

일본의 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향

후시웨*, 팡더량**

목 차	
I. 서론	V. 추가 분석: 산업 이질성과 작용경로
II. 선행연구 검토와 이론적 논의	VI. 결론 및 정책적 시사점
III. 연구자료와 분석모형	
IV. 실증분석 결과	

| 논문요약 |

기존 연구는 주로 에너지 소비 총량, 에너지 구조 및 에너지 이용효율이 녹색 성장에 미치는 영향에 주목해 왔다. 그러나 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성(GTFP)에 미치는 영향에 대해서는 실증적 검토가 충분하지 않다. 본 연구는 1995~2023년 일본의 산업별 자료를 활용하여 패널자료를 구축하고, 녹색 솔로우 모형을 이론적 기반으로 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 분석하였다. 분석에는 양방향 고정효과모형을 적용하였으며, 산업별 이질성과 구조 효과 및 에너지 이용 효과를 함께 검토하였다. 분석 결과, 산업 간 에너지 소비구조 변화는 녹색 전요소생산성과 유의한 음(-)의 관계를 보였다. 산업별 이질성 분석에서는 이러한 음(-)의 관계가 주로 농림서비스업군에서 나타난 반면, 제조업군에서는 통계적으로 유의하지 않았다. 전체 표본을 대상으로 한 효과분해 결과, 구조 효과는 녹색 전요소생산성과 유의한 정(+)의 관계를 보였으나 에너지 이용 효과는 통계적으로 유의하지 않았다. 산업군별 분석에서는 농림서비스업군의 에너지 이용 효과가 유의한 음(-)의 관계를 보인 반면 구조 효과는 유의하지 않았으며, 제조업군에서는 두 효과 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 이러한 결과는 에너지 소비

* 제1저자 및 교신저자: 길림대학 동북아학원 박사과정.

** 공동저자: 길림대학 동북아학원 교수.

구조 조정이 녹색 전요소생산성에 미치는 영향이 산업별 특성에 따라 상이하
며, 그 영향의 방향과 작용경로가 각 산업의 에너지 이용방식과 생산구조에 따
라 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서 이를 단일한 정책적 틀로 설명하거나 접
근하기보다는 산업별 특성에 적합한 차별화된 조정전략을 마련할 필요가 있다.

▪ 주제어 : 일본, 에너지 소비, 녹색 전요소생산성, 산업구조, 에너지정책

I. 서론

전 세계적으로 기후변화 대응이 중요한 과제로 부상함에 따라 각국은 저
탄소 발전을 지속적으로 추진하고 있다. ‘공동의 그러나 차별화된 책임
(Common but Differentiated Responsibilities)’ 원칙에 따라 국가들은 자국
의 발전 단계와 역량에 상응하는 온실가스 감축 책임을 부담하고 있으며, 특
히 선진경제권은 상대적으로 높은 수준의 감축 의무를 이행하고 있다. 이러
한 흐름은 단순히 온실가스 감축 목표의 달성에 그치지 않고, 자원 및 환경
제약하에서 경제성장의 질을 제고하고 환경성과와 경제효율성을 조화롭게
향상시키는 데에도 중점을 두고 있다. 이러한 배경에서 에너지 이용방식과
자원배분의 효율성을 제고하여 녹색성장을 실현하는 방안은 에너지경제학
과 환경경제학 분야의 중요한 연구 주제로 부각되고 있다. 기존 연구는 주
로 1차 에너지구조의 최적화, 에너지 소비 총량의 관리, 에너지 이용효율의
향상 등을 중심으로 저탄소 발전을 논의해 왔다. 그러나 에너지 자원이 산
업 간에 재배분되는 과정에서 나타나는 구조적 변화에 대해서는 상대적으로
충분한 관심이 이루어지지 않았다. 실제로 산업 간 에너지 소비구조의 변화
는 산업구조 자체의 변화를 반영할 뿐만 아니라, 에너지 생산요소가 산업 간
에 재배분되는 과정을 의미하며, 자원배분의 효율성과 기술 선택 경로를 통
해 녹색성장에 영향을 미칠 가능성이 있다.

일본은 자원이 상대적으로 부족하고 해외 에너지 의존도가 높은 선진경
제국으로, 장기간에 걸쳐 에너지 절약 정책, 산업 고도화 및 녹색성장을 추

진하는 과정에서 대표적인 에너지 소비 특성을 형성해 왔다. 따라서 일본은 산업 간 에너지 배분과 녹색성장 간의 관계를 분석하기에 적합한 사례라 할 수 있다. 이에 본 연구는 일본의 4대 산업 분류에 대한 패널자료를 활용하여 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고, 아울러 산업별 이질성을 추가적으로 검토하고자 한다. 이를 통해 관련 연구 분야에 새로운 실증적 근거를 제시하고, 자원 제약 조건 하에 있는 선진경제국의 녹색성장 효율성 제고를 위한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

본 연구의 기여는 다음의 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 일본이라는 대표적인 자원 제약형 선진경제국의 에너지 전환과 녹색성장에 관한 실증적 근거를 확장한다. 일본은 오랫동안 제한된 에너지 자원 부존, 높은 해외 에너지 의존도 및 강화되는 기후변화 제약이라는 복합적인 조건에 직면해 왔으며, 에너지구조 조정, 에너지 절약정책 및 저탄소 기술개발과 관련하여 풍부한 정책적 경험을 축적해 왔다. 본 연구는 일본의 장기적인 산업 수준 자료를 이용하여 에너지 소비구조 변화와 녹색 전요소생산성 간의 관계를 분석하고, 일본의 에너지 전환 및 관련 정책의 전개와 연계하여 그 현실적 의미를 검토한다. 이를 통해 자원 제약형 경제가 에너지 전환과 녹색성장을 추진하는 과정에 활용할 수 있는 실증적 참고를 제공한다.

둘째, 녹색성장에 관한 기존 연구의 분석시각을 산업 간 에너지 생산요소 배분의 차원으로 확장한다. 기존 연구는 주로 경제성장, 오염배출 및 감축기술 진보 등의 관점에서 지속가능한 성장의 조건을 설명해 왔다. 본 연구는 이에 더하여 산업 간 에너지 생산요소 배분에 주목하고, 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 어떠한 영향을 미치는지를 실증적으로 검증한다. 이를 통해 거시적 차원의 녹색성장 문제와 산업 수준의 에너지 생산요소 배분을 연결한다.

셋째, 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향의 산업별 이질성과 작용경로를 보다 구체적으로 규명한다. 본 연구는 전체적인 영향뿐만 아니라 산업별로 나타나는 차별적인 특성을 검토하고, 나아가 에너지 소비구조 변화의 영향을 구조 효과와 에너지 이용 효과로 분해하여 분석한다. 이를 통해 에너지 소비 총량이나 전체적인 에너지구조만을 근거로

에너지 전환의 효과를 판단하는 데서 벗어나, 에너지 생산요소의 재배분이 산업별 녹색 생산성에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 보다 세분화된 실증적 근거를 제시한다. 또한 이러한 분석은 산업유형별 특성에 적합한 차별화된 에너지 전환 및 녹색 생산성 제고 정책을 설계하는 데 근거를 제공한다.

II. 선행연구 검토와 이론적 논의

1. 에너지 소비구조와 녹색성장에 관한 선행연구

에너지 소비구조의 변화, 에너지 생산요소의 배분 및 녹색성장 간의 관계에 관한 기존 연구는 주로 에너지 배분방식이 경제발전의 효율성에 미치는 영향, 산업별 에너지 소비의 차이, 그리고 에너지 요인이 녹색 전요소생산성에 미치는 영향 등을 중심으로 이루어져 왔다.

에너지는 중요한 생산요소로서 투입 규모, 이용방식 및 배분구조의 변화가 경제 운영의 효율성과 지속가능한 발전 수준에 중요한 영향을 미친다. 일부 연구는 이론적 관점에서 에너지 이용방식의 변화가 경제발전의 효율성에 미치는 영향을 분석하였다. 스단과 왕레이는 에너지 이용방식의 혁신이 신산업의 발전을 촉진하고 경제효율성을 제고할 수 있으며, 에너지 혁명이 세계 경제 발전을 견인하는 중요한 추세가 되고 있다고 지적하였다(史丹·王蕾 2015). 웨이웨이와 쑹웨이팅은 실질저축을 포함한 DSGE 모형을 이용하여 에너지 전환과 경제의 지속가능한 성장 간의 관계를 분석한 결과, 에너지 전환 과정에는 정상상태 전환(steady-state transition)의 특성이 존재하며, 에너지 전환의 추진은 경제를 비지속가능한 상태에서 지속가능한 상태로 점진적으로 전환시키는 데 기여한다고 주장하였다(魏巍 2018). 쉬리자오는 에너지를 독립적인 생산요소로 경제성장모형에 포함시켜야 한다고 제안하면서, 화석에너지에 장기 의존하는 성장방식은 지속가능하지 않으며, 녹색성장을 실현하기 위해서는 에너지 소비구조가 청정에너지 중심으로 전환되어야 한다고 주장하였다(許麗姣 2019). 이들 연구는 에너지 이용방식과 소비구조의 변화가 에너지 공급체계뿐 아니라 산업발전, 생산비용 및 생산효율성의 변화를 통해 경제

성장의 질에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

실증연구에서는 에너지 소비구조의 변화가 경제성장에 미치는 영향을 다각도로 검증하였다. 마르카키 등은 그리스의 청정에너지 투자에 대한 분석을 통해 특정 에너지 절감 정책의 시행과 재생에너지 기술의 보급이 국내총생산(GDP) 증가와 고용 창출에 유의한 효과를 가져온다고 보고하였다(Markaki et al. 2013). 알페와 오구즈 역시 유럽연합(EU) 국가를 대상으로 한 분석에서 재생에너지 소비가 경제성장을 촉진하는 것으로 나타났다고 보고하였다(Alper & Oguz 2016). 첸취안은 중국 자료를 이용한 연구에서 에너지 절약 편향적 기술진보가 전요소생산성을 향상시켜 경제성장을 촉진한다고 분석하였다(錢娟 2019). 장홍위는 에너지 전환의 종합평가모형을 활용하여 중국 에너지 시스템 전환의 비용과 편익을 분석한 결과, 풍력 및 태양광 발전의 대규모 확대는 에너지 비용 절감뿐 아니라 설비 수출 확대, 고용 증대 및 탄소배출로 인한 사회적 비용 감소에도 기여한다고 주장하였다(張鴻宇 2021).

