

OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석

조향숙*

요약 : 본 연구에서는 탄소세를 시행하고 있는 OECD 7개 국가를 대상으로 1995년부터 2013년 기간 동안 CO₂ 배출량 감소에 영향을 미치는 주요 요인에 대해 분해 분석을 실시하였다. 최근까지 진행된 CO₂ 배출량 변화에 대한 분해 분석 연구들은 기술에 기반을 둔 물리적인 요소에만 초점을 맞추고 있으나 본 연구는 경제적 감축수단인 탄소세의 효과를 반영하여 배출량 변화 요인을 분석하였다. 로그 평균 디비지아 지수(Log Mean Divisia Index, LMDI)를 이용하여 분석한 결과, OECD 7개 국가의 총 CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 기여요인은 에너지 집약도 효과와 탄소세 정책 효과로 나타났다. 다음으로, OECD 7개 국가별 분해분석 결과 에너지 집약도 효과가 배출량 감소에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으나, 탄소세 정책효과와 탄소세 세수효과는 국가별 정책 상황과 여건에 따라 상이하게 나타나는 결과를 보였다.

주제어 : CO₂ 배출량, 로그 평균 디비지아 지수, 분해분석, 탄소세

JEL 분류 : Q4, Q5

접수일(2016년 10월 28일), 수정일(2017년 1월 23일), 게재확정일(2017년 2월 10일)

[†] 본 논문의 개선을 위하여 조언해주신 성균관대학교 이광석 교수님과 익명의 두 분 심사위원께 감사를 드립니다.

* 성균관대학교 경제학과, 박사과정(e-mail: hscho2014@skku.edu)

Decomposition Analysis of the Reduction in CO₂ Emissions from Seven OECD Countries

Hyangsuk Cho*

ABSTRACT : This study investigates a decomposition analysis of the determinants of the reduced CO₂ emissions in seven OECD countries that implemented carbon taxes from 1995 to 2013. Recent studies on decomposition analysis of changes in CO₂ emissions focused on technology-based physical factors; however, this study analyzes the effects of a carbon tax as an economic factor. According to the results obtained by using the Log Mean Divisia Index, the energy intensity effect and the carbon tax effect contributed the most towards the reduction of total CO₂ emissions in the seven OECD countries. The results for each country show that the emissions decreased due to the energy intensity effect, while the effects of carbon tax and carbon tax revenues differed by policy and environment of the countries.

Keywords : CO₂ emissions, Log mean divisia Index, Decomposition analysis, Carbon tax

Received: October 28, 2016, Revised: January 23, 2017, Accepted: February 10, 2017.

* Ph.D Candidate, Department of Economics, Sungkyunkwan University(e-mail: hscho2014@skku.edu)

I. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제5차 평가 종합보고서¹⁾에 따르면, 지구 평균 기온 상승·해양 산성화·해수면 상승 등 기후변화가 전례 없는 수준으로 관측되고 있으며, 그 주원인이 인위적 온실가스 배출이라고 설명한다. 또한 지금부터 수십 년간의 온실가스 배출량에 따라 기후변화 위험도가 결정된다고 발표하였다. 기후변화의 원인인 온실가스 배출은 인간의 경제성장 및 인구증가로 인해 계속 증가 해왔다. 우리나라의 온실가스 배출량은 1990년 대비 2013년 137.6% 증가하여 세계 6위의 배출량(2013년 기준, 695백만 톤CO₂)을 기록하였고, 특히 2013년 온실가스 배출량에서 CO₂ 배출량의 비중은 약 91.5%를 차지한다.²⁾

따라서 CO₂ 감축을 위한 노력은 전 세계적으로 논의되고 있으며, 이를 위한 적응 정책과 완화 정책은 필수적이다. 이러한 흐름에 따라, 교토 의정서³⁾ 하에서 온실가스 감축 의무 부담이 있는 선진국(부속서 I국가)은 국가별로 감축목표를 발표하고 있으며, 목표 달성을 위해 탄소 배출권 거래제, 탄소세 등 다양한 경제적 감축 정책을 수반하고 있다. 뿐만 아니라 CO₂ 감축을 위한 완화 정책은 기후변화 적응의 효과성을 높이며, 비용 효과적인 CO₂ 감축을 위해서는 에너지 수요관리, 탄소 집약도⁴⁾ 개선, 에너지 공급의 탈탄소화 등 전 부분을 함께 고려하는 다양한 접근이 필요하다.

최근 OECD 국가의 CO₂ 배출 현황⁵⁾을 살펴보면, OECD에 속한 국가들의 총 CO₂ 배출량은 1990년 대비 2013년 9.3%가 증가하였으나, OECD에 속한 유럽 국가들을 중심으로는 1990년 대비 2013년 8.9%가 감소하였다. 유럽의 CO₂ 배출량의 큰 부분을 차지하고 있는 프랑스와 독일 그리고 영국의 경우 1990년 대비 2013년에 각각 8.9%, 19.2%, 18.2%가 감소하였다.⁶⁾

1) 제40차 IPCC 총회(2014.11.1., 덴마크 코펜하겐)에서 최종 승인·채택된 보고서.

2) GIR, 2015 국가 온실가스 인벤토리 보고서.

3) 교토 의정서(Kyoto protocol)는 지구 온난화의 구제 및 방지를 위한 국제 협약인 기후변화 협약의 수정안을 말한다.

4) 탄소 집약도(Carbon intensity)는 GDP 대비 CO₂ 배출량(CO₂ 배출량/GDP)을 의미한다.

5) 에너지부문 연료 연소에 의한 CO₂ 배출량.

6) IEA, CO₂ Emission from Fuel Combustion Highlights 2015.

이들 국가의 CO₂ 배출량 감소요인에 관하여 최근 까지 진행된 대부분의 연구들은 기술에 기반을 둔 물리적인 요소에만 초점을 맞추고 있다.⁷⁾ 그러나 OECD에 속한 유럽 국가들에서 배출 감소 추세가 나타나는 것은 탄소세 그리고 ETS (Emission Trading System)⁸⁾와 같은 정책 실행에 크게 영향을 받았을 것으로 추측된다. 따라서 본 연구는 물리적 요소뿐만 아니라 경제적 감축수단인 탄소세의 효과를 반영하여 배출량 감소 원인과 요소별 기여도를 분석하고자 한다.

본 연구에서는 로그 평균 디비지아 지수(LMDI, Log Mean Divisia Index) 방법론을 이용하여 1995~2013년까지 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출에 대한 요인 분해를 통해 CO₂ 배출량 변화의 주요 요인을 분석함으로써 CO₂ 감축을 위해 주력해야 할 정책에 대한 시사점을 제공하고자 한다. 특히, 에너지 집약도, CO₂ 배출계수, 에너지 믹스 등의 에너지 요인과 함께 GDP 대비 탄소세 비중, 탄소세 효과 등 경제적인 감축 정책의 영향에 대한 함의를 제공하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 이론적 배경과 선행연구를 살펴보고, 제 III장에서는 분석을 위한 지수 분해 방법론을 소개한다. 제 IV장은 OECD 국가 중 탄소세를 시행하고 있는 7개 국가의 자료를 바탕으로 CO₂ 배출량 감소에 영향을 미치는 주요 요인에 대한 분석결과를 제시하며, 제 V장은 결론으로 본 논문의 끝을 맺는다.

II. 이론적 배경 및 선행연구

1. 이론적 배경

디비지아 지수는 모든 경제변수를 시간의 연속함수로 가정하고 항등식에 기계적인 미적분을 적용한다. Diwert (1976)는 이러한 지수식에 대한 미시경제적인 평가기준을 제시하였으며 이 접근법을 이용하여 Zarnikau (1995)는 에너지 자원을 노동, 자본과 함께 경제의 구성요소로 인식하여, 에너지원의 분해 분석을 실시한 바 있다. Zarnikau

7) Greening (2004), Bhattacharyya and Matsumura (2010), Camarero et al. (2013), Calbick and Gunton (2014), Moutinho et al. (2015)

8) 탄소 배출권 거래제: 온실가스 배출 감소를 위한 경제적 수단으로서 2005년 교토의정서 발효 이후, EU가 처음으로 도입하였다.

(1995)에 의하면, 경제에서 기업은 다음과 같은 두 단계 의사결정을 하게 된다. 첫 번째로, 기업은 자본, 노동, 중간재, 에너지원의 최적 수준을 결정하며, 다음으로 선택 가능한 에너지원 사이에서 기업의 선택이 무엇인지에 대해 의사결정의 초점을 맞춘다.

에너지원의 생산함수는 다른 요소로부터 분리 가능한 약 분리성(weak separability)을 가정하였으며, 생산함수는 다음과 같다.

$$Y = f[K, L, M, q(I)] \quad (1)$$

Y 는 산출량, K 는 자본, L 은 노동, M 은 중간재, $q(I)$ 는 에너지원의 부문 생산 함수(subproduction function)이며, 부문 생산함수 $q(I)$ 는 식 (2)와 같은 형태를 필요로 한다.⁹⁾

$$[(\partial f / \partial x_i) / (\partial f / \partial x_j)] / \partial \theta = 0 \quad (i \neq j) \quad (2)$$

θ 는 노동, 자본, 중간재 [K, L, M]을 말하고, 에너지원 사이의 한계 대체율(marginal rate of substitution)은 노동, 자본, 중간재와 독립적이다.

기업은 에너지원의 집합 $i \in I$ 의 최적 구성을 선택하며, I 는 전력, 천연가스, 석유, 석탄을 포함한다. 다음으로 기업은 에너지 생산성, 즉 에너지원의 투입으로부터 얻게 되는 산출량을 최대화하기 위해 에너지원을 선택하며, 에너지원 선택에 대한 예산, 노동, 자본, 중간재는 주어진 것으로 가정한다. 이러한 가정 하에, 기업의 효용을 극대화하는 에너지원 선택은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \max. & u(x) \\ \text{s.t.} & p'x = m \end{aligned} \quad (3)$$

p 는 에너지원의 가격 벡터(vector)이고, x 는 에너지원 양의 벡터(vector)를 의미하며, m 은 에너지원에 대한 제약식이다. 이 식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

9) $q(I) = \phi(x_i)$, $i = 1, \dots, I$ 이며, x_i 는 각 에너지원의 에너지양을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 U &= u(x) + \lambda(m - p'x) \\
 \partial U / \partial x_i &= \partial u(x) / \partial x_i - \lambda p_i = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \\
 \partial U / \partial \lambda &= (m - p'x) = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$u(x)$ 에 대해 전미분(total differentiation)을 하면,

$$du(x) = \sum_i [u(x) / \partial x_i] dx_i \tag{5}$$

식 (4)를 이용하여 다시 정리하면, 아래와 같다.

$$du(x) = \sum_i (\lambda p_i) dx_i \tag{6}$$

다음으로, $\Pi(p)$ 를 피셔 요소 역전 테스트(Fisher's factor reversal test)¹⁰⁾를 만족하는 쌍대 가격(dual price)으로 정의하고, 구성요소의 생산과 총 지출이 같다고 하면, 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\Pi(p)u(x) = \sum_i p_i x_i = m \tag{7}$$

식 (3)을 풀기 위해, 선형 동조성이 주어진다고 가정하면, $e(p)$ 라는 함수가 존재하게 되며, 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 x &= me(p) \\
 u(x) &= u[me(p)] = m u[e(p)]
 \end{aligned} \tag{8}$$

10) 피셔 물량지수와 피셔 가격지수의 곱이 금액비율과 일치하는 것을 말한다.

