한국경제지리학회지 제24권 제4호 2021(400~410)

우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인 분석: 횡단면 의존성과 계수 이질성을 고려하여*

김소연** · 류수열***

Analysis of Determinants of Carbon Dioxide Emissions in Korea: Considering Cross-sectional Dependence and Heterogeneous Coefficient*

So-youn Kim** · Suyeol Ryu***

요약: 본 연구는 2000년부터 2019년까지 우리나라 16개 광역시·도의 패널자료를 활용하여 확장된 STIRPAT 모형을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하였다. 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수 이질성을 검정한 후, 이들 특성을 반영한 MG, CCEMG, AMG 추정법을 통해 분석하였다.

AMG 추정법을 통해 분석한 결과를 살펴보면, 소득, 인구, 에너지 집약도의 계수가 양(+)의 부호로 통계적으로 유의하게 나타났으나, 도시화는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.

우리나라 이산화탄소 배출량의 감소는 에너지 효율의 증가와 지속가능한 경제성장을 통해 이루어질 수 있다. 따라서 이산화탄소 감축기술의 적극적인 개발로 저탄소 사회를 구축하고, 이와 함께 기술혁신을 통해 장기적으로 생산성 향상을 유발하여 지속가능한 경제성장에 기여할 수 있는 정책수립이 필요하다.

주요어: 이산화탄소 배출량, 횡단면 의존성, 계수 이질성, 공간패널모형

Abstract: This study analyzed the determinants of carbon dioxide emissions through the expanded STIRPAT model using panel data from 16 metropolitan cities and provinces in Korea from 2000 to 2019. After testing cross-sectional dependence and coefficient heterogeneity of panel data, we performed analysis using MG, CCEMG, and AMG estimation methods reflected these characteristics.

The results of analysis using the AMG estimation method are as follows. The coefficients of income, population, and energy intensity were statistically significant with a positive sign, but urbanization was statistically insignificant.

Reduction of carbon dioxide emissions in Korea can be achieved through an increase in energy efficiency and sustainable economic growth. It is necessary to establish a policy that can contribute to sustainable economic

* 이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

** 주저자, 안동대학교 사회과학대학 경제학과 시간강사 (Instructor, Department of Economics, Andong National University, abcd2id@nate.com)

*** 교신저자, 안동대학교 사회과학대학 경제학과 교수 (Professor, Department of Economics, Andong National University, syryu@anu.ac.kr)

https://doi.org/10.23841/egsk.2021.24.4.400

growth by inducing productivity improvement through technology innovation reducing carbon dioxide emissions in the long-term as well as building a low-carbon society through active development of carbon dioxide reduction technology.

Key Words : CO_2 emissions, cross-sectional dependence, heterogeneity of slope coefficient, spatial panel model

1. 서론

이산화탄소는 대표적인 온실가스이며, 전 세계 이산화탄소 농도는 산업화 이후 상승세를 보여 2019년에 409.8ppm으로 최고치를 기록하였다.[1] 지구온난화로 인한 기후변화에 대응하기 위해 전 세계 각국은 이산화탄소 배출량 감축에 힘쓰고 있으며, 에너지 전환 등을 통해 고효율 저탄소 사회를 구축하고자 노력하고 있다.[2] 2021년 기후정상회의에서 미국은 2005년 배출량 대비 50~52%의 온실가스 감축을 2030년 감축목표로 발표하였고, 유럽연합은 2030년 감축목표를 1990년 배출량 대비 기존 40%에서 55%로 올렸으며, 일본도 2030년까지 2013년 배출량 대비 기존 25%에서 상향 조정하여 46%를 감축하겠다는 목표를 발표하였다.

우리나라는 대륙과 해양의 영향을 동시에 받기 때문에 가뭄과 홍수, 태풍, 폭염, 해수면 상승 등 기후위기로 인한 재해의 영향을 많이 받는 국가이지만, 전 세계 평균보다 많은 양의 이산화탄소를 배출하는 국가이기도 하다. 기상청 국립기상과학원이 발간한 '2019년 지구대기 감시 보고서'에 따르면 2019년 우리나라의 평균 이산화탄소 농도는 417.9ppm이며, 미국 해양대기청(NOAA)이 발표한 전 지구 평균농도와 비교해 8.1ppm 높게 나타났다. 이에 2017년 배출량 대비 24.4% 감축을 2030년 국가 온실가스 감축목표로 확정하였으며, 2021년 내 감축목표를 상향할 예정이다.

이러한 국제적 흐름과 관련하여 국내외에서 여러 학자들에 의해 이산화탄소 배출량 결정요인 분석이 다양하게 진행되고 있다. 주로 환경영향모형인 STIRPAT 모형(STochastic estimation of Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)에 의해 인구, 소득, 기술을 중심으로 이산화탄소 배출량 결정요인이 분석되고 있으며, 국가 및 지역 데이터를 활용한 시계열 및 패널분석이 실시되고 있다. 실증분석에서 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 인구, 소득, 기술 등의 요인은 지역마다 상이할 수 있기 때문에 지역별 기울기 계수가 동일하다고 가정하는 일반패널분석은 이산화탄소 배출량 결정요인 분석에 제약을 가하게 되고 편의(bias)된 추정결과를 유발할 수 있다. 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량 및 결정요인 변수에 횡단면 의존성(cross-sectional dependence)이 존재하는 경우에 상호독립성을 가정하는 최소제곱추정법이나 전통적인 패널 추정기법을 활용하면 편의적 결과를 초래할 수 있다.

이에 따라 STIRPAT 모형에 횡단면 의존성과 계수의 이질성(heterogeneous coefficient)을 고려한 분석이 최근 해외 연구를 중심으로 이루어지고 있다. 주로 계수의 이질성을 고려하기 위한 Pesaran(1997)의 그룹평균 추정법(Mean Group, MG)과 횡단면 의존성과 계수의 이질성을 모두 고려한 Pesaran(2006)의 CCEMG(Common Correlated Effects Mean Group) 추정법 및 Eberhardt and Teal(2010)의 AMG(Augmented Mean Group) 추정법을 사용하여 모형을 추정한다.

