

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

정해식* · 이기훈**

〈차 례〉

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| I. 서론 | III. CO ₂ 배출량 변화의 요인 분해 |
| II. 로그 평균 디비지아 지수의
작성과 분해 | IV. 결 론 |

I. 서론

우리 나라는 고속성장에 못지 않게 에너지 소비의 급격한 증가와 이로 인한 CO₂ 배출의 폭발적인 증대를 경험해 왔다. 에너지 소비로 인한 CO₂ 배출량은 지난 1970년 1,342만 탄소톤(이하 TC)에서 1998년에는 1억 751만 TC로 8배나 증가하여 세계 10위의 이산화탄소 배출국이 되었다. CO₂ 배출은 앞으로 경제성

* 한국전자통신연구원.

** 충남대학교 경제학과.

장과 에너지 소비전망을 감안할 때 증가속도는 다소 누그러지더라도 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다.

이 때문에 국내외에서 우리 나라의 CO₂ 배출량 증가에 대한 우려도 높고, 저감압력도 갈수록 드세게 일고 있다. 기후변화협약 협상의 진전 추세로 보아 우리 나라가 어떠한 형태로든 CO₂ 배출량 증가를 억제해야 할 부담을 지는 것은 시간문제로 보인다. 갈수록 지금보다 더 적극적인 배출억제 정책이 필요할 것으로 예상되고 있다.

이 연구는 우리 나라 CO₂ 배출량 증가의 요인을 찾고, 각 요인별 기여도를 파악하려는 것이다. 구체적으로는 1970년부터 1998년까지의 기간중 에너지 소비로 인한 CO₂ 총배출량의 변화와 CO₂ 배출 집약도(GDP 단위당 CO₂ 배출량) 변화의 요인을 분해한다. 또, CO₂ 배출량 변화에 산업, 수송, 가정·상업, 공공·기타 등 주요 부문별 요인이 미친 영향도 분석한다. 이는 앞으로 CO₂ 배출량 증가 추세를 전망하고, 배출량 증가 억제를 위한 정책을 마련하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

분석은 로그 평균 디비지아 지수(log mean Divisia index)의 작성 및 분해(decomposition) 기법을 이용한다. 이 방법은 비교적 간편히 계산될 수 있는 반면 설명력이 높고, 오차항이 남지 않는 완전분해로 최근 에너지나 환경 관련 지표분석에 이용되기 시작하였다. 특히 시계열 자료를 분석할 때 해당 데이터가 없는 이른바 '영의 문제'가 있는 경우 사용하기 쉬운 특성이 있다(최기홍, 2000).

II. 로그 평균 디비지아 지수의 작성과 분해

여러 가지 디비지아 지수의 작성과 분해 모형을 다음과 같이 일반화해 볼 수 있다.¹⁾ 어떤 총지표 V 는 n 개 요인 (X_1, \dots, X_n)에 의해 결정되고, 각 요인

1) 디비지아 지수의 미시경제학적 의미와 도출과정은 Zarnikau (1996), 로그 평균 디비지아 지수의 작성과 적용은 최기홍(2000)을 참조하시오.

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

X_i 는 m 개의 값 (x_{i1}, \dots, x_{im}) 을 갖는다고 하면, V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \sum_{j=1}^m \left\{ \prod_{i=1}^n (x_{ij}) \right\} \quad (1)$$

연속함수인 경우 \log 를 취한 뒤 시간 미분하여 어떤 시점에 있어서 V 의 변화율(instantaneous growth rate)을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{d \ln V}{dt} = \sum_{j=1}^m w_j \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{d(\ln x_{ij})}{dt} \right\} \quad (2)$$

$$\text{단, } w_j = \frac{x_{ij}}{\sum_{k=1}^m \prod_{i=1}^n (x_{ik})}$$

두 시점 (0, 1) 사이의 변화율은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\ln V^1 - \ln V^0 = \int_0^1 \sum_{j=1}^m w_j \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{d(\ln x_{ij})}{dt} \right\} dt \quad (3)$$

상첨자 0은 기준년도(base year), 1은 비교년도(current year)를 나타낸다. 식 (3)의 좌변 전체지표의 변화는 식 (4)에서처럼 $X_{i-effect}$ (i 는 1부터 n) n 개의 합으로 표시된다. $X_{i-effect}$ n 개는 두 시점 (0, 1) 사이의 해당 요인의 변화가 전체지표 V 변화에 미친 효과를 나타낸다.

$$\ln V^1 - \ln V^0 = \sum_{i=1}^n X_{i-effect} \quad (4)$$

$$X_{i-effect} = \int_0^1 \sum_{j=1}^m w_j \left\{ \frac{d(\ln x_{ij})}{dt} \right\} dt \quad (5)$$

이렇게 우리는 총지표 V 의 변화를 각 구성 요인 X_i 의 변화로 구분할 수

있게 되었다. 여기서 식 (5)는 X_i 를 제외한 다른 모든 요인들의 값이 기준연도의 값을 유지할 때 X_i 값의 변화가 V 값 변화에 미친 효과만을 나타낸다. 이것이 바로 디비지아 지수 분해(Divisia index decomposition) 기법이 된다.

디비지아 지수의 작성도 마찬가지이다. 식 (5) 하나 하나가 디비지아 지수가 된다. X_i 가 수량이면 디비지아 수량 지수, 가격이면 디비지아 가격 지수가 되고, 같은 식으로 에너지 효율지수, CO₂ 배출 효율지수 등을 작성할 수 있다.

