

## 국제무역에 함유된 탄소이력(carbon footprint)의 측정과 분석: MRIO모형의 응용<sup>†</sup>

신 동 천\*

**요약** : 국제무역에 함유된 탄소이력에 대한 연구는 탄소배출의 궁극적인 책임소재에 관한 논란과 연관되어 있다. 지구온난화를 늦추기 위한 범세계적인 노력의 일환으로 수행되는 국가온실가스배출량 집계에 소비에 함유된 탄소배출을 어떤 방식으로든 일부나마 반영하여야 한다는 주장이 제기되고 있다. 본 연구에서는 최근에 발표된 GTAP의 자료기반으로부터 다지역 투입-산출 분석을 위한 각 지역의 투입-산출표를 구성해서 각 지역의 생산과 소비에 함유된 탄소배출량, 따라서 국제무역에 함유된 탄소이력을 측정하였다. 또한 이와 관련된 각 지역의 수출과 수입의 탄소집약도를 분석하고 각 지역의 국민소득이 증가할 때 한국과 세계 전체의 탄소배출량 및 한국의 탄소무역수지에 미치는 효과를 계산하였다. 한국은 에너지 연소로 인한 탄소배출에 관한 한 이산화탄소의 순수입국이나 소비기반 배출량과 생산기반 배출량의 차이가 크지 않은 탄소무역수지 균형에 가까운 것으로 평가되었고 한국의 주요 교역대상국인 선진국들은 탄소무역수지 적자국이며 개발도상국들은 탄소무역수지 흑자국으로 평가되었다.

**주제어** : 탄소이력, 국제무역, MRIO모형

**JEL 분류** : F1, Q2

접수일(2012년 10월 8일), 수정일(2012년 11월 12일), 게재확정일(2012년 11월 15일)

<sup>†</sup> 본 연구는 2012년도 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

\* 연세대학교 경제학부 교수(e-mail: shindc@yonsei.ac.kr)

# The Calculation of Carbon Footprint Embodied in International Trade: A Multi-Regional Input-Output Analysis

Shin Dong Cheon

**ABSTRACT :** The recent analyses of carbon emissions embodied in international trade are related with discussions on who is responsible for the carbon emissions causing global warming. Some authors insist that the countries importing carbon-intensive goods should share the responsibility with the suppliers of those goods. In order to determine which countries are net importers of carbon dioxide embodied in traded goods, we need to construct the multi-regional input-output (MRIO) model incorporating national input-output tables and data on bilateral trades. The paper calculates consumption-based as well as production-based inventories by using MRIO model whose global database is GTAP version 8 to get the picture of carbon footprints in international trades of Korea and other regions in the world.

**Keywords :** Carbon footprint, Trade, MRIO Model

---

Received: October 8, 2012, Revised: November 12, 2012, Accepted: November 15, 2012.

\* School of Economics, Yonsei University(e-mail: shindc@yonsei.ac.kr)

## I. 서론

상품의 국제무역은 지역간 상품의 직접적 이동을 의미할 뿐만 아니라 교역상품의 생산에 투입된 생산요소와 자원이 상품의 국제무역을 통하여 간접적으로 지역간 이동하는 것으로 볼 수 있다. 상품의 국제무역을 통하여 생산요소와 자원이 간접적으로 교역되는 현상은 국제무역이론에서는 요소함유량 모형(factor-content model of trade)에 의하여 분석되고 있다. 상품의 생산과정에서 배출되는 이산화탄소는 부(負)의 결합생산물이긴 하지만 일종의 투입요소로 생각할 수 있으며 노동이나 자본과 같은 본원적 생산요소의 간접적인 국제무역과 마찬가지로 상품의 국제무역을 통하여 이산화탄소가 간접적으로 교역되는 것으로 볼 수 있다. 상품의 국제무역이 상품의 생산과 소비의 차이이듯이 상품의 국제무역에 간접적으로 함유된 탄소량은 상품 생산과정에서 배출되는 탄소량과 상품 소비에 간접적으로 함유된 탄소량의 차이이다.

국제무역에 함유된 탄소이력(炭素履歷, carbon footprint)에 관한 최근의 논의는 국가온실가스배출량의 정의 및 측정과 온실가스 배출의 궁극적 책임문제를 둘러싼 논란과 관련되어 있다. UN기후변화협약이 요구하는 국가온실가스배출량 통계는 해당 국가의 통치권이 미치는 지역 및 국경 내에서의 온실가스배출량(territorial-based inventory)으로 국경 내의 에너지, 공정과정, 솔벤트, 농업, 토지사용 및 폐기물에서 발생한 온실가스 배출량을 집계한 것이다. UN기후변화협약의 국가온실가스배출량 통계에는 국제운송부문에서 발생하는 온실가스배출량이 포함되지 않는다. 이와 관련하여 국가온실가스배출량 통계가 국제운송부문에서 발생하는 탄소배출량을 포함하여야 할 뿐만 아니라 국민계정체계(system of national accounts, SNA)와 일관되고 환경을 포함하는 국가회계행렬(national accounting matrix including environmental accounts, NAMEA)을 작성하기 위해서도 경제주체들의 생산활동으로 인한 온실가스배출량(production-based inventory)뿐만 아니라 소비에 기인한 온실가스배출량(consumption-based inventory)도 측정할 필요가 있다는 주장이 대두되고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 주장의 배경에는 온실가스 배출증가에 대한 책임이 온실가스 배출상품에 대한

---

1) Rodrigues et al(2006), Lenzen et al(2007), Peters(2008)와 Wiedmann(2009c)을 참조.

수요에도 일부 있다는 온실가스 배출의 소비책임론이 있다. 개발도상국들이 선진국의 수요를 충족시키기 위한 수출품 생산에서 발생하는 온실가스 배출량의 일부 책임이 수요당사자인 선진국에도 있다는 것이다. 즉 선진국의 온실가스 감축책임이 개발도상국으로부터의 탄소집약적인 상품수입을 통하여 회피되고 있다는 것이다. 본 연구의 결과도 상품의 국제무역을 통하여 개발도상국은 탄소를 순수출하고 선진국은 탄소를 순수입하는 무역구조를 가지고 있는 것으로 나타나 선진국이 탄소집약적인 상품에 대한 수요를 개발도상국으로부터의 수입에 의하여 충족시키고 있는 것으로 나타난다.

