

# 한·중·일 환경 협력이 대기질과 경제에 미치는 영향\*

김의준\*\* / 문승윤\*\*\*

한국, 중국, 및 일본 등 동북아시아 지역의 미세먼지를 저감하는데는 한국과 일본의 우수한 환경기술을 중국에 이전하는 방안이 효과적이며, 이를 위해서는 환경기술 이전의 국가간 경제적 효과 및 오염저감효과에 대해 정량적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 미세먼지 다국가 연산가능일반균형(PMCGE) 모형을 활용하여 미세먼지의 주요 발생원인 석탄 화력 발전시설에 대한 기술을 타국가에 지원할 시 3개국의 미세먼지 농도, 건강개선 편익, 및 경제적 영향 등을 분석하였다. 분석 결과, 자국에 대한 시설투자가 자국 내 미세먼지 발생에는 가장 큰 효과를 보이고 있었다. 그러나 수여국의 시설투자로 인한 기술효과보다 투자국의 투자지출로 인한 규모효과가 더욱 큰 경우도 나타났다. 특정국가의 환경정책은 자국 내에서는 효과를 나타낼 수 있으나, 다국가 간 관계를 고려한 통합적인 관점에서는 국가 간 경쟁 및 교역에 의해 오히려 미세먼지의 총량이 증가할 수도 있었다. 이는 환경정책은 특정 국가만의 문제로 해결될 수 있는 것이 아니라, 국가 간 긴밀한 경제관계를 고려해야 한다는 것을 의미한다. 본 연구는 3국간 미세먼지와 경제를 연계하고 있어 실질적인 정책을 평가했다는 데 의의가 있다.

주제어 \_ 미세먼지, 환경협력, 기술이전, 미세먼지 다국가 일반균형연산가능모형, 동북아시아

\* 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 일반공동연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2021S1A5A2A03063693)이며, 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020S1A5A8046057)

\*\* 서울대학교 농경제사회학부 교수 및 농업생명과학대학연구원 겸무연구원(제1저자)

\*\*\* (주)지역계획연구소 누리 소장(교신저자)

# Effect of Korea–China–Japan Environmental Cooperation on Air Quality and Economy

Euijune Kim\* / Seung-woon Moon\*\*

---

In order to reduce PM<sub>2.5</sub> in Northeast Asia such as Korea, China, and Japan, it is reasonable to induce cooperation according to technological differences of each country. This study analyzes the PM<sub>2.5</sub> concentration, health promotion benefits, and economic effects of technical support for coal-fired power generation facilities, the largest source of PM<sub>2.5</sub> in three countries using the PMCGE (PM<sub>2.5</sub> Multi-national CGE) model. As a result of the analysis, a specific country's environmental policy can have a positive effect within its own country, but from an integrated perspective considering multinational relations, the total amount of PM<sub>2.5</sub> can increase due to trade between countries. This means that environmental policy cannot be solved as a problem specific to a specific country, but must consider the economic relationship between countries. This study is significant in that it evaluated the practical policies that link PM<sub>2.5</sub> and the economy of the three countries.

**Key words** \_ PM<sub>2.5</sub>, Environmental Cooperation, Technology Transfer, PMCGE, Northeast Asia

---

\* Department of Agricultural Economics and Rural Development and Adjunct Researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea (First Author)

\*\* Director, Regional Planning Institute, NURI Corporation, Gyeonggi, Korea (Corresponding Author)

# I. 서론

미세먼지(particulate matter, PM)가 이슈(issue)다. 세계보건기구(WHO)에서는 미세먼지(PM10, PM2.5)를 1급 발암물질로 지정하였으며, 기존의 연구들은 미세먼지가 조기사망까지 유발할 수 있음을 밝히고 있다. 이렇듯 미세먼지는 우리에게 악영향을 미치고 있어 시급히 해결해야 할 사회적 문제임이 분명하다. 미세먼지 문제는 우리나라에만 국한된 문제가 아니다. 한국을 비롯한 중국, 일본 등 동북아시아는 높은 인구밀도와 집중된 에너지 소비로 인해 환경오염물질의 배출이 상대적으로 많으며 이로 인한 피해도 큰 지역이다. 특히, 최근 중국의 급격한 경제성장과 이로 인한 환경오염은 동북아시아 지역에 범국가적인 환경문제를 야기하고 있으며, 미세먼지와 같은 월경성(trans-boundary) 환경오염물질은 개별 국가 내부뿐만 아니라 국제적 문제로 부각되고 있다(심창섭 외, 2015). 따라서, 미세먼지 문제 해결을 위해서는 우리나라뿐만 아니라 동북아시아 지역을 아우르는 통합적인 개선방안을 모색해야 한다.

한국, 중국, 및 일본 등 동북아시아 지역의 미세먼지를 줄이기 위해서는 미세먼지의 최대 배출원인 석탄의 소비를 줄일 필요가 있으며, 특히 중국의 미세먼지 발생을 억제할 필요가 있다. 중국은 세계의 굴뚝이라고 불릴만큼 제조업 중심의 산업구조를 지니고 있으며, 제조업 생산과정에서 필요한 에너지원으로 석탄을 주로 사용하고 있다. 그러나 석탄사용으로 인해 발생하는 미세먼지의 상당부분이 제어되지 않고 있어 이에 대한 대책이 필요하다. 이에 최근 중국은 환경산업을 적극 육성하기 위한 정책을 마련하고 있으며, 대기오염에 대한 단속이 강화되면서 환경기술과 환경설비에 대한 수요가 급증하고 있다. 그러나 중국의 대기오염저감 관련 기술은 선진국 대비 40~60% 수준으로 불가피하게 선진국의 기술 도입이 필요하다(강택구 외, 2013). 반면, 한국과 일본의 청정 석탄 기술은 세계적인 수준이며 이러한 기술을 중국으로 이전할 시 중국의 미세먼지는 크게 감소될 것으로 예상된다(강택구 외, 2013).

