

## 소비기준 온실가스 배출량 산정을 위한 고해상도 환경산업연관분석 모델 개발

이성규\* · 권태현\*\* · 이주희\*\*\* · 전의찬\*\*\*\*†

\*세종대학교 기후환경융합학과 박사과정, \*\*한국은행 경제통계국 전문부국장,  
\*\*\*세종대학교 기후에너지융합학과 조교수, \*\*\*\*세종대학교 기후에너지융합학과 교수

### High-resolution environmentally extended input-output analysis model for consumption-based greenhouse gas accounting

Lee, Sunggyu\* · Kwon, Tae Hyun\*\* · Lee, Joohee\*\*\* and Jeon, Eui-Chan\*\*\*\*†

\*Ph.D. Student, Dept. of Climate and Environment, Sejong University, Seoul, Korea

\*\*Research Associate, Economic Statistics Dept., Bank of Korea, Seoul, Korea

\*\*\*Assistant Professor, Dept. of Climate and Energy, Sejong University, Seoul, Korea

\*\*\*\*Professor, Dept. of Climate and Energy, Sejong University, Seoul, Korea

#### ABSTRACT

The importance of consumption-based greenhouse gas (GHG) reduction is gaining recognition as an effective mitigation strategy. To achieve GHG reductions on the consumption side, it is essential to quantify and analyze GHG emissions from consumption in detail. In this study, a high-resolution environmentally extended input-output analysis (EEIOA) model is developed for consumption-based GHG accounting. The EEIOA, which integrates environmental impacts into input-output tables, is a useful tool for analyzing the direct and indirect emissions of pollutants from industrial activities based on inter-industry relationships. To construct the EEIOA model, we used South Korea's 2020 non-competitive input-output table, energy balance, and national GHG inventory as input data. A high-resolution EEIOA model with 380 sectors was developed to address biases resulting from the aggregation of sectors. This model comprehensively quantifies both direct and indirect GHG emissions arising from four key sources: domestic production, production of imported intermediate products, production of imported final goods, and household energy consumption. Using our EEIOA model, we accounted direct and indirect GHG emissions induced by final demand. The results showed total direct GHG emissions estimated by the EEIOA model were 658.92 MtCO<sub>2</sub>eq., which is 0.41% (2.70 MtCO<sub>2</sub>eq.) higher than 656.22 MtCO<sub>2</sub>eq. reported in the national GHG inventory in 2020. Consumption-based GHG emissions accounted by the EEIOA model were 800.70 MtCO<sub>2</sub>eq., 22.16% (144.50 MtCO<sub>2</sub>eq.) higher than the production-based GHG emission reported in the national GHG inventory. This high-resolution EEIOA model is to be applied to estimate household carbon footprints.

*Key words* : EEIOA, Greenhouse Gas, Consumption-Based GHG Accounting, Carbon Footprint, Sustainable Consumption and Production

†Corresponding author : [ecjeon@sejong.ac.kr](mailto:ecjeon@sejong.ac.kr) (209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Korea. Tel. +82-2-3408-3388)

ORCID 이성규 0009-0005-1340-8288  
권태현 0009-0002-9175-2779

이주희 0000-0002-5883-8362  
전의찬 0000-0003-2783-4550

## 1. 연구 배경과 목적

제21차 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 당사국총회에서 채택된 파리협정은 심화하는 기후변화에 대응하기 위해 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C 이내로 억제하며, 더 나아가 1.5°C 이내로 억제하기 위해 세계 각국의 노력을 요구하고 있다. 파리협정에 따라 당사국은 2030년까지 달성하고자 하는 온실가스 감축 계획을 담은 NDCs (Nationally Determined Contributions)를 UNFCCC에 제출하였다. 한국은 2020년 첫 NDC를 UNFCCC에 제출하였고, 2021년 강화된 NDC를 제출하였다. 또한, 2050 탄소중립 목표달성을 위해 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령을 2022년 시행하였다.

각국은 에너지 저(탈)탄소화와 에너지효율 향상 등 생산 측면의 온실가스 감축에 집중하고 있다. 예를 들어, 2023년 두바이에서 개최된 제28차 당사국회의에서 재생에너지 발전용량 3배 확대, 효율화 2배 향상을 목표로 세웠다. 이런 노력으로 미국, 유럽, 일본 등 일부 국가에선 경제성장에도 불구하고 온실가스 배출량이 줄었다(Hughes et al., 2021). 하지만 이들 국가의 온실가스 감축은 일정 부분 탄소누출에 따른 것이기 때문에 전 세계 온실가스 배출총량은 줄지 않았고(Grubb et al., 2022), 에너지효율 향상을 통한 감축 효과는 리바운드 효과에 의해 온실가스 증가로 귀결되었다(Vivanco et al., 2022).

전 세계 온실가스 배출량은 지속적으로 증가하고 있으나, 1992년, 2009년, 2020년에 예외적으로 감소하였다(Friedlingstein et al., 2022). 1992년의 배출량 감소는 1991년 말 소비에트연방 붕괴로 인한 소비에트연방 국가들의 경기 침체가 원인이었다. 2009년의 감소는 리먼 브러더스 사태가 촉발한 전 세계 금융위기의 결과였으며, 2020년의 감소는 코로나19 확산 방지를 위해 취해진 전 세계적 봉쇄 조치로 인한 것이었다. 온실가스 배출량이 지속적으로 증가한 가운데 일부 기간에 있었던 감소는 경기 침체와 이에 따른 소비 감소 등 글로벌 경제 환경의 변화가 원인이었는지, 국제사회의 온실가스 감축 노력에 의한 결과가 아니었다(MacKinnon, 2021).

생산 측면 감축 정책은 리바운드 효과로 그 한계가 드러났고 오히려 경기 침체가 발생할 경우 온실가스 배출량이 감소하는 현상에 대한 인식이 증가함에 따라 소비 측면의 감축에 대한 정책적 관심과 연구가 증가하고 있다. 2015년 유엔환경계획(United Nations Environment Programme,

UNEP)은 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs) 중 책임 있는 소비와 생산(responsible consumption and production) 목표에 지속 가능한 발전을 위한 소비의 중요성을 명시하였다. UNEP는 특히 개개인의 생활방식의 변화가 지속가능한 온실가스 감축에 필수적인 것으로 보았다(UNEP, 2020). 같은 보고서는 파리협정에서 규정한 산업화 이전 대비 1.5°C 기온상승 억제 목표를 달성하기 위해 2030년까지 연간 인당 소비기준 온실가스 배출량을 2~2.5 tCO<sub>2</sub>eq.로 줄여야 한다고 주장하였다.

IPCC도 제6차 평가보고서 제3실무그룹 보고서에서 라이프스타일 변화를 통한 소비기준 온실가스 감축의 중요성을 공식적으로 언급하였다(Creutzig et al., 2022). 동 보고서에서 가계 소비에 따른 온실가스 배출량이 전 세계 온실가스 배출량의 58~72%로 큰 비중을 차지하며, 라이프 스타일과 소비 행동 변화를 통해 전 세계 온실가스 배출량의 40~70%를 감축할 수 있을 것으로 예측하였다.

