

한국 데이터센터의 직·간접 물 소비량 정량화:

물-에너지 넥서스 기반의 통합 평가와 정책적 시사점*

Quantifying Direct and Indirect Water Consumption of Korean Data Centers: Integrated Assessment and Policy Implications Based on the Water-Energy Nexus

안대한** · 황보은*** · 한혜진****

Daehan An · Boeun Hwang · Haejin Han

요약: 본 연구는 물-에너지 넥서스 관점에서 한국 데이터센터의 직·간접 물 소비량과 이를 평가하는 지표인 WUE_source를 정량화했다. 2023년을 기준으로 데이터센터의 직·간접 물 소비량은 8.7백만 톤(직접 4.7백만 톤, 간접 4백만 톤), WUE_source는 1.39톤/MWh로 분석됐다. 데이터센터의 전력 수요, 냉각 효율, 전력 믹스를 조합한 5개의 시나리오를 구성하여 직·간접 물 소비량과 WUE_source의 변화를 분석했고, 불확실성 및 민감도 분석을 수행했다. 본 연구의 결과는 데이터센터의 물관리 전략에서 단일 수단보다 냉각-전력-저탄소화의 통합적 접근이 필요하며, 중장기적으로는 간접 물 소비량의 관리 체계 구축이 중요함을 제언한다.

핵심주제어: 데이터센터, WUE_source, 물-에너지 넥서스, 직·간접 물 소비량

Abstract: This study quantifies the water-energy nexus of South Korean data centers, reporting 2023 water consumption at 8.7M tons (4.7M direct, 4.0M indirect) and a WUE_source of 1.39 tons/MWh. Through five-scenario and sensitivity analyses, the research highlights that sustainable water management requires an integrated cooling-power-decarbonization approach, emphasizing the long-term necessity of robust management systems for indirect water consumption.

Key Words: Data Center, WUE_Source, Water-Energy Nexus, Direct and Indirect Water Consumption

* 본 논문은 한국환경연구원의 2024년도 일반과제 「물-환경-경제 통합분석 기반 물 정책전망 연구(I)(GP2024-09)」의 지원으로 수행되었음.

** 주저자, 국가녹색기술연구소 제도혁신센터 박사후연구원

*** 공동저자, 한국환경연구원 국토환경연구본부 전문연구원

**** 교신저자, 한국환경연구원 국토환경연구본부 선임연구위원

I. 서론

최근 인공지능 기술의 급속한 확산과 클라우드 기반 서비스의 보편화는 데이터센터의 수요 및 투자를 폭발적으로 증가시키고 있다. 데이터센터의 글로벌 수요는 2023년부터 2030년까지 연평균 22%의 속도로 증가하여 연간 219GW에 달할 것으로 전망되며(McKinsey & Company, 2024), 생성형 인공지능의 등장은 전망치가 무색할 정도로 이러한 수요를 더욱 가속화시키고 있다(Boston Consulting Group, 2025).

전 세계의 데이터센터는 2022년에 약 460TWh의 전력을 소비하며, 전체 전력 수요의 약 2%를 차지했다(IEA, 2024a). 데이터센터는 일반적인 사무실 건물보다 에너지 집약도가 약 50배 이상 높다(Cho, Yang, Lee and Lee, 2015). 이로 인해 데이터센터의 고전력 수요 증가와 그에 비례한 수자원 소비 상승이 새로운 위협으로 급부상하고 있다(McKinsey Quarterly, 2025). 데이터센터가 소비하는 수자원은 온실가스 배출량처럼 Scope 1(직접 소비)과 Scope 2(간접 소비)로 구분된다(The Green Grid, 2011). 직접 소비는 24시간 구동되는 서버들의 냉각을 위해 소비되는 물 소비량이며, 간접 소비는 전력 발전을 위한 발전용수 소비량이다. 로런스 버클리 국립연구소는 위의 개념을 적용하여 미국 데이터센터의 간접(Off-site) 물 소비량이 직접(On-site) 물 소비량에 비해 약 5배 더 높음을 밝혔다(Shehabi et al., 2016).

이런 배경으로 인해 데이터센터의 물 소비량에 대한 이슈가 국제적인 화두로 떠오르고 있다(IEA-EBC, 2020). 하지만 데이터센터의 자원 사용과 관련된 선행 연구는 주로 에너지(전력) 효율에 집중되어 있으며, 물 소비량에 관한 연구는 매우 부족한 상황이다(Karimi et al., 2022). 또한, 데이터센터의 직접 물 소비량을 최소화할 수 있는 냉방 시스템 설계에 대한 관심은 지속적으로 증가하고 있으나 전력 생산 과정에서 발생하는 간접 물 소비량은 간과되는 경향이 있다(Li, Yang, Islam and Ren, 2023). 즉, 물과 에너지 사이의 상호작용을 분석하는 물-에너지 넥서스 측면의 접근이 미흡하다. 산업통상자원부(2025)에서는 데이터센터의 전력 수요를 전망했지만 물 수요에 대한 전

망은 고려하지 않았다. 국내 수자원을 관리하는 환경부는 관련 대책이 전무한 상황이다.

제기된 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 데이터센터의 물 소비를 개별 설비의 냉각 문제로 보지 않고, 전력 생산과 물 공급을 함께 고려하는 물-에너지 넥서스의 관점에서 접근한다. 연구 목적은 다음과 같다. 첫째, 물-에너지 넥서스 개념을 활용하여 한국 데이터센터의 2023년 직접 및 간접 물 소비량과 2038년 전망치를 추정한다. 미국의 선행 연구(Shehabi et al., 2016)에서 간과했던 수자원 공급을 위한 에너지 사용량(Energy for Water)을 추가적으로 고려하여 더욱 정밀한 간접 물 소비량을 산정한다. 둘째, 시나리오 분석과 불확실성 및 민감도 분석을 통해 어떤 요소가 물 소비량에 큰 영향을 미치는지 파악한다. 셋째, 앞선 결과들을 활용하여 데이터센터의 물 소비 증가에 따른 수자원 안보 리스크를 완화하기 위한 정책 방안을 도출한다.

II. 이론적 배경 및 선행 연구

1. 데이터센터의 개요

데이터센터는 주로 데이터 처리(서버), 데이터 저장(스토리지 장비), 그리고 통신(네트워크 장비)에 사용되는 전자 설비들로 구성된다(Shehabi et al., 2016). 이러한 설비들은 일반적으로 ‘정보기술(IT) 장비’라고 불리며, 디지털 정보를 처리-저장-전송한다. 또한, 신뢰도 높은 고품질 전력을 지속적으로 공급하기 위한 특수 전력 변환 및 백업 설비뿐만 아니라, IT 장비의 운용에 적합한 온도와 습도를 유지하기 위한 환경 제어 설비(공조 설비)를 갖추고 있다. 즉, 데이터센터는 대규모 정보를 보유한 핵심 장비들을 안전하게 보호하며, 결과적으로 인터넷이 기능하는 데 있어 필수적이고 핵심적인 역할을 담당한다(McLellan, 2013).

데이터센터는 전 세계로 정보를 전달하는 과정에서 매우 중요한 역할을 수행하기 때문에, 최적의 기능을 발휘하기 위한 몇 가지 필수 요건을 갖추어야

한다(Carey, Raisinghani and White, 2017). 첫째, 지속적이고 정교한 전력 공급원이다. 데이터센터의 목표는 24시간 내내 중단 없이 가동되며 가용성을 유지하는 것이기 때문이다. 둘째, 장비가 보관되는 환경의 물리적 조건이다. 이는 온도와 습도를 모두 제어하는 정교한 공조 환경을 의미한다. 셋째, 내부 및 외부 요인으로 인한 손실 위협의 고려이다. 재난적 사건으로부터 시설을 보호하기 위한 다단계 보안 체계의 구축이 필요하다. 마지막으로, 민감한 장비를 관리할 전문 인력과 데이터 및 서비스 손실을 방지하기 위한 상시 백업 안전장치의 확보이다. 데이터센터는 전 세계 어디든 위치할 수 있으며, 이러한 요구사항을 세심하게 관리함으로써 서비스 품질을 보장할 수 있다.

