

신재생에너지의 확산이 대기오염 배출 저감에 미치는 영향 분석

배정환^{1)*} · 정서림²⁾

Analysis on Impacts of Renewable Energy Promotion on Mitigation of Air Pollution

Jeong Hwan Bae^{1)*} · Seo Rim Jung²⁾

Received 18 May 2020 Revised 5 June 2020 Accepted 17 June 2020 Published online 7 September 2020

ABSTRACT This study analyzed whether the diffusion of new and renewable energy contributed to mitigating emissions of various air pollutants, including particulate matter, using panel econometric models. The theoretical foundation of such econometric models is based on the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis, which assumes an inverted U-shaped relation between national income and environmental pollution, as originally proposed by Grossman and Krueger. We examined whether there are inverted U-, U-shaped, or N-shaped relations between national income and air pollution. We demonstrate that increases in new and renewable energy significantly mitigated emissions of CO, NO_x, and PM_{2.5}. Additionally, we included NO_x, SO_x, PM₁₀, and VOCs as secondary emission sources of PM_{2.5} and found that emission of PM₁₀ resulted in the highest PM_{2.5} emissions, followed by NO_x and SO_x emissions. The impact of new and renewable energy on air pollution varied across regions. Increase of new and renewable energy in the Honam region significantly mitigated CO, NO_x, and TSP emissions, while that in the Yeungnam and metropolitan areas did not significantly mitigate air pollution overall. There was a U-shaped relationship between air pollution and national income for CO, NO_x, PM_{2.5}, and SO_x, while an inverted N-shape was observed for PM₁₀.

Key words New and renewable energy(신재생에너지), Air pollutants(대기오염물질), PM_{2.5}(초미세먼지), Environmental Kuznets curve(환경쿠즈네츠곡선)

Nomenclature

GRDP : Gross regional domestic product

EKC : Environmental Kuznets Curve

1. 서론

2019년 환경부의 발표에 따르면 2014년 기준 국내 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 324,109톤으로, 정부는 2022년까지 초미세먼지 배출량의 30.5%를 감축할 계획이다^[1]. 또한 국내 발전부문의 초미세먼지 기여도는 15.2%로 추정된다^[2]. 발전 부문 대부분의 배출원은 석탄화력발전소이며, 직접적인 출력 감소와 간접적으로는 태양광, 풍력 등 신재생에너지로의 대체 방안이 있다. 초미세먼지 배출량은 직접 배출량 이외에도 이황산가스(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOC)로부터 2차적으로 생성되는 배출

1) Professor, Department of Economics, Chonnam National University

2) Economist, Non-Bank Analysis Team, Financial Stability Department, The Bank of Korea

*Corresponding author: jhbae@jnu.ac.kr

Tel: +82-10-8531-1542 Fax: +82-62-530-1542

량을 합산하여 산출된다.

한편 신재생에너지는 화석에너지 대체, 에너지 안보, 기후변화 대응, 대기오염저감과 같은 다양한 정책목표를 갖고 있고, 정부는 2030년까지 신재생에너지 비중을 총발전량의 20% 까지 확대하고자 한다. 2018년 기준 정부의 신재생에너지 지원사업 규모는 2조 6천억 원으로 추산되며, 2017년 기준 신재생에너지 총생산량은 16,448천TOE로 일차에너지 생산량의 5.45%에 해당된다. 정부의 신재생에너지에 대한 지원과 투자를 통해 생산량이 지속적으로 증가해 왔으나, 과연 대기오염물질 배출 저감에 얼마나 기여했는지에 대한 정량적이고, 과학적인 평가는 그동안 없었다.

본 연구는 신재생에너지 보급 확대에 따라 과연 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)를 비롯한 다양한 대기오염물질(일산화탄소, 질소산화물, 아황산가스, 총부유먼지, 오존 등) 배출량 저감에 신재생에너지가 얼마나 기여했는지를 실증적으로 분석하고자 한다. 이러한 실증 분석의 이론적 토대인 환경 쿠즈네츠 곡선 가설에 따르면 환경오염문제는 일인당 국민소득과 역U자형의 관계에 있고, 기술진보, 경제규모, 산업구조와 같은 변수가 환경오염의 주요 결정요인인 것으로 알려져 있다^[3]. 최근에는 Alvarez-Herranza et al. (2017)^[4]의 연구에서 OECD 국가들의 경우 환경오염과 국민소득간에 역U자형의 관계보다는 N자형의 관계를 보이는 경향이 있음을 이론적·실증적으로 증명하였다. 즉 경제성장에 따라 환경오염저감기술 및 환경오염 규제정책을 통해 환경오염이 지속적으로 감소되면서 역U자형을 보이지만, 점차 저성장 단계로 접어들면서 환경오염저감기술에 대한 투자가 감소하여 기존의 환경오염 저감기술이 낙후되면서 환경오염이 다시 심화된다는 것이다. 본 연구는 우리나라도 이러한 측면에서 대기오염과 지역총생산액(Gross Regional Domestic Products, GRDP)간에 N자형의 관계에 있는지를 분석하고자 한다. 특히 신재생에너지 기술을 환경오염 저감기술로 보고, 계량분석모형에 신재생에너지 변수와 GRDP 변수의 교차항을 포함시켜 대기오염 저감 효과를 반감하는 효과(dampening effect)가 있는지를 검증한다는 점에서 기존 선행연구와 다르다고 할 수 있다.

이러한 목적을 달성하기 위해 대기오염물질 배출량에 관한 계량경제모형을 설정하고 어떤 요인들이 배출량에 영향을 미치는 지를 분석하고자 한다. 여기에는 경유소비량, 천

연가스버스 보급량, 운송사업체수와 같은 수송부문, 건설사업체수, 제조업체수 등 산업부문, 신재생에너지 생산량, 일차에너지 생산량 등 에너지 부문, GRDP, 소비자물가지수와 같은 거시경제변수, 인구밀도, 기온, 강수량, 풍속 등 기후변수 등이 포함된다. 전국 16개 시도별 패널 데이터에 관한 계량경제모형을 구축하여 어떤 변수가 대기오염 배출량을 증가시키고, 어떤 변수가 감소시키는지를 분석하고자 한다. 특히 신재생에너지가 어떤 대기오염물질 배출 저감에 더 많은 기여를 하였는지를 분석한다. 다음으로는 주요 지역권역별 신재생에너지 보급이 대기오염 배출에 미치는 영향이 다르게 나타나는지를 비교하고자 한다. 또한 대기오염물질별로 소득전환점(income turning point)을 도출하여 평균 GRDP를 기준으로 대기오염 물질별로 배출량이 증가하는 구간에 있는지, 감소하는 구간에 있는지를 분석하고자 한다. 이러한 분석 결과에 기초하여 신재생에너지 보급정책과 대기오염(미세먼지) 저감정책에 대한 정책 개선방안을 제시한다.

2. 선행연구

환경 경제학 분야에서 대기오염배출 요인분석에 관한 기존 연구들은 이론적 토대로서 국민소득과 환경오염간의 역U자형 관계를 나타내는 환경쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC) 가설에 주로 의존하고 있다. EKC 가설은 경제성장 초기에는 부의 축적을 통해 빈곤에서 탈피하는 데에 자원이 집중되면서 환경오염 문제를 중요하게 생각하지 않지만, 소득전환점을 지나면서 점차 삶의 질과 환경에 관심을 갖게 되고 환경오염 수준이 임계점을 지나면 환경오염의 피해에 주목하게 된다는 것이다. 이에 따라 사람들의 인식도 친환경적으로 바뀌고 환경규제 정책도 강화되면서 점차 환경이 개선된다는 것이다. 그러나 몇몇 연구에서는 N자형 EKC가 나타나기도 하는데, 이는 장기적으로 소득-환경오염 간의 관계가 증폭될 수 있음을 의미한다^[3,5~8]. 즉 환경오염이 초기의 저소득 경제 단계에서는 증가하지만, 소득전환점을 통과한 이후에는 감소하고, 결국에는 다시 환경오염이 소득과 더불어 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 1은 경제성장에 관한 동태적 과정을 가정한 일인당 소득수준과 환경 오염간의 N자 형의 상관관계를 보여주며, 네 가지 경로를 통해 경제성장이 환경의 질에 영향을 미친다는 것을 시사한다.

