우수한 전기전도도를 활용한 필름 형태와 2) 넓은 표면적을 활용한 3차원 구조체에 대한 연구가 진행되고 있다.

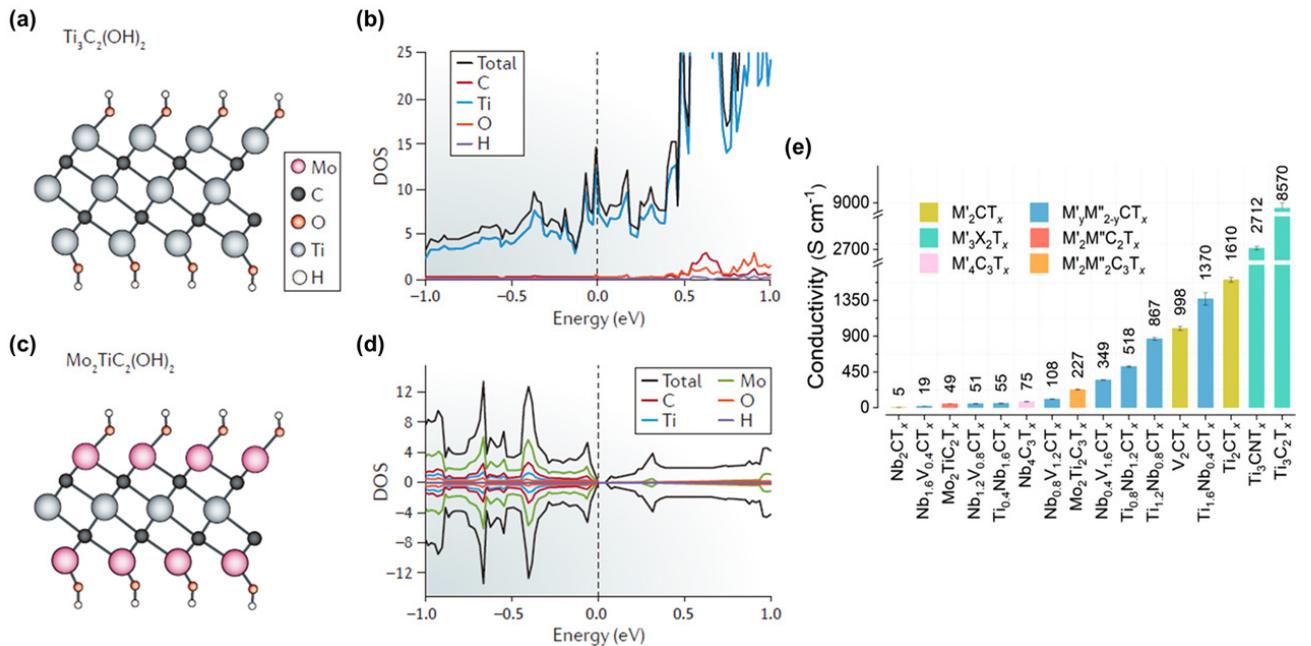
3. MXene 기반 EMI 차폐 필름

Gogotsi 그룹은 약 25 μm 의 두께를 갖는 세 종류의 단층 $Ti_3C_2T_x$, 이중층 $Mo_2TiC_2T_x$ 및 $Mo_2Ti_2C_3T_x$ MXene 필름을 진공 여과 공정을 사용해 제조했다. $Ti_3C_2T_x$ 를 이용해 제조된 필름은 각각 120, 300 S/cm의 전기전도도를 갖는 $Mo_2TiC_2T_x$ 및 $Mo_2Ti_2C_3T_x$ 필름에 비해 4700 S/cm의 우수한 전기전도도를 가지며, X-band 주파수 범위 (8.2-12.4 GHz)에서 두께가 증가함에 따라 EMI 차폐 특성이 증가했으며, 45 μm 의 두께에서 92 dB의 가장 높은 차폐 특성을 보였다. 이는 입사 EMI를 약 99.99999994% 차단함으로써 0.00000006%의 투과율을 보이는 것으로, $Ti_3C_2T_x$ MXene 필름과 동일한 두께의 흑연, 그래핀, CNT와 같은 전도성 물질보다 우수한 성능을 보여 기존의 금속필름과 비견될만한 결과를 나타내었다. MXene의 EMI 차폐 메커니즘은 우수한



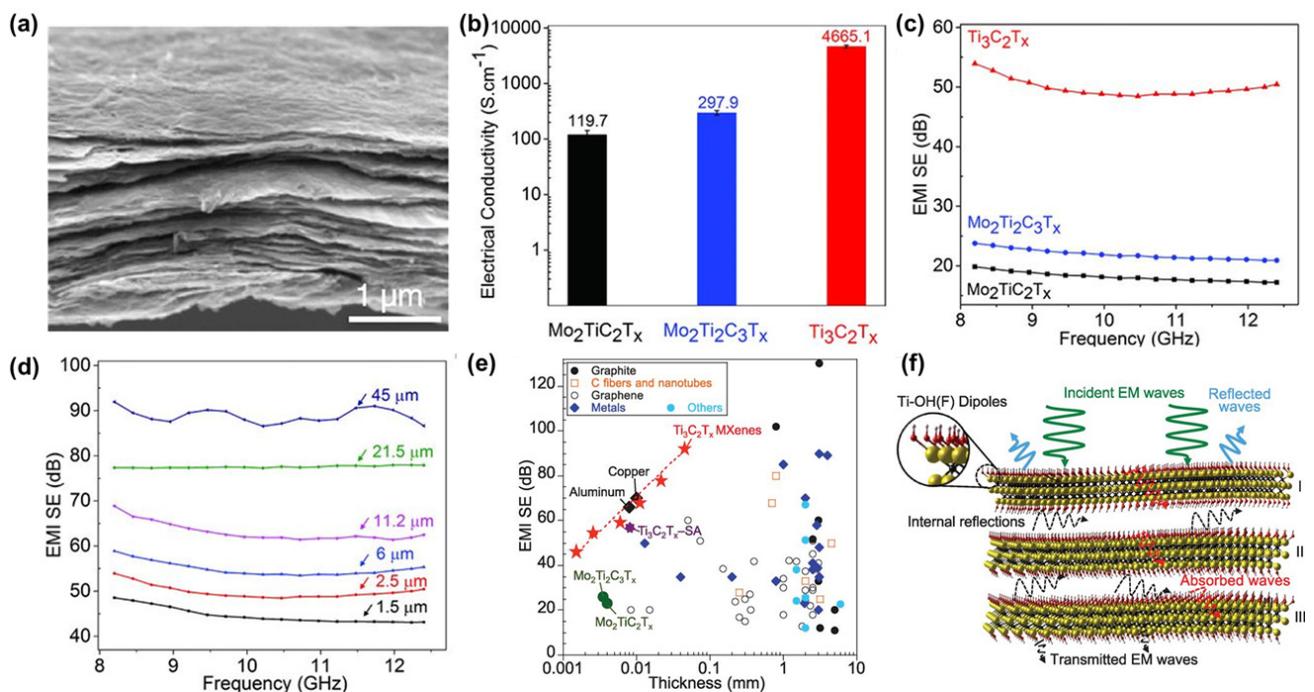
출처 Advanced Materials (Wiley)

그림 1 MXene의 구조 및 제조공정 모식도 [1]



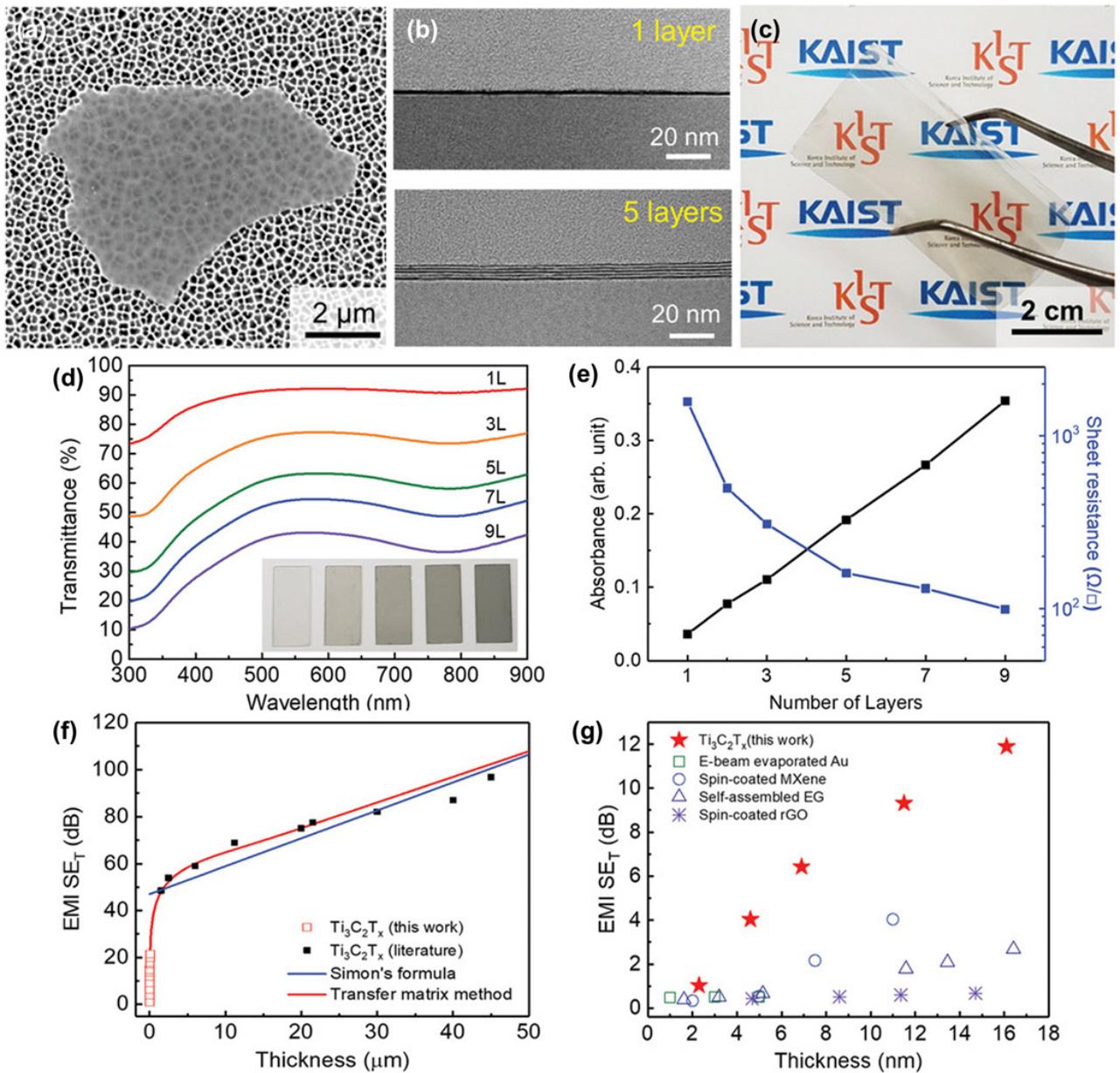
출처 Nature Reviews Materials (Nature Publishing Group) ACS nano(ACS Publications)

그림 2 $Ti_3C_2(OH)_2$ MXene의 (a) 구조 모식도, (b) Density of state (DOS) 결과. $Mo_2TiC_2(OH)_2$ MXene의 (c) 구조 모식도, (d) DOS 결과. (e) MXene 종류에 따른 전기전도도. [2,3]



출처 Science(AAAS)

그림 3 (a) $Ti_3C_2T_x$ 필름의 주사전자현미경 이미지. MXene 종류에 따른 (b) 전기전도도 및 (c) EMI 차폐 성능. (d) $Ti_3C_2T_x$ 필름 두께에 따른 EMI 차폐 성능. (e) $Ti_3C_2T_x$ 필름과 기존 연구 (2차원 소재 및 금속) 결과 비교. (f) $Ti_3C_2T_x$ 의 EMI 차폐 메커니즘 모식도 [4]



출처 Advanced Materials (Wiley)

그림 4 (a) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 와 (b) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 필름의 투과전자현미경 이미지. (c) PET $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 필름의 디지털 이미지. 필름 두께에 따른 (d) 투과도, (e) 흡광도 및 면저항, (f) EMI 차폐 성능, (g) 기존 연구 결과 비교. [5]

전기 전도성에서 비롯된 것으로, MXene 표면에 전자기파가 맞게 되면 일부 전자파는 MXene 표면의 풍부한 자유 전자에 의해 즉시 반사된다. 나머지 전자파는 MXene의 격자구조를 통과하는 동안 높은 전자 밀도와 상호 작용으로 인해 전압 손실을 야기하는 전류가 유도되며 감쇄되고 이러한 현상은 MXene의 격자 구조를 지나는 동안 반복되며, 동시에 표면에서는 내부 반사

를 발생시킨다. 이 현상은 전자기파가 MXene 구조에 완전히 흡수될 때까지 반복된다. 이는 규칙적인 결정 구조를 가지며 내부 다중 반사 현상을 제공하는 층간 반사 표면이 없는 순수 금속과 대조를 이룬다.

