www.osia.or.kr

OSIA S&TR Journal

ISSN 1738-9887 Vol. 38, No. 2, September 2025
• 발행인 : 조성래 회장/OSIA • 편집위원 : 백은경(이화여대), 이현우(ETRI)

08 Editorial
디지털 탄소중립: 그린 전환과 인공지능 전환의 전략적 혁신에 의한 지속가능한 생태계
백은경 교수 (이화여자대학교)

Article
10 탄소중립을 위한 데이터센터 기술 표준화 동향
김용운 책임 (ETRI)

16 디지털 트윈 기반의 건물 에너지 최적화와 소버린 전략
류수영 전무 (이에이트)

22 에너지 효율화와 탄소중립을 위한 인공지능 적용 동향
김말희 책임 (ETRI)

28 디지털 트윈 기반 분산 에너지 생태계: 탄소중립 실현을 위한 스마트 실증 플랫폼
이상엽 센터장 (KETI)

(사)한국컴퓨터통신연구회
Open Standards and ICT Association

SK broadband

14년 연속 국가고객만족도 1위

1등 서비스로
고객님의 사랑에 보답하겠습니다



NCSI

초고속인터넷/IPTV 부문

국가고객만족도(NCSI) 14년 연속 1위

SUNDOSOFT

대한민국 기술의 미래

GIS·빅데이터 분야 선도기업

선도소프트

공간빅데이터 플랫폼 개발 전문회사로서 GIS 융복합시스템 개발, 공간디지털트윈 서비스 및 플랫폼 기술지원을 제공하고 있습니다.

GIS DRONE BIG DATA PLATFORM BIO

About Business

정보화 컨설팅부터 시스템 구축, 운영까지 토탈 IT서비스 제공

사회·경제·행정정보와 공간정보를 융합한 빅데이터 분석·컨설팅 제공

디지털트윈 플랫폼을 이용한 다차원 시각화·분석 지원

위성·항공·드론 영상을 이용한 GeoAI 분석 플랫폼 구축

(주) 선도소프트

서울시 금천구 가산디지털2로 143, 15층(가산어반워크 2) | T. 02-856-1900 | F.02-856-1901

ITCEN ENTEC

Inspire with Technology

세상을 변화시키는 기술

우리는 고객에 대한 이해를 넘어서,
변화의 흐름을 읽고, 멈추지 않는 도전을 통해
지식과 기술로 세상을 혁신합니다.

깊은 신뢰감으로 늘 고객과 함께하고,
기술, 사람, 기업간 새로운 연결 속에서
새로운 경험과 가치를 발굴하며
아이티센은 지속가능한 변화를 실현합니다.

더 나은 내일을 향한 기술로
고객의 삶에 필요한 가치를 창조하는 것.
아이티센이 생각하는
우리의 역할이자 우리의 존재 이유입니다.



대영유비텍(주)

도시를 [SMART] 하게!

대영유비텍은 37년간 축적된 엔지니어링 노하우를 바탕으로
대한민국의 스마트도시를 만들어 갑니다.



SMART CITY (도시계획 설계 구축)

첨단 정보통신 기술을 활용하여
다양한 도시문제를 해결하고 삶의 질을
향상시키는
시민중심의 스마트도시조성을 지원합니다.

GREEN CITY (환경전략 ESG)

기후 환경위기 속에서 한국판 뉴딜과
연계하여 지속가능한 친환경 녹색도시 구현을
위한
스마트그린도시의 표준을 제시합니다.

DATA HUB (데이터 마켓 플레이스)

대영스마트시티포털(DSP) 솔루션을 바탕으로
자자체 및 공공기관을 대상으로
혁신적인 데이터 허브 플랫폼을 제공합니다.

www.dyeng.net / 서울 구로구 디지털로 306, 11층 1103호 Tel : 070-7432-3000 E-Mail : datec@dyeng.net

NEOBRIX

Slogan

AUTONOMY, CONFIDENCE AND INTERACTION

Management Philosophy

행복한 구성원이 행복한 기업을 만든다. 행복한 기업이 행복한 세상을 만든다.

회사명
네오브릭스 주식회사

대표이사
현종일

임직원수 (2025년 기준)
21명(연구개발/기술인력 17명)

사업영역
소프트웨어 개발, 공급 및 유지보수
시스템 통합 자문 및 구축 관련 서비스 용역











NEOBRIX

CREATIVE
SPACE DESIGN
GROUP

GL ASSOCIATES



GL associates

지엘어소시에이츠는 홍보관, 박물관, 전시관, 테마파크,공공 및
환경디자인에 이르는 공간디자인의 전 부문을 기획에서 디자인/설계
그리고 시공까지 프로젝트의 모든 과정을 진행하면서 보다 가치있는
콘텐츠와 문화를 만들고 선도하는 크리에이티브 디자인 그룹입니다.

우리는 인간과 공간에 대한 깊은 이해를 바탕으로 공간에 의미를
부여하고 브랜드 가치를 극대화하는 것을 최종의 목표로 삼고 있습니다.

Address
(06097) 서울시 강남구 봉은사로 449 밤부타워

BAMBU TOWER, 449 Bongeunsa-ro,
Gangnam-gu, Seoul, Korea

Tel
02 518 7721

Web
www.gl-ex.com

디지털 탄소중립: 그린 전환과 인공지능 전환의 전략적 혁신에 의한 지속가능한 생태계

백은경 교수
이화여자대학교

기후 변화와 인공지능 전환(AI Transformation, AX)이라는 두 개의 거대한 물결이 중첩되는 대전환의 변곡점에서, 디지털 탄소중립은 지속가능한 생태계를 위한 핵심 수단으로 주목받고 있습니다. 세계기상기구(WMO)가 2024년에 지구 온도 1.5도 상승을 공식적으로 발표하면서 파리협정의 온도 상승 억제 마지노선은 붕괴되었고, 에너지 안보와 식량 안보를 비롯한 기후 안보의 문제가 부상하고 있습니다. 인류와 지구의 지속가능성에 대한 근본적인 재고가 요구되는 중대한 현실 앞에서, 세계 각국은 2035 국가 온실가스 감축 목표(NDC)를 강화해야 하는 기로에 있습니다. 이와 같은 중대한 시기에 디지털 탄소중립은 기후 변화의 위기를 해결하고 인공지능 전환에 의한 새로운 기회를 제공하는 핵심 수단으로 주목받고 있습니다.

이번 특집호에서는 탄소중립과 녹색성장이라는 거대한 목표를 달성하기 위한 디지털 탄소중립의 역할과 전략적 여정을 탐구합니다. 디지털 기술로 다양한 분야의 탄소중립을 실현하는 디지털 그린(Digital Green)과 그 과정에서 발생하는 탄소중립 문제를 해결하는 그린 디지털(Green Digital)의 균형있는 발전과 도약을 위한 논의의 장이 되기를 바랍니다.

첫 번째 논문인 '탄소중립을 위한 데이터센터 기술 표준화 동향'에서는 그린 디지털 기술 중에서 가장 주목받고 있는 데이터 센터를 대상으로 하여, 급증하는 전력 수요와 안전성 문제에 대응하기 위한 국내외 표준화 동향을 다룹니다. 에너지 효율 측정, 평가, 향상을 위한 기술 표준화는 물론, 화재 등 안전사고 예방을 위한 표준화 현황을 함께 조망하며, 탄소중립과 안전을 동시에 확보할 방안을 모색합니다.

이어지는 세 편의 논문은 주요 분야에서의 디지털 그린 기술을 고찰합니다. 먼저 '디지털 트윈 기반의 건물 에너지 최적화와 소버린 전략'은 전 세계 탄소 배출의 40%를 차지하는 건물 부문의 혁신을 위한 해법으로 디지털 트윈 기술을 제시합니다. 기존의 비효율적인 건물 에너지 관리 방식을 극복하고, 실시간 데이터를 활용한 최적화 전략을 소개합니다. 특히, 해외 플랫폼 의존도를 낮추고 자체 플랫폼을 구축하는 소버린 전략이 에너지 효율화와 데이터 주권 확보라는 두 가지 목표를 어떻게 동시에 달성할 수 있는지 심도 있게 다룹니다.

또한 '에너지 효율화와 탄소중립을 위한 인공지능 적용 동향'은 AI가 산업 현장의 에너지 효율을 극대화하고 탄소중립을 실현하는 핵심 기술임을 강조합니다. 글로벌 기업들의 성공 사례와 국내 동향을 분석하며, 에너지 특화 파운데이션 모델을 기반으로 한 AI 에이전트와 피지컬 AI로의 진화가 국내 산업의 경쟁력을 어떻게 강화할 수 있는지 구체적인 방향을 제시합니다.

마지막으로, '디지털 트윈 기반 분산 에너지 생태계: 탄소중립 실현을 위한 스마트 실증 플랫폼'은 무탄소에너지 발전 목표 달성을 위한 국가적 과제와 재생에너지의 간헐성 문제를 동시에 해결할 방안을 제시합니다. 디지털 트윈 기반의 스마트 실증 플랫폼이라는 새로운 개념을 소개하며, 이 플랫폼이 어떻게 미래 에너지 시스템의 자율 운영을 가능하게 하고, 지속가능한 녹색경제로 나아가는 핵심적인 디지털 인프라가 될 수 있는지 고찰합니다.

이 특집호가 인공지능 전환 시대의 디지털 기술이 가진 잠재력을 이해하고, 디지털 기반의 탄소중립 전략을 모색하는 데 있어 의미있는 통찰을 제공하길 바랍니다. 아울러 탄소중립 사회를 향한 그린 전환(Green Transformtaion, GX)의 기회를 찾아 전략적인 혁신의 여정에 보다 많은 분들이 동참하는 계기가 되기를 바랍니다. 끝으로, 본 특집호의 기획과 집필에 참여해주신 연구자 분들께 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 여러분의 도전과 열정이 지속가능한 미래를 향한 중요한 이정표가 되리라 믿습니다.

탄소중립을 위한 데이터센터 기술 표준화 동향

김용운, 정상진
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

Abstract

전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 디지털 기술의 역할이 강화됨에 따라, 데이터센터는 에너지 효율성과 안전성 측면에서 중요한 표준화 대상이 되고 있다. 본 고는 급격히 증가하는 데이터센터 전력 수요와 이에 대응한 정부의 탄소중립 정책을 배경으로, 데이터센터 설비 및 IT 장비의 에너지 효율 측정·평가·향상을 위한 국내외 표준화 동향을 살펴본다. 또한, 데이터센터 화재 사례를 바탕으로 안전성 확보의 필요성을 강조하며, 관련 표준화 현황을 소개한다. 이를 통해 데이터센터 운영 효율과 안전성을 동시에 확보함으로써, 탄소중립 달성에 기여할 수 있는 데이터센터 기술 표준화의 현재와 미래를 조망한다.

Ⅰ. 서론

사물인터넷, 인공지능, 빅데이터 등 다양한 서비스가 도입됨에 따라 급속히 증가하는 콘텐츠의 저장, 처리 등을 위해 활용되는 데이터센터의 수가 증가하고 있으며, 이들이 사용하는 전력량도 급증하고 있다. 국내 데이터센터 수는 최근 5년간 꾸준한 증가세를 보이고 있다. 2020년부터 2024년까지 연평균 1.41%의 성장률을 기록했으며, 2024년 기준으로 총 165개소가 운영되고 있다[1]. 한국IDC는 이들 데이터센터의 전력 수요는 2025년 4,461MW에서 2028년까지 6,175MW로 1.4배 증가할 것으로 예상하였는데, 이 전망치는 현재 운영 중인 기업 내 소규모 서버룸을 포함한 엔터프라이즈 데이터센터 전력 수요와 서비스 사업자의 데이터센터 전력 수요를 합산한 규모이며, 국내에 공급되는 서버 수량을 기반으로 추정하였다[2].

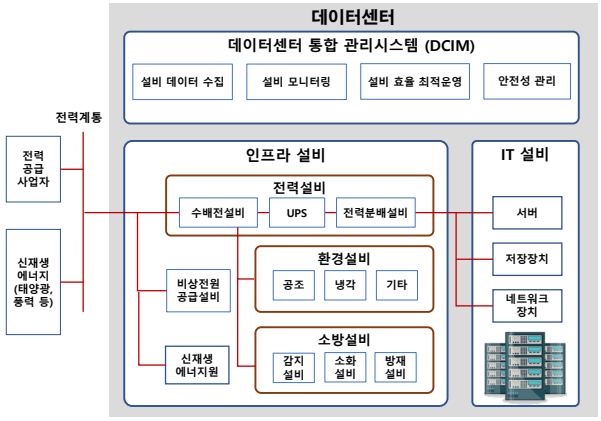
급증하는 데이터센터 전력 사용량에 대응하여 정부에서는 '2050 대한민국 탄소중립' 실현을 위한 10대 핵심 기술 중 디지털 기반 에너지효율 최적화 부문의 핵심지표로 '2030년까지 데이터센터 전력 소모 20% 저감'을 선정하여 중점 추진중이다. 또한, 2025년까지 100대 핵심 서비스표준 개발 및 세계 최고 수준 서비스 품질 확보를 목표로 하는 '서비스산업 혁신을 지원하는 서비스 표준화 추진전략' 내 중점 추진 서비스 표준화로 '데이터센터 설비의 자원사용 효율 측정 및 평가를 위한 세부 표준개발'을 선정하여 데이터센터 효율 개선을 위한 표준화를 적극 추진 중에 있다[3][4].

또한, 2022년 10월 15일 발생한 국내 A사 데이터센터 화재 사건을 통해 정부기관·기업들의 중요 업무용 데이터를 처리·보관하는 데이터센터의 사고 및 장애 발생은 대규모 전산망 마비 사태로 이어질 수 있으며 대국민 서비스가 제한될 수 있음이 확인되었다. 이에 따라 국내 데이터센터 업계에서 활용 가능한 데이터센터의 안전 운영을 위한 운영 매뉴얼 또는 운영 지침의 개발 및 보급 필요성이 증대되고 있다.

본 고에서는 탄소중립을 위한 데이터센터의 설비 및 IT 장비에 대한 에너지 효율을 측정하고 평가 및 향상시키기 위한 국내외 표준화 기구의 표준 개발 동향과 데이터센터의 안전성 향상을 위한 표준 개발 현황을 살펴본다.

Ⅱ. 데이터센터 개요

데이터센터는 서버·스토리지 등의 ICT 장비를 건물·공간에 중앙 집중식으로 집적시키고, 이를 통해 IT 서비스 제공에 필요한 장비를 통합·관리하여 24시간 365일 무중단으로 안정적인 서비스를 제공할 수 있도록 하는 시설을 지칭한다. 데이터센터의 구성요소는 크게 IT 장비(서버, 스토리지, 네트워크 장비 등), 기반 인프라 시설(UPS/배터리, 항온항습장치, 발전기, 소방설비 등) 및 운영 · 유지 시스템(DCIM: Data Center Infrastructure Management System)으로 구분될 수 있다. 데이터센터의 에너지 사용은 서버, 저장장치 등의 IT 장비의 사용량과 데이터센터 설비(냉각, 공조, 조명 등)의 사용량으로 분류될 수 있다. 그림 1은 데이터센터의 설비 개념도를 도시한 것이다. 데이터센터는 전력공급 사업자로부터 공급되는 전원 이외에 전력공급 이상 발생 시 대처하기 위한 비상전원 공급 장치와 태양광 발전설비 등의 신재생에너지 발전 설비 등을 활용하여 다양한 전력원으로부터 전력을 공급받을 수 있다. 공급받은 전력을 사용하여 데이터센터 기반 설비 및 서버, 네트워크 장치, 저장장치 등의 IT 장비의 운용에 사용한다.



〈그림 1. 데이터센터 설비 개념도〉

데이터센터 인프라 통합 관리시스템(DCIM)은 데이터센터 인프라 전체의 모니터링 및 최적 운영과 제어를 담당하고 있다. 데이터센터의 에너지 효율 향상을 위해서는 데이터센터의 각 주요 구성요소의 에너지 사용의 측정 및 평가가 선결되어야 한다. 이를 위해 데이터센터 전체의 에너지 효율을 측정하는 방법과 데이터센터 내 존재하는 다양한 세부 설비들의 에너지 효율을 측정하고 평가하는 방법에 대한 표준 개발이 진행되고 있다.

데이터센터 안전 측면에서는 데이터센터의 주요 화재 발생 요소인 비상전원 및 UPS 설비에 대한 안전운영 방법에 대한 표준화 필요성이 대두되고 있다.

Ⅲ. 데이터센터 관련 기술 표준화 현황

3.1 데이터센터 에너지 효율 관련 JTC 1/SC 39 국제표준화 동향

데이터센터 관련 국제 표준화는 현재 표 1과 같은 구성으로 JTC1/SC39(지속가능 IT) 및 ITU-T SG5 (환경 및 기후변화) WP3에서 진행되고 있다.