데이터센터의 종류는 운영 주체, 이용 목적, 규모 등에 따라 엔터프라이즈(Enterprise), 코로케이션(Colocation), 하이퍼스케일(Hyperscale)로 구분된다(표 1)(Kamiya and Coroamă, 2025). 국내 데이터센터 시장은 과거 기업이 직접 운영하는 엔터프라이즈 중심이었지만, 현재는 상업용 코로케이션과 대규모 클라우드 서비스를 위한 하이퍼스케일로 급격히 전환되는 과도기에 있다(EdgeconneX, 2023).

〈표 1〉 데이터센터 종류별 비교

구분	엔터프라이즈	코로케이션	하이퍼스케일
소유 및 운영	개별 기업	상업용 데이터센터 사업자	글로벌 클라우드 사업자
주요 고객	기업 내부 부서	다양한 외부 기업	클라우드 이용자
시설 규모	소~중규모	중~대규모	초대규모
에너지 효율(PUE)	상대적으로 낮음 (1.8~2.0)	중간 수준 (1.4~1.6)	매우 높음 (1.1~1.2)

출처: Shehabi et al.(2016); IEA(2024b); Kamiya and Coroamă(2025)

국내 상업용 데이터센터의 약 90%가 수도권에 위치하며(2024년 기준), 2028년까지 40건 이상의 신규 데이터센터가 수도권에 추가로 구축될 예정이기에 수도권 집중화는 더욱 가속화될 전망이다(세빌스 코리아, 2025). 이렇게 수도권으로 몰리는 이유는 안정적 네트워크 인프라, 전문 인력 수급, 기업 밀집 등의 입지적 강점 때문이다.

2. 데이터센터의 물 소비량 지표

Green Grid(2011)는 데이터센터의 지속가능성을 평가하기 위해 Water Usage Effectiveness(WUE)를 새롭게 정의하고, Power Usage Effectiveness (PUE),¹⁾ Carbon Usage Effectiveness(CUE)²⁾와 함께 3대 지속가능성 지표로 제안했다. 또한, 전력 사용으로 인한 간접 물 소비량을 포함하는 WUE_source 개념을 제시했다. 일반적으로 WUE는 데이터센터 현장(Site)에서의 물 소비 효율을 의미하기에(Lei, Lu, Shehabi and Masanet, 2025), 명확한 구분을 위해 본고에서는 WUE를 WUE_site로 표기한다. WUE_site와 WUE_source를 계산하는 방정식(1, 2)은 다음과 같으며, 단위는 톤/MWh이다.

$$WUE_site = \frac{W_site}{E_IT} \quad (1)$$

W_site는 시설의 물 소비량으로 데이터센터 현장에서 냉각을 위해 직접적으로 소비하는 물의 양(톤)이며, E_IT는 IT 장비로 인한 전력 소비량(MWh)이다. 즉, WUE_site는 냉각 효율을 물 소비 측면에서 정량적으로 평가하는 지표이고, 온실가스 Scope 1 배출량과 비슷한 개념이다.

$$WUE_Source = \frac{W_grid + W_site}{E_IT} \quad (2)$$

W_grid는 전력 기반 물 소비량(톤)으로 전력 생산을 위해 간접적으로 소비되는 물의 양을 뜻하며, 온실가스 Scope 2 배출량과 유사한 의미이다. 이로 인해 WUE_source는 직접(W_site) 및 간접(W_grid) 물 소비량을 포함하여, 보다 넓은 관점에서 데이터센터의 수자원 영향을 평가한다. 본 논문에서는 위 개념을 통해 데이터센터의 직·간접 물 소비량을 계산하고, 이를 기반으로

1) 총 전력 사용량 / IT 장비의 전력 소비량.

2) 데이터센터의 탄소 배출량 / IT 장비의 전력 소비량.

WUE_source를 도출한다.

3. 데이터센터의 물 소비 관련 선행 연구

Mytton(2021)은 데이터센터가 직·간접적으로 소비하는 물의 양을 정리하여 데이터센터가 지역 수자원 경쟁에 미치는 영향을 제시하고, 업계의 물 소비 데이터 공개와 표준화가 필요함을 주장했다.

Chen and Wernhoff(2022)는 데이터센터의 직·간접 물 소비량뿐만 아니라 지역 수자원 가용성까지 반영하여 물 부족 지역에서의 물 소비 효율성(Water Scarcity Usage Effectiveness, WSUE) 지표를 제안하고, 이를 미국에 적용했다. 이를 통해 WSUE는 지역 수자원 상황에 따라 큰 차이를 보이며, 현장에서 물을 소비하는 것(직접 물 소비)이 전력 소비를 줄이는 것(간접 물 소비)보다 더 지속가능한 선택이 될 수 있음을 밝혔다.

IEA-EBC(2020)는 국제적 관점에서 데이터센터의 에너지 효율성 개선 정책을 비교 및 평가했다. 에너지 효율 향상으로 전력 소비 증가가 제한적이었으나 최근 들어 물 소비 관리가 새로운 지속가능성 이슈로 대두되고 있음을 강조했다.

Li et al.(2023)은 AI 훈련 및 운영에 따른 데이터센터의 물 소비가 매우 크지만 정보 공개가 부족하기에 AI의 물 발자국을 정량화(Scope 1~3)하여 환경적 책임에 대한 논의가 필요함을 강조했다. 이를 통해 AI 운영의 시·공간적 물 효율성 차이를 분석하여 탄소 발자국뿐만 아니라 물 발자국을 함께 고려한 총체적 지속가능성 접근의 필요성을 주장했다.

한혜진 등(2024)은 투입산출표와 물계정을 연계한 환경산업연관분석을 통해 데이터센터의 직·간접 물 소비량을 추정했다. 그 결과, 데이터센터의 2020년 직·간접 물 소비량은 연간 11.9백만 톤(직접 6.3백만 톤, 간접 5.6백만 톤)으로 분석됐다.

Lei et al.(2025)은 워크로드(Workload) 수준에서 데이터센터의 직·간접 물 소비량을 분석하여 WUE와의 차이를 정량적으로 비교했다. 이를 통해 데이터센터의 물 소비 결정요인을 더욱 정밀하게 평가하는 지표인 'L/Workload'를

제안했다.

기존 연구들은 데이터센터의 물 소비에 대한 정량적 분석 및 지표 제안에 기여했다. 하지만 데이터의 비공개성과 지역 전력 구조를 정밀하게 반영하지 못했고 정책적 연계성이 부족하다는 한계점이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하고자 수자원 가용성과 에너지 믹스의 상호작용을 포괄하는 ‘물-에너지 넥서스’ 관점을 적용하여 데이터센터의 물 소비량을 정교하게 평가한다. 그리고 분석된 결과를 바탕으로 데이터센터가 국가 수자원 안보에 미치는 부정적인 영향을 최소화하기 위한 정책적 대안을 도출한다.

4. 물-에너지 넥서스

넥서스(Nexus)의 사전적인 의미는 결합, 연쇄 등을 뜻하며 물-에너지-식량 넥서스, 물-에너지-탄소 넥서스 등 자원 안보와 같이 사용될 때는 상호작용을 뜻한다(Hoff, 2011). 물-에너지-식량의 핵심 자원들은 서로 밀접하게 연관되어 있기에, 각 자원만을 중요시하는 폐쇄적(Silo) 접근 방식을 타파하고 자원 안보 사이의 상호작용을 고려하는 것이 넥서스 접근법이다(An, 2023).

