

물질균형접근에 기초한 생산단위의 지속가능성 계측*

강상목**

Measurement of Sustainability on Production Units based on Material
Flow Approach

Sang-Mok Kang**

부산대학교 경제학과(Dept. of Economics, Pusan National University)

제 출 : 2012년 10월 4일 수 정 : 2012년 12월 10일 승 인 : 2013년 3월 6일

국 문 요 약

본 논문의 목적은 물질균형접근에 기초하여 화석연료와 경제, 그리고 화석연료와 환경의 연계를 통하여 국가의 지속가능성을 측정하고자 함이다. 연구의 초점은 국가별로 경제와 환경 중 어디에 더 치중하고 있는지 확인해 보는 것이다. 대부분의 국가는 경제와 환경의 조화로운 성장을 외치고 있으나 거의 모든 국가가 환경보다는 경제성장에 치중한 것으로 나타났다. 그 중에서 지속가능성은 OECD그룹이 가장 낮고 저소득그룹이 가장 높다. 최근 온실가스로서 인한 지구온난화의 주범이 개도국과 후진국으로 알려져 있으나 오히려 선진국의 인당 온실가스 배출량이 높고 그로 인한 지속가능성은 훨씬 더 낮다는 것을 보여주고 있다. 따라서 온실가스 배출은 선진국이 보다 많은 책임이 있기에 배출저감도 선진국이 많이 부담하는 것이 필요할 것이다.

■ 주제어 ■ 전통적 접근, 물질균형접근, 지속가능성

Abstract

The purpose of this article is to measure sustainability of countries based on material flow approach by connecting fossil fuel vs. economy, and fossil fuel vs. environment, respectively. The focus of the article is to confirm where each country concentrates more between economic growth and environment. Even though most of countries exclaimed the growth harmonized between economy and environment, the empirical results proved that they had weight on economic growth over environment. Of three country groups, the sustainability in OECD countries was the lowest, whereas that of low income countries was the highest. It has been known that the main offenders of global warming are developing countries

* 이 과제는 2010학년도 부산대학교 교수 국외 장기파견 지원비에 의하여 연구되었음. (This work was supported by the Financial Supporting Project of Long-term Overseas Dispatch of PNU's Tenure-track Faculty, 2010.)

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

and backward countries, but emission of greenhouse gas per capita in OECD countries was higher and as a result, their sustainability was much lower than those of other countries. Accordingly, because the OECD countries have more responsibility for the emission of greenhouse gas, it is necessary that they have to bear a larger portion of emission reduction.

■ **Keywords** ■ Traditional Approach, Material Flow Approach, Sustainability

I. 서론

오늘날 인류는 지구환경질을 향상시키고 지구온난화의 진행을 억제하는 중요성에 많은 관심을 갖고 있다. 대다수는 지구온난화의 생태적 영향과 그 경제적 결과에 공동의 관심을 가지고 있는 한편 동시에 환경질을 향상시키는 노력이 국가 간에 초래하게 될 상이한 경제적 비용도 인식하고 있다. 1997년 교토의정서는 부속서 I에 속한 국가들이 공동적으로 온실가스를 감축하되 국가에 따라 차별적인 감축의무를 규정한 바 있고 이에 따라서 각 국가들이 감축목표에 따라 감축을 진행하여 왔다.

그러나 OECD국가를 비롯한 각국의 오염감축 노력이 실질적으로 지속가능한 성장에 부합하는 형태인지를 확인해 볼 필요가 있다. 지금까지는 지속가능한 성장을 평가할 수 있고 적용가능한 척도가 현실적으로 마련되지 못한 실정이다. 가령, Chambers et al.(1996), Chung et al.(1997), Fare et al.(2001), Weber and Domazlicky(2001), Jeon and Sickles (2004), Fare et al.(2006), Kumar(2006), Picazo-Tadeo and Prior(2009), Cuesta et al.(2009), Fare and Grosskopf(2010) 등은 바람직한 산출물인 GDP와 바람직하지 못한 산출물인 오염물이 동시에 생산되는 생산활동에서 오염저감노력은 생산목적의 투자를 오염저감 투자로 돌림으로써 경제적 비용을 수반하고 경제성장을 제약하는 상황이 발생하지만 다른 한편에서 오염저감은 오염피해의 감소로 편익이 증가하는 측면이 있음을 고려하여 생산의 기술효율과 기술변화를 측정하고자 하였다.

그런데 이들 기존연구는 지속가능성을 고려할 수 있는 근거로서 산출활동과 오염활동을 연계시켜서 지속가능성의 방향으로 경제와 환경을 통합한 성과지표들을 제시하고 있으나 생산단위의 지속가능성을 명시적으로 평가해 주지는 못하였다. 나아가 이들 전통적 접근방법의 주된 문제점은 생산활동에서 오염과 관련된 화석연료로 인한 에너지 사용과 온실가스 및 GDP 간의 인과관계를 직접 고려하지 못하고 포괄적으로 노동과

자본 등의 변수와 온실가스 및 GDP 간의 일정한 관계를 가정하고 분석함으로써 현실과 괴리가 있는 모델을 제시하고 있다. 또한 에너지를 제약조건으로 사용한 경우에도 온실가스 배출과 거의 무관한 비화석연료와 화석연료를 구분하지 않은 상태에서 온실가스와 연계시키는 문제점을 보여주었다.

본 연구에서는 이들과 다르게 물질균형접근에 기초하여 오염과 직접 연관된 화석연료를 바람직한 산출물 및 온실가스(CO₂)와 연계시켜서 개별 생산단위가 경제와 환경 중 어디에 치중된 성장을 하는지를 평가할 수 있는 모형을 제시하여 지속가능한 성장을 확인하고자 한다. 즉, 본 연구에서는 화석연료와 경제성장, 환경오염은 서로 밀접히 연계되어 있음을 인식하고 화석연료를 이용한 생산활동이 경제성장과 환경오염 중 어디에 보다 영향을 주는지를 살펴보고자 함이다.¹⁾ 특히 화석연료 사용과 온실가스 제약 하에서 경제성장을 달성하는 것이 과연 지속가능한 성장을 하고 있는지 여부를 화석연료의 경제생산성과 화석연료의 환경생산성을 통하여 측정해 보고자 한다.²⁾

따라서 본 연구의 목적은 물질균형접근에 기초하여 화석연료와 경제, 화석연료와 환경을 연계시킴으로써 지속가능성을 확인하는 것이다. 이를 위하여 생산과정 상에 여타 투입물이 주어진 상태에서 화석연료가 활성화될 때 GDP와 온실가스가 변화하는 수준을 파악하여 국가들의 지속가능성을 살펴볼 것이다.

특히 본 연구는 다음의 두 가지 척도를 통하여 지속가능성을 측정해 보고자 한다.

첫째, 선형프로그램을 통하여 경제지향 효율과 환경지향 효율을 각각 측정하고 이들을 연계시켜서 지속가능성 지수를 유도한다.

둘째, 화석연료의 한계산출량과 화석연료의 한계 온실가스 배출량을 각각 측정하여 이의 상대적 비를 이용하여 경제지향성과 환경지향성을 연계하여 한계지속가능성 지수를 도출한다.

이를 분석하기 위하여 본 연구에서는 선형계획법에 기초한 자료포락분석(Data Envelopment Analysis; DEA)을 활용하여 분석한다. 특히 물질균형흐름에 따라서 직접적으로 연계된 환경에 유해한 투입물인 화석연료와 온실가스를 저감하는 방향거리 함수(directional distance function)를 도입한다. 이론모형에서 일반적인 노동과 자본스톡, 비화석연료는 포함하되 온실가스에 미치는 직접적인 영향은 적으므로 이들 변수는

1) 환경문제가 대두되기 전에 에너지 사용은 경제성장과 밀접히 연계되어 있었지만 에너지 사용으로 인한 오염이 심각해지면서 에너지가 경제와 환경 중 어디에 더 밀접한 것인지에 대한 관심이 증대되었다.

2) 단순히 오염원단위(=오염배출량/GDP)에 기초할 경우 단위 산출당 오염배출량이 높고 낮은 수준은 판단할 수 있지만 그 생산단위가 경제와 환경 중 어디에 편향된 것인지 판단할 지속가능성의 근거는 제공하지 못한다.

직접 약처분 제약을 주지 않고 주어진 것으로 간주하였다. 그러나 본 연구에서는 생산의 기술구조를 바람직한 산출의 생산기술과 환경기술의 두 가지로 구분하고 환경기술을 통하여 화석연료, 온실가스 등 직접적인 관계를 갖는 변수에 제약을 가함으로써 보다 현실설명력이 높은 방법을 적용한다.

이하 제 II장에서는 이론 모형을, 제 III장에서는 실증분석을 위한 통계자료와 실증 결과를 제시하며 제 IV장에서는 정책적 시사점과 함께 결론을 맺는다.

II. 이론모형

본 연구는 Coelli(2007), Førsund(2009)와 같은 물질흐름접근(Material Flow Approach)에 따라서 투입물과 산출물 및 오염물이 물질적 균형 상태를 유지한다는 전제 하에 경제성과와 환경성과의 측정을 시도한다.³⁾ 바람직한 산출물과 오염물을 생산하는 생산단위의 효율을 이론모형화하는 최근의 접근은 바람직한 산출물과 투입물이 강처분되는 한편 오염물은 약처분되는 방향거리함수를 이용하는 것이다.⁴⁾ 이러한 방향성을 주는 접근법은 온실가스 배출과 같은 유해한 산출물이 존재하는 경우의 효율성 측정에 많이 사용되어 왔다(Jeon and Sickles, 2004; Arcelus and Arocena, 2005; Kumar, 2006). 방향거리함수를 사용하는 목적은 생산단위가 바람직한 산출물은 최대한으로 확대하고 오염물은 동시에 저감하는 방향으로 효율을 측정하는 것이다. 지금까지 이를 GDP와 환경오염 간의 관계에 적용할 때 오염을 줄이려면 생산프론티어를 따라서 GDP가 감소해야 한다고 주장됐다. 그러나 이러한 바람직한 산출물과 오염물 간 결합생산의 정확한 본질에는 많은 주의를 기울이지 않았다. 본 연구는 이러한 선행연구와는 다르게 생산기술의 대안적인 개념을 제시하고자 한다. 즉, 본 연구의 생산기술은 GDP와 오염물을 분리된 산출물로 다루고 이들이 특별한 투입물인 화석연료의 사용을 통하여 연결되어 있다고 본다.