- 규모효과:** 경제성장의 초기 단계에서는 지속적인 국민소득 증가에 필요한 에너지 투입량의 증가로 인해 화석 연료의 막대한 사용을 초래하고, 그 결과 오염이 증가한다. 따라서 규모효과는 환경의 질을 감소시킨다.
- 구성효과:** 경제가 성장함에 따라 오염 집약적인 생산 공정을 수반하는 개발 경제체제에서 오염집약도가 낮은 선진 경제로의 이행과 같은 구조적 변화를 수반한다. 즉, 구성효과는 개발 경제의 자본집약적 산업에서 서비스 분야로, 궁극적으로 환경의 질에 직접적으로 영향을 미치는 더 효율적인 에너지 절약과 화석연료 사용을 줄이는 기술집약적 지식 경제로의 변화를 나타낸다.
- 기술개선효과:** 고소득 선진 경제는 연구개발 및 실증에 더 많은 자원을 할당한다. Fisher-Vanden et al. (2004)^[9] 등은 에너지 연구개발 및 실증에 투입되는 공공 예산이 국내총생산 대비 에너지 소비 감소와 온실가스 배출 감소에 긍정적 영향을 미친다는 증거를 발견했다. 선진 경제는 오래되고 비효율적인 기술을 새롭고 더 효과적인 기술로 대체함으로써 환경의 질을 향상시킨다.
- 기술낙후효과:** 선진국 경제가 점차 저성장 단계로 이행함에 따라 환경오염 저감기술이 낙후되어 경제성장

이 환경오염을 증가시키는 효과를 의미한다. Alvarez-Herranza et al. (2017)^[4]은 이에 따라 선진국에서의 에너지효율개선, 재생에너지 기술 등에 대한 R&D 투자확대가 필요하다고 주장한다. 이들 연구에서는 기술낙후효과 추정을 위해 재생에너지와 일인당 국민소득간의 교차항을 모형에 반영하였다.

그로스만과 크루거(Grossman and Kruger, 1995)^[3]가 PM10(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. 대체로 OECD나 EU와 같은 선진국은 국민소득이 증가함에 따라 환경오염 수준도 감소하는 역U자형으로 나타났으나, 개도국에서는 주로 선형이나 N자형으로 나타났다. 우리나라의 경우 역U자형이 존재한다는 연구결과가 있는 반면^[10~13], EKC가 관측되지 않는 것으로 나타난 연구 결과들도 있다^[14~15].

한편 환경오염의 주요인으로 경제성장 이외에 소비자물가, 인구규모, 에너지가격, 에너지 효율, 환경오염 저감기술, 산업구조, 대외개방도와 같은 변수들이 주로 사용되었다. 최근에는 관료들의 부패나 제도적 요인이 환경오염 규제의 집행력에 미치는 영향을 분석하기도 하였다^[16~17]. 특히 배정환, 김유선(2016)^[18]은 경유소비가 대기오염물질에 미치는 영향을 추정하기 위해 경유소비를 내생변수로 간주하고 이를 경유가격과 지역소득, 휘발류가격, 실업율에 관한 모형에 의해 추정한 다음, 다른 통제변수들과 함께 대기오염배출 결정모형을 수립하였다. 추정결과 경유가격 1% 상승시 장기적으로는 대기오염물질을 0.3~0.53% 저감하는 것으로 분석되었다.

환경오염물질의 유형별로 선행연구를 살펴보면, 과거에는 아황산가스, 질소산화물, 매연, 일산화탄소^[3,6,18]와 같은 대기오염물질 중심이었으나 점차 기후변화가 주요 관심사가 되면서 이산화탄소 배출에 영향을 미치는 요인 분석^[19~23]이 주류를 이루고 있다.

다음으로 본 연구에서 주요 설명변수로 채택한 재생에너지 소비 또는 생산량을 분석의 대상으로 삼고 있는 선행연구를 살펴보면, 우선 Apergis와 Payne(2015)^[24]는 재생에

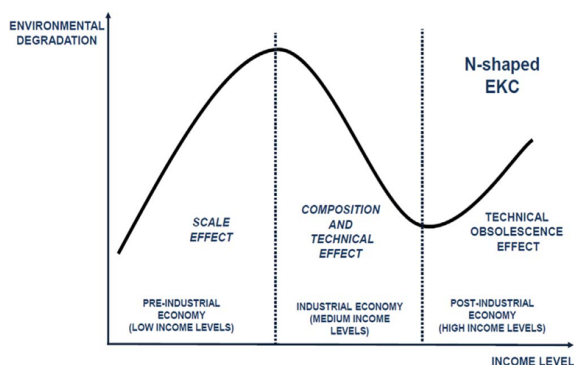


Fig. 1. N-shape EKC between pollution and national income (Source: Alvarez-Herranza et al. (2017))

너지 소비와 소득, 이산화탄소 배출량간의 관계를 분석했다. 그들은 재생에너지가 지속 가능한 경제 성장에 도움이 된다는 것을 발견했다. 한편 Dogan과 Seker(2016)^[25]는 1980년부터 2012년까지 EU 국가의 이산화탄소 배출량과 재생에너지, 비재생에너지 소비와 소득 수준의 관계에 대해 분석하였다. 그들은 재생에너지 소비의 증가가 이산화탄소 배출량을 감소시키지만 화석에너지 소비의 증가는 이산화탄소 배출을 증가시킨다는 결론을 내렸다. 또한 Balsalobre et al.(2016)^[26]을 비롯한 여러 선행 연구들은 재생에너지 증가가 온실가스 수준 감소에 직접적인 영향을 미친다는 것을 증명했다.

Moorkens와 Dauwe(2019)^[27]의 연구에서는 EU 28개 국을 대상으로 재생에너지 시장을 재생에너지 전력, 재생 에너지 냉난방, 재생에너지 수송 부문으로 구분하였다. 재생에너지 시장이 대기 오염물질 배출에 미친 영향을 분석한 결과, 2005년에 비해 2015년에 NO_x와 SO₂는 저감되는 효과가 유의한 것으로 추정되었다. 그러나 PM₁₀, PM_{2.5}, VOC는 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 재생에너지 전력 시장의 경우 VOC 배출량을 제외하고 모든 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 재생에너지 냉난방 시장 분야에서는 SO₂를 제외하고는 모든 대기오염 물질의 배출량이 증가하였다. 또한 연소 기반 재생 에너지 기술(고체, 액체 및 가스 재생 연료 사용)의 경우, 대기 오염 배출이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 추정 모형 및 데이터

3.1 데이터 및 변수

본 연구에 이용된 데이터의 기간은 배출량 기준으로 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 총부유먼지(TSP), 미세먼지(PM₁₀), 휘발성유기화합물(VOC)은 2000~2015년, 초미세먼지(PM_{2.5})는 2011~2015년이다. 배출농도의 경우 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 미세먼지, 오존은 2005~2017년이고, 초미세먼지는 2015~2017년이다. 설명변수¹⁾의 경우, 경유 소비량은 2003~2017년,

지역별 신재생에너지 생산량은 2005~2017년이고, 운수업, 건설업, 제조업체 사업체 수는 2006~2017년, 1차에너지 생산량은 2005~2017년이다. 일인당 지역총생산액, 소비자 물

Table 1. Definition of variables

Variable name	Definition	Unit	Number of observations
grdp	Per capita gross regional domestic product	1000WON	288
cpi	Consumer price index	(2015=100)	288
density	Population density	person/km ²	288
acoal	Coal consumption	1000ton	266
dcon	Diesel consumption	TOE	240
car	Number of cars	10000	288
nre	New&renewable production	TOE	208
nrer	Ratio of NRE to primary energy production	%	208
tplant	N. of transport business	number	192
mplant	N. of manufacture business	number	192
cplant	N. of construction business	number	192
bus	N. of CNG Bus	number	288
co	CO emission	ton	256
aco	CO density	ppm	208
ao	Ozon density	ppm	208
nox	NOX emission	ton	256
anox	Density of NOX	ppm	208
sox	SOX emission	ton	256
asox	SOX density	ppm	208
tsp	TSP emission	ton	256
pm10	PM10 emission	ton	256
apm	PM10 density	μg/m ³	208
pm2,5	PM2,5 emission	ton	80
aupm	PM2,5 density	μg/m ³	48
voc	VOC emission	ton	256
rain	Precipitation	mm	288
temp	Temperature	°C	288
wind	Wind speed	m/s	288

방, 운송, 산업, 폐기물 소각 및 농업, 브레이크, 타이어 및 도로 마모 및 기타 유형의 인공 분진에서 직접 배출된다. 또한 해수염, 자연적으로 발생하는 먼지, 꽃가루도 직접적인 배출원이다. 한편 2차 미세먼지는 SO₂, NO_x, NH₃ 및 VOCs와 대기 중 화학반응에 의해 형성된다. VOC는 주로 석유나 자동차 배기가스 등 휘발성 화합물이 배출원이다.

