

# 화석 연료와 온실가스 저감이 생산효율과 경제성장에 미치는 효과 - 전통적 접근과 MFA 접근 비교 -<sup>†</sup>

강 상 목\*

**요약** : 본 연구의 목적은 전통적 접근의 한계를 지적하고 물질균형 접근의 생산효율을 도입하여 두 생산효율의 차이와 2단계 효율, 오염규제의 경제성장에 미치는 영향 등을 비교하고자 함이다. 특히 상이한 국가들을 대상으로 세 그룹으로 구분하여 이들의 결과를 비교한다. 본 연구에서는 화석연료 투입물을 직접 연계된 CO<sub>2</sub>와 산출물과 연결시킴으로써 보다 현실에 가까운 생산효율을 측정하였다. 전통적 생산효율과 물질균형 효율비교에서 효율의 측정치는 세부적으로 살펴보면 상당한 차이가 있다. 특히 투입물인 화석연료를 고려하지 않을 경우 저소득국은 생산효율의 성과가 나쁘고 OECD와 중고소득이 보다 좋은 성과를 보인 것으로 나타나고 있어서 현실을 제대로 반영하지 못하고 있다. 물질흐름접근에 기초할 경우 저소득국의 성과가 OECD보다 높고 환경적 요인이 경제에 미치는 영향도 보다 완화된 것으로 확인된다.

**주제어** : 전통적 접근, 물질흐름접근, 화석연료, 생산효율, 경제성장

**JEL 분류** : O4, Q1, C5

접수일(2014년 1월 10일), 수정일(2014년 3월 17일), 게재확정일(2014년 6월 9일)

<sup>†</sup> 이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012-S1A5A2A-01018965)

\* 부산대학교 경제학부 교수(e-mail: smkang@pusan.ac.kr)

# Effect of Fossil Fuels and Green House Gas on Production Efficiency and Economic Growth<sup>†</sup>

Sangmok Kang\*

**ABSTRACT** : The purpose of this paper is to compare efficiencies, two stage efficiencies, and the reduction of economic growth due to the restraint of CO<sub>2</sub> and fossil fuel in two efficiency approach by pointing out the limit of traditional efficiency approach and introducing material balance approach. The efficiencies under the traditional approach and the material balance approach report significant gaps when they are analyzed in detail. Especially, in case not including fossil fuels, the low income countries show the bad performance of production efficiencies, but OECD and high-middle income countries reveal the better performance than that of the low countries. It fails to reflect the reality justly. Based on the material balance approach, the low income countries report the higher performance and the alleviated effect of environmental components for economic growth than OECD's.

**Keywords** : Traditional approach, Material balance approach, Fossil fuel, Production efficiency, Economic growth

---

Received: January 10, 2014, Revised: March 17, 2014, Accepted: June 9, 2014.

<sup>†</sup> This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (NRF-2012-S1A5A2A-01018965)

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

## I. 서론

화석에너지는 생산활동의 중요한 투입물로서 어떤 다른 투입물보다도 경제성과 밀접한 관계를 갖는 것으로 인식되고 있다. 특히 우리 나라처럼 경제성장이 화석연료에 크게 의존하는 경제는 화석에너지의 확보와 그 효율적 이용이 지속가능한 경제에 중요한 영향을 미치게 된다. 이와 동시에 화석연료는 온실가스 배출의 주범으로 지난 20여 년 동안 기후변화라는 지구적 환경문제를 야기하여 지구온난화를 가속시키고 있다. 따라서 노력의 차이는 있지만 대다수 국가들은 경제성장을 추구하면서 화석연료로 인한 지구온난화가 초래할 생태계와 경제에 미치는 영향을 최소화하기를 원한다. 지난 1997년 교토의정서에서 국가별로 차별적인 감축의무를 규정하였고 이에 따라서 각 국가들은 온실가스를 감축하고 있고 일부 국가들은 자발적인 감축노력을 기울이고 있는 실정이다.

그런데 Nordhaus and Boyer(2000)는 교토의정서가 경제학이나 환경정책에 적절하게 근거해서 결정되지 않았다고 주장한다. 이들은 포괄적인 분석을 통해서 교토의정서하에서 매년 전체적인 감축수준이 그들이 제안한 최적 프로그램하에서 최적량에 근접하긴 하지만 장기적으로 온실가스 배출량이 최적프로그램하에서 보다 교토의정서 하에서 더 높다고 주장하였다. 이들은 이런 결과가 교토의정서의 두 가지 주요 결함으로 발생한 것이라고 생각한다. 즉, 첫째, 각 나라의 배출량 제한이 역사적인 배출수준에 근거를 두고 있어서 역사적으로 비효율적인 에너지시스템을 가진 국가들에게 주로 이득을 준다는 점, 둘째, 교토의정서는 부속서에 속한 국가들에게만 배출량제한을 가하지만 비부속서B 국가들에게는 제한을 주지 못한다는 점을 지적하였다. 이처럼 비부속서B 국가들의 온실가스 배출량을 규제하는 것은 이들 국가가 급속한 경제성장에 따라서 온실가스 또한 급속히 증가하고 있고 가까운 시기에 선진국에 필적할 만한 온실가스를 배출할 것이기 때문에 매우 중요하다.

경제발전단계가 상이한 국가를 균등하게 상호 비교하는 것은 교토의정서 상의 목표를 달성하는 데 좋은 방법은 아닌 것으로 보이지만 온실가스와 소득 간에 트레이드 오프의 효율적인 관리를 통하여 각 국가가 다른 국가의 최선의 실천사례를 배우는 것은 필요하다. 그런데 지구적 온실가스의 감축이 전 지구적인 사안으로서 모든

국가를 대상으로 경제성장의 단계별로 온실가스와 경제성장의 관계를 분석하는 것이 필요함에도 기존의 연구들은 주로 선진국을 대상으로 온실가스와 소득과의 관계를 분석하거나 제한된 개도국만을 포함하여 그 대안을 제시하는 데 머무르고 있다. 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 생산활동 상에서 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 생산효율을 측정하고자 하였다.

그러나 Førsund (2009)가 지적하듯이 지금까지 거의 모든 선행연구는 투입물이 일정하게 주어진 상태에서 바람직한 산출물과 오염물 간의 약처분성이나 결합생산에 기초하여 오염물과 직접 관계없는 투입물을 연계시켜서 환경규제하의 생산효율을 연구함으로써 물질흐름균형의 법칙에 부합하지 않는 가정을 한다는 한계점을 갖는다.<sup>1)</sup> 실제 대다수 기존연구는 생산활동에서 오염과 관련된 화석연료 사용과 온실가스 및 GDP 간의 인과관계를 직접 고려하지 못하고 포괄적으로 노동과 자본 등의 변수와 온실가스 및 GDP 간의 일정한 관계를 가정하고 분석함으로써 현실과는 괴리가 있는 모델을 제시하고 있다는 한계가 있다. 나아가 기존연구는 분석 대상이 OECD 국가나 특정 일부 국가를 대상으로 제한함으로써 전 국가를 대상으로 화석연료와 온실가스 배출이 생산효율과 경제성장에 미치는 영향을 명확하게 측정하여 제시해 주고 있지 못하다.

본 연구에서는 결합생산과 약처분에 의존하여 환경을 포함한 생산효율을 측정하려고 시도하였던 기존연구들을 전통적 접근으로 분류하고 이에 대비되는 새로운 시도를 물질흐름접근법(material flow approach: MFA)으로 간주한다. 특히 본 연구는

---

1) 본 연구에서 약처분성은 환경규제나 오염처리의 제약으로 인하여 바람직한 산출물과 오염물의 생산이 자유롭게 이루어지지 못하는 상태, 즉, 규제나 제약이 존재하는 상태를 말한다. 이와 반대로 강처분은 투입물과 산출물 생산에 아무런 규제나 제약이 없는 상태를 말한다.

물질흐름접근법(material flow approach: MFA)을 도입하여 오염물에 직접 연계된 화석에너지를 고려한 생산효율과 경제성장의 제약을 시도한다.<sup>2)</sup> 즉, 기존 연구에서 투입물을 일정하게 두거나 혹은 오염과 직접 관련없는 노동과 일반 자본스톡이 온실가스와 연계된 모형을 제시한 것과는 다르게 본 연구는 온실가스와 직접적 원인이 되는 화석연료와 비화석연료를 구분하고 화석연료와 GDP, 온실가스를 연결시킴으로써 보다 현실에 가까운 접근을 시도한다. 또한 효율측정의 2단계 모형을 사용하여 프론티어 상에서 추가 온실가스 저감의 정도를 측정하는 방법을 제시한다.

국내적으로 강상목(2013)은 물질흐름접근에 의한 생산단위의 경제지향효율과 환경지향효율을 구하고 이를 연계시켜서 지속가능성지수를 측정하였으나 본 연구와 같이 전통적 접근과 물질흐름접근을 비교하지 않았고 화석연료와 온실가스가 경제성장에 미치는 영향은 분석하지 않았다. 그의 초점은 지속가능성지수를 측정해 보았다는 점에 있었다. 하지만 전통적 접근과 물질흐름접근을 이론과 실증에서 세부적으로 직접 비교해 보는데 초점을 두지 않았기에 이들을 비교하여 생산효율과 경제성장에 미치는 효과 등을 측정하지는 않았다. 따라서 본 연구는 생산효율과 온실가스 저감의 경제성장에 미치는 영향을 측정하는 것이고 이를 측정하는데 있어서 전통적 접근과 물질균형 접근을 비교하여 제시하는 것이다. 물론 생산효율과 온실가스 저감의 경제성장에 미치는 영향을 전통적 접근으로도 할 수 있지만 물질흐름 접근과의 비교에 중점을 두고 전개하고자 한다.

나아가 기존 연구에서 물질흐름접근에 기초하여 생산효율을 측정한 연구를 찾기는 쉽지 않고 동시에 온실가스 저감의 경제성장에 미치는 효과를 측정한 연구는 존재하지 않는다. 뿐만 아니라 두 접근방법을 상호비교하여 다양한 생산효율과 경제성장의 효과를 측정한 연구는 찾아볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 처음으로 전통적 접근과 물질흐름접근의 두 방법을 비교하여 모형을 제시하고 이를 실증적으로 측정할 것이다.

본 연구의 목적은 환경제약이 있는 생산효율 측정에서 전통적 접근에서 일방적으로 받아들였던 결합생산과 약처분의 가정과는 다르게 물질흐름접근에 의존한 생산

---

2) 물질흐름균형 접근법으로 표현되기도 하나 여기서는 간단히 물질흐름접근법으로 명명한다.

효율을 구하고 이들을 각각 측정하여 비교한다. 또한 이를 기초로 프론티어 상에서 온실가스 추가 저감의 효율을 측정하며 화석연료와 온실가스 저감이 초래하는 경제성장의 제약을 선진국뿐만 아니라 개도국과 후발국을 포함하여 비교할 것이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 전통적 효율접근이 가정하는 바람직한 산출물과 오염물 간에 결합생산이나 이들 간에 약처분 등의 한계점을 지적한다. 이어서 물질흐름균형의 접근에 기초하여 생산기술과 오염 처리기술을 분리하고 투입물 중 오염물 발생과 직접 연계된 화석에너지와 바람직한 산출물, 오염물을 연계시키는 이론 모형을 설정한다. 즉, 본 연구는 전세계 국가를 대상으로 화석에너지와 온실가스 및 GDP 간의 조정여지를 분석하고자 한다. 이를 통하여 화석에너지 사용과 온실가스 제약 하에서 경제성장을 달성하는 것이 과연 누구에게 유리한지 파악해 보고자 한다. 나아가 프론티어 상에서 GDP를 최대화하는 수준하의 온실가스 배출량수준임에도 여전히 추가 저감의 여지가 있을 수 있다. 이러한 초과배출량 수준이 어느 정도 인지를 측정할 것이다. 이는 향후 온실가스를 국가별로 할당할 때 중요하게 고려해야 할 정보가 될 수 있을 것이다.

그러므로 본 연구는 다음의 과제에 초점을 두고 연구를 진행하고자 한다.

첫째, 오염물을 포함한 전통적 접근의 생산효율 측정의 한계를 지적하고 물질흐름접근에 기초한 방법을 도입하여 생산기술과 오염처리기술을 분리하고 투입물 중 오염물 발생과 직접 연계된 화석에너지와 바람직한 산출물, 오염물을 연계시키는 이론 모형을 설정한다.

둘째, 국가별로 화석에너지와 온실가스가 생산과정에서 비효율적으로 이용되는 국가의 그룹과 국가는 어디인가? 이를 선진국과 개도국, 저개발국으로 구분하여 살펴볼 것이다.

셋째, 화석에너지와 온실가스의 저감에 따른 생산효율에 미치는 효과에 대한 민감도를 살펴볼 것이다.

넷째, 화석에너지와 온실가스의 규제가 경제성장을 제약하는 정도를 OECD 국가와 비OECD 국가에 대하여 비교할 것이다. 이는 온실가스와 화석 에너지소비량을 줄이거나 동결하면서 GDP를 높게 유지할 수 있는지 보여준다.

이를 위하여 본 연구에서는 선형계획법을 활용하여 분석한다. 특히 온실가스와

같은 유해한 산출물(bad outputs)이 존재하는 경우에 유익한 산출물과 유해한 산출물의 상이한 이동방향을 동시에 고려할 수 있는 방향거리함수(directional distance function)를 도입한다. 그러나 Chung et al.(1997), Fare and Grosskopf (2004) 등 기존 연구와는 다르게 물질흐름접근을 따른다. 또한 온실가스의 국가 간 조정과 해결에 정책적 시사점을 제공할 수 있도록 선진국뿐만 아니라 개도국, 저개발국 등을 최대한 포괄하여 통계자료를 수집 및 가공하여 분석한다. 연구방법 면에서는 일반적인 노동과 자본스톡, 비화석연료는 포함하되 온실가스에 직접적인 영향은 적으므로 이들 변수는 직접 약처분 제약을 주지 않는 반면에 온실가스, 화석연료 사용 등 직접적인 관계를 갖는 변수에 제약을 가함으로써 보다 현실설명력이 높은 생산효율을 도출한다. 이러한 제약 조건하에서 온실가스와 화석에너지 소비량을 줄이면서 GDP를 높게 유지할 수 있는 국가를 파악한다.

이하 제II 장에서는 전통적 접근과 물질흐름접근의 이론 모형을 비교하여 제시한다. 제III 장에서는 실증에 사용되는 기초통계를 제시하고 이를 이용한 여러 실증결과를 제시한다. 제IV 장에서는 정책적 시사점과 함께 결론을 제시한다.

## II. 이론모형

### 1. 전통적 접근

전통적 접근을 따르는 연구들은 바람직한 산출물과 오염물의 결합생산과 약처분을 가정하여 이들을 동시에 만족하는 생산과정을 전제로 모형을 수립하였다. 즉, 생산과정에서 산출량 생산이 없으면 오염물 생산도 없다고 가정하고 오염물을 저감하려면 바람직한 산출량을 감소시켜야 한다고 주장한다. 이들에 속하는 기존 연구는 Färe et al. (1986), Färe et al.(1989), Färe et al.(1996), Tyteca (1997), Chung et al.(1997), Boyd and McClelland(1999), Zaim and Taskin(2000a, 2000b), Sancho et al.(2000), Zofio and Prieto (2001), Färe et al.(2001), Weber and Domazlicky (2001), Boyd et al.(2002), Jeon and Sickles(2004), Lo et al.(2005), Kumar(2006), Zhou et al.(2006), Färe et al.(2006, 2007a, 2007b), Zhou et al.(2007), Picazo-Tadeo

and Prior(2009), Aiken et al.(2009), Mandal(2010), Wang et al.(2012) 등이다.