물-에너지 넥서스는 물과 에너지의 상호작용, 즉 에너지 생산을 위해 사용되는 수자원과 수자원 공급을 위해 소비되는 에너지를 종합적으로 고려하는 것이다.

김하나(2017)는 물-에너지 넥서스 개념과 산업연관분석 모형을 통해 에너지 부문의 직접 및 간접 물 이용 집약도를 추정했지만, 단일 시점에서만 분석되었기에 정책 반영과 기술 개선에 따른 변화 추적이 어렵다.

필자들은 데이터센터 증가, 전력 믹스 변화, 물-에너지 효율성 개선 등을 고려하는 시나리오를 통해 미래 전망을 시도한다. 본 연구에서 물-에너지 넥서스는 단순한 개념 소개가 아니라 데이터센터의 물 소비를 해석하는 분석틀로 사용된다. 구체적으로 본 연구는 첫째, 현장 냉각수 사용과 전력 생산용수 소비의 상호의존성을 함께 고려하고, 둘째, 전력 효율 개선이 총 물 소비 감소로 곧바로 이어지지 않을 수 있는 trade-off를 검토하며, 셋째, 단위 효율지표의 개선이 총자원 사용량 증가와 병존할 수 있는 반동효과(Rebound

effect)를 확인하고자 한다.

III. 연구 방법

1. 직·간접 물 소비량 추정

1) 직접 물 소비량

환경정보공개시스템³⁾의 자료를 통해 2023년을 기준으로 민간 데이터센터 38개소에서 사용한 용수 사용량/전력 사용량 비율인 0.48톤/MWh를 산출한다.⁴⁾ 이를 전체 데이터센터의 전력 사용량에 적용하여, 2023년 전체 데이터센터의 직접 물 소비량(W_{site})을 산정한다.

2) 간접 물 소비량

물-에너지 넥서스 개념에 기반하여, 방정식(2)의 W_{grid} (전력 기반 물 소비량)는 두 가지($W_{fe} + E_{fW}$)로 구분하여 합산한다.

(1) 전력 공급을 위한 물 소비량(Water for Energy, W_{fe})

전력 발전을 위한 물 소비 계수(Water Intensity)를 환경정보공개시스템의 발전원별 용수 사용량과 전력통계정보시스템⁵⁾의 발전원별 발전량을 통해 직접 산출한다. 통계치를 구할 수 없는 발전원들은 해외 선행 연구의 분석치를 참고한다<표 2>.

이를 기반으로 데이터센터의 전력 사용량과 에너지 믹스에 적용하여 다음 방정식(3)을 통해 간접 물 소비량을 산출한다.

3) <https://www.env-info.kr/>

4) 38개소에서 사용한 전력 사용량이 전체 데이터센터가 사용한 전력 사용량의 81.4%를 차지하기에 대표성이 충분함.

5) <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/>

$$WfE = E_{total} \times \sum_{i=1}^n (GS_i \times WI_i) \quad (3)$$

E_{total} 은 데이터센터에서 사용하는 전체 전력 소비량, GS_i 는 전체 발전량 중 특정 발전원 i 가 차지하는 비중(%), WI_i 는 발전원 i 의 단위 전력 생산당 물 소비 계수(톤/MWh)이다.

〈표 2〉 발전원별 물 소비 계수

발전원	물 소비 계수(톤/MWh)	기준	출처
원자력	0.0376	한국	환경정보공개시스템 및 전력통계정보시스템
석탄	0.2402	한국	환경정보공개시스템 및 전력통계정보시스템
LNG	0.4421	한국	환경정보공개시스템 및 전력통계정보시스템
유류	1.58	세계 평균	Mekonnen et al.(2015)
수력	17	세계 평균	Macknick et al.(2012)
태양광	0.004	세계 평균	Jia et al.(2021)
풍력	0.004	말레이시아	Jia et al.(2021)
바이오	3.71	세계 평균	Jin et al.(2019)

(2) 수자원 공급을 위한 에너지 소비량(Energy for Water, EfW)

물 공급을 위한 에너지 소비 계수(Energy Intensity)⁶⁾를 반영하여 직접 물 소비량으로 인한 전력 사용량을 계산한다. 이를 물 계수와 에너지 믹스에 대입하여 다음 방정식(4)을 통해 간접 물 소비량을 계산한다.

$$EfW = W_{site} \times EI \times \sum_{i=1}^n (GS_i \times WI_i) \quad (4)$$

EI 는 물 공급 단위당 전력 소비 계수(MWh/톤)이다.

6) 0.00037MWh/ton 적용(Hoff, 2011).

2. 전력-물 집약도 계수

국가 전력 믹스를 적용하여〈표 3〉, 전력-물 집약도 계수(Energy-Water Intensity Factor, EWIF)를 산출한다. EWIF(톤/MWh)는 다음 방정식(5)을 통해 계산되며, 단위 전력(1MWh)을 생산하기 위해 발전소에서 소비되는 수자원의 양(톤)을 의미한다.

$$EWIF = \sum_{i=1}^n (GS_i \times WI_i) \quad (5)$$

이 지표는 국가 전력 믹스와 직결된다. 예를 들어, 냉각수가 많이 필요한 화력 발전 비중이 높으면 상승하고, 수자원 소비가 거의 없는 재생에너지(태양광 및 풍력)의 비중이 높으면 하락한다. 즉, EWIF는 에너지 시스템과 수자원 시스템의 상호의존성을 정량화하는 연결 지표로서 전력 발전에 숨겨진 가상수(Virtual Water) 계수이다.

〈표 3〉 전력 믹스 현황(2023년)과 전망치(2038년)*

에너지원		2023년		2038년	
		발전량(GWh)	비중(%)	발전량(GWh)	비중(%)
비신재생	원자력	180,494	31.3	248,300	41.5
	석탄	184,927	32.1	70,900	11.8
	LNG	157,749	27.3	74,300	12.4
	유류	1,487	0.3	0	0
	소계	524,657	90.9	393,500	65.7
신재생	태양광	33,236	5.8	96,560	16.1
	풍력	3,392	0.6	94,353	15.8
	수력	3,718	0.6	3,712	0.6
	바이오	11,918	2.1	10,602	1.8
	소계	52,265	9.1	205,227	34.3
총합		576,922	100	598,727	100

* 비신재생에너지의 양수 및 기타, 신재생에너지의 해양 및 재생폐기물은 미미한 비중과 물 소비 계수의 부재로 제외함.

출처: 국가통계포털 홈페이지; 산업통상자원부(2025)

3. 시나리오 구성

시나리오들은 2023년을 기준으로 2038년에 변화할 데이터센터의 상황을 다양하게 반영한다(표 4). 한국처럼 소규모 데이터센터가 대부분인 경우, 자원 절감 기회를 평가 및 식별하고 이를 실제로 구현할 수 있는 능력이 부족한 경우가 많기에(DOE, 2017) 보수적인 변화량을 적용한다.

BAU 시나리오는 전력 수요 30TWh,⁷⁾ PUE 1.3,⁸⁾ WUE_{site} 0.56톤/MWh,⁹⁾ EWIF 0.27톤/MWh를 적용한다. 엄청난 효율 혁신이나 극적인 에너지 전환 없이 현재의 추세를 유지하는 시나리오로서 다른 시나리오들과 비교하는 기준점이다.

전력 효율 개선 시나리오는 BAU에서 PUE를 1.1로 낮춘다. 같은 전력을 사용하더라도 IT 장비에 더 많은 전력이 전달되도록 시설 효율을 높인 시나리오이다.