위의 식을 통해 식 (4), (6), (7)을 재정리하면, 식 (9)~(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\partial u(x)/\partial x_i p_i = \lambda \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

$$\lambda = 1/\Pi(p) \quad (10)$$

$$u[e(p)] = 1/\Pi(p)$$

$$du(x) = \sum_i [1/\Pi(p)] p_i dx_i \quad (11)$$

마지막으로 식 (11)에 로그를 취하면, 식 (12)와 같이 로그 평균 디비지아 지수로 나타낸다.

$$d \log u(x) = \sum_i [x_i p_i / \sum_i x_i p_i] d \log x_i \quad (12)$$

$$\log Q_{it} - \log Q_{it-1} = \sum_i (0.5)(A_{it} + A_{it-1})(\log x_{it} - \log x_{it-1}) \quad (13)$$

단, $d \log u(x) = \log Q_{it} - \log Q_{it-1}$

$$A_{it} = p_{it} x_{it} - \sum_i p_{it} x_{it}$$

식 (13)은 디비지아 지수의 불연속 형태를 나타내며, 가중치를 0.5로 사용한 산술 평균 디비지아 지수(AMDI, Arithmetic Mean Divisia Index)이다.¹¹⁾ 식 (13)을 두 시점 (0, t) 가중치의 로그 평균값인 로그 평균 디비지아 지수를 사용하여 나타내면 식 (14)와 같다.¹²⁾

11) 이 지수의 경우, 시계열 자료의 값이 0을 가질 때 요인 분해가 되지 않아 값을 처리하기 어려운 문제가 생기므로, 본 연구에서는 이 한계를 극복한 로그 평균 디비지아 지수를 사용한다.

12) 식의 자세한 도출과정은 정해식·이기훈(2001) 참조.

$$Q_j^* = \frac{L(Q_j^t, Q_j^0)}{\sum L(Q_j^t, Q_j^0)} = \frac{Q_j^t - Q_j^0}{\ln Q_j^t - \ln Q_j^0} / \sum \frac{Q_j^t - Q_j^0}{\ln Q_j^t - \ln Q_j^0} \quad (14)$$

2. 선행연구

지수 분해 분석(IDA, Index decomposition analysis) 연구는 현재까지 활발히 사용되는 방법론이며,¹³⁾ 국내에서는 정해식·이기훈(2001)을 통해, 해외에서는 Tornavger (1991)을 통해 분해분석 기법을 이용한 CO₂ 배출량 분석이 시도되었다. 분해 분석은 주로 디비지아 지수에 의해 이루어지며, CO₂ 배출량 또는 에너지 소비 변화요인을 분석하는 데에 유용하다. 분해 분석에 대한 문헌은 매우 방대하기 때문에, 본 연구에서는 CO₂ 배출량 변화요인을 분석한 선행연구에 초점을 맞추어 살펴보기로 한다(<표 1> 참조).

국내에서는 주로 한국을 대상으로 CO₂ 또는 온실가스 배출량의 변화요인에 대한 연구가 진행되었다. 정해식·이기훈(2001), 한택환(2007), 김수이·정경화(2011), 박년배·전의찬(2013), 박년배·심성희(2015)의 연구를 살펴보면, CO₂ 배출량의 감소에 산업구조와 에너지 집약도가 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 즉 에너지 다소비 산업의 비중이 줄고, GDP 대비 에너지 소비량이 감소하는 것이 CO₂ 배출량 저감의 주된 요인으로 나타났다.

국외 선행연구를 살펴보면, 분해분석 기법 중 산술 평균 디비지아 지수(AMDI, Arithmetic Mean Divisia Index) 또는 로그 평균 디비지아 지수(LMDI, Log Mean Divisia Index) 그리고 그 외의 기법을 사용하였으며, 주로 산업부문, 에너지 전환 부문 그리고 수송부문의 연구가 주를 이루었다. Torvanger (1991)는 OECD 9개 국가의 제조업을 대상으로 CO₂ 배출량의 변화요인을 분석한 결과, 에너지 집약도의 감소가 CO₂ 집약도의 감소에 기여하는 주요 원인임을 밝혔으며, Ang (1997)의 연구에서는 1980년대 초반 한국·중국·대만의 제조업에서 에너지 집약도의 변화가 CO₂ 집약도에 큰 영향을 주었고, 특히 1980년 중반 이후 한국과 대만에서 CO₂ 집약도가 증가하는 결과를 보였다. 수송부문의 CO₂ 배출량 변화와 관련하여, Greening (2004)은 OECD 10개 국가에 대하여 분석한 결과, 1인당 GDP와 에너지 가격이 연료 대체에 영향을 주고 화석연료 대체가 CO₂ 배출 감

13) Ang and Xu (2013)는 1991~2012년까지 총 80편의 지수 분해 분석 논문을 소개하였다.

소에 중요한 역할을 하나, 연료 대체만으로는 수송부문의 CO₂ 배출량 감소를 위한 정책으로 불충분하다고 주장했다. Trmilsina and Shrestha (2009a) 아시아 12개 국가에 있어 수송부문의 CO₂ 배출량의 감소에 에너지 집약도의 개선이 큰 기여를 한다고 밝혔다. 또한 Trmilsina and Shrestha (2009b)는 남미와 카리브 연안 국가 20개를 대상으로 분석한 연구에서, 이전의 연구와 마찬가지로 수송부문의 에너지 집약도 개선이 CO₂ 배출량 감소에 영향을 주는 요인임을 재확인했다.

Malla (2009)와 Shrestha et al. (2009)는 에너지 전환(전력생산) 부문에 대한 CO₂ 배출량 변화 요인을 분석하였다. 두 연구에서 모두 구조효과 즉, 총 전력생산에서 다소비 산업에 해당하는 부문의 전력생산이 증가할수록 CO₂ 배출량이 증가함을 보였고, GDP 대비 전력 생산량이 증가할수록 CO₂ 배출량 또한 증가함을 밝혔다.

에너지 전부문¹⁴⁾의 CO₂ 배출량 변화를 대상으로 분석한 연구도 활발히 진행되었다. Sun and Malaska (1998)가 24개 개발도상국을 대상으로 분석한 결과, CO₂ 배출량 감소에 에너지 집약도가 70%, 탄소배출계수가 30%의 비중을 차지하였다. O'Mahony (2013)는 1990~2010년까지 아일랜드에서 화석연료의 대체와 에너지 집약도가 CO₂ 배출 감소에 큰 영향을 주었으며, 신재생 보급 효과도 미미하지만 영향을 주었다고 분석했다. 그러나 이와 달리 Sheinbaush et al. (2011)은 화석연료 대체의 CO₂ 감소 효과에 대해 1990~2006년의 기간 동안 5개의 남미국가를 대상으로 연구한 결과, 이들 국가에서 에너지 대체효과가 CO₂ 배출 감소에 유의한 영향을 미치는지는 확실치 않다고 결론지었다. Moutinho et al. (2015)는 21개 유럽국가에 있어 화석연료의 대체와 에너지 믹스의 변화가 CO₂ 배출량 감소에 유의한 영향을 준다고 밝히며, O'Mahony (2013)의 연구와 맥락을 같이 했다.

본 연구는 선행연구들의 흐름과 같이 CO₂ 배출량 요인을 분석하되, 배출량의 감소 요인에 대해 초점을 맞추어 분석을 진행하며, 특히 경제적 감축수단인 탄소세의 효과를 반영한 점에서 이전의 연구와 차별성이 있다고 하겠다.

14) 산업, 가정, 수송, 상업, 기타부문을 포함.

〈표 1〉 CO₂ 배출량 변화 요인에 대한 지수 분해 분석 연구

저자	대상	기간	부문	IDA 항등식	주요 결과
1. 국내 선행 연구(온실가스 배출량 분해 분석 포함)					
정해식·이기훈 (2001)	한국	1970-1998	에너지	$CO_2 = \left(\frac{CO_2}{FEC} \right) \cdot \left(\frac{FFC}{TEC} \right) \cdot \left(\frac{TEC}{GDP} \right) \cdot \left(\frac{GDP}{POP} \right) \cdot POP$ <p>CO₂: 총 CO₂배출량, FEC: 화석 연료 소비량, TEC: 총 에너지 소비량, GDP: 국내 총 생산, POP: 인구</p>	- CO ₂ 배출계수와 화석 연료 비중 변화가 CO ₂ 배출량 감소에 미치는 영향 약화
한택환 (2007)	한국 미국 영국	1980-1990	제조업	$\epsilon = \left(\frac{\Delta E_p/E_0}{\Delta Y/Y_0} \right) + \left(\frac{\Delta E_s/E_0}{\Delta Y/Y_0} \right) + \left(\frac{\Delta E_t/E_0}{\Delta Y/Y_0} \right) + \epsilon_R$ <p>ε : CO₂ 배출량 탄력성, E_p: 생산 효과, E_s: 구조 효과, E_t: 기술 효과, ER; 잔차</p>	- 미국, 영국에 비해 한국의 제조업은 CO ₂ 배출량 감소에 대한 기술적 요인의 기여도가 상대적으로 매우 작음
황인창 (2008)	한국 영국 독일 미국	1990-2005	에너지	$CO_2 = \left(\frac{CO_2}{FEC} \right) \times \left(\frac{FFC}{TEC} \right) \times \left(\frac{TEC}{GDP} \right) \times \left(\frac{GDP}{POP} \right) \times POP$	- 에너지 집약도 개선과 재생가능 에너지, 화석연료 간 전환 등을 통해 경제성장으로 인한 CO ₂ 배출증가를 상쇄 - 그러나 에너지 집약도 군집에서는 에너지 전환에, 탄소 집약도 군집에서는 기후변화 문제 해결에 무관심
진상현·황인창 (2009)	한국 16개 광역시도	1997-2006	에너지	$CO_2\text{배출} = \sum_{ij} \left(\frac{CO_2\text{배출}}{\text{에너지소비}_{ij}} \right) \times \left(\frac{\text{에너지소비}_{ij}}{\text{총에너지소비}_{ij}} \right) \times \left(\frac{\text{총에너지소비}_{ij}}{GRDP_i} \right) \times \left(\frac{GRDP_i}{\text{인구}_i} \right) \times \text{인구}_i$	- 서울·부산은 인구 감소로 온실가스 배출 감소, 인천·경기는 신규 유입인구 증가로 온실가스 배출 증가 - 울산·경북·충남 전남은 제조업의 생산액 증가로 생산효과가 온실가스 배출을 증가시킴

〈표 1〉 CO₂ 배출량 변화 요인에 대한 지수 분해 분석 연구 (Continued)

