

온실가스 감축에 대비한 에너지 효율의 계측

강상목*

Measurement of Energy Efficiency For the Reduction of Greenhouse Gases

Sang-Mok Kang

부산대학교 경제통상대학 경제학부(Dept. of Economics, Pusan National University)

제출: 2012년 2월 2일 수정: 2012년 3월 5일 승인: 2012년 3월 23일

국문 요약

본 논문의 목적은 OECD국가를 중심으로 온실가스 감축에 대비하여 에너지 원단위(原單位) 측정의 다른 방법으로 서 에너지효율함수와 원단위의 효율함수의 추정을 통하여 에너지효율을 측정하는 것이다. 실증결과는 기존의 전통적 에너지원단위와 확률변경함수에 의한 에너지 효율이 크게 연관되어 있지 않았음을 보여준다. 에너지효율 함수와 원단 위 효율함수의 효율도 다소 상이하였다. 에너지 투입효율함수에 의한 에너지효율은 GDP, 자본스톡, 노동, 에너지투입 량의 순서로 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 향후 투입요소 간 최적 결합을 통한 에너지 절감이 필요하고 에너지 소비가 작은 제품의 생산을 통한 저탄소 경제성장의 추구가 요구된다.

【주제어】 확률변경함수, 에너지효율, 에너지효율함수, 원단위 효율함수

Abstract

The purpose of the paper is to estimate the functions of the energy input efficiency and the energy intensity efficiency, and measure their energy efficiencies for the reduction of greenhouse gases focusing on OECD countries. The efficiency of the traditional energy intensity was rarely connected with the energy efficiencies of the stochastic frontier function. It seems that the energy efficiency by the function of energy input efficiency sensitively responds to the order of GDP, capital stock, labor, and energy input quantity as explanatory variables. In the future, we need to reduce energy quantities by the optimal mix of inputs, and pursuit low-carbon economic growth through the production of the goods consuming small energy.

【Keywords】 Stochastic Frontier Function, Energy Efficiency, Energy Efficiency Function, Intensity Efficiency Function

* E-mail : smkang@pusan.ac.kr

** 이 논문은 2010년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회연구역량강화사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2010-330-B00087).

I. 서론

오늘날 우리나라는 널리 알려져 있는 바와 같이 세계 10위의 에너지 다소비 국가로서 사용 에너지의 96%를 해외에 의존해야 하기 때문에 매년 전체 수입액에서 에너지 수입액이 30% 이상을 차지한다. 특히 국제유가가 급등하면 경제성장률이 급격히 떨어지는 매우 불안한 경제를 가지고 있다. 뿐만 아니라 현 정부가 자발적으로 온실가스를 2005년 기준 배출전망치 대비 2020년까지 30% 감축을 발표한 이상 온실가스 감축은 우리가 구체적으로 달성해야 하는 국가적 과제가 되었다. 따라서 이러한 온실가스 감축과 에너지 부족 문제를 해결하면서 동시에 경제성장을 달성해야 하는 저탄소 녹색성장으로 나아가는 가장 중요한 수단이 바로 에너지효율 향상이다. 따라서 앞으로 우리의 에너지 효율향상과 에너지 절감을 통한 온실가스 감축노력은 더욱 강화될 것으로 보인다. 최근 유럽, 미국 등 주요 선진국의 경우도 자원부족과 온실가스 저감에 대비하기 위하여 에너지 원단위 절감을 통한 에너지 효율향상을 가장 주요한 목표로 삼고 있는 실정이다.

그런데 지금까지 대부분의 국가에서 온실가스 감축에 대비한 에너지 효율향상은 에너지원단위(energy intensity)를 개선하는 데 주로 초점을 두었다. 국가의 GDP에 대한 에너지소비량으로서 표시되는 에너지원단위는 각국에서 에너지효율성을 측정하는 대표적인 지표로서 사용되어 왔고 에너지정책을 시행할 때마다 에너지원단위 개선이 에너지효율화의 주요한 목표가 되었다. 그러나 에너지원단위는 각 경제단위가 처한 경제활동과 산업구조, 생산투입요소의 결합관계, 생산과정, 실제 에너지장비와 기술의 에너지효율성, 에너지가격 등 다양한 요소에 의하여 영향을 받기 때문에 실제적인 에너지효율을 보여주지는 못한다.¹⁾ 즉, 에너지원단위는 경제구조가 내포하고 있는 경제활동 상의 에너지효율을 보여주지 못하고 있다는 점에서 분명히 그 한계점을 지니고 있다. 일반적으로 부가가치 기준 에너지원단위는 물리적 에너지원단위의 변화 없이 단순히 해당재화의 부가가치 상승이 있을 경우 에너지 효율 개선으로 간주되는 문제가 있다.²⁾ 특히 과다한 에너지소비량을 가진 선진국이 상대적으로 높은 GDP수준으로 에너지원단위가 낮아져서 에너지 효율이 높은 것으로 간주되는 경향도 있다. 이처럼 단순

1) 에너지 사용량의 수준은 화석연료와 비화석연료의 비중, 제조업의 비중, 가정용 및 상업용 기기의 성능, 에너지절감 시설 및 건물, 교통이용수단, 사용자의 숙련도와 절감의지 등 다양한 경제활동의 내부적 요소의 산물이다. 뿐만 아니라 경제와 기업의 제도, 경제 및 에너지정책 등 외생적인 제도와 에너지 규제요소 등에도 의존하게 된다.

2) 본 연구에서 에너지 원단위는 에너지사용량을 투입으로 두고 산출물을 GDP로 둔 것으로 정의한 부가가치기준 원단위이다.

히 모든 경제활동의 결과물인 GDP와 에너지소비량의 비율인 에너지원단위를 가지고 국가의 에너지 정책을 수립하고 입안하는 것은 매우 부정확할 수 있을 뿐만 아니라 세부적인 정책을 수립하기도 어렵다.

이러한 에너지원단위의 문제점을 극복하고 보완할 수 있는 대안적인 에너지효율의 지표가 필요하다. 본 연구에서는 기존의 전통적 에너지원단위 뿐만 아니라 다른 대안적인 효율의 지표로서 생산프론티어에 기초한 에너지 효율과 에너지원단위의 효율 등 두 가지를 소개한다. 즉, 기존의 E/GDP 지표에 대응하는 E^*/E , $(E/GDP)^*/(E/GDP)$ 의 두 대안적인 지표를 제시하고자 한다.³⁾ 이후부터 에너지효율의 기준인 기존의 원단위는 에너지원단위로 언급하고 본 연구에서 생산프론티어에 기초한 원단위는 에너지효율함수, 원단위효율함수 등으로 명명한다. 따라서 본 연구의 목적은 OECD국가를 중심으로 에너지원단위 측정의 다른 방법으로서 에너지 효율함수와 원단위 효율함수의 추정을 통하여 에너지효율을 측정하는 것이다.

본 연구는 세부적으로 다음과 같은 문제의식에 대한 그 해답을 찾는 데 초점을 둘 것이다.

첫째, 기존의 에너지원단위와 확률변경함수에 의한 에너지효율함수와 원단위효율함수는 유사한가?

둘째, 에너지 효율에 영향을 미치는 주된 요인은 무엇인가?

에너지 효율의 측정에 있어서 생산프론티어 접근에 기초를 둔 기존연구는 지금까지 비모수적 접근방법인 자료포락분석(data envelopment analysis, DEA)을 이용한 것이 대부분이다. Boyd and Pang(2000)은 기업을 대상으로 생산성에 미치는 에너지 효율을 측정하는 바 있다. Mukherjee(2008a)는 미국의 주요지역의 제조업을 대상으로 에너지 효율을 측정하는 바 있고 Mukherjee(2008b)는 유사한 방법으로 인도의 주요지역 제조업에 대하여 에너지 효율을 측정하였다. 또한 Mukherjee(2010)는 인도제조업을 대상으로 성과지수와 효율변화지수 접근법에 기초하여 에너지 효율을 측정하는 바 있다. Ray et al.(2010)은 미국의 주별 제조업을 대상으로 에너지 절감의 네 가지 방향을 상호비교하여 제시한 바 있다. 국내적으로 자료포락분석의 비모수적 접근방법을 사용하여 에너지효율을 측정하는 것은 강상목·김해창(2011)이 있다. 그러나 이러한 DEA 접근은 에너지 비효율의 오차항과 임의오차(random error)의 오차항을 구분하지 않기 때문에 임

3) E^* 와 $(E/GDP)^*$ 는 각각 최소에너지량과 최소 에너지원단위를 의미한다.

