

동북아시아 미세먼지의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량의 비교 : 한국, 중국, 일본을 대상으로*

Comparison of Production-Based Emissions and Consumption-Based Emissions of Particulate Matter in Northeast Asia

문승운 Moon Seung-woon**

Abstract

This study assesses the consumption-based PM emission, and compares production-based accounting and consumption-based accounting of trade and embodied PM for three Northeast Asia countries - Korea, China, and Japan. The result shows that 22.00% of Japan's and 36.02% of Korea's consumption-based PM emission are generated in China. In other words, China is the largest emitter of PM, but much of PM emissions of China come from consumption in Korea and Japan. In addition, the Chinese industry has a higher pollution intensity than the Korean and Japanese industries, suggesting that the Pollution haven hypothesis has been proven. Consumption-based accounting can quantify the responsibilities of Korea and Japan for PM generated in China, and this results can be considered in cross-border negotiations for abatement of PM. Abating PM in Northeast Asia requires cross-border cooperation, and consumption-based accounting can provide important scientific evidence. The results of this study may provide appropriateness and basic material for international cooperation.

Keywords: Particulate Matter, Consumption-based Emissions, Production-based Emissions, Multi-regional Input-Output Model(MRIO)

I. 서론

미세먼지(Particulate Matter, 이하 PM)는 세계보건기구(WHO)에서 지정한 1급 발암물질로 인체에 매우 유해하며 조기사망을 유발한다(OECD 2012). 이에 세계 각국은 미세먼지 저감을 위한 대책을 강구하고 있으며, 특히 중국은 세계 최대의 미세먼지 배출지역으

로 미세먼지 저감 대책이 시급하다(Ju 2017). 또한, 미세먼지와 같이 국가경계를 넘어서 이동하는 월경성(Trans-boundary) 오염물질은 해당 국가뿐만 아니라 인접한 국가들에게도 피해를 입히고 있으며, 중국에서 배출되는 상당량의 미세먼지가 한국과 일본으로 이동하여 대기질을 악화시키는 것으로 보고되고 있다(Li, Yang, Wang, and Chen et al. 2014; Kajino, Sato,

* 본 논문은 문승운(2019)의 박사학위 논문 “동북아시아 미세먼지 저감정책이 경제성장과 대기오염에 미치는 영향”의 일부를 수정·보완한 것이며, 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017S1A3A2066771).

** 서울대학교 경제학 박사 | Ph.D. in Economics, Seoul National Univ. | moonswoon@naver.com

Inomata and Uedac 2013). 한국과 일본의 대기오염물질의 상당 부분이 중국으로부터 유입되는 것이 과학적으로 밝혀지면서, 대기오염 문제는 동북아시아의 중요한 경제, 사회, 외교적 현안으로 부각되고 있다. 따라서, 미세먼지 저감을 위해서는 개별 국가들만의 노력뿐만 아니라, 인접한 국가들과의 초국경적인 협의와 공동 대응이 필요하다.

미세먼지 저감정책의 국가 간 협의 또는 협력을 위해서는 무엇보다도 '누가'에 대한, 즉 미세먼지의 책임 소재에 대한 과학적인 연구가 필요하다. 미세먼지와 같은 환경오염물질의 배출량 또는 책임분배를 고려하는데 있어서 생산기반 배출회계(Production-based emission inventory)와 소비기반 배출회계(Consumption-based emission inventory)는 전 세계적 차원, 국가적 차원, 그리고 지역적 차원의 환경 분석에서 다양하게 적용되고 있다(Liang, Wang, Zhang and Xu et al. 2017). 생산기반 배출회계란 특정 국가에서 재화 및 서비스를 생산함으로써 발생하는 오염물질량을 집계한 것이다. 반면 소비기반 배출회계는 비록 자국에서는 배출되지 않지만, 자국에서 소비하는 재화 및 서비스로 인해 발생된 오염물질량을 집계한 것이다. 즉, 국경 내 생산 과정에서 발생하는 오염물질을 집계하는 개념이 아니라, 비록 타국에서 생산되더라도 자국의 소비에 의해 발생하는 오염물질을 집계하는 것이다.

최근 생산기반 배출회계의 한계를 지적하면서 소비기반 배출회계를 고려해야 한다는 연구가 다수 수행되고 있다(Kondo, Moriguchi and Shimizu 1998; Munksgaard and Pedersen 2001; Lenzen, Pade and Munksgaard 2004; Munksgaard, Christoffersen, Keiding and Pedersen et al. 2005; 2007; Wilting and Vringer 2007). 특히, 기후변화의 주요 원인인 이산화탄소(CO₂)에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 개발도상국에서 선진국으로 수출되는 재화 생산으로 인해 발생

하는 오염물질의 책임에 대한 논의에 많이 언급된다(김의준, 문승운 2019; Kim, Moon and Kagawa 2019). 이는 이산화탄소나 미세먼지와 같은 오염물질에 대해 소비기반 배출회계가 환경오염의 국가 간 책임분배에 있어 새로운 해법을 제공할 수 있다고 여기기 때문이다(Peters and Hertwich 2006). 우선, 소비기반 배출회계는 자국의 소비로 인해 발생한 오염물질이 다른 나라에서 얼마나 많이 배출되었는지를 계량화하기 때문에, 비록 자국에서 직접 배출되지 않는 오염물질이라도 그에 대한 책임이 존재한다는 근거를 제공한다(Wiedmann 2009). 즉, 소비기반 배출회계는 생산국가뿐만 아니라 소비국가에게도 일정 부분의 책임을 부여할 수 있기 때문에, 저개발국가의 미세먼지 저감을 위한 국가 간 지원 및 협상을 유도할 수 있는 근거가 된다. 소비기반 배출회계를 통한 선진국으로의 책임 부여는 선진국의 재정을 이용한 기술적 및 재정적 지원과 같은 국제 협력 및 파트너십 조성 의무를 요구할 수 있다. 또한, 선진국의 소비자는 소비기반 배출회계를 통해 자신의 소비로 인해 발생하는 오염물질 배출량을 가늠할 수 있으며, 선진국의 기업도 오염물질의 간접 배출에 대해 인식할 수 있다. 즉, 소비국가는 소비기반 배출회계를 기반으로 자국뿐만 아니라 전 지구적인 차원에서의 지속가능한 소비 전략을 수립하여 간접적인 환경오염 저감 정책을 수립할 수 있다.

소비기반 배출회계가 미세먼지 저감을 위한 초국경적인 협의 및 대응방안 마련에 활용될 수 있지만, 아직까지 미세먼지 소비기반 배출회계에 대한 공식적인 통계가 없다. 따라서 본 논문에서는 전 세계적으로 미세먼지 발생량과 피해가 큰 중국, 한국, 및 일본을 대상으로 미세먼지의 소비기반 배출회계를 산정하고자 한다. 일반적으로 소비기반 배출회계는 교역과 그에 체화된 오염물질을 통해 산정한다(Andersson and Lindroth 2001). 한국, 중국, 및 일본 간 교역과 체화된

오염물질에 관계를 통해 생산과 소비로 인한 환경적 영향, 특히 각 국의 소비로 인한 환경 영향을 분석하고자 한다. 본 논문에서는 생산기반 및 소비기반 배출 회계를 통해 3개 국가 간의 미세먼지 관련 환경협력의 당위성을 모색해 보고자 한다.

