

우리나라 온실가스 배출량 결정요인 분석: 16개 광역지자체 자료를 바탕으로[†]

진태영*

요약 : 본 연구에서는 16개 광역지자체 자료를 활용하여 온실가스 배출량의 결정요인을 분석하였다. 분석 모형으로는 환경적 영향을 확률론적 방법으로 모델링하는 STIRPAT 모형이 사용되었다. 동질적 패널 분석과 이질적 패널 분석이 활용되었다. 동질적 패널 분석 결과가 패널 자료의 특성상 왜곡될 수 있다는 점에 착안하여 횡단면 의존성 검정과 기울기 동질성 검정을 수행하였으며, 검정 결과 횡단면 의존성을 고려하고 기울기 이질성을 반영할 수 있는 추정치를 활용함이 적합한 것으로 확인되었다. 이에 따라 이질적 패널 분석을 주요 추정 결과로 제시하였으며, 추정 결과 온실가스 배출량의 핵심 요인은 소득변수(1인당 GRDP)와 에너지효율(에너지원단위)인 것으로 확인되었다. 오히려 인구는 온실가스 배출에 있어 핵심변수가 아닌 것으로 나타났으며, 지역별 산업구조(서비스업 비중) 역시 잠재적으로 온실가스 배출 결정요인인 것으로 도출되었다. 환경 쿠즈네츠 곡선 가설 검정 결과 통계적으로 유의하지 않았으며, 지자체별로 소득 증가 및 경제발전보다는 에너지효율화를 통한 온실가스 감축이 가장 효과적인 정책도 구할 것으로 보인다.

주제어 : 온실가스 배출량, STIRPAT, 광역지자체, 탄소중립

JEL 분류 : Q54, Q50, Q49

접수일(2024년 7월 17일), 수정일(2024년 8월 16일), 게재확정일(2024년 8월 23일)

[†] 이 논문은 2024년도 전북대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2023-00218913).

* 전북대학교 자원에너지공학과 조교수, 단독저자(e-mail: tyjin@jbnu.ac.kr)

Determinants of Korean Greenhouse Gas emissions revisited: Based on 16 Metropolitan City Data[†]

Taeyoung Jin*

ABSTRACT : This study analyzes the determinants of greenhouse gas emissions using data from 16 metropolitan municipalities in South Korea. The STIRPAT model, which probabilistically models environmental impacts, was employed for the analysis. Both homogeneous and heterogeneous panel analyses were utilized. Recognizing that results from homogeneous panel analysis could be distorted due to the characteristics of panel data, cross-sectional dependence and slope homogeneity tests were conducted. The tests indicated that it is appropriate to use estimates that consider cross-sectional dependence and reflect slope heterogeneity. Therefore, the results from heterogeneous panel analysis were presented as the main findings. The analysis identified income (per capita GRDP) and energy efficiency (energy intensity) as key determinants of greenhouse gas emissions. Conversely, population was found not to be a key factor, and the industrial structure of the regions (share of the service industry in value-added) was also identified as a potential determinant of greenhouse gas emissions. The hypothesis of the Environmental Kuznets Curve was not statistically significant, suggesting that improving energy efficiency, rather than income growth and economic development, would be the most effective policy tool for reducing greenhouse gases in each municipality.

Keywords : GHG emissions, STIRPAT, Metropolitan city, Net-zero

Received: July 17, 2024. Revised: August 16, 2024. Accepted: August 23, 2024.

[†]This paper was supported by research funds for newly appointed professors of Jeonbuk National University in 2024.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(No.RS-2023-00218913).

* Assistant Professor, Jeonbuk National University, Sole author (e-mail: tyjin@jbnu.ac.kr)

1. 서론

온실가스 배출은 기후변화 대응을 위해 감축해야 하는 요인으로 손꼽힌다. 이산화탄소, 메탄 등의 온실가스가 기후변화를 유발한다는 것에 대한 과학적 합의가 도출되었기 때문이다(McCright et al., 2013). 기후변화에 관한 정부간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간한 1.5°C 특별보고서에서는 글로벌 온도 상승을 섭씨 1.5도 이내로 제한해야 한다는 내용을 담고 있다(Rogelj et al., 2018). 매년 개최되는 당사국총회(COP)에서는 국제적 기후변화 대응을 위해 규범을 수립하고 국제 협력을 논의하는 등의 노력을 기울이고 있다(외교부, 2022). 또한 기후변화로 인한 피해가 서서히 가시화됨에 따라 세계 각국에서는 온실가스 순배출량을 ‘0’으로 만드는 탄소중립(net-zero) 목표를 내걸거나 정책을 수립하고 있다(Climate Action Tracker, 2024). 이렇듯 온실가스 감축을 통한 기후변화 대응과 탄소중립은 한 국가의 문제가 아닌 글로벌 규범으로 자리 잡았다.

우리나라에서도 파리협정(Paris Agreement)을 비준함에 따라 매 5년마다 자발적 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 제출하고 이행경로를 점검하도록 하고 있다.¹⁾ 우리나라의 NDC는 2030년까지 2018년 배출량 대비 40%를 감축된 배출량을 달성하겠다는 것이다(관계부처합동, 2023). 또한, 이와는 별개로 2021년에 2050년까지의 탄소중립 여정을 담은 2050 탄소중립 시나리오를 고려할 때(관계부처합동, 2021), 탄소중립이라고 제시된 목표에서 NDC가 중간 감축목표로서 역할을 수행한다고 볼 수 있다. 우리나라의 온실가스 배출량은 2018년에 우리나라 온실가스는 총배출량은 최고점을 달성한 후 낮아지고 있는 추세이다(온실가스종합정보센터, 2023). 2020년 COVID-19 창궐 이후 2021년에 경제가 회복되면서 온실가스 배출량이 반등했으나 2018년의 정점을 초과하지는 않았다(이상엽 외, 2021). 이렇게 반등한 온실가스 배출량을 관리하여 NDC 및 탄소중립을 달성하도록 관리하는 방안이 필요하다(김동구·손인성, 2018).

1) 외교부 홈페이지

한편, 우리나라에서는 문재인 정부 때부터 기존의 저탄소 녹색성장 기본법을 폐기하고, 근간을 유지하면서 탄소중립 녹색성장 기본법을 내세웠다. 이렇게 법이 개정됨에 따라 기존의 녹색성장 5개년 계획은 명맥을 잃었으며, 대신 과거 녹색성장 계획과 국가 NDC를 한데 담은 제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획이 발표되었다(관계부처합동, 2023). 저탄소 녹색성장 기본법이 포함하고 있던 에너지기본계획이 탄소중립 녹색성장 기본법으로 바뀌면서 포함되지 않으면서 지위를 잃게 되었으며, 에너지기본계획의 하위 계획으로 지자체들이 별도로 수립하던 지역에너지계획도 함께 명맥을 유지하지 않게 되었다. 대신 탄소중립 녹색성장 기본계획하에서 요구하는 바와 같이 각 지자체별로 탄소중립 계획을 수립하게 되었다. 이로 인해 각 지자체에서는 지자체별 에너지 및 온실가스 현황을 파악하고 장기 전략을 수립하게 되어 있다.

