

논문

경상남도 온실가스 배출과 경제성장 간 탈동조화 요인 분해 분석 Factor Decomposition Analysis of Decoupling between Greenhouse Gas Emissions and Economic Growth in Gyeongsangnam-do

조성혁, 박종관, 최미진^{1)*}

창원대학교 스마트그린공학부 환경에너지공학전공, ¹⁾(주)에이치아이피 제품전략본부

Seonghyeok Cho, Jongkwan Park, Mi-Jin Choi^{1)*}

Department of Environment & Energy Engineering, School of Smart & Green Engineering,
Changwon National University, Changwon, Republic of Korea

¹⁾Product Strategy Division, H.I.Pathway Co., LTD., Seoul, Republic of Korea

접수일 2026년 7월 14일
수정일 2026년 8월 17일
채택일 2026년 8월 23일

Received 14 July 2026
Revised 17 August 2026
Accepted 23 August 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)70-5118-5988
E-mail : cmj111@hipathway.com

Abstract This study analyzes the decoupling trends between direct greenhouse gas (GHG) emissions and economic growth in Gyeongsangnam-do, South Korea, over the period 2012~2022. The region, dominated by energy-intensive heavy manufacturing sectors including shipbuilding, machinery, and petrochemicals, exhibits a GHG emission intensity per unit of real GRDP (484.4 ton CO₂-eq per billion KRW) that substantially exceeds the national average. To address the interpretive limitations of a single indicator, the UNEP (2011) Decoupling Index (DI) was supplemented by Tapio elasticity classification, LMDI-I (Logarithmic Mean Divisia Index I) decomposition, EKC (Environmental Kuznets Curve) stage correspondence, and counterfactual scenario analysis. DI analysis revealed a nonlinear decoupling trajectory, alternating between strong decoupling (2014, 2019) and negative decoupling (2017, 2021). Tapio reclassification demonstrated that 2017 and 2020, classified as negative decoupling by DI, were more appropriately categorized as recessive decoupling, reducing genuine negative decoupling years from four to two. LMDI-I decomposition using official datasets (GIR, KOSIS, KESIS) identified a structural shift around the 2015 Emissions Trading Scheme (ETS). The dominant reduction driver transitioned from the structure effect (46.9% pre-ETS) to the technology effect (68.1% post-ETS), with the latter increasing 4.5-fold. Mapped onto the Environmental Kuznets Curve framework, this indicates that, based on direct emissions, the region has entered the early phase of the technology-effect stage. However, the technology effect reversed to positive values in 2021~2022, indicating incomplete consolidation.

Key words: Decoupling index, Greenhouse gas emissions, Tapio elasticity, LMDI decomposition, Environmental Kuznets Curve

1. 서 론

기후위기의 심화와 탄소중립 목표의 국제적 확산은 전통적인 성장 중심의 산업정책에서 벗어나, 환경과 경제의 상호 조화를 모색하는 새로운 패러다임 전환을 요구하고 있다. 특히 제조업 중심의 산업 구조를 가진 지역에서는 온실가스 배출을 줄이면서 경제성장

을 달성해야 하는 이중 과제에 직면하고 있다. 이러한 맥락에서 ‘탈동조화(Decoupling, DI)’ 개념은 지속가능한 발전의 핵심 개념으로 부각되고 있으며, 온실가스 감축과 경제성장의 병행가능성을 정량적으로 분석할 수 있는 방법론으로 주목받고 있다(Jin and Kim, 2021; Lee and Jo, 2020).

탈동조화는 경제성장률과 환경부하(탄소배출량

등) 증가율 간의 관계가 비례하지 않고 약화되거나 해소되는 현상을 의미하며, 특히, 경제가 성장하면서도 탄소배출이 증가하지 않거나 감소하는 경우 ‘강한 탈동조화(strong decoupling)’로 분류된다. 일반적으로 자원효율성 향상, 에너지 전환, 생산 구조의 고도화 등 구조적 요인이 탈동조화를 유발하며, 정책 개입의 강도와 방향에 따라 그 양상은 다르게 나타난다(Koh and Ye, 2022). 다만, 탈동조화 지수(Decoupling Index, DI)는 배출량과 경제성장의 변화를 비율에 기반한 지표로서, 그 자체만으로는 특정 정책이나 산업 변화의 인과적 기여를 식별하기 어렵다. 따라서 탈동조화 경향의 해석에는 구조적 요인의 분리 분석이 병행될 필요가 있으며, 이를 위해 LMDI(Log Mean Divisia Index) 분해 분석이나 Tapio 탄력성 모형 등이 보완적 도구로 활용되고 있다(Koh and Ye, 2022; Jin and Kim, 2021; Tapio, 2005).

주요 선진국의 저탄소 전환 전략은 기후변화로 인한 피해 감축을 넘어, 장기적인 경제 구조 개편과 성장동력 확보까지 포괄하는 방향으로 진화하고 있다. 이처럼 탈동조화는 단순한 환경오염 억제를 넘어 지속가능한 발전 경로를 모색하는 전략으로 이해되고 있으며, 환경쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설과 밀접한 관련이 있다(Lee, 2010; Kim and Oh, 2005; Grossman and Krueger, 1991). EKC는 경제 성장과 환경오염 간의 관계를 역 U자형 곡선으로 설명하며, 특정 소득 수준 이상에서 오염이 감소하는 전환점 개념이 제시한다. 오염물질 배출량이 경제성장 초기에는 증가하다가 일정 소득 수준(전환점)을 넘어서면 감소하는 비선형적 관계를 설명하며, ‘경제활동효과’ → ‘에너지집약도효과’ → ‘탄소집약도효과’ 단계를 통해 탈동조화로 이어지는 경로를 이론화하였다. 실제로 선진국은 소득이 높아져도 탄소배출이 감소하는 절대적 탈동조화 경향을 보이는 반면, 인도·중국 등 신흥국에서는 여전히 탄소배출과 경제성장이 동시에 증가하는 양상이 관찰된다. 본 연구에서는 EKC를 독립적인 회귀모형으로 검증하기보다는, LMDI 분해를 통해 산정된 경제활동효과·에너지집약

도효과·탄소집약도효과와 기간별 기여도 변화를 EKC의 이론적 단계 구분과 대응시킴으로써, 경남이 EKC 곡선상 어느 전환 구간에 위치하는지를 정량적 데이터에 근거하여 진단하고자 한다.

경상남도는 기계, 조선, 화학 등의 중화학공업이 GRDP의 약 50% 이상을 차지하고 있는 대표적인 제조업 중심 지역으로, 이산화탄소 배출 역시 전국 평균을 상회하고 있다. 실제로 국가온실가스종합정보센터(GIR)에 따르면 2010년 7,574만 톤으로 정점에 도달한 이후 완만한 감소세로 전환되어, 2020년에는 약 4,602만 톤, 2022년 약 5,863만 톤 수준으로 나타났다. 반면, 같은 기간 실질 GRDP(2015년 기준연쇄가격)은 106.2조 원에서 2022년 약 121.1조 원으로 약 14% 증가하였다. 이처럼 배출량은 감소하는 가운데 경제는 성장하고 있어, 경남지역은 직접배출량 기준으로 특정 시기에 탈동조화가 실현되었을 가능성이 있으며, 이를 시계열적으로 분석하는 것이 필요하다.

탈동조화는 비선형적이며 구조적으로 변화하는 경향을 가지며, 이는 정책 개입, 에너지 가격, 산업 구조 조정, 기술도입 등 다양한 외생 변수에 의해 영향을 받는다(Jin and Kim, 2021). 예를 들어, 2015년 산업단지 에너지진단 의무화와 배출권 거래제 시행, 2016년 LNG 연료 전환 확대, 2018년 산업용 전기요금 현실화, 2021년 이후의 RE100 기반 에너지 전환 캠페인 등은 국내 제조업 중심 지역의 온실가스 배출 구조에 유의미한 변화를 가져왔을 가능성이 제기되어 왔다(Hong, 2025; Jin and Kim, 2021). 다만, 이러한 정책 효과는 조선업 경기 변동, 글로벌 에너지 가격 등 외생적 충격과 시기적으로 중첩되는 경우가 많아, 단순한 시계열 대응만으로는 정책과 탈동조화 간의 인과관계를 단정하기 어렵다. 국내에서 온실가스 배출과 경제성장 간 탈동조화를 분석한 선행 연구는 크게 세 가지 흐름으로 구분된다. 첫째, DI와 LMDI를 결합하여 광역자치단체 단위의 탈동조화 유형과 요인을 분석한 연구로, Koh and Ye (2022)는 16개 시도를 대상으로 에너지 집약도 개선이 탈동조화를 추동하는 주요 요인임을 보고하였다. 둘째, 산업 부문에 초점을 맞추어

업종별 탈동조화 변화 요인을 분해한 연구로 1990~2018년 산업별 배출량과 부가가치 간의 관계를 분석하였으며(Jin and Kim, 2021), Cho (2017)는 전력산업을 대상으로 LMDI와 Tapio 탄력성을 결합하여 배출 요인을 분석한 바 있다. 셋째, 수송 부문에 한정하여 에너지 전환의 탈동조화 효과를 분석한 연구가 보고되었다(Lee and Jo, 2020; Lim and Jo, 2019). 그러나 이들 연구는 대부분 전국 단위 또는 특정 부문에 한정되어 있어, 제조업 중심 지역의 산업 구조적 특성이 탈동조화 경로에 미치는 영향을 심층적으로 다루지 못하였다. 또한, DI 또는 LMDI 단일 방법론에 의존하는 경우가 많아 지표 간 교차 검증이 이루어지지 않았으며, 정책 효과의 시차 구조나 외생 충격과의 분리 가능성을 체계적으로 검토한 사례는 찾기 어렵다. 본 연구는 DI, Tapio 탄력성, LMDI 분해, 반사실적(counterfactual) 시나리오를 순차적으로 적용하는 다층적 분석 체계를 구성함으로써, 단일 지표의 해석적 한계를 보완하고 정책과 외생 충격의 상대적 기여 가능성까지 탐색하고자 하였다.

