

# OECD 국가의 이산화탄소 배출량 분해분석\*

김광욱\*\*, 강상목\*\*\*

---

## 〈요 약〉

---

이산화탄소 저감에 대한 사회·경제적 관심이 높아지면서 실제 이산화탄소 배출의 변화요인을 추정하고 그 영향력을 파악하는 분해분석의 중요성이 높아지고 있다. 본 연구는 1980년~2007년의 OECD 27개 국가를 대상으로 방향거리함수를 활용한 이산화탄소 분해산식을 정의하고 각 요인별 변화효과를 추정하였다. 특히 생산 과정에 투입되는 에너지 사용량을 화석연료와 비-화석연료로 구분하고 각 에너지원에 따른 이산화탄소 변화효과를 계측하였다.

상대적으로 급격한 경제성장을 경험한 국가는 표본기간내 생산성 하락과 배출집약도 증가를 동시에 보여주고 있고 규모 확대에 의한 이산화탄소 배출압력을 효과적으로 제어하지 못하고 있었다. 특히 효율 및 기술 변화요인이 이산화탄소의 저감을 유도하지 못하였고 이산화탄소의 배출량 증가에 가장 주요한 요인으로 작용하고 있었다. 또한 적절한 환경규제가 작용하지 않는 상태에서 이루어진 경제성장이 배출집약도의 상승을 유도하고 있고 강력한 환경정책 설정의 필요성을 확인할 수 있었다. 반면 실제 이산화탄소의 감소를 보이는 국가는 생산성의 성장, 에너지 투입의 효율성 상승, 배출집약도의 하락을 동시에 보여주고 있었다. 비-화석연료의 사용비중 증대와 강력

---

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

\*\* 부산대학교 경제통상대학 경제학과 강사(제1저자).

\*\*\* 부산대학교 경제통상대학 경제학과 교수(교신저자).

---

한 환경정책 등으로 인한 환경친화적 생산전환을 확인할 수 있었고 대부분이 환경에 대한 사회·경제적 관심이 높은 유럽국가라는 공통점이 있었다. 특히 이들 국가는 기술변화에 의한 저감효과가 강하게 나타났고, 이산화탄소의 배출량 증가속도가 빠른 국가에 비해 그 효과가 확대되는 모습을 보였다.

주제어 : 방향거리함수, 에너지 효율성, 분해분석, 배출집약도, 이산화탄소 배출

\*\*\*\*\*

This paper presents an alternative decomposition technique to identify the relative importance of factors associated with changes in CO<sub>2</sub> emissions by using directional distance function to model the joint production of desirable and undesirable outputs. The key feature of the proposed approach is the introduction of fossil and non-fossil fuel energy input efficiencies, productivity change and emission intensity change.

For the 27 OECD countries as a whole, the empirical results indicate that economic growth is the most important contributor to CO<sub>2</sub> emissions increase, while efficiency change is the most important component to CO<sub>2</sub> emissions reduction between 1980 and 2007. For more extensive insights, this paper divided 3 groups according to the emission growth rate and find out that high emission countries show relatively low production efficiencies and technical changes contributing CO<sub>2</sub> emissions increase. The results also provide that more strict environmental regulations are needed to improve the pollution intensity in these countries.

Keywords : directional distance function, energy efficiency,  
decomposition analysis, pollution intensity,  
carbon dioxide emission

---

JEL 분류 : C6, Q4, Q5

## I. 서 론

기후변화의 심각성이 대두되면서 실제 이산화탄소의 변화요인을 추정하는 분해분석(decomposition analysis)의 중요성이 높아지고 있다. 분해분석은 이산화탄소의 주요 배출요인을 구분하고 그 영향력을 파악하는 분석으로 효율적인 저감정책을 설정하는데 필수적인 과정이다. 특히 이산화탄소의 감축의무가 점차 강화되는 시점에서 각 변화요인에 맞는 적절한 정책수단을 적용하고 이에 따른 환경성과를 파악하는 것은 향후 산업경쟁력 유지에도 매우 중요한 요소이다. 이러한 문제의식에서 Ang and Zhang (2000), Wang *et al.*(2005), Lee and Oh (2006), Zha *et al.*(2010)은 지수분해분석(index decomposition analysis : IDA)의 방식을 활용하여 오염 배출량의 변화를 분석한 바 있다. 지수분해분석은 오염물 변화를 주요 요인의 곱셈형태로 표현하는 방식으로 다양한 환경이슈를 고려할 수 있고 해석상의 편의성이 높다는 장점을 가진다. 한편 Pasurka (2006), Wang (2007), Zhou and Ang (2008), Li (2010), Zhang *et al.*(2011)은 자료포락분석(data envelopment analysis : DEA)의 거리함수(distance function)를 활용하여 오염물의 변화요인을 추정하고 있다. 거리함수 접근법은 실제 생산 과정에서 결합되는 투입물과 산출물의 상호관계에 바탕을 둔 분석 방법으로 생산효율에 따른 변화효과를 분석할 수 있는 장점을 가진다.

먼저 Pasurka (2006)는 산출물과 오염물의 동시적 확장을 유도하는 방사선 척도(radial measure)를 적용하여 1987년~1995년의 미국 전력발전소의 질소산화물( $\text{NO}_x$ )과 이황산가스( $\text{SO}_2$ ) 배출의 변화요인을 분석하였다. 언급한 바와 같이 방사선 척도는 산출물의 확장 수준을 추정하는 과정에서 오염물의 증가도 동시에 이루어지는 단점을 가진다. 따라서 오염저감활동이 환경이슈로 떠오른 현실을 반영하지 못한 한계가 있었고, 이후 Wang (2007), Li (2010)는 산출물의 확장만을 고려한 Shephard의 산출거리함수(output distance function)를 적용한

분석을 통해 이를 보완하고 있다.<sup>1)</sup> 특히 이들 연구는 생산 과정에 사용된 각 투입요소의 성장에 따른 이산화탄소의 변화효과를 추정함으로써 보다 세분화된 분해산식을 제안하였다. Zhou and Ang (2008)은 투입물 거리함수(input distance function)와 산출물 거리함수를 동시에 적용한 분해분석을 시도하였고 특히 에너지 투입량의 저감에 따른 배출량 변화를 고려한 특징이 있다. 마지막으로 Zhang *et al.*(2011)은 20개 개발도상국을 대상으로 이산화탄소 변화요인을 추정하였으며, 2개의 투입거리함수와 1개의 산출거리함수를 각각 적용하여 분해산식을 정의하였다. 분석 결과는 경제규모의 성장이 가장 주요한 이산화탄소 증가요인이고, 생산성 성장에 의한 이산화탄소 저감효과는 상대적으로 낮다고 지적하였다.

이처럼 자료포락분석에 기초한 분해방식은 투입 및 산출 변수의 선택, 거리함수의 형태에 따라 다양하게 활용되고 있고, 에너지 및 환경 생산성의 추정으로 확대되는 경향을 보인다. 그러나 에너지 저감과 산출량 증대를 동시에 고려한 분해산식을 제안한 선행연구는 현재까지 검토된 바 없다. 따라서 본 연구는 에너지 투입변수와 산출물의 상이한 방향벡터를 고려한 방향거리함수(directional distance function)에 기초한 분해분석을 시도한다. 즉, 에너지 투입 수준의 저감과 산출물의 확장을 동시에 달성할 수 있는 생산성 지표를 정의하고 이에 따른 이산화탄소 배출량 변화효과를 추정한다. 특히 에너지 투입변수를 화석연료와 비-화석연료로 구분함으로써 각 에너지원에 따른 이산화탄소의 변화요인을 추정하고 에너지원별 생산성의 변화에 기초한 분해산식을 최초로 제안한다. 최근 화석연료의 과다남용으로 인한 기후변화가 사회·경제적 이슈로 부각되면서 비-화석연료의 사용비중을 확대시키는 환경정책이 추진되고 있고 이에 기초한 이산화탄소의 배출량 변화효과를 구분하는 것은 실제 에너지 정책 설정에 매우 중요한 기준이 될 것이다.

