

AI에서 제번스의 역설: 에너지, 노동시장, 산업구조를 잇는 문헌 검토

인쇄용 PDF / 2026-04-06

기반 자료: 공개 원문 PDF 7편 및 번역본

이 문서는 AI와 제번스의 역설에 관한 선행연구를 에너지, 시스템 반등, 노동시장, 산업구조
관점에서 정리한 인쇄용 버전이다.

목차

초록	3
핵심어	3
1. 서론	3
2. 자료와 방법	3
3. 직접효과: AI는 이미 높은 자원집약성을 가진다	3
4. 시스템 수준: 데이터센터와 클라우드에서 나타나는 반등	4
5. 간접효과: 반등은 기술 내부가 아니라 사회 전체에서 형성된다	4
6. 노동시장과 산업구조: AI형 제번스는 대체 압력과 연산 수요를 함께 키울 수 있다	4
7. 종합 논의	5
8. 정책 함의와 연구 한계	5
9. 결론	5
참고문헌	5

초록

본 문헌 검토는 인공지능(AI)에 제번스의 역설이 적용될 수 있는지를 검토한다. 제번스의 역설은 효율 향상이 단위 비용을 낮추더라도 총수요 확대를 통해 총자원 소비를 오히려 증가시킬 수 있다는 논리다. 본 보고서는 2026년 4월 6일 기준으로 확보한 공개 원문 PDF 7편을 바탕으로, AI의 직접적 자원집약성, 데이터센터 및 클라우드 차원의 시스템 반등, 노동시장 대체효과, 산업구조 재편 효과를 연결해 해석한다. 검토 결과, AI에서 제번스의 역설이 보편적으로 실증되었다고 단정하기는 아직 이르다. 그러나 효율 향상 이후 가격 하락, 도입 확대, 연산 집약도 상승, 데이터 플라이휠 강화로 이어지는 메커니즘은 상당히 강하게 확인된다 (1-7). 따라서 AI 정책은 효율 개선 자체보다 효율 이후의 총량 반응을 추적하고 관리하는 방향으로 설계될 필요가 있다.

핵심어

AI, 제번스의 역설, 반등효과, 데이터센터, 노동시장, 디지털 지능 자본

1. 서론

AI는 더 빠르고, 더 정확해지고, 더 저렴해지고 있다. 표면적으로 보면 이러한 효율 향상은 같은 산출을 더 적은 자원으로 생산하게 만들므로 에너지와 비용을 절감할 것처럼 보인다. 그러나 고전적인 에너지경제학은 효율 증가가 총소비 감소를 자동으로 보장하지 않음을 보여준다. 제번스의 역설은 바로 이 지점을 설명한다. 효율 향상은 단위 비용을 낮추고, 낮아진 비용은 사용 확대와 신규 수요 창출을 부르며, 그 결과 총자원 소비가 오히려 증가할 수 있다.

생성형 AI와 대형언어모델 확산은 이 문제를 다시 전면으로 가져왔다. 모델 훈련과 추론의 효율은 빠르게 좋아지고 있지만, 동시에 더 큰 모델, 더 많은 사용자, 더 복잡한 에이전트 구조, 더 광범한 산업 도입이 함께 나타나고 있다. 따라서 현재의 핵심 질문은 "AI가 얼마나 효율적인가"가 아니라 "효율 향상 이후 총전력, 총연산, 총노동대체 압력이 어떻게 변하는가"이다.

2. 자료와 방법

본 검토는 공개 원문 PDF 확보가 가능했던 7편의 문헌을 대상으로 한다. 문헌 구성은 다음과 같다. 첫째, 직접효과를 다루는 계량 연구로 Strubell et al. (1), Faiz et al. (2)를 포함했다. 둘째, 시스템 수준의 반등을 다루는 문헌으로 Sharma (3), International Energy Agency (5)를 포함했다. 셋째, 간접효과와 사회기술적 맥락을 다루는 비판적 문헌으로 Luccioni et al. (6)을 포함했다. 넷째, 노동시장 및 산업구조 효과를 다루는 이론 문헌으로 Narayanan and Pace (4), Zhang and Zhang (7)을 포함했다.

이 문헌들은 동일한 방법론을 쓰지 않는다. 일부는 직접 계량이고 (1)(2), 일부는 정책 전망 (5), 일부는 경제이론 모형 (4)(7), 일부는 사회기술적 비판적 논의 (6)다. 따라서 본 보고서는 단일 추정치 비교가 아니라, 서로 다른 층위의 결과를 이어 붙여 AI에서 제번스 메커니즘이 어떤 구조로 작동하는지를 종합적으로 해석하는 방식으로 접근한다.