특히 경상남도는 조선·기계·석유화학 등 에너지 집약적 중화학공업이 GRDP의 약 50% 이상을 차지하는 국내 대표적 제조업 집중 지역으로, 배출권 거래제 할당 대상 업체가 다수 소재하여 탈동조화 경향과 정책 효과를 분석하기에 적합한 사례이다. 아울러, 본 연구에서는 경남을 단독으로 분석하는 데 그치지 않고, 유사한 제조업 구조를 가진 울산, 화력 발전 중심의 충남, 서비스업 중심의 서울과의 비교 분석을 병행함으로써 산업 구조에 따른 탈동조화 경로의 이질성을 함께 검토하였다. 이에 본 연구는 경남지역을 독립된 분석 단위로 설정하고, 2011년부터 2022년까지 12개 연도에 대한 탈동조화 경향을 정량적으로 분석하고자 한다. UNEP의 탈동조화 지수 산정법에 따라 연도별 DI를 산정하여 탈동조화의 시점 및 유형을 규명하고, GRDP 대비 CO₂ 배출 강도 변화와 제조업 중심의 산업별 기여도 분석을 병행하여 구조적 해석의 정밀도를 높인다. 아울러, Tapio 탄력성 모형을 적용하여 UNEP DI와의 분류 차이를 비교하고, LMDI 분해를

통해 경제활동효과·에너지집약도효과·탄소집약도 효과의 상대적 기여도를 분리함으로써 DI 단일 지표의 해석적 한계를 보완한다. 나아가 정책 개입 시점과 탈동조화 경향 간의 시계열적 상관관계를 시차 분석 및 반사실적(counterfactual) 시나리오를 통해 검토함으로써, 향후 경남지역의 저탄소 경제 구조 전환을 위한 정책적 시사점을 도출하는 데 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 탈동조화 지수 산정 및 분석 절차

본 연구에서는 경상남도의 경제성장과 온실가스 배출 간의 관계를 시계열적으로 분석하기 위하여 유엔환경계획에서 제시한 탈동조화 지수(DI)를 분석 틀로 활용하였다(UNEP, 2011). 이 지수는 일정 기간 동안의 온실가스 배출량 변화율을 실질 GRDP 증가율과 비교함으로써, 경제활동 대비 환경부하의 변화 방향성과 강도를 평가하는 데 활용된다.

탈동조화 지수는 다음의 수식으로 정의된다.

$$DI = \frac{\left(\frac{E_t - E_{t-1}}{E_{t-1}}\right)}{\left(\frac{GDP_t - GDP_{t-1}}{GDP_{t-1}}\right)} = \frac{\Delta E / E_{t-1}}{\Delta GDP / GDP_{t-1}}$$

여기서, E_t 와 E_{t-1} 은 각각 t 년과 $t-1$ 년의 온실가스 배출량, GDP_t 와 GDP_{t-1} 은 각각 t 와 $t-1$ 년의 실질 GRDP를 나타낸다.

본 연구에서는 UNEP (2011)에서 제시한 기준을 참고하여 DI 값을 네 가지 구간으로 분류하였다(표 1).

한편, UNEP (2011)의 DI는 연도 간 변화율을 이용하는 지표로서 산업 구조 변화, 에너지 효율 향상, 기술 도입 효과 등을 완전히 분리하여 설명하기에는 한계가 있다. 특히, DI는 분모인 GRDP 변화율이 0에 근접할 경우 지수 값이 극단적으로 커지는 수치적 불안정성을 내포하며, GDP가 감소하는 침체기에는 배출 감소가 동반되더라도 ‘역동조화’로 분류되는 구조적 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 DI를 활용한 1차적 경향 분석에 더하여, Tapio 탄력성 모형, LMDI

Table 1. Interpretation of decoupling index ranges.

DI range	Type	Interpretation
DI < 0	Strong decoupling	GDP grows while GHG emissions decrease
0 < DI < 1	Weak decoupling	GDP growth rate exceeds emission growth rate, reducing relative emission intensity
DI ≈ 1	Coupling	Emission growth rate and GDP growth rate are similar, maintaining a proportional relationship
DI < 1	Negative decoupling	Emission growth rate exceeds GDP growth rate, worsening emission intensity

분해 분석, EKC 단계 대응 해석, 정책-배출 시차 상관 분석을 병행함으로써 단일 지표의 해석적 한계를 보완하고자 한다.

2.2 자료 구축

분석에 사용한 자료는 2000년부터 2022년까지의 전국 및 각 시도별 온실가스 배출량과 경제지표를 기반으로 구축하였다. 이 중 3.1절의 국가 배출 추이 분석에는 2000~2022년 전체 자료를 활용하였으며, 3.2절 이후의 DI 기반 분석에는 2010년을 기준연도로 하여 2011~2022년 자료를, LMDI 분해 분석에는 2011년을 기준연도로 하여 2012~2022년 자료를 사용하였다. 온실가스 배출량 데이터는 온실가스종합정보센터에서 제공하는 광역자치단체 기준 지역별 온실가스 인벤토리를 사용하였으며, 직접배출량을 활용하였다. 같은 기간 GRDP는 국가데이터처에서 제공하는 2015년 기준 연쇄가격 실질 GRDP (시도) 자료를 사용하였고, 지역별 인구는 통계청 장래인구추계 및 시도 인구통계를 이용하였다. 또한, LMDI 분해 분석을 위해 국가에너지통계종합정보시스템에서 제공하는 지역 에너지통계연보의 경남 최종 에너지 소비량(천 TOE) 자료를 활용하였다. 이러한 자료를 바탕으로 2010년 대비 연도별 배출량 증가율, GRDP 증가율, DI를 산정하였으며, 표 1 구간 기준에 따라 2011~2022년 각 연도의 탈동조화 유형을 분류하고, 3장에서는 주요 전환 연도의 구조적 변화 양상을 시계열적으로 비교·분석하였다. 이 중 국가 배출 추이 분석에는 2000~2022년 전체 자료를 활용하였으며, 3.2절 이후의 DI 기반 분석에는 2010을 기준연도로 하여 2011~2022년 자료를 사용하였다.

Table 2. Tapio decoupling elasticity classification.

GDP growth direction	ϵ range	Type
GDP > 0	$\epsilon < 0$ ($\text{CO}_2 < 0$)	Strong decoupling
GDP > 0	$0 \leq \epsilon < 0.8$	Weak decoupling
GDP > 0	$0.8 \leq \epsilon \leq 1.2$	Expansive coupling
GDP > 0	$\epsilon > 1.2$	Expansive negative decoupling
GDP < 0	$\epsilon < 0$ ($\text{CO}_2 > 0$)	Strong negative decoupling
GDP < 0	$0 \leq \epsilon < 0.8$	Weak negative decoupling
GDP < 0	$0.8 \leq \epsilon \leq 1.2$	Recessive coupling
GDP < 0	$\epsilon > 1.2$	Recessive decoupling

2.3 Tapio 탄력성 모형

UNEP DI의 수치적 불안정성과 경기 침체기 분류 한계를 보완하기 위해 Tapio (2005)가 제안한 탈동조화 탄력성(Decoupling Elasticity) 모형을 병행 적용하였다(Tapio, 2005). Tapio 탄력성(ϵ)은 DI와 동일하게 배출 변화율과 GDP 변화율의 비율로 산정되나, GDP의 증감 방향을 별도로 고려하여 8가지 유형으로 세분화한다는 점에서 차별화된다.

$$\epsilon = \frac{\% \Delta \text{CO}_2}{\% \Delta \text{GDP}}$$

Tapio 모형의 분류 기준은 표 2와 같다.

이 분류는 경제 침체기에 배출도 함께 감소하는 경우를 ‘침체형 탈동조화’로 구분함으로써, UNEP DI가 동일 상황을 ‘역동조화’로 과대 분류하는 문제를 해소한다. 본 연구에서는 UNEP DI와 Tapio 분류를 연도별로 병렬 비교하여, 양 지표 간 불일치가 발생하는 연도의 구조적 원인을 분석하고, 3년 이동평균 기반의 중기 추세를 함께 제시한다.

2.4 LMDI 분해 분석

DI 및 Tapio 탄력성은 탈동조화의 방향과 강도를

판별하는 데 유용하지만, 그 원인을 구조적으로 분리하지는 못한다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 Kaya 항등식에 기반한 LMDI-I 방법을 적용하여 온실가스 배출 변화를 경제활동효과, 에너지집약도효과(에너지집약도), 탄소집약도효과(탄소집약도)로 분해하였다(Ang, 2004).

Kaya 항등식에 따라 온실가스 배출량(CO_2)은 다음과 같이 분해된다.

$$CO_2 = GDP \times \frac{E}{GDP} \times \frac{CO_2}{E} = GDP \times EI \times CI$$

여기서 GDP는 실질 GRDP로서 경제 활동 규모의 확대가 배출량에 미치는 영향(경제활동효과)을 나타내며, EI는 최종에너지 소비량(E)을 GDP로 나눈 에너지집약도로서 동일한 경제산출을 위한 투입되는 에너지량의 변화(에너지집약도효과)를 반영한다. CI는 CO_2 배출량을 최종에너지 소비량으로 나눈 탄소집약도로서 에너지원 구성 및 연료 전환에 따른 단위 에너지당 탄소배출의 변화(탄소집약도효과)를 의미한다.