의오차로 인한 비효율을 에너지 비효율로 간주하는 한계점을 갖고 있다.⁴⁾

반면 Boyd(2007)는 옥수수 생산시설을 대상으로 확률변경함수(Stochastic Frontier Function)를 사용하여 에너지 효율을 측정하였다. 그런데 그는 에너지투입량을 바로 직접 종속변수로 두고 에너지 투입량에 대한 횡단회귀모형으로서 확률변경함수를 사용하여 에너지 투입효율을 측정하고자 하였다.⁵⁾ 본 연구는 확률변경함수를 사용하되 에너지효율함수와 원단위효율함수를 추정하는 패널회귀모형을 사용하고자 한다. 확률변경함수를 사용하여 에너지효율함수의 유도과정을 통하여 투입효율함수를 제시하고 원단위효율함수를 패널회귀모형으로 추정한다는 점에서 Boyd(2007)와는 구별된다. 본 연구에서 제시한 에너지효율 함수를 유도하여 에너지 효율을 측정한 연구는 지금까지 존재하지 않고 확률변경함수를 에너지효율 측정에 적용한 연구는 거의 찾아볼 수 없을 정도로 매우 드문 실정이다. 그러므로 본 연구는 확률변경함수를 이용한 에너지 효율을 측정하는 방법을 제시하였다는 점에서 선행연구를 보완한다.

이하 II장에서는 확률변경함수에 기초하여 에너지 소비에 따른 에너지 효율함수와 에너지 원단위에 기초한 에너지원단위 효율함수를 소개할 것이다. 제III장은 확률변경함수에 기초한 두 에너지 효율모형의 추정회귀의 결과와 함께 에너지효율을 제시한다. 제IV장에서는 정책적 시사점을 포함한 결론을 맺는다.

II. 이론 모형

제시할 에너지효율의 이론 모형으로는 확률변경함수에 기초하여 에너지효율함수와 원단위효율함수에 의한 에너지효율을 측정하는 방법을 제시하고자 한다. 확률변경함수를 이용하면 에너지의 비효율적 이용이 있다는 것을 포함할 수 있다. 실제 각 국가나 개인의 에너지 이용은 항상 최소의 에너지량을 사용한다고 볼 수 없고 여러 가지 요인에 의하여 에너지의 과다투입과 낭비가 발생할 수 있다. 특히 이 확률변경함수에 기초하여 도출하는 에너지 효율은 생산활동에서 노동과 자본스톡 등을 동시에 고려하고

4) DEA는 다수의 산출물과 투입물을 포함하는 것이 가능하고 프론티어 형성에 볼록성(Convexity)가정을 제외한 어떤 가정도 하지 않기 때문에 함수설정의 오류 없이 효율성을 측정할 수 있는 반면에 측정오차를 기술비효율 오차에 포함시켜서 효율성을 측정하는 문제점이 있다. 이와 반대로 SFA(Stochastic Frontier Analysis)는 측정오차를 기술비효율 오차와 분리하는 장점이 있는 반면에 특정함수와 기술비효율 오차의 분포에 대한 가정을 해야 한다는 문제점을 갖는다.

5) Boyd(2007)와 같이 에너지 투입량을 바로 종속변수에 두고 설명변수를 통하여 회귀모형을 추정하는 경우 콥다글라스 함수 등과 같이 규모경제에 대한 제약을 포함할 수 없다.

이들과 에너지 투입량이 결합되어 생산활동이 이루어지는 것으로 간주하기에 지금까지 단순히 에너지효율을 GDP와 에너지투입량만에 의존하여 에너지원단위로 표시하는 것과는 차별성을 갖는다.

본 연구에서는 투입물지향 에너지효율함수와 원단위효율함수를 측정할 것이다. 전통적 생산함수와 구별되는 생산변경함수의 특징은 주어진 산출량에서 최소투입량을 초과한 실제 투입량의 존재를 받아들인다. 그때 최소투입물에 대한 실제 투입량의 비율은 고려된 요소투입물의 기술적 효율성을 보여준다. Farrell(1957)에 따라서 투입효율함수는 다음과 같이 정의된다.⁶⁾

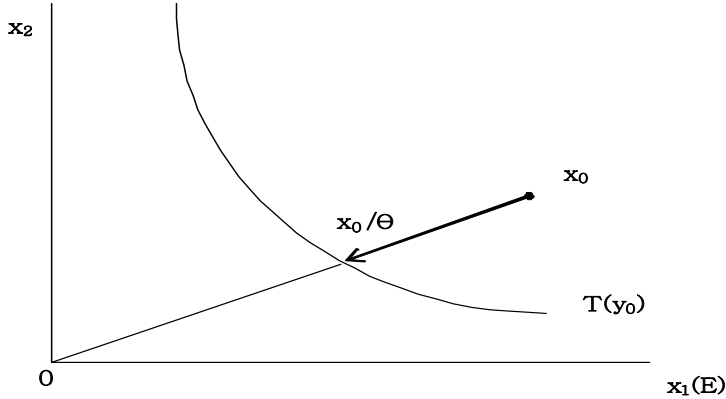
$$P(y, x) = \max \{ \theta : x / \theta \in T(y) \} \quad (1)$$

여기서 $P(y, x)$ 는 투입효율함수이고 $T(y)$ 는 주어진 투입물로 산출물을 생산하는 투입물 조건집합이다. y 는 산출물벡터로서 투입물벡터 x 를 사용한다. 거리함수 $P(y,x)$ 는 x 에 있어서 비체감적이고 양(+)⁶⁾의 선형 동질적이며 y 에 대하여 비체증적이다(Fare and Primont, 1995).

투입물 효율은 일정한 산출물을 생산하는데 실제 투입물과 최소투입물 간의 차이를 이용하여 효율을 측정하는 것으로 <그림 1>과 같다. 투입물집합 $T(y_0)$ 는 일정한 산출물을 달성하는 집합이다. 주어진 투입물벡터 x_0 에서 $P(y_0, x_0)$ 는 $T(y_0)$ 의 프론티어 위에 $x_0/P(y_0, x_0)$ 의 값이 위치한다. Fare and Grosskopf(1996, p.51)에 따라서 $1 \leq P(y, x)$ 이면 $x \in T(y)$ 이고 이는 투입효율함수가 투입물 조건집합의 내부에 있을 때는 효율함수가 1보다 작고 효율집합의 프론티어 상에 있으면 효율이 1의 값을 갖는다. 특히 여기서 투입효율함수는 투입된 모든 투입물이 원점을 향한 방사선을 따라서 프론티어 상에서 벗어난 정도를 측정한다.

6) 투입효율함수(input efficiency function)는 효율(θ)을 포함하고 있다는 점에서 단순히 요소 투입함수와 구별된다.

그림 1 투입물 프론티어 집합과 투입효율함수



투입효율함수를 추정하기 위하여 콤팩트 형태 of 생산함수를 사용하고자 한다. 식 (1)에서 정의된 투입효율함수의 확률적 오차를 고려한 형태는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(y, x) = f(x, y; \alpha) \cdot e^v \quad (2)$$

여기서 투입효율함수는 투입물과 산출물로 구성되어 있고 a 는 투입물과 산출물의 계수로서 추정해야 할 파라미터이다. v 는 측정오차와 통계적 오차를 의미하는 임의잔차 요소이다. 이는 독립적이고 동일하게 즉, $iid \sim N(0, \sigma_v^2)$ 로 분포한다. 생산이 프론티어 상에서 이루어질 때 투입효율함수는 1의 값을 갖게 된다. 식 (2)의 양변을 로그 취하여 로그함수로 전환하면 투입효율함수가 1의 값을 가질 때 좌변은 모든 관측치에 대하여 $\ln P(y, x) = \ln(1) = 0$ 이 된다. Fare and Primont(1995)와 같이 좌변의 효율함수가 0이 되는 문제를 피하기 위해서 효율함수에 대하여 투입물의 1차 동차함수의 특성을 부여할 수 있다. 즉,

$$P(y, kx) = k \cdot P(y, x) \quad (3)$$

투입요소로서 에너지투입량에 대한 투입효율을 측정하기 위한 모형으로 변형하기 위해서는 에너지투입량(E)과 같은 임의의 투입물을 선택하고 $k = 1/E$ 로 가정하면 다음이 성립한다.

