



JULY 2023

7

Vol. 118

ESG TECH TREND... 탄소 줄이는 똑똑한 전력망 스마트그리드

GLOBAL TECH ISSUE... 작전명, 기술을 지켜내라

NEW TECH... 국내에서 개발된 적 없는 1600°C급 가스터빈 소재

탄소중립을 위한 최선의 대안
원자력발전

원자력발전

NEW TECHNOLOGY

이달의 신기술

OF THE MONTH

**JULY
2023**

SPECIAL THEME

02

INTRO

All About 원자력발전

NEW TECH

26

올해의 산업혁신기술상

세양폴리머(주) 윤성업 대표이사

국내 고성능 복합 소재 개발 가능성의
문을 열다



등록일자

2013년 8월 24일

발행일

2023년 6월 30일

발행인

한국산업기술평가관리원 원장 전윤종

발행처

한국산업기술평가관리원,

한국산업기술진흥원,

한국에너지기술평가원, 한국공학한림원

주소

대구광역시 동구 첨단로8길 32(신서동)

한국산업기술평가관리원

후원

산업통상자원부

편집 및 제작

한국경제매거진(주)(02-360-4816)

인쇄

(주)영남프린텍(053-964-1700)

구매 문의

02-360-4859 / chojh@hankyung.com

문의

한국산업기술평가관리원

(053-718-8567)

잡지등록

대구동, 라00026

※

본지에 게재된 모든 기사의 판권은

한국산업기술평가관리원이 보유하며,

발행인의 사전 허가 없이는 기사와 사진의

무단 전재, 복사를 금합니다.

04

BACKGROUND

원자력발전은 언제부터
친환경 에너지가 되었나

10

GLOBAL

전 세계가 지금 원전에 주목하는 이유

16

INTERVIEW

정동욱 중앙대학교

에너지시스템공학부 교수

탄소중립의 든든한 파트너, 원자력발전

20

ISSUE

미래형 원자력발전소

소형모듈원전^{SMR}

30

R&D 프로젝트

미래 e모빌리티 분야의

차세대 배터리를 위한 기술

34

R&D 연구단

‘꿈의 배터리’ 실현으로

K-배터리 기술력 강화하다



38

이달의 기술
국내에서 개발된 적 없는
1600°C급 가스터빈 소재

40

스페셜 리포트
누리호가 쏘아 올린
차세대 소형위성2호 목표 궤도 안착



GLOBAL TECH ISSUE

44

INFO
한눈에 보는 OT 보안산업

46

기술 현주소
작전명, 기술을 지켜라!



50

산업 이슈
OT 산업, 유능한 보안관이
필요하다

ESG TECH TREND

54

ESG 기술
탄소 줄이는 똑똑한 전력망
스마트그리드



58

ISSUE BRIEFING
배터리 3사가
탄소중립에 대처하는 법

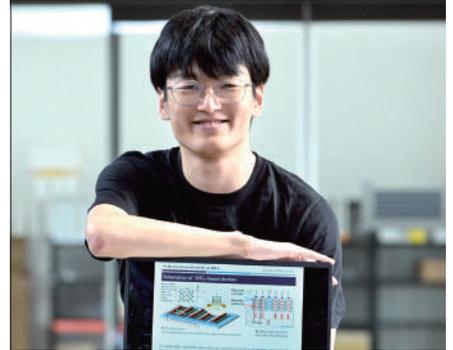
62

ESG 국내외 동향
다 쓴 태양광 설비
어떻게 재활용할까?

TECH STORY

66

싱크탱크
생명과학 산업을 위한 최고의 협력



70

프런티어
강유전체 기반 반도체 신소재를 연구한
KIST 이현재 박사

72

잡 인사이드
과학 커뮤니케이터 이민환
요즘은 과학을 재미로 봅니다

76

예술로 본 기술
원자력 안전관리가 모든 것이다

80

산업 뉴스
2023년도 산업통상자원부-에너지
공기업 기술 나눔 공고

ALL ABOUT 원자력발전

원자력발전이란?



화력발전과 마찬가지로 증기 힘으로 터빈을 돌려 전기를 만들지만 열원이 다르다.
우라늄을 연료로 사용하고, 우라늄의 핵분열 때 나오는 에너지로 증기를 만든다.
원자로는 우라늄이 핵분열을 해 에너지를 낼 수 있도록 만든 특수 우라늄 보일러다.

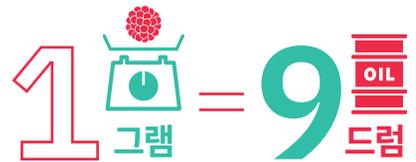


작지만
힘센
원자력

우라늄 235 1그램은 석유 9드럼, 석탄 3톤에 해당하는 열에너지를 생산할 수 있는 에너지원으로, 소량의 원자력 연료를 원자로에 장전해 약 3~4년 동안 많은 열을 발생시킬 수 있다.

우라늄 235 1그램

석유 9드럼



원전 수출
1기당 기대 효과

자료: 산업통상자원부

직접효과

1 건설비

50 억 달러

25 만대

2 2000cc급 중형차

3 50만 톤급 유조선

45 척

원자력발전의 역사

원자력의 시작

엔리코 페르미가 이끄는 과학자들이 1942년 12월 2일 오후 3시 25분 시카고 대학교 운동장 지하에 설치한 세계 최초의 원자로 '시카고 파일-1'에서 핵분열 연쇄반응을 지속시킴으로써 원자력 시대를 열었다.

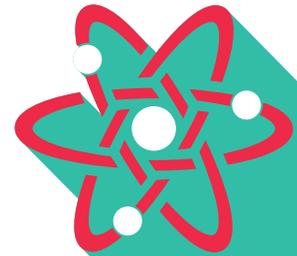
제1세대 원전

1954년 세계 최초로 운전한 오브닌스크 원전(5MWe, 러시아) 등 1950년대에 건설된 원전이다.

역대 원전 월별 전력 거래량



자료: 한국전력거래소, 단위: GWh



석탄 3톤



원전 가동률 추이



자료: 한국수력원자력, 단위: %

15대
에어버스
항공기 A380

간접효과

1 운영, 정비, 연료
공급 폐기물처리

50 억 달러
60년간

2만 7000여명

2 고용 창출 10년간



제2세대
원전

1974년에 운전한 자이언-1 원전(1000MWe, 미국), 한국에서 최초로 상업 가동한 고리 1호기(587MWe) 등 고리·영광·울진 지역의 가압경수로와 월성의 가압중수로 원전이 여기에 속한다.

제3세대
원전

1990년대 후반 일본에 건설된 1350MWe급 개량비등경수로, 미국의 AP600 및 한국의 APR1400 (신고리 3-4호기 등)이 여기에 속하고, 제3세대 원전을 개량한 AP1000, EPR, ACR1000, ARP+ 같은 개량 제3세대 원전도 있다.

제4세대
원전

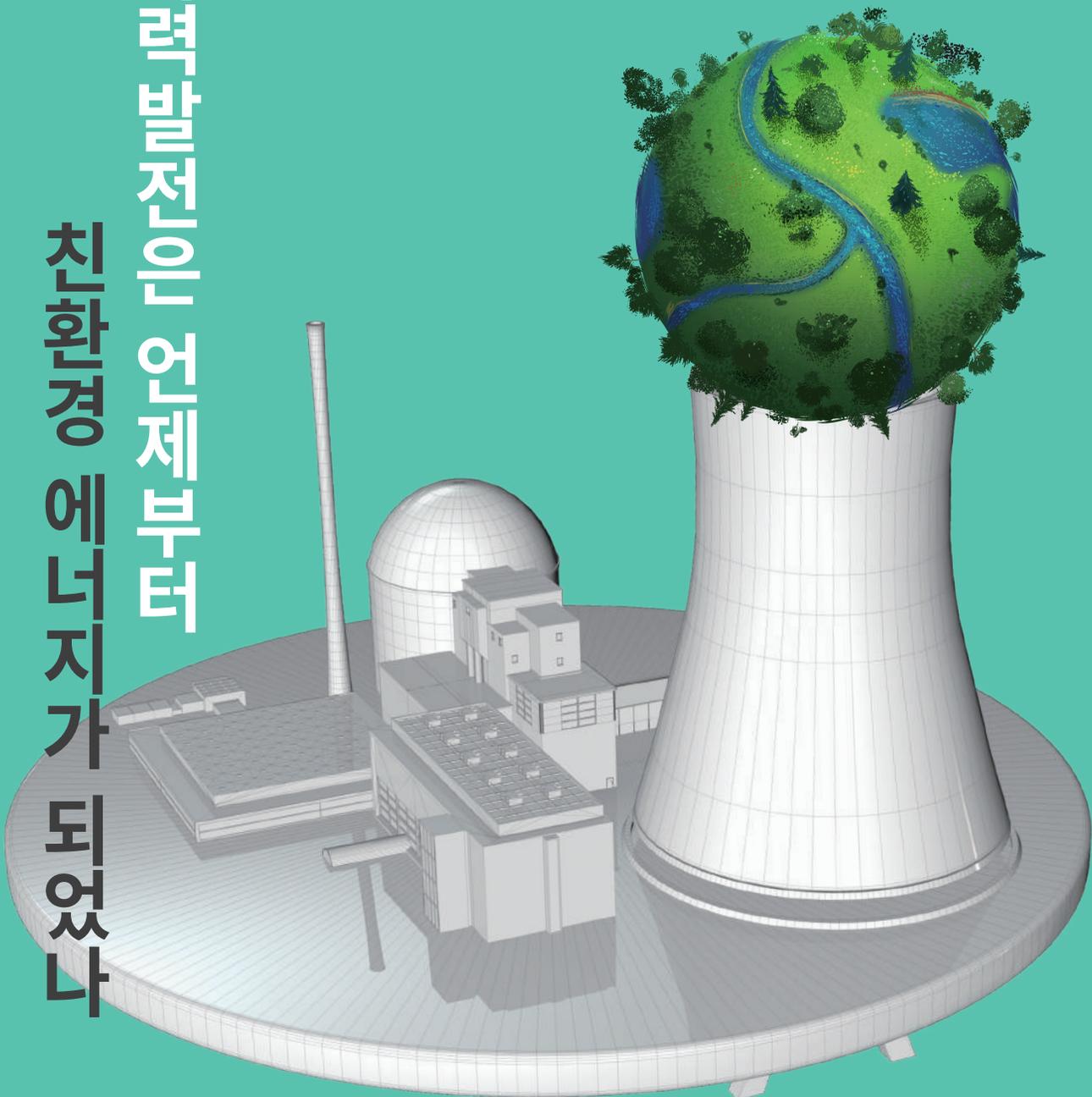
2030년 이후에 실용화될, 원자력의 안전성·친환경성·핵확산 저항성을 획기적으로 향상시킨 소듐냉각고속로^{SFR}와 원자력 수소 생산 시스템 구축을 위한 초고온가스로^{VHTR} 등의 원전을 개발 중이다.



요즘 친환경이 종교처럼 우리 삶의 구석구석을 지배하고 있다. 그런데 친환경성을 평가하는 잣대가 감각적이라면 우리 삶의 구석구석이 오류로 점철될 것이다. 조금만 이성을 가동해보면 원자력발전이 친환경적이라는 것을 쉽게 알 수 있다. 원자력은 그렇게 탄생한 에너지자원이다.

원자력발전은 언제부터

친환경 에너지가 되었나



2022년 7월 6일, 유럽의회는 원자력을 그린 택소노미^{Green Taxonomy} (녹색 분류체계)에 포함시켰다. 그린 택소노미는 어떤 활동이 환경적으로 지속 가능한 것인가를 나타내는 분류체계로, 회사·투자자·정책개발자에게는 이러한 활동이 무엇인지 알려주는 지침이 된다. 많은 사람이 원자력발전이 오랫동안 녹색 분류체계에서 빠져 있다가 갑자기 포함된 것으로 알고 있지만, 실은 그렇지 않다. 녹색 분류체계는 2020년 기본 원칙을 마련하고, 2021년 세부 기준을 발표했다. 원자력계는 녹색 분류체계 포함 여부에 별 관심이 없었다. 녹색 분류체계는 발전소를 건설할 때 투자를 받기 위한 수단인데, 2021년만 해도 신규 원전 건설 의지가 높지 않았기 때문이다.

원자력에 대한 태도 변화

기후변화 대응이라는 거대한 도전이 에너지 정책에 부과되면서 이산화탄소 배출이 적은 재생에너지는 큰 기대감을 갖고 확대되어왔다. 하지만 전력 생산 단가가 높고, 많은 부지가 필요하며, 무엇보다 전력 생산 변동성 때문에 어느 수준 이상으로는 확대하기 어렵다는 것이 알려지면서 한계에 봉착했다. 재생에너지 발전을 무턱대고 늘린 나라들은 혹독한 전기 요금 인상과 이에 따른 냉난방 제한 등 문명을 역행하는 수준의 불편, 그리고 전력 공급 불안정성을 감수하거나 그 영향을 주변국에 전가할 수밖에 없는 상황에 이르렀다.

프랑스가 유럽연합^{EU} 의장국이 되어 친원전 입장을 강화한 것도 원자력에 대한 태도 변화의 요인이다. 결국 원자력발전은 녹색 분류체계에 포함되었다. 몇 가지 조건 사항이 붙었지만, 그다지 달성하기 어려운 과도한 조건은 아니다.

그런데 원자력이 녹색 분류체계에 들어갔다고 해서 친환경적이고, 들어가지 못했다고 해서 친환경적이지 않다고 평가할 수는 없다. 녹색 분류체계도 결국 정치적 타협의 산물이기 때문이다. 우리는 깨끗해 보이거나 좋아 보이면 친환경이라고 생각하는 경향이 있다. 이것은 과학적 판단 결과가 아니다. 상식적인 얘기지만, 친환경성은 과학적 잣대로 평가하는 것이 옳다.

— 1

한 상품 또는 서비스가 환경친화적인지 여부를 판단하는 분석. 제품 생산에서 폐기 단계까지 분석해 환경친화적인지 여부를 판단한다.

— 2

영국의 고전파 경제학자로 사회주의 사상을 비판하고, 자본주의 사회의 모순을 합리적으로 설명했으며, 1789년에 간행된 <인구론>에서 인구 증가가 식량 증산을 상회한다고 파악, 과잉 인구에 따른 빈곤을 피할 수 없다고 주장했다.

친환경 에너지를 구분하는 기준

첫째, 친환경은 환경 부담이 없거나 최소화하는 것이어야 한다. 그러기 위해서는 제작, 건설, 운전 전 과정에서 오염물질 배출이 없어야 한다. 오염물질 배출이 전혀 없을 수는 없다. 그러나 배출되는 오염물질이 자정 능력 이내라면 과학적으로 환경오염은 아니라고 본다. 생애주기 분석^{life cycle analysis} ¹을 통해 발전소를 건설하기 위해 기자재를 생산·운반·제작하는 데 발생된 오염물질과 이산화탄소 그리고 그것을 운전하는 과정에서 운전 요원이 발생시키는 이산화탄소를 모두 고려한다. 이에 따르면, 재생에너지와 원자력은 거의 같은 수준이다. 재생에너지 중 햇볕이 좋지 않거나 바람이 불지 않는 곳에 설치된 재생에너지는 원자력발전보다 두세 배의 이산화탄소를 배출할 수밖에 없다. 또 태양광 패널이나 풍력발전이 이산화탄소를 마구 배출하는 국가에서 생산된다면 이 또한 친환경적이라고 보기 어렵다.

둘째, 고밀도 전원이어야 한다. 에너지원의 발전은 단위면적당 에너지 생산 밀도가 높아지는 방향으로 발전하고 있다. 지구상 인구는 증가하는데, 지구는 유한하기 때문이다. 토머스 로버트 멀서스^{Thomas Robert Malthus} ²는 이 때문에 인류가 언젠가는 굶게 될 것이라고 했지만, 집약 농업이라는 기술개발을 간과했다. 농업 생산성은 100배로 증가했고, 우리는 경작지를 늘리지 않고도 음식의 풍요를 구가하는 첫 번째 인류가 되었다. 마찬가지로 에너지 생산도 밀도

를 높이지 않는다면 결국 한계에 이를 수밖에 없다.

따라서 나무, 석탄, 석유, 가스로 발전하다가 원자력으로 대체되는 것은 필연이다. 원자핵에 내재된 에너지를 활용함으로써 연소라는 과정 없이 석탄보다 100만 배 밀도로 에너지를 얻는 것이다. 우라늄 235 1그램은 석탄 3톤, 석유 9드럼과 비슷한 에너지를 발생한다. 돌이 모두 떨어져서 석기시대가 끝난 것이 아니듯, 자원 고갈을 염려하기보다는 고밀도 에너지로 전환하는 것이 과학적 상식이다.

우리는 보통 농약과 비료를 사용하지 않는 유기농 재배 방식을 친환경적이라고 여긴다. 하지만 토지 사용 효율을 보면 결코 친환경적이지 않다. 물론 건강에 좋다면 친인간적이라고 할 수는 있다. 유기농을 친환경으로 여기는 것은 감각적 판단일 뿐 과학적 판단은 아니다.

또 하나의 오류는 안전과 친환경이라는 잣대를 섞는 것이다. 안전이라는 것은 위험하지 않다는 의미이며, 환경 부담이나 지속가능성에 대한 지표는 아니다. 즉 안전과 환경성은 서로 다른 차원의 것으로, 비교할 수 없다. 길이와 무게를 비교할 수 없는 것과 마찬가지다. 그런데 원전의 친환경성을 설명하다 보면 “원전은 위험하잖아요?”라는 질문을 받곤 한다. 이 질문은 틀렸다. 다른 차원의 문제다. 여기 또 다른 오류가 있다. 원자력발전은 안전 측면에서도 다른 어떤 에너지원보다 위험하지 않다. 동일한 전력을 생산하는 데 사망자 수를 비교한 통계를 보면 원자력으로 인한 사망자가 가장 적다.

에너지 발생량 비교



우라늄 235 1그램

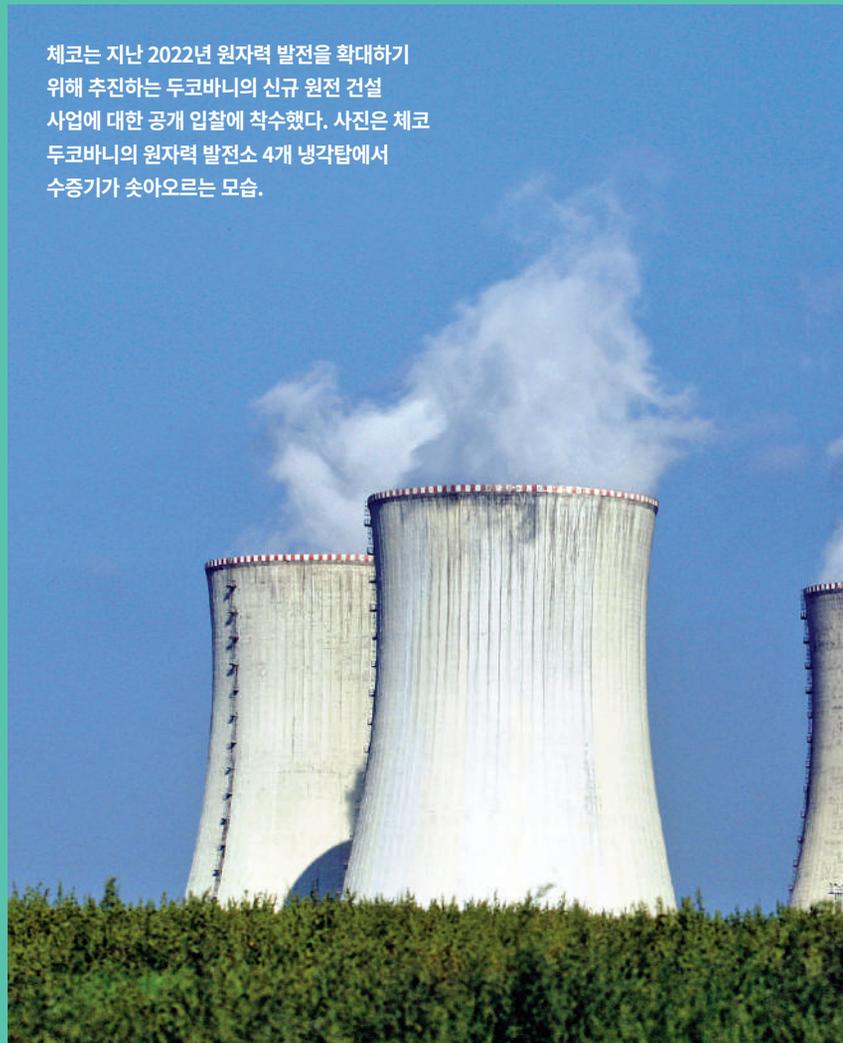


석탄 3톤

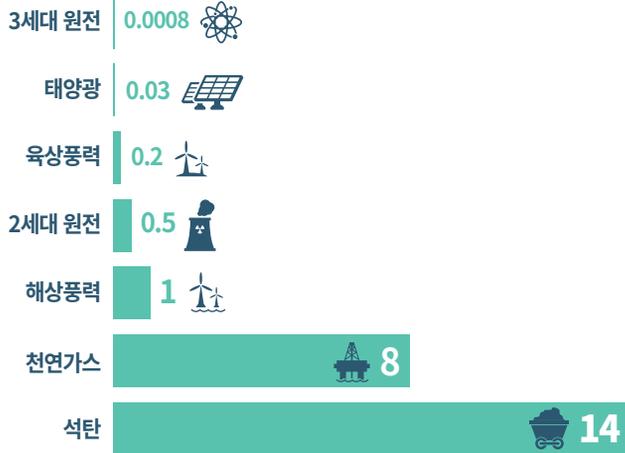


석유 9드럼

체코는 지난 2022년 원자력 발전을 확대하기 위해 추진하는 두코바니의 신규 원전 건설 사업에 대한 공개 입찰에 착수했다. 사진은 체코 두코바니의 원자력 발전소 4개 냉각탑에서 수증기가 솟아오르는 모습.

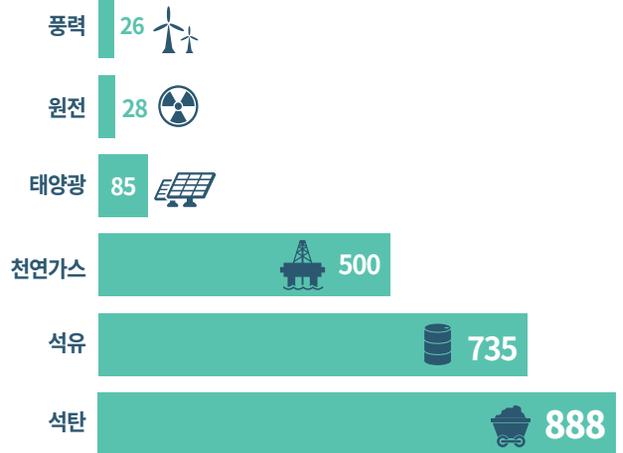


에너지원별 중대 사고 치명률



자료: EU 합동연구센터
단위: 명, 전력 생산 1조kWh당 사망자 수

에너지원별 온실가스 배출량



자료: EU 합동연구센터
단위: GWh당 톤



원전이 환경에 미치는 영향

“인간 건강과 환경에 미치는 영향은 수력발전, 태양광·풍력과 비슷.”

“원전이 인간 건강과 환경에 더 많은 해를 끼친다는 과학적 증거는 없다.”

“방사성폐기물을 지하에 묻는 것은 가장 안전하고 장기적인 해결책이다.”

“토지 점유율은 풍력·태양광보다 훨씬 낮다.”

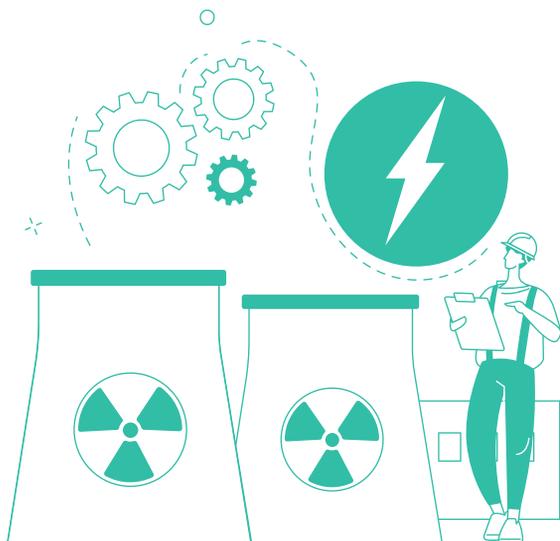


태생부터 친환경적이었던
원자력발전은 발전 단가가 낮고,
소유 부지가 적으며, 제작·건설·운영
과정에서 환경으로 인한 배출물이
0에 가깝다.

셋째, 친환경 제품은 저렴해야 한다. 제품 가격은 수입한 자원을 생산한 제품 수로 나눠 산출한다. 비싸다는 것은 투입된 자원이 많다는 것이고, 지속 가능하지 않다는 것을 의미한다. 따라서 다소 비싸더라도 친환경 제품을 사는 것은 환경을 사랑하는 아름다운 마음이지만, 합리적인 것은 아니다. 친환경 제품은 저렴해야 한다.

이러한 차원에서 원자력은 태생부터 친환경적이었다. 발전 단가가 낮고, 소요 부지가 적으며, 제작·건설·운영 과정에서 환경으로 인한 배출물이 0에 가깝다. 사용 후 핵연료는 남지만 절대량이 적다. 다른 발전원의 100만 분의 1 수준이다.

원자력발전은 100만 배의 에너지를 생산하기에 값이 비쌀 수 없다. 이는 다른 차원에서는 안전성을 확보하기 위해 비용을 치를 여유가 있음을 의미하기도 한다. 지난 65년간 세계적으로 500여 기 이상 원전이 가동하며 사망에 이른 사고가 발생한 것은 체르노빌 원자력발전사고 한 건뿐이다. 이에 유엔과학위원회^{UNSCLEAR}는 보고서에 43명 사망으로 기록했다. 당시 체르노빌 4호기에서 사고가 발생했고, 1~3호기는 그 후로도 10여 년간 정상적으로 운전되었다. 원전사고는 드물지만 한 번 발생하면 끝장이라는 선동은 미국·러시아·일본이 아직 끝장나지 않은 데다 여전히 주종 에너지원으로 원자력을 사용한다는 사실을 보면 틀렸다는 것을 알 수 있다. 체르노빌 자연생태계는 방치를 통해 대부분 복원되었고, 후쿠시마 지역도 인간의 노력을 통해 복원되었다.



이산화탄소 배출 없는 전기 생산의 유일한 대안

요즘 친환경은 종교처럼 우리 삶의 구석구석을 지배하고 있다. 그런데 친환경성을 평가하는 잣대가 감각적이라면 우리 삶의 구석구석이 오류로 점철될 것이다. 조금만 이성을 가동해보면 원자력발전이 친환경적임을 알 수 있으며, 또 그렇게 탄생했다.

기후변화에 대비해야 하는 상황에서 원자력 이용은 앞으로 더욱 확대될 것이다. 전통적으로 화석연료를 사용하던 부문을 전기화하고 수소화하지 못한다면 이산화탄소 배출 저감은 난망하다. 화석연료 사용분은 전기 사용분의 네 배를 넘어서기 때문이다. 따라서 이산화탄소 배출 없이 전기와 수소를 생산하는 것은 온 인류의 과제되었으며, 현재 기술로는 원자력이 유일한 대안이다. 기존 대형 원전을 전개하는 것뿐 아니라 소형모듈원전^{Small Modular Reactor, SMR}도 인류의 도전에 큰 몫을 할 것이다.

— 3

증기발전기, 냉각재 펌프, 가압기 등 주요 기기를 하나의 용기에 일체화한 소형 원자로를 뜻한다. 기존 대형 원전 출력(1000~1500MW급)의 3분의 1에서 5분의 1 이하 규모다. SMR에 대한 자세한 내용은 20페이지에서 확인.



정범진 경희대학교 원자력공학과 교수

과학기술부 원자력국 사무관, 영국 맨체스터 대학교 포스트닥 연구원, 제주대학교 에너지공학과 부교수, 한국연구재단 원자력단 단장 등을 역임했다. 현재 경희대학교 원자력공학과 교수, 산업통상자원부 에너지위원회 위원으로 활동하고 있다.

전 세계가 지금 원전에 주목하는 이유

전 세계적으로 탄소중립에 대한 거센 압박과 러시아의 우크라이나 침공 이후 크게 대두된 에너지 안보의 중요성으로 인해 원자력발전이 재조명받고 있다. 원자력발전 확대 정책을 펼치고 있는 세계 각국의 동향과 함께 차세대 원전으로 주목받는 소형모듈원전 개발 경쟁 동향을 살펴본다.



미국 에너지부는 소형모듈원전 개발사 중 선두 기업으로 거론되는 뉴스케일 파워의 VOYGR 원자로 실증을 위해 약 14억 달러를 지원할 예정이다. 사진은 미국 뉴스케일파워의 소형모듈원전 플랜트 가상 조감도.

— 1
동법의 Section 958(Enabling Nuclear Energy Innovation)에서는 SMR을 포함한 첨단 원자로의 혁신 기술개발 연구 활동을 증진하기 위해 다음과 같은 지원 제도를 명시함. ① 민간 SMR 개발 기업이 미국 국립 연구소와 협력해 국립 연구소 부지 및 DOE 소유의 부지에서 실증로를 건설할 수 있도록 하며, ② DOE가 실증 사업을 지원하는 민간 SMR 기술 관련 전문 지식과 역량(technical expertise and knowledge)을 NRC(Nuclear Regulatory Commission(원자력규제위원회))와 공유할 수 있게 해 NRC의 첨단 원자로 기술 및 안전성에 대한 이해도를 높여, 개발하는 첨단 원자로를 위한 새로운 인허가 체계 구축을 가속화함.

미국은 30년, 영국은 20년, 프랑스는 15년 만에 대형 원전 신규 건설 사업을 재개해 미국은 올해 완공했고, 영국과 프랑스는 아직도 건설 중이다. SMR 개발도 활발히 추진하고 있으며 아직까지 건설에 착수한 SMR 노형은 없지만, 기술개발 및 인허가 획득을 위해 국가적 역량을 쏟고 있는 것으로 파악된다. 이와 달리 캐나다는 대형 원전이 아닌 SMR 공급망 구축 및 자국 내 구축에 집중하는 것으로 파악되며, 9개의 SMR 개발사가 현재 캐나다에서 인허가 절차를 진행 중이다. 중국과 러시아는 서방의 원전 강국인 미국·프랑스가 주

축한 사이 전 세계 원전 수출 시장의 대부분을 장악했으며, 대형 원전뿐 아니라 SMR 개발도 선제적으로 착수해 현재 다양한 노형의 SMR 상업 운전을 진행 중인 원전 선도 국가다. 현재 우리나라를 포함한 미국·프랑스·중국·러시아가 세계 각지에서 대형 원전에 대한 수출 경쟁을 펼치고 있으며, 자국 SMR 노형 개발 및 상업화를 위해 치열하게 경쟁 중이라 원전의 역할 및 비중이 점차적으로 확대되는 탄소중립·에너지 안보 시대에 어느 나라가 선도 국가가 될지 귀추가 주목된다.

| 첨단 원자로 사업 적극 추진

미국은 원자력발전 기술의 종주국으로 6월 현재 93기의 원전을 가동 중인 세계 최대 원전 보유국이며, 자국의 전기 생산 중 원전이 차지하는 비중은 약 18%다. 또 미국은 웨스팅하우스^{Westinghouse}의 대형 원전인 AP1000을 적용한 보글 3호기가 지난 4월 송전망 연결에 성공했다. 후속 호기인 보글 4호기도 올 4분기에 송전망 연결이 이뤄질 것으로 예상된다. 미국은 소형모듈원전^{Small Modular Reactor, SMR} 개발에서도 가장 앞서가는 국가로, 각종 지원법을 통과시켜 적극적으로 민관협력을 추진하고 있다. 예를 들면, ‘Nuclear Energy Innovation Capabilities Act of 2017’¹은 민관협력을 통한 SMR 개발을 촉진하기 위해 마련된 법률로, 첨단 원자로 실증 사업 지원 프로그램^{Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP}을 위한 법적 근거를 마련했다. 동법을 통해 미국 에너지부는 ARDP 프로그램을 2020년부터 진행하고 있으며, 대표적 예로 빌 게이츠가 개발한다고 알려진 테라파워^{TerraPower}의 나트륨^{Sodium} 원자로를 실증하기 위해 2021년부터 2028년까지 약 20억 달러를 지원할 예정이다. 그뿐 아니라 미국 에너지부는 소형모듈원전 개발사 중 선두 기업으로 거론되는 뉴스케일 파워^{NuScale Power}의 VOYGR 원자로 실증을 위해 약 14억 달러를 지원할 예정이며, VOYGR 원자로는 2030년 상업 운전을 목표로 하고 있다.

