

Greenovation

&

Issues&Insights

2024년

04

발간일 | 2024년 4월 29일

탄소중립을 위한 인공지능, 그린 AI(Green AI)의 역할

염성찬 이찬환 안세진 장용철
정민경 송영석 박상현

히어리, 박태기나무, 병꽃나무의 공통점은?...
이산화탄소 흡수 우수한 관목

미세먼지 저감 능력 높은 나무는?...
소나무, 편백 등 59개 나무가 '우수'

김진두



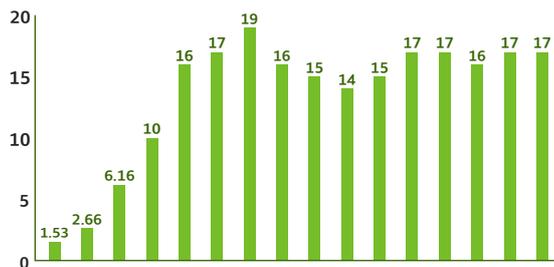
탄소중립을 위한 인공지능, 그린 AI(Green AI)의 역할

• 인공지능(AI)은 현대 사회의 변혁적인 기술로 자리 잡아가고 있으며, 일각에서는 이를 불과 전기의 발견에 비유하기도 한다.¹ 불과 전기가 가져온 변화가 경제와 사회 구조의 변화를 이끌고 인간의 삶의 질을 획기적으로 향상시켰듯이 인공지능의 발전도 그 범위와 영향력이 급속히 확장되고 있으며 거의 모든 분야에서 혁신의 촉매제 역할을 하고 있다.

• 단순한 기술적 진보를 넘어 혁명적인 변화를 이끄는 ‘생성형 AI’ ChatGPT는 2022년 12월 출시 후 5일 만에 이용자 수 100만 명을 달성하였으며, 2023년 2월에는 10억 명을 넘어서고 2023년 4월에는 18억 명까지 월간 사용자²가 확대되었다. 시밀러웹(Similarweb 社)에서 발표한 2024년 2월 한 달 OpenAI 접속자는 여전히 16억 명이 넘는다. 비록 다양한 우려 사항이 존재함에도 불구하고, 사회적 수용성과 분위기를 반영하여 기업들도 ‘생성형 AI’ 제공을 위해 경쟁하고 있다.

[그림 1] ChatGPT 월별 방문자 수

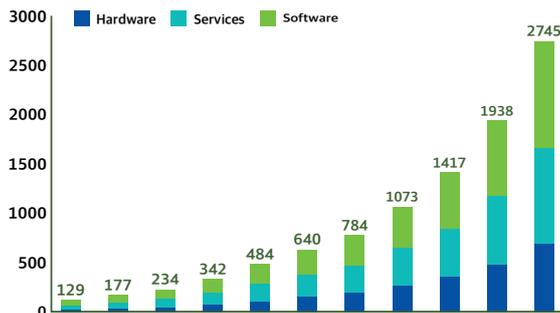
(단위: 억 명)



출처: 시밀러웹 홈페이지³ 자료 재정리

[그림 2] 글로벌 AI 시장규모

(단위: 억 달러)



출처: 마켓어스 홈페이지⁴ 자료

- 염성찬 데이터정보센터
- 이천환 데이터정보센터
- 안세진 데이터정보센터
- 장용철 데이터정보센터
- 정민경 데이터정보센터
- 송영석 데이터정보센터
- 박상현 데이터정보센터

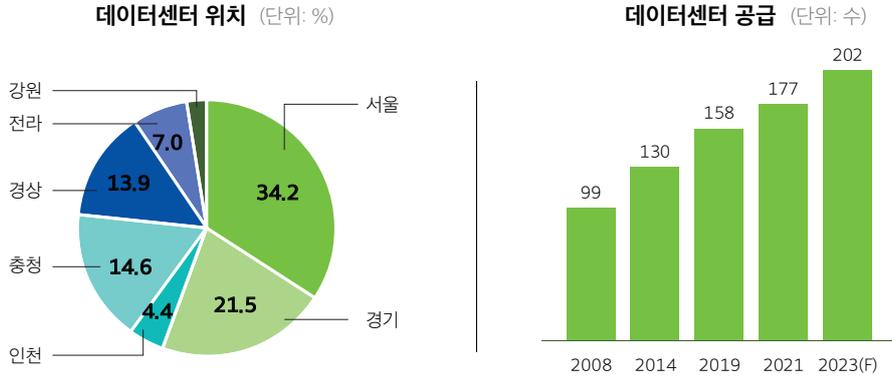
1 포춘코리아 (2023.04.18). <https://www.fortunekorea.co.kr/newsarticleView.html?idxno=27482> (2024.04.08. 접근)

2 Exploding Topics 홈페이지 (2024). <https://explodingtopics.com/blog/chatgpt-users> (2024.04.08. 접근)

3 Similarweb 홈페이지 (2024). <https://www.similarweb.com/website/chat.openai.com/#overview> (2024.04.08. 접근)

4 Market.U.S 홈페이지 (2024). <https://market.us/report/artificial-intelligence-market> (2024.04.08. 접근)

[그림 3] 국내 데이터센터 현황



출처: 인베스트조선 보도자료

- AI의 확산 속도를 고려할 때, AI의 영향력과 함께 관련 산업의 성장이 자명하다고 볼 수 있다. 글로벌 시장 예측 기관인 마켓어스(Market.us 社)에 따르면, 2022년 1,290억 달러(약 168조 원)였던 AI 산업의 시장 가치가 2033년 약 2조 7,450억 달러(약 3,569조 원)에 달할 것으로 전망된다.
- AI의 급격한 성장과 적용 확대는 막대한 양의 연산 처리와 데이터 저장이 필요하게 되어, 이에 따른 상당한 에너지 소비와 냉각수 사용에 대한 우려를 동반하고 있다. 전력의 과도한 사용은 탄소 배출량의 증가로 이어질 것이며, 에너지 부족이 심화될 가능성이 있다. AI에 사용되는 전력 대부분이 화석 연료로 만들어지고, AI의 발전에 따라 전력 수요가 급증하고 있다는 사실은 탄소중립 목표 달성에 있어서 부정적인 영향을 줄 수 있다. 또한, 막대한 양의 냉각수 사용은 물부족 상황에서 인간과 데이터센터가 경쟁 관계에 놓일 수 있음을 시사한다.
- 국제에너지기구(IEA)에 따르면, 2022년 전 세계 데이터센터는 약 240~340TWh의 전력을 소모한 것으로 추정되며, 이는 전 세계 최종 전력 수요의 1~1.3%에 해당하는 수치다. 대규모 데이터센터에서 처리하는 업무량의 급속한 증가로 에너지 사용량이 매년 20~40% 증가하고 있으며, 아마존, 마이크로소프트, 구글, 메타는 2017년부터 2021년 사이에 에너지 사용량이 두 배 이상 증가해 2021년에는 약 72TWh에 이르렀다.⁵
- 우리나라에서도 2022년 기준 국내에 운영 중인 데이터센터는 약 187개이며, 이중 60%에 이르는 대다수의 센터가 수도권에 입지해 있다.⁶ 그리고 이들 시설에서 사용하는 전력 수요는 2022년 1.7GW에서 2029년 49.4GW(센터 732개)로 크게 증가할 것을 예상하고 있다. 이는 수도권 전력 계통에 부담을 주어 전력 신뢰도나 품질에도 영향을 미칠 수 있다.⁷

5 IEA 홈페이지 (2024). <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks> (2024.04.08. 접근)

6 인베스트 조선 (2023.12.07.). https://www.investchosun.com/site/data/html_dir/2023/12/06/2023120680042.html (2024.04.08. 접근)

7 한겨레 (2023.03.09.). https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/1082890.html (2024.04.08. 접근)

[그림 4] 남우루과이 구글 데이터센터 조감도



[그림 6] 칠레 데이터 저항 포스터



출처: 몽가베이 홈페이지

• AI 데이터센터를 운영하는 데 또 다른 문제는 냉각용 담수⁸ 사용에 대한 문제다. AI 데이터 센터를 유지하기 위해서는 센터 내부 온도와 서버의 발열을 낮추기 위하여 수백만 리터의 담수를 직접 사용해야 하며, 이는 인간과 환경에 악영향을 미친다. AI가 작동하는 장비(하드, 서버, GPU, 메모리 등)들을 구동하고 유지하는 데도 이러한 영향은 계속된다. 이는 인간이 전력을 사용하거나 물을 사용하는데 있어서 AI와 경쟁해야 하는 관계가 형성된다는 것을 의미한다.

• 블루필드 리서치(Bluefield Research 社)는 2030년까지 데이터센터의 물 사용량이 매일 약 17억 리터를 넘어설 것으로 예측하였으나, 이미 이보다 빠른 2022년에 17억 리터의 물을 소비하고 있는 것으로 확인되었다. 연구에 따르면, 2030년 인터넷을 사용하는 1인당 물 사용량이 3리터에 달할 것으로 예상하며, 이는 인간이 매일 마시는 물보다 많은 양이고, 물리적으로는 그 이상을 소비할 가능성이 크다고 설명한다.

• 물 사용의 경우 에너지 사용보다도 인간과 직접적인 갈등을 야기한다. 최근 마이크로소프트와 구글이 칠레와 우루과이에서 데이터센터를 건립하기 위해 식수 저수지 물을 활용하여 이에 반대하는 시위⁹가 벌어지기도 했다. 이러한 상황이 문제가 되는 이유는 칠레와 우루과이에서는 기온 이상 현상으로 2023년에 70년 만에 찾아온 극심한 가뭄으로 인한 심각한 물 부족 사태가 발생했기 때문이다.

• 영국의 유명한 UI/UX 전문가 게리 맥거번(Gerry McGovern)은 「World Wide Waste(2020)」¹⁰에서 데이터 센터의 건립을 광산 산업에 비유한 바 있다. 광산의 건설과 데이터센터의 건립은 자원 소비와 환경적 영향, 지속 가능성 문제, 경제적 영향 측면에서 유사한 효과를 보인다. 자원의 소비 측면에서 데이터 센터는 운영에 필요한 대량의 전력과 물을 소비하며, 광산도 광물 추출 과정에서 많은 에너지와 물을 소비한다. 환경적 영향 측면에서는 지역 수자원 부족 문제나 대량의 에너지 소비로 인하여 탄소 배출량 증가 등의 문제를 초래할 수 있다. 지속 가능성 측면에서도 한정된 자원의 소비가 부수적인 문제를 일으킬 수 있다. 경제적 영향에 있어서는 지역사회의 일자리 창출과 경제적 이익에 긍정적인 효과를 가져올 수 있으나, 다양한 사회적 이슈가 발생할 수 있다는 것이다.

8 데이터센터에서 사용하는 냉각용 담수는 박테리아와 불순물이 없는 상태여야 하며, 이는 사람들이 사용하는 자원과 직접적으로 연계된다. 클라우드 서버의 데이터 저장에 담수 공급에 실질적인 영향을 미치고 있으나, 이러한 소비량은 공개되지 않는 것이 현실이다.

9 Mongabay (2023.11.02).

<https://news.mongabay.com/2023/11/the-cloud-vs-drought-water-hog-data-centers-threaten-latin-america-critics-say> (2024.04.08. 접근)

10 Gerry McGovern (2020). "World Wide Waste". <https://gerrymcgovern.com/books/world-wide-waste> (2024.04.08. 접근)

• AI의 환경적 영향에 대한 제도적 차원의 대응도 진행 중이다. 2023년 6월 EU 회원국들은 고위험 AI 시스템이 포함된 장비와 설비의 사용 시 에너지 소비와 자원 사용 등의 영향을 보고하도록 하는 「Artificial Intelligence (AI) Act」를 승인하였으며, 이 법안은 2025년부터 시행될 예정이다¹¹. 또한 미국에서는 2024년 2월 「2024 인공지능 환경영향법(Artificial Intelligence Environmental Impacts Act of 2024)」이 발의되었는데, 이 법안은 인공지능의 환경 영향을 평가하고 보고하는 표준화된 시스템을 구축하는 것을 목표로 하고 있다.¹²

• 이상의 내용을 정리하면 현재 인공지능(AI), 머신러닝(Machine learning), 딥러닝(Deep learning)은 산업과 경제, 사회를 아우르는 다양한 분야에서 혁신과 발전을 선도하고 있으며, 기술 진보와 새로운 가치 창출을 위해 적극적으로 도입 활용되고 있다. 하지만 이 과정에서 대량의 에너지 사용은 우려의 대상이다. 이에, 본 연구는 AI 개발의 부정적 요소를 최소화하고 지속가능성을 제고 할 수 있도록 그린 AI(Green AI)¹³로의 전환, 재생 가능 에너지 사용의 증대, 탄소중립 목표 기여 등이 필요하다는 관점을 바탕으로 향후 정책적 개선사항에 대한 필요성을 제시하고자 한다.

