

한국의 수출에 함유된 국내외 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain): 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

신동천* · 이혁** · 김용균***

요약 : 최근 국가온실가스배출량 측정과 관련하여 소비기반 배출량에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 소비기반 배출량은 정의상 국제무역에 함유된 온실가스 배출량과 직접적인 관계가 있다. 본 연구에서는 에너지 연소에 따른 이산화탄소 배출에 한하여 한국의 주요 교역상대국들에 대한 최종재 수출에 함유된 상품별 국내외 탄소배출 비중을 계산할 뿐만 아니라 한국의 자국 최종수요에 기인한 탄소배출과 외국 최종수요에 기인한 탄소배출을 분해하여 이를 주요 교역상대국들과 비교한다. 또한 한국의 주요 교역상대국들에 대한 수출에 얽혀 있는 탄소사슬을 분석하고 탄소사슬별 탄소집약도를 계산하여 주요 특징들을 살펴본다.

주제어 : 수출의 탄소배출비중, 다지역 투입-산출분석, 탄소사슬

JEL 분류 : Q50, Q56

접수일(2014년 6월 11일), 수정일(2015년 2월 5일), 게재확정일(2015년 2월 9일)

* 연세대학교 경제학부 교수, 제1저자(e-mail: shindc@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 경제학부 박사과정, 교신저자(e-mail: hlee1841@yonsei.ac.kr)

*** 연세대학교 경제학부 박사과정, 제2저자(e-mail: kimyk0909@yonsei.ac.kr)

The Carbon Content and Chain Embodied in Exports of Korea with Major Trading Partners : The Multi-Regional Input-Output Analysis

Dong Cheon Shin*, Hyeok Lee** and Yong Kyun Kim***

ABSTRACT : The concept of consumption-based greenhouse gas (GHG) inventory is directly related with the carbon content of international trade. Along the lines of the consumption-based GHG inventory, we investigate domestic and foreign carbon contents embodied in sectoral exports of Korea. In addition to the analysis of carbon content of exports, it is investigated how much share of responsibility for carbon emissions of Korea belongs to each major trading partner of Korea. We also compute the carbon intensities of Korean exports in carbon chain with other trading partners and find some characteristics revealed in Korea's carbon emissions embodied in its exports.

Keywords : Carbon content of exports, Multi-regional input-output model, Carbon chain

Received: June 11, 2014, Revised: February 5, 2015, Accepted: February 9, 2015.

* Professor, Department of Economics, Yonsei University, First Author(e-mail: shindc@yonsei.ac.kr)

** Ph. D. Student, Department of Economics, Yonsei University(e-mail: hlee1841@yonsei.ac.kr)

*** Ph. D. Student, Department of Economics, Yonsei University(e-mail: kimyk0909@yonsei.ac.kr)

I. 서론

기후변화와 관련된 온실가스 감축논의에서 국가 온실가스 배출량(national greenhouse gas inventory)의 정의와 정확한 측정은 감축목표를 설정하고 국제적 합의를 도출하는 데 가장 중요한 전제조건이다. 교토의정서와 같은 온실가스 감축을 위한 대부분의 국제적 논의에서 사용되는 국가 온실가스 배출량의 정의는 자국의 주권이 미치는 영토 내에서 배출되거나 제거된 온실가스의 양을 집계하는 영토기반 배출량(territorial-based inventory)이며, 기본적으로 영토내의 생산과정에서 발생한 배출량을 측정하는 것이다. 그러나 이러한 온실가스 배출량에 관한 영토기반 정의는 기후변화협약의 의무감축국가들이 자발적인 감축노력보다는 비참가국가들로부터의 상품수입을 증가시켜 보고되는 국가 온실가스 배출량을 줄이려는 이른바 탄소누출(carbon leakage)에 취약할 수밖에 없는 구조를 가지고 있다. 따라서 최근에는 온실가스 배출의 궁극적인 책임이 상품소비에 있다는 입장에서 국가 온실가스 배출량을 소비기반 배출량(consumption-based inventory)으로 하거나 혹은 기존의 영토기반 배출량과 혼합하여 사용하는 방법을 찾자는 주장이 제기되고 있다.¹⁾

상품의 생산과정에서 배출되는 온실가스는 기업들이 생산활동을 하는 지역이나 국가에서 배출되지만 생산된 상품은 해당 국가뿐만 아니라 수출을 통하여 외국에서도 소비된다. 또한 수출재 생산에는 수입된 중간투입재들이 사용되며 이들 중간투입재 생산에도 역시 온실가스가 배출되기 때문에 수출재에 함유된 온실가스는 수출국에서 직접적으로 발생한 온실가스뿐만 아니라 수입된 중간투입재의 외국 생산과정에서 배출된 온실가스도 포함되어야 한다. 특히 수직적 분업(vertical specialization)과 같은 국제적 생산분업의 활성화로 인하여 세계교역에서 중간투입재가 차지하는 비중이 최종재보다 높으며 국가간 국제무역과 투입-산출관계가 복잡하게 연결되어 있어 생산기반 배출량 측정에 비하여 소비기반 배출량의 측정이 훨씬 더 어려운 것이

1) 국가온실가스배출량의 정의와 생산기반 및 소비기반 배출량에 관한 최근의 논의와 분석으로 Peters (2008), Peters et al.(2008a, 2008b), Davis et al.(2010), Wiebe et al.(2012) 등이 있으며 특히 Peters et al.(2008a)에서는 영토기반 국가온실가스배출량 개념이 갖는 문제점들을 지적하고 이와 관련하여 생산 및 소비기반 배출량 개념을 설명하고 소비기반 배출량 기준이 갖는 장점을 설명하고 있고 Lenzen et al.(2007)은 온실가스 배출관련 생산과 소비의 책임분담문제를 논의하고 있다.

사실이다. 소비기반 배출량 측정을 위해서는 국가간 쌍무적 수출입과 산업연관관계 를 모두 포함하는 다지역 투입-산출모형(multi-regional input-output model)을 이용 하는 것이 필요하다.

소비기반 국가온실가스 배출량은 생산에서 발생한 온실가스 배출량에서 수출에 함유된 배출량을 빼고 수입에 함유된 배출량을 더한 값이기 때문에 국제무역에 함 유된 온실가스 배출량(carbon content of trade)과 직접적인 관계를 가지고 있다. 최 근 국제무역 분야에서 활발하게 연구되고 있는 국제무역에 함유된 부가가치(value added content of trade) 및 부가가치 사슬(value chain)과 국제무역에 함유된 온실가 스 배출량 및 탄소사슬(carbon chain)은 동일한 회계구조를 갖는 다지역 산업연관모 형을 이용하여 분석할 수 있다.²⁾ 상품 생산에 투입되는 본원적 생산요소에 대한 보 수인 부가가치는 상품의 국제무역에 함유되어 국가간 이동하는 것으로 볼 수 있듯 이 온실가스도 상품생산에 투입되는 ‘생산요소’로 간주하여 부가가치와 마찬가지로 상품의 국제무역에 함유되어 국가간 이동한다고 볼 수 있다.³⁾

