고해상도 환경산업연관분석 모델을 활용한 가계 소비 탄소발자국 연구

이성규 박사 넷제로홀딩스그룹(주)
이주희 교수 세종대학교
전의찬 교수 세종대학교

1. 서론

- **기존 감축 정책의 한계와 소비 측면 감축의 중요성 대두**: 파리협정 목표 달성을 위해 에너지효율 향상 등 생산 측면 감축 노력이 지속되었으나, 리바운드 효과 등으로 한계에 직면하였다(York et al., 2022). 전 세계 온실가스 배출량의 약 58~72%가 가계 소비와 직간접적으로 연관되어 있어 소비변화를 통한 소비 측면 온실가스 감축의 중요성이 대두되었다(IPCC, 2023).
- **소비기반 온실가스 배출량 평가가 필요**: 소비측면 감축을 위해서는 소비활동에 따른 온실가스 배출량(탄소발자국) 분석이 선행되어야 한다.
- **선행 연구의 한계**: 기존 국내연구는 설문조사 기반으로 소수 시민을 대상으로 제한된 소비항목에 대한 탄소발자국을 분석하여 소비 탄소발자국 산정의 체계성과 신뢰도에 한계가 있다.
- **연구 방법과 내용**: 선행연구의 한계를 개선하고자 고해상도 환경산업연관분석 모델을 활용하여 주거에너지, 교통, 상품·서비스 소비, 식품·외식 등 모든 가계 소비항목에 대한 소비 탄소발자국을 정량적으로 분석하였다.

2. 선행연구

- **탄소발자국 정의**: 어떤 활동에 따라 직·간접적으로 발생하거나 생산, 사용, 폐기 등 제품의 전과정에 발생하는 **온실가스 직·간접배출량의 총합**이며(Wiedmann and Minx, 2008), 개인, 가계, 정부 기관, 회사, 사회조직, 생산 프로세스, 사업 부문 등의 활동, 상품, 서비스를 대상으로 탄소발자국을 평가할 수 있음. 소비기준 온실가스 배출량(Consumption-based GHG Emissions, CBE)이라고도 부른다.
- **탄소발자국 산정방법**: 탄소발자국은 **환경산업연관분석**을 통해 산정할 수 있다. 환경산업연관분석은 일정 기간 한 지역에서 발생하는 재화와 서비스의 생산 및 처분과 관련된 모든 거래 내역을 일정한 원칙과 형식에 따라 기록한 통계표인 산업연관표를 이용하여 경제활동에 따른 환경영향을 평가하는 방법이다(Leontief, 1970; Miller and Blair, 2022).
- **적용 분야**: 환경산업연관분석을 이용한 탄소발자국 분석은 국가단위 소비기준 온실가스 배출량 산정(박유진 등, 2022; Hertwich and Peters, 2009; Ivanova et al., 2016; Yu et al., 2021), 국제무역으로 인한 탄소누출 효과 분석(Munksgaard and Pedersen, 2001), 가계 소득분위간/지역간 탄소불평등 분석(Chancel, 2022; Kilian et al., 2023; Mo Li et al., 2025), 가계 부문 온실가스 배출 hotspot 분석(IGES, 2019; Ivanova et al., 2016; Long et al., 2021) 등에 적용되었다.
- **국내 연구**: 가계 탄소발자국 관련 국내 연구(김태현·김태현, 2023; 명수정, 2023)가 있으나, 연구 대상과 소비영역이 제한적이며, 환경산업연관분석을 통한 체계적인 연구는 찾아보기 어렵다.
- **본 연구의 차별점**: (1) 환경산업연관분석을 이용하여 가계 탄소발자국에 대한 체계적인 분석을 수행; (2) 고해상도 환경산업연관분석 모델을 활용하여 부문별 온실가스 배출구조는 국가 온실가스 인벤토리 뿐만 아니라 산업연관표의 부문 간 경제구조와 일관성 유지; (3) 비경쟁형 산업연관표를 기반으로 개발한 모델을 적용하여 수입품과 국산품의 내재 탄소량을 분리하여 평가.

