pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2025.08.60.4.263

Check for updates

Journal of Korea Planning Association Vol.60, No.4 (2025)
대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제60권 제4호 pp.263-274

탄소중립 정책에 민감한 산업 도출과 지역경제 성장요인 분해분석*

Identifying Industries Sensitive to Carbon Neutrality Policies and Decomposing Regional Economic Growth Factors

박기웅** · 김병석*** · 박창석****
Park, Giwoong · Kim, Byungsuk · Park, Chang Sug

Abstract

Despite expectations that carbon neutrality policies will have varying impacts across industries and regions, responses remain uniform and fragmented. For a successful regional transition toward carbon neutrality, strategies must consider internal and external conditions shaped by industrial structures. This study classifies industries that are likely to be sensitive to carbon regulations and decomposes regional economic growth factors to offer planning implications. The analysis covers 17 regions (Si-Do) in South Korea from 2010 to 2019, identifying five industrial types using cluster analysis based on carbon emissions and response capacity indicators: low-emission–medium-capacity, medium-low-emission–medium-high-capacity, medium-high-emission–medium-high-capacity, high-emission–medium-high-capacity, and low-emission–low-capacity. Dynamic shift-share analysis is then applied to decompose employment changes into national growth, industrial structure, and regional competitive effects. The results show that even industries with high response capacity may experience job losses depending on regional conditions. Moreover, regions with the same industrial type can exhibit different growth factors. The findings highlight the need for differentiated regional strategies based on growth factors, beyond general industrial responses to carbon neutrality.

주제어 탄소중립 정책, 지역경제, 성장요인, 군집분석, 동태적 변이할당분석
Keywords Carbon Neutrality Policy, Regional Economy, Growth Factors, Cluster Analysis, Dynamic Shift-Share Analysis

I. 서 론

2020년 기준 우리나라의 연료 연소에 의한 온실가스 배출량은 5억 5천 1백만 톤 CO_2eq.로 전 세계에서 8번째로 많다(IEA, 2022). 특히 한국은 다른 선진국에 비해 제조업 중심의 산업구조를 지니고 있다. 세계은행과 한국은행 통계에 따르면 2022년 기준 한국의 GDP에서 제조업이 차지하는 비중은 28.0%로 OECD 국가 중 2위에 해당한다(통계청, 2024d). 또한 2020년 기준 국내 온실가스 총 배출량 중 제조업 및 건설업의 비중은 약 27.7%에 달한다(환경부, 2022). 이에 따라 정부는 산업 부문의 탄소중립 기술개발과 감축 전략을 추진하고 있다(산업통상자원부, 2023).

탄소중립 목표 달성을 위해서는 산업 부문의 적극적인 감축 전략이 필수적이다. 탄소중립 정책이 본격화되면 탄소세 부과와 배출량 상한제 및 거래제 등의 규제가 강화되며, 이에 따라 산업의

* 본 논문은 한국환경연구원에서 경제·인문사회연구회의 협동연구과제로 수행된 「탄소중립형 메가시티 구축을 통한 국가균형발전 전략 연구(2022-095)」의 연구결과를 기초로 작성되었습니다.
** Ph.D. Student, Pusan National University (First Author: gwpark@pusan.ac.kr)
*** Associate Researcher, Chungbuk National University (bsk0728@chungbuk.ac.kr)
**** Director General, Korea Environment Institute (Corresponding Author: plade290@kei.re.kr)

추가적인 비용 부담과 경제적 충격이 불가피하다. 이러한 영향은 모든 지역에서 동일하게 나타나지 않으며, 지역별 산업구조와 내생적 여건의 차이에 따라 상이한 수준의 영향을 받을 가능성이 크다(Liu et al., 2021; Liu et al., 2023). 결국 탄소중립 이행에 취약한 산업구조를 가진 지역일수록 더 큰 경제적 충격에 직면할 가능성이 높으며, 기존의 지역 간 격차가 새로운 형태의 불균형으로 이어질 수 있다(안예현 외, 2022; 유이선 외, 2022).

기존의 연구는 주로 업종별 감축 방안에 초점을 맞추고 있으며, 동일한 산업이라도 지역 특성에 따라 이질적으로 나타나는 성장요인을 충분히 고려하지 않았다. 그러나 산업은 지역 특성과 밀접하게 연계되어 있기 때문에 자원 부존성, 경제 규모, 산업구조, 발전 수준 등 지역 여건에 따른 차별화된 탄소중립 전략이 필요하다(Liu et al., 2023). 이에 따라 탄소중립 정책이 지역 경제에 어떠한 영향을 미치는지가 연구되고 있으나(김수이 외, 2010; 조경엽·김영덕, 2013; 박종욱, 2024), 그러한 영향으로부터 지역 산업별로 어떻게 대응해야 하는지를 분석한 연구는 상대적으로 부족하다.

기존의 연구는 탄소중립 정책에 취약한 산업을 도출하고 이들 산업구조에 따른 지역 취약성을 평가하는 데 주로 초점을 맞추었다. 본 연구는 탄소중립 정책에 취약한 산업 유형이라 하더라도, 각 지역에서 지역경제 성장에 기여한 요인이 다를 수 있다는 점을 명시적으로 다룬다. 탄소배출과 대응 역량을 반영할 수 있는 지표를 활용하여 군집분석을 통해 산업을 유형화한 후, 동태적 변이할당분석을 이용하여 2010~2019년 동안 고용 성장에 기여한 요인을 분해한다. 이를 통해 탄소중립 정책 대응에 있어 산업 및 지역 차원의 단순한 취약성 평가를 넘어, 지역경제 성장의 이질적 요인을 분해함으로써 지역별 차별화된 전략적 대응을 제시한다는 점에서 명확한 학술적·정책적 시사점을 제공하고자 한다.

Ⅱ. 선행연구 검토

기후변화가 미래 세대에 경제적인 영향을 미친다는 것은 자명한 사실이다. Kotz et al.(2024)의 연구에 따르면 기후변화로 인한 영향이 없는 시나리오 대비, 2049년까지 글로벌 1인당 소득이 평균적으로 19% 감소할 것으로 예측했다. 이러한 영향은 지역별로 다르게 나타나는데, 특히 남아시아와 아프리카에서 가장 큰 소득 감소가 나타날 것으로 나타났다(Kotz et al., 2024). 우리나라 또한 이러한 영향에서 자유롭지 않다. 선진국에 비해 전 산업 중 제조업의 비중이 높은 산업구조를 보유하고 있으며, 제조업의 배출량이 약 65.9%에 달한다(박경훈 외, 2021). 한국은행의 연구에 따르면 우리나라에서 탄소세가 시행되는 경우 GDP 성장률이 연평균 0.08~0.32%p 감소하는 것으로 추정하였다(박경훈 외, 2021).

기후변화의 경제적 영향을 추정하는 다양한 연구들이 존재하지만, 주요한 난제 중 하나는 미래 예측의 불확실성이다(유종현 외, 2024). 이러한 불확실성 요인 중 하나가 지역별 산업구조의 차이이다. 산업별 기술수준의 차이는 탄소중립 이행 과정에 있어 다른 대응으로 나타나고, 그러한 산업구조에 따라 고용과 부가가치 등 이질적인 경제적 영향으로 이어진다(민은지·윤남준, 2021). 우리나라 시·도를 대상으로 한 기후변화 시나리오 분석 결과에 따르면 도시화 및 산업화 비중이 높은 대도시를 중심으로 실질 부가가치가 하락하는 것으로 나타났다(이지원, 2023). 산업별 분석에서도 현행 정책을 유지하는 경우 업종별 실질 부가가치 변동이 -0.19%에서 -20.99%까지 편차가 이질적인 것으로 나타났다(이지원, 2023). 즉, 탄소중립 이행 과정에서 탄소세와 같은 탄소 감축 정책이 시행될 경우, 지역별 산업구조와 그 비중에 따라 경제적 영향이 상이하게 나타날 수 있다(조경엽·김영덕, 2013; 박종욱, 2024).

탄소중립 정책의 효과는 지역별 산업구조와 일자리 분포, 탄소배출 구조에 따라 달라질 수 있다. 산업구조 조정이 탄소배출을 줄이는 데 중요한 역할을 하지만, 기술 수준과 경제적 다각화 정도에 따라 감축 효과가 상이하게 나타나기 때문이다(Zhou et al., 2013). 특히 산업화 단계에 따라 지역의 탄소중립 정책이 이질적인 영향을 줄 수 있다. 자원 의존적인 산업구조를 보유한 지역은 환경 규제로부터 적응이 어려워 경제적 부담이 커질 가능성이 크다(Tian et al., 2019). 이는 결국 일률적인 탄소중립 정책이 아닌 지역별 산업 특성을 고려한 정책 설계가 필요함을 시사한다.