상품의 생산과 소비, 국제무역에 함유된 탄소이력<sup>2)</sup>을 측정하기 위한 방법으로는 상품의 생애주기평가(life cycle assesment, LCA)모형과 같은 상향식 방법과 다지역 투입-산출표를 이용한 하향식 방법, 이 두 가지 방법을 혼합한 하이브리드 혼합형 모형이 있다<sup>3)</sup>. 각 방법에는 각자 나름의 장단점이 있으나 본 연구에서는 다지역 투입-산출표(multi-regional input-output table, MRIO)를 이용한 방법을 채택하여 에너지 연소에 기인한 이산화탄소 배출이 한국과 한국의 대외부문에서 큰 비중을 차지하는 지역들의 생산, 소비 및 국제무역에 함유되는 탄소이력을 측정하고, 한국을 비롯한 각 지역의 국제무역의 탄소집약도와 각 지역의 국민소득 증가로 인한 최종수요의 증가가 한국과 세계 전체의 탄소배출 및 한국의 탄소무역수지에 미치는 효과를 분석한다. 제2장은 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소배출량 추정을 위한 기본적 다지역 투입-산출(MRIO) 모형을 설정하고 2012년에 발표된 GTAP(Global Trade Analysis Project) version 8의 자료기반으로부터 몇 가지 가정에 입각하여 분석에 필요한 MRIO표를 구축하는 방법을 설명한다. 제3장은 MRIO모형을 이용하여 한국을 포함한 세계 각 지역의 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소이력을 계산하고 각 지역의 국민소득 증가가 한국의 탄소배출량과 탄소무역수지에 미치는 효과를 분석한다. 제4장은 요약 및 결론이다.

2) 탄소이력(carbon footprint)의 개념 정의와 관련하여 오해의 소지가 있으나 본 연구에서의 개념은 시간에 걸친 탄소배출량 추이를 말하는 것이 아니라 상품생산에 위하여 투입되는 중간재들에 직간접적으로 함유된 탄소배출량을 포함하여 상품의 전(全)생산과정에서 배출된 탄소배출량을 의미한다.

3) 탄소이력을 측정하기 위한 상·하향식 모형의 최근 동향과 각 모형의 장단점에 관한 간략한 고찰은 Wiedman(2009a) 참조.

## II. 탄소이력 측정을 위한 MRIO모형

### 1. MRIO모형의 구조

환경오염과 환경오염제거 산업을 투입-산출표에 명시적으로 도입한 것은 Leontief (1971)이지만 투입-산출 모형을 통하여 국제무역에 간접적으로 함유된 환경오염을 분석한 것은 Walter(1973)가 최초라고 볼 수 있다. Walter(1973) 이후 온실가스 배출증가로 인한 지구온난화 문제가 심각하게 대두되면서 상품의 생산, 소비와 국제 무역에 함유된 온실가스 배출량이 다시 관심의 대상이 되어 투입-산출 모형을 이용한 많은 연구들이 수행되었다.<sup>4)</sup> 투입-산출 모형을 이용하여 단일국가의 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소배출량을 추정하는 분석은 대부분 수입재에 대하여 자국의 해당 수입경쟁산업의 탄소집약도를 적용하는 이른바 국내기술가정(domestic technology assumption, DTA)을 채택하고 있으나, GTAP이나 GRAM<sup>5)</sup>과 같이 세계의 많은 국가와 지역들이 포함되는 다지역 투입-산출표를 구축할 수 있는 지역별 자료와 국가간 국제무역자료의 확보가 가능해지면서 각국의 생산기술을 반영하는 각국별 및 산업별 탄소집약도를 적용하는 다지역 산업연관분석을 할 수 있는 기반이 마련되었다. 다지역 투입-산출 모형을 이용하여 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소이력을 분석하고 있는 비교적 최근의 연구들로 GTAP의 자료기반을 이용한 Peters and Hertwich (2008b), Hertwich and Peters(2009), Andrew et al(2009), Davis and Caldeira(2010) 등과 GRAM의 자료기반을 이용한 Wiebe et al(2012) 등이 있다.

국제무역에 함유된 탄소배출량을 측정하기 위한 하향식 투입-산출 모형은 두 가지가 있다. 비교적 간단하게 국제무역의 탄소이력을 계산할 수 있는 방법은 이른바 ‘국가간 국제무역에 함유된 배출량(emissions embodied in bilateral trade, EEBT)모형’을 이용하는 것이다<sup>6)</sup>. EEBT모형에서는 생산으로 인한 탄소배출량을 수출수요

4) 소비와 국제무역에 함유된 탄소이력을 추정하기 위한 투입-산출 모형들에 관한 기존 연구들에 관한 고찰은 Wiedmann(2009c)과 Wiedmann et al(2007)를 참조.

5) 지속가능유럽연구소(Sustainable Europe Research Institute, SERI)의 GRAM(Global Resource Accounting Model)은 48개 산업으로 구성되어 있고 53개국과 2지역에 대하여 1995년-2005년사이의 소비에 함유된 탄소배출량을 계산할 수 있는 다지역 산업연관 모형임.

6) 국제무역에 함유된 탄소이력 계산을 위한 EEBT모형과 MRIO모형 구조에 관해서는 Peters(2008)를 참

를 포함한 국내재에 대한 최종수요를 충족시키는 산출에 기인한 탄소배출량으로 정의하고, 소비에 함유된 탄소배출량은 수출수요를 제외한 국내재에 대한 최종 수요를 충족시키는 산출에 기인한 탄소배출량과 수입재에 함유된 탄소배출량을 합한 배출량으로 정의한다. 국제무역에 함유된 탄소배출량은 이렇게 계산된 생산으로 인한 배출량과 소비에 함유된 배출량의 차이가 된다.

국제무역의 탄소이력을 계산할 수 있는 두 번째 모형인 MRIO모형은 분석에 필수적인 일부의 통계자료가 존재하지 않기 때문에 가정을 통하여 GTAP 자료기반으로부터 도출하여야 하는 어려움이 있긴 하지만 소비에 함유된 탄소이력을 계산하는데 이론적으로 타당한 모형이라고 볼 수 있다. MRIO모형은 해외로부터의 수출수요를 최종수요용과 중간투입용으로 구분한다. 수출재를 생산하기 위하여 해외로부터 중간투입재를 수입하고 그 수출재가 다른 상품의 중간투입재가 되어 그 상품이 수입되지 않는다면 그 중간투입재를 생산하는 과정에서의 탄소배출량은 중간투입재 수입국의 소비에 함유된 탄소이력에 포함되지 않는다. 만약  $r$ 국으로부터의 수입재를 중간투입하여 생산되는  $k$ 국의 수출재가 다시  $r$ 국의 수출재 생산에 중간투입되어  $k$ 국의 최종수요 용도로 수입된다면  $k$ 국의 수출재 생산에 투입된 중간투입 수입재 생산에서 발생한 탄소배출량의 일부가  $k$ 국의 소비에 함유된 탄소이력에 포함된다. 이러한 관계가 국가간 국제무역과 각국의 투입-산출 관계를 통하여 대단히 복잡하게 얽혀 있다. MRIO모형은 국제무역과 투입-산출 관계로 연결된 생산과 소비에서 오로지 궁극적인 최종소비에 함유된 탄소이력만을 소비에 함유된 탄소배출량으로 계산한다. MRIO모형과 EEBT모형은 산출량이 동일하기 때문에 생산에 기인한 탄소배출량은 두 모형이 동일하나 MRIO모형은 수출재를 무역상대국의 최종수요용도와 중간투입용도로 구분하기 때문에 소비에 함유된 탄소배출량은 서로 다르다.