한국, 중국 및 일본 사이의 석탄관련 미세먼지 관련 기술이전 사업을 통해 중국은 저감 기술을 통한 대기질 개선을 확보할 수 있고, 한국과 일본의 경우 환경기술이 중국에 진출할 수 있는 교두보가 된다는 측면에서 윈윈 전략이라고 할 수 있다(이상윤 외, 2015). 3국간 미세먼지 관련 합의에서 가장 중요한 부분은 협력 국가 간 제공할 수 있는 경제적 인센티브라고 할 수 있다. 따라서 국가 간 협력·협약에서는 미세먼지 저감효과 뿐만 아니라, 궁극적으로 경제적 효과에 대한 논의가 필요하게 되며, 이와 관련하여 실질적인 협력체계 구축을 위한 실증연구가 필요하다. 즉, 3국의 미세먼지 저감기술 지원이 각국의 대기오염 및 경제에 어떠한 효과를 미치는지 다각적이고 종합적인 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 정책 시나리오로 각국이 미세먼지 저감설비를 지원할 때 자국 및 상대국에 미치는 미세먼

지의 저감효과 및 경제적 파급효과를 분석하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 문헌연구에서는 대기오염으로 인한 외부효과와 국가간 협력의 필요성을 살펴보고, 이 후 미세먼지 다국가 연산 일반균형모형(PM2.5 Multi-national CGE, 이하 PMCGE)을 활용하여 국가별 환경협력 시나리오 상의 대기질 및 경제변화를 분석하였다. 결론에서 본 연구의 의의와 한계를 언급하였다.

## II. 문헌 연구

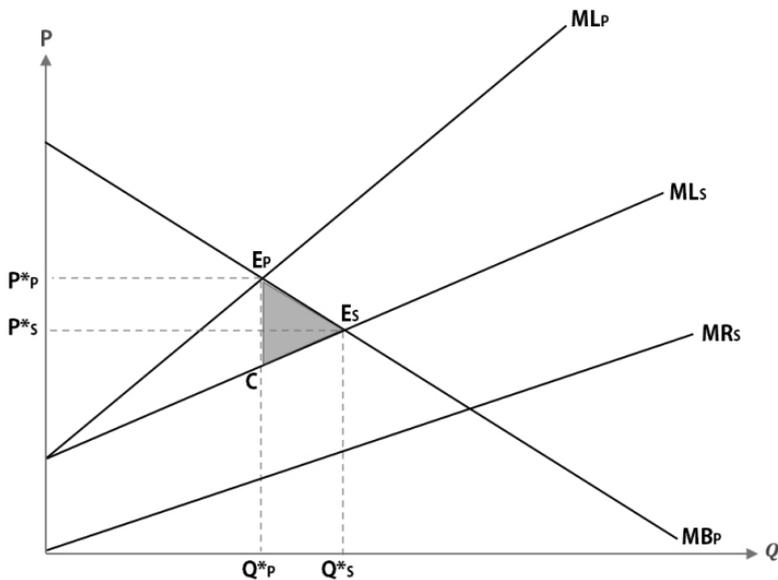
### 1. 이론적 배경

미세먼지와 같은 대기오염의 사회적 외부비용이 완전하게 내재화된다면, 환경오염 등의 시장실패는 발생하지 않을 것이다. 그러나, 현실적으로는 다음과 같은 이유로 인하여 사회적 비용의 부분적인 내재화가 불가피하다. 첫째, 배출허용기준이 최적수준보다 완화된 수준으로 설정되는 경향이 있다. 그리고 사후체제 미비로 설정기준에 대한 완전한 감시도 불가능하다. 둘째, 대기오염의 사회적 비용이 과소추정되기 마련이다. 사회적 비용은 대부분 화폐가치로 환산되지 않는 형태로 나타나기 때문에 간접적인 지표로 통해 추산하게 된다. 그런데, 이러한 방법도 자료부족, 추정방법의 한계 등으로 인해 피해의 일부만을, 예를 들어 가시적인 인체피해 정도만을 화폐가치로 환산하고 있는 실정이다. 또한 오염피해는 장기적·누적으로 나타나지만, 대부분의 경우 단기적·현상적 피해만을 고려하는 경향이 있다. 이처럼 대기오염의 사회적 비용이 실제보다 과소 추정·반영됨에 따라 에너지는 사회적 최적수준 이상으로 소비되고, 생산자 또는 소비자 누구도 책임지지 않는 사회적 비용이 발생되고 누적되어 사회적 후생 극대화 실패하는 현상이 지속된다.

시장실패를 방지하기 위해서는 정부가 시장에 개입하여 저감설비 보급에 대한 지원이 불가피하다. 저감설비 보급 지원을 통해 편익이 발생하는 경로를 설명하면 <그림 1>과 같다. 수평축은 저감설비 보급량, 수직축은 한계편익 또는 한계비용을 나타낸다.  $MR_S$ 는 저감설비 보급으로 인한 대기오염의 사회적 비용 감소분, 즉 대기오염 저감의 사회적 편익을 나타내는 곡선이다.  $ML_S$ 는 저감설비 보급에 대한 사회적 한계손실곡선이다. 저감설비를 보급하기 위해서는 사적으로는  $ML_P$ 의 비용을 지불하지만 사회 전체적으로는  $MR_S$ 의 편익이 발생하므로, 보급으로 인한 사회적 한계손실은 각각의  $Q$ 에 대해  $ML_P$ 와  $MR_S$ 의 수직적 차이가 된다. 즉,  $ML_S(Q) = ML_P(Q) - MR_S(Q)$ 이다. 따라서, 사적균형은 사적 한계편익 곡선  $MB_P$ 와 사적 한계비용곡선  $ML_P$ 가 교차하는  $E_P$ 에서 발생한다. 그리고, 사적 최적 보급량은  $Q^*_P$ 이

