

생산기반 온실가스 배출량 vs 소비기반 온실가스 배출량

조홍종*·구효정**

요약 : 본 연구에서는 1990년부터 2021년까지의 소비기반 온실가스 배출량을 산업부문별로 산정하고, 국가 간 교역으로 인하여 이전되는 온실가스 배출량을 비교하여 한국에 어떤 시사점을 주는지 분석하였다. 결과적으로, 미국, 독일, EU, OECD 등에서 생산기반 배출량과 소비기반 배출량이 동시에 점점 감소되는 것을 확인했다. 한국은 생산기반 배출량이 소비기반 배출량 보다 많으며 이는 수출주도 경제 구조 때문으로 확인된다. 이러한 다른 선진국들과 달리 한국은 육로를 통한 에너지 교역이 불가능하기 때문에 한국만의 특징을 고려한 온실가스 저감계획을 수립하는 것이 타당하다고 말할 수 있다.

주제어 : 소비기반 온실가스 배출량, 생산기반 온실가스 배출량, MRIO모형

JEL 분류 : F1, Q2

접수일(2022년 10월 31일), 게재확정일(2022년 11월 3일)

* 단국대학교 경제학과 부교수, 제1저자(e-mail: hongcho@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 국제학부 강의전담교수, 교신저자(e-mail: betterme@gmail.com)

Production-Based Greenhouse Gas Emissions and Consumption-Based Emissions

Hong Chong Cho* and Hyojung Koo**

ABSTRACT : In this study, consumption-based greenhouse gas emissions from 1990 to 2021 are calculated by the industry sector, and greenhouse gas emissions transferred due to trade between countries are compared to analyze what implications Korea has. As a result, production-based and consumption-based emissions in the United States, Germany, the EU, and the OECD are gradually decreasing. Production-based emission in Korea is larger than consumption-based emissions because Korean economic structure is import-oriented. However, unlike other developed countries, Korea cannot trade energy by land, so it can be said that it is reasonable to establish a greenhouse gas reduction plan considering Korea's unique characteristics.

Keywords : Consumption-based emissions, Production-based emissions, MRIO Model

Received: October 31, 2022. Accepted: November 3, 2022.

* Associate Professor, Department of Economics, Dankook University, First author (e-mail: hongcho@dankook.ac.kr)

** Assistant Professor, Department of International Business Administration, Dankook University, Corresponding author (e-mail: betterme@gmail.com)

1. 서론

1. 연구 배경

최근 기후위기와 지구 온난화에 경각심을 가지며 대부분의 국가들이 관심을 가지고 있고 그에 대한 정책을 제시하고 있다. 이에 따라, 대부분의 국가들은 탈탄소화를 외치고 있지만 여전히 탄소배출량이 많은 산업을 유지하며 고탄소 배출을 유지하는 국가들도 존재한다. 2015년 파리협약에서 195개국 이 지구 평균기온의 증가폭을 산업화 이전을 기준으로 2°C 이하로 유지하며, 1.5°C까지 제한하기 위해 함께 노력하기로 약정한 이후, 온실가스 순배출을 0으로 만드는 탄소중립을 선언하는 국가들이 빠르게 증가하고 있다. 2022년 4월 기준¹⁾ 탄소중립을 법제화한 국가는 프랑스, 독일, 대한민국 등 총 18개국이 있으며, 정책으로서 문서화한 국가는 70개국이며 여기에는 미국, 중국 등이 있다.

우리나라는 2019년을 기준으로 온실가스 총배출량이 7억 140만 톤이며, International Energy Agency(IEA)에 따르면 18년 기준 전 세계에서 온실가스 배출량 7위에 해당한다. 2019년 기준 우리나라 온실가스 배출량의 대부분은 에너지(266.2백만 톤), 제조 및 건설업(187.6백만 톤), 수송산업(101백만 톤)이 차지하고 있다.²⁾ 이러한 특성이 나타나는 이유는 제조업 비중이 높은 우리나라의 산업구조에 있다. 우리나라의 온실가스 총배출량은 1990년 이래로 1997년 외환위기를 겪은 후 꾸준하게 증가하다가 2018년 정점을 달성한 후, 2019년 소폭 감소했다.

이렇게 통상적으로 탄소배출량을 측정하는 기준은 해당 국가에서 재화를 생산해서 발생하는 “생산기반 탄소배출량” 기준이다. 그러나 이러한 기준으로 측정한 탄소배출량을 국제 표준으로 정해도 타당할 것인지는 의문이 존재할 수 있다. 예를 들어, 제3국에서 생산하는 상품들은 선진국의 수요를 위해 생산한 상품들이 상당수 존재한다. 이러한 이유로 제3국에서 발생한 탄소배출량을 온전히 제3국이 책임지는 것이 과연 합리적인지 의심을 해볼 수 있다는 것이다. 어떠한 국가의 최종수요를 기준으로 탄소배출량을 측정하는 방식을 “소비기반 탄소배출량”이라고 한다. 오래전부터 생산기반 배출량을 기

1) Net Zero Tracker, <https://zerotracker.net/>

2) 국가 온실가스 인벤토리 보고서 (1990-2019)

준으로 하는 측정법에 대해 의문점을 제기하며, 또 다른 측정 방법론으로 소비기반 배출량에 대한 논의가 제시되고 있다. 따라서 기존에 활용했던 생산기반 배출량뿐만 아니라 이러한 소비기반 배출량을 고려한 분석을 할 필요가 있다.

기존 연구들은 대부분 생산기반 배출량에 초점을 두고 생산기반 탄소배출량에 영향을 미치는 요인들이 무엇인지 거시적인 관점에서 혹은 미시적인 관점에서 금융, 과학기술, 정치제도 등이 생산기반 탄소배출량에 어떠한 영향을 미치는지 분석한 연구들이 대부분이었다(Balogh and JÁmbor, 2017; You and Lv, 2018; Hanif et al., 2019; Purcel, 2019; Muhammad and Long, 2021). 그러나 이러한 연구들은 생산기반 배출량을 기준으로 하고 있기 때문에 자국의 탄소배출량을 감소시키기 위해 탄소배출규제 수준이 낮은 주변국으로 생산활동을 이전하는 탄소누출(carbon leakage) 현상을 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 연구되었던 생산기반 배출량이 아닌 소비기반 배출량을 기준으로 우리나라뿐만 아니라 전 세계 여러 국가들의 특징을 살펴보고자 한다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 소비기반 배출량을 국가 및 산업별로 계산하여 장기시계열을 나타낸 후 이를 통해 한국이 얻을 수 있는 시사점이 무엇인지 찾아내는 것이다. 우선, 국가별 온실가스 배출량을 비교하기 위해 최종소비 항목별 유발 배출량을 분석하여 수출수요에 의해 유발된 온실가스 배출량과 국내 소비 배출량을 비교한다. 특히, 산업별로 배출량을 확인하여 향후 탄소배출량 감축전략 계획 시 이를 고려할 수 있도록 한다. 우리나라는 2021년 기준 GDP 대비 제조업 비중이 25%로 OECD 국가 중 아일랜드 다음으로 높은 국가이다. 따라서 무역 의존도가 높은 우리나라의 특성상 제조업 수출은 중요한 부분이다. 그러나 제조업 수출 상품의 대부분은 탄소 집약적 상품들이 다수 존재하며, 앞으로 탄소중립을 달성하기 위해서라도 산업별 배출량 분석은 중요한 연구 중 하나이다.