반면 에너지 소비 변화가 경제성장에 항상 긍정적인 영향을 미치는 것은 아니라는 연구도 존재한다. 아페르기스와 페인은 16개 신흥시장국의 패널자료를 이용한 분석에서 재생에너지 전력소비와 경제성장 간에는 장기균형관계가 존재하지만, 재생에너지 전력소비가 경제성장을 촉진하는 장기효과는 통계적으로 유의하지 않다고 보고하였다(Apergis & Payne 2011). 자오신위는 중국을 대상으로 에너지 투자와 경제성장의 관계를 분석한 결과, 에너지 투자는 경제성장에 시차효과를 가지며 양자 간 장기 공적분 관계는 존재하지 않지만, 에너지 투자가 경제성장의 일방향 그랜저 원인임을 확인하였다(趙新宇 2021). 한동르는 에너지 전환을 에너지구조 전환, 에너지기술 전환 및 에너지정책 전환으로 구분하여 분석한 결과, 에너지 전환과 경제성장의 질 사이에는 유의한 문턱효과와 비선형성이 존재한다고 밝혔다. 또한 청정 에너지 개발정책과 에너지 절약정책은 단기적인 정책효과는 있으나 지속성이 약한 반면, 신에너지 산업정책은 단기효과는 제한적이지만 장기적으로 경제성장의 질을 근본적으로 향상시키는 데 기여하며, 정책조합이 단일 정책수단보다 더 효과적인 것으로 나타났다(韓冬日 2021). 오잘과 아슬란은 터키를 대상으로 한 연구에서 재생에너지 소비가 경제성장에 부정적인 영향을 미친다고 보고하면서, 재생에너지 소비와 경제성장 간의 관계에 대한 기존

연구결과가 일관되지 않음을 지적하였다(Ocal & Aslan 2013). 샤바즈 등은 인도를 대상으로 한 연구에서 에너지 소비와 경제성장 간에는 비대칭적 관계가 존재하며, 에너지 소비 감소는 경제성장에 유의한 영향을 미치지만 에너지 소비 증가는 통계적으로 유의한 영향을 미치지 않는다고 분석하였다(Shahbaz et al. 2017).

한편 산업 간 에너지 소비의 배분 차이 역시 경제효율성과 녹색성장에 영향을 미치는 중요한 요인으로 주목받고 있다. 기존 연구에 따르면 산업별 생산방식, 에너지 의존도 및 기술수준의 차이로 인해 에너지 소비 변화가 산업별로 상이한 경제효과를 초래할 수 있다. 치즈신 등은 산업의 경공업·중공업 구조 변화가 에너지 소비에 유의한 영향을 미치며, 특히 중공업 비중의 증가는 산업 에너지 집약도를 크게 높인다고 분석하였다(齊志新 외 2007). 박정옥·김수이(2013)는 한국과 일본 산업부문의 에너지 소비를 생산효과, 구조효과 및 집약도 효과로 분해하여 비교한 결과, 일본에서는 산업구조 변화가 에너지 소비 감소에 중요한 역할을 하였으며, 구조효과의 기여가 집약도 효과보다 상대적으로 크게 나타났음을 보고하였다. 쉬강과 판치즈는 산업별 에너지 소비, 산업성장 및 에너지 이용효율 사이에는 장기균형관계가 존재하며, 에너지 이용효율 개선 효과는 산업별로 차이를 보인다고 지적하였다. 특히 서비스업, 운송업 및 농업에서의 에너지 이용효율 향상이 에너지 소비 절감에 더욱 효과적인 것으로 나타났다(徐剛·潘祺志 2009). 김수이는 국내 제조업을 대상으로 한 LMDI 요인분해 분석에서 생산효과가 에너지 소비 증가를 주도한 반면 산업구조 변화와 에너지집약도 개선은 에너지 소비를 감소시키는 방향으로 작용하였으며, 이러한 효과의 크기와 기여도는 산업별로 상이하게 나타난다고 보고하였다(김수이 2011). 후속 연구에서는 전력 소비를 대상으로 분석 범위를 확장하여 생산효과와 전력화효과가 소비 증가를 견인하는 반면 산업구조효과와 에너지집약도효과는 소비를 억제하는 방향으로 작용하며, 이러한 영향 역시 산업별 특성에 따라 차이를 보인다는 점을 확인하였다(김수이 2023). 치사오저우와 리양은 서비스업의 재생에너지 소비 증가는 경제성장을 유의하게 촉진하며, 여러 에너지원 가운데 풍력에너지 소비 증가의 긍정적 효과가 가장 뚜렷하다고 보고하였다(齊紹洲·李楊 2017). 귀징과 왕타오는 지역별 에너지 소비와 경제성장 간의 관계가 동태

성, 비동조성 및 주기성을 가지며, 이러한 관계는 지역의 산업구조, 에너지 소비구조 및 경제발전 방식 등에 의해 복합적으로 영향을 받는다고 분석하였다(郭晶·王濤 2017). 또한 자오진원과 판지타오는 LSTR 모형을 이용하여 에너지 소비와 경제성장 간에는 비선형성, 비대칭성 및 단계적 특성이 존재하며, 경제성장 단계에 따라 에너지 소비가 경제성장에 반응하는 강도 역시 달라진다고 밝혔다. 특히 고성장 단계에서는 에너지 소비가 경제성장보다 더 빠르게 확대되는 경향을 보였다(趙進文·范繼濤 2007).

최근에는 녹색성장 개념의 확산과 함께 경제성장을 단순한 산출 규모만으로 평가하기보다 자원소비와 환경오염을 함께 고려하는 녹색 전요소생산성(Green Total Factor Productivity: GTFP)이 녹색성장 수준을 평가하는 핵심 지표로 활용되고 있다(李斌 외 2013; Sun & Zhao 2025; 柴智慧 외 2026; 邵慰·魏賽特 2026). 녹색 전요소생산성은 전통적인 전요소생산성과 달리 생산과정에서의 자원 투입과 환경오염 등 비기대산출을 동시에 고려함으로써 경제성장의 질과 지속가능성을 보다 종합적으로 평가할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 관점에서 에너지 투입 규모, 에너지 배분구조 및 에너지 이용효율의 변화는 모두 녹색 전요소생산성에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 기존 연구는 주로 에너지 소비 총량, 에너지구조 또는 에너지 이용효율과 같은 거시적 요인에 초점을 맞추고 있어, 에너지 자원이 산업 간에 재배분되는 과정이 녹색 전요소생산성에 미치는 효과에 대해서는 충분한 실증적 검토가 이루어지지 않았다.

종합하면, 기존 연구는 에너지 이용방식, 에너지 소비구조 및 에너지 이용효율의 변화가 경제성장과 녹색발전에 미치는 영향을 다각도로 규명함으로써 에너지 배분과 경제성과 간의 관계를 이해하는 데 중요한 기반을 제공하였다. 그러나 산업 간 에너지 소비구조 변화는 에너지 생산요소의 재배분을 보여주는 핵심적인 지표임에도 불구하고, 이러한 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향과 산업별 이질성에 대해서는 충분한 실증적 검증이 이루어지지 않았다. 이에 본 연구는 일본의 4대 산업 패널자료를 활용하여 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 실증적으로 분석하고, 산업별 이질성을 함께 검토하고자 한다.

2. 녹색 솔로우 모형

브록과 테일러는 오염 감축을 위한 경제적 노력, 즉 감축비용을 외생변수로 설정하여 전통적 솔로우 모형에 도입하였다. 이 모형은 환경오염을 경제적 산출에 수반되는 불가피한 부산물로 보는 한편, 사회가 오염 감축을 위해 투입하는 자원을 경제적 비용으로 명시함으로써 생산과 환경개선 간의 상충관계를 분석한다(Brock & Taylor 2010).

첫째, 오염의 발생과 감축이다. 단위 산출당 발생하는 오염량을 외생적으로 주어진 상수 Ω_t 라고 하면, 경제활동에 따라 발생하는 순오염량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_t &= \Omega_t F_t - \Omega_t A(F_t, F_t^A) \\ &= \Omega_t F_t \left(1 - A\left(1, \frac{F_t^A}{F_t}\right) \right) \\ &= \Omega_t F_t a(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 F_t 는 총산출, $\Omega_t F_t$ 는 감축 이전의 잠재적 오염배출량, $F_t A$ 는 경제활동 가운데 오염 감축에 투입되는 부분을 의미한다. $\Omega_t A(F_t, F_t^A)$ 는 오염 감축량을 나타내는 함수로서 각 인자에 대해 증가함수이면서 엄격한 오목함수이다. 녹색 솔로우 모형은 오염 감축함수가 1차 동차성을 갖는다고 가정하며, 이에 따라 감축 노력의 증가에 따른 한계 감축효과는 점차 감소한다.

오염 감축에 자원이 투입되면 소비와 투자에 사용할 수 있는 실제 산출은 총산출에서 감축투입을 차감한 값으로 정의된다.

$$\begin{aligned} Y_t &= F_t - F_t^A \\ &= (1 - \theta)F_t \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\theta = \frac{F_t^A}{F_t}$ 는 전체 산출 가운데 오염 감축에 투입되는 비율을 의미한다. 따라서 감축 노력의 확대는 환경오염을 줄이는 동시에 소비와 투자에 활용할 수 있는 산출을 감소시키는 비용을 수반한다.

둘째, 환경제약하의 경제성장이다. 감축비용을 고려할 경우 녹색 솔로우 모형의 집약형 자본동학식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{k} = sf(k)(1 - \theta) - (n + \delta + g_B)k \quad (3)$$

단위 유효노동당 자본축적은 실제 투자와 균형투자 간의 차이에 의해 결정된다. 여기서 s 는 저축률, n 은 인구증가율, δ 는 자본감가상각률, g_B 는 재화생산 부문의 기술진보율을 의미한다. 생산함수가 이나다 조건을 충족하면, θ 가 일정할 때 경제는 어떠한 초기 자본수준 $k(0) > 0$ 에서 출발하더라도 전통적 솔로우 모형과 동일하게 유일한 정상상태로 수렴한다.