미국 원자력발전 현황



| 원자력산업 부활의 시작

영국은 6월 현재 9기의 원전을 가동 중이며, 자국의 전기 생산 중 원전이 차지하는 비중은 약 12%다. 현재 영국은 프랑스 EDF사의 대형 원전인 EPR 2기를 영국 남서부 서머싯주에 건설 중이다. 이는 ‘힌클리 포인트 C 프로젝트’라 불리며, 2025년에 완공될 예정이다. 힌클리 포인트 C 프로젝트는 영국에서 약 20년 만에 재개된 신규 원전 건설로, 미국의 보글 3·4호기 원전과 마찬가지로 영국 내 원자력산업 부활의 신호탄으로 주목받고 있다. 또 영국은 2020년 11월 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 ‘녹색산업 혁명을 위한 10대 중점 계획’을 발표하면서 2050년까지 전기 생산에서 원전이 차지하는 비중을 25%까지 높인다는 계획을 제시했다. 그뿐 아니라 SMR 원전 기술개발과 건설을 지원하기 위해 총 4억 파운드 규모의 정부 기금^{Advanced Nuclear Fund}을 설정해 롤스로이스사가 개발하는 UK-SMR의 영국 내 건설을 지원하고 있다. 즉 최초 호기를 포함해 최대 16기의 UK-SMR을 먼저 영국에 건설하려는 계획을 통해 경제성 및 건설 역량을 확보한 후 유럽을 시작으로 해외시장에 진출하려는 의도로 파악된다.

영국 원자력발전 현황





프랑스의 전기 생산 중 원전이 차지하는 비율은 63%로 세계적으로 매우 높다.
 사진은 프랑스 생루프 골페치 원전의 냉각탑에서 증기가 솟구치고 있는 모습.

■ ■ | 최대 원자력발전 사용 국가

프랑스는 6월 현재 56기의 원전을 가동 중이며, 자국의 전기 생산 중 원전이 차지하는 비중은 약 63%로 원전을 국가 에너지 믹스에서 가장 많이 사용하는 대표적 국가다. 프랑스도 미국·영국과 마찬가지로 신규 원전 건설을 장기간 중단한 국가로, 자국 내 마지막 건설 이후 신규 사업이 중단된 지 15년 만에 대형 원전인 EPR이 적용된 플라망빌 3호기를 2007년에 착공했다. 하지만 아직 건설 중인 플라망빌 3호기는 2024년 완공이 예상되며, 프랑스 내 단절된 전문 인력풀과 공급망을 실감케 했다. 마크롱 대통령은 2022년 2월 자국 원자력산업 부흥 정책을 발표하며 2050년까지 최대 14기의 EPR을 신설하는 계획을 제시했다. 2021년 10월에는 ‘프랑스 2030 투자 계획’을 발표하며 자국 SMR 노형인 누워드^{Nuward}에 대한 개발계획을 소개했고, 현재 개발 중이다.

프랑스 원자력발전 현황





🇨🇦 | SMR 배치에 초집중

캐나다는 중수로 기술의 종주국으로 6월 현재 19기의 중수로 원전을 가동 중이고, 자국의 전기 생산 중 원전이 차지하는 비중은 약 12%다. 캐나다는 현재 대형 원전이 아닌 소형모듈원전 개발 및 자국 내 배치에 집중하고 있다. 이를 위해 2020년 12월, 캐나다 정부는 SMR 액션 플랜^{SMR Action Plan}을 발표했으며, 자국 내 SMR 배치를 위해 표준화를 통한 경제성 실현 목표 및 위험 분배 전략을 제시했다.

표준화를 통한 경제성 실현 목표 및 위험 분배 전략

⇒ 표준화 및 경제성 실현 목표

더 많은 원자로를 생산·운영함에 따라 자본비용 감소 실현

⇒ 위험 분배 전략

정부가 주도하는 금융·자금 조달 메커니즘을 통해 캐나다 내 조기 실증 및 건설을 지원하기 위한 정부, 유틸리티·산업 간 SMR 개발사업 위험 공유 전략

캐나다 원자력발전 현황

19기 원전 보유

전기 생산 중 원전 비율

12%



(2023년 6월 기준)

6월 현재 캐나다에는 9개의 SMR 개발사가 캐나다 규제 기관의 사전 인허가에 참여하고 있으며, 사전 인허가 2단계를 가장 먼저 받은 GE 원자력에너지^{GE-Hitachi Nuclear Energy}의 BWRX-300이 2028년 캐나다 온타리오주 달링턴에 완공될 계획이다. 캐나다 인프라 은행은 해당 프로젝트에 약 72억 달러를 지원할 예정이다. 또 사전 인허가 2단계를 올해 안에 받을 것으로 예상되는 ARC 클린에너지^{ARC Clean Energy}의 ARC-100은 2030년 초까지 캐나다 뉴브런즈윅주의 중수로 해체 부지에 최초 호기가 건설될 계획이다.

중국 | 공격적 원전 증설 추진

중국은 6월 현재 55기의 원전을 가동 중이며, 21기를 건설 중인 원자력발전에서 가장 급성장하고 있는 신흥국이다. 중국은 원전을 55기나 가동 중이지만, 자국 내 전기 생산 중 원전이 차지하는 비중은 약 5%에 불과해 향후 중국 내 원전 증설이 더욱 공격적으로 이뤄질 것으로 예상된다. 또 중국은 대형 원전의 최신 기술 버전이라 불리는 3세대 원전의 다양한 노형(4기의 AP1000, 2기의 EPR)을 운영하고 있으며, 자국 노형인 HPR1000도 2021년부터 상업 운전에 착수했다. 다양한 설계기술이 적용된 SMR도 이미 개발을 완료해 운전 중인 SMR 분야 선도 국가이기도 하다. 예를 들면, ACP100이라는 경수형 SMR은 현재 건설 중이고, 초고온가스로는 HTR-PM도 2022년부터 상업 운전에 착수했다. 소듐냉각고속로형 SMR은 실증을 완료한 후 CFR-600을 건설 중이며, 올해 안에 상업 운전을 시작할 것으로 예상된다. 또 사막에서도 운전이 가능한 토륨 핵연료를 활용한 용융염원자로형 SMR도 올해부터 실증 운전을 시작했다.

중국 원자력발전 현황



시진핑 중국 국가주석과 블라디미르 푸틴 러시아 대통령이 중국 장쑤성 텐완 원전과 라오닝성 쉬다바오 원전 착공식을 화상으로 참관하며 손을 흔들고 있다.





러시아는 전 세계 원전 수출 시장의 60% 이상을 장악할 정도로 성장한 국가다. 6월 현재 37기의 원전을 가동 중이며, 자국 내 전기 생산의 약 20%를 원전이 차지한다. 사진은 러시아의 칼리닌스키 원전의 모습.

🇷🇺 | 원전 수출 시장의 60% 이상 장악

러시아는 중국과 마찬가지로 미국·캐나다·영국 등 서방국가가 신규 노형 개발 및 원전 신규 건설에 주춤한 사이 전 세계 원전 수출 시장의 60% 이상을 장악할 정도로 성장한 국가다. 6월 현재 37기의 원전을 가동 중이며, 자국 내 전기 생산의 약 20%를 원전이 차지한다. 2020년 4월 ‘러시아 연방 원자력 사용 분야에서의 장비, 기술, 연구 개발에 대한 대통령령 No.270’이 공포되었으며, 2030년까지 시행될 예정이다. 이를 통해 러시아는 다양한 노형의 SMR을 공격적으로 개발할 것으로 파악된다. 대표적으로는 러시아 톰스크주 세베르스크시에 납냉각고속로형인 BREST-OD-300과 재처리 시설을 건설 중이며, 2026년 가동할 계획이다. 또 소듐냉각고속로형인 BN-원자로를 1973년부터 현재까지 용량을 점차적으로 키워가며 안정적으로 가동 중이다. 그뿐 아니라 페베크 지역에 SMR을 탑재한 부유식 원전인 아카데미 로모노소프를 2020년부터 상업 운전전에 착수했고, 1959년부터 레닌 쇄빙선을 운항하기 시작해 지금도 운항 중인 두 척을 포함해 총 10척 이상의 쇄빙선을 운항한 바 있다. 러시아도 중국과 마찬가지로 SMR 분야 선도 국가다.

러시아 원자력발전 현황



박상길 법무법인(유한) 광장 원자력 분야 전문위원

한국원자력안전기술원, 한국원자력연구원, 스위스 폴 셰러 인스티튜트(Paul Scherrer Institute) 등 여러 기관의 연구원과 한국원자력학회 총무이사, 삼성경제연구소 수석연구원 등을 지냈다. 현재 법무법인(유한) 광장의 원자력 에너지 분야 전문위원을 맡고 있다.

탄소중립의 든든한 파트너 원자력발전

word 강진우 photo 이승재

최근 전 세계가 기후변화 대응에 힘쓰는 가운데, 원자력발전의 중요성이 부각되고 있다. 안전성·경제성·현실성 등을 두루 따질 때 원전을 친환경 에너지로 분류할 수 있으며, 탄소중립에도 기여할 것이라는 게 선진국들의 판단이다. 그렇다면 우리나라는 앞으로 원전을 어떻게 바라보고 활용해야 할까. 제34대 한국원자력학회장을 지낸 정동욱 중앙대학교 에너지시스템공학부 교수와 함께 탄소중립 파트너로서 원전에 대해 살펴봤다.

정동욱 중앙대학교
에너지시스템공학부 교수



Q.

전 세계가 탄소중립에 힘쓰는 가운데 러시아·우크라이나전쟁이 발발하면서 에너지 안보와 탄소중립을 동시에 실현하는 효과적 대안으로 원전이 주목받고 있다고 들었습니다.

유럽연합^{EU}은 2019년 12월, 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위한 로드맵 ‘EU 그린딜^{Green Deal}’에 이어 2020년 6월 세계 최초로 녹색 분류체계인 ‘그린 택소노미’를 발표했는데요. 이때만 해도 EU는 재생에너지와 천연가스로 탄소중립을 실현한다는 방침이었습니다. 하지만 연구와 논의를 거듭하면서 두 에너지로 문명을 유지·발전시키면서도 탄소중립을 실현하기란 현실적으로 매우 어렵다는 것을 깨달았고, 2022년 2월 원전에 대한 투자를 그린 택소노미로 분류하는 안을 확정·발의해 7월 가결시켰습니다. 미국은 이전부터 원전을 그린에너지로 규정해 기술 투자를 이어왔죠. 이런 와중에 공급망에도 러·우전쟁이 시작되어 천연가스 수급이 불안정해지면서 재생에너지와 천연가스만으로는 탄소중립과 에너지 안보를 이루기 힘들다는 공감대가 더욱 확고해졌고, 원전과 함께 미래를 준비하려는 움직임이 분주해졌습니다.

Q.

‘2050 탄소중립’을 달성하기 위해서는 재생에너지와 원전을 모두 활용해야 한다고 주장하시는데, 그 이유는 무엇인가요?

인류가 보유한 에너지 중 무탄소 에너지는 재생에너지와 원전밖에 없습니다. 그런데 재생에너지는 우리가 원하는 시점에, 원하는 만큼 에너지를 만들어낼 수 없습니다. 예를 들어 날이 흐리면 태양광발전 효율이 크게 줄어들고, 바람이 불지 않으면 풍력발전은 무용지물이 되죠. 이러한 재생에너지의 ‘간헐성’을 최소화하려

면 발전효율이 좋을 때 생산한 전기를 에너지저장장치^{Energy Storage System, ESS}에 저장해야 하는데, 현재 ESS의 가격은 상당히 비싸서 재생에너지와 ESS만으로 우리가 필요로 하는 에너지를 공급하는데 한계가 있습니다. 원전은 재생에너지와 ESS의 이러한 단점을 충분히 보완할 수 있을 정도로 발전효율과 경제성이 높으며, 그 과정에서 탄소가 발생하지 않습니다. 그러기에 2050 탄소중립을 위해 재생에너지와 원전을 함께 가져가야 한다고 말씀드리는 것입니다. 이렇게 하면 두 분야가 서로 경쟁하면서 기술혁신을 거듭하는 부가효과도 누릴 수 있습니다. ESS는 배터리 생산에 들어가는 희토류 함량을 줄이고 가격 경쟁력을 확보하는 쪽으로, 원전은 안전성을 더욱 높이는 방향으로 발전하겠죠. 어느 쪽이 승리할지는 알 수 없지만, 이 경쟁이 탄소중립과 에너지 공급 효율 향상에 큰 도움이 될 것임은 분명합니다.

Q.

국민 상당수가 불안해하는데, 실제로 원전의 안전성은 어느 정도 수준인가요?

원전의 안전성은 과학적으로 충분히 입증됐습니다. 그렇지 않았다면 미국과 EU가 원전을 그린에너지로 분류하지 않았겠죠. 발전소가 정상적으로 운영되는 경우 우리에게 익숙한 화력발전은 미세먼지와 온실가스 발생 등으로 환경·인명 피해가 상당한 반면, 원전은 이러한 문제에서 자유롭습니다. ‘만에 하나 사고가 발생하면 어떨까?’라고 질문할 수 있는데요. EU는 원전을 그린 택소노미에 포함시키면서 “중대 사고가 발생할 때에도 재생에너지에 비해 그 피해가 심각하다고 할 수 없다”는 견해를 밝혔습니다. EU는 총 에너지의 약 30%를 재생에너지로 생산하는데, 이 중 절반이 수력발전입니다. 만약 수력발전댐이 무너지는 중대 사고가 발생했다고 가정하면, 그 피해는 원전에 비해 약하다고 볼 수 없습니다.

올 6월 우크라이나 카호우카댐이 폭발했을 때 발생한 어마어마한 인명·재산·환경 피해를 떠올린다면 이 주장이 충분한 설득력 있다는 것을 어렵지 않게 알 수 있죠. 물론 안전성과 안심은 다릅니다. 안전성은 과학적 근거를 바탕으로 하는 반면, 안심은 정서와 감정에 기반하죠. 원전의 시작점에 원자폭탄이 있었고 1986년 체르노빌 원전사고, 2011년 후쿠시마 원전사고의 인상이 워낙 강렬해 국민들이 안심하지 못하는 점은 이해합니다. 하지만 탄소중립과 에너지 안보를 모두 달성해야 하는 이 시점에서 더욱 중요한 것은 전 세계적으로 원전의 안전성이 충분히 입증됐으며, 이 두 가지 문제를 해결하는 데 원전이 큰 역할을 할 수 있다는 사실입니다.

Q.

그렇다면 우리나라 원전의 안전성은 어떤가요?

세계 최고 수준이라고 확실하게 말씀드릴 수 있습니다. 일반 국민은 잘 모르지만, 체르노빌과 후쿠시마 원전사고 이전에 큰 사고가 한 건 더 있었습니다. 원자로 냉각장치 파열로 핵연료가 녹아내린 1979년 미국 스리마일섬 원전사고인데요. 다만 이때는 격납 건물이 튼튼하게 지은 가압경수로형원자로라 방사선이 외부로 노출되지 않았습니다. 반면 체르노빌은 러시아 특유의 원전 설계, 후쿠시마 원전은 비등형경수로로 지었으며, 공교롭게도 두 사고 모두 상당한 외부 피해가 발생했죠. 다행인 점은, 우리나라가 1972년 원전을 도입할 때 가압경수로를 표준으로 채택했다는 것입니다. 이에 따라 중수로형인 월성원자력발전소를 제외한 우리나라의 모든 원전은 가압경수로형으로 지었죠. 앞선 세 건의 원전사고 발생은 유감스럽지만, 거꾸로 이를 통해 우리나라 원전의 안전성이 입증된 것입니다.

Q.

방사성폐기물의 처리와 처분도 주요 이슈인데, 이 문제는 어떻게 해결해야 할까요?

핀란드·프랑스·스웨덴 등 선진국은 지하 깊은 곳에 방사성폐기물 처리장(이하 방폐장)을 만들고 있습니다. 수십만 년간 움직이지

않고 물도 스며들지 않는 지하 500m 아래 점토층에 대규모 갱도를 만든 후 방사성폐기물을 구리·콘크리트 등으로 만든 단단한 용기에 담아 영구 저장하는 방식이죠. 방사성폐기물을 지상과 완전히 분리·격리한다는 점에서 효과적인 방법입니다. 우리나라도 하루빨리 이러한 방폐장을 건설해야 합니다. 원전 내 임시 저장소에 보관하는 것보다 훨씬 안전하고, 만에 하나 방폐장에 지하수가 스며들어 수천 년 후 방사성폐기물이 점토층으로 노출된다 해도 그 영향이 자연방사선 이하로 떨어질 테니까요. 눈앞으로 다가온 기후 위기에 효과적으로 대응하기 위해서는 과학적으로 안전성이 입증된 원전을 활용해야 하고, 그러려면 당연히 방폐장을 건설해야 합니다. 방폐장 건설에 반대하는 분들은 기후 위기라는 당장의 위험 대신 수천 년 혹은 수만 년 이후에 벌어질 수도 있는, 그마저 방폐장에 이상이 없다면 아무 문제도 일어나지 않을 것들을 걱정하는 셈이죠. 게다가 과학은 지속적으로 발전할 것이기에 그나마 일어날 수 있는 문제도 미래에는 충분히 막을 수 있을 것입니다. 기후 위기에 대응하는 것과 수천 년, 수만 년 이후에 발생할지 모를 방폐장 문제에 대응하는 것, 과연 무엇이 더 중요할까요?

Q.

우리나라 원전의 기술 수준과 경쟁력이 궁금합니다.

이 역시 안전성과 함께 세계 최고 수준이라고 자부합니다. 현재 운영 중인 3세대 원전은 안전성과 경제성 측면에서 미국·프랑스 등 원전 강국을 넘어설 정도로 톱클래스입니다. 최근 원자력산업 트렌드의 선두에 있는 소형모듈원전^{Small Modular Reactor, SMR} 개발 및 상용화도 충분히 선진국을 따라잡을 수 있는 수준이며, 2028년 인허가 완료를 목표로 개발에 매진하고 있습니다. 다만 안전성과 발전효율이 뛰어난 4세대 원전 개발 수준은 미국과 어느 정도 격차가 있는데요. 한국원자력연구원을 중심으로 활발하게 연구가 이뤄지고 있는 만큼 이 또한 어느 순간 최고 수준에 다다를 것으로 전망합니다.



“원전은 앞으로 다가올 우주 시대의 핵심 에너지원이 될 것입니다. 재생에너지를 이용할 수 없는 우주에서는 원전 외에는 대안이 없으니까요.”

Q.

앞으로 우리나라 원전은 어떤 방향성을 가지고 나아가야 할까요?

원전은 현실을 고려할 때 탄소중립 실현을 위해 반드시 필요한 에너지이며, 과학적으로 충분히 안전성이 입증된 전력원입니다. 그렇기에 꾸준히 기술개발에 투자해야 하며, 업계 종사자들은 국민

이 안심할 수 있도록 안전성 유지 및 향상에 노력을 기울여야 합니다. 탄소중립에서 한 발 더 나아가, 원전은 앞으로 다가올 우주 시대의 핵심 에너지원이 될 것입니다. 재생에너지를 이용할 수 없는 우주에서는 원전 외에는 대안이 없으니까요. 국민들도 이런 점을 생각해 무조건 불안한 시선으로 원전을 바라보지 않으면 좋겠습니다. 믿어주신 만큼 저를 포함한 원자력업계도 안전성과 효율성을 더욱 확보할 수 있도록 최선을 다하겠습니다.

미래형 원자력발전소 소형모듈원전^{SMR}

재앙적인 기후변화를 방지하고 에너지 안보 확보를 위해서 ‘초저탄소’ 에너지원인 원자력발전 확대가 주요국에서 추진되고 있다. 특히 미래형 원자력발전소 형태의 소형모듈원전^{SMR}이 그 중심에 있다.

SMR은 ‘Small Modular Reactor’의 약자로, 일반적으로 전기 출력 300MWe 이하이고 소위 ‘피동 안전성’을 가진 원자로를 의미한다. 국제원자력기구^{IAEA}에 따르면 70여 종에 이르는 다양한 형태로 SMR이 2030년대 상용화를 목표로 주요국에서 경쟁적으로 개발되고 있다.

피동 안전성을 목표로 하는 경제성 높은 원자로

2011년 일본 후쿠시마 원전 중대 사고 이후 본격 개발되는 SMR의 가장 큰 특징은 지진 등으로 외부 전원이 상실된 최악의 조건에서도 중력 및 자연대류와 같은 100% 믿을 수 있는 피동적 방식만으로 원자로의 안전성을 확보하는 ‘피동 안전성’을 목표로 한다는 점이다. 피동 안전성을 확보하기 위해서 SMR의 전기 출력은 흔히 300MWe 이하라고 하지만 이는 정확하지 않다. 사용되는 원자로 방식에 따라서 400MWe 출력에서도 피동 안전성이 확보될 수 있기 때문이다. SMR에서 중대 사고가 발생할 확률은 수천만 년에서 1억 년에 한 번으로 ‘기우’에 가까울 정도로 극히 낮다. 참고로, 지구와 소행성의 충돌로 인류가 멸망할 확률은 약 2000만 년에 한 번 정도다. SMR의 두 번째 주요 특징은 레고 블록과 같은 모듈형 설계 및 제작을 통해 경제성 향상을 추구하는 것이다.

전 세계 탄소중립을 달성하기 위해서는 수많은 화력발전소가 재생 에너지 및 원자력 같은 초저탄소 에너지원으로 대체되어야 한다. SMR은 부하추종운전을 효과적으로 수행해 간헐적인 재생에너지

소형모듈원전^{SMR}이란?

‘Small Modular Reactor’의 약자로, 일반적으로 전기 출력 300MWe 이하이고 소위 ‘피동 안전성’을 가진 원자로.

SMR 시장 규모

약 **350**조 원
(2050년 예상)



미국 뉴스케일 파워의 SMR 플랜트 조감도

와 상보적으로 활용될 수 있는 장점도 있다. 많은 나라가 추구하는 ‘2050 탄소중립’을 위해 많은 수의 SMR이 다양한 방식으로 활용될 것으로 예상된다. 관련 연구에 따르면 2050년까지 SMR 시장은 약 350조 원 규모로 성장할 것으로 예상된다. 또 비전력 분야 탄소중립을 위해서 SMR을 이용한 산업 분야 공정열 및 수소 생산 또한 효과적인 응용 분야다. 그뿐 아니라 대형 상선의 온실가스배출을 억제하기 위한 선박 추진용 SMR 활용 또한 연구되고 있다. 충분한 피동 안전성이 확보될 경우 SMR은 대도시와 같은 수요처 인근에 건설될 수 있어 경쟁력이 크게 제고될 것이다.

국내 기술 현황:

4세대 원자로 SMR 2030년 중반부터 상용화 예상

현재 개발되는 SMR의 약 절반은 물을 냉각재로 사용하는 경수형이고, 나머지는 소위 제4세대 선진 원자로 개념에 기초하고 있다. 경수로 기반 SMR은 약 10년 이내로 상용화가 기대되며, 4세대 원자로 SMR은 2030년대 중반부터 본격적인 상용화가 예상된다. 기존 가압경수로^{PWR} 기반 SMR의 경우 증기발생기를 포함한 주요 구성 요소를 하나의 용기에 통합해 피동 안전성을 극대화한 소위 통합형 SMR이 대표적 형태다. 통합형 SMR의 경우 용기 크기 제한으로 인해 원자로 출력이 많이 제한되는데, 이 때문에 증기발생기와 원자로를 통합하지 않고 분리해 매우 가깝게 배치하는 ‘블록형’ 가압경수로 SMR도 개발되고 있다. 한편 비등수로^{BWR} 기반의 경우 기본적으로 대형로에서 출력을 낮추고 안전성을 개선한 SMR 개념을 추구한다.



UK-SMR



NuWard



ACP100



i-SMR



NuScale

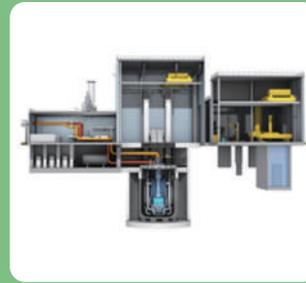


BWRX-300

주요국의 SMR 개발 현황

아래 표에서 보듯이 수냉식 SMR 대부분은 가압경수로형이고, 비등수로형은 BWRX가 유일하다. 사실 한국은 통합형 SMR인 SMART를 개발해 2012년 세계 최초로 표준설계 인허가를 완성한 바 있는데, 최근 안전성과 경제성이 대폭 향상된 i-SMR 개발을 추진하고 있다. 미국 뉴스케일 파워^{NuScale Power}는 자연순환에 기초한 VOYGR이라는 혁신적 SMR을 개발하면서 SMR 기술혁신을 견인하고 있는데, 최대 12개 모듈을 하나의 수조에 설치해 운전하는 개념이다. 영국과 프랑스의 경우 출력 극대화를 통한 경제성 제고를 위해 블록형 SMR을 추구하고 있다. 미국 GE-히타치^{GE-Hitachi} 또한 기존 대형로 ESBWR의 출력을 300MWe로 낮추고 피동 안전성을 보강해 경제성을 극대화하는 전략을 취한다. 중국은 한국의 SMART와 유사한 ACP100을 건설 중인데, 조만간 완성될 것으로 보인다. 러시아는 기존 선박 추진용 블록형 KLT-40 시스템을 개량해 부유식 SMR 시스템을 이미 완성해 사용하고 있다. 한편 최근 미국 웨스팅하우스^{Westinghouse} 또한 출력 300MWe급 AP300이라는 SMR 개발을 발표했다.

제4세대 원자로에 기반한 SMR은 소동냉각고속로^{SFR}, 납냉각고속로^{LFR}, 용융염원자로^{MSR}, 고온가스로^{HTGR} 네 종류와 MSR·HTGR 개념을 혼합한 용융염냉각고온로^{FHR}로 구분할 수 있다. 이 중 SFR과 LFR은



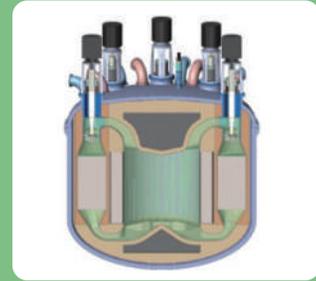
Natrium



IMSR



KP-FHR



TerraPower MSR



BREST-300



HTR-PM

대표적 물냉각 SMR 개발 현황

| 개념 | PWR | PWR | PWR | PWR | PWR | PWR | BWR |
|---------|----------|--------|---------|--------|----------|------------|----------|
| SMR | SMART | UK-SMR | NuWard | ACP100 | VOYGR | i-SMR | BWRX |
| 출력(MWe) | 110 | 470 | 300~400 | 125 | 50 | 160~170 | 300 |
| 개발자 | 한국원자력연구원 | 롤스로이스사 | EDF | CNNC | 뉴스케일 파워 | 한국수력원자력(주) | GE-히타치 |
| 국가 | 한국 | 영국 | 프랑스 | 중국 | 미국 | 한국 | 미국·일본 |
| 설계수명(년) | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 비고 | 인허가 획득 | 개념설계 | 개념설계 | 건설 중 | 설계 인증 획득 | 개념설계 | 인허가 심사 중 |

고속중성자를 이용하는 소위 고속로 개념이고, HTGR은 흑연을 감속재로 사용하는 열중성자로서, MSR의 경우 두 원자로 형식이 모두 개발되고 있다. HTGR을 제외한 4세대 원자로는 고속로의 고유한 장점으로 인해 사용 후 연료를 최소화하면서 지속 가능한 원자력 시스템을 구현하기 위해 개발 중이며, HTGR은 고온의 열을 활용

4세대 원자로 기반 SMR 개발 예

| 개념 | SFR | LFR | MSR | MSR | FHR | HTGR |
|---------|---------|---------|------|------------|---------|--------|
| SMR | Natrium | BREST | MCRE | IMSR | KP-FHR | HTR-PM |
| 출력(Mwe) | 345~550 | 300 | 실험로 | 185~192 | 140 | 105 |
| 개발자 | 테라파워 | 아툼에네고프롬 | 테라파워 | 테레스트리얼 에너지 | 카이로스 파워 | CNNC |
| 국가 | 미국 | 러시아 | 미국 | 캐나다 | 미국 | 중국 |
| 설계수명(년) | 60 | 60 | -- | 60 | 60 | 60 |
| 비고 | 개념설계 | 건설 중 | 개념설계 | 개념설계 | 개념설계 | 운전 중 |

한 공정열 및 수소 생산 등 고유한 응용을 위해서도 개발되고 있다. 위 표는 선진 4세대 원자로 기반 SMR의 몇 가지 예를 보여준다.

한편 액체연료를 사용하는 MSR은 재료 부식 등 현안에도 불구하고 안전성과 경제성 관점에서 큰 장점이 있는 것으로 평가되며, 빌게이츠 전 마이크로소프트 회장이 설립한 테라파워^{TerraPower}를 포함해 20개 이상 벤처기업이 관련 연구개발을 경쟁적으로 하고 있다. 그 예로 덴마크 시보그^{Seaborg}는 한국의 삼성중공업(주)과 협력해 CMSR이라는 SMR을 한국에서 완성해 수출하는 전략을 추진하고 있다. 현대적인 SMR 설계에서 관찰되는 공통 사항 중 하나는 거대한 격납 건물을 배제하면서도 안전성을 확보하는 혁신을 추구한다는 점이다. SMR은 일반적으로 지하에 배치하는데, 이를 통해 격납 건물 없이도 비행기 충돌 시 원자로를 안전하게 보호할 수 있으며, 지진에 따른 피해 또한 크게 줄일 수 있다.

주요 현안과 도전

대형 원전에서와 같은 ‘규모의 경제’를 취할 수 없는 SMR의 경우 경제성을 개선하기 위해 아래 그림과 같이 다양한 방안을 고려하고 있다. 먼저 표준화, 단순화, 모듈화된 다수의 SMR 모듈을 공장에서 제작해 소위 ‘다수 경제’ 효과를 통해 제조 단가를 크게 낮출 수 있다. 또한 모듈설계 및 모듈 건설 기법으로 빠른 건설이 가능해 건설 단가를 더욱 저감할 수 있다. 대형 상용로 건설 공기는 최소 5년 정도인데 비해 SMR 건설 공기는 2~3년이 목표다. 또 낮은 출력으로 인해 초기 투자비가 적고 짧은 건설 공기로 이익 회수가 빨라 자본 위험도가 크게 낮아질 수 있다. 특히 단일 부지에 복수 모듈을 설치해 중형로와 대형로에 해당하는 출력을 달성할 수 있어 경제성이 크게 향상될 것으로 평가된다. SMR의 큰 장점 중 하나는 대형에 비해 훨씬 유연한 운전이 가능해 간헐적 재생에너지와 상호보완적으로 활용, 가치를 제고할 수 있다. 요구되는 충분한 피동 안전성을 확보할 수만 있다면 단일 SMR 모듈의 출력은 클수록 경제성 향상에 도움이 된다. 또 자원에 가까운 SMR 운전 자동화를 통해 안전성 및 경제성 또한 제고 가능하다. 최근 SMR의 경제성에 대해 미국에서 연구한 바에 따르면, 복수 모듈을 사용해 총출력이 기존 대형과 유사한 경우 SMR 시스템의 경제성은 대형 상용로와 유사하거나 더 낮아질 수 있다고 한다.



미국 뉴스케일 파워의 소형모듈원전 건물 내부 모습

모든 SMR 설계의 공통적 표준 피동 안전성 확보 필요

SMR을 효과적으로 개발하고 활용하기 위해선 기존 규제의 변화가 반드시 필요하다. 예를 들어, 단일 부지에 복수 SMR 모듈 설치의 필수적이고, 가능하면 단일 제어실에서 운전될 수 있어야 하는데 한국을 비롯한 주요국에서 이러한 설계는 기존 규제 관점에서 도전적인 변화다. 위에서 기술한 바와 같이 SMR을 대규모로 활용하기 위해서는 피동 안전성이 충분히 확보되어야 하는데, 개발되고 있는 다양한 SMR의 피동 안전성 수준은 제각각이다. 특히 일부 SMR 설계의 경우 경제성을 높이기 위해 원자로 출력력을 극대화하는 설계를 추구하고 있다. 따라서 탄소중립 시대를 맞아 원자력을 안전하고 효율적으로 활용하기 위해서는 모든 SMR 설계가 공통의 표준적인 피동 안전성을 확보할 필요가 있다. 세계 각국에서 SMR이 많이 활용되기 위해서는 핵확산 저항성 및 핵안보가 모든 SMR 설계에서 필수적으로 고려해야 하는 새로운 설계 요건이 되어야 한다. 한편 4세대 원자로 기반의 SMR을 상용화하려면 우라늄 농축도가 10~20%로 증가된 소위 고품질저농축우라늄^{HALEU}이 필요한데 러시아·우크라이나전쟁으로 HALEU 공급이 극히 어려운 상황이다. 4세대 선진 원자로 개발 및 운영을 위해서는 안정적인 글로벌 HALEU 공급망이 매우 중요하다.