3. 선행연구

환경 문제가 지속되고 이에 따라 선진국을 중심으로 환경규제가 높아짐에 따라 배출

규제가 높은 국가의 기업들이 배출 규제가 낮은 국가로 이전해 탄소배출량을 근본적으로 줄이는 것이 아니라 회피하는 현상이 나타나고 있다. 그동안 세계적으로 탄소누출과 관련하여 여러 연구들이 진행된 바 있다. 탄소누출(carbon leakage)과 관련한 선행연구들은 장단기 분석, 산업별 분석 등이 존재한다. 탄소누출은 탄소 가격으로 인해 국내 제품의 비용이 상승해 탄소 가격을 부과하지 않는 국가에서 수입하는 제품으로 수요가 이동하는 현상이다. 즉, 온실가스 규제의 시행으로 유발된 규제지역에서 비제약 국가 및 부문으로의 배출량 증가분이 온실가스 규제지역에서 규제정책의 시행으로 유발된 배출량 감소분보다 크면 탄소누출이 발생된 것으로 본다. 따라서 탄소누출 비율이 높을 경우 어떠한 국가 내에서의 감축이 다른 국가나 지역의 배출량 증가로 이어질 수 있기 때문에 전 세계적으로 기후 정책의 효과가 감소될 수 있다.

탄소누출에 대해 다루어진 문헌으로는 오인하(2012), Demailly and Quirion(2008a, 2008b), Ponssard and Walkr(2008), Qin et al.(2021) 등이 존재한다. 오인하(2012)에 따르면, 탄소누출과 관련하여 함께 논의되는 두 가지 문제점이 있는데 하나는 선진국의 국가들이 주장하는 탄소누출에 대응하기 위한 탄소국경조정조치(carbon boarder adjustment measure)가 있으며, 다른 하나의 이슈는 배출의 책임을 제품의 소비지역도 책임이 있다는 소비지역관점의 탄소회계(consumption-based carbon accounting)이다. 국경 조치는 현재 유럽연합(EU)이 실시할 예정인 탄소국경조정메커니즘(carbon border adjustment mechanism, CBAM)이 있지만 탄소회계 관련 정책은 상대적으로 적극적인 조치가 취해지고 있지 않다.

탄소국경조정제도(CBAM)는 철강, 시멘트, 알루미늄, 비료 및 전기품목을 대상으로 하며, 적용국가로는 EU로 대상 품목을 수출하는 역외국이다. 또한, 생산시설 내에서 발생하는 탄소 직접 배출량(direct emissions)을 과세대상으로 한다. 수입업자가 수입할 때 제품의 배출량 1톤당 탄소인증서 1개를 구매하여 제출토록 의무화하고 EU ETS와 연계 시행하여, 배출권 가격과 CBAM 인증서(certificat) 가격을 연동하는 형태로 운영한다 (EU ETS 배출권 경매 증가의 주당 평균 가격을 적용). EU CBAM 안에 따르면 ‘내포된 탄소배출량’에는 수입 상품 그 자체의 생산 공정 중에 발생된 배출량뿐만 아니라, 업스트림 생산물(upstream products)의 생산 공정상에서 발생된 배출량까지도 포함된다. 즉, 해당 상품의 생산을 위해 특정 배출량이 내포된 원자재가 사용되었다면, 이 같은 원자재

의 생산 과정 및 채굴에서 발생하는 탄소까지도 포함한다는 것이다. 예컨대, 제조업 비중이 높은 우리나라의 경우 철광석이라는 원자재를 사용 및 처리하여 제품을 생산하는 특정 철강제품의 생산공정뿐만 아니라 당해연도 철강기업이 실제로 배출에 무관한 업스트림 과정(철광석의 채굴 등)에서 발생된 탄소배출량까지 당해 철강제품의 탄소배출량에 포함된다. 이와 같이 적용 범위가 업스트림 생산공정으로 확대됨에 따라 EU에 CBAM 해당품목을 수출하는 국내기업들은 탄소가격이 증가함에 따라 비용상승에 대한 압박을 받게 될 것이고 이는 다시 CBAM으로부터 직접적인 적용을 받지 않는 업스트림 분야까지 부작용으로 작용할 가능성이 높다.

그러나 CBAM은 탄소누출의 근본적인 문제를 해결하지 못한다. 왜냐하면 CBAM은 유럽국가들이 자국 산업보호를 위해 담합문제를 야기할 가능성이 존재하기 때문이다. 또한, EU의 수입품에 관세를 부과한다면 보호무역의 우려가 제기될 가능성도 있다.

오인하(2012)는 소비관점의 탄소회계를 중심으로 우리나라 및 G20 주요국을 관찰한 결과를 다음과 같이 요약했다. 한국은 호주/뉴질랜드, 브라질, 아르헨티나, 일본, 러시아, 중동국가, 남아공, 인도네시아 등 중위소득국가들과 교역할 때 제품에 내재된 탄소를 수입하고 프랑스, 이탈리아, 캐나다, 멕시코, 영국, 미국, 독일, 인도, 터키 등 기타유럽 국가들과 교역 시 제품에 탄소를 내재화하여 수출하는 것으로 분석되었다. 2001년에 우리나라는 중국과의 무역 시 탄소수지가 흑자로 제품에 내재된 탄소를 수출하는 국가였으나 2004년에는 탄소수지가 적자로 역전되었다. G20 국가의 경우, 러시아, 중국, 중동국가 등 개도국이 탄소수지 흑자를 기록했지만 OECD 국가들은 탄소수지가 적자인 것으로 분석되었다. OECD 국가들은 비OECD 국가와의 교역에서 탄소수지 적자의 대부분이 발생하고 있다는 것을 알 수 있었다. 2004년 우리나라는 소폭의 탄소수지 적자(2.7백만 톤CO₂)를 기록했다. 비록 소폭이지만 이러한 제품에 내재된 탄소의 무역행태는 선진국과 우리나라가 무역 시 제품에 내재된 탄소를 수입하는 국가가 된 것을 뜻한다. 탄소수지는 총수입이 총수출보다 많다면 음의 결과가 도출되며 총수출이 총수입보다 많은 경우 반대로 양의 결과가 도출된다.

