



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학 석사학위 논문

OECD 국가의 발전부문 온실가스 배출
요인분해분석

2013년 2월

서울대학교 대학원

협동과정 기술경영경제정책전공

김 현 용

OECD 국가의 발전부문 온실가스 배출 요인분해분석

지도교수 이종수

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2013년 2월

서울대학교 대학원
협동과정 기술경영경제정책전공
김 현 용

김현용의 공학석사학위 논문을 인준함

2013년 2월

위원장 이 정 동 (인)

부위원장 이 종 수 (인)

위원 조 영 상 (인)

초 록

오늘날 전 세계 에너지 소비량은 꾸준히 증가하고 있으며, 에너지 수요를 충족시키기 위한 전력 생산량도 함께 증가하고 있다. 특히 전 세계의 이산화탄소 배출량은 2009년도까지 꾸준히 상승하였으며, 2010년에는 전 세계의 이산화탄소 배출량이 역대 최대치를 기록하였다. 이 중 발전부문에서 배출되는 이산화탄소 비중은 2010년 기준 39%로써, 이산화탄소 배출의 주요 원인으로 지목되고 있다. 이러한 결과는 세계 각국이 교토의정서 이후로 이산화탄소 배출 저감에 노력을 했음에도 불구하고 이산화탄소 배출량을 많이 감축하지 못했음을 의미하며, 특히 발전부문에서의 개선이 시급함을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 본 논문은 지난 30년 동안 OECD 20개국의 발전부문에서 발생하는 이산화탄소 배출 요인을 찾기 위해, 로그 평균 디비지아 지수(Log Mean Divisia Index)를 이용하여 분해분석을 실시하였다.

로그 평균 디비지아 지수는 지수분해분석 방법론의 일종이며, 에너지 소비와 이산화탄소 배출량을 분석하는 데 널리 쓰이고 있는 방법론이다. 본 연구는 이산화탄소 배출요인을 생산 효과, 구조 효과, 화력발전 효율 효과, 연료 효율 효과, 탄소 배출계수 효과, 연료 믹스 효과로 분해하여 분석하였다. 분석 결과, 한국은 생산 효과, 화력발전 효율 효과에서 이산화탄소 배출량을 줄였으며, 연료 효율 효과, 연료 믹스 효과, 탄소 배출계수 효과는 반대로 이산화탄소 배출량을 증가시킨 것으로 나타났다. 특히, 한국의 경우 이산화탄소 배

출량을 증가시킨 주요 원인으로 저탄소 연료인 석유, 천연가스 보다는 과거부터 석탄 화력발전을 중심으로 한 전력생산량이 증가했기 때문으로 드러났다. 프랑스, 벨기에의 경우에는 원자력 발전 비중을 크게 증가시켰고, 화력발전 비중을 축소시켜 이산화탄소 배출량 감소 효과가 가장 크게 나타났다. 또한 호주, 체코 등은 상대적으로 이산화탄소를 적게 배출하는 천연가스의 사용량을 증가시켜, 연료 믹스 효과를 통해 이산화탄소 배출량을 줄인 것으로 나타났다. 분석 결과, 개별 국가들의 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 요인은 다르게 나왔으며, 본 논문에서는 추가적으로 이산화탄소 배출의 주요 요인을 찾기 위하여, 이산화탄소 배출에 관한 선형회귀분석을 실시하여 이산화탄소 배출에 영향을 주는 독립변수들을 확인하였다.

분석결과를 바탕으로, 화력발전이 이산화탄소 배출에 끼치는 영향을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 기후 변화협약 이행을 위해서 각 정부는 화력발전의 비중, 효율, 연료 전환, 연료 효율 등을 통제할 필요가 있음을 알 수 있다. 현재 시점에서 본 연구의 결과를 이용하면 국가 에너지 정책 방향을 설정하는데 고려해야 할 요소들을 인식하고, 이를 바탕으로 녹색성장을 위한 효과적인 정책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 로그 평균 디비지아 지수, 이산화탄소 요인 분해분석, 생산 효과, 화력발전 효율, 연료 믹스, 탄소 배출 계수, OECD국가

학 번 : 2011-21141

목 차

초 목	iii
목 차	v
표 목차	vii
그림 목차	viii
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 방법론	3
1.3 연구 목적	5
1.4 연구 구조	6
2. 선행 연구	8
2.1 분해분석 개념	8
2.2 이산화탄소 배출의 분해분석	10
3. 연구 방법론	12
3.1 지수 분해 방법	12
3.2 로그 평균 디비지아 지수 분석	13
3.2.1 로그 평균 디비지아 지수 개념	13
3.2.2 로그 평균 디비지아 지수 분석	15
4. 실증 분석	24
4.1 데이터	24

4.2	전력 부문의 분해분석	26
4.2.1	OECD 20개국 전체 분석 결과.....	26
4.2.2	OECD 20개국 국가별 분석.....	31
5.	선형 회귀 분석.....	55
5.1	선형 회귀 모형	55
5.2	데이터	56
5.3	분석 결과	57
6.	결론 및 시사점.....	59
6.1	결론.....	59
6.2	시사점	62
	참 고 문 헌	65
	부록 1 : IPCC 탄소배출계수(Carbon emission factor: CEF)	70
	부록 2 : 분석결과.....	72
	Abstract.....	74

표 목차

<표 1> 선형분석 결과.....	57
--------------------	----

그림 목차

[그림 1] OECD 20개국 이산화탄소 배출량 변화(1980년~2010년)	27
[그림 2] OECD 20개국의 전력 구조 효과	30
[그림 3] OECD 20개국의 이산화탄소 배출량과 전력 생산량 변화	32
[그림 4] OECD 20개국의 이산화탄소 배출량과 전력 생산량 변화	34
[그림 5] OECD 20개국의 전력원단위 당 이산화탄소 배출량 변화	36
[그림 6] OECD 20개국의 생산 효과	37
[그림 7] OECD 20개국의 화력발전 비중 효과	39
[그림 8] OECD 4개국의 화력발전 비중 효과	40
[그림 9] OECD 8개국의 화력발전 비중 효과	41
[그림 10] OECD 20개국의 화력발전 효율 효과	44
[그림 11] OECD 20개국의 연료 믹스 효과	47
[그림 12] OECD 20개국의 연료 효율 효과	49
[그림 13] OECD 20개국의 탄소 배출 계수 효과	51

1. 서론

1.1 연구배경

전 세계적으로 지구온난화 현상이 진행되고 있다는 점은 새삼스러운 이슈가 아니다. 산업혁명 이후 다량의 온실가스가 대기 중으로 배출됨에 따라 대기 중 온실가스 농도가 증가하였고, 이는 지구 해수면의 온도가 상승하는 "지구온난화" 현상을 초래하였다. 특히 온실가스 중에서도 이산화탄소 배출량은 지속적으로 증가하였으며, 세계 여러 국가들은 지구 온난화에 대처하기 위한 이산화탄소 배출 규제 필요성에 대해 국제적인 합의를 도출하였다. 1992년 6월에 유엔총회는 유엔환경 개발회의(United Nations Conference on Environment and Development)에서 유엔기후변화협약을 채택하였다. 한국의 경우, 1993년 12월 가입하여 세계 47번째 가입국이 되었고, 2007년도에는 190개국이 가입하였다. 하지만, 1992년 당시의 협약 내용은 선진국에게 온실가스 감축 의무를 부여하였으나, 온실가스 감축 의무 이행사항을 피하는 여러 가지 우회적인 방법이 생겨났고, 실질적으로 온실가스 배출량을 줄이지 못하였다. 이를 보완하기 위해, 1997년 제3차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 채택된 교토의정서를 통하여 이전 협약에서 보완되어야 했던 규제의무사항을 신설하였다. 이에 유럽 및 일본 등 선진국들에 대한 구체적인 감축의무가 부여되고 각국은 탄소 배출량 감축의무를 시행하기 위해 많은 노력을 하게 된다. 2000년대에 들어서 세계 에너지 수요는 계속 증가하지만, 2008년 금융위기로 수요

증가세가 주춤하게 된다. 하지만, 국제에너지 기구(International Energy Agency, IEA)에 따르면¹ 1차 에너지 수요는 2009년 세계경제 회복이 진행되면서 급격한 회복세를 보였고, 전력수요도 다시 증가하고 있는 추세이다. 특히 전 세계의 이산화탄소 배출량은 1980년 대비 2010년에는 68% 증가하였으며, 2010년에는 사상 최대치를 기록하였다. 이는 전 세계적으로 이산화탄소 배출량을 감축하려는 노력에도 불구하고, 실제 배출량은 꾸준히 증가하고 있다는 것을 의미한다. 오늘날 세계 각국은 녹색성장을 통한 경제 성장이라는 구호를 외치고 있지만, 실제로 이산화탄소 배출량 증가로 녹색성장을 제대로 이행하지 못하고 있는 상황인 것이다. 더구나, 일본 후쿠시마 사태와 중동 및 북아프리카(Middle East and North Africa)지역의 정치적 혼란은 에너지 공급의 불안정성을 야기하고 있어, 전세계 기후변화 대응 목표를 달성하기 어려운 상황이다.

