

우리나라 대기오염배출 원인과 저감 정책 효과 분석

배정환* · 김유선**

요약 : 최근 우리나라는 미세먼지 및 초미세먼지 문제가 크게 대두되면서 대기오염문제에 대한 효과적인 해결책이 중요해진 시점에 있다. 본 연구는 대기오염의 원인을 계량경제모형을 통해 찾아보고, 경유가격 인상정책이 경유소비 감소와 대기오염의 저감에 기여하는지를 분석해 보았다. 대기오염물질로는 TSP, PM10, NO_x, SO_x, CO, VOC가 포함되었다. 분석 결과 CO를 제외하고 모든 오염물질에서 경제성장은 역U자형의 영향을 미치는 것으로 나타났고, 소비자 물가지수, 화력발전설비, 경유소비, 황사발생일수, 천연가스버스, 운수업체 사업장수, 평균기온, 제조업체 사업장수 등이 대기오염에 영향을 미치는 변수로 나타났다. 또한 경유가격이 1% 상승하면 대기오염물질은 단기적으로는 0.07~0.12% 감소하고, 장기적으로는 0.31~0.53% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 환경개선부담금의 형태로 경유가격을 올리고, 그 수입원을 바이오디젤 보급 지원에 사용한다면 보다 효과적인 대기오염 개선을 기대할 수 있다.

주제어 : 대기오염물질, 경유소비, 경유가격인상, 바이오디젤

JEL 분류 : Q42, Q53, Q58

접수일(2016년 8월 20일), 수정일(2016년 10월 12일), 게재확정일(2016년 11월 10일)

* 전남대학교 경제학부 부교수, 교신저자(e-mail: jhbae@jnu.ac.kr)

** 전남대학교 경제학부 석사과정(e-mail: yousun@gmail.com)

Causes of Air pollution and Effects of Mitigation Policy in Korea

Jeonghwan Bae* and Yusun Kim**

ABSTRACT : Recently as fine and ultra fine particles become major environmental issues in Korea, it is very important to develop effective solutions to air pollution. Accordingly this study aims at detecting causes of air pollution by using models and examining if diesel price increases contribute to reduction of diesel consumption and air pollution. TSP, PM10, NO_x, SO_x, CO, and VOC are included as major air pollutants. As a result, we found invert U shape curve between pollution and income for all air pollutants except CO. Consumer price index, coal power capacity, diesel consumption, frequency of yellow dust, number of natural gas buses, number of transport business, annual average temperature, number of manufacturing businesses are also influential in explaining causes of air pollution. As diesel price increases by 1%, air pollutants decline between 0.07~0.12% in the short run. Simultaneously, the additional revenue from increases in diesel prices might be transferred to support expansion of biofuel market. Also, stronger policy should be developed to mitigate the current air pollution problem.

Keywords : Air pollutants, Diesel consumption, Diesel price increase, Biodiesel

Received: August 20, 2016. Revised: October 12, 2016. Accepted: November 10, 2016.

* Associate Professor, Department of Economics, Chonnam National University(e-mail: jhbae@jnu.ac.kr)

** Master Student, Department of Economics, Chonnam National University(e-mail: yousun@gmail.com)

I. 서론

최근 몇 년 사이에 수도권뿐만 아니라 전국적으로 미세먼지 문제가 심각해지면서 그 원인이 비단 중국발 황사뿐만 아니라 국내 배출원 증가도 중요한 원인일 수 있다는 전문가들의 주장이 제기되었다. 이에 따라 2016년 5월부터 정부는 미세먼지 종합대책을 수립하기 위해 부처간 조정회의와 전문가 자문을 통해 미세먼지 주요 배출원으로 경유차량 증가,¹⁾ 석탄화력 발전량 증가, 황사일수의 증가 등으로 판단하였다. 이에 따른 대응 정책으로 10년 이상 된 경유 차량의 폐차비 지원 및 신규 저공해차 교체 시 개별소비세 인하, 노후 석탄화력 발전소 폐지, 전기차 및 수소 연료전지차 조기 보급, 친환경 건축물 확산, 스마트 도시사업 확대, 황사문제 해결을 위한 주변국과 환경협력 강화 등을 제시한 바 있다.

그러나 이러한 대책들이 과연 실효성 있는 대책인가에 대해서는 이견이 분분하며, 경유소비를 억제하기 위한 경유가격 인상 정책과 같은 핵심적인 내용은 제외되어 있다는 점에서 정책 실효성에 의문을 제기하는 전문가들이 상당하다. 특히 수송부문 저공해차량 대책의 경우 이미 나와 있는 전기차 및 수소연료전지차 보급이 과연 새로운 대책인지는 더욱 의문스럽다.²⁾ 특히 전기차 보급 증가로 전기수요가 증가하면 석탄 화력발전이 증가할 수 있고, 수소연료전지도 수소 생산을 위해 천연가스가 필요하다는 점에서 무공해 차량이 아니다. 따라서 미세먼지 저감 능력이 뛰어난 바이오디젤³⁾ 보급 확대와 같은 대안적인 접근도 고려해볼 만하지만 애그플레이션에 대한 우려(Cha and Bae, 2011), 열대우림 파괴 가능성, 국산 원료의 한계(Bae, 2015), 면세유 문제 등으로 아예 검토 대상이 아닌 것으로 보인다.

본 연구는 이러한 배경에서 출발하여 미세먼지를 포함한 다양한 대기오염배출의 원

1) 국제암연구소의 분석에 따르면 폐암을 유발하는 1등급 발암물질로 경유 배출가스를 지적하였고, 간접 흡연보다 경유배출가스가 건강에 더 해롭다고 하였다. 또한 미국 환경청(US EPA, 1998)에 따르면 경유차가 미세먼지 발생의 23%를 차지하는 것으로 보고되었다.

2) 2016년 OECD의 대기오염의 경제적 결과라는 보고서(OECD, 2016)에 따르면 한국이 현재 추세대로 미세먼지가 배출된다면 2060년경에는 OECD 회원국 가운데 미세먼지로 인한 사망률 1위 국가가 될 것으로 전망했다.

3) 국립환경과학원(2013)에 따르면 바이오디젤 혼합이 증가할수록 일반경유에 비해 PM2.5, CO, VOC, PAH, HC 등이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 다만 NOx는 바이오디젤 혼합률 증가에 따라 배출량에 변화가 없는 것으로 나타났다.

