

2023년 제25회 한국경영학회 융합학술대회

발표 논문

1. 논문제목

(국문) 넷제로 전환 시대의 에너지 및 탄소 생산성: 기업 기술혁신의 효과

(영문) Towards a net-zero world: How do technology innovations affect firms' energy and carbon productivity?

2. 분야: 생산계량/기술경영 (융합)

3. 저자명 및 소속 (국문/영문)

이수열 (전남대학교 경영학과, 교수) Su-Yol Lee (leesuyol@jnu.ac.kr)

임정대 (전남대학교 경영학과, 강사) Jeongdae Yim (jdyim@jnu.ac.kr)

이수진 (전남대학교 경영학과, 석사과정) Sujin Lee (true716@naver.com)

넷제로 전환 시대의 에너지 및 탄소 생산성 : 기업 기술혁신의 효과

(Towards a net-zero world: How technological innovations affect firms' energy and carbon productivity?)

Abstract

기후변화는 세계 경제와 비즈니스 영역에 중대한 영향을 미치는 가장 심각한 현안이다. 기후변화 대응과 경제 성장, 기업 성과의 양립이 어떻게 가능할 것인지 논쟁은 지속되고 있다. 이 연구는 국가와 기업은 넷제로(net-zero) 경제로의 전환에 있어 기술혁신의 역할에 대해 탐구한다. 기업의 기술혁신 활동이 에너지효율성과 탄소생산성에 미치는 효과를 논증하고 실증한 연구이다. 한국의 온실가스에너지 목표관리제와 탄소배출권 거래제 대상 기업의 십년 자료를 분석하였다. 이 연구결과는 첫째, 기술혁신 활동이 에너지효율성과 탄소생산성 개선에 직접 기여를 하고, 둘째, 에너지효율성이 기술혁신이 탄소생산성 미치는 효과를 매개하며, 셋째, 기술혁신의 효과는 에너지다소비 및 온실가스다배출 업종에서 더 두드러진다는 근거를 제시한다. 기술혁신이 에너지, 온실가스, 기업 성과의 동시 달성을 통해 넷제로 경제로 전화하는 데 중요한 역할을 한다는 사실을 확인하 이 연구는 기후변화 대응을 위한 기업의 전략과 실무, 그리고 탄소중립 국가 목표 달성을 위한 탄소정책 수립에 중요한 시사점을 제공한다.

핵심어: 기후변화, 기술혁신, 탄소생산성, 에너지효율성, 매개효과, 업종 조절효과, 배출권거래제

I Introduction

기후변화는 지난 십수 년 동안 경제와 비즈니스 영역에 중대한 영향을 미치는 글로벌 쟁점으로 부상하여 현 세대가 직면한 가장 커다란 도전 과제로 자리잡았다. 2007년 발간된 스텐보고서(The Stern Review)는 기후변화가 세계 경제에 직접적이고 광범위하며 이전까지 경험하지 못한 중대한 영향을 미칠 것이라고 전망했다(Stern, 2007). 최근 조사는 기후변화가 미칠 수 있는 경제적 영향이 세계 총생산(GDP)의 18%에 이를 것으로 예측했는데 이는 세계 경제에 미치는 기후변화의 영향이 시간이 지날수록 급격히 커지고 있음을 보여준다(Guo et al., 2021). 2015년 파리협정은 저탄소 경제(low-carbon economy), 넷제로(net-zero) 경제로의 전환에 중요한 계기가 되었다. 탄소 순(純)배출 제로를 목표로 하는 움직임, 즉 넷제로를 공식 선언한 국가가 2023년 현재 137개

국이며, 포춘 글로벌 500대 기업중 40% 이상이 자발적으로 넷제로 경영 목표를 공표했다(visualcapitalist 웹사이트; climateimpact 웹사이트). 우리나라도 2030년까지 예상배출량 대비 온실가스 37% 감축안을 공표했고 2050년 탄소중립을 공식 선언하였다. 하지만 기후변화 대응과 넷제로 경제로의 전환은 현실적으로 커다란 도전으로 인식된다. 세계 에너지 수요는 지속적으로 증가하고 있어 지속가능성을 지향한 모든 정책을 동원해도 2040년까지 화석연료비중을 60% 이내로 줄일 수 없다는 경고가 있다(IEA, 2018). 각 나라의 경제발전, 산업과 기업의 경쟁력을 저해하지 않으면서 에너지사용과 온실가스 배출을 줄일 수 있는 탈동조화(decoupling) 담론이 중요해진 이유이다(김동구 등, 2019). 특히 한국은 세계 8대 온실가스 다배출국가이자 지난 10년간 온실가스 배출량 증가율이 가장 높은 국가로 저탄소 경제 전환에 저항 관성이 크다(IEA, 2016). 우리나라 산업구조는 1차금속(철강 및 비철금속), 석유화학, 정유, 시멘트 및 유리요업 등 에너지다소비, 온실가스 다배출 업종 중심으로 구성되어 있다. 2021년 기준으로 산업 부문은 국가 온실가스 배출량의 56.0%를 차지한다(온실가스종합정보센터, 2022). 경제성장과 온실가스 저감이라는 탈동조화를 한번도 경험해 보지 못한 우리나라 산업계에게 넷제로 경제로 체질을 바꾸면서도 기업 경쟁력을 잃지 않는 방안은 매우 중대한 도전이다(안영환 등, 2017).

에너지 및 탄소 생산성은 탈동조화를 보여주는 가장 중요한 지표로써 이들 생산성이 향상된다는 것은 넷제로 전환이 순조롭다는 것을 시사한다(Du and Li, 2019; Zhang et al., 2017). 생산성은 일반적으로 투입물 대비 산출물의 비율로 보통 정의되며 국가, 산업, 기업의 경쟁력이나 성과를 평가하는 핵심 지표이다(Gronroos and Ojasalo, 2004). 에너지 및 탄소 생산성은 에너지 사용량 또는 온실가스 배출량 대비 경제 산출을 뜻한다. 경제 산출은 분석 단위에 따라 국내총생산(GDP), 부가가치, 기업 매출 등으로 표현되는데(Ekins et al., 2012; Wu et al., 2014) 이들 생산성이 높다는 것은 동일한 에너지 사용과 온실가스 배출로 더 많은 바람직한 산출을 생산(또는 동일한 산출에서 더 적은 에너지 사용과 온실가스 배출)하고 있다는 의미이며, 그 자체로 탈동조화 성과의 표현과 같다. 핵심 쟁점은 에너지 및 탄소 생산성을 높일 수 있는지 주요 원천이 무엇인지에 있다. 기존 경제구조와 기업 경영 체질은 본질적으로 에너지, 온실가스, 그리고 경제적 산출이 서로 밀접히 엮인 동조화(coupling)에 뿌리를 두고 있다. 이들 연결고리를 끊을 수 있는 방안으로 기술혁신의 역할이 기대되는 이유이다(Du and Li, 2019; Zhang et al., 2017).

기술혁신과 에너지효율, 탄소생산성의 관계에 대한 대표적인 이론으로 포터 가설(the Porter Hypothesis)을 들 수 있다. 에너지와 오염(온실가스 등)은 그 자체로 비효율을 보여주는 신호(signal)이며 자원 생산성을 높이려는 기업의 혁신활동이 환경성과와 경제적 성과, 그리고 기업 경쟁력 개선으로 이어질 수 있다고 논증한다. 환경 성과와 경제 성과의 양립 가능성을 지지하는 주장이다(Porter and Linde, 1995). 기존 연구는 에너지 및 탄소 생산성에 미치는 기술혁신의 효과를 실증적으로 탐구하였지만 아직도 명확한 결론에 도달하지 못하고 있다(Mo, 2023; Sun et al., 2019; Weina et al., 2016). 무엇보다, 대다수 연구는 국가나 산업 단위에서 기술혁신과 생산성 관계를 실증하는데 초점을 맞추었다(예: Fan et al., 2021; Du and Li, 2019; Yan et al., 2012). 또한 기술혁신의 효과를 단순히 온실가스 배출량, 에너지 사용량 감소 차원에서만 다루는 문헌도 다수인데(Erdogan, 2021; Fethi and Rahuma, 2020; Yin et al., 2015; Wang

et al., 2012), 단일 지표를 분석대상으로 하는 이들 문헌은 경제와 환경의 비율로 나타내는 생산성을 다룬 문헌과 혼재되어 있어 시사점을 찾는 과정에서 오해를 일으킬 수 있다. 또한, 국가나 산업수준 분석과 비교할 때 기업 단위에서 기술혁신이 에너지 및 탄소 생산성에 미치는 실증은 상대적으로 소수이다(Mo, 2023; Fan et al., 2017; Cole et al., 2013).

이 연구는 기업의 기술혁신 활동이 에너지 및 탄소 생산성에 미치는 효과를 탐구하고 있다. 한국의 온실가스에너지목표관리제와 탄소배출권거래제 대상 기업을 대상으로 실증 분석을 수행하여 환경, 기후변화와 기업 경쟁력의 양립 가능성에 대한 실증 근거를 제시하고자 한다. 넷제로 전환의 가능자(enablers)로서 기술혁신의 역할에 대해 규명하는 연구이다. 이 연구가 갖는 차별성과 기여는 다음과 같다.

