

화석에너지와 CO₂배출량 규제 하의 경제와 환경의 효율성 분석[†]

강상목* · 조 단**

요약 : 본 연구의 목적은 2000-2009년 국가별로 환경과 화석에너지의 제약 하에서 경제와 환경의 효율을 측정하고자 함이다. 본 연구는 국가별 소득수준에 따른 OECD국가, 중고소득국가, 저소득국가 등 세 그룹으로 구분하여, 생산가능집합에서 바람직한 산출물인 GDP와 오염물을 동시에 포함한 '환경지향형, 경제지향형, 환경-경제지향형, Two-stage DEA모형' 등의 네 가지 방법을 제시하여 비교한다. OECD국가는 상대적으로 경제효율성이 높으나 환경효율성은 낮았고 비OECD국가는 환경효율성이 높고 경제효율성이 낮았다. 화석에너지와 온실가스의 저감의 여지는 OECD국가가 더 높았다.

주제어 : 다국가 비교연구, 화석에너지소비, 이산화탄소배출, 환경규제, 효율성, Two-stage DEA모형

JEL 분류 : C0, Q1, 04, 05

접수일(2013년 4월2일), 수정일(2013년 5월14일), 게재확정일(2013년 5월 28일)

[†] 본 논문은 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음.(NRF-2010-330-B00087)

* 부산대학교 경제통상대학 경제학과 교수(주저자)(e-mail: smkang@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 경제통상대학 경제학과 석사과정 수료(교신저자)(e-mail: zd_401@hanmail.net)

Analysis of the Economy and Environment Efficiencies under the Regulation of Fossil Fuel and Carbon Dioxide Emission

Sangmok Kang* and Dan Zhao**

ABSTRACT : The purpose of this paper is to measure economy and environment efficiencies under fossil fuel and environment regulation by countries for 2000-2009. Distinguishing 83 countries with three groups of OECD, upper-middle, and low countries, we compare four models such as environment oriented, economy-oriented, environment-economy oriented, and two-stage types, which include a desirable output, GDP and an undesirable output, pollutant together in the production possibility set. OECD countries relatively showed high economy efficiency and low environment efficiency, whereas Non-OECD countries showed high environment efficiency and low economy efficiency. OECD countries reported a higher possibility to reduce fossil fuel and CO₂ emission.

Keywords : Multi-nations Comparison, Fossil Energy consumption, Environment Regulation, Efficiency, Two-stage Models

Received: April 2, 2013. Revised: May 14, 2013. Accepted: May 28, 2013.

* Department of Economics, Pusan National University(e-mail: smkang@pusan.ac.kr)

** Department of Economics, Pusan National University(e-mail: zd_401@hanmail.net)

I. 서론

산업혁명 후 기계의 등장으로 인하여 세계 경제가 빠르게 성장하는 동시에 환경 문제가 집중적으로 일어났다. 특히, 석탄, 석유 등 화석에너지의 과도한 소비는 온실가스(GHG)의 대량배출을 초래하였고 지난 수 십년 간의 기후변화는 각 국의 경제성장을 제약하는 중요한 요인 중 하나로 부상되었다.

최근 환경에 대한 관심이 매우 높아짐에 따라서 수많은 국가별 또는 국제적인 환경정책이 동시 다발적으로 제정되었다. 그 중에 가장 대표적인 국제환경협약으로는 1992년 6월 브라질의 리우데자네이루에서 체결되었던 유엔기후변화협약(The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)과 1997년 12월 11일 일본 교토에서 발표했던 교토 의정서(Kyoto Protocol)가 있다. 지구 온난화를 줄이기 위하여 교토 의정서는 기후변화협약의 구체적 이행방안으로, 선진국(38개국)은 1990년을 기준으로 2008-2012년까지 평균 5.2%의 온실가스를 감축하였다. 이러한 온실가스 감축의 책임이 선진국뿐만 아니라 개도국으로 확대 적용되어 가는 추세이다.

그러나 국제적으로 각 국가들이 온실가스를 감축함에 따라서 경제성장이 얼마나 제한을 받게 될지는 정확히 파악을 하고 있지 못하다. 따라서 본 연구의 목적은 국가별로 온실가스와 화석에너지의 제약 하에서 경제와 환경의 효율을 측정하고 온실가스의 추가저감의 여지를 파악하고자 함이다. 특히, 본 연구는 비모수적 생산프론티어 접근법에 기초하여 생산 가능집합에서 바람직한 산출물인 GDP와 바람직하지 못한 산출물인 CO₂를 동시에 포함한 방향거리함수를 도입하여 ‘환경지향형, 경제지향형, 환경-경제지향형 및 Two-stage DEA모형 등의 네 가지 방법을 제시한다.¹⁾ 특히 환경과 경제의 Two-stage모형을 통하여 산출이 최대로 달성된 상태에서도 온실가스의 추가 저감이 가능한 정도를 확인함으로써 국가별로 CO₂ 배출이 많은 국가의 추가저감의 여지를 확인해 볼 것이다. 본 연구에서는 화석연료와 경제성장, 환경오염(CO₂)은 서로 밀접히 연계되어 있음을 인식하고 화석에너지를 이용한 경제활동이 경제성장과

1) 비모수적 생산프론티어 접근법(non-parametric production frontier approach)은 생산자의 행동가정이나 특정형태의 생산함수를 가정할 필요가 없고 양적인 자료를 보다 효과적으로 처리할 수 있는 장점을 갖고 있다. 특히 횡단면자료를 분석할 경우 효과적인 비교를 가능하게 한다. 그러나 모수적 접근법과 달리, 측정오차는 고려대상으로 하지 않는다.

환경오염 중 어디에 더 많은 영향을 받는지 살펴볼 것이다.

일반적으로 노동, 자본 등 투입물은 온실가스에 미치는 영향이 적으므로 이들 변수는 직접 약처분 제약을 주지 않고 주어지므로 간주한다.²⁾ 여기서 에너지는 화석에너지와 비화석에너지 두 가지로 구분하여 온실가스배출에 직접 영향을 주는 화석에너지의 사용량과 온실가스인 CO₂에 대한 배출제약 하 경제효율과 환경효율을 비교하여 측정해 보고자 한다. 본 연구는 오염과 무관한 투입물까지 포함하여 경제 성장에 미치는 영향을 분석하였던 선행연구의 한계점을 보완할 것이다. 특히 본 연구에서는 다음의 의문들에 대한 해답을 찾는 데 그 의미를 갖는다.

첫째, 환경제약 하에 각 나라의 경제효율과 환경효율은 어떻게 상이한가? 어느 국가가 환경제약의 영향을 더 많이 받는가?

둘째, 어떤 국가가 GDP에 비하여 온실가스 배출량이 더 많은 국가인가?

셋째, 최대 산출량을 달성한 상태에서 추가적인 온실가스 저감의 여지는 어느 정도인가?

이런 의문점을 확인하기 위해 본 연구는 주로 다음과 같은 연구방법을 사용할 것이다.

첫째, 선형프로그램을 통하여 환경오염에 밀집한 관계가 있는 화석 에너지, 바람직한 산출물인 GDP와 바람직하지 못한 온실가스에 대하여 각기 상이한 방향을 부여하는 4가지 벡터를 설정한다. 이 4가지 방향벡터를 비교하여 각 국가가 경제 발전과 동시에 환경에 대한 입장 차이를 파악한다.

둘째, Two-stage DEA모형에 기초하여 각국의 최대 산출수준에서 추가적으로 줄일 수 있는 화석에너지의 사용량과 이산화탄소의 배출량을 파악할 것이다.

경제와 환경의 효율성에 관한 연구는 1950년부터 시작되었다. 그 중에서 대표적인 선행연구로는 Mishan(1967), Hartog et al.(1976), Färe et al.(1986,1989), Chung et al.(1997), Boyd et al.(1999), Zaim and Taskin(2000), Sancho et al.(2000), Zofio

2) 오염물과 산출물 간의 처분성 여부에 따라 달라진다. Färe, Grosskopf, Lovell, and Pasurka(1989)는 오염물의 처분성으로 강처분과 약처분을 구분한다. 약처분은 강처분과 반대 개념이다. 약처분 척도는 생산자가 일정한 환경제약의 기준을 만족시켜야만 하는 경우, 생산비용 이외에 오염처리비용을 부담해야 하는 생산기술상태를 의미한다. 그래서 약처분은 오염처리라는 생산의 제약이 있는 방식이라고 정의한다. 이와 반대로 강처분은 아무런 환경규제 없이 자유롭게 결정할 수 있는 형태이다.

and Proeto(2001), Färe et al.(2004), Kumar(2006), Zhou et al.(2006, 2007), Färe et al.(2007), Lonzano S. and E Gutierrez(2008), Aiken et al.(2009), 강상목·정영근·이명현(2011), Wang(2012), Zhou(2012), Riccardi and Oggioni(2012) 등을 열거할 수 있다. Mishan(1967)는 Leontief의 투입산출이론을 기초하여 처음으로 환경개념을 도입하였다. Hartog et al.(1976)는 공업생산 중에서 배출한 모든 오염물을 고려하여 오염물의 처리함과 환경효율성에 미친 영향을 분석하였다. Färe et al.(1986)은 Farrell (1957)의 기술효율 개념에 기초하여 1975년에 미국에서 임의로 선정된 100개의 전력시설에 대한 자료로서 환경효율성 모델화(DEA모델: data envelopment analysis)하였고, 규제받는 생산프론티어와 규제받지 않는 생산프론티어를 비교함으로써 환경규제의 효과를 유도하였다. Chung et al.(1997)는 새로운 지수형태의 Malmquist- Luenberger 지수를 제시하여 방향거리함수 방법을 이용하여 1986-1990년간 스웨덴의 펄프 및 제지산업 39개 기업을 대상으로 오염물과 산출물의 대체관계에 따른 물질균형접근에 부합하는 환경효율성을 분석하였다. Boyd et al.(1999)는 Shepard(1970)의 거리함수방법에 기초하여 1988-1992년간 미국 제지산업의 146개 기업을 대상으로 환경규제로 인한 바람직한 생산물의 잠재적 상실정도와 내부인자를 파악하였다. Zaim & Taskin(2000)은 쌍곡선척도를 이용하여 OECD의 25개 국가들의 1980-1990년간 환경규제하의 경제성장에 미치는 영향을 비교하여 분석하였다. Kumar(2006)은 ML지수개념을 기초한 방향거리함수방법을 사용하여 1971-1992년간 세계41개국가가 최소 이산화탄소 배출하의 각국의 총요소생산성을 분석하였다. Zhou et al.(2007)은 온실가스(CO₂, CO, SO_x, NO_x)와 GDP, 노동, 에너지 등을 연계시켜서 환경규제로 인한 1995-1997년간 26개 OECD국가를 대상으로 최소 온실가스 배출단위당하의 추가 저감GDP의 감소분을 측정하였다. Färe et al.(2007)은 1995년 미국 92개 화력발전소를 대상으로 환경생산함수 및 환경방향거리함수 두 가지 방법을 비교활용하여 오염처리비용을 계측하였다. Aiken et al.(2009)는 1987-2001년간 독일, 일본, 네덜란드, 미국 등나라는 환경규제받는 상태와 환경규제받지 않은 상태하의 오염감소과 경제성장간의 연관을 보여주었다. 강상목 외(2011)는 2004-2007년간 OECD의 30개 국가를 대상으로 환경규제하의 지속가능한 성장의 세방향에서 비효율성을 비교하여 온실가스감축이 GDP에 미치는 영향도 같이 파악한 바 있다. Wang et al.(2012)은 방향거리

합수방법을 이용하여 2001-2007년간 중국28개성을 대상으로 환경 및 경제적 생산성을 측정하였다.

