연구논문 「환경정책」 제34권 제3호 2026. 9: 223-244
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2026.34.3.223
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

기초지자체의 경제성장과 온실가스 배출 탈동조화*

Decoupling Economic Growth from Greenhouse Gas Emissions in Korean Local Governments

손철희* · 임영신** · 최희선****
Cheol Hee Son · Young-Shin Lim · Hee-Sun Choi

요약: 본 연구의 목적은 우리나라 226개 시군구를 대상으로 경제성장과 온실가스 배출 간의 실질적 탈동조화 양상 및 부문별 배출구조를 규명하는 것이다. 이를 위해 첫째, Tapio 지수로 시군구별 탈동조화 수준을 산정하여 시도 단위 결과와 비교하였고, 둘째, LMDI 방법론을 적용하여 배출집약도 개선에 따른 성장형 탈동조화와 인구·경제활동 감소에 따른 위축형 탈동조화를 구분하였으며, 셋째, 패널 고정효과모형으로 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성을 분석하였다. 분석 결과, 1) 전체적으로 탈동조화가 진행되었으나, 시도 내부의 시군구 간 탄력성 편차(평균 0.731)가 시도 간 편차(0.506)보다 크게 나타나, 시도 집계가 동일 시도 내부의 상이한 탈동조화 양상을 평균화해 실제 격차를 축소해 보여주는 것으로 확인되었다. 2) 전체 시군구의 82.7%(187개)는 배출집약도가 개선된 성장형 탈동조화, 6.6%(15개)는 인구와 경제활동 감소가 주로 작용한 위축형 탈동조화였으며, 나머지 10.6%(24개)는 배출이 경제성장보다 빠르게 증가한 비탈동조화로 나타났다. 3) 총배출량은 경제성장(탄력성 0.180)보다 인구 변화(0.440)에 더 민감했으며, 이는 주로 건물(0.490)과 수송(0.574) 부문의 인구 영향에서 비롯되었다. 지자체 유형별로 자치구는 인구 탄력성(0.655)이 높고 GRDP 탄력성은 유의하지 않은 반면, 산업 비중이 높은 시·군 지역은 GRDP 탄력성(0.207~0.220)이 유의하게 높았다. 본 연구는 총배출량 중심의 단순 평가를 넘어, 인구·경제 여건과 부문별 배출구조를 반영한 차별화된 지역 탄소중립 성과관리체계 구축이 필요함을 시사한다.
핵심주제어: 지속가능성, 온실가스, 경제성장, 탈동조화, 탈동조화 탄력성

Abstract: This study examines the decoupling of economic growth from greenhouse gas emissions across 226 Korean municipalities, using the Tapio index and log-linear elasticity compared with province-level results, LMDI decomposition to distinguish growth-type from contraction-type decoupling, and a two-way fixed-effects model to estimate emission elasticities by sector and municipality type. The dispersion of elasticities within provinces (0.731) exceeded that across provinces (0.506), indicating that provincial aggregation understates local disparities. Of the 226 municipalities, 187 (82.7%) exhibited growth-type decoupling, 15 (6.6%) contraction-type decoupling, and 24 (10.6%) showed no decoupling. Total emissions were more responsive to population change (0.440) than to economic growth (0.180), mainly through building (0.490) and transport (0.574) sectors. GRDP elasticities were 0.033 for districts, 0.207 for cities, and 0.220 for counties. These findings highlight the need for locally differentiated carbon-neutrality policies based on the sources of emission reductions and sectoral emission structures.
Key Words: Sustainability, Greenhouse Gas Emissions, Economic Growth, Decoupling, Decoupling Elasticity

* 본 논문은 한국환경연구원의 2026년도 연구개발적립금과제 「탄소중립·기후적응·재해저감을 연계한 기후탄력적 도시 추진전략 개발(RR2026-03)」의 지원으로 수행되었음
** 주저자, 한국환경연구원 초빙연구원
*** 공동저자, 한국환경연구원 전문연구원
**** 교신저자, 한국환경연구원 선임연구위원

I. 서론

기후변화 대응과 지속가능한 성장을 달성하기 위해서는 경제성장과 온실가스 배출량의 동반 증가 구조, 즉 경제성장과 배출량 간의 연동성(Coupling)을 끊어내는 '탈동조화(Decoupling)'가 핵심과제로 언급된다(UNEP, 2011). 전 세계는 기후위기 극복을 위해 탄소중립을 선언하고 있으며, 경제적 부가가치를 창출하면서도 환경 부하를 줄이는 탈동조화는 녹색성장과 지속가능성을 판단하는 핵심 지표로 자리 잡았다(Hubacek, Chen, Feng, Wiedmann and Shan, 2021; UNEP, 2011). 실제로 다수의 선진국에서는 실질 국내총생산(GDP)이 증가하는 가운데 온실가스 배출량이 감소하는 '강한 탈동조화(strong decoupling)'가 나타났으며, 배출집약도 개선이 이를 이끄는 주요 요인으로 분석되었다(Hubacek et al., 2021). 이처럼 온실가스 배출 추이와 경제성장의 관계를 진단하는 것은 저탄소 전환 정책의 실효성을 가늠하는 출발점으로서 매우 중요하다.

하지만 2018년 온실가스 배출 정점과 2020년 인구 정점을 지나 탄소중립 이행을 추진하는 한국에서는, 지역별 인구변화와 경제구조의 차이를 고려한 탈동조화 실증연구가 충분하지 않다. 기존의 국내 연구들(고재경·예민지, 2022; 김대수·이상엽, 2019; 임형우·조하현, 2019; 조향숙, 2020)은 대부분 국가 전체나 광역지자체(시도) 수준의 거시적 분석에 머물러 있어, 하위 지역의 실제 탈동조화 양상을 파악하지 못하는 한계를 지닌다. 단순히 배출량 규모의 많고 적음이 아니라 경제성장 대비 배출 변화율을 뜻하는 '탈동조화 탄력성'은 분석을 수행하는 공간적 단위에 따라 전혀 다른 결과로 나타날 수 있다(Fotheringham and Wong, 1991; Openshaw, 1984). 광역 단위의 집계 지표는 하위 기초지자체 간의 상이한 탄력성이 상호 상쇄된 결과일 뿐이므로, 일부 지역의 배출 감축 성과가 다른 지역의 부진을 가리는 문제가 발생할 수 있다(Fotheringham and Wong, 1991). 따라서 실질적인 탄소 전환을 유도하기 위해서는 구체적인 기후 정책의 집행 주체인 기초지자체(시군구) 수준에서 탈동조화 탄력성을 진단하고, 광역 지표와의 차이를 실증할 필요가 있다.