인을 계량경제모형을 이용하여 실증적으로 규명하고, 대표적인 정책수단으로 경유가격 인상 방안의 정량적 효과를 평가하고자 한다. 대기오염배출 결정모형을 설정하기 위해 기존 연구들은 이론적 토대로서 환경쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve: EKC) 가설에 주로 의존하고 있다.

EKC 가설은 경제성장과 환경오염간에 역U자형의 관계에 있다는 것으로 경제성장 초기에는 부의 축적을 통해 빈곤에서 탈피하는 데에 자원이 집중되면서 환경오염 문제가 주목을 받지 못하지만 소득전환점을 지나면서 점차 삶의 질과 환경에 관심을 갖게 되고 환경오염 수준이 임계점을 지나면서 환경오염의 피해에 대해 주목하게 된다는 것이다. 이에 따라 환경 규제 정책이 강화되고 사람들의 인식도 친환경적으로 바뀌면서 점차 환경이 개선된다는 것이다.

그로스만과 크루거(Grossman and Kruger, 1995)가 PM (Particulate Matter), SO₂ (Sulfur Dioxide), BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand)를 대상으로 EKC가 존재함을 실증적으로 규명한 이래로 수많은 학자들이 다양한 오염물질과 대상국가에 대해 상이한 방법론들을 동원하여 환경쿠즈네츠곡선 가설이 성립하는지에 대해 연구해 왔다. OECD 또는 EU 등 선진국에서는 대체로 역U자형의 오른쪽에 위치하여 경제성장에 따라 환경오염 수준도 감소하는 것으로 나타났으나, 개도국에서는 역U자형보다는 선형이나 N자형이 더 많은 것으로 나타났다. 우리나라의 경우도 연구별로 역U자형이 존재한다는 연구결과가 있는 반면에(배정환·김미숙, 2012; 이광훈, 2010; 이광훈·이춘화, 2009), EKC가 관측되지 않는 것으로 나타난 연구 결과들도 있다(김정인·오경희, 2005; 김원규, 2011).

한편 환경오염의 주요인으로 경제성장 이외에 인구규모, 소비자물가, 에너지가격, 환경오염 저감기술, 에너지 효율, 산업구조, 대외개방도와 같은 변수들이 주로 사용되었다. 최근에는 관료들의 부패나 제도적 요인이 환경오염 규제의 집행력에 미치는 영향을 분석하기도 하였다(Cole, 2007; Leitao, 2010). 환경오염물질의 유형을 살펴보면 과거에는 주로 아황산가스나 질소산화물, 매연, 일산화탄소(Grossman and Kruger, 1995; Seldon and Song, 1994; Hauer and Runge, 2000)와 같은 대기오염물질 중심이었으나 최근에는 기후변화가 주요 관심사가 되면서 이산화탄소 배출에 영향을 미치는 요인 분석(Galeotti et al., 2006; Aslanidis and Anastasios, 2006; Aslanidis and Susana, 2009;

Galeotti et al., 2009)이 주류를 이루고 있다.

본 연구는 6가지 대기오염배출물질인 총부유먼지(TSP), 미세먼지(PM10), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOC)을 대상으로 지역 총생산, 소비자 물가지수, 인구밀도와 같은 거시변수와 경유 소비량, 황사일수, 석탄화력발전규모, 기후변수, 천연가스버스 보급 규모, 제조업 및 운송업체수와 같은 다양한 미시변수를 이용했다는 점에서 기존 연구와 차별적이다. 특히 경유 소비를 추정하는 다음, 추정된 경유 소비량을 대기오염배출모형의 설명변수로 이용하는 연립추정법(joint estimation)을 사용했다는 점도 차별적이다. 이러한 연립추정법을 이용하여 경유가격이 경유소비를 통해 대기오염 배출⁴⁾에 미치는 영향을 추정함으로써 경유가격 인상정책의 대기오염저감 효과를 정량적으로 평가했다는 점이 선행연구에 기여하는 부분이다.

논문의 전개는 우선 대기오염배출량의 결정요인과 경유수요 결정요인에 관한 계량경제모형을 설정하고, 분석에 필요한 데이터를 설명한다. 다음으로 경유수요 및 대기오염물질별 배출량 결정 모형을 추정하고, 경유가격 인상이 경유소비와 대기오염물질 배출에 미치는 효과를 정량화한다. 끝으로 경유에 대한 대체연료인 바이오디젤 보급 확대를 위한 정책적 시사점을 도출하였다.

II. 분석모형 및 분석자료

분석모형은 두 부분으로 구성된다. 우선 대기오염배출모형을 설정하고, 주요 설명변수인 경유 소비량은 다시 경유가격 및 기타 통제변수에 대해 추정한다. 이에 따라 1단계 추정은 경유 수요모형이 되고, 2단계는 추정된 경유 소비량이 대기오염배출모형에서 설명변수로 포함되는 연립추정법(joint estimation)을 채택하였다(Cole, 2007; Leitão, 2010). 그 이유는 경유가격 인상이 경유소비와 대기오염 배출 수준에 연쇄적으로 미치는 영향을 파악하기 위함이다.

4) 대기오염배출농도의 경우 연평균으로 계산하면 연도간 차이가 거의 없는 것으로 나타나기 때문에 대기오염 배출량을 기준으로 하였다.

1. 대기오염배출 결정모형

16개 시·도 가운데 지역 i 의 시점 t 에서 대기오염물질별 배출량 (AP_{jit})에 대한 결정모형은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln AP_{jit} = & \alpha_1 + \alpha_2 \ln GRDP_{i,t} + \alpha_3 \ln GRDP_{i,t}^2 + \alpha_4 \ln CI_{i,t} + \alpha_5 \ln DEN_{i,t} \\ & + \alpha_6 \ln ElnDCON_{i,t} + \alpha_7 \ln COAL_{i,t} + \alpha_8 \ln YDUST_{i,t} + \alpha_9 \ln CBUS_{i,t} \\ & + \alpha_{10} \ln NTB_{i,t} + \alpha_{11} \ln NMB_{i,t} + \alpha_{12} \ln RAIN_{i,t} + \alpha_{13} \ln TEMP_{i,t} + \epsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (1)$$

($j=CO, TSP$ (비산먼지 제외), NO_x, SO_x, VOC, PM_{10} (비산먼지 제외))

여기서 $GRDP$ 는 지역총생산액, CI 는 소비자 물가지수, DEN 은 인구밀도, $ElnDCON$ 은 다음 절에서 설명할 경유수요모형에서 추정된 경유소비량을 뜻한다.⁵⁾ $COAL$ 은 석탄화력 발전용량, $YDUST$ 는 연간황사발생일수, $CBUS$ 는 천연가스버스 보급대수, NTB 는 운송부문 사업체수, NMB 는 제조업체수, $RAIN$ 은 연평균 강수량, $TEMP$ 는 연평균기온을 나타낸다.