탄소중립 녹색성장 기본법 제11조에서 자발적 탄소중립 계획 수립을 요구하는 광역자치단체에서는 이미 지역에너지계획을 수립했던 경험이 있고 지자체 발전계획 등 중장기 계획 수립 역량이 검증되어 있기 때문에 큰 어려움이 없을 것으로 보인다. 반면, 동법 제12조에서는 기초지자체까지도 포함하고 있기 때문에 어려움을 겪을 것이다(진상현, 2022). 온실가스종합정보센터에서 기초지자체 단위로도 온실가스 배출량을 모니터링하고 있기는 하지만(온실가스종합정보센터, 2022), 지자체별로 이를 감축하기 위해 다양한 에너지 및 산업분야의 현황을 살펴보고 정책을 수립해야 하기 때문이다.

최근까지 온실가스 감축목표 할당 등 하향식 접근법을 가지던 정책 경향성과는 달리, 탄소중립 정책들의 경우 지자체별 정책 수립과 상향식 목표설정이 균형점을 가지도록 상-하향의 균형을 추구할 것으로 보인다. 이에 따라 온실가스 감축 정책에 있어서 각 광역지자체와 기초지자체의 권한과 책임이 강화될 것으로 판단된다. 각 지자체별로 온실가스 감축을 위한 에너지 및 환경, 산업 정책을 지자체 실정에 맞게 수립해야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 지자체별로 온실가스 배출량의 결정요인을 분석하고 새로운 시각을 제시하면서 시의적절하게 온실가스 감축을 위한 정책 제언을 시도하고자 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 온실가스 배출량 결정요인과 관련된 선행연구를 분석한다. 제3장에서는 본 연구에서 활용한 패널 분석 방법론을 설명한다. 제4장에서는 분석 결과를 요약하고, 제5장에서는 연구를 결론짓는다.

II. 선행연구

본 장에서는 온실가스 배출량 관련 선행연구를 정리한다. 온실가스 배출량을 정량적으로 분석한 연구는 대부분이 배출량 요인분해 기법을 활용해 변화요인 분석을 수행하거나, 계량경제학적 기법을 활용해 결정요인을 분석한 연구에 해당한다. 본 연구는 이 두 카테고리 중에서는 후자에 해당한다. 온실가스 배출량 변화요인 분석과 계량경제 기법 둘 다 동일한 이론적 기반을 둔 분석 프레임워크를 사용하기 때문에, 두 문헌 종류 모두 분석하여 연구 격차(research gap)를 도출하고자 한다.

먼저 온실가스 배출량 변화요인 분석을 수행하는 요인분해분석(index decomposition analysis, IDA)을 활용한 문헌이 있다. IDA의 경우 여러 분석 모형이 있었으나, 최근 들어서는 Ang(1994)에서 산업부문 에너지 소비량 변화요인 분해분석을 위해 제안된 로그 평균디비지아지수(log mean Divisia index, LMDI)을 활용한 분석 기법이 주를 이루고 있다. IDA 방법론은 그 특성상 완결성, 시간가역성, 요소 가역성, 영값에 대한 강건성이 라는 조건을 만족해야 한다(김진수, 2015). 완결성의 경우 분해 시 잔차가 남지 않고 깔끔하게 분해됨을 뜻하며, 시간 및 요소가역성은 각각 시간 순서와 요소 순서를 바꾸어 분석해도 동일 결과가 도출됨을 의미한다. 영값에 대한 강건성은 분석 자료에 영값이 존재하더라도 문제 없이 분석되어야 함을 뜻한다. LMDI는 위의 요소를 모두 만족하는 것으로 밝혀졌으며(Ang, 2004), 적용의 용이성과 직관적이라는 특징으로 인해 많은 연구자들이 활용해 논문을 작성하고 있다. 최근 들어 출판되는 에너지 소비 및 온실가스 배출량 관련 분해분석 연구는 대부분 LMDI 기법에 기반을 두고 있다고 해도 과언이 아니다.

상술하였듯 LMDI 방법론이 처음 제시된 배경은 에너지 소비량을 지수이론(index theory)으로 설명하기 위함이었다. 그러나 Ehrlich and Holdren(1971)의 IPAT(Impact, Population, Affluence, and Technology)²⁾ 이론이 온실가스 관련 분석 프레임워크로서 Kaya 항등식 형태로 구체화되면서 온실가스 배출량 변화요인을 IDA로 분석하도록 발전하였다(Kaya and Keiichi, 1997). IDA는 직관적으로 변화요인을 분해하는 결정론적 방법에 해당하며, 반면 IPAT 모형을 확률론적 방법으로 추정하는 방식이 제안된 모형이

2) IPAT(Impact, Population, Affluence, and Technology)은 환경적 영향(Impact)을 인구, 소득, 기술변수로 설명하고자 하는 모형이다.

Dietz and Rosa(1997)의 STIRPAT³⁾ 모형이다. 계량경제학적 분석 기법을 활용해 온실가스 배출량 결정요인을 파악하는 문헌은 대부분이 STIRPAT 모형에 기반을 두고 있다.

먼저 IDA 문헌을 정리하고자 한다. LMDI를 활용해 우리나라에서 온실가스 배출량 변화요인을 분석한 사례는 꾸준히 존재해 왔으며, 지역별 온실가스 배출량, 기업 대상 온실가스 배출량, 산업부문, 수송부문 등 다양한 부문을 대상으로 분석이 수행되었다. 먼저 우리나라 온실가스 배출량 전반을 다룬 연구는 진태영 외(2020)의 연구가 있다. 이 연구에서는 온실가스 배출량 변화요인을 파악하기 위해 인구 효과, 소득 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 믹스 효과, 에너지 전환 및 배출계수 효과를 살펴볼 수 있도록 Kaya 항 등식을 연장하였고, 구조 효과 및 집약도 효과, 배출계수 효과가 온실가스 감축요인으로 작용하였음을 보였다.

기업을 대상으로 한 연구의 경우, 김문정·허은녕(2020)의 배출권거래제 참여기업 대상으로 한 온실가스 배출 변화요인 분해분석이 있다. 이 연구에서는 온실가스 배출량을 매출액 효과인 생산효과, 산업구조 효과인 구조효과, 에너지 집약도 효과, 배출계수 효과인 4개 요인으로 분해하였는데, 구조효과와 집약도 효과가 꾸준한 배출량 감소 요인으로 작용함을 밝혀내었다. 이후 박년배(2023)의 연구에서 국내 탄소중립 선언 기업만을 대상으로 비교적 짧은 기간에 대해(2019~2021년) 온실가스 배출량 변화요인 분석을 수행하였다. 이 연구에서는 기업의 경우 에너지 집약도 효과와 배출계수 효과가 감축요인으로서 작용했음을 보였다.

