

제조업 디지털 전환의 에너지 소비 구조 변화 분석:

탄소중립 실현을 위한 업종별 정책 차별화 전략

Analysis of Changes in Energy Consumption Structure Following Digital Transformation in Manufacturing: Sectoral Differentiation Strategies for Achieving Carbon Neutrality

이영경*

Youngkyeong Lee

요약: 본 연구는 2025년 출범한 기후에너지환경부의 통합 거버넌스 체제 하에서, 한국 제조업의 탄소중립 실현을 위한 핵심 동력으로서 디지털 전환의 실효성을 실증 분석하였다. 이를 위해 2010년부터 2020년까지 제조업 17개 세부 업종의 패널 데이터를 구축하고, 초월대수 비용함수 모형을 적용하여 ICT(Information and Communication Technology, 이하 ICT) 자본 투입이 에너지 소비 구조 및 온실가스 배출에 미치는 영향을 규명하였다. 분석 결과, ICT 투입은 제조업 전체에서 약 1,896.51천tCO₂의 온실가스 순감축을 견인하였다. 에너지원별로는 석탄과 석유 등 고탄소 화석연료에서 강력한 대체 및 감축 효과를 이끌어낸 반면, 공정 자동화에 따른 '구조적 전력화'의 영향으로 전력 사용량 및 관련 배출량은 오히려 증가하는 상충 관계가 관측되었다. 특히 ICT 자본-에너지 간 대체 탄력성은 산업군별로 뚜렷한 이질성을 보였다. 에너지 다소비 산업군에서는 화석연료를 직접 대체하는 저탄소 혁신 기제로 작용한 반면, 첨단 주력 산업군에서는 디지털화가 전력 수요 폭증으로 이어지는 '전력화 리스크'가 발견되었다. 이러한 결과는 모든 업종에 일괄 적용되는 보편적 ICT 보급 정책은 한계가 있음을 시사하며, 고탄소 업종의 '연료 전환'과 첨단 업종의 '전력 효율화'를 분리한 차별화된 지원 체계 구축이 필요함을 제안한다.

핵심주제어: 디지털 전환, 에너지 대체 효과, 탄소중립, 산업대전환, 기후에너지환경부

Abstract: This study analyzes the impact of digital manufacturing innovation on carbon neutrality under the Ministry of Climate, Energy, and Environment. Using panel data (2010-2020) from 17 manufacturing sectors and a translog cost function, it examines how ICT capital reshapes energy structures and GHG emissions. Findings show that ICT investment drove a net reduction of 1,896.51 ktCO₂. While it significantly cut fossil fuel emissions, it increased electricity-related emissions through process electrification. In particular, the elasticity of substitution between ICT capital and energy exhibited distinct heterogeneity across industrial sectors. In energy-intensive industries, ICT acted as a low-carbon innovation mechanism that directly replaced fossil fuels. Conversely, in leading high-tech sectors, a 'digitalization-driven electrification risk' was identified, where digital transformation led to a surge in electricity demand. These findings suggest that universal ICT dissemination policies applied uniformly across all sectors have inherent limitations. Therefore, this study proposes the establishment of differentiated support frameworks that decouple 'fuel switching' in high-carbon sectors from 'power efficiency optimization' in high-tech industries.
Key Words: Digital Transformation, Energy Consumption Structure, Carbon Neutrality, Great Industrial Transformation, Ministry of Climate, Energy and Environment

* 한국통계진흥원 통계품질센터 연구기획팀 부연구위원

I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

한국 제조업은 국가 경제의 근간을 이루고 있으나, 동시에 에너지 집약도가 매우 높아 탄소중립 달성을 위해 가장 시급한 구조적 전환이 요구되는 분야이다. 현재 제조업 내 석유·석탄 기반의 공정 의존도는 여전히 높은 수준이며, 특히 철강·석유화학 등 에너지 다소비 산업의 비중이 높아 공정 단위의 기술 개선뿐만 아니라 산업 구조 전반의 효율 혁신이 병행되어야 하는 과제를 안고 있다.

이러한 상황에서 디지털 전환(Digital Transformation, 이하 DX)은 생산 공정의 운영 방식 혁신, 자동화, 데이터 기반의 정밀 에너지 모니터링 등을 통해 산업 활동의 내재적 구조를 근본적으로 변화시킬 수 있는 핵심 동력으로 주목받고 있다. 우리 정부 역시 이를 인식하고 「산업 디지털 전환 촉진법」 및 스마트공장 고도화 사업 등을 통해 디지털 전환을 국가 산업 정책의 핵심 기제로 추진해 왔다(국가법령정보센터, 2024). 특히 2025년 10월에는 기후에너지환경부 출범을 통해 산업 정책과 기후 정책의 통합 관리를 도모하고 있으며(환경부, 2025), 이는 디지털 전환을 온실가스 감축의 결정적 수단으로 삼아 산업 경쟁력 강화와 탄소중립이라는 두 가지 목표를 동시에 달성하려는 국가적 전략으로 볼 수 있다.

이러한 정책적 시도에도 불구하고, 디지털 전환이 산업별 에너지 소비 구조를 재편하고 실질적 온실가스 감축에 기여하는 경로에 대한 정량적 근거는 여전히 미흡하다. 기존 연구들이 주로 디지털화의 생산성 향상 효과에 매몰되어 에너지원별(석탄·석유·전력·가스) 대체 구조를 간과해 온 점을 고려할 때, 디지털 전환을 실효성 있는 탄소중립 전략으로 연결하기 위해서는, 업종별 특성에 따라 어떠한 산업군이 화석연료를 직접 대체하고 어떠한 산업군이 전력 최적화를 통해 감축에 기여하는지 그 구조적 분기점을 확인하는 실증분석이 필요한 시점이다. 본 연구는 기후-산업 통합 정책 설계를 위한 실증적 토대를 마련한다는 점에서 기존 연구와 차별화된다.

2. 연구 목적

본 연구는 산업 디지털 전환을 산업 에너지 구조 및 온실가스 배출 체계를 재편하는 핵심적 '구조적 전환 변수'로 정의하고, 한국 제조업 17개 업종을 대상으로 ICT 자본 투입이 생산요소 및 에너지원별 소비 구조에 미치는 차등적 영향을 실증하여 탄소중립을 위한 차별적 정책 대안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

이를 위한 세부 연구목적은 다음과 같다. 첫째, 한국 제조업의 세부 업종별 ICT 자본 축적 수준과 종사자 수, 그리고 온실가스 배출량 및 연료별 배출 구조를 파악하여 산업별 디지털 전환의 기초 현황을 파악한다. 둘째, 한국 제조업 17개 산업을 대상으로 ICT 자본투자 변화가 에너지(석탄·석유·전력·가스) 소비 구조에 미치는 차등적 영향을 정량적으로 규명한다. 셋째, 이러한 분석 결과를 바탕으로 한국이 신설된 기후에너지환경부 체제하에서 산업별 특성을 반영한 맞춤형 디지털 제조혁신 정책과 탄소중립 지원 전략의 방향성을 제언하고자 한다.