소비 측면에서 온실가스 감축 정책을 수립하고 시행하기 위해서는 소비기준 온실가스 배출량 산정이 선행되어야 하지만 생산 측면 온실가스 감축량 산정에 비해 아직 미진한 수준이다. 본 연구에서 소비기준 온실가스 배출량 산정에 활용한 환경산업연관분석은 산업연관표에 환경영향을 결합한 것으로, 한 지역 내 산업의 생산 활동이 중간재 소비를 통해 다른 산업과 맺는 직·간접 효과를 분석하는 산업연관분석을 활용하여 최종 소비를 충족시키기 위한 관련 산업 활동에 따른 환경오염물질의 직·간접 배출량을 분석하는데 유용한 연구방법이다(Miller and Blair, 2009). 환경산업연관분석은 국가, 도시, 산업부문, 조직, 가구 단위의 소비기준 온실가스 배출량 평가에 폭넓게 활용되고 있다(Castellani et al. 2019; Park et al., 2024).

환경산업연관분석을 수행할 때 생산 부문을 통합하는 것은 소비기준 온실가스 배출량 산정하는데 오류를 유발한다. 특히 온실가스 배출강도가 큰 부문과 작은 부문 간의 통합시 오류가 더 커진다. 부문 통합으로 발생하는 문제는 부문이 통합되지 않은 고해상도 환경산업연관분석 모델을 통해 해결할 수 있다. 본 연구에서는 부문 통합에 따른 온실가스 배출량 산정결과의 편향 문제를 극복하기 위해 380개 부문으로 구성된 고해상도 환경산업연관분석 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 적정성을 검증하기 위해 모델로 산정한 온실가스 직접배출량을 국가 온실가스 인벤토리 배출량과 비교하였다. 그리고 최종수요에 의한 온실가스 직·간접 배출량으로 소비기준 온실가스 배출량을 산정하고 이를 생산기준 온실가스 배출량과 비교·분석하였다.

## 2. 환경산업연관분석을 활용한 소비기준 온실가스 배출량 산정 선행연구

소비기준 온실가스 배출량은 소비된 상품과 서비스를 생산하는 동안 공급망 전체에서 직·간접적으로 배출되는 온실가스 총량이며, 소비 탄소발자국이라고도 한다. 소비기준 온실가스 배출량은 생산기준 온실가스 배출량과 다르다. 생산기준 온실가스 배출량은 국경 내에서 제품이나 서비스를 생산하는 과정에서 발생하는 온실가스 직접배출량으로 수출상품의 내재탄소량을 포함한다. 국가 온실가스 인벤토리가 대표적인 생산기준 온실가스 배출량이다. 소비기준 온실가스 배출량은 국경 내에서 발생한 온실가스 배출량에서 수출상품의 내재탄소량을 제한 후 수입상품의 내재탄소량을 더한 것으로, 간접배출량도 포함한다. 아직 국제적으로 합의된 소비기준 온실가스 배출량 공식 산정 기준과 방법론은 없다. 하지만 학술적 목적이나 소비기준 온실가스 감축 정책을 수립하고 정책 효과를 평가하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 연구 결과를 반영한 정책 또한 점점 확대되고 있다. 스웨덴은 2022년 세계 최초로 소비기준 온실가스 감축 목표를 법제화하였고, 2045년까지 소비기준 온실가스 배출량 넷제로를 달성하겠다는 목표를 제시하였다(Swedish Government, 2022).

생산기준 온실가스 배출량은 IPCC 지침에 따라 산정하며, 연료 연소와 반도체 디스플레이 공정가스 등 배출원의 특성에 따른 온실가스 직접배출(scope 1)량만을 포함한다. 최근 탄소국경조정세 등이 요구하는 전력과 스팀 등 사용에 따른 간접배출(scope 2)과 공급망 전반에 걸쳐 배출된 간접배출(scope 3)을 평가할 수 없다는 한계가 있다. 이에 비해 소비기준 온실가스 배출량 산정 방법은 scope 1, 2, 3 배출량을 모두 평가할 수 있다는 장점이 있다.

소비기준 온실가스 배출량을 산정하기 위해 활용하는 환경산업연관분석은 산업연관표를 활용하여 경제활동에 따른 직·간접 환경영향을 평가하는 방법이다. 산업연관표는 일정 기간 한 지역에서 모든 재화와 서비스를 생산하고 처분하는 과정에서 발생하는 모든 거래를 일정한 원칙과 형식에 따라 행렬 형태로 기록한 통계표(Kwon, 2020)로 한 지역의 경제 전반에 대한 분석에 유용한 자료이다. 환경산업연관분석 관련 연구는 1960년대 후반에 시작되었다. Leontief (1970)는 산업연관분석을 이용한 환경영향 평가 방법을 제안하여 소비기준 온실가스 배출량 산정

방법론에 대한 기초를 놓았다. 산업연관표에 환경오염 물질 배출계수를 외생변수로 추가하여 각 부문의 오염물질 배출량을 산정하였다.

Munksgaard and Pedersen (2001)은 Leontief (1970)의 방법을 발전시켜 국가 단위 소비기준 온실가스 배출량을 산정하는 방법을 제안하였다. 소비기준 온실가스 배출량을 산정하기 위해 산업연관표, 에너지 밸런스, 에너지원별 온실가스 배출계수 데이터를 사용하였다. Huppel et al. (2008)은 부문별 온실가스 배출강도(emission intensity)<sup>1)</sup> 개념을 도입하여 모델을 한층 더 발전시켰다. 소비기준 온실가스 배출량은 탄소누출효과 분석(Munksgaard and Pedersen, 2001), 탄소불평등 분석(Chancel, 2022), 온실가스 배출 핫스팟 분석(Ivanova et al., 2016; Long et al., 2021) 등에 폭넓게 활용되고 있다.

환경산업연관분석은 단일지역 환경산업연관분석과 다지역 환경산업연관분석이 있다. 전자는 한 지역의 산업연관표를 이용하는 것으로 수입상품에 적용된 기술이 국산품 생산에 적용된 기술과 같다는 동일기술가정에 기초하기 때문에 수입상품의 내재탄소량을 제대로 평가할 수 없다는 한계가 있다. 다지역 환경산업연관분석은 다지역의 산업연관표를 이용하기 때문에 단일지역 환경산업연관분석의 한계를 극복할 수 있지만, 현재 국제적으로 사용되고 있는 다지역 환경산업연관분석표는 부문이 통합되어 있다는 단점이 있다. 스웨덴 정부는 2000년대 초 단일지역 환경산업연관분석을 적용하여 소비 탄소발자국 산정을 시작하였고, 2014년부터 다지역 환경산업연관분석으로 분석법을 바꾸었다. 두 분석법을 비교한 결과 단일지역 환경산업연관분석은 동일기술가정이라는 한계에도 불구하고 다지역 환경산업연관분석으로 산정한 결과와 큰 차이가 없음을 보고했다(Swedish Government, 2022).

단일지역 환경산업연관분석을 이용한 소비기준 온실가스 배출량 분석을 위해 많은 연구에서 산업연관표의 산업 부문 간 거래를 국산과 수입으로 구분하지 않은 경쟁형 산업연관표를 활용하였다(Park et al., 2022; Huppel et al., 2008; Yang et al., 2022). 이들이 사용한 모델은 식 (1)과 같다.

$$E = e(I - A)^{-1}y + E_{dir} \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 소비기준 온실가스 배출량,  $e$ 는 부문별 온

1) 온실가스 배출강도는 각 부문의 온실가스 직접배출량을 부문 총 산출액으로 나눈 값으로 단위는 CO<sub>2</sub>eq./금액이다.