한국은 경제규모에 비하여 수출비중이 매우 높은 경제로서 한국의 수출에 함유된 온실가스 배출량은 수출재 생산과정에서 한국이 배출한 양(domestic carbon content of trade)과 한국의 수출재 생산에 사용된 수입 중간투입재를 생산하는 외국에서 배 출된 온실가스의 양(foreign carbon content of trade)으로 구성된다. 수출재의 국내 배출 비중과 외국배출 비중은 해당 상품의 생산기술과 국제적 생산분업 구조에 의 하여 결정되며 상품별로 상이하다. 한국의 수출상품별 온실가스의 국내외 배출비중 을 주요 교역상대국들과 비교해 봄으로써 한국의 국제무역과 관련된 온실가스 배출 구조의 특징을 파악할 수 있다. 또한 한국의 온실가스 배출량을 한국의 최종수요에 기인하는 부분과 주요 교역상대국들의 최종수요에 기인하는 부분으로 분해함으로 써 소비기반 배출량의 입장에서 한국이 궁극적으로 책임이 있는 부분을 가려낼수

2) 국가 간 수직적 분업을 분석하는 Himmels et al.(2001), 요소함유량 모형의 구조를 분석하고 있는 Treffer et al.(2010), 부가가치-수출 비율의 국가간 차이를 분석하고 있는 Johnson et al.(2012) 등은 모두 다지역 투입-산출 모형을 이용하고 있다. 한국경제를 대상으로 다지역 투입-산출 모형을 이용하여 국제무역에 함유된 부가가치 교역을 분석한 연구는 신동천(2012)이 있으며 신동천(2013)에서는 국제 무역에 함유된 탄소무역수지를 계산하고 있다. 소비기반 온실가스 배출량 관련 분석모형들에 대한 일반적 및 국가별 고찰은 Wiedmann(2009)이 제공하고 있다.

3) 상품의 생산과정에서 발생하는 온실가스는 부(負)의 결합생산물이지만 자본 및 노동과 같이 생산과정에 투입되는 생산요소로 간주하여도 분석결과에 아무런 차이를 가져오지 않는다.

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

있고 국제적 생산분업으로 인하여 복잡하게 얽혀 있는 한국과 주요 교역상대국사이의 탄소사슬을 분석함으로써 한국과 주요 교역상대국들 사이의 탄소배출의 국제적 연관구조를 파악할 수 있다.

국제산업연관분석을 가능하게 하는 다지역 투입-산출표 중에서 본 논문은 GTAP (2012) 자료에 나와 있는 에너지 연소로 인한 이산화탄소 배출자료를 이용하여 다 지역 산업연관모형을 설정하고 이를 이용하여 한국의 수출에 함유된 탄소배출 구조를 밝히고자 한다.⁴⁾ 제2장은 본 논문에서 사용하는 다지역 투입-산출 모형을 설명하며 제3장은 한국의 수출에 함유된 에너지 연소로 인한 탄소배출의 국내외 비중과 한국의 주요 교역상대국들과의 탄소사슬을 분석한다. 제4장은 요약 및 결론이다.

II. 다지역 투입-산출 모형

다지역 투입-산출 회계는 각국의 산업연관표와 국가간 쌍무적 국제거래를 포함하고 있다. 다지역 투입-산출표를 이용한 국제산업연관모형의 구조는 이미 잘 알려져 있으며,⁵⁾ 본 논문에서 사용하고 있는 국제산업연관모형의 구조도 이와 같은 ‘표준적’인 회계구조를 가지고 있다. 일국의 산출은 자국과 외국의 중간투입재와 최종소비재 용도로 사용된다. 상품의 총수가 N 이고 국가 혹은 지역의 총수가 G 이며 국가 혹은 지역을 나타내는 상하첨자는 k, r 혹은 s 이며 상품을 나타내는 하첨자를 i 혹은 j 로 표시하면 k 국의 산출은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 X^r 은 r 국의 산출벡터, q_{kr} 은 k 국 상품에 대한 r 국의 중간재수요 벡터, f_{kr} 은 k 국 상품에 대한 r 국의 최종수요 벡터, A_{kr} 은 k 국 상품에 대한 r 국의 투입-산출 계수행렬이다. r 국의 k 국 상품에 대한 중간수요는 $q_{kr} = A_{kr}X^r$ 이라는 사실을 이용하면 k 국의 산출벡터는 식 (1)의 두 번째 등식과 같이 표시할 수 있다.

4) 본 논문이 활용하는 다지역 투입-산출표와 국가간 쌍무적 수출입자료는 GTAP version 8(2012)을 사용하며 GTAP의 국가별 및 상품별 온실가스 배출량 관련 자료는 에너지 연소에 따른 이산화탄소 배출량만을 포함하고 있으며 공정과정 등에서 배출되는 온실가스는 포함하고 있지 않다.

5) ‘표준적’인 다지역 산업연관모형은 Miller and Blair(2009) 참조.

$$X^k = \sum_{r=1}^G (q_{kr} + f_{kr}) = \sum_{r=1}^G (A_{kr} X^r + f_{kr}) \quad (1)$$

$$X^k \equiv \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_N^k \end{bmatrix}, \quad q_{kr} \equiv \begin{bmatrix} q_1^{kr} \\ q_2^{kr} \\ \vdots \\ q_N^{kr} \end{bmatrix}, \quad f_{kr} \equiv \begin{bmatrix} f_1^{kr} \\ f_2^{kr} \\ \vdots \\ f_N^{kr} \end{bmatrix}, \quad A_{kr} \equiv \begin{bmatrix} a_{11}^{kr} & a_{12}^{kr} & \cdots & a_{1N}^{kr} \\ a_{21}^{kr} & a_{22}^{kr} & \cdots & a_{2N}^{kr} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^{kr} & a_{N2}^{kr} & \cdots & a_{NN}^{kr} \end{bmatrix}$$

식 (1)을 모든 국가에 대하여 행렬 형식으로 표시하면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$X = AX + f \quad (2)$$

$$X \equiv \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix}_{NG \times 1}, \quad A \equiv \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1G} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{G1} & A_{G2} & \cdots & A_{GG} \end{bmatrix}_{NG \times NG},$$

$$f \equiv \begin{bmatrix} \sum_r f_{1r} \\ \sum_r f_{2r} \\ \vdots \\ \sum_r f_{Gr} \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^G \begin{bmatrix} f_{1r} \\ f_{2r} \\ \vdots \\ f_{Gr} \end{bmatrix}_{NG \times 1}$$

식 (2)는 다시 레온티에프 역행렬 L 을 이용하여 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$X = (I - A)^{-1} \sum_{r=1}^G f_r = \sum_{r=1}^G (I - A)^{-1} f_r \equiv \sum_{r=1}^G L f_r \quad (3)$$

$$I \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{NG \times NG} \quad (\text{항등행렬}), \quad f_r \equiv \begin{bmatrix} f_{1r} \\ f_{2r} \\ \vdots \\ f_{Gr} \end{bmatrix}_{NG \times 1}$$

$$L \equiv (I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1G} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{G1} & B_{G2} & \cdots & B_{GG} \end{bmatrix}$$

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

식 (3)의 Lf_r 은 r 국의 최종수요를 충족시키기 위한 각국의 산출을 나타낸다. 예를 들어 r 국의 최종수요를 충족시키기 위한 k 국의 산출벡터 $y_{kr} = (y_1^{kr}, y_2^{kr}, \dots, y_N^{kr})'$ 은 다음과 같다.