국제무역에 함유된 탄소이력을 계산할 수 있는 MRIO모형의 기본구조는 비교적 잘 알려져 있다<sup>7)</sup>. 본 분석에서 사용하는 모형에서  $k$ 와  $r$ 은 국가 혹은 지역을 나타내며  $G$ 는 국가 혹은 지역의 총수이다.  $i$ 와  $j$ 는 산업을 표시하며  $N$ 은 산업의 총수

조하고 Peters and Hertwich(2008b)는 EEBT 모형을 이용하여 국제무역에 함유된 탄소배출량이 교토 의정서와 같은 글로벌 기후정책의 효과성에 갖는 의미를 분석하고 있다.

7) 생산 및 소비기반 탄소배출량을 계산하기 위한 아래의 MRIO모형 기본식들은 표준적인 투입-산출표의 회계구조를 가지고 있다(Peters(2008) 참조).

를 나타낸다.  $X^k$ 를 산출벡터,  $A^k$ 를 투입-산출 계수행렬,  $y^k$ 를 민간소비, 정부소비 및 투자를 합한 최종수요벡터,  $e^k$ 를 수출수요벡터,  $m^k$ 를 수입벡터라고 하면 기본적인 투입-산출 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$X^k = A^k X^k + y^k + e^k - m^k \quad (1)$$

다지역 투입-산출 모형에서  $k$ 국의 총수출은 다른 모든 국가들에 대한 수출( $e^{kr}$ ,  $r \neq k$ )의 합계이므로  $e^k = \sum_{r \neq k} e^{kr}$ 로 나타낼 수 있으며 투입-산출 계수행렬은 국산거래표로부터 계산된 계수행렬( $A^{kk}$ )와 수입거래표로부터 계산된 계수행렬( $A^{km}$ )의 합계로 표시할 수 있고 최종수요 역시 국내재에 대한 최종수요( $y^{kk}$ )와 수입재에 대한 최종수요( $y^{km}$ )의 합계로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} X^k &= A^{kk} X^k + A^{km} X^k + y^{kk} + y^{km} + \sum_{r \neq k} e^{kr} - m^k \\ &= A^{kk} X^k + y^{kk} + \sum_{r \neq k} e^{kr} \quad (\because A^{km} X^k + y^{km} = m^k) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $k$ 국이  $r$ 국에 수출하는 상품은  $r$ 국의 최종소비( $y^{kr}$ )에 사용하거나  $r$ 국의 상품생산을 위한 중간투입재( $z^{kr}$ )로 사용된다. 즉  $e^{kr} = z^{kr} + y^{kr}$  이 되며  $k$ 국이 수출하고  $r$ 국이 수입하여 중간투입 용도로 사용하는 상품들은  $r$ 국의 투입-산출관계에 의하여 각 상품생산에 투입된다.  $k$ 국이  $r$ 국에 중간투입 용도로 수출하는 상품들에 대한  $r$ 국의 투입-산출 행렬을  $A^{kr}$ 이라고 하면  $z^{kr} = A^{kr} X^r$ 이며 따라서 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X^k &= A^{kk} X^k + y^{kk} + \sum_{r \neq k} A^{kr} X^r + \sum_{r \neq k} y^{kr} \\ &= \sum_r A^{kr} X^r + \sum_r y^{kr}, \quad k = 1, 2, \dots, G \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 모든 국가 혹은 지역에 대한 행렬 형태로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1G} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{G1} & A^{G2} & \dots & A^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_r y^{1r} \\ \sum_r y^{2r} \\ \vdots \\ \sum_r y^{Gr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$(X = AX + Y)$$

$k$ 국의 산업별 탄소집약도(carbon intensity)를  $b^k = (b_1^k, b_2^k, \dots, b_n^k)$ 라고 하고  $k$ 국의 상품생산으로 인한 탄소배출량을  $f_p^k$ 라고 하면 각국의 생산으로 인한 탄소배출량은 다음과 같이 계산된다.

$$F_p = B(I - A)^{-1} Y \quad (5)$$

$$F_p = (f_p^1, f_p^2, \dots, f_p^G)', \quad Y = (\sum_r y^{1r}, \sum_r y^{2r}, \dots, \sum_r y^{Gr})'$$

$$B = \begin{bmatrix} b^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & b^3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b^G \end{bmatrix}$$

반면에  $k$ 국의 소비에 함유된 탄소배출량을 계산하기 위해서는  $k$ 국의 국내재에 대한 최종수요를 충족시키는 산출에서 배출되는 탄소량과  $k$ 국이 최종소비를 위하여 해외로부터 수입하는 수입재를 해당 수출국가에서 생산하는데 배출되는 탄소량을 합해야 한다.  $k$ 국이 최종소비를 위하여 각국으로부터 수입하는 수입벡터를  $y^{*k} = (y^{1k}, y^{2k}, \dots, y^{Gk})'$ ,  $k$ 국의 최종소비에 함유된 탄소배출량을  $f_c^k$ ,  $diag(B)$ 를  $B$ 행렬의 대각선에 있는 값들로 이루어진 벡터(즉,  $diag(B) \equiv (b^1, b^2, \dots, b^G)$ )라고 하면  $f_c^k$ 는 다음 식 (6)에 의하여 계산된다.

$$f_c^k = diag(B) (I - A)^{-1} y^{*k}, \quad k = 1, 2, \dots, G \quad (6)$$



식 (6)에 의한 소비에 함유된 탄소배출량과 식 (5)에서 계산되는 생산에서 발생하는 탄소배출량의 차이가 MRIO모형에 의한 국제무역에 함유된 탄소배출량이 된다.

EEBT모형은 MRIO모형과는 달리 식 (4)의  $A$  행렬 전체를 구축할 필요가 없으며 각 지역의 국산거래표와 국가간 국제무역에 관한 자료만 있으면 생산, 소비 및 국제 무역에 함유된 탄소이력을 계산할 수 있다. EEBT모형에서 생산활동으로 인한 탄소 배출량은 다음과 같이 정의된다.

$$f_p^k = b^k \cdot (I - A^{kk})^{-1} (y^{kk} + \sum_{r \neq k} e^{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, G \quad (7)$$

MRIO모형과 EEBT모형의 출발은 식 (2)이며 두 모형의 차이는 수출을 최종수요용과 중간투입용으로 나누는지 여부에 있기 때문에 두 모형에서 계산되는 생산에 기인한 탄소배출량은 동일하다. 즉 식 (7)에 의하여 계산된 탄소배출량과 식 (5)에 계산된 탄소배출량은 동일하다. 그러나 소비에 함유된 탄소배출량은 두 모형에서 다른 값을 갖게 된다. EEBT모형에서 소비에 함유된 탄소배출량( $f_{ce}^k$ )은 다음 식 (8)에 의하여 정의된다.

$$f_{ce}^k = b^k \cdot (I - A^{kk})^{-1} y^{kk} + \sum_{r \neq k} b^r \cdot (I - A^{rr})^{-1} e^{rk}, \quad k = 1, 2, \dots, G \quad (8)$$

식 (8)의 우변의 첫 항은 국내재에 대한 최종수요를 충족시키는 산출을 생산하는데 따르는 탄소배출량이고 두 번째 항의  $(I - A^{rr})^{-1} e^{rk}$ 는  $k$ 국이  $r$ 국으로부터 수입하는 수입벡터( $e^{rk}$ )를  $r$ 국이 수출하기 위하여 필요한  $r$ 국의 산출벡터를 나타낸다. 따라서 우변의 두 번째 항은  $k$ 국의 수입수요를 충족시키기 위한 산출을 생산하는데 따르는 각 지역의 탄소배출량의 합계이다. MRIO모형의 소비기반 탄소배출량인 식 (6)과 EEBT모형의 소비기반 탄소배출량인 식 (8)은 서로 다른 값을 갖는다.