다만 환경 규제가 항상 즉각적인 탄소 감축 효과를 보이는 것은 아니며, 경우에 따라 지역 간 경제적 격차를 더욱 심화시킬 수 있다. 환경 규제와 탄소배출 간 관계는 비선형적이며, 산업구조의 최적화 수준이 낮은 지역에서는 환경 규제가 오히려 탄소배출을 증가시킬 가능성이 있기 때문이다(Chen et al., 2019). 또한 산업이 다각화된 지역에서는 규제가 긍정적인 영향을 미치는 반면, 산업구조가 고착화된 지역에서는 적응이 어려울 수 있다(Dai et al., 2023). 게다가 고탄소 산업에 대한 의존도가 높은 지역은 산업 다각화가 지연되고 탄소 감축이 어려워지는 구조적인 문제가 발생한다(Wu et al., 2021). 이러한 연구들은 탄소중립 정책의 효과가 기존 산업 및 경제적 조건에 의해 결정되며, 때로는 지역 간 격차를 줄이기보다 오히려 심화시킬 수 있음을 보여준다.

탄소중립 정책의 영향은 지역별 산업구조와 경제적 여건에 따라 차별적으로 나타난다. 일부 지역에서는 탄소중립 정책이 산업구조의 고도화와 경제 성장의 기회로 작용할 수 있지만, 다른 지역에서는 기존 산업의 경쟁력을 약화시키는 요인이 될 수 있다. 지방자치단체가 탄소중립 정책을 시행하는 과정에서 일부 지역은 적극적인 기술 혁신과 산업 전환을 통해 경쟁력을 확보하는 반면, 산업구조상 적응이 어려운 지역에서는 정책 효과가 미미하거나 부정적인 영향을 받을 가능성이 있다(Pan et al., 2023). 예를 들어 Zheng et al.(2021)은 중국의 저탄소 도시 시범 사업이 기

술 인프라가 발달한 지역에서는 산업구조 고도화에 긍정적인 영향을 미쳤으나, 산업구조가 고착화된 지역에서는 효과가 크지 않았음을 밝혔다. 이는 탄소배출 및 산업구조의 공간적 차이가 정책의 효과성을 결정짓는 주요 요인임을 시사하며, 이에 따라 지역별로 차별화된 정책 대응이 필요하다는 점을 강조한다(Yu et al., 2024).

종합적으로 기존 연구들은 탄소중립 정책이 지역에 미치는 영향을 분석함으로써 지역 특성을 고려한 전략의 필요성을 강조하였다. 하지만 탄소중립 정책으로 인해 동일하게 영향을 받는 산업이라도 지역적 맥락에 따라 산업이 성장하거나 쇠퇴하는 주요 원인이 다를 수 있음을 간과하였다. 즉, 탄소중립 정책에 취약한 산업구조로 이루어진 지역이라도 내생적인 문제가 존재할 수 있으며, 그 반대의 가능성도 있다. 본 연구는 탄소중립 규제로부터 산업 유형별 영향과 대응력을 간접적으로 파악하고, 동일한 산업이라도 지역별 성장의 이질적인 요인을 분석함으로써 기존 연구와 차별점을 가진다. 이는 각 지역이 탄소중립 규제에 대응하기 위한 구체적인 대응 방식을 이끌어낼 수 있다는 점에서 정책적 시사점이 있다.

Ⅲ. 자료 및 분석방법

1. 군집분석

군집분석은 독립변수들의 값과 거리를 토대로 샘플들을 일정한 군집으로 분류하는 기법을 말한다. 군집분석은 크게 계층적 군집분석과 비계층적 군집분석으로 나뉜다. 계층적 군집분석은 군집의 수를 사전에 설정하지 않고 군집분석 결과를 바탕으로 연구자가 군집의 수를 판단한다. 비계층적 군집분석은 연구자가 사전에 군집의 수를 설정한 뒤에 해당 군집 수의 중심값에 가까운 샘플을 도출한다.

본 연구에서는 먼저 계층적 군집분석을 통해 덴드로그램을 판단하여 사전에 군집의 수를 설정한 후 비계층적 군집분석 방법 중 하나인 K-평균(K-means) 군집분석을 수행하였다. K-평균 군집분석은 임의 군집의 각 평균과 군집 내 샘플 간 제곱 오차의 합이 최소화되는 조합을 찾는 알고리즘으로 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다(Jain, 2010).

$$J(c_k) = \sum_{x_i \in c_k} \| x_i - \mu_k \|^2 \quad (i = 1, \ldots, n) \quad (k = 1, \ldots, K) \tag{1}$$

$$J(C) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{x_i \in c_k} \| x_i - \mu_k \|^2 \tag{2}$$

식 (1)에서 c_k는 k번째 군집을 의미한다. 각 군집은 i번째 샘플 x와 군집 c_k의 평균인 μ_k의 제곱 오차가 최소화되는 방향으로 결정된다. K-평균 군집분석의 목적은 K개의 모든 군집의 제곱 오차를 최소화하는 것이며, 식 (2)로 표현할 수 있다. 다만 군집의 수 K가 증가할수록 제곱 오차가 감소하기 때문에 연구자가 임의의 K를 설정하는 것이 필요하다.

본 연구에서 계층적 군집분석을 수행할 때 군집 내 샘플값의 제곱 합을 최소로 하는 Ward 방법을 이용하였고 유클리드 거리를 적용하여 측정하였다. 이후 덴드로그램을 통해 적절한 군집의 수를 설정한 후 K-평균 군집분석을 수행하였다. 군집분석에 이용되는 변수는 표준화 과정을 거쳤다.

2. 동태적 변이할당분석

군집분석을 통해 도출한 업종을 대상으로 성장 원인을 분석하기 위해 변이할당분석(shift-share analysis)을 수행하였다. 일반적으로 변이할당분석은 지역의 산업 성장요인을 국가성장효과와 산업구조효과, 지역할당효과로 분해하는 방법론이다. 국가성장효과란 전체 경제 성장에 따른 영향을 의미하며, 특정 지역의 산업구조와 관계없이 국가 경제 성장으로 인해 발생하는 변화를 의미한다. 산업구조효과는 국가 수준에서 특정 산업이 성장하거나 쇠퇴하는 과정에서 해당 산업을 많이 보유한 지역이 상대적으로 더 큰 영향을 받는 효과를 반영한다. 지역할당효과는 동일한 산업을 보유한 지역 간에도 차이가 발생하는 요인으로써 지역의 경쟁력, 정책적 지원, 인프라 등의 차이에 따라 산업 성장률이 국가 평균과 다르게 나타나는 부분을 의미한다. 이를 통해 변이할당분석은 어떠한 요인이 특정 산업의 변화에 기여한 것인지를 분해하는 데 활용될 수 있다.

$$g_i^r = \frac{E_{i,t2}^r - E_{i,t1}^r}{E_{i,t1}^r} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} g_i^r &= g_i^r + (g^N - g^N) + (g_i^N - g_i^N) \\ &= g^N + (g_i^N - g^N) + (g_i^r - g_i^N) \\ &= g^{national} + g^{industrial} + g^{regional} \end{aligned} \tag{4}$$

g_i^r는 시점 $t1$와 $t2$ 간 r 지역의 i 산업에 속한 종사자 수 E의 증가율을 의미한다. 식 (3)의 우변에 같은 기간 국가의 전 산업 증가율과 국가의 산업 i 증가율을 가감하면 식 (4)와 같다. g^N와 $g_i^N - g^N$, $g_i^r - g_i^N$은 각각 국가성장효과, 산업구조효과, 지역할당효과를 의미한다. 식 (4)의 양변에 $E_{i,t1}^r$을 곱하면 각 효과별 종사자 수의 변화량을 알 수 있다.

변이할당분석의 한계 중 하나는 선택하는 두 개의 시점으로 인

해 시점 사이에 발생하는 동태적인 양상을 파악할 수 없다는 것이다. 이를 보완하기 위해 두 시점 사이의 모든 시점을 고려하여 전반적인 변동성을 파악하는 동태적 변이할당분석(dynamic shift-share analysis)을 적용하였다. 예를 들어 시점 $t1$에서 $t10$까지를 분석 기간으로 설정한 경우 $t1$~$t2$, $t2$~$t3$, …, $t9$~$t10$ 기간별 효과를 모두 합하는 것이다.