다. 그러나, 이러한 상태는 사회적 최적상황이 아니다.  $Q^*_p$ 에서는 아직도 사회적 한계편익  $MB_p$ 가 사회적 한계손실  $ML_s$ 보다 크므로 이 두 곡선이 교차할 때까지는 보급량을 증대시킴으로써 사회적 후생을 빚금친  $\Delta E_p C E_s$  만큼 증가시킬 수 있기 때문이다. 이 경우 사회적 균형은 이 두 곡선이 교차하는  $E_s$ 에서 발생하며, 이 때 사회적 최적보급량은  $Q^*_s$ 이다. 그러나, 순수 시장경제체제하에서는 이러한 사회적 최적상태 도달에 실패한다. 민간에서의 생산자는 사적 한계편익과 사적 한계비용에 근거하여 자신의 최적 보급량을 결정하기 때문이다. 따라서, 생산자로 하여금 사회적 최적상태의 보급을 유도하기 위해서는 그러한 행위가 발생시키는 순사회적 한계편익을 생산자에게 보상해 주는 것이 필요하다. 즉, 대기오염저감의 사회적 편익을 내재화하는 것이 필요하게 된다. 이제 정부가 사업자에게 순사회적 편익만큼을 보상해주면 사적 한계편익곡선이  $MB_p$  상태에서 사적 한계손실곡선은 이제  $ML_s$ 가 되므로, 보상 후의 사적 균형은 두 곡선의 교차점인  $E_s$ 에서 발생하게 된다. 즉, 보상이 이루어지면 사적 균형은 사회적 균형과 일치하게 되며, 사적 최적 보급량은 사회적 최적 보급량과 일치되는 수준인  $Q^*_s$ 가 된다. 대기오염의 사회적 비용을 초래하는 에너지소비행위에 대해서는 초래되는 사회적 비용에 근거하여 환경세를 부과함으로써 에너지소비행위의 억제 내지 효율화를 유도해야 한다. 대기오염 저감편익을 발생시키는 대기오염 저감노력 또는 시설투자에 대해서는 발생하는 저감편익에 근거하여 발생자에게 보상함으로써 저감노력 또는 관련 시설투자를 촉진하게 된다.

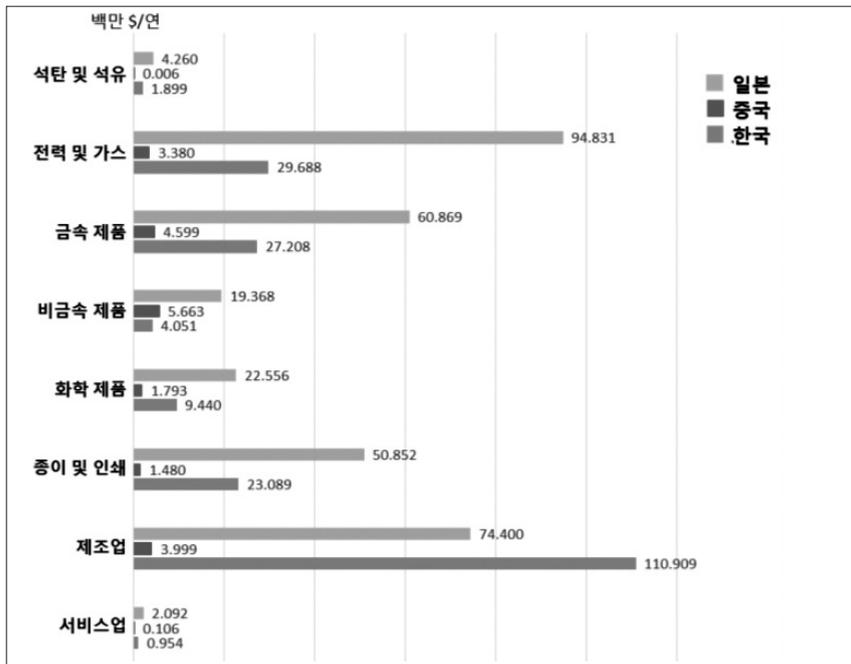
〈그림 1〉 대기오염 저감설비 보급의 사적균형과 사회적 균형



## 2. 3국간 미세먼지 저감정책의 필요성

〈그림 2〉는 한국, 중국, 일본 3개국에서 국가별·산업별로 미세먼지의 한계저감비용을 나타내고 있다. 보는바와 같이 모든 산업에서 한국과 일본의 한계저감비용이 중국보다 월등하게 큰 것을 알 수 있다. 한국과 일본은 이미 미세먼지 저감을 위한 다양한 조치가 시행되어 어느 정도 효과를 보고 있기 때문에, 추가적인 미세먼지 저감을 위해 소요되는 한계비용이 높다. 등한계원칙에 입각할 때 한국, 중국, 일본 간 미세먼지 저감을 위한 공동노력은 효율성 측면에서 반드시 필요하다. 즉, 동북아시아 전체 지역의 미세먼지를 줄이기 위해서는 한국과 일본의 발생량을 규제하는 것보다는 중국의 발생량을 줄이는 것이 경제적으로 효율적이다. 또한, 한국과 일본의 입장에서 중국 한계저감비용이 자국에 비해 현저히 낮기 때문에, 자국의 발생량을 줄이는 방안보다 중국으로부터의 이동량을 감소시키는 방안이 비용-편익 측면에서 효율적일 수 있다. 즉, 한국 또는 일본이 중국의 미세먼지 저감을 위해 기술 및 비용을 지원한다면, 중국만의 이익이 아니라 한국과 일본을 포함한 3개국 모든 국가에 이익이 될 수 있으며, 이는 한국, 중국, 일본이 환경공동체로서 협력해야 하는 당위성을 제공한다.

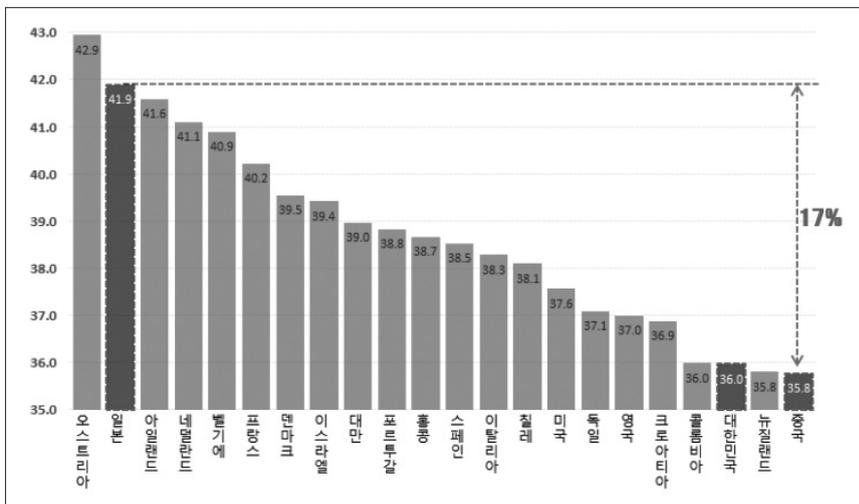
〈그림 2〉 산업별 미세먼지 한계저감비용



자료: GAINS (Greenhouse Gas Air Pollution Interactions and Synergies)