실가스 배출 강도 행렬,  $(I - A)^{-1}$ 는 레온티에프 역행렬,  $y$ 는 소비 최종수요,  $E_{dir}$ 는 가계 부문 에너지 소비에 의한 온실가스 직접배출량이다.

환경산업연관분석 모델은 여러 부문으로 이루어져 있으며, 데이터의 가용성이나 분석의 편의에 따라 유사한 부문을 통합한다. 이때 부문 통합이 과도할 경우 분석 결과의 편향 문제가 발생할 수 있다. 온실가스 배출강도는 부문별로 큰 차이가 있으며, 배출강도 차이가 큰 부문을 한 부문으로 통합하면, 통합되기 전 부문의 온실가스 배출특성을 모델에 반영할 수 없을 뿐 아니라 통합한 부문의 온실가스 배출량 또한 편향된 결과가 된다(Weber, 2008). Yang et al. (2022)은 환경전과정평가 방법론으로써 환경산업연관분석이 국가 경제 전체를 시스템 경계로 함으로써 프로세스 기반의 전과정평가가 갖는 절단 오차(truncation error)로부터 자유롭다고 주장하면서도 부문 통합이 과도할 경우 이로 인한 오차가 절단 오차보다 더 클 수 있다고 하였다.

부문 통합으로 인한 환경산업연관분석의 한계를 극복하기 위해 고해상도 모델 개발을 위한 연구가 수행되었다. Nansai et al. (2002)은 일본의 1995년 산업연관표를 기반으로 400개 부문으로 된 고해상도 환경산업연관분석 모델(3EID)을 개발하였다. 그 후 모델을 두 차례 업그레이드하였으며, 가장 최신 모델은 2005년 산업연관표를 기반으로 한다. Yang et al. (2022)은 한국의 2017년 산업연관표를 활용하여 381개 부문의 고해상도 환경산업연관분석 모델을 개발하고, 이를 이용하여 한국 전자산업의 탄소발자국을 분석하였다. Park et al. (2022)은 Yang et al. (2022)이 개발한 고해상도 환경산업연관분석 모델을 이용하여 경제부문별 scope 1, 2, 3 온실가스 배출량을 산정하였다. 수출 산업의 scope 3 배출량이 많아 탄소국경조정세 등 scope 3 배출량을 규제하는 정책에 효과적으로 대응하기 위해서는 수출 산업 전체 공급망의 온실가스 감축 노력이 필요하다고 주장하였다.

본 연구에서는 2020년 실측 비경쟁형 산업연관표를 이용하여 380개 부문 고해상도 환경산업연관분석 모델을 개발하였다. 비경쟁형표는 내생부문과 최종수요 부문이 국산과 수입으로 구분된 것이다. 2020년 산업연관표는 코로나19 팬데믹의 영향으로 인한 경제구조의 변화를 반영하고 있다. 총공급과 총수요에서 대외거래 비중이 축소되었고, 의료와 비대면 서비스 성장에 따라 서비스의 산출과 부가가치 비중이 증가하는 등 산업구조가 변화하였다. 투입

구조 측면에서는 국제 유가 하락으로 수입 중간재 투입 비중이 감소하여 중간재 국산화율이 상승하였다고 보고하였다. 본 연구는 이처럼 팬데믹 이후의 경제구조 변화를 반영한 2020년 산업연관표를 이용하여 고해상도 환경산업연관분석 모델을 개발한 최초의 연구라는데 의의가 있다.

### 3. 2020 고해상도 환경산업연관분석 모델 개발

#### 3.1. 활용 데이터

환경산업연관분석 모델은 산업연관표와 환경위성계정으로 이루어져 있다(Suh, 2005). 우리나라의 산업연관표는 한국은행이 5년 주기로 실측표를 작성하며, 실측표 작성연도 사이에는 이전 실측표를 기준년도로 매년 연장표를 작성·발표한다. 가장 최신의 실측표는 2020년 실측표이다. 환경위성계정은 온실가스, 자원고갈, 폐기물 등 한 지역의 경제활동으로 발생하는 환경 영향에 대한 정보를 담고 있는 통계이다. 우리나라에서는 정부 기관이 공식적으로 작성하여 발표하지 않고 있어 연구자가 목적에 맞게 직접 작성해야 한다. 소비로 인한 온실가스 배출량 분석을 위해서는 부문별 온실가스 배출량을 나타내는 환경위성계정, 즉 부문별 온실가스 배출강도 행렬이 필요하다.

본 연구에서는 환경산업연관분석 모델 개발을 위해 산업연관표, 에너지 밸런스, 국가 온실가스 인벤토리를 활용하였다. 산업연관표는 생산자가격 기준 2020년 실측표를 이용하였으며, 국산거래표와 수입거래표로 이루어진 비경쟁형 산업연관표이다. 부문 통합으로 인한 분석 결과의 편향 문제를 해결하기 위해 해상도가 가장 높은 기본부문 산업연관표를 사용하였다.

화석연료 연소에 의한 부문별 온실가스 배출강도 행렬 구축에 필요한 부문별 에너지 사용량 산정을 위해 에너지 경제연구원에서 발표한 확장 에너지 밸런스(KEEI, 2023)를 활용하였다. 에너지 밸런스는 한 국가에서 특정 기간 공급·소비된 모든 에너지상품의 흐름을 에너지 수지표로 정리한 국가 에너지 수급통계이다. 본 연구에서는 2023년 1월 국제에너지기구의 기준을 적용하여 대폭 개정된 개정 에너지 밸런스 중 확장 에너지 밸런스를 활용하였다. 개정 에너지 밸런스는 에너지원과 에너지 수급 흐름을 에너지 지원별, 산업별, 공정별로 세분하여 제공하며, 기본 에너지 밸런스와 확장 에너지 밸런스로 되어 있다. 후자는 연간 통계로, 국가 온실가스 인벤토리 작성, 장기 에너지 수

요 전망 등을 위한 기초자료로 활용된다. 국가 온실가스 종합정보센터도 향후 국가 온실가스 인벤토리 작성에 확장 에너지 밸런스를 활용하려 계획하고 있다(GIR, 2024).

국가 온실가스 배출량 자료는 2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 데이터를 활용하였다(GIR, 2022). 국가 온실가스 인벤토리는 기후변화 대응정책을 수립·이행하기 위해 국내 온실가스 배출원과 흡수원을 파악하고 배출원과 흡수원별 배출량과 흡수량을 산정한 결과이다. 국가 인벤토리 보고서는 IPCC 지침에 따라 에너지, 산업공정, 농업, LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업), 폐기물 분야의 온실가스 배출량 통계를 제공한다. 우리나라 온실가스 인벤토리 보고서는 교토의정서에서 규정한 6대 온실가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>)의 배출량과 흡수량을 보고한다. 본 연구는 배출량 데이터만을 모델 구축에 사용하였다.