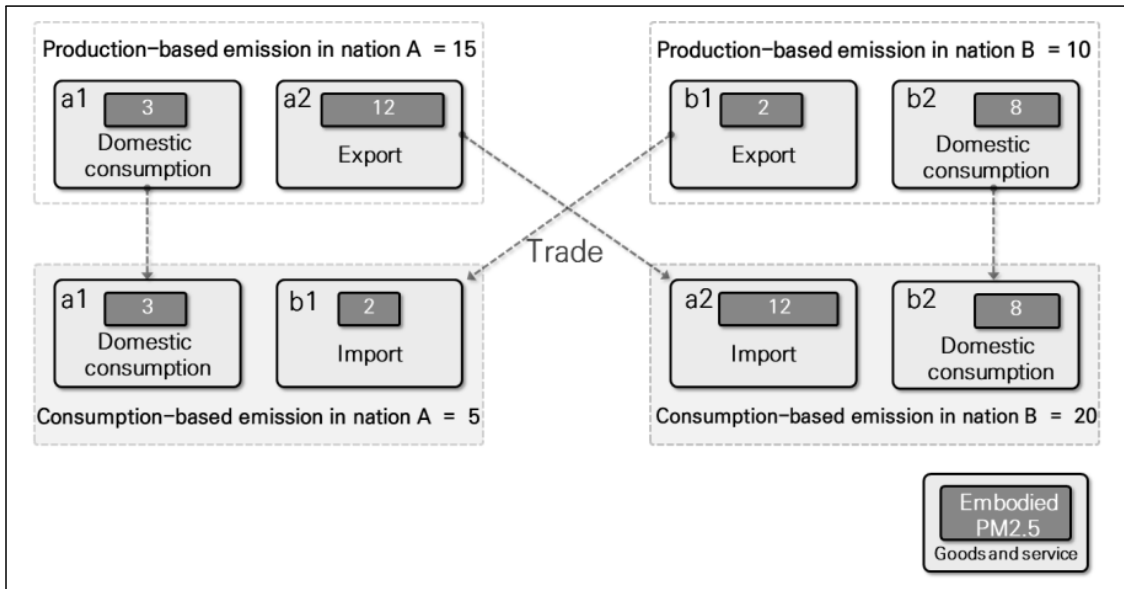
II. 이론적 고찰

1. 생산기반 및 소비기반 배출회계의 개념

미세먼지의 생산기반 배출회계와 소비기반 배출회계의 개념을 간단히 설명하기 위해 국가A에서는 재화 a1과 a2를 생산하고 국가B에서는 재화 b1과 b2를 생산한다고 가정하자. 또한, 각 재화를 생산하면서 발생하는 미세먼지는 해당 재화에 체화(Embodied)되어 있다고 가정하자(<Figure 1> 참조). 재화 a1과 b2는 그 재화가 생산된 국가에서 소비되고, 재화 a2는 국가A에서 국가B로 수출하며, 재화 b1은 국가B에서 국가A

로 수출한다. 이때 국가A의 미세먼지의 생산기반 배출량은 재화 a1과 a2를 생산하면서 발생하는(체화된) 미세먼지양이며, 국가B의 미세먼지의 생산기반 배출량은 재화 b1과 b2를 생산하면서 발생하는(체화된) 미세먼지양이다. 반면, 국가A의 미세먼지의 소비기반 배출량은 재화 a1과 b1의 체화된 미세먼지양을 합친 것이며, 국가B의 미세먼지의 소비기반 배출량은 재화 a2와 b2의 체화된 미세먼지양을 합친 것이다. 예시에서 보듯이 생산기반 배출량은 국가A(=15)가 국가B(=10)보다 크지만, 소비기반 배출량은 국가B(=20)가 국가A(=5)보다 더 크다. 국가A에서 미세먼지를 더 많이 배출하는 상황이지만, 이는 상당부분 국가B의 소비를 위해서 발생하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 상황은 가상의 예시뿐만 아니라, 오늘날 국가 간 교역을 통해 많이 찾아볼 수 있다. 특히 한국과 일본, 그리고 중국은 국가 간 교역이 상당히 활발하게 이루어지고 있으며, 한국과 일본은 중국으로부터의 수입에 많이 의존하고 있다. 즉, 중국의 생산 과정에서 발

Figure 1 _ Production-based and Consumption-based Emissions from Both Countries



생하여 한국과 일본으로 월경하는 미세먼지를 모두 중국의 책임만으로는 볼 수 없을 것이다. 중국에서 발생하는 미세먼지에 대해 한국과 일본은 일정 부분 책임을 공감하며, 동북아시아 지역 미세먼지 저감에 대한 협력 방안을 모색해야 할 것이다.

2. 소비기반 배출회계의 이론적 배경

앞 절에서 살펴본 바와 같이 기본적으로 생산기반 배출회계와 소비기반 배출회계가 상이한 이유는 국가 간 교역 때문이다. 오늘날 세계 경제는 국가 간 무역을 통해 국가별·산업별 생산과 소비를 서로 분담하고 있으며, 이로 인해 생산 또는 소비활동이 환경에 미치는 영향은 국가별로 다르게 나타나고 있다(Mozner 2013). 수입국가(소비국가)는 수출국가(생산국가)에 재화 및 서비스에 대한 화폐적 가치를 지불하기 때문에 (금전적) 무역수지는 균형을 이루고 있으며, 결론적으로 양국 간 교역은 공정한 교환이라고 여긴다. 그러나 국가 간 교역은 재화 및 서비스만 이동하는 것이 아니라, 재화 및 서비스에 체화된 오염물질이 함께 이동한다. 즉, 수입국은 수출국으로부터 재화 및 서비스만 수입하는 것이 아니라, 재화 및 서비스를 생산함으로써 악화되는 환경의 질 또는 환경수용력(Bio-capacity)과 같은 생태자본(Ecological Stock) 또는 환경자본(Environmental Capital) 등을 수입하고 있다(Pronay and Malovics 2008). 그러나 수입국가가 지불하는 금전적 화폐가치에는 재화 및 서비스에 내재되어 있는 오염물질은 고려하지 않기 때문에 환경자본에 대한 지불은 하고 있지 않으며, 따라서 환경적인 입장에서 서로 불공정한 거래를 하고 있다고 볼 수 있다(Andersson and Lindroth 2001). 즉, 선진국들은 저개발국의 환경 서비스(Environmental Services)를 이용하면서 합당한 비용을 지불하지 않고 있으며, 이는 선

진국이 저개발국에게 갚아야 할 일종의 환경부채(Environmental Debt)인 것이다(Torras 2003; Martinez-Alier 2002). 이러한 환경부채가 지속적으로 증가하고 있으며, 따라서 이를 해결하기 위한 조치가 필요하지만 현재 이용되고 있는 생산기반 배출회계를 통해서 선진국이 저개발국에 이전하는 환경비용 또는 환경부채를 파악할 수가 없다(Muradian and Martinez-Alier 2001). 따라서 이러한 대안의 하나로써 소비기반 배출회계의 개념이 필요한 것이다.

그동안 선진국들은 환경을 위해 많은 노력을 해 왔으며, 그들의 노력을 통해 자국의 환경오염이 감소하고 있다고 주장한다(CEECEC 2010). 선진국들은 경제가 성장함에 따라 자국민의 1인당 오염물질 배출량이 감소하고 있고, 자국의 기업들은 좀 더 환경 친화적인 정책을 통해 오염물질 배출량을 감소시키고 있다고 주장한다. 그러나 이러한 사실은 모두 공간적 범위를 자국에 한정했을 때에만 적용된다. 선진국의 환경개선 효과는 그들의 노력으로 인한 것이기도 하지만, 다른 측면에서는 저개발국으로부터의 수입을 통해 달성되고 있다(Kerekes and Luda 2011). Jorgenson and Rice(2005)는 천연자원의 소비가 많은 선진국일수록 천연자원의 보유량의 감소율은 더 작은 것을 발견하고, 이를 '소비·환경 저하의 역설(Consumption-environmental Degradation Paradox)'라고 불렀다. 즉, 선진국은 자국의 자원을 소모하지 않고 타국으로부터 수입을 통해 자국의 소비를 충족시키고 있다. 선진국은 국제무역을 통해 자국의 소비수준은 유지하면서 환경의 질을 개선하고 있는 것이다. 이러한 관계는 저개발국의 환경을 지속적으로 악화시키게 되고, 이는 전 지구적인 차원에서 봤을 때 지속가능한 개발은 아니다.