한국, 중국 및 일본에서의 미세먼지 관련 협력은 각 국가의 기술력 차이를 바탕으로 협력 및 합의를 유도하는 것이 합리적이다(이상윤 외, 2015). 기술이전 사업을 통해 중국은 저감 기술을 통한 대기질 개선을 확보할 수 있고, 한국과 일본의 경우 환경기술이 중국에 진출할 수 있는 교두보가 된다는 측면에서 윈윈 전략이라고 할 수 있다. 중국은 전세계 석탄 소비량의 절반 이상을 소비하는 세계 최대 석탄 소비국이다. 중국의 미세먼지 발생원 중 77%가 석탄 사용으로 인해 발생한다(추장민 외, 2016). 반면, 한국의 청정 석탄 기술은 세계적인 수준이며 이러한 기술을 중국으로 이전할 시 중국의 미세먼지는 크게 감소될 것으로 예상된다. 실제로 '한·중 미세먼지 저감 환경기술 실증 협력사업'을 통해 한국의 우수한 대기오염방지 기술을 중국내 제철소 등에 시범적으로 적용한 결과 국내 기술의 우수성이 검증되었다. 국내 기술이 도입된 산동성, 산서성, 하북성 등 중국 6개 지역의 제철소와 석탄화력발전소 등에서 우리나라의 기술을 적용한 결과 집진 효율을 99.2%까지 상승시켜 미세먼지 발생을 저감하였다. (환경부 보도자료, 2017). 한국과 중국 간의 협력뿐만 아니라, 일본과 중국의 고효율 석탄 화력발전 기술 이전도 진행되고 있다(심창섭 외, 2015). 일본은 발전 비용의 감소와 발전부문의 에너지 효율 향상을 위해 고효율 석탄화력 발전기술을 보유하고 있다. 중국의 석탄 화력 발전소의 효율은 33.8%인 반면, 한국은 38.3%를 기록했으며, 일본은 42.7%를 기록해 오스트리아 다음으로 가장 효율이 높은 것으로 나타났다.(그림 3) 만약, 일본의 석탄 효율향상 기술이 중국으로 그대로 이전되었다고 가정하면 중국의 석탄 발열효율은 기존보다 17% 향상될 수 있으며, 이는 석탄사용량 및 미세먼지의 감소로 이어질 수 있다.

〈그림 3〉 국가별 석탄 연료 효율성



출처: the World Energy Council (<https://wec-indicators.enerdata.net>)

### Ⅲ. 방법론

본 연구에서는 한국, 중국, 및 일본이 미세먼지 저감을 위해서 기술 이전 또는 협력을 실시했을 때 각 국가의 경제 및 대기에 미치는 영향을 분석하고자 하며, 이러한 사항들을 통합적으로 고려할 수 있는 분석틀로서 문승운(2019)의 미세먼지 다국가 연산일반균형모형(PM2.5 Multi-national CGE, 이하 PMCGE)을 활용하고자 한다. PMCGE 모형은 경제모형-미세먼지 발생(에너지 모형)-대기이동 모형이 연계된 정태 모형으로, 경제모형인 3개국 연산가능일반균형 모형을 기반으로 하여 산업별 생산 및 에너지 사용량과 같은 주요 경제변수들과 미세먼지의 배출량, 이동량, 및 인체에 미치는 영향 등이 연계된 모형이다.<sup>1)</sup> 모형 내에서 각 국가의 산업부문은 생산과정에서 석탄, 석유, 가스, 및 전력을 에너지 원으로 사용하며, 이러한 에너지원의 소비는 각국에 PM2.5를 발생시킨다. 이렇게 발생한 미세먼지는 한국, 중국, 및 일본 간 미세먼지 발생원-수용원 행렬(Source-Receptor RelationMatrix, 이하 SRR)에 따라 각 국가의 미세먼지로 인한 조기사망자에 영향을 미친다. 시나리오에 따라 미세먼지 저감정책이 시행될 경우 생산활동이 영향을 받으며, 이는 각국 경제주체 간 상호작용을 통해 영향을 미치게 된다. 특정 국가의 미세먼지 발생이 감소하면 이는 대기이동 모형(SRR)을 통해 자국뿐만 아니라 타국의 미세먼지 노출에 영향을 미치게 된다(문승운, 2019).

본 연구의 시나리오는 미세먼지 저감을 위해 석탄 화력발전소에 미세먼지 저감설비를 설치하도록 정부에서 지원하는 것이다. 세부 시나리오는 ‘한국, 중국, 또는 일본’의 정부가 ‘한국, 중국, 또는 일본’의 석탄 화력발전소에 저감시설을 지원하는 것으로 설정하였다. PMCGE 모형 내에서는 투자증여국의 투자지출이 증가하고, 투자수여국의 석탄발전으로 인한 미세먼지의 배출계수가 감소하게 된다. 투자증여국(3개국)과 투자수여국(3개국)의 관계로 총 9개의 경우의 수가 생길 수 있다. 즉, 투자지출→시설개선이라고 했을 때, ①중국→중국, ②일본→중국, ③한국→중국, ④일본→일본, ⑤한국→일본, ⑥중국→일본, ⑦한국→한국, ⑧일본→한국, ⑨중국→국국의 대안을 설정하여 미세먼지 저감효과 및 경제적 파급효과를 분석하였다. 미세먼지 저감 효과는 자국에서의 미세먼지 배출량과 조기사망자 수를 산정하였다. 경제적 지표로는 국내총생산, 총산출, 후생변화, 및 정부수입 등을 나타내었고, 후생변화는 대등변화(equivalent variation, EV)를 지표로 산정하였다. 대등변화는 가격 변화가 일어나지 않은 상태에서 목표한 후생 수준으로 올리기 위해 필요한 소득의 변화를 의미한다(문승운, 2019). 이러한 시나리오별 분석결과는 한국, 중국, 및 일본 등 각국의 미세먼지 저감 정책이 동북아시아 지역의 대기질 및

1) PMCGE모형에 대한 자세한 설명은 문승운(2019)를 참조하기 바란다.

