

한국, 중국, 및 일본의 경제성장이 대기오염에 미치는 영향:

미세먼지-다국가 연산가능일반균형(PMCGE) 모형 구축*

The Effect of the Economic Growth on the Emission of PM_{2.5}:
Developing PM_{2.5}-Multinational Computable General Equilibrium Model
of Korea, China, and Japan

문승운** · 김익준***

Seung-woon Moon · Euijune Kim

요약: 한국, 중국, 및 일본의 경제성장이 각국의 미세먼지 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위해 경제모형, 에너지 모형, 대기이동 모형이 연계된 3개국의 미세먼지-다국가 연산가능일반균형(PMCGE) 모형을 구축하고, 경제성장이 자국 및 타국가에 미치는 영향을 생산기반 배출량과 소비기반 배출량 기준으로 분석하였다. 분석 결과, 중국의 성장은 동북아시아 대기질에 부정적인 영향을 미치고 있었으나, 한국과 일본의 경우는 경제성장시 3국의 경제가 성장함에도 불구하고 3국의 미세먼지 총량을 감소시킬 수 있었다. 또한, 중국은 경제성장을 보다 더 큰 폭의 미세먼지 배출 상승율을 보였다.

핵심주제어: 미세먼지, 연산가능일반균형 모형, 소비기반 배출량

Abstract: This study analyzes the effect of economic growth on the emission of PM_{2.5} in three Northeast Asia countries (Korea, China, and Japan) in terms of production base and consumption base. The PM_{2.5}-Multinational Computable General Equilibrium model is developed to integrate the energy and atmospheric mobility models with a multinational economic model. Based on the analysis, China's growth had a negative effect on air quality in NortheastAsia. Still, in the case of Korea and Japan, the total amount of PM_{2.5} in the three countries could be reduced even though the economy of the three countries underwent economic growth. In addition, China showed a higher rate of PM_{2.5} emission than the economic growth rate.

Key Words: PM_{2.5}, Computable General Equilibrium Model, Consumption-Based Emission

* 이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020S1A5A8046057).

** 주저자, (주)누리지역계획연구소 소장

*** 교신저자, 서울대학교 농경제사회학부 교수 및 농업생명과학대학연구원 겸무연구원

I. 서론

한국을 비롯한 중국, 일본 등 동북아시아는 미세먼지로 인한 피해가 막대하다. 특히, 세계 최대 미세먼지 배출국인 중국에서 발생한 미세먼지가 다른 나라로 월경(trans-boundary)하는 것이 과학적으로 밝혀짐에 따라 해당 문제는 국제적인 문제로 부각되고 있다(심창섭, 2015). 우리나라의 미세먼지 저감을 위해서는 우리나라뿐만 아니라 동북아시아 지역을 아우르는 통합적인 방안을 모색해야 한다.

미세먼지의 상당한 피해에도 불구하고 미세먼지 저감 정책을 적극적으로 시행하지 못하는 이유는 일반적으로 환경규제와 경제성장이 상충관계에 있기 때문이다. 또한, 대부분의 환경정책은 피해지역의 후생은 증대시키는 반면 배출지역의 후생은 감소시키기 때문에 지역 간 형평성을 고려해야 한다. 즉, 미세먼지 정책을 시행하기 위해서는 국가 내의 직접적인 영향은 물론, 정책 시행으로 인한 국가 간의 간접적인 영향까지 파악해야 한다. 이러한 인과관계의 파악없이 특정 국가 내 오염 발생원에 대한 규제만 강조한다면, 미세먼지 저감 대책은 사회·경제적 효율성과 형평성을 크게 손실시킬 수 있다. 결론적으로 한국, 중국, 및 일본 등 동북아시아의 미세먼지 저감을 위해서는 반드시 각국의 경제적·환경적 영향을 고려해야 한다. 이를 위해서는 국가 간 대기질과 경제 부문이 연계된 종합적이고 과학적인 분석틀이 필요하다.

본 연구는 한국, 중국, 및 일본을 대상으로, 각 국가의 미세먼지 저감 정책이 각 국가의 경제 및 대기에 미치는 영향을 살펴보고자 하며, 이러한 사항들을 통합적으로 고려할 수 있는 분석틀로서 미세먼지-다국가 연산가능일반균형(PM_{2.5}-Multinational Computable General Equilibrium, 이하 PMCGE) 모형을 개발하였다. 특히 본 연구에서는 PMCGE 모형을 통해 각국의 미세먼지 배출량을 생산기반 배출회계(production-based emission inventory, 이하 PBA)와 소비기반 배출회계(consumption-based emission inventory, 이하 CBA)로 구분하여 비교하였다. PBA는 특정국가에서 제품 및 서비스를 생산함

으로써 발생하는 오염물질량을 집계한 것이다. 반면 CBA는 비록 타국에서 생산되더라도 자국의 소비에 의해 발생하는 오염물질을 집계하는 것이다. 이러한 CBA의 개념은 저개발국에서 선진국으로 수출되는 재화생산으로 인해 발생하는 오염물질의 책임에 대한 논의에서 많이 언급되고 있으며, 저개발국에서 배출하는 미세먼지의 책임이 선진국에도 일정 부분 있다는 논거를 제공할 수 있다(문승운, 2020).