최근Yun 그룹에서는 나노미터 두께의 MXene 필름의 차폐 특

성과 다중 반사 효과에 대한 연구를 보고했다. 단층 MXene 필름은 자가조립을 이용했으며, 다층 필름은 단층 필름의 반복 적층으로 제조했다. 평균 2.3 nm의 두께를 갖는 단층 $Ti_3C_2T_x$ MXene 시트(필름)는 우수한 유연성, 90% 이상의 투과율 및 1056 Ω/cm^2 의 면저항을 나타냈다. 필름의 두께가 두꺼워질수록 시트 저항은 감소하고 흡광도와 EMI 차폐 성능은 향상했다. 단층 $Ti_3C_2T_x$ MXene 필름 (2.3 nm) 은 1 dB의 EMI 차폐능을 나타내는 반면, 55 nm 두께의 24층 MXene 필름은 20 dB 및 99% 차폐 성능을 보였다. 유사한 필름 두께에서 $Ti_3C_2T_x$ MXene 필름은 우수한 전도도로 인해 EG 및 rGO (200 S/cm) 필름보다 훨씬 우수한 EMI 차폐 성능을 보인다.

4. MXene 기반 3차원 구조체 EMI 차폐 소재

Liu 그룹은 3차원 $Ti_3C_2T_x$ MXene foam을 EMI 차폐 소재에 적용한 연구결과를 보고하였다. 진공 여과 장치를 이용해 MXene 필름을 제조한 후 히드라진 용액으로 MXene sheet 사이 층간 간격을 확장하여 저밀도 foam 구조를 제조했다. 1, 3, 6 μm 의 두께를 가진 필름은 히드라진 용액 처리 후 각각 6.2, 18, 60 μm 로 두께가 증가하였으며, 전기전도도는 필름 형태보다 감소한 값을 나타내었으나, 히드라진 용액 처리를 통해 $Ti_3C_2T_x$ 표면에 Ti-O와 C-O 결합의 비율이 높아져 습한 환경에서도 산화에 대한 안정성을 확인하였다. 낮은 전기 전도도에도 불구하고 다공성 MXene foam은 필름보다 우수한 EMI 차폐 성능을 보였는데 이는 다공성

MXene foam 내에서 전자기파가 반사 및 산란이 발생할 수 있는 계면을 필름보다 많이 제공하기 때문이다.

Bian 그룹은 외부 지지체 및 화학적 가교제를 사용하지 않고 동결 건조를 이용하여 $Ti_3C_2T_x$ MXene 에어로젤을 제조했다. 에어로젤 밀도는 동결 건조에 사용된 MXene 용액의 농도에 의해 제어되었으며, 기공의 형태는 동결 중 형성된 얼음 결정에 의해 결정된다. 에어로젤은 비교적 22 S/cm의 낮은 전기전도도를 가지지만, 0.004 g/cm³의 낮은 밀도와 무게를 가지며 낮은 전자파 반사 (1 dB 미만)와 우수한 EMI 차폐 성능 (75 dB) 결과를 보고하였다.

5. 결 론

본 고에서는 고성능 전자기기 발달로 인한 전자기파의 문제점과 차폐의 중요성에 대해 살펴보고, 이를 위해 2016년부터 현재까지 MXene을 활용한 전자기파 차폐 연구 결과에 대해 논의했다. MXene을 활용한 필름 형태의 차폐재부터 3차원 구조의 차폐재까지 모두 우수한 전기 전도성 혹은 비표면적으로 인해 높은 차폐 특성을 보였으며, 이는 유사한 2차원 소재 및 금속 재료를 사용한 기존 연구 결과와 비교하여 높은 특성과 활용성을 보여주고 있다. 이러한 MXene 기반 EMI 차폐에 대한 연구는 향후 더욱 증가하는 전자기파 간섭 및 장애로 인한 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되며, EMI 차폐/흡수재 응용 뿐만 아니라 에너지, 촉매, 복합재료 등 다양한 산업 분야로의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

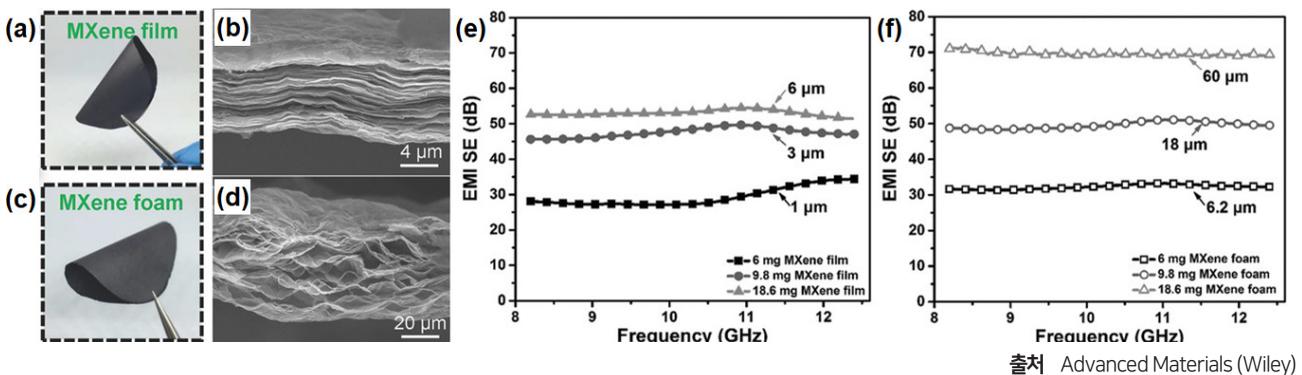
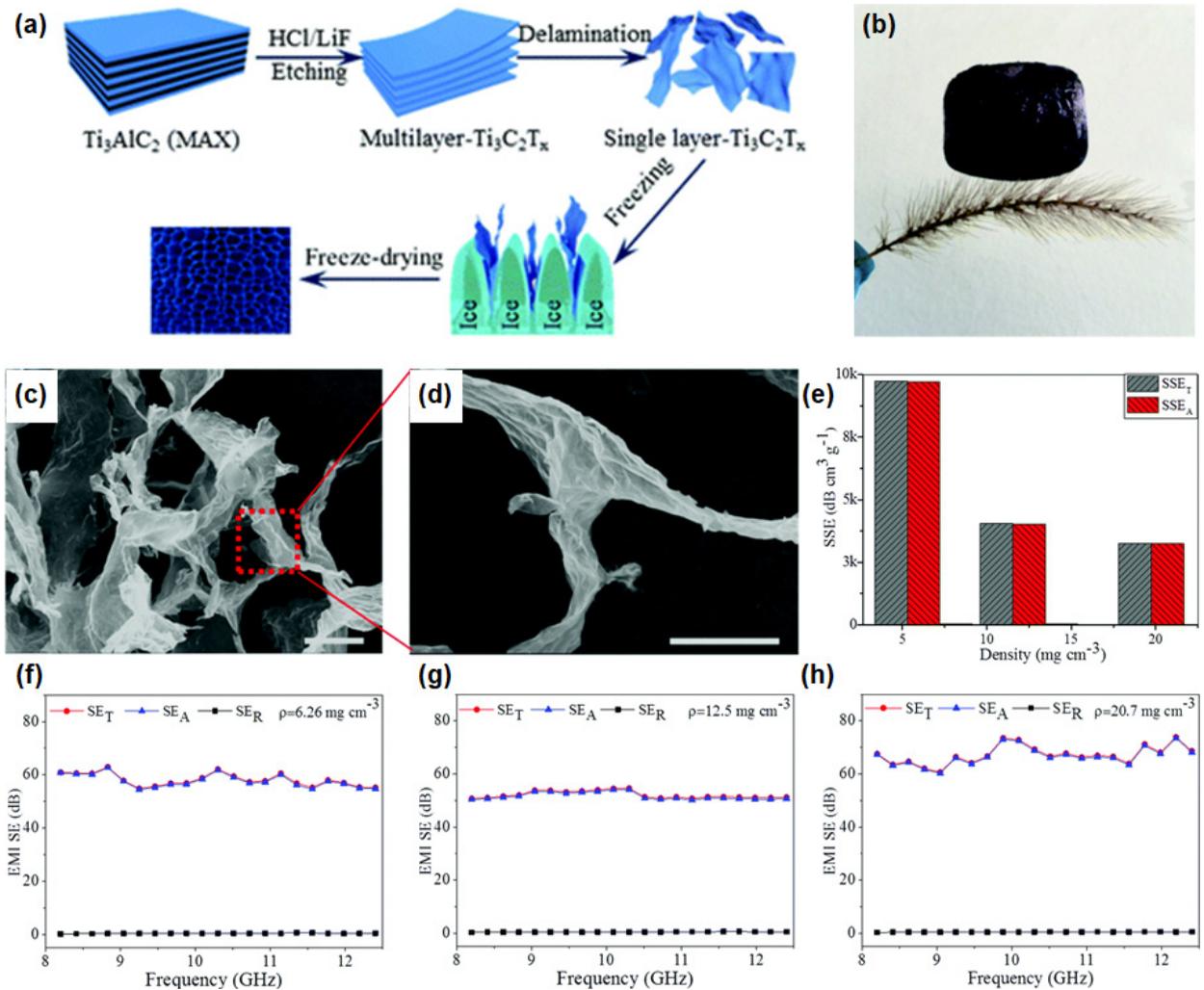


그림 5 (a-b) $Ti_3C_2T_x$ 필름 디지털 및 주사전자현미경 이미지. (c-d) $Ti_3C_2T_x$ foam 디지털 및 주사전자현미경 이미지. (e) 필름 두께에 따른 EMI 차폐 성능. (f) foam 두께에 따른 EMI 차폐 성능. [6]



출처 Journal of Materials Chemistry C (RSC Publishing)

그림 6 (a) $Ti_3C_2T_x$ 에어로젤 제조 공정 모식도 $Ti_3C_2T_x$ 에어로젤의 (b) 디지털 이미지, (c-d) 주사전자현미경 이미지. (e-h) 에어로젤 밀도에 따른 EMI 차폐 성능. [7]

[참고문헌]

[1] Michael Naguib, Vadym N. Mochalin, Michel W. Barsoum, Yury Gogotsi, "25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials", *Advanced Materials*, 2013.12

[2] Babak Anasori, Maria R. Lukatskaya, Yury Gogotsi, "2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage", *Nature Reviews Materials*, 2017.1

[3] Meikang Han, Christopher Eugene Shuck, Roman Rakhmanov, David Parchment, Babak Anasori, Chong Min Koo, Gary Friedman, Yury Gogotsi, "Beyond $Ti_3C_2T_x$: MXenes for Electromagnetic Interference Shielding", *ACS Nano*, 2020.3

[4] Faisal Shahzad, Mohamed Alhabeb, Christaine B. Hatter, Babak Anasori, Soon Man Hong, Chong Min Koo, Yury Gogotsi, "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)", *Science*, 2016.9

[5] Taeyeong Yun, Hyerim Kim, Aamir Iqbal, Yong Soo Cho, Gang San Lee, Myung-Ki Kim, Seon Joon Kim, Daesin Kim, Yury Gogotsi, Sang Ouk Kim, Chong Min Koo, "Electromagnetic Shielding of Monolayer MXene Assemblies", *Advanced Materials*, 2020.1

- [6] Ji Liu, Hao-Bin Zhang, Renhui Sun, Yafeng Liu, Zhangshuo Liu, Aiguo Zhou, Zhong-Zhen Yu, "Hydrophobic, Flexible, and Lightweight MXene Foams for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding", *Advanced Materials*, 2017.8
- [7] Renji Bian, a Gaoling He, a Weiqiang Zhi, b Shanglin Xiang, b Tingwei Wangb and Dongyu Cai, "Ultralight MXene-based aerogels with high electromagnetic interference shielding performance", *Journal of Materials Chemistry C*, 2019.3
- [8] 민복기, 이윤식, 탐반누엔, 슈브라문달, 최춘기, "저차원 나노 소재 기반 다기능 전자파 차폐 및 센싱 응용기술", *전자통신동향분석*, 2020.8

저자소개

김슬기(Seulgi Kim)

2019년 충북대학교 신소재공학과 졸업
 2020년 동 대학교 대학원 졸업(석사)
 2021년~현재 동 대학교 대학원 박사과정
 주 연구분야 : 나노소재, 복합재료,
 에너지저장소재 등



황혜원(Hyewon Hwang)

2021년 충북대학교 신소재공학과 졸업
 2022년 동 대학교 대학원 졸업(석사)
 주 연구분야 : 나노소재, 복합재료,
 에너지저장소재 등



이동주(Dongju Lee)

2008년 한양대학교 신소재공학부 졸업
 2010년 KAIST 신소재공학과 졸업(석사)
 2014년 KAIST 신소재공학과 졸업(박사)
 2015년~2017년 한국원자력연구원 선임연구원
 2017년~현재 충북대학교 신소재공학과 교수
 주 연구분야 : 나노소재, 복합재료,
 에너지 저장/변환소재 등



한양대학교 HVDC 전력연구실 소개

이방욱, 김선진

연구실 개요

2008년에 개설된 한양대학교 전자공학부 이방욱 교수의 HVDC(High Voltage Direct Current) 전력연구실은 HVDC 전력기기의 절연설계 및 전계해석, DC전력시스템의 과전압 절연설계, DC 차단기술, 초전도 전력기기, 친환경 전력기기 연구 개발 분야에 대한 다양한 연구 및 산학협력들을 수행해오고 있다.

