

공간패널모형을 이용한 대기오염물질과 지역소득간 탈동조화 분석*

Analysis of Decoupling between Atmospheric Pollutants and Regional Income: A Spatial Panel Approach

조향숙**
Hyangsuk Cho

요약: 대기오염물질별 배출량 추세는 지역별 환경요인, 사회·경제적 요인, 오염물질별 배출 특성에 따라 상당히 다른 양상을 보이며, 이동에 경계가 따로 없어 지역 내 뿐만 아니라 인접지역의 대기오염에 간접적인 영향을 주거나 받을 수 있다. 따라서 본 연구는 우리나라 16개 시도의 패널 자료를 이용하여 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOCs)과 지역소득 간 탈동조화(Decoupling) 추세를 살펴보고, 공간패널모형을 이용하여 탈동조화에 영향을 미치는 결정요인 및 지역 간 공간적 상관성에 관해 분석하였다. 첫째, 수도권 지역과 대규모 산업단지 및 석탄 화력발전소가 위치한 지역에서 대기오염물질 배출량이 높게 나타났으며, 대기오염물질별로 탈동조화 추세가 다르게 나타났다. 둘째, VOCs를 제외한 대부분의 대기오염물질은 한 지역의 탈동조화 현상(또는 동조화 현상)이 인접지역의 탈동조화(또는 동조화) 정도에 영향을 받으며, 모든 대기오염물질에 대해 특정지역의 설명변수의 변화가 직접효과(해당지역 탈동조화)에 유의한 영향을 미쳤다. 마지막으로, CO와 NO_x는 특정지역의 설명변수 변화가 간접효과(인접지역 탈동조화)에, 인접지역의 설명변수의 변화가 특정지역의 탈동조화에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심주제어: 공간적 상관성, 대기오염물질, 탈동조화(Decoupling), 공간패널모형

Abstract: The emission trends of atmospheric pollutants differ by regional environmental and socioeconomic factors and each pollutant's emission characteristics. Moreover, air pollution in the region and its neighboring regions, directly and indirectly, affect each other due to the move throughout the atmosphere. This study uses panel data of 16 regions in Korea and examines the decoupling trends between regional incomes and atmospheric pollutants (CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, and VOCs). Moreover, this study uses spatial panel models to determine the key drivers of decoupling and analyze the regional spatial correlation. First, atmospheric pollutant emission levels are high in the capital region and among industrial complexes and coal-fired power stations. The decoupling trends for each air pollutant, however, vary widely. Second, for most atmospheric pollutants, excluding VOCs, the decoupling (or coupling) of a particular region is affected by the degree of decoupling (or coupling) in its neighboring regions. All pollutants have a statistically significant direct effect on the decoupling of the region, concerning changes in a particular region's explanatory variable. Third, for CO and NO_x, changes in the explanatory variables in a particular region have a significant indirect effect on the decoupling of its neighboring regions. Meanwhile, changes in the explanatory variables in its neighboring regions have a significant effect on the decoupling of particular regions.

Key Words: Spatial Correlation, Atmospheric Pollutants, Decoupling, Spatial Panel Model

* 본 논문은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)으로 지원된 연구임.

** 고려대학교 경제학과 BK21 경제학교육연구단 연구교수

I. 서론

대기오염물질은 1960년대 이후 산업화 과정에서 일어난 대규모 산업단지의 확대, 서울을 포함한 수도권을 중심으로 이루어진 인구증가, 소득 수준의 성장, 에너지 소비의 증가 및 기술의 발전을 통해 지속적으로 증가해 왔다. 이를 개선하기 위해 우리나라는 1990년대 이후 ‘대기환경보전법’¹⁾ ‘수도권 대기환경개선에 관한 특별법’²⁾ 등 강력한 대기오염물질 배출 규제 정책을 통해 대기오염물질 저감을 위한 노력을 해왔으며, 그 성과로 수도권 지역에서의 대기오염물질 배출량은 1999년 이후 2013년까지 대체로 감소해왔다.³⁾ OECD가 2017년 3월 발표한 ‘제3차 한국 환경성과평가 보고서(The 3rd OECD Environmental Performance Review 2017)’⁴⁾에서도 한국 정부가 대기오염 저감을 위해 꾸준히 노력해왔으며, 그 성과로 2000~2012년 사이 미세먼지(PM₁₀)를 제외한 주요 대기오염물질의 배출이 경제성장과 탈동조화(Decoupling) 되었다고 평가했다.

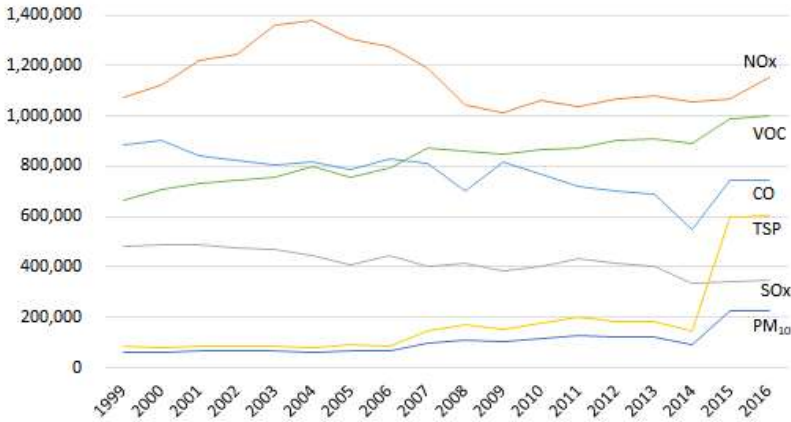
그러나 <그림 1>을 보면, 2013년 이후 대기오염물질 배출량이 다시 증가하기 시작했으며, 미세먼지 문제가 주요 환경의제로 부상하였다. 이에 현 정부는 2017년 미세먼지 종합대책을 마련했으며, 최근에는 대기질 개

-
- 1) 1990년에 제정되어 1991년부터 시행된 대기환경보전법은 대기오염으로 인한 국민건강이나 환경에 관한 위해를 예방하고, 대기환경을 적정하고 지속가능하게 관리·보전하여 모든 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 수 있게 하는 것을 목적으로 하며, 사업장 등과 생활환경상의 대기오염물질 배출 규제, 자동차·선박 등의 배출가스 규제, 자동차 온실가스 배출 관리, 벌칙 등을 규정하고 있다(국가법령정보센터 참조).
 - 2) 2003년에 제정되어 2005년부터 시행된 수도권 대기환경개선에 관한 특별법은 대기오염이 심각한 수도권 지역의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고, 대기오염원을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성함을 목적으로 한다(국가법령정보센터 참조).
 - 3) 1999년 대비 2013년, 수도권 지역(서울, 경기, 인천)의 대기오염물질(NH₃ 제외) 중 휘발성 유기화합물(VOCs)만이 19.1%의 증가추세를 보였고, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 먼지(TSP), 미세먼지(PM₁₀)는 각각 -30.5%, -8.0%, -44.5%, -24.9%, -19.8%의 감소 추세를 보였다(국가미세먼지정보센터 시도별 배출량 참조).
 - 4) OECD 환경성과평가는 OECD 회원국의 환경상태와 정책을 평가하여 개선방안 권고를 통한 회원국 간의 지속적인 정책 논의를 촉진하며, 10년을 주기로 매년 3~4개국을 평가한다. 2017년에는 한국, 뉴질랜드, 에스토니아의 보고서가 발간되었다.

선을 위한 방안으로 대기오염물질을 실효성 있게 감축할 계획을 발표했다. 구체적으로 산업·발전부문에서 대기오염총량제를 확대 시행하는 한편 30% 강화된 배출기준 적용과 질소산화물 배출금 부과 등을 통해 다량 배출사업장 배출량을 20% 이상 집중 감축하고, 수송부문에서 미세먼지 배출이 많은 노후 경유차를 대폭 줄여 전기차 또는 수소차로 대체하는 등의 정책과 제도를 추진할 계획이다(환경부, 2020). 이를 통해 궁극적으로 경제는 성장하면서 대기오염물질의 배출량은 줄어드는 ‘탈동조화’를 실현해야 한다. 이를 위해서는 대기오염물질 배출의 결정요인에 대한 명확한 규명이 필요하다.

대기오염물질별 배출량 추세는 지역별 환경요인, 사회·경제적 요인, 오염물질별 배출 특성에 따라 상당히 다른 양상을 보이고 있다(Park and Lee, 2011; 국립환경과학원, 2019). 에너지 변환, 에너지 소비 및 산업공정에서 발생하는 대기오염물질은 지역별 대기오염의 주요 원인이며, 그 중 경제활동이 집중된 도시지역 또는 산업단지는 상대적으로 대기오염에 노출되기 쉽다(Mage et al., 1996; Jung et al., 2019; OECD, 2019). 그리고 한 번 배출되면 이동에 경계가 따로 없어 지역 내 뿐만 아니라 인접지역의 대기오염에 간접적인 영향을 주거나 받을 수 있다(You and Lv, 2018; Zeng et al., 2019). 따라서 지역경제의 성장과 대기오염물질별 배출량 간의 탈동조화에 영향을 주는 결정요인에 대한 분석이 필요하며, 공간적 상관관계가 지역 간 탈동조화에 미치는 영향을 고려해야 한다.

〈그림 1〉 연도별 대기오염물질 배출량



자료: 국가미세먼지정보센터 물질별 배출량 참조(단위: 톤)

본 연구는 우리나라 시도별 16개 지역을 대상으로 1999~2016년의 지역 내 경제성장과 6대 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOCs) 배출량 사이의 탈동조화 추세를 확인하고, 공간적 상관성을 고려한 공간 패널모형을 이용하여 탈동조화 결정요인과 지역 간 영향에 대해 분석하고자 한다. 기준년도를 1999년으로 설정한 것은 첫째, 환경부 국립환경과학원에서 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 기반으로 1999년부터 총 7개 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOCs, NH₃) 배출량 산정을 시작하였으며, 둘째, 우리나라는 1990년대에 총 3단계(1단계: 1994년 12월 이전, 2단계: 1995~1998년, 3단계: 1999년 이후)로 구분하여 배출허용 기준⁵⁾을 강화하여 왔으므로, 1999년을 기준으로 분석하는 것이 데이터의 일관성(Consistency)에 적합하다고 판단하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 공간계량분석을 적용하여 지역 내 대기오염물질과 경제성장 간의 탈동조화를 연구한 선행연구를 살펴보고, 제 III장에서는 실증분석을 위한 분석모형 및 분석자료를 검토한

5) 대기환경보전법 제8조 3항, 5항 및 6항의 규정에 의하여 일반적인 배출허용기준보다 강화된 기준을 적용하고 있다. 자세한 내용은 국가법령정보센터 참조.