$$P(y, x / E) = P(y, x) / E \quad (4)$$

식 (4)를 로그 취하면 다음과 같이 변형된다.

$$\ln(P(y, x) / E) = \ln P(y, x / E) = \ln f(y, x / E) + v \quad (5)$$

이를 정리하면 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$- \ln(E) = \ln f(y, x / E) + v - \ln P(y, x) \quad (6)$$

여기서 Coelli et al.(1998, p.184)에 의하면 관측될 수 없는 $\ln P(y, x)$ 를 기술비효율의 오차항인 식 (6)에서 u 로 대체하면 다음과 같은 에너지투입량에 대한 효율함수를 얻는다. 즉,

$$- \ln(E) = \ln f(y, x / E) + v - u \quad (7)$$

기술적 비효율 오차항(u)에 대해서는 확률변경함수에서 일반적으로 가정하듯이 u 는 양(+)이고 $N(0, \sigma^2 u)$ 인 정규분포를 한다고 가정한다. 전체의 오차항 $\varepsilon = v - u$ 하에서 u 의 조건분포에 기초한 투입물효율은 다음과 같이 기대치를 구할 수 있다.

$$P(y, x) = EP(e^u | \varepsilon) \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)은 Battese and Coelli(1992) 등 확률변경함수 추정에서 사용하는 최우 추정법(maximum likelihood estimation, MLE)을 통하여 추정을 할 수 있다.

실제 모형을 적용하기 위하여 생산활동은 하나의 산출물과 에너지(E)를 포함한 노

7) $-\ln P(y, x) = -u$ 의 양변을 다시 지수를 취하면 $\{P(y, x)\}^{-1} = e^{-u}$ 가 되고 e^{-u} 는 Farrell (1957)의 투입효율함수($P(y, x)$)와 역의 관계를 갖는 거리함수의 효율성(TE)이 정의된다.

동(L)과 자본스톡(K) 등 3개의 투입물로 구성된다고 가정하자. 구체적 추정모형으로는 투입효율함수를 위한 콥다글라스 함수형태를 가정한다. 즉,

$$\ln(P) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(L) + \alpha_2 \ln(K) + \alpha_3 \ln(E) + \alpha_4 \ln(GDP) + v - u \quad (9)$$

여기서 투입물과 산출물은 각 연도의 세 개의 투입물과 GDP를 사용하고 v와 u는 식 (7)에서 정의한 것을 적용한다.⁸⁾ 규모일정 불변의 콥다글라스함수를 가정하므로 세 개 투입물의 추정계수의 합은 1의 값을 갖는다. 즉,

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (10)$$

이는 투입물에 있어서 효율함수의 동차성을 보장한다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\ln(P) - \ln(E) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(L/E) + \alpha_2 \ln(K/E) + \alpha_4 \ln(GDP) + v - u \quad (11)$$

프론티어 기술이 추정되므로 투입효율함수 $\ln(P)$ 는 1과 동일하게 되고 식 (11)의 좌변은 $-\ln(E)$ 만 남는다. 결과적으로 생산기술집합의 프론티어를 추정할 최종모형은 다음의 형태가 될 것이다. 즉,

$$-\ln(E) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(L/E) + \alpha_2 \ln(K/E) + \alpha_4 \ln(GDP) + v - u \quad (12)$$

식 (12)는 에너지 투입함수에 확률적 요소를 결합한 일반형태인 식 (7)과 동일하다. 이를 이용하면 에너지에 대한 투입효율함수의 회귀추정식과 생산기술집합의 프론티어를 동시에 얻을 수 있다.

나아가 에너지원단위를 기준으로 한 효율함수를 추정하면 원단위 기준 효율을 측정

8) 식 (9)는 Boyd(2007) 등 수많은 기존 연구에서 효율성을 종속변수로 두고 설명변수로 산출량을 두는 일반적인 투입효율함수의 전형적인 형태이다.

할 수 있다. 이는 다음과 같은 추정식을 통하여 측정하고자 한다.⁹⁾

$$-\ln(E/GDP) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(L/E) + \alpha_2 \ln(K/E) + v - u \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 에너지 효율은 다르게 표시된다. 즉, 식 (12)의 에너지효율은 $\theta = E^*/E$ 로 표시되고 식 (13)의 에너지원단위의 효율은 $\theta = (E/GDP)^*/(E/GDP)$ 로 표시된다.¹⁰⁾ 따라서 에너지투입의 효율은 최소 에너지투입량에서 실제 에너지투입량이 벗어난 정도를 측정하는 반면에 에너지원단위에 기초한 효율은 최소 에너지원단위에서 실제 원단위가 벗어난 정도를 측정한다는 점에서 상이하다. 또한 전통적인 에너지원단위(E/GDP)는 회귀추정식의 최소치와의 비율이 아니라 단순히 실제 E/GDP로 측정한다는 점에서 앞선 두 가지 에너지 효율과 다르다.

한편 기술비효율 오차항 u 에 대한 분포는 Aigner, Lovell, and Schmidt(1977)와 같이 단측 정규분포(non-negative one side distribution)를 가정한다. 즉, 임의오차 v 가 $iid \sim N(0, \sigma_v^2)$ 로서 독립적이고 균등한 분포를 하는 것과 같이 기술비효율 오차항 u 도 v 와 독립적으로 균등분포하고 0에서 절단된 분포함수인 $iid \sim N(0, \sigma_u^2)$ 를 가정한다. u 는 기술적 비효율성에 수반되는 투입물의 과다투입의 정도를 나타내는 것으로 항상 양(+)¹¹⁾의 값을 갖는 것으로 가정한다. 따라서 Aigner, Lovell, and Schmidt(1977)은 확률변경함수의 로그우도함수(log-likelihood function)를 정의하고 이 우도함수를 두 개의 분산을 합친 총분산, $\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$ 과 $\lambda = \sigma_u/\sigma_v$ 으로 표현한 바 있다.¹¹⁾ Battes and Corra(1977)는 $\lambda = \sigma_u/\sigma_v$ 가 비율의 모든 값이 될 수 있다고 판단하여 0과 1 사이의 값을 갖게 되는 임의오차의 분산에 대한 기술비효율의 오차항의 분산의 비율인 $\Upsilon = \sigma_u^2/\sigma_v^2$ 를 사용하였다. Υ 는 0과 1 사이의 값을 갖게 되고 1에 가까울수록 기술비효율의 오차는 큰 값을 갖게 되고 반대인 경우는 그 오차가 작은 값을 갖게 된다. 즉, 기술적 비효율성은 Υ 의 값이 1에 가까울수록 증가한다. 반대로 0에 가까울수록 전체오차는 기술비효율 오차가 아닌 임의오차에 의한 것임을 의미한다.

9) 식 (13)의 좌변의 에너지원단위가 우변에 기술비효율 오차항을 포함하고 있기에 에너지원단위 효율함수로 간주된다. 물론 우변에 기술비효율 오차항이 없다면 이는 에너지원단위 함수가 될 것이다.

10) E^* 와 $(E/GDP)^*$ 는 추정 프론티어에서 최소에너지와 최소 원단위수준을 말한다.

11) 임의오차는 계량경제에서 널리 사용되는 오차의 개념이다. 기술비효율 오차는 전통적인 생산함수에서 산출물을 생산하는 투입물이 항상 최소화되지 않고 최소값보다 더 투입될 수 있다는 것을 전제로 한다. 기존의 임의오차는 추정선을 중심으로 오차가 양(+)과 음(-)의 값으로 분포가 되지만 기술비효율 오차는 실제값보다 추정선이 낮기 때문에 기술비효율 오차는 항상 양(+)의 값을 가진다. 두 오차는 독립적으로 분포한다고 가정한다.