냉각 효율 혁신 시나리오는 BAU에서 WUE_{site}를 0.16톤/MWh¹⁰⁾으로 낮춘다. 고효율 냉각, 순환수 활용, 냉각방식 전환 등을 통해 현장 물 소비량을 크게 줄이는 시나리오이다.

저탄소 에너지 전환 시나리오는 BAU에서 EWIF를 0.22톤/MWh로 낮춘다. 데이터센터 운영 방식보다 전력 믹스 변화에 따른 효과를 보는 시나리오이다.

7) 산업통상자원부(2025).

8) 최근 구축된 데이터센터의 수치를 참고함(Uptime Institute, 2024).

9) 2023년부터 2038년까지 매년 2%씩 개선된다고 가정함. 운영 최적화와 관리 효율화 만으로도 달성이 가능한 보수적 수준의 절감 경로를 의미함.

10) 2023년부터 2038년까지 매년 10%씩 개선된다고 가정함. 고효율 냉각설비 도입, 물 재이용 확대, 제어시스템 고도화 등 추가적 투자와 기술 전환을 전제로 하는 도전적 시나리오로 설정함. 모든 데이터센터에 즉시 적용 가능한 보편적 기준이라기보다는 중장기적 기술 확산과 정책 유인을 전제로 검토할 수 있는 목표 수준으로 해석할 필요가 있음.

〈표 4〉 시나리오 요약

No.	시나리오	주요 수치
1	2038 BAU	-데이터센터의 전력 수요: 30TWh -EWIF: 0.27톤/MWh -PUE: 1.3 -WUE_site: 0.56톤/MWh
2	전력 효율 개선	-데이터센터의 전력 수요: 30TWh -EWIF: 0.27톤/MWh -PUE: 1.1 -WUE_site: 0.56톤/MWh
3	냉각 효율 혁신	-데이터센터의 전력 수요: 30TWh -EWIF: 0.27톤/MWh -PUE: 1.3 -WUE_site: 0.16톤/MWh
4	저탄소 에너지 전환	-데이터센터의 전력 수요: 30TWh -EWIF: 0.22톤/MWh -PUE: 1.3 -WUE_site: 0.56톤/MWh
5	수요 증가 및 통합 최적화	-데이터센터의 전력 수요: 45TWh -EWIF: 0.22톤/MWh -PUE: 1.1 -WUE_site: 0.16톤/MWh

수요 증가 및 통합 최적화 시나리오는 전망치를 상회하는 AI 확산으로 인해 데이터센터의 전력 수요가 45TWh로 증가하는 상황을 가정한다. 동시에 전력 믹스가 저탄소화되어 EWIF를 0.22로 낮춘다. 또한, 전력 및 냉각 효율 혁신에 따라 PUE 및 WUE_site를 각각 1.1, 0.16으로 낮추는 복합 개선을 적용한다. 즉, 수요 증가라는 불리한 조건 속에서도 전력 효율, 냉각 효율, 에너지 전환을 동시에 추진해 전체 물-에너지 부담을 최소화하는 시나리오이다.

4. 불확실성 및 민감도 분석

민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 통해 데이터센터 운영에 영향을 미치는 핵심 독립변수(전력 수요, PUE, WUE_site, EWIF)가 개별적으로 변동할 때, 직·간접 물 소비량과 효율 지표(WUE_source)에 미치는 영향력을 평가한다. 이를 통해 수자원 리스크를 제어할 수 있는 가장 강력한 정책적 레버

(Policy Lever)를 식별한다.

또한, 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)으로 불확실성을 반영하기 위해 모든 변수가 동시에 무작위로 변화하는 상황을 10,000회 실시한다. 이는 특정 시나리오가 발생할 확률적 분포를 도출하고, 최악의 시나리오(상위 5% 리스크)에서의 수자원 소비 부담 및 리스크를 검토하여 시스템을 평가한다. 두 분석은 모두 2038년 BAU를 기준으로 전력 수요, PUE, WUE_site, EWIF의 불확실성을 반영했다. 각 변수의 확률분포와 변동 범위는 본문의 시나리오 설정값과 문헌에서 제시된 현실적 변동 가능성을 바탕으로 설정한다. 본 분석의 목적은 단일 예측치의 제시보다, 주요 입력변수의 동시 변동이 직·간접 물 소비량과 WUE_source의 분포에 미치는 영향을 탐색적으로 평가하는 데 있다.

IV. 분석 결과 및 논의

1. 시나리오별 결과 및 함의

1) 시나리오 분석 결과

〈표 5〉는 시나리오 분석 결과를 종합적으로 나타낸다. 2038년 BAU에서는 데이터센터 전력 수요량이 30TWh로 증가함에 따라 직·간접 물 소비량이 2.1천만 톤으로 확대된다. 이는 2023년 대비 약 142.6% 증가한 수준이다. 전력 사용량 증가율에 비해 직·간접 물 소비량 증가율은 낮은 수준인데, 이는 EWIF 개선과 시설 효율(PUE, WUE_site) 향상에 기인한 것으로 분석된다. 덕분에 WUE_source는 0.91톤/MWh로 약 34.5% 감소한다. 이러한 노력에도 불구하고, 총 전력 수요 증가가 절대 물 소비량 증가를 전인한다.

시나리오별 변화량은 BAU를 기준으로 비교한다. 전력 효율 개선 시나리오의 직접 물 소비량은 1.5천만 톤으로 18.2% 증가하고, 직·간접 물 소비량도 2.3천만 톤으로 모든 시나리오 중 가장 크게 나타났다(11.2% 증가). 냉각

기술(WUE_site) 수준이 그대로인데 IT 부하만 늘어났기에 현장에서 쓰는 직접 물 소비량이 대폭 증가한다. 즉, 시설 전력효율을 높이는 PUE 개선이 오히려 지역 수자원에는 더 큰 부담을 줄 수 있는 것이다.

냉각 효율 혁신 시나리오는 직접 물 소비량 절감 효과가 가장 크게 나타난다. 직접 물 소비량은 3.6백만 톤으로 72.1% 감소하고, 직·간접 물 소비량도 1.17천만 톤으로 44.3% 감소한다. 반면 간접 물 소비량은 8.1백만 톤으로 거의 유사하여, 본 시나리오의 감축 효과가 주로 현장 냉각 부문(직접 물 소비)에서 발생함을 확인할 수 있다. 이에 따라 직·간접 물 소비량 비중(%)은 30.7/69.3으로 전환되어 물 소비 구조의 중심이 직접 부문에서 간접 부문으로 이동하는 특징을 보인다.

저탄소 에너지 전환 시나리오의 직접 물 소비량은 동일한 수준을 유지하지만, EWIF 개선을 반영하여 간접 물 소비량이 6.5백만 톤으로 20% 감소한다. 이로 인해 직·간접 물 소비량은 1.9천만 톤으로 7.7% 감소하였으며, WUE_source도 0.84톤/MWh로 개선된다. 즉, 전력 공급 구조의 저탄소화가 간접 물 소비량 저감에 실질적으로 기여함을 보여준다.

수요 증가 및 통합 최적화 시나리오는 전력 수요가 45TWh(50% 증가)인 고수요 조건임에도 불구하고, PUE, WUE_site, EWIF를 동시에 개선한 결과 직·간접 물 소비량이 1.6천만 톤으로 23.3% 낮은 수준이며, WUE_source는 0.39톤/MWh로 모든 시나리오 중 가장 우수한 값을 보인다. 직접 물 소비량은 6.4백만 톤으로 50.6% 감소하지만, 간접 물 소비량은 9.8백만 톤으로 약 20% 증가하여, 직·간접 비중(%)은 39.5/60.5로 간접 비중이 우세한 구조를 보인다. 이는 향후 전력 수요가 증가하는 측면에서는 냉각 효율 및 전력 계통 전환을 병행하더라도 간접 물 소비량 관리가 핵심 과제가 될 가능성을 시사한다.