II. 이론적 배경 및 정책 동향

1. 산업 디지털 전환의 개념 및 에너지 효율화 메커니즘

디지털 전환은 정보통신기술(Information and Communication Technology, 이하 ICT), 센서, 자동화, 데이터 분석 등 디지털 기술을 생산공정 및 운영체계에 통합하여 효율성과 생산성을 제고하는 활동을 의미한다(OECD, 2019). 이는 단순한 공정 자동화를 넘어 공급망과 에너지 사용 구조 등 산업 활동의 핵심 요소를 구조적으로 변화하는 과정을 포함한다. 특히 제조업에서 DX는 공정 운영, 공급망(supply chain), 에너지 사용 구조 등을 구조적으로 변화시키는 핵심 동인으로 작용한다.

이러한 기술적 변화는 에너지 사용 방식과 온실가스 배출 구조에 직·간접

적인 영향을 미친다. 해외 연구에 따르면, 실시간 공정 모니터링과 자동화는 불필요한 설비 가동을 줄여 에너지 낭비를 감소시키며(Erdmann and Hilty, 2010; Lange and Santarius, 2020), 데이터 기반의 지능화된 공정 관리는 전기 기반 설비의 활용을 증가시켜 전력화(electrification)를 촉진하는 효과를 가진다(Takase and Murota, 2004). 이는 DX가 단순한 효율 개선을 넘어 산업 에너지 투입 구조 자체를 근본적으로 변화시킬 수 있는 잠재적 요인임을 시사한다.

2. 국내외 연구 동향 및 한계

디지털 전환(DX)이 산업 생산성 향상과 자원 효율성 제고에 미치는 영향은 국내외 학계에서 지속적으로 논의되어 왔다(Jorgenson, Ho and Samuels, 2008). 초기 연구들은 ICT 자본 투입이 공정 지능화를 통해 유발하는 기술적 잠재력에 주목하여, ICT 자본이 에너지 절약적 속성을 바탕으로 전통적인 생산요소를 경제적으로 대체할 수 있음을 입증하였다(Fisher-Vanden, Jefferson, Ma and Xu, 2006; Jaffe, Newell and Stavins., 2004; Lange and Santarius, 2020).

그러나 최근 실증 연구들은 DX가 반드시 에너지 총량의 감소로 직결되지는 않는다는 '다면적 전환 경로'의 복잡성을 경고하고 있다. 구조적 전환 측면에서는 Takase and Murota(2004) 등이 지능화된 공정 운영이 전력 기반 설비로의 이행을 촉진하여 산업 전반의 전력 수요를 가속화한다고 분석하였다. 그리고 이 과정에서 ICT 인프라 확충에 따른 전력 사용 증가분이 타 에너지원의 절감분을 상회하거나, 효율 향상이 생산 규모 확대로 이어져 절감분을 상쇄하는 '반등효과(rebound effect)'가 발생할 위험성도 꾸준히 제기되고 있다(Williams, DeBenedictis, Ghanadan, Mahone, Moore and Morrow, 2012).

방법론적으로 기존 연구들은 초월대수 비용함수 등을 활용하여 생산요소 간 대체탄력성을 추정하여 이러한 관계를 분석해 왔다(김수일, 2006; 박창수, 2005; Pindyck, 1979). 하지만 ICT 투자의 에너지 대체 여부에 대해서는 Khayyat(2014)과 김지효·허은녕(2014)의 사례처럼 연구마다 상반된 결과

가 나타나고 있어 학술적 합의가 부족한 실정이다(Schulte, Welsch and Rexhäuser, 2016). 특히 기존 연구 대다수가 에너지를 '전력'과 '연료'라는 거시적 범주로만 구분함으로써(Salahuddin and Alam, 2015), 화석연료 내 석탄·석유·가스별 기술적 고착 효과나 배출 강도의 산업별 이질성을 포착하지 못했다는 점은 주요한 한계로 남는다.

3. 관련 국내 정책 동향

우리나라의 산업 DX 정책은 단순한 기술 보급을 넘어 법적·전략적 체계를 갖춘 국가적 구조 전환 정책으로 추진되어 왔다. 우선 2022년 범정부 차원의 「대한민국 디지털 전략」을 수립하여 세계 최고의 디지털 역량 확보와 산업 전반의 디지털 확산을 국가적 과제로 제시하였고(관계부처 합동, 2022), 이를 구체화하기 위해 「산업 디지털 전환 촉진법」을 제정하고 「신(新) 디지털 제조혁신 전략」을 수립하는 등 2027년까지 철강, 석유화학 등 에너지 다소비 업종의 DX 고도화와 AI 내재화에 막대한 R&D 예산을 투입하고 있다(중소벤처기업부, 2023).

또한 이러한 정책적 흐름은 2025년 10월 출범한 기후에너지환경부를 통해 새로운 국면을 맞이하고 있다. 기후에너지환경부는 '기후·에너지 디지털 전환 및 AI 전환 전략 전담반' 신설을 통해 데이터 기반의 에너지 효율화를 기후 대응의 핵심 수단으로 공식화하고 있기 때문이다(환경부, 2025). 그러나 이러한 방대한 지원 체계와 정책노력에도 불구하고, 기존 정책은 세 가지 측면에서 실무적·학술적 한계가 존재한다.

첫째, 자원 배분의 우선순위를 결정할 실증적 기준이 미비하다. 현재의 지원 체계는 업종별 배출 총량이나 기업 규모 등 단편적 지표에 의존하고 있어, 디지털 자본 투입 시 실제 탄소 감축으로 이어지는 에너지 전환 효율성을 파악하는 데 한계가 있었다. 즉, 동일한 예산을 투입하더라도 업종별 에너지 구조에 따라 탄소 감축 성과가 현저히 다를 수 있음에도 불구하고, 어떤 업종이 디지털 기술을 통해 화석연료를 가장 효과적으로 대체하는지에 대한 계량적 우선순위 설정하기 위한 노력이 부족했던 것이다.

둘째, '전력화 리스크'에 대한 대응체계가 부족하였다. 현행 정책은 디지털화를 통한 생산성 향상에 집중할 뿐, ICT 설비 확충에 따른 전력 소비 증가가 온실가스 배출권 거래제(ETS) 등 기후 정책과 어떻게 충돌하는지에 대한 통합적 고려가 부족하였다. 특히 첨단 산업군에서 나타나는 디지털화와 전력 소비 간의 보완적 관계를 간과할 경우, DX가 오히려 간접 배출량을 늘리는 '디지털 리바운드 효과'를 초래할 위험이 있다.

셋째, 부처 간 분절된 데이터 및 관리 체계는 한계를 가진다. 그간 산업부는 '산업 경쟁력'의 관점에서, 환경부는 '배출권 관리'의 관점에서 DX를 바라봐왔다. 이로 인해 국가 차원의 DX 지원 사업이 실제 에너지 구조 전환 및 온실가스 감축에 기여하는 인과관계를 정밀하게 모니터링하고 이를 정책에 환류하는 데에 어려움이 있었다.

III. 연구방법

본 연구는 디지털 전환이 산업부문 에너지 소비 구조와 온실가스 배출에 미치는 구조적 영향을 정량적으로 규명하기 위하여, 제조업 업종별 ICT 자본 투자 수준과 생산요소·에너지원 소비의 상호관계를 분석한다. 특히 본 연구는 제조업 부문의 ICT 자본 1% 변화가 노동, 비ICT 자본, 그리고 석탄·석유·전력·가스 등 에너지 소비에 어떠한 변화를 유발하는지 추정하는 것을 핵심 분석 목표로 설정하였다.