저자	대상	기간	부문	IDA 항등식	주요 결과
1. 국내 선행 연구(온실가스 배출량 분해 분석 포함)					
김수아·정경찬 (2011)	한국	1991-2007	제조업	$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{E_{ij}} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = \sum_{ij} QS_i I_i M_{ij} U_{ij}$ <p>C: 총 온실가스 배출량, E_{ij}: i산업에서의 j에너지 사용량, C_{ij}: i산업에서의 j에너지에 대한 온실가스 배출량, Q: 생산 효과(산업의 총 생산), S_i: 구조 효과, I_i: 집약도 효과, M_{ij}: 에너지 믹스 효과, U_{ij}: 배출계수 효과</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 배출량 증가 완화 요인: 구조 효과와 집약도 효과 - 2000년 이후 구조 효과와 집약도 효과가 더욱 개선 (고유가→에너지 가격 상대적인 변화가 저탄소화 촉진)
박년배·전의찬 (2013)	한국	2000-2007 2008-2010 (2011-2020)	산업	$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{E_{ij}} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = \sum_{ij} QS_i I_i M_{ij} U_{ij}$	<ul style="list-style-type: none"> - 2000-2007년 구조 효과와 집약도 효과는 배출량 감소에 기여 - 2008-2010년: 이전 기간 보다 구조 효과와 집약도 효과로 인한 감소 영향 하락
박년배·심성희 (2015)	한국	2004-2011	18개 산업	$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{E_{ij}} \frac{E_{ij}}{E_i} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} = \sum_{ij} QS_i I_i M_{ij} U_{ij}$	<ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 배출량 감소 요인: 구조 효과(-5.0%)
2. 국외 선행 연구					
Torvan ger (1991)	OECD 9개 국가	1973-1987	제조업	$C = \sum_{ijk} C_{ijk} = \sum_{ijk} U_{ijk} E_{ijk} = \sum_{ijk} U_{ijk} \left(\frac{E_{ijk}}{E_{ik}} \frac{E_{ik}}{Q_{ik}} \frac{Q_{ik}}{Q_k} \frac{Q_k}{Q} \right) Q$ <p>C: 총 CO₂ 배출량, C_{ijk}: k국가 i부문 j연료 CO₂ 배출량, U_{ijk}: 탄소배출계수, Q_{ik}: k국가 i부문 부가가치, Q: 총 부가가치</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 집약도 감소로 인해 탄소 집약도 감소
Ang (1997)	한국 중국 대만	1980-1993	제조업	$C = \sum_{ij} U_{ij} E_{ij}$ $\rightarrow Z = \sum_{ij} U_{ij} E_{ij} / Y = \sum_{ij} (Y_{ij} / Y) (E_{ij} / E_i) (E_i / Y_i)$ <p>C: 총 CO₂ 배출량, U_{ij}: i부문 j연료의 평균 탄소배출계수, E_{ij}: i부문의 j연료 소비량, Y_i: i부문 제조업 산출량</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 집약도가 탄소 집약도에 큰 영향을 주며, 1980년대 중반 한국과 대만의 탄소 집약도 증가로 배출량 증가

〈표 1〉 CO₂ 배출량 변화 요인에 대한 지수 분해 분석 연구 (Continued)

저자	대상	기간	부문	IDA 항등식	주요 결과
2. 국외 선행 연구					
Sun and Malaska (1998)	개발도상국 24개 국가	1980-1994	에너지	$E/GDP = \sum_i^n (W_i/GDP_i) \times (E_i/W_i)(GDP_i/GDP) \equiv A$ $= \sum_i^n I_i \times C_i \times S_i$ <p>E: CO₂ 배출량, W: 에너지 사용량, A: 탄소 집약도</p>	- 에너지 집약도(70%) 감소와 연료 대체로 인한 탄소 배출계수 변화(30%)로 CO ₂ 배출량 감소
Greening (2004)	OECD 10개 국가	1970-1993	수송	$G_t = \frac{C_t}{P_t} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij} E_{ij} E_{it} P_{it}}{E_{ij} E_{it} P_{it} P_t}$ <p>G: t기의 탄소 집약도, C_{ij}: t기에 i수단의 j연료에서 발생하는 탄소 배출량, P_{ij}: t기에 i수단의 승객 이동거리, E_{ij}: t기에 i수단의 j연료에서 발생하는 에너지 소비량</p>	- 1인당 소득과 에너지 가격이 수송부문 연료 대체에 영향을 줌
O'Mahony (2013)	아일랜드	1990-2010	에너지	$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{FF_i} \frac{FF_i}{FF} \frac{FF}{E} \frac{E}{Y} \frac{Y}{P} P = \sum_i F_1 S_1 S_2 IGP$ <p>C: 화석연료의 총 CO₂ 배출량, C_i: i연료의 CO₂ 배출량, E: 일차에너지 공급량, FF_i: i연료 생산에 필요한 일차에너지, Y: GDP, P: 인구</p>	- 화석연료 대체와 에너지 집약도의 개선이 CO ₂ s 감소에 큰 기여를 함 - 신재생 에너지 보급효과는 미비했음
Malla (2009)	아시아 태평양/남미 7개 국가	1990-2005	에너지 전환 (전력 생산)	$C = \sum_i C_i = \sum_i G \frac{G_i}{G} \frac{Q_i}{G_i} \frac{C_i}{Q_i} = \sum_i G s_i f_{i2} u_i$ <p>C: 총 CO₂ 배출량, C_i: 전력 생산 시 i연료의 CO₂ 배출량, G: 총 전력 생산량, G_i: i연료의 전력 생산량, Q_i: 전력 생산에 투입되는 i연료</p>	- 전력 한 단위당 사용되는 에너지가 감소할수록 CO ₂ 배출량 감소
Shrestha et al. (2009)	아시아 태평양 15개 국가	1980-2004	에너지 전환 (전력 생산)	$E_t = \sum_{i=1}^n E = \sum_i k c_{it} \frac{F_{it}}{G_{it}} \frac{G_{it}}{G_t} \frac{G_i}{Y_t} Y_t = \sum_i k c_{it} f_{i2} g_e Y_t$ <p>E_i: t기의 전력 생산으로 인한 총 CO₂ 배출량, E_{it}: t기의 전력 생산 시 i연료의 총 CO₂ 배출량, F_{it}: t기에 사용된 i연료량, G_{it}: t기의 i연료 전력 생산량, Y_t: GDP</p>	- 전력 집약도의 악화(증가)로 CO ₂ 배출량 증가 - 에너지 집약도의 개선(감소)는 CO ₂ 배출량 감소에 기여

III. 분석 방법 및 분석 자료

본 연구에서는 로그 평균 디비지아 지수(LMDI) 분해 분석 기법을 이용하여 CO₂ 배출량의 변화 요인에 대해 분석하며, 이에 기초적인 틀을 제공한 Kaya 항등식에 대해서도 소개한다.

1. Kaya 항등식

Kaya 항등식은 일본의 에너지 경제학자인 Yoichi Kaya가 1993년 동경에서 개최된 ‘세계환경, 에너지 및 경제개발에 관한 회의’에서 처음으로 도입한 이래로 CO₂ 배출의 요인 분해를 위한 도구로 많이 활용되어 왔다.¹⁵⁾ 이를 수식으로 표현하면 다음과 같이 네 가지 요인으로 나타낼 수 있다.

$$Total\ CO_2\ emission = Population \times \frac{GDP}{person} \times \frac{Energy}{GDP} \times \frac{CO_2}{Energy}$$

위의 Kaya 항등식을 살펴보면, CO₂ 배출량이 인구와 1인당 소득으로 구성되는 경제 규모와 함께, 에너지 집약도와 탄소 집약도로 구성되는 기술진보에 의해 영향을 받음을 보여준다. 이 항등식은 지금까지도 여러 연구에서 해당 요인을 더 세분화하여 분석하는 등 CO₂ 배출 요인 분석에 꾸준히 이용되고 있다.

본 연구에서는 위의 항등식을 기반으로 식을 재구성하고 세분화하여, 에너지 집약도, CO₂ 배출계수, 에너지 믹스 등의 에너지 요인들과 경제적인 감축 정책인 탄소세 비중, 탄소세 효과 등을 통해 CO₂ 배출량의 감소요인을 분석하고자 한다. 본 연구의 분석대상인 OECD 7개 국가는 탄소세뿐만 아니라 배출권 거래제를 실시하고 있어 CO₂ 배출량 감축에 배출권 거래제로 인한 영향도 내재되어 있으나, 이에 대한 자료를 수치화하기 어려우므로 탄소세로 인한 효과만 분석한다. 식은 아래와 같으며, 각 요인들에 대한 구체적인 설명은 <표 2>와 <표 3>에 정리하였다.

15) Kaya, Yoichi and Keiichi Yokobori, eds. (1993), Environment, Energy and Economy, Bookwell Publications, pp. 271~280.

$$\begin{aligned}
 C_t &= \sum_i C_t = \sum_i \frac{C_{it}}{FFC_{it}} \times \frac{FFC_{it}}{FFC_t} \times \frac{FFC_t}{TPES_t} \times \frac{TPES_t}{GDP_t} \times \frac{GDP_t}{FFC_t} \times \frac{FFC_t}{TAX_t} \times \frac{TAX_t}{GDP_t} \times GDP_t \\
 &= \sum_i C_{cf} F_{fs} N_{ffs} E_{int} F_{pro} T_f T_{gdp} G
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

〈표 2〉 CO₂ 배출량 변화 분석에 사용되는 변수

C_t	t기의 총 CO ₂ 배출량	$TPES_t$	t기의 총 에너지 소비량
C_{it}	t기의 화석연료 i의 CO ₂ 배출량	TAX_t	t기의 탄소세액
FFC_t	t기의 총 화석연료 소비량	GDP_t	t기의 국내 총 생산
FFC_{it}	t기의 화석연료 i의 소비량		

주: i = 석탄, 석유, 천연가스

〈표 3〉 CO₂ 배출량 변화 요인

C_{cf}	F_{fs}	N_{ffs}	E_{int}	F_{pro}	T_f	T_{gdp}	G
$\frac{C_{it}}{FFC_{it}}$	$\frac{FFC_{it}}{FFC_t}$	$\frac{FFC_t}{TPES_t}$	$\frac{TPES_t}{GDP_t}$	$\frac{GDP_t}{FFC_t}$	$\frac{FFC_t}{TAX_t}$	$\frac{TAX_t}{GDP_t}$	GDP_t
탄소 배출계수	화석연료 대체효과	비화석연료 보급효과	에너지 집약도	화석연료 생산성	탄소세 효과	GDP 대비 탄소세 비중	경제성장 효과

식(19)에서 CO₂ 배출량의 변화 요인은 탄소배출계수(C_{cf}), 화석연료 대체효과(F_{fs}), 비화석연료 보급효과(N_{ffs}), 에너지 집약도(E_{int}), 화석연료 생산성(F_{pro}), 탄소세 효과(T_f), GDP 대비 탄소세 비중(T_{gdp}), 국내 총생산(G)으로 구성되어 있다. 화석연료 한 단위당 배출되는 CO₂ 배출량이 감소하고(탄소 배출계수의 값이 감소하고), 화석연료 대체효과가 작아질수록(화석연료 간 대체로 에너지 효율이 증가할수록) CO₂ 배출량은 감소한다. 또한 1차 에너지 총 소비량에서 화석연료가 차지하는 비중이 작아지고(비화석연료 보급효과가 증가하고), 에너지 집약도가 개선될수록(GDP 한 단위당 1차 에너지 총 소비량이 감소할수록) CO₂ 배출량은 감소하게 된다. 경제적 감축수단인 탄소세 효과는 탄소세 한 단위당 소비하는 화석연료가 감소하고, GDP 대비 탄소세 비중이 감소할수록 CO₂ 배출량이 감소한다.¹⁶⁾

16) GDP 대비 탄소세 세수 비중을 의미하며, 탄소세 도입에 따라 오염물질 배출(탄소 배출)의 저감으로 인해 총 세수

반면에, 화석연료의 생산성 증가와 GDP의 증가는 CO₂ 배출량 증가에 기여하게 된다.

따라서 위의 항등식을 바탕으로 CO₂ 배출량에 변화에 영향을 주는 여덟 가지 요인이 감소 혹은 증가하는지 살펴보고, CO₂ 배출량 감소에 기여하는 주된 요인을 파악한다.