### 3.2. 모델 개발 절차

#### 3.2.1. 환경산업연관분석 모델 구성

모델을 구축함에 본 연구는 소비기준 온실가스가 네 부분에서 배출된다고 가정하였다. 1) 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산과정, 2) 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산을 위해 중간재로 투입된 수입품의 생산과정, 3) 수입품 최종수요로 인한 수입품 최종재 생산과정, 4) 가정 내 에너지 직접소비이다. 이들 네 가지로 인한 온실가스 배출량을 산정하기 위한 환경산업연관분석 모델은 식 (2)와 같다.

$$E = \hat{c}(I - A^d)^{-1} Y^d + \hat{c} A^m (I - A^d)^{-1} Y^d + \hat{c} Y^m + E_{dir} \quad (2)$$

여기서, E: 소비기준 온실가스 배출량,  $\hat{c}$ : 부문별 온실가스 배출강도 대각행렬,  $(I - A^d)^{-1}$ : 국산품 거래의 레온티에프 역행렬,  $A^m$ : 수입품 거래 투입계수 행렬,  $Y^d$ : 국산품 최종수요,  $Y^m$ : 수입품 최종수요,  $E_{dir}$ : 가정 내 에너지 직접소

비에 의한 온실가스 직접배출량이다.

식 (2) 우변에서 첫 번째 항  $\hat{c}(I - A^d)^{-1} Y^d$ 은 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량으로, 국산품 최종수요에 의한 생산유발효과에 따른 온실가스 직·간접 배출량을 평가할 수 있다. 두 번째 항  $\hat{c} A^m (I - A^d)^{-1} Y^d$ 은 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산을 위해 중간재로 투입된 수입품의 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량이다<sup>2)</sup>. 세 번째 항  $\hat{c} Y^m$ 은 수입품 최종재의 온실가스 직접배출량이다. 두 번째 항의 수입품 중간재와 같이 온실가스 직·간접배출량을 모두 고려해야 하지만 연구에서 적용하고 있는 단일지역 환경산업연관분석에서는 간접배출량을 평가할 수 없다. 네 번째 항  $E_{dir}$ 는 가정에서 연료 연소 시 배출되는 온실가스 직접배출량이다. 냉난방과 취사, 자동차 운행을 위해 사용한 연료 연소 등으로 인한 온실가스 배출량이다.

식 (2)의 첫 번째 항  $\hat{c}(I - A^d)^{-1} Y^d$ 는 식 (3)과 같이 풀어쓸 수 있다. 첫 번째 항  $\hat{c} Y^d$ 는 최종수요에 의해 직접적으로 배출된 각 부문의 직접(scope 1)배출량이다. 두 번째 항 이후의 항은 최종수요를 만족하기 위한 각 부문의 n차 파급효과에 의한 간접 배출량(scope 2, 3 배출량)이다. 따라서 식 (2)로 산정한 최종수요에 의해 유발된 온실가스 배출량은 직접배출량뿐 아니라 간접배출량(scope 2, 3)을 포함한다.

$$\hat{c}(I - A^d)^{-1} Y^d = \hat{c} Y^d + \hat{c}(A^d) Y^d + \hat{c}(A^d)^2 Y^d + \hat{c}(A^d)^3 Y^d + \dots \quad (3)$$

#### 3.2.2. 온실가스 배출강도 행렬 구축

환경산업연관분석 모델 개발의 핵심은  $\hat{c}$ 행렬 구축에 있다.  $\hat{c}$ 행렬은 각 생산 부문의 온실가스 배출량을 각 부문의 산출액으로 나눈 값인 부문 배출계수 벡터를 대각화한 대각행렬이다. 부문별 온실가스 배출량을 산정하는 방법은 외생법과 내생법이 있다. 외생법은 국가 온실가스 인벤토리 등에서 제공한 온실가스 배출량 데이터를 활용하여 부문별 온실가스 배출량을 산정한다(Choi, 2008). 이 방법은 국가 온실가스 인벤토리의 부문과 산업연관표 부

2)  $\hat{c} A^m (I - A^d)^{-1} Y^d = \hat{c} A^m X$ 이다. 여기서  $A^m X$ 는 산출 X에 투입되는 수입 중간재이므로  $\hat{c} A^m X$ 는 수입 중간재 생산과정에서 발생하는 온실가스 직·간접배출량이다. 이에 해당하는 온실가스 배출량은 수입 중간재의 내재탄소이며 국외 생산국에서 발생하므로 생산기준 온실가스 배출량 산정에는 고려하지 않으나, 소비기준 온실가스 배출량 산정 시에는 포함된다. 또한, 온실가스 배출강도는 기술구조에 따라 생산국별로 다르지만, 이 연구에서는 수입품 생산국의 온실가스 배출강도가 국산품 생산 시 온실가스 배출강도가 같다는 가정에 동일할 온실가스 배출강도( $\hat{c}$ )를 적용한다.

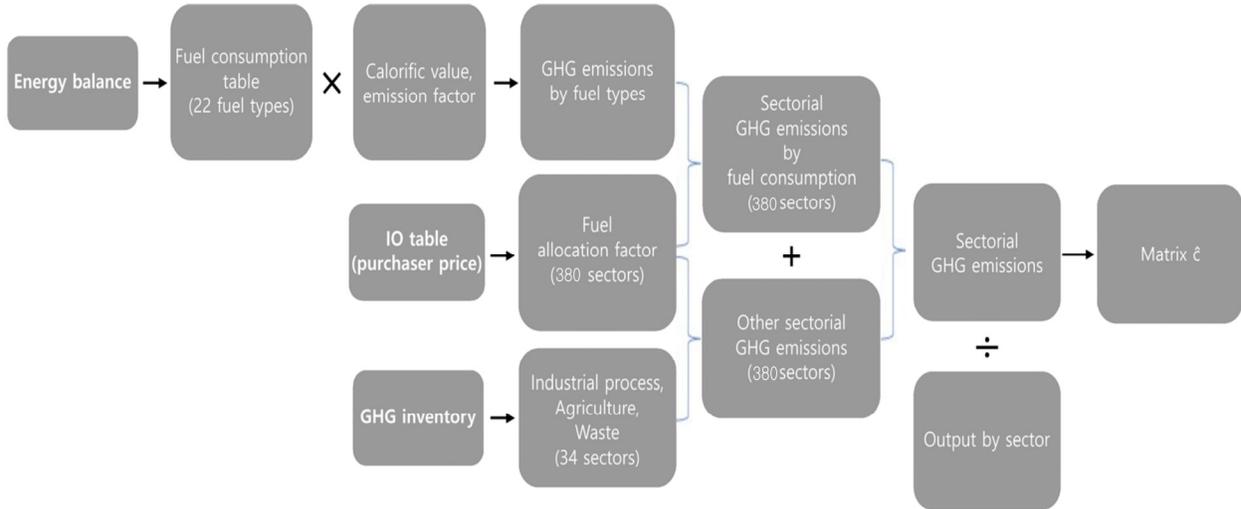


Fig. 1. Procedure of GHG intensity matrix (matrix  $\hat{c}$ ) construction

문이 일치하지 않으므로 산업연관표 부문에 온실가스 배출량을 할당하기 어려울 뿐만 아니라 인벤토리의 부문 분류가 상세하지 않아 고해상도 환경산업연관분석 모델에 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

본 연구에서 부문별 온실가스 배출강도를 산정하기 위해 사용한 내생법은 산업연관표의 배분 구조를 따라 부문별 온실가스 배출량을 산정하는 방법이다(Nansai et al., 2002; Park et al., 2022; Suh, 2005). 온실가스 배출량은 크게 연료 연소에 의한 배출량과 산업공정, 농업, 폐기물 부문의 배출량으로 나눌 수 있다. 연료 연소에 의한 배출량은 각 연료 사용량을 기준으로 연료별 온실가스 배출 총량을 산정한 후 산업연관표의 연료별 배분 구조에 따라 산업부문에 온실가스 배출량을 할당한다. 산업공정, 농업, 폐기물 부문의 배출량은 온실가스 인벤토리의 배출량을 산업연관표의 해당 부문에 할당한다. 부문별 온실가스 배출 총량이 산정되면 이를 부문 총산출액으로 나눈 후 대각화하여  $\hat{c}$  행렬을 구축한다. 구축 절차는 Fig. 1과 같다.