각 요인의 기여량은 Ang (2005)이 제시한 LMDI-I 가법 분해 방식에 따라 산정하였다(Ang, 2005). 이 방법은 잔차가 발생하지 않는 완전분해(residual-free) 방식으로, 경제활동효과·에너지집약도효과·탄소집약도효과의 기여량 합이 총 배출 변화량과 정확히 일치하는 장점이 있다. 본 연구에서 온실가스 배출권 거래제 시행 전(2012~2014)과 시행 후(2015~2022)로 구분하여 기간별 요인 구조의 변화를 비교하였다.

나아가, LMDI 분해 결과를 EKC 가설의 이론적 단계 구분과 대응시켜 해석하였다. EKC 가설에 따르면 경제발전 초기에는 산출 증가에 따라 배출이 비례적으로 증가하는 경제활동효과가 지배적이며, 이후 산업 구조 전환에 따른 에너지집약도효과, 최종적으로 청정기술 도입에 의한 탄소집약도효과가 순차적으로 탈동조화를 견인한다(Lee, 2010; Kim and Oh, 2005). 본 연구에서는 전반기·후반기의 요인별 기여도 변화가 이 단계 전환에 부합하는지를 검토함으로써, 경남이 EKC 곡선상 어느 전환 구간에 위치하는지를 진단하고자 한다. 아울러, 서울·울산·충남의 배출집약도

및 1인당 배출량을 경남과 비교 제시하여 산업 구조에 따른 EKC 경로의 이질성을 확인한다.

2.5 정책-배출 시차 상관분석 및 반사실적 시나리오

DI 분석에서 특정 연도의 탈동조화 경향을 정책 이벤트에 직접 귀속시키는 것은 인과적 추론으로서 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 정책 효과의 시차 구조와 외생 충격과의 분리 가능성을 검토하기 위해 다음의 보조 분석을 수행하였다.

첫째, 주요 정책 이벤트(배출권 거래제 시행, LNG 전환 확대, 전기요금 현실화, RE100 캠페인 등)에 대해 적용 범위(전국/지역)와 규제 구속력(의무/자발)을 기준으로 1~3전 척도의 강도 더미변수를 코딩하고(예: 배출권 거래제 시행=3, 전기요금 현실화=2, RE100 캠페인=1), 배출 변화율(EI) 및 LMDI 탄소집약도효과와의 상관계수를 시차 0~2년에 걸쳐 산정하였다. 이를 통해 정책 효과의 발현 시점과 시차 구조를 탐색하였다.

둘째, 배출집약도 시계열에 대해 연도별 분할점 전후의 평균 변화율 차이를 비교하는 방식으로 구조변화점을 탐색하였다.

셋째, 반사실적(counterfactual) 시나리오를 구성하였다. 구체적으로, (A) 2015년 배출권 거래제 미시행을 가정하여 시행 이전(2011~2014년) 평균 배출집약도 변화율이 이후에도 지속되는 경로를 설정하고, 실제 궤적과 비교하여 정책 기여분의 상한을 추정하였으며, (B) 2014년, 2017년 조선평 침체가 없었을 경우를 가정하여 해당 연도의 GRDP 성장률을 전후 3년 평균을 대체한 시나리오에서 DI를 재산정함으로써, 외생적 산업 충격이 DI 분류에 미친 영향을 분리하였다.

이상의 분석은 인과적 식별(causal identification)을 목적으로 한 것이 아니라, DI 값의 연도별 변동에 대한 해석적 근거를 보강하고 정책과 외생 충격의 상대적 기여 가능성을 탐색하기 위한 보조적 접근으로 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국가 온실가스 배출량 및 온실가스 배출 효율성

2022년 기준, 우리나라의 온실가스 총배출량은 약 724.3백만 톤 CO₂-eq로, 이는 2018년 대비 약 7.6% 감소한 수치이다. 같은 해 1인당 온실가스 배출량은 14.0톤 CO₂-eq, GDP 10억 원당 배출량(배출 효율성)은 367.9톤 CO₂-eq로 나타났다. 이는 단순한 총량 감축을 넘어 경제성장과 환경부하 간의 구조적 탈동조화 실현 가능성을 시사하는 지표로 해석된다(그림 1).

시계열적으로 보면, GDP당 온실가스 배출량은 2000년 이후 꾸준히 감소세를 유지하고 있으며, 이는 산업 부문에서의 기술 고도화, 에너지 효율 향상, 연료 전환 등 구조적 변화가 반영된 결과로 볼 수 있다(Sorrell, 2015). 반면, 1인당 배출량은 2018년까지 증가세를 이

어오다 이후부터는 감소 추세로 전환되었는데, 이는 수송·건물·생활 등 비산업 부문의 에너지 소비 행태 변화와 더불어, 전기차 보급 확대, 신재생에너지 확산, 개인 수준의 감축 노력이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

이러한 변화 양상은 EKC 가설에서 제시하는 전환점(turning point) 이후의 패턴과 유사하다(Grossman and Krueger, 1991). 본 연구의 LMDI 분석 틀에 따르면, GDP당 배출량의 지속적 감소는 에너지집약도효과(에너지집약도 개선)가 경제활동효과(경제성장의 의한 배출 증가)를 상쇄하고 있음을 의미하며, 2018년 이후 1인당 배출량의 감소 전환은 탄소집약도효과(탄소집약도 개선)가 추가적으로 작동하기 시작한 결과로 해석할 수 있다(Lee, 2010). 총배출량의 절대적 감소와 GDP당 배출량의 지속적 개선은 강한 탈동조(strong decoupling)로의 전환 가능성을 뒷받침하며, 정책 개입 및 민간 부문 행동 변화의 효과성을 시사하는 사례라 할 수 있다.

결국, 국가 수준에서 나타나는 이와 같은 비선형적 탈동조화 경향은 EKC 가설의 이론적 경로와 부합할 뿐 아니라, 지역 수준의 탈동조화 분석과 정책 설계 시 기준선 역할을 할 수 있다. 특히, 경남지역과 같이 제조업 비중이 높은 지역이 경제활동효과·에너지집약도효과·탄소집약도효과 가운데 어느 요인이 지배적인 단계에 위치해 있는지를 파악하는 것은 향후 지역 맞춤형 감축 전략과 구조 전환 정책 수립에 실질적인 방향성을 제공할 수 있을 것이다.

광역자치단체별 온실가스 배출 특성을 2018년과 2022년 기준으로 비교한 결과, 국가 전체적으로는 구조적 탈동조화가 진전되고 있음을 확인할 수 있었다. 국가 평균 GRDP당 온실가스 배출량은 2018년 대비 8.9% 감소하여 동일한 경제활동 수준에서도 배출량이 줄어들고 있다는 점에서 경제성장과 환경부하 간의 비례관계 약화, 즉 탈동조화 경향이 나타났음을 시사한다(Koh and Ye, 2022; Jin and Kim, 2021; Lim and Jo, 2019). 이는 기술 혁신과 에너지 구조 전환이 일정 수준 효과를 발휘하고 있음을 보여준다.

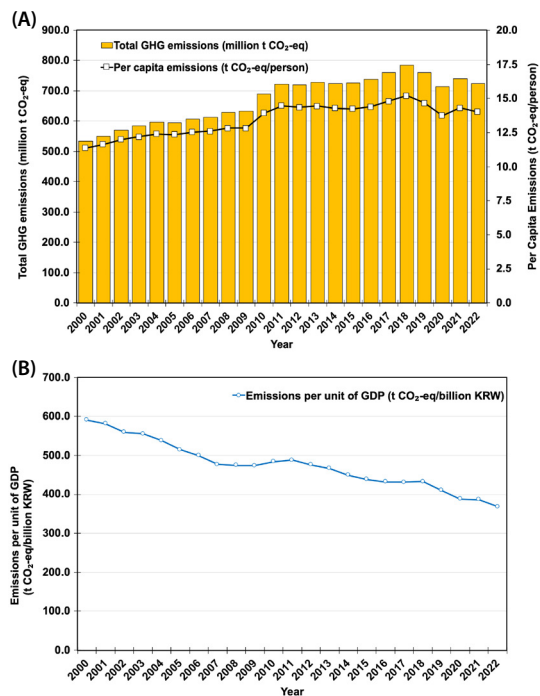


Fig. 1. National greenhouse gas emission trends in South Korea from 2000 to 2022: (A) total GHG emissions and per capita emissions; (B) emissions per unit of GDP.

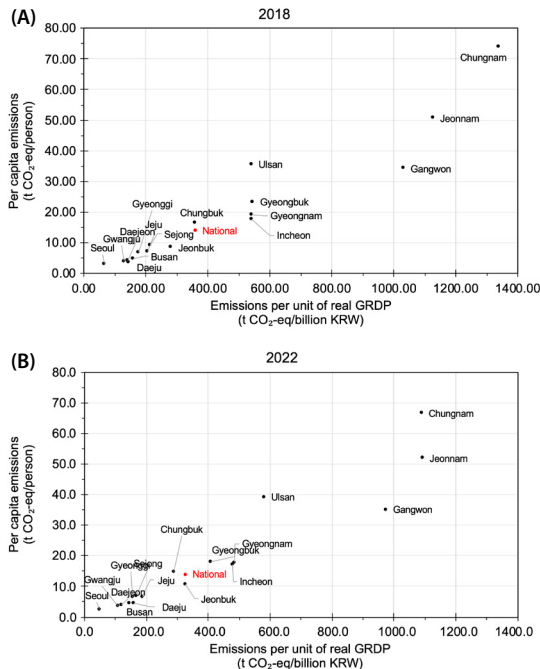


Fig. 2. Greenhouse gas emissions by metropolitan autonomous regions: (A) 2018 and (B) 2022.