두 산출물 (y , b)를 고려하자. y 는 바람직한 산출물이고 b 는 온실가스이다. 이들은 4개의 투입물(k , l , nf , ff)로 생산된다. k 는 자본, l 은 노동, nf 는 비화석연료, ff 는 석탄과 석유를 포함하는 화석연료이다. 생산에 관한 두 개의 생산가능집합이 다음과 같이

3) 기존연구에서 물질흐름접근은 물질균형접근(material balance approach)으로 언급되기도 한다.

4) 생산자가 산출물을 생산할 때 강처분은 투입물과 산출물 생산에 아무런 규제나 제약이 없는 상태를 말한다. 반면 약처분은 환경규제를 받아 에너지와 오염배출의 규제기준이나 목표를 준수해야만 하는 상태를 의미한다.

존재한다고 가정하자.⁵⁾

$$\begin{aligned} T_1 &= \{(k, l, nf, ff) : (k, l, nf, ff) \text{ produce } y\} \\ T_2 &= \{(ff, b) : ff \text{ produces } b\} \end{aligned} \quad (1)$$

T_1 에서 바람직한 산출물과 4개의 투입물은 강처분이 가정된다. 그러나 T_2 에서 투입물과 산출물의 한 쌍인 (ff, b) 는 약처분이 가정된다. 이러한 약처분을 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (ff, b) \in T_2 \rightarrow (\alpha \cdot ff, \alpha \cdot b) \in T_2, 0 \leq \alpha \leq 1, \text{ but} \\ \text{not } (ff, \alpha \cdot b) \in T_2, 0 \leq \alpha \leq 1, \text{ or } (\alpha \cdot ff, b) \in T_2, \alpha > 1 \end{aligned} \quad (2)$$

이는 b 와 ff 가 물질흐름관계에 있음을 가정한다. 화석연료 증가는 온실가스 배출량을 변화시킨다. 즉, 일정한 기술상태에서 화석연료 사용을 늘리면 온실가스는 증가할 수 밖에 없다. T_1 과 T_2 는 불록결합 관계를 갖는다. 따라서 전체 생산가능집합은 다음과 같이 표현된다.

$$T = \{(k, l, nf, ff; y, b) : (k, l, nf, ff; y) \in T_1, (ff, b) \in T_2\} \quad (3)$$

이처럼 생산의 기술구조가 산출량 생산의 기술과 환경기술로 구분된다고 가정한다. 나아가 이러한 기술구조 하에 물질균형접근을 도입하고자 한다. 기본적으로 물질균형 접근에 의하면 투입물과 산출물 및 오염물은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\theta_1 x = \theta_2 y + \theta_3 b \quad (4)$$

5) 식(1)에서 T_1 기술집합은 바람직한 산출물을 생산하는 일반적인 생산기술을 의미한다. 즉, 자본, 노동, 화석연료, 비화석연료 등 투입물을 사용하여 바람직한 산출물을 생산하는 생산집합을 표현하고 있다. 여기서 산출물을 생산하는 기술이 주로 활용되고 있다. 반면 T_2 기술집합은 오염의 처리하는 생산집합을 의미한다. 온실가스와 같은 오염물의 발생은 주로 화석연료의 사용으로 발생되므로 직접 관련된 화석연료 투입에 따라서 온실가스가 배출되는 상황에 기초하여 화석연료와 온실가스 조절에 관여하는 기술집합을 분리하여 제시한 것이다.

$$\text{단, } dy/dx = \theta_1/\theta_2 \geq 0, \quad dy/db = -\theta_3/\theta_2 \leq 0$$

식(4)에서 좌변은 투입물의 양이고 우변의 첫째항은 산출물, 두 번째항은 오염물이다. 각 변수의 계수는 일정하게 알려진 비율의 벡터이다. 즉, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각각 투입물이 생산활동에 투입될 때 낭비되는 부분을 제외하고 실제 순수하게 사용되는 비율을 의미한다.⁶⁾ 가령, 투입물 중 에너지의 경우 1차에너지가 생산활동에 바로 투입되는 것이 아니고 투입되는 최종에너지로 전환되기까지는 상실되는 부분이 존재한다. 따라서 생산활동에서 실제 투입된 투입물은 결과적으로 생산활동에서 일정한 산출물과 오염물로 남게 되고 총투입물과 총산출물(산출물+오염물)은 같은 양으로 존재하게 된다. 물질흐름의 특성상 식(2)에서 x 와 y, b 는 양(+)의 관계를 갖는 반면에 y 와 b 는 음의 관계를 갖는다.

본 연구에서는 물질균형접근에 기초하여 특히 화석연료와 연계된 산출생산성(y/ff)과 온실가스생산성(b/ff)의 관계를 유도한다. 이에 기초하여 각 국가의 경제활동에서 경제지향적 혹은 환경지향적인 생산활동을 하는지 측정해 보고자 한다. 이를 위하여 본 연구는 두 가지 방법을 통하여 경제지향성 혹은 환경지향성 여부를 측정하고자 한다. 경제지향성은 식(3)의 생산기술 T_1 에 기초하여 도출하고 환경지향성은 생산기술 T_2 에 기초하여 도출하게 된다.

이러한 시도를 위하여 식(4)를 변형하면 다음과 같이 투입물의 산출생산성에 관한 형태로 간단히 변형이 가능하다. 즉,

$$y/x = \theta_1 / \theta_2 - (\theta_3 / \theta_2)b/x \tag{5}$$

식(5)에서 x 를 화석연료로 가정하면 화석연료의 산출생산성은 화석연료의 오염생산성과 음(-)의 관계를 갖게 됨을 알 수 있다. 즉, 화석연료의 오염생산성이 증가할수록 화석연료의 산출생산성은 저하됨을 시사한다. 다시 말하여 오염의 증가는 산출물의

6) 물질균형접근법이 전제하는 질량보존의 법칙에 따라서 투입되는 자원은 생산과정에서 생산되는 산출물과 그 잔여분인 오염물로 남게 된다. 즉, 투입되는 자원량은 산출물과 오염물로 구성되고 그 양은 궁극적으로 같기 때문이다. 따라서 식(4)에서 각각의 θ 변수는 사용비율로서 일정하고 산출량과 오염량은 반비례관계를 가지게 되는 것이다. 즉, 생산단위의 기술구조에 의하여 투입된 자원은 산출량에 일정부분 배분되고 그 나머지는 오염물로 배분될 것이다. 만약 기술수준이 개선되어 일정 투입자원이 산출량에 흘러간다면 오염물은 적게 발생한다. 여기서 이들 간의 전환계수가 일정하다고 가정하므로 선형으로 표시한 것이다.

증가를 제약하게 됨을 의미한다.⁷⁾ 식(4)의 양변을 각각 미분하게 되면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$d(y/x) = -(\theta_3 / \theta_2)d(b/x) \text{ or } d(b/x) = -(\theta_2 / \theta_3)d(y/x) \quad (6)$$

식(6)의 좌변 $d(y/x)$ 는 화석연료의 한계생산 내지 한계생산성을 의미하고 우변의 $d(b/x)$ 는 화석연료의 한계 온실가스 배출 내지 한계 오염생산성을 의미한다.⁸⁾ 따라서 균형에서 둘 간에 화석연료의 한계 오염생산이 증가할수록 화석연료의 한계 산출생산은 감소하고 그 역이 성립한다.

이상과 같이 산출물과 화석연료 그리고 온실가스와 화석연료의 관계는 그림 1, 그림 2와 같다. 일반적으로 화석연료가 증가하면 산출물과 온실가스는 증가하게 되고 화석연료 투입이 일정 수준에 이르면 산출물과 오염물은 일정 수준을 유지하게 된다. 이는 전통적인 경우에서나 물질균형접근에서 모두 동일하게 유지된다. 그러나 산출물과 오염물의 관계는 전통적인 경우와 물질균형접근에서 상이하다. Fare et al.(1989, 1997)에서 보듯이 그림 3의 전통적 경우는 결합생산과 약처분에 의하여 산출물과 오염물은 비례관계를 갖는 것으로 가정하였다. 그러나 식(4)와 같은 물질균형접근에서 산출물과 오염물의 관계는 반비례관계를 갖게 되므로 산출물과 온실가스의 관계는 그림 4와 같이 표시될 수 있다.⁹⁾

7) 그러나 현실의 경제에서는 에너지 투입이 증가하더라도 산출물과 오염물이 동시에 증가하는 경제도 있지만 산출물만 증가하고 오염물은 감소하거나 산출물은 감소하고 오염물만 증가하는 경제형태도 발생할 수 있다. 전자는 일반적인 경제의 경우이고 후자의 두 사례는 특별한 경우를 의미한다, 즉, 선진경제처럼 앞선 오염방지기술이 갖추어져 산출 증가에도 오염은 보다 저감하는 경제시스템을 갖출 수 있고 반대로 후진경제처럼 산출은 증가시키지 못하고 오염물만 발생시키는 경우도 존재할 수도 있다.

8) 물론 화석연료의 한계산출생산은 증가할수록 바람직하지만 화석연료의 한계 온실가스배출생산은 감소할수록 바람직하다.

9) 물질균형접근이 전통적 접근과 다른 주된 차이점은 전통적 접근이 투입물이 일정하게 가정한 상태에서 산출물과 오염물이 비례관계를 갖는다고 가정하는 반면에 물질균형접근은 그러한 투입물 일정의 가정없이 투입물을 산출물과 오염물을 연계시킨다는 점이다. 즉, 전통적 접근은 투입물 일정 하에 y와 b의 비례관계를 전제하지만 물질균형접근은 x의 변화를 포함시킨다는 점이다.