이러한 상황에서, 온실가스를 감축하고 공급의 안정성을 유지하기 위해서는 전력 산업의 올바른 성장이 무엇보다 중요한데, 이는 국내의 경우 전력산업이 전체 이산화탄소 배출량의 34.6%를 차지하는 큰 산업이기 때문이다. 전력 산업의 경우 사용하는 연료에 따라서 이산화탄소 배출량이 변하기 때문에 최근 세계 선진국들은 석유 및 석탄에 의존하던 화력발전에서 원자력 또는 신재생 에너지를 통한 발전에 초점을 맞추으로써 이산화탄소 배출을 줄여 나가고 있다. 이러한 구조변화에도 불구하고, 현재 세계 전력산업은 이산화탄소 배출량

¹ IEA (2011)

을 개선하는 데 실질적인 역할을 하지 못하고 있기 때문에, 근본적인 이산화탄소 배출이 어떤 요인에 영향을 받는지를 분석해 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 국가 중 전력 생산량 상위 20개국을 대상으로 온실가스 중 이산화탄소 배출량을 요인분해분석 하였다. OECD 국가의 전력 생산량은 1980년대에는 세계 전체의 55%를 차지하였고, 2010년에는 41%의 비중을 차지하고 있어 세계 온실가스 배출에 막대한 영향을 끼치고 있다. 더욱이 전력 부문의 이산화탄소 배출량의 규모는 과거 1980년에는 전체 이산화탄소 배출량 중 32%를 기록하였지만 2010년에는 39%로 증가하여 상황이 더욱 악화되었다. 본 논문은 지난 30년간 전력산업을 살펴보고, 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 주요 요인들을 분석하여 세계 각국의 전력산업에 전력구조, 화력 발전 기술, 사용 연료 등에 관한 시사점을 제시하는 것을 목표로 한다..

1.2 방법론

에너지 산업에 있어서, 적절한 분석 방법을 통해 에너지 수요에 영향을 미치는 요인을 분석하여 수요를 관리하고, 에너지 수요의 증가에 따른 이산화탄소 배출량을 줄이는 것이 매우 중요하다. 요인분해분석 방법은 이러한 문제를 다루는 접근법들 가운데 널리 쓰이는 방법론이며 산업 전체의 에너지소비 변화나 에너지 산업의 이산화탄소 배출량 변화를 분석하는 데 널리 사용되고 있다.

1970년대 후반과 1980년대 초기에는 요인분해분석 방법으로 라스파이레스 지수(Laspeyres Index)를 사용하였다. 이 방법은 어떤 요인 변화를 분석하기 위해 다른 요인들을 기준 연도에 고정시켜 놓고 분석한다. 이 후 Boyd et al.(1988)는 에너지 요인분해분석에서 디비지아 지수(Divisia Index)를 도입하였다. 이 방식은 각 요인의 변화를 로그 평균 변화로 결정 짓고 기준 연도를 통한 비교가 아닌 가변가중치를 도입하여 분석하였다. 본 논문에서는 OECD 국가의 전력산업의 이산화탄소 배출 추이를 분석하는 것으로 디비지아 지수에서 더욱 개선된 로그평균 디비지아 지수(Log Mean Divisia Index, LMDIs) 방법론을 사용하였다. 디비지아 지수분해분석 방법론 중에서도 LMDI 방법론은 요인 역전 검증(factor reversal test)을 만족 하며 설명되지 않는 잔차가 결과에 남지 않는 장점을 가지고 있다. 로그 평균 디비지아 지수는 가법적 요인분해와 승법적 요인분해로 나눌 수 있으며, 가법적 요인분해는 변화를 요인분해 한 것이고, 승법적 요인분해는 변화율을 요인분해 한 것이다. 디비지아 지수는 에너지 소비 요인을 분해분석 하는 데 효과적일 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량의 요인분해분석에도 효과적이다. Ang and Lee(1994), 김수이(2011)등은 에너지 소비요인을 디비지아 지수를 통해 요인분해분석 하였고, Asbjorn(1991), Mavrotas(2000), Steenhof(2007), Oh(2010) 등은 에너지 소비에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 분해분석 하였다. 최근 연구는 주로 로그 평균 디비지아 지수를 이용한 요인분해분석이 주를 이루고 있는 데 이는 정확도와 더불어 결과해석의 용이성 측면에서도 우수하기 때문으로 보인다.

1.3 연구 목적

본 연구는 OECD 국가를 대상으로 지난 30년간 전력산업의 이산화탄소 배출량을 요인분해분석 하는 것을 주요 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 전력산업의 구조효과를 중심으로, 발전 효율 및 연료 믹스 효과를 살펴본다.

먼저 본 연구에서는 OECD 국가들의 이산화탄소 배출량이 지난 30년간 증가하고 있다는 사실에 주목하였다. 세계 에너지 수요는 인구 성장과 경제 성장과 맞물려 증가하고 있으며, 이에 따라 이산화탄소 배출량도 꾸준히 증가하고 있다. 특히, 전력산업은 전체 산업 중에서 이산화탄소를 배출하는 규모도 막대하다. 따라서 발전부문의 이산화탄소 배출의 주요요인을 찾는 것은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있겠다. 특히, 최근에는 세계적으로 녹색성장을 위해 신재생에너지나 원자력 발전과 같은 이산화탄소를 배출하지 않는 친환경 발전을 선호하고 있으며, 화력발전에 사용되는 연료가 점차 고갈되고 비용이 높아져 가고 있기 때문에 화력발전소를 줄이려는 움직임이 활발히 진행되고 있다. 하지만 녹색성장을 통한 이산화탄소 배출 감소는 만족할만한 성과를 내지 못하고 있다.

이러한 상황에서 본 연구는 발전부문의 구조효과를 중심으로 이산화탄소 배출량의 요인을 구조효과, 생산효과, 에너지원 단위 효과, 연료 믹스효과, 배출계수 효과로 분해하여 분석하였다. 특히 기존 문헌에서 사용한 구조효과를 더

욱 자세히 살펴보았으며, 이를 위해 구조효과를 화력발전, 원자력발전, 신재생 에너지 발전으로 나누어서 각각의 비중이 이산화탄소 배출 증가에 어떤 영향을 미쳤는지 분석하였다. 이를 통해 신재생에너지 발전과 이산화탄소 감축의 관계, 국가별 생산효과와 전체 생산량에 따른 이산화탄소 배출 요인을 살펴보았다. 이를 기반으로 현재 국가별로 온실가스 감축을 얼마나 잘 이행하고 있는지를 판단하였으며, 국가간 비교를 통해 이산화탄소 감축을 잘 시행하지 못하고 있는 나라를 위한 시사점을 도출하였다. 마지막으로 본 연구에서는 화력발전 효율효과, 연료 효율효과, 배출계수효과를 살펴보았다. 해마다 증가하는 화력발전의 효율은 화력발전의 기술이 발전했음을 의미하며, 연료 효율 향상은 공정혁신을 내포하고 있다. 따라서 이들의 향상은 궁극적으로 탄소배출 계수를 줄이는 결과를 가져온다고 할 수 있다. 이러한 결과를 통해, 국가 전체의 이산화탄소 배출량 변화를 분석하고 추가적으로 20개 국가간의 분석결과를 비교함으로써, 미래의 전력산업 구조 변화를 위한 정책적 함의를 제시하였다.

1.4 연구 구조

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 분해분석 개념과 방법론에 관한 기존 연구를 간단하게 살펴본다. 3장에서는 연구에서 쓰이는 방법론을 자세하게 기술하고, 생산효과, 구조효과, 화력발전 효율 효과, 연료 믹스효과, 연료 효율효과 등을 어떻게 분석할 수 있는지 설명한다. 4장에서는 본 연

구에서 사용되는 데이터와 분해분석 결과를 보이고, 5장에서는 선형회귀분석을 통해 추가적으로 이산화탄소 배출에 영향을 주는 요인을 분석한다. 끝으로 마지막 장에서는 연구 결과를 바탕으로 한 정책적 시사점이 기술되어 있다.

2. 선행 연구

2.1 분해분석 개념

본 연구에서 사용된 로그 평균 디비지아 지수 방법론은 기존의 요인분해분석 방법론에서 많이 발전된 방법론이다. 요인분해분석 방법론 중에서 지수분해분석 방법론은 에너지 수요와 이산화탄소 배출량을 분석하는 데 널리 사용되고 있다. 과거 1970년대 후반에 처음으로 지수분해분석 방법론을 이용하여 산업 에너지 수요에 있어서 생산품 믹스 변화에 따른 효과를 구하였다.

1980년대 초기에 사용된 지수분해분석 방법론은 주로 라스파이레스 지수였다. 라스파이레스 지수는 어떤 요인 변화를 분석하기 위해 다른 요인들은 기준 연도에 고정시켰다. Jenne and Cattell(1983) 연구에서는 이 지수를 산업의 에너지 효율과 구조적 변화를 측정하는 데 이용하였다. Reitler et al.(1987)는 에너지 수요에 영향을 주는 요인을 분석하기 위해 라스파이레스 지수를 조금 더 개선시킨 방법론을 제안하였다. 라스파이레스 지수는 요인분해를 할 경우, 잔차가 존재하여 정확도가 떨어지기 때문에 이를 극복하는 연구가 많이 진행되었다. Park(1992)의 연구에서는 잔차를 구조효과와 생산효과 등으로 분해하여 잔차의 크기를 작게 만들기 위한 시도가 이루어졌다. 그 이후 Sun(1998)와 Ang(2002) 연구 등에서도 꾸준히 라스파이레스 지수를 이용하여 에너지 수요 및 이산화탄소 배출 요인에 대해 분석하였다. Mavrotas(2000)는 Park(20002)의 방법론을 활용하여, 그리스의 제조업부

문 온실가스 배출량을 분해분석 하였다. Steenhof(2007) 연구에서는 중국 전력 부문에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 라스파이레스 지수로 분해분석 하였다. 주어진 데이터는 라스파이레스 지수를 사용하여도 잔차 문제가 발생하지 않았기 때문에 특별한 문제점 없이, 전력부문의 이산화탄소 배출량에 관해 배출전망치(business as usual) 시나리오를 이용한 정책적 함의를 제시하였다.