1. 분석 모형

본 연구는 요소 간 유연한 대체 관계를 포착하기 위해 중립적 기술변화를 가정한 초월대수(Translog) 비용함수를 근사 모델로 설정한다. 더불어 Shephard's Lemma를 적용하여 도출한 식(1)의 비용비중함수식(Cost Share Equations)을 바탕으로, 각 방정식의 오차항 간 상관관계를 고려할 수 있는 SUR(Seemingly Unrelated Regression) 모형을 통해 파라미터를 추정한다.

그리고 추정 시 가격에 대한 1차 동차성 및 대칭성 제약조건을 부과하여 모형의 이론적 정합성을 확보한다.

$$s_i = \beta_i + \sum_j \delta_{ij} \ln P_j + \delta_{yi} \ln Y \quad (1)$$

$$i, j = K_{ICT}, K_{NICT}, L, E_C, E_O, E_E, E_G$$

식 (1)에서 s_i 는 생산요소 i (노동, 비ICT자본, 석탄, 석유, 전력, 가스)의 비용분담비율을 의미하며, 투입요소는 ICT 자본(K_{ICT})과 비ICT자본(K_{NICT}), 노동(L), 그리고 세부 에너지원(석탄 E_C , 석유 E_O , 전력 E_E , 가스 E_G)으로 구성된다. $\ln P_j$ 는 각 투입요소의 가격을, K_{ICT} 는 외생적으로 결정되는 ICT 자본 축적량을 나타낸다.

본 연구는 식(1)의 분석결과 추정된 계수(δ_{ij})와 비용 비중(s_i)을 바탕으로 Allen의 대체탄력성(σ_{ij})을 우선 도출한 다음, 이 값을 바탕으로 수요의 가격 탄력성인 자기가격 탄력성(ϵ_{ii} , own-price elasticity)과 교차가격 탄력성(ϵ_{ij} , cross-price elasticity)을 산정하였다.

Allen의 대체탄력성(σ_{ij})은 값이 양(+)이면 대체 관계, 음(-)이면 보완 관계를 의미하며, 생산기술의 구조적 전환 방향을 제시한다. 그리고 자기가격 탄력성(ϵ_{ii})은 $i=j$ 인 Allen의 대체탄력성에 생산요소 i 의 비용비중을 곱한 값으로, 이는 요소 자체의 가격 반응도를 의미한다. 음(-)의 부호를 가질 때 해당 생산요소에 대한 수요 법칙이 성립함을 시사한다.

또한 다른 요소 간 수요의 가격탄력성은 교차가격 탄력성(ϵ_{ij})으로 명명하며 생산요소 j 의 가격 1% 변화에 따른 생산요소 i 의 수요변화율을 의미한다. 이는 가격 변화에 대한 수요의 상대적 민감도를 나타낸다.

자기가격 탄력성과 교차가격탄력성(ϵ_{ii} , ϵ_{ij})의 각각에 대한 계산식은 아래와 같다.

· 자기가격탄력성

$$\epsilon_{ii} = \sigma_{ii}s_i \text{ where } \sigma_{ii} = \frac{\delta_{ii} + s_i^2 - s_i}{s_i^2} \quad (2)$$

· 교차가격탄력성

$$\epsilon_{ij} = \sigma_{ij}s_j \text{ where } \sigma_{ij} = \frac{\delta_{ij} + s_i s_j}{s_i s_j} \quad (3)$$

본 연구는 분석결과의 직관적 해석을 위해 수요의 가격탄력성의 추정된 계수를 바탕으로 ICT 자본 축적에 따른 에너지 대체효과를 에너지 소비 민감도($\eta_{i,ICT}$)를 산출을 통해 제시하였다. 이는 표준적인 가격 대체탄력성 개념을 확장하여 자본량 변화의 효과를 직관적으로 해석하기 위함이며, ICT 자본 축적이 1% 증가할 때, 각 에너지원(i)의 사용량이 얼마나 변화하는지를 의미한다. 구체적으로는 추정된 대체탄력성 값을 바탕으로 ICT 자본 가격 1% 변화에 따른 에너지원($i=E_C, E_O, E_E, E_C$)의 교차가격탄력성($\epsilon_{i,ICT}$)을 산출하고, 이를 ICT 자본의 자기가격탄력성($\epsilon_{ICT,ICT}$)으로 정규화($\eta_{i,ICT}=\epsilon_{i,ICT}/\epsilon_{ICT,ICT}$)하였다.

이 값이 음(-)이면 ICT 자본 투자가 해당 에너지 소비를 줄이는 대체효과가 있음을 의미하고, 양(+)이면 디지털 전환으로 인한 전력화 현상이나 구조적 수요 유발로 인해 에너지 소비를 동반 상승시키는 보완 관계가 있음을 시사한다.

2. 분석 자료 및 범위

본 연구를 수행하기 위해서는 산업별 ICT 자본, 비ICT 자본, 노동, 에너지(석탄·석유·전력·가스)의 비용 및 가격자료가 필요하며, 관련 자료는 한국생산성본부(Korea Productivity Center, 이하 KPC)의 「총요소생산성(Korea Industrial Productivity, 이하 KIP) DB」, 한국은행 경제통계시스템에서 제공

하는 「산업연관표」, 통계청의 「광업제조업조사」, 한국에너지공단의 국가온실가스종합정보시스템(National GHG Emission Total Information System, 이하 NETIS)에서 제공하는 「산업부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계」 자료를 활용하였다.

본 연구는 분석 자료 간의 시계열적 정합성과 가용성을 고려하여 2010년부터 2020년까지를 분석 범위로 설정하여 업종별 패널 데이터를 구축하였다. 분석단위는 한국표준산업분류(KSIC) 제조업 기준을 준용하되, KIP DB와 온실가스정보시스템의 산업분류기준을 종합하여 정책 논의와 연계 가능하도록 총 17개 산업분류로 설정하였다.

첫째, 자본변수 구축을 위해서는 KPC의 「KIP DB」와 한국은행의 「시장금리 지표」를 활용하였다. 특히 본 연구는 자본 비용변수를 구축하는 과정에서 별도의 ICT 자본 지출 데이터가 직접 존재하지 않는 데이터상의 한계를 보완하기 위해, KPC의 KIP DB에서 제공하는 ICT 및 비ICT 실질 자본스톡 자료에 자본의 사용자 비용 계수(감가상각률+자본수익률)¹⁾를 적용하여 자본보수를 역산하여 산정하였다. KPC가 제시하는 ICT 자본과 비ICT자본을 분류하기 위한 기준은 아래 <표 1>과 같다.

<표 1> ICT 자본 분류

분류	자산명
ICT 자본	컴퓨터 장비, 통신 장비, 소프트웨어
비ICT 자본	주거용 건물, 비주거용건물, 구축물, 운수 장비, 기타 기계 및 장비, 1차 상품, 기타 유형고정자산, 기타 무형고정자산

자료: 한국생산성본부 KIP DB 구축근거를 활용하여 저자 재구성

이때 감가상각률은 「KIP DB」의 자산별 표준 수치를 준용하였으며, 자본의 기회비용을 의미하는 자본수익률은 한국은행의 경제통계시스템(ECOS)에서 제공하는 「시장금리 지표」 내 국고채(3년) 수익률을 활용하였다. 자본 가격은 앞서 산출된 자산군별 총 자본보수(비용)를 해당 자산의 실질 자본스톡(물량)으로 나누어 도출하는 내생적 단위 가격 방식을 적용하였다.