1) Moorkens and Dauwe(2019)의 연구에 의하면 NO_x과 SO_x의 주요 배출원은 에너지 연소이고, PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 발전, 가정 난

Table 2. Technical statistics of variables

Variable	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
grdp	23,640	10,729	8,953	64,410
cpi	86.71	11.70	65.45	103.62
density	2,262	3,943	89	16,758
acoal	688	976	1	4,227
dcon	9,035	7,042	1,186	40,591
car	110	105	16	746
nre	557,665	604,582	28,006	3,229,557
nrer	4,720	4,587	0,179	27,762
tplant	22,563	24,296	5,215	95,147
mplant	23,299	25,491	2,067	130,282
cplant	7,089	6,041	1,212	28,854
bus	141	232	0	1,574
co	48,133	37,138	7,566	193,907
aco	0.5245	0.1088	0.3	0.88
ao	0.0263	0.0056	0.02	0.04
nox	72,482	49,761	9,568	234,958
anox	0.0206	0.0061	0.01	0.04
sox	26,427	24,836	349	103,959
asox	0.0053	0.0050	0	0.01
tsp	10,012	15,763	362	104,748
pm10	6,182	8,010	354	46,125
apm	48,6519	6,3594	33	68,36
pm2.5	4,893	5,802	318	24,306
aupm	25,3737	2,8803	20.8	35
voc	52,051	38,218	4,919	188,801
rain	1,339	336	652	2,475
temp	13.44	1.35	11.04	17.10
wind	3.19	1.44	1.48	7.98

가지수, 실업율, 인구밀도, 자동차 등록대수, 천연가스버스 보급대수, 강수량, 기온, 풍속 데이터의 기간은 2000~2017년이다. 또한 분석에 사용된 모든 데이터는 16개 시도별 패널 데이터이다. 세종시의 경우 충남과 합하여 데이터의 일관성을 유지하였다. 각 변수 별 기초 통계량, 정의, 출처는 Table 1~3에 자세히 나타나 있다.

3.2 추정 모형

신재생에너지가 대기오염 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해서 신재생에너지 변수를 신재생에너지 생산량(TOE)과 일차에너지 대비 신재생에너지 생산 비중으로 나누었

Table 3. Source of variables

Variable	Source
grdp	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1C51&conn_path=I3 ^[28]
pop	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1YL4201&conn_path=I3 ^[29]
ci	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1J17136&conn_path=I3 ^[30]
density	Bureau of Statistics 「Future population prediction : 2015~2045」, Ministry of land&transport 「Geographic statistics」 ^[31]
acoal	KESIS Regional annual energy statistics 2018 (http://www.kesis.net/sub/sub_0003.jsp) ^[32]
dcon	
car	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_5498&conn_path=I3 ^[33]
nre	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=337&tblId=TX_33701_A005&conn_path=I3 ^[34]
nrer	
tplant	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1YL20831&conn_path=I3 ^[29]
mplant	
cplant	
bus	http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_17_000004&conn_path=I3 ^[35]
co, o, nox, sox, tsp, pm10, pm2.5, voc	https://www.data.go.kr/main.jsp#/L21haW4 ^[34]
rain	https://data.kma.go.kr/climate/StatisticsDivision/selectStatisticsDivision.do?pgmNo=158 ^[36]
temp	
wind	

다. 구체적인 추정모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \ln AP_{jit} = & \alpha_1 + \alpha_2 \ln GRDP_{i,t} + \alpha_3 \ln GRDP_{i,t}^2 \\
 & + \alpha_4 \ln GRDP_{i,t}^3 + \alpha_5 \ln CI_{i,t} \\
 & + \alpha_6 \ln DENSITY_{i,t} \\
 & + \alpha_7 \ln DCON_{i,t} + \alpha_8 \ln ACOAL_{i,t} \\
 & + \alpha_9 \ln BUS_{i,t} \\
 & + \alpha_{10} \ln CAR_{i,t} + \alpha_{11} \ln NRE_{i,t} \\
 & + \alpha_{12} \ln NRE_{i,t} * \ln GRDP_{i,t} \\
 & + \alpha_{13} \ln NRE_{i,t} * D_{k,t} + \alpha_{14} \ln WIND_{i,t} \\
 & + \alpha_{15} \ln RAIN_{i,t} + \alpha_{16} \ln TEMP_{i,t} + \epsilon_{i,t}
 \end{aligned}$$

i=16개 시도, t=연도, k=호남권(광주, 전남, 전북), 수도권(서울, 인천 경기), 대경권(대구, 경북), 부울경(부산, 울산, 경남), j=CO, TSP(비산먼지 제외), NOx, SOx, VOC, PM10, PM2.5(비산먼지 제외) (1)

여기서 AP는 종속변수로서 대기오염물질별 배출량, 설명변수인 GRDP는 지역총생산액, CI는 소비자 물가지수, DENSITY은 인구밀도, DCON은 경유소비량, ACOAL은 무연탄 소비량, BUS는 천연가스버스 보급대수, CAR는 자동차 등록대수, NRE는 신재생에너지 생산량, Dk는 권역별 더미변수, WIND는 연평균 풍속, RAIN은 연평균 강수량, TEMP는 연평균기온을 나타낸다. 모형에 사용된 모든 변수들은 로그값을 취함으로써 각 설명변수의 추정계수는 탄력성을 의미한다.

본 모형은 국내요인만 고려되었고, 해외요인(중국, 북한 등)에 의한 월경환경오염문제는 데이터 수집 한계로 제외하였다. 해외요인을 고려하기 위해서는 기존의 황사일수로는 한계가 있고, 월경 대기오염물질의 배출원별 발생량이나 풍향과 같은 데이터의 구축이 선행되어야 할 것이다. 또한 석탄화력발전량도 설명변수에서 제외하였는데, 모든 대기오염물질에 대한 추정결과가 유의하지 않았다. 이는 발전소 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질이 바람의 방향이나 세기에 따라 지역별 영향이 달라지기 때문인 것으로 보인다. 따라서 석탄화력발전량 대신 무연탄 소비량으로 대체하였다.

지역총생산액, 소비자 물가지수는 거시경제변수이고, 인구밀도는 공간적 효율성을 나타내는 지표이며, 자동차 등록대수, 경유소비, 무연탄 소비량, 운수업체수, 제조업체수, 건설업체수는 배출오염원이며, 천연가스버스 보급대수, 신재생에너지 생산량(생산비중), 신재생에너지 생산량(생산비중)과 광역권 더미의 교차항은 배출저감요인, 풍속, 강수량 및 기온은 기후변수로 볼 수 있다. 특히 지역총생산액은 EKC 가설을 검증하기 위해 일차항, 이차항, 삼차항을 포함시켰다. 음의 이차항 계수가 유의하고, 양의 일차항 계수가 유의하면 역U자형이 되므로 EKC를 지지할 수 있고, 3차항이 양의 값이면 N자형, 음의 값이면 역N자형이 된다. 한편 소비자물가지수가 높을수록 소비가 줄어들기 때문에 오염도 감소할 것으로 보았다.