## 2. MRIO표의 도출

다지역 투입-산출 분석을 통하여 국제무역에 함유된 탄소이력을 계산하기 위해

서는 각 국의 산업연관표와 이들 국가간의 쌍무적 교역에 관한 자료가 필요하다. 글로벌 자료기반을 제공하는 GTAP은 원래 연산일반균형(CGE)모형을 위한 자료기반이나 MRIO모형이 필요로 하는 각 국의 투입-산출표와 국가간 국제무역자료를 포함하고 있으며 각 국별 및 산업별로 에너지 연소에 따른 이산화탄소 배출량 통계를 제공하고 있어서 국제무역에 함유된 에너지 연소에 따른 탄소이력을 계산할 수 있는 자료기반이 될 수 있다. 본 연구에서는 2012년에 발표된 GTAP version 8로부터 식 (4)의 MRIO표(즉, 행렬 $A$ ) 작성에 필요한 자료를 추출하여 식 (5)와 식 (6)으로부터 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 에너지 연소로 인한 탄소배출량을 계산한다<sup>8)</sup>.

GTAP자료에서 상품가격은 구매자가격(agent's price), 시장가격(market price) 및 국제가격(world price)의 세 종류가 있다. 시장가격은 구매자가격에서 상품세를 뺀 값이다. 국제무역에 함유된 탄소이력을 측정하는 연구에서 일반적으로 권장되고 있는 기초가격(basic price)에 해당되는 가격은 없으나 시장가격이 기초가격에 가장 가깝기 때문에 기존의 다른 연구에서와 같이 시장가격으로 평가된 투입-산출표를 사용한다. 식 (4)의 행렬 $A$ 의 대각선에 있는 투입-산출 계수행렬  $A^{kk}$ ,  $k = 1, 2, \dots, G$ , 는 개별 국가나 지역의 국산거래표로부터 계산되며 이는 GTAP 자료에서 바로 얻을 수 있다. 그러나 GTAP의 수입거래표은 각 산업에 중간투입되는 상품들의 수입은 알 수 있으나 그 상품들이 어느 국가로부터 수입되었는지는 알 수 없다. 따라서 대각선 바깥에 있는 행렬  $A^{kr}$ ,  $k \neq r$ , 들은 가정을 통하여 도출하여야 한다.

$A^{kr} = [a_{ij}^{kr}]_{i,j=1,2,\dots,N}$ 은  $r$ 국이  $k$ 국으로부터 중간투입 용도로 수입한 상품들의 투입-산출 계수행렬이다.  $A^{kr}$ 에서  $r$ 국 산업 $j$ 에서의 중간투입을 위하여  $k$ 국으로부터 수입된 상품 $i$ 의 수량이  $z_{ij}^{kr}$ 이고  $r$ 국의 상품 $j$ 의 산출량을  $x_j^r$ 이라하면  $a_{ij}^{kr} = z_{ij}^{kr}/x_j^r$ 이 된다.  $z_{ij}^{kr}$ 의 값을 구하기 위해서는 별도의 가정이 필요하며 본 연구에서는 Peters (2008), Rutherford(2010) 및 Peters, Andrew and Lennox(2011) 등이 사용한 다음과 같은 방법을 채택한다. 즉,  $k$ 국이  $r$ 국으로 수출한 상품 $i$ 의 수출( $e_i^{kr}$ )에  $r$ 국의 상품 $i$  총수입( $m_i^r$ )에서  $r$ 국의 산업 $j$ 의 중간투입 용도로 사용된 상품 $i$ 의 수입( $z_{ij}^{rm}$ )이 차이

8) 2012년에 발표된 GTAP version 8가 가장 최신판이긴 하지만 수록하고 있는 통계자료는 2007년도를 대상으로 하고 있다.

하는 비율을 곱하여  $z_{ij}^{kr}$  을 구한다.

$$z_{ij}^{kr} = \frac{z_{ij}^{rm}}{m_i^r} e_i^{kr}, \quad (k \neq r) \quad (9)$$

식 (9)의  $z_{ij}^{kr}$  을  $r$ 국의 산업  $j$ 의 총산출( $x_j^r$ )로 나누면 식 (10)과 같이 행렬  $A^{kr}$  을 도출할 수 있다.

$$A^{kr} = [a_{ij}^{kr}]_{i,j=1,2,\dots,N} = \left[ \frac{z_{ij}^{kr}}{x_j^r} \right]_{i,j=1,2,\dots,N} \quad (k \neq r) \quad (10)$$

GTAP은 각국의 국내재에 대한 최종수요( $y_i^{kk}$ )와 수입재에 대한 최종수요( $y_i^{rm}$ )에 관한 자료를 제공하나 최종수요를 위한 수입재를 어느 국가가 얼마나 수출했는지는 알 수 없다. 따라서 식 (4)의  $k$ 국이  $r$ 국의 최종수요 용도로 수출하는 상품  $i$ 의 수출( $y_i^{kr}$ )도  $z_{ij}^{kr}$  을 도출하는 방법과 동일한 방법으로 도출한다.

$$y_i^{kr} = \frac{y_i^{rm}}{m_i^r} e_i^{kr} \quad (k \neq r) \quad (11)$$

식 (9)과 식 (11)에서  $\sum_j z_{ij}^{rm} + y_i^{rm} = m_i^r$  이므로  $\sum_j z_{ij}^{kr} + y_i^{kr} = e_i^{kr}$  이 성립한다.