첫째, 이 연구는 기술혁신이 넷제로 탈동조화에 미치는 영향을 에너지효율성과 탄소생산성을 동시에 고려하여 탐구하였다. 에너지 사용량과 온실가스 배출량은 매우 높은 상관관계가 있다는 전제하여 기존 문헌은 일반적으로 기술혁신의 효과를 에너지와 온실가스 중에 하나에 초점을 맞추고 있다. 예를 들어, 에너지 분야 연구는 기술혁신과 에너지효율성의 관계를 다루는 반면(예: Sun et al., 2021; Wurlod and Noailly, 2018; Popp, 2012), 기후변화 분야에서는 온실가스 배출량이나 탄소생산성에 초점을 맞춘다. 이들 문헌은 기술혁신이 제품, 공정, 원료의 효율성을 높여 탄소 생산성을 높이는데 기여한다고 가정한다. 즉, 기술혁신 효과의 매개로 에너지효율성을 전제하고 있지만 이 매개효과를 직접 다루지는 않는다(예: Mo, 2023; Mo, 2022; Hu and Liu, 2016). 이 연구는 에너지효율을 매개로 기술혁신과 탄소 생산성을 연결함으로써 기존의 두 분야의 연구 흐름을 연결하고 있다.

둘째, 이 연구는 산업 특성을 조절변수로 이용하여 기술혁신이 에너지효율성과 탄소생산성에 미치는 효과의 상황 차이를 규명하고 있다. 기존 문헌도 기술혁신이 에너지효율이나 탄소생산성 향상에 미치는 영향이 국가, 산업, 업종에 따라 다를 수 있다는 점을 강조한다(Mo, 2023; Garcia-Quevedo and Jove-Llopi, 2021). 예를 들어, Mo(2023)는 가공형제조, 장치형흐름생산, 조립업종에서 기술혁신의 효과가 어떻게 다른지 규명했다. 기존 연구의 흐름을 따르면 본 연구는 산업 특성의 조절효과를 명확히 구분하는데 초점을 맞추었다. 에너지 다소비, 온실가스 다배출 업종에서 비교 업종에 비해 기술혁신의 효과가 어떻게 유의하게 차이를 보이는지 실증하고 있다.

셋째, 이 연구는 기업과 정책 입안자에게 넷제로 전환과 기업 경쟁력에 대한 의미있는 시사점을 제공한다. 일반적으로 에너지 효율과 온실가스 배출 저감을 다루는 정책 부서에 차이가 있다. 예를 들어 에너지는 산업과 관련된 정책, 온실가스는 환경과 관련된 정책으로 구분되어 정책간 장벽(silo) 문제가 제기된다. 이 연구는 이 두가지 쟁점이 서로 밀접하게 연결되어 있음을 보여준다. 또한 궁극적으로 탄소생산성과 넷제로 전환이 기술혁신을 통한 기업 경쟁력의 원천이 될 수 있는 가능성을 시사한다는 점에서 기업 전략과 경영 실무에 함의가 높다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 에너지효율성과 탄소생산성에 대한 개념과 측

정방법에 대해 서술한 뒤 이 연구의 핵심 내용인 연구모형과 가설을 제시한다. 3장은 연구 방법론을 설명한다. 변수의 정의 및 측정, 표본, 분석 모형을 서술한다. 4장은 분석결과와 토의를 다룬다. 5장은 연구요약, 학술적, 실무적, 정책적 시사점을 정리한다.

II Theoretical Backgrounds and Research Model

2.1 Energy efficiency and carbon productivity

효율성 또는 생산성의 개념과 정의는 아직까지 명확히 합의된 형태로 정리되지 못했지만(Filippini and Hunt, 2015), 일반적으로 투입물 대비 산출물의 비율 관점으로 이해하는데 큰 이견은 없다(Bhattacharyya, 2011). 에너지효율성은 유용한 생산물의 산출을 투입된 에너지로 나눈 비율로 정의되고, 국가나 산업 수준의 에너지효율을 분석할 때는 보통 이 역수인 에너지 집약도(energy intensity) 개념이 사용된다(Shahiduzzman and Alam, 2013). 산출은 분석단위에 따라 다르지만 국가나 산업 수준에서 에너지효율성은 화폐적 단위(예: GDP)를 주로 사용하고 기업 수준 분석에서는 기업 매출 이외에도 물질적 산출(예: 생산량)이 이용되기도 한다(Ang et al., 2015; Ang and Xu, 2013). 유사한 방식으로 탄소생산성은 온실가스 배출량 대비 산출물로 정의되며 역수인 탄소 집약도 용어를 쓰기도 한다(Du and Li, 2019).

문헌은 에너지 및 탄소 성과를 보여주는 생산성을 두 가지 방법으로 측정한다. 첫째는 단일 요소 지표(partial-factor productivity)로 측정하는 방법으로 위에서 언급한 생산성의 기본 정의를 따르는 방식이다. 이 지표는 측정이 쉽고 직관적이라는 장점이 있다(Su and Ang, 2015; Zhou et al., 2010). 생산성 측정 대상의 개별적인 성과를 나타내는 절대지표 특성을 갖는다. 둘째는 총요소 생산성(total-factor productivity)을 측정하는 방법이다. 단일 요소 지표는 에너지 대비 산출, 온실가스 배출 대비 산출의 비율로 측정하기 때문에 산출에 기여하는 다른 요소를 반영하지 못한다는 한계가 있다. 총요소 생산성은 여러 투입, 산출을 동시에 반영할 수 있어 에너지 및 탄소 생산성 향상에 기여하는 잠재적 요인을 종합적으로 고려할 수 있도록 개발되었다. 총요소 생산성은 동일한 투입물 상황에서 가능한 최대 산출을 계산하여 방식으로 비교 대상군의 상대적 효율성을 보여주는 지표이다(Chen et al., 2020). 총요소 생산성을 측정하는 방식도 다양한데 대표적으로 특정 시점의 상대적 생산성을 분석하는 정태적 분석, 생산성 변화를 분석하는 동태적 분석, 그리고 자료포락분석(data envelop analysis: DEA), 확률변경분석(stochastic frontier analysis: SFA) 방법으로 구분된다. 총요소 생산성 접근법을 이용하여 OECD 국가의 상대적 에너지 효율성을 분석한 연구(예: Chen et al., 2021), 국가별 탄소 생산성을 분석한 연구(예: Zaim and Taskin, 2000), 제조 부문 에너지 효율성의 메타연구(Boyd, 2017), 산업 부문 업종별 탄소 생산성 변화를 분석한 연구(예: Mo, 2023)가 수행되었다.

단일 요소 지표에 비해 총요소 생산성 지표는 에너지 및 탄소 생산성에 영향을 미칠 수 있는 다

른 생산 요소를 고려할 수 있다는 장점이 있어 문헌에서 자주 사용된다. 하지만 본 연구는 에너지 효율성과 탄소 생산성 지표로 단일 요소 지표를 사용한다. 이유는 다음과 같다. 첫째, 총요소 생산성은 상대적 효율성이다. 특정 시점의 비교 대상군 중 최대 효율 대비 비효율을 측정하거나(DEA 방법), 투입 대비 예상되는 최대 산출 기준과의 격차를 측정한다(SFA 방법). 투입과 산출의 여러 요소를 고려하고 동시에 여러 개체를 비교하는 것이 장점인 이러한 상대적 효율성 방법은 역설적으로 개별 개체의 생산성을 평가할 때 직관성이 떨어진다. 온실가스 한 단위에서 산출되는 기업의 매출이 이해하기 쉽고 보다 직관적이다. 둘째, 생산성의 영향 요인을 탐구하는 목적의 연구에서 총요소 생산성 방법은 설명 변수를 줄이는 제약이 된다. 예를 들어 탄소 생산성을 SFA 방법으로 분석할 경우 자본, 노동, 에너지를 투입 요소로 포함하고 바람직한 산출(GDP 또는 매출)과 바람직하지 않은 산출(온실가스 배출량)을 비교한다(Mo, 2023). 자본, 노동, 에너지 사용량이 생산성을 측정하는 투입 변수로 모두 포함되면서 개별 개체의 생산성을 설명하는 변수로는 역할을 하지 못하는 경우이다. 셋째, 계량경제 모형을 이용하여 기업의 생산성을 설명할 경우 단일 요소 지표가 갖는 한계를 극복할 수 있다. 예를 들어, 자본, 노동을 포함한 다양한 요인을 통제변수로 구성하면 생산성에 영향을 미칠 수 있는 잠재요인을 반영할 수 있고 동시에 잠재요인의 효과를 걸러냄으로써 주요 설명요인의 영향력을 세밀하게 분석하는 것이 가능하다.

2.2 Research model and hypotheses

이 연구는 기업의 기술혁신 활동이 에너지효율성을 통해 어떻게 탄소생산성 향상에 기여하는지 규명한다.