확장 에너지밸런스의 연료는 총 22종이며, 이들 22개 연료의 최종소비량은 확장 에너지 밸런스의 석탄류, 석유류, 가스류 등 비재생에너지 에너지 흐름 데이터를 이용하여 산출하였다. 에너지 흐름을 분석하여 원료탄 중 환원제, 원유 중 납사 등과 같이 연소하지 않고 원료로 사용되는 양을 연료 소비량에서 제하였고, 손실분은 최종소비량에 더하였다. Fig. 2는 에너지 밸런스에 따른 석탄류 에너지 흐름을 나타낸 것이고, 이를 이용하여 구한 최종소

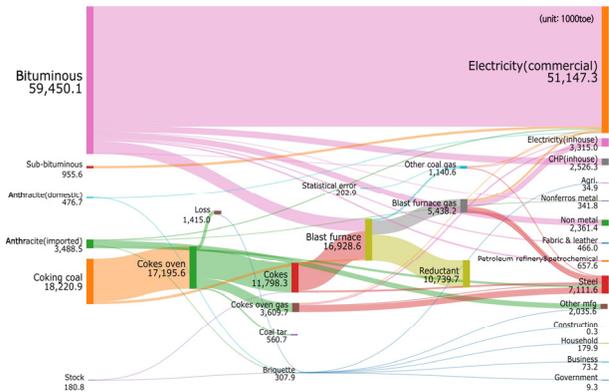


Fig. 2. Energy flow (coal) based on energy balance

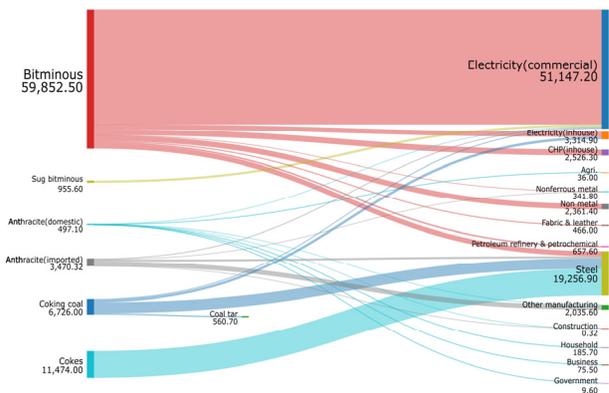


Fig. 3. Allocated energy flow (coal) by final demand

비부문별 소비량은 Fig. 3과 같다. 석유류와 가스류 연료의 소비부문별 소비량도 같은 방법으로 산정하였다.

연료 연소 시 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 배출량은 2006 IPCC 지침에 따라 산정하였다. 이산화탄소 배출량 산정식과 메탄, 아산화질소 배출량 산정식은 각각 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$E = \sum_{ij} [TA_{ij} \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 44/12 \times 10^{-3}] \quad (4)$$

$$E = \sum_{ij} [TA_{ij} \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 10^{-6} \times GWP] \quad (5)$$

여기서, E: 배출량(천톤CO<sub>2</sub>), TA: 연료 사용량(천TOE), 41.868: Joule-TOE 환산계수(TJ/천TOE), CF: 전환계수(순발열량/총발열량), EF: 배출계수(tC/TJ), 44/12: 탄소 배출량을 이산화탄소 배출량으로 환산(kgCO<sub>2</sub>/kgC), GWP: 지구온난화지수, i: 연료 유형, j: 부문이다.

순발열량/총발열량 전환계수는 에너지법 시행규칙<개정 2017. 12. 28.>의 제7차 연료별 국가 고유 발열량 및 배출계수 기준을 따랐다. 배출계수는 2022년 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 제시한 2017~2021년 국가고유 배출계수 값을 따랐으며, 국가고유배출계수가 없는 원유와 코크스의 배출계수는 IPCC 2006 지침이 제시한 값을 사용하였다. GWP는 IPCC 제5차 평가보고서가 제시한 GWP<sub>100</sub> 값(메탄 28, 아산화질소 265)을 적용하였다.

연소에 따른 연료별 온실가스 배출량은 배분계수를 이용하여 산업연관표의 380개 부문에 할당하였다. Nansai et al. (2002)은 사용표를 이용하여 산업연관표의 400개 기본 부문의 연료별 사용량을 산정한 후 연료별 배출계수를 곱하여 기본부문의 연료 연소에 따른 온실가스 배출량을 산정하였다. 하지만 본 연구는 연료별 온실가스 배출량을 하위 부문에 배분하는 방식은 Nansai et al. (2002)의 방법을 따르되, 부문별 연료 사용량은 에너지 밸런스의 값을 적용하였다. 에너지 밸런스의 연료 소비량은 국가 온실가스 인벤토리의 연료 연소에 의한 온실가스 배출량 산정 기준이므로 이를 사용하는 것은 온실가스 인벤토리의 배출량과의 정합성을 제고할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 부문별 배출량 배분 방식은 산업연관표의 배분구조를 따름으로써 환경산업연관분석을 위한 가장 기본적인 자료인 산업연관표와 정합성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 식 (6) 온실가스 배출량의 부문별 배분계수이다.

$$d_{k,i} = \frac{Z_{k,i}}{Z_k} \quad (1 \leq i \leq 380) \quad (6)$$

$$Z_k = \sum_{i=1}^{380} Z_{k,i}$$

여기서, d<sub>k,i</sub>는 부문 i의 연료 k 연소로 인한 온실가스 배출량 배분계수이며, Z<sub>k,i</sub>는 산업연관표에 있는 부문 i의 연료 k 투입액이다. Z<sub>k</sub>는 산업연관표에 있는 모든 부문의 연료 k 투입총액, 즉 연료 k의 중간수요합이다.

각 부문의 온실가스 배출량 산정식은 식 (7)과 같다.

$$e_i^D = \sum_k^m (e_k^A \times d_{k,i}) \quad (7)$$

$$e_k^A = \sum_i e_{k,i}^D$$

여기서 e<sup>D</sup><sub>i</sub>는 부문 i에서 사용한 모든 연료의 연소로 인한 온실가스 총배출량, e<sup>A</sup><sub>k</sub>는 연료 k 연소로 인한 온실가스 배출량, d<sub>k,i</sub>는 부문 i의 연료 k 연소로 인한 온실가스 배출량 부문 배분계수, m은 각 부문에서 소비된 연료 유형의 개수이다.

산업공정, 농업, 폐기물 분야에서 발생한 온실가스 배출량은 상응하는 부문에 할당하였다. 국가 온실가스 인벤토리 부문이 두 개 이상의 산업연관표 기본부문에 걸쳐 있는 경우 부문별 총산출액 비율에 따라 해당 부문에 배분하였다. 연료 연소에 의한 부문별 온실가스 배출량과 산업공정, 농업, 폐기물 분야의 부문별 온실가스 배출량을 합한 후 부문의 총산출액으로 나누어 부문별 온실가스 배출강도를 구한 후 이를 대각화하여 380행×380열의 행렬을 구축하였다.