1) Jorgenson(1963)의 '자본의 사용자 비용(User Cost of Capital)' 개념에 근거.

둘째, 노동변수 구축을 위해서는 통계청의 「광업·제조업조사」를 활용하였다. 노동 비용은 「광업·제조업조사」에서 제공하는 업종별 급여액 데이터를 활용하였고, 노동 가격은 앞서 파악된 급여 총액을 종사자 수(총 노동 투입량)으로 나눈 연간 실질 임금 수준으로 정의하였다. 이러한 방식은 노동 시장의 일반적인 임금 지수를 사용하는 대신, 개별 산업의 노동 생산성과 고용 구조가 반영된 실질적인 노동 투입 단가를 모형에 투영할 수 있게 한다.

셋째, 에너지 변수는 한국은행 「산업연관표」와 한국에너지공단 NETIS에서 제공하는 「산업부문 온실가스 배출량 조사」를 결합하여 구축하였다. 석탄, 석유, 전력, 가스로 세분화된 에너지원별 비용은 한국은행의 산업연관표에서 '석탄 및 석탄제품', '석유제품', '전력', '도시가스'의 중간투입액을 해당 산업의 석탄, 석유, 전력, 가스의 비용으로 정의하였다. 이는 생산 과정에서 해당 에너지원을 소비하기 위해 지불한 실제 지출액을 의미한다. 그리고 각 연도별 산업연관표의 화폐 단위 차이를 통제하기 위해, 생산자물가지수를 적용하여 2020년 기준 불변가격으로 실질화하였다. 에너지 가격은 에너지원별 비용(지출액)을 NETIS에서 제공하는 업종별 에너지원별 실질 에너지 소비량(TOE)으로 나누어 단위당 에너지 가격을 도출하였다.

IV. 분석 결과

1. 기초 통계 및 제조업 업종별 디지털(경제), 에너지·환경 특성 진단

본 연구의 실증 분석에 활용된 산출량 및 요소 가격 변수는 분포의 안정성을 확보하고 이분산성을 완화하기 위해 자연로그(ln)로 변환하여 활용하였다. 분석 대상 기간(2010-2020년) 동안의 주요 변수에 대한 기초통계량 분석 결과는 <표 2>와 같다.

먼저 투입요소별 비용 비중(s_i)을 살펴보면, 제조업 전반의 ICT 자본 비용 비중(s_{ICT})은 평균 20.3%를 기록하였다. 이는 비ICT 자본(34.0%)이나 노동(30.0%)에 비해 낮은 수준이나, 최대치(0.470)와 표준편차(0.112)를 통해 업

〈표 2〉 주요 변수의 기초통계량 (2010~2020년, 17개 제조업)

변수명	변수	정의 및 단위	평균	표준편차	최소값	최대값
산출량	$\ln Y$	총산출량 (실질 가격, 로그)	18.1296	0.7716	16.4046	19.6271
자본 가격	$\ln P_{K,ICT}$	ICT 자본 (로그)	-2.7874	0.6576	-3.9033	-1.2947
	$\ln P_{K,NICT}$	비ICT 자본 (로그)	-2.0441	0.5594	-3.7750	-0.3252
에너지 가격	$\ln P_{EC}$	석탄 (원/TOE, 로그)	5.7568	1.1442	5.5706	9.5424
	$\ln P_{EO}$	석유 (원/TOE, 로그)	8.6962	1.4870	4.3532	12.4919
	$\ln P_{EE}$	전력 (원/TOE, 로그)	6.8499	0.3924	5.4341	8.1265
	$\ln P_{EG}$	가스 (원/TOE, 로그)	6.2609	1.0633	2.9893	9.5875
비용 비중	s_{ICT}	ICT 자본 (0~1)	0.2033	0.1120	-0.0080	0.4704
	s_{NICT}	비ICT 자본 (0~1)	0.3401	0.1024	-0.0314	0.6464
	s_L	노동 (0~1)	0.2999	0.1357	0.0441	0.7169
	s_C	석탄 (0~1)	0.0175	0.0531	0.0000	0.2645
	s_O	석유 (0~1)	0.0770	0.1347	0.0071	0.6313
	s_E	전력 (0~1)	0.0509	0.0351	0.0138	0.2001
	s_G	가스 (0~1)	0.0106	0.0088	0.0011	0.0497

주 1: \ln 표기는 해당 변수의 자연로그 변환 값을 의미함

주 2: 비용비중(s_i)은 총비용 대비 해당 요소 투입액 비율을 의미

주 3: 표본은 2010~2020년 기간의 한국 제조업 17개 세부 산업 패널자료를 기반으로 함

자료: 한국생산성본부 「KIP DB」, 한국은행 「산업연관표」, 통계청 「광업·제조업조사」, 한국에너지공단 「산업부문 온실가스 배출량 조사」

증별 디지털 전환의 속도와 집약도에 상당한 이질성이 존재함을 확인할 수 있다.

특히 ICT 자본 가격($\ln P_{K,ICT}$)은 비ICT 자본 가격에 비해 평균적으로 낮은 수준을 형성하고 있으며, 최대값(-1.2947)과 최소값(-3.9033) 사이에 상당히 큰 폭의 편차가 존재한다. 이는 분석 대상 기간 내에 ICT 자산의 가격이 역동적으로 변화했음을 시사하며, 상대적으로 저렴해진 ICT 자본 투입의 확대는 향후 탄력성 분석에서 에너지를 대체하는 주요한 경제적 유인이 될 수 있다.

산출량($\ln Y$) 변수는 산업 간 규모 차이를 반영하고 있으나, 표준편차가 0.77로 과도하게 크지 않아 전반적으로 안정적인 분포를 보였다. 에너지원 별 가격의 경우 석탄과 석유가 전력 및 가스에 비해 상대적으로 높은 가격 변

동성을 나타냈다. 에너지 비용 비중 측면에서는 석유(7.7%)와 전력(5.1%)이 일정 수준의 비중을 유지하고 있는 반면, 석탄(1.7%)과 가스(1.1%)는 평균 비중이 낮게 나타났다. 특히 일부 산업에서 특정 화석연료의 사용 비중이 전무하거나 낮은 것은 산업별 에너지 투입 구조의 강한 이질성을 보여주며, 이는 향후 디지털 전환에 따른 에너지 소비 최적화 경로가 업종별로 차별화되어 전개될 것임을 뒷받침한다.

