

국내 철강업의 생산요소 간 비효율적 배분을 고려한 CO₂ 저감비용 산정 및 분석: 비용함수접근법[†]

이 명 현*

요약 : 2015년부터 도입예정인 탄소 배출권거래제의 파급효과를 분석하는 데 있어서 산업별, 기업별 CO₂ 저감비용에 대한 정확한 산정이 요구된다. 기업이 환경규제 등 제약된 환경에서 생산 활동을 할 경우 생산요소의 투입과정에서 비효율적 배분으로 인한 생산비용의 증가가 초래되어 비용최소화 달성에 실패할 개연성이 높아진다. CO₂ 암묵가격을 측정된 기존 거리함수접근법은 투입요소 간 비효율적 배분 비용을 반영하지 못함에 따라 CO₂ 저감비용을 과소평가할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 거리함수접근법의 한계를 극복하기 위하여 국내 철강업을 대상으로 비용함수접근법을 사용하여 1990-2010 기간 동안 투입요소 간 비효율적 배분 여부를 검증하고, CO₂ 한계저감비용을 추정하였다. 투입요소 간 배분 효율성 달성은 기각되었으며, 표본 기간 동안 CO₂ 1톤 감축하는 데 연평균 92,000원의 비용을 지불한 것으로 나타났다.

주제어 : 탄소 배출권거래제, CO₂ 한계저감비용, 요소 간 비효율적 배분, 비용함수접근법

JEL 분류 : C32, D24, L61, Q52

접수일(2014년 5월 20일), 게재확정일(2014년 9월 22일)

[†] 이 논문은 인하대학교의 지원과 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013S1A3A2055150).

* 인하대학교 국제통상학과 교수(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

Estimation of CO₂ Abatement Cost Considering Allocative Inefficiency of Inputs for the Korean Steel Industry: A Cost Function Approach

Myunghun Lee*

ABSTRACT : Analyzing the effects of carbon emissions trading, which is scheduled to be introduced in Korea in 2015, requires an accurate assessment of CO₂ abatement costs by both industries and firms. Firms faced with regulatory constraints are unlikely to minimize their production costs due to rising production costs caused by allocative inefficiency of inputs. The use of a distance function would result in underestimation of CO₂ abatement costs, because it fails to capture the allocative distortion costs. Recognizing the disadvantage of the previous approach, first, this paper tests for allocative efficiency of input for the Korean steel industry over the period 1990-2010, then derives the marginal CO₂ abatement costs by applying a cost function approach. The hypothesis of allocative efficiency in inputs is rejected and the steel industry pays an annual average cost of 92,000 won in removing an additional ton of CO₂ over the sample period.

Keywords : Carbon emission trading, Marginal CO₂ abatement cost, Allocative inefficiency of inputs, Cost function approach

Received: May 20, 2014. Accepted: September 22, 2014.

* Department of International Trade, Inha University(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

I. 서론

글로벌 금융위기 이후 잠시 느슨하였던 기후변화에 대한 각국의 대응 강도는 유럽 경제 상황이 최악의 국면을 벗어나고 미국의 제반 경제 지표가 개선되는 등 세계 경제 회복의 신호가 감지되면서 향후 국가 간 최대 공동 관심사 내지 현안으로 부상할 개연성이 높다.¹⁾ 한국은 기존 개도국 지위 유지라는 방어적, 소극적 전략에서 벗어나 국가 감축 잠재량 재평가, 기존 감축정책의 실효성 점검, 녹색기술 개발과 신재생에너지 산업 육성과 관련 산업의 일자리 창출, 에너지 효율 개선과 에너지저소비 산업구조로의 전환을 유인하는 수요관리정책의 도입, 이산화탄소 배출규제와 통상 마찰 사례연구 및 조정안 모색 등 새로운 국가 장기 기후전략 수립이 요구되고 있다.

온실가스 감축과 관련하여 선진국과 개도국 간 CDM 사업과 함께 향후 동북아 탄소배출권 시장이 형성될 것으로 예상됨에 따라 배출권 거래제 도입의 경제 파급 효과 등 탄소시장 전반에 대한 심층적인 연구가 필요한 상황이다.²⁾ 한국 정부는 중기 목표로 2020년까지 예상 배출량 (BAU)의 30%를 줄이기로 하였으며, 이는 2005년 배출량 기준 4% 감축량 수준으로서 7개 부문별로 세분화하여 감축목표를 할당하였다. 이를 효율적으로 실행하기 위하여 정책수단으로서 2015년부터 기업별 온실가스 배출 할당량을 설정하고 기업 간 배출권거래제를 도입하기로 하였다. 온실가스 배출규제의 사회적 비용을 최소화하기 위하여 배출권의 시장가격과 함께 기업별 참여 형태 (배출권 구매/판매 여부), 그리고 비용절감 효과 등을 예측, 분석하는 데 있어서 각 기업 또는 산업별 CO₂ 배출 저감비용의 현황을 정확히 파악하는 실증적 작업이 선행되어야 한다.

특정 산업 혹은 기업을 대상으로 CO₂ 한계저감비용을 추정할 기존 문헌 대부분

1) UN 기후변화협약 제17차 당사국 총회 (COP 17)에서 2012년 만료되는 교토의정서 이행 기간을 5년 연장하기로 하고, 온실가스 감축의무 대상 국가로서 교토의정서 체제에 동참하지 않았던 배출규모 세계 1~3위의 미국, 중국, 인도를 포함하여 선진국, 개도국이 모두 참여하는 법적 구속력 있는 조약체결을 위한 협상을 2015년까지 마무리하고 각 국의 기준을 거쳐 2020년까지 발효하는 일정에 합의하였다.

