연구논문 「환경정책」 제34권 제3호 2026. 9: 307-348
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2026.34.3.307
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

한·중 에너지 소비 관련 탄소배출의 영향 요인 및 탈동조화 효과 비교 연구:

LMDI와 Tapio 모형을 기반으로

Comparative Study on the Driving Factors and Decoupling Effects of Energy Consumption-Related Carbon Emissions in South Korea and China: Based on the LMDI and Tapio Models

주일* · 지지에**
Yi Zhou · Jie Ji

요약: 본 연구는 2000~2023년 한국과 중국의 에너지 및 경제 데이터를 바탕으로 LMDI와 Tapio 모형을 활용하여 탄소배출 요인과 경제성장 간의 관계를 분석하였다. 결과에 따르면 양국의 탄소배출은 모두 증가하였으나, 한국은 완만한 배출 증가세와 석유 중심의 에너지 소비 구조를 나타낸 반면, 중국은 빠른 증가세와 석탄 중심의 구조를 보였다. 경제규모 효과는 주요 배출 증가 요인이며 특히 중국에서 더 크게 나타났다. 반면 에너지 집약도 효과는 가장 중요한 감축 요인으로 확인되었다. 산업구조 및 에너지 구조 효과는 제한적이었다. 탈동조화 분석 결과 중국은 주로 약한 탈동조화 상태를, 한국은 일부 기간 강한 탈동조화 상태를 보였으나 변동성이 존재하였다. 이러한 차이는 발전 단계 및 산업·에너지 구조 차이에 기인한다. 이에 따라 중국은 저탄소 전환을 가속화하고, 한국은 석유 의존도를 완화하며 정책 안정성을 제고해야 한다.
핵심주제어: 탄소배출, LMDI, Tapio 모형, 탈동조화, 한·중 비교

Abstract: This study examines carbon emission drivers and their relationship with economic growth in South Korea and China (2000-2023) using LMDI and Tapio models. Results show emissions increased in both countries, but more slowly in Korea with a petroleum-based structure, and faster in China with coal dependence. Economic scale is the main driver (stronger in China), while energy intensity is the key mitigating factor. Industrial and energy structure effects are limited. China mainly shows weak decoupling, while Korea shows occasional strong decoupling but with volatility. These differences stem from disparities in development stages and in industrial and energy structures. Accordingly, China should accelerate low-carbon transition, while Korea should reduce oil dependence and improve policy stability.
Key Words: Carbon Emission, LMDI, Tapio, Decoupling, South Korea-China comparative analysis

* 주저자, 연세대학교 행정학과 박사과정
** 교신저자, 연세대학교 행정학과 박사과정

I. 서론

극단적인 기상 현상, 이상 고온, 홍수 및 가뭄 등 기후 위험이 지속적으로 심화됨에 따라 기후변화는 인류의 생존, 안전 및 지속가능한 발전에 중대한 영향을 미치는 전 지구적 의제로 자리 잡고 있다(Bansal and Ochoa, 2011; Bo, Li and Jia, 2023; Dell, Jones, and Olken, 2012; Enete and Amusa, 2010; Rudebusch, 2019; Minghui, Jianglong, Guanfei, and Xiuwang, 2022). 온실가스 배출, 특히 에너지 소비 과정에서 발생하는 이산화탄소배출은 지구 온난화를 유발하는 핵심 요인이다. 따라서 경제성장을 유지하면서 탄소배출을 감축하고 에너지 시스템의 저탄소 전환을 추진하여 궁극적으로 탄소중립을 달성하는 것은 전 세계 국가들이 공통적으로 직면한 중요한 정책 과제이다.

동아시아 지역에서 중국과 한국은 대표적인 산업경제 국가이자 글로벌 저탄소 전환 과정의 핵심 참여국이다. 한국은 급속한 산업화와 경제성장 과정에서 제조업 중심의 산업구조와 높은 에너지 수입 의존 구조를 형성하였다. 경제가 성숙 단계에 진입하였음에도 불구하고 석유 및 석탄 등 화석연료에 대한 에너지 의존도는 여전히 높아 에너지 안보와 탄소감축 간의 조정 문제가 지속되고 있다. 이에 한국은 최근 저탄소 녹색성장, 에너지 전환 및 탄소중립 정책을 지속적으로 추진하고 있으며, 2050년 탄소중립 달성을 목표로 하고 있다. 2021년 8월 31일에는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(탄소중립기본법)」이 국회를 통과하였다. 최근 발표된 『한국 기후위기 평가보고서 2025』에 따르면, 한국 정부는 2008년 '저탄소 녹색성장'을 국가발전전략으로 채택한 이후 온실가스 감축을 위해 지속적으로 다양한 정책을 추진해 왔다. 또한 이재명 정부는 대선 공약 10대 과제 중 하나로 '기후위기 대응 및 산업구조 탈탄소 전환'을 제시하였다.

한편 중국 역시 세계 주요 경제국이자 에너지 소비 대국으로서 경제성장, 산업 고도화, 에너지 안보 및 감축 책임 간의 복합적인 제약에 직면해 있다. 중국은 2030년 이전 탄소배출 정점 도달, 2060년 탄소중립 달성이라는 '이중

탄소(30·60)' 목표를 제시하고, 에너지 구조 최적화, 에너지 효율 향상, 탄소 배출권 거래제 구축 및 산업의 녹색 전환 등을 통해 감축을 추진하고 있다. 2023년 11월 8일 중국 국무원 신문판공실이 발표한 『중국 탄소정점 및 탄소중립 행동 백서』는 중국이 세계 최대 탄소배출국으로서 '3060 목표' 실현에 노력하고 있음을 강조하였다. 또한 2026년부터 시행되는 제15차 5개년 계획에서도 녹색·저탄소 전환 전략이 더욱 강화되었다.

그러나 탄소중립 목표의 달성은 정책 선언 자체보다 배출 변화 메커니즘을 정확히 규명하는 데 달려 있다. 즉, 배출 증가가 경제 규모 확장, 산업 구조 변화, 에너지 효율 부족 또는 고탄소 에너지 구조 중 어떤 요인에 기인하는지를 명확히 하지 못할 경우 정책의 정밀성이 떨어질 수 있다.

기존 연구는 한·중 양국의 에너지 소비와 탄소배출을 이해하는 데 중요한 이론적·실증적 기반을 제공해 왔다. 그러나 다음과 같은 세 가지 측면에서 명확한 학술적 한계를 지닌다. 첫째, 대부분의 선행연구는 단일 국가를 대상으로 한 정량분석이나 특정 제조업 산업군에 초점을 맞추고 있어, 동아시아 저탄소 전환의 핵심 국가인 한국과 중국을 대상으로 한 비교연구는 상대적으로 부족하다. 둘째, 기존 연구들은 LMDI 모형을 활용한 탄소배출 영향요인 분해 또는 Tapio 모형을 활용한 탈동조화 상태 분석 중 어느 한 분야에 집중하는 경향이 있어, 개별 요인이 탈동조화의 동태적 변화에 어떠한 방식으로 영향을 미치고 기여하는지에 대한 메커니즘적 설명이 충분하지 않다. 셋째, 기후변화라는 시장실패를 교정하기 위한 한국과 중국 정부의 정책적 대응 메커니즘과 거버넌스적 함의를 행정학적 관점에서 통합적으로 분석한 연구 역시 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 2000~2023년 한·중 양국의 시계열 자료를 바탕으로 에너지 관련 탄소배출량을 정밀하게 산정하고, LMDI 모형과 Tapio 탈동조화 모형을 구조적으로 결합한 통합 분석틀을 적용한다. 이를 통해 다음과 같은 연구질문을 제시하고자 한다.

첫째, LMDI 분해 결과에 따르면 한국과 중국의 탄소배출을 촉진하거나 억제하는 요인은 각각 무엇이며, 각 요인의 기여도와 변화 추세는 어떠한 차이

를 보이는가? 둘째, 경제규모 효과, 산업구조 효과, 에너지 집약도 효과, 에너지 구조 효과 가운데 어느 요인이 양국의 Tapio 탈동조화 상태와 탈동조화 탄력성의 차이를 가장 잘 설명하는가? 셋째, LMDI 분해 결과는 Tapio 탈동조화 상태의 시기별 변화와 어떠한 연관성을 가지며, 이를 통해 한국과 중국의 저탄소 전환 단계의 차이를 어떻게 해석할 수 있는가? 넷째, 이러한 분석 결과는 한국과 중국의 차별화된 탄소중립 정책 수립에 어떠한 정책적 시사점을 제공하는가?

종합하면, 본 연구의 학술적 차별성과 독창성(novelty)은 단순히 두 국가의 데이터를 병렬적으로 비교하는 데 그치지 않는다. 본 연구는 LMDI 기반의 요인분해와 Tapio 기반의 탈동조화 분석을 유기적으로 결합함으로써, 한국의 성숙기형 고부가가치 저탄소 전환 메커니즘과 중국의 압축성장형 구조전환 메커니즘 간의 본질적인 차이를 실증적으로 규명하고자 한다. 아울러 기후위기 대응이라는 글로벌 공공재 공급 과정에서 나타나는 국가별 정책 집행의 경로의존성과 거버넌스의 한계를 행정학적 관점에서 재해석함으로써, 이론적·정책적 측면에서 새로운 학술적 기여를 제시한다.

II. 이론적 고찰 및 선행연구 검토

1. 시장실패론 논의[1)]

시장실패란 한마디로 시장에서 자원을 효율적이고 합리적으로 배분하지 못하는 경우를 의미한다. 다시 말하면 "보이지 않는 손"이라는 가격기구로서 제대로 최적배분을 유도하지 못하는 것을 의미한다(Samuelson and Nordhaus, 1998). 시장실패를 초래하는 원인은 크게 공공재 특성, 외부성, 불완전 경쟁, 정보 비대칭의 4가지 유형으로 나눌 수 있다(Pindyck and Rubinfeld, 1998; Stiglitz, 2000).

1) 시장실패에 대한 보다 자세한 내용은 김성준의 공공선택론(박영사, 2012)을 참조.

기후변화와 같은 환경문제에서 가장 핵심적인 시장실패 요인은 공공재와 외부성이다. 먼저 대기환경은 공공재적 성격을 가지며, 누구나 사용할 수 있고 특정 개인을 배제하기 어렵다. 예를 들어 공기나 도로는 대표적인 공공재에 해당한다(김성준, 2020). 그러나 이러한 비배제성(non-excludability)과 비경합성(non-rivalry)으로 인해 '무임승차(free-riding)'가 발생하며, 개인은 환경오염, 피해 비용을 부담하지 않으려는 경향이 있어 결과적으로 자원의 과도한 사용과 '공유지의 비극(The Tragedy of the Commons)'(Hardin, 1968)을 초래한다. 따라서 시장만으로는 환경문제 대응이 충분히 이루어지기 어렵고, 정부 개입의 필요성이 제기된다(사공영호, 2017; Weimann, Brosig-Koch, Heinrich, Hennig-Schmidt, and Keser, 2022).

또한 기후변화는 대표적인 부정적 외부성을 동반한다. 외부성이란 한 경제주체의 행위가 다른 주체에게 영향을 미치지만 그 영향이 시장가격에 반영되지 않는 현상을 의미한다. 긍정적 영향을 주면 외부경제, 부정적 영향을 주면 외부불경제라고 한다. 기후변화의 경우 기업과 개인의 온실가스 배출이 사회 전체의 비용을 증가시키지만 그 비용을 전부 부담하지 않기 때문에 전형적인 부정적 외부성이 발생한다(김승우 등, 2000). 그 결과 시장은 과잉오염과 자원배분의 비효율을 초래하게 된다.

따라서 정부는 탄소세나 환경세와 같은 피구세(Pigouvian tax) 등을 통해 개입할 필요가 있으며, 이를 통해 오염으로 발생하는 사회적 비용을 경제주체의 의사결정에 반영함으로써 외부성을 내부화할 수 있다. 이러한 정책은 현재 많은 국가에서 기후변화 대응을 위한 핵심 정책수단으로 활용되고 있다.

2. 환경쿠즈네츠 곡선 가설

앞서 살펴본 바와 같이, 기후변화는 대표적인 시장실패 현상에 해당하며, 이는 정부가 조세 및 규제와 같은 정책수단을 통해 환경문제에 개입할 수 있는 이론적 근거를 제공한다. 그러나 이러한 환경정책이 경제성장에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 학계 내에서도 다양한 논의가 존재한다. 특히 환경문제와 경제성장 간의 관계를 설명하는 환경 쿠즈네츠 곡선

(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설은 가장 대표적인 이론으로 자리 잡고 있으며, 본 절에서는 이를 살펴보고자 한다.