지역총생산액, 소비자 물가지수는 거시경제변수이고, 인구밀도는 공간적 효율성을 나타내는 지표이며, 경유소비와 화력발전용량, 운수업체수, 제조업체수, 연간황사발생일수는 배출오염원이며, 천연가스버스 보급대수는 배출저감기술, 강수량 및 기온은 기후변수로 볼 수 있다. 특히 EKC 가설을 검증하기 위해 지역총생산액은 일차항과 이차항을 포함시켰다. 이차항 계수가 유의한 음이고, 일차항 계수가 유의한 양이면 역U자형이 되므로 EKC 를 지지할 수 있다. 한편 소비자 물가지수의 경우 물가지수가 높을수록 소비가 감소하므로 오염도 감소할 것으로 보았다.

TSP 와 PM_{10} 의 경우 다음 절의 대기오염배출현황에서 알 수 있듯이 2007년도에 수입 무연탄이 새로운 대기오염 배출원으로 포함되기 시작했다. 따라서 2007년을 전후로 TSP 및 PM_{10} 배출량에 구조적 변화가 있는지의 여부를 살펴보기 위해 2007~2012년을 1로 하고, 2000~2006년을 0으로 하는 더미변수($D2007$)을 추가하였다.

대기오염배출 결정모형을 추정하기 위해 패널일반화최소자승법(GLS)를 적용하였

5) 경유 소비의 추정치를 설명변수로 사용함으로써 경유소비모형과 대기오염배출모형이 연결된다.

다. 본 연구에서 사용한 패널 자료에는 횡단면 개체 간 이분산성 문제, 시계열 개체간 상관성 문제가 존재하는 것으로 나타났다. 이를 위해 Wooldridge F-test를 이용하여 시계열 1차 자기상관성을 검증하였고, 집단간 이분산성 문제를 검증하기 위해 Modified Wald test를 적용하였다(민인식·최필선, 2012). 검증 결과 모든 대기오염물질 배출모형에서 1차 자기상관성과 이분산성 문제가 존재하는 것으로 나타났다(<표 1>).

패널 데이터에 개체 간 이분산성만 존재한다면 패널고정효과 또는 확률효과 모형을 적용하여 제거할 수 있지만, 시계열 자기상관성까지 동시에 존재하는 경우에는 패널 GLS 방식을 적용해야 한다. 즉 오차항의 공분산에 이분산성과 1차 자기상관성을 허용하여 추정해야 한다. 모든 대기오염물질에서 개체 간 이분산성과 1차 자기상관성 문제가 관측되었으므로 패널GLS 접근법을 이용하여 대기오염배출 결정모형을 추정하였다.

<표 1> 이분산성 및 시계열 자기상관성 검증 결과

Model	TSP	PM10	NOx	SOx	CO	VOC
Wooldridge F-test	125.131***	93.019***	21.051***	82.363***	41.652***	25.776***
Modified Wald Chi Square-test	13678.52***	12765.63***	175.96***	668.02***	256.13***	913.76***

(주: *** p-value<0.01, ** p-value<0.05, * p-value<0.1)

2. 경유수요 결정모형

경유수요에 대한 가격탄력성을 추정한 국내 선행연구로는 강만옥(2007), 김영덕(2007), 김민성, 김성수(2011)의 연구가 있다. 강만옥은 가격탄력성을 단기에 -0.304, 장기에 -0.472로 추정했고, 김영덕은 단기 -0.11, 장기 -0.139로 추정했으며, 김민성, 김성수는 단기 -0.219~-0.314, 장기 -0.811~-1.085로 추정했다. 기존의 국내 선행연구들은 시계열자료를 이용하여 자기시차분포모형(ADL), 자기회귀시차분석모형(ARDL), 연립방정식모형(SUR) 등을 통해 경유소비의 가격탄력성을 추정하는 방식을 적용했다.

본 연구는 패널 데이터를 이용하고 있기 때문에 시계열 분석 모형을 사용하지 않고 패널 추정 방법인 패널 GLS 모형과 패널동태 모형을 이용하여 경유 소비의 가격탄력성을 구하였다. 경유수요 결정모형에서도 패널 데이터가 이분산성과 자기상관성 문제가 존

재하고, 경유수요와 경유가격 간의 내생성 문제가 내포되어 있기 때문에 패널동태모형이 가장 적절한 추정방법이다.

경유수요를 추정하기 위해 다음의 식 (2)와 같은 모형을 사용했다.

$$\ln DCON_{i,t} = \beta_1 + \beta_2 \ln DCON_{i,t-1} + \beta_3 \ln GRDP_{i,t} + \beta_4 \ln UNE_{i,t} + \beta_5 \ln DPRICE_{i,t} + \beta_6 \ln GPRICE_{i,t} + u_{i,t} \quad (2)$$

여기서 $DCON_{i,t}$ 은 t기의 경유소비량, $DCON_{i,t-1}$ 은 t-1기의 경유 소비량, $GRDP$ 는 지역총생산액, UNE 는 실업률, $DPRICE$ 는 경유가격, $GPRICE$ 는 휘발유가격을 나타낸다. 일반적으로 재화의 수요를 추정하기 위해 일차적인 변수는 가격과 소득 변수, 그리고 대체재의 가격이다. 본 연구에서는 지역 변수라는 측면에서 지역별 실업률을 추가하였고, 장기 가격탄력성 추정을 위해 전기의 경유 소비량을 추가적인 설명 변수로 사용했다.

본 연구에서 사용한 경유수요모형은 종속변수의 시차변수가 설명변수로 포함되었기 때문에 패널 GLS⁶⁾에서는 오차항의 자기상관성 문제를 완전히 제거할 수 없고, 내생성 문제 역시 제거할 수 없다. 따라서 Arellano-Bover (1995)와 Blundell-Bond (1998)이 종속변수의 과거차분변수를 추가로 도구변수로 이용하는 시스템GMM(Generalized Method of Moment)을 적용한 동태패널모형을 이용해야 한다. Allerano and Bond (1991)은 내생성과 자기상관성을 해결하기 위해 종속변수의 과거 수준값을 도구변수로 사용하는 차분 GMM을 개발하였으나, 시스템GMM이 더 효율적인 추정을 가능하게 하는 것으로 알려져 있다(민인식·최필선, 2009).