표 1. 데이터센터 관련 국제 표준화 기구

표준화 그룹	작업반
JTC1/SC39 (지속가능성, IT 및 데이터센터) • 의장: Ricardo Gonzalez (미국) • 간사: Bill Ash (미국)	WG1 (자원 효율적인 데이터센터) • 컨비너: Niek van des Pas (네덜란드)
	WG3 (지속가능한 설비 및 인프라) • 컨비너: Jens Dittirich (독일)
ITU-T SG5/WP3 (기후변화, 탄소중립) • 의장: Qi Shuguang (중국)	Q11 (기후변화 완화 및 스마트 에너지) • 라포터: 정상진 (한국), Qi Shuguang (중국)

ISO/IEC JTC 1/SC 39는 지속가능 IT 기술 분야의 국제 표준화를 위해 설치된 그룹으로 산하에 WG1(자원 효율적인 데이터센터), WG3(지속가능한 설비 및 인프라)가 설치되어 관련 표준 개발을 진행하고 있다. WG1에서는 데이터센터 내 다양한 설비들의 에너지 효율을 측정하고 평가하기 위한 핵심성과지표(KPI; Key Performance Indicator)를 중점적으로 개발하고 있으며, 표 2의 국제표준이 제정되었으며 주요 측정지표 표준개발이 완료됨에 따라 신규 표준개발 항목을 논의 중에 있다. WG3에서는 데이터센터 건물 자체에 대한 건축 관점의 표준으로 유럽 표준인 EN 50600(데이터센터 설비 및 인프라) 시리즈 표준을 JTC 1 국제표준으로 채택하는 작업을 진행하고 있다.

표 2. JTC 1/SC 39의 데이터센터 에너지 효율 관련 표준개발 현황

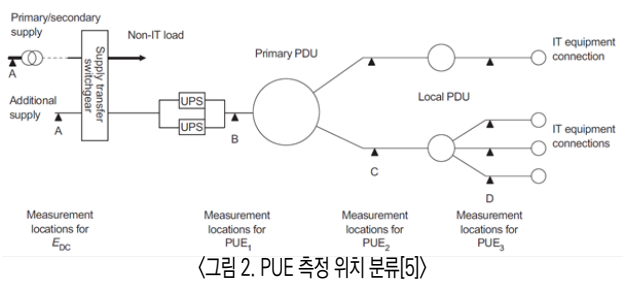
표준번호	표준명칭	상태
ISO/IEC 30134-1	데이터센터 성능지표 – 개요 및 일반 요구사항	제정(2016)
ISO/IEC 30134-2	데이터센터 성능지표 – 전력사용효율지수(PUE) (개정판 발간 예정)	제정(2016)
ISO/IEC 30134-3	데이터센터 성능지표 – 재생에너지 사용 효율(REF)	제정(2016)
ISO/IEC 30134-4	데이터센터 성능지표 – IT 장비 에너지 효율(ITEEsv)	제정(2017)
ISO/IEC 30134-5	데이터센터 성능지표 – IT 장비 운용 효율(ITEUsv)	제정(2017)
ISO/IEC 30134-6	데이터센터 성능지표 – 에너지 재활용률 지수(ERF)	제정(2021)
ISO/IEC 30134-7	데이터센터 성능지표 – 냉각 효율 지수(CER)	제정(2023)
ISO/IEC 30134-8	데이터센터 성능지표 – 탄소 사용 효율 지수(CUE)	제정(2022)
ISO/IEC 30134-9	데이터센터 성능지표 – 물 사용 효율 지수(WUE) (개정판 개발 착수)	제정(2022)
ISO/IEC 23544	데이터센터 응용 플랫폼의 에너지 효율 지수(APEE)	제정(2021)
ISO/IEC TR 20913	데이터센터 성능지표들의 종합적 평가 지침	제정(2016)

상기 데이터센터 설비의 효율을 측정 표준에서 정의된 주요 측정 지표들의 개념은 다음과 같다.

- 전력사용효율지수(PUE; Power Usage Effectiveness): 데이터센터 전체의 에너지 효율을 측정하기 위한 측정지표로서,

$$\frac{\text{데이터센터 전체에너지 사용량}(kWh)}{\text{IT장비 에너지 사용량}(kWh)}$$ 으로 정의됨.

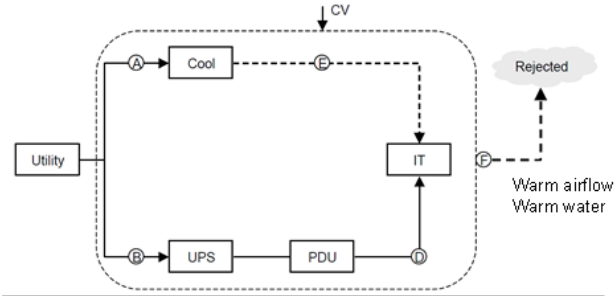
PUE의 값이 1에 가까울수록 효율이 높으며 2021년 기준 국내 데이터센터들은 평균 2.0 내외의 값을 나타냄. PUE 측정을 위한 측정 위치에 따라 PUE 측정값의 정확도가 달라지며, 그림 2와 같이 세 개의 측정 위치가 정의되어 있음



〈그림 2. PUE 측정 위치 분류[5]〉

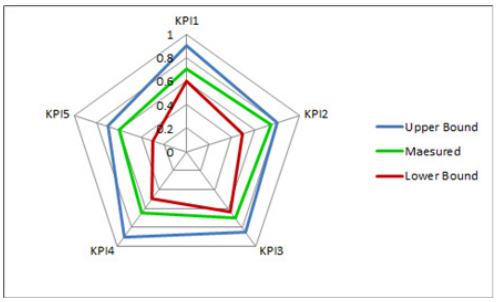
	PUE1	PUE2	PUE3
EIT 측정위치	UPS 출력단	전력분배장치 출력단	IT 장비 입력단
고려사항	IT 장비와 냉각 부하의 변동성 포함	전력분배장치 및 관련설비 (변압기, 스위치 등)의 손실의 영향 제거	전력분배장치와 비 IT 장비의 손실로 인한 영향 제거

- 재생에너지 사용 효율(REF; Renewable Energy Factor): 데이터센터에서 사용하는 재생에너지의 사용 비율을 측정하는 측정지표로서, $\frac{재생에너지사용량(kWh)}{데이터센터전체에너지사용량(kWh)}$ 으로 정의됨. 재생에너지 사용 효율은 재생에너지원을 이용하여 생산된 에너지를 데이터센터의 운영에 어느 정도 사용하는가를 측정하는 측정지표, 측정값이 클수록 친환경 에너지를 사용하는 데이터센터임
- IT 장비 에너지 효율(ITEEsv; IT Equipment Energy Efficiency for Servers): 데이터센터의 서버 장비의 효율을 측정하는 지표로서, $\frac{데이터센터서버의최대성능}{데이터센터서버의최대전력사용량(watts)}$ 으로 정의됨. 서버가 사용하는 에너지 대비 성능이 높은 서버를 판정하기 위한 용도로 사용되며, 데이터센터 운용자가 IT 장비의 구입단계에서 성능 대비 에너지 효율이 높은 장비를 구입하기 위한 용도로 활용 가능함
- IT 장비 운용 효율(ITEUsv; IT Equipment Utilization for Servers): 데이터센터의 서버 장비의 운용 효율을 측정하는 지표로서, $\frac{각서버별연평균CPU사용률의합}{전체서버의수}$ 으로 정의됨. IT 장비 운용 효율 지수는 IT 서버장비의 연간 누적 전원 공급 시간 (Power-on) 동안의 해당 서버의 가동률을 측정함으로써, 서버 장비의 연간 평균 가동률을 계산할 수 있도록 하는 지표로 운용 시간이 긴 서버를 판정하기 위한 용도로 사용됨. 교체 대상 서버의 판정을 위해 활용 가능함
- 에너지 재활용률 지수(ERF; Energy Reuse Factor): 데이터센터에서 발생하는 폐에너지의 재활용률을 측정하는 지표로서, $\frac{재활용되는폐에너지양(kWh)}{데이터센터전체에너지사용량(kWh)}$ 으로 정의됨. 에너지 재활용률 지수는 데이터센터의 운용에 따라 발생하는 폐에너지의 재활용 정도를 측정함으로써 데이터센터의 운용이 주변 환경의 에너지 절감에 도움이 될 수 있음을 판단할 수 있도록 하는 지표임. 그림 3은 데이터센터 폐에너지 재활용률을 평가하기 위한 데이터센터 구역 구분을 나타낸 것임. 폐에너지 재활용률은 CV(Control Volume) 영역에서 생성된 폐에너지를 외부(F)로 방출하여 재활용하는 정도를 평가함

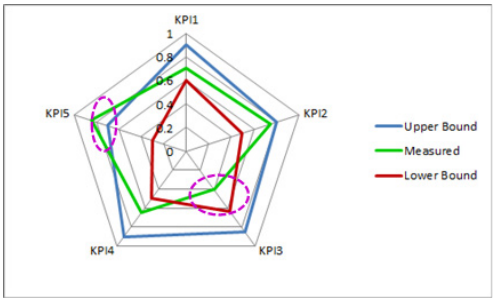


〈그림 3. ERF 측정을 위한 데이터센터 구역 구분[6]〉

그 외 다수의 데이터센터 평가지표가 개발됨에 따라, 이들을 종합적으로 평가할 수 있도록 한국(ETRI)은 데이터센터 성능 지표들의 종합적 평가 방법을 ISO/IEC TR 20913으로 개발하였다. 데이터센터 효율 종합적 평가 방법은 그림 4와 같이 복수 개의 데이터센터 측정지표를 도표 형식으로 표시하고, 각 측정지표별 운용 효율을 정규화하여 표시하는 방법이다. 그림 4에서는 다섯 개의 에너지 효율 측정지표를 가지는 데이터센터를 예시로 운영효율을 표시하였다. 각 KPI (Key Performance Indicator)는 에너지 효율 측정 및 평가를 위한 측정지표를 나타내고, 파란색과 빨간색으로 표시된 그래프는 각 에너지 효율 측정지표별 운영효율 상의 상한 및 하한 목표치를 나타낸 것이다. 마지막으로 초록색으로 표시된 그래프는 현재 측정된 운영효율을 나타낸다. 데이터센터 운영자는 각 KPI를 목표 범위 내에서 운영하고자 하며, 그림 5의 보라색 점선부분과 같이 운영 범위를 벗어나는 경우에 해당 에너지 효율 측정지표의 값이 운영 목표치 이내로 포함되도록 필요한 조치를 취하게 된다. 표준에서는 데이터센터 에너지 운영 효율의 목표치 대비 미달성 정도를 계량화하는 방법을 제시하여 정량적으로 평가할 수 있도록 하였다[7].



〈그림 4. 스파이더 웹 차트 기반 에너지 운영효율 측정 방법〉



〈그림 5. 스파이더 웹 차트 기반 에너지 운영효율 모니터링 방법의 문제점[8]〉

한국은 SC 39 서울 총회에서('25.5) 액침 냉각 등 액체를 활용하여 고효율의 낮은 에너지 소비 냉각 방식에 대한 표준화 필요성을 제안하여 ISO/IEC PWI 22237-44 (데이터센터 액체 냉각 적용 지침) 표준화를 시작하게 되었다. 표준화 필요성 발제 취지의 제안이었으나 회원국들의 적극적 지지로 표준화 추진 동의가 이루어져 표준화 준비 항목(PWI)으로 승인되었다. ETRI 정상진 책임이 프로젝트 에디터를 맡고 국내 기술 전문가들의 참여와 국립전파연구원 JTC 1/SC 39 전문위원회의 지원을 통해 표준화를 진행할 계획이며 초안 작성 및 Form 4 형식의 신규 표준화 제안서를 개발하여 표준화 승인 투표로 제출할 계획이다.

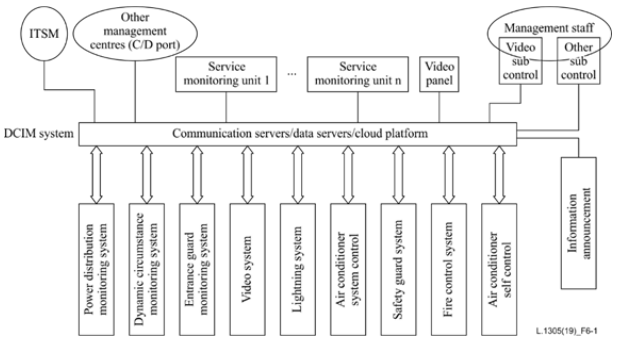
3.2 데이터센터 에너지 효율 관련 ITU-T SG 5 국제표준화 동향

ITU-T SG5 WP3 산하 Q11(기후변화 완화 및 스마트 에너지)이 데이터센터 효율 측정 및 개선 관련 표준 개발을 진행하고 있는데, 특히, 데이터센터 설비 효율을 개선하기 위한 표준 개발에 주력하고 있다. 표 3은 Q11에서 진행되고 있는 데이터센터 관련 표준 개발 현황을 요약한 것이다.

표 3. ITU-T WP3/Q11의 데이터센터 관련 표준개발 현황

표준번호	표준명칭	상태
ITU-T L.1300	그린 데이터센터 구축 지침	제정 (2014)
ITU-T L.1301	데이터센터 에너지 관리 시스템의 데이터 집합 및 통신 요구사항	제정 (2015)
ITU-T L.1320	데이터센터의 전원공급장치 및 냉각장치의 에너지 효율 측정 지표	제정 (2014)
ITU-T L.1302	데이터센터 및 통신망 센터의 인프라 에너지 효율 평가 방법	제정 (2015)
ITU-T L.1303	그린 데이터센터 에너지 절감 시스템의 기능 요구사항 및 프레임워크	제정 (2017)
ITU-T L.1305	빅데이터와 AI 기반의 데이터센터 인프라 관리시스템	제정 (2019)
ITU-T L.1306	엣지 데이터센터 규격	제정 (2023)
ITU-T L.1307	엣지 컴퓨팅을 위한 마이크로 데이터 센터 에너지 효율	제정 (2024)
ITU-T L.1311	이종 서버 대상 에너지 효율 측정 방법 및 지표	제정 (2025)
ITU-T L.1327	데이터센터 냉각 기술 선택에 대한 시나리오 기반 선택 지침	제정 (2024)
ITU-T L.1381	데이터센터 스마트 에너지 솔루션	제정 (2020)

데이터센터 인프라 관리시스템(DCIM)은 IT 설비가 원활하게 동작할 수 있도록 데이터센터 인프라의 실시간 모니터링을 제공하는 시스템이다. DCIM은 통합 시스템 내에서 무정전 전원 공급장치, 공조장치, 배전 설비 등을 포함한 모든 유형의 인프라를 동시에 관리하며, 관련 데이터 분석 및 분류를 통해 데이터센터 운영 효율성을 극대화하고 안정성을 도모한다. 데이터센터 인프라 관리시스템은 기본적인 정보 수집 및 전송장치를 사용해서 인프라 정보를 종합적으로 모니터링 및 관리한다. 그림 6은 데이터센터 인프라 관리시스템 구조의 예를 나타낸 것으로, 그림 상의 모든 하위 시스템이 존재할 필요는 없으며, 상위 시스템으로 통합하여 구성하는 것도 가능하다.



〈그림 6. 데이터센터 인프라 관리시스템 구조 예시[9]〉

3.3 데이터센터 에너지 효율 관련 국내 표준화 동향

국내에서는 TTA PG424 스마트 에너지/환경 프로젝트그룹에서 데이터센터 관련 표준화가 진행 중에 있으며, 데이터센터 구축, 효율 측정 및 평가, 효율 개선 등의 분야에서 다양한 표준이 개발되고 있다. 또한, 국립전파연구원 및 국가기술표준원을 통한 데이터센터 구축 및 효율 모니터링 시스템 관련 국가 표준도 개발되었다. 표 4는 데이터센터 관련 국내 표준개발 현황을 요약한 것이다.