$$y_{kr} = \sum_{s=1}^G B_{ks} f_{sr} = B_{k1} f_{1r} + B_{k2} f_{2r} + \dots + B_{kG} f_{Gr} \quad (4)$$

식 (4)에서 $B_{ks} f_{sr} (\equiv y_{ksr})$ 은 s 국 상품에 대한 r 국의 최종수요(f_{sr})를 충족시키기 위한 s 국의 상품생산에 사용된 k 국의 산출을 나타낸다. r 국의 최종수요를 충족시키기 위한 k 국의 산출벡터 y_{kr} 은 k 국이 r 국에 직접적으로 수출하는 상품의 산출 뿐만 아니라 r 국이 최종수요하는 k 국이 아닌 다른 국가들의 상품들을 생산하는데 중간투입재로 사용되는 k 국의 산출도 포함한다.

k 국의 산출단위당 탄소배출 벡터를 $e_k = (e_1^k, e_2^k, \dots, e_N^k)$ 라고 하면 r 국의 최종수요를 충족시키기 위한 생산에서 배출되는 k 국의 탄소량은 $c_{kr} = e_k y_{kr}$ 이며 이는 r 국에 대한 k 국의 직접적인 수출로 인한 탄소배출량뿐만 아니라 제삼국에 대한 중간투입재 수출을 통한 우회적이고 간접적인 탄소배출량을 모두 포함한다. y_{ksr} 은 s 국 상품에 대한 r 국의 최종수요(f_{sr})를 생산하기 위하여 s 국이 중간투입용으로 필요로 하는 k 국의 상품량 벡터이고 c_{ksr} 을 y_{ksr} 에 k 국의 산출단위당 탄소배출벡터 e_k 를 곱한 값이라고 하면 결국 c_{ksr} 은 s 국 상품에 대한 r 국의 최종수요를 충족시키기 위하여 s 국 상품생산에 중간투입되는 k 국 상품 생산에서 발생하는 탄소배출량을 의미한다(즉 $c_{ksr} = e_k y_{ksr} = e_k B_{ks} f_{sr}$). r 국의 최종수요를 위한 k 국의 산출에 함유된 탄소배출량 c_{kr} 은 식 (4)에 의하여 다음 식 (5)와 같이 분해된다.

$$c_{kr} = \sum_{s=1}^G e_k B_{ks} f_{sr} = c_{k1r} + c_{k2r} + \dots + c_{kGr} \quad (5)$$

r 국의 최종수요를 충족시키기 위한 k 국 탄소배출량 c_{kr} 에서 제삼국을 통한 우회

적인 수출에 기인한 탄소배출량 c_{ksr} , $s \neq k$, 가 차지하는 비중(즉, c_{ksr}/c_{kr})은 수직적 분업과 같은 국제적 생산분업의 정도에 의하여 결정된다. 또한 각 사슬별 평균 탄소집약도(carbon intensity)는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{ksr} = \frac{c_{ksr}}{i \cdot y_{ksr}}, \quad s = 1, 2, \dots, G, \quad (y_{ksr} \equiv B_{ks} f_{sr}, \quad i \equiv (1, 1, \dots, 1)) \quad (6)$$

III. 한국의 수출에 함유된 탄소배출 비중과 탄소사슬

앞 장에서 설정된 다지역 투입-산출 모형을 이용하여 한국과 주요 교역상대국들 사이의 수출에 함유된 에너지 연소 관련 탄소배출구조와 탄소사슬을 분석하기 위하여 GTAP(2012) 자료를 이용하여 국제산업연관표를 설정하였다.

GTAP에서 바로 국제산업연관표를 제공하는 것은 아니며 국제운송서비스의 귀속 등 GTAP자료의 조정이 필요하다. GTAP에는 각국이 제공한 국제운송서비스와 다른 국가들로부터 상품을 수입하는데 사용한 국제운송서비스에 관한 자료가 있다. 각국이 제공한 국제운송서비스는 운수산업의 수출에 해당하나 GTAP에는 운수산업의 국제운송서비스의 총액만 기록되어 상품을 운송하는데 어느 국가에 얼마의 국제운송서비스를 제공하였는지 알 수 없다. 다지역 투입-산출표의 균형을 이루기 위해서는 각국이 다른 국가에 제공한 국제운송서비스에 관한 자료가 필요하다. GTAP에는 각국이 상품들을 수입하는 데 사용한 국제운송서비스에 관한 자료가 있으므로 r 국이 상품 i 를 수입하는데 사용한 국제운송서비스(t_i^r)에 r 국의 상품 i 의 총수입(m_i^r)에서 r 국의 산업 j 의 중간투입 용도로 사용된 상품 i 의 수입(z_{ij}^m)이 차지하는 비율을 곱하면 r 국의 산업 j 에서 중간투입을 위하여 해외로부터 상품 i 를 수입하는데 사용된 국제운송서비스 금액(d_{ij}^r)이 계산되며 최종소비 용도로 해외로부터 상품 i 를 수입하는데 사용된 국제운송서비스 금액(d_i^r)도 같은 방법으로 계산할 수 있다.

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

$$c_{ij}^r = \frac{z_{ij}^{r,m}}{m_i^r} t_i^r, \quad d_i^r = \frac{y_i^{r,m}}{m_i^r} t_i^r \quad (7)$$

$(\sum_i c_{ij}^r)$ 은 r 국의 산업 j 가 중간투입 용도의 상품을 수입하는데 사용한 국제운송서비스 금액이 된다. GTAP이 제공하는 각국의 국제운송서비스 공급액이 세계전체의 국제운송서비스공급액에서 차지하는 비중을($\sum_i c_{ij}^r$)과 d_i^r 에 곱해주면 각국이 r 국의 각 산업의 중간투입용 수입재 운송과 최종수요용 수입재 운송에 대하여 r 국에 제공한 국제운송서비스가 계산된다.⁶⁾

한국의 주요 교역상대국들을 중국, 일본, 미국, EU, 기타지역(ROW)으로 하고 한국을 포함한 총 6개 지역으로 구성된 국제산업연관표를 작성하였고 상품의 수를 총 23개로 통합하였다($N=23$). 특히 식 (2)의 국가간 중간재 거래를 나타내는 행렬 ($A_{kr}, k, r = 1, 2, \dots, G$)중에서 국내재의 자국 투입-산출 행렬인 $A_{kk}, k = 1, 2, \dots, G$ 는 GTAP 자료로부터 얻을 수 있으나 $A_{kr}, k \neq r$ 는 얻을 수 없기 때문에 가정을 통한 설정이 필요하다. 거의 대부분의 다지역 산업연관분석에서 사용하는 가정은 이른바 ‘비례가정(proportionality assumption)’으로 수입거래표에서 각 상품의 수입액 중에서 해당 상품에 대한 최종수요와 산업별 중간수요가 차지하는 비중대로 외국으로부터의 수입을 나누는 방법이다.⁷⁾ 예를 들어 r 국의 상품 i 의 총수입이 m_i^r , 상품 i 에 대한 최종재 수입수요가 f_i^r , 중간재 수입수요가($q_{i1}^r, q_{i2}^r, \dots, q_{iG}^r$)이고 k 국으로부터의 상품 i 의 수입이 m_i^{kr} 이라고 하면 행렬 A_{kr} 은 다음과 같이 계산된다.

$$A_{kr} = [a_{ij}^{kr}]_{i,j=1,2,\dots,N} = \left[m_i^{kr} \frac{q_{ij}^r}{m_i^r} \right]_{i,j=1,2,\dots,N}, \quad k \neq r \quad (8)$$

6) 국제운송서비스의 귀속 방법에 관한 자세한 내용은 Peters et al.(2011)을 참조할 것.