특히, DC 전력기기 절연설계를 위하여 필수적인 DC 전계해석 분야 연구는 국내에서는 가장 앞선 연구 인프라를 구축하였으며, 해외 대학들과 대등한 수준의 연구실적을 구축하고 있다. 또한, 아시아 대학중 최대 규모로 154kV급 전력기기까지 시험 평가가 가능한 퓨전전기기술훈공 연구소의 시험 설비를 갖추고 있다.

최근에는 600kV급 DC전력기기 내전압 시험설비를 구축 완료하여, 다수의 중전기 업체들과의 협업을 통해 교류, 직류 전력기기 핵심 기술 개발에 주력하고 있다.

본 연구실은 2016년부터 5년간 국가과제로 수행한 '차세대 DC 송배전 핵심 기반기술 연구 고급 트랙' 인력양성 사업을 통해 비약적인 발전을 이루었으며, BK사업 및 한양대학교 자체사업인 '차세대송배전전력변환시스템 디자인센터' 구축 사업에 선정되어, DC송배전 핵심 연구기술 개발 및 산학연 프로젝트를 수행을 통해 인재양성에 주력하고 있다.

이를 바탕으로, 본 연구실 졸업생들은, 한국전력, 한국전기연구원 등 국책연구기관 및 국내 굴지의 대기업 연구소에서 21세기 전력산업을 선도할 연구 개발의 주역으로 활약하고 있다.

다음으로 본 연구실에서 최근 중점적으로 수행하고 있는 연구들 및 핵심 설비 인프라를 소개하고자 한다.

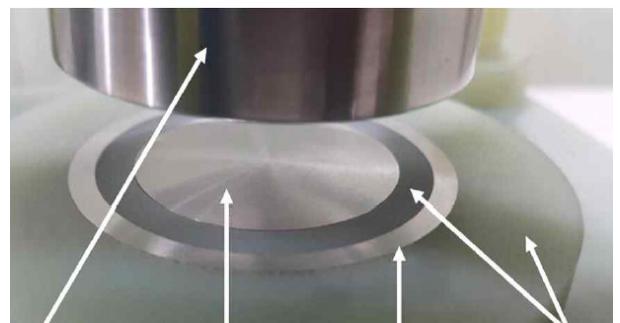
1. AC/DC 전력기기 전계해석 기술

전력기기의 절연설계를 위해 전계해석은 필수적으로 수행되어야 할 절차이다. 유전율에 기반하는 AC 전계특성과는 다르게 DC 전계는 도전율에 의존한다. 특히, DC 환경에서는 절연체 내부에 공간전하 축적 현상이 발생하기 때문에, 이를 고려한 해석 기술도 요구된다. 본 연구실은 도전율 기반 DC전계해석 기술을 자체적으로 구축하였으며, 이를 기반으로 HVDC 송배전 선로, DC 애자, DC 케이블 등을 비롯한 다양한 전계해석을 수행하고, 시험 평가를 진행하여 정합성을 향상시키는 연구를 진행하고 있다.

을 구축하였다. 측정된 누설전류 값을 도전율로 환산하여 DC 전계해석의 매개변수로 활용하며 다양한 전력기기의 DC 전계특성 분석이 가능하다.

(1) 도전율 기반 DC 전계해석 기술

절연재료의 체적 저항을 도출하기 위해 누설전류 측정 시스템을



상부 전극 주 전극 가드 전극 GFRP 전극

그림 1 도전율 측정용 전극구조



그림 2 도전을 측정 시스템

(2) DC 전력기기 모델링 및 전계해석

전력 시스템의 안정적인 운영을 위해 케이블 및 접속함 그리고 애자 등과 같은 주요 전력기기와 기소재에 대한 절연 성능 평가가 필수적으로 수행되어야 한다. 특히, HVDC 시스템에서는 스위칭 ON/OFF, 극성반전 및 임펄스 중첩 등 과도상태가 존재하므로, 정상상태 및 과도상태를 모두 고려한 전계해석 기법을 적용하여 다양한 전력기기의 전계특성 분석, 전계 완화 대책 수립 등 다양한 연구를 수행하고 있다.

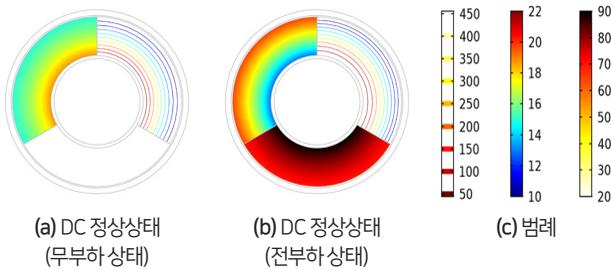


그림 3 HVDC 케이블 DC 전계해석 사례

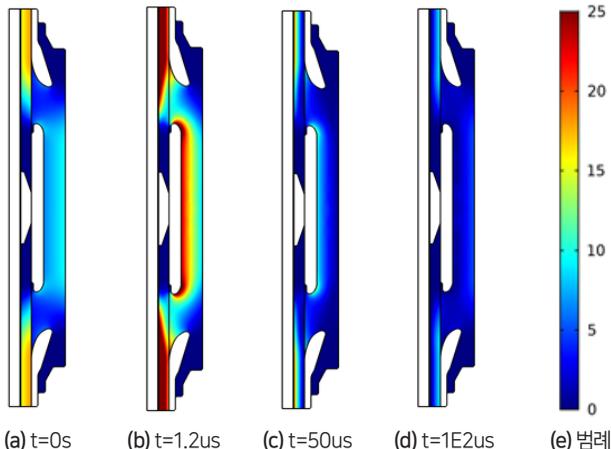
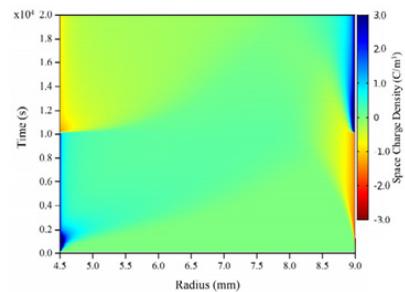


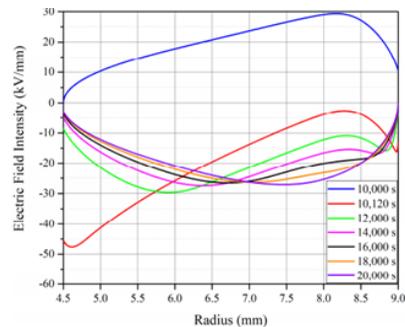
그림 4 케이블 접속함 DC 전계해석 사례(DC 정상상태+노입펄스 중첩)

(3) 공간전하 거동 모의 해석 기술

HVDC 케이블의 가장 큰 이슈는 공간전하 축적 문제이며, 이는 절연체에서 국부적인 전계집중을 발생시키고 나이가 케이블의 수명 단축의 원인이 될 수 있다. 이를 개선하기 위해 공간전하 측정 및 재료 개발 등 실험적 연구와 전하거동을 예측하는 수치해석적 연구가 국내·외로 활발히 진행 중이다. 본 연구실에서는 절연체 내 공간전하 거동을 모의할 수 있는 해석 모델을 개발하고, 나이가 전압 혹은 온도조건의 과도상태와 다양한 절연재료에 적용할 수 있도록 메커니즘 개선 등의 연구를 수행하고 있다.



(a) 공간전하밀도



(b) 절연체 내 전계분포

그림 5 공간전하 거동 수치해석 사례

2. 배전급 진공 인터럽터 (VI)의 진공도 감지 원천기술 연구

VI 내부 진공도의 실시간 모니터링은 효율적인 유지보수를 위한 가장 중요한 기술 중 하나이며, 부분방전 특성을 기반으로 배전급 VI의 진공도에 따른 실시간 모니터링 원천기술에 대한 연구를 수행 중에 있다.

(1) PRPD (Phase Resolved Partial Discharge)법을 적용한 VI 내부 진공도 감지

PRPD법을 적용하여 AC전압 인가 시, 배전급 VI 내부 진공도

에 따른 부분방전 패턴 및 전하량을 분석하고 있다. 그림 6에는 PRPD법 적용하여 VI 내부 진공도에 따른 AC 부분방전 패턴을 나타내었다.

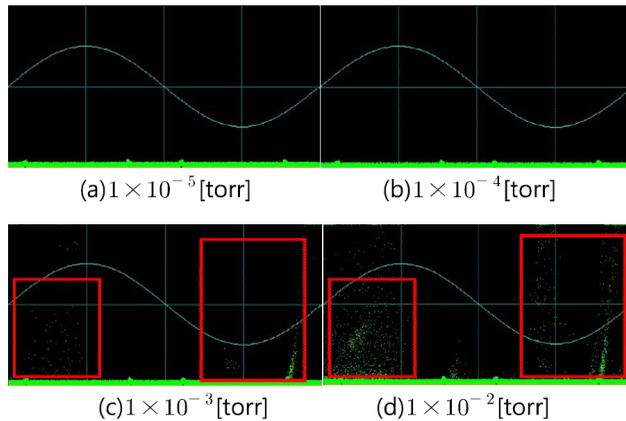


그림 6 PRPD법이 적용된 VI 내부 진공도에 따른 AC 부분방전 패턴

(2) PSA (Pulse Sequence Analysis)법을 적용한 VI 내부 진공도 감지

AC와 다르게 DC전압은 PRPD법이 적용되어지지 않는다. 이에 따라 PRPD법이 아닌 PSA법을 적용하여 DC전압 인가 시, 배전급 VI 내부 진공도에 따른 부분방전 패턴 및 전하량을 분석하고 있다. 그림 7에는 PSA법 적용하여 VI 내부 진공도에 따른 DC 부분방전 패턴을 나타내었다.

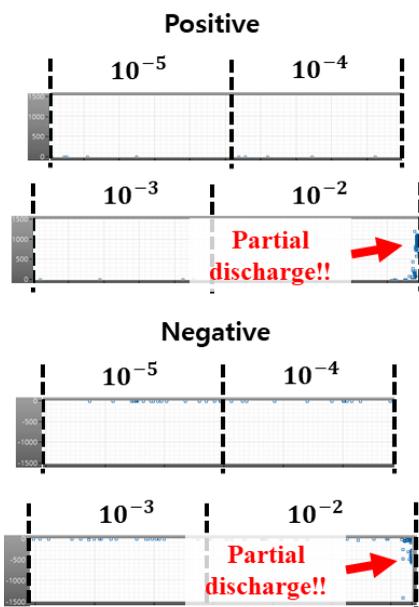


그림 7 PSA법이 적용된 VI 내부 진공도에 따른 DC 부분방전 패턴

3. XLPE 케이블 수명 진단

전력케이블의 지중화 및 30년 이상 노후 케이블의 증가에 따라 전력케이블의 현실적인 관리 방안이 필요하다. 이에 따라 노후 전력선로의 특성을 측정하여 얻은 결과를 바탕으로 XLPE 케이블의 잔존수명을 진단하는 시스템 및 프로세스를 개발하고 있다.

(1) XLPE 케이블의 절연특성 평가

XLPE 케이블의 수명예측을 위해 시편과 신/구 XLPE 케이블에 대한 기계적, 전기적 및 화학적 평가를 수행 후 Database를 구축한다.

