

SW로 탄소중립을 지원하는 기후기술·기업 사례 연구

Case Study on Climate
Technologies and Businesses
Supporting Carbon Neutrality
with SW



Executive Summary

현재 인류가 직면한 최대의 위험은 기후위기다. 단기적으로는 극한 기상이 기승을 부리고, 장기적으로는 생물 다양성 감소에 따른 생태계 붕괴까지 이어질 수 있다. 이에 주요 선진국을 포함한 전 세계 130여 개국이 기후위기 극복을 위해 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다고 선언했다.

탄소중립은 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 순 배출을 제로로 만드는 것을 의미하며, 청정에너지 사용 확대, 에너지 소비의 효율화, 온실가스 고정 등을 통해 이룰 수 있다. 이처럼 탄소중립을 지원하고 기후변화에 대응하는 기술을 ‘기후기술’이라 칭한다. 기후기술 산업은 기후위기 극복의 핵심이 될 뿐 아니라 선진국의 차세대 성장 동력으로도 주목받는다.

최근 수년간 빅데이터, AI 등의 비약적 발전으로 다양한 산업 분야에서 혁신을 이끌어 낸 SW 기술은 기후 기술 산업에서도 중요한 역할을 차지한다. 특히, 국내 온실가스 배출량의 약 87%를 차지(2021년 기준)하는 에너지 분야에서 SW는 재생에너지의 불확실성을 줄여 안정적 공급을 지원하고, 산업·건물·수송 등의 에너지 소비 효율을 증진하는 데에 적극 활용되고 있다. 탄소중립 달성을 위해 SW(SW for 탄소중립)가 이미 전방위적으로 활약하고 있으며, 향후에도 더욱 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

반면, 디지털전환, 생성 AI 보편화 등으로 인해 SW 산업이 소모하는 전력량이 급증하는 것은 또 다른 문제다. 데이터센터의 연간 전력 소모량은 2022년 기준 460TWh로 프랑스(425), 독일(490)의 국가 연간 전력 소모량과 유사하며, 향후 더욱 급증할 전망이다. 따라서 국가 경쟁력의 핵심으로 떠오르는 AI, 빅데이터를 비롯한 SW 산업의 지속가능한 성장을 위해서도 탄소중립이 필요(탄소중립 for SW)하다. 이는 AI 반도체 및

소프트웨어정책연구소 SW기반정책·인재연구실

이은경 선임연구원 dr.eklee@spri.kr

이동현 선임연구원 dhlee1016@spri.kr

조원영 실장 wycho@spri.kr

데이터센터의 저전력화, 친환경 SW 생태계 구축 등으로 가능하다.

본 보고서는 온실가스 배출의 주원인인 에너지 분야에서, 탄소중립을 지원하는 SW 기술 및 기업의 사례를 탐구했다. 에너지 공급 쪽에서는 ‘재생에너지(식스티헤르츠)’, 에너지 소비 쪽에서는 ‘AI 반도체(리벨리온, 사피온, 퓨리오사AI) 및 데이터센터(구글)’, ‘SW 개발(그린SW재단)’, ‘건물(에너지엑스)’ 분야에 대해 현재 성과를 보이는 기업을 선정했다. 사례 연구를 기반으로 기후위기 극복에 기여하는 SW 기술의 실효성을 살펴보고, 탄소중립 달성에 SW 기술이 더욱 적극적으로 도입 및 활약하기 위해서 필요한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

The greatest threat to humanity today is climate change. In the short term, extreme weather patterns prevail, while in the long term, it could lead to ecosystem collapse due to the reduction in biodiversity. To tackle this, over 130 countries worldwide, including major advanced nations, have pledged to achieve carbon neutrality by 2050 to combat climate change.

Carbon neutrality refers to achieving a net zero emission of greenhouse gases, including carbon dioxide, through measures such as expanding clean energy usage, enhancing energy efficiency, CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage) and so on. The technology supporting carbon neutrality and addressing climate change is referred to as “climate technology.” The climate technology industry not only plays a crucial role in addressing climate change but also attracts attention as a future growth driver for advanced nations.

In recent years, software (SW) technologies, driven by significant advancements such as big data and AI, have led innovations across various industries. SW technology also plays a important role in the climate technology industry. Particularly in the energy sector, which accounts for approximately 87% of domestic greenhouse gas emissions (as of 2021), SW helps support stable renewable energy supply by reducing the uncertainty, and enhances energy efficiency in industries, buildings, and transportation. SW is already actively contributing to achieving carbon neutrality (SW for CN) and is expected to play an even more significant role in the future.

However, the increasing power consumption by the SW industry due to digital transformation and widespread adoption of AI poses another challenge. The annual power consumption of data centers is approximately 460TWh as of 2022, which is similar to the national annual power consumption of countries like France(425) and Germany(490). Therefore, achieving carbon neutrality is necessary for the sustainable growth of the SW industry (CN for SW), including AI and big data, which are emerging as key drivers of national competitiveness. This can be achieved through low-power AI chips and data center greening efforts.

This report explores SW technologies and companies supporting carbon neutrality in the energy

sector, the primary source of greenhouse gas emissions. It identifies companies demonstrating success in renewable energy(Sixtyhertz), AI chips(Rebellion, SAPEON, FuriosaAI), data centers(Google), SW development (Green Software Foundation), and building(EnergyX) sectors. Through case studies, it examines the effectiveness of SW technologies in addressing climate change and derives policy implications to facilitate the more proactive adoption and deployment of SW technologies for achieving carbon neutrality.

I . SW 기술과 탄소중립

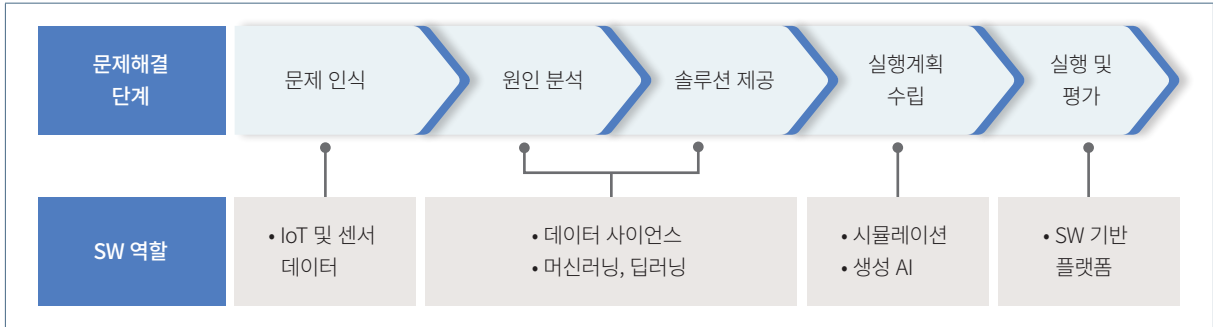
1. 사회혁신에 기여하는 SW·디지털 기술

■ 빅데이터, AI 등으로 촉발된 SW·디지털 기술의 비약적인 발전은 전 산업 및 사회 영역에서 난제를 해결하고 혁신을 견인하는 원동력으로 주목

- 환경, 재난, 의료 등 현대사회가 직면한 각종 국가난제*는 발생에 영향을 주는 변수가 많고 영향력의 범위도 넓어서 분석 및 예측의 난이도가 극상
 - * ‘국가난제’란 오래 반복되고, 인과관계 및 이해관계자가 복잡하고, 원인 규명과 해결 방법 적용이 어려운 문제들 중 국가 차원에서 공공성과 파급성이 큰 것을 의미
 - 과학기술정책연구원에 따르면, 2023년 우리나라 국가난제는 탄소중립 사회로의 전환, 급격한 인구구조 변화, 글로벌 공급망 충격 등이 선정¹
- 최근 SW·디지털 기술은 데이터 축적 및 알고리즘 개발에 힘입어서 [그림 1]과 같이 난제 해결의 전 과정에 기여하며 가시적인 성과를 보이는 추세
 - 질병 치료를 위한 유전자 분석 및 기후위기 대응을 위한 기상예측 분야에서 최근 SW 기술력이 강한 빅테크 기업 중심으로 혁신적 성과*가 도출
 - * 딥마인드의 유전자 변이 예측모델(AlphaMissense, 2023년 공개)은 질병 유발의 가능성을 판단할 수 있는 변이 비율을 0.1%에서 89%까지 향상시켜 원인 불명의 질병 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대
 - * MS의 기상예측 모델(ClimaX, 2023년 발표)은 기존의 가장 우수한 예측모델 대비 단기 예측 성능은 유사하고, 중기 예측에서는 더 높은 정확도 보유