본 연구는 Arellano-Bover/Blundell-Bond linear dynamic panel-data estimation으로 알려진 동태패널모형에 기초하여 경유수요를 추정하였다. 또한 추정된 경유 소비량은 앞서 대기오염물질별 배출요인 결정모형에서 설명변수로 사용되었다. 이를 통해 경유가격 1% 인상이 대기오염물질 배출을 얼마나 저감할 수 있는지를 추정하고자 하며 식 (3)을 사용하였다.⁷⁾ 즉 두 번째 식은 경유가격이 경유소비에 미치는 한계효과와 경유소

6) 경유 수요 모형에 대한 이분산성과 자기상관성을 Modified Wald Chi Square 및 Wooldridge F-test를 이용하여 검증한 결과 각각 34.979와 381.67로 나타나 이분산성과 자기상관성이 있는 것으로 나타난다.

7) 앞서 설명한 바와 같이 경유수요모형과 대기오염배출모형이 연립추정(joint estimation)되므로 식 (3)을 이용하여 경유가격이 대기오염배출에 미치는 영향을 추정할 수 있다. 이러한 연립추정방법은 Cole(2007) 및 Leitão(2010)에서 부패지수가 GDP를 통해 온실가스 배출에 미치는 영향을 추정하기 위해 적용한 방식이다.

비가 대기오염배출량에 미치는 한계효과로 구성되어 있고, 세 번째 식은 각 한계효과에 대한 식 (1)과 식 (2)의 추정계수들로 구성되어 있다.

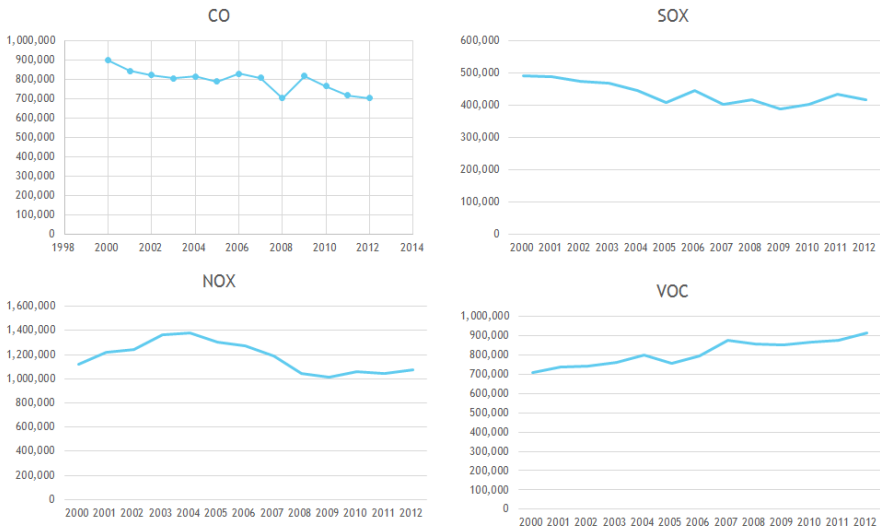
$$\frac{d \ln AP}{d \ln DPRICE} = \frac{d \ln AP}{d E \ln DCON} \frac{d \ln DCON}{d \ln DPRICE} = \beta_5 \times \alpha_6 \quad (3)$$

3. 대기오염 배출현황 및 분석자료

본 연구에서 사용된 연도별 16개 시·도 지역별 대기오염물질 배출량은 통계청 대기 환경데이터⁸⁾를 이용하였다. 2000~2012년까지 CO, SO_x, NO_x, VOC, TSP(비산먼지 제외), PM10(비산먼지 제외)를 대상으로 하였고, 암모니아(NH₃), 비산먼지를 포함한 TSP 및 PM10도 있지만 분석 결과 심각한 측정오차가 발견되어 제외하였다. 또한 PM2.5는 2011년과 2012년도 자료만 있어서 분석에서 제외하였다. 따라서 분석에 사용된 6가지 종류의 대기오염 배출량 추세는 <그림 1>과 같다.

<그림 1> 대기오염물질별 연도별 배출 추세(2000~2012)

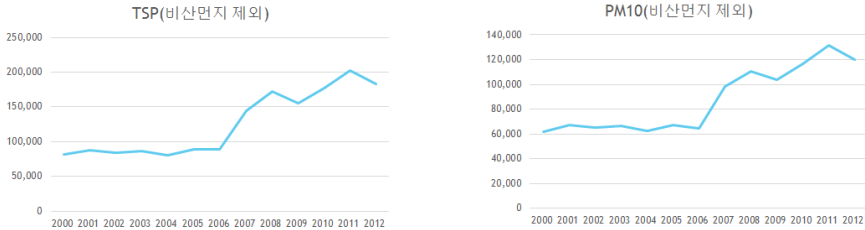
(단위: 톤)



8) <https://www.data.go.kr/main.jsp#/L21haW4> 참조

〈그림 1〉 대기오염물질별 연도별 배출 추세(2000~2012) (Continued)

(단위: 톤)



일산화탄소는 전반적으로 감소 추세에 있지만, SO_x 및 NO_x는 최근 들어 감소 추세에서 약간 상승하는 추세에 있고, VOC, TSP, PM10은 전반적으로 지속적으로 상승 추세에 있음을 알 수 있다. 특히 TSP와 PM10은 2007년을 기점으로 큰 폭으로 상승해왔음을 알 수 있다.⁹⁾

〈표 2〉 추정에 사용된 데이터 기술통계량

설명변수	관측수	단위	평균	표준편차	최솟값	최댓값
CO	208	톤	49,655	38,806	7,566	193,907
NO _x	208	톤	73,699	50,675	9,568	234,958
SO _x	208	톤	27,332	25,059	899	103,959
TSP	208	톤	7,844	11,686	404	79,180
PM10	208	톤	5,461	6,944	370	46,125
VOC	208	톤	50,597	37,339	4,919	176,946
황사일수	208	일	9	6	0	29
GRDP	208	억 원	58,300	60,100	5,350	289,000
소비자물가지수	208	-	89	10	72	107
인구밀도	208	명/km ²	2,277	4,023	91	17,044
경유소비량	208	1000bbl	8,613	6,309	1,186	33,360
화력발전용량	208	MW	1,202	2,849	0	12,402
천연가스버스수	208	대	152	251	0	1,574
운송업체수	208	개	20,607	22,613	4,089	95,222

9) 국립환경과학원(2015) 자료에 따르면 2007년부터 기준에 누락되었던 수입 무연탄이 배출원으로 추가되었고, VOC 및 NH₃ 배출계수가 변경되었다.