7) 다지역 산업연관분석에서 사용되는 ‘비례가정’은 두 가지 종류가 있다. 하나는 생산자거래표상의 투입에 외국으로부터의 상품 수입액이 수입을 포함한 해당 상품의 국내소비(domestic absorption)에서 차지하는 비중을 곱하여 해당 외국으로부터의 수입거래표를 작성하는 방법이며(Hummels et al.(2001)와 Trefler and Zhu(2010) 등 참조), 다른 하나는 본 논문에서와 같이 수입거래표를 이용하는 방법이다(Peters et al.(2011) 참조).

식 (7)의 방법으로 생성된 행렬 A 로부터 계산된 레온티에프 역행렬 $L = (I - A)^{-1}$ 은 각국의 최종수요가 야기하는 탄소배출의 국내외 비중과 탄소사슬을 분석하는 핵심 부분이 된다.

1. 한국의 수출에 함유된 국내외 탄소배출 비중

최종재 수출과 같은 한국 상품에 대한 최종수요 증가는 한국의 탄소배출을 증대시킬 뿐만 아니라 국제적 생산분업을 통하여 한국에 중간투입재를 수출하는 교역상대국들의 탄소배출도 증가시킨다. 한국의 최종수요 증가가 한국의 탄소배출과 교역상대국들의 탄소배출을 증가시키는 정도는 관련 국가들의 생산기술과 국제적 생산분업 구조에 의하여 결정된다. 한국상품에 대한 최종수요 증가에 의하여 야기되는 상품별 탄소배출량의 국내비중(domestic carbon content)과 외국비중(foreign carbon content)은 레온티에프 역행렬 L 과 산출단위당 탄소배출 벡터 $e_k, k = 1, 2, \dots, G$ 로부터 계산할 수 있다. 한국, 중국, 일본, 미국, EU 및 기타지역(ROW)의 6개 국가 및 지역으로 구성된 세계에서($G=6$) 상품별 국내외 탄소배출 비중을 계산하기 위하여 식 (3)의 양변에 국가별 산출단위당 탄소배출 벡터들로 구성된 아래의 행렬 Φ 을 곱하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi X = \sum_{r=1}^6 \Phi L f_r \tag{9}$$

$$\Phi \equiv \begin{bmatrix} e_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e_6 \end{bmatrix}_{6 \times 6N}, \quad \Phi L = \begin{bmatrix} e_1 B_{11} & e_1 B_{12} & \cdots & e_1 B_{16} \\ e_2 B_{21} & e_2 B_{22} & \cdots & e_2 B_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_6 B_{61} & e_6 B_{62} & \cdots & e_6 B_{66} \end{bmatrix}_{6 \times 6N}$$

식 (9)에서 $\Phi L f_r$ 은 r 국의 최종수요로 인하여 발생한 국가별 탄소배출량 벡터이다. 즉, $\Phi L f_r = (\sum_{s=1}^6 e_1 B_{1s} f_{sr}, \sum_{s=1}^6 e_2 B_{2s} f_{sr}, \dots, \sum_{s=1}^6 e_6 B_{6s} f_{sr})$ 에서 $\sum_{s=1}^6 e_k B_{ks} f_{sr}$ 는 r 국의 최종수요 f_r 로 인하여 발생한 k 국의 탄소배출량에 해당한다. 따라서 행렬

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

ΦL 의 각 열은 해당 열이 속한 국가의 해당 상품에 대한 최종수요 한 단위가 초래하는 각국의 탄소배출량을 나타낸다. $e_k B_{ks}$ 는 s 국 상품에 대한 최종수요 한 단위가 초래하는 k 국의 탄소배출량 벡터이다. 즉, $e_k B_{ks} = \left[\sum_{i=1}^{23} e_i^k b_{ij}^{ks} \right]_{j=1,2,\dots,23}$ 이라면

$\sum_{i=1}^{23} e_i^k b_{ij}^{ks}$ 는 s 국 상품 j 에 대한 최종수요 한 단위가 초래하는 k 국의 탄소배출량에 해당한다. $e_k B_{ks} f_{sr}$ 은 s 국이 생산한 상품에 대한 r 국의 최종수요(s 국의 r 국에 대한 수출)인 f_{sr} 에 직간접적으로 함유된 k 국의 탄소배출량이다. 열벡터 Δf_{sr} 가 $\Delta f_{sr} = (1,0,0,\dots,0)_{23 \times 1}$ 이라면 $e_k B_{ks} \Delta f_{sr}$ 는 s 국이 생산한 상품1에 대한 r 국의 백만 달러 최종수요(s 국의 백만 달러 상품1 수출)에 함유된 k 국의 탄소배출량에 해당한다. 이 값은 $r=s$, 즉 한국의 자국 상품에 대한 국내최종소비이든 $r \neq s$, 즉 한국의 수출이든 동일하다. 따라서 행벡터인 $e_k B_{ks}$ 의 각 요소는 한국의 해당 상품 백만 달러 수출에 함유된 k 국의 탄소배출량이 된다.

<표 1>은 한국의 최종재 백만 달러 수출이 가져오는 상품별 국내의 탄소배출량을 계산한 표이며 (23×1) 행벡터인 $e_k B_{ks}$ (s =한국)를 열벡터로 바꾼 후 국가별로 나타낸 것이다. 교역규모가 작고 본질적으로 비교역재에 속하는 서비스부문을 제외하면 제조업 등 비(非)서비스산업 중에서 비금속광물의 백만 달러 수출에 함유된 국내의 탄소배출량이 약 1,241톤으로 가장 높고 일차금속이 약 1,124톤, 섬유·가죽이 737톤으로 그 뒤를 잇고 있다. 서비스산업을 제외한 농림어업, 광업 및 제조업의 백만 달러 최종재 수출에 함유된 평균 탄소배출량은 608톤이며 이는 평균 국내 탄소배출량 359톤(약 59%)과 평균 외국 탄소배출량 249톤(약 41%)으로 나누어진다. 즉, 한국의 비서비스산업 최종재 수출 백만 달러당 국내에서 배출되는 에너지 연소로 인한 탄소배출량은 평균적으로 359톤이며 한국이 수출하는 비서비스산업 최종재를 생산하기 위하여 사용된 외국의 중간투입재 생산에서 발생한 에너지 연소에 기인한 탄소배출량은 약 249톤이 된다는 것이다.

한국의 비서비스부문 최종재 수출에 함유된 외국의 탄소배출 비중이 평균적으로 가장 높은 지역은 기타지역(ROW)이며 백만 달러당 약 110톤으로 약 18.2%를 차지하고 있고 중국 13.4%, EU 3.4%, 미국 3.3%, 일본 2.8%의 순으로 비중이 높은 것

으로 나타났다. 한국의 최종재 수출에 함유된 주요 교역상대국들의 탄소배출 비중은 중국과 같이 한국과 국제적 생산분업 정도가 큰 교역상대국에서 높음을 알 수 있다. 한국이 최종재를 수출하지만 국제적 투입-산출관계를 통하여 한국에 중간투입재를 공급하는 국가들에서도 한국의 수출과 관련하여 탄소가 배출되어 소비기반 탄소배출량의 관점에서 한국으로부터 최종재를 수입하는 국가는 한국의 국내 탄소배출뿐만 아니라 한국의 수출에 의하여 유발되는 다른 국가들의 탄소배출에도 책임이 있는 것이다.