기초지자체 단위 탈동조화 분석이 필요한 또 다른 이유는 배출량 감소를 유발하는 실질적인 전환 원인을 규명하는 데 있다. 단순히 경제성장률 대비 온실가스 배출량 변화율만을 비교하면, 경제활동이 지속되는 가운데 경제활동 단위당 배출량이 줄어든 경우와 인구 감소나 경제활동 위축으로 지역의 활동 규모가 축소되면서 배출량이 함께 줄어든 경우를 구분하기 어렵다(Cohen, Jalles, Loungani, Marto and Wang, 2019; Zhao, Jiang and Zhang, 2022). 특히 인구 감소와 산업 위축이 진행 중인 한국의 시·군 지역에서는 경제구조의 실질적인 전환이 아니라 활동량 감소에 따른 배출 감소가 탈동조화로 나타날 가능성도 고려해야 한다(김대수·이상엽, 2019; Cohen et al., 2019). 따라서 시군구 수준에서 온실가스 배출량 변화 요인별 기여도를 산출하여 개별 지역의 배출량 감소가 배출집약도 개선에서 비롯된 것인지, 인구나 경제활동 감소에 따른 것인지를 구분할 필요가 있다(Zhao et al., 2022).

이에 더해, 지역의 배출구조에 따라 탈동조화가 어떻게 다르게 나타나는지를 실증한 연구도 여전히 부족하다. 배출량 자체에 영향을 미치는 요인들을 밝히는 연구는 기존 도시 및 환경계획 연구에서 풍부하게 다루어졌다(Son, Baek and Ban, 2018). 그러나 경제성장과 배출량의 유기적 관계를 보여주는 '탈동조화 탄력성'이 산업·건물·수송 등 부문에 따라 어떻게 달라지는지, 그리고 그 차이가 지자체 유형(시·군·자치구)별 배출구조와 어떻게 연결되는지는 구체적으로 밝혀지지 않았다. 지역의 배출이 어느 부문에 집중되어 있는지에 따라 경제성장에 대한 배출 반응은 물론 인구변화에 대한 반응도 달라질 수 있음에도(김동구·손인성, 2023), 기존 연구들은 총배출량 탄력성 중심의 단순 분석에 치중해 왔다. 개별 지방정부가 관할 구역 내에서 건물 수요관리나 교통체계 개편 등 맞춤형 정책을 설계하기 위해서는, 총배출량 수준을 넘어 부문별 탈동조화 탄력성이 지자체 유형에 따라 어떻게 다르게 나타나는지를 규명할 필요가 있다.

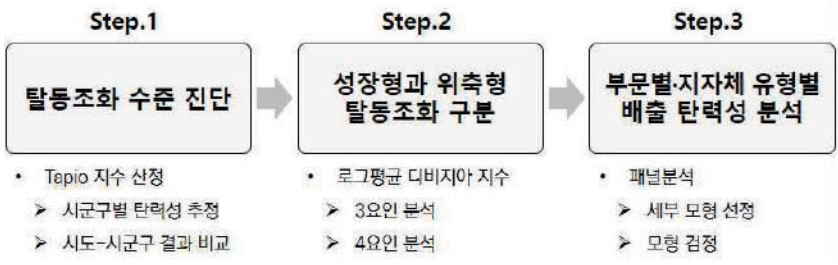
이러한 선행연구의 한계를 보완하기 위해 본 연구는 한국의 226개 시군구를 대상으로 다음 세 가지를 밝히고자 한다. 첫째, 시군구별 탈동조화 수준을 진단하고 시도 집계 결과와 비교하여 공간적 분석 단위에 따른 차이를 확인

한다. 둘째, 시군구별 탈동조화를 성장형과 위축형으로 구분하고, 배출 변화가 배출집약도 개선, 인구 감소 또는 경제활동 위축 중 어떤 요인에서 비롯되었는지 밝힌다. 셋째, 경제성장과 인구변화에 대한 배출량의 반응을 부문별·지자체 유형별로 비교하여 지역의 배출구조에 따른 차이를 밝힌다.

II. 연구 방법

본 연구는 세 단계로 진행하였다〈그림 1〉. 첫째, Tapio 지수와 시군구별로 회귀 탄력성을 이용하여 연도별 탈동조화 수준을 산정하고, 시도 집계 탄력성과 비교하였다. 둘째, 요인별 기여도 분석을 통해 배출량 변화를 인구, 1인당 GRDP 및 배출집약도 효과로 구분하고, 이를 바탕으로 탈동조화 유형을 판별하였다. 셋째, 패널모형으로 GRDP와 인구에 대한 배출 탄력성을 부문별·지자체 유형별로 추정하여 지역의 배출구조에 따른 차이를 분석하였다.

〈그림 1〉 연구 흐름 및 방법



1. 탈동조화 진단

탈동조화 지수(DI)는 온실가스 배출량 변화율을 실질 GRDP 변화율로 나눈 값이다.

$$DI_t = \frac{\Delta E_t / E_{t-1}}{\Delta G_t / G_{t-1}} \quad (1)$$

여기서 DI_t는 t년의 탈동조화 지수, E_t와 G_t는 각각 t년의 온실가스 배출량과 실질 GRDP, $\Delta E_t = E_t - E_{t-1}$, $\Delta G_t = G_t - G_{t-1}$

지수 해석 방법으로는 UNEP(2011)와 Tapio(2005)가 널리 쓰인다. 본 연구는 Tapio(2005)를 따랐다. UNEP는 GRDP가 증가하는 측면만 다루어 경기 위축에 따른 배출 감소를 탈동조화로 잘못 판정할 수 있다. 분석기간에 코로나19로 인한 경기 위축이 포함되어 두 국면을 구분할 필요가 있기 때문이다. Tapio(2005)는 배출량과 GRDP의 증감 방향 및 지수 크기를 함께 고려하여 탈동조화 상태를 8개 유형으로 구분한다. 이 가운데 성장 중 배출이 감소하는 강한 탈동조화와 배출이 성장보다 느리게 증가하는 약한 탈동조화가 탈동조화 국면에 해당한다. 반면 GRDP가 감소할 때 배출이 더 빠르게 감소하는 경기침체적 탈동조화는 경기 위축에 따른 배출 감소를 구분하는 기준이 된다.

식 (1)은 연도별로 탈동조화를 보여주지만 분석기간 전체의 탈동조화 수준을 나타내지는 못한다. 이에 Cohen et al.(2019)의 방법을 따라 배출량과 GRDP를 로그로 변환한 뒤, 시군구 각각에 대해 다음 시계열 모형을 개별적으로 추정하여 탈동조화 탄력성 β를 도출하였다〈식 (2)〉.

$$\ln E_t = \alpha + \beta \cdot \ln G_t + \epsilon_t \quad (2)$$

여기서 E_t는 t년의 온실가스 배출량, G_t는 실질 GRDP, β는 탈동조화 탄력성, ϵ_t는 오차항

이 단계의 탄력성은 시도 집계 지표와의 직접 비교를 목적으로 하므로 GRDP만을 설명변수로 사용하였다. 인구를 통제한 탄력성은 3절의 패널모형에서 별도로 추정한다.