국내 SMR 성공적 개발을 위한 제언

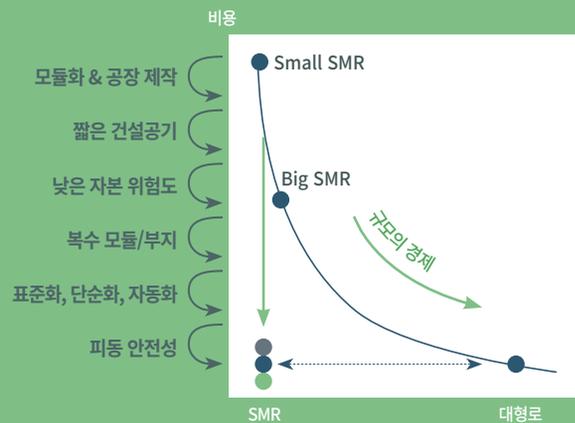
한국수력원자력(주)은 혁신적인 i-SMR 연구개발을 2028년 인허가 획득을 목표로 한국원자력연구원 등과 공동으로 추진하고 있다. 한편 국내 다수 대기업도 해외의 다양한 SMR 개발사와 전략적 협력에 적극 참여하고 있다. 성공적인 국내 SMR 연구개발을 위해 몇 가지 제언을 하고자 한다.

먼저, 앞에서 기술한 바와 같이 혁신적 i-SMR 설계 적기 완성을 위해서는 기존 규제 방식을 수정할 필요가 있다. 특히 4세대 원자로 기반의 SMR을 개발하기 위해서는 규제 체계 현대화가 요구된다. 또 지속 가능한 원자력 개발 및 이용을 위해 4세대 원자로에 기초한 SMR은 필수이며, 혁신적 SMR 개발을 위해서는 정부의 일관된 정책 및 지원이 매우 중요하다. 개발된 SMR이 해외시장에 진출하려면 반드시 국내에서 실증되어야 한다. 그리고 SMR 경쟁력을 극대화하기 위해 필요에 따라 모듈 수를 달리해 소형, 중형, 대형으로 나눠 사용할 수 있도록 설계하는 것도 중요하다.

SMR의 주요 장점

- 1 부하추종운전을 효과적으로 수행할 수 있어 간헐적인 재생에너지와 상호보완적으로 활용 가능.
- 2 복수 모듈을 사용해 총출력이 기존 대형과 유사한 경우 SMR 시스템의 경제성은 대형 상용로와 유사하거나 더 낮아질 수 있음.

SMR 경제성 향상 방안



김용희 한국과학기술원^{KAIST} 원자력및양자공학과 교수
미국 국립알곤연구소 방문연구원, 한국원자력연구원 책임연구원, 원자력안전전문위원회 전문위원 등을 지냈으며, 현재 카이스트 자율운전소형모듈형원자로 연구센터장을 맡고 있다.

데이터 기반의 기획·평가



한국산업기술평가관리원의 Never Ending R&D story

미래 기술혁신의 길은 계속됩니다

잘 만든 기술은
세상의 모든 것을 이롭게 합니다
더 많은 산업 기술의 꿈을
이룰 수 있도록
아낌없는 지원과 협력으로
힘을 보태고 있는 KEIT,
가능성에 끊임없이 도전하며
혁신기술의 길을 만들어가겠습니다

R&D 혁신 생태계 강화



주력산업의 기술고도화 촉진



첨단산업 성장기반 기술 확보



국내 고성능 복합 소재 개발 가능성의 문을 열다

word 조범진 photo 김기남

국제적으로 지속 가능한 산업 추구, 초연결 사회로 진입 등 환경변화에 대응하고자 글로벌 경쟁력 강화 및 미래성장동력 발굴을 위한 연구개발 지원이 활발히 이루어지고 있다. 이런 가운데 고성능 엔지니어링 플라스틱 소재 전문 기업 세양폴리머(주)가 그동안 국산화에 성공하지 못한 열방성 액정 폴리에스터 섬유의 원천 소재가 되는 LCP 수지를 순수 국내 기술로 개발·사업화하는 데 성공해 큰 화제를 불러 모았다.

| | |
|--------|---|
| 사업명 | 산업소재핵심기술개발사업(섬유의류) |
| 연구과제명 | 고강력 열방성 액정 폴리에스터 섬유 개발 |
| 제품명 | SEYANG® LCP |
| 개발 기간 | 2016년 7월~2021년 6월(60개월) |
| 정부출연금 | 65억 원 |
| 개발기관 | 세양폴리머(주)/인천광역시 남동구 남동대로49번길 64 ☎032-818-1421, www.seyangpolymer.com |
| 참여 연구진 | 이윤웅, 장선화, 이진규, 김성은, 하태영, 박수민, 곽영선, 지창훈 |

국내 최초 LCP 수지 중합 기술개발 및 상업화 성공

글로벌산업이 고도화됨에 따라 고분자 소재에 고기능을 요구하는 분야가 점점 증가하고 있다. 특히 자동차, 전기·전자 부품의 소형화 및 박막화, 경량화 및 고성능화 추세에 따라 내열성, 내화학성, 고강도 및 환경친화적 특성을 갖는 첨단소재 개발이 진행되고 있다. 전기자동차, 초고속 통신 및 항공·우주산업 등 앞으로 다가올 미래 산업용 소재로서 고분자의 용도가 다양해지고 가치사슬 전 산업 분야로 확대될 것으로 예상된다.

현재 복합 소재의 국내 기술 수준은 기반 기술, 핵심 소재 제조 기술 및 응용 기술 측면에서 비교적 높은 수준을 유지하고 있으나 미래의 고부가가치 산업 분야로의 소재 기술 개발과 관련해서는 원천 기술 확보의 필요성이 절실히 요구된다. 이런 상황에서 세양폴리머가 이번에 국내 최초이자 유일한 액정 폴리에스터 LCP 수지 및 이를 이용한 복합 소재를 개발·상업화에 성공한 것은 우리나라 소재 산업의 미래 가능성을 한층 높이는 계기가 될 것으로 기대된다.

이와 관련해 이윤웅 전무는 “세양폴리머 임직원들은 지난 30여 년간 우리나라 엔지니어링 플라스틱 산업이 발전하는 데 작지만 의미 있는 기여를 해왔다는 자부심이 있다”며 “최근에는 국내 유일의 LCP 수지 및

수지(레진 resin)

유기화합물과 그 유도체로 이루어진 비결정성 고체 또는 반고체. 천연수지와 합성수지(플라스틱)로 나뉘며, 후자는 다시 석유정제 시 생성되는 것과 순수한 단량체를 중합해 생성되는 것으로 구분한다.

HOW-TO LCP 수지는 국내에서 개발 경험이 없었기에 분자설계부터 양산까지 모든 공정 기술을 독자적으로 개발해야 하는 어려움이 있었다. 그러나 당사 연구원들이 밤낮없이 문제점을 찾고, 국내의 기업에서 테스트조차 외면당하는 상황에서도 끈질기게 개발된 소재의 장점을 소개하는 등 노력을 기울인 결과 독자 기술개발 및 상업화에 성공할 수 있었다.

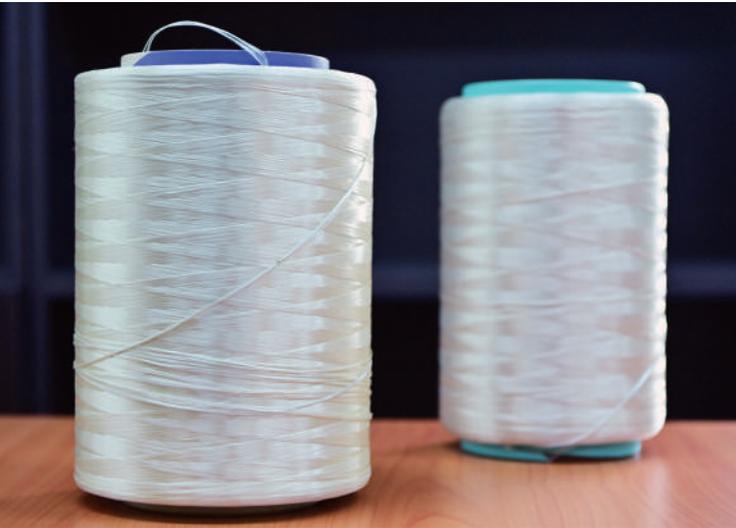


고강력 열방성
액정 폴리에스터
섬유 개발

산업혁신기술상 사업화기술 부문
세양폴리머(주)
윤성업 대표이사



www.seyangpolymer.com



LCP 섬유



착색 및 도금이 가능한 LCP 소재

제품 제조 기술을 자체적으로 확보했을 뿐 아니라 전량 수입에 의존하던 소재를 국산화함으로써 국가 산업 발전의 작은 축이 되고 있다고 생각하며, 앞으로도 끊임없는 기술개발을 통해 기여하고자 한다”고 말했다.

중합·용융방사·열처리 기술 확보, 기술 독립 실현

슈퍼섬유는 일반 섬유보다 강도가 월등히 높고 고열에 견딜 수 있는 내열·난연성이 우수한 고성능 섬유 소재로, 자동차와 항공·우주, 안전·보호, 해양수산 및 스포츠 산업 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 그러나 현재 슈퍼섬유로 가장 널리 사용되는 아라미드 계열 및 탄소섬유는 국산화에 성공한 반면, LCP 섬유는 원천 소재가 되는 LCP 수지부터 공급받지 못해 섬유화 기술개발은 시도조차 못 했으며, LCP 섬유는 전량 수입에 의존하는 실정이었다.

이런 가운데 세양폴리머가 개발한 LCP 수지는 기존 상업화된 LCP 수지가 고가의 모노머를 30% 이상 사용함에 따라 발생하는 낮은 가격 경쟁력과 다양한 산업용 섬유로 적용하는 것에 따른 어려움을 해결하는데 성공했다.

세양폴리머가 개발에 성공한 LCP 수지는 신규 모노머들을 다양하게 조합한 분자구조를 설계하고 중합 공정의 여러 변수를 최적화하는 많은 실험을 통해 축중합반응 속도를 조절함으로써 분자량 분포가 좁고 균일해 용융방사가 가능하다. 또한 기존의 상업화된 수지보다 30% 이상 가격 경쟁력을 갖출 뿐 아니라 강도 및 탄성률도 높아 다양한 산업 분야 소재로 적용할 수 있는 가능성을 확인했다.

고성능 복합 소재 개발 글로벌 전문기업 목표

한편, 세양폴리머는 이번 기술개발을 통해 용융방사 기술 외에도 열처리 기술, LCP 섬유를 사용한 산업용 벨트 및 해양수산용 로프를 제조하는 기술까지 국내 최초로 확보함으로써 섬유뿐 아니라 전기·전자 부품, 자동차 전장 부품, 반도체 공정용 소재 및 모바일폰 소재까지 응용 분야를 넓히고 있어 사업 현황이나 전



망이 매우 밝다. 장선화 이사는 “개발한 자동차 부품용 소재 3종은 부품제조사인 K사와 완성차 업체인 H사에 공급 중이며, 전기자동차 시장 확대 정책에 따라 개발한 소재의 적용은 지속적 증가가 예상된다. 이와 함께 모바일폰의 카메라 모듈용 소재를 개발해 고화소용으로 S전자 스마트폰에 독점 적용되고 있으며, 이를 계기로 복합 소재 시장의 국산화·세계화를 추진하고 있다”며 “신규 개발 소재는 2018년부터 국내외 시장에서 품질을 승인받아 2019년부터 매년 50% 이상 매출이 신장되고 있다”고 말했다.

세양폴리머가 신규 개발한 복합 소재는 국내 글로벌 전기전자 기업과 협력해 미래 시장을 선점하는 데 기여하고 있으며, 이는 세양폴리머가 목표하는 글로벌 소재 기업에 성큼 다가서는 원동력이 되고 있다. 이들은 앞으로 끊임없는 연구개발을 통해 새로운 통신 시장을 창출하기 위한 소재 개발에 적극 나서 향후 6G 고속통신 시대 글로벌 기술 경쟁력 및 핵심 소재 수급 국산화와 안정화를 확보하는 데 최선의 노력을 다하겠다고 포부를 밝혔다.



세양폴리머(주)

1985년 세계 최대 화학 회사인 듀폰과 기술지원 및 공급계약 체결을 통해 엔지니어링 플라스틱·패키징 플라스틱 분야 기반을 확보했고, 1997년 인천 남동에 컴파운딩 공장 준공과 이듬해 기업 부설 연구소를 설립했다. 2001년에는 세양폴리머의 독자 기술이 집약된 고성능 엔지니어링 플라스틱 브랜드 사이트론^{Sytron}을 선보였으며, 이후 다양한 제품을 독자적으로 개발·공급하고 있다. 특히 2016년부터 2018년까지 LCP 수지 공장 준공 및 안정화를 통해 국내에서 유일하게 LCP 수지 상업화에 성공했으며, LCP 수지를 사용한 고성능 제품을 개발해 글로벌 기업에 공급함으로써 명실상부 국내 최고 고성능 엔지니어링 플라스틱 소재 전문 기업으로 거듭나고 있다.

고안전성과 고에너지밀도를 동시에 미래 e모빌리티 분야의 차세대 배터리를 위한 기술

e모빌리티 시장이 확대되면서 에너지밀도가 높고 폭발, 발화와 같은 사고로부터 안전한 배터리의 필요성이 커지고 있다. 한국전자통신연구원은 얇고 유연한 전고체전지용 고체전해질 막 개발을 통해 안전성과 에너지밀도가 높은 산업 응용 분야에 사용 가능한 배터리 제조에 힘을 보태고 있다.

| | |
|--|---|
| 프로젝트명 이온전도도 1mS/cm 이상, 두께 30μm 이하의 고체전해질 막 제조 기술 | 참여 연구진 한국전자통신연구원, 대구경북과학기술원, 한양대학교 에리카, (주)민테크 테이팩스, (주), LG에너지솔루션 연구진 포함 45명 |
| 연구개발 기관 · 주관 기관: 한국전자통신연구원 ^{ETRI} · 참여 기관: 대구경북과학기술원 ^{DGIST} , 한양대학교 에리카, (주)민테크, 테이팩스(주), LG에너지솔루션 · 주요 기업: LG에너지솔루션 | 연구 기간 · 1단계(3년): 2020년 6월 1일~ 2022년 12월 31일(31개월) · 2단계(2년): 2023년 1월 1일~2024년 12월 31일(24개월) |

태생부터 안전하지 못한 배터리를 위한 해결책

리튬이온배터리^{Lithium-ion Battery, LIB}는 가연성의 액체전해질을 셀 내에 과량 주액해 제조하는 LIB의 근본적 한계 때문에 안전에 취약하다. 셀 제조업계는 태생적인 안전성의 한계를 극복하기 위해 지금까지 피나는 노력을 기울여와 셀 내 전해액 첨가제나 세라믹 코팅 분리막 등을 적용해 전압 및 열안전성을 높이는가 하면, 배터리 팩 구성 시 열관리를 위해 BMS 포함 다양한 냉각시스템을 장착했다. 그럼에도 불구하고 전기자동차의 발화 및 폭발 사고가 끊이지 않고 있다. 셀 안전성을 극단적으로 강화할 수 있는 근본적 해결책이 필요한 이유다. 기존 LIB에서 가연성의 액체전해질을 사용할 수밖에 없

었던 이유는 전해액 내 전하이동체로 사용하는 리튬을 이온 상태로 유지할 수 있는 유일한 용매들이 가연성을 띠기 때문이다. 이에 액체전해질 내에서 유기용매와 같은 역할을 할 수 있는 세라믹 또는 고분자 형태의 고체로 전환하는 기술적 시도가 본격적으로 진행되기 시작했다.

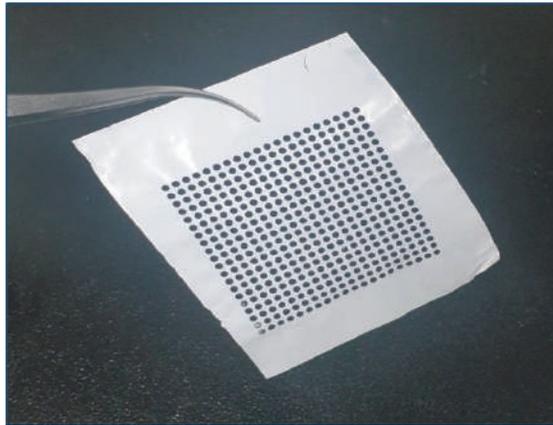
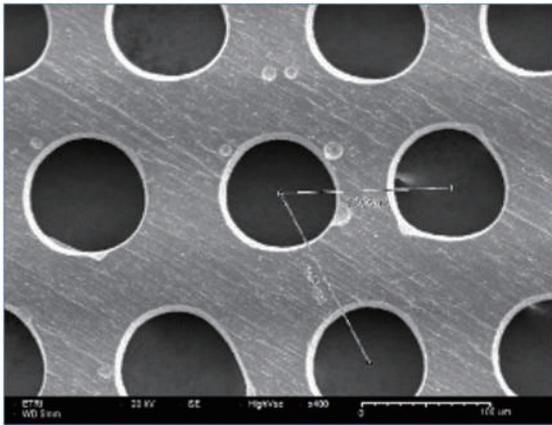
얇고 유연하다

2010년 이후 LIB의 대안으로 전고체전지^{all-solid-state battery}를 본격적으로 연구하기 시작했다. 초창기 전고체전지 개발은 고체전해질 소재에 집중되었다. 이에 산화물^{oxide}계, 나시콘^{NASICON}계, 황화물^{sulfide}



계, 고분자^{polymer}계, 유무기 하이브리드^{hybrid}계 등 다양한 고체 전해질 소재가 개발되었다. 이후 개발된 고체 전해질 소재들은 셀 적용성 검증을 위해 펠릿^{pellet}이나 시트^{sheet} 또는 필름 형태로 제조되기 시작했다. 이 중 펠릿은 세라믹 입자에 압력을 가해 알약^{tablet}처럼 뭉쳐놓은 형태이기 때문에 두께가 매우 두껍고 딱딱하다. 이를 극복하기 위해 고분자 결합제를 소량 넣어 비교적 얇은 필름이나 시트 형태로 제조를 시도했다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 기존 LIB의 분리막에 비해 여전히 시트나 필름의 두께가 두껍고 유연

성도 떨어진다. 고체 전해질의 두께가 두꺼워지면 셀 제조 시 내부 저항이 커서 과전압이 걸리게 되고 성능이 제대로 구현되기 어렵다. 또 중대형 셀로 크게 제조하기 위해서는 대면적화가 용이해야 하는데, 기존 시트나 필름 기술로는 이러한 성능을 구현하기에 한계가 있었다. 이에 본 연구 그룹에서는 분리막에 근접한 박막의 유연한 고체 전해질 막^{membrane}을 개발하고 있다. 이때 두께를 얇게 만들면서도 적층^{stacking} 및 권취^{winding}가 가능해 기존 LIB 제조공정과 호환 가능한 기술을 제시하고자 한다.



지지체 상에 규칙적으로 형성된 다양한 크기의 다공 구조

이온 이동경로 최소화한 다공 구조

본 기술의 핵심은 전고체전지용 고체 전해질 막을 개발하는 것이다. 이를 위해 규칙적인 다공 구조를 형성한 박막의 프레임용 지지체로 적용했다. 기존 연구들 중에도 다공성 프레임 구조를 적용한 접근 방법은 있었지만 대부분 부직포와 같은 불규칙한 다공 구조를 적용한 형태다. 이번 프로젝트에서 중요하게 생각한 것은 이온이 이동하는 경로를 최소화할 수 있는 다공 구조 설계였다. 다공 구조가 불규칙하면 고체 전해질을 양면에 코팅할 경우 기공 내 고체 전해질이 균일하게 채워지지 않는 문제가 발생할 거라고 생각했기 때문이다. 또 막 내 불규칙한 고체 전해질의 분포는 결국 리튬이온이 이동할 때 이동경로가 길고, 복잡하고, 구불구불하게^{tortuous} 만들게 되어 이온 이동에 따른 저항이 많이 걸리는 문제점이 있다.

위 그림에서 제시한 바와 같이, 규칙적으로 천공된 구멍을 제외한 나머지 지지체 부분으로 기계적 강도를 강하게 유지할 수 있기 때문에 두께는 분리막 수준으로 얇게 만들 수 있다. 이후 습식 코팅 공정을 통해 고체 전해질을 다공성 프레임 양면과 기공 사이에 채워지게 제조해 이온이 이동할 수 있는 최단 거리를 확보하도록

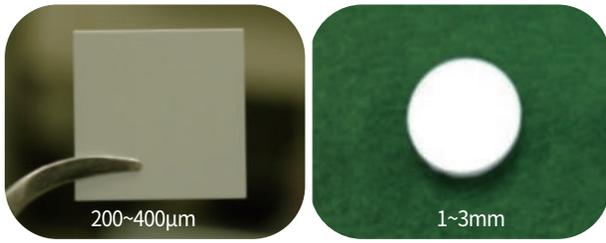
설계를 진행했다.

이번 프로젝트는 현재 총사업 기간 중 1단계를 종료했다. 기술적 성과로는 두께 45 μ m 및 상온 이온전도도 0.24mS/cm급 황화물 고체 전해질 막을 개발했고, 이를 모노셀^{mono cell}에 적용해 셀의 정상적 구동을 확인했다. 정량적 실적으로는 국내 출원 4건 및 등록 1건, 해외 출원 2건 중 1건은 5개국(한국, 미국, 유럽, 중국, 일본) PCT를 출원했다. 이는 본 연구개발에 참여하고 있는 ETRI, DGIST, 한양대 에리카 그리고 LG에너지솔루션이 공동으로 거둔 성과다

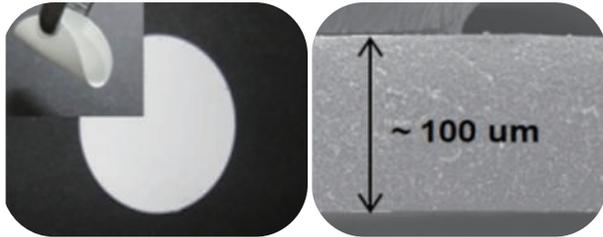
제품 활용 분야

- 고안전성 및 고에너지밀도를 동시에 지녀야 하는 미래 e모빌리티 분야(전기자동차, 전기트럭, 도심 항공교통, 전기배, 전기비행기 등)
- 인체 밀착 및 삽입형 디바이스 분야
- 에너지 저장 장치^{ESS}
- 극저온·극고온 환경에서 사용하는 모든 산업 응용 분야

Thick & Hard Brittle

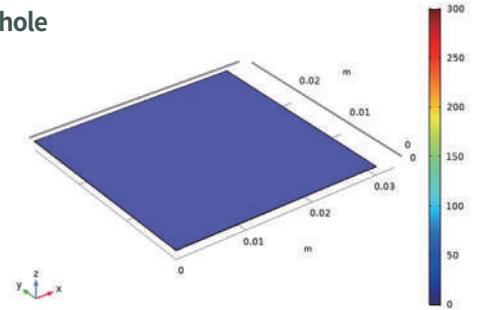


Thin & Flexible

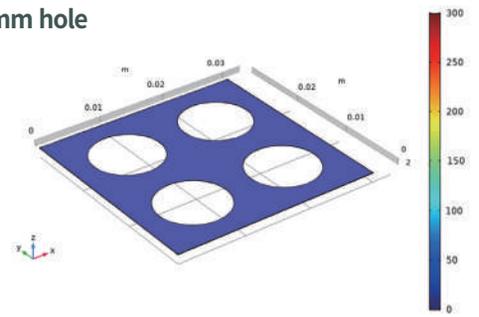


고체전해질의 대면적화 및 박막화로 접근방법 변화

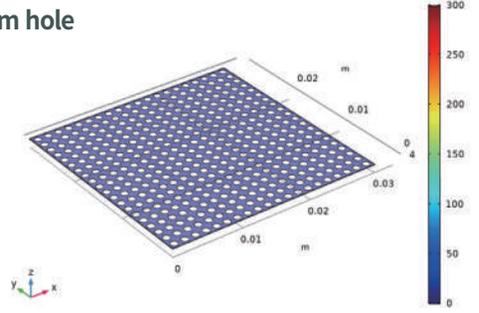
No hole



10mm hole



1mm hole



전산모사를 통한 다공 구조의 사전설계 및 기계적 강도 예측

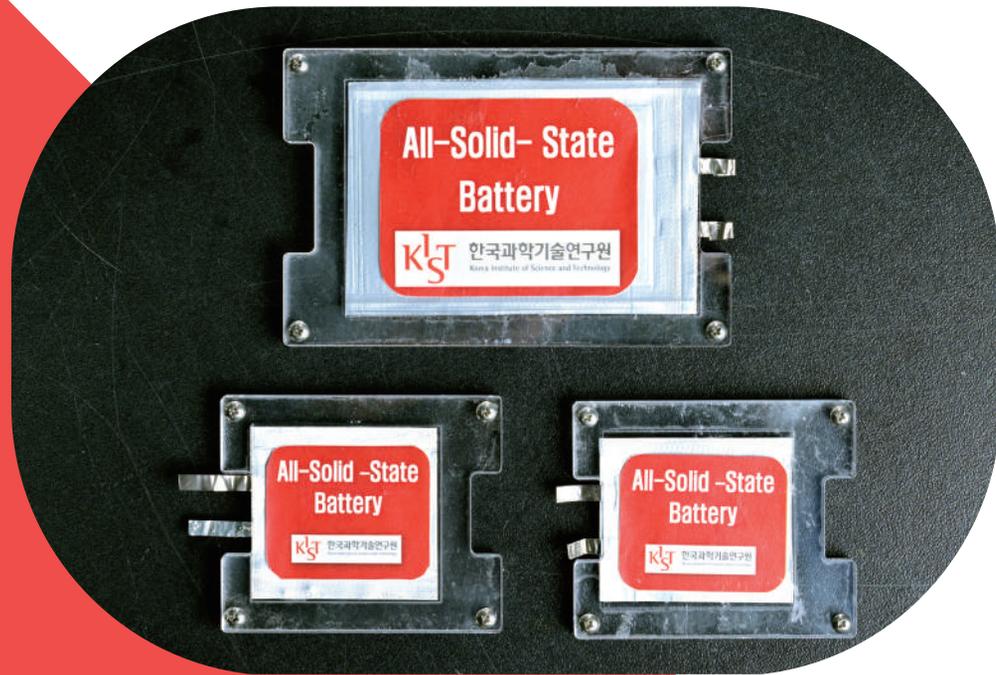
프로젝트
기술 차별성
3가지

- 1 다공성 프레임의 소재에 관계없이 지름 200µm 미만의 규칙적 기공을 대면적에 걸쳐 형성
- 2 천공된 다공성 프레임상에 고체 전해질을 얇고 균일하게 코팅하는 기술 확보
- 3 상기 과정에서 고체전해질의 코팅 및 다공성 프레임상에 부착 특성을 유지할 수 있는 다양한 표면 처리 기술 확보



한국전자통신연구원 스마트소재연구실

에너지 관련 소재를 집중적으로 연구하는 곳으로 이차전지, 태양전지, 열전 및 압전 소재, 메타 소재 등 다양한 테마를 다룬다. 그중 이차전지 인력은 전체 연구원의 50% 정도로, 대부분 차세대 이차전지용 소재·부품·셀(전지) 개발 분야 등으로 나뉘어 연구를 진행 중이다. 현재는 차세대 이차전지^{Advanced LIB + Post LIB} 분야 연구에 집중하고 있다.



15mS/cm급 고이온 전도성
황화물 기반 고체 전해질 소재
및 제조 기술 개발

word 조범진 photo 김기남

‘꿈의 배터리’ 실현으로 K-배터리 기술력 강화하다

향후 전기자동차 시장의 게임 체인저로 주목받고 있는 차세대 이차전지인 전고체전지 기술 개발에 국내외 주요 대학과 연구기관, 배터리 제조업체의 협업이 본격화되고 있다. 이런 가운데 한국과학기술연구원^{KIST} 정훈기 박사 팀이 전고체전지 상용화의 시작점이자 핵심인 전고체전지용 핵심 소재 기술 개발 성공에 한 걸음 다가서면서 2030년 세계 최초 전고체전지 상용화의 꿈이 현실로 이어지고 있다.

화재와 폭발 위험 없는 차세대 이차전지 관심 고조

이차전지는 한 번 사용하고 버리는 건전지나 수은전지 같은 일차전지와 달리, 완전 사용(방전) 후 다시 충전해 사용할 수 있는 전지를 말한다. 이차전지는 납축전지, 니켈카드뮴전지, 니켈수소전지에 이어 최근 리튬이온전지까지 개발되어 사용하고 있다. 전지에 한 번 충전할 수 있는 용량인 에너지밀도가 점차적으로 증대되면서 소형에서 중대형 전자기기까지 다양한 전자제품에 적용되고 있다. 이 가운데 리튬이온전지는 1991년 일본 소니에 의해 상용화되었지만, 현재 전 세계적으로 기술을 선도하고 있는 곳은 전자 3사로 일컫는 배터리 대표 기업을 보유한 우리나라다.

휴대폰, 전기자동차에 적용되고 있는 리튬이온전지는 높은 에너지밀도, 우수한 출력, 장기간 사용할 수 있는 수명 등 성능 면에서 과거에 개발된 이차전지에 비해 성능이 월등히 좋다. 하지만 최근 빈번히 발생하는 화재·발화 사고 등으로 인해 전기자동차, 에너지저장장치^{ESS} 같은 대형 시스템에 적용하기에는 우려되는 것이 사실이다.

이에 따라 ‘꿈의 배터리’로 불리는 미래형 차세대 이차전지로 전고체전지 개발 및 관심이 높아지고 있다. 또 드론, 비행기 등 가벼운 차세대 이차전지로 리튬황전지 같은 시스템을 개발하고 있는 KIST 정훈기 박사 팀의 전고체전지용 핵심 소재 기술 개발 행보에 세간의 관심과 이목이 집중되고 있다.

고체전해질 소재 개발, 이온전도도와 안전성 극대화



고이온전도성 황화물 기반
고체전해질 소재 분말

‘15mS/cm급 고이온 전도성 황화물 기반 고체전해질 소재 및 제조 기술 개발’ 과제는 리튬이온 전지 성능 고도화 기술 개발의 일환으로 미래형 차세대 이차전지인 전고체전지용 핵심 소재 기술을 개발하기 위해 출범했다.

전고체전지의 핵심 소재는 양극과 음극 소재 사이의 리튬이온 이동을 담당하고 있는 고체전해질 소재이며, 현재 상용화에 근접한 황화물 기반 고체전해질 소재의 성능 중 리튬이온전도 특성을 극대화하고, 양산화 가능한 공정 기술을 개발하는 과제다.

또 전고체전지는 일본 토요타를 비롯해 BMW, GM, 폭스바겐 등 외국계 자동차 회사는 물론 현대자동차에서도 관심을 보이는 기술이다. 이처럼 전고체전지가 국내외 완성차업체의 관심을 받는 이유는 전기자동차에 적용되고 있는 리튬이온전지의 액체 전해질을 고체 전해질로 대체함으로써 화재·폭발 위험성을 근본적으로 제거해 궁극적으로 안전한 전기자동차를 개발할 수 있기 때문이다.

이에 대해 기술개발을 주도하고 있는 정 박사는 “액체 전해질의 리튬이온전도 특성보다 높은 이온전도 특성을 구현하는 황화물 기반 고체전해질 소재를 개발하는 것을 목표로 최종 고체전해질 관련 소재 회사에서 사용할 수 있는 원천기술을 개발하기 위해 본 과제를 수행하고 있다”고 밝혔다.



KIST 정훈기 박사 팀은 전고체전지용 핵심 소재 기술 개발에 성공해 2030년 세계 최초 전고체전지 상용화의 꿈에 한 걸음 가까이 서게 되었다.