Alvarez-Herranz et al.(2017)^[20]의 연구에서는 재생에너지 소비증가에 따른 대기오염수준의 교정효과를 분석하기 위해 재생에너지 소비량과 일인당국내총생산(GDP)의 교차항을 포함시켜 분석하였는데, 이는 재생에너지가 온실가스나 대기오염문제를 교정하는 효과를 감소시키는

역할(suppressor effect or dampening effect)을 하는 것으로 알려져 있다. 보다 일반적으로는 교차항을 조절변수(moderator variable)라고도 하며 관심의 대상이 되는 독립변수와 종속변수의 관계에 있어서 크기(magnitude) 또는 방향에 영향을 미치는지를 분석하기 위해 사용한다. 본 연구에서도 신재생에너지 생산량 또는 신재생 비중 변수가 대기오염물질 배출에 영향을 미치는 지를 분석함에 있어서 교차항을 통해 그 효과가 상승하는지, 아니면 상쇄시키는지를 파악하기 위해 모형에 교차항을 포함시켰다. 만약 교차항 파라미터인 α_{12} 가 양의 값을 갖고, 신재생에너지 생산량 또는 비중 변수에 대한 파라미터인 α_{11} 이 음의 값을 갖는다면 교차항은 상쇄효과를 초래한다고 할 수 있다.

대기오염배출 결정모형을 추정하기 위해 패널일반화최소자승법(GLS)을 적용하였다. 본 연구에서 사용한 패널 자료에는 횡단면 개체간 이분산성 문제, 시계열 개체간 상관성 문제가 존재하는 것으로 나타났다²⁾. 이를 위해 Wooldridge F-test를 이용하여 시계열 1차 자기상관성을 검증하였고, 이분산성 문제를 검증하기 위해 Modified Wald test를 적용하였다^[37]. 검증 결과 모든 대기오염물질 배출모형에서 1차 자기상관성이 존재하고, 모든 대기오염물질 배출모형에서 이분산성 문제가 존재하는 것으로 나타났다.

패널 데이터에 개체간 이분산성만 존재한다면 패널고정효과 또는 확률효과 모형을 적용하여 제거할 수 있지만, 시

Table 4. AR(1) test results

Model	lnCO	lnNOX	lnSOX	lnTSP	lnPM	lnUPM	lnVOC
F(1,14)	18.797	20.780	8.950	10.536	22.944	24.192	28.853
Pr>F	0.001	0.000	0.010	0.006	0.000	0.000	0.000

Table 5. Heteroskedasticity test results

	lnCO	lnNOX	lnSOX	lnTSP	lnPM	lnUPM	lnVOC
chi2(15)	428.940	75.500	229.920	112.000	75.590	209.130	469.250
Prob>chi2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

2) 통상 모형 추정의 불편성(unbiasedness) 및 효율성(efficiency) 조건으로 다중공선성(multicollinearity) 검증을 위해 VIF(Variance Inflation Factor) 테스트가 필요하며, 본 연구에서는 일인당 지역총생산(GRDP)의 일차항, 이차항, 삼차항이 모두 포함되어 있어서 VIF가 10을 넘는다. 그러나 통상 EKC 가설검증시 GRDP에 관한 다항식을 포함하므로 다중공선성 문제는 다루지 않으며, 계량경제학 원론에서도 다중공선성이 심각하지 않는 한 추정에서 크게 문제가 되지 않는다고 본다(Guzarati, 2003).

계열 자기상관성까지 동시에 존재하는 경우에는 패널 GLS 방식을 적용해야 한다. 즉 오차항의 공분산에 이분산성과 1차 자기상관성을 허용하여 추정해야 한다. 모든 대기오염 물질 배출 결정모형에서 개체간 이분산성과 1차 자기상관성을 감안한 패널GLS 접근법을 이용하였다³⁾. 패널GLS모형의 경우 추정계수가 0이라는 귀무가설을 테스트하기 위해 Wald- χ^2 를 사용하며, 모든 모형에서 귀무가설을 기각하였기 때문에 모형이 적합하다고 볼 수 있다.

4. 분석결과

4.1 신재생에너지 생산량 기준

모형을 추정한 결과 신재생에너지 생산량 변수(lnnre)가 유의하면서 음의 값을 갖는 경우는 CO, NOX, PM2.5에서 나타났다(Table 6~8). 신재생에너지 생산량과 일인당 소

Table 6. Estimation results for panel GLS (NRE production)-1

Variable	lnCO	lnNOX
lngrdp	-6.963 ^{***} (1.868)	-6.183 [*] (3.212)
lngrdp2	0.263 ^{**} (0.104)	0.213(0.177)
lnci	-2.834 ^{***} (0.271)	-1.984 ^{***} (0.339)
lnacoal	0.017(0.014)	0.058 ^{***} (0.015)
lndensity	-0.030(0.028)	-0.180 ^{***} (0.038)
lndcon	-0.051(0.083)	0.386 ^{***} (0.109)
lnbus	0.006(0.018)	-0.017(0.016)
lnicar	0.948 ^{***} (0.085)	0.584 ^{***} (0.119)
lnnre	-1.719 ^{***} (0.510)	-1.830 ^{***} (0.641)
lnnre_grdp	0.174 ^{***} (0.050)	0.181 ^{***} (0.063)
lnwind	0.328 ^{***} (0.044)	0.505 ^{***} (0.064)
lntemp	0.076(0.322)	-0.036(0.284)
lnrain	0.150 ^{***} (0.056)	0.040(0.039)
lnnrehonam	-0.031 ^{***} (0.005)	-0.025 ^{***} (0.006)
lnnresudokwon	-0.008(0.009)	0.009(0.012)
lnnredaekyung	-0.009 [*] (0.005)	-0.019 ^{***} (0.007)
lnnrebukyung	-0.018 ^{***} (0.005)	0.017 ^{**} (0.008)
constant	61.046 ^{***} (9.021)	54.743 ^{***} (14.55)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

3) 패널자료인 경우 일반적으로 사용하는 패널고정효과 모형과 패널확률효과 모형을 적용해 추정해 보았으나 대체로 유의하지 않았다.

Table 7. Estimation results for panel GLS (NRE production)-2

Variable	lnSOX	lnTSP
lngrdp	-16.06 ^{***} (6.174)	-3.440 [*] (1.950)
lngrdp2	0.788 ^{**} (0.334)	
lnci	-3.065 ^{***} (0.797)	0.167(0.739)
lnacoal	0.088 ^{***} (0.030)	0.285 ^{***} (0.060)
lndensity	-0.374 ^{***} (0.092)	-0.041(0.103)
lndcon	0.256(0.267)	0.809 ^{***} (0.162)
lnbus	0.010(0.029)	-0.106(0.075)
lnicar	0.309(0.305)	
lnnre	-0.617(1.391)	-2.587(1.577)
lnnre_grdp	0.068(0.134)	0.293 [*] (0.152)
lnwind	0.932 ^{***} (0.185)	0.759 ^{***} (0.189)
lntemp	-0.393(0.560)	2.719 ^{**} (1.335)
lnrain	-0.044(0.077)	-0.576 ^{**} (0.232)
lnnrehonam	0.003(0.016)	-0.054 ^{***} (0.020)
lnnresudokwon	0.029(0.036)	-0.010(0.037)
lnnredaekyung	0.011(0.016)	-0.018(0.014)
lnnrebukyung	0.102 ^{***} (0.018)	-0.003(0.021)
constant	102.455 ^{***} (29.65)	26.325(19.476)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