2. 성장형과 위축형 탈동조화 구분

배출 감소가 배출집약도 개선에서 비롯된 것인지, 경기 위축이나 인구 감소에 따른 것인지 구분하기 위해 요인별 기여도를 분석하였다. 배출량 변화를 인구, 1인당 GRDP 및 배출집약도의 세 요인으로 나누어(3요인 기여도 분석) 살펴보았다〈식 (3)〉.

$$E = P \times \frac{G}{P} \times \frac{E}{G} \quad (3)$$

여기서 P는 인구, G/P는 1인당 GRDP, E/G는 배출집약도를 의미한다. 요인별 기여도는 승법형 로그평균 디비지아 지수(LMDI)를 적용하여 산출하였으며, 각 요인의 변화배수가 1보다 크면 배출을 늘리는 방향으로, 1보다 작으면 줄이는 방향으로 작용한 것을 뜻한다(Ang, 2005).

전 기간 GRDP보다 배출량이 빠르게 증가한 지역은 비탈동조화로 분류하였다. 나머지 지역은 LMDI 분석을 통해 배출 변화의 주된 원인을 확인하였다. 온실가스 탈동조화 선행연구에서도 LMDI를 이용하여 경제활동, 에너지 원단위 및 배출계수 변화의 기여도를 구분한 바 있다(고재경·예민지, 2022; 진태영·김도원, 2021). 이에 따라 본 연구에서는 배출집약도 개선이 탈동조화를 이끈 지역은 '성장형 탈동조화'로, 인구 감소나 경제활동 위축이 주로 작용한 지역은 '위축형 탈동조화'로 정의하고 분류하였다.

한편, 배출집약도 개선의 원인을 에너지집약도와 탄소집약도로 세분하기 위해 4개 요인 기여도 분석도 수행하였다〈식 (4)〉.

$$E = P \times \frac{G}{P} \times \frac{F}{G} \times \frac{E}{F} \quad (4)$$

여기서 F는 최종에너지 소비량, F/G는 에너지집약도, E/F는 탄소집약도를 의미한다. 최종에너지 자료가 제공되는 2019년과 2022년을 비교하여 배출량 변화를 인구, 1인당 GRDP, 에너지집약도 및 탄소집약도가 각각 얼

마나 기여했는지 산출하였다.

에너지집약도는 에너지 수요와 효율 변화를, 탄소집약도는 연료 구성과 전력 배출계수 변화를 반영한다. 시군구별 최종에너지 소비 자료가 2019년부터 제공되어 4요인 기여도 분석은 2019~2022년을 대상으로 하였으며, 코로나19의 영향이 포함되어 보조분석으로 활용하였다. 요인별 기여도는 전체 시·군·구를 대상으로 산출하는 한편, 지자체 유형별로도 비교하였다. 지자체 유형은 시, 군, 특별·광역시의 자치구로 구분하였다.

3. 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성

앞 절에서는 시군구별 탈동조화 수준과 배출 변화의 원인을 분석하였다. 다음으로 경제성장과 인구변화가 배출량에 미치는 평균적인 영향을 파악하고, 그 차이가 부문과 지자체 유형에 따라 어떻게 나타나는지를 분석하였다. 시군구별 탄력성은 지역당 8개 연도만을 이용하여 추정되므로 개별 추정치의 불확실성이 클 수 있다. 이에 226개 시군구를 결합한 패널모형에 GRDP와 인구를 동시에 투입하여, 인구를 통제한 GRDP 탄력성과 GRDP를 통제한 인구 탄력성을 각각 추정하였다〈식 (5)〉.

$$\ln E_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_G \ln G_{it} + \beta_P \ln P_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

여기서 E_{it}는 시군구 i의 t년 배출량, G_{it}는 실질 GRDP, P_{it}는 인구, α_i는 시군구 고정효과, γ_t는 연도 고정효과, β_G는 인구를 통제한 GRDP 탄력성, β_P는 인구탄력성, ϵ_{it}는 오차항, i는 시군구, t는 연도를 의미한다.

패널모형은 지역 및 시간효과를 고려하지 않는 합동모형, 지역효과 또는 시간효과만을 고려하는 일원모형, 두 효과를 함께 고려하는 이원모형으로 구분하여 검토하였다. 고정효과 F 검정과 Breusch-Pagan LM 검정으로 합동모형의 적합성을 확인하고, Hausman 검정으로 고정효과와 확률효과모형을

비교하였다. 또한 연도효과의 공동 유의성을 검정하여 일원모형과 이원모형을 비교하고, 자기상관과 이분산성에 대응하기 위해 시군구 단위 군집 강건 표준오차를 적용하였다.

종속변수는 총배출량과 산업, 건물, 수송, 폐기물, 농업 및 기타 부문별 배출량으로 설정하였다. 전체 표본과 시군구 표본을 각각 추정하여 부문 및 지자체 유형별 차이를 비교하였다.

4. 변수 선정 및 데이터 구축

탈동조화는 경제가 성장하는 동안 배출량이 그에 얼마나 함께 늘거나 줄어드는지를 보는 개념이다. 따라서 배출량을 GRDP에 대한 반응변수로 두고, 그 민감도를 탈동조화의 크기로 해석한다(임형우·조하현, 2019; Tapio, 2005). 물가변동의 영향을 제외하기 위해 명목 GRDP가 아닌 실질 GRDP를 사용하였다. 인구는 지역의 활동 규모를, 1인당 GRDP는 인구 1인당 경제활동 수준을, 배출집약도는 경제활동 1단위당 배출량을 나타낸다. 에너지집약도는 경제활동 1단위당 최종에너지 소비량을, 탄소집약도는 에너지 소비 1단위당 배출량을 의미한다. 인구는 GRDP와 별개로 지역의 활동 규모를 통해 배출량에 영향을 미칠 수 있다(손철희·정휘철·박창석, 2026; York, Rosa and Dietz, 2003). 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성 분석에서는 인구를 제외하면 인구 변화에 따른 배출량 변화가 경제성장 효과에 포함되어 GRDP 탄력성이 과대 추정될 수 있으므로 이를 함께 통제하였다. 유형에 따라 배출구조가 다르므로 경제성장과 인구변화에 대한 배출 반응도 다르게 나타날 수 있다. 지자체 유형은 설명변수로 투입하지 않고, 전체 표본을 시군구로 나누어 동일한 모형을 각각 추정하는 기준으로 사용하였다.

분석 대상은 2015~2022년 동안 연속적으로 자료가 확보된 226개 시군구이며, 분석 단계별 기간은 데이터 구득에 따라 달라진다〈표 1 참조〉. 또한 동기간 중 지역내총생산 자료가 공표되지 않는 세종특별자치시와 대구광역시 군위군, 행정구역 명칭 변경으로 인구 자료가 단절된 인천광역시 미추홀구는 제외하였다. 온실가스 배출량은 온실가스종합정보센터의 「지역 온실가스 통

계」를 재가공하였다. 원자료는 전력과 열의 생산지역에 관련 배출량을 할당하지만, 본 연구는 지역 내 최종수요와 활동에 따른 배출을 비교하기 위해 소비기준 배출량을 재구성하였다. 이를 위해 직접배출량에서 에너지산업 부문을 제외하고 전력·열 소비에 따른 간접배출량을 더하였다. 폐기물은 발생지역 기준 배출량을, 수송은 지역 내 주행거리(VKT) 기준 배출량을 사용하였다.