3. 연구방법과 사용 데이터

3.1. 연구방법

- 본 연구는 이성규 등(2024)의 고해상도 환경산업분석 모델(식 (1))을 활용하여 가계 탄소발자국을 분석하였다. (1) 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산과정의 직·간접 배출량, (2) 국산품 최종수요를 만족하기 위한 국산품 생산을 위해 중간재로 투입된 수입품의 생산과정의 직·간접 배출량, (3) 수입품 최종수요로 인한 수입품 최종재 생산과정의 직·간접 배출량, (4) 가정 내 에너지 직접소비에 따른 직접 배출량이다.

$$E = \overset{(1)}{\boxed{\hat{c}(I - A^d)^{-1}Y^d}} + \overset{(2)}{\boxed{\hat{c}\,A^m(I - A^d)^{-1}Y^d}} + \overset{(3)}{\boxed{\hat{c}Y^m}} + \overset{(4)}{\boxed{E_{dir}}} \quad (1)$$

- 식 (1)의 첫번째 항은 식 (2)와 같이 풀어 쓸 수 있으며, 첫번째 항 $\hat{c}Y^d$ 는 최종수요(Y^d)에 의해 직접 배출된 각 부문의 직접(Scope 1)배출량이고, 두 번째 항 이후의 항들은 최종수요를 만족하기 위한 각 부문의 1차, 2차, 3차... 파급효과에 의한 간접 배출량(Scope 2, 3 배출량)으로 최종수요, 즉 어떤 소비 지출 항목에 대한 가계 소비 지출액에 따른 온실가스 직간접 배출량을 산정할 수 있다.

$$\hat{c}(I - A^d)^{-1}Y^d = \sum_{i=0}^{\infty}\hat{c}(A^d)^iY^d \quad (2)$$

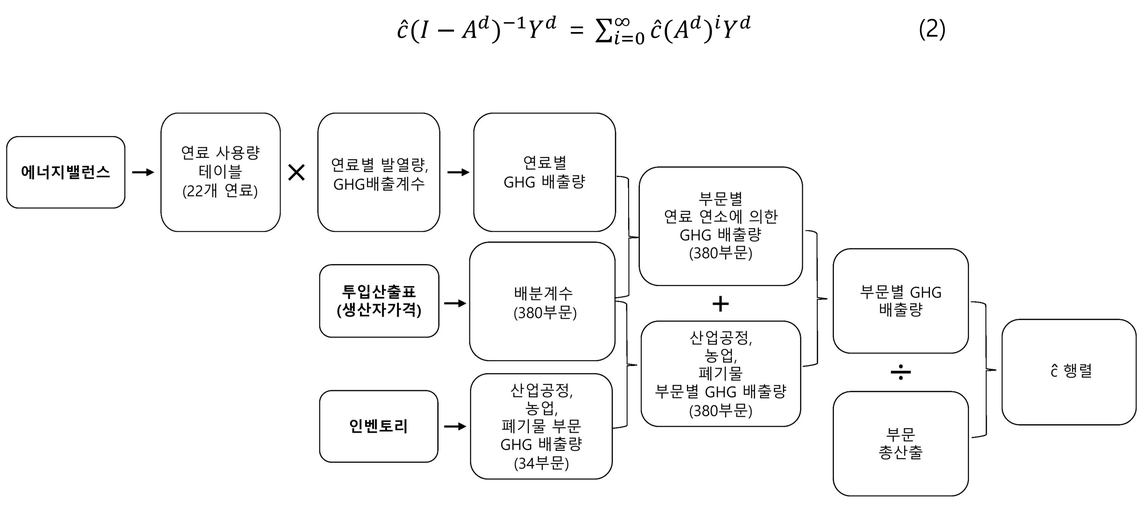


그림 1. 환경계정($\hat{c}$) 구축 절차

3.2. 사용 데이터

- 환경산업연관분석 모델은 산업연관표와 환경계정(그림 1)으로 이루어져 있으며(Suh, 2015), 모델 개발을 위해 2020년 생산자가격 기준 380개 기본부문 산업연관표, 2020년 확장 에너지 밸런스, 2020년 국가 온실가스 인벤토리를 활용하였다.
- 가계 소비 탄소발자국 산정을 위해서 통계청의 2020년 가계동향조사 결과를 최종수요(Y^d, Y^m)에 대한 입력 자료로 활용했다.

4. 결과와 토의

4.1. 가계 평균 탄소발자국

- 2020년 가계 평균 탄소발자국은 12.41CO_2eq.이었으며, 소비영역별로는 주거에너지 탄소발자국이 6.41CO_2eq.으로 비중이 가장 컸고, 교통 2.77CO_2eq., 상품·서비스 1.75CO_2eq., 식품·외식 1.49CO_2eq. 순이었다(그림 2). 주거에너지와 교통의 탄소발자국이 전체의 73.9%를 차지하여 에너지 사용에 따른 탄소발자국 비중이 매우 높음을 확인할 수 있었다.
- 1인당 탄소발자국[1]은 5.17CO_2eq.으로 핀란드나 일본보다는 낮고, 중국, 브라질, 인도 등 개발도상국보다는 높았다(그림 2).