〈표 1〉 한국의 상품별 백만 달러 수출에 함유된 국내외 탄소배출량

($e_k B_{ks}$, s =한국, 단위: 천 CO_2 톤)

산업 \ k	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
농림수산업	0.332	0.022	0.005	0.011	0.009	0.047	0.425
광업	0.302	0.016	0.004	0.006	0.006	0.031	0.364
음식료품	0.228	0.036	0.006	0.021	0.014	0.057	0.362
섬유·가죽	0.461	0.145	0.012	0.019	0.021	0.081	0.737
목제품	0.286	0.082	0.007	0.023	0.024	0.084	0.506
종이·인쇄	0.432	0.049	0.010	0.023	0.018	0.089	0.620
석탄·석유제품	0.159	0.037	0.005	0.013	0.025	0.213	0.451
화학제품	0.412	0.073	0.024	0.029	0.027	0.159	0.723
비금속광물	1.039	0.063	0.016	0.017	0.019	0.088	1.241
일차금속	0.580	0.177	0.047	0.027	0.034	0.259	1.124
금속제품	0.323	0.117	0.030	0.019	0.022	0.148	0.659
수송장비	0.242	0.091	0.022	0.023	0.021	0.100	0.500
전기·전자제품	0.140	0.112	0.025	0.029	0.022	0.091	0.420
기계장비	0.220	0.100	0.027	0.022	0.022	0.101	0.492
기타제조업	0.224	0.103	0.021	0.020	0.022	0.110	0.500
비서비스산업 평균	0.359	0.081	0.017	0.020	0.020	0.110	0.608

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

<표 1> 한국의 상품별 백만 달러 수출에 함유된 국내외 탄소배출량 (계속)
 ($e_k B_{ks}$, s =한국, 단위: 천 CO_2 톤)

산업 \ k	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
전기·가스·수도	4.464	0.026	0.005	0.009	0.015	0.114	4.631
건설	0.239	0.058	0.014	0.012	0.013	0.068	0.404
도소매	0.203	0.021	0.003	0.010	0.008	0.033	0.277
운수·보관	0.904	0.037	0.010	0.050	0.051	0.165	1.217
통신	0.129	0.015	0.003	0.006	0.005	0.020	0.177
금융·보험	0.084	0.007	0.001	0.004	0.003	0.012	0.111
공공서비스	0.159	0.019	0.005	0.007	0.007	0.029	0.225
기타서비스	0.162	0.023	0.004	0.009	0.008	0.031	0.236
전산업 평균	0.510	0.062	0.013	0.018	0.018	0.092	0.713

<표 2>와 <표 3>은 한국과 비교를 위하여 중국과 일본의 상품별 최종재 수출에 함유된 국내외 탄소배출 비중을 계산한 표이다. <표 2>에서 중국 비서비스산업의 백만 달러 수출에 함유된 탄소배출량의 평균은 1,619톤으로 한국의 2배 이상으로 중국 수출의 탄소집약도가 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 중국의 비서비스산업의 최종재 수출에 함유된 국내배출 탄소배출량 평균이 1,486톤(약 92%)이고 중국의 비서비스산업 수출에 함유된 외국의 탄소배출량이 133톤(약 8%)으로 다른 국가들에 비하여 수출에 함유된 국내배출 비중이 매우 높다는 특징을 가지고 있다. <표 3>에서 일본의 비서비스산업의 백만 달러 수출에 함유된 탄소배출량 평균은 421톤으로 한중일 삼국 중에서 가장 적으며 탄소배출의 국내 비중이 백만 달러당 275톤(65.5%)이고 탄소배출의 외국 비중이 146톤(34.5%)으로 수출에 함유된 탄소배출 비중구조 면에서는 한국과 중국의 중간인 것으로 나타났다.

〈표 2〉 중국의 백만 달러 수출에 함유된 국내외 탄소배출량

($e_k B_{ks}$, s =중국, 단위: 천 CO_2 톤)

산업 \ k	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
농림수산업	0.003	0.654	0.003	0.005	0.005	0.029	0.699
광업	0.005	1.751	0.006	0.008	0.011	0.057	1.838
음식료품	0.004	0.936	0.004	0.010	0.009	0.048	1.011
섬유·가죽	0.008	1.189	0.006	0.012	0.013	0.065	1.294
목제품	0.006	0.995	0.007	0.013	0.013	0.067	1.101
종이·인쇄	0.007	1.738	0.009	0.017	0.016	0.078	1.864
석탄·석유제품	0.008	1.683	0.008	0.015	0.029	0.178	1.920
화학제품	0.012	1.903	0.012	0.017	0.019	0.103	2.064
비금속광물	0.007	3.062	0.008	0.011	0.014	0.075	3.177
일차금속	0.008	2.603	0.012	0.012	0.019	0.119	2.773
금속제품	0.009	1.817	0.013	0.013	0.018	0.107	1.976
수송장비	0.010	1.199	0.014	0.016	0.020	0.089	1.348
전기·전자제품	0.016	0.698	0.020	0.021	0.020	0.123	0.898
기계장비	0.011	1.304	0.016	0.015	0.020	0.110	1.477
기타제조업	0.006	0.754	0.007	0.009	0.011	0.060	0.847
비서비스산업 평균	0.008	1.486	0.010	0.013	0.016	0.087	1.619
전기·가스·수도	0.005	12.481	0.006	0.007	0.010	0.049	12.557
건설	0.007	1.549	0.010	0.011	0.015	0.081	1.673
도소매	0.003	0.677	0.003	0.006	0.006	0.032	0.728
운수·보관	0.004	1.433	0.005	0.008	0.010	0.055	1.515
통신	0.004	0.565	0.005	0.006	0.007	0.032	0.617
금융·보험	0.002	0.326	0.002	0.003	0.004	0.017	0.353
공공서비스	0.004	0.742	0.005	0.008	0.008	0.042	0.809
기타서비스	0.004	0.560	0.005	0.008	0.008	0.041	0.626
전산업 평균	0.007	1.766	0.008	0.011	0.013	0.072	1.877

한국의 수출에 함유된 국내외 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

<표 3> 일본의 백만 달러 수출에 함유된 국내외 탄소배출량

($e_k B_{ks}$, s =일본, 단위: 천 CO_2 톤)