문헌은 기술혁신과 기술적 진보가 에너지효율성을 높인다는 근거를 제공한다(Popp, 2012; Wurlod and Noailly, 2018; Sun et al., 2019). Wurlod and Noailly(2018)는 1975년부터 2005년까지 17개 OECD 국가의 14개 산업군의 녹색기술 특허를 분석하여 이들 혁신이 해당 산업군의 에너지 집약도를 낮추는데 기여했다고 밝혔다. 국가의 기술혁신은 자국의 에너지효율 개선 뿐 아니라 인접국가에도 긍정적인 영향을 미친다고 알려져 있다. 기술혁신의 확산 효과(spillover effects)로 불린다(Sun et al., 2021; Marin and Palma, 2017). 많은 연구가 기술혁신의 효과를 검증하고 근거를 제시하고 있다. 다만, 대다수 문헌은 국가, 지역 또는 산업 수준의 에너지 효율성을 다루고 있고 있다(Sun et al., 2019). 에너지 정책, 시장의 정책적 수단과 기술 혁신의 효과 등 정책 의사결정 차원에서 시사점이 중요했기 때문이다(Du et al., 2018; Song and Yu, 2018).

기업 경영 의사결정에 의미있는 기업 수준 연구는 상대적으로 수가 적지만 기술혁신의 긍정적인 효과를 지지하는 편이다. Trianni et al.(2013)은 시장에서 경쟁하는 기업의 수가 많을수록 시장 혁신이 활성화되고 이는 제품과 공정 혁신을 촉발하여 궁극적으로 에너지효율성 개선에 기여한다고 설명한다. 기업의 연구개발(R&D) 비용과 특허수가 에너지 비효율을 줄이며(Saudi et al., 2019), 특히 중소기업에 있어서는 기술혁신이 기업가 지향성이 상호작용할

때 에너지 효율에 미치는 긍정적 영향이 커질 수 있다(Ahmed et al., 2020). 실증 연구를 뒷받침하는 논증은 포터 가설에서 찾을 수 있다. 이 가설은 기술혁신은 에너지 투입을 줄이는 동시에 산출을 늘리는데 기여함으로써 효율성을 높인다고 논증한다. 혁신활동은 생산, 제품, 서비스, 가치 사슬 전반에 구조적으로 얽혀 있는 자원사용의 비효율을 개선하는데 기여하는데 이런 과정에서 축적된 혁신은 기업에 내재되어 후발 경쟁자가 쉽게 모방할 수 없는 경쟁력의 원천이 된다고 설명한다(Porter and Van der Linde, 1995; Hart, 1995).

이러한 논증을 토대로 다음 가설을 제시한다.

가설 1. 특허수와 연구개발 집약도로 측정되는 기업의 기술혁신 활동은 에너지효율성을 높이는데 긍정적인 영향을 준다.

기존 문헌은 기술혁신이 온실가스 저감과 탄소생산성 개선에 기여할 수 있다는 근거를 제시하고 있다. 먼저, 탄소배출을 폐기물 저감 등을 포함한 포괄적인 범위에서 환경성과의 일부로 고려하는 연구들은 기술혁신이 환경 질 개선에 직접적인 영향을 준다고 설명한다(Trevlopoulos et al., 2021). 특허나 연구개발 투자가 국가, 산업, 기업 수준의 탄소 배출과 음(-)의 관계가 있다는 실증이 있다. 다만, 업종 등 효과가 발현되는 상황이 서로 다를 수 있음을 강조한다. 예를 들어, Fethi and Rahuma(2020)는 연구개발 투자가 석유화학 기업의 온실가스 배출을 줄이는데 기여하지만 그 효과는 장기적으로 나타난다고 밝혔다. 특정 업종, 예를 들어 수송 부문에서 혁신이 탄소배출량 저감을 이끌며 특히 이 효과는 선진국에서 더 크다는 국가적 상황의 차이를 보여주는 연구가 있다(Demircan Cakar et al., 2021).

기술혁신이 탄소생산성 향상에 기여한다는 연구도 위와 맥을 같이 한다. Du and Li(2019)는 1992-2012 기간의 OECD 국가를 분석하여 녹색 기술과 관련된 특허건수와 탄소생산성 사이에 양(+)의 관계가 있음을 밝혔다. 다만, 이 관계는 선진국에서만 나타났는데 개발도상국의 경우 혁신활동과 관계없이 배출량은 지속적으로 증가하기 때문으로 해석했다. 기업을 대상으로 한 연구도 기술혁신의 효과를 검증해 왔다. Fan et al.(2021)은 중국 제조기업을 분석하여 기술혁신 활동이 탄소 생산성 개선에 기여했음을 실증했다. Mo(2023)는 한국의 배출권거래제 대상 기업의 특허수와 연구개발 투자를 분석하여 기술혁신 활동이 탄소생산성 향상에 기여했다고 밝혔다.

이러한 논증을 토대로 다음 가설을 제시한다.

가설 2. 특허수와 연구개발 집약도로 측정되는 기업의 기술혁신 활동은 탄소 생산성을 높이는데 긍정적인 영향을 준다.

이 연구는 기술혁신이 에너지효율성을 통해 궁극적으로 탄소생산성에 영향을 미치는 경로를 고려한다. 온실가스의 직접적인 저감은 일반적으로 제품 및 공정의 변화, 원료 전환, 연료 전환, 탄소 포집으로 실현된다(Lee, 2013). 하지만 탄소 저감을 목표로 하는 직접적인 기술혁

신 활동 보다는 여러 다른 목적으로 실행되는 기술혁신이 다양한 경로를 통해 탄소저감으로 이어진다. 에너지는 비용과 직접 관련되어 있어 기업에게 탄소 배출보다는 더 직접적이고 현실적인 쟁점이다. 기업이나 산업이 현실에서 도입가능한 최적가용기술(best available technologies: BAT)은 보통 탄소 저감 목적의 기술보다 에너지 효율 향상을 목적으로 하는 기술이 보편적이다(IPCC, 2014). 실제로 에너지 효율성 개선은 온실가스 배출량 저감을 위한 비용효과적인 수단으로 인식되고 있다(Peng et al., 2015; Worrell et al., 2009). 국제에너지기구(IEA)에 따르면 2050년 탄소중립 달성에 있어 에너지 효율의 기여분이 37%로 가장 높다. 에너지 효율 향상이 탄소 배출량 저감과 탄소 생산성 향상에 있어 가장 중요한 수단이라는 근거이다(IEA, 2019). 에너지 효율의 효과는 재생에너지 등 연료 전환보다 효과가 큰 것으로 알려져 있다(Akram, 2020). 업종별 효과의 차이는 있지만 기술혁신이 에너지 집약도를 낮추어 탄소 배출 저감에 기여한다는 실증이 최근 증가하고 있다(Wang et al., 2022).

이러한 논증을 토대로 다음 가설을 제시한다.

가설 3. 에너지 효율성은 기업의 기술혁신 활동이 탄소 생산성을 높이는데 매개역할을 한다.

기존 문헌의 실증과 포터 가설은 대체로 기술혁신과 탄소배출 감소, 탄소생산성 향상 사이의 긍정적인 관계를 지지하지만 늘 일관된 결과에 도달하는 것은 아니다(Mo, 2023). 상황 요인의 가능성을 암시한다. 앞서 언급한 바와 같이 기술혁신이 에너지효율성이나 탄소생산성에 미치는 효과는 국가별, 산업별, 업종별 차이가 있다(Mo, 2022; Jung et al., 2021; Du and Li, 2019). 제품, 공정, 가용한 저감기술 등이 서로 다르기 때문이다. 이 연구는 몇 가지 근거를 통해 기술혁신의 효과가 에너지 다소비, 온실가스 다배출 업종에서 클 것으로 추측한다. 첫째, 에너지 다소비 업종일수록 에너지 소비와 온실가스 배출 감소에 대한 필요가 크다. 특히, 에너지 소비는 기업의 제조원가와 직접 관련이 있어 기술혁신 활동이 녹색기술과 관계가 높을 가능성이 크며 이는 기술혁신이 에너지와 탄소생산성에 직접적인 효과로 이어진다(Du and Li, 2019). 둘째, 에너지 및 탄소 정책은 일반적으로 철강, 석유화학, 정유, 시멘트 등 에너지 다소비, 온실가스 다배출 업종에 집중한다(Zhu et al., 2021). 국가 정책의 주된 관리 대상이 되면서 다양한 정책적 압력 또는 지원과 상호작용하면서 기술혁신이 보다 실질적 효과로 이어질 수 있다. 셋째, 에너지 다소비 업종이 상대적으로 감축 여력이 높다. 이들 업종은 대체로 장치형 산업으로 공정 기술이 중요하며 이러한 기술혁신에 의해 줄일 수 있는 감축 잠재량이 자동차, 전기전자 제품과 같이 에너지를 상대적으로 적게 소비하는 업종보다 크다(Liu et al., 2022). 기술혁신의 초점도 업종 특성에 따라 다르다. 에너지 다소비 업종의 경우 공정기술과 연관성이 높고 에너지 저소비 업종은 상대적으로 제품기술에 초점이 맞추어져 있다(Mo, 2023; Xie et al., 2019).