결론적으로 환경오염에 대한 책임을 논할 때 생산기반 배출회계만 적용한다면, 선진국들은 자국이 지

불해야 할 환경비용 또는 환경부하를 타국으로 무상으로 이전시킬 수가 있다(Muradian and Martinez-Alier 2001). 오염물질을 배출하는 재화를 수입함으로써 수입국은 생산과정에서 발생하는 환경비용을 지불하지 않고도 소비로 인한 효용을 누릴 수 있다. 이러한 인식을 기반으로 소비기반 배출회계의 필요성이 대두되고 있는 것이다. 선진국의 소비로 인해 저개발국가의 환경이 얼마나 부정적 영향을 받았는지에 대한 분석은 소비기반 배출회계를 통해 알 수 있기 때문이다.

3. 소비기반 배출회계 산정 방법

미세먼지와 같은 오염물질의 배출량 통계는 일반적으로 생산기반 배출회계를 기준으로 집계되고 있다. 이는 생산기반 배출회계가 소비기반 배출회계에 비해 계측하기 쉽고, 환경 정책적인 측면에서 이용하기 쉽기 때문이다. 가시적으로 오염물질을 배출하고 있는 공장, 즉 현장(on-site) 중심의 1차적인 배출 규제가 여타의 규제정책보다는 시행이 용이하기 때문에 생산자 중심의 환경정책이 주로 시행되어 왔으며, 이를 위해 공식적인 오염물질 배출량을 생산기반 배출회계로 집계했다고 볼 수 있다. 그러나 생산기반 배출회계는 정책시행자 입장에서는 유용하게 쓰일 수 있으나, 환경문제의 근본적인 해결책 모색에는 한계가 있다. 왜냐하면, 자국에서 오염물질을 배출하면서 생산한 재화를 타국에서 소비하는 경우가 많기 때문이다.

생산기반 배출회계와 소비기반 배출회계, 두 회계 방식은 다음과 같은 차이점이 있다. 우선 생산기반 배출회계는 많은 기관에서 공식적인 통계 자료 형태로 제공되기 때문에 그대로 이용 가능하다. 또한, 생산기반 배출회계는 생산 활동을 기반으로 산정되므로, 타 통계자료(예를 들어 국내총생산(GDP))들과 대체로 일치하여 함께 이용할 수 있다. 반면, 소비기반 배출

회계는 '기술적인 문제'와 '데이터 문제'로 인해 불확실성이 존재한다(Peters 2008). 여기서 기술적인 문제란 소비기반 배출량을 산정하는 과정에서 발생할 수 있는 편의(bias)를 의미한다(De Haan and Keuning 1996). 즉, 소비기반 배출량은 공식적인 통계가 있는 것이 아니라, 연구자가 목적에 따라 별도의 방법론을 이용하여 산정해야 한다. 많은 경우 공식 통계인 생산기반 배출량을 기반으로 하여 국가별·산업별 소비기반 배출량을 산정하는데, 이러한 과정을 거치면서 편의가 발생할 수 있다. 다음으로 데이터 문제란 소비기반 배출량을 산정하는 데 이용되는 다지역투입산출표(Multi Regional Input Output table, 이하 MRIO)로 인해 발생하는 문제이다. MRIO는 지역 내 또는 지역 간 산업 간 거래에 대한 선행관계를 가정하며, 이러한 강한 가정 때문에 산업부문의 오염물질 배출량을 산정할 때 불가피하게 불확실성이 존재하게 된다(Lenzen 2001; Lenzen, Pade and Munksgaard 2004; Weber and Matthews 2007). 특히, 연구에 따라 산업부문의 분류 수준이 낮을 경우에는 제품 및 산업별 영향에 대한 정보가 상당히 손실될 수 있다(Lenzen, Pade and Munksgaard 2004). 또한, MRIO가 공식적으로 작성되는 국가가 소수이기 때문에, 소비기반 배출회계는 모든 국가의 데이터를 포함할 수가 없어 불확실성이 증가한다(Subak 1995). 즉, 현재의 데이터 가용성을 감안할 때 일부 국가에서는 소비기반 배출회계를 예측할 수가 없는 상황이다(Dimaranan 2006).

미세먼지 배출량의 공식 통계가 생산기반 배출회계를 기준으로 작성되기 때문에 생산기반 배출회계를 산정하는 별도의 방법론은 필요가 없다. 반면, 2019년을 기준으로 미세먼지와 관련하여 소비기반 배출량을 산정한 국제적인 공식 통계는 없다. 따라서 소비기반 배출회계는 별도의 자료와 방법론을 이용하여 산정해야 하며, 일반적으로 제품에 내재되어 있는 오염물질

의 국가 간 이동관계, 즉 수입 및 수출을 고려하여 산정한다. 구체적으로는 투입산출표와 같은 산업구조 및 무역구조를 포함하는 자료와 교역에 체화된 오염물질에 대한 가정(예, 배출계수)을 통해 소비기반 배출량을 산정하게 된다. 이 과정에서 MRIO를 이용하게 되는데, 앞서 언급한바와 같이 MRIO를 이용한 방법론이 기술적인 문제와 데이터 문제를 지니고 있지만, 아직까지는 가장 신뢰할 만한 적절한 방법론으로 여겨진다(Wiedmann 2009). 따라서 본 논문에서도 MRIO를 이용하여 소비기반 배출회계를 산정하도록 한다.

소비기반 배출회계를 산정하기 위한 근본적인 가정은 재화(또는 서비스)를 생산하면서 발생하는 오염물질이 해당 재화(또는 서비스)에 체화(embodied)되어 있다는 것이다. 특정국가에 생산한 재화에는 생산 과정에서 투입(소비)된 에너지가 체화되어 있으며, 이러한 에너지가 투입(소비)될 때 발생하게 되는 미세먼지는 해당 재화에 체화(또는 내재)되게 된다는 가정이다. 이러한 가정은 자국에서 생산하여 소비하는 재화와 타국으로부터 수입되는 재화에 체화된 오염물질을 집계함으로써 소비기반 배출회계를 산정할 수 있게 한다.

체화된 미세먼지를 산정하는 데 중요한 변수는 배출계수(Emission Factor) 또는 오염집약도이다. 배출계수는 경제활동에 따른 오염물질의 배출량으로(배출계수 = 오염물질 배출량 / 경제활동), 일종의 기술 수준이라고 볼 수 있다. 배출계수를 산정하기 위해서는 관련 자원의 소비량과 그로인해 배출되는 미세먼지양을 알아야 한다. 또는 다른 경로로부터 배출계수를 미리 알고 있을 시, 관련 경제활동을 통해 발생하는 미세먼지양을 역으로 산정할 수 있다. 전자의 방식을 하향식 접근, 후자의 방식을 상향식 접근이라고 한다. 본 논문에서는 경제활동과 배출량을 이용하여 배출계수를

산정하고 있으며, 하향식 접근을 통해 미세먼지의 에너지별 배출계수를 산정하였다.

$$EmissionFactor_r^N = \frac{Emission_r^N}{Action_r^N} \quad <식 1>$$

- $EmissionFactor_r^N$: N 국가 r 자원의 배출계수
- $Emission_r^N$: N 국가 r 자원의 소비로 인한 배출량
- $Action_r^N$: N 국가 r 자원을 이용한 경제활동

4. 선행 연구

선행연구로는 미세먼지와 같은 오염물질의 생산기반 및 소비기반 배출회계를 분석하고, 이를 통해 정책적 함의를 도출하는 연구를 살펴보았다. 국내에서 김의준, 문승운(2019)은 국내의 16개 시도를 대상으로 국가 대기오염물질 배출량(국립환경과학원 2016)과 지역산업연관표(한국은행 2017)를 이용하여 생산기반 및 소비기반 미세먼지(PM10, PM2.5) 배출량을 산정하였다. 분석결과, 서울, 경기, 인천 등 대도시권의 소비자들을 위한 상당 부분의 재화들은 타 지역에서 생산되고 있으며, 그러한 생산과정에서 발생하는 미세먼지는 당연히 타 지역에서 발생하고 있었다.