산업부문을 대상으로 한 온실가스 배출량 변화요인 분석은 박년배·심성희(2015)가 유일하다고 할 수 있다. 2004년부터 2011년까지 온실가스 감축목표 업종체계를 바탕으로 산업을 분류하여 온실가스 배출량 동인을 파악한 이 연구는 구조 효과만이 온실가스 감축 요인으로 작용한다고 지적하였다. 김문정·허은녕(2020)의 연구와 연계하여 살펴보면, 에너지 집약도 효과(i.e. 에너지 효율 효과)가 해당 분석 기간 동안 온실가스 감축요인으로 작용하지 않았다는 점으로 미루어 볼 때, 2010년대 중반까지는 에너지 효율 향상을 통한 온실가스 감축이 이루어지지 못했으나 최근 들어서 효과를 거두고 있는 것을 알 수 있다.

3) STIRPAT(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) 모형은 IPAT 모형을 확률론적 방법으로 추정하는 모든 모형을 포괄한다.

단일 업종 혹은 부문을 대상으로 한 연구는 조용성(2017)의 전력산업 대상 배출요인 분석 연구가 있다. 이 연구에서는 전력산업의 온실가스 배출량을 경제발전효과와 전력 집약도 효과, 에너지 전환 효과와 발전구조 변화로 분해하였고, 에너지 전환과 화력발전 비중 감소에 따라 온실가스가 감축되었다는 결과를 도출하였다. 상기한 연구들과는 달리 에너지 효율을 나타내는 전력집약도 효과는 증가요인으로 작용하였다. 이재형(2018)과 장명진 외(2021)의 경우 각각 철도부문과 수송부문을 대상으로 하여 온실가스 배출량을 평가하였다. 이호상·서진호(2023)는 제지산업을 대상으로 지중별 온실가스 배출량을 요인분해하였는데, 해당 부문의 생산량 증가에 따라 증가하여 온실가스가 증가하였으나 생산과정에서 소비되는 재생에너지 비중이 증가하여 온실가스가 감소한 것으로 나타났다.

마지막으로, 지역 간 온실가스 배출 변화요인을 비교한 연구는 진상현·정경화(2013)와 조향숙(2017)이 있다. 진상현·정경화(2013)은 우리나라 16개 광역지자체를 바탕으로 분석하였으며, 조향숙(2017)은 OECD 7개 국가를 바탕으로 온실가스 배출 변화요인을 도출하였다. 지자체별 분석 결과 광역지자체의 온실가스 배출 요인에 따라 특성을 유형화할 수 있었으나, 산업구조에서 발생가능한 지역별 차이는 LMDI로 분석할 때 단순화되는 경향이 있기 때문에 해석에 유의해야 함을 밝혔다. OECD 7개 국가를 대상으로 한 분석 결과에서는 에너지 집약도 효과와 탄소세 정책 효과가 가장 큰 감축요인인 것으로 나타났다.

계량경제학적 추정 방법론을 활용해 온실가스 배출량 결정요인을 파악한 연구도 지속적으로 수행되고 있다. 오진·김현중(2022)의 연구에서는 제조업 부문의 집적이 탄소 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 공간패널 분석을 수행하였으며, 제조업의 집적이 인근 지역의 온실가스 배출량을 증가시킬 수 있음을 제시하였다. 진보영 외(2020)는 IPAT 기반 모형 분석이라기보다는 한국의 경제성장, 전력소비량, 이산화탄소 배출량과 환경규제 간의 nexus를 분석한 사례이며, 패널분석이 아닌 시계열 자료 기반으로 벡터 오차수정모형을 사용하였다. 분석 결과 경제성장과 이산화탄소 배출량 간에는 양방향 인과관계가 있음을 도출하였다. 신석하(2014)에서도 동일한 모형을 사용하여 우리나라의 탄소배출량, 소득수준, 기술수준, 에너지 가격 간의 관계를 분석하였으며, 기술수준의 향상과 에너지 가격 상승이 탄소배출량을 감소시킬 수 있음을 제시하였다.

STIRPAT 기반 모형을 사용하여 온실가스 결정요인 분석을 수행함에 있어 도시화율을 핵심 변수로 활용한 경우도 있다. 이효진·강명구(2012)의 연구에서는 107개국을 대상으로 도시화율이 온실가스 배출량을 증가시키는 요인임을 확인하였다. 진태영·김진수(2017)의 연구에서도 동일한 결과가 도출되었으며, 윤정혜·강상목(2023)의 ASEAN 국가 대상 분석에서도 도시화율은 온실가스 증가 요인으로 나타났다. 마찬가지로 여러 국가를 대상으로 한 온실가스 배출 결정요인 분석은 온실가스-경제성장 간의 탈동조화를 살펴본 임형우·조하현(2019)과 환경 쿠즈네츠 곡선(environmental Kuznets curve, EKC) 가설을 살핀 허가형(2022)의 사례가 있다.

국내 지자체별 자료를 활용한 분석이 없었던 것은 아니다. 서형준·이형석(2019)에서는 온실가스 배출효율을 맘퀴스트 지수를 활용하여 지자체별로 분석하였다. 김소연·류수열(2019)의 연구에서는 오진·김현중(2022)과 마찬가지로 공간패널 모형을 사용하여 국내 16개 광역지자체를 바탕으로 온실가스 배출 결정요인을 분석하였다. 인구밀도와 무역개방도, 제조업 비중이 온실가스 배출을 증가시키는 요인이며, 환경 쿠즈네츠 곡선 가설도 성립함을 보였다. 이광훈(2010)의 연구에서도 지역별 이산화탄소 배출량을 활용한 환경 쿠즈네츠 곡선 가설을 확인한 사례가 있다.

김소연·류수열(2021)의 연구에서는 본 연구의 분석 프레임워크와 마찬가지로 이질적 패널 분석법을 적용하여 16개 광역지자체 대상 온실가스 배출 변화요인을 분석한다. 그러나 이 연구에서는 에너지 소비량 바탕으로 추산한 온실가스 배출량을 자료로 사용해 자료에 내생성이 존재할 수 있다. 진상현(2024)의 연구에서도 패널분석을 활용해 16개 광역지자체를 대상으로 한 온실가스 배출 영향요인을 분석하였으나 동질적 패널 분석과 같이 단순화된 모형을 사용하여 다양한 변수 활용을 탐색함이 부족했다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 한계점들을 극복하기 위해 동질적 패널과 이질적 패널 분석을 함께 시도하며, 기존 Kaya 항등식 외에도 지자체별 산업구조(서비스업 비중) 등을 반영하여 분석하고 시사점을 제시하고자 한다.