한편 우리나라의 이산화탄소 배출량 결정요인 분석에 횡단면 의존성과 계수의 이질성이 모두 고려된 연구는 존재하지 않는 실정이다.

따라서 본 연구는 우리나라 16개 광역시·도의 패널 데이터를 활용하여 STIRPAT 모형을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하되, 횡단면 의존성과 지역별 이질적 계수의 존재여부를 확인하고, 이를 통제할 수 있는 추정법을 사용하여 실증분석을 실시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 선행연구를 살펴보고, 3장에서 분석모형 및 분석자료를 제시한다. 4장에서 분석결과를 살펴보고, 마지막으로 5장에서 요약 및 결론을 제시한다.

2. 선행연구

이산화탄소 배출량 결정요인에 대한 연구는 주로 STIRPAT 모형에 대해 다양한 추정방법을 통하여 실시되어 왔다. 패널 데이터를 활용하여 고정효과 모형과 확률효과 모형의 일반패널분석이 주로 이루어져 왔으며, 일반적률추정법(GMM), 주성분분석법 등 여러 분석방법이 활용되었다. Abou-Ali *et al.*(2016)과 Lin *et al.*(2017)은 각각 21개 아랍국가와 53개 국가를 대상으로 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 요인에 대해 고정효과와 확률효과 모형으로 패널분석을 실시하였고, Martinez and Maruotti(2011)와 Sharif(2011)는 각각 88개 개발도상국과 9개 국가를 대상으로 GMM 추정법을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하였다. Yang *et al.*(2018)은 중국을 대상으로 주성분분석법을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하였다. 이러한 추정법은 패널 데이터의 횡단면 상호독립성과 계수의 동질성을 가정하고 있어 편의적 결과를 초래할 수 있다.

최근 STIRPAT 모형에 대해 패널 데이터의 횡단면 의존성 및 계수 이질성을 고려한 MG, CCEMG, AMG 추정법 등을 활용한 연구가 해외 연구를 중심으로 진행되고 있다. Sadorsky(2014)는 16개의 개도국을 대상으로 STIRPAT 모형을 기반으로 추정한 결과, 인구, 소득, 에너지 집약도에서 양(+)의 부호가 나타났고, 도시화에 대한 결과는 세 가지 추정법 모두에서 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다. Rafiq *et al.*(2016)과 Salim *et al.*(2017)는 각각 53개 국가와 아시아 13개 국가를 대상으로 한 분석을 통해, 인구와 산업화는 이산화탄소 배출량을 증가시키고 도시화와 무역개방도는 이산화탄소 배출량을 감소시키는 요인으로 나타났다.

Dong *et al.*(2018)과 Ahmad and Ghulam(2019)은 각각 128개국과 10개국의 데이터를 활용하여 이산화탄소 배출량의 결정요인을 분석하였다. 그 결과 인구와 소득은 이산화탄소 배출에 양(+)의 영향을 미치고, 에너지 집약도는 이산화탄소 배출을 감소시키는 것으로 나타났다. Zhang and Wang(2019)은 BRICS 국가를 대상으로 이산화탄소 배출량에 미치는 영향을 추정한 결과, 재생가능 에너지 소비는 이산화탄소 배출을 줄이는 효과적인 방법이며, 서비스 산업으로의 산업구조 변화는 이산화탄소 배출을 감소시키는데 기여하는 요인은 아님을 확인하였다. 신범철(2013)은 20개 아시아 국가를 대상으로 이산화탄소 배출량과 경제성장 간의 환경쿠즈네츠 가설[3]을 검증하였다. 패널의 횡단면 의존성과 계수 이질성을 고려하여 분석한 결과, 환경쿠즈네츠 가설은 지지되지 않는 것으로 나타났다.

우리나라를 대상으로 분석한 연구로는 김진웅 외(2012), 신석하(2013) 등이 있으며, 이들은 시계열 데이터를 활용하여 분석하였다. 김진웅 외(2012)는 비선형 회귀분석법을 통해 분석하였으며, 제조업 비중, 무역의 존도의 증가는 이산화탄소 배출량 저감에 기여하는 것으로 나타났다. 신석하(2013)는 오차수정모형을 통해 추정한 결과, 소득수준 향상은 이산화탄소 배출량을 증가시키고, 기술수준 향상과 에너지가격 상승은 이산화탄소 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다.

한편 김동하 외(2016)는 이산화탄소 배출량에 공간의 존성(spatial dependence)[4]이 존재함을 확인하고 이를 고려한 공간가중회귀모형을 이용하여 서울시 행정동별 이산화탄소 배출량에 대해 분석하였으며, 인구, 고용밀도가 이산화탄소 배출량에 양(+)의 영향을 주는 것으로 나타났다. 김소연·류수열(2019)은 16개 광역시·도의 패널 데이터를 이용한 공간패널모형을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하였으며, 그 결과 환경쿠즈네츠 가설을 확인하였고, 인구밀도, 무역개방도, 제조업 비중이 양(+)의 부호로 나타났으며, 도시화는 음(-)의 부호로 나타났다.

이처럼 우리나라를 대상으로 한 몇몇의 연구에서 이산화탄소 배출량의 공간의존성을 고려한 분석이 이루어져 왔으나, 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수 이질성이 모두 고려한 연구는 현재까지 없는 실정이다.