생산기반 및 소비기반 배출회계와 관련한 연구는 해외에서도 다수 진행되었다. Mozner(2013)는 환경투입산출모형(Environmentally Extended Input-Output model)을 이용하여 독일, 영국, 네덜란드, 헝가리를 대상으로 이산화탄소(CO2)의 생산기반 및 소비기반 배출회계를 비교하면서, 이산화탄소 저감 정책을 위해서는 소비기반 배출회계를 반드시 고려해야 한다고 주장하였다. Mozner(2013)의 분석모형은 국가 간 산업 간 분석이 가능하여 산업별 소비기반 배출회계를 산정하고 있다. Zhao, Zhang, Guan and Davis et

al.(2015)는 MRIO를 이용하여 중국 내 30개 행정구역의 미세먼지(PM2.5)와 미세먼지의 전구물질인 SO_x, NO_x, NMVOC를 소비기반 배출회계로 추산하였다. 행정구역에 따라 소비기반 정책과 생산기반 정책의 효율성이 상이하므로 지역에 따라 적절한 정책을 시행해야 함을 보이고 있다. Nagashima, Kagawa, Suh and Nansai et al.(2016)은 MRIO 기반의 구조경로분석(Structural Path Analysis)과 주산업분석(Key Sector Analysis)을 이용하여, 소비기반 미세먼지가 건강에 악영향을 미치는 산업의 공급사슬을 밝혀내고, 주산업 분석을 통해 산업별 저감정책의 우선순위를 선정하고, 아시아 지역의 미세먼지 저감을 위해서 일본의 소비 정책이 중요함을 보이고 있다. Liu, Huang, Baetz and Kaiqiang(2018)는 환경투입산출모형을 이용하여 캐나다의 서스캐처원(Saskatchewan)을 대상으로 온실가스 저감을 위한 생산기반 정책과 소비기반 정책을 비교 분석하였다. 생산기반 정책은 재생에너지 권고나 에너지 효율 증가 등의 정책을 의미하며, 소비기반 정책은 오염집약적인 재화의 소비를 감소시키는 정책을 의미한다. 분석결과 1차 산업에서는 생산기반 정책이 효과적이었으며, 산업사슬(Industrial Chain)(또는 공급사슬, Supply Chain)의 마지막일수록 소비기반 정책이 효과적임을 밝혔다.

이상의 연구들은 미세먼지와 같은 환경오염물질에 대한 책임은 배출 지역에만 있는 것이 아니라, 그 재화를 소비하는 타 지역에도 있으며, 이를 통해 환경오염 저감을 위해서는 소비기반 정책이 고려되어야 함을 밝히고 있다.

본 논문과 선행연구들과의 근본적인 차이점은 선행연구들이 소비기반 배출회계를 통해 정책적 함의를 도출하는 것이 연구의 목적이라면, 본 논문에서는 보다 정확한 소비기반 배출회계를 산정하는 것에 초점을 두고 있다는 것이다. 선행연구들은 주로 CO₂, SO_x,

NO_x, NMVOC 등의 오염물질을 대상으로 하고 있다. 이는 해당 오염물질들은 공식적인 통계가 존재하기 때문이다. 그러나 아직까지 소비기반 미세먼지에 대한 공식적인 통계가 존재하지 않기 때문에 본 논문에서는 미세먼지를 대상으로 소비기반 배출회계를 산정하고자 하며, 해당 자료를 구축하는 과정에서 ‘기술적인 문제’와 ‘데이터 문제’로 인한 불확실성을 최대한 줄이는 것이 본 논문의 목적인 것이다. 본 논문은 소비기반 배출회계의 불확실성을 감소시키기 위해, 산업별 미세먼지 배출량이 아니라, 미세먼지 배출의 근원인 에너지 소비량을 근거로 하여 산업별 에너지 사용량 자료와 산업별·에너지별 미세먼지 배출계수를 산정하고 있다.

III. 분석

1. 자료 및 분석 방법

미세먼지의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량을 산정하기 위해 국가 간·산업 간 교역구조를 나타내는 자료와 미세먼지 배출량 자료가 필요하다. 일반적으로 국가 간·산업 간 자료로는 투입산출표를 이용하지만, 미세먼지 배출량 자료는 공식적인 통계를 제공하지 않는다. 본 논문에서는 WIOD(World Input-Output Database)에서 제공하는 2014년 세계산업연관표(World Input-Output Table: WIOT)를 통해 국가 간·산업 간 교역량 자료를 구축하였으며, 국가별·산업별·에너지별 미세먼지 배출계수는 기본적으로 하향식 산정 방식을 준용하였다. 즉, GAINS(Greenhouse Gas-Air Pollution Interactions and Synergies)에서 제공하는 국가별·산업별 미세먼지 배출량 자료와 세계투입산출표의 총산출 자료를 이용하여 국가별·산업별 생산량당 미세먼지 배출량을 산정하였다. 그러나 국

가별·산업별·에너지별 배출량 자료가 존재하지 않기 때문에, 에너지별 배출계수는 EMEP(European Monitoring and Evaluation Programme)에서 제공하는 에너지별 배출계수의 비율을 근거로 하여 하향식의 국가별·산업별 배출량과 일치되도록 조정하였다. 세계투입산출표는 모두 56개의 산업부문을 구성하고 있으나, 타 자료들과의 산업분류를 일치시켜야 되므로, 본 논문에서는 <Table 1>과 같이 12개의 산업으로 통합·분류하였다.

본 논문에서 사용하는 세계투입산출표는 43개국을 다루고 있다. 따라서 본 논문에서는 연구의 공간적 범위에 따라 세계투입산출표를 '3개국 미세먼지 다지역 투입산출표'로 가공하였다(<Table 2> 참조). 통상적인 다지역 투입산출표는 지역 간·산업 간 중간재 거래(Z_{ij}^{RS}), 최종재(Y_{ij}^{RS}), 수출(E_i^R), 수입(I_j^S), 부가가치(V_j^S), 총산출(X_i^R)로 구성되지만, 본 논문에서는 기본적인 다지역투입산출표를 확장하여 미세먼지 배

출량(P_j^S)을 추가하였다. 해당 표기(notation)에서 위첨자 R 과 S 는 국가를 나타내며, 아래첨자 i 와 j 는 산업을 나타낸다. 예를 들어 Z_{ij}^{rs} 는 R 국가 i 산업에서 S 국가 j 산업으로의 중간재 거래를 나타낸다.

일반적으로 투입산출분석은 투입계수를 구하는 것부터 시작한다. 3개국 미세먼지 다지역투입산출표(3 National PM-MRIO)에서 투입계수($A_{ij}^{rs} = Z_{ij}^{rs} / X_j^s$)는 국가 간·산업 간 중간재 거래(Z_{ij}^{rs})를 국가·산업의 총산출(X_j^s)로 나눈 값이다. 이러한 방식에 따라 국가 간·산업 간 투입계수행렬을 나타내면 <식 2>와 같다. R 국가의 최종수요는 R 국가에서의 자체 수요량과 S 국가로의 수출량, 그리고 수출량이 모두 더해진 값으로 <식 3>과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 수식을 통해 <식 8>의 $AX + Y = X$ 와 같은 항등식이 되며, 이는 $X = (I - A)^{-1} Y$ 와 같이 변형할 수 있다(이 항등행렬). 이때 $(I - A)^{-1}$ 를 레온티에프 역행렬(또는 생산유발계수)이라고 하며 간단하게 L 로 나타내기로 하자.