지역별로 살펴보면, 충청남도는 GRDP당 배출량이 1089.9톤/10억 원, 1인당 배출량은 66.6톤으로 전국 최고 수준을 기록하고 있으며, 이는 대형화력발전소 및 중후장대한 산업시설의 집중에 기인한다(그림 2). 이러한 수치는 전국 평균의 약 3배에 달하는 배출강도를 의미하며, 충남은 탈동조화 실현보다는 여전히 역동조화 또는 정비례 성장 국면에 머물러 있음을 보여준다. 반면, 서울특별시의 경우 GRDP당 배출량은 48.3톤/10억 원, 1인당 배출량은 2.6톤으로 전국 최저 수준을 기록하였다. 이는 서울이 제조업 비중이 낮고, 서비스 산업 중심의 구조를 바탕으로 에너지 소비량이 낮기 때문이며, LMDI 관점에서 에너지집약도효과와 탄소집약도효과가 모두 안정적으로 작동하여 강한 탈동조화가 실현된 대표적 사례로 볼 수 있다.

경남은 2022년 기준 실질 GRDP당 직접배출량이 약 484.4톤 CO₂-eq/10억 원으로, 국가 평균 GDP당 총배출량(367.9톤/10억 원)을 크게 상회한다. 이는 조선,

기계, 금속, 화학 등 탄소 집약도가 높은 제조업 중심의 산업 구조를 반영한 결과로, 온실가스 배출 효율성 측면에서 여전히 취약한 상태이다. 이와 같은 수치는 경남이 절대적 탈동조화를 실현하기 위해서는 산업 구조의 고도화, 에너지 전환 정책, 친환경 공정 기술 도입 등이 병행되어야 함을 시사한다.

이처럼 동일한 국가 내에서도 지역별 산업 구조, 정책 수단, 에너지 소비 행태 등에 따라 온실가스 배출 특성이 상이하게 나타나며, 이는 탈동조화 전략의 지역맞춤형 접근 필요성을 뒷받침하는 근거가 된다. 향후 경남과 같은 제조업 중심 지역은 단순 감축목표 설정을 넘어, 배출 강도를 정량적으로 측정하고 산업 구조 변화에 따른 시계열 분석을 수행하는 다층적 분석 체계가 필요하다.

3.2 탈동조화 분석

본 연구에서는 UNEP (2011)의 탈동조화 지수와 표 1의 구간 구분을 바탕으로 2011년부터 2022년까지의 국가 및 지역 단위의 탈동조화 유형 변화를 분석하였다. DI는 실질 GRDP 대비 온실가스 배출량의 연도별 증가율을 비교함으로써, 성장과 환경부하 간의 비례 관계가 약화되었는지 또는 해소되었는지를 평가하는 지표로 활용된다.

전국 단위 분석 결과, 2010년대 후반부터 점진적인 구조적 탈동조화 경향이 나타나기 시작했다(표 3). 2011년과 2013년의 DI는 각각 1.31과 0.34로 ‘역동조화 - 약한 탈동조화’ 범위를 오가며 동조화에 가까운 상태였으나, 2014년(-0.17)은 DI<0으로 전환되면서 강한 탈동조화 구간에 최초로 진입하였다. 2019년(-1.29)과 2022년(-0.82) 역시 강한 탈동조화 유형에 해당하며, 연료 전환 확대, 배출권 거래제, 에너지 효율 정책 등이 시기적으로 중첩되어 있어 이들 정책의 중장기적 영향이 작용했을 가능성이 있다. 반면, 2020년에는 COVID-19에 따른 경기 급락으로 DI가 9.88까지 상승하여 ‘역동조화’ 구간으로 일시 전환되었고, 이후 2021년(0.87)을 거쳐 2022년에는 다시 강한 탈동조화 구간으로 복귀하였다. 다만, 2020년의 경우 배

출과 경제가 동시에 감소한 상황으로, Tapio 분류 체계에서는 ‘침체형 탈동조화’에 해당하며, UNEP DI의 ‘역동조화’ 분류와 상반된 결과를 보인다. 이러한 분류 차이에 대해서는 3.3절에서 상세히 분석한다. 이처럼 국가 차원에서는 2010년대 중반 이후 강한 탈동조화 구간이 점차 확대되고 있어, 구조적 전환이 일정 부분 진전되고 있음을 보여준다(표 3).

경상남도는 보다 비선형적이고 불안정한 탈동조화 흐름을 보였다. 경상남도는 기계, 조선, 석유화학 등 중화학 제조업이 지역경제를 주도하는 산업 구조를 가지고 있어, 2014년(-8.11), 2019년(-4.24)에는 ‘강한 탈동조화’ 구간에 속하지만, 2017년(9.56), 2021년(6.25), 2022년(2.05)에는 ‘역동조화’ 구간에 해당하는 등 DI 값의 진폭이 크게 나타났다. 다만, 이러한 진폭이 곧 환경 성과의 급격한 악화를 의미하는 것은 아닐 수 있으며, DI 산정식의 구조적 특성이 기여하는 부분도 있다.

그림 3은 경남의 온실가스 배출량 증가율(EI), GRDP 증가율(GI), 탈동조화 지수(DI)를 동시에 제시함으로써, 주요 전환 연도의 구조적 변화를 시각적으로 보여준다. 그림 3에서 GI는 2017년과 2020년을 제외하면 대체로 양(+)의 값을 유지하며 비교적 안정적인 흐름을 보인 반면, EI는 연도별 변동폭이 GI보다 현저히 크다. 이는 경남의 DI 진폭이 GRDP 변동보다는 온실가스 배출량 변동에 의해 주도되고 있음을 시사한다.

2014년의 경우 EI가 약 -0.05로 음(-)의 값을 보이고, GI는 양(+)의 값을 유지하면서 DI가 -8.11로 강한 탈동조화 구간에 위치하였다. 이는 배출량은 감소하는 가운데 경제는 소폭 성장한 사례로, 조선산업 침체와 일부 고효율 설비 도입이 동시에 작동한 결과로 해석된다. 다만 두 요인의 상대적 기여도는 DI만으로 분리하기는 어려우며, 이에 대해서는 LMDI 분해 분석과 반사실적(counterfactual) 시나리오를 통해 보완하고자 한다.

반면 2017년에는 그림 3에서 확인되듯이 EI와 GI가 모두 0에 근접하는 값을 보였으나, EI는 -0.042로

Table 3. Annual trends of decoupling index (DI) by region in Korea (2011~2022).

Year	National	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Daejeon	Ulsan	Sejong	Gyeonggi	Gangwon	Chungbuk	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongbuk	Gyeongnam	Jeju
2011	1.31	0.15	0.78	-0.36	3.84	-0.38	0.23	1.55	-	-0.57	2.66	0.57	1.32	3.11	-4.83	2.40	0.69	-0.15
2012	-0.08	-0.22	-0.01	-0.82	1.04	-1.27	1.94	12.56	-	0.00	-0.63	0.49	-1.53	0.59	-4.78	-4.53	-0.27	0.34
2013	0.34	-0.60	-0.18	-0.02	-0.14	1.41	-1.07	0.65	-	0.00	-0.24	0.42	-2.17	0.26	-2.14	-1.33	-0.58	1.22
2014	-0.17	-4.21	-0.94	-1.49	0.86	-1.22	-3.56	-59.78	1.39	-0.39	-0.34	0.16	1.30	-0.51	0.71	0.21	-8.11	-1.42
2015	0.08	-0.04	-2.00	1.65	0.74	-0.62	1.42	-16.29	1.19	0.84	-1.27	0.49	-3.02	2.75	-1.79	2.03	-0.17	0.00
2016	0.50	0.52	2.08	5.60	-0.16	1.10	1.16	-4.22	0.82	0.71	1.37	0.97	0.64	-20.29	1.41	4.03	0.24	0.42
2017	0.88	-0.33	7.82	0.01	-0.58	0.36	0.11	-9.96	1.08	0.92	2.99	0.06	1.23	-0.68	4.27	-7.97	9.56	1.11
2018	1.04	-0.24	1.75	0.92	0.60	-0.01	4.57	-6.67	4.12	0.90	5.48	-0.26	-0.26	0.72	-1.62	5.76	-2.82	6.14
2019	-1.29	-1.29	-2.17	-2.29	-1.77	-1.19	-1.17	3.81	-2.09	1.79	-1.60	-0.31	-3.69	-2.83	-2.03	-1.66	-4.24	-1.57
2020	9.88	11.48	1.99	7.39	2.61	-2.65	-2.72	0.22	2.82	-1.04	6.20	3.50	-8.37	33.10	2.63	2.76	3.44	1.47
2021	0.87	0.32	1.21	1.38	0.21	0.88	0.62	1.06	0.76	1.22	1.00	0.54	-0.20	1.41	1.69	0.99	6.25	1.63
2022	-0.82	-1.24	0.33	0.71	-1.00	-1.19	0.87	-0.53	-1.04	-1.20	0.94	0.34	-0.26	-3.38	10.63	-13.04	2.05	0.03

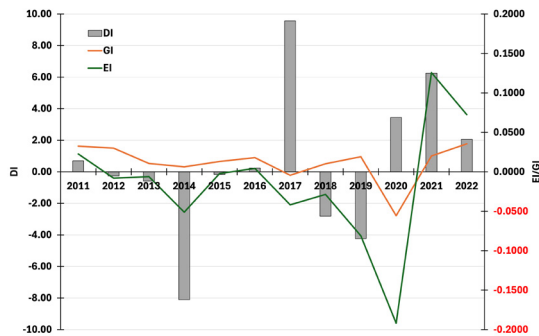


Fig. 3. Trends of decoupling index (DI), emission change rate (EI), and GRDP change rate (GI) in Gyeongsangnam-do (2011~2022).

완만한 감소에 그친 반면, GI는 -0.0044 로 거의 0에 근접할 정도로 크게 둔화되었다. 이로 인해 DI 계산식에서 분모가 매우 작아지면서 DI 값이 9.56까지 급등하여 역동조화 구간에 진입한 것으로 나타났다. 이는 DI의 수치적 불안정성이 뚜렷하게 드러나는 사례로, 배출 자체는 감소(-4.2%)했음에도 불구하고 GRDP 정책에 의해 ‘역동조화’로 분류된 것이다. Tapio 분류에서는 동일 연도가 ‘침체형 탈동조화’에 해당하며, 조선업 침체가 없었을 경우 반사실적(counterfactual) DI가 -4.28 로 강한 탈동조화에 해당한다.