산업 \ k	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
농림수산업	0.002	0.017	0.224	0.009	0.008	0.037	0.296
광업	0.002	0.013	0.431	0.007	0.009	0.046	0.508
음식료품	0.002	0.020	0.170	0.014	0.010	0.041	0.257
섬유·가죽	0.005	0.156	0.102	0.012	0.016	0.051	0.342
목제품	0.003	0.033	0.121	0.016	0.015	0.056	0.243
종이·인쇄	0.002	0.025	0.278	0.010	0.010	0.041	0.365
석탄·석유제품	0.005	0.021	0.189	0.012	0.028	0.194	0.449
화학제품	0.005	0.050	0.360	0.019	0.018	0.102	0.554
비금속광물	0.003	0.023	0.653	0.008	0.011	0.064	0.761
일차금속	0.008	0.045	0.598	0.015	0.022	0.187	0.874
금속제품	0.005	0.028	0.278	0.008	0.010	0.085	0.414
수송장비	0.004	0.036	0.156	0.013	0.012	0.062	0.281
전기·전자제품	0.005	0.045	0.175	0.011	0.010	0.065	0.310
기계장비	0.004	0.052	0.183	0.011	0.011	0.058	0.319
기타제조업	0.003	0.035	0.216	0.010	0.012	0.063	0.338
비서비스산업 평균	0.004	0.040	0.275	0.012	0.013	0.077	0.421
전기·가스·수도	0.003	0.015	2.613	0.007	0.014	0.091	2.742
건설	0.002	0.024	0.171	0.007	0.008	0.040	0.251
도소매	0.001	0.008	0.116	0.004	0.004	0.016	0.149
운수·보관	0.002	0.011	0.535	0.012	0.016	0.061	0.638
통신	0.001	0.006	0.095	0.004	0.003	0.013	0.122
금융·보험	0.001	0.004	0.054	0.003	0.003	0.009	0.073
공공서비스	0.001	0.010	0.153	0.004	0.004	0.021	0.194
기타서비스	0.001	0.008	0.090	0.003	0.003	0.014	0.119
전산업 평균	0.003	0.030	0.346	0.010	0.011	0.062	0.461

<표 4>는 한국을 포함한 6개 국가 및 지역의 비서비스산업의 백만 달러 수출에 함유된 국내 및 외국의 평균 탄소배출량과 비중을 비교한 것이다. 백만 달러 수출에 함유된 국내외 탄소배출 평균비중을 보면 한국의 국내 탄소배출 비중은 59%로 한

국의 주요 교역상대국들과 비교하여 가장 낮으며 일본이 약 66%, EU가 68%, 미국이 78% 그리고 중국이 92%로 가장 큰 국내비중을 가지고 있다. 이는 수출을 위하여 외국으로부터 수출재 생산을 위한 중간투입재를 수입하는 수직적 분업 정도가 상대적으로 크기 때문이다.

<표 4> 각국별 비서비스산업 백만 달러 수출에 함유된 국내외 평균 탄소배출 비중
(단위: CO₂ 톤)

	한국		중국		일본		미국		EU	
국내비중	359	(59.0%)	1,486	(91.8%)	275	(65.5%)	461	(77.9%)	250	(68.3%)
외국비중	249	(41.0%)	133	(8.2%)	146	(34.5%)	131	(22.1%)	116	(31.7%)
계	608	(100%)	1,619	(100%)	421	(100%)	592	(100%)	366	(100%)

2. 한국과 주요 교역상대국들 사이의 탄소사슬

국제적 생산분업망(global production network)은 국제무역에 함유된 탄소배출의 국가간 사슬구조를 결정한다. <표 5>는 식 (5)에 의하여 한국 상품에 대한 중간 및 최종 수요에 의한 탄소사슬을 나타낸 표이다. <표 5>의 각 열은 해당 국가의 각국 상품에 대한 최종수요를 충족시키기 위하여 필요한 한국 상품을 생산하는 과정에서 배출된 탄소량을 나타낸다. 예를 들어 <표 5>의 첫 열은 한국의 각국 상품들에 대한 최종수요를 충족시키기 위하여 필요한 한국 상품을 생산하는 과정에서 배출된 탄소량이다. 한국이 자국 상품에 대한 최종수요를 충족시키는 생산과정에서 배출된 탄소량(c_{kkk} , k =한국)이 230.41 백만 톤이며 중국 상품에 대한 한국의 최종수요로 인하여 중국이 한국으로부터 수입한 중간투입재의 한국 생산에서 배출된 탄소량(c_{ksk} , k =한국, s =중국)은 0.14 백만 톤이다. 이렇게 한국의 자국 및 외국 상품에 대한 최종수요를 충족시키기 위한 한국의 최종재와 중간투입재 생산으로부터 발생한 탄소배출 총량은 230.72 백만 톤으로 계산되었다. <표 5>의 두 번째 열에 해당하는 중국의 한국 상품에 대한 최종수요로 인한 한국의 탄소배출량(<표 5>에서 3.91 백만 톤)과 자국 및 외국 상품에 대한 중국의 최종수요를 충족시키기 위하여 각국이 생산에 투입한 한국산 중간투입재로부터 발생한 탄소배출량의 합계는 21.3 백만 톤

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

이다. 미국, EU 및 일본의 최종수요는 한국에 각각 10.22 백만 톤, 25.51 백만 톤, 29.73 백만 톤의 탄소배출을 초래한 것으로 나타났다.

한국의 에너지 연소에 기인한 탄소배출 총량은 약 372 백만 톤이며 이중에 한국의 최종수요를 충족시키기 위한 상품생산에서 발생한 탄소배출량의 비중은 약 62%이고 기타지역(ROW)을 제외한 주요 교역상대국들 중에서 EU의 최종수요를 충족시키기 위하여 생산된 한국 상품에 함유된 탄소배출 비중이 8.1%로 가장 높고 그 다음으로 미국 6.8%, 중국 5.7%, 일본 2.7% 순인 것으로 나타났다. 결국 한국이 상품생산에 따른 에너지 연소로 인한 탄소배출총량 중에서 소비기반 배출량이라는 측면에서 한국이 책임이 있는 부분은 탄소배출총량의 약 62%이며 나머지 38%는 외국의 최종수요에 책임이 있다는 것이다.

<표 5>의 각 행(row)은 해당 국가의 상품에 대한 각국의 최종수요로 인한 한국의 탄소배출량들을 나타낸다. 첫 행은 한국 상품에 대한 각국의 최종수요에 기인한 한국의 탄소배출량으로 한국의 자국 상품에 대한 최종수요로 인하여 230.41 백만 톤이 배출되고 중국의 한국 상품에 대한 최종수요로 인하여 3.91 백만 톤, 일본의 한국 상품에 대한 최종수요로 2.72 백만 톤 등 한국 상품에 대한 세계전체의 최종수요로 인하여 한국에서 약 275 백만 톤의 탄소가 배출되었으며 중국 상품에 대한 세계전체의 최종수요로 인하여 약 22 백만 톤의 탄소가 한국에서 배출되어 기타지역을 제외하면 가장 높은 배출비율을 차지하는 외국이다. 일본에 대한 세계전체의 최종수요로 인한 한국의 탄소배출량은 주요 교역상대국들 중에서 가장 적은 약 7.7 백만 톤인 것으로 나타났다.

<표 5>의 각 열(column)은 교역국들간 얽혀있는 탄소사슬에서 해당 국가의 최종수요에 기인하여 발생한 한국의 탄소배출량을 나타낸다. 예를 들어 중국에 해당하는 열에서 첫 번째 셀인 3.91(= $c_{\text{한국, 한국, 중국}}$)은 중국이 한국상품에 대한 최종수요(한국의 대중국 최종재 수출)를 생산하는데 발생한 한국의 탄소배출량이며 두 번째 셀인 16.88(= $c_{\text{한국, 중국, 중국}}$)은 중국이 자국상품에 대한 최종수요를 생산하기 위하여 직간접적으로 중간투입한 한국상품(한국의 대중국 중간재 수출)을 한국이 생산하면서 배출한 탄소배출량이다. 즉, <표 5>를 열로 읽을 때 한국에 해당하는 열과 행에 있는 셀들을 제외한 나머지 셀들은 열에 해당하는 국가의 최종수요를 충족시키기

위해 자국 혹은 한국을 제외한 다른 국가들이 중간투입재로 사용한 한국의 수출재를 한국이 생산하면서 발생한 탄소배출량을 나타낸다.