2) 시나리오 분석 논의

종합하자면, 시나리오별 영향은 물 소비 경로별로 상이하게 나타난다. 냉각 효율 혁신은 직접 물 소비 저감에 가장 효과적이며, 저탄소 에너지 전환은

간접 물 소비 저감에 효과적이다. 전력 효율 개선은 단위 효율(WUE_source) 개선에는 기여하나, 분석 경계(전력 소비량 고정) 설정에 따라 절대 물 소비량이 증가할 수 있다. 따라서 데이터센터 물관리 전략은 단일 수단보다 냉각 효율, 전력 효율, 전력 계통 저탄소화의 통합적 접근이 필요하며, 특히 중장기적으로는 수요 증가를 전제로 한 간접 물 소비 관리 체계 구축이 중요하다.

또한, 시나리오 결과는 물 소비량의 절대 규모뿐 아니라 직·간접 물 소비의 구성비에 대한 해석이 중요함을 보여준다. 특히 간접 물 소비량의 비중이 높아지는 경우, 데이터센터 물관리 전략 및 지표 해석 측면에서 다음과 같은 한계와 위험이 발생할 수 있다.

첫째, 관리 및 감축의 한계이다. 물 소비량의 대부분이 전력 생산 단계에 기인함에 따라 수자원 재이용, 냉각 개선 등 직접적인 물 절감만으로는 직·간접 물 소비량을 크게 줄이기 어렵다. 동일 투자 대비 감축 탄력성이 낮아지는 것이다.

둘째, 공간적 불일치와 위험 전가이다. 간접 물 소비량은 발전소가 위치한 유역에서 소비 및 증발된다. 이로 인해 물 스트레스가 높은 유역으로 부하가 이전될 수 있고, 가뭄 및 취수 제한 시 전력 공급 리스크¹¹⁾와 농업용수·상수도와의 물 배분 갈등¹²⁾이 발생한다.

셋째, 지표 왜곡이다. WUE_source 방정식의 구조상 간접 물 소비량의 비중이 높으면 직·간접 물 소비량이 증가하더라도 WUE_source 수치가 낮게 나타날 수 있다. 예를 들어, PUE 개선 등으로 IT 전력 소비량(분모)이 증가하면 WUE_source 값은 개선된 것으로 나타날 수 있으나, 동시에 전력 소비량 혹은 간접 물 소비량 증가로 인해 전체 물 소비량은 오히려 확대될 수 있다. 따라서 WUE_source의 개선만을 근거로 물관리 성과를 판단할 경우, 총량 증가 위험을 과소평가할 가능성이 있다. 또한, 이는 제본스의 역설(Jevons Paradox)¹³⁾을 유발하여 수자원 안보에 치명적인 위협을 끼칠 수 있다. 이렇

11) 이상복(2015).

12) 정대섭(2009); 김경태(2017).

13) 어떤 자원의 효율이 높아져 단위당 비용이 낮아지면 자원 사용이 줄어드는 것이 아니라 오히려 자원을 더 많이 쓰게 되어 총사용량이 증가할 수 있다는 현상(Alcott, 2005).

게 왜곡된 지표가 물 소비량을 간과한 채로 의사결정에 활용된다면 그린워싱 논란이 발생할 수도 있다.

〈표 5〉 2023년 및 시나리오별 추정 결과*

시나리오	전력 사용량 (MWh)	IT 장비의 전력 사용량 (MWh)	PUE	WUE_site (톤/MWh)	EWIF (톤/MWh)	직접 물 소비량 (톤)	간접 물 소비량(톤)			직·간접 물 소비량 (톤)	직·간접 물 소비량 비중 (%)	WUE_source (톤/MWh)
							EfW	WfE	소계			
2023년	9,864,303	6,243,230	1.58	0.76	0.4	4,734,865	701	3,947,694	3,948,395	8,683,261	54.5/45.5	1.39
2038 BAU	30,000,000	23,076,923	1.3	0.56	0.27	12,926,096	1,297	8,138,640	8,139,937	21,066,033	61.4/38.6	0.91
전력 효율 개선	30,000,000	27,272,727	1.1	0.56	0.27	15,276,295	1,533	8,138,640	8,140,173	23,416,468	65.2/34.8	0.86
냉각 효율 혁신	30,000,000	23,076,923	1.3	0.16	0.27	3,603,412	362	8,138,640	8,139,002	11,742,413	30.7/69.3	0.51
저탄소 에너지 전환	30,000,000	23,076,923	1.3	0.56	0.22	12,926,096	1,038	6,510,912	6,511,950	19,438,046	66.5/33.5	0.84
수요 증가 및 통합 최적화	45,000,000	40,909,091	1.1	0.16	0.22	6,387,866	513	9,766,368	9,766,881	16,154,747	39.5/60.5	0.39