3. 분석자료

제조업 업종 유형화를 위해서 지표를 크게 탄소배출과 대응 역량 부문으로 구분하였다(표 1). 탄소배출 부문은 산업이 규제에 직접적으로 노출될 가능성을 의미한다. 탄소세 및 배출량 거래제와 같은 규제는 배출량만큼의 부담을 주기 때문에 고배출 산업일수록 규제의 강도와 범위에 더 큰 영향을 받을 가능성이 크다. 대응 역량 부문은 규제에 따라 간접적으로 영향을 받는 동시에 대응할 수 있는 역량을 의미한다. 이는 업종의 자원 보유 수준과 운영 기반을 반영함으로써 정책 변화에 대응할 수 있는 구조적 역량으로 간주할 수 있다.

분석의 시간적 범위는 2010년부터 2019년까지로 설정하였는데, 이는 2020년 이후 코로나19로 인한 경제적 영향이 자료의 변동성을 왜곡할 가능성이 있기 때문이다. 다만 자료의 한계로 인해 업종별 연구개발비는 2020년을 기준으로 하였다. 업종 구분은 제10차 한국표준산업분류의 중분류 기준을 적용하였다. 업종별 탄소배출량과 에너지소비량 자료는 국가온실가스 배출량 종합정보시스템의 연도별 산업부문 온실가스 배출량 조사보고서에서 구득하였다. 업종별 상용근로자 수는 「전국사업체조사」, 종사자 수와 부가가치액은 「광업제조업조사」, 연구개발비는 「경제총조사」를 활용하였다.

군집분석을 위한 자료를 구성하는 과정에서 제조업 10인 이상 사업체를 대상으로 한정하였는데, 이는 2010~2019년 부가가치액 자료를 제공하는 「광업제조업조사」가 10인 미만 사업체를 조사하지 않기 때문이다. 그러나 2019년 기준 제조업 탄소배출량에서 10인 미만 사업체가 차지하는 비중이 4.9%에 불과하여(한국에너지공단, 2024), 이를 제외하더라도 탄소배출 관점에서 본 연구의 분석에 큰 무리가 없다고 판단하였다.

동태적 변이할당분석 및 입지계수를 측정하기 위해 구득한 지역별 및 산업별 종사자 수는 10인 이상 사업체뿐만 아니라 10인 미만 사업체도 조사 대상에 포함되는 통계청의 「전국사업체조사」자료를 이용하였다.

1) 탄소배출 부문

석탄 및 석유를 비롯한 화석연료는 다른 에너지원에 비해 탄소배출량이 많아 주요 감축 대상이다. 특히 우리나라는 석유에 대한 에너지 수입 의존도가 높아 석유와 관련한 경제적 충격이 발생할 경우 부정적인 영향이 클 수 있다. 따라서 탄소중립 및 에너지 안보 측면에서 에너지 총소비량 중 석탄·석유·가스 소비량의 비

Table 1. Definition and source of indicators

Categories	Indicators	Definition	Unit	Source
Carbon emissions	Fossil fuel dependence	Share of coal, oil, and gas consumption in total energy consumption (2019)	%	Korea Energy Agency (2024)
	Cumulative carbon emission	Cumulative carbon emissions (2010–2019)	million tCO_2	Korea Energy Agency (2024)
	Carbon emission growth rate	Average annual carbon emission growth rate (2010–2019)	%	Korea Energy Agency (2024)
	Carbon intensity	Carbon emissions per unit of value added (2019)	tCO_2 per billion KRW	Korea Energy Agency (2024), Statistics Korea (2024a)
	Energy intensity	Energy consumption per unit of value added (2019)	toe per billion KRW	Korea Energy Agency (2024), Statistics Korea (2024a)
Response capacity	Ratio of permanent employees	Proportion of regular employees in total employment (2019)	%	Statistics Korea (2024b)
	Employment growth rate	Average annual employment growth rate (2010–2019)	%	Statistics Korea (2024a)
	Value-added growth rate	Average annual value-added growth rate (2010–2019)	%	Statistics Korea (2024a)
	Labor productivity	Value added per employee (2019)	million KRW per person	Statistics Korea (2024a)
	R&D expenditure	R&D expenditure per 1,000 employees (2020)	million KRW per 1,000 employees	Statistics Korea (2024a), Statistics Korea (2024c)

중을 화석연료 의존도로 설정하였다(Xia et al., 2011; Yu et al., 2018).

탄소중립은 단기간에 달성할 수 있는 목표가 아니라 누적적이고 경로의존적인 과정을 반영한다. 즉, 환경을 희생하며 성장한 산업이 하루아침에 청정산업으로 전환되는 것은 현실적으로 불가능하다. 과거에 배출된 온실가스는 대기 중에 잔존하며 현재에도 영향을 미치므로, 이에 대한 책임을 고려해야 한다(Yang et al., 2017). 이에 따라 2010~2019년 연도별 누적 탄소배출량을 탄소중립 부문 지표로 설정하였다(Yang et al., 2017; Zhang and Hao, 2017; Zhou et al., 2019). 또한 과거 탄소배출량의 추세를 반영하여 미래의 경향을 파악할 수 있으므로, 2010~2019년 연평균 탄소배출 증가율도 분석 지표로 포함하였다.

탄소 및 에너지집약도는 환경적 영향과 경제발전 간 관계를 직관적으로 설명하는 지표이다. 모든 경제활동 단위는 노동, 자본, 에너지를 투입하여 부가가치와 온실가스를 산출한다. 따라서 탄소배출 및 에너지 사용의 집약도는 산업의 효율성을 나타내는 중요한 지표가 될 수 있다(Xia et al., 2011; Wang et al., 2015; Yang et al., 2017). 지속가능한 발전을 위해서는 온실가스 감축뿐만 아니라 경제적 성장도 동시에 달성할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 탄소집약도를 부가가치액 대비 탄소배출량, 에너지집약도를 부가가치액 대비 에너지소비량으로 설정하였다. 각 값이 클수록 부가가치 대비 탄소배출 및 에너지 사용의 비효율성이 크다는 것을 의미한다.

2) 대응 역량 부문

탄소중립 관련 규제가 미치는 경제적인 영향은 다양한 결과로 나타난다. 규제 대상 기업은 단기적으로 구조 조정이나 생산활동을 축소함으로써 대응하며, 이는 기술혁신을 통한 적응에 비해 즉각적이고 저렴한 수단이기 때문이다(Hanoteau and Talbot, 2019). 환경 규제가 적절한 인센티브와 함께 이루어지는 경우에는 기업의 연구개발 투자와 녹색혁신을 촉진함으로써, 장기적으로는 고용이나 생산성을 증가시킬 수 있다(Wen et al., 2023; Wang et al., 2025). Shang and Xu (2022)는 중국의 저탄소 환경 규제가 탄소배출 감소 초기에는 고용이 감소하지만 장기적으로 증가하는 유의미한 U자형을 띈다고 밝혔다. 다만 이러한 영향은 고용 형태와 산업별로 이질적으로 나타난다. 기술집약적인 업종일수록 기존의 혁신역량을 바탕으로 새로운 기술을 성공적으로 도입할 가능성이 크며, 생산성 증가로 이어질 수 있다(Mo, 2023; 2024). 즉, 규제로 인한 기술혁신은 상대적으로 기술 친화적인 인적 자본을 향상시키므로(Zhang et al., 2024), 저숙련, 임시직, 다배출 산업에 대한 고용 효과는 제한적일 수 있다(Huang and Sun, 2023; Wang et al., 2025).

이를 바탕으로 탄소중립 이행에 따른 간접적인 영향 및 대응을 의미하는 상용근로자 비율, 일자리 증가율, 부가가치 증가율, 1인당 부가가치, 연구개발비를 지표로 설정하였다. 상용근로자 비율은 2019년 기준 전체 종사자 중 상용근로자의 비율로 측정하였으며, 일자리 증가율과 부가가치 증가율은 각각 2010~2019년 연평균 종사자 수 증가율 및 부가가치액 증가율로 계산하였다. 노동생산성은 2019년 기준 종사자 1인당 부가가치액을 의미하며, 연구개발비는 2020년 기준 종사자 천 명당 연구개발비로 측정하였다.