식 (9)~식 (11)로부터 식 (4)의 다지역 투입-산출 계수행렬  $A$ 와 각 지역 최종수요 벡터  $Y$ 를 도출할 수 있으며 이를 이용하여 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소이력을 계산하는데 필요한 MRIO표를 구축할 수 있다. GTAP version 8은 129개 국가 및 지역과 57개 산업 대한 산업연관표와 국가간 국제무역 자료를 포함하고 있으며 본 연구에서는 <표 1>과 같이 한국경제의 국제무역에 있어서 중요한 비중을 차지하는 국가와 지역을 중심으로 14개 국가 및 지역으로 통합하였고 산업은 에너지 연소에 따르는 탄소배출에 중요한 산업들을 포함하여 한국은행(2009)의 분류기

〈표 1〉 지역 및 산업 분류

지 역		산 업			
R1.	한국	S1.	농림수산업	S15.	수송장비
R2.	중국	S2.	석탄	S16.	전자제품
R3.	일본	S3.	원유	S17.	기타기계제품
R4.	미국	S4.	천연가스	S18.	기타제조업
R5.	대만	S5.	광물	S19.	전력
R6.	홍콩	S6.	음식료품	S20.	도시가스·증기
R7.	기타아시아	S7.	섬유·가죽	S21.	수도
R8.	오세아니아	S8.	목재	S22.	건설
R9.	북미(미국제외)	S9.	종이·인쇄·출판	S23.	도소매·숙박·음식
R10.	라틴아메리카	S10.	석탄·석유 제품	S24.	운수·보관
R11.	유럽연합	S11.	화학제품	S25.	방송·통신
R12.	중동	S12.	비금속광물	S26.	금융·보험
R13.	아프리카	S13.	1차 금속	S27.	공공행정·교육·보건
R14.	기타지역	S14.	금속제품	S28.	기타서비스

준에 맞추어 28개 산업으로 통합하였다.

국제무역에 함유된 탄소이력의 측정을 위하여 GTAP의 산업별 및 국가별 에너지 연소로 인한 이산화탄소 배출량 자료를 이용하여 산업별 탄소집약도(산출 100만 달러당 이산화탄소 배출량)를 계산하였다. GTAP의 이산화탄소 배출량 통계를 이용하면 한국의 2007년도 에너지 연소로 인한 탄소배출량은 4억 2,413만 톤인 것으로 계산된다. 그러나 녹색성장위원회(2012)는 2007년도 에너지 연소로 인한 한국의 이산화탄소배출량이 4억 9,580만 톤인 것으로 발표하여 GTAP 자료와 약 7,000만 톤의 차이를 보이고 있고 심상렬(2005)이 제시하는 에너지산업연관표의 항등식 구조를 이용하여 계산한 이산화탄소배출량과는 더 큰 차이가 나는 것으로 나타난다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 통계의 일관성을 위하여 GTAP으로부터 계산된 산업별 및 국가별 탄소집약도를 적용하였다.9)

9) GTAP version 8의 에너지 및 이산화탄소 배출량은 국제에너지기구(IEA)의 자료에 기반을 두고 있으며 GTAP-E 또는 그 이후 버전의 에너지 및 이산화탄소 배출량 추계와 비슷할 것으로 생각되나 공식적으로 version 8에 대한 구체적인 기준이나 해설이 제공되지 않았다. 한국의 공식발표 자료와의 차이는 석유 및 석탄제품의 자기부문 투입액과 그에 대한 배출계수의 차이점 등으로 발생하는 것으로 사료

### III. 국제무역에 함유된 탄소이력의 측정

14개 국가 및 지역과 28개 산업에 대한 다지역 투입-산출표를 구축한 후 수출을 수입국의 최종수요를 위한 수출과 수입국의 중간투입을 위한 수출로 분리하는 MRIO 모형의 생산기반 탄소배출량을 계산하는 식 (5)와 소비에 함유된 탄소배출량을 계산하는 식 (6)을 적용하여 계산한 결과가 <표 2>에 제시되었다. 한국은 소비에 함유된 탄소배출량이 생산에 기인하는 배출량보다 커서 탄소를 순수입하는 것으로 나타나나 다른 선진국들에 비하여 탄소무역수지는 균형에 가까운 것으로 나타났다. 한국의 국제무역에서 큰 비중을 차지하고 있는 국가 혹은 지역 중에서 예상대로 중

<표 2> 국제무역에 함유된 CO<sub>2</sub>배출량(MRIO 모형)

(단위: 백만 CO<sub>2</sub> 톤, %)

지 역	소비기반 배출량 (A)	생산기반 배출량 (B)	순수입 배출량 (C=A-B)	C/B (%)
한국	438.79	424.13	14.65	3.45
중국	4175.09	5268.80	-1093.71	-20.76
일본	1243.33	1067.79	175.54	16.44
미국	6184.78	5583.42	601.36	10.77
대만	193.46	258.33	-64.87	-25.11
홍콩	105.79	80.27	25.53	31.81
기타아시아	2392.46	2605.09	-212.63	-8.16
오세아니아	421.65	426.31	-4.66	-1.09
북미(미국제외)	985.29	965.49	19.79	2.05
중남미	1006.37	991.86	14.52	1.46
유럽연합	4754.85	3902.92	851.93	21.83
중동	1900.12	1859.85	40.27	2.17
아프리카	585.54	586.27	-0.74	-0.13
기타지역	2136.76	2503.76	-367.00	-14.66
세계 전체	26524.27	26524.27	0.00	

된다. 이러한 차이를 고려할 때 향후 산업연관표의 부문별 에너지 수요량 배분에 대하여 체계적인 검토가 필요할 것으로 생각된다(이 점을 지적해 준 익명의 심사위원께 감사드린다).

국은 탄소배출량의 순수출국으로 약 11억 톤의 탄소를 순수출하는 것으로 나타났으며 미국, 일본 및 유럽연합은 순수입국으로 나타났다. 미국은 약 6억 톤을 순수입하고 유럽연합은 약 8억 5,000만 톤, 일본은 1억 7,500만 톤을 순수입하고 있는 것으로 나타났다. 이들 세 지역에서 소비되는 상품에 함유된 탄소배출량의 합계는 약 121억 8,300만 톤으로 세계 전체의 탄소배출 총량의 약 46%를 점하고 있다. 이들 지역의 생산기반 탄소배출량은 105억 5,400만 톤으로 세계 전체의 탄소배출 총량의 약 40%로 상품의 국제무역을 통하여 세계 전체의 탄소배출 총량의 약 6%를 순수입하는 것으로 나타났다.

중국이 약 10억 9400만 톤의 탄소를 순수출함으로써 가장 큰 탄소 순수출국이며 기타아시아 등 주로 개발도상국과 후진국이 탄소배출의 순수출국임을 알 수 있다. 이러한 결과는 선진국들의 국가온실가스 배출저감 목표를 자국내 생산에서 발생하는 온실가스 배출량, 혹은 UN기후변화협약이 요구하는 국가온실가스배출량을 기준

〈표 3〉 소비, 생산 및 국제무역에 함유된 CO<sub>2</sub> 배출량 (EEBT모형)  
(단위: 백만 CO<sub>2</sub> 톤)

지 역	소비기반 배출량 (A)	생산기반 배출량 (B)	순수입 배출량 (C=A-B)	순수입 배출량 (MRIO)
한국	501.24	424.13	77.10	14.65
중국	4182.95	5268.80	-1085.85	-1093.71
일본	1255.74	1067.79	187.95	175.54
미국	5976.12	5583.42	392.70	601.36
대만	246.37	258.33	-11.95	-64.87
홍콩	121.36	80.27	41.09	25.53
기타아시아	2466.45	2605.09	-138.64	-212.63
오세아니아	407.34	426.31	-18.96	-4.66
북미(미국제외)	1002.80	965.49	37.31	19.79
중남미	987.34	991.86	-4.52	14.52
유럽연합	4778.03	3902.92	875.11	851.93
중동	1881.06	1859.85	21.21	40.27
아프리카	581.09	586.27	-5.19	-0.74
기타지역	2136.39	2503.76	-367.37	-367.00
세계 전체	26524.27	26524.27	0.00	

으로 하는 경우 세계 전체의 온실가스 저감목표 달성에 한계가 있다는 지적의 배경이 된다. 즉, 선진국들이 개발도상국들로부터 상대적으로 탄소집약도가 높은 제품들을 수입하여 자국수요를 충족시킴으로써 자국내 생산을 통한 온실가스 배출을 줄인다는 비판이 있다. 탄소집약도가 상대적으로 높은 상품에 대한 수요도 온실가스 배출증가에 일부 책임이 있기 때문에 국가온실가스배출량을 소비기반 배출량에 근거하거나 혹은 생산기반 배출량과 소비기반 배출량을 적정한 율로 가중평균하여 국가 온실가스배출량으로 정해야 한다는 주장도 제기되고 있다.