본 연구에서는 처음으로 환경규제 하에서 세계 83개 국가들을 대상으로 소득수준에 따라 OECD국가, 중·고소득국가, 저소득국가의 세 그룹으로 구분하여, 경제, 환경, 에너지 등을 연계시킴으로써 4가지 효율성으로 구분하여 계측한다. 특히, 본 연구는 기존연구와 다르게 OECD국가뿐만 아니라 비OECD국가를 포함하고 2단계 효율성(two-stage DEA efficiency)을 포함한 4가지 효율성을 제시하고 있다. 또한 화석에너지와 비화석에너지를 구별하여, 온실가스와 직접 연계된 화석에너지와 온실가스, 산출량을 연계시킨다는 점에서 기존연구와 차별성을 갖는다.

이하 제2장에서는 경제성장과 환경효율성에 대한 연구의 방법론과 4가지 이론모형을 각각 제시할 것이다. 제3장에서는 실증자료 기술과 실증결과를 제시한다. 마지막으로 실증결과에 기초하여 정책적 시사점과 함께 결론을 제시한다.

II. 이론모형

먼저 생산가능 집합을 $P(x) = \{(y, b) : (x, ff, y, b) \in T\}$ 으로 가정한다. 여기서 T 는 오염물을 고려한 생산기술수준이다. 투입물과 산출물의 방향벡터는 각각 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in R_+^n$, $ff = (ff_1, ff_2, ff_3, \dots, ff_n) \in R_+^n$, $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m) \in R_+^m$, $b = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_j) \in R_+^j$ 로 표시된다. 생산과정 중에 화석연료의 소비량은 ff 로 가정하여 다른 투입요소의 소비량은 x 로 가정한다. 특정한 생산기술 T 하에서 주어진 투입물 x 와 ff 를 활용하여 바람직한 산출물(y)과 오염물(b)을 동시에 생산할 수 있다. Färe et al.(2004,2007)은 방향거리함수에 기초한 생산함수의 특징을 다음과 같이 제시한다.

1. If $\{0\} \in P_i$, then for all $x \in R_+^n$

식 1은 투입량이 0이어도 생산가능집합은 성립한다. 즉, 투입물이 없으면 산출물도 없다는 뜻이다(this axiom tells us that inactivity is always possible).

2. If $(x, ff, y, b) \in T$ and $\forall x' \geq x$, then $(x', ff, y, b) \in T$

3. If $(x, ff, y, b) \in T$ and $\forall y' \leq y$, then $(x, ff, y', b) \in T$

위에 식 2~3에서는 투입물과 산출물을 제약 없이 이용할 수 있는 강처분성을 설명한다. 즉, 투입물의 증가 또는 유익한 산출물의 감소는 유해 오염 배출량의 변화 없이도 가능하다. 한편, 산출물과 오염물의 약처분성은 식 iv)와 같이 표시된다.

4. If $(x, ff, y, b) \in T$ and $0 \leq \lambda \leq 1$, then $(x, ff, \lambda y, \lambda b) \in T$

공식 4는 실제 생산 활동에서 오염물과 산출물을 동시에 1보다 작은 비율로 조정 하더라도 최종결과에 영향을 미치지 않고 여전히 생산 프론티어 내부에 위치한다는 의미이다. 만약 오염물의 배출량이 0이라면, 바람직한 산출물도 생산될 수 없다. 즉, 유익한 산출물의 생산에는 필연적으로 유해한 오염물의 배출이 수반된다는 것을 의미한다. 또한, 화석연료의 소비가 없으면 이산화탄소를 비롯한 오염물의 배출도 없다. 이는 공식 5~6와 같다.

5. If $(x, ff, y, b) \in T$ and $b = 0$, then $y = 0$

6. If $(ff, b) \in T$, and $ff = 0$, imply $b = 0$

이를 바탕으로 환경규제로 인한 규모수익불변(constant returns to scale, CRS)의 가정 하에 생산가능 집합 $P(x)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 P(x) = \{ & (x, ff, y, b) \in T \\
 & \left. \begin{aligned}
 \sum_{k=1}^k \lambda_k x_{kn} &\leq x_{kn} & n=1,2,3,\dots,N \\
 \sum_{k=1}^k \lambda_k y_{km} &\geq y_{km} & m=1,2,3,\dots,M
 \end{aligned} \right\} & \text{(x\&y강처분)} \\
 & \left. \begin{aligned}
 \sum_{k=1}^k \lambda_k ff_{kn} &= ff_{kn} & n=1,2,3,\dots,N \\
 \sum_{k=1}^k \lambda_k b_{kj} &= b_{kj} & j=1,2,3,\dots,J
 \end{aligned} \right\} & \text{(ff\&b약처분)} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k \geq 0 & k=1,2,3,\dots,K & \text{(CRS)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 λ 는 생산가능 집합을 형성하는 일종의 가중치이다. k 는 의사결정단위 (decision making units, DMUs)이다. 이는 관측된 투입물과 산출물 및 오염물의 볼록 결합을 통하여 생산가능경계를 형성한다. λ_k 는 밀도벡터로서 최대 및 최소값에 대한 프론티어를 형성한다.³⁾ 제약조건의 첫 번째 항에서 좌변은 λ_k 가 형성하는 최소 투입량이고 우변은 실제투입량이다. 두 번째 항의 좌변은 λ_k 가 형성하는 최대 산출량으로서 우변의 실제 산출량(y_{km})보다 크다. 세 번째 항과 네 번째 항은 화석에너지와 오염물에 대한 제약조건을 제시하는데 모두 약처분의 가정이 적용된다. 즉, 등호는 약처분성을 표시하고 좌변의 최소에너지와 우변의 실제 에너지가 동일하고 최대 오염물이 실제 오염 배출량과 일치해야 한다는 규제조건을 보여준다.

다음으로 Chung et al.(1997), Färe and Grosskopf(2004)의 방향거리함수에 기초하여 특정 방향벡터의 적용에 따라 4가지 효율성의 순서로 제시한다.

첫째, 생산과정 중에 배출한 오염물과 오염물에 직접 영향을 주는 화석에너지를 같은 비율로 동시에 감축하는 방법이다. 방향벡터를 $g=(-g_{ff}, 0, -g_b)$ 로 두면 방향거리함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{D}(x, ff, y, b) = \sup\{\alpha : (ff, b) - \alpha g \in T(x)\}, \quad g = (-ff, -b) \quad (2)$$

여기서 α 는 오염물에 대해 조정할 수 있는 환경효율성 지수이고 0에 가까울수록 효율적이다. 식 (2)에서 정의된 것을 기초로 먼저 화석에너지와 오염물의 약처분성의 기술 하에서 환경요인만 고려하는 환경효율성의 선형프로그램(linear programming)은 다음과 같다.

3) 자세한 것은 강상목(2011 p.43)을 참조바란다.

$$\begin{aligned}
 & \max \alpha \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k y_{km} \geq y_{km} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k ff_{kn} = (1 - \alpha) ff_{kn} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k b_{kj} = (1 - \alpha) b_{kj} \\
 & \lambda_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3 \dots K
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

둘째, 환경요인을 무시하고 경제 성장위주로 진행하는 방향으로 효율성을 측정하는 것이다. 방향벡터를 $g=(0,+g_y,0)$ 로 두면 방향거리함수는 식 (4)와 같다.

$$\vec{D}(x, ff, y, b) = \sup \{ \beta : y + \beta g \in T(x) \}, g = (0, +y, 0)
 \tag{4}$$

여기서 β 는 환경규제 하의 실제산출과 최대산출 간의 격차 비율로 정의되며 경제효율성지수가 된다. 바람직한 산출을 최대화하는 경제효율성의 선형프로그램은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \max \beta \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k y_{km} \geq (1 + \beta) y_{km} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k ff_{kn} = ff_{kn} \\
 & \sum_{k=1}^k \lambda_k b_{kj} = b_{kj} \\
 & \lambda_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3 \dots K
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

식 (5)는 오염배출량(b)과 화석연료(ff)의 규제 하에서 바람직한 산출량을 확장하는 방향으로 효율을 측정한다.

셋째, 온실가스감축과 산출량을 동시에 같은 비율로 확장하는 경우이다. 방향벡터를 $g=(-g_{ff}, +g_y, -g_b)$ 로 두면 방향거리함수는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{D}(x, ff, y, b) = \sup \{ \gamma : (ff, y, b) + \gamma g \in T(x) \} = \\ \sup \{ \gamma : (ff - \gamma g_{ff}, y + \gamma g_y, b - \gamma g_b) \in T(x) \} \end{aligned} \quad (6)$$

이에 기초한 환경-경제효율성의 선형프로그램은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \gamma \\ \sum_{k=1}^k \quad & \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn} \\ \sum_{k=1}^k \quad & \lambda_k y_{km} \geq (1 + \gamma) y_{km} \\ \sum_{k=1}^k \quad & \lambda_k ff_{kn} = (1 - \gamma) ff_{kn} \\ \sum_{k=1}^k \quad & \lambda_k b_{kj} = (1 - \gamma) b_{kj} \\ & \lambda_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \end{aligned} \quad (7)$$

넷째, two-stage 모형으로 1단계에서 최대한 산출을 확대하는 경제효율성을 측정하고, 최대 경제효율 하에서 2단계로 이산화탄소와 화석에너지를 동시에 감축하는 환경효율성을 측정한다. 선진국과 같이 GDP가 높으면서 동시에 온실가스 배출이 많은 국가의 경우 경제적 효율성이 달성되더라도 온실가스 배출량은 여전히 많은 상태를 보여준다. 이들의 온실가스 추가저감의 정도를 보여주는데 두 단계모형이 유용하다. 또한 실제로 개도국과 후진국들의 경우는 경제성장이 우선시되는 경우가 많아서 우선 경제성장을 달성하고 난 후 환경을 개선하려는 움직임이 적지 않다. 이 전에 식 (5)에서 경제효율은 1단계로 도출되므로 여기서 나온 β 값을 활용하여 온실가스를 추가적으로 저감하는 환경효율을 측정한다. 이와 같은 2단계 환경효율의 방향거리함수