<표 1> 레드 AI(Red AI)와 그린 AI(Green AI)

비교요인	레드 AI	그린 AI
중점 지표	· 정확도 · 속도 · 성능	· 효율성 · 환경적 비용 · 사회적 비용
측정 및 용어	계산 비용/단일 예제 처리 비용/훈련 데이터셋 크기/ 하이퍼파라미터 실험 수/부동소수점 연산 수	탄소 배출/전기 사용/훈련 시간 효율성/추론 시간 효율성/추론 에너지 효율성



11 박희영 (2023). 「유럽연합(EU) 인공지능법안(AI Act)과 저작권법-ChatGPT 등 생성형 인공지능과 관련하여」, 이슈리포트 2023-19, 한국저작권위원회.

12 법률신문 (2024.03.28.). <https://www.lawtimes.co.kr/news/197146> (2024.04.08. 접근)

13 Schwartz et al.(2020)은 인공지능이 객체인식, 게임플레이, 음식인식, 기계번역 등을 포함한 광범위한 범위에서 기능발전이 진행되어오고 있다는 점을 설명하면서, 레드 AI(Red AI)와 그린 AI(Green AI) 개념을 처음 도출하였다. Red AI는 고비용 고예산의 컴퓨팅 비용(따라서 탄소 비용)을 급격히 증가시키고 더 많은 매개변수를 포함하여 연산하여, 정확도와 속도를 바탕으로 모델의 성능을 증가시켜 재정적, 환경적 비용이 증가하는 것을 의미한다. AI 모델 훈련에서 상당한 양의 전력이 소모되는 이유는, 고도로 복잡한 계산과 대량의 데이터 처리가 필요하기 때문이며, 모델이 더 정교해질수록, 즉 더 많은 데이터를 학습하고 더 복잡한 연산을 수행할수록 더 많은 컴퓨팅 자원이 요구되고 이는 결국 더 많은 전력 소비로 이어진다. Green AI는 효율성 추구하고 환경적 비용과 사회적 비용을 줄여나가면서 새로운 결과를 산출하는 연구를 의미한다. 이러한 방식은 에너지에 효율적이고 계산 비용이 낮은 새로운 알고리즘과 모델을 개발하여 에너지 소비를 줄이는 방법이며, 모델 크기와 복잡성을 줄이면서도 성능을 유지하거나 향상시키는 기법을 적용하는 것이다. 재생 가능 에너지의 사용 측면에서도 그린 AI의 실현은 시스템을 운영 데이터센터에서 재생 가능 에너지를 사용하는 것이다.

정부의 AI 정책과 그린 AI 투자

정부의 AI 투자전략

• 정부는 AI를 일상생활부터 산업 전반에 접목되는 핵심 기반 기술로 인식하고 있으며, AI의 고효율성·안전성·신뢰성을 제고하기 위해 노력하고 있다. 이러한 노력은 국가 경쟁력 강화 및 각 산업 분야에서의 디지털 패권 경쟁을 위해서는 AI 기술 발전이 중요한 핵심역량임을 인지하고 있기 때문이며, 에너지 효율화 및 탄소중립 목표달성을 위한 핵심기술로서도 AI 기술을 활용하고 있기 때문이다.

• 2023년 10월 국가과학기술자문회의 산하 '제4회 국가전략기술 특별위원회'에서는 '인공지능 전략로드맵'을 발표하여 AI 기술투자 확대와 함께 산업부문에 대한 AI 도입을 강조하고 있다. 인공지능 기술개발 목표는 ① 효율적 학습 및 인공지능(AI) 인프라 고도화, ② 첨단 모델링·의사결정, ③ 산업활용·혁신AI, ④ 안전·신뢰AI 등 4개 중점기술별로 구체화하고 있다.

<표 2> 인공지능 전략로드맵 상 기술 분야 및 기술개발 목표

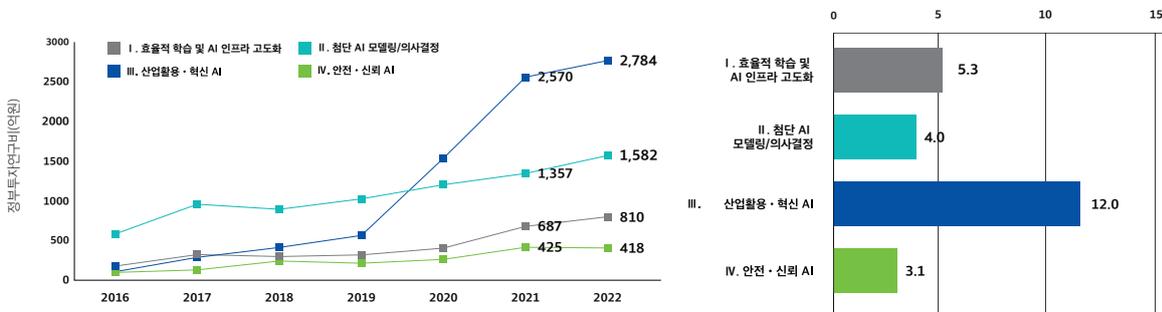
번호	중점기술	세부분야	기술확보 목표
1	효율적 학습/ AI인프라 고도화	AI 학습·추론 고효율화	데이터·전력·컴퓨팅 규모 50% 이상 효율화하는 고효율 학습모델 기술 개발 → 데이터 수량별 적응적 학습, 비정제 데이터 기반 자기지도학습, On-Device 학습 기술 등
		고성능·저전력 AI 컴퓨팅 인프라 구축	AI 시스템 성능·확장성 향상 및 에너지 절감 (50% 이상) → 대규모 데이터의 서버 분산/병렬형 학습 인프라 구축 → AI Cloud 최적 운영, 초거대 AI 데이터 통합 관리 플랫폼 확보
2	첨단 AI모델링/ 의사결정	딥러닝 모델 한계 극복	인간의 지식습득 과정에 기반한 협업·자율성장형 AI 고도화 → AI Agent간 자율적·종합적 의사소통·협업 기술 → 자체적인 학습방법 체득을 통한 초소량 데이터 학습 기술(Few/Zero-Shot)
		AGI 원천기술 확보	차세대 인간지향적 인공지능(AGI) 원천기술 개발 → 그럴듯한 거짓답변(Hallucination) 예방을 위한 상식추론 → 복합 정보의 초고속·초정확 인식을 통한 멀티모달 표현 → 뇌 신경망의 해부학적/기능적 모사를 토대로 한 뇌모사 AI
	산업활용·혁신 AI	기업별 특화 AI 내재화	기업에서 손쉽게 도입할 수 있는 전문영역별 특화 서비스형 AI(AI as a service) 개발 → 전문 코딩 기술이 없어도 누구나 설계·코딩이 가능한 Low/No-code 기반 AI 어플리케이션 개발 및 보급
		비즈니스 모델 AI 적용	기업이 보유한 데이터 기반 AI Transformation 적용 및 실증 → 비즈니스 모델 및 기업 업무 전과정의 효율성·생산성·품질 수준 혁신 지원
4	안전·신뢰 AI	데이터 공정성 확보	데이터 공정성 침해 여부 자동 판별, 공정성-활용성 간 균형 확보 → 개인정보 비식별화의 자동화 (데이터 가명처리, 마스킹 등) → AI 생성 결과물의 저작권, 개인정보 침해 여부 자동 판별(탐지율 90% 이상)
		설명가능한 AI(XAI)	AI 결론도출 과정(작동원리) 및 결과에 대한 설명가능성 강화→ 투명성 확보 → (1단계) AI모델의 결론도출 과정, 결론의 의미 (시스템 작동방식 보장) → (2단계) AI모델이 가진 편향성 등 구조적 취약점을 자체 판단 (결과수준 보장)
		AI 시스템 강건성	AI모델의 오용방지 기술 개발 → 편향·거짓, 변조·생성된 데이터가 투입되더라도 모델의 강건성(robustness) 유지

출처: 과학기술정보통신부 (2023.10). 「국가전략기술 임무중심 전략로드맵(안) II. 미래혁신 분야: 인공지능·첨단바이오」

정부의 AI R&D 투자현황

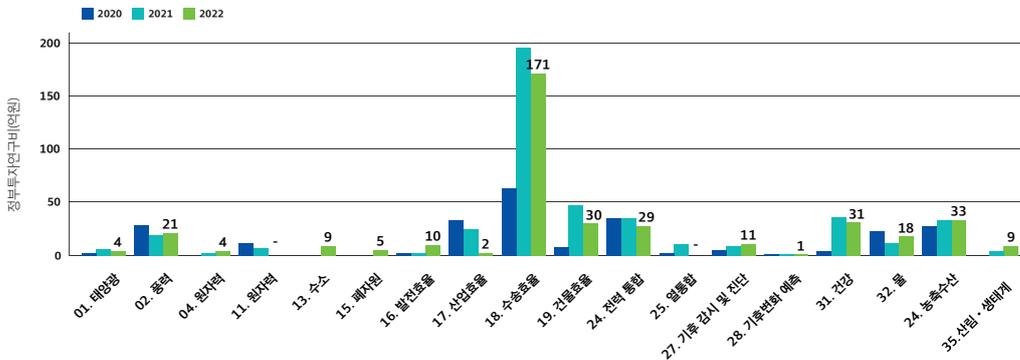
- 앞서 논의된 인공지능 전략로드맵 분류를 기준으로, 그린 AI¹⁴ 투자현황을 분석하면 다음과 같다.
- 먼저 전체 인공지능 분야 R&D 투자규모는 2016년 1,027억 원에서 2022년 5,594억 원으로 증가하며 2019년을 기점으로 크게 확대되는 것으로 나타나며[그림 7-a], 인공지능 분야 내 탄소중립 관련 과제는 산업활용·혁신 AI(12.0%), 효율적학습 및 AI 인프라 고도화(5.3%), 첨단 AI 모델링/의사결정(4.0%) 순으로 분포하고 있다[그림 7-b].
- 탄소중립 부문에 대한 R&D 투자 규모에 있어 AI는 에너지 효율 기술(①발전효율 기술, ②산업효율 기술, ③수송효율 기술, ④건물효율 기술) 부문에 투자가 집중되어 있고 이 중 가장 많은 과제 비중을 차지하고 있는 분야는 수송효율 기술이며, 그 밖에 풍력기술 부문과 건강기술, 농업·축산·수산기술 부문에서도 2022년 기준 약 20억원 이상이 투자되어 AI 개발 투자 규모가 큰 것으로 나타나고 있다[그림 7-c].

[그림 7] 인공지능 전략로드맵 분야 R&D 투자 및 탄소중립 부문 분포 현황('16-'22)



a) 인공지능 전략로드맵 분류별 R&D 투자 추이('16~'22, 억원)

b) 인공지능 분야 내 탄소중립 R&D 분포(%)



c) 인공지능 전략로드맵 R&D에서의 탄소중립 기술별 투자 규모('20~'22, 억원)

* 자료: 인공지능 전략로드맵 상 기술분류 체계 및 정의를 바탕으로 국가연구개발사업 각 연도별 데이터의 연구내용을 분석하여 저자 산출

14 이 연구에서는 '그린 AI'를 단순한 효율적인 학습 기술이나 AI 인프라를 넘어서, 탄소중립을 실현하기 위해서 AI 기술이 적용 활용되는 다양한 산업 및 기술 영역 전반으로 정의한다.