Ⅲ. 분석 자료 및 방법론

본 연구에서는 16개 광역지자체 기준으로 패널 분석을 활용하여 온실가스 배출량의

결정요인을 분석하고자 한다. 분석에 있어서는 IPAT 모형에 기반을 둔 STIRPAT 모형을 채택하였다. STIRPAT 모형을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (1)$$

위 수식에서 I 는 환경적 영향(impact), P 는 인구(population), A 는 경제적 부를 나타내는 소득(affluence), T 는 기술(technology)을 나타낸다. 소득 변수는 1인당 GRDP로 표현할 수 있으며, 기술 변수는 에너지원단위가 사용된다. STIRPAT 모형은 기존 IPAT 모형을 확률론적 방법으로 추정하기 위해 개정한 수식이라 할 수 있으며, $a \sim e$ 는 각 변수가 확률적으로 환경요인에 영향을 미치는 정도를 나타내는 추정계수이다. 그리고 식 (2)를 자연로그 변환하면 아래와 같이 선형 모형으로 나타낼 수 있다.

$$\ln I_{it} = \ln a + b \ln P_{it} + c \ln A_{it} + d \ln T_{it} + e_{it} \quad (2)$$

i 와 t 는 각각 횡단면과 시계열을 나타내는 지수이다. 본 연구에서 i 는 광역지자체를 나타내며, t 는 연도를 가리킨다.

본 연구에서 수집한 자료는 16개 광역지자체 자료이며, IPAT 모형에 기반을 두기 때문에 지자체별 온실가스 배출량, 인구, 지역별 소득(GRDP), 에너지원단위 변수 등에 대한 수집이 필요하다. 여기에 추가적인 변수로 서비스업의 비중, 지자체별 인구비중 등을 활용하였다. <표 1>에 수집된 변수의 기술통계량이 나와 있다. 16개 광역지자체를 대상으로 1996년부터 2021년까지의 자료를 수집하였으므로 변수별로 총 416개의 관측치를 가진다. 지자체별 온실가스 배출량의 경우 온실가스종합정보센터(2023)로부터 수집하였으며, 에너지 소비량 자료는 에너지경제연구원(2023)의 지역에너지통계연보를 활용하였다. GRDP 자료의 경우 통계청의 시도별 경제활동별 지역 내 총생산 자료를, 지역별 인구 및 인구비중 자료는 e-나라지표의 지역별 인구 및 인구밀도 자료를 사용하였다.

STIRPAT 모형에 투입되는 변수는 인구, 1인당 GRDP, 에너지원단위이므로 수집된 GRDP, 인구, 에너지소비량 자료를 바탕으로 변환하였다. 1인당 GRDP는 GRDP를 인구로 나누었고, 에너지원단위는 에너지소비량을 GRDP로 나누어 도출하였다. 서비스

업 비중의 경우 자료를 바탕으로 GRDP 출처와 동일하게 시도별 경제활동별 지역 내 총생산 자료로부터 서비스업 부가가치 생산량의 비중을 추출하였다.

수집 과정에서 문제가 있는 자료는 울산광역시와 세종특별자치시로, 분석 기간 (1996~2021) 중에 지자체의 지위가 변경되면서 기존 광역지자체에서 별도로 독립한 광역지자체이기 때문이다. 따라서 지자체별 통계에 있어서 독립 전까지는 자료가 존재하지 않다가 울산광역시의 경우 1998년부터, 세종특별자치시의 경우 2013년부터 생성되었다. 세종특별자치시는 충청남도에 포함시켜 분석을 진행하였으나 울산광역시의 경우 광역시 승격 전까지는 경상남도에 포함되어 있으므로 해당 자료를 분리할 필요가 있었다. 따라서 울산광역시의 경우 모든 변수에 대해 1998년부터 울산광역시와 경상남도가 차지하는 비중의 앞선 3개년 평균을 사용하여 도출하였다. 예를 들어 울산광역시의 1997년 에너지 소비량은 1998년부터 2000년까지 울산광역시 에너지 소비량과 경상남도 에너지 소비량 비율 평균을 바탕으로 1997년 경상남도 에너지 소비량으로부터 분리하였다.

〈표 1〉 수집변수 기술통계량

변수명	단위	평균	표준편차	최댓값	최솟값
온실가스 배출량 (I_{it})	GgCO ₂ eq	37,942.32	31,913.28	163,800.84	2,970.06
인구 (P_{it})	천명	3,070.81	2,964.75	13,611.00	514.00
1인당 GRDP (A_{it})	백만 원	24.57	12.31	69.31	7.51
에너지원단위 (T_{it})	ktoe/10억 원	0.20	0.16	0.84	0.03
서비스업 비중 (S_{it})	%	0.57	0.17	0.93	0.23

주: 서비스업 비중의 경우 기본적인 STIRPAT 모형에 포함되는 변수는 아니나 지자체별 산업구조 반영을 위한 추가변수로 활용됨.

패널 분석의 경우 동질적 패널 방법론과 이질적 패널 방법론을 함께 활용한다. 동질적 패널 방법론의 경우 고정효과 모형과 확률효과 모형이 활용되었으며, 모든 횡단면에 대해 동질한 기울기를 가정하는 모형의 경직성에 따라 데이터의 특성을 반영하지 못할 수 있기 때문에 이질적 패널 모형을 함께 추정하였다. 동질적 패널 모형은 패널 선형회귀 분석의 가장 기본적 모형이기 때문에 별도로 설명하지 않으며, 이질적 패널 모형 추정치

를 아래와 같이 소개한다.

본 연구에서는 이질적 패널 모형으로 그룹 평균(mean group, MG) 추정치와, MG 추정에 기반을 둔 두 가지 추정치를 활용한다: CCEMG(common correlated effect mean group) 및 AMG(augmented mean group) 추정치. MG 추정치의 경우 시계열 분석에서 말하는 자기상관이 횡단면을 가로질러 존재하는 횡단면 의존성(cross-section dependence) 이 분석 결과를 왜곡할 수 있다는 단점이 있다(Pesaran et al., 1997). 그러나 CCEMG와 AMG의 경우 횡단면 의존성을 고려할 수 있으며, 장기추정 모형이 가능하다는 장점이 있다. 또한 횡단면에 따른 이질성을 고정효과가 아닌 변수별 영향(기울기)으로 가정할 수 있어 모형의 추정이 유연하다고 할 수 있다. MG 추정치는 단순히 횡단면별로 별도의 회귀분석을 수행한 후, 개별 그룹의 추정치를 평균내어 구할 수 있다.

CCEMG 추정치와 AMG 추정치는 각각 Pesaran(2006) 및 Eberhardt and Bond(2009)에 의해 제안되었으며, 횡단면 의존성을 각기 다른 방식으로 고려하기 위해 시도된 모형이다. CCEMG 모형의 추정식은 식 (3)에 나와 있으며, AMG 모형은 2단계의 추정 절차를 거쳐 식 (4)와 (5)에 나와 있다.

$$y_{it} = \alpha_{1i} + \beta_{1i}X_{it} + \delta_{1i}\bar{y}_{it} + \beta_{2i}\bar{X}_{it} + \xi_{1i}F_{1t} + e_{1it} \quad (3)$$

$$\Delta y_{it} = \alpha_{2i} + \beta_{3i}\Delta X_{it} + \sum_{t=2}^T \delta_{2i}\Delta D_t + \xi_{2i}F_{2t} + e_{2it} \quad (4)$$

$$y_{it} = \alpha_{3i} + \beta_{4i}X_{it} + d_i\hat{\delta}_{2i} + e_{3it} \quad (5)$$

위 식에서 y 와 X 는 각각 종속변수, 설명변수 벡터를 가리킨다. D_t 는 시간더미, ξ_i 와 F_t 는 패널 분석에서의 요인 가중치(factor loading)와 공통요인(common factor)을 나타낸다. e_{it} 는 각 방정식의 오차항이다.