지금까지는 변수가 시간에 대한 연속함수(continuous function)로 간주하고 이론을 전개하였다. 그러나 실제로 다루는 통계치들은 대부분 월, 분기, 년 등으로 관찰되니까 모두가 불연속 함수(discrete function)이다. 따라서, 이 연속함수의 근사식(approximation)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln X_i = \int_0^1 \sum_j w_j \frac{d \ln x_{ij}}{dt} dt \simeq \sum_j w_j^* (\ln x_{ij}^1 - \ln x_{ij}^0) \quad (6)$$

여기서 가중치 w_j^* 의 근사식은 여러 가지가 있을 수 있다. 이 w_j^* 의 근사값으로 전후 두 가중치의 단순산술평균, 즉 $(w_j^0 + w_j^1)/2$ 를 쓰는 것이 디비지아 지수 가운데 가장 흔히 쓰는 산술 평균 디비지아 지수(arithmetic mean weight Divisia index) 혹은 Törnqvist 지수이다. 이 지수를 이용할 경우 오차항이 남을 뿐 아니라, 시계열 데이터 값이 영인 경우 처리하기가 곤란한 이른바 '영의 값'(zero value) 문제가 생긴다.

로그 평균 디비지아 지수(logarithmic mean weight Divisia index)는 두 시점 가중치의 log 평균을 가중치로 사용한 것이다. 즉,

$$w_j^* = \frac{L(w_j^0, w_j^1)}{\sum L(w_j^0, w_j^1)} = \frac{w_j^0 - w_j^1}{\ln w_j^0 - \ln w_j^1} \bigg/ \sum \frac{w_j^0 - w_j^1}{\ln w_j^0 - \ln w_j^1} \quad (7)$$

단, $L(A, B) = \frac{A - B}{\ln A - \ln B}$ (로그 평균)

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

로그 평균 디비지아 지수는 이를 제시한 사람의 이름을 따서 Sato-Vartia 지수라고도 한다. 로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 지수의 작성이나 요인분해는 앞서 언급한 대로 factor reversal²⁾한 완전분해인 데다 영의 문제를 처리하는 데 편리하여 최근 에너지나 환경분야 분석에 두루 쓰이기 시작하였다. Ang and Choi (1997)는 에너지 원단위 분석에 이 방법을 처음으로 적용하였으며, 최기홍 (2000)은 화력발전 효율개선 측정에도 적용한 바 있다.³⁾ 정현식·이해춘 (2000)은 로그 평균 디비지아 지수는 변수가 음의 값을 갖는 경우 사용할 수 없는 단점을 보완하여 평균변화율지수를 개발, 1990년부터 1995년까지의 기간중 7대 산업의 CO₂ 배출량 요인분해를 실시한 바 있다.

Ⅲ. CO₂ 배출량 변화의 요인 분해

1. 총배출량 변화의 분해

앞에서 살펴본 로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용하여 우리 나라의 1970년부터 1998년까지의 기간중 에너지소비로 인한 CO₂ 총배출량 변화의 요인을 구분하고, 각 요인별 기여도를 알아보려고 한다. 에너지 소비로 인한 CO₂ 배출량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$CO_2 = \left(\frac{CO_2}{FEC} \right) \cdot \left(\frac{FEC}{TEC} \right) \cdot \left(\frac{TEC}{GDP} \right) \cdot \left(\frac{GDP}{POP} \right) \cdot POP \quad (8)$$

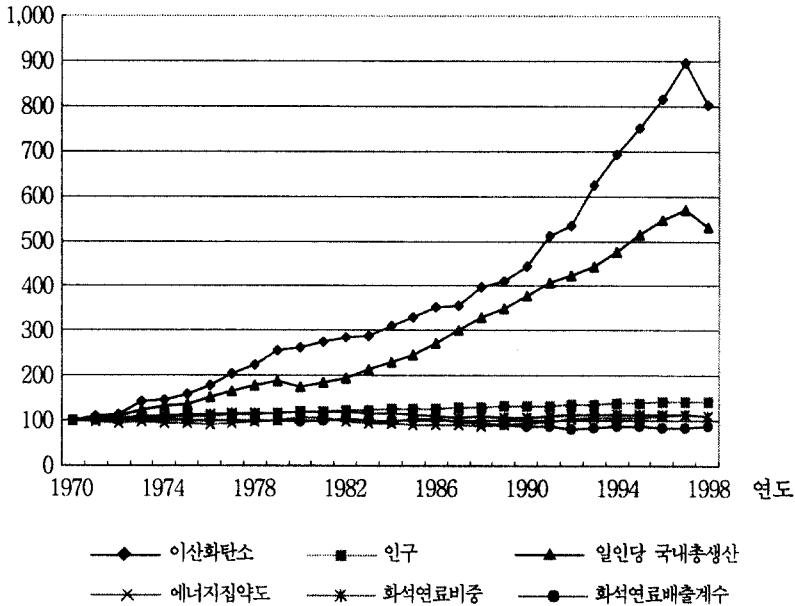
여기서 CO₂는 CO₂ 배출량, FEC는 화석 연료 소비량(fossil energy consumption), TEC는 총에너지 소비량(total energy consumption), GDP는

2) 지수의 특징이나 속성에 관해서는 Ang and Zhang (2000)과 Diewert (2001)를 참조하시오.

3) 최기홍 (2000)을 참조하시오.

<그림 1> CO₂ 배출량 및 관련지표 추이

지수(1970=100)



국내총생산(gross domestic product), POP는 인구(population)를 나타낸다. 따라서, 이 식의 오른쪽 첫째 항은 화석연료의 탄소배출계수, 둘째 항은 전체에너지 소비에서 화석연료 비중, 셋째 항은 에너지 집약도, 넷째 항은 일인당 GDP, 다섯째 항은 인구를 나타낸다.