¹ 과학기술정책연구원(2023.9.), 「2023 국가난제 EYE 가이드북」(<https://www.stepi.re.kr/site/nwpko/main.do>)

[그림 1] 문제 해결 프로세스와 SW의 역할



출처: NIA(2018), 「사회문제 해결형 SW 정책 발전방향」

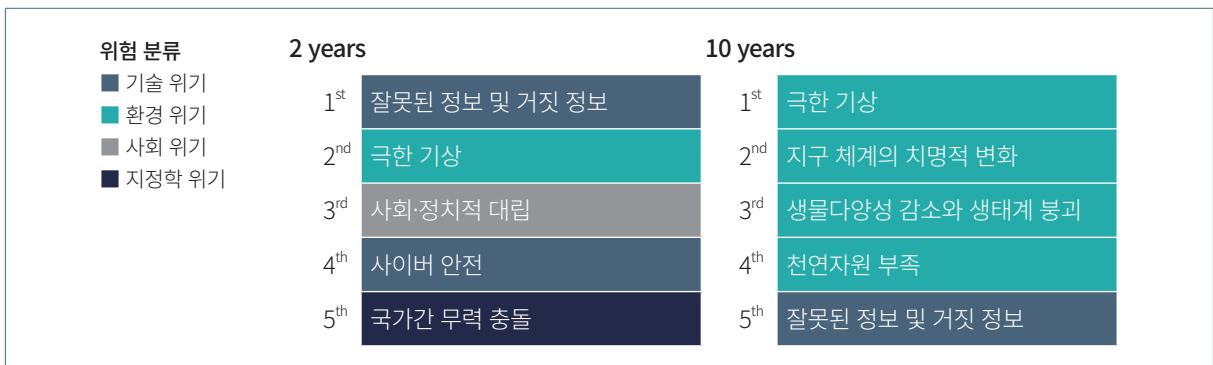
2. 탄소중립 시대의 기후기술

■ 현재 인류 최대 난제가 기후위기라는 것에 전 세계적 합의가 이뤄졌고, 기후위기 대응을 위해서 130여 개국이 2050년 탄소중립* 달성을 선언

* ‘탄소중립’은 이산화탄소를 포함한 6대 온실가스 순 배출량을 제로로 만든다는 의미로서 ‘넷제로(Net Zero)’와 같은 개념이며, 기후위기 해소의 필수 조건

- 세계경제포럼은 2024년 인류 최대 위협으로 기후위기로 인한 ‘극한 기상’을 선정했고, 장기적으로도 기후위기로 인한 이변을 가장 심각한 위협으로 예측
 - 우리나라의 경우, 과학기술정책연구원에서 소개한 2023년 10대 국가난제 중 하나로 ‘자원순환 경제 및 탄소중립 사회로의 전환’이 포함

[그림 2] 단기 및 장기 글로벌 위험 순위



출처: World Economic Forum(2024), 「The Global Risks Report 2024」

- EU, 미국, 한국 등 주요국은 탄소중립 달성을 법제화하고, 탄소배출 관련 단기 및 중장기 정책을 지속 수립
 - 우리나라는 2021년 세계에서 14번째로 탄소중립을 법제화*하고 2030년 감축 목표(2018년 대비 최소 40% 감축)를 설정했으나, 목표 달성을 위해서는 전 분야의 온실가스 감축 노력이 더욱 강화되어야 한다는 필요성 제기
 - * 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(2021년 9월 24일 제정 및 공포)
 - * 국내 온실가스 총배출량 연도별 추이(단위: 백만 톤): ('18)727 → ('19)701.2 → ('20)656.2 → ('21)678.1 → ('22)654.5
 - 미국 인플레이션감축법, EU 탄소중립산업법, EU 탄소국경제도 등 탄소 관련 통상법 제정도 이어지고 있어 탄소중립이 경제 영역에도 영향을 미칠 전망

■ 온실가스 배출량 감소 및 기후변화 대응을 지원하는 ‘기후기술’이 탄소중립의 열쇠이자 새로운 성장동력으로 주목받으며, 기후기술 산업이 급속하게 성장

- 국가녹색기술연구소는 기후기술을 대분류(3개), 중분류(14개), 소분류(45개)로 구분하고, 탄소중립녹색성장위원회는 클린·카본·에코·푸드·지오테크 5개로 구분
 - * 기후기술 분류체계는 아직 표준화된 바가 없고 국가나 기관마다 상이하지만, 온실가스 감축과 기후위기 적응이라는 목표를 지원하는 기술이라는 점에서 대동소이

[표 1] 녹색기술센터가 발표한 기후기술 분류체계

대분류 (3)	중분류 (14)	소분류 (45)
감축	(1) 재생에너지	수력, 태양광, 태양열, 지열, 풍력 등 8개
	(2) 신에너지	수소 제조, 연료전지
	(3) 비재생에너지	청정 화력발전·효율화, 핵융합 발전, 원자력 발전
	(4) 에너지 저장	전력 저장, 수소 저장
	(5) 송배전·전력IT	송배전 시스템, 전기 지능화 기기
	(6) 에너지 수요(사용)	수송 효율화, 산업 효율화, 건축 효율화
	(7) 온실가스 고정	CCUS, Non-CO2 저감
적응	(8) 농업·축산	유전자원·유전개량, 작물재배·생산 등 4개
	(9) 물	수계·수생태계 관리, 수자원 확보 및 공급 등 4개
	(10) 기후변화 예측 및 모니터링	기후예측 및 모델링, 기후정보 경보 시스템
	(11) 해양·수산·연안	해양생태계, 수산자원, 연안재해 관리
	(12) 건강	감염질병 관리, 식품안전 예방
	(13) 산림·육상	산림피해 저감, 생태·모니터링·복원
감축/적응 융합	(14) 다분야 중첩	신재생에너지 하이브리드, 저전력 소모 장비 등 4개

출처: 녹색기술센터(2019), 「녹색기후기술백서 2019」

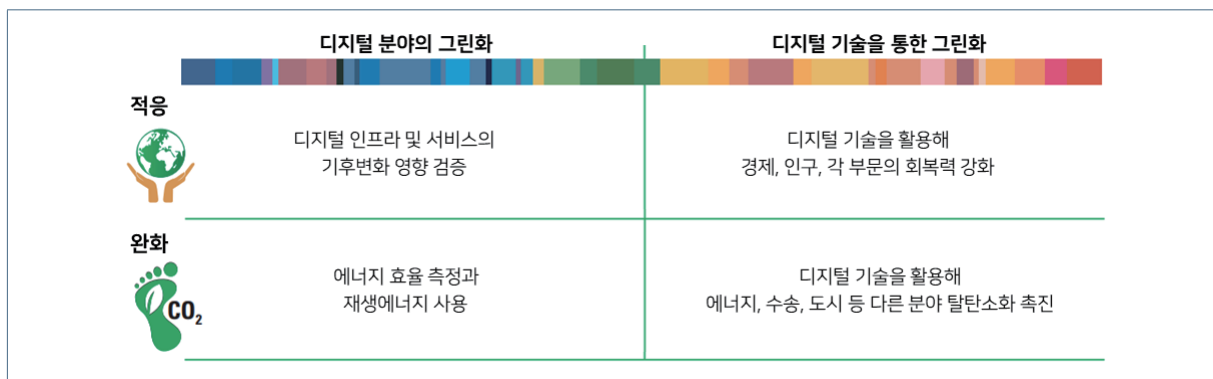
- 주요국의 탄소중립 정책과 환경 관련 시민의식 향상이 기후기술 산업 성장의 명확하고 긍정적인 신호가 되면서 전 세계적으로 투자가 급증
 - 국제에너지기구(IEA) 분석²에 의하면 글로벌 기후기술 산업은 2016년 169억 달러에서 2032년 1,480억 달러 규모로 성장할 전망
 - 기후기술 투자는 2022년 1.6조 달러 수준으로, 유니콘 기업이 80여 개 생겨났으나, 우리나라는 주요국 대비 투자금액이 작고 유니콘도 없는 상황³
 - * 국내 기후기술 투자규모는 1.5조 원으로 상위 10개국 평균(7.9조 원)의 13.3% 수준⁴

3. 기후기술로서의 SW·디지털 기술

■ SW·디지털 기술을 활용해 각 분야의 탄소중립을 지원(탄소중립을 위한 SW)하는 동시에 SW·디지털 분야가 배출하는 탄소를 저감(SW를 위한 탄소중립)하는 기술개발 및 정책지원에 대한 요구 증대

- 세계은행은 긴급한 기후위기 극복에 디지털 기술이 핵심 도구임을 강조하며, 녹색 정책과 디지털 정책의 상호 연결을 이해하고 통합을 추구할 것을 촉구⁵
 - 디지털 혁신으로 생산과 소비가 많은 부분이 비물질화되고, 이는 경제성장과 온실가스 배출 증가의 디커플링을 달성하는 기회로 작용