다. 제 IV장에서는 공간패널모형을 적용한 실증분석 결과를 요약하며, 마지막으로 제 V장에서는 결론 및 정책적 함의를 제시한다.

II. 선행연구

환경과 관련된 문제에서 공간 차원의 중요성을 지적인 연구들(Bockstael, 1996; Goodchild et al., 2000; Anselin, 2001)을 시작으로 환경오염과 경제성장의 관계에 관한 최근의 연구들은 공간계량경제학(Spatial Econometrics)을 이용한 Anselin(1988)의 방법론⁶⁾을 적용하여 특정지역의 환경오염이 인접지역의 환경오염에 미치는 영향을 고려하였다. 이와 함께 경제성장 초기에는 환경오염이 증가하다가 특정 전환점을 지나 경제가 성장하면서 환경오염이 감소하는 환경쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC)을 검증하는 실증연구가 이루어지고 있다.

Rupasingha et al.(2004)는 미국의 지역 내 1인당 소득과 독성오염물질 사이에 EKC의 존재 여부를 분석하여, 공간적 상관성과 인종적 다양성이 유의한 영향을 미친다는 것을 보여 주었다. Maddison(2006)은 135개 국가를 대상으로 공간계량분석을 하였으며, 1인당 NO_x와 1인당 SO_x의 배출량이 다른 인접 국가의 배출량에 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다. Burnett and Bergstrom(2010)은 1963~2001년까지 미국의 39개의 주(state)를 대상으로 공간의존성을 고려하여 CO₂ 배출량과 미국의 주 내 소득 사이의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 두 변수 간 EKC가 존재하는 것을 발견하였고, 인접한 주의 CO₂ 배출이 특정 주의 지역 내 배출에 잠재적으로 영향을 미친다는 것을 보였다. You and Lv(2018)는 1985~2013년

6) Anselin(1988)에 의하면, 지역경제와 관련된 분석자료는 공간적 종속성 및 공간적 이질성과 같은 공간적 상관관계가 존재하여 최소제곱법(Ordinary Least Squares, OLS)과 같은 전통적인 회귀분석을 적용할 경우 편의(bias)가 나타난다. 따라서 이를 해결하기 위한 방법론으로 공간 가중치 행렬(Spatial Weighted Matrix)을 적용한 공간시차모형(Spatial Lag Model, SLM)과 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM)을 제시하였다.

까지 83개 국가를 대상으로 CO₂ 배출량의 공간의존성을 분석하였다. 분석결과, 첫째, CO₂ 배출량은 국가 간 공간적 상관관계가 존재하며 EKC 가설이 성립함을 보였다. 둘째, KOF 지수(KOF Globalization Index)⁷⁾를 통해 세계화(Globalization)가 CO₂ 배출량에 미치는 공간의존성을 추정한 결과, CO₂ 배출량에 대한 경제적 세계화의 직접효과는 배출량을 증가시켰지만 간접효과가 배출량을 더 크게 감소시켜 결과적으로 세계화로 인한 CO₂ 배출량(총효과)은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 고도로 세계화된 국가(highly globalized country)와 인접한 국가는 환경의 질에 대해 긍정적 효과를 가진다는 것을 보였다.

Poon et al.(2006)은 중국의 지역 내 SO_x와 Soot⁸⁾의 배출량과 1인당 소득 간에 EKC 가설이 성립하는지 공간상관성을 고려하여 분석하였다. SO_x의 경우 EKC 가설이 성립하지만, Soot는 성립하지 않으며, 공간적 상관성이 유의한 것으로 나타났다. Chan and Yao(2008)는 1990년대 이후 중국의 경제성장이 수많은 대도시의 출현을 야기했고, 에너지 소비 증가, 대기 오염물질 배출, 이로 인한 대기질 하락 등이 중국의 큰 환경문제 중 하나임을 언급하며, 대도시의 대기오염 문제에 대한 현황을 제시하고 인구밀집지역의 대기오염배출 통제가 필요함을 역설했다. 이 후, 공간의존성을 고려하여 중국 지역 내 PM_{2.5}, SO_x, NO_x 등의 대기오염물질과 경제성장의 관계에 대해 EKC가 존재하는지에 대한 연구가 진행되었으며(He et al., 2012, 2014; Zheng et al., 2014; Fang et al., 2015), 최근에도 활발한 연구가 이루어지고 있다.

Kang et al.(2016)은 공간패널모형을 이용하여 1997~2012년까지 중국의 CO₂ 배출량에 대해 EKC가 존재하는지 분석한 결과, 경제성장과 배출량 사이에 역 N자 모형이 존재함을 밝혔고 공간 의존성이 EKC 곡선의 형태에 영향을 미친다는 것을 보여주었다. Hao and Liu(2016)는 2013년 중

7) 스위스 취리히 연방공대 산하 기업사이클 연구소(KOF)에서 매년 발표하는 지수이며, 경제, 사회, 정치 등 3개 부문에서 23개 변수를 기준으로 세계화 수준을 평가한다.

8) Soot는 일반적으로 디젤엔진에서 배출되는 배기가스 성분 중 매연 또는 그을음을 말하며, 중국에서 관련 데이터는 2004년부터 공식적으로 발표되었다.

국의 73개 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 및 대기질 지수 데이터를 바탕으로 중국 내 도시지역의 $PM_{2.5}$ 와 1인당 GDP 관계를 분석하였다. 분석결과, 대기질과 1인당 GDP 간에 EKC가 존재하였고, $PM_{2.5}$ 농도는 인접지역과 유의한 양(+)의 공간적 상관관계가 있는 것으로 나타났다. Hao et al.(2016)는 패널 공간계량모형을 이용하여 1995~2012년까지 중국의 29개 지역을 대상으로 지역별 1인당 석탄소비와 1인당 소득 간에 EKC가 존재하는지 분석하였다. 지역별 석탄소비는 유의한 공간적 상관관계를 가지는 것으로 나타났다, 1인당 석탄소비와 1인당 소득 간 EKC가 성립하였다. 또한 공간적 효과를 고려했을 때 더 높은 1인당 소득 수준에서 EKC의 변환점이 나타난다는 것을 발견했다.

국내에서 지역 간 공간상관성을 고려하여 대기오염물질과 지역소득 간의 관계에 대해 분석한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 김지욱(2018)은 패널공간계량모형을 이용하여 1998~2014년까지 16개 시도를 대상으로 CO, NO_x, SO_x 배출량과 지역소득 간에 EKC 가설이 성립하는지를 분석하였고, 강희찬(2019)은 2003~2014년까지 PM_{10} 의 농도와 PM_{10} 의 발생원 간의 관계를 지역 간 공간 상관성을 고려한 EKC 가설을 기반으로 분석하였다. 그러나 국내 연구에서 공간 의존성을 고려하여 6대 대기오염물질과 지역 내 경제성장의 관계에 대한 종합적인 평가를 할 수 있는 분석이 이루어지지 않았으며, 절대적 탈동조화⁹⁾에 대해서만 초점을 맞추었다. 대기오염물질은 그 특성과 지역별 경제여건 및 상황에 따라 상당히 다른 배출 추이를 보이기 때문에 배출원단위를 고려한 상대적 탈동조화 현상에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내 16개 시도를 대상으로 6대 대기오염물질의 탈동조화 현상에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 공간 의존성을 고려한 패널공간계량모형을 통해 지역 간 영향에 대해 분석하고자 한다.

9) 절대적 탈동조화는 경제가 성장하면서 오염물질 배출량이 감소하는 것을 말하며, 상대적 탈동조화는 배출원단위(오염물질 배출량/GDP)의 개선을 의미한다.

Ⅲ. 분석모형 및 분석자료

1. 대기오염물질의 탈동조화 지수

본 연구에서 대기오염물질의 탈동조화(Decoupling)란 지역 내 경제가 성장하면서 대기오염물질의 배출량은 상대적으로 적게 증가하는 현상을 말하며, 탈동조화 지수(Decoupling Ratio, DR)는 아래와 같이 계산된다.¹⁰⁾

$$Decoupling\ Ratio(DR) = - \frac{(P/GRDP)_{t+1} - (P/GRDP)_t}{(P/GRDP)_t} \quad (1)$$

P 는 1인당 대기오염물질 배출량을, $GRDP$ 는 1인당 지역내총생산, $P/GRDP$ 는 대기오염물질 배출 집약도를 나타낸다. 따라서 DR 은 t 기 대비 $t+1$ 기에 변화된 대기오염물질 배출 집약도를 의미한다. $DR > 0$ 이면, 기준년도 대비 배출 집약도가 감소하는 탈동조화를 의미하며, $DR < 0$ 이면, 기준년도 대비 배출 집약도가 증가하는 동조화를 나타낸다.

2. 공간패널모형(Spatial Panel Model)

변수의 값이 서로 공간적 의존성 또는 공간적 자기상관성이 있는 경우, 잔차가 서로 독립적이지 않으므로 공간회귀모형을 사용하면 보다 신뢰성 있는 통계적 추정이 가능하다(Anselin, 1988). 따라서 본 연구는 공간시차(Spatial lag)를 종속변수에 포함시켜 종속변수의 공간적 자기상관성을 고려하는 공간자기회귀모형(Spatial Autoregressive Model, SAR), 오차항에

10) 환경과 녹색성장 분야에서 OECD가 정의한 탈동조화란 환경압력(environmental bads)과 경제성장(economic goods) 간에 상관관계가 존재하지 않게 되는 상태, 즉, GDP 상승에도 탄소배출이 증가하지 않는 저탄소 성장의 단계를 말한다(OECD 주요 용어집 17 참조). 본 연구는 OECD(2002)에서 제시한 DR 지수를 사용하였으며, 지역 내 경제성장률 대비 대기오염물질의 증가율을 계산한 상대적 탈동조화 지수를 사용하였다(OECD, 2013).