2019년에는 EI가 다시 음수로 전환되고 GI가 완만한 플러스 흐름을 유지함에 따라 DI가 -4.24 로 강한 탈동조화 유형을 회복하였다. 2020년에는 코로나19 영향으로 그림 3에서 EI가 -0.19 까지 급락하며 분석 기간 중 가장 큰 폭의 감소를 기록하였고, GI 역시 약 -0.08 로 동반 하락하였다. 이에 따라 DI는 3.44로 양(+)의 값을 기록하였는데, 2017년과 마찬가지로 Tapio 분류에서 ‘침체형 탈동조화’에 해당하는 패턴이다.

이후 2021년에는 그림 3에서 EI가 $+0.13$ 으로 급반등하여 분석 기간 중 가장 큰 양(+)의 배출 증가율을 기록한 반면, GI는 약 $+0.02$ 에 그쳐, 배출 증가율이 경제성장률을 크게 상회하면서 DI가 6.25로 역동조화 구간에 재진입하였다. 이는 코로나19 이후 산업활동 재개에 따른 배출 반등이 경제 회복 속도보다 빠르게

나타난 결과이다. 2022년에는 EI가 약 $+0.04$ 로 둔화되면서 DI가 2.05로 완화되었으나, 여전히 역동조화 구간에 머물렀다.

이상의 연도별 DI 분석 결과를 종합하면, 경남은 온실가스 배출량 증가율, GRDP 증가율, 탈동조화 지수 모두에서 연도별 진폭이 크고 비선형적인 탈동조화 전환 양상을 보이며, 산업 및 정책 환경에 따라 DI의 진폭이 크게 나타나는 특징을 보였다(그림 3). 이러한 결과는 경남의 탈동조화 경향이 구조적으로 안정화되기보다는 산업 및 정책 환경, 외생변수(예: 코로나19, 글로벌 조선경기 등)에 따라 비선형적이고 변동성이 큰 형태로 나타나고 있음을 보여준다. 특히 전국 평균과 비교했을 때, 동일한 정책 환경 내에서도 경남은 더 큰 진폭의 DI 변화를 보이며, 이는 고탄소 산업 중심 구조, 에너지 전환 수용성 부족, 설비 노후화 등의 복합 요인에 기인하는 것으로 판단된다(Ko and Ye, 2022). 다만, DI의 연도별 진폭이 곧 탈동조화의 구조적 실패를 의미하는지, 아니면 DI 지표의 수치적 특성에 의한 과대 표현인지를 분리하기 위해서는 Tapio 분류 및 LMDI 요인 분석을 통한 보완적 분석이 필요하다.

울산광역시도 경상남도과 유사한 산업 구조를 가지고 있다. 그러나 2011년부터 2022년까지의 DI 지수 분석 결과, 울산은 경남과는 구조적 반응에서 뚜렷한 차이를 보인다. 2012년 울산의 DI 12.56은 전국 최고 수준의 역동조화를 기록했는데, 이는 석유화학·정유 업종의 수요 회복 및 공정 확대에 따라 배출량이 급증했기 때문으로 해석된다. 하지만 불과 2년 뒤인 2014년에는 DI가 -59.78 로 급전환하면서 전국 최고 수준의 강한 탈동조화를 보였으며, 이는 울산 석유화학단지 내 온실가스 저감 설비 투자와 노후시설 교체 등이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다.

이후에도 울산은 2016~2018년 연속으로 DI가 음(-)의 값을 유지하며 강한 탈동조화 경향을 나타냈고, 이는 정책 효과와 기술 전환이 일부 산업에서 성공적으로 작동했음을 시사한다. 반면 2019년에는 DI가 3.81로 다시 역동조화로 돌아서며, 전반적인 탈동조화 정착에는 한계가 있음을 보여준다. 2022년에는 DI가

-0.53으로 다시 강한 탈동조화 구간에 진입하였는데, 이는 산업계의 에너지 효율화 및 연료 전환 정책 이행, 수소 기반 전환 초기 흐름 등이 반영된 결과로 볼 수 있다. 그러나 전체적으로 울산은 변동폭이 큰 탈동조화 패턴을 보이며, 산업 구조 고도화와 정책 개입 사이의 간극이 여전히 존재하는 상황이다.

반면, 서울은 제조업 비중이 극히 낮고, 서비스업과 지식 기반 산업이 중심을 이루는 경제 구조를 갖고 있다. 이에 따라 실질 GRDP당 온실가스 배출량은 전국 최저 수준을 기록하고 있으며, 2014년 이후 대부분의 연도에서 $DI < 0$ 을 유지하며 안정적인 절대적 탈동조화 경향을 보였다. 특히 2022년 기준, 서울의 1인당 온실가스 배출량은 2.6톤, GRDP당 배출량은 48.3톤/10억 원으로 경남(17.8톤, 484.4톤/10억 원) 및 울산(37.3톤, 680톤/10억 원)과 비교할 때 현저히 낮은 수치를 보인다. 이러한 격차는 산업 구조 차이뿐 아니라, 교통·건물 등 민간 부문의 에너지 소비 효율화, 정책 이행 수준 차이, 공간 구조의 고밀화에 따른 이점 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

충청남도는 산업이 아닌 화력발전 중심의 에너지 공급 부문이 주된 배출원으로 작용하는 특수한 구조를 가진 지역이다. 2022년 기준 1인당 배출량은 66.6톤, 실질 GRDP당 배출량은 1,089톤/10억 원으로 전국 최고 수준이다. 이는 태안, 당진, 보령 등 대형 석탄 화력발전소의 집중 배치에 기인하며, 단위 경제활동당 온실가스 배출량이 압도적으로 높다는 점에서 배출 효율성이 매우 낮은 구조임을 보여준다. DI 역시 일부 연도에서 음(-)의 값을 보이긴 했으나, 이는 구조 개편에 의한 것이 아니라 발전량 감소나 설비 정지 등의 일시적 요인에 의한 감속형(decoupling without growth) 경향이 강하다. 충남은 탈동조화를 실현하기 위해 지역 차원의 노력만으로는 한계가 있으며, 국가 차원의 발전 설비 전환, 조기 폐지 및 대체 에너지 확산 정책이 병행되어야 한다.

이처럼, 경남-울산-충남은 모두 높은 탄소배출 구조를 공유하고 있지만, 각각 제조업 중심과 발전 중심이라는 차별화된 배출 특성을 지니며, 탈동조화 실현 경

로 역시 상이하다. 반면, 서울은 구조 전환이 완료된 상태에서 안정적인 탈동조화 흐름을 유지하고 있다. 이러한 비교는 단순한 온실가스 감축 수치만으로 탈동조화 실현 여부를 단정짓기 어렵고, 산업 구조, 에너지 소비행태, 지역의 제도적 역량 등 복합 요인이 상호작용함을 보여준다.

결론적으로, 제조업 비중이 높은 경남과 울산은 탈동조화 실현을 위해 정책 개입 외에도 구조 개편, 기술 혁신, 산업 내 저탄소화 전략의 병행이 요구되는 지역이며, 서울은 이미 구조적 전환이 상당 부분 완료된 상태에서 안정적 탈동조화가 유지되고 있다. 따라서 향후 경남형 저탄소 전환 전략 수립 시, 산업고도화, 연료 다변화, 지역 맞춤형 제도 설계가 삼중적으로 추진되어야 탈동조화의 실질적 정착이 가능할 것이다.

3.3 Tapio 탄력성 분석 및 UNEP DI와의 비교

앞선 분석에서 확인한 바와 같이, UNEP DI는 GRDP 변화율이 0에 근접하거나 음(-)의 값을 보이는 수치적 불안정성을 나타내며, 경기 침체기의 배출 감소를 '역동조화'로 과대 분류하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 방법론에서 제시한 Tapio (2005) 탄력성 모형을 경남에 적용하여 연도별 탈동조화 유형을 재분류하고, UNEP DI와의 비교를 통해 해석의 정밀도를 높이고자 한다.

Tapio 탄력성(ϵ)은 UNEP DI와 산정식이 동일하여 수치는 항상 일치한다. 차이는 분류 기준에만 있으며, Tapio의 GDP의 증감 방향을 별도로 고려하여 8가지 유형으로 세분화하므로, 동일한 ϵ 값이라도 GDP 감소기에는 UNEP과 다른 유형으로 분류될 수 있다. 그림 4는 경상남도의 2011~2022년 연도별 $DI(=\epsilon)$ 값과 함께, UNEP 및 Tapio 분류를 색상 블록으로 병렬 비교한 것이다. GDP 방향(+/-)은 Tapio 분류의 핵심 기준이므로 별도 행으로 표시하였다.

12개 연도 가운데 UNEP와 Tapio 분류가 일치하는 연도는 10개이며, 2017년과 2020년에서 분류가 상반된다. 그림 4에서 확인되었듯이, 두 연도는 GDP 방향이

Year	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DI (= ϵ)	0.69	-0.27	-0.58	-8.11	-0.17	0.24	9.56	-2.82	-4.24	3.44	6.25	2.05
GDP	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
UNEP classification	Weak DC	Strong DC	Strong DC	Strong DC	Strong DC	Weak DC	Neg. DC	Strong DC	Strong DC	Neg. DC	Neg. DC	Neg. DC
Tapio classification	Weak DC	Strong DC	Strong DC	Strong DC	Strong DC	Weak DC	Recess. DC	Strong DC	Strong DC	Recess. DC	Exp. ND	Exp. ND

Strong DC	Weak DC	Recessive DC	Negative DC / Exp. ND	Bold border = Divergent
-----------	---------	--------------	-----------------------	-------------------------

Fig. 4. Comparison of UNEP DI and Tapio elasticity classification for Gyeongsangnam-do (2011~2022).