<표 3>은 MRIO모형을 이용한 분석결과와의 비교를 위하여 EEBT모형으로 계산한 생산, 소비 및 국제무역에 함유된 탄소이력이다. EEBT모형으로 계산한 생산기반 배출량은 MRIO 모형과 항상 동일하나 소비기반 배출량은 수출을 최종수요용과 중간투입용으로 나누지 않기 때문에 MRIO 모형과 일반적으로 다르다. 한국의 경우 MRIO모형에 의한 순수입 탄소량은 1,465만 톤이나 EEBT모형에 의한 순수입 탄소량은 7,710만 톤으로 EEBT모형에 의한 순수입 탄소량이 더 크다. 한국의 경우 MRIO모형의 소비기반 배출량이 EEBT모형에 의한 소비기반 배출량보다 적은 것은 한국의 수입재가 중간투입용으로 사용되는 비중이 상대적으로 크고 중간투입재를 생산에 사용한 수출재가 한국이 최종수요 용도로 수입하는 상품들에 중간투입되어 탄소가 다시 간접적으로 수입되는 비중이 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 미국은 반대로 MRIO분석에 의한 소비기반 탄소배출량이 EEBT에 의한 소비기반 탄소배출보다 큰 것은 미국의 최종소비를 위한 수입이 상대적으로 많고 미국의 수출재가 미국의 최종수요 용도의 수입재 생산에 중간투입되어 탄소가 다시 간접적으로 수입되는 비중이 상대적으로 크다는 것을 나타낸다. 일본, 중국 및 유럽연합의 경우는 두 모형에 의한 소비기반 탄소배출량이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

Leontief(1956)는 미국의 투입-산출표를 이용하여 미국의 100만 달러 상당의 수출과 수입에 함유된 노동과 자본을 측정하여 미국이 수출과 수입에 함유된 생산요소 집약도(factor intensity)를 계산한 바 있다. 수출과 수입의 생산요소 집약도를 계산하기 위하여 Leontief(1956)는 수출품과 수입품을 생산하는 데 직접적으로 투입되는 생산요소량뿐만 아니라 투입-산출표를 이용하여 해당 상품의 생산에 중간투입된 상품을 생산하는 데 사용된 간접적인 생산요소량도 포함하여 상품생산에 직접 및 간

접적으로 투입된 생산요소량을 모두 측정하였다. 각 지역의 수출과 수입의 탄소집약도를 Leontief(1956)가 생산요소 집약도를 계산한 것과 동일한 방법(식 (10)과 식 (11))으로 투입-산출표를 이용하여 각 국가와 지역의 100만 달러 상당의 수출과 수입에 함유된 탄소집약도를 계산하면 <표 4>와 같다.

$$\text{수출의 탄소집약도}(\rho_x^k) \equiv \frac{\sum_{r \neq k} b^k \cdot (I - A^{kk})^{-1} e^{kr}}{\sum_r \sum_i e_i^{kr}} \quad (10)$$

$$\text{수입의 탄소집약도}(\rho_m^k) \equiv \frac{\sum_{r \neq k} b^r \cdot (I - A^{rr})^{-1} e^{rk}}{\sum_r \sum_i e_i^{rk}} \quad (11)$$

한국 수출의 탄소집약도는 약 0.3298천 톤으로 세계평균인 0.5063천 톤보다 낮고

<표 4> 수출 및 수입의 탄소집약도

(단위: 천 CO<sub>2</sub>톤)

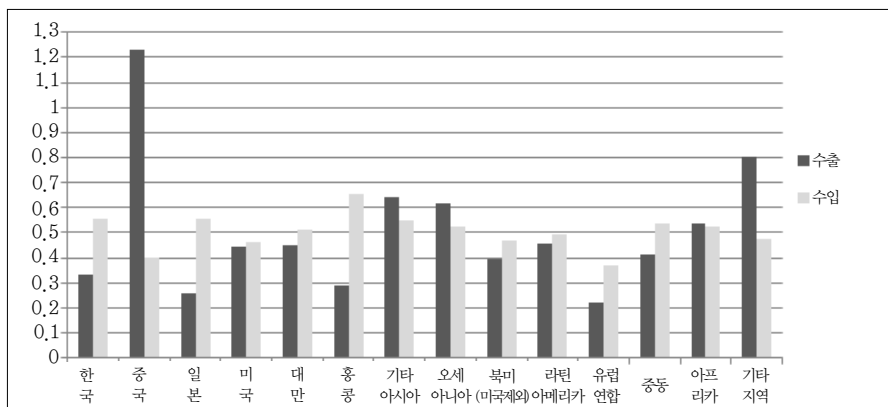
지역	수출의 탄소집약도 ( $\rho_x^k$ )	수입의 탄소집약도 ( $\rho_m^k$ )	$\rho_m^k / \rho_x^k$
한국	0.32984	0.55415	1.68
중국	1.23029	0.40171	0.33
일본	0.25552	0.55604	2.18
미국	0.44591	0.46103	1.03
대만	0.45098	0.51268	1.14
홍콩	0.28861	0.65337	2.26
기타아시아	0.64040	0.55066	0.86
오세아니아	0.61981	0.52129	0.84
북미(미국제외)	0.39300	0.47023	1.20
라틴아메리카	0.45517	0.49183	1.08
유럽연합	0.22092	0.36956	1.67
중동	0.41493	0.53544	1.29
아프리카	0.53805	0.52385	0.97
기타지역	0.80406	0.47275	0.59
세계평균	0.50625	0.50533	1.22



14개 지역 중에서 네 번째로 낮은 반면에 수입의 탄소집약도는 약 0.5542천 톤으로 세계평균인 0.5053천 톤보다 높아 수입의 탄소집약도가 수출의 탄소집약도에 비하여 1.68배 큰 것으로 나타났다. 총 14개 지역 중 수출의 탄소집약도가 가장 높은 국가는 중국으로 1.2302천 톤으로 한국의 약 4배이고 세계평균의 2배 이상이면서 수입의 탄소집약도는 유럽연합에 이어 두 번째로 낮은 것으로 평가되었다. 중국은 다른 지역 혹은 국가들에 비하여 탄소집약도가 월등히 높은 상품들을 수출하고 상대적으로 탄소집약도가 낮은 상품을 수입하고 있음을 분명하게 보여주고 있다. 유럽연합은 14개 지역 중 수출의 탄소집약도와 수입의 탄소집약도 모두 가장 낮은 지역으로 나타났다.