3. 모형 및 자료

1) 분석모형

환경에 영향을 미치는 요인에 관한 실증분석은 주로 Dietz and Rosa(1997)의 STIRPAT모형(STochastic estimation of Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology)을 통해 이루어지고 있다.

$$I_{it} = a_i P_{it}^b A_{it}^c T_{it}^d e_{it} \quad \text{식 (1)}$$

I는 환경의 질을 나타내고, P는 인구, A는 소득, T는 기술을 나타낸다. 식에서 지역은 하첨자 $i(i=1,\cdots, N)$로 표시되고, $t(t=1,\cdots, T)$는 기간을 나타내며, 지역별 효과는 a_i를 통해 표현되고, e_{it}는 무작위 오차항을 나타낸다.

식 (1)의 양변에 자연로그를 취하여 선형함수형태로 변환하면 식 (2)가 된다.

$$\ln(I_{it}) = \ln\alpha_i + b\ln(P_{it}) + c\ln(A_{it}) + d\ln(T_{it}) + v_i + \varepsilon_{it} \quad \text{식 (2)}$$

STIRPAT모형은 설명변수를 추가하여 확장할 수 있으며, 본 논문에서는 도시화 변수(U)를 추가한다. Liddle and Lung(2010), Poumanyvong and Kaneko (2010), Martinez-Zarzoso and Maruotti(2011), Sadorsky(2014) 등에서 STIRPAT모형을 사용하여 도시화의 영향을 분석하였다. 이들은 이산화탄소 배출량에 대한 도시화의 영향을 고려하지 않은 분석은 지속가능한 개발 정책에 부정확한 결과를 제시한다고 주장하였다.[5)]

패널 모형의 설명변수에 지역별 이질적 영향이 존재한다면 식 (3)과 같이 이질적 기울기 계수를 포함할 수 있다.

$$\ln(I_{it}) = \ln\alpha_i + b_i\ln(P_{it}) + c_i\ln(A_{it}) + d_i\ln(T_{it}) + f_i\ln(U_{it}) + v_i + \varepsilon_{it} \quad \text{식 (3)}$$

2) 분석방법

모형에서 계수가 지역별로 동일하다고 가정한다면 고정효과(fixed effects) 및 확률효과(random effects) 등을 포함한 표준 패널회귀분석법을 사용하여 추정할 수 있다. 그러나 이러한 패널 기법은 모든 지역에 이산화탄소 배출량과 여러 요인 간에 동일한 함수형태를 가정하기 때문에 한 국가의 이산화탄소 배출량 결정요인을 도출하는데 제약을 가하게 되어 편의적(bias) 추정결과를 초래할 수 있다.

식 (3)과 같이 지역별 이질적 영향이 존재한다면 계수의 이질성을 고려하기 위해 Pesaran(1997)의 그룹평균(Mean Group, MG) 추정법을 활용하게 되며, 최근 계량경제학 분야에서 이질적 계수를 가진 패널모형 분석이 MG 추정법의 확장을 통해 활발하게 이루어지고 있다.

MG 추정법은 모든 계수와 오차 분산이 그룹에 따라 달라지도록 허용함으로써 패널 간 이질성을 반영한다. 이는 각 패널 그룹별로 회귀식을 추정하여 그룹별 계수를 얻은 다음 이를 평균하는 방식이다. MG 추정법을 식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$y_{it} = a_i + \boldsymbol{b_i'} \boldsymbol{x_{it}} + e_{it} \quad \text{식 (4)}$$

$$\hat{\boldsymbol{b}}_{MG} = N^{-1}\sum_i \hat{\boldsymbol{b}}_i$$

여기서 a_i는 이질적 절편이고, $\boldsymbol{b_i}$는 이질적 기울기 계수이며, 개별 그룹의 추정치는 $\hat{\boldsymbol{b}}_i$이고 $\hat{\boldsymbol{b}}_{MG}$는 그룹평균 추정치이다. $\boldsymbol{x_{it}}$는 독립변수 벡터이며, e_{it}는 오차항이다.

MG 추정법이 그룹별 계수의 이질성을 반영하지만, 패널

데이터에 횡단면 의존성(cross-sectional dependence)이 존재하는 경우 편의적 결과를 유발할 수 있다. 이에 Pesaran(2006)은 이질적 계수와 횡단면 의존성을 고려한 CCEMG(Common Correlated Effects Mean Group) 추정법을 제시하였다.[6] 이질적 계수는 그룹별 계수를 평균하는 MG 추정법을 사용하며, 횡단면 의존성은 종속변수와 독립변수의 횡단면 평균(cross-sectional averages)을 통해 통제한다. 여기서 횡단면 평균은 비관찰 공통요인(unobservable common factor)으로 설명된다. CCEMG 추정법을 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$y_{it} = a_i + \boldsymbol{b_i'x_{it}} + d_{1i}\overline{y_t} + \boldsymbol{d_{2i}'}\overline{\boldsymbol{x_t}} + e_{it} \qquad \text{식 (5)}$$

$$\hat{\boldsymbol{b}}_{CCEMG} = N^{-1}\sum_i \hat{\boldsymbol{b}}_i$$

여기서 $\overline{y_t}$와 $\overline{\boldsymbol{x_t}}$는 종속변수와 독립변수의 시간 t에서 횡단면 평균이고, $\overline{y_t}$와 $\overline{\boldsymbol{x_t}}$의 추정계수 $\boldsymbol{d_i}$는 성가신 모수(nuisance parameters)로 취급되어 추정치에 의미를 두지 않는다. 그러나 이 경우에 독립변수와 비관찰 공통요인 간에 내생성 문제가 존재할 수 있다.

Eberhardt and Teal(2010)은 비관찰 공통요인의 계수를 성가신 모수로 취급하는 것과 내생성 문제가 존재할 수 있는 CCEMG 추정법의 대안으로 AMG(Augmented Mean Group) 추정법을 제시하였다. AMG 추정법은 비관찰 공통요인을 의미 있는 동태적 공통과정(common dynamic process)으로 취급하며, 이를 통해 횡단면 의존성을 통제하는 추정법이다. 특히 AMG 추정법은 FMOLS(fully modified OLS)[7] 추정법의 확장모형이며, FMOLS 추정법의 내생성 통제 방식이 적용되기 때문에 CCEMG 모형의 문제점을 해결할 수 있다.