[그림 3] 그린-디지털 넥서스



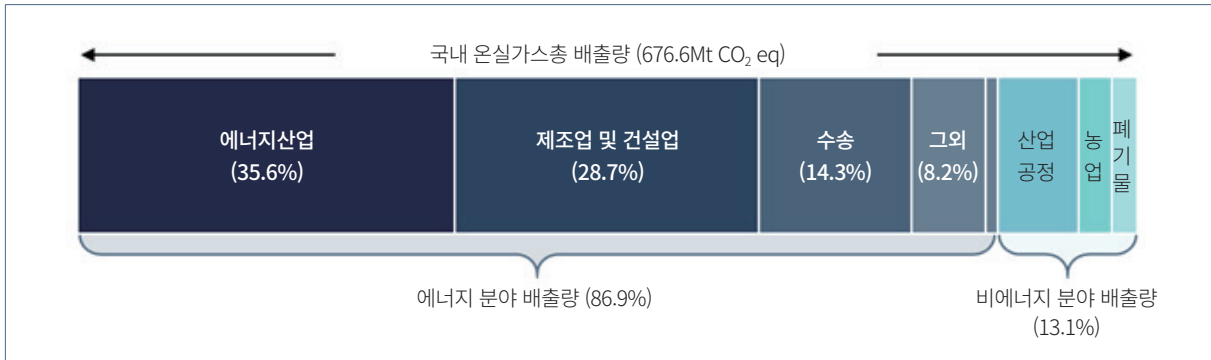
출처: World Bank

2 IEA(2023), 「Energy Technology Perspectives 2023」
 3 국무여협회 국제무역통상연구원(2024), 「기후테크 산업 동향 및 우수기업 사례를 통해 본 성공 전략」
 4 아산나눔재단 외(2023), 「기후테크 스타트업 육성 및 생태계 활성화를 위한 정책 제안」
 5 World Bank Group(2021), 「Green Digital Transformation」

■ (탄소중립을 위한 SW) SW·디지털 기술이 에너지 분야를 비롯한 기후기술의 각 영역에 융합되면서, 탄소중립의 핵심 요소기술로 주목

- 국내 온실가스 배출량의 86.9%(2021년 기준)를 차지하는 에너지 분야에서 디지털전환이 가속화되는 추세

[그림 4] 국내 온실가스 부문별 배출구성(2021년 기준)



출처: 환경부, 국가온실가스통계

- 에너지 분야는 데이터 프라이버시, 물리적 제약 등으로 디지털 기술 도입이 어려운 산업이었으나, 최근 빠르고 안전한 센싱 및 전송이 가능해지며 에너지 공급 및 소비 측면에서 전방위적으로 디지털화 진행

* [그림5]와 같이 에너지 흐름 전반에 걸쳐 데이터가 수집되고 분석에 활용되기 시작

- 전력 인프라 및 소프트웨어 투자 증가와 더불어 에너지 디지털화 시장은 2018년 520억 달러에서 2025년 640억 달러 규모로 증가할 전망⁶

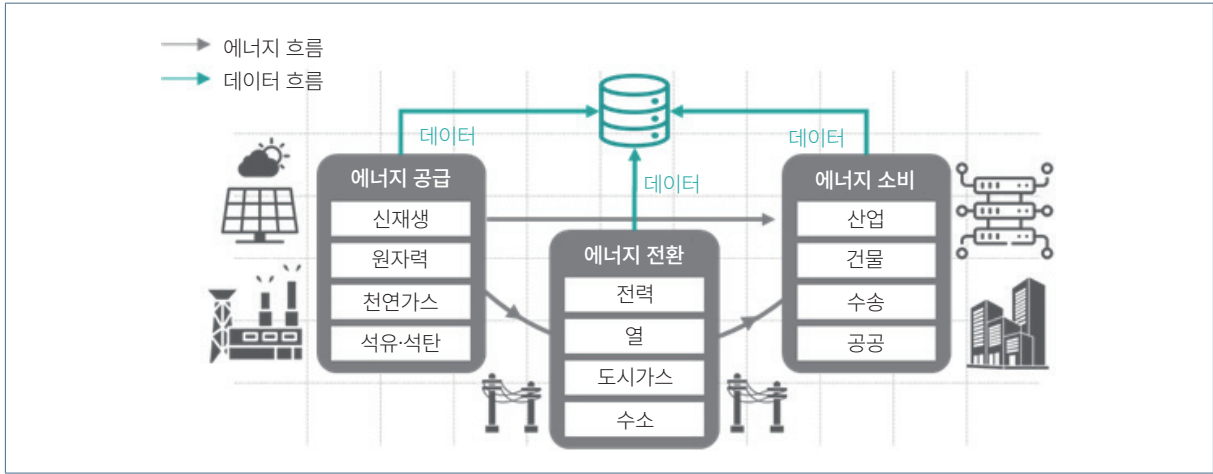
- 에너지 분야의 디지털전환으로 AI를 비롯한 SW 기술이 재생에너지의 계통 불안전성, 에너지 수급 불균형 등의 문제를 완화해 탄소중립에 기여할 전망

- 세계경제포럼과 액센츄어에 따르면, 디지털 기술은 에너지, 모빌리티, 원재료 분야에서 2050년 온실가스 배출을 20% 감소시킬 수 있을 것으로 기대⁷

⁶ Bloomberg New Energy Finance(2017), 「Market for Digitalization in Energy Sector to Grow to \$64BN by 2025」

⁷ WEF(2022), 「Digital Tech Can Reduce Emissions by up to 20% in High-Emitting Industries」

[그림 5] 에너지 분야 데이터 흐름



출처: 한광우(2023)「탄소중립을 위한 신재생에너지 시스템 디지털전환연구」 기반으로 필자 재구성

■ (SW를 위한 탄소중립) 반면, 빅데이터와 AI 보편화로 SW 사용이 크게 늘면서 데이터센터 에너지 소비의 급증이 예상되므로, 지속가능한 디지털 기술 사용을 위해서는 청정에너지 공급 확대 및 저전력 기술 개발 등 탄소중립이 필수

- 데이터센터 전력 수요는 2022년 460TWh로 전체 수요의 2% 수준이었으나 2026년에는 620~1050TWh 까지 급증할 것으로 전망⁸
 - 생성형 AI인 GPT-3의 학습과정에 사용한 전력은 1,287MWh, 이산화탄소 배출량은 522톤이며, 발열량도 많아 냉각에도 에너지가 다량 소비
- 저전력 반도체 칩 및 서버 개발, 데이터센터 에너지효율화 기술, 재생에너지 활용 등 디지털 산업의 탄소 배출량 감축을 위한 기술 개발이 필요
 - 빅테크 기업을 비롯한 주요 ICT 기업은 탄소중립 및 온디바이스 AI 등을 목적으로 초저전력 AI 반도체 칩 개발에 박차

■ 본 보고서는 에너지 공급 및 전환, 에너지 활용 분야에서 기후기술로 개발되는 SW·디지털 기술에 대한 4개 사례를 연구하고 이에 따른 시사점을 도출

- 에너지 공급 및 전환 분야에서는 ‘재생에너지’, 에너지 활용에서는 ‘AI 반도체 및 데이터센터’, ‘소프트웨어 개발’, ‘건물’ 부문을 사례 연구 대상으로 채택

⁸ IEA(2024), 「Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026」

- * SW·디지털 기술의 역할이 크고, 탄소중립을 위해 반드시 해결해야 하는 분야 선정
- * 녹색기술센터 기후기술 대분류(중분류)상 감축(재생에너지), 감축/적응 융합(다분야 중첩), 감축(에너지 수요-산업 효율화), 감축(에너지 수요-건축 효율화)에 해당

[표 2] 본 연구에서 다루는 ‘탄소중립을 지원하는 디지털 기술’ 사례 분류


분류		소분류 (사례 연구)	디지털 기술로 해결하려는 탄소중립 이슈
에너지 공급 및 전환		① 재생에너지	변동성 및 출력제한 문제를 해결하고 관리 및 거래를 용이하게 하여 사용량을 확대
에너지 활용	산업	② AI 반도체 및 데이터센터	고성능을 유지하면서 전력 소비를 줄여 디지털 산업의 탄소배출량 증가 억제
		③ 소프트웨어 개발	같은 기능을 구현하더라도 탄소배출량이 적은 코드를 쓰도록 탄소 측정 및 가이드라인 제시
	산업 외	④ 건물	설계 및 운영 단계에서 기후, 일조량 등의 환경 변수를 고려한 제로에너지빌딩 목표 달성