<표 5>는 각국의 국민소득이 100만 달러 증가시 한국과 세계 전체의 탄소배출을 유발하는 정도를 계산한 것이다. 국민소득 100만 달러 증가하는 경우 각 상품별 최종수요가 기준년도와 같은 비율을 유지한다는 가정하에서<sup>10)</sup> 한국의 국민소득 100만 달러 증가는 세계 전체의 탄소배출량을 약 390톤 증가시키는 것으로 평가되어 세계평균인 533톤보다 낮으며 14개 지역 중 6번째로 적게 탄소배출을 유발시키는 것으로 나타났다. 국민소득 증가가 한국의 탄소배출량을 가장 크게 증가시키는 국

<그림 1> 수출 및 수입의 탄소집약도



10) 국제무역이론에서와 같이 소비자들의 선호체계가 동조적(homothetic)이고 상품가격체계가 변동하지 않는다면 소득이 변화하여도 상품의 소비비율은 변화하지 않는다.

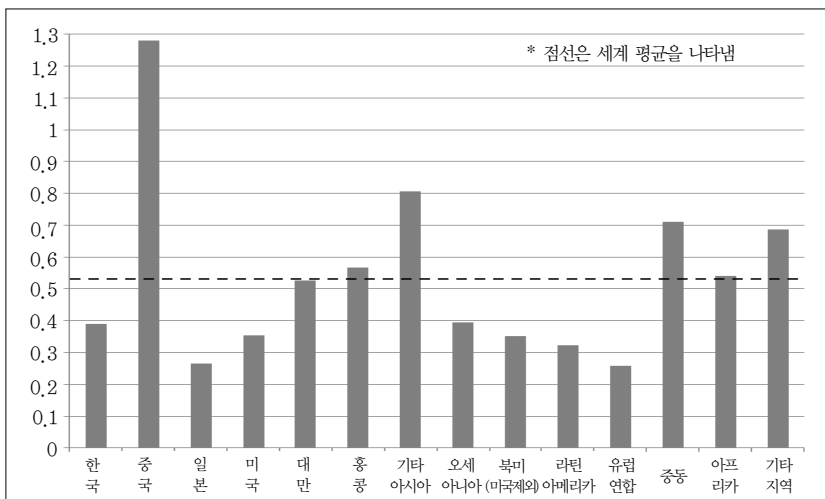
〈표 5〉 세계 전체와 한국의 탄소배출 및 탄소무역수지의 변화  
(국민소득 100만 달러 증가시)

(단위: 천 CO<sub>2</sub>톤)

지역	세계 총배출량	한국 총배출량	한국 탄소무역수지
한국	0.3895	0.2290	0.1610
중국	1.2808	0.0076	-0.0076
일본	0.2652	0.0025	-0.0025
미국	0.3536	0.0018	-0.0018
대만	0.5257	0.0064	-0.0064
홍콩	0.5677	0.0113	-0.0114
기타아시아	0.8062	0.0052	-0.0052
오세아니아	0.3957	0.0030	-0.0030
북미(미국제외)	0.3526	0.0025	-0.0025
라틴아메리카	0.3228	0.0022	-0.0022
유럽연합	0.2573	0.0019	-0.0019
중동	0.7097	0.0049	-0.0049
아프리카	0.5416	0.0046	-0.0046
기타지역	0.6866	0.0033	-0.0033

〈그림 2〉 세계 전체 탄소배출 증가에 미치는 효과 (국민소득 100만 달러 증가시)

(단위: 천 CO<sub>2</sub>톤)



가는 홍콩(11.3톤), 중국(7.6톤), 대만(6.4톤) 순이며 미국(1.8톤), 유럽연합(1.9톤), 라틴아메리카(2.2톤) 순으로 가장 작게 증가시키는 것으로 나타났다.

소비기반 탄소배출량에서 생산기반 탄소배출량을 뺀 값으로 정의된 탄소무역수지는 한국의 국민소득이 100만 달러 증가하면 탄소의 순수입이 약 161톤 증가하는 것으로 나타났으며, 다른 국가 혹은 지역의 국민소득 증가는 한국의 탄소의 순수입을 감소시키는 것으로 계산되었다. 홍콩, 중국, 대만 순으로 그 국가의 국민소득 증가가 한국의 탄소 순수입을 가장 크게 감소시키며, 미국, 유럽연합, 일본 순으로 국민소득 증가가 한국의 탄소 순수입을 가장 작게 감소시키는 것으로 계산되었다.

국민소득의 증가가 세계 전체의 탄소배출량을 가장 크게 증가시키는 국가는 중국으로 중국의 국내총생산 100만 달러 증가는 세계 전체의 탄소배출량을 약 1,281톤 증가시켜 각 지역의 국민소득 증가시 유발되는 세계 전체 배출증가량 평균의 2배 이상이 된다. 중국 다음으로 기타아시아(806톤), 중동(710톤), 기타지역(687톤) 등의 순으로 세계 전체의 탄소배출량 증가가 큰 것으로 나타났다. 국내총생산의 증가가 세계 전체의 탄소배출량을 유발하는 정도가 낮은 지역은 유럽연합(257톤), 일본(265톤), 라틴아메리카(323톤) 등의 순인 것으로 나타난다.

#### IV. 요약 및 결론

국제무역에 함유된 탄소이력을 측정하는 MRIO모형과 EEBT모형 모두 세계 각 지역의 산업연관표와 국가간 국제무역자료를 이용하여 생산과 소비에 함유된 에너지 연소로 인한 탄소배출량을 계산하고 이로부터 국제무역에 함유된 탄소배출량을 계산할 수 있는 하향식 모형이다. 이산화탄소 배출에 대한 궁극적인 책임의 일부가 최종적인 소비에도 있다면 최종적인 소비에 기인한 탄소이력, 따라서 국제무역에 함유된 탄소이력을 측정하는데 MRIO모형이 이론적으로 보다 정확한 모형이라고 할 수 있으며 탄소배출의 생애주기평가(LCA)와 같은 상향식 모형과도 비교될 수 있는 모형이라고 할 수 있다. 그러나 각 지역의 투입-산출 국산거래표와 국제무역자료만으로 국제무역에 함유된 탄소배출량을 계산하는 EEBT모형에 비하여 MRIO모형은 국가간 중간투입재 교역에 관한 광범위한 자료가 요구되며 그에 따른 인위적

가정이 필요하다는 점에 MRIO모형을 이용하여 계산된 탄소이력에 어느 정도의 불확실성이 존재함을 부정할 수 없다.