Table 1_ Industry Sector Classification

	12 Industry Sector (This Study)	WIOT (56 sector) from WIOD	PM2.5 Emission Inventory (82 sector) from GAINS	Energy Consumption Data (43 sector) from IEA
AG	1. Primary Industry	1. Crop and Animal Production.....	1. Agriculture	1. Agriculture/Forestry
MN	2. Mining and Quarrying	4. Mining and Quarrying	9. Mining	3. Mining and Quarrying
FU	3. Fuels and Coke	5. Coke and Refined Petroleum Products	10. Fuel Conversion	4. Fuel Mining and Extraction
PW	4. Supply of Power, Heat and Water	6. Electricity, Gas, Steam and Air Conditioning Supply ...	...	...
MT	5. Metal	8. Basic Metals ...	...	...
NM	6. Non-metallic Mineral Products	...	...	...
CH	7. Chemical Products	...	...	...
PP	8. Paper Products and Publishing Activities	...	...	...
MF	9. Manufacture	...	...	...
CT	10. Construction	...	...	...
TR	11. Transport	...	...	...
RC	12. Residential Activities	56. Other Service Activity	82. Residential	43. Residential

Table 2_3 National PM-MRIO

Nation, Industry(<i>i</i>)			Intermediate Good			Final Good			Export (<i>E</i>)	Total Output(<i>X</i>)
			Korea (<i>K</i>)	China (<i>C</i>)	Japan (<i>J</i>)	Korea (<i>K</i>)	China (<i>C</i>)	Japan (<i>J</i>)		
			1... <i>j</i>	1... <i>j</i>	1... <i>j</i>					
중간재	Korea (<i>K</i>)	1 ⋮ <i>i</i>	Z_{ij}^{KK}	Z_{ij}^{KC}	Z_{ij}^{KJ}	Y_i^{KH}	Y_i^{KC}	Y_i^{KJ}	E_i^K	X_i^K
	China (<i>C</i>)	1 ⋮ <i>i</i>	Z_{ij}^{CK}	Z_{ij}^{CC}	Z_{ij}^{CJ}	Y_i^{CH}	Y_i^{CC}	Y_i^{CJ}	E_i^C	X_i^C
	Japan (<i>J</i>)	1 ⋮ <i>i</i>	Z_{ij}^{JK}	Z_{ij}^{JC}	Z_{ij}^{JJ}	Y_i^{JH}	Y_i^{JC}	Y_i^{JJ}	E_i^J	X_i^J
Import			I_j^K	I_j^C	I_j^J					
Value Added (<i>V</i>)			V_j^K	V_j^C	V_j^J					
Total Input (<i>X</i>)			X_j^K	X_j^C	X_j^J					
PM2.5 Emission			P_j^K	P_j^C	P_j^J					

$$A = \begin{bmatrix} A^{KK} & \dots & A^{KJ} & \dots & A^{KC} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{JK} & \dots & A^{JJ} & \dots & A^{JC} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{CK} & \dots & A^{CJ} & \dots & A^{CC} \end{bmatrix} \quad \text{<식 2>}$$

$$Y^{R*} = \sum_{S=1}^n \sum_{R=1}^q Y_{ij}^{RS} + E^R \quad \text{<식 3>}$$

$$AX + Y = X \Leftrightarrow X = (I - A)^{-1} Y = LY \quad \text{<식 4>}$$

- *A* : 국가 간·산업간 투입계수 행렬($A_{ij}^{rs} = Z_{ij}^{rs} / X_j^s$)
- Y^{R*} : *R*국가의 최종수요
- Y^{RS} : *R*국가 *i*산업에서 *S*국가 *j*산업으로의 교역량
- E^R : *R*국가의 수출량
- *I* : 단위행렬

<식 5>와 같이 특정국가의 산업별 최종수요(*y*) 및 총산출(*x*)을 정의하면, 미세먼지 배출량(*p*)은 <식 6>

을 통해 구할 수 있다. $F_{ij}^R = P_{ij}^R / X_j^R$ 는 배출계수의 대각행렬로 단위 생산량당 발생하는 미세먼지 배출량을 나타내며, 국가별·산업별 미세먼지 배출량(P_i^R)를 알고 있을 때, $F_{ij}^R = P_{ij}^R / X_j^R$ 를 통해 산출할 수 있다.

$$Y = \begin{bmatrix} Y^1 \\ \vdots \\ Y^R \\ \vdots \\ Y^N \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^R \\ \vdots \\ X^N \end{bmatrix} \quad \text{<식 5>}$$

$$P = FLY \quad \text{<식 6>}$$

- *Y* : 국가별·산업별 최종수요
- *X* : 국가별·산업별 총산출
- *P* : 국가별·산업별 미세먼지 배출량
- *F* : 배출계수의 대각행렬
- *L* : 레온티에프 행렬($= (I - A)^{-1}$)

이상의 과정을 통해 R지역의 생산기반 배출량(P_r)은 <식 7>과 <식 8>을 통해 구해지며, R지역의 소비기반 배출량(C_r)은 <식 9>와 <식 10>을 통해 산정할 수 있다. 두 방식의 차이는 <식 8>과 <식 10>에 의해 발생하고 있다. <식 8>은 R지역에서 생산하는 최종재를 의미하며, <식 10>은 R지역의 소비를 위해 타 지역에서 생산되어 R지역으로 수입되는 최종재를 나타낸다.

$$P^R = FLY^R \quad \text{<식 7>}$$

$$Y^R = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ Y^R \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{<식 8>}$$

$$C^R = FLC^R \quad \text{<식 9>}$$

$$c^R = \begin{bmatrix} Y^{1R} \\ \vdots \\ Y^{RR} \\ \vdots \\ Y^{NR} \end{bmatrix} \quad \text{<식 10>}$$

- P^R : R국가의 생산기반 배출량
- C^R : R국가의 소비기반 배출량
- Y^R : R국가의 생산되는 최종재
- c^R : R국가의 소비되는 타지역 최종재

2. 분석 결과

국가별·산업별 미세먼지 배출계수를 살펴보면, 대체로 중국의 배출계수가 일본 및 한국의 배출계수보다 상당히 크다(<Table 3> 참조). 국가 및 산업의 배출계수는 해당 국가 및 산업의 기술수준을 나타낸다. 즉, 배출계수가 낮을수록 산업의 기술수준은 높다는 의미이며, 이러한 배출계수의 차이는 국가 간 협력을 통해 미세먼지 저감의 잠재력이 존재한다는 것을 의미한다. 에너지별 배출계수를 비교하면, 특히 중국의 석탄 사용에 따른 배출계수가 한국과 일본에 비해 상당히 크다. 이는 중국에서 석탄으로 인한 미세먼지 발생량을 줄일 수 있는 잠재력이 크다는 것을 의미한다.

국가별·산업별·에너지별 배출계수가 구해지면, 국가 간 교역량을 통해 교역에 체화된 미세먼지양을

Table 3_ PM Emission Factor by Energy Source, Industrial Sector, and Country

(unit: kt/million toe)

Industrial Sector	Coal			Oil			Gas		
	China	Japan	Korea	China	Japan	Korea	China	Japan	Korea
1. Primary Industry	54.773	0.000	0.000	10.143	24.328	3.493	2.536	0.000	0.000
2. Mining and Quarrying	2.054	0.000	0.000	0.380	0.015	0.167	0.095	0.004	0.000
3. Fuels and Coke	5.567	0.000	0.117	1.031	0.040	0.022	0.000	0.000	0.000
4. Supply of Power, Heat and Water	0.778	0.107	0.088	0.144	0.020	0.016	0.036	0.005	0.004
5. Metal	20.217	1.388	1.932	3.744	0.257	0.358	0.936	0.064	0.089
6. Non-metallic Mineral Products	11.086	4.668	5.797	2.053	0.864	1.074	0.513	0.216	0.268
7. Chemical Products	0.212	0.482	3.393	0.039	0.089	0.628	0.010	0.022	0.157
8. Paper Products and Publishing Activities	1.159	0.514	3.347	0.215	0.095	0.620	0.054	0.024	0.155
9. Manufacture	6.003	9.416	4.821	1.112	1.744	0.893	0.278	0.436	0.223
10. Construction	9.988	0.000	0.000	1.850	5.201	2.821	0.462	1.300	0.705
11. Transport	7.569	0.000	0.000	1.402	0.431	0.584	0.350	0.108	0.146
12. Residential Activities	59.152	3.562	7.608	10.954	0.660	1.409	2.739	0.165	0.352

산정할 수 있다. <Table 4>는 3국간의 교역량과 교역에 체화된 미세먼지양을 정리한 것이다. 1열과 2열을 수출국가 및 산업을 나타내며, 2행의 국가들은 수입국가를 나타낸다. 즉, 3행 8열의 1.81(10억 달러)이

Table 4_ Embodied PM in Intermediate Good, Final Good, and Total Trade among 3 Countries