2) 동북아지역은 새로이 부상하는 세계경제의 중심축으로서 2010년도 현재 이산화탄소 배출량 세계 1위 중국을 비롯하여 4위 러시아, 5위 일본, 7위 한국 등이 속해 있다. 중국의 경우 북경시(北京市), 천진시(天津市), 상해시(上海市), 중경시(重慶市), 호북성(湖北省), 광둥성(廣東省), 심천시(深圳市) 등 7개 지역을 탄소 배출권거래제 도입 시범지역으로 지정하였다.

은 생산요소의 추가 투입 없이 선호 (desirable) 산출물인 최종 재화와 비선호 (undesirable) 산출물인 CO₂ 배출량을 동시에 최대한 증가시킬 수 있는 비율의 역수로 정의되는 산출물거리함수 (output distance function)를 추정하여, CO₂ 한 단위 감축 시 포기해야 할 최종 재화 생산량의 가치로 측정된 기회비용 개념의 암묵가격 (shadow price)을 도출하였다. Kwon and Yun (1999), Park and Lim (2009), Lee (2011) 등은 한국 화력발전소를 분석하였고, Lee and Zhang (2011)과 김영마이명현 (2013)은 중국의 제조업과 화력발전산업을 각각 연구하였다. Matsushita and Yamane (2012)는 일본 발전소 자료를 사용하였다.

Atkinson and Halvorsen (1984)은 환경규제 등을 포함하여 제약된 조건에서 기업이 생산활동을 할 경우 투입요소 간 최적 배분에 방해를 받음으로써 비용최소화 달성에 실패할 수 있음을 지적하였다. 하지만 거리함수접근법으로부터 도출된 CO₂ 암묵가격은 생산요소의 투입과정의 변화까지 포착할 수 없는 분석모형의 내재적 한계로 인하여 요소 간 비효율적 배분으로 발생하는 비용이 누락됨으로써 기업이 규제 환경에서 CO₂ 감축 시 실제 부담하는 비용을 과소평가하게 된다.³⁾ 산업 업종에 따라 저탄소 생산공정의 도입으로 온실가스 배출을 억제할 경우 요소 간 왜곡 배분에 기인하여 증가한 한계 비용이 CO₂ 암묵가격을 능가할 수 있다. 본 논문에서는 2012년부터 ‘온실가스 목표관리제’가 시행되면서 국내 제조업 가운데 CO₂ 의무감축 할 당량이 가장 많은 철강업을 대상으로 비용함수접근법을 사용하여 투입요소 간 효율적 배분 여부를 검증한 다음, CO₂ 감축에 따른 기업의 총 지불비용을 측정한다.⁴⁾ 또한 각 요소수요에 대한 가격탄력성을 추정한 다음 이들을 활용한 모의실험을 통하여 자본투자로 인한 에너지저감 규모를 산정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II절에서는 투입요소 간 분배 효율성을 검증하기 위하여 암묵비용함수를 도출하고, 제III절에서는 비용함수로부터 CO₂ 한계저감 비용과 가격탄력성을 측정한다. 제IV절에서 실증분석 결과를 제시하고, 제V절에서

3) 거리함수접근법은 특정 값에 대한 부호 (한계값의 방향) 부여의 용이성, 적은 양의 자료 사용 등의 이점이 있는 반면, Kolstad and Turnovsky (1998)가 지적하였듯이 종속변수의 관찰치 부재, 설명변수의 내생성 (endogeneity) 등 계량경제학적 문제를 내포하고 있다.

4) 선행연구에서 비용함수접근법은 쌍대성 이론 (duality theory)을 이용하여 특정 기업 혹은 산업에 대한 생산함수의 제반 특성들, 예컨대 요소의 가격탄력성 및 대체탄력성 (Atkinson and Halvorsen, 1976), 환경규제의 생산성 파급효과 (Gollop and Roberts, 1983) 등을 측정하는 데 주로 사용되어 왔다.

요약과 결론을 담는다.

II. 분배 효율성 분석

자본 (k), 노동 (l), 에너지 (e)로 구성된 생산요소 벡터 $\mathbf{x} \in R_+^3$ 을 투입하여 산출물 (Q)을 창출하는 철강업의 생산함수는 다음과 같다.

$$Q = f(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

여기서 t 는 기술변화를 측정하는 시간지표이다. 식 (1)에 기초하여 생산과정에서 동시적으로 발생하는 부산물, CO₂ (E)의 배출함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = g(\mathbf{x}, t). \quad (2)$$

향후 국내외적으로 온실가스 감축 요구에 직면한 상황에서 그 필요성을 인식하여 기업 내부적으로 CO₂ 배출량 저감 목표를 설정할 경우 기업의 비용최소화를 위한 Lagrangian 함수를 정의할 때 다음과 같이 기존 생산함수 (1) 제약조건에 배출함수 (2)가 추가된다.

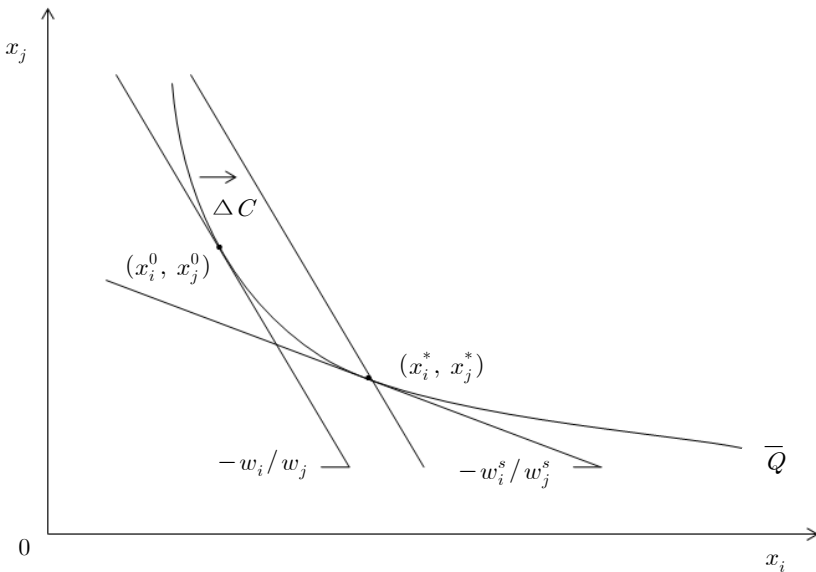
$$\mathcal{L} = \sum_i w_i x_i + \lambda(Q - f(\mathbf{x}, t)) + \mu(E - g(\mathbf{x}, t)), \quad (3)$$