이에 본 연구에서는 경제부문과 대기부문을 종합적으로 연계한 분석틀로써 PMCGE를 구축하고, PBA와 CBA의 개념을 통해 한·중·일 동북아시아 지역의 미세먼지 저감을 위한 초국경적인 협의 및 대응방안 마련에 활용될 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 선행연구

1. 대기오염 연산가능일반균형 모형

연산가능일반균형(Computable General Equilibrium, 이하 CGE) 모형은 비선형 다부문 모형으로 1970년대에 개발되었다. 이 후 1990년대 초반 온실가스로 인한 기후변화의 정책 분석을 위해 활용되기 시작하였으며, 최근에는 오존(Ozone)이나 미세먼지와 같은 여타 대기오염 물질이 저감되는 데 수반되는 환경·건강 편익을 분석하기 위한 정량분석 모형으로 활용되고 있다. 현재 많이 활용되고 있는 대기오염 평가 CGE 모형으로는 ENV-Linkages, GEM-E3 모형, 및 EPPA(Emission Prediction and Policy Analysis) 모형 등이 있다.

ENV-Linkages 모형은 OECD에서 개발한 GREEN(GeneRal Equilibrium Environmental) 모형을 개선한 모형이다. GREEN 모형은 이산화탄소 저감 정책의 경제적 영향을 평가하기 위해 1992년 OECD에서 개발한 모형으로, 주로 기후 변화 정책을 연구하는 데 사용되었다(Burniaux et al., 1992). ENV-Linkages 모형은 다부문·다지역 분석이 가능한 축차동태형(recursive

dynamic) 일반균형모형으로, Lanzi et al.(2018)는 ENV-Linkages 모형을 이용하여 2010~2060년 PM_{2.5}와 오존이 경제에 미치는 영향을 분석하였다. 타 연구들이 경제활동이 대기오염에 미치는 영향을 분석했다면, 이 연구는 대기오염의 감축이 경제에 미치는 일종의 환류 효과(feedback effect)까지 분석한 것이 특징이다. 즉, 건강 악화로 인한 노동 생산성 손실, 질병으로 인한 건강 지출액 증가, 농업 수확량 손실 등을 계량화하였다. GEM-E3 모형은 에너지, 기후, 및 환경 정책의 거시 경제 효과를 평가하는 CGE 모형으로, OECD 국가, G20 국가, 및 EU국가 등을 포함한 다수의 지역 및 부문을 다루고 있다. GEM-E3 모형은 간접세, 에너지세, 직접세, 부가가치세, 생산보조금, 사회 보장 기여금, 수입 관세, 외국 송금 및 정부 기관 등 9 가지 범주의 세수를 구분하고 있어, 정부정책으로 인한 비용효과적인 대안을 검토할 수 있다. 이 모형의 특징은 생산주체인 기업이 자본, 노동, 에너지, 및 중간재로 구성된 중첩-CES(nested constant elasticity of substitution)함수를 통해 생산한다는 것이다. MIT의 EPPA 모형은 세계 경제를 대상으로 한 다부문 축차동태모형으로 에너지 및 환경 정책이 경제와 대기질에 미치는 영향을 연구하기 위해 활용되고 있다(Matus et al., 2008, 2012; Nam et al., 2010). 이상의 선행연구들을 모두 에너지(Energy)-환경(Environment)-경제(Economy)를 연계하는 소위 E3의 분석틀 안에서 환경정책이 경제와 환경에 미치는 영향을 분석하고 있다(Bohringer and Loschel, 2006). 이에 본 연구에서도 한국, 중국, 및 일본을 대상으로 에너지-환경-경제를 연계한 모형을 구축하였다.

살펴본 모형들에서 대기오염 저감정책을 구현하는 방법은 크게 '배출계수의 조정'과 '생산요소(구조) 변화' 두 개의 범주로 구분할 수 있다. 배출계수의 조정은 각 부문의 경제활동으로 인해 발생하는 단위당 배출량 수준을 외생적으로 조절하는 것이다. 일반적으로 CGE 모형에서 미세먼지의 발생량은 특정 부문의 경제 활동과 경제 활동 단위당 배출량(배출계수)을 곱하여 결정한다. 배출계수는 배출량 강도를 나타내는 지표로써 해당 지표를 외생적으로 조정하여 배출량을 조정할 수 있으며, 생산량 당 배출계수 또는 에너지당 배출계수가 이용되고 있다(Chateau et al., 2014). 생산

요소의 변화를 통한 방법은 생산함수를 변형하는 방법이다. 일반적으로 중첩-CES 생산 함수를 이용하여 배출량을 내생적으로 결정한다. 내생적 접근 방식의 장점은 모형을 통해 에너지 소비구조, 국내총생산(GDP), 저감 비용 등 경제 전반에 대한 효과를 분석할 수 있다는 것이다. 본 연구의 목적인 경제성장이 대기오염에 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 대기오염을 외생으로 처리하는 배출계수 조정보다는 경제성장과 대기오염이 내생적으로 결정되는 생산요소의 변화 방식이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 각 국가의 생산요소와 에너지원 소비 구조를 중첩-CES 함수로 구성한 모형을 구축하였다.