산림 흡수량은 흡수량이 큰 일부 군 지역에서 순배출량이 음수가 되어 로그변환과 기여도 산출이 불가능하므로 제외하였다.

배출량은 산업, 건물, 수송, 폐기물, 농업 및 기타의 6개 부문으로 구분하였다. 산업부문은 제조업·건설업의 직접배출량, 산업공정 배출량 및 제조업의 전력·열 간접배출량을 합산하였다. 건물부문은 가정·상업·공공 부문의 직접배출량과 전력·열 간접배출량을 합산하였다. 실질 GRDP는 통계청 지역소득 통계의 2020년 기준년가격 자료를 사용하였다. 인구와 최종에너지 소비량을 포함한 변수의 정의, 단위 및 자료 출처는 〈표 1〉에 제시하였다.

〈표 1〉 변수 정의 및 출처

구분 (분석 기간)	변수(단위)	정의 및 단위	자료 출처
1. 탈동조화 수준 진단 (2015~2022)	온실가스 배출량 (Gg)	소비기준 온실가스 총배출량	온실가스종합정보센터
	실질 GRDP (백만원)	2020년 기준년가격 지역내총생산	KOSIS
2. 성장형과 위축형 탈동조화 구분 (3요인: 2015~2022, 4요인: 2019~2022)	온실가스 배출량 (Gg)	소비기준 온실가스 총배출량	온실가스종합정보센터
	인구(명)	주민등록인구	KOSIS
	1인당 GRDP (백만원/명)	실질 GRDP ÷ 인구	KOSIS, 산정
	배출집약도	온실가스 배출량 ÷ 실질 GRDP	KOSIS, 산정
	최종에너지 소비 (천 toe)	시군구별 최종에너지 소비량	에너지수급통계
	에너지집약도	최종에너지 소비량 ÷ 실질 GRDP	KOSIS, 산정
	탄소집약도	온실가스 배출량 ÷ 최종에너지 소비량	KOSIS, 산정
3. 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성 (2015~2022)	총배출량(Gg)	소비기준 온실가스 총배출량	온실가스종합정보센터
	부문별 배출량 (Gg)	산업·건물·수송·폐기물·농업·기타 배출량	온실가스종합정보센터
	실질 GRDP (백만원)	2020년 기준년가격 지역내총생산	KOSIS
	인구(명)	주민등록인구	KOSIS
	지자체 유형	시군구	행정구역 분류

Ⅲ. 분석 결과

1. 기술통계

분석에 사용한 주요 변수의 기술통계는 〈표 2〉와 같다. 결측치나 이상치는 발견되지 않았다. 배출량과 GRDP는 왜도가 각각 4.7과 3.1로 값이 큰 쪽으로 크게 치우쳐 있다. 소수의 대도시와 산업도시가 매우 큰 값을 갖기 때문이다. 이에 분석에서는 두 변수에 로그를 취해 사용하였으며, 로그 변환 후 왜도는 각각 0.4와 0.1로 줄어든다.

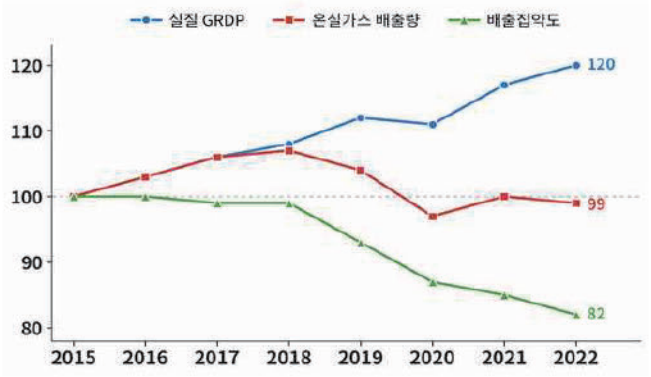
〈표 2〉 주요 변수 기술통계 값

변수(단위)	평균	표준편차	최소값	중위값	최대값	왜도	N
온실가스 총배출량(Gg)	2,969.069	5,026.056	72.189	1,563.383	43,229.933	4.667	1,808
실질 GRDP(십억원)	8,898.365	11,573.093	352.916	4,584.343	95,699.853	3.096	1,808
인구(천 명)	225.449	221.384	8.867	148.659	1,202.628	1.672	1,808
1인당 GRDP(백만원/명)	41.534	38.071	9.302	33.432	556.112	7.494	1,808
최종에너지 소비(천 toe)	882.105	2,555.061	15.000	357.500	27,045.000	7.277	904

2. 탈동조화 진단

2015년부터 2022년까지 226개 시군구의 온실가스 총배출량은 657,586 Gg에서 648,612 Gg으로 1.4% 감소하였다. 같은 기간 실질 GRDP는 1,826.6조원에서 2,191.8조원으로 20.0% 증가하였고, 인구는 0.5% 줄었다. GRDP 1단위당 배출량을 뜻하는 배출집약도는 17.8% 낮아졌다. 다음 〈그림 2〉는 세 지표의 추이를 보여준다. GRDP가 증가하는 동안 배출량은 감소하고 배출집약도도 뚜렷이 낮아져 탈동조화가 진행되고 있다.

〈그림 2〉 온실가스 배출량, 실질 GRDP 및 배출집약도 추이(2015년=100)



연도별 탈동조화는 〈표 3〉과 같다. 경제가 성장하면서 배출이 줄어드는 강한 탈동조화가 전체 관측치의 31.9%, 배출이 성장보다 느리게 느는 약한 탈동조화가 20.6%로, 절반 이상이 탈동조화에 해당한다. 시기별 흐름도 뚜렷하다. 2016년에는 배출이 성장보다 빠르게 늘어난 지역이 85개로 가장 많았으나, 2019년에는 강한 탈동조화가 159개로 늘었고 2022년에도 101개를 유지하였다. 2020년은 예외이다. 경기침체적 탈동조화가 78개로 급증하였는데, 이는 코로나19로 경기가 위축되면서 배출이 함께 줄어든 결과로 판단된다. 경기 위축에 따른 배출 감소를 탈동조화로 오해하지 않으려면 성장 국면과 위축 국면을 나누어 보아야 한다.

〈표 3〉 연도별 시군구의 탈동조화 유형

구분	강한 탈동조화	약한 탈동조화	확장적 연계	확장적 부(-)의 탈동조화	경기침체적 탈동조화	경기침체적 연계	약한 부(-)의 탈동조화	강한 부(-)의 탈동조화
	DI < 0	0 < DI < 0.8	0.8 ≤ DI ≤ 1.2	DI > 1.2	DI > 1.2	0.8 ≤ DI ≤ 1.2	0 < DI < 0.8	DI < 0
2016	18	50	19	85	4	0	7	43
2017	67	70	12	25	15	2	6	29
2018	35	66	17	44	11	3	9	41
2019	159	11	4	7	27	3	8	7
2020	97	1	0	3	78	21	22	4
2021	27	84	22	54	1	0	4	34
2022	101	44	4	13	25	9	15	15
계	504	326	78	231	161	38	71	173

Tapio(2005)의 분류기준에 따라 탄력성 0.8과 1.2를 경계값으로 사용하였으며, 동일한 DI 구간이라도 실질 GRDP의 증감 방향에 따라 유형이 구분된다.