셋째, 지속가능한 성장의 조건이다. 경제가 균형성장경로에 접근하면 총산출, 소비 및 자본은 일정한 비율로 증가하며, 이에 상응하는 1인당 변수 역시 기술진보에 따라 증가한다. 그러나 이러한 성장경로가 지속가능하기 위해서는 경제성장과 동시에 환경오염이 개선되어야 한다. 균형성장경로에서 총배출량의 증가율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_E = g_B + n - g_A \quad (4)$$

여기서 g_E 는 총배출량 증가율, g_A 는 감축기술 진보율을 의미한다. 지속가능한 성장은 1인당 소비 증가와 환경개선이 동시에 이루어지는 균형성장경로를 요구하므로, 다음 조건이 충족되어야 한다.

$$g_B > 0 \text{ 且 } g_A > g_B + n \quad (5)$$

식 (5)는 재화생산 부문의 기술진보가 1인당 소득 증가를 위해 필요하며, 감축기술의 진보율은 총산출 증가율을 상회해야 오염배출을 줄이고 환경을 개선할 수 있음을 의미한다.

녹색 솔로우 모형은 자연자원의 소비와 오염배출을 경제성장 과정에 포함한 전통적 솔로우 성장모형의 환경적 확장이라 할 수 있다. 전통적 경제성장모형이 주로 자본, 노동 및 기술진보에 초점을 맞추고 환경·에너지 제약을 충분히 고려하지 않았다면, 녹색 솔로우 모형은 에너지 소비와 환경오염을 함께 고려하여 경제성장의 지속가능성과 그 조건을 분석한다. 이 모형은 자본, 노동 및 기술진보 외에 자연자원과 오염배출을 주요 변수로 도입하고, 환경규제 및 오염 감축과 관련된 함수를 통해 환경적 제약을 생산과 성장 과정에 반영한다. 이에 따라 생태적 제약하에서 장기적인 정상상태를 유지하기 위해서는 자본축적과 기술진보뿐 아니라 자원 이용효율의 향상과 오염

배출의 지속적인 감축이 함께 이루어져야 한다.

이후 녹색 솔로우 모형은 탄소배출과 경제성장 간의 관계를 분석하는 다양한 연구에 활용되어 왔다. Ferrara와 Guerrini(2009)는 녹색 솔로우 모형을 바탕으로 오염저감 부문의 기술진보를 Solow - Swan 모형에 포함하여, 오염저감 기술의 진보 속도가 생산 부문의 기술진보 속도를 상회할 경우 지속가능한 성장이 가능하다고 보았다. Hao와 Wei(2015)는 녹색 솔로우 모형을 이용하여 중국의 CO₂ 배출 전환점을 예측하고, 탄소효율이 배출 정점의 시기를 결정하는 핵심 요인임을 제시하였다. Chen(2017)은 1950~2010년 유럽연합 자료를 이용하여 녹색 솔로우 모형의 설명력을 검증한 결과, 1인당 배출량이 환경쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve: EKC)의 궤적을 보이며 배출집약도의 감소 추세가 기후변화에 대한 국제적 관심이 본격화되기 이전부터 나타났음을 확인하였다. 최근 Bassetti et al.(2024)은 녹색 솔로우 모형에서 인적자본이 CO₂ 배출에 미치는 임계효과를 분석하였다. 이러한 연구들은 녹색 솔로우 모형이 탄소배출의 동태와 녹색성장 간의 관계를 분석하는 주요한 이론적 틀로 활용되어 왔음을 보여준다.

다만 기존 연구는 주로 국가 또는 지역 수준의 총량 배출경로와 환경쿠즈네츠곡선의 검증에 초점을 맞추어 왔으며, 생산요소로서의 에너지, 특히 산업 수준에서 나타나는 에너지 배분구조의 변화가 녹색성장에 미치는 영향에 대해서는 상대적으로 충분한 이론적·실증적 검토가 이루어지지 않았다. 에너지는 경제성장과 탄소배출을 연결하는 핵심적인 생산요소이므로, 산업 간 에너지 투입방식과 배분구조의 변화는 녹색 전요소생산성의 변화와 직접적으로 관련될 수 있다.

이러한 선행연구의 축적에도 불구하고, 녹색 솔로우 모형 자체는 에너지라는 생산요소가 서로 다른 산업 간에 재배분될 때 이러한 변화가 녹색성장에 미치는 구체적인 영향을 직접적으로 설명하지는 않는다. 산업 수준에서 에너지 소비는 단순히 에너지 소비 총량의 변화로만 나타나는 것이 아니라, 에너지 생산요소가 서로 다른 산업에 배분되는 비율이 동태적으로 변화하는 형태로도 나타난다. 이러한 변화는 산업별 투입요소의 구성, 자원배분 및 에너지 이용방식을 변화시키고, 나아가 경제적 산출과 오염배출에 영향을 미침으로써 최종적으로 녹색 전요소생산성의 변화로 나타날 수 있다.

따라서 녹색 솔로우 모형이 제시하는 경제성장과 환경제약 간의 기본적인 관계를 바탕으로, 산업 간 에너지 생산요소 배분의 관점에서 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 추가적으로 검토할 필요가 있다. 또한 산업별로 탄소생산성, 에너지 이용방식 및 기술적 조건이 서로 다르기 때문에 에너지 소비구조 변화에 대한 반응 역시 동일하지 않을 수 있다. 아울러 이러한 영향은 산업 간 에너지 생산요소의 재배분과 에너지 이용효율의 변화 등 서로 다른 경로를 통해 나타날 가능성이 있다. 이에 본 연구는 산업 간 에너지 소비구조 변화의 전체적인 영향, 산업별 이질성 및 작용경로의 세 측면에서 연구가설을 설정하고 이를 실증적으로 검증한다.

3. 작용 메커니즘과 연구가설

녹색 솔로우 모형은 경제성장 과정에서 생산의 확대가 환경오염을 심화시킬 수 있으며, 지속가능한 성장을 위해서는 생산기술의 발전과 오염 감축기술의 진보가 함께 이루어져야 함을 제시한다. 에너지는 생산활동의 핵심 투입요소인 동시에 탄소배출과 밀접하게 연관되어 있으므로, 에너지가 서로 다른 산업에 투입되는 방식과 그 배분구조는 경제성장과 환경성장에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다. 특히 산업별로 에너지 의존도, 생산기술, 탄소배출집약도 및 에너지 이용효율에서 상당한 차이가 존재한다는 점을 고려하면, 에너지 소비의 변화는 단순한 총량의 증감에 그치지 않고 에너지 생산요소의 산업 간 배분구조를 변화시킴으로써 녹색 전요소생산성에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구는 각 산업의 에너지 소비량이 전체 산업의 총에너지 소비량에서 차지하는 비중을 이용하여 산업 간 에너지 소비구조를 측정한다. 에너지 소비 총량의 변화와 달리 이 지표는 에너지 생산요소가 산업 간에 상대적으로 어떻게 배분되는지를 나타낸다. 이러한 변화는 각 산업의 생산활동 규모와 에너지 투입집약도를 변화시키고, 이를 통해 생산기술의 선택, 에너지 이용효율 및 탄소배출 수준에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 에너지 생산요소의 산업 간 이동이 반드시 녹색 전요소생산성의 향상으로 이어지는 것은 아니다. 에너지의 산업 간 재배분이 녹색성장에 유리하게 작용하는지는 에너지를 추가로 배분받은 산업이 이를 효과적으로 산출 증가로 전환할 수 있는지,

그리고 그 과정에서 에너지 이용효율이나 생산기술이 함께 개선되는지에 따라 달라질 수 있다.

이러한 논리에 따라 본 연구는 다음의 세 가지 단계에서 산업 간 에너지 소비구조 변화와 녹색 전요소생산성 간의 관계를 검토한다.

첫째, 산업 간 에너지 재배분의 전체 효과이다. 에너지 생산요소가 한 산업에서 다른 산업으로 재배분될 경우 해당 산업의 에너지 투입 규모가 변화할 뿐 아니라, 생산요소의 결합, 생산비용 및 에너지 이용방식에도 영향을 미쳐 산업의 생산효율성을 변화시킬 수 있다(胡曉 외 2026). 또한 산업의 에너지 소비행태 변화는 오염배출 수준의 변화를 초래하며(邵帥 외 2010), 이는 탄소배출을 비기대산출로 포함하는 녹색 전요소생산성에 영향을 미칠 수 있다. 산업별로 에너지 의존도, 기술수준, 에너지 이용효율 및 오염배출집약도 등에 차이가 존재하기 때문에 동일한 에너지 생산요소의 재배분이라도 서로 다른 생산 및 환경효과가 나타날 수 있다. 이에 다음과 같은 연구가설을 설정한다.

가설1 (H1): 산업 간 에너지 소비구조 변화는 녹색 전요소생산성에 유의한 영향을 미칠 것이다.

둘째, 산업 이질성의 원천이다. 에너지 생산요소가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향은 모든 산업에서 동일하지 않으며, 산업별 에너지 이용방식, 기술수준 및 오염배출 특성 등에 의해 달라질 수 있다. 탄소생산성은 탄소배출 제약하에서 산업이 경제적 산출을 창출하는 능력을 나타내며, 그 수준은 산업의 에너지 이용효율, 저탄소 기술수준 및 생산방식의 차이를 일정 부분 반영한다. 탄소생산성이 높은 산업은 일반적으로 자원이용 효율성도 상대적으로 높기 때문에 에너지 생산요소의 배분 변화가 생산활동에 미치는 영향이 탄소생산성이 낮은 산업과 다르게 나타날 수 있다. 다만 탄소생산성이 높은 산업에서도 에너지 소비구조의 변화가 자동적으로 녹색생산성의 향상으로 이어지는 것은 아니다. 에너지 투입의 변화가 생산성 증가로 효과적으로 전환되기 위해서는 생산기술의 개선이나 에너지 이용효율의 향상이 함께 이루어질 필요가 있다. 또한 산업별로 에너지 의존도, 에너지 대체 여건 및

기술개조 역량에서도 상당한 차이가 존재하므로, 동일한 산업 간 에너지 소비구조의 조정이 이루어지더라도 각 산업의 생산 및 환경적 반응은 상이하게 나타날 수 있다. 이에 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향은 산업의 탄소생산성 수준에 따라 차이를 보일 것으로 예상하고 다음과 같은 연구가설을 설정한다.

가설2 (H2): 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향은 탄소생산성 수준이 서로 다른 산업 간에 차이를 보일 것이다.

셋째, 전달경로를 구조 효과와 에너지 이용 효과로 분해한다. 산업 간 에너지 소비구조 변화의 전체 효과는 두 가지 차원으로 나누어 이해할 수 있다. 첫 번째는 특정 산업의 경제활동 규모 자체가 확대되거나 축소됨에 따라 해당 산업의 에너지 소비 비중이 변화하는 경우이다. 산업부가가치 비중이 높아지면 생산활동 규모가 확대되고 이에 따라 에너지 소비 비중도 증가할 수 있다. 이처럼 산업 규모의 변화에 따라 에너지 소비 비중이 변화하는 것은 산업구조 조정 과정에서 나타나는 에너지 배분구조의 변화를 반영하며, 이를 ‘구조 효과(structural effect)’라 할 수 있다.