* PUE, WUE_site, EWIF, WUE_source는 소수 셋째 자리에서 반올림함

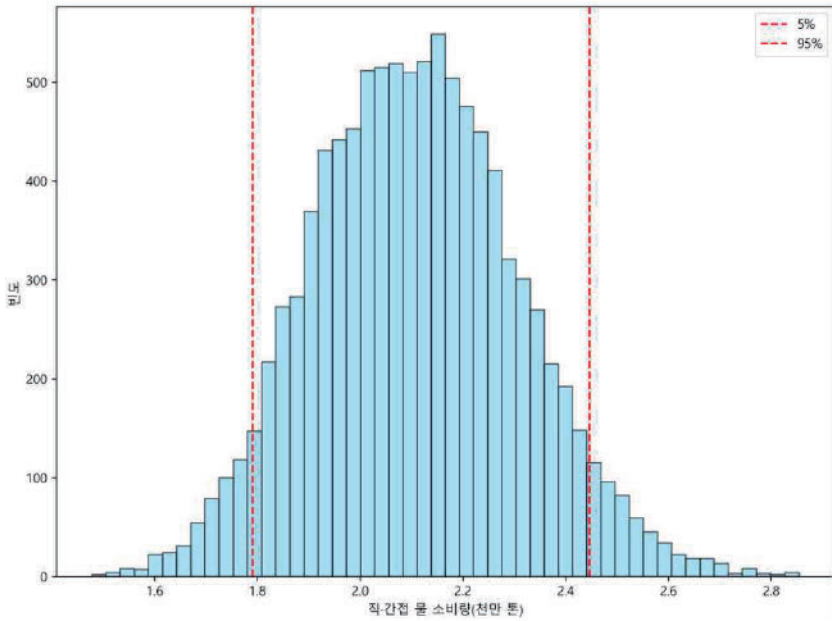
2. 불확실성 및 민감도 분석 결과 및 함의

1) 불확실성 분석

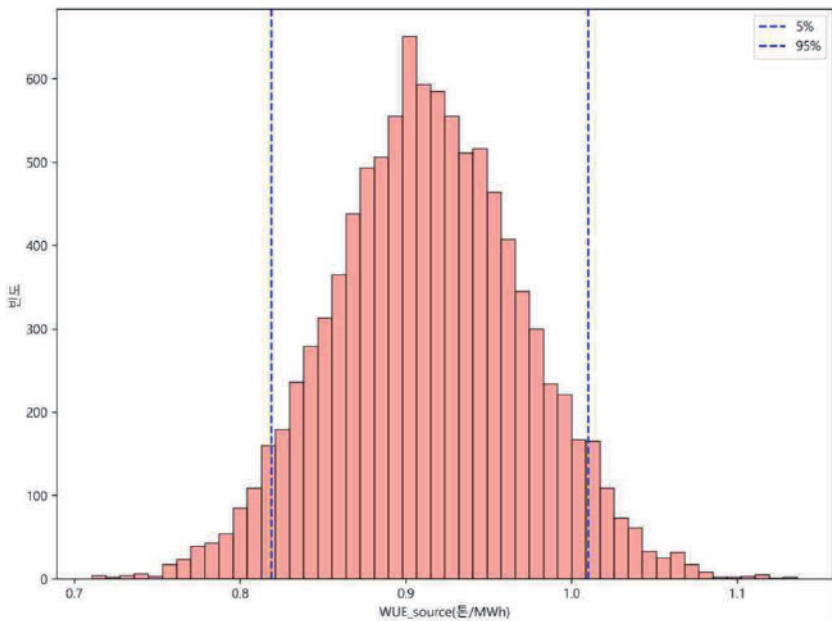
〈그림 1, 2〉는 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 직·간접 물 소비량과 WUE_source의 불확실성 분석 결과를 각각 나타낸다. 직·간접 물 소비량의 확률분포는 전반적으로 정규분포에 가까운 형태를 보인다. 분포 중심은 약 2.1천만 톤 수준에 형성되어 있으며, 5%~95% 범위는 대략 1.78천만 톤~2.45천만 톤으로 나타난다. 이는 기준값 대비 상당한 불확실성 폭을 가지며, 독립변수(전력 수요, PUE, WUE_site, EWIF)의 변동이 직·간접 물 소비량 추정치에 유의미한 영향을 미친다는 점을 시사한다. 특히 직·간접 물 소비량 분포는 약한 우측 비대칭이 나타나는데 이는 일부 독립변수 조합이 중첩될 경우, 직·간접 물 소비량이 비선형적으로 확대될 수 있음을 보여준다.

WUE_source의 확률분포도 비교적 안정적인 분포를 보인다. 분포 중심은 약 0.91~0.92톤/MWh 수준이며, 5%~95% 범위는 대략 0.82~1.02톤/MWh이다. 직·간접 물 소비량에 비해 상대적으로 변동폭이 좁게 나타나는 것은 WUE_source가 절대량이 아닌 단위 기준 지표이기 때문이다. 다만 WUE_source 분포가 비교적 안정적으로 보인다는 사실이 곧 직·간접 물 소비량 리스크가 낮다는 의미는 아니다. 단위 지표의 안정성과 총량 리스크는 별개로 해석해야 하며, 정책 및 운영 판단 시 두 지표를 병행 평가할 필요가 있다.

〈그림 1〉 몬테카를로 시뮬레이션 결과: 직·간접 물 소비량



〈그림 2〉 몬테카를로 시뮬레이션 결과: WUE_source

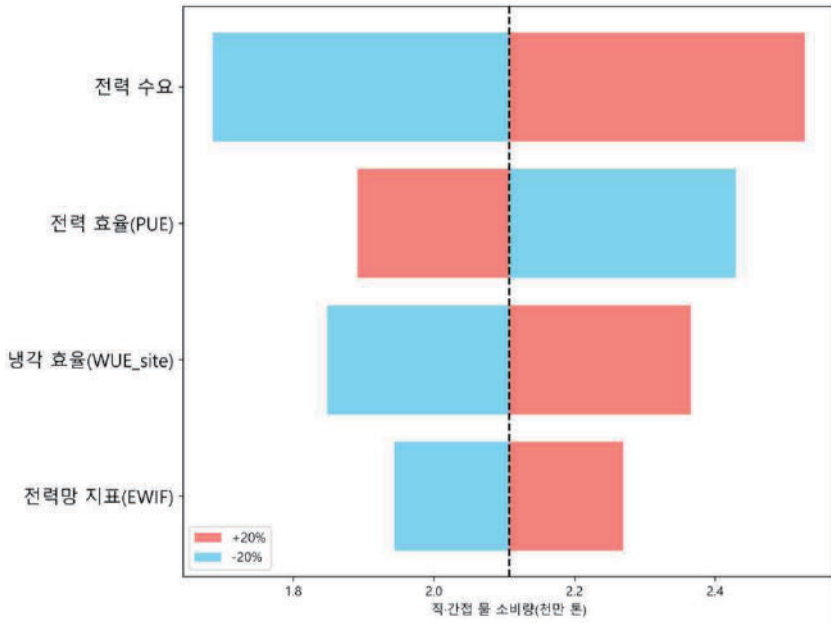


2) 민감도 분석

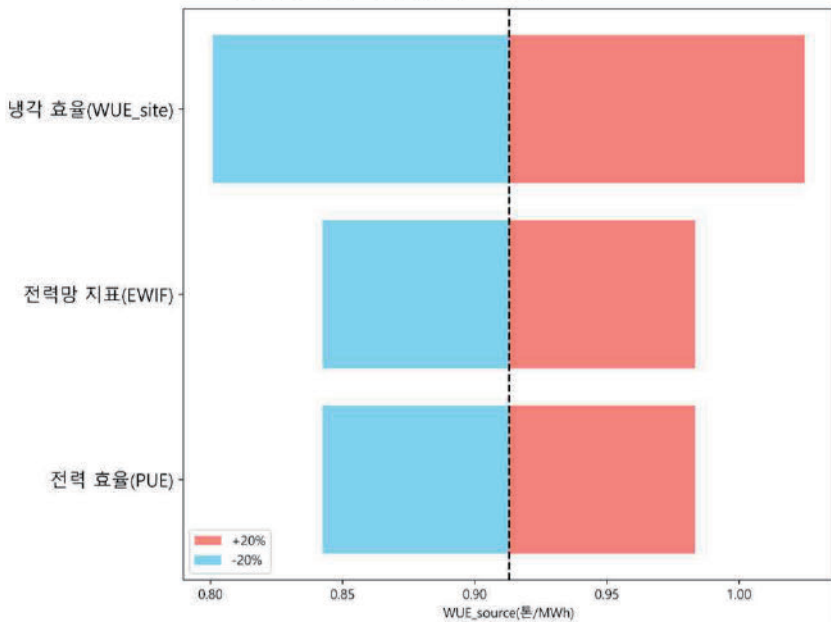
〈그림 3, 4〉는 민감도 분석을 통한 직·간접 물 소비량과 WUE_source의 결과를 각각 나타낸다. 직·간접 물 소비량에 가장 큰 영향 요인은 전력 수요로 나타났다. 이는 직·간접 물 소비량의 방정식이 전력 수요에 직접 비례하는 구조이기 때문이다. 즉, 수요 증가 자체가 직·간접 물 소비량 증가를 가장 강하게 전인하며, 효율 개선만으로는 수요 증가 효과를 완전히 상쇄하기 어렵다. 전력 수요는 절대 물 소비량을 좌우하는 구조적 결정요인으로 이해할 필요가 있으며, PUE, WUE_site, EWIF는 이러한 총량 압력을 완화하거나 증폭시키는 정책 레버(Policy lever)로 해석할 수 있다. PUE와 WUE_site도 유의미한 요인이지만, 이들은 주로 직접 물 소비량 경로를 통해 작용하므로 전력 수요에 비해 영향력이 제한적이다. EWIF는 간접 물 소비량을 좌우하는 핵심 변수이지만, BAU 시나리오의 직·간접 구성비 및 $\pm 20\%$ 변동 폭 설정 하에서는 영향도가 상대적으로 작게 나타난다.