Ⅲ. 모형 구축

1. 자료

PMCGE 모형에 필요한 변수들의 초기값과 방정식을 구성하는 다수의 모수(parameter)를 결정하기 위해 3국가 간 사회계정행렬을 구축하였다. 사회계정행렬 작성에 기본이 되는 투입산출표는 국제투입산출자료(World Input Output Database, 이하 WIOD)에서 제공하는 2014년의 국제산업연관표(World Input Output Table, 이하 WIOT)를 이용하였다. WIOT는 '43(개국)×56(산업)'차원의 행렬이다. 사회계정행렬 구축시 분석목적에 맞는 산업부문의 정의 및 분류가 선행되어야 한다. 우선 대상 국가는 한국, 중국, 및 일본과 해외부문으로 구성하였다. 산업분류의 경우, 산업의 수가 많을수록 정책의 영향을 분석하는데 효과적이지만, 모형 내에서 최적해를 도출하기가 어려워진다는 단점이 있다. 모형에서 사용되는 자료는 세계산업연관표 뿐만 아니라 GAINS의 국가별·산업별 미세먼지 배출량 자료, IEA의 국가별·산업별 에너지 소비량 자료이다. 해당 자료들의 산업 분류 위계를 고려하여, 본 연구에서는 에너지 및 미세먼지 발생과 밀접한 관련 있는 산업을 위주로 취합·분류 하였다.

WIOD에서는 WIOT 뿐만 아니라 사회경제계정(Socio Economic Accounts, 이하 SEA)도 제공하고 있다. SEA는 WIOT를 구성하는 해당국가들의 산업별 고용자 수, 자본스톡, 총산출, 및 부가가치 등을 포함하고 있어 사회계정행렬을 작성하는데 있어서 중요한 자료이다. 사회계정행렬의 각 계정은 생산요소(임금, 영업잉여), 생산, 정부, 투자, 자본, 관세, 운수마진 및 해외로 구성된다. 사회계정행렬을 구성하는 자료는 대부분 WIOT국제산업연관표로부터 얻어지며, 국제산업연관표에서 구득할 수 없는 자료는 각 국가별 국민계정을 통해 얻을 수 있다. 이상의 과정을 통해 한국, 중국, 일본의 3국가 사회계정행렬의 구조는 <표 1>과 같으며, 사회계정행렬을 채우고 있는 각 셀의 정보와 출처는 <표 2>에 정리하였다.

〈표 1〉 PMCGE 사회계정행렬의 기본 구조

연번	계정		1	2	3		4		5		6		7	8	9	계 (R)	
			노동	자본	가계 한 국	중 국	정부 일 본	한 국	중 국	생산활동 일 본	한 국	중 국	자본 일 본	한 국	중 국		일 본
1	생산 요소	노동							피용자보수 S(1,5)								노동수입 R1
2		자본							영업잉여 S(2,5)								자본수입 R2
3	가계	한국	피용자 보수 S(3,1)	영업 잉여 S(3,2)				보조금 S(3,3)									가계소득 R3
		중국 일본															
4	정부	한국			직접세 S(4,3)			간접세 S(4,5)				관세 S(4,7)					정부수입 R4
		중국 일본															
5	생산 활동	한국			민간소비 S(5,3)		정부소비 S(5,4)	중개거래 S(5,5)	투자 S(5,6)				교통마진 S(5,8)		수출 S(5,9)		총산출 (총수요) R5
		중국 일본															
6	자본	한국			가계저축 S(6,3)		정부저축 S(6,4)										총저축 R6
		중국 일본															
7	관세								관세 S(7,5)								관세 R7
8	교통마진								교통마진 S(8,5)								교통마진 R8
9	해외	한국							수입 S(9,5)	해외투자 S(9,6)							해외지출 R9
		중국 일본															
계 (C)			노동공급 C1	자본공급 C2	가계지출 C3	정부지출 C4	총투입 (총공급) C5		총투자 C6	관세 C7	교통마진 C8	해외수입 C9					