<그림 1>은 이 지표들의 추이를 그림으로 나타낸 것이다. 각 항목의 추이를 보면 우선 CO₂ 배출량은 일인당 GDP의 증가보다 더 빠른 속도로 증가하여 왔다. 1998년은 외환위기로 경제성장이 둔화되고, CO₂ 배출량이 감소되었다. 인구, 에너지 집약도, 화석연료 비중도 꾸준히 증가하고 있으나, 화석연료의 탄소배출계수는 감소하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 경제성장이 우리 나라 CO₂ 배출량 증가에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

CO₂ 배출량 변화의 다섯 가지 요인별 기여도는 식 (8)에 로그를 취하고 시간

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

에 대하여 미분하면 다음과 같이 파악할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta \log CO_2 &= \Delta \log (CO_2/FEC) + \Delta \log (FEC/TEC) \\ &+ \Delta \log (TEC/GDP) + \Delta \log (GDP/POP) \\ &+ \Delta \log (POP) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 TEC는 석유, 석탄, 가스 등 일차 에너지원의 소비량을 합한 것이다. 지금까지는 열량기준으로 단순 합계한 것을 써 왔다.

$$STEC_t = \sum E_{k,t} \quad (10)$$

여기서 $E_{k,t}$ 는 개별 에너지원, 즉 석유, 석탄, 전력, 도시가스, 열에너지, 신탄 등의 t 기 소비량이다. 즉, 서로 다른 에너지를 통상 석유환산톤(TOE)이나 Btu 등으로 환산한 뒤 단순 합계한 수치이다(이하 STEC). 이 단순합계 STEC는 여러 가지 문제가 있다. 우선, 석유나 석탄이 열량기준으로 완전 대체재(perfect substitutes)가 아니며, 같은 열량의 에너지라도 전기는 석탄보다 7~8배 더 비쌌 뿐만 아니라 훨씬 더 생산에 기여하는 바가 크다고 보는 것이 합리적이다. 그런데도 에너지들의 특성을 고려하지 않고 단순 합계하는 것은 여러 가지 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 로그 평균 디비지아 총에너지 소비량 지수(이하 DTEC)를 만들어 사용한다. 디비지아 지수를 쓰게 되면 무엇보다도 개별 에너지의 소비량과 비용만 알면 되므로 서로 다른 에너지 단위를 석유환산톤이나 Btu 같은 단위로 전환할 필요가 없다. 비용의 비중이 높은 에너지는 더 큰 가중치를 갖게 되므로 경제적 가치가 반영된다는 장점이 있다. 디비지아 지수 가운데 로그 평균 기법을 쓰는 이유는 앞서 밝힌 바와 같다.

로그 평균 디비지아 DTEC는 다음과 같이 만든다.

$$\ln E_t - \ln E_{t-1} = \sum w_k(t^*) (\ln E_{k,t} - \ln E_{k,t-1}) \quad (11)$$

여기서 $E_{k,t}$ 는 개별 에너지원, 즉 석유, 석탄, 전력, 도시가스, 열에너지, 신탄 등의 t 기 소비량이며, $w_k(t^*)$ 는 두 시점 가중치의 로그 평균으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} w_k(t^*) &\equiv \frac{L(w_{k,t-1}, w_{k,t})}{\sum_i L(w_{i,t-1}, w_{i,t})} \\ &\equiv \frac{w_{k,t-1} - w_{k,t}}{\ln w_{k,t-1} - \ln w_{k,t}} \bigg/ \sum_i \frac{w_{i,t-1} - w_{i,t}}{\ln w_{i,t-1} - \ln w_{i,t}} \end{aligned} \quad (12)$$

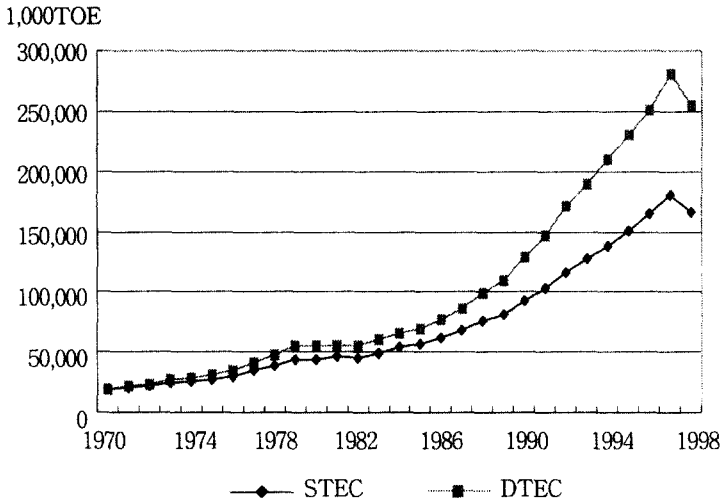
여기서 $w_{k,t} = \frac{P_{k,t} \times E_{k,t}}{\sum P_{k,t} \times E_{k,t}}$ 이고, $P_{k,t}$ 는 개별 연료의 가격이다. 따라서 $w_{k,t}$ 는 개별 연료의 비용 비중(cost share)이 된다. 이 식의 분자는 두 가중치의 로그평균이며, 분모는 가중치의 합을 1로 해 주기 위한 표준화 인자(normalizing factor)이다(최기훈, 2000).

이렇게 해서 만든 DTEC와 STEC를 비교하면 <그림 2>와 같다. 이 그림에서 보듯이 DTEC값이 기존 STEC값보다 크며, 그 차이는 갈수록 벌어지고 있다. 이는 그만큼 전기나 석유, 가스 등 값비싼 에너지의 소비비중이 증가하고 있는 현상을 반영하기 때문이다. 에너지 소비량 합계를 지금까지 해 온 것처럼 STEC로 파악하는 경우 우리 나라의 에너지 소비 증가 추세를 과소평가하게 되는 것이다.

따라서, 본 연구에서는 식 (8)에 있는 TEC를 DTEC로 바꾸어 요인분해하였다. 분해한 결과는 <표 1>에 나타나 있다. 우리 나라 CO₂ 배출량은 지난 1970년 1,342만 TC에서 1998년에는 1억 751만 TC로 9,410만 TC나 증가하였는데 여기에는 일인당 GDP의 증가가 7,446만 TC, 인구증가가 1,615만 TC 기여한 것으로 나타났다. 즉, 경제성장의 기여도가 9,061만 TC에 달해 전체배출량 증

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

〈그림 2〉 STEC와 DTEC의 비교



가의 대부분을 차지하고 있다. 이 기간중 에너지 효율의 현저한 하락 현상도 CO₂ 배출량 증가에 상당히 기여하였다. 즉, GDP 단위당 에너지 소비량으로 측정된 에너지 집약도의 상승으로 2,961만 TC의 CO₂ 배출량 증가를 초래하였다. 반면에 화석연료의 배출계수는 떨어지고, 화석연료의 비중도 줄어들어 각각 759만 TC, 1,853만 TC만큼 배출량을 감소시키는 요인으로 작용하였다. 이 기간중 적용된 연료별 CO₂ 배출계수가 바뀌지 않은 점을 감안하면 배출계수 변화효과는 사실 연료대체 효과로 파악될 수 있다.