이러한 전통적 접근의 핵심이론인 약처분성과 결합생산을 간단히 소개하면 다음과 같다. 바람직한 산출물과 오염물이 투입물을 통하여 생산되는 기술구조를 가정한다. 환경을 포함한 생산의 기술구조는 다음과 같이 정의된다.

$$T(x) = \{(y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\} \quad (1)$$

여기서 환경을 포함한 생산기술  $T(x)$ 는 투입물( $x$ )과 바람직한 산출물( $y$ )와 오염물 ( $b$ ) 벡터의 집합으로 구성되고 폐쇄되고 볼록집합의 특성을 가정한다. 나아가 두 산출물 벡터 ( $y, b$ )가 약처분성을 가질 경우 생산에 환경제약을 갖게 된다는 것을 의미한다. 앞서 전통적 접근으로 분류한 선행연구들은 이러한 약처분성을 다음과 같이 표시하였다.

$$(y, b) \in T(x) \text{ and } 0 \leq \lambda \leq 1 \text{ imply } (\lambda y, \lambda b) \in T(x) \quad (2)$$

이는 투입물이 주어진 상태에서 바람직한 산출물을 줄일 때 오염물도 줄일 수 있음을 의미하고 있다. 즉, 주어진 투입물로 두 산출물 ( $y, b$ )를 생산할 경우  $\lambda$ 만큼 산출물과 오염물을 동시에 감소하거나 증가시킬 수 있음을 보여주고 있다.

또한, 바람직한 산출물과 오염물의 관계에 대한 선행연구들의 대표적인 가정은 결합생산으로 이는 다음과 같이 정의하였다. 즉,

$$(y, b) \in T(x) \text{ and } b = 0 \text{ imply } y = 0 \quad (3)$$

약처분성의 정의와 유사하게 식 (3)의 결합생산은 바람직한 산출물과 오염물 간의 관계만을 정의하고 투입물과 두 산출물 간의 관계를 언급하고 있지는 못하다. 즉, 전통적 접근의 한계점은 투입물이 일정하게 주어진 상태에서 바람직한 산출물과 오염물만의 연계에 의해서 두 산출물의 감소와 증가가 가능한 것으로 가정하고



있다. 그러나 현실적으로 바람직한 산출물과 오염물은 투입물의 조정과 밀접히 연계되어 변화되기에 그 가정에 한계점을 갖는다. 나아가 최근의 기존연구들은 이러한 한계를 보완하여 자본과 노동 등 투입물을 동시에 조정하는 모형을 제시하고 있으나 일반적으로 노동이나 자본스톡의 전체가 오염배출량과 직접적으로 연계된 것은 아니다. 현실적으로 화석에너지가 주로 오염배출과 연계되어 있다고 볼 때 이러한 시도 역시 현실적 한계를 갖고 있다.

## 2. 물질흐름 접근

환경과학에서 강조하는 물질흐름균형(Material Flow Balance)에 의하면 투입물이 생산과정에 투입되면 투입된 양과 동일한 양이 바람직한 산출물과 오염물로 남게 된다. 이는 생산활동에서 오염물 발생에 투입물이 직접 관여하고 있음을 의미한다. 물질흐름접근을 투입물과 산출물 벡터를 포함한 선형 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_1 x = \alpha_2 y + \alpha_3 b \quad (4)$$

여기서  $x$ ,  $y$ ,  $b$ 는 각각 투입물, 산출물, 오염물 벡터를 말하고  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각각 알려진 비율의 계수벡터를 의미한다.  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 투입물이 생산과정에 투입될 때 낭비되는 부분을 제외하고 실제 사용되는 비율이다.<sup>3)</sup> 여기서 투입물량은 주로 화석연료 소비량이 되고 이것의 일부는 다른 투입물(노동, 자본스톡, 원재료 등)과 함께 산

3) 가령, 화석연료의 경우 1차 에너지가 생산활동에 바로 투입되는 것이 아니고 투입되는 최종에너지로 전환되기까지는 일정부분 상실되는 부분이 존재한다.  $\alpha_1$ 은 이를 제외한 비율을 의미한다.  $\alpha_2$ 과  $\alpha_3$ 는 바람직한 산출물과 온실가스 배출량에 남게되는 부분의 비율을 각각 의미한다. ( $\alpha_2$ 과  $\alpha_3$ 의 비율은 그 생산단위가 가진 생산기술과 오염처리기술에 따라서 달라질 것이다.) 따라서 물질흐름접근에 근거하면 생산활동에서 실제 투입된 화석연료의 최종에너지는 결과적으로 생산활동에서 일정한 산출물과 온실가스로 남게 되고 총투입물과 총산출물(산출물+오염물)은 같은 양으로 존재하게 된다. 여기서 측정단위는 이론상으로 양변이 동일한 양으로 표시되려면 화석연료의 최종에너지(Btu 등)로 표현될 수 있다. 하지만 화석연료가 산출물과 온실가스에 투입되어 다른 재료와 결합되어 변형되므로 좌변의 화석연료의 최종투입량의 단위와 우변의 산출물과 온실가스의 측정단위는 다르게 표현될 수도 있다. 그러나 물질흐름접근에 의하면 산출물과 온실가스가 다른 물질과 결합되더라도 투입된 화석에너지의 양은 동일한 양으로 산출물과 온실가스에 그대로 남게 된다.

출물 생산에 투입되며 다른 한편으로는 오염물에 남게 된다. 즉, 생산활동에 투입된 투입물의 양은 생산활동 후 바람직한 산출물과 오염물로 남게 된다. 식 (4)는 다음과 같이 변화시켜 표현할 수 있다. 즉,

$$\alpha_3 b = \alpha_1 x - \alpha_2 y \geq 0 \quad (5)$$

여기서 오염물의 양은 투입물에서 산출물을 차감한 양으로 결정된다. 이를 통하여 오염물은 투입물과 비례관계에 있고 산출량과는 반비례관계에 있음을 알 수 있다. 즉,

$$\frac{db}{dx} = \frac{\alpha_1}{\alpha_3} \geq 0, \frac{db}{dy} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \leq 0 \quad (6)$$

식 (6)의 상대적인 계수는 투입물과 오염물 혹은 산출물과 오염물 간의 전환율을 의미한다. 식 (6)에 의하면 투입물과 오염물은 같은 방향으로 움직이지만 바람직한 산출물과 오염물은 상이한 방향성을 가지기에 전통적 방법과 같이 투입물을 일정하게 둔 상태에서 바람직한 산출물과 오염물이 같은 방향성을 갖는다는 약처분 가정은 물질흐름균형에 부합하지 않는다. 이처럼 투입물은 오염물과 밀접한 양(+)의 관계를 가짐에도 불구하고 전통적인 접근에서는 그러한 관계를 고려해 넣지 않거나 이를 명시화하지 못하였다. 또한 전통적 접근은 식 (6)과 다르게 주어진 투입물 하에서 약처분의 가정을 통하여 산출물과 오염물 간에 양(+)의 관계가 있다고 주장한다. 그러므로 전통적 접근의 바람직한 산출물과 오염물의 관계를 분석할 때 투입물 특히 오염물과 밀접히 관계된 화석에너지를 동시에 고려하는 것이 현실에 부합한다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이전의 전통적 접근과는 다르게 생산기술의 대안적인 개념을 제시하고자 한다. 즉, 생산기술은 바람직한 산출물을 오염물과 분리된 산출물로 다루고 이들이 특별한 투입물인 화석연료의 사용을 통하여 간접적으로 연결되어 있다고 본

다. 가령, 두 산출물 ( $y_1, y_2$ )를 고려하자.  $y_1$ 은 바람직한 산출물이고  $y_2$ 는 오염물이다. 이들은 4개의 투입물( $x_1, x_2, x_3, x_4$ )로 생산된다.<sup>4)</sup> 생산에 관한 두 개의 생산가능 집합이 다음과 같이 존재한다고 가정하자.

$$\begin{aligned} T_1 &= \{(x_1, x_2, x_3, x_4) : (x_1, x_2, x_3, x_4) \text{ produce } y_1\} \\ T_2 &= \{(x_3, y_2) : x_3 \text{ produces } y_2\} \end{aligned} \quad (7)$$

$T_1$ 에서 바람직한 산출물과 4개의 투입물은 강처분이 가정된다, 그러나  $T_2$ 에서 투입물과 산출물의 한 쌍인 ( $x_3, y_2$ )만 약처분이 가정된다. 이러한 약처분을 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (x_3^0, y_2^0) \in T_2 \Rightarrow (kx_3^0, ky_2^0) \in T_2, 0 \leq k \leq 1 \text{ but} \\ \text{not } (x_3^0, ky_2^0) \in T_2, 0 \leq k \leq 1 \text{ or } (kx_3^0, y_2^0) \in T_2, k > 1 \end{aligned} \quad (8)$$

이는  $y_2$ (이산화탄소)과  $x_3$ (화석연료)가 물질흐름관계에 있음을 가정한다. 화석연료 사용증가는 오염수준을 변화시킨다. 즉, 일정한 기술상태에서 화석연료 사용을 늘리면 오염수준은 증가할 수밖에 없다.  $T_1$ 과  $T_2$ 는 볼록결합 관계를 갖는다. 따라서 전체 생산가능집합은 다음과 같이 표현된다.

$$T = \{(x_1, x_2, x_3, x_4; y_1, y_2) : (x_1, x_2, x_3, x_4; y_1) \in T_1, (x_3, y_2) \in T_2\} \quad (9)$$

식 (9)는 생산의 기술이 일반적인 생산기술과 환경기술이 결합된 두 가지의 기술 구조로 구성되어 있음을 표시하고 있다. 이를 통하여 투입물 중 화석연료와 오염물이 밀접히 연계되어 있음을 반영한다.

4) 예를 들어 4개의 투입물은 노동, 자본스톡, 화석연료, 비화석연료 등이다.

### 3. 전통적 접근과 물질흐름 접근의 모형 비교

본 연구에서 가정하는 생산함수는 투입물로서 노동, 자본, 화석연료, 비화석연료, 산출물로서 GDP, 이산화탄소배출량에 의하여 결정된다고 가정한다. 본 연구는 기존의 Chung, Färe, and Grosskopf (1997)와 Färe et al.(2001, 2006, 2007a, 2007b)과는 다르게 일반 노동( $l$ )과 자본( $k$ ), 그리고 비화석연료( $nf$ )는 그대로 둔 채 화석연료( $ff$ )와 온실가스 배출( $b$ )이 동시에 제약을 받고 이 두 요소가 직접 연결된 모형을 설명하는데 적합한 방향거리함수를 정의하고자 한다. 이 방향거리함수는 화석연료과 온실가스가 직접 연계되어 있음을 보이는 데 초점을 둔다. 그 방향벡터를  $g = (+g_y, -g_{ff}, -g_b)$ 라 두면 화석연료와 온실가스 배출을 동시에 저감하는 방향거리함수( $\bar{D}_C$ )는 다음과 같이 정의된다.<sup>5)</sup>

$$\begin{aligned} \bar{D}_C(k, l, nf, ff, y, b : +g_{ff} - g_{ff}, -g_b) = \\ \max \beta : (y + g_y \beta, ff - \beta g_{ff}, b - \beta g_b) \in T(x, y) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서  $y$ 는 인당 GDP,  $b$ 는 인당 온실가스,  $k$ 는 인당자본,  $l$ 은 인당 노동,  $nf$ 는 인당 비화석연료투입량,  $ff$ 는 인당 화석연료투입량을 의미하고  $T(x)$ 는 개별 그룹의 기술집합을 표시한다. 물론  $\beta$ 는 방향거리함수의 값으로  $\beta = 0$ 이면 최적치이고 관측치는 프론티어 상에 위치한다.  $0 < \beta$ 이면 비효율적이고 프론티어 내부에 위치한다. 이와는 반대로 전통적 접근을 물질균형 접근에서 같은 형태로 표현할 경우 화석연료에 대한 제약없이 단지 바람직한 산출물과 오염물에 대해서만 방향벡터  $g = (+g_y, -g_b)$ 를 설정하여 비교해 볼 수 있을 것이다. 최근의 전통적 접근가운데서 오염물과 크게 관련이 없는 노동과 자본 등에 대해서도 제약을 설정하고 있으나 본 연구에서는 오염물과 크게 무관한 이들에 대해서는 제약을 두지 않는다.

따라서 물질흐름접근에 기초하여 제시하려는 모형은 국가별로 인당 투입물, 인당 산출물 변수를 세분화하여 다른 투입물은 일정하게 둔 채 화석연료와 온실가스를 최대로 저감하면서 산출량의 최대화를 시도함으로써 현실에 부합하는 생산효율을

5) 식 (10)의 모형에서 화석연료의 방향벡터를 제거하면 전통적 모형이 된다.

계측할 것이다. 나아가 본 연구의 접근이 전통적 접근에 의한 생산효율과의 차이를 확인할 필요가 있으므로 이를 함께 비교·제시할 것이다. 이러한 두 접근을 통한 생산효율을 얻는 선형 프로그램은 식 (11)의 (A)와 (B)로 각각 표현할 수 있다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} & \text{(B)} \\
 \text{Max}_{s.t.} \quad \beta & \text{Max}_{s.t.} \quad \phi \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \beta) y_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \phi) y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \beta) b_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \phi) b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j \leq ff_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = (1 - \phi) ff_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\
 \lambda_j \geq 0, & \lambda_j \geq 0
 \end{array} \tag{11}$$

식 (11)의 (A)는 산출물만을 고려한 전통적 접근에 의한 프로그램이고 (B)는 화석 연료와 두 산출물 간의 관계를 고려한 생산효율을 도출하는 프로그램이다. (A)와 (B)의 뚜렷한 차이는 (A)에서는 화석연료의 조정이 없이 산출물과 오염물의 동시적 조절을 표시하고 있다. 그러나 (B)에서는 화석연료의 제약(등호사인)을 표시하고 있고 화석연료의  $\phi$ 만큼 동시적 조절이 가능하다는 점이다. 따라서 프로그램 (B)는 화석연료가 바람직한 산출량 및 오염물과 직접적으로 연결되어 작용하는 상황을 보여 주고 있으나 (A)는 그렇지 못하다는 한계를 갖는다.

식 (11)의 두 계획식 (A)와 (B) 내에서 좌변에 위치한 것은 산출물과 투입물의 최대량과 최소량을 각각 의미하고 우변은 각각 실제 산출량과 투입량을 의미한다. 여기서  $\lambda_j$ 는 관측된 투입물과 산출물의 최대량과 최소량을 형성하여 생산가능경계를 형성하는 비음의 밀도벡터(intensity vector :  $k \times 1$ )이고 화석에너지와 오염물에 대한 등호는 이들에 대한 처분의 제약을 표현한 것이다. 각 국가가 온실가스와 화석연료의 저감의 의무를 가질 때 프론티어 상의 한 점과 내부의 한 점을 비교할 경우 저감

가능한 화석연료와 온실가스의 수준을 확인할 수 있다. 즉, 온실가스와 화석연료 사용의 효율이 높고 낮은 생산단위를 보여줄 수 있다.