〈표 2〉 추정에 사용된 데이터 기술통계량 (Continued)

설명변수	관측수	단위	평균	표준편차	최솟값	최댓값
제조업체수	208	개	20,701	22,175	1,685	102,989
연간강수량	208	mm	1,407	312	761	2,328
경유가격	208	원/리터	1174	412	600	1891
가솔린가격	208	원/리터	1524	240	1226	2059
실업률	208	%	3.2	1.0	1.3	7.1

III. 실증분석 결과

1. 경유소비 추정 결과

식 (2)를 Arellano-Bover/Blundell-Bond linear dynamic panel-data estimation으로 알려진 동태패널모형으로 추정한 결과에 기초하였고, 참고로 이분산성과 1계 자기상관을 감안한 패널GLS 추정 결과는 동태패널 추정결과와의 비교를 위해 <표 3>에 함께 제시하였다.

동태패널모형에 기초한 분석 결과를 요약하면, 우선 전기(t-1)의 경유 소비가 1% 증가하면 현재(t기) 경유소비도 0.766% 증가하고, 지역총소득이 1% 증가하면 경유소비도 0.15% 증가하고, 실업률이 1% 증가하면 경유소비는 0.1% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 경유가격이 1% 증가하면 경유소비는 0.23% 감소하고, 휘발유 가격이 1% 증가하면 대체효과에 의해 경유소비가 0.177% 증가하는 것으로 나타났다. 경유소비의 단기 가격탄력성은 -0.23를 이용하고, 장기 가격탄력성은 다음의 과정에 의해 도출하였다.

장기적인 균형 상태에서는 $DCON_t = DCON_{t-1} = DCON^*$ 이 성립하므로, $\frac{d \ln DCON^*}{d \ln DPRICE} = \frac{\beta_5}{1 - \beta_2} = -0.9868$ 이 된다. 따라서 경유소비의 장기 가격탄력성은 -0.9868을 사용한다. 이는 참고로 김민성·김성수(2011)의 경유소비의 가격탄력성 연구 결과인 단기 가격탄력성 0.219~0.314, 장기 가격탄력성 0.811~1.085와 매우 근접한 값이다.

<표 3> 경유수요 결정모형 추정 결과

모형	패널 GLS	동태패널
L.lndcon	0.966*** (0.016)	0.766*** (0.077)
lngrdp	0.034** (0.015)	0.147* (0.086)
lnune	-0.047*** (0.014)	-0.100*** (0.033)
lnprice	-0.212*** (0.035)	-0.231*** (0.044)
lnprice	0.345*** (0.084)	0.177** (0.072)
_cons	-1.263*** (0.382)	-0.063 (0.570)
Number of obs.	192	192
Wald chi-square	23892.86***	842.53***

주 1) *** p-value<0.01, ** p-value<0.05, * p-value<0.1

2) 괄호 내의 수치는 표준오차를 의미함

2. 대기오염배출모형 추정결과

동태패널모형을 이용해 추정된 경유소비량을 대기오염 배출모형의 설명변수로 하여 모형을 개체간 이분산성과 시계열 1차 자기상관성을 허용한 패널GLS에 의해 추정한 결과는 <표 4>와 같다.

우선 일산화탄소를 제외한 모든 대기오염물질에 대해 지역총생산액은 역U자형을 관계를 갖는 것으로 나타났다. 일산화탄소의 경우 지역총생산액 증가에 따라 배출량도 증가하는 패턴을 갖는 것으로 나타났다. 소비자 물가지수의 경우 VOC를 제외하고는 모든 배출물질에서 통계적으로 유의한 수준에서 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 즉 물가가 증가함에 따라 소비 활동이 위축되고 이는 오염 집약적 소비활동의 감소뿐만 아니라 오염집약적 생산의 감소를 유발함을 의미한다. 한편 인구밀도의 증가는 일산화탄소를 제외한 모든 배출량에서 통계적으로 유의하게 배출량을 감소시키는 것으로 나타났다. 즉 인구 밀도 증가가 자원의 효율적인 활용을 가능하게 함으로써 오염물질 배출의 감소를 유발한 것이다.

논란의 중심인 석탄화력과 경유소비의 경우 실증분석 결과 석탄화력이 유의한 경우

는 NO_x를 제외하고는 없는 것으로 나타났고, 반면에 경유소비는 TSP와 SO_x만 유의하지 않고 모든 대기오염에 대해 통계적으로 유의하게 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다. 특히 미세먼지인 PM10의 경우 경유소비 1% 증가는 미세먼지를 0.34% 증가시키는 것으로 나타났다. 경유소비의 영향이 가장 큰 오염물질은 VOC로 경유소비 1% 증가시 VOC는 0.534% 증가했다. 황사일수는 TSP, PM10, SO_x의 경우 유의하게 양의 관계에 있는 것으로 나타났다.

천연가스 버스대수의 경우 NO_x의 경우에만 통계적으로 유의한 음의 영향을 갖는 것으로 나타났다. 운송사업체 증가는 TSP, PM10, CO에서 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 나타났고, 강수량은 배출을 감소시키지만 통계적으로 유의하지는 않았다. 연평균 기온의 경우 PM10, CO 및 VOC에만 유의하였고, CO에 대해서는 음의 관계를 갖고, PM10 및 VOC의 경우 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 제조업체수 증가는 VOC에 유의하게 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

한편 더미변수인 D2007은 TSP와 PM10의 경우 2007년부터 수입 무연탄이 추가되었기 때문에 2007년을 기준으로 구조적 변화 여부를 평가하기 위해 포함되었다. TSP 및 PM10에 대한 추정 결과 Y절편뿐만아니라 무연탄을 사용하는 석탄화력 발전용량 변수에 대한 기울기에도 통계적으로 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나 구조적 변화는 없는 것으로 볼 수 있다.