표 4. 데이터센터 관련 국내 표준개발 현황

표준번호	표준명칭	상태
KCS.KO-09.0065	그린 데이터 센터 구축 지침	제정 (2012)
KCS.KO-09.0082	그린 데이터 센터 수준 진단 모델	제정 (2012)
KS X 4151-1	데이터센터 에너지 효율 모니터링 시스템 - 제1부: 일반 요구사항	제정 (2015)
KS X 4151-2	데이터센터 에너지 효율 모니터링 시스템 - 제2부: 에너지효율 종합적 판단지표	제정 (2015)
TTAK.KO-10.0767	클라우드 데이터 구축 참조모델 - 제1부: 건물형	제정 (2014)
TTAK.KO-10.0768	클라우드 데이터센터 구축 참조모델 - 제2부: 조립형	제정 (2014)
TTAK.KO-10.0769	클라우드 데이터센터 구축 참조모델 - 제3부: 컨테이너형	제정 (2014)

표준번호	표준명칭	상태
TTAK.KO-10.0762	클라우드 데이터센터의 에너지 효율성 평가 프레임워크	제정 (2014)
TTAK.KO-10.0764	데이터센터 에너지 효율 성능 지표 – 서버	제정 (2014)
TTAK.KO-10.0765	데이터센터 에너지 효율 성능 지표 – 재생에너지 사용	제정 (2014)
TTAK.KO-10.0837	데이터센터 에너지 효율 성능 지표 – 비용	제정 (2015)
TTAK.KO-10.1079	데이터센터 서버 전원 관리 인터페이스	제정 (2018)
TTAK.KO-10.1306	서버 전력 및 열 관리를 위한 베이스보드 관리 컨트롤러(BMC)의 기능 요구사항	제정 (2021)
TTAK.KO-10.1442	서버의 운영 전력 절감을 위한 지능형 베이스보드 관리 컨트롤러(BMC) 소프트웨어 기능 요구사항	제정 (2023)
TTAK.KO-10.0998/R1	스토리지 시스템의 소비전력 측정을 위한 분류 체계 및 요구사항	제정 (2023)
TTAK.KO-10.1519	지능형 베이스보드 관리 컨트롤러(BMC) 소프트웨어를 활용한 서버의 소비전력 및 장애 관리 구조	제정 (2024)

3.4 데이터센터 안전성 향상을 위한 표준화 동향

데이터센터 등의 중요 정보통신 설비에 대한 보호 및 안전성 향상을 위해서 과학기술정보통신부는 2024년5월23일 고시 2024-19호를 통해 '집적정보 통신시설 보호지침'을 개정하여 표 5와 같은 정보통신 시설의 각종 재난에 대한 보호조치를 수립하여 적용할 것을 권고하고 있다.

그러나, 상기 지침은 데이터센터의 전원공급이 중단되는 경우에 대한 대비를 중심으로 정의되어 화재 등의 사고에 대한 대응방안과 설비 안전운영 측면의 사항이 미흡한 상태이다. 따라서, 위 보호 지침을 기반으로 데이터센터의 자원 효율 향상 지침 내에 데이터센터의 안전성 향상과 관련된 데이터센터 예방관리, 변화관리 등의 사항이 포함하여 표준을 개정하는 작업이 표 6과 같이 진행되고 있다.

또한, 안전한 데이터센터 운영지침을 국내 표준으로 개발하여 데이터센터 관련 업계에서 활용할 수 있도록 추진할 예정이다. 그 외, 데이터센터 화재사고의 가장 큰 원인인 리튬 배터리의 안전성 확보 관련하여 기존 리튬배터리 기반 에너지저장장치의 운영 관련 표준들을 데이터센터에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

표 5. 집적정보 통신시설 보호지침 제4조 현황

제4조(각종 재난에 대비한 보호조치)
① 사업자는 집적정보통신시설에 안정적으로 전원을 공급하고 지진, 수해 및 화재 등으로 인한 전원공급이 중단되는 경우에 대비하기 위하여 다음 각호에 해당하는 조치를 하여야 한다. ② 사업자는 각종 전원장비를 보호하기 위하여 다음 각 호에 해당하는 조치를 하여야 한다. ③ 사업자는 도난 및 테러 등으로부터 집적정보통신시설을 보호하기 위하여 다음 각 호에 해당하는 조치를 하여야 한다. ④ 사업자는 지진, 수해 및 화재 등 재난으로부터 집적정보통신시설을 보호하기 위하여 다음 각호에 해당하는 조치를 하여야 한다. ⑤ 사업자는 지진, 수해, 화재 등 각종 재난으로부터 주요시설 설비의 안전운영을 위하여 주요시설 설비 안전운영매뉴얼을 수립하여 관련 직원을 대상으로 교육하고 주기적으로 관리감독하여야 한다. ⑥ 사업자는 주요시설 설비의 변경이 발생한 때에는 관련분야 전문가로부터 변경사항에 대한 안전성 검토를 받아야 한다. 이때 관련 전문가는 건축·전기설비·소방설비·재난 등 변경사항에 관련한 전문지식을 지닌 자를 말한다.

표 6. 데이터센터 안전성 향상 관련 표준개발 현황

표준번호	표준명칭	상태
ITU-T L.1300	그린 데이터센터의 구축 지침	제정 (2014)
IEC 62933-5-1	전기에너지 저장시스템의 안전 요구사항 – 일반 규격	제정 (2017)
IEC 62933-5-2	전기화학 기반 전기에너지 저장시스템의 안전 요구사항	제정 (2020)
IEC 62933-3-3	전기에너지 저장시스템의 에너지 집중형 및 비상전원 활용 요구사항	제정 (2022)
TTAK.KO-10.1366-Part1	전기저장장치(ESS) 통합 모니터링 시스템 – 제1부: 참조모델	제정 (2022)
TTAK.KO-10.1366-Part2	전기저장장치(ESS) 통합 모니터링 시스템 – 제2부: 데이터 수집 항목	제정 (2022)
–	데이터센터에서 리튬이온 배터리를 사용하는 전력설비 대상 안전관리시스템 – 제1부: 기능 요구사항 및 참조구조	예정 (2025)
–	데이터센터에서 리튬이온 배터리를 사용하는 전력설비 대상 안전관리시스템 – 제2부: UPS 데이터 모델	예정 (2025)

Ⅳ. 결론

본 고에서는 데이터센터의 에너지 효율을 측정하고 평가하기 위한 국내외 표준개발 동향과 안전성 향상을 위해 추진 중에 있는 국내외 표준화 동향을 살펴보았다. 데이터센터에는 다양한 세부 설비들이 존재하며, 이들 설비별로 효율을 측정하고 측정된 효율을 평가하며, 평가 결과를 기반으로 데이터센터의 구축 및 운영효율과 운영 안전성을 개선하기 위한 다양한 표준들이 필요하다. 이를 통해 개발된 표준들을 국내 데이터센터 업계에 적용함으로써 국내 데이터센터의 에너지 효율 및 운영 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

※ 본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원 에너지기술개발사업 [No. 20212020090053A, 건물 분산사업장 대상 클라우드 에너지관리시스템 핵심 기술 개발 및 실증연구] 사업의 일환으로 수행하였으며, 정보과학회지 제41권 제5호 제408호(2023.5) "탄소중립 데이터센터를 위한 표준화 동향" 원고에서 최근 표준화 현황을 추가로 반영하였다[10].

참고문헌

[1] 김용희, "AI가 바꾼 데이터센터의 패러다임," SK에코플랜트 ESG칼럼, 2025. 8. 7., https://news.skecoplant.com/plant-tomorrow/18677/

[2] 한국IDC, "한국IDC, 국내 데이터센터 전력 수요 2028년까지 연평균 11%로 증가 전망," 2025. 6., https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP53643725&utm_medium=rss_feed&utm_source=alert&utm_campaign=rss_syndication

[3] 과학기술정보통신부, "탄소중립 기술혁신 추진전략,", 3월, 2021.

[4] 산업통상자원부, "서비스산업 혁신을 지원하는 서비스 표준화 추진전략," 4월, 2021.

[5] ISO/IEC 30134-2:2016, "Information technology – Data centres – Key performance indicators – Part 2: Power usage effectiveness (PUE)," 2016.

[6] ISO/IEC 30134-6:2021, "Information technology – Data centres key performance indicators – Part 6: Energy Reuse Factor (ERF)," 2021.

[7] 정상진, 송준화, "안전하고 효율적인 데이터센터를 위한 표준화 동향," TTA 저널, 158권, 2015, pp. 87-93.

[8] ISO/IEC TR 20913:2016, "Information technology – Data centres – Guidelines on holistic investigation methodology for data centre key performance indicators," 2016.

[9] ITU-T L.1305, "Data centre infrastructure management system based on big data and artificial intelligence technology," 11월, 2019.

[10] 정상진, "탄소중립 데이터센터를 위한 표준화 동향," 정보과학회지 제41권 제5호 제408호, 2023.5, pp.29-35

Biographies

김용운

- 1990.2: 동아대학교 전자공학과 학사
- 1995.2: 포항공과대학교 정보통신학과 석사
- 1995.2~2001.4: 한국전자통신연구원 표준연구본부 선임연구원
- 2001.5~2004.4: ZTE퓨처텔 팀장, 이니텍 CTO/보안기술연구소장
- 2004.5~현재: 한국전자통신연구원 표준연구본부 책임연구원
- 2012.7.~2017.5.: JTC 1/SC 39/WG 2 (그린ICT) 컨비너
- 2013.1.~2016.12.: ITU-T SG 5/WP 3 (기후변화 대응) 부의장
- 2014.2.~현재: TTA PG 424 (스마트에너지/환경 프로젝트그룹) 의장
- 2018.4.~현재: 국립전파연구원 JTC 1/WG 11(스마트시티) 전문위원회 위원장
- 주요 관심분야: 디지털 트윈, 스마트 제조, 스마트시티
- e-mail: qkim@etri.re.kr

정상진

- 1999: KAIST 전산학과 졸업(학사)
- 2001: KAIST 정보통신공학과 졸업(석사)
- 2014: KAIST 정보통신공학과 졸업(박사)
- 2003~현재: 한국전자통신연구원 표준연구본부 표준전문위원/책임연구원
- 2021~현재: ITU-T SG5(환경 및 기후변화) Q11(스마트에너지) Rapporteur
- 관심분야: 탄소중립, 스마트에너지, 데이터센터, IoT 융합
- E-mail: sjjeong@etri.re.kr

디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화와 소버린 전략

류수영
이에이트㈜

Abstract

전 세계 탄소 배출의 약 40%를 차지하는 건물 부문은 탄소중립 달성을 위해 반드시 혁신이 필요한 영역이다. 기존의 건물 에너지 관리 방식은 설계 도면과 경험적 운영에 의존해 비효율이 크고, 에너지 사용량과 배출량을 정밀하게 파악하기 어렵다. 이에 따라 최근 디지털 트윈(Digital Twin) 기술을 활용해 건물의 설계·운영 데이터를 통합하고 실시간 데이터를 바탕으로 에너지 흐름을 최적화하려는 시도가 본격화되고 있다. 특히 해외 SaaS 플랫폼에 대한 의존도를 줄이고 자체 플랫폼을 확보하는 소버린 전략은, 에너지 효율화뿐 아니라 데이터 주권 확보와 글로벌 시장 경쟁력 강화라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 핵심 전략으로 부상하고 있다. 본 고에서는 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화의 개념과 구조, 주요 사례와 성과를 살펴보고, 이를 국산화 전략과 연계해 해외 시장으로 확장하기 위한 비즈니스 모델 및 정부 정책적 지원 방안을 제시한다.

Ⅰ. 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화의 구조

탄소중립 목표 달성을 위한 건물 부문의 근본적 전환은, 기존의 정적 설계 중심 관리 체계에서 동적 데이터 기반 운영 체계로의 패러다임 전환을 의미한다. 이러한 전환을 가능하게 하는 핵심 기술이 바로 Digital Twin(디지털 트윈)이다.[1] 디지털 트윈은 실제 건물의 물리적 상태와 운영 정보를 가상 공간에 실시간으로 복제(digital replica)하고, 이를 활용하여 모니터링–분석–예측–최적화에 이르는 전 과정을 자동화하는 것을 목적으로 한다.

디지털 트윈 기반 건물 에너지 관리 시스템은 일반적으로 물리 계층(Physical Layer), 데이터 계층(Data Layer), 모델링·시뮬레이션 계층(Model & Simulation Layer), 지능형 제어 계층(AI Optimization Layer)의 4계층 구조로 구성된다.

첫째, 물리 계층은 건물 내 설치된 설비 및 인프라 전반을 포함한다. 구체적으로는 HVAC(냉난방공조), 조명, 급·배수 설비, 엘리베이터, ESS(에너지저장장치)뿐만 아니라, 배관·덕트·전력계통 등 모든 물리적 자산이 해당된다. 이 계층에서는 온도, 습도, 조도, 전력 사용량, CO_2 농도 등과 같은 운영 데이터를 센서 및 계측장치를 통해 실시간으로 수집한다.

둘째, 데이터 계층은 Internet of Things(IoT) 센서와 BAS(Building Automation System)에서 수집한 운영 데이터를 Building Information Modeling(BIM) 기반의 설계 데이터 모델과 통합·연계하여 디지털 트윈 운영 데이터 모델을 구성하는 역할을 수행한다. 이 계층에서는 ISO 16739-1 IFC, gbXML, IEC 62541 OPC UA, NGSI-LD 등의 국제 표준 포맷을 적용하여 데이터의 상호운용성을 확보하는 것이 핵심이다. [3][4]

셋째, 모델링·시뮬레이션 계층은 BIM 기반 설계 데이터와 실시간 운영 데이터를 결합하여 건물의 에너지 부하 및 설비 운영 상태를 분석·예측한다. 이를 위해 EnergyPlus, TRNSYS, DesignBuilder, NFLOW 등의 시뮬레이션 엔진과 연동하여, 외기 온도 변화·점유자 행동 패턴·기상조건 변화 등에 따른 난방·냉방 부하 변동을 사전에 분석한다. [5][6]

넷째, 지능형 제어 계층은 Artificial Intelligence(AI) 기반 알고리즘을 활용하여 최적 운전 전략을 도출하고 이를 BEMS(Building Energy Management System) 및 FMS(Facility Management System)에 전달하여 설비를 자동 제어한다. 이 계층에서는 강화학습 기반의 최적화 기법을 통해 냉난방기의 가동 시점·출력 조절·ESS 충·방전 스케줄 등을 스스로 학습하고, 운전 효율을 지속적으로 개선한다. [7]

이러한 다층 구조를 통해 디지털 트윈 기반 에너지 관리 시스템은 건물의 설계–시공–운영 전 생애주기(Life Cycle)를 통합 관리할 수 있으며, 운영 중 수집된 데이터를 다시 설계·리모델링·정비 단계로 피드백함으로써 지속적인 성능 향상과 에너지 효율 최적화를 가능하게 한다.

Ⅱ. 주요 적용 사례와 실증 성과

디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 기술은 전 세계적으로 다양한 실증 프로젝트를 통해 에너지 절감·운영 효율화·ESG 대응력 강화 등에서 가시적인 성과를 입증하고 있다. 본 장에서는 국내 및 해외에서 수행된 대표적 적용 사례를 분석하여, 해당 기술의 실효성을 검증하고 향후 확산 가능성을 고찰한다.

2.1 국내 실증 사례

첫째, 서울에 위치한 S사 본사 건물에 디지털 트윈 기반 통합 에너지 관리 시스템이 구축되었다. 이 시스템은 이에이트(주)에서 구축한 것으로, Building Information Modeling(BIM) 모델과 2,000여 개의 Internet of Things(IoT) 센서를 연계하고, AI 기반 부하 예측 알고리즘을 적용하여 냉난방·조명 시스템의 운전을 최적화하였다. 운영 결과 연간 전력 사용량이 약 15% 감소하였으며, 설비 이상 조기 탐지를 통한 예방정비(PdM) 체계 구축으로 유지관리 비용이 10% 이상 절감 될 것으로 기대한다.



〈그림1. 빌딩 에너지 최적화 디지털 트윈 사례〉

둘째, 서울 복합개발 프로젝트는 이에이트(주)에서 제안하고 건설사에서 계획하고 있는 내용으로 설계 단계부터 BIM-to-FM 연계형 디지털 트윈 플랫폼이 적용되었다. 해당 플랫폼은 gbXML 기반으로 설계 데이터를 변환하여 EnergyPlus 시뮬레이션과 연동하여 설계단계에서 에너지 최적화 계획을 수립하여 실시 설계에 반영하고 있으며, 시공 단계에서 구축된 IoT 센서 데이터가 운영 단계 FMS(Facility Management System)와 자동 연계되도록 설계되었다. 시뮬레이션 분석을 통해 난방부하 18% 및 냉방부하 12% 절감을 목표로 하고 있으며, 유지관리 인력 투입량은 약 25% 감소할 것으로 예측하고 있다.



〈그림 5. 스파이더 웹 차트 기반 에너지 운영효율 모니터링 방법의 문제점[8]〉

셋째, 제주도의 스마트그리드 실증단지에서는 개별 건물 단위를 넘어 지역 단위에서의 분산 에너지 자원 통합 운영을 실증하였다. Korea Smart Grid Institute 주관으로 수행된 본 프로젝트는 태양광·풍력 발전 설비, Energy Storage System(ESS), 전기차 충전소 등에서 수집한 데이터를 디지털 트윈 기반 플랫폼에 통합하였으며, AI 기반 수요 예측을 통해 피크 부하를 20% 저감하였다. 또한, 신재생 전력 자가소비율을 기존 30%에서 52%까지 향상시키며, 에너지 자립형 스마트시티 모델의 가능성을 입증하였다. [8]

2.2 해외 실증 사례

해외에서도 다수의 대규모 프로젝트가 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화의 효과를 입증하였다.