특히 패널자료를 사용할 경우 기술비효율 오차에 시간의 변화를 고려해야 하므로 Battese and Coelli(1992) 모형에 따라서 기술비효율 오차항 uit 는 다음과 같이 가정한다.

$$u_{it} = \exp\{-\eta(t - T)\} \cdot u_i, i = 1, 2 \dots N, t = 1, \dots, T \quad (14)$$

식 (14)에서 uit 는 시간에 따라 변화하는 기술비효율성 오차의 변화를 의미하고 ui 는 시간이 고려되지 않은 기술비효율성 오차를 의미한다. η 는 기술적 비효율성의 변화율을 반영한 파라미터로 양(+)의 값을 가지면 기술비효율성이 시간변화에 따라 감소하는 반면, 음(-)의 값을 가지면 시간변화에 따라 증가한다.¹²⁾ 따라서 시간변수 t 를 포함할 경우 시간에 따른 에너지투입량의 효율성을 측정할 수 있다. $t = T$ 일 경우 $uit = ui$ 가 된다.

III. 실증 결과

실증분석에서는 이론모형에서 제시한 두 가지 함수에 기초하여 에너지 효율의 회귀 추정 결과와 에너지 효율수준을 각각 제시할 것이다. 실증자료는 OECD와 Penn world Table 6.3에서 제공하는 2001~2007년 기간 30개국의 투입물과 산출물 자료를 이용하였다.¹³⁾ 투입물은 노동과 자본스톡, 에너지투입량이다. 노동은 OECD 통계에서 제공하고 있는 총 노동자 수를 사용하였고 자본스톡은 Penn world Table 6.3에서 제공하고 있는 신규투자를 이용하여 30개 OECD 국가들에 대하여 영구재고법으로 추정하였다.¹⁴⁾ 에너지투입량은 석유환산톤으로 표시된 OECD 통계자료를 사용하였다. 산출물로는 OECD 국가의 GDP를 사용하였고 자본스톡, GDP 등 금액자료는 2005년 기준 가격으로 환산된 자료이다. 생산프론티어는 확률변경함수에 기초하여 에너지투입량과 에너지원단위를 종속변수로 두고 콥다글라스 생산함수형태로 회귀추정하였다. 본 연구의 콥다글라스 함수의 추정치는 모두 유의적이고 의미있는 결과를 보였으나 초월대수 함수의 추정치는 노동, 자본, GDP 변수들이 대부분 유의적이지 않아서 그 관계를 확인하기 어려웠다. 따라서 에너지 투입효율함수의 회귀추정에 콥다글라스 함수를 사

12) 기술효율성을 기준으로 보면 시간변화에 따라서 η 가 양(+)일 경우 기술효율성은 증가하고 음(-)일 경우 감소한다.

13) 멕시코는 missing value가 있고 시계열이 불규칙하여 제외되었다.

14) 영구재고법은 과거의 신규투자를 누적하고 자본스톡의 감가상각률을 적용하여 현재의 자본스톡을 추정하는 방법이다. 이를 위하여 초기자본 스톡은 초기 신규투자를 초기 일정기간 동안 신규투자의 평균성장률 및 감가상각률로 나누어 추정하였다.

용하였다. 확률 변경함수와 전통적 생산함수의 중요한 차이점은 전자는 주어진 산출량 수준에서 최소투입물과 실제 투입물을 구별함으로써 저감이 필요한 투입물의 수준을 보여주지만 후자는 두 값이 일치한다고 가정한다.

OECD 국가의 2001~2007년 간 패널자료를 가지고 에너지 효율함수를 회귀추정한 결과는 <표 1>과 같다. 본 연구에서는 에너지 투입에 영향을 미치는 요인으로 GDP, 노동, 자본 등의 밀접한 요인들의 관계를 확인하는 데 중점을 두고 있다. 추정결과는 모든 계수에서 유의적이고 적절한 부호로 나타났다. 추정결과에서 종속변수인 에너지 투입량 자체가 음수를 포함하고 있으므로 독립변수의 계수의 부호가 음(-)일 경우 에너지효율에 양(+)의 영향을 미치고 양(+)의 계수는 에너지효율에 음(-)의 영향을 미친다. 추정모형 중 OLS(ordinary least squares)모형은 기술비효율의 효과가 없다($u_i = 0$)고 가정하고 추정한 것이다.¹⁵⁾

표 1 에너지효율함수의 회귀추정결과

	OLS			MLE		
	계수	표준오차	t값	계수	표준오차	t값
C	11.676**	0.156	74.867	11.719**	0.270	43.414
ln(L/E)	-0.119**	0.027	-4.360	-0.212**	0.066	-3.198
ln(K/E)	-0.695**	0.030	-22.920	-0.584**	0.060	-9.722
ln(GDP)	-0.992**	0.007	-148.297	-0.990**	0.017	-56.670
σ^2	0.019			0.021**	0.005	4.317
γ				0.890**	0.018	49.900
u				0.272**	0.042	6.417
η (eta)				0.036**	0.009	4.020
로그우도값	118.922			277.193		
LR				316.540		
n	210			210		

주: 1) 우도비 검정의 검정통계량은 $LR = -2\{L(H_0) - L(H_1)\}$ 이며 여기서 $L(H_0)$ 와 $L(H_1)$ 는 OLS와 MLE추정치인 로그 우도값임. 즉, 이를 가지고 $\gamma = 0$ 라는 귀무가설과 $\gamma > 0$ 이라는 대립가설을 결정하게 됨.

2) **는 1% 수준에서 유의적임.

3) γ 는 임의오차와 기술비효율 오차의 분산의 비로서 이 값이 0가 되면 기술비효율의 분산이 0이 되고 $\mu(U_{it})$ 는 모형에서 제외되어야 함. 모두 기술비효율의 측정에 관련된 것으로서 이들이 모두 0가 될 때 남는 것은 OLS추정치가 됨. η (eta)는 기술비효율의 시간에 따른 방향을 결정하는 계수로서 실제 통계자료에 기초하여 시간의 변화에 따라 $\mu(U_{it})$ 의 값의 방향을 결정함.

15) OLS회귀를 사용할 경우는 기술비효율 오차를 고려하지 않기 때문에 기술효율을 측정할 수가 없다. 즉, γ , u , η 등은 모두 기술비효율이 존재할 때만 필요한 것이기 때문에 기술비효율 오차 자체를 전제하지 않는 OLS회귀에는 필요하지 않다.

따라서 기술비효율이 존재할 경우 OLS모형에서 포함된 3개의 독립변수의 탄력성은 편의가 없지만 상수항인 C와 분산은 편의가 존재하게 된다. 다만 OLS모형과 MLE (maximum likelihood estimation)모형의 비교를 통하여 독립변수들의 추정부호와 그 유의도를 참고로 할 수 있다. MLE모형은 이 로그우도값 중 가장 큰 값을 얻는 최우추정량을 얻기 위하여 OLS모형을 기초로 반복해서 추정하게 된다.¹⁶⁾ 따라서 OLS와 MLE 추정의 차이점은 기술비효율성의 존재유무이다. 기술비효율성이 존재하지 않는다는 귀무가설($H_0 : \gamma = \eta = 0$)이 채택된다면 생산변경함수에 기술비효율은 존재하지 않는다. 이 가설에 대한 검정통계량은 316.54로서 자유도 2의 χ^2 분포를 이루고 1% 유의수준(임계값 9.21)에서 기각되었다.

결과적으로 기술적 비효율성이 존재하고($\gamma \neq 0$) 기술비효율이 시간에 걸쳐서 변화($\eta \neq 0$) 함을 의미한다. 따라서 <표 1>의 추정결과에서 보듯이 추정계수는 모두 유의적이고 γ 와 η 는 각각 양(+)¹⁷⁾의 값을 보인다. 따라서 기술적 비효율성이 존재하고 그 비효율성이 매년 감소함을 의미한다. 그러므로 추정결과는 귀무가설인 $\gamma = 0$ 이 기각되고 MLE추정이 보다 적합한 것으로 나타났다.

에너지 비효율 요소를 고려할 수 있는 MLE모형을 기준으로 할 때 추정계수는 모두 유의적이고 기대한 부호를 나타내었다. 먼저 OECD 국가의 GDP는 에너지투입량과 양(+)¹⁸⁾의 방향으로 나타났고 GDP의 1% 증가는 0.990% 에너지소비 증가를 보여 가장 민감하게 반응한다. 에너지투입량에 대한 단위당 자본이 1% 증가할 경우 에너지투입량도 0.584% 증가하는 것으로 나타나서 자본스톡도 에너지투입량 증가에 민감하게 반응하였다. 에너지투입량에 대한 단위 노동량 역시 에너지투입량과는 양(+)¹⁹⁾의 관계를 보였다. 그러나 그 탄력성은 GDP와 에너지투입량에 대한 단위당 자본스톡보다는 떨어진다.¹⁷⁾ 추정모형의 분산은 0.021로 1% 임계수준에서 유의적이다. $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma_v^2$ 또한 유의적이고 0.890으로 1에 가까운 수준으로 나타났다. 즉, 전체 오차항은 거의 대부분 임의오차가 아닌 기술비효율 오차로 설명된다.