II. 탄소중립을 지원하는 디지털 기업·기술 사례

1. 재생에너지 분야

■ (식스티헤르츠) AI 기반의 재생에너지 발전량 예측·관리 소프트웨어를 개발해 재생에너지 확대 및 기업의 사용을 지원하는 기후테크 스타트업

[표 3] 식스티헤르츠 기업 소개

기업명	식스티헤르츠 (대표: 김종규)	
설립일자	2020년 11월 23일	
구성원	현재 50여 명의 직원 중 절반이 SW 개발 인력	
특허	‘재생에너지 발전량 예측모델 관리 방법, 장치 및 시스템’(23.6. 등록), ‘확률론적 태양광 발전량 예측 및 가상발전소 운영 의사결정 방법과 시스템’(23.6. 등록) 포함 10여 건 등록 및 출원 완료	
비고	대한민국 기상산업 대상(’23.9 환경부장관상), SW(예비)고성장클럽 선정(’23.3), CES2023 혁신상(’23.1), 범정부 공공데이터활용 창업경진대회 대상(’21.11 대통령상) 등 다수	

출처: 식스티헤르츠 홈페이지 및 각종 언론

▷ **기상 빅데이터 처리 시스템** * 과기정통부 ‘2021년 민관협력기반 ICT 스타트업 육성 사업’ 결과

- 대량의 기상 데이터와 자체 개발한 구름 이동 예측 알고리즘 등을 활용해서 일사량 등의 기상 정보를 보다 정교하게 예측하고, API 형태로 제공
 - 기상관측위성 천리안 2호 영상데이터, 기상 예보 및 관측 데이터 등 연간 약 180TB 규모의 데이터를 활용해서 분석
 - 지역별·시간대별 기상위성 정보 및 사용자 맞춤형 정보를 제공하고, 발전량 예측 결과를 활용해 재생 에너지 입찰제도 및 실시간 전력거래 등에 활용 예정

[그림 6] 식스티헤르츠의 기상 빅데이터 처리 시스템 구조



출처: 식스티헤르츠 기반 SPRI 재구성

▷ **재생에너지 발전량 예측 플랫폼 ‘햇빛바람지도’**

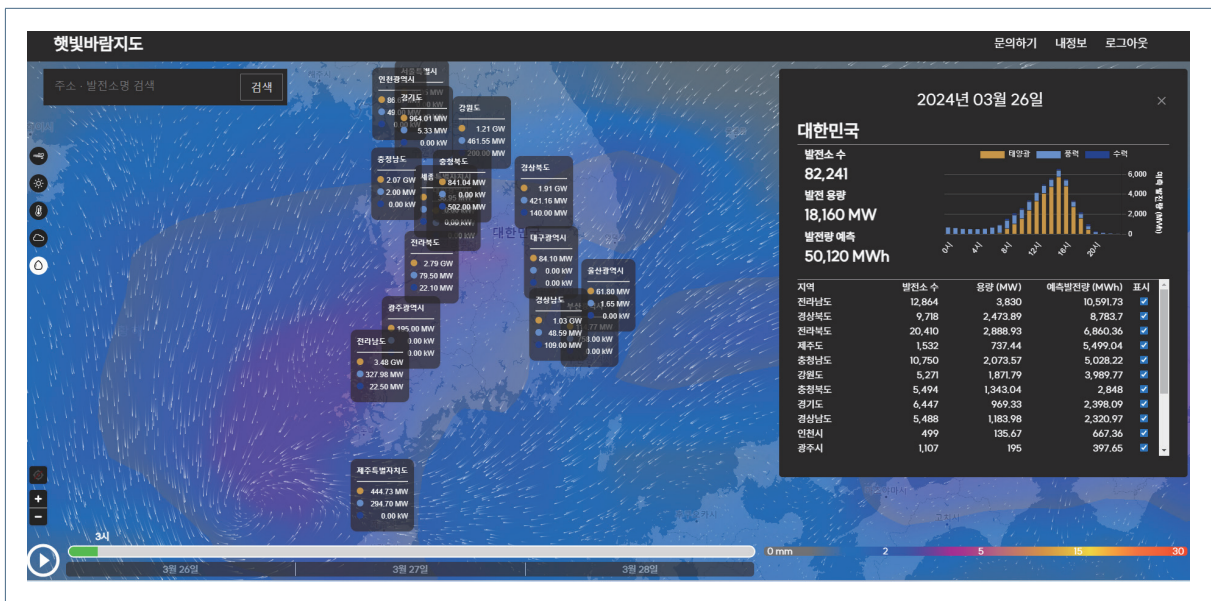
- 국내 8만 2천여 개 태양광, 풍력, 수력 발전소에 대해 일간 및 월간 발전량을 시간대별로 예측해 지도 위에 표시하고 무료로 공개
 - 우리나라 기상청과 미국 해양대기청의 기상예측값과 실제 관측값의 오차를 시로 학습해 보정한 후, 이를 기반으로 재생에너지 발전량을 예측
 - * 태양광 발전량의 예측 오차는 2.6% 수준으로 안정적인 정확도를 보이고 있으며, 예측 난이도가 높은 풍력 발전량에 대해서도 높은 정확도를 보유

▷ **재생에너지 구독 플랫폼 ‘월간햇빛바람’**

- 재생에너지 사용을 원하는 기업과 소상공인에게 매월 신청한 전력량만큼 요금을 받고 ‘재생에너지 공급 인증서(REC)’를 제공

- 기존 REC 거래 시스템은 절차가 복잡하고 소량 매물을 찾기 어려우나, ‘월간햇빛바람’은 중소기업도 쉽게 REC를 제공받아 RE100을 달성하도록 지원
 - * 2021년 8월 한국형 RE100을 위한 일반기업용 REC 거래시장이 개설됐으나, RPS 공급의무 거래시장 대비 거래량은 매우 미미한 수준
- ‘월간햇빛바람’으로 재생에너지의 공급뿐 아니라 소비 측면에서도 소규모 분산 활용이 가능해짐으로써 재생에너지 수급 조절 및 안정화에 기여할 전망

[그림 7] 식스티헤르츠의 재생에너지 정보 플랫폼 ‘햇빛바람지도’



출처: 식스티헤르츠 ‘햇빛바람지도’ (<https://map.60hz.io/page/map>)

2. AI 반도체 및 데이터센터 분야

■ (국내 AI 반도체 팹리스 스타트업 3사) GPU보다 전성비*가 뛰어난 AI 전용 NPU를 설계하는 팹리스 분야에 ‘리벨리온’, ‘사피온’, ‘퓨리오사AI’가 활약

* 전성비란, 소비전력 대비 성능을 의미하는 용어로서, 전성비가 높은 반도체를 사용해야 데이터센터, 슈퍼컴퓨터 등의 발열 및 전력 사용을 줄이고 탄소배출도 감축

[표 4] 국내 AI 반도체 팹리스 3사 소개

	리벨리온	사피온	퓨리오사AI
설립일자	2020년 6월 23일	2022년 1월 4일	2017년 5월 15일
대표 제품	데이터센터용 NPU ‘아툼’	데이터센터용 NPU ‘X330’	데이터센터용 NPU ‘워보이’
회사/제품 특징	생성형AI를 포함한 여러 딥러닝 모델 구동에 최적화된 풀스택 SW	개방형 신경망 교환 기반 SW 스택 및 AI 추론 플랫폼 SW 제공	SW와 HW의 유기적 결합을 위한 SDK 및 데이터 배포
주요 고객	KT클라우드	NHN클라우드	네이버 클라우드, 카카오펀터프라이즈
누적투자	2,800억 원(시리즈 B)	600억 원(시리즈 A)	1,700억 원(시리즈 C)
비고	차세대 제품 ‘리벨’ 2025년 상반기 출시 예정	차세대 제품 ‘X430’ 2025년 말 출시 예정	2세대 AI 반도체 ‘레니게이드’ 2024년 내 출시 예정
	3사 모두 과학기술정보통신부의 실증사업 ‘K-클라우드 프로젝트’ ⁹ 에서 AI 반도체 사업자로 선정		

출처: 각사 홈페이지 및 관련 언론(2024년 5월 기준); 2024년 6월 12일 리벨리온과 사피온 합병 발표

- AI 학습·추론에 쓰이는 GPU 수요가 커지는 상황에서, 팹리스 스타트업들이 SW 최적화 기술을 기반으로 NPU의 에너지효율과 성능을 개선
 - * AI용 GPU 시장은 엔비디아의 독점 체제이며, 생성 AI 열풍으로 GPU 공급부족까지 이어지고 있으나 새로 개발된 NPU가 GPU 일부를 대체할 수 있을 것으로 기대
 - 리벨리온 아툼의 경우, 자체 개발한 컴파일러, 펌웨어, 드라이버, 런타임을 통해 SW 최적화를 이뤄서, 단위 데이터 처리에 드는 에너지효율이 GPU 대비 3~4.5배 높은 수준¹⁰
 - * KT 클라우드는 2023년 5월, 서버에 아툼을 적용한 NPU 인프라 서비스를 상용화했고, 전력 소모량이 GPU 활용 대비 5분의 1 이하 수준으로 추정