한편, 식 (11)를 통하여 화석연료와 온실가스를 동시 저감할 경우 최적효율은 도출할 수 있으나 화석연료와 온실가스가 어느 정도 밀접한 관계를 갖는지를 확인해 주지는 못한다. 이를 확인하기 위하여 화석연료의 추가적인 절감이 온실가스의 변화를 초래하는 정도를 측정해 볼 필요가 있다. 식 (11)의 (B)에서 화석연료에 대한 일정 저감수준을 가정할 때 이에 반응하는 온실가스의 변화를 효율로 측정하는 것이다. 이처럼 화석연료 저감의 수준에 대응하는 온실가스의 저감의 효율은 다음과 같은 선형프로그램으로 측정이 가능하다.

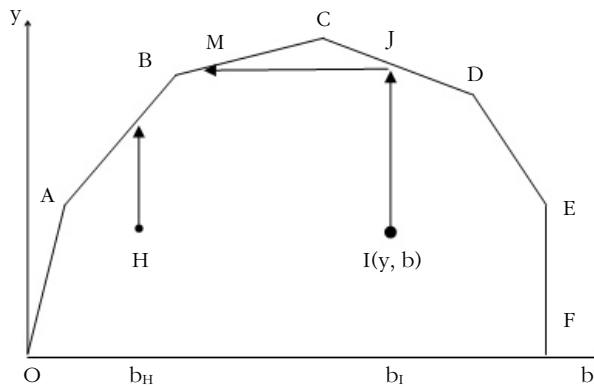
$$\begin{aligned}
 & \text{Max}_{s.t.} \quad \rho \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \rho) y_0 \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \rho) b_0 \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = (1 - \theta) ff_0 \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\
 & \lambda_j \geq 0,
 \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)는 화석연료(ff)를 임의의 수준  $\theta$ 만큼 단계적으로 감소시킬 경우 절감가능한 온실가스의 효율수준( $\rho$ )을 보여준다. 이때  $\theta$ 의 수준을 단계별로 제시하면 그에 상응하는 온실가스 저감의 최적효율 수준을 도출할 수 있다. 특히 식 (11)과 식 (12)를 비교하면 화석연료의 저감과 온실가스를 동시에 저감할 수 있는 정도가 어느 정도인지, 화석연료와 온실가스가 어느 정도 밀접히 연계되어 있는지 등을 보여주게 될 것이다.

한편, 생산단위가 최대효율에 도달한 상태에서 온실가스의 추가저감 여지가 있는

지 확인이 필요하다. <그림 1>과 같이 바람직한 산출물과 오염물이 동시에 생산되는 생산가능집합을 가정하자. 임의의 생산단위  $I(y, b)$ 는 생산가능집합의 내부에 위치한다. 만약  $I$ 점에서 주어진 온실가스배출수준에서 달성가능한 최대산출량은 생산 프론티어상의  $J$ 점이 된다. Picazo-Tadeo and Prior(2009)가 지적하듯이  $J$ 점과 같이 생산 프론티어상에 위치한 점이라도 환경적 비효율이 존재할 수 있어서 온실가스를 추가 저감할 수 있는 여지가 있다. 그러나 생산점이  $H$ 에 위치할 경우 주어진 온실가스 배출수준에서 산출량( $y$ )이 최대가 되는 프론티어 상의 최대 생산효율점에 도달하더라도 더 이상 온실가스를 저감할 여지는 존재하지 않는다. 이처럼 생산프론티어의 위치에 따라서 국가별로 산출량을 극대화하는 효율점에 도달하더라도 온실가스를 추가저감이 가능한 국가와 가능하지 않은 국가가 존재한다. 추가저감이 가능한 국가들은 주로 상대적으로 온실가스 배출량이 산출량에 비하여 높은 국가들이 이에 속할 것이다.

<그림 1> 주어진 온실가스수준에서 최대 생산효율과 추가 저감가능량



본 연구에서는 효율 측정의 2단계 모형을 사용하여 OECD 국가와 비OECD 국가를 대상으로 각 국가가 현재 상태 혹은 온실가스의 감축수준을 설정한 상태에서 달성가능한 최대 효율을 도출하고 그 상태에서 온실가스의 추가저감이 가능한 정도를 측정하고자 한다. 이는 각 국가가 온실가스를 과대 배출하는 정도를 확인함으로써

향후 온실가스 저감에 대한 노력을 강화시킬 수 있는 정보가 될 수 있다.

이러한 상황을 파악하기 위하여 화석에너지와 온실가스에 초점을 둔 제 1단계 선형프로그램을 각각 설정하면 다음과 같다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} & \text{(B)} \\
 \text{Max}_{s.t.} \quad \delta & \text{Max}_{s.t.} \quad \gamma \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \delta) y_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \gamma) y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = b_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j \leq ff_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = ff_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\
 \lambda_j \geq 0, & \lambda_j \geq 0,
 \end{array} \tag{13}$$

식 (13)의 (A)는 전통적 접근 하에서 주어진 현재의 화석연료와 온실가스수준에서 달성가능한 바람직한 산출량에 대한 생산효율( $\delta$ )을 도출하는 프로그램이고 (B)는 물질흐름접근 하에서 화석연료와 온실가스에 대한 환경규제가 시행되는 경우에 감축목표치를 각각 설정했을 경우 달성가능한 최대 생산효율( $\gamma$ )를 구하는 프로그램이다.<sup>6)</sup> 식 (13)의 (A)는 <그림1>의 점 J에서 점 M으로의 이동으로 산출량의 손실을 감수하지 않고도 온실가스를 감소시킬 수 있는 여지가 있다. 만약 현재의 배출량  $b_i$  점이 환경규제로 설정된 온실가스의 배출목표 수준과 다를 경우 그 배출목표 수준을 대입해야 할 것이다. 식 (13)의 (B)는 온실가스와 화석연료가 동시에 규제되는 상황에서 생산효율( $\gamma$ )을 도출한다. 마찬가지로 실제 온실가스와 화석연료보다 규제가 강화된다면 강화된 수준을 대입하여 도출할 수 있다.

6) 식 (13)에서 (A)와 (B) 간의 차이는 (A)에서는 온실가스 배출의 규제는 존재하지만 화석연료에 대한 규제는 존재하지 않는 상태를 보여주고 (B)에서는 온실가스와 화석연료가 동시에 규제되는 상황을 표시하고 있다는 점이다.



이처럼 1단계에서 도출한 프론티어 상의 최대효율 상태에서 추가 저감이 가능한 화석연료와 온실가스의 저감 (혹은 온실가스 만의 저감)을 측정하기 위하여 두 접근 방법에 대응하는 제2단계 선형프로그램을 설정할 필요가 있는데 이는 식 (14)의 (A) 및 (B)와 같다. 식 (14)의  $\delta^*$ 와  $\Upsilon^*$  는 식 (13)에서 구한 각각의 최적해이고  $\eta$ 와  $\psi$ 는  $\delta^*$ 와  $\Upsilon^*$ 가 주어진 프론티어 상에서 화석연료와 온실가스의 추가저감의 효율을 의미한다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} & \text{(B)} \\
 \text{Max}_{s.t.} \quad \eta & \text{Max}_{s.t.} \quad \psi \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \delta^*) y_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq (1 + \Upsilon^*) y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \eta) b_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = (1 - \psi) b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j \leq ff_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j = (1 - \psi) ff_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 & \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq l_0 \\
 \lambda_j \geq 0, & \lambda_j \geq 0,
 \end{array} \tag{14}$$

나아가 화석에너지와 온실가스 저감의 경제성장에 미치는 효과를 확인하고자 한다. 가령, 단계적으로 화석연료나 온실가스 목표치를 강화할 경우 달성가능한 경제 성장의 수준을 보여줄 수 있다. 화석연료와 온실가스의 일정한 감축이 초래할 생산 상의 제약을 산출량 수준의 변화로 측정할 필요가 있다. 이를 선형계획식의 형태로 제시하면 식 (15)와 같다. 즉,

$$\begin{array}{ll}
 \text{(A)} & \text{(B)} \\
 \text{Max}_{s, t, \dots} & y^* \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot y_j \geq & (1 + \beta) y_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot b_j = & (1 - \beta - \mu) b_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot ff_j \leq & ff_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot nf_j \leq & nf_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot k_j \leq & k_0 \\
 \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot l_j \leq & l_0 \\
 \lambda_j \geq & 0,
 \end{array} \tag{15}$$

식 (15)의 (A)는 전통적 접근에 따라서 온실가스에 대한 감축목표치를 정할 경우 달성가능한 최대산출량의 수준을 도출하는 식이고 (B)는 물질흐름접근과 같이 화석 연료를 포함하여 화석연료와 온실가스에 대한 감축목표치를 함께 규제할 경우 달성 가능한 최대산출량을 도출하는 식이다. 즉, 산출량은 확대하고 오염량은 축소하는 방향의 효율측정에서  $\beta$ 는 방향거리함수에 의하여 결정되는 효율치이고  $\mu$ 는 감축목표치의 규제수준을 의미한다. 식 (15)의 (B)에서는 물질흐름접근에 따라서 화석연료와 이산화탄소 배출량의 감축목표치를  $\mu$ 만큼 설정할 경우  $y$ 수준을 측정한다. 이들 두 계획식을 통하여 전통적 접근과 물질흐름접근 하에서 온실가스 혹은 화석연료와 온실가스 배출량 목표 수준 하에서 최대 산출량수준을 도출한다. 이를 이용하면 온실가스 혹은 화석연료와 온실가스 저감이 경제성장률에 미치는 영향을 국가별로 측정할 수 있다.<sup>7)</sup>

7) 본 연구에서는 국가 간에 객관적인 비교를 위하여 일관되게 동일한 감축수준을 부여한다. 하지만 국제적으로 논의되는 저감목표수준을 국가별로 다르게 설정하여 국가별로 경제성장률에 미치는 영향도 추정해 볼 수 있을 것이다.

### III. 자료 및 실증결과

본 연구의 초점은 환경규제를 고려한 생산효율 측정에서 기존연구들이 당연하게 받아들였던 전통적 접근과는 다르게 물질흐름접근에 의존한 생산효율을 각각 측정하여 전통적 결과와 비교하는 데 있다. 따라서 실증분석에서는 전통적 접근과 물질흐름접근으로 설정된 계획식에 따라서 자료가 허용가능한 83개 국가를 대상으로 결과를 확인하고자 한다. 본 연구에서 사용한 통계자료의 출처는 83개 국가의 인구, GDP(실질), 자본스톡, 화석연료사용량, 비화석연료 사용량, 노동력, 이산화탄소배출량 등으로 2009년 자료를 사용하였다.<sup>8)</sup> 2009년을 기준으로 83개 국가의 수는 통계자료가 공통적으로 이용가능한 국가들이다. 이들 통계 중 인구, GDP 등은 자본스톡 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 등 모든 변수는 인구수로 나누어서 사용하였다. 83개 국가는 World Bank의 국가별 소득수준에 따른 분류에 기초하여 OECD 국가, 중고(High-middle)소득 국가, 저(Low)소득 국가의 세 그룹으로 구분하였다.<sup>9)</sup> 세 그룹별 요약통계는 <표 1>과 같다. OECD 국가의 인당 평균소득이 31천 달러로 가장 높고 중고소득은 약 17천 달러, 저소득국 4천 달러로 큰 차이를 보인다. 인당 이산화탄소 배출량도 OECD 국가가 가장 높고 저소득국이 가장 낮다. 이러한 추이는 인당 투입요소에서도 비슷한 형태이다. 특히 저소득국은 인당 자본스톡이 여타 국가에 비하여 크게 낮고 인당 화석연료의 사용이 상당히 낮은 편이다. OECD 국가의 경우 인당 비화석연료의 사용이 여타 국가에 비하여 높은 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 소득수준에 비례하여 인당 CO<sub>2</sub> 배출량과 투입요소의 사용량이 높은 추이를 보이지만 이를 통해서 투입대비 산출의 경제적 성과를 짐작하기는 어렵다.

8) 83개 국가의 상이한 국가의 통계자료는 국제적으로 이들이 신속히 공표되지 않기 때문에 최근 연도의 자료를 이용하지 못하였다.

9) 본 연구의 초점은 상이한 3개의 소득그룹에 따른 결과의 차이이다. 개별국가에 대하여 각각 분석하기에는 국가 수가 너무 많아서 지면관계상 OECD, 중고소득 국가, 저소득 국가를 중심으로 설명한다.

〈표 1〉 요약통계

| 구분   |      | GDP/P<br>(천\$) | CO <sub>2</sub> /P<br>(천톤) | L/P<br>(명) | K/P<br>(천달러) | FF/P<br>(백만<br>BTU) | NF/P<br>(백만<br>BTU) |
|------|------|----------------|----------------------------|------------|--------------|---------------------|---------------------|
| 전체   | 평균   | 19.17          | 6.89                       | 0.42       | 50.09        | 101.90              | 42.72               |
|      | 표준편차 | 14.50          | 6.57                       | 0.09       | 41.73        | 105.75              | 144.28              |
|      | 최댓값  | 74.03          | 38.76                      | 0.59       | 187.81       | 697.70              | 1192.39             |
|      | 최솟값  | 1.30           | 0.35                       | 0.04       | 2.20         | 6.07                | 0.00                |
| OECD | 평균   | 31.14          | 9.53                       | 0.47       | 86.18        | 140.17              | 100.09              |
|      | 표준편차 | 12.11          | 4.39                       | 0.06       | 35.12        | 64.31               | 226.18              |
|      | 최댓값  | 74.03          | 21.52                      | 0.59       | 187.81       | 322.98              | 1192.39             |
|      | 최솟값  | 11.21          | 3.35                       | 0.28       | 20.40        | 47.82               | 1.98                |
| 중고소득 | 평균   | 16.83          | 7.59                       | 0.41       | 40.43        | 113.62              | 8.59                |
|      | 표준편차 | 10.99          | 8.32                       | 0.07       | 30.55        | 140.94              | 9.36                |
|      | 최댓값  | 48.69          | 38.76                      | 0.58       | 135.94       | 697.70              | 31.20               |
|      | 최솟값  | 6.18           | 1.33                       | 0.25       | 4.23         | 20.09               | 0.00                |
| 저소득  | 평균   | 4.35           | 1.67                       | 0.36       | 9.58         | 23.84               | 8.41                |
|      | 표준편차 | 2.02           | 1.29                       | 0.12       | 5.97         | 17.03               | 18.76               |
|      | 최댓값  | 9.16           | 5.44                       | 0.59       | 22.99        | 63.46               | 65.90               |
|      | 최솟값  | 1.30           | 0.35                       | 0.04       | 2.20         | 6.07                | 0.00                |

식 (11)에 기초하여 도출한 전통적 생산효율과 물질균형 접근의 생산효율은 <표 2>와 같다. 방향거리함수에 기초한 전통적 생산효율은 산출물과 CO<sub>2</sub>를 동시에 증가 및 감소시킬 경우의 효율을 말한다. 전통적 효율은 투입물이 일정한 상태에서 오염물과 산출물을 조정한다는 비현실적인 가정을 하기에 현실설명력이 낮다. 반면 물질균형 효율은 오염물과 밀접히 관련된 투입물로서 화석연료가 동시에 저감되는 상태에서 측정된 효율이다. 전체적으로 전통적 생산효율은 0.207이고 물질균형 효율은 0.203으로 나타나 겉으로 보기에는 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 그러나 이를 OECD, 중고소득국, 저소득국의 세 그룹으로 구분하면 차이를 보인다. 먼저 전통적 효율에서 OECD 국가는 0.173으로 저소득국의 0.309에 비하면 매우 높은 수준을 보였으나 반대로 물질균형 효율에 기초할 경우 OECD는 0.219이고 저소득 국가

는 0.203으로서 OECD 국가가 더 비효율적으로 나타났다. 따라서 전통적 접근의 효율에 의존할 경우 생산효율이 왜곡될 수도 있다.