의 정의와 이를 도출하는 선형계획식은 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

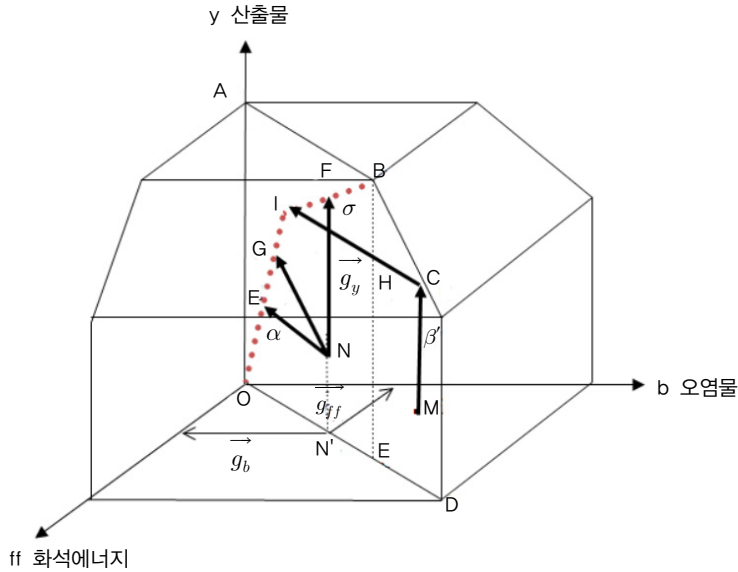
$$\begin{aligned} \overrightarrow{D}(x, ff, y, b) = \sup\{\delta : (ff, y^*, b) + \delta g \in T(x)\} = \\ \sup\{\delta : (ff - \delta g_{ff}, y + \beta^* g_y, b - \delta g_b) \in T(x)\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 β^* 는 식 (5)에서 도출한 β 의 최대값을 의미한다. 즉, 바람직한 산출물의 최대 확장으로 프로티어상에 최대 산출물이 달성되는 것을 말한다. 이 최대 산출물 하에서 온실가스와 화석에너지를 추가저감할 여지인 δ 의 수준을 측정하는 것이다.

$$\begin{aligned} \max \delta \\ \sum_{k=1}^k \lambda_k x_{kn} \leq x_{kn} \\ \sum_{k=1}^k \lambda_k y_{km} \geq (1 + \beta^*) y_{km} \\ \sum_{k=1}^k \lambda_k ff_{kn} = (1 - \delta) ff_{kn} \\ \sum_{k=1}^k \lambda_k b_{kj} = (1 - \delta) b_{kj} \\ \lambda_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, K \end{aligned} \quad (9)$$

이상과같이 제시한 효율성지수 α, β, γ 와 δ 은 모두가 0이 되었을 때 가장 효율적이고 0에 가까울수록 효율적이다. 이처럼 투입과 산출, 오염물(온실가스)을 동시에 고려한 방향거리함수를 입체적으로 표시하면 <그림 2>와 같다.

<그림 2> 투입과 산출을 동시 고려한 방향거리함수의 입체도형



<그림 2>공간에서 한 평면 OABCD를 선정하여 분석한다. 이 영역은 환경규제가 없는 강제분(자유처분)이 존재하는 생산 프론티어로 간주된다. 반면에 OBCD영역은 환경규제가 있는 오염물의 약처분 영역이다. 프론티어 전체에서 최대산출량을 달성하는 점B에서부터 수직적으로 BE선을 그리면 이를 기준하여 두 부분으로 나눌 수 있다. BE선 좌측에 임의점 N과 우측에 임의점 M을 가정한다. 이 N과 M은 실제 생산 활동이 이루어진 어떤 실제점이다. N점에서 이동 가능한 방향은 대표적으로 NE, NF, NG의 3가지 방향이 있고 모두 프론티어 상에 위치하여 전부 효율적으로 간주된다. 다만 어떤 방향이 더 유리한지 확인해 볼 필요가 있다. 방향벡터 α 는 주어진 산출물 수준 하 투입된 화석에너지와 유해 오염물을 동시에 감축하는 것을 의미한다. 이것은 바로 앞에 언급했던 환경효율성의 개념과 일치한다. N'점은 공간에 위치한 실제점N을 ff와 b를 구성하는 평면에서 투영된 점이다. 그림에서 방향벡터는 $\alpha = (-g_{ff}, -g_b)$ 로 구성한다. 방향 β 는 오염물과 관계없이 경제 확장을 중심으로 바람직한 산출을 최대화시키는 방향벡터이다. 즉, 경제효율성을 분석한 방향이다. 그림에서 $\beta = (+g_y, 0)$ 로 표현한다. α, β 가운데에 위치한 방향벡터 γ 는 환경과 경제를 같은

비율로 동시에 지향하는 환경-경제효율성이다. 방향벡터 γ 는 $(-g_{ff}, +g_y, -g_b)$ 로 구성된다. 만약 중심선 BE 우측에 위치한다면 two-stage모형을 이용하여 분석한다. 즉, 오염배출량이 과대한 생산단위의 경우는 최대산출량이 달성되더라도 오염량은 추가저감의 여지가 존재하게 된다. 그림에서 보여주듯이 먼저 산출물의 최대 확장으로 프론티어 상에 최대산출물에 도달한 후에 화석에너지와 온실가스의 추가저감할 여지를 측정한다. 즉 방향벡터 δ 이다. 먼저 경제효율성 β^* 를 달성하고 나서 추가저감 $(-g_{ff}, -g_b)$ 의 정도를 파악한다. 본 연구에서는 이 네 가지 방법을 이용하여 각 국가에 대하여 경제와 환경의 효율성을 측정하게 된다.

III. 통계자료 및 실증분석결과

본 연구는 2000부터 2009년까지의 10년간 세계 83개 국가를 대상으로 노동(L), 자본스톡(K), 화석에너지(FF), 비화석에너지(NF), GDP, CO₂배출량의 자료를 이용하였다. 실증의 목적은 소득수준에 따른 세 그룹 중에 경제효율성과 환경효율성 등 4가지 효율성에서 성과가 높고 낮은 그룹을 확인하고자 함이다. 여기서 GDP와 자본스톡(K)은 Penn World Table 7.1의 최신자료를 이용한다. 특히 자본스톡은 1979년 기준가격으로 환산하였고 영구재고법으로 추정하였다.⁴⁾ 노동(L)에 대한 데이터는 International Labor Organization에서 제공하고 있는 각 나라의 총노동자수를 이용하였다. 화석에너지의 소비량 및 비화석에너지의 소비량과 이산화탄소의 배출량은 International Energy Statistics를 이용하였다. 또한 세계 83개 국가는 World Bank의 국가별 소득수준에 따른 분류에 기초하여 OECD국가(high), 중·고(middle-high)소득국가, 저소득국가(low)의 세 그룹으로 구분하였다.⁵⁾ 통계요약은 <표 1>과 같다.

4) 영구재고법(perpetual inventory method, PIM)은 자본스톡을 추계하는 방법 중의 하나다. 과거의 누적한 지출을 바탕으로 초기자본스톡을 구성하여 현재의 자본스톡을 추정하는 기법이다.

5) 시대에 따라 또는 국제기구에 따라 약간 다르지만 OECD·DAC, 세계은행, UNDP의 최근의 정의에 의하면 1인당 GNP 11,456달러 이상인 국가를 고소득국가로 하고 1인당 GNP가 935달러 이하인 국가를 저소득국가로 규정한다. 고소득국가와 저소득국가는 1인당 GNP가 10,521달러로 상당한 격차가 있고 전체 GNP에서 차지하는 비중이 현재 약 65배 정도 차이가 난다.

〈표 1〉 투입과 산출의 기술통계(계속)

년도	국가별	기술통계	GDP/P (인당국 민소득) 1000\$	CO ₂ /P (인당이산 화탄소) million metric tons	L/P (인당 노동) 1000명	K/P (인당자본 스톡) 1000\$	FF/P (인당화석) Quadrillio n BTU	NF/P (인당비 화석) Quadrillion BTU	
2000		평균	28088.7	10.0	0.4	68437.2	145182.7	82928.8	
	OECD 국가	표준 편차	11565.0	4.6	0.1	28554.0	65802.3	162325.4	
		최소값	9576.9	3.0	0.3	16113.9	42123.6	127.3	
		최대값	65131.1	20.8	0.6	135434.3	301609.0	865846.1	
		평균	13221.9	6.5	0.4	32763.4	93215.1	7746.9	
	중·고 소득국	표준 편차	8505.1	5.7	0.1	25517.7	83454.2	8803.2	
		최소값	4726.2	1.0	0.2	4381.1	13947.0	0.0	
		최대값	37053.0	26.7	0.5	112322.0	376946.8	27001.1	
		평균	3344.1	1.3	0.4	7543.5	18297.2	7356.3	
	저소득 국가	표준 편차	1688.8	0.8	0.1	5181.4	12198.1	17282.8	
		최소값	877.4	0.2	0.2	1255.0	3616.3	0.0	
		최대값	7754.1	3.1	0.6	20529.1	45961.3	67706.8	
		평균	16394.4	6.5	0.4	40010.3	94572.2	35732.8	
	전체 국가	표준 편차	13195.0	5.6	0.1	33671.5	81483.8	105274.4	
		최소값	877.4	0.2	0.2	1255.0	3616.3	0.0	
		최대값	65131.1	26.7	0.6	135434.3	376946.8	865846.1	
	2005		평균	31039.4	10.5	0.5	78166.2	153220.9	87417.9
		OECD 국가	표준 편차	12440.8	5.2	0.1	31738.4	75590.8	183595.9
최소값			11061.7	3.2	0.3	17663.3	46012.9	39.2	
최대값			73243.0	26.9	0.5	164216.3	401412.8	996777.6	
평균			15295.4	7.4	0.4	35675.4	108465.5	8219.5	
중·고 소득국		표준 편차	9942.1	7.3	0.1	27215.9	117303.5	9403.7	
		최소값	5440.8	1.1	0.2	3887.6	15009.0	0.0	
		최대값	41988.6	31.7	0.5	115643.1	544235.0	29311.6	
		평균	3809.3	1.6	0.4	8327.0	22027.7	7213.7	
저소득 국가		표준 편차	1892.4	1.1	0.1	5517.0	15866.9	16093.1	
		최소값	1057.1	0.3	0.2	1688.9	4702.7	0.0	
		최대값	8980.7	4.2	0.6	21597.3	55560.2	56223.7	