■ (구글) 2030년까지 데이터센터의 무탄소 에너지* 운영을 목표로 에너지효율 증진, 재생에너지 전력 구매 협정 등을 적극 진행

- * 무탄소 에너지(Carbon Free Energy)는 재생에너지, 원자력, 수소 등 온실가스를 배출하지 않는 모든 에너지를 의미
- 데이터센터가 큰 부분을 차지하는 구글의 연간 전력 사용량은 2020년 기준 15.5TWh로, 미국 샌프란시스코 총소비 전력의 두 배 규모
 - * 탄소배출권 구매와 재생에너지 구입으로 탄소배출량을 상쇄해 2007년부터 넷제로 유지하고 있으나, 데이터 센터의 저전력화에도 지속적으로 노력

⁹ 2023년부터 2030년까지 8,262억 원(예정)을 투자해 국산 AI 반도체를 NPU(1단계) → 저전력 PIM(2단계) → 극저전력 PIM(3단계)에 걸쳐 고도화하는 AI 강화 정책

¹⁰ ZDNET Korea(2024.2.26.), 리벨리온 오진욱 CTO 인터뷰 내용 중

- 구글 데이터센터의 전력사용효율(PUE)는 글로벌 전체 데이터센터 평균보다 약 30% 이상 우수하며, 효율성을 더욱 개선하는 중
 - * PUE(Power Usage Effectiveness)는 데이터센터가 사용하는 총 전력을 IT 장비가 사용한 전력으로 나눈 값으로, 1에 가까울수록 우수한 전력사용효율을 의미. 구글의 2021년 2분기 PUE는 1.1, 전 세계 데이터센터 평균은 1.57 수준
- 구글은 냉각에 유리한 데이터센터의 위치 선정, HW 및 SW 조합의 최적화 등을 활용해 전력사용효율을 증진
 - * HW 효율을 높이기 위해 서버용 신소재에 투자하고, SW 측면에서는 열펌프 가동 효율이 최대화되는 시간을 예측하는 머신러닝 알고리즘을 개발

[표 5] 구글의 데이터센터 탄소배출 감소를 위한 가이드라인

주제	권장사항
클라우드 탄소배출 및 탄소발자국 이해	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소발자국을 줄이기 위한 기본 전략을 이해하고, 클라우드 리전(Region)의 무탄소 에너지 소비를 설명하는 방식을 이해 • ‘탄소발자국’ 도구를 사용해 구글 클라우드 사용량의 탄소발자국 이해
가장 적합한 클라우드 리전 및 서비스 선택	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소발자국, 가격, 지연 시간에 따른 최적의 클라우드 리전을 결정하고, 적합한 조직 정책 수립을 고려 • 비효율적인 온프레미스 데이터센터에서 컴퓨트 엔진을 VM으로 마이그레이션하고, 특정 워크로드에 최적화된 서비스 사용
미사용 클라우드 리소스 최소화	<ul style="list-style-type: none"> • 미사용 VM을 삭제하고 VM 형태를 최적화하며 무인 프로젝트 종료 • 리소스를 영구적으로 유지하지 않고 필요할 때 만들고 삭제할 기회를 파악 • 워크로드를 컨테이너로 마이그레이션하고, 관리형 서비스를 사용해 효율적으로 실행 • 데이터 처리와 분석을 위해 컴퓨팅과 스토리지를 분리하는 서비스 사용
일괄 워크로드의 탄소배출량 감소	<ul style="list-style-type: none"> • 탄소배출 강도가 낮은 리전에서 적합한 일괄 워크로드 실행 • 가능하면 낮은 그리드 탄소 강도와 일치하는 시간 동안 일괄 워크로드 실행

출처: 구글 클라우드 아키텍처 센터 자료 기반으로 필자 재구성

《 ‘전기 먹는 하마’ 데이터센터와 탄소중립 》

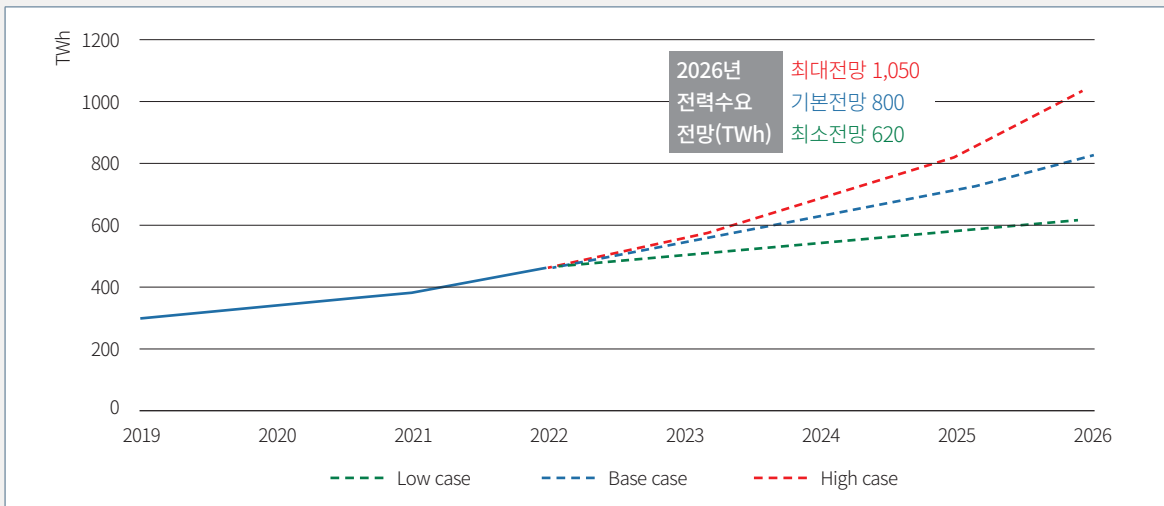
- ▣ 데이터센터 연간 전력 소모량은 2022년 기준 460TWh로 독일(490), 프랑스(425)의 국가 전력 소모량과 유사하며, 생성형 AI 보편화 등으로 인해 향후 더욱 급증할 전망

 - GPT-3 등의 거대언어모델 학습 과정에서 배출되는 이산화탄소는 약 500톤으로, 뉴욕-런던을 600회 비행할 때 배출되는 이산화탄소량과 유사
 - ChatGPT와 1회 질의응답 시, 필요한 전력은 평균 2.9Wh로 구글 검색의 10배
 - “AI 데이터센터를 현재 기술로 구축하면 2025년 전 세계 전력의 15%를 데이터센터가 소비하게 될 것” (반도체 장비사 어플라이드머티어리얼즈 CEO)
- ▣ 탄소중립 및 전력수급 불균형 문제 대비를 위하여 AI 반도체 칩 및 IT 장비의 에너지 고효율화, 재생에너지 비중 확대, 냉각 효율화 등을 통한 데이터센터 저전력화 필수

 - 데이터센터 저전력화가 효과적으로 이루어지지 않을 경우, 2026년 데이터센터의 글로벌 전력 소모량은 1,050TWh까지 치솟을 전망
- ▣ 우리나라는 해외 데이터센터 대비 낮은 에너지효율을 가진 국내 상황을 개선하고자 2012년부터 그린데이터센터 인증 제도를 운용하고, 데이터센터 친환경화를 추진

 - 2012년 데이터센터 평균 PUE: 글로벌 1.8, 국내 2.3 (1에 가까울수록 고효율); 2022년 데이터센터 평균 PUE: 글로벌 1.55, 국내 민간 1.76
 - 민간의 그린데이터센터 인증이 이어지는 반면, 공공기관의 데이터센터는 에너지효율 고도화를 향한 동력이 부족해 그린데이터센터 인증 실적도 미미한 현황

[그림 8] 데이터센터의 글로벌 전력 소모량



출처: IEA, 「Electricity 2024」


11 MIT Technology Review(2023.12), Making an image with generative AI uses as much energy as charging your phone

3. 소프트웨어 개발 분야

■ (그린소프트웨어재단) SW 개발, 배포, 사용에서 탄소배출을 최소화함으로써 친환경 SW 생태계를 구축하기 위한 목적으로 설립된 비영리 재단

- 2021년 MS 연례 개발자 컨퍼런스 ‘빌드 2021’에서 액센추어, 깃허브 등 글로벌 SW 기업 및 리눅스 재단과 함께 재단 설립을 발표
- 현재 4개의 워킹그룹이 깃허브 등에서 13개의 그린 SW 관련 프로젝트 운영
 - * 워킹그룹은 표준(Standards), 정책(Policy), 오픈소스, 커뮤니티로 구성