Table 8. Estimation results for panel GLS (NRE production)-3

Variable	lnPM10	lnPM2.5	lnVOC
lngrdp	-332.883 [*] (187.947)	25.471 ^{***} (7.120)	0.098(0.622)
lngrdp2	32.247 [*] (18.403)	-4.580 ^{***} (1.228)	
lnci	-0.317(0.688)		-0.973 ^{***} (0.24)
lnacoal	0.212 ^{***} (0.051)	0.159 ^{***} (0.045)	-0.007(0.015)
lndensity	-0.009(0.085)	-0.103(0.102)	-0.095 ^{***} (0.03)
lndcon	0.842 ^{***} (0.141)	1.365 ^{***} (0.283)	0.608 ^{***} (0.055)
lnbus	-0.022(0.056)		0.017(0.015)
lnnre	-1.849(1.695)	-4.545 [*] (2.366)	-0.581(0.51)
lnnre_grdp	0.213(0.166)	0.444 [*] (0.229)	0.056(0.049)
lnwind	0.689 ^{***} (0.159)	1.292 ^{***} (0.165)	-0.179 ^{***} (0.06)
lntemp	1.476(1.026)		0.590 ^{**} (0.282)
lnrain	-0.305 [*] (0.169)	-0.200(0.135)	0.042(0.040)
lnnrehonam	-0.038 ^{**} (0.016)	-0.021 [*] (0.012)	0.023 ^{***} (0.006)
lnnresudokwon	-0.022(0.031)	-0.039 [*] (0.023)	0.059 ^{***} (0.010)
lnnredaekyung	-0.008(0.012)	0.000(0.016)	0.029 ^{***} (0.007)
lnnrebukyung	-0.001(0.017)	-0.009(0.016)	0.038 ^{***} (0.007)
lngrdp3	-1.047 [*] (0.598)	0.200 ^{***} (0.055)	
lnmplant		0.076(0.247)	
constant	1,146.85 [*] (636.4)	(dropped)	7,564(6.253)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

득수준의 교차항(lnnre_GRDP)의 경우 CO, NO_x, TSP, PM_{2.5}에서 유의한 것으로 나타났다. CO, NO_x, TSP, PM_{2.5}에 대해서는 양의 값으로 추정되어 신재생에너지가 대기오염을 저감하는 효과를 반감시키는 것으로 나타났다. 한편 지역별로 신재생에너지 생산량이 대기오염배출량에 미치는 영향을 살펴보면, 호남지역의 경우 유의하면서 음의 값을 갖는 경우는 SO_x와 VOC를 제외한 모든 대기오염배출량에서 나타나고, 수도권의 경우 PM_{2.5}에서만 유의하면서 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 대경권은 CO, NO_x에 대해 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타나고, 부울경의 경우 CO에 대해서 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 지역의 일인당 소득수준(GRDP)과 대기오염배출량간의 관계를 살펴보면, CO, SO_x의 경우 이차항이 양의 값을 갖기 때문에 U자형의 관계에 있는 것으로 나타났고, NO_x, TSP의 경우 일차항이 음의 값을 갖는 선형 관계에 있는 것으로 나타났다. CO, SO_x, NO_x, TSP 모형에서는 GRDP 3차항이 포함되지 않았는데, 3차항이 포함될 경우 모형의 적합도가 더 낮아지기 때문이다. 한편 PM₁₀의 경우 일인당 지역소득변수의 3차항이 음의 값을 가지므로 역N자형의 관계에 있는 것으로 나타났고, PM_{2.5}의 경우 일인당 지역소득변수의 3차항이 양의 값을 가지므로 대기오염배출수준과 N자형의 관계에 있음을 알 수 있다.

물가수준(CI)과 대기오염배출수준과의 관계를 살펴보면, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}를 제외한 나머지 대기오염배출수준과 음의 관계에 있음을 알 수 있다. 즉 물가수준의 상승은 전반적인 소비를 감소시키고, 이로 인해 생산이 감소하여 생산의 부산물인 대기오염배출 수준이 감소된다는 것이다. 무연탄 소비량(acoal)과 대기오염배출수준과의 관계를 살펴보면, CO와 VOC를 제외한 모든 대기오염배출량에 대해서 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타났다. 인구밀도(density)의 경우 NO_x, SO_x, VOC에서 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타났는데, 인구밀도가 높을수록 보다 효율적으로 에너지가 소비된다는 것으로 해석할 수 있다. 경유 소비량(dcon)의 경우 CO와 SO_x를 제외한 모든 대기오염배출수준에 대해 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 경유 소비량의 증가가 대부분의 대기오염물질 배출 증가에 영향을 미친다는 것으로 알 수 있다. 자동차 등록대수(car)는 CO, NO_x에 대해 유의한 양의 값을 갖는 것

으로 나타났다.

기후변수 가운데 풍속(wind)은 CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}에서 유의한 양의 값을 보였고, VOC에 대해서는 유의한 음의 값을 보였다. 또한 기온(temp)은 TSP, VOC에 대해서는 유의한 양의 값을 나타내고, 강수량(rain)은 CO에 대해서는 유의한 양의 값을 나타냈고 TSP, PM₁₀에 대해서 유의한 음의 값을 나타냈다.

4.2 강건성 검증: 신재생에너지 비중 기준

신재생에너지 생산량 대신 신재생에너지 비중으로 대체한 모형을 추정함으로써 신재생에너지 생산량을 기준으로 추정한 모형과 비교하여 추정결과가 얼마나 다른지를 확인하였다(Table 9~11). 추정 결과, 일차에너지 대비 신재생에너지 비중 변수(nrer)가 유의하면서 음의 값을 갖는 경우는 CO, NO_x, PM_{2.5}에서 나타났다. 신재생에너지 비중과 일인당 소득수준의 교차항(nrer_grdp)의 경우 CO, NO_x, PM_{2.5}에서 유의하며, 양의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 신재생에너지 생산량에 관한 모형에서의 추정결과와

Table 9. Estimation results for panel GLS (NRE ratio)-1

Variable	lnCO	lnNOX
lngrdp	-11.874 ^{***} (1.932)	-7.827 ^{***} (2.990)
lngrdp2	0.608 ^{***} (0.094)	0.401 ^{***} (0.147)
lnci	-2.785 ^{***} (0.255)	-2.230 ^{***} (0.346)
lnacoal	0.022 [*] (0.012)	0.045 ^{***} (0.014)
lndensity	-0.040 [*] (0.024)	-0.158 ^{***} (0.031)
lndcon	-0.088(0.088)	0.386 ^{***} (0.106)
lnbus	-0.003(0.019)	-0.017(0.016)
lncar	1.010 ^{***} (0.085)	0.630 ^{***} (0.113)
nrer	-57.289 ^{***} (20.495)	-57.744 ^{**} (23.22)
nrer_grdp	5.818 ^{***} (2.022)	5.747 ^{**} (2.287)
lnwind	0.289 ^{***} (0.046)	0.459 ^{***} (0.070)
lntemp	-0.194(0.261)	-0.118(0.265)
lnrain	0.091 [*] (0.054)	0.048(0.039)
nrerhonam	-7.346 ^{***} (1.637)	-5.587 ^{***} (1.622)
nrersudokwon	-2.127(2.129)	-0.766(2.653)
nrerdaekyung	-0.985(1.246)	-1.295(1.670)
nrerbukyung	-7.045 ^{***} (2.158)	6.784 ^{**} (3.246)
constant	76.940 ^{***} (9.799)	53.199 ^{***} (14.54)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

Table 10. Estimation results for panel GLS (NRE ratio)-2

Variable	lnSOX	lnTSP
lngrdp	-13.721 ^{**} (5,876)	0.958 ^{***} (0,348)
lngrdp2	0.727 ^{**} (0,287)	
lnci	-2.041 ^{**} (0,827)	-0.028(0,888)
lnacoal	0.119 ^{***} (0,031)	0.323 ^{***} (0,063)
lndensity	-0.332 ^{**} (0,077)	-0.137(0,086)
lndcon	0.788 ^{***} (0,291)	0.884 ^{***} (0,225)
lnbus	0.021(0,028)	-0.068(0,073)
lnicar	-0.142(0,284)	
nrer	36,570(49,864)	3,970(82,050)
nrer_grdp	-4,141(4,901)	0,088(8,084)
lnwind	-	0.701 ^{**} (0,288)
lntemp	-0.797(0,572)	4,750 ^{***} (1,174)
lnrain	-0.015(0,086)	-
nrerhonam	2,467(4,819)	-14,087 [*] (7,381)
nrersudokwon	-4,592(6,462)	9,980(11,237)
nrerdaekyung	2,944(2,993)	1,582(4,295)
nrerbukyang	25,787 ^{***} (6,298)	-3,258(10,646)
constant	80,393 ^{***} (29,66)	-22,467 ^{***} (5,44)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