공간적 자기상관성이 존재할 때 공간시차를 오차항에 포함시키는 공간오차모형(Spatial Error Model, SEM),¹¹⁾ 공간시차를 종속변수와 설명변수에 모두 포함시켜 공간적 자기상관과 인접지역의 설명변수에 영향을 받는 공간더빈모형(Spatial Dubin Model, SDM)¹²⁾을 사용하였다. 각 모형의 식은 아래와 같다.

$$\text{SAR: } y_{i,t} = \rho \sum_{j=1}^N W_{i,j} y_{j,t} + \beta_0 + X_{i,t} \beta + \mu_i + \eta_t + \epsilon_{i,t}, \quad i = 1, \dots, N, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\text{SEM: } y_{i,t} = \beta_0 + X_{i,t} \beta + \mu_i + \eta_t + V_{i,t}, \quad V_{i,t} = \lambda \sum_{j=1}^N W_{i,j} V_{j,t} + \epsilon_t \quad (3)$$

$$\text{SDM: } y_{i,t} = \rho \sum_{j=1}^N W_{i,j} y_{j,t} + \beta_0 + X_{i,t} \beta + \sum_{j=1}^N W_{i,j} X_{j,t} \theta + \mu_i + \eta_t + \epsilon_{i,t} \quad (4)$$

$y_{i,t}$ 는 t 시점에 i 지역의 종속변수, $X_{i,t}$ 는 설명변수의 벡터, β_0 와 β 는 각각 상수항과 회귀계수, μ_i 와 η_t 는 각각 지역의 개별효과와 시간효과를 나타내며, $\epsilon_{i,t}$ 는 잔차항이다. ρ 와 θ 는 각각 SAR과 SDM모형의 공간자기회귀계수(Spatial autoregressive coefficient), λ 는 SEM모형의 잔차항에 적용되는 공간자기상관계수(Spatial autocorrelation coefficient), $W_{i,j}$ 는 공간가중행렬 W 의 원소를 나타내며, $V_{i,t}$ 는 공간적으로 자기상관된 잔차항이다.

본 연구는 SDM 모형을 통해 특정지역의 설명변수의 변화가 해당지역의 종속변수에 영향을 미치는 직접효과와 특정지역의 설명변수가 다른 인접지역의 종속변수에 영향을 미치는 간접효과를 추정하였다. 직접효과와 간접효과를 도출하기 위해 SDM모형을 벡터로 표현하면 식 (5)와 같다.¹³⁾

11) Anselin et al.(2004) 참조.

12) Lesage and Pace(2009) 참조.

13) 식 (5)를 k 차 설명변수에 대해 편미분을 하면, 아래의 식과 같으며, $(I - \rho W)^{-1} \beta_k$ 는 직접효과를, 비대각행렬에 있는 원소들의 행합 또는 열합은 간접효과를 나타낸다.

$$y = (I - \rho W)^{-1} X\beta + (I - \rho W)^{-1} WX\theta + (I - \rho W)^{-1} \epsilon \quad (5)$$

본 연구에 사용된 변수를 적용한 각 모형의 식은 다음의 (6)~(8)과 같다.

$$\ln DR_{P_{i,t}} = \rho \sum_{i=1}^N W_{i,j} \ln P_{GRDP_{i,t}} + \beta_0 + \beta_1 \ln P_{Energy} + \beta_2 \ln P_{Diesel} + \beta_3 \ln P_{Gasoline} \\ + \beta_4 \ln VA_{Manuf} + \mu_i + \eta_t + \epsilon_{i,t} \quad (6)$$

$$\ln DR_{P_{i,t}} = \beta_0 + \beta_1 \ln P_{GRDP} + \beta_2 \ln P_{Energy} + \beta_3 \ln P_{Diesel} + \beta_4 \ln P_{Gasoline} \\ + \beta_5 VA_{Manuf} + \mu_i + \eta_t + V_{i,t}, \quad V_{i,t} = \lambda \sum_{i=1}^N W_{i,j} V_{i,t} + \epsilon_t \quad (7)$$

$$\ln DR_{P_{i,t}} = \rho \sum_{i=1}^N W_{i,j} \ln P_{GRDP_{i,t}} + \beta_0 + \beta_1 \ln P_{Energy} + \beta_2 \ln P_{Diesel} + \beta_3 \ln P_{Gasoline} \\ + \beta_4 \ln VA_{Manuf} + \sum_{i=1}^N W_{i,j} Z_{i,t} \theta + \mu_i + \eta_t + \epsilon_{i,t} \quad (8)$$

$DR_{P_{i,t}}$ 는 t 기에 i 지역의 대기오염물질별 탈동조화 지수이며, P_{GRDP} 는 1인당 지역내총생산, P_{Energy} 는 1인당 최종에너지소비량, P_{Diesel} 과 $P_{Gasoline}$ 은 각각 경유와 휘발유의 평균판매가격, VA_{manuf} 는 제조업의 부가가치 비중이다. $W_{i,j}$ 는 공간적으로 더 인접한 지역에 높은 가중치를 부여하여 i 지역과 j 지역 간 상관관계의 크기를 보여주는 공간가중치 행렬이다.¹⁴⁾ 공간가중치 행렬계수인 ρ 와 θ 그리고 λ 는 인접지역의 대기오염물질 배출 변화가 특정지역의 대기오염물질 배출에 미치는 효과를 의미한다.

$$\left[\frac{\partial y}{\partial x_{1k}} \dots \frac{\partial y}{\partial x_{Nk}} \right]_t = \left[\frac{\partial y_1}{\partial x_{1k}} \dots \frac{\partial y_1}{\partial x_{Nk}} \right] = (1 - \rho W)^{-1} \begin{bmatrix} \beta_k & w_{12}\theta_k & \dots & w_{1N}\theta_k \\ w_{21}\theta_k & \beta_k & \dots & w_{2N}\theta_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1}\theta_k & w_{N2}\theta_k & \dots & \beta_k \end{bmatrix}$$

14) 공간가중치 행렬은 공간좌표(coordinates)를 이용하여 한 지역의 중심에서 다른 지역의 중심까지 좌표거리를 계산한 후, 이를 행의 합이 1이 되도록 횡단 표준화 하는 방법을 사용하였다. 이와 관련된 구체적인 방법은 강희찬(2019) 참조.

3. 분석자료

본 연구는 1999년부터 2016년까지 전국 16개 시도¹⁵⁾를 대상으로 패널자료를 구축하여 지역별 대기오염물질의 탈동조화 현상에 영향을 미치는 결정요인을 분석하였으며, <표 1>에 본 연구에 사용된 변수별 설명과 데이터 출처를 정리하였다. 종속변수로는 일산화탄소(Carbon Monoxide, CO), 질소산화물(Nitrogen Oxide, NOx), 황산화물(Sulfur Oxides, SOx), 총부유먼지(Total Suspended Particles, TSP), 10 μm 이하의 미세먼지(Particulate Matter 10, PM₁₀), 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등 6대 대기오염물질 배출량의 탈동조화지수를 사용하였다.¹⁶⁾ 1인당 지역내총생산(GRDP), 1인당 최종에너지소비량, 경유 및 휘발유 평균판매가격은 설명변수로, GRDP 대비 제조업 부가가치 비중은 통제변수로 사용하였다.¹⁷⁾

<표 1> 변수 설명 및 데이터 출처

분류	변수명	설명	출처
종속변수	DR_p	1인당 대기오염물질 배출량의 탈동조화 지수 ($p = CO, NOx, SOx, TSP, PM_{10}, VOCs$)	국가미세먼지 정보센터
설명변수	P_{GRDP}	1인당 지역내총생산(단위: 천원)	통계청
	P_{Energy}	1인당 최종에너지소비량(단위: 천Toe)	지역에너지통계연보
	P_{Diesel}	경유 평균판매가격(단위: 원/리터)	한국석유공사 오피넷
	$P_{Gasoline}$	휘발유 평균판매가격(단위: 원/리터)	
통제변수	VA_{manuf}	GRDP 대비 제조업 부가가치 비중(단위: %)	통계청

15) 분석대상은 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주 등이며, 세종은 2012년부터 데이터가 존재하여 제외하였다.

16) CO의 주요 배출원은 수송부문이며, 산업공정과 비수송부문의 연료 연소 등에서 발생한다. NOx는 고온 연소공정 및 화학물질 제조공정 등에서 주로 발생하며, SOx는 난방용·발전용·산업용 연소시설 및 기타 산업공정 등에서 발생한다. TSP는 대기 중 부유상태에 있는 총 먼지의 양을, PM₁₀은 1,000분의 100 mm 보다 작은 먼지로, 주요 배출원은 화석연료를 사용하는 각종 연소시설 및 소각시설 등이다. VOCs는 유기용제를 사용하는 도장시설, 정유사 및 주유소, 인간의 일상생활과 밀접한 관계가 있는 소비상품 등에서 배출된다(국가미세먼지정보센터 참조).

17) 배정환·김유선(2016)은 우리나라의 CO, NOx, SOx, TSP, PM₁₀, VOC 배출량의 결정요인으로 GRDP, 소비자 물가지수, 인구밀도, 경유소비량, 화력발전용량, 천연가스 버스수, 운송 및 제조업체수, 연간강수량, 경유 및 휘발유가격 등을 사용했다.

일반적으로 시계열 측면에서 에너지소비는 GDP와 같은 소득변수와 매우 유사하게 움직여 설명변수로 함께 고려하면 다중공선성(multicollinearity)이 발생할 수 있다. 그러나 본 연구와 같이 시계열 자료가 아닌 지역별 패널 자료를 활용하면 이러한 문제를 피하고, 지역별 개별성(heterogeneity)을 고려하게 되어 분석결과의 정확성을 높일 수 있다.¹⁸⁾ 경유 및 휘발유 평균 판매가격은 대기오염물질 배출의 원인이 되는 연료소비와 관련된 영향을 추정하기 위해 사용하였다. 본 연구에 사용된 설명변수 및 통제변수 간 상관관계를 분석한 결과는 <부표 1>에 제시하였다.