여기서 w_i 는 생산요소 x_i 의 시장가격이며, λ 와 μ 는 Lagrangian 승수이다. 생산요소 x_i 와 x_j 각각에 대한 비용최소화 1차 필요조건으로부터 다음의 관계식을 도출할 수 있다.

$$\frac{f_i}{f_j} = \frac{w_i + \mu g_i}{w_j + \mu g_j} \neq \frac{w_i}{w_j}, \quad (4)$$

여기서 $f_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$, $g_i \equiv \frac{\partial g}{\partial x_i}$ 이다. CO₂ 감축 제약에 직면할 경우 두 생산요소 간 효율적 배분조건으로서 한계기술대체율과 시장가격의 비율이 일치하지 않게 되어 비용최소화 달성에 실패함으로써 추가비용이 발생한다. 이러한 상황을 <그림 1>에서 설명하면, 온실가스 배출량의 제약조건이 부여되기 전에는 (x_i^0, x_j^0) 가 생산비용을 최소화시키는 투입요소의 조합점이 되나, 온실가스의 목표 배출량이 설정되면 최적점은 등량곡선 \bar{Q} 를 따라서 (x_i^*, x_j^*) 로 이동한다. 이때 들어가는 생산비용을 시장가격으로 측정하면 기업은 (x_i^0, x_j^0) 보다 ΔC 만큼 더 지불하게 된다.

<그림 1> 투입요소 간 왜곡된 배분으로 인한 비용 상승효과



Atkinson and Halvorsen (1984)은 요소 간 상대가격 효율성 달성 여부를 검증하기 위하여 (4)에서 $w_i + \mu g_i$ 을 암묵가격 (shadow price), w_i^s 로 정의한 후 $w_i^s = h_i w_i$ 로 명시하였다. h_i 는 시장가격과 규제 환경에서 기업이 직면한 요소 가격인 암묵가격과의 괴리 정도를 측정하는 왜곡상수 (distortion factor)로서 $h_i = 1$ 인 경우 기업은 시장가격으로 각 요소를 투입하게 되며 요소 간 효율적 배분이 이루어지게 된다.

식 (4)로부터 쌍대성이론 (duality theory)을 이용하여 요소의 암묵가격의 함수인 다음과 같은 암묵비용함수를 도출한다.

$$C^s = C^s(Q, \mathbf{hw}, t), \quad (5)$$

여기서 \mathbf{hw} 는 생산요소의 암묵가격 벡터이다. 암묵비용함수 (5)를 추정하는 데 있어서 초월대수함수 형태를 선택한 다음, Shephard (1970) 정리를 이용하여 각 투입요소의 암묵비용뮌방정식 (M_i^s)을 도출하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ln C^s = & \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_t t + \sum_i \alpha_i \ln(h_i w_i) \\ & + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 + 0.5 \gamma_{tt} t^2 \\ & + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_i w_i) \ln(h_j w_j) + \sum_i \gamma_{iQ} \ln(h_i w_i) \ln Q \\ & + \sum_i \gamma_{it} \ln(h_i w_i) t + \gamma_{Qt} (\ln Q) t, \\ & \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \quad i \neq j, \quad i, j = k, l, e. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_i^s = \frac{\partial \ln C^s}{\partial \ln(h_i w_i)} &= \frac{h_i w_i}{C^s} \cdot \frac{\partial C^s}{\partial(h_i w_i)} = \frac{h_i w_i x_i}{C^s} \\ &= \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q + \gamma_{it} t, \quad i, j = k, l, e. \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)로 구성된 방정식체계를 동시에 추정하는 데 있어서 C^s 와 M_i^s 에 대한 자료가 존재하지 않기 때문에 시장가격으로 평가한 실제 비용과 비용뮌 방정식으로 나타내는 작업이 요구된다. 식 (7)로부터 각 요소 투입량을 산출하면 다음과 같다.

$$x_i = \frac{M_i^s \cdot C^s}{h_i w_i}. \quad (8)$$

실제 비용 (C)와 비용몫 (M_i)을 정의한 후 x_i 에 대하여 식 (8)을 대입하면 다음의 관계식을 도출할 수 있다.

$$C \equiv \sum_i w_i x_i = C^s \sum_i M_i^s h_i^{-1}, \quad (9)$$

$$M_i \equiv \frac{w_i x_i}{C} = \frac{C^s M_i^s h_i^{-1}}{C} = \frac{M_i^s h_i^{-1}}{\sum_i M_i^s h_i^{-1}}. \quad (10)$$

식 (6)과 (7)을 식 (9)와 (10)에 대입함으로써 다음과 같이 실제 비용과 비용몫 방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_t t + \sum_i \alpha_i \ln(h_i w_i) \\ & + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 + 0.5 \gamma_{tt} t^2 \\ & + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_i w_i) \ln(h_j w_j) + \sum_i \gamma_{iQ} \ln(h_i w_i) \ln Q \\ & + \sum_i \gamma_{it} \ln(h_i w_i) t + \gamma_{Qt} (\ln Q) t, \\ & + \ln \left[\sum_i (\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q + \gamma_{it} t) / h_i \right], \\ & \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \quad i \neq j, \quad i, j = k, l, e. \end{aligned} \quad (11)$$

$$M_i = \frac{[\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q + \gamma_{it} t] / h_i}{\sum_i [\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(h_j w_j) + \gamma_{iQ} \ln Q + \gamma_{it} t] / h_i}, \quad i, j = k, l, e, \quad (12)$$

여기서 Atkinson and Halvorsen (1998)이 입증한 바와 같이 식 (11)과 (12)가 h_i 에 대하여 0차 동차이므로 h_i 의 절대값을 구하는 것은 불가능하다. 따라서 에너지에 대한 왜곡상수, $h_e = 1$ 로 표준화시킨 후 다른 요소에 대한 상대값을 추정하여 요소 간 상대가격 효율성 달성 여부를 검증한다.