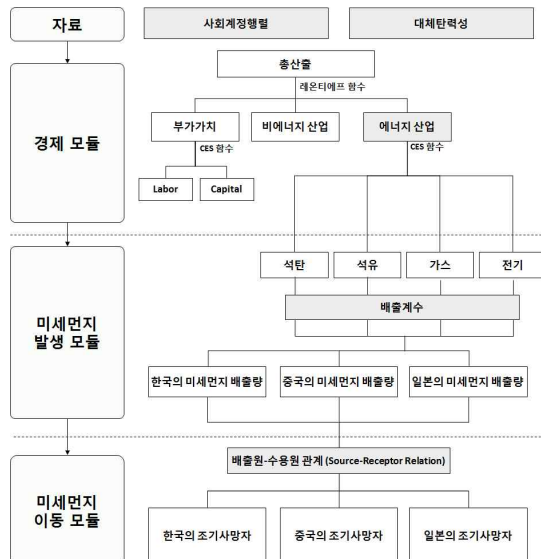
〈표 2〉 사회계정행렬 구축 자료

셀번호	내 용	자료 출처
S(1,5) = S(3,1)	피용자 보수	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(2,5) = S(3,2)	영업입여	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(3,4)	보조금	· 각 국가 국민계정 (각 국가 통계청)
S(4,3)	직접세	· 각 국가 국민계정 (각 국가 통계청)
S(4,5)	간접세	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(4,7) = S(7,5)	관세	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(5,3)	민간소비	· 경제협력개발기구(OECD) 통계국
S(5,4)	정부소비	· 국제투입산출자료 (2014)
S(5,5)	중간재 거래	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(5,6)	투자(고정자본형성)	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(5,8) = S(8,5)	교통마진	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(5,9)	수출	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(6,3)	가계 저축	· 각 국가 국민계정 (각 국가 통계청)
S(6,4)	정부 저축	· 각 국가 국민계정 (각 국가 통계청)
S(9,5)	수입	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
S(9,6)	해외투자	· 수출(S59) - 수입 (95)
C1	노동 공급	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
C2	자본 공급	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
C3	가계지출	· 세로합
C4	정부지출	· 각 국가 국민계정 (각 국가 통계청)
C5	총투입 (총공급)	· 세로합
C6	총투자	· 세로합
C7 = R7	관세	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
C8 = R8	교통마진	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
C9	해외 수입	· 세로합
R1	노동 수입	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
R2	자본 수입	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
R3	가계 소득	· 가로합
R4	정부 수입	· 가로합
R5	총산출 (총수요)	· WIOT (국제투입산출자료, 2014)
R6	총저축	· 가로합
R9	해외 지출	· 가로합

2. 모형 구축

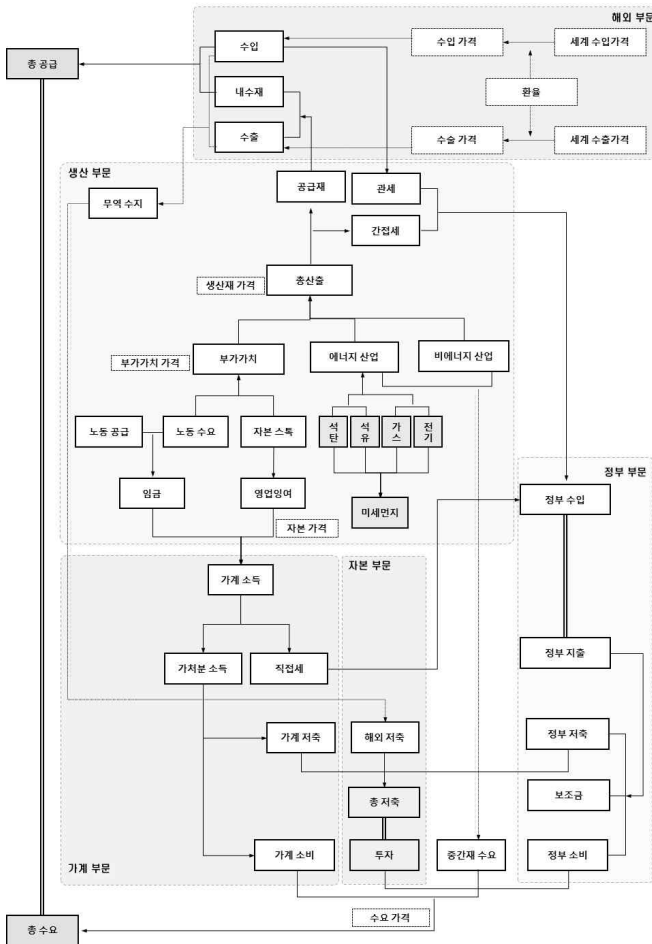
PMCGE는 경제모형인 3개국 CGE 모형을 기반으로 하여 산업별 생산 및 에너지 사용량과 같은 주요 경제변수들과 미세먼지의 배출량, 이동량, 및 인체에 미치는 영향 등을 연계한 모형이다(〈그림 1〉). 먼저 사회계정행렬과 외생변수인 대체탄력성 모수를 결정한 후, 이들 자료를 이용하여 경제모형인 CGE 모형을 구축한다. 모형 내에서 각 국가의 산업부문은 생산과정에서 석탄, 석유, 가스, 및 전력을 에너지원으로 사용하며, 이러한 에너지원의 소비는 각국에 $PM_{2.5}$ 를 발생시킨다. 이렇게 발생한 미세먼지는 한국, 중국, 및 일본 간 미세먼지 발생원-수용원 행렬(Source-Receptor Relation Matrix, 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.

〈그림 1〉 모형 구축의 체계



PMCGE는 경제주체를 3개국(한국, 중국, 일본)의 생산자, 가계 및 정부와 해외로 구분하여, 각 경제주체의 합리적인 경제행위를 가정한다. 개별 경제주체의 최적화 행위를 통해 얻어진 결과가 시장청산(저시경제 규칙)을 만족시켜야 한다는 조건을 설정함으로써 모형의 기본구조가 만들어진다. 각 경제주체간의 관계와 시장청산조건으로 설정된 PMCGE 모형의 구조는 <그림 2>와 같다.

<그림 2> PMCGE 모형의 구조



언급한바와 같이 본 모형에서는 각 국가의 각 산업의 생산과정에서 에너지를 사용할 때 발생하는 미세먼지를 산정한다. 즉, 각 국가별·산업별 에너지 사용량과 해당 에너지의 배출계수에 따라 미세먼지의 발생량이 결정된다. 한 국가에서 발생하는 미세먼지의 총량은 해당 국가별(N)·에너지별(EI) 사용량($ECon$)에 에너지별 배출계수(EF)를 곱한 값들을 모두 더해서 산정된다(〈식 1〉). 본 연구에서 적용되는 에너지원은 석탄, 석유, 가스, 및 전력이 있으며 이러한 에너지들의 배출계수는 기술수준에 따라 국가별·산업별로 상이하게 설정되었다.¹⁾