원천기술 확보가 미래 배터리 시장 성패 좌우

현재 전고체전지 기술에 대한 국내외 산업계 동향을 살펴보면, 우선 토요타는 가장 오랜 기간 전고체전지 기술을 개발해왔으며, 2021년 전고체전지를 탑재한 자동차를 시연하기도 했다. 또 BMW, 폭스바겐, GM 등 세계적 자동차 회사들도 전고체전지 관련 스타트업과 협력해 미래형 전기자동차용 이차전지 기술인 전고체전지 기술을 확보하기 위해 노력하고 있다. 현대자동차도 삼성SDI와 협력해 전기자동차에 탑재하기 위한 전고체전지 기술을 공동개발 중이다.

아울러 우리 정부도 이차전지 산업 육성에 적극적으로 나서고 있다. 반도체와 마찬가지로 이차전지 산업을 중요한 미래 먹거리 산업으로 정한 정부는 지난 4월 21일 차세대 이차전지인 전고체전지 세계 최초 상용화를 목표로 민관이 2030년까지 20조 원을 공동투자하는 이차전지 산업 경쟁력 강화 국가 전략을 발표했다.

발표에 따르면, 앞으로 5년 동안 이차전지 양극재의 국내 생산 능력을 4배, 장비 수출액을 3배 이상 확대하는 등 소재·부품·장비 경쟁력 강화와 이차전지 전 제품군 경쟁력을 강화하기 위해 리튬·인산·철 전지는 오는 2025년까지 전기자동차용으로 양산하고 2027년까지 세계 최고 기술력을 확보해 기술 초격차를 확보한다는 계획이다.

특히 이번 발표에 관심이 모아진 것은 정부가 차세대 전지를 개발하기 위한 대규모 연구개발^{R&D}을 추진한다는 점이다. 이는 세계 최초로 차량용 전고체전지 양산 기술을 확보하기 위함으로, R&D 대상에는 안전성을 높인 전고체전지와 주행거리를 늘린 리튬메탈전지, 무게를 줄인 리튬황전지 등 유망 이차전지가 포함되었다.

이와 관련해 정 박사는 “소재부터 셀, 팩까지 원천기술을 우선적으로 확보해야 한다. 제조 기술



항화물 기반 고체 전해질 소재를 이용하여 제조한 전해질 필름

은 뛰어나지만 소재 원천기술이 부족해 강대국에 로열티를 지불하던 과거 우리나라의 어려움을 더 이상 반복해선 안 되기 때문이다”라며 “미국·일본·중국 등은 광물, 소재부터 자국의 기술력으로 확보하려는 노력을 쏟고 있으며, 이에 대한 무역규제도 점차 강화하고 있다. 우리나라도 하루빨리 해외의 움직임에 적극 대응해야 한다”고 말했다.

뛰어난 소재 기술 개발로 기술 초격차 실현 목표

전고체전지는 전기자동차의 안전성을 획기적으로 개선함은 물론, 주행거리도 늘릴 수 있는 기술로 알려졌다. 특히 소비자들이 화재 우려 때문에 전기자동차 구입을 망설이던 점을 해소할 수 있다는 측면에서 전고체전지 기술은 전기자동차를 한 단계 이상 업그레이드할 수 있는 기술임이 분명하다.

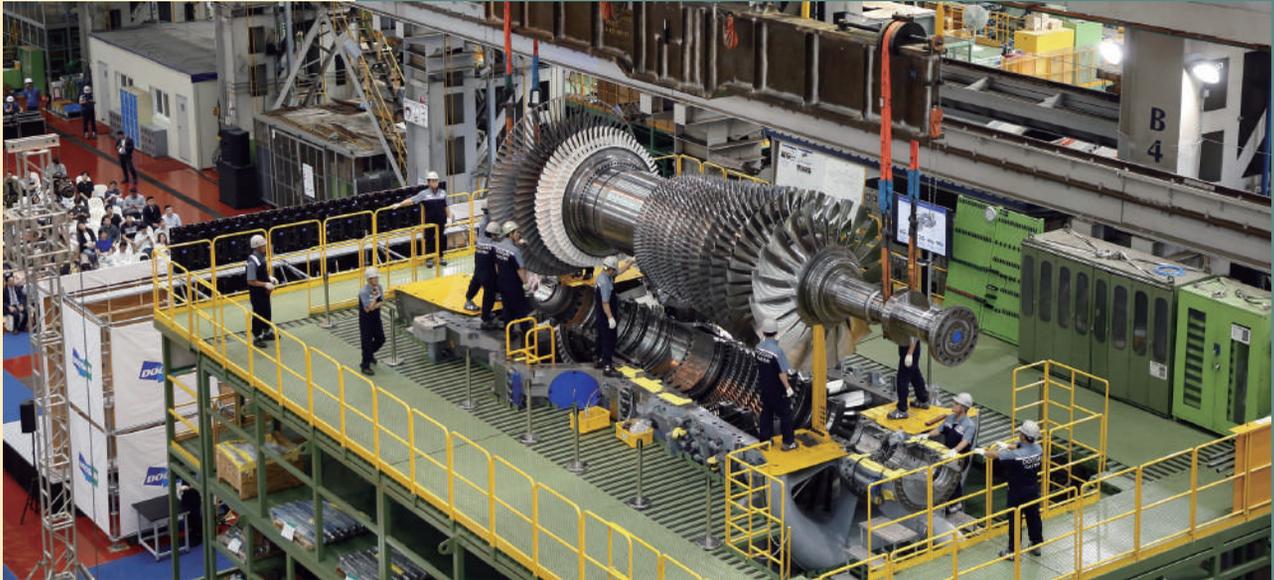
그뿐 아니라 에너지저장장치에서 일어났던 화재 및 발화 사고도 원천적으로 막을 수 있기 때문에 전고체전지 상용화는 중대형 리튬이온전지를 빠르게 대체할 것으로 기대된다. 이와 동시에 화석연료 중심에서 재생에너지 중심으로 에너지 패러다임이 전환되는 시점에서 기후 위기를 극복하기 위한 다양한 혁신 기술 중 하나인 전고체전지 기술의 사회적·경제적 가치 및 배터리 밸류체인 형성에도 큰 역할을 할 것으로 보인다.

한편 앞으로 계획과 목표에 대해 정 박사는 “전고체전지의 핵심은 양극, 음극보다 고체전해질 소재 기술에 있다고 할 수 있다. 이는 전고체전지의 가격, 에너지밀도, 성능을 결정할 소재이기 때문이다”라며, “우리나라는 양극 및 음극 등 소재 회사는 세계적 기술력을 보유하고 있으나, 고체전해질 소재 기술은 아직 그렇지 못하다. 따라서 미국·일본 등에서 확보한 소재 기술보다 뛰어난 기술을 개발하고, 궁극적으로는 우리나라 소재 회사에서 사용하거나 상업화할 수 있는 초격차 기술을 개발하는 것이 계획이자 목표다”라고 밝혔다.



국내에서 개발된 적 없는 1600°C급 가스터빈 소재

1991년부터 가스터빈, 자동차, 항공기 등 여러 분야를 개발해온 천지산업은 미래 가스터빈의 중요 부분인 금속과 세라믹의 핵심 요소 기술을 개발하는 프로젝트에서 세계 최고 성능 수준의 목표를 달성했다. 현재 고온 부품 제조 기술개발과 가스터빈 분야 등 부품 개발에 활용되고 있다.



설비 원청업체 의존 탈피와 독자 시장 개척

가스터빈은 압축기를 이용해 압축한 공기와 혼합한 화석연료의 연소를 통해 압력과 온도가 높아진 가스가 터빈에 유입되며 단열팽창됨에 따라 유체에너지가 기계에너지로 바뀌면서 전력을 생산하는 발전용 회전형 열기관이다. 천지산업은 1600°C급 가스터빈 소재를 국내에서 처음 개발한 회사로, 1991년부터 가스터빈·자동차·항공기 등 여러 분야를 연구해왔다. 그리고 많은 실패 과정을 거쳐 최종 목표인 150mm를 250mm까지 개발하기에 이르렀다. 초내열 단결정 합금 개발, 저열전도성 세라믹 열차폐 코팅 기술개발, 단결정 합금 주조 및 제조 기술개발 등 뛰어난 성과를 거두었다. 천지산업 합금연구개발의 최종 목표는 1600°C급 가스터빈의 핵심 부품에 사용되는 독자 조성의 단결정 초내열 합금을 개발하는 것이었다. 특히 고온 크리프 특성과 산화 특성 측면에서 사용 합금보다 우수한 특성의 합금을 개발하는 것을 목표로 했다. 또 합금 개발과 함께 단결정 초내열합금 부품의 정밀주조 기술개발 및 세라믹 주형 제조 기술개발을 진행했다.



프로젝트 개발 배경

- 일반 석탄화력발전보다 고효율
- 이산화탄소 발생 저감
- 설치 및 운용의 유연성
- 국내외 발전시스템 적용 증가 추세

| | |
|--|---|
| <p>프로젝트명</p> <p>고효율 발전을 위한 1600°C급 가스터빈 소재 개발</p> | <p>연구개발 기관</p> <p>천지산업, 세원하드페이징, 한국기계연구원, 한국세라믹기술원, NIMS, 국민대학교, 창원대학교</p> |
| <p>참여 연구진</p> <p>한두옥, 한지혜, 이승재, 한재선, 이동준, 박만해, 황중백, 이수민, 황근영, 이지환, 박현진, 김민섭</p> | <p>연구 기간</p> <p>2012년 11월 1일~2018년 12월 31일</p> |



개발 기술

- 1600°C급 가스터빈 고온 부품용 Re-Ru 함유 단결정 합금 개발
- Creep 수명/고온산화 특성 향상: 상용 소재 합금의 동등 이상 특성
- 단결정용 모합금 및 세라믹 코어 제조 기술개발
- 단결정 블레이드 시제품 개발



200mm 단결정 터빈 블레이드

국내에 없던 단결정 초내열 합금 소재 개발

당시 국내에서 일부 가스터빈 부품에 대한 개발이 진행되었으나, 단결정 초내열 합금에 대한 소재 개발 연구는 진행되지 않았다. 이에 지능형 합금 설계 기술을 이용한 단결정 초내열 합금 및 세라믹 코어 기술을 개발했다. 이를 위해 금속과 무반응성 주형 조성 예측이 가능한지 고온 강도를 위한 알루미나 샌드^{alumina sand}의 적용 타당성을 검증했다. 입자 간 소결성 향상 및 결정립 크기 감소에 의한 주형의 강도 역시 증진했다. 또 16MPa 이상 파괴 강도, 100% 용출성 및 형상 변형 없는 세라믹 코어를 제작했다. 지르코니아계 저열전도 복합 조성 및 나노 복합 구조 제어 열차폐 코팅 기술을 개발했으며, 세계적으로 우수한 1100°C 단결정 초내열 합금인 TMS-196 대비 순차적으로 LCF 특성 110%, TMF 특성 110%를 확보했다.

열 기계적 피로 시험^{TMF}은 실제 블레이드의 응력 분포를 분석할 때 변형과 온도를 엇갈리게 부과하는 아웃 오브 페이스^{out of phase} TMF가 적절한 시험이라고 판단해 500~1100°C 온도 구간에서 목표 합금과 개발 합금의 OP-TMF를 수행했다. 그 결과 개발 합금인 KSC-06은 목표 합금의 약 120% TMF 수명을 보여주었다. 또 950°C, 스트레인 컨트롤^{strain control} 조건으로 저주기 피로 시험^{LCF}을 수행한 결과 목표 합금인 TMS-196 대비 평균 245%의 월등한 수명을 보여주었다.

최고 성능 수준 목표 달성

이번 프로젝트는 미래 가스터빈의 가장 중요한 부분인 금속과 세라믹의 핵심 요소 기술을 개발하는 융합 과제였으며, 크게 금속 공정 개발, 세라믹 공정 개발, 금속 소재 개발, 세라믹 소재 개발 네 가지 파트의 연구개발로 볼 수 있다. 평가 항목당 목표를 세계 최고 성능 수준으로 잡았으며, 대부분의 목표를 달성했다. 천지산업은 해당 연구과제를 통해 확보한 진공 정밀 주조 기술을 활용해 해외사에 여러 종의 항공 부품을 수주해 연간 매출 향상에 기여하고 있다. 누리호 발사체에 들어가는 7/75톤 터보 펌프 부품 개발은 한화에어로스페이스, 한국항공우주연구원과 함께 추진 중이다.

누리호가 쏘아 올린 차세대 소형위성2호 목표 궤도 안착

지난 5월 쏘아 올린 차세대소형위성2호가 궤도에 안착해 지상과 정상 신호를 주고받는 데 성공했다. 차세대소형위성2호의 핵심 임무와 한국 우주 항공 기술의 성취를 들여다본다.

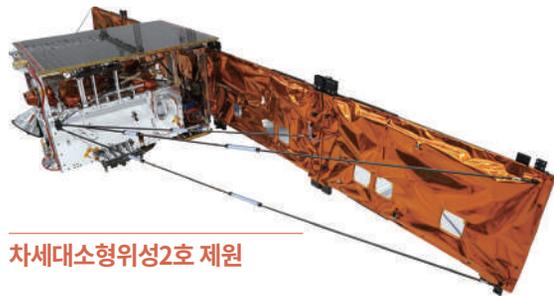
우리나라 최초의 위공위성은 한국과학기술원^{KAIST}에서 개발한 우리별1호다. 1992년 8월 11일 프랑스 기아나 우주센터에서 아리안4호 로켓으로 발사되어 1997년도 임무가 종료되었다. 이후 아리랑위성, 과학기술위성, 차세대중형위성 등 위성 18기가 목표 궤도에 안착해 현재 10기를 운용·점검 중이다.



차세대소형위성2호 궤도 안착 이상 무

지난 5월 25일 우리나라가 독자적인 우주 수송 능력을 확보하기 위해 개발한 누리호 3차 발사가 국민의 관심과 성원 속에 목표 궤도 550km에 성공적으로 도달했다. 우리가 개발한 위성을 우리 발사체로 목표 궤도에 안착시킴으로써 한국의 우주 기술에 대한 국제적 위상과 우주 발사 역량을 한 단계 진보시킨 엄청난 성과를 이루었다.

이번 누리호에 탑승한 첫 손님은 우리 기술로 개발한 차세대소형위성2호와 천문연구원, 민간기업이 개발한 큐브 위성 등 총 8기다. 목표 궤도에 도달한 누리호는 가장 먼저 차세대소형위성2호를 분리한 후 20초 간격으로 저스텍, 루미르, 카이로스페이스의 큐브위성과 도요셋을 궤도로 보냈다. 이 중 도요셋 1기와 저스텍에서 개발한 JAC 큐브 위성은 신호가 수신되지 않아 자세제어시스템 우주 검증 임무를 할 수 없는 아쉬움도 있다. 차세대소형위성2호는 누리호 발사 후 40분 만에 한국항공우주연구원 남극 세종기지 안테나를 통해 비전 신호를 수신했고, 발사 후 94분경 대전 KAIST 지상국과 최초 교신에 성공했다. 이후 수차례 교신을 통해 차세대소형위성2호의 자세제어 시스템에 적용된 반작용힐과 광학 자이로 기능을 점



차세대소형위성2호 제원

| 항목 | 주요 내용 |
|---------------|----------------------|
| 궤도 | 500~600km, 태양동기궤도 |
| 임무 수명 | 2년 |
| 무게 | 150kg 내외 |
| 전력 | 500W |
| 자세제어 방식 및 정밀도 | 3축 안정화 방식, 0.002° |
| 통신주파수 | S-대역, X-대역 |
| 탑재체 | X-대역 영상레이더 |
| | 우주 핵심기술 검증 과학 임무 탑재체 |

검하고, 태양전지판이 태양을 바라보는 자세제어와 고속 데이터송신을 위해 안테나를 지상국으로 지향하는 자세제어 기능 외에도 탑재한 컴퓨터의 기능이 정상적으로 작동되고 있음을 확인했다.

우주공간에서 수행할 주요 임무

차세대소형위성2호는 2017년 3월부터 2020년 12월까지 정부 예산 297억 원을 투입해 시스템, 본체 및 탑재체 등의 설계·조립·시험·검증 등 위성 개발 전 과정을 통해 우주 환경에서 우주 핵심기술 성능 검증과 중점 기술개발을 목적으로 KAIST 인공위성연구소 주관하에 국내 독자 기술로 개발한 소형 위성이다. 차세대소형위성2호는 총중량 170kg으로 고도 550km 태양동기궤도를 2년간 돌면서 영상레이더 기술 검증과 지상 관측, 우주방사선 관측, 그리고 산학연에서 개발한 위성 핵심기술 4종(상변환 물질을 이용한 열 제어 장치, X-대역 QaN 기반 전력증폭기, GPS·갈릴레오 복합 항법 수신기, 태양전지 배열기)에 대한 우주 검증도 함께 수행한다.

차세대소형위성2호의 가장 큰 가치 중 하나는 국내 최초 우주용 영상레이더 탑재체를 개발해 개발 과정에서 얻은 다양한 노하우로 향후 탑재체의 시스템을 개선·보완할 수 있는 기술 자립화를 이루어낸 것이다. 특히 국내 기술로 제작한 X-대역 영상레이더^{SAR 1}는 해상도 5m, 관측 폭 40km의 레이더 영상 획득을 목표로 하고 있고, 우주방사선 관측기는 근지구 궤도의 중성자²·대전입자³에 대한 정밀 선량⁴ 지도를 작성하고, 태양 활동 상승 주기 시 우주방사선 변화에 따른 우주 환경 영향과 근지구 궤도의 중성자 가중치를 연구하는 데 활용할 예정이다. 또 태양동기궤도⁵에 안착한 도요셋(10kg, 수명 1년)은 세계 최초로 편대비행을 통해 태양 활동으로 생기는 우주 환경의 데이터 수집 임무를 수행할 예정이며, 스타트업(루미르, 카이로스페이스)이 개발한 LUMIR-T(7kg, 수명 6개월)와 KSAT3U(6kg, 수명 1년)는 우주 방사능을 측정하고 방사능에 노출되어 저하된 시스템 복구 기능 시연과 우주쓰레기 경감 기술 검증 임무를 수행할 예정이다.

— 1 SAR^{Synthetic Aperture Radar} (X-대역 영상레이더): 빛과 구름의 영향을 받지 않아 주야간, 악천후에도 관측이 가능하며 재해·재난, 국토·해양 관리 등에 활용.

— 2 중성자^{neutron}: 원자핵을 구성하는 것 중 전하(물체가 띠고 있는 정전기의 양)가 없는 양성자보다 약간 무거운 핵자.

— 3 하전입자^{charged particle}: 전기(전하)를 띤 입자로 양성자, 전자, 이온 등이 대표적.

— 4 선량: 방사선이나 엑스선의 에너지양.

— 5 태양동기궤도^{sun synchronous orbit}: 위성궤도면이 1항성년 사이에 지구의 공전과 같은 방향으로 1회전하는 궤도.

뉴 스페이스 시대 우주기술의 진화는 어디까지?

기존의 우주개발은 국가 주도의 과학적 탐사와 군사 용 개발이 주목적이었다. 하지만 최근 민간 부문의 적극적인 자본 참여와 기술개발로 우주 경제 경쟁이 심화되는 새로운 우주 산업 기회의 장으로 변화하고 있다. 이는 우주개발 주도권이 국가에서 민간으로 이전하는 뉴 스페이스 시대가 도래했음을 의미한다. 테슬라 CEO 일론 머스크가 2002년 스페이스 X를 창업한 후 세계 최초로 상용 우주선 발사, 궤도 발사체 수직 이착륙, 궤도 발사체 재활용(발사 비용 kg당 단가

약 1400달러 수준), 민간 우주비행사 국제우주정거장(ISS) 도킹, 스타링크 프로젝트⁶ 등 21세기 인류의 우주개발을 주도하면서 뉴 스페이스 시대 전환을 빠르게 리딩하고 있다.

글로벌 우주 서비스 시장은 크게 네 가지로 나눌 수 있다. **첫째, 위성인터넷 분야**다. 스페이스 X 외에 원웹이 위성 428기를 저궤도에 배치해 알래스카와 캐나다에서 인터넷 사용 서비스를 시작했고, 중국은 귀왕 프로젝트⁷를 가동해 향후 위성인터넷 서비스 시장은 경쟁이 심화될 것으로 전망한다. 국내에서는 한화시스템이 원웹의 지분 8.8%를 인수해 위성 서비스 사업 참여가 예상된다.

차세대소형위성2호의 임무

- ① 영상레이더 기술 검증과 지상관측
- ② 우주방사선 관측
- ③ 위성 핵심기술 4종(상변환 물질을 이용한 열제어 장치, X-대역 QaN 기반 전력증폭기, GPS-갈릴레오 복합 항법 수신기, 태양전지 배열기)에 대한 우주 검증

— 6

스타링크 프로젝트^{Starlink Project}: 저궤도에 위성 4만2000여 기를 배치해 전 세계 위성인터넷을 보급하는 서비스 사업. 현재 3700여 기를 발사해 북미·호주·유럽 등 40여 개국에서 서비스를 시작했고, 최근 국내 서비스를 위해 스타링크코리아 법인을 설립 후 기간통신사업자로 등록 완료했다.

— 7

귀왕 프로젝트^{Guowang Project}: 중국 정부 주도 아래 저궤도(508~1145km)에 위성 약 1만3000여 기를 배치해 운영하는 통신위성 사업.

둘째는 아직 초기 단계지만, 우주여행 분야다. 우주여행은 목적지에 따라 무중력을 체험할 수 있는 소우주여행, ISS 등에 체재하는 우주여행, 우주를 경유하는 이동 여행, 달·화성으로 이주, 이렇게 네 가지로 분류할 수 있다. 현재 이 사업에 블루오리진, 버진 갤러틱, 스페이스 X 등 민간기업이 참여하고 있다. 우주 로켓 기술이 진화하고 비용이 낮아지면 무중력 공간에서 우주를 바라볼 수 있는 우주 관광 시대도 곧 올 것이다. 우리나라도 최근 우주 발사체를 활용한 ‘카르만 라인⁸’이라 부르는 우주 경계선(고도 100km)까지 올라가는 준궤도 우주여행 사업을 할 수 있는 법적 근거가 마련되었다.

셋째, 우주쓰레기 수거 분야다. 유럽우주국^{ESA}에 따르면 지구 궤도에는 1만 4710여 기의 위성이 있고, 이 중 6900여 기만이 실제 임무를 수행 중이라고

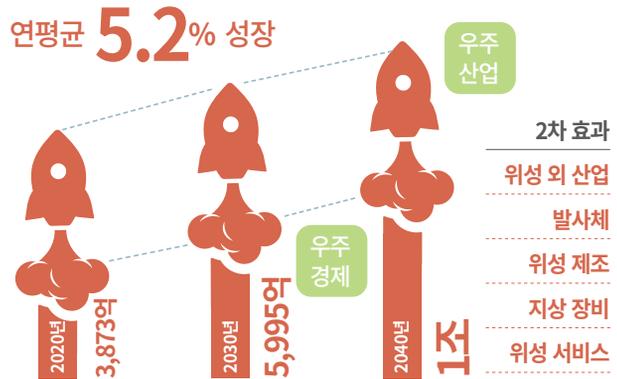
한다. 약 7800기는 우주쓰레기로 방치되어 있다는 것이다. 이러한 우주쓰레기는 위성의 지구 관측 및 통신 등에 장애가 될 뿐 아니라 지구에 떨어질 위험 또한 크다. 우주쓰레기를 수거하기 위한 기술은 현재 일본의 우주 스타트업 에일과 아스트로스케일이 선도하고 있다. 아스트로스케일은 2024년에 ELSA-d 위성을 통해 우주쓰레기 수거를 시작한다고 발표했다. 이 외에도 미국, 중국, EU 등에서 우주쓰레기를 수거하기 위한 다양한 기술을 개발 중이다. 우리나라는 항공우주연구원에서 로봇 팔로 목표 위성을 붙잡아 대기권에서 자연 소각하는 초소형 포집 위성 기술을 개발하고 있으며, 우리별2호가 첫 번째 처리 대상이다.

넷째, 우주 자원 채취 및 달 기지 건설 등 심우주 분야. 100톤급 넘는 화물과 승무원을 운반할 수 있는 대형 우주선 기술이 개발되면 달에 유인 기지 건설을 위한 우주 모빌리티와 원자력 등 에너지 서비스 분야 이외에 우주 자원(희토류, 헬륨-3 등)을 채취·수송하는 새로운 서비스 산업도 생겨날 것이다. 우리나라는 미국 주도로 추진하고 있는 아르테미스 프로그램⁹에 열한 번째 국가로 참여했고, 현대자동차는 우주에서 사용할 로버와 모빌리티 등 선행 기술을 개발하고 있다.

우주 경제 글로벌 강국으로 도약

우주산업은 반도체, IT, 기계 등 다양한 고도의 기술이 집약된 산업이다. 전후방 연관 산업을 고도화하고 위성 서비스 활용 분야의 새로운 산업을 촉진하는 미래 전략산업인 동시에 국가안보와 직결되는 국가 전략산업이기도 하다. 이에 선진국에서는 우주산업 관련 핵심 기술 이전을 기피하고 후발 국가들의 우주 분야 진출을 막기 위해 ITAR, EAR 등 진입 장벽을 만들고 있다. 외산 우주 부품을 사용할 경우 위성발사

글로벌 우주 시장 규모



자료: 모건스탠리, 단위: 달러

시 개별적 협의뿐 아니라 발사 장소도 예약을 받는다. 2020년 모건스탠리에서 발표한 자료에 따르면, 우주산업은 민간 투자와 새로운 서비스산업 확대로 2040년경 1조527억 달러 규모로 시장이 성장할 것으로 전망하고 있다. 그간 국내 우주산업은 국책 연구 기관 중심의 발사체·위성체 개발로 기술개발에는 성공했지만 산업생태계 조성은 다소 미흡했다. 우주 부품의 높은 신뢰성과 실패에 대한 두려움, 검증되지 않은 국내 개발 부품 탑재 기피로 민간기업이 우주 헤리티지 확보에 많은 어려움이 있었기 때문이다. 다행히 이번 누리호 3차 발사에 실린 차세대소형위성2호에는 국내 연구소와 민간기업이 개발한 기술들이 적용되어 국내 우주산업이 성장할 수 있는 기반을 마련했다. 2020년 KISTEP 기술 수준 평가에 따르면 우리나라 우주기술은 미국 대비 55~60%로 낮은 수준이다. 하지만 우리는 세계에서 일곱 번째로 실용급(1톤급 이상) 위성 발사 기술을 확보하고 있고, 통신·반도체 등 ICT 산업 발달로 서비스 분야를 다각화하기 용이할 것이다. 최근 민간 부문에서 지속적인 투자가 진행되고 있고, 국책 연구소 주도의 우주 사업을 민간으로 이전해 2025년부터는 민간 분야의 우주산업 생태계가 조성될 것이다. 정부는 뉴 스페이스 시대가 확대되고 우주 탐사가 진행되어 우주 경제 시대가 본격화될 것으로 전망해 지난 3월 제4차 우주개발진흥계획에 ‘2045년 우주 경제 글로벌 강국 실현’을 위한 비전과 ‘5대 장기 우주개발 추진 전략’을 미션으로 설정했다. 정부의 이러한 정책들이 로드맵에 따라 강력히 추진되고 정부 예산에 우주산업 육성 의지가 더해진다면 우리도 2045년에는 글로벌 우주 강국으로 부상할 것으로 확신한다.

— 8

카르만 라인^{Karman Line}: 지구 대기권과 우주 공간 사이의 경계.

— 9

아르테미스 프로그램^{Artemis Program}: 2024년까지 최초의 여성 우주비행사 달 착륙, 2028년까지 유인 기지 건설, 달을 전초기지로 화성 유인 탐사에 필요한 기술 확립과 심우주 개척 등 달을 정기적으로 연구하기 위한 프로그램으로 미국, 일본, 영국, 호주, UAE, 한국 등 12개국이 참여하고 있다.



신만희 한국항공우주산업진흥협회 전략기획본부장

1992년부터 지금까지 31년 동안 한국항공우주산업진흥협회에서 일하면서 한·중, 한·EU, 한·캐나다 중형 항공기 개발 사업 참여, 산업부 드론 및 항공산업 발전 전략 수립, 제2·3차 항공산업 발전 기본계획 수립, 민간 주도 우주산업 소부장 발전 전략 수립 등 국내 항공우주산업 발전을 위한 정책 및 지원제도 마련에 힘써왔다.

산업 전반에 걸쳐 일어나는 디지털전환^{DX}의 물결에 따라 생산 환경 역시 스마트 팩토리 등을 도입하며 OT 보안의 위험이 증가하고 있다. DX의 변화를 피할 수 없다면 OT·ICS 산업의 변화와 함께 보안도 강화할 필요가 있다.

OT란?

운영 기술^{Operation Technology, OT}은 하드웨어와 소프트웨어를 사용해 산업용 장비를 제어하는 방식을 말한다. OT는 제조, 에너지, 의료, 건물 관리, 기타 업종에서 사용하는 전문 시스템을 포괄한다.

OT vs IT

OT 시스템이 물리적 환경과 상호작용하는 데 사용되는 반면, IT는 주로 비즈니스 문제를 해결하는 데 사용된다. OT 시스템이 네트워크와 연결되는 경우가 더 흔해지고, 갈수록 많은 양의 데이터를 생성하고 사용함에 따라 OT와 IT의 여러 측면이 융합되고 있다.

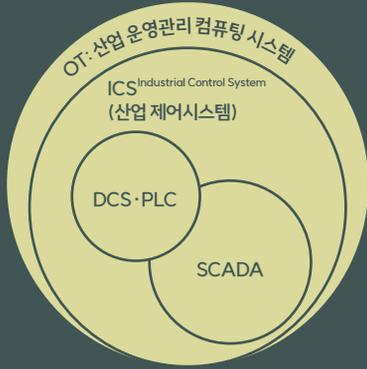
| 구분 | OT/ICS 시스템 | IT 시스템 |
|-----------|-------------------------------|----------------------|
| 보안 우선순위 | 가용성> 무결성> 기밀성 | 기밀성> 무결성> 가용성 |
| 성능 요구 | 실시간, 준실시간 | 실시간, 배치 등 다양화 |
| 가용성 | 고가용성 요구, 계획된 중단만 허용 | 재시작 허용, 상대적으로 낮음 |
| 보호 대상 | 설비, 프로세스, 필드 장치 등 | 정보, 핵심 IT 자산 |
| 시스템 운영체제 | 전용 운영체제 | 개방형·범용 운영체제 |
| 생애주기 | 15~20년 | 3~5년 |
| 통신 | 장비별 전용 프로토콜 | 표준 프로토콜(TCP/IP) |
| S/W 변경 관리 | 사전 시험 후 점진적 적용, 계획된 정지 시기에 적용 | 보안 정책에 따라 자동 적용 |
| 접근 용이성 | 넓은 영역에 퍼져 있음, 물리적 접근 차단 곤란 | 특정 지역에 국한, 물리적 차단 용이 |
| 단말·시스템 특징 | 상대적으로 저성능, 노후 장비 | 상대적으로 고성능, 최신 장비 |

OT 보안의 주요 문제점

- 산업 제어시스템은 대부분 원래부터 보안이 결여되어 있으며, 수명 주기가 20년 이상
- IT-OT의 융합을 일으키는 디지털 혁신으로 인해 에어갭 보호^{air-gap protection}가 줄어들면서 사이버 자산과 물리적 자산의 공격면 확장
- 외부 ICS 제조사나 직원에게 원격 액세스를 제공해야 할 필요성이 생기면서 위험 증대
- SG, IoT, 클라우드 등 새로운 기술 도입 증가 추세
- OT 고객사에서 ICS 제조사와 SI에 의존하면서 중요한 시스템이 추가적 위험에 노출됨

보안산업 OT 보안산업

OT의 구성



| 구분 | 내용 |
|-------|---|
| OT | · Operational Technology(산업 운영관리 컴퓨팅 시스템) · ICS·SCADA 등을 포괄하는 산업용 기계, 공정 운영을 위한 기술 및 시스템 |
| ICS | · Industrial Control System(산업 제어시스템) · 공장이나 시설의 각종 기계나 공정을 제어하기 위한 시스템 |
| SCADA | · Supervisory Control and Data Acquisition(작업 공정 감시-제어시스템) · HM ^{Human-Machine Interface} , PLC 등을 포함하며 공정 시설과 설비를 제어하기 위해 원격제어시스템·통신시설 기반의 산업제어 및 감시 시스템 |
| DCS | · Distributed Control System(분산제어시스템) · 자동제어 프로그램이 내장된 제어용 컴퓨터를 기능별로 분산해 중앙관리 및 제어하는 시스템 |
| PLC | · Programmable Logic Controller(프로그램된 제어장치) · 산업 플랜트의 자동제어 및 감시에 사용하는 제어시스템 |

OT 보안, 어떻게 해야 할까?