〈표 1〉 투입과 산출의 기술통계(계속)

년도	국가별	기술통계	CO ₂ /P					NF/P (인당비 화석) Quadrillion BTU
			GDP/P (인당국 민소득) 1000\$	(인당이산 화탄소) million metric tons	L/P (인당 노동) 1000명	K/P (인당자본 스톡) 1000\$	FF/P (인당화석) Quadrillio n BTU	
		평균	18407.9	7.1	0.4	44955.5	104352.9	37557.2
	전체	표준 편차	14522.5	6.5	0.1	37860.5	99565.3	118007.4
	국가	최소값	1057.1	0.3	0.2	1688.9	4702.7	0.0
		최대값	73243.0	31.7	0.6	164216.3	544235.0	996777.6
2009		평균	31138.5	9.5	0.5	86184.2	140167.1	100088.0
	OECD	표준 편차	12110.1	4.4	0.1	35122.3	64305.3	226177.5
	국가	최소값	11214.3	3.3	0.3	20404.8	47816.5	1978.3
		최대값	74030.9	21.5	0.6	187814.3	322976.2	1192386.5
		평균	16829.5	7.6	0.4	40429.5	113616.8	8588.1
	중·고	표준 편차	10989.5	8.3	0.1	30547.2	140942.3	9364.3
	소득국	최소값	6179.1	1.3	0.3	4226.3	20090.2	0.0
		최대값	48685.5	38.8	0.6	135939.7	697695.0	31195.8
		평균	4349.8	1.7	0.4	9581.7	23838.0	8406.8
	저소득	표준 편차	2016.4	1.3	0.1	5965.2	17029.1	18763.5
	국가	최소값	1296.4	0.4	0.0	2196.6	6067.1	0.0
		최대값	9156.6	5.4	0.6	22993.5	63461.5	65896.7
		평균	19166.7	6.9	0.4	50085.4	101899.7	42719.1
	전체	표준 편차	14495.3	6.6	0.1	41731.1	105751.3	144279.0
	국가	최소값	1296.4	0.4	0.0	2196.6	6067.1	0.0
		최대값	74030.9	38.8	0.6	187814.3	697695.0	1192386.5

〈표 1〉은 실증에 사용한 모든 변수들은 해당년도의 총인구수로 나누어서 인당 통계치이다. 83개 국가의 GDP는 2000년 평균 16394.4천 달러에서 2009년 평균 19166.7천 달러로 증가하였다. 연평균 GDP의 성장률은 16.9%이다. 노동자의 수량은 동 기간에 크게 성장하지 않았다. 전체국가의 인당 이산화탄소 배출량은 2005년 까지 증가하였다가 이후부터 다시 감소하고 있는 추세를 보였다. 자본스톡은 시간에

따라 지속적으로 증가하였다. 2000-2009년간 평균 자본스톡은 40010에서 50085로서 연평균 25.18%로 크게 증가하였다. 특히 저소득국가에 연평균 27.1%의 높은 성장률을 보였다. 화석에너지 및 비화석에너지는 국가별로 OECD국가들은 가장 많이 소비하고 중고소득국가는 세 그룹 중에 가장 적게 나타난다. 동 기간에 비화석에너지의 소비 증가율은 19.6%로서 화석에너지의 소비 증가율의 7.7%보다 높다.

연도별로 보면, 2000년 기준으로 OECD국가의 인당 국민소득은 세 그룹 중에서 가장 높은 반면에 인당 화석연료의 소비량과 인당 이산화탄소의 배출량도 가장 높게 나타났다. 저소득국가에 비하여 인당 화석연료의 소비량과 이산화탄소의 배출량은 약 10배 가까이 높게 날 정도로 성장속도가 빠르다. 2005년에 저소득국가의 자본스톡 성장에 치우쳐있는 동시에 화석연료는 연평균 20.4%의 성장률을 보였다. 인당 이산화탄소의 배출량도 크게 증가하였다. 2009년의 기술통계를 보면 대부분 OECD국가가 화석에너지의 소비보다 비화석에너지의 소비증가율은 더 높게 나타났다. 인당 이산화탄소의 배출량도 음(-)의 성장률을 보였다. 이와 동시에 비OECD국가의 화석에너지의 소비가 꾸준히 증가하였다.

먼저 주어진 GDP수준에서 화석에너지의 소비와 이산화탄소를 감축하는 방향으로 환경비효율성과 GDP증가방향으로 국가별 경제비효율성을 각각 측정한 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 국가별 환경비효율성(α)과 경제비효율성(β)(계속)

그룹	국가별	환경비효율 (-b, -ff)				경제비효율 (+y)			
		2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
OECD 국가	Australia	0.000	0.000	0.523	0.174	0.000	0.000	0.036	0.012
	Austria	0.121	0.487	0.346	0.318	0.066	0.245	0.187	0.166
	Belgium	0.503	0.585	0.489	0.526	0.428	0.367	0.289	0.361
	Canada	0.560	0.672	0.674	0.635	0.000	0.091	0.240	0.110
	Czech Republic	0.610	0.593	0.587	0.597	0.380	0.490	0.433	0.434

〈표 2〉 국가별 환경비효율성 (α)과 경제비효율성(β)(계속)

그룹	국가별	환경비효율 (-b, -ff)				경제비효율 (+y)			
		2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
OECD 국가	Denmark	0.281	0.555	0.586	0.474	0.165	0.273	0.402	0.280
	Finland	0.446	0.583	0.620	0.550	0.286	0.351	0.416	0.351
	France	0.000	0.000	0.331	0.110	0.000	0.000	0.155	0.052
	Germany	0.336	0.595	0.597	0.509	0.211	0.367	0.325	0.301
	Greece	0.000	0.531	0.425	0.319	0.000	0.091	0.369	0.153
	Hungary	0.406	0.000	0.202	0.203	0.442	0.000	0.224	0.222
	Iceland	0.000	0.211	0.410	0.207	0.000	0.027	0.239	0.088
	Ireland	0.228	0.280	0.553	0.354	0.078	0.091	0.296	0.155
	Italy	0.038	0.000	0.314	0.118	0.024	0.000	0.161	0.062
	Japan	0.342	0.489	0.537	0.456	0.315	0.398	0.536	0.416
	Korea, South	0.579	0.527	0.598	0.568	0.799	0.643	0.677	0.706
	Luxembourg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Mexico	0.355	0.345	0.633	0.444	0.311	0.393	0.615	0.440
	Netherlands	0.450	0.607	0.520	0.526	0.207	0.192	0.152	0.184
	New Zealand	0.457	0.657	0.662	0.592	0.252	0.211	0.245	0.236
	Norway	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Poland	0.142	0.000	0.579	0.240	0.000	0.000	0.152	0.051
	Portugal	0.408	0.464	0.515	0.462	0.332	0.750	0.735	0.606
	Slovakia	0.634	0.695	0.618	0.649	0.963	0.611	0.413	0.663
	Slovenia	0.390	0.619	0.659	0.556	0.118	0.414	0.518	0.350
Spain	0.285	0.572	0.522	0.460	0.164	0.442	0.447	0.351	
Sweden	0.000	0.239	0.064	0.101	0.000	0.093	0.067	0.053	
Switzerland	0.000	0.091	0.236	0.109	0.000	0.095	0.176	0.090	
Turkey	0.204	0.526	0.593	0.441	0.068	0.180	0.209	0.152	
United Kingdom	0.126	0.391	0.479	0.332	0.053	0.013	0.057	0.041	
United States	0.449	0.572	0.598	0.540	0.000	0.098	0.207	0.102	
중·고 소득국	Barbados	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Croatia	0.541	0.437	0.511	0.496	0.355	0.370	0.500	0.408
	Cyprus	0.539	0.211	0.367	0.372	0.000	0.031	0.000	0.010
	Hong Kong	0.286	0.647	0.000	0.311	0.147	0.185	0.000	0.111

〈표 2〉 국가별 환경비효율성 (α)과 경제비효율성(β)(계속)

그룹	국가별	환경비효율 (-b, -ff)				경제비효율 (+y)			
		2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
중·고 소득국	Israel	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Macau	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Malta	0.326	0.000	0.000	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000
	Puerto Rico	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Saudi Arabia	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Singapore	0.528	0.000	0.000	0.176	0.000	0.000	0.000	0.000
	Taiwan	0.432	0.751	0.691	0.625	0.154	0.311	0.251	0.239
	Trinidad & Tobago	0.776	0.000	0.000	0.259	0.000	0.000	0.000	0.000
	Algeria	0.627	0.063	0.378	0.356	0.392	0.054	0.369	0.272
	Argentina	0.000	0.010	0.101	0.037	0.000	0.005	0.065	0.023
	Brazil	0.398	0.414	0.595	0.469	0.381	0.455	0.482	0.439
	Bulgaria	0.795	0.840	0.724	0.786	0.526	0.455	0.789	0.590
	Chile	0.595	0.627	0.619	0.614	0.316	0.438	0.575	0.443
	Colombia	0.408	0.401	0.491	0.433	0.262	0.383	0.314	0.320
	Costa Rica	0.000	0.009	0.189	0.066	0.000	0.008	0.143	0.051
	Cuba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Dominican Repu blic	0.153	0.466	0.000	0.206	0.033	0.389	0.000	0.140
	Jamaica	0.578	0.698	0.632	0.636	0.537	0.950	0.888	0.792
	Malaysia	0.389	0.688	0.758	0.611	0.512	0.734	0.655	0.634
	Mauritius	0.580	0.665	0.629	0.625	0.576	0.932	0.880	0.796
	Panama	0.656	0.745	0.631	0.677	0.440	0.601	0.521	0.521
	Peru	0.145	0.426	0.342	0.305	0.130	0.288	0.189	0.202
	Romania	0.786	0.759	0.720	0.755	1.501	0.978	0.831	1.103
	Russia	0.840	0.775	0.698	0.771	0.000	0.150	0.362	0.171
	Saint Lucia	0.116	0.000	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000
	South Africa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Uruguay	0.310	0.477	0.444	0.410	0.205	0.499	0.370	0.358
	Venezuela	0.628	0.786	0.807	0.740	0.398	0.650	0.871	0.639

〈표 2〉 국가별 환경비효율성 (α)과 경제비효율성(β)(계속)