EKC 가설에 따르면 환경문제와 1인당 GDP 간에는 역U자형 관계가 존재한다. 즉, 경제발전 초기에는 소득 증가에 따라 환경오염 수준이 증가하지만, 일정 수준 이상의 소득에 도달하면 경제구조 전환, 기술혁신 및 환경의식 향상 등에 의해 오염 수준이 감소하는 것으로 설명된다(Grossman and Krueger, 1991; Stern, 2018). 일반적으로 1인당 소득이 약 10, 000달러를 초과할 경우 경제가 환경 질 개선 단계에 진입할 가능성이 높다고 본다. 이러한 기준에 따르면 한국(약 36, 227달러)과 중국(약 13, 968달러)[2]은 이미 해당 수준에 도달했거나 근접해 있으므로, EKC 가설이 성립한다면 양국 모두 경제성장과 환경개선을 동시에 추구하는 지속가능한 발전 단계로 전환되고 있다고 볼 수 있다.

그러나 EKC 가설의 실증 결과는 여전히 일관되지 않으며, 경제성장이 자동적으로 환경 개선으로 이어지는지에 대해서는 지속적인 논쟁이 존재한다(Perman and Stern, 2003). 일부 연구는 경제발전 수준이 증가함에 따라 환경오염이 감소하는 역U자형 관계를 지지하지만(Andreoni and Levinson, 1998; Pasche, 2002), 다른 연구들은 이를 지지하지 않는 결과를 제시하였다. 예를 들어, Lantz and Feng(2006)은 캐나다 자료를 이용하여 환경오염과 경제성장이 U자형 관계를 가진다고 주장하였으며, Özokcu and Özdemir(2017) 역시 EKC 가설을 지지하는 충분한 증거를 발견하지 못하였다. 이러한 연구 결과는 경제성장 자체가 환경개선을 보장하는 것이 아니라, 에너지 소비 구조, 에너지 이용효율, 산업구조 및 기술 수준 등 다양한 구조적 요인이 경제성장과 환경오염 간 관계를 결정한다는 점을 보여준다.

특히 기존 EKC 연구는 경제성장과 환경오염 간의 관계를 하나의 총체적 관계로 분석하는 경향이 있어(Ma, 2016), 경제성장이 환경에 미치는 내부적 전달 메커니즘과 구체적인 영향 경로를 충분히 설명하지 못한다는 한계가 있다(Zhong and Zhang, 2010). 즉, 경제성장 과정에서 나타나는 탄소배출 변

2) "Latest Estimate for 2025 in Nominal terms, IMF", Worldometer, 2026.4.

화가 단순히 소득 수준 변화에 따른 결과인지, 아니면 에너지 집약도 개선, 에너지 구조 전환, 산업구조 변화 등 다양한 요인의 결합적 결과인지를 구분할 필요가 있다. 이러한 측면에서 탄소배출 변화 요인을 분해하고 각 요인의 상대적 기여도를 분석하는 요인분해 접근법은 경제성장과 환경성과 간의 관계를 보다 구조적으로 이해하는 데 중요한 역할을 한다(Ang, Zhang, and Choi, 1998).

이에 따라 최근 연구에서는 경제성장과 탄소배출 간 관계를 단순한 증가 또는 감소 패턴으로 판단하기보다, 탄소배출 변화의 원인과 경제성장 과정에서 발생하는 탈동조화 여부를 함께 고려하는 접근이 요구되고 있다. LMDI(Logarithmic Mean Divisia Index) 방법은 탄소배출 변화의 주요 영향 요인을 분해하여 각 요인의 기여도를 정량적으로 평가할 수 있다는 장점이 있으며(Ang et al., 1998), Tapio 탈동조화 모형은 경제성장과 탄소배출 간의 관계를 강한 탈동조화, 약한 탈동조화, 결합 등 다양한 상태로 구분하여 경제성장과 배출 변화 간의 동태적 관계를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 두 방법을 결합할 경우 탄소배출 변화가 어떠한 요인에 의해 발생하였는지뿐만 아니라, 이러한 변화가 경제성장과 어떠한 관계 속에서 나타났는지를 동시에 분석할 수 있다.

이러한 이론적 논의를 바탕으로 본 연구는 EKC 가설과 탈동조화 이론을 결합하여 경제성장과 탄소배출 간 관계를 보다 구조적이고 동태적인 관점에서 분석하고자 한다. 또한 시장실패 이론을 이론적 기반으로 하여, 한국과 중국의 최근 24년간 에너지 소비 관련 탄소배출 변화를 대상으로 LMDI 분해모형과 Tapio 탈동조화 모형을 적용한다. 이를 통해 양국 탄소배출 변화의 핵심 결정요인을 규명하고, 경제성장과 탄소배출 간 탈동조화 과정에서 어떠한 요인이 촉진 또는 제약 요인으로 작용하는지를 분석함으로써 지속가능한 저탄소 전환을 위한 정책적 시사점을 제시하고자 한다.

3. 지수분해분석 모형 및 탈동조화지수 모형

1) 지수분해분석 모형

탄소배출과 에너지 소비 변화에 대한 분석을 위해 학계에서는 다양한 연구가 수행되어 왔다(김문정·허은녕, 2020; 김수이·정경화, 2011; 김진수·허은녕, 2005). 기존 문헌의 상당수는 회귀분석을 활용하고 있다(Acaravci and Ozturk, 2010; Li et al., 2023; Muhammad, 2019). 회귀분석은 변수 간 인과관계를 설명하는 데 유용하지만, 모형 설정이나 변수 선택에 따라 결과가 크게 달라질 수 있어 오차 가능성이 존재한다. 이에 비해 로그 평균 디비지아 지수 분해법(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)은 잔차(residual) 없이 완전 분해(complete decomposition)가 가능하므로 각 요인의 기여도를 보다 직관적이고 명확하게 파악할 수 있다. 이 방법은 경제성장, 산업구조, 에너지 집약도 및 에너지 구조의 영향을 정량적으로 평가할 수 있어 탄소중립 및 에너지 전환 정책 수립에 효과적인 도구로 간주되며, 최근 관련 연구에서도 활용이 증가하는 추세이다(Yang, Wang, Dunya, and Yuan, 2025).

분해분석법은 계산식의 단순성과 지수 분석의 실용성으로 인해 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 전통적인 지수인 라스파이레스 지수(Laspeyres Index)와 파셰 지수(Paasche Index)는 고정 가중치를 기반으로 두 시점을 비교하는 방식이기 때문에 비교 기간이 길어질수록 오차가 누적되는 한계가 있다. 이러한 문제를 완화하기 위해 다기간 연속 비교 방식이 사용되며, 대표적인 방법이 디비지아 지수(Divisia Index)이다(조용길, 2002).

다양한 분해 방법 중에서 지수분해분석(IDA)은 국가 단위의 에너지 및 배출 요인 분석에 널리 활용되고 있다(Hoekstra and Van den Bergh, 2003). IDA는 Kaya 항등식을 기반으로 하여 탄소배출 변화를 탄소집약도, 구조, 경제규모, 인구 등의 요인으로 분해함으로써 각 요인의 기여도를 식별한다. IDA의 발전은 크게 두 단계로 구분된다. 첫 번째 단계는 비완전 분해로 잔차가 존재하는 산술평균 디비지아 지수법(AMDI) 방식이며, 두 번째 단계에서는 로그평균 디비지아 지수법(LMDI)이 개발되었다. Boyd, McDonald, Ross,

and Hanson(1987)이 처음 AMDI를 제시하였으나, 이는 0값 처리의 어려움과 비교적 큰 잔차 문제가 있었다. 이후 Ang and Choi(1997)는 가중치를 로그평균 방식으로 대체하여 잔차가 없고 0값 문제를 해결할 수 있는 LMDI 방법을 개발하였다. 이러한 장점으로 인해 최근 연구에서는 이산화탄소 및 에너지 소비 변화 요인을 분석하는 데 LMDI 방법이 보다 널리 활용되고 있다(김수이·김현석, 2011; 진상현·황인창, 2009; 진상현, 2024; Fan, Luo, Xia, and Li, 2015; Lin and Long, 2016; Wang and Feng, 2018).

2) Tapio 탈동조화 모형

Tapio 탈동조화 모형(Tapio Decoupling Model)은 핀란드 학자 Jukka Tapio가 2005년에 제안한 분석 프레임워크로, 경제성장과 자원 소비 또는 환경 압력 간의 탈동조화 관계를 측정하기 위해 사용된다. 이 모형은 환경경제와 지속가능발전 연구 분야에서 널리 활용되며, 특히 탄소배출과 경제성장 간 탈동조화 분석에서 활발히 적용되고 있다(이상준, 2017; 刘怡君, 王丽, and 牛文元, 2011; Tian and Xu, 2025). 특히 최근에는 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 조건으로서 경제성장과 온실가스 배출 간 탈동조화의 중요성이 더욱 강조되고 있다(고재경·예민지, 2022).

이 모형은 탄력성 계수(elasticity coefficient) 계산 방식을 통해 변수 간 탈동조화 정도를 정량적으로 평가하며, 이를 8가지 상태로 구분한다. 즉, 강한 탈동조화, 약한 탈동조화, 확장적 동조화, 확장적 음(-)의 탈동조화, 침체적 탈동조화, 침체적 동조화, 약한 음(-)의 탈동조화, 강한 음(-)의 탈동조화로 구분된다. OECD 탈동조화 모형과 달리, Tapio 모형은 기준연도 선택 문제를 극복하였다는 장점이 있어 탄소배출 연구에서 널리 활용되고 있다(Shi, 2020; Wu, Chau, Lu, Shen, Shuai, and Chen, 2018).

Tapio 탈동조화 모형의 핵심은 탈동조화 탄력성 지수이며, 이는 경제성장이 1% 변화할 때 탄소배출이 몇 % 변화하는지를 나타낸다. 그러나 이 모형은 경제성장과 탄소배출 간의 조화 수준을 평가하는 데 유용함에도 불구하고, 탄소배출의 구체적인 요인을 설명하는 데에는 한계가 있다(Diakoulaki and

Mandaraka, 2007). 즉, 탈동조화 수준은 정량적으로 평가할 수 있지만 그 배경에 있는 메커니즘을 충분히 설명하지 못한다.

따라서 많은 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 Tapio 탈동조화 모형과 요인분해 분석을 결합하여 사용하고 있다(김민규, 2025; 이호상·서진호, 2025; He et al., 2025; Wang, Xu, and Zhang, 2023; Yan and Raza, 2025).

4. 선행연구 검토

먼저 중국을 대상으로 LMDI를 활용한 연구들은 경제성장이 탄소배출 증가를 유발하는 핵심 요인인 반면, 에너지 집약도 개선이 이를 상쇄하는 주요 감축 요인이라는 점을 공통적으로 제시해 왔다. Wang, Chen, and Zou (2005)은 1957~2000년 중국의 에너지 소비 관련 CO_2배출량을 Kaya 항등식 기반으로 분해한 결과, 에너지 집약도 감소가 전체 감축 효과의 약 95%를 차지하는 가장 중요한 억제 요인임을 밝혔다. 특히 1980년 개혁개방 이후 경제 효율성 향상과 정책적 개입에 따른 감축 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났음을 제시하였다. Xu, He, and Long(2014)은 1995~2011년 중국 6대 산업 부문 및 동·중·서부 지역을 대상으로 분석하여, 경제규모 효과가 탄소배출 증가를 주도한 반면 에너지 집약도 효과는 가장 강력한 억제 요인으로 작용했음을 확인하였다. 또한 산업별로는 공업 부문이 전체 배출량의 95.28%를 차지하고, 지역별로는 동부 지역이 높은 에너지 효율에도 불구하고 대규모 배출량을 유지하는 반면 중·서부 지역은 산업구조 및 에너지 효율 개선이 필요하다는 지역 간 차이를 제시하였다. Xu et al.(2014)는 1996~2011년을 세 개의 5개년 계획 시기로 구분하여 경제 부문과 가정 부문의 배출 요인을 비교한 결과, 경제 부문에서는 경제성장 효과가 주요 증가 요인으로 작용하고 에너지 효율 개선이 이를 억제하는 반면, 가계 부문에서는 1인당 에너지 소비 증가와 인구 이동이 배출 확대 요인으로 작용함을 밝혀 부문별 차별적 메커니즘을 제시하였다. 또한 Jiang et al.(2023)은 2008~2019년 중국 8대 경제권을 대상으로 환경규제 강도와 규제 투입 요소를 LMDI 분석에 추가하여, 전국적

으로 경제성장이 탄소배출 증가의 가장 큰 촉진 요인인 동시에 환경규제가 주요 억제 요인으로 작용함을 규명하였다.

이러한 중국을 분석대상으로 한 연구는 장기간 시계열 자료와 다양한 분해 요인을 활용하여 탄소배출 변화의 구조적 원인을 규명하고 LMDI 방법론을 확장하는 데 기여하였다. 그러나 대부분 연구가 중국 내부의 산업 및 지역 간 차이를 분석하는 데 집중되어 있어, 경제발전 단계와 에너지 시스템이 상이한 국가 간 비교를 통해 저탄소 전환 경로의 차이를 설명하는 데에는 한계가 존재한다.