보안관리 체계 수립

- 경영진의 의지가 반영돼 있는가?
- OT 보안을 위한 표준 및 관리 체계를 수립했는가?
- 관련 정책, 조직, 기술, 프로세스를 수립했는가?

보안 아키텍처 수립

- OT 보안에 최적화된 보안 솔루션을 구축했는가?
- IT 보안기술과 통합된 보안관리 아키텍처를 구축했는가?
- 보안 솔루션에서 발생하는 이벤트와 경보에 대한 모니터링 그리고 대응을 수행하고 있는가?

가시성 확보

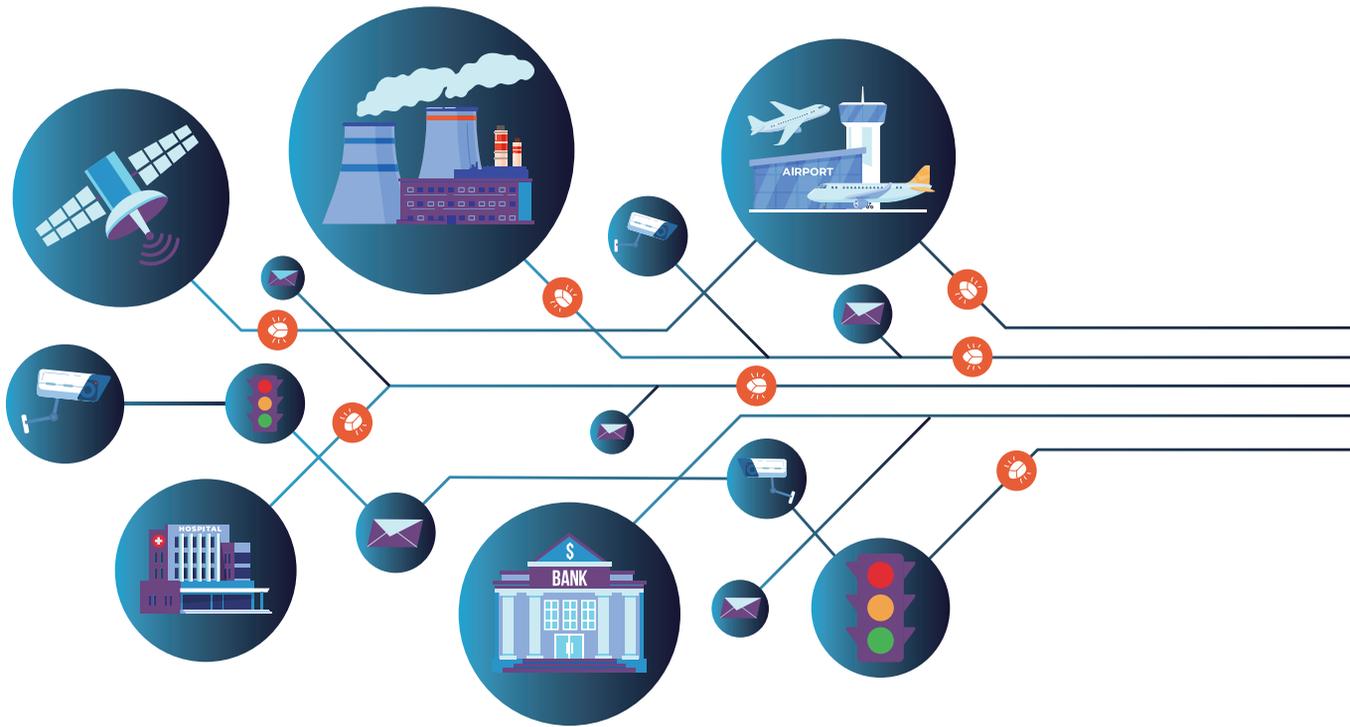
- 관리 중인(보호해야 하는) OT 시스템이 무엇이고, 어디에 있는가?
- 이 시스템은 어디와 연결되어 있는가?
- 이 시스템의 담당자는 누구인가?





작전명, 기술을 지켜라!

많은 것들이 디지털화되면서 전 세계적으로 산업 우위를 점하기 위한 경쟁이 심화되고 있다. 이런 기술적 트렌드 속에서 운영 기술 사이버보안은 현대 산업 시스템을 튼튼하게 유지하는 기둥 역할을 하고 있다.



운영 기술이란 무엇인가?

운영 기술^{OT}은 기업에서 물리적 장치, 프로세스 및 사건을 모니터링·제어하거나 변화시키는 데 사용되는 하드웨어와 소프트웨어의 조합을 의미한다. 이런 기술은 일반적으로 산업 제어 시스템^{CS}의 핵심에 위치하며 감시 제어 및 데이터 수집^{SCADA} 시스템, 프로그래머블 로직 컨트롤러^{PLC}를 포함한다. 이런 시스템은 전력 그리드, 상수도 시설, 공장 기계, 그리고 복잡한 교통 네트워크 같은 핵심 인프라의 원활한 운영을 돕는다.





왜 지금 OT가 중요한가

OT는 오늘날 산업기술의 핵심 요소로, 기존 수동 프로세스를 자동화해 생산성을 향상시키며 인간의 오류를 줄이고 안전성을 증진한다. OT와 정보기술^{IT}의 결합은 통합된, 더욱 스마트한 산업화를 돕는다. 또 이러한 시너지는 장비 고장 예측, 에너지 효율성 향상, 성능 최적화를 위한 데이터 분석, 머신 러닝, 인공지능의 사용을 가능하게 한다.

하지만 심각한 보안 문제도 있다. OT가 지속적으로 발전하고 IT와 교차함에 따라 복잡한 OT 환경을 보호하는 일은 점점 더 힘들어지고, 그 중요성은 높아지고 있다. 이렇게 강화된 보안은 OT 시스템의 잠재적 사이버 위협에 대한 철저한 이해, 그리고 효과적 관리에 필요하며, 이는 현대 산업 생태계에서 OT 사이버보안의 필수적 역할을 부각한다.

OT와 사이버보안

IT·OT 통합과 인터넷 연결이 증가함에 따라 OT 시스템은 그 어느 때보다 사이버 위협에 노출돼 있다. 그 범위는 광범위하다. 데이터 침해 또는 금전적 손실이 대부분인 IT 시스템과 달리 OT 시스템은 물리적 작업을 제어하기에 OT 시스템에 대한 사이버공격은 상당한 물리적 피해, 환경적 재앙, 심지어 대규모 인명 피해를 초래할 수 있다. 전 세계적으로 OT 시스템에 대한 사이버 위협은 계속되고 있으며, 2021년 전기·제조업 분야 기업의 89%가 연간 평균 6회 사이버 공격을 받았다. 그로 인해 36억 원 이상의 금전적 손실을 입었다.

OT 시스템에 대한 사이버공격의 예로는 최근 발생한 콜로니얼 파이프라인^{Colonial Pipeline} 사태를 들 수 있다. 미국 동부 해안 지역에서 소비되는 연료의 45%를 보급하는 대형 송유관 회사인 콜로니얼 파이프라인은 2021년 5월 랜섬웨어로 파이프라인 관리 시스템이 중단되었고, 해킹 그룹에 440만 달러를 지급한 후에야 시스템을 복구할 수 있었다.

이 외에도 2018년 이탈리아 오일 서비스 회사는 데이터 삭제형 악성코드인 샤문^{Shamoon}에 의해 공격당했으며, 2017년에는 15개 넘는 사우디아라비아 정부 및 민간 시스템이 악성코드에 감염되어 큰 피해를 입었다. 2016년 이스라엘 전자 비자 발급 기관 해킹, 2015년 오스트레일리아 에너지 연구소 해킹 등 OT 시스템에 대한 사이버 공격으로 피해가 증가하고 있으며, 금전적 피해도 커지고 있다.



전기·제조업 분야 기업
OT 사이버공격 현황
(2021년 기준)

89%

연간 평균 **6회**
사이버공격

금전적 손해
36억 원

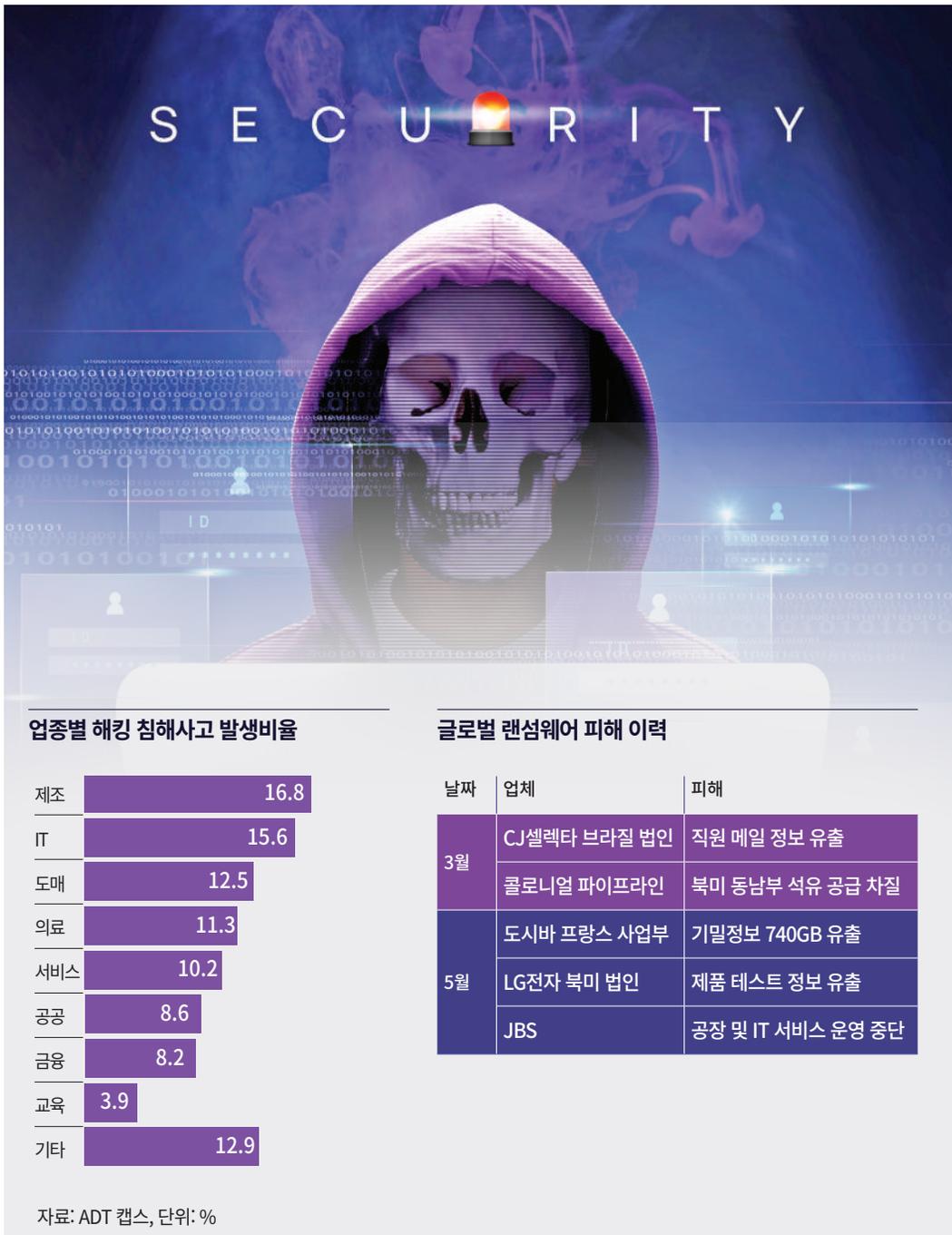
산업 기밀 탈취와 사회 기간망 붕괴가 목적

최근 들어 빠른 속도로 디지털전환이 이루어지고 있는 국내 제조업 분야에서도 광범위한 사이버공격이 발생하고 있다. 특히 공장 제어 시스템, 도면 관리 시스템이 주요한 공격 대상으로 파악되고 있으며, 랜섬웨어 공격에 의해 금전적 피해로 이어지고 있다.

낮은 보안 인식과 부족한 보안 인력으로 OT 시스템 보호를 위한 기본 보안 장비 도입도 미비하며, 기초적 보안 설정도 미흡한 실정이다. 이런 상황에서 지능형 지속 공격^{APT}처럼 지능적 해킹 그룹의 공

격에서 자유롭지 못한 것이 사실이다. 최근에는 국가 차원의 지원을 받는 대규모 해킹 그룹이 등장하고 있으며, 이러한 해킹 그룹은 정교한 공격을 통해 우리나라 산업 기밀을 탈취하거나 사회 기간망을 붕괴시키는 것을 목적으로 한다.

우리나라는 지정학적 위치상 러시아·중국·북한과 인접해 있으며, 다양한 사이버공격에 노출된 상황이다. 특히 북한과 연계된 해킹 그룹은 주요한 외화벌이 수단으로 이용될 만큼 사이버공격을 금전적 이익을 얻기 위한 수단으로 이용한다.



우리가 할 수 있는 일, 그리고 해야 하는 일

OT 사이버보안에 대한 낮은 인식과 비IT 인력에 의한 OT 시스템 도입 및 운영이 국내 OT 사이버보안의 주요 문제로 지적될 수 있다. 시스템 운영 관점에서 사이버보안은 효율성을 떨어뜨리고 부가적인 것이라는 인식에서 벗어나 안정적 시스템 운영을 위해 반드시 필요한 요소로 받아들여야 하며, 전문적 사이버보안 인력을 배치하고 꾸준한 인력 양성과 교육이 요구된다.

기술적으로 OT 시스템은 IT와 운영 환경이 다르기에 설비 시스템의 특성을 파악하고 OT 시스템에서 동작하는 전용 소프트웨어와 프로토콜을 이해해야 한다. 많은 경우 OT 시스템의 소프트웨어와 프로토콜은 그 동작의 구체적 내용이 문서화되어 있지 않고, 벤더에 의해 표준을 따르지 않는 형태로 작성되어 있다.

OT 시스템도 여러 네트워크로 구성되어 있다는 것을 잊지 말아야 한다. 사이버공격을 하는 사람은 어떻게 해서든 네트워크를 통해 시스템에 침투하려고 한다. 이는 망이 분리된 환경이라 해도 완벽하지 않다는 것을 최근 연구 결과에서 알 수 있다. 그럼에도 네트워크를 분리하고 분리된 네트워크 단위로 보안기술을 적용하는 것은 네트워크를 횡단하고자 하는 공격을 모니터링하고 차단하는 기회를 제공한다.

OT 시스템의 또 다른 특징은 설비 시스템이 노후화될 가능성이 높다는 것이다. 한번 설치하면 10년에서 20년 이상 사용하는 시스템의 특성상 미확인·미식별된 자산이 많고, 이러한 자산 현황 파악의 어려움으로 보호해야 하는 대상도 식별하기 어려울 수 있다.

최근에는 공급망 보안과 제로 트러스트¹ 같은 굵직굵직한 보안 기술이 트렌드로 떠오르고 있다. 이러한 기술은 OT 사이버보안의 중요성으로 더욱 주목받고 있다. 산업계가 디지털화되면서 사이버공격이 대두되었으며, 이로 인해 공급망을 이루는 산업계에 대한 보안, 즉 공급망 보안이 강조되는 것이다. 자국의 산업 발전과 보호가 국가경쟁력으로 이어지는 상황에서 공급망 보안은 어찌 보면 OT 사이버보안을 강조하는 또 다른 키워드로 받아들일 수 있다. 제로 트러스트 또한 시스템 외부나 내부에서 안전한 접근을 강조하기 위한 키워드로서 OT 사이버보안을 강화하기 위한 요소 중 하나일 뿐이다. 국내 산업의 안정적 발전을 위해서라도 OT 시스템에 공급망 보안, 제로 트러스트 같은 보안 개념과 기술 도입이 요구되는 실정이다.

IT와 OT 시스템에 대한 사이버공격은 분명 그 궤를 달리한다. 산업계를 목표로 하고 대규모 금전적 손실과 인명 피해로 이어질 수 있는 상황에서 OT 사이버보안의 중요성은 갈수록 커지고 있다. 산업 기술 패권 경쟁이 치열해지면서 각국은 스스로 생존하기 위해 기술과 산업 안보를 강화하는 추세다. 우리나라도 국내 산업 발전과 보호를 위해 OT 사이버보안에 대한 국가적 지원과 민간투자가 필요한 상황이다.

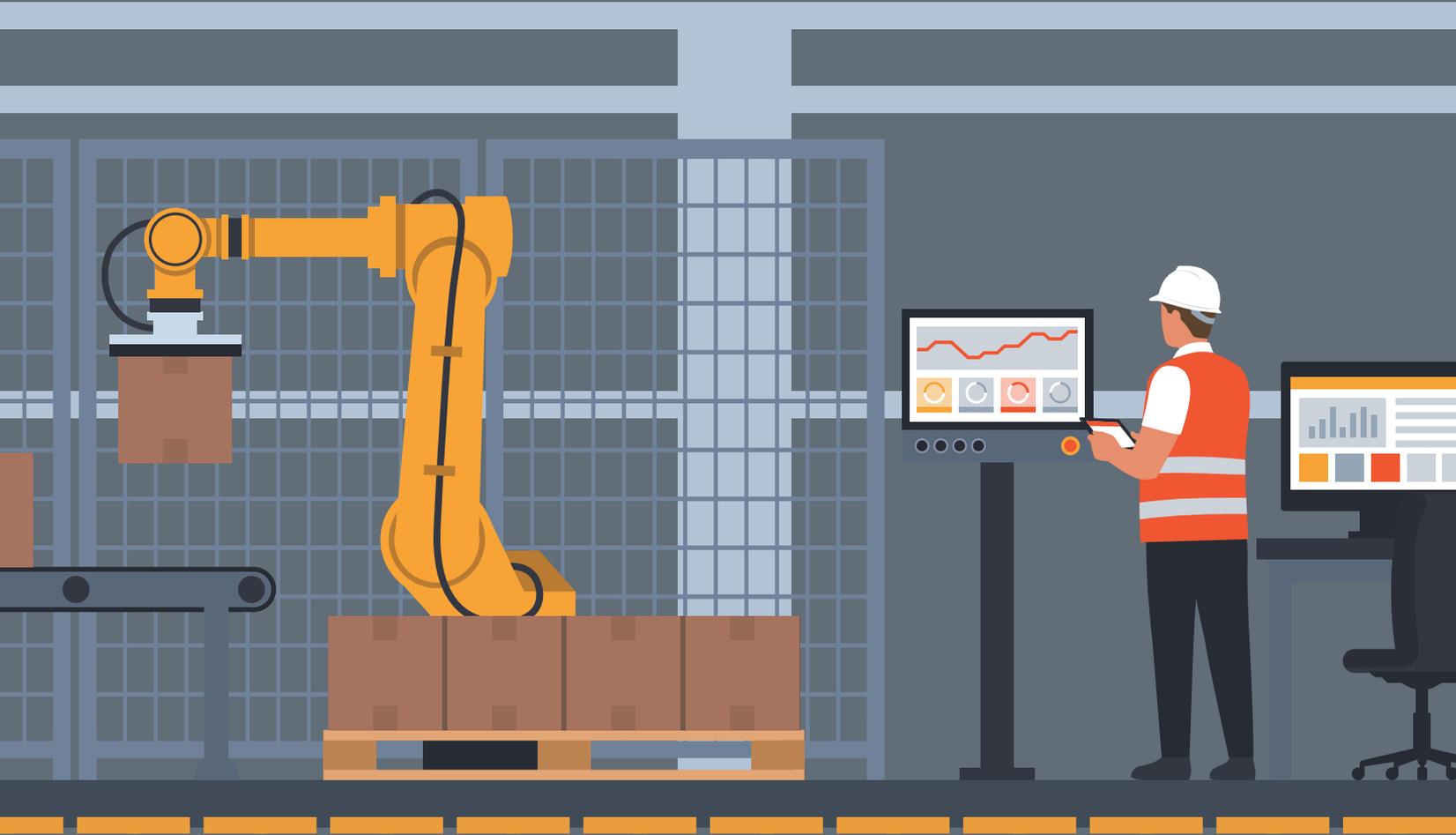
— 1

제로 트러스트^{Zero Trust}. ‘아무것도 신뢰하지 않는다’는 것을 전제로 한 사이버보안 모델. 사용자 또는 기기가 접근을 요청할 때 철저히 검증하고, 검증을 완료해도 최소한의 신뢰만 부여해 접근을 허용하는 방식을 말한다.



이중혁 세종대학교 정보보호학과 교수

상명대학교 소프트웨어학과 교수, 프랑스 그랑제콜^{Grand Écoles} 교수, 프랑스 국립연구원^{INRIA} 연구원 등을 지냈으며 현재 세종대학교 정보보호학과 교수직을 맡고 있다.



OT 산업, 유능한 보안관이 필요하다

폐쇄망으로 운영되는 OT는 IT와 함께 사용되면서 사이버 공격에 노출되었다. OT 분야에서 보안 문제 발생 시 기업이나 국가의 근간을 흔들 정도로 큰 피해가 발생한다. 하지만 아직도 OT 분야는 보안 전문가와 인식이 절대적으로 부족하다.

흔히 OT(Operaton Technology)라 부르는 운영 기술은 주로 제조·생산 분야에서 쓰이는 기술을 의미한다. 쉽게 말하면 ‘공장’에서 사용하는 기기를 운영하는 기술이며, 나아가 발전 등 기반 시설에서도 사용하는 것이 OT다. 흔히 산업 제어시스템(Industrial Control System, ICS)¹과 혼용하기도 하지만, 엄밀히 말하면 ICS는 OT의 한 영역에 불과하다. 실제로 글로벌 리서치 기업 가트너(Gartner)는 OT에 ICS가 포함되며, ICS에 SCADA와 DCS가 포함된다고 정의했다.

OT는 기본적으로 폐쇄망, 즉 내부 기기끼리 연결되어 있고 외부(인터넷)와는 연결되어 있지 않았다. 그 때문에 외부에서의 사이버 공격 자체가 불가능한 상황이었다. 하지만 점차 기술이 발달하면서 기술적 편의성 때문에 IT(Information Technology)를 OT와 함께 사용하게 됐고, 자연스레 사이버 공격에 노출됐다.

OT를 공격하는 랜섬웨어

글로벌 보안 기업 포티넷이 발표한 ‘2023 글로벌 OT 및 사이버보안 현황 보고서’에 따르면, OT 조직의 4분의 3이 2022년에 최소 한 번의 침해 사고를 경험했다. 주로 멀웨어(56%)²와 피싱(49%) 공격이었으며, 랜섬웨어³(32%) 공격도 많았다. OT 조직 보안 담당자들은 사이버공격이 증가한 이유로 OT 기기의 IP, 즉 네트워크 연결 지원을 꼽았다. 보고서에 응답한 조직의 80%는 OT 환경에 100개 이상 IP 지원 OT 기기를 보유하고 있다고 밝혔다. 실제로 2018년 8월, 세계 최대 반도체 위탁생산 기업인 대만의 TSMC가 워너크라이 랜섬웨어(WannaCry Ransomware)에 감염돼 하루 동안 반도체 생산이 중지됐

고, 손실액이 3억 대만달러(당시 약 110억 원)에 달했다. 여기에 제품 출하 지연과 비용 증가 등을 포함하면 무려 2800억 원의 손해를 입은 것으로 알려졌다.

2019년 3월에는 세계 최대 알루미늄 생산 기업인 노르웨이의 노르스크 하이드로(Norsk Hydro)가 로커고가(LockerGoga) 랜섬웨어에 감염돼 압출 공정 일부가 중단됐으며, 이로 인해 약 4100만 달러(당시 약 477억 원)의 손해를 봤다. 심지어 노르스크 하이드로가 알루미늄 생산을 하지 못하면서 전 세계 알루미늄 가격이 오르기도 했다.

2020년 6월에는 일본의 자동차 기업 혼다(Honda)가 랜섬웨어의 공격을 받아 공장이 멈추는 사고가 있었다. 스네이크(Snake)는 주로 OT를 노리는 랜섬웨어로 2020년 혼다와 남미의 에너지 기업 에넬 아르헨티나(Enel Argentina)를 공격해 민감한 정보를 빼돌리는 한편, 주요 파일을 암호화해 공정을 멈추게 했다.

2021년 5월에 발생한 미국 최대 송유관 운영사 콜로니얼 파이프라인(Colonial Pipeline)이 랜섬웨어에 공격당한 사건은 사회 주요 기반 시설의 보안 현황을 알 수 있는 중요한 사건이었다. 보안 전문가들은 콜로니얼 파이프라인 사건은 2010년 이란에서 발견된 스텝스넷 이후 OT 보안이 전혀 달라지지 않아 일어났다고 비판했다.

콜로니얼 파이프라인은 미국 동부 해안 지역에서 소비되는 연료의 45%를 보급하는 주요 기반 시설이지만 랜섬웨어 공격 한 번에 5500마일(약 8851km)에 달하는 파이프라인이 마비됐고, 공격자에게 440만 달러를 지급한 후에야 복구할 수 있었다. 문제는 당시 랜섬웨어가 역대급으로 발생했으며, 모든 기업과 기관이 랜섬웨어 대비에 나선 때였다는 사실이다. 즉 OT 분야는 여전히 사이버보안에 취약하다는 것을 보여준 사례다.

2023 글로벌 OT 및 사이버보안 현황 보고



자료: 포티넷

- 1
공장이나 시설의 각종 기계나 공정을 제어하기 위한 시스템
- 2
악성소프트웨어(malicious software) 또는 악성코드(malicious code)에서 나온 말로, 남에게 피해를 입히기 위해 개발된 소프트웨어를 의미한다.
- 3
랜섬웨어는 ‘랜섬(ransom(몸값))’과 ‘소프트웨어(software)’의 합성어다. 시스템을 잠그거나 데이터를 암호화해 사용할 수 없도록 만든 후 이를 빌미로 금전을 요구하는 악성프로그램을 일컫는다.



사이버공격을 받은 미국 최대 송유관 운영사 콜로니얼 파이프라인은 해킹 범죄 단체에 거의 500만 달러 (약 56억7000만 원)를 추적하기 어려운 가상화폐로 지불했다.

보안 전문가 없는 OT 산업

OT 환경의 보안이 미약한 이유는 보안 전문가가 없기 때문이다. IT나 ICT에서 말하는 보안은 OT에서의 보안과 의미가 다르다. 한 OT 보안 전문가는 IT에서 말하는 보안이 ‘사이버 시큐리티^{cyber security}’라면 OT에서 말하는 보안은 ‘안전^{safety}’이라며, 서로 관점이 다르다고 지적했다.

“OT는 기본적으로 폐쇄망입니다. PLC나 RTU, HMI 등 공장에서 운영하는 생산망과 설비망, 공정망은 내부적으로만 통신하며 제품을 생산하기 때문에 공장 운영자는 사이버보안에 대해 아예 생각조차 하지 않습니다.”

상황이 이렇기에 OT에서 사이버 위협에 대해 아무도 모르는 것이 현실이다. IT 혹은 ICT 산업은 그동안 크고 작은 사건·사고를 겪으면서 적어도 ‘보안에 대한 인식’과 최소한의 ‘보안을 위한 투자’에 대한 공감대를 형성했다. 다른 업무와 겸직을 할지언정 최소한 보안 담당자를 두거나, 법을 지키기 위해 정보보호 관련 인증을 획득하고, 보안 솔루션을 구입하는 것에 대해 수긍한다. 그런데 공장에는 사이버 보안은 고사하고 IT나 ICT 전문가도 없는 상황이다. 물론 어느 정도 규모가 있는 공장에서는 본사에 IT나 ICT, 보안 전문가가 있지만 그들 역시 공장에서의 보안에 대해서는 모르는 것이 현실이다.

사이버 위협, 인명 피해까지 발생 가능

한 OT 보안 컨설턴트는 “공장 등 대규모 생산 시설은 한 번 생산이 멈추면 천문학적 피해를 입기에 보안 솔루션 구입이나 기본 업데이트 등을 꺼린다”고 말하며 “하지만 그러한 조치를 취하지 않으면 더 큰 피해를 입을 수 있다는 사실을 알아야 한다”고 우려했다.

이는 OT 보안과 관련한 전문가들이 입을 모아 지적하는 부분이다. 특히 공장 등 생산 시설에서 자칫 사이버 위협으로 생산 중단을 넘어 물리적 사고가 발생할 경우 인명 피해까지 발생할 수 있다고 강조한다. 예를 들어 고열로 작업하는 공정에 사이버 위협으로 온도



2018년 대만 반도체 기업 TSMC가 랜섬웨어 공격으로 천문학적 피해를 입으면서 글로벌 반도체 기업 삼성전자와 SK하이닉스 등 여러 기업이 OT 보안을 심각하게 고민하기 시작했다.

제어가 되지 않을 경우 현장에서 일하는 근로자에게 물리적 피해를 줄 수 있다는 설명이다. 이에 일부 OT 보안 전문가는 “정부에서 스마트공장을 적극적으로 추진하는 만큼 보안에 대한 강제 조항을 만들어서라도 보안을 강화하는 것이 필요하다”고 주장한다.

다행히 세계적 OT 기업이 연이어 사이버공격을 받으면서 관련 기업이나 기관이 이에 대응하기 시작했다. 특히 2018년 대만 반도체 기업 TSMC가 랜섬웨어 공격으로 천문학적 피해를 입으면서 글로벌 반도체 기업 삼성전자와 SK하이닉스가 보안을 심각하게 고민했고, 2021년 콜로니얼 파이프라인 사건 이후 사회 주요 기반 시설과 정부 기관이 보안의 중요성을 깨닫기 시작했다. 특히 우리나라는 2020년 스마트 공장 3만 개, 스마트 산업단지 열 곳을 조성한다는 정부 방침을 내세운 터라 OT 보안 강화에 적극적일 수밖에 없었다.

ICS를 위한 다섯 가지 보안 대책

미국 국토안보부^{DHS} ‘심층 방어 전략을 통한 ICS 사이버보안 개선’ 연구 보고서

- ① ICS에 대한 모든 네트워크 연결을 식별, 최소화 및 보호한다.
- ② 불필요한 서비스, 포트·프로토콜을 비활성화해 ICS-지원 시스템을 강화하고, 사용 가능한 보안 기능을 활성화하며, 강력한 구성관리 사례를 구현한다.
- ③ ICS, 네트워크와 상호 연결 보안을 지속적으로 모니터링하고 평가한다.
- ④ ICS 시스템과 네트워크 보안에 대한 위험 기반 심층 방어 접근 방식을 구현한다.
- ⑤ 인력 관리- ICS의 요구사항을 명확하게 식별하고, 성능의 기대치를 설정하며, 개인의 성과에 대한 책임을 지게 한다. 정책을 수립하고 모든 운영자와 관리자에게 ICS 보안 교육을 제공한다.

미국 시작으로 주요 국가 및 기업 OT 보안 강화

세계 주요 공장과 기반 시설이 연이어 사이버공격을 당하자 미국 국립표준연구소^{NIST}는 ‘산업 제어시스템 보안 가이드^{NIST SP 800-82}’를 발표했다. 또 미국 국토안보부^{DHS}도 ‘심층 방어 전략을 통한 ICS 사이버보안 개선’이라는 이름의 연구보고서를 통해 유관 기관 및 기업이 ICS 보안을 강화하게 했다. 이 보고서는 주요 보안 대책 다섯 가지를 통해 ICS에서의 보안 환경을 구축하도록 했다.

우리나라도 2017년 한국인터넷진흥원^{KISA}의 ‘스마트공장 주요정보 유출방지 가이드’를 시작으로 스마트공장 보안 문제 해결에 나섰다. 이후 KISA는 한국산업단지공단과 함께 스마트제조 분야 보안 강화를 위한 MOU를 맺고 스마트공장의 보안점검 및 컨설팅 서비스를 추진했다. 2021년에는 스마트공장 보안 담당자가 스마트공장 보안 위협을 식별하고, 식별된 보안 위협에 대응하기 위한 보안 요구 사항, 보안기술, 보안 솔루션을 제시함으로써 실제 스마트공장 보안 강화에 활용할 수 있도록 ‘스마트공장 보안모델’을 발표했다. 또한 2022년에는 과학기술정보통신부와 KISA가 ‘찾아가는 보안리빙랩’을 통해 스마트공장 제조·운영 설비에서 발생하는 융합보안 문제를 해결하기 위한 현장 점검을 추진했다.