최근에 발표된 GTAP의 자료기반으로부터 MRIO분석을 위한 각 국가 및 지역의 투입-산출표를 구성해서 각 지역의 생산과 소비에 함유된 탄소이력, 따라서 국제무역에 함유된 탄소배출량을 계산하였다. 또한 이와 관련된 각 지역의 수출과 수입의 탄소집약도를 분석하고 각 지역의 국민소득이 증가할 때 한국과 세계 전체의 탄소배출량 및 한국의 탄소무역수지에 미치는 효과를 계산하였다. 한국은 에너지 연소로 인한 탄소배출에 관한 한 이산화탄소의 순수입국이나 소비기반 배출량과 생산기반 배출량의 차이가 크지 않은 탄소무역수지 균형에 가까운 것으로 평가되었고 예상과 같이 중국이 탄소무역수지 최대 흑자국이며 유럽연합이 탄소무역수지 최대 적자국인 것으로 나타났다.

생산과 소비에 함유된 탄소이력에 대한 연구는 탄소배출의 궁극적인 책임소재에 관한 논란과 연계되어 있다. 지구온난화를 늦추기 위한 범세계적인 노력의 일환으로 수행되는 국가온실가스배출량 집계에 소비에 함유된 탄소배출을 어떤 방식으로든 일부나마 반영하여야 한다는 주장이 제기되고 있다. 개발도상국들은 상대적으로 탄소집약적인 상품을 순수출하는 무역구조를 가지고 있고 선진국들은 상대적으로 탄소집약적인 상품을 순수입하는 무역구조를 가지고 있어서 개발도상국들의 생산구조는 상대적으로 탄소배출을 많이 하는 구조인 반면에 선진국들의 생산구조는 탄소배출을 적게 하는 구조로서 탄소집약적인 상품에 대한 수요를 개발도상국으로부터의 수입에 의하여 충족시키고 있다. 한국과 한국의 주요 교역대상국들의 소비와 국제무역에 함유된 탄소배출량을 계산한 결과는 선후진국의 이러한 탄소무역구조를 확인시켜주고 있다.

## [참고문헌]

1. 김윤경, “환경산업연관표 2005를 이용한 산업부문의 이산화탄소( $CO_2$ ) 배출 분석”, 「자원·환경경제연구」 제20권 제1호, 2011, pp. 1-31.

2. 녹색성장위원회, 「온실가스배출권거래제법 시행령 공청회 자료」, 2012.
3. 심상렬, 『에너지 산업연관표 작성』, 에너지경제연구원 기본연구보고서05-00, 2005.
4. 정창봉·이성근, 『국가에너지수급통계 매뉴얼』, 에너지경제연구원, 2009.
5. 한국은행, 『2007 산업연관표』, 2009.
6. Ahmad, N. and A. Wyckoff, “Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods,” *OECD Science, Technology and Industry Working Papers* 2003/15, OECD Publishing, 2003, pp. 1-65.
7. Andrew, R., G. Peters, and J. Lennox, “Approximation and Regional Aggregation in Multi-regional Input-output Analysis for National Carbon Footprint Accounting,” *Economic Systems Research* 21, 2009, pp. 311-335.
8. Davis, S. J. and K. Calderia, “Consumption-based Accounting of CO Emissions,” *Proceedings of The National Academy of Sciences* 107, 2010, pp. 5687-5692.
9. de Haan, M., and S. Keuning, “Taking the Environment into Account: The NAMEA Approach,” *Review of Income and Wealth*, 42, 1996, pp. 131-148.
10. GTAP, *Version 8 Database*, 2012, Purdue University.
11. Hertwich, E. G and G. Peters, “Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-linked Analysis,” *Environmental Science & Technology* 43, 2009, pp. 6414-6420.
12. IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
13. Kanemoto, K., M. Lenzen, G. Peters, D. Moran, and A. Geschke, “Frameworks for Comparing Emissions Associated with Production, Consumption And International Trade,” *Environmental Science & Technology* 46, 2012, pp. 172-179.
14. Leontief, W., “Environmental Repercussions and The Economic Structure: An Input-Output Approach,” *The Review of Economics and Statistics* 52, 1971, pp. 262-271.
15. Leontief, W., “Factor Proportions and the Structure of American Trade: Further Theoretical and Empirical Analysis,” *Review of Economics and Statistics* 38, 1956, pp. 386-407.
16. Lenzen, M., J. Murray, F. Sack, and T. Wiedmann, “Shared Producer and Consumer Responsibility-Theory and Practice,” *Ecological Economics* 61, 2009, pp. 27-42.
17. Peters, G., R. Andrew, and J. Lennox, “Constructing An Environmentally-Extended Multi-region Input-output Table Using GTAP database,” *Economic Systems Research*

- 23, 2011, pp. 131-152.
18. Peters G., "From Production-based To Consumption-based National Emissions Inventories", *Ecological Economics* 65, 2008, pp. 13-23.
  19. Peters, G. and E. Hertwich, "Post-Kyoto Greenhouse Gas Inventories: Production versus Consumption," *Climate Change* 86, 2008a, pp. 51-66.
  20. Peters, G. and E. Hertwich, " $CO_2$  Embodied in International Trade With Implications for Global Climate Policy", *Environmental Science & Technology* 42, 2008b, pp. 1401-1407.
  21. Rodrigues, J., T. Domingos, S. Giljum, and F. Schneider, "Designing An Indicator of Environmental Responsibility", *Ecological Economics* 59, 2006, pp. 256-266.
  22. Rutherford, T. F., "Climate-Linked Tariffs: Practical Issues," *TAIT Second Conference on Climate Change, Trade and Competitiveness: Issues for The WTO*, Geneva, 2010.
  23. Walter, Ingo, "The Pollution-Content of American Trade," *Economic Inquiry* 11, 1973, pp. 61-70.
  24. Wiedmann, T., "Editorial: Carbon Footprint and Input-Output Analysis: An Introduction," *Economic Systems Research* 21, 2009a, pp. 175-186.
  25. Wiedmann, T., "A First Empirical Comparison of Energy Footprint Embodied in Trade-MRIO versus PLUM," *Ecological Economics* 68, 2009b, pp. 1975-1990.
  26. Wiedmann, T., "A Review of Recent Multi-Region Input-Output Models for Consumption-Based Emissions and Resource Accounting," *Ecological Economics* 69, 2009c, pp. 211-222.
  27. Wiedmann, T., M. Lenzen, and K. Barret, "Examining The Global Environmental Impact of Regional Consumption Activities-Part2: Review of Input-Output Models for The Assessment of Environmental Impacts Embodied in Trade," *Ecological Economics* 61, 2007, pp. 15-26.
  28. Wiebe, K., B. Bruckner, S. Giljum, and C. Lutz, "Calculating Energy-related  $CO_2$  Emissions in International Trade Using A Global Input-Output Model", *Economic Systems research* 24, 2012, pp. 113-139.
  29. Weber, C. and H. Matthews, "Embodied Environmental Emissions in U.S. International Trade, 1997-2004", *Environmental Science & Technology* 41, 2007, pp.4875-4881.