두 번째는 산업 차원에서 단위 산출당 에너지 소비집약도가 변화함에 따라 에너지 소비 비중이 달라지는 경우이다. 산업 규모가 일정하더라도 에너지 이용효율이 향상되어 단위 산출당 에너지 소비가 감소하거나, 반대로 에너지 이용효율이 악화되면 해당 산업의 에너지 소비 비중은 변화할 수 있다. 이처럼 단위 산출당 에너지 소비의 변화에 따라 발생하는 에너지 소비 비중의 변동은 에너지 이용효율 차원의 조정을 반영하며, 이를 ‘에너지 이용 효과(energy-use effect)’라 할 수 있다.

두 경로의 이론적 의미는 서로 다르다. 구조 효과는 산업 규모가 확대되거나 축소되는 과정에서 에너지 배분도 함께 변화하는 데 초점을 둔다. 즉 산업부가가치 비중이 높아지면 에너지 소비 역시 증가할 수 있으며, 반대의 경우도 마찬가지이다. 반면 에너지 이용 효과는 주어진 산출 수준에서 에너지 소비집약도가 어떻게 변화하는지에 초점을 둔다. 단위 산출당 에너지 소

비의 감소는 에너지 이용효율의 향상을 의미하며, 반대로 단위 산출당 에너지 소비의 증가는 에너지 이용효율의 악화를 의미한다. 따라서 산업 간 에너지 소비구조 변화의 전체 효과를 구조 효과와 에너지 이용 효과로 추가적으로 분해하면 에너지 재배분이 녹색생산성에 영향을 미치는 구체적인 전달 경로를 식별할 수 있다. 이에 다음과 같은 연구가설을 설정한다.

가설3 (H3): 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향은 구조 효과와 에너지 이용 효과의 두 경로를 통해 전달될 것이다.

III. 연구자료와 분석모형

1. 분석모형의 설정

산업 간 에너지 소비구조 변화가 산업별 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 실증적으로 검증하기 위해 다음과 같은 기준 패널모형을 설정하였다.

$$TFPCH_Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 d_PEC_{it} + \beta_2 control_{it} + \gamma_i + \phi_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

여기서 i 는 산업 유형($i=1, 2, 3, 4$)을, t 는 연도를 의미한다. $TFPCH_Y_{it}$ 는 t 년 산업 i 의 녹색 전요소생산성 변화지수로, 환경 제약을 고려한 생산효율의 변화를 나타낸다. d_PEC_{it} 는 핵심 설명변수인 산업별 에너지 소비 비중의 연간 변화로, 해당 산업의 에너지 소비 비중이 확대되거나 축소되는 정도를 나타낸다. $control_{it}$ 는 통제변수 벡터이며, γ_i 는 시간에 따라 변하지 않는 산업별 특성을 통제하기 위한 산업고정효과를, ϕ_t 는 에너지가격 변동이나 기후정책 변화 등 각 연도에 공통적으로 작용하는 거시적 충격을 통제하기 위한 연도고정효과를 의미한다. ε_{it} 는 오차항이다. 따라서 기준모형은 산업고정효과와 연도고정효과를 동시에 포함하는 양방향 고정효과(two-way fixed effects) 모형으로 설정하였다.

산업의 특성을 고려하여 JIP(Japan Industrial Productivity Database)의

세부 산업을 농림목축어업·광업·건설업, 제조업, 제3차 산업 및 운송업의 네 개 산업군으로 재분류하였다(표 1 참조). 핵심계수 β_1 은 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 나타낸다.

2. 변수의 설정

본 연구는 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성(GTFP)에 미치는 영향을 분석하기 위해 1995~2023년 일본 4개 산업의 패널자료를 이용하여 실증분석을 실시하였다. 분석대상은 농림목축어업·광업·건설업, 제조업, 제3차 산업 및 운송업의 네 산업군이다. 운송업은 에너지 소비량과 탄소배출량이 크고 일본의 에너지 절약정책과 감축계획에서도 주요 정책대상으로 별도로 다루어져 왔다는 점을 고려하여 독립된 산업군으로 구분하였다. 이는 운송업의 특징이 제3차 산업의 평균적 특성에 의해 희석되는 것을 방지하기 위한 것이며, 이러한 분류는 본 연구에서 사용하는 일본 『종합에너지통계』의 산업 분류기준과도 일치한다.

후속 산업 이질성 분석에서는 1995~2023년 각 산업의 단위 산출당 에너지 소비량 평균을 탄소생산성 수준을 구분하기 위한 역방향 대리지표로 활용하였다. 이 지표는 2015년 연쇄가격 기준 산출 1조 엔당 원유환산 에너지 소비량(만 KL)으로 측정되며, 값이 낮을수록 탄소생산성이 상대적으로 높은 것으로 해석한다. 산업별 평균값은 농림목축어업·광업·건설업 14.77, 제조업 50.21, 제3차 산업 11.36, 운송업 203.34로 나타났다. 이에 따라 농림목축어업·광업·건설업과 제3차 산업을 ‘농림서비스업군’으로, 제조업과 운송업을 ‘제조운송업군’으로 구분하였다. 일본의 장기적인 정책에서도 제조업과 운송업은 에너지 절약 및 탄소배출 감축의 주요 정책대상으로 다루어져 왔다는 점에서 이러한 분류는 통계적 근거와 정책적 배경을 함께 가진다.

첫째, 종속변수는 녹색 전요소생산성 변화지수(TFPCHLY)이다. 본 연구는 노동(L), 자본(K) 및 에너지(E)를 투입요소로, 실질산출(Y)을 기대산출로, 이산화탄소 배출량(CO₂)을 비기대산출로 설정하고, 방향성 거리함수(Directional Distance Function: DDF)에 기초한 Malmquist - Luenberger 생산성지수를 이용하여 녹색 전요소생산성을 산출하였다(Ray & Desli

1997; 李斌 외 2013). 구체적으로 노동(L), 자본(K) 및 실질산출(Y) 자료는 일본 경제산업연구소(Research Institute of Economy, Trade and Industry: RIETI)의 JIP 데이터베이스(2026) 세부 산업자료를 이용하고, 각 세부 산업을 경제활동의 특성에 따라 앞서 제시한 네 개 산업군으로 통합하였다.¹⁾ 에너지(E)는 일본 경제산업성 자원에너지청의 『종합에너지통계』에서 제공하는 최종에너지 소비량을 이용하였다. 이산화탄소 배출량(CO₂)은 동 통계의 전력·열 배분 후(電氣·熱配分後) 기준 자료를 이용하였다. 이 기준은 발전 및 열 생산 과정에서 발생한 CO₂ 배출량을 전력과 열의 실제 소비량에 따라 각 최종소비부문에 배분하는 방식으로, 각 산업의 CO₂ 배출량에는 해당 산업의 전력 및 열 사용에 수반되는 간접배출이 포함된다. 이를 통해 산업별 탄소배출량이 각 산업의 실제 에너지 소비활동과 대응하도록 하였다. 원자료는 앞서 제시한 네 개 산업군에 따라 분류되어 있다.

기대산출은 실질산출과 실질부가가치를 각각 적용하여 두 가지 GTFP 지표를 산출하였다. 실질산출을 기대산출로 사용한 녹색 전요소생산성 변화지수는 TFPCH_Y로, 실질부가가치를 기대산출로 사용한 지표는 TFPCH_V로 정의하였다. 기준 회귀분석에서는 TFPCH_Y를 사용하고, TFPCH_V는 종속변수를 대체하는 강건성 검토에 활용한다.

둘째, 핵심 설명변수는 산업 간 에너지 소비구조 변화(d_PEC)이다. 이는 각 산업의 에너지 소비량이 네 산업 전체의 에너지 소비량에서 차지하는 비중의 변화를 이용하여 측정하며, 에너지 생산요소가 서로 다른 산업 간에 어떻게 배분되는지를 나타낸다. 특정 산업의 에너지 소비 비중이 증가하면 전체 에너지 소비구조에서 해당 산업이 차지하는 비중이 확대된 것을 의미하며, 반대로 비중이 감소하면 그 비중이 축소된 것을 의미한다. 에너지 소비의 절대량 변화와 비교하면, 에너지 소비 비중의 변화는 전체 산업의 총에너지 소비 변동에서 비롯되는 영향을 줄이면서 산업 간 에너지 배분구조의 조정 양상을 보다 직접적으로 포착할 수 있다. 산업별 에너지 소비 비중의 변

1) 노동투입(L)은 각 세부 산업의 실질부가가치가 해당 산업군의 실질부가가치에서 차지하는 비중을 가중치로 하여 세부 산업의 노동투입지수를 가중평균하였다. 자본투입(K)도 동일하게 실질부가가치 비중을 가중치로 사용하여 세부 산업의 자본서비스 투입지수를 가중평균하였다. GTFP는 인접 시점 간 변화지수이므로 산출된 값을 후 년도의 GTFP 자료로 사용하였다. 이에 따라 1994~2023년의 기초 투입·산출자료로부터 1995~2023년의 GTFP 자료를 구축하였다.

화는 거시적 에너지구조 전환이 산업 수준에서 나타난 결과로서, 생산요소 가격, 정책적 유인 및 외생적 충격이 복합적으로 작용하는 과정에서 에너지 생산요소가 생산효율성과 환경효율성이 서로 다른 산업 간에 재배분되는 과정을 반영한다.

셋째, 통제변수는 다음과 같이 설정하였다. ① 전통적 전요소생산성 증가율(TFP)은 기초적인 기술진보 효과를 통제하기 위한 변수이다. 이를 통해 녹색 솔로우 모형의 A(t)에 해당하는 일반적 기술혁신 효과를 분리하고, 에너지 전환으로 유발된 녹색기술 진보를 보다 정확하게 식별하고자 하였다. 녹색 전환은 기존 기술수준이 높은 산업에서 상대적으로 용이하게 나타날 수 있으므로, 전통적 전요소생산성을 통제하지 않을 경우 기초 기술역량의 영향을 에너지 소비구조 변화의 효과로 잘못 해석할 가능성이 있다. 이 변수는 각 산업의 실질부가가치 비중을 가중치로 사용하여 전통적 전요소생산성 증가율의 가중평균값으로 산출하였다.