Siemens는 Singapore Building and Construction Authority와 협력하여 싱가포르 정부청사 10개 동에 디지털 트윈 기반 에너지 관리 플랫폼을 구축하였다. 본 시스템은 1만여 개 이상의 IoT 센서, BIM 기반 자산모델, AI 기반 부하 예측 알고리즘으로 구성되며, 도입 후 냉난방 에너지 사용량이 22% 감소하고 유지관리 인력이 15% 감축되었다. 또한 실시간 탄소배출량 산정 및 ESG 자동 리포팅 체계를 구축하여 정량적·정성적 성과를 동시에 확보하였다. [9]

Microsoft는 Redmond 캠퍼스 125개 동에 걸쳐 AI+디지털 트윈 기반 에너지 관리 플랫폼을 적용하였다. 본 플랫폼은 매일 5억 개 이상의 센서 데이터를 처리하며, 기상 데이터와 설비 성능 데이터를 결합해 AI가 최적 운전 스케줄을 산출한다. 이로써 전력 사용량 30% 절감, 설비 고장률 25% 감소, ESG 공시 항목 자동 생성 등의 성과를 거두었다. [10]

또한, Johnson Controls는 Abu Dhabi National Oil Company와 협력하여 아부다비 산업단지 내 고에너지소비 건물군에 디지털 트윈 기반 통합 에너지 관리 시스템을 구축하였다. 그 결과 연간 에너지비용이 27% 절감되었으며, 설비 가동률은 95% 이상으로 유지되었고, ISO 50001 기반 에너지경영시스템 인증까지 획득하였다. [11]

2.3 종합 분석

이상의 사례를 종합하면, 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 시스템은 평균 15~30% 수준의 에너지 절감, 10~20%의 운영비 절감, 설비 신뢰성 및 ESG 보고 대응력 강화 등 정량적 성과를 제공함과 동시에, 설계-운영 데이터 통합, 부하 예측 기반 자율 제어, 실시간 탄소배출 모니터링 등 질적 혁신을 동반하는 것으로 나타났다.

따라서 본 기술은 단일 건물에서 대규모 단지·산업시설에 이르기까지 확장 가능한 에너지 효율화 플랫폼으로 기능하며, 건물 부문 탄소중립 달성 및 지속가능경영 체계 구축의 핵심 수단으로 평가될 수 있다.

Ⅲ. 소버린 전략의 필요성과 방향

디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 기술은 데이터 중심의 운영 의사결정과 플랫폼 기반 서비스화를 특징으로 하며, 이는 기술적 측면 뿐 아니라 데이터 주권, 보안, 산업 생태계 측면의 국가적 전략성을 함께 수반한다. 그러나 현재 글로벌 시장은 Siemens, Schneider Electric, Johnson Controls 등 해외 대기업 중심으로 재편되어 있으며, 국내 다수의 건물 에너지 관리 시스템은 이들 해외 SaaS 플랫폼에 대한 의존도가 높다. 이러한 의존 구조는 보안·비용·표준 비정합·데이터 국외 이전 등 복합적 리스크를 초래할 수 있다는 점에서 구조적 한계를 내포한다.

3.1 해외 플랫폼 의존에 따른 구조적 리스크

첫째, 해외 플랫폼 이용 시 건물의 실시간 에너지 데이터, 설비 배치 정보, 이용자 행동 패턴 등 보안 민감 정보가 국외 클라우드로 이전될 가능성이 존재하며, 이는 국가 기반시설(공공청사·병원·국방시설 등)의 사이버 보안 위협으로 직결될 수 있다.

둘째, 해외 솔루션은 초기 구축비용 외에도 지속적인 구독료·유지보수비·라이선스 비용이 수반되므로, 대규모 빌딩·단지·캠퍼스 수준에서 장기간 운영 시 총소유비용(TCO)이 과도하게 증가하는 문제가 발생한다.

셋째, 국내 설계·시공 단계에서 활용되는 Building Information Modeling(BIM)·gbXML 기반 데이터와 일부 해외 플랫폼의 폐쇄적 데이터 포맷 간 비정합으로 인해 ISO 16739-1 IFC, ISO 19650, IEC 62541 OPC UA 등 국제 표준 기반 상호운용성 확보에 장애가 발생한다. 이러한 비정합은 설계-운영 데이터 연계(BIM-to-FM)를 저해하여, 디지털 트윈 기반 에너지 최적화의 효과를 제한한다.

3.2 소버린 전략의 개념과 목표

이와 같은 문제를 극복하기 위해서는 국산 플랫폼을 중심으로 한 소버린 전략(Sovereign Strategy)이 필요하다.

소버린 전략은 단순한 기술 국산화 수준을 넘어, 데이터 주권 확보·산업 생태계 자립·보안성 강화·국제 표준 정합성 확보를 포괄적으로 달성하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는 다음과 같은 네 가지 핵심 목표를 포함한다. [13]

- 데이터 주권 확보: 건물의 실시간 에너지 데이터, 설비 운영 데이터, 점유자 패턴 데이터 등을 국내 인프라 내에서 안전하게 저장·처리
- 보안성 강화: 클라우드-온프레미스 하이브리드 아키텍처를 통해 국외 유출·사이버공격을 방지하고, 국가 보안 인증체계와 연계
- 산업 생태계 자립화: 국내 기업이 개발한 디지털 트윈 엔진·미들웨어·대시보드 솔루션을 공공 선도사업에 적용하여 산업 저변 확대
- 국제 표준 정합성 확보: Korean Agency for Technology and Standards 주도로 ISO 23247, ISO 50001, ISO 16739-1 IFC 등과 정합성을 확보하여 수출 경쟁력 강화



〈그림3. 국산 디지털 트윈 플랫폼 사례〉

3.3 소버린 플랫폼 구축을 위한 실행 전략

소버린 전략을 실현하기 위해서는 다음과 같은 다층적 실행 전략이 필요하다.

첫째, 핵심 엔진·미들웨어의 국산화가 요구된다. 이를 위해 EnergyPlus, OpenStudio 등 오픈소스 기반 시뮬레이션 커널을 활용한 국산 건물 부하 해석 엔진 개발과, BIM(IFC)-FM 간 연계를 위한 gbXML 변환기 및 API 미들웨어 국산화가 추진되어야 한다.

둘째, 데이터 보안 및 인프라 체계 강화가 필요하다. National Intelligence Service 및 국가정보자원관리원과 연계하여 사이버보안 인증체계를 구축하고, 클라우드-온프레미스 하이브리드 아키텍처를 도입함으로써 데이터 주권을 확보해야 한다.

셋째, 공공 주도 선도사업 발굴 및 적용이 요구된다. 정부청사·공공병원·국방시설 등 국가 기반시설에 우선 적용하여 실증 레퍼런스를 확보하고, 이를 기반으로 민간 대형 개발사업과 산업단지로 확산해야 한다.

넷째, 국제 표준화 활동 및 인증 연계를 강화해야 한다. 정부 주도로 buildingSMART International, International Electrotechnical Commission(IEC) 등 국제표준화 기구 활동에 적극 참여하고, 국산 플랫폼이 ISO 50001 기반 에너지 경영시스템(EnMS) 인증을 획득하도록 지원해야 한다.

3.4 기대 효과

소버린 전략이 성공적으로 구축될 경우, 해외 솔루션 라이선스 및 운영비를 대체하여 연간 수백억 원 규모의 수입 대체 효과를 창출할 수 있으며, 플랫폼 개발·운영·데이터 분석 분야에

서 전문인력 수요 증가에 따른 일자리 창출이 기대된다. 또한, 데이터 주권을 중시하는 신흥국 시장에서 규제 적합성과 보안 신뢰성을 무기로 한 수출 경쟁력 확보가 가능하며, 건물 부문을 넘어 스마트산단·스마트시티·스마트야드 등 연관 산업으로 파급될 것이다.

Ⅳ. 해외 시장 진출 전략

디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 플랫폼은 본질적으로 데이터 및 소프트웨어 중심 산업이기 때문에 국경을 초월한 확산 가능성이 높다. 특히 ASEAN·Middle East·Latin America 등 신흥국을 중심으로 한 스마트시티 및 에너지 효율화 수요의 급격한 증가는, 한국의 디지털 트윈 실증 경험을 기반으로 한 해외시장 진출의 전략적 기회를 제공하고 있다. 본 장에서는 이러한 기회요인을 기반으로 한 시장 수요 분석, 진출 모델, 전략적 고려사항 및 단계별 추진전략을 고찰한다.

4.1 해외 시장 수요 및 기회요인

첫째, 신흥국에서는 도시화와 에너지 위기가 동시에 심화되고 있다.

ASEAN 및 Middle East 지역은 급속한 도시 인구 증가로 인해 건물 수요가 지속 확대되고 있으며, 전력 인프라 부족 및 에너지 가격 상승으로 에너지 효율화에 대한 정책적·경제적 수요가 강하게 나타나고 있다. [14]

둘째, Carbon Border Adjustment Mechanism(CBAM) 등 국제 규제 환경 변화는 운영단계 탄소배출(스코프2) 데이터의 실시간 산정 및 보고 체계 구축을 요구하고 있다.

디지털 트윈 기반 에너지 관리 시스템은 실시간 배출량 산정 및 ESG 보고 자동화를 가능케 함으로써 이러한 규제 요구에 대응하는 핵심 수단이 될 수 있다.

셋째, World Bank·Asian Development Bank·Inter-American Development Bank 등 국제개발금융기관(DFI)은 스마트시티·에너지 효율화 인프라에 대한 ODA·융자 프로그램을 대폭 확대하고 있다.

이들 프로젝트는 데이터 주권·표준 정합성·ESG 효과를 중시하므로, 국산 플랫폼 기반의 소버린 전략을 적용한 한국형 모델이 경쟁력을 가질 가능성이 높다.

4.2 진출 비즈니스 모델

해외 시장 진출은 국가별 여건과 규제 환경에 따라 다음과 같은 4가지 대표 모델로 구분할 수 있다. [15]

1. PPP(민관합작) 컨소시엄 모델

- 한국 플랫폼 기업, 현지 정부·공기업, 국제금융기관(DFI)으로 구성
- 현지 인허가 및 규제 리스크를 최소화할 수 있으며, 대규모 도시개발 사업에 적합
- 예: 베트남, 말레이시아 등

2. ODA 기반 EPC+O&M 모델

- 공적개발원조(ODA) 자금을 활용해 초기 구축비를 조달하고, 이후 운영·유지보수(O&M)를 수익 구조로 전환
- 중남미·아프리카 등 재정여력이 낮은 국가에 적합

3. 하이브리드 플랫폼 공급 모델

- 클라우드-온프레미스 혼합형 아키텍처를 적용하여 데이터 주권 규제를 충족
- 현지 데이터센터 또는 공기업 IDC 내 플랫폼을 설치해 사이버보안 및 주권 이슈를 해소

4. 레퍼런스 사이트 기반 수출 모델

- 세종·부산 스마트시티, 빌딩 에너지 디지털 트윈 등 국내 실증 사례를 패키징하여 해외에 제시
- 사업 초기의 신뢰 확보 및 설득력 제고에 효과적

4.3 전략적 고려사항

해외시장 진출은 기술력만으로는 성공을 보장할 수 없으며, 정치·제도·문화·금융 환경 등 비기술적 요인에 대한 종합적 고려가 요구된다.

- 정치·규제 리스크 관리: 정부 교체, 법령 개정 등 환경 변화에 대비한 장기계약·지분구조 설계 필요
- 문화·운영 관행 차이: 설비 운영 및 유지보수 역량이 낮은 지역에는 교육·자동화 패키지 제공
- 현지 인증 및 조달 체계 부합성: ISO 50001, ISO 23247, ISO 16739-1 IFC 등 국제표준 호환성 확보
- 금융·환위험 관리: Export-Import Bank of Korea, Korea Trade Insurance Corporation 등과 연계한 금융·보증 활용

4.4 단계별 추진 로드맵

한국 기업이 실질적으로 글로벌 시장을 개척하기 위해서는 다음과 같은 3단계 추진전략이 요구된다. [15]

1. 레퍼런스 확보 및 브랜드화

- 국내 실증(세종·부산·건물에너지 디지털 트윈 등)을 고도화하고, 국제 전시·컨퍼런스 및 buildingSMART International 활동을 통해 브랜드 인지도를 제고

2. 전략국 진출 및 파트너십 구축

- 초기 타깃 국가(ASEAN, Middle East 등)를 선정하여 현지 EPC·ICT 기업과 JV 설립
- 한국형 표준모델(K-Reference Model)을 제시

3. 현지화 및 플랫폼 상업화

- 다국어 UI 지원, 교육·유지보수 패키지 제공, 현지 데이터 센터 구축 등을 통해 하이브리드 플랫폼으로 상업화
- SaaS 구독형 비즈니스 모델로 확장

4.5 기대 효과

이와 같은 전략을 통해 한국은 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 플랫폼을 국내 특화기술에서 글로벌 수출산업으로 전환할 수 있다.

구체적으로는 ▲플랫폼·시뮬레이션엔진·데이터분석 SaaS 수출을 통한 신산업 창출, ▲ODA 기반 에너지외교 네트워크 강화, ▲국제 ESG 투자 유치 기반 확보, ▲신흥국의 데이터 주권 요구에 대응 가능한 소버린 플랫폼 수출모델 확립 등의 효과가 기대된다.

V. 정부의 정책적 지원 방안

디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 산업은 건설·에너지·ICT·데이터 산업이 융합된 복합 신산업으로서,민간의 기술개발 노력만으로는 생태계 구축에 한계가 존재한다. 따라서 정부 차원의 정책적 지원과 제도적 기반 마련이 병행되어야 하며, 이는 민간기업이 기술개발 → 실증 → 상용화 → 수출의 전주기 사업화 사이클을 완성하는 데 필수적이다. 해외 주요국들은 이미 정부 주도로 표준화·인증체계·R&D·금융지원·공공조달 연계 정책을 추진하여 관련 산업을 전략적으로 육성하고 있으며, 한국 역시 적극적 공공정책介入(public policy intervention)을 통해 글로벌 시장 선도 기반을 확보할 필요가 있다. [16][17]

5.1 표준화 및 인증체계 구축

우선적으로, 국제 표준과의 정합성을 확보한 국가 차원의 디지털 트윈 건물 표준화 정책이 필요하다. 구체적으로는 Korean Agency for Technology and Standards 주도로ISO 16739-1 IFC, ISO 23247, ISO 50001, ISO 19650 등과의 정합성을 확보하는 국가표준을 제정하고, buildingSMART International, International Electrotechnical Commission(IEC) 등 국제표준화기구 활동에 적극 참여하여 국산 플랫폼의 국제 표준 적합성을 확보해야 한다. 또한, 에너지절감률·운영효율·보안성·상호운용성 등을 평가항목으로 하는 국가 인증제도를 도입하여 국내 디지털 트윈 기반 에너지관리시스템의 품질·신뢰성 검증체계를 구축하고, 한국에너지공단의 ZEB·친환경건축 인증제와 연계하여 조달시장 진입 장벽을 완화할 필요가 있다.

5.2 R&D 및 실증·상용화 지원

핵심 기술개발을 위한 장기·대규모 연구개발(R&D) 투자가 필수적이다.구체적으로는 EnergyPlus, OpenStudio 등 오픈소스 기반 커널을 활용한 국산 시뮬레이션 엔진 개발, gbXML 기반 BIM-to-FM 미들웨어 및 API 플랫폼 개발이 요구된다. 아울러, 세종·부산 스마트시티, 국가 공공청사, 산업단지 등을 테스트베드로 지정하여 R&D-실증-상용화가 연계되는 구조를 마련하고, 실증 성공 시 조달 및 민간시장 진입을 연계하는 패스트트랙 제도를 도입해야 한다.

5.3 금융·수출지원 및 해외인증 지원

해외시장 진출 확대를 위해 금융 및 보증 지원체계를 강화해야 한다. 한국수출입은행 및 한국무역보험공사와 연계하여 수출금융, 환위험 보증, 프로젝트 파이낸싱(PF) 등을 제공하고, 디지털 트윈 플랫폼 수출 전용 펀드를 조성하여 중소·중견기업의 초기 시장 진입을 촉진해야 한다. 또한, LEED, BREEAM, ISO 50001 등 해외 주요국의 조달·인허가 인증 취득 지원 프로그램을 운영하고, World Smart City Expo 등 국제 전시회 참가비·홍보비 지원을 통해 해외 레퍼런스 확보를 촉진해야 한다.

5.4 전문인력 양성 및 산업생태계 조성

지속 가능한 산업성장을 위해서는 융합형 전문인력 양성 체계 구축이 필요하다. 대학·산업계 연계형 디지털트윈·BIM·에너지 분석 융합 교육과정을 신설하고, 현장 실습 및 전문가 자격제도를 도입하여 실무역량을 확보해야 한다. 또한, 데이터 과학·기계학습·시뮬레이션 분야의 전문인력을 배출함으로써 산업 전반의 인적 기반(knowledge base)을 강화해야 한다.