16) 추정을 위한 컴퓨터프로그램은 확률적 변경분석에 적합한 Frontier 41을 이용하였다. 회귀식에서 발생하는 임의오차(v_i)의 확률밀도함수($f(v_i), i=1, \dots, n$)들의 결합확률밀도함수는 n 개의 확률밀도함수의 곱으로 표시되는데 이 결합확률밀도함수의 값을 로그우도함수로 간주한다. OLS 회귀식 역시 로그우도함수를 갖는다. 이 로그우도함수의 값을 최대로 하는 회귀추정식의 계수와 그 분산의 값을 구하는 방법이 최우추정법이고 그때 구한 값을 최우추정치(MLE)로 간주한다.

17) 참고로 에너지 투입량과 노동과 자본스톡, GDP의 관계를 보기 위하여 단순히 에너지 투입량을 종속변수로 두고 노동과 자본스톡, GDP를 설명변수로 한 단순회귀결과는 다음과 같고 그 회귀계수는 모두 유의적이었다.

$\ln(E) = -8.129 + 0.310 * \ln(L) + 0.313 * \ln(K) + 0.287 * \ln(GDP)$

여기서 GDP의 1단위 증가는 0.287단위의 에너지수요를 유발한다.

이 MLE 추정에 기초하여 계측한 에너지효율함수의 결과는 <표 2>와 같다.¹⁸⁾ 2001~2007년간 평균 에너지효율은 2001년의 0.710에서 점차적으로 개선되어 2007년에 0.757로 향상되었다. 동 기간 에너지 투입량에 기초한 에너지 효율의 평균은 0.734이다. 에너지 효율이 가장 높은 국가는 룩셈부르크, 아일랜드, 영국, 노르웨이 등으로 나타났고 에너지 효율이 가장 낮은 국가로는 한국, 슬로바키아, 일본, 아이슬란드 등으로 나타났다.

표 2 에너지효율함수를 이용한 에너지효율 결과

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	평균
호주	0.725	0.733	0.741	0.749	0.757	0.764	0.771	0.749(12)
오스트리아	0.774	0.781	0.788	0.794	0.801	0.807	0.813	0.794(5)
벨기에	0.692	0.701	0.710	0.718	0.727	0.735	0.743	0.718(17)
캐나다	0.717	0.726	0.734	0.742	0.750	0.757	0.765	0.742(15)
체코	0.613	0.624	0.634	0.644	0.654	0.664	0.674	0.644(25)
덴마크	0.752	0.759	0.767	0.774	0.781	0.787	0.794	0.773(10)
핀란드	0.635	0.645	0.655	0.664	0.674	0.683	0.693	0.664(24)
프랑스	0.743	0.751	0.758	0.766	0.773	0.780	0.787	0.765(11)
독일	0.692	0.701	0.709	0.718	0.726	0.734	0.742	0.718(18)
그리스	0.763	0.770	0.777	0.784	0.791	0.797	0.803	0.784(8)
헝가리	0.688	0.697	0.706	0.715	0.723	0.731	0.739	0.714(20)
아이슬란드	0.579	0.590	0.601	0.612	0.622	0.633	0.643	0.611(27)
아일랜드	0.936	0.938	0.940	0.942	0.944	0.946	0.948	0.942(2)
이탈리아	0.723	0.731	0.739	0.747	0.754	0.762	0.769	0.746(13)
일본	0.555	0.567	0.578	0.589	0.600	0.611	0.621	0.589(28)
한국	0.519	0.531	0.542	0.554	0.566	0.577	0.588	0.554(30)
룩셈부르크	0.978	0.979	0.979	0.980	0.981	0.981	0.982	0.980(1)
네덜란드	0.765	0.772	0.779	0.786	0.793	0.799	0.805	0.786(7)
뉴질랜드	0.699	0.708	0.717	0.725	0.733	0.741	0.749	0.725(16)
노르웨이	0.819	0.825	0.830	0.836	0.841	0.846	0.851	0.835(4)
폴란드	0.686	0.695	0.704	0.712	0.721	0.729	0.737	0.712(21)
포르투갈	0.600	0.611	0.621	0.632	0.642	0.652	0.662	0.631(26)
슬로바키아	0.534	0.545	0.557	0.569	0.580	0.591	0.602	0.568(29)
슬로베니아	0.720	0.728	0.737	0.744	0.752	0.760	0.767	0.744(14)

18) 식 (12)와 식 (13)에 대한 회귀추정식인 <표 1>과 <표 3>의 MLE추정계수에 대하여 각 국가의 실제 설명변수의 값을 입력하면 최소 에너지 투입량과 최소 에너지 투입원단위가 도출되므로 이를 각 해당 국가의 실제 에너지투입량과 실제 에너지 원단위를 가지고 상대적 비율로 표시하면 각각의 에너지효율을 얻게 된다.

강상목

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	평균
스페인	0.690	0.699	0.708	0.716	0.725	0.733	0.741	0.716(19)
스웨덴	0.754	0.761	0.768	0.776	0.782	0.789	0.796	0.775(9)
스위스	0.660	0.670	0.679	0.688	0.697	0.706	0.715	0.68(22)
터키	0.648	0.658	0.668	0.677	0.687	0.696	0.705	0.677(23)
영국	0.871	0.876	0.880	0.884	0.887	0.891	0.895	0.883(3)
미국	0.771	0.778	0.784	0.791	0.798	0.804	0.810	0.791(6)
평균	0.710 (0.719)	0.718 (0.727)	0.726 (0.735)	0.734 (0.743)	0.742 (0.751)	0.750 (0.758)	0.757 (0.765)	0.734 (0.743)

주: 1) 제시한 에너지 효율은 Farrell(1957)의 효율로서 1에 가까울수록 효율적이고 0에 가까우면 비효율적임.
 2) 가로 평균의 괄호 안의 수치는 각국의 소득으로 가중한 수치이고 세로 평균의 괄호 안의 수치는 각국의 순위임.

특히 일본의 경우 전통적 에너지원단위는 매우 효율적인 것으로 알려지고 있으나 생산활동상에 노동, 자본, 에너지투입량과 산출량 간의 관계에서 나타나는 에너지효율 수준은 낮은 편에 속하는 것으로 나타났다. 일본은 높은 소득수준에 따른 에너지 소비가 많이 유발되는 것으로 알려져 있다.

에너지 효율이 앞선 국가들은 등량곡선 프론티어에서 프론티어 상의 투입량에 실제 에너지 투입량이 가장 가까이 위치하고 있음을 의미한다. 반면에 생산 프론티어에서 멀리 떨어져서 효율이 낮은 국가들은 동일한 GDP를 생산하는 데 다른 국가보다 과도한 에너지 투입이 이루어졌음을 시사한다.

다음으로 에너지 원단위효율함수의 추정결과는 <표 3>과 같다. <표 2>의 에너지효율함수의 추정결과와 마찬가지로 종속변수인 에너지원단위가 음수를 포함하고 있으므로 설명변수의 계수의 부호가 음(-)일 경우 에너지효율에 양(+)의 영향을 미친다. 추정모형 중 기술비효율의 효과가 없다고 가정하는 OLS모형의 경우에 에너지투입량에 대한 노동량과 자본소득의 1% 변화는 에너지 원단위를 각각 0.132%, 0.700% 증가시키는 것으로 나타났다. 기술비효율의 존재를 가정하는 MLE모형과 이를 제외하는 OLS모형 간의 보다 적합한 모형을 확인하기 위하여 기술비효율성이 존재하지 않는다는 귀무가설 ($H_0 : \gamma = \eta = 0$)을 검정해 본 결과, 이 가설의 검정통계량은 360.2로 자유도 2의 χ^2 분포를 이루고 1% 유의수준(임계값 9.21)에서 기각되었다. 따라서 이 경우도 기술비효율성이 존재하고($\gamma \neq 0$) 기술비효율이 시간에 걸쳐서 변화한다. ($\eta \neq 0$) 즉, γ 와 η 는 각각 양(+)의 값을 보이고 모두 유의적이다. 그러므로 MLE모형이 보다 적합하고 기술비효율성이 존재하며 그 비효율성이 매년 감소하는 것으로 나타났다.