② 산업 발전 규모(lnV)는 규모의 경제 효과를 통제하기 위한 변수이다. 이를 통해 시장규모의 변화로 발생하는 효율성 향상 또는 환경압력이 녹색 전요소생산성에 미치는 직접적인 영향을 통제하였다. 산업 발전 규모는 각 산업 유형에 포함된 세부 산업의 실질부가가치를 합산한 후 자연로그를 취하여 산출하였다.

③ 중간투입 의존도(intermed_share)는 생산의 외주화와 수직적 전문화 정도를 나타내며, 산업이 생산네트워크에서 차지하는 위치가 녹색 전요소생산성 측정에 미치는 영향을 통제하기 위해 사용하였다. 산출식은 다음과 같다.

$$\text{intermed_share}_{it} = \frac{Y_{it} - V_{it}}{Y_{it}} \quad (7)$$

여기서 Y_{it} 는 산업 i 의 t 년 실질산출을, V_{it} 는 실질부가가치를 의미한다.

<표 1> 산업 분류

유형	산업 구분	포함 산업
1	농림목축어업·광업·건설업	농업, 농업서비스업, 임업, 어업, 광업, 건설업(주택건설업), 토목공사업
2	제조업	농림목축어업 관련 식품가공·제조업(축산물·수산물·곡물제분 등의 식품 및 사료 포함), 음료·담배 제조업, 화학공업(기초화학제품·비료·화학섬유·의약품·석유 및 석탄제품 등 포함), 비금속광물제품 제조업(유리·시멘트·도자기 등 포함), 금속 및 금속제품 제조업(철강·비철금속 제련 및 각종 금속제품 포함), 기계·장비 제조업(일반기계·특수기계·사무용 장비·무기 등 포함), 전자·전기 제조업(반도체·전자부품·산업용 및 민생용 전기장비·통신장비·컴퓨터 등 포함), 운송장비 제조업(자동차 및 부품과 기타 운송장비 포함), 기타 제조업(목재가공·가구·인쇄·플라스틱·고무·가죽·시계 등 포함)
3	제3차 산업	전력·가스·열공급·수도업(전력·가스·열공급·상수도·산업용수·하수처리 포함), 폐기물처리업, 도·소매업, 우편·물류서비스업(우편 포함), 숙박·음식서비스업, 정보통신 및 콘텐츠산업(통신·방송·정보서비스·영상·음향·문자 콘텐츠 제작 포함), 금융·보험업, 부동산·임대업(주택·부동산·기업용 물품 임대 포함), 전문기술·사업서비스업(연구기관·광고·자동차 정비 및 기타 기업서비스 포함), 공공행정·사회보장·복지업(공무·교육·보건·의료·사회보험·사회복지·장기요양 포함), 생활서비스업(오락·세탁·이·미용·목욕 및 기타 개인서비스 포함)
4	운송업	철도운송업, 도로 화물·여객운송업, 수상운송업, 항공운송업, 기타 운송업 및 화물취급서비스업

▪ 주: 일본의 공식 통계에서는 전력·가스·열공급·수도업을 제3차 산업인 서비스업으로 분류한다. 운송업은 에너지 소비 규모가 크고 화석에너지 의존도가 높으며 감축경로가 상대적으로 독립적이라는 특성을 가진다. 이에 일본의 에너지정책 및 기후정책에서는 운송업을 일반적으로 독립된 부문으로 분석한다. 본 연구는 운송업의 에너지 소비 특성이 제3차 산업의 평균적 특성에 의해 희석되는 것을 방지하기 위해 운송업을 별도로 분류하고, 이를 토대로 네 가지 산업 유형을 구성하였다.

IV. 실증분석 결과

1. 기술통계

표 2는 주요 변수의 기술통계 결과를 제시한다. 최종 분석표본은 총 116개의 관측치로 구성된다. TFPCH_Y의 평균은 1.001, 표준편차는 0.010으로 나타나 표본기간 동안 네 산업군의 녹색 전요소생산성 변화지수가 전반적으로 비교적 안정적인 수준을 유지하였음을 보여준다. 지표의 특성상 TFPCH_Y가 1보다 크면 해당 기간의 녹색 전요소생산성이 향상되었음을, 1보다 작으면 감소하였음을 의미한다. 따라서 전체 표본에서는 녹색 전요소생산성이 전반적으로 완만하게 증가한 것으로 볼 수 있다. 실질부가가치를 기대산출로 사용하여 산출한 TFPCH_V의 평균 역시 1.001이며 표준편차는 0.008로, TFPCH_Y와 유사한 분포 특성을 보여 이후 강건성 검정에서 대체 종속변수로 활용하기에 적절하다.

핵심 설명변수인 산업 간 에너지 소비구조 변화(d_PEC)의 평균은 0이고 표준편차는 0.006이며, 최솟값은 -0.016, 최댓값은 0.020으로 나타났다. 이는 표본기간 동안 산업별 에너지 소비 비중의 연간 변화폭이 전반적으로 크지 않았지만 산업과 연도에 따라 일정한 차이가 존재했음을 보여준다.

통제변수 역시 횡단면과 시계열 차원에서 일정한 변이를 보여 후속 패널 회귀분석에 필요한 자료적 기반을 갖추고 있다.

<표 2> 변수의 기술통계

variable	N	mean	sd	min	max
TFPCH_Y	116	1.001	0.0100	0.951	1.040
d_PEC	116	0	0.00600	-0.0160	0.0200
TFP	116	0.00100	0.0400	-0.253	0.129
lnV	116	18.17	1.012	16.78	19.76
intermed_share	116	0.494	0.122	0.351	0.692
TFPCH_V	116	1.001	0.00800	0.957	1.033

2. 기준 회귀분석

본 연구는 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 검증하기 위해 산업고정효과와 연도고정효과를 포함한 양방향 고정효과모형을 적용하였다. 이를 통해 시간에 따라 변하지 않는 산업별 특성과 각 연도에 공통적으로 작용하는 거시경제 환경, 에너지시장 및 정책 변화 등의 영향을 통제하였다. 기준 회귀분석 결과는 표 3에 제시하였다.

모형 (1)은 핵심 설명변수인 d_PEC 만을 투입한 결과로, d_PEC 의 추정계수는 -0.627 이며 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이후 통제변수를 단계적으로 추가한 경우에도 핵심 설명변수의 계수는 일관되게 유의한 음(-)의 값을 유지하였다. 전통적 전요소생산성(TFP), 산업 발전 규모($\ln V$) 및 중간투입 의존도($intermed_share$)를 모두 통제한 모형 (4)에서 d_PEC 의 추정계수는 -0.599 로 나타났으며 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다.

이는 전통적 생산성, 산업 규모 및 중간투입 의존도를 통제한 이후에도 산업 간 에너지 소비구조 변화와 녹색 전요소생산성 간에 유의한 음(-)의 관계가 존재함을 보여준다. 즉 특정 산업의 에너지 소비 비중이 확대될수록 해당 산업의 녹색 전요소생산성이 낮아지는 경향이 나타난다. 이러한 결과는 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 유의한 영향을 미칠 것이라는 가설 1을 지지한다.

<표 3> 기준 회귀분석 결과

	(1)	(2)	(3)	(4)
	TFPCH_Y	TFPCH_Y	TFPCH_Y	TFPCH_Y
d_PEC	-0.627^{***}	-0.631^{***}	-0.620^{***}	-0.599^{***}
	(0.152)	(0.158)	(0.161)	(0.161)
TFP		0.003	0.002	0.008
		(0.026)	(0.026)	(0.027)
$\ln V$			0.004	0.007
			(0.009)	(0.009)
$intermed_share$				0.110
				(0.076)
$_cons$	0.993^{***}	0.993^{***}	0.922^{***}	0.810^{***}
	(0.005)	(0.005)	(0.168)	(0.184)
N	116	116	116	116
R^2	0.375	0.375	0.376	0.392

▪ 주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미한다. 이하 동일.

3. 강건성 검정

본 연구는 종속변수의 대체, 특정 연도의 제외 및 추정방법의 변경이라는 세 가지 방법을 이용하여 기준 회귀분석 결과의 강건성을 검증하였다. 분석 결과는 표 4에 제시하였다.

첫째, 종속변수를 대체하였다. 기준분석에서는 실질산출(Y)을 기대산출로 사용하여 녹색 전요소생산성을 산출하였다. 기대산출의 추정방식에 따라 GTFP 산출결과가 달라질 가능성을 고려하여, 실질부가가치(V)를 실질산출(Y) 대신 기대산출로 사용하여 녹색 전요소생산성을 다시 산출하고 이에 기초한 TFPCH_V를 종속변수로 사용하였다. 모형 (1)의 결과를 보면 d_PEC의 추정계수는 -0.515로 1% 수준에서 통계적으로 유의하였으며, 기준 회귀분석과 동일한 방향과 유의성을 유지하였다. 이는 산업 간 에너지 소비구조 변화와 GTFP 간의 음(-)의 관계가 기대산출의 특정 추정방식에 의존하지 않음을 보여준다.

둘째, 2011년 관측치를 제외하였다. 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 일본은 원자력발전 공급의 급격한 감소와 화석에너지 이용 증가를 경험하였으며, 이에 따라 산업별 에너지 소비행태 역시 영향을 받았을 가능성이 있다. 따라서 특정 연도의 예외적 충격이 추정결과에 미치는 영향을 배제하기 위해 2011년 관측치를 제외하고 회귀분석을 다시 실시하였다. 모형 (2)의 d_PEC 추정계수는 -0.600으로 1% 수준에서 통계적으로 유의하였으며, 기준 회귀분석과 비교하여 방향과 유의성이 유지되었다. 이는 핵심 결과가 2011년의 특수한 충격에 의해 좌우되지 않음을 의미한다.

셋째, 추정방법을 변경하였다. 기준모형의 추정결과가 특정 추정방법에 의존하는지를 검토하기 위해 실현가능 일반화최소자승법(FGLS)을 적용하였다. 모형 (3)에서 d_PEC의 추정계수는 -0.342로 1% 수준에서 통계적으로 유의하였으며, 기준 회귀분석과 동일한 방향과 통계적 유의성을 유지하였다.

이상의 세 가지 강건성 검정에서 d_PEC의 추정계수는 모두 음(-)의 값을 나타냈으며 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 따라서 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성과 유의한 음(-)의 관계를 갖는다는 기준 회귀분석 결과는 종속변수의 추정방식, 특정 연도 및 추정방법의 변경에도 강건하게 유지되는 것으로 판단된다.