또 하나의 중요한 사실은 OECD, 중고소득 국가는 전통적 효율에서 생산효율이 상대적으로 프런티어에 가깝게 높게 측정되었으나 물질흐름 효율에서는 낮게 측정되었다. 특히 OECD 국가의 전통적 생산효율은 0.173이고 물질흐름 효율은 0.219로 나타나 상당한 차이를 보인다. 이와는 상이하게 저소득국의 전통적 효율은 0.309이나 물질흐름효율은 반대로 0.203으로 크게 개선되어 프론티어에 가까워졌다는 점이다. 이는 OECD 국가에서 화석연료 사용이 많아서 화석연료를 동시에 저감할 경우 생산효율 향상이 어렵기에 그 영향이 크다. 반면에 저소득국은 화석연료의 사용이 상대적으로 적어서 이를 동시에 저감하더라도 생산효율에 크게 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 오히려 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 즉, 대부분의 저소득 국가 중 상당 국가가 물질흐름 효율에서 프론티어 상에 위치하는 것으로 나타났다.

다음으로 <표 2>에서 물질흐름 효율에서 화석연료의 추가적인 절감이 생산효율에 미치는 정도를 함께 제시하였다. 화석연료를 각각 0%, 5%, 10%, 15% 절감할 경우, 생산효율이 어떻게 반응하는지 그 민감도를 측정하였다. 화석연료를 0%로 줄이지 않을 경우 전체 생산효율은 0.091로 프런티어에 가깝게 위치하였고 5%, 10%, 15%로 절감함에 따라서 생산효율은 각각 0.117, 0.143, 0.167로 조금씩 악화되었다. 즉, 생산비효율이 9.1%에서 11.7%, 14.3%, 16.7%로 나빠졌다. 하지만 화석연료 저감을 0만큼 저감할 경우의 효율인 20.3% 저감수준까지는 악화되지는 않았다. 화석연료 저감은 온실가스 저감과 함께 전체적으로 최대 20% 정도까지 저감의 가능성은 존재하는 것으로 보인다. 이를 세 국가그룹으로 살펴보면 화석연료절감으로 OECD 국가가 가장 생산비효율이 나빠졌다. 그 뒤를 저소득 국가, 중고소득 국가가 따른다. 즉, 화석연료의 단계별 저감에 따라서 OECD 국가는 9.6%, 12.6%, 15.7%, 18.3%의 생산비효율을 보였다. 특히 중고소득 국가들 중에 화석연료 의존도가 낮거나 화석연료의존도가 아주 높은 국가들의 경우 상대적으로 화석연료의 단계별 저감에 전혀 반응을 보이지 않는 국가들이 많았다.<sup>10)</sup>

10) 이들 국가는 바바도스, 이스라엘, 마카오, 몰타, 푸에토리코, 싱가포르, 트리니다드 타바고 등 다수이다.

강상목

〈표 2〉 전통접근과 물질흐름 접근의 효율 및 물질흐름접근의 화석연료저감 효율

| Name           | 전통효율<br>(+y, -b) | 물질흐름<br>(+y,-b,-ff) | 물질흐름의 화석연료저감 |       |       |       |       |
|----------------|------------------|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                |                  |                     | 0%           | 5%    | 10%   | 15%   |       |
| OECD           | Australia        | 0.134               | 0.168        | 0.134 | 0.154 | 0.172 | 0.190 |
|                | Austria          | 0.175               | 0.129        | 0.048 | 0.079 | 0.111 | 0.142 |
|                | Belgium          | 0.301               | 0.186        | 0.050 | 0.087 | 0.123 | 0.160 |
|                | Canada           | 0.098               | 0.228        | 0.098 | 0.132 | 0.166 | 0.199 |
|                | Czech Republic   | 0.198               | 0.415        | 0.198 | 0.233 | 0.268 | 0.302 |
|                | Denmark          | 0.149               | 0.277        | 0.149 | 0.181 | 0.212 | 0.242 |
|                | Finland          | 0.169               | 0.280        | 0.169 | 0.203 | 0.238 | 0.268 |
|                | France           | 0.149               | 0.118        | 0.050 | 0.081 | 0.110 | 0.137 |
|                | Germany          | 0.105               | 0.290        | 0.105 | 0.137 | 0.170 | 0.202 |
|                | Greece           | 0.197               | 0.268        | 0.197 | 0.227 | 0.258 | 0.280 |
|                | Hungary          | 0.400               | 0.109        | 0.017 | 0.059 | 0.101 | 0.144 |
|                | Iceland          | 0.201               | 0.185        | 0.201 | 0.234 | 0.267 | 0.300 |
|                | Ireland          | 0.102               | 0.203        | 0.102 | 0.130 | 0.158 | 0.185 |
|                | Italy            | 0.235               | 0.114        | 0.037 | 0.071 | 0.104 | 0.138 |
|                | Japan            | 0.386               | 0.329        | 0.083 | 0.122 | 0.160 | 0.199 |
|                | Korea            | 0.071               | 0.425        | 0.071 | 0.113 | 0.155 | 0.196 |
|                | Luxembourg       | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                | Mexico           | 0.445               | 0.374        | 0.101 | 0.141 | 0.181 | 0.220 |
|                | Netherlands      | 0.159               | 0.138        | 0.077 | 0.101 | 0.122 | 0.143 |
|                | New Zealand      | 0.136               | 0.232        | 0.136 | 0.169 | 0.198 | 0.217 |
|                | Norway           | 0.039               | 0.000        | 0.000 | 0.016 | 0.032 | 0.021 |
|                | Poland           | 0.159               | 0.211        | 0.159 | 0.178 | 0.197 | 0.211 |
|                | Portugal         | 0.461               | 0.344        | 0.080 | 0.119 | 0.157 | 0.195 |
|                | Slovakia         | 0.116               | 0.373        | 0.116 | 0.154 | 0.192 | 0.230 |
|                | Slovenia         | 0.178               | 0.484        | 0.178 | 0.213 | 0.248 | 0.283 |
|                | Spain            | 0.087               | 0.292        | 0.087 | 0.125 | 0.163 | 0.200 |
|                | Sweden           | 0.103               | 0.033        | 0.008 | 0.046 | 0.083 | 0.098 |
|                | Switzerland      | 0.039               | 0.129        | 0.039 | 0.074 | 0.109 | 0.135 |
| Turkey         | 0.207            | 0.199               | 0.104        | 0.132 | 0.160 | 0.188 |       |
| United Kingdom | 0.047            | 0.055               | 0.047        | 0.054 | 0.062 | 0.056 |       |
| United States  | 0.123            | 0.204               | 0.123        | 0.152 | 0.179 | 0.192 |       |
| High-middle    | Barbados         | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                | Croatia          | 0.464               | 0.336        | 0.071 | 0.110 | 0.150 | 0.190 |
|                | Cyprus           | 0.079               | 0.127        | 0.079 | 0.098 | 0.117 | 0.116 |
|                | Hong Kong        | 0.092               | 0.000        | 0.092 | 0.070 | 0.051 | 0.035 |
|                | Israel           | 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 |
|                | Malta            | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|                | Puerto Rico      | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

〈표 2〉 전통접근과 물질흐름 접근의 효율 및 물질흐름접근의 화석연료저감 효율 (계속)

| Name         | 전통효율<br>(+y, -b)    | 물질흐름<br>(+y,-b,-ff) | 물질흐름의 화석연료저감 |       |       |       |       |
|--------------|---------------------|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              |                     |                     | 0%           | 5%    | 10%   | 15%   |       |
| High-middle  | Saudi Arabia        | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.010 |
|              | Singapore           | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|              | Taiwan              | 0.153               | 0.242        | 0.153 | 0.187 | 0.211 | 0.222 |
|              | Trinidad and Tobago | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|              | Algeria             | 0.407               | 0.214        | 0.047 | 0.086 | 0.120 | 0.164 |
|              | Argentina           | 0.219               | 0.041        | 0.007 | 0.050 | 0.089 | 0.123 |
|              | Brazil              | 0.332               | 0.285        | 0.116 | 0.151 | 0.185 | 0.218 |
|              | Bulgaria            | 0.230               | 0.584        | 0.230 | 0.264 | 0.298 | 0.332 |
|              | Chile               | 0.421               | 0.367        | 0.121 | 0.158 | 0.195 | 0.231 |
|              | Colombia            | 0.223               | 0.198        | 0.110 | 0.132 | 0.154 | 0.177 |
|              | Costa Rica          | 0.132               | 0.104        | 0.034 | 0.068 | 0.101 | 0.123 |
|              | Cuba                | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|              | Dominican Republic  | 0.079               | 0.000        | 0.000 | 0.020 | 0.040 | 0.060 |
|              | Jamaica             | 0.439               | 0.437        | 0.194 | 0.228 | 0.259 | 0.289 |
|              | Malaysia            | 0.155               | 0.442        | 0.155 | 0.189 | 0.223 | 0.258 |
|              | Mauritius           | 0.514               | 0.459        | 0.189 | 0.225 | 0.260 | 0.296 |
|              | Panama              | 0.203               | 0.452        | 0.203 | 0.231 | 0.259 | 0.287 |
|              | Peru                | 0.205               | 0.129        | 0.052 | 0.088 | 0.118 | 0.141 |
|              | Romania             | 0.503               | 0.470        | 0.141 | 0.178 | 0.216 | 0.253 |
|              | Russia              | 0.069               | 0.273        | 0.069 | 0.107 | 0.145 | 0.183 |
| Saint Lucia  | 0.000               | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 |       |
| South Africa | 0.338               | 0.000               | 0.338        | 0.367 | 0.396 | 0.425 |       |
| Uruguay      | 0.251               | 0.235               | 0.114        | 0.146 | 0.173 | 0.198 |       |
| Venezuela    | 0.154               | 0.552               | 0.154        | 0.193 | 0.231 | 0.269 |       |
| Low          | Belize              | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|              | Bolivia             | 0.308               | 0.000        | 0.000 | 0.032 | 0.064 | 0.095 |
|              | China               | 0.326               | 0.000        | 0.326 | 0.356 | 0.386 | 0.417 |
|              | Egypt               | 0.452               | 0.012        | 0.003 | 0.042 | 0.080 | 0.119 |
|              | El Salvador         | 0.108               | 0.042        | 0.024 | 0.045 | 0.067 | 0.088 |

<표 2> 전통접근과 물질흐름 접근의 효율 및 물질흐름접근의 화석연료저감 효율 (계속)

| Name | 전통효율<br>(+y, -b) | 물질흐름<br>(+y,-b,-ff) | 물질흐름의 화석연료저감 |       |       |       |       |
|------|------------------|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|      |                  |                     | 0%           | 5%    | 10%   | 15%   |       |
| Low  | Guatemala        | 0.110               | 0.077        | 0.046 | 0.066 | 0.087 | 0.107 |
|      | Honduras         | 0.427               | 0.348        | 0.184 | 0.222 | 0.254 | 0.289 |
|      | India            | 0.000               | 0.000        | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
|      | Indonesia        | 0.486               | 0.444        | 0.178 | 0.213 | 0.248 | 0.282 |
|      | Morocco          | 0.506               | 0.465        | 0.109 | 0.148 | 0.187 | 0.225 |
|      | Nicaragua        | 0.564               | 0.463        | 0.198 | 0.233 | 0.267 | 0.302 |
|      | Pakistan         | 0.331               | 0.174        | 0.073 | 0.103 | 0.132 | 0.160 |
|      | Paraguay         | 0.151               | 0.088        | 0.048 | 0.071 | 0.093 | 0.115 |
|      | Philippines      | 0.276               | 0.253        | 0.136 | 0.160 | 0.183 | 0.206 |
|      | Sri Lanka        | 0.152               | 0.131        | 0.075 | 0.098 | 0.118 | 0.138 |
|      | Syria            | 0.570               | 0.475        | 0.153 | 0.187 | 0.221 | 0.255 |
|      | Thailand         | 0.537               | 0.500        | 0.129 | 0.168 | 0.208 | 0.247 |
|      | Tunisia          | 0.218               | 0.073        | 0.013 | 0.055 | 0.091 | 0.123 |
|      | Vietnam          | 0.520               | 0.522        | 0.223 | 0.258 | 0.290 | 0.322 |
|      | Bangladesh       | 0.137               | 0.000        | 0.000 | 0.019 | 0.039 | 0.058 |
| mean | OECD             | 0.173               | 0.219        | 0.096 | 0.126 | 0.157 | 0.183 |
|      | High-middle      | 0.177               | 0.186        | 0.083 | 0.105 | 0.125 | 0.144 |
|      | Low              | 0.309               | 0.203        | 0.096 | 0.124 | 0.151 | 0.178 |
|      | Overall          | 0.207               | 0.203        | 0.091 | 0.117 | 0.143 | 0.167 |

한편, <표 2>에서 확인되는 전통적 접근과 물질흐름접근의 효율성에 유의적인 차이가 있는지를 통계적으로 확인하기 위하여 <표 3>과 같이 두 결과치에 대한 t 유의성 검정을 아래와 같이 실시하였다. 즉, 전통접근과 물질흐름 접근의 효율수준에 차이가 없다는 귀무가설(두 효율성 값의 차이=0)을 설정하고 동분산을 가정한 t 유의성 검정을 실시하였다. <표 3>에서 알 수 있듯이 OECD 국가와 저소득 국가는 10%와 5% 유의수준에서 두 효율성 값이 상이한 것으로 나타났다. 그러나 중고소득 국가의 경우는 귀무가설이 기각되어서 두 값의 차이가 없었다. 그 이유는 이들 국가들은 두 접근법의 효율성이 일관성을 보여주지 못했기 때문이다. 즉, OECD 국가나 저소득국은 전통접근에 비하여 물질흐름접근에서는 효율성이 모두 저하되었다. 이



와 반대로 중고소득 국가들은 두 방법에 반응을 보이지 않는 국가들이 상대적으로 많았고 물질흐름접근에서 오히려 효율성이 개선되는 국가들도 나타나는 등 일정한 패턴을 보여주지 못함으로써 저하된 값과 향상된 값이 상쇄되는 등 두 결과 값이 차이를 보이지 못하였다.