방정식의 기본 형태를 살펴보면 횡단면 이질성 가정을 위해 개별적인 절편과 기울기를 가정함을 알 수 있으며, CCEMG 모형은 demeaning 과정을 활용하는 반면 AMG 모형은 동태적 패널 추정으로부터 도출된 시간더미의 계수를 정태적 패널 추정에서 시간

추세항으로 활용하여 추정하는 방식이다. 둘 다 도출되는 설명변수의 계수 추정은 CCEMG의 경우 $\hat{\beta}_{1i}$ 를, AMG의 경우 $\hat{\beta}_{4i}$ 를 횡단면 개수로 나누어 평균을 도출하는 방식으로 이루어진다.

IV. 분석 결과

3장에서 수집된 변수를 바탕으로 패널 분석을 수행하였다. 패널 분석 방법에 있어서는 먼저 동질적 패널 분석을 시도한다. 그리고 동질적 패널 분석에서 발생가능한 잠재적인 문제점을 해결하기 위한 방안으로 통계적 검정 결과와 함께 이질적 패널 분석 결과를 제시하고자 한다. 먼저 <표 2>에 패널 선형회귀분석 모형인 고정효과와 확률효과 모형을 사용해 도출한 16개 지자체의 온실가스 배출 결정요인 분석 결과가 나와 있다. 고정효과와 확률효과 모형의 효율성을 비교하는 하우스만 검정 결과 귀무가설을 기각하지 못해 확률효과가 더 통계적으로 효율적인 모형임을 보이고 있다. 그러나 두 추정치 간에 큰 경향성의 차이는 없는 것으로 나타난다.

<표 2> 패널 선형회귀분석 추정 결과

변수명	고정효과 모형	확률효과 모형
인구 (P_{it})	0.669 (0.000)***	0.715 (0.000)***
1인당 GRDP (A_{it})	0.715 (0.000)***	0.728 (0.000)***
에너지원단위 (T_{it})	0.711 (0.000)***	0.733 (0.000)***
상수항	4.059 (0.000)***	3.705 (0.000)***
R-squared	0.817	0.817
F 검정 통계량	174.46 (0.000)***	575.90 (0.000)***
하우스만 검정	4.24 (0.237)	

주: *는 10% 유의수준, **는 5% 유의수준, ***는 1% 유의수준하에서 귀무가설 기각을 의미

본 연구에서 사용한 변수는 비중 변수(서비스업 비중)를 제외하면 모두 자연로그로 변환되어 있으므로 추정계수는 탄력성을 가리킨다. 확률효과 모형을 바탕으로 해석하면 지자체들의 인구 1% 증가는 온실가스의 0.715% 증가로 이어진다. 또한, 소득(1인당

GRDP) 및 에너지원단위의 1% 증가는 각각 온실가스의 0.728% 및 0.733% 증가를 유발한다. 이렇게 추정된 결과는 인구 증가, 경제활동 증가, 에너지의 비효율적 활용이 온실가스 배출량 증가를 유발한다는 직관적인 결과로 해석된다. 우리나라 지자체를 대상으로 수행한 선행연구에서도 유사한 결과를 도출한 바 있다(진상현, 2024; 김소연·류수열, 2021).

그러나 인구, 소득, 에너지원단위의 탄력성이 거의 동일하다는 점은 비직관적인 결과로 해석된다. 분해분석 연구를 살펴보면 Kaya 항등식을 기반으로 한 결과 각 변수의 기여도는 다르게 나타나는 것이 통상적이다. 대부분의 경우 소득 효과가 가장 높은 비중을 차지하며, 인구 효과는 꾸준한 증가 요인으로 작용하지만 그 영향 규모는 소득 효과 대비 작은 것으로 여겨지기 때문이다(진태영 외, 2020). 본 연구에서는 이러한 경향성이 우리나라 지자체 대상 분석 시 횡단면 의존성을 고려하지 않아 발생했다는 가설을 수립하고 패널 검정을 수행하였다. 고정효과 및 확률효과 모형보다 타 모형을 적용하여 분석하는 것이 타당한지에 대해 횡단면 의존성 검정과 기울기 동질성(slope homogeneity) 검정이 수행되었다. <표 3>에는 해당 검정 결과가 요약되어 있다.

<표 3> 횡단면 의존성 및 기울기 동질성 검정 결과

검정명		분석 출처	검정통계량 (<i>p</i> -value)
횡단면 의존성 검정	<i>CD</i>	Pesaran (2021, 2015)	1.33 (0.184)
	<i>CDw</i>	Juodis and Reese (2022)	-1.82 (0.069)*
	<i>CDw+</i>	Fan et al. (2015)	199.70 (0.000)***
	<i>CD*</i>	Pesaran and Xie (2021)	3.34 (0.001)***
기울기 동질성 검정		Pesaran and Yamagata (2008)	15.684 (0.000)***

주1: *는 10% 유의수준, **는 5% 유의수준, ***는 1% 유의수준하에서 귀무가설 기각을 의미
 주2: 횡단면 의존성 검정은 귀무가설과 대립가설로 약(weak) 및 강(strong) 횡단면 의존성을 사용
 주3: 기울기 동질성 검정은 귀무가설로 기울기 동질성을 사용

횡단면 의존성 검정 결과 두 개의 모형에서 귀무가설을 1% 유의수준하에서 기각함을 알 수 있다. Juodis and Reese(2022)의 검정 결과에서도 10% 유의수준하에서 귀무가설을 기각한다. 많은 횡단면 중 대부분이 의존성을 가진다고 할 수 있으며, 약한 의존성도 존재할 가능성이 있다. 기울기 동질성 검정 결과 역시 1% 유의수준하에서 귀무가설

을 기각하는 것으로 나타났다. 두 검정 결과 모두 통계적 유의성을 가진다고 할 수 있다. 요약하면 우리나라 16개 광역지자체를 대상으로 한 STIRPAT 모형은 횡단면 의존성이 특징적인 데이터 형태를 가지고 있으며, 추정 모형에 있어서도 동질적인 기울기를 가정하기보다는 이질적인 기울기를 추정할 수 있는 모형을 활용함이 적합하다. 이 검정 결과를 바탕으로 MG, CCEMG, 그리고 AMG 추정치를 <표 4>와 같이 제시한다.