CO₂ 배출량의 변화와 그 요인들을 기간별로 구분해서 보면 향후 배출량 증가가 둔화되리라고 기대하기 어렵게 만드는 부정적인 경향을 발견할 수 있다. 경제성장 요인의 양의 기여도는 갈수록 커지고 있는 반면, 1980년대 후반에 배출량 감소 요인이었던 에너지 집약도 변화는 1990년대 들어서 배출량 증가 요인으로 바뀌었고, 화석연료 비중 변화와 탄소배출계수 변화로 인한 배출량 감소 기여도가 1990년대 들어서 현저히 줄어들고 있기 때문이다.

〈표 1〉 CO₂ 배출량 증가의 요인 분해

(단위 : MTC)

연 도	총 CO ₂ 배출량 변화	요인별 기여				
		화석연료 탄소 배출계수의 변화 (CO ₂ /FEC)	화석연료의 비중 변화 (FEC/DTEC)	에너지 집약도 변화 (DTEC/GDP)	일인당 GDP 변화 (GDP/POP)	인구증가 (POP)
1970~1971	1.26	0.10	-0.23	0.19	0.93	0.28
1971~1972	0.47	0.00	-0.07	-0.12	0.38	0.28
1972~1973	3.93	0.28	0.21	1.35	1.79	0.30
1973~1974	0.65	-0.03	0.10	-1.19	1.43	0.33
1974~1975	1.59	-0.16	0.23	0.27	0.91	0.35
1970~1975	7.90	0.23	0.12	0.63	5.39	1.54
1975~1976	2.50	-0.07	-0.54	0.60	2.15	0.36
1976~1977	3.42	-0.28	-0.62	1.83	2.11	0.40
1977~1978	2.61	-0.29	-0.90	1.24	2.13	0.43
1978~1979	4.37	0.01	-0.12	2.27	1.72	0.49
1979~1980	0.84	-0.08	0.47	1.91	-2.00	0.54
1975~1980	13.73	-0.73	-1.94	7.40	6.86	2.14
1980~1981	1.92	0.34	1.86	-2.44	1.61	0.56
1981~1982	1.45	1.51	-0.14	-2.85	2.35	0.58
1982~1983	0.36	-1.76	-1.31	-0.67	3.53	0.57
1983~1984	2.79	-0.18	-0.57	0.09	2.94	0.50
1984~1985	2.91	1.42	-0.84	-0.98	2.88	0.42
1980~1985	9.42	1.28	-0.78	-7.18	13.41	2.69
1985~1986	2.68	0.20	-2.25	-0.14	4.41	0.46
1986~1987	0.54	-2.55	-2.37	0.29	4.70	0.47
1987~1988	5.67	-1.04	0.06	1.25	4.90	0.49
1988~1989	1.70	-1.93	-2.07	2.34	2.82	0.54
1989~1990	4.58	-3.27	-1.62	4.27	4.64	0.56
1985~1990	15.16	-8.41	-8.50	7.53	21.99	2.55
1990~1991	9.02	1.20	-0.41	2.64	4.96	0.63
1991~1992	2.91	-6.27	-1.27	6.99	2.74	0.73
1992~1993	12.03	4.54	-0.64	3.81	3.54	0.79
1993~1994	9.18	1.12	-0.88	1.69	6.37	0.89
1994~1995	7.73	-0.41	-0.85	0.73	7.30	0.97
1990~1995	40.88	-0.29	-4.04	16.97	24.28	3.96
1995~1996	8.86	-1.05	1.03	1.67	6.17	1.05
1996~1997	10.72	-0.19	-2.12	6.97	4.94	1.12
1997~1998	-12.58	1.28	-2.66	-4.39	-7.89	1.08
1995~1998	7.00	-0.04	-3.33	3.96	3.38	3.04
1970~1998	94.10	-7.59	-18.53	29.61	74.46	16.15

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

〈표 2〉 STEC와 DTEC를 이용한 분해 결과의 비교

(단위 : MTC)

연 도	화석연료 비중 변화의 기여도		에너지 집약도 변화의 기여도	
	(FEC/STEC)	(FEC/DTEC)	(STEC/GDP)	(DTEC/GDP)
1970~1971	0.34	-0.23	-0.39	0.19
1971~1972	0.17	-0.07	-0.36	-0.12
1972~1973	0.91	0.21	0.65	1.35
1973~1974	0.10	0.10	-1.19	-1.19
1974~1975	0.38	0.23	0.12	0.27
1970~1975	1.93	0.12	-1.18	0.63
1975~1976	0.50	-0.54	-0.44	0.60
1976~1977	0.52	-0.62	0.68	1.83
1977~1978	-0.16	-0.90	0.50	1.24
1978~1979	0.30	-0.12	1.86	2.27
1979~1980	0.39	0.47	1.99	1.91
1975~1980	1.59	-1.94	3.87	7.40
1980~1981	0.13	1.86	-0.72	-2.44
1981~1982	0.02	-0.14	-3.01	-2.85
1982~1983	-0.96	-1.31	-1.01	-0.67
1983~1984	-0.25	-0.57	-0.23	0.09
1984~1985	-0.68	-0.84	-1.14	-0.98
1980~1985	-1.70	-0.78	-6.27	-7.18
1985~1986	-1.54	-2.25	-0.85	-0.14
1986~1987	-1.62	-2.37	-0.46	0.29
1987~1988	1.44	0.06	-0.12	1.25
1988~1989	-0.73	-2.07	1.00	2.34
1989~1990	0.28	-1.62	2.37	4.27
1985~1990	-2.47	-8.50	1.51	7.53
1990~1991	1.03	-0.41	1.20	2.64
1991~1992	1.27	-1.27	4.45	6.99
1992~1993	0.56	-0.64	2.61	3.81
1993~1994	1.14	-0.88	-0.34	1.69
1994~1995	-0.72	-0.85	0.60	0.73
1990~1995	3.68	-4.04	9.26	16.97
1995~1996	0.09	1.03	2.61	1.67
1996~1997	0.67	-2.12	4.17	6.97
1997~1998	-4.21	-2.66	-2.84	-4.39
1995~1998	-3.15	-3.33	3.77	3.96
1970~1998	-0.62	-18.53	11.70	29.61