(unit: billion US \$, KT)

Exporter		Importer											
		Intermediate Good Trade			Final Good Trade			Total Trade			Embodied PM (KT)		
Sector		China	Japan	Korea	China	Japan	Korea	China	Japan	Korea	China	Japan	Korea
China	AG	1218.09	0.81	0.42	438.34	1.00	0.87	1656.43	1.81	1.30	919.02	1.00	0.72
	MN	1200.43	0.54	0.64	14.31	0.21	0.12	1214.74	0.74	0.76	15.73	0.01	0.01
	FU	791.80	1.14	1.34	39.32	0.13	0.32	831.12	1.27	1.65	860.79	1.31	1.71
	PW	979.53	0.09	0.10	73.75	0.08	0.03	1053.28	0.18	0.13	954.25	0.16	0.12
	MT	2212.01	11.01	14.58	67.46	2.53	0.75	2279.47	13.55	15.33	3928.61	23.34	26.41
	NM	838.89	2.45	4.99	6.37	0.30	0.08	845.26	2.75	5.07	1715.93	5.58	10.29
	CH	1949.99	10.37	8.70	68.94	2.72	0.38	2018.93	13.09	9.08	18.20	0.12	0.08
	PP	325.63	1.06	0.57	4.70	0.32	0.07	330.33	1.38	0.65	9.78	0.04	0.02
	MF	5423.65	37.49	38.98	2140.95	97.37	29.73	7564.60	134.86	68.72	311.52	5.55	2.83
	CT	244.19	0.01	0.01	2761.21	0.00	14.31	3005.40	0.01	14.32	57.99	0.00	0.28
	TR	782.21	1.54	0.50	123.12	0.49	0.48	905.33	2.03	0.98	357.94	0.80	0.39
RC	4005.82	0.69	3.34	3587.12	0.47	2.56	7592.94	1.16	5.90	5795.07	0.89	4.50	
Japan	AG	0.07	88.21	0.03	0.02	30.96	0.01	0.09	119.17	0.04	0.01	18.11	0.01
	MN	0.45	33.75	0.23	0.19	0.38	0.01	0.64	34.13	0.25	0.00	0.01	0.00
	FU	1.26	100.15	1.88	0.34	53.80	0.54	1.59	153.94	2.42	0.06	6.16	0.10
	PW	0.01	150.37	0.01	0.00	66.57	0.00	0.01	216.94	0.01	0.00	11.31	0.00
	MT	14.78	383.94	14.65	1.27	34.10	1.37	16.05	418.04	16.02	0.58	15.23	0.58
	NM	2.44	49.45	2.20	0.05	1.85	0.01	2.49	51.30	2.20	0.81	16.80	0.72
	CH	17.34	295.81	14.06	1.55	24.89	0.41	18.89	320.70	14.47	0.12	2.03	0.09
	PP	0.86	135.33	0.53	0.41	10.91	0.04	1.27	146.24	0.57	0.01	0.88	0.00
	MF	44.28	578.18	13.40	40.20	414.49	11.95	84.48	992.67	25.35	0.63	7.46	0.19
	CT	0.01	95.53	0.01	0.00	521.35	18.83	0.01	616.87	18.84	0.00	10.76	0.33
	TR	1.63	178.89	0.05	0.64	122.99	0.34	2.27	301.88	0.38	0.20	26.35	0.03
RC	0.43	1476.51	1.11	0.41	2980.57	6.49	0.84	4457.07	7.60	0.00	20.21	0.03	
Korea	AG	0.04	0.06	41.81	0.02	0.14	13.54	0.06	0.20	55.35	0.01	0.02	4.83
	MN	0.02	0.02	4.77	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	4.82	0.00	0.00	0.01
	FU	6.46	5.52	72.41	1.47	1.69	3.76	7.93	7.21	76.17	0.20	0.18	1.91
	PW	0.02	0.03	94.80	0.01	0.01	27.43	0.02	0.04	122.23	0.00	0.00	6.45
	MT	6.14	8.32	185.58	0.51	1.37	6.79	6.65	9.69	192.37	0.38	0.55	10.95
	NM	0.74	0.36	13.27	0.02	0.01	0.24	0.76	0.36	13.51	0.77	0.37	13.83
	CH	25.97	4.51	178.07	0.80	0.47	7.71	26.77	4.98	185.78	0.10	0.02	0.67
	PP	0.39	0.24	43.29	0.10	0.03	9.15	0.48	0.27	52.44	0.00	0.00	0.18
	MF	66.69	7.63	410.92	45.18	8.55	157.72	111.88	16.19	568.63	0.58	0.08	2.93
	CT	0.01	0.01	10.01	0.00	0.00	184.65	0.02	0.01	194.66	0.00	0.00	2.37
	TR	0.89	0.35	80.95	0.16	0.17	26.28	1.05	0.52	107.22	0.15	0.07	15.31
RC	7.93	3.32	458.29	4.49	1.17	686.36	12.42	4.49	1144.65	0.19	0.07	17.96	

라는 숫자는 중국의 1차 산업에서 생산 후 일본으로 수출한 교역량을 나타낸다. 이때 해당 교역에 체화되어 있는 미세먼지양은 1.00(kg)이다.

<Table 5>는 중국, 일본, 및 한국 간 교역량과 체화된 미세먼지양의 이동을 나타내는 행렬로 열린 수출국가를 나타내며, 행은 수입국가를 나타낸다. 행렬의 각 성분은 해당 열의 수출국가에서 해당 행의 수입국가로 이동하는 교역량 또는 체화된 미세먼지양을 나타낸다. 국가 간 이동량을 가로행으로 합하면 해당

국가의 생산량 또는 생산기반 미세먼지 배출량이 되고, 세로 열로 합하면 해당 국가의 소비량 또는 소비기반 미세먼지 배출량이 된다. 생산기반 이동량은 재화의 이동과 미세먼지의 이동이 대체로 일치한다. 반면, 소비기반 이동량은 재화의 이동량과 체화된 미세먼지의 이동량이 큰 차이를 보이고 있다. 일본은 총 소비의 2.15%를 중국으로부터 수입하고 있으며, 한국은 총 소비의 4.23%를 중국으로부터 수입하고 있다. 그러나, 이러한 수입량에는 일본의 소비로 인해 발생

Table 5_ Production-based and Consumption-based Accounts of Trade and Embodied PM

1) Trade

(unit: billion US\$)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	29297.82	172.81	123.87	29594.50
	Japan	128.63	7828.96	88.17	8045.76
	Korea	168.05	43.99	2717.83	2929.87
	Total	29594.50	8045.76	2929.87	40570.12

2) Embodied PM

(unit: KT)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	15619.12	41.65	50.25	15711.02
	Japan	2.85	146.04	2.33	151.22
	Korea	2.91	1.65	86.92	91.47
	Total	15624.88	189.34	139.50	15953.71

3) Production-based Trade Share

(unit: %)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	99.00	0.58	0.42	100.00
	Japan	1.60	97.31	1.10	100.00
	Korea	5.74	1.50	92.76%	100.00
	Total	72.95	19.83	7.22	100.00

4) Production-based Embodied PM Share

(unit: %)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	99.42	0.27	0.32	100.00
	Japan	1.88	96.57	1.54	100.00
	Korea	3.18	1.80	95.02	100.00
	Total	97.94	1.19	0.87	100.00

(continued)

Table 5 _ Production-based and Consumption-based Accounts of Trade and Embodied PM (continued)

5) Consumption-based Trade Share

(unit: %)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	99.00	2.15	4.23	72.95
	Japan	0.43	97.31	3.01	19.83
	Korea	0.57	0.55	92.76	7.22
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00

6) Consumption-based Embodied PM Share

(unit: %)

Variable		Importer			
		China	Japan	Korea	Total
Exporter	China	99.96	22.00	36.02	98.48
	Japan	0.02	77.13	1.67	0.95
	Korea	0.02	0.87	62.31	0.57
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00

하는 미세먼지양의 22.00%가 체화되어 있으며, 한국의 소비로 인해 발생하는 미세먼지양의 36.02%가 체화되어 있다. 즉, 한국과 일본이 소비하는 재화가 생산될 때 배출되는 미세먼지는 중국에서 상당 부분 배출되고 있음을 알 수 있다.