표 3 원단위효율함수의 회귀추정결과

	OLS			MLE		
	계수	표준오차	t값	계수	표준오차	t값
C	-2.026**	0.105	-19.358	-2.218**	0.162	-13.691
ln(L/E)	-0.132**	0.026	-4.548	-0.242**	0.048	-4.425
ln(K/E)	-0.700**	0.028	-24.625	-0.533**	0.054	-9.898
σ^2	0.018			0.019**	0.007	2.886
γ				0.911**	0.030	29.926
u				0.236**	0.048	4.910
η (eta)				0.036**	0.006	6.287
로그우도값	127.223			307.322		
LR				360.198		
n	210			210		

주: 1) 우도비 검정의 검정통계량은 $LR = -2\{L(H_0) - L(H_1)\}$ 이며 여기서 $L(H_0)$ 와 $L(H_1)$ 는 OLS와 MLE추정치
 로그우도값임. 즉, 이를 가지고 $\gamma = 0$ 라는 귀무가설과 $\gamma > 0$ 이라는 대립가설을 결정하게 됨.

2) **는 1 %수준에서 유의적임.

전체 추정모형의 분산은 0.019로 유의적이었고 두 오차의 분산의 상대적 비인 $\gamma (= \sigma_u^2/\sigma_v^2)$ 는 0.911로 전체 표본 오차 중 기술비효율로 인한 표본오차가 임의오차보다도 더 큰 것으로 나타났다.¹⁹⁾ 이는 전체 오차 중 기술비효율의 오차가 거의 대부분의 설명력을 갖는다고 볼 수 있다. 기술비효율의 오차항의 계수도 0.236으로서 매우 유의적으로 나타났다. 이는 OECD국가 간에 기술비효율의 수준에서 유의적인 차이가 있음을 의미한다.

에너지 원단위효율함수의 MLE모형에 기초한 회귀계수는 모두 유의적이다. 에너지 투입량에 대한 노동의 1% 변화는 에너지원단위를 0.242% 증가시키고 에너지투입량과 자본스톡 간 상대적 비율의 1% 증가는 에너지원단위를 0.533% 증가시키는 것으로 나타났다.²⁰⁾

한편, 에너지원단위에 대한 MLE 회귀추정에 기초하여 추정함수의 프론티어상의 지점과 각 개별 국가의 실제 위치에서 에너지원단위를 비교하면 각 국가의 에너지원단위에 대한 에너지효율성을 <표 4>와 같이 얻을 수 있다.

19) 분산이 0이라는 귀무가설에 대한 검정결과를 t값으로 보여준다.

20) 에너지 단위 노동량과 자본이 원단위를 증가시키는 원인을 확인하기 위하여 상관분석을 실시한 결과, 종속변수의 원단위와 에너지 단위당 노동량과 자본스톡의 상관관계가 각각 0.497, 0.899인 데 반하여 원단위와 GDP의 상관관계는 0.250에 불과하고 에너지 단위당 노동 및 자본과 GDP의 상관계수는 각각 0.098, 0.229로 나타났다. 따라서 OECD국가의 경우 에너지 단위당 노동과 자본의 증가는 GDP에 미치는 효과보다도 원단위에 미치는 효과가 큰 것으로 보인다.

이때 에너지 효율은 생산활동에서 나타난 실제 에너지원단위와 최적 에너지원단위 간의 비율을 보여준다. 에너지원단위를 기준으로 한 2001~2007년간 평균 에너지효율은 2001년의 0.744에서 점차적으로 개선되어 2007년에 0.786으로 향상되었다. 즉, 국가별 에너지원단위의 효율수준이 수렴되고 있는 것으로 보인다. 동 기간 에너지원단위에 기초한 에너지효율의 평균은 0.766으로 에너지투입효율함수에 기초한 효율보다 높은 편이다.

에너지 효율이 가장 높은 국가는 룩셈부르크, 아일랜드, 영국, 노르웨이, 미국 등이고 에너지 효율이 가장 낮은 국가로는 슬로바키아, 한국, 아이슬란드, 일본 등으로 나타났다. 이전의 에너지 투입량 기준의 효율과는 그 값은 다소 상이하고 순위도 약간 차이가 있는 것으로 나타났다.

그런데 에너지 투입효율함수의 에너지효율과 비교해 볼 때, 대부분 국가의 에너지원단위 효율함수의 에너지효율은 향상되었고 비슷한 수준을 유지한 것으로 보이지만 예외적인 국가들도 없지 않다. 아이슬란드와 슬로바키아 등은 에너지원단위 효율함수의 에너지효율이 약간 감소하였다. 이들 국가들이 GDP가 다른 국가에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 프론티어에서 더 떨어진 것으로 보이고 룩셈부르크의 경우 두 결과가 차이가 없는 것은 생산 프론티어가 두 경우에 큰 변화가 없기 때문이다. 이와는 다르게 미국의 경우 두 효율이 크게 차이가 난다. 에너지원단위에 의한 효율이 0.848로 높아진 것은 미국의 높은 GDP로 인하여 에너지원단위가 낮아져서 다른 국가에 비하여 프론티어에 가까이 위치하기 때문으로 보이고 반대로 에너지 투입효율함수에 기초하면 에너지투입량이 높기 때문에 생산프론티어 상의 최소투입량에서 멀리 위치하여 나타난 현상으로 보인다.

그런데 이러한 생산변경함수에 의한 접근에서 유의해야 할 점은 에너지 효율은 생산활동에서 다른 투입물의 제약을 동시에 받는 것으로 가정하고 에너지 효율을 측정하고 있기 때문에 넓은 국토를 가지고 인구당 에너지를 많이 소비하는 미국, 캐나다, 호주, 뉴질랜드 등과 같은 국가의 에너지 효율이 다소 과대 평가될 가능성이 없지 않다. 만약 에너지 투입량이 노동과 자본스톡과 연계되지 않고 자유롭게 조절될 수 있는 상황이라면 프론티어 상의 최소에너지 투입량과 이들 국가의 실제 에너지 투입량은 큰 차이를 보일 것이므로 이들 국가의 에너지 효율은 아주 낮게 나타날 수도 있을 것이다.²¹⁾

21) 기준에 사용하고 있는 에너지원단위는 국가전체를 대상으로 에너지사용량과 GDP의 상대적 비로 표시하기에 GDP가 높은 선진국들이 에너지 사용량이 많음에도 불구하고 낮은 에너지원단위를 유지하고 있으나 인당 에너지 사용량은 절대적으로