Table 11. Estimation results for panel GLS (NRE ratio)-3

Variable	lnPM10	lnPM2.5	lnVOC
lngrdp	-685,823 ^{***} (211,622)	29,767 ^{***} (4,721)	0,750 ^{***} (0,111)
lngrdp2	66,721 ^{***} (20,671)	-5,812 ^{***} (0,898)	-
lnci	0,032(0,822)	-	-1,014 ^{***} (0,251)
lnacoal	0,202 ^{***} (0,055)	0,173 ^{***} (0,033)	-0,019(0,014)
lndensity	-0,066(0,076)	-0,281 ^{***} (0,083)	0,002(0,027)
lndcon	1,385 ^{***} (0,196)	1,073 ^{**} (0,320)	0,764 ^{***} (0,060)
lnbus	0,009(0,050)	-	0,030 [*] (0,016)
nrer	92,991(77,198)	-131,945 [*] (67,684)	-6,157(24,325)
nrer_grdp	-8,901(7,595)	12,523 [*] (6,631)	0,479(2,385)
lnwind		0,987 ^{***} (0,141)	0,054(0,060)
lntemp	2,057 ^{**} (0,954)	-	0,448 [*] (0,259)
lnrain	-0,292 [*] (0,159)	-0,331 ^{***} (0,123)	0,025(0,044)
nrerhonam	-1,674(6,218)	-3,862(3,214)	2,642(1,718)
nrersudokwon	-18,767 ^{**} (8,977)	-10,052 ^{**} (4,837)	7,393 ^{***} (2,563)
nrerdaekyung	1,964(3,639)	-2,266(3,173)	2,929 [*] (1,710)
nrerbukyang	-5,563(8,408)	-11,610 ^{**} (5,207)	12,470 ^{***} (2,702)
lngrdp3	-2,157 ^{***} (0,672)	0,282 ^{***} (0,043)	-
lnmplant		0,266(0,228)	-
constant	2,334,930 ^{***} (720,214)	-	-0,594(1,558)

Notes: s.e is given in the bracket respectively; *, **, *** show significance at 10%, 5%, 1% respectively.

거의 유사하였다.

한편 지역별로 신재생에너지 비중이 대기오염배출량에 미치는 영향을 살펴보면, 호남지역의 경우 유의하면서 음의 값을 갖는 경우는 CO, NO_x, TSP에서 나타나고, 수도권 지역의 경우 PM10과 PM2.5에서 유의하면서 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 대경권은 VOC에 대해 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타나고, 부울경의 경우 CO, PM2.5에 대해서 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 신재생에너지 생산량에 관한 모형에 비해 지역별 영향은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 다만 호남지역이 타 지역에 비해 신재생에너지의 대기오염 저감효과가 대체로 양호한 것은 유사한 것으로 나타났다.

다음으로 지역의 일인당 소득수준(GRDP)과 대기오염배출량간의 관계를 살펴보면, CO, NO_x, SO_x의 경우 이차항이 양의 값을 갖기 때문에 U자형의 관계에 있는 것으로 나타났다. TSP, VOC의 경우 일차항이 양의 값을 갖는 선형 관계에 있는 것으로 나타났다. 한편 PM10의 경우 일인당 지역소득변수의 3차항이 음의 값을 가지므로 역N자형의 관계에 있는 것으로 나타났고, PM2.5의 경우 일인당 지역소득변수의 3차항이 양의 값을 가지므로 대기오염배출수준과 N자형의 관계에 있음을 알 수 있다. 대기오염배출과 GRDP의 관계도 신재생에너지 생산량에 관한 모형 결과와 유사한 것으로 나타났다.

다음으로 물가수준(CI)과 대기오염배출수준과의 관계를 살펴보면, TSP, PM10, PM2.5을 제외한 나머지 대기오염배출수준과 유의하면서 음의 관계에 있는 것으로 나타나 신재생에너지 생산량 모형 결과와 같았다. 무연탄 소비량(acoal)과 대기오염배출수준과의 관계를 살펴보면, VOC를 제외한 모든 대기오염배출량에 대해서 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타났고, 인구밀도(density)의 경우 TSP, PM10, VOC를 제외한 모든 대기오염배출수준에 대해 유의한 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 경유 소비량(dcon)의 경우 CO를 제외한 모든 대기오염배출수준에 대해 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타났다. 자동차 등록대수(car)는 CO, NO_x에 대해 유의한 양의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이상의 변수들도 대체로 신재생에너지 생산량에 관한 모형 추정결과와 유사하였다.

기후변수 가운데 풍속(wind)은 CO, NO_x, TSP, PM2.5

에서 유의한 양의 값을 보였다. 또한 기온(temp)은 TSP, PM10, VOC에 대해서는 유의한 양의 값을 나타내고, 강수량(rain)은 CO에 대해서는 유의한 양의 값을 나타냈고 PM10, PM2.5에 대해서 유의한 음의 값을 나타냈다. 기후변수들도 신재생에너지 생산량 모형 추정결과와 유사하였다.

4.3 초미세먼지 배출 결정모형에 대한 추가 분석

초미세먼지의 경우 직접 배출뿐 만아니라 기존 대기오염 물질이 대기 중에서 상호작용하여 2차적인 초미세먼지를 발생시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 초미세먼지에 대한 배출요인으로 SO_x, NO_x, PM10, NH(암모니아), VOC를 고려하여 재추정 하였다. Table 12는 PM2.5(신재생에너지 생산량) 모형과 PM2.5(신재생에너지 비중) 모형을 비교하였다. 우선 신재생에너지 생산량 기준으로는 대기오염물질 가운데 SO_x, PM10, NH가 PM2.5의 2차 생

Table 12. Estimation results for PM2.5 with second emission sources

Variable	pm2.5 (NRE production)	pm2.5 (NRE ratio)
lnNOX	0.146(0.123)	0.246 [*] (0.129)
lnSOX	0.152 ^{***} (0.048)	0.096 ^{**} (0.049)
lnPM10	0.534 ^{***} (0.025)	0.520 ^{***} (0.025)
lnNH	0.113 ^{***} (0.034)	0.167 ^{***} (0.043)
lnVOC	-0.054(0.081)	-0.075(0.081)
lnGRDP	11.036 ^{***} (2.468)	7.884 ^{***} (2.449)
lnGRDP2	-1.729 ^{***} (0.446)	-1.503 ^{***} (0.473)
lnGRDP3	0.062 ^{***} (0.021)	0.070 ^{***} (0.023)
lnacoal	0.053 ^{***} (0.015)	0.078 ^{***} (0.014)
lndcon	0.219 [*] (0.119)	0.027(0.133)
lnbus	0.041 [*] (0.022)	0.027(0.024)
nrer	—	-84.056 ^{***} (28.530)
nrer_grdp	—	7.986 ^{***} (2.781)
lnwind	0.258 ^{***} (0.075)	0.197 ^{***} (0.072)
lntemp	-0.341(0.274)	-0.156(0.281)
lnrain	0.073(0.061)	0.021(0.060)
lnnre	-3.748 ^{***} (0.682)	—
lnnre_grdp	0.360 ^{***} (0.066)	—

note: s.e is given in the bracket respectively; ^{***} p<0.01, ^{**} p<0.05, ^{*} p<0.1

성원인 것으로 나타났고, 신재생에너지 비중 기준으로는 NO_x, SO_x, PM10이 2차 생성원인 것으로 나타났다. 그러나 NO_x의 경우 통계적 유의도가 10% 수준에 불과하다는 점에서 SO_x, PM10, NH3가 유의한 2차 생성원이라고 할 수 있다.

일인당 GRDP나 신재생에너지 생산량 및 GRDP와의 교차항 등 대부분의 설명변수들이 유의하고, 부호도 적합한 것으로 나타났다. 다만 기후변수는 풍속을 제외하고 유의하지 않았다.