3. 직접효과: AI는 이미 높은 자원집약성을 가진다

직접효과 문헌의 공통 메시지는 단순하다. AI의 효율 향상 논의는 이미 높은 에너지와 탄소 비용 위에서 이루어지고 있다는 점이다. Strubell et al. (1)은 대형 NLP 모델의 훈련과 하이퍼파라미터 탐색이 상당한 전력 사용, 금전비용, 탄소배출을 수반한다고 정량화했다. 이 연구는 고성능 모델의 정확도 향상이 계산자원 투입 확대에 크게 의존한다는 사실을 초기 단계에서 분명히 했다.

Faiz et al. (2)은 이를 더 확장한다. LLMCarbon은 훈련뿐 아니라 추론, 저장, 실험, 그리고 내재탄소까지 포괄해 LLM의 탄소발자국을 추정한다. 이 연구는 반등효과를 직접 입증하지는 않지만, 효율 향상 이후 총량 효과를 계량하기 위한 측정 인프라를 제공한다는 점에서 중요하다. 제번스의 역설은 결국 효율 개선이 총자원 사용을 어떻게 바꾸는지 추적하는 문제이며, 그러한 추적은 정교한 측정도구 없이는 불가능하다.

4. 시스템 수준: 데이터센터와 클라우드에서 나타나는 반등

Sharma (3)는 클라우드 컴퓨팅을 열역학적 시스템으로 해석하며, 효율 향상이 총에너지 소비 감소가 아니라 시스템 성장으로 이어질 수 있다고 본다. 이 논문에서 핵심 변수는 단순한 서버 효율이 아니라 플랫폼의 매출 확대, 서비스 확장, 사용자 증가다. 효율 향상은 비용을 낮추지만, 그 절감분은 다시 더 많은 서비스와 더 큰 규모의 인프라로 흡수될 수 있다.

IEA의 2025년 특집 보고서 (5)는 이를 거시적 규모에서 뒷받침한다. 보고서에 따르면 데이터센터는 2024년 약 415TWh를 소비했으며, 2030년에는 약 945TWh까지 증가할 수 있다 (5). AI는 전력망 최적화와 에너지시스템 효율 개선에 기여할 잠재력도 있지만, 동시에 데이터센터 수요 확대의 핵심 원인으로 지목된다 (5). 이 조합은 AI 효율 향상이 국소적 절감으로 끝나지 않고 총수요 증가를 동반할 수 있음을 보여준다.

5. 간접효과: 반등은 기술 내부가 아니라 사회 전체에서 형성된다

Luccioni et al. (6)은 AI 환경영향 논의가 지나치게 직접효과에 집중되어 있다고 비판한다. 이들은 전력 사용, 물 사용, 탄소배출, 전자폐기물만으로 AI의 총환경영향을 설명할 수 없으며, 기업의 성장전략, 광고 기반 비즈니스 모델, 규제 환경, 소비자 행태 변화가 함께 고려되어야 한다고 주장한다. 이 관점에서 반등효과는 모델 내부 효율의 문제가 아니라 사회기술적 시스템 전체의 문제다.

이 문헌의 함의는 분명하다. AI 모델이 더 효율적으로 작동하더라도, 그 효율이 서비스 확장 수요 자극의 수단으로 사용되면 총자원 소비는 계속 증가할 수 있다. 따라서 AI에 대한 제번스 해석은 기술평가와 시장분석을 함께 요구한다.

6. 노동시장과 산업구조: AI형 제번스는 대체 압력과 연산 수요를 함께 키울 수 있다

Narayanan and Pace (4)는 시간가변 대체탄력성 모형을 통해 AI가 인간 노동의 보완재에서 대체재로 전환되는 조건을 분석한다. 이 연구는 가격 하락만으로는 충분하지 않으며, 품질 향상과 대체탄력성 상승이 함께 나타날 때 AI 채택이 본격적으로 확대된다고 본다 (4). 이 해석에 따르면 효율 향상은 동일 업무의 비용을 낮추는 데 그치지 않고, 기존에는 경제성이 부족했던 업무영역까지 AI 적용을 넓힌다.

Zhang and Zhang (7)은 이를 산업구조 차원으로 확장한다. 이들은 AI를 “디지털 지능 자본”으로 보고, 추론가격 하락이 더 긴 추론 체인, 더 큰 컨텍스트, 더 많은 도구 통합, 더 복잡한 에이전트 구조를 유도할 수 있다고 주장한다 (7). 이 경우 총연산 수요는 단순히 비례적으로 늘지 않고 초탄력적으로 증가할 수 있다 (7). 동시에 더 많은 사용량은 더 많은 데이터와 피드백을 낳고, 이는 다시 더 높은 품질과 더 강한 시장집중으로 이어진다 (7). 제번스의 역설은 이 지점에서 에너지 문제를 넘어 경쟁정책 문제로 바뀐다.