한국을 대상으로 한 LMDI 연구들은 주로 산업 부문, 지역 단위 및 도시 수준에서 에너지 소비와 탄소배출 변화 요인을 분석하는 방향으로 발전해 왔다. 진상현·황인창(2009)은 1990~2006년 한국 16개 지방자치단체의 에너지 소비 변화를 생산효과, 집약도효과, 인구효과로 분해하여 에너지 효율 개선이 경제성장에 따른 소비 증가를 어느 정도 상쇄하는지를 분석하였다. 김수이·정경화(2011)는 1991~2007년 한국 제조업의 온실가스 배출 변화를 생산효과, 구조효과, 강도효과, 에너지믹스효과, 배출계수효과로 분해하여 생산효과가 가장 큰 증가 요인인 반면 강도효과와 구조효과가 주요 감소 요인으로 작용했음을 밝혔다. 또한 외환위기와 고유가 시기에 산업 구조 및 에너지 효율 개선이 가속화되었다는 점을 제시하여, 외부 경제 충격이 탄소배출 변화 요인의 구조에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다. 문혜정·이기훈(2019)은 2006~2016년 16개 광역시도를 대상으로 분석하여 전국적으로 경제효과가 여전히 주요 증가 요인으로 작용하고 있으며, 에너지 효율 개선 효과는 상대적으로 제한적임을 확인하였다. 한준·정연미(2020)는 2002~2017년 서울시 전력소비를 가정·산업·상업·교통·공공 부문으로 구분하여 분석한 결과, 1인당 GRDP 효과와 전력화율 효과가 주요 증가 요인인 반면 에너지 집약도 개선은 억제 요인으로 작용함을 밝혔다.

기존 한국을 분석 대상으로 한 연구는 지역 및 산업별 특성을 반영하여 에너지 소비와 탄소배출 변화 요인을 세분화하고 정책적 시사점을 도출했다는 점에서 의미가 있다. 그러나 대부분 특정 산업 또는 특정 지역 내부의 변화 양

상을 분석하는 데 초점을 두고 있으며, 국가 간 비교를 통해 경제성장과 탄소배출 간 관계의 차이를 설명하거나 탈동조화 수준을 체계적으로 측정하는 연구는 상대적으로 부족하다.

이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 LMDI 분석과 Tapio 탈동조화 모형을 결합하여 탄소배출 변화 요인의 기여도와 경제성장-탄소배출 간 관계 변화를 동시에 분석하는 연구가 확대되고 있다. He, Jiang, Gao and Liu(2025)과 임형우·조하현(2019)은 경제규모 확대와 제조업 성장 등이 탈동조화를 저해하는 주요 요인임을 밝혔다. 또한 Wang and Jiang(2019)은 분석을 통해 에너지 집약도 효과는 탄소배출 감소에 가장 중요한 역할을 수행하지만, 공업 부문은 탈동조화를 저해하는 요인으로 작용할 수 있음을 밝혔다. 이호상·서진호(2025)는 한국 제지산업을 대상으로 탈동조화의 주요 원인이 에너지 집약도 감소에 있으며, 탄소집약도 개선 효과는 상대적으로 제한적임을 확인하였다. 한편 김민규(2025)는 코로나19와 같은 외부 충격이 한국 가정 부문의 전력 소비 탈동조화 상태를 변화시킬 수 있음을 보여주며, 탈동조화가 고정된 결과가 아니라 산업 구조, 정책 변화 및 외부 환경 변화에 따라 동태적으로 변화하는 과정임을 강조하였다.

종합하면, 기존 LMDI-Tapio 결합 연구는 탄소배출 변화 요인의 상대적 기여와 탈동조화 과정의 동태성을 설명하는 데 중요한 기여를 하였으나, 여전히 두 가지 한계를 가진다. 첫째, 중국 연구와 한국 연구는 대부분 개별 국가 내부의 산업·지역 차이를 분석하는 데 집중하고 있으며, 산업구조와 에너지 체계가 상이한 한국과 중국을 동일한 분석 틀에서 비교한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 둘째, 기존 연구들은 전체 연구기간의 평균적 효과를 중심으로 분석하는 경우가 많아, 경제발전 단계 변화에 따라 요인별 영향력이 어떻게 변화하고 탈동조화 상태가 어떻게 전환되는지에 대한 시기별·단계별 분석은 충분히 이루어지지 않았다.

이에 본 연구는 LMDI 모형과 Tapio 탈동조화 모형을 결합하여 한국과 중국의 탄소배출 변화 메커니즘을 비교 분석한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다. 구체적으로 본 연구는 단순한 평균 효과 분석을 넘어 시기별 요인

기여도의 변화를 추적함으로써 탈동조화 과정의 단계적 특징을 규명하고, 산업화 수준·에너지 구조·산업구조가 상이한 한국과 중국을 동일한 분석 체계에서 비교함으로써 양국 간 저탄소 전환 경로의 차이를 설명하고자 한다. 이를 통해 본 연구는 기존의 단일 국가 및 정태적 분석 중심 접근을 확장하여, 국가별 제도적·경제적 조건에 따른 탄소배출 감축 메커니즘의 차이를 이해할 수 있는 비교 분석 틀을 제시하는 것을 목표로 한다.

Ⅲ. 분석자료 및 실증분석

1. 데이터 출처

한국과 중국의 에너지원별 CO_2배출 특성을 분석하기 위해 본 연구는 다음과 같은 데이터를 활용하였다. 중국 관련 데이터는 『중국 에너지 통계연감(China Energy Statistical Yearbook)』과 『중국 통계연감(China Statistical Yearbook)』에서 수집하였으며, 한국 자료는 한국에너지경제연구원(KEEI)과 한국은행(Bank of Korea)에서 취득하였다. 단, 현재 중국의 에너지 관련 통계가 2023년까지 제공되고 있으므로, 본 연구의 분석 기간은 2000년부터 2023년까지로 설정하였다〈표 1〉.

또한 분석 대상 산업은 1차, 2차, 3차 산업으로 구분하였다. 구체적으로 1차 산업은 농림어업, 2차 산업은 광업, 제조업 및 건설업, 3차 산업은 공공·서비스업, 상업 및 운수 부문을 포함한다. 아울러 본 연구는 각 산업 내 석탄, 석유, 천연가스 및 기타 에너지의 최종 에너지 소비 데이터를 활용하여 에너지원별 탄소배출 특성을 분석하였다.

〈표 1〉 데이터 출처

분류	출처	비고
CO_2 배출량	Tier 2 방식 계산	IPCC(2006)
에너지 최종 소비량 (중국)	〈중국에너지통계연감〉	산업별, 에너지원별 최종에너지소비량
에너지 최종 소비량 (한국)	에너지경제연구원	산업별, 에너지원별 최종에너지소비량 (1, 000 TOE)
지역내총생산 (중국)	〈중국통계연감〉	-
지역내총생산 (한국)	한국은행	-

2. CO_2배출량 계산법

한·중 에너지원별 CO_2 배출 특성 분석을 위해 본 연구는 IPCC(2006) 기준에 따라 "산업-에너지원-연도"의 3차원 체계를 구축하였다. 이는 LMDI 모형의 에너지 구조 분해 요구를 충족하고, 전력·열 등 2차 에너지의 중복 계산 문제를 방지한다. 또한 Wang, Zhang, Li, Lin, Zhang and Cao(2021)을 참고해 IPCC Tier 2 방법을 적용하였으며, 산정 과정은 다음 두 단계로 구성된다.

(1) 탄소배출계수(F)의 산정

우선 에너지원별 탄소배출계수를 산정한다. 본 연구는 한·중 양국의 결과 비교 가능성과 평가 기준의 일관성을 확보하기 위해 IPCC(2006) 기본값을 기반으로 탄소배출계수 산정 모형을 구축하였다:

$$F_j = NVC_j \times S_j \times O_j \times \frac{44}{12} \qquad \langle 식\ 1 \rangle$$

〈식 1〉에서 F는 단위 에너지당 탄소배출계수, j는 에너지 유형을 의미한다. NCV는 평균 저위발열량으로 에너지 물량을 표준 열량 단위로 환산하는 기준이며, S는 단위 열량당 탄소함량, O는 탄소 산화율을 나타낸다. 또한 44/12는 탄소가 이산화탄소로 전환될 때의 질량 변환계수이다.

(2) 탄소배출총량(C)의 산정

〈식 1〉을 통하여 에너지원별 배출계수를 산정한 후, 전체 탄소배출량을 산정하였다:

$$C = \sum_i \sum_j E_{ij} \times F_j \qquad \langle 식\ 2 \rangle$$

〈식 2〉에서 C는 탄소배출 총량을 의미하며, i와 j는 각각 세부 산업과 에너지 유형을 나타낸다. E_{ij}는 i산업에서 j에너지에 대한 실제 소비량을 의미한다.

3. LMDI 모형 분석

본 연구는 LMDI를 활용하여 2000년부터 2023년까지 한국과 중국의 탄소배출량을 분해 분석하였다. 분석 대상 산업은 1차 산업(농업, 임업, 어업), 2차 산업(제조업, 광업, 건설업), 3차 산업(상업, 공공, 운수, 서비스업)으로 구분하였다. 분해에 사용된 요인은 경제규모 효과, 산업구조 효과, 에너지 집약도 효과, 에너지 소비 구조 효과 및 배출계수 효과이다. 해당 식은 〈식 3〉과 같이 표현되며, 각 변수의 정의는 표에 제시되어 있다.

$$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} GDP \times \frac{GDP_i}{GDP} \times \frac{E_i}{GDP_i} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = \sum_{ij} G \times S_i \times EI_i \times ES_{ij} \times F_{ij} \qquad \langle 식\ 3 \rangle$$

〈식 3〉에서 각 변수의 의미는 다음과 같다.

C: 총 탄소배출량

i: 산업 부문(1차 산업, 2차 산업, 3차 산업)

j: 에너지 유형(석탄, 석유, 천연가스, 기타)

C_{ij}: i산업에서 j에너지를 소비함으로써 발생하는 탄소배출량

GDP: 총 부가가치(국내총생산)

GDP_i: i산업의 부가가치

E_i: i산업의 총 에너지 소비량

E_{ij}: i산업에서 j에너지의 소비량

$G = GDP$: 경제 규모

$S_i = GDP_i / GDP$: 산업 구조

$EI_i = E_i / GDP_i$: 에너지 집약도

$ES_{ij} = E_{ij} / E_i$: 에너지 구조

$F_{ij} = C_{ij} / E_{ij}$: 배출 계수

〈식 3〉을 구성하는 각 요소가 탄소배출량 변화에 미치는 영향은 〈식 4〉에 따라 계산된다. 기준기(0)에서 대상기(T)까지의 배출 변화량(ΔC)은 앞서 제시된 다섯 가지 요인의 변화량을 합한 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_G + \Delta C_S + \Delta C_{EI} + \Delta C_{ES} + \Delta C_F \qquad \langle 식\ 4 \rangle$$

LMDI 분해 원리에 따르면, 각 요인이 탄소배출 변화에 기여하는 값은 다음과 같은 공식으로 계산된다.

$$\Delta C_G = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln\left(\frac{G^T}{G^0}\right) \quad \langle 식\ 5 \rangle$$

$$\Delta C_S = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln\left(\frac{S_i^T}{S_i^0}\right) \quad \langle 식\ 6 \rangle$$

$$\Delta C_{EI} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln\left(\frac{EI_i^T}{EI_i^0}\right) \quad \langle 식\ 7 \rangle$$

$$\Delta C_{ES} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln\left(\frac{ES_{ij}^T}{ES_{ij}^0}\right) \quad \langle 식\ 8 \rangle$$

$$\Delta C_F = \sum_{ij} \frac{C_{ij}^T - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^0} \ln\left(\frac{F_{ij}^T}{F_{ij}^0}\right) \quad \langle 식\ 9 \rangle$$

본 연구는 한·중 양국의 비교 가능성과 배출계수 적용기준의 일관성을 확보하기 위해 전 분석기간에 동일한 IPCC(2006) 기본 배출계수를 적용하였

다. 이에 따라 동일 에너지원의 배출계수는 시점 간 변하지 않으므로 배출계수 효과(ΔC_F)는 0으로 나타난다. 따라서 이후의 실증분석과 LMDI-Tapio 결합 분석에서는 경제규모 효과, 산업구조 효과, 에너지 집약도 효과 및 에너지 구조 효과의 네 가지 요인을 중심으로 결과를 제시하였다.

4. Tapio 모형 분석

한국과 중국의 경제성장과 탄소배출 간 관계를 보다 면밀히 분석하기 위해, 본 연구는 LMDI 분해 결과를 바탕으로 Tapio 탈동조화 모형을 추가하였다. Tapio 탈동조화 모형은 탄소배출 변화율과 경제성장률 간의 탄력성 계수를 구축하여, 경제성장 과정에서 탄소배출이 동반 증가하는지 여부를 판단함으로써 경제발전과 환경압력 간의 탈동조화 상태를 식별한다. Tapio 탈동조화 모형은 탄소배출과 경제성장 간의 동태적 관계를 측정할 수 있으며, LMDI 분해 결과와 결합하여 각 요인이 탈동조화 과정에 미치는 영향을 추가적으로 분석하는 데 활용될 수 있다.