한국, 중국, 및 일본 간의 소비기반 미세먼지 배출량은 3개국 간 교역량에 영향을 받지만, 3개국 주력 산업의 오염집약도(배출계수)에 의해서도 영향을 받는다. 즉, 배출계수가 큰 산업들은 중국에 입지하는 경향이 강하고, 비교적 오염집약도가 작은 산업들은 한국과 일본에 입지하는 경향이 강하다면 중국에서 생산하는 재화에 체화된 미세먼지양이 많아진다. <Table 6>은 소비기반 기준으로 '체화된 미세먼지양 / 교역량을 나타낸 표이다. 표에서 볼 수 있듯이 단위 교역량에 체화된 미세먼지는 '(수출)중국-(수입)일본'의 경우가 가장 많으며, '(수출)중국-(수입)한국'의 경우가 그 다음이다.

일본 자국에서 생산하여 자국에서 소비하는 재화에는 미세먼지가 0.79만큼 체화되어 있는 반면, 중국에서 생산하여 일본에서 소비하는 재화에는 미세먼지가 10.52만큼 체화되어 있다. 이와 같은 상황은 한국

Table 6 _ Embodied PM per Consumption-based Trade

Variable		Importer		
		China	Japan	Korea
Exporter	China	1.01	10.52	8.88
	Japan	0.13	0.79	0.53
	Korea	0.08	1.60	0.66

도 마찬가지이다. 즉, 일본과 한국의 경우, 중국으로부터의 수입재에 체화된 미세먼지양이 자국에서 생산해서 자국에서 소비하는 내수재화에 체화된 미세먼지양보다 13배 이상 체화되어 있는 것을 알 수 있다. 반대로 한국이나 일본이 수출하는 경우는 체화된 미세먼지의 상대량이 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 한국, 중국, 및 일본 간의 '오염 피난처 가설 (Pollution Haven Hypothesis)'을 입증하는 근거로 볼 수 있다. 즉, 다량의 미세먼지를 배출하는 오염집약적인 산업은 중국에 집중하고 있으며, 한국과 일본은 친환경 산업을 중심으로 입지하고 있다는 증거이다.

IV. 결론

그동안 미세먼지 배출량에 대한 공식적인 통계가 없기 때문에 미세먼지에 대한 소비기반 배출회계 연구가 부족하였다. 본 논문은 이러한 공백을 채울 수 있는 기초연구라고 볼 수 있으며, 특히 본 논문에는 소비기반 배출회계의 정확도를 위해 산업별·에너지별 배출계수를 이용하여 분석을 시도하였다.

본 논문에서는 전 세계에서 미세먼지의 배출량과 피해 규모가 큰 한국, 중국, 및 일본을 대상으로, 3국의 미세먼지 저감을 위해서는 초국경적인 협력이 필요하며, 이를 위해서는 소비기반 배출회계가 중요한 과학적 근거를 제공할 수 있음을 이론적으로 살펴보았다. 실증적으로는 3개국 간 재화 및 체화된 미세먼지의 교역 자료를 통해 생산기반 및 소비기반 교역량 및 미세먼지 배출량을 분석하였다. 분석 결과, 한국과 일본은 자국의 소비를 위한 재화를 상당 부분 중국에서 생산하고 있었으며, 이로 인해 중국에서 다량의 미세먼지가 배출되고 있었다. 또한, 중국의 산업들이 한국과 일본의 산업에 비해 오염집약도가 상대적으로 많이 높아 오염피난처 가설이 입증하고 있음을 유추할 수 있었다. 이는 중국에서 배출되는 미세먼지는 중국뿐만 아니라 일정 부분 한국과 일본의 책임이 필요하다는 근거이다.

오늘날과 같이 생산국가와 소비국가의 분리가 점점 더 양극화되는 상황에서, 환경오염의 책임을 모두 생산국가에만 물을 수가 없다(Liu and Diamond 2005). 물론, 환경오염 물질의 저감을 위해서는 생산국가가 적절한 저감 정책을 시행하여야 하지만, 생산위주의 개발도상국의 입장에서는 자국의 경제성장을 저해할 수 있는 환경오염 저감 정책에 대해 거부감을 가질 수밖에 없다(Peters and Hertwich 2006). 따라서, 생산기반 배출회계 및 생산기반 환경정책은 환경오염 해

결에 대해 한계를 지니게 된다. 이에 반해 소비기반 배출회계의 개념은 저개발국에서 배출하는 미세먼지의 책임이 선진국에도 일정부분 있다는 논거를 제공할 수 있어, 환경오염의 책임에 대한 논의에 많이 언급되고 있다. 즉, 미세먼지 저감정책의 시행은 국가 간 형평성이 충분하게 논의되어야 하며, 이러한 논의를 진행함에 있어 본 논문은 한국, 중국, 및 일본 간 미세먼지 저감을 위한 협력의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다. 또한, 본 논문을 통해 미세먼지 저감정책은 사회경제적인 시각에서 지역 간 형평성을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다. 생산국가의 굴뚝오염원 규제와 같은 가시적인 정책도 중요하지만, 소비국가에서 환경라벨제도, 소비자 공익마케팅 등과 같은 소비기반의 미세먼지 정책을 마련하는 것이 효과적일 수 있다.

본 논문의 한계도 존재한다. 언급한 바와 같이, 본 논문에서 활용한 방법론은 ‘기술적인 문제’와 ‘데이터 문제’를 지니고 있으며, 본 논문에서도 이러한 한계를 일부 벗어난 것은 못했다. 또한, 소비기반 배출회계를 통해 선진국이 저개발국가의 환경오염에 대해 책임이 있다는 것을 알 수 있지만, 그 책임의 정도가 얼마만큼인지, 즉 선진국과 저개발국가 간의 책임 분배에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다. 마지막으로, 본 논문에서는 국가 간 배출현황을 다루었지만, 미세먼지가 배출된 후 국가 간 이동을 고려해야 한다. 즉, 미세먼지와 같은 월경성 오염물질은 국가 간을 이동하기 때문에, 한 국가 내에서의 미세먼지 배출량은 해당 국가에서의 미세먼지로 인한 피해량과는 상이할 것이다. 즉, 배출량보다는 피해량에 대한 연구가 필요하며, 이를 위해서는 대기, 풍향, 지형 등의 요소를 연계하여 정확한 피해규모를 산정하는 연구가 수행될 필요가 있다.