AMG 추정법은 2단계의 추정절차를 통해 이루어지며, 1단계에서 추정된 연도더미 추정계수를 2단계의 비관찰 공통요인으로 제공하게 된다. 식으로 살펴보면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$\text{AMG (1단계)} \quad \Delta y_{it} = \boldsymbol{b'}\Delta\boldsymbol{x_{it}} + \sum_{t=2}^{T} c_t \Delta D_t + e_{it} \qquad \text{식 (6)}$$

$$\Rightarrow \hat{\boldsymbol{c_t}} \equiv \hat{\mu}_t$$

$$\text{AMG (2단계)} \quad y_{it} = a_i + \boldsymbol{b_i'x_{it}} + d_i\hat{\mu}_t + e_{it} \qquad \text{식 (7)}$$

$$\hat{\boldsymbol{b}}_{AMG} = N^{-1}\sum_i \hat{\boldsymbol{b}}_i$$

불안정적 변수의 수준변수는 회귀분석에서 추정치를 편향(bias)시키는 것으로 간주되기 때문에 1단계에서 차분 회귀분석(pooled regression in first differences)을 실시한다. c_t는 연도더미의 계수를 나타내고, 이때 추출된 $\hat{\mu}_t$가 동태적 공통과정이며, 이를 2단계 식에 포함한다. 2단계에서 $\hat{\mu}_t$는 시간 추세항으로 포함되어 그룹별 회귀분석에 각각 적용되며, 몬테카를로 시뮬레이션 결과에 의하면 $\hat{\mu}_t$가 관찰되지 않는 공통요인의 계수(factor loadings)로 식별될 수 있다. AMG의 추정치는 MG 추정법과 같이 개별 그룹 추정치의 평균으로 도출된다.

본 연구에서 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수의 이질성 및 시계열 안정성을 검정한 후, 이상의 세 가지 추정법을 통해 우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하고자 한다.

3) 분석자료

우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하기 위해 2000년부터 2019년까지 16개 광역시·도의 패널자료를 활용하고, 식 (3)에 해당되는 변수를 이용한다. 이산화탄소 배출량($\ln CO_2$)이 환경의 질을 나타내는 종속변수가 되고, 총인구(lnpop)는 행정안전부에서 제공하는 주민등록인구를 이용하며, 소득 수준(lnPGRDP)을 나타내는 대리지표는 통계청에서 제공하는 1인당 실질 GRDP(2015년 기준)를 이용한다. 기술(lnEI) 변수는 에너지 효율 또는 에너지 집약도(energy intensity)로 나타내며, 지역에너지 통계연보의 GRDP당 총 에너지 사용량을 이용한다. 즉, GRDP에서 에너지가 차지하는 비중을 의

표 1. 변수 기초통계량

Variable	Unit	Mean	Std.Dev.	Min	Max
CO_2 배출량(CO_2)	1000ton	15,578	11,360	1,797	59,477
1인당 GRDP(PGRDP)	백만원	25,772	11,479	9,195	65,370
총인구(pop)	명	3,121,496	3,029,492	542,368	13,239,666
도시화(urb)	%	86.6	12.80	59.00	100.00
에너지 집약도(EI)	%	0.23	0.20	0.02	1.15

1) 관측수는 320개임. (obs=320, n=16, T=20)

미하며, 에너지 집약도가 감소한다는 것은 에너지 효율의 증대, 에너지 기술 혁신 등으로 해석할 수 있다. 도시화(lnurb)는 전체 인구 대비 도시인구의 비중이며, 도시인구는 국토교통부 도시계획현황통계의 시도별 도시지역 인구현황을 이용한다.

이산화탄소 배출량($lnCO_2$)은 지역별로 일관된 통계자료가 존재하지 않아 16개 광역시·도별 이산화탄소 배출량을 직접 산정하였다. '기후변동에 관한 정부 간 패널(IPCC)'의 가이드라인에 따라 배출량을 추정하였으며, 에너지경제연구원 지역에너지통계연보를 통해 구축한 지역별 최종에너지의 소비량에 탄소배출계수를 적용하여 이산화탄소 배출량으로 환산하였다.[8)]

표 1은 자연로그를 취하기 전 변수들의 기초통계량을 보여준다.[9)]

모형을 추정하기 전에 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수의 이질성 존재여부 및 시계열 안정성에 대한 검정을 실시한다.

먼저 패널 데이터에 횡단면 의존성이 존재하는 경우, 이를 고려하지 않고 모형을 추정하면 추정모수의 편의를 발생시키고 일치추정량을 얻을 수 없는 문제가 있다(Chudik, Pesaran and Tosetti, 2011). 따라서 패널 데이터의 횡단면 의존성 존재여부는 Pesaran(2004)의 CD test (cross-sectional dependence test)를 통해 확인한다.[10)]

귀무가설은 '횡단면 의존성이 존재하지 않는다'이며, 표본 데이터에 대해 CD test를 한 결과, 표 2와 같이 횡단면 독립성의 귀무가설이 모든 변수에서 기각되어 이산화탄소 배출량 결정요인 변수에 횡단면 의존성이 존재하는 것으로 나타났다.

표 2. 횡단면 의존성 검정 결과

Variable	Statictic	p-value
$lnCO_2$	12.72^{***}	0.000
lnPGRDP	48.38^{***}	0.000
lnpop	3.01^{***}	0.003
lnurb	2.06^{**}	0.039
lnEI	42.62^{***}	0.000

1) ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준에서 귀무가설을 기각함을 의미함.