5.5 공공수요 창출 및 초기시장 확보

공공부문을 중심으로 한 초기시장 창출은 민간 확산의 전제조건이다. 정부청사·공공병원·국방시설·지자체 건물 등에 국산 디지털트윈 플랫폼을 우선 적용하고, 「디지털트윈 기반 에너지관리 선도지구」를 지정하여 시범사업을 운영해야 한다. 또한, 선구매 후상용화 제도를 적용하여 공공조달을 통한 민간 확산을 촉진할 필요가 있다.

5.6 종합적 고찰

요약하면, 정부는 표준화–R&D–금융–인증–인력–공공수요라는 6대 정책축을 통합 지원함으로써 민간기업이 기술개발 → 실증 → 사업화 → 수출의 전주기 산업 생태계를 구축할 수 있도록 해야 한다. 이는 한국이 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 분야에서 글로벌 선도국으로 도약하기 위한 필수적 전제조건이라 할 수 있다.

Ⅵ. 결론

본 고는 디지털 트윈 기반 건물 에너지 최적화 기술의 구조와 실증적 효과를 분석하고, 이를 토대로 소버린 전략 구축, 해외시장 진출, 정부 정책적 지원 방안을 종합적으로 제시하였다. 디지털 트윈 기반 시스템은 에너지 사용량 15~30% 절감, 운영비 10~20% 절감, 설비 신뢰성 향상, ESG 보고 자동화 등 정량적·정성적 성과가 다수의 실증 프로젝트에서 입증되었으며, 이는 건물 부문의 탄소중립 실현을 위한 핵심 기반 기술로 기능할 수 있음을 시사한다.

특히, 건물 에너지 최적화 분야에서의 디지털 트윈 적용은

① 설계-시공-운영 전 생애주기 데이터를 통합 관리할 수 있고,

② IoT·시뮬레이션·AI 기반의 폐루프(closed-loop) 운영 최적화 체계를 구현할 수 있으며,

③ 실시간 탄소배출량 산정 및 ESG 보고 체계 구축이 가능하다는 점에서 기존의 BEMS 기반 모니터링 체계를 지능형 자율제어 기반으로 전환하는 구조적 혁신이라 할 수 있다.

그러나 현재 국내 시장은 Siemens·Schneider Electric·Johnson Controls 등 해외 플랫폼에 대한 의존도가 높아, 보안·데이터 주권·표준 비정합·라이선스 비용 등 다중 리스크에 노출되어 있다. 따라서 국산 플랫폼 중심의 소버린 전략(Sovereign Strategy)을 통해 데이터 주권 확보·산업 생태계 자립·보안성 강화·국제 표준 정합성 확보를 동시에 달성해야 하며, 이는 향후 해외시장 진출 경쟁력 확보의 필수적 전제조건이 된다.

해외시장 측면에서, ASEAN·Middle East·Latin America 등 신흥국을 중심으로 한 도시화·에너지 위기·탄소규제 강화는 디지털 트윈 기반 에너지 효율화 플랫폼에 대한 수요를 급격히 확대시키고 있다. 한국은 세종·부산 스마트시티, S사 건물, 제주도 스마트그리드 등 세계적 수준의 실증 레퍼런스를 보유하고 있어, PPP·ODA·하이브리드 플랫폼·레퍼런스 사이트화 전략을 통해 단계적 글로벌 시장 진출이 가능하다.

이를 위해 정부는 표준화·R&D·금융·해외인증·인력양성·공공수요창출 등6대 축을 통합 지원하여 민간기업이 기술개발→실증→사업화→수출의 전주기 산업 생태계를 완성할 수 있도록 해야 한다.

결론적으로, 디지털 트윈은 더 이상 탄소중립을 보조하는 도구가 아니라, 탄소중립 자체를 실현하기 위한 핵심 기반 인프라로 기능해야 한다. 한국은 기술력·실증경험·표준역량을 바탕으로 본 산업을 글로벌 전략산업으로 육성할 수 있는 최적의 위치에 있으며, 지금이야말로 산업계와 정부가 '디지털 탄소중립'이라는 국가적 비전 아래 결집해야 할 시점이다.

참고문헌

[1] ISO 23247: Digital Twin framework for manufacturing.

[2] ISO 50001: Energy management systems — Requirements with guidance for use.

[3] ISO 16739-1: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing.

[4] ISO 19650: Organization and digitization of information about buildings.

[5] EnergyPlus. U.S. Department of Energy. https://energyplus.net

[6] TRNSYS. University of Wisconsin-Madison. https://sel.me.wisc.edu/trnsys

[7] DesignBuilder Software Ltd. https://designbuilder.co.uk

[8] Korea Smart Grid Institute, 제주 스마트그리드 실증단지 운영결과, 2022.

[9] Siemens, Singapore BCA Smart Building Report, 2021.

[10] Microsoft, Redmond Campus Energy Optimization Case Study, 2022.

[11] Johnson Controls, ADNOC Smart Building Project Whitepaper, 2022.

[12] Schneider Electric, Digital Building Platforms Overview, 2023.

[13] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 디지털트윈 국산화 전략 보고서, 2024.

[14] World Bank, World Development Indicators & Energy Data.

[15] Asian Development Bank, Smart Cities and Energy Efficiency Initiatives.

[16] Korean Agency for Technology and Standards, 디지털트윈 표준화 로드맵, 2023.

[17] Korea Energy Agency, Zero Energy Building Certification Guidelines, 2023.

Biographies



류수영

1992년 : 경남대학교 산업공학과 학사

1996년 : HD현대중공업 ICT혁신센터

2019년 : HD한국조선해양 디지털혁신부문 PLM추진팀장

2021 년 : 이에이트㈜ DX사업본부, AX/DX개발본부 본부장

주요 관심분야 : Digital Transformation, Digital Twin, PLM, Energy Simulation, 제조온톨로지

e-mail : sy.ryu@e8ight.co.kr, syryu1015@gmail.com

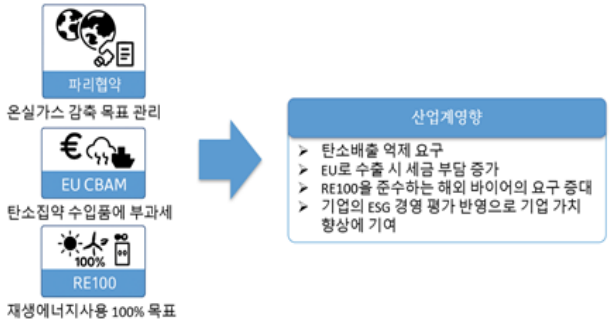
에너지 효율화와 탄소중립을 위한 인공지능 적용 동향

김말희, 허태욱, 이일우
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

Abstract
기후변화 및 탄소중립 대응은 전 세계 산업계의 시급한 과제이며, 인공지능(AI)은 이를 해결하기 위한 핵심 기술로 부상하고 있다. Google, Microsoft, Siemens 등 글로벌 기업들은 지능형 전력망 등을 포함한 에너지 효율과 온실가스 감축에서 성과를 보이고 있다. 우리나라 역시 스마트팩토리, FEMS/BEMS, 지능형 전력망 등에서 AI 활용을 확대하고 있다. 그러나, 에너지 및 탄소중립 복잡계 시스템에서의 솔루션 제시를 위한 AI전환 기술과 산업 전반 확산을 위한 지속가능 플랫폼 제공이 필요한 시점이다. 이를 위한 에너지 특화 파운데이션 모델을 기반으로 AI 에이전트와 피지컬 AI로의 진화는 국내 에너지 및 탄소중립 산업의 경쟁력 강화의 중심이 될 것이다. 본 논문은 산업계 AI 기술 관련 글로벌·국내 동향을 종합적으로 검토하고, ETRI의 관련 연구동향을 소개하며, 에너지 및 탄소중립 분야 AI 기술의 방향을 제시한다. 마지막으로 AI 기반 에너지 효율화와 탄소중립 실현을 위한 산업화 과제를 제안한다.

Ⅰ. 서론

탄소중립은 산업계를 비롯한 모든 영역에서 더 이상 선택이 아닌 필수 과제이다. 다음 그림 1에서와 같이 파리협약, EU 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism : CBAM), Renewable Energy 100%(RE 100) 등 글로벌 규제와 이니셔티브는 산업계 전반에 근본적 변화를 요구하고 있다.



〈그림 1. 주요 글로벌 탄소중립 정책과 산업계 영향〉

산업 부문은 전 세계 온실가스 감축의 핵심 영역으로 에너지 효율화와 탄소 배출 감축이 필요한 영역이다. IEA(2022)[1]에 따르면 산업 부문의 에너지 관련 이산화탄소 배출량은 전 세계 에너지 관련 이산화탄소 배출량의 약 25%를 차지하며, 중공업을 포함한 확장 범위에서는 WEF(2022)[2]의 추정치처럼 30% 이상으로 평가되기도 한다. Table 1은 IEA자료를 기반으로 산업 부문별 온실가스 배출량의 비율을 산정한 것이다.

Table 1. 전 세계 온실가스 배출 부문별 비중
(IEA, 2022 [3]기준 자체 작성)

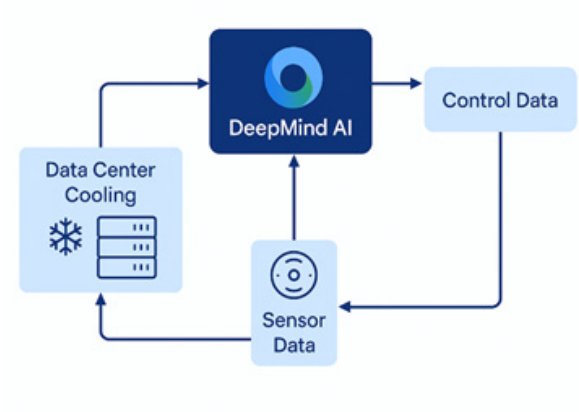
부문	배출 비중	주요 배출원 사례
발전	약 40%	석탄·가스 발전소, 전력 생산 과정
산업	약 30%	철강, 시멘트, 화학, 반도체 제조
수송	약 20%	자동차, 항공, 해운
건물	약 10%	난방·냉방, 전기 사용

최근 AI 기술은 방대한 데이터를 실시간으로 분석하고 예측 및 최적화할 수 있는 능력을 통해 산업 부문의 에너지 혁신을 이끌고 있다. 특히 최적의 제어를 학습하는 강화학습(Reinforcement Learning : RL)은 복잡한 시스템의 에너지 효율을 극대화하는 데 효과적인 것으로 입증되었다[4]. 본고에서는 글로벌 선도 기업의 AI 기반 에너지 효율화 사례와 ETRI 관련 연구 현황을 소개하고, 다양한 에너지 도메인 데이터의 이질성을 극복하고 활용사례와 서비스화를 위한 에너지 AI 기술 개발의 방향성과 핵심 산업화 과제를 제시한다.

Ⅱ. 글로벌 기업의 인공 지능 적용 사례

2.1 Google DeepMind: 데이터센터 최적화

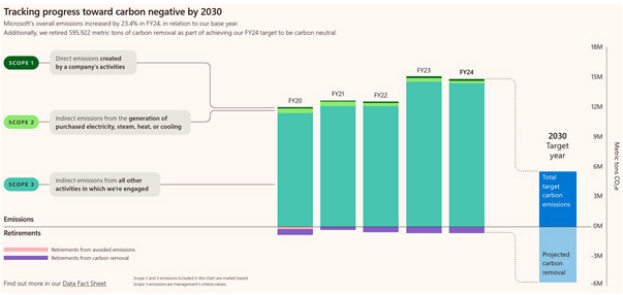
다음 그림 2에서와 같이, Google은 DeepMind의 AI 알고리즘을 통해 데이터센터 냉각 효율을 40% 개선하여, 전체 전력 사용량의 약 15%를 절감하였다[4]. 이후 이 기술은 Google Cloud 데이터센터 전반으로 확대 적용되어 운영 효율을 지속적으로 개선하고 있다.



〈그림 2. Google DeepMind AI 기반 데이터센터 냉각 최적화 구조〉

2.2 Microsoft: AI 기반 탄소 관리

Microsoft의 지속가능성 보고서 2025에 따르면, Microsoft는 AI를 탄소 관리의 핵심 수단으로 활용하고 있다. 데이터센터에서는 강화학습 기반 제어를 통해 냉각과 HVAC(heating, ventilation, and air conditioning) 효율을 높여 레드몬드 캠퍼스에서 약 30% 에너지 절감, 피닉스에서는 약 21% 물 사용 절감을 달성했다. 다음 그림 3에서와 같이, Microsoft의 AI 탄소 관리의 핵심은 탄소 배출량 추적, 분석, 보고를 자동화하고 최적화하는 플랫폼 구축에 있다. Microsoft는 자체 운영과 공급망 전반에서 발생하는 Scope 1(직접 배출), Scope 2(간접 배출), Scope 3(기타 간접 배출)의 모든 탄소 배출 데이터를 AI 기반으로 투명하게 관리한다[5].



〈그림 3. Microsoft Scope 1·2·3 탄소배출 관리 상황[5]〉

2.3 Siemens: 스마트 제조 및 설비 관리

Siemens와 Mercedes-Benz가 공동 개발한 디지털 에너지 트윈이 대표적인 사례인데, 이는 공장의 물리적 에너지 시스템을 가상으로 시뮬레이션 하여 에너지 사용 최적화 방안을 제시한다. 디지털 에너지 트윈은 산업 고객의 지속가능성 및 탈탄소화 목표 달성을 지원하는 지멘스 포트폴리오의 핵심 요소이다. 15~20%의 에너지 절감과 50%에 달하는 CO_2 감축 효과를 예상하고 있다[6].

2.4 Enel: 지능형 전력망 운영

이탈리아 Larderello 지역의 지열 발전소에서 Enel은 AVEVA PI System과 Predictive Analytics를 포함한 AI 기반 예측 분석 솔루션을 활용하여 수천 개의 센서 데이터를 실시간으로 수집·분석하고 설비 고장을 조기 탐지함으로써 운영 효율을 최적화하였다. 이를 통해 불필요한 화석연료 기반 백업 발전의 사용을 줄이고, 에너지 효율성을 높이는 동시에 24개월 동안 약 41만 톤의 CO_2 배출을 감축하는 성과를 거두었으며, 이는 95,000대 이상의 차량 연간 주행에서 발생하는 배출량에 해당한다. 이러한 성과는 AI 기반 예측 분석이 에너지 인프라의 안정적 운영과 탄소중립 달성에 직접적으로 기여할 수 있음을 보여준다[7].

III. ETRI 관련 연구 현황

에너지의 인공지능·디지털 전환(AI Transformation/Digital Transformation), 스마트(SMART)화가 탄소중립 실현의 여러 과정 중 중요한 이슈이며, ETRI는 다음과 같은 방향성을 수립하여 연구개발을 진행하고 있다.

'S'는 표준(Standardization)과 보안(Security)이며 산업의 응용 서비스 확대와 성과 검증을 위해서는 시스템 참조모델과 기준정보 등 설비와 장비, 데이터 및 연동 인터페이스 등 표준화가 필수적이다. 특히, 에너지시스템의 데이터 및 네트워크 보안은 필수적인 요소이다. 'M'은 시장(Market) 원리 기반의 에너지 절감과 최적화를 통한 비용 절감, 온실가스 사업을 수행하는 이해당사자들에게 정책지원과 보급사업 일변도에서 벗어나 누구나 참여할 수 있는 개방형 생태계 시장 환경을 마련해야 한다. 또한, 에너지시스템의 데이터 수집 네트워킹, 모니터링을 위한 엣지 장치 등 인프라 구축 시장, 온실가스배출권 거래 시장, 수요관리(Demand Response) 시장 등 현존하는 시장연계형 시스템 기술이 필요하다. 'A'는 시스템에 운영자의 개입을 최소화한 자동·자율화(Autonomy)를 의미하며, 아울러 이상 없이 정상적으로 운영될 수 있도록 가용성(Availability) 또한 제공되어야 한다. 'R'은 각종 센서, 전력량계, 유량계, 열량계 등 미터기, 인버터, 에너지관리 및 운영시스템 등으로부터 실시간 수집되는 데이터의 신뢰성(Reliability) 확보와 이를 기반으로 하는 계통의 운영에 대한 회복력(Resilience)을 담보할 수 있어야 한다. 인공지능 기반 최적화 기술과 디지털트윈 등을 통한 결과에 대한 시뮬레이션과 AI 분석·예측 결과들을 통해 신뢰성을 제고할 수 있다. 'T'는 에너지-AI-ICT-엔지니어링의 복합적인 기술융합(Technical Merge)의 집합체를 뜻하며, 산업환경은 다양한 에너지 공급원과 각종 제조 공정과 설비, 그리고 특성이 다른

수요자원들 혼재되어 있기 때문에 효율적인 융합 방안 모색과 구현이 이루어져야 한다. 이러한 방향성을 기준으로 ETRI에서 수행한 기술 몇 가지를 소개한다.