DTEC를 이용한 분해와 기존의 STEC를 이용한 분해 결과를 비교하면, 다섯가지 요인별 기여도 가운데 화석연료의 비중변화와 에너지 집약도 변화의 기여도가 서로 다르다. <표 2>는 STEC를 이용했을 때와 DTEC를 이용했을 때의 분해 결과를 비교한 것이다. 화석연료 비중 변화효과는 STEC의 경우 -62만 TC이나 DTEC를 이용했을 경우 -1,853만 TC로 마이너스 기여도가 확대되었다. 반면에 에너지 집약도 변화의 기여도는 STEC의 경우 1,170만 TC이나 DTEC를 이용했을 경우 2,961만 TC로 증가하였다. 에너지 집약도 악화가 CO₂ 배출 증가에 미친 영향이 DTEC를 이용한 분석에서 훨씬 크게 나타났다.

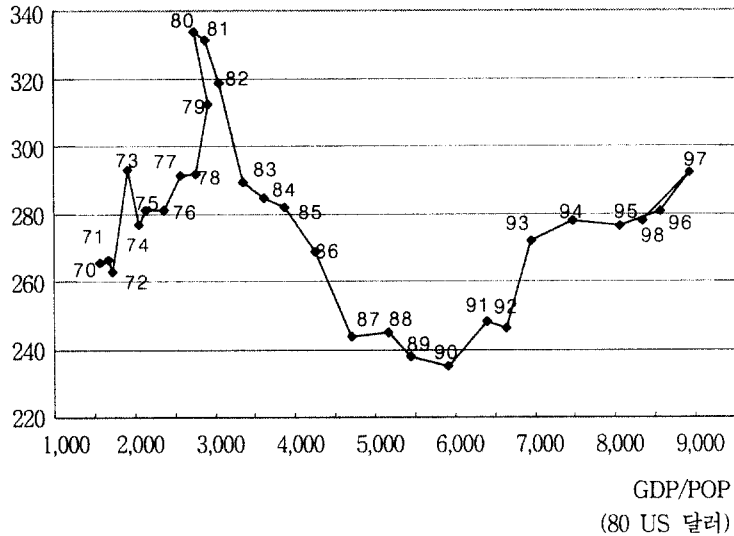
기간별로는 STEC를 이용한 분석에서는 화석연료의 비중변화의 기여도가 1970년대에는 플러스에서 1980년대에는 마이너스였다가 1990년대에는 다시 플러스로 돌아섰으나, DTEC를 이용한 경우 화석연료의 비중변화의 기여도는 분석기간 대부분 마이너스를 보였다. 에너지 집약도 변화의 플러스 기여도의 증가 추세는 1990년대에 두드러지고, DTEC 분석 결과에서 더 두드러진 것으로 나타났다. 이런 현상은 기본적으로 1980년대보다 1990년대에 석탄에서 석유, 가스나 전기 등 단위열량 가격이 비싼 에너지로의 의존도가 증가했으며, 이 때문에 STEC보다 DTEC가 시간이 갈수록 더 큰 값을 갖게 되었고, 그 영향으로 화석연료 비중 변화의 마이너스 기여도와 에너지 집약도 변화의 플러스 기여도가 더 증가한 것으로 분석된다.

2. CO₂ 배출집약도 변화의 분해

CO₂ 배출집약도(emission intensity)는 GDP 한 단위당 CO₂ 배출량으로 정의된다. 에너지 집약도가 에너지의 사용효율을 나타내듯이 CO₂ 배출집약도는 경제의 CO₂ 배출효율을 나타낸다고 할 수 있다. 우리나라의 경우 CO₂ 배출집약도는 1970년 266에서 1998년 278로 상승하였다. GDP 100만 달러 어치를 생산하는데 배출되는 CO₂가 1970년 266TC에서 1998년 278TC로 증가한 것이다. 그만큼 배출효율이 떨어진 것이다. 이러한 CO₂ 집약도 변화에 어떤 요인들이

<그림 3> CO₂ 배출집약도와 일인당 GDP

CO₂/GDP
(TC/10억 달러)



얼마나 영향을 끼쳤는지를 앞에서와 같은 완전분해 방법을 이용하여 분석한다. CO₂ 집약도 분해는 CO₂ 배출량 증가 요인 중 경제성장요인을 제거한 효과만 보는 의미가 있다.

CO₂ 배출집약도와 일인당 GDP의 변화 추세를 동시에 보면 <그림 3>과 같다. <그림 3>의 수직축에는 CO₂ 배출집약도, 수평축에는 일인당 GDP를 놓아 연도별 수치를 표시하였다. 여기서 우리는 1970년대와 1980년대 그리고 1990년대의 추세가 확연히 다를 수 있다. 즉, 1970년대에는 그림이 우상향하다가 1980년대에는 우하향하였고, 다시 1990년대에는 우상향 추세로 돌아선 것이다. 따라서, 분석기간 내내 일인당 GDP는 계속 증가하였으나 CO₂ 집약도는 1970년대에는 증가추세를 1980년대에는 감소추세를 보이다가 1990년을 기점으로 다시 증가 추세로 돌아선 것을 알 수 있다.

CO₂ 배출집약도 변화의 요인 분해는 식 (8)을 다음과 같이 바꾸어 이용한다.