$$PM_{2.5}E_N = \sum_{EI} (ECon_N^{EI}) \cdot EF_N^{EI} \quad (1)$$

$PM_{2.5}E_N$: n 국가의 $PM_{2.5}$ 총배출량

$ECon_N^{EI}$: n 국가의 EI 에너지의 소비량

$EFactor_N^{EI}$: n 국가의 EI 에너지의 배출계수

각 국의 에너지 소비로 인해 발생한 미세먼지는 다른 국가로 이동하며, 3개국간 미세먼지 이동량은 Takahashi et al.(2014)와 Nagashima et al.(2017)의 결과를 인용하였다.²⁾ 이들은 기상모형 또는 대기화학 모형인 Weather Research and Forecasting(WRF) 모형(Skamarock et al., 2008), Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) 모형(Byun and Schere, 2006), 그리고 Regional Emission inventory in ASia(REAS)(Ohara et al., 2007)을 이용하여 동북아시아의 연간 평균 미세먼지 농도에 따른 SRR을 구축하였다. 이들이 구축한 SRR은 미세먼지의 이동만 나타내는 것이 아니라, Ben-MAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program, 2012)의 농도-

1) 에너지 별 배출계수는 EMEP(European Monitoring and Evaluation Programme)에서 제공하는 에너지별 배출계수의 비율을 근거로 하여 하향식의 국가별·산업별 배출량과 일치되도록 조정하였다(문승운, 2020).

2) 미세먼지의 이동량을 정확하게 산정하기 위해서는 세밀한 지역 구분이 되어 있는 대기화학 모형 및 기후모형이 필요하지만, 본 연구에는 3개 국가 간 이동량만 산정하기 때문에 국가 내에서의 이동량은 고려하지는 않았다.

반응함수(concentration-response function)를 이용하여 수용지의 조기사망자 수를 산정할 수 있도록 하고 있다. 이렇게 구축된 Takahashi et al.(2014)와 Nagashima et al.(2017)의 SRR은 아래의 <표 3>과 같으며, SRR 행렬과 식 (2)를 통해 조기사망자수를 산정하였다.

<표 3> 한국, 중국, 일본의 발생원-수용지 관계 행렬

(단위: 인/kt)

발생원-수용지 행렬		수용지 (인/kt)		
		중 국	일 본	한 국
발생원	중 국	36.0000	0.0049	0.1648
	일 본	0.7004	32.8000	0.2470
	한 국	3.8400	3.8300	28.3000

출처: Takahashi et al.(2014), Nagashina et al.(2017)

$$\overrightarrow{premortal} = [SRR]^T \cdot \overrightarrow{Em} \quad (2)$$

$\overrightarrow{premortal}$: 국가별 조기사망자수 열벡터
 $[SRR]^T$: 발생원-수용지 행렬의 전치행렬
 $\overrightarrow{Em}$: 국가별 배출량 열벡터

IV. 분석 결과

한국, 중국, 및 일본의 경제성장에 따라 각 국가의 교역량과 미세먼지 배출량이 어떻게 변하는지를 모의실험을 통해 파악하였다. 구체적으로는 각 국가의 자본스톡 또는 국내총생산(GDP)이 1% 증가할 때 자국 및 타국의 경제 및 대기오염에 미치는 영향을 분석하였다. 경제에 미치는 영향은 국내총생산, 총산출, 대등변화, 정부수입, 에너지 소비량 등의 변화를 통해 파악하였으며, 대기오염에 미치는 영향은 조기사망자수, 산업별 미세먼지 배출량의 변화를 통해 나타내었다. <표 4>의 각 지표들은 자본스톡이 1% 증가할 때의 경제지표 및 대기오염 지표의 %변화율을 나타내고 있어 경제지표 및 대기오염의 자본스톡 탄력성을 의미한다. 그리고, 각 국가

경제성장이 대기질에 미치는 영향을 국가 간으로 비교하기 위해 대기질 지표를 국내총생산으로 나눈 값을 나타내었다. 이는 단위 경제성장량 당 증감하는 에너지 소비량, 조기사망자수, 미세먼지 배출량을 나타낸다.

자본스톡이 1% 증가할 때 자국 내에서 가장 큰 변화를 보이는 국가는 한국이며, 3국 통합지표에 가장 큰 영향을 미치는 국가는 경제규모가 가장 큰 중국이다. 개별국가의 입장에서만 본다면 각 국가는 모두 경제성장을 통해 국내총생산(A) 물론 미세먼지 배출량(D)도 증가하게 된다. 이 때 국내총생산의 증가율 대비 미세먼지 배출량 증가(D/A)가 가장 큰 국가는 중국이다.

일본의 성장은 일본 입장에서는 미세먼지 발생량을 0.379% 증가시키지만, 한국, 중국, 및 일본의 3개국 통합적으로 본다면 -0.022% 감소시킨다. 한국도 3개국 통합적으로 본다면 미세먼지를 -0.009% 감소시킨다. 즉, 한국과 일본은 비록 개별국가 입장에서는 경제성장과 미세먼지 발생량이 양(+)의 관계를 갖지만, 3개 국가를 통합적으로 본다면 경제성장과 미세먼지 발생량과의 관계가 음(-)이 될 수 있다. 즉, 경제가 성장함에도 불구하고 3국 전체의 미세먼지량과 이로 인한 조기사망자수가 감소할 수 있다.