본 연구는 통계데이터의 수집이 가능한 1980년~2007년의 OECD 27개국을

1) Wang (2007)은 산출 단위당 에너지 사용량, 즉 에너지 효율성 변화(energy efficiency change)의 분해산식을 제안하였으며 오염 배출량을 고려하지 않은 생산경계를 가정하고 있다.

대상으로 이산화탄소 배출량 변화요인을 실증분석한다. OECD는 전 세계 이산화탄소 배출량의 대부분을 차지하고 있고 오염저감활동을 통한 사회·경제적 변화도 상대적으로 강하게 표출되고 있다. 따라서 OECD를 대상으로 경제성장, 생산성 변화, 에너지원별 투입 효율성 등에 따른 이산화탄소 배출량의 분해분석은 현재의 환경성과를 산정하고 향후 적절한 환경정책 설정에 주요한 요소라고 판단된다.

이하 제Ⅱ장에서는 이산화탄소 배출량의 분해산식을 정의하기 위한 방향거리 함수를 제시하고, 각 분해요인의 수학적 도출 과정을 설명한다. 제Ⅲ장에서는 실증분석에 사용된 통계데이터 설명과 실증 결과를 제시하며, 제Ⅳ장은 분석 결과를 기초로 결론을 맺는다.

## Ⅱ. 분석모형

Chung *et al.*(1997), Weber and Domazlicky(2001), Färe and Grosskopf(2000), Färe *et al.*(2007)은 산출물(good output)과 오염물(bad output)이 동시에 생산되는 결합생산기술(joint production technology)을 정의하기 위해 산출물의 강처분성(strong disposability)과 오염물의 약처분성(weak disposability)을 가정하고 있다. 각 처분성 가정은 산출물 및 오염물의 감소에 추가적인 비용이 요구되는지에 따라 구분된다. 오염물에 대한 약처분 가정은 실제 생산 과정에서 부과되는 환경규제 혹은 환경제약으로 해석할 수 있다. 즉, 오염물의 감소는 산출물의 생산 과정에 투입되는 생산요소가 오염저감활동에 투입되는 것을 의미하고 이는 산출량의 감소로 나타난다. 식 (1)은 이러한 관계를 표현한 것으로 오염저감을 위한 산출량의 비례적 감소 조건을 정의한 것이다. 여기서  $T$ 는 결합생산기술을 정의한 것이고,  $E$ ,  $Y$ ,  $B$ 는 각각 투입물, 산출물, 오염물 벡터를 의미한다.

$$\text{if } (E, Y, B) \in T \text{ and } 0 \leq \theta \leq 1, \text{ then } (E, \theta Y, \theta B) \in T \quad (1)$$

$$\text{if } (E, Y, B) \in T \text{ and } B = 0 \text{ then } Y = 0 \quad (2)$$

생산기술( $T$ )은 추가적으로 산출물과 오염물의 결합생산성(null-joint)을 가정한다. 즉, 산출물의 생산 과정에서는 필연적으로 오염물이 배출되고 이러한 관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이를 바탕으로 규모수익불변(constant returns to scale) 하의 생산기술( $T$ )을 식 (3)과 같이 정의할 수 있다. 여기서  $z$ 는 생산경계(production frontier)를 형성하는  $K \times 1$  밀도벡터를 의미한다.

$$T = \left\{ \begin{array}{l} (E, Y, B) : \sum_{k=1}^K z_k E_k^i \leq E_k^i \quad \text{input vector} \\ \sum_{k=1}^K z_k Y_k \geq Y_k \quad \text{good output} \\ \sum_{k=1}^K z_k B_k = B_k \quad \text{bad output} \\ z_k \geq 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

본 연구는 생산 과정에 활용되는 투입물로 에너지 사용량을 적용한다. 여기서 에너지 사용량은 화석연료와 비-화석연료로 구분한다. 언급한 바와 같이 이산화탄소는 주로 화석연료의 과다남용으로 유도되었고, 최근 환경친화적인 비-화석연료에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 따라서 에너지원의 구분을 통한 효율성 추정은 각 생산단위의 환경상태를 보다 적절하게 표현할 수 있고 향후 지속가능성장을 위한 바람직한 환경정책 설정에도 중요한 근거가 될 것이다.

다음으로 각 생산단위의 환경성과를 정의하기 위한 방향거리함수는 방향벡터(directional vector)의 설정에 따라 다양하게 정의된다(Chambers *et al*, 1996). 본 연구는 0기 생산단위  $k$ 를 대상으로 산출물의 확장과 오염물의 저감을 동시에 고려한 방향벡터  $g = (Y, -B)$ 를 적용하였다. 이를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{D}^0(E^0, Y^0, B^0) &= \sup\{\beta : (Y^0, B^0) + \beta g \in T(E^0, Y^0, B^0)\} \\ g &= (Y, -B) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의  $\beta$ 는 주어진 각 에너지 투입 수준에서 산출물의 최대 확장과 오염물의 최대 저감 수준을 동시에 추정하는 방향거리함수를 의미한다. 만약 생산단위  $k$ 가 산출물과 오염물의 최적 수준에서 생산하고 있다면,  $\beta = 0$ 을 만족하고 생산경계 상에 위치하게 된다. 반면 생산가능곡선의 내부에 위치한 생산단위의 경우  $\beta > 0$ 이고 산출물 및 오염물의 조정이 필요한 비효율적 생산단위로 구분된다. 이를 바탕으로 방향거리함수에 기초한 이산화탄소 배출량 변화를 식 (5)와 같이 정의할 수 있으며 0기와 1기 생산성의 시계열적 변화(mixed period analysis)를 항등식으로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned} \frac{B^1}{B^0} &= \left[ \frac{\{1 + \overline{D}^0(E^1, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(E^1, Y^1, B^1)\}}{\{1 + \overline{D}^0(E^0, Y^0, B^0)\} \{1 + \overline{D}^1(E^0, Y^0, B^0)\}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\quad \left[ \frac{\{1 + \overline{D}^0(E^0, Y^0, B^0)\} \{1 + \overline{D}^1(E^0, Y^0, B^0)\}}{\{1 + \overline{D}^0(E^1, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(E^1, Y^1, B^1)\}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{B^1}{B^0} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 첫 번째 항은 Färe *et al.*(2000), Kumbhakar *et al.*(2001), Kumar (2006)에서 정의된 Malmquist-Luenberger(ML) 생산성 지수의 역수이며, 효율 변화(efficiency change : EC) 및 기술변화(technical change : TC)로 다시 구분할 수 있다.<sup>2)</sup> 여기서 효율변화는 각 시기 특정 생산단위가 생산경계까지 이르는 거리의 변화로 측정되며 기술변화는 생산경계 자체의 변화를 의미한다. 다음으로 식 (5)의 두 번째 항은 식 (6)과 같이 투입성장변화(input growth change : IGC)와 산출구성변화(output mixed change : OMC)로 분해할 수 있으며 여타

2) 본 연구는 이산화탄소 배출량의 시계열적 변화를 항등식의 좌변에 두고 그 변화요인을 분석하는 것이 목적이다. 따라서 효율 및 기술의 성장이 발생할 경우 1보다 큰 값을 가지는  $ML (= EC \times TC)$ 지수의 역수를 적용하는 것이 바람직하다. 즉, 식 (4)는 효율 및 기술의 성장은 이산화탄소 배출량의 감소를 유도하는 형태의 항등식을 의미한다.