소비기반 배출량에 대해 다루어진 국내문헌은 많지는 않은 수준이며, 거의 특정시점에서 분석된 연구들이고, 한국은 소비기반 배출량이 높다는 결론을 내린다(오인하, 2012; 신동천, 2013; 신동천 외, 2015). 오인하(2012)는 MRIO, CGE를 활용하여 2004년

을 분석한 결과 한국은 탄소수입국이라는 것을 밝혔다. 신동천(2013)은 MRIO, EEBT를 활용하여 2007년을 대상으로 한국은 탄소 수입국이지만, 소비기반 배출량과 생산기반 배출량의 차이가 적다는 결론을 내렸다. 그리고 신동천 외(2015) 또한 MRIO를 활용하여 2007년 한국을 다시 분석했다. 한국은 수출재를 생산할 때, 외국으로부터 수입해 온 중간재를 투입하는 비중이 크므로 수출에 포함된 외국의 탄소배출 비중이 주요 교역 대상국들에 비해 높았다. 참고로 비슷한 방법을 사용하여 문승운(2020)은 소비기반 미세먼지 배출량을 분석하였고, 한국과 일본이 자국의 소비를 위한 재화를 중국에서 대부분 생산하여 중국에서 미세먼지가 다량으로 배출됐다는 결론을 내렸다.

소비기반 배출량에 관한 해외 연구들은 다수 존재한다. Subak(1995)은 소비기반 메탄 배출량에 대해 분석을 실시했다. 1990년대를 기점으로 UN의 양자 무역 자료를 사용하여 미국, 영국, 독일, 일본, 프랑스, 캐나다의 메탄집약적 재화인 농산물(쌀, 옥류, 유제품)교역에 포함된 메탄 배출량을 분석했다. 그 결과, 영국은 메탄이 포함된 제품의 최대 수입국이었으며, 개발도상국의 가축생산이 경쟁력을 갖출수록 메탄이 포함된 제품이 증가할 수 있음을 밝혔다.

Lenzen et al.(2004)는 1997년 단일지역 투입산출표와 MRIO를 사용하여 무역에 포함된 CO₂ 배출량의 현실적 수치와 각국에 대한 책임 비중을 소비자 책임에 기초하여 찾기 위해서는 교역상대국의 생산방식, 에너지 사용구조, CO₂ 배출량을 명시적으로 고려해야 한다고 주장했다. Davis and Calderia(2010)은 MRIO를 활용하여 2004년을 분석했다. 그 결과, 오스트리아, 스위스, 스웨덴, 영국, 프랑스는 소비기반 배출량의 30% 이상을 수입했으며, 미국은 전 세계 소비기반 배출량의 약 10.8%를 차지했다. 이와 반대로, 중국은 생산된 배출량의 22.5%를 전 세계 소비국에게 수출했다. 결론적으로 소비기반 배출량 산정방법론을 통해 탄소누출이 발생하고 있다는 것을 증명했다.

Peters et al.(2012)는 EEBT와 MRIO를 사용하여 2004년을 전 세계 무역데이터를 참고하여 분석을 실시했다. 무역에 포함된 CO₂ 배출량은 석유제품의 경우 석유제품 생산량의 50%를 차지했으며(183Mt), 무역에 포함된 CO₂ 배출량은 가축제품의 경우 총 가축제품 탄소배출량의 22%를 차지했다(28Mt). 어느 기관의 데이터를 사용하는지에 따라 소비기반 배출량의 결과는 상이하지만 공통적으로 비슷한 추세와 결과를 보임으로써 모든 분석 결과에서 개도국의 무역흐름을 볼 때 탄소집약적인 상품들이 급격하게 증가

하는 현상을 보임을 제시하였다.

Fernandez-Amador et al.(2016)는 MRIO를 활용하여 1997, 2001, 2004, 2007, 2011년 스위스의 소비기반 탄소배출량을 계산했다. 모든 연도에서 스위스의 무역에 포함된 온실가스는 이입량 60Mt, 이출량 10Mt으로 이입량이 6배 많은 것으로 나타났다. 스위스의 이출입에서 가장 큰 비중을 차지하는 국가는 호주로 이입량의 30%, 이출량의 40%를 차지했다. Z. Mi et al.(2016)는 단일지역 투입산출모형을 활용하여 2007년 중국 13개 도시의 소비기반 배출량을 계산했다. 생산기반 배출량이 높았던 도시는 사회경제적 발전을 통해 소비기반 배출량이 높아지는 도시로 변하는 경향이 존재했다는 점을 밝혀냈다.

Rocco et al.(2020)는 MRIO의 확장모형인 WTMBT(world trade model with bilateral trades)를 활용하여 2007년 시점을 분석했다. WTMBT는 교역이나 무역 운송에 소요되는 수송 비용 등을 추가로 반영한다. 분석 결과를 보면 소비기반 배출량으로 탄소예산정책(온실가스 40% 감소)을 고려할 경우 EU는 약 1.2Gton을 줄여야 한다는 결과를 도출했다. 반면, 생산기반 배출량으로는 오히려 0.8Gt를 늘려도 된다는 결론을 이끌어 냈다. 그 결과, 소비기반 탄소회계 방법으로 정책을 세운다면 탄소누출 문제를 피하면서 온실가스감축 정책을 효과적으로 세울 수 있다는 시사점을 제공했다.

II. 자료 및 연구방법

1. 자료 및 변수 설명

본 연구에서는 Eora 다지역 산업연관표 자료를 사용하여 소비기반 배출량을 산정한다. Eora는 시드니 대학의 물리학 학교의 ISA(integrated sustainability analysis) 그룹에 의해 개발되었다.³⁾ Lenzen et al.(2013)은 Eora가 자료를 구성함에 있어서 원시자료를 최대한 활용하는 것을 목표로 함을 밝힌다. 따라서 SRIO(단일지역 투입산출) 자료의 경우 각국의 통계청에서 제공되는 자료 또는 Eurostat, 아시아경제연구소(IDE)-일본무역진흥기구(JETRO), OECD에서 제공되는 자료를 사용한다고 밝히고 있으며, 이러한 방식으로 74개의 국가에 대한 자료가 수집된다고 언급했다.