III. CO₂ 한계저감비용 및 가격탄력성 추정

식 (3)에 대한 비용최소화 최적조건으로부터 각 생산요소의 수요함수를 구한 후 이를 식 (3)의 목적함수에 대입함으로써 다음과 같이 비용함수를 도출할 수 있다.

$$C = C(Q, E, \mathbf{w}, t), \quad (13)$$

여기서 \mathbf{w} 는 생산요소의 시장가격 벡터이다.

비용함수 (13)을 추정하기 위하여 다음과 같이 초월대수함수 형태를 선택한다.⁵⁾

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \alpha_Q \ln(\theta \cdot E) + \alpha_E \ln E + \alpha_t t + \sum_i \alpha_i \ln w_i \\ & + 0.5\gamma_{QQ}(\ln(\theta \cdot E))^2 + 0.5\gamma_{EE}(\ln E)^2 + \gamma_{tt} t^2 \\ & + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i \ln(\theta \cdot E) \\ & + \sum_i \gamma_{iE} \ln w_i \ln E + \sum_i \gamma_{it} (\ln w_i) t + \gamma_{QE} \ln(\theta \cdot E) \ln E \\ & + \gamma_{Qt} (\ln(\theta \cdot E)) t + \gamma_{Et} (\ln E) t, \\ & \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \quad i \neq j, \quad i, j = k, l, e, \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 Färe et al. (1989) 등을 따라서 Q 의 생산감소 없이 E 의 배출량을 줄일 수 없는 생산공정을 반영하기 위하여 약처분 (weak disposability) 생산기술을 전제한다.⁶⁾ 이를 수식으로 나타내면 $Q = \theta \cdot E$, $\theta \geq 0$ 가 성립하며 이때 CO₂의 한계저감비용은 (-) 값을 갖게 된다.

Shephard 정리를 이용하여 각 다음과 같이 투입요소의 비용뮌방정식 (M_i)을 도출한 다음, 식 (14)와 함께 구성된 연립방정식 체계를 반복적 켈너 (iterative Zellner)

5) 비용함수가 투입요소 가격에 대하여 선형 동차성이 충족되기 위하여 다음의 제약조건을 부여한다.

$$\sum_i \alpha_i = 1, \sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \gamma_{iQ} = \sum_i \gamma_{iE} = \sum_i \gamma_{it} = 0.$$

6) 실제 CO₂ 배출규제가 비용 혹은 생산성에 영향을 미치는지 여부를 파악하기 위하여 다음 제약조건을 Wald 방식으로 검증한 결과, 해당 귀무가설은 기각되었다: $\alpha_E = \gamma_{iE} = \gamma_{QE} = \gamma_{Et} = 0$. 1% 유의수준 하에서의 임계수준 16.81에 대하여 χ^2 통계량은 663.42로 산출되었다.

방법을 사용하여 동시에 추정한다.

$$M_i = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln(w_i)} = \frac{w_i}{C} \cdot \frac{\partial C}{\partial(w_i)} = \frac{w_i x_i}{C} \tag{15}$$

$$= \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln(w_j) + \gamma_{iQ} \ln(\theta \cdot E) + \gamma_{iE} \ln E + \gamma_{it} t, \quad i, j = k, l, e,$$

여기서 $\sum_i M_i = 1$ 이므로 각 요소의 비용뭉방정식 간 선형 종속(linearly dependent) 관계가 성립하지 않도록 하기 위하여 에너지의 비용뭉방정식 (M_e)를 연립방정식에서 제외시킨다.

추정결과를 이용하여 식 (14)로부터 CO₂의 한계저감비용 (MAC_E)을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$MAC_E = \partial C / \partial E = (\alpha_E + \gamma_{EE} \ln E + \sum_i \gamma_{iE} \ln w_i + \gamma_{QE} (\ln \theta + 2 \ln E) + \gamma_{Et} t$$

$$+ \alpha_Q + \gamma_{QQ} \ln(\theta \cdot E) + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i + \gamma_{Qt} t) \cdot \frac{C}{E}. \tag{16}$$

식 (14)와 (15)를 이용하여 각 요소의 가격탄력성 및 요소 간 대체탄력성을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{ii} \equiv \frac{\partial x_i}{\partial w_i} \frac{w_i}{x_i} = \frac{M_i(M_i - 1) + \gamma_{ii}}{M_i}, \quad i = k, l, e, \tag{17}$$

$$E_{ij} \equiv \frac{\partial x_i}{\partial w_j} \frac{w_j}{x_i} = \frac{M_i M_j + \gamma_{ij}}{M_i}, \quad i, j = k, l, e, i \neq j, \tag{18}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{M_j} E_{ij} = 1 + \frac{\gamma_{ij}}{M_i M_j}, \quad i, j = k, l, e, i \neq j, \tag{19}$$

여기서 E_{ii} 와 E_{ij} 는 각각 자기 및 교차 가격탄력성을, σ_{ij} 는 대체탄력성을 나타낸다.