그룹	국가별	환경비효율 (-b, -ff)				경제비효율 (+y)			
		2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
저 소 득 국	Belize	0.521	0.661	0.000	0.394	0.406	0.687	0.000	0.364
	Bolivia	0.049	0.433	0.000	0.161	0.000	0.492	0.000	0.164
	China	0.176	0.000	0.000	0.059	0.215	0.000	0.000	0.072
	Egypt	0.000	0.462	0.043	0.168	0.000	0.523	0.017	0.180
	El Salvador	0.000	0.313	0.148	0.154	0.000	0.158	0.058	0.072
	Guatemala	0.000	0.304	0.256	0.187	0.000	0.195	0.111	0.102
	Honduras	0.248	0.571	0.522	0.447	0.333	0.640	0.860	0.611
	India	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Indonesia	0.665	0.714	0.767	0.715	0.888	0.678	1.023	0.863
	Morocco	0.650	0.699	0.639	0.663	0.846	1.181	0.925	0.984
	Nicaragua	0.564	0.662	0.633	0.620	0.762	1.045	1.259	1.022
	Pakistan	0.504	0.472	0.405	0.460	0.232	0.493	0.306	0.344
	Paraguay	0.258	0.321	0.292	0.291	0.309	0.324	0.126	0.253
	Philippines	0.422	0.581	0.536	0.513	0.437	0.465	0.436	0.446
	Sri Lanka	0.267	0.376	0.363	0.336	0.251	0.391	0.186	0.276
	Syria	0.684	0.765	0.753	0.734	0.000	0.654	0.754	0.469
	Thailand	0.513	0.749	0.751	0.671	0.919	1.701	1.097	1.239
	Tunisia	0.407	0.180	0.146	0.245	0.413	0.169	0.119	0.234
	Vietnam	0.078	0.612	0.701	0.464	0.034	0.310	1.294	0.546
	Bangladesh	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
평균치	OECD	0.269	0.383	0.467	0.373	0.183	0.223	0.290	0.232
	high-middle	0.357	0.340	0.323	0.340	0.215	0.277	0.283	0.258
	low	0.300	0.444	0.348	0.364	0.302	0.505	0.429	0.412
	overall	0.311	0.381	0.383	0.358	0.224	0.312	0.321	0.285

전체국가들의 연평균 환경비효율 수준은 0.358로서 연평균 35.8%의 환경비효율이 존재한다.⁶⁾ 2000년 연평균 0.311에서 2009년 0.383으로 지속적으로 증가하였다. 소

6) 방향거리함수의 값은 0을 기준으로 하기에 0의 값은 효율적이고 0에서 멀수록 비효율적이다. 따라서 제시된 수치들은 비효율성으로 용어를 통일하였다.

소득수준에 따라서 세 그룹으로 구분하여 보면 소득수준이 가장 높은 OECD국가들은 환경비효율성이 0.373으로 가장 높은 반면에 중고소득국가와 저소득국가의 비효율성은 낮게 나타났다. 저소득국보다 중고소득국가들의 환경비효율성이 더 낮은 이유는 이들 국가들의 인당 오염배출량이 상대적으로 작아서 오염물과 산출물로 표현된 프론티어 상으로부터 가장 가까이 위치하기 때문이다.

국가별로 볼 때, OECD국가 중 환경 비효율성 수준이 가장 낮은 국가는 스위스, 프랑스, 이탈리아, 룩셈부르크 등이고 반면에 비효율수준이 가장 높은 국가의 순서는 네덜란드, 캐나다, 슬로베니아, 체코, 뉴질랜드, 한국 등이다. 미국, 캐나다, 핀란드 등의 환경비효율이 높은 이유는 GDP와 CO₂ 배출량은 높으나 인구가 상대적으로 낮은 편이기 때문에 인구 당으로 비교분석한 결과에서는 환경비효율이 큰 것으로 나타났다. 시간 추이에 따라 OECD국가 중 호주, 이탈리아 등은 2000-2005년간 환경효율성이 높았으나 2009년에 크게 악화되었다. 반대로 노르웨이, 룩셈부르크, 헝가리 등의 국가는 2000년에는 환경효율성이 낮았으나 2005년 이후 환경이 개선되었다. 특히 후자의 원인은 UN기후변화협약에 따라서 2000년에 비하여 생산활동 중 오염과 관련된 화석에너지의 사용량을 감소시키는 에너지 절약을 추진하는 동시에 비화석에너지 등의 사용을 확대한 데 기인한 것으로 보인다.

중·고소득국가의 환경비효율성은 세 그룹 중 가장 낮게 나타났다. 연평균 환경비효율은 0.340로서 연평균 34%의 환경적 개선잠재력을 갖는다. 오염물 감소방향으로 가장 효율적인 국가는 주로 남아프리카 공화국, 세인트루시아, 쿠바, 마카오 등이고 반면에 가장 비효율적인 국가는 불가리아, 러시아, 대만, 베네수엘라 등이다. 환경효율성이 낮은 국가의 주된 원인은 화석에너지 사용량이 높고 에너지 다소비 제조업이 상대적으로 높기 때문으로 보인다.

저소득 그룹은 분석기간 동안 OECD국가 다음으로 높은 환경비효율 수준을 보였다. 연평균 환경비효율성은 0.364이고 고소득 OECD국가와 별로 큰 차이가 없다. 저소득국 중 시리아, 인도네시아, 태국 등은 소득수준에 비하여 화석에너지의 과대 소비로 인한 이산화탄소 역시 과다 배출되어 환경비효율성이 높게 나타난 것으로 보인다. 다만 중국과 인도는 산업구조가 제조업의 비중이 높고 빠른 경제성장에 따른 화석연료의 사용량이 급격히 증가하고 있기에 온실가스배출량은 매우 높다. 하지만 본

연구에서 분석한 것은 인당 자료가기에 인구가 많은 중국과 인도는 인당 GDP가 낮지만 인당 CO₂ 배출량도 낮다. 결과적으로 이들 국가의 환경비효율성이 우리의 예상과는 다르게 낮게 나타나고 있다.

둘째, 국가별 경제비효율성 수준을 측정한 결과를 보면 세 그룹이 대체로 시간에 따라 증가하고 있는 추세를 보인다. 이는 경제발전이 앞선 국가와 후발국가 간에 경제적 성과의 갭이 시간이 흐를수록 확대되고 있음을 의미한다. OECD국가와 중고소득국가들의 평균 경제비효율성은 각각 0.232 및 0.258로서 상대적으로 낮은 반면에 저소득 국가들은 0.412로 매우 높게 나타났다.

국가별을 보면 OECD국가에서 GDP 증가방향으로 비효율수준이 가장 높은 국가는 한국, 슬로바키아, 포르투갈 등이고 이들은 모두 비효율지수가 0.606이상으로 나타났다. 한국의 경우, 경제적 성과는 낮은 반면에 화석에너지 다소비 제조업의 비중이 높아서 에너지 소비가 경제규모에 비하여 높고 온실가스 배출량이 높았다. 반대로 경제효율성이 양호한 국가는 주로 노르웨이, 프랑스, 호주, 스위스 등으로 모두 0.05보다 낮게 나타났다.

중·고소득국가들은 전반적으로 경제효율성이 높은 편이지만 루마니아, 모리셔스, 자메이카가 등 비효율성이 매우 높은 국가들도 없지 않다. 특히, 루마니아는 비효율성이 1보다 더 크게 났다.⁷⁾ 대부분 저소득국가에 속한 나라들은 상대적으로 경제발전의 단계가 낮고 인당 GDP 수준이 낮기 때문에 경제효율성이 상대적으로 가장 낮게 나타났다. GDP 증가방향으로 인도, 방글라데시, 중국, 엘살바도르 등이 가장 효율적인 반면에 태국, 니카라과, 모로코, 인도네시아 등이 가장 비효율적인 것으로 나타났다. 따라서 세계경제의 양극화 현상은 경제의 세계화 추세에 따라서 개선되지 않고 악화되고 있는 것으로 보인다.

셋째, 환경과 경제의 효율성을 통합한 환경-경제의 비효율성수준은 <표 3>과 같다.

7) 루마니아는 1996년 정권 교체에 따른 정부내부에 갈등이 심해 국내 정치적, 경제적 상황이 악화되고 보수적인 정부 하의 낙후한 경제 구조 개편 및 민영화 등으로 경제적인 개혁을 추진하지 못하였다. 따라서 경제 불안이 더 심화되었고 경제발달의 단계가 낮아서 효율적 경제성장을 달성하지 못하는 것으로 보인다.

〈표 3〉 국가별 환경-경제의 비효율성(γ)(계속)

그룹	국가별	환경-경제비효율 (+y,-b,-ff)			
		2000	2005	2009	평균
OECD국가	Australia	0.000	0.000	0.168	0.056
	Austria	0.043	0.169	0.129	0.114
	Belgium	0.258	0.258	0.186	0.234
	Canada	0.000	0.104	0.228	0.111
	Czech Republic	0.280	0.534	0.415	0.410
OECD국가	Denmark	0.118	0.210	0.277	0.202
	Finland	0.182	0.253	0.280	0.239
	France	0.000	0.000	0.121	0.040
	Germany	0.141	0.257	0.290	0.229
	Greece	0.000	0.090	0.268	0.120
	Hungary	0.241	0.000	0.109	0.117
	Iceland	0.000	0.024	0.185	0.070
	Ireland	0.064	0.069	0.203	0.112
	Italy	0.015	0.000	0.114	0.043
	Japan	0.179	0.256	0.329	0.255
	Korea, South	0.369	0.339	0.425	0.378
	Luxembourg	0.000	0.000	0.000	0.000
	Mexico	0.197	0.195	0.374	0.255
	Netherlands	0.169	0.215	0.138	0.174
	New Zealand	0.181	0.230	0.232	0.215
	Norway	0.000	0.000	0.000	0.000
	Poland	0.000	0.000	0.211	0.070
	Portugal	0.232	0.294	0.344	0.290
	Slovakia	0.470	0.512	0.373	0.452
	Slovenia	0.091	0.444	0.484	0.340
	Spain	0.113	0.296	0.292	0.234
	Sweden	0.000	0.079	0.033	0.037
	Switzerland	0.000	0.046	0.129	0.058
	Turkey	0.052	0.192	0.199	0.148
	United Kingdom	0.037	0.013	0.055	0.035
United States	0.000	0.130	0.204	0.111	

〈표 3〉 국가별 환경-경제의 비효율성(γ)(계속)