표 4 원단위효율함수의 에너지효율 결과

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	평균
호주	0.762	0.769	0.776	0.783	0.790	0.797	0.803	0.783(14)
오스트리아	0.802	0.808	0.814	0.820	0.826	0.832	0.837	0.820(9)
벨기에	0.712	0.721	0.729	0.737	0.745	0.753	0.760	0.737(21)
캐나다	0.741	0.749	0.757	0.764	0.771	0.778	0.785	0.764(15)
체코	0.617	0.627	0.638	0.648	0.658	0.667	0.677	0.647(26)
덴마크	0.812	0.818	0.824	0.829	0.835	0.840	0.845	0.829(7)
핀란드	0.649	0.659	0.669	0.678	0.688	0.697	0.706	0.678(25)
프랑스	0.786	0.792	0.799	0.805	0.811	0.817	0.823	0.805(11)
독일	0.739	0.747	0.755	0.762	0.770	0.777	0.784	0.762(16)
그리스	0.816	0.822	0.828	0.833	0.838	0.844	0.849	0.833(6)
헝가리	0.719	0.728	0.736	0.744	0.752	0.759	0.766	0.743(20)
아이슬란드	0.580	0.591	0.602	0.613	0.623	0.634	0.644	0.612(28)
아일랜드	0.960	0.962	0.963	0.964	0.965	0.967	0.968	0.964(2)
이탈리아	0.807	0.813	0.819	0.825	0.830	0.836	0.841	0.824(8)
일본	0.615	0.626	0.636	0.646	0.656	0.666	0.675	0.646(27)
한국	0.544	0.555	0.567	0.578	0.589	0.600	0.611	0.578(29)
룩셈부르크	0.977	0.977	0.978	0.979	0.980	0.980	0.981	0.979(1)
네덜란드	0.785	0.792	0.798	0.805	0.811	0.817	0.823	0.804(12)
뉴질랜드	0.736	0.744	0.752	0.759	0.767	0.774	0.781	0.759(17)
노르웨이	0.852	0.856	0.861	0.866	0.870	0.874	0.878	0.865(4)
폴란드	0.693	0.702	0.711	0.719	0.728	0.736	0.744	0.719(22)
포르투갈	0.664	0.673	0.683	0.692	0.701	0.710	0.718	0.692(23)
슬로바키아	0.519	0.531	0.543	0.555	0.566	0.578	0.589	0.555(30)
슬로베니아	0.727	0.735	0.743	0.751	0.759	0.766	0.773	0.751(19)
스페인	0.776	0.783	0.789	0.796	0.802	0.808	0.814	0.795(13)
스웨덴	0.800	0.807	0.813	0.819	0.824	0.830	0.835	0.818(10)
스위스	0.730	0.738	0.746	0.754	0.761	0.769	0.776	0.753(18)
터키	0.662	0.672	0.681	0.690	0.699	0.708	0.717	0.690(24)
영국	0.918	0.921	0.924	0.926	0.929	0.931	0.934	0.926(3)
미국	0.858	0.833	0.839	0.844	0.849	0.854	0.858	0.848(5)
평균	0.744 (0.781)	0.752 (0.777)	0.759 (0.784)	0.766 (0.790)	0.773 (0.797)	0.780 (0.803)	0.786 (0.809)	0.766 (0.792)

주: 가로 평균의 괄호 안의 수치는 각국의 소득으로 가중한 수치이고 세로 평균의 괄호안의 수치는 각국의 순위임.

높고 에너지는 보다 비효율적으로 사용되는 경우가 많다. 에너지가 자본, 노동과 연계되지 않은 경우 비모수적 방법의 에너지 효율은 강상욱 김해창(2011)을 참조바란다.

한편, 이러한 생산변경함수를 이용한 두 가지 에너지 효율은 본 연구의 부록에 제시한 전통적인 에너지원단위(에너지사용량/GDP)와 일치 여부를 확인할 필요가 있다. 상이한 접근방법에 따른 에너지효율의 측정결과의 일관성을 확인하기 위하여 Kendall과 Spearman의 순위상관계수(rank correlation)를 OECD국가의 세 가지 에너지 효율에 각각 적용하여 비교한 결과는 <표 5>와 같다.

표 5 세 가지 에너지효율성의 순위상관분석

	에너지효율기준	원단위	에너지효율함수	원단위효율함수
Kendall	원단위	1.000	-0.394**	-0.425**
	에너지효율함수		1.000	0.813**
	원단위효율함수			1.000
Spearman	원단위	1.000	-0.478**	-0.572**
	에너지효율함수		1.000	0.942**
	원단위효율함수			1.000

- 주: 1) 관측치는 n = 30이고 순위상관은 OECD국가의 2001~2007년 평균치에 기초한 것임.
 2) **는 P < 0.01의 양측검정 결과임.
 3) Kendall의 순위상관계수(KRC) = (Nc - Nd)/(n(n-1)/2). n는 국가의 수이고 Nc는 각 기준의 순위가 일치한 쌍의 수이며 Nd는 일치하지 않는 쌍의 수이다.
 4) Spearman 순위상관계수(SRC) = 1 - {6*∑i(Si - Di)/n(n² - 1)}. 여기서 n는 국가의 수이고 Si는 첫 번째 기준에서 i 국가의 순위이며 Di는 두 번째 기준에서 I국가 순위이다.

먼저 Kendall 순위상관계수를 기준으로 OECD 국가에 대한 원단위와 에너지효율함수의 효율성 간에는 -0.394이고 에너지원단위와 원단위 효율함수의 효율성 간에는 -0.425로서 국가별 순위는 일관성이 낮았다. 반면 에너지효율함수와 원단위 효율함수 간에는 0.813의 높은 순위상관을 보였다. 이러한 결과는 Spearman 순위상관계수에서도 비슷한 추이를 보이고 있는데 그 결과치는 다소 높았다.

에너지 효율을 전통적 에너지원단위 기준에만 의존하여 판단할 때는 효율성에 대한 정확한 정보를 얻는데 한계가 있음을 유의해야 할 것으로 보인다. 이러한 차원에서 본 연구에서 제시한 실증결과를 전통적 원단위와 기존 연구로서 DEA를 사용한 강상목·김해창(2011)과 비교하고자 한다. 지면관계상 그 결과를 모두 제시할 수 없어서 에너지 효율이 높은 국가와 낮은 국가를 중심으로 <표 6>과 같이 정리하였다.

첫째, 원단위와 SFA 기준의 순위 상관은 <표 5>에서 제시한 바와 같이 Kendall의 순위상관계수에서 -0.394~ -0.425 정도로 낮고 SFA하의 두 기준인 에너지효율함수와

원단위효율함수는 매우 높은 순위상관을 보인다. 따라서 전통적인 원단위 접근과 본 연구의 SFA접근은 다소 상이한 결과를 보였다.

둘째, 방법론상에서 SFA의 기준과 DEA의 방사선 기준하의 에너지 효율은 유사한 결과를 보였다. 이는 에너지와 동시에 다른 투입요소인 노동과 자본 등을 동시에 축소해야 하기 때문에 특히 에너지를 많이 소비하는 미국과 캐나다 등이 높은 순위를 보였다. 반면 같은 DEA의 비방사 기준과 수평선 기준에서 미국과 캐나다 등이 낮은 순위를 보여줌으로써 두 국가가 실제 에너지 효율은 높지 않다는 것을 보여준다. 원단위 기준에서도 두 국가의 에너지 효율은 높지가 않았다.

표 6 세 가지 방법에 기초한 에너지 효율의 국가별 순위요약

유형		국가 순위	
원단위 기준	A	스위스(1), 아일랜드(2), 이탈리아(3), 그리스(4), 덴마크(5), 오스트리아(6), 영국(9), 룩셈부르크(11),	
	B	아이슬란드(30), 캐나다(29), 슬로바키아(28), 핀란드(27), 체코(26), 한국(25), 폴란드(24), 미국(23), 터키(19)	
SFA 기준	A	룩셈부르크(1), 아일랜드(2), 영국(3), 노르웨이(4), 오스트리아(5), 미국(6), 그리스(7)	
	B	한국(30), 슬로바키아(29), 일본(28), 아이슬란드(27), 포르투갈(26), 체코(25), 핀란드(24), 터키(23)	
DEA기준	방사선	A	영국(1), 룩셈부르크(2), 아일랜드(3), 터키(4), 미국(5), 폴란드(6), 스위스(7)
		B	한국(30), 슬로바키아(29), 일본(28), 아이슬란드(27), 핀란드(26), 체코(25), 포르투갈(24)
	비방사선	A	영국(1), 터키(2), 아일랜드(3), 룩셈부르크(4), 스위스(5), 폴란드(6), 이탈리아(7)
		B	아이슬란드(30), 캐나다(29), 핀란드(28), 한국(27), 슬로바키아(26), 체코(25), 미국(24)
	수평선	A	영국(1), 룩셈부르크(2), 아일랜드(3), 스위스(4), 이탈리아(5), 그리스(6), 노르웨이(7)
		B	아이슬란드(30), 슬로바키아(29), 핀란드(28), 캐나다(27), 체코(26), 한국(25), 미국(20)

- 주: 1) A는 효율이 가장 높은 국가, B는 효율이 가장 낮은 국가의 순위임.
 2) 괄호안의 숫자는 그 순위임.
 3) DEA접근의 순위는 멕시코를 제외한 순위임
 4) SFA는 본 연구의 결과이고 DEA는 강상목·김해창(2011)의 결과를 정리한 것임.