Ⅳ. 분석결과

1. 기술통계량

〈표 2〉는 군집분석을 위해 이용한 지표들의 기술통계량이며, 표준화 과정을 거치기 전의 값이다. 평균값을 통해서 각 지표별 산업의 배출수준과 대응 역량을 대략적으로 파악할 수는 있으나, 산업 간 차이가 얼마나 유의한지는 판단할 수 없다. 지표에 대한 산업별 이질성을 포착하기 위해서 군집분석을 수행하였다.

2. 군집분석 결과

군집분석은 각 지표를 평균 0, 표준편차 1로 표준화한 후 수행되었다. 계층적 군집분석 결과와 덴드로그램을 검토한 결과 적절한 군집 수는 5개로 나타났다(그림 1). 군집의 수를 결정하는 명

Table 2. Descriptive statistics of indicators

Indicators	Mean	S.D.	Min.	Max.
Fossil fuel dependence	37.309	24.859	5.700	96.400
Cumulative carbon emission	111.559	231.844	0.857	1,060.350
Carbon emission growth rate	3.752	4.783	-10.483	11.591
Carbon intensity	524.795	923.868	21.800	4,254.600
Energy intensity	195.773	378.262	5.500	1,499.300
Ratio of permanent employees	81.919	13.064	53.700	98.300
Employment growth rate	0.971	2.322	-4.355	5.530
Value-added growth rate	2.919	3.081	-5.386	8.383
Labor productivity	273.930	397.911	84.600	1,973.100
R&D expenditure	4,714.031	8,151.307	284.669	39,071.429

Note: N=24

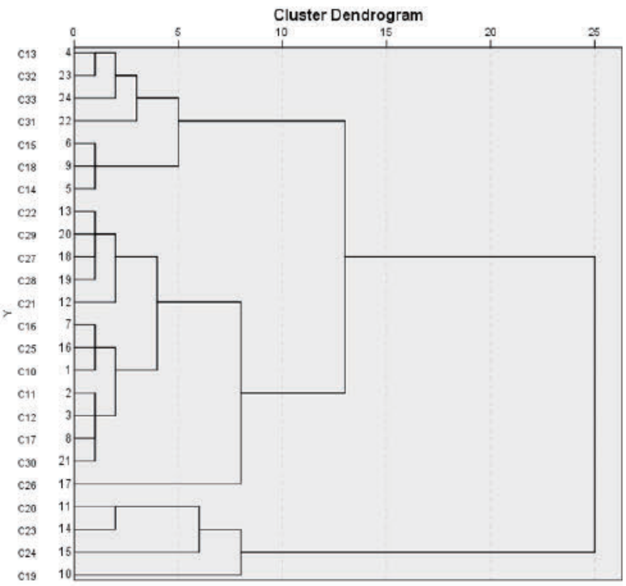

Figure 1. Dendrogram of hierarchical cluster analysis results

확한 기준은 없지만 5개와 6개 군집 간 거리 차이가 크지 않았으며, 군집 수가 증가할수록 해석이 어려워지고 의미가 모호해질 가능성이 커지므로 5개 군집을 채택하였다.

이후 군집을 5개로 설정하여 K-평균 군집분석을 수행하였으며, 결과는 〈그림 2〉로 나타내었다. 각 수치는 최종 군집중심을 의미하며 평균 이상인 경우 파란색, 이하인 경우 주황색으로 표시하였다. 해석의 일관성을 위해 탄소배출 부문 지표는 수치가 증가할수록 긍정적인 의미(저배출)를 가지도록 부호를 반대로 변환하였다. 예를 들어 유형 1과 2, 5의 화석연료 의존도는 제조업 평균보다 낮음을 의미한다.

군집분석 결과를 바탕으로 탄소배출 부문 중 평균 이상인 지표가 5개인 경우 저배출, 4개인 경우 중·저배출, 2~3개인 경우 중배출, 1개인 경우 중·고배출, 0개인 경우 고배출로 분류하였다. 마찬가지로 대응 역량 부문도 고역량과 중·고역량, 중역량, 중·저역량, 저역량으로 분류하였다. 이에 따라 유형 1은 저배출-중역량 산업, 유형 2는 중·저배출-중·고역량 산업, 유형 3은 중·고배출-중·고역량 산업, 유형 4는 고배출-중·고역량 산업, 유형 5는 저배출-저역량 산업으로 명명하였다. 각 유형에 속하는 업종은 〈표 3〉으로 제시하였다.

유형 1(저배출-중역량 산업)은 식료품, 음료, 목재 및 나무제품, 고무 및 플라스틱 등 10개 업종을 포함한다. 이 유형은 모든 탄소배출 지표가 제조업 평균보다 낮아 탄소중립 규제로부터 비교적 덜 노출된다. 다만 대응 역량 면에서는 상용근로자 비율과 노동생산성, 연구개발비가 제조업 평균 이하로 나타나 장·단기적인 역량 강화가 필요하다. 특히 연구개발 투자를 확대하고 인적자본을 강화하여 지속가능한 성장을 도모해야 한다.

유형 2(중·저배출-중·고역량 산업)는 의약품, 전자 부품, 정밀기기, 전기장비 등 기술집약적인 4개 업종으로 구성된다. 탄소배출 지표 중 4개가 제조업 평균 이하로 규제 영향이 제한적이며, 대응 역량 지표 중 4개가 제조업 평균 이상이다. 이로 인해 유형 2는 탄소중립 규제로부터 직간접적 영향이 가장 적을 것으로 예상된다. 다만 탄소배출 증가율은 평균보다 높게 나타나는데, 이는 고용과 생산량 증가에 따른 일시적인 효과일 수 있다. 따라서 최적화를 통한 배출량 및 생산성 개선이 필요하다.

유형 3(중·고배출-중·고역량 산업)은 코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업이다. 이 유형은 탄소배출 지표 중 4개가 제조업 평균보다 높아 규제에 직접적이고 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 대응 역량 지표들이 연구개발비를 제외하고 제조업 평균을 상회하므로 단기적으로는 고용 및 생산량 조정을 통해 대응할 수 있겠으나, 장기적으로는 기술혁신 투자 강화 및 고숙련 노동자 재교육 등 구조적 전환이 필수적이다.

유형 4(고배출-중·고역량 산업)는 화학제품 제조업과 금속 제조업으로 구성된다. 모든 탄소배출 지표가 제조업 평균보다 높아 규제의 영향이 크게 미칠 가능성이 높다. 대응 역량 지표는 부가가치 증가율을 제외하고 제조업 평균 이상으로 나타났다. 유형 3과 유사하게 단기적으로 큰 충격이 발생할 수 있으나, 동시에 대응할

Categories	Indicators	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
Carbon emissions	Fossil fuel dependence	0.276	0.588	-2.375	-1.927	0.159
	Cumulative carbon emission	0.332	0.244	-0.913	-2.794	0.315
	Carbon emission growth rate	0.333	-1.073	0.458	-0.038	0.083
	Carbon intensity	0.270	0.445	-1.086	-2.401	0.201
	Energy intensity	0.330	0.451	-3.446	-1.845	0.290
Response capacity	Ratio of permanent employees	-0.033	0.795	1.252	0.843	-0.826
	Employment growth rate	0.348	0.791	0.162	0.464	-1.105
	Value-added growth rate	0.352	0.896	1.082	-0.228	-1.104
	Labor productivity	-0.119	-0.086	4.270	0.001	-0.391
	R&D expenditure	-0.327	1.590	-0.358	0.033	-0.400

Figure 2. The result of K-means clustering

Table 3. Manufacturing industry classification results

Type no.	Type name	Manufacture of
1	Low emission–medium capacity	Food products
		Beverages
		Tobacco products
		Wood and of products of wood and cork; except furniture
		Pulp, paper and paper products
		Rubber and plastic products
		Fabricated metal products, except machinery and furniture
		Other machinery and equipment
		Motor vehicles, trailers and semitrailers
		Other manufacturing
2	Medium-low emission–medium-high capacity	Pharmaceuticals, medicinal chemical and botanical products
		Electronic components, computer; visual, sounding and communication equipment
		Medical, precision and optical instruments, watches and clocks
		Electrical equipment
3	Medium-high emission–medium-high capacity	Coke, briquettes and refined petroleum products
4	High emission–medium-high capacity	Chemicals and chemical products; except pharmaceuticals and medicinal chemicals
		Basic metals
5	Low emissions–low capacity	Textiles, except apparel
		Wearing apparel, clothing accessories and fur articles
		Leather, luggage and footwear
		Printing and reproduction of recorded media
		Other non-metallic mineral products
		Other transport equipment
		Furniture

수 있는 역량도 우수하다. 주요한 차이점은 유형 3에 비해 기술혁신 역량이 우수하므로 저탄소 기술 전환을 통한 장기적인 대응에 초점을 맞추어야 한다.