- 친환경/재생에너지 확산을 위한 문제(안정성, 수용성, 경제성, 지속가능성) 해결을 위한 빅데이터/AI 활용 플랫폼 기술[8][9]



〈그림 4. 친환경/재생에너지 확산을 위한 기술 개발〉

- 국민 소유 분산에너지자원(연료전지, 태양광, ESS 등) 전력시장 참여 및 P2P(Prosumer to Prosumer) 거래 공유 기술[10][11]



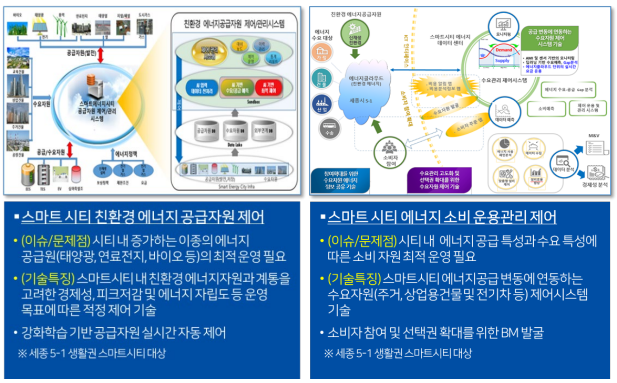
〈그림 5. 분산 에너지자원 공유/거래 기술 개발〉

- 에너지 다소비 공장·산업단지 에너지효율화를 위한 AI 기반 맞춤형 솔루션, FEMS 표준 플랫폼 기술[12][13]



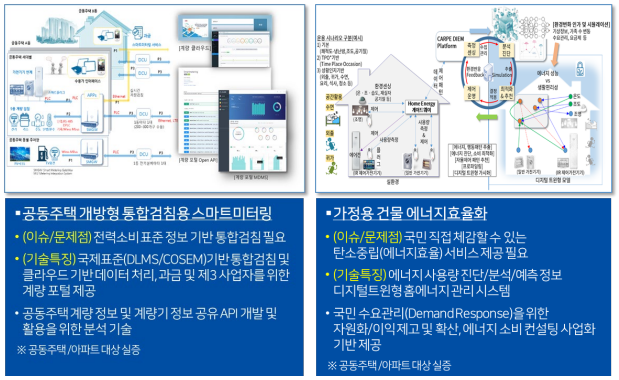
〈그림 6. 공장에너지관리시스템 기술 개발〉

- 분산에너지자원 기반 커뮤니티의 에너지 클라우드 수급 최적화 및 에너지효율화 기술[14][15]



〈그림 7. 스마트시티 에너지 관리 기술 개발〉

- Residential Building의 에너지관리 및 스마트 미터링, 효율화 서비스 플랫폼 기술[16][17]



〈그림 8. Residential Building 에너지 관리 기술 개발〉

- 탄소경제로의 전환을 대비한 제조 및 생산환경 전주기 탄소배출량 관리와 에너지효율 향상위한 AI 최적화 플랫폼 기술[18][19]



〈그림 9. 제조공장 효율향상화 및 탄소중립을 위한 기술 개발〉

특히 산업분야에 있어서, 국가적 아젠다인 탄소중립, 에너지 효율화 향상을 위해서는 양질의 공장에너지관리시스템과 보급확산 지원 표준플랫폼이 필요했으며, 이를 위해 에너지 다

소비 공장에 확산 가능한 FEMS 표준플랫폼을 개발했다. 다양한 설비와 공정으로 구성된 다수의 중소중견기업에 적용하기 위해 DevOps/MSA(Micro Service Architecture) 채용을 통해 composable architecture 구조 기반의 플랫폼을 제공한다. FEMS 표준플랫폼의 참조모델, 정보모델 및 3-rd 연동표준 가이드라인과 측정·검증(M&V) 가이드라인, 보안 가이드라인을 제공하고 있다. 특히, 공장의 규모, 업종, 공정(단속, 배치, 연속) 유형별 5가지 모델(배포형, 기본형, 고급형, 전문형, 연계형)에 따른 기본 프레임워크를 바탕으로 공장의 형상에 유연하게 적용할 수 있는 동적 플랫폼 기술이다. 에너지 다소비 4대 업종에 대해서는 디지털트윈 지식베이스를 통한 디지털트윈 인스턴스 및 서비스 관리, 에너지(스팀, 전력) 사용량 수집 · 학습을 통한 데이터 모델 기반 에너지 이상 사용 패턴 분석 기술 등을 포함하는 에너지 다소비 업종대상 맞춤형 디지털트윈 FEMS 기술도 개발했다. 업종별 12~15% 에너지 절감을 목표로 용해, 제지, 바이오/의약, 식품 공장을 대상으로 실증과 기술검증, 성과분석을 완료했다.

Ⅳ. 에너지 및 탄소중립 분야 인공지능 적용

최근 LLM(Large Language Model)의 확산으로 국가 주도의 한국형 소버린AI의 확보와 산업특화 AI의 개발에 대한 논의가 활발하다. 또한, AI의 진보에 대한 방향성과 규모, 속도, 주권에 대한 기술 이슈들이 등장하고 있다. AI의 진전이 '더 큰 모델'에서 '잘 작동하는 시스템'으로 이동중에 있으며, 이는 에너지 및 탄소중립 분야의 특징과도 맞닿아 있다고 보인다.

생성형 AI 모델을 기반으로 제공할 수 있는 에너지 및 탄소중립 응용은 서비스 제공 범위에서 한계가 있으며, 궁극적으로 Agentic/Physical AI와 같은 행동형 AI 모델로의 진화가 예측된다. 생성형 AI 응용은 실제 산업환경에서 요구되는 안정성, 생산성, 경제성을 충족하지 못한다. 해석가능성, 신뢰성 및 재현가능성을 제공하지 못하는 블랙박스 특성이 존재하기 때문이다.

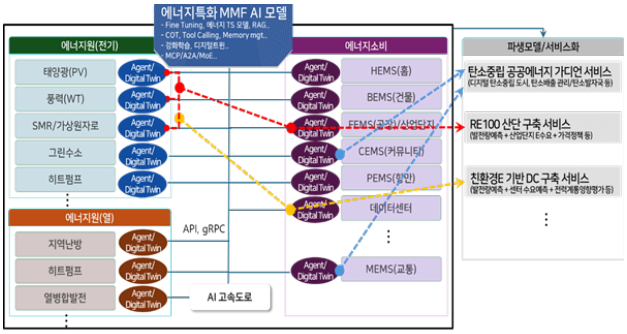
에너지 수급을 보다 정밀하고 능동적으로 조율할 수 있어야 하고, 공급 및 수요 예측의 고도화, 재생에너지의 간헐성 대응, 실시간 계통 운영 등 안정적 에너지 그리드를 구현하여야 하는 목적을 달성하는데 인공지능의 역할은 더욱 확대될 것이다.

현재 국내에서는 해당 영역의 목적을 달성하기 위해 사일로 에이전트 형태의 알고리즘 개발과 구현의 관점의 접근이 대부분이다. 에너지 정보는 시계열 데이터의 특징을 나타내는 바, 구글이나 아마존에서는 Chronos, TimesFM 등 시계열 특화 AI 모델을 활용한 전력 수요예측과 최적화 연구 강화가 이루어지고 있다.

단순한 정보 제공 외에 피지컬 AI로 발전하기 위해서는 고품질 데이터가 필요하게 되는데, 첫번째 방안은 에너지 시스템 및 각종 센서, 계측 장치로부터 생성되는 이종의 데이터를 표준화하여 수집·통합하는 방식이다. 데이터 형식과 품질을 일정 기준에 따라 정제(Fine Tuning)하고, 통일된 체계로 큐레이션하는 과정이 필요하다. 이미 수집된 데이터의 경우에는 사후에 정합성을 높이는 데이터 하모나이제이션 작업이 필요하다. 두번째는 표준화된 방식으로 새로운 데이터를 대규모로 생산하는 방식이다. 대규모 데이터 생산은 일관된 프로토콜과 품질체계하에서 수행되어야 한다.

에너지 및 탄소중립 분야에서 시계열 데이터 기반 서비스 개발을 위한 에너지 특화 파운데이션 모델 개발·제공이 필요하며, 이를 기반으로 MCP(Multi-Agent Collaboration Protocol), A2A(Agent to Agent) 및 MoE(Mixture of Experts) 등의 에이전트 연계형 통합운영 서비스가 제공되는 형태로 발전할 것으로 판단된다.

다음 그림10에 에너지특화 파운데이션 모델 기반의 에이전트와 파생모델/서비스화의 예를 나타내었다.



〈그림 10. 에너지 특화 멀티모달 파운데이션 AI모델 기반 서비스화 사례〉

우선 국내 공공/공개 데이터, 실증/유료 데이터들을 기본모델에 임베딩하고 Parameter Efficiency/Supervised Fine Tuning, Tool Calling 등을 통해 멀티모달 파운데이션 모델을 구축하고 에너지 공급과 소비 AI 에이전트를 구현한다. 단일 에이전트 기반의 서비스 제공도 가능하고, 에이전트 간의 협업, 통합운영 등을 통해 설정한 목표를 달성하는 결과를 도출하게 된다. 그림 상의 각 시스템과 도메인의 에이전트들 또한 다음과 같은 서브 에이전트들로 구현할 수 있다.

- 모니터링 AI 에이전트: 각 에너지원의 상태, 발전량 등과 가전, HVAC, 조명, 공정 설비 등의 소비량 데이터를 실시간 수집 및 전처리, 이상탐지 수행
- 진단/예측 AI 에이전트: 시계열 데이터 기반의 상태 예측, 이상 발생의 원인 추론 및 관련 변수 식별과 전이 가능성 진단
- 자율제어 AI 에이전트: 기동정지, 충방전 제어, 수요관리 제어 등 최적 제어 파라미터 산출 및 적용

오케스트레이션 에이전트는 의사결정과 관련된 상기 각 에이

전트들의 역할 분담(workflow), 정보통합 및 액션 수행을 담당하게 된다. 예를 들어, 태양광 셀과 패널의 상태, 발전량, 기후예보모델, 발전량예측 알고리즘 등의 데이터를 기반으로 최적의 발전상태를 유지하며 발전소유자들의 수익을 증대시킬 수 있는 에이전트를 구현하고, 산업단지의 에너지 수요를 예측하는 에이전트와 협업하여 RE100 산단 구축 서비스를 제공할 수 있다. 또한, 태양광 발전처럼 회전체가 없어 관성(inertia) 제공이 어려운 인버터 발전원에 인공관성을 부여해서 계통을 형성하는 그리드 포밍과 같은 안정화 기술을 개발하여, AI기반 계통연계 최적제어 등의 서비스가 피지컬 AI의 하나의 사례라고 볼 수 있다.

V. 에너지효율 및 탄소중립 디지털전환 과제

5.1. 이종 데이터의 확보·통합 및 지식화

에너지 산업에서 발생하는 데이터는 발전, 분배, 소비, 재생에너지, 수송 등 다양한 도메인에 분산되어 있으며, 형식과 구조가 상이하다. 단순히 데이터를 수집·집적하는 것만으로는 활용 가치가 제한적이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 온톨로지와 지식그래프를 기반으로 한 의미적 데이터 통합이 필수적이다[12]. 의미적 통합을 통해 도메인 간 상호 연계 및 통합 분석이 가능해지고, 데이터 활용의 범위가 개별 시스템을 넘어 에너지 전주기 최적화 및 효율화로 확장될 수 있다.

5.2. 에너지 효율화 컴퓨팅

Gartner는 2025년 중요 기술 트렌드로 에너지 효율적 컴퓨팅을 꼽고 있다. IT 지속가능성 확보를 위해서는 단순한 인프라 최적화만으로는 한계가 있으며, 계산 효율성과 에너지 소비를 현재 대비 100~1000배 수준으로 개선할 수 있는 새로운 기술, 아키텍처, 운영 방식의 도입이 필수적이다. 특히 AI 학습, 최적화, 시뮬레이션, 미디어 렌더링과 같은 고에너지 연산 애플리케이션이 주요 탄소 배출 요인으로 작용하고 있어, 이를 대상으로 한 혁신적 에너지 효율화 전략이 시급히 요구된다[20].

5.3. AI 기술의 실증 및 산업 전반 확산

현재 AI기술은 주로 개별 공급 및 저장 장치, 공장, 건물 단위의 에너지 관리 및 최적화에 적용되고 있다. 그러나 산업단지, 지자체, 도시 및 국가 단위 전력망 확장과 이를 위한 유연성과 범용성 제공이 필요하다. 이를 위해서는 대규모 실증 프로젝트를 체계적으로 추진하고, 다수의 현장 데이터를 확보하여 에너지 특화 인공지능 모델 성공 사례를 산업계 전반에 공유하여 기술의 신뢰성과 확산 가능성을 높여야 한다.

5.4. 국제 표준화 및 협력 강화

에너지·AI 융합의 확산과 지속 가능성을 위해서는 국제 표준화 참여가 필수적이다. 특히 IEC CIM(Common Information Model), W3C RDF/OWL, IEEE AI 표준 등과 같은 글로벌 표준 논의에 적극적으로 참여함으로써, 데이터 상호운용성과 국제 경쟁력을 확보할 수 있다. 표준화 활동은 단순한 기술 규격 참여를 넘어, 산업 생태계 내에서 디지털 혁신의 지속 가능성을 보장하는 핵심 기반으로 작용한다.

5.5. 정책·제도적 지원 및 인력 양성

에너지 전환 및 디지털 혁신은 정책·제도와 밀접하게 연계되어야 한다. 국내의 경우, 탄소중립·녹색성장 기본법, 글로벌 기업들의 RE100(Renewable Energy 100) 이행, 유럽연합의 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism: CBAM), 디지털제품여권(Digital Product Passport: DPP) 등 정책·제도적 변화에 대응한 전주기적 지원 체계가 필요하다. 동시에, AI-에너지 융합을 선도할 전문 인력 양성이 시급하며, 조직 차원의 디지털 인재 전략을 수립하고 주도해야 한다. 이러한 기반 위에서만 에너지 산업의 디지털 혁신과 지속 가능한 성장 달성이 가능하다.

VI. 결론

인공지능은 이미 글로벌 기업들을 중심으로 에너지 효율화와 탄소 감축의 핵심 도구로 자리 잡았다. 우리나라도 일부 성과가 있기는 하지만, 에너지 산업 전반 확산과 국가 단위 최적화에는 여전히 과제가 많다.

앞으로는 개별 도메인 최적화를 넘어, 데이터 통합과 지식화를 통해 에너지 시스템 전체를 최적화해야 한다. 에너지 특화 멀티모달 파운데이션 AI 모델의 확보와 다양한 에너지효율화, 탄소중립 서비스의 구현을 통해 지속가능한 플랫폼으로서의 역할을 확대해 나가야 할 것이다. 인공지능 모델들이 하루가 멀다하고 공개되고 있다. 이에, 전통산업 영역인 에너지 산업 효율화와 탄소중립 과학기술적 기여 측면에서 인공지능 기술을 효과적이고 적극적으로 활용하는 것이 중요한 방향이다. 우리나라 독자적인(소버린)의 에너지 및 탄소중립 파운데이션 모델 확보와 新서비스의 개발은 비용절감, 생산성향상, 수익창출의 산업화 기반이 될 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. [No.RS-2023-00237018]

참고문헌 (IEEE 스타일)

[1] International Energy Agency (IEA), Tracking Industry 2022, Paris, France, 2022. [Online]. Available: https://www.iea.org/energy-system/industry

[2] World Economic Forum, The Net-Zero Industry Tracker 2022, Geneva, Switzerland, 2022. [Online]. Available: https://www.weforum.org/publications/the-net-zero-industry-tracker

[3] International Energy Agency (IEA), "Global CO_2 emissions by sector, 2019-2022," Paris, France. [Online]. Available: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019-2022

[4] J. Evans and D. Gao, "DeepMind AI reduces Google data centre cooling bill by 40%," DeepMind Blog, 2016. [Online]. Available: https://deepmind.google/discover/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/

[5] Microsoft Corporation, 2025 Environmental Sustainability Report, Redmond, WA, USA, 2025. [Online]. Available: https://www.microsoft.com/en-us/corporate-responsibility/sustainability/report/

[6] Automotive World, "Siemens and Mercedes-Benz transform future of sustainable factory planning with digital energy twin," Automotive World – News Release, Apr. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.automotiveworld.com/news-releases/siemens-and-mercedes-benz-transform-future-of-sustainable-factory-planning-with-digital-energy-twin

[7] AVEVA Group plc, Enel Success Story: How Predictive Analytics Helped Enel Reduce CO_2 Emissions and Optimize Geothermal Power Operations, 2022. [Online]. Available: https://www.aveva.com/en/perspectives/success-stories/enel

[8] 태양광 보급확대를 위한 국내 태양광발전시스템 빅데이터 기반의 유지관리비용 저감기술개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415168215.