IV. 분석결과

본 실증분석을 위하여 국내 철강업에 대한 1990-2010년 기간의 시계열 자료를 사용하였다. 대부분의 자료는 별도의 언급이 없는 한 통계청의 『광공업통계조사보고서』로부터 얻었다. 산출물 (Q) 생산량은 소비자물가지수로 환산한 실질 생산액이며, CO₂ 배출량 (E)은 에너지경제연구원의 『에너지통계연보』에 나와 있는 유연탄 소비량과 탄소배출계수를 사용하여 산출하였다.⁷⁾ 자본비용 (C_k)는 부가가치에서 연간 급여액을 공제하여 사용하였고, 자본가격 (w_k)는 C_k 를 소비자물가지수로 환산한 유형고정자산의 연말 실질 잔액으로 나누어 구하였다. 노동가격 (w_l)을 계산하기 위하여 연간 급여액으로 측정한 (C_l)을 월평균 종사자수로 나누었다. 에너지 비용 (C_e)는 연료비와 전력비를 합산한 비용이며, 에너지가격 (w_e)는 에너지경제연구원의 『에너지통계연보』에 보고된 유연탄과 전력의 가중 평균 가격을 사용하였다. <표 1>은 변수별 통계자료를 요약한 것이다.

〈표 1〉 자료 통계

변수	단위	평균	표준편차	최대	최소
Q	조 원	52.638	24.551	103.20	25.559
E	10 ⁶ 톤	48.847	9.206	68.340	29.647
C_k	조 원	14.087	7.611	28.810	4.145
w_k	-	0.580	0.261	1.172	0.225
C_l	조 원	2.684	1.214	4.936	1.083
w_l	10억 원/명	0.023	0.009	0.038	0.008
C_e	조 원	2.000	1.091	4.295	0.603
w_e	천 원/toe	106.380	47.274	215.180	67.023
C	조 원	18.772	9.846	37.267	6.149

7) $CO_2 = F \times tc \times cr \times (44/12)$, 여기서 F 는 유연탄 투입량 (toe), tc 는 탄소배출계수 (톤/toe), cr 는 연소율을 나타낸다.

χ^2 분포의 Wald 검증법을 사용하여 요소 간 상대가격 배분 효율성 달성 여부를 검증한 결과 <표 2>에서 보는 것처럼 모든 투입요소가 효율적으로 배분될 때 충족되어야 하는 제약조건 $h_k = h_l = h_e (= 1)$ 이 기각되었다. 이는 CO₂ 배출량 제약 등이 가해질 경우 기업의 요소 간 효율적인 투입을 저해하여 생산비용의 증가를 야기시켰음을 의미한다. 이번에는 두 요소 간 효율적 배분 여부를 진단하기 위하여 세 요소에 대한 경우의 수에 해당하는 제약조건들 $h_k = h_l$, $h_k = 1$, $h_l = 1$ 을 각각 검증한 결과 이 역시 모두 기각되었다. 자본과 노동, 자본과 에너지, 노동과 에너지 사이에는 모두 그 투입비율이 비용을 최소화시키는 적정율에서 벗어났음을 알 수 있다.

<표 2> 요소 간 분배 효율성 가설 검증 결과

귀무가설 제약조건	Wald 통계량	임계치(1%)	자유도
$h_k = h_l = 1$	112.74	9.21	2
$h_k = h_l$	83.14	6.63	1
$h_k = 1$	78.09	6.63	1
$h_l = 1$	90.63	6.63	1

식 (14)와 (15)를 하나의 방정식 체계로 동시에 추정한 결과 오차항 사이에 1차 자기상관 (autocorrelation)이 존재하는 것으로 감지되었다. <표 3>의 추정계수 값은 1차 자기회귀 (AR) 모형을 적용하여 도출한 것이다. 총 29개 추정계수 가운데 8개와 4개가 1%와 5%에서 각각 유의적인 것으로 나타났다. 모형의 설명력과 적합도를 가늠해볼 수 있는 R^2 값은 방정식별로 0.406에서 0.994의 범위를 보였다. 비용함수에 대한 정규조건(regularity condition) 충족 여부를 확인한 결과, 표본 기간 동안 요소가격에 대한 단조성과 오목성 모두 충족되었다.⁸⁾

8) 추정 비용함수에 대하여 요소가격의 단조성을 만족시키기 위해서는 각 요소의 비용함수방정식 추정치는 양수가 되어야 하며, 오목성이 만족되기 위해서는 헤시안(Hessian) 행렬이 양의 준정부호(positive semi-definite)이어야 한다.

〈표 3〉 비용함수 추정결과

계수	추정치	계수	추정치
α_0	2.2166(9.1419)	γ_{lQ}	-0.3723(0.2462)
α_Q	-4.9772(10.1980)	γ_{eQ}	0.6697(0.3840)*
θ	0.1406(0.0242)**	γ_{kE}	0.3677(0.2396)
α_E	3.0408(5.7595)	γ_{lE}	0.4123(0.2531)
α_t	-0.3186(0.2458)	γ_{eE}	-0.7800(0.4172)*
α_k	-1.3198(1.1253)	γ_{kt}	0.0019(0.0052)
α_l	-0.0453(0.6307)	γ_{lt}	-0.0078(0.0054)
α_e	2.3651(1.3751)*	γ_{et}	0.0058(0.0061)
γ_{kk}	0.0438(0.0312)	γ_{QQ}	8.1556(3.0998)**
γ_{kl}	-0.0635(0.0141)**	γ_{QE}	-7.2266(2.0501)**
γ_{ke}	0.0197(0.0299)	γ_{EE}	6.7614(1.6476)**
γ_{ll}	0.0886(0.0142)**	γ_{Qt}	-0.1279(0.0449)**
γ_{le}	-0.0250(0.0146)*	γ_{Et}	0.1252(0.0527)**
γ_{ee}	0.0053(0.0341)	γ_{tt}	0.0010(0.0032)
γ_{kQ}	-0.2974(0.2141)		