이러한 추론을 토대로 다음 가설을 제시한다.

가설 4. 에너지효율성과 탄소생산성에 미치는 기술혁신의 효과는 산업의 특성에 따라 다르다. 에너지 다소비 및 탄소 다배출 업종에서 기술혁신의 효과가 더 높다.

이 연구는 기술혁신은 에너지 효율성을 통해 탄소 생산성 향상에 기여하고 이러한 효과는 다배출 업종에서 더 클 것이라는 가설을 종합하면 다음 <그림 1>과 같은 연구모형으로 정리할 수 있다.

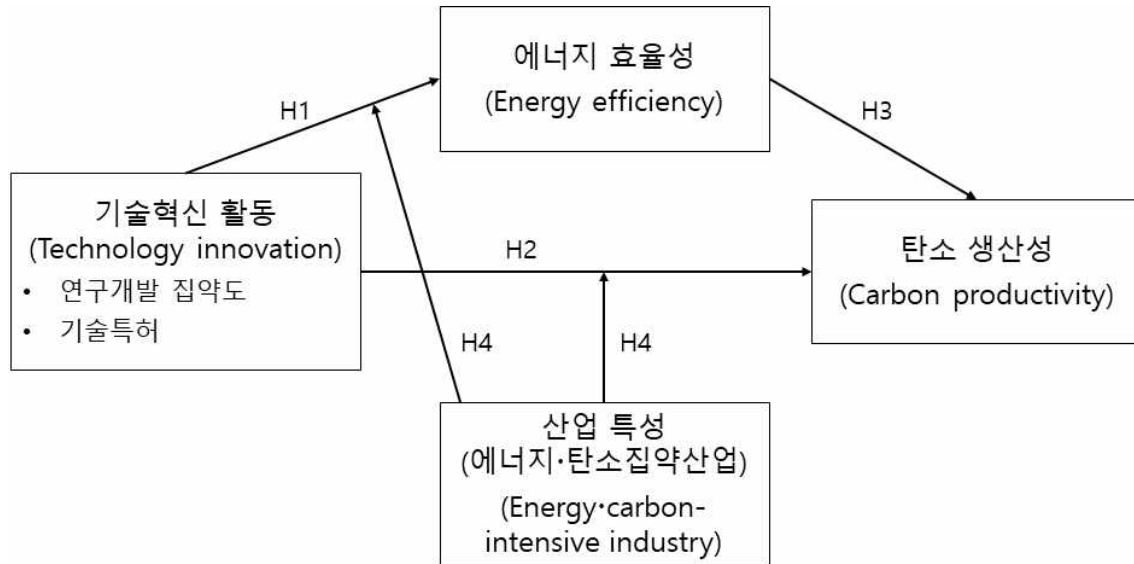


그림 1. 연구모형과 가설: 기술혁신, 에너지효율성, 탄소생산성의 관계와 업종 조절효과

III Research Methods

3.1 Sample

이 연구는 기업의 기술혁신 활동과 에너지효율성, 탄소생산성의 관계를 실증한다. 표본은 국내 온실가스에너지 목표관리제(이하 목표관리제)와 탄소배출권 거래제(이하 배출권거래제) 해당 사업장 중 산업 부문에 포함된 기업이다. 목표 관리제는 2012년 시행된 제도로 온실가스와 소비한 에너지 연평균 총량이 일정 기준 이상인 사업장을 대상으로 한다. 정부와 대상 업체가 상호 협의하여 온실가스 및 에너지 소비 목표를 정하고 정부는 인센티브와 패널티를 통해 목표달성을 유도하고 업체는 이행계획과 개선활동을 수행하게 된다. 배출권거래제는 2015년 시행되었다. 일정 수준 이상의 온실가스를 배출하는 사업체에게 배출권을 할당하고 여분 또는 부족분을 거래할 수 있는 시장기반 탄소 정책이다. 2015-2017년까지 1차 계획기간, 2018-2020년 2차 계획기간을 거쳐 현재 3차 계획기간으로 운영중이다.¹⁾ 목표관리제와 배출권거래제 대상기업을 표본으로 삼은 이

유는 에너지 사용량과 온실가스 배출량 정보가 공개되어 가용하기 때문이다. 현재 2011-2021년 자료가 공개되어 있다. 배출권거래제가 시행되기 이전인 2011-2014년까지는 목표관리제 기업으로 공개되고 이후에는 목표관리제 대상기업, 배출권거래제 대상기업이 구분된다. 대상 기업 기준이 변경되고 기업체 변동이 있어 매년 대상 기업수에 있어 일부 차이가 있다 (표 1). 기업-연도 (firm-year)를 기준으로 9,541개 중에서 자료가 없는 기업을 제외하고 총 5,141개 기업을 분석하였다.

표 1. Sample (온실가스에너지 목표관리제 및 배출권거래제 대상 기업)

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	합계
목표 관리제					338	336	366	418	426	449	390	
배출권 거래제					522	562	592	586	619	612	689	
합계	491	577	618	860	860	898	958	1004	1045	1061	1079	9541

3.2 Variables and measurement

이 연구의 핵심 변수는 기술혁신, 에너지효율성, 탄소생산성, 에너지다소비·온실가스다배출 업종 구분이다. 첫째, 기술혁신은 특허출원수와 연구개발집약도를 이용하였다. 특허출원수는 WIPS Corporation의 WIPS On 데이터베이스에서 표본 기업을 검색하여 연도별 출원건수를 수집하였다. 특허출원건수의 자연로그 값을 분석에 사용했다. 연구개발집약도는 기업 재무정보에서 총자산 대비 연구개발비 비율이다. 둘째, 에너지 효율성은 기업의 연도별 에너지사용량(TJ: Terra Joule) 대비 매출(억원)의 비율이다. 셋째, 탄소 생산성은 기업의 연도별 온실가스배출량(톤CO₂e.) 대비 매출(억원) 비율이다. 에너지 사용량과 온실가스 배출량은 국가 온실가스종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center: GIR)의 국가온실가스종합관리시스템(ngms.gir.go.kr)에서 추출하였다. 재무적 통제변수로는 기존 문헌에서 공통적으로 사용하는 기업규모, 부채비율, 유형자산비율, 현금흐름비율을 사용하였다. GIR 자료원의 업종은 기간에 따라 19-26개 업종으로 분류가 변경되어 왔다. 이 연구는 일관성을 높이기 위해 에너지통계연보(Energy Balance)의 광업 및 제조업의 13개 업종으로 재분류하였다. 광업, 식품및담배, 섬유및가죽, 목재및나무제품, 제지및인쇄, 석유정제, 화학및석유화학, 비금속광물, 철강, 비철금속, 수송장비, 전자및기계류, 기타제조 업종이다. 석유정제, 화학및석유화학, 비금속광물, 철강, 비철금속 등 5개 업종은 에너지다소비 및 온실가스 다배출 업종으로 분류하였다. 세부 업종과 연도는 더미로 통제하였다. 변수의 조작적 정의와 측정, 자료원은 다음 <표 2>와 같다.

1) 제도에 대한 상세한 설명은 국가온실가스종합관리시스템 자료를 참고할 수 있다 (ngms.gir.go.kr).

표 2. Variables, measurement, and data sources (변수의 측정과 자료원)

변수	변수 (코드)	측정	자료원
기술혁신	특허출원 (PAT)	$\log(\text{특허출원건수}+1)$	WIPS On 데이터베이스
	연구개발집약도 (RDI)	연구개발비/총자산	KISVALUE 데이터베이스
에너지 효율성	(EE)	매출(억원)/에너지소비량(TJ)	KISVALUE 데이터베이스, 국가온실가스종합관 리시스템
탄소 생산성	(CP)	매출(억원)/온실가스배출량(CO2e.)	상동
에너지다소비·온실 가스다배출업종	(TYPE)	1 if 업종=정유, 석유화학, 비금속광물, 철강, 비철금속 0 otherwise	에너지통계연보 업종기준 재분류
통제변수	기업규모 (SIZE)	$\log(\text{총자산})$	KISVALUE 데이터베이스
	부채비율 (LEV)	총부채/총자산	상동
	유형자산비율 (TG)	유형자산/총자산	상동
	현금흐름비율 (CFO)	영업현금흐름/총자산	상동
	업종 (ID)		
	연도 (Y)		

3.3 Analytical models

이 연구는 다음과 같은 분석모형의 회귀분석 방법을 이용하였다.