<표 3> 전통적 접근과 물질흐름 접근의 효율성의 차이검정

|                    | OECD   |       | 중고소득국  |       | 저소득국    |       |
|--------------------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
|                    | 전통     | 물질    | 전통     | 물질    | 전통      | 물질    |
| 평균                 | 0.179  | 0.226 | 0.257  | 0.270 | 0.343   | 0.226 |
| 분산                 | 0.013  | 0.014 | 0.021  | 0.034 | 0.028   | 0.042 |
| 관측수                | 30     | 30    | 22     | 22    | 18      | 18    |
| 공동(Pooled) 분산      | 0.014  |       | 0.027  |       | 0.035   |       |
| 귀무가설<br>(두값차이 = 0) | 0      |       | 0      |       | 0       |       |
| t 통계량              | -1.572 |       | -0.259 |       | 1.879   |       |
| P (T<=t)           | 0.061* |       | 0.398  |       | 0.034** |       |

주: 1) 두 접근의 측정방법의 수치적 차이를 보는 것이므로 두 접근방법에 상관없이 항상 최대효율을 보인 국가들은 제외하였음. 따라서 제시한 평균값은 <표 2>의 평균값과 차이가 있음

2) \*\*(\*)는 5%(10%) 유의수준에서 유의적임

<표 4>에서는 전통적 접근 및 물질흐름접근의 2단계 효율 및 추가저감량을 제시하였다. 이는 식 (13)의 (A)와 (B)에서 제시한 1단계 프로그램에서 소득을 최대화하는 효율과 프런티어에 도달한 연후에 식 (14)의 (A)와 (B)에서 2단계 프로그램을 통하여 저감가능한 CO<sub>2</sub> 배출량을 각각 보여준다.

첫째, 전통적 접근의 1단계 생산효율은 주어진 CO<sub>2</sub> 제약하에서 산출물을 확대할 수 있는 효율수준을 보여준다. 1단계의 전체 생산효율은 0.400으로 전체 국가들이 기존의 산출물 수준에서 평균적으로 40% 정도 산출물을 향상시킬 수 있는 여지가 있다. OECD와 중고소득국은 32.5% 정도이고 저소득 국가는 63.5%로서 개선의 여지가 많다. 즉, 전반적으로 저소득 국가의 경우 현재 소득 수준이 낮아서 프런티어에서 멀리 떨어져 있는 상태임을 의미한다. 전통적 접근의 2단계 효율은 최대 산출

물 수준에서 온실가스를 저감할 수 있는 여지를 보여준다. 전체적으로 CO<sub>2</sub> 저감의 비효율이 0.103으로서 개별 국가별로 기존 CO<sub>2</sub> 배출량에서 평균적으로 약 10.3%를 절감할 여지가 있음을 의미한다. OECD 국가와 중고소득 국가의 온실가스 배출의 비효율이 0.103, 0.122로 상대적으로 높고 저소득국은 0.072로 낮다. 온실가스 절감 가능량을 톤/인당으로 환산했을 경우에 전체적으로 1012톤/인당의 절감이 가능하다. 중고소득 국가는 1,248.6톤/인당으로 가장 높고 저소득국은 313.9톤/인당으로 가장 낮다. 그러나 대부분의 국가에서는 최대 산출물 수준에서 저감가능한 CO<sub>2</sub> 배출량이 없는 경우가 많다.<sup>11)</sup>

둘째, 물질흐름접근의 1단계 생산효율은 전체적으로 전통적 1단계 생산효율보다 0.319로 프런티어에 가깝게 위치한다. 이는 CO<sub>2</sub> 제약뿐만 아니라 화석연료제약을 동시에 포함하므로 산출물 확장은 그만큼 제한을 받기 때문이다. OECD와 중고소득 국가에서 저소득국보다 생산의 비효율이 작은 것으로 나타났다. 반면에 저소득 국가는 프런티어에서 가장 멀리 떨어져서 GDP 개선이 가장 필요하다. 물질흐름접근의 2단계 효율은 유사하게 최대 산출물 수준에서 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 저감할 수 있는 여지를 확인할 수 있다. 전체적으로 CO<sub>2</sub>와 화석연료 저감의 평균 비효율수준은 0.031로서 3.1% 추가저감의 가능성이 있다. 이에 기초하여 온실가스 추가 절감가능량과 화석연료 추가 절감가능량을 톤/인당으로 환산했을 경우에 전체 평균 각각 301.3 톤/인당, 4,061천톤/인당으로 계산되었다. CO<sub>2</sub> 절감가능량은 전통적 접근보다 감소했으나 화석에너지 절감량이 적지 않다. 세 국가그룹의 추가 비효율 수준은 0.042, 0.030, 0.018 등으로 OECD 국가의 추가저감이 요구되는 양이 가장 높고 중고소득, 저소득 국가 순이다. 전통적 접근과 마찬가지로 CO<sub>2</sub> 배출량이 많고 화석연료 사용량이 많은 OECD 국가의 평균 추가절감 가능량이 각각 저소득국의 10배 이상을 차지한다. 물질흐름접근의 2단계 효율이 전통적 접근의 2단계 효율보다 크게 향상된 이유는 1단계 효율의 경우와 마찬가지로 온실가스뿐만 아니라 화석연료를 동시에 절감하는 방향으로 효율개선은 매우 어렵다는 것을 의미한다.

11) 약 60개 국가는 추가저감 가능량이 0으로 나타났다.

〈표 4〉 전통적 접근과 물질흐름접근의 2단계 효율 및 추가저감량

| Name           | 전통 효율(CO <sub>2</sub> 추가저감) |       |                          | 물질흐름효율(CO <sub>2</sub> ,ff추가저감) |       |                          |              |
|----------------|-----------------------------|-------|--------------------------|---------------------------------|-------|--------------------------|--------------|
|                | 1단계                         | 2단계   | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 1단계                             | 2단계   | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 화석연료<br>(천톤) |
| Australia      | 0.036                       | 0.541 | 10473.0                  | 0.000                           | 0.523 | 10123.5                  | 133017.0     |
| Austria        | 0.261                       | 0.000 | 0.0                      | 0.187                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Belgium        | 0.401                       | 0.000 | 0.0                      | 0.289                           | 0.007 | 86.0                     | 1369.8       |
| Canada         | 0.260                       | 0.125 | 2051.1                   | 0.240                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Czech Republic | 0.433                       | 0.388 | 3502.5                   | 0.433                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Denmark        | 0.402                       | 0.192 | 1733.7                   | 0.402                           | 0.000 | 0.7                      | 9.4          |
| Finland        | 0.417                       | 0.272 | 2705.6                   | 0.416                           | 0.000 | 3.4                      | 46.4         |
| France         | 0.210                       | 0.000 | 0.0                      | 0.144                           | 0.038 | 232.0                    | 3539.9       |
| Germany        | 0.332                       | 0.000 | 0.0                      | 0.325                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Greece         | 0.370                       | 0.210 | 1977.9                   | 0.369                           | 0.003 | 24.8                     | 323.8        |
| Hungary        | 0.423                       | 0.000 | 0.0                      | 0.224                           | 0.014 | 69.6                     | 1162.4       |
| Iceland        | 0.239                       | 0.513 | 5721.4                   | 0.239                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Ireland        | 0.305                       | 0.000 | 0.0                      | 0.296                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Italy          | 0.367                       | 0.000 | 0.0                      | 0.161                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| OECD Japan     | 0.645                       | 0.000 | 0.0                      | 0.536                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Korea          | 0.721                       | 0.000 | 0.0                      | 0.677                           | 0.030 | 326.6                    | 5240.3       |
| Luxembourg     | 0.000                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Mexico         | 0.663                       | 0.000 | 0.0                      | 0.615                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Netherlands    | 0.159                       | 0.000 | 0.0                      | 0.152                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| New Zealand    | 0.252                       | 0.000 | 0.0                      | 0.245                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Norway         | 0.056                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Poland         | 0.152                       | 0.455 | 3601.8                   | 0.152                           | 0.447 | 3538.2                   | 45407.3      |
| Portugal       | 0.754                       | 0.000 | 0.0                      | 0.735                           | 0.069 | 363.9                    | 5546.0       |
| Slovakia       | 0.430                       | 0.000 | 0.0                      | 0.413                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Slovenia       | 0.518                       | 0.299 | 2560.3                   | 0.518                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Spain          | 0.481                       | 0.000 | 0.0                      | 0.447                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Sweden         | 0.106                       | 0.000 | 0.0                      | 0.067                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Switzerland    | 0.189                       | 0.000 | 0.0                      | 0.176                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Turkey         | 0.212                       | 0.000 | 0.0                      | 0.209                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |

강상목

〈표 4〉 전통적 접근과 물질흐름접근의 2단계 효율 및 추가저감량 (계속)

| Name        |                     | 전통 효율(CO <sub>2</sub> 추가저감) |        |                          | 물질흐름효율(CO <sub>2</sub> ,ff추가저감) |       |                          |              |
|-------------|---------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|---------------------------------|-------|--------------------------|--------------|
|             |                     | 1단계                         | 2단계    | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 1단계                             | 2단계   | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 화석연료<br>(천톤) |
| OECD        | United Kingdom      | 0.065                       | 0.000  | 0.0                      | 0.057                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | United States       | 0.207                       | 0.197  | 3491.2                   | 0.207                           | 0.159 | 2807.4                   | 40601.2      |
| High-middle | Barbados            | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Croatia             | 0.533                       | 0.000  | 0.0                      | 0.500                           | 0.062 | 279.9                    | 4371.0       |
|             | Cyprus              | 0.000                       | 0.386  | 3361.8                   | 0.000                           | 0.367 | 3195.6                   | 42391.2      |
|             | Hong Kong           | 0.000                       | 0.388  | 4786.5                   | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Israel              | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Macau               | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Malta               | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Puerto Rico         | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Saudi Arabia        | 0.000                       | 0.680  | 11759.3                  | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Singapore           | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Taiwan              | 0.251                       | 0.000  | 0.0                      | 0.251                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Trinidad and Tobago | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Algeria             | 0.684                       | 0.000  | 0.0                      | 0.369                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Argentina           | 0.234                       | 0.000  | 0.0                      | 0.065                           | 0.024 | 99.7                     | 1698.7       |
|             | Brazil              | 0.646                       | 0.000  | 0.0                      | 0.482                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Bulgaria            | 0.789                       | 0.466  | 2777.5                   | 0.789                           | 0.448 | 2671.0                   | 35275.0      |
|             | Chile               | 0.594                       | 0.000  | 0.0                      | 0.575                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Colombia            | 0.391                       | 0.000  | 0.0                      | 0.314                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Costa Rica          | 0.197                       | 0.000  | 0.0                      | 0.143                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Cuba                | 0.000                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Dominican Republic  | 0.140                       | 0.000  | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| Jamaica     | 0.933               | 0.000                       | 0.0    | 0.888                    | 0.000                           | 0.0   | 0.0                      |              |
| Malaysia    | 0.655               | 0.000                       | 0.0    | 0.655                    | 0.000                           | 0.0   | 0.0                      |              |
| Mauritius   | 0.880               | 0.000                       | 0.0    | 0.880                    | 0.000                           | 0.0   | 0.0                      |              |
| Panama      | 0.521               | 0.279                       | 1263.9 | 0.521                    | 0.000                           | 0.0   | 0.0                      |              |

〈표 4〉 전통적 접근과 물질흐름접근의 2단계 효율 및 추가저감량 (계속)

| Name        |              | 전통 효율(CO <sub>2</sub> 추가저감) |       |                          | 물질흐름효율(CO <sub>2</sub> ,ff추가저감) |       |                          |              |
|-------------|--------------|-----------------------------|-------|--------------------------|---------------------------------|-------|--------------------------|--------------|
|             |              | 1단계                         | 2단계   | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 1단계                             | 2단계   | CO <sub>2</sub><br>(인당톤) | 화석연료<br>(천톤) |
| High-middle | Peru         | 0.349                       | 0.000 | 0.0                      | 0.189                           | 0.010 | 13.7                     | 207.1        |
|             | Romania      | 0.909                       | 0.000 | 0.0                      | 0.851                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Russia       | 0.368                       | 0.611 | 6316.6                   | 0.362                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Saint Lucia  | 0.000                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | South Africa | 0.000                       | 0.923 | 8631.8                   | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Uruguay      | 0.435                       | 0.000 | 0.0                      | 0.370                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Venezuela    | 0.887                       | 0.178 | 1057.0                   | 0.866                           | 0.050 | 296.5                    | 4377.6       |
| Low         | Belize       | 0.000                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Bolivia      | 0.732                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | China        | 0.000                       | 0.871 | 4742.5                   | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Egypt        | 0.835                       | 0.079 | 190.1                    | 0.017                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | El Salvador  | 0.172                       | 0.000 | 0.0                      | 0.058                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Guatemala    | 0.173                       | 0.000 | 0.0                      | 0.111                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Honduras     | 0.888                       | 0.000 | 0.0                      | 0.860                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | India        | 0.000                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Indonesia    | 1.288                       | 0.000 | 0.0                      | 1.023                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Morocco      | 1.135                       | 0.000 | 0.0                      | 0.925                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Nicaragua    | 1.314                       | 0.000 | 0.0                      | 1.259                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Pakistan     | 0.749                       | 0.000 | 0.0                      | 0.306                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Paraguay     | 0.247                       | 0.000 | 0.0                      | 0.126                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Philippines  | 0.521                       | 0.000 | 0.0                      | 0.436                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Sri Lanka    | 0.238                       | 0.000 | 0.0                      | 0.187                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Syria        | 0.754                       | 0.498 | 1345.3                   | 0.754                           | 0.303 | 817.5                    | 11685.0      |
|             | Thailand     | 1.539                       | 0.000 | 0.0                      | 1.097                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Tunisia      | 0.443                       | 0.000 | 0.0                      | 0.119                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
|             | Vietnam      | 1.417                       | 0.000 | 0.0                      | 1.220                           | 0.050 | 59.7                     | 795.7        |
|             | Bangladesh   | 0.275                       | 0.000 | 0.0                      | 0.000                           | 0.000 | 0.0                      | 0.0          |
| mean        | OECD         | 0.325                       | 0.103 | 1220.0                   | 0.288                           | 0.042 | 567.0                    | 7621.4       |
|             | High-middle  | 0.325                       | 0.122 | 1248.6                   | 0.283                           | 0.030 | 204.9                    | 2760.0       |
|             | Low          | 0.636                       | 0.072 | 313.9                    | 0.425                           | 0.018 | 43.9                     | 624.0        |
|             | Overall      | 0.400                       | 0.103 | 1012.7                   | 0.319                           | 0.031 | 301.3                    | 4061.0       |

마지막으로 <표 5>는 식 (15)에 기초하여 CO<sub>2</sub>와 화석연료 저감이 경제성장을 감소시키는 정도를 측정하는 것이다. 본 연구에서는 전통적 접근하에서 CO<sub>2</sub>를 저감하는 경우와 물질흐름접근하에서 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 동시에 저감하는 경우를 대비시켰다. 이들을 저감하는 방식은 CO<sub>2</sub> 저감 혹은 CO<sub>2</sub>와 화석에너지의 동시적 저감이 경제성장에 미치는 영향을 확인하는 데 있으므로 이들을 3%, 6% 각각 저감하는 경우를 추정하여 보았다.<sup>12)</sup> 나아가 이들의 변화를 이용하면 CO<sub>2</sub> 저감에 대한 GDP 탄력성과 CO<sub>2</sub>와 화석연료의 동시저감에 대한 GDP 탄력성을 보여줄 수 있기에 이를 함께 제시하였다. 이를 추정하기 위하여 필요한 것은 기준이다. 가령, 전통적 접근하에서 볼 때 그 기준이 되는 GDP수준은 CO<sub>2</sub> 배출을 현재수준에서 전혀 저감하지 않는 경우(0% 저감)에 달성가능한 최대 GDP로 간주하였다. 이 기준을 GDP수준에 대비시켜서 볼 때 CO<sub>2</sub>를 3%, 6% 저감할 때 도달하는 최대 GDP수준은 감소할 것이다. 이와 같은 최대 GDP수준의 변화는 <부록>을 참조바란다. 따라서 배출량의 0% 저감수준의 GDP를 기준으로 3%, 6% 저감수준의 GDP를 비교하여 경제성장률 감소를 도출하였다. 다만 CO<sub>2</sub>를 3%, 6%로 저감하였음에도 도달가능한 GDP수준이 변하지 않는 경우에 경제성장률 저감은 일어나지 않게 된다. 이런 경우는 경제성장률 저감이 0%가 된다. 하지만 현실적으로 오염기술이 일정한 상태에서 CO<sub>2</sub>를 실제 상태보다 더 저감할 경우 경제성장률이 감소하지 않는다는 것은 비합리적이므로 GDP 감소가 없는 것으로 추정된 국가들은 모두 제외하였다.<sup>13)</sup> 물질흐름접근의 경우도 전통적 접근과 동일하게 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 동일하게 적용하였다.