<표 4> 그룹 평균 모형 추정 결과: STIRPAT 모형

변수명	MG	CCEMG	AMG
인구 (P_{it})	-0.411 (0.595)	1.244 (0.256)	-0.135 (0.851)
1인당 GRDP (A_{it})	0.871 (0.000)***	1.001 (0.000)***	0.813 (0.000)***
에너지원단위 (T_{it})	0.602 (0.000)***	0.555 (0.000)***	0.493 (0.000)***
상수항	12.194 (0.040)**	-3.594 (0.710)	10.208 (0.070)*
통계오차 (RMSE)	0.071	0.0487	0.0611

주: *는 10% 유의수준, **는 5% 유의수준, ***는 1% 유의수준하에서 귀무가설 기각을 의미

분석 결과 모든 모형에서 일관적인 추정 결과가 나타난다. 특히 인구 변수의 경우 통계적 유의성을 가지지 않는다는 결론이 도출된다. 소득변수인 1인당 GRDP, 에너지원 단위가 꾸준히 통계적 유의성을 가진다. 기본 STRIPAT 모형에서 온실가스 배출량을 설명하기 위해 1인당 GRDP와 에너지원단위는 모두 1% 유의수준하에서 통계적 유의성을 가지는 변수이며, 온실가스 배출량과는 양의 상관관계를 가진다. 1인당 GRDP가 높아질수록, 그리고 에너지를 경제적 산출물 대비 비효율적으로 사용할수록 온실가스 배출량은 증가하는 구조이다. 횡단면의 기울기 동질성을 가정한 고정효과 및 확률효과 모형과 가장 대조되는 결과는 인구 변수가 온실가스 배출량을 설명하기에 적합하지 않다는 점과, CCEMG 및 AMG 모형 추정 결과에서 목격되는 1인당 GRDP와 에너지원단위의 탄력성 규모 차이라 할 수 있다. 기울기 동질성 모형에서는 1인당 GRDP와 에너지원단위의 탄력성이 거의 동일했으나 이질성 모형에서는 1인당 GRDP가 가장 핵심적인 변수로 지목된다.

다음으로는 <표 5>와 같이 각 지자체의 산업구조가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 확인하고, 환경적 지속가능성을 살펴보기 위해 환경 쿠즈네츠 곡선(EKC) 가설을 검

증하고자 하였다. 이를 위해 산업구조 반영 차원에서는 부가가치 생산 중 서비스업 비중을 변수로 사용하였고, 환경 쿠즈네츠 곡선의 경우 1인당 GRDP의 제곱 형태를 변수로 투입하였다($ALSUBitLSUP2$). 해당 모형은 아래와 같이 선형모형을 연장한 것이며, 산업구조의 영향을 통제하기 위해 서비스업의 부가가치 생산 비중도 함께 설명변수로 투입하였다(S_{it}).

$$\ln I_{it} = \ln \alpha + \beta_1 \ln P_{it} + \beta_2 \ln A_{it} + \beta_3 \ln A_{it}^2 + \beta_4 \ln T_{it} + \beta_5 \ln S_{it} + \epsilon_{it} \quad (6)$$

환경 쿠즈네츠 곡선 가설은 간단히 말하면 1인당 소득과 환경적 영향 간의 관계를 설명하는 가설이다. 1인당 소득의 영향이 뒤집어진 U자 형태(inverted U-shape) 곡선을 가지는 경우 소득 증가 구간에 따라 환경 오염이 유발될 수 있으며, 환경 오염의 최댓값을 지나면 환경기술 투자 촉진 및 인식 확대 등으로 인해 환경 오염이 감소될 수 있다는 의미이다. 1인당 GRDP(A_{it}) 변수의 제곱항이므로 식 (6)은 1인당 GRDP에 대한 2차방정식이 되며, 환경적 영향(I_{it})이 1인당 GRDP로부터 받는 영향이 곡선으로 이루어졌는지 살펴보는 것이다. 곡선에 대한 검증을 선형모형 추정 바탕으로 수행하기 때문에 해당 가설을 검증하기 위해서는 식 (6)의 β_3 및 β_2 부호가 상당히 중요해진다. 환경 쿠즈네츠 변수($ALSUBitLSUP2$)에 대한 추정계수인 β_3 가 통계적으로 유의한 음(-)의 계수를 가져야 하며, 1인당 GRDP 변수(A_{it})의 추정계수인 β_2 는 양(+)의 계수를 가져야 한다.

1인당 GRDP와 에너지원단위의 경우 여전히 핵심 변수인 것으로 나타난다. 서비스업 비중의 경우 MG 및 AMG 추정치에서는 통계적 유의성을 가지며 고부가가치 생산을 유발하면서 온실가스 배출량을 매우 높은 탄력성으로 감소시킬 수 있는 변수로 나타나나 CCEMG 추정치에서는 통계적 유의성을 확보하지 못하는 것으로 보인다. 환경 쿠즈네츠 곡선 가설의 경우 모든 모형에서 성립하지 않는 것으로 나타난다. 오히려 1인당 GRDP와의 다중공선성 문제로 인해 모든 모형에서 1인당 GRDP의 영향이 지워지는 것으로 나타난다. 따라서 우리나라 지자체 온실가스 배출량 자료에서 EKC 가설은 성립하지 않는 것으로 보이며, 서비스업 비중 증가는 온실가스 배출을 감축시킬 수 있으나 그 영향이 혼재되어 있다. EKC 가설에 대한 회의적인 시각이나 통계적으로 성립하지 않는

이유는 다양한 문헌에서 제시되어 오고 있어 이러한 결과가 완전히 새롭다고 보긴 어렵다(Stern, 2017; Stern, 2004).

〈표 5〉 산업구조 반영 추정 결과

변수명	MG		CCEMG		AMG	
인구 (P_{it})	0.545 (0.414)	0.710 (0.325)	0.869 (0.443)	-1.316 (0.925)	0.565 (0.381)	0.580 (0.425)
1인당 GRDP (A_{it})	0.731 (0.000)***	0.707 (0.381)	0.819 (0.006)***	-1.796 (0.426)	0.514 (0.000)***	1.115 (0.157)
에너지원단위 (T_{it})	0.604 (0.000)***	0.589 (0.000)***	0.568 (0.000)***	0.463 (0.000)***	0.495 (0.000)***	0.462 (0.000)***
서비스업 비중 (S_{it})	-1.267 (0.013)**	-1.434 (0.029)**	-0.857 (0.286)	-0.697 (0.212)	-1.045 (0.041)**	-0.955 (0.095)*
환경 쿠즈네츠 ($ALSUB_{it}LSUP2$)	-	-0.005 (0.970)	-	0.385 (0.306)	-	-0.095 (0.440)
상수항	5.595 (0.286)	4.234 (0.477)	-3.594 (0.710)	-6.290 (0.574)	5.787 (0.255)	4.529 (0.437)
통계오차 (RMSE)	0.064	0.058	0.039	0.034	0.054	0.047