조건이 동일한 경우 각각 투입물( $E$ ) 및 산출물( $Y, B$ )의 구성변화에 따른 생산성의 변화를 계측한 것이다(Pasurka, 2006).<sup>3)</sup> 여기서 산출구성변화는 동일한 투입물 수준에서 산출량과 오염물의 구성변화에 따른 생산성 변화를 실제 오염 배출량과의 비율로 표현한 것이다. 즉, 산출 단위당 오염 배출량 변화에 따른 생산성 변화를 나타낸 것이며, 이는 오염저감활동(pollution abatement activity)에 따른 배출집약도(emission intensity)의 변화로도 해석할 수 있다(Lovell, 2003; Pasurka, 2006). 결과적으로 식 (5)는 0기와 1기 사이 특정 생산단위  $k$ 의 효율변화, 기술변화, 투입성장변화, 산출구성변화를 정의하고 각 요인변화에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 추정하는 식이다.

$$\begin{aligned} \frac{B^1}{B^0} &= \\ &\underbrace{\left[ \frac{\{1 + \vec{D}^1(E^1, Y^1, B^1)\}}{\{1 + \vec{D}^0(E^0, Y^0, B^0)\}} \right]}_{\text{Efficiency Change (EC)}} \underbrace{\left[ \frac{\{1 + \vec{D}^0(E^0, Y^0, B^0)\} \{1 + \vec{D}^0(E^1, Y^1, B^1)\}}{\{1 + \vec{D}^1(E^0, Y^0, B^0)\} \{1 + \vec{D}^1(E^1, Y^1, B^1)\}} \right]^{\frac{1}{2}}}_{\text{Technical Change (TC)}} \\ &\underbrace{\left[ \frac{\{1 + \vec{D}^0(E^0, Y^1, B^1)\} \{1 + \vec{D}^1(E^0, Y^0, B^0)\}}{\{1 + \vec{D}^0(E^1, Y^1, B^1)\} \{1 + \vec{D}^1(E^1, Y^0, B^0)\}} \right]^{\frac{1}{2}}}_{\text{Input Growth Change (IGC)}} \\ &\underbrace{\left[ \frac{B^1 / \{1 + \vec{D}^0(E^0, Y^1, B^1)\} B^1 / \{1 + \vec{D}^1(E^1, Y^1, B^1)\}}{B^0 / \{1 + \vec{D}^0(E^0, Y^0, B^0)\} B^0 / \{1 + \vec{D}^1(E^1, Y^0, B^0)\}} \right]^{\frac{1}{2}}}_{\text{Output Mixed Change (OMC)}} \\ &= EC \times TC \times IGC \times OMC \end{aligned} \tag{6}$$

3) Pasurka(2006)는 산출거리함수(output distance function)의 방사선 척도(radial measure)에 기초하여 오염 배출량 분해를 시도하였다. 이는 산출물과 오염물의 동시적 증가에 바탕을 둔 효율성 산정이며, 환경성과(envronmental performance) 추정을 위한 현실적 방안으로 보기 힘든 단점이 있다.



마지막으로 식 (6)의 투입성장변화는 각 투입변수에 따른 배출량 변화로 다시 분해할 수 있으며 이를 수식으로 표현하면 식 (7)과 같다. 언급한 바와 같이 본 연구는 생산경계를 형성하는 투입변수로 화석연료( $f$ )와 비-화석연료( $nf$ )의 사용량을 활용하고 있다. 따라서 두 지수는 각각의 에너지 투입량 변화에 따른 이산화탄소의 배출량 변화(fossil and non-fossil fuel energy input change: FC, NFC)를 의미하며 에너지원별 생산성의 변화로도 해석할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 IGC = & \left[ \frac{\{1 + \overline{D}^0(f^0, nf^0, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(f^0, nf^0, Y^0, B^0)\}}{\{1 + \overline{D}^0(f^1, nf^0, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(f^1, nf^0, Y^0, B^0)\}} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 & \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Fossil Fuel Energy Input Growth Change (FC)}} \\
 & \left[ \frac{\{1 + \overline{D}^0(f^1, nf^0, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(f^1, nf^0, Y^0, B^0)\}}{\{1 + \overline{D}^0(E^1, Y^1, B^1)\} \{1 + \overline{D}^1(f^1, nf^1, Y^0, B^0)\}} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 & \underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Non-Fossil Fuel Energy Input Growth Change (NFC)}} \tag{7}
 \end{aligned}$$

한편, 실제 방향거리함수의 추정은 식 (8)과 식 (9)에 제시된 선형계획모형(linear programming)을 이용하여 계측되며, 각각 0기와 1기의 생산기술 하에서 계측되는 생산단위  $k'$ 의  $\beta$  값을 의미한다. 여기서 투입물  $f$ ,  $nf$ 는 각각 생산 과정에 투입된 화석연료와 비-화석연료의 사용량을 의미하고,  $z \geq 0$ 은 규모 보수불변을 가정한 제약이다.<sup>4)</sup>

4) 본 연구는 실제 mixed period 선형프로그램에서 발생 가능한 ‘infeasible solution’ 문제를 줄이기 위해 Färe et al(2001), Pasurka(2006)에서 제안한 windows 방식의 생산경계설정을 활용한다. 예를 들어, 0기 생산기술을 의미하는  $\overline{D}^0$ 는 실제로 -1기, -2기의 데이터와 함께 추정된 생산기술 수준이다. 따라서 실증분석의 결과는 1982년부터 시작된다.

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{D}^0(E_k^0, Y_k^0, B_k^0) &= Max \beta \\
 \sum_{k=1}^K z_k f_k^0 &\leq f_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k n f_k^0 &\leq n f_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k Y_k^0 &\geq Y_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k B_k^0 &= B_{k'}^0, \\
 z_k &\geq 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{D}^0(E_k^0, Y_k^0, B_k^0) &= Max \beta \\
 \sum_{k=1}^K z_k f_k^1 &\leq f_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k n f_k^1 &\leq n f_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k Y_k^1 &\geq Y_{k'}^0 \\
 \sum_{k=1}^K z_k B_k^1 &= B_{k'}^0, \\
 z_k &\geq 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

### Ⅲ. 통계자료 및 실증분석 결과

본 연구는 데이터 수집이 가능한 1980년~2007년의 OECD 27개국을 대상으로 각국의 이산화탄소 변화요인을 분해한다. 사용된 통계자료는 국내총생산( $Y$ ), 이산화탄소 배출량( $B$ ), 화석연료 사용량( $f$ ), 비-화석연료 사용량( $nf$ )이며, 데이터의 출처 및 기초통계량은 <표 1>과 <표 2>와 같다.

〈표 1〉 통계자료의 출처 및 단위

변수	정의	데이터 출처	단위
<i>Y</i>	국내총생산	OECD STAN dataset	10억 달러 (2005년 기준)
<i>B</i>	이산화탄소 배출량	UNFCCC	100만 톤
<i>f</i>	화석연료 사용량	International Energy Agency	10조 Btu
<i>nf</i>	비-화석연료 사용량		

주: Btu(British thermal unit).