라스파이레스 지수와는 달리, 디비지아 지수는 Boyd et al.(1998) 연구에서 처음으로 에너지원단위를 분석하는 데 사용되었다. 디비지아 지수는 각 요인의 변화를 로그 평균 변화로 결정하고, 기준 연도를 통한 비교가 아닌 기준연도와 비교연도의 평균치를 도입하였다. 이 방법론은 잔차를 남기지 않는 장점이 있기 때문에 그 이후에도 Torvanger(1991), Liu et al.(1992), Ang(1994), Paul, et al.(2004) 등의 연구를 통해 이론적으로 발전되었다. 디비지아 지수는 앞서 언급했듯이, 잔차를 남기지 않는 장점이 있다. Ang(1994)연구에서는 라스파이레스 지수 기반 디비지아 지수, 디비지아 지수를 비교하여 싱가포르와 태국의 산업 에너지 소비요인을 분석하였다. 결과 해석에는 두 지수 모두 비슷한 의미를 내포하였지만, 잔차의 크기에 따라 라스파이레스 지수의 모델의 적절성이 검증되었다. Ang(2004)연구에서는 디비지아 지수의 우수성을 설명하였는데, 에너지 정책 수립을 위한 요인분해분석 방법론인 라스파이레스 지수와 디비지아 지수 두 방법론을 사용하여 결과를 비교하였으며, 이를 통해 디비지아 지수의 적용 용이성, 사용하기 쉬운 점과 해석의 편리성을 강조하였다.

최근 널리 사용하는 디비지아 지수분해분석 방법론 중에서 LMDI는 Ang(2001)의 연구에서 처음 소개되었으며, LMDI 방법론에서는 승법적 요인 분해기법을 사용하였다. Ang(2007)은 LMDI 방법론은 결과 해석에 어려움이 없고, 하위집단 분석에도 일관성을 유지하는 완벽한 분해분석 방법론이라 하였다. 하지만, 로그를 이용하기 때문에 주어진 자료에 0이 포함되어 있는 경우에 계산상 문제가 발생하기도 하였으며, 이후 Ang and Liu(2007) 연구에서 데이터에 0값이 있는 경우에 충분히 작은 δ 값을 도입하는 "작은 값 (small value)"방법으로 이러한 문제를 해결할 수 있음을 보였다.

2.2 이산화탄소 배출의 분해분석

최근 분해분석 방법론을 이용한 연구는 로그 평균 디비지아 지수 방법론이 주를 이루고 있다. Torvanger(1991)연구는 OECD 9개국의 제조업 부문 이산화탄소 배출요인을 분해분석 하였다. 9개국의 전체 제조업 부문 이산화탄소 배출량을 분석하기 위하여, 국가별 에너지 생산 비중을 의미하는 국제적 구조 효과를 추가하였고, 에너지 집약도 효과, 탄소배출 계수 효과에 대한 국가별 비교를 하였다. Shrestha(1997)연구는 12개의 아시아 국가 발전부문에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 분해하였다. 발전믹스와 연료 집약도 변화를 주요인으로 시계열 분석을 진행하였다. 정해식·이기훈(2001) 연구에서는 국내 에너지 소비량에 따른 이산화탄소 배출량 변화 요인을 LMDI 방법론을 이용

하여 분석하였으며, 이산화탄소 배출 집약도 변화를 분석하고 국내 산업을 세분화 하여 산업 부문별 분해를 추가하였다.

Paul et al.(2004)연구는 인도의 에너지 사용에 배출되는 이산화탄소에 영향을 주는 요인을 분석하였다. 디비지아 지수가 아닌 LMDI 지수를 활용하여 잔차를 없앴으며, 오염계수 효과를 측정하여, 연료의 질과 연료 전환 및 완화 기술들에 대한 내용을 담았다. 산업 부문을 GDP 비율로 나누었고, GDP를 이용하여 활동효과 및 집약도 효과를 측정하였다. Hatzigeorgiou(2008)연구에서는 산술 평균 디비지아 지수와 로그 평균 디비지아 지수를 이용하여, 그리스 산업의 이산화탄소 배출량을 분석하였다. 1998년 천연가스 소비를 시작하면서, 달라지는 연료 믹스를 중심으로 수입효과, 에너지 집약도 효과를 분석하였다. Oh et al.(2010)연구는 한국의 에너지 소비 부문에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 LMDI 방법론으로 분석하였다. 경제성장에 따른 디커플링 지수(decoupling index)를 통해, 기간을 나누었고 7개의 산업부문으로 나누어서 자세히 분석하였다. 김수이와 정경화(2011)의 연구에서는 국내 제조업을 대상으로 1991년부터 2007년까지의 이산화탄소 배출 특성을 분석하였다. 이 연구는 국내의 제조업 부문을 대상으로 LMDI 가법적, 승법적 요인분해분석을 모두 활용한 처음 연구이다.

3. 연구 방법론

3.1 지수 분해 방법

본 연구에서는 Ang(2004) 논문에서 사용한 승법적 로그 평균 디비지아 지수를 적용하였다. Ang의 연구에서는 디비지아 지수와 라스파이레스 지수를 비교하여 어느 방법론이 우월한지 비교하였다. 디비지아 지수는 분석하는 요인이 많아질수록, 해석이 용이하며 분석도 간단한 장점이 있는 것으로 결론지었다. Ang(2005)은 로그 평균 디비지아 지수를 이용하여 캐나다의 산업 부문 이산화탄소 배출량과 에너지 수요를 분석하였다. 1990년부터 2000년까지 패널 데이터를 사용하여, 이산화탄소 배출 요인을 크게 생산 효과, 구조 효과, 집약도 효과, 연료 믹스 효과, 배출 계수 효과로 나누어 방법론을 적용하였다. Oh(2010) 연구에서는 한국의 에너지 소비로부터 발생하는 이산화탄소 요인을 알아보기 위하여, 산업을 보다 세부적으로 나누어서 구조효과를 중심으로 이산화탄소발생요인을 분석하였다. 김규남 외(2010) 연구에서는 국내 전력산업으로 산업을 한정하고, 로그 평균 디비지아 지수를 이용하여 전력 산업의 수요와 공급 측면에서 이산화탄소 배출요인을 분해분석 하였다.

산업을 세부산업으로 나눈 후 LMDI 방법론을 이용하여 분석하는 방법이나, 전력 산업을 수요와 공급으로 나누어서 분석하는 방법 모두 효과적인 방법이지만, 본 논문은 화력발전, 원자력발전, 신재생에너지 등의 발전 구조에 따른 이산화탄소 배출요인을 자세히 분석하고자 한다. 기존의 Ang(2001)이 사용

한 LMDI 방법론을 사용할 것이며 추가적으로 선형 회귀모형을 통해 이산화 탄소 배출 요인에 영향을 주는 변수를 찾음으로써, 보다 정확한 결과를 이끌어 낼 것이다.

3.2 로그 평균 디비지아 지수 분석

3.2.1 로그 평균 디비지아 지수 개념

본 연구에서 사용한 로그 평균 디비지아 지수는 디비지아 지수에서 확장된 개념이다. 디비지아 지수는 이전 라스파이레스 지수와는 달리 관련 변수들의 상대적인 변화의 기하평균을 의미한다. 즉, 변수들의 로그 변화에 산술가중 평균값을 하여 지수값을 취해 주는 것이다.

에너지 산업에 있어서 디비지아 지수는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$E = \sum \{Y_i(E_i / Y_i) = Y \sum \{(Y_i / Y)(E_i / Y_i)\} = Y \sum S_i I_i \quad (3.1)$$

여기서 E는 제조업 전체의 총 에너지소비, Y는 제조업 전체의 생산, $S_i = Y_i / Y$ 는 각 i 산업의 업종별 생산 비중, $I_i = E_i / Y_i$, i 산업의 업종별 에너지 원단위를 의미한다.

$$e = E / Y = \sum \{(Y_i / Y)(E_i / Y_i)\} = \sum S_i I_i \quad (3.2)$$

위의 식을 다음과 같이 미분하면, 디비지아 지수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
de/dt &= \sum (ds_i/dt)I_i + \sum (dI_i/dt)S_i \\
(de/dt)/e &= \sum \{(dS_i/dt)(I_i/\sum S_i I_i)\} + \sum \{(dI_i/dt)(S_i/\sum S_i I_i)\} \\
&= \sum [\{(dS_i/dt)/S_i\} (S_i I_i / \sum S_i I_i)] + \sum [\{(dI_i/dt)/I_i\} (S_i I_i / \sum S_i I_i)] \\
d \ln e / dt &= \sum w_i (d \ln S_i / dt) + \sum w_i (d \ln I_i / dt) \tag{3.3}
\end{aligned}$$

이는 전체 에너지에 대한 에너지변화율이며, 요인을 두 가지로 분해하였다.