〈표 4〉 대기오염배출모형 추정결과

Air pollutant	TSP	PM10	NO _x	SO _x	CO	VOC
지역총생산	12.628*** (2.762)	10.062*** (2.420)	4.417*** (1.632)	23.329*** (3.337)	1.781** (0.818)	3.348** (1.643)
지역총생산	-0.332*** (0.075)	-0.262*** (0.066)	-0.107** (0.045)	-0.634*** (0.092)	-0.033 (0.022)	-0.079* (0.046)
소비자물가	-2.572*** (0.612)	-2.325*** (0.568)	-1.799*** (0.322)	-2.165*** (0.585)	-1.677*** (0.149)	-0.388 (0.248)
인구밀도	-0.547*** (0.065)	-0.431*** (0.061)	-0.190*** (0.035)	-0.404*** (0.061)	-0.017 (0.016)	-0.059* (0.031)
석탄화력	-0.019 (0.016)	-0.011 (0.015)	0.015** (0.007)	0.021 (0.014)	-0.002 (0.003)	0.008 (0.006)

<표 4> 대기오염배출모형 추정결과 (Continued)

Air pollutant	TSP	PM10	NOx	SOx	CO	VOC
경유소비	0.281 (0.219)	0.342* (0.203)	0.422*** (0.130)	0.405 (0.254)	0.318*** (0.059)	0.534*** (0.117)
황사일수	0.050* (0.027)	0.044* (0.025)	0.003 (0.010)	0.047** (0.023)	-	0.010 (0.010)
천연가스버스	-0.025 (0.027)	-0.023 (0.026)	-0.019* (0.011)	-0.007 (0.025)	-0.006 (0.010)	0.004 (0.011)
운송사업체	1.005*** (0.339)	0.667** (0.307)	0.135 (0.162)	-	0.66*** (0.089)	-
강수량	-0.068 (0.088)	-0.009 (0.083)	0.049 (0.034)	-0.064 (0.076)	-0.069 (0.0337)	-0.021 (0.032)
기온	0.810 (0.499)	0.834* (0.467)	-0.004 (0.224)	0.424 (0.478)	-0.557*** (0.154)	0.976*** (0.216)
제조업체수	-	-	-	-	-	0.246** (0.118)
석탄화력* D2007	0.007 (0.019)	0.012 (0.017)	-	-	-	-
D2007	0.001 (0.093)	-0.023 (0.088)	-	-	-	-
상수항	-94.713*** (24.245)	-76.148*** (21.377)	-27.498* (14.259)	-196.144*** (29.448)	9.910*** (0.870)	-27.498* (14.605)
Wald Chi Square	378.76***	460.31***	744.41***	340.93***	3021.98***	989.36***
N of Obs.	169	169	169	169	169	169

주 1) *** p-value<0.01, ** p-value<0.05, * p-value<0.1

2) 괄호 내의 수치는 표준오차를 의미함

3. 경유가격이 대기오염 배출에 미치는 효과

경유소비모형과 대기오염 배출모형은 연립 추정식에 의해 추정되었기 때문에 경유가격이 1% 상승할 때 대기오염이 얼마나 감소하는지를 식(3)을 이용하면 알 수 있다. 우선 경유소비의 단기 가격탄력성을 이용하여 단기적인 대기오염배출효과를 살펴보면 <표 5>의 4번째 열에 나타나 있다. 통계적으로 유의한 오염물질에 국한하여 해석하면, 우선 미세먼지인 PM10이 경우 경유가격이 1% 상승할 경우 PM10은 0.086% 감소하고,

NO_x는 0.1%, CO는 0.07%, VOC는 0.12% 감소하는 것으로 나타났다. 단기적으로는 경유가격 상승이 VOC에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

다음으로 <표 5>의 마지막 열을 보면, 장기적인 경유가격의 영향을 알 수 있는데, 우선 미세먼지는 경유가격이 1% 증가하면 0.367% 감소하고, NO_x는 0.42%, CO는 0.32%, VOC는 0.53% 감소하는 것으로 나타났다. 이렇게 장기적으로 경유가격 상승이 미치는 효과가 커지는 이유는 장기가 되면 소비자는 경유차를 휘발유차나 저공해차로 교체할 유인을 갖기 때문이다.

<표 5> 경유가격 상승이 대기오염 배출에 미치는 영향

대기오염물질	오염배출의 경유소비 탄력성(%)	경유소비의 단기 가격탄력성(%)	오염배출의 단기경유가격 탄력성(%)	경유소비의 장기 가격탄력성(%)	오염배출의 장기경유가격 탄력성(%)
TSP	0.28	-0.2310	-0.0647	-0.9868	-0.2763
PM10	0.342*	-0.2310	-0.079	-0.9868	-0.3375
NO _x	0.422***	-0.2310	-0.0975	-0.9868	-0.4164
SO _x	0.405	-0.2310	-0.0935	-0.9868	-0.3996
CO	0.318***	-0.2310	-0.0735	-0.9868	-0.3138
VOC	0.534***	-0.2310	-0.1233	-0.9868	-0.5269

4. 배출농도를 이용한 미세먼지 결정요인 추정

미세먼지인 PM10의 경우 배출량을 사용하게 되면 2007년부터 수입 무연탄이 신규 배출원으로 추가됨으로써 데이터의 일관성에 문제가 발생할 수 있다. 물론 이러한 변화가 구조적인지를 파악하기 위해 더미변수인 D2007을 이용하여 추정한 결과 추정계수가 유의하지 않아서 구조적인 영향을 미치지 않은 것으로 나타났으나 여기서는 PM10에 대한 배출 농도¹⁰⁾를 이용하여 동일 모형을 이분산성 및 자기상관을 고려한 패널 GLS를 이용하여 재추정해 보았다.¹¹⁾ 배출량 모형과 달리 여기서는 D2007 변수가 제외되었

10) 한국환경공단에서 제공하는 대기오염 물질별 연평균 농도 데이터를 이용하였다. 배출량과 달리 농도의 경우 이산화황, 이산화질소, 오존, 일산화질소, 미세먼지(PM10)을 제공하고 있어 TSP 농도에 대한 추정은 할 수 없었다.

11) Modified Wald 검정 결과 Chi2값이 111.75이고, Wooldridge 검정 결과 F값이 16.284로 나타나 이분산성 및 자기상관 문제가 있는 것으로 나타났다.

고, 운송사업체수 이외에도 건설사업체수와 제조업체수를 포함하여 모형별로 비교해 보았다. 추정 결과 APM2 모형이 대부분의 변수에서 통계적으로 유의하게 나타나고 Wald Chi Square도 가장 높게 나타났다(<표 6>). 특히 경유 소비 변수의 경우 경유 소비가 1% 증가하면 미세먼지 농도는 0.315% 증가하는 것으로 나타나 배출량 기준 모형에서의 탄력성인 0.342%와 비슷한 수준으로 분석되었다.