첫째, <표 5>에서 전통적 접근 하에서 CO<sub>2</sub>를 각각 3%, 6% 저감할 경우에 GDP 성장률이 감소하는 정도를 살펴보면 전체 평균이 각각 0.87%와 1.75%로 추정되었다. CO<sub>2</sub> 배출량을 실제보다 3% 저감할 경우 저소득국이 1.22%로 가장 크게 감소되고 OECD 국가는 0.62%로 경제성장률 감소가 가장 작다. 중고소득 국가는 0.90%로 중간에 속한다. 이것이 의미하는 것은 일반적으로 저소득국과 중고소득국의 경제성장률이 OECD 국가보다 높기 때문에 CO<sub>2</sub> 저감은 비OECD 국가의 경제성장에 더

12) 모형은 일정하므로 %를 달리하여도 경제성장의 감소는 거의 비례적으로 일어난다.

13) CO<sub>2</sub> 감소에 GDP 감소가 일어나지 않은 국가는 0%가 아닌 '-' (not available)으로 처리하였다. 사실 이들 국가들은 생산프런티어 상에 있는 국가들이거나 CO<sub>2</sub> 배출이 작아서 거의 GDP에 영향을 주지 못하는 국가들이 속할 수 있다.

큰 부담으로 작용할 수 있다는 점이다. 즉, CO<sub>2</sub>를 국가그룹의 구분없이 동일하게 일정한 율로 저감하도록 요구하면 선진국보다는 저소득국이 경제성장에 더 큰 타격을 받게 될 것이란 점이다. 따라서 CO<sub>2</sub> 저감을 저소득국이나 중고소득국에 동일하게 요구하거나 적용하는 것은 형평성의 관점에서 적절하지 않다. 가령, 기존 배출량의 3%를 동일하게 감축을 요구하면 경제성장에 미치는 부정적 영향은 저소득국에서 더 크게 나타난다. 비슷하게 전통적 접근에서 CO<sub>2</sub>를 6% 저감하는 경우도 저소득국이 OECD 국가에 비하여 경제성장률이 두 배 정도 감소하였다.

〈표 5〉 온실가스와 화석연료 저감이 GDP 감소에 미치는 영향

| Name           | 전통 CO <sub>2</sub> 저감 |     | 물질 CO <sub>2</sub> ,ff저감 |     | 저감의 소득탄력성 |      |
|----------------|-----------------------|-----|--------------------------|-----|-----------|------|
|                | 3%                    | 6%  | 3%                       | 6%  | 전통        | 물질흐름 |
| Australia      | 0.8                   | 1.6 | 0.8                      | 1.7 | 0.27      | 0.28 |
| Austria        | 0.8                   | 1.7 | 0.8                      | 1.6 | 0.28      | 0.27 |
| Belgium        | 1.1                   | 2.1 | 1.0                      | 1.9 | 0.35      | 0.32 |
| Canada         | 0.2                   | 0.4 | 0.1                      | 0.3 | 0.06      | 0.04 |
| Czech Republic | 0.1                   | 0.3 | 0.1                      | 0.2 | 0.05      | 0.03 |
| Denmark        | 0.9                   | 1.7 | 0.7                      | 1.5 | 0.29      | 0.24 |
| Finland        | 0.9                   | 1.9 | 0.8                      | 1.5 | 0.31      | 0.26 |
| France         | 0.8                   | 1.6 | 0.6                      | 1.2 | 0.27      | 0.19 |
| Germany        | 0.7                   | 1.5 | 0.6                      | 1.4 | 0.23      | 0.21 |
| Greece         | 0.6                   | 1.2 | 0.6                      | 1.3 | 0.20      | 0.21 |
| Hungary        | 0.1                   | 0.3 | 1.5                      | 3.0 | 0.04      | 0.50 |
| OECD Iceland   | 0.9                   | 1.8 | 0.6                      | 1.2 | 0.30      | 0.19 |
| Ireland        | 0.9                   | 1.8 | 0.9                      | 1.8 | 0.30      | 0.29 |
| Italy          | 0.9                   | 1.7 | 0.8                      | 1.6 | 0.29      | 0.26 |
| Japan          | 0.9                   | 1.7 | 0.9                      | 1.7 | 0.29      | 0.29 |
| Korea          | 1.0                   | 1.9 | 1.5                      | 3.0 | 0.32      | 0.50 |
| Luxembourg     | -                     | -   | -                        | -   | -         | -    |
| Mexico         | 1.2                   | 2.3 | 0.9                      | 1.7 | 0.38      | 0.29 |
| Netherlands    | 0.0                   | 0.1 | 0.4                      | 0.9 | 0.00      | 0.15 |
| New Zealand    | 0.1                   | 0.3 | 0.1                      | 0.3 | 0.05      | 0.04 |
| Norway         | 0.9                   | 1.7 | -                        | -   | 0.29      | -    |
| Poland         | -                     | -   | -                        | -   | -         | -    |
| Portugal       | 1.5                   | 3.0 | 1.5                      | 3.0 | 0.50      | 0.50 |

강상목

〈표 5〉 온실가스와 화석연료 저감이 GDP 감소에 미치는 영향 (계속)

|                    | Name                | 전통 CO <sub>2</sub> 저감 |     | 물질 CO <sub>2</sub> 저감 |      | 저감의 소득탄력성 |      |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-----|-----------------------|------|-----------|------|
|                    |                     | 3%                    | 6%  | 3%                    | 6%   | 전통        | 물질흐름 |
| OECD               | Slovakia            | 0.1                   | 0.3 | 0.8                   | 1.5  | 0.04      | 0.26 |
|                    | Slovenia            | 0.1                   | 0.2 | 1.4                   | 2.9  | 0.04      | 0.46 |
|                    | Spain               | 0.8                   | 1.7 | 0.9                   | 1.8  | 0.28      | 0.29 |
|                    | Sweden              | 0.1                   | 0.2 | 1.5                   | 3.0  | 0.03      | 0.50 |
|                    | Switzerland         | 0.7                   | 1.4 | 1.2                   | 2.7  | 0.23      | 0.41 |
|                    | Turkey              | 0.1                   | 0.3 | 0.1                   | 0.3  | 0.04      | 0.04 |
|                    | United Kingdom      | -                     | -   | 0.1                   | 0.2  | -         | 0.03 |
|                    | United States       | 0.2                   | 0.4 | 0.2                   | 0.3  | 0.06      | 0.06 |
| High-middle        | Barbados            | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Croatia             | 1.1                   | 2.1 | 1.5                   | 3.0  | 0.36      | 0.49 |
|                    | Cyprus              | 0.9                   | 1.8 | 0.9                   | 1.8  | 0.29      | 0.29 |
|                    | Hong Kong           | 0.6                   | 1.3 | -                     | -    | 0.21      | -    |
|                    | Israel              | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Macau               | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Malta               | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Puerto Rico         | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Saudi Arabia        | 0.3                   | 0.6 | -                     | -    | 0.09      | -    |
|                    | Singapore           | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Taiwan              | 0.2                   | 0.4 | 0.2                   | 0.3  | 0.06      | 0.06 |
|                    | Trinidad and Tobago | -                     | -   | -                     | -    | -         | -    |
|                    | Algeria             | 0.9                   | 1.8 | 1.1                   | 2.3  | 0.29      | 0.37 |
|                    | Argentina           | 0.2                   | 0.3 | 1.1                   | 2.2  | 0.05      | 0.37 |
|                    | Brazil              | 1.1                   | 2.2 | 1.0                   | 1.9  | 0.37      | 0.32 |
|                    | Bulgaria            | 1.3                   | 2.6 | 1.2                   | 2.7  | 0.43      | 0.41 |
|                    | Chile               | 1.1                   | 2.3 | 1.0                   | 2.0  | 0.38      | 0.33 |
|                    | Colombia            | 1.1                   | 2.1 | 0.9                   | 1.9  | 0.35      | 0.31 |
| Costa Rica         | 0.9                 | 1.8                   | 1.5 | 3.0                   | 0.29 | 0.49      |      |
| Cuba               | -                   | -                     | -   | -                     | -    | -         |      |
| Dominican Republic | 1.2                 | 2.4                   | -   | -                     | 0.40 | -         |      |
| Jamaica            | 1.3                 | 2.7                   | 1.3 | 2.6                   | 0.45 | 0.44      |      |
| Malaysia           | 0.8                 | 1.7                   | 1.1 | 2.1                   | 0.28 | 0.35      |      |
| Mauritius          | 1.1                 | 2.2                   | 1.5 | 3.0                   | 0.37 | 0.50      |      |



〈표 5〉 온실가스와 화석연료 저감이 GDP 감소에 미치는 영향 (계속)

|             | Name         | 전통 CO <sub>2</sub> 저감 |      | 물질 CO <sub>2</sub> 저감 |      | 저감의 소득탄력성 |      |
|-------------|--------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------|------|
|             |              | 3%                    | 6%   | 3%                    | 6%   | 전통        | 물질흐름 |
| High-middle | Panama       | 1.3                   | 2.5  | 1.2                   | 2.4  | 0.42      | 0.40 |
|             | Peru         | 1.0                   | 2.0  | 0.8                   | 1.7  | 0.34      | 0.28 |
|             | Romania      | 1.2                   | 2.3  | 1.0                   | 2.0  | 0.38      | 0.34 |
|             | Russia       | 0.1                   | 0.1  | 1.0                   | 1.9  | 0.04      | 0.32 |
|             | Saint Lucia  | -                     | -    | -                     | -    | -         | -    |
|             | South Africa | -                     | -    | -                     | -    | 0.01      | -    |
|             | Uruguay      | 1.0                   | 2.0  | 0.9                   | 1.8  | 0.34      | 0.30 |
|             | Venezuela    | 1.3                   | 2.6  | 1.2                   | 2.4  | 0.43      | 0.39 |
| Low         | Belize       | -                     | -    | -                     | -    | -         | -    |
|             | Bolivia      | 1.3                   | 2.7  | -                     | -    | 0.44      | -    |
|             | China        | 1.3                   | 2.6  | -                     | -    | 0.44      | -    |
|             | Egypt        | 1.3                   | 2.7  | 0.8                   | 1.2  | 0.45      | 0.28 |
|             | El Salvador  | 1.0                   | 2.0  | 0.8                   | 1.6  | 0.33      | 0.27 |
|             | Guatemala    | 1.0                   | 2.0  | 0.8                   | 1.7  | 0.33      | 0.28 |
|             | Honduras     | 1.1                   | 2.2  | 1.5                   | 3.0  | 0.36      | 0.50 |
|             | India        | -                     | -    | -                     | -    | -         | -    |
|             | Indonesia    | 1.3                   | 2.5  | 1.2                   | 2.4  | 0.42      | 0.39 |
|             | Morocco      | 1.3                   | 2.6  | 1.2                   | 2.6  | 0.43      | 0.41 |
|             | Nicaragua    | 1.5                   | 3.0  | 1.5                   | 3.0  | 0.50      | 0.50 |
|             | Pakistan     | 1.3                   | 2.5  | 1.1                   | 2.2  | 0.42      | 0.37 |
|             | Paraguay     | 1.0                   | 2.0  | 0.8                   | 1.7  | 0.34      | 0.28 |
|             | Philippines  | 1.1                   | 2.2  | 1.0                   | 2.0  | 0.37      | 0.33 |
|             | Sri Lanka    | 0.9                   | 1.9  | 0.8                   | 1.6  | 0.32      | 0.27 |
|             | Syria        | 1.4                   | 2.8  | 1.3                   | 2.5  | 0.46      | 0.42 |
|             | Thailand     | 1.3                   | 2.6  | 1.2                   | 2.3  | 0.43      | 0.39 |
|             | Tunisia      | 1.3                   | 2.6  | 1.3                   | 2.7  | 0.44      | 0.43 |
|             | Vietnam      | 1.2                   | 2.5  | 1.2                   | 2.4  | 0.41      | 0.39 |
|             | Bangladesh   | 1.3                   | 2.6  | -                     | -    | 0.44      | -    |
| mean        | OECD         | 0.62                  | 1.26 | 0.76                  | 1.54 | 0.21      | 0.25 |
|             | High-middle  | 0.90                  | 1.80 | 1.06                  | 2.15 | 0.29      | 0.35 |
|             | Low          | 1.22                  | 2.44 | 1.10                  | 2.19 | 0.41      | 0.37 |
|             | Overall      | 0.87                  | 1.75 | 0.94                  | 1.88 | 0.29      | 0.31 |

주: ‘-’는 CO<sub>2</sub>와 화석연료 저감에 GDP변화가 없는 경우로서 현실설명력이 낮으므로 이들은 제외하였음

둘째, 물질흐름접근 하에서 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 동시에 3%, 6% 감소할 경우와 전혀 감소하지 않을 경우를 비교하여 경제성장률 감소의 정도를 측정하였다. 전체적으로 경제성장률 감소는 0.94%와 1.88%로 전통적 접근에 비하여 약간 높게 나타났다. 이는 CO<sub>2</sub>뿐만 아니라 화석연료 저감의 규제가 동시에 시행되는 경우에 해당되므로 경제성장률 감소에 미치는 영향이 당연히 클 것이다. 세 그룹별로는 전통적 경우와 비슷하게 저소득 국가의 영향이 가장 크고 그 다음으로 중고소득국, OECD의 순서이다. 그러나 전통적 접근에 비하여 경제성장률에 미치는 영향이 선진국의 경우는 더 증가하였으나 저소득국의 경우는 더 감소하였다. 이는 화석연료 사용이 경제성장에 미치는 영향이 저소득국보다는 OECD 국가가 더 크다는 것을 시사한다. 중고소득국의 경우도 OECD와 유사한 형태를 보여주었다. 이것이 시사하는 바는 경제가 발전된 국가일수록 인당 에너지 사용이 많기 때문에 이에 대한 규제를 실시하게 되면 경제성장률에 미치는 타격은 선진국이 클 것이란 점이다.