7. 종합 논의

검토한 문헌은 AI에서 제번스의 역설이 이미 완전히 증명되었다고 말하지는 않는다. 하지만 서로 다른 층위의 문헌이 같은 방향을 가리키고 있다는 점은 분명하다. 직접효과 문헌은 AI가 이미 자원집약적임을 보여주고 (1)(2), 시스템 문헌은 효율 향상에도 총전력 수요가 증가할 수 있음을 설명하며 (3)(5), 노동시장 및 산업구조 문헌은 효율 개선이 더 넓은 도입과 더 큰 구조적 수요를 부를 수 있음을 이론적으로 정교화한다 (4)(7). 비판적 문헌은 이 과정이 기업전략과 정책 인센티브에 의해 강화될 수 있음을 지적한다 (6).

따라서 현 단계에서 가장 타당한 해석은 다음과 같다. AI는 제번스의 역설이 작동하기 쉬운 기술적, 경제적, 제도적 조건을 강하게 갖추고 있다. 다만 부문별 실증 강도는 아직 다르며, 장기 패널데이터와 기업 수준 공개자료가 부족하다는 점은 중요한 한계다.

8. 정책 함의와 연구 한계

정책 차원에서는 네 가지 함의가 중요하다. 첫째, 효율 개선만을 정책목표로 삼아서는 안 된다. 총수요 관리와 전력 인프라 계획이 함께 필요하다. 둘째, 모델 훈련, 추론, 저장, 데이터센터 운영에 대한 전력 및 탄소 공개 기준을 강화해야 한다. 셋째, 노동시장에서는 생산성 평균보다 직무 재구성, 대체탄력성, 전환교육이 더 중요한 관찰 변수다. 넷째, 데이터 플라이휠과 시장집중이 자원소비 구조를 악화시킬 수 있으므로 경쟁정책과 데이터 거버넌스를 함께 설계해야 한다.

연구 한계도 분명하다. 이번 검토는 공개 PDF로 확보 가능한 문헌 7편에 기반하므로 폐쇄형 저널 문헌을 충분히 포괄하지 못했다. 또한 상당수 연구가 preprint이거나 이론모형이어서, 산업별 실제 총량 반응을 장기적으로 입증하는 패널 증거는 여전히 제한적이다. 따라서 AI와 제번스의 관계는 “확정된 결론”보다는 “강한 구조적 가능성”으로 해석하는 편이 정확하다.

9. 결론

AI는 효율이 빠르게 개선되는 기술이지만, 효율 향상이 총자원 사용 감소로 이어질 것이라고 가정하기는 어렵다. 지금까지의 문헌은 오히려 반대 방향의 구조를 보여준다. 효율 향상은 가격 하락을 낳고, 가격 하락은 더 넓은 채택과 더 복잡한 사용방식을 낳으며, 그 결과 총전력, 총연산, 노동대체 압력이 확대될 수 있다 (1-7). 앞으로의 핵심 과제는 AI 효율을 더 높이는 것만이 아니라, 그 효율이 사회 전체에서 어떤 총량 반응을 낳는지 추적하고 통제하는 것이다.

참고문헌

- (1) Strubell E, Ganesh A, McCallum A. Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP. In: Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Florence:

- Association for Computational Linguistics; 2019. p. 3645-3650. Available from:
<https://aclanthology.org/P19-1355/>
- [2] Faiz A, Kaneda S, Wang R, Osi R, Sharma P, Chen F, Jiang L. LLMCarbon: Modeling the End-to-End Carbon Footprint of Large Language Models. In: The Twelfth International Conference on Learning Representations. Vienna: ICLR; 2024. Preprint available from:
<https://arxiv.org/abs/2309.14393>
 - [3] Sharma P. The Jevons Paradox in Cloud Computing: A Thermodynamics Perspective. arXiv (Preprint). 2024. Available from: <https://arxiv.org/abs/2411.11540>
 - [4] Narayanan RP, Pace RK. Will Neural Scaling Laws Activate Jevons' Paradox in AI Labor Markets? A Time-Varying Elasticity of Substitution (VES) Analysis. arXiv (Preprint). 2025. Available from:
<https://arxiv.org/abs/2503.05816>
 - [5] International Energy Agency. Energy and AI. World Energy Outlook Special Report. Paris: IEA; 2025. Available from: <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
 - [6] Luccioni AS, Strubell E, Crawford K. From Efficiency Gains to Rebound Effects: The Problem of Jevons' Paradox in AI's Polarized Environmental Debate. arXiv (Preprint). 2025. Available from:
<https://arxiv.org/abs/2501.16548>
 - [7] Zhang Y, Zhang T. The Economics of Digital Intelligence Capital: Endogenous Depreciation and the Structural Jevons Paradox. arXiv (Preprint). 2026. Available from:
<https://arxiv.org/abs/2601.12339>