〈표 3〉 업종별 에너지원별 온실가스 배출현황

(단위: 천톤CO₂, %)

산업분류	온실가스 배출량				산업 내 에너지원 별 배출 비중			
	총	산업간 비중	변화 추세	10년간 변화량	석탄	석유	전력	가스
음식료품 및 담배 제조업	9,181	2.8	↗	61.5	1.4	11.0	62.5	25.1
섬유 및 가죽제품 제조업	4,081	1.3	↘	-9.3	1.2	16.6	72.5	9.8
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	10,173	3.1	↗	5.9	0.0	13.7	77.0	9.3
석탄 및 석유제품 제조업	33,916	10.4	↗	5.3	0.0	80.9	14.8	4.3
화학물질 및 화학제품 제조업	61,961	19.1	↗	43.7	3.0	51.3	40.7	4.9
의약품 및 의료물질 제조업	1,207	0.4	↗	135.2	0.0	0.7	78.5	20.7
고무제품 및 플라스틱제품	5,708	1.8	↗	30.5	0.0	2.6	77.8	19.6
비금속광물제품 제조업	6,299	1.9	↘	-69.3	42.2	24.2	27.5	6.1
1차 금속제품 제조업	131,518	40.5	↗	45.2	81.4	1.0	13.1	4.5
금속제품 제조업	12,276	3.8	↗	101.6	0.1	2.8	91.6	5.5
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	26,145	8.0	↗	76.3	0.0	1.0	92.0	7.0
정밀기기 제조업	957	0.3	↗	116.2	0.1	8.9	85.7	5.2
전기장비 제조업	5,005	1.5	↗	201.3	0.0	0.7	90.8	8.5
기계 및 장비 제조업	6,285	1.9	↗	133.1	0.0	3.8	92.4	3.8
자동차 제조업	7,283	2.2	↗	6.8	0.0	5.0	74.8	20.2
기타 운송장비 제조업	2,078	0.6	↗	16.7	0.0	7.3	83.1	9.5
기타 제조업	735	0.2	↘	-46.1	3.2	2.9	87.1	6.8
총계	324,808	100.0	↗	854.4	-			

자료: 온실가스종합정보센터(GIR), 한국에너지공단 「국가온실가스종합정보시스템(NETIS)」 자료를 바탕으로 저자 재구성

다음으로 제조업 내부의 산업별 온실가스 배출 구조를 살펴보면, 1차 금속 제품 제조업(석탄 81.4%) 비금속광물제품 제조업, 석탄·석유 정제 산업(석유

80.9%) 등 일부 산업군이 전체 제조업 배출량의 상당 부분을 차지하고 있다 (<표 3> 참조). 이는 해당 산업군이 고열·열처리 공정 중심의 생산 특성상 탄소 집약도가 높은 에너지원에 의존하기 때문이다.

<표 4> 업종별 ICT 자본스톡 및 종사자수 현황

(단위: 십억원, 천명, %)

산업분류	자본스톡					종사자수		
	2020년				10-20년 ICT 자본 증감률	2020년		10-20년 증감률
	총	ICT 자본	비ICT 자본	ICT 자본스톡 비중		종사자 수	비중	
음식료품 및 담배 제조업	72,216	5,878	66,338	7.6	75.0	392	9.3	40.4
섬유 및 가죽제품 제조업	46,751	2,894	43,857	5.9	50.4	311	7.4	-1.2
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	51,476	3,140	48,336	5.7	80.6	202	4.8	19.9
석탄 및 석유제품 제조업	30,030	1,076	28,953	3.2	103.1	12	0.3	3.6
화학물질 및 화학제품 제조업	112,319	15,588	96,731	12.4	74.4	189	4.5	49.1
의약품 및 의료물질 제조업	20,843	2,893	17,951	12.5	116.2	55	1.3	80.6
고무제품 및 플라스틱제품	83,528	5,528	78,000	6.2	78.5	292	7.0	26.7
비금속광물제품 제조업	54,460	3,604	50,855	6.2	60.7	121	2.9	17.8
1차 금속제품 제조업	170,964	7,011	163,953	3.7	106.6	165	3.9	14.6
금속제품 제조업	100,805	9,569	91,236	8.9	103.6	471	11.2	21.5
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	784,465	181,653	602,812	21.1	116.6	400	9.5	-1.8
정밀기기 제조업	20,914	6,361	14,553	27.9	112.3	147	3.5	68.7
전기장비 제조업	51,109	12,144	38,965	21.6	94.2	284	6.8	45.2
기계 및 장비 제조업	138,946	23,731	115,214	15.7	97.4	506	12.1	37.6
자동차 제조업	168,905	31,514	137,391	17.0	95.2	361	8.6	26.1
기타 운송장비 제조업	74,511	13,902	60,609	17.0	94.5	130	3.1	-15.4
기타 제조업	17,737	1,076	16,661	5.6	89.0	156	3.7	29.3
총계	1,999,980	327,564	1,672,416	100.0	104.4	4,196	100.0	18.7

자료: 통계청 「광업제조업조사」, 한국생산성본부(KPC) 「생산성 통계 DB」 자료를 바탕으로 저자 산출 및 재구성

또한 국내 제조업의 디지털화 수준은 업종별 공정 특성에 따라 현저한 격차를 보이고 있다. 정밀기기(27.9%), 전기장비(21.6%), 전자부품·컴퓨터(21.1%) 등 첨단 주력·기술집약 산업군은 이미 매우 높은 ICT 자본 집적도와

자동화 수준을 달성한 것으로 나타났다(〈표 4〉 참조). 반면, 제조업 전체 온실가스 배출량이 집중되어 있는 에너지 다소비 산업군인 석탄 및 석유제품 제조업(3.2%)과 1차 금속제품 제조업(3.7%), 비금속 광물제품 제조업(6.2%), 그리고 섬유 및 가죽제품 제조업(5.9%), 목재, 종이, 인쇄 및 복제 제조업(5.7%), 고무제품 및 플라스틱제품 제조업(6.2%) 등 중소·범용 가공 산업군은 상대적으로 ICT 자본 비중이 낮아 아직 디지털 전환의 초기 단계에 머물러 있다.

업종별 온실가스 배출 수준과 디지털화 수준을 대조하여 분석해보면, 디지털 전환의 양적 확대가 모든 산업군에서 즉각적인 탄소 감축으로 직결되고 있음을 확인가능하다. 이는 디지털 성숙도가 높은 산업일지라도 공정의 특성에 따라 전력 소비가 수반되는 등 감축 경로가 상이할 수 있음을 시사하며, 실효성 있는 국가 탄소중립 실현을 위해서는 보편적인 디지털 기술 보급 정책에서 탈피하여, 디지털 전환의 탄소 감축 잠재력이 큰 산업군을 우선적으로 식별해야 함을 의미한다.

본 연구는 ‘맞춤형 디지털 전환’의 실효적 추진 방안을 마련하기 위해, 각 산업의 온실가스 배출현황 및 경제 특성(〈표 3〉 및 〈표 4〉 참조)을 종합하여 아래 〈표 5〉의 세 가지 산업군집으로 분류하였다. 이러한 분류는 산업별 디지털화 수준과 온실가스 배출량 사이의 구조적 차이를 반영하여, 각 군집에 최적화된 탄소중립 이행 경로를 설계하는 데 목적이 있다.