본 연구에서는 $t-1$년부터 t년까지의 Tapio 탈동조화 탄력성을 다음과 같다:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta C_t / C_{t-1}}{\Delta GDP_t / GDP_{t-1}} = \frac{(C_t - C_{t-1})/C_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \qquad \langle 식\ 10 \rangle$$

〈식 10〉에서 ϵ_t는 t년과 $t-1$년 사이의 탄소배출과 경제성장 간 탈동조화 탄력성을 의미한다. C_t와 C_{t-1}은 t년과 $t-1$년의 탄소배출 총량을, GDP와 GDP_{t-1}은 t년과 $t-1$년의 경제성장을 나타낸다. ΔC_t는 탄소배출 변화량을, ΔGDP_t는 GDP 변화량을 의미한다.

Tapio 탈동조화 탄력성은 경제성장과 탄소배출 변화 간의 상대적 관계를 측정하는 지표이다. 경제성장률이 양(+)인 상황에서 탄소배출 변화율이 음(-)인 경우 강한 탈동조화에 해당하며, 탄소배출 변화율이 양(+)이더라도 탄력성 값이 0 이상 0.8 미만인 경우에 위치하여 탄소배출 증가율이 경제성장률보다 낮은 경우에는 약한 탈동조화로 분류된다. 본 연구는 Tapio 탈동조화

유형 분류 기준에 따라 탈동조화 상태를 다음과 같이 구분한다〈표 2〉.

〈표 2〉 탈동조화 개념

$\Delta GDP, \Delta C$	$\epsilon C, GDP$	탈동조화 상태	의미
$\Delta GDP > 0, \Delta C < 0$	$\epsilon < 0$	강한 탈동조화	경제는 증가하지만 탄소배출은 감소하는 상태
$\Delta GDP > 0, \Delta C > 0$	$0 \leq \epsilon < 0.8$	약한 탈동조화	경제와 탄소배출이 모두 증가하였으나, 탄소배출 증가율이 더 낮은 상태
$\Delta GDP > 0, \Delta C > 0$	$0.8 \leq \epsilon < 1.2$	확장적 동조화	경제성장과 탄소배출이 유사 속도로 증가하는 상태
$\Delta GDP > 0, \Delta C > 0$	$\epsilon > 1.2$	확장적 음(-)의 탈동조화	탄소배출 증가율이 경제성장률보다 높은 상태
$\Delta GDP < 0, \Delta C < 0$	$\epsilon > 1.2$	침체적 탈동조화	경제는 감소하지만 탄소배출은 더 크게 감소하는 상태
$\Delta GDP < 0, \Delta C < 0$	$0.8 \leq \epsilon < 1.2$	침체적 동조화	경제성장과 탄소배출이 유사 속도로 감소하는 상태
$\Delta GDP < 0, \Delta C < 0$	$0 \leq \epsilon < 0.8$	약한 음(-)의 탈동조화	경제와 탄소배출이 모두 감소하였으나, 탄소배출 감소폭이 더 작은 상태
$\Delta GDP < 0, \Delta C > 0$	$\epsilon < 0$	강한 음(-)의 탈동조화	경제는 감소하지만 탄소배출은 증가하는 상태

자료: Tapio(2005)를 바탕으로 재작성

이를 바탕으로 본 연구는 LMDI 분해 결과를 Tapio 탈동조화 모형에 결합하여 각 요인의 탈동조화 기여도를 분석하였다. 구체적으로, LMDI 분해 결과를 Tapio 탈동조화 탄력성 식에 대입하여 요인별 탈동조화 기여도를 산출하였다.

$$\epsilon_t = \epsilon_{G,t} + \epsilon_{S,t} + \epsilon_{EI,t} + \epsilon_{ES,t} \qquad \langle 식\ 11 \rangle$$

여기서 각 요인의 탈동조화 기여도는 다음과 같은 계산식으로 나타낼 수 있다:

$$\epsilon_{k,t} = \frac{\Delta C_{k,t} / C_{t-1}}{\Delta GDP_t / GDP_{t-1}} \qquad \langle 식\ 12 \rangle$$

여기서 k는 경제 규모, 산업 구조, 에너지 집약도 및 에너지 구조의 네 가지 요인을 의미한다. 특정 요인의 탈동조화 기여값이 양(+)일 경우, 해당 요인은 탄소배출 증가를 유발하여 탈동조화를 저해하는 것으로 해석된다. 반대로 음(-)일 경우, 탄소배출 증가를 억제하여 탈동조화를 촉진하는 요인으로 간주된다. 또한 절대값이 클수록 해당 요인이 미치는 영향력이 더 크다는 것을 의미한다. LMDI-Tapio 결합 분석을 통해 본 연구는 각 요인이 탈동조화에 미치는 작용 방향과 기여 정도를 식별할 수 있으며, 한국과 중국의 경제성장과 탄소배출 간의 탈동조화 상태를 보다 정확하게 판단할 수 있다.

Ⅳ. 분석 결과

1. 에너지 소비와 탄소배출 요인 결과 분석

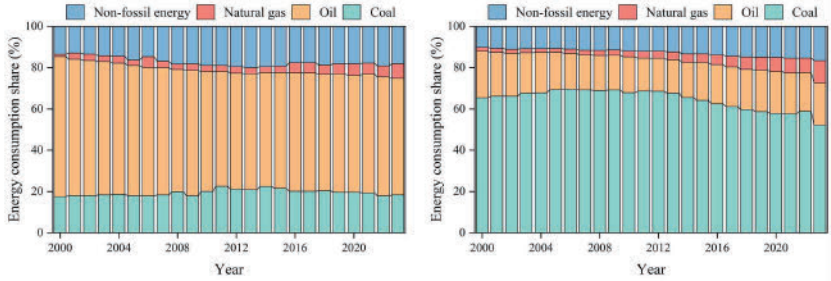
에너지 구조의 변화를 설명한 〈그림 1〉을 살펴보면, 2000년부터 2023년까지 한·중 양국 모두 에너지 구조가 어느 정도 저탄소화되는 경향을 보였지만, 구조적 특성과 전환 압력에는 뚜렷한 차이가 존재한다.

한국의 에너지 소비는 석유 중심 구조로, 석유 비중은 2000년 67.8%에서 2023년 56.4%로 감소하였으나 여전히 높은 수준을 유지하고 있다. 석탄 비중은 전반적으로 안정적인 구조를 보였으며, 천연가스와 비화석에너지의 비중은 점차 증가한 것을 알 수 있다. 반면 중국의 에너지 소비는 장기간 석탄 중심 구조를 유지해 왔으며, 석탄 비중은 2000년 65.5%에서 2023년 52.2%로 감소하여 비교적 큰 폭의 하락을 보였지만 여전히 에너지 소비의 주요 비중을 차지하고 있다. 동시에 중국의 천연가스 및 비화석에너지 비중은 지속적으로 증가하여 에너지 구조 고도화 및 저탄소 전환 추세가 나타나고 있다. 에너지 소비 총량 측면에서 보면, 한국은 118.5 Mtce에서 167.9 Mtce로 증가하며, 중국은 1,371.9 Mtce 에서 5,228.6 Mtce로 증가하여 높은 성장세를 보였다.

이를 통해 한국의 에너지 탄소배출 변화는 주로 에너지 구조 조정의 영향

을 크게 받는 반면, 중국의 에너지 탄소배출은 에너지 구조 변화뿐 아니라 에너지 소비 총량의 급격한 확장에 의해 영향을 받는다. 따라서 중국은 석탄 비중 감소와 비화석에너지 비중 확대를 통해 저탄소 전환 성과를 보이고 있음에도 불구하고, 거대한 에너지 소비 규모로 인해 여전히 상당한 탄소 감축 압력에 직면하고 있다.

〈그림 1〉 한·중 에너지 소비 구조 (2000-2023)

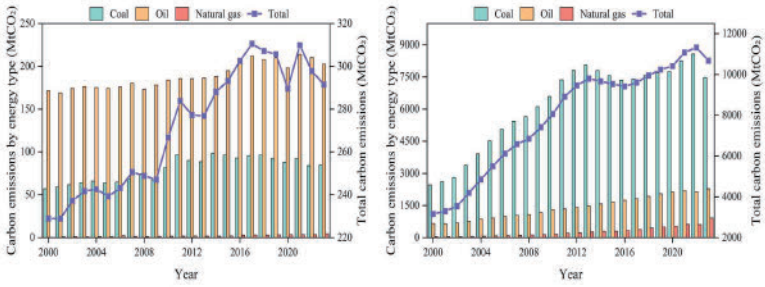


에너지원별 탄소배출량 측면에서 설명한 〈그림 2〉를 살펴보면, 2000년부터 2023년까지 한·중 양국의 에너지 탄소배출 총량은 모두 증가 추세를 보였지만, 배출 규모, 증가 속도 및 에너지원 구조 측면에서 차이가 존재하고 있다.

한국의 에너지 탄소배출은 228.91 $MtCO_2$에서 291.43 $MtCO_2$로 약 27.31% 증가했으며, 전반적으로 완만한 상승 이후 높은 수준에서 변동하는 양상을 보인다. 한국의 탄소배출은 주로 석유에서 기인하며, 2023년 석유 배출량은 202.37 $MtCO_2$로 전체 배출의 69.44%를 차지하여 여전히 가장 중요한 배출원으로 나타난다. 석탄 배출 비중은 24.92%에서 28.98%로 증가하여 총배출에 대한 영향이 증가되었으며, 천연가스는 상대적으로 작은 비중을 차지하지만 지속적으로 증가하는 추세를 보인다. 반면 중국의 에너지 탄소배출은 보다 급격한 증가를 보이며, 3,161.62 $MtCO_2$에서 10,674.96 $MtCO_2$로 증가하여 약 237.64%의 높은 증가율을 기록하였다. 중국의 탄소배출은 석탄에 크게 의존하며, 2023년 석탄 배출량은 7,475.64 $MtCO_2$로 전체의 70.03%를 차지한다. 비록 석탄 배출 비중은 2000년에 비해 감소했지만, 규

모는 여전히 매우 커 중국 탄소배출의 핵심 원천으로 남아 있다. 석유와 천연가스 배출 역시 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 천연가스 배출 비중은 1.32%에서 8.59%로 상승하여 에너지 구조 전환 과정에서 천연가스 사용이 확대되는 것으로 나타난다.

〈그림 2〉 한·중 에너지원별 탄소배출 및 총 탄소배출량



2. 한국 에너지 탄소배출의 영향 요인

경제성장, 산업구조, 에너지 효율 및 에너지 구조가 탄소배출 변화에 미치는 영향을 식별하기 위해 본 장의 2절과 3절에서 한국과 중국을 대상으로 LMDI를 수행하였다. 〈그림 3〉은 한국의 분석 결과이며, 이를 토대로 보면, 한국의 에너지 탄소배출 변화는 주로 경제 규모 효과가 배출 증가를 견인하는 반면, 에너지 집약도 효과는 배출을 억제하는 것으로 나타났다.

경제규모 효과는 연구기간 전반에 걸쳐 양(+)의 값을 보이며 연평균 +14.92 $MtCO_2$로 나타나, 경제성장이 한국 탄소배출 증가의 주요한 양(+)의 요인임을 의미한다. 해당 효과는 특정 시점에서 높은 값을 보였는데, 이는 경제 회복, 제조업 및 수출 활동의 반등, 에너지 수요 증가와 관련된다. 2009~2010년에는 글로벌 금융위기 이후 공공투자를 통한 경기 회복 과정에서 에너지 수요가 증가하며 경제규모 효과가 확대되었다. 2020~2021년에는 코로나19 이후 경기 회복 정책과 '한국판 뉴딜', '그린 뉴딜' 등의 추진으로 생산·투자·소비 활동이 회복되면서 에너지 소비 및 탄소배출의 반등으로 이어졌다.