4.4 EKC 검증 및 신재생에너지 효과 분석

4.4.1 EKC 검증

여기서는 일인당 지역소득과 대기오염물질 배출간에 역 U자형의 관계가 성립하는지를 분석하고, 구체적인 함수형태와 소득전환점을 계산하였다. 앞서 추정한 모형을 이용하여 GRDP변수가 일차항과 이차항에서 추정계수가 유의한 경우에는 식 (1)로부터 다음 공식 식 (2)를 사용하여 소득전환점을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln AP_{i,t}}{\partial \ln grdp_{i,t}} = \hat{\alpha}_2 + 2\hat{\alpha}_3 \ln grdp = 0$$

$$\text{따라서, } \ln grdp^* = -\hat{\alpha}_2 / 2\hat{\alpha}_3 \quad (2)$$

한편 GDDP 변수가 삼차항에 대해서도 유의한 경우에는 다음 공식 식 (3)을 이용하여 소득전환점을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln AP_{i,t}}{\partial \ln grdp_{i,t}} = \hat{\alpha}_2 + 2\hat{\alpha}_3 \ln grdp + 3\hat{\alpha}_4 \ln grdp^2 = 0$$

따라서,

$$\ln grdp^* = \frac{-2\hat{\alpha}_3 \pm [(2\hat{\alpha}_3)^2 - 4*3\hat{\alpha}_4\hat{\alpha}_2]^{0.5}}{2*3\hat{\alpha}_4}$$

$$\text{단, } (2\hat{\alpha}_3)^2 \geq 4*3\hat{\alpha}_4\hat{\alpha}_2 \quad (3)$$

다음 Table 13은 신재생에너지 생산량 기준으로 지역소득과의 교차항을 고려하여 추정된 Table 6~Table 8의 결

Table 13. Income turning points for various pollutants (Unit: 1,000 KRW)

pollutant		lnCO	lnNOX	lnSOX	lnPM10	lnPM2.5
Income turning point	grdp1	17,454	17,465	12,529	52,722	30
	grdp2	—	—	—	17,099	30,950
Curve type		U-shape	U-shape	U-shape	Inverted N-shape	N-shape

Note: First turning point for PM2.5 was estimated as 30,000 KRW which is very small relative to other pollutants

과를 식 (2)와 식 (3)에 적용하여 각 대기오염배출물질별로 소득전환점을 비교한 것이다. 전국 시도 평균 GRDP는 23,640천원으로 이를 소득전환점과 비교하면, CO, NO_x, SO_x의 경우 평균 GRDP가 소득전환점보다 모두 높다는 것을 알 수 있고, 이는 소득 증가에 따라 대기오염배출량도 증가하는 구간에 있음을 의미한다. 한편 PM10의 경우 GRDP와 역N자형의 관계에 있고, 평균GRDP가 두개의 소득전환점 사이에 있기 때문에 GRDP 증가에 따라 배출량도 증가하는 구간에 있음을 알 수 있다. 반면에 PM2.5의 경우 N자형의 관계에 있고, 두 번째 소득전환점(30,950천원)보다 평균 GRDP가 작기 때문에 GRDP 증가에 따라 초미세먼지가 감소하는 구간에 있음을 알 수 있다. 참고로 TSP와 VOC의 경우 모형추정결과 일인당 GRDP와는 양의 선형관계에 있기 때문에 분석에서 제외하였다.

4.4.2 신재생에너지 효과 분석

신재생에너지 생산량과 일인당 지역총생산액간 교차항을 포함한 모형의 경우 신재생에너지가 대기오염물질 배출에 미치는 영향은 직접효과와 상호작용효과를 모두 감안하여야 한다. 우선 신재생에너지 생산량을 기준으로 보면, CO, NO_x, PM2.5에서 유의하게 배출량을 저감하는 것으로 나타났다. 그러나 교차항을 고려하면 다음 Fig. 2와 같이 CO에서는 신재생에너지가 배출량을 직접 저감하는 효과보다 교차항에 의한 증가효과가 더 크게 나타난다. NO_x와 PM2.5에서는 직접적인 저감효과가 교차항에 의한 증가효과보다 더 큰 것으로 나타났다.

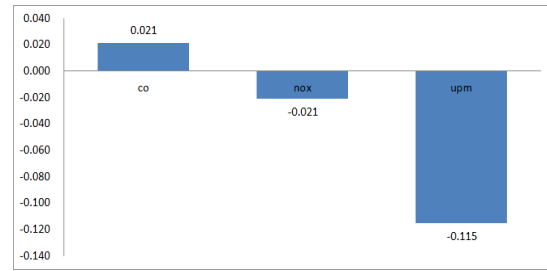


Fig. 2. Net effects of new and renewable energy production on air pollution (%)

5. 결론

본 연구에서는 신재생에너지 보급 확대 정책이 과연 미세먼지를 비롯한 대기오염물질의 저감에 얼마나 기여했는지를 패널계량모형을 구축하여 실증분석을 시도하였다. 패널계량모형의 이론적 토대는 대기오염물질 배출이 일인당 국민소득수준(GDP)과 역U자형 곡선의 형태를 갖는다는 환경쿠즈네츠곡선(EKC) 가설에 기초하였다. 본 연구에서는 경제성장률과 대기오염물질 배출 간에 역U자형뿐만 아니라 U자형과 N자형, 역N자형 관계를 갖는지도 검증하였다.

또한 종속변수를 대기오염물질배출량으로 놓고, 신재생에너지 생산량, 일차에너지 대비 신재생에너지 비중에 따라서 모형을 세분화하였다. 또한 초미세먼지에 대해서는 이차 생성원을 고려한 모형을 추가하였다. 모형 추정방법은 이분산성과 자기상관성을 고려한 패널 GLS 방법을 적용하였다.

모형 추정결과, 신재생에너지 생산량 기준으로는 CO, NO_x, PM2.5에서 유의하게 저감하는 것으로 나타났고, 호남지역은 SO_x 및 VOC를 제외하고는 모두 유의하게 배출량을 저감하는 것으로 나타났다. 또한 신재생에너지 비중 기준으로도 CO, NO_x, PM2.5에서 유의하게 저감한 것으로 나타나 모형이 강건하다는 것을 보여주었다. 또한 신재생에너지 생산량이 배출저감에 미치는 총효과(직접 효과 + 교차항 효과)를 계산해보면, CO에 대해서는 증가하고, NO_x와 PM2.5에 대해서는 저감하는 것으로 나타났다. 추가적으로 2차 생성원을 고려한 초미세먼지 배출요인 결정모형을 추정한 결과, SO_x, PM10, NH의 경우 초미세먼지 발생의 2차 생성물질이며 PM10의 영향이 가장 크게 나타났고, SO_x와 NH는 모형에 따라 그 영향력이 다르게 나타났다.

다음으로 경제성장과 대기오염간의 관계를 신재생에너지 생산량 모형을 기준으로 분석한 결과, CO, SO_x, NO_x의 경우 GRDP와는 U자형의 관계에 있고, PM10은 역N자형, PM2.5는 N자형의 관계에 있는 것으로 나타났고, 평균 GRDP가 이미 소득 전환점을 상회하고 있음을 알 수 있었다. 즉 GRDP 상승에 따라 대기오염배출량도 증가하는 구간에 놓여 있다는 것이다.

기후변수의 경우 대기오염물질별로 일관되지 않은 방향성을 보이고 있는데, 이는 국외요인, 즉 중국, 북한, 동남아 등지에서 발생하는 대기오염물질이 유입됨에 따라 바람의 방향이나 계절성 등 복잡한 경로를 통해 우리나라의 대기오염 배출량에 영향을 미치기 때문인 것으로 보인다. 특히 풍속의 경우 통상 대기 확산이 원활함에 따라 대기오염배출이나 대기오염농도를 감소시킬 것으로 추정하지만, 이는 해외요인을 감안하지 않기 때문으로 보인다. 즉 북서풍이나 황사 등으로 인해 풍속이 증가한다면 해외 요인의 영향이 커진다는 점에서 풍속의 증가가 대기오염배출이나 농도를 증가시킬 수 있다는 것이다. 다만 이에 대한 정확한 분석을 위해서는 향후 풍향이나 황사발생일수 등 보다 추가적인 데이터가 필요할 것이다.