이렇게 세계 각국과 기업은 OT 혹은 ICS의 보안을 강화하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 이는 앞서 설명한 것처럼 OT 분야에서 보안 사건이 발생할 경우 기업이나 기관, 나아가 국가의 근간을 흔들 정도로 큰 피해가 발생하기 때문이다. 하지만 아직도 OT나 ICS는 IT만큼 보안에 대한 대비나 인식이 바뀌지 않은 것이 사실이다. 게다가 OT 보안에 대해 능숙한 전문가를 찾기도 힘들다. 따라서 현장에 알맞은 OT·ICS 보안 솔루션을 구축하는 한편, 이미 활성화된 OT·ICS용 IT 보안 솔루션을 함께 적용하는 것이 필요하다. 무엇보다 OT·ICS 환경에서 보안을 총괄할 책임자와 담당자, 담당 부서를 명확하게 하고 보안 업무를 맡기는 것이 시급하다. 아울러 OT와 ICS 환경의 특수성과 보안의 중요성을 임직원 모두 공유하고 실천하는 마음가짐이 중요하다.

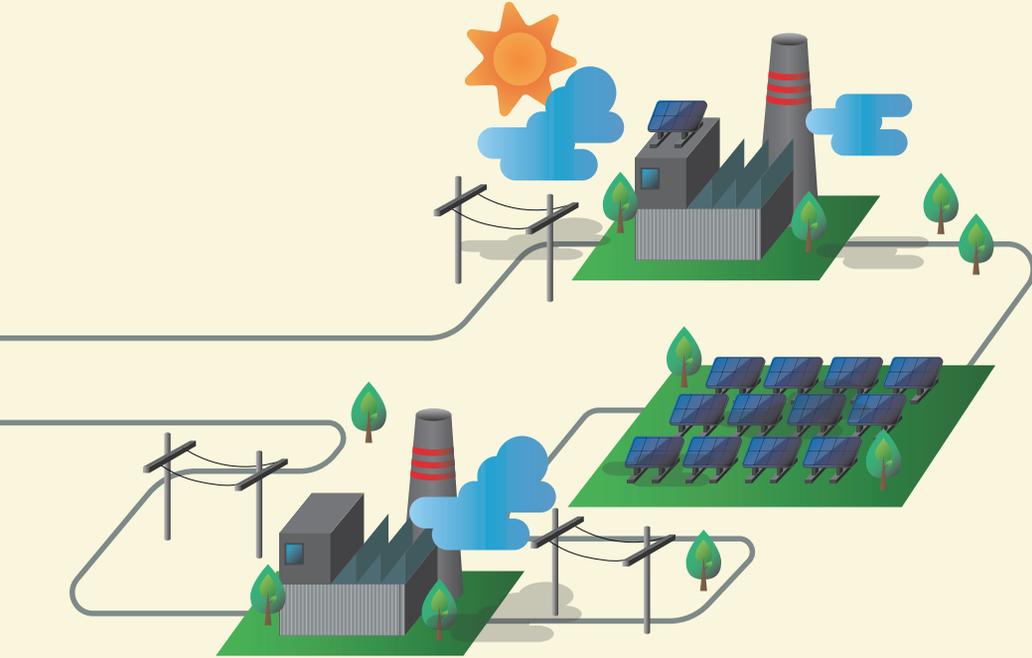


원병철 <보안뉴스> 기자

물리보안 전문지 <시큐리티월드>와 사이버보안 전문지 <보안뉴스>에서 약 15년간 근무한, 국내 몇 안 되는 물리보안과 사이버보안 모두를 경험한 보안 전문 기자다. 특히 2012년 산업기술 보호와 관련한 공로를 인정받아 지식경제부 (현 산업통상자원부) 장관상을 받았으며, 2017-2019년 한국정보보호학회로부터 정보보호기자상을 수상했다.

탄소 줄이는 똑똑한 전력망 스마트그리드

지구온난화로 여름 기온이 치솟는 상황에서 사람들의 걱정을 덜 수 있는 효과적인 방법은 없을까? 국내외 에너지 전문가들은 전기료 폭등 및 블랙아웃 위협에 가장 이상적으로 대응할 차세대 기술 중 하나로 스마트그리드를 주목하고 있다.



현대적으로 지능화된 전력 시스템

스마트그리드^{smartgrid}는 영단어 ‘smart(똑똑한)’와 ‘grid(전력망)’의 합성어로, 국내에서는 ‘지능형전력망’이라고 부른다. 정부는 이미 지난 2011년에 스마트그리드 보급 및 확산을 위해 ‘지능형전력망(스마트그리드) 구축 및 이용 촉진에 관한 법률’을 제정하고 관련 기기와 인프라 등을 보급·실증 중에 있다. 이 법에 따르면 스마트그리드는 정보통신기술^{ICT}을 적용해 전기 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환, 에너지 이용 효율을 극대화하는 전력망으로 정의하고 있다.

쉽게 말해, 현재 전력 시스템이 소수 공급자 중심의 수직적·단방향(한전 → 소비자)인 반면, 스마트그리드는 다수의 전력 생산자와 소비자 사이의 실시간 상호작용 및 정보교환에

기반한 분산적·양방향(한전, 신재생에너지 발전사업자, 구역 전기 사업자 등 ↔ 소비자) 네트워크라고 볼 수 있다.

국내외 에너지 전문가들은 스마트그리드가 일상적으로 사용하는 전기를 수요관리 차원에서 보다 효율적으로 관리하고, 더 많은 에너지를 저렴하고 친환경적으로 생산할 수 있게 해주는 현대적이고 지능화된 전력 시스템이라고 강조한다. 특히 최근 전 세계적으로 화두가 되는 에너지전환, 탄소중립, RE100 등의 기후변화 대응과 관련해 재생에너지를 통합하고 탄소배출량 감소를 촉진하며 최적화된 운영관리를 통해 에너지 효율을 향상시키는 지속 가능한 차세대 전력 시스템으로 주목하고 있다.

스마트그리드란?

정보통신기술을 적용해 전기 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환, 에너지 이용 효율을 극대화하는 전력망이다.

기존 전력망과 스마트그리드 비교

자료: 미국 전기전자학회

| 구분 | 기존 전력망 | 스마트그리드 |
|--------|------------------------|------------------------------------|
| 통제시스템 | 아날로그 | 디지털 |
| 발전 | 중앙 집중형 전원 | 중앙 집중형+분산형 전원 |
| 송배전 | 단방향(공급자 위주), 비실시간 | 양방향(수요 공급 상호작용), 실시간 |
| 미터링 | 전자 기계적 미터링 | 디지털 미터링, RTP 9 가능 |
| 전력 공급원 | 중앙 전원, 화석연료 위주 | 분산 전원 포함(신재생, 전기차) |
| 제어시스템 | 국지적·제한적 제어 | 광범위·자동적 제어 |
| 운전 | 수동 감시, 정기적 유지보수 | 자동 감시, 상태 기반 유지보수 |
| 고장 복구 | 수동 복구 | 자가 복구 |
| 신뢰도 | 신뢰도 낮음 / 사고 파급 / 수동 대비 | 신뢰도 높음 / 사고 파급 한정 또는 자동 치유 / 자동 대비 |
| 시스템 흐름 | 정해진 방향의 전력 흐름 | 네트워크, 다양한 전력 흐름 |

탄소배출 감축을 위한 친환경 전력망

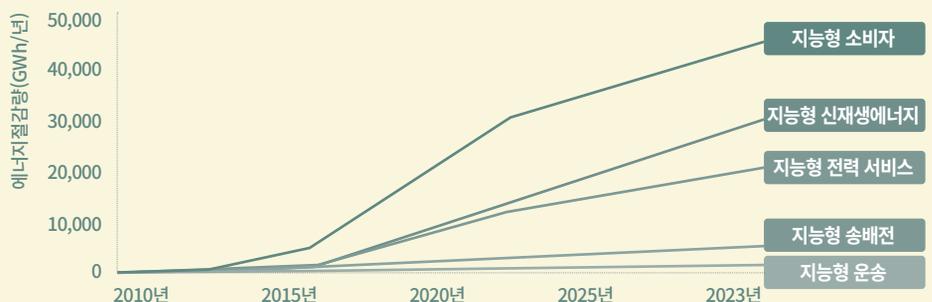
정부는 탄소중립이라는 국가 비전 선포 후 최근 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획을 통해 2030년까지 2018년 대비 온실가스를 40%까지 줄이겠다고 국제사회에 약속(국가온실가스 감축목표^{NDC 1})했다. 이 목표를 성공적으로 달성하기 위해서는 화력발전 사용을 최대한으로 줄이고, 태양광·풍력 등 다양한 신재생에너지를 대체 사용해야 한다.

스마트그리드는 국가의 장기적 도전 과제인 신재생에너지 보급과 밀접하게 연관되어 있다. 태양광·풍력 등 신재생에너지 보급 확대의 가장 큰 걸림돌은 날씨 같은 외부 요인의 영향을 받아 발전량이 일정하지 않고, 이에 따라 전력 품질이 고르지 않다는 것이다. 하지만 스마트그리드를 도입하면 이를 충분히 해결할 수 있다.

한편 전기는 특성상 생산과 소비가 동시에 이루어지며, 남은 전기는 따로 저장할 수 없어 버려야 한다. 따라서 계획적으로 생산해야 하지만, 우리는 일정한 패턴으로 전기를 사용하지 않기에 실수요를 정확히 전망해 그에 상응하는 전기 생산 계획을 세우기란 상당히 어려운 일이다. 이에 따라 기존 전력망 시스템은 최대 전기 소비량을 일자별·시간별로 예측하고, 여기에 여유분으로 15% 정도의 예비 전력을 추가한 양만큼 전력을 생산하는 식으로 운영하고 있다. 이는 많은 발전설비와 화석연료가 필요하며 이산화탄소 배출량도 필요 이상으로 늘어난다. 버려지는 많은 양의 전기는 에너지 낭비를 일으킬 뿐 아니라, 탄소배출 감축을 통해 탄소중립으로 나아가는 과정에 큰 걸림돌이 된다.

지능형전력망 분야별 에너지절감 효과

자료: KSEE



— 1
Nationally Determined Contribution: 기후변화 파리기후변화협약에 따라 당사국이 스스로 발표하는 국가온실가스 감축목표를 의미.

마이크로그리드란?

스마트그리드의 하위개념으로 제한된 소규모 지역에서 태양광 및 풍력 등의 분산에너지원과 부하를 통합 관리해 전력을 자체 생산·저장·소비하는 전력망이다.

불필요한 에너지 낭비를 막아라

스마트그리드 기술의 핵심인 첨단 계량 인프라¹(Advance Metering Infrastructure, AMI)는 전기 수요자와 공급자가 전력발전량 및 사용량 정보를 실시간으로 교환하며 필요한 전기량을 파악해 즉시 생산할 수 있는 시스템이다. 빅데이터, 인공지능, 사물인터넷 등 4차 산업혁명을 이끄는 핵심기술을 활용해 실시간 전력 데이터 분석 및 정확한 전력 수요 예측으로 적정 전력에 비율을 확보하고, 불필요한 설비투자 절감 효과를 도출하며, 불필요한 에너지 낭비를 방지할 수 있는 핵심기술이 바로 스마트그리드다. 한편, 최근 세계적으로 더 많은 소비자가 온실가스를 대량으로 배출하는 기업에 대해 사회적 책임을 묻기 시작했다. 특히 구글, 애플, 마이크로소프트 등 전 세계 글로벌 기업들 중심으로 RE100 캠페인² 가입을 통해 자사에서 사용하는 전력을 재생에너지로만 쓰는 추세다. 특히 제조업 기반의 부품 및 서비스 수출 비중이 높은 한국 기업에도 RE100을 강력하게 요구하고 있는 상황이다. 따라서 이제 RE100은 기후 위기 대응을 넘어 국내 주요 기업의 수출경쟁력과 직결되기에 삼성전자, SK, LG전자, 현대자동차, 카카오 등 국내 주요 기업들도 RE100 캠페인에 잇따라 가입하며 재생에너지 전환에 박차를 가하고 있다.

‘프로슈머’ 역할을 가능케 하는 차세대 첨단 기술

‘광주에 거주하고 있는 A 씨는 아파트 옥상 등 공용부지에 설치된 태양광 설비를 통해 생산한 전력을 가정에서 사용하고, 남은 전력을 전력 중개 시장을 통해 추가 수익을 창출하고 있습니다.’

위 사례는 현재 광주광역시 소재 아파트를 대상으로 ‘규제특례’를 적용해 스마트그리드 기반의 다양한 전력 서비스를 구현하는 국책사업(‘미래형 스마트그리드 실증연구사업’) 내 용을 예로 소개한 것이다. 우리 세대는 에너지 사용과 관련해 혁신 기술을 바탕으로 큰 변화

를 맞이하고 있다. 기존 에너지 산업은 소비자와 공급업체 사이에 일방적 공급 관계가 존재했는데, 이제는 기존 제도와 정책 정비를 통해 점점 더 많은 에너지 소비자들이 자체적으로 에너지를 생산하고 양방향 소통을 통해 직접 거래가 이루어지는 시대가 오고 있다. 우리는 이런 에너지 소비자들을 프로슈머³라고 부른다. 스마트그리드는 분산에너지원 중심으로 독립된 전력 시스템을 통해 에너지 자급자족을 가능케 하는 ‘마이크로그리드’ 기술로 전력 생산·사용·판매 등과 관련된 주도적 소비자로서의 역할과 권한을 제공할 수 있는 차세대 첨단기술이다.

마이크로그리드^{microgrid}는 스마트그리드의 하위개념으로 제한된 소규모 지역에서 태양광 및 풍력 등의 분산에너지원과 부하를 통합 관리해 전력을 자체 생산·저장·소비하는 전력망이다. 기존의 중앙 집중식(한전 → 소비자) 전력망에 의존해 일방적으로 전력을 공급받는 것이 아니라, 기존 광역 체계로부터 독립되어 재생에너지를 기반으로 작은 범위에서 전력을 생산하고 소비하는 것을 의미한다.

안전성과 효율성 증진을 위한 대안 ‘마이크로그리드’

즉 마이크로그리드는 분산에너지원을 활용한 소규모 ‘자급자족’ 전력 체계를 뜻한다. 최근 전 세계적으로 대학 캠퍼스와 농공 산단, 지역 관광단지 등 지역 또는 산업 형태를 고려해 에너지 자립 모델로서 마이크로그리드를 구축·운영하는 사례가 증가하는 추세다.

특히 우리나라는 주민 수용성 등의 이슈로 발전소 송전선로 건설이 지연돼 공급이 불안정한 상태이므로 다른 효과적인 대안 도입이 필요하다. 이러한 측면에서 별도의 송전설비가 필요하지 않은 소규모 마을 단위의 마이크로그리드가 과거 대규모 발전소 위주의 전력 공급 방식에 비해 안정성과 효율성을 증진할 수 있는 좋은 대안으로 부상하고 있다.

신재생에너지 중심의 마이크로그리드는 전기

— 2

RE100 캠페인은 2014년 국제 비영리 환경단체 ‘클라이밋 그룹(The Climate Group)’과 CDP가 연합해 발족한 재생에너지 이니셔티브다. RE100 캠페인에 참여하는 기업은 2050년까지 재생에너지원 발전 전력 사용 100% 달성이 목표다.

대표적 규제 현황 및 특례 예시

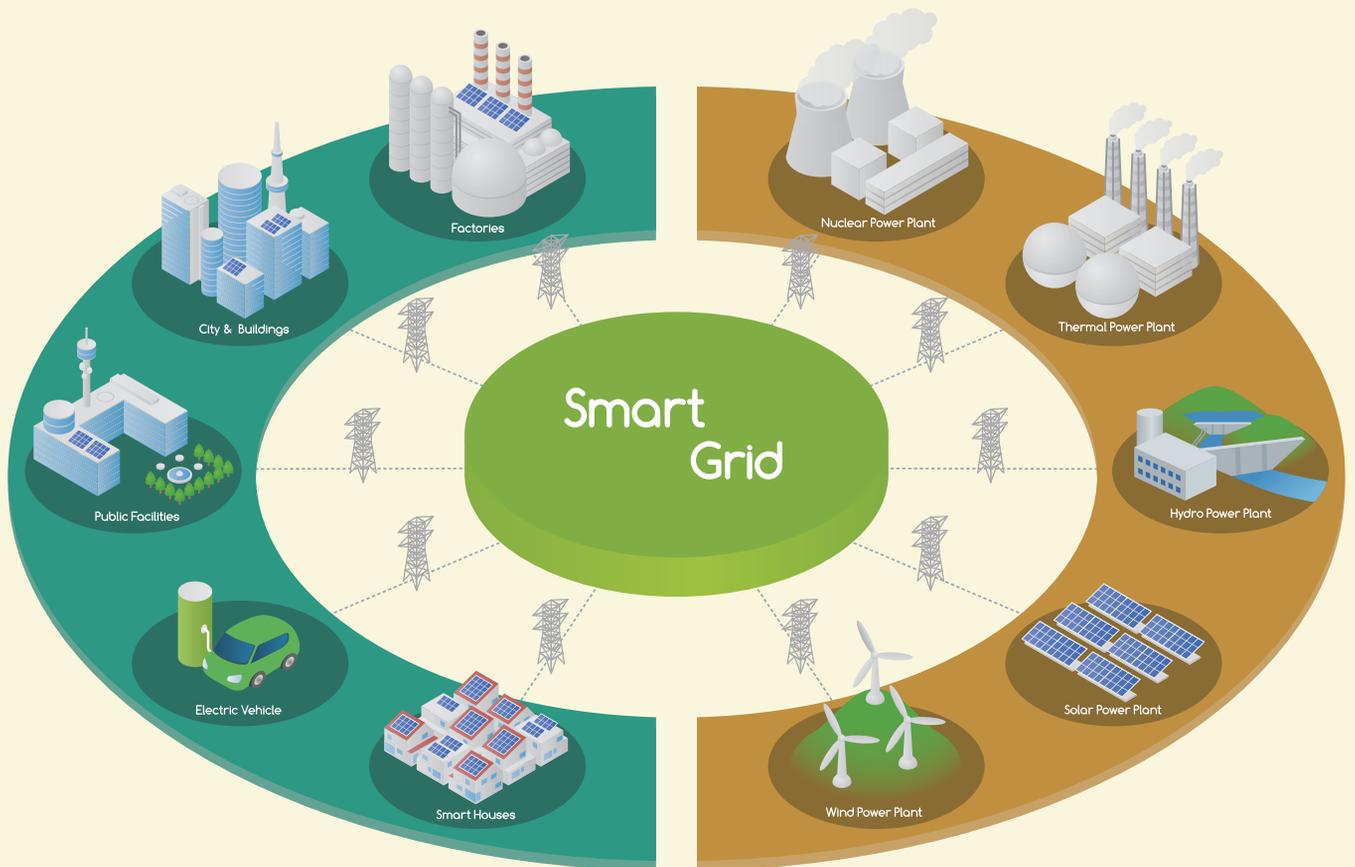
자료: 산업통상자원부

| 기존(전기사업법) | 규제 특례 |
|------------------------|-----------------------------|
| 두 종류 이상 전기사업 불가(제7조) | 분산에너지 사업자 복수 사업 허가(발전 및 판매) |
| 전력시장을 통한 거래만 허용(제31조) | 생산자·소비자 간 자율적 전력 거래 허용 |
| 사용자는 직접 전력 거래 불가(제32조) | 전기 사용자 전력 직접구매 허용 |

를 생산하고 생산된 전력을 비축해두었다가 부족할 때 쓰거나 필요한 곳에 활용할 수 있게 해주는 에너지저장장치^{ESS}와 지역 내 풍력, 태양광 등 신재생에너지원과 ESS 등을 제어할 수 있는 에너지관리시스템^{Energy Management System, EMS} 등의 스마트그리드 핵심 장비에 기반을 두고 있다.

지난 10년간 우리 정부 및 관련 산업 유관기관들은 전력 시스템 안정성과 효율성 향상을 목표로 AMI, ESS 등 스마트그리드 핵심 기기

보급 및 확산을 통해 인프라를 확충했고, 산업 활성화를 위한 정책·제도 혁신 및 개선을 위해 지속적으로 노력하고 있다. 현재는 더 나아가 분산에너지원 중심의 탄소중립 시대로의 전환이라는 글로벌 도전 과제에 효과적으로 대응 가능한 첨단기술 솔루션으로 발전하고 있다. 국가적으로는 기후변화와 관련한 국제공조 대응에 적극 기여하고, 국민 개개인의 삶을 사회경제적으로 보다 편리하고 지속 가능하도록 변화시킬 것으로 기대된다.



안아람 한국스마트그리드사업단 전략경영실장

국제에너지기구^{IEA} 산하 스마트그리드 분야 글로벌 협력을 위해 27개 에너지정부가 참여 중인 ISGAN의 사무국 역할을 2011년부터 수행 중이며, 지능형전력망 산업 유공으로 2020년 산업통상자원부 장관 표창을 받은 바 있다. 현재 한국스마트그리드사업단 전략경영실장을 맡고 있다.

배터리 3사가 탄소중립에 대처하는 법

배터리 산업은 탄소중립에 필요한 핵심 업종으로 분류되지만 제조 과정에서 환경오염이 심해 규제가 강화되고 있다. 국내 배터리 3사는 전고체 배터리 개발은 물론 공급망 관리 강화, 탄소상쇄, 자원순환 개선을 통해 탄소중립에 속도를 내고 있다.

word 이승균 <환경ESG> 기자

배터리 산업은 전기차 배터리와 에너지저장장치^{ESS} 등 온실가스 감축 분야에서 다양하게 활용될 수 있어 탄소중립을 위한 핵심 산업으로 분류된다. 그러나 리튬·코발트·니켈·흑연 등 원재료가 되는 광물을 채굴하거나 제련·정제하는 과정에서 수질과 토양이 오염되고 다량의 온실가스를 배출해 배터리 제조사와 전후방 산업에 대한 규제가 강화되고 있다. 지난 3월 유럽의회 본회의를 통과한 ‘EU 배터리 법안’이 대표적 배터리 규제다. 이 법은 2026년부터 제품 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량에 따라 배터리를 분류하도록 하는 내용을 담고 있다. 유럽연합^{EU}은 이를 토대로 2027년부터 배터리 제조 과정에서 온실가스 배출 상한선을 준수하도록 요구할 예정이다.

배터리 이력 추적하는 배터리여권제도

EU가 2026년부터 시행하는 배터리여권제도도 눈여겨봐야 한다. EU 역내에서 거래되는 2kWh 이상 모든 산업용·자동차용 배터리 생산과 이용·재활용 등 전과정 이력은 디지털로 기록해 공유해야 한다. 이력이 확인되지 않은 배터리는 판매가 금지된다. 배터리의 온실가스 감축과 제품 전과정평가^{LCA}를 강제하는 셈이다. 한국의 배터리 3사인 LG에너지솔루션, 삼성SDI, SK온도 완성차업체의 전기차 라인업 확대와 판매량 증가에 힘입어 환경경영을 강화하고 있다. 탄소중립 목표를 수립하고 재생에너지 사용을 늘리며 배터리 재활용, 재사용 원자재 비중을 높이는 등 온실가스 감축에 나서고 있다. 지속가능경영 보고서와 각 사가 제공한 자료 등을 토대로 LG에너지솔루션·삼성SDI·SK온도의 전고체 배터리 개발 현황, 탄소중립 목표와 달성 전략, 온실가스 배출량과 집약도, 감축 추이 등을 분석했다.



삼성SDI 2027년 전고체 상용화 목표

전해질을 액체 대신 고체로 쓰는 전고체 배터리 기술은 에너지밀도가 높아 경제적인 데다 안정성이 높고 탄소감축에도 도움이 될 것으로 보인다. 유럽 환경단체 교통과 환경^{T&E}의 조사에 따르면, 전고체 배터리는 에너지밀도가 높아 제조 과정에서 리튬이온배터리와 비교할 때 탄소배출량이 최대 39% 적은 것으로 알려졌다. 전고체 배터리에서는 삼성SDI가 가장 빨리 움직이고 있다. 삼성SDI는 황화물계 전고체 배터리를 개발 중이다. 수원 연구소에 파일럿 라인을 착공했고, 올 상반기 준공을 마치고 샘플 제작에 나선다. 2025년까지 전고체 공급망을 확보해 배터리 3사 중 가장 빠른 2027년 양산에 돌입한다는 계획이다. SK온도 전고체 배터리 투자를 이어가며 양산 일정을 앞당기고 있다. 2025년까지 대전 배터리연구원에 4700억 원을 투자해 전고체 배터리를 개발한다. 이번 투자로 실험실을 구축해 대규모 양산 기술을 확보하고, 전고체 파일럿 생산 라인 설치까지 마무리하기로 했다. 2024년 하반기 시제품을 개발하고, 2028년 내 상용화한다는 계획이다.

LG에너지솔루션은 기존 배터리 라인의 생산효율성을 증대하기 위해 최근 오창 에너지 플랜트에 6000억 원을 투자하기로 결정하면서 속도 조절에 나서는 모습이다. 또 2030년까지 리튬이온배터리가 시장을 주도할 것으로 예상되는 만큼 황화물계 전고체 배터리를 2030년 안에 상용화하기로 했다.

SK온·LG에너지솔루션 스코프 3 목표 수립

SK온은 배터리 3사 중 가장 도전적인 탄소중립 목표를 수립했다. 2030년까지 재생에너지 사용 100%(RE100) 목표를 달성하고, 이를 바탕으로 2035년까지 넷제로를 실현하기로 한 것이다. 탄소중립과 달리 넷제로는 탄소포집저장기술을 토대로 순배출량을 0으로 만들어야 한다. 실제 SK온은 탄소포집과 활용 기술, 타 제품과의 환경 기술 우위 등을 토대로 넷제로를 달성한다는 계획이다. 스코프 3(공급망을 포함한 총외부배출량) 감축목표도 수립했다.

LG에너지솔루션은 2030년까지 RE100을 달성하고 2040년까지 탄소중립을 실현한다. 공급망(밸류체인)에서 배출하는 온실가스는 2050년까지 모두 감축한다.

삼성SDI는 배터리 3사 중 가장 늦은 2050년을 탄소중립 목표 연도로 정했다. 스코프 3와 관련한 구체적 계획은 아직 없다.

배터리 3사 온실가스 감축 관련 주요 목표

자료: 각 사 제공

| 기업명 | 탄소중립 | RE100 | 스코프 3 |
|----------|------------|-------|-------------------|
| LG에너지솔루션 | 2040년 | 2030년 | 2050년 |
| 삼성SDI | 2050년 | 2050년 | × |
| SK온 | 2035년(넷제로) | 2030년 | 2050년(절대량 70% 감축) |



SK온은 2025년까지 대전 배터리연구원에서 4700억 원을 투자해 전고체를 개발한다. 사진은 SK 이노베이션 배터리 공장



LG에너지솔루션은 2040년 탄소중립 달성 이후에도 이를 기반으로 국제사회의 탄소감축 요구에 능동적으로 대응한다는 계획이다.

공급망 감축, 탄소상쇄

기업별로 살펴보면, LG에너지솔루션은 저탄소 소재를 활용한 제품 개발, 원재료 재활용과 재사용, 탄소상쇄에 주력한다. 전력 외 사용하는 연료를 바이오매스, 수소 등 대체에너지로 전환하는 탄소상쇄 프로그램을 개발하고 있다. 2040년 탄소중립 달성 이후에도 이를 기반으로 국제사회의 탄소감축 요구에 능동적으로 대응한다는 계획이다. LG에너지솔루션은 2021년 4월 배터리업계 최초로 RE100에 가입하는 등 재생에너지 전환에 속도를 내고 있다. RE100 가입 이전에도 폴란드 브로츠와프와 미국 미시간주 공장에서 녹색요금제와 재생에너지 공급 인증서^{REC}를 통해 재생에너지 사용을 늘려왔다. 글로벌 생산 공장은 2025년까지 100% 재생에너지로 전환하고, 충북 오창과 중국 난징 공장은 재생에너지 사용 비중을 매년 늘려 2030년까지 RE100을 달성할 예정이다. LG에너지솔루션은 LCA를 통해 협력사 단계에서 발생하는 온실가스 감축에 적극적이다. 협력사의 RE100 지원을 주요 감축 전략으로 포함하고 있다. 직접 협력사 외에도 2차·3차 협력사로 탄소감축 활동을 확대하고 있다. 배터리 재사용·재활용을 위한 시범사업에도 적극적이다. 오창에 폐배터리를 활용한 전기차 충전소를 설치하고, 제주에 신재생발전을 연계한 에너지저장장치 설비를 시범 운영하고 있다.



자원순환, 재생에너지 조달 다각화

삼성SDI는 기후변화 대응과 자원순환을 중심으로 탄소중립을 달성한다. 배터리의 탄소발자국을 측정하고 자원 회수 시스템을 확대해 공급망 온실가스를 최소화한다. 전기차 배터리 제품의 LCA를 통해 환경영향을 최소화하기 위한 다양한 시도를 하고 있다. 광물 원자재 회수 프로세스와 폐배터리 재활용률도 개선 중이다. 생산과정에서 발생한 원자재 조각(스크랩) 회수, 전문 업체와 협력해 제조공정에서 배출되는 원자재의 재활용 프로세스를 운영하고 있다. 리사이클 연구소를 신설해 관련 기술개발에도 속도를 내고 있다. 삼성SDI는 2050년까지 국내외 사업장의 사용 전력을 100% 재생에너지로 전환해 탄소중립을 달성한다. 재생에너지 사용은 2025년 42%, 2030년 65%, 2040년 90%로 점진적으로 확대한다. 헝가리 법인과 중국 텐진 법인에서 2025년까지 재생에너지를 100% 사용하고, 2030년 전체 해외 법인으로 확대해 2050년 국내 사업장까지 모두 재생에너지를 사용한다. 삼성SDI는 2021년 헝가리 법인과 텐진 법인에서 REC를 구매하고, 국내에서는 2020년 녹색요금제 시범 사업에 참여하는 등 재생에너지 조달 방식을 다각화하고 있다. 2021년 한국에너지공단을 통해 RE100 거래 시장에 시범적으로 참가했다. 삼성SDI는 전력 구매 계약^{PPA} 체결도 검토 중인 것으로 알려졌다.

배터리 3사 온실가스 관련 정보

단위: 톤

| 기업명 | 온실가스 배출량(스코프 1+2) | | | 1억 원당 배출량 | 연평균 집약도 증감률 (2017~2021년 구간) |
|----------|-------------------|-------|-------|-----------|--------------------------------|
| | 2019년 | 2020년 | 2021년 | | |
| LG에너지솔루션 | 96만 | 122만 | 134만 | 7.5 | 자료 없음 |
| 삼성SDI | 127만 | 139만 | 157만 | 11.6 | -5.4% |
| SK온 | 1251만 | 1209만 | 1121만 | 23.9 | -3.8% |

2030년 RE100, 2035년 넷제로 목표

SK온의 탄소중립 전략은 모회사인 SK이노베이션을 통해 확인할 수 있다. SK이노베이션은 SK온과 SK아이테크놀로지를 배터리·소재 사업 부문으로 묶어 넷제로 전략을 수립하고 있다. SK이노베이션은 배터리·소재 부문에서 2035년까지 넷제로를 달성하기로 했다. 이는 글로벌 배터리업계에선 가장 빠른 일정으로, 다소 도전적으로 보인다.

SK온의 RE100 달성 목표 연도는 넷제로보다 5년 빠른 2030년이다. 회사는 온실가스 배출과 관련해 넷제로 특별 보고서를 통해 상세한 추정치를 제공하고 있다. 배터리·소재 부문에서 2035년 온실가스 1379만 톤을 배출할 것으로 추정한다. 회사는 배출량의 58%에 달하는 805만 톤을 재생에너지 사용으로 줄인다. 또 SK온의 서산, 헝가리, 미국, 중국 등 국내의 사업장을 순차적으로 재생에너지 사업장으로 전환한다. SK이노베이션은 RE100 달성 시점인 2030년 배터리·소재 부문 전력 사용량을 1만2369GWh로 예상한다. 해당 전력량을 모두 재생에너지로 조달하기 위해서는 태양광 기준 5.7GW급 발전설비(24.5% 효율 기준)가 필요해 다양한 방식의 조달 수단이 요구된다.

다 쓴 태양광 설비, 어떻게 재활용할까?