〈표 2〉 기초통계량

국가	<i>B</i>		<i>Y</i>		<i>f</i>		<i>nf</i>	
	평균	%	평균	%	평균	%	평균	%
호주	298.6	2.72	475.6	3.80	3,930.0	2.73	164.5	1.08
오스트리아	61.7	0.96	217.1	2.50	901.6	1.05	365.2	1.66
벨기에	134.7	0.16	260.4	2.36	1,963.4	0.48	412.8	5.71
캐나다	510.3	1.07	799.6	3.32	7,722.8	1.25	4,036.6	1.69
덴마크	60.3	-0.49	137.1	2.55	808.0	-0.42	51.2	5.99
핀란드	52.2	0.18	116.7	2.59	730.8	0.12	397.6	3.98
프랑스	396.2	-0.53	1,439.3	2.13	6,031.6	-0.30	3,715.2	4.52
독일	927.8	-0.90	2,055.1	2.11	12,730.5	-0.56	1,761.9	3.41
그리스	82.8	2.80	196.7	2.58	1,059.4	2.63	42.6	1.72
헝가리	66.4	-1.44	125.6	1.63	998.1	-0.86	132.8	7.22
아일랜드	31.2	2.78	86.2	5.16	446.8	2.79	11.8	4.80
아이슬란드	2.5	3.20	7.4	2.99	34.2	2.70	66.5	5.89
이탈리아	415.6	0.79	1,359.8	1.93	6,337.1	0.98	647.6	0.71
일본	1,075.8	1.05	3,208.2	2.09	16,490.5	1.36	3,305.2	2.61
한국	320.8	5.09	642.6	6.57	4,771.7	6.03	693.1	13.24
룩셈부르크	10.3	0.19	20.6	5.43	135.2	1.24	15.3	1.51
멕시코	329.8	2.30	845.2	2.43	4,975.8	2.42	402.0	3.85
네덜란드	223.5	0.93	411.4	2.79	3,430.5	1.06	101.0	4.94
뉴질랜드	30.6	2.50	71.1	2.89	456.4	2.64	281.7	1.18
노르웨이	37.5	0.83	152.7	3.20	562.7	1.10	1,135.5	1.51
폴란드	347.2	-1.37	351.2	3.30	4,162.3	-1.02	20.8	1.10
포르투갈	46.4	3.50	160.1	2.58	688.0	3.76	130.3	2.69
스페인	265.1	2.58	826.7	3.39	3,739.4	2.79	810.9	4.13
스웨덴	62.2	-1.38	212.8	2.42	896.0	-1.33	1,320.4	1.78
스위스	43.7	-0.27	225.4	1.83	646.4	-0.23	565.1	1.29
영국	582.0	-0.27	1,364.8	2.96	8,408.5	0.07	952.0	2.50
미국	5,261.7	0.86	8,883.4	3.39	76,084.3	0.79	12,517.8	2.29

주: %는 각 변수의 연평균 변화율을 의미함.

전반적으로 경제규모가 큰 국가에서 이산화탄소의 배출량이 많은 특징을 확인할 수 있고 미국, 일본, 독일, 영국, 캐나다 등이 이산화탄소의 과다배출국가로 분류된다. 경제성장률과 이산화탄소 증가율의 관계에서도 급격한 경제성장을 이룩한 국가가 이산화탄소 배출량의 증가율 역시 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 한국은 표본국가 중에서 경제성장(6.57%)과 이산화탄소 배출량 증가(5.09%)를 가장 급격하게 경험하는 국가로서 환경친화적 성장전략이 매우 필요한 것으로 보인다. 반면 덴마크, 폴란드, 헝가리, 스웨덴, 스위스, 프랑스, 독일 등은 이산화탄소 배출량이 감소하는 경향을 보이는 국가로서 화석연료의 사용량 감소가 주원인으로 예상된다. 즉, 이산화탄소와 직접적으로 관련되는 화석연료의 사용비중을 줄이고 비-화석연료의 투입비중을 증가시킴으로써 경제성장과 배출량 저감을 동시에 달성한 경우로 해석할 수 있다. 다음으로 에너지원별 사용량 변화를 확인하면 화석연료에 비해 비-화석연료의 사용량이 더욱 빠르게 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 화석에너지 수급의 불확실성 증대와 환경보호에 대한 국제적 관심으로 인한 에너지 다각화 및 비-화석연료의 사용량 증대로 인한 결과로 예상할 수 있다.

<표 3>은 27개 OECD 국가의 이산화탄소 배출량 및 변화요인을 분해한 결과이다. 먼저 (a)열의 이산화탄소 배출량의 경우 총 27개 국가들 중 21개 국가들이 표본기간 배출량의 증가를 경험하고 있고 평균 누적증가율은 약 39.7%로 나타났다. 특히 한국(362.0%), 아이슬란드(247.7%), 아일랜드(223.0%), 포르투갈(217.5%), 그리스(214.0%), 호주(197.3%) 등은 매우 급격한 배출량 증가를 경험한 국가들이지만 헝가리(-31.2%), 폴란드(-24.2%), 독일(-17.0%), 스웨덴(-10.6%) 등은 표본기간 동안 이산화탄소 배출량이 감소한 국가들로 나타났다.

이산화탄소 배출량의 변화요인 중 ML 생산성 지수의 구성요소인 효율변화(b열)와 기술변화(c열)의 결과는 이산화탄소 배출량을 감소시키는 방향으로 작용하고 있고 평균적으로 각각 -8.5%, -1.7%의 저감효과를 보인다. 먼저 각 시기 생산경계까지의 거리로 정의되는 효율변화에서는 룩셈부르크(-32.1%)의 효율성 성장이 가장 크게 계측되었고, 폴란드(-28.6%), 영국(-23.6%), 독일(-21.6%),

<표 3> 국가별 이산화탄소 변화의 분해요인

국가	<i>B</i>	<i>EC</i>	<i>TC</i>	<i>FC</i>	<i>NFC</i>	<i>OM</i>
	이산화탄소 (a)	효율변화 (b)	기술변화 (c)	화석연료 투입변화 (d)	비-화석연료 투입변화 (e)	산출구성 변화 (f)
호주	1.9733	0.9426	1.0028	1.0000	0.9874	1.9769
오스트리아	1.4155	0.8752	1.0002	0.9910	0.9572	1.4302
벨기에	1.0972	0.8636	1.0035	1.0000	0.9454	1.0949
캐나다	1.4412	0.9485	1.0004	1.0000	1.0000	1.4418
덴마크	1.0259	1.0730	1.0212	0.8073	1.1122	1.0124
핀란드	1.2409	0.9330	0.9985	1.0000	0.9744	1.2396
프랑스	0.9994	0.8771	1.0137	1.0000	0.9063	1.0028
독일	0.8301	0.7838	0.9931	1.0000	0.9285	0.8317
그리스	2.1406	1.1532	0.9880	1.0935	0.9607	1.6998
헝가리	0.6878	0.8805	0.9927	1.0000	0.8452	0.6899
아일랜드	2.2306	0.9827	1.0810	1.3895	0.9545	1.6963
아이슬란드	2.4773	1.1422	0.9984	1.0000	1.0000	2.4734
이탈리아	1.2933	0.8714	1.0426	0.7713	0.9741	1.7666
일본	1.3941	0.8678	1.0009	1.0000	0.9598	1.3963
한국	3.6208	1.0872	0.9931	1.0000	0.7291	3.6611
룩셈부르크	1.3000	0.6786	1.0052	0.9424	0.9909	1.3837
멕시코	1.5746	0.9876	0.9983	1.0000	0.9553	1.5627
네덜란드	1.4208	1.0617	0.9967	1.0000	0.9147	1.4256
뉴질랜드	1.8879	1.0298	1.0059	1.0000	0.9883	1.8905
노르웨이	1.4615	0.9149	1.0008	1.0000	1.0000	1.4626
폴란드	0.7585	0.7145	0.4899	1.0093	0.9595	0.5268
포르투갈	2.1752	0.9765	1.1773	0.9448	0.8797	2.7784
스페인	1.7558	0.8768	1.0109	0.7768	0.8364	2.3813
스웨덴	0.8936	0.8200	1.0020	1.0000	1.0000	0.8953
스위스	1.1864	0.9611	0.9518	1.0015	1.0082	1.0097
영국	0.9964	0.7637	0.9976	1.0000	0.9512	0.9967
미국	1.3644	0.8354	1.0000	1.0000	0.9800	1.3626
기하평균	1.3969	0.9146	0.9832	0.9845	0.9492	1.3921
# < 1.00	6	21	11	6	21	5
# ≥ 1.00	21	6	16	21	6	22

주: #은 조건에 맞은 국가의 수를 의미함.