3) Owen A. (2017)

그리고 투입산출표가 없는 국가의 경우 대용 투입산출표(proxy IO table)를 사용한다. 이 대용 투입산출표는 호주, 일본 및 미국의 투입산출표 양식구조의 평균을 기반으로 하면서 국가별 거시 계량 경제 데이터를 사용하여 작성된다(Lenzen et al., 2012). 양자 무역 자료는 UN Comtrade 및 UN Service Trade에서 제공되는 자료로 구성된다.

Eora는 투입산출표의 연장작업을 시행할 때, KRAS(Lenzen et al., 2009)라는 기법을 사용한다. 그리고 통화의 경우 각국에서 사용하는 통화가 다르기 때문에 이들을 반드시 서로 통일시켜야 하는데, Eora는 이러한 문제를 IMF의 자료를 사용하여 미국달러로 통일하여 해결한다(Lenzen et al., 2013).⁴⁾

Eora는 배출량 할당 방식이 영토원칙(territorial principle)이며, PRIMAP에서 제공되는 자료를 사용하고, PRIMAP 자료는 유럽연합 산하의 EDGAR(emissions database for global atmospheric research, 지구 대기 연구를 위한 배출 데이터베이스)의 자료와 Andrew(2018)의 시멘트 데이터, UNFCCC 자료 등을 사용하여 자료 간의 충돌을 해결하는 방법을 사용한다고 알려진다.

참고로 배출량 할당 방식은 영토원칙과 거주원칙(residence principle) 두 가지가 존재하며, 영토원칙은 말 그대로 영토에서 그대로 배출되는 온실가스를 해당 국가에 할당하는 방식이며, 거주원칙은 영토기준이 아닌, 산업 및 가계의 경제활동을 기준으로 온실가스를 해당 국가에 할당하는 방식이다. 예를 들어 A국의 사람이 B국에서 배출한 온실가스는 영토원칙으로 보면 B국의 배출량에 해당되며, 거주원칙으로 보면 A국의 배출량에 해당한다. 참고로 교토의정서는 영토원칙을 따른다. 다른 용어로 구분하자면, 영토원칙은 배출 인벤토리(emission inventories), 거주원칙은 배출 계정(emission accounts)이다.⁵⁾

Eora의 산업부문은 26가지이며, 이 중 재수출-재수입 영역을 제외한 나머지 25개의 산업부문은 국제표준산업분류 3차 개정(ISIC Rev.3)을 따른다. 본 연구에서는 국제표준산업분류를 참고하며 이를 번역하는 과정에서 한국표준산업분류 10차에서 사용하는 명칭을 참고하였다. Eora에서 분류하는 산업부문을 정리하면 <표 1>과 같다.

4) 그러나 이러한 방법도, 달러대비 자국화폐단위의 환율이 급격하게 변동하는 경우 온실가스 배출량이 급격히 변동하는 현상이 나타난다는 단점을 가지고 있다.

5) Usubiaga and Acosta-Fernández (2015)

〈표 1〉 Eora의 산업분류와 그에 대응하는 국제표준산업분류 비교

Eora 산업분류		국제표준산업분류 비교
Agriculture	농업, 임업	1, 2
Fishing	어업	5
Mining and quarrying	광업	10, 11, 12, 13, 14
Food and beverages	식료품 및 음료 제조업	15, 16
Textiles and wearing apparel	섬유제품 및 의복 제조업	17, 18, 19
Wood and paper	목재 및 종이제품 제조업	20, 21, 22
Petroleum, chemical and non-metallic mineral products	석유, 화학 및 비금속 광물 제품 제조업	23, 24, 25, 26
Metal products	금속 제품 제조업	27, 28
Electrical and machinery	전기 및 기계장비 제조업	29, 30, 31, 32, 33
Transport equipment	운송 장비 제조업	34, 35
Other manufacturing	기타 제조업	36
Recycling	재생용 재료 수집 및 판매업	37
Electricity, gas and water	전기, 가스 및 수도 공급업	40, 41
Construction	건설업	45
Maintenance and repair	유지관리 및 수리업	50
Wholesale trade	도매업	51
Retail trade	소매업	52
Hotels and restaurants	숙박 및 음식점업	55
Transport	운수업	60, 61, 62, 63
Post and telecommunications	우편 및 통신업	64
Financial intermediation and business activities	금융 중개 및 사업서비스업	65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74
Public administration	공공행정	75
Education, health and other services	교육, 보건 및 기타 서비스	80, 85, 90, 91, 92, 93
Private households	가구 내 고용활동	95
Other	기타	99

여기서 제조업은 식료품 및 음료 제조업부터 재생용 재료 수집 및 판매업까지를 포함한다. 그리고 금융 중개 및 사업서비스업은 장비 대여, 데이터 처리, 연구 및 실험개발 등이 포함되어 있어서 배출량이 다른 부문에 비해 비교적 높게 산정되는 경향이 있다.

2. 모형 설정

일반적으로 소비기반 온실가스 배출량을 계산하는 방법 중 레온티에프의 산업연관표를 주로 사용하게 되며, 이 연구에서도 이와 같은 방법을 사용한다. 투입산출표에서 투입계수행렬을 먼저 계산하기 위해 중간재를 총생산량으로 나누는 연산을 한다.

중간재 행렬은 Z 로 나타나며, 총생산량 벡터는 X 로 표시한다. 총생산량 벡터 X 의 성분을 주대각선 방향으로 나열한 행렬을 \hat{X} 라 하자. 투입계수행렬 A 는 다음과 같이 계산된다.

$$Z\hat{X}^{-1} = A$$

그리고 최종수요벡터를 Y 라고 하자. 총산출량과 투입계수행렬, 최종수요벡터는 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$X = Z + Y = AX + Y$$

이 식을 X 를 좌변으로 하여 정리하면 아래와 같이 변형할 수 있다.

$$X = (I - A)^{-1}Y$$

생산기반 온실가스 배출량은 각 산업별 탄소배출강도계수를 계산한 다음 위의 식에 곱해주면 계산할 수 있다. 엄밀히 말하면, 생산기반 배출량은 이미 자료를 통해 얻을 수 있으나, 소비기반 온실가스 배출량을 계산하기 위해서는 레온티에프의 투입산출모형으로 생산기반 온실가스 배출량을 산정해야만 한다.

온실가스 배출량 수준을 Em 이라 하자. Em 은 PRIMAP 배출량 데이터베이스의 HISTCR 시나리오에서 가져온 값이다. 이 값은 LULUFC(산림흡수원)⁶⁾를 제외한 GgCO₂eq KYOTO GHGs단위의 배출량이다. 이를 간단하게 KtCO₂eq로 표현할 수 있으며, 본 연구에서는 MtCO₂eq로 단위를 통일한다.