노후 태양광의 폐기 시점이 다가오면서 폐패널 재활용 시장이 열리기 시작했다. 세계 각국이 다양한 지원책을 내놓으며 시장 확대를 도모하고 있다. 국내에서는 지난 1월부터 태양광 폐패널이 생산자책임재활용제도 적용 품목에 포함돼 시장 확대 기대감이 커지고 있다.

word 이승균 <환경ESG> 기자

재생에너지 확산을 위해 생산한 초기 태양광 설비의 수명이 곧 만료될 예정이다. 태양광 패널의 기대수명은 약 20~25년이다. 그 기간이 지나면 발전 효율이 85%대로 떨어져 설비를 교체해야 한다. 그런데 교체한 노후 태양광 시설을 처리하는 것도 문제다. 현재 노후 또는 훼손을 이유로 교체된 태양광 시설은 대부분 폐기 대상이다. 소형 태양광은 생활폐기물로 분류되고, 5톤 이상 대형 태양광은 건설·산업폐기물로 분류된다. 본격적으로 태양광 폐패널이 급증하는 시기는 2027년으로 예상된다. 2000년대 초 설치한 태양광부터 차례로 재활용 대상이다. 태양광 패널에 들어간 각종 광물은 물리적·화학적 가공을 통해 새로운 용도를 찾을 수 있다. 국제에너지기구^{IEA}와 국제재생에너지기구^{IRENA}에 따르면, 태양광 폐기물 재활용 기술은 태양광 모듈의 원자재 확보 측면만 고려해도 2030년까지 4억5000만 달러 규모의 시장을 형성할 것으로 예상된다.





— 1

n-type과 p-type의 실리콘 반도체를 접합해 오믹 접촉을 형성하며 전면에는 Ag 페이스트를, 후면에는 Al 페이스트를 이용해 형성한다. 여러 방법으로 전극을 형성할 수 있으며, 스크린 프린팅이 대표적 방법이다.

결정질 실리콘 우주 시장 성장

자원순환 관점에서는 새로운 기회의 장이 열리는 셈이다. 세계 각국이 앞다투어 폐패널 재활용 관련 정책을 내놓는 이유다. 유럽연합^{EU}은 2014년부터 폐전기·전자기기 처리 지침^{WEEE}에 태양광 모듈을 포함했다. 이에 따라 EU 국가들은 자국법에 태양광 폐모듈을 처리할 규정을 마련 중이고, 태양광 생산자(제조업체)에게 폐기물 재활용 및 처분에 대한 책임을 부과하고 있다.

우리나라도 지난 1월부터 태양광 폐패널 관리 강화 방안의 하나로 생산자 책임재활용제도^{EPR}를 비롯한 자원순환 프로그램을 시행하기로 했다. 킬로그램당 회수 부과금 94원, 재활용 부과금 727원 등 단위 비용 규정을 신설했다. 폐패널 재활용·재사용률을 3년 안에 EU 수준인 80% 이상으로 끌어올리겠다는 목표를 세웠다. 재활용하기 쉬운 재료와 구조로 모듈 생산을 바꾸고 전담 수거반, 재활용업체 확대, 재사용·재활용 기준 마련을 통해 목표를 달성할 방침이다.

현재 결정질 실리콘 패널¹ 시장점유율이 가장 높은 점을 감안하면 향후 수년간 시장에 등장할 폐패널의 종류도 예측할 수 있다. 태양광 패널의 핵심 부품은 태양전지로, 프레임·유리·밀봉재·태양전지·백시트·정선 박스 등 구조가 일반적이다.

패널 종류에 따라 재활용 방법이 달라질 수 있지만 대부분 ‘폐기물 회수-정선 박스, 프레임 등 부품별 분리-밀봉재 제거-금속 추출-백시트 분리’ 순으로 처리된다. 프레임이나 정선 박스 등을 해체하는 작업은 물리적으로 분해 가능하며, 대부분 알루미늄 소재라 재활용하기도 어렵지 않다. 가장 까다로운 작업은 밀봉재 제거 단계로, 실리콘·구리·은에 달라붙어 있어 금속이 손상되지 않도록 제거하는 것이 핵심이다.

경제성부터 자원순환까지

태양광 패널은 일반적으로 알루미늄 프레임 8%, 강화유리 76%, EVA·백시트(폴리머) 10%, 셀(실리콘) 5%, 기타 금속류 1% 등으로 구성되는 만큼 유리 재활용도 높은 비용을 차지한다. 현재 유리를 포함한 실리콘과 금속은 유리째 파분쇄한 후 재료를 선별하는 방식을 이용하는데, 순도나 오염 문제로 재활용 폭이 좁아진다는 한계가 있다. 패널에 사용한 유리는 유리폼이나 유리섬유 같은 단열재로 재활용할 수 있지만, 금속에 오염돼 위생이 중요한 식품 관련 용도로는 재활용하기 어렵다. 이 때문에 최근 개발한 기술은 판유리를 그대로 회수한 후 유리와 실리콘을 선별하는 방법으로 변화하는 추세다.

현재 재활용 수준이나 기술력으로 볼 때 매립이 가장 현실적 방안이라는 지적도 나온다. 산업연구원이 2017년 발표한 ‘사후관리 체계 구축을 통한 신재생에너지 활성화 방안’에 따르면 폐패널 재활용 효율성은 중장기로 갈수록 급격히 높아진다. 산업연구원은 폐태양광 모듈에 대해 재활용 없이 전량 매립할 경우, 알루미늄 프레임만 재활용한 후 매립할 경우, 폐기물 자원화



태양광 패널 기대수명
20~25년

태양광 폐패널 급증 예상 시기
2027년

태양광 폐기물 재활용 기술 시장 규모
4억5000만 달러
(2030년 예상)

과정을 거쳐 재활용할 경우 등에 대한 시나리오 분석을 진행했다.

그 결과 2020년부터 2029년까지는 알루미늄 프레임만 재활용하고 매립할 때 비용편익률이 가장 높게 나타났다. 하지만 분석 기간을 2020년부터 2040년으로 늘리자 자원화 과정을 거친 재활용이 회수 물질 판매에 따른 수익, 온실가스 저감 효과 등으로 경제성이 더욱 높아졌다.

재활용뿐 아니라 발전설비를 최신형으로 교체해 모듈 자체의 효율을 다시 높이는 리파워링¹도 주목받고 있다. 기존 태양광 모듈은 비바람, 눈 등 계절의 영향으로 노후화되기 쉽다. 리파워링은 기존에 인가받은 부지를 활용하기 때문에 추가적 환경파괴 우려가 없고, 별도의 인가도 불필요하다. 최신 설비로 교체하는 과정에서 기존보다 사용 부지를 줄일 수도 있다. 태양광업계에 따르면, 현재 생산하는 모듈을 적용하면 동일 면적당 최소 50%에서 100% 이상 에너지 효율을 높일 수 있다. 공간과 발전 효율 둘 다 높이는 방안으로 리파워링이 언급되는 이유다.

산적인 규제 넘어야

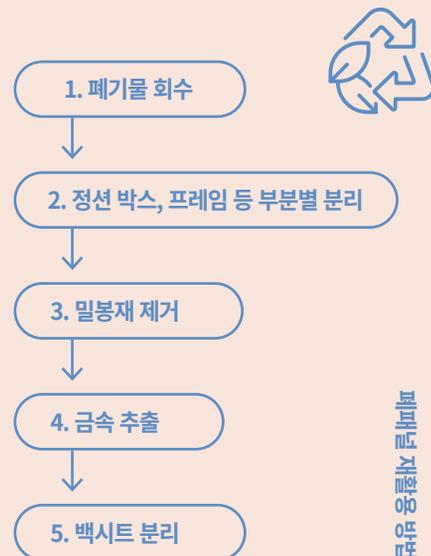
시장 전망은 밝지만 앞으로 넘어야 할 산도 있다. 정부와 연구 기관이 투자한 충북테크노파크의 태양광 모듈 센터를 비롯해 몇몇 민간기관만 재활용 시장에 발을 들인 상황이다. 재활용과 리파워링 두 시장 모두 극초기이기에 정부의 인센티브와 관련한 제도가 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

폐패널 재활용은 결국 EPR²이 중요한 규제이자 시장 유인이 될 것이라는 것이 업계의 예상이다. 규제 시행 이후 5개월이 지났지만, 아직 의무 이행자의 인식 수준이 낮은 데다 재활용 의무량 총량인 159톤이 시장 확대를 이끌기에는 부족한 수준이라는 평가다.

리파워링 역시 기존 규제와의 충돌이 발목을 잡았다. 대표적 장애물은 이격거리 규제다. 이격거리는 위험물이나 혐오시설이 주거시설이나 도로에서 일정 거리 이상 떨어져야 한다는 규정이다. 이격거리 규제는 2015년부터 시행돼 지난해 기준 128개 지자체가 관련 조례를 두고 있다. 지자체별로 이격거리도 제각각이라 태양광발전소의 신규 진입을 막는 대표적 규제로 지적된다. 문제는 2015년 이전에 세운 태양광 설비의 리파워링을 진행하면 설치 이후 생긴 이격거리 규제의 영향을 받는다는 점이다. 정부가 최근 재생에너지 보급 확대를 위해 이격거리 완화 카드를 꺼내 들었지만, 업계와 주민 간 갈등이 지속되고 있어 해결책 마련이 쉽지 않은 상황이다.

— 2

생산자책임재활용제도. 2003년부터 15개 품목(전자제품 5개, 전지(4개), 포장재(4개), 타이어, 윤활유)에 대해 적용되고 있다. 2004년엔 형광등과 필름포장재가, 2005년부터는 오디오, 이동전화단말기 등 대부분의 제품에 적용된다.



산업 디지털 「전환」과 저탄소 기술 「성장」을 선도하는 한국산업기술시험원 **ktl**

ESG경영을 실천하는 KTL은 기술강국 실현을 위해 **국가 표준과 인증 기준에 따라**
국민 안전과 기업 지원을 뒷받침 하는 든든한 공공 종합 시험인증기관입니다.

산업 디지털 전환

- ↻ 인공지능/빅데이터 플랫폼
- ↻ 스마트제조/협동로봇
- ↻ IT융합분야/디지털 ID
- ↻ 스마트홈/IoT
- ↻ 차세대 통신(5G, 6G)
- ↻ 소프트웨어 · 보안

저탄소 기술 성장

- ↻ 미래모빌리티/전기차 충전기
- ↻ 자율주행/기능안전
- ↻ 에너지저장시스템(ESS)
- ↻ 중대형 이차전지
- ↻ 스마트그린산업인프라
- ↻ 청정수소/차세대 핵심 소재

산업기술 · 기업지원 분야

- ↻ 산업 전분야 시험평가 및 인증서비스
 - 전기안전, 기계/시스템, 우주·항공, 국방·조선
 - 바이오의료헬스, 환경기술, 종합교정솔루션 등
- ↻ 국가 시험평가기술 연구개발
- ↻ 수출기업 해외인증획득 지원
- ↻ KTL아카데미 기술교육

—— 1823년에 설립된 매사추세츠 약학보건과학대학은 보스턴에서 가장 오래된 고등 학문 기관으로, 생명과학 산업의 글로벌 허브로 자리매김했다.



MCPHS

생명과학 산업을 위한 최고의 협력



한국산업기술평가관리원^{KEIT}은 최근 미국 보건·생명과학 교육 분야 선두 주자인 매사추세츠 약학보건과학대학^{MCPHS}과 양해각서를 체결했다. 1823년 설립된 MCPHS는 생물학, 화학부터 의료사업에 이르기까지 100개 넘는 프로그램을 캠퍼스 세 곳과 온라인을 통해 제공하고 있다. 이 파트너십은 미국 기업과 대학을 한국의 연구 활동과 연계하는 광범위한 캠페인의 일환으로, 양국 관계를 강화하고 과학 분야 진보를 달성하는 것이 공통의 목표다.

word 프레데릭 프랭크하우저 MCPHS 제약 비즈니스 및 행정 과학 학과장



새로운 파트너십 통한 교육·생명과학 기업 기획 확장

KEIT는 생명과학 산업의 글로벌 허브인 MCPHS와 협력해 한국의 바이오 기술과 제약·의료기기 기업의 연구개발 활동을 강화하는 데 힘쓰고 있다. 보스턴은 소규모 바이오 기술 스타트업부터 큰 제약 회사까지 1000개에 이르는 바이오·제약 기업의 본고장으로, 매사추세츠에 본사를 둔 기업의 의약품 파이프라인은 전 세계 7.2%를 차지한다. 한국의 많은 생명과학 기업이 보스턴에 터전을 잡고 있다.

MCPHS 총장 리처드 J. 레사드^{Richard J. Lessard}는 “MCPHS는 보스턴은 물론 전 세계 여러 조직과 광범위한 네트워크를 맺고 있기 때문에 의료 시장의 니즈를 깊이 이해하고 있다”고 강조하며 “학생들이 완벽한 ‘취업 준비’를 마친 뒤 졸업할 수 있도록 지속적으로 프로그램을 향상시키고 있다. 학생들은 MCPHS 파트너가 지원하는 인턴십과 연구 협력을 통해 실무를 경험하고, MCPHS는 기업을 위한 맞춤 프로그램을 개발해 학생들이 새로운 기술을 배우고 발전할 수 있도록 지원한다”고 덧붙였다.

KEIT와 MCPHS는 초기부터 상호 연구개발 관심사, 제품 인허가 훈련, MCPHS 학생을 위한 인턴십 기회에 중점을 두고 논의해왔다. MCPHS 교수진은 현재 의약품과 의료기기 규제에 관한 미국의 접근 방식을 토대로 한국 기업 직원들에게 제공할 워크숍을 계획 중이다.



미래 인재 훈련

보스턴 외곽에 있는 기업을 비롯한 한국의 생명과학 기업은 MCPHS의 미래 인재 훈련에 기대를 걸어볼 수 있다. 현재 재학생 중 15%가 외국 학생으로, 그중 300명 이상이 한국인이다. 이들은 약학 박사부터 제품 인허가 및 보건정책학 석사, 임상 연구학 석사 등의 학위를 취득하기 위해 노력하고 있다. 또 여러 관점을 중요시하는 다양한 커뮤니티에서 엄격한 훈련을 받은 후 의료계를 발전시키고 글로벌 혁신 경제에 기여할 준비를 갖춘 인재가 되어 졸업한다.

MCPHS의 교무처장 캐럴라인 제인드^{Caroline Zeind}는 “우리 학생들은 학부 생활을 하는 동안 생명과학 기업을 비롯한 다양한 환경에서 성공할 수 있는 실무 기술 등을 습득한다”고 설명하며, “MCPHS는 협력과 팀워크를 강조하는 분위기에서 리더와 문제 해결자를 육성하는 데 뛰어나다”고 자부심을 내비쳤다.

MCPHS 학생들은 보건·생명과학에 집중하는 동급생들과 함께 듣고, 배우고, 문제를 해결할 수 있

는 기회를 제공하는 다양한 프로그램에 참여한다. 14개 학교에서 수십 가지 학문을 배우는 학생들과 함께하는데, 이들이 지닌 전문 지식은 서로 연관성이 있으면서도 차별화된다.

또 학생들은 생명과학 분야의 수많은 직책과 전문화된 업무에서 성과를 내기 위해 다양한 지식과 전문 기술을 습득한다. MCPHS는 최근 몇 가지 프로그램을 통해 학생들을 위한 실습을 강화했다. 이 과정에서 구인 광고를 분석하고, 생명과학 분야 리더들과 논의했으며, 핵자기공명^{NMR}을 비롯해 분광학 기구, 질량 분석계^{MS}, 고성능 액체 크로마토그래피^{HPLC} 장비, 정밀한 알약 조제를 위한 3D 프린터 등 최신 장비를 구매하기 위해 매사추세츠 생명과학센터로부터 63만 달러의 기금을 받았다. 기업들은 MCPHS와의 연구 협력을 통해 장비를 사용할 수 있고, 학생들은 이러한 기기를 다루는 능력을 갖춰 졸업하게 된다.

MCPHS 제약 비즈니스 및 행정 과학 학과장 프레데릭 프랭크하우저^{Frederick Frankhauser}는 “미래의 고용주에게 ‘이 장비를 사용해본 적이 있고 훈련을 받았다’고 말할 수 있는 능력을 갖췄다면 졸업생에게는 분명히 경쟁 우위 요소가 될 것”이라고 강조한다.

MCPHS는 또 기본적인 실험 기법과 실험 설계를 비롯한 지식 및 기술 툴키트를 마련하고 있다. 생명과학 분야에서 커리어를 쌓고 싶은 모든 학부생에게 제공하는 툴키트는 DNA 조작·분석, 단백질 분석, 미생물학 및 세포배양, 실험실 연구 노트, 과학적 소양을 포함한다. 또 일련의 업계 인턴십을 확장해 학습을 보완하는 수단을 제공하기도 한다.



기업의 요구에 맞춘 학위

MCPHS는 학부생 교육 외에도 졸업생이 생명과학 산업에서 의미 있는 커리어를 쌓을 수 있도록 학생들을 배치해주는 대학원 학위를 제공한다. 예를 들어, 의약 화학·약리학·약학 졸업생 학위는 미래의 고용주 요구에 맞춘다. 마찬가지로 MCPHS의 오래된 바이오 약 펠로십 프로그램은 전문가가 생명과학 산업 커리어를 위해 임상 약학 박사를 준비하는 과정이다.

MCPHS는 최근 보건 정보학 석사 및 정밀 의학 졸업증명서 도입 등 프로그램을 확장했다. 데이터 과학·분석 분야도 의약품 개발과 관련 있는 프로그램을 추가로 도입했다.

이처럼 MCPHS는 여러 가지 프로그램을 제공해 현직 전문가가 전문 대학원과 의료사업, 기술 대학원을 통해 발전해나가도록 지원한다. 예를 들어 의료 관리 졸업증명서는 리더십과 전략적 의사결정 능력을 강화하는 데 중점을 두는 시간제 온라인 프로그램이다. MCPHS는 또한 기업과 협력해 주요 직무를 맡은 직원의 능력을 향상하기 위한 맞춤 프로그램을 설계하기도 한다. 예를 들어 MCPHS는 큰 제약 회사와 파트너십을 맺고 제품 인허가 분야의 유능한 인재를 위해 리더십 개발 프로그램을 제공한다.

MCPHS는 수십 년 동안 의료 시장이 변화할 때마다 이에 발빠르게 대응해왔다. MCPHS 학부 및 프로그램에서 생명과학 인력 개발 활동을 조율하기 위해 설립한 매사추세츠 생명과학센터는 산업계와 협력해 이러한 기회를 현실화하고 있다. 생명과학 분야는 보스턴을 비롯해 전 세계에서 급속도로 확장되고 있으며, MCPHS는 성장을 이어나가도록 맡은 역할에 최선을 다하고 있다. KEIT와 협력하는 것도 그 노력의 일환이다.

“이번 양해각서 체결은 본교가 바이오 제약 및 바이오 기술 산업계와 관계를 지속하는 초석이 될 것이며, 동시에 우리 학생들과 교수진에게 산업 파트너와 일하는 기회를 제공할 것이다. 우리와 연결된 사람이라면 모두 이 기회를 함께 누릴 수 있다.” 국제 교류 부교무처장 스티븐 커^{Stephen Kerr}의 말이다.



——매사추세츠 약학보건과학대학은 꾸준히 실험실을 확장하고 새로운 장비를 마련해 학생들이 실무 경험을 쌓을 수 있는 기회를 제공한다.

강유전체 기반 반도체 신소재를 연구한

KIST 이현재 박사

빠른 시간 내에 이윤을 창출해내지 못한다는 이유로 우리가 한동안 돌아보지 않았던 소재공학. 그러나 일본과의 무역분쟁을 계기로 그 중요성이 새삼 부각되었다. 그중에서도 반도체 소재 분야 발전에 일익을 담당해 지난해 원익상을 수상한 연구자를 만나보았다.

word 이동훈 photo 김기남

이현재 박사는 울산과학기술원^{UNIST}에서 에너지공학을 전공했고, 주로 배터리·태양전지 같은 에너지 관련 시스템과 저전력 반도체에 쓰이는 소재 과학을 연구했다. 올해 2월 박사학위를 받아, 현재는 한국과학기술연구원^{KIST}에서 박사후연구원으로 근무하고 있다. 그는 '강유전체 기반 새로운 반도체 소재 개발연구'로 지난해 원익상 연구 분야 우수상을 수상했다.

HfO₂ 기반 강유전체 사용 고집적·저전력 메모리 가능성 제시

이 연구는 컴퓨팅 시스템 핵심 구성 요소인 메모리의 주요한 문제점인 전력 소비를 줄이기 위해 시작되었다. 현대 컴퓨팅 시스템은 무어의 법칙에 따라 계속 집적도를 높여 성능을 향상시키지만, 동시에 전력 소비 증가라는 무시할 수 없는 문제를 안고 있다. 이는 특히 빅데이터와 시가 상용화되어 정보통신 기술의 에너지 효율성이 더 중요해지는 현재 두드러진다. 더구나 소자 크기의 지속적 소형화와 고집적화는 물리적·기술적 한계에 도달하고 있다. 강유전체를 이용한 저전력 메모리 기술은 이러한 한계를 극복하기 위한 것이다. 강유전체는 그 특성상 메모리셀에 저장된 정보를 효율적으로 유지하면서 전력 소비를 크게 줄일 수 있기 때문이다. 강유전체는 특정 방향으로 정렬된 전기 분극을 지닌 소재다. 이 분

극의 방향에 따라 전기적 신호를 0과 1로 구분한다. 이런 특성 때문에 강유전체는 메모리 반도체에 매우 유용하다. 그러나 이 같은 강유전체는 아주 작은 크기에서는 강유전성을 상실하므로, 현대의 반도체소자에 비해 소형화와 고집적화가 어려웠다. 그래서 그가 연구한 강유전체는 HfO₂, 즉 hafnium 산화물이었다. 이 소재는 매우 작은 크기에서도 강유전성을 유지할 수 있기 때문이다. 이를 이용하면 기존 강유전체의 한계를 극복하고 소형화·고집적화된 메모리 반도체를 만들 수 있다.

그러나 이 소재를 제대로 쓰기 위해서는 새로운 연구과제를 풀어야 했다. 소재의 강유전 특성 및 도메인 벽구조와 특성을 알아야 했다. 도메인 벽은 강유전체 내에서 분극의 방향이 바뀌는 지점이다. 도메인 벽의 형태와 위치, 그리고 이동 등은 강유전체의 특성에 큰 영향을 준다.

그는 이 과제를 풀기 위해 제일원리 계산을 적용했다. 이는 물질의 원자와 전자 등 기본적 구성 요소의 행동을 예측하고 이해하기 위해 사용하는 계산 방법이다. 실험 데이터를 사용하지 않고도 양자역학 시뮬레이션을 통해 물질의 전기적·기계적·열적 특성을 예측할 수 있다. 이로써 HfO₂의 강유전성을 이론적으로 규명하고 1nm 이하 크기에서 형성된 부분 분극이 독립적으로 작동할 수 있음을 밝혀냈으며, 각각의 부분 분극들이 독립적이고 안정적으로 정렬될 수 있음을 확인했다. 기존 한계를 극복하고 HfO₂ 기반 강유전체를 이용한 고집적·저전력 메모리의 가능성을 제시하는 데 성공한 것이다.

인공지능과 에너지 등 여러 분야에서 혁신을 이끌어낼 수 있어

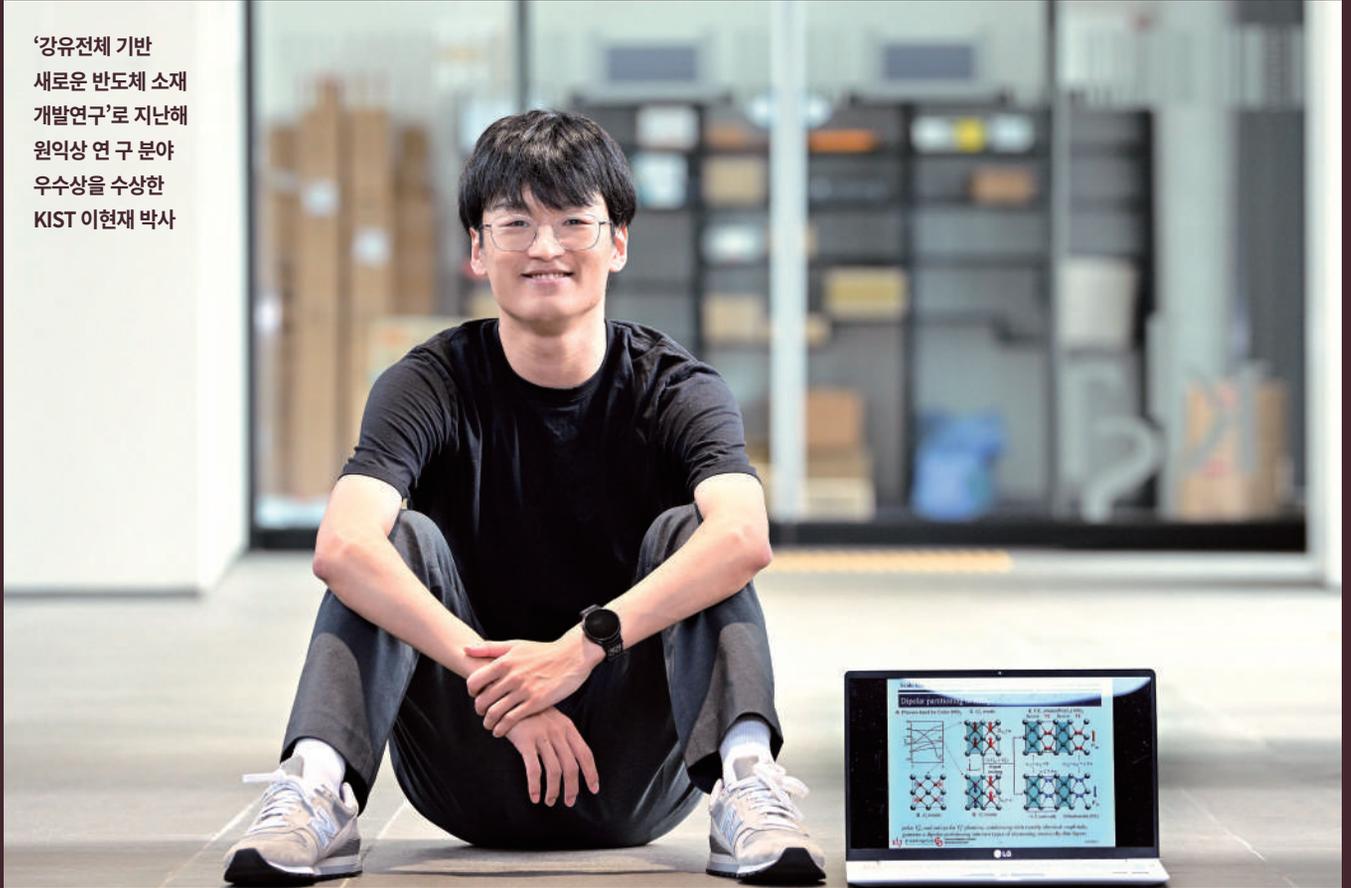
이 연구의 의의성은 또 있다. 원자 레벨의 전기적 컨트롤로 작동하는 인공지능 반도체의 가능성을 입증함으로써 메모리 반도체 시장 뿐 아니라 차세대 FeFET 논리소자, FRAM 메모리 반도체 등 미래 반도체 기술의 혁신이 가능해졌다. 특히 Si를 활용한 여러 정보통신 산업에 폭넓게 이용될 수 있다. 최근 한 기업에서 HfO₂ 3진법 반도체를 구현했다. 가까운 미래에는 이를 기반한 Si 반도체도 구현될

것이라고 이 박사는 전망한다.

또 HfO₂의 물성은 나노미터 이하 크기에서도 유지된다. 이를 이용해 선택적 전기화학 반응이 가능한 나노입자로 활용할 수 있다. 즉 이차전지 등의 분야에서 나노 첨가제로 활용될 수 있다. 이차전지의 음극이나 분리막에 HfO₂를 코팅하면 리튬이온의 선택적 투과와 충·방전 속도를 높일 수 있고, 덴드라이트 생성을 방지해 전지 수명을 늘릴 수도 있다. 에너지산업 등 여러 분야에서 혁신을 이끌어낼 기술이다.

이 연구는 학술지 <사이언스^{Science}>에도 게재되었다. 이는 곧 해당

‘강유전체 기반 새로운 반도체 소재 개발연구’로 지난해 원익상 연구 분야 우수상을 수상한 KIST 이현재 박사



분야의 주요 발견임을 의미한다. 이 박사는 또 이 연구를 바탕으로 고집적·초소형 반도체소자 구조에 대한 특허출원도 진행했다.

그는 “원익상 수상은 개인적 성과가 아니라 제가 속한 연구실 모두의 노력과 응원 덕분에 가능했다. 앞으로는 더욱 겸손하게 연구와 학술 활동에 노력을 기울여 학계와 사회에 기여하는 사람이 되겠다”고 수상 소감을 밝혔다.

현재 KIST에서 소재 과학의 머신러닝 분야를 연구하고 있는 이 박사는 장치 산업계와 협력해 산업 현장의 문제를 해결하는 연구도 하고 싶다고 포부를 밝혔다. 또 그는 학생들에게 좋은 멘토도 되고

싶다고 말했다. 본인 역시 지금까지 어려움에 직면할 때마다 많은 멘토에게 조언을 받았기 때문이다.

그는 후배들에게 세 가지를 당부한다. 첫째, 목표 설정과 그 목표를 이루기 위한 꾸준한 노력. 둘째, 견문을 넓히기 위한 학업 이외의 다양한 경험. 셋째, 실패를 두려워하지 말고 배움의 기회로 삼을 것.

현재 이공계 기피 풍조에 대해 국가적 지원 부족을 그 이유로 꼽으며 안타까워하는 이 박사. 그는 이공계 대학원에 많은 관심을 가져달라는 부탁을 끝으로 인터뷰를 마무리했다. 대학원이야말로 주요 연구 인력인 석박사의 산실이기 때문이다.

요즘은 과학을 재미로 봅니다

과학
커뮤니케이터



과학 커뮤니케이터 이민환

세상이 변함에 따라 새로운 직업도 연일 생겨나고 있다. 과학기술계도 예외가 아니다. 연구소와 생산 현장에서 다양한 장비에 둘러싸여 일하는 사람들 외에도 다양한 직군이 있다. 그중 하나인 과학 커뮤니케이터를 만나보았다.

word 이동훈 photo 이승재

오늘날 우리 삶을 편리하게 해주는 과학기술. 그러나 그 과학기술은 이해하기가 쉽지 않다. 관련 문서를 살펴봐도 수많은 수식과 생소한 전문용어, 그리고 전공자만이 알 수 있는 과학적 원리로 도배되어 있다. 이는 수많은 사람이 과학기술에 대한 이해를 포기하게 만들고, 심지어 반과학적 사고방식을 품게 하는 데까지 일조하고 말았다. 그 때문에 과학기술 정보를 학자의 언어가 아닌 대중의 언어로 흥미롭고도 정확하게 전달해야 할 사람들이 필요해졌다. 요즘은 그런 이들을 과학 커뮤니케이터로 부른다.

요즘 유튜브를 통해 많은 과학 커뮤니케이터가 활동하고 있다. 그러나 과학 커뮤니케이터의 활동 무대는 유튜브 외에도 다양하다. 책, 과학 버스킹(과학 실험 시연을 의미하며, 유명한 사례로 외국 TV 프로그램 <미스버스터^{Mythbuster}> 등이 있다), 과학 주제 연극 등도 과학 커뮤니케이션 활동에 포함된다. 이민환 씨 역시 과학 커뮤니케이터다. 그는 유튜브 채널 <지식인미나니>(www.youtube.com/@iamminani)를 운영하며 다양한 과학기술 관련 콘텐츠를 올리는 유튜버다. 구독자 18만에 실버 버튼까지 받았다. 또 한국예술원 특임교수로 재직하며 후배 크리에이터를 가르친다. 무인탐사연구소^{UEL} 홍보파트장도 맡고 있다. <알수록 쓸모 있는 요즘 과학 이야기>, <요즘 과학> 등 저서도 여러 권이다. 게다가 그가 아직 서른에 불과한 청년이라는 데서 이러한 성취는 더욱 빛난다.

취미 삼아 시작한 유튜브가 어느새 본업으로

사실 그는 처음부터 이쪽으로 들어설 생각은 없었다고 한다. 대구한의대학교에서 한방식품약리를 전공한 그. 대학 시절부터 호기심(과학 분야도 포함) 해결을 테마로 한 유튜브를 운영했다. 마침 그는 학부생 연구원이었는지라 실험 시간 외 노는 과학 장비를 사용해 유튜브 동영상을 촬영하는 것도 가능했다. 졸업 후에는 입시 기업 '진학사'에 취직했다. 직장 생활 중에도 유튜브는 계속했다. 시간이 지나면서 유튜브 관련 일이 점점 많아졌다. 퇴사 후 이직을 준비하는 동안 유튜브만 해도 사는 데 지장이 없을 정도였다. 그래서 아예 유튜브로 전업을 하게 된 것이다. 유튜브 활동을 통해 과학 커뮤니케이터로 알려지자 여러 행사나 강의 등에 꼬리에 꼬리를 물고 초청받아 활동하게 되었다. 그가 과학 커뮤니케이터로 발돋움한 계기는 학창 시절 전공과 유튜브였던 셈이다. 남 밑에서 일하는 것보다는 자기 주도적으로 하는 것을 좋아하는 그의 성향도 이 길을 택하는 데 한몫했다.