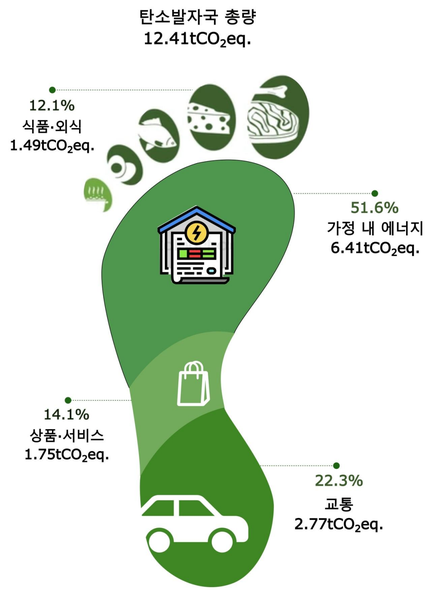
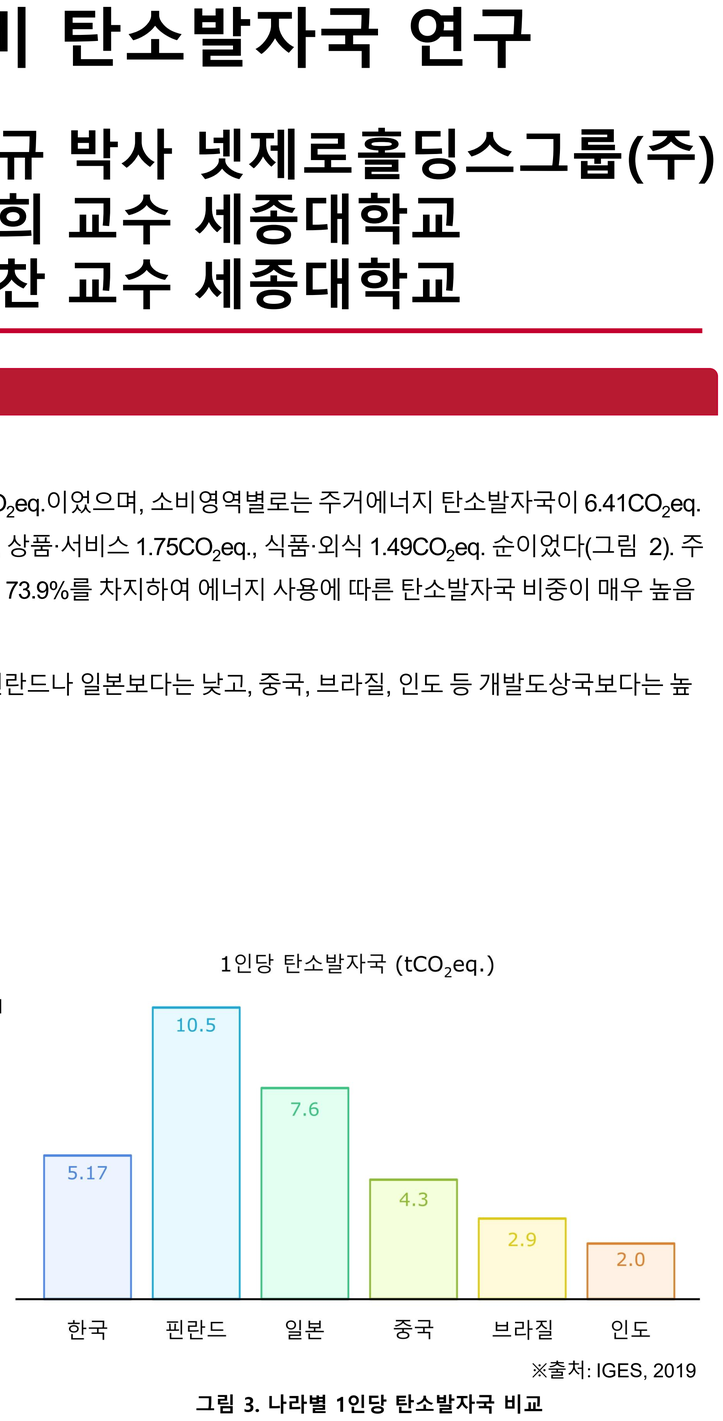