음(-)인 해에 해당하며, 이것이 Tapio 재분류의 핵심 기준이 된다. 2017년과 2020년은 배출량과 GRDP가 모두 감소하였으나 배출 감소폭이 경제 감소폭보다 큰 해로, Tapio 모형에서 ‘침체형 탈동조화(Recessive decoupling)’로 분류된다. 배출집약도 자체는 개선되었으나 UNEP DI는 이를 ‘역동조화’로 분류하여 환경 성과를 과소평가한 셈이다. 이에 따라 12개 연도 중 실질적 역동조화(배출집약도 악화)가 발생한 해는 UNEP 기준 4개(2017, 2020, 2021, 2022)에서 Tapio 기준 2개(2021, 2022)로 줄어들며, 경남의 탈동조화 이탈이 UNEP DI가 시사하는 것보다 덜 빈번했음을 보여 준다.

한편, 연도별 변동성을 완화하여 중기 추세를 파악하기 위해 3년 이동평균 기반 Tapio 탄력성을 산정한 결과, 2013~2015년($\epsilon = -2.95$), 2017~2019년($\epsilon = 0.83$)으로 나타나 2014년 전후와 2018년 전후에 탈동조화 추세가 강하게 나타났음을 확인할 수 있다. 특히 2013~2020년 구간에서는 3년 이동평균 ϵ 가 대부분 음(-)의 값 또는 1 미만을 유지하여, 연도별 DI의 극단적 진폭과 달리 중기적으로 탈동조화 방향성이 유지되고 있었음을 시사한다. 반면 2020~2022년 구간에서는 이동평균 ϵ 가 양(+)으로 전환되어, 코로나19 이후 배출 반등에 의한 탈동조화 이탈이 일시적 현상인지 구조적 전환인지에 대한 추가 관찰이 필요하다.

이상의 Tapio 분석 결과를 종합하면, 경남의 탈동조화 양상은 UNEP DI만으로 평가할 때보다 다소 양호한 것으로 재평가된다. 다만, Tapio 모형 역시 탈동조화의 원인을 구조적으로 분리하지는 못한다. Cho (2017)는 전력사업에서 Tapio와 LMDI를 결합한 바 있으나, 제조업 중심 지역에 적용한 사례는 보고되지

않았다. 이에 다음 절에서는 LMDI 분해를 통해 경제 활동효과·에너지집약도효과·탄소집약도효과의 상대적 기여도를 분석한다.

3.4 LMDI 분해 분석 및 EKC 단계

앞선 분석에서는 DI와 Tapio 탄력성을 통해 경남의 탈동조화 방향과 강도를 확인하였다. 그러나 두 지표 모두 배출 변화율과 GRDP 변화율의 비율만을 산정할 뿐, 배출 변화가 경제성장에 의한 영향(경제활동효과), 에너지 효율 개선의 영향(에너지집약도효과), 연료 전환 등 에너지원 변화의 영향(탄소집약도효과)를 분리하지 못한다. 예를 들어, 2014년 강한 탈동조화($DI = -8.11$)가 조선산업 침체와 고효율 설비 도입의 중첩 결과라고 해석하였으나, 두 요인의 상대적 기여도를 DI만으로는 판별할 수 없었다. 이러한 한계를 보완하기 위해 본 절에서는 LMDI-I 가법 분해를 적용하여 경남의 온실가스 배출 변화를 경제활동효과, 에너지집약도효과, 탄소집약도효과로 정량적으로 분리하였다. 분석 기간은 2015년 배출권 거래제(ETS) 시행 전(2012~2014년)과 시행 후(2015~2022년)로 구분하였다. ETS는 경남 제조업에서 직접적인 배출 비용을 부과한 최초의 구조적 정책으로, LMDI 요인 변화를 관찰하기에 적절한 분할 기점이 된다. 분석에 사용된 데이터는 온실가스종합정보센터의 경남 광역 총배출량(직접배출량), KOSIS의 실질 GRDP (2015년 기준연쇄가격), KESIS의 최종에너지 소비량(천 TOE)이며, 세 변수 모두 공식 확정치를 사용하였다.

표 4는 배출권 거래제 시행 전후의 LMDI 분해 결과를 요약한 것이다. ETS 시행 전(2012~2014년)에는 경제활동효과가 +353.4만 톤으로 GRDP 성장에 따른

Table 4. LMDI decomposition of changes in GHG emissions in Gyeongsangnam-do before and after the ETS implementation (unit: 10^4 t CO₂-eq).

Category	Total change	Economic activity effect	Energy intensity effect	Carbon intensity effect
Pre-ETS (2012~2014)	-535.6	+ 353.4 (28.5%)	-582.5 (46.9%)	-306.3 (24.7%)
Post-ETS (2015~2022)	-1,301.4	+ 364.6 (18.0%)	-283.4 (14.0%)	-1,382.6 (68.1%)
Total (2012~2022)	-1,837.0	+ 718.0 (21.9%)	-865.9 (26.5%)	-1,688.9 (51.6%)

Table 5. Correspondence between LMDI dominant factors and EKC stages in Gyeongsangnam-do.

Category	Dominant factor	Corresponding EKC stage	Interpretation
Pre-ETS (2012~2014)	Energy intensity effect (46.9%)	Energy intensity effect stage (near the transition point)	Improvements in energy intensity offset the economic activity effect, while the carbon intensity effect also contributed partially.
Post-ETS (2015~2022)	Carbon intensity effect (68.1%)	Transition from the energy intensity effect stage to the carbon intensity effect stage	After the implementation of the ETS, improvements in carbon intensity became the dominant driver of emissions reduction.

배출 증가 압력이 작용하였으나, 에너지집약도효과가 -582.5만 톤으로 이를 상쇄하여 전체적으로 535.6만 톤의 배출 감소가 나타났다. 이 시기 탄소집약도효과는 -306.3만 톤으로 당초 예상과 달리 시행 전에도 일정 수준 감축에 기여하고 있었다. 이는 2010년대 전반 경남 제조업의 공정 효율화 및 산업 구조조정이 배출 감소에 기여한 반면, 에너지원 구성의 전환은 아직 본격화되지 않았음을 반영한다. 반면, ETS 시행 후에는 탄소집약도효과가 -1,382.6만 톤으로 지배적 감축 요인으로 부상하였다. 이는 시행 전 대비 약 4.5배에 해당하는 규모이다. 에너지집약도효과는 -283.4만 톤으로 여전히 음(-)의 값을 유지하였으나, 기여비율은 시행 전(46.9%)에서 크게 축소되었다. 이러한 변화는 배출권 거래제 도입에 따른 배출 비용 내재화가 LNG 전환 확대, 고효율 설비 도입 등 에너지원 구성 변화를 촉진하면서, 단위 에너지당 탄소배출(탄소집약도)이 감소한 결과로 해석할 수 있다. 특히 시행 전에는 에너지집약도효과 단독으로 경제활동효과를 상쇄하는 구조였으나, 시행 후에는 탄소집약도효과가 에너지집약도효과의 약 4.9배에 달하면서 감축의 주도적 역할을

이어받는 구조적 전환이 나타났다. 다만, 배출권 거래제 시행과 탄소집약도효과 전환 사이에는 시차가 존재할 수 있으며, 이에 대해서는 다음 절에서 정책배출 시차 분석을 통해 보완한다. 전체 기간을 기준으로 보면, 탄소집약도효과가 세 요인 중 가장 큰 감축 기여를 보였으며, 에너지집약도효과(26.5%)가 그 뒤를 이었다. 두 요인의 감축 합계는 경제활동효과에 의한 배출 증가를 크게 상쇄하여, 분석 기간 전체로 1,837.0만 톤의 순감축이 실현되었다.

이러한 요인별 기여도 변화를 EKC 가설의 이론적 단계 구분과 대응시키면, 경남의 탈동조화 경로를 다음과 같이 진단할 수 있다(Lee, 2010; Grossman and Krueger, 1991).

DI 단일 지표에 기반한 해석만으로는 경남이 경제활동효과에서 에너지집약도효과 단계로 이행하는 과도기에 머물러 있는 것으로 판단될 수 있다. 그러나 LMDI 분해 결과에 따르면 에너지집약도효과는 배출권 거래제 시행 이전부터 이미 경제활동효과를 상쇄할 정도로 충분히 작동하고 있었으며, 시행 후에는 탄소집약도효과가 전체 감축의 68.1%를 차지하는 지배

적 요인으로 전환되었다(표 5). 따라서 경남은 직접배출량 기준 EKC 곡선상 에너지집약도효과 구간을 지나 탄소집약도효과 구간으로 진입하는 초기 단계에 있는 것으로 재평가할 수 있다.

다만, 연도별 분해 결과를 살펴보면 2021년(+584.3만 톤)과 2022년(+520.1만 톤)에 탄소집약도효과가 양(+)으로 전환되어 배출 증가에 기여한 것으로 나타났다. 이는 코로나19 이후 경기 회복기에 고탄소 연료 수요가 반등하면서 탄소집약도가 일시적으로 악화된 결과로, 탄소집약도효과의 안정적 정착이 아직 완료되지 않았음을 시사한다. 이 부분이 앞서 지적인 “구조적 정착 미흡”의 실체이며, 향후 탄소집약도효과의 지속성 여부가 경남의 탈동조화 정착을 결정하는 핵심 변수가 될 것이다.