경제에 미치는 영향을 통해, 국제적으로 협력할 수 있는 대안 모색의 근거자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

시나리오의 따른 비용은 집진시설의 투자액이다. 집진시설의 투자비용은 ‘균등화발전비용(Levelized Cost Of Electricity, LCOE)’를 이용하여 추산한다. LCOE는 특정 발전소에서 생산된 전력 단위(kWh) 당 평균 실질발전비용(원)으로, 발전시설 총비용의 현재가치를 총발전량의 현재가치로 나누어 계산한다. LCOE는 원료를 소모하면서 얻는 에너지 대비 원료 원가를 계산하하는 것이 아니라, 경제적 수명 기간 동안 발전량과 초기 건설자본, 운영 및 유지에 이르는 전 과정에서 소요되는 비용을 평가한 것이다. LCOE는 발전소를 건설하고 이를 수명기간 동안에 운영하여 전력을 생산하는데 소요되는 총비용을 말하며, 발전원가는 단위전력량(1kWh)을 생산할 때 소요되는 비용을 말한다(표 1).

〈표 1〉 LCOE에 따른 석탄화력 집진기술 설비비용

구분	금액	단위
시설 조성비용	3,636.0	달러/KW
고정 운영 비용	42.1	달러/KW-년
가변 운영 비용	0.0046	달러/KWh

LCOE에 따른 비용산정시 투자비 대비 개선효과는 선형의 함수가 되기 때문에 투자금액이 크게 의미를 지니지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 각 국의 정부에서 100억 달러를 투자하는 것으로 가정하였다. 따라서, 석탄화력발전소의 집진시설 설비비용을 3,636달러/KW, 발전소의 가동률을 80%로 가정하였을 때, 100억 달러를 투자하여 개선되는 석탄화력발전량은 연간 192.7억 kw이다. 각국의 석탄화력 발전량 중에서 개선된 석탄화력발전소에서 발생하는 전력량의 비율을 산정한 후, 석탄화력 배출계수는 이 비율만큼 감소하게 된다. 이와 같은 방법에 따르면, 각국에 100억 달러를 투자할 시 중국은 0.495%, 일본은 5.924%, 한국은 8.717%의 배출계수 감소효과가 나타나게 된다(표 2).

〈표 2〉 100억 달러 투자에 따른 배출계수 변화

구분	중국	일본	한국	단위
석탄화력 배출계수	0.7778	0.1073	0.0881	kt/백만 TOE
석탄화력 발전량	3890.14	325.36	221.10	십억 kWh/년
투자받는 석탄발전소 비율	0.495	5.924	8.717	%
투자 후 석탄 발전 배출계수	0.7740	0.1010	0.0805	kt/백만 TOE

## IV. 분석 결과

중국정부가 100억 달러를 중국의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비에 투자할 때, 중국의 미세먼지 배출량은 0.256% 감소하며, 일본은 거의 변화가 없고, 한국은 0.017% 증가한다(표 3). 이러한 중국, 일본, 및 한국의 농도감소는 조기사망자수를 각각 0.256%, 0.004%, 0.119%씩 감소시킨다. 한국의 미세먼지 배출량이 증가함에도 불구하고 조기사망자수가 감소하는 이유는 중국의 미세먼지 배출량 감소로 인해 중국으로부터 넘어오는 미세먼지의 양이 감소했기 때문이다.

〈표 3〉 중국 정부의 중국 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	-0.230	0.002	0.000	-0.146
총산출	-0.228	0.004	0.014	-0.165
대등변화*	-20.992	0.396	0.201	-20.394
정부수입	-0.218	0.009	0.012	-0.107
총에너지 소비량	-0.125	0.000	0.043	-0.094
조기사망자	-0.256	-0.004	-0.119	-0.252
미세먼지 배출량	-0.256	0.003	0.017	-0.252

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

중국정부가 아닌 일본정부가 100억 달러를 중국의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비(전력산업)에 투자할 경우, 일본의 미세먼지량은 감소하지만 중국의 미세먼지량 감소는 상대적으로 크지 않았다(표 4). 이는 기술개선으로 인한 기술효과보다 일본 타산업의 투자비 감소로 인한 생산감소의 규모효과 또는 구성효과가 월등히 크기 때문이다.<sup>2)</sup> 즉, 중국은 시설 투자로 인해 전력산업의 미세먼지 배출계수와 미세먼지량이 감소하였으나, 일본과의 국가경쟁력 우위로 인한 생산 증가가 더 많은 미세먼지를 배출하게 만든 것이다. 이러한 결과는, 일본의 국가경쟁력 감소가 3국의 미세먼지에도 영향을 미치므로 3국간의 동반성장이 필요함을 시사하고 있다.

2) 경제성장 또는 국가 간 교역이 오염물질의 양에 미치는 영향은 기술효과(technique effect), 규모효과(scale effect), 및 구성효과(composition effect)로 구분할 수 있다(Copeland and Taylor, 1995). 기술효과는 경제가 성장함에 따라 환경친화적인 생산기술에 대한 수요가 높아짐에 따라 환경기술 향상으로 인해 오염물질이 감소하는 효과이다. 규모효과는 생산량(또는 교역량)의 변화로 인해 오염물질의 발생량이 변화하는 효과이다. 기술수준 등의 모든 조건이 동일할 때, 경제성장 또는 교역량 증가에 따라 생산량이 증가하면 그로인해 발생하는 미세먼지량이 증가하는 효과이다. 구성효과는 경제성장 또는 교역을 통해 생산 또는 소비하는 재화 및 서비스의 구성이 변화하는 것이다.(문승운, 2019)

〈표 4〉 일본 정부의 중국 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.011	-0.214	0.007	-0.052
총산출	0.019	-0.229	0.023	-0.029
대등변화*	1.591	-8.730	0.172	-6.967
정부수입	0.014	-0.197	0.011	-0.070
총에너지 소비량	0.087	-0.112	0.053	0.056
조기사망자	-0.005	-0.245	0.003	-0.007
미세먼지 배출량	-0.005	-0.268	0.014	-0.007

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

다음은 한국정부가 100억 달러를 중국의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비(전력산업)에 투자하는 경우이다(표 5). 중국의 미세먼지 농도는 0.007% 감소하며, 일본은 0.020%, 한국은 0.870% 감소한다. 이러한 농도 변화는 중국, 일본, 및 한국의 조기사망자수를 각각 0.008%, 0.075%, 0.435%씩 감소시킨다. 한국→중국의 투자는 중국의 총산출을 증가시켜 그로 인한 에너지원 사용을 소폭 증가시키는 것으로 나타났으나, 석탄 산업의 미세먼지 배출계수 감소로 인해 전체적으로 미세먼지 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 한국이 중국으로 투자함에도 불구하고 미세먼지 배출량의 상대적인 저감효과는 일본이 중국보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 단순히 시설투자로 인한 배출계수의 감소보다도 긴밀한 경제관계로 인한 간접적인 생산량 증감이 미세먼지의 총 배출량에 영향을 더 크게 미치기 때문이다. 이는 미세먼지 정책을 시행하는데 있어, 국가 간 경제관계를 반드시 고려해야 되는 이유이다.