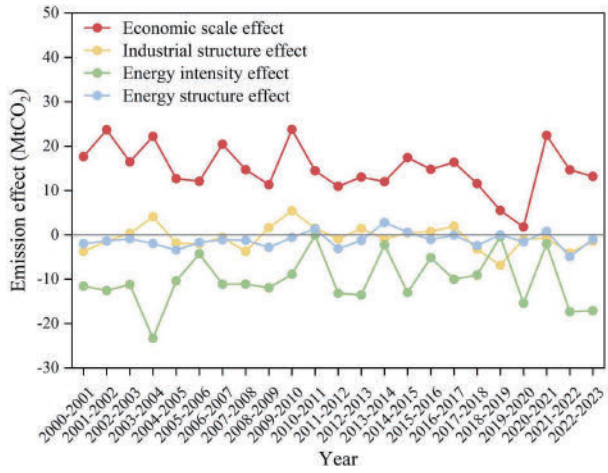
에너지 집약도 효과는 한국 탄소배출 증가를 억제하는 핵심 요인으로 연평균 -10.23 $MtCO_2$로 나타났다. 해당 효과는 연구기간 전반에 걸쳐 지속적으로 음(-)의 값을 보여 한국의 단위 GDP당 에너지 소비 감소, 즉 에너지 효율 개선을 의미한다. 이러한 효율 향상은 탄소배출 증가를 지속적으로 억제하여 경제규모 확대에 따른 배출 증가의 약 68.58%를 상쇄한 것으로 분석되었다. 2003~2004년에는 억제 효과가 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 초기 에너지 절약 정책 및 「에너지이용합리화법」 관련 조치 추진과 관련된다. 2019년 이후에는 억제 효과가 더욱 강화되었으며, 이는 코로나19 영향과 더불어 한국의 그린뉴딜 정책, 에너지 효율 개선 및 저탄소 전환 정책 강화와 연관된 것으로 판단된다.

산업구조 효과는 전반적으로 영향력이 크지 않으며, 연구기간 동안 양(+)과 음(-)의 변동을 반복하였고 누적 효과는 음(-)이며, 연평균 -0.65 $MtCO_2$로 나타났다. 이는 산업구조 조정이 전반적으로는 감축에 기여하였으나 그 기여도는 제한적임을 의미한다. 2009~2010년에는 금융위기 이후 제조업 및 수출 부문 회복과 에너지 집약도 높은 산업 생산 증가로 인해 산업구조 효과가 양(+)으로 나타났다. 그러나 2017년 이후에는 한국이 스마트 제조, 첨단 제조업 및 서비스업 발전을 추진하면서 해당 효과가 주로 음(-)으로 전환되었으며, 이는 산업 고도화가 탄소배출 억제에 일정 부분 기여하고 있음을 보여준다. 또한 2015년 박근혜 정부가 2030 BAU(Business As Usual) 기준 온실가스 감축목표를 제시한 이후, 감축정책 강화와 산업구조 조정을 통해 탄소배출 증가 부담을 일정 부분 완화한 것으로 판단된다.

에너지 구조 효과는 전반적으로 음(-)의 감축 효과를 보이며 연평균 -1.18 $MtCO_2$로 분석되었다. 이는 에너지 구조 전환이 전반적으로 탄소배출 감소에 기여했음을 의미하지만, 일부 연도에서는 변동이 나타났다. 해당 효과는 2010~2011년과 2013~2014년에만 양(+)의 값을 보였다. 2010~2011년에는 경제 규모 및 산업구조 효과가 동시에 배출 증가를 유발하면서 고탄소 에너지 수요가 증가해 에너지 구조 효과가 오히려 배출 증가 방향으로 작용한 것으로 해석된다. 2013~2014년 역시 저탄소 에너지 전환이 충분히 이루어지

지 못해 감축 효과가 제한되었으며, 이는 해당 효과가 경제활동 및 산업구조 변화에 민감하게 영향을 받는 구조적 특성을 지님을 시사한다.

〈그림 3〉 한국의 에너지 관련 탄소배출에 대한 LMDI 분해 분석



3. 중국 에너지 탄소배출의 영향 요인

중국 에너지 탄소배출의 변화 메커니즘을 설명하기 위해 본 연구는 한국 모형을 기반으로 중국 에너지 탄소배출에 대한 LMDI를 설정하였다. 〈그림 4〉는 중국을 대상으로 한 분석 결과이며, LMDI 분해 결과는 한국과 유사하게 나타났으며, 경제 규모 효과는 배출 증가를 견인하고 에너지 집약도 효과는 배출 증가를 억제하는 핵심 요인이었다.

경제 규모 효과는 전반적으로 양(+)의 값을 유지하였으며, 연평균 814.62 $MtCO_2$로 나타났다. 이는 경제성장이 지속적으로 에너지 수요를 확대하고 있으며, 중국 에너지 탄소배출 증가의 주요 요인인 것을 알 수 있다. 특히 2006~2007년, 2009~2011년, 2020~2021년에 해당 효과가 두드러지게 증가하였는데, 이는 경제의 빠른 확장 또는 회복 국면에서 산업 생산, 인프라 건설 및 에너지 수요가 증가하면서 탄소배출이 빠르게 상승했기 때문이다. 특히 2009~2011년과 2020~2021년의 재상승은 금융위기 이후와 코로나19

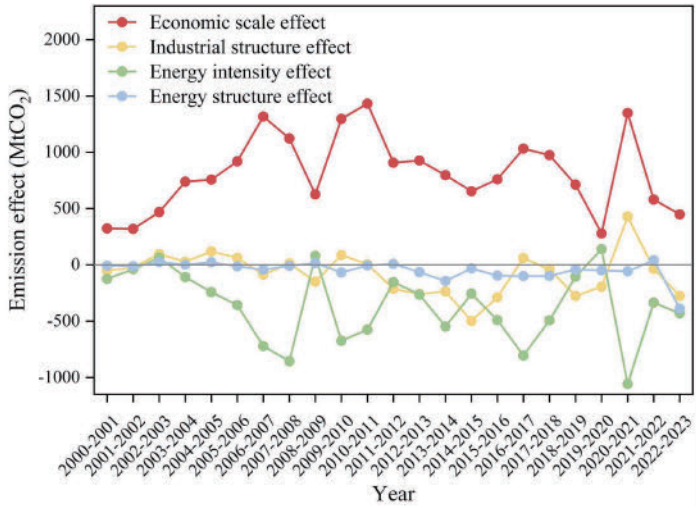
이후의 경제 회복, 산업 생산 반등 및 에너지 수요가 증가했기 때문이다.

에너지 집약도 효과는 중국 탄소배출 증가를 억제하는 주요 요인으로, 연평균 -363.51 $MtCO_2$로 나타났다. 이는 단위 경제 산출당 에너지 소비가 전반적으로 감소하여 에너지 효율 개선이 경제 규모 확장에 따른 배출 증가를 상당 부분 상쇄하고 있음을 의미한다. 이는 중국이 에너지 절약·배출 저감 정책, 낙후 생산능력 퇴출 및 산업 에너지 효율 향상에서 일정한 성과를 거두었음을 보여준다. 특히 2020~2021년에는 경제 규모 효과가 배출을 크게 증가시켰음에도 불구하고 에너지 집약도 효과 역시 강한 음(-)의 값을 보이며, 경제 회복으로 인한 배출 압력을 일정 부분 완화한 것으로 나타났다.

산업 구조 효과는 변동성이 비교적 크며, 연평균 -75.55 $MtCO_2$로 나타났다. 이는 산업 구조 변화가 시기별로 상이한 영향을 미쳤음을 의미한다. 2012년 이후에는 대부분의 기간에서 음(-)의 값을 보여 서비스업 비중 확대, 산업 구조 고도화 및 일부 고에너지 산업 성장 둔화가 탄소배출 억제에 기여했음을 시사한다. 반면 2020~2021년에는 산업 구조 효과가 다시 증가하였는데, 이는 코로나19 이후 산업 활동 회복 및 에너지 집약적 산업 생산의 반등과 관련이 있는 것으로 해석된다.

에너지 구조 효과는 전반적으로 영향이 제한적이지만 연평균 -48.93 $MtCO_2$로 감축 방향으로 작용하였다. 대부분 음(-)의 값을 보여 에너지 구조 개선이 탄소배출 감소에 기여했음을 의미한다. 특히 2022~2023년에는 -387.82 $MtCO_2$로 연구기간 중 가장 강한 감축 효과를 나타냈다. 다만 일부 연도에서는 양(+)의 값도 나타나 변동성이 존재하였다. 중국은 장기간 석탄 중심 구조를 유지하고 있으며 저탄소 에너지가 증가하고 있음에도 전체 에너지 소비 규모가 커 대체 효과가 제한되는 것으로 해석된다. 따라서 에너지 구조 효과는 감축에 기여하지만 안정성과 영향력 측면에서는 개선 여지가 있다.

〈그림 4〉 중국의 에너지 관련 탄소배출 LMDI 분해 결과



4. 한·중 LMDI 표준화 효과 비교 분석

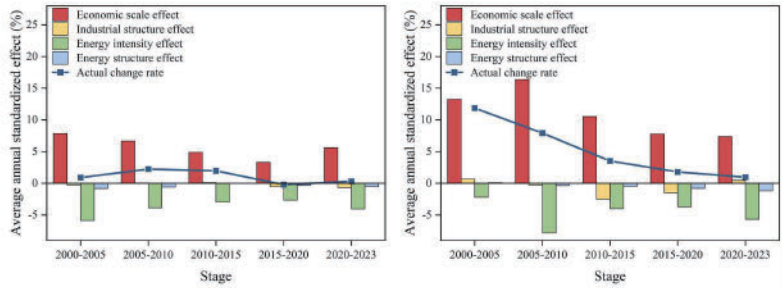
한국과 중국은 경제 규모, 에너지 소비 규모 및 탄소배출 기초 수준에서 차이가 크기 때문에 LMDI 절대 효과값을 직접 비교하는 경우 국가 규모의 영향이 크게 작용하여 각 요인의 상대적 작용을 정확하게 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구는 원자료 분해 결과를 유지하는 동시에 표준화 처리 방법을 적용하여 기초 규모 차이를 제거하고 비교 가능성을 높였다.

또한 연도별 데이터는 변동성이 크고 분석 연수가 많을 경우 시각적 가독성이 저하될 수 있으므로, 연구기간을 2000~2005년, 2005~2010년, 2010~2015년, 2015~2020년, 2020~2023년의 다섯 개 단계로 구분하였다. 이후 각 단계별 평균 연간 표준화 효과를 계산하여 이상치에 따른 변동 영향을 완화하고, 두 국가의 서로 다른 시기별 동인 구조를 보다 명확하게 비교할 수 있도록 하였다.

〈그림 5〉는 두 국가 간의 비교 분석 결과이며, 한·중 양국 모두에서 탄소배출 변화는 경제 규모 효과가 양(+)의 요인으로 작용하고, 에너지 집약도 효과가 음(-)의 억제 요인으로 나타났다. 그러나 이러한 효과의 크기와 단계별 변

화에서는 양국 간 차이가 존재하는 것으로 나타났다.

〈그림 5〉 한·중 단계별 연평균 표준화 LMDI 탄소배출 효과 비교 분석



2000~2005년 한·중 양국의 탄소배출 변화는 모두 경제규모 효과에 의해 주로 견인되었으나, 중국의 증가 압력이 훨씬 강하게 나타났다. 중국의 실제 변화율(11.86%)은 한국(0.91%)보다 크게 높았으며, 이는 주로 경제규모 효과의 차이에 기인한다. 중국은 초기 산업화·도시화 단계에서 제조업과 인프라, 중공업이 급속히 확대되며 조방형 성장 구조가 배출을 강하게 견인한 반면, 한국은 에너지 집약도 효과(-5.84%)가 상대적으로 강하게 작용하여 배출 증가를 효과적으로 억제하였다.

2005~2010년에는 중국의 경제규모 효과가 가장 높은 수준을 보였으며, WTO 가입 이후 수출 주도형 제조업 확장과 인프라 투자 증가가 주요 요인으로 작용하였다. 한국의 실제 변화율(2.24%)은 다섯 개 구간 중 가장 높았는데, 이는 경제규모 효과가 유지되는 가운데 에너지 집약도 억제 효과가 약화된 결과이다. 중국의 변화율(7.93%)은 여전히 높지만 이전보다 감소하였으며, 이는 에너지 효율 개선이 점차 강화되면서 경제성장 효과와 부분적으로 상쇄되었기 때문이다.

2010~2015년에는 양국 모두 증가 속도가 둔화되었다. 한국(1.96%)은 비교적 안정적인 구조를 보였으며, 중국(3.51%)은 경제규모 효과 감소와 함께 산업구조 및 에너지 집약도 효과가 억제 요인으로 작용하였다. 이는 산업 고도화와 서비스업 비중 확대의 영향을 반영한다.

2015~2020년에는 한국이 -0.20%로 감소 전환되었으며, 에너지 집약도·산업구조·에너지 구조 효과가 모두 음(-)으로 작용해 경제규모 효과를 상쇄하였다. 중국은 1.79%로 증가세를 유지했으나 증가 폭은 크게 둔화되었고, 구조적 개선 효과가 점차 강화되었다.

2020~2023년에는 팬데믹 이후 회복으로 소폭 반등이 나타났으나, 중국(0.96%)과 한국(0.32%) 모두 낮은 수준의 변화율을 보였다. 중국은 경제규모 효과(7.38%)가 여전히 배출을 견인했으나 효율 개선 및 에너지 구조 전환이 이를 상당 부분 상쇄하였다. 한국 역시 경제규모 효과(5.64%)에도 불구하고 감축 요인의 지속으로 증가폭이 제한되었다.