정부는 신재생에너지에 많은 투자를 해왔고, 2030년까지 20% 및 2040년까지 30% 이상의 신재생에너지 비중 목표를 설정하여 지속적인 투자를 할 예정이지만, 대기오염 배출에 미치는 영향에 대한 정량적이고 거시적인 연구는 거의 없었다는 점에서 추후 이러한 정책 연구들이 필요하다. 또한 지역별 영향을 검토한 결과 수도권이나 영남권 대비 호남지역에서의 신재생에너지 생산 증가가 대기오염 배출 저감에 미치는 효과가 우수한 것으로 나타났다. 이는 호남지역이 태양광 중심이고, 타 지역은 바이오매스가 상대적으로 많기 때문일 것으로 보인다. 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

한편 석탄화력발전소가 대기오염 특히 미세먼지 배출에 미치는 영향이 존재할 것으로 예상되지만 석탄화력발전소의 지역별 발전량 자료 부족으로 무연탄 소비량으로 대체되었다는 점에서 본 연구의 한계가 존재한다. 또한 대기오염물질 배출요인으로 국내요인만을 고려하였고, 해외요인, 특히 중국, 북한, 동남아 등지에서 배출되는 요인들에 대해서는 통제하지 않았다. 끝으로 폐기물에너지의 경우 대기

오염 배출 가능성이 있다는 점에서 향후 폐기물에너지를 제외하고 신재생에너지가 대기오염에 미치는 영향을 추정할 필요가 있지만, 폐기물에너지 비중은 지속적으로 감소해왔다는 점에서 대기오염 배출에 미치는 영향도 감소되어왔을 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 한국은행의 재정지원을 받아 한국은행 광주전남본부와 공동으로 작성된 것임.

We would like to thank Editage (www.editage.co.kr) for English language editing.

References

- [1] Ministry of Environment, 2013, "Second basic plan on the metropolitan area air quality management (2015-2024)", http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=6482
- [2] Korea Institute of Public Finance, 2019, "In-depth evaluation for particulate matter mitigation policies (Final report)".
- [3] Grossman, G.M., and Krueger, A.B., 1995, "Economic growth and the environment", Q. J. Econ. **110**(2), 353-377.
- [4] Alvarez-Herranz, A., Balsalobre-Lorente, D., Shahbaz, M., and Cantos, J.M., 2017, "Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels", Energy Policy, 105, 386-397.
- [5] Moomaw, W.R., and Unruh, G.C., 1997, "Are environmental Kuznets curves misleading us?" The case of CO2 emission", Environ. Dev. Econ. **2**(4), 451-463.
- [6] Selden, T., and Daqing, S., 1994, "Environmental quality and development: is there a Kuznets Curve for air pollution emissions?", J. Environ. Econ. Manag. **27** (2), 147-162.
- [7] Shafik, N., and Bandyopadhyay, N., 1992, "Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence", World Bank Working Papers, 904, 1-6.
- [8] Torras, M., and Boyce, J., 1998, "Income, inequality, and

- pollution: a reassessment of the Environmental Kuznets Curve”, *Ecol. Econ.*, **25**(2), 147-160.
- [9] Fisher-Vanden, K., Jefferson, G., Liu, H., and Tao, Q., 2004, “What is driving China’s decline in energy intensity?”, *Resour. Energy Econ.*, **26**(1), 77-97.
- [10] Bae, J.H., and Kim, M.S., 2012, “Analysis of determinants of emission of green house gases applying a production function approach”, *Korea Review of Applied Economics*, **14**(3), 107-132.
- [11] Lee, G.H., 2010, “Estimation and comparison of regional environmental Kuznets curves for CO2 emissions in Korea”, *Journal of Environmental Policy*, **9**(4), 53-76.
- [12] Lee, G.H., and Li, C.H., 2009, “Searching for an environmental Kuznets curve for CO2 emissions in the Seoul metropolitan area and its policy implications”, *Seoul Studies*, **10**(3), 83-95.
- [13] Kim, W., 2011, “Implication and analysis on determinants of CO2 emission per capita for major countries”, *KIET Industrial Economy*, **41**, 41-53.
- [14] Kim, J.I., and Oh, K.H., 2005, “A study on environmental Kuznets curve in Korea”, *Journal of Korean Official Statistics*, **10**(1), 119-144.
- [15] Cole, M.A., 2007, “Corruption, income, and the environment: An empirical analysis”, *Ecol. Econ.*, **62**(3-4), 637-647.
- [16] Leitao, A., 2010, “Corruption and the environmental Kuznets curve: Empirical evidence for sulfur”, *Ecol. Econ.*, **69**(11), 2191-2201.
- [17] Bae, J.H., and Kim, Y.S., 2016, “Causes of Air pollution and effects of mitigation policy in Korea”, *Environmental and Resource Economics Review*, **25**(4), 545-564.
- [18] Hauer, G. and Runge, C.F. 1999, “Trade-environment linkages in the resolution of transboundary externalities”, *World Econ.*, **22**(1), 25-39.
- [19] Aslanidis, N. and Xepapadeas, A., 2006, “Smooth transition pollution-income paths”, *Ecol. Econ.*, **57**(2), 182-189.
- [20] Aslanidis, N. and Susana, I., 2009, “Environment and development: is there a Kuznets curve for CO2 emissions”, *Appl. Econ.*, **41**(6), 803-810.
- [21] Galeotti, M., Manera, M. and Lanza, A., 2009, “On the robustness of robustness of the environmental Kuznets curve hypothesis”, *Environ. Resour. Econ.*, **42**(4), 551-574.
- [22] Galeotti, M., Lanza, A. and Pauli, F., 2006, “Reassessing the environmental kuznets curve for CO2 emissions: A robustness exercise”, *Ecol. Econ.*, **57**(1), 152-163.
- [23] Rho, K., Lee, J.H., and Park, J.G., 2016, “An empirical analysis of the causal relations between economic growth, electricity consumption, and carbon dioxide emissions in Korea”, *New. Renew. Energy*, **12**(S1), 34-41.
- [24] Apergis, N., and Payne, J.E., 2015, “Renewable energy, output, carbon dioxide emissions, and oil prices: evidence from South America”, *Energy Sources Part B: Econ. Plan. Policy*, **10**(3), 281-287.
- [25] Dogan, E., and Seker, F., 2016, “Determinants of CO2 emissions in the European Union: the role of renewable and non-renewable energy”, *Renew. Energy*, **94**, 429-439.
- [26] Lorente, D., Álvarez, A., and Baños, J., 2016, “La innovación y la sustitución energética como medidas de corrección medioambiental en países de la OCDE”. *Estud. Econ.*, **34**, 235-260.
- [27] Moorkens, I., and Dauwe, T., 2019, “Impacts of renewable energy on air pollutant emissions”, *European Topic Centre on Climate Change Mitigation and Energy*, 7-80.
- [28] Department of Income Statistics, Statistics Korea, 2019, “Regional Income”, http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/13/2/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=379534&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&searchInfo=&sTarget=title&sTxt=
- [29] Department of Regional Statistics, Statistics Korea, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=315&tblId=TX_315_2009_H1001
- [30] Statistics Korea, “Consumer price survey”, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1C51&con_n_path=I3
- [31] Statistics Korea, “Population projections by province: 2015-2045”, http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/2/6/index.board?bmode=read&aSeq=361108&pageNo=&rowNum=10&amSeq=&sTarget=&sTxt=
- [32] KESIS Korea Energy Economics Institute, 2018, “Yearbook of Regional Energy Statistics 2018”, <http://www.keei.re.kr/keei/download/RES2018.pdf>
- [33] Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Transport, “Total registered moter vehicles”, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLT

M_5498&conn_path=I3

- [34] Korea Energy Agency, “Survey on deployment of new & renewable energy”, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=337&tblId=TX_33701_A005&conn_path=I3
- [35] Ministry of Environment, “Status of natural gas vehicle supply”, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_17_000004

- [36] Korea Meteorological Administration, “Meteorological data open portal-Climatic statistical analysis - Climatic analysis -multiple point statistics”, <https://data.kma.go.kr/climate/StatisticsDivision/selectStatisticsDivision.do?pgmNo=158>
- [37] Min, I.S., and Choi, P.S., 2012, “Advanced panel data analysis STATA”, JIPHIL MEDIA.