〈표 5〉 한국 정부의 중국 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.011	0.006	-0.340	-0.019
총산출	0.027	0.008	-0.710	-0.031
대등변화*	2.493	0.518	-11.112	-8.101
정부수입	0.022	0.011	-0.890	-0.066
총에너지 소비량	0.088	-0.005	3.110	0.329
조기사망자	-0.008	-0.075	-0.435	-0.013
미세먼지 배출량	-0.007	-0.020	-0.870	-0.013

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

일본정부가 100억 달러를 일본의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비에 투자할 때, 일본의 미세먼지 배출량은 -0.606% 감소하며, 한국은 0.014%, 중국은 0.004% 증가한다(표 6). 이러한 배출량 증감

은 조기사망자수를 일본은 0.557% 감소시키고, 한국과 중국의 조기사망자수는 각각 0.005%, 0.005% 증가시킨다. 일본→일본의 투자는 자국의 미세먼지를 감소시키는데는 효과적일 수 있으나, 타국의 미세먼지 저감 및 경제에 미치는 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

〈표 6〉 일본 정부의 일본 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.001	-0.203	0.007	-0.055
총산출	0.004	-0.214	0.023	-0.037
대등변화*	0.552	-8.168	0.172	-7.444
정부수입	0.005	-0.185	0.011	-0.070
총에너지 소비량	0.004	0.038	0.053	0.013
조기사망자	0.004	-0.557	0.005	-0.001
미세먼지 배출량	0.004	-0.606	0.014	-0.001

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

다음으로 일본정부가 아닌 한국정부가 100억 달러를 일본의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비에 투자한다고 가정하였다(표 7). 이럴 경우 일본의 미세먼지량 감소율보다 한국의 미세먼지 감소율이 더 크게 나타났다. 이는 일본→중국의 경우와 마찬가지로 기술개선에 의한 기술효과보다 한국 타산업의 투자비 감소로 인한 생산감소의 규모효과 또는 구성효과가 크기 때문이다. 즉, 일본의 시설 투자로 인한 미세먼지 저감량보다 한국의 산업투자 감소로 인한 생산량 감소가 한국에게 더 크게 작용한 것이다.

〈표 7〉 한국 정부의 일본 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.002	0.017	-0.340	-0.022
총산출	0.011	0.023	-0.710	-0.039
대등변화*	1.453	1.081	-11.120	-8.586
정부수입	0.012	0.024	-0.890	-0.066
총에너지 소비량	0.005	0.145	3.109	0.286
조기사망자	0.001	-0.387	-0.434	-0.007
미세먼지 배출량	0.001	-0.359	-0.870	-0.007

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

일본정부가 100억 달러를 한국의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비에 투자할 때, 한국의 미세먼지 농도는 0.390% 감소하며, 일본은 0.268% 감소하고 중국은 0.004% 증가한다(표 8). 이 경우도 한

국→일본의 경우와 유사한 효과가 발생한다. 즉, 한국의 미세먼지량 감소율보다 일본의 미세먼지 감소율이 더 크게 나타난다. 즉, 타국가들 간의 관계와 마찬가지로 기술개선으로 인한 기술효과보다 일본 타산업의 투자비 감소로 인한 생산감소의 규모효과 또는 구성효과가 크기 때문이다. 즉, 한국의 시설 투자로 인한 미세먼지 저감량보다 일본의 산업투자 감소로 인한 생산량 감소가 더 크게 작용한 것이다.

〈표 8〉 일본 정부의 한국 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.001	-0.214	0.084	-0.052
총산출	0.004	-0.229	0.112	-0.033
대등변화*	0.583	-8.730	1.007	-7.140
정부수입	0.005	-0.197	0.073	-0.069
총에너지 소비량	0.004	-0.112	0.814	0.056
조기사망자	0.004	-0.272	-0.193	0.000
미세먼지 배출량	0.004	-0.268	-0.390	0.000

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

한국정부가 100억 달러를 한국의 석탄화력발전소의 미세먼지 저감설비에 투자하는 경우이다(표 9). 이럴 경우, 한국의 미세먼지 농도는 0.63% 감소하며, 일본은 0.10%, 중국은 거의 변화가 없다. 이러한 농도 변화는 중국, 일본, 및 한국의 조기사망자수를 각각 0.00%, 0.10%, 0.63%씩 감소시킨다. 한국→한국의 투자는 자국의 미세먼지를 감소시키는데는 가장 효과적이거나 타국의 미세먼지 저감에 미치는 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

〈표 9〉 한국 정부의 한국 석탄산업에 100억 달러 투자 효과

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	0.002	0.006	-0.261	-0.019
총산출	0.012	0.009	-0.621	-0.035
대등변화*	1.485	0.518	-10.277	-8.273
정부수입	0.013	0.011	-0.826	-0.065
총에너지 소비량	0.006	-0.005	3.882	0.330
조기사망자	0.001	-0.102	-0.631	-0.006
미세먼지 배출량	0.001	-0.021	-1.272	-0.006

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

〈표 10〉 및 〈표 11〉은 중국이 일본 또는 한국의 석탄산업에 100억 달러를 투할 때의 효과를 나타낸다. 중국의 타국가로의 투자는 자국의 경제에 부정적인 영향을 미치며, 이러한 경제의 영향을 미세면지가 감소하게 된다. 중국이 일본에 투자할 시에는 한국의 미세면지가 증가하며, 중국이 한국에 투자할 시에는 일본의 미세면지가 증가하고 있으므로 한국과 일본은 중국의 투자의향을 유심히 살펴보아야 할 필요가 있다.