주: 괄호 안의 숫자는 표준오차로서 ** (*) 표시는 1% (5%) 수준에서의 통계적 유의성을 나타냄

식 (16)을 이용하여 CO₂ 한계저감비용 (MAC_E)을 산출하여 연도별로 제시하면 <표 4>에서 보는 바와 같다. <표 4>로부터 알 수 있듯이 CO₂ 총배출량 (E)은 약 3,000만 톤을 기록한 1990년 이후 20년 동안 2배 이상 늘어났다. 하지만 단위 생산액 당 CO₂ 배출량 (E/Q)은 표본 기간 동안 대체로 감소하는 양상을 보이고 있다. (E/Q)의 대수치 (log)를 시간지표 (t)로 OLS 선형회귀분석을 실시한 결과 1990-2010년 기간 동안 매년 평균적으로 약 4%씩 감소하는 것으로 나타났다. (E/Q)의 변화추이를 기간별로 나누어 살펴보면, 1990-1993년 기간 동안에는 생산액 100만원 을 산출하는 데 있어서 배출되는 CO₂의 양이 1.1톤에서 1.4톤으로 증가하였다. 1993년 이후부터 1999년까지는 (E/Q)가 생산액 100만 원당 1.1-1.2톤 사이에서 비

교적 안정적으로 유지되고 있다. 2000년대 들어서는 (E/Q)의 감소추이가 현저하게 목격되었으며 특히 2008년에는 CO₂ 배출량이 0.5톤으로서 최저치를 기록하였다. 2000-2010년 기간만을 대상으로 추정된 (E/Q)의 연평균 감소율은 7.5%에 이르렀다. 이러한 (E/Q)의 감소추세는 1997년 교토협약 체결 이후 제조업 부문 가운데 유연탄 사용량이 가장 많은 철강산업은 2009년 정부가 7개 부문별로 온실가스 감축 할당량을 제시하는 등 CO₂ 배출량 규제가 본격적으로 실시되기 이전인 1990년대 중반부터 내부적으로 CO₂ 감축의 불가피성을 인식하고 세계 동향에 선제적으로 대응하기 위하여 온실가스 저감 기술 및 공정에 대한 R&D 사업에 지속적인 투자가 이루어졌음을 의미한다.⁹⁾ 표본 기간 동안 철강업은 100만 원 상당의 생산액을 산출하는 과정에서 매년 평균적으로 약 1톤의 CO₂를 배출하는 것으로 나타났다.

CO₂ 1톤 감축하는 데 들어간 비용 (MAC_E)는 1990-2010년 기간 동안 연도별로 1993년에 최저 69,000원에서 2009년에 최대 176,000원의 범위를 보였으며, 연평균 92,000원을 지불한 것으로 추산되었다. MAC_E 의 평균치로 비교할 때 2001-2004년과 2007년의 국내 화력발전소 자료를 각각 사용하여 Park and Lim (2009)과 Lee (2011) 등이 도출한 CO₂ 1톤의 평균 암묵가격 14유로 및 14.63달러보다 4배 이상 높은 수준인데 그 이유로서 다음의 요인들을 들 수 있다. 첫째, CO₂ 한계저감비용은 배출량에 체감하므로 철강업에서 화력발전보다 CO₂의 배출량이 적은 만큼 CO₂ 한 단위 감축하는 데 상대적으로 더 많은 비용을 지불한다.¹⁰⁾ 둘째, 화력발전의 경우 연료효율화 설비 구축 및 이산화탄소 포집·저장 (CCS) 시설 투자 없이 유연탄에서 LNG로의 사용 연료 간 대체를 통하여 비교적 적은 비용으로 일정량의 CO₂를 감축할 수 있는 반면 철강업에서는 제철 공정의 친환경적인 신공법 (예컨대, FINEX)을 도입하여 CO₂ 배출을 최대한 억제하는 과정에서 감축비용이 상대적으로 더 많이 소요된다. 셋째, 선행 연구와 달리 투입요소 간 비효율적 배분으로 야기되는 비용 상승분까지 고려했기 때문이다. MAC_E 의 기간별 변화추이를 분석하면, 1993년까지 지속적으로 하락하여 최저 수준에 도달한 후, 2004년까지 주로 7-8만 원대에서

9) 1995년까지는 제철업의 유연탄 사용량이 가장 많았으나 1993년부터 화력발전의 유연탄 비중이 점점 확대됨에 따라 1995년부터 유연탄 수입량에서 차지하는 제철업 수요량의 점유율은 감소하기 시작하였다.

10) 2005년 현재 한국의 CO₂ 총배출량에서 발전 부문과 산업 부문이 차지하는 비중은 각각 44%와 21%로 나타났다. (IEA)

등락을 거듭하였다. 2005년에 10만 원대로 상승한 다음 2006년에 일시적으로 7만 원대로 떨어지긴 했으나 2009년까지 증가세를 나타냈으며 2010년에는 다시 7만 원대로 낮아졌다. 특히 2008-2009년 기간 동안 MAC_E 가 급등한 현상은 글로벌 금융 위기의 대외충격으로 인한 환율 상승이 철광석, 유연탄 등 원자재 수입비용의 증가에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다. MAC_E 의 대수값을 t 로 OLS 선형회귀분석을 실시한 결과로부터 표본 기간 동안 CO₂의 한계저감비용은 연평균 5.5%의 증가율로 전반적으로 상승하는 추세를 알 수 있다.