## 4. 분석 결과

### 4.1. 모델 검증

개발한 모델의 정확성은 동 모델을 이용하여 산정한 온실가스 직접배출량을 국가 온실가스 인벤토리와 비교하여 검증하였다. 모델로 산정한 온실가스 직접배출량은 6억5,891.8만톤CO<sub>2</sub>eq.으로 2020년 국가 온실가스 인벤토리 배출량 6억5,622.2만톤CO<sub>2</sub>eq.보다 269.6만톤CO<sub>2</sub>eq. 더 많게 산정되었다. 이는 인벤토리 배출량의 0.41%에 해당한다. 이러한 차이가 발생한 것은 모델로 산정한 연료 연

Table 1. Comparison of model-estimated direct GHG emissions and GHG Inventory in 2020

Sector	GHG emission (ktCO <sub>2</sub> eq.)		
	Model (A)	Inventory (B)	Difference (A-B)
Fuel combustion	572,613	569,917	2,696 (0.47%)
Industrial process	48,528	48,528	0
Agriculture	21,050	21,050	0
Waste	16,728	16,728	0
Total	658,918	656,222	2,696 (0.41%)

소 부문의 온실가스 배출량이 연료 연소 부문의 인벤토리 배출량보다 더 높게 산정되었기 때문이다(Table 1).

본 연구가 구축한 모델로 추정된 결과가 국가 온실가스 인벤토리 배출량과 차이가 나는 원인은 크게 세 가지이다. 첫째, 연료 연소로 인한 이산화탄소 배출량 산정식 차이이다. 이 연구에서는 2006 IPCC 지침에 제시된 이산화탄소 배출량 산정식(식 (4))을 사용하였으나, 국가 온실가스 인벤토리에서는 1996 IPCC 지침을 따른다(식 (8)). 식 (4)와 식 (8)의 차이는 연료 산화율이다. 산화율은 연료로 소비된 에너지원 중 산화된 탄소의 비율을 의미하며, 산화되지 않은 탄소는 이산화탄소 배출량에서 제외한다. 1996 IPCC 지침이 제시한 연료별 산화율은 석탄 98%, 원유와 석유제품 99%, 가스 99.5%이지만, 2006 IPCC 지침은 모든 연료의 산화율을 100%로 간주한다. 메탄과 아산화질소 배출량은 연료 산화율과 관련이 없으므로 두 지침 사이에 차이가 없다.

$$E = \sum_{ij} \left[ TA_{ij} \times FCS_{ij} \times 41.868 \times CF_i \right] \times EF_i \times OF_i \times 44/12 \times 10^{-3} \quad (8)$$

두 번째 원인은 GWP 값의 차이이다. 국가 인벤토리 보고서에서는 IPCC 제2차 평가보고서(AR2)에 제시한 값(CH<sub>4</sub>: 21, N<sub>2</sub>O: 310)을 사용하였으나, 이 연구에서는 2006 IPCC 지침에 따라 IPCC 제5차 평가보고서(AR5)에 제시한 값(CH<sub>4</sub>: 28, N<sub>2</sub>O: 265)을 적용하였다. 마지막 원인은 사용한 에너지통계의 차이이다. 국가 온실가스 인벤토리 산정 시 기존 에너지 밸런스를 사용하였고, 본 연구는 2023년 1월 개정된 확장 에너지 밸런스를 사용하였다.

이상의 세 가지 원인에 따른 온실가스 배출량 산정결과의 차이를 분해한 것이 Fig. 4이다. 2006 IPCC 지침의 이산화탄소 배출량 산정식을 사용하면 1996 IPCC 지침 적용 시보다 이산화탄소 배출량이 5,650천톤CO<sub>2</sub>eq. 증가한다. 아산화질소와 메탄의 GWP 차이에 의해 AR5 제시 값

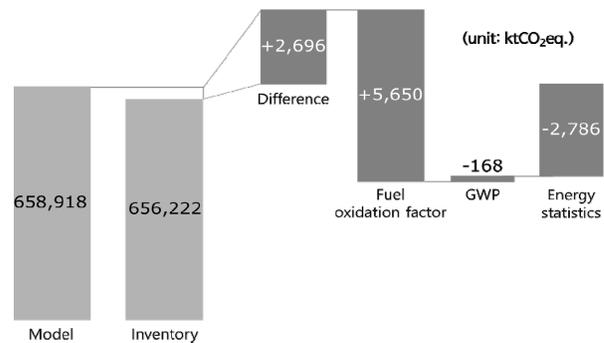


Fig. 4. Analysis on difference between model-estimated direct emissions and GHG inventory in 2020

을 적용하는 것이 AR2 제시 값을 적용할 때보다 온실가스 배출량이 168천톤CO<sub>2</sub>eq.이 감소한다. 이 두 요인의 차이에 따른 배출량 차이는 5,482천톤CO<sub>2</sub>eq. (5,650천톤CO<sub>2</sub>eq.-168천톤CO<sub>2</sub>eq.)이며, 나머지 2,786천톤CO<sub>2</sub>eq.는 사용한 에너지통계의 차이로 추정된다. 에너지통계 차이로 인한 배출량 차이를 모델의 오차로 가정한다면, 모델의 오차는 0.49%로 Park et al. (2022)이 보고한 오차(2%)와 비슷한 수준이다.

#### 4.2. 부문별 온실가스 직접배출량과 배출강도

본 연구에서 개발한 모델로 산정한 온실가스 직접배출량을 부문별로 살펴보면 발전과 증기 및 온수 생산 등 에너지 생산 부문, 열연강관 등 철강 부문, 시멘트 부문, 중유와 경유 등 화석연료 부문, 폐기물처리 부문이 상위를 차지하였다. 서비스 부문에서는 도소매서비스, 도로화물운송과 도로여객운송서비스, 시장조사서비스, 일반음식점의 직접배출량이 많았다. 이들 부문은 화석연료 사용량이 많은 공통점이 있다. 농업부문 중에서는 벼의 직접배출량이 상위 20개 부문에 들어갔다. 벼의 직접배출량이 높은 이유는 벼 재배 과정에서 발생하는 메탄이 주요인이다.