한편 CO<sub>2</sub>와 화석연료 저감에 따른 GDP 성장률 감소를 통하여 이들 간의 탄력성을 도출할 수가 있다. 즉, CO<sub>2</sub>와 화석연료 변화율에 대한 GDP 변화율로 도출된다. <표5>의 마지막 두 열은 전통적 접근과 물질균형 접근에 의한 GDP 탄력성을 보여준다.<sup>14)</sup> 먼저 전통적 접근의 전체 평균 탄력성은 0.29로서 GDP 탄력성은 높은 편이 아니다. 즉, CO<sub>2</sub> 저감에 따른 GDP 감소는 크게 반응하지는 않는 편이다. 세 그룹별로 보면 저소득국의 탄력성이 0.41로 가장 높고 OECD 국가의 탄력성이 0.21로 가장 낮으며 중고소득은 그 중간에 속한다. 저소득국의 경우 추가적 CO<sub>2</sub> 감소는 GDP에 민감한 변화를 초래한다. 다음으로 물질흐름접근 하에서 전체 평균 탄력성은 0.31로 전통적 접근보다 약간 높으나 거의 비슷한 편이다. 세 그룹별로는 저소득국의 탄력성(0.37)이 가장 높고 중고소득(0.35), OECD(0.25)의 순서이다. 전통적 접근에 비하여 OECD와 중고소득 국가는 탄력성이 조금 증가하였으나 저소득 국가는 다소 감소하였다. 이는 역시 화석연료에 대한 규제가 포함될 경우 그 영향은 OECD 국가가 더 민감하게 반응할 것이란 것을 보여준다.

14) CO<sub>2</sub> 배출량과 화석연료 3%, 6% 저감에 대한 GDP의 탄력성은 그 값이 동일하다.

## IV. 결론

본 연구에서는 전통적 접근의 한계를 지적하고 물질균형 접근의 생산효율을 도입하여 두 생산효율의 차이와 2단계 효율, 오염규제의 경제성장에 미치는 영향 등을 비교분석하였다. 특히 상이한 국가들을 대상으로 세 그룹으로 구분하여 이들의 결과를 비교하였다. 특히 본 연구에서는 방법론적으로 물질흐름접근의 이론모형과 실증모형을 나뉘대로 제시하고 이에 기초하여 실증결과를 제시한 점은 기존 연구에서 찾아볼 수 없는 첫 시도이다. 기존 연구의 전통적 접근법은 기술을 바람직한 재화의 생산기술과 오염기술로 구분하지 않고 있고 투입물을 산출물이나 온실가스와 연계시키지 않거나 연계시키더라도 온실가스와 직접 관련이 없는 노동이나 자본스톡 등을 함께 연계시키고 있다는 한계점을 지적한 바 있다. 또한 전통적 생산효율 접근은 산출물과 오염물 간에 약처분성이나 결합생산의 가정으로 오염물과 직접 관련이 없는 투입물을 연계시키거나 투입물이 일정한 상태에서 오염물과 산출물 간의 변화를 시도함으로써 현실에 부합하지 않는다는 한계가 있다. 이들과는 다르게 본 연구는 온실가스와 직접적으로 연계된 투입물로서 화석연료 사용량에 대해서만 온실가스와 연계시켰다. 본 연구의 초점을 물질흐름접근만을 제시하고 그에 대해서 연구를 진행할 수도 있겠으나 이 접근법이 전통적 접근과 차이를 명확히 보여주기 위하여 비교하는 형태로 논의를 전개하였다. 본 연구에서 확인한 결과는 다음과 같다.

첫째, 전체적으로 전통적 생산효율은 0.207이고 물질균형 효율은 0.203으로 나타나서 차이가 없어 보인다. 하지만 세 그룹으로 구분하여 볼 때, 먼저 전통적 효율에서 OECD 국가는 0.173으로 저소득국의 0.309에 비하면 매우 높다. 그러나 물질균형 효율에 기초할 경우 OECD는 0.219이고 저소득 국가는 0.203으로서 OECD 국가가 더 비효율적으로 나타났다. 따라서 주어진 투입물 하에서 산출물과 오염물이 조정가능하다는 전통적 효율에 의존하면 생산효율을 왜곡되게 측정할 수 있다. OECD 국가나 중고소득국은 화석연료 사용이 많기에 이를 동시에 저감할 경우 그것이 어렵다는 것을 의미한다. 반면 저소득국은 화석연료의 사용이 적어서 온실가스와 동시에 저감하더라도 오히려 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 즉, 대부분의 저소득 국가 중 상당 국가가 물질흐름접근의 효율에서 프론티어 상에 위치하는 것으로 나

타났다.

둘째, 전통적 접근의 1단계 생산효율은 주어진 CO<sub>2</sub> 제약하에서 산출물을 확대할 수 있는 효율수준을 보여준다. 1단계의 전체 생산효율은 0.400으로 전체국가들이 기존의 산출물 수준에서 평균적으로 40% 정도 산출물을 향상시킬 수 있는 여지가 있다. 그룹 내에서는 OECD와 중고소득국은 32.5%정도이고 저소득 국가는 63.5%로서 개선의 여지가 많다. 나아가 2단계에서 측정한 CO<sub>2</sub> 저감의 비효율이 0.103으로서 국가별로 기존 CO<sub>2</sub> 배출량에서 평균적으로 약 10.3%를 절감할 여지가 있음을 의미한다. OECD 국가와 중고소득 국가의 온실가스 배출의 비효율이 0.103, 0.122로 상대적으로 높고 저소득국은 0.072로 낮다. 온실가스 절감가능량(톤)을 인당으로 환산했을 경우에 전체적으로 1012 톤/인당의 절감이 필요하다. 중고소득 국가는 1,248.6톤/인당으로 가장 높고 저소득국은 313.9톤/인당으로 가장 낮다.

한편, 물질흐름접근의 1단계 생산효율은 전체적으로 전통적 1단계 생산효율보다 0.319로 프린티어에 가깝게 위치한다. 이는 CO<sub>2</sub> 제약뿐만 아니라 화석연료제약을 동시에 포함하므로 산출물 확장은 그만큼 제한을 받기 때문이다. 2단계 효율인 CO<sub>2</sub>와 화석연료 저감의 비효율의 경우, 전체 평균은 0.031로서 현재보다 3.1% 추가저감의 가능성이 있다. 온실가스 추가 절감가능량과 화석연료 추가 절감가능량은 전체 평균 각각 301.3 톤/인당, 4,061천 톤/인당으로 계산되었다. OECD 국가의 평균 추가절감 가능량이 가장 높아서 저소득국의 10배 이상에 해당한다.

셋째, 전통적 접근하에서 CO<sub>2</sub>를 각각 3%, 6% 저감할 경우에 GDP 성장률 감소는 각각 0.87%와 1.75%로 추정되었다. CO<sub>2</sub> 배출량을 실제배출량보다 3% 저감할 경우 저소득국이 1.22%로 가장 크게 감소되고 OECD 국가는 0.62%로 경제성장률 감소가 가장 작다. CO<sub>2</sub>를 국가별 구분없이 동일하게 일정한 율로 감소하게 되면 선진국보다는 저소득국이 경제성장에 더 큰 타격을 받게 될 것이다. 따라서 CO<sub>2</sub> 저감을 저소득국이나 중고소득국에 동일하게 요구하거나 적용하는 것은 형평성의 관점에서 적절하지 않다.

반면, 물질흐름접근 하에서 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 동시에 3%, 6% 감소할 경우에 경제성장률 감소는 0.94%와 1.88%로 전통적 접근에 비하여 약간 높다. 전통적 접근에 비하여 경제성장률에 미치는 영향이 선진국의 경우는 더 확대되었으나 저소득국

의 경우는 더 축소되었다. 이는 화석연료 사용이 경제성장에 미치는 영향이 저소득 국보다는 OECD 국가가 더 크다는 것을 의미한다. 즉, 경제가 발전된 국가일수록 인당 에너지 사용이 많기 때문에 이에 대한 규제를 실시하게 되면 경제성장률에 미치는 타격은 그렇지 못한 국가보다 더 크게 나타날 것이라는 것을 의미한다.

실증결과가 함축하는 시사점은 전통적 생산효율과 물질균형 효율비교에서 그 결과를 세부적으로 살펴보면 상당한 차이가 있다는 것이다. 특히 투입물인 화석연료를 고려하지 않을 경우 저소득국은 생산효율의 성과가 나쁘고 OECD와 중고소득이 보다 좋은 성과를 보인 것으로 나타나고 있어서 현실을 제대로 반영하지 못하고 있다. 물질흐름접근에 기초할 경우 저소득국의 성과가 OECD보다 높고 환경적 요인이 경제에 미치는 영향도 보다 완화된 것으로 확인되고 있다. 즉, OECD 국가의 환경제약으로 인한 생산효율이 좋지 못한 것이 전통적 접근으로 과대평가되고 있다. 즉, 전통적 접근에서 OECD 국가의 생산효율, 2단계생산효율이 더 높게 평가되었고 경제성장에 미치는 부정적 영향은 더 낮게 평가되었다. 이처럼 전통적 접근의 생산효율 측정은 현실을 왜곡시킬 여지가 있으므로 향후 현실을 더 정확히 반영할 수 있는 방법론에 기초한 보다 정교한 추정이 이루어질 필요가 있다.

나아가 물질흐름접근에서 확인되는 점은 OECD 국가일수록 CO<sub>2</sub>와 화석연료를 고려한 생산효율, CO<sub>2</sub>와 화석연료의 추가저감의 비효율이 좋지 않고 추가저감량 가능량이 훨씬 높게 나타나고 있다. 널리 알려져 있듯이 온실가스 배출은 화석연료 사용의 기여가 크다. 인당 화석연료 소비량이 훨씬 높은 선진국들이 지구의 환경훼손을 초래한 요인이 더 클 수 있고 앞으로도 그럴 가능성이 더 높기 때문에 이에 대비하여 지구적 환경개선에 대한 높은 책임의식과 부담이 필요하고 적극적인 환경보전을 위한 노력들이 이루어져야 할 것이다. 또한 과거 환경을 파괴하는 개발방식에서 배운 교훈을 통하여 같은 방식으로 경제성장을 추구하는 후진국들이 더 이상 같은 경로를 밟지 않도록 선진국들이 지원하고 협력하는 것도 필요하다.

[References]

1. 강상목, “물질흐름접근에 기초한 생산단위의 지속가능성 계측,” 「환경정책연구」, 제 12권, 제1호, 2013, pp. 125~153.
2. Aiken, D. V., R. Färe, S. Grosskopf, and C. A Jr. Pasurka, “Pollution Abatement and Productivity Growth: Evidence from Germany, Japan, The Netherlands, and the United States”, *Environmental Resource and Economics*, Vol. 44, 2009, pp. 11~28.
3. Ang, B. W. and F. Q. Zhang, “Inter-Regional Comparisons of Energy-Related CO<sub>2</sub> Emissions Using the Decomposition Technique,” *Energy* 24, 1999, pp. 297~305.
4. Arcelus, F. J. and P. Arocena, “Productivity Differences Across OECD Countries in The Presence of Environmental Constraints,” *Journal of the Operational Research Society* 56, 2005, pp. 1352~1362.
5. Boyd, G. A., G. Tolley, and X. B. Pang, “Productivity and Undesirable Output: A Directional Distance Function Approach,” *Journal of Environmental Management*, 51, 1997, pp. 229~240.
6. Boyd, G. A. and J. D. McClelland, “The Impact of Environmental Constraints on Productivity Improvement in Integrated Paper Plants,” *Journal of Environmental Economics and Management*, 138, 1999, pp. 121~142.
7. Chung, Y.R., R. Fare, and S. Grosskopf, “Productivity and Undesirable Outputs: a Directional Distance Function Approach,” *Journal of Environmental Management* 51, 1997, pp. 229~240.
8. Färe, R., S. Grosskopf, and C. Pasurka, “Accounting for Air Pollution Emissions in Measures of State Manufacturing Productivity Growth,” *Journal of Regional Science* 4(3), 2001, pp. 381~409.
9. Färe, R. and S. Grosskopf, “Nonparametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs; Comment,” *American Journal of Agricultural Economics*, 85, 2003, pp. 1070~1074.
10. Färe, R. and S. Grosskopf, “*New Direction: Efficiency and Productivity*,” Kluwer Academic Publishers Boston, 2004.
11. Färe, R., S. Grosskopf, and D. Margaritis, “Productivity Growth and Convergence in the European Union,” *Journal of Productivity Analysis* 25, 1-2, 2006, pp. 111~141.

12. Färe, R. S. Grosskopf, and Carl Pasurka, "Effects on Relative Efficiency in Electric Power Generation due to Environmental Controls," *Resources and Energy*, 8, 1986, pp. 167~184.
13. Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell, and C. Pasurka, "Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach," *Review of Economics and Statistics* 71(1), 1989, pp. 90~98.
14. Färe, R., S. Grosskopf, M. Norris, and Z. Zhang, "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries," *The American Economic Review*, 84(1), 1994, pp. 66~83.
15. Färe, R. S. Grosskopf, and Daniel Tyteca, "An Activity Analysis Model of The Environmental Performance of Firms-Application to Fossil Fuel Fired Electric Utilities," *Ecological Economics*, 18, 1996, pp. 161~175.
16. Färe, R., S. Grosskopf, and D. Margaritis, "Time Substitution With Application to Data Envelopment Analysis," *European Journal of Operational Research* 206(3), 2010, pp. 686~690.
17. Førsund, Finn R., "Energy in a Bathtub: Electricity Trade Between Countries with Different Generation Technologies," Memorandum 17/2009, Oslo University, Department of Economics.
18. Gomes, E. G. and M. P. E. Lins, "Modelling Undesirable Outputs With Zero Sum Gains Data Envelopment Analysis Models," *Journal of the Operational Research Society*, 7, 2007, pp. 1~8.
19. Hamilton, C. and H. Turton, "Determinants of Emissions Growth in OECD Countries," *Energy Policy* 30, 2002, pp. 62~71.
20. Jeon, B. and R. C. Sickles, "The Role of Environmental Factors in Growth Accounting," *Journal of Applied Econometrics* 19, 2004, pp. 567~594.
21. Kumar, S., "Environmentally Sensitive Productivity Growth: A Global Analysis Using Malmquist-Luenberger Index," *Ecological Economics*, 56, 2006, pp. 280~293.
22. Lo, S. F., H. J. Sheu, and J. L. Hu, "Taking CO<sub>2</sub> Emissions Into A Country's Productivity Change: The Asian Growth Experience," *International Journal of Sustainable Development and World*, 12, 2005, pp. 279~290.
23. Lozano, S. and E. Gutierrez, "Non-parametric Frontier Approach to Modelling the

- Relationships among Population, GDP, Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emission,” *Ecological Economics*, 66, 2008, pp. 687~699.
24. Margaritis, D., R. Färe, and S. Grosskopf, “Productivity Convergence and Policy: A Study of OECD Countries and Industries,” *Journal of Productivity Analysis*, 28, 1~2, 2007, pp. 87~105.
25. Mandal, S. K. and S. Madheswaran, “Environmental Efficiency of The Indian Cement Industry”, *Energy Policy*, vol.38, 2010, pp. 1108~1118.
26. Nordhaus, W. and J. Boyer, “Warning The World :Economic Models of Global Warming,” MIT Press; Cambridge, MA, 2000.
27. Parry, M., N. Arnell, T. McMichel, R. Nicholls, P. Martens, S. Kovats, M. Livermore, C. Rosenzweig, A. Iglesias, and G. Fischer, “Millions at Risk: Defining Critical Climate Change Threats and Targets,” *Global Environmental Change*, 11, 2001, pp. 181~183.
28. Picazo-Tadeo, A. J. and D. Prior, “Environmental Externalities and Efficiency Measurement,” *Journal of Environmental Management*, 90, 2009, pp. 3332~3339.
29. Ray, S. C., *Data Envelopment Analysis: Theory and Techniques for Economics and Operations Research*, Cambridge University Press, 2004.
30. Sancho, Francesc Hernaadez, Tadeo, Andres Picazo and Ernest Reig Martiez, “Efficiency and Environmental Regulation,” *Environmental and Resource Economics*, 15, 2000, pp. 365~378.
31. Tyteca, D., “On The Measurement of The Environmental Performance of Firms 3/4 a Literature Review and a Productive Efficiency Perspective,” *Journal of Environmental Management*, 46, 1996, pp. 281~308.
32. Tyteca, D., “Linear Programming Modules for The Measurement of Environmental Performance of Firms 3/4 Concepts and Empirical Results,” *Journal of Productivity Analysis*, 8, 1997, pp. 183~197.
33. Tulkens, H. and P. Vanden Eeckaut, “Non-parametric Efficiency, Progress and Regress Measures for Panel Data: Methodological Aspects,” *European Journal of Operational Research*, 80, 1995, pp. 474~499.
34. Weber, W. L. and B. R. Domazlicky, “Productivity Growth and Pollution in State Manufacturing,” *Review of Economics and Statistics*, 83, 2001, pp. 195~199.