유형 5(저배출-저역량 산업)는 섬유, 의복, 가죽제품, 인쇄 및 기록매체 복제업 등 7개 업종을 포함한다. 탄소배출 지표는 모두 제조업 평균 이하로 규제 영향이 낮을 수는 있겠으나, 대응 역량의 모든 지표가 평균 이하로 나타나 장·단기적인 충격에 대응하기가 어려울 것으로 보인다. 따라서 이 유형은 연구개발 투자 확대를 통한 생산성 향상 및 고용 안정성 확보 등 다각적인 지원 전략이 필요하다.

3. 동태적 변이할당분석 결과

각 유형별 동태적 변이할당분석 결과는 〈그림 3〉으로 제시하였다. 더불어 지역별 해석은 해당 유형에 대해 입지계수(Location Quotient, LQ)가 1 이상인 지역을 중심으로 하였다(그림 4). 입지계수는 특정 산업이 지역 내에서 국가 평균 대비 특화된 정도를 나타내는 지표로서, 일반적으로 1 이상인 지역이 해당 산업의 경제적 중요성과 경쟁력 측면에서 상대적으로 유의미한 것으로 간주되기 때문이다. 또한 2010~2019년간 전국 종사자 수가 증가함에 따라 지역별 유형에 관계없이 국가성장효과는 양수를 띈다. 따라서 국가성장효과에 대한 해석은 생략하고자 한다. 대신에 산업구조효과와 지역할당효과의 부호에 따라 성장형(산업구조효과 양수 및 지역할당효과 양수), 경쟁강화형(산업구조효과 양수 및 지역할당효과 음수), 성장잠재형(산업구조효과 음수 및 지역할당효과 양수), 쇠퇴형(산업구조효과 음수 및 지역할당효과 음수)으로 구분하여 풍부한 해석을 제공하고자 한다(김대중·김태연, 2014; 나주몽·김재영, 2022). 이를 통해 각 유형별로 탄소배출 저감과 대응 역량 강화를 위한 지역별 차별적인 전략을 이끌어낼 수 있다.

유형 1(저배출-중역량 산업)은 대구와 인천, 울산, 경기, 충북, 충남, 전북, 경북, 경남에서 입지계수가 1 이상으로 나타났다. 이

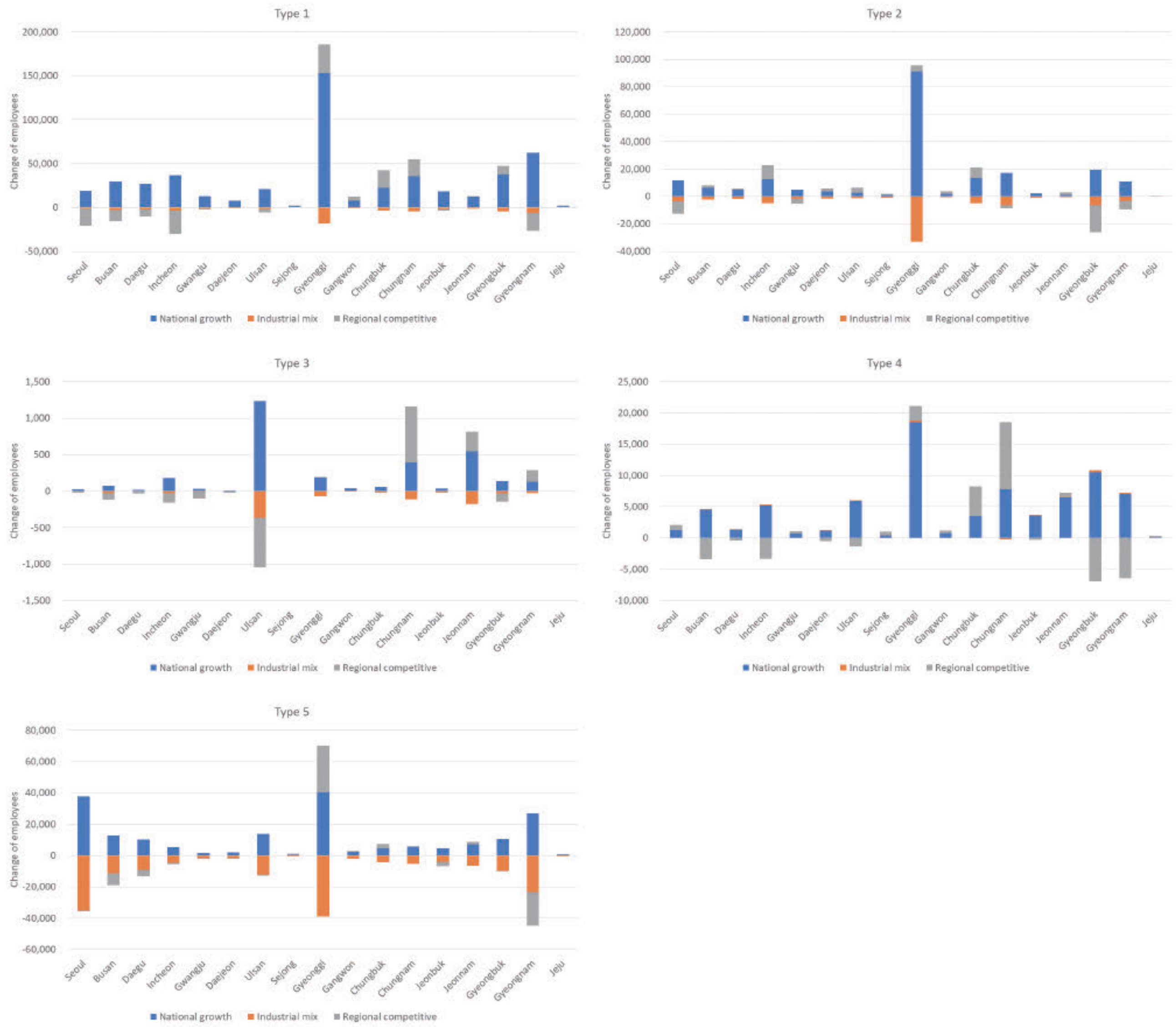

Figure 3. Dynamic shift-share analysis results by type

들 지역은 공통적으로 산업구조효과가 모두 음수를 나타내며, 이는 산업의 구조적 약점이 존재함을 의미한다. 지역경쟁력을 의미하는 지역할당효과는 대구와 인천, 울산, 전북, 경남에서 음수로 나타났고 경기와 충북, 충남, 경북에서 양수로 나타났다. 즉 유형 1에 대하여 대구를 비롯한 지역에서는 쇠퇴산업의 특징을 보이는 반면, 경기를 비롯한 지역에서는 성장 잠재력이 있음을 의미한다. 따라서 유형 1이 성장잠재형인 지역에서는 산업구조가 다소 불리할 수 있으나, 지역 내 정책 대응력 및 기업 경쟁력이 존재하므로 산업구조 고도화를 통한 장기적인 대응력 강화가 요구된다. 반면 유형 1이 쇠퇴형인 지역에서는 산업구조와 지역경쟁력 모두 불리하게 작용하므로 탄소중립 관련 규제로 인한 단기적인 충격에 대응해야 한다.

유형 2(중·저배출-중·고역량 산업)는 인천과 세종, 경기, 충북, 충남, 경북에서 입지계수가 1 이상으로 나타났다. 유형 2의 산업구조효과는 모든 지역에서 음수로 나타났으며, 지역할당효과는 인천과 세종, 경기, 충북에서 양수, 충남과 경북에서 음수로 나타났다. 즉 유형 2도 지역에 따라서 성장잠재형과 쇠퇴형으로 구분할 수 있다. 특히 유형 2를 성장시키는 것은 탄소중립과 지역경제에 모두 유리하게 작용할 수 있다. 유형 2가 성장잠재형인 지역은 기술기반 산업을 바탕으로 강한 기업가적 혁신과 정책 수용력을 보유하고 있으므로, 산업구조의 취약성을 개선한다면 성장형으로 발전할 가능성이 크다. 반면 유형 2가 쇠퇴형인 지역에서는 고역량 산업임에도 지역 단위에서의 성과가 낮게 나타난 만큼, 지역경쟁력 강화를 통한 장기적인 대응이 요구된다.