<표 5> 한국 상품에 대한 수요에 함유된 탄소사슬

(C_{kSR} , k =한국, 단위: 백만 CO_2 톤)

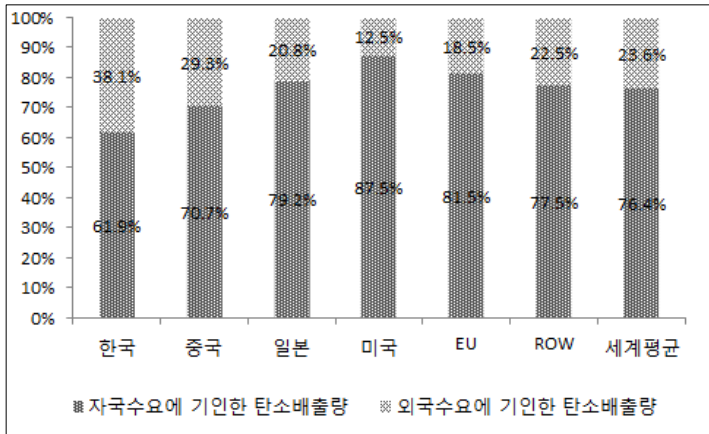
$s \backslash r$	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
한국	230.41	3.91	2.72	7.67	9.35	21.01	275.07 (73.9%)
중국	0.14	16.88	0.52	1.51	1.24	1.78	22.07 (5.8%)
일본	0.04	0.11	6.58	0.32	0.19	0.49	7.73 (2.1%)
미국	0.03	0.04	0.06	13.57	0.27	0.77	14.74 (4.0%)
EU	0.02	0.08	0.07	0.42	17.24	1.18	19.01 (5.1%)
ROW	0.08	0.28	0.27	2.02	1.44	29.72	33.81 (9.1%)
합계	230.72 (61.9%)	21.30 (5.7%)	10.22 (2.7%)	25.51 (6.8%)	29.73 (8.1%)	54.95 (14.8%)	372.43 (100%)

<그림 1>은 한국을 대상으로 한 <표 5>와 같은 표를 각국별로 계산하여 한국 및 주요 교역상대국들의 생산기반 탄소배출량(production-based inventory)중에서 자국과 외국의 최종수요에 기인한 탄소배출량 비중을 계산하여 그래프로 표시한 것이다. 자국의 최종수요에 기인한 탄소배출량 비중의 세계평균은 76.4%인 것을 감안하면 한국의 상품생산에서 발생한 탄소배출 총량 중에서 한국의 자국 수요에 기인한 탄소배출량이 차지하는 비중인 62%는 상대적으로 낮은 수준이다. 반면에 미국의 자국 수요에 기인한 탄소배출량 비중은 87.5%로 세계평균과 비교해서 높은 수준이며 한국의 주요 교역상대국들 중에서도 가장 큰 것으로 나타났다. EU와 일본의 자국 수요에 기인한 탄소배출량 비중은 각각 81.5%와 79.2%로 세계평균보다 높다. 중국의 자국 수요에 기인한 탄소배출량 비중은 한국보다 높은 70.7%이나 세계평균보다

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
 주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

는 낮은 것으로 나타났다. 한국의 경우 외국수요에 기인한 탄소배출량 비중이 높은 것은 경제규모에 비하여 무역의존도, 특히 해외수출의 비중이 상대적으로 매우 높고 다른 국가들의 최종수요를 충족시키기 위한 중간투입재의 수출 비중이 상대적으로 크기 때문에 예상할 수 있는 결과라고 할 수 있다.

<그림 1> 각국별 자국수요 및 외국수요에 기인한 탄소배출 비중



<표 6>은 식 (6)을 이용하여 <표 5>의 한국 상품에 대한 중간투입 및 최종수요에 함유된 탄소사슬별 탄소집약도(carbon intensity)를 계산한 것으로 한국의 상품이 사용되는 용도별(최종재와 중간투입재) 및 교역상대국별 탄소집약도의 몇가지 특징을 보여주고 있다. 한국의 탄소사슬별 탄소집약도(α_{kstr})는 s 국의 각 상품에 대한 r 국의 최종수요를 충족시키기 위하여 필요한 한국(k 국)의 각 상품 산출에 함유된 탄소배출량 합계를 한국의 각 상품 산출합계로 나눈 값으로 평균적 개념이다. 따라서 한국의 탄소사슬별 탄소집약도는 r 국의 최종수요를 위한 s 국 상품 생산에 사용되는 한국의 상품구성에 의하여 영향을 받으며 한국의 교역상대국의 최종수요를 충족시키기 위하여 수출하는 상품구성의 탄소집약성 정도에 의하여 결정된다.

<표 6>에 나타난 한국의 탄소사슬별 탄소집약도의 특징을 보면 중국의 최종수요를 충족시키기 위한 한국의 수출에 함유된 평균 탄소집약도가 0.1596으로 한국의 주요 교역상대국들 중에서 가장 낮고 미국과 일본의 최종수요를 충족시키기 위한

한국의 수출에 함유된 평균 탄소집약도는 각각 0.1708과 0.1709로 유사한 것으로 나타났으며 기타지역의 최종수요를 충족시키기 위한 한국의 수출에 함유된 평균 탄소집약도가 0.1755로 가장 높은 것으로 계산되었다. 중국에 대한 한국의 최종재 수출의 탄소집약도가 0.1183으로 한국의 주요 교역상대국들 중에서 가장 낮으며 이는 한국이 중국에 최종재로 수출하는 상품구성이 상대적으로 탄소집약도가 낮은 상품들로 구성되었기 때문이다. 일본, 미국 및 EU에 대한 한국의 최종재 수출에 함유된 탄소집약도는 평균 0.152 수준에서 큰 차이가 없다. 한국의 주요 교역상대국들의 각국 상품에 대한 최종수요 중에서 자국 상품에 대한 최종수요를 충족하기 위하여 한국이 수출하는 중간투입재의 탄소집약도(<표 6>의 대각선에 있는 값들)가 대체로 높은 편이다. 일본의 자국 상품에 대한 최종수요를 충족하기 위한 한국의 수출에 함유된 탄소집약도는 0.2029로서 가장 높은 것으로 나타났고 기타지역 0.1992, EU 0.1953, 미국 0.1833, 중국 0.1748 순으로 높은 것으로 나타나며 한국의 자국 상품에 대한 최종수요를 충족시키기 위한 산출의 탄소집약도는 0.1455로 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 한국이 상대적으로 탄소집약도가 높은 상품을 주요 교역상대국들의 자국 상품에 대한 최종수요를 위한 생산에 중간투입재로 수출하고 있음을 알 수 있다.