〈표 5〉 한국 제조업의 특성별 산업군 분류

산업군	세부 업종	주요 산업 공정	온실가스 배출 구조	디지털화 수준
에너지 다소비 산업군	1차 금속, 비금속광물, 석탄 및 석유제품, 화학물질 및 제품	고온·열처리 공정, 원료 추출 및 정제 공정	석탄·석유 등 고탄소 화석연료 의존도 극대화 (제조업 배출의 약 70% 집중)	약 3~12%
첨단 주력·기술집약 산업군	전자부품·컴퓨터, 정밀기기, 전기장비, 기계 및 장비, 자동차, 기타 운송장비	부품 조립, 정밀 가공, 자동화 라인 운용	전력 기반 공정 중심; 지능화에 따른 전력소비 및 간접배출 발생 가능성 상존	약 15~27%
경공업, 범용 가공 산업군	음식료품, 섬유, 목재·종이, 의약품, 고무 및 플라스틱, 금속제품, 기타 제조업	단순 가공, 소규모 설비 가동, 다품종 소량 생산	전력 및 가스 중심의 분산된 배출 구조; 개별 업종별 배출 규모는 상대적으로 작음	약 5~12%

자료: 저자 작성

2. ICT 자본이 에너지 전환 및 온실가스 배출에 미치는 영향

본 연구에서는 CO₂배출량 산정의 정밀성을 확보하기 위해, 온실가스종합정보센터(GIR)의 국가 고유 배출계수와 에너지법 시행규칙의 에너지열량 환산기준을 통합 적용한 한국에너지공단 NETIS의 「산업부문 온실가스 배출량 조사」 자료를 활용하였다.

본 연구는 산업별 ICT 자본 투입이 에너지 대체에 미치는 영향을 먼저 규명하였으며(〈표 6〉 참조), 이를 근거로 ICT 자본 1% 증가함에 따른 탄소 총 배

〈표 6〉 업종별 에너지 소비 총량(2020년 기준) 및 ICT 자본 1% 증가의 에너지 대체 효과
(단위: toe)

산업분류	에너지 소비 총량(2020년 기준)*				에너지 대체효과			
	석탄	석유	전력	가스	석탄	석유	전력	가스
음식료품 및 담배 제조업	30,300	347,000	987,400	983,600	-0.0089	0.0670	-7.2417	-2.1656
섬유 및 가죽제품 제조업	9,600	189,300	479,100	159,000	0.1036	3.5325	-3.2139	-0.2829
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	0	307,400	1,033,500	312,500	-1.7129	7.7454	-11.9783	-0.8229
석탄 및 석유제품 제조업	0	30,748,300	915,600	664,000	-0.2431	-12.6346	7.7815	0.1493
화학물질 및 화학제품 제조업	420,700	26,386,600	4,109,300	1,245,300	0.0189	-3.4488	0.6637	0.0517
의약품 및 의료물질 제조업	0	2,900	161,700	107,200	-0.0000	-0.4488	-0.1265	-0.0187
고무제품 및 플라스틱제품	100	51,500	795,100	479,600	0.0004	2.5318	0.1612	2.0232
비금속광물제품 제조업	2,156,700	1,383,500	1,021,400	563,900	1.6494	-9.9543	2.6719	1.2366
1차 금속제품 제조업	26,988,000	413,900	3,212,800	2,787,600	-14.8185	-3.3162	10.5170	-4.8436
금속제품 제조업	2,300	127,400	2,102,800	313,700	-0.0224	-3.8648	1.7862	-1.5601
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	0	97,200	4,449,300	846,400	0.0000	0.4783	0.0477	-0.5418
정밀기기 제조업	200	31,000	140,600	21,000	0.0177	1.5517	0.5603	0.5959
전기장비 제조업	200	11,600	820,100	191,500	0.0034	0.0299	3.2563	-0.4590
기계 및 장비 제조업	500	89,500	1,088,800	106,900	0.0001	-2.0147	0.5272	-0.5525
자동차 제조업	0	129,900	1,023,600	691,700	0.0008	-0.4108	-0.0737	-0.0077
기타 운송장비 제조업	0	54,300	325,300	92,800	-0.0000	-0.8477	-0.2666	-0.0139
기타 제조업	9,100	13,600	202,100	37,100	0.0195	0.2887	0.0059	-0.0465
총계	116,504.10	64,361.00	121,443.90	20,483.60	-	-	-	-

* ICT 변화에 따른 변화량이 아닌 2020년 시점 제조업 에너지 소비 현황을 의미하며 산업별 주력 에너지원을 파악하기 위한 정보

주 1: 본 연구에서 산출된 *에너지 대체효과는 ICT 자본 스톡의 1% 변화가 개별 에너지원(석탄, 석유, 전력, 가스) 수요에 미치는 백분율 변화를 의미하는 민감도 지수로 정의

주 2: 2020년 기준 에너지 사용량이 500,000toe 이상인 산업의 에너지 사용량, 대체효과 탄력성의 절대값이 1을 초과하는 산업의 대체효과 값에 볼드 표시

주 3: 주력 에너지원(에너지 소비 총량 500,000toe 이상)에 대한 에너지 대체효과가 높은 경우 음영 표시
자료: 한국에너지공단 「온실가스정보시스템(NETIS)」 자료 및 분석결과를 종합하여 저자작성

〈표 7〉 ICT 자본 1% 증가함에 따른 탄소 총배출량 변화

(단위: 천tCO₂)

산업분류	탄소 배출 변화량				총계
	석탄	석유	전력	가스	
음식료품 및 담배 제조업	-0.01	0.62	-379.76	-45.68	-42.48
섬유 및 가죽제품 제조업	0.04	20.59	-81.78	-0.97	-6.21
목재, 종이, 인쇄 및 복제업	-0.00	75.73	-657.47	-5.47	-58.72
석탄 및 석유제품 제조업	0.00	-3,360.92	378.38	2.10	-298.04
화학물질 및 화학제품 제조업	0.30	-948.40	144.84	1.37	-80.19
의약품 및 의료물질 제조업	0.00	-0.04	-1.09	-0.04	-0.12
고무제품 및 플라스틱제품	0.00	3.56	6.80	21.56	3.19
비금속광물제품 제조업	137.30	-475.88	144.94	14.90	-17.87
1차 금속제품 제조업	-15,761.48	-44.56	1,794.39	-286.00	-1,429.76
금속제품 제조업	-0.00	-13.36	199.46	-10.52	17.56
전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업	0.00	1.24	11.26	-9.71	0.28
정밀기기 제조업	0.00	1.21	4.18	0.27	0.57
전기장비 제조업	0.00	0.01	141.81	-1.87	14.00
기계 및 장비 제조업	0.00	-4.82	30.49	-1.31	2.44
자동차 제조업	0.00	-1.48	-4.01	-0.11	-0.56
기타 운송장비 제조업	0.00	-1.29	-4.60	-0.03	-0.59
기타 제조업	0.01	0.10	0.06	-0.04	0.01
총계	-15,623.84	-4,747.68	1,727.91	-321.54	-1,896.51

자료: 저자작성

출량 변화를 도출한다. 더불어 분석의 유의성을 확보하기 위해, 〈표 6〉에서 산업별 주력 에너지원(에너지 소비 총량이 500,000toe 이상인 경우)을 식별하고, 이에 대한 에너지 대체효과가 높은 경우(절대값 1 이상)에 해당하는 산업 부문을 주된 해석 대상으로 삼았다.