〈표 4〉 연도별 CO₂ 한계저감비용 추정치

연도	CO ₂ 배출량 (E) (백만 톤)	단위 CO ₂ 배출량 (E/Q) (톤/백만 원)	CO ₂ 감축비용 (MAC_E) (원/톤)
1990	29.647	1.1599	109,999
1991	35.157	1.2887	93,258
1992	36.569	1.3529	85,218
1993	40.964	1.4180	69,302
1994	40.172	1.2707	80,551
1995	41.991	1.1145	88,222
1996	45.017	1.1957	77,986
1997	46.638	1.1949	79,248
1998	47.859	1.1951	93,719
1999	48.445	1.2065	87,036
2000	50.717	1.1374	76,023
2001	51.155	1.1812	80,352
2002	53.217	1.1390	72,802
2003	54.180	1.0668	72,223
2004	55.367	0.8245	89,575
2005	55.322	0.7715	102,615
2006	59.709	0.7997	76,015
2007	54.047	0.6487	118,714
2008	59.192	0.5865	137,729
2009	52.072	0.6188	176,842
2010	68.340	0.6622	78,597
전체	48.847	1.0397	92,668

단위 CO₂ 배출량 (E/Q)와 한계저감비용 (MAC_E)와의 관계를 조사하기 위하여 회귀분석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\ln MAC_{E,t} = -0.9129 - 1.7055 \ln(E/Q)_t - 0.0736t + \epsilon_t, \\ (1.1900) \quad (0.6760) \quad (0.0543)$$

여기서 $R^2=0.652$ 이며, 괄호 안의 숫자는 표준오차를 나타낸다. ϵ_t 는 오차항이다. 예상대로 단위 CO₂ 배출량을 줄일수록 한계저감비용은 증가하는 것으로 나타났다. 표본 기간 동안 (E/Q)을 1% 감축하면 다른 요인들이 일정불변할 때 MAC_E 는 평균적으로 1.7% 상승하게 된다.

중간 연도 2000년에서 측정된 각 요소의 가격탄력성 및 요소 간 대체탄력성을 계산하기 위하여 식 (14), (15)의 방정식 체계에서 표기된 대수형태의 모든 변수를 2000년에서 1이 되도록 표준화한 다음 방정식 체계를 재추정하고, 식 (17), (18), 그리고 (19)를 이용하여 측정된 제반 탄력성 결과를 <표 5>에 제시하였다.¹¹⁾ 각 생산 요소의 자기가격 탄력성은 예상대로 모두 음수로서 5% 수준에서 유의적인 것으로 나타났다. 노동수요가 가격변화에 가장 탄력적으로 반응을 보였으며 에너지, 자본 순으로 강도가 낮았다. 특히 에너지 및 자본에 대한 가격탄력성이 노동에 비해 상대적으로 현저히 낮게 측정되었는데 이는 철강업이 산업 특성 상 에너지 및 자본 사용적인 생산구조를 갖고 있음을 의미한다. 에너지 가격이 1% 상승하면 0.48%만큼 에너지수요의 감소가 예상된다. 자본과 에너지 간 교차가격 탄력성은 양 방향 모두 양수로서 1% 수준에서 통계적 유의성이 확보됨에 따라 자본과 에너지는 상호 대체가능한 것으로 나타났다. E_{kk} 와 E_{ek} 값을 이용하여 정부의 가격보조로 인한 자본투자의 확대가 에너지 수요를 얼마만큼 감소시킬 수 있는지에 대한 모의실험이 가능하다. 다른 요인들이 변하지 않는다면 자본투자에 대한 세액공제로 자본수요가 1% 증가할 경우 에너지 사용량은 1.8% 줄어드는 것으로 산출되었다.¹²⁾ 요소 간 대체탄력

11) 2000년 기준으로 식 (17), (18), (19)을 이용하여 가격 및 대체 탄력성을 측정할 경우 대수형태의 변수가 모두 0이 되어 중간 연도의 단일 탄력성을 용이하게 도출할 수 있다.

12) 자본수요 1% 증가를 유도하기 위하여 요구되는 $(1/|E_{kk}|)\%$ 의 자본가격이 하락할 경우 에너지 수요량은 $(E_{ek}/|E_{kk}|)\%$ 감소한다.

성이 모두 양수로 측정됨에 따라 세 요소 모두 대체관계인 것으로 조사되었으나 노동과 에너지 간 관계는 통계적 유의성을 확보하는 데 실패하였다.

〈표 5〉 투입 요소 간 가격 탄력성 및 대체탄력성 추정결과 (2000년 기준)

가격탄력성	추정치
E_{kk}	-0.3675(0.1399)**
E_{ll}	-2.7340(1.4302)*
E_{ee}	-0.4782(0.2073)*
E_{kl}	-0.2468(0.1044)*
E_{lk}	1.6124(1.0193)
E_{ke}	0.6143(0.2035)**
E_{ek}	0.6637(0.2020)**
E_{le}	1.1216(0.4668)*
E_{el}	-0.1854(0.0781)*
대체탄력성	추정치
σ_{kl}	2.8581(1.6847)*
σ_{ke}	1.1764(0.1189)**
σ_{le}	2.1478(1.3423)

주: 괄호 안의 숫자는 표준오차로서 ** (*) 표시는 1% (5%)에서의 통계적 유의성을 나타냄

V. 요약 및 결론

한국 정부는 2020년까지 온실가스 예상 배출량을 30% 줄이는 데 있어서 7개 부문별로 감축 목표량을 할당하였으며, 2015년부터는 기업별 온실가스 배출 허용량 설정과 함께 탄소 배출권거래제를 전면 도입할 예정이다. 생산비용 상승으로 인한 가격 경쟁력 저하, 매출 감소 등 온실가스 규제의 산업계에 대한 경제적 파급효과를 최소화하기 위하여 산업별, 기업별 CO₂ 감축비용을 정확하게 산정하고 이를 토대로 배출권 예상 가격을 도출하며 거래의 비용절감 효과를 분석하는 연구가 요구된다.