이 식을 시점 s에서 t까지 시간에 대해 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\int_s^t \frac{d \ln e}{dx} dx &= \ln e_t - \ln e_s = \ln \frac{e_t}{e_s} \\
&= \int_s^t \sum_i w_t \frac{d \ln S_t}{dx} dx + \int_s^t \sum_i w_i \frac{d \ln I_t}{dx} dx \tag{3.4}
\end{aligned}$$

디비지아 지수를 이용하여 s 시기에서 t 시기의 에너지원 단위 비교를 하면, 아래와 같다.

$$\frac{e_t}{e_s} = \exp(\ln \frac{e_t}{e_s}) = \exp(\int_s^t \sum_i w_t \frac{d \ln S_t}{dx} dx) \times \exp(\int_s^t \sum_i w_i \frac{d \ln I_t}{dx} dx) \tag{3.5}$$

우변의 첫째 항은 산업구조효과의 디비지아 지수이며, 둘째 항은 에너지원단위효과의 디비지아 지수이다.

$$DI_{st} = \text{Exp}[\sum_i (\frac{w_{it} + w_{is}}{2}) \ln(\frac{I_{it}}{I_{is}})] \tag{3.6}$$

$$DS_{st} = \text{Exp}[\sum_i (\frac{w_{it} + w_{is}}{2}) \ln(\frac{S_{it}}{S_{is}})] \tag{3.7}$$

이는 단순 이산형 디비지아 지수 공식이며, 선행 연구에서 사용하는 로그 평균 디비지아 공식은 다음과 같다.

$$DI_{st} = Exp[\sum_i w_i \ln(\frac{I_{it}}{I_{isb}})] \quad (3.8)$$

$$DS_{st} = Exp[\sum_i w_i \ln(\frac{S_{it}}{S_{is}})] \quad (3.9)$$

이 식에서 λ_i 와 w_i 는 각각 $\lambda_i = (w_{it} - w_{is}) / \ln(w_{it} - w_{is})$, $w_i = \lambda_i / \sum \lambda_i$ 이다.

위와 같이 구성된 로그평균 디비지아 지수는 기존 라스파이레스 지수와 단순 이산형 디비지아 지수와 달리 두 가지 측면에서 장점이 있다. 첫째, 기준 시간을 바꾼 후 효과를 비교해도 결과값이 똑같이 나오는 시간역전검증을 충족한다. 둘째, 분해된 요인들을 합하고, 바꾸어서 분석할 경우에도 결과가 똑같이 나오는 요소역전 검증을 만족한다

3.2.2 로그 평균 디비지아 지수 분석

본 연구에서는 OECD 20개국의 발전부문에서 발생하는 이산화탄소 배출 요인을 다음과 같이 크게 6가지로 분해하여 분석하였다.

$$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum Q \frac{Q_i}{Q} \frac{TG_i}{Q_i} \frac{\sum f_{ij}}{TG_i} \frac{f_{ij}}{\sum f_{ij}} \frac{Q_{ij}}{f_{ij}} \frac{C_{ij}}{Q_{ij}} \quad (3.10)$$

$$D_{tot} = C^T / C^O = D_{pro} D_{napro} D_{ig} D_{tgeff} D_{mix} D_{eff} D_{enf} \quad (3.11)$$

여기서 i 는 각 국가들을 나타내는 지표이며 1부터 20까지 존재한다. j 는 화력발전에 사용되는 연료의 종류를 의미한다. 식 (3.10)과 (3.11)에 있는 6

가지 효과에 대한 설명은 각각 다음과 같다.

3.2.2.1 생산효과

첫째, OECD20개국 전체에서 발생하는 전력 생산에 따른 이산화탄소 배출량에 대한 생산효과는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 생산되는 전체 전력량이 이산화탄소 배출에 미치는 영향(D_{pro})이고, 다른 하나는 국가별 생산에 따라 이산화탄소 배출에 주는 효과(D_{napro})이다. 이 효과는 국가들의 전력생산량 증가가 이산화탄소 배출에 주는 영향을 의미하며, 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$D_{pro} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{C_{ij}^T - C_{ij}^O}{C^T - C^O} / \frac{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O}{\ln C^T - \ln C^O}\right) \ln\left(\frac{Q^T}{Q^O}\right)\right] \quad (3.12)$$

$$D_{napro} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{C_{ij}^T - C_{ij}^O}{C^T - C^O} / \frac{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O}{\ln C^T - \ln C^O}\right) \ln\left(\frac{Q_i^T / Q^T}{Q_i^O / Q^O}\right)\right] \quad (3.13)$$

이 식은 승법적 로그 평균 디비지아 지수이다. 이는 가변적 로그 평균 디비지아 지수에 비해, 상대적인 증가 비율을 구할 수 있어, 나라별 분석을 할 경우에 유용하게 사용된다.

3.2.2.2 구조효과

전 세계적으로 전력 생산은 화력발전소, 원자력 발전소, 수력발전소, 태양열 발전소, 지열 발전소 등에서 이루어지고 있다. 본 논문에서는 발전원의 특

징에 따라 크게 화력발전과 원자력 발전, 신재생에너지 발전으로 나누었으며, 신재생에너지는 IEA(2012)에서 분류한 발전원 중에서 지열, 태양열, 수력, 풍력 발전을 합하여 나타내었다.

본 논문에서는 1980년부터 2010년 동안에 발전 부문의 구조효과를 분석하고자 한다. 특히, 화력발전은 OECD 국가에서 1980년 전체 전력생산량 중 69%를 차지하였고, 2010년에는 63%를 차지한 영향력이 큰 발전이다. 따라서, 화력발전 비중의 변화에 따른 이산화탄소 배출량이 어떻게 달라지는지를 보는 것은 중요하다². 다음 장에서 이 화력발전 비중에 따른 이산화탄소 배출량 변화를 구조효과로 보고 분석할 것이다. 또한, 원자력 발전과 신재생에너지 발전은 탄소를 배출하지 않는 발전원으로 시간이 흐를수록 비중이 증가하는 추세이고, 지구 온난화를 대비하는 주 발전원이기 때문에 이들 발전에 따른 효과를 분석할 필요가 있다. 따라서 화력발전 비중효과를 자세하게 나눈 후 각 발전원 별 비중에 따른 효과를 추가적으로 분석할 것이다.

$$D_{tg} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^O) / (\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O)}{(C^T - C^O) / (\ln C^T - \ln C^O)}\right) \ln\left(\frac{TG_i^T / Q_i^T}{TG_i^O / Q_i^O}\right)\right] \quad (3.14)$$

위 식은 화력발전 비중에 따른 효과이다. 신재생에너지와 원자력 발전에 따른 효과를 분석하기 위해, 다음과 같이 요인을 더 분해하였다.

² Steenhof(2007)

$$\frac{TG_i}{Q_i} = \frac{NG_i}{Q_i} \frac{RE_i}{NG_i} \frac{TG_i}{RE_i} \quad (3.15)$$

위의 식에서 오른쪽 첫 번째 요소는 원자력 발전 비중에 따른 효과이다. 세계 각국은 1997년 교토의정서 합의 이후로 이산화탄소를 줄이고 경제성장을 이룩하기 위해 녹색성장을 모토로 삼았다. 특히, 환경에 해가 되는 화력발전소의 비중을 줄이기 위한 대안으로 효율성이 높고 이산화탄소를 배출하지 않는 원자력에 대한 관심이 증가하였다. 프랑스와 같은 국가는 대부분의 발전을 원자력발전으로 전환하였으며, 미국, 일본과 같은 선진국들도 원자력발전소 건설을 증가시켰다. 이러한 움직임이 탄소 배출량 변화에 영향을 주는 효과라 볼 수 있다.

두 번째로 원자력발전 대비 신재생에너지 비중 효과이다. 저탄소 발전원으로 가기 위해서 국가는 신재생에너지 발전량을 늘리거나 원자력 발전량을 늘릴 수 있다. 원자력발전 대비 신재생에너지 비중 증가는 원자력발전의 감소나 신재생에너지의 증가를 의미하며, 반대의 경우 원자력발전의 증가나 신재생에너지의 감소를 의미한다. 따라서 이 변수는 해당 국가의 저탄소 발전원인 원자력발전량의 증가를 선택하는지 아니면 무탄소 발전원인 신재생에너지 발전량의 증가를 선택하는지를 의미하며, 이 방향이 탄소 배출량에 주는 영향을 뜻한다. 즉, 이 변수를 통하여 OECD 20개국이 탈 화력발전을 어느 발전으로 전환시키는 지를 알 수 있고, 그 정도를 측정할 수 있다.

마지막으로 신재생에너지 대비 화력발전 비중에 따른 효과이다. 최근 세계 녹색선진국들은 증가하는 전력 수요를 충족하기 위하여 신재생에너지를 늘리

고 화력발전을 줄이려는 노력을 하고 있다. 이 효과는 이 두 발전소의 비중 변화를 측정함으로써, 신재생에너지 산업이 화력발전에 비해 얼마나 성장하고 기존 화력발전을 대체하고 있는 지를 알 수 있다.

위와 같은 분해 방법은 화력발전 비중을 세 가지 요인으로 나누어 살펴봄으로써, 국가의 전력구조 변화를 파악할 수 있게 된다. 또한 이 요인들이 이산화탄소 배출에 얼마나 영향을 주는 지를 분석할 수 있으며, 국가 별 비교 분석을 통해 에너지 선진국과 개발 도상국의 차이를 살펴볼 수 있다.

3.2.2.3 화력발전 효율 효과

세 번째는 화력발전에 투입되는 연료 당 생산되는 전력량을 의미하는 화력발전 효율 효과이다. 화력 발전의 효율은 투입되는 연료에 따라 향상될 수 있고, 화력 발전의 기술 진보로 인해 향상될 수 있다. 화력발전을 주요 전력생산 수단으로 삼고 있는 나라에서는 화력 발전의 효율성 향상을 통해 전력 생산량 증가와 이산화탄소 배출량 감소의 효과를 동시에 얻을 수 있어 이는 매우 중요한 요인이라고 할 수 있다.