사람들의 관심을 끌 과학 주제를 찾아라

개중에는 속도 모르고 “출퇴근 안 하는 프리랜서라서 좋겠다”고 하는 사람도 있다. 그러나 그의 생활은 직장인보다도 철저히 업무 지향적이다. 촬영과 편집, 학교 강의를 없을 때는 늘 유튜브 소재거리를 연구해야 한다. 과학의 세계는 무궁무진하지만, 그중에 일반인이 흥미를 가지도록 가공할 수 있는 것은 의외로 적기 때문이다. 인터넷과 책도 보고, 또 과학기술계 인맥을 적극 활용해 소재를 찾는다. 심지어 그에게는 같이 일하는 동료도 없다. 기획부터 대본 집필, 촬영, 편집까지 모든 것을 혼자 다 해야 한다.

그는 볼러만 주면 국내든 해외든 마다하지 않고 간다. 작년에는 국제우주대회를 취재하기 위해 UEL의 지원으로 프랑스 파리에 가기도 했다. 이후에도 MIT-IBM 보스턴의 지원으로 미국 보스턴 MIT-IBM 왓슨 AI 연구소, 주한 미국대사관의 지원으로 미국 대학 연구소를 현지 취재했다. 과학기술이 생산되고 활용되는 현장을 취재해야만 얻을 수 있는 박진감이야말로 그의 채널과 동영상을 더욱 돋보이게 하는 요소다. 유튜브 활동을 지속할수록 많은 기관에서 그에게 홍보 영상을 찍어달라고 의뢰하는 선순환이 일어나고 있고, 그는 이러한 흐름을 잘 타고 있다. 물론 열심히 영상을 만들었는데도 사람들이 악플을 달거나 조회 수가 잘 안 나올 때는 괴롭다. 그러나 요즘은 그런 경우는 별로 없다. 대신 “새로운 정보와 견해를 알 수 있어 좋다”, “학교에서 이대로 따라 했더니 좋은 성적이 나왔더라” 등의 댓글이 달릴 때야말로 보람된 순간이라고 말한다.

4개월간 공들여 콘텐츠 하나 만들기도

수많은 콘텐츠를 만들었지만 그중에서도 특별히 기억에 남는 작품은 우리나라의 달 탐사선 다누리의 이야기를 다룬 ‘NASA와 스페이스X도 놀란 다누리가 달 궤도성공할 수 있었던 이유!’(https://youtu.be/2kfwNVkwBMc)다. 9분짜리 짧은 영상이지만 실은 무려 4개월 동안 공을 들였다. 다누리의 홍보를 위한 한국항공우주연구원의 적극적 협조로 발사 전부터 개발 현장 취재, 관련자 인터뷰 등 필요한 모든 것을 다 취재했다. 100% 성공한다는 보장이 없는 우주개발 속성상 발사에 실패했을 경우 대체 영상까지도 미리 만들어놓고 기다렸다가, 발사 성공에 맞춰 업로드했다. 반응은 폭발적이었다. 작성일 현재 조회 수 38만, 댓글 500개를 돌파했다. 이민환 씨는 이 동영상으로 문화체육관광부장관 표창까지 받았다.

범람하는 가짜 뉴스에 맞서 선한 영향력 늘려야

유튜브는 역기능도 있다. 분야를 가리지 않고 가짜 뉴스가 난무하는 매체인 것이다. 이민환 씨도 처음에는 과학기술과 관련한 가짜 뉴스를 근절하려고 애썼다. 하지만 인위적으로 없앨 수 있는 문제가 아니라고 판단했다. 그 대신 과학기술을 제대로 다루는 유튜버들이 미치는 선한 영향력을 높여야 한다는 것이 그의 해법이다. 진짜 뉴스의 영향력이 커지면 가짜 뉴스는 자연스럽게 안 보게 된다는 것이다. 그는 가짜 뉴스를 판별하는 나름의 기준도 제시했다. 일단 음성을 시로 만드는 곳, 대본과 영상이 다른 것을 심하게 베끼고 내용이 응집력이 없어 ‘뽕 뜯 느낌’이 강하게 드는 곳, 그리고 만드는 사람의 얼굴이 나오지 않는 채널은 주의하라고 조언한다. ‘진짜’는 거의 대부분 영상을 만든 사람의 얼굴이 나오기 때문이다.

커뮤니케이터 역할은 세상을 사는 데 필요한 ‘기본기’

학교에서 예비 크리에이터들을 가르치는 그는 시작하는 유튜버들에게도 조언을 아끼지 않았다. 일단 처음에는 시간이든 돈이든 너무 많이 투자할 필요 없고, 그래서 안 된다. 이민환 씨도 처음에는 아이폰X와 맥북 에어만 가지고 시작했다. 지금도 그의 제작 장비는 단출하다. 카메라, 삼각대, 짐벌, 녹음기 정도만 들고 어디든 가서 찍는다. 영상 제작 방법도 유튜

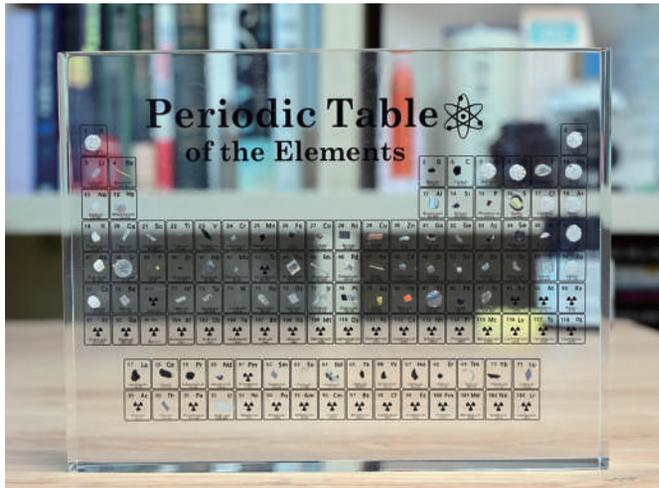
브로 직접 공부했다. 유튜브 채널을 운영하면 무조건 일확천금을 벌 수 있을 것처럼 유혹하는 사람이 많지만, 그의 현실 인식은 냉정하다. 그는 누구나 유튜브로 큰돈을 벌 수 있으리라고 보지 않는다. 학생들에게도 최소 6개월에서 1년은 전혀 수입을 기대할 수 없으니 그 시기를 버틸 수 있어야 한다는 점을 분명히 말한다. 유튜브한다고 본업을 바로 그만두지 말고 취미의 연장선으로 시작한 후 충분히 성장하면 그 후에 본업을 접어도 늦지 않다는 것이다.

그럼에도 그는 유튜브 활동은 적극적으로 권하는 편이다. 왜냐하면 자신을 세계에 알리고, 세계와 소통하는 효율적인 창구가 될 수 있기 때문이다. 미래에는 영상 제작이 의무 교육과정에 포함되는, 세상을 사는 데 반드시 필요한 ‘기본기’가 될 수도 있다는 게 그의 생각이다.

유튜브 외 여러 영역에서도 활발히 활동하고파

앞서 말했듯이 그는 레거시 미디어인 책도 만들고 있다. 유튜브 영상 제작을 위해 써두었던 대본을 기반으로 해서 그나마 집필하기 쉬웠다고 한다. 그의 저서 중 <알수록 쓸모 있는 요즘 과학 이야기>는 2020년 ‘세종 도서’에 선정되는 영광도 누렸다. <내 미래의 직업은?>(공저)은 9쇄까지 찍은 흥행 서적이 되었다. 그리고 <요즘 과학>은 대만, 일본과 계약을 추진 중이다. 같은 내용을 다루더라도 책은 유튜브와는 또 다른 강점이 있다. 레거시 미디어이니 만큼 사람들의 신뢰도가 높고, 전기와 통신이 없어도 즐길 수 있다. 이민환 씨는 앞으로 자신의 브랜드를 더욱 키우고, 유튜브 외에도 여러 영역에서 활동의 폭을 늘리는 것이 포부다. 어디서든 이름만 대면 그 권위를 인정받는 과학 커뮤니케이터가 되고 싶다고. 마지막

으로 그는 앞서 말한 다누리 관련 동영상도 한국항공우주연구원의 지원이 없었으면 만들지 못했을 거라며 연구 시설에서 콘텐츠 제작을 위해 더 많이 협조해주었으면 좋겠다고 밝혔다. 또 홍보를 원하는 연구시설들을 한눈에 찾을 수 있는 플랫폼이 있었으면 하는 바람도 내비쳤다. 아직도 제작자의 인맥에 기대어 동영상을 제작하다 보니 제작에 한계가 있는데, 그러한 한계를 벗어나 더욱 흥미롭고 유익한 콘텐츠를 만들고 싶다는 것이다.



시작하는 유튜버들을 위한
이민환 과학 커뮤니케이터의 조언

- 처음부터 시간과 돈을 많이 투자하지 말라
- 시작 단계의 ‘버티는 시간’을 견뎌라
- 본업은 유튜브가 충분히 성장한 뒤 접어도 늦지 않다
- 생각이 있다면 적극적으로 도전하라

뚝소리단

PREVIEW



뚝소리단은 산업기술에 관심있는 다양한 연령층의 독자로 구성되어 있으며, 매월 표지를 선정하고 콘텐츠 의견을 제안하는 등 활발한 활동을 이어가고 있습니다. <이달의 신기술>을 함께 만들어 가고 있는 뚝소리단의 6월호 리뷰를 확인해 보세요!

디지털 닥터 시대를 맞이하다(4p)

국내 건조 연안 여객선 경쟁력 강화의 전환점을 마련하다(26p)

전준규 👍

코로나19로 촉발된 비대면 진료와 관련한 여러 가지 사회적이슈 연장선에서 궁금한 내용을 알 수 있었습니다. 디지털 헬스케어 도입의 필요성과 현주소, 앞으로 나아가야 할 다양한 신기술까지 명쾌하게 보여줘서 좋았습니다.

정다현 😊

이 기사를 읽기 전에는 디지털 헬스케어라면 미래의 이야기로만 여겼습니다. 생각해보니 저도 애플 워치를 이용해 디지털 헬스케어 기술의 혜택을 누리고 있더라고요. 이 기술이 일상에 스며들고 있다는 것을 느끼게 해준 기사였습니다.

김화영 😊

국내 여객선 노후화로 인한 안전성 문제가 어떻게 해결되고 있는지 몰랐는데, 우리나라 항구 실정에 맞는 선박 건조 기술을 개발했다는 점을 알게 되어 좋았습니다. 안전문제를 신기술로 극복하는 것과 관련한 기사를 더 자주 보고 싶습니다.

차세대 이차전지 개발이 왜 중요해졌을까?(44p)

이유정 👍

요즘 주식시장에서 이차전지 관련주의 인기가 뜨거운데, 미래에는 어떤 종류의 배터리가 개발될지 알 수 있어 흥미로웠습니다. 특히 각각의 장점이 뚜렷하다고 하니 어느 영역부터 상용화가 시작될지, 그리고 과연 어떤 기업이 선두 주자가 될지 자못 궁금합니다.

김정현 😊

이차전지는 전공과 직접 관련이 있기도 하고, 실제 제작 과정에서 공급 문제에 자주 직면했습니다. 공급 문제를 구체적으로 어떻게 해결해야 하는지 다른 내용을 보면서 안정적 공급의 중요성을 다시금 깨달았습니다.

이주현 👍

이차전지에 대한 전반적 내용을 간결하게 살펴볼 수 있어 좋았습니다. 특히 이차전지는 광물 의존도가 높기 때문에 이를 해결하기 위한 방안(폐배터리 재활용)에 관한 부분도 더 알고 싶다는 생각이 들었습니다.

탄소중립 실현 위한 바이오매스 기반 화이트바이오 산업 육성 첫발(34p)

김경은 😊

탄소중립을 목표로 한 온실가스 감축과 친환경 플라스틱 제품을 개발 중인 현재, R&D 지원-투자가 지속적으로 증가해야 하는 부분으로 보입니다. 제품화 생태계를 구축하면서 탄소중립 실현을 위한 사회적가치 창출, 2050년에는 실현이 가능할지 앞으로 기대되는 사업입니다.

한눈에 보는 이차전지 시장(42p)

조재현 😊

니켈, 코발트, 리튬은 광물 의존도가 큰 원소이다 보니 한정된 자원에서 다양한 산업군이 경쟁하듯 발전하는 상황입니다. 엔데믹 이후 항공-선박 건조가 큰 폭으로 늘면서 광물자원 확보에 집중하고 있으며, 지속 가능 성장을 위해서는 리사클링 사업 활성화도 필요할 것 같습니다.

지속 가능한 건물을 만드는 방법(52p)

김성수 😊

늦었다고 생각할 때가 가장 빠르다는 격언이 생각났습니다. 겨울엔 춥고 여름엔 더워 난방이나 냉방으로 많은 에너지를 소모하는 상황인데, 설계나 시공 단계에서 환경 투자라는 개념으로 창의적인 건물을 많이 지었으면 좋겠습니다.

오선옥 👍

탄소중립 실천 방법으로 건축물도 해당된다는 것이 흥미로웠고, 그린 리모델링을 통해 에너지 사용량과 요금을 리모델링 전후로 비교한 분석표가 인상적이었습니다. 온실가스 배출량 저감과 에너지 절감에 효과적이라 더욱 기대됩니다.

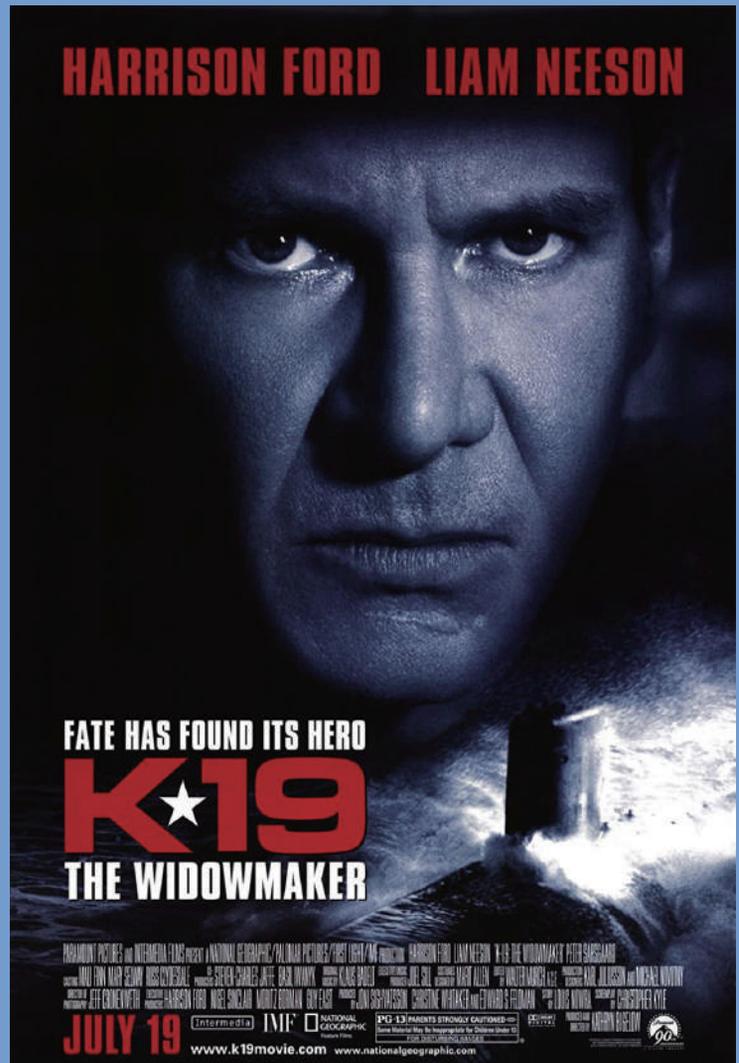
원자력 안전관리가 모든 것이다

원자력은 불과 전기에 이어 인류가 손에 넣은 제3의 불이다. 그 불은 너무나도 강력해 온 세상을 태워버릴 수도 있다. 1961년 발생한 소련 잠수함 'K-19'의 원자로 사고를 그린 이 영화는 그 사실을 깨우치면서, 철저한 원자력 안전관리의 중요성을 강조한다.

word 이동훈(과학 칼럼니스트)



영화 <K-19 위도우메이커>



<K-19 위도우메이커> 영화 포스터

소련의 붕괴로 냉전이 종식된 지도 벌써 30년이 넘었다. 약 50년간 이어진 냉전의 역사 중 하마터면 인류를 핵전쟁으로 몰고 갈 뻔한 사건이 굵직한 것만 수십 건에 달한다고 하면 과연 몇 명이나 믿을지 모르겠다. 하지만 이는 엄연한 사실이다. 물론 그중에 가장 유명한 사건은 1962년 10월의 쿠바 미사일 위기다. 그 외에도 많은 사건

이 있었다. 이번에 소개할 영화 <K-19 위도우메이커>(이하 <K-19>)에서 다른 1961년 7월 4일에 일어난 K-19 잠수함 원자로 사고도 그중 하나다. 이 작품은 실화를 바탕으로 하고 있으므로, 영화에서 묘사된 실제 사건 및 그 이면의 이야기와 내포한 의미를 중심으로 말해보고자 한다.



영화 속에서 묘사된 K-19 잠수함

재수 없는 배 K-19

호텔급 전략 원자력 잠수함의 네임쉽^{name ship}인 K-19는 수중 배수량 5000톤, 선체 길이 114m, 승조원 정원 125명 규모다. 주 무장은 핵탄두 탑재 가능한 R-13 SLBM(사거리 650km) 세 발이었다. 1960년 12월 12일 완공했고, 1961년 4월 취역했다. 하지만 이 잠수함은 취역하기 전부터 ‘재수 없는 배’라는 악명이 파다했다. 건조 중에 이미 사고로 여러 사람이 죽었기 때문이다. 건조 중 화재 사고로 두 명, 물탱크 내장 고무 작업 중 유독가스 질식으로 여섯 명, 미사일 탑재 작업 중 미사일 발사관 뚜껑에 압사당해 한 명, 추락사한 명이 죽었다. 그러나 이 배가 취역한 해 7월 4일에 있었던 원자로 사고에 비하면 그 어떤 것도 명함을 내밀 수 없었다. 당시 K-19는 그린란드 동남 해안 앞바다에서 훈련 중이었다. 현지 시각으로 오전 4시 15분 갑자기 우현 원자로 냉각장치의 압력이 0으로 떨어지면서 원자로 냉각재의 순환이 정지되고 말았다. 원자로 담당 승조원들은 냉각계에 큰 균열이 생겨 냉각재가 새어 나오고, 이로써 냉각재 펌프가 작동을 멈춘 사실을 알아냈다. K-19는 이 사실을 소련 본국에 알리려 했지만 설상가상으로 원거리 통신기도 고장이 나버렸다. K-19에는 원자로 긴급정지 시스템이 있어 제어봉을 삽

입했지만 원자로의 온도는 통제 불능으로 올라갔다.

이에 이 배의 함장 니콜라이 블라디미로비치 자테예프 대령(영화에서는 어떤 이유에서인지 보스트리코프 중령으로 관동 성명이 바뀐다. 배우는 해리슨 포드)은 여덟 명으로 이루어진 정비반에 새 냉각시스템을 즉석에서 만들어낼 것을 지시했다. 정비반은 배의 음료수 탱크 속 음료를 연결해 냉각시스템을 만들었고, 그 결과 원자로의 온도를 낮추는 효과를 거두었다.

그러나 이 작업을 진행한 곳은 엄청난 방사능을 뿜어내는 원자로 실이었다. 이곳에 적절한 방호 장구도 없이 투입된 정비반 여덟 명은 모두 위험치의 방사능에 노출되고 말았다. 사람이 4~5시버트^{Sv}의 방사능에 노출되면 30일 내로 사망할 확률이 50%에 달한다. 이 응급 냉각시스템을 만들어낸 일곱 명은 최대 54시버트, 최저 7.5시버트의 방사능에 노출되었고, 방사선 노출로 인한 질환에 시달린 끝에 1961년 7월이 가기 전 모두 사망했다.

방사능에 피폭된 것은 이들만이 아니었다. 균열된 냉각계에서 새어

나온 방사능을 띤 수증기가 함의 환기장치 속으로 퍼졌고, 이 때문에 함 전체가 방사능에 오염된 것이다. 사고 후 2년 동안 15명의 승조원이 더 죽었다. 그나마 배의 단거리 통신기는 멀쩡했기에, 소련 디젤 잠수함 S-270에 구조되어 나머지 승조원과 함을 살릴 수 있었다. 소련 본국으로 귀환한 K-19는 손상된 원자로 교체 작업 중 반경 700m에 달하는 땅까지 방사능으로 오염시켰고, ‘히로시마’라는 불명예스러운 별명을 얻고 말았다.

부실하게 건조한 소련 잠수함

이 사건을 조사한 소련 정부의 공식 발표에 따르면 사고 원인은 건조 중 발생한 용접 오류였다. 그 사실은 원자로 교체 작업을 위해 함을 분해 정비하던 도중 밝혀졌다. 냉각재가 지나다니는 파이프는 용접 작업 중에는 석면 커버를 씌워 보호해야 한다. 그러나 용접공이

공간이 비좁다는 이유로 이 보호 작업을 생략한 채 용접을 한 것이다. 그 결과 녹은 용접봉이 냉각재 파이프 위로 떨어졌고, 눈에 보이지 않는 미세한 균열을 만들어냈다. 냉각재 파이프 속에는 200기압 이상의 압력으로 냉각재가 지나간다. 이렇게 높은 압력을 받은 결과 균열이 점점 커져 결국 냉각재가 누출되었다는 것이다.

조사 결과는 이 사고가 미국에 맞서 냉전을 수행해야 했던 소련이 안고 있는 구조적 결함에 기인한 것임을 드러낸다. 냉전에 소련은 도저히 미 해군과 호각, 또는 우위를 차지할 대규모 대양 해군을 건설할 경제력이 없었다. 그런 그들에게 가장 현실적인 선택지는 잠수함 전력 육성이었다. 그러나 소련은 경제력뿐 아니라 기술력 면에서도 미국에 뒤지고 있었다. 부족한 경제력과 기술력으로도 미 해군은 물론, 미 본토에까지 위협을 가할 대규모 잠수함 전력을 육성하려면 안전성과 신뢰성은 어느 정도 무시한 채 잠수함을 건조할 수밖에 없었다. 이 사실을 입증이라도 하듯 K-19 사고 외에도 소련 해군의 잠수함들은 냉전 기간 내내 숏한 안전사고를 일으켰다.



K-19 승조원 여덟 명이 원자로실에서 응급 냉각시스템을 만들어 배를 살리고 세계도 구했다. 하지만 대가는 그들의 생명이었다.

그럼에도 K-19에 응급 냉각시스템을 만들어 원자로의 노심용융을 막아낸 승조원들의 결단과 용기는 높이 평가해야 한다. 만약 이들이 응급조치에 실패해 원자로가 노심용융을 일으켰다면 배에 실려 있던 핵탄두 미사일도 폭발했을 것이다. 그리고 K-19가 있던 장소는 그린란드 앞바다였다. 그린란드-아이슬란드-영국을 잇는 이른바

GIUK 결구는 항구를 떠난 소련 잠수함들이 대서양으로 빠져나오는 중요한 전략 요충지다. 그곳에서 핵폭발이 일어난다면 소련군의 선제 핵공격으로 해석될 수밖에 없었다. 그렇다면 이후는 심중팔구 핵전쟁이다. 보는 관점에 따라서는, K-19의 냉각계를 고치고 죽은 여덟 명의 승조원은 한 사람당 10억 명의 세계 인류를 구해낸 셈이다.

경쟁자 미 해군, 안전관리는 한 치의 양보도 허용 안 해

한편 그들의 경쟁자였던 미 해군은 어떠했을까. 냉전 이후 현재까지 미 해군은 세계 최대, 최강이다. 동시에 세계 최대, 최강의 원자력 해군이기도 하다. 미 해군은 현재 원자력 잠수함 68척, 원자력 항공모함 11척을 보유하고 있다. 그러나 이렇게 많은 원자력 군함을 운용하면서도 현재까지 원자로 관련 안전사고는 단 한 건도 없었다. 이러한 안전 신화의 이면에는 미국 ‘원자력 해군의 아버지’로 추앙받는 한 괴짜 제독이 있었다. 그의 이름은 하이먼 G. 리코버(1900~1986)다. 1900년 폴란드 입헌왕국에서 태어난 그는 1906년 가족과 함께 미국으로 이민했다. 그리고 1918년 미 해군사관학교에 입학해 해군 생활을 시작했다. 제2차 세계대전 중 해군 기술행정 부대만 거친 그는 지극히 까다롭고 꼼꼼하게 함정 정비와 수리에 임했고, 마음에 들지 않는 상대에게는 거침없이 독설을 날리는 것으로 유명했다. 그런 만큼 어떤 임무를 맡겨도 반드시 완수해냈다.

제2차 세계대전 종전 후 그는 제너럴 일렉트릭사에 파견되어 구축함 추진용 원자로 연구개발 업무를 시작하면서 동력으로서 원자력이 지닌 엄청난 잠재력에 눈을 떴다. 그는 당시 해군 참모총장이던 체스터 니미츠 제독을 접견해 원자력의 가능성에 대한 자신의 견해를 피력했다. 이에 니미츠는 해군 장관 존 L. 설리번을 설득했고, 설리번은 인류 최초의 원자력 잠수함인 노틸러스함 개발과 건조를 승인했다. 리코버도 책임자로 이 배에 배치되었다. 이것이 리코버가 원자력 해군의 아버지로 불리는 이유 중 하나다. 그가 이끄는 개발팀은 폭 8.4m짜리 노틸러스의 선체에 들어갈 크기의 S1W 원자로를 개발하는 데 성공했다. 노틸러스는 1954년 진수 및 취역 등 여러 신기록을 세웠다.

이후 퇴역하기까지 약 30년간 리코버는 미 해군의 원자력 함대 건설과 유지에 힘썼다. 그는 군함, 기술, 인원 등 원자력 함대를 이루는 모든 것을 간간하게 개발하고 관리했다. 특히 원자력 군함에 근무할 총 1만4000여 명에 이르는 모든 장교를 직접 면접한 것으로도 유명했는데, 그의 면접에서 불합격하면 근무할 수 없었다. 1973년 리코버는 해군에 입대한 지 55년 만에 해군 대장으로 진급했다. 비전투 병과 출신으로는 미 해군 역사상 두 번째 대장이었다. 또 그는 복무 기간 내내 안전 확보에 광적으로까지 집착하는 것으로도 유명했다. 그 결과 앞서 말했듯이 미 해군에서 원자로 관련 사고는 한 건도 일어나지 않았다. 1979년 미국의 스리마일 원자력발전소에서 원자로 노심용융 사고가 나자 리코버는 미국 의회에 출석해달라는 요구를 받았다. 미 해군 원자로가 높은 안전성을 유지하는 비결을 알고 싶다는 것이었다. 1982년, 리코버는 만 63년의 군 생활을 마무리하고 퇴역했다.

리코버는 반감기가 엄청나게 긴 방사능폐기물이라는 원자력의 문제점도 분명히 직시하고 있었다. 그는 퇴역 직전 미 의회 증언에서 “할 수만 있다면 미국의 모든 원자력 군함을 자침시켜버리고 싶다. 원자력 동력은 방사능폐기물이라는 문제를 감수하면서까지 끌어안고 있어야 할 가치가 없다. 내가 원자력 해군 건설에 매진한 것은 어디까지나 국가 방위를 위한 ‘필요악’이었기 때문이다”라는 취지의 발언을 해 세상을 놀라게 했다. 이처럼 원자력의 문제점을 직시했기에 현역 시절 안전관리에 철저히 매달린 건 아닐까.

우리나라도 최근 원자력발전에 큰 힘을 실어주고 있다. 원자력이라는 엄청난 에너지를 효율적이면서도 안전하게 개발하고 관리하려면, 탁월한 선구안과 타협하지 않는 옹고집을 겸비한 리코버 같은 인재, 그리고 그러한 인재에게 힘을 실어주는 풍토가 반드시 필요하다.



하이먼 G. 리코버 미 해군 제독.
절대 양보 없는 안전관리로
미 해군의 원자로 안전 신화를 일궈냈다.

2023년도 산업통상자원부-에너지 공기업 기술 나눔 공고

공공기관이 보유한 특허 기술을 중소기업 등으로 무상 이전해 기술혁신과 민간·공공 부문 동반성장 문화에 기여하기 위해 다음과 같이 기술 나눔을 공고하오니 많은 기업의 참여 바랍니다.

사업 목적

공공기관이 보유한 미활용 특허를 중소·중견기업으로 이전해 중소·중견기업의 기술경쟁력 제고 및 공공부문의 상생 협력 문화 확산

지원 내용

기술 제공 기업: 한국전력, 한국남부발전, 한국서부발전, 한국중부발전

· 나눔 기술: 전력 관리·전력 발전·환경 시스템 등 에너지 및 ESG 분야 총 332건

· 이전 방식: 무상 이전(양도 및 실시권 허여)

- * 특허 소유권 이전에 따른 권리 이전 등록료(특허청), 업무 대행 수수료(특허 법인 등) 같은 행정 경비와 이후 특허별 연차료는 양수 기업이 부담
- * 공고 기간 중 연차료 납부 기간이 도래하는 경우 추가 납부 연차료가 발생할 수 있음.

지원 자격

중소·중견기업

- * 중소기업: '중소기업기본법' 제2조에 의한 기업
- * 중견기업: '중견기업 성장촉진 및 경쟁력 강화에 관한 특별법' 제2조에 의한 기업

신청 방법·기간

· 신청 방법: 온라인(이메일 technanum@kiat.or.kr) 제출

- * 우편 또는 방문으로 신청 서류를 접수받지 않으니 주의 요망

· 신청 기간: 2023년 6월 19일(월) 09:00~7월 21일(금) 18:00

- * 신청자의 이메일 발송 시간 기준으로 2023년 7월 21일 18:00까지 접수

신청 서류와 지원에 대한 자세한 내용은 산업통상자원부 홈페이지에서 확인 가능

독자 퀴즈

다음 ○○에 들어갈 단어를 적어주세요!

퀴즈에 참여해주신 정답자 분들께는 소정의 상품을 보내드립니다.

퀴즈 답변과 휴대폰 번호를 grintjssu@hankyung.com으로 보내주세요.

독자 선물은 교환, 환불이 불가합니다. 전화번호 오류 등으로 반송 시 재발송하지 않습니다.

최근 원자력산업 트렌드의 선두에 있는 ○○○○○○ 개발 및 상용화도 충분히 선진국을 따라잡을 수 있는 수준이며, 2028년 인허가 완료를 목표로 개발에 매진하고 있습니다.

NEW TECHNOLOGY OF THE MONTH

산업통상자원부 산하 한국산업기술평가관리원,
한국산업기술진흥원, 한국에너지기술평가원,
한국공학한림원 등 R&D 대표기관 및
최고 권위인 공학기술자단체가 공동으로
발행하는 <이달의 신기술>



정기구독 안내

<이달의 신기술>은 2023년 11월호부터 무료로
전환될 예정으로, 신규 정기구독 서비스를
중단합니다. 현재 구독 중인 구독자분들에게는
10월호까지 매거진을 발송해드릴 예정입니다.



02-360-4859

산업기술에 ESG를 더해
지구의 내일을 키워갑니다

기업과 지구의 지속가능한 내일을 위하여

KEIT ESG



선도적인 공공기관으로서

ESG의 가치를 사회적으로 확산하고
산업기술 환경을 친환경 체제로 전환합니다



R&D 신규협약 시에

'ESG 경영실천 선언서' 의무화와
기업에게 인센티브 제도를 운영합니다



탄소배출 저감을 위해

多 배출 업종 분야를 중심으로
탄소배출 저감 신기술 개발에 착수합니다

ESG (Environmental, Social and Corporate Governance)란
환경(Environment), 사회(Social), 지배구조(Governance)를 뜻하는 것으로,
'ESG 경영'이란 장기적인 관점에서 친환경 및 사회적 책임경영과 투명경영을
통해 지속 가능한 발전을 추구하는 것을 의미합니다