〈표 3〉 한·중 에너지 관련 탄소배출의 표준화 LMDI 효과 연도별 분해 결과

연도	경제규모 효과 (%)	산업구조 효과 (%)	에너지 집약도 효과 (%)	에너지 구조 효과 (%)	실제 변화율 (%)
Korea					
2000-2001	7.70	-1.64	-5.06	-0.87	-0.003
2001-2002	10.35	-0.60	-5.50	-0.60	3.62
2002-2003	6.94	0.13	-4.73	-0.38	1.90
2003-2004	9.18	1.70	-9.65	-0.81	0.37
2004-2005	5.23	-0.77	-4.28	-1.42	-1.36
2005-2006	5.06	-0.87	-1.80	-0.72	1.59
2006-2007	8.40	-0.23	-4.59	-0.46	3.08
2007-2008	5.87	-1.50	-4.43	-0.48	-0.69
2008-2009	4.55	0.66	-4.81	-1.14	-0.72
2009-2010	9.61	2.20	-3.62	-0.24	7.934
2010-2011	5.42	0.58	-0.03	0.51	6.40
2011-2012	3.86	-0.34	-4.65	-1.11	-2.30
2012-2013	4.70	0.52	-4.89	-0.46	-0.15
2013-2014	4.34	-0.32	-0.82	1.01	4.04
2014-2015	6.06	0.16	-4.52	0.21	1.80
2015-2016	5.04	0.26	-1.76	-0.37	3.16
2016-2017	5.41	0.64	-3.32	-0.03	2.65
2017-2018	3.73	-1.05	-2.93	-0.77	-1.07
2018-2019	1.80	-2.24	-0.13	0.003	-0.50
2019-2020	0.60	-0.32	-5.06	-0.52	-5.24
2020-2021	7.75	-0.26	-0.71	0.28	6.95

2021-2022	4.73	-1.32	-5.60	-1.60	-3.86
2022-2023	4.43	-0.49	-5.75	-0.34	-2.14
China					
2000-2001	10.25	-1.61	-3.97	-0.22	4.45
2001-2002	9.68	-0.77	-1.20	-0.41	7.29
2002-2003	13.22	2.70	1.82	0.68	18.43
2003-2004	17.60	0.64	-2.61	0.03	15.66
2004-2005	15.58	2.45	-5.00	0.45	13.49
2005-2006	16.69	1.13	-6.47	-0.26	11.08
2006-2007	21.53	-1.44	-11.81	-0.72	7.56
2007-2008	17.06	0.18	-13.01	-0.15	4.078
2008-2009	9.13	-2.21	1.15	0.24	8.32
2009-2010	17.47	1.17	-9.10	-0.92	8.63
2010-2011	17.77	0.07	-7.15	-0.08	10.60
2011-2012	10.17	-2.40	-1.73	0.10	6.14
2012-2013	9.79	-2.75	-2.79	-0.69	3.56
2013-2014	8.13	-2.41	-5.60	-1.48	-1.36
2014-2015	6.75	-5.15	-2.65	-0.33	-1.38
2015-2016	7.97	-3.03	-5.15	-1.01	-1.21
2016-2017	10.97	0.64	-8.55	-1.06	1.99
2017-2018	10.15	-0.43	-5.13	-1.02	3.57
2018-2019	7.16	-2.77	-1.06	-0.42	2.92
2019-2020	2.73	-1.90	1.37	-0.49	1.71
2020-2021	12.96	4.12	-10.16	-0.56	6.36
2021-2022	5.23	-0.32	-3.03	0.36	2.24
2022-2023	3.95	-2.44	-3.80	-3.43	-5.71

5. Tapio 탈동조화 모형 분석

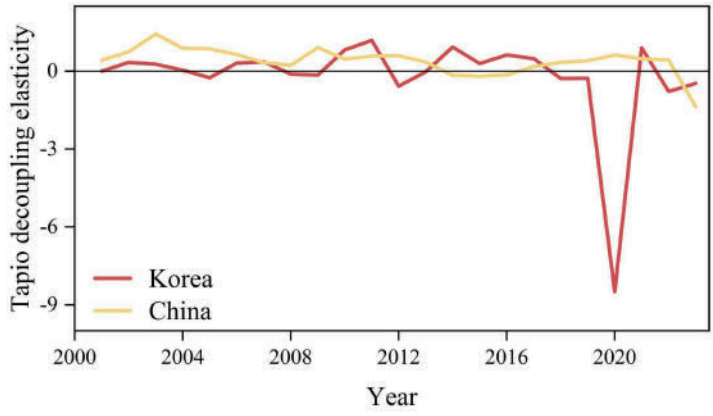
LMDI 표준화 분석을 기반으로 Tapio 모형은 경제성장과 탄소배출 변화 간의 탄력성 관계를 통해 한·중 양국의 탈동조화 상태를 추가로 판단하고, 각 요인이 탈동조화에 미치는 영향을 밝혀냈다. 이때 요인 기여값이 양(+)이면 배출 증가를 촉진하고 탈동조화를 저해하는 것이며, 음(-)이면 배출 증가를 억제하고 탈동조화를 촉진하는 것으로 해석된다.

〈그림 6〉에 따르면 2000~2023년 동안 한·중 양국의 Tapio 탈동조화 탄력

성은 모두 변동적인 것을 보였다. 한국의 탄력계수는 더 큰 변동성을 보이며 일부 연도에서는 음(-)의 값을 나타내어 경제성장과 탄소배출 감소가 동시에 발생하는 강한 탈동조화가 실현된 시기도 존재한다. 특히 2019~2020년에는 탄력계수가 크게 하락하였는데, 이는 코로나19 기간 동안 에너지 소비, 교통 및 산업 활동이 감소한 영향과 함께 GDP 성장률 둔화가 탄력성 값을 더욱 크게 변화시킨 결과이다.

반면, 중국의 탄력계수는 전체적으로 비교적 안정적인 수준을 유지하며 대부분 양(+)이고 0.8보다 작은 값을 보여, 경제성장은 여전히 탄소배출 증가를 동반하지만 배출 증가 속도는 GDP 증가 속도보다 낮아 주로 약한 탈동조화 상태를 나타낸다. 이는 LMDI 결과와도 일치하는데, 경제 규모 효과가 지속적으로 배출을 증가시키는 반면 에너지 집약도 효과가 다수의 기간에서 감축 역할을 수행하기 때문이다.

〈그림 6〉 한·중 탄소배출과 GDP 간 Tapio 탈동조화 탄력성 분석 결과 (2001-2023)



한국의 결과를 보면, 경제규모 기여도는 장기간 양(+)의 값을 유지하며 대부분 약한 탈동조화 또는 확장적 동조화 범위에 위치하여 경제성장이 여전히 탄소배출 증가를 견인하고 있음을 보여준다. 반면 에너지 집약도 기여도는 대부분 음(-)의 값을 나타내며 탈동조화를 주도하는 핵심 요인으로 작용하였다. 특히 2019~2020년에는 해당 효과가 크게 음(-)으로 확대되면서 탈동조

화가 강화되었는데, 이는 코로나19로 인한 에너지 소비 및 배출 감소의 영향으로 해석된다. 산업구조 기여도는 2017년 이후 대부분 음(-)으로 전환되어 산업 고도화와 고에너지 산업 둔화가 탈동조화에 기여했음을 보여준다. 에너지 구조 기여도 역시 음(-)의 값을 보였으나 그 영향은 상대적으로 제한적이었다. 이러한 변화는 서비스업 및 고부가가치 산업 중심으로의 산업구조 전환이 경제성장의 탄소 의존도를 낮추는 데 기여하고 있음을 보여준다. 에너지 구조 기여도 역시 일부 기간에서 음(-)의 값을 보이며 탈동조화에 기여하였으나 그 영향은 에너지 집약도 효과에 비해 상대적으로 제한적이었다. 다만 석유 의존도가 점차 감소하고 재생에너지를 포함한 비화석에너지 비중이 확대되고 있다는 점을 고려하면, 향후 에너지 구조 전환이 탈동조화에 미치는 영향은 더욱 확대될 가능성이 있다.

중국의 결과를 보면, 경제규모 기여도는 전 기간에 걸쳐 양(+)의 값을 나타내며 대부분 0.95에 근접하거나 이를 상회하여 확장적 결합 또는 이에 준하는 상태를 보였다. 이는 경제성장과 탄소배출 간의 높은 동조성이 지속되고 있음을 의미하며, 탈동조화를 제약하는 핵심 요인으로 작용한다. 특히 2002~2003년에는 전체 탄력성이 1.428로 나타나 확장적 음(-)의 탈동조화 상태를 보였는데, 이는 산업화·도시화 및 고에너지 산업 확대에 따른 에너지 수요 증가와 관련된다. 반면 에너지 집약도 기여도는 대부분 음(-)의 값을 보여 탈동조화를 촉진하는 주요 요인으로 작용하였다. 산업구조 기여도 역시 2012년 이후 점차 음(-)으로 전환되며 구조적 개선이 탈동조화에 기여하기 시작하였다. 특히 2013~2016년 강한 탈동조화는 에너지 집약도와 산업구조 효과가 동시에 음(-)으로 작용한 결과이다. 에너지 구조 기여도는 전반적으로 영향이 제한적으로 나타났으나, 2022~2023년에는 음(-)의 값이 강화되며 후기 단계에서 탈동조화에 대한 기여가 확대된 것으로 나타났다. 이는 중국에서 석탄 중심의 에너지 구조가 점차 완화되고 재생에너지를 포함한 비화석에너지의 비중이 확대되는 등 에너지 구조의 저탄소 전환이 진행되고 있는 흐름과도 연결된다. 그러나 이러한 에너지 효율 개선과 산업·에너지 구조 전환에도 불구하고 경제규모 확대에 따른 탄소배출 증가 압력을 완전히 상쇄하

지는 못하고 있다는 점에서 중국의 탈동조화는 여전히 약한 탈동조화를 중심으로 형성되고 있다.

전체적으로 볼 때, 한국의 탈동조화 수준은 중국보다 높지만 중국의 탈동조화 과정은 상대적으로 더 안정적인 특징을 보인다. 중국은 대부분의 연도에서 약한 탈동조화 상태를 유지하고 있다. 이는 경제성장이 여전히 탄소배출 증가를 동반하지만 배출 증가율은 GDP 증가율보다 낮다는 것을 의미한다. 에너지 집약도 개선은 탄소배출 증가를 억제하는 핵심 요인으로 작용하였으나, 경제규모 효과가 장기간 강한 양(+)의 값을 유지하여 이를 완전히 상쇄하지는 못하였다. 또한 대규모 산업체계와 고에너지 소비 산업, 높은 석탄 의존도가 지속되고 있어 에너지 효율 개선만으로는 강한 탈동조화로의 전환에 한계가 있음을 보여준다. 따라서 에너지 효율 향상과 함께 고에너지 소비 산업의 비중을 낮추는 산업 고도화, 석탄 중심의 에너지 구조 완화, 재생에너지를 포함한 비화석에너지 확대가 동시에 추진될 필요가 있다. 특히 2012년 이후 산업구조 효과가 점차 감축 방향으로 전환되고, 후기에는 에너지 구조 효과의 기여도 확대되고 있다는 점은 이러한 구조적 전환의 중요성을 보여준다. 즉, 중국이 약한 탈동조화에서 보다 안정적인 강한 탈동조화 단계로 전환하기 위해서는 에너지 효율 개선뿐만 아니라 산업구조와 에너지 구조를 동시에 저탄소화하는 종합적인 전환이 요구된다.

반면 한국은 강한 탈동조화가 나타난 연도가 더 많았으며, 이는 일부 시기에 경제성장과 탄소배출 감소가 동시에 실현되었음을 의미한다. 이는 한국이 상대적으로 성숙한 경제 구조를 갖추고 있으며, 경제 규모 확장 압력이 비교적 낮고, 에너지 집약도 개선이 안정적으로 이루어졌으며, 산업 구조가 서비스업 및 고부가가치 산업 중심으로 전환되었기 때문으로 해석된다. 즉, 한국은 경제성장의 에너지 및 탄소 의존도가 상대적으로 낮아 강한 탈동조화를 실현하기에 유리한 구조를 가지고 있다. 다만 한국에서 나타난 강한 탈동조화를 모두 구조적 탈탄소화의 성과로 해석하는 데에는 주의가 필요하다. 에너지 집약도 개선과 산업구조 변화가 지속적으로 탄소배출 억제에 기여했다는 점에서는 구조적 탈동조화의 기반이 확인되지만, 일부 시기에는 외부 충

격의 영향도 크게 작용하였다. 특히 2019~2020년 전체 Tapio 탄력성은 -8.495로 크게 하락하였고, 에너지 집약도 기여도 역시 -8.202로 매우 큰 음(-)의 값을 나타냈다. 이는 코로나19로 인한 생산·교통 등 경제활동 위축과 에너지 소비 감소가 해당 시기의 강한 탈동조화에 상당한 영향을 미쳤음을 보여준다. 따라서 한국의 탈동조화 성과는 에너지 효율 및 산업구조 개선에 따른 구조적 효과와 경기변동·외부 충격에 따른 일시적 효과를 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.