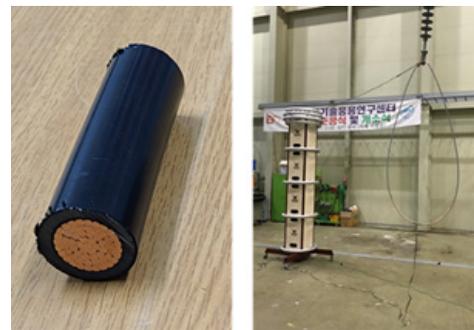


그림 8 케이블 시편 및 전기적 평가

(2) XLPE 케이블 수명예측 기술 제안

전력기기와는 달리 전력케이블에 대해서는 잔존 수명을 예측할 수 있는 물리량이 제한적이며 수명과 상관계수를 도출하기 어렵다. 또한, 케이블의 실질 운전이력 데이터 확보가 어렵고, 케이블 수명에 영향을 미치는 요소는 운전이력뿐만 아니라 다양한 환경적인 요인이 복합적으로 작용한다. 따라서 운전이력과 연계된 실제품의 특성 평가를 분석하여 수명예측 기술을 제안하고자 한다.

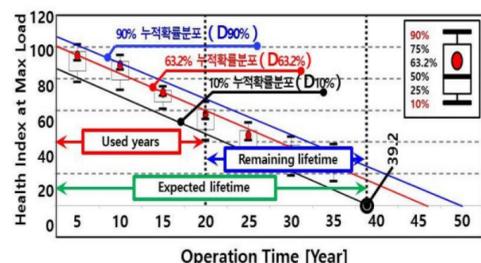


그림 9 수명예측 기술

4. 초고압 시험 설비를 활용한 친환경 절연재료 절연특성 분석

전력기기의 주요 절연매질인 SF₆ 가스의 사용 규제에 따라 전 세계적으로 초고압 친환경 전력기기 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에, 본 연구실에서는 퓨전전기기술응용 연구소의 초고압 시험 설비를 활용하여 친환경 전력기기 개발을 위한 다양한 절연물들의 절연특성 분석 연구를 진행하고 있다.



(a) 1600kV 뇌임펄스시험설비 (b) DC 600kV 내압기

그림 10 퓨전전기기술응용연구소 주요 초고압 시험설비

(1) 절연특성 분석

현재 초고압 전력기기에 대표적으로 사용되고 있는 SF₆ 가스를 친환경 절연가스로 대체하기 위해 가스 종류 선정 적합한 사용압력 도출 연구가 필요하다. 본 연구실에서는 g₃, Dry-Air, N₂ 등과 같은 친환경 절연가스의 압력, 혼합비 조건에 따른 절연특성 연구와 기존 전력기기의 고체 절연물에 대한 친환경 절연가스 적용 가능성 평가 연구를 통해 친환경 전력기기 개발을 위한 핵심 기술을 연구하고 있다.

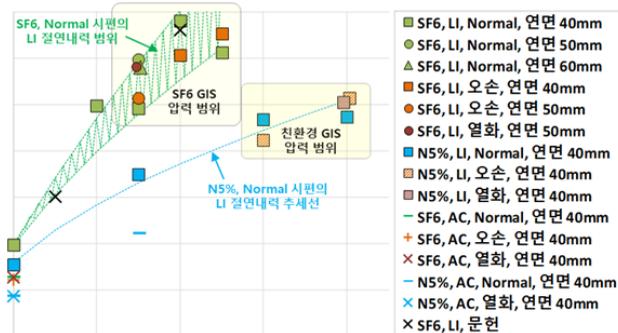


그림 11 절연특성 분석 결과 사례

5. DC 계통 고장 과도해석 기술 및 저압 DC 차단기 설계

DC 계통은 AC 계통과 달리 사고 발생 시 큰 차이를 보이며, 정확한 DC 계통 설계 및 안정성 확보를 위해 고장 관련 계통 시뮬

레이션을 수행하여 차단기 개발까지 연계되어야 진행되어야 한다. 본 연구실에서는 관련하여 다음 내용과 같이 DC 과전압 해석, 고장전류 해석 및 차단기 개발을 수행하였다.

(1) HVDC 시스템 과전압 해석

전류형 HVDC 복합송전선로 낙뢰과전압 해석을 수행하였으며, 케이블 길이에 따라 철탑에 인입된 낙뢰가 케이블에 어떤 영향을 미치는지 확인하였다.

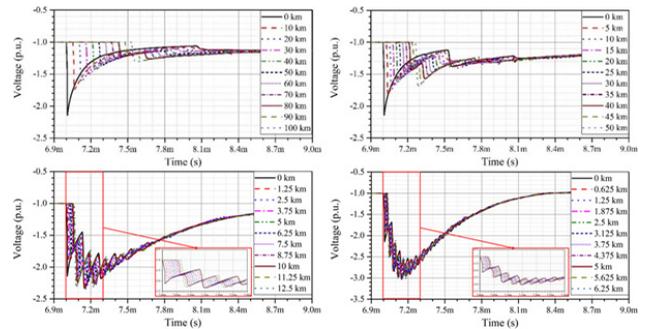


그림 12 HVDC 시스템 과전압 시뮬레이션

(2) HVDC 시스템 시뮬레이션 분석 기술

HVDC 시스템 선로 고장 위치에 따른 고장 규모 분석 및 다중 터미널 HVDC 시스템의 고장전류 해석을 통한 차단기 모델링을 수행하였으며, 초전도 한류기의 적용 위치에 따른 한류기 효율 분석 풍력 및 태양광 등 신재생 발전 연계 HVDC 계통 연구를 수행하였다.

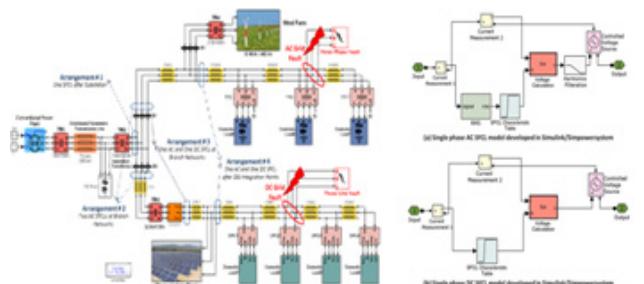


그림 13 HVDC 시스템 고장 분석 시뮬레이션

(3) DC 차단기 모델링 및 분석 기술

차단기 내 발생하는 아크를 계통 과도해석 소프트웨어를 통해 Black-box 아크 모델로 구현할 수 있으며, 정밀한 아크 모델

링을 활용하여 고장전류 차단이 어려운 DC 계통 고장전류 해석을 수행하였다.

출하였다.

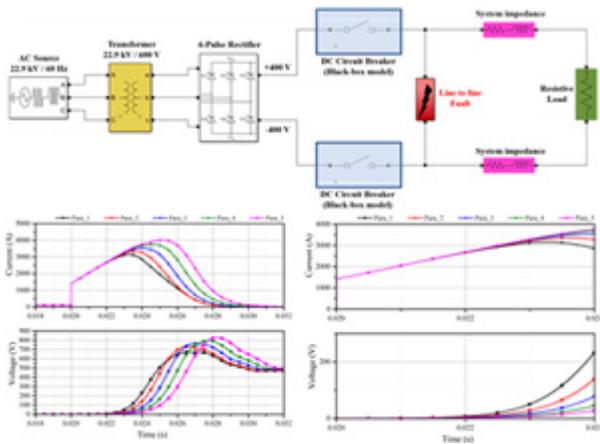


그림 14 DC Black-box Arc Model

(4) 차단기 자체해석 및 전계해석

DC 1500V DSU 차단기 개발을 위해 구체적인 절연설계 방법이 필요하였으며, 유한요소해석법을 적용한 자체 해석을 통해 접점 간 로렌츠력과 자계의 분포를 구하여 다양한 DSU 형상을 비교 분석하였음. 또한 전계해석을 진행하여 AC 및 DC 전계분포를 통해 전계집중 위치를 파악하여 절연물 설계 방법을 제시하였다.

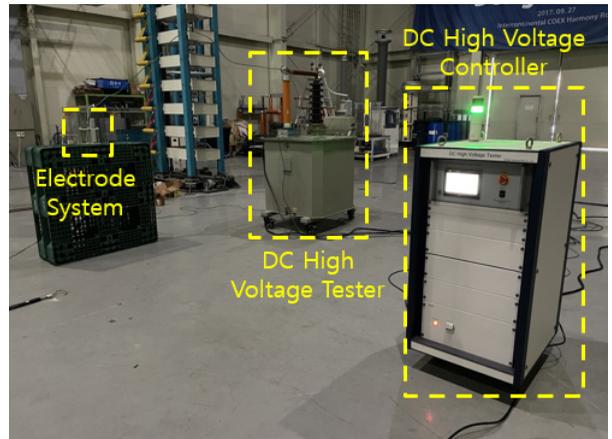


그림 16 직류 내압시험 설비

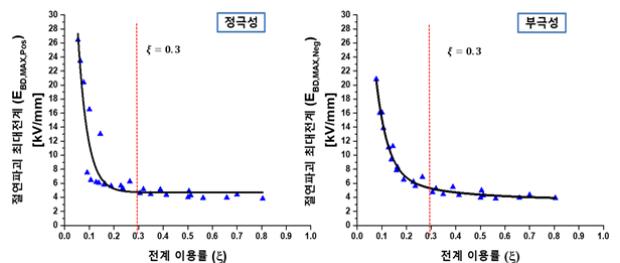


그림 17 전계이용률에 따른 기중절연내력

DSU 차단기 내부 형상 모델		
모델 형상	자체 해석	
	정접속	
	로렌츠력 분포도	자계 분포도
역접속		
로렌츠력 분포도	자계 분포도	

그림 15 DSU 차단기 자체해석

(5) DC 기중절연내력 도출

저압 차단기는 MCCB 등이 사용되고 있으며, 주로 공기를 절연매질로 하여 아크를 차단하는 방식을 이용함. 따라서 직류 저압급의 차단기 개발을 위해서는 기중 환경에서의 절연내력을 도

(6) DSU 차단기 내압 시험

차단기 규격 시험 중 내전압 시험은 보호설비에 대한 절연내력을 검증하기 위한 항목임. 저압급 규격에 의거하여 차단기 내압 시험을 진행하였으며, 대용량 정격에 대비한 내압 시험에 대한 연구를 진행하였다.



(a) 극간 (b) 상간

그림 18 DSU 차단기 내압 시험

6. IUCC(Industry University Coupled Center) 차세대 송배전 전력변환 디자인 센터

초고압 전력시험 설비 활용을 통해 전력용 반도체 모듈, 전력변

환 설비, HVDC 전력설비의 신뢰성과 안정성을 확보하기 위한 기술 구축과 중전설비 업체의 참여를 통해 산학연이 연계된 전문인력 양성 및 인프라 구축의 목적으로 운영 중인 사업이다.

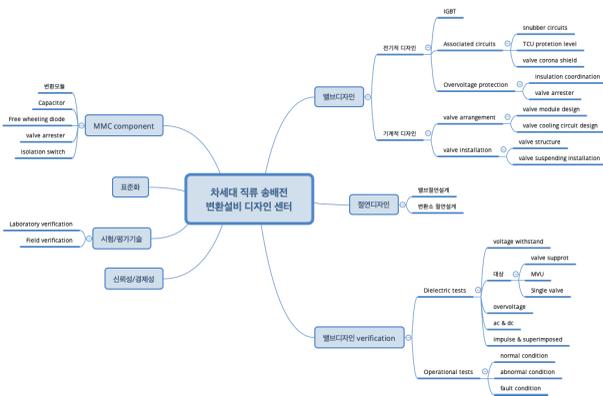


그림 19 차세대 송배전 변환설비 디자인센터

7. BK21 플러스사업 참여

BK21 사업을 통해 장학금 지원, 인센티브 제도, 학연산 인적/물적 교류 등 다양한 혜택을 제공함으로써 대학원생들의 학비 및 생활비에 부담을 갖지않고 연구에 몰입할 수 있는 환경을 조성하고 있다.

8. 향후계획

한양대학교 HVDC 전력연구실은 최근 HVDC 전력기기 절연 설계 및 수치해석, VI 진공도 평가, 절연재료 수명 예측, HVDC 및 MVDC 전력계통 과전압 절연설계, HVDC/MVDC 차단기 개발

그리고 초고압 시험 설비를 활용한 전력기기 시험 평가 등 다양한 연구과제를 수행하고 있다. 또한, 본 연구실은 인력양성 사업, 다양한 국책 과제 참여와 여러 중전기 업체들과의 협업을 통해 국내 고전압 전력분야의 전문가들을 지속적으로 배출해왔다.

향후에는 본 연구실의 가장 큰 장점인 전력계통과 전력기기의 융합 연구가 가능하다는 잇점을 살리고, 전력기기와 전력계통을 아우르는 전문가 육성에 주력하고자 하며, 국내 DC전력 기기 및 시스템 기술 발전에 기여하고자 한다.