누적분해분석(cumulative decomposition analysis)<sup>5)</sup>

$$\text{이산화탄소 배출량 변화}(B) = EC \times TC \times FC \times NFC \times OM$$

5) <표 3>의 결과는 누적분해의 분석 결과를 제시한 것이다. 즉, 시작년도 1982년을 기준 (= 100)으로 연평균 변화율을 적용하여 최종년도 2007년의 수치를 추정한 결과이다.

스웨덴(-18.0%), 미국(-16.5%)의 순으로 나타났다. 반면 그리스(15.3%), 아이슬란드(14.2%), 덴마크(7.3%), 네덜란드(6.2%) 등은 효율성의 하락으로 인한 이산화탄소의 증가경향이 나타난 국가들이다. 다음으로 기술발전의 catch-up 수준으로 정의되는 기술변화에 의한 이산화탄소 변화효과의 경우 전반적으로 이산화탄소의 배출량 변화에 미치는 영향이 미미하게 나타났다.<sup>6)</sup>

각 에너지의 투입변화에 따른 배출량 변화효과를 추정한 (d)열과 (e)열은 각각 -1.6%, -5.1%의 평균 저감효과를 보였다. 즉, 화석연료에 비해 비-화석연료의 성장에 따른 이산화탄소 배출량 저감효과가 상대적으로 크고 배출량 저감을 위한 에너지원의 전환이 실제 이산화탄소의 배출량을 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 비-화석연료의 성장효과인 (e)열을 기준으로 한국(-27.1%), 스페인(-16.4%), 헝가리(-15.5%), 포르투갈(-12.0%) 등이 상대적으로 큰 배출량 저감효과를 보였고 기초통계량에서 확인할 수 있듯이 비-화석연료의 사용량이 상대적으로 빠르게 증가한 국가라는 공통점이 있다.

마지막으로 산출물의 구성변화에 따른 이산화탄소 배출량 변화효과는 (f)열에 제시되어 있고 다른 지수에 비해 상대적으로 매우 큰 값을 보인다. 언급한 바와 같이 산출구성변화지수는 배출집약도와 실제 이산화탄소 배출량 변화의 곱으로 정의된다. 따라서 산출구성변화지수가 실제 이산화탄소의 배출량 성장에 비해 큰 값을 보이는 경우 배출집약도의 증가가 나타난 국가를 의미한다. 대표적으로 스페인, 포르투갈, 이탈리아의 오염 집약도가 크게 증가한 반면 아일랜드, 그리스, 폴란드, 스위스 등은 표본기간 동안 오염 집약도가 다소 하락한 국가로 분류되었다.

<표 3>의 결과를 요약하면 표본국가의 경제규모가 급격하게 성장하는 상황에서 생산성 및 에너지 투입효율의 성장으로 인한 이산화탄소의 배출저감효과

6) 언급한 바와 같이 기술변화(TC)는 생산경계 자체의 이동에 의한 생산성의 변화를 의미한다. 따라서 각 시기 생산경계를 형성하는 모범사례(best practice)와 생산가능곡선 내부에 위치한 생산단위와의 거리변화로 해석할 수 있다(Mandal, 2010). 전체평균을 기준으로 기술 변화는 이산화탄소 배출량 변화에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 보이거나 이후 실제 이산화탄소의 배출량 수준에 따른 그룹별 변화에서는 다소 격차를 보인다.

가 다소 나타났으나 그 크기가 상대적으로 낮게 계측되었다. 특히 정부의 환경규제로 해석될 수 있는 배출집약도 하락효과가 거의 나타나지 않았고 오히려 표본기간 배출집약도가 상승하는 국가가 다수 존재한다. 이는 광역적 오염물질로 분류되는 이산화탄소에 대한 규제가 실제 생산 과정에는 강력하게 작용하지 못하고 있고 산출량 증대에 따른 규모효과를 상쇄시킬 만큼 크지 않다는 것을 의미한다. 즉, 이산화탄소의 경우 각 국가별로 강력한 환경규제설정을 유도하는 경제적 유인이 매우 낮다. 그 결과 실제 배출집약도의 하락을 유도하는 산출구성효과가 이산화탄소의 배출량 저감에 큰 영향을 미치지 않은 결과로 예상할 수 있다.

보다 엄밀한 분석을 위해 본 연구는 이산화탄소 배출량의 증가속도에 따라 표본국가를 3개 그룹으로 구분하고 각 분해요인의 크기를 <표 4>와 같이 제시하였다. 각 그룹은 9개 국가로 구성되고 이산화탄소 배출량의 증가속도가 빠른 국가모임 순서로 그룹 1~3을 이룬다. 먼저 평균 배출량 증가속도가 가장 빠른 그룹 1에 속한 국가는 상대적으로 급격한 경제성장을 경험했다는 공통점이 있고 이러한 규모의 확대가 이산화탄소의 배출압력으로 작용했음을 예상할 수 있다. 또한 그룹 1에서는 효율 및 기술 변화와 관련된 분해지수가 모두 1보다 큰

<표 4> 그룹별 이산화탄소 분해요인

	<i>B</i>	<i>EC</i>	<i>TC</i>	<i>FC</i>	<i>NFC</i>	<i>OM</i>	국가
그룹 1	2.1446	1.0161	1.0268	1.0122	0.9170	2.1566	한국, 아이슬란드, 아일랜드, 포르투갈, 그리스, 호주, 뉴질랜드, 스페인, 멕시코
그룹 2	1.3683	0.8818	1.0049	0.9642	0.9720	1.4286	노르웨이, 캐나다, 네덜란드, 오스트리아, 일본, 미국, 룩셈부르크, 이탈리아, 핀란드
그룹 3	0.9288	0.8538	0.9211	0.9777	0.9593	0.8757	스위스, 스웨덴, 벨기에, 덴마크, 프랑스, 영국, 독일, 폴란드, 헝가리

값을 보이는 특징이 있다. 즉, 그룹 1은 상대적인 생산성의 하락으로 인해 이산화탄소의 배출량이 증가하고 있고 효율변화에 비해 기술변화에 의한 배출량 증가효과가 다소 크게 예측되었다.<sup>7)</sup> 다음으로 에너지원과 관련된 변화요인을 살펴보면 화석연료의 사용량 증가는 이산화탄소 배출량의 확대효과를 보이는 반면 비-화석연료의 사용량 증가는 이산화탄소 배출량을 크게 저감하는 것으로 나타났다. 그룹 1에 속한 국가들은 비-화석연료의 투입비중이 상대적으로 매우 낮은 수준이고 빠른 속도로 그 비중을 증가시키는 경향을 보이는 국가들이다. 따라서 위 결과는 비-화석연료의 투입비중 증가로 인한 이산화탄소 배출량 저감효과가 경제규모의 급격한 성장으로 인한 이산화탄소 배출압박을 제어하는 가장 큰 효과라는 것을 확인할 수 있다.<sup>8)</sup>

한편 그룹 2의 국가들은 효율변화에 의한 이산화탄소 저감효과가 -11.8%로 나타난 반면 기술변화와 관련된 분해지수는 1과 큰 차이를 보이지 않았다. 즉, 생산성을 기준으로 기술변화에 비해 효율변화가 그룹 2의 주요한 탄소저감요인임을 확인할 수 있다. 다음으로 그룹 2의 에너지 관련 분해지수를 살펴보면 화석연료 및 비-화석연료의 사용량 증가에 따른 탄소저감효과가 각각 -3.6%, -2.8%로 예측되었으며 에너지 효율성의 성장을 다소 확인할 수 있었다.