<표 3> 인공지능 전략로드맵 분야 R&D 투자 및 탄소중립 부문 분포 현황('16-'22)

구분		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	합계	CAGR (5y, %)
인공지능 투자	I. 효율적 학습 및 AI 인프라 고도화**	196	331	314	333	420	687	810	3,091	26.7
	II. 첨단 AI 모델링/의사결정	597	969	909	1,037	1,219	1,357	1,582	7,671	14.9
	III. 산업활용·혁신 AI	119	309	429	581	1,554	2,570	2,784	8,347	59.6
	IV. 안전·신뢰 AI	114	149	262	228	275	425	418	1,872	12.4
인공지능 분야 합계		1,027	1,759	1,915	2,180	3,468	5,039	5,594	20,981	30.7
AI R&D 중 탄소중립 투자	I. 효율적 학습 및 AI 인프라 고도화	14	15	14	16	23	30	51	163	38.3
	II. 첨단 AI 모델링/의사결정**	39	48	59	40	29	60	35	309	-12.2
	III. 산업활용·혁신 AI**	24	22	26	75	202	354	303	1,005	84.4
	IV. 안전·신뢰 AI**	4	15	11	12	5	10	1	58	-47.4
탄소중립 분야 합계		81	99	110	143	259	454	389	1,535	37.2

* 자료: 인공지능 전략로드맵 상 기술분류 체계 및 정의를 바탕으로 NTIS의 연도별 국가연구개발투자 데이터를 분석하여 산출

** 그린 AI 투자 분야

<표 4> 그린 AI 국가 R&D 투자 추이(주요 변수별, '16-'22)

(단위 : 억 원)

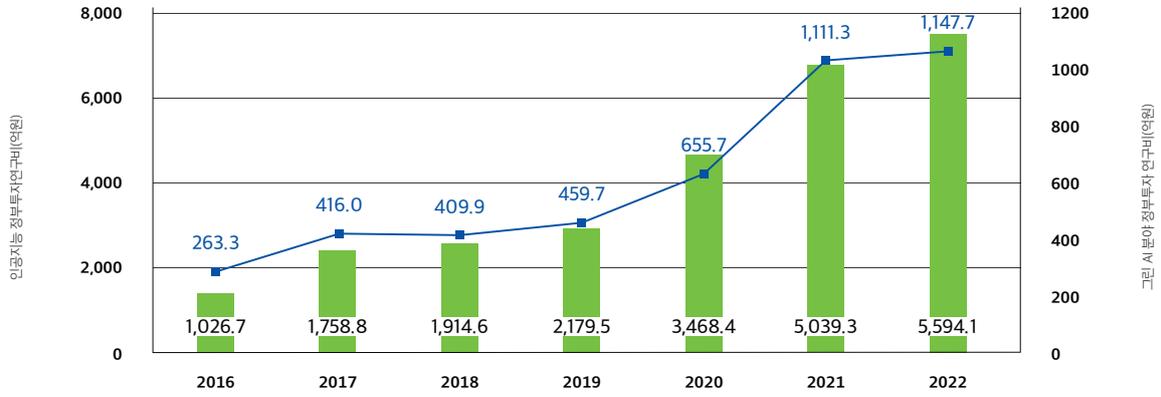
구분		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	합계	분야 내 비중(%)	CAGR (5y, %)	
그린 AI**	연구수행 주체	기업	96	177	198	174	252	472	459	1,828	40.9	23.3
		대학	34	51	69	121	140	218	308	940	21.1	45.2
		연구소	133	188	143	165	263	421	381	1,695	38.0	27.9
	연구개발 단계	기초	46	51	44	50	59	107	163	520	11.7	38.9
		응용	36	148	160	123	193	340	330	1,330	29.8	19.8
		개발	181	184	135	211	370	629	592	2,301	51.5	44.7
		기타	0	34	71	76	34	35	63	312	7.0	-3.0
	합계		263	416	410	460	656	1,111	1,148	4,464	100.0	29.4

• 그린 AI(인공지능 분야의 '효율적 학습 및 AI 인프라 고도화', '탄소중립 기술에서의 AI 적용 분야')는 2016년 263억 원에서 2022년 1,148억 원으로 연평균 증가율은 29.4% 수준으로 나타나[그림 8-a], 전체 인공지능 분야 증가율(30.7%)과 유사한 수준으로 확대되고 있다<표 4>.

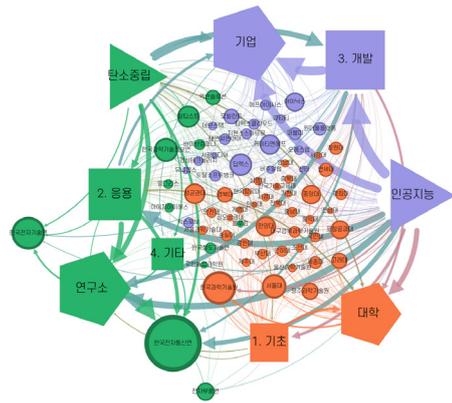
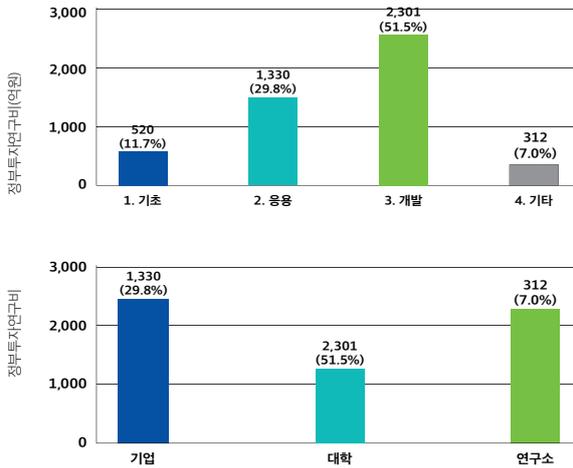
• R&D 주요 변수별로는 연구개발단계 상 개발연구 비중이 51.5%로 가장 높고, 응용연구가 29.8%, 기초연구 11.7% 순으로 나타났으며, 수행주체별로는 대학이 21.1%, 연구소 38.0%, 기업 40.9% 순으로 나타난다[그림 8-b].

• 세부 연구수행주체별 투자예산 규모를 반영시킨 네트워크 분포 현황을 살펴보면, 탄소중립 분야는 응용분야와 밀접하고, 연구소-기업 등을 중심으로 수행되고 있으며, 인공지능 분야와 관련해서는 기업(개발연구)과 대학의 기초연구 주도로 추진되고 있다[그림 8-c].

[그림 8] 그린 AI 국가R&D 투자 추이 (주요 변수별, 수행주체 네트워크 현황, '16-'22)



a) 그린 AI 분야 R&D 투자액 추이



b) 그린 AI R&D 특성변수별 분포 현황('16-22, 억원, %)

c) 연구개발단계별-수행주체별 네트워크 분포 현황(R&D 3억원 이상)



정부의 AI 정책과 그린 AI 투자

• AI 기술의 도입과 확산은 전력 소비량을 증가시키고 탄소배출 저감에 부정적 영향을 미칠 수 있으나, 다른 한편으로는 에너지 효율성 개선에 기여하고 환경적 가치를 제고함으로써 탄소중립을 달성하는 데 중요한 역할을 수행할 수 있다.

• 탄소중립 목표 달성에 있어 AI 기술의 역할은 온실가스감축 및 기후변화적응과 관련된 기후변화대응 기술(이하 '기후기술')에서 AI 기술이 통합되는 구체적인 사례를 확인함으로써 명확해질 수 있다. 본 연구에서는 2016년에서 2022년까지 수행된 국가연구개발사업과제 가운데 탄소중립에 기여하는 AI 기술활용 과제를 중점적으로 설명하고자 한다.

• 기후기술의 분류기준은 기후기술법과 세부 고시내용에 기반¹⁵하고 있으며, 상세내용은 다음 <표 5>와 같다.

• 본 연구에서는 기후기술의 중분류 기준으로 AI 적용 분야를 설명하고 있으나 모든 중분류에 AI 통합사례가 존재하는 것이 아니었으므로 이러한 중분류(온실가스 처리, 기후영향평가 및 진단, 정책기술분석 및 평가)는 제외하였다. 또한, 하나의 중분류 안에서도 소분류에 따라 AI 적용 분야나 방식이 다양하게 나타나는 경우가 있었으므로 이런 경우 중분류를 구분함으로써 탄소중립에 기여하는 AI 기술 적용 방식을 정확하게 소개하고자 하였다(피해관리 및 탄력성 제고).

<표 5> 기후기술 분류

대분류	중분류*	소분류
감축	I. 에너지 생산	1.태양광 기술, 2.태양열 기술, 3.풍력 기술, 4.해양에너지 기술, 5.수력 기술, 6.수열 기술, 7.지열 기술, 8.바이오에너지 기술, 9.수소-암모니아 발전 기술, 10.석탄액화-가스화 기술, 11.원자력 기술, 12.핵융합에너지 기술
	II. 연원료 대체	13.수소 기술, 14.바이오매스 기술, 15.폐자원 기술
	III. 에너지 효율	16.발전효율 기술, 17.산업효율 기술, 18.수송효율 기술, 19.건물효율 기술
	IV. 온실가스 처리	20.이산화탄소(CO2) 포집·저장·활용 기술, 21.메탄(CH4) 처리 기술, 22.기타 온실가스 처리 및 대체 기술, 23.탄소흡수원 기술
	V. 에너지 융복합	24.전력 통합 기술, 25.열 통합 기술, 26.전력-비전력 부문간 결합 기술
적응	VI. 기후변화 모니터링	27.기후변화 감시 및 진단 기술, 28.기후변화 예측 기술
	VII. 기후영향평가 및 진단	29.기후변화 영향 평가 기술, 30.기후변화 취약성 및 위험성 평가 기술
	VIII. 피해관리 및 탄력성 제고	31.건강 부문 기술, 32.물 부문 기술, 33.국토·연안 부문 기술, 34.농축수산 부문 기술, 35.산림·생태계 부문 기술, 36.산업-에너지 부문 기술
	IX. 정책기술 분석 및 평가	37.적응조치의 효과평가 기술, 38.기후변화 적응기반 기술

* 중분류 명칭은 기후기술법 시행규칙에 기반하여 저자가 개념화하였다.

출처: 엄성찬 외(2023) 「기후변화대응 기술개발 활동조사 연구」

15 정부는 기후변화대응 기술을 통해 국내외 온실가스를 감축하고 이를 새로운 국가발전의 모멘텀으로 활용하기 위한 “기후변화대응 기술개발 촉진법(기후기술법)”을 제정하고(22.09) 동법 시행규칙 및 세부내용 고시를 통해 기후변화대응 기술의 범위 및 세부내용을 규정하였다.

1. (탄소배출 감축) 에너지 생산 분야

• AI는 태양광·열, 풍력, 해양에너지 등 재생가능 에너지의 효율적인 생산에 활용 가능하다. 예를 들어, AI 알고리즘은 태양광 발전소와 풍력 발전소에서 에너지 출력을 최적화하기 위해 날씨 예측과 발전효율을 분석하여 재생 가능 에너지의 안정적인 통합·활용에 기여한다.

• (주요 과제) ‘디지털트윈 적용 태양광발전량 예측 고도화 및 발전 설비 예지보전 AI학습서비스 플랫폼 개발(과기부)’에서는 대량의 데이터를 수집해 발전량 예측모델을 생성하여 성능을 평가하고, 태양광 패널의 이미지 데이터를 분석하는데 딥러닝 모델을 활용하며 이를 통해 발전량을 정밀하게 예측하고 발전소 운영효율을 극대화한다. ‘강화 학습을 활용한 중운동 파력발전장치의 최적제어연구(과기부)’에서는 실시간으로 수집되는 해역환경 정보에 대하여 강화학습 알고리즘을 개발하여 파력발전장치 운영방식을 최적화하는데 AI 기술이 활용되며, 이를 통해 해양에너지 시스템의 효율성을 제고한다.

2. (탄소배출 감축) 연원료 대체 분야

• AI 기술은 에너지 생산을 위한 지속가능한 대체재로 바이오연료나 화학 물질의 개발 및 생산, 생산 설비의 관리 및 운영 고도화에 적용되고 있다.

• (주요 과제) ‘수소충전소 원격 모니터링, 진단 및 안전관리를 위한 디지털 솔루션 실증기술 개발(산자부)’ 사업과제에서 AI 기술은 실시간으로 수집된 수소충전소의 데이터를 모니터링하고 수집데이터 분석을 통해 설비 이상징후를 조기 감지하는데 활용되며, 이를 통해 수소충전소의 안정성 및 운영효율에 기여한다. ‘딥 러닝이 적용된 컴퓨터 비전 지능형 대용량 재활용 분류 로봇 개발 및 사업화(과기부)’는 딥러닝 알고리즘을 통하여 폐기물을 분류하도록 함으로써 신속하고 효과적으로 재활용 과정을 자동화·효율화할 수 있으며, 폐기물 처리과정의 비용 및 탄소배출량을 감축시킬 수 있다.

3. (탄소배출 감축) 에너지 효율 분야 - 발전·산업·수송·건물효율

• 에너지 수요 관리와 효율성 향상 측면에서 AI 기술은 스마트 그리드와 스마트 빌딩 시스템을 지원하여 에너지 소비를 최적화하고, 산업 공정에서의 에너지 사용을 줄일 수 있다. 교통 시스템에서 AI 기술은 루트 최적화, 차량 공유 서비스의 효율성 제고를 통해 연료 소비를 감축하는데 활용된다.

• (주요 과제) ‘빅데이터·인공지능 기반 물류연계 최적화 기술 개발(해수부)’ 과제에서 빅데이터와 인공지능에 기반한 물류 예측 및 최적화 모델을 설계하고 활용하는 기술을 개발하여 수송 효율을 제고하고 탄소저감에 기여할 수 있다. ‘에너지 다소비 건물의 에너지 관리 및 최적화를 지원하는 국내외 기술표준 연계형 디지털 트윈 플랫폼 및 사업 모델 개발(산자부)’ 사업에서는 인공지능 기반 건물 에너지관리 시스템을 구축하여 건물 운영의 효율성을 제고한다.

4. (탄소배출 감축) 에너지 융복합 분야

• 다양한 에너지생산·저장·소비기술을 통합하는 에너지 융복합 분야에서는 AI 기술의 도입을 통해서 효과적으로 에너지원을 통합하여 관리하고 에너지 공급의 안정성과 효율성을 제고한다.