[표 6] 그린소프트웨어재단(GSF) 소개

재단명	그린소프트웨어재단(Green Software Foundation)	
설립일자	2021년 5월 25일	
참여 기업	MS, 액센추어, 깃허브, 소트웍스, 골드만삭스 등	
설립 목표	그린 SW 산업 표준 수립 그린 SW 애플리케이션을 지원하는 오픈소스 및 오픈 프로젝트 육성으로 혁신 가속화 친환경 SW 생태계 관련 인식 향상 및 성장 지원	

출처: Green Software Foundation 홈페이지 및 관련 언론

▷ SW의 탄소배출강도를 측정하는 ‘SCI(SW Carbon Intensity)’

- SW를 사용할 때 발생하는 탄소배출량의 측정치로서, 절대적 배출량이 아닌 점수로 측정되며 숫자가 0에 가까울수록 에너지효율이 높음을 의미
 - * ISO 국제 표준으로 채택(2024.3.22.)
 - **(SCI 목적)** SW 개발로 인한 탄소배출의 객관성 있는 지표를 제공해 SW 관련자들이 탄소배출을 최소화하는 의사결정을 하도록 지원
 - **(SCI 계산)** SW 사용에 따른 전력 소비 및 해당 지역의 한계탄소강도, SW가 구동되는 HW의 제조와 폐기 과정에 배출되는 탄소배출에 기반하여 계산
 - * SW와 HW의 스펙과 지역 전력망에 대한 정보가 필요하며, 제조사 등에 문의해서 수치를 구하거나 불가능할 경우에는 근사치를 추정해 계산
 - **(SCI 적용)** 대규모 분산 클라우드 시스템부터 오픈소스 라이브러리, 온프레미스 애플리케이션까지 모든 SW에 적용 가능
 - * 자동으로 SCI를 계산하는 ‘그린 매트릭스 툴(GMT)’이 오픈소스로 공개되어 있고, 기업은 GMT를 통해 자사 SW 개발 프로세스의 탄소발자국 평가 가능

《 그린SW재단에서 개발한 SW 탄소강도 ‘SCI’ 계산법 》

□ SCI는 SW 기능(R) 하나당 발생하는 운영 배출(O)과 임베디드 배출(M)의 합으로 정의:

$$SCI = (O + M) \text{ per } R = \{ (E \cdot I \cdot RS) + (TE \cdot TS \cdot RS) \} \text{ per } R$$

- 운영 배출(O)은 SW가 운영 시, 발생하는 탄소배출로, SW를 작동하는 HW 전력 소비량(E), 지역 기반의 한계 탄소강도(I), HW 자원 사용비율(RS)의 곱으로 측정

* HW 전력 소비량(E)은 데이터센터, 개별머신(e.g, VM/Node), 개별서비스(e.g, API 호출, 머신러닝 학습), 수행 코드 등의 스펙으로 결정

* 지역 기반의 한계 탄소 강도(I)는 에너지 1kWh 소비당 생산되는 탄소배출로, 해당 HW가 사용하는 전력이 연결된 지역 전력망에 의해 결정

- 임베디드 배출(M)은 HW의 제조와 폐기 과정에 배출되는 탄소(TE) 중 일부를 SW가 할당받는 것으로, 해당 SW가 HW의 시간과 자원을 어느 정도 비율로 사용했는지(TS, RS)에 따라 결정

□ 글로벌 투자은행 UBS의 SW 애플리케이션이 유발하는 SCI를 계산한 결과, 투자은행 앱은 사용자 1인당 1년에 16.88kg, 자산관리 앱은 631.29kg으로 측정

[표 7] UBS의 SCI 계산 과정 및 결과

1a) 시간당 운영배출						
Data source		Central Application Database		National Grid Database		Central Application Database
시간당 운영배출	=	에너지(E)	x	한계탄소강도(I)	x	자원 사용 비율(RS)
투자은행 앱 (2.67kg)	=	13.6kWh	x	0.5kg/kWh	x	0.39
자산관리 앱 (24.80kg)	=	49.6kWh	x	0.5kg/kWh	x	1
1b) 연간 운영배출						
연간 운영배출	=	시간당 운영배출	x	연간 사용시간		
투자은행 앱 (23,389.2kg)	=	2.67kg	x	8760 hours		
자산관리 앱 (217,248kg)	=	24.8kg	x	8760 hours		
2a) 서버당 임베디드 배출						
Data source		Product Website		Product Website		Central Application Database
서버당 임베디드 배출	=	평균 HW 임베디드 배출	x	시간 사용 비율		자원 사용 비율(RS)
투자은행 앱 (113.52kg)	=	1158g	x	0.25	x	0.39
자산관리 앱 (303.5kg)	=	1214kg	x	0.25	x	1
2b) 애플리케이션당 임베디드 배출						
애플리케이션당 임베디드 배출	=	서버당 임베디드 배출	x	사용 서버 수		
투자은행 앱 (1248.73kg)	=	113.53kg	x	11		
자산관리 앱 (10015.5kg)	=	303.5kg	x	33		
3) SCI Rate 계산 (SCI = (O + M) per R)						
SCI	=	(운영 배출	+	임베디드 배출)	/	기능
투자은행 앱 (16.88kg)	=	(23.389.2kg	+	1248.73kg)	/	1459 (users)
자산관리 앱 (631.29kg)	=	(217,248kg	+	10015.5kg)	/	360 (users)

* 출처: Green Software Foundation

▷ 탄소배출이 적은 'SW 소스코드 개발 및 공개 (그린 SW 패턴)'

- 단위 기능을 구현하는 SW 코드에 대해, SCI 임팩트를 가장 작게 발생시키는 효율적인 코드를 개발 및 검증하여 깃허브에 공개
 - 누구든지 그린 SW 패턴에 새로운 패턴 추가나 기존 패턴 수정을 제안할 수 있으며, 깃허브에서 절차에 따라 철저한 검증을 거친 이후 DB에 포함
 - * 그린 SW 패턴에 들어가는 코드 검증 절차: 코드 제안/토의 → 템플릿에 맞게 코드 작성/수정 → 초기 리뷰(1주) → GSF 내부 전문가 리뷰(2주) → 팀 검토(2주) → 분기별 검증 완료된 코드 업데이트
 - 그린 SW 패턴을 활용할 잠재적 대상자로는 데이터 과학자, SW 엔지니어, 클라우드 엔지니어, 웹 개발자, 프로그램 매니저 등으로 예상

▷ 에너지에 따라 SW 작업량을 결정하는 '탄소 인지 SDK(Carbon Aware SDK)'

- SW가 친환경 에너지를 활용할 때 더 많은 작업을 수행하고, 탄소배출이 많은 에너지를 활용할 때는 작업량을 줄이도록 조절하는 오픈소스 툴킷
 - * 바로 활용 가능한 API와 40개 프로그래밍 언어에서 활용 가능한 라이브러리로 구성
 - 머신러닝의 경우, 워크로드가 큰 작업을 친환경 에너지 활용 시간대로 옮김으로써 머신러닝 학습에서의 탄소배출을 최대 15%까지 감축 가능
 - * 시간과 위치의 변경까지 고려하면 탄소배출을 최대 50% 줄일 수 있을 것으로 추정
 - 탄소 인지 SDK는 글로벌 금융사 UBS, 친환경 에너지사 VESTAS를 비롯해 다양한 회사가 이미 활용 중이며, 깃허브를 통해서 지속적으로 업데이트 중

« 탄소 인지 앱을 만드는 해커톤 'CarbonHack22' »

- ▣ GSF는 탄소 인지 SDK를 활용해 앱을 만드는 해커톤 'CarbonHack22'를 실시 (2022.10.13.~2022.11.10.)
 - [1등 프로젝트: Lowcarb] 탄소발자국을 줄일 수 있는, 프라이버시 보호에 특화된 연합학습 프레임워크 플러그인(성능 저하 없이 탄소배출 13% 감축)
 - [2등 프로젝트: Carbon-Aware DNN Training with Zeus] GPU의 전력 한계를 변경해서 DNN 학습 시, 에너지효율을 최적화하는 프레임워크(학습 시간 3% 증가했지만, 탄소배출은 24% 감축)

4. 건물 분야

■ (에너지엑스) 시를 비롯한 SW 기술을 기반으로 건물 설계부터 운영·관리까지 건축물의 효율적 에너지 관리 및 탄소중립 실현을 지원하는 에너지 테크 기업