IV. 분석결과

1. 시도별 대기오염물질 추이

1) 시도별 대기오염물질 배출량 현황

1999~2016년까지 시도별 대기오염물질 배출량 현황을 <표 2>에서 살펴보면, 총 CO 배출량은 1999년 885천톤에서 2016년 795천톤으로 연평균 -0.629%의 감소추세를 보였다. NO_x는 1999년 1,072천톤에서 2016년 1,248천톤으로 연평균 0.898%가 증가하였고, SO_x는 1999년 485천톤에서 2016년 359천톤으로 연평균 -1.754%가 감소하였다. TSP, PM₁₀, VOCs의 총배출량은 각각 12.313%, 7.997%, 2.572%의 증가추세를 보였다.

1999~2016년까지 시도별 대기오염물질 평균배출량은 경기 지역이 가장 높았으며, 경북, 충남, 전남이 그 뒤를 이었다. 경기 지역은 높은 인구밀도, 자동차 대수 및 에너지 소비량 급증과 함께 대기오염물질 배출 사업장의 32%가 경기지역에 밀집해 있어¹⁹⁾ 배출량이 가장 높은 것으로 보인다.

18) 1인당 지역내총생산(GRDP)과 1인당 최종에너지소비량의 다중공선성을 검토한 결과, VIF의 값이 10 이하로 나타나 다중공선성이 없는 것으로 평가하였다.

19) 대기오염 배출시설 관리현황에 의하면 2016년 기준 대기오염물질 배출 사업장은 전국 57,500개소이며, 서울, 인천, 경기 지역에 각각 1,816개소, 4,031개소, 18,225개

경북은 포항과 구미에 대규모 국가 산업단지가 위치해 있어 PM₁₀, VOCs, SO₂와 같은 대기오염물질을 대량으로 배출하여 다른 지역보다 대기질이 나쁠 가능성이 매우 크다.²⁰⁾ 충남에서 대기오염물질이 많이 배출되는 이유는 대규모 태안화력, 당진화력 및 보령화력과 같은 석탄화력발전소와 현대제철, 당진제철소 및 석유화학 산업단지가 분포하고 있기 때문이다.²¹⁾ 시도별 대기오염물질의 평균배출량은 <부그림 1>에 제시하였다.

〈표 2〉 시도별 대기오염물질 배출량 현황

(단위: 천톤)

	CO		NOx		SOx		TSP		PM10		VOCs	
	'99	'16	'99	'16	'99	'16	'99	'16	'99	'16	'99	'16
서울	188	56	90	73	14	4	3	22	3	9	80	63
부산	55	23	48	50	21	11	4	17	3	7	32	41
대구	37	20	32	30	11	4	5	10	4	4	21	31
인천	40	38	47	49	15	12	2	19	2	6	41	52
광주	22	9	13	13	2	0	1	5	1	2	12	17
대전	21	12	19	16	4	1	1	5	1	2	14	16
울산	36	32	63	51	63	49	14	10	9	5	79	97
경기	154	131	172	204	40	15	9	85	8	33	126	185
강원	34	45	63	84	34	18	11	36	7	10	14	26
충북	38	48	51	73	21	9	7	32	5	10	22	40
충남	44	64	138	135	60	82	5	85	4	38	41	73
전북	40	43	45	41	17	7	2	41	2	10	22	71
전남	48	64	68	106	45	62	6	73	5	29	64	87
경북	65	93	91	110	49	39	10	108	7	46	43	85
경남	54	56	121	102	87	31	4	48	3	14	49	108
제주	11	13	13	19	3	2	1	11	1	4	5	11
전국	885	795	1,072	1,248	485	359	85	612	63	233	665	1,024
연평균 증가율	-0.629%		0.898%		-1.754%		12.313%		7.997%		2.572%	

소가 있어 42%가 수도권에 밀집해있다(환경부 환경통계포털 참조).

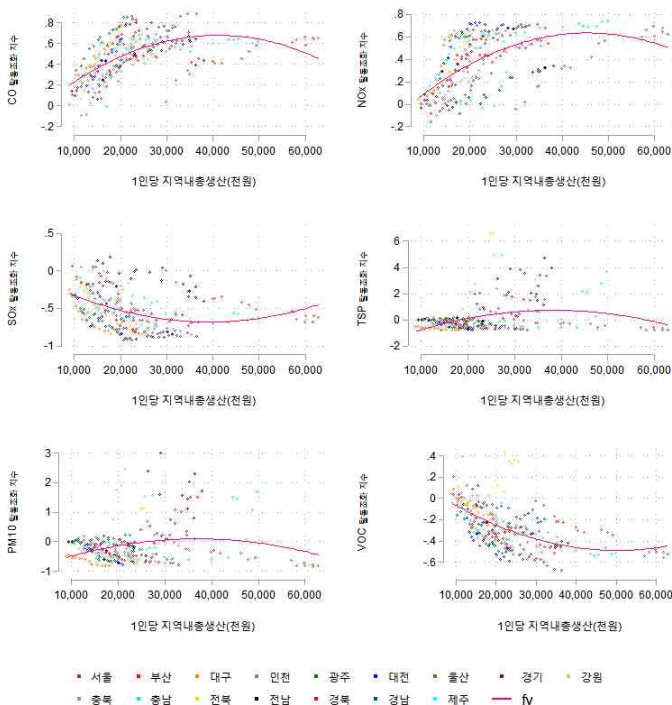
20) 황인조·김태오(2019)참조.

21) 이복진·박승식(2019) 참조.

2) 탈동조화 지수

대기오염물질별 1인당 지역내총생산과 탈동조화 지수 사이의 추이는 <그림 2>와 같다. 먼저, CO와 NO_x의 탈동조화 지수를 살펴보면 1인당 지역내총생산이 증가하면서 탈동조화 지수가 증가하여 탈동조화가 진행된 것으로 나타났으나, SO_x와 VOCs의 경우 1인당 지역내총생산이 증가하면서 탈동조화 지수가 감소하여 동조화가 진행된 것으로 나타났다. TSP와 PM₁₀의 경우 1인당 지역내총생산이 증가하면서 탈동조화 지수가 미세하게 증가하였다. 이처럼 지역별, 대기오염물질별 탈동조화 수준이 다르게 나타나고 있고, 지역 간에 다른 효과를 유발할 가능성이 높으므로, 지역 간 의존성을 고려하여 이에 영향을 미칠 수 있는 결정요인들에 대한 분석이 필요하다.

<그림 2> 1인당 지역내총생산(GRDP)과 탈동조화 지수의 관계



주: fv는 fitted value를 의미

2. 공간패널모형 추정결과

공간계량모형 중 가장 적합한 모형을 판단하기 위해 일반적으로 LR(Likelihood Ratio) 검정을 실시하여(LeSage and Pace, 2009), SDM 모형을 SAR 모형 또는 SEM 모형으로 단순화 할 수 있는지를 판단한다. 그러나 Dubin(2004)에 따르면, SAR 모형의 공간자기회귀계수(ρ)와 SEM 모형의 공간자기상관계수(λ)의 유의성이 모두 유의하지 않으면 OLS 모형의, ρ 의 유의성이 크면 SAR 모형의, λ 의 유의성이 크면 SEM 모형의 설명력이 높음을 보여주며, 직접효과와 간접효과 분석의 편의를 위해서 SDM 모형을 활용한다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 공간패널모형을 이용하여 대기오염물질별 탈동조화 분석을 실시하였으며, SDM 모형의 공간가중행렬 변수의 추정결과와 직접 및 간접효과의 분석결과는 별도의 표로 정리하였다.

1) 공간패널모형을 이용한 대기오염물질별 탈동조화 현상

〈표 3〉은 공간패널모형을 이용하여 1인당 CO 배출량의 탈동조화 현상을 분석한 결과이다. 결과를 살펴보면, 1인당 GRDP, 1인당 최종에너지 소비, 경유 및 휘발유 판매가격은 모든 모형에서 통계적으로 유의하였다. 1인당 GRDP와 연료판매가격의 부호가 양(+)으로 나타나 지역경제의 성장과 연료가격의 상승으로 탈동조화가 진행되었다고 볼 수 있다. CO 배출량의 탈동조화는 지역 내 경제성장으로 인해 자동차와 산업시설에서 배출되는 CO 배출을 감소시키는 삼원촉매장치의 보급과 기타 친환경 기술의 발전에 의한 것으로 보인다.²²⁾ 또한 CO의 경우, 자동차 등에 의한 도로이동오염원 배출량이 가장 높은 배출 기여율을 보여,²³⁾ 경유와 휘발유의 판매가격 상승이 탈동조화에 유의한 영향을 미친 것으로 추측된다. 반면, 1

22) 통계로 보는 한국의 환경(2007) 참조.

23) 2016년 기준, 총 CO 배출량은 795,044톤이며, 도로이동오염원에 의한 배출량은 244,566톤으로 30.8%의 기여율을 보인다(국가미세먼지정보센터 홈페이지 참조).

인당 최종에너지 소비와 제조업 비중의 부호는 음(-)으로 나타나 에너지 소비와 제조업 비중의 증가가 CO의 동조화 현상을 야기했다.

한편 모든 모형에서 공간자기회귀계수인 ρ 와 λ 가 유의한 것으로 나타났다. 즉, CO 탈동조화 현상은 지역 간에 상호 영향을 미치며, 부호가 (+)이므로 특정지역의 CO 탈동조화 현상은 인접지역의 CO 탈동조화에 상당히 영향을 받는다는 것을 의미한다.