2. LMDI 적용

로그 평균 디비지아 지수(LMDI)를 적용하여 CO₂ 배출량 변화 요인에 대한 분해 분석을 실시한다. CO₂ 배출량의 여덟 가지 요인별 기여도 식 (19)에 LMDI 기법을 적용하면 <표 4>와 같다. <표 4>는 요인별 효과의 변화율을 곱하여 나타낸 승법 분해로 기준년도 대비 CO₂ 배출량의 상대적인 변화를 나타낸다. 반면, 요인별 효과의 변화량을 더하여 CO₂ 배출량의 절대적인 변화량을 분석할 수 있는 가법 분해는 <표 5>에 나타나 있다.¹⁷⁾

<표 4> LMDI 분해 기법에 의한 CO₂ 배출량 변화 분석 식(승법 분해)

LMDI 분해식	$C = C_t/C_0 = C_{cf}F_{fs}N_{ffs}E_{int}F_{pro}T_fT_{gdp}G$	
요인별 분석식	C_{cf}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{C_{cf}^t}{C_{cf}^0}\right)$
	F_{fs}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{F_{fs}^t}{F_{fs}^0}\right)$
	N_{ffs}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{N_{ffs}^t}{N_{ffs}^0}\right)$
	E_{int}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{E_{int}^t}{E_{int}^0}\right)$
	F_{pro}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{F_{pro}^t}{F_{pro}^0}\right)$
	T_f	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{T_f^t}{T_f^0}\right)$
	T_{gdp}	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{T_{gdp}^t}{T_{gdp}^0}\right)$
	G	$= \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{(C_{i,t} - C_{i,0})/(\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0})}{(C_t - C_0)/(\ln C_t - \ln C_0)} \ln \frac{G^t}{G^0}\right)$

는 감소된다. 결과적으로, GDP 대비 탄소세 비중이 감소한다는 것은 CO₂ 배출량이 감소했다는 것을 의미한다.
17) Ang (2005) 참조.

〈표 5〉 LMDI 분해 기법에 의한 CO₂ 배출량 변화 분석 식(가법 분해)

LMDI 분해식	$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_{cf} + \Delta F_{fs} + \Delta N_{ffs} + \Delta E_{int} + \Delta F_{pro} + \Delta T_f + \Delta T_{gdp} + \Delta G$	
요인별 분석식	ΔC_{cf}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{C_{cf}^t}{C_{cf}^0} \right)$
	ΔF_{fs}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{F_{fs}^t}{F_{fs}^0} \right)$
	ΔN_{ffs}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{N_{ffs}^t}{N_{ffs}^0} \right)$
	ΔE_{int}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{E_{int}^t}{E_{int}^0} \right)$
	ΔF_{pro}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{F_{pro}^t}{F_{pro}^0} \right)$
	ΔT_f	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{T_f^t}{T_f^0} \right)$
	ΔT_{gdp}	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{T_{gdp}^t}{T_{gdp}^0} \right)$
	ΔG	$= \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t} - C_{i,0}}{\ln C_{i,t} - \ln C_{i,0}} \ln \frac{G^t}{G^0} \right)$

3. 분석 자료

분석 대상에 해당하는 국가는 탄소세¹⁸⁾를 시행하고 있는 OECD 7개 국가이다. 핀란드, 스웨덴, 덴마크, 노르웨이, 네덜란드, 영국, 독일이 이에 해당하며, 이들 국가는 탄소세와 에너지세¹⁹⁾를 함께 시행하고 있다. 대부분의 국가에서 에너지세를 중심으로 추진되고 있으며, 탄소세는 에너지세를 보완하여 에너지 가격 왜곡을 방지하고 온실가스 감축을 위한 목적으로 추진하고 있으므로, 본 연구에서는 에너지세와 탄소세를 지구온난화 방지를 위한 포괄적 범위의 세금으로 인식하여 두 가지 세금을 모두 포함하여 분석한다.

본 연구에 사용된 CO₂ 배출량 자료는 IEA에서 제공하는 에너지 부문의 연소에 따른

18) 탄소를 많이 함유하는 화석연료에 대하여 세금을 부과함으로써 화석연료 이용을 억제하고 지구 온난화 방지를 유도하기 위해 CO₂를 배출하는 석유, 석탄 등 화석연료 사용량에 따라 부과하는 세금.

19) 세금의 부과로 에너지 사용량을 감소시켜 CO₂ 배출감소, 에너지 보존, 대기오염 등 공해 문제의 예방 등의 목적을 실현하고자 에너지 함유량에 따라 부과되는 물품세.

CO₂ 배출량을 사용하였다. 따라서 탄소세 자료도 에너지 부문의 CO₂ 배출과 관련한 세금의 수입을 활용하였으며, 이와 관련한 효과는 탄소세로 인한 효과로 명칭한다.²⁰⁾ GDP는 World bank의 자료를 사용하며 구매력 평가(Purchasing Power Parity, PPP)를 기준으로 하며, 총 에너지 소비량의 경우, 에너지 집약도의 의미를 설명하는 데에 국제적으로 쓰이는 1차 에너지 총 소비량(TPES, Total Primary Energy Supply)을 사용한다. 각 요인별 사용한 자료의 출처는 <표 6>에 정리하였으며, 본 연구의 분석 기간은 1995~2013년을 대상으로 한다.²¹⁾

<표 6> 변수의 정의와 자료 출처

변수	정의	출처
C_{it}	국가별 연료별 연도별 총 CO ₂ 배출량(ton)	IEA World CO ₂ emission from fuel combustion 2015
$TPES_t$	국가별 연도별 1차 에너지 총 소비량(toe)	IEA Energy Balance of OECD countries 2015
FFC_t	국가별 연도별 총 화석 연료 소비량(toe)	
FFC_{it}	국가별 연도별 화석 연료별 소비량(toe)	
TAX_t	국가별 연도별 에너지세 · 탄소세(\$)	OECD
GDP_t	국가별 연도별 국내 총 생산(\$)	World bank

4. OECD 7개 국가의 에너지세 · 탄소세 도입 내용²²⁾

국제적으로 약 10여개의 국가에서 탄소세 또는 에너지세를 도입하였으며, 대부분 에너지세와 탄소세를 병행하여 추진하고 있다. 특히 온실가스 감축을 위해 핀란드, 영국, 독일 등 OECD 국가들은 기존의 에너지세의 강화 및 탄소세를 도입하여 친환경적 에너

20) <http://stats.oecd.org/>. Energy products (fossil fuels and electricity) including those used in transportation (petrol and diesel). This includes all CO₂-related taxes.

21) 교토 의정서는 온실가스 감축의 공식적인 기준년도를 1990년으로 설정하여 감축목표를 제시하고 있다. 그러나 OECD에서 제공하는 탄소세 · 에너지세의 자료가 1994년부터 제공되어 분석의 편의를 위하여 1995년을 기준년도로 설정하여 분석하였다.

22) 강만옥 외(2011), 신상철 외(2010) 참조.

지세제 개편을 성공적으로 운용하고 있다. 탄소세는 1990년 핀란드를 시작으로 도입되었으며, 이후에 스웨덴, 덴마크, 네덜란드, 독일 등이 기후변화에 대응하기 위해 에너지세와 탄소세 도입에 함께 동참하였다. <표 7>은 OECD 7개 국가의 에너지 및 탄소세 시행내용을 보여준다.

<표 7> OECD 7개 국가의 에너지 및 탄소세 시행내용

국가	세목	시행년도	시행내용
덴마크	에너지세	1995	'95년 에너지세제(Energy Package)를 도입, 에너지 사용에 비례하여 세금 부담을 늘려 에너지 소비절감에 기여
	탄소세	1992	2단계 과정을 거쳐 도입: (1단계) '92년 5월부터 가정부문에 대해 탄소세 도입, (2단계) '93년 1월부터 산업부문에 대해 탄소세 도입
핀란드	에너지세	1980년대	'80년대 말 에너지 자원에 대한 다양한 환경세 도입
	탄소세	1990	CO ₂ 배출감축과 재정개혁의 일환으로 세계 최초 탄소세 도입
독일	에너지세	1999	'99년 환경세제개혁을 통해 기존 광유세(Mineral oil tax)에 생태적 에너지세(eco-tax)와 전력세를 도입
네덜란드	에너지세	1988	'88년 '일반환경보호법(General Environmental Provision Act)'에 일반연료부과금(general fuel charge)의 신설이라는 신규 조항을 추가 시행함으로써 네덜란드 환경세의 기초 마련
	탄소세	1990	에너지세에 일반연료세(General Fuel tax) 추가 도입
노르웨이	탄소세	1991	'70년대에 석유에 대해 에너지세를 도입하였으나 1991년 탄소세가 도입되고 나서 '93년 석유에 부과되는 에너지세 폐지. 석유에 탄소세 가장 먼저 도입
스웨덴	에너지세	1980년대	'80년대 말 소득세에서 에너지 및 환경오염세로 조세체계 전환
	탄소세	1991	기준탄소세율은 1991년 이산화탄소 kg당 0.25SEK/kg 수준으로 책정
영국	에너지세	1990	화석연료세(Fossil Fuel Levy)를 도입
	탄소세	2001	기후변화세(Climate Change Levy)를 도입하여 천연가스, 전력, 석탄 소비에 대해 세금 부과

IV. 분석 결과

1. OECD 7개 국가 CO₂ 배출량 추이

1995년~2013년까지 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량의 변화 추이를 <표 8>과 <그림 1>에서 살펴보면, OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 연평균 증가율은 -0.77%로 감소 추세에 있으며, 1995년 1,719백만 톤CO₂에서 2013년 1,494백만 톤CO₂로 배출량의 감소를 기록하였다. 국가별로 살펴보면, 노르웨이를 제외한 대부분의 국가에서 CO₂ 배출량의 연평균 증가율은 감소하였으며, 스웨덴과 덴마크가 각각 -2.55%, -2.38%로 가장 큰 감소율을 보였다. 절대량을 살펴보면, 7개 국가 중 독일(2013년 741백만 톤CO₂)이 가장 많은 배출을 하고 있다. 이들 OECD 7개 국가는 1990년 이후부터 탄소세와 에너지세를 동시에 시행하고 있는 국가들이며, 이들 국가 대부분이 탄소세로 인한 CO₂ 저감 효과를 지지하고 있으며, 실제 배출량 감소를 통해 탄소세 정책으로 인한 CO₂ 감소의 긍정적 역할을 뒷받침 한다.²³⁾

<표 9>와 <그림 2>는 OECD 7개 국가의 연료별 CO₂ 배출량의 비중 변화를 보여준다. 1995년의 CO₂ 배출량을 연료별로 살펴보면, 석탄이 656백만 톤CO₂(38.2%), 석유가 674백만 톤CO₂(39.2%) 그리고 가스가 387백만 톤CO₂(22.6%)로 석탄과 석유로부터 발생하는 배출량이 큰 비중을 차지하였다. 1995~2013년 석탄과 석유의 사용량은 각각 연평균 -1.03%, -1.29%로 감소하였으며, 가스의 사용량은 0.38%로 다소 증가하였으나, 전체적으로 연료별 사용비중의 변화는 미비하다. 2013년 연료별 배출량 비중의 경우, 석탄은 31.7%, 석유는 31.0%, 가스는 24.2%로 나타났다.

23) 덴마크는 1992년부터 탄소세를 시행하였으며, 탄소세와 에너지세를 통해 2008~2012년 동안 연평균 약 0.69백만 톤CO₂가 감소하였다(Sixth National Communication, UNFCCC (2013) 참조). 핀란드는 1990년 탄소세를 최초로 도입 하였으며 1998년에 세금 부과 이전보다 온실가스 배출량이 7% 감소하였다고 밝혔다(Prime Minister's Office, Finland (2000) 참조).