• (주요 과제) ‘스마트시티 에너지 데이터 수집, 처리 기술 개발(산자부)’ 과제에서는 스마트시티의 에너지 효율성을 높이기 위해 대규모의 에너지 사용 데이터 수집 및 처리에 AI 기술을 도입·활용한다. ‘컴퓨팅 서버의 운영 전력 절감을 위한 지능형 메인보드 제어 소프트웨어 기술(기재부)’ 과제에서는 데이터센터 내 지능형 메인보드 제어 소프트웨어를

개발 및 도입하고 이를 통해 데이터센터의 에너지를 절감하고 운영 효율성을 제고한다.

5. (기후변화 적응) 기후변화 모니터링 분야

- 지구 온난화와 기후변화의 진행 상황을 정밀하게 모니터링 하기 위한 위성 이미지 분석, 기후 데이터의 복잡한 모델링 및 예측에 AI를 활용하여 기후변화 영향을 세밀하게 파악하고 대응 전략을 수립하도록 돕는다.
- (주요 과제) 기상청의 ‘스마트시티 기상기후 플랫폼 개발’ 과제에서는 스마트시티 내의 다양한 기상·기후 정보를 통합하여 관리하기 위해 디지털 트윈 기술을 적용하고 이를 통해 기상재난 재해 예방 시스템을 구축한다. ‘빅데이터 기반 AI 의사결정 핵심기술 개발(행정안전부)’에서는 재난대응 의사결정을 지원하기 위해서 재난 관련 다양한 정보를 분석하는 인공지능 알고리즘을 개발한다. ‘딥러닝 기반 3차원 기상 레이더 데이터 분석기법 연구’는 기상 레이더 데이터를 분석하는 여러 인공지능 모델을 개발, 정밀한 기상예측이 가능하도록 한다.

6. (기후변화 적응) 피해관리 및 탄력성 제고 1 - 건강·물·국토연안·농축수산 부문

- AI 기술은 복잡한 데이터 패턴을 분석하고 예측함으로써 기후 변화로 인한 피해를 최소화하고 사전에 재해 발생 가능성을 예측, 효과적인 대응 계획을 수립하여 인명 피해와 재산 피해를 줄이는 데 기여할 수 있다.
- (주요 과제) ‘IoT 기반의 수자원 계측 데이터의 표준화 플랫폼 개발(과기부)’에서는 물관리 시스템에 대한 예측 모델링 개발 및 데이터수집·관리·표준화 과정에 AI기술을 활용함으로써 안정적으로 수자원을 관리운영하고자 한다. ‘소류지 농업용수 무인관리 시스템 개발(중기부)’과제에서는 가뭄과 같은 기후재해에 대응하기 위한 데이터 분석 예측모델에 AI를 적용한다.

7. (기후변화 적응) 피해관리 및 탄력성 제고 2 - 산림생태계 부문

- 산림생태계의 건강 상태 모니터링, 불법 벌목 감시, 식생 복원 및 생태계 보전에 AI 기술을 활용하여 산림의 탄소 흡수·저장 능력을 강화시킬 수 있다.
- (주요 과제) ‘AI 기반 이종 데이터 분석을 통한 산불 전조 탐지 및 확산 예측 모델링 핵심 기술 개발(산림청)’ 과제에서 산불 발생 및 확산에 대한 학습데이터 기반 AI 예측모델을 개발하여 재난을 관리함으로써 산림생태계를 보존한다.
- 종합적으로, AI 기술은 에너지의 생산에서 융복합, 기후변화 모니터링 및 기후변화 피해관리에 이르기까지 다양한 부문에 통합되어 기후 위기를 해결하는 중요한 열쇠가 되고 있다. 이러한 AI의 폭넓은 활용은 환경적 지속가능성을 향상시키기 위한 그린 AI의 개념과 일치한다고 볼 수 있으며, 정부는 앞으로도 탄소중립 목표 달성을 위한 그린 AI의 역할을 확인하고 증대시켜나갈 필요성이 있다.
- 앞서 살펴본 2016-2022 국가연구개발사업에서 기후변화와 관련된 ‘온실가스 처리 기술(CCUS 기술 등)’, ‘기후영향평가 및 진단 기술’, ‘정책기술 분석 및 평가 기술’ 분야에서는 AI 기술 활용이 확인되지 않았다. 향후 정부는 이들 미활용 분야에서 기후변화 적응 및 탄소중립 목표달성에 기여하기 위한 AI 통합 및 기술 발전을 지원함으로써, 그린 AI 기술의 추가적인 적용 가능성을 발굴하고 촉진할 수 있을 것이다.

<표 6> 탄소중립 분야 AI 기술 활용 주요과제('16-'22)¹⁶

대분류	중분류	소분류	과제명
감축	I. 에너지 생산	태양광	디지털트윈 적용 태양광 발전량 예측 고도화 및 발전 설비 예지보전 AI 학습 서비스 플랫폼 개발
		풍력	디지털트윈 기술에 기반한 부유식 해상풍력 시스템의 예지적 유지보수 기술 개발
		해양에너지	강화 학습을 활용한 중운동 파력발전장치의 최적제어 연구
	II. 연원료 대체	수소	수소충전소 원격 모니터링, 진단 및 안전관리를 위한 디지털 솔루션 실증 기술 개발
		폐자원	딥 러닝이 적용된 컴퓨터 비전 지능형 대용량 재활용 분류 로봇 개발 및 사업화
	III. 에너지 효율	발전효율	AI 기반 신규 리튬염 발굴을 통한 수계 기반 4V급 리튬이온전지 개발
		산업효율	뿌리산업을 위한 스마트공장 수직형 통합 패키지 개발
		수송효율	빅데이터·인공지능 기반 물류 연계 최적화 기술 개발
		건물효율	에너지 다소비 건물의 에너지 관리 및 최적화를 지원하는 국내외 기술 표준 연계형 디지털 트윈 플랫폼 및 사업 모델 개발
	V. 에너지 융복합	전력 통합	(총괄) 스마트시티 에너지 데이터 수집, 처리 기술 개발
			컴퓨팅 서버의 운영 전력 절감을 위한 지능형 메인보드 제어 소프트웨어 기술
		열 통합	전원 불안정 감내 자율적 에너지 기반 컴퓨팅 시스템 SW 원천 기술 개발
		전력비전력 부문간 결합	IoT 기반 전원 독립형 연료전지-태양광- 풍력 하이브리드 발전 기술 개발
적용	VI. 기후변화 모니터링	기후 감시 및 진단	스마트시티 기상·기후 플랫폼 개발
			빅데이터 기반 AI 의사결정 핵심기술 개발
		기후변화 예측	딥러닝 기반 3차원 기상 레이더 데이터 분석기법 연구
	VII. 피해관리 및 탄력성 제고1	건강	효과적인 감염병 대응을 위한 홈·생활치료센터의 비대면 환자 감염활동추론(IAI) 및 보호관리 SW 기술 개발
		물	소류지 농업용수 무인관리 시스템 개발
			IoT 기반의 수자원 계측 데이터의 표준화 플랫폼 개발
	농축수산	축산질병 예방 및 통제 관리를 위한 ICT 기반의 지능형 스마트 안전 축사 기술 개발	
	VIII. 피해관리 및 탄력성 제고2	산림·생태계	AI 기반 이종 데이터 분석을 통한 산불 전조 탐지 및 확산 예측 모델링 핵심 기술 개발

16 AI 기술활용 주요과제는 정부연구비 상위 과제를 중심으로 선정함

- (인공지능 기술분류) 인공지능 기술은 여러 가지 하위 기술분야와 기술적 접근 방식으로 구분할 수 있으며, 각각의 기술들은 다양한 응용 분야에서 인간의 인지 능력을 모방하거나 향상시키는데 중점을 두고 있다.

<표 7> AI 기술 분류와 탄소중립을 위한 AI 적용 가능 분야

소분류	정의	그린 AI 적용 가능 분야
인지 컴퓨팅 (Cognitive Computing)	인지 컴퓨팅은 인간의 사고 과정을 모방하는 컴퓨터 시스템을 만들기 위한 분야로, 복잡한 상황에서 의사결정을 지원하기 위해 설계	기존 컴퓨팅 시스템 대비 생산성·운영속도 향상을 통한 에너지 효율 개선
기계 학습 (Machine Learning, ML)	데이터로부터 학습하여 패턴을 인식하고 예측을 수행하는 알고리즘을 개발	
딥러닝 (Deep Learning)	인공신경망을 사용하여 데이터에서 고차원적인 특징을 추출하는 ML의 한 방법론으로, 이미지와 음성 인식과 같은 복잡한 문제를 해결하는 데 사용	
자연어 처리 (Natural Language Processing, NLP)	인간의 언어를 이해하고 처리할 수 있는 시스템을 개발하는 AI 분야로, 번역, 요약, 감정 분석 등에 사용	
데이터 마이닝 (Data Mining)	대규모 데이터셋에서 유용한 정보와 패턴을 찾아내는 과정으로, 의사결정 지원 시스템 등에 활용	원격제어 및 자동인식을 통한 작업 프로세스의 간소화 및 에너지 절감
음성 인식 (Speech Recognition)	사람의 말을 인식하고 이해하여 텍스트로 변환하거나 명령을 수행하는 기술	
텍스트 인식 (Text Recognition)	텍스트 데이터를 해석하고 정보를 추출하는 기술로, 문서 분석 및 자동화에 널리 사용	
이미지 및 패턴 인식 (Image and Pattern Recognition)	이미지 데이터 내의 객체나 패턴을 인식하는 기술로, 의료 진단, 보안 시스템 등에 적용	
컴퓨터 비전 (Computer Vision)	컴퓨터를 사용하여 이미지와 비디오로부터 정보를 추출하고 해석하는 기술 분야	작업 수행 자동화를 통한 전력수요 변동성 최소화
지능엔지니어링 (Intelligent Engineering)	엔지니어링 문제를 해결하기 위해 AI를 적용하는 분야로, 설계 최적화, 결함 감지 등에 사용	
로봇틱스 (Robotics)	자율적으로 움직이고, 인지하며 작업을 수행할 수 있는 로봇을 개발하는 기술로, AI는 로봇에게 복잡한 작업을 수행하도록 하고 환경을 인지하며 학습하는 능력을 부여	
추천 시스템 (Recommendation Systems)	사용자의 이전 행동과 선호도를 분석하여 개인화된 제품이나 서비스를 추천하는 시스템으로 온라인 쇼핑, 스트리밍 서비스에서 널리 사용	
자율주행 기술 (Autonomous Driving)	센서 데이터를 이용해 차량이 스스로 주변 환경을 인식하고, 결정을 내려 운전을 하는 기술	차량 운행 에너지 효율 향상으로 인한 온실가스 배출량 저감
모방 학습 (Imitation Learning)	인간의 행동을 관찰하고 모방하여, 에이전트가 특정 작업을 수행하도록 학습하는 방법	반복 수행작업의 자동화를 통한 전력 소비패턴의 최적화

* 저자 작성

탄소중립 목표 달성을 위한 산업부문 그린 시 전환 사례

• 지속 가능한 발전 관점에서 데이터센터는 환경적 영향을 최소화하는 방향으로 진화해야 한다. 디지털화와 자동화의 급속한 발전은 데이터센터의 중요성을 더욱 부각시키고 있으며, 이에 따른 에너지 및 물 사용량의 증가는 지속 가능한 관리 전략의 필요성을 강조한다. 데이터센터가 전력 소비의 주요 부분을 차지하면서 환경에 미치는 영향도 증가하고 있기 때문에, 에너지 효율성 향상과 재생에너지 사용으로의 전환은 필수적이다. 이는 탄소 배출을 줄이고, 에너지 공급 압박과 비용 상승 문제에 대응하는 데 있어 중요한 역할을 한다. 마찬가지로, 물 사용량의 지속적인 증가는 데이터센터 운영의 다른 주요 도전 과제이다. 물 부족 지역에 위치한 데이터센터들은 지역 수자원에 부담을 주고 있으며, 기후변화로 인한 가뭄은 이 문제를 더욱 심화시킨다. 결과적으로, 물과 에너지 관리의 효율성 향상은 데이터센터 산업이 탄소중립을 향해 나아가는 데 있어서 중대한 역할을 하며, 이는 지구 환경 보호와 더불어 산업의 지속가능성을 위해서도 필수적인 조치이다. 따라서 데이터센터는 지속 가능한 에너지 사용과 물 관리 전략을 개발하고 실행해야 할 책임이 있다.