〈표 4〉 한·중 에너지 관련 탄소배출의 Tapio 탈동조화 탄력성 및 요인별 기여도 분석 결과

	연도	ϵ_G	ϵ_S	ϵ_{EI}	ϵ_{ES}	전체
한국	2000-2001	0.962	-0.204	-0.631	-0.109	0.000
	2001-2002	0.967	-0.056	-0.514	-0.056	0.339
	2002-2003	0.975	0.018	-0.664	-0.053	0.266
	2003-2004	0.956	0.177	-1.005	-0.085	0.039
	2004-2005	0.967	-0.142	-0.792	-0.263	-0.252
	2005-2006	0.983	-0.169	-0.350	-0.139	0.309
	2006-2007	0.974	-0.027	-0.531	-0.053	0.357
	2007-2008	0.967	-0.247	-0.731	-0.079	-0.113
	2008-2009	0.973	0.141	-1.028	-0.244	-0.153
	2009-2010	0.991	0.227	-0.374	-0.025	0.819
	2010-2011	1.004	0.106	-0.006	0.095	1.186
	2011-2012	0.969	-0.084	-1.168	-0.278	-0.577
	2012-2013	0.976	0.108	-1.015	-0.095	-0.031
	2013-2014	0.998	-0.074	-0.188	0.233	0.930
	2014-2015	0.979	0.026	-0.731	0.034	0.291
	2015-2016	0.990	0.052	-0.345	-0.073	0.620
	2016-2017	0.986	0.117	-0.605	-0.006	0.483
	2017-2018	0.976	-0.275	-0.767	-0.202	-0.281
	2018-2019	0.988	-1.230	-0.072	0.002	-0.273
	2019-2020	0.971	-0.513	-8.202	-0.849	-8.495
	2020-2021	0.996	-0.033	-0.091	0.036	0.894
	2021-2022	0.957	-0.268	-1.134	-0.324	-0.782
	2022-2023	0.967	-0.106	-1.254	-0.075	-0.468

중국	2000-2001	0.972	-0.153	-0.376	-0.021	0.422
	2001-2002	0.988	-0.079	-0.123	-0.042	0.745
	2002-2003	1.025	0.209	0.141	0.053	1.428
	2003-2004	0.991	0.036	-0.147	0.002	0.881
	2004-2005	0.990	0.156	-0.317	0.029	0.857
	2005-2006	0.973	0.066	-0.378	-0.015	0.646
	2006-2007	0.933	-0.062	-0.512	-0.031	0.328
	2007-2008	0.937	0.010	-0.715	-0.009	0.224
	2008-2009	0.996	-0.241	0.126	0.026	0.907
	2009-2010	0.958	0.064	-0.498	-0.050	0.473
	2010-2011	0.966	0.004	-0.389	-0.004	0.576
	2011-2012	0.980	-0.231	-0.167	0.009	0.592
	2012-2013	0.970	-0.272	-0.277	-0.068	0.353
	2013-2014	0.953	-0.283	-0.656	-0.173	-0.159
	2014-2015	0.960	-0.731	-0.377	-0.047	-0.196
	2015-2016	0.954	-0.362	-0.616	-0.121	-0.145
	2016-2017	0.956	0.056	-0.746	-0.093	0.173
	2017-2018	0.968	-0.041	-0.489	-0.097	0.341
	2018-2019	0.979	-0.379	-0.145	-0.057	0.399
	2019-2020	0.995	-0.691	0.500	-0.180	0.624
	2020-2021	0.968	0.308	-0.759	-0.041	0.475
	2021-2022	0.985	-0.060	-0.571	0.068	0.422
	2022-2023	0.950	-0.586	-0.914	-0.823	-1.372
비고	■Strong decoupling			■Weak decoupling		
	■Expansive coupling			■Expansive negative decoupling		

V. 결론 및 함의

1. 결론

본 연구는 2000~2023년 한·중 양국의 에너지 관련 탄소배출 데이터를 기반으로 LMDI 모형과 Tapio 탈동조화 모형을 활용하여 탄소배출의 주요 동인과 경제성장과의 동태적 관계를 비교·분석하였다. 분석 결과, 양국의 탄소배출은 경제규모, 산업구조, 에너지 집약도 및 에너지 구조의 영향을 받지만,

경제발전 단계와 에너지 구조 차이로 인해 요인별 기여도와 탈동조화 수준에는 차이가 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

첫째, 한국은 석유 의존형 구조로 인해 배출이 증가하는 추세를 보인 반면, 중국은 석탄 중심 구조와 높은 에너지 소비 증가로 인해 여전히 탄소 감축 압력이 크다. 둘째, 경제규모 효과는 양국 모두에서 배출 증가의 핵심 요인이었으며, 특히 중국에서 강하게 나타났는데, 이는 중국의 급격한 산업화·도시화의 영향을 반영하고 있다. 한국은 상대적으로 완만한 경제규모 효과를 보여 안정 단계로의 전환을 시사한다. 셋째, 에너지 집약도 효과는 양국 모두에서 주요 감축 요인으로 작용했으며, 에너지 효율 개선이 배출 억제에 핵심 역할을 수행하였다. 다만 중국은 경제규모 효과가 크기 때문에 대부분 시기에서 이를 완전히 상쇄하지는 못했다. 넷째, 산업구조 및 에너지 구조 효과는 전반적으로 감축에 기여했으나 상대적으로 제한적이었다. 한국은 서비스업 중심 전환으로 감축 효과가 강화되었고, 중국은 2012년 이후 산업 구조 고도화 전환과 비화석에너지 확대에 따라 점진적 개선이 나타났다. 다섯째, Tapio 분석 결과 중국은 주로 약한 탈동조화 상태를 보인 반면, 한국은 일부 기간에서 강한 탈동조화를 달성하였다. 그러나 한국의 탈동조화는 변동성이 존재하며 외부 충격의 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 이론적 및 정책적 시사점

이러한 연구 결과는 경제성장과 탄소배출 간 관계를 이해하는 데 있어 이론적 함의를 제공할 뿐만 아니라, 국가별 저탄소 전환 전략 수립을 위한 정책적 시사점을 제시할 수 있다.

첫째, 본 연구는 EKC 논의와 탈동조화 이론을 결합하여 경제성장과 탄소배출 간 관계를 보다 동태적이고 구조적인 관점에서 해석한다는 점에서 이론적 의미를 가진다. 기존 EKC 연구는 경제성장 초기에는 환경오염이 증가하고 일정 소득 수준을 넘어선 이후 감소하는 역U자형 관계를 가정하지만, 실제 국가별 탄소배출 변화 과정은 경제 발전 단계뿐만 아니라 산업구조, 에너지 소비 구조 및 에너지 효율 개선 수준에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 본

연구의 분석 결과, 한국과 중국 모두 경제규모 확대가 탄소배출 증가의 주요한 압력으로 작용하였으나, 에너지 집약도 개선과 에너지 구조 전환은 이러한 증가 효과를 완화하는 핵심 요인으로 나타났다. 특히 한국은 에너지 효율 개선 효과가 경제규모 확대에 따른 배출 증가를 상당 부분 상쇄한 반면, 중국은 급격한 경제성장과 거대한 에너지 소비 규모로 인해 감축 압력이 지속되는 차이를 보였다. 이는 경제성장과 탄소배출 간 관계가 단순한 소득 수준 변화에 의해 결정되는 것이 아니라, 국가별 산업 및 에너지 전환 과정에 따라 상이하게 형성될 수 있음을 보여주며, EKC 논의를 구조적·동태적 관점으로 확장한다.

둘째, 본 연구는 LMDI와 Tapio 탈동조화 모형을 결합한 통합 분석틀을 제시함으로써 탄소배출 변동의 원인과 경제성장 간의 관계 양상을 동시에 설명할 수 있다는 점에서 방법론적·이론적 기여를 한다. 기존 LMDI 연구는 탄소배출 변화 요인의 상대적 기여도를 분석하는 데 강점을 가지지만, 이러한 요인이 실제 경제성장과 탄소배출 간 탈동조화 과정에서 어떠한 역할을 하는지 설명하는 데에는 한계가 있다. 반면 Tapio 모형은 경제성장과 탄소배출 간 관계 유형을 식별할 수 있지만, 특정 탈동조화 상태가 발생한 원인을 구체적으로 설명하기 어렵다는 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 LMDI 분해 결과를 Tapio 탈동조화 탄력성 식과 결합하여각 요인이 탈동조화 과정에 미치는 방향과 기여도를 분석하였다. 구체적으로 경제규모, 산업구조, 에너지 집약도, 에너지 구조 요인의 탈동조화 기여도를 산출함으로써, 어떠한 요인이 탄소배출 증가를 유발하여 탈동조화를 저해하는지, 또는 배출 증가를 억제하여 탈동조화를 촉진하는지를 규명하였다. 이러한 접근은 기존의 "배출 변화 요인 분석"과 "경제성장-환경압력 관계 분석"을 분리하여 다루던 연구 흐름을 통합하고, 탄소중립 전환 과정에서 국가별 탈동조화 메커니즘을 보다 종합적으로 설명할 수 있는 분석 틀을 제공할 수 있다.

이와 같은 이론적 논의는 경제성장과 탄소배출 간 관계가 단순한 성장 억제나 배출 감축의 문제가 아니라, 에너지 효율 개선, 산업구조 전환 및 에너지 체계 변화와 같은 구조적 요인의 조합에 의해 결정된다는 점을 보여준다. 따

라서 탈동조화를 지속적으로 강화하기 위해서는 국가별 경제·에너지 구조의 특성을 고려한 차별화된 정책 접근이 필요하다. 이에 본 연구의 실증 결과를 바탕으로 다음과 같은 정책적 시사점을 제시한다.

첫째, 중국은 산업 구조 조정과 에너지 구조의 저탄소 전환을 가속화해야 한다. 연구 결과에 따르면 경제 규모 효과는 중국 탄소배출 증가의 핵심 요인이며, 에너지 집약도 효과는 감축 역할을 수행하고 있으나 경제 확장에 따른 배출 압력을 충분히 상쇄하지 못하고 있다. 따라서 중국의 감축 정책은 단순한 에너지 효율 개선을 넘어 성장 방식의 전환을 요구한다. 한편으로는 철강, 시멘트, 화학, 전력 등 고에너지 산업의 효율 기준을 강화하고 낙후 생산능력의 퇴출과 공정 고도화를 추진해야 한다. 다른 한편으로는 산업정책, 재정정책 및 녹색금융을 활용하여 자원을 첨단 서비스업과 저탄소 제조업으로 유도함으로써 고탄소 산업 의존도를 낮추고 저탄소 기술의 개발 및 확산을 촉진해야 한다. 동시에 에너지 안보를 전제로 석탄 소비 비중을 단계적으로 축소하고 재생에너지 확대를 가속화하며, 저장·전력망 운영·수요관리 체계를 개선하고 탄소배출권 거래시장을 정비하여 탄소가격 기능을 강화할 필요가 있다. 또한 중국은 지역별 산업구조, 에너지 자원 조건 및 발전 수준에 차이가 존재하므로, 획일적인 감축 정책보다는 지역 특성을 고려한 차별화된 저탄소 전환 전략을 추진할 필요가 있다. 둘째, 한국은 강한 탈동조화 추세를 공고히 하고 석유 의존도를 완화해야 한다. 한국은 에너지 집약도 개선을 통해 탈동조화를 달성하고 있으나, 에너지 구조는 여전히 석유 의존도가 높고 탈동조화 탄력성 역시 외부 충격에 따라 변동하는 특징을 보인다. 따라서 교통·운송, 석유화학 및 제조업 등 주요 산업 부문의 특성을 고려한 차별화된 감축 전략을 추진하고 전기차, 친환경 물류, 저탄소 연료 및 산업 전기화를 확대해야 한다. 또한 재생에너지 비중을 확대하고 전력 시스템의 수용성을 강화하여 화석연료 경로 의존성을 완화할 필요가 있다. 아울러 탄소가격제, 에너지 효율 기준 및 녹색보조금 정책의 일관성과 예측 가능성을 높여 기업의 장기적인 저탄소 투자를 유도하고, 경기 변동이나 외부 충격에도 영향을 덜 받는 안정적인 구조적 탈동조화를 구축해야 한다. 이를 위해 단기적인 배출 감소

보다는 지속 가능한 에너지 전환 정책과 산업 부문별 감축 체계를 강화할 필요가 있다.

3. 향후 연구

본 연구는 한·중 양국의 에너지 관련 탄소배출 동인과 탈동조화 상태를 비교·분석하였으나, 다음과 같은 한계가 존재한다.