〈표 3〉 CO₂ 배출집약도 요인별 분식

(단위 : TC/100만 달러)

연 도	CO ₂ 배출 집약도 변화 (CO ₂ /GDP)	요인별 기여		
		탄소 배출 계수 변화 (CO ₂ /FEC)	화석 연료 비중 변화 (FEC/DTEC)	에너지 집약도 변화 (DTEC/GDP)
1970~1971	0.95	1.82	-4.43	3.56
1971~1972	-3.44	-0.07	-1.32	-2.06
1972~1973	29.93	4.50	3.35	22.08
1973~1974	-16.41	-0.43	1.52	-17.50
1974~1975	4.60	-2.24	3.17	3.68
1970~1975	15.64	3.62	1.95	10.07
1975~1976	-0.12	-0.86	-6.72	7.46
1976~1977	10.34	-3.17	-7.01	20.52
1977~1978	0.47	-2.99	-9.22	12.68
1978~1979	20.45	0.14	-1.16	21.47
1979~1980	21.43	-0.76	4.39	17.80
1975~1980	52.57	-8.07	-21.54	82.19
1980~1981	-2.31	3.13	17.14	-22.57
1981~1982	-12.80	12.99	-1.19	-24.60
1982~1983	-29.44	-13.87	-10.30	-5.27
1983~1984	-4.68	-1.25	-4.06	0.63
1984~1985	-2.60	9.36	-5.53	-6.44
1980~1985	-51.84	9.94	-6.05	-55.73
1985~1986	-13.16	1.20	-13.54	-0.82
1986~1987	-25.01	-13.79	-12.77	1.55
1987~1988	1.33	-5.04	0.31	6.06
1988~1989	-7.37	-8.58	-9.23	10.43
1989~1990	-2.57	-13.49	-6.70	17.62
1985~1990	-46.77	-41.95	-42.37	37.55
1990~1991	12.93	4.53	-1.54	9.94
1991~1992	-1.94	-22.10	-4.47	24.63
1992~1993	25.74	15.16	-2.15	12.74
1993~1994	6.01	3.50	-2.76	5.26
1994~1995	-1.54	-1.19	-2.43	2.08
1990~1995	41.21	-0.93	-13.16	55.30
1995~1996	4.37	-2.78	2.73	4.42
1996~1997	11.63	-0.48	-5.29	17.40
1997~1998	-14.45	3.21	-6.67	-11.00
1995~1998	1.54	-0.11	-8.88	10.54
1970~1998	12.35	-33.57	-85.84	131.76

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

$$\frac{CO_2}{GDP} = \left(\frac{CO_2}{FEC} \right) \cdot \left(\frac{FEC}{DTEC} \right) \cdot \left(\frac{DTEC}{GDP} \right) \quad (13)$$

분해 모형에서 좌변은 CO₂ 배출집약도를 나타내고, 우변의 첫째 항은 탄소배출계수, 둘째 항은 화석연료 비중, 그리고 셋째 항은 에너지 집약도를 나타낸다. 따라서 CO₂ 배출집약도가 탄소배출계수, 화석연료비중, 에너지 집약도 등의 변화에 어느 정도 영향을 받았는지 알 수 있게 된다.

분해한 결과는 <표 3>과 같다. 전체분석 기간중 CO₂ 배출집약도는 12.35 증가하였는데 이는 여러 요인 가운데 에너지 집약도 변화는 CO₂ 집약도를 131.8만큼 증가시켰으나, 화석연료 비중 변화는 85.8만큼, 배출계수변화는 33.6만큼 감소 요인으로 작용하였기 때문에 분석되었다. 에너지 집약도의 악화가 CO₂ 배출집약도 악화로 귀착된 것이다. 기간별로 보면 앞서 살펴본 대로 1980년대에는 CO₂ 배출집약도가 현저히 감소하였으나 1990년대 들어서 다시 증가추세로 돌아섰는데, 그 원인으로는 탄소배출계수의 변화와 화석연료 비중 변화의 마이너스 기여도가 줄어든 반면 에너지 집약도 악화의 플러스 기여도가 크게 상승한 탓으로 분석된다. 탄소배출계수와 화석연료 비중 변화의 플러스 기여도가 갈수록 줄고, 에너지 집약도는 갈수록 악화되는 것은 우려할 만한 현상이 아닐 수 없다.

3. CO₂ 배출량 변화의 부문별 분해

여기서는 CO₂ 배출량 변화의 요인을 에너지전환, 산업, 수송, 가정·상업, 공공·기타의 5대 부문으로 나누어 분해한다. 즉, 부문별 배출계수 변화와 에너지 소비 구조 변화, 에너지 소비량 증가 등의 요인이 전체배출량 변화에 미친 영향을 분석한다.

<표 4>는 부문별 CO₂ 배출량 추이를 나타낸 것이다. 부문별로 파악할 경우 수송부문과 산업부문의 배출량 증가속도가 가장 빠름을 알 수 있다. 수송부문은

〈표 4〉 부문별 CO₂ 배출량 추이

(단위 : MTC)

부 문	1981	1985	1990	1995	1997	1998
전 환	7.53 (20.3)	8.26 (18.9)	10.34 (15.8)	22.73 (22.5)	30.65 (26.2)	25.97 (25.0)
산 업	12.17 (32.7)	13.29 (30.2)	23.78 (36.6)	36.23 (35.8)	39.78 (34.1)	40.02 (38.5)
가정·상업	12.97 (35.1)	15.49 (35.2)	17.63 (27.0)	18.90 (18.7)	20.14 (17.2)	15.58 (15.0)
수 송	3.04 (8.1)	5.44 (12.3)	11.51 (17.7)	22.06 (21.8)	25.04 (21.4)	21.22 (20.4)
공공·기타	1.41 (3.8)	1.48 (3.4)	1.91 (2.9)	1.26 (1.3)	1.31 (1.1)	1.11 (1.1)
계	37.12 (100)	43.96 (100)	65.17 (100)	101.18 (100)	116.92 (100)	103.90 (100)

주: ()안은 구성비(%)를 나타냄.

자료: 에너지경제연구원.