유형 3(중·고배출-중·고역량 산업)은 인천과 울산, 충남, 전남에서 입지계수가 1 이상으로 나타났다. 유형 3의 산업구조효과는 모든 지역에서 음수로 나타났으며, 지역할당효과는 인천과 울산에서는 음수, 충남과 전남에서는 양수로 나타났다. 유형 3은 저탄소 산업구조 전환에 초점을 맞추어야 하는 산업으로써 장기적으로 기술혁신에 대한 투자가 강화되어야 한다. 특히 울산은 유형 3

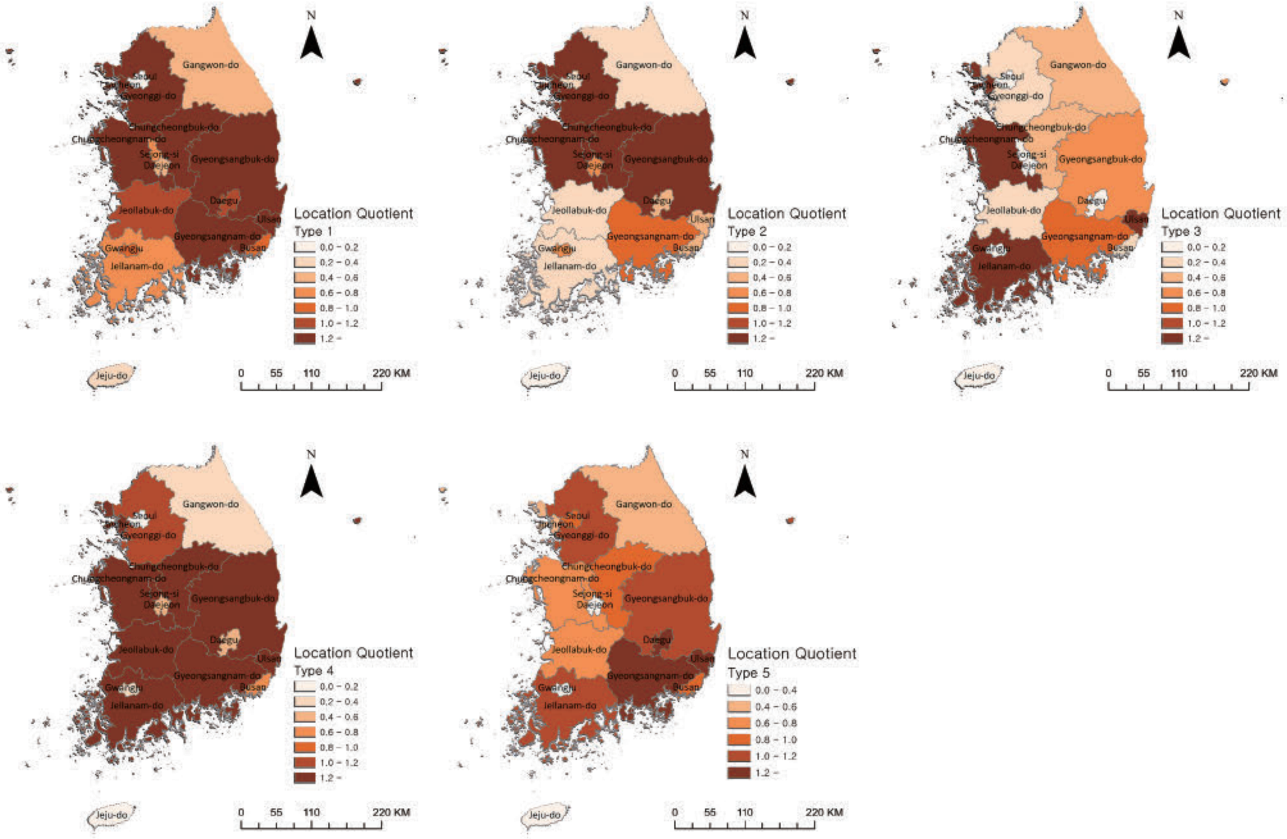

Figure 4. Location quotient by type

에 대한 입지계수가 약 16.7로 매우 높은 특화도를 보임에도 불구하고 쇠퇴형의 특징을 띄고 있다. 이러한 지역은 임시방편의 대응은 가능하겠으나 장기적으로는 전반적인 산업기반이 약화될 것으로 우려된다. 따라서 이들 지역은 기술 인프라를 지원하여 지역경쟁력을 강화하고, 저배출 산업 다각화에 초점을 맞추어야 한다. 반면 유형 3이 성장잠재형인 지역은 기술혁신 투자 강화를 통해 산업구조를 개선하여 장단기적인 저탄소 전환이 요구된다.

유형 4(고배출-중·고역량 산업)는 인천과 울산, 세종, 경기, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남에서 입지계수가 1 이상으로 나타났다. 또한 유형 4는 경기와 전남에서는 성장형, 인천과 울산, 전북, 경북, 경남에서는 경쟁강화형, 세종과 충북, 충남에서는 성장잠재형으로 나타났다. 특히 울산은 유형 4에서도 가장 높은 특화도를 가진 지역이므로 어떻게 대응하는지에 따라 지역경제에 큰 영향을 줄 수 있다. 하지만 유형 4는 유형 3에 비해 혁신역량이 우수하다는 강점이 있다. 따라서 경기를 비롯한 성장형 지역은 기술혁신을 통한 저탄소 전환에 집중할 수 있다. 인천을 비롯한 경쟁강화형 지역은 지역경쟁력 강화를, 세종을 비롯한 성장잠재형 지역은 산업구조 개선을 통한 단기적인 충격에 대응하는 한편 두 종류의 지역 모두 저탄소 기술혁신에도 소홀히 하지 않아야 한다.

유형 5(저배출-저역량 산업)는 대구와 울산, 경기, 전남, 경북, 경남에서 입지계수가 1 이상으로 나타났다. 이 중 대구, 울산, 경북, 경남에서는 산업구조효과와 지역경쟁력효과 모두 음수로 나타나는 쇠퇴형, 경기와 전남에서는 산업구조효과는 음수이나 지역경쟁력효과가 양수로 나타나 성장잠재형으로 나타난다. 유형 5는 저배출 산업이지만 대응 역량이 낮아 장단기적인 충격에 모두 대응할 필요가 있다. 대구를 비롯한 쇠퇴형 지역은 지역경쟁력 강화와 산업구조 개선을 통해 전반적인 대응 역량 향상에 초점을 맞추어야 한다. 또한 경기를 비롯한 성장잠재형 지역은 지역 특성을 고려한 산업구조 고도화를 통해 대응 역량을 강화할 필요가 있다.

한 가지 사례를 들어 구체적인 해석을 추가하고자 한다. 유형 3은 상대적으로 역량이 높은 산업임에도 불구하고 울산에서 쇠퇴형 산업으로 간주된다. 게다가 입지계수가 16.7에 달하여 해당 산업 유형에 대한 의존도가 매우 높다. 하지만 국가성장효과(1,233명)가 산업구조효과(-367명)와 지역할당효과(-676명)의 부정적인 면을 상쇄하여 전반적인 종사자 수가 증가하였다. 이는 울산에서 유형 3이 성장한 것으로 오인하게 만드는 결과를 낳는다. 이러한 상황에 안주하는 경우 잘못된 탄소중립 전략이 수립될 수 있다는 것이다.

V. 논 의

본 연구에서는 제조업을 대상으로 탄소배출 및 대응 역량 부문의 지표를 설정하고 군집분석을 통해 5개 유형으로 분류하였다.

분류된 유형은 저배출-중역량 산업, 중·저배출-중·고역량 산업, 중·고배출-중·고역량 산업, 고배출-중·고역량 산업, 저배출-저역량 산업이다. 이후 2010~2019년 동안 지역별 및 유형별 종사자 수의 변화를 동태적 변이할당분석을 이용해 국가성장효과과 산업구조효과, 지역할당효과으로 분해하였다. 산업구조효과와 지역할당효과의 부호에 따라 성장형, 경쟁강화형, 성장잠재형, 쇠퇴형으로 분류하여 지역별 전략 방향을 제시하였다.