〈표 7〉의 온실가스 배출 변화량은 도출된 에너지원별 소비 변화량에 NETIS가 공식 채택하고 있는 직접 및 간접 탄소배출계수를 적용하여 환산한 결과이다. 이는 에너지원별 투입 구조의 변화가 환경적 성과로 전이되는 메커니즘을 반영한 것이며, 특히 전력 소비에 따른 간접 배출을 포함하는 결과로 볼 수 있다.

분석 결과 ICT 자본 1% 증대는 대부분의 제조업 업종에서 석탄·석유 중심의 전통적 에너지 투입을 축소하는 동시에, 전력 사용량을 확대하는 방향으로 작용하여, 디지털 전환이 에너지 구조 전환 과정에 영향을 미친다는 점을

보여준다(〈표 6〉 참조).

더불어 〈표 6〉과 〈표 7〉의 분석결과를 종합하여 도출한 각 산업군별 정책적 함의는 다음과 같다.

첫째, 화석연료(석탄, 석유) 의존도가 높은 에너지 다소비 산업군에서는 주력 에너지원에 대한 ICT의 강력한 대체 효과가 대규모 탄소 감축으로 이어졌다.

우선 석탄 소비 총량이 26,988,000toe에 달하는 1차 금속제품 제조업은 석탄 대체 탄력성이 -14.8185로 분석 대상 업종 중 가장 높게 기록되었으며, 이를 통해 -15,761.48천tCO₂의 온실가스 저감 잠재량을 보이며 제조업 전체 감축 성과를 견인하였다. 다만 해당 산업에서 도출된 높은 대체성과 감축 효과는 업종 특성상 비에너지(원료용) 소비분이 포함된 NETIS 데이터의 통계적 특성에 기인한 측면이 있다. 따라서 본 수치는 단순한 연료 연소량의 절감만이 아니라, ICT 도입에 따른 공정 지능화 및 최적화가 원료와 연료를 아우르는 탄소 집약적 투입 구조를 저탄소 체계로 전환시키는 기술적 충격의 강도로 해석하는 것이 타당하며, 실제 적용 시 이러한 산업 구조적 특성을 고려한 해석이 요구된다.

더불어 주력 에너지원이 석유인 석탄 및 석유제품 제조업(소비 총량 30,748,300toe)과 화학물질 및 화학제품 제조업(소비 총량 26,386,600toe) 역시 각각 -12.6346 및 -3.4488의 유의미한 대체 효과를 나타내며 이에 따라 각각 -3,360.92천tCO₂와 -948.40천tCO₂의 배출량을 저감한 것으로 나타났다.

둘째, 목재·종이(1,033,500toe) 및 음식료품(987,400toe) 산업 등 경공업, 범용 가공 산업군에서는 전력을 주력 에너지원으로 사용하고 있고, ICT 도입에 따라 각각 -11.9783과 -7.2417의 높은 대체 효과를 보인다. 그리고 이러한 전력 소비 최적화를 통해 각각의 산업에서는 -657.47천tCO₂와 -379.76천tCO₂를 저감할 수 있다.

셋째, 전기장비 제조업과 같은 첨단 주력·기술집약 산업군에서는 주력 에너지원인 전력(820,100toe)에 대한 대체효과가 3.2563으로 양(+)의 값을 나타낸다. 이는 디지털화에 따른 공정 지능화 및 자동화(공정 온도 관리, 반응

조건 조정, 에너지 모니터링 등) 설비 확충이 노동력을 대체함과 동시에 전력 수요가 수반되는 구조적 특성을 반영하며, 그 결과 전력 소비에 따른 온실가스가 141.81천tCO₂ 증가하는 현상이 나타났다.

결과적으로, 지능화 공정 확산으로 전력 사용에 따른 온실가스 총배출량이 1,727.91천tCO₂ 증가하였음에도 불구하고, 화석연료인 석탄(-15,623.84천tCO₂)과 석유(-4,747.68천tCO₂) 사용에 따른 온실가스 배출 감소폭이 이를 크게 상회하여 제조업에서의 ICT 자본 투자는 전체 기준 -1,896.51천tCO₂의 온실가스 순감축 효과를 보인다. 이는 디지털 전환이 산업 전반의 탄소중립 실현을 위한 실질적 기제로 작동하고 있었다.

V. 결론 및 정책 시사점

본 연구는 2010년부터 2020년까지 한국 제조업 17개 업종을 대상으로 ICT 자본 투입이 에너지 소비 구조에 미치는 영향을 실증 분석하였다. 분석 결과, ICT 자본은 제조업 전체적으로 약 1,896.51천tCO₂의 온실가스 감축을 견인하였으나, 그 내부 구조는 업종별로 극명한 이질성을 나타냈다. 본 연구의 시사점은 다음과 같다.

첫째, 분석결과는 보편적인 ICT 보급 정책에서 벗어나, 업종별 에너지 대체 탄력성을 고려한 정책 설계의 필요성을 실증 제시하였다는 점에서 학술적 가치가 있다. 특히 철강, 석유화학 등 화석연료 의존도가 높은 '에너지 다소비 산업군'에서는 ICT 자본 투입이 석탄과 석유를 강력하게 대체하여 공정 지능화와 정밀 모니터링이 비효율적이었던 기존 화석연료 연소 과정을 최적화하고 있는 것으로 나타났다. 이에 반해 전자부품, 자동차 등 '첨단 주력·기술집약 산업군'에서는 ICT 자본과 전력 소비간에 보완 관계가 나타나, 디지털 전환이 오히려 간접 배출량을 늘리는 '전력화 역설(Rebound Effect)' 현상이 관측되었다.

둘째, 본 연구는 실증 분석에서 도출한 업종별 이질성을 바탕으로, 2025년 출범한 기후에너지환경부가 한국 제조업의 탄소중립 실현을 위해 고려해야

할 두 가지 정책 가이드라인을 제시한다.

먼저 ICT의 화석연료 대체 효과가 확인된 업종을 중심으로 탄소 저감을 위한 선택과 집중이 필요하다. 특히 정부는 탄소 규제 대응이 시급한 5대 업종(배터리, 자동차, 가전, 철강·알루미늄, 석유)을 중심으로 탄소 데이터 플랫폼 구축을 통한 관리를 추진하고 있기 때문에, 본 연구가 도출한 업종별 ICT-에너지 대체 관계 수치를 플랫폼의 성과 예측 시뮬레이션에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 실증 분석 결과 화석연료(석탄, 석유) 대체 탄력성이 높은 에너지 다소비 업종을 대상으로 AI 기반 연소 최적화 및 저탄소 원료 전환 시뮬레이션 등 고배출 공정을 직접 혁신할 수 있는 디지털 솔루션을 '국가 탄소중립 핵심기술'로 지정하고, 세계 혜택과 R&D 투자를 대폭 확대하여 연료 전환의 속도를 높일 필요가 있다.

다음으로 디지털화에 따른 '전력화 리스크'에 대응하기 위한 에너지 효율화 전략이 병행되어야 한다. ICT 자본과 전력 소비 간의 보완 관계가 뚜렷한 첨단 주력·기술집약 산업군의 경우, 디지털 전환이 전력 수요 폭증으로 이어지지 않도록 친환경·에너지 절감형 제조 설비에 대한 투자 확대를 유도해야 한다. 에너지경영시스템(FEMS) 고도화와 더불어, 고효율 설비 교체 및 RE100 이행 지원을 패키지로 제공함으로써 디지털화의 편익이 전력 소비 증가로 상쇄되지 않도록 정책적 안전장치를 강화해야 한다.