1981년 304만 TC에서 1998년 2,122만 TC로 배출이 늘어났으며, 산업부문은 같은 기간중 1,217만 TC에서 4,002만 TC로 증가하였다. 이에 반해 가정·상업 부문의 배출증가세는 상대적으로 완만하였고, 공공·기타부문의 배출량은 오히려 감소한 것으로 나타났다. 그 결과 전체배출에서 산업과 수송 부문의 점유율은 1981년 8.1%와 32.7%에서 20.4%와 38.5%로 각각 증가한 반면, 가정·상업과 공공·기타 부문은 35.1%와 3.8%에서 15.0%와 1.11%로 각각 감소하였다.

부문별 요인분해는 앞서 살펴본 로그 평균 디비지아 분해 기법을 이용하여 다음과 같이 실시되었다. 우리 나라의 에너지 사용으로 인한 CO₂ 배출량은 전환, 산업, 가정·상업, 수송, 공공·기타 등 5개 부문에서의 배출량의 합이다. 즉,

로그 평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해

$$CO_2 = \sum_i CO_{2i} \quad (14)$$

$i =$ 전환, 산업, 가정·상업, 수송, 공공·기타 부문

이 식은 다음과 같이 정리된다.

$$CO_2 = \sum \frac{CO_{2i}}{E_i} \cdot \frac{E_i}{E} \cdot E = \sum C_i \cdot T_i \cdot E \quad (15)$$

$i =$ 전환, 산업, 가정·상업, 수송, 공공·기타 부문

여기서 E_i 는 각 부문별 에너지 소비량, E 는 전체에너지 소비량이다.⁴⁾ 따라서, 우변의 첫째 항 C_i 는 부문별 배출계수, 둘째 항 T_i 는 각 부문별 에너지 소비량 비중, E 는 전체에너지 소비량이 된다. 따라서, 전체 CO_2 배출량 변화는 부문별 배출계수의 변화 효과(C_i 효과), 전체에너지 소비량에서 각 부문이 차지하는 에너지 소비량 비중의 변화, 즉 구조변화 효과(T_i 효과)와 총에너지 소비량의 변화 효과(E 효과)로 구분된다.

따라서, 전체 CO_2 배출량 변화는 로그 평균 디비지아 지수 분해 기법을 적용하면 다음과 같이 세 가지 개별 효과의 합으로 나타내어진다.

$$\Delta CO_2 = \sum X_{i-effect} = \sum L(CO_{2i}^0, CO_{2i}^1) \ln \frac{X_i^1}{X_i^0} \quad (16)$$

$$\text{단, } L(CO_{2i}^0, CO_{2i}^1) = \frac{CO_{2i}^0 - CO_{2i}^1}{\ln CO_{2i}^0 - \ln CO_{2i}^1}$$

이 때 각 요인별 효과 $X_{i-effect}$ 는 다음과 같이 구해진다.

4) 이 전체에너지 소비량은 앞에서 구한 DTEC와는 다르다. 각 부문별 에너지원별 소비량과 비용 관련 자료가 없기 때문에 단순합계 에너지 소비량을 쓴다.

〈표 5〉 부문별 CO₂ 배출량 변화요인 분해

(단위: 천TC)

연 도	효 과	전 환	산 업	가정·상업	수 송	공공·기타	합 계
1981~ 1985	<i>C_i</i>	-1,771	-584	566	-33	-77	-1,899
	<i>T_i</i>	866	-944	-995	1,572	-150	349
	<i>E</i>	1,642	2,648	2,954	859	300	8,403
1985~ 1990	<i>C_i</i>	-4,082	-166	-993	10	-69	-5,301
	<i>T_i</i>	1,494	1,572	-5,204	1,977	-354	-514
	<i>E</i>	4,669	9,088	8,336	4,082	849	27,023
1990~ 1995	<i>C_i</i>	5,249	-3,952	-4,077	8	-406	-3,179
	<i>T_i</i>	-392	2,239	-3,394	2,774	-985	241
	<i>E</i>	7,535	14,162	8,745	7,765	748	38,954
1995~ 1998	<i>C_i</i>	-936	-3,411	-2,095	-50	-188	-6,679
	<i>T_i</i>	1,788	3,464	-2,915	-2,904	-82	-646
	<i>E</i>	2,384	3,735	1,685	2,121	116	10,041
1981~ 1998	<i>C_i</i>	-1,540	-8,112	-6,599	-66	-740	-17,057
	<i>T_i</i>	3,755	6,331	-12,508	3,420	-1,570	-579
	<i>E</i>	16,230	29,633	21,720	14,827	2,013	84,422
	<i>C_i + T_i + E</i>	18,444	27,852	2,613	18,181	-298	66,792

$$X_{i-effect} = L(CO_{2i}^0, CO_{2i}^1) \ln \frac{X_i^1}{X_i^0} \quad (17)$$

i = CO₂ 배출계수, 구조변화, 성장 효과

〈표 5〉는 이렇게 분해한 결과이다. 5대 부문의 전체 CO₂ 배출량은 1981년 3,712만 TC에서 1998년 1억 390만 TC로 6,679만 TC 증가하였는데 이러한 CO₂ 배출량 증가의 최대 원인은 에너지 소비 증가인 것으로 나타났다. 즉, 성

장 효과에 의해 84만 4,200TC 증가하였다. 반면에 CO₂ 배출계수의 변화로 인해서는 17만 600TC 감소요인이 되었으며, 구조변화효과는 5,700TC 감소 효과밖에 없었다. 부문별 성장 효과는 산업과 수송 부문이 가장 크게 나타났으며, 공공·기타 부문이 가장 작았다. 반면에 CO₂ 배출계수 효과는 산업과 가정상업 부문이 가장 크게 나타났으나, 수송부문에서는 가장 작았다. 수송부문이 가장 작은 이유는 연료 대체의 가능성이 적기 때문으로 분석된다. 구조변화 효과는 가정 상업과 공공 기타 부문의 마이너스 효과가 산업, 전환, 수송부문의 플러스 효과에 의해 대부분 상쇄되어 전체적으로는 미미한 정도가 되었다.