저자소개

이방욱(Bangwook Lee)

1991년 한양대학교 전기공학과 공학사
 1993년 한양대학교 전기공학과 공학석사
 1998년 한양대학교 전기공학과 공학박사
 2008년~현재 한양대학교 전자공학부 교수
 1998년~2008년 LS electric 전력연구소
 수석연구원



2002~2003 한국기술교육대 겸임교수
 주 연구분야 : 전력기기 절연설계 및 전계해석,
 절연재료 특성평가, DC 전력계통 절연협조 등
 e-mail : bangwook@hanyang.ac.kr
 Homepage : hvdc.hanyang.ac.kr

김선진(Sunjin Kim)

2017년 한양대학교 전자시스템공학과 공학사
 2017년~현재 한양대학교 전자공학부
 석·박통합과정
 주 연구분야 : HVDC 케이블 절연설계 및 공간전하
 수치해석 연구,
 송/배전 애자 DC 절연특성 등
 e-mail : ksj8119@hanyang.ac.kr
 Homepage : hvdc.hanyang.ac.kr





전력계통 디지털 트윈 구현을 위한 인공지능 기술

Artificial intelligence to realize the power system digital twins

정재성 | 아주대학교 전자공학과 부교수

Jaesung Jung | Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University



요약

최근 분산자원의 전력시스템 연계가 증가함에 따라 전력시스템 운영의 복잡성과 불확실성이 증가하고 있다. 하지만, 과거의 전력시스템 운영 방식으로 다수의 분산자원 정보를 반영하기에는 한계가 존재한다. 따라서, 미래 전력계통의 안정적인 운영을 위해 현실계통과 가상계통을 실시간으로 연동하여 고도화된 시뮬레이션이 가능한 디지털 트윈 기술 도입을 검토할 필요가 있다. 본 원고는 전력계통 디지털 트윈 기술 동향을 분석하여 요소 기술을 도출하고 이를 구현하기 위한 최신 인공지능 기술을 소개한다.

Abstract

As the penetration of distributed energy resources increases in the power system, the operation of power system is more and more complicated and uncertain. However, the conventional way to operate the power system is not able to accommodate all information obtained from several DERs. Therefore, for future power systems, it is necessary to apply digital twin technology that enables advanced simulation by synchronizing virtual model with the physical power system model in real-time. For this purpose, this article introduces the artificial intelligence technology to realize the power system digital twins.

1. 서론

탄소 중립을 위한 에너지 전환 과정에서 전기화로 인한 전력수요가 증가하는 한편, 불확실성이 높은 재생에너지의 비중을 빠르게 증가시켜야 한다는 과제에 직면하고 있다. 기존의 중앙집중식으로 공급설비 증설 위주의 대응방식에는 한계가 있어 재생에너지, 수요자원, 전기차 등 소규모 자원을 활용하는 지역 단위 분산형 에너지시스템으로 운영 구조가 개편되고 있다.

분산형 시스템에서는 연계된 모든 자원을 모두 모니터링하거

나 제어할 수 없는 상황에서도 전력 공급 안정성을 유지해야 한다. 따라서 실시간으로 변화하는 계통 상황을 신속하게 분석·대응할 수 있고, 복잡한 시스템을 통합·운영할 수 있는 솔루션이 필요하다. 그러나 최근 제안되고 있는 운영 모델(DERMS, VPP, DSO 등)은 이종 운영시스템 간 연계 제한과 실시간 데이터 활용의 한계가 있어 통합 운영시스템으로 기능하지 못하고 있다.

이에 대한 해결책으로 전력계통 디지털 트윈 모델이 제안되고 있다. 디지털 트윈은 물리적 개체가 가상공간에 복제(Mirroring)된 모델로 현실 세계와 가상세계가 실시간으로 동기화 된다. 전력

계통 디지털 트윈은 종래의 운영시스템과 달리 실시간으로 업데이트되는 가상모델을 이용해 미래 계통 상황을 현재 시점에서 동적인 시뮬레이션이 가능하고 그 결과 외란 발생에 대한 선제적 조치가 가능하다는 장점이 있다.

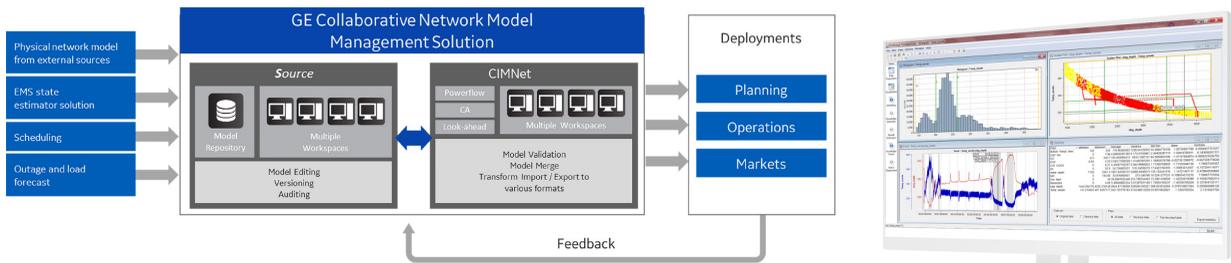
본 원고에는 국내의 전력계통 디지털 트윈의 기술 동향 분석을 분석하여 요소 기술을 도출하고 이를 구현하기 위한 AI 기술을 소개한다.

2. 디지털 트윈 기술 동향

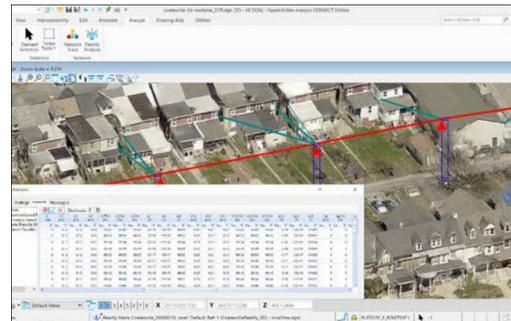
디지털 트윈과 종래 계통 운영시스템과의 차이점은 이중 시스템과의 통합성과 실시간 데이터의 동기화 두 가지로 요약할 수 있

다. 통합성은 여러 도메인의 운영시스템이 상호 연동되어 있음을 의미하며, 실시간 동기화는 실제 시스템에서 특정 주기마다 취득되는 다양한 이중 데이터가 가상 모델에 연동되어 있음을 의미한다. 동기화된 데이터로 현재 시점에서 운영 결정에 따른 모든 미래 상황에 대해 전 주기적으로 시뮬레이션하며 외란 발생 시 신속하게 대응할 수 있고 이중 시스템과의 상호 연동을 통해 복합적인 원인에 의해 발생한 문제를 다각도로 분석할 수 있어 통합적인 운영이 가능한 장점이 있다.

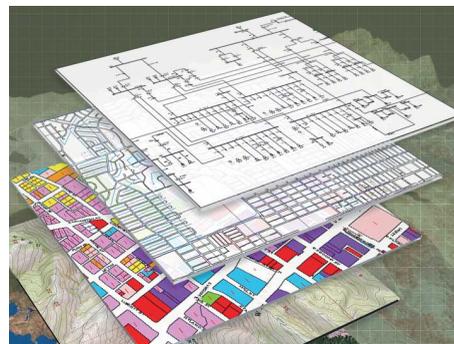
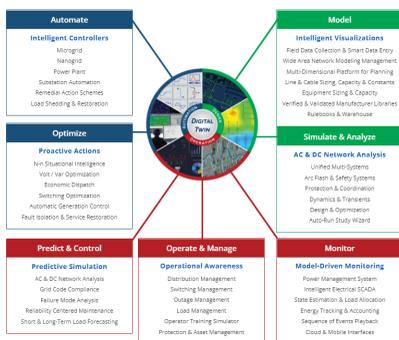
이러한 이유로 최근 전력계통 운영시스템에 디지털 트윈 기술을 적용하는 사례가 증가하고 있다. 대표적으로 GE 사의 “Network Digital Twin”, Bentley Systems 사의 “iTwin” ETAP 사의 ETAP Digital twin 등이 있다. GE 사의 “Network Digital Twin”



GE, Network Digital Twin [출처: Gartner]



Bentley Systems iTwin [출처: Bentley]



ETAP Digital Twin [출처: ETAP]

그림 1 분자 절연물의 절연성능에 영향을 주는 여러가지 요소 [9-11]

은 ADMS(Advanced Distribution Management Solutions) 및 GIS(Geographic Information System) 데이터를 융합한 디지털 트윈 모델이다[1]. 모선 단위부터 급전선(Feeder line), 변전소 단위까지 필요에 따라 별도의 모델로 분할하여 시물레이션하며, 실시간 상황 인지 및 최적 대응방안을 결정하고, 전 주기적 시물레이션을 통해 기후변화와 증가하는 재생에너지, 인프라의 노후화 영향을 고려한 운영 계획 수립할 수 있다.

Bentley Systems 사는 드론, 지상 촬영 장비, 3D 레이저스캐너로 수집한 이미지와 GPS 정보를 활용해 3D 매쉬를 생성하는 “iTwin”을 개발하였다[2]. 이미지 데이터 분석 기술로 설비 상태를 모니터링하여 예측 정비를 수행할 수 있고 3D 매쉬 생성 기술을 통해 미계측 지점의 데이터를 추정하여 신규 센서 설치를 최소화하며 보다 정밀한 시물레이션이 가능하다. 또한 타 시스템과의 연계를 위해 오픈소스 라이브러리(iModel.js)를 제공하고 있다.

ETAP 사의 디지털 트윈 플랫폼은 다차원 플랫폼으로 구축하여 계통 구성, 모니터링, 최적 제어를 위한 다양한 기능을 제공한다[3]. 설비 제조사의 라이브러리를 반영한 다양한 가상 모델을 제공하여 계통 모델링이 용이하며 다양한 시나리오를 가정한 고도화된 시물레이션이 가능하다. 이를 통해 계통 상황 예측 결과에 따라 사전에 Volt/VAR 제어, 스위칭 제어, 고장격리(Fault Isolation), 복구(Service Restoration) 전략을 수립할 수 있다.

이와 같이 전력계통 디지털 트윈은 가상 전력계통에 다양한 데이터 및 이종 시스템과 연동되어 고도화된 시물레이션을 통해 실시간 계통 운영을 가능하게 한다. 이를 구현하기 위한 요소 기술로는 크게 실시간 데이터 처리 기술, 데이터 기반 계통해석 기술, 최적 운영 기술, 고장 예측 및 복구 기술 네 가지로 분류할 수 있다.

3. 인공지능 기반 전력계통 디지털 트윈 요소기술

3.1. 실시간 데이터 동기화 기술

디지털 트윈에는 AMI 및 다양한 IoT 센서를 통해 결측치 및 동기화 오류가 포함된 대량의 실시간 데이터가 수집된다. 따라서 실측 데이터의 신속한 유효성 검증 및 불완전 데이터 보정, 이종데이

터 융합 과정이 필요하다. 이를 위해 가상계통에 지리정보, 기상 정보, 이미지 데이터 등의 이종 데이터를 융합하면 계측 데이터에 공간 정보를 부여할 수 있다. 이를 이용해 미계측 지점에 대한 데이터 추정이 가능하며, 계측 데이터 유효성 검증에 활용할 수 있다. 또한 연합학습(Federated learning)을 활용해 이기종 센서 및 통신 시스템에 의해 초래되는 동기화 오류를 원 데이터로 복원하여 불완전 데이터로 인한 성능 저하를 최소화하는 데이터 처리기술이 제안되고 있다[4].

3.2 AI 계통 해석 기술

배전계통 내에 다수의 소규모 분산자원이 산재되어 계통이 복잡해지고 간헐적인 재생에너지로 인해 전력 공급 변동성이 증가하고 있다. 이에 따라 많은 시간이 소요되는 기존의 계통 해석 방법을 대신하는 AI 기반 계통 해석 기술이 필요하다. 기존에는 지도학습 기반 모델을 활용해 계통 운영 이력 및 계측 데이터 간의 상관관계 패턴을 통해 추론하는 수준이었다. 이는 데이터의 추세가 안정적으로 유지되는 경우에는 유용하나 조류의 변동성이 극심한 배전계통 해석에는 적합하지 않다. 최근에는 계통 구성에 따른 이웃 선로의 영향 및 시간 경과에 따른 변화를 반영하기 위해 데이터의 공간 정보를 학습할 수 있는 CNN(Convolutional Neural Network)과 자기 상관성이 내제된 시계열 데이터 해석에 탁월한 LSTM(Long Short Term Memory)이 결합된 모델이 제안되고 있다. 또한 공간 정보가 내제된 데이터를 활용해 모선, 피더, 변전소 단위 등 가상모델을 분할하여 하위 모델의 학습 정도에 따라 가중치 및 수렴조건을 최적화하여 상위 AI 모델의 연산 속도 및 정확도를 향상시키는 등 다양한 학습 모델이 제안되고 있다[5].