그림 1 산출물과 화석연료의 관계

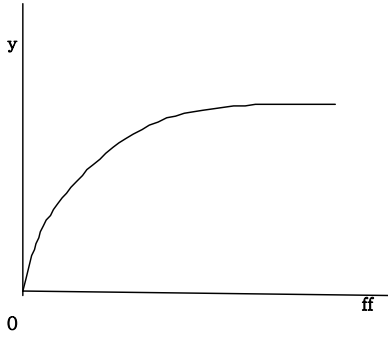


그림 2 온실가스와 화석연료의 관계

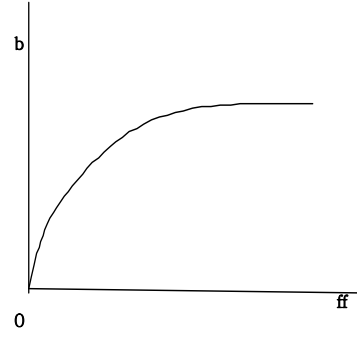


그림 3 산출물과 온실가스의 전통적 관계

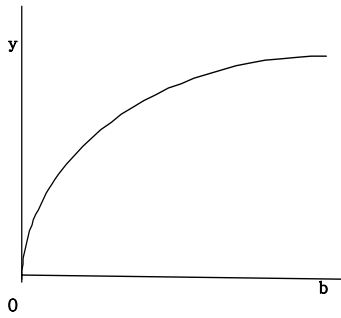
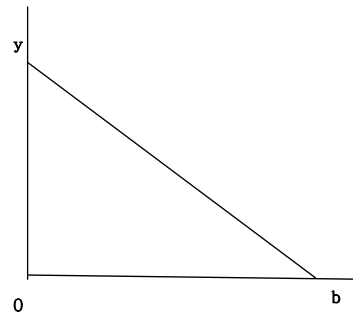
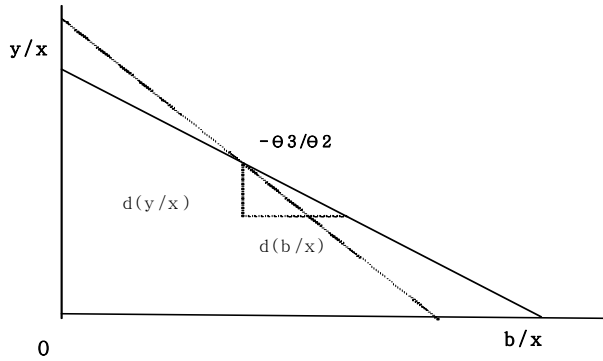


그림 4 산출물과 온실가스의 MFA 관계



이러한 물질균형접근에서 y 와 b 의 관계를 고려하여 식(5)와 (6)을 이용하면 단위 화석연료의 한계생산과 한계 온실가스 배출을 그림 5와 같이 표현할 수 있다.

그림 5 단위 화석연료의 한계생산과 한계 온실가스 배출



이는 화석연료의 산출생산과 온실가스 배출이 반비례관계에 있음을 의미하고 이들의 한계생산 역시 동일한 상태에 있음을 보여준다. 따라서 y/x 를 종축에 둘 경우 곡선의 기울기는 $-\theta_3/\theta_2$ 가 되고 이는 $d(y/x)/d(b/x)$ 와 동일한 값을 갖는다. 곡선의 기울기는 개별 국가가 처한 산출물과 오염물의 기술구조에 의하여 결정되는 것으로, 단위 투입물(화석연료)당 산출물과 단위 투입물당 오염물의 교환비율이 국가별로 다르다면 그 기울기는 다르게 나타날 것이다. 이러한 교환비율이 크고 작음을 기초로 해서 그 국가의 지속가능성을 판단해 볼 수도 있을 것이다. 가령, 화석연료의 단위당 투입이 가져오는 추가적인 산출량과 추가적인 온실가스 배출 가운데 보다 높은 것에 따라서 지속가능성 여부는 결정될 수 있다.¹⁰⁾ 따라서 이러한 물질흐름접근의 이론적 기초에 입각하여 본 연구는 두 가지 형태의 경제성과와 오염성과를 기초로 OECD국가의 경제지향성과 오염지향성을 비교 분석하고자 한다.

첫째, 전통적인 방향거리함수를 기초로 경제지향적인 생산효율과 오염지향적인 생산효율을 각각 측정하여 이들 두 가지를 연계한 지속가능성 지수를 정의하여 비교한다.

둘째, 단위 에너지 증가가 초래하는 생산의 증가(한계산출)와 온실가스의 증가(한계 온실가스배출)를 각각 측정하고 이를 연계하여 한계 지속가능성 지수를 정의하여 비교한다.

10) 투입자원이 동태적 관점에서 증가할 때 산출물과 오염물의 절대량은 증가하지만 산출과 오염의 교환비율은 일정하기 때문에 이는 동태적 관점에서도 유지되는 가정이다. 즉, (그림 2)에서 투입자원 x 가 증가하면 기술구조에 의해 결정되는 기울기(산출과 오염 간의 교환비율)는 일정한 상태로 산출량과 오염량이 동시에 증가하게 된다. $(y = (\theta_1/\theta_2)x - (\theta_3/\theta_2)b)$ 뿐만 아니라 지속가능성 관점에서 그 교환비율이 바뀌더라도 일정 투입자원이 그 바뀐 교환비율에 따라서 산출과 오염으로 가기 때문에 동태적 관점에서도 적용이 되는 것이다.

본 연구는 기존의 Chung, Färe, and Grosskopf(1997)와 Färe, Grosskopf, and Pasurka(2001)와는 다르게 일반 노동과 자본, 비화석연료는 그대로 둔 채 화석연료와 온실가스 배출이 동시에 제약을 받고 이 두 요소가 직접 연결된 모형을 설명하기에 적합한 방향거리함수를 정의하고자 한다. 이 방향거리함수는 경제적 관점에서 산출량과 화석연료가 밀접히 연계되어 있을 뿐만 아니라 환경적 관점에서 온실가스와 화석연료도 밀접히 연계되어 있음을 보여줄 수 있다. 먼저 경제적 관점에서 산출물과 화석연료에 관한 방향벡터를 $g = (+g_y, -g_{ff})$ 라 두면 산출량을 증가시키고 동시에 화석연료를 감소시키는 방향거리함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{D}_V(k, l, nf, ff, y, b : +g_y, -g_{ff}) = \max \{ \beta : (y + \beta \cdot g_y, ff - \beta \cdot g_{ff}) \in T \} \quad (7)$$

식(7)에서 y 는 인당 GDP, b 는 인당 온실가스, k 는 인당자본, l 은 인당노동, nf 는 인당 비화석연료투입량, ff 는 인당 화석연료투입량을 의미하고 T 는 개별 그룹의 기술집합을 표시한다. 이 방향거리함수는 가변규모 하에서 산출량은 증가시키고 화석연료는 저감하는 방향거리함수의 효율을 측정한다.¹¹⁾

다음으로 환경적 관점에서 화석연료와 온실가스가 직접적으로 연계되어 있음을 보여주는 것이 필요하다. 이러한 방향거리함수를 위한 방향벡터를 $g = (-g_{ff}, -g_b)$ 라 두면 화석연료와 온실가스 배출을 동시에 저감하는 방향거리함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{D}_V(k, l, nf, ff, y, b : -g_b, -g_{ff}) = \max \{ \rho : (b - \rho \cdot g_b, ff - \rho \cdot g_{ff}) \in T \} \quad (8)$$

식(8)은 가변규모의 생산기술이 온실가스와 화석연료에 연계되어 이들을 동시에 저감하는 방향으로 효율을 측정한다. 물론 이러한 방향거리함수의 효율은 0이면 효율적이고 관측치는 프론티어 상에 위치하는 반면에 0보다 크면 비효율적이고 프론티어 내부에 위치한다.

11) 규모에는 불변규모와 규모체중 및 체감을 포함하는 가변규모가 있다. 즉, 규모경제를 불변규모로 가정하지 않고 규모체중 혹은 체감이 될 수 있는 상태를 가정한 것이다.

이와 같이 방향거리함수를 이용하면 화석연료와 연계된 경제적 효율성과 온실가스 효율성을 측정할 수 있다. 이를 위하여 물질균형접근에 입각하여 다른 투입물은 일정하게 둔 채 에너지에 연계된 경제지향적 생산효율과 환경지향적 생산효율을 도출하는 선형프로그램을 제시하면 각각 다음과 같다.

<p>(a) 경제지향 효율성</p> $ \begin{aligned} & \text{Max}_{s.t.} \quad \beta \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \beta) y_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = b_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = (1 - \beta) ff_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, \end{aligned} $	<p>(b) 환경지향 효율성</p> $ \begin{aligned} & \text{Max}_{s.t.} \quad \rho \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq y_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \rho) b_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = (1 - \rho) ff_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\ & \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, \end{aligned} \tag{9} $
---	---

식(9)의 (a)는 경제지향 효율성을 도출하는 선형프로그램이고 (b)는 환경지향 효율성을 도출하는 선형프로그램이다. 두 선형 프로그램은 각각 가변규모 하의 효율성을 측정하고 있다. 온실가스와 화석연료의 등호는 온실가스와 화석연료의 제약 하에 생산활동이 이루어지고 있는 현실을 반영하고 있다. (a)와 (b)에서 도출된 경제효율성(β)과 환경효율성(ρ)을 이용하면 개별 국가의 경제활동이 경제적 효율성 혹은 환경효율성에 편향된 것인지를 평가하는 척도로 사용할 수 있다. 우리는 여기서 이러한 상대적 비율을 지속가능성장의 수준으로 정의한다. 그런데 방향거리함수에 기초한 효율의 상대적 비는 분모가 0의 값을 가질 경우 정의되지 않을 수 있으므로 이를 일반적 효율로 전향해서 상대적 효율로 표시하면 다음과 같다.

$$SUS = \frac{\bar{D}_b + 1}{\bar{D}_y + 1} = \frac{\rho + 1}{\beta + 1} \quad (10)$$

식(10)의 β 와 ρ 는 0에 가까울수록 효율적임을 의미하므로 지속가능성장(SUS)의 평가는 그 값이 1보다 작아야 한다. 1보다 클 경우 환경비효율이 경제비효율보다 더 크기 때문에 상대적으로 지속가능성장은 낮다고 말할 수 있다. 만약 식(10)이 1보다 작다면 환경비효율이 경제비효율보다 작기 때문에 바람직한 상태라 할 수 있다. 나아가 ρ 와 β 가 0이라면 경제적 관점에서뿐만 아니라 환경적 관점에서 효율적인 생산단위이고 지속가능성 지수는 1의 값을 갖는다. 이는 경제와 환경 관점에서 균형잡힌 성장을 하는 것으로 간주될 수 있다. 결국 SUS는 1보다 작은 값을 가지면 지속가능성으로 간주될 수 있다.