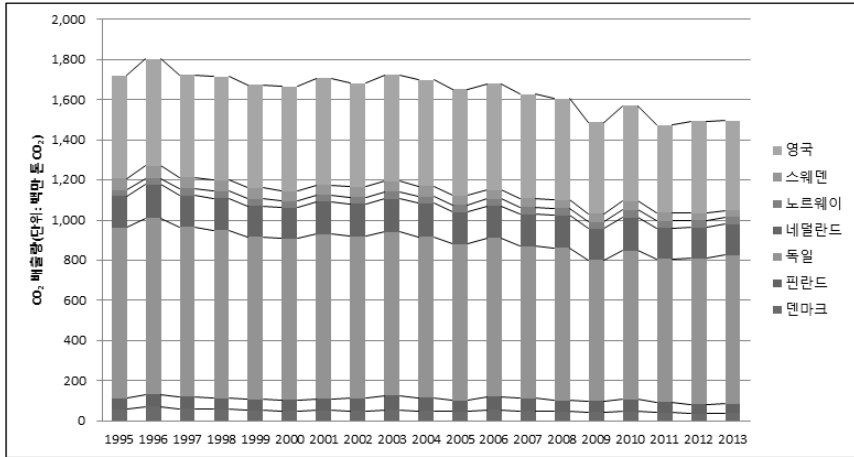
〈표 8〉 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 변화

(단위: 백만 톤CO₂)

	덴마크	핀란드	독일	네덜란드	노르웨이	스웨덴	영국	총합계
1995	57.43	55.40	849.24	157.15	31.18	56.00	512.95	1,719.34
1996	70.61	60.92	878.87	165.75	32.13	61.49	532.97	1,802.73
1997	60.78	58.81	846.22	157.59	33.89	55.28	510.98	1,723.56
1998	56.87	55.44	836.86	159.02	35.50	56.08	514.30	1,714.07
1999	53.56	54.81	807.71	153.12	36.95	54.99	511.70	1,672.83
2000	49.50	54.08	803.70	154.96	31.62	50.67	520.35	1,664.88
2001	51.01	59.90	819.54	160.77	32.57	49.84	532.71	1,706.33
2002	50.66	62.17	807.04	161.62	32.19	51.32	516.28	1,681.28
2003	55.95	70.43	816.01	164.65	34.64	52.30	528.51	1,722.50
2004	50.25	66.29	799.79	166.28	35.19	50.69	529.69	1,698.17
2005	46.88	54.08	779.68	160.49	34.09	47.15	528.14	1,650.51
2006	54.78	65.71	790.96	158.09	35.05	44.49	530.09	1,679.17
2007	49.97	63.69	757.35	159.03	35.61	43.37	518.81	1,627.83
2008	46.92	55.23	760.24	161.31	34.85	41.25	505.99	1,605.79
2009	45.29	52.66	703.36	155.05	35.22	38.94	456.80	1,487.31
2010	45.86	60.92	740.67	165.55	37.02	44.02	475.04	1,569.09
2011	40.62	53.54	713.39	154.01	35.52	40.37	435.54	1,472.98
2012	35.51	47.83	726.42	153.98	34.70	37.19	458.09	1,493.71
2013	37.26	48.28	741.30	153.18	34.37	35.17	445.20	1,494.77
연평균 증가율	-2.38%	-0.76%	-0.75%	-0.14%	0.54%	-2.55%	-0.78%	-0.77%

OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 감소요인 분해 분석

〈그림 1〉 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 추이

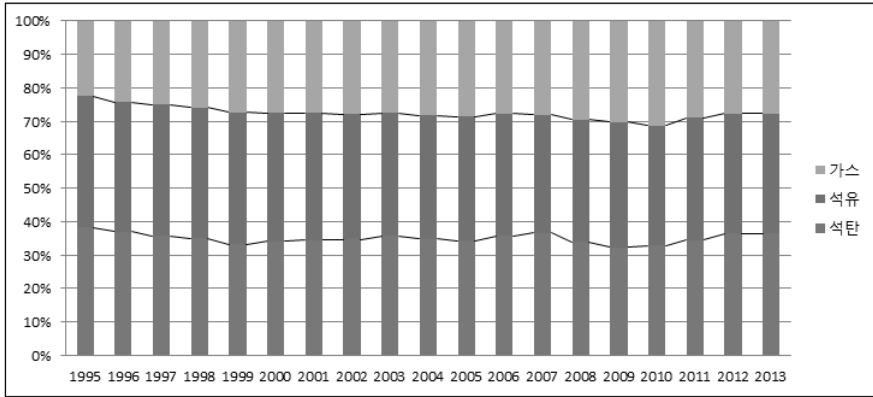


〈표 9〉 OECD 7개 국가의 연료별 CO₂ 배출량 변화

(단위: 백만 톤CO₂, %)

	석탄		석유		가스	
1995	656.8	38.2%	674.7	39.2%	387.9	22.6%
1996	665.9	38.7%	698.8	40.6%	438.0	25.5%
1997	615.4	35.8%	676.2	39.3%	432.0	25.1%
1998	598.5	34.8%	671.9	39.1%	443.7	25.8%
1999	555.3	32.3%	660.9	38.4%	456.6	26.6%
2000	568.5	33.1%	639.1	37.2%	457.2	26.6%
2001	587.4	34.2%	648.1	37.7%	470.8	27.4%
2002	581.2	33.8%	632.1	36.8%	468.0	27.2%
2003	613.9	35.7%	633.6	36.9%	475.0	27.6%
2004	591.8	34.4%	624.8	36.3%	481.5	28.0%
2005	563.8	32.8%	614.1	35.7%	472.6	27.5%
2006	599.6	34.9%	614.0	35.7%	465.6	27.1%
2007	595.9	34.7%	575.1	33.4%	456.9	26.6%
2008	543.9	31.6%	586.7	34.1%	475.2	27.6%
2009	479.6	27.9%	557.7	32.4%	450.1	26.2%
2010	515.2	30.0%	561.8	32.7%	492.1	28.6%
2011	506.7	29.5%	539.5	31.4%	426.8	24.8%
2012	543.6	31.6%	535.7	31.2%	414.5	24.1%
2013	545.5	31.7%	533.7	31.0%	415.5	24.2%
연평균 증가율	-1.03%		-1.29%		0.38%	

〈그림 2〉 OECD 7개 국가 연료별 CO₂ 배출량 비중(%)



2. 분해 분석 결과

1995년~2013년까지 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량에 대한 승법 분해 결과는 <표 10>과 같다. 승법 분해의 경우 기준년도 대비 해당년도에 배출량 수치가 증가했는지 감소했는지를 계산한다.²⁴⁾ 승법 분해 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. 총 CO₂ 배출량은 1995년 대비 2013년에 13.1% 감소하였는데, 이 중 화석연료 한 단위당 배출되는 CO₂ 배출량의 감소 즉, 배출계수 효과로 인한 감소율이 1.6%를 차지하고, 화석연료 대체 효과로 인한 감소율은 1.2%, 비화석연료 보급 효과로 인한 감소율은 6.0%, 에너지 집약도 효과로 인한 감소율은 28.8%, 탄소세 효과와 GDP 대비 탄소세 비중 효과로 인한 감소율은 각각 25.9%, 9.7%를 차지한다. 반면, 연료 생산성 효과와 경제성장 효과로 인한 증가는 각각 49.5%, 33.7%이다. 따라서 배출계수 효과, 화석연료 대체 효과, 비화석연료 보급효과, 에너지 집약도 효과, 탄소세 효과, 탄소세 비중 효과, 연료 생산성 효과, 경제성장 효과를 모두 곱하면 총효과가 도출된다.²⁵⁾

24) 예를 들어, 1996년 총효과 수치는 1.049이며, 이것은 1995년 대비(1995년=1) 2013년에 CO₂ 배출량이 1.049배 증가했다는 것을 의미한다. 따라서 이 수치를 %로 나타내면, 1995년 대비 1996년에 배출량이 4.9% $(=(1.049-1)/100)$ 증가했다고 해석할 수 있다. 반대로, 2005년의 경우 1995년 대비 4.0% $(=(0.960-1)/100)$ 감소했다고 해석할 수 있다.

25) 2013년의 경우, 0.869(총효과) = 0.984(배출계수 효과) × 0.988(연료대체 효과) × 0.940(비화석연료 보급효과) × 0.712(에너지 집약도 효과) × 1.495(연료 생산성 효과) × 0.741(탄소세 효과) × 0.903(세수 효과) × 1.337(경제성장 효과).

승법 분해 분석 결과, 1995년~2013년까지 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량은 2004년 이후 계속 감소 추세에 있으며, CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 기여를 하는 요인은 에너지 집약도 효과와 탄소세 효과로 나타났다. 즉, GDP 한 단위당 1차 에너지 총 소비량의 감소와 탄소세 시행으로 인한 화석연료 소비의 감소가 배출량 감소의 큰 부분을 차지하였다.

〈표 10〉 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 변화요인 분해 분석(승법 분해)

	C_{cf}	F_{fs}	N_{ffs}	E_{int}	F_{pro}	T_f	T_{gdp}	G	C
	배출계수 효과	연료대체 효과	비화석 연료 보급효과	에너지 집약도 효과	연료 생산성 효과	정책 효과 (탄소세)	세수 효과	경제성장 효과	총효과
1996	1.013	0.991	1.004	1.022	0.975	1.036	0.990	1.018	1.049
1997	1.004	0.986	0.990	0.980	1.030	1.003	0.967	1.044	1.002
1998	1.003	0.981	0.989	0.955	1.059	0.970	0.974	1.074	0.997
1999	1.005	0.974	0.983	0.917	1.109	0.875	1.030	1.103	0.973
2000	0.992	0.978	0.983	0.889	1.145	0.844	1.035	1.142	0.968
2001	0.994	0.979	0.982	0.891	1.142	0.835	1.049	1.165	0.992
2002	0.998	0.977	0.983	0.869	1.171	0.816	1.046	1.176	0.978
2003	1.003	0.981	0.987	0.868	1.168	0.802	1.068	1.189	1.002
2004	0.994	0.979	0.980	0.854	1.195	0.809	1.035	1.212	0.988
2005	0.989	0.976	0.968	0.834	1.239	0.815	0.990	1.233	0.960
2006	0.985	0.984	0.970	0.814	1.267	0.828	0.954	1.277	0.977
2007	0.986	0.986	0.970	0.762	1.353	0.821	0.900	1.317	0.947
2008	0.984	0.976	0.969	0.759	1.361	0.818	0.898	1.323	0.934
2009	0.986	0.969	0.955	0.754	1.389	0.751	0.959	1.257	0.865
2010	0.979	0.973	0.959	0.771	1.352	0.795	0.930	1.295	0.913
2011	0.982	0.980	0.949	0.706	1.494	0.722	0.928	1.328	0.857
2012	0.987	0.989	0.941	0.711	1.495	0.735	0.910	1.331	0.869
2013	0.984	0.988	0.940	0.712	1.495	0.741	0.903	1.337	0.869

〈표 11〉에는 1995년~2013년까지 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량에 대한 가법 분해 결과가 나타나 있다. 가법 분해는 CO₂ 배출량의 절대량(톤CO₂)을 기준으로 해석하며, 음(-)의 부호는 배출량의 감소를 나타내고, 양(+)의 부호는 배출량의 증가를 나타낸다. 따라서 8

개 효과의 수치를 모두 더하면 총효과가 도출된다. 승법분해는 배출량에 대한 상대적인 기여도를 나타내지만, 가법 분해는 배출량에 대한 절대적인 기여도를 나타낸다고 볼 수 있다.