IV. 결 론

지금까지 로그 평균 디비지아 지수의 작성 및 분해 기법을 이용하여 우리나라의 1970년부터 1998년까지의 기간중 에너지 소비로 인한 CO₂ 배출량 급증과 CO₂ 집약도 변화의 요인을 분해하였으며, 1981년부터 1998년까지의 기간중 CO₂ 배출량 변화의 요인을 부문별로 구분하여 분해하였다. 총 CO₂ 배출량 변화는 화석연료 배출계수의 변화, 화석연료 비중의 변화, 에너지 집약도의 변화, 일인당 소득 증가, 인구 증가의 다섯 가지 요인으로 구분하여, 각 요인이 기간별로 전체배출량 변화에 미친 영향을 분석하였다.

분해결과 소득의 증가와 인구 증가가 CO₂ 배출량 증가의 가장 큰 요인이었고, 1990년대 들어서는 에너지 집약도의 증가, 즉 에너지 효율의 하락 현상이 두드러지면서 CO₂ 배출량 증가 요인으로 작용하고 있는 것으로 나타났다. 더구나, CO₂ 배출계수의 변화와 화석연료 비중 변화가 CO₂ 배출량 감소 요인으로 작용하는 정도가 점점 더 약화되고 있는 것도 향후 CO₂ 배출량 억제에 좋지 않은 신호로 분석되고 있다.

특히 각 에너지원별 소비량을 집계(aggregate)할 때에 지금과 같은 열량기준

단순합계 방식으로 합산하는 것보다 각 에너지원의 가격과 비용을 감안한 로그 평균 디비지아 지수 기법으로 합산하는 경우는 상당한 차이가 있으며, 고급연료의 사용 증대로 그 차이가 점점 더 벌어지고 있는 것으로 나타났다. 이 때문에 로그 평균 디비지아 지수로 분해한 경우 에너지 사용 효율의 악화 현상은 통상적인 분석보다 훨씬 더 심화되고 있음을 발견할 수 있었다.

◎ 참 고 문 헌 ◎

1. 산업자원부 · 에너지경제연구원, 『기후변화협약 대응 실천계획 수립을 위한 연구』, 1999.
2. 에너지경제연구원, 『에너지 소비구조 분석 및 에너지 절약방안』, 1997.
3. _____, 『에너지통계연보』, 각 호.
4. 정현식 · 이해춘, “평균 변화율지수에 의한 CO₂ 배출요인 분해방법”, 『자원 · 환경경제연구』, 한국환경경제학회 · 한국자원경제학회, 제9권 제3호, 2000, pp. 489~513.
5. 최기홍, “화력발전소 효율개선 측정에 대한 디비지아 분해기법의 적용”, 『자원 · 환경경제연구』, 한국환경경제학회 · 한국자원경제학회, 제9권 제5호, 2000, pp. 811~827.
6. Ang, B. W., “Decomposition Methodology in Industrial Energy Demand Analysis,” *Energy*, 20, 1995, pp. 1081~1095.
7. _____ and F. Q. Zhang, “A Survey of Index Decomposition Analysis in Energy and Environmental Studies,” *Energy*, 25, 2000, pp. 1149~1176.
8. _____ and K. H. Choi, “Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensity for Industry: A Refined Divisia Index Method,” *The Energy Journal*, Vol. 18, No. 3, IAEE, 1997, pp. 59~73.
9. Diewert, W. Erwin, *The Consumer Price Index and Index Number Theory: A Survey*, Discussion Paper NO, 01-02, 2001.

10. Greening, Lorna A., William B. Davis and Lee Schipper, "Decomposition of Aggregate Carbon Intensity for the Manufacturing Sector: Comparison of Declining Trends from 10 OECD Country for the Period 1971-1991," *Energy Economics*, 20, 1998, pp. 43~65.
11. Laurent Viguier, "Emissions of SO₂, NO_x and CO₂ in Transition Economies: Emission Inventories and Divisia Index Analysis," *The Energy Journal*, 20, 1999, pp. 59~87.
12. Liaskas, K., Mavrotas, G., Mandaraka, M. and D. Diakoulaki, "Decomposition of Industrial CO₂ Emission: The Case of European Union," *Energy Economics*, 22, 2000, pp. 383~394.
13. Sun, J. W., "Decomposition of Aggregate CO₂ Emissions in the OECD: 1965-1995," *The Energy Journal*, 20, 1999, pp. 147~155.
14. _____ and B. W. Ang, "Some Properties of an Exact Energy Decomposition Model," *Energy*, 25, 2000, pp. 1177~1188.
15. Zhang, F. Q. and B. W. Ang, "Methodological Issues in Cross-Country/Region Decomposition of Energy and Environment Indicators," *Energy Economics*, 23, 2001, pp. 179~190.
16. Zhang, Zhong Xiang, "Can China Afford to Commit Itself an Emission Cap? An Economic and Political Analysis," *Energy Economics*, 22, 2000, pp. 587~614.
17. _____, "Decoupling China's Carbon Emissions Increase from Economic Growth: An Economic Analysis and Policy Implication," *World Development*, 28, 2000, pp. 739~752.
18. Zarnikau, J., "Can Different Energy Resources Be Added or Compared?" *Energy* 21(6), 1996, pp. 483~491.

ABSTRACT

Decomposition of Energy-Induced CO₂ Emissions
in Korea Using Log Mean Divisia Index Approach

Hae-Shik Chung · Kihoon Lee

We examine historical contributions of inter fuel substitution, changes in carbon efficiency and energy intensity, growth of economy and population to Korea's CO₂ emissions from 1970 to 1998 using the log mean weight Divisia index method. The study reveals that economic growth is the most significant factor to CO₂ emissions growth among the five factors. Changes in the fuel substitution and carbon coefficient are found negative contributors to CO₂ emissions growth. Energy intensity, which played dominant role in halting CO₂ emissions growth in the 1980s, began to play reversed role in the 1990s. When evaluated with the log mean Divisia index technique, deterioration of energy intensity in the 1990s is found worse and expected to contribute CO₂ emissions growth further.