화석 연료 연소 및 시멘트 생산으로 인한 배출은 최종 수요가 배출과 관련된 생산을 유

6) 산림흡수원은 온실가스를 자연에서 흡수하는 양을 의미한다.

발시킨 국가로 재귀속된다. 항공 및 해상 병커 연료의 배출량은 소비기반 배출량 인벤토리에 포함되지 않는다. 병커 연료의 배출량을 연료가 병커링된 국가 이외의 국가에 할당하는 방법이 아직 개발되지 않았기 때문이다,

먼저 탄소배출강도계수 ef 를 구하기 위해서는 온실가스 배출량을 해당 산업의 총생산량(화폐단위)으로 나누어야 한다. 즉 1번 국가의 3번 산업의 탄소배출강도계수는 다음과 같이 계산한다.

$$ef_{1,3} = Em_{1,3}/x_{1,3}$$

이제 ef 를 국가별로, 산업별로 각각 계산하여 주대각성분으로 나열하여 대각행렬 EF 를 계산한다. 여기서 하첨자인 i 는 국가를 의미하고, j 는 산업을 의미한다. Eora자료를 사용한다면, i 는 1에서 190까지의 값을 가지고, j 는 1에서 26까지의 값을 가지게 된다.

$$EF = \begin{bmatrix} ef_{1,1} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & ef_{i,j} & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & ef_{N,K} \end{bmatrix}$$

이렇게 계산된 행렬 EF 를 위에서 계산한 레온티에프 투입산출식에 곱하면, 생산기반 배출량을 레온티에프 투입산출모형을 통해 다시 보일 수 있는 것이다. 온실가스 배출량 행렬을 CC 라 하면, 다음이 성립한다.

$$CC = EF \cdot (I - A)^{-1} Y$$

이와 같이 계산된 행렬에서 하나의 행을 모두 더하면 산업별 생산기반 배출량이 계산되는 것이고, 하나의 열을 모두 더하면 해당 국가의 소비기반 배출량이 된다. 해당 열에서 특정 산업만의 배출량을 추출할 경우 산업별 소비기반 배출량을 계산할 수 있다.

또한 Eora 자료를 통해 계산된 한국의 생산기반 배출량을 환경부 국가 온실가스 인벤토리에서 제공하는 배출량의 증가율과 비교한 결과 2019년부터 증가율의 차이가 3%이상 차이가 나므로 2019년부터 2021년까지의 온실가스 배출량 행렬을 조정한다. 증가율

은 환경부 자료와 일치하도록 하여 생산기반 배출량의 총량을 조정한다. 그리고 산업부 문별 생산기반 배출량은 2019년의 경우 2016년부터 2018년까지 3개년의 비중을 평균 내어 계산한 후, 그 비중에 맞게 산업별 생산기반 배출량을 구한다. 2020년의 경우에는 2017년부터 2019년까지의 비중을 평균 내어 계산한 후, 그 비중에 맞게 산업별 생산기반 배출량을 계산한다.

이에 더하여 온실가스 배출량 행렬에서, 한국에서 생산하여 전 세계로 배출하는 성분들을 국가별로 3개년씩 비중을 평균 내어 구한 후, 이 비중을 각 산업의 배출량과 곱하여 조정한다.

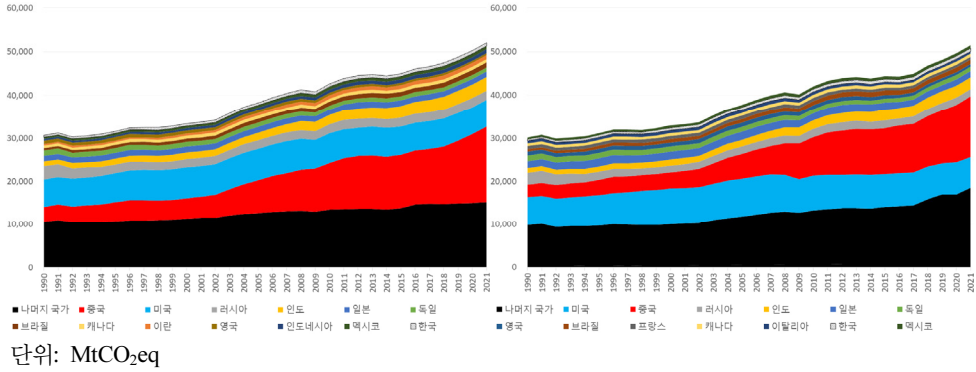
그리고 한국의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량의 차이인 탄소순수출량은 관세청에서 공개하는 무역수지와 상관도가 0.91로 매우 높은 수준이다. 이를 참고하여 2019년부터 2021년까지의 탄소순수출량을 무역수지의 증가율과 일치하도록 조정한다.

III. 추정 결과

1990년부터 2021년까지 전 세계의 생산기반 및 소비기반 온실가스 배출량을 그래프로 나타내면 다음<그림 1>과 같다. 1990년부터 2021년까지 누적 생산기반 배출량을 기준으로 1위인 국가는 중국이며, 2위는 미국이고 3위는 러시아이다. 한국은 15위에 해당한다. 2021년 기준으로 생산기반 배출량에서 1위는 중국이며, 2위는 미국이고, 3위는 인도이다. 한국은 13위를 기록하였다.

반대로 소비기반 배출량에서는 누적기준으로 1위가 미국, 2위가 중국, 3위가 러시아이며 한국은 13위를 기록했다. 2021년 기준으로는 중국이 1위, 미국이 2위, 인도가 3위를 하고 한국이 13위를 하였다. 생산기반과 소비기반 배출량이 둘 다 높은 중국은 각각 2021년을 기준으로 17.5GtCO₂eq의 생산기반 배출량과 14.1GtCO₂eq의 소비기반 배출량을 발생시키게 되어, 생산기반 배출량은 전 세계 배출량의 34%를 차지하고, 소비기반 배출량은 전체의 24%를 차지한다. 미국은 각각 6.2GtCO₂eq의 생산기반 배출량과 7.1GtCO₂eq의 소비기반 배출량을 발생시켜, 생산기반 배출량은 전체 배출량 중 11%, 소비기반 배출량은 전 세계에서 14%를 차지하게 된다.