마지막으로 표본기간 이산화탄소 배출량의 감소를 보인 그룹 3에서는 효율변화(-14.6%) 및 기술변화(-7.9%)로 인한 탄소저감효과가 가장 뚜렷하게 나타났다. 특히 기술발전에 의한 저감효과가 매우 크게 예측되었으며 그룹간의 가장 큰 격차를 보이는 분해지수임을 확인할 수 있다. 또한 그룹 3에서는 산출구성변화지수를 기초로 파악할 수 있는 배출집약도가 그룹 1~2와 달리 크게 하락하는 것으로 나타났다. 언급한 바와 같이 배출집약도의 하락은 탄소저감을 위한 환경정책 수준으로 해석할 수 있으며 그룹 3은 적절한 환경장치로 인한 이산화

7) 일반적으로 생산성은 투입 수준에 대한 산출량의 비율을 의미하며 본 연구에서는 ML 생산성 지수이론에 기초하여 생산성을 효율변화(EC)와 기술변화(TC)로 구분하였다.

8) 실제 그룹 1에 속한 국가들은 화석연료의 투입량 확대를 통한 산출량 증가를 경험하고 있다. 이는 상대적으로 작은 절대량을 가지는 비-화석연료의 이산화탄소 저감효과가 크게 나타난 것으로도 예상할 수 있다.



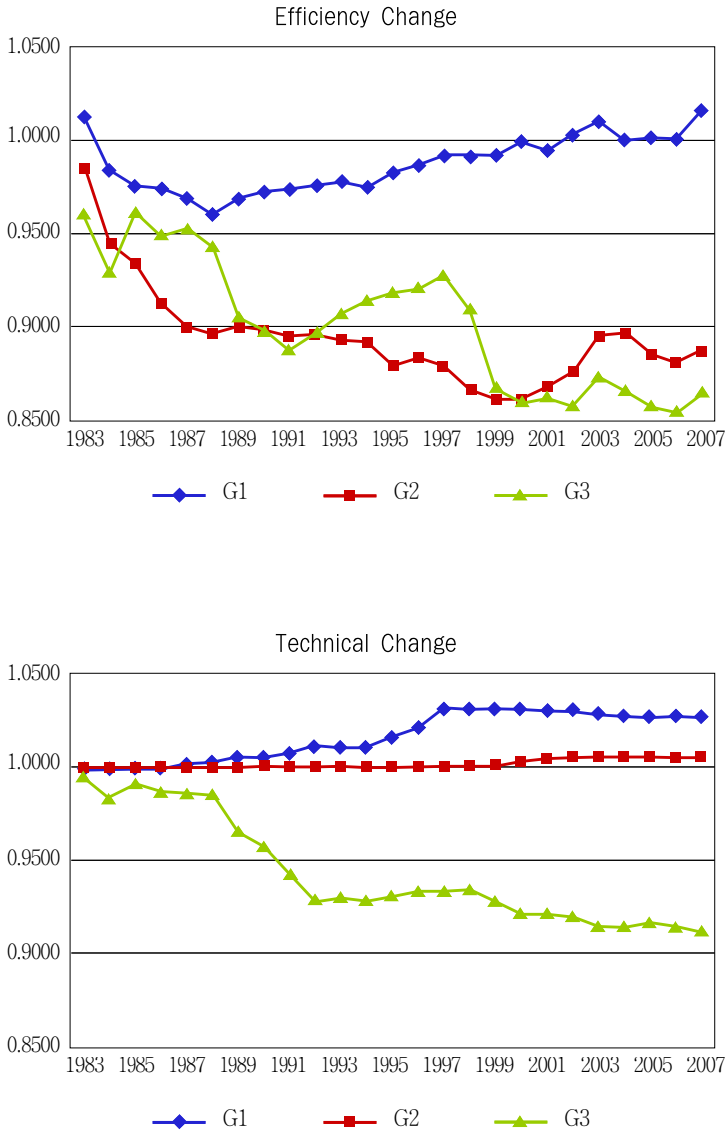
탄소의 저감효과가 나타난 것으로 예상할 수 있다.

이를 종합하면 표본기간 이산화탄소 배출량의 급증을 경험한 국가들은 생산성의 하락을 보였고 경제규모의 확대에 의한 이산화탄소의 배출압박을 적절히 상쇄시키지 못하는 것으로 나타났다. 반면 표본기간 이산화탄소 배출량의 저감을 경험한 국가에서는 적절한 환경규제의 적용과 함께 생산성의 성장으로 인한 저감효과가 크게 표출되고 있다.<sup>9)</sup> 또한 에너지원별 변화요인에서는 전체적으로 이산화탄소의 저감효과를 보이는 경향이 있으나 그룹 1의 화석연료 분해지수에서는 오히려 이산화탄소를 증가시키는 효과를 보였다. 이는 그룹 1에서 나타난 급격한 경제성장이 주로 화석연료의 과도한 투입과 관련이 깊고 비록 비-화석연료의 투입비중이 증가하고 있지만 경제성장 속도를 따라가지 못하는 것이 원인으로 판단된다.

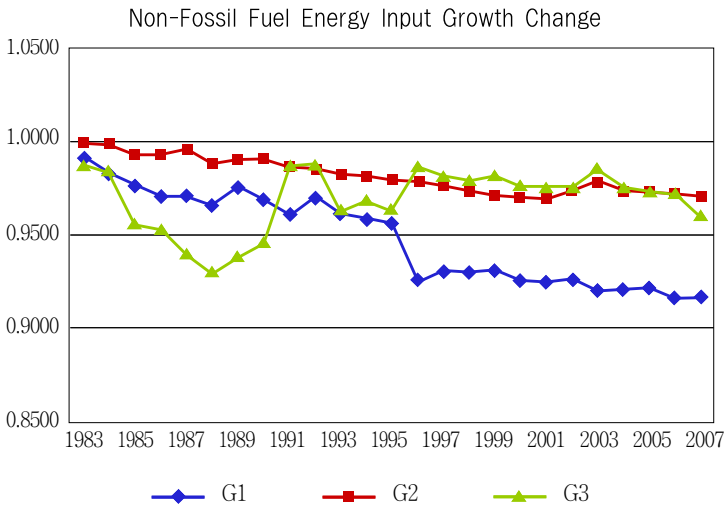
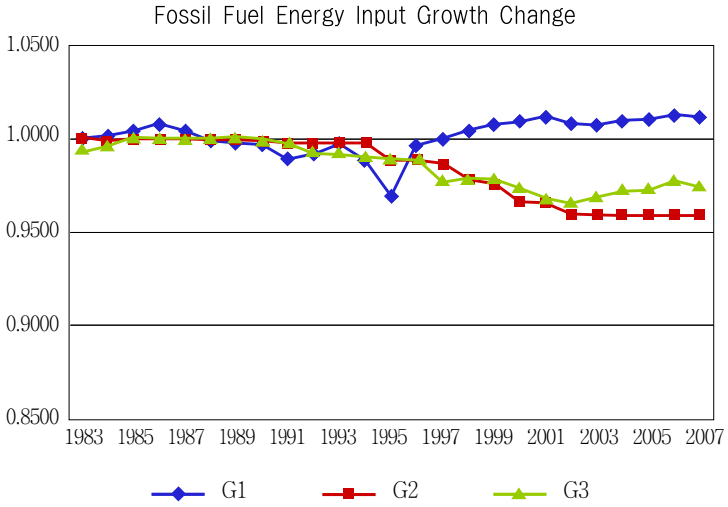
<그림 1>은 이산화탄소 분해요인의 시계열 변화를 각 그룹별로 나타낸 것이다. 먼저 효율 및 기술 변화는 각 그룹의 격차가 가장 크게 나타난 분해요인이고 이산화탄소 배출량 변화에 가장 큰 영향을 미치는 분해지수임을 확인할 수 있다. 그룹 1의 경우 1980년대 중후반까지는 이산화탄소를 저감시키는 방향으로 효율변화가 이루어졌으나 이후 지속적인 효율성의 하락을 보인다. 반면 그룹 2~3은 다소 큰 변동은 있으나 전반적으로 효율성의 성장경향을 확인할 수 있고 이산화탄소 배출량을 저감시키는 가장 큰 분해지수로 나타났다. 기술변화의 경우 그룹 3의 기술발전이 두드러지게 나타났고 특히 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 급격한 기술발전을 보였다. 반면 그룹 1~2는 표본기간 동안 그룹 3의 기술발전을 따라잡지 못하고 있고 기술효율의 하락으로 인한 이산화탄소의 배출압박이 확인되었다. 특히 이산화탄소의 증가속도가 가장 빠른 국가로 구성된 그룹 1의 경우 1990년대 후반부터 기술효율의 하락이 나타나고 있다.