두 번째 방법으로 화석연료의 한계산출(한계산출생산성)과 화석연료의 한계 온실가스 배출(한계 온실가스 배출 생산성)을 기초로 경제지향성과 오염지향성을 측정하고 이를 기초로 지속가능성을 평가할 수 있다. 한계 지속가능성은 화석연료의 추가 사용에 따른 한계산출과 한계 온실가스 배출의 증가가 초래하는 지속가능성의 한계변화를 살펴보고자 하는 것이다. 여기서는 앞선 방법과 일관성을 유지하기 위하여 화석연료의 한계산출과 한계 온실가스 배출을 도출하기 위한 선형프로그램을 통하여 이를 추정하고자 한다. 이를 위한 두 선형프로그램을 설정하면 식(11)과 같이 표시할 수 있다. 식(11)의 (a)는 화석연료의 한계산출($d(y/ff)$)을 도출하기 위한 것이고 (b)는 화석연료의 한계 온실가스배출($d(b/ff)$)을 도출하는 프로그램이다. (a)에서 화석연료를 ff_0 에서 \bar{ff} 수준으로 일정수준만큼 증가시킬 때 다른 투입물 조건은 주어진 상태에서 산출량이 변화하는 정도(y^{**})를 측정할 수 있다. 이는 최초의 화석연료수준에서 도출한 최대산출량(y^*)과의 차이를 구하면 화석연료의 한계생산을 도출할 수 있다. 마찬가지로 (b)에서 화석연료를 일정 수준으로 증가시킬 경우 다른 투입물 조건이 일정한 상태에서 온실가스가 최대로 증가하는 정도(b^{**})를 측정하게 된다. 여기서 도출한 b^{**} 를 최초의 화석연료수준에서 도출한 최대배출량(b^*)과 비교하면 화석연료의 한계 온실가스 배출량을 측정할 수 있다. 이를 간단히 표현하면 화석연료의 한계변화가 초래하는 한계산출량의 증가와 한계 온실가스 배출량의 증가 중 어느 것이 더 크게 변화하는지를 확인하는 것과 같다.

(a) 화석연료의 한계산출

$$\begin{aligned}
 y^{**} &= \underset{s.t.}{\text{Max}} \quad y \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j &\geq y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j &= b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j &= \overline{ff}_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j &\leq nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j &\leq k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j &\leq l_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j &= 1, \lambda_j \geq 0,
 \end{aligned}$$

(b) 화석연료의 한계 온실가스 배출

$$\begin{aligned}
 b^{**} &= \underset{s.t.}{\text{Max}} \quad b \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j &\geq y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j &= b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j &= \overline{ff}_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j &\leq nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j &\leq k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j &\leq l_0 \\
 \lambda_j &\geq 0,
 \end{aligned} \tag{11}$$

따라서 식(11)의 (a)와 (b)를 이용하여 한계산출과 한계 온실가스 배출을 구할 수 있고 이들의 상대적 비를 이용하여 동일하게 지속가능성을 측정해 볼 수 있다.¹²⁾ 실제 $d(y/ff)$ 와 $d(b/ff)$ 를 측정하면 그 값이 0이 되는 경우가 발생하기 때문에 식(10)의 지속가능성 지수와 동일하게 0을 기준으로 하지 않고 1을 기준으로 환산하여 제시하고자 한다. 가령, 그림 1과 그림 2에서 생산곡선의 수평부분에서는 한계생산과 한계 온실가스배출이 0이 될 수 있어서 지속가능성 지수의 값을 가지지 못할 수 있다. 그러므로 한계개념에 기초한 지속가능성은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{SUS}(m) = \frac{d(b/ff)+1}{d(y/ff)+1} \tag{12}$$

12) 한계산출과 한계 온실가스 배출을 각각 분리해서 볼 경우 한계 지속가능성의 수준을 객관적으로 판단하기 어렵기 때문에 두 가지를 결합하여 하나의 지수로 전환하는 것이다. 가령, 한계산출이 높더라도 한계 온실가스 배출이 더 높다면 한계지속성은 높을 수 없다. 반면에 한계산출이 낮더라도 한계 온실가스 배출이 더 낮다면 한계지속성은 높을 수 있다.

식(12)에서 화석연료의 한계산출이 한계 온실가스 배출보다 크다면 즉, $SUS(m) > 1$ 이라면 지속가능하지 못하다고 볼 수 있고 반대로 화석연료의 한계산출이 한계 온실가스 배출보다 작다면 즉, $SUS(m) < 1$ 이면 지속가능한 것으로 간주할 수 있다. 그러므로 한계 지속가능성 지수가 1보다 클수록 한계산출보다 한계 온실가스 배출량이 크고 지속가능성이 낮다. 반면 그 지수가 1보다 작으면 화석연료의 단위증가에 따른 산출증가가 온실가스 배출증가보다 크므로 지속가능성이 높다고 볼 수 있다.

Ⅲ. 자료 및 실증결과

실증의 목적은 물질균형분석에 기초하여 화석연료의 투입량이 산출량과 이산화탄소 배출량으로 구성되는 상황을 가정하고 생산활동 상에 화석연료 투입을 통한 경제성장과 온실가스 배출 가운데서 각 국가가 어디에 보다 치중하였는지 확인하고자 함이다. 이는 산출량과 직접적인 연계가 없는 온실가스를 산출량과의 보완관계로 보는 기존연구와는 상이하다. 이를 위하여 화석연료의 제약처분 하에서 경제지향 효율과 온실가스 효율을 기초로 지속가능성을 측정하고 나아가 화석연료의 한계 산출과 한계 온실가스 배출을 이용한 한계 지속가능성을 측정할 것이다.

본 연구에서 사용한 통계자료의 출처는 표 1과 표 2에서 알 수 있듯이 2000년과 2007년의 83개 국가의 인구, GDP(실질), 자본스톡, 화석연료사용량, 비화석연료사용량, 노동력, 이산화탄소배출량 등이다. 83개 국가의 수는 통계자료가 공통적으로 이용 가능한 국가들이다. 이들 통계 중 인구, GDP, 자본 스톡 등은 Penn World Table 6.3에서 얻었다. 자본스톡은 Penn World Table 6.3에서 국가별 신규투자를 이용하여 영구재고법으로 추정하였다. 화석연료사용량, 비화석연료사용량, 이산화탄소 배출량 등은 International Energy Statistics에서 얻었고 노동력의 총고용량은 International Labor Organization에서 얻었다. GDP와 자본스톡, 제조업의 부가가치 등은 2005년 기준년도 가격으로 환산하였고 모든 변수는 인구수로 나누어서 사용하였다. 83개 국가는 World Bank의 국가별 소득수준에 따른 분류에 기초하여 OECD국가, 중·고(High-middle) 소득국가, 저(Low)소득국가의 세 그룹으로 구분하였다.

표 1 사용된 통계자료

변수	정의	출처	단위
GDP	실질 국내총생산	Penn World Table 6.3	1000\$
Capital(K)	자본스톡 영구재고법으로 추정	Penn World Table 6.3 New Investment	1000\$
Labor(L)	노동스톡	International Labor Organization(total employment)	1000명
Fossil Fuel(FF)	화석연료 에너지소비량	International Energy Statistics	quadrillion Btu
Non-Fossil(NF)	비화석연료 에너지소비량	International Energy Statistics	quadrillion Btu
Population(P)	인구	Penn World Table 6.3	1000명
CO ₂	이산화탄소배출량	International Energy Statistics	Million Metric Tones

표 2 83개 국가 통계자료의 요약

		GDP/P	CO ₂ /P	K/P	L/P	FF/P	NF/P
		(1000\$)	(metric ton)	(1000\$)	(number)	(million BTU)	(million BTU)
2000	평균	16.3	6.6	44.1	0.4	94.6	25.5
	표준편차	12.0	5.6	37.2	0.1	81.5	53.9
	최대	63.4	26.7	158.1	0.6	376.9	322.4
	최소	1.8	0.2	1.9	0.2	3.6	0.0
2007	평균	19.8	7.3	52.7	0.4	103.1	28.2
	표준편차	14.4	6.9	44.5	0.1	102.9	66.8
	최대	77.8	38.1	202.1	0.6	656.3	501.5
	최소	2.2	0.3	2.1	0.3	4.9	0.0

먼저 식 (8)과 (9)에 기초하여 83개 국가들의 지속가능성을 2000년과 2007년을 기준으로 측정된 결과는 표3과 같다.¹³⁾

13) 2000년과 2007년 사이 중간연도의 결과는 지면 관계상 다 제시할 수 없고 전체를 평균하여 제시하기보다는 두 연도의 기간 동안 차이에 초점을 두었다.