이 화력발전 효율 효과는 로그 평균 디비지아 식을 이용하여 다음과 같이 구 할 수 있다.

$$D_{tgeff} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{C_{ij}^T - C_{ij}^O}{C^T - C^O} \frac{\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O}{\ln C^T - \ln C^O}\right) \ln\left(\frac{\sum f_{ij}^T / TG_i^T}{\sum f_{ij}^O / TG_i^O}\right)\right] \quad (3.19)$$

화력발전의 효율 효과를 구함으로써, 이산화탄소 배출량 감축이 잘 진행되고 있는 국가를 찾을 수 있고, 동시에 국가별 기술진보의 정도를 구할 수 있을 것이다.

3.2.2.4 연료 믹스 효과

네 번째는 화력발전에 투입되는 연료들의 비중 변화에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 의미하는 연료 믹스효과이다. 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에 따르면, 투입되는 연료의 탄소 배출계수는 각각 다르다. 석탄 및 폐기물은 석유나 액화천연가스(Liquid Natural Gas, LNG)에 비해 배출하는 이산화탄소가 많으며, 석탄도 종류에 따라 조금씩 배출 계수가 다르다. 효과적인 이산화탄소 배출량 조절을 위해서, 각 국가가 저탄소 배출연료를 사용하는 것은 이산화탄소 저감정책으로서 중요한 수단이 될 수 있다.

다음 식을 통하여, 연료 믹스효과를 구할 수 있다.

$$D_{mix} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^O) / (\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O)}{(C^T - C^O) / (\ln C^T - \ln C^O)}\right) \ln\left(\frac{f_{ij}^T / \sum f_{ij}^T}{f_{ij}^O / \sum f_{ij}^O}\right)\right] \quad (3.20)$$

연료 믹스효과를 통해 전력생산에 사용되는 연료들의 비중 변화에 따른 이산화탄소 배출량을 구할 수 있다. 특히, 가까운 미래에 석유의 고갈과 석유가

격 상승, 셰일가스의 등장으로 인한 가스 가격 하락과 같이 세계 연료 시장에 변화가 생길 때, 이산화탄소 배출량의 변화를 예측할 수 있을 것이며 연료 변화에 따른 이산화탄소 배출량 변화를 측정할 수 있을 것이다.

3.2.2.5 연료 효율 효과

다섯 번째는 연료 투입량 대비 연료의 전력생산량을 의미하는 연료 효율이 이산화탄소 배출량에 주는 효과인 연료 효율 효과이다. 앞서 본 화력발전 효율 효과는 화력발전소 자체의 전력 생산효율에 따른 효과였다면, 본 효과는 개개의 연료 효율을 의미한다. 과거부터 현재까지 화력발전 기술은 꾸준히 개선되어 왔다. 화력발전 종류 중에서 석탄화력발전, 석유화력발전, 가스화력발전의 효율은 꾸준히 개선이 되어왔으며, 특히 1990년 이후 세계 각국에서는 에너지를 절약하기 위해 폐기물 소각을 통한 폐기물 화력발전소의 전력생산 증가와 기술발전이 진행되었다. 또한, 열병합 발전을 통해 열과 전력을 동시에 생산함으로써 에너지 효율을 높여왔다.

본 연구에서는 아래의 식으로 연료 효율 효과를 구한다.

$$D_{eff} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^O) / (\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O)}{(C^T - C^O) / (\ln C^T - \ln C^O)}\right) \ln\left(\frac{Q_{ij}^T / f_{ij}^T}{Q_{ij}^O / f_{ij}^O}\right)\right] \quad (3.21)$$

연료 효율 효과를 통해 개개의 연료 효율이 국가별, 기간별로 어떻게 변화했는지 알 수 있으며, 이 효과가 이산화탄소 배출량 증가에 얼마나 영향을 미

치는 지를 구할 수 있다. 또한, 국가별로 연료 효율을 비교함으로써, 연료 효율을 개선할 필요가 있는 국가를 식별할 때에도 유용한 정보를 제공한다.

3.2.2.6 탄소 배출 계수 효과

마지막 효과는 탄소 배출 계수 효과로, 이는 연료의 전력 생산량 대비 발생하는 이산화탄소 배출량을 의미한다. IPCC에 따르면, 해당 연료들은 각각 다른 탄소 배출계수를 가지고 있으며 시기에 따라 조금씩 계수의 값이 변화하고 있다. 본 연구에서는 연도에 따른 연료의 탄소 배출계수는 일정하다고 가정하였기 때문에 시기에 따라 달라지는 탄소 배출계수 효과를 측정할 수는 없다. 하지만 만약 전력 생산시 의 연료 효율성향상과 같은 방법을 통해, 기존보다 연료의 전력생산량은 증가하면서 동시에 이산화탄소 배출량이 줄어들고 있다면, 이는 탄소배출 계수가 줄어들고 있다는 신호이자, 이산화탄소 배출량 감축이 올바르게 진행되고 있다는 것을 의미한다. 그러므로 탄소 배출 계수 효과를 구함으로써, 분석을 더 자세하게 진행할 수 있다.

본 연구에서 아래의 식으로 탄소 배출 계수 효과를 구하였다.

$$D_{emf} = \exp\left[\sum_{ij} \left(\frac{(C_{ij}^T - C_{ij}^O) / (\ln C_{ij}^T - \ln C_{ij}^O)}{(C^T - C^O) / (\ln C^T - \ln C^O)}\right) \ln\left(\frac{C_{ij}^T / Q_{ij}^T}{C_{ij}^O / Q_{ij}^O}\right)\right] \quad (3.22)$$

본 논문에서는 위와 같이 OCED 20개국의 이산화탄소 배출의 요인을 살펴보기 위해 이산화탄소 배출을 6가지 요인으로 분해하여 분석하였다. 이들 6가

지 요인은 서로 상호적으로 연관이 되어 있는데, 예를 들면 화력발전 효율이 높으면, 연료효율이 높을 가능성이 높고, 이들 효율성이 높을 경우, 탄소 배출 계수가 낮을 가능성이 있다. 또한, 화력발전 효율, 연료효율, 탄소 배출계수의 경우에는 분해하는 방식에 따라 이산화탄소 배출에 양(+)의 효과를 줄 수 있기도 하고 음(-)의 효과를 줄 수도 있다.

따라서 요인분해분석만으로 직접적인 온실가스 배출의 주 요인을 판단하기 어려운 경우가 생길 수 있으므로 추가적인 분석을 할 필요가 있다. 다변량 선형 회귀 모형은 주어진 데이터를 이용하여 종속변수에 영향을 주는 독립변수를 찾을 수 있는 점에서 유용한데, 본 논문에서는 이 모형을 이용하여 이산화탄소 배출에 영향을 주는 다른 변수들의 효과를 추가적으로 살펴보았다.

4. 실증 분석

4.1 데이터

본 연구에서는 OECD 국가의 발전부문 이산화탄소 배출을 분석하기 위해 IEA(2012)의 OECD 각국의 전력 통계 자료를 이용하였으며, OECD 국가 중 2010년 기준으로 전력 생산량 상위 20개 국가만을 대상으로 하였다. 상위 20개 국가의 전력생산량의 총합은 OECD 전력생산의 95%를 차지하고 있어 OECD 전체 생산량을 대변한다고 할 수 있다. 해당국가는 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 이탈리아, 일본, 한국, 멕시코, 네덜란드, 노르웨이, 폴란드, 스페인, 스웨덴, 터키, 미국, 영국이다. 분석을 위해, 전력 통계에 나와있는 연도별 각 국 발전소의 연료 투입량, 발전원별 전력생산량을 이용하였다. 각 연료의 탄소배출량 자료는 IPCC 2006 가이드라인에 있는 탄소배출계수를 사용하였으며, 분석에 사용된 연료는 무연탄, 갈탄, 피트(peat), 석탄가스, 석유, LNG 및 폐기물이다. 모든 데이터는 1980년부터 2010년 기간을 다루고 있다.

각 연료 별 이산화탄소 배출량을 구하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\text{CO}_2\text{배출량(ton)} = \text{연료투입량(TOE)} \times \text{연소율} \times \text{탄소배출계수} \times 44/12$$

(4.1)

또한 폐기물 소각 부문의 경우에는 폐기물 종류에 따라 탄소배출계수를 다르게 적용하였다. IPCC(1996)에 따르면 바이오매스원 매립지의 가스 이산화탄소는 온실가스 통계조항에 포함이 되지 않아, 바이오매스로부터 나오는 이산화탄소는 생략하였으며, 산업 폐기물과 도시 폐기물은 IPCC(2006)에 나와 있는 탄소배출계수를 이용하였다.

반면 폐기물의 이산화탄소 계산은 위 식과 다르게 다음과 같이 표현할 수 있다.⁴

$$\text{CO}_2\text{배출량(ton)} = \text{배출계수} \times \text{소각량} \times \text{소각효율} \quad (4.2)$$

여기서 환경부의 ‘환경부문의 온실가스배출량 조사 및 통계구축’에 나온 폐기물의 이산화탄소 배출량 계산에 활용된 소각 효율 97%를 적용하였다. 여러 국가의 경우 소각효율이 다를 수 있지만, 본 논문에서는 이를 동일하다고 가정하고 폐기물의 이산화탄소 배출량을 계산하였다. 또한, 원자력 발전과 신재생에너지로 분류한 조력, 풍력, 수력, 태양열 발전 등은 이산화탄소를 배출하지 않는 발전으로 간주하였다.