또한, 국가 배출 추이 분석에서 비교한 서울·울산·충남의 배출집약도 및 1인당 배출량을 LMDI 관점에서 재해석하면, 서울은 에너지집약도효과와 탄소집약도효과가 모두 장기적으로 안정화된 상태(EKC 탄소집약도효과 구간 정착)이며(Ko and Ye, 2022), 충남은 화력발전 중심 구조로 인해 경제활동효과가 여전히 지배적인 상태(EKC 상승구간)에 해당한다. 울산은 경남과 유사하게 에너지집약도효과가 작동하되, 석유화학 업종의 공정 특성상 탄소집약도효과의 변동폭이 더 큰 것으로 판단된다. 이러한 지역 간 차이는 동일한 국가 정책 환경 내에서도 산업 구조에 따라 EKC 경로가 상이하게 전개됨을 보여주며, 지역 맞춤형 탈동조화 전략의 필요성을 뒷받침한다. 이상의 LMDI 분해 및 EKC 대응 분석은 DI와 Tapio가 제시하지 못한 탈동조화의 구조적 원인을 분리하고, 경남의 EKC 위치를 정량적 데이터에 근거하여 진단하였다.

3.5 정책-배출 시차 분석 및 반사실적 시나리오

DI 분석에서 특정 연도의 탈동조화 경향을 정책 이벤트에 직접 귀속시키는 것은 인과적 추론으로 한계가 있다. 따라서 본 절에서는 배출집약도 시계열의 구조변화점 탐색과 반사실적(counterfactual) 시나리오를 통해, 정책 효과와 외생 충격의 상대적 기여가능성

을 검토하였다.

경남의 배출집약도(직접배출량/실질 GRDP)는 2010년 0.713 Gg/10억 원에서 2019년 0.488 Gg/10억 원까지 9년 연속 감소하여 연평균 -4.1%의 개선을 보였다. 2020년에는 코로나19의 영향으로 0.401 Gg/10억 원까지 급락하였으나, 2021년(+12.7%)과 2022년(+7.0%)에 연속 반등하여 0.484 Gg/10억 원으로 상승하였다. 각 연도를 분할점으로 설정하여 전후 구간의 평균 변화율 차이를 비교한 결과, 2015년(배출권 거래제 시행)을 기준으로 한 전후 차이는 +0.57%p에 그쳐, 배출집약도 시계열상에서 배출권 거래제 시행 시점이 뚜렷한 구조적 전환점으로 나타나지는 않았다. 이는 시행 전(2012~2014년)의 평균 변화율이 이미 -3.28%로 상당한 감소 추세에 있었기 때문이며, 배출권 거래제의 효과가 기존 추세에 중첩되어 독립적으로 식별되기 어려운 구조임을 시사한다.

이러한 중첩 구조를 보다 구체적으로 검토하기 위해 두 가지 반사실적(counterfactual) 시나리오를 설정하였다. 첫째, 배출권 거래제가 시행되지 않았을 경우를 가정하여 시행 전 평균 배출집약도 변화율(-3.28%/년)이 2015년 이후에도 지속되는 경로를 설정하고, 실제 궤적과 비교하였다(시나리오 A). 그 결과, 2015~2022년 누적 기준으로 실제 경로는 반사실적 경로 대비 1,754만 톤 적게 배출한 것으로 나타났다. 이는 배출권 거래제를 포함한 정책 개입이 중장기적으로 감축에 기여했을 가능성을 보여준다. 그러나 2022년 단년 기준으로 실제 배출량(5,862.5만 톤)이 반사실적(counterfactual) 경로(5,781.9만 톤)보다 오히려 80.5만 톤 높았다. 이는 2017~2020년에 정책 효과와 경기 침체가 중첩되어 배출이 크게 감소하였으나, 2021~2022년의 경기 회복기 반등이 반사실적(counterfactual) 경로의 일정 감소율(-3.28%)보다 가파르게 나타났기 때문이다. 이 결과는 LMDI 분석에서 동일 시기에 탄소집약도효과가 양(+)으로 전환된 것과 일치하며, 배출권 거래제가 중기적 감축에는 기여하였으나 경기 변동에 따른 배출 반등을 억제하는 데에는 한계가 있음을 보여준다. 한편, 국가 수준에서 배출권 거래

제가 관리하는 배출량은 국가 총배출량의 약 73.5%에 해당한다(NABO, 2024). 경남은 조선·기계·석유화학 등 연간 125,000톤 CO₂-eq 이상을 배출하는 대규모 사업장이 다수 소재하여 ETS 할당 대상 비중이 국가 평균 이상일 것으로 추정되나, 지역 단위의 공식 통계가 공개되어 있지 않아 정확한 비중은 확인되지 않는다. 따라서 본 연구의 반사실적 시나리오에서 산정된 누적 감축분(1,754만 톤)은 ETS의 직접 효과뿐 아니라 동기간에 시행된 에너지진단 의무화, LNG 전환 지원 등 복수 정책의 복합적 효과가 포함된 상한 추정치로 해석되어야 한다.

둘째, 2017년과 2014년의 DI 극단값이 조선업 침체에 따른 GRDP 정체에 기인하는지를 검토하기 위해, 해당 연도의 GRDP 성장률을 전후 연도 평균으로 대체한 반사실적(counterfactual) DI를 산정하였다(시나리오 B). 2017년의 경우, 실제 GRDP 성장률은 -0.44%였으나 전후 평균(+1.33%)을 적용하면 DI는 9.56(역동조화)에서 -4.28(강한 탈동조화)로 분류가 역전된다. 배출 자체는 -5.70% 감소하였으므로, 2017년의 역동조화 분류는 배출 증가가 아닌 GRDP 정체에 의한 산정식 왜곡임이 확인된다. 이는 Tapio 분석에서 동일 연도를 ‘침체형 탈동조화’로 재분류한 결과와도 일치한다. 반면, 2014년의 배출 감소(-5.15%)가 GRDP 정체에 의한 허수가 아니라 실질적인 배출집약도 개선에 의한 것이었음을 보여준다. 2014년과 2017년의 조선업 침체는 경남 GRDP 정체의 주요 원인인 동시에, ETS 시행(2015년) 전후 시기와 시간적으로 중첩된다. 시나리오 B에서 2017년 반사실적(counterfactual) DI가 -4.28(강한 탈동조화)로 역전된 것은 GRDP 정체에 의한 DI 산정식의 구조적 왜곡을 보여주는 것이며, 조선업 침체에만 기인한다는 의미는 아니다. 실제로 2017년의 배출 감소(-5.70%)는 조선업 생산량 감소에 따른 에너지 소비 축소와 ETS 도입 이후 사업장의 연료 전환 및 에너지 효율 개선이 동시에 작용한 결과로 판단되며, LMDI 분해에서 동 시기 탄소집약도효과가 음(-)의 값을 유지한 것이 이를 뒷받침한다. 다만, 두 요인의 개별 기여도를 엄밀히 분리하기 위해서는

업종별 LMDI 분해가 필요하며, 이는 향후 연구 과제로 남는다.

이러한 결과를 종합하면, 경남의 배출집약도 개선은 배출권 거래제 시행 이전부터 연평균 -3.28%의 추세로 진행되고 있었으며, 배출권 거래제는 이 추세를 가속하기보다는 중기적 누적 감축에 기여하는 방향으로 작용한 것으로 판단된다. 또한 DI의 극단적 진폭은 배출량 변동보다 GRDP 변동에 의해 증폭되는 경우가 있으며, 이는 Tapio 재분류 및 반사실적(counterfactual) DI 산정을 통해 확인되었다. 다만, 본 분석은 인과적 식별을 목적으로 한 것이 아니라 DI 값의 연도별 변동에 대한 해석적 근거를 보강하고 정책과 외생 충격의 상대적 기여 가능성을 탐색하기 위한 보조적 접근으로 수행되었다.

4. 결론 및 정책적 시사점

본 연구는 경상남도의 온실가스 직접배출량과 경제성장 간의 탈동조화 경향을 2012~2022년 시계열에 기반하여 정량적으로 분석하였다. UNEP 탈동조화 지수(DI)를 1차 분석 도구로 활용하되, DI 단일 지표의 해석적 한계를 보완하기 위해 Tapio 탄력성 분류, LMDI-I 요인 분해, EKC 단계 대응 해석, 정책-배출 시차 분석 및 반사실적(counterfactual) 시나리오를 순차적으로 적용하였다.

첫째, DI 분석 결과 경남은 2014년(-8.11), 2019년(-4.24) 등 강한 탈동조화 구간과 2017년(9.56), 2021년(6.25) 등 역동조화 구간을 반복적으로 오가는 비선형적 전환 양상을 보였다. 그러나 Tapio 탄력성 재분류를 통해, UNEP DI가 역동조화로 분류한 4개 연도가운데 2017년과 2020년은 GDP 감소기에 배출이 더 크게 감소한 ‘침체형 탈동조화’에 해당함을 확인하였다. 이에 따라 실질적 역동조화(배출집약도 악화)가 발생한 해는 4개에서 2개(2021, 2022)로 축소되며, 경남의 탈동조화 이탈이 DI가 시사하는 것보다 덜 빈번한 것으로 재평가되었다.

둘째, LMDI-I 분해를 통해 배출 변화의 구조적 원인을 경제활동효과·에너지집약도효과·탄소집약도효과로 분리한 결과, 배출권 거래제 시행 전(2012~2014)에는 에너지집약도효과(에너지집약도 개선)가 전체 감축의 46.9%를 차지하며 주도적 역할을 하였으나, 시행 후(2015~2022)에는 탄소집약도효과(탄소집약도 개선)가 68.1%로 지배적 감축 요인으로 전환되었다. 탄소집약도효과는 시행 전 대비 약 4.5배 증가하였으며, 이는 배출권 거래제 도입에 따른 배출 비용 내재화가 LNG 전환, 고효율 설비 도입 등 에너지원 구성 변화를 촉진한 결과로 해석된다. 이러한 요인 전환을 EKC 가설에 대응시키면, 경남은 직접배출량 기준으로 에너지집약도효과 구간을 지나 탄소집약도효과 구간으로 진입하는 초기 단계에 위치하는 것으로 진단된다.