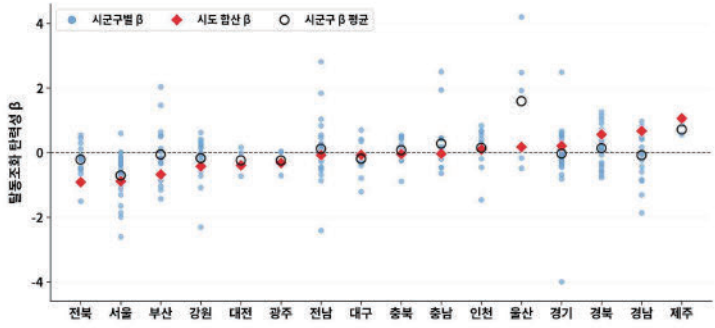
다음으로 시도 단위 탄력성과 시군구 단위 탄력성을 구분하여 살펴보았다. 분석 결과 첫째, 같은 시도에 속한 시군구별 탄력성의 표준편차는 평균 0.731로, 시도 합산 탄력성의 표준편차 0.506보다 크게 나타났다. 이는 시도 간 차이보다 동일 시도 내부의 시군구 간 차이가 더 컸음을 보여준다〈표 4 참조〉.

〈표 4〉 시도 집계 탄력성과 시군구별 탄력성 비교

시도	시도 합산 β	시군구 수	시군구 β 평균	시군구 β 표준편차	최소	최대
전북	-0.909	14	-0.216	0.520	-1.501	0.538
서울	-0.886	25	-0.708	0.722	-2.608	0.599
부산	-0.672	16	-0.060	0.941	-1.427	2.036
강원	-0.423	18	-0.175	0.683	-2.311	0.620
대전	-0.389	5	-0.241	0.343	-0.728	0.165
광주	-0.323	5	-0.245	0.303	-0.712	0.040
전남	-0.076	22	0.117	1.009	-2.411	2.817
대구	-0.069	8	-0.193	0.646	-1.216	0.700
충북	-0.046	11	0.075	0.432	-0.888	0.524
충남	-0.032	15	0.276	0.863	-0.644	2.505
인천	0.095	9	0.145	0.735	-1.461	0.835
울산	0.175	5	1.593	1.943	-0.482	4.206
경기	0.212	31	-0.033	0.935	-4.003	2.488
경북	0.562	22	0.137	0.600	-0.774	1.260
경남	0.672	18	-0.081	0.784	-1.867	0.962
제주	1.061	2	0.713	0.222	0.557	0.870
전국(합산)	-0.153	226	-0.044	0.866	-4.003	4.206

둘째, 시도로 합치면 결론이 뒤집히기도 한다. 경상남도는 합산하면 +0.672로 탈동조화 정도가 약하게 나타나지만, 18개 시군구를 따로 계산해 평균하면 -0.081로 탈동조화 구간에 든다. 여러 시군구를 묶는 순간 내부 차이가 평균에 가려지기 때문이다. 경상남도 외에도 시도 합산 탄력성이 소속 시군구 분포의 중심에서 벗어나는 분포가 다수 확인된다〈그림 3 참조〉.

〈그림 3〉 시도 합산 탄력성과 시군구 탄력성의 분포



3. 성장형과 위축형 탈동조화 구분

3요인 기여도 분석을 통해 탈동조화 유형을 구분한 결과, 226개 시군구 중 187개(82.7%)가 성장형 탈동조화로, 1인당 GRDP가 평균 24.6% 늘어난 가운데 배출집약도가 18.7% 낮아졌다. 개별 지역을 확인한 결과, 성장형 탈동조화로 분류된 187개 지역에서는 모두 배출집약도가 개선되었다. 반면 위축형 탈동조화는 15개(6.6%)로, 인구가 평균 8.3% 줄고 1인당 GRDP 증가도 2.2%에 그쳐 배출 감소가 저탄소화보다 인구·경제 정체와 맞물려 있었다. 나머지 24개(10.6%)는 비탈동조화로, GRDP가 증가하는 동안 배출이 더 빠르게 늘어 배출집약도가 21.9% 악화되었다. 또한 성장형 탈동조화 지역은 제조업 비중이 평균 21.6%로 위축형·비탈동조화 지역(약 27%)보다 낮았다. 결국 대부분의 탈동조화는 인구 감소나 경기 위축이 아니라 배출집약도 개선을 동반하여 나타났다〈표 5, 그림 4 참조〉.

〈표 5〉 성장형·위축형·비탈동조화 특성

성격	시군구 수	배출 변화	인구	1인당GRDP	배출집약도	탄력성 β	제조업 비중(%)
성장형 탈동조화	187	0.971	0.973	1.246	0.813	-0.235	21.6
위축형 탈동조화	15	0.889	0.917	1.022	0.954	0.659	27.2
비탈동조화	24	1.348	1.023	1.110	1.219	1.000	27.1

2015년 대비 2022년 변화배수. 〉1: 증가, 〈1: 감소

〈그림 4〉 시군구 탈동조화 유형(좌) 및 탄력성(우)의 공간적 분포



한편, 배출집약도 변화는 에너지집약도와 탄소집약도로 다시 구분하여 분석하였다〈표 6〉. 분석 결과, 배출이 감소한 183개 시·군·구 중 103개는 탄소집약도 개선이, 62개는 에너지집약도 개선이 감소를 주로 이끌었고, 나머지 18개는 인구 감소나 경기 위축이 주로 작용하였다. 지자체 유형에 따라서도 차이가 나타났다. 시와 군은 탄소집약도가 각각 0.923, 0.920으로 낮아진 반면, 자치구는 에너지집약도가 0.922로 낮아지고 탄소집약도는 거의 변하지 않았다. 즉 시·군에서는 에너지 단위당 배출량 감소가, 자치구에서는 경제활동 대비 에너지 소비 감소가 상대적으로 크게 작용하였다. 유형별 차이는 다음 절에서 경제성장과 인구변화에 대한 배출 탄력성과 함께 자세히 살펴본다.

〈표 6〉 지자체 유형별 온실가스 배출변화의 요인별 기여도

요인	전체	시	군	구	배출을 줄인 시군구 수
배출 변화	0.960	0.964	0.978	0.933	183
인구	0.980	1.003	0.964	0.974	172
1인당 GRDP	1.079	1.057	1.104	1.073	39
에너지집약도	0.979	0.998	1.008	0.922	194
탄소집약도	0.943	0.923	0.920	0.995	194

주된 감소 요인은 배출 감소 방향으로 작용한 요인 중 로그기여도의 절댓값이 가장 큰 요인을 기준으로 판정하였다. 탄소집약도 103개, 에너지집약도 62개, 인구·경제활동 18개이다.