〈표 3〉 일산화탄소(CO) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	0.519*** (0.037)	0.580*** (0.033)	0.580*** (0.157)	0.656*** (0.038)	0.503*** (0.062)	0.580*** (0.049)
$\ln P_{Energy}$	-0.279*** (0.046)	-0.291*** (0.046)	-0.309*** (0.043)	-0.319*** (0.043)	-0.252*** (0.046)	-0.279*** (0.046)
VA_{Manuf}	-0.291* (0.169)	-0.322* (0.172)	-0.187 (0.159)	-0.234 (0.158)	-0.377** (0.177)	-0.348** (0.177)
$\ln P_{Diesel}$	0.120*** (0.022)		0.150*** (0.032)		0.139*** (0.043)	
$\ln P_{Gasoline}$		0.167*** (0.041)		0.238*** (0.063)		0.248*** (0.083)
ρ	0.345*** (0.064)	0.387*** (0.064)			0.665*** (0.127)	0.797*** (0.109)
λ			0.810*** (0.115)	0.877*** (0.103)		
σ^2	0.004*** (0.0003)	0.004*** (0.0004)	0.004*** (0.0003)	0.004*** (0.0003)	0.004*** (0.0003)	0.004*** (0.0003)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

〈표 4〉는 1인당 NO_x 배출량의 탈동조화 현상을 분석한 결과이다. 모든 모형에서 1인당 GRDP와 연료판매가격이 유의한 양(+)의 부호로 추정되어 1인당 지역내총생산의 증가와 연료가격의 상승으로 NO_x 배출량의 탈동조화가 진행된 것으로 나타났다. NO_x 탈동조화는 수도권 사업장 대기 오염물질 총량관리제²⁴⁾ 및 수도권 대기환경개선대책을 통한 배출허용기

준 강화와 지역 내 경제성장과 함께 NO_x를 줄이기 위한 저감 사업²⁵⁾ 등의 노력이 기여한 것으로 보이며, 배출원 중 도로이동오염원의 비중이 가장 높아²⁶⁾ 경유와 휘발유의 판매가격 상승이 NO_x 탈동조화에 유의한 영향을 미친 것으로 해석된다. 반면, 1인당 최종에너지 소비가 증가하면서 동조화 현상이 진행되었다.

공간설명변수의 경우 SAR 모형과 SEM 모형에서 값이 유의하여 NO_x 배출량의 탈동조화는 인접지역의 탈동조화에 영향을 받는 것으로 나타났다.

〈표 4〉 질소산화물(NO_x) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	0.551*** (0.051)	0.600*** (0.045)	0.614*** (0.060)	0.681*** (0.051)	0.561*** (0.088)	0.610*** (0.069)
$\ln P_{Energy}$	-0.218*** (0.064)	-0.226*** (0.063)	-0.219*** (0.064)	-0.228*** (0.064)	-0.281*** (0.066)	-0.292*** (0.065)
VA_{Manuf}	-0.145 (0.234)	-0.185 (0.234)	-0.104 (0.232)	-0.148 (0.232)	-0.008 (0.251)	-0.088 (0.248)
$\ln P_{Diesel}$	0.120*** (0.030)		0.159*** (0.039)		0.154*** (0.061)	
$\ln P_{Gasoline}$		0.233*** (0.056)		0.302*** (0.071)		0.319*** (0.115)
ρ	0.339*** (0.077)	0.338*** (0.077)			0.172 (0.183)	0.086 (0.189)
λ			0.507*** (0.162)	0.487*** (0.163)		
σ^2	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

24) 2008년부터 시행된 사업장 대기오염물질 총량관리제도는 종전의 사후적 관리인 배출농도관리와는 달리 배출총량을 기준으로 관리하는 사전 예방적 관리제도로 오염물질별 목표 대기질 달성을 위한 배출허용총량을 산정한 후 사업장별로 배출량을 할당하여 그 범위 내에서 오염물질을 배출하도록 하는 제도이며, 수도권권역 내 지정된 사업장을 대상으로 질소산화물, 황산화물, 먼지에 대해 규제한다.

25) 2005~2014년까지 국가 대기질 개선을 위한 1차 수도권 대기개선대책이 추진되었고 NO_x 저감장치 부착을 통해 저감을 달성하였다(한국환경정책·평가연구원, 2012).

26) 2016년 기준, 총 NO_x 배출량은 1,248,309톤이며, 도로이동오염원에 의한 배출량이 452,995톤으로 36.3%의 기여율을 보인다(국가미세먼지정보센터 홈페이지 참조).

〈표 5〉는 1인당 SOx 배출량의 탈동조화 현상을 분석한 결과이다. CO, NOx와 달리, 1인당 GRDP의 부호가 음(-)으로 나타나 1인당 지역내총생산이 증가하면서 SOx 배출량이 증가하는 동조화 현상이 진행되었다. 반면, 1인당 최종에너지 소비가 증가할수록 SOx 배출량의 탈동조화가 진행되었는데, SOx의 배출원은 주로 생산공정과 제조업 및 에너지 산업연소 부문에서 크게 발생하므로,²⁷⁾ 이 부문의 효율향상을 통한 최종에너지 소비의 감소가 SOx의 탈동조화 현상에 기여한 것으로 보인다. 연료 가격의 경우 대부분의 모형에서 유의하지 않은 것으로 나타났다.

〈표 5〉 황산화물(SOx) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	-0.694*** (0.061)	-0.730*** (0.054)	-0.815*** (0.070)	-0.858*** (0.054)	-0.803*** (0.101)	-0.830*** (0.079)
$\ln P_{Energy}$	0.354*** (0.073)	0.363*** (0.072)	0.373*** (0.071)	0.380*** (0.070)	0.366*** (0.075)	0.381*** (0.074)
VA_{Manuf}	-0.210 (0.268)	-0.242 (0.267)	-0.222 (0.259)	-0.219 (0.258)	-0.148 (0.290)	-0.248 (0.286)
$\ln P_{Diesel}$	0.009 (0.034)		0.011 (0.047)		0.062 (0.078)	
$\ln P_{Gasoline}$		0.104* (0.062)		0.127 (0.088)		0.213 (0.134)
ρ	0.364*** (0.090)	0.363*** (0.089)			0.591*** (0.151)	0.587*** (0.149)
λ			0.647*** (0.146)	0.639*** (0.147)		
σ^2	0.011*** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.014*** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.010*** (0.001)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

27) 2016년 기준, 총 SOx 배출량은 358,951톤이며, 생산공정에 의한 배출량은 112,734톤, 제조업 연소에 의한 배출량은 86,593톤, 에너지산업 연소에 의한 배출량은 91,696톤으로 각각 31.4%, 25.5%, 241%의 기여율을 보인다(국가미세먼지정보센터 홈페이지 참조).

공간설명변수는 모든 모형에서 유의한 양(+)의 값이 추정되어 특정지역에서 SO_x의 탈동조화 현상이 인접지역의 SO_x 탈동조화 현상에 영향을 받는 것으로 나타났다. 일부지역은 상대적으로 많은 SO_x를 배출하는 석유제품 및 제철제강업 등의 산업기반으로 성장해 왔으며, 기준년도 대비 비교적 낮은 배출 증감율을 유지하여 인접지역으로 그 영향이 확산되었다는 것을 보여준다.

〈표 6〉과 〈표 7〉은 1인당 TSP와 PM₁₀ 배출량의 탈동조화 현상을 분석한 결과이다. TSP는 1인당 GRDP와 최종에너지 소비의 부호가 양(+)으로 나타나 GRDP와 최종에너지 소비가 증가했지만 에너지 효율 향상이 탈동조화 현상을 이끈 것으로 보이며, PM₁₀은 1인당 최종에너지 소비만 모든 모형에서 유의한 양(+)의 부호로 나타났다.

TSP와 PM₁₀의 경우 주로 시멘트 및 연탄, 골재 공장 등에서 일정한 배출구를 거치지 않고 대기 중으로 직접 배출되는 비산먼지가 주요 배출원이며, 제조업 연소 부문에서도 상당량이 배출된다. 또한 제철·제강업 등 대형사업장이 위치한 경북 지역, 화력발전소와 산업단지가 많은 인천 지역, 대규모 제조업 공장들이 있는 경기 지역, 대규모 석탄화력 발전소가 있는 충남 지역이 총부유먼지와 미세먼지 배출 주요 지역인데, 1995년에 개정된 환경정책기본법을 통한 미세먼지 집중 관리와 에너지 효율 향상²⁸⁾을 통해 산업부문의 미세먼지 감축을 이끈 것이 탈동조화의 주요한 영향으로 추측된다.²⁹⁾

주목할 만한 특징은 연료의 평균판매가격 상승이 총부유먼지와 미세먼지의 동조화 현상을 야기했다는 것이다. 경유 가격이 상승해도 휘발유 가격 대비 연비가 좋아 가격 상승이 미세먼지 감축을 주도하는데 역부족이며, 휘발유 가격의 상승은 경유의 소비를 촉진시켜 이 또한 미세먼지 감축

28) 미세먼지의 연평균 환경기준 달성률은 2007년 24.4%에서 2016년 71.6%로 상당히 개선되었으며(한국의 사회동향, 2018), 화력발전소(석탄)로부터 배출된 황산화물에 의해 발생하는 미세먼지가 부산, 대구, 인천 등에서 감소하는 경향을 보였다. 이를 통해 각 지자체 및 정부 차원에서 시행한 미세먼지 배출량 감소 정책이 적절히 잘 진행되었음을 유추할 수 있다(한국의 사회동향, 2018).

29) 이재운·유이선·김한훤·오인하(2018) 참조.

에는 영향을 미치지 못한 것으로 볼 수 있다.³⁰⁾ 즉, 본 연구에서는 연료 가격 상승에 의한 TSP 및 PM₁₀의 탈동조화는 진행되지 않은 것으로 나타났다.³¹⁾

〈표 6〉 총부유먼지(TSP) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	2.377*** (0.492)	1.577** (0.383)	3.816*** (0.535)	2.689*** (0.401)	3.423** (0.712)	2.465*** (0.562)
$\ln P_{Energy}$	3.947*** (0.520)	4.075*** (0.515)	3.668*** (0.496)	3.801*** (0.496)	3.760*** (0.529)	3.931*** (0.523)
VA_{Manuf}	-4.805** (1.934)	-4.233** (1.923)	-4.712** (1.841)	-4.011** (1.834)	-5.970*** (2.036)	-5.108** (2.022)
$\ln P_{Diesel}$	-2.019*** (0.312)		-2.787*** (0.373)		-2.326** (0.496)	
$\ln P_{Gasoline}$		-3.957*** (0.592)		-5.311*** (0.676)		-4.331*** (0.945)
ρ	0.644*** (0.125)	0.594** (0.131)			0.748*** (0.129)	0.716*** (0.135)
λ			0.794*** (0.125)	0.748*** (0.135)		
σ^2	0.539*** (0.045)	0.535*** (0.045)	0.519*** (0.044)	0.518*** (0.044)	0.507*** (0.043)	0.507*** (0.043)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

30) 에너지 전환과 미세먼지 저감을 위한 세계개편 방향 및 과제(김승래, 2019) 참조.