다음으로 패널 데이터가 이질적인 기울기로 구성된 경우, 이를 고려하지 않고 동질의 계수를 적용하면 일관성이 없고 편향된 결과를 도출하게 된다. 따라서 패널 데이터의 계수 이질성 존재여부는 Pesaran and Yamagata(2008)의 기울기 계수 동질성 검정(slope homogeneity test)을 통해 확인한다.[11)]

귀무가설은 '모든 횡단면 단위에서 계수가 동일하다'이며 검정 결과, $\triangle$=4.962(p=0.000), $\triangle_{adj}$=5.931(p=0.000)으로 계수 동질성의 귀무가설이 기각되어 패널 데이터에 이질적 계수가 존재하는 것으로 나타났다.

마지막으로 패널 데이터의 안정성 검정을 실시한다. 시계열 측면에서 불안정적 데이터를 이용하여 선형회귀모형을 추정하면 가성회귀(spurious regression)의 문제가 생길 수 있다(이희연·이제연, 2010). 따라서 Im, Pesaran and Shin(2003)의 IPS 패널 단위근 검정(panel unit root test)을 실시한다. 특히 변수에 횡단면 의존성이 확인된 경우, 이를 고려하지 않고 추정하는 경우 검정력이 낮을 수 있으므로 횡단면 의존성을 고려한 Pesaran(2007)의 CIPS(cross-sectionally augmented

표 3. 단위근 검정 결과

Variable	IPS		CIPS	
	수준변수	1차 차분변수	수준변수	1차 차분변수
$lnCO_2$	-4.6941***	-10.7870***	-2.604	-3.571***
lnPGRDP	0.4813	-9.5728***	-2.051	-3.363***
lnpop	0.7179	0.3674	-1.487	-2.866**
lnurb	-7.7762***	-16.7688***	-3.526***	-5.502***
lnEI	2.8827	-11.6845***	-3.241***	-4.303***

1) ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준에서 귀무가설을 기각함을 의미함.
2) 검정에 상수항 및 추세항(trend)을 포함함.
3) AIC(Akaike information criterion)에 의해 적정차수를 적용함.

IPS) 단위근 검정도 실시한다. 귀무가설은 '모든 시계열은 단위근을 갖는다', 즉 '불안정적 시계열이다'이다.

IPS 검정에서 lnPGRDP와 lnpop, lnEI가 단위근을 포함하고 있으며, CIPS 검정에 의해 $lnCO_2$, lnPGRDP, lnpop에 단위근이 존재하는 것으로 나타났다. 이 변수들은 1차 차분 안정성을 보였으며, lnurb 변수는 수준변수에서 안정적인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Liddle(2013)과 유사하며, 도시화 변수가 시간이 흐름에 따라 큰 변화가 없이 일정하다는 것을 의미한다.

I(1) 변수가 모형에 혼합된 경우에는 변수 간의 공적분 관계가 존재하는지 살펴보아야 한다. Pedroni 공적분 검정 및 Westerlund 공적분 검정은 횡단면에서 이질적 절편 및 추세(trend)를 고려할 수 있고, 특히 Westerlund 공적분 검정은 횡단면 의존성을 고려한 검정법이다. 귀무가설은 '변수 간에 공적분 관계가 존재하지 않는다'이며, 표 4에서 공적분 관계의 귀무가설을 기각하여 장기적인 균형이 존재함을 확인할 수 있다.

표 4. 공적분 검정 결과

Test		Statictic	p-value
Pedroni	Modified PP	3.8009***	0.0001
	PP	-4.3979***	0.0000
	ADF	-2.7128***	0.0033
Westerlund		-2.2157**	0.0134

1) ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준에서 귀무가설을 기각함을 의미함.
2) 검정에 추세항(trend)을 포함함.

4. 분석결과

본 연구의 실증분석은 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수의 이질성을 고려한 일련의 회귀모형을 추정하여 강건성(robustness)을 검토하도록 한다. 표 5는 MG 추정법과 CCEMG 추정법 및 AMG 추정법을 이용한 모형의 추정결과를 보여준다.

MG 추정법을 적용하여 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석한 결과, 모든 추정계수는 통계적으로 유의하지 않게 나타났다. CCEMG 추정법을 적용하여 분석한 결과, lnPGRDP, lnpop, lnurb 변수에 대한 추정계수는 유의하지 않는 것으로 나타났고, lnEI 변수에 대해서만 5% 수준에서 유의한 것으로 나타났다.

AMG 추정법을 통해 추정결과를 살펴보면, 먼저, lnPGRDP의 추정계수는 5% 수준에서 통계적으로 유의한 양(+)의 값으로 나타나 우리나라 이산화탄소 배출량이 장기적으로 소득수준에 영향을 받으며, 소득이 높아질수록 이산화탄소 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 신석하(2013), Sadorsky(2014), Dong *et al.* (2018), Ahmad and Ghulam(2019) 등과 같은 결과이다. 국제에너지기구(IEA)(2015)에 의하면, 전 세계 이산화탄소 배출량이 감소한 기간은 1980년대 초 제2차 석유위기, 1992년 구소련 붕괴, 2009년 세계 금융위기 등 모두 경기가 침체되어 소득수준이 감소한 기간으로 나타났다.