표 3 경제지향 효율성과 환경지향 효율성을 통한 지속가능성 결과

그룹	국가	2000			2007		
		경제지향	환경지향	지속성	경제지향	환경지향	지속성
OECD	Australia	0.000	0.000	1.000	0.0758	0.8293	1.700
	Austria	0.044	0.201	1.150	0.1680	0.4710	1.259
	Belgium	0.106	0.526	1.379	0.1933	0.5499	1.299
	Canada	0.060	0.620	1.529	0.1955	0.6841	1.409
	Czech Republic	0.072	0.677	1.565	0.1436	0.7948	1.570
	Denmark	0.078	0.296	1.202	0.1232	0.7051	1.518
	Finland	0.070	0.542	1.442	0.1595	0.6841	1.452
	France	0.030	0.000	0.971	0.1532	0.0000	0.867
	Germany	0.054	0.447	1.373	0.1725	0.6523	1.409
	Greece	0.003	0.313	1.308	0.1006	0.6777	1.524
	Hungary	0.223	0.489	1.218	0.2975	0.0000	0.771
	Iceland	0.000	0.000	1.000	0.0883	0.7133	1.574
	Ireland	0.000	0.000	1.000	0.1435	0.4928	1.305
	Italy	0.064	0.164	1.094	0.2168	0.2692	1.043
	Japan	0.102	0.382	1.254	0.2181	0.5616	1.282
	Korea, South	0.172	0.597	1.362	0.2865	0.4545	1.131
	Luxembourg	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Mexico	0.184	0.512	1.278	0.2867	0.5389	1.196
	Netherlands	0.046	0.516	1.449	0.1206	0.8109	1.616
	New Zealand	0.152	0.517	1.317	0.2035	0.6906	1.405
	Norway	0.000	0.000	1.000	0.0895	0.0408	0.955
	Poland	0.000	0.000	1.000	0.1200	0.8038	1.611
	Portugal	0.120	0.441	1.286	0.2331	0.5092	1.224
	Slovakia	0.225	0.679	1.370	0.2283	0.7019	1.386
	Slovenia	0.066	0.590	1.491	0.0867	0.6722	1.539
	Spain	0.057	0.294	1.225	0.1929	0.6020	1.343
Sweden	0.040	0.331	1.281	0.1695	0.3368	1.143	
Switzerland	0.000	0.000	1.000	0.1566	0.1503	0.995	
Turkey	0.145	0.675	1.463	0.1531	0.4375	1.247	
United Kingdom	0.081	0.357	1.255	0.2038	0.4941	1.241	
United States	0.000	0.512	1.512	0.1260	0.7262	1.533	
High-middle	Barbados	0.000	0.000	1.000	0.0440	0.3209	1.265
	Croatia	0.200	0.651	1.376	0.1249	0.6696	1.484
	Cyprus	0.000	0.207	1.207	0.0000	0.0000	1.000
	Hong Kong	0.000	0.000	1.000	0.0316	0.2313	1.194
	Israel	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Macau	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Malta	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Puerto Rico	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Saudi Arabia	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Singapore	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Taiwan	0.000	0.634	1.634	0.0000	0.0000	1.000
	Trinidad and Tobago	0.000	0.831	1.831	0.0000	0.0000	1.000

물질균형접근에 기초한 생산단위의 지속가능성 계측

그룹	국가	2000			2007		
		경제지향	환경지향	지속성	경제지향	환경지향	지속성
	Algeria	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Argentina	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Brazil	0.131	0.227	1.084	0.0403	0.2027	1.156
	Bulgaria	0.153	0.847	1.602	0.0255	0.7919	1.747
	Chile	0.094	0.332	1.218	0.1610	0.4930	1.286
	Colombia	0.098	0.250	1.139	0.1160	0.3636	1.222
	Costa Rica	0.000	0.000	1.000	0.1529	0.2968	1.125
	Cuba	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Dominican Republic	0.093	0.379	1.262	0.1964	0.5151	1.266
	Jamaica	0.080	0.620	1.499	0.1814	0.8183	1.539
	Malaysia	0.236	0.220	0.987	0.2173	0.6582	1.362
	Mauritius	0.000	0.000	1.000	0.0493	0.3751	1.311
	Panama	0.114	0.698	1.524	0.1368	0.7733	1.560
	Peru	0.000	0.000	1.000	0.0695	0.2797	1.197
	Romania	0.205	0.794	1.488	0.1508	0.7822	1.549
	Russia	0.231	0.859	1.510	0.2556	0.8410	1.466
	Saint Lucia	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	South Africa	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Uruguay	0.000	0.000	1.000	0.0747	0.2596	1.172
	Venezuela	0.247	0.608	1.289	0.1639	0.8224	1.566
	Belize	0.128	0.531	1.357	0.2452	0.6676	1.339
	Bolivia	0.031	0.136	1.102	0.0000	0.0000	1.000
	China	0.003	0.058	1.054	0.0000	0.6750	1.675
	Egypt	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	El Salvador	0.062	0.242	1.170	0.1316	0.3705	1.211
	Guatemala	0.025	0.107	1.080	0.1232	0.3094	1.166
	Honduras	0.040	0.225	1.177	0.1948	0.5703	1.314
	India	0.000	0.000	1.000	0.0079	0.0516	1.043
	Indonesia	0.093	0.503	1.374	0.1790	0.6255	1.379
Low	Morocco	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Nicaragua	0.070	0.351	1.263	0.0121	0.0586	1.046
	Pakistan	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Paraguay	0.044	0.067	1.022	0.0279	0.0837	1.054
	Philippines	0.031	0.200	1.164	0.0356	0.1281	1.089
	Sri Lanka	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Syria	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Thailand	0.199	0.473	1.229	0.2080	0.7608	1.458
	Tunisia	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
	Vietnam	0.000	0.000	1.000	0.1462	0.4655	1.279
	Bangladesh	0.000	0.000	1.000	0.0000	0.0000	1.000
Mean	OECD	0.071	0.344	1.251	0.165	0.518	1.308
	High-middle	0.059	0.255	1.177	0.068	0.297	1.202
	Low	0.036	0.145	1.100	0.066	0.238	1.153
	Overall	0.058	0.262	1.186	0.104	0.365	1.230

2000년의 경우 방향거리함수에 기초한 전체 국가의 경제적 효율성은 0.058이고 온실가스 효율성은 0.262이며 지속가능성은 1.186으로 나타났다. 즉, 전체 국가의 경제적 효율을 0.058 개선할 잠재력이 있는 반면에 온실가스 개선잠재력은 0.262로서 훨씬 더 크므로 경제적 측면의 비효율보다도 환경측면의 비효율이 더 크다는 것을 의미한다. 지속가능성이 1보다 큰 것은 전체 국가에서 생산활동이 환경지향적(환경친화적)이기보다는 경제지향적인 방향으로 진행되었음을 의미한다. 즉, 지속가능성이 1이면 경제적 비효율과 환경적 비효율이 동일하지만 1보다 크면 환경적 비효율이 경제적 비효율보다 크다는 것을 의미한다. 따라서 대부분의 국가들이 경제와 환경의 조화로운 성장 내지 경제와 환경의 지속가능한 성장을 주장하였으나 현실에서는 환경보다는 경제에 치중한 성장을 지향한 것으로 보인다. 이를 세 그룹으로 구분하여 보면 OECD 국가의 경제효율성(비효율성)이 가장 낮고(높고) 저소득 국가의 경제효율성(비효율성)이 가장 높(낮)았다.¹⁴⁾ 반면 세 그룹 중 OECD 국가의 환경효율성(비효율성)은 가장 낮(높)았고 저소득 국가의 환경효율성(비효율성)은 가장 높(낮)았다. 따라서 OECD 국가의 지속가능성은 OECD가 가장 낮은 반면에 저소득 국가의 지속가능성이 가장 높게 나타났다.

이러한 2000년의 추이는 2007년에도 거의 동일하다. 경제효율성보다 환경효율성이 더 나빠져서 지속가능성 지수는 전반적으로 1.186에서 1.230으로 악화되었다. 이는 전체 국가들이 환경보다는 경제에 중심을 둔 성장을 지향하였음을 시사한다. 역시 OECD 국가의 지속가능성이 1.308로 가장 나쁘고 후진국의 지속가능성이 1.153으로 가장 좋았다. 이러한 지속가능성 지수의 결과는 OECD 그룹이 경제와 환경의 지속가능성을 추구했다고 하나 실제 경제성장은 경제에 치우친 방향으로 진행되어왔음을 시사한다. 또한 선진국의 지속가능성 지수가 더 나쁘게 나타났으므로 선진국들이 자주 언급하였듯이 선진국보다 저개발국과 개도국들이 환경을 더 훼손하는 경제성장을 하고 있다는 주장은 설득력이 없다고 볼 수 있다.

세 그룹 내부의 국가별로 지속가능성을 살펴보면 2000년 기준으로 대부분의 국가는 지속가능성 지수가 1보다 크게 나타나서 대부분 경제와 환경 가운데 경제에 치중된 성장을 한 것으로 간주된다. OECD 국가에서 지속가능성 지수가 좋은 국가는 프랑스, 스위스, 룩셈부르크, 노르웨이, 아이슬란드, 아일랜드, 폴란드, 호주 등이고 지속가능

14) 방향거리함수의 효율성은 0에 가까울수록 효율적이고 0에서 멀수록 비효율적이다.

성이 나쁜 국가의 순서는 체코, 캐나다, 미국, 슬로베니아, 네덜란드, 핀란드 등으로 나타났다.¹⁵⁾ OECD국가에서 프랑스는 유일하게 지속가능성 지수가 1보다 낮아 경제보다 환경지향적인 성장을 한 것으로 나타났다. 중·고소득국가에서 지속가능성 지수가 좋은 국가는 OECD국가보다 더 많은 편에 속하고 아주 나쁜 국가들로는 트리니다드토바고, 대만, 파나마, 러시아, 자메이카, 루마니아 등으로 나타나고 있다.¹⁶⁾ 저소득 국가들 대부분은 상대적으로 지속가능성 지수가 양호한 편이고 다소 나쁜 국가들도 다른 두 그룹 국가의 안 좋은 국가들보다는 양호한 편에 속한다. 결과적으로 저소득국가에 속한 그룹이 상대적으로 경제효율과 환경효율이 가장 좋고 지속가능성 또한 가장 양호하게 나타났다.¹⁷⁾

2007년 기준으로 지속가능성 지수를 살펴보면, OECD 국가 중 지속가능성이 좋은 국가들은 헝가리, 프랑스, 노르웨이, 스위스, 룩셈부르크 등이다. 이들 중 룩셈부르크를 제외하면 네 국가 모두 지속가능성 지수가 1보다 작아서 환경효율이 경제효율보다 상대적으로 좋다. 반면 지속가능성 지수가 나쁜 국가들로는 호주, 네덜란드, 폴란드, 체코, 슬로베니아, 아이슬란드, 미국, 덴마크, 핀란드 등이다. 이 중 호주, 폴란드, 아이슬란드 등은 2000년에는 지속성 지수가 좋았으나 2007년에 이르러 크게 악화되었다. 그 주된 원인은 2000년에 비하여 2007년에 화석연료 사용량이 상대적으로 크게 증가함에 따라서 온실가스도 상당히 증가하였으나 소득증가는 그에 상응하게 증가하지 않았기 때문이다. 그런데 캐나다를 비롯하여 OECD국가 중에는 2000년보다 2007년에 화석연료 사용이 감소하고 온실가스가 감소한 국가들이 적지 않음을 고려하면 호주의 화석연료 사용증대와 온실가스 배출증가는 큰 차이를 보인다.