셋째, 본 연구에서 활용한 데이터의 한계점을 보완하기 위한 향후 연구 과제를 고려할 수 있다. 우선 본 연구는 자본(K), 노동(L), 에너지(E) 생산체계를 바탕으로 ICT 자본과 에너지원 간의 대체 관계를 실증 분석하였으나, 활용된 데이터의 특성상 비에너지(원료용) 소비분이 포함되어 있어 에너지와 원자재 간의 구분이 모호한 측면이 존재한다. 또한, 디지털화 수준을 측정하기 위해 활용한 ICT 자본 데이터는 DX의 정량적 투입 규모를 나타내나, 이것이 실제 공정 내 AI 활용이나 데이터 분석 역량 등 질적 성숙도와 반드시 비례하는 것은 아니다. 따라서 본 분석 결과를 해석함에 있어 비에너지 소비분 포함에 따른 탄력성 수치의 영향과, 실제 디지털 기술의 활용도에 따른 질적 차이가 존재할 수 있음에 유의할 필요가 있다.

이러한 한계를 보완하기 위해 향후 연구에서는 투입 요소를 보다 세분화하여 원자재(M) 항목이 독립적으로 구성된 KLEM(Capital, Labor, Energy, Materials) 체계를 구축함으로써, 연료 연소분과 원료 투입분을 엄밀히 분리한 분석을 수행할 필요가 있다. 나아가 본 연구의 분석 결과를 IASA(International Institute for Applied Systems Analysis)의 통합 평가 모델(IAM) 등 공정 전반의 물질 흐름을 시뮬레이션하는 모델의 주요 파라미터로 적용하거나, 국내 제조업의 지역별 이질성을 반영한 후속 논의를 병행함으로써 보다 정교한 탄소중립 시나리오와 실효성 있는 정책적 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

■ 참고문헌 ■

- 관계부처 합동, 2022, 「대한민국 디지털 전략」, 과학기술정보통신부 발표자료 (2022.09.27).
 광업제조업조사, 2010~2020, 통계청.
 김수일, 2006, 「산업별 에너지 수요의 가격 및 대체 탄력성 추정」, 『에너지경제연구』, 5(2), pp.101-125.
 김지효·허은녕, 2014, 「ICT 자본 투입이 노동 및 에너지 수요에 미치는 영향」, 『자원·환경경제연구』, 23(1), pp.91-132.
 박창수, 2005, 「한국 제조업의 에너지 수요분석: 세부 업종별 패널 자료를 이용한 분석」, 『에너지경제연구』, 4(1), pp.69-90.
 산업통상자원부, 2021, 「2050 탄소중립 산업전략」.
 산업통상자원부, 2022, 「에너지법 시행규칙 [별표] 에너지열량 환산기준」, 국가법령정보센터.
 온실가스종합정보센터, 2023, 「2023 국가 온실가스 인벤토리 보고서(1990~2021)」, 환경부.
 중소벤처기업부, 2023, 「신(新) 디지털 제조혁신 전략」, 관계부처 합동 보도자료.
 한국생산성본부, 2010~2020, 「KIP(Korea Industrial Productivity) DB」.
 한국은행, 2010~2020, 「산업연관표(Input-Output Table)」.
 환경부, 2025, 「탈탄소 녹색문명 전환을 선도하는 기후에너지환경부 출범」, 보도자료 (2025.09.30.), 세종: 환경부 혁신행정담당관실.
 Berkhout, P. H., J. C. Muskens, and J. W. Velthuisen, 2000, "Defining the rebound effect," *Energy Policy*, 28(6-7), pp.425-432.

- Erdmann, L. and L. Hilty, 2010, "Scenario analysis of ICT-enabled energy efficiency," *Journal of Industrial Ecology*, 14(6), pp.826-843.
- Fisher-Vanden, K., G. H. Jefferson, H. Ma, and J. Xu, 2006, "Technology development and energy intensity in China," *Energy Economics*, 28(2), pp.195-213.
- Jaffe, A. B., R. G. Newell, and R. N. Stavins, 2004, "Economics of energy efficiency," *Encyclopedia of Energy*, 2, pp.79-90.
- Jorgenson, D. W., 1963, "Capital Theory and Investment Behavior," *The American Economic Review*, 53(2), pp.247-259.
- Jorgenson, D. W., M. S. Ho, and J. D. Samuels, 2008, "Information Technology and U.S. Productivity Growth: Evidence from a Prototype Industry Production Account," *Journal of Productivity Analysis*, 30(1), pp.15-32.
- Khayyat, N. T., 2014, "Substitutability between ICT and energy: The case of Korea," *Energy Strategy Reviews*, 2(3-4), pp.282-289.
- Lange, S., J. Pohl, and T. Santarius, 2020, "Digitalization and energy consumption: Does ICT reduce energy demand?" *Ecological Economics*, 176, 106760.
- Moyer, J. D. and B. B. Hughes, 2012, "ICT and energy use: Energy efficiency and energy rebound," *Technological Forecasting and Social Change*, 79(7), pp.1334-1345.
- OECD, 2019, *Digitalisation and Productivity*, Paris: OECD Publishing.
- Pindyck, R. S., 1979, "Interfuel substitution and the industrial demand for energy," *The Review of Economics and Statistics*, 61(2), pp.169-179.
- Salahuddin, M. and K. Alam, 2015, "Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia," *Energy Economics*, 52, pp.154-162.
- Schulte, P., H. Welsch, and S. Rexhäuser, 2016, "ICT and the demand for energy: Evidence from OECD countries," *Environmental and Resource Economics*, 63(1), pp.119-146.
- Takase, K. and Y. Murota, 2004, "The impact of IT investment on energy: Japan-US comparison," *Energy Policy*, 32(11), pp.1291-1301.
- Williams, J. H., A. DeBenedictis, R. Ghanadan, A. Mahone, J. Moore, W. R. Morrow, et al., 2012, "The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity," *Science*, 335(6064), pp.53-59.
- Zhang, C. and C. Liu, 2015, "The impact of ICT on CO₂ emissions in China," *Energy Policy*, 81, pp.29-40.

웹사이트

국가법령정보센터, 2024, 『산업 디지털 전환 촉진법』, 대한민국 정부. <https://www.law.go.kr> [접속일: 2025. 11. 25.]

한국에너지공단, 2010~2020, 『산업부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 통계』, 국가온실가스배출량 종합정보시스템(NETIS). <https://netis.energy.or.kr> [접속일: 2025.01.26.]

이영경: 연세대학교에서 도시공학 학·석·박사학위를 취득하고, 한국환경연구원을 거쳐 현재 한국통계진흥원 통계품질센터에서 부연구위원으로 재직중이다. 주요 관심분야는 탄소중립, 기후·에너지, 지역계획, 국토균형발전, 데이터 분석 등이며, 현재 데이터 기반의 통계 품질 관리와 정책 실증 분석을 통해 지속 가능한 국토 환경 조성을 위한 연구에 매진하고 있다(yklee@stat.or.kr).

투 고 일: 2026년 01월 02일
심 사 일: 2026년 01월 24일
게재확정일: 2026년 03월 11일