그룹	국가별	환경-경제비효율 (+y,-b,-ff)			
		2000	2005	2009	평균
중·고 소득국	Barbados	0.000	0.000	0.000	0.000
	Croatia	0.232	0.238	0.336	0.269
	Cyprus	0.052	0.030	0.127	0.070
	Hong Kong	0.098	0.159	0.000	0.086
	Israel	0.000	0.000	0.000	0.000
	Macau	0.000	0.000	0.000	0.000
	Malta	0.000	0.000	0.000	0.000
	Puerto Rico	0.000	0.000	0.000	0.000
	Saudi Arabia	0.000	0.000	0.000	0.000
	Singapore	0.000	0.000	0.000	0.000
	Taiwan	0.118	0.333	0.242	0.231
	Trinidad & Tobago	0.000	0.000	0.000	0.000
	Algeria	0.284	0.029	0.214	0.176
	Argentina	0.000	0.003	0.041	0.015
	Brazil	0.264	0.235	0.285	0.261
	Bulgaria	0.496	0.496	0.584	0.525
	Chile	0.212	0.400	0.367	0.326
	Colombia	0.192	0.227	0.198	0.206
	Costa Rica	0.000	0.004	0.104	0.036
	Cuba	0.000	0.000	0.000	0.000
	Dominican Republic	0.022	0.253	0.000	0.092
	Jamaica	0.361	0.495	0.437	0.431
	Malaysia	0.223	0.507	0.442	0.391
	Mauritius	0.359	0.501	0.459	0.440
	Panama	0.308	0.379	0.457	0.381
	Peru	0.078	0.219	0.129	0.142
	Romania	0.607	0.593	0.467	0.556
	Russia	0.470	0.267	0.286	0.341
	Saint Lucia	0.000	0.000	0.000	0.000
	South Africa	0.000	0.000	0.000	0.000
	Uruguay	0.146	0.313	0.235	0.231
	Venezuela	0.374	0.584	0.552	0.503

〈표 3〉 국가별 환경-경제의 비효율성(γ)(계속)

그룹	국가별	환경-경제비효율 (+y,-b,-ff)			
		2000	2005	2009	평균
저소득국	Belize	0.270	0.464	0.000	0.245
	Bolivia	0.000	0.230	0.000	0.077
	China	0.097	0.000	0.000	0.032
	Egypt	0.000	0.246	0.012	0.086
	El Salvador	0.000	0.120	0.042	0.054
	Guatemala	0.000	0.156	0.077	0.078
	Honduras	0.137	0.400	0.348	0.295
	India	0.000	0.000	0.000	0.000
	Indonesia	0.488	0.422	0.444	0.452
	Morocco	0.454	0.537	0.465	0.485
	Nicaragua	0.390	0.499	0.463	0.451
	Pakistan	0.163	0.241	0.174	0.193
	Paraguay	0.148	0.191	0.088	0.142
	Philippines	0.275	0.329	0.253	0.286
	Sri Lanka	0.159	0.231	0.130	0.173
	Syria	0.355	0.523	0.475	0.451
	Thailand	0.329	0.596	0.500	0.475
	Tunisia	0.226	0.087	0.073	0.129
	Vietnam	0.013	0.218	0.522	0.251
	Bangladesh	0.000	0.000	0.000	0.000
평균치	OECD	0.111	0.168	0.219	0.166
	high-middle	0.153	0.196	0.186	0.178
	low	0.175	0.275	0.203	0.218
	overall	0.143	0.204	0.203	0.183

전체국가의 연평균 환경-경제 비효율 수준은 0.183로서 18.3%의 비효율이 존재한다. 이것은 앞에 제시했던 환경비효율성과 경제비효율성에 비하여 상대적인 낮은 수치이다. 비효율수준 γ 이 축소된 것은 한 방향만을 측정하는 α 와 β 보다 이들을 동시에 통합하여 방향성을 주기 때문이다. 세 그룹 중 OECD국가들의 환경-경제비효율성

이 가장 낮은 반면에 저소득국이 가장 높게 나타났다. OECD국가가 환경비효율에 비하여 경제비효율이 상대적으로 낮기 때문에 이들을 통합한 환경-경제비효율 또한 가장 낮게 나타난 것으로 보인다. 그런데 시간의 흐름에 따라 OECD국가는 효율적이지만 최근으로 올수록 비효율성이 점차 증가하였다.

2000년 기준으로 OECD국가 중 환경-경제비효율성이 높은 국가의 순서는 슬로바키아, 한국, 체코, 룩셈부르크 등이고 가장 낮은 국가는 노르웨이, 호주, 프랑스, 폴란드 등이다. 중·고소득국가는 루마니아, 불가리아, 러시아 등 나라를 제외하면 대부분은 상대적으로 효율적인 편에 속한다. 특히, 루마니아는 전체 83개 국가 중에 가장 비효율적으로 보인다. 그 주된 원인은 루마니아 2000년에 심각한 경제 침체상황을 겪었기 때문이다. GDP수준이 낮은 저소득국은 경제비효율성이 아주 높아서 전체 환경-경제비효율성도 낮게 나타났다. 이러한 대표적인 국가는 인도네시아, 모로코와 니카라과이다.

2005년의 추이는 2000년과 거의 일치한다. 전반적으로 저소득국 비효율성이 가장 높은 반면에 선진국과 중고소득국은 역시 증가하는 추세를 보인다. OECD국가 중 슬로베니아의 비효율성 변화폭이 눈에 띄게 증가하였다.⁸⁾ 2005년 후 저소득 국가들은 경제에 치중한 성장을 추구하였고 에너지 다소비 제조업의 비중이 높으며 생산 활동에 필요한 에너지, 특히 온실가스배출에 직접 영향을 주는 화석에너지에 대한 의존도가 높아져서 비효율성이 악화된 것으로 보인다.

한편, 2009년 기준으로 세 그룹 중 OECD국가의 비효율성이 가장 높았다. 그 중 가장 효율적인 국가들은 노르웨이, 룩셈부르크, 스웨덴, 영국 등이고, 반면에 슬로베니아, 한국, 멕시코, 슬로바키아 등의 효율성은 낮았다. 중·고소득그룹에서 환경-경제비효율성이 낮은 국가들로는 이스라엘, 사우디아라비아, 싱가포르, 트리니다드토바고 등 여러 국가가 있는 반면 비효율성이 상대적으로 높은 국가들은 불가리아, 베네수엘라, 루마니아, 모리셔스, 파나마 등이다. 저소득 국가는 베트남, 태국, 시리아, 모

8) 슬로베니아는 발칸반도에서 산업화가 먼저 진행된 지역으로 공업생산이 국민소득의 약 2/3를 차지하여 1990-2000년간 연평균 4.6%의 높은 성장을 이루었다. 환경뿐만 아니라 경제 비효율성이 좋지 않기에 슬로베니아의 2000년의 환경-경제비효율성도 낮게 나타났다. 슬로베니아는 생산 활동에 필요한 석탄, 석유와 같은 화석연료를 주로 외국으로부터 수입하였으며, 인구가 적은 탓에 내수시장도 충분히 크지 않아 절반 이상의 생산품을 해외로 수출하였다. 2003년 이후 발발한 이라크 전쟁으로 석유수급에 차질이 일어났고, 유럽재정위기까지 닥치면서 수출이 침체되어 슬로베니아의 경제는 불안정하였다.

로코, 니카라과, 인도네시아를 제외하면 다른 국가들은 거의 다 효율적이다. 베트남은 역시 소득수준에 비하여 화석에너지를 과다투입하기 때문에 결과가 좋지 않다.

넷째, Two-stage DEA 모형을 활용하여 도출한 온실가스 추가저감의 효율수준은 <표 4>와 같다. 이는 산출이 최대로 달성된 상태에서 온실가스의 추가저감이 가능한 정도를 보여주게 된다. 즉, 온실가스의 배출이 많은 국가의 경우 비록 경제적인 관점에서 최대효율을 보이더라도 온실가스 배출량은 여전히 높은 상태를 유지하는 국가를 확인하는데 두 단계모형은 유용하다.

<표 4> 국가별 Two-stage 효율성(δ)(계속)

그룹	국가별	추가저감효율성 (-b,-ff)			평균
		2000	2005	2009	
OECD 국가	Australia	0.000	0.000	0.394	0.131
	Austria	0.000	0.000	0.000	0.000
	Belgium	0.042	0.059	0.007	0.036
	Canada	0.560	0.594	0.000	0.384
	Czech Republic	0.000	0.591	0.000	0.197
	Denmark	0.000	0.000	0.000	0.000
	Finland	0.000	0.000	0.000	0.000
	France	0.000	0.000	0.000	0.000
	Germany	0.000	0.000	0.000	0.000
	Greece	0.000	0.000	0.000	0.000
	Hungary	0.035	0.000	0.014	0.016
	Iceland	0.000	0.000	0.000	0.000
	Ireland	0.000	0.000	0.000	0.000
	Italy	0.000	0.000	0.000	0.000
	Japan	0.000	0.000	0.000	0.000
	Korea, South	0.000	0.000	0.030	0.010
	Luxembourg	0.000	0.000	0.000	0.000
	Mexico	0.000	0.000	0.000	0.000
	Netherlands	0.089	0.366	0.000	0.152
	New Zealand	0.000	0.595	0.000	0.198
Norway	0.000	0.000	0.000	0.000	

〈표 4〉 국가별 Two-stage 효율성(δ)(계속)

그룹	국가별	추가저감효율성 (-b,-ff)			평균
		2000	2005	2009	
OECD 국가	Poland	0.000	0.000	0.447	0.149
	Portugal	0.000	0.000	0.065	0.022
	Slovakia	0.000	0.459	0.000	0.153
	Slovenia	0.000	0.456	0.000	0.152
	Spain	0.000	0.000	0.000	0.000
	Sweden	0.000	0.000	0.000	0.000
	Switzerland	0.000	0.000	0.000	0.000
	Turkey	0.000	0.306	0.000	0.102
	United Kingdom	0.000	0.378	0.000	0.126
	United States	0.449	0.408	0.159	0.339
중·고 소득국	Barbados	0.000	0.000	0.000	0.000
	Croatia	0.000	0.075	0.054	0.043
	Cyprus	0.201	0.000	0.367	0.189
	Hong Kong	0.000	0.000	0.000	0.000
	Israel	0.000	0.000	0.000	0.000
	Macau	0.000	0.000	0.000	0.000
	Malta	0.000	0.000	0.000	0.000
	Puerto Rico	0.000	0.000	0.000	0.000
	Saudi Arabia	0.000	0.000	0.000	0.000
	Singapore	0.000	0.000	0.000	0.000
	Taiwan	0.000	0.436	0.000	0.145
	Trinidad & Tobago	0.776	0.000	0.000	0.259
	Algeria	0.000	0.000	0.000	0.000
	Argentina	0.000	0.000	0.022	0.008
	Brazil	0.051	0.019	0.000	0.024
	Bulgaria	0.468	0.533	0.448	0.483
	Chile	0.000	0.376	0.000	0.125
	Colombia	0.004	0.000	0.000	0.001
	Costa Rica	0.000	0.000	0.000	0.000
	Cuba	0.000	0.000	0.000	0.000
Dominican Republic	0.000	0.000	0.000	0.000	

〈표 4〉 국가별 Two-stage 효율성(δ)(계속)