31) 미세먼지의 농도와 배출을 줄이려면 경유 가격을 휘발유 수준으로 올려야 한다는 주장도 제기됐으며(<https://www.mk.co.kr/news/society/view/2019/06/423003/>), 이와는 달리 경유가 휘발유보다 비싸도 미세먼지는 감소효과가 그리 크지 않다고도 지적한다(<https://news.joins.com/article/21739423>).

〈표 7〉 미세먼지(PM₁₀) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	0.161 (0.235)	-0.146 (0.178)	0.554** (0.275)	0.156 (0.214)	0.662* (0.398)	0.354 (0.315)
$\ln P_{Energy}$	2.939*** (0.289)	2.992*** (0.288)	2.820*** (0.283)	2.872*** (0.284)	2.790*** (0.295)	2.860*** (0.292)
VA_{Manuf}	-1.502 (1.081)	-1.291 (1.080)	-1.318 (1.056)	-1.078 (1.057)	-1.643 (1.137)	-1.358 (1.131)
$\ln P_{Diesel}$	-0.682*** (0.160)		-0.871*** (0.189)		-0.545** (0.277)	
$\ln P_{Gasoline}$		-1.242*** (0.293)		-1.563*** (0.353)		-0.838 (0.528)
ρ	0.505*** (0.164)	0.510*** (0.163)			0.339* (0.192)	0.322* (0.194)
λ			0.614*** (0.173)	0.601*** (0.180)		
σ^2	0.168*** (0.014)	0.168*** (0.014)	0.165*** (0.014)	0.166*** (0.014)	0.158*** (0.013)	0.158*** (0.013)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

공간설명변수는 모든 모형에서 유의한 양(+)의 추정계수를 갖는 것으로 나타났다. 즉, 특정지역의 총부유먼지와 미세먼지 배출량의 탈동조화는 인접지역의 탈동조화 현상에 영향을 받는 것을 의미한다. 미세먼지는 발생원에서 직접 배출되는 1차 오염물질과 대기 중 물리 및 화학반응을 통하여 확산·이동되는 2차 오염물질로 구분되므로 오염배출의 특성상 인접지역 등에서의 외부영향에 민감하다. 따라서 오염물질 배출량, 대기질, 지역 간 영향 등의 관계 등을 고려하여 광역적 대기관리체계 구축이 필요하다.

〈표 8〉은 1인당 휘발성 유기화합물(VOCs) 배출량의 탈동조화 현상 분석 결과를 보여준다. 1인당 GRDP의 부호가 (-)로 나타나 지역 내 소득이 증가하면서 VOCs의 배출량이 증가하여 동조화가 진행된 것으로 나타났다. 1인당 최종에너지 소비의 부호는 양(+)으로 나타나 최종에너지 소비가 증가하였으나 에너지 효율 개선으로 VOCs의 탈동조화가 진행된 것으로 보인다.

공간설명변수의 경우 모든 모형에서 유의하지 않은 것으로 나타나 인접지역에서 발생하는 VOCs의 동조화에 영향을 받지 않는다는 것을 보여준다.

〈표 8〉 휘발성 유기화합물(VOCs) 추정결과

	SAR		SEM		SDM	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln P_{GRDP}$	-0.371*** (0.105)	-0.481*** (0.095)	-0.389** (0.111)	-0.515*** (0.102)	-0.200 (0.166)	-0.223 (0.144)
$\ln P_{Energy}$	0.222*** (0.082)	0.241*** (0.082)	0.230*** (0.082)	0.252*** (0.082)	0.202** (0.085)	0.217*** (0.084)
VA_{Manuf}	-0.006 (0.285)	0.046 (0.285)	-0.048 (0.284)	0.007 (0.284)	-0.104 (0.314)	-0.199 (0.311)
$\ln P_{Diesel}$	-0.093 (0.062)		-0.112* (0.085)		-0.187* (0.105)	
$\ln P_{Gasoline}$		-0.049 (0.130)		-0.083 (0.148)		-0.445** (0.225)
ρ	0.186 (0.134)	0.216 (0.132)			-0.001 (0.245)	-0.059 (0.252)
λ			0.099 (0.240)	0.129 (0.249)		
σ^2	0.010** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.010** (0.001)	0.010** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.010** (0.001)

주: *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 을 나타내며, 괄호안의 값은 표준오차이다

2) SDM모형의 공간가중행렬과 직접 및 간접효과

〈표 9〉는 SDM 모형을 이용해 추정한 공간가중행렬(W) 변수(θ)와 직접 및 간접효과의 분석결과이다. 먼저, 공간가중행렬 변수를 살펴보면 CO는 θ_1 이 유의한 음(-)의 추정치가 도출되어 인접지역의 지역내총생산의 증가가 특정지역의 CO 동조화 현상에 영향을 미치며, θ_2 는 유의한 양(+)의 추정치가 도출되어 인접지역의 최종에너지 소비 변화가 특정지역의 CO 탈동조화 현상에 유의한 영향을 미친다는 것을 보여준다. NO_x는 θ_1 이 유의한 양(+)의 추정치가 도출되어 인접지역의 지역내 총생산의 증가가 특정

지역의 NO_x 탈동조화 현상에 영향을 미치며, θ_2 가 유의한 음(-)의 추정치가 도출되어 인접지역의 최종에너지 소비의 증가가 특정지역의 NO_x 동조화 현상에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

다음으로 경유의 평균판매가격을 포함하여 추정한 직접 및 간접효과를 살펴보면, $\ln P_{GRDP}$ 는 직접효과와 총효과의 부호가 <표 3>의 추정계수의 부호와 동일하였으나 간접효과의 부호는 반대 방향으로 나타났다. 이것은 지역내총생산의 증가가 특정지역과 인접지역에 미치는 효과의 방향이 다르다는 것을 의미한다. VOC를 제외한 대부분의 대기오염물질의 탈동조화는 지역 내 경제성장에 직접적인 영향을 받지만, 인접지역의 경제성장은 특정지역의 NO_x 탈동조화에만 영향을 미친다.

$\ln P_{Energy}$ 의 직접효과는 모든 대기오염물질에 대해 유의하여 1인당 최종에너지 소비의 증가가 해당지역의 탈동조화에 영향을 준 것으로 나타났다. CO와 NO_x는 직접 및 간접효과가 모두 유의하여 특정 지역과 인접지역의 1인당 최종에너지 소비의 증가가 특정지역의 CO와 NO_x의 탈동조화 현상에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

$\ln P_{Diesel}$ 은 SO_x를 제외한 대부분의 대기오염물질의 탈동조화가 지역 내 경유 평균판매가격의 상승에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 휘발유의 평균판매가격을 포함하여 추정한 결과는 경유의 평균판매가격을 포함하여 추정한 결과와 거의 유사하여, $\ln P_{Gasoline}$ 변수의 결과만 제시하였다. $\ln P_{Gasoline}$ 은 SO_x와 PM₁₀을 제외한 대기오염물질의 탈동조화가 지역 내 휘발유 평균판매가격의 상승에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 경유와 휘발유의 평균판매가격의 추정계수를 비교해보면, $\ln P_{Diesel}$ 의 효과 크기가 $\ln P_{Gasoline}$ 의 효과 크기보다 커, 경유 판매가격이 휘발유 판매가격보다 대기오염물질의 탈동조화(또는 동조화)에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

〈표 9〉 θ 및 직접효과, 간접효과 추정결과

Variable	Effects	CO	NOx	SOx	TSP	PM10	VOCs
$\ln P_{GRDP}$	θ_1	-0.432* (0.160)	0.663** (0.273)	0.420 (0.256)	-0.919 (1.806)	-0.061 (0.956)	-0.530 (0.401)
	Direct	0.501*** (0.062)	0.570*** (0.089)	-0.802*** (0.101)	3.536*** (0.716)	0.679* (0.403)	-0.194 (0.170)
	Indirect	-0.085 (0.144)	0.435*** (0.118)	-0.056 (0.181)	1.575 (1.371)	0.091 (0.535)	-0.278 (0.190)
	Total	0.417*** (0.116)	1.005*** (0.112)	-0.858*** (0.187)	5.112*** (1.467)	0.769 (0.541)	-0.472*** (0.162)
$\ln P_{Energy}$	θ_2	1.192*** (0.377)	-1.950*** (0.592)	-0.165 (0.616)	-2.939 (4.331)	-1.276 (2.407)	0.135 (0.664)
	Direct	-0.210*** (0.052)	-0.300** (0.131)	0.366*** (0.085)	3.745*** (0.643)	2.777*** (0.306)	0.198** (0.085)
	Indirect	0.893*** (0.328)	-1.144*** (0.313)	0.068 (0.540)	0.065 (4.371)	-0.134 (1.625)	0.079 (0.350)
	Total	0.683* (0.360)	-1.444*** (0.339)	0.434 (0.591)	3.809 (4.806)	2.643 (1.769)	0.276 (0.375)
$\ln P_{Diesel}$	θ_3	-0.015 (0.085)	-0.104 (0.119)	-0.118 (0.136)	1.519 (1.023)	-0.199 (0.566)	0.233 (0.206)
	Direct	0.141*** (0.043)	0.152** (0.062)	0.058 (0.070)	-2.352*** (0.491)	-0.559** (0.280)	-0.190* (0.108)
	Indirect	0.066 (0.050)	-0.045 (0.061)	-0.066 (0.085)	-0.234 (0.636)	-0.254 (0.289)	0.118 (0.105)
	Total	0.207*** (0.042)	0.107*** (0.038)	-0.001 (0.067)	-2.586*** (0.561)	-0.813** (0.212)	-0.072 (0.072)
$\ln P_{Gasoline}$	θ_4	-0.162 (0.158)	-0.154 (0.223)	-0.205 (0.253)	2.520 (1.973)	-0.715 (1.080)	1.105** (0.458)
	Direct	0.249*** (0.081)	0.315*** (0.117)	0.207 (0.132)	-4.383*** (0.928)	-0.866 (0.530)	-0.454* (0.232)
	Indirect	0.035 (0.107)	-0.069 (0.115)	-0.067 (0.159)	-0.575 (1.181)	-0.639 (0.708)	0.562** (0.234)
	Total	0.284*** (0.090)	0.246*** (0.065)	0.140 (0.118)	-4.958** (0.983)	-1.505*** (0.382)	0.108 (0.147)