[9] 소규모 분산자원 중개시장서비스 상용화 기술개발 및 실증 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415163256.

[10] 주택 대상 잉여전력 거래 및 공유 서비스 플랫폼 개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415181826.

[11] 전력중개거래 기반 플러스에너지 주택단지 설계 및 운영기술 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415182185.

[12] 에너지 다소비 업종 대상 맞춤형 공장에너지 관리시스템 기술개발 및 실증 보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 2410006079.

[13] 공장 에너지관리 시스템 보급형 표준 플랫폼 개발 및 실증 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 2410005881.

[14] 친환경 에너지공급 자원 제어 시스템 개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415174575.

[15] 스마트시티 에너지 소비 운영 관리를 위한 제어 시스템 개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415174582.

[16] 공동주택(민수용) 소비자 편익을 위한 개방형 차세대 통합검침용 스마트 미터링 기술 개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 1415174367.

[17] 가정 에너지 사용량 실시간 진단 및 지능형 자율제어/관리 시스템 원천기술 개발 최종보고서, 한국에너지기술평가원, 과제번호 141582004.

[18] AX기반 제조·서비스에서 전주기 제로터치를 달성하기 위한 디지털 혁신요소기술 개발 사업계획서, 정보통신기획평가원, 과제번호 2710085680.

[19] 배터리·자동차 산업 대상 제품 전주기 탄소발자국 플랫폼(MCF) 개발 및 AI 기술 기반 탄소 저감 기술 개발 사업계획서, 한국산업기술진흥원, 과제번호 2410011732

[20] N. Jones, Top Strategic Technology Trends for 2025: Energy-Efficient Computing, Gartner Research, Stamford, CT, USA, ID G00818764, Oct. 21, 2024.

Biographies



김말희

1996년 : 서강대학교 전자계산학과 학사
1998년 : 서강대학교 전자계산학과 석사
2006년 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
주요 관심분야 : 에너지 융합 ICT, AI기반 탄소중립기술, 에너지효율/수요관리 등
e-mail : mariekim@etri.re.kr



허태욱

1999년 : 경북대학교 전자공학과 학사
2001년 : 경북대학교 전자공학과 석사
2015년 : 충남대학교 컴퓨터공학 박사
주요 관심분야 : 에너지 융합 ICT, AI기반 탄소중립기술, 에너지효율/수요관리 등
e-mail : htw398@etri.re.kr



이일우

1992년 : 경희대학교 컴퓨터공학과 학사
1994년 : 경희대학교 컴퓨터공학과 석사
2007년 : 충남대학교 전산학 박사
주요 관심분야 : 에너지ICT, 탄소중립 대응 기술, 에너지효율/수요관리, AI융합, 유무선네트워크 등
e-mail : ilwoo@etri.re.kr

디지털 트윈 기반 분산 에너지 생태계: 탄소중립 실현을 위한 스마트 실증 플랫폼

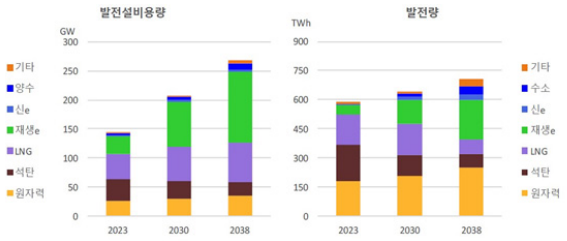
이상엽, 임성민
한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터

Abstract

대한민국은 2038년까지 무탄소에너지 발전 비중 70% 달성이라는 국가적 목표를 설정했으나, 인공지능(AI: Artificial Intelligence) 및 반도체 산업의 폭발적 성장으로 인한 전력수요 급증이라는 전례없는 도전에 직면해 있다. 이러한 상황에서 태양광, 풍력 등 간헐성 재생에너지원의 대규모 보급은 전력계통 안정성 확보라는 기술적 난제를 동반한다. 본고는 이러한 도전을 극복하기 위한 핵심 전략으로서 '디지털 트윈 기반의 스마트 실증 플랫폼'의 중요성을 조명한다. 본고에서 제시하는 스마트 실증 플랫폼은 분산에너지 시스템의 복잡성을 해결하고 탄소중립 실현을 가속하기위한 국가적 차원의 디지털 인프라이다. 이는 특히 재생에너지원의 대규모 보급에 따른 전력계통의 기술적 난제를 해결하는 핵심전략으로 기능한다. 스마트 실증 플랫폼은 단순한 모방을 넘어, '고충실도 자원모델링', '국제표준 기반 인터페이스', '실시간 시뮬레이션 연계', 그리고 '사용자 저작도구'라는 네가지 핵심기술이 마치 유기적인 신경망처럼 상호 작용하며 미래 에너지 시스템의 자율 운영을 가능하게 한다.

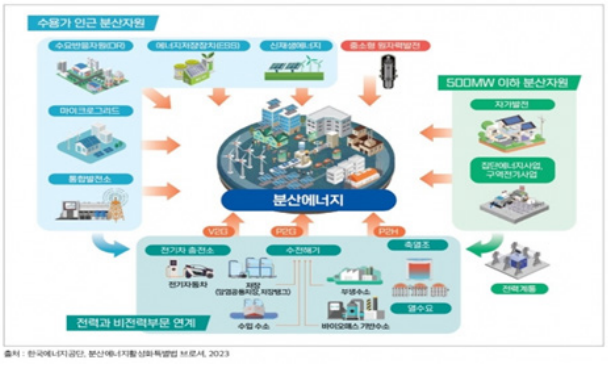
Ⅰ. 서론

기후변화 대응이 전 지구적 과제로 부상하면서, 세계 각국은 지속 가능한 미래를 위한 에너지 시스템의 근본적인 전환을 추진하고 있다. 대한민국 역시 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 통해 2050년 탄소중립 달성을 법제화하고, 2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 2018년 대비 40% 감축으로 상향 조정하며 책임 있는 국제사회의 일원으로서의 역할을 다하고 있다. 이러한 국가적 비전은 「제1차 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획」을 통해 구체화되었으며, 특히 전환 부문의 혁신은 목표 달성을 위한 핵심 과제로 자리 잡았다[1]. 이러한 배경하에 수립된 「제11차 전력수급기본계획」은 대한민국 전력 시스템이 직면한 이중적 과제를 명확히 보여준다[2].



〈그림 1. 11차 계획발전설비용량 및 발전량 변화〉

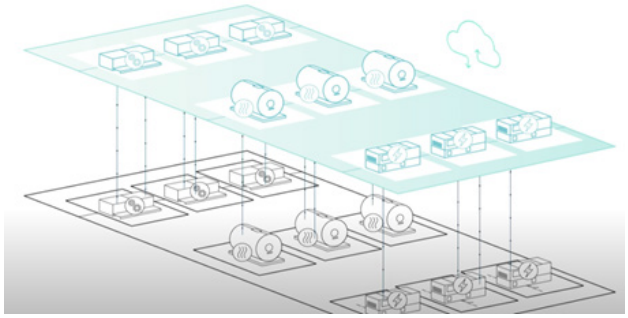
재생에너지원의 대규모 보급은 전력계통의 전압 불안정, 주파수 변동 등 전례없는 기술적 도전을 야기한다. 또한, 전통적인 중앙집중형 전력 시스템은 대규모 발전소와 소비지를 잇는 장거리 송전망 건설에 의존해왔으나, 이는 막대한 사회적 갈등과 물리적 한계에 직면해왔다. 이에 대한 근본적인 해결책으로, 정부는 에너지 정책의 패러다임을 '분산에너지'로 전환하는 결단을 내렸다. 2024년 6월 본격 시행된 「분산에너지 활성화 특별법」은 이러한 에너지 시스템 전환을 제도적으로 뒷받침하는 획기적인 법적 기반이다[3]. 이 법을 통해 가상발전소(VPP: Virtual Power Plant), 지역 차등요금제, 계통영향평가, 특화지역 지정 등 분산자원 통합을 위한 제도적 기반이 마련되었다. 이로써 분산에너지 생태계 조성과 계통 운영의 패러다임 전환이 본격화되고 있다. 그림2는 「분산에너지 활성화 특별법」에 명시된 분산 에너지의 정의와 범위를 시각적으로 보여준다. 이는 수용가 인근의 소규모 분산 자원부터 전력과 비전력 부문을 연계하는 다양한 에너지원을 포괄하며, 새로운 에너지 생태계 조성의 밑바탕이 된다.



〈그림 2. 분산에너지 정의 및 범위〉

Ⅱ. 디지털 트윈 기술 개념 및 필요성

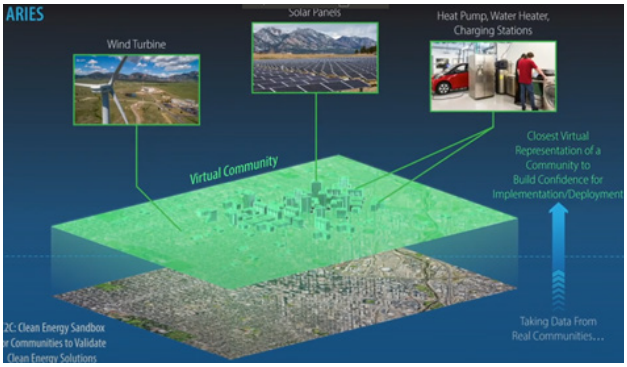
디지털 트윈은 물리적 자산이나 시스템을 가상 공간에 동적으로 복제하여, 현실에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 시뮬레이션하고 예측하는 기술이다. 에너지 분야에서 디지털 트윈은 개별 태양광 패널, 인버터, 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)부터 전체 마이크로그리드에 이르기까지 모든 요소를 포함하는 고충실도의 가상 복제품을 의미한다. 이 가상 모델은 실제 설비에서 수집되는 실시간 데이터를 지속적으로 반영하여 물리적 시스템의 상태와 동작을 거울처럼 비추는 동시에, 양방향 통신을 통해 가상 세계의 분석 결과를 현실 세계의 제어에 반영한다.



〈그림 3. AT&S, 에너지 디지털트윈〉

본 프로젝트에서 구축하는 '스마트 실증 플랫폼'은 이러한 에너지 디지털 트윈 개념을 국가적 차원으로 확장한 '혁신 샌드박스'이다. 이곳은 새로운 에너지 기술, VPP나 전력구매계약(PPA: Power Purchase Agreement)과 같은 비즈니스 모델, 그리고 복잡한 운영 전략들을 비용과 위험 부담 없이 시험하고 최적화할 수 있는 가상 환경을 제공한다. 예를 들어, 마이크로그리드 사업자는 특정 지역에 최적화된 발전원 조합을 가상으로 구성하고, 수십 년간의 운영 결과를 단 몇 시간 만에 시뮬레이션하여 사업의 경제성을 정밀하게 분석할 수 있다. 이는 막대한 초기 투자 비용과 실패의 위험을 획기적으로 낮춰, 더 많은 기업이 새로운 에너지 시장에 진입할 수 있는 문을 열어준다.

전력산업 현장에서는 이미 디지털 트윈을 적용한 다양한 사례가 등장하고 있다. 글로벌 전력기업 GE(General Electric)는 '디지털 파워 플랜트' 솔루션을 통해 발전소의 모든 설비를 디지털 트윈화하고 운전 효율성을 극대화해왔다. GE 측은 이를 통해 신규 복합화력발전소 한 기당 최대 2억 3천만 달러 규모의 비용 절감 효과를 달성할 수 있다고 보고한 바 있다[4]. 또한 Siemens는 독자적인 '전력망 디지털 트윈(Electrical Digital Twin)' 솔루션을 운영 중이다. 핀란드 TSO(Transmission System Operator)인 Fingrid의 사례에서 보듯, Siemens의 디지털 트윈 도입 후 데이터 수집 및 검증에 소요되던 수작업 비중을 기존의 80%에서 20%로 단축했고, 네트워크 모델의 정확성과 일관성을 크게 개선할 수 있었다[5]. 이 외에도 미국 국립재생에너지연구소(NREL)는 대규모 계통 시뮬레이터(RTAG: Real-Time Analytics for Bulk Grid)와 디지털 트윈·AI 기술을 융합하여 미래 제어실에 활용할 가상 운전지원 시스템을 개발 중이다[6]. 이처럼 디지털 트윈은 발전소 운전부터 계통계획, 재생에너지 통합, 실시간 운영관리에 이르기까지 전력망 전반에서 활용 가능성이 증명되고 있다.



〈그림 4. NREL, ARIES 디지털트윈 프로젝트〉

이러한 디지털 트윈 기반 테스트 및 실증 환경은 새로운 에너지 기술과 비즈니스 모델의 성능을 안전하게 검증하고 조기 보완함으로써 현장 적용의 위험을 줄여준다. 동시에 산업계와 학계, 정부가 공동 활용하는 혁신적 샌드박스로서 규제 샌드박스와 연계되어 정책 수립을 지원하고, 기술 표준화 및 시장 확산을 견인할 수 있다. 본 플랫폼은 이러한 글로벌 트렌드를 국내 환경에 구현함으로써, 기술 혁신을 통한 경쟁력 확보와 정책적 목표 달성에 기여하는 전략적 발판이 될 것이다

Ⅲ. 재생에너지 디지털 트윈 플랫폼의 기술적 구현

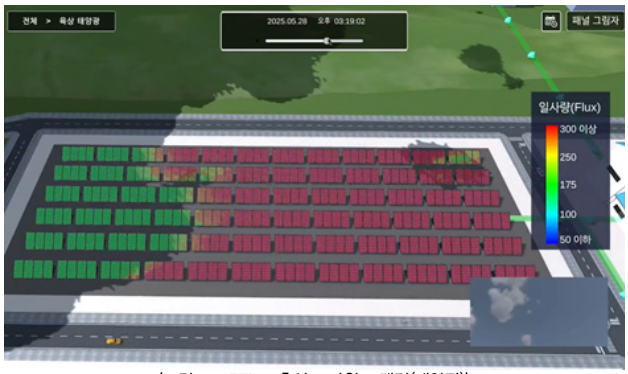
스마트 실증 플랫폼은 단순히 현실을 모방하는 것을 넘어, 미래 에너지 시스템을 예측하고 제어하는 지능형 플랫폼이다. 이는 네가지 핵심 기술 요소가 유기적으로 결합하여 하나의 통합된 신경망처럼 작동하기에 가능하다. 이 기술들은 데이터의 정밀한 복제에서부터 통합 검증, 자율적 의사결정, 그리고 혁신의 대중화에 이르는 체계적인 구조를 이룬다.

• 고충실도 자원 모델링

플랫폼의 신뢰성은 가상 모델이 현실을 얼마나 정확하게 반영하는지에 달려있다. '고충실도 자원 모델링'은 이를 위한 첫 단추이다. 이 기술은 에너지 변환의 기본 원리를 설명하는 전통적인 물리학 기반의 수학적 모델과, 방대한 실제 운영 데이터를 학습하여 비선형적 특성과 미세한 변화를 포착하는 AI 모델을 결합한 하이브리드 방식을 채택한다. 물리 모델이 시스템의 근본적인 동작 원리를 보장한다면, AI 모델은 실제 환

경에서 발생하는 복잡하고 예측하기 어려운 변수들을 반영하여 모델의 정확성을 현실 세계 수준으로 끌어올린다.

특히 이 모델들은 정적인 데이터를 넘어 동적인 환경과 실시간으로 상호작용한다. 3차원 지리정보시스템(GIS: Geographic Information System) 데이터를 활용하여 발전소 주변의 지형, 건물, 나무와 같은 구조물이 일조량이나 바람의 흐름에 미치는 미세한 영향을 계산에 반영한다. 더 나아가, 현장에 설치된 스카이 카메라의 실시간 이미지나 위성 영상을 분석하여 구름의 이동 경로와 속도를 파악하고, 이를 통해 수 분 후의 태양광 발전량 변화까지 정밀하게 예측한다. 이는 단순히 설비의 제원에 의존하던 기존의 예측 방식을 뛰어넘어, 살아 움직이는 현실 세계의 모든 변수를 반영한 고차원의 시뮬레이션을 가능하게 한다. 그림5는 플랫폼의 핵심기술인 고충실도 자원 모델링의 한 예시로, 태양광 발전소 주변의 지형 및 기상상태가 일사량에 미치는 영향을 계산에 반영하여 발전량 변화를 정밀하게 예측하는 모습을 보여준다.