가법 분해 분석 결과, 2013년 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량은 1995년에 비해 총 CO₂ 배출량이 224백만 톤CO₂가 감소하였는데, 배출계수 효과와 연료 대체 효과에 의해 각각 25백만 톤CO₂, 19백만 톤CO₂가 감소하였으며, 비화석연료 보급효과와 에너지 집약도 효과에 의해 각각 99백만 톤CO₂, 544백만 톤CO₂가 감소하였다. 또한 탄소세 효과와 탄소세 비중 효과에 의해 각각 480백만 톤CO₂, 164백만 톤CO₂가 감소하였으나, 연료 생산성 효과와 경제성장 효과에 의해 1,110백만 톤CO₂가 증가하였다. 승법 분해의 결과와 같이 2004년 이후부터 CO₂ 배출량이 감소하고 있고, 에너지 집약도 효과와 탄소세 효과로 인한 배출량 감소가 총 배출량 감소에 가장 큰 기여를 했음을 확인할 수 있다.

〈표 11〉 OECD 7개 국가의 CO₂ 배출량 변화요인 분해 분석(가법 분해)

(단위: 백만 톤CO₂)

	ΔC_{cf}	ΔF_{fs}	ΔN_{ffs}	ΔE_{int}	ΔF_{pro}	ΔT_f	ΔT_{gdp}	ΔG	ΔC
	배출계수 효과	연료대체 효과	비화석 연료 보급효과	에너지 집약도 효과	연료 생산성 효과	정책 효과 (탄소세)	세수 효과	경제성장 효과	총효과
1996	23.48	-16.13	6.79	37.58	-44.37	62.91	-18.54	31.67	83.39
1997	6.43	-24.50	-16.75	-34.95	51.71	5.32	-57.02	73.99	4.22
1998	4.80	-33.57	-18.84	-79.73	98.57	-53.10	-45.47	122.07	-5.28
1999	7.80	-45.54	-29.28	-146.30	175.58	-226.33	50.75	166.81	-46.51
2000	-12.74	-37.86	-29.16	-199.49	228.65	-287.26	58.61	224.78	-54.47
2001	-10.12	-36.88	-30.88	-196.73	227.61	-309.26	81.65	261.60	-13.01
2002	-4.01	-40.01	-29.91	-239.19	269.10	-344.86	75.76	275.06	-38.06
2003	5.91	-33.59	-23.14	-244.43	267.57	-380.70	113.13	298.41	3.16
2004	-10.64	-35.58	-34.41	-269.57	303.98	-362.42	58.45	329.02	-21.17
2005	-18.63	-41.74	-54.49	-306.53	361.02	-344.27	-16.75	352.56	-68.83
2006	-25.40	-28.26	-52.10	-349.52	401.62	-321.37	-80.26	415.10	-40.18
2007	-23.05	-23.31	-50.37	-455.38	505.75	-329.86	-175.89	460.59	-91.51
2008	-26.77	-40.62	-52.46	-459.31	511.77	-333.14	-178.63	465.62	-113.55
2009	-22.96	-50.13	-73.96	-451.46	525.42	-457.76	-67.67	366.48	-232.04
2010	-34.32	-44.89	-68.86	-426.95	495.80	-376.75	-119.05	424.75	-150.26
2011	-28.17	-31.41	-84.01	-555.06	639.08	-519.22	-119.86	452.30	-246.36
2012	-21.42	-18.46	-97.32	-547.26	644.57	-493.41	-151.17	458.83	-225.63
2013	-25.84	-19.28	-99.91	-544.96	644.87	-480.37	-164.51	465.42	-224.58

다음으로 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 요인의 승법 분해 분석 결과가 <표 12>와 <그림 3>에 나타나 있다. 먼저, 덴마크의 총 CO₂ 배출량은 1995년 대비 2013년에 35.1% 감소하였는데 이 중 배출계수 효과로 인한 감소율은 1.9%, 화석연료 대체 효과로 인한 감소율은 5.9%, 비화석연료 보급효과로 인한 감소율은 21.9%, 에너지 집약도 효과와 정책 효과로 인한 감소율은 27.5%, 44.5%로 나타났다. 반면, 세수효과는 오히려 CO₂ 배출량 증가율에 1.9% 기여하였으며, 연료 생산성 효과와 경제성장 효과로 인한 증가율은 각각 76.7%, 24.2%로 나타났다. CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 기여를 하는 요인은 정책 효과로 나타났다.

핀란드의 경우, 2013년 총 CO₂ 배출량은 1995년 대비 12.9% 감소하였다. 배출량 감소에 가장 큰 영향을 준 요인은 정책 효과로 전체 배출량 감소의 37.1%를 차지하였으며, 세수효과로 인한 감소율은 5.8%를 차지하였다. 에너지 집약도 효과와 비화석연료 보급 효과에서도 각각 24.5%, 21.6%의 감소율이 나타났다.

독일의 총 CO₂ 배출량은 1995년 대비 2013년에 12.7% 감소하였는데, 에너지 집약도 효과로 인한 감소율이 24.5%로 가장 큰 기여를 하였고, 정책 효과로 인한 감소율은 19.9%로 나타났다.

네덜란드는 정책효과로 인한 감소율이 43.5%로 나타나 총 CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 기여를 하였고 다음으로는 에너지 집약도 효과가 21.2%로 배출량 감소에 영향을 주었다. 그러나 세수효과로 인한 배출량 증가율이 34.1%로 나타나 덴마크와 마찬가지로 오히려 배출량 증가의 요인으로 작용하였다.

노르웨이의 경우, OECD 7개 국가 중 유일하게 1995년 대비 2013년 CO₂ 배출량이 증가하였으며, 각 요인별 수치도 상이한 결과를 보여주는 국가이다. CO₂ 배출량 감소에 있어 탄소 배출계수 효과와 세수효과로 인한 감소율이 각각 29.5%, 49.1%로 나타났으며, 정책효과와 경제 성장 효과로 인한 전체 배출량 증가의 119.1%를 차지하였다. 탄소세로 인한 화석연료 소비의 감소는 1995년 대비 대부분의 국가에서 다소 긍정적인 효과를 보이거나, 노르웨이의 경우 오히려 화석연료의 소비가 급증한 것으로 인한 결과라고 볼 수 있다. 노르웨이는 1990년부터 탄소세를 부과하여 일부 기업들의 탄소 배출량이 50% 남짓 줄어드는 등 적잖은 성과를 보였으나, 전체 탄소 배출량은 증가한 것으로 나타났다. 노르웨이에서 배

출량 증가의 주요 요인은 교통수단 증가에 따른 것으로 나타났으며, 이는 에너지 소비구조 개선 없이는 탄소세 부과와 실효성이 낮다는 것을 보여주는 하나의 사례이다.²⁶⁾

스웨덴은 1995년 대비 2013년 총 CO₂ 배출량이 37.2% 감소하였으며, 에너지 집약도 효과와 정책효과로 인한 배출량 감소가 각각 35.6%, 34.8%로 배출량 감소에 가장 큰 기여를 하였다. 또한 세수효과로 인한 감소율도 20.2%로 나타났다.

영국의 총 CO₂ 배출량은 1995년 대비 2013년 13.2% 감소하였으며, 에너지 집약도와 정책 효과의 감소율이 각각 38.7%, 30.0%로 나타났고, 다른 나라들과 달리 탄소 배출계수 효과가 배출량 증가에 영향을 준 것으로 나타났다. 이는 탄소 배출량이 높은 화석 연료 사용 증가로 인하여 탄소배출 계수 증가에 영향을 준 것으로 볼 수 있다.

이상의 결과를 통해, OECD 7개 국가에서 CO₂ 배출량 감소에 두드러진 역할을 하는 요인은 에너지 집약도 효과로서 GDP 한 단위당 에너지 소비량의 감소가 배출량 감소에 가장 큰 기여를 한 것으로 나타났고, 탄소세와 관련한 정책효과와 세수 효과는 각 국가의 상황과 여건에 따라 배출량 감소에도 기여를 하나, 오히려 배출량 증가의 원인이 되는 경우도 발생함을 볼 수 있었다.

〈표 12〉 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화요인 분해 분석(승법 분해)

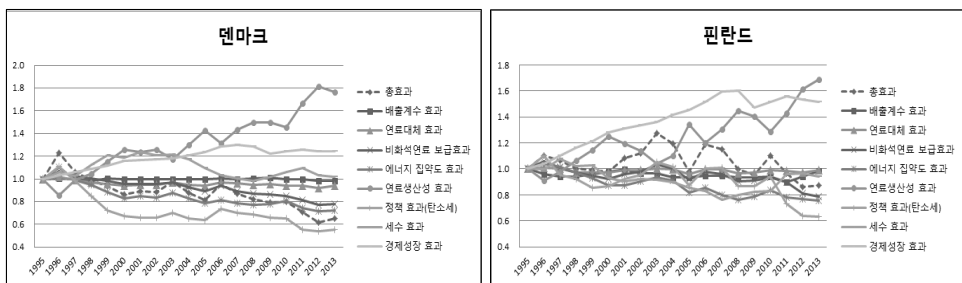
		C_{cf}	F_{fs}	N_{ffs}	E_{int}	F_{pro}	T_f	T_{gdp}	G	C
		배출계수 효과	연료대체 효과	비화석 연료 보급효과	에너지 집약도 효과	연료 생산성 효과	정책 효과 (탄소세)	세수 효과	경제성장 효과	총효과
덴마크	2000	0.994	0.943	0.956	0.829	1.261	0.669	1.184	1.159	0.862
	2005	1.000	0.940	0.891	0.787	1.426	0.640	1.096	1.238	0.816
	2010	0.998	0.939	0.848	0.809	1.457	0.648	1.060	1.241	0.798
	2013	0.981	0.941	0.781	0.725	1.767	0.555	1.019	1.242	0.649
핀란드	2000	0.977	0.973	0.920	0.871	1.247	0.865	0.927	1.281	0.976
	2005	0.937	0.961	0.914	0.815	1.343	0.871	0.855	1.455	0.976
	2010	0.940	0.991	0.934	0.834	1.284	0.940	0.829	1.515	1.100
	2013	0.984	0.989	0.784	0.755	1.688	0.629	0.942	1.513	0.871

26) 이상현, 「노르웨이 17년 탄소세 실험, 절반의 성공」, 『월 스트리트 저널』 2008.9.30. (http://news.sustain.kr/bbs/print.php?bo_table=full&wr_id=794)