표 5. 이산화탄소 배출량 결정요인 추정결과

Variable	MG	CCEMG	AMG
lnPGRDP	0.0181(0.917)	-0.1441(0.547)	0.4640(0.011)**
lnpop	1.0864(0.167)	3.9115(0.304)	1.9320(0.005)***
lnurb	5.2558(0.308)	4.0248(0.243)	2.6292(0.459)
lnEI	0.0400(0.548)	0.2298(0.041)**	0.1298(0.002)***
Constant	-30.4624(0.151)	-54.1482(0.057)*	-35.2196(0.096)*
CIPS	-3.334***	-4.623***	-3.754***
RMSE	0.0873	0.0410	0.0489

1) ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 유의수준에서 귀무가설을 기각함을 의미함.
2) ( )안의 수치는 p값을 나타냄.
3) 추정에 추세항(trend)을 포함함.

lnpop의 추정계수는 1% 유의수준에서 양(+)의 값으로 나타나, 인구가 증가할수록 이산화탄소 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 인구가 많은 지역일수록 상대적으로 더 많은 재화를 소비하기 때문에 생산과정에서 에너지 사용이 많아 그렇지 않은 지역에 비해 더 많은 이산화탄소를 배출하게 된다. Sadorsky(2014), Rafiq *et al.*(2016), Dong *et al.*(2018), Ahmad and Ghulam (2019) 등 대부분의 선행연구에서 동일한 결과를 제시하고 있으며, 에너지경제연구원(2016)은 온실가스 배출증감 요인분해 결과, 경제성장과 인구증가가 주요 배출증가 요인이라 주장하였다.

lnEI의 추정계수 역시 1% 수준에서 통계적으로 유의한 양(+)의 값으로 나타나, 에너지 집약도가 증가할수록 즉, 에너지 효율이 감소하고 에너지 기술 혁신이 덜 이루어질수록 이산화탄소 배출량은 증가한다고 이해할 수 있다. 국제에너지기구(IEA)(2015)는 에너지 집약도를 낮추어 에너지 효율을 개선시키는 정책이 이산화탄소를 감축하는데 기여한다고 밝혔다.

lnurb의 추정계수는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다. 도시화는 생산 측면에서 도시로의 과도한 집중으로 이산화탄소 배출량을 증가시킬 수 있으며, 반면에 규모의 경제(economies of scale)를 통해 에너지 사용의 효율성이 증대되어 이산화탄소 배출량을 감소시킬 수도 있다. 분석 결과와 같이 도시화가 이산화탄소 배출량에 의미 있는 영향을 미치지 않는 것은 도시화의 긍정적인 영향과 부정적인 영향이 서로를 상쇄시킨 것으로 설명할 수 있다(Sadorsky, 2014).

추정 후 잔차의 안정성 검정을 위해 CIPS test를 실시한 결과, 세 가지 모형 모두에서 1% 유의수준에서 귀무가설을 기각함으로써 변수 간 장기적인 관계가 존재함을 확인하였다. RMSE[2] 값은 MG 추정법 보다 CCEMG와 AMG 추정법의 RMSE가 절반 이상 낮게 나와 이산화탄소 배출량 결정요인 분석에 이질적 계수를 고려한 모형이 더욱 적합한 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 우리나라 16개 광역시·도의 지역별 이산화탄소 배출량을 패널 데이터로 구축하여, 확장된 STIRPAT 모형을 통해 우리나라 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석하였다. 패널 데이터에 횡단면 의존성과 계수의 이질성이 존재하는 경우에 이를 고려하지 않고 횡단면 상호독립성과 동질의 기울기 계수를 가정하는 일반패널추정법을 사용하면 편의적 결과를 초래할 수 있다.

패널 데이터를 대상으로 횡단면 의존성 검정과 기울기 동질성 검정을 실시한 결과, 두 가지 특성이 모두 존재함을 확인하였고, 단위근 검정과 공적분 검정을 통해 불안정적 자료의 공적분 관계가 존재함을 확인하였다. 따라

서 이들을 통제할 수 있는 추정법을 활용하였다. 특히 AMG 추정법은 패널 데이터의 횡단면 의존성과 계수의 이질성 뿐만 아니라 독립변수와 비관찰 공통요인 간에 존재할 수 있는 내생성도 함께 고려할 수 있으며, 불안정적 자료의 공적분 관계를 분석하는데 장점을 갖고 있다.

AMG 추정법을 통해 이산화탄소 배출량 결정요인을 분석한 결과, 소득, 인구, 에너지 집약도의 계수가 양(+)의 부호로 통계적으로 유의하게 나타났으며, 도시화 변수는 통계적으로 유의미하지 않게 나타났다.

추정결과에 따르면 우리나라 이산화탄소 배출량은 장기적으로 인구와 경제성장 및 에너지 집약도의 영향을 받으며, 결과적으로 이산화탄소 배출량 감소는 에너지 효율의 증가와 지속가능한 경제성장을 통해 이루어질 수 있다. 에너지 효율의 증가는 화석연료에서 재생 가능한 연료로의 전환에 대한 노력과 이산화탄소 감축기술에 대한 정부와 민간의 적극적인 기술개발에서 비롯될 것이다. 특히 저탄소 사회의 구축과 함께 지속적인 경제성장을 위해서는 이산화탄소 감축이 경제성장을 저해하지 않는 전략수립이 이루어져야 한다. 즉, 이산화탄소 배출량 감축을 위한 기술혁신을 통해 생산성 향상을 유발하여 경제성장에 기여할 수 있는 정책수립이 필요하다.

이와 관련하여 2014년 이후 세계 경제가 3% 이상 성장했음에도 불구하고 에너지 소비에 의한 이산화탄소 배출량이 2년 연속 정체수준을 나타내어 경제성장과 온실가스 배출량 간에 탈동조화(decoupling) 추이를 보이고 있다. 대부분의 개도국에서는 온실가스 배출량이 증가했으나, 온실가스 다배출 국가에서 신재생에너지 활용의 지속적인 확대와 석탄사용의 감소가 온실가스 감소의 주요 요인으로 작용하여 세계 이산화탄소 배출량 감소에 가장 큰 기여를 한 것으로 나타났다(에너지경제연구원, 2016).

우리나라도 지속가능한 경제성장과 함께 탄소중립 사회로의 전환을 이루기 위해 신경제·사회구조 시스템 구축을 추진해야하며, 우리나라 실정에 맞는 저탄소화 관련 연구개발과 실용화를 추진할 필요가 있다.