<표 4> 강건성 검정 결과

	(1)	(2)	(3)
	TFPCH_V	TFPCH_Y	TFPCH_Y
d_PEC	-0.515***	-0.600***	-0.342***
	(0.137)	(0.160)	(0.119)
TFP	0.006	-0.014	-0.027
	(0.023)	(0.023)	(0.018)
lnV	0.005	-0.002	-0.000
	(0.008)	(0.009)	(0.001)
intermed_share	0.081	0.012	0.004
	(0.064)	(0.058)	(0.006)
_cons	0.855***	1.029***	0.993***
	(0.157)	(0.164)	(0.014)
N	116	112	116
R ²	0.395	0.139	

▪ 주: 모든 모형은 통제변수(TFP, lnV, intermed_share)를 포함한다. 모형 (1)의 종속변수는 실질부가가치를 기대산출로 하여 산출한 녹색 전요소생산성 변화지수(TFPCH_V)이며, 모형 (2)는 2011년 관측치를 제외하여 추정하였다. 모형 (3)은 실현가능 일반화최소자승법(FGLS)을 적용한 결과이다.

V. 추가 분석: 산업 이질성과 작용경로

1. 산업 이질성

산업별 생산방식, 에너지 이용특성 및 탄소생산성에는 상당한 차이가 존재한다. 이에 본 연구는 산업 특성에 따라 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향이 서로 다르게 나타나는지를 추가적으로 검토하였다. 앞서 제시한 탄소생산성 수준을 구분하기 위한 역방향 대리지표를 기준으로 농림목축어업·광업·건설업과 제3차 산업을 ‘농림서비스업군’으로, 제조업과 운송업을 ‘제조운송업군’으로 구분하여 각각 그룹별 회귀분석을 실시하였다.

농림서비스업군의 분석결과인 모형 (1)에서 d_PEC 의 추정계수는 -1.912로 1% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이는 해당 산업군에서 산업 간 에너지 소비구조 변화와 녹색 전요소생산성 간에 유의한 음(-)의 관계가 존재함을 의미한다. 기준 회귀분석에서 나타난 약 -0.6의 추정계수와 비교하면 절대값도 상대적으로 크게 나타나, 농림서비스업군의 녹색 전요소생산성이 에너지 소비구조 변화에 보다 민감하게 반응함을 보여준다.

반면 제조운송업군에서는 d_PEC 의 추정계수가 0.032로 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 이 산업군에서는 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 유의한 영향을 미친다는 통계적 근거를 확인하기 어렵다. 한편 제조운송업군에서 전통적 전요소생산성 증가율(TFP)의 추정계수는 -0.046으로 5% 수준에서 유의한 음(-)의 값을 보였다. 이 결과만으로 구체적인 인과경로를 직접 식별할 수는 없지만, 전통적 생산성의 개선이 반드시 녹색 전요소생산성의 향상으로 연결되는 것은 아닐 가능성을 보여준다. 하나의 가능한 해석은 제조업과 운송업이 장기간의 에너지 절약관리와 설비투자를 거치면서 생산기술과 에너지 이용방식에 일정한 경로의존성을 형성하였고, 기존 설비체계가 성숙할수록 녹색기술로의 추가적인 전환 과정에서 매몰비용과 기술적 전환비용이 발생할 수 있다는 것이다. 이러한 조건에서는 기존 생산기술을 통한 생산성 개선과 녹색 생산성의 추가적인 향상이 반드시 같은 방향으로 나타나지 않을 수 있다. 따라서 제조운송업군의 녹색전환을 위해서는 기존 생산기술의 효율성 개선을 넘어 보다 심층적인 녹색기술 혁신과 기술경로의 전환을 모색할 필요가 있다.

이러한 결과는 산업 간 에너지 소비구조 변화의 효과가 모든 산업에서 동일하게 나타나는 것이 아님을 보여준다. 특히 농림서비스업군에서는 유의한 음(-)의 관계가 나타난 반면 제조운송업군에서는 d_PEC 의 추정계수가 0에 가까우며 통계적으로 유의하지 않았다. 동시에 제조운송업군에서는 전통적 생산성 변화와 녹색 생산성 변화 간의 관계 역시 단순하지 않은 것으로 나타났다. 이는 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향에 산업별 이질성이 존재하며, 제조운송업군의 경우 에너지 배분구조뿐 아니라 산업 내부의 기술적 조건과 전환경로도 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

<표 5> 산업별 이질성 검정 결과

	(1)	(2)
	TFPCH_Y	TFPCH_Y
d_PEC	-1.912***	0.032
	(0.455)	(0.104)
TFP	0.022	-0.046**
	(0.106)	(0.022)
lnV	-0.002	0.006
	(0.010)	(0.005)
intermed_share	-0.034	-0.028
	(0.121)	(0.027)
_cons	1.059***	0.909***
	(0.247)	(0.073)
N	58	58
R ²		

2. 구조 효과와 에너지 이용 효과

기존 회귀분석에서는 각 산업의 에너지 소비 비중 변화를 핵심 설명변수로 사용하여 에너지 요소의 산업 간 재배분을 측정하였다. 그러나 이 변수는 결과지표의 성격을 지니므로, 그 변화는 두 가지 경로에서 발생할 수 있다. 첫째, 산업 생산규모의 확대 또는 축소에 따라 에너지 소비 총량이 직접 변화하는 경우로, 이는 경제활동 규모 변화에 따른 구조 효과(structural effect)로 이해할 수 있다. 둘째, 일정한 생산 수준에서 기술혁신이나 관리 수준의 향상 등을 통해 에너지 이용효율이 개선되고 단위 산출당 에너지 소비가 감소하는 경우로, 이는 에너지 이용 효과(energy-use effect)에 해당한다. 따라서 산업 간 에너지 소비구조 변화는 산업구조의 변화와 에너지 이용행태의 변화가 결합된 결과로 볼 수 있다.

이러한 점을 고려하여 본 연구는 산업 간 에너지 소비구조 변화를 구조 효과(Struc)와 에너지 이용 효과(EY)로 분해하고, 확장모형을 통해 각각의 효과를 식별하였다. 이를 통해 ‘에너지가 산업 간에 어떻게 배분되는가’와 ‘주어진 배분구조에서 에너지 이용효율이 어떻게 변화하는가’를 구분하여

분석하고자 하였다. 구체적으로 구조 효과는 해당 산업의 부가가치 비중으로 측정하였으며,²⁾ 에너지 이용 효과는 해당 산업의 단위 산출당 에너지 소비량으로 측정하였다.³⁾ 이는 각각 규모 확대 경로와 효율성 향상 경로에 대응한다. 기준 회귀모형과의 차이점은 핵심 설명변수를 구조 효과(d_Struc)와 에너지 이용 효과(d_EY)로 분해하여 모형에 포함하였다는 점이다.

$$TFPCH_{Yit} = \beta_0 + \beta_1 d_{Struc_{it}} + \beta_2 d_{EY_{it}} + \beta_3 control_{it} + \gamma_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

먼저 전체 표본을 대상으로 구조 효과와 에너지 이용 효과가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 검토한 후, 농림서비스업군과 제조운송업군으로 표본을 구분하여 두 효과가 산업군별로 상이하게 나타나는지를 분석하였다.

모형 (1)은 전체 표본을 대상으로 한 효과분해 결과를 제시한다. 산업 구조 효과인 d_Struc의 추정계수는 0.532이며 5% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이는 다른 요인을 통제한 이후에도 산업구조 변화에 의해 형성되는 구조 효과와 녹색 전요소생산성 변화 간에 유의한 정(+)의 관계가 존재함을 의미한다. 반면 에너지 이용 효과인 d_EY의 추정계수는 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 전체 표본에서는 두 경로 가운데 산업 구조 효과가 통계적으로 유의한 관계를 보이는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 산업 규모의 확대가 반드시 자원소비 증가나 환경효율 저하를 수반하는 것은 아님을 보여준다. 구체적으로 산업부가가치 비중의 증가와 함께 GTFP가 향상된다는 것은 산업 확대 과정에서 생산기술의 발전, 자원배분의 개선 및 오염관리 역량의 향상이 함께 이루어질 수 있음을 의미한다. 이에 따라 추가적인 산출이 단순히 에너지와 기타 생산요소의 투입 증가에 의해서만 이루어지는 것이 아니라 생산효율성의 향상에 의해서도 실현될 수 있다. 경제적 의미에서 이는 산업구조 조정과 녹색 생산효율 개선 사이에 일정한 상승관계가 존재할 가능성을 보여준다. 즉 산업의 발전 자체가 녹색전환의 비용으로만 작용하는 것이 아니라 녹색성장을 촉진하는 요인

2) 해당 산업군에 포함된 모든 세부 산업의 부가가치 합계.

3) Struc은 해당 산업의 실질 부가가치를 전체 산업의 실질 부가가치(2015년 기준, 백만 엔)로 나눈 비율로 계산하였다. EY는 산업별 에너지 소비량(만 kL)을 총산출(2015년 기준, 원자료는 백만 엔이며 계산의 편의를 위해 조 엔 단위로 환산)로 나누어 산출하였다. 자료는 일본 경제산업연구소(RIETI)와 일본 경제산업성 자원에너지청 「종합에너지통계(1990~2023년도 속보)」를 이용하였으며, 차분값을 모형에 투입하였다.

이 될 수도 있다.

다음으로 산업별 에너지 소비특성, 생산구조 및 에너지 이용방식의 차이를 고려하여 앞서 설정한 산업군별로 분석하였다. 모형 (2)와 모형 (3)은 각각 농림서비스업군과 제조운송업군의 추정결과를 제시한다.

농림서비스업군의 경우 d_Struc 의 추정계수는 통계적으로 유의하지 않은 반면, d_EY 의 추정계수는 -0.007 로 10% 수준에서 통계적으로 유의하였다. 이는 농림서비스업군에서 에너지 이용 효과와 녹색 전요소생산성 간에 일정한 음(-)의 관계가 존재함을 의미한다. d_EY 가 단위 산출당 에너지 소비량의 변화를 나타낸다는 점을 고려하면, 단위 산출당 에너지 소비가 감소하여 에너지 이용효율이 향상될수록 GTFP가 증가하는 관계가 나타난 것으로 해석할 수 있다. 즉 농림서비스업군에서는 단순한 산업구조 변화보다 에너지 이용효율의 변화가 녹색 전요소생산성과 보다 밀접하게 관련되어 있는 것으로 나타났다.

반면 제조운송업군의 경우 d_Struc 와 d_EY 의 추정계수는 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 따라서 현재의 표본과 모형설정하에서는 제조운송업군의 GTFP 변화가 산업구조 변화나 에너지 이용 변화에 의해 유의하게 설명된다고 보기 어렵다.