이는 미세먼지의 경우 배출량이나 배출농도나 경유소비가 미치는 영향이 비슷하다는 것을 보여준다. 따라서 모형의 추정결과는 적어도 미세먼지의 경우 강건한 것으로 나타났다. 다만 다른 대기오염배출 모형의 경우 배출농도가 연도별로 거의 차이가 없기 때문에 추정에서 제외하였다.

<표 6> PM10 배출농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 대한 추정 결과

대기오염물질	APM1	APM2	APM3
지역총생산	0.756(0.691)	1.274*(0.661)	0.644(0.748)
지역총생산 ²	-0.023(0.019)	-0.040**(0.018)	-0.020(0.021)
소비자물가	-0.698*** (0.125)	-0.657*** (0.115)	-0.557*** (0.126)
인구밀도	-0.010(0.014)	0.070*** (0.013)	0.030** (0.013)
석탄화력설비	-0.007** (0.003)	-0.009*** (0.003)	-0.010*** (0.003)
경유소비	0.212*** (0.049)	0.315*** (0.050)	0.177*** (0.053)
황사일수	0.012(0.009)	0.011(0.010)	0.013(0.010)
천연가스버스	0.004(0.007)	0.006(0.008)	0.002(0.009)
운송업체수	0.449*** (0.074)		
강수량	-0.086*** (0.027)	-0.117*** (0.030)	-0.084*** (0.030)
기온	-0.250* (0.133)	-0.496*** (0.133)	-0.367** (0.145)
건설사업체수		0.297*** (0.069)	
제조업체수			0.061(0.049)
상수항	2.717(5.841)	-2.375(5.601)	1.432(6.607)
Wald Chi Square	227.48***	264.04***	204.53***
N of Obs.	165	165	165

주 1) *** p-value<0.01, ** p-value<0.05, * p-value<0.1

2) 괄호 내의 수치는 표준오차를 의미함

IV. 결론 및 정책적 시사점

본 연구는 최근에 전 국민적 관심사인 미세먼지를 비롯한 대기오염물질 배출 증가의 주요 원인이 경유소비와 화력발전, 그리고 황사 발생의 증가에 기인한 것인지에 대해 12년간의 패널 데이터를 이용하여 실증적으로 분석해 보았다. 분석 결과 화력발전이나 황사발생일수보다는 경유소비가 대기오염배출에 미치는 영향이 광범위한 것으로 나타났다. 특히 미세먼지인 PM10, NO_x, CO, VOC의 경우 경유소비가 미치는 영향이 다른 통제변수를 고려하면 상당한 것으로 나타났다.

지역총생산의 경우 CO를 제외하고는 환경쿠즈네츠 가설을 지지하는 것으로 나타났고, CO의 경우 정의 관계에 있는 것으로 나타나 환경오염배출이 환경오염저감 기술보다 더 가파르게 성장할 수 있음을 확인하였다. 특히 우리나라는 비록 선진국 반열에 올라가기 직전에 있음에도 불구하고 여전히 환경쿠즈네츠곡선의 우하향하는 구간에 있다는 점에서 보다 적극적인 환경오염 저감 정책이 실시되어야 함을 보여주었다.

정부에서는 전기자동차와 수소연료전지차 보급을 앞당기겠다고 하였으나 현재 전기자동차 보급에 필수적인 전기충전 인프라 미비와 관련 정책의 비효율성으로 보급목표에 크게 못 미치고 있다(관계부처합동, 2015).¹²⁾ 또한 향후 전기자동차 시장이 커짐에 따라 전력수요 증가는 결국 기저부하 공급을 늘리게 되고 석탄화력 또는 화석연료 기반 발전소의 증가로 이어질 수 있다. 비록 신재생에너지 발전량이 2022년까지 전체 발전량의 10%를 목표로 하고 있으나 우리나라처럼 신재생 부존자원이 열악한 상황에서 보급 목표 달성이 어려울 수 있다는 점에서 전기자동차 시장 확대시 신재생 발전에 의해 공급될 지도 미지수이다. 따라서 전과정평가(LCA)의 관점에서 전기자동차가 일차적으로 대기오염배출을 감소시키더라도 간접적인 기저부하 증가로 화력발전량이 늘어난다면 이차적인 대기오염배출 증가로 이어질 수 있다.

따라서 미세먼지 저감에 탁월한 바이오디젤을 비롯한 바이오에탄올, 바이오가스 등 바이오연료 확대 정책을 고려할 필요가 있다. 바이오디젤은 2006년부터 경유에 0.5%가 혼합되기 시작해서 2016년 기준 2.5%가 혼합되어 있고, 2022년까지 약 5%가 최대치로

12) 전기 자동차의 2015년 보급목표는 85.7천 대이나 동 기간 보급량은 4.9천 대로 달성률이 5.7%에 불과하였다.

전망된다. 그러나 인도네시아, 태국, 파키스탄, 필리핀 등 다른 개도국들을 보면 2020까지 적어도 10% 이상을 목표로 하고 있고, 미국은 이미 2013년 기준 바이오연료의 수송 분담률이 9%에 달하고 있다(김재곤, 2013). 우리나라도 바이오디젤을 비롯한 다양한 바이오연료 사용을 늘릴 필요가 있다. 또한 청소차량이나 영업용 트럭 등 자기정비차량의 경우 BD20을 보다 적극적으로 보급할 필요가 있다. 바이오디젤의 원료가 팜유, 유채유, 대두유 등 식량원료에 기반하고 있어 식량부족이나 열대우림 파괴 문제가 한계로 지적된 적이 있으나 최근에는 폐식용유, 동물성 유지, 팜 부산물 활용이 늘어나고 있고, 제3세대 바이오연료 기술인 미세조류를 이용한 바이오디젤 기술에 대한 연구도 활발하여 비식량 기반 바이오디젤의 10% 혼유는 가능할 것으로 전망된다(이상필·김희식, 2013).

다만 이제는 바이오연료에 대한 면세유 정책을 지속할 수 없는 상황이므로 경유가격 인상에 따른 추가 세수를 환경개선부담금의 형태로 확보하여 이를 바이오연료 보급 확대 및 매연저감 또는 녹소저감장치 개발과 보급에 쓸 수 있도록 해야 할 것이다.