3.3 AI 최적 운영 기술

신재생에너지 증가 및 수요자원 확대되고 있는 전력계통의 실시간 운영을 위해 불확실성을 고려한 AI 기반 최적 운영 기술 개발이 필요하다. 또한 제어목적, 입지조건 등이 상이한 소규모 분산자원을 효율적으로 제어하기 위한 군집화(Clustering) 기술, 타 에너지 관리 시스템과 연동하여 최적 운영 전략을 도출하기 위한

AI 기반 계층적 최적화 기술이 융합되어야 한다. 최근에는 다양한 요인에 의해 발생할 수 있는 불확실성을 유형별로 분류(Classification)하는 불확실성 모델링 기술과, 가우시안 프로세스를 통해 목적함수를 추정하고 관측치로 보정하는 과정을 반복하는 Bayesian 모델 기반 최적화 기술이 제안되고 있다[6,7]. 이를 통해 복잡도와 불확실성이 높아 목적함수 정의가 어려운 복잡한 전력 계통의 최적 운영 스케줄을 도출할 수 있다.

3.4 AI 고장 진단 및 복구 기술

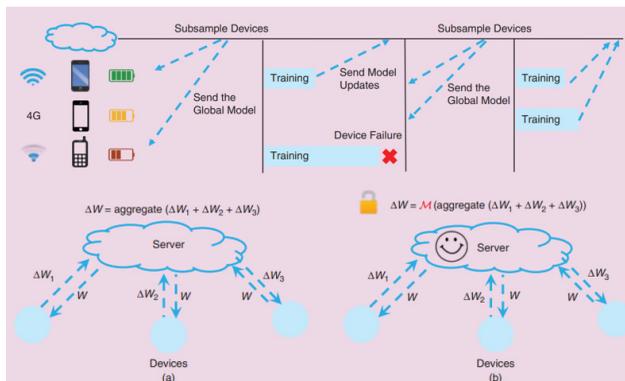
디지털 트윈은 계통의 모든 구성요소를 모니터링하며 전 주기적 시뮬레이션을 통해 고장 발생을 사전에 예측하고 선제적 조치를 취해 계통 안정성을 유지할 수 있다. 기존에는 고장 상황 시뮬레이션을 위해 실제 데이터가 필요했으나 최근에는 GAN(Generative Adversarial Networks)을 활용하여 다양한 고장 상황을 가정하는 데이터를 생성하고 이에 대응하기 위한 전략 수립을 반복하는 모델과, 강화학습(Reinforcement Learning)을 활용해 계통의 운영 규칙을 학습한 모델이 특정한 상황에서 발생하는 계통의 변화를 평가하여 보상을 책정하고, 보상이 극대화되는 전략을 선택하는 비지도 학습 기술이 제안되고 있다[8,9].

이를 통해 사전 예방을 통해 설비의 수명 증가, 고장 확률 감소를 기대할 수 있으며, 향후 발생할 수 있는 극한 재난 상황에 대비할 수 있다.

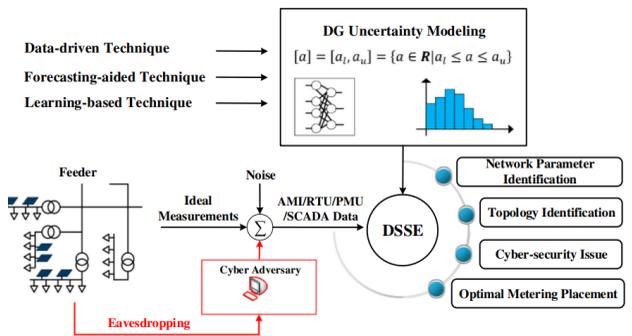
4. 결론

본 원고에서는 국내외 전력계통 디지털 트윈의 기술 동향 분석을 통해 요소기술을 도출하고 이를 구현하기 위한 AI 기술을 소개하였다. 전력계통 디지털 트윈은 가상계통과 실제 계통이 실시간으로 동기화되어 외란 발생 시 신속한 대응이 가능하며 이중 시스템과의 상호 연동되어 효율적인 통합제어를 가능하게 한다. 이를 위해 미계측 데이터를 추정하고 결측치를 보정하는 데이터 처리 기술, 실시간 변화를 인지하기 위한 계통해석 기술, 최적 대응 전략 수립을 위한 최적화 기술, 고장 진단 및 복구 기술 개발이 선행되어야 한다.

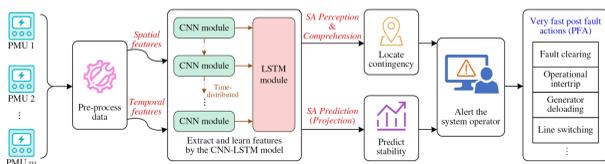
최근의 AI 기술은 단순히 방대한 데이터로 학습하고 추론하는 대신 연합학습을 통해 탈 중앙화하여 학습 효율을 높이고 불량 데이터 복원 및 미계측 지점 데이터를 추정하여 실시간 불완전 데이터로 인한 성능 저하를 최소화한다. 그리고 데이터의 시공



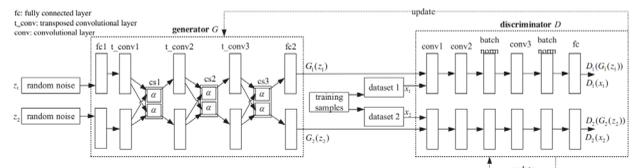
연합학습 데이터 처리 모델[4]



불확실성 분석 모델[6]



CNN-LSTM 기반 안정도 해석 모델[5]



AnoGAN 모델 기반 이상탐지 기술[8]

그림 2 AI 기술예시

간적 특성을 고려한 딥러닝 모델(CNN, LSTM 등)을 적용하여 계통 해석 정확도를 향상시키고, 재생에너지 및 수요자원 등에 의한 불확실성을 고려한 최적 운영 전략을 수립할 수 있다. 또한, 재난 상황과 같이 이력 데이터가 존재하지 않는 상황에 대해 강화 학습 및 GAN을 통해 데이터를 생성하고 사전에 대비할 수 있다.

미래 전력계통은 다양한 분산자원이 산발적으로 연계되어 복잡성과 불확실성이 더욱 심화될 것이다. 그러므로 AI 기술을 적용한 전력계통 디지털 트윈 구축을 검토할 필요가 있다.

[참고문헌]

[1] DIGITAL UTILITY OF THE FUTURE, GE, 2017.08
 [2] OpenUtilities Analysis (Powered by Siemens' PSS@SINCAL, Bentley, 2018
 [3] ETAP Digital Twin Platform, ETAP, 2021.12
 [4] Federated learning: Challenges, methods, and future directions. IEEE Signal Processing Magazine, LI, Tian, et al. 2020
 [5] Toward the prediction level of situation awareness for electric power systems using cnn-lstm network, WANG, Qi, et al. 2020

[6] Uncertainty modeling of distributed energy resources: techniques and challenges. Z. Ying et al. 2019
 [7] LSTM-attention-embedding model-based day-ahead prediction of photovoltaic power output using Bayesian optimization, Yang, T., Li, B., & Xun, Q. 2019
 [8] Distribution System Anomaly Detection Based on AnoGAN Embedded with Cross-Stitch Units, Wang, Y., Guo, Y., Xu, Z., & Sun, H. 2020
 [9] Restoring distribution system under renewable uncertainty using reinforcement learning, ZHANG, Xiangyu, et al. 2020

저자소개

정재성(Jung Jae-sung)

2014년 Virginia Tech 대학원 졸업(공학)
 2016년~현재 아주대학교 전자공학과 부교수
 현재 전기의 세계 편집 위원
 주 연구분야 : 전력계통, 전력경제, ESS 등



공간전하를 고려한 HVDC 시스템의 절연메커니즘 해석

Analysis of Insulating Mechanism for HVDC Systems Considering Space Charge

김민희 | 경북대학교 BK 사업단(전자전기 융합인재양성교육연구단), 포스닥 연구원

이세희 | 경북대학교 전기공학과 교수

Min-Hee Kim | Postdoc, KNU Electronics and Electrical Engineering Advancement Institute

Se-Hee Lee | Professor, Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University



요약

최근 전세계적인 전력수요 급증에 따라 대용량전력수송을 위한 장거리 초고압 직류송전이 필수적으로 요구되고 있으며, 국제전기위원회(IEC)와 세계대전력망회의(CIGRE)가 주축이 되어 활발한 논의를 진행하고 있다. DC 시스템의 경우 절연재료에 한 방향으로 지속적으로 가해지는 전기스트레스로 인해 공간전하의 거동과 관련된 절연파괴 현상이 매우 중요하게 부각되고 있다. 이에 따라 본 고에서는 최근까지 본 저자들이 수치해석적으로 구현해오고 있는 HVDC 절연환경에서의 절연파괴 메커니즘을 간략하게 소개하고자 한다.

Abstract

Recently, it is required a long-distance ultra-high-voltage DC transmission with large-capacity power due to a sudden increase in global power demand. And the International Electrotechnical Commission (IEC) and the International Council on Large Electric System (CIGRE) have played a key role in developing new standards. For the HVDC systems, a breakdown phenomenon related to the space charge is a very important issue due to a continuous and unidirectional electrical stress in insulating materials. In this article, we present several important results for the breakdown mechanism in the HVDC insulation systems by use of a numerical approach.

1. 서론

전력기기의 고 신뢰성화와 소형화는 고부가가치의 전력기기를 개발하기 위한 핵심요소로서 절연재료의 개발과 매우 밀접한 관계에 있다. 또한 신재생 에너지를 활용한 마이크로그리드 및 장거리 대전력 송전과 같은 새로운 체계의 전력망은 대부분 직류(DC) 방식을 취하게 된다. 이러한 DC 전력망의 경우 직류전압이 상시로 절연재료에 인가되므로 공간전하와 표면전하가 지속적으로 한 방향으로 이동하거나 누적되어, 조건에 따라서는 절연

파괴로 진전되어 계통망에 치명적인 손상을 일으키게 된다. 따라서 DC 전계 하에서 공간전하와 표면전하의 거동 메커니즘을 분석하고, 이를 절연특성과의 상관성을 규명하고자 하는 다양한 연구가 수행되고 있다.

2. DC전계 수치해석 기반 HVDC 시스템의 연구동향

절연재료의 절연파괴에 관한 연구는 지금까지 주로 누적된

데이터를 통계적으로 분석하는 실험적인 접근으로 이루어졌다. 특히 고체 절연재료의 두께, 온도에 대한 절연파괴의 시간, 절연 파괴 경향성 등에 대한 활발한 연구가 이루어졌지만, 주요한 고체 절연재료인 고분자의 경우 그림 1과 같이 복잡한 물리적 특성과 결함을 유발하는 다양한 요인으로 인해 절연파괴 메커니즘을 설명하는 데 어려움이 있었다 [1,2]. 최근 저지 고분자 절연물에 나노입자를 포함하는 복합절연재료의 설계는 전력에너지 분야에서 주목을 받고 있다. 특히, 고분자 나노 복합절연재료는 전기적·기계적으로 우수한 성능과 부분방전 및 전기 트리에 대한 높은 저항성과 공간전하 축적을 억제하는 특성으로 새로운 절연시스템의 설계를 가능하게 하는 2세대 재료로서 많은 관심을 끌고 있다 [3,4].

이러한 나노 복합절연재료의 우수한 전기적 성능을 평가하기 위해서 주로 절연물 내부의 최대 전계강도가 얼마나 낮아졌는가, 공간전하가 얼마나 축적되었는가에 초점을 맞추어 연구가 진행되었다. 하지만 절연물 내부의 전계 강도와 공간전하 축적에 의한 전계왜곡 정도만으로는 절연물의 두께, 인가 전압 파형, 온도에 대한 절연파괴의 경향성을 설명하기 어렵다 [5,6]. 이는 각각의 요소들이 비선형적으로 영향을 주고받기 때문이다. 이러한 현상을 분석하기 위해서는 주요 전하 캐리어들의 거동을 국부적으로 파악해야 할 필요성이 제기되었다. 이를 위해 다양한 실험적인 방법이 제시되어 오다가, 최근에는 실험적 결과를 바탕으로 BCT (bipolar charge transport) 모델, 양자화학계산(quantum

chemical calculations) 기반 모델, phase-field 모델과 머신러닝 등을 활용한 다양한 절연파괴 관련 수치해석 방법들이 제시되어 오고 있다 [7,8].

본 고에서는 저자들이 수행한 최근의 연구결과인 고분자 절연물의 공간전하의 거동과 전기-기계에너지 상태를 고려한 절연 파괴 예측 수치해석 기법을 소개하고자 한다. 아울러, 향후 복합 유전체 계면현상에 대해 연구를 진행하기 위해 기존에 수행하였던 유체-고체 계면에서의 공간전하 거동을 분석한 내용을 소개하였다.