$$EE = \beta_0 + \beta_1 PAT + \beta_2 \sum [Controls] + \beta_3 \sum [ID] + \beta_4 \sum [Y] \quad (Eq.1)$$

$$EE = \beta_0 + \beta_1 RDI + \beta_2 \sum [Controls] + \beta_3 \sum [ID] + \beta_4 \sum [Y] \quad (Eq.2)$$

$$CP = \beta_0 + \beta_1 PAT + \beta_2 EE + \beta_3 \sum [Controls] + \beta_4 \sum [ID] + \beta_5 \sum [Y] \quad (Eq.3)$$

$$CP = \beta_0 + \beta_1 RDI + \beta_2 EE + \beta_3 \sum [Controls] + \beta_4 \sum [ID] + \beta_5 \sum [Y] \quad (Eq.4)$$

$$EE = \beta_0 + \beta_1 PAT + \beta_2 TYPE + \beta_3 PAT*TYPE + \beta_4 \sum [Controls] + \beta_5 \sum [ID] + \beta_6 \sum [Y] \quad (Eq.5)$$

$$EE = \beta_0 + \beta_1 RDI + \beta_2 TYPE + \beta_3 RDI*TYPE + \beta_4 \sum [Controls] + \beta_5 \sum [ID] + \beta_6 \sum [Y] \quad (Eq.6)$$

$$CP = \beta_0 + \beta_1 PAT + \beta_2 EE + \beta_3 TYPE + \beta_4 PAT*TYPE + \beta_5 \sum [Controls] + \beta_6 \sum [ID] + \beta_7 \sum [Y] \quad (Eq.7)$$

$$CP = \beta_0 + \beta_1 RDI + \beta_2 EE + \beta_3 TYPE + \beta_4 RDI * TYPE + \beta_5 \sum [Controls] + \beta_6 \sum [ID] + \beta_7 \sum [Y] \quad (Eq. 8)$$

Eq.1과 Eq.2는 기술혁신이 에너지효율성에 미치는 효과에 대한 식이다. Eq.3과 Eq.4는 기술혁신이 탄소생산성에 미치는 효과와 에너지효율성의 매개효과에 대한 식이다. Eq.5-Eq.8은 에너지다소비 온실가스다배출 업종의 조절효과 식이다.

IV Results and Discussion

4.1 Descriptive analysis

<표 3>은 기술 통계량을 보여준다. 특허출원건수는 자연로그를 취하기 전의 값이다. 각 변수에 대해 상위, 하위 1% 값을 윈저화(winsorization)하여 이상치를 조정하였다. 특허출원수의 편차가 큰 것은 일부 기업에서 많은 수의 특허를 출원하는 반면 다수 기업은 특허가 적은 실태를 보여 준다. 연구개발집약도에서도 기업간 차이가 크다.

표 3. 기술 통계량 (Descriptive statistics)

변수	Obs.	Mean	Median	Ste.Dev.	Min.	Max.
특허출원 (PAT)	5141	71.292	0.000	414.270	0.000	7216.000
연구개발집약도 (RDI)	5141	0.008	0.000	0.017	0.000	0.101
에너지효율성 (EE)	5141	5.097	2.461	7.696	0.000	48.608
탄소생산성 (CP)	5141	0.098	0.045	0.151	0.000	0.925
에너지다소비업종(TYPE)	5141	0.379	0.000	0.485	0.000	1.000
기업규모 (SIZE)	5141	26.687	26.476	1.567	23.564	31.078
부채비율 (LEV)	5141	0.452	0.458	0.210	0.057	0.999
유형자산비율 (TG)	5141	0.413	0.397	0.184	0.033	0.911
현금흐름비율 (CFO)	5141	0.070	0.063	0.079	-0.148	0.329

<표 4>는 변수간 상관관계를 보여준다. 기술혁신 변수인 특허출원건수와 연구개발집약도가 높은 상관관계를 보여준다. 에너지효율성과 탄소생산성은 매우 높은 상관관계(0.990)를 보이는데 온실 가스배출량이 에너지사용량과 매우 밀접하다는 것을 확인할 수 있다. 특허출원과 연구개발집약도로 측정된 기술혁신은 에너지효율성, 탄소생산성과 유의한 수준에서 정(+)의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 에너지다소비 및 온실가스다배출 업종인 경우 특허출원, 연구개발집약도, 에너지효율성, 탄소생산성이 낮다는 것을 확인할 수 있다.

표 4. 상관관계 결과 (Correlations)

변수	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1. 특허출원 (PAT)	-								
2. 연구개발집약도 (RDI)	0.563 ***	-							
3. 에너지효율성 (EE)	0.383 ***	0.297 ***	-						
4. 탄소생산성 (CP)	0.377 ***	0.307 ***	0.990 ***	-					
5. 에너지다소비업종 (TYPE)	-0.115 ***	-0.203 ***	-0.173 ***	-0.184 ***	-				
6. 기업규모 (SIZE)	0.700 ***	0.338 ***	0.371 ***	0.362 ***	0.022	-			
7. 부채비율 (LEV)	0.033* **	0.042 ***	0.062 ***	0.060 ***	0.008	-0.059 ***	-		
8. 유형자산비율 (TG)	-0.140 ***	-0.074 ***	-0.270 ***	-0.266 ***	0.006	-0.155 ***	0.302 ***	-	
9. 현금흐름비율 (CFO)	0.023 *	0.036 ***	-0.043 ***	-0.046 ***	0.004	-0.040 ***	-0.244 ***	0.058 ***	-

비고: *, $p<0.1$; **, $p<0.05$; ***, $p<0.01$

4.2 Hypotheses test

계층적 회귀분석 방법을 이용하여 기술혁신이 에너지효율성, 탄소생산성에 미치는 효과에 대한 가설을 검증하였다. <표 5>는 회귀분석 결과를 보여준다.

첫째, 연구개발집약도와 특허출원수로 측정한 기술혁신이 에너지효율성에 유의미한 수준에서 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인했다($b=58.200$, $b=0.716$, 각각). 둘째, 기술혁신은 탄소생산성과 유의미한 수준에서 긍정적인 관계가 있다(연구개발집약도 $b=1.268$, 특허출원수 $b=0.014$). 이 결과는 기술혁신 활동이 에너지효율성과 탄소생산성 향상에 기여한다는 가설 1과 가설 2를 지지한다. 통제변수의 영향을 살펴보면 에너지다소비 및 온실가스다배출 업종이 에너지효율과 탄소생산성이 높은 경향이 있다. 상관관계 분석에서 두 변수간 음(-)의 관계를 보였는데 회귀분석은 다른 결과를 제시한다. 기술혁신 활동과 재무적 통제변수의 복합적인 영향을 걸러내면 영향관계가 달라질 수도 있다. 에너지다소비 업종이 에너지효율 향상을 위한 수요가 높아 다양한 저감활동의 결과가 긍정적인 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 기업규모가 클수록 에너지효율성과 탄소생산성이 높아진다. 같은 에너지를 사용하고, 같은 양의 온실가스를 배출하더라도 기업규모가 클수록 매출과 같은 산출면에서 유리하기 때문으로 이해된다.

표 5. Regression analysis: 기술혁신과 에너지효율성, 탄소생산성 관계

	Model 1 (에너지효율성)	Model 2 (에너지효율성)	Model 3 (탄소생산성)	Model 4 (탄소생산성)
연구개발집약도 (RDI)	58.200***		1.268***	
특허출원수 (PAT)		0.716***		0.014***
에너지다소비업종 (TYPE)	1.041***	1.139***	0.072***	0.073***
기업규모 (SIZE)	1.096***	0.887***	0.020***	0.017***
부채비율 (LEV)	4.227***	4.089***	0.080***	0.078***
유형자산비율 (TG)	-8.812***	-8.702***	-0.168***	-0.166***
현금흐름비율 (CFO)	3.620***	3.459***	0.063***	0.061***
상수항	상수항 포함			
산업 더미 (ID)	산업더미 포함			
연도 더미 (YEAR)	연도더미 포함			
Adj. R-Square	0.355	0.355	0.358	0.356
F-value	57.021***	50.423***	69.321***	62.192***

비고: ***, $p < 0.01$

<표 6>은 기술혁신과 탄소생산성의 관계를 매개하는 에너지효율의 역할에 대한 검증 결과를 보여준다. 에너지효율성의 매개효과는 모형 1, 2, 3, 4, 6, 7을 이용하여 분석하였다. Baron and Kenny(1986)의 제언에 따르면 (1) 독립변수가 매개변수에 유의한 영향을 미치고 (모형 1, 2), (2) 독립변수가 종속변수에 유의한 영향을 미치고 (모형 3, 4), (3) 독립변수와 매개변수가 동시에 포함된 회귀분석에서 매개변수가 종속변수에 유의한 영향을 미치는 경우 (모형 6, 7) 매개 효과가 있다고 할 수 있다. 또한 매개변수, 독립변수를 포함한 회귀분석에서 독립변수의 영향이 독립변수만 투입된 회귀분석의 영향보다 유의하게 작아야 한다. 첫째, 기술혁신 활동이 에너지효율성에 유의한 영향을 미친다(모형 1, 2). 둘째, 기술혁신 활동이 탄소생산성에 유의한 영향을 미친다(모형 3, 4). 셋째, 기술혁신과 에너지효율성이 모두 포함된 회귀식에서 에너지효율성이 탄소생산성에 유의한 영향을 미친다(모형 6, 7). 넷째, 모형 6, 7에서 연구개발집약도와 특허출원수가 탄소생산성에 미치는 효과($b=0.019$, $b=0.004$, 각각)가 모형 3, 4에서 효과($b=1.268$, $b=0.014$, 각각)보다 유의하게 적다. 결과적으로 에너지효율성은 기술혁신 활동이 탄소생산성 향상에 기여하는데 매개 역할을 하는 것을 확인할 수 있다. 연구결과는 가설3을 지지한다.