데이터센터의 에너지전환 전략 : 에너지 효율 개선과 재생에너지 사용

• 데이터센터는 전세계 전력 소비의 약 1-1.5%를 차지하고 있다. 이 비율은 지속적인 디지털화와 자동화가 진행되며, 2030년까지 4%까지 상승할 것으로 예측되고 있다. 이로 인해 탄소 배출량이 증가하게 되고, 기후변화 문제의 가속화를 야기할 수 있다. 또한, 에너지 수요증가에 의해서 에너지 공급에 대한 압박이 높아지며, 결과적으로 에너지 비용 상승 문제에도 영향을 줄 수 있다.¹⁷ 이러한 문제에 대응하기 위해 여러 가지 방안들이 제시되고 있으며, 그 중 1)에너지 효율 개선과 2)재생에너지의 사용과 같은 지속 가능한 전략이 주요 전략으로 이용되고 있다.¹⁸

1. 에너지 효율 개선

• 일반적으로 에너지 효율 개선은 탄소중립 달성에 필수적인 요소 중 하나이다. 효율적인 기술과 시스템을 통하여 에너지 사용을 최소화함으로써, 온실가스 배출을 줄일 수 있기 때문이다. 데이터센터에서의 에너지 효율 개선과 같은 경우는 사용되는 전력 소비의 최소화 및 사용 에너지 손실 감축 방법을 찾는 것을 말한다. 이를 통해 운영비용 절감, 환경에 미치는 영향 감소라는 결과를 도출할 수 있다. 이는 서버의 전력 소비를 최소화 하는 칩 설계 및 제조 기술의 발전, 효율적인 냉각 시스템의 도입, 에너지 관리 관리기술의 향상, 고효율 건축 기술을 포함한다.

• (AI 기술을 이용한 효율적 냉각 시스템) Google의 데이터센터는 냉각시스템을 관리하는 시시스템을 개발하여 냉각시스템 작동을 최적화 하였다. 이를 바탕으로 냉각시스템 작동을 최적화 하여 냉각에 필요한 에너지 사용을 최대 40%까지 절감하였다. 또한, 자체적으로 설계하고 제작한 고효율 서버를 사용하여 사용 에너지의 효율의

17 Data Centre Magazine (2023). <https://datacentremagazine.com/articles/efficiency-to-loom-large-for-data-centre-industry-in-2023> (2024.04.08. 접근)

18 Data Centre Magazine (2022). <https://datacentremagazine.com/articles/top-10-data-centres-using-green-energy> (2024.04.08. 접근)

개선을 이루어냈다. 결과적으로 2010년부터 2018년 사이에 데이터센터에서 수행되는 컴퓨팅 작업량이 550%가 증가하였음에도 에너지 소비량은 6%만 증가시키는 데 성공하였다.¹⁹

- (자연을 이용한 냉각 시스템) Apple의 노스캐롤라이나 데이터센터는 환경적인 영향을 최소화 하기 위하여 밤과 겨울 동안 외부 공기를 활용한 냉각 방법을 통해 냉각기 사용량을 75% 줄이는 데 성공하였다. 또한, 디젤로 구동되는 비상 발전기의 탄소 배출량을 감소시키기 위하여 배출가스 제어 시스템을 설치하였다. 그리고 추가 송전선 설치를 통해서 비상 발전기 사용량을 줄여 에너지 효율의 개선을 이루고 있다.²⁰ 마찬가지로, 네이버의 데이터센터는 하이브리드 공조시스템과 에너지 재사용 시스템의 도입을 통해 에너지 효율 개선을 이루고 있다. 하이브리드 공조시스템과 같은 경우, 기후환경에 따라 직접 외기와 간접 외기를 선택적으로 사용할 수 있는 시스템으로 냉방 에너지 사용을 획기적으로 절감하고 있다. 또한 서버 냉각 후 생성되는 폐열 공기를 활용한 물 가열, 바닥난방, 태양광 발전 시설을 통한 전력 확보, 지열을 활용한 냉/난방 공급 등을 통해 에너지 사용을 줄이고 있다. 세종 데이터센터와 같은 경우 연간 1만 3천 MWh의 전력과 6천 톤의 온실가스 배출을 절감하고 있다.²¹

- (전력소비 최소화 칩 설계) 데이터 전송과 처리 시, 전기의 효율적인 제어와 변환에 사용되는 전력반도체와 고성능 컴퓨팅, 에너지 절약을 가능케 하는 오디바이스칩의 갈륨 나이트라이드(GaN) 기술의 적용은 에너지소비를 줄이고 성능을 향상시키는 데 기여할 수 있다. GaN 기술로의 전환은 2030년까지 데이터센터에서만 125백만 톤의 온실가스 배출 감소를 예상하고 있다.²²

- (고효율 에너지 관리) Infosys Bangalore의 데이터센터는 증발냉각 시스템, 빌딩관리시스템(BMS), 모든 펌프와 팬에 초고효율 모터와 가변 주파수 드라이브(VFD)를 설치한 장비 효율 최적화 시스템을 통해 전력사용 효율성을 높이고 인프라 에너지 사용을 최소화 하였다.²³

- (고효율 장비 및 건축설계) NetApp Bangalore의 데이터센터는 외부 공기 유입을 사용한 냉각시스템, 디젤회전 무정전 전원공급장치(DRUPS)를 사용하며, 에너지 효율성을 위해 공기 처리 및 전력 전달 시스템을 수직으로 구축하여 건축 비용, 공간 및 분배 손실을 최소화 하였다. 이를 통해 4.26MW로 설계된 용량의 약 23%인 0.96MW으로 운영되고 있다.²⁴

- (효율적인 유닛 재구성) Fujitsu의 호주 데이터센터는 에너지 소비를 줄이기 위해 공기흐름 최적화 및 CRAC(Cooling, Refrigeration, Air Conditioning) 유닛의 재구성을 진행하였다. 이를 통해서 에너지 소비를 48% 감소시켰으며, 연간 전기 사용량에서 약 23만 달러의 절감효과를 가져왔다. 추가 부품 설치 없이 에너지 및 비용 절감효과를 이루어낸 성공적인 효과 중 하나로 손꼽힌다.²⁵

19 Google 블로그 (2020). <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/data-centers-energy-efficient/> (2024.04.08. 접근)

20 Data Center Knowledge (2024). <https://www.datacenterknowledge.com/data-center-faqs/apple-data-center-and-servers-faq> (2024.04.08. 접근)

21 네이버 데이터센터 홈페이지(2024). <https://datacenter.navercorp.com/green/green-energy> (2024.04.08. 접근)

22 Cadence Blog (2023). <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-gallium-nitride-semiconductors-summary> (2024.04.08. 접근)

23 FEMP (2020). <https://datacenters.lbl.gov/resources/infosys-bangalore-case-study> (2024.04.08. 접근)

24 FEMP (2021). <https://datacenters.lbl.gov/resources/netapp-case-study> (2024.04.08. 접근)

25 Data Center Dynamics (2021). <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/green-data-centers-the-key-to-energy-efficiency-in-a-digital-world/> (2024.04.08. 접근)

[그림 9] 에너지 효율화를 위한 데이터센터



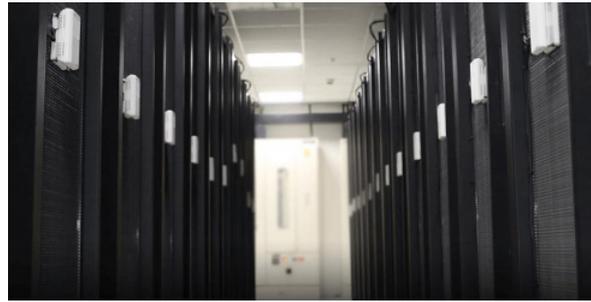
Google 데이터센터



Apple 노스캐롤라이나 데이터센터



Naver 공조시스템의 외부공기 주입 팬



Infosys Bangalore 데이터센터의 서버실



NetApp Balalore 데이터센터 공조시스템



Fujitsu의 데이터센터

2. 재생에너지 사용

• 재생에너지는 자연 과정에서 지속적으로 보충되는 에너지를 말하며 태양광, 풍력, 수력 지열 등을 포함하고 있다. 이러한 에너지 소스들은 화석연료와 비교하여 탄소배출이 적기 때문에 탄소 중립의 관점에서 중요한 역할을 하고 있다. 재생에너지 사용은 데이터센터 운영에 사용되는 에너지원을 재생에너지로 제공받는 것을 말한다. 이를 통하여 데이터센터와 관련하여 발생하는 온실가스 발생량을 줄일 수 있으며, 지속가능한 발전을 위한 밑거름이 될 수 있다. 데이터센터의 재생에너지 사용은 크게 3가지로 구분될 수 있다. 다양한 재생에너지 발전업체로부터 전력구매계약(Power Purchase Agreement, PPA)을 하거나, 해당 지역의 고유 특성을 활용한 재생에너지 발전시설 활용 또는, 직접 재생에너지 발전시설을 설치하는 형태가 있다.

• (재생에너지 PPA) PPA는 RE100의 등장과 함께 기업들이 재생에너지 사용량 충당을 위해 재생에너지 전력 생산업체와 직접 전력구매계약을 맺어 직접거래하는 방식으로, 다양한 기업들에서 활용 중에 있다.²⁶ Apple의

26 인더스트리 뉴스 홈페이지(2022). <http://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=46946> (2024.04.08. 접근)

데이터센터는 2014년부터 100% 재생에너지로 구동되고 있다.²⁷ 여러 공급업체로부터 재생에너지를 공급받아 2017년 한해에만 150만 톤의 온실가스 배출을 감소시켰다.²⁸ 데이터센터뿐만 아니라 공급망 내에서도 재생에너지 사용을 확대하고 있다. 또한, 네이버의 데이터센터는 2040년까지 전체 사용 전력량의 100%를 재생에너지로 전환하고 운영하는 모든 수송 수단을 전기차로 전환하기로 결정하였다. 이와 함께, 비즈니스 활동을 통해 친환경 효과는 극대화하고, 부정적 자연환경에 대한 효과는 최소화하기 위한 2040 카본 네거티브 전략을 수립하였으며 RE100과 EV100에 가입하는 등 적극적인 활동을 진행하고 있다.²⁹

- (지역 특성 활용) 데이터센터 설치 계획에서 지속 가능한 에너지 사용을 고려하는 것이 중요하다. 이를 위해 지리적 특성을 감안하여 설치 위치를 선정하며, 자연 냉각이 가능하거나 재생에너지원 접근이 용이한 지역을 선택함으로써 에너지 효율을 높이고 환경 영향을 최소화할 수 있다. EcoDataCenter는 센터가 위치한 각각의 지역에서 해당 지역의 특색에 맞춰 재생에너지를 통해 발생하는 전력을 공급받고 있다. 북극에 가까운 스웨덴 북부 숲에 위치하는 센터는 주위에 존재하는 수력발전소에서 생산되는 전력을 활용하여 소비전력의 100%를 재생에너지로 충당하고 있다.³⁰

- (재생에너지 발전설비 직접 설치) 미국의 Pegasus Group Holdings는 애리조나의 700에이커 부지에 340MW 태양광 발전 설비를 갖춘 데이터센터 ‘하이브(The Hive)’ 프로젝트를 개발하고 있다. 마찬가지로 에너지 이노베이션 파크와 썬더버드 CHP(Energy Innovation Park and Thunderbird)는 코네티컷의 구 스탠리 블랙 앤 데커(Stanley Black & Decker) 공장을 20MW 연료 전지 마이크로그리드 및 데이터센터로 전환하는 계획을 진행 중이다.³¹

[그림 10] 재생에너지를 활용한 데이터센터



Apple 옥상 태양광 발전 시설



Naver 세종 데이터센터



Digital Realty 데이터센터



EcoDataCenter

27 Apple Newsroom (2018).

<https://www.apple.com/newsroom/2018/04/apple-now-globally-powered-by-100-percent-renewable-energy/> (2024.04.08. 접근)

28 Data Center Dynamics (2013).

<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/apple-reaches-100-renewable-energy-across-all-data-centers/> (2024.04.08. 접근)

29 네이버 데이터센터 홈페이지 (2024). <https://datacenter.navercorp.com/green/green-energy> (2024.04.08. 접근)

30 Data Centre Magazine (2022). <https://datacentremagazine.com/articles/top-10-data-centres-using-green-energy> (2024.04.08. 접근)

31 Schneider Electric 자사 블로그(2022).

<https://blog.se.com/datacenter/2022/05/25/understanding-the-options-renewable-energy-for-data-centers> (2024.04.08. 접근)

데이터센터의 물 사용 효율화 전략 : 자원순환과 대체냉각, 그리고 측정 및 모니터링

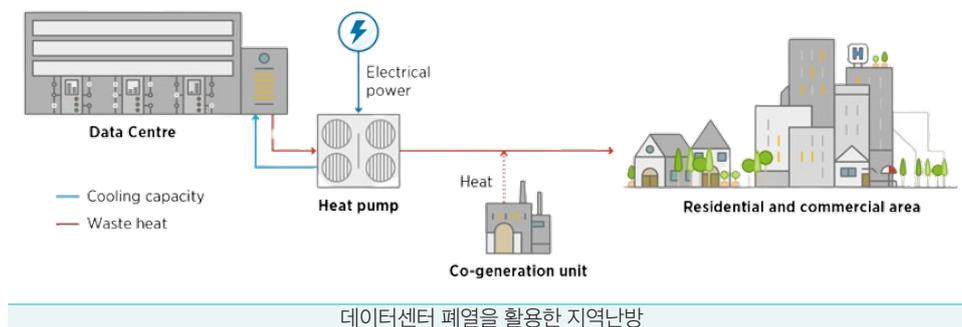
• 데이터센터는 많은 전력을 소비하며, 이로 인해 발생하는 열을 제거하기 위해 상당한 양의 물을 사용한다. 해당 시설 운영을 위한 물 사용량은 지속적으로 증가하고 있으며³², 특히 미국 서부와 같은 물 부족 지역에 위치한 데이터센터는 지역 수자원에 큰 압박을 주고 있다.³³ 또한, 기후변화로 인한 가뭄이 심해지면서 데이터센터는 물 부족 문제에 직면해 있는 실정으로, 이는 지역사회에도 영향을 미친다. 이외에도, 현재 데이터센터의 물 사용 효율성을 나타내는 지표인 물 사용 효율성(Water Usage Effectiveness)은 재활용된 물이나 반환된 물의 양, 전력 생산 과정에서의 간접적인 물 사용을 고려하지 않아 그 한계가 지적되고 있다.³⁴ 하지만 이러한 문제들을 해결하기 위한 다양한 방안들이 제시되고 있다. 탄소중립과 지속 가능성 측면에서 데이터센터의 물 사용 효율성을 높이는 방안은 크게 3가지로 구분해 볼 수 있으며, 1)순환경제 도입, 2)대체 냉각, 3)물 사용량 측정 및 모니터링이 있다.