이러한 결과는 산업군별로 GTFP 향상을 위한 정책적 초점이 서로 다를 수 있음을 보여준다. 농림서비스업군에서는 단순히 산업 간 에너지 소비구조를 변화시키는 것보다 에너지 이용효율을 향상시키고 단위 산출당 에너지 소비를 줄이는 것이 보다 중요한 과제가 될 수 있다. 제조업에서는 생산설비의 갱신, 에너지 절약기술의 개조, 생산공정의 개선 및 기술진보와 같은 산업 내부 요인을 보다 중시할 필요가 있으며, 운송업의 경우에는 운송방식, 운송효율 및 교통에너지 이용방식 등 구체적인 산업 특성을 함께 고려할 필요가 있다.

종합하면, 본 연구의 분해결과는 농림서비스업군에서는 에너지 이용효과와 그 개선효과를 보다 중시해야 하며, 제조운송업군에서는 산업의 고유한 특성을 고려하여 기술개조와 효율성 향상을 추진할 필요가 있음을 시사한다. 다만 이러한 결과는 제조운송업군의 GTFP 결정과정에 구조 효과나 에너지 이용 효과가 전혀 존재하지 않는다는 의미가 아니라, 현재의 표본과 모형설정하에서 유의한 통계적 관계가 확인되지 않았음을 의미한다.

<표 6> 두 효과의 회귀분석 결과

	(1)	(2)	(3)
	TFPCH_Y	TFPCH_Y	TFPCH_Y
d_Struc	0.532** (0.202)	0.749 (0.597)	0.115 (0.195)
d_EY	-0.000 (0.000)	-0.007* (0.003)	0.000 (0.000)
TFP	-0.113** (0.046)	-0.002 (0.114)	-0.043 (0.037)
lnV	0.012 (0.010)	0.019 (0.013)	0.005 (0.005)
intermed_share	0.176** (0.080)	0.250 (0.155)	-0.025 (0.026)
_cons	0.684*** (0.193)	0.516* (0.305)	0.918*** (0.070)
N	116	58	58
R ²	0.353		

3. 일본 에너지정책의 전개와 실증결과에 대한 추가 논의

일본은 1990년대 이후 산업별 특성을 고려한 차별화된 에너지 절약 및 탄소배출 감축정책 체계를 점진적으로 구축해 왔다. 『교토의정서』 및 이후의 정책체계하에서 일본 정부는 산업별로 서로 다른 정책수단을 적용하였다. 산업부문에서는 지속적으로 에너지 절약기술의 개조를 추진하고 산업별 기준제도를 도입하였으며, 운송부문에서는 에너지 절약형 차량의 보급과 운송시스템의 효율화를 중점적으로 추진하였다. 상업 및 서비스부문에서는 건축물의 에너지 절약, 사무기기의 에너지효율 향상 및 수요측 관리 등을 통해 에너지 소비를 감축하였다(環境省 2005). 이러한 차별화된 정책체계는 본 연구의 실증분석에서 확인된 산업별 이질성결과도 밀접하게 연계된다.

정책대상의 측면에서 제조업과 운송업은 에너지 소비 규모가 크고 생산비용과 밀접하게 관련되어 있어 오랫동안 일본의 에너지 절약관리와 에너지 효율 기준정책의 주요 대상이 되어 왔다. 본 연구의 분석결과에서는 제조업

송업군의 에너지 소비구조 변화가 GTFP에 유의한 영향을 미치지 않았으며, 구조 효과와 에너지 이용 효과 역시 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 비교적 성숙한 에너지 절약관리 기반을 갖춘 제조업송업군에서는 에너지 소비구조의 변화가 자동적으로 녹색 전요소생산성의 향상으로 이어지는 것이 아니라 기술혁신, 설비 갱신 및 생산과정의 개선과 같은 중간경로를 통해 전달될 필요가 있음을 보여준다.

반면 농림서비스업군에서는 산업 간 에너지 소비구조 변화와 GTFP 간에 유의한 음(-)의 관계가 확인되었으며, 효과분해 결과 이러한 관계는 구조 효과보다 에너지 이용 효과와 더욱 밀접하게 관련된 것으로 나타났다. 다시 말해, 이 산업군에서는 에너지 투입의 변화가 단위 산출당 에너지 소비의 감소로 이어지는지가 중요한 문제이다. 에너지 투입이 증가하더라도 이에 상응하는 산출 증가가 이루어지지 않거나, 에너지 소비가 감소하더라도 에너지 이용효율의 개선이 수반되지 않는다면 GTFP의 향상으로 연결되기 어렵다.

일본은 2012년 ‘지구온난화대책세’를 도입한 이후 화석연료에 대한 조세 부담을 점진적으로 확대하였으며, 관련 세수는 에너지 절약, 재생에너지 및 저탄소 기술 분야에 활용되어 왔다(環境省 2026). 또한 『에너지절약법』을 중심으로 한 제도체계와 ‘Top Runner 제도(トップランナー制度)’를 통해 최종 에너지 이용기기의 효율 향상을 지속적으로 추진해 왔다(經濟産業省資源エネルギー廳省エネルギー課 2020).

이러한 정책은 산업 전반에 적용되지만 실제 작용경로는 산업별로 다를 수 있다. 제조업송업군은 에너지 소비가 집중되어 있어 탄소비용의 증가는 생산 및 운영비용을 직접 상승시키는 한편, 기업의 에너지 절약투자, 연료대체 및 생산공정 혁신을 유도하는 시장신호로 작용할 수 있다. 이에 따라 비용상승 압력의 일부는 효율성 개선을 촉진하는 동력으로 전환될 수 있다. 반면 농림서비스업군은 에너지 이용이 상대적으로 분산되어 있고 경영주체 간 규모의 차이도 크기 때문에 에너지가격 신호가 생산의사결정으로 전달되는 효율성이 상대적으로 낮을 수 있다.

이러한 점에서 제조업송업군의 정책은 고효율 설비의 갱신, 전기화 및 에너지관리와 같이 단위 에너지당 산출을 직접적으로 개선할 수 있는 수단을 지속적으로 강화할 필요가 있다. 반면 농림서비스업군에서는 제조업에 적용

되는 정책방식을 단순히 반복하기보다는 건축물, 상업시설, 농업기계 및 분산된 경영주체의 특성을 고려하여 에너지 절약진단과 재정보조 등을 통해 에너지 절약기술의 적용비용을 낮추는 정책수단을 활용할 필요가 있다.

VI. 결론 및 정책적 시사점

1. 연구 결과의 요약

본 연구는 1995~2023년 일본 4개 산업군의 패널자료를 바탕으로, 녹색 솔로우 모형을 이론적 기반으로 산업 간 에너지 소비구조 변화가 녹색 전요소생산성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 산업별 이질성과 구조 효과 및 에너지 이용 효과를 함께 고려하여 그 작용 메커니즘을 실증적으로 검토하였다.

분석 결과, 일본의 산업 간 에너지 소비구조 변화는 녹색 전요소생산성 변화와 유의한 음(-)의 관계를 보이는 것으로 나타났다. 산업별 이질성 분석에서는 제조운송업군에 비해 농림서비스업군의 녹색 전요소생산성이 에너지 소비구조 변화에 보다 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 산업 간 에너지 소비구조 변화를 산업 자체의 규모 변화에 따른 ‘구조 효과’와 산업의 에너지 이용효율 변화에 따른 ‘에너지 이용 효과’로 분해한 결과, 전체 표본에서는 구조 효과가 녹색 전요소생산성과 유의한 정(+)의 관계를 보인 반면, 에너지 이용 효과는 통계적으로 유의하지 않았다. 산업군별로 구분하여 분석한 결과, 농림서비스업군에서는 에너지 이용 효과가 유의한 음(-)의 관계를 나타내어 에너지 이용방식의 변화가 해당 산업군의 녹색 전요소생산성에 영향을 미치는 중요한 요인일 가능성을 보여주었다. 반면 제조운송업군에서는 구조 효과와 에너지 이용 효과 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 이러한 결과는 녹색 전요소생산성의 영향요인이 산업군별로 상이하며, 에너지 소비구조 조정이 녹색 생산성에 미치는 영향을 단일한 방식으로 설명하기 어렵다는 점을 보여준다. 따라서 각 산업의 에너지 이용방식과 생산구조의 특성에 적합한 차별화된 조정방안이 필요하다.

2. 정책적 시사점

첫째, 에너지 소비구조의 조정 자체가 곧 녹색 생산성의 향상을 의미하는 것은 아니다. 기존 회귀분석에서 산업 간 에너지 소비구조 변화와 GTFP 간에 유의한 음(-)의 관계가 확인된 것은 특정 산업에 대한 에너지 생산요소의 투입 확대가 해당 산업의 녹색성장 동력을 제약할 가능성이 있음을 보여준다. 반대로 에너지 절약 및 탄소감축 정책을 통해 비효율적인 에너지 투입을 효과적으로 줄일 수 있다면 일정한 녹색성장 효과를 얻을 가능성도 있다. 이러한 결과는 정책적 관심이 단순히 ‘에너지 배분을 조정하는 것’에 머물러서는 안 되며, ‘배분된 에너지가 생산과정에서 얼마나 효율적으로 활용되는가’까지 확대되어야 함을 시사한다. 전자가 정책수단이라면 후자는 녹색성장이 실제로 실현될 수 있는지를 결정하는 핵심적인 조건이다.

둘째, 산업별 특성을 고려한 차별화된 정책을 추진할 필요가 있다. 효과분석에서 농림서비스업군은 에너지 이용 효과가 유의한 반면 구조 효과는 유의하지 않았다. 따라서 이 산업군에서는 전체 에너지 소비에서 차지하는 비중 자체를 조정하기보다 단위 산출당 에너지 소비를 줄이고 에너지 이용효율을 향상시키는 데 정책의 초점을 둘 필요가 있다. 이러한 산업에서는 에너지 절약형 설비의 보급, 에너지관리 역량의 강화, 중소기업 경영주체를 대상으로 한 에너지 절약진단 및 재정정보조 등의 정책수단이 산업구조 자체의 조정보다 보다 효과적일 수 있다.