4. 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성

패널모형의 선택 및 진단 결과, 지역·연도 고정효과의 공동 유의성 검정에

서 합동모형이 기각되었고(F=582.54, p〈0.001), Breusch-Pagan LM 검정에서도 합동모형보다 패널모형이 적합한 것으로 나타났다(p〈0.001). 연도효과 역시 공동으로 유의하여(F=37.54, p〈0.001) 지역과 시간효과를 함께 고려할 필요가 있었다. 본 연구의 관심은 지역 간 수준 차이가 아니라 동일 지역 내 변화에 대한 배출 반응이고, 산업입지 등 시점불변 지역 특성이 GRDP·인구와 상관될 가능성이 높아 이원 고정효과모형을 채택하였다. Hausman 검정에서 확률효과모형이 기각되지는 않았으나(p=0.444), 모형 비교 결과 합동 OLS에서 0.668이던 GRDP 탄력성이 지역효과를 통제하면 유의성을 잃고 연도효과까지 반영한 이원 고정효과에서 0.180으로 안정되어, 지역 특성을 통제하지 않을 경우 성장과 배출의 연계가 과대추정됨을 확인하였다. 또한 Wooldridge 검정에서 자기상관이 확인됨에 따라(F=58.14, p〈0.001) 시군구 단위 군집 강건표준오차를 적용하였다.

추정 결과 총배출량의 GRDP 탄력성은 0.180, 인구 탄력성은 0.440으로 나타났다〈표 7 참조〉. GRDP가 1% 증가할 때 배출량은 0.18% 증가하는 데 그쳐 약한 탈동조화가 확인된 반면, 인구가 1% 증가할 때는 배출량이 0.44% 증가하였다. 인구의 영향이 GRDP의 두 배를 넘어 시군구 배출량은 경제성장보다 인구 변화에 더 민감하게 반응하였다. 따라서 인구를 통제하지 않을 경우 인구 증가에 따른 배출 변화가 GRDP 효과에 포함될 수 있다.

〈표 7〉 총배출량 배출 탄력성 추정 결과

변수	합동 OLS	일원 FE	이원 FE
ln(GRDP)	0.668***	0.062	0.180***
ln(인구)	0.153	0.581***	0.440***
유형: 시	0.569***	—	—
유형: 군	0.533***	—	—
지역 고정효과	없음	있음	있음
연도 고정효과	없음	없음	있음
R^2	0.665	0.102	0.083
관측치	1,808	1,808	1,808

*** p〈0.01, ** p〈0.05, * p〈0.1.
유형더미는 자치구를 기준으로 함. 고정효과모형의 R^2는 within 기준으로 지역 간 차이와 전국 공통 추세를 제거한 뒤의 설명력을 나타내므로, 통상의 R^2보다 낮게 나타남. 지자체 유형은 시점불변 변수로 지역 고정효과에 흡수되어 고정효과모형에서는 추정되지 않음(-)

부문별로 보면 산업부문의 GRDP 탄력성은 0.206으로 10% 수준에서만 유의하였고 인구 탄력성은 유의하지 않았다(0.274). 반면 건물부문은 GRDP에 유의하게 반응하지 않았으나(0.048) 인구에는 강하게 반응하였고(0.490), 수송부문의 인구 탄력성도 0.574로 높았다. 농업부문에서는 인구 탄력성이 −0.422로 나타나 인구 감소와 농업배출 증가가 함께 나타나는 음의 관계가 확인되었다. 즉, 총배출량에서 나타난 큰 인구 영향은 주로 건물 · 수송 · 농업부문에서 비롯된 것으로 해석된다〈표 8 참조〉.

한편, 산업부문의 within R^2는 0.004로 건물(0.144)이나 수송(0.070)에 비해 낮았다. 이는 산업배출이 일부 대형 사업장에 집중되어 있고, 분석기간 중 당진·포항·광양 등 상위 10개 시군구가 전체 산업배출의 56.7%를 차지하기 때문에 시군구 단위의 GRDP와 인구만으로 산업배출의 변화를 설명하기 어려운 것으로 판단된다. 산업배출을 보다 정확히 분석하기 위해서는 사업장별 생산 및 에너지 자료가 필요하다.

지자체 유형별 총배출량의 GRDP 탄력성은 시 0.207, 군 0.220, 구 0.033으로 나타났다. 자치구에서는 경제성장과 배출 증가 간 뚜렷한 관계가 확인되지 않은 반면 시와 군에서는 GRDP가 1% 증가할 때 배출량이 약 0.21~0.22% 증가하였다. 인구 탄력성은 자치구가 0.655로 가장 높았고 시 0.492, 군 0.157로 나타나, 유형에 따라 배출이 반응하는 변수가 서로 달랐다.

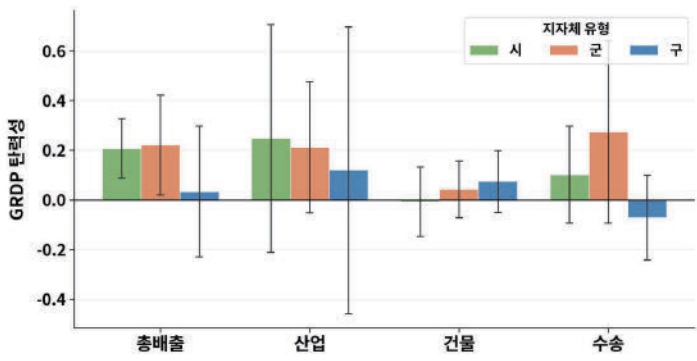
〈표 8〉 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성 추정 결과

부문	전체 GRDP	전체 인구	R^2	시 GRDP	시 인구	군 GRDP	군 인구	구 GRDP	구 인구
총배출	0.180***	0.440***	0.083	0.207***	0.492***	0.220**	0.157	0.033	0.655**
산업	0.206*	0.274	0.004	0.247	0.298	0.212	−0.063	0.119	0.346
건물	0.048	0.490***	0.144	−0.008	0.635***	0.042	0.163	0.073	0.603***
수송	0.142	0.574***	0.070	0.101	0.727***	0.274	0.376	−0.072	0.761***
농업	−0.133	−0.422	0.011	0.067	−0.532**	0.009	−0.265	−0.826*	−0.115
관측치	1,808			616		648		544	

*** p〈0.01, ** p〈0.05, * p〈0.1. 군집강건 표준오차 적용함
모든 모형은 이원 고정효과모형이며 R^2는 전체 모형의 within 기준. 폐기물 및 기타 부문은 계수의 통계적 유의성이 낮아 표에서 제외함

이러한 차이는 유형별 배출구조와 관련된다. 자치구는 건물과 수송부문의 비중이 각각 41.2%와 24.1%로 전체 배출의 65.3%를 차지하는 반면, 시와 군에서는 산업부문의 비중이 각각 58.5%와 47.9%로 높다. 건물과 수송배출은 GRDP에 대한 반응이 약한 반면 산업배출은 GRDP에 반응하므로, 산업 중심의 시·군에서 경제성장과 배출 간 연계가 상대적으로 강하게 나타난 것으로 해석된다. 이러한 결과는 지역별 탈동조화 수준이 배출이 주로 집중된 부문과 밀접하게 관련됨을 보여준다.