그룹	국가별	추가저감효율성 (-b,-ff)			
		2000	2005	2009	평균
중·고 소득국	Jamaica	0.000	0.000	0.000	0.000
	Malaysia	0.001	0.389	0.000	0.130
	Mauritius	0.000	0.000	0.000	0.000
	Panama	0.000	0.046	0.000	0.015
	Peru	0.011	0.000	0.010	0.007
	Romania	0.000	0.347	0.031	0.126
	Russia	0.839	0.716	0.000	0.518
	Saint Lucia	0.000	0.000	0.000	0.000
	South Africa	0.000	0.000	0.000	0.000
	Uruguay	0.000	0.000	0.000	0.000
	Venezuela	0.239	0.538	0.000	0.259
저소득국	Belize	0.000	0.269	0.000	0.090
	Bolivia	0.000	0.000	0.000	0.000
	China	0.000	0.000	0.000	0.000
	Egypt	0.000	0.000	0.000	0.000
	El Salvador	0.000	0.000	0.000	0.000
	Guatemala	0.000	0.000	0.000	0.000
	Honduras	0.008	0.000	0.000	0.003
	India	0.000	0.000	0.000	0.000
	Indonesia	0.000	0.000	0.000	0.000
	Morocco	0.000	0.000	0.000	0.000
	Nicaragua	0.000	0.000	0.000	0.000
	Pakistan	0.006	0.000	0.000	0.002
	Paraguay	0.000	0.000	0.000	0.000
	Philippines	0.009	0.000	0.000	0.003
	Sri Lanka	0.000	0.000	0.002	0.001
	Syria	0.685	0.450	0.303	0.479
	Thailand	0.000	0.001	0.000	0.000
	Tunisia	0.000	0.000	0.000	0.000
	Vietnam	0.000	0.000	0.000	0.000
Bangladesh	0.000	0.000	0.000	0.000	
평균치	OECD	0.038	0.136	0.036	0.070
	high-middle	0.081	0.109	0.029	0.073
	low	0.035	0.036	0.015	0.029
	overall	0.054	0.101	0.028	0.061

온실가스 추가저감의 비효율 정도는 세 그룹 중 OECD국가와 중고소득국가들은 비슷하고 저소득 국가들의 비효율성이 가장 낮았다. 국가별로 보면 OECD국가에서 캐나다와 미국의 비효율성이 가장 높았다. 특히 미국의 경우, 앞에 세 가지 효율성모형으로 분석했을 때 가장 나쁜 편은 아니었으나 2단계를 통한 온실가스의 추가저감 비효율수준은 높다. 즉, 미국의 인당 온실가스 배출량은 여타 국가에 비하면 지나치게 높은 편이다. 다시 말해서 미국은 경제적 성과면에서는 높은 효율을 보이지만 반면에 화석에너지와 온실가스의 과대배출이 이루어지는 대표적인 국가이다.⁹⁾

중·고소득국가들 중 추가저감의 비효율성이 낮은 국가들의 수는 OECD국가보다 더 많은 편에 속하고 반대로 아주 높은 비효율성을 보인 국가는 러시아, 불가리아, 베네수엘라, 트리니다드토바고 등이다. 이 중에서 러시아의 산업구조는 제조업의 비중이 상당히 높아서 석탄, 석유 등 화석연료에 크게 의존하는 경제성장을 추구하고 있다. 저소득 국가들의 추가저감의 결과는 시리아를 제외하고 대부분 국가들이 거의 다 효율적이다. 특히, 시리아의 경우는 추가저감의 비효율성이 가장 높게 나타났다.¹⁰⁾

이어서 Two-stage DEA모형을 기초하여 추가저감이 가능한 화석에너지 소비량과 온실가스의 배출량을 제시하면 <표 5>과 같다.

<표 5> 추가저감 화석에너지의 소비량과 온실가스의 배출량(계속)

그룹	국가별	추가저감화석에너지 (BTU/명)				추가저감CO ₂ (톤/인)			
		2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
OECD 국가	Australia	0.0	0.0	7.6	2.5	0.0	0.0	100154.1	33384.7
	Austria	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Belgium	0.6	0.9	0.1	0.5	9079.3	12787.2	1369.8	7745.4

9) 전세계 이산화탄소배출량의 28%를 차지하는 미국은 교토의정서의 비준을 거부했으나 자국의 산업보호를 위해 2001년3월에 전체 회원국에서 자발적으로 탈퇴하였다. 세계 총인구의 5%를 차지하는 미국은 세계 자원의 35%이상을 소비하였다.

10) 시리아의 발전 초기에 프랑스의 식민정책으로 공업 개발이 억제되었고 또한 수십 년간 국외 및 국내 전쟁의 커다란 영향을 받아서 장기적으로 경제 침체 상황에 빠졌다. 시리아의 공업은 온실가스 과다 배출산업인 화학화학물의 비중이 전체공업 중 14-15%를 차지하였으나 기술부족하여서 에너지의 원단위 사용효율이 매우 낮다.

〈표 5〉 추가저감 화석에너지의 소비량과 온실가스의 배출량(계속)

그룹	추가저감화석에너지 (BTU/명)					추가저감CO ₂ (톤/인)			
	국가별	2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
OECD 국가	Canada	10.3	11.4	0.0	7.3	156602.0	175285.1	0.0	110629.0
	Czech Republic	0.0	5.4	0.0	1.8	0.0	74406.1	0.0	24802.0
	Denmark	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.4	3.1
	Finland	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	France	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Germany	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Greece	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Hungary	0.2	0.0	0.1	0.1	3034.1	0.0	1162.4	1398.8
	Iceland	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Ireland	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Italy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Japan	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Korea, South	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	5240.3	1746.8
	Luxembourg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mexico	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Netherlands	1.4	6.0	0.0	2.5	20507.4	90131.6	0.0	36879.7
	New Zealand	0.0	6.0	0.0	2.0	0.0	84508.1	0.0	28169.4
	Norway	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Poland	0.0	0.0	3.5	1.2	0.0	0.0	45407.3	15135.8
	Portugal	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	5.5	5194.5	1733.3
	Slovakia	0.0	3.4	0.0	1.1	0.0	49872.2	0.0	16624.1
	Slovenia	0.0	3.9	0.0	1.3	0.0	51573.5	0.0	17191.2
	Spain	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sweden	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Switzerland	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Turkey	0.0	1.0	0.0	0.3	0.0	14082.1	0.0	4694.0
	United Kingdom	0.0	3.6	0.0	1.2	0.0	55166.3	0.0	18388.8
	United States	9.3	8.3	2.8	6.8	134907.5	118537.7	40601.2	98015.5

〈표 5〉 추가저감 화석에너지의 소비량과 온실가스의 배출량(계속)

그룹	추가저감화석에너지 (BTU/명)					추가저감CO ₂ (톤/인)			
	국가별	2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
중·고소득국	Barbados	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Croatia	0.0	0.3	0.2	0.2	0.0	5419.7	3828.8	3082.9
	Cyprus	2.0	0.0	3.2	1.7	27333.2	0.0	42391.2	23241.5
	Hong Kong	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Israel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Macau	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Malta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Puerto Rico	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Saudi Arabia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Singapore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Taiwan	0.0	5.6	0.0	1.9	0.0	76700.9	0.0	25567.0
	Trinidad and Tobago	17.1	0.0	0.0	5.7	260732.1	0.0	0.0	86910.7
	Algeria	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Argentina	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	26.5	1549.9	525.5
	Brazil	0.1	0.0	0.0	0.0	1502.2	580.1	0.0	694.1
	Bulgaria	2.9	3.7	2.7	3.1	39848.1	50531.7	35275.0	41884.9
	Chile	0.0	1.6	0.0	0.5	0.0	23334.4	0.0	7778.1
	Colombia	0.0	0.0	0.0	0.0	88.5	0.0	0.0	29.5
	Costa Rica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cuba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Dominican Republic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Jamaica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Malaysia	0.0	2.4	0.0	0.8	97.1	36461.2	0.0	12186.1
	Mauritius	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Panama	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	2674.6	0.0	891.5
	Peru	0.0	0.0	0.0	0.0	153.6	0.0	207.1	120.2
	Romania	0.0	1.6	0.1	0.6	0.0	22689.8	1632.1	8107.3
	Russia	8.6	7.9	0.0	5.5	132466.5	122480.1	0.0	84982.2
	Saint Lucia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

〈표 5〉 추가저감 화석에너지의 소비량과 온실가스의 배출량(계속)

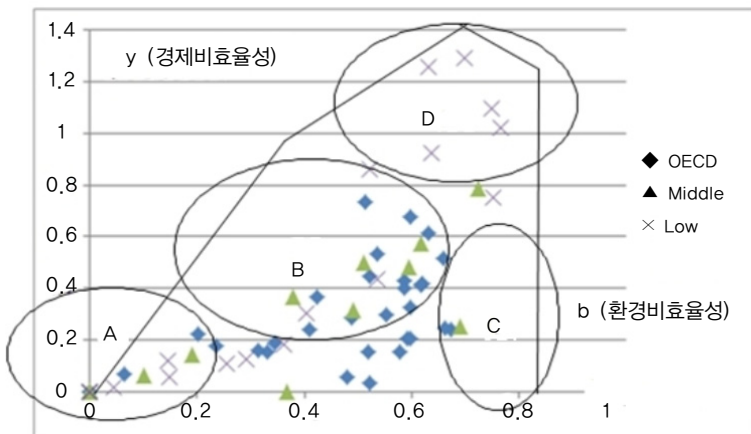
그룹	추가저감화석에너지 (BTU/명)					추가저감CO ₂ (톤/인)			
	국가별	2000	2005	2009	평균	2000	2005	2009	평균
중·고 소득국	South Africa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Uruguay	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Venezuela	1.4	3.1	0.0	1.5	21753.5	45851.1	0.0	22534.8
저 소 득 국	Belize	0.0	0.9	0.0	0.3	0.0	13415.7	0.0	4471.9
	Bolivia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	China	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Egypt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	El Salvador	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Guatemala	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Honduras	0.0	0.0	0.0	0.0	80.7	0.0	0.0	26.9
	India	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Indonesia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Morocco	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Nicaragua	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pakistan	0.0	0.0	0.0	0.0	69.3	0.0	0.0	23.1
	Paraguay	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Philippines	0.0	0.0	0.0	0.0	102.6	0.0	0.0	34.2
	Sri Lanka	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	18.2	7.0
	Syria	2.1	1.2	0.8	1.4	31496.6	18848.2	11685.0	20676.6
	Thailand	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.5	0.0	22.2
	Tunisia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vietnam	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Bangladesh	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
평균	OECD	0.7	1.6	0.5	0.9	10455.8	23430.8	6423.8	13436.8
	high-middle	1.0	0.8	0.2	0.7	15124.2	12085.9	2652.6	9954.3
	low	0.1	0.1	0.0	0.1	1587.6	1616.5	585.2	1263.1
	overall	0.7	0.9	0.3	0.6	10118.8	13800.4	3563.0	9160.7

전반적으로 분석 기간동안 전체국가들의 추가저감 화석에너지의 사용량은 평균 0.3-0.9(BTU/명)사이에 속한다. 세 그룹 중 OECD국가들이 가장 크게 나타났고 저소

독국은 추가저감량이 작았다. OECD국가들 내에서 대표적으로 미국, 캐나다, 네덜란드, 호주, 뉴질랜드 등은 추가저감 화석에너지량이 많은 편에 속한다. 또한 OECD국가의 상당수가 이산화탄소배출의 추가저감의 여지가 존재한다. 이산화탄소 초과배출량이 높은 국가의 순서로 캐나다, 미국, 네덜란드, 호주, 뉴질랜드, 체코를 들 수 있다. 반면에 추가저감의 여지가 없는 국가는 프랑스, 스위스, 노르웨이, 아이슬란드, 아일랜드 등으로 나타났다. 중·고소득국가 가운데 추가적으로 화석에너지를 감소해야 하는 국가는 트리니다드토바고, 러시아, 불가리아, 대만, 키프로스 등이다.¹¹⁾ 저소득국가운데 추가저감의 여지는 가장 낮게 나타났다. 시리아와 벨리즈를 제외하면 추가저감량은 상대적으로 크지 않다.