첫째, 본 연구는 에너지 소비에 따른 CO_2 배출에 한정하여 분석을 수행하였으며, 산업 공정, 농업, 폐기물 등 기타 온실가스 배출은 포함하지 못하였다. 향후 연구에서는 전 부문 배출을 포함한 분석을 통해 탄소중립 경로를 보다 종합적으로 평가할 필요가 있다. 둘째, 한·중 양국 간 통계 기준, 산업 분류 및 에너지 집계 방식의 차이로 인해 데이터의 완전한 비교 가능성에는 한계가 존재한다. 향후에는 보다 세분화된 에너지·산업 분류와 함께 불변가격 GDP, PPP 또는 부가가치 지표를 활용한 강건성 검정이 요구된다. 셋째, LMDI 모형은 배출 변화의 구조적 요인 분석에는 유용하나 인과관계 식별에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 DID, SCM, 이벤트 스터디 및 패널 모형 등을 활용하여 정책 효과를 보다 정밀하게 분석할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 국가 단위 분석에 기반하여 지역 및 산업 내부의 이질성을 충분히 반영하지 못하였다. 향후에는 성·도시·산업 단위 분석을 통해 보다 미시적인 배출 구조를 규명할 필요가 있다. 다섯째, 향후 연구에서는 계량 분석과 정책 텍스트 분석을 결합하여 정책 요인이 탈동조화 성과에 미치는 영향을 텍스트 마이닝 및 토픽 모델링 등을 통해 심층적으로 분석할 필요가 있다.

▌참고문헌 ▐

고재경·예민지, 2022, "광역자치단체 온실가스 배출량과 경제성장의 탈동조화 분석," 『지방행정연구』, 36(1), pp.3-32.

김민규, 2025, "국내 광역자치단체별 가정 부문의 전력 소비 변화 특성에 관한 분석: LMDI 및 Tapio Decoupling Model을 활용하여," 『환경정책』, 33(4),

pp.233-258.
김문정·허은녕, 2020, "LMDI 방법론을 이용한 국내 배출권거래제 참여기업의 배출량 변화요인 분해분석," 『한국혁신학회지』, 15(2), pp.349-367.
김성준, 2020, 『공공선택론』, 서울: 박영사.
김수이·김현석, 2011, "LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 에너지 소비 요인 분해분석," 『에너지경제연구』, 10(1), pp.49-76.
김수이·정경화, 2011, "LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해 분석," 『Environmental and Resource Economics Review』, 20(2), pp.229-254.
김승우 등, 2000, 『환경경제학: 이론과 실제』, 서울: 박영사.
김진수·허은녕, 2005, "구조분해분석을 통한 국내 산업별 에너지 소비 변화요인 연구," 『Environmental and Resource Economics Review』, 14(2), pp.257-290.
문혜정·이기훈, 2019, "다계층 LMDI 분해법을 이용한 지역에너지 소비 변화의 영향 분석," 『경영경제연구』, 41(2), pp.221-243.
사공영호, 2017, "공공재와 정부실패: 경제학적 접근의 인식론적 한계," 『행정논총』, 55(2), pp.67-102.
이상준, 2017, "주요국의 온실가스 배출과 경제성장의 탈동조화 경향과 시사점," 『KERI Insight』, 17-6, 한국경제연구원.
이호상·서진호, 2025, "한국 제지산업의 Kaya 항등식 기반 탄소 탈동조화 분석," 『펄프·종이기술』, 57(5), pp.44-50.
임형우·조하현, 2019, "경제성장과 탄소배출량의 탈동조화 현상 분석: 63개국 동태패널 분석 (1980~2014년)," 『자원·환경경제연구』, 28(4), pp.497-526.
조용길, 2002, "지수의 이론과 측정", 『BOK 계간 국민계정』, 10(3), 0-0.
진상현·황인창, 2009, "지수분해분석을 이용한 지자체의 에너지 소비특성에 관한 연구," 『자원환경경제연구』, 18(4), pp.557-586.
진상현, 2024, "광역지방자치단체 온실가스 배출의 영향 요인 탐색: 패널회귀 및 지수분해 분석을 중심으로," 『지방정부연구』, 28(1), pp.175-196.
한준·정연미, 2020, "LMDI를 활용한 서울시 전력소비량 특성 연구," 『환경정책』, 28(2), pp.131-151.
환경부·기상청, 2025. 『한국 기후위기 평가보고서 2025』, 환경부·기상청.
国务院, 2025. 『碳达峰中和的中国行动』, 国务院新闻办公室.
刘怡君·王丽·牛文元, 2011,"中国城市经济发展与能源消耗的脱钩分析," 『中国人口· 资源与环境』, 21(1), 70-77.
Acaravci, A. and I. Ozturk, 2010, "On the relationship between energy consumption, CO_2 emissions and economic growth in Europe," *Energy*, 35(12), pp. 5412-5420.

Andreoni, J. and A. Levinson, 1998, "The Simple Analytics of the Environmental Kuznets Curve ," (NBER Working Paper Series, No. 6739), *National Bureau of Economic Research.*

Ang, B. W. and K. H. Choi, 1997, "Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method," *The Energy Journal*, 18(3), pp. 59-73.

Ang, B. W., F. Q. Zhang and K. H. Choi, 1998, "Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition," *Energy*, 23(6), pp. 489-495.

Bansal, R. and J. Ochoa, 2011, "Temperature, Aggregate Risk, and Expected Returns," (NBER Working Paper Series), Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.

Bo, L., Y. Li and Y. Jia, 2023, "Climate changes and the total factor productivity of manufacturing enterprises: Mechanism analysis and empirical tests,' *Journal of Hunan University* (*Social Sciences*), 37, pp. 78-87.

Boyd, G., J. F. McDonald, M. Ross and D. A. Hanson, 1987, "Separating the changing composition of US manufacturing production from energy efficiency improvements: A Divisia index approach," *The Energy Journal*, 8(2), pp. 77-96.

Dell, M., B. F. Jones and B. A. Olken, 2012, "Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century," *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), pp. 66-95.

Diakoulaki, D. and M. Mandaraka, 2007, "Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO_2 emissions in the EU manufacturing sector," *Energy Economics*, 29(4), pp. 636-664.

Enete, A. A. and T. A. Amusa, 2010, "Challenges of agricultural adaptation to climate change in Nigeria: A synthesis from the literature," *Field Actions Science Reports*, 4.

Fan, T., R. Luo, H. Xia and X. Li, 2015, "Using LMDI method to analyze the influencing factors of carbon emissions in China's petrochemical industries," *Natural Hazards*, 75(Suppl 2), pp. 319-332.

Grossman, G. M. and A. B. Krueger, 1991, "Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement," (NBER Working Paper Series, No. 3914), Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.

Hardin, G., 1968, "The tragedy of the commons," *Science*, 162(3859), pp. 1243-1248.

He, H., W. Jiang, Z. Gao and T. Liu, 2025, "Influencing factors of carbon emissions

from final consumption based on LMDI decomposition and Tapio index: The EU 28 as an example," *Energy Reports*, 13, pp. 4884-4899.

Hoekstra, R. and J. C. Van den Bergh, 2003, "Comparing structural decomposition analysis and index decomposition analysis," *Energy Economics*, 25(1), pp. 39-64.

International Monetary Fund, 2026, Latest estimate for 2025 in nominal terms. *Worldometer*.

Jiang, P., X. Gong, Y. Yang, K. Tang, Y. Zhao, S. Liu, et al., 2023, "Research on spatial and temporal differences of carbon emissions and influencing factors in eight economic regions of China based on LMDI model," *Scientific Reports*, 13(1), 7965.

Lantz, V. and Q. Feng, 2006, "Assessing income, population, and technology impacts on CO_2 emissions in Canada: Where's the EKC?," *Ecological Economics*, 57(2), pp. 229-238.

Li, J., M. Irfan, S. Samad, B. Ali, Y. Zhang, D. Badulescu, et al., 2023, "The relationship between energy consumption, CO_2 emissions, economic growth, and health indicators," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2325.

Lin, B. and H. Long, 2016, "Emissions reduction in China's chemical industry-Based on LMDI," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 1348-1355.

Ma, L., 2016, :Decomposition of China's industrial environment pollution change based on LMDI," *Geographical Research*, 35, pp. 1857-1868.

Minghui, L., J. Li, G. Ma and X. Yu, 2022, "How does temperature shocks affect household energy consumption? Insights from demand heterogeneity," *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 42, pp. 74-85.

Muhammad, B., 2019, "Energy consumption, CO_2 emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries," *Energy*, 179, pp. 232-245.

Özokcu, S. and Ö. Özdemir, 2017, "Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, pp. 639-647.

Pasche, M., 2002, "Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve," *Ecological Economics*, 42(3), pp. 381-389.

Perman, R. and D. I. Stern, 2003, "Evidence from panel unit root and cointegration tests that the environmental Kuznets curve does not exist," *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47(3), pp. 325-347.

Pindyck, R. S. and D. L. Rubinfeld, 1998, "Econometric models and economic forecasts (4th ed.)," New York: McGraw-Hill.

Rudebusch, G. D., 2019, "Climate change and the Federal Reserve," *FRBSF Economic Letter*, 9, pp. 33-52.

Samuelson, P. and W. Nordhaus, 1998, "Economics" (16th ed.), New York: McGraw-Hill.

Shi, C., 2020, "Decoupling analysis and peak prediction of carbon emission based on decoupling theory," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100424.

Stern, D. I., 2018, "The environmental Kuznets curve," *In Companion to Environmental Studies*(pp. 49-54), Routledge.

Stiglitz, J., 2000, "Economics of the Public Sector" (3rd ed.), New York: W. W. Norton & Company.

Tapio, P., 2005, "Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001," *Transport Policy*, 12(2), pp. 137-151.

Tian, L. and S. Xu, 2025, "Driving Factors and Decoupling Effects of Carbon Emissions from Civil Aviation in China Based on LMDI-Tapio Model," *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 38(2), pp. 73-85.

Wang, C., J. Chen and J. Zou, 2005, "Decomposition of energy-related CO_2 emission in China: 1957-2000," *Energy*, 30(1), pp. 73-83.

Wang, H., W. Xu and Y. Zhang, 2023, "Research on provincial carbon emission reduction path based on LMDI-SD-Tapio decoupling model: The case of Guizhou, China," *Sustainability*, 15(17), 13215.

Wang, M. and C. Feng, 2018, "Decomposing the change in energy consumption in China's nonferrous metal industry: An empirical analysis based on the LMDI method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2652-2663.

Wang, Q. and R. Jiang, 2019, "Is China's economic growth decoupled from carbon emissions?," *Journal of Cleaner Production,* 225, pp. 1194-1208.

Wang, Y., Y. Zhang, J. Li, J. G. Lin, N. Zhang and W. Cao, 2021, "Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends," *Journal of Environmental Management*, 297, 113324.

Weimann, J., J. Brosig-Koch, T. Heinrich, H. Hennig-Schmidt and C. Keser, 2022, "CO_2 Emission reduction – Real public good provision by large groups in

the laboratory," *Journal of Economic Behavior & Organization*, 200, pp. 1076-1089.

Wu, Y., K. W. Chau, W. Lu, L. Shen, C. Shuai and J. Chen, 2018, "Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry," *Environmental Impact Assessment Review*, 71, pp. 60-69.

Xu, S. C., Z. X. He and R. Y. Long, 2014, "Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using LMDI," *Applied Energy*, 127, pp. 182-193.

Xu, X., T. Zhao, N. Liu and J. Kang, 2014, "Changes of energy-related GHG emissions in China: An empirical analysis from sectoral perspective," *Applied Energy*, 132, pp. 298-307.

Yan, X. and M. Y. Raza, 2025, "Decoupling the traded coal and its factors under the sustainable energy changeover in South Korea," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, pp. 1-21.

Yang, B., Y. Wang, R. Dunya and X. Yuan, 2025, "Study on the driving factors and decoupling effect of carbon emission from pig farming in China-based on LMDI and Tapio model," *Environment, Development and Sustainability*, 27(2), pp. 3145-3175.

Zhong, M. and X. Zhang, 2010, "Summary about the critique of Environmental Kuznets Curve," *China Population, Resources and Environment*, 20, pp. 62-67.

주일: 연세대학교 행정학과 박사과정에 재학 중이며, 주요 연구 관심 분야는 환경정책, 에너지정책, 공공관리 등이다(zhouyi@yonsei.ac.kr).

지지에: 연세대학교 행정학과에서 박사과정에 재학 중이며, 탄소시장 및 기후변화 정책에 관심을 갖고 있으며, 주식회사 더키 THEKIE 주관했던 볼록체인 기반 자발적 탄소시장 프로젝트에 참여한 바 있다(0918jjsx@gmail.com).

투 고 일: 2026년 05월 28일
심 사 일: 2026년 06월 18일
게재확정일: 2026년 08월 22일