3. DC전계해석 기반 HVDC 시스템의 절연해석

3.1 고체절연물의 공간전하 이동 메커니즘과 절연파괴 수치모델 제안

고분자 절연재료는 인가전압, 전극의 재료, 운영 온도에 따라 공간전하의 거동과 절연성능이 크게 변화하므로 이를 고려한 수치해석 모델 수립은 필수적이다. 본 연구에서는 고분자 절연재료 내부의 절연성능을 수치해석적으로 분석하고 전하수송 메커니즘을 분석하기 위해서 BCT 모델 및 MCD (molecular chain displacement) 모델을 사용하였다. 이를 각각 그림 2와 그림 3에 도시하였다. 특히 BCT 모델은 전자와 정공을 전하 캐리어로 사용하여 절연체 내 전계 분포의 함수로 공간전하 거동을 분석하는데 사용되었으며, BCT 모델과 푸아송 방정식을 완전히 결합하여

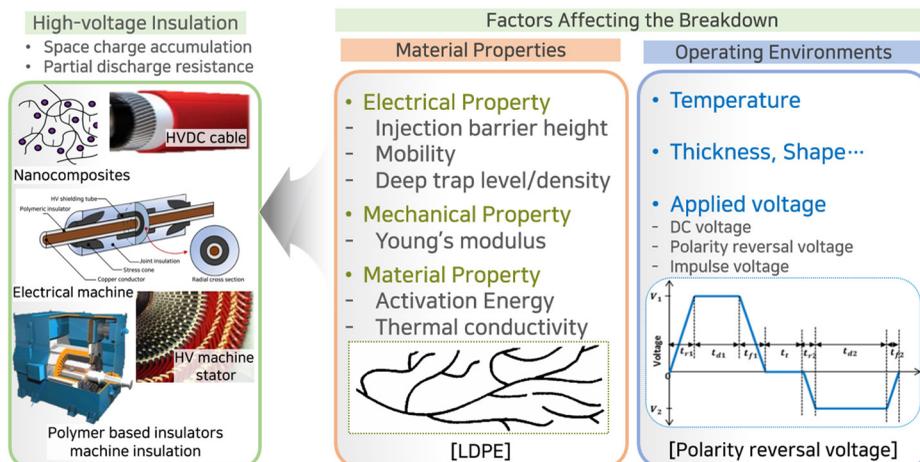


그림 1 고분자 절연물의 절연성능에 영향을 주는 여러 가지 요소 [9-11]

공간전하 분포에서 발생하는 전계의 왜곡을 분석하였다. MCD 모델은 쿨롱힘이 작용하는 분자 사슬의 변위를 운동 방정식을 통해 계산하는데, 절연파괴 현상의 시작 시점과 파괴 강도를 결정하는 데 사용되었다.

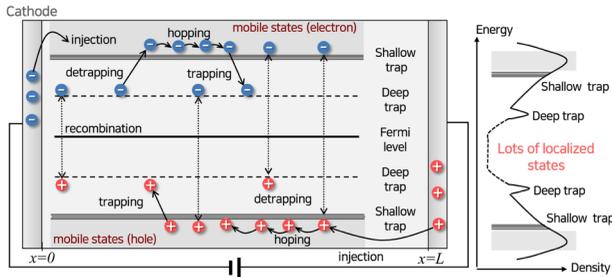


그림 2 BCT (bipolar charge transport) model에서 고려하는 다양한 물리현상

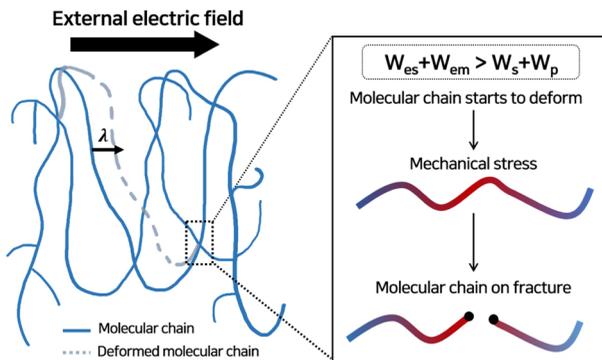


그림 3 전기기계에너지를 고려한 수정된 MCD (molecular chain displacement) 모델

고분자 절연재료가 실제 전력기계에 적용되는 경우 양단에는 온도 구배가 존재하기도 하며 높은 전압의 극성이 변화하는 가혹한 환경에 노출되기도 한다. 대부분의 경우 전하 운반자인 정공이 주입되는 양극에 높은 온도가 인가된다. 최근에는 공간전하의 주입과 거동에 큰 영향을 주는 온도 구배와 극성이 변화하는 전압이 인가되는 경우에 대해 공간전하 분포와 절연파괴 특성을 분석하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 [12]. 특히 그림 4와 같이 온도 구배가 절연물 내에 존재하는 경우, 최대 전계는 주로 저온 영역에서 나타난다. 이때 극성이 변화하는 전압이 함께 인가될 때는 절연파괴 세기는 일정한 방향의 전압이 인가될 때에 비해 낮아지며, 대부분의 절연파괴는 전계가 급격히 상승하는 전압의 극성이 변화하는 시기에 일어난다 [13].

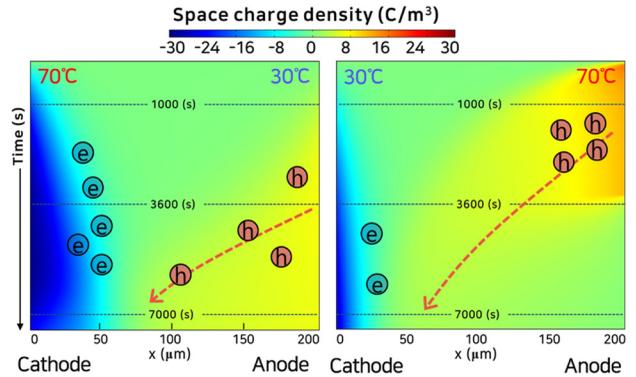


그림 4 절연물내부온도구배가있는 경우의 공간전하의거동 [13]

두께 200 μm의 Low-density polyethylene (LDPE)에 ramp rate 500 V/s의 전압을 인가하는 경우 절연물 내부에 축적되는 공간전하의 총량은 그림 5(위)와 같이 온도에 따라서, 전극의 재질에 따라 달라진다. 인가되는 온도가 달라지면 내부 전하 운반자의 이동도가 지수함수로 변화하며 전극과 절연물 계면에서 주입되는 전하의 양도 달라진다. 전극의 재질 (절연물-전극 계면에서의 주입 장

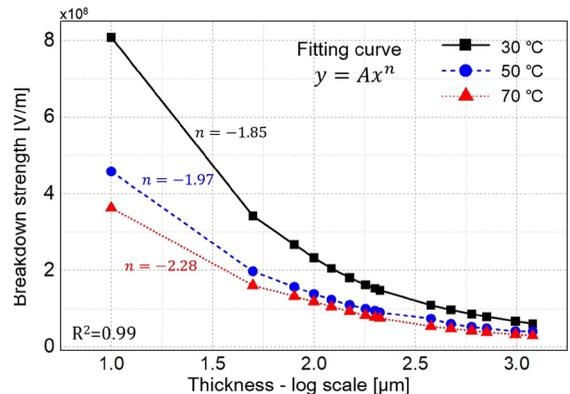
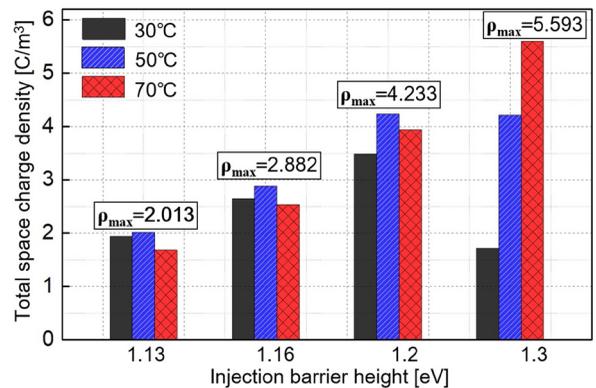


그림 5 (위) 온도에 따른 공간전하 축적량 (아래) 온도, 두께에 따른 절연파괴세기 [14]

벽: 1.13~1.3 eV)에 따라서 다르지만, 분자 사슬의 구조가 변화하는 50°C 인근에서 가장 많은 양의 공간전하가 축적되며 이는 잘 알려진 실험 결과와도 일치한다. BCT와 MCD의 결합 모델을 이용해서 계산한 절연과피 세기는 그림 5(아래)와 같이 온도가 증가할수록 두께가 두꺼워질수록 감소하며, 이러한 수치해석 결과는 기존 문헌에서 제시한 실험 결과와 비교했을 때 실제 절연과피 현상을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다 [14].

3.2 유체-고체절연물 계면에서의 표면 및 공간전하 이동 메커니즘 수치해석

대부분의 전력기기에서 두 가지 이상의 서로 다른 유전율과 전도도를 가지는 복합절연재료가 널리 사용되고 있다. 복합절연재료를 사용하면 두께를 줄이고 절연내력이 증가한다는 장점이 있지만, 계면에서의 전하 축·방전 현상으로 인해 예기치 못한 전계 집중 현상이 일어나기도 한다. 계면에서의 전하 거동은 복합절연재료의 절연성과 이로 인한 방전 현상을 방지하는데 필수적이므로 이중계면을 가지는 복합절연재료 계면에서의 공간전하의 거동을 분석하려는 연구는 활발하게 진행되어왔다.

특히 절연유와 고체 나노 복합절연재료로 구성된 이중계면의

경우에는 계면에서 나노 복합절연재료로 파고드는 공간전하와 이로 인한 전계를 분석하는 것은 매우 까다롭다. 때문에 그림 6과 같이 전기장-유체-열이 결합된 Multiphysics 해석기법을 적용하여 구현된 Migration-Ohmic 모델을 사용하여 공간전하의 실시간 거동을 분석하였다. 공간전하는 표면과 내부를 관통하면서 반대극판으로 이동하게 되는데, 이동을 하는 전하량은 표면 및 내부 전도도에 비례하여 전과되는 양상을 띄게 된다.

4. 결론

본 고에서는 절연과피 현상을 분석하고자 하는 최근의 연구 동향과 본 저자들의 최근 연구결과에 대해 간략하게 소개하였다. 특히, 전기-기계에너지 상태를 고려한 고분자 절연물의 절연과피 예측 기술은 BCT 모델과 결합된 수정-MCD 모델로 제시하였으며, 기존의 실험 문헌들에서 제시된 결과들과 잘 일치되는 결과를 보였다. 현재 이러한 수치해석 기법과 양자화학 계산기법을 결합하는 방안을 깊이 있게 연구 중에 있다.

[참고문헌]

- [1] Azmi, A., K. A. A. Seman, and K. Y. Lau, "Breakdown characteristics of polyethylene/silicon nitride nanocomposites," *Telkomnika*, 17.4, 2019.
- [2] Xing, Zhaoliang, et al., "Study on DC breakdown characteristics of epoxy insulating materials," 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, 2018.
- [3] Danikas, Michael G., and Toshikatsu Tanaka, "Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25.4, pp. 19-25, 2009.
- [4] Tanaka, T., "Polymer nanocomposites as HV insulators: Superiority and expectation," *Proceedings of the XVth international symposium on high voltage engineering*, Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [5] Murakami, Yoshinobu, et al., "DC conduction and electrical

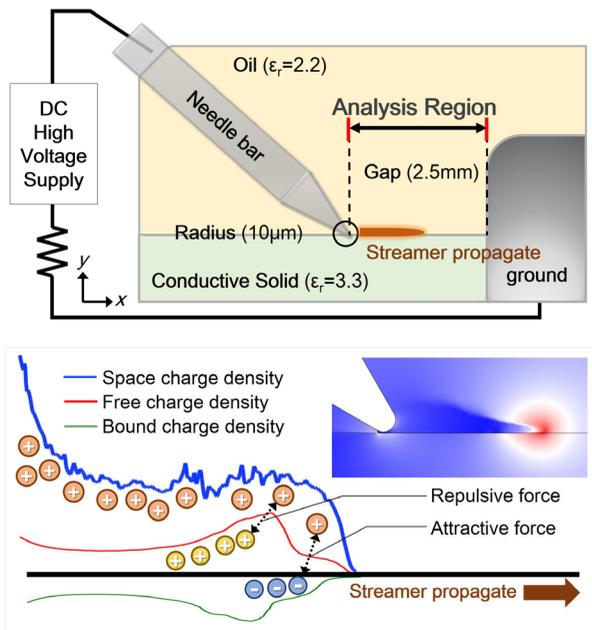


그림 6 절연유-나노복합절연재료로 구성된 복합절연재료와 스트리머 전파해석 [15]

- breakdown of MgO/LDPE nanocomposite," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15.1, pp. 33-39, 2008.
- [6] Lau, K. Y., et al., "On the space charge and DC breakdown behavior of polyethylene/silica nanocomposites," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 21.1, pp. 340-351, 2014
- [7] Tatsuo Takada, Tsuyoshi Tohmine, Yasuhiro Tanaka, and Jin Li, "Space Charge Accumulation in double-Layer dielectric systems-Measurement Methods and Quantum Chemical Calculations," IEEE Electrical Insulation Magazine, no. 19, pp. 36-46, 2019.
- [8] Shen, ZH., Wang, JJ., Jiang, JY. et al., "Phase-field modeling and machine learning of electric-thermal-mechanical breakdown of polymer-based dielectrics," Nature Communications, 10, 1843, 2019.
- [9] Dissado, Len A., and John C. Fothergill, Electrical degradation and breakdown in polymers, Vol. 9, 1992.
- [10] Mason, John H., "Effects of thickness and area on the electric strength of polymers," IEEE transactions on electrical insulation, 26.2 pp. 318-322, 1991.
- [11] Liao, Yanqun, et al., "Breakdown failure analysis of 220 kV cable joint with large expanding rate under closing overvoltage," Engineering Failure Analysis, 120, 2021.
- [12] Chen, X., et al., "Effect of voltage reversal on space charge and transient field in LDPE films under temperature gradient," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., no. 19, pp. 140-149, 2012
- [13] Kim, Minhee and Se-Hee Lee, "Modified Molecular Chain Displacement Analysis Employing Electro-Mechanical Threshold Energy Condition for Direct Current Breakdown of Low-Density Polyethylene," Polymers, no. 13.16, pp. 2746, 2021.
- [14] Kim, Minhee, Su-Hun Kim, and Se-Hee Lee, "Numerical Prediction of DC Breakdown Characteristics in LDPE with Current Profile as Critical Index," IEEE Access, no. 8, pp. 200051-200062, 2020.
- [15] Kim, Minhee, et al., "Surface and internal discharge propagation with the liquid-conductive solid interface based on the Migration-Ohmic model," IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, 2019.