다음으로 2007년 중·고(High-middle) 소득그룹에서 지속가능성 지수가 좋은 국가들로는 이스라엘, 사우디아라비아, 싱가포르, 대만, 트리니다드토바고 등 여러 국가가 있다. 그 중 대만과 트리니다드토바고가 2000년에 지속가능성 지수가 아주 나빴으나 2007년에 좋아진 이유를 살펴보면 대만은 2007년에 화석연료를 2000년 수준 이하로 절감하였기에 온실가스도 크게 감소하였으나 트리니다드토바고는 2000년의 소득

15) 독일이 그렇게 좋지 못한 이유는 다른 유럽국가에 비하여 독일 산업구조에서 제조업의 비중이 상대적으로 높아서 화석연료 사용량이 높기 때문으로 보인다.

16) 이들 중 대만은 제조업, 특히 에너지 다소비 제조업의 비중이 높고 러시아는 석탄 등 화석연료에 대한 의존도가 너무 높은 등 이들 국가들은 산업구조가 에너지를 많이 사용하는 형태이거나 에너지 중 화석연료를 많이 소비하는 형태의 국가들이다.

17) 이는 물질균형접근에 기초하여 화석연료와 산출량, 화석연료와 온실가스에 중점을 둔 효율을 측정하기에 기존의 전통적으로 사용하던 경제효율과 환경효율과는 상이한 형태임을 유의해야 할 것이다.

수준에 대비하여 과도한 화석연료와 온실가스 배출로 인하여 좋지 않게 나타났다. 지속성 성과가 나쁜 국가로는 불가리아, 파나마, 루마니아, 자메이카, 러시아 등 2000년과 비슷한 국가들이 대체로 유사하게 나타났다. 저소득국가 중에서 상대적으로 지속가능성 지수가 안 좋은 국가로는 중국, 태국, 인도네시아 등이다. 중국은 연 9% 이상의 빠른 경제성장을 추구하는 가운데 2000년에 비하여 2007년에 화석연료를 약 두 배가량 증가시킴에 따라서 온실가스의 두 배 이상 증가를 초래하였으나 경제효율은 변화가 없고 환경효율은 크게 악화되었다. 인도네시아, 태국 역시 소득수준에 비하여 화석연료의 과다투입과 온실가스의 과다배출로 인하여 경제효율보다 환경효율이 좋지 않았다. 요컨대 이들 국가에서는 경제개발을 위한 산업화가 한창 진행되고 있고 산업구조는 주로 제조업 중심이며 그 중에서도 오염집약적인 산업의 비중이 높을 뿐만 아니라 주된 에너지원으로 석탄 등의 화석연료를 주로 사용하기에 여타 국가의 소득수준에 대비하여 화석연료와 온실가스 배출량이 높게 나타나고 있다.

다음으로 식(10)과 식(11)에 기초하여 83개 국가들의 한계 지속가능성을 2000년과 2007년을 기준으로 측정한 결과는 표 4와 같다. 이는 화석연료의 단위 증가가 초래하는 산출과 온실가스 배출의 증가량을 각각 측정한 것이다. 한계지속성이 있으려면 한계산출은 높은 반면 한계 온실가스 배출은 낮아야 하고 이런 경제가 지속가능한 경제로 간주할 수 있다. 따라서 한계지속성 지수는 한계 산출과 한계 온실가스 배출이 동시에 높더라도 한계 산출수준이 보다 높다면 낮을 수 있다.

표 4 한계 산출과 한계 온실가스에 기초한 한계 지속가능성 결과

국가	2000			2007		
	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성
Australia	0.219	13.885	12.211	0.747	1.114	1.210
Austria	0.299	2.629	2.794	0.545	6.837	5.072
Belgium	0.310	3.323	3.299	0.500	12.482	8.991
Canada	0.237	6.844	6.340	0.587	11.204	7.691
Czech Republic	0.339	4.335	3.983	0.687	0.632	0.968
Denmark	0.300	4.299	4.076	0.632	3.994	3.060
Finland	0.319	2.153	2.391	0.585	5.263	3.951
France	0.263	0.000	0.792	0.282	0.000	0.780
Germany	0.328	1.196	1.653	0.567	5.842	4.367
Greece	0.369	6.380	5.390	0.720	1.842	1.653
Hungary	0.261	5.451	5.117	0.489	1.204	1.480

물질균형접근에 기초한 생산단위의 지속가능성 계측

국가	2000			2007		
	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성
Iceland	0.346	7.576	6.373	0.682	0.993	1.185
Ireland	0.433	0.338	0.934	0.483	7.320	5.610
Italy	0.248	4.112	4.096	0.284	8.925	7.727
Japan	0.303	6.372	5.659	0.529	8.541	6.241
Korea, South	0.278	7.003	6.263	0.512	13.261	9.431
Luxembourg	0.433	0.000	0.698	0.961	0.000	0.510
Mexico	0.280	5.243	4.879	0.509	11.793	8.480
Netherlands	0.189	3.378	3.681	0.677	4.259	3.136
New Zealand	0.275	7.031	6.298	0.603	6.055	4.401
Norway	0.433	0.000	0.698	0.479	1.688	1.818
Poland	0.281	9.303	8.043	0.733	2.037	1.753
Portugal	0.290	4.425	4.207	0.560	8.214	5.908
Slovakia	0.253	5.449	5.147	0.571	6.855	5.001
Slovenia	0.328	2.914	2.948	0.754	2.177	1.811
Spain	0.287	1.570	1.997	0.538	6.551	4.910
Sweden	0.308	2.822	2.923	0.608	5.941	4.317
Switzerland	0.433	0.000	0.698	0.621	4.569	3.435
Turkey	0.301	0.884	1.448	0.604	1.483	1.548
United Kingdom	0.158	6.157	6.180	0.525	8.288	6.090
United States	0.433	2.402	2.374	0.574	6.794	4.953
Barbados	0.354	0.000	0.738	0.876	1.234	1.190
Croatia	0.274	4.799	4.550	0.702	3.156	2.442
Cyprus	0.401	0.553	1.109	0.954	13.191	7.264
Hong Kong	0.000	0.000	1.000	0.551	3.372	2.819
Israel	0.000	0.000	1.000	0.569	3.068	2.592
Macau	0.433	0.000	0.698	0.961	0.000	0.510
Malta	0.000	0.000	1.000	0.769	11.242	6.919
Puerto Rico	0.433	0.000	0.698	0.000	0.000	1.000
Saudi Arabia	0.433	1.497	1.742	0.961	20.365	10.897
Singapore	0.327	5.013	4.533	0.800	0.505	0.836
Taiwan	0.216	4.503	4.524	0.697	16.487	10.302
Trinidad and Tobago	0.841	8.418	5.117	0.961	21.743	11.599
Algeria	0.399	0.000	0.715	1.023	0.000	0.494
Argentina	0.634	0.000	0.612	1.048	1.114	1.032
Brazil	0.261	5.167	4.893	0.876	2.987	2.125
Bulgaria	0.310	3.090	3.122	0.908	2.798	1.991
Chile	0.179	3.090	3.470	0.601	5.658	4.160
Colombia	0.270	4.501	4.332	0.632	2.239	1.985
Costa Rica	0.433	0.000	0.698	0.573	4.845	3.715
Cuba	0.433	0.000	0.698	0.961	0.000	0.510
Dominican Republic	0.323	3.578	3.461	0.558	6.096	4.553
Jamaica	0.350	4.515	4.085	0.666	1.217	1.331
Malaysia	0.223	8.701	7.930	0.583	7.252	5.213
Mauritius	0.433	0.000	0.698	0.319	2.826	2.901

강상목

국가	2000			2007		
	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성	한계산출	한계 온실가스배출	한계지속성
Panama	0.329	4.157	3.881	0.729	2.222	1.863
Peru	0.004	0.000	0.996	0.698	2.298	1.942
Romania	0.276	3.802	3.764	0.704	2.077	1.806
Russia	0.272	6.028	5.525	0.570	9.536	6.713
Saint Lucia	0.444	0.000	0.693	1.029	0.000	0.493
South Africa	0.193	3.868	4.082	0.232	1.560	2.078
Uruguay	0.224	0.000	0.817	0.671	2.519	2.106
Venezuela	0.251	9.028	8.017	0.686	0.807	1.072
Belize	0.303	1.940	2.257	0.549	7.474	5.470
Bolivia	0.275	2.904	3.061	0.453	0.000	0.688
China	0.413	10.670	8.260	0.950	4.530	2.836
Egypt	0.433	0.000	0.698	1.667	0.000	0.375
El Salvador	0.329	1.990	2.251	0.630	0.336	0.820
Guatemala	0.344	1.528	1.881	0.667	0.434	0.860
Honduras	0.390	4.413	3.894	0.647	1.740	1.663
India	0.412	6.873	5.577	0.946	5.263	3.219
Indonesia	0.331	2.874	2.912	0.669	2.010	1.803
Morocco	0.001	0.000	0.999	0.286	0.460	1.135
Nicaragua	0.377	4.223	3.792	0.938	4.087	2.625
Pakistan	0.464	0.000	0.683	0.850	0.000	0.541
Paraguay	0.233	0.927	1.563	0.822	1.206	1.211
Philippines	0.393	4.670	4.071	0.826	2.933	2.154
Sri Lanka	0.433	0.000	0.698	0.039	0.000	0.963
Syria	0.433	16.688	12.343	4.556	13.122	2.542
Thailand	0.273	7.066	6.336	0.621	0.896	1.170
Tunisia	0.433	0.000	0.698	1.216	0.000	0.451
Vietnam	0.257	3.791	3.811	0.716	2.406	1.985
Bangladesh	0.397	0.000	0.716	0.809	0.000	0.553
OECD	0.308	4.112	3.987	0.585	5.360	4.112
High-middle	0.311	2.635	2.787	0.715	4.763	3.327
Low	0.346	3.528	3.325	0.943	2.345	1.653
Overall	0.318	3.402	3.365	0.721	4.403	3.217