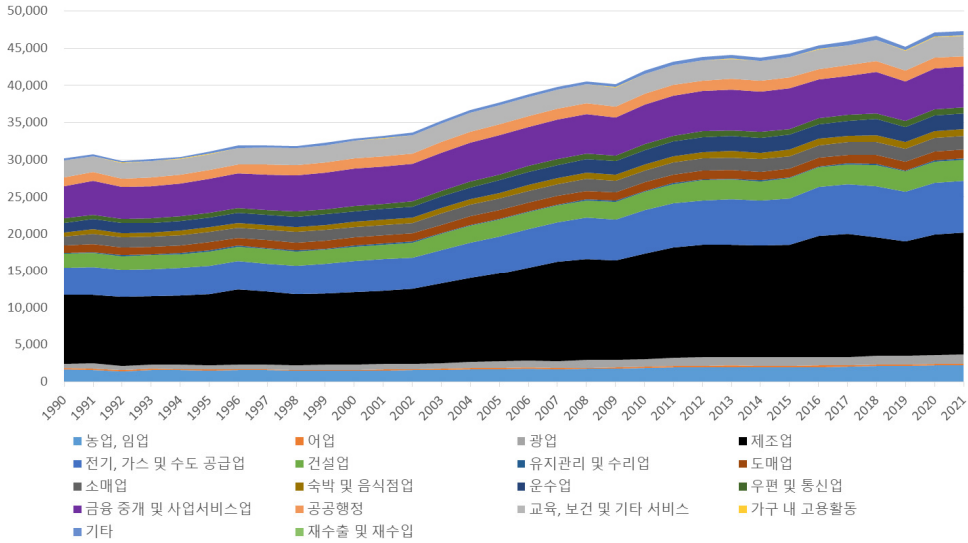
<그림 1> 국가별 생산 및 소비기반 배출량



그리고 전 세계 산업별 배출량을 확인할 때에는 생산기반과 소비기반을 따로 구분하지 않는다. 전 세계를 하나의 국가로 보면, 모든 무역은 내수거래가 되기 때문이다. 분석 기간 동안의 누적 배출량을 기준으로 <그림 2>에서 살펴보면, 전 세계 온실가스 배출량 중에서 가장 배출이 많이 이루어지고 있는 산업부문은 전기, 가스 및 수도 공급업이고, 그 수준은 164,618MtCO₂eq이며 전체 배출량 중 14%를 차지한다. 2위는 금융 중개 및 사업서비스업이며 그 수준은 161,729MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 13%를 차지한다. 3위는 석유, 화학 및 비금속 광물 제품 제조업이며 그 수준은 95,217MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 8%를 차지한다. 4위는 전기 및 기계장비 제조업이며 그 수준은 86,268MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 7%를 차지한다. 5위는 교육, 보건 및 기타 서비스이며 79,489MtCO₂eq 수준이고, 전체 배출량 중 7%를 차지한다.

2021년을 기준으로 살펴보면, 전 세계 온실가스 배출량 중에서 가장 배출이 많이 이루어지고 있는 산업부문은 전기, 가스 및 수도 공급업이고, 그 수준은 6,938MtCO₂eq이며 전체 배출량 중 15%를 차지한다. 2위는 금융 중개 및 사업서비스업이며 그 수준은 5,417MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 11%를 차지한다. 3위는 석유, 화학 및 비금속 광물 제품 제조업이며 그 수준은 4,053MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 9%를 차지한다. 4위는 전기 및 기계장비 제조업이며 그 수준은 3,766MtCO₂eq이고, 전체 배출량 중 8%를 차지한다. 5위는 건설업이며 2,855MtCO₂eq의 수준이고, 전체 배출량 중 6%를 차지한다.

<그림 2> 산업별 생산 및 소비기반 배출량



단위: MtCO₂eq

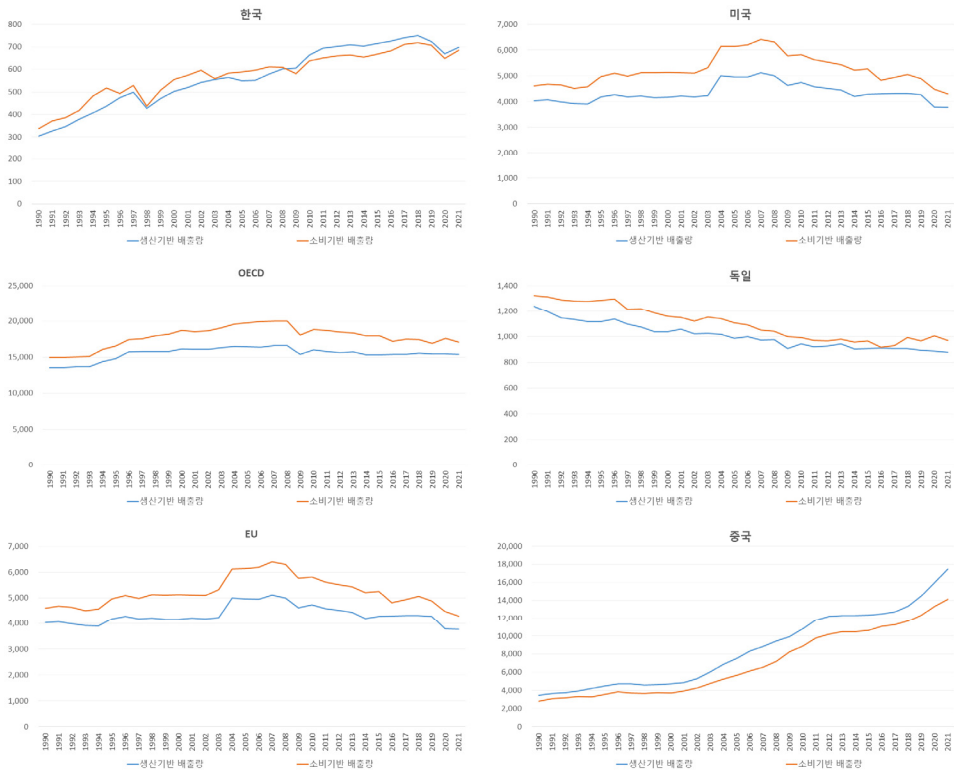
한국을 비롯한 미국, 중국, 독일, EU, OECD 등 주요국들의 온실가스 배출량 시계열은 <그림 3>과 같다. EU와 OECD의 경우 가입국과 탈퇴국을 고려하여 배출량을 산정한 것이다. 예를 들어 EU의 경우 영국은 1937년 1월부터 2021년 1월 까지 EU에 속하였기 때문에, 분석기간 중 1990년부터 2019년까지의 영국의 온실가스 배출량은 EU의 온실가스 배출량에 속하고, 2020년, 2021년의 영국의 온실가스 배출량은 EU의 온실가스 배출량에 포함되지 않는다.