〈그림 5〉 부문별·지자체 유형별 배출 탄력성 추정값의 95% 신뢰구간



Ⅳ. 토의

본 연구에서는 시도 집계 수준(표준편차 0.506)보다 시군구 수준(표준편차 0.731)에서 탈동조화의 변동성이 크게 나타났다. 이는 분석 단위에 따라 탈동조화의 분포와 편차가 달라지는 수정가능한 공간단위 문제(Modifiable Areal Unit Problem: MAUP)가 나타날 수 있음을 보여준다. 이러한 지역 간 차이가 인접 지역을 따라 일정한 공간적 패턴을 보이는지 확인하기 위해 추가 분석을 수행하였다. Moran's I 검정 결과, 탈동조화 지표의 공간자기상관은 통계적으로 유의하지 않았다($I = 0.052$, $p = 0.084$). 공간시차모형(SAR)과 공간오차모형(SEM)에 대한 검정에서도 공간시차효과와 공간오차효과가 확

인되지 않았다(각각 p=0.340, p=0.403). 반면 제조업 종사자 비중은 뚜렷한 공간적 밀집을 보였다(I=0.359).

이는 산업 입지나 인구 분포가 유사한 인접 지역에서 온실가스 배출량도 유사하게 나타나며, 인접지역 간 유의한 공간적 의존성을 보인다고 보고한 선행연구(조향숙, 2020)와 대조된다. 즉 산업구조와 지리적 환경이 유사한 이웃 지자체라 하더라도, 경제성장과 배출량의 관계를 뜻하는 탈동조화 양상은 지역마다 다를 수 있다.

이 결과는 현행 탄소중립 정책의 질적 성과관리 측면에 한계가 있음을 시사한다. 탈탄소화 성과는 배출량 변화뿐 아니라 정책의 실행역량과 이행과정을 함께 고려하여 평가할 필요가 있으며(Zhang, Yang, Zhao, Ma, Larson and Greig, 2022), 지역 기후정책의 감축효과 역시 국가 정책 등 외부 여건에 따라 달라질 수 있다(Ebner, Kachi, Rhodes and Andrew, 2025). 따라서 총배출량의 양적 변화만으로는 지자체의 정책적 노력과 인구 변화나 경기 변동 등 다른 요인의 영향을 구분하기 어렵다. 실제로 본 연구에서 탈동조화가 나타난 202개 지역 중 15개는 경제활동 위축을 동반한 위축형 탈동조화였으며, 배출 감소에는 지자체의 노력뿐 아니라 국가 전원믹스 개선에 따른 탄소집약도 효과도 크게 작용하였다. 배출 총량만으로는 이러한 성과의 원천을 구분할 수 없다.

따라서 시군구의 배출구조와 인구·경제 여건을 종합적으로 반영한 질적 성과관리체계로의 전환이 요구된다. 부문별 탄력성을 지속적으로 모니터링하여 경기적 요인에 의한 감축과 기술·효율 개선에 의한 실질적 저감을 구분하는 평가체계가 구축되어야 한다.

나아가 배출구조는 탈동조화 전략을 결정하는 기준이 된다. 산업 비중이 높은 시·군은 성장과 배출이 여전히 연동되어 있으나(GRDP 탄력성 0.21~0.22), 산업배출이 소수 대형 사업장이 위치한 지역에 집중되어 있어(상위 10개 시군구가 56.7%) 지자체가 독자적으로 성장과 배출의 연결을 끊기는 어렵다. 반면 자치구는 배출의 3분의 2가 건물(41.2%)과 수송(24.1%)에서 발생하며, GRDP 탄력성이 통계적으로 유의하지 않아 경제성장과 배출의

연계가 뚜렷하지 않았다. 두 부문은 전체 표본에서 GRDP보다 인구에 크게 반응하는 것으로 나타나(인구 탄력성 각각 0.490, 0.574), 자치구의 배출은 성장률보다 거주·활동 인구가 만들어내는 건물·교통 수요에 좌우될 가능성이 크다. 결국 시·군에서는 국가·기업과 연계한 산업 전환이, 자치구에서는 건물·교통 수요의 효율적 관리가 탈동조화의 관건이 된다.

V. 결론

본 연구는 2015~2022년 전국 226개 시군구를 대상으로 경제성장과 온실가스 배출 간 탈동조화 수준을 진단하고, 배출 감소의 원인과 부문별·지자체 유형별 차이를 분석하였다. 이를 위해 연도별 탈동조화 지수와 시군구별 탄력성을 산정하고, 요인별 기여도 분석을 통해 배출 변화를 인구, 경제활동, 배출집약도 효과로 구분하고, 배출집약도 효과를 에너지집약도와 탄소집약도로 세분하여 분석하였다. 또한 패널모형을 활용하여 총배출량과 부문별 배출량이 GRDP와 인구 변화에 어떻게 반응하는지 분석하였다.

분석 결과, 첫째, 탈동조화 수준은 시도보다 시군구 단위에서 더 큰 차이를 보였다(시도 간 표준편차 0.506, 시도 내 표준편차 평균 0.731). 탈동조화 수준의 공간자기상관도 뚜렷하지 않아, 인접 지역이라 하더라도 탈동조화 양상은 서로 다르게 나타났다. 이는 광역단위의 집계지표만으로는 동일 시도 내부의 상이한 탈동조화 양상을 충분히 파악하기 어렵다는 점을 보여준다.

둘째, 탈동조화 지역의 대부분은 배출집약도 개선이 주로 작용한 성장형 탈동조화였으나, 일부 지역에서는 경제활동 위축이 배출 감소를 동반한 위축형 탈동조화가 나타났다. 다만 위축형으로 분류된 15개 시군구 중 11개는 배출집약도 역시 개선되었으며, 이 분류는 배출 감소에 경제 규모 축소가 동반되었음을 뜻할 뿐 해당 지역의 감축 노력이 없었음을 의미하지 않는다.

셋째, 총배출량은 경제성장보다 인구 변화에 더 민감하게 반응하였으며(GRDP 탄력성 0.180, 인구 탄력성 0.440), 이러한 반응은 지자체 유형에 따

라 다르게 나타났다. 자치구에서는 경제성장과 배출 간 관계가 확인되지 않은 반면 인구 탄력성이 0.655로 가장 높았고, 이는 건물(0.603)과 수송(0.761) 부문에서 비롯되었다. 반면 시·군에서는 총배출량이 경제성장에 유의하게 반응하였다(0.207, 0.220).

이러한 결과는 지자체의 감축성과를 총배출량 변화만으로 판단하는 데 한계가 있음을 보여준다. 총배출량에는 지역의 정책 노력뿐 아니라 인구와 경제활동의 변화, 에너지 소비구조, 국가 차원의 전력·에너지 정책 효과가 함께 반영되기 때문이다. 따라서 지자체 감축성과 평가에는 총배출량과 함께 요인별 기여도를 구분하는 접근이, 그리고 지역별 배출구조에 따른 차별화된 감축 전략이 요구된다.