본 연구의 분석 결과는 기존 연구에서 제시한 탄소중립 정책과 산업별 관계와 일부 유사한 경향을 보이면서도, 유형 및 지역에 따른 차별적인 영향을 추가적으로 도출하였다. 선행연구들은 탄소중립 정책이 산업에 따라 다른 영향을 미칠 뿐만 아니라 지역경제적 성장과도 관련이 있음을 밝혔다(Zhou et al., 2013; Tian et al., 2019). 본 연구에서도 탄소중립 규제로부터 받을 수 있는 영향과 대응할 수 있는 역량이 산업 유형별로 다를 수 있음을 군집분석을 통해 밝혔다. 일반적으로 유형1과 2, 5는 배출 수준이 낮은 산업, 유형 3과 4는 배출 수준이 높은 산업으로 분류되지만, 대응 역량에 따라서 다른 전략이 요구됨을 시사한다. 특히 유형 2와 4는 기술역량이 높은 유형으로 나타났으나, 탄소배출에 있어서는 전혀 다른 양상을 보임으로써 향후 저탄소 전환 과정에서 차이가 발생할 수 있다(Chen et al., 2019; Wu et al., 2021).

그러나 본 연구는 선행연구와 차별적으로 동일한 산업 유형이라도 지역에 따라 경제적 성장요인이 달라질 수 있음을 정량적으로 제시하였다. 유형 2와 3, 4가 대응 역량이 높은 수준이라 하더라도 특정 지역에 따라서 산업구조효과와 지역할당효과의 부호가 반대로 작용하는 것으로 나타났다. 특히 유형 3의 특화도가 매우 높은 울산의 경우 산업구조효과와 지역할당효과가 음수임에도 불구하고 국가성장효과가 이를 상쇄하여, 마치 해당 산업이 성장하는 것처럼 보일 수 있다는 것이다. 이러한 상황에서 산업별 및 지역별 정책 초점이 잘 못 설정되는 경우 지역경제적 부담으로 작용할 가능성이 있음을 시사한다(Yu et al., 2024; Pan et al., 2023; Zheng et al., 2021).

Ⅵ. 결 론

본 연구는 탄소중립 정책에 민감한 산업을 도출하기 위해 탄소배출 및 대응 역량 부문 지표를 설정한 후 계층적 군집분석을 통해 제조업을 5개 유형으로 분류하였다. 이후 동태적 변이할당분석을 이용하여 지역별 및 유형별 2010~2019년 종사자 수 변화에 기여한 요인을 분해하였다. 본 연구를 통해 동일한 산업 유형이라도 지역별 성장 혹은 쇠퇴에 기여한 요인이 다르다는 점을 체계적으로 밝혀낼 수 있었다. 주목할 만한 점은 높은 대응 역량을 가진 유형이라도 산업구조와 지역경쟁력이 부정적으로 작용하는 지역이 있는 것으로 나타났고, 심지어 국가성장효과를 상쇄하여 전반적인 고용 감소로 이어지는 경우도 존재했다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내리고자 한다.

산업별 탄소중립 전략은 배출 수준뿐만 아니라 대응 역량, 지역별 특성을 종합적으로 고려해야 한다. 고배출 산업구조를 가진 지역은 고용과 생산 등에 단기적으로 큰 충격이 발생할 가능성이 크므로 이를 완화하기 위한 일자리 전환 정책이 요구된다. 저배출 혹은 저역량 산업구조를 가진 지역은 장기적인 규제에 대응하기 위해 탄소중립 기술개발에 초점을 맞추어야 한다. 또한 올바른 대응을 위해서는 지역 내·외부적인 명확한 진단이 필요하다. 기존에 지속되어 왔던 입지계수 기반의 성장전략만을 유지하는 경우 지역 내부적인 경쟁력이 고려되지 않을 가능성이 크다. 산업구조의 문제라면 산업다양성 확보와 산업 간 일자리 연계 등의 전략이 요구될 것이며, 지역 여건의 문제라면 인프라 개선과 인적자본 강화 등 지역 자원의 개발에 초점을 맞추어야 할 것이다.

본 연구의 한계는 탄소중립 정책이 미치는 영향의 방향을 고려하지 못했다는 점이다. 정책의 효과는 매우 다양하고 복잡하므로 지역경제에 악영향을 미칠 수 있지만, 성장의 기회가 될 수도 있다. 이에 따라서 지역의 대응 전략은 보다 세분화될 수 있다. 또한 산업 간 혹은 지역 간 연관성을 고려하지 않았다. 현실에서는 이러한 연관관계에 따라 규제의 충격이 전이되어 파급되므로, 산업연관분석이나 전후방 연쇄효과를 고려할 필요가 있다.

인용문헌
References

1. 김대중·김태연, 2014. “지역전략산업의 지역경제성장 효과분석: 충청남도를 중심으로”, 「한국산학기술학회논문지」, 15(4): 2085-2092.
   Kim, D.J. and Kim, T., 2014. “An Analysis of the Effect of Regional Strategic Industries on Regional Economic Growth: The Case of ChungNam Province”, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 15(4): 2085-2092.
2. 김수이·조경엽·노동운, 2010. “국내 온실가스 감축정책의 지역별 효과 분석”, 「한국경제연구」, 28(3): 29-57.
   Kim, S., Cho, G., and Noh, D., 2010. “Regional Impacts Analysis of Domestic GHG Mitigation Policy”, *Journal of Korean Economy Studies*, 28(3): 29-57.
3. 나주몽·김재영, 2022. “변이할당분석을 통한 지역성장률 격차요인 변화와 지역대표산업의 산업경쟁력 분석: 광주전남을 중심으로”, 「산업경제연구」, 35(2): 173-201.
   Na, J.M. and Kim, J.Y., 2022. “Changes in Gap Factors of Regional Growth Rate and Industrial Competitiveness of Regional Representative Industries using Shift-Share Analysis: Focusing on the Gwangju Region and Jeollanam Region”, *Journal of Industrial Economics and Business*, 35(2): 173-201.
4. 민은지·윤남준, 2021. 「국제사회의 탄소중립 추진 현황 및 경제적 영향」, 한국은행.

Min, E.J. and Yoon, N.J., 2021. *Current Status of Global Carbon Neutrality Efforts and Their Economic Impact*, Bank of Korea.

5. 박경훈·박종욱·박상우·임준혁·김찬우·이종웅·곽윤영, 2021. "기후변화 대응이 거시경제에 미치는 영향", 「BOK 이슈노트」, 23.
Park, K., Park, J., Park, S., Lim, J., Kim, C., Lee, J., and Gwak, Y., 2021. "The Impact of Climate Change Response on the Macroeconomy", *BOK Issue Note*, 23.

6. 박종욱, 2024. "탄소세 도입의 지역별 및 산업별 영향 분석: 에너지 연소 온실가스 배출량을 중심으로", 「자원환경경제연구」, 33(1): 87-112.
Park, J., 2024. "The Impacts of Carbon Taxes by Region and Industry in Korea: Focusing on Energy-burning Greenhouse Gas Emissions", *Environmental and Resource Economics Review*, 33(1): 87-112.

7. 산업통상자원부, 2023. 「4대업종 탄소중립 기술개발 본격 착수」, 세종.
Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023. *Full-scale Initiation of Carbon Neutral Technology Development in Four Major Industries*, Sejong.

8. 안예현·윤은주·박종화·김은화·홍나은, 2022. 「탄소중립 전환 취약지역 지원방안 연구」, 세종: 국토연구원
An, Y., Yoon, E., Park, J., Kim, E., and Hong, N., 2022. *A Study on Policies for Vulnerable Regions Affected by the Transition to Net Zero*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.

9. 유이선·변창욱·최윤기·김지수·최성웅·이준영·배진원·조성민, 2022. 「지역의 탄소중립 수용력 진단과 중장기 대응 전략 연구」, 세종: 산업연구원.
Yoo, Y., Byeon, C.U., Choi, Y.K., Kim, J., Choi, S., Lee, J., Bae, J., and Cho, S.M., 2022. *A Study on 2050 Carbon Neutrality from the Perspective of Regional Policy: Policy Capacity and Strategies*, Sejong: Korea Institute for Industrial Economics and Trade.

10. 유종현·최요한·오진호, 2024. "한국의 기후변화 경제적 비용 추정: 피해비용과 탄소 감축비용을 모두 고려하여", 「경제학연구」, 72(2): 5-31.
Yoo, J., Choi, Y.H., and Oh, J.H., 2024. "Economic Impacts of Climate Change in Korea: Accounting for Climate Damage and Carbon Abatement Costs", *The Korean Journal of Economic Studies*, 72(2): 5-31.