1. 순환경제 도입³⁵

• 데이터센터의 냉각에 사용된 물은 일반적으로 25-40°C의 온도 범위에서 저온폐수로 발생이 된다. 이것은 다른 산업폐수들에 비해 상대적으로 낮은 온도를 가지고 있으며, 이를 회수하여 활용하는 것은 기술적 및 경제적인 도전이 수반된다. 그럼에도 불구하고, 이러한 저온폐수를 효율적으로 활용하면 데이터센터의 에너지 효율성을 극대화하고 온실가스 배출을 감축할 수 있다. 순환경제 측면에서 저온폐수의 활용성은 다양하다. 주로, 열회수를 통해 이루어지며, 지역 및 건물 난방, 농업용수, 에너지 재생산 등으로 사용됨으로써 데이터센터 이외의 에너지 사용량 및 온실가스 감축에 기여할 수 있다.

• (지역난방) 덴마크에 위치하고 있는 페이스북(Facebook)의 데이터센터는 매년 최대 100,000MWh의 폐에너지를 회수하여 지역에 활용할 수 있도록 위치하고 있다. 발생된 저온폐수를 피에르 바르메 핀社(Fjernvarme Fyn)가 운영하는 도시의 지역난방 시스템으로 보내는데, 여기서 저온폐수는 주로 라디에이터를 사용한 난방에 사용된다. 해당 데이터센터는 또한 주로 지역 풍력 프로젝트(코펜하겐 에너지효율센터)에서 100% 재생에너지로 전력을 공급받는다.³²

[그림 11] 폐열회수시스템 배치도



32 Water Footprint Calculator(2021). <https://www.watercalculator.org/news/news-briefs/data-center-water-usage> (2024.04.08. 접근)

33 VT News(2022). <https://news.vt.edu/articles/2022/01/Datacenters.html> (2024.04.08. 접근)

34 Data Center Dynamics(2021). <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/an-industry-in-transition-1-data-center-water-use> (2024.04.08. 접근)

35 IRENA(2023). <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-heat-and-cooling/31-Waste-heat-recovery-from-data-centres> (2024.04.08. 접근)

- (양식장) 미국의 클리블랜드에 위치한 8에이커 규모의 부지에서는 데이터센터의 폐열을 양식장의 물을 데우는데 재활용하는 혁신적인 프로젝트가 계획되었다. 이 지속 가능한 시스템에서 데이터센터는 지하에 건설되어, 지하 우물을 여름에는 냉각수로 사용하고, 겨울에는 발생한 저온폐수를 농업센터나 사무실 난방에 활용한다. 이 프로젝트는 지속 가능한 시스템을 제공할 뿐만 아니라 일자리 창출과 지역의 경제적 자극을 제공할 것으로 예상된다.³⁶

- (펠릿생산) 스웨덴 팔룬에 위치한 에코데이터센터는 팔루에너지앤바텐(Falu Energi & Vatten)과 협력하여 인근의 열·전력 복합발전소로 온수를 운반하는 지하배관을 설치했다. 이 복합발전소는 팔룬과 볼렝에 열을 공급하고 목재 펠릿을 생산한다. 펠릿에 사용되는 톱밥은 목재에서 나올 때 높은 수분 함량을 가지지만, 펠릿 생산을 위해 10% 이하로 줄여야 하는데 여기에는 열이 필요하다. 하지만 겨울 동안 복합발전소에서 생산된 모든 열은 도시 난방에 투입이 되기 때문에, 펠릿 생산이 중단되거나 프로판가스를 사용해왔다. 그러나 데이터센터의 열을 활용하면 펠릿 생산 기간을 연장하고, 프로판가스 사용을 줄일 수 있다.³⁷

2. 대체 냉각

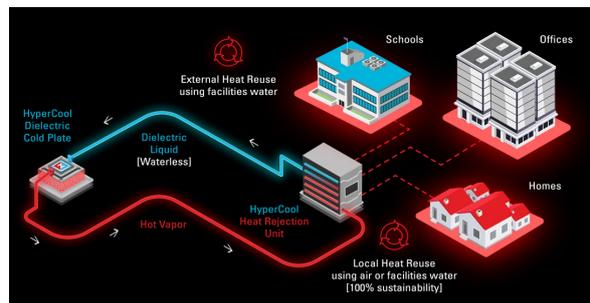
- 지속 가능한 데이터센터 운영을 위한 혁신적인 방안이 적극적으로 모색되고 있다. 고성능 데이터센터를 운영하는데 필요한 상당한 에너지 사용은 저온폐수의 증가로 이어지는데, 이는 환경에 부담을 주는 주요 요인 중 하나이다. 따라서, 앞서 언급한 에너지 효율화는 지속 가능한 데이터센터 운영의 기본적이면서도 필수적인 목표로 자리 잡고 있다. 이와 함께, 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 혁신적인 냉각 방식의 도입이 중요하다. 이러한 혁신적인 냉각 방식은 더 적은 에너지를 사용하여 효과적으로 열을 관리하며, 이는 전체적인 환경 부담 감소에 기여한다. 현재 이를 위한 방안으로는 액침 냉각(Immersion Cooling), 직접 칩 냉각(Direct-to-Chip Cooling, D2C), 지열 냉각 시스템 등이 존재한다.³⁸

- (액침 냉각) 전자 장비를 비전도성 액체에 완전히 잠그는 방식으로, 이 액체는 열을 전달하면서 전기를 전도하지 않는다. 이 방법은 서버 팬과 같은 움직이는 부품이 필요 없어 전통적인 공랭 및 수냉에 비해 효율적이다. 사용되는 액체는 일반적으로 백색 광물유, 공학적 전기 유체 등이다. 액침 냉각에는 단일 위상과 이중 위상의 두 가지 유형이

[그림 12] 대체냉각 사례



액침 냉각



직접 칩 냉각 시스템

36 DataCenter Knowledge(2015). <https://www.datacenterknowledge.com/business/international-data-center-day-quiz-put-your-knowledge-test> (2024.04.08. 접근)

37 Data Center Dynamics (2020). <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/sharing-warmth-nordic-way/> (2024.04.08. 접근)

38 DCS(2023). <https://blog.datacentersystems.com/sustainable-cooling-solutions-for-data-centers-from-air-to-liquid-cooling> (2024.04.08. 접근)

존재한다.³⁹ 해당 기술은 국내에서도 활발히 개발이 진행 중에 있다.⁴⁰ SK엔무브와 삼성물산이 액체 기반의 차세대 데이터센터 냉각시스템 사업을 강화하고 있다. SK엔무브는 미국 GRC에 300억 원을 투자했고, 삼성물산은 자체 냉각시스템을 개발했다. 이들 기업은 글로벌 액침냉각 시장의 높은 성장 잠재력을 인식하고 있으며, 이 기술은 데이터센터뿐만 아니라 ESS, 전기차 배터리 등 다양한 분야에도 활용될 것으로 예상된다.

- (직접 칩 냉각) D2C 냉각은 데이터센터에서 발생하는 높은 열을 관리하는 방법으로, 주로 고성능 서버의 컴포넌트에 직접 냉각액을 공급한다. 이 기술은 냉각액, 열을 전달하는 냉각판, 순환장치, 열 인터페이스 재료 등으로 구성되며, 특히 고밀도 GPU 클러스터와 같은 고성능 서버의 열을 효과적으로 관리하는 데 중요하다. D2C 냉각의 이점은 에너지 소비 감소, 서버 성능 향상, 특정 부위 열 관리의 효과적인 방법을 제공하는 반면, 도전 과제로는 전통적인 공기 냉각 시스템에 비해 높은 비용, 냉각액 누출의 위험, 그리고 주요 열원만을 냉각함으로써 다른 서버 부품의 과열 위험이 있다.²⁵ ZutaCore가 개발한 새로운 냉각 기술은 시스템 전체에 물을 사용하지 않고 직접 칩을 냉각한다. 이 기술은 고성능 컴퓨팅(HPC) 환경과 인공지능(AI) 응용 프로그램에 특히 적합하며, 기존 냉각 시스템에 비해 에너지와 공간 사용을 50% 줄이면서 컴퓨팅 밀도를 세 배까지 높일 수 있는 장점이 있다. ZutaCore는 Equinix과 협력하여 이 기술을 활용함으로써 IT 인프라의 지속 가능성 문제를 해결하는 데 성공한 사례로 꼽힌다.⁴¹

- (지열 냉각) 지하에 위치한 물이나 지열 자원을 이용하여 열을 효과적으로 관리하는 냉각 시스템이다. 지열 에너지는 연중 일정한 온도를 유지하기 때문에, 데이터센터의 열을 효과적으로 관리할 수 있다. 지열 냉각 시스템은 전통적인 공기 냉각 시스템보다 에너지 소비가 적고, 탄소발자국도 줄일 수 있어 환경적으로 유리하다. 데이터센터에 지열 냉각 시스템을 도입하면 장기적으로 운영 비용을 절감하고, 에너지 효율성을 높일 수 있다. 미국 사우스웨스트 버지니아의 'Project Oasis'는 지하 광산에 축적된 약 11도의 광천수를 활용하여 데이터센터를 냉각하는 방안을 연구하고 있다. 이 프로젝트는 전통적인 냉각 시스템에 비해 연간 약 100만 달러의 전기 및 물 사용 비용을 절감할 수 있으며, 지속 가능한 데이터센터 운영을 위한 중요한 사례로 꼽히고 있다.⁴² 또한, 영국 햄프셔에 위치하고 있는 IBM Hursley은 데이터센터를 오프그리드로 운영할 수 있는 파트너와 협력하고, 지하 저수지를 이용한 냉각을 계획하는 등의 방식을 통해 탄소중립을 추진하고 있다. 이를 위해 IBM® Turbonomic® 하이브리드 클라우드 비용 최적화 솔루션을 사용하여 성능을 보장하고 전력 사용을 절감하고 있다.⁴³

3. 물 사용량 측정 및 모니터링

- 데이터센터에서 물 사용량의 측정 및 모니터링은 에너지 사용과 환경에 미치는 영향을 줄이기 위해 필수적이다. 물 사용량 측정 및 모니터링을 통해 데이터센터는 자원의 효율성을 향상시키고, 지속 가능한 운영 방안을 개발할 수 있다. 이를 위해서는 정확한 데이터 수집과 분석이 필요하며, 물 사용량을 정기적으로 모니터링함으로써 불필요한 소비를 줄이고, 물 관리 전략을 개선할 수 있다. 측정 및 모니터링은 또한 냉각 시스템의 최적화, 물 재활용 및 재사용 방안의

39 Haghshenas, K., Setz, B., Blosch, Y. et al. Enough hot air: the role of immersion cooling. Energy Inform 6, 14(2023). <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00269-0>

40 FETV(2024). <https://www.fetv.co.kr/mobile/article.html?no=158969> (2024.04.08. 접근)

41 ZutaCore(2024). <https://zutacore.com> (2024.04.08. 접근)

42 InvestSWVA(2022). <https://www.investswva.org/project-oasis> (2024.04.08. 접근)

43 IBM(2022). <https://www.ibm.com/case-studies/ibm-hursley> (2024.04.08. 접근)

식별, 그리고 전반적인 데이터센터의 에너지 및 환경 효율성 개선에 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 고도화된 센서와 데이터 분석 도구를 사용하여 물 사용량을 실시간으로 추적하고, 이를 기반으로 조정 및 개선 조치를 취할 수 있다. 또한, 지속가능성 목표 설정과 관련하여 정확한 모니터링은 데이터센터가 환경영향을 줄이고, 산업 표준 또는 규제 요구 사항을 충족하는데 필요한 정보를 제공할 수 있다.⁴⁴

- 물 사용에 대한 관측지표로 물 사용 효율성(Water Usage Effectiveness, WUE) 등이 제시된다. 해당 지표는 물 사용량과 IT 하드웨어에 전달되는 전기량의 비율로 계산된다. 이 지표는 물 사용의 효율성을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 대부분의 데이터센터 물 사용이 냉각 시스템에서 발생하기 때문에, 냉각 과정에서의 물 사용량을 최소화하는 것이 물 사용 효율성을 개선하는 데 중요한 요인이다.⁴⁵ 그러나 이 지표는 간접 물 사용을 고려하지 않는다는 한계가 있다. 이 때문에 미국의 연방 에너지 관리 프로그램(The Federal Energy Management Program, FEMP)은 물 사용 효율성을 비롯해 용수 온도, 냉각기 평가, 관련 기회 탐색 등을 활용해 데이터센터의 물 절약에 대한 지침과 방향을 제공하고 있다.⁴⁶ 이러한 접근은 데이터센터의 물 사용에 대한 통찰력을 제공하고, 지속 가능한 운영을 위한 방향을 제시한다.