주

1) 국제에너지기구(IEA)의 '세계에너지 리뷰: 2020년 이산화탄소 배출'.
2) 이순성·이희연(2013), 안영진(2013).
3) 낮은 소득수준에서 경제성장이 이루어짐에 따라 환경이 악화되지만, 경제가 성장할수록 환경이 개선된다는 가설임.
4) 인접 지역과의 상호작용으로 인한 공간적 상관관계를 의미함.
5) 윤갑식·이갑정(2013)에서 지구온난화 방지대책은 도시인구 규모 등을 고려한 도시공간 차원에서 접근해야 함을 강조함.
6) Pesaran(2006)에 의해 개발된 CCE(Common Correlated Effects) 추정법은 모든 관측 가능한 변수의 횡단면 평균을 포함함으로써 관측되지 않은 공통요인과 그룹의 횡단면 의존성을 설명함.

$$y_{it} = \alpha + \beta' x_{it} + u_{it}\,,\ u_{it} = \lambda_i' f_t + \epsilon_{it}$$

여기서 f_t가 공통요인이자 횡단면 의존성에 해당하고, λ_i'는 요인 적재(factor loading)가 됨.
관측 가능한 변수의 추정계수는 회귀모형에서 공통(β')으로 가정하고, 비관찰 공통요인의 추정계수(λ_i')는 이론으로 인해 필요하지만 추정 상 성가신(nuisance) 변수로 간주됨. 또한 변수 모두 안정성(정상성)을 가정함.
7) FMOLS 추정법은 불안정적 패널 변수이고 공적분 관계에 있는 변수를 이용하여 공적분 벡터를 추정하는 대표적인 추정법이며, $\triangle x_{it}$변수의 리드 및 래그 변수 ($\sum_{j=-p}^{r} \gamma_{i,j} \triangle x_{it-j}$)를 이용하여 내생적 피드백을 통제함(Pedroni, 2007).
8) 에너지별 순발열량 기준으로 계산된 석유환산계수를 이용하여 에너지 소비량을 환산하고, 에너지별 소비량에 각 탄소배출계수를 곱하여 탄소발생량을 구한 후, 이를 이산화탄소 배출환산량으로 계산함.
9) 설명변수들 간 다중공선성(multicollinearity)을 검증하기 위해 VIF(variance inflation factor)를 측정한 결과, 변수들 모두 10보다 작고, 1/VIF가 0.1보다 크게 나와 다중공선성 문제가 없음을 확인하였다(이홍택, 2018).
10) $CD = \sqrt{2/N(N-1)}\left(\sum_{r=1}^{N-1}\sum_{j=r+1}^{N}\sqrt{T}\,\widehat{\rho_{rj}}\right)$
T는 기간이며 N은 각 지역의 수이고, $\widehat{\rho_{rj}}$는 지역 r과 j의 상관계수임.
11) $\triangle = \sqrt{N}\left(\frac{N^{-1}S - k}{\sqrt{2k}}\right)$, $S = \sum_{i=1}^{N}(\beta_i - \beta_{WFE})' \frac{X_i' M_\tau X_i}{\sigma_i^2}(\beta_i - \beta_{WFE})$,

$\triangle_{adj} = \sqrt{N}(\frac{N^{-1}S-k}{\sqrt{\frac{2k(T-k-1)}{T+1}}})$

β_i는 그룹별 OLS 회귀모형의 계수이고, β_{WFE}는 기울기의 동질성을 부과하는 가중고정효과(weighted fixed effect)의 추정계수임. X_i는 독립변수 행렬이고, M_i는 항등행렬이며, k는 독립변수의 개수임. 여기서 S 통계량의 값이 크면, 즉 제한 모형의 계수 β_i와 비제한 모형의 계수 β_{WFE}의 차이가 크면 그 둘 사이에 불일치가 있음을 의미하고, $\triangle$ 검정통계량이 커지므로 기울기 동질성 가설을 기각하게 됨. $\triangle_{adj}$는 bias adjusted 통계량임.

12) 평균제곱오차(RMSE, root mean squred errors). RMSE $= \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}-y)^2}{n}}$ 즉, (예측값−실제값) 제곱의 평균 제곱근임. 모형의 적합도 판정방법으로 주로 활용되는 평가기준임.

참고문헌

국립기상과학원, 2019, 2019 지구대기감시 보고서.

김동하·강기연·손소영, 2016, “공간가중회귀 모형을 이용한 서울시 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출 분석,” 대한산업공학회지 42(2), pp.96-111.

김소연·류수열, 2019, “공간패널모형을 이용한 이산화탄소 배출량 결정요인 분석,” 한국지역경제연구 43, pp.49-69.

김진웅·김원규·노영진, 2012, “우리나라 CO2 배출량의 경제적 요인 분석,” 에너지경제연구 11(1), pp.87-119.

신범철, 2013, “동태적 MG패널기법에 의한 아시아국가의 경제성장과 환경오염에 대한 실증분석,” 국제경제연구 19(4), pp.88-111.

신석하, 2013, “오차수정모형을 이용한 한국의 탄소배출량 결정요인 분석,” 경제학연구 62(3), pp.5-28.

안영진, 2013, “독일의 기후변화에 대응한 에너지정책에 관한 고찰,” 한국경제지리학회지 16(1), pp.135-148.

에너지경제연구원, 2016, “최근 세계 이산화탄소 배출동향과 파리협정의 2도 목표 달성 가능성 분석,” 정책이슈페이퍼 pp.16-12.

윤갑식·이갑정, 2013, “인구밀도경사함수를 이용한 우리나라 도시공간구조의 지역별·규모별 변화특성 분석,” 한국경제지리학회지 16(3), pp.445-457.

이순성·이희연, 2013, “주거 에너지 소비에 따른 이산화탄소 배출량의 지역 격차와 격차요인 분석 -중국의 성급을 대상으로 하여-,” 한국경제지리학회지 16(2), pp.149-166.

이홍택, 2018, “사회적경제의 지속가능성에 대한 경제지리적 결정요인: 충청남도를 사례로,” 한국경제지리학회지 21(1), pp.34-52.