[표 8] 에너지엑스 기업 소개

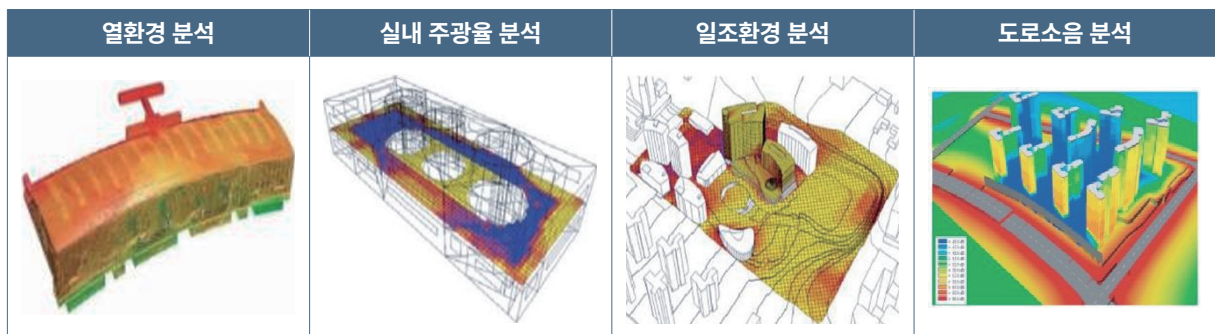
기업명	에너지엑스 주식회사	ENERGYX
설립일자	2019년 2월 28일	
구성원	친환경 기술과 AI-SW 전문가 중심의 임직원 (총 184명)	
특허	건물 외벽의 선형 열교 인식 시스템 및 방법('24.2. 등록), BIM을 이용한 CFD 모델 설계 시스템 및 방법('22.8. 등록), 열화상 및 실화상을 이용한 건물 외벽의 열적 이상 부위 판단 시스템과 그 방법('22.5. 등록) 등 66종의 친환경 건축 관련 HW-SW 특허 보유	
비고	미래건축문화대상 건축플랫폼(친환경) 부문 대상 수상(조선일보, '23.11.), 초격차 스타트업 친환경·에너지 분야 선정(중소벤처기업부, '24.5.), K-유니콘 기업 선정(중소벤처기업부, '21.5.)	

출처: 에너지엑스 관계자 인터뷰, 홈페이지, 언론자료 등을 통해 SPRI 작성

▷ 건축물 설계 시뮬레이션

- 기후·소음·일조량 등의 환경변화가 건축물 에너지 생성 및 활용에 미칠 잠재적 영향을 예측하고 최적 솔루션을 제공하여 지속가능한 설계를 촉진하는 SW
 - 에너지효율 증진, 재생에너지 활용을 비롯한 다양한 설계 옵션을 탐색하고, 최적화된 솔루션(패적존)을 도출하여 최종 설계 결정에 중요 정보 제공
 - 건물의 열전달, 빛 분산, 공기 흐름 등의 복잡한 물리적 변화를 평가하고 에너지 효율적이면서 지속가능한 설계방안을 도출
- * 건축물 내외부 환경을 고려한 최적의 열성능 재료, 냉난방 에너지 수요, 재생에너지 활용, 건축 및 환경 규제 충족 여부 판단 등 최적 조건 평가

[그림 9] 에너지엑스 환경성능 개선 시뮬레이션 분석



출처: 에너지엑스 자료 기반으로 필자 재구성

▷ **건물의 에너지를 최적 관리하는 AIMS(인공지능 관리 시스템)**

- 건물이 생산·사용하는 에너지 데이터를 실시간 수집 및 분석하고, 자체 피드백을 통한 최적화 알고리즘으로 건물 에너지 운영 및 관리 의사결정 지원
 - 에너지 및 환경 데이터 기반의 최적화 기능으로 건물 내 에너지 공조 장치, 조명, 기타 설비장치 등을 건물의 특정 요구와 사용자 선호에 맞춰 자동 조절
 - * 기존 건물 에너지 관리 시스템은 상세 계측 및 분석력이 부족하고 효과를 확인하기 어려워 사용성이 낮았으나, 클라우드와 AI 기술로 단점을 보완하고 편의성을 확대
 - 클라우드 기반의 서비스형 SW 및 모바일 애플리케이션을 통해 건물 에너지 사용량 분석 결과를 전송하고, 에너지 관련 설비 기기의 원격 제어를 지원
 - * 공간 중심으로 용도별(냉방, 난방, 조명 등) 사용 데이터를 분석하여 이상 징후가 감지된 경우, 담당자에게 알림(경고) 메시지 전달하는 등 실시간 운영관리 지원

[그림 10] 에너지엑스의 AI 기반 건물 에너지 관리 시스템출처: 에너지엑스 자료 기반으로 필자 재구성



* 출처: 에너지엑스 자료 기반으로 필자 재구성

《 에너지자립률 100%를 넘긴 플러스 에너지 빌딩 》

- 에너지엑스는 2023년 8월 국내 최초로 에너지자립률 121.7%인 플러스(+) 에너지 빌딩을 준공해, 건물이 발생시키는 탄소배출의 획기적 감축 가능성을 직접 구현
 - 건물 일체형 태양광 시스템 기술로 재생에너지를 자체 생산하고 에너지 절감 기술과 고효율 설비를 활용 → 단위 면적당 1차 에너지 생산량 191.2kWh/m²·y, 소비량 157.1kWh/m²·y
- 자체적으로 건축한 플러스 에너지 빌딩 외에도 상업용 신축 및 리모델링 사업에 참여해 건물의 에너지 사용 절감에 기여
 - 광고복합체육센터(에너지 절감 21.9%), 화성동탄지구 제로에너지 임대리츠(에너지 절감 79%), 대전컨벤션센터 제2전시장(에너지 절감 27%) 등의 레퍼런스 보유

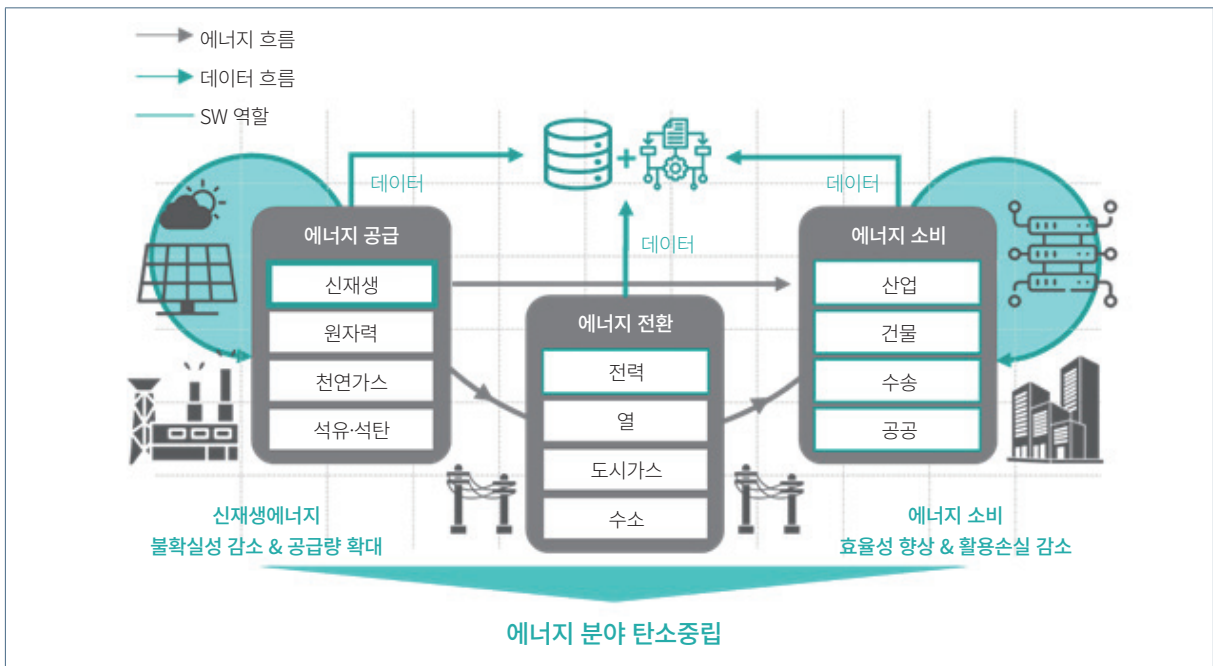
III. 요약과 시사점

1. 요약

■ 전 세계적으로 2050 탄소중립을 선언 및 법제화하는 가운데, 에너지 분야에서 SW 적용을 통한 청정에너지 활용 및 에너지효율 증진의 중요성이 증대