44 DATA NET(2023). <https://www.datanet.co.kr/news/articleView.html?idxno=182307> (2024.04.08. 접근)

45 AKCP (2021). <https://www.akcp.com/blog/data-center-water-usage-effectiveness-wue/> (2024.04.08. 접근)

46 FEMP (2024). <https://datacenters.lbl.gov/water-efficiency/> (2024.04.08. 접근)

시사점

- 탄소중립 실현과 AI 기술의 환경적 영향을 연계하는 것은 중요하다. AI 모델이 고도화되고 정확성을 기반으로 한 다양한 연구개발이 진행될수록 데이터센터의 에너지 소비는 증가하고, 이는 탄소배출을 늘릴 위험이 있기 때문이다.
- 세계는 현재 AI를 미래 산업으로 여기고, 글로벌 산업 생태계를 선점하고자 다양한 경쟁과 투자를 진행하고 있다. 전 세계 시가총액 상위 기업들도 마이크로소프트, 애플, 엔비디아, 아마존, 구글, 메타 등의 IT 기반 기업들이 최상위를 차지하고 있으며, 브랜드가치 또한 높게 평가되고 있다. AI 기반 기술들은 SW가 시장 매출의 대부분(80%)을 구성하고 있으며, 인공지능 솔루션과 플랫폼도 성장해 나갈 것이다. HW 및 GPU 시장의 90%는 NVIDIA가 장악하고 있다. 향후 글로벌 주도권 경쟁을 위한 국가적인 노력이 필요한 시점이기도 하다.
- AI 기술의 발전이 환경적 측면에서 부정적 영향을 가정하는 것은 AI 모델 훈련 고도화에 따른 에너지 소비와 대량의 냉각용 물 사용을 우려하는 것이다. AI 훈련에 있어서 복잡하지만 정확성에 기반한 AI 개발을 진행하는 과정과 데이터센터를 운영하는 데는 상당량의 많은 에너지를 소비하며, 탄소 배출량을 증가시킬 수 있다. 이 때문에 탄소중립 실현을 위해서는 ‘그린 AI’를 적극적으로 실천할 수 있는 규제와 정책개발이 필요한 것이다.
- 본 연구에서는 ‘그린 AI’의 범위를 단순히 AI 반도체 효율이나 재생에너지원 전환으로 한정하지 않고, AI가 탄소중립에 기여할 수 있는 산업 부문을 포괄하여 정의하였으며, AI의 효율적 학습 및 저전력 인프라 개발과 AI를 활용한 산업 부문 기술을 포괄하여 살펴보았다.
- 정부의 인공지능의 핵심기술 개발 로드맵은 AI 분야를 1)효율적 학습 및 인공지능(AI) 인프라 고도화, 2)첨단 모델링·의사결정, 3)산업활용·혁신AI, 4)안전·신뢰 AI의 4개 중점기술 부문으로 구분하고 있다. 이중 ‘그린 AI’ 분야는 ①효율적 학습 및 인공지능 인프라 고도화 부문이라고 할 수 있으며 그 외 기후기술 분야와 연계된 AI 투자를 포함한다고 할 수 있다. 2022년 기준 AI 부문 R&D 전체 투자 5,594억 원 중 1,149억 원(20.5%)에 해당하는 수치를 보인다. 이러한 분석결과는 여전히 정부는 AI에 대한 투자에 있어서 기술의 최적화에 목적을 둔 ‘레드 AI’ 개발이 80%에 가까우며, ‘그린 AI’를 통한 개발과 관심은 상대적으로 낮다는 점을 의미한다.
- 데이터 관련 기업들의 ‘그린 AI’ 전환 전략은 ‘에너지 전환’과 ‘물 사용 효율화’로 나눌 수 있다. ‘에너지 전환’은 에너지 효율 개선 및 재생에너지 사용으로 구성되며, ‘물 사용 효율화’는 순환경제 도입, 대체 냉각 방식 및 물 사용량 모니터링에 초점을 둔다. 이 전략들은 온실가스 배출 감소와 운영 비용 절감을 목표로 하며, AI 관련 많은 기업들이 기술 개발을 위한 노력을 진행하고 있지만 여전히 정부의 지원과 연구 확대가 필요한 분야이다.
- 이상에서 살펴본 바와 같이, ‘그린 AI’ 추진을 위해서는 에너지 효율성 향상과 재생 가능 에너지 사용에 초점을 맞춘 전략이 필수적이다. 이를 위해 데이터센터의 냉각 시스템과 서버 운영을 최적화하고, 에너지 소비를 줄일 수 있는 고효율 기술을 적극적으로 도입해야 한다. 또한, 에너지를 재생 가능 에너지로 전환하고, 물 사용량을 줄이는 기술과 정책을 개발하는 것이 중요하다. 정부와 기업은 이러한 변화를 지원하기 위해 정책, 연구 및 개발(R&D) 투자를 확대해야 하며, 연구자들도 스스로 ‘그린 AI’를 지키고 환경적 책임을 질 필요성이 있음을 시사한다.

참고문헌

1. AKCP (2021). Data Center Water Usage Effectiveness - WUE. <https://www.akcp.com/blog/data-center-water-usage-effectiveness-wue/> (2024.04.08. 접근)
2. Apple Newsroom (2018.04.09). Apple now globally powered by 100 percent renewable energy. <https://www.apple.com/newsroom/2018/04/apple-now-globally-powered-by-100-percent-renewable-energy/> (2024.04.08. 접근)
3. Cadence Blog (2023). Gallium Nitride Semiconductors Summary. <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-gallium-nitride-semiconductors-summary> (2024.04.08. 접근)
4. Data Center Dynamics (2013.03.21). Apple reaches 100% renewable energy across all data centers. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/apple-reaches-100-renewable-energy-across-all-data-centers/> (2024.04.08. 접근)
5. Data Center Dynamics (2020.01.31). Sharing warmth the Nordic way. <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/sharing-warmth-nordic-way/> (2024.04.08. 접근)
6. Data Center Dynamics (2021.11.29). An industry in transition 1: data center water use. <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/an-industry-in-transition-1-data-center-water-use/> (2024.04.08. 접근)
7. Data Center Dynamics (2021.08.07). Green data centers: the key to energy efficiency in a digital world. <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/green-data-centers-the-key-to-energy-efficiency-in-a-digital-world/> (2024.04.08. 접근)
8. Data Center Knowledge (2015). <https://www.datacenterknowledge.com/business/international-data-center-day-quiz-put-your-knowledge-test/> (2024.04.08. 접근)
9. Data Center Knowledge (2024). <https://www.datacenterknowledge.com/data-center-faqs/apple-data-center-and-servers-faq> (2024.04.08. 접근)
10. Data Centre Magazine (2022.12.01). Top 10 data centres using green energy. <https://datacentremagazine.com/articles/top-10-data-centres-using-green-energy> (2024.04.08. 접근)
11. Data Centre Magazine (2023.12.30). Energy efficiency predictions for data centres in 2023. <https://datacentremagazine.com/articles/efficiency-to-loom-large-for-data-centre-industry-in-2023> (2024.04.08. 접근)
12. DCS (2023.06.16). Sustainable Cooling Solutions for Data Centers: From Air to Liquid Cooling. <https://blog.datacentersystems.com/sustainable-cooling-solutions-for-data-centers-from-air-to-liquid-cooling/> (2024.04.08. 접근)
13. Exploding Topics 홈페이지 (2024). "Number of ChatGPT Users (Apr 2024)" <https://explodingtopics.com/blog/chatgpt-users> (2024.04.08. 접근)
14. FEMP (2020). <https://datacenters.lbl.gov/resources/infosys-bangalore-case-study> (2024.04.08. 접근)
15. FEMP (2021). <https://datacenters.lbl.gov/resources/netapp-case-study> (2024.04.08. 접근)
16. FEMP (2024). <https://datacenters.lbl.gov/water-efficiency/> (2024.04.08. 접근)
17. FETV (2024.02.15). SK엔무브·삼성물산, 데이터센터 냉각시스템사업 박차. <https://www.fetv.co.kr/mobile/article.html?no=158969/> (2024.04.08. 접근)
18. Gerry McGovern (2020.04). "World Wide Waste". <https://gerrymcgovern.com/books/world-wide-waste> (2024.04.08. 접근)
19. Google 블로그 (2020.02.27). Data centers are more energy efficient than ever. <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/data-centers-energy-efficient/> (2024.04.08. 접근)
20. Haghshenas, K., Setz, B., Blosch, Y. et al. (2023). Enough hot air: the role of immersion cooling. Energy Inform 6, 14. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00269-0>
21. IBM (2022). <https://www.ibm.com/case-studies/ibm-hursley/> (2024.04.08. 접근)
22. IEA 홈페이지 (2024). <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks> (2024.04.08. 접근)
23. InvestSWVA (2022). <https://www.investswva.org/project-oasis/> (2024.04.08. 접근)

24. IRENA (2023). <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-heat-and-cooling/31-Waste-heat-recovery-from-data-centres/> (2024.04.08. 접근)
25. Market Us 홈페이지 (2024). Artificial Intelligence Market. <https://market.us/report/artificial-intelligence-market> (2024.04.08. 접근)
26. Mongabay (2023.11.02). The Cloud vs. drought: Water hog data centers threaten Latin America, critics say. <https://news.mongabay.com/2023/11/the-cloud-vs-drought-water-hog-data-centers-threaten-latin-america-critics-say> (2024.04.08. 접근)
27. Schneider Electric 블로그 (2022). Understanding the options for renewable energy for data centers. <https://blog.se.com/datacenter/2022/05/25/understanding-the-options-renewable-energy-for-data-centers/> (2024.04.08. 접근)
28. Similarweb 홈페이지 (2024). <https://www.similarweb.com/website/chat.openai.com/#overview> (2024.04.08. 접근)
29. VT News (2022). Researcher explores how proliferating data centers affect water supply in the United States. <https://news.vt.edu/articles/2022/01/Datacenters.html/> (2024.04.08. 접근)
30. Water Footprint Calculator (2021.05.05/2022.11.7). Data Center Water Usage: Tackling Challenges Amid Historic Droughts, Wildfires. <https://www.watercalculator.org/news/news-briefs/data-center-water-usage/> (2024.04.08. 접근)
31. ZutaCore (2024). <https://zutacore.com/> (2024.04.08. 접근)
32. 과학기술정보통신부 (2023.10). 「국가전략기술 임무중심 전략로드맵(안) II. 미래혁신 분야: 인공지능·첨단바이오」.
33. 네이버 데이터센터 홈페이지 (2024). <https://datacenter.navercorp.com/green/green-energy> (2024.04.08. 접근)
34. 데이터넷 (2023.03.31). 데이터센터, 혁신 기술과 전략으로 탄소 배출·물 소비 줄여야. <https://www.datanet.co.kr/news/articleView.html?idxno=182307/> (2024.04.08. 접근)
35. 박희영 (2023). 「유럽연합(EU) 인공지능법안(AI Act)과 저작권법-ChatGPT 등 생성형 인공지능과 관련하여」, 이슈리포트 2023-19, 한국저작권위원회.
36. 법률신문 (2024.03.28). 글로벌 인공지능(AI) 규제 확산: 우리 기업의 새로운 비즈니스 전략이 필요한 결정적 시기. <https://www.lawtimes.co.kr/news/197146> (2024.04.08. 접근)
37. 인더스트리 뉴스 (2022.08.31). 9월부터 직접PPA 제도 시행...재생에너지 구매 선택 폭 넓어진다. <http://www.industrynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=46946> (2024.04.08. 접근)
38. 인베스트 조선 (2023.12.07). AI 호황에 각광받던 데이터센터...수도권 밀집에 공실 걱정, '제2 물류센터' 전략 우려. https://www.investchosun.com/site/data/html_dir/2023/12/06/2023120680042.html (2024.04.08. 접근)
39. 포춘코리아 (2023.04.18). 알파벳 CEO "AI 기술은 '프로메테우스의 불'". <https://www.fortunekorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=27482> (2024.04.08. 접근)
40. 한겨레 (2023.03.09). '전기 먹는 하마' 데이터센터, 한전이 전력 공급 거부할 수 있다. https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/1082890.html (2024.04.08. 접근)

기후탄소 이슈레포트

**히어리, 박태기나무,
병꽃나무의 공통점은?...
이산화탄소 흡수
우수한 관목**

**미세먼지 저감 능력
높은 나무는?...
소나무, 편백 등
59개 나무가 '우수'**

김진두 YTN 부국장

히어리, 박태기나무, 병꽃나무의 공통점은?... 이산화탄소 흡수 우수한 관목

도시숲이나 정원에는 크게 자라는 나무보다는 사람 키 2배 이하로 자라는 관목류가 주로 사용된다. 관목도 나무다 보니 이산화탄소 흡수원으로서 중요한 역할을 담당한다.