주1: $\theta_1 = W \times \ln P_{GRDP}$, $\theta_2 = W \times \ln P_{Energy}$, $\theta_3 = W \times \ln P_{Diesel}$, $\theta_4 = W \times \ln P_{Gasoline}$

주2: VA_{Manuf} 변수는 CO와 TSP의 일부 결과에 대해 유의하여 표에서 생략하였다

V. 결론 및 시사점

미세먼지를 포함한 대기오염물질 배출의 대부분은 에너지 부문에서 기인하고 있으므로, 경제활동과 에너지 소비가 집중되어 있는 수도권 지역과 산업단지에서의 대기오염물질 저감은 시급한 과제이다. 또한 대기오염물질은 지역 내 뿐만 아니라 인접지역과 상호영향을 주고받을 수 있으므로 오염물질의 특성에 따른 관리가 필요하다. 따라서 대기질의 개선을 위해 기존의 에너지원을 대체하는 재생에너지 확대와 에너지 효율성 개선을 위한 노력이 필요하며, 이를 통해 지역 내 대기오염물질 배출과 경제성장의 탈동조화를 이끌어내야 한다.

이러한 점에 착안하여 본 연구는 우리나라 16개 시도의 패널 자료를 이용하여 6대 대기오염물질 배출량과 지역소득 간 탈동조화 추세를 살펴보고, 탈동조화에 영향을 미치는 결정요인 및 지역 간 영향에 관해 추정하였다. 분석모형은 지역 간 공간의존성을 고려할 수 있는 공간패널모형을 적용하였으며, 탈동조화의 결정요인으로서는 1인당 GRDP, 1인당 최종에너지 소비량, 경유 및 휘발유 평균판매가격, GRDP 대비 제조업 비중을 사용하여 분석을 진행했다. 분석결과 중 큰 특징들을 몇 가지 정리하면 다음과 같다.

첫째, 1999~2016년까지 6대 대기오염물질의 연평균 증가율은 CO와 SO_x를 제외하고 대부분 증가세에 있는 것으로 나타났다. 이는 수도권 지역의 높은 인구밀도, 자동차 대수 증가, 에너지 소비 급증과 함께 대규모 산업단지 및 석탄 화력발전소가 위치한 지역의 대기오염물질 배출량 증가가 주요 원인인 것으로 보인다.

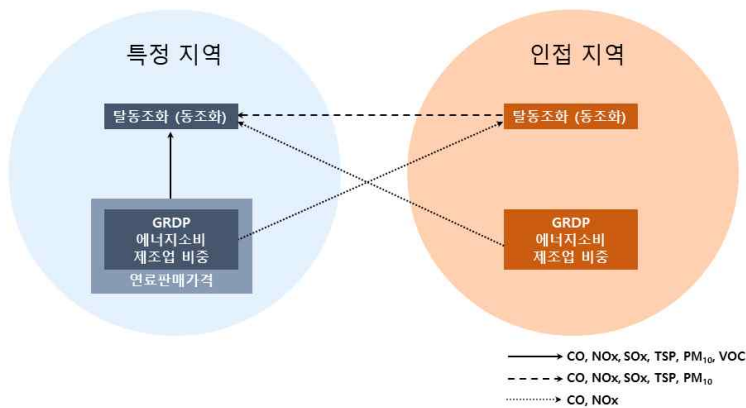
둘째, 대기오염물질별로 탈동조화 추세가 다르게 나타났다. 즉, 지역경제가 성장하면서 CO와 NO_x의 배출량은 상대적으로 적게 증가하여 탈동조화 현상이 존재하였으나, SO_x와 VOCs는 배출량이 더 크게 증가하여 동조화 현상이 나타났다. 한편 TSP와 PM₁₀은 탈동조화 지수가 미세하게 증가하였다.

셋째, VOC를 제외한 대부분의 대기오염물질의 공간회귀계수가 통계적으로 유의하여 한 지역의 탈동조화 현상(또는 동조화 현상)은 인접지역의 탈동조화(또는 동조화) 정도에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 한 지역의 설명변수의 변화가 지역 내 탈동조화에 영향을 미치는 직접효과는 모든 대기오염물질에 대해 유의한 것으로 나타났다.

넷째, 연료판매가격을 제외한 특정지역의 설명변수의 변화는 인접지역의 CO와 NO_x의 탈동조화에, 인접지역의 설명변수의 변화는 특정지역의 CO와 NO_x의 탈동조화 현상에 상호영향을 미치는 것으로 나타났다.

지역 간 공간적 상관관계에 대한 결과는 <그림 3>에 정리하였다.

<그림 3> 특정지역과 인접지역의 공간적 상관관계



마지막으로 주목할 만한 특징은 TSP와 PM₁₀의 연료판매가격 직접효과가 음(-)으로 추정되어 연료판매가격 상승이 TSP와 PM₁₀의 동조화를 유발하였으며, 휘발유의 추정계수의 크기가 더 작아 경유가 탈동조화(또는 동조화) 현상에 더 큰 영향을 미친다는 것이다.

이와 같은 본 연구의 분석결과를 토대로 볼 때, 지역별·대기오염물질별 탈동조화 추세, 인접지역과의 공간적 상관관계, 탈동조화에 영향을 미치는 결정요인을 고려하여 대기오염물질 저감 정책을 수립해야 하며, 특히

경유 인상을 통한 미세먼지 저감 정책은 그 실효성이 확실치 않아 논란의 여지가 있는 것으로 보이며, 앞으로 다각적인 측면의 연구가 필요하다. 또한 자동차, 발전소 및 산업공정에서 배출되는 NO_x는 수도권 지역과 대규모 산업단지에서 다량 배출되며, 다른 대기오염물질에 비해 공기 중 반응성이 커 지역 내 뿐만 아니라 인접지역과의 상호영향을 고려한 정책을 실현해야 한다. 뿐만 아니라 동조화 현상이 나타나고 있는 SO_x와 VOCs를 배출하는 대규모 산업단지 및 다량 배출 사업장의 에너지 효율을 개선하고 배출 저감 장치를 의무 설치화 하는 등 더 강력한 에너지 수요관리와 배출 저감 정책이 실시되어야 한다.

본 연구는 우리나라 지역 내 공간적 의존성만을 고려하였으므로, 추후 연구에서는 우리나라 대기질에 영향을 주는 중국의 영향을 함께 적용한 분석이 필요하며, 대기오염물질의 배출량과 더불어 농도를 고려한 분석도 의미가 있을 것으로 생각된다. 또한 데이터의 한계로 인해 지역별·연료별 에너지 소비를 반영하지 못하였는데 이 부분을 분석한다면 추후 더 정확한 탈동조화의 원인을 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

■ 참고문헌 ■

- 강희찬, 2019, “한국의 미세먼지 발생요인 분석: 공간계량모형의 적용,” 『자원·환경경제연구』, 28(3), pp.327-354, DOI: 10.15266/KEREA.2019.28.3.327.
- 국립환경과학원, 2019, 『2016 대기오염물질 배출량』, 인천: 국립환경과학원.
- 김승래, 2019, “에너지 전환과 미세먼지 저감을 위한 세계개편 방향 및 과제,” 『한국재정학회 정책토론회』, 프레스센터.
- 김지옥, 2018, “패널공간터빈모형을 통한 환경오염과 한국 지역소득간의 비선형관계분석,” 『환경정책』, 26(4), pp.123-145, DOI: 10.15301/jepa.2018.26.4.123.
- 배정환·김유선, 2016, “우리나라 대기오염배출 원인과 저감 정책 효과 분석,” 『자원·환경경제연구』, 25(4), pp.545-564, DOI: 10.15266/KEREA.2016.25.4.545.
- 에너지경제연구원, 2018, 『2018 지역에너지통계연보』, 울산: 에너지경제연구원.
- 연합뉴스, 2019.6.16., “미세먼지 농도 낮추려면 경유 가격 휘발유 수준으로 올려야,” <https://www.mk.co.kr/news/society/view/2019/06/423003/>.