각 국가에서 동일한 비율의 국내총생산이 증가할 때, 총에너지의 소비량의 증가율이 가장 큰 국가는 한국이다. 즉, 한국의 경제가 1% 성장 할때 에너지 소비량은 2.636% 증가하며, 이는 중국 1.322%, 일본 0.945%와 비교할 때 상당히 높은 증가율이다. 이를 통해 한국의 산업은 중국과 일본과 비교할 때 에너지 집약적인 산업 위주로 구성되어 있다고 판단할 수 있다. 한국의 에너지 소비 증가율이 가장 높지만 미세먼지 배출량 및 조기사망자 증가율은 중국이 0.732%로 가장 높다. 이는 중국의 단위 에너지 소비로 인해 발생하는 미세먼지량이 한국과 일본과 비교할 때 상당히 높기 때문이다. 이러한 현실은 일본과 한국의 환경기술을 중국에 이전한다면, 동북아시아의 미세먼지가 상당히 저감될 수 있다는 의미이다.

〈표 4〉 중국, 일본, 및 한국의 경제 및 대기오염에 대한 자본스톡 탄력성

경제성장 국가		중국		일본		한국	
기 준		자국 기준	3국 통합	자국 기준	3국 통합	자국 기준	3국 통합
국내총생산 (A)		0.438	0.283	0.649	0.182	0.845	0.071
총산출		0.484	0.353	0.666	0.130	0.771	0.058
총에너지 소비량 (B)		0.579	0.423	0.613	0.054	2.227	0.177
조기사망자 (C)		0.325	0.319	0.348	-0.023	0.214	-0.009
미세 먼지 배출량	소 계 (D)	0.325	0.319	0.379	-0.022	0.443	-0.009
	1차산업	0.497	0.486	0.410	0.000	0.515	0.001
	제조업	0.231	0.225	0.422	-0.015	0.163	-0.013
	서비스업	0.303	0.298	0.232	-0.020	0.245	-0.005
B / A		1.322	1.495	0.945	0.297	2.636	2.493
C / A		0.742	1.127	0.536	-0.126	0.253	-0.127
D / A		0.742	1.127	0.584	-0.121	0.524	-0.127

* 대등변화는 변화량을 나타냄 (단위: 십억 달러)

〈표 5〉는 한국, 중국, 및 일본의 GDP 1% 증가에 따라 ‘국가 간 교역량’과 ‘체화된 미세먼지량’의 변화율을 나타내고 있는 행렬로, 각 성분은 해당열의 국가에서 해당행의 국가로 이동하는 교역량 또는 체화된 미세먼지량의 변화율을 나타낸다. GDP가 1% 증가할 때의 변화율을 나타내고 있으므로 각 지표의 GDP 탄력성을 의미한다. 교역량 행렬에서 행을 기준으로 하면 해당행 국가의 총생산량의 변화율을 나타내고, 열을 기준으로 하면 해당열 국가의 총소비량의 변화율을 나타낸다. 미세먼지 변화율 행렬에서 행을 기준으로 하는 생산기반 배출량의 변화율을 나타내고, 열을 기준으로 하면 소비기반 배출량의 변화율을 나타낸다.³⁾ 그리고 행과 열의 총합은 3개국의 총생산량과 총미세먼지량의 변화율을 나타낸다.

한 국가의 경제성장은 대체로 자국의 생산량 및 소비량, 그리고 생산기반 미세먼지 배출량과 소비기반 미세먼지 배출량을 증가시키고 있다. 반면 타국에 미치는 영향을 살펴보면 타국의 생산기반 배출량과 생산량은 감소시키지만, 국가 간에 따라 소비기반 미세먼지 배출량 및 소비량은 증

3) ‘체화된 미세먼지량’, ‘생산기반 미세먼지 배출량’ 및 ‘소비기반 미세먼지 배출량’ 산정에 대한 보다 상세한 설명은 문승운(2020)을 참조.

가하기도 하고 감소하기도 한다.

중국의 GDP 1% 증가시 중국은 총생산량 변화율(0.631)보다 미세먼지의 변화율(0.740)이 1.174배 크다.(<표 5>, a) 즉, 중국의 생산량 증가율보다 미세먼지 배출량이 더 큰 폭으로 증가함에 따라 오염집약도가 더 커질 것임을 예상할 수 있다. 반면, 일본과 한국의 총소비량은 감소하지만, 소비기반 미세먼지의 총배출량은 증가한다. 이는 자국의 생산품이 상대적으로 오염집약도가 큰 중국 제품으로 대체되었기 때문이다. 또한 3국 통합적인 관점에서, 중국의 자본스톡 1% 증가시 3국의 총생산량 및 소비량이 0.443% 증가하는 반면, 미세먼지 발생량은 0.725%가 증가하여 미세먼지 발생량 증가율이 더 높다. 즉, 현재 상태에서 중국의 성장은 3국 통합적인 관점에서도 미세먼지의 발생을 더 가속화시켜 동북아시아 3국의 대기환경에 부정적인 영향을 끼치게 될 것을 알 수 있다. 또한, 중국의 성장에서 일본 및 한국의 소비기반 교역량은 감소하는 반면 체화된 미세먼지량은 증가한다. 즉, 중국의 성장은 한국과 일본의 소비를 감소시키면서 동시에 미세먼지 피해도 증가시키게 된다.