〈표 6〉 한국의 탄소사슬별 탄소집약도

(α_{ksr} , k =한국, 단위: 천 CO_2 톤/백만달러)

$s \backslash r$	한국	중국	일본	미국	EU	ROW	합계
한국	0.1455	0.1183	0.1527	0.1536	0.1518	0.1556	0.1463
중국	0.1392	0.1748	0.1474	0.1404	0.1413	0.1504	0.1489
일본	0.1784	0.1752	0.2029	0.1911	0.1879	0.1909	0.1877
미국	0.1580	0.1636	0.1688	0.1833	0.1714	0.1739	0.1698
EU	0.1865	0.1724	0.1918	0.1850	0.1953	0.1831	0.1857
ROW	0.1539	0.1535	0.1615	0.1716	0.1864	0.1992	0.1710
합계	0.1603	0.1596	0.1709	0.1708	0.1724	0.1755	0.1682

IV. 요약 및 결론

온실가스 저감을 위한 국제적 논의에서 국가 온실가스 배출량의 정의와 측정은 온실가스 감축량을 결정하고 감축약속의 이행여부를 확인할 수 있는 기준이 된다. 최근 현재의 국가 온실가스 배출량의 정의를 영토기반 배출량에서 소비기반 배출량으로 전환하는 것이 탄소누출을 막고 온실가스 감축을 촉진할 수 있다는 주장이 제기되고 있다. 국가 간 수직적 분업과 같은 국제적 생산분업으로 각국의 상품생산에는 자국에서 생산된 상품뿐만 아니라 외국에서 생산된 상품들이 중간투입재로 사용되고 있어 소비기반 배출량은 국제무역에 함유된 탄소배출량과 직접적인 관계가 있다. 에너지 연소에 따른 이산화탄소 배출만을 대상으로 했을 때 수출재 생산에 외국으로부터의 수입중간재 투입 비중이 상대적으로 높은 한국은 상품별로 차이가 있는 하지만 평균적으로 수출에 함유된 외국의 탄소배출 비중이 주요 교역상대국들에 비하여 높게 나타난다.

한국의 에너지 연소관련 탄소배출 총량에서 자국 및 외국 상품에 대한 한국의 최종수요로 인하여 발생한 탄소배출 비중이 주요 교역상대국들의 자국 및 외국 상품에 대한 최종수요로 인하여 발생한 탄소배출 비중보다 9%~25% 포인트 낮고 세계 평균보다는 약 15% 포인트 낮은 것으로 평가되어 국내 생산에서 발생하는 탄소배출에서 한국의 최종수요에 기인하는 부분이 다른 국가들에 비하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 한국과 주요 교역상대국들 사이의 탄소배출 사슬에서 주요 교역상대국들의 각국 상품에 대한 최종수요 중에서 자국상품에 대한 최종수요를 충족시키기 위한 한국의 중간투입재 수출에 함유된 탄소집약도가 대체로 높은 편인 것으로 나타났다. 특히 중국의 각국 상품에 대한 최종수요로 인하여 발생하는 한국의 수출에 함유된 탄소집약도가 평균적으로 주요 교역상대국들 중에서 가장 낮은 것으로 평가되었다.

한국의 국제무역에 함유된 주요 교역상대국들과의 탄소배출 비중과 사슬 구조를 살펴본 본 연구의 신뢰성은 대부분의 연구에서 어쩔 수 없이 사용하고 있는 가정이기는 하지만 국가간 중간재 투입-산출 관계에 관한 ‘비례가정’이 현실을 얼마나 반영하는가에 영향을 받을 수밖에 없다. 또한 에너지 연소로 인한 이산화탄소 이외의

공정과정 등에서 발생하는 온실가스를 포함하고 있지 않기 때문에 이산화탄소 이외의 온실가스가 포함되는 경우 분석결과가 다소 달라질 수 있다는 점을 부인할 수 없다.

[References]

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. 신동천, “국제무역에 함유된 부가가치와 수출보험,” 「무역보험연구」, 제13권, 제4호, 2012, pp. 1~17.
4. 신동천, “국제무역에 함유된 탄소이력(Carbon Footprint)의 측정과 분석,” 「자원·환경경제연구」, 제22권, 제1호, 2013, pp. 31~52.
5. 심상렬, 『에너지 산업연관표 작성』, 에너지경제연구원 기본연구보고서05-00, 2005.
6. 정창봉·이성근, 『국가에너지수급통계 매뉴얼』, 에너지경제연구원, 2009.
7. 한국은행, 『2007 산업연관표』, 2009.
8. 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.
9. 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*, Vol. 21, 2009, pp. 311~335.
10. Davis, S. J. and K. Calderia, “Consumption-based Accounting of CO₂ Emissions,” *Proceedings of The National Academy of Sciences*, Vol. 107, 2010, pp. 5687~5692.
11. GTAP, *Version 8 Database*, 2012, Purdue University.
12. Hummels, D., J. Ishii, and K. Yi, “The Nature and Growth of Vertical Specialization in World Trade,” *Journal of International Economics*, Vol. 54, 2001, pp. 75~96.
13. IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006.
14. Johnson, Robert C. and Guillermo Noguera, “Accounting for Intermediates: Production

한국의 수출에 함유된 국내의 탄소배출 비중과 탄소사슬(carbon chain):
주요 교역상대국들을 중심으로 한 다지역 산업연관분석

- Sharing and Trade in Value Added,” *Journal of International Economics*, Vol. 86, 2012, pp. 224~236.
15. 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*, Vol. 46, 2012, pp. 172~179.
 16. Miller, R. and P. Blair, *Input-Output Analysis: Foundation and Extensions*, New York, Cambridge University Press, 2009.
 17. Lenzen, M., J. Murray, F. Sack, and T. Wiedmann, “Shared Producer and Consumer Responsibility-Theory and Practice,” *Ecological Economics*, Vol. 61, 2007, pp. 27~42.
 18. Leontief, W., “Environmental Repercussions and The Economic Structure: An Input-Output Approach,” *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 52, 1971, pp. 262~271.
 19. Peters G., “From Production-based To Consumption-based National Emissions Inventories,” *Ecological Economics*, Vol. 65, 2008, pp. 13~23.
 20. Peters, G., R. Andrew, and J. Lennox, “Constructing An Environmentally -Extended Multi-region Input-output Table Using GTAP database,” *Economic Systems Research*, Vol. 23, 2011, pp. 131~152.
 21. Peters, G. and E. Hertwich, “Post-Kyoto Greenhouse Gas Inventories: Production versus Consumption,” *Climate Change*, Vol. 86, 2008a, pp. 51~66.
 22. Peters, G. and E. Hertwich, “CO₂ Embodied in International Trade With Implications for Global Climate Policy,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, 2008b, pp. 1401~1407.
 23. Rutherford, T. F., “Climate-Linked Tariffs: Practical Issues,” *TAIT Second Conference on Climate Change, Trade and Competitiveness: Issues for The WTO*, Geneva, 2010.
 24. Treffer, Daniel and Susan Zhu, “The Structure of Factor Content Predictions,” *Journal of International Economics*, Vol. 82, 2010, pp.195~207.
 25. Walter, Ingo, “The Pollution-Content of American Trade,” *Economic Inquiry*, Vol. 11, 1973, pp. 61~70.
 26. Wiedmann, T., “A Review of Recent Multi-Region Input-Output Models for Consumption-Based Emissions and Resource Accounting,” *Ecological Economics*, Vol. 69, 2009b,

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*, Vol. 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*, Vol. 24, 2012, pp. 113~139.