반면 제조운송업군에서는 구조 효과와 에너지 이용 효과 모두 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 기존 정책이 해당 산업군에서 효과가 없었다는 의미라기보다는, 장기간의 에너지 절약관리를 거치면서 에너지 이용효율이 기술적 프런티어에 근접하여 에너지 소비구조 조정을 통해 GTFP를 추가적으로 향상시킬 수 있는 한계적 여지가 상대적으로 제한되었을 가능성을 보여준다. 따라서 제조운송업군의 정책방향은 기존의 ‘에너지 절약관리’에서 한 단계 더 나아가 ‘첨단기술의 돌파’로 점차 확대될 필요가 있다. 구체적으로 심층적인 전기화, 수소에너지 활용, 탄소 포집 및 활용 등 기존의 효율성 한계를 넘어설 수 있는 기술경로를 적극적으로 모색할 필요가 있다.

셋째, 본 연구의 실증결과는 일본의 기존 에너지정책의 효과 자체를 부정

하는 것이 아니라, 에너지 소비구조 조정과 녹색 생산성 향상 사이에 단순하고 자동적인 대응관계가 존재하지 않음을 보여준다. 일본이 장기간 추진해 온 산업별 차별화 정책은 에너지구조 전환을 위한 제도적 기반을 마련해 왔지만, 실제 정책효과는 각 산업의 기술적 조건, 에너지 이용방식 및 조정능력에 따라 달라질 수 있다. 제조업군에서는 기존 에너지 절약기술이 갖는 한계효과 감소의 제약을 넘어서는 것이 중요하며, 농림서비스업군에서는 에너지 이용효율과 에너지 절약기술의 확산 측면에 존재하는 한계를 보완할 필요가 있다. 따라서 두 산업군에 완전히 동일한 정책체계를 적용하는 것은 적절하지 않다.

보다 일반적으로 본 연구의 결과는 에너지정책의 평가가 에너지 소비량이나 소비 비중의 변화 여부를 확인하는 데 그쳐서는 안 된다는 점을 보여준다. 정책평가에서는 이러한 변화가 실제 생산과정에서 효율성 개선으로 효과적으로 전달되었는지를 함께 검토해야 한다. 이는 에너지정책을 설계하는 출발점인 동시에 그 정책효과를 평가하는 최종적인 기준이 되어야 한다.

| 참고문헌 |

1. 논문 및 단행본

- 김수이 (2011). “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 에너지 소비 요인분해 분석.” 『에너지경제연구』 . 제10권. 제1호, pp. 49-76.
- 김수이 (2023). “국내 제조업의 전력 소비 요인분해 분석.” 『에너지경제연구』 . 제22권. 제1호, pp. 73-99.
- 박정욱 · 김수이 (2013). “한국과 일본의 산업부문 에너지 소비에 대한 LMDI 요인분해 분석.” 『에너지경제연구』 . 제12권. 제1호, pp. 67-103.
- Alper, A. and O. Oguz (2016). “The role of renewable energy consumption in economic growth: Evidence from asymmetric causality.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 60, pp. 953-959.
- Apergis, N. and J. E. Payne (2011). “Renewable and non-renewable electricity consumption-growth nexus: Evidence from emerging market economies.” *Applied Energy*. Vol. 88. No. 12, pp. 5226-5230.
- Bassetti, T., F. Pavesi and M. Scotti (2024). “The Green Solow model and the threshold effect of human capital on CO₂ emissions.” *Metroeconomica*. Vol. 75. No. 2, pp. 249-279.
- Brock, W. A. and M. S. Taylor (2010). “The Green Solow Model.” *Journal of Economic Growth*. Vol. 15, pp. 127-153.
- Chen, W. J. (2017). “Is the Green Solow model valid for emissions in the European Union?” *Environmental & Resource Economics*. Vol. 67. No. 1, pp. 23-45.
- Ferrara, M. and L. Guerrini (2009). “The Green Solow model with logistic population change.” In N. E. Mastorakis, A. Croitoru, V. E. Balas, E. Son and V. Mladenov (eds.), *MICBE '09: Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics*. WSEAS, p. 17.
- Hao, Y. and Y. M. Wei (2015). “When does the turning point in China’s CO₂ emissions occur? Results based on the Green Solow model.” *Environment and Development Economics*. Vol. 20. No. 6, pp. 723-745.
- Markaki, M., A. Belegri-Roboli, P. Michaelides, S. Mirasgedis and D. P. Lalas (2013). “The impact of clean energy investments on the Greek economy: An input-output analysis (2010-2020).” *Energy Policy*. Vol. 57, pp. 263-275.

- Ocal, O. and A. Aslan (2013). “Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 28, pp. 494-499.
- Ray, S. C. and E. Desli (1997). “Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries: Comment.” *The American Economic Review*. Vol. 87. No. 5, pp. 1033-1039.
- Shahbaz, M., T. H. V. Hoang, M. K. Mahalik and D. Roubaud (2017). “Energy consumption, financial development and economic growth in India: New evidence from a nonlinear and asymmetric analysis.” *Energy Economics*. Vol. 63, pp. 199-212.
- Sun, M. Z. and L. D. Zhao (2025). “The Impact of Energy Transition on China’s Urban GTFP: Based on the Threshold Effects of Technology and Policy.” *Sustainability*. Vol. 17. No. 22, 10351.
- 柴智慧·賈詩雨·高翠玲 (2026). “農業保險對農業綠色全要素生產率的影響.” 『中國農業大學學報』. 第31卷. 第4期, pp. 345-358.
- 郭晶·王濤 (2017). “中國能源消費与經濟增長關係的實証分析.” 『統計与決策』. 第4期, pp. 138-141.
- 韓冬日 (2021). “能源轉型對經濟增長質量的影響及對策研究.” 哈爾濱工程大學 博士學位論文.
- 胡曉·蔣涵文·王正杰 (2026). “能源要素供給對企業新質生產力形成的影響研究.” 『科研管理』. 第47卷. 第2期, pp. 36-46.
- 李斌·彭星·歐陽銘 (2013). “環境規制、綠色全要素生產率与中國工業發展方式轉變——基于36个工業行業數據的實証研究.” 『中國工業經濟』. 第4期, pp. 56-68.
- 錢娟 (2019). “能源節約偏向型技術進步對經濟增長的影響研究.” 『科學學研究』. 第37卷. 第3期, pp. 436-449.
- 齊紹洲·李楊 (2017). “可再生能源消費影響經濟增長嗎?——基于歐盟的實証研究.” 『世界經濟研究』. 第4期, pp. 106-119.
- 齊志新·陳文穎·吳宗鑫 (2007). “工業輕重結構變化對能源消費的影響.” 『中國工業經濟』. 第2期, pp. 35-42.
- 邵帥·楊莉莉·曹建華 (2010). “工業能源消費碳排放影響因素研究——基于STIRPAT模型的上海分行業動態面板數據實証分析.” 『財經研究』. 第36卷. 第11期, pp. 16-27.
- 邵慰·魏寶特 (2026). “服務貿易創新發展試點政策能提高綠色全要素生產率嗎?” 『經濟經緯』. Online first, pp. 1-14.

- 史丹·王蕾 (2015). “能源革命及其對經濟發展的作用.” 『產業經濟研究』. 第1期, pp. 1-8.
- 魏巍 (2018). “能源轉型、穩態變遷及其經濟可持續增長效應.” 云南大學 博士學位論文.
- 徐剛·潘祺志 (2009). “中國能源消費與經濟增長及能源效率關係的實証分析——基于6大產業部門的綜列協整和PVECM模型.” 『中央財經大學學報』. 第5期, pp. 63-68.
- 許麗姣 (2019). “基于拉姆齊模型的能源轉型與經濟增長關係研究.” 中國石油大學 (北京) 碩士學位論文.
- 張鴻宇·黃曉丹·張達·張希良 (2021). “加速能源轉型的經濟社會效益評估.” 『中國科學院院刊』. 第36卷. 第9期, pp. 1039-1048.
- 趙進文·范繼濤 (2007). “經濟增長與能源消費內在依從關係的實証研究.” 『經濟研究』. 第8期, pp. 31-42.
- 趙新宇·李宇男 (2021). “能源投資與經濟增長：基于能源轉型視角.” 『廣西社會科學』. 第2期, pp. 112-120.

2. 기타

- 環境省 (2005). 『京都議定書目標達成計畫』. 環境省.
- 經濟産業省資源エネルギー廳省エネルギー課 (2020). 『日本の省エネルギー政策について』. 經濟産業省資源エネルギー廳.
- 經濟産業研究所·一橋大學 (2026). “JIP2026データベース.”
<https://www.rieti.go.jp/jp/database/jip.html> (2026년 8월 1일 검색).
- 經濟産業省資源エネルギー廳 (2023). “総合エネルギー統計.”
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/ (2026년 5월 3일 검색).
- 環境省 (2026). “環境に關わる税制.”
<https://www.env.go.jp/policy/tax/kaisei.html> (2026년 1월 7일 검색).

| 논문투고일 : 2026년 07월 22일 |

| 논문심사일 : 2026년 08월 10일 |

| 게재 확정일 : 2026년 08월 19일 |

| ABSTRACT |

The Impact of Changes in the Inter-Industry Energy Consumption Structure on Green Total Factor Productivity in Japan

Hu Xiyue

(Northeast Asian Studies College, Jilin University)

Pang Deliang

(Northeast Asian Studies College, Jilin University)

Previous studies have primarily focused on the effects of aggregate energy consumption, energy mix, and energy efficiency on green growth. However, empirical evidence on the effects of changes in the inter-industry energy consumption structure on green total factor productivity (GTFP) remains limited. Using industry-level data from Japan for 1995 - 2023, this study constructs a panel dataset and, drawing on the Green Solow Model as its theoretical framework, examines how changes in the inter-industry energy consumption structure affect GTFP. A two-way fixed effects model is employed, with additional analyses of industry heterogeneity and the structural and energy-use effects. The results show a significant negative relationship between changes in the inter-industry energy consumption structure and GTFP. The heterogeneity analysis indicates that this negative relationship is concentrated in the agriculture - forestry - services group, whereas it is not statistically significant in the manufacturing - transportation group. In the full sample, the structural effect is significantly and positively associated with GTFP, while the energy-use effect is not statistically significant. In the subgroup analysis, the energy-use effect is significantly negative in the agriculture - forestry - services group, whereas the structural

effect is not statistically significant; neither effect is statistically significant in the manufacturing - transportation group. These findings indicate that the effects of energy consumption structure adjustment on GTFP vary across industries and that both the direction and the transmission channels of these effects depend on industry-specific patterns of energy use and production structure. Accordingly, rather than applying a uniform policy framework, differentiated adjustment strategies tailored to the characteristics of individual industries are warranted.

- Key words: Japan, energy consumption, green total factor productivity, industrial structure, energy policy