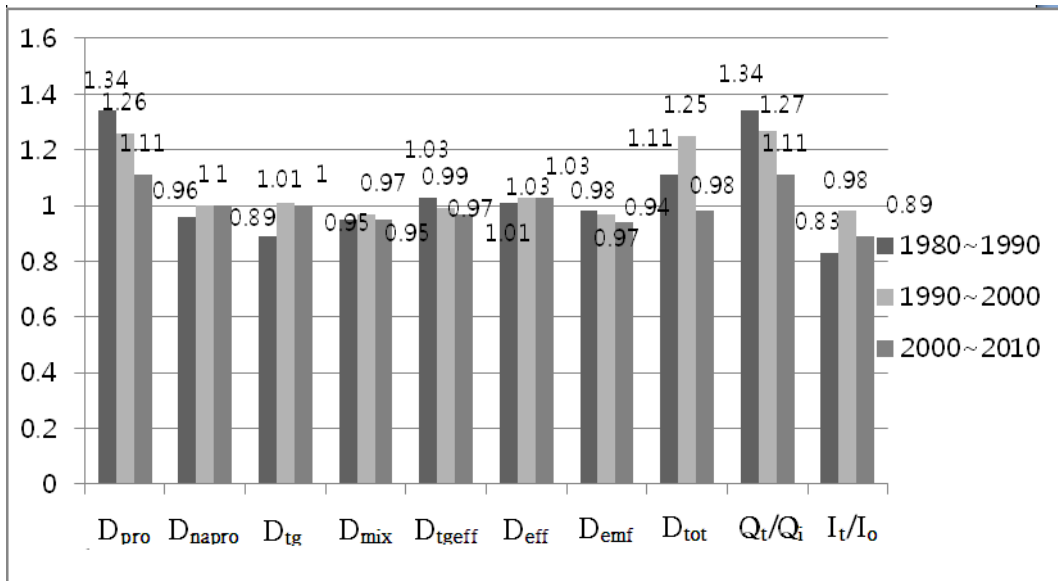
⁴ 환경부(2002)

4.2 전력 부문의 분해분석

4.2.1 OECD 20개국 전체 분석 결과

먼저 OECD 20개국의 총 이산화탄소 배출량을 LMDI 방법론을 이용하여 분석하였다. 1980년부터 1990년, 1990년부터 2000년, 2000년부터 2010년까지 기간을 세 부분으로 나눈 후, 이산화탄소 배출요인을 7가지로 분해하였다.

앞 장에서 언급했듯이, 이산화탄소 배출 요인은 생산효과(D_{pro}), 국가별 생산효과(D_{napro}), 화력발전 비중효과(D_{tg}), 연료 믹스효과(D_{mix}), 화력발전 효율효과(D_{teff}), 연료 효율효과(D_{eff}), 탄소배출계수 효과(D_{emf})로 분해하였다. OECD 20개 국가의 1980년부터 2010년까지의 결과는 [그림1]과 같다. 여기서 Q_t/Q_0 는 기준연도 대비 비교연도의 전력 생산량을 의미하며, I_t/I_0 는 전력생산량 대비 이산화탄소 배출량을 의미한다. 이 값이 1보다 작을 경우, 국가는 전력생산량 증가 대비 이산화탄소 증가율이 더 낮게 증가했다는 것을 의미한다.



[그림 1] OECD 20개국 이산화탄소 배출량 변화(1980년~2010년)

OECD 20개국의 이산화탄소 배출량은 1980년부터 2000년도까지 11%, 25% 각각 증가하다가 2000년부터 2010년에는 2% 감소하였다. 1990년대 이산화탄소 배출량 증가는 피크를 보였으며, 2000년대에 들어서 각국의 탄소 감축 정책으로 인하여 실질적으로 이산화탄소 배출을 줄인 것으로 판단된다.

배출량이 증가한 주요 원인은 OECD 20개국의 전체 생산효과이다. 생산효과는 다른 모든 효과보다 큰 비율을 나타냈다. 생산효과는 이산화탄소 배출량을 증가시켰지만, 다른 요인들로 인해 이산화탄소 배출은 조금 완화되는 모습을 보이고 있다.

다음으로 구조효과를 살펴보기 위해, 먼저 1980년 대비 1990년 기간을 살

펴보면 다음과 같다. 국가별 생산효과는 4%, 화력발전 비중효과는 11%를 감축했으며, 연료 믹스효과와 탄소 배출계수 효과는 각각 5%, 2% 감축하여 전력 생산량 변화 대비 이산화탄소 배출량 변화인 I_t/I_o 는 0.83을 기록하였다.. 이 시기에는 증가하는 전력 생산량을 다른 요인들로 잘 억제했던 시기라 할 수 있다.

다음 시기인 1990년 대비 2000년에는 전력 생산량이 27% 증가할 때, 이산화탄소 배출량도 거의 비슷하게 25% 증가하여($I_t/I_o= 0.98$) 이산화탄소 저감이 제대로 진행되지 못한 시기라고 할 수 있다.

대부분의 국가들은 1990년대에 환경문제를 중요하게 인식하고 에너지 효율을 높이기 위해 원자력발전과 열병합발전소를 통한 발전을 증가하였다. 열병합발전소가 증가하면서, 많은 국가들은 폐기물 소각을 통한 전력생산을 하기 시작하였으며, 원자력 발전의 증가는 이산화탄소 배출량을 낮추는 동시에 증가하는 전력수요를 충족시켜 주었다. 하지만, 열병합발전의 증가와 폐기물 소각은 화력발전소의 효율을 낮추었고, 연료 효율도 낮추었다. 이러한 복합적인 효과가 발생하여, 1990년부터 2000년 사이에는 이산화탄소 배출량을 줄이지 못하고 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

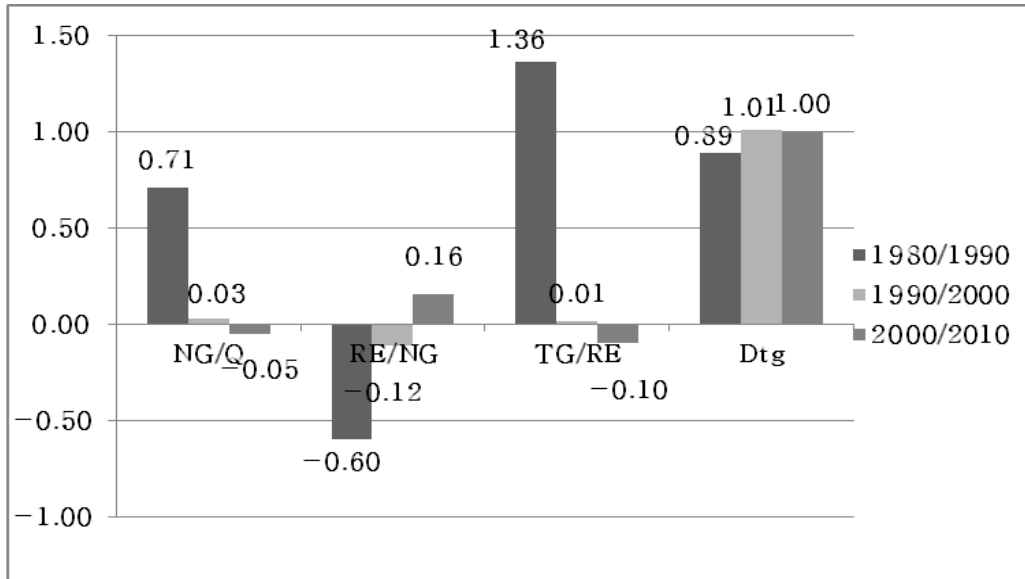
마지막으로 2000년 대비 2010년을 비교해보면, 전력생산량은 11% 증가하였지만, 이산화탄소 배출량은 오히려 2% 감소하여, $I_t/I_o=0.89$ 을 기록하였다. 즉, 이 시기는 연료 믹스 효과와 화력발전 효율 효과 및 탄소 배출 계수 효과를 통해 이산화탄소 배출량이 감소하였다. 2000년 이후로 저탄소 연료로 전

환이 증가하고, 또한 화력발전 기술이 진보하였고 전체적으로 긍정적인 효과가 진행되고 있다고 해석될 수 있다.

지난 30년간을 살펴보면, 연료 믹스 효과(D_{mix})의 경우에는 중간시기에는 약간 값이 올랐지만, 지속적으로 이산화탄소 배출을 줄이는 요인으로 작용했다. 이는 이산화탄소 배출이 큰 석탄에서 비교적 저탄소 연료인 석유와 천연가스로의 전환이 지난 30년간 잘 이루어지고 있음을 의미한다. 화력발전 효율 효과(D_{igff})는 분석 기간 동안 1.03, 0.98, 0.97로 나타나 시간이 지날수록 효율이 좋아지고 있으며, 이는 화력발전의 기술 혁신이 일어나고 있음을 의미한다. 반면, 연료 효율효과를 살펴보면, 1980년대부터 지속적으로 이산화탄소 배출량을 늘리는 데 기여하였다. 이는 효율이 좋지 못한 연료의 사용이 증가하였다는 것을 의미하며, 여기서는 폐기물 소각의 비중이 늘어난 점과 상통한다. 하지만, 효율이 좋지 못한 연료를 화력발전에서 사용함에도 불구하고 전체 화력발전 효율이 증가한 것은 오히려 긍정적인 효과라 볼 수 있다. 또한 탄소배출 계수효과는 0.98, 0.97, 0.94로 꾸준히 개선되었는데, 이는 OECD 20개국은 연료 믹스 효과와 더불어 이산화탄소배출이 적은 연료로의 전환이 이루어지고 있음을 의미한다.