WUE_source에 대한 민감도 순위에서는 전력 소비량이 제외된다. 이는 본 모형에서 WUE_source가 사실상 전력 소비량과 무관한 구조로 계산되기 때문이다. 즉, 전력 소비량은 직·간접 물 소비량을 변화시키지만, 단위 지표인 WUE_source에는 직접적인 영향이 거의 없거나 상쇄된다. 또한, WUE_site의 영향력이 가장 크게 나타난 것은 WUE_source 내에서 직접 물 사용의 기여가 크기 때문이다. 반면 EWIF와 PUE는 비슷한 수준의 민감도를 보이는데, 이는 WUE_source 방정식 구조상 두 변수가 곱의 형태로 결합되어 유사한 수준의 변화 효과를 나타내기 때문이다.

〈그림 3〉 민감도 분석 결과: 직·간접 물 소비량



〈그림 4〉 민감도 분석 결과: WUE_source



3) 불확실성 분석 및 민감도 분석 논의

이러한 결과는 데이터센터의 물관리 평가에서 평균값 기반의 단일 시나리오 분석을 넘어, 불확실성(확률분포)과 변수 민감도(영향 우선순위)를 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다. 특히 직·간접 물 소비량은 전력 수요에 대한 민감도가 가장 크고, WUE_source는 WUE_site 및 EWIF에 의해 주로 결정되므로, 수요 관리-냉각 효율-전력 믹스를 통합한 다층적 관리전략이 필요하다.

V. 결론 및 정책 제언

2024년 3월을 기준으로 전 세계 데이터센터 개수의 46%를 차지하는 미국¹⁴⁾은 2007년부터 국가 차원에서 데이터센터의 에너지 사용량에 대한 보고서를 지속적으로 작성하고 있다(Brown et al., 2007). 또한, 2016년부터는 데이터센터의 물 소비량에 관한 내용을 추가했다. 하지만 한국은 데이터센터의 자원 사용량에 대한 주기적인 분석이 전무하다. 게다가 한국데이터센터연합회가 2012년부터 그린데이터센터 인증제를 실시하고 있으나, 이는 전력 사용 효율인 PUE만 다루고 있으며, 물 소비량은 고려하지 않는다.

본 연구는 이러한 한계점을 극복하기 위해 물-에너지 넥서스 관점에서 국내 데이터센터의 물 소비량을 직접과 간접으로 통합해 정량화하고 정책·기술 조합별 효과와 리스크를 동시에 평가했다. 또한, 직접 및 간접 물 소비량을 통합적으로 평가하는 분석 체계를 제시함으로써 연구의 독창성이 있다.

한혜진 등(2024)과 본 연구에서 산출한 데이터센터의 직·간접 물 소비량의 차액인 3.2백만 톤은 추가적인 가치사슬 배출·소비 범위(Scope 3) 검토의 필요성을 시사한다. 2023년을 기점으로 2038년 목표 연도에 따른 5가지 시나리오를 설정하여 데이터센터의 수자원 소비 변화를 분석한 결과, 단순 효

14) Visual Capitalist(2025).

을 개선이 아닌 전력과 수자원 지표의 통합적 관리 여부가 전체 수자원 발국 결정에 핵심적인 역할을 하는 것으로 나타났다.

시나리오 분석 결과에 따르면, 2038년 BAU에서의 직·간접 물 소비량은 2023년 대비 급증할 것으로 예측된다. 주목할 점은 전력 효율(PUE)만을 단독으로 개선한 시나리오에서 나타나는 결과이다. 동일한 총 전력 공급량 내에서 실제 IT 부하가 증가함에 따라 직접 물 소비량은 오히려 BAU 대비 약 18% 증가하는 것으로 분석됐다. 이는 에너지 효율 개선이 수자원 인프라에는 도리어 부정적 외부효과를 유발하는 역설을 정량적으로 증명한다.

냉각 효율 혁신 시나리오는 WUE_site를 획기적으로 낮춤으로써 직접 물 소비량뿐만 아니라, EfW까지 동시 절감하는 연쇄 효과를 나타냈다.

저탄소 에너지 전환 시나리오는 EWIF 감소를 통해 간접 물 소비량을 직접적으로 제어한다. 이는 데이터센터 자체의 노력 외에도 국가 전력 믹스의 저탄소화가 데이터센터로 인한 수자원 리스크를 완화하는 필수 전제 조건임을 시사한다.

수요 증가 및 통합 최적화 시나리오는 가장 높은 전력 수요를 가정함에도 불구하고, 기술적 혁신(PUE 및 WUE_site 개선)과 정책적 지원(EWIF 감소)이 결합될 경우 WUE_source가 모든 시나리오 중 가장 낮은 수준으로 개선됨을 확인했다. 이는 데이터센터 산업의 양적 성장이 수자원 지속가능성과 양립하기 위해서는 ‘고효율 냉각 기술의 의무화 또는 확산’과 ‘저탄소 에너지 전원의 공급’이라는 투트랙(Two-track) 전략이 통합적으로 설계되어야 함을 시사한다.

이러한 결론에 따라 다음의 정책 방안을 제안한다.

첫째, 냉각 효율 의무화 및 인센티브이다. WUE_site를 매년 10%씩 개선하는 제도를 공공 및 민간 데이터센터에 도입하고, 재이용수·비음용수 냉각, 프리쿨링·액침냉각 등의 기술을 지원하며 관련 R&D에 예산을 투자한다.

둘째, 전력 믹스의 전환 가속화 및 전력-물 집약도 고려이다. 간접 물 소비량을 줄이기 위해 현재 전력수급기본계획상의 목표가 신속히 달성되도록 노력해야 한다. 또한, 이 계획에서 발전원의 전력-물 집약도를 고려하는 방안

을 강구해야 한다.

셋째, 그린데이터센터 인증제의 고도화이다. PUE만 고려하는 현재의 그린데이터센터 인증제는 한계가 있다. PUE뿐만 아니라 WUE_source와 직·간접 물 소비량을 의무적으로 보고·관리하도록 해야 한다. 이와 더불어 CUE, 재생에너지 사용 효율 지표(Renewable Energy Factor, REF), 에너지 재활용률 지표(Energy Reuse Factor, ERF), 워터 포지티브(Water Positive) 지수 등을 추가하여 진정한 의미의 그린데이터센터 인증제로 발전시킬 필요가 있다.

넷째, 공간적 분포를 고려한 입지 배정이다. 간접 물 소비량의 경우 데이터센터가 위치하지 않은 타지역에서 발생하므로 유역 및 발전소 위치를 고려하여 데이터센터의 입지를 허가해야 한다. 예컨대 수도권에 위치한 데이터센터로 인해 전력 생산 밀집 지역(지방)의 물 스트레스가 심화될 수 있다.

다섯째, 데이터 공개 및 표준화이다. EfW 포함 산정, 전력-물 집약도 계수, 유역별 WfE 위치정보를 정기 공개·검증해 정책·투자 의사결정의 투명성을 높인다.

위의 정책 제안은 앞선 시나리오 및 민감도 분석 결과에서 확인된 주요 결정요인과 trade-off에 근거한다. 즉, 냉각 효율 혁신은 직접 물 소비 저감에 가장 효과적이었고, 전력 믹스 저탄소화는 간접 물 소비량 감축에 유의한 효과를 보였으며, PUE 단독 개선은 절대 물 소비량 증가 가능성과 지표 왜곡 가능성을 드러냈다. 따라서 정책 수단 역시 이러한 결과에 대응하는 형태로 설계될 필요가 있다.