참고문헌 ●●●●●

1. 국립환경과학원. 2016. 대기환경연보 2015. 인천: 국립환경과학원.
NIER. 2016. *Annual Report of Air Quality in Korea*. Incheon: NIER.
2. 김의준, 문승운. 2019. 미세먼지의 지역별 생산기반 배출량과 소비기반 배출량. 한국지역개발학회지 31권, 1호: 101-122.
Kim Euijune and Moon Seungwoon. 2019. Comparison of production-based emissions and consumption-based emissions of regional particulate matter. *Journal of The Korean Regional Development Association* 31, no.1: 101-122.
3. 문승운. 2019. 동북아시아 미세먼지 저감정책이 경제성장과 대기오염에 미치는 영향. 박사학위논문, 서울대학교.
Moon Seungwoon. 2019. *Effect of Northeast Asia PM2.5 Abatement Policy on Economic Growth and Air pollution*. Ph.D. diss., Seoul National University.
4. 한국은행. 2017. 산업연관표. <http://ecos.bok.or.kr>
Bank of Korea. 2017. Input-output Table. <http://ecos.bok.or.kr>
5. Andersson, J. O. and Lindroth, M. 2001. Ecologically unsustainable trade. *Ecological Economics* 37, no.1: 113-122. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00272-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00272-X)
6. De Haan, M. and Keuning, S. 1996. Taking the environment into account: The NAMEA approach. *Review of Income and Wealth* 42, no.2: 131-148. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4991.1996.tb00162.x>
7. Dimaranan, B. V. 2006. *Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 6 data base*. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University.
8. Jorgenson, A. A. and Rice, J. 2005. Structural dynamics of international trade and material consumption: A cross-national study of the ecological footprints of less-developed countries. *Journal of World-Systems Research* 11, no.1: 57-77. <https://doi.org/10.5195/jwsr.2005.393>
9. Ju, Yiyi. 2017. Tracking the PM2.5 inventories embodied in the trade among China, Japan and Korea. *Journal of Economic Structures* 6, no.1: 27. <https://doi.org/10.1186/s40008-017-0089-4>
10. Kajino, M., Sato, K., Inomata, Y. and Uedac, H. 2013. Source-receptor relationships of nitrate in Northeast Asia and influence of sea salt on the long-range transport of nitrate. *Atmospheric Environment* 79: 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.024>
11. Kerekes, S. and Luda, S. 2011. Climate or rural development policy? *Society and Economy* 33, no.1: 145-159. <https://doi.org/10.1556/soccc.33.2011.1.11>
12. Kim, E., Moon, S. W. and Kagawa, S. 2019. Spatial economic linkages of economic growth and air pollution: Developing an air pollution-multinational CGE model of China, Japan and Korea. *The Annals of Regional Science* 63: 255-268. <https://doi.org/10.1007/s00168-019-00925-y>
13. Kondo, Y., Moriguchi, Y. and Shimizu, H. 1998. CO2 emissions in Japan: Influences of imports and exports. *Applied Energy* 59, no.2-3: 163-174. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00011-7)
14. Lenzen, M., Pade, L. and Munksgaard, J. 2004. CO2 multipliers in multi-region input-output models. *Economic Systems Research* 16, no.4: 391-412. <https://doi.org/10.1080/0953531042000304272>
15. Lenzen, Manfred. 2001. Errors in conventional and Input-Output-based Life-Cycle inventories. *Journal of Industrial Ecology* 4, no.4: 127-148. <https://doi.org/10.1162/10881980052541981>
16. Li, J., Yang, W., Wang, Z., Chen, H., Hua, B., Li, J. and Sun, Y. 2014. A modeling study of source-receptor relationships in atmospheric particulate matter over Northeast Asia. *Atmospheric Environment* 91: 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.027>
17. Liang, S., Wang, Y., Zhang, C., Xu, M., Yang, Z., Liu, W., and Chiu, S. 2017. Final production-based emissions of regions in China. *Economic Systems Research* 30, no.1: 18-36. <https://doi.org/10.1080/09535314.2017.1312291>
18. Liu, J. and Diamond, J. 2005. China's environment in a globalizing world. *Nature* 435, no.7046: 1179-1186. <https://doi.org/10.1038/4351179a>
19. Liu L., Huang, G., Baetz, B. and Kaiqiang, Z. 2018. Environmentally-extended input-output simulation for analyzing production-based and consumption-based industrial greenhouse gas mitigation policies. *Applied Energy* 232: 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.192>

20. Martinez-Alier, J. 2002. *The Environmentalism of the Poor: A Study of Ecological Conflicts and Valuation*. Northampton, MA: Edward Elgar.
21. Mozner, Z. V. 2013. A consumption-based approach to carbon emission accounting-sectoral differences and environmental benefits. *Journal of Cleaner Production* 42: 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.014>
22. Munksgaard, J. and Pedersen, K. A. 2001. CO2 accounts for open economies: Producer or consumer responsibility? *Energy Policy* 29, no.4: 327-334. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00120-8)
23. Munksgaard, J., Wier, M., Lenzen, M. and Dey, C. 2005. Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels. *Journal of Industrial Ecology* 9, no.1-2: 169-185. <https://doi.org/10.1162/1088198054084699>
24. Munksgaard, P., Christoffersen, L. B., Keiding, H., Pedersen, O. G. and Jensen, T. S. 2007. An environmental performance index for products reflecting damage costs. *Ecological Economics* 64, no.1: 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.006>
25. Muradian, R. and Martinez-Alier, J. 2001. Trade and the environment: From a 'Southern' perspective. *Ecological Economics* 36, no.2: 281-297. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00229-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00229-9)
26. Nagashima, F., Kagawa, S., Suh, S., Nansai, K. and Moran, D. 2017. Identifying critical supply chain paths and key sectors for mitigating primary carbonaceous PM2.5 mortality in Asia. *Economic Systems Research* 29, no.1: 105-123. <https://doi.org/10.1080/09535314.2016.1266992>
27. OECD. 2012. *Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264130807-en>
28. Peters, P. G. 2008. From production-based to consumption-based national emission inventories. *Ecological Economics* 65, no.1: 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.014>
29. Peters, P. G. and Hertwich, E. 2006. Post-Kyoto greenhouse gas inventories: Production versus consumption. *Climatic Change* 86, no.1-2: 51-66. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9280-1>
30. Pranay, S. and Malovics, G. 2008. Locality and sustainable consumption. In *Question Marks in the Economic Development of the Regions*, 184-203. Szeged: JATEPress.
31. Subak, Susan. 1995. Methane embodied in the international trade of commodities: Implications for global emissions. *Global Environmental Change* 5, no.5: 433-446. [https://doi.org/10.1016/0959-3780\(95\)00056-T](https://doi.org/10.1016/0959-3780(95)00056-T)
32. The CEECEC. 2010. *Glossary: Ecological Economics from the Bottom-Up. European Union 7th framework programme*. <https://base.socioeco.org/docs/the-ceecec-glossary.pdf>
33. Torras, Mariano. 2003. An ecological footprint approach to external debt relief. *World Development* 31, no.12: 2161-2171. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.09.001>
34. Weber, C. and Matthews, H. S. 2007. Embodied environmental emissions in U.S. international trade, 1997-2004. *Environmental Science and Technology* 41, no.14: 4875-4881. <https://doi.org/10.1021/es0629110>
35. Wilting, H. and Vringer, K. 2007. Environmental accounting from a producer or a consumer principle: An empirical examination covering the world. In *Proceedings of 16th International Input-Output Conference*, July 2-6. Istanbul: Istanbul Technical University Macka Campus.
36. Wiedmann, T. 2009. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics* 69, no.2: 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.08.026>
37. Zhao, H., Zhang, Q., Guan, D., Davis, S. J., Liu, Z-R., Huo, H. and Lin, J. T. 2015. Assessment of China's virtual air pollution transport embodied in trade by using a consumption-based emission inventory. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, no.10: 5443-5456. <https://doi.org/10.5194/acp-15-5443-2015>

-
- 논문 접수일: 2020. 1. 10.
 - 심사 시작일: 2020. 1. 28.
 - 심사 완료일: 2020. 5. 26.

요약

주제어: 미세먼지, 소비기반 배출회계, 생산기반 배출회계, 다지역투입산출표

본 논문에서는 전 세계에서 미세먼지의 배출량과 피해가 큰 한국, 중국, 및 일본을 대상으로, 3개국 간 재화 및 체화된 미세먼지의 교역 자료를 통해 소비기반 미세먼지 배출량을 산정한 후, 생산기반 및 소비기반 교역량 및 미세먼지 배출량을 비교하였다. 분석 결과, 한국과 일본은 자국의 소비를 위한 재화를 상당 부분 중국에서 생산하고 있었으며, 이로 인해 중국에서 다량의 미세먼지가 배출되고 있었다. 특히, 중국의 산업들이 한국과 일본의 산업에 비해 오염집

약도가 상대적으로 많이 높아 오염피난처 가설이 입증하고 있음을 유추할 수 있었다. 이는 중국에서 배출되는 미세먼지는 중국뿐만 아니라 일정 부분 한국과 일본의 책임이 필요하다는 근거이다. 동북아시아의 미세먼지 저감을 위해서는 초국경적인 협력이 필요하며, 이를 위해서는 소비기반 배출회계가 중요한 과학적 근거를 제공할 수 있었으며, 본 논문의 결과는 국가 간 협력의 당위성 및 기초 자료를 제공할 수 있다.