35. Wang, Q., P. Zhou, and D. Zhou, "Efficiency Measurement with Carbon Dioxide Emissions: The Case of China," *Applied Energy*, 90, 2012, pp. 161~166.s
36. Zaim, O. and F. Taskin, "Environmental Efficiency in Carbon Dioxide Emissions in The OECD: A Non-Parametric Approach," *Journal of Environmental Management* 58, 2000a, pp. 95~107.
37. Zaim, O. and F. Taskin, "A Kuznets Curve in Environmental Efficiency: An Application on OECD Countries," *Environmental and Resource Economics* 17, 2000b, pp. 21~36.
38. Zhou, P., B. W. Ang, and K. L. Poh, 2006. "Slacks-based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance," *Ecological Economics Elsevier*, Vol. 60(1), pp. 111~118.
39. Zhou, P., K. L. Poh, and B. W. Ang, "A Non-Radial DEA Approach to Measuring Environmental Performance," *European Journal of Operational Research*, 178, 2007, pp. 1~9.
40. Zhou, P., B. W. Ang, and K. L. Poh, "A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies," *European Journal of Operational Research*, 2007.
41. Zhou, P., B. W. Ang, and K. L. Poh, "Measuring Environmental Performance Under Different Environmental DEA Technologies," *Energy Economics*, 30, 2008, pp. 1~14.
42. Zofío, J. L. and A. M. Prieto, "Environmental Efficiency and Regulatory Standards: The Case of CO<sub>2</sub> Emissions From OECD Countries," *Resource and Energy Economics*, 23, 2001, pp. 63~83.

강상목

〈부록 표 1〉 CO<sub>2</sub>와 CO<sub>2,ff</sub>의 동시 감소 시 최대 GDP 수준의 변화

| Name        |                | 전통적 접근(천 달러)        |                     |                     | 물질흐름접근(천 달러)           |                        |                        |
|-------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             |                | CO <sub>2</sub> -0% | CO <sub>2</sub> -3% | CO <sub>2</sub> -6% | CO <sub>2,ff</sub> -0% | CO <sub>2,ff</sub> -3% | CO <sub>2,ff</sub> -6% |
| OECD        | Australia      | 49.0                | 48.6                | 48.2                | 47.7                   | 47.3                   | 46.9                   |
|             | Austria        | 44.2                | 43.9                | 43.5                | 42.5                   | 42.1                   | 41.8                   |
|             | Belgium        | 45.3                | 44.8                | 44.4                | 41.3                   | 40.9                   | 40.5                   |
|             | Canada         | 45.3                | 45.2                | 45.1                | 44.5                   | 44.5                   | 44.4                   |
|             | Czech Republic | 32.5                | 32.4                | 32.4                | 32.1                   | 32.1                   | 32.1                   |
|             | Denmark        | 44.3                | 44.0                | 43.6                | 42.6                   | 42.3                   | 42.0                   |
|             | Finland        | 43.0                | 42.6                | 42.2                | 40.6                   | 40.3                   | 40.0                   |
|             | France         | 35.6                | 35.3                | 35.0                | 34.8                   | 34.6                   | 34.4                   |
|             | Germany        | 42.6                | 42.3                | 42.0                | 42.2                   | 41.9                   | 41.6                   |
|             | Greece         | 34.7                | 34.5                | 34.3                | 33.2                   | 33.0                   | 32.8                   |
|             | Hungary        | 22.8                | 22.8                | 22.8                | 18.1                   | 17.9                   | 17.6                   |
|             | Iceland        | 50.8                | 50.3                | 49.9                | 44.6                   | 44.3                   | 44.1                   |
|             | Ireland        | 43.1                | 42.7                | 42.3                | 43.0                   | 42.6                   | 42.2                   |
|             | Italy          | 34.6                | 34.3                | 34.0                | 31.2                   | 30.9                   | 30.7                   |
|             | Japan          | 41.7                | 41.4                | 41.0                | 40.0                   | 39.7                   | 39.3                   |
|             | Korea          | 39.2                | 38.8                | 38.4                | 35.5                   | 34.9                   | 34.4                   |
|             | Luxembourg     | 74.0                | 74.0                | 74.0                | 74.0                   | 74.0                   | 74.0                   |
|             | Mexico         | 16.5                | 16.3                | 16.1                | 15.7                   | 15.6                   | 15.4                   |
|             | Netherlands    | 43.6                | 43.6                | 43.6                | 42.8                   | 42.6                   | 42.4                   |
|             | New Zealand    | 34.0                | 34.0                | 33.9                | 33.9                   | 33.8                   | 33.8                   |
|             | Norway         | 52.3                | 51.9                | 51.4                | 50.4                   | 50.4                   | 50.4                   |
|             | Poland         | 19.5                | 19.5                | 19.5                | 19.5                   | 19.5                   | 19.5                   |
|             | Portugal       | 28.6                | 28.2                | 27.7                | 26.3                   | 25.9                   | 25.5                   |
|             | Slovakia       | 26.0                | 26.0                | 25.9                | 25.4                   | 25.2                   | 25.1                   |
| Slovenia    | 36.9           | 36.9                | 36.8                | 36.4                | 35.9                   | 35.4                   |                        |
| Spain       | 36.6           | 36.3                | 36.0                | 35.8                | 35.4                   | 35.1                   |                        |
| Sweden      | 37.8           | 37.8                | 37.7                | 35.4                | 34.9                   | 34.4                   |                        |
| Switzerland | 44.5           | 44.2                | 43.9                | 44.1                | 43.6                   | 42.9                   |                        |
| Turkey      | 13.5           | 13.5                | 13.5                | 13.4                | 13.4                   | 13.4                   |                        |

〈부록 표 1〉 CO<sub>2</sub>와 CO<sub>2,ff</sub>의 동시 감소 시 최대 GDP 수준의 변화 (계속)

| Name               |                     | 전통적 접근(천 달러)        |                     |                     | 물질흐름접근(천 달러)           |                        |                        |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                    |                     | CO <sub>2</sub> -0% | CO <sub>2</sub> -3% | CO <sub>2</sub> -6% | CO <sub>2,ff</sub> -0% | CO <sub>2,ff</sub> -3% | CO <sub>2,ff</sub> -6% |
| OECD               | United Kingdom      | 35.3                | 35.3                | 35.3                | 35.0                   | 34.9                   | 34.9                   |
|                    | United States       | 48.7                | 48.6                | 48.6                | 48.6                   | 48.5                   | 48.5                   |
| High-middle        | Barbados            | 28.0                | 28.0                | 28.0                | 28.0                   | 28.0                   | 28.0                   |
|                    | Croatia             | 21.8                | 21.5                | 21.3                | 19.9                   | 19.7                   | 19.4                   |
|                    | Cyprus              | 21.3                | 21.1                | 20.9                | 21.3                   | 21.1                   | 20.9                   |
|                    | Hong Kong           | 39.4                | 39.2                | 38.9                | 36.1                   | 36.1                   | 36.1                   |
|                    | Israel              | 25.2                | 25.2                | 25.2                | 25.2                   | 25.2                   | 25.2                   |
|                    | Macau               | 43.7                | 43.7                | 43.7                | 43.7                   | 43.7                   | 43.7                   |
|                    | Malta               | 21.5                | 21.5                | 21.5                | 21.5                   | 21.5                   | 21.5                   |
|                    | Puerto Rico         | 23.3                | 23.3                | 23.3                | 23.3                   | 23.3                   | 23.3                   |
|                    | Saudi Arabia        | 19.8                | 19.9                | 19.9                | 19.8                   | 19.8                   | 19.8                   |
|                    | Singapore           | 48.7                | 48.7                | 48.7                | 48.7                   | 48.7                   | 48.7                   |
|                    | Taiwan              | 35.9                | 35.9                | 35.8                | 35.8                   | 35.7                   | 35.7                   |
|                    | Trinidad and Tobago | 30.5                | 30.5                | 30.5                | 30.5                   | 30.5                   | 30.5                   |
|                    | Algeria             | 8.7                 | 8.6                 | 8.5                 | 7.5                    | 7.4                    | 7.3                    |
|                    | Argentina           | 14.1                | 14.1                | 14.1                | 12.2                   | 12.0                   | 11.9                   |
|                    | Brazil              | 10.6                | 10.5                | 10.4                | 10.2                   | 10.1                   | 10.1                   |
|                    | Bulgaria            | 16.5                | 16.3                | 16.1                | 16.5                   | 16.3                   | 16.0                   |
|                    | Chile               | 16.8                | 16.6                | 16.4                | 16.2                   | 16.0                   | 15.9                   |
|                    | Colombia            | 9.0                 | 8.9                 | 8.8                 | 8.8                    | 8.8                    | 8.7                    |
|                    | Costa Rica          | 12.6                | 12.5                | 12.4                | 12.3                   | 12.1                   | 11.9                   |
|                    | Cuba                | 11.3                | 11.3                | 11.3                | 11.3                   | 11.3                   | 11.3                   |
| Dominican Republic | 10.6                | 10.5                | 10.4                | 9.9                 | 9.9                    | 9.9                    |                        |
| Jamaica            | 12.5                | 12.4                | 12.2                | 12.5                | 12.4                   | 12.2                   |                        |
| Malaysia           | 16.8                | 16.7                | 16.6                | 16.1                | 15.9                   | 15.7                   |                        |
| Mauritius          | 15.0                | 14.8                | 14.6                | 14.5                | 14.3                   | 14.0                   |                        |
| Panama             | 15.0                | 14.9                | 14.7                | 15.0                | 14.8                   | 14.7                   |                        |

〈부록 표 1〉 CO<sub>2</sub>와 CO<sub>2,ff</sub>의 동시 감소 시 최대 GDP 수준의 변화 (계속)

| Name        |              | 전통적 접근(천 달러)        |                     |                     | 물질흐름접근(천 달러)           |                        |                        |
|-------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             |              | CO <sub>2</sub> -0% | CO <sub>2</sub> -3% | CO <sub>2</sub> -6% | CO <sub>2,ff</sub> -0% | CO <sub>2,ff</sub> -3% | CO <sub>2,ff</sub> -6% |
| High-middle | Peru         | 8.3                 | 8.2                 | 8.1                 | 7.8                    | 7.7                    | 7.7                    |
|             | Romania      | 14.5                | 14.3                | 14.2                | 14.1                   | 14.0                   | 13.9                   |
|             | Russia       | 20.2                | 20.2                | 20.2                | 18.7                   | 18.5                   | 18.4                   |
|             | Saint Lucia  | 12.7                | 12.7                | 12.7                | 12.7                   | 12.7                   | 12.7                   |
|             | South Africa | 12.0                | 12.0                | 12.0                | 7.3                    | 7.3                    | 7.3                    |
|             | Uruguay      | 13.5                | 13.4                | 13.2                | 13.3                   | 13.2                   | 13.1                   |
|             | Venezuela    | 15.4                | 15.2                | 15.0                | 14.8                   | 14.6                   | 14.4                   |
| Low         | Belize       | 9.2                 | 9.2                 | 9.2                 | 9.2                    | 9.2                    | 9.2                    |
|             | Bolivia      | 4.8                 | 4.7                 | 4.7                 | 3.7                    | 3.7                    | 3.7                    |
|             | China        | 11.9                | 11.7                | 11.6                | 7.1                    | 7.1                    | 7.1                    |
|             | Egypt        | 6.8                 | 6.7                 | 6.7                 | 4.8                    | 4.7                    | 4.7                    |
|             | El Salvador  | 6.7                 | 6.7                 | 6.6                 | 6.3                    | 6.3                    | 6.2                    |
|             | Guatemala    | 6.7                 | 6.6                 | 6.5                 | 6.5                    | 6.4                    | 6.4                    |
|             | Honduras     | 5.1                 | 5.0                 | 5.0                 | 4.8                    | 4.7                    | 4.7                    |
|             | India        | 3.2                 | 3.2                 | 3.2                 | 3.2                    | 3.2                    | 3.2                    |
|             | Indonesia    | 5.7                 | 5.6                 | 5.5                 | 5.5                    | 5.4                    | 5.4                    |
|             | Morocco      | 5.3                 | 5.3                 | 5.2                 | 5.2                    | 5.1                    | 5.0                    |
|             | Nicaragua    | 3.5                 | 3.4                 | 3.4                 | 3.3                    | 3.2                    | 3.2                    |
|             | Pakistan     | 3.0                 | 3.0                 | 2.9                 | 2.6                    | 2.6                    | 2.6                    |
|             | Paraguay     | 4.2                 | 4.1                 | 4.1                 | 3.9                    | 3.9                    | 3.9                    |
|             | Philippines  | 3.9                 | 3.8                 | 3.8                 | 3.8                    | 3.8                    | 3.7                    |
|             | Sri Lanka    | 4.4                 | 4.4                 | 4.4                 | 4.4                    | 4.3                    | 4.3                    |
|             | Syria        | 6.0                 | 5.9                 | 5.8                 | 5.6                    | 5.5                    | 5.5                    |
|             | Thailand     | 11.6                | 11.5                | 11.3                | 11.4                   | 11.2                   | 11.1                   |
|             | Tunisia      | 7.3                 | 7.2                 | 7.1                 | 6.4                    | 6.3                    | 6.2                    |
|             | Vietnam      | 3.9                 | 3.8                 | 3.8                 | 3.9                    | 3.8                    | 3.8                    |
|             | Bangladesh   | 1.5                 | 1.5                 | 1.4                 | 1.3                    | 1.3                    | 1.3                    |
| mean        | OECD         | 38.6                | 38.4                | 38.2                | 37.1                   | 36.9                   | 36.6                   |
|             | High-middle  | 19.5                | 19.5                | 19.4                | 18.9                   | 18.8                   | 18.7                   |
|             | Low          | 5.7                 | 5.7                 | 5.6                 | 5.1                    | 5.1                    | 5.1                    |
|             | Overall      | 23.3                | 23.2                | 23.1                | 22.4                   | 22.3                   | 22.1                   |