CO₂ 저감비용을 추정된 선행 연구 대부분은 거리함수접근법을 사용하여 기존 생산공정에 투입되는 요소의 일부분을 CO₂를 감축하는 데 사용할 경우 초래되는 생

산 감소의 기회비용으로 측정하였다. 기업이 환경규제 등 제약된 환경에 직면할 경우 생산과정에서 투입 요소 간 효율적 배분이 저해되어 이로 인한 생산비용의 증가로 비용최소화 달성에 실패할 개연성이 높아진다. 기존 거리함수접근법은 CO₂ 배출량을 억제하는 과정에서 발생하는 이러한 투입요소 간 비효율적 배분으로 인한 생산비용의 상승분을 반영하지 못하여 기업이 실제 부담하는 CO₂ 감축비용을 과소평가할 수 있다. 본 논문은 국내 철강업을 대상으로 비용함수접근법을 사용하여 투입요소 간 효율적 배분 여부를 검증하고, 생산비용의 최소화 달성이 기각될 경우 CO₂ 감축 과정에서 수반되는 모든 형태의 생산비용의 증가분을 산출하였다.

1990-2010년의 표본 기간 동안 ‘투입요소 간 배분 효율성이 달성되었다.’의 귀무가설이 기각됨에 따라 CO₂를 감축하는 데 있어서 요소의 비효율적 투입으로 인한 생산비용의 증가가 초래되었음을 알 수 있다. 표본 기간 동안 단위 생산액당 평균 CO₂ 배출량은 매년 평균적으로 4%씩 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 국내 철강업에서 온실가스 저감 기술 및 친환경 공정에 대한 지속적인 투자가 이루어져 왔음을 의미한다. 표본 기간에 걸쳐 CO₂ 1톤 감축하는 데 지불한 연간 한계저감비용은 평균 92,000원으로서 1993년 최저 69,000원에서 2009년 최대 176,000원까지 상승하였다. 이는 선행연구에서 전력산업을 대상으로 추정된 CO₂ 1톤에 대한 암묵가격보다 높은 수준으로서 철강업 생산공정 특성 상 친환경 제철 공법 도입으로 인한 감축비용이 상대적으로 높을 뿐 아니라 CO₂ 저감과정에서 발생하는 투입요소 간 비효율적 배분 비용까지 고려하였기 때문이다. 자본과 에너지의 상호 대체관계는 철강업에서 자본투자를 통하여 에너지 사용량 (이와 비례하여 CO₂ 발생량)을 줄이는데 어느 정도 성과를 거둘 수 있음을 시사한다. 다른 요인들이 일정불변할 경우 자본투자가 1% 늘어나면 에너지 사용량은 1.8% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구의 한계로서 비용최소화 문제에서 CO₂ 배출 제약식만 고려함에 따라 생산요소 간 비효율적 배분으로 인하여 CO₂ 감축비용이 얼마나 상승하였는지에 대한 분석이 이루어지지 못하였다. 이를 보완하기 위하여 향후 과제에서는 CO₂ 배출 제약식을 포함한 제반 규제환경 하에서 도출된 요소 암묵가격과 CO₂ 배출량의 함수인 암묵비용함수를 추정하여 CO₂ 감축비용을 산정하고, 생산비용의 최소화 달성을 나타내는 제약조건이 부여된 CO₂ 감축비용의 추정치와 비교하고자 한다.

[References]

- 김영미·이명현, “중국 화력발전산업의 CO₂ 암묵가격 및 잠재감축량, 연료에 대한 대체가능성 분석”, 「자원·환경경제연구」, 22(1), 2013, pp. 77~98.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Interfuel Substitution in Steam Electric Power Generation,” *Journal of Political Economy*, 84, 1976, pp. 959~978.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand in U.S. Electric Power Generation,” *International Economic Review*, 25, 1984, pp. 647~662.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Tests for Static and Dynamic Equilibrium,” *Journal of Econometrics*, Vol. 85, 1998, pp. 33~50.
- De Cara, S. and P. Jayet, “Marginal Abatement Costs of Greenhouse Gas Emissions from European Agriculture, Cost Effectiveness, and the EU Non-ETS Burden Sharing Agreement,” *Ecological Economics*, Vol. 70, 2011, pp. 1680~1690.
- Ellis, G. M. and R. Halvorsen, “Estimation of Market Power in a Nonrenewable Resource Industry,” *Journal of Political Economy*, Vol. 110, 2002, pp. 883~899.
- Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell, and C. Pasurka, “Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: A Nonparametric Approach,” *Review of Economics and Statistics*, Vol. 71, 1989, pp. 90~98.
- Gollop, F. M. and M. J. Roberts, “Environmental Regulations and Productivity Growth: The Case of Fossil-fueled Electric Power Generation,” *Journal of Political Economy*, Vol. 91, 1983, pp. 654~674.
- Kolstad, C. D. and M. H. L., Turnovsky, “Cost Functions and Nonlinear Prices: Estimating a Technology with Quality-Differentiated Inputs,” *Review of Economics and Statistics*, Vol. 80, 1998, pp. 444~453.
- Kwon, O. S. and W. C. Yun, “Estimation of the Marginal Abatement Costs of Airborne Pollutants in Korea’ Power Generation Sector,” *Energy Economics*, Vol. 21, 1999, pp. 547~560.
- Lee, M., “Potential Cost Savings from Internal/External CO₂ Emissions Trading in the Korean Electric Power Industry,” *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 6162~6167.
- Lee, M. and N. Zhang, “Technical Efficiency, Shadow Price of Carbon Dioxide Emissions,

and Substitutability for Energy in the Chinese Manufacturing Industries,” *Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 1492~1497.

Matsushita, K. and F. Yamane, “Pollution from the Electric Power Sector in Japan and Efficient Pollution Reduction,” *Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 1124~1130.

Park, H. and J. Lim, “Valuation of Marginal CO₂ Abatement Options for Electric Power Plants,” *Energy policy*, Vol. 37, 2009, pp. 1834~1841.

Shephard, R. W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, 1970.