〈그림 5. KETI, 고충실도 자원 모델링(태양광)〉

• 국제표준 기반 모델 인터페이스

분산 에너지 시스템은 태양광, 풍력, ESS, 전기차 등 수많은 제조사의 다양한 설비들이 복잡하게 얽혀 있는 이기종(Heterogeneous) 환경이다. 이들을 하나의 시뮬레이션 환경에 원활하게 통합하기 위해서는 '공통의 언어'가 필수적이다. 본 프로젝트는 이를 위해 분산 시뮬레이션 분야의 국제표준인 HLA(High Level Architecture, IEEE 1516)를 채택했다[7]. HLA는 각기 다른 시뮬레이션 시스템들이 '페더레이션(Federation)'이라는 하나의 연합된 시뮬레이션 안에서 원활하게 데이터를 교환하고 시간을 동기화할 수 있도록 지원하는 표준 아키텍처이다. 이 모든 상호작용은 RTI(Run-Time Infrastructure)라는 미들웨어 소프트웨어를 통해 이루어진다. 이 표준을 적용함으로써 플랫폼은 특정 기술이나 공급업체에 종속되지 않는 개방성과 확장성을 확보하게 된다. 이는 미래에 완전히 새로운 유형의 에너지 자원이나 혁신적인 제어 알고리즘이 등장하더라도, 표준 인터페이스를 통해 손쉽게 플랫폼에 통합하여 검증할 수 있음을 의미하며, 지속 가능한 기술 생태계를 구축하는 기반이 된다.

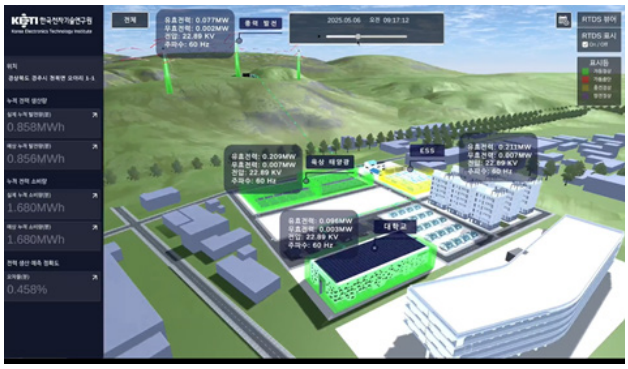
• 실시간 시뮬레이션 연계 플랫폼

고도로 정밀한 가상 모델이라도 실제 물리적 세계와의 상호검증 없이는 완전한 신뢰를 얻기 어렵다. 이 플랫폼은 시스템 전체와 개별 하드웨어 양단에서 다층적 검증 체계를 갖춤으로써 시뮬레이션의 신뢰도를 극대화한다.

- 배전계통 해석: 시스템의 장기적이고 거시적인 안정성을 평가하기 위해, 플랫폼은 미국 전력연구소(EPRI)가 개발한 'OpenDSS(Open-Source Distribution System Simulator)'를 활용한다. OpenDSS는 배전계통 전체의 전력 조류, 전압 변동, 고장 현상 등을 분석하는 강력한 오픈소스 시뮬레이터이다. 특히 '준정적(quasi-static)' 시간대별 시뮬레이션 기능을 통해 하루 또는 일 년과 같이 긴 시간 동안 시시각각 변화하는 재생에너지 출력이 배전망 전체에 미치는 누적 효과를 정밀하게 분석할 수 있다. 이를 통해 단기적인 현상뿐만 아니라 장기적인 관점에서의 계통 안정성과 효율성을 종합적으로 평가한다.
- 실시간 동특성 분석: 밀리초 단위의 빠르고 복잡한 전기적 현상을 분석하기 위해, 플랫폼은 RTDS(Real-Time Digital Simulator)와 같은 실시간 시뮬레이터를 사용한다. RTDS는 계통의 동적 거동을 실시간으로 모의하여, 고장이나 급격한 부하 변동과 같은 과도 현상이 발생했을 때 시스템이 어떻게 반응하는지를 정밀하게 분석한다. 이는 OpenDSS의 준정적 분석으로는 포착하기 어려운 순간적인 전압 강하나 주파수 변동 등을 검증하여, 시스템의 동적 안정성을 확보하는 데 핵심적인 역할을 한다.
- 물리적 하드웨어 검증: 가상 시뮬레이션의 최종 검증 단계로, 실제 전력 설비를 시뮬레이션에 직접 연결하여 시험하는 PHILS(Power Hardware-in-the-Loop Simulation) 기술을 도입한다. PHILS는 단순히 제어 신호만 주고받는 일반적인 HIL(Hardware-in-the-Loop)과 달리, RTDS 시뮬레이션 결과에 따라 실제 전력을 전력 증폭기를 통해 시험 대상 하드웨어(예: 인버터, 배터리)에 직접 인가하고, 그 전기적 반응을 실시간으로 측정하여 다시 시뮬레이션에 피드백하는 폐쇄 루프 시험 방식이다[8]. 이는 실제 전력망에 연결되었을 때 발생할 수 있는 모든 전기적 특성과 과도 현상을 가장 사실적으로 모사하여, 장비의 안정성과 성능을 실제 계통에 투입하기 전 최종적으로 검증하는 가장 신뢰도 높은 방법이다.

이 세 가지 기술은 상호 보완적으로 작동하며, OpenDSS와 RTDS 간의 교차 검증을 통해 모델의 정확성을 지속적으로 보완한다. 이 모든 가상-실증 연계 과정의 데이터 흐름은 클라우드 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템을 통해 통합 관제되어, 가상 세계의 디지털 트윈과 현

실 세계의 실증단지 데이터를 실시간으로 동기화하고 하나의 통합된 검증 체계를 완성한다.

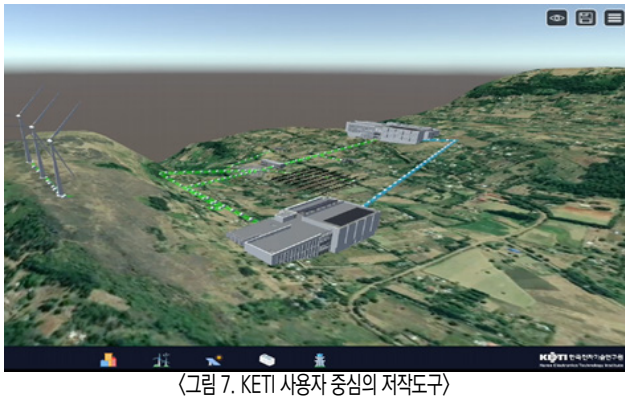


〈그림 6. KETI 실시간 시뮬레이션연계 플랫폼〉

• 사용자 중심의 저작도구

아무리 강력한 기술이라도 소수의 전문가만 사용할 수 있다면 그 파급력은 제한적이다. 이 플랫폼은 그래픽 사용자 인터페이스(GUI: Graphical User Interface) 기반의 저작도구를 제공함으로써 기술 접근성을 확대한다. 사용자는 복잡한 코딩 지식 없이도 3D 지도 위에 가상의 태양광 발전소나 전기차 충전소를 마우스로 끌어다 배치하고, "전력 요금이 두 배로 인상될 경우" 또는 "특정 송전선로에 고장이 발생했을 경우"와 같은 다양한 시나리오를 손쉽게 설정하여 시뮬레이션을 실행할 수 있다.

플랫폼은 시뮬레이션 결과를 투자수익률(ROI: Return on Investment) 분석 보고서나 직관적인 3D 시각화 데이터 형태로 제공하여, 사업자가 새로운 비즈니스 모델의 타당성을 신속하고 명확하게 검토할 수 있도록 돕는다. 이는 스마트 실증 플랫폼을 단순한 기술 검증 도구를 넘어, 새로운 에너지 서비스를 기획하고 사업 전략을 수립하며, 투자의 불확실성을 제거하는 강력한 비즈니스 혁신 플랫폼으로 기능하게 한다.



〈그림 7. KETI 사용자 중심의 저작도구〉

Ⅳ. 정책 및 사회적 함의

스마트 실증 플랫폼의 구축은 단순한 기술 개발을 넘어, 대한민국의 에너지 정책, 산업 구조, 그리고 사회적 가치 창출 방식에 깊은 함의를 지닌다. 이는 전력망의 안정성을 높이는 기술적 해결책인 동시에, 새로운 시장을 창출하고 국가적 목표 달성을 가속하는 사회 혁신의 인프라이다.

1. 전력수급 안정화와 지역 에너지 자립

디지털 트윈 플랫폼은 분산에너지자원의 도입과 운영에 따르는 불확실성을 크게 줄여 보급을 가속한다. 이는 대규모 송전망 건설에 대한 의존도를 낮추고, 지역 내에서 에너지를 생산하고 소비하는 '에너지 자립'을 촉진한다. 이는 전력계통의 회복탄력성을 높일 뿐만 아니라, 지역 주도형 재생에너지 확산 정책을 실질적으로 뒷받침하는 역할을 한다. 이러한 비전은 NREL이 제시하는 '자율 에너지 그리드(Autonomous Energy Grids, AEGs)' 개념과 맞닿아 있다. AEG는 중앙의 통제 없이도 개별 마이크로그리드나 지역 단위의 '셀(cell)'이 스스로 최적화되고, 필요에 따라 상호 협력하는 상향식(bottom-up) 전력망을 구상한다[9]. 이는 전체 시스템의 안정성과 회복력을 극대화하는 미래형 전력망의 청사진이다.

2. 신산업 창출: 가상 검증이 여는 새로운 에너지 시장

혁신적인 아이디어를 가진 기업이라도 실제 전력망에 서비스를 적용하기까지는 높은 기술적, 재정적 장벽에 부딪힌다. 스마트 실증 플랫폼은 이러한 진입 장벽을 극적으로 낮추는 '인큐베이터' 역할을 수행한다. VPP 사업자, 수요반응 서비스 제공자, AI 기반 발전량 예측 및 O&M(운영·유지보수) 솔루션 기업 등은 이 플랫폼을 통해 자사의 알고리즘과 비즈니스 모델을 사전에 검증하고, 성능과 수익성을 입증한 후 시장에 진출할 수 있다. GE가 '디지털 파워 플랜트'를 통해 발전소 운영에서 막대한 비용 절감 효과를 입증했듯이, 디지털 트윈 기반의 가상 검증은 자산 최적화를 중심으로 한 새로운 서비스 산업의 폭발적인 성장을 견인할 것이다.

3. 경제적 파급효과: 기술 국산화와 리스크 저감

현재 고도화된 에너지 관리 및 시뮬레이션 솔루션 시장은 소수의 글로벌 기업들이 주도하고 있다. 저비용·고효율로 운영 가능한 국산 디지털 트윈 플랫폼을 확보하는 것은 해외 기술에 대한 의존도를 줄이고, 국가 기술 경쟁력을 강화하는 중요한 과제이다. 또한, 수십조 원이 투입되는 국가 전력망 현대화 프로젝트는 막대한 재정적 리스크를 수반한다. 스마트 실증 플랫폼을 통한 '가상 검증(Virtual Validation)'은 잠재적인 설계 오류나 운영상의 문제를 사전에 발견하고 해결함으로써,

대규모 인프라 투자 실패 리스크를 최소화하는 경제적 안전장치가 될 수 있다.

4. 사회적 가치: 탄소중립과 균형발전을 위한 핵심 인프라

스마트 실증 플랫폼은 탄소중립과 넷제로(Net-Zero)라는 국가적 아젠다를 실현하기 위한 핵심 사회 인프라이다. 이 플랫폼은 재생에너지의 안정적인 확대를 기술적으로 뒷받침하여 기후변화 대응에 직접적으로 기여한다. Siemens가 자사의 디지털 트윈 솔루션을 통해 양방향 전력 조류의 복잡성을 관리하고 신재생에너지 통합을 간소화하는 것처럼, 이 플랫폼은 현대 전력망 관리의 근간이 되는 기술이다. 더 나아가, 지역 공동체가 스스로 에너지 프로슈머가 되어 에너지 정책에 참여할 수 있는 기술적 기반을 제공함으로써, 중앙과 지방의 균형발전 및 에너지 민주주의 실현에도 긍정적인 사회적 가치를 창출할 것이다.



〈그림 8. KETI, 국가종합에너지 실증단지 디지털트윈〉

V. 결론

'디지털 트윈 기반의 스마트 실증 플랫폼' 프로젝트는 단순히 현재의 문제를 해결하는 것을 넘어, 미래 에너지 시스템의 패러다임을 제시한다. 이 플랫폼에서 검증되고 고도화된 기술들은 점차 개별 마이크로그리드를 넘어 국가 전력망 전체로 확장될 것이다. AI와 디지털 트윈의 결합은 전력망이 스스로 상태를 진단하고, 고장을 예측하며, 최적의 상태로 자율 운영되는 '지능형 자율 에너지 시스템'의 등장을 예고한다. 국내에서는 분산에너지 특별법과 제11차 전력수급기본계획 확정, 국외에서는 IEEE 2800, FERC Order No.2023, EU Net-Zero Industry Act 등 규제, 표준, 산업정책이 동시에 전개되고 있다. 이러한 전환기에 디지털 트윈 기반의 스마트 실증 플랫폼은 정책 이행과 민간투자 리스크 저감을 동시에 달성하는 공공-민간 공용 테스트베드로 자리매김할 것이다. 또한, 대한민국이 탄소중립이라는 시대적 과제를 해결하고 미래 에너지 산업의 주도권을 확보하기 위한 필수적인 전략 자산이 될 것이다.

RE100 이니셔티브 확산과 글로벌 공급망의 탄소중립요구는 국내 제조업계의 재생에너지 도입을 가속화하고 있다. 이러한 글로벌 트렌드에 대응하기 위해서는 디지털 트윈을 통한 기업별 맞춤형 재생에너지 포트폴리오 설계 지원이 필요하다. 기업의 재생에너지 접근성 향상을 위한 VPP 모델 검증과 수익성 분석기능이 해당 플랫폼의 핵심 역할이 될 것이다.

본 연구에서 제시한 디지털 트윈 기반의 스마트 실증 플랫폼은 전북 군산 새만금국가산단 2공구 7-3구역에 조성 중인 에너지 국가종합실증연구단지를 기반으로 실제 구현되고 있다. 이 플랫폼은 2025년 10월 완공을 목표로 현재 해당 실증단지의 핵심 설비 및 인프라에 대한 디지털 트윈 구축이 진행 중이다. 완성될 실증단지는 태양광, 풍력, 수전해, ESS, AC/DC 시험연구동 등 차세대 에너지 기술의 통합 운영을 위한 다양한 실증 인프라를 갖춘 국내 최대 규모의 현장 검증 시설로 구축될 예정이다.



〈그림 9. KETI, 국가종합에너지 실증단지 구축〉

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00232017, 재생에너지 디지털 트윈 기반 e-실증단지 고도화)

References

[1] 2050 탄소중립녹색성장위원회, 「제1차 국가 탄소중립 녹색성장 기본계획」, 2023.
[2] 산업통상자원부, 「제11차 전력수급기본계획」, 2024.
[3] 산업통상자원부, 「분산에너지 활성화 특별법」, 법률 제19443호, 2023. 6. 13. 제정, 2024. 6. 14. 시행.
[4] GE Power & Water, "GE Power & Water Unveils the Digital Power Plant; a Revolutionary Energy Innovation to Meet Increasing Global Demand for Fast, Data-Driven, Secure Power Solutions," GE News, Sep. 29, 2015.
[5] Siemens AG, "Siemens Electrical Digital Twin," 2018.
[6] S. Choi, "Control Room of the Future," National

Renewable Energy Laboratory (NREL), Mar. 18, 2025.
[7] IEEE, “IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) — Framework and Rules,” IEEE Std 1516-2025, 2025.
[8] A. von Jouanne, E. Agamloh, and A. Yokochi, ‘‘Power hardware-in-the-loop (PHIL): A review to advance smart inverter-based grid-edge solutions,’’ Energies, vol. 16, no. 2, p. 916, Jan. 2023.
[9] C. O’Neil, “From the Bottom Up: Designing a Decentralized Power System,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), Feb. 18, 2022.

Biographies



이상엽

2003년 : 연세대학교 전기전자공학부 학사
2005년 : 연세대학교 전자공학과 석사
2019년 : 고려대학교 컴퓨터정보학 박사
2005년~2009년 : 삼성전기 중앙연구소 선임연구원
2009년~현재: 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터 센터장
주요 관심분야 : Digital Twin, Energy Management System, Energy AI
e-mail : syublee@keti.re.kr



임성민

2022년 : 한국외국어대학교 컴퓨터공학부 학사
2025년 : 연세대학교 컴퓨터과학과 석사
2021년~현재: 한국전자기술연구원 에너지IT융합연구센터
주요 관심분야 : Digital Twin, Energy Management System, Energy AI
e-mail : lsm7926@keti.re.kr

ETRI
한국전자통신연구원
Electronics and Telecommunications Research Institute



제4차 산업혁명을 선도하는
ICT Innovator

ICT Innovator leading the 4th Industrial Revolution

ETRI의 최첨단 기술은
새로운 영역과 새로운 가치를 만들어내고 있습니다.
꿈꾸는 모든 것을 현실로 구현하는 기술,

ETRI의 첨단 ICT기술은
세상을 더욱 풍요롭게 만들어갑니다.