일본의 경제성장은 3국의 총생산량이 0.158% 증가함에도 불구하고 미세먼지는 -0.035 % 감소하고 있다. 즉, 3국 통합적인 관점에서 환경적으로 긍정적인 경제성장이라고 할 수 있다. 또한, 중국의 입장에서도 일본의 성장은 비록 중국의 소비량과 생산량이 감소하지만, 이러한 감소율보다 소비기반 및 생산기반 미세먼지 감소율이 더 크기 때문에 중국의 대기환경에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

한국의 경제성장은 3국 통합 및 일본에게 긍정적인 영향을 끼친다. 우선 3국 통합적 관점에서 총생산량이 0.016% 증가함에도 미세먼지 발생량은 -0.010% 감소한다. 일본은 생산량이 0.001% 증가함에도 생산기반 미세먼지 배출량이 0.020% 감소하고 있으며, 중국은 비록 생산량이 -0.001% 감소하지만, 생산기반 미세먼지는 -0.013%가 감소하여 미세먼지의 감소율이 훨씬 크다.

〈표 5〉 국가 간 교역량 및 체화된 미세먼지 이동에 대한 GDP 탄력성

a) 중국의 GDP 1% 증가

교역량 변화율 (A)		중국	일본	한국	평균
	중국	0.628	0.962	0.748	0.631
	일본	-0.624	-0.031	-0.319	-0.043
	한국	-0.336	-0.074	-0.108	-0.120
	평균	0.617	-0.009	-0.078	0.443
미세먼지 변화율 (B)		중국	일본	한국	평균
	중국	0.738	1.316	1.111	0.740
	일본	-1.341	-0.237	-0.657	-0.264
	한국	-0.706	-0.083	-0.196	-0.210
	평균	0.737	0.108	0.269	0.725

b) 일본의 GDP 1% 증가

교역량 변화율 (A)		중국	일본	한국	평균
	중국	-0.008	-0.441	-0.105	-0.011
	일본	0.993	0.834	0.677	0.835
	한국	0.026	-0.070	-0.008	-0.007
	평균	-0.003	0.802	0.008	0.158
미세먼지 변화율 (B)		중국	일본	한국	평균
	중국	-0.040	-0.293	-0.084	-0.041
	일본	0.914	0.575	0.590	0.582
	한국	0.077	-0.117	-0.009	-0.008
	평균	-0.040	0.379	-0.026	-0.035

c) 한국의 GDP 1% 증가

교역량 변화율 (A)		중국	일본	한국	평균
	중국	0.005	0.072	-1.567	-0.001
	일본	0.016	0.029	-2.511	0.001
	한국	0.408	0.405	0.221	0.234
	평균	0.007	0.032	0.066	0.016
미세먼지 변화율 (B)		중국	일본	한국	평균
	중국	-0.010	0.019	-1.034	-0.013
	일본	-0.005	0.014	-2.196	-0.020
	한국	1.538	1.694	0.462	0.518
	평균	-0.010	0.030	-0.117	-0.010

V. 결론

본 연구에서는 한국, 중국, 및 일본을 대상으로 경제 모형-미세먼지 배

출 모듈-미세먼지 이동 모듈이 연계된 PMCGE 모형을 구축하고, 각 국가의 경제성장을 시나리오로 설정하여 특정국가의 경제성장이 자국 및 타국가 경제 및 대기질에 미치는 영향을 생산기반과 소비기반 기준에서 분석하였다. 분석 결과, 중국의 성장은 동북아시아 대기질에 부정적인 영향을 미치고 있었으나, 한국과 일본의 경우는 경제성장시 3국의 경제 총량이 성장함에도 불구하고 3국의 미세먼지 총량을 감소시킬 수 있었다. 또한, 중국은 경제성장률 보다 더 큰 폭의 미세먼지 배출 상승율을 보였다. 즉, 아무런 변화가 없는 상태에서 중국의 지속적인 경제성장은 동북아시아의 미세먼지 배출량을 더욱 가속화할 수 밖에 없을 것이다.

지금까지 산업부문의 감축 기준은 생산 과정에서 발생하는 배출량에 초점을 맞추고 있었기 때문에, 감축목표가 되는 대상과 기준은 모두 생산에서 발생하는 배출량을 기준으로 설정되었다(Liang et al., 2017; 오인하, 2011). 그러나 특정국가에서 발생하는 미세먼지는 발생국가 뿐만아니라 수입국가의 소비 때문에도 발생하기 때문에 수입국가도 미세먼지에 대한 책임이 일정부분 있다. 이러한 결과는 미세먼지 저감을 위해서 개별 국가들이 적극적으로 협력해야 한다는 당위성을 제공한다. 즉, 소비 기반 배출회계에 대한 논거는 저개발국 관점에서는 선진국의 감축률 상향 및 소비 기반 배출회계 작성을 통한 오염물질에 대한 책임 등을 주장하는 근거가 될 수 있다(Munksgaard et al., 2005).

한국, 중국, 및 일본 간 미세먼지 연구는 그동안 미세먼지의 발생 및 이동에 대한 과학적 인과관계 연구가 주로 이루어졌으나, 이러한 과학적 사실이 실질적인 정책으로 발전되지는 못하고 있었다. 그에 반해 본 연구는 3국간 미세먼지와 경제구조를 연계하고 있어 실질적인 정책을 개발하는데 도움을 줄 수 있다. PMCGE 모형은 다양한 시나리오와 정책의 비교를 통한 분석이 가능하므로 미세먼지 관련 정책 수립 등에 유용할 것으로 기대된다. 또한, 한국뿐만 아니라 중국과 일본의 정책이 반영된 정책 평가도 가능하기 때문에 더욱 의미있는 결과를 기대할 수 있다.