- 이복진·박승식, 2019, “충청남도 지역 2018년 초여름 대기환경기준물질 농도의 시간적·공간적 변화 분석,” 『한국대기환경학회지』, 35(2), pp.265-281, DOI: 10.5572/KOSAE.2019.35.2.265.
- 이재윤·유이선·김한훤·오인하, 2018, 『대기오염 문제의 국내경제 영향 및 시사점』, 세종: 산업연구원.
- 중앙일보, 2017.7.8., “미세먼지 주범 vs 서민증세일 뿐...재점화한 경유값 인상 논란,” <https://news.joins.com/article/21739423/>.
- 통계청 통계개발원, 2018, 『한국의 사회동향 2018』, 대전: 통계청.
- 한국환경정책·평가연구원, 2012, 『수도권대기환경관리 증장기 정책방향 설정』, 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- 황인조·김태오, 2019, “경북지역 산업단지의 대기 중 PM_{2.5}의 화학적 특성,” 『한국대기환경학회지』, 35(3), pp.336-345, DOI: 10.5572/KOSAE.2019.35.3.336.
- 환경부, 2007, 『통계로 보는 한국의 환경』, 세종: 환경부.
- _____, 2020, 『녹색전환으로 만드는 더 나은 대한민국』, 세종: 환경부.
- Anselin, L., 1988, “Lagrange multiplier test diagnostics for spatial dependence and spatial heterogeneity,” *Geographical Analysis*, 20(1), pp.1-17, DOI: 10.1111/j.1538-4632.1988.tb00159.x.
- _____, 2001, “Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics,” *American Journal of Agricultural Economics*, 83(3), pp.705-710, DOI: 10.2307/1245103.
- Anselin, L., R. J. G. M. Florax, and S. J. Rey, 2004, Econometrics for spatial models: Recent advances, In L. Anselin, R. Florax, and S. J. Rey, (Eds.), *Advances in spatial econometrics: Methodology, tools and applications*, (pp.1-25), Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bockstael, N. E., 1996, “Modeling economics and ecology: The importance of a spatial perspective,” *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), pp.1168-1180, DOI: 10.2307/1243487.
- Burnett, J. W. and J. C. Bergstrom, 2010, *US state-Level carbon dioxide emissions: A spatial-temporal econometric approach of the environmental Kuznets curve*, (Working Paper Faculty Series 96031), Athens, GA: University of Georgia, Department of Agricultural and Applied Economics.
- Chan, C. K. and X. Yao, 2008, “Air pollution in mega cities in China,” *Atmospheric Environment*, 42(1), pp.1-42, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.09.003.
- Dubin, R. A., 2004, Spatial lag and spatial revisited: Some monte carlo evidence. In J. P. Lesage, and R. K. Pace (Ed.), *Spatial and spatiotemporal econometrics*, (Advances in Econometrics, 18, pp.75-98), Bingley: Emerald Group

- Publishing Limited, DOI: 10.1016/S0731-9053(04)18002-X.
- Fang, C., H. Liu, G. Li, D. Sun, and Z. Miao, 2015, "Estimating the impact of urbanization on air quality in China using spatial regression model," *Sustainability*, 7(11), pp.15570-15592, DOI: 10.3390/su71115570.
- Goodchild, M. F., L. Anselin, R. P. Appelbaum, and B. H. Harthorn, 2000, "Toward spatially integrated social science," *International Regional Science Review*, 23(2), pp.139-159, DOI: 10.1177/016001760002300201.
- Hao, Y. and Y.M. Liu, 2016, "The influential factors of urban PM_{2.5} concentrations in China: A spatial econometric analysis," *Journal of Cleaner Production*, 112, pp.1443-1453, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.005.
- Hao, Y., Y. Liu, J. Weng, and Y. Gao, 2016, "Does the environmental Kuznets curve for coal consumption in China exist? New evidence from spatial econometric analysis," *Energy*, 114, pp.1214-1223, DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.075.
- He, C., F. Pan, and Y. Yan, 2012, "Is economic transition harmful to China's urban environment? Evidence from industrial air pollution in Chinese cities," *Urban Studies*, 49(8), pp.1767-1790, DOI: 10.2307/26150958.
- He, C., Z. Huang, and X. Ye, 2014, "Spatial heterogeneity of economic development and industrial pollution in urban China," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(4), pp.767-781, DOI: 10.1007/s00477-013-0736-8.
- Jung, M. C., J. Park, and S. Kim, 2019, "Spatial relationships between urban structures and air pollution in Korea," *Sustainability*, 11(2), pp.1-17, DOI: 10.3390/su11020476.
- Kang, Y., T. Zhao and Y. Yang, 2016, "Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions in China: A Spatial panel data approach," *Ecological Indicators*, 63, pp.231~239, DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.12.011.
- Maddison, D., 2006, "Environmental Kuznets curves: A spatial econometric approach," *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(2), pp.218-230, DOI: 10.1016/j.jeem.2005.07.002.
- Mage, D., G. Ozolins, P. Peterson, A. Webster, R. Orthofer, and V. Vandeweerd et al., 1996, "Urban air pollution in megacities of the world," *Atmospheric Environment*, 30(5), pp.681-686, DOI: 10.1016/1352-2310(95)00219-7.
- LeSage, J. and R. K. Pace, 2009, *Introduction to spatial econometrics*, Boca Raton, Florida: CRC Press.
- OECD, 2002, *Indicators to measure decoupling of environmental pressure from*

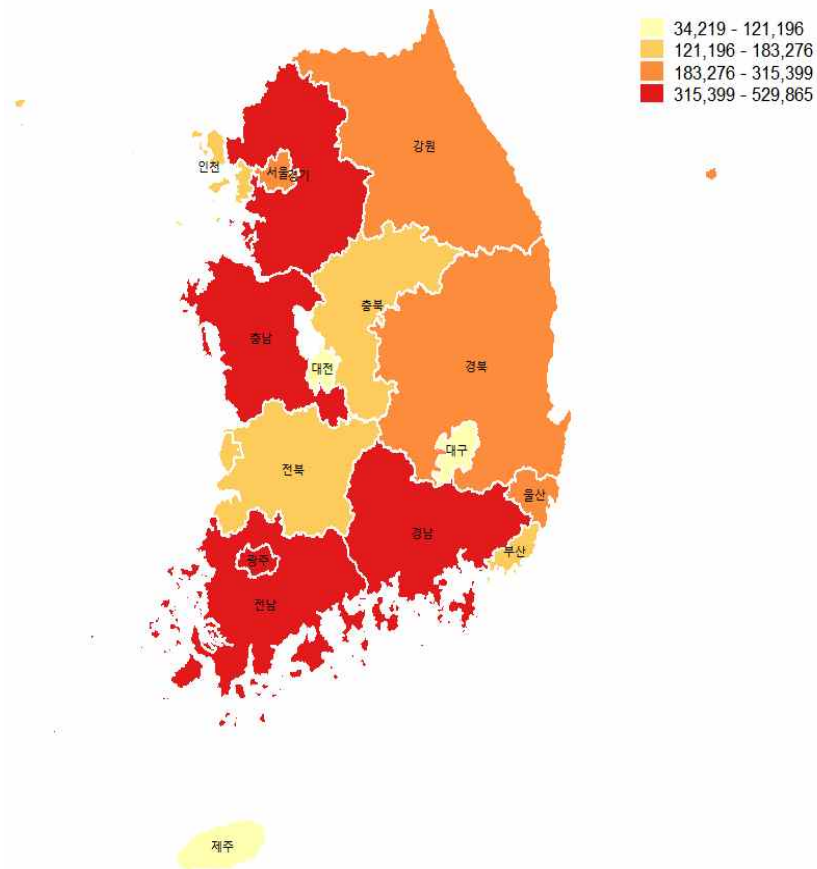
- economic growth*, Paris: OECD.
- _____, 2013, *Environment at a glance 2013: OECD indicators*, Paris: OECD Publishing.
- _____, 2017, *OECD Environmental performance reviews: Korea 2017*, OECD Publishing, Paris: OECD.
- _____, 2019, *Environment at a glance: Climate change, environment at a glance: indicators*, Paris: OECD.
- Park, S. and Y. Lee, 2011, "Regional model of EKC for air pollution: Evidence from the Republic of Korea," *Energy Policy*, 39(10), pp.5840-5849. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.06.028.
- Poon, J. P., I. Casas, and C. He, 2006, "The impact of energy, transport, and trade on air pollution in China," *Eurasian Geography and Economics*, 47(5), pp.568-584, DOI: 10.2747/1538-7216.47.5.568.
- Rupasingha, A., S. J. Goetz, D. L. Debertin, and A. Pagoulatos, 2004, "The environmental Kuznets curve for US counties: A spatial econometric analysis with extensions," *Papers in Regional Science*, 83(2), pp.407-424, DOI: 10.1111/j.1435-5597.2004.tb01915.x.
- You, W. and Z. Lv, 2018, "Spillover effects of economic globalization on CO₂ emissions: A spatial panel approach," *Energy Economics*, 73, pp.248-257, DOI: 10.1016/j.eneco.2018.05.016.
- Zeng, J., T. Liu, R. Feiock, and F. Li, 2019, "The impacts of China's provincial energy policies on major air pollutants: A spatial econometric analysis," *Energy Policy*, 132, pp.392-403, DOI: 10.1016/j.enpol.2019.05.052.
- Zheng, X., Y. Yu, J. Wang, and H. Deng, 2014, "Identifying the determinants and spatial nexus of provincial carbon intensity in China: A dynamic spatial panel approach," *Regional Environmental Change*, 14(4), pp.1651-1661, DOI: 10.1007/s10113-014-0611-2.
- 국가미세먼지정보센터, <http://www.airemiss.nier.go.kr/>.
- 국가법령정보센터, <https://www.law.go.kr/>.
- 주오이시디 대한민국 대표부, "OECD 주요 용어집 17," <https://overseas.mofa.go.kr/>, [2020.6.25]
- 통계청, <http://kosis.kr/>.
- 한국석유공사 오피넷, <https://www.opinet.co.kr/>.
- 환경부 환경통계포털, <http://stat.me.go.kr/>.

〈부표 1〉 설명변수 간 상관관계

	P_{GRDP}	P_{Energy}	P_{Diesel}	$P_{Gasoline}$	VA_{manuf}
P_{GRDP}	1.0000				
P_{Energy}	0.5507	1.0000			
P_{Diesel}	0.5814	0.0524	1.0000		
$P_{Gasoline}$	0.5246	0.0343	-	1.0000	
VA_{manuf}	0.3411	0.5935	0.0412	0.0124	1.0000

주: 경유 및 휘발유 평균판매가격은 각각 추정되므로, 상관관계를 -로 표시

〈부그림 1〉 시도별 대기오염물질 평균배출량 현황



주: 1999~2016년의 시도별 6대 대기오염물질 평균 배출량(단위: 톤)

자료: 국가미세먼지정보센터

조향숙: 성균관대학교 경제학과에서 경제학 박사학위를 취득하고 현재 고려대학교 경제학과 BK21 연구교수로 재직 중이다. 주요 연구실적으로는 조향숙(2019), “국가별 소득 수준에 따른 1인당 CO₂ 배출량 수렴 분석” (『자원환경경제연구』, 28(1))과 조향숙(2017), “OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석”(『자원환경경제연구』, 26(1)) 등이 있다(hscho83@korea.ac.kr).

투 고 일: 2020년 09월 03일
심 사 일: 2020년 09월 17일
게재확정일: 2020년 10월 27일