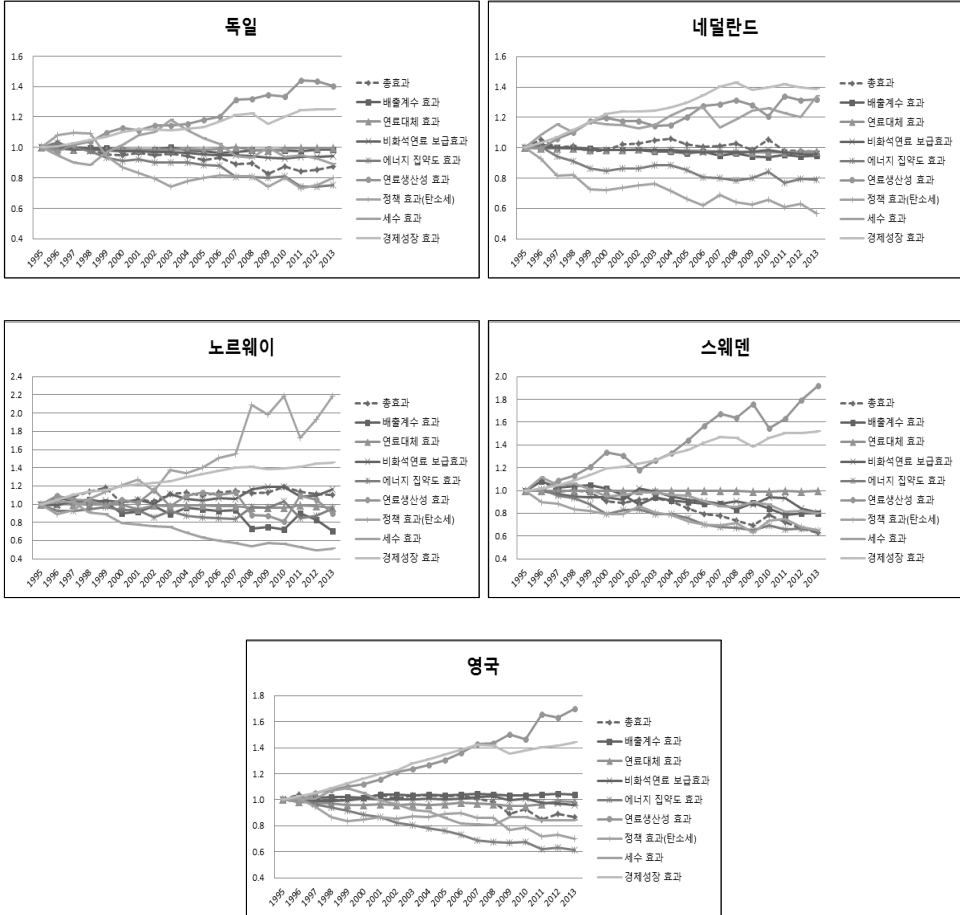
〈표 12〉 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화요인 분해 분석(승법 분해) (Continued)

		C_{cf}	F_{fs}	N_{ffs}	E_{ent}	F_{pro}	T_f	T_{gdp}	G	C
		배출계수 효과	연료대체 효과	비화석 연료 보급효과	에너지 집약도 효과	연료 생산성 효과	정책 효과 (탄소세)	세수 효과	경제성장 효과	총효과
독일	2000	0.982	0.989	0.974	0.910	1.127	0.871	1.019	1.099	0.946
	2005	0.977	0.983	0.954	0.886	1.183	0.800	1.057	1.131	0.918
	2010	0.980	0.988	0.927	0.809	1.334	0.800	0.937	1.202	0.872
	2013	0.983	0.995	0.945	0.755	1.402	0.801	0.891	1.251	0.873
네덜란드	2000	0.983	0.986	0.984	0.848	1.199	0.722	1.155	1.221	0.986
	2005	0.965	0.980	0.975	0.855	1.200	0.662	1.259	1.295	1.021
	2010	0.940	0.967	0.984	0.844	1.205	0.658	1.262	1.398	1.053
	2013	0.950	0.976	0.961	0.788	1.321	0.565	1.341	1.389	0.975
노르웨이	2000	0.895	0.993	1.025	0.932	1.047	1.206	0.792	1.195	1.014
	2005	0.941	0.983	1.036	0.857	1.126	1.398	0.636	1.332	1.094
	2010	0.723	0.960	1.187	1.035	0.814	2.190	0.561	1.393	1.188
	2013	0.705	0.963	1.168	0.955	0.897	2.191	0.509	1.457	1.103
스웨덴	2000	1.019	0.997	0.942	0.793	1.339	0.790	0.946	1.192	0.905
	2005	0.898	0.997	0.918	0.755	1.442	0.728	0.953	1.357	0.842
	2010	0.840	0.988	0.937	0.690	1.546	0.735	0.879	1.466	0.786
	2013	0.798	0.995	0.809	0.644	1.921	0.652	0.798	1.520	0.628
영국	2000	1.018	0.960	1.008	0.884	1.123	0.847	1.052	1.166	1.014
	2005	1.033	0.964	1.004	0.764	1.303	0.890	0.862	1.347	1.030
	2010	1.032	0.952	1.007	0.678	1.465	0.788	0.866	1.381	0.926
	2013	1.041	0.986	0.958	0.613	1.702	0.700	0.839	1.439	0.868

〈그림 3〉 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화(승법 분해)



<그림 3> OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화(승법 분해) (Continued)



<표 13>과 <그림 4>는 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 요인의 가법 분해 분석 결과를 보여준다. 승법 분해와 같은 양상을 띠며, 노르웨이를 제외한 6개 국가에서 배출량 감소에 가장 큰 견인을 하는 요인은 정책효과(탄소세)와 에너지 집약도 효과임을 알 수 있다.

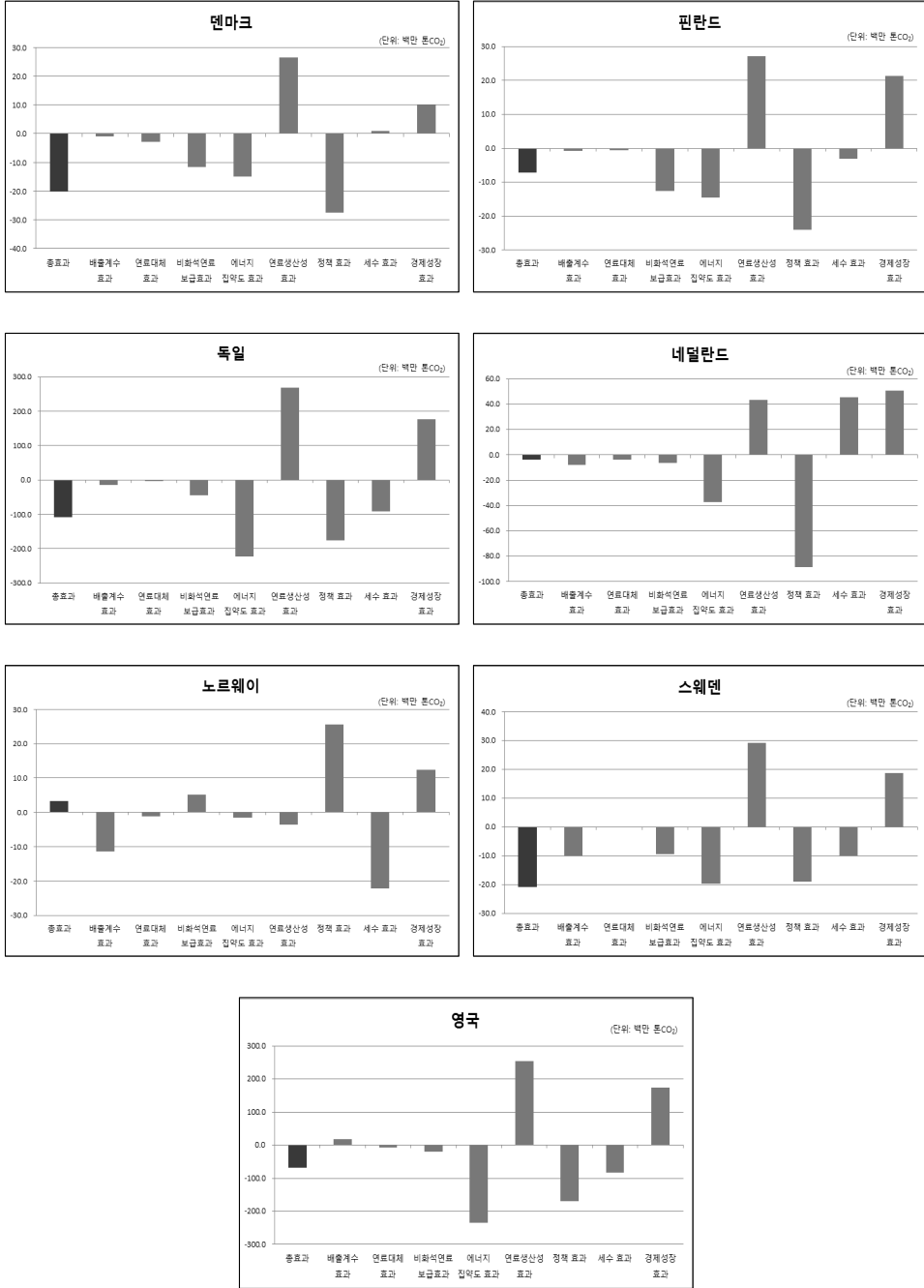
〈표 13〉 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화요인 분해 분석(가법 분해)

(단위: 백만 톤CO₂)

		C_{cf}	F_{fs}	N_{ffs}	E_{int}	F_{pro}	T_f	T_{gdp}	G	C
		배출계수 효과	연료대체 효과	비화석 연료 보급효과	에너지 집약도 효과	연료 생산성 효과	정책 효과 (탄소세)	세수 효과	경제성장 효과	총효과
덴마크	2000	-0.30	-3.11	-2.39	-9.99	12.39	-21.42	9.03	7.86	-7.93
	2005	0.00	-3.20	-6.01	-12.43	18.44	-23.20	4.76	11.09	-10.55
	2010	-0.11	-3.22	-8.45	-10.90	19.35	-22.34	2.99	11.11	-11.58
	2013	-0.91	-2.82	-11.53	-15.00	26.53	-27.42	0.89	10.09	-20.17
핀란드	2000	-1.27	-1.52	-4.56	-7.53	12.09	-7.94	-4.16	13.55	-1.33
	2005	-3.54	-2.18	-4.92	-11.21	16.13	-7.56	-8.57	20.53	-1.32
	2010	-3.59	-0.55	-3.98	-10.53	14.51	-3.62	-10.88	24.16	5.52
	2013	-0.85	-0.59	-12.57	-14.53	27.10	-23.98	-3.12	21.42	-7.12
독일	2000	-14.98	-9.44	-21.35	-77.79	99.14	-114.45	15.32	78.01	-45.55
	2005	-18.89	-13.57	-38.39	-98.65	137.04	-182.13	45.09	99.93	-69.56
	2010	-16.38	-9.34	-59.88	-168.69	228.57	-176.84	-51.73	145.72	-108.57
	2013	-13.70	-3.82	-44.77	-223.34	268.11	-176.60	-91.50	177.69	-107.94
네덜란드	2000	-2.73	-2.27	-2.55	-25.78	28.33	-50.78	22.45	31.14	-2.19
	2005	-5.68	-3.15	-4.10	-24.81	28.91	-65.46	36.56	41.08	3.35
	2010	-10.06	-5.43	-2.67	-27.43	30.10	-67.61	37.51	53.99	8.40
	2013	-7.95	-3.77	-6.17	-37.01	43.19	-88.66	45.47	50.94	-3.97
노르웨이	2000	-3.47	-0.21	0.77	-2.22	1.45	5.88	-7.33	5.59	0.45
	2005	-2.00	-0.56	1.16	-5.02	3.86	10.92	-14.78	9.34	2.92
	2010	-11.04	-1.40	5.84	1.16	-7.00	26.66	-19.66	11.29	5.85
	2013	-11.45	-1.23	5.08	-1.52	-3.56	25.68	-22.12	12.32	3.20
스웨덴	2000	1.00	-0.14	-3.16	-12.38	15.54	-12.55	-2.99	9.36	-5.32
	2005	-5.55	-0.16	-4.39	-14.44	18.83	-16.36	-2.47	15.69	-8.85
	2010	-8.70	-0.61	-3.22	-18.47	21.70	-15.30	-6.40	19.03	-11.97
	2013	-10.11	-0.24	-9.51	-19.72	29.23	-19.12	-10.11	18.76	-20.82
영국	2000	9.02	-21.17	4.09	-63.80	59.71	-85.99	26.28	79.26	7.40
	2005	17.03	-18.92	2.16	-139.97	137.82	-60.47	-77.34	154.89	15.19
	2010	15.55	-24.33	3.51	-192.09	188.59	-117.70	-70.88	159.46	-37.91
	2013	19.14	-6.80	-20.44	-233.84	254.28	-170.26	-84.02	174.20	-67.75

조향숙

〈그림 4〉 1995년 대비 2013년 OECD 7개 국가별 CO₂ 배출량 변화(가법 분해)



V. 결론

본 연구는 탄소세를 실행하고 있는 OECD 7개 국가를 대상으로 1995~2013년 기간 동안의 CO₂ 배출량 감소요인에 대하여 분해분석을 실시하였다. 기존의 연구들은 대부분 기술에 기반을 둔 물리적인 요소 즉, 탄소 집약도, 에너지 집약도, 에너지 대체효과 등에만 초점을 맞추었으나 본 연구는 이들 요소뿐만 아니라 경제적 감축수단인 탄소세의 효과를 반영하여 배출량의 변화요인과 요소별 기여도를 분석하였다.