- SW는 빅데이터 및 예측 알고리즘을 활용해 기존 신재생에너지의 단점이었던 공급 불확실성을 줄이고 전력계통 연계성을 효과적으로 확보하는 데에 기여
 - * 전력계통이란, 전력 생산자에서 소비자에게로 전기를 공급하기 위해 연결된 네트워크
 - 에너지 발전 분야는 디지털화가 더디게 진행되어 왔지만, 최근 재생에너지 공급 요구가 커지면서 민간 주도의 디지털전환 및 SW 적용이 활발
 - * 특히, 소규모 재생에너지 분산전원을 클라우드 기반 SW로 정보를 통합해 하나의 발전소처럼 관리하는 가상발전소(VPP) 분야에 발전사 및 스타트업이 적극 참여
- ICT 산업(AI 반도체 칩, 데이터센터, SW 개발), 건물 분야 등에서도 에너지 소비 증대가 예상되지만, SW 혁신을 통한 저전력화 및 탄소중립에 박차

[그림 11] 에너지 분야에서 SW의 역할



출처: 한광우(2023), 「탄소중립을 위한 신재생에너지 시스템 디지털전환연구」 기반으로 필자 재구성

2. 정책적 시사점

■ 우리나라는 글로벌 추세에 발맞춰 탄소중립의 제도적 기반을 마련하고 있으며, 최근 AI 기반 그린디지털전환을 통한 탄소중립 실현을 위한 논의의 장 마련

- 국내 기후대응 정책은 제1차, 제2차 기후변화대응 기본계획 수립('16, '19), 2050 탄소중립 선언 및 추진 전략 마련('20), 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제정('21) 등으로 점차 고도화하며 온실가스 감축목표를 상향
- 정부는 '디지털전환을 통한 탄소중립 촉진방안('21.11)'을 발표해 ①전 산업 부문의 탄소감축 촉진(Green by Digital), ②디지털 부문 고효율화·저전력화(Green of Digital), ③그린디지털 생태계 구축(Green Digital Ecosystem) 분야에서 6개 정책 과제* 추진
 - * ① - (1)부문별 탄소배출량 감축기술 개발, (2)그린디지털전환 확산,
 - ② - (1)저전력·고성능 데이터센터 기술개발·적용, (2)저전력 네트워크 핵심기술 개발
 - ③ - (1)탄소중립 데이터 활용기반 마련, (2)탄소중립 의사결정 지원체계 구축
- * "AI가 전력망 관리, 수요예측 및 관리, 소비자 편익과 행동 변화 등 탄소중립 에너지 솔루션의 핵심...(중략) 우리나라는 AI를 통해 탄소중립을 가속화할 역량을 지니고 있고, 또한 주도해야 한다."(김상협 위원장, AI 기반 그린디지털전환 컨퍼런스('24.4))

■ SW·디지털 기술이 다양한 분야에서 탄소중립에 기여할 잠재력을 파악하고, SW·디지털 기반 기후기술 R&D 및 투자를 강화하며 정책지원을 도모할 필요

- 기후기술 산업은 탄소중립 달성과 미래 국가 경쟁력 강화의 핵심적인 요소로 초기시장 형성 및 확대를 위한 정책적 지원과 민관 협력이 중요
 - * 2023년 10월 기준, 글로벌 유니콘 기업(1,348개) 중 기후기술 관련 기업은 55개이며, 미국 24개, 중국 19개, 독일 6개 순이고, 한국 기업은 없는 상황
 - * 기후기술의 큰 부분을 차지하는 에너지 분야 신기술 사업화 기간은 평균 33.1개월로 일반 기술(16.9개월) 보다 훨씬 길기 때문에 산업 특성에 맞는 육성 정책이 필요
- 그린SW재단 주도로 정립된 SW 탄소배출 측정에 대한 국제 표준에 대응해 SW 산업의 탄소중립 우수 사례를 발굴하고 글로벌 선도를 추진할 필요
 - * SW 산업의 주요 대기업 혹은 공공 SW 사업 참여사에게 SW 탄소강도(SCI) 정보 제공을 의무화하고, 이를 경영성과나 평가체계에 반영하는 방식 등을 고려 가능

◎ 참고문헌

1. 국내문헌

과학기술정책연구원(2019), 「국가 난제 해결을 위한 과학기술 관점의 경제·사회 시스템 혁신전략 연구」
 김광민(2022.3), 「탄소중립 시대 데이터센터의 열관리」, KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터 이슈브리프
 녹색기술센터(2019), 「녹색기후기술백서 2019」
 대통령소속 2050 탄소중립위원회(2021.7), 「탄소중립 학습 자료집」
 사단법인 넥스트(2023.11), 「기후정책 가이드북: 기후테크의 기회와 장벽」
 삼성KPMG(2019.1), 「에너지 산업의 디지털화(Digitalization)가 가져올 미래」, 삼성KPMG Issue Monitor 제100호
 이창희(2023.3), 「에너지엑스」, 삼성증권
 아산나눔재단 외(2023), 「기후테크 스타트업 육성 및 생태계 활성화를 위한 정책 제안」
 에너지경제연구원(2022.12), 「2022 자주찾는 에너지통계」
 이일우(2022), 「디지털 탄소중립 현황과 전망」, TTA 저널이 내다보는 미래
 임지훈(2024), 「기후테크 산업 동향 및 우수기업 사례를 통해 본 성공 전략」, Trade Focus 2024년 7호
 조일규(2019), 「사회문제해결을 위한 ICT R&D 정책 및 기술개발 동향」
 한국에너지기술연구원(2022.10), 「Horizon Europe(2021~2027) EU 연구혁신 프로그램-“기후변화대응기술” 중심으로」, KIER 기술정책 Focus Vol.16, No.1
 한국정보화진흥원(2018.9), 「사회문제 해결형 SW 정책 발전방향」
 한국지능정보사회진흥원(2023.2), 「탄소중립 목표 달성을 위한 그린-디지털전환 추진방향」, Grand Digital Transformation
 환경부 온실가스종합정보센터(2022.12), 「2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서」
 KOTRA(2022.12), 「주요국 탄소중립 추진 동향과 한국 기후기술 산업의 해외진출 기회 분석」, Global Market Report 22-044

2. 국외문헌

Germanwatch, NewClimate Institute & Climate Action Network(2023.12), 「Climate Change Performance Index(CCPi)」
 International Energy Agency(2023), 「Energy Technology Perspectives 2023」
 International Energy Agency(2024), 「Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026」
 LAZARD(2023.11), 「The Increasingly Horizontal Climate Software Opportunity」, VGB Insights
 McKinsey&Company(2022.1), 「The Net-Zero Transition: What It Would Cost, What It Could Bring」
 Melissa Heikkila(2023.12), 「Making an Image with Generative AI uses as much as Charging Your Phone」, MIT Technology Review
 World Economic Forum(2022), 「Digital Tech Can Reduce Emissions by up to 20% in High-Emitting Industries」
 World Economic Forum(2024), 「The Global Risks Report 2024」

3. 기타

Bloomberg New Energy Finance(2017.11.7.), Market for Digitalization in Energy Sector to Grow to \$64BN by 2025
 구글클라우드 아키텍처 센터 홈페이지 (<https://cloud.google.com/architecture/reduce-carbon-footprint?hl=ko>)
 그린소프트웨어재단 홈페이지(<https://greensoftware.foundation>)
 과학기술정보통신부 보도자료(2023.5.19.), 「한국형 탄소중립 100대 핵심기술 확정 본격적인 탄소중립 기술개발 청사진 제시」
 과학기술정보통신부 보도자료(2023.7.11.), 「2050 탄소중립, 디지털과 함께합니다」
 대통령소속 2050 탄소중립녹색성장위원회 전체회의 의결안건 1(2023.11.23.), 「디지털전환을 통한 탄소중립 촉진방안 -DX/GX(디지털전환/녹색전환)기반 탄소중립전략」
 대통령소속 2050 탄소중립녹색성장위원회 보도자료(2024.4.29.), 「AI로 풀어가는 탄소중립, 한국이 주도한다」
 리벨리온 홈페이지(<https://rebellions.ai>)
 사피온 홈페이지(<https://sapeon.com>)
 식스티헤르츠 홈페이지(<https://60hz.io>)
 에너지엑스 홈페이지(<https://www.energyx.ai>)
 퓨리오사AI 홈페이지(<https://furiosa.ai>)
 한광우(2023), 「탄소중립을 위한 신재생에너지 시스템 디지털전환 연구」, ETRI Open Source Tech Day 2023(<https://youtu.be/5LAmddBB5cRE?si=mcug8MMKoauHb4l1>)