표 6. 회귀분석 결과: 에너지효율성의 매개효과

	Model 5 (탄소생산성)	Model 6 (탄소생산성)	Model 7 (탄소생산성)
에너지효율성 (EE)	0.019***	0.019***	0.019***
연구개발집약도 (RDI)		0.147***	
특허출원수 (PAT)			0.004*
에너지다소비업종 (TYPE)		0.052***	0.051***
기업규모 (SIZE)	0.001	-0.001**	-0.001**
부채비율 (LEV)	-0.001	-0.001	-0.001
유형자산비율 (TG)	0.002	0.002	0.002
현금흐름비율 (CFO)	-0.005	-0.006***	-0.005
상수항	상수항 포함		
산업 더미 (ID)	산업더미 포함		
연도 더미 (YEAR)	연도더미 포함		
Adj. R-Square	0.932	0.982	0.982
F-value	6320.02***	6330.58***	6095.28***

비고: *, $p<0.1$; **, $p<0.05$; ***, $p<0.01$

<표 7>은 기술혁신과 에너지효율성, 탄소생산성의 관계에 대한 업종 특성(에너지다소비 및 온실가스다배출)의 조절효과 검증 결과이다. 연구개발집약도와 특허출원수가 에너지효율과 탄소생산성에 미치는 긍정적인 영향이 에너지다소비·온실가스다배출 업종에서 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

표 7. 회귀분석 결과: 에너지다소비·온실가스다배출 업종의 조절효과

	Model 8 (에너지효율성)	Model 9 (에너지효율성)	Model 10 (탄소생산성)	Model 11 (탄소생산성)
연구개발집약도 (RDI)	58.200***		1.268***	
특허출원수 (PAT)		0.716***		0.014***
에너지다소비업종 (TYPE)	1.041***	1.139***	0.072***	0.073***
RDI*TYPE	46.205***		1.233***	
PAT*TYPE		0.619***		0.013***
기업규모 (SIZE)	1.096***	0.887***	0.020***	0.017***
부채비율 (LEV)	4.227***	4.089***	0.080***	0.078***
유형자산비율 (TG)	-8.812***	-8.702***	-0.168***	-0.166***
현금흐름비율 (CFO)	3.620***	3.459***	0.063***	0.061***

상수항	상수항 포함			
산업 더미 (ID)	산업더미 포함			
연도 더미 (YEAR)	연도더미 포함			
Adj. R-Square	0.355	0.355	0.358	0.356
F-value	57.021***	50.423***	69.321***	62.192***

비고: *, $p<0.1$; **, $p<0.05$; ***, $p<0.01$

기술혁신 활동(연구개발집약도, 특허출원수)이 에너지효율성에 미치는 효과는 에너지다소비·온실가스다배출 업종에서 두드러질 정도로 크다(그림 2). 기술혁신활동의 효과가 탄소생산성에 미치는 효과 역시 에너지다소비 업종에서 보다 높지만 에너지효율성에 미치는 효과 차이보다는 작다(그림 3). 전체적으로 기술혁신 활동이 에너지효율성을 높이고 탄소생산성 향상에 기여하는 정도는 에너지 다소비, 온실가스 다배출 업종에서 클 것이라는 가설6을 지지하고 있다.

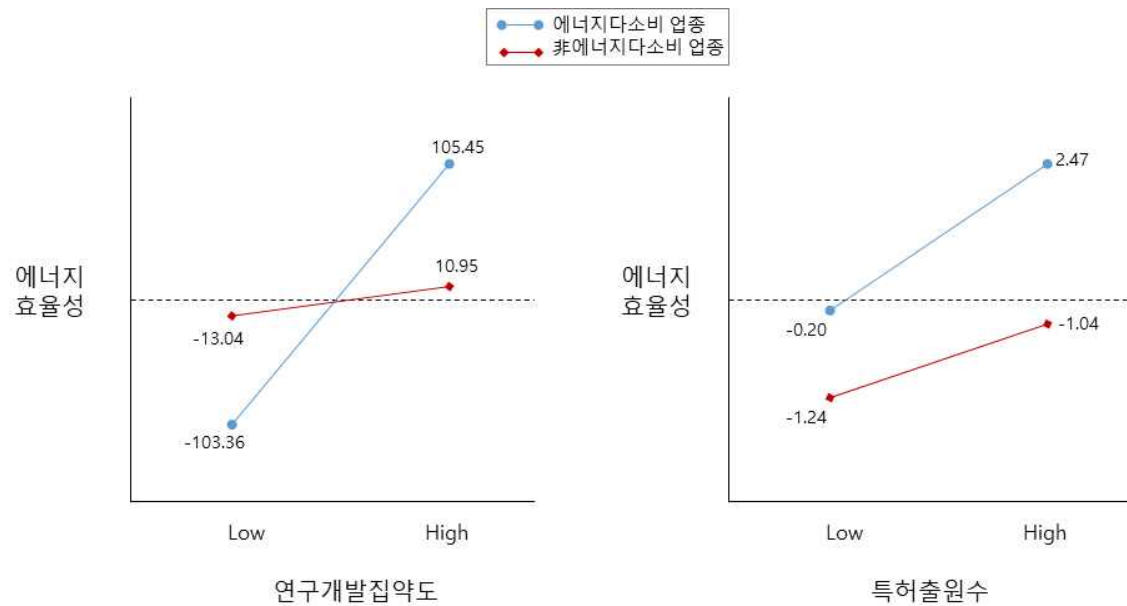


그림 2. 에너지다소비 업종의 조절효과: 기술혁신 활동과 에너지효율성

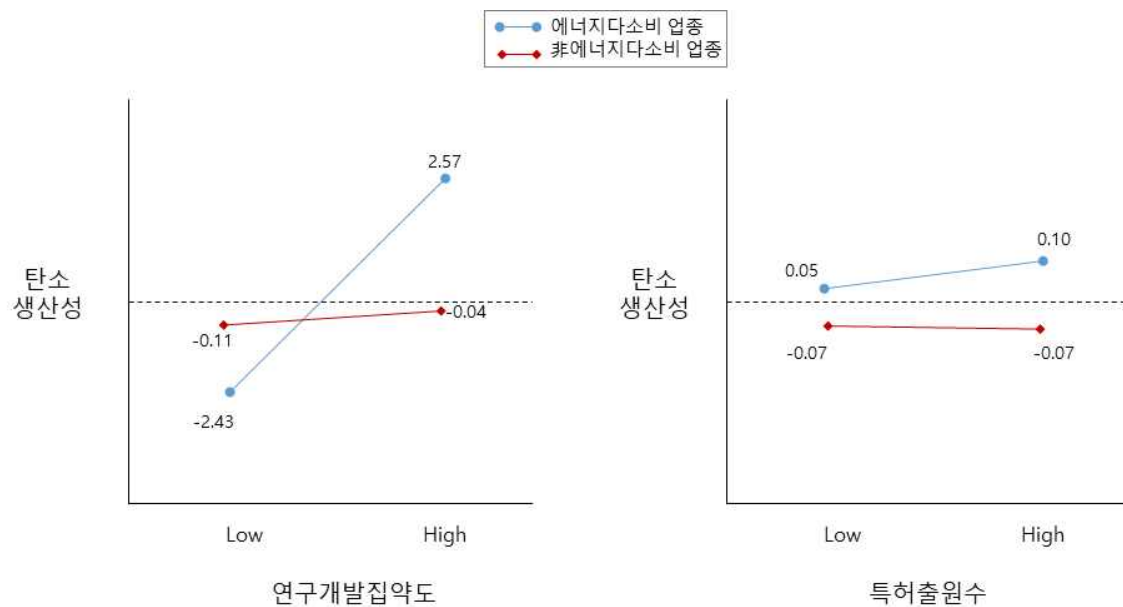


그림 3. 에너지다소비 업종의 조절효과: 기술혁신 활동과 탄소생산성

V Conclusion

5.1 Research implications

이 연구는 한국의 온실가스에너지 목표관리제와 배출권거래제 대상 기업을 대상으로 기술혁신 활동과 에너지효율성, 탄소생산성의 관계를 업종 특성의 차이를 고려하여 실증하였다. 이 연구 결과는 학술적, 실무적, 정책적 관점에서 몇 가지 의미있는 시사점을 제공한다.