2000년의 경우 전체 국가의 화석연료 증가에 따른 한계산출은 0.318단위이고 한계 온실가스 배출은 3.402단위로 한계 지속가능성 지수는 3.365이다. 즉, 화석연료의 단위 증가는 산출의 증가보다 더 큰 온실가스 배출 증가를 초래한다. 따라서 전체 국가의 한계 지속가능성 지수가 높은 것은 추가적인 경제성장의 추구가 초래하는 온실가스의 추가 배출이 매우 큰 수준임을 의미하고 환경에 미치는 영향이 큰 것을 시사한다. 한계 지속가능성 지수의 값이 1보다 크면 클수록 단위당 산출의 증가보다 온실가스 배출 증가량이 많음을 의미한다. 반면 1보다 작으면 한계 산출이 한계 온실가스 배출을 초과

하게 된다. 국제적으로 경제성장을 위한 화석연료의 사용은 GDP에 대한 기여보다도 훨씬 온실가스의 추가를 초래하는 현실을 보여준다. 세 그룹으로 구분해서 볼 때, OECD그룹은 화석연료 단위증가는 0.308단위의 산출증가와 4.112단위의 온실가스 증가를 초래하는 반면 중·고소득 그룹은 0.311단위의 산출증가, 2.635단위의 온실가스 증가를 초래하여 온실가스 배출 면에서 중·고소득 그룹이 가장 좋은 성과를 보인다. 저소득그룹은 한계산출에서는 가장 높으나 한계 온실가스 배출 역시 높은 편이다. 세 그룹의 한계산출과 한계 온실가스 배출을 한계지속가능성 지수로 환산하면 OECD그룹은 3.987로 좋지 않고 중·고소득 그룹은 2.787로 가장 양호하다.

2007년의 경우, 전체 국가의 한계산출은 0.721였고 한계 온실가스 배출은 4.403으로 한계 온실가스 배출이 한계산출을 크게 능가한다. 한계 지속가능성 지수는 3.217로 2000년보다 한계산출과 한계 온실가스 배출이 모두 증가하였으나 한계 지속가능성 지수는 3.365에서 3.217로 다소 낮아졌다. 이러한 결과는 세 그룹 중에서 저소득국가의 한계 지속가능성 지수가 개선된 결과임을 확인할 수 있다. 반면 OECD그룹과 중·고소득그룹은 2000년에 비하여 2007년에 오히려 한계 지속가능성 지수가 악화되었음을 알 수 있다. 이는 두 그룹의 경제활동이 저소득그룹보다 더 온실가스 배출지향적임을 의미한다. 화석연료 단위 증가에 따른 OECD그룹의 한계산출은 0.585이고 한계 온실가스 배출은 5.360인 반면 저소득그룹은 한계산출이 0.943으로 가장 높고 한계 온실가스 배출은 2.345로 OECD그룹의 한계 온실가스배출의 절반에 미치지 못한다. 결과적으로 OECD그룹은 한계지속가능성 지수가 4.112로 가장 나쁘고 저소득그룹은 1.653으로 OECD그룹의 절반 이하이다.

한편, 세 그룹 내부의 국가별로 한계산출, 한계 온실가스 배출, 한계지속성을 살펴보고자 한다. 2000년의 전반적인 추세를 살펴보면 비OECD국가의 한계산출은 OECD국가보다 높은 반면에 한계 온실가스 배출은 OECD국가보다 낮아서 한계 지속가능성은 비OECD그룹의 성과가 보다 양호하다.

첫째, OECD그룹에서 한계산출이 높은 국가는 룩셈부르크, 노르웨이, 스위스, 미국, 아일랜드 등이고 가장 낮은 국가는 영국과 네덜란드 등이다.¹⁸⁾ 또한 한계 온실가스 배출이 높은 국가는 호주, 폴란드, 아이슬란드, 뉴질랜드, 한국, 캐나다, 그리스 등이고 가장 낮은 국가는 프랑스, 룩셈부르크, 노르웨이, 스위스 등이다. 이를 기초로 한계

18) 2000년에 한계산출의 값이 일치하는 국가가 많은 이유는 이들 국가가 생산함수의 경계면이 동일한 프론티어에 접하기 때문이다.

지속성 지수의 성과가 나쁜 국가는 호주, 폴란드, 아이슬란드, 캐나다, 뉴질랜드, 한국 등이 속하고 지속성 지수가 가장 좋은 국가는 룩셈부르크, 노르웨이, 스위스, 프랑스, 아일랜드 등이다 이들은 모두 한계지속성 지수가 1 이하로 단위 에너지의 한계산출이 한계 온실가스 배출을 능가한다.

둘째, 중·고소득그룹에서 한계산출이 좋은 국가는 트리니다드토바고, 아르헨티나를 들 수 있다. 한계 온실가스 배출이 낮은 국가는 홍콩, 이스라엘 등 다수의 국가로 증가하고 한계 온실가스배출 배출이 높은 국가는 베네주엘라, 말레이시아, 트리니다드 토바고, 러시아, 브라질 등의 순서이다. 따라서 한계지속성 지수가 좋지 않는 국가로 말레이시아, 러시아, 트리니다드토바고, 브라질의 순서이고 한계지속성지수가 좋은 국가들은 아르헨티나 등 다수가 존재한다.¹⁹⁾

셋째, 저소득그룹에서 한계산출이 높은 국가는 파키스탄, 이집트 등 다수 국가가 있으나 상대적으로 매우 낮은 국가는 모로코 외에는 거의 없다. 한계 온실가스 배출이 높은 국가는 시리아, 중국, 태국, 인도 등 대표적인 개도국들이 속하는 반면에 낮은 국가는 이집트, 스리랑카 등 다수 존재한다. 그러므로 저소득그룹에 낮은 한계 온실가스 배출로 인하여 한계지속성이 양호한 국가가 다수 존재한다.

다음으로 세 그룹의 2007년 기준 한계산출, 한계 온실가스 배출, 한계 지속가능성을 살펴보고자 한다. 2007년의 경우의 주된 특징도 2000년과 거의 동일하게 OECD그룹에 비하여 비OECD그룹의 한계산출은 높은 반면 한계 온실가스 배출은 낮아서 비 OECD그룹의 한계 지속가능성이 보다 건전하다는 점이다.

첫째, OECD그룹에서 2000년과 다르게 2007년의 한계산출이 높은 국가는 룩셈부르크, 호주, 슬로베니아, 폴란드 등으로 나타났다. 전반적으로 한계산출이 증가하였으나 여전히 상대적으로 낮은 한계산출을 유지하는 프랑스, 이탈리아 같은 국가도 있다. 한계 온실가스배출도 OECD그룹에서 큰 변화를 보인다. 2000년 한계 온실가스 배출이 높았던 호주, 폴란드, 아이슬란드 등은 한계배출이 낮아진 반면에 한국, 벨기에, 멕시코, 캐나다, 이탈리아, 일본 등이 가장 높은 한계배출을 보인다. 하지만 룩셈부르크, 프랑스 등은 여전히 낮은 수준을 유지하고 아이슬란드, 체코는 급격히 낮은 수준을 보여 준다. 그러므로 한계 온실가스 배출이 크게 높아진 국가들의 한계지속성이 크게 나빠지는 형태를 보여준다. 즉, 한국, 멕시코, 벨기에, 캐나다 등이 가장 한계지속성이 좋지

19) 트리니다드토바고는 베네수엘라 옆의 작은 섬나라로 산업의 90%가 석유제품 및 원유이고 화학제품이 주를 이룬다. 따라서 에너지가공, 소비, 수출 등으로 인한 오염배출이 상대적으로 높다.

못하다. 반면 룩셈부르크, 프랑스는 가장 양호하다.

둘째, 중·고소득그룹에서 2007년에 한계산출이 크게 신장된 국가들이 많은데 그 중에서도 아르헨티나, 세인트루치아, 알제리, 사우디아라비아 등이 가장 높다. 한계 온실가스 배출에서도 큰 변화를 보인다. 트리니다드토바고, 대만, 사우디아라비아, 사이프러스 등이 가장 높은 수준을 보여주고 있는 반면에 마카우, 푸에르토리코, 싱가포르 등은 매우 낮은 수준을 보여서 대조를 보인다. 결과적으로 한계 온실가스 배출이 높은 대부분 국가들의 한계지속성은 좋지 못하다. 즉, 트리니다드토바고, 대만, 사우디아라비아, 사이프러스, 러시아가 이들에 속한다.