1995~2013년 OECD 7개 국가의 배출량 연평균 증가율은 -0.77%이며, 1995년 1,719백만 톤CO₂에서 2013년 1,494백만 톤CO₂로 배출량의 감소를 기록하였다. 승법분해를 통해 감소요인을 분석한 결과, GDP 한 단위당 1차 에너지 총 소비량의 감소에 기여한 에너지 집약도 효과와 화석연료 소비 감소에 영향을 준 탄소세 정책 효과로 인한 감소율이 1995년 대비 2013년에 각각 28.9%, 25.9%로 나타나 이 두 요인이 CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 가법분해로 분석한 결과도 마찬가지로 에너지 집약도 효과와 탄소세 정책 효과에 의해 1995년 대비 2013년에 각각 544백만 톤CO₂, 480백만 톤CO₂가 감소한 것으로 나타났다.

다음으로 OECD 7개 국가별 분해분석 결과, CO₂ 배출량 감소에 있어 가장 주요한 역할을 한 요소는 에너지 집약도 효과인 것으로 나타났고, 탄소세 정책효과와 세수효과는 각 국가의 CO₂ 감축 관련 정책 상황과 여건에 따라 다르게 나타났다. 덴마크와 네덜란드에서 탄소세 세수효과는 CO₂ 배출량의 증가에 영향을 주었으나, 노르웨이에서는 배출량 감소에 기여를 하였다. 반면에, 노르웨이를 제외한 6개의 국가에서 탄소세 정책효과가 배출량 감소에 기여를 하였는데 특히 덴마크와 네덜란드에서 탄소세 정책효과로 인한 CO₂ 배출량 감소는 1995년 대비 2013년에 각각 44.5%, 43.5%로 나타나 배출량 감소에 가장 큰 영향을 준 것으로 나타났다. 노르웨이의 경우 탄소세 실행에도 불구하고 교통수단의 증가로 오히려 화석연료 소비가 급증하였다. 또한 탄소세 부과의 여파로 탄소 배출 감축에 취약한 산업에 속한 기업들에게 엄청난 추가 비용부담을 안겨줬고, 탄소 배출량을 줄이기 위한 엄청난 투자에도 불구하고 에너지 소비의 증가로 탄소 배출량은 되레 늘어난 것으로 파악되었다. 이와 같이, 탄소세 정책효과와 세수효과는 국가별로 상이

하게 나타나 탄소세 시행은 CO₂ 배출량 감소에 기여한 측면이 있으나, 세수의 배분·활용으로 인한 CO₂ 감축 실효성 여부는 아직 미비한 것으로 추측된다. 이상의 결과를 볼 때 CO₂ 감축을 위해서는 CO₂ 감축 기술수단과 에너지 소비구조 개선 뿐 아니라 탄소세 또는 에너지세와 같은 경제적 감축수단이 함께 조화를 이루는 노력이 필요함을 보여준다.

본 연구는 에너지 연소부문 전체를 대상으로 하는 CO₂ 배출량에 대해서 분석을 실시하였는데, 향후 부문별(산업부문, 가정부문, 상업·공공부문) 분해 분석을 적용하는 것도 CO₂ 배출 감축 정책 수립에 의미가 있을 것으로 생각된다.

[References]

- 김수이·정경화, “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해분석”, 『자원·환경경제연구』, 제20권 제2호, 2011, pp. 229~254.
- 강만옥·강광규·조정환, 「탄소세 도입 및 에너지세제 개편방안 연구」, 한국환경정책·평가연구원, 2011.
- 박년배·심성희, “감축목표 업종 분류체계에 따른 산업부문의 에너지 소비 및 온실가스 배출 요인 분해 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제24권 제1호, 2015, pp. 189~224.
- 박년배·전의찬, “국내 산업 부문 에너지 소비와 온실가스 배출에 대한 과거 및 중기 목표 분해분석”, 『환경정책』, 제21권 제3호, 2013, pp. 103~126.
- 신상철·김용진·한정희·박하얀, 「기후변화 대응을 위한 탄소세 도입방안」, 한국환경정책·평가연구원, 2010.
- 온실가스종합정보센터, 「2015년 국가 온실가스 인벤토리 보고서」, 2015.
- 이상현, 『노르웨이 17년 탄소세 실험, 절반의 성공』, 월 스트리트 저널, 2008.9.30, (http://news.sustain.kr/bbs/print.php?bo_table=full&wr_id=794).
- 정해식·이기훈, “로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해”, 『자원·환경경제연구』, 제20권 제2호, 2001, pp. 569~589.
- 진상현·황인창, “지자체의 온실가스 배출특성에 관한 지수분해분석: 에너지부문을 중심으로”, 『환경정책』, 제17권, 제3호, 2009, pp. 101~128.
- 한택환, “제조업 부문의 이산화탄소 배출 요인분해: 한국, 영국, 미국의 국제비교 연구”,

- 『자원·환경경제연구』, 제16권 제3호, 2007, pp. 723~738.
- 황인창, “기후변화 대응전략에 따른 이산화탄소 배출량 변화요인 분석: 생태적 근대화 전략을 중심으로”, 『환경사회학연구』, 제12권 제2호, 2008, pp. 153~184.
- Ang, B. W., “The LMDI Approach to Decomposition Analysis: A Practical Guide,” *Energy Policy*, Vol. 33, 2005, pp. 867~871.
- Ang, B. W., and G. Pandiyan, “Decomposition of Energy-induced CO₂ Emissions in Manufacturing,” *Energy Economics*, Vol. 19, 1997, pp. 363~374.
- Bhattacharyya, S. C. and W. Matsumura, “Changes in the GHG Emission Intensity in EU-15: Lessons from a Decomposition Analysis,” *Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 3315~3322.
- Calbick, K. S. and T. Gunton, “Differences Among OECD Countries’ GHG Emissions: Causes and Policy Implications,” *Energy Policy*, Vol. 67, 2014, pp. 895-902.
- Camarero, M., A. J. Picazo-Tadeo, and C. Tamarit, “Are the Determinants of CO₂ Emissions Converging Among OECD Countries?,” *Economics Letters*, Vol. 118, 2013, pp. 159-162.
- Danish Ministry of Climate, Energy and Building, *Denmark’s Sixth National Communication and First Biennial Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2013.
- Diewert, W. E., “Exact and Superlative Index Numbers,” *Journal of Econometrics*, Vol. 4, 1976, pp. 115~145.
- Diewert, W. E., “The Consumer Price Index and Index Number Theory,” *A Survey Discussion Paper*, No. 01-02, 2001.
- Greening, L. A., “Effects of Human Behavior on Aggregate Carbon Intensity of Personal Transportation: Comparison of 10 OECD Countries for the Period 1970-1993,” *Energy Economics*, Vol. 26, 2004, pp. 1~30.
- Greening, L. A., W. B. Davis, and L. Scipper, “Decomposition of Aggregatcarbon Intensity for the Manufacturing Sector: Comparison of Declining Trends from 10 OECD Countries for the Period 1971-1991,” *Energy Economics*, Vol. 20, 1998, pp. 43~65.
- IEA, *CO₂ Emission from Fuel Combustion Highlights 2015*, OECD/IEA, Paris, 2015.
- IPCC, *Summary for Policymakers in Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change*, Cambridge and New York, Cambridge University Press, 2014.

- Kaya, Y. and Y. Keiichi, eds, *Environment, Energy and Economy*, Bookwell Publications, 1993, pp. 271~280.
- Kaya, Y., *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP growth: Interpretation of Proposed Scenarios. Paper presented to the IPCC energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris, (mimeo), 1990.*
- Liu, L-C., Fan, Y., Wu, G., and Wei, Y-M., "Using LMDI Method to Analyze the Change of China's Industrial CO₂ Emissions from Final Fuel Use: An Empirical Analysis," *Energy Policy*, Vol. 35, 2007, pp. 5892~5900.
- Löfgren, Å., and A. Muller, "Swedish CO₂ Emissions 1993-2006: An Application of Decomposition Analysis and Some Methodological Insights," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 47, 2010, pp. 221~239.
- Malla, S., "CO₂ Emissions from Electricity Generation in Seven Asia-Pacific and North American Countries: A Decomposition Analysis," *Energy Policy*, Vol. 37, 2009, pp. 1~9.
- Moutinho, V., A. C. Moreira, and P. M. Silva, "The Driving Forces of Change in Energy-related CO₂ Emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: The LMDI Approach to Decomposition Analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, pp. 1483~1499.
- O'Mahony, T., "Decomposition of Ireland's Carbon Emissions from 1990 to 2010: An Extended Kaya Identity," *Energy Policy*, Vol. 59, 2013, pp. 573~581.
- Paul, S. and R. N. Bhattacharya, "CO₂ Emission from Energy Use in India: A Decomposition Analysis," *Energy Policy*, Vol. 32, 2004, pp. 585~593.
- Prime Minister's Office (Finland), *Environmental and Energy Taxation in Finland-Preparing for the Kyoto Challenge*, Summary of the Working Group Report, Prime Minister Office Publication Series 2000/4. Helsinki, Finland, 2000.
- Sheinbaum, C., B. Ruíz, and L. Ozawa, "Energy Consumption and Related CO₂ Emissions in five Latin American countries: Changes from 1990 to 2006 and perspectives," *Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 3629~3638.
- Shrestha, R. M., G. Anandarajah, and M. H. Liyanage, "Factors Affecting CO₂ Emission from the Power Sector of Selected Countries in Asia and the Pacific," *Energy Policy*, Vol. 37, 2009, pp. 2375~2384.

- Sun, J. W. and P. Malaska, "CO₂ Emission Intensities in Developed Countries 1980-1994," *Energy*, Vol. 23, 1998, pp. 105~112.
- Sun, J. W., "Decomposition of Aggregate CO₂ Emissions in the OECD: 1960-1995," *Energy*, Vol. 20, No. 3, 1999, pp. 147~155.
- Timilsina, G. R. and A. Shrestha, "Factors Affecting Transport Sector CO₂ Emissions Growth in Latin American and Caribbean Countries: An LMDI Decomposition Analysis," *International Journal of Energy Research*, Vol. 33, 2009b, pp. 396~414.
- Timilsina, G. R. and A. Shrestha, "Transport Sector CO₂ Emissions Growth in Asia: Underlying Factors and Policy Options," *Energy Policy*, Vol. 37, 2009a, pp. 4523~4539.
- Torvanger, A., "Manufacturing Sector Carbon Dioxide Emissions in Nine OECD Countries, 1973-87," *Energy Economics*, Vol. 13, No. 3, 1991, pp. 168~186.
- Zamikau, J., "Can Different Energy Resources be Added or Compared?," *Energy*, Vol. 26, No. 6, 1996, pp. 483~491.