환경부는 경유가격 인상을 초기의 미세먼지 대책으로 내놓았다가 기재부와 산자부의 반대로 결국 노후 경유차 폐차지원 및 저공해차 전환 시 개별소비세 감면 정책으로 전환했다. 많은 에너지경제학자들은 경유 원가가 휘발유 원가보다 비싸고, 환경오염 측면에서 유류세가 더 높아져야 한다고 주장하고 있지만 정부는 경유차 소유자들과 정유업계의 눈치만 보고 있는 현실이 안타깝다. 현재 휘발유 : 경유에 대한 유류세는 100 : 85로, 미국은 이미 경유가격이 휘발유 가격보다 높기 때문에 대부분의 SUV 차량이 휘발유로 되어 있지만 우리나라는 경유가 더 싸기 때문에 SUV가 대부분 경유차이다. 유럽도 조만간 경유에 대한 과세를 강화한다고 한다. OECD (2016)의 분석에 따르면 우리나라는 2050년에는 OECD 국가 가운데 대기오염으로 인한 조기 사망자수가 가장 많을 것으로 전망했다.

이제는 경유차 소유자들도 가성비만 고집할 것이 아니라 자신과 타인의 건강에 미치는 영향을 걱정해야 할 때이고, 정부는 인기 영합주의에 매몰될 것이 아니라 사회 전체의 후생 관점에서 보다 강력한 대기오염 저감정책을 고려해야 할 것이다.

[References]

- 강만옥, “최근 수송부문 에너지 세제 개편의 성과 평가”, 한국환경정책평가연구원, 2007.
- 관계부처합동, “제3차 환경친화적 자동차 개발 및 보급 기본계획”, 보도자료, 2015.
- 국립환경과학원, “바이오디젤 연료사용에 따른 미세먼지(PM2.5)의 환경성 평가 연구”, 2013.
- 국립환경과학원, “2013 국가 대기오염물질 배출량”, NIER-GP2015-240, 2015.
- 김민성·김성수, “수송용 휘발유와 경유 수요의 가격 및 소득 탄력성 추정”, 환경논총, 제 50집, 2011, pp. 159~182.
- 김세완·이기훈, “비선형 STAR 모형을 이용한 이산화탄소 배출량과 경제성장 간의 관계 분석”, 자원·환경경제연구, 제17권 제1호, 2008, pp. 3~23.
- 김영덕, “석유 수요와 탄력성의 변화”, KEEI ISSUE PAPER, 제1권, 2007, pp. 1~20.
- 김원규, “주요국별 1인당 CO₂ 배출량 결정요인 비교분석과 시사점”, KIET 산업경제, 산업연구원, 2011, pp. 41~53.
- 김재곤, “지속가능한 바이오연료의 보급정책과 기술개발 동향”, KIC News, 제16권 제2호, 2013, pp. 1~15.
- 김정인·오경희, “한국의 환경쿠즈네츠에 관한 고찰”, 통계연구, 제10권 제1호, 2005, pp. 119~144.
- 민인식·최필선, “고급 패널데이터 분석 STATA”, 지필사, 2012.
- 배정환·김미숙, “생산함수 접근법을 이용한 온실가스 배출 결정요인 분석”. 응용경제, 제 14권 제3호, 2012, pp. 107~131.
- 이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교”, 환경정책연구, 제9권 제4호, 2010, pp. 53~76.
- 이광훈·이춘화, “수도권 지역 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 탐색 및 정책적 함의”, 서울시연구, 제10권 제3호, 2009, pp. 83~95.
- 이상필·김희식, “미세조류를 이용한 바이오디젤”, 한국과학기술정보연구원, 2013.
- 창해에탄올, “초본계 바이오에탄올 경제성 및 파급효과” 용역 최종 보고서, 2013.
- 통계청 국가통계포털, “16개 시도별 주요지표”, <<http://www.kosis.kr/>>.
- Arellano, M. and O. Bover, “Another look at the instrumental variable estimation of error-components models”, *Journal of Econometrics*, Vol. 68, 1995, pp. 29~51.
- Arellano, M. and S. Bond, “Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations”, *Review of Economic Studies*,

- Vol. 58, 1991, pp. 277~297.
- Aslanidis, N. and X. Anastasios, "Smooth Transition Pollution-Income Paths", *Ecological Economics*, Vol. 57, 2006, pp. 182~189.
- Aslanidis, N. and I. Susana, "Environment and Development: Is There A Kuznets Curve for CO₂ Emissions", *Applied Economics*, Vol. 41, 2009, pp. 803~810.
- Bae, J. H., "Supply portfolio of bioethanol in the Republic of Korea", *The Korean Economic Review*, Vol. 30, No. 1, 2014, pp. 133~161.
- Blundell, R. and S. Bond, "Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models", *Journal of Econometrics*, Vol. 87, 1998, pp. 115~143.
- Cha, K. S. and J. H. Bae, "Dynamic impacts of high oil prices on the bioethanol and feedstock market's", *Energy Policy*, Vol. 39: 2011, pp. 753~760.
- Cole, M. A., "Corruption, income, and the environment: An empirical analysis", *Ecological Economics*, Vol. 62, 2007, pp. 637~647.
- Galeotti, M., A. Lanza, and F. Pauli, "Reassessing the environmental kuznets curve for CO₂ emissions: A robustness exercise", *Ecological Economics*, Vol. 57, 2006, pp. 152~163.
- Galeotti, M., M. Manera, and A. Lanza, "On the robustness of robustness of the environmental kuznets curve hypothesis", *Environmental and Resource Economics*, Vol. 42, 2009, pp. 551~574.
- Grossman, G. M. and A. B. Kruger, "Economic growth and the environment", *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110, No. 2, 1995, pp. 353~377.
- Hauer, G. and C. F. Runge, "Trade-environment linkages in the resolution of transboundary externalities", *The World Economy*, Vol. 22, No. 1, 2000, pp. 25~39.
- Leitão, A., "Corruption and the environmental Kuznets curve: Empirical evidence for sulfur", *Ecological Economics*, Vol. 69, 2010, pp. 2191~2201.
- OECD, "The economic consequences of outdoor air pollution", 2016.
- Seldon, T. M. and S. Daqing, "Environmental quality and development: Is there a kuznets curve for air pollution emissions?" *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 27, No. 2, 1994, pp. 147~162.
- US EPA, "Locating and estimating air emission from sources of polycyclic organic matter", EPA-454/R-98-014, 1998.