주: *는 10% 유의수준, **는 5% 유의수준, ***는 1% 유의수준하에서 귀무가설 기각을 의미

V. 결론

탄소중립까지의 여정은 일단 2050년까지 정해져 있으며, 일차적으로 2030년의 NDC 달성 여부가 중간목표가 될 것이다. 그러나 우리나라의 경우 2018년에 온실가스 배출량 정점을 기록한 것으로 판단했으나 감소추세가 지속되지 않고 2021년에 다시 반등함에 따라 추가적으로 정책목표를 발굴하고 온실가스 감축 노력을 지속해야 하는 실정이다. 이에 2023년의 제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획 발표와 탄소중립 녹색성장 기본법 개정으로 광역지자체와 기초지자체의 탄소중립 계획 수립이 요구되면서, 지자체를 대상으로 한 온실가스 감축 목표 설정 연구가 시급할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 위와 같이 STIRPAT 모형에 기반하여 동질적 패널과 이질적 패널 모형을 사용하여 우리나라 지자체의 온실가스 배출량 결정요인을 평가하고자 하였다. 분석 결과를 요약하면 소득 변수와 에너지원단위는 전통적인 IPAT 모형에서 제시하는 바와

같이 온실가스 배출량의 핵심 변수라고 판단된다. 그러나 통계적 검정 결과를 바탕으로 시도한 이질적 패널 추정치에서는 인구 변수가 온실가스 배출량에 있어 통계적으로 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타난다.

실제로 1990년부터 2021년까지 OECD(2002)의 방법론을 바탕으로 온실가스와 인구 간의 탈동조화 경향성을 살펴본 결과,⁴⁾ 우리나라는 일부 지자체에서 1인당 온실가스 배출량이 증가하다가 낮아지는 경향을 보인다. 특히 서울의 경우 1997년에 1인당 배출량이 정점을 기록한 후 지속적으로 감소하고 있으며, 충남, 경북, 경남지역에서도 동일한 경향성이 나타난다. 이러한 원인으로 이질적 패널 분석에서는 인구가 주요 원인으로 인식되지 못하는 것으로 판단된다. 지자체별 인구 분산이 온실가스 감축을 위해 효과적인 방안이라기보다는 지자체의 경제활동과 에너지 효율, 산업구조에 따라 온실가스 배출량이 달라진다고 보는 것이 타당하다.

환경 쿠즈네츠 곡선 가설이 성립하지 않는다는 점에서 미루어 볼 때 지자체별 경제발전을 통한 환경기술 투자를 촉진하는 것을 단기적으로 기대하기는 어려워 보인다. 지자체별로는 산업구조 변화와 에너지 효율화를 꾀하는 것이 본 연구의 분석 결과에 기반할 때 가장 타당하다. 그러나 산업구조는 각 지자체별 특성이 이미 반영되어 있으며 특화단지 조성 등 하향식 정책의 결과물이므로 지자체에서 대응하기 어려울 것으로 보인다. 또한 고부가가치 산업에 해당하는 서비스업 육성은 특정 지자체에 집중되어 있다. 결국 에너지의 효율적인 활용이 지자체별로 목표를 수립하고 달성하기 용이한 정책목표라 할 수 있다.

한편, 우리나라에서 활용할 만한 감축 프레임워크로 UNFCCC의 공동의 그러나 차별화된 책임(Common but Differentiated Responsibilities)을 활용할 수 있을 것으로 보인다. 우리나라는 현재 인구가 특정 광역지자체를 중심으로 분산되어 있으므로 에너지 소비량, 온실가스 배출량, 부가가치 생산 역시 동일한 경향성을 가지고 있다. 경제산출물 생산을 위한 생산요소가 특정 지자체에 집중되어 있다는 점을 고려할 때, 지자체별로 온실가스 감축 목표가 부여된다면 달성에 대한 부담을 동시에 함께하는 것이라 할 수 있다. 이러한 정책적 환경은 기후변화 대응에 있어 선진국과 개도국의 공동부담을 떠올리게

4) 탈동조화의 경우 경제성장과 온실가스의 탈동조화를 살펴보는 것이 통상적이나(진태영·김도원, 2021), 본 연구에서는 인구와 온실가스 간의 탈동조화에 초점을 맞춘다.

한다. 최근 들어 UNFCCC에서는 이러한 문제점을 인식하고 기후변화 피해 기금을 설립했다. 기후변화 대응에 있어서 자발적 협력체계를 구축하기 위해서는 중앙정부 차원에서 노력이 필요할 것으로 본다. 기존의 기후대응 기금을 비용효율적인 탄소중립 기술 개발 혹은 금융지원보다 지자체 탄소중립 지원에 우선적으로 할당하는 등 예산 활용의 구체화가 필요할 것이다.

[References]

- 관계부처합동, 『대한민국 2050 탄소중립 시나리오』, 2021.
- 관계부처합동, 『제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획』, 2023.
- 김동구·손인성, 『우리나라 온실가스 배출 정점 도달 시점 분석』, 2018, 에너지경제연구원 기본연구보고서, pp. 18~13.
- 김문정·허은영, “LMDI 방법론을 이용한 국내 배출권거래제 참여기업의 배출량 변화요인 분해분석”, 『자원·환경경제연구』, 제15권 제2호, 2020, pp. 349~367.
- 김소연·류수열, “공간패널모형을 이용한 이산화탄소 배출량 결정요인 분석”, 『한국지역경제연구』, 제43권 제4호, 2019, pp. 49~69.
- 김소연·류수열, “우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인 분석: 횡단면 의존성과 계수 이질성을 고려하여”, 『한국경제지리학회지』, 제24권 제4호, 2021, pp. 400~410.
- 김진수, “우리나라 에너지소비 분해분석 연구에 대한 고찰”, 『에너지경제연구』, 제14권 제3호, 2015, pp. 265~291.
- 박년배, “탄소중립 선언한 국내 주요 기업의 온실가스 배출량 변화 분해분석”, 『에너지공학』, 제32권 제2호, 2023, pp. 23~37.
- 박년배·심성희, “감축목표 업종 분류체계에 따른 산업부문의 에너지 소비 및 온실가스 배출요인 분해 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제24권 제1호, 2015, pp. 189~224.
- 서형준·이형석, “16개 광역지자체 온실가스배출 효율성에 대한 글로벌맘퀴스트 분석 - 녹색 생산성을 중심으로 -”, 『서울도시연구』, 제20권 제1호, 2019, pp. 19~32.
- 신석하, “오차수정모형을 이용한 한국의 탄소배출량 결정요인 분석”, 『경제학연구』, 제62권 제3호, 2014, pp. 5~28.
- 에너지경제연구원, 『지역에너지통계연보』, 2023.