첫째, 기업 수준에서 환경, 에너지와 기업 성과의 양립 가능성을 확인하는 근거를 제시한다. 에너지효율성과 탄소생산성은 더 적은 에너지 소비와 온실가스 배출로 더 많은 경제적 산출을 창출하는 성과지표이다. 이 연구는 넷제로 전환을 위한 환경성과와 기업성과의 핵심 동인으로 기술혁신의 역할을 증거한다. 포터 가설의 오해는 환경성과와 향상이 자동으로 기업성과로 이어지는 것으로 해석하는 것이다. 이 연구는 포터 가설이 주장하는 환경과 경제의 양립 가능성은 기술혁신을 통해 가능하다는 학술적 이해를 높이는데 기여한다.

둘째, 경영학 연구에서 기술혁신은 오랜기간 중요한 연구주제였다. 하지만 기후변화, 넷제로, 이와 관련된 탄소생산성은 최신 쟁점이다. 전통적으로 에너지와 온실가스는 정책이나 경제 분야 연구 주제로 인식되어 접점이 상대적으로 적었다. 이 연구는 기술혁신, 에너지, 탄소 쟁점을 다른 연구로 기후변화에 대한 경영학 연구 부름에 응답한다(Henderson et al., 2020; Howard-Grenville et al., 2014). 이 연구는 넷제로를 위한 초창기 경영학 학술 문헌으로 공헌한다.

셋째, 이 연구결과를 통해 기술혁신과 탄소생산성 관계를 매개하는 에너지효율의 역할을 확인할 수 있다. 온실가스 저감, 탄소생산성 개선에 있어 기술혁신의 중요성에는 공감대가 있었다. 하지만 이 둘 사이 개념적 거리가 멀어 인과관계에 대한 세밀한 설명이 필요했다. 이 연구결과는 기존 문헌에서 전제로 했던 에너지효율성이 기술혁신과 탄소생산성을 연결하는 역할을 확인함으로써 학술적 영역을 넓힌다.

넷째, 이 연구는 기업 경영에 실무적, 전략적 시사점을 제공한다. 최근 더 많은 기업이 넷제로를 선언하며 기후변화의 적극적 대응에 동참하고 있다. 지속가능발전목표(sustainable development goals: SDGs)나 ESG(environment, society, governance), 이해관계자 자본주의 경영의 흐름속에서 기업은 전향적인 변혁이라는 도전에 직면하고 있다(Lee, 2022). 하지만 기업은 미사여구의 수사(rhetoric)이 아닌 실현가능하고 실천에 기반한 새로운 전략, 정책, 실무관행을 고민하고 있다(Lee, 2022). 그린워싱(greenwashing) 등 실행이 뒤따르지 못하는 선언이 불러올 수 있는 사회적 반감과 역효과의 위험성도 높다. 이러한 시대상황에서 넷제로 전환시대에 기업의 딜레마 해결책 중 하나가 기술혁신이다. 제품, 공정, 시장에서의 기술혁신은 기업에게 익숙한 실무관행이며 오랜 경험을 통해 다양한 대안이 이미 존재한다. 이 연구결과는 넷제로 시대의 경쟁력이 완전한 무(無)에서 이루어지는 것이 아니라 기존 경쟁의 양상 속에서 찾을 수 있다는 시사점을 제공한다. 넷제로 전환의 가장 현실적이고 실행가능한 전략 방안으로 기술혁신 투자를 제언하고 있다. 기술혁신은 에너지효율을 통한 비용절감, 온실가스 저감과 비즈니스 경쟁력 강화로 연결할 수 있다는 실천가능한 넷제로 경쟁력의 원천이다.

다섯째, 이 연구결과는 기후변화 정책에 의미있는 시사점을 제공한다. 우리나라는 2030년까지 국가 온실가스를 2018년 대비 40.0% 감축하는 목표(Nationally Determined Contributions: NDC)와 2050 탄소중립을 선언하였다. 국가의 탄소중립녹색성장 로드맵 이행을 위해서는 온실가스 배출량의 56%를 차지하는 산업계, 기업의 역할이 중요하다. 정부는 온실가스에너지목표관리제, 배출권 거래제를 비롯하여 다양한 탄소 정책을 통해 기업의 온실가스 감축을 유도하고 있지만 온실가스 감축은 매우 도전적인 과제이다. 이 연구결과는 기업이 기술혁신을 통해 온실가스감축과 기업 경쟁력을 동시에 추구할 수 있도록 다양한 인센티브를 포괄하는 정책 설계가 필요하다는 시사점을 제공한다. 잘 설계된 제도가 기술혁신을 촉발하여 환경과 경쟁력 양립을 높일 수 있다는 포터 가설을 지지하는 이 연구결과가 넷제로 전환을 위한 정책수립에 중요한 의미를 제공할 수 있다.

5.2 Limitations and future research

이 연구가 가진 몇 가지 한계를 서술하면서 추후 연구 과제를 제안한다. 첫째, 이 연구는 기술혁신 활동의 대리지표 중 하나로 특허출원수를 사용하였다. 연도별 기업이 출원한 특허인데 기술을 세분화하지 않았다. 특허를 범주화하여 분석하는 연구가 수행될 필요가 있다. 예를 들어 제품 특허, 공정 특허, 특허 등을 구분하거나 에너지 및 환경관련 특허와 일반 기술특허를 구분하면 (예: Du and Li, 2019) 에너지효율성과 탄소생산성에 미치는 기술혁신 특성의 차이를 규명할 수

있을 것으로 기대한다. 둘째, 최근 기술혁신의 파급효과(spillover effects)에 관심이 고조된다. 기술 혁신의 효과는 혁신이 발생한 개체뿐 아니라 연관된 다른 개체로 확산된다는 개념이다(예: Sun et al., 2021). 개별 기업의 기술혁신 뿐 아니라 업종을 넘어 전달되는 기술혁신의 탄소생산성 파급효과가 의미있는 연구주제로 다루어져야 한다. 셋째, 기업의 기후변화 전략, 정책, 실무관행을 종합적으로 분석한 연구로 확장될 필요가 있다. 기업은 다양한 형태로 자발적 비재무적 정보공개(voluntary non-financial information disclosure)를 해왔다. 내용분석(content analysis) 등 방법을 활용하여 개별기업의 기후변화 지향성(orientation), 대응전략의 유형과 수준을 계량화한 후 기술혁신, 탄소생산성과 연계하며 기후변화 관련된 경영학의 학술적 영역을 확장하고 실무에 전략적 유용한 시사점을 제공하는데 기여할 수 있다. 넷째, 최근 ESG 주제의 경영학 연구가 관심을 받는다. ESG 등급 등 외부 평가 자료를 이용한 기술혁신, 에너지와 탄소 경쟁력 연구도 의의가 있다.

참고문헌

- 김동구, 손인성, 김성균, 이소영, 이승문, 김수인, 선인경, 박환일, 김지은, 이수열 (2019), 경제인문사회연구회 협동연구 총서 19-7-01.
- 안영환, 이유수, 이철용, 김성균, 이수열, 박환일, 이진면, 이용호, 김재진, 박상준 (2017), 2050 저탄소경제 비전 연구, 경제인문사회연구회 미래사회 협동연구 총서 17-13-01.
- 온실가스종합정보센터(GIR) (2022), 2021년 온실가스감축 이행실적 평가.
- Ahmed, U., Mozammel, S. and Zaman, F. (2020), "Impact of ecological innovation, entrepreneurial self-efficacy and entrepreneurial orientation on environmental performance and energy efficiency," International Journal of Energy Economics and Policy, 10(3), 289-295.
- Akram, R., Chen, F., Khalid, F., Ye, Z. and Majeed, M.T. (2020), "Heterogeneous effects of energy efficiency and renewable energy on carbon emissions: Evidence from developing countries," Journal of Cleaner Production, 119122.
- Ang, B.W. and Xu, X.Y. (2013), "Tracking industrial energy efficiency trends using index decomposition analysis," Energy Economics, 40, 1014-1021.
- Ang, B.W., Xu, X.Y. and Su, B. (2015), "Multi-country comparisons of energy performance: The index decomposition analysis approach," Energy Economics, 47, 68-76.
- Baron, R.M. and Kenny, D.A. (1986), "The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual strategic and statistical considerations," Journal of Personality and Social Psychology, 51, 1173-1182.
- Boyd, G.A. (2017), "Comparing the statistical distributions of energy efficiency in manufacturing: meta-analysis of 24 case studies to develop industry-specific energy performance indicators(EPI)," Energy Efficiency, 10, 217-238.
- Chen, K.H., Cheng, J.C., Lee, J.M., Li, L.Y. and Peng, S.Y. (2020). "Energy efficiency: Indicator,