물론 본 연구에도 한계는 존재한다. 미세먼지는 굴뚝에서 직접발생하는

1차발생도 있지만, 황산화물, 질소산화물 등 여타 대기오염물질들에 의해 2차로 생성되는데, 본 연구에서는 2차 생성 미세먼지는 감안하지 못하고 있다. 이는 향후 보다 정교한 기상모형 또는 대기화학 모형을 통해 해결할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌 ■

- 문승운, 2020, “동북아시아 동북아시아 미세먼지의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량의 비교: 한국, 중국, 일본을 대상으로,” 『국토연구』, 105, pp.31-48, DOI: 10.15793/kspr.2020.105..003.
- 오인하, 2011, 『배출규제가 탄소누출에 미치는 영향 분석 및 전망_소비 관점의 탄소회계와 국경조치의 영향을 중심으로』, (경제·인문사회연구회 녹색성장 종합연구 총서; 11-02-19, 기본연구보고서; 11-03), 의왕: 에너지경제연구원.
- 심창섭, 2015, 『동아시아 대도시 대기질 개선을 위한 국제 공동 연구』, (사업보고서; 2015-06-03), 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- Bohringer, C. and A. Loschel, 2006, “Computable general equilibrium models for sustainability impact assessment: Status quo and prospects,” *Ecological Economics*, 60(1), pp.49-64.
- Burniaux, J. M., J. P. Martin, G. Nicoletti, and J. O. Martins, 1992, *GREEN a multi-sector, multi-region general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: A Technical Manual*, (OECD Economics Department Working Papers No. 116), Paris: OECD.
- Byun, D. W. and K. L. Schere, 2006, “Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system,” *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), pp.51-77, DOI: 10.1115/1.2128636.
- Chateau, J., R. Dellink, and E. Lanzi, 2014, *An overview of the OECD ENV-Linkages model: Version 3*, (OECD Environment Working Papers No. 65), Paris: OECD Publishing.
- Lanzi, E., R. Dellink, and J. Chateau, 2018, “The sectoral and regional economic consequences of outdoor air pollution to 2060,” *Energy Economics*, 71, pp.89-113, DOI: 10.1016/j.eneco.2018.01.014.
- Liang, S., Y. Wang, C. Zhang, M. Xu, Z. Yang, and W. Liu et al., 2017, “Final

- production-based emissions of regions in China,” *Economic Systems Research*, 30(1), pp.8-36, DOI: 10.1080/09535314.2017.1312291.
- Matus, K., K. M. Nam, N. E. Selin, L. N. Lamsal, J. M. Reilly, and S. Paltsev, 2012, “Health damages from air pollution in China,” *Global Environmental Change*, 22(1), pp.55-66, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.08.006.
- Matus, K., T. Yang, S. Paltsev, J. Reilly, and K. M. Nam, 2008, “Toward integrated assessment of environmental change: Air pollution health effects in the USA,” *Climatic Change*, 88(1), pp.59-92, DOI: 10.1007/s10584-006-9185-4.
- Munksgaard, P., M. Wier, M. Lenzen, and C. Dey, 2005, “Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels,” *Journal of Industrial Ecology*, 9(12), pp.169-185, DOI: 10.1162/1088198054084699.
- Nagashima, F., S. Kagawa, S. Suh, K. Nansai, and D. Moran, 2017, “Identifying critical supply chain paths and key sectors for mitigating primary carbonaceous PM_{2.5} mortality in Asia,” *Economic Systems Research*, 29(1), pp.105-123, DOI: 10.1080/09535314.2016.1266992.
- Nam, K. M., N. E. Selin, J. M. Reilly, and S. Paltsev, 2010, “Measuring welfare loss caused by air pollution in Europe: A CGE analysis,” *Energy Policy*, 38(9), pp.5059-5071, DOI: 10.1016/j.enpol.2010.04.034.
- Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, and Xi. Yan et al., 2007, “An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, pp.4419-4444, DOI: 10.5194/acp-7-4419-2007.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, and M. G. Duda et al., 2008, *A description of the advanced research WRF version 3*, (NCAR TECHNICAL NOTE: NCAR/TN-475+STR), Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
- Takahashi, K., K. Nansai, S. Tohno, M. Nishizawa, J. Kurokawa, and T. Ohara, 2014, “Production-based emissions, consumption-based emissions and consumption-based health impacts of PM_{2.5} carbonaceous aerosols in Asia,” *Atmospheric Environment*, 97, pp.406-415, DOI: 10.1016/j.atmosenv. 2014.04.028.

문승운: 고려대학교 환경생태공학부를 졸업하고 서울대학교 농경제사회학부 지역정보 전공에서 박사학위를 취득하고, 현재 (주)누리지역계획연구소의 소장으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 재난, 자연재해, 환경오염, 미세먼지 등이다(moonswoon@snu.ac.kr).

김의준: 연세대학교 건축공학과를 졸업하고 미국 Cornell University에서 지역경제학 박사학위를 취득하였다. 현재 서울대학교 농경제사회학부 정교수 및 농업생명과학연구원 겸무연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 도시 및 지역경제학, 도시 및 지역이론 및 공공투자정책이다(euijune@snu.ac.kr).

투 고 일: 2020년 11월 23일
심 사 일: 2020년 11월 29일
게재확정일: 2020년 12월 12일