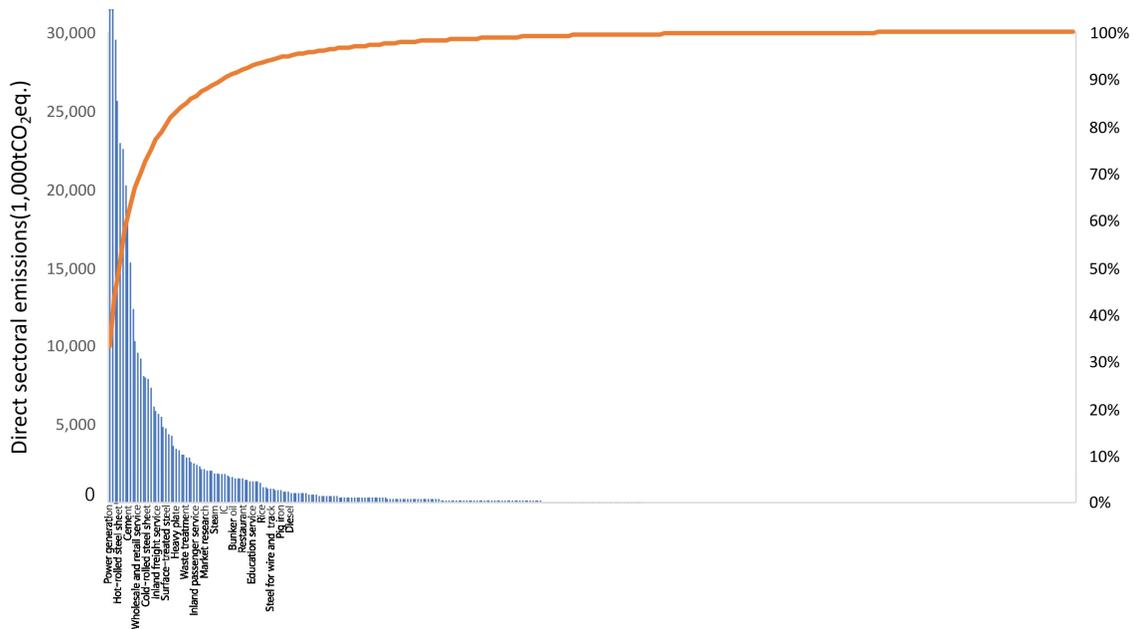


Fig. 5. Direct GHG emissions by sector

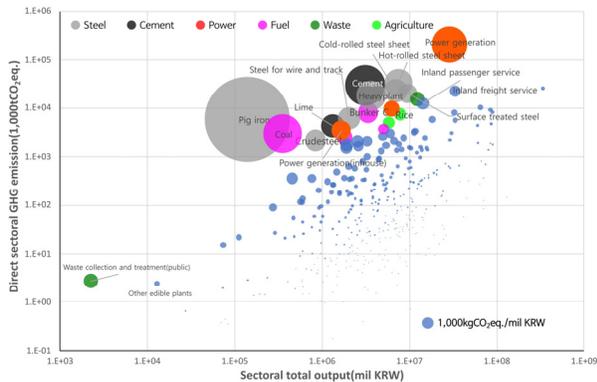


Fig. 6. By-sector total output, direct GHG emissions and GHG emission intensity

상위 20개 부문의 부문별 직접배출량은 화력발전이 207.0백만톤CO<sub>2</sub>eq.로 가장 높으며, 직접배출 총량의 33%를 차지하였다. 열연강판이 33.9백만톤CO<sub>2</sub>eq.(이하 단위 같음), 시멘트 29.6, 도소매서비스 23.0, 냉간압연강재 23.0, 도로화물운송서비스 22.6, 표면처리강재 20.3, 중후판 18.1, 폐기물 처리 15.4, 도로여객운송서비스 12.4, 시장조사 서비스 10.4, 증기 및 온수 9.6, 집적회로 9.3, 중유 8.1, 일반음식점 8.1, 교육서비스 7.9, 벼 7.4, 선재 및 궤조 6.1, 선철 5.9, 경유 5.7였다. 이들 상위 20개 부문의 직접배출량 합계는 전체 직접배출량의 78%를 차지하였다(Fig. 5).

Table 2. Model-estimated GHG emissions and GDP by final demand

Final demand	Model-estimated GHG emissions (million tCO <sub>2</sub> eq.)	GDP (trillion KRW)
Consumption	568.8 (33.9%)	1,084.6 (53.2%)
Investment	231.9 (13.8%)	469.8 (23.1%)
Export	878.7 (52.3%)	481.8 (23.7%)
<b>Total</b>	<b>1,679.4 (100%)</b>	<b>2,036.2 (100%)</b>

직접배출량을 부문 총산출액으로 나눈 온실가스 배출강도도 부문별 직접배출량과 비슷한 양상을 보였으나 순위는 일부 차이가 있다. 배출강도는 선철이 42,427 kgCO<sub>2</sub>eq/백만원으로 가장 높았고, 시멘트가 9,477 kgCO<sub>2</sub>eq/백만원로 뒤를 이었다. 직접배출량이 높은 부문이 배출강도도 높은 걸 확인할 수 있었다(Fig. 6).

#### 4.3. 최종수요에 의해 유발된 온실가스 배출량 산정결과

2020 고해상도 환경산업연관분석 모델을 활용하여 소비, 투자, 수출 등 최종수요에 의해 유발된 직·간접 온실가스 배출량을 산정하였다(Table 2). 모델 산정 온실가스 배출 총량은 16억7,940만톤CO<sub>2</sub>eq.로 생산기준 배출량인

Table 3. Model-estimated GHG emissions by final demand

(unit: million tCO<sub>2</sub>eq.)

Final demand	Domestic goods and service	Imported intermediate goods	Imported goods for final demand	Household energy use	Total
Consumption	288.8	246.5	3.7	29.9	568.8
Investment	178.5	53.9	-0.5		231.9
Export	432.5	446.2	0.0		878.7
Total	899.8	746.6	3.2	29.9	1,679.4

국가 온실가스 인벤토리 6억5,220만톤CO<sub>2</sub>eq.보다 10억 2,320만톤CO<sub>2</sub>eq. 많았다. 최종수요 항목별로 구분하여 살펴보면, 민간과 정부 소비로 인한 배출량은 5억 6,880만톤 CO<sub>2</sub>eq, 투자로 인한 배출량은 2억3,190만톤CO<sub>2</sub>eq, 수출에 의한 배출량은 8억7,870만톤CO<sub>2</sub>eq였다. 총배출량에 대한 비중은 각각 33.9%, 13.8%, 52.3%로 GDP에 대한 각 부문의 기여도와 차이가 있다. 소비는 GDP의 53%를 차지하였으나, 온실가스 배출량 비중은 33.9%로 GDP에 대한 기여도에 비해 적었다. 소비로 인한 온실가스 배출량이 전 세계 배출량의 58~72%를 차지한다는 Creutzig et al. (2022)의 연구 결과보다 낮는데 이는 수출로 인한 온실가스 배출량 비중이 다른 국가들에 비해 높기 때문이다. 수출은 GDP에 대한 기여도보다 배출량에 대한 비중이 두 배 이상 크게 나타났다(Table 2). 이처럼 수출의 온실가스 배출 비중이 큰 것은 우리나라의 수출이 제조업 제품 중심이며, 제조업의 에너지소비량이 높기 때문으로 판단된다. 투자부문도 GDP 기여도에 비해 온실가스 배출량 비중이 더 낮게 나타났다.

배출원별 직·간접 온실가스 배출량은 국산품 생산으로 배출된 직·간접 온실가스는 8억9980만톤CO<sub>2</sub>eq.이고, 수입품 중간재의 직·간접 온실가스 배출량은 7억 4660만톤 CO<sub>2</sub>eq., 수입품 최종재의 온실가스 직접배출량은 320만톤 CO<sub>2</sub>eq., 가계 에너지 소비에 의한 직접배출량은 2,990만톤CO<sub>2</sub>eq.이었다(Table 3). 수입품으로 인한 온실가스 배출량은 7억4,980만톤CO<sub>2</sub>eq.으로 국산품으로 인한 온실가스 배출량의 80.6% 수준이었다.