이희연·이제연, 2010, “지식창출활동과 지역경제성장 간의 인과관계 분석,” 한국경제지리학회지 13(3), pp.297-311.

Abou-Ali, H., Abdelfattah, Y.M. and Adams, J., 2016, “Population Dynamics and Carbon Emissions in the Arab Region: An Extended STIRPAT Ⅱ Model,” *The Economic Research Forum Working Papers* 988, pp.1-32.

Ahmad, G. and Ghulam, A., 2019, “Investigation of Key Contributors of CO2 Emissions in Extended STIRPAT Model for Newly Industrialized Countries: A Dynamic Common Correlated Estimator Approach,” *Energy Reports* 5, pp.242-252.

Chudik, A., Pesaran, M.H. and Tosetti, E., 2011, “Weak and Strong Cross Section Dependence and Estimation of Large Panels,” *Econometrics* 14, pp.45-90.

Dietz, T. and Rosa, E., 1997, “Effects of Population and Affluence on CO2 Emissions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, pp.175-179.

Dong, K., Hochman, G., Zhang, Y., Sun, R., Li, H. and Liao, H., 2018, “CO2 Emissions, Economic and Population Growth, and Renewable Energy: Empirical Evidence Across Regions,” *Energy Economics* 75, pp.180-192.

Eberhardt, M. and Teal, F., 2010, “Productivity Analysis in Global Manufacturing Production,” *Economics Series Working Papers*, 515, University of Oxford, Department of Economics.

Ehrlich, P. and Holdren, J., 1971, “The Impact of Population Growth,” *Science* 171, pp.1212-1217.

IEA, 2015, “*World Energy Outlook Special Report: Energy and Climate Change*,” International Energy Agency.

Im, K. S., M. H. Pesaran, and Y. Shin, 2003, “Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels,” *Journal of Econometrics* 115, pp.53-74.

Liddle, B., 2013, "The Energy, Economic Growth, Urbanization Nexus Across Development: Evidence from Heterogeneous Panel Estimates Robust to Cross-sectional Dependence," *Energy* 34, pp.223-244.

Liddle, B. and Lung, S., 2010, "Age-structure, Urbanization, and Climate Change in Developing Countries: Revisiting STIRPAT for Disaggregated Population and Consumption Related Environmental Impacts," *Population and Environment* 31, pp.317-343.

Lin, S., Wang, S., Marinova, D., Zhao, D. and Hong, J., 2017, "Impacts of Urbanization and Real Economic Development on CO2 Emissions in Non-high Income Countries: Empirical Research Based on the Extended STIRPAT Model," *Journal of Cleaner Production* 166, pp.952-966.

Martinez-Zarzoso, I. and Maruotti, A., 2011, "The Impact of Urbanization on CO2 Emissions: Evidence from Developing Countries," *Ecological Economics* 70(7), pp.1344-1353.

Pedroni, P., 2007, "Social Capital, Barriers to Production and Capital Shares: Implications for the Importance of Parameter Heterogeneity from a Nonstationary Panel Approach," *Journal of Applied Econometrics* 22(2), pp.429-451.

Pesaran, M. H., 1997, "The Role of Economic Theory in Modelling the Long Run," *The Economic Journal* 107, pp.178-191.

Pesaran, M. H., 2004, "*General Diagnostic Tests for Cross-section Dependence in Panels*," IZA Discussion Paper No.1240 and CESifo Working Paper No.1229.

Pesaran, M. H., 2006, "Estimation and Inference in Large Heterogeneous Panels with a Multifactor Error Structure," *Econometrica* 74(4), pp.967-1012.

Pesaran, M. H., 2007, "A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-section Dependence," *Journal of Applied Econometrics* 22(2), pp.265-312.

Pesaran, M. H. and Yamagata, T., 2008, "Testing Slope Homogeneity in Large Panels," *Journal of Econometrics* 142(1), pp.50-93.

Poumanyvong, P. and Kaneko, S., 2010, "Does Urbanization Lead to Less Energy Use and Lower CO2 Emissions? A Cross-country Analysis," *Ecological Economics* 70(2), pp.434-444.

Rafiq. S., Salim, R. and Apergis, N., 2016, "Agriculture, Trade Openness and Emissions: an Empirical Analysis and Policy Options," *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 60(3), pp.348-365.

Sadorsky, P., 2014, "The Effect of Urbanization on CO2 Emissions in Emerging Economies," *Energy Economics* 41, pp.147-153.

Salim, R., Rafiq, S. and Shafiei, S., 2017, "*Urbanization, Energy Consumption, and Pollutant Emission in Asian Developing Economies: an Empirical Analysis*," Asian Development Bank Institute.

Sharif Hossain, M., 2011, "Panel Estimation for CO2 Emissions, Energy Consumption, Economic Growth, Trade Openness and Urbanization of Newly Industrialized Countries," *Energy Policy* 39(11), pp.6991-6999.

Yang, L., Xia, H., Zhang, X. and Yuan, S., 2018, "What Matters for Carbon Emissions in Regional Sectors? A China Study of Extended STIRPAT Model," *Journal of Cleaner Production* 180, pp.595-602.

Zhang, Y. J. and Wang, W., 2019, "Do Renewable Energy Consumption and Service Industry Development Contribute to CO2 Emissions Reduction in BRICS Countries?," *Environmental Science and Pollution Research* 26, pp.31632-31643.

교신: 류수열, (36729) 경북 안동시 송천동 경동로 1375 안동대학교 경제학과, 전화: 054-820-6209, 이메일: syryu@anu.ac.kr

Correspondence: Suyeol Ryu, Department of Economics, Andong National University, (Songcheon-dong) 1375 Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do, 36729, Korea, Tel: 82-54-820-6209, E-mail: syryu@anu.ac.kr

최초투고일 2021년 11월 03일
수 정 일 2021년 12월 16일
최종접수일 2021년 12월 23일