셋째, 반사실적(counterfactual) 시나리오 분석에서 배출권 거래제 미시행을 가정할 경우, 2015~2022년 누적 기준으로 실제 경로가 반사실적(counterfactual) 경로 대비 1,754만 톤 적게 배출한 것으로 나타나 정책의 중장기적 기여 가능성이 확인되었다. 다만, 2022년 단년 기준으로 실제 배출이 반사실적(counterfactual) 경로보다 80.5만 톤 높아, 경기 회복기 배출 반등을 억제하는 데에는 한계가 있음이 드러났다. 또한, 2017년 역동조화(DI=9.56)는 GRDP 정체를 정상 성장률(+1.33%)로 대체하면 DI가 -4.28(강한 탈동조화)로 역전되어, DI 산정식의 구조적 왜곡에 의한 것임이 확인되었다.

넷째, 2021~2022년에 탄소집약도효과가 양(+)으로 전환되어 배출집약도가 반등한 것은 코로나19 이후 고탄소 연료 수요 회복에 기인한 것으로, 탄소집약도효과와 안정적 정착이 아직 완료되지 않았음을 시사한다. 이 부분이 경남의 “구조적 정착 미흡”의 실체이며, 향후 탈동조화 정착을 위한 핵심 과제를 제시한다.

이를 바탕으로, 경남의 지속가능한 탈동조화 실현을 위해서는 다음과 같은 정책 방향이 요구된다. 산업 현장 측면에서는, LMDI 분석에서 배출권 거래제 시행 후 전체 감축의 68.1%를 차지한 탄소집약도효과

비가역적 정착이 가장 시급한 과제이다. 2021~2022년 탄소집약도효과가 양(+)으로 반전된 것은 경기 회복기에 석탄·유류 비중이 재상승하면서 탄소집약도가 악화된 것을 의미하며, 연료 전환의 비가역성이 아직 확보되지 않았음을 보여준다. 따라서, 조선·기계 등 주력 업종에서 공정별 연료 전환 로드맵을 수립하고, 산업단지 단위의 LNG·수소 기반 열공급 인프라 확충, 전기로·히트펌프 등 공정 전기화(electrification)를 단계적으로 추진할 필요가 있다. 동시에, 배출권 거래제 시행 전 감축의 46.9%를 차지했던 에너지집약도효과가 시행 후 14.0%로 축소된 점을 감안하면, 에너지집약도 개선 추세의 약화를 방지하기 위한 산업단지 에너지진단 의무화 확대, 모듈형 고효율 설비 보급, 폐열 회수 네트워크 구축 등도 병행되어야 한다.

제도·거버넌스 측면에서는, 반사실적(counterfactual) 분석에서 배출권 거래제가 2015~2022년 누적 1,754만 톤의 감축에 기여했을 가능성이 확인되었으나, 2022년 단년 기준으로는 실제 배출이 반사실적(counterfactual) 경로보다 80.5만 톤 높아 경기 회복기 배출 반등 억제에는 한계가 드러났다. 배출 상한의 점진적 강화, 지역 단위 탄소예산제와의 연계, 배출집약도 기반 성과 모니터링 체계 고도화를 통해 경기 변동에 따른 정책의 비대칭적 효과를 보완할 필요가 있다. 나아가, 울산·부산 등 인접 광역자치단체와 연계한 광역 탄소관리 협력체계를 구축하여, 유사한 고탄소 산업 구조를 공유하는 경남·울산 간 공정 전기화 및 연료 전환 인프라의 공동 투자와 실증을 추진하는 것이 효과적일 것이다.

이러한 정책 과제들의 현장 적용을 뒷받침하기 위해서는 지역 대학 및 연구기관의 기초 연구 역할이 중요하다. 업종별 연소공정의 탄소집약도 변동 메커니즘 규명, 대체연료(수소·암모니아) 혼소시 NO_x·PM 등 대기오염물질 동시 저감 조건 최적화, 공정 전기화에 따른 전력 피크 부하 및 계통 영향 평가 등은 산업 현장의 기술 도입 의사결정에 필수적인 근거를 제공한다. 나아가 경남 산업단지 내 연소설비의 연료별 배출 계수 모니터링 체계를 구축하고 이를 지역 연구기관

과 연계하며, 탄소집약도효과의 연도별 변동 원인을 설비 수준에서 추적하는 동시에 감축 기술의 실증 데이터를 체계적으로 확보할 수 있을 것이다.

다만, 본 연구에는 다음과 같은 한계가 존재한다. LMDI 분해에서 에너지 소비를 총량 기준으로 처리하여 업종별·연료별 세분화하여 분해하지 못한 점, 반사실적(counterfactual) 시나리오가 단순 추세 연장에 기반하여 인과적 식별에는 한계가 있는 점은 향후 연구에서 보완이 필요하다.

또한, 본 연구는 지역 간 이중계상 방지를 위해 온실가스종합정보센터의 직접배출량(Scope 1)을 기준으로 분석을 수행하였으며, 전력 소비에 따른 간접배출량(Scope 2)은 포함하지 않았다. 경남은 조선·기계·금속 등 전력 다소비 제조업 중심의 산업 구조를 가지고 있어, 역외에서 생산된 전력을 소비함에 따라 발생하는 간접배출량이 상당한 비중을 차지할 것으로 추정된다. 직접배출량 기준에서는 전력 소비 증가에 따른 배출이 발전소 소재 지역에 귀속되므로, 경남의 제조업이 생산량을 유지하면서 연료 연소를 전력 사용으로 대체하는 경우에도 직접배출량은 감소하여 탈동조화로 분류될 수 있다. 이러한 구조적 특성은 직접배출량 기준의 탈동조화가 전력 소비 구조의 변화를 포착하지 못하는 분석상의 제약을 수반한다. 따라서 본 연구에서 도출된 탈동조화 경향 및 LMDI 분해 결과는 직접배출량 범위 내에서의 분석으로 한정하여 해석되어야 하며, 향후 연구에서는 전력 소비에 따른 간접배출량을 포함한 소비 기반(consumption-based) 배출 산정을 통해 탈동조화의 실질적 범위를 재평가할 필요가 있다. 특히, LMDI 분해에서 탄소집약도효과의 개선이 연료 연소의 전력 대체에 기인하는 부분과 실질적인 연소 효율 개선에 기인하는 부분을 분리하는 것이 중요한 후속 과제이다.

감사의 글

본 논문은 교육부의 재원으로 지역혁신중심대학(RISE)의 지원을 받아 수행된 글로벌대학사업과 경남

녹색환경지원센터의 연구사업비를 지원받아 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ang, B.W. (2004) Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method?, *Energy Policy*, 32(9), 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4)
- Ang, B.W. (2005) The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide, *Energy Policy*, 33(7), 867-871. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010>
- Cho, Y.S. (2017) Analysis of greenhouse gas emission factors and reduction measures in the power industry, *Journal of Climate Change Research*, 8(4), 357-370. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2017.8.4.357>
- Grossman, G.M., Krueger, A.B. (1991) Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement, NBER Working Paper, No. 3914. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Hong, G.D. (2025) Determinants of RE100 participation: Evidence from South Korean companies, *Journal of Climate Change Research*, 16(2), 267-281. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2025.16.2.267>
- Jin, T.Y., Kim, D.W. (2021) Decomposing the decoupling between GHG emissions and value added of industry sectors, *Environmental Policy*, 29(1), 101-127. <https://doi.org/10.15301/jepa.2021.29.1.101>
- Kim, J.I., Oh, K.H. (2005) A study on Environmental Kuznets Curve in Korea, *The Journal of Statistical Research*, 10(1), 6.
- Koh, J.K., Ye, M.J. (2022) Decoupling analysis of economic growth and greenhouse gas emissions of regional local governments in Korea, *Korean Journal of Local Government Studies*, 36(1), 3-32. <https://doi.org/10.22783/krila.2022.36.1.3>
- Lee, H., Jo, H. (2020) Drivers of Carbon Decoupling in Transportation Sector and the Effect of Energy Transition: Panel Analysis of 25 OECD Countries, *Environmental and Resource Economics Review*, 29, 389-418. <https://doi.org/10.15266/KEREA.2020.29.3.389>
- Lee, K.H. (2010) Estimation and comparison of regional environmental Kuznets curves for CO₂ emissions in Korea, *Journal of Environmental Policy Studies*, 9(4), 53-76. <https://doi.org/10.17330/joep.9.4.201012.53>
- Lim, H., Jo, H. (2019) Analysis of Decoupling Phenomenon Between Economic Growth and GHG Emissions: Dynamic Panel Analysis of 63 Countries (1980-2014), *Environmental Policy*, 27(4), 3-30. <https://doi.org/10.152>

- 66/KEREA.2019.28.4.497
- National Assembly Budget Office (NABO) (2024) Current Status and Future Challenges of the Greenhouse Gas Emissions Trading Scheme. <https://nabo.go.kr/board/file/download.do?fid=33318359>
- Sorrell, S. (2015) Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.002>
- 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), 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011) Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth: A Report of the Working Group on Decoupling to the International Res-

source Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi. <https://wedocs.unep.org/items/c337f278-f250-40a6-bcc0-57da308b2e0d>

Authors Information & Contributions

- 조성혁 (창원대학교 스마트그린공학부 환경에너지공학전공 박사과정, josh6125@gmail.com) Software, Investigation, Visualization, Writing - original draft
- 박종관 (창원대학교 스마트그린공학부 환경에너지공학전공 교수, jkpark2019@changwon.ac.kr) Writing - review & editing, Funding acquisition, Supervision, Validation
- 최미진 ((주)에이치아이피 제품전략본부 책임연구원, cmj111@hipathway.com) Conceptualization, Writing - original draft, Project administration, Visualization