본 연구는 기초지자체 단위에서 탈동조화의 수준과 원인을 함께 분석하고, 이를 부문 및 지자체 유형별 차이와 연결했다는 점에서 의의가 있다. 다만 분석 기간이 8개 연도로 제한되어 시군구별 탄력성 추정의 불확실성이 존재하며, 에너지·탄소집약도를 포함한 분석은 자료 제약으로 2019~2022년에 한정되어 코로나19의 영향을 포함한다. 또한 전력·열 간접배출에는 국가 차원의 전원믹스와 배출계수 변화가 함께 반영될 수 있으며, 국가 차원의 2050 탄소중립 선언 및 2021년 탄소중립녹색성장법 제정에 따른 지자체별 탄소중립 노력과, 지역별 산업기술, 에너지원 구성, 건축물 특성 및 교통수요와 같은 세부 요인을 충분히 반영하지 못하였다. 향후에는 장기 시계열과 소득, 활동인구, 건축물 및 교통수요 등 부문별 배출 특성을 반영한 보다 세분된 활동자료를 구축하고, 지역별 탄소중립 정책수단의 적용 가능성과 효과를 고려하여 지자체 정책수단과 탈동조화 성과의 관계를 분석함으로써 지역별 탄소중립 정책의 실질적 효과를 검증할 필요가 있다.

▮참고문헌▮

고재경·예민지, 2022, "광역자치단체 온실가스 배출량과 경제성장의 탈동조화 분석," 『지방행정연구』, 36(1), pp.3-32, DOI: 10.22783/krila.2022.36.1.3.

김대수·이상엽, 2019, "국내 온실가스 배출량과 경제성장 간 장단기 비동조화 분석," 『자원·환경경제연구』, 28(4), pp.583-615, DOI: 10.15266/KEREA.2019.28.4.583.

김동구·손인성, 2023, "화학산업의 온실가스 배출 탈동조화 분석: 한-일 비교를 중심으로," 『에너지경제연구』, 22(2), pp.1-24, DOI: 10.22794/keer.2023.22.2.001.

손철희·정휘철·박창석, 2026, "도시 기후탄력성 정책 인벤토리 및 정책 이행 평가 체계의 개발과 적용," 『환경정책』, 34(1), pp.211-238, DOI: 10.15301/jepa.2026.34.1.211.

임형우·조하현, 2019, "경제성장과 탄소배출량의 탈동조화 현상 분석: 63개국 동태패널 분석(1980~2014년)," 『자원·환경경제연구』, 28(4), pp.497-526, DOI: 10.15266/KEREA.2019.28.4.497.

조향숙, 2020, "공간패널모형을 이용한 대기오염물질과 지역소득간 탈동조화 분석," 『환경정책』, 28(4), pp.1-32, DOI: 10.15301/jepa.2020.28.4.1.

진태영·김도원, 2021, "산업부문 온실가스 탈동조화 변화요인 분석," 『환경정책』, 29(1), pp.101-127, DOI: 10.15301/jepa.2021.29.1.101.

Ang, B. W., 2005, "The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide," *Energy Policy*, 33(7), pp.867-871, DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.010.

Cohen, G., J. T. Jalles, P. Loungani, R. Marto, and G. Wang, 2019, "Decoupling of emissions and GDP: Evidence from aggregate and provincial Chinese data," *Energy Economics*, 77, pp.105-118, DOI: 10.1016/j.eneco.2018.03.030.

Ebner, M., A. Kachi, E. Rhodes, and K. Andrew, 2025, "Climate action close to home: The role of public attitudes and policy responses in reducing greenhouse gas emissions," Energy Research & Social Science, 127, 104264, DOI: 10.1016/j.erss.2025.104264.

Fotheringham, A. S. and D. W. S. Wong, 1991, "The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis," *Environment and Planning* A, 23(7), pp.1025-1044, DOI: 10.1068/a231025.

Hubacek, K., X. Chen, K. Feng, T. Wiedmann, and Y. Shan, 2021, "Evidence of decoupling consumption-based CO_2 emissions from economic growth," *Advances in Applied Energy*, 4, 100074, DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100074.

Openshaw, S., 1984, *The modifiable areal unit problem*, Concepts and techniques in modern geography No. 38, Norwich: Geo Books.

Son, C. H., J. I. Baek, and Y. U. Ban, 2018, "Structural impact relationships between urban development intensity characteristics and carbon dioxide emissions in Korea," *Sustainability*, 10(6), 1838, DOI: 10.3390/su10061838.

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, DOI: 10.1016/j.tranpol.2005.01.001.

United Nations Environment Programme, 2011, *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*, Nairobi: United Nations Environment Programme.

York, R., E. A. Rosa, and T. Dietz, 2003, "STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts," *Ecological Economics*, 46(3), pp.351-365, DOI: 10.1016/S0921-8009(03)00188-5.

Zhang, C., H. Yang, Y. Zhao, L. Ma, E. D. Larson, and C. Greig, 2022, "Realizing ambitions: A framework for iteratively assessing and communicating national decarbonization progress," *iScience*, 25(1), 103695, DOI: 10.1016/j.isci.2021.103695.

Zhao, X., M. Jiang, and W. Zhang, 2022, "Decoupling between economic development and carbon emissions and its driving factors: Evidence from China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2893, DOI: 10.3390/ijerph19052893.

손철희: 충북대학교에서 박사학위를 취득하였고, 한국환경연구원 초빙연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 탄소중립도시, 기후적응, 도시 및 환경계획/정책, 지속가능한 발전이다. '제5차 국가환경종합계획 수정계획 수립 연구', 도시공간 기후탄력성 확보 기술 평가 및 의사결정지원 시스템개발' 등에 참여하였다(sonch@kei.re.kr).

임영신: 연세대학교에서 도시·지역계획으로 공학박사학위를 받았으며, 한국환경연구원 국가기후위기적응센터에서 전문연구원으로 재직 중이다. 현재 지방 기후위기 적응대책 수립·이행 지원 강화, 도시공간 기후탄력성 확보 기술 평가 및 의사결정지원 시스템 개발 등을 수행하고 있고, 기후위기 취약계층 보호·관리, 기후탄력적 도시개발, 기후적응 주류화 연구에 관심을 기울이고 있다(yslim@kei.re.kr).

최희선: 서울대학교에서 환경생태계획분야로 박사학위를 받았으며, 한국환경연구원 선임연구위원으로 재직 중이다. 국토-환경계획 통합관리, 도시회복력 및 지능형 생태도시 연구에 관심이 있다. 국가기후위기대응위원회, 중앙환경정책위원회, 노후계획도시특별위원회 등 국토·도시환경계획분야에서 활동을 해오고 있다(choihs@kei.re.kr).

투 고 일: 2026년 07월 28일
심 사 일: 2026년 08월 05일
게재확정일: 2026년 08월 07일