마지막으로 발전원 구조를 좀 더 살펴 볼 필요가 있다. 현재의 화력발전 비중 효과만으로는 원자력 발전과 신재생에너지 발전의 증가를 설명하기에는 어려움이 있다. 실제로 1980년 이래로 원자력 발전소의 생산량은 급증하였고, 1990년 이후에는 신재생에너지의 발전규모도 증가하고 있다. 따라서, 화력발

전 비중 효과만으로 표현되었던 전력구조 효과를 원자력발전 비중(NG/Q), 원자력 대비 신재생에너지 비중(RE/NG), 화력 대비 신재생에너지 비중(RE/TG)로 나누어 분석하였다.



[그림 2] OECD 20개국의 전력 구조 효과

시기별로 전력구조 변화를 살펴보면, 1980년 대비 1990년에 변화의 폭이 가장 크게 일어났다. 이 시기에는 원자력발전 비중도 71% 증가하였고 신재생에너지 대비 화력발전 비중도 크게 증가하였다. 이산화탄소를 배출하지 않는 발전원과 배출하는 발전원이 모두 증가하였지만, 신재생에너지 증가가 미미하여 세 번째 효과보다 첫 번째 효과가 주 요인으로 작용하여 이산화탄소 배출량을 줄인 것으로 판단된다. 1990년 대비 2000년에는 비슷한 결과를 가져왔지만, 그 수치가 아주 미미한 것으로 나타났다. 원자력발전과 화력발전의 증

가 속도는 둔화되었으며, 이산화탄소 배출량의 변화에도 거의 영향을 주지 않았다. 반면, 2000년에는 다른 구조 변화가 일어났는데, 이는 세계 각국이 녹색성장을 모토로 신재생에너지 발전을 본격적으로 지원하고 발전시키기 시작했다. 이 시기에는 원자력발전 대비 신재생에너지 비중이 증가하였으며, 원자력발전의 규모는 축소되었고, 화력발전 역시 증가 속도가 다소 둔화되었다. 이산화탄소 배출이 감소하는 올바른 전력구조로 가는 듯 보였으나, 신재생에너지 효율이 좋지 못했기 때문에 실질적으로 이산화탄소 배출량을 줄이지 못했다.

이러한 결과를 종합해보면, 화력발전, 원자력발전, 신재생에너지의 단순한 증가가 아닌 상호간 비중에 따라 이산화탄소 배출량이 변화함을 알 수 있다. 이는 각 발전원에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 직접적으로 측정하기가 어려움을 의미한다.

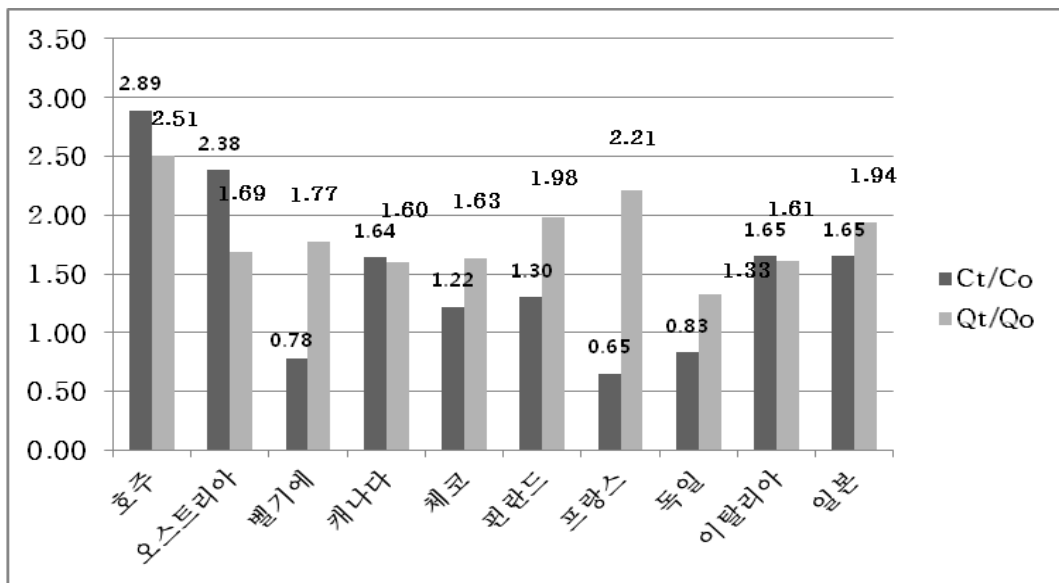
4.2.2 OECD 20개국 국가별 분석

앞 절에서는 OECD 20개국 전체의 이산화탄소 배출요인을 살펴보았다. 위 결과는 전세계의 이산화탄소 배출량의 변화 추이를 보는 데 유용하게 사용될 수 있다. 같은 데이터를 이용하여 이번 절에서는 20개 국가의 이산화탄소 배출요인을 국가별로 살펴볼 것이며, 이는 국가간의 정책 비교를 하는 데 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 앞 절과 비슷하게 LMDI 방법론을 이용하여 OECD 20개국 발전부문의 이산화탄소 배출량을 요인분해 분석하였고, 자세한

구체적 결과는 부록2에 제시하였다.

4.2.2.1 각 국의 전력원단위 당 이산화탄소 배출량

각 국의 전력 원단위 당 배출되는 이산화탄소의 연도별 변화율을 구하기 위해, 먼저 1980년부터 2010년까지 OECD 20개 국의 이산화탄소 배출량과 전력 생산량 변화를 살펴보았다.

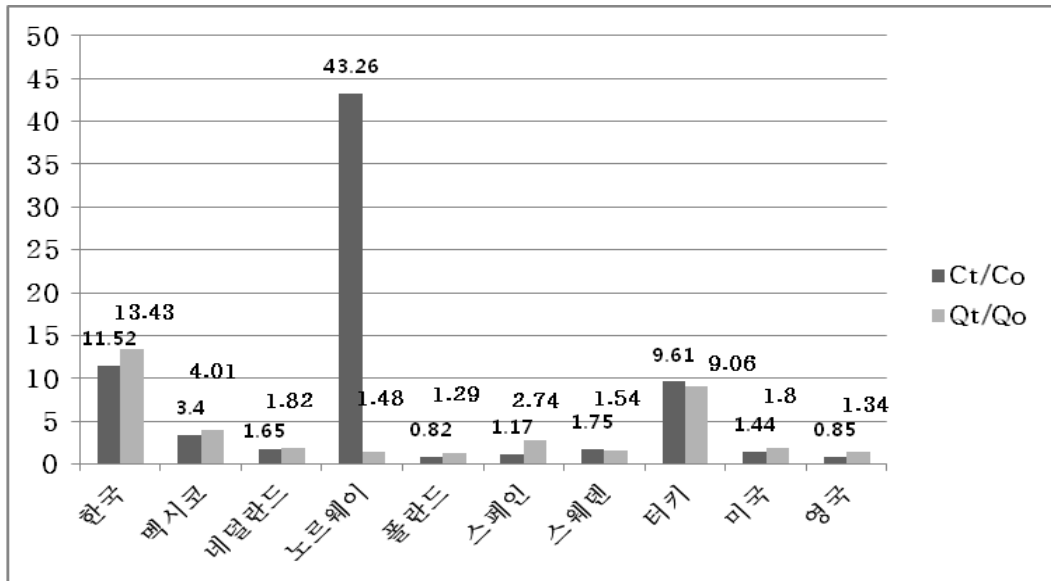


[그림 3] OECD 20개 국의 이산화탄소 배출량과 전력 생산량 변화

먼저 이산화탄소 배출량 증가 상위 3개국인 노르웨이, 한국, 터키는 다른 나라에 비해 매우 높은 비율로 증가하였음을 알 수 있다. 노르웨이의 경우

43.26배, 한국은 11.52배, 터키는 9.61배의 비율로 이산화탄소 배출량이 증가한 것으로 나타났다. 노르웨이는 전력생산량에 비해 이산화탄소 배출량이 매우 많이 증가한 특수한 나라인데, 이는 1980년대까지 대부분의 전력 공급이 수력발전을 통해 이루어졌기 때문에 이산화탄소 배출량이 거의 없었기 때문이다.⁵ 즉, 1990년부터 화력발전소 생산량이 증가하면서 이산화탄소 배출량이 조금씩 발생하기 시작했고, 이로 인해 매우 높은 비율로 이산화탄소 배출량이 증가한 것으로 보이게 된 것이다. 하지만 절대적인 이산화탄소 배출량은 미미한 편이기 때문에 크게 심각한 수준은 아니라고 보여진다. 한국의 경우에는 1980년 이후에 급격한 경제성장을 이루며, 전력 생산량도 급격히 증가하였는데, 전력생산량 증가는 13.43배로 20개국 가운데 가장 높은 비율을 기록했다. 이 기간에는 특히 화력발전소의 성장이 두드러졌기 때문에 이산화탄소 배출량도 더불어 증가하였다. 터키도 한국과 비슷한 과정을 거친 것으로 보여 지는데, 1980년대 이후 GDP가 급격히 늘어나고 이와 동시에 전력생산량과 이산화탄소 배출량도 증가하였다.