저자소개

김민희(Min-Hee Kim)

2012년 성균관대학교 물리학과 졸업(이학사)
 2019년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
 2022년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
 2022년 ~ 현재 경북대학교 BK 사업단
 (전자전기 융합인재양성교육연구단),
 포스닥 연구원

주 연구분야: 전자기장 Multiphysics, 전기절연



이세희(Se-Hee Lee)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1998년 숭실대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
 2002년 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업
 (공학박사)

2003년 ~ 2006년 미국 MIT공대, 포스닥 연구원
 2006년 ~ 2008년 한국전기연구원 선임연구원
 2008년 ~ 현재 경북대학교 전기공학과 교수
 주 연구분야: 전자기장 Multiphysics, 전기절연



학회 소식**☰ 2022년도 제1차 평의원회****일 시** 2022년 2월 11일(금) 18:00~19:00**장 소** 한국과학기술회관 12층 "아나이스홀" 및 화상회의**참석자** 김재언 회장 외 80명**주요 회의 내용**

1. 성원보고 (차한주 총무이사)
 - 재적 평의원 : 294명
 - 출석 평의원 : 81명 (참석 36명, 화상회의 15명, 위임 30명)
2. 개회 및 학회장 인사 (김재언 회장)
3. 의결사항
 - (1) 제1호 의안 : 2021년 사업실적
차한주 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
 - (2) 제2호 의안 : 2021년 수지결산
주성관 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
 - (3) 제3호 의안 : 산업전기응용(가칭) 부회 설치(승격) 건
차한주 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
 - (4) 제4호 의안 : 정관 일부 개정(안) 등의
차한주 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
4. 기타사항
 - (1) 2022년 본부 상벌심의위원회 위원 2명 추천
· 차한주 총무이사의 제안 설명을 듣고 손진근(가천대 교수), 주성관(고려대 교수) 평의원을 추천함.
5. 폐회

**☰ 2022년도 제2차 이사회****일 시** 2022년 2월 11일(금) 16:30~18:00**장 소** 한국과학기술회관 12층 "아나이스홀" 및 화상회의

참석자 김재언, 이건영, 이병준, 노대석, 김태균, 박부건, 김재문, 심덕선, 박관수, 이준호, 박기주, 신윤용, 오호진, 이천구, 장창익, 황우현, 차한주, 한기선, 주성관, 송경빈, 박종배, 남순열, 허 진, 김규호, 김명진, 이방욱, 신성수, 장용무, 지평식, 강용성, 유홍국, 윤순일, 손진근, 박성원, 우정욱, 이기환, 임철교, 이교범, 강승택, 차준민, 김미영, 김응상, 안길영, 기유경, 조현중, 허 진, 송길목, 원동준, 유희덕, 윤재영, 박정호(감사)

(이상 51명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인 : 원안 승인함.
 - 총 12명 [정회원 4명, 준회원(석사) 3명, 종신 3명, 다수년 2명]
 - 차한주 총무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
2. 2021년 사업실적 및 수지결산 승인
 - 차한주 총무이사과 주성관 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
3. 학회 사무실 및 회의실 인테리어 공사 등을 위한 정보화 자금 사용 승인 건
 - 주성관 재무이사의 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.



학회 소식

4. 탄소중립 전기산업발전 정책 협의회 및 부문별 TF 구성과 운영 건
 - 송경빈 전력정책위원장으로 부터 제안 설명을 듣고 아래와 같은 내용을 승인함.
 - 부문회별 탄소중립 T/F 구성
 - 부문회 인원은 부문회당 팀장 포함하여 5~8명으로 결정
 - 예산은 부문회당 500만원씩 본부에서 지원으로 책정
 - 탄소중립 전기산업발전 정책보고서(백서)를 올해 작성하기로 함
 - 백서의 내용은 각 부문별 TF에서 적합한 아이টে을 정하여 진행하기로 함.
 - 관련 회의 개최 일정
 - 짝수월 : 전력정책위원회 개최 / 홀수월 : 정책 협의회 개최
 - 관련 포럼 개최 일정
 - 5월 개최는 불가능하므로 7월부터 진행하고자 함.
5. 산업계 인사 회장 추대 관련 정관 개정(안)
 - 차한주 총무이사 및 김재언 회장으로 부터 제안 설명을 듣고, 지난 1차 이사회에서 제기된 법적인 문제와 문구 해석상의 문제에 대해 법조계의 자문 및 5개 부문회의 의견을 수렴한 후 수정하여 개정 승인함.
6. 산업전기위원회의 부회 승격 건
 - 손진근 산업전기위원회 위원장으로 부터 제안 설명을 듣고 논의한 결과, 학술활동 영역은 기존의 학술활동 영역으로 하고, 확대 개편되는 영역에 대해서는 E부문회의 의견을 받아 다시 조정한다는 조건으로 하여 부회 승격을 승인함.
7. 전기학회 교육원 규정 제정(안)
 - 지평식 연구조사위원장으로 부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
8. 보관 기간이 오래된 학회 재무서류(전표) 파기의 건
 - 주성관 재무이사로부터 제안 설명을 듣고 최근 5년 이전의 전표들은 파기하기로 함.

학회 일지

2022.1.20. ~ 2022.2.19

1.20(목)~27일(목)

제1차 연구조사위원회 (이메일 회의)

1.21(금)

E부문 제1차 이사회 (과총 아나이스홀)

C부문 제1차 이사회 (학회 회의실 + 화상회의)

1.25(화)

제1차 A부문 국문지 편집위원회 (화상회의)

E부문 제1차 ICEF 2022 조직위원회 (화상회의)

1.26(수)

제1차 영문편집위원회 (화상회의)

제1차 전력정책위원회 (학회 회의실 + 화상회의)

1.27(목)

제1차 산업전기위원회 운영회의 (학회 회의실 + 화상회의)

제7차 ICEE 한국위원회 (화상회의)

1.28(금)

E부문 제2차 ICEF 2022 조직위원회

(한국교통대 + 화상회의)

2.3(목)

회지 「전기의 세계」 71권 2호(2월호) 발간
전기학회 국문논문지 71권 2호(2월호) 발간

2.4(금)

D부문회 제1차 이사회

(과총 아이리스크홀 + 화상회의)

2.7(월)

제1차 본부 국문논문지 편집위원회 (화상회의)

제1차 여성과학기술위원회 (화상회의)

2.8(화)

E부문 제3차 ICEF 2022 조직위원회

(한국교통대+화상회의)

2.11(금)

본부 제2차 이사회 (과총 아나이스홀 + 화상회의)

본부 제1차 평의원회 (과총 아나이스홀 + 화상회의)

제2차 학술위원회 (학회 회의실 + 화상회의)

2.16(수)

제1차 학회지 편집위원회 (화상회의)

편집위원

허진 (편집위원장, 인천대학교)	이상훈 (대구기계부품연구원)	이상문 (경북대학교)	조춘남 (한국폴리텍대학)
전진홍 (한국전기연구원)	장미혜 (연세대학교)	남의석 (극동대학교)	조수연 (한국자동차연구원)
이한상 (세명대학교)	구상모 (광운대학교)	안진호 (호서대학교)	이기덕 (한국전자기술연구원)
이재걸 (한전 전력연구원)	서동욱 (한국해양대학교)	문원식 (숭실대학교)	
최경달 (한국공학대학교)	석오균 (금오공과대학교)	최근호 (경성대학교)	



고효율 저소음 변압기 한발 앞선 기술로 미래도약.

“지식경영과 기술개발로 고객 만족도를 극대화 시키고,
최상의 품질과 기술로 세계적인 기업으로
산일전기의 신뢰도를 쌓아 가겠습니다.”

Transformers

- 유입변압기
- 몰드변압기
- 건식변압기
- 특수변압기 (인버터·로용 등)

Reactor

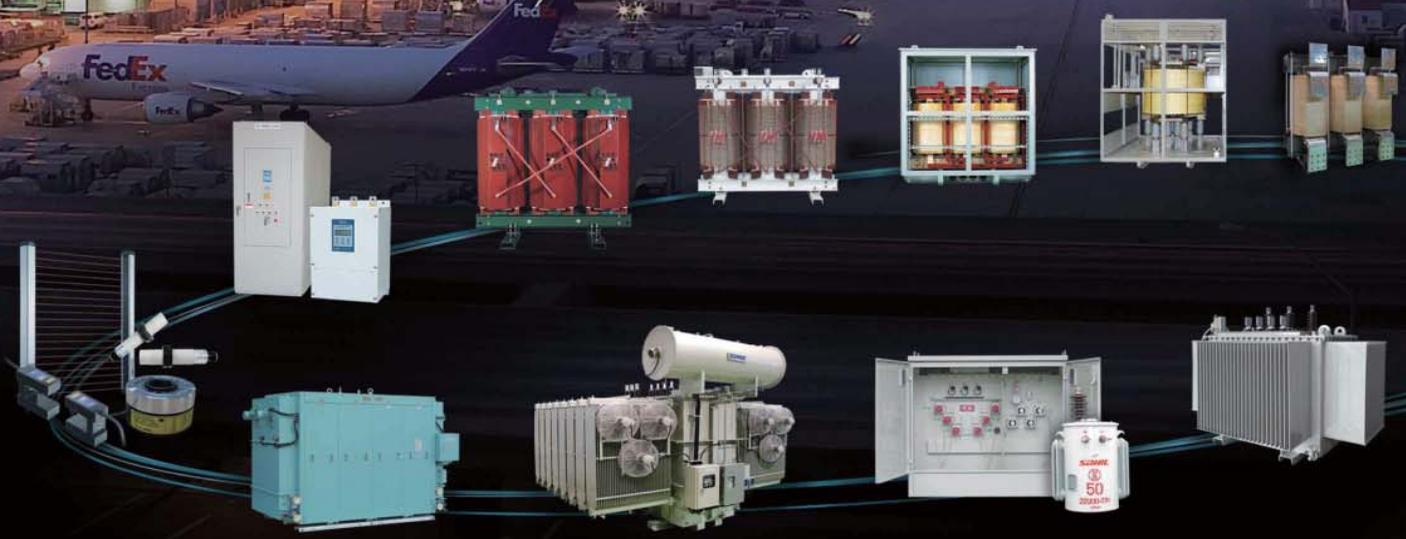
- 인버터용리액터
- 모터기동용리액터
- 콘덴서직렬리액터
- 공심 및 특수리액터

Soft Starters

- Soft Starters (HV/LV)

Sensors

- 근접센서
- 빔센서
- 초음파센서
- 화이버센서



Top 100
Global
Innovator
10년 연속 선정

친환경 절연유 변압기

콩을 주원료로 하는 친환경 절연유 변압기,
LS ELECTRIC의 앞선 기술력이 변압기의 미래를 선도합니다.

- 환경오염 최소화
- 우수한 화재 안전성
- 운영 및 유지보수 비용 절감
- 옥외 변전소 건설 비용 감소



LS ELECTRIC