9) 배출집약도의 하락을 보이는 그룹 3에 속한 국가들은 모두 유럽국가라는 공통점이 있다. 이는 지구온난화 및 이산화탄소에 관한 사회적·학문적 관심이 매우 높은 지역적 특성의 결과로도 해석 가능하다. 이 외에도 그룹 1과 그룹 2에 속하지만 유럽국가인 아일랜드, 포르투갈, 스페인, 핀란드 등도 배출집약도의 하락을 경험한 국가들이다.

<그림 1> 그룹별 이산화탄소 분해요인의 시계열 변화



OECD 국가의 이산화탄소 배출량 분해분석



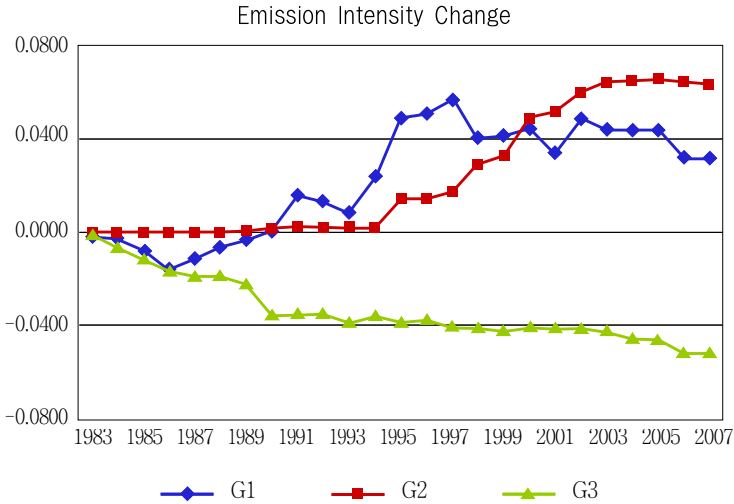
다음으로 화석연료의 투입성장에 따른 이산화탄소 배출량의 시계열적 변화효과를 살펴보면 그룹 1과 그룹 2~3이 1990년대 중반을 기점으로 뚜렷한 차이를 보인다. 즉, 1990년대 중반 이후 그룹 1에서는 화석연료의 투입성장이 이산화탄소의 배출압박으로 작용한 반면, 그룹 2~3에서는 오히려 탄소배출의 저감요인으로 나타났다. 이에 반해 비-화석연료 투입량 성장은 표본기간 모든 그룹에서 이산화탄소의 저감효과를 가져왔고, 그룹 3의 변동이 다소 심한 것을 확인할 수 있다.

각 분해지수의 시계열 변화를 종합하면 급격한 이산화탄소의 증가를 경험한 그룹 1은 효율 및 기술 변화가 시간의 흐름에 따라서 다소 악화되는 경향을 보이고 있고 경제규모의 확대에 의한 이산화탄소 배출압박을 효율적으로 제어하지 못하는 것으로 나타났다. 특히 1990년대 후반 이후 화석연료의 투입에 따른 이산화탄소 배출압박이 나타났고 화석연료의 효율적 사용이 요구되는 것으로 확인되었다. 기술변화에서는 그룹 3의 성장이 가장 두드러지고 특히 1980년대 후반 급격한 기술발전이 이산화탄소의 배출량 저감에 큰 요인으로 작용하였다. 또한 그룹 3은 1990년대 이후 화석연료의 효율적 투입으로 인한 저감효과가 완만하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 그룹 2는 대체로 그룹 3과 유사한 경향을 보이고 있으나 기술변화에서는 대체로 큰 변화가 없는 점이 특징적이다.

마지막으로 <그림 2>는 각 그룹별 배출집약도의 시계열적 변화를 그래프로 표현한 것이다.<sup>10)</sup> 언급한 바와 같이 산출구성변화지수는 실제 이산화탄소 배출량 변화와 배출집약도의 변화를 곱한 형태로 이루어진다. 따라서 실제 이산화탄소 변화에 비해 큰 값을 가질 경우 배출집약도의 상승을 의미한다. <그림 2>에서 그룹 3은 배출집약도의 지속적인 하락을 경험하고 있고 특히 1980년대 후반의 하락폭이 매우 큰 특징을 보인다. 반면 그룹 1의 경우 1997년까지 전반적으로 상승하는 경향을 확인할 수 있으나 이후 다소 변동이 심하지만 1990년대 중반 이후 다소 감소하는 것으로 보인다. 그룹 2의 경우는 매우 특징적인 형태를

10) <그림 2>에서는 산출구성지수를 구성하는 배출집약도의 시계열 변화를 표현한 것이다.

〈그림 2〉 그룹별 오염집약도의 시계열 변화



보이는데 표본기간 초기 배출집약도에 큰 변화가 없다가 1990년대 중반 이후 빠르게 증가하는 경향을 보인다.<sup>11)</sup>

산출 단위당 이산화탄소 배출량을 의미하는 배출집약도의 변화는 각 국가에 적용된 환경규제의 강화에 영향을 받은 것으로 보인다. 따라서 이를 바탕으로 그룹 3은 이산화탄소에 대한 저감노력이 상대적으로 강한 그룹이고 표본기간 지속적인 배출집약도의 하락을 보이고 있다. 반면 그룹 1~2는 1990년대 이후 배출집약도의 증가를 경험하는 그룹으로 급격한 규모 확대, 생산성 하락, 에너지 효율성 하락 등과 함께 이산화탄소의 강력한 배출압력을 경험하는 그룹으로 판단된다.

11) 그룹 2에 나타난 배출집약도의 급속한 증가는 이탈리아에 의해 주도된 경향이 있다. 이를 제외하면 배출집약도의 변화가 크게 나타나지 않는다. 이탈리아는 환경 선진국으로 분류되는 여타 유럽국가에 비해 경제성장 및 탄소저감성고가 상대적으로 더딘 특징이 있다.

## IV. 결 론

본 연구는 OECD 27개국을 대상으로 이산화탄소 변화요인에 대한 분해분석을 시도하였다. 자료포락분석의 방향거리함수를 적용한 분석 방법은 이산화탄소의 분해요인을 효율변화, 기술변화, 에너지 투입물 성장변화, 산출구성변화로 구분할 수 있다. 특히 투입물 성장변화효과는 각 에너지 투입원에 따른 에너지 효율성 변화에 따라 이산화탄소 변화효과를 추정할 수 있는 장점을 가진다. 1980년~2007년의 시계열 데이터를 대상으로 다섯 가지 분해요인을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 전체적으로 표본국가의 경제규모가 급격하게 성장하고 있고 이는 이산화탄소의 강력한 배출압박으로 작용하고 있으며 생산성 및 에너지 투입효율의 성장으로 인한 이산화탄소 저감효과는 상대적으로 낮게 계측되었다. 특히 정부의 환경규제로 해석 가능한 배출집약도는 전체적으로 거의 변화가 없었고 오히려 배출집약도가 상승하는 국가가 더 많은 것으로 나타났다. 즉, 광역오염물질의 특성을 보이는 이산화탄소에 대한 규제유인이 낮은 상황에서 다수의 국가는 이산화탄소 저감을 위한 적극적 노력이 소홀한 것으로 보인다.