- 오진·김현중, “국내 제조업 집적이 탄소 배출 강도에 미치는 영향: 공간패널회귀분석의 적용”, 「무역학회지」, 제47권 제3호, 2022, pp. 157~175.
- 온실가스종합정보센터, 『2023년 국가 온실가스 인벤토리 (1990-2021)』, 2023.
- 온실가스종합정보센터, 『기초지자체 기준 지역 온실가스 배출량(2016-2020)』, 2022.
- 외교부, “제27차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP27) 폐막”, 2022. https://overseas.mofa.go.kr/www/brd/m_4080/view.do?seq=373033
- 외교부, https://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do
- 윤정혜·강상목, “이산화탄소 배출 효율에 대한 도시화의 영향: ASEAN 8개국을 중심으로”, 「국토연구」, 제118권 2023, pp. 61~75.
- e-나라지표, https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1007
- 이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교”, 「환경정책」, 제9권 제4호 2010, pp. 53~76.
- 이상엽·박주영·양유경, “포스트 코로나 시기 국가 온실가스 배출 반등전망 및 대비 방향”, 「환경포럼」, 제252권 2021, pp. 1~24.
- 이재형, “철도수송부문 온실가스 배출 요인 분해분석”, 「한국기후변화학회지」, 제9권 제4호, 2018, pp. 407~421.
- 이호상·서진호, “LMDI 방법론을 이용한 제지산업의 지종별 온실가스 배출 요인분해 분석”, 「펄프·종이기술」, 제55권 제6호, 2023, pp. 13~20.
- 이효진·강명구, “패널분석을 이용한 도시화율과 CO₂ 배출량과의 관계에 관한 연구”, 「한국지역개발학회지」, 제24권 제5호, 2012, pp. 125~144.
- 임형우·조하현, “경제성장과 탄소배출량의 탈동조화 현상 분석: 63개국 동태패널분석(1980~2014년)”, 「자원·환경경제연구」, 제28권 제4호, 2019, pp. 497~526.
- 장명진·곽민주·이지용, “수송부문 온실가스 배출량 요인분해 분석과 감축정책 평가: 2018-2019”, 「한국기후변화학회지」, 제12권 제3호, 2021, pp. 271~279.
- 조용성, “전력산업의 온실가스 배출요인 분석 및 감축 방안 연구”, 「한국기후변화학회지」, 제8권 제4호, 2017, pp. 357~367.
- 조향숙, “OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제26권 제1호, 2017, pp. 1~35.
- 진보영·김근우·박중구, “한국의 경제성장, 전력소비량, 이산화탄소 배출량 및 환경규제 간 인과관계 분석”, 「에너지공학」, 제29권 제1호, 2020, pp. 1~12.
- 진상현, “광역지방자치단체 온실가스 배출의 영향 요인 탐색: 패널회귀 및 지수분해 분석을 중

- 심으로”, 「지방정부연구」, 제28권 제1호, 2024, pp. 175~196.
- 진상현, “한국의 기후변화정책 관련 의제설정 유형 및 과정”, 「NGO연구」, 제17권 제3호, 2022, pp. 41~83.
- 진상현·정경화, “지역별 온실가스 배출특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로”, 「한국정책과학학회보」, 제17권 제2호, 2013, pp. 1~26.
- 진태영·김도원, “산업부문 온실가스 탈동조화 변화요인 분석”, 「환경정책」, 제29권 제1호, 2021, pp. 101~127.
- 진태영·김진수, “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구”, 「환경정책」, 제25권 제3호, 2017, pp. 47~70.
- 진태영·최가영·이은미·이수경, “이산화탄소 배출량 분해분석: 산업 및 에너지 소비구조를 중심으로”, 「환경정책」, 제28권 제2호, 2020, pp. 153~182.
- 통계청, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1C81&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=Q_7&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do
- 허가형, “경제성장에 따른 환경개선 효과 실증분석”, 「자원·환경경제연구」, 제31권 제4호, 2022, pp. 887~908.
- Ang, B. W., “Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which is the Preferred Method?,” *Energy policy*, Vol. 32, No. 9, 2004, pp. 1131~1139.
- Ang, B. W., “Decomposition of Industrial Energy Consumption: The Energy Intensity Approach,” *Energy Economics*, Vol. 16, No. 3, 1994, pp. 163~174.
- Climate Action Tracker, <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker-2022/>
- Dietz, T., and E. A. Rosa, “Effects of population and affluence on CO₂ emissions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 175~179.
- Eberhardt, M., and S. Bond, *Cross-section dependence in nonstationary panel models: a novel estimator*, 2009. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/17692/1/MPRA_paper_17692.pdf
- Ehrlich, P. R., and J. P. Holdren, “Impact of Population Growth,” *Science*, Vol. 171, No. 3977, 1971, pp. 1212~1217.
- Fan, J., Y. Liao, and J. Yao, “Power Enhancement in High-Dimensional Cross-Sectional Tests,” *Econometrica*, Vol. 83, 2015, pp. 1497~1541.
- Juodis, A., and S. Reese, “The Incidental Parameters Problem in Testing for Remaining Cross-section Correlation,” *Journal of Business Economics and Statistics*, Vol. 40, No. 3,

- 2022, pp. 1191~1203.
- Kaya, Y., and Y. Keiichi, *Environment, energy, and economy: strategies for sustainability*, Vol. 4. Tokyo, Japan: United Nations University Press, 1997.
- McCright, A. M., R. E. Dunlap, and C. Xiao, "Perceived Scientific Agreement and Support for Government Action on Climate Change in the USA," *Climatic Change*, Vol. 119, 2013, pp. 511~518.
- OECD, *Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth*, (Sustainable development SG/SD(2002)1/FINAL), 2002, Paris: OECD.
- Pesaran, M. H., "Estimation and inference in large heterogeneous panels with a multifactor error structure," *Econometrica*, Vol. 74, No. 4, 2006, pp. 967~1012.
- Pesaran, M. H., "General Diagnostic Tests for Cross-Sectional Dependence in Panels," *Empirical Economics*, Vol. 60, 2021, pp. 13~50.
- Pesaran, M. H., "Testing Weak Cross-Sectional Dependence in Large Panels," *Econometric Reviews*, Vol. 34, No. 6-10, 2015, pp. 1089~1117.
- Pesaran, M. H., and T. Yamagata, "Testing Slope Homogeneity in Large Panels," *Journal of Econometrics*, Vol. 142, No. 1, 2008, pp. 50~93.
- Pesaran, M. H., and Y. Xie, *A Bias-Corrected CD Test for Error Cross-Sectional Dependence in Panel Data Models with Latent Factors*, Cambridge Working Papers in Economics 2158, 2021.
- Pesaran, M. H., Y. Shin, and R. P. Smith, *Pooled Estimation of Long Run Relationships in Dynamic Heterogeneous Panels*, RePEc, 1997.
- Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg et al., *Global Warming of 1.5°C*. "An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. In: the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty," V Masson-Delmotte et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2018.
- Stern, D. I., "The environmental Kuznets curve after 25 years," *Journal of Bioeconomics*, Vol. 19, 2017, pp. 7~28.
- Stern, D. I., "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve," *World Development*, Vol. 32, No. 8, 2004, pp. 1419~1439.