온실가스 배출량의 추세를 살펴보면, 한국과 중국은 점점 증가하는 추세이며, 한국의 경우에는 2008년 금융위기 이전까지 소비기반 배출량이 높았지만, 그 이후로는 생산기반 배출량이 상대적으로 더 높아졌음을 확인할 수 있다. 그 이유는 한국의 제조업지수에서 찾아볼 수 있다. <그림 4>를 보면 생산기반 배출량이 금융위기 직후 급격히 상승하였음을 확인할 수 있다. 다만 2018년 이후로 추세가 달라지는 이유는 온실가스 배출권거래제의 2차 계획기간이 2018년부터 시작되었기 때문이며, 2차에서는 거래제의 범위가 확대되고, 배출량 보고 및 검증 등 각종 기준이 고도화되었기 때문이다.⁷⁾ 한국의 경우 이미 소비기반 배출량이 생산기반 배출량에 낮은 상태로 수출기반의 제조업의 결과이다. 한

국의 수출은 해외 소비자들이 소비한다는 점에서 전 세계 배출량을 줄이기 위해서는 소비적인 측면을 더욱 면밀히 연구해야 함을 의미한다.

그리고 미국, EU, OECD의 경우 2008년 금융위기까지 온실가스 배출량이 증가하고, 그 이후로는 감소하는 추세를 확인할 수 있으며, 모두 소비기반 배출량이 생산기반 배출량보다 상대적으로 더 높다는 것을 확인할 수 있다. 독일은 분석기간 전반적으로 온실가스 배출량이 감소하고 있다.

〈그림 3〉 주요국의 생산 및 소비기반 배출량

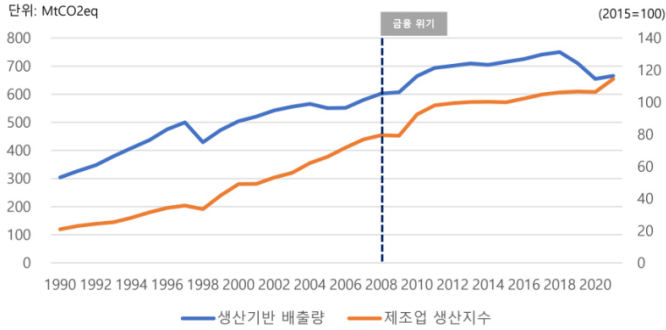


단위: MtCO₂eq

7) 한국환경공단, <https://www.keco.or.kr/>

생산기반 온실가스 배출량 vs 소비기반 온실가스 배출량

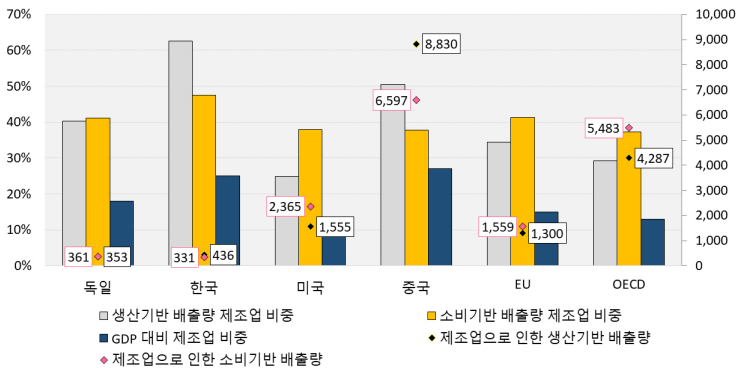
<그림 4> 한국의 생산기반 배출량과 제조업 생산지수



자료: 통계청

<그림 5>에서는 2021년을 기준으로 온실가스 배출량 중 제조업 부문의 비중, GDP 대비 제조업 부문의 비중 및 제조업으로 인한 온실가스 배출량이 나타나 있다. 독일은 2021년 제조업 부문에서 한국보다 생산기반 온실가스 배출을 적게 배출하고 있지만 소비기반 배출량은 높게 배출하고 있음을 확인할 수 있다. 중국은 제조업 부문에서 상대적으로 생산기반 배출량이 높지만, 소비기반 배출량 역시 매우 높은 수준이므로, 만약 소비기반을 기준으로 한 비용부담 정책이 이루어진다면 하더라도 중국은 큰 비용부담을 질 수 있는 상황이다.

<그림 5> 전체 배출량과 GDP 대비 제조업의 비중 및 제조업 배출량



주: 우측 축은 제조업으로 인한 온실가스 배출량에 대한 것으로, 단위는 MtCO2eq이다.
 자료: World Bank

이러한 점을 미루어 보았을 때, 한국 역시 자국의 소비기반 배출량이 생산기반 배출량보다 적다는 점에서, CBAM에 의해 생산기반에 대한 책임을 한국과 같은 생산국만의 책임이 아니라, 장기적으로는 소비기반이 높은 유럽과 미국의 선진국 소비자들이 배출량 감소에 대한 목표의식을 가져야 한다는 시사점을 얻을 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 통상적으로 온실가스 배출량을 나타내는 말인, 영토를 기준으로 하는 생산기반 배출량과 최종수요를 고려한 소비기반 배출량을 Eora자료를 사용하여 각각 구함으로써 온실가스 배출량의 이동을 확인하였다.

특히 본 연구는 한국의 온실가스 배출량에 대하여 장기적인 시계열분석을 하고, 여러 국가와 지역과의 교역을 고려한 배출 이전량을 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 일반적으로 한국에 대한 소비기반 배출량에 대한 연구는 특정 시점에 대하여 연구되어 왔으며, 한 번에 여러 국가와 비교하는 문헌은 적은 편이었다. 본 연구에서는 미국, 중국, 독일, OECD, EU 등의 주요 국가와 지역과의 산업부문별 배출이전량을 통해 각 국가별로 어떤 특성을 가지고 있는지 확인하였다.

종합적으로 살펴보았을 때, 미국, 독일, EU, OECD 등에서 생산기반 배출량과 소비기반 배출량이 점점 감소되는 것을 보면 한국 역시 소비기반 온실가스 저감계획을 수립하는 것이 필요하다는 시사점을 얻을 수 있다. 다만, 이러한 다른 선진국들과 달리 한국은 육로를 통한 에너지 교역이 불가능하기 때문에 재생에너지로의 전환이 이에 대한 해법이 되는 것이 어려울 수 있으므로 한국만의 특징을 고려한 온실가스 저감계획을 수립하는 것이 타당하다고 말할 수 있다.

만약 소비기반을 기준으로 한 비용부담 정책이 이루어진다면 하더라도, 중국의 경우에는 생산기반 배출량이 소비기반 배출량보다 높아서 혜택을 받는 부분이 일부 존재할 수 있지만, 생산기반 및 소비기반 배출량이 둘 다 매우 높은 수준이기 때문에 이에 대한 책임은 회피할 수 없을 것이다. 또한 한국의 경우는 소비기반 배출량이 이미 생산기반 배출량보다 낮은 상황으로 선진국에 대한 수출이 주된 배출량의 원인임을 알 수 있다. 다만 중국처럼 생산기반 배출량이 소비기반 배출량보다 높다는 현실에 대하여 글로벌 감축

의무가 없어지는 것이 아니기 때문에 더욱 저감에도 노력하면서 EU의 탄소국경조정에 대비하고 산업경쟁력도 유지하는 동시 목표를 달성하기 위해 노력해야 한다.