그럼 관목 가운데 이산화탄소 흡수 능력이 뛰어난 종은 무엇일까?

이 연구를 국립세종수목원이 3년생 관목류 50종을 대상으로 수행했다. 그 결과 연평균 이산화탄소 흡수량이 높은 수종으로는 히어리, 박태기나무, 병꽃나무, 낙상홍, 덩펵나무가 선정됐다[표 1].

<표 1> 탄소흡수량 상위 5종

국명	히어리	박태기나무	병꽃나무	낙상홍	덩펵나무
탄소흡수량 (단위: g CO ₂ /y)	263.71±27.42	260.07±58.38	236.13±58.38	159.50±39.01	146.96±48.86

출처: 국립세종수목원

관목 이름이 익숙하지 않는데, 사진을 보면 어디선가 본 듯한 나무들이다.

그중 3개의 나무의 특징을 알아보자.

먼저 히어리[그림 1]는 조록나무과 낙엽관목으로 이른 봄에 노란 꽃을 피우고 가을에 둥근 잎이 노랗게 물드는 한국 고유 특산종이다. 1~2m 높이로 자라며, 줄기는 여러 갈래로 많이 갈라진다. 이른 봄인 3~4월에 잎보다 꽃이 먼저 피는데, 초롱 모양의 작고 노란색 꽃이 8~12개가 모여 달려 밑으로 늘어진다.

박태기나무[그림 2]는 중국 원산의 콩과 낙엽 활엽 관목으로 가지에 자주색 붉은 꽃이 줄줄이 핀다. 꽃이 피기 전, 꽃봉오리가 밥알을 닮아서 ‘밥풀떼기’ ‘밥티기’ 등으로 불리다가 박태기나무가 됐다.

마지막으로 병꽃나무[그림 3]는 인동과의 낙엽 활엽관목으로 한국 특산종이다. 전국의 양지바른 산기슭에서 자라며 키는 2~3m까지 자란다. 잎은 거꾸로 된 달걀 모양으로 끝이 뾰족하며, 잎 가장자리에는 잔 톱니가 있다. 꽃은 5월에 잎겨드랑이에서 1~2송이씩 피는데, 긴 통꽃이며 옅은 노란색에서 점차 붉은빛을 띤다.

탄소 흡수능력이 높다는 것은 대기 중의 이산화탄소를 그만큼 잘 흡수한다는 것인데, 결국은 지구 온난화를 완화한다는 점에서 탄소중립과 탄소배출 상쇄에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

도시숲과 정원을 가꾸는 것도 보기에 좋고 힐링할 수 있는 공간을 만드는 것 외에 이산화탄소 흡수 능력이 높은 품종을 심어 탄소 저감에 도움이 되는 것을 염두에 두어야 하는 상황이 됐다.

[그림 1] 히어리



출처: 국립세종수목원

[그림 2] 박태기나무



출처: 국립세종수목원

[그림 3] 병꽃나무



출처: 국립세종수목원

미세먼지 저감 능력 높은 나무는?... 소나무, 편백 등 59개 나무가 '우수'

서울 홍릉에 있는 국립산림과학원에 가면 이색적인 실험실을 만나볼 수 있다.

그 이름은 파이토타론, 식물환경조절실험동[그림 4]이다. 연면적 304.5㎡, 지상 1층 규모로 구축된 파이토타론은 식물 생장에 주요한 요인인 습도, 광, 기체 등 환경조건을 임의로 조절할 수 있는 생육 장치다.

파이토타론은 대기오염물질인 미세먼지와 가스 형태의 대기 오염물질인 오존, 이산화황, 이산화질소, 이산화탄소의 처리가 가능하며, 온도나 습도, 풍속, 광, 자외선지수 등 환경조건을 시뮬레이션할 수 있어, 실제 도시산림 공간에서 일어나고 있는 식물의 대기오염물질 저감 기작에 대한 연구가 가능하다.

이 연구시설에서 최근 흥미 있는 연구 결과가 발표됐다.

도시숲에 심는 나무들의 미세먼지 저감 능력을 재평가한 건데, '미세먼지 저감 수종 목록'으로 발표됐다.

나무는 기본적으로 미세먼지를 저감하는 능력이 있지만, 연구진은 상대적인 능력 차이에 따라 우수와 양호, 권장의 3단계로 구분하였다.

개선된 미세먼지 저감 수종 목록은 우수 59수종, 양호 175수종, 권장 80수종으로 총 314수종으로 돼 있다. 그런데 재평가 과정에서 25수종의 평가 점수가 상향되어 12 수종은 '양호'에서 '우수' 그룹으로, 13수종은 '권장'에서 '양호' 그룹으로 변동되었다.

[그림 4] 홍릉 산림과학원 파이토타론



출처: 국립산림과학원

‘양호’에서 ‘우수’ 그룹으로 변동된 수종은 귀룽나무, 꽃댕강나무[그림 5], 광광나무, 두충, 보리수나무, 사스레피나무, 쉬나무, 좀작살나무, 참조팝나무, 해당화, 홍가시나무, 회양목이었고,

‘권장’에서 ‘양호’ 그룹으로 변동된 수종은 개나리, 계수나무, 굴거리나무, 꽃사과(벗잎꽃사과나무), 다정큼나무, 대추나무, 돈나무[그림 6], 모과나무, 장미, 석류나무, 진달래, 황칠나무, 히어리로 나타났다[표 2].

이런 변화는 연구 방법의 차이에 의해 생겼다. 기존 2018년에 작성된 미세먼지 저감 수종 목록은 수목의 생물리학적 특성인 수관구조, 잎의 복잡성, 잎의 크기, 잎의 표면 특성을 기반으로 미세먼지 저감 능력을 평가했다.

이렇게 생겼으니 이런 능력을 지니고 있을 것으로 판단한 것이다. 하지만 파이토티론을 통해 좀 더 과학적인 실험이 가능했고 이 과정에서 미세먼지 저감 능력에 차이를 보인 수종이 생긴 것이다.

도시숲은 도심 기온을 낮추고 미세먼지를 줄여주며 심리적인 안정감과 행복감을 안겨주는 중요한 자원이다. 이 가운데 미세먼지를 더 잘 줄여 국민의 건강을 증진하기 위한 기본적인 조건이 마련됐다. 앞으로는 이같은 연구를 바탕으로 도시숲 조성과 관리 사업의 효율성을 높이는 실천이 필요할 것이다.

[그림 5] 꽃댕강나무: 우수



출처: 국립산림과학원

[그림 6] 돈나무: 양호



출처: 국립산림과학원

<표 2> 미세먼저 저감 수종 목록

구분		수종	
교목 및 소교목	상록	우수	가문비나무, 곰솔, 구상나무, 금백(황금편백), 금송, 나한송, 독일가문비, 리기다소나무, 백송, 버지니아소나무, 분비나무, 삼나무, 서양측백, 섬잣나무, 소나무, 스트로브잣나무, 실화백, 잣나무, 전나무, 주목, 측백나무, 편백, 향나무, 향나무'가이즈카', 홍가시나무, 화백
		양호	가시나무, 굴거리나무, 녹나무, 담팔수, 동백나무, 비파나무, 소철, 식나무, 아왜나무, 애기동백나무, 태산목, 황칠나무, 후박나무
		권장	개잎갈나무, 구실잣밤나무, 까마귀쪽나무, 당종려, 대나무류(오죽 등), 먼나무, 후피향나무
	낙엽	우수	갈참나무, 귀룽나무, 낙우송, 느티나무, 두충, 메타세쿼이아, 밤나무, 버즘나무, 쉬나무, 일본잎갈나무, 자귀나무
		양호	감나무(돌감나무), 거제수나무, 겹벗나무류, 계수나무, 고로쇠나무, 고추나무, 공작단풍, 괴불나무, 굴참나무, 노각나무, 느릅나무, 능수버들, 다릅나무, 단풍나무(청단풍, 홍단풍), 당단풍나무, 대양참나무, 대팻집나무, 돌배나무, 들메나무, 떡갈나무, 마가목, 말채나무, 매실나무, 모감주나무, 모과나무, 목련, 물푸레나무, 미국풍나무, 박달나무, 백합나무, 벗나무, 벗잎꽃사과나무, 벽오동나무, 복사나무류(꽃복숭아, 능수백도화), 복자기, 복장나무, 비목나무, 뽕나무, 산겨릅나무, 산벗나무, 산사나무, 살구나무, 상수리나무, 서부해당, 서어나무, 석류나무, 수양버들, 시달나무, 신갈나무, 신나무, 아그배나무, 야광나무, 양버들, 열녀목, 오동나무, 오리나무, 율나무, 왕버들, 왕벗나무, 용버들, 은행나무, 음나무, 이태리포플라, 이팝나무, 자엽꽃자두, 자작나무, 졸참나무, 줄야광나무, 중국단풍, 쪽동백나무, 참느릅나무, 참빗살나무, 참죽나무, 채진목, 층층나무, 칠엽수, 팔배나무, 팽나무, 푸조나무, 피나무, 함박꽃나무, 황금회화나무, 황벽나무, 황칠나무, 회화나무
		권장	가죽나무, 개오동, 나래회나무, 때죽나무, 루브라참나무, 배롱나무, 산딸나무, 산수유, 안개나무, 일본목련, 풍년화, 호두나무
관목	상록	우수	꽃댕강나무, 팽팽나무, 눈향나무, 비자나무, 사스레피나무, 설악눈주목, 향나무'글로보사'(옥향, 둥근향), 황금측백나무, 회양목
		양호	금목서, 다정큰나무, 돈나무, 영산홍/자산홍, 좁은잎피라칸타(피라칸사스), 호랑가시나무, 소철, 식나무
		권장	광나무, 까마귀쪽나무, 남천, 백량금, 사철나무, 실유카, 유카, 은목서, 조릿대, 치자나무, 팔손이, 황금사철류(금반, 금테, 황록 등)
	낙엽	우수	겹산철쭉, 고광나무, 국수나무, 덜꿩나무, 두릅나무, 말발도리, 병꽃나무, 보리수나무, 분꽃나무, 산철쭉, 좁작살나무, 참조팝나무, 해당화
		양호	개나리, 개쉬땅나무, 갯버들, 고추나무, 골담초, 괴불나무, 나무수국, 낙상홍, 노린재나무, 누리장나무, 단풍철쭉, 대추나무, 땃강나무, 딱총나무, 뜰보리수, 마가목, 만리화, 매자나무, 모란, 무궁화, 무화과나무, 바위말발도리, 백당나무, 병아리꽃나무, 불두화, 뽕나무, 산가막살나무, 산수국, 산옥매(옥매화), 생강나무, 소사나무, 쉬땅나무, 아그배나무, 영도나무, 울괴불나무, 일본매자나무(양매자), 일본조팝나무, 작살나무, 장미, 조팝나무, 쥐똥나무, 진달래, 채진목, 철쭉, 초피나무, 칠자화, 홍괴불나무, 황매화, 흰말채나무, 히어리
		권장	가침박달, 공조팝나무, 꼬리조팝나무, 덩굴장미, 명자나무, 미선나무, 박태기나무, 수수꽃다리, 아로니아류, 나래회나무, 애기배롱'포코모케', 영춘화, 풍년화, 화살나무, 황근
지피식물	상록	양호	수호초
		권장	고비고사리, 빈카, 속새, 털머위
	낙엽	양호	감국, 구절초, 꽃잔디, 꽃향유, 노루오줌, 마타리, 민들레류, 배초향, 뽕딸기, 벌노랑이, 썩부쟁이, 아주가, 양지꽃, 잔디, 제비꽃
		권장	개미취, 금계국, 기린초, 김의털, 노랑꽃창포, 돌나물, 돌단풍, 두메부추, 둥굴레, 땅채송화, 맥문동, 물레나물, 벌개미취, 비비추, 사초류, 수크령, 억새, 옥잠화, 원추리, 타래뽕꽃, 톱풀, 패랭이꽃
덩굴성 식물	상록	양호	멸꿀, 아이비, 줄사철나무
		권장	마삭줄, 모란, 붉은인동, 송악, 인동덩굴
	낙엽	양호	노박덩굴, 다래, 담쟁이덩굴, 미국담쟁이덩굴, 바위수국, 오미자, 으름덩굴, 으아리
		권장	능소화, 등, 목향장미(덩굴장미), 청가시덩굴, 청미래덩굴

출처: 국립산림과학원