〈표 10〉 중국 정부에서 일본 석탄산업에 100억 달러 투자시 변화

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	-0.239	0.013	0.000	-0.150
총산출	-0.244	0.018	0.013	-0.174
대등변화*	-22.031	0.954	0.201	-20.876
정부수입	-0.009	0.013	0.000	-0.107
총에너지 소비량	-0.208	0.150	0.043	-0.137
조기사망자	-0.247	-0.311	-0.117	-0.246
미세먼지 배출량	-0.247	-0.336	0.016	-0.246

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

〈표 11〉 중국 정부에서 한국 석탄산업에 100억 달러 투자시 변화

(단위: %)

국 가	중국	일본	한국	합계
국내총생산	-0.239	0.002	0.078	-0.146
총산출	-0.243	0.004	0.102	-0.170
대등변화*	-21.999	0.391	1.037	-20.572
정부수입	-0.241	0.206	0.063	-0.106
총에너지 소비량	-0.208	0.000	0.805	-0.094
조기사망자	-0.247	-0.026	-0.315	-0.245
미세먼지 배출량	-0.247	0.002	-0.387	-0.245

\* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

〈표 12〉는 시나리오별 미세먼지 저감효과를 나타낸다. 자국의 입장에서는 자국이 자국에 투자했을 때 가장 큰 효과가 있다. 그러나 투자국과 수여국이 상이할 경우, 미세먼지 저감효과와 건강개선 편익은 투자를 받는 수여국 보다는 투자를 하는 투자국에서 가장 크게 나타나고 있다. 이는 Copeland and Taylor (1995)이 제시한 환경개선효과의 직접적인 기술 지원 및 시설투자도 효과가 있지만 그보다 국

가 간·산업간 가치사슬에 의해 간접적으로 발생하는 효과가 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

〈표 12〉 보조금 정책대안의 미세먼지 저감 효과 (%)

투자국	수여국	총 효과	중국	일본	한국
중국	중국	-0.252	-0.256	0.003	0.017
일본	중국	-0.007	-0.005	-0.268	0.014
한국	중국	-0.013	-0.007	-0.020	-0.870
일본	일본	-0.001	0.004	-0.606	0.014
한국	일본	-0.007	0.001	-0.359	-0.870
중국	일본	-0.246	-0.247	-0.336	0.016
일본	한국	0.000	0.004	-0.268	-0.390
한국	한국	-0.006	0.001	-0.021	-1.272
중국	한국	-0.245	-0.247	0.002	-0.387

제한된 정부 예산에서 석탄발전에 대한 투자는 타산업의 투자를 감소시키므로 전체적으로 GDP가 감소하게 된다(표 13). 즉, 자국의 전력산업에 대한 투자는 자국의 타산업에 부정적인 영향을 미치게 되고, 이는 타국 경제에는 대체로 긍정적인 효과를 미친다. 이러한 타국으로의 경제적 효과는 타국에서의 미세먼지 발생량을 증가시키는 요인으로 작용하기도 한다. 이는 비록 오염 피난처 가설이 아니더라도 국가 간 경쟁 관계에 의해서 배출량 누출이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

〈표 13〉 보조금 정책대안의 국내총생산 효과 (%)

투자국	수여국	총 효과	중국	일본	한국
중국	중국	-0.146	-0.230	0.002	0.000
일본	중국	-0.052	0.011	-0.214	0.007
한국	중국	-0.019	0.011	0.006	-0.340
일본	일본	-0.055	0.001	-0.203	0.007
한국	일본	-0.022	0.002	0.017	-0.340
중국	일본	-0.150	-0.239	0.013	0.000
한국	한국	-0.019	0.002	0.006	-0.261
일본	한국	-0.052	0.001	-0.214	0.084
중국	한국	-0.146	-0.239	0.002	0.078

## V. 결론

미세먼지는 배출 국가만의 문제가 아니라 국경, 주권의 범위, 및 행정적 범위까지 넘어서는 범지구적·국제적 문제로, 미세먼지를 ‘누가’, ‘어떻게’ 줄여야 하는가에 대해서는 많은 논의가 필요하다. 특히, 한국, 중국, 및 일본을 포함하는 동북아시아 지역은 최대의 미세먼지 배출지역으로 미세먼지 저감을 위한 국가 간 협력과 이와 관련한 과학적인 연구가 절실하다. 따라서, 본 연구에서는 미세먼지 저감을 위한 국가간 협력이 국가 간 대기질 및 경제에 어떠한 영향을 미치는지를 정량적으로 평가하고자 하였으며, 이에 경제모형-미세먼지 발생(에너지 모형)-대기이동 모형이 연계된 미세먼지 다국가 연산가능일반균형(PMCGE) 모형을 활용하여 미세먼지의 최대 발생원인 석탄화력 발전시설에 대한 투자 지원을 할 시 3개국의 미세먼지 농도, 건강개선 편익, 및 경제적 영향 등을 분석하였다. 분석 결과, 자국이 자국에 투자하는 것이 가장 비용-효율적으로 나타났으며, 수여국의 시설투자로 인한 기술효과보다 투자국의 투자지출로 인한 규모효과가 더욱 큰 것으로 나타났다. 또한 특정국가의 환경정책은 자국 내에서는 효과를 나타낼 수 있으나, 다국가 간 관계를 고려한 통합적인 관점에서는 국가 간 경쟁 및 교역에 의해 오히려 미세먼지의 총량이 증가할 수도 있었다. 이는 환경정책은 특정 국가만의 문제로 해결될 수 있는 것이 아니라, 국가 간 긴밀한 경제관계를 고려해야 한다는 것을 의미한다.

한국, 중국, 및 일본의 미세먼지 정책에 대해 다음과 같은 종합적인 함의를 도출 할 수 있었다. 특정국가의 미세먼지 저감 정책은 해당 국가뿐만 아니라 인접국가에까지 영향을 미치고 있기 때문에, 미세먼지 저감을 위해 국가 간 협력은 당연한 과정이다. 한국과 일본의 경우 중국발 미세먼지의 영향이 상당함과 동시에 중국에 대한 경제적 의존도도 상당하기 때문에 미세먼지 저감을 위해서는 중국과의 협력이 필수적이다. 즉, 한국, 중국, 및 일본은 동북아시아의 경제적 협력 또는 견제가 지속적이기 때문에 이러한 점들을 고려한 초국경적인 미세먼지 정책이 필요하다. 이러한 미세먼지 저감정책은 단순히 굴뚝에서 나오는 오염물질의 감소만을 의미하지는 않는다. 정책실험의 분석결과 미세먼지의 영향보다도 경제적 영향이 상당히 크게 작용하고 있었으며, 자국 뿐만 아니라 타국에까지 미치고 있었다. 미세먼지와 경제와의 관계가 긴밀하고 복잡하기 때문에, 미세먼지 저감 정책 시행으로 인한 경제적 영향을 파악해야 하고, 동시에 이러한 경제적 영향이 다시 미세먼지 저감에 미치는 영향까지도 고려해야 했다. 또한, 대부분의 시나리오 결과에서 기술효과보다 규모효과가 더욱 크게 나타나고 있어, 3개국의 초국경적인 미세먼지 저감 정책은 직접적인 설비투자보다 간접적인 경제적 유인이 더욱 효과가 있을 것으로 예상되었다.