- estimation, and a new idea,” *Sustainability*, 12(12), 4944.
- Chen, M., Sinha, A., Hu, K. and Shah, M. I. (2021). “Impact of technological innovation on energy efficiency in industry 4.0 era: Moderation of shadow economy in sustainable development,” *Technological Forecasting and Social Change*, 164, 120521.
- Cole, M.A., Elliott, R.J., Okubo, T. and Zhou, Y. (2013), “The carbon dioxide emissions of firms: a spatial analysis,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 65, 290-309.
- Demircan Cakar, N., Gedikli, A., Erdogan, S. and Yildirim, D.C. (2021), “A comparative analysis of the relationship between innovation and transport sector carbon emissions in developed and developing Mediterranean countries,” *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45693-45713.
- Du, K. and Li, J. (2019), “Towards a green world: How do green technology innovations affect total-factor carbon productivity,” *Energy Policy*, 131, 240-250.
- Du, M., Wang, B. and Zhang, N. (2018), “National research funding and energy efficiency: evidence from the National Science Foundation of China,” *Energy Policy*, 120, 335-346.
- Ekins, P., Pollitt, H., Summerton, P. and Chewpreecha, U. (2012), “Increasing carbon and material productivity through environmental tax reform,” *Energy Policy* 42, 365-376.
- Fan, L.W., Pan, S.J., Liu, G.Q. and Zhou, P. (2017). “Does energy efficiency affect financial performance? Evidence from Chinese energy-intensive firms,” *Journal of Cleaner Production*, 151, 53-59.
- Fan, L.W., You, J. and Zhang, W. (2021), “How does technological progress promote carbon productivity? Evidence from Chinese manufacturing industries,” *Journal of Environmental Management*, 277. 111325.2.
- Fethi, S. and Rahuma, A. (2020), “The impact of eco-innovation on CO₂ emission reductions: Evidence from selected petroleum companies,” *Structural Change and Economic Dynamics*, 53, 108-115.
- Filippini, M. and Hunt, L.C. (2016), “Measuring persistent and transient energy efficiency in the US,” *Energy Efficiency*, 9, 663-675.
- Garcia-Quevedo, J. and Jove-Llopis, E. (2021), “Environmental policies and energy efficiency investments: An industry-level analysis,” *Energy Policy*, 156, 112461.
- Gronroos, C. and Ojasalo, K. (2004), “Service productivity: Towards a conceptualization of the transformation of inputs into economics results in services,” *Journal of Business Research*, 57(4), 414-423.
- Guo, J., Kubli, D., & Saner, P (2021), “The economics of climate change: no action not an option,” The Swiss Re Institute, available at <https://www.swissre.com/dam/jcr:e73ee7c3-7f83-4c17-a2b8-8ef23a8d3312/swiss-re-institute-expertise-publication-economics-of-climate-change.pdf> (accessed on Jan. 17, 2022).
- Hart, S.L. (1995), “A natural-resource-based view of the firm,” *Academy of Management Review*,

20(4), 986-1014.

- Henderson, R.B., Reinert, S.A. and Oseguera, M. (2020), "Climate change in 2020: Implications for business," Harvard Business School Press Case. 9-320-087.
- Howard-Grenville, J., Buckle, S.J., Hoskins, B.J., and George, G. (2014), "Climate change and management," *Academy of Management Journal*, 57(3), 615-623.
- Hu, X. and Liu, C. (2016), "Carbon productivity: a case study in the Australian construction industry," *Journal of Cleaner Production*, 112, 2354-2362.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014), *The Fifth Assessment*.
- International Energy Agency (IEA) (2016), *World Energy Outlook 2016*.
- International Energy Agency (IEA) (2018), *World Energy Outlook 2018*.
- International Energy Agency (IEA) (2018), *World Energy Outlook 2019*.
- Jung, H., Song, S., Ahn, Y., Hwang, H. and Song, C. (2021), "Effects of emission trading schemes on corporate carbon productivity and implications for firm-level responses," *Scientific Reports* 11, 11679.
- Lee, S. (2022), "Justifications of stakeholder capitalism theory of the corporation: Concepts, history, legal backgrounds, and issues," *Korean Management Review*, 51(5), 1297-1322.
- Lee, S.Y. (2013). Existing and anticipated technology strategies for reducing greenhouse gas emissions in Korea's petrochemical and steel industries. *Journal of Cleaner Production*, 40, 83-92.
- Liu, J., Yang, Q., Ou, S. and Liu, J. (2022), "Factor decomposition and the decoupling effect of carbon emissions in China's manufacturing high-emission subsectors," *Energy*, 248, 123568.
- Marin, G. and Palma, A. (2017), "Technology invention and adoption in residential energy consumption: a stochastic frontier approach," *Energy Economics*, 66, 85-98.
- Mo, J.Y. (2022). "Technological innovation and its impact on carbon emissions: evidence from Korea manufacturing firms participating emission trading scheme," *Technology analysis & Strategic management*, 34(1), 47-57.
- Mo, J.Y. (2023), "Do environmental policy and innovation improve carbon productivity? Evidence from the Korean Emission Trading Scheme," *Energy & Environment*, 34(3), 445-462.
- Peng, L., Zeng, X., Wang, Y. and Hong, G-B. (2015), "Analysis of energy efficiency and carbon dioxide reduction in the Chinese pulp and paper industry," *Energy Policy*, 80, 65-75.; Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., Harnisch, J. (2009), "Industrial energy efficiency and climate change mitigation," *Energy Efficiency*, 2, 109-123.
- Popp, D. (2012), *The role of technological change in green growth*, World Bank.
- Porter, M.E. and Linde, C.V.D. (1995), "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship," *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97-118.
- Saudi, M.H.M., Sinaga, O., Roespinoedji, D. and Ghani, E.K. (2019), "The impact of technological

- innovation on energy intensity: evidence from Indonesia,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(3), 11.
- Shahiduzzaman, M. and Alam, K. (2013). “Changes in energy efficiency in Australia: a decomposition of aggregate energy intensity using logarithmic mean Divisia approach,” *Energy Policy*, 56, 341-351.
- Song, F. and Yu, Y. (2018), “Modelling energy efficiency in China: a fixed-effects panel stochastic frontier approach,” *Economics and Political Studies*, 6(2), 158-175.
- Stern, N. (2007), *The economics of climate change: The Stern review*, Cambridge, UK.
- Su, B. and Ang, B.W. (2015), “Multiplicative decomposition of aggregate carbon intensity change using input.output analysis,” *Applied Energy*, 154, 13-20.
- Sun, H., Edziah, B.K., Kporsu, A.K., Sarkodie, S.A. and Taghizadeh-Hesary, F. (2021), “Energy efficiency: The role of technological innovation and knowledge spillover,” *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120659.
- Sun, H., Edziah, B.K., Sun, C. and Kporsu, A.K. (2019), “Institutional quality, green innovation and energy efficiency,” *Energy Policy*, 135, 111002.
- Trevlopoulos, N.S., Tsalis, T.A., Evangelinos, K.I., Tsagarakis, K.P., Vatalis, K.I. and Nikolaou, I.E. (2021), “The influence of environmental regulations on business innovation, intellectual capital, environmental and economic performance,” *Environment Systems and Decisions*, 41, 163-178.
- Trianni, A., Cagno, E. and Worrell, E. (2013), “Innovation and adoption of energy efficient technologies: An exploratory analysis of Italian primary metal manufacturing SMEs,” *Energy Policy*, 61, 430-440.
- Wang, Q., Wang, X. and Li, R. (2022), “Does urbanization redefine the environmental Kuznets curve? An empirical analysis of 134 Countries,” *Sustainable Cities and Society*, 76, 103382.
- Weina, D., Gilli, M., Mazzanti, M. and Nicolli, F. (2016), “Green inventions and greenhouse gas emission dynamics: a close examination of provincial Italian data,” *Environmental Economics and Policy Studies*. 18, 247-263.
- Wu, J., An, Q., Yao, X. and Wang, B. (2014), “Environmental efficiency evaluation of industry in China based on a new fixed sum undesirable output data envelopment analysis,” *Journal of Cleaner Production*, 74, 96-104.
- Wurlod, J-D. and Noailly, J. (2018), “The impact of green innovation on energy intensity: An empirical analysis for 14 industrial sectors in OECD countries,” *Energy Economics*, 71, 47-61.
- Xie, X. Huo, J. and Zou, H. (2019), “Green process innovation, green product innovatio, and corporate financial performance: A content analysis method,” *Journal of Business Research*, 101, 697-706.
- Zaim, O. and Taskin, F. (2000), “Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: a non-parametric approach,” *Journal Environmental Management*, 58, 95-107.

- Zhang, Y.J., Peng, Y.L., Ma, C.Q., and Shen, B. (2017). "Can environmental innovation facilitate carbon emissions reduction? Evidence from China," *Energy Policy*, 100, 18-28.
- Zhou, P., Ang, B. and Han, J. (2010), "Total factor carbon emission performance: a malmquist index analysis," *Energy Economics*, 32, 194-201.
- Zhu, R., Zhao, R., Sun, J., Xiao, L., Jiao, S., Chuai, X., Zhang, L. and Yang, Q. (2021), "Temporospatial pattern of carbon emission efficiency of China's energy-intensive industries and its policy implications," *Journal of Cleaner Production*, 286, 125507.

웹사이트

<https://www.visualcapitalist.com/sp/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country>

<https://www.climateimpact.com/news-insights/fortune-global-500-climate-commitments>