국가 단위 소비기준 온실가스 배출량은 최종수요 중 소비와 투자로 인한 직·간접 배출량으로 8억 70만톤CO<sub>2</sub>eq.으로 생산기준 배출량인 인벤토리 배출량 6억5,220만톤 CO<sub>2</sub>eq.보다 1억 4,450만톤CO<sub>2</sub>eq. (22.16%) 더 많았다. 이 차이는 수입상품의 내재탄소량과 전력과 열 소비에 따른 scope 2 배출량, 공급망 전체에서 배출되는 scope 3 배출량과 수입상품의 내재탄소량을 포함하는지에 따른 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 2020년 산업연관표 실측표에 기반한 고해상도 환경산업연관분석 모델을 구축하였다. 모델은 비경쟁형 산업연관표를 활용함으로써 국산품과 수입품을 구별하지 않는 경쟁형 산업연관표를 활용한 기존 연구의 모델과 차별화하였을 뿐만 아니라 배출원별 온실가스 직·간접 배출량을 산정하는 방법도 고려하였다. 본 연구의 접근법은 수입의존도가 높은 우리나라의 산업구조를 반영함으로써 소비기준 온실가스 배출량 분석에 더 적합하다고 할 수 있다. 온실가스 직접배출량과 국가 온실가스 인벤토리의 배출량과 비교를 통해 모델을 검증한 결과 오차는 0.49%로 기존 연구 결과와 비슷한 수준이었다. 부문별 온실가스 배출강도는 철강, 연료, 시멘트, 폐기물, 도로운송 서비스 등 화석연료를 많이 소비하는 부문에서 높았으며, 메탄 배출량이 많은 벼 부문도 상위 20개에 포함되었다. 소비기준 온실가스 배출량은 8억 70만톤CO<sub>2</sub>eq.로 생산기준 배출량인 인벤토리 배출량보다 1억 4,450만톤CO<sub>2</sub>eq. (22%) 더 많았다. 본 연구에서 개발한 2020 고해상도 환경산업연관분석 모델은 향후 가계 탄소발자국 분석과 같은 다양한 소비기준 온실가스 감축 정책 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 사사

본 연구는 환경부 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

Castellani V, Beylot A, Sala S. 2019. Environmental impacts of household consumption in Europe: Comparing

- process-based LCA and environmentally extended input-output analysis. *J Clean Prod* 240: 117966. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117966
- Chancel L. 2022. Global carbon inequality over 1990-2019. *Nat Sustain* 5: 931-938. doi: 10.1038/s41893-022-00955-z
- Choi JY. 2008. An analysis of greenhouse gas emission by industrial sectors in Korea. *Q Natl Account* 3: 121-147.
- Creutzig F, Roy J, Devine-Wright P, Díaz-José J, Geels FW, Grubler A, Maïzi N, Masanet E, Mulugetta Y, Onyige CD, et al. 2022. Demand, services and social aspects of mitigation. In: Shukla PR, Skea J, Slade R, Al Khourdajie A, van Diemen R, McCollum D, Pathak M, Some S, Vyas P, Fradera R, et al. (eds). *Climate change 2022 - Mitigation of climate change: Working group III contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 503-612. doi: 10.1017/9781009157926.007
- Friedlingstein P, Jones MW, O'Sullivan MO, Andrew RM, Bakker DCE, Hauck J, Le Quéré C, Peters GP, Peters W, Pongratz J, et al. 2022. Global carbon budget 2021. *Earth Syst Sci Data* 14: 1917-2005. doi: 10.5194/essd-14-1917-2022
- GIR. 2022. National greenhouse gas inventory report of Korea.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea). 2024. A study on national greenhouse gas emission statistics in energy sector in line with the requirements of Paris Agreement. Cheongju, Korea: Author.
- Grubb M, Jordan ND, Hertwich E, Neuhoff K, Das K, Bandyopadhyay KR, van Asselt H, Sato M, Wang R, Pizer WA, et al. 2022. Carbon leakage, consumption, and trade. *Annu Rev Environ Resour* 47: 753-795. doi: 10.1146/annurev-environ-120820-053625
- Hughes L, de Jong M, Thorne Z. 2021. (De)coupling and (de)carbonizing in the economies and energy systems of the G20. *Environ Dev Sustain* 23(4): 5614-5639. doi: 10.1007/s10668-020-00834-7
- Huppes, Gjalte, Arjan de Koning, Sangwon Suh, Reinout Heijungs, Laurant van Oers, Per Nielsen, Jeroen B. Guinee, 2008 Environmental impacts of consumption in the European Union, *Journal of Industrial Ecology* 10(3), pp. 129-146.
- Ivanova D, Stadler K, Steen-Olsen K, Wood R, Vita G, Tukker A, Hertwich EG. 2016. Environmental impact assessment of household consumption. *J Ind Ecol* 20(3): 526-536. doi: 10.1111/jiec.12371
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2023. Revised energy balance (24th March, 2023). Ulsan, Korea: Author.
- Kwon TH. 2020. Input-output analysis. Seoul: Chungnam Publishing.
- Leontief W. 1970. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *Rev Econ Stat* 52(3): 262-271. doi: 10.2307/1926294
- Long Y, Jiang Y, Chen P, Yoshida Y, Sharifi A, Gasparatos A, Wu Y, Kanemoto K, Shigetomi Y, Guan D. 2021. Monthly direct and indirect greenhouse gases emissions from household consumption in the major Japanese cities. *Sci Data* 8: 301. doi: 10.1038/s41597-021-01086-4
- MacKinnon JB. 2021. The day the world stops shopping. New York: HTsukubaarperCollins.
- Miller RE, Blair PD. 2009. Input-output analysis: Foundations and extensions, 2nd edn. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Munksgaard J, Pedersen KA. 2001. CO<sub>2</sub> accounts for open economies: Producer or consumer responsibility? *Energy Policy* 29(4): 327-334. doi: 10.1016/S0301-4215(00)00120-8
- Nansai K, Moriguchi Y, Tohno S. 2002. Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan using input-output tables (3EID) -Inventory data for LCA-. Tsukuba, Japan: National Institute for Environmental Studies. CGER-D031-2002.
- Park Y, Kim J, Kyung D, Park HS. 2022. Characterization of greenhouse gases emissions by economic sectors using environmentally extended input-output analysis (EEIOA) (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 44(9): 308-335.
- Park YJ, Putra AS, Park HS, Kim J. 2024. Characterization

- of the life cycle carbon footprint of the automobile industry in the Republic of Korea by environmentally extended input-output model. *Environ Eng Res* 29(5): 230583. doi: 10.4491/eer.2023.583
- Suh S. 2005. Developing a sectoral environmental database for input-output analysis: The comprehensive environmental data archive of the US. *Econ Syst Res* 17(4): 449-469. doi: 10.1080/09535310500284326
- Swedish Government. 2022. Sveriges globala klimatavtryck (Sweden's global carbon footprint). Stockholm, Sweden: Author. SOU 2022:15.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2020. Emissions gap report 2020. Nairobi, Kenya: Author.
- Vivanco DF, Freire-González J, Galvin R, Santarius T, Walnum HJ, Makov T, Sala S. 2022. Rebound effect and sustainability science: A review. *J Ind Ecol* 26(4): 1543-1563. doi: 10.1111/jiec.13295
- Weber CL. 2008. Uncertainties in constructing environmental multiregional input-output models. IOMME08: International Input-Output Meeting on Managing the Environment; 2008 Jul 9~Jul 11; Pablo de Olavide University. Seville, Spain: International Input-Output Association.
- Yang Y, Park YJ, Smith TM, Kim T, Park HS. 2022. High-resolution environmentally extended input-output model to assess the greenhouse gas impact of electronics in South Korea. *Environ Sci Technol* 56(4): 2107-2114. doi: 10.1021/acs.est.1c05451