결과적으로 본 연구의 SFA 결과가 DEA의 비방사 기준, 수평선 기준 등과 다른 결과를 보인 것은 방사선 기준과 동일하게 노동과 자본 등 다른 투입요소를 동시에 줄이는 효율을 측정하는 반면에 이들 두 기준은 에너지를 추가로 줄이는 여지와 에너지만 줄

이는 방향으로 에너지 효율을 측정하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 <표 6>의 결과들을 종합하면 영국, 아일랜드, 룩셈부르크, 스위스 등은 모든 기준에서 효율이 높게 나타났다고 반면에 아이슬란드, 한국, 슬로바키아, 체코, 핀란드 등은 에너지 효율이 낮은 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 OECD국가를 중심으로 확률변경함수에 기초하여 생산과정에서 에너지 투입효율 함수와 에너지원단위 효율함수를 추정하고 에너지효율을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 접근방법은 투입물 최소화를 의미하는 경제적 효율성에 부합하는 다른 관점의 대안이 될 수 있음을 보여주고자 한 것이다. 특히, 본 연구는 전통적 에너지원단위와 확률변경함수에 의한 두 에너지 효율이 유사한지, 에너지투입변화에 영향을 미치는 주된 생산변수가 무엇인지 등을 실증적으로 확인하였다.

첫째, 기존의 전통적 에너지원단위와 확률변경함수에 의한 에너지 효율은 크게 연관되어 있지 않았다. 따라서 에너지 효율을 평가할 때 기존의 에너지원단위 기준은 생산 접근방식 등 여타의 에너지 효율 측정방법과 상호 보완적으로 사용될 필요가 있다.

둘째, 에너지원단위 기준과 확률변경함수 기준에서 에너지 효율이 높은 국가와 낮은 국가는 비슷하지 않다. 에너지원단위가 낮은 국가로는 스위스, 아일랜드, 이탈리아, 그리스 등이고 높은 국가는 아이슬란드, 캐나다, 슬로바키아, 핀란드 등의 순서이다. 그러나 생산변경함수 기준으로 에너지효율이 높은 국가는 룩셈부르크, 아일랜드, 영국, 미국 등이고 에너지 효율이 가장 낮은 국가로는 한국, 슬로바키아, 아이슬란드, 체코 등으로 나타났다.

셋째, 에너지 투입효율함수의 추정에서 에너지효율에 영향을 주는 변수는 GDP, 자본스톡, 노동, 에너지투입량의 순서로 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 이는 직접적인 에너지투입량 저감뿐만 아니라 GDP와 다른 투입요소의 변화를 통해서도 에너지 효율 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

실증결과를 한국의 관점에서 볼 때, 확률변경함수에 의한 한국의 에너지효율은 강상목·김해창(2011)의 자료포락분석에 의한 결과보다 약간 나쁘게 나타났다. 즉, 에너지 효율함수로 측정한 에너지 효율은 OECD국가 중 가장 낮게 측정되었다. 이것이 시사

하는 바는 생산프론티어 형성에서 특히 한국은 전체 오차 중 임의오차가 상대적으로 매우 적고 대부분 에너지비효율 오차가 전체 오차의 대부분을 설명하는 것으로 보인다.²²⁾ 에너지의 해외의존도가 매우 높은 우리나라가 다른 OECD국가에 비하여 에너지를 GDP증가에 효율적으로 사용하지 못하고 있다는 점은 선진국으로 진입하기 위해서는 해결해야 할 과제가 아닐 수 없다. 한국은 먼저 에너지 비효율 자체를 개선하기 위하여 범정부적으로 시행되고 있는 다양한 노력이 충실하게 실천되어야 할 것이다.

추가적으로 지적하고 싶은 것은 지금까지 한국은 에너지효율의 지표로서 에너지원단위(E./GDP) 기준에 너무 의존하여 에너지 효율의 성과를 평가해 왔다. 에너지원단위 기준은 에너지 저감보다는 상대적으로 GDP 증가를 통하여 원단위를 낮추려는 노력에 치중하게 하는 경향이 있을 수 있다. 즉, 이러한 단순지표에 의존할 경우 GDP와 에너지가 밀접히 연계되어 영향을 주고 받는 것을 소홀히 여기고 양적 성장을 추구하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 바와 같이 원단위 지표뿐만 아니라 다양한 보완지표를 통하여 에너지효율의 성과를 여러 관점에서 점검해 나가는 것이 필요하다. 특히 에너지 투입은 생산과정에서 노동과 자본 등 다른 투입요소 및 에너지 소비가 많고 적은 특정 산출물과 연계되어 있기에 다른 투입요소와 에너지가 결합되는 산업별 정보와 제품별 정보 등을 축적하여 투입요소 간 최적 결합을 통한 에너지 절감에 노력해야 할 것이다. 장기적이고 근본적으로는 단위당 에너지 소비가 작은 제품의 생산을 통한 생산성 향상 및 경제성장을 추구해 나가야 할 것이다. 즉, GDP증가에만 치우친 양적인 경제성장의 추구는 오히려 에너지효율을 악화시킬 수도 있으므로 GDP 성장에 보다 적은 에너지를 투입할 수 있는 산업의 업종과 제품의 생산과 소비를 위한 노력이 있어야 할 것이다. 이것이 우리가 추구하는 지속가능한 성장 내지 저탄소녹색 성장과도 부합하는 기본적인 실천 방향의 하나일 것이다.

본 연구의 한계로 에너지와 기술진보의 관계와 에너지와 GDP간의 내생성 문제 등을 다루고 있지는 않다. 이는 또 하나의 심층분석이 필요한 주제로서 향후과제로 남긴다.

22) 전체 오차는 임의오차와 에너지비효율 오차로 구성되어 있는데 국가에 따라서 상대적으로 임의오차가 큰 국가도 있고 에너지 비효율오차가 큰 국가도 있다. 한국은 전체오차의 대부분이 주로 에너지비효율오차로 나타났다는 것을 말한다.

참고 문헌

- 강상목, 김해창. 2011. “생산프론티어접근을 통한 에너지효율 비교: OECD국가를 중심으로.” 『자원·환경경제연구』 20(1): 33-60.
- Aigner, D., C.A.K. Lovell, and P. Schmidt. 1977. "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models." *Journal of Econometrics*, 6: 21-37.
- Battese, G.E. and G.S. Corra. 1977. "Estimation of a Production Frontier with Application to the Pastoral Zone of Eastern Australia." *Australian Journal of Agricultural Economics*, 21: 169-179.
- Battese, G.E. and T.J. Coelli. 1992. "Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data : With Application to Paddy Farmers in India." *Journal of Productivity Analysis*, 3: 153-169.
- Boyd, G.A. and J.X. Pang. 2000. "Estimating the Linkage between Energy Efficiency and Productivity." *Energy Policy*, 28: 289-296.
- Boyd, G.A. 2007. "Estimating the Distribution of Plant-Level Manufacturing Energy Efficiency With Stochastic Frontier Regression." Working Paper CES07-07. Duke University.
- Coelli, T.J., D.S. Pasado Rao, and G.E. Battese. 1998. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Springer.
- Coelli, T.J. and S. Perelman. 1996. "Efficiency Measurement, Multi-output Technologies and Distance Function : With Application to European Rails." Working Paper No.CREPP 96/05. University de Liege.
- Fare, R. and S. Grosskopf. 1996. *Intertemporal Production Frontiers : With Dynamic DEA*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Fare, R. and D. Primont. 1995. *Multi-output Production and Duality: Theory and Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Farrell, M. j. 1957. "The Measurement of Productivity Efficiency." *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(A): 253-281.
- Madal, S.K. and M.S. Madheswaran. 2010. "Energy Use Efficiency of Indian Cement Companies: A Data Envelopment Analysis." *Energy Efficiency*. forthcoming.
- Mukherjee, K. 2008a. "Energy Use Efficiency in U.S. Manufacturing : A Nonparametric Analysis." *Energy Economics*, 30: 76-96.
- _____. 2008b. "Energy Use Efficiency in the Indian Manufacturing Sector : An Interstate Analysis." *Energy Policy*, 36: 662-672.

- _____. 2010. "Measuring Energy Efficiency in the Context of an Emerging Economy : The Case of Indian Manufacturing." *European Journal of Operational Research*, 201: 933-941.
- Ray, S.C., K. Mukherjee, and L. Chen. 2010. "A Cost- Constrained Measure of Energy-Use Efficiency in U.S. Manufacturing : An Inter-State Comparison Using the Census of Manufacturing Data." Working Paper. University of Connecticut.