또한 러시아의 우크라이나 침공으로 인하여 현 시점에서는 유럽을 포함하여 각국에서 NDC 목표를 달성하기 힘들어질 것이라는 예상을 할 수 있다. 온실가스 저감목표를 이루는 것에 있어 경제적인 요건 등이 더욱 강화되었기 때문이다. 이러한 상황에서 EU CBAM에 대응하고 향후 미국 등의 IRA(inflation reduction act)와 친환경 무역규제에 적절한 대응책을 찾아야 할 것이다.

[References]

관세청, Accessed 2022.09.30., <https://www.customs.go.kr>

문승운, “동북아시아 미세먼지의 생산기반 배출량과 소비기반 배출량의 비교: 한국, 중국, 일본을 대상으로”, 「국토연구」, 2020, pp. 31~47.

신동천, “국제무역에 함유된 탄소이력 (carbon footprint) 의 측정과 분석: MRIO 모형의 응용”, 「자원·환경경제연구」, 제22권 제1호, 2013, pp. 31~52.

신동천·이혁·김용균, “한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬 (carbon chain): 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석”, 「자원·환경경제연구」, 제24권 제1호, 2015, pp. 141~164.

오인하, “배출규제가 탄소누출에 미치는 영향 분석 및 전망: 소비 관점의 탄소회계와 국경조치의 영향을 중심으로”, 「자원·환경경제연구」, 제21권 제4호, 2012, pp. 851~891.

통계청, Accessed 2022.09.30., <https://kostat.go.kr>

Andrew, R. M., “Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data,” Vol. 10, No. 1, 2018, pp. 195~217.

Balogh, J. M., and A. J̄mbor, “Determinants of CO₂ emission: A global evidence,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol. 7, No. 5, 2017, pp. 217~226.

Davis, S. J., and K. Calderia, “Consumption-based Accounting of CO₂ Emissions,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, No. 12, 2010, pp. 5687~5692.

Demilly, D., and P. Quirion, “European Emission Trading Scheme and competitiveness: A case

- study on the iron and steel industry,” *Energy Economics*, Elsevier, Vol. 30, No. 4, 2008a, pp. 2009~2027.
- Demaiily, D., and P. Quirion, “Leakage from climate policies and border tax adjustment: lessons from a geographic model of the cement industry,” *The Design of Climate Policy*, 2008b, pp. 333~358.
- Fernandez-Amador, O., J. F. Francois, and P. Tomberger, “MRIO linkages and Switzerland's CO₂ profile,” *Aussenwirtschaft*, Vol. 67, No. 3, 2016, pp. 47~63.
- Hanif, I., S. M. F. Raza, P. Gago-de-Santos, and Q. Abbas, “Fossil fuels, foreign direct investment, and economic growth have triggered CO₂ emissions in emerging Asian economies: some empirical evidence,” *Energy*, Vol. 171, 2019, pp. 493~501.
- Lenzen, M., B. Gallego, and R. Wood., “Matrix Balancing under Conflicting Information,” *Economic Systems Research*, Vol. 21, No. 1, 2009, pp. 23~44.
- Lenzen, M., C. Dey, and B. Foran, “Energy requirements of Sydney households,” *Ecological Economics*, Vol. 49, No. 3, 2004, pp. 375~399.
- Lenzen, M., D. Moran, K. Kanemoto, and A. Geschke, “Building Eora: A Global Multi-regional Input-Output Database at High Country and Sector Resolution,” *Economic Systems Research*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 20~49.
- Lenzen, M., K. Kanemoto, D. Moran, and A. Geschke, “Mapping the structure of the world economy,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 46, No. 15, 2012, pp. 8374~8381.
- Mi, Z., Y. Zhang, D. Guan, Y. Shan, Z. Liu, R. Cong, X. C. Yuan, and Y. M. Wei, “Consumption-based emission accounting for Chinese cities,” *Applied Energy*, Vol. 184, 2016, pp. 1073~1081.
- Muhammad, S., and X. Long, “Rule of law and CO₂ emissions: a comparative analysis across 65 belt and road initiative (BRI) countries,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 279, 2021, p. 123539.
- NET ZERO TRACKER, Accessed 2022.09.30., <https://zerotracker.net/>
- Owen, A., “Techniques for evaluating the differences in consumptionbased accounts - A comparative evaluation of Eora, GTAP and WIOD,” *The University of Leeds*, 2017.
- Peters, G. P., S. J. Davis, and R. Andrew, “A synthesis of carbon in international trade,” *Biogeosciences*, Vol. 9, No. 8, 2012, pp. 3247~3276.
- Ponssard, J. P., and N. Walker, “EU emissions trading and the cement sector: a spatial competition

- analysis,” *Climate Policy*, Vol. 8, No. 5, 2008, pp. 467~493.
- Purcel, A. A., “Does political stability hinder pollution? Evidence from developing states,” *Economic Research Guardian*, Vol. 9, No. 2, 2019, pp. 75~98.
- Qin, L., M. Y. Malik, K. Latif, Z. Khan, A. W. Siddiqui, and S. Ali, “The salience of carbon leakage for climate action planning: Evidence from the next eleven countries,” *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 27, 2021, pp. 1064~1076.
- Rocco, M. V., N. Golinucci, S. M. Ronco, and E. Colombo, “Fighting carbon leakage through consumption-based carbon emissions policies: empirical analysis based on the world trade model with bilateral trades,” *Applied Energy*, Vol. 274, 2020, p. 115301.
- Subak, S., “Methane embodied in the international trade of commodities: Implications for global emissions,” *Global Environmental Change*, Vol. 5, No. 5, 1995, pp. 433~446.
- The Eora Global Supply Chain Database, Accessed 2022.09.30., <https://worldmrio.com>
- Usubiaga, A., and J. Acosta-Fernández, “CARBON EMISSION ACCOUNTING IN MRIO MODELS: THE TERRITORY VS. THE RESIDENCE PRINCIPLE,” *Economic Systems Research*, Vol. 27, No. 4, 2015, pp. 458~477.
- You, W., and Z. Lv, “Spillover effects of economic globalization on CO₂ emissions: a spatial panel approach,” *Energy Economics*, Vol. 73, 2018, pp. 248~257.