본 연구의 의의는 다음과 같다. 그동안 동북아시아 지역에서의 월경성 대기오염물질과 관련한 환경

협력에서는 공통된 과학적 이해의 부족이 가장 큰 장애요소였다(추장민 외, 2017). 본 연구는 경제분야 및 대기질 분야의 과학적 전문지식에 기반을 두면서 국가들 간의 미세먼지 정책의 효과를 분석하고 있으므로, 본 연구를 기반으로 한국, 중국, 및 일본의 미세먼지 관련 협력을 촉진할 수 것이다. 또한, 본 연구의 결과는 향후 미래 동북아시아의 미세먼지 정책 평가 대한 기초자료로 활용될 것으로 사료된다. 본 모형을 통해 유럽 또는 미국 중심의 전망 모형을 벗어나, 동북아시아 지역 특성에 맞는 미세먼지 정책 수립을 도모할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 한국, 중국, 및 일본의 대기오염을 통합적으로 관리할 수 있으며, 3개국의 사회·경제적인 변화와 적응정책이 동아시아 대기질에 미치는 영향 평가할 수 있을 것이다. 한국, 중국, 및 일본 간 미세먼지 연구는 그동안 미세먼지의 발생 및 이동에 대한 과학적 인과관계 연구가 주로 이루어지고 있으나, 이러한 과학적 사실이 실질적인 정책으로 발전되지는 못하고 있었다. 그에 반해 본 연구는 3국간 미세먼지와 경제를 연계하고 있어 실질적인 정책을 개발하는데 도움을 줄 수 있는 연구이다.

물론 본 연구의 한계도 존재한다. 우선 본 연구의 분석모형은 시간의 흐름을 고려하지 않는 정태모형이다. 환경정책들은 시간에 걸쳐 나타나기 때문에 상당한 기간을 염두한 분석모형이 필요하다. 또한, 본 연구에서는 국가 간 모형을 이용함에 따라 대기의 이동을 최대한 단순화하고 있다. 대기의 이동은 많은 변수가 존재하기 때문에 국가 간 행렬로 나타내기에는 한계가 존재한다. 좀 더 세부적인 공간단위에서의 대기이동 모듈이 적용되어야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

강택구·심창섭·추장민·노태호·김예화·정성운(2013). 『한·중 대기오염 저감 관리 비교와 협력방안』, 대외경제정책연구원.

문승운(2019). 『동북아시아 미세먼지 저감정책이 경제성장과 대기오염에 미치는 영향: 한국, 중국, 및 일본의 대기오염 다국가 연산일반균형모형 개발』, 서울대학교 박사학위 논문.

문승운(2021). “한국, 중국, 및 일본의 경제성장이 대기오염에 미치는 영향: 미세먼지-다국가 연산가능일반균형(PMCGE) 모형 구축”, 『환경정책』, 29(1) : 1-19.

심창섭 외 (2015). 『동아시아 대도시 대기질 개선을 위한 국제 공동 연구』, 한국환경정책평가연구원.

이상윤·이승민·김이진·김인경·최도현(2015). 『월경성 대기오염물질 관리를 위한 단계별 대응방안 연구』, 한국환경정책평가연구원.

추장민·공성용·이승민·정성운·동전봉(2016), 『한·중 권역별 대기오염 저감정책 비교 및 협력방안 연구-이동오염원 관리 대책을 중심으로』, 대외경제정책연구원.

추장민·강광규·주현수·정성운·DONG Zhanfeng·QU Aiyu·ZHOU Quan·WU Qiong·LI Hongxiang(2017). 『한·중 권역별 대기오염 저감정책 비교 및 협력방안 연구-고정오염원 관리 대책을 중심으로』, 대외경제정책연구원.

Copeland, Brian & Scott Taylor(1995). “Trade and Transboundary Pollution”, *American Economic Review*, 85: 716-737.

<https://wec-indicators.enerdata.net> the World Energy Council.

<https://www.iea.org/classicstats/relateddatabases/worldenergystatistics> IEA, World Energy Balance

<https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=830370&menuId=286> 환경부 보도자료.

---

원 고 접 수 일 | 2022년 4월 10일  
심 사 완 료 일 | 2022년 5월 9일  
최종원고채택일 | 2022년 5월 16일

**김의준** euijune@snu.ac.kr

미국 Cornell University에서 지역경제학 박사학위를 취득하였다. 국토연구원 책임연구원, 연세대학교 정교수 등을 역임하였으며, 현재 서울대학교 농경제사회학부 정교수 및 농업생명과학연구원 겸무연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 도시 및 지역경제학, 도시 및 지역이론 및 공공투자정책으로 “미세먼지의 지역별 생산기반 배출량과 소비기반 배출량”(2019), “Spatial Economic Linkages of Economic Growth and Air pollution: Developing an Air Pollution-multinational CGE Model of China, Japan, and Korea”(2019) 등 다수의 논문을 발표하였다.

**문승운** moonswoon@naver.com

서울대학교 농경제사회학부 지역정보전공에서 경제학 박사를 취득하고, 현재는 (주)지역계획연구소 누리에서 소장으로서 재직 중이다. 주요 관심분야는 재난, 자연재해, 환경오염, 미세먼지 등으로, “동북아시아 미세먼지의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량의 비교: 한국, 중국, 일본을 대상으로”(2020), “사회재난의 경제적 파급효과 2016 철도과업으로 인한 물류대란 피해”(2018), “대설의 경제적 피해 - 교통 수요모형과 불능투입산출모형의 이용”(2018) 등의 논문을 발표하였다.