그림 2. 2020년 가계 평균 탄소발자국

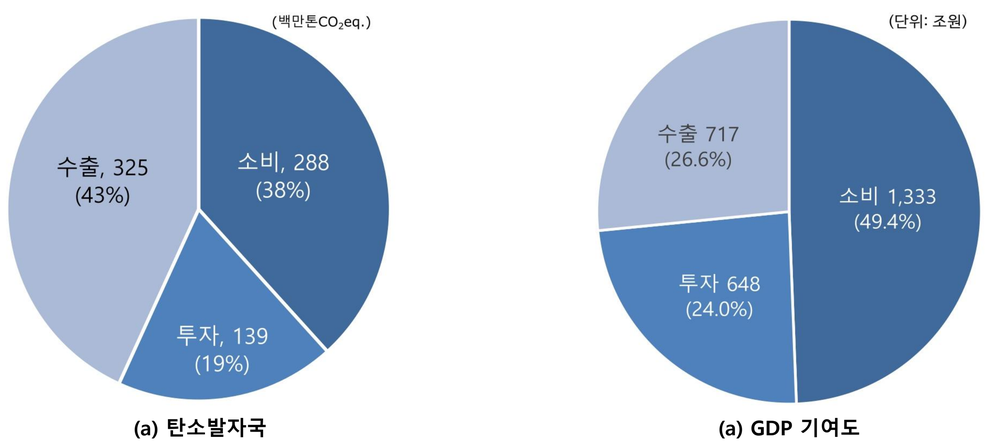


※출처: IGES, 2019

그림 3. 나라별 1인당 탄소발자국 비교

4.2. 국가단위 탄소발자국

- 소비, 수출, 투자 탄소발자국의 총합은 7억 5200만tCO$_2$eq.이며, 이중 소비 탄소발자국 비중은 38%로 GDP 기여도 49.4%보다 작지만, 수출의 탄소발자국 비중은 43%로 GDP 기여도 26.6%보다 컸다(그림 3).



(a) 탄소발자국 (a) GDP 기여도

그림 4. 소비, 투자, 수출의 탄소발자국과 GDP 기여도

4.3. 토의

- 가계 탄소발자국 중 주거에너지와 교통의 탄소발자국이 전체 탄소발자국의 73.9%로 에너지 사용에 따른 탄소발자국 비중이 높았다. 국가 인벤토리에서 에너지 부문 차지하는 비중 76.4%와 비슷한 경향을 보인다.
- 이는 산업 뿐만 아니라 가계에서도 에너지 사용량이 많으며, 가계 탄소발자국을 줄이기 위해 **에너지 사용량 줄이기**와 **재생에너지 전환을 통한 전력배출계수를 낮추**는 것이 시급함을 시사한다.
- 1인당 탄소발자국은 5.17tCO$_2$eq.로 생산기준 1인당 배출량[2] 12.8tCO$_2$eq.의 40.4%에 불과하다. 이는 한국 경제가 철강, 석유화학, 반도체 등 온실가스 고배출 산업의 수출비중이 높기 때문으로 보인다.
- 한국의 온실가스 감축을 위해서는 **소비 탄소발자국 감축만으로는 충분치 않으며 에너지 시스템과 산업의 탈탄소화를 병행해야 함**을 시사한다.

1) 가계 탄소발자국을 2020년 가구당 평균 가구원 수 2.4명(통계청, 2021)으로 나눈 값이다.
2) 생산기준 1인당 배출량은 국가 온실가스 인벤토리 총배출량을 총인구수로 나눈 값이다.

5. 결론

- 산업연관표, 에너지 밸런스, 국가 온실가스 인벤토리 등 국내 데이터를 기반으로 개발한 **고해상도 산업연관분석 모델**을 이용하여 가계 소비 탄소발자국을 분석하여, 산정이 쉬운 난방, 전력, 수도, 생활폐기물, 교통 등 제한적 소비 영역만을 평가한 기존 국내 선행연구와 달리 **모든 소비 영역의 탄소발자국을 국가 통계 데이터를 이용하여 체계적으로 평가**하였다는 데 연구 의의가 있다.
- 가계 탄소발자국 중 **에너지 소비(주거에너지와 교통)의 비중이 73.9%**로, 소비 측면 온실가스 감축을 위해서는 **가계 에너지 소비에 따른 탄소발자국을 줄이는 것이 시급**함을 확인하였다. 가구 내 **에너지 절감** 노력 뿐만 아니라 에너지 **특히 전력의 배출계수를 낮추는** 게 시급한 과제이다.
- **1인당 탄소발자국은 생산기준 1인당 배출량의 40.4%**였으며, 이 수치는 국가 단위 소비, 수출, 투자의 탄소발자국 중 **소비의 비중 38%와 유사**하였다. 이는 소비기반 온실가스 배출량과 생산기반 온실가스 배출량 모두 **가계 소비로 인한 배출량이 산업 활동으로 인한 배출량보다 낮다는 것**을 의미한다. 따라서 한국의 온실가스 배출량을 감축하는데 있어 **소비측면의 온실가스 감축만으로는 한계가 있으며, 탄소배출량이 높은 에너지 전환부문과 산업부문의 탈탄소화를 병행해야 함**을 시사한다.

사사: 이 연구는 환경부「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.