11. 이지원, 2023. "국내 기후변화 물리적 리스크의 실물경제 영향 분석", 「BOK 경제연구」, 26.
Lee, J.W., 2023. "Analysis of the Impact of Domestic Climate Change Physical Risks on the Real Economy", *BOK Economic Research*, 26.

12. 조경엽·김영덕, 2013. "탄소세 도입이 지역경제에 미치는 영향에 대한 실증 분석", 「환경정책연구」, 12(3): 123-159.
Cho, G. and Kim, Y., 2013. "The Impacts of CO2 Tax on the Regional Economies in Korea", *Journal of Environmental Policy*, 12(3): 123-159.

13. 통계청, 2024a. 「광업제조업조사」, 대전.
Statistics Korea, 2024a. *Mining and Manufacturing Survey*, Daejeon.

14. 통계청, 2024b. 「전국사업체조사」, 대전.
Statistics Korea, 2024b. *Census on Establishments*, Daejeon.

15. 통계청, 2024c. 「경제총조사」, 대전.
Statistics Korea, 2024c. *Economic Census*, Daejeon.

16. Chen, X., Chen, Y.E., and Chang, C., 2019. "The Effects of Environmental Regulation and Industrial Structure on Carbon Dioxide Emission: A Non-linear Investigation", *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(29): 30252-30267.

17. Dai, W., Cheng, M., and Zheng, L., 2023. "The Effect Exerted by Environment Regulation on Industrial Structure Optimization: Evidence of 286 China's Cities on the Prefecture Level", *Heliyon*, 9(5): e16406.

18. Hanoteau, J. and Talbot, D., 2019. "Impacts of the Québec Carbon Emissions Trading Scheme on Plant-level Performance and Employment", *Carbon Management*, 10(3): 287-298.

19. Huang, T. and Sun, Z., 2023. "Climate Policy Uncertainty and Firm Investment", *International Journal of Finance and Economics*, 29(4): 4358-4371.

20. Jain, A.K., 2010. "Data Clustering: 50 Years beyond K-means", *Pattern Recognition Letters*, 31(8): 651-666.

21. Kotz, M., Levermann, A., and Wenz, L., 2024. "The Economic Commitment of Climate Change", *Nature*, 628(8008): 551-557.

22. Liu, Z., Deng, Z., He, G., Wang, H., Zhang, X., Lin, J., and Liang, X., 2021. "Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China", *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(2): 141-155.

23. Liu, B., Meng, L., Nie, B., Shi, J., and Li, Y., 2023. "Regional Disparities and Drivers of Carbon Emissions in China: A Temporal-spatial Production-theoretical Decomposition Analysis", *Science Progress*, 106(1): 368504231163145.

24. Mo, J.Y., 2023. "Do Environmental Policy and Innovation Improve Carbon Productivity? Evidence from the Korean Emission Trading Scheme", *Energy & Environment*, 34(3): 445-462.

25. Mo, J.Y., 2024. "Dynamics of Innovation Activity and Carbon Emission: An Empirical Analysis from Korean Manufacturing Industries", *Technology Analysis & Strategic Management*, 36(8): 1665-1679.

26. Pan, X., Wang, M., and Li, M., 2023. "Low-carbon Policy and Industrial Structure Upgrading: Based on the Perspective of Strategic Interaction among Local Governments", *Energy Policy*, 183: 113794.

27. Shang, L. and Xu, P., 2022. "Can Carbon Emission Regulation Achieve a Dual Target of Low Carbon and Employment? An Empirical Analysis Based on China's Provincial Panel Data", *Frontiers in Energy Research*, 10.

28. Tian, X., Bai, F., Jia, J., Liu, Y., and Shi, F., 2019. "Realizing Low-carbon Development in a Developing and Industrializing Region: Impacts of Industrial Structure Change on CO2 Emissions in Southwest China", *Journal of Environmental Management*, 233: 728-738.

29. Wang, C., Zhang, X., Wang, F., Lei, J., and Zhang, L., 2015. "Decomposition of Energy-related Carbon Emissions in

Xinjiang and Relative Mitigation Policy Recommendations", *Frontiers of Earth Science*, 9(1): 65-76.

30. Wang, Z., Gong, Z., and Zhou, F., 2025. "Improving the Employment in Less-developed Areas through Low-carbon City Pilot Policy: A Study on Old Revolutionary Areas in China", *Science Progress*, 108(1): 368504251320699.

31. Wen, H., Chen, S., and Lee, C., 2023. "Impact of Low-carbon City Construction on Financing, Investment, and Total Factor Productivity of Energy-intensive Enterprises", *The Energy Journal*, 44(2): 79-102.

32. Wu, L., Sun, L., Qi, P., Ren, X., and Sun, X., 2021. "Energy Endowment, Industrial Structure Upgrading, and CO2 Emissions Iin China: Revisiting Resource Curse in the Context of Carbon Emissions", *Resources Policy*, 74: 102329.

33. Xia, X.H., Huang, G.T., Chen, G.Q., Zhang, B., Chen, Z.M., and Yang, Q., 2011. "Energy Security, Efficiency and Carbon Emission of Chinese Industry", *Energy Policy*, 39(6): 3520-3528.

34. Yang, B., Liu, C., Su, Y., and Jing, X., 2017. "The Allocation of Carbon Intensity Reduction Target by 2020 Among Industrial Sectors in China", *Sustainability*, 9(1): 148.

35. Yu, B., Xu, Z., Du, C., Xu, J., Pan, Y., Zhou, J., and Shan, Y., 2024. "Spatiotemporal Evolution and Drivers of Carbon Inequalities in Urban Agglomeration: An MLD-IDA Inequality Indicator Decomposition", *Ecological Indicators*, 162: 112004.

36. Yu, X., Lu, B., and Wang, R., 2018. "Analysis of Low Carbon Pilot Industrial Parks in China: Classification and Case Study", *Journal of Cleaner Production*, 187: 763-769.

37. Zhang, Y. and Hao, J., 2017. "Carbon Emission Quota Allocation among China's Industrial Sectors Based on the Equity and Efficiency Principles", *Annals of Operations Research*, 255(1-2): 117-140.

38. Zhang, H., Sun, X., Ahmad, M., and Wang, X., 2024. "Heterogeneous Impacts of Carbon Emission Trading on Green Innovation: Firm-level in China", *Energy & Environment*, 35(7): 3504-3529.

39. Zheng, J., Shao, X., Liu, W., Kong, J., and Zuo, G., 2021. "The Impact of the Pilot Program on Industrial Structure Upgrading in Low-carbon Cities", *Journal of Cleaner Production*, 290: 125868.

40. Zhou, X., Zhang, J., and Li, J., 2013. "Industrial Structural Transformation and Carbon Dioxide Emissions in China", *Energy Policy*, 57: 43-51.

41. Zhou, J., Li, Y., Huo, X., and Xu, X., 2019. "How to Allocate Carbon Emission Permits among China's Industrial Sectors Under the Constraint of Carbon Intensity?", *Sustainability*, 11(3): 914.

42. 통계청, 2024d.9.30. "경제활동별 국내총생산(당해년가격)", https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_2KAA903&conn_path=I2.
Statistics Korea, 2024, Sep. 30. "Gross Domestic Product by Economic Activity (Current Year Prices)", https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_2KAA903&conn_path=I2.

43. 한국에너지공단, "산업부문 온실가스 배출량 조사보고서(각 연도)", 2024.7.3. 읽음. https://min24.energy.or.kr/netis/CST/home.do.
Korea Evergy Agency, "Survey Report on Greenhouse Gas Emissions in the Industrial Sector (Annual)", Accessed July 3, 2024. https://min24.energy.or.kr/netis/CST/home.do.

44. 환경부, 2022.10.25. "국가 온실가스 인벤토리(1990-2020)", https://www.gir.go.kr/home/main.do.
Ministry of Environment, 2022, Oct. 25. "National GHG Inventory(1990-2020)", https://www.gir.go.kr/home/main.do.

45. IEA, 2022. Sep. 16. "Greenhouse Gas Emissions from Energy Highlights", https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy-highlights.

Date Received	2025-02-13
Date Reviewed	2025-04-27
Date Accepted	2025-04-27
Date Revised	2025-07-17
Final Received	2025-07-17