결과적으로 국가별 환경 또는 경제의 비효율성을 포함한 국가들을 기준으로 생산 프론티어를 도출하고 이를 근거로 국가별 분포를 제시하면 <그림 3>와 같다.

<그림 3> 국가별 환경과 경제의 비효율성



<그림3>는 세 그룹에 속한 국가들의 프론티어집합 내에서 위치를 보여주고 있다. A유형에 속한 국가들은 온실가스를 적게 배출하는 동시에 경제비효율성도 낮은 국

11) 대만은 한국과 함께 아시아의 신흥공업국으로 지목되었던 빠른 성장국가이다. 유일하게 좁은 국토에 자원이 부족해서 수출 의존도가 매우 심하다. 대만은 대기업이 별로 없고 수많은 중소기업이 대만경제의 대부분을 차지한다. 특히 화석에너지를 다소비하는 중소 제조업의 비중이 아주 높다.

가에 해당한다. 대부분 저소득국으로 방글라데시, 인도, 볼리비아 등을 들 수 있다. B유형은 주로 OECD국가와 중고소득국가들이 여기에 위치한다. 이 유형에 속한 국가들은 이산화탄소배출이 상대적으로 낮고 경제가 일정 수준으로 성장한 상태이다. 대표적인 국가는 프랑스, 호주, 싱가포르, 폴란드 등이다. C유형은 경제수준도 높고 온실가스배출량도 높은 국가이다. 이 유형에는 주로 국토가 넓은 선진국이 속한다. 가령, 미국, 캐나다, 호주 등이 이에 속한다. 마지막으로 D유형은 환경오염도 심각하고 경제성장도 안 좋은 국가들이다. 주로 화석에너지 다소비 제조업 비중이 높은 소수 저소득국으로 모로코, 태국, 니카라과, 시리아 등이다.

IV. 결론

본 연구는 83개 국가를 대상으로 화석에너지, 경제성장과 환경효율성을 연계하여 환경효율성, 경제효율성, 환경-경제효율성, 온실가스 추가저감 효율성과 저감량을 측정해 보았다. 특히, 3그룹 중에서 4가지 효율성에서 어느 그룹이 보다 나은 성과를 보여주는지 확인하는데 그 의미를 두었다. 실증결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 대부분 국가가 환경효율성보다는 경제에 치중한 성장을 추구한 것으로 나타났다. 대부분 국가들은 경제비효율성보다 환경비효율 수준이 더 높다. OECD국가는 상대적으로 경제효율성이 높으나 환경효율성이 낮았다. 반면 비 OECD국가들은 상대적으로 환경효율성은 높으나 경제효율성이 낮았다.

둘째, 환경-경제효율성을 기준으로 하면 OECD국가가 비 OECD국가보다 효율적이었다. 이는 OECD의 높은 경제효율성이 낮은 환경효율성을 상쇄한 결과로 간주된다. 반면 비 OECD국가들은 상대적으로 높은 환경효율성이 매우 낮은 경제효율성을 극복하지 못하였다.

셋째, 프로티어 상의 최대 산출수준 하에서 화석에너지 및 온실가스의 추가저감 여지는 OECD국가가 중고소득국과 저소득국에 비하여 더 크다.

결과적으로 OECD국가의 경제성장도 환경적 관점에서 보면 비 OECD국가(개도국과 후진국)에 비하여 환경친화적인 성장을 추구했다고 보기는 어렵다. 지금까지 선진국이 주장하듯이 개도국이나 후진국이 경제성장 확장에서 환경오염을 더 심각하게

훼손한다는 주장은 타당하다고 보기 어렵다. 본 연구의 초점은 환경효율성과 경제-환경효율성을 향상시키는 것이라고 볼 때 요소 간에 대체가능성이 높다면 생산투입요소의 대체를 통하여 오염을 줄이면서 생산을 확대하는 것이 가능할 수 있을 것이다. 가령 화석연료 투입량의 일정부분이 생산량 감소없이 연료효율적인 친환경공정의 자본스톡으로 대체가 순조롭게 이루어지고 초기 자본투자비용을 능가하는 이익의 발생이 기대된다면 친환경공정의 도입이 이루어질 것이고 경제와 환경이 동시에 향상되는 지속적 성장으로 연결될 것이다. 즉, 화석연료와 자본 간에 대체가능성이 높다면 이를 대체하는 것이 보다 경제-환경효율성을 동시에 높일 수 있는 대안이 될 수 있을 것이다. 이러한 대체는 기존의 기술 나아가서 새로운 기술이나 혁신기술을 도입해야 가능할 수도 있을 것이다. 또한 이 기술도입은 해당 국가가 기존에 보유한 생산기술의 수준에도 크게 의존할 것이다. 일반적으로 비 OECD국가들은 처음부터 신기술이나 혁신기술을 도입하기는 어려운 반면에 기존기술을 보다 상황에 맞게 전환하거나 고쳐나가는 것이 필요할 것이다. 반면 OECD국가들은 생산기술에서 앞서 있으므로 보다 적극적인 오염저감과 대체를 위한 신기술과 혁신기술의 도입이 보다 용이할 것이다.

아무튼 지속가능한 성장은 오염을 줄이면서 생산을 확대해 나가야 한다고 볼 때 보다 새로운 생산방식과 적극적이고 혁신적인 기술의 도입을 요구한다. 이런 관점에서 OECD국가는 비 OECD국가에 비하여 경제적 여력이 있고 기술의 축적이 있기 때문에 지구적 환경문제에 보다 큰 역할이 이루어져야 한다는 점에는 이견이 없을 것이다. 따라서 국제적 환경문제의 해결을 위해서는 선진국의 보다 책임있는 자세와 온실가스 저감을 위한 노력이 더 필요한 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 강상목·정영근·이명현, 2011.6, “지속가능성장 모형구축과 지속가능성 계측”, 『환경정책』 제19권 제2호, pp.35-66.
2. 정영근·강상목·이준, 2008, “OECD국가의 환경-경제효율성 비교”, 『자원·환경경제연구』 제17권 제1호, pp. 121-148.

3. Boyd, G.A. and J.D.McClelland, 1999, "The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.38, pp.121-142.
4. Chung Y.R., Färe, R., and S.Grosskopf, 1997, "Productivity and Undesirable Output: A Directional Distance Function Approach," *Journal of Environmental Management*, Vol.51, pp.229-240.
5. Färe, R., and S. Grosskopf, 2004, *New Direction: Efficiency and Productivity*, Kluwer Academic Publishers Boston.
6. Färe, R., Grosskopf, S., and C.A.Pasurka Jr., 2007, "Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions," *Energy Economics*, Vol.32, pp.1055-1066.
7. Fei, L., Dong, Suo cheng, and L.Xue, 2011, "Energy Consumption-Economic Growth Relationship and Carbon Dioxide Emissions in China," *Energy Policy*, Vol.39, Issue 2, pp.568-574.
8. Føsum, F. R., 2009, "Good Modeling of Bad Outputs: Pollution and Multiple-Output Production," *International Review of Environmental and Resource Economics*, Vol.3, pp.1-38.
9. Kumar, S., 2006, "Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist-Luenberger Index," *Ecological Economics*, Vol.56, pp.280-293.
10. Lo, S.F., Sheu, H.J., and J.L. Hu, 2005, "Taking CO₂ Emissions into a Country's Productivity Change: the Asian Growth Experience," *International Journal of Sustainable Development and World*, Vol.12, pp.279-290.
11. Lozano, S. and E. Gutiérrez, 2008, "Non-parametric Frontier Approach to Modelling the Relationships among Population, GDP, Energy Consumption and CO₂ Emission," *Ecological Economics*, Vol.66, pp.687-699.
12. Mandal, S.K., 2010, "Do Undesirable Output and Environmental Regulation Matter in Energy Efficiency Analysis? Evidence from Indian Cement Industry," *Energy Policy*, Vol.38, pp.6076-6083.
13. Wang, Q., Zhou, P., and Zhou, D., 2012, "Efficiency Measurement with Carbon Dioxide Emissions: The case of China," *Applied Economics*, Vol.90, pp.161-166.
14. Zaim, O., and F. Taskin, 2000a, "Environmental Efficiency in Carbon Dioxide

- Emissions in the OECD: A Non-parametric Approach,” *Journal of Environmental Management*, Vol.58, pp.95-107.
15. Zaim, O., and F. Taskin, 2000b, “A Kuznets Curve in Environmental Efficiency: an Application on OECD Countries,” *Environmental and Resource Economics*, Vol.17, pp.21-36.
 16. Zhou, P., Poh, K.L., and B.W. Ang, 2007a, “A Non-radial DEA Approach to Measuring Environmental Performance,” *European Journal of Operational Research*, Vol.178, pp.1-9.
 17. Zhou, P., Ang, B.W., and K.L.Poh, 2007b, “A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies,” *European Journal of Operational Research*, Vol.189, pp.1-18.
 18. Zhou, P., Ang, B.W., and K.L. Poh, 2008, “Measuring Environmental Performance under Different Environmental DEA Technologies,” *Energy Economics*, Vol.30, pp.1-14.
 19. Zofio, J.L. and A.M. Prieto, 2001, “Environmental Efficiency and Regulatory Standards: the Case of CO₂ Emissions from OECD Countries,” *Resource and Energy Economics*, Vol.23, pp.63-83.