본 연구는 데이터 가용성 문제로 인해 데이터센터의 냉각방식을 고려하지 못했고, 발전원별 물 소비 계수 중 일부를 국내가 아닌 해외 사례의 값을 사용했다는 한계점이 있다. 추후 연구에서는 냉각방식별 물 소비량과 모든 발전원별 물 소비 계수를 국내에 맞게 적용하고, 유역별 간접 물 소비량 영향을 고려한다면 더욱 정교한 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

■ 참고문헌 ■

- 김하나, 2017, “에너지-물 상호의존성,” 『환경정책』, 25(4), pp.213-239.
- 산업통상자원부, 2025, 『제11차 전력수급기본계획』, 세종: 산업통상자원부.
- 세빌스 코리아, 2025, 『한국 데이터센터 시장』, 서울: 세빌스 코리아.
- 한혜진·오명진·현윤정·김호정·차윤경·구윤모 등, 2024, 『물-환경-경제 통합분석 기반 물정책전망 연구(I)』, 세종: 한국환경연구원.
- Alcott, B., 2005, “Jevons' paradox,” *Ecological economics*, 54(1), pp.9-21.
- An, D., 2023, “A simultaneous equations approach to analyze the sustainable water-energy-food nexus in South Korea,” *Environmental Research Communications*, 5(9), 095017.
- Brown, R., E. Masanet, B. Nordman, B. Tschudi, A. Shehabi, J. Stanley et al., 2007, 『Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency: Public Law 109-431』, Washington, DC: Sustainable Energy & Environmental Systems.
- Carey, C., M. S. Raisinghani, and B. White, 2017, Foundations of data center: key concepts and taxonomies. In 『Engineering and Management of Data Centers: An IT Service Management Approach』, (pp.1-13), Cham: Springer International Publishing.
- Chen, L. and A. P. Wemhoff, 2022, “Characterizing Data Center Cooling System Water Stress in the United States,” In ASHRAE Annual Conference papers.
- Cho, J., J. Yang, C. Lee, and J. Lee, 2015, “Development of an energy evaluation and design tool for dedicated cooling systems of data centers: Sensing data center cooling energy efficiency,” *Energy and Buildings*, 96, pp.357-372.
- DOE, 2017, 『Small Data Centers, Big Energy Savings: An Introduction for Owners and Operators』, Washington, DC: DOE.
- EdgeconneX, 2023, 『Structure Research Korea Report 2023』.
- Hoff, H., 2011, 『Understanding the Water, Energy, and Food Security Nexus: Solutions for the Green Economy』, Stockholm: SEI.
- IEA, 2024a, 『Electricity 2024』, Paris: IEA.
- IEA-EBC, 2020, 『International review of energy efficiency in Data Centres for IEA EBC Building Energy Codes Working Group』, Birmingham: Author.
- Jia, X., J. J. Klemeš, and R. R. Tan, 2021, “Overview of Water Use in Renewable Electricity Generation,” *Chemical Engineering Transactions*, 89, pp.403-408.
- Jin, Y., P. Behrens, A. Tukker, and L. Scherer, 2019, “Water use of electricity technologies: A global meta-analysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109391.

- Kamiya, G. and Coroamă, V.C., 2025, Data Centre Energy Use: Critical Review of Models and Results, EDNA – IEA 4E TCP, Retrieved from <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/05/Data-Centre-Energy-Use-Critical-Review-of-Models-and-Results.pdf>.
- Karimi, L., L. Yacuel, J. Degraft-Johnson, J. Ashby, M. Green, M. Renner, A. Bergman, R. Norwood, and K. L. Hickenbottom, 2022, "Water-energy tradeoffs In data centers: A case study in hot-arid climates," *Resources, Conservation and Recycling*, 181, 106194.
- Lei, N., Lu, J., Shehabi, A., & Masanet, E., 2025, "The water use of data center workloads: A review and assessment of key determinants," *Resources, Conservation and Recycling*, 219, 108310.
- Li, P., J. Yang, M. A. Islam, and S. Ren, 2023, "Making ai less 'thirsty': Uncovering and addressing the secret water footprint of ai models," *arXiv preprint arXiv:2304.03271*.
- Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., & Hallett, K. C. (2012). Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environmental Research Letters*, 7(4), 045802.
- Mekonnen, M. M., P. W. Gerbens-Leenes, and A. Y. Hoekstra, 2015, "The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment," *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1(3), pp.285-297.
- Mytton, D., 2021, Data centre water consumption. *npj Clean Water*, 4(1), 11.
- Shehabi, A., S. Smith, D. Sartor, R. Brown, M. Herrlin, J. Koomey, et al., 2016, "United States Data Center Energy Usage Report", (LBNL-1005775), Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- The Green Grid, 2011, "Water Use Effectiveness: A Green Grid Data Center Sustainability Metric", (White Paper #35), Beaverton, OR: Author.
- Uptime Institute, 2024, "Uptime Institute Global Data Center Survey 2024".

웹사이트

- 국가통계포털, <https://kosis.kr/index/index.do>. [2025.12.29.]
- 김경태, 2017.06.30., "계속된 가뭄에도 화력발전소 '물' 평평," 환경일보, <https://www.hkbs.co.kr/news/articleView.html?idxno=429541>. [2025.12.29.]
- 이상복, 2015.10.19., "석탄화력 12GW, 최악 가뭄에 발전차질 비상," 이투데이, <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=84156>. [2025.12.29.]
- 전력통계정보시스템, <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/>. [2025.12.30.]

- 정대섭, 2009.07.27., “최악의 저수율 보인 옥정호…원인은?,” 전북일보, <https://www.jjan.kr/article/20090726319399>. [2025.12.30.]
- 환경정보공개시스템, <https://www.env-info.kr/>. [2025.12.22.]
- Boston Consulting Group, 2025, “Breaking Barriers to Data Center Growth,” <https://www.bcg.com/publications/2025/breaking-barriers-data-center-growth>, [2025.11.23.]
- IEA, 2024b, “What the data centre and AI boom could mean for the energy sector,” <https://www.iea.org/commentaries/what-the-data-centre-and-ai-boom-could-mean-for-the-energy-sector>, [2025.12.29.]
- McKinsey & Company, 2024, “AI power: Expanding data center capacity to meet growing demand,” [https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/ai-power-expanding-data-center-capacity-to-meet-growing-demand#/,](https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/ai-power-expanding-data-center-capacity-to-meet-growing-demand#/) [2025.11.27.]
- McKinsey Quarterly, 2025, “The cost of compute: A \$7 trillion race to scale data centers,” [https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-cost-of-compute-a-7-trillion-dollar-race-to-scale-data-centers#/,](https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-cost-of-compute-a-7-trillion-dollar-race-to-scale-data-centers#/) [2025.11.20.]
- McLellan, C., 2013, “The 21st Century Data Center: An overview,” <http://www.zdnet.com/article/the-21st-century-data-center-an-overview>, [2026.02.02.]
- Visual Capitalist, 2025, “Ranked: The Top 25 Countries With the Most Data Centers,” <https://www.visualcapitalist.com/ranked-the-top-25-countries-with-the-most-data-centers>, [2025.11.19.]

안대한: 일본 교토대학교에서 환경정책학 박사학위를 취득하고, 현재 국가녹색기술연구소 제도혁신센터에서 박사후연구원으로 재직 중이다. 관심 연구 분야는 WEF nexus, 기후변화 정책, 지속가능한발전 등이다(zzank1900@naver.com).

황보은: 한국환경연구원 국토환경연구본부 전문연구원으로 근무하고 있다. 주요 연구 분야로는 환경경제, 환경정책, 물관리계획 등이다(behwang@kei.re.kr).

한혜진: 미국 미시간대학교에서 박사학위를 취득하고 현재 한국환경연구원 선임연구위원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 물관리 계획 및 제도 수립, 온실가스 감축, 재정 분석 등에 관한 연구를 진행하고 있다(hanhj@kei.re.kr).

투 고 일: 2026년 02월 25일
심 사 일: 2026년 02월 26일
게재확정일: 2026년 03월 30일