둘째, 본 연구는 각 국가별 분해요인에 대한 보다 일반적 경향을 찾기 위해 실제 이산화탄소의 배출량 증가속도에 따라 3개 그룹으로 구분하여 비교분석하였다. 표본기간 실제 이산화탄소의 저감을 경험한 국가들은 모두 유럽국가들이라는 공통점이 있고, 경제규모의 확대에 의한 이산화탄소의 배출압박을 크게 상쇄시키는 것으로 나타났다. 특히 강력한 환경규제의 영향으로 인한 배출집약도의 하락과 기술변화에 의한 배출량 저감효과가 상대적으로 크게 작용하였고 환경친화적 생산 과정으로 변화되어가는 모습을 보였다. 반면 급격한 이산화탄소 배출량의 증가를 경험한 국가들은 대부분 배출집약도에서도 상승하는 경향을 보였고 생산성의 상대적 하락이 큰 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 본 연구는 각 그룹별 분해요인의 시계열 변화를 확인하고 그 결과를 그래프로 제시하였다. 실제 이산화탄소 배출량의 증가속도가 빠른 국가들은 생산성 하락이 점차 확대되는 경향을 보였고 특히 화석연료의 과도한 투입에 따른 이산화탄소 배출압박이 점차 강하게 표출되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이들 국가는 상대적으로 환경친화적인 생산을 보이고 있는 국가에 비해 기술발전의 속도가 크게 느리고 그 격차가 점차 확대되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 1990년대를 기점으로 배출집약도의 격차가 크게 확대되는 추세를 보였고 이산화탄소에 대한 사회·경제적 관심유무와 정책효과 등에 따른 결과로 해석할 수 있다.

마지막으로 본 연구의 분해산식을 기초로 이산화탄소의 효율적 저감방향을 요약하면 다음과 같다. 급격한 경제성장으로 인한 이산화탄소 배출압박을 경험하는 국가는 생산성 개선노력과 적절한 환경규제의 적용이 요구된다. 특히 효율성 하락이 강하게 표출되고 있고 에너지의 효율적 사용과 환경친화적 기술개발이 필수적이다. 또한 배출집약도의 상승을 제어할 수 있는 강력한 환경규제의 적용이 요구되고 비-화석연료의 투입비중을 증가시켜 이산화탄소의 배출압박을 완화시킬 필요성이 높다. 그 외 이산화탄소의 증가를 경험한 국가는 각 요인에 따른 저감효과가 나타나고 있으나 경제성장으로 인한 배출량 증가속도를 상쇄시킬 만큼 크지 않다. 특히 기술효율 하락과 배출집약도 상승에 의한 이산화탄소 배출압박의 개선이 필요하다.

본 연구는 기후변화와 직접적으로 관련된 이산화탄소의 배출량 변화요인을 다양한 관점에서 분해를 시도했다는 점과 각 에너지원에 따른 에너지 투입효율에 따른 변화요인을 추정했다는 점에서 독창성을 가지나 통계자료의 미비로 인해 중국, 인도와 같은 이산화탄소 과다배출 국가를 표본에 포함시키지 못한 한계가 있으며 이는 향후의 연구과제로 남기고자 한다.

◎ 참고 문헌 ◎

1. Ang, B. W. and F. Q. Zhang, "A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Analysis," *Energy*, 25, 2000, pp. 1149 ~ 1176.
2. Chambers, R., Y. Chung, and R. Färe, "Benefit and Distance Functions," *Journal of Economics Theory*, 70, 1996, pp. 407 ~ 419.
3. Chung, Y. H., R. Färe, and S. Grosskopf, "Productivity and Undesirable Outputs : A Directional Distance Function Approach," *Journal of Environmental Management*, 51, 1997, pp. 229 ~ 240.
4. Färe, R. and S. Grosskopf, "Theory and Application of Directional Distance Function," *Journal of Productivity Analysis*, 13, 2000, pp. 93 ~ 103.
5. Färe, R., S. Grosskopf, and C. A. Pasurka, "Accounting for Air Pollution Emissions in Measures of State Manufacturing Productivity Growth," *Journal of Regional Science*, 41(3), 2001, pp. 381 ~ 409.
6. Färe, R., S. Grosskopf, and C. A. Pasurka, "Pollution Abatement Activities and Traditional Measures of Productivity," *Ecological Economics*, 62, 2007, pp. 673 ~ 682.
7. Kumar, S., "Environmentally Sensitive Productivity Growth : A Global Analysis using Malmquist-Luenberger Index," *Ecological Economics*, 56(2), 2006, pp. 280 ~ 293.
8. Kumbhakar, S. C., A. Lozano-Vivas, C. A. K. Lovell, and I. Hasan, "The Effect of Deregulation on the Performance of Financial Institutions : The Case of Spanish Saving Banks," *Journal of Money, Credit and Banking*, 33, 2001, pp. 101 ~ 120.
9. Lee, K. and W. Oh, "Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions in APEC Countries : A Time Series and a Cross Sectional Decomposition using the Log Mean Divisia Method," *Energy Policy*, 34, 2006, pp. 2779 ~ 2787.
10. Li, M., "Decomposing the Change of CO<sub>2</sub> Emissions in China : A Distance Function Approach," *Ecological Economics*, 70, 2010, pp. 77 ~ 85.



11. Lovell, C. A. K., "The Decomposition of Malmquist Productivity Indexes," *Journal of Productivity Analysis*, 20, 2003, pp. 437 ~ 458.
12. Mandal, S. K., "Do Undesirable Output and Environmental Regulation Matter in Energy Efficiency Analysis? Evidence from Indian Cement Industry," *Energy Policy*, 38, 2010, pp. 6076 ~ 6083.
13. Pasurka, C. A., "Decomposing Electric Power Plant Emissions within a Joint Production Framework," *Energy Economics*, 28, 2006, pp. 26 ~ 43.
14. Wang, C., "Decomposing Energy Efficiency Change: A Distance Function Approach," *Energy*, 32, 2007, pp. 1326 ~ 1333.
15. Wang, C., J. Chen, and J. Zou, "Decomposition of Energy Related CO<sub>2</sub> Emission in China: 1957~2000," *Energy*, 30, 2005, pp. 73 ~ 83.
16. Weber, W. L. and B. Domazlicky, "Productivity Growth and Pollution in State Manufacturing," *Review of Economics and Statistics*, 83(1), 2001, pp. 195 ~ 199.
17. Zha, D. L., D. Q. Zhou, and P. Zhou, "Driving Forces of Residential CO<sub>2</sub> Emissions in urban and Rural China: An Index Decomposition Analysis," *Energy Policy*, 38, 2010, pp. 3377 ~ 3383.
18. Zhang, X. P., Y. K. Tan, Q. L. Tan, and J. H. Yuan, "Decomposition of Aggregate CO<sub>2</sub> Emissions within a Joint Production Framework," *Energy Economics*, forth coming, 2011.
19. Zhou, P. and B. W. Ang, "Decomposition of Aggregate CO<sub>2</sub> Emissions: A Production Theoretical Approach," *Energy Economics*, 30, 2008, pp. 1054 ~ 1067.

접수일(2012년 4월 16일), 수정일(2012년 6월 5일), 게재확정일(2012년 6월 7일)