셋째, 저소득그룹에서 한계산출이 크게 높은 국가들로 시리아, 이집트, 튀니지, 중국, 인도를 들 수 있다. 그러나 한계 온실가스 배출에서 시리아는 2000년과 비슷하게 높은 수준을 보이고 그 다음으로 벨리제, 인도, 중국 등이 뒤따른다. 그러나 그 외 국가들은 아주 낮은 편이다. 따라서 한계지속성은 벨리제, 인도, 중국 등이 가장 좋지 않으나 OECD그룹에 비하면 높은 편이 아니다. 전반적으로 2007년 저소득 국가의 한계지속가능성은 1 이하를 보인 국가들이 제일 많아서 세 그룹 중 가장 양호하고 건전한 국가들이 대부분이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 83개 국가를 대상으로 물질균형접근에 기초하여 화석연료와 경제, 그리고 화석연료와 환경의 연계를 통하여 지속가능성을 측정해보았다. 지금까지 OECD 국가뿐만 아니라 비OECD국가들도 경제와 환경의 조화로운 지속가능한 성장을 추구한다고 대내외적으로 공표하고 이를 반영하여 노력한 것으로 알려져 있다. 그러나 개별 국가가 지속가능성을 언급하고 있지만 그 지속가능성을 확인할 수 있는 객관적 증거와 지속가능성의 수준을 보여주는 연구는 거의 존재하지 않는다. 또한 본 연구는 물질균형접근에 기초하기에 온실가스 배출과 직접 관련이 없는 일반 생산기술과 환경 기술을 분리함으로써 보다 현실에 부합하는 가정에 기초하였다. 본 연구의 초점은 경제와 환경 중 어디에 얼마만큼 더 치중하고 있는지 확인해 보고자 하였다. 즉, 지속가능성을 객관적으로 측정해보는 데 그 의미를 두었다. 실증결과를 통하여 다음과 같은 사항을 확인할 수 있다.

첫째, 대부분의 국가는 경제와 환경의 조화로운 성장을 외쳤으나 실증결과에서는 거의

모든 국가가 환경보다는 경제에 치중한 성장을 추구한 것으로 나타났다. 즉, 지속가능성 지수를 기준으로 83개 국가는 전반적으로 경제의 비효율보다 온실가스의 비효율이 크기 때문에 지속가능성은 낮은 편에 속한다. 그 중에서 지속가능성이 OECD그룹이 가장 낮고 저소득그룹이 가장 높다.

둘째, 한계 지속가능성 지수를 기준으로 할 때, 화석연료의 단위 증가로 인한 산출의 증가분보다 온실가스의 증가분이 훨씬 크게 나타났기에 한계지속성의 성과 역시 좋지 않았다. 즉, 한계지속성 지수는 1에서 크게 초과하는 수준을 보였다. 특히 OECD그룹의 한계산출은 세 그룹 중 가장 낮았으나 한계 온실가스 배출은 가장 높은 것으로 나타나서 한계지속성 지수 역시 가장 좋지 않았다.

이러한 결과를 놓고 볼 때, 선진국들이 지금까지 주장하듯이 저개발국과 개도국들이 환경을 더 훼손하는 경제성장을 한다는 말은 설득력이 없는 것으로 보인다. 선진국의 지속가능성이 낮은 주된 원인은 결과적으로 경제성장에 따른 화석연료 사용이 초래하는 온실가스 배출이 더 높기 때문이다. 그러나 비OECD그룹 중에서도 빠른 경제성장에 따라서 화석연료의 사용이 크게 증가하고 그에 따른 온실가스 배출이 급증하는 국가들의 지속가능성은 역시 마찬가지로 낮았다. 이처럼 지속가능성 지수가 악화되는 요인으로 주로 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 대체로 산업구조가 오염을 많이 배출하는 제조업의 비중이 크고 그 중에서도 화석연료 사용이 많은 경우이다. 둘째, 에너지 사용, 특히 화석연료 사용이 많을 경우 온실가스 배출 또한 높기 때문에 화석연료 투입에 따른 산출 증가보다 더 큰 온실가스배출 증가가 수반되는 경우이다. 이에 속하는 국가들은 대체로 그렇지 않은 국가에 비하여 지속가능성은 낮게 나타났다.

이러한 실증에서 얻을 수 있는 시사점은 향후 에너지 소비구조를 화석연료에서 비화석연료로 전환하는 노력이 필요하고 산업구조 또한 에너지 다소비에 의존하는 제조업 특히, 석유제품과 정제 및 화학제품 등 오염산업에 의존도를 줄여나가는 것이 지속가능성을 높일 수 있을 것이다. 또한 최근 온실가스로 인한 지구온난화의 주범이 개도국과 후진국으로 알려져 있으나 본 실증결과는 오히려 선진국의 인당 온실가스 배출량이 높고 그로 인한 지속가능성은 훨씬 더 낮다는 것을 보여주고 있다. 따라서 온실가스 배출은 선진국이 보다 많은 책임이 있기에 배출저감에 대한 부담도 선진국이 많은 부분을 부담하는 책임있는 자세가 필요할 것이다. 특히 경제개발을 시도하는 개도국과 후진국들의 동참을 유도하기 위해서는 선진국의 솔선수범과 적극적 지원이 보다 확대 추진되고 온실가스 저감을 위한 상호 협력과 교류의 확대가 이루어져야 할 것으로 보인다.

본 연구의 의의는 처음으로 화석연료, 경제, 환경을 연계하여 지속가능성을 측정하는 방법을 제시하고 실증적으로 측정해 본 것이다. 특히 우리가 알고 있는 기대와는 다르게 중국과 인도의 지속가능성이 상대적으로 호주나 캐나다와 크게 차이가 없는 이유는 호주나 캐나다, 미국 등의 국토가 인구에 비하여 매우 넓고 GDP생산에 비하여 자원의 과다사용 즉, 에너지사용량이 높고 온실가스 배출량이 많기 때문이다. 따라서 본 연구와 같이 인당 자료에 기초하여 분석할 경우, 호주나 캐나다 등의 지속가능성은 그리 높지 못하다. 반면 화석연료 특히 석탄의 소비와 제조업의 비중이 높은 중국 등 개도국의 온실가스 배출량이 높기는 하지만 인당 에너지 사용량과 인당 온실가스 배출량은 이들보다 높지 않다. 또한 본 연구에서는 자료확보의 한계로 다른 대기오염물질 배출량을 포함하지 못하였다. 이들을 포함시킬 경우에 결과는 다를 수도 있을 것이다.

참고 문헌

- 강상목, 정영근, 이명현. 2011. "지속가능성장 모형구축과 지속가능성 계측". 『환경정책』 19(2): 35-66.
- Arcelus F.J., and P. Arocena. 2005. "Productivity Differences across OECD Countries in the Presence of Environmental Constraints". *Journal of the Operational Research Society* 56: 1352-1362.
- 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* 38: 121-142.
- Boyd, G.A., G. Tolley, and J.X. Pang. 2002. "Plant Level Productivity, Efficiency, and Environmental Performance of The Container Glass Industry" *Environmental and Resource Economics* 23: 29-43.
- Chamber, R.G., Y. Chung and R. Färe. 1996. "Benefit and Distance Functions". *Journal of Economic Theory* 70: 407-419.
- Chung, Y.R., R. Färe and S. Grosskopf. 1997. "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach". *Journal of Environmental Management* 51: 229-240.
- Cole, M.A. 2000. "Air Pollution and 'Dirty' Industries : How and Why Does the Composition of Manufacturing Output Change with Economic Development". *Environmental and Resource Economics* 17: 109-123.
- Coelli, T., L. Lauwers and G.V. Huylenbroeck. 2007. " Environmental Efficiency Measurement and the Material Balance Condition". *Journal of Productivity Analysis* 28: 3-12.
- Färe, R., S. Grosskopf, C.A.K. Lovell and C. Pasurka. 1989. "Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: A Nonparametric Approach". *Review of Economics and Statistics* 71(1): 90-98.
- Färe, R., S. Grosskopf and C.A.Jr. Pasurka. 2001. "Accounting for Air Pollution Emission in Measures of State Manufacturing Productivity Growth". *Journal of Regional Science* 41(3): 381-409.
- Färe, R., S. Grosskopf. 2004. "New Direction: Efficiency and Productivity". Kluwer Academic Publishers Boston.
- Färe, R., S. Grosskopf and C.A Jr. Pasurka. 2007. "Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Function". *Energy* 32: 1055-1066.
- Førsund, F. R. 2009. "Good Modeling of Bad Outputs: Pollution and Multiple -Output Production". *International Review of Environmental and Resource Economics* 3: 1-38.
- Hettige, H., M. Mani and D. Wheeler. 2000. "Industrial Pollution in Economic Development : the Environmental Kuznets Curve Revisited". *Journal of Development Economics* 62: 445-476.
- Jeon, B., R.C. Sickles. 2004. "The Role of Environmental Factors in Growth Accounting". *Journal of Applied Econometrics* 19: 567-594.
- Kumar, S. 2006. "Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist-Luenberger Index". *Ecological Economics* 56: 280-293.

- Mandal, S.K. 2010. "Do Undesirable Output and Environmental Regulation Matter in Energy Efficiency Analysis? Evidence From Indian Cement Industry". *Energy Policy* 38: 6076-6083.
- Mandal, S.K., and S. Madheswaran. 2010. "Environmental Efficiency of the Indian Cement Industry". *Energy Policy* 38: 1108-1118.
- Mani M., and D. Wheeler. 1997. "In Search of Pollution Havens? Dirty Industry in the World Economy, 1960-1995". World Bank. Working Paper 1-30.
- Nordhaus W. and J. Boyer. 2000. "Warming the World : Economic Models of Global Warming". MIT Press. Cambridge, MA.
- Picazo-Tadeo A.J. and D. Prior. 2009. "Environmental Externalities and Efficiency Measurement". *Journal of Environmental Management*. 90: 3332-3339.
- Ray, S.C. 2004. *Data Envelopment Analysis: Theory and Techniques for Economics and Operations Research*. Cambridge University Press.
- Ray, S.C. and K. Mukherjee. 2007. "Efficiency in Managing the Environment and the Opportunity Cost of Pollution Abatement," The University of Connecticut. Department of Economics Working Paper 2007-09.
- Weber, W. and B. Domazlicky. 2001. "Productivity Growth and Pollution in State Manufacturing". *Review of Economics and Statistics* 83: 195-199.
- Zaim, O., and F. Taskin. 2000a. "Environmental Efficiency in Carbon Dioxide Emissions in the OECD: A Non-Parametric Approach". *Journal of Environmental Management* 58: 95-107.
- Zaim, O., and F. Taskin. 2000b. "A Kuznets Curve in Environmental Efficiency: An Application on OECD Countries". *Environmental and Resource Economics* 17: 21-36.
- Zhou, P., B.W. Ang, and K.L. Poh. 2008. "A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies". *European Journal of Operational Research* 189: 1-28.
- 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* 23: 63-83.