⁵ 전력거래소(2011)

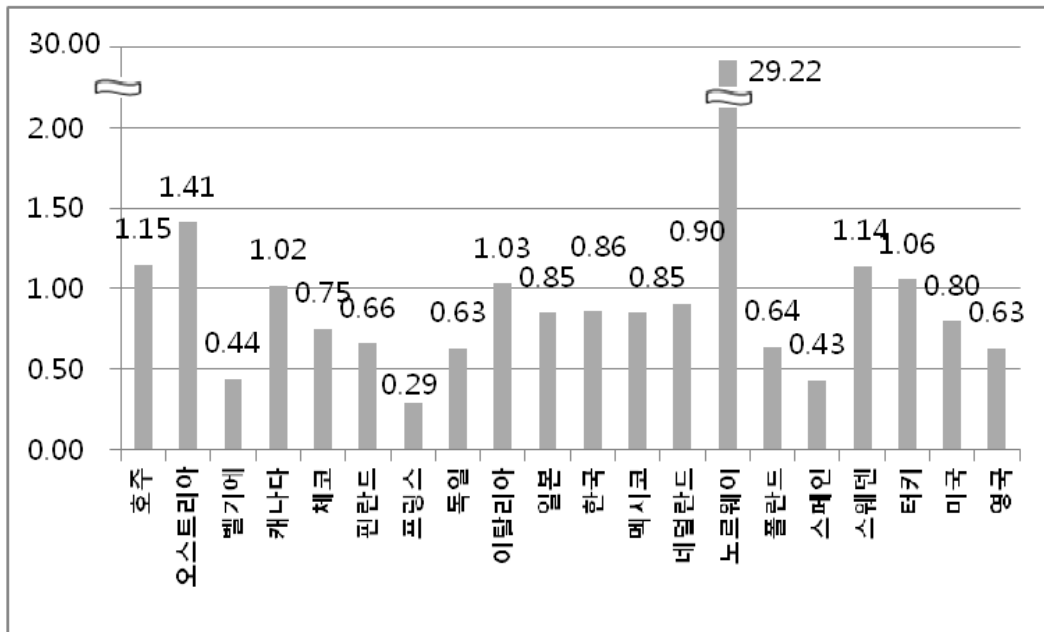


[그림 4] OECD 20개국의 이산화탄소 배출량과 전력 생산량 변화

이산화탄소 배출량 변화 하위 5개국은 벨기에, 프랑스, 독일, 폴란드, 영국으로 나타났다. 이 국가들은 다른 국가들의 이산화탄소 배출량이 증가하는 시기에 오히려 배출량을 감소하였다. 독일과 벨기에의 경우엔 1980년 이후 증가하는 전력수요를 충족하기 위해서 화력발전량을 늘리기보다는 원자력 발전소를 중심으로 전력량을 증가시킨 것이 이산화탄소 감소 정책이었다. 독일은 전력 수요가 증가함에도 불구하고, 화력발전량을 늘리지 않는 대신 원자력발전과 신재생에너지를 서서히 증가시켰는데, 이러한 구조 변화가 이산화탄소 배출량을 감소시키는 데 영향을 주었다. 반면, 폴란드와 영국의 경우에는 화력발전소와 원자력발전소가 동시에 증가하였지만 이산화탄소 배출량은 감소한 것으로 나타났다. 이에 대한 이유는 뒤에서 추가적인 분석을 통해 살펴보도록

한다.

다음으로 OECD 20개국의 전력원단위 당 이산화탄소 배출량 변화를 살펴보면 다음과 같다. 이는 전력원단위당 이산화탄소 배출량은 실질적으로 개별 국가들이 이산화탄소 배출량 감축을 잘 이행하고 있는지를 살펴볼 수 있는 척도라고 할 수 있다. [그림5]를 보면, 벨기에, 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 한국, 일본, 멕시코, 네덜란드, 폴란드, 스페인, 미국, 영국 총 13개국은 생산량 대비 이산화탄소 배출량이 줄어든 국가들이다. 반면 호주, 오스트리아, 캐나다, 이탈리아, 스웨덴, 터키, 노르웨이 총 7개 국은 생산량 대비 이산화탄소 배출량이 감소한 국가이다. 노르웨이는 앞서 언급한 것처럼 특수한 국가 전력 구조 때문에 전력 생산량에 비해 이산화탄소 배출량이 매우 많이 증가한 것으로 나타났다.

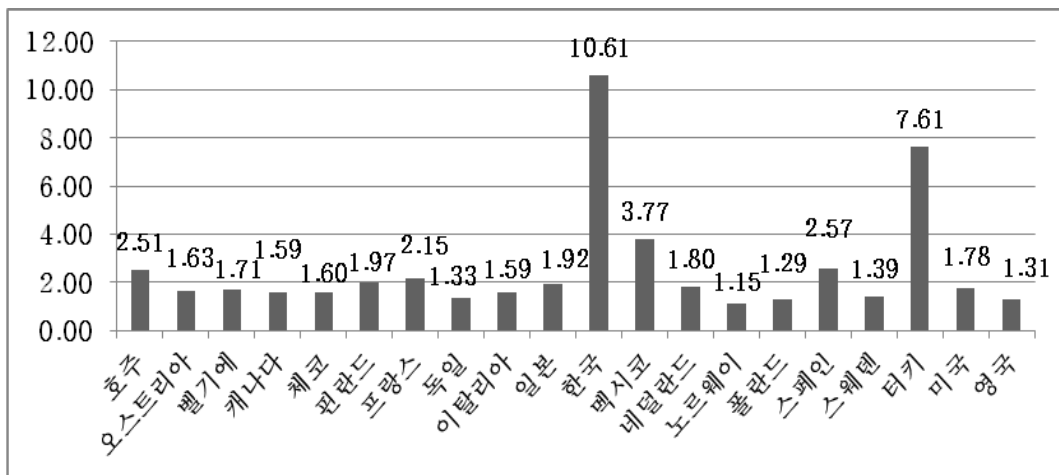


[그림 5] OECD 20개국의 전력원단위 당 이산화탄소 배출량 변화

한국은 비슷한 수준으로 생산량이 증가한 국가인 멕시코, 노르웨이, 터키에 비해 이산화탄소 배출량을 상대적으로 잘 관리하고 있는 것으로 나타났다. 특히 벨기에, 프랑스, 스페인은 0.5 이하의 수치를 기록하여, 탄소 저감정책이 잘 이행되고 있는 국가로 나타났다. 전체적으로 대부분의 국가들은 전력원단위 당 이산화탄소 배출량은 감소하였고, 증가한 국가들의 경우도 그 수치가 미미한 것으로 보여진다. 다음 장에서 이산화탄소 배출요인에 대해 자세히 분석할 것이다.

4.2.2.2 생산 효과

본 절부터는 각 국의 이산화탄소 변화를 크게 6가지의 요인으로 나누어 살펴본다. 먼저 본 절에서는 첫 번째 요인인 생산 효과를 살펴본다. 생산 효과는 앞서 말했듯이, 각 국의 전력 생산량 증가에 따른 이산화탄소 배출량 변화 효과를 나타내며, 대부분의 기존 연구에서 이산화탄소 증가의 주요 요인으로 나타난 요인이다. 정해식·이기훈(2001) 연구에서 국내 제조업 부문 이산화탄소 배출량의 주된 요인이 성장 효과인 생산 효과인 것으로 나타났으며, Mavrotas et al.(2000)의 연구에서도 그리스 제조업 부문 이산화탄소 배출량의 주된 요인으로 생산 효과를 의미하는 GDP 성장 효과를 제시하였다.



[그림 6] OECD 20개국의 생산 효과

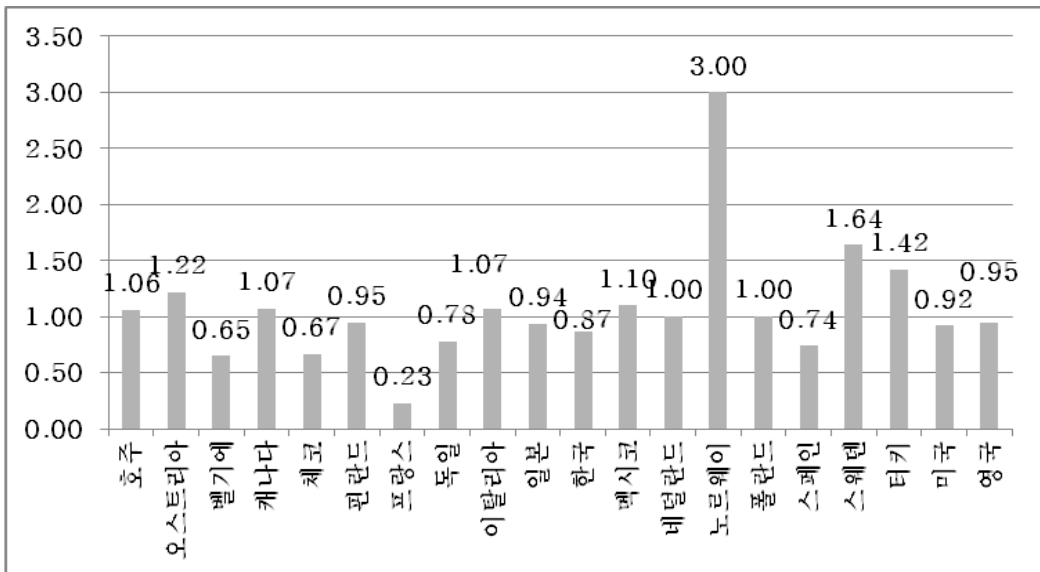
본 연구에서도 [그림 6]를 보면, OECD 20개국 모두 생산효과가 1보다 큰 값이 나타나, 생산량 증가가 이산화탄소 배출의 주된 요인으로 나타났다. 특히 분석 기간 동안 경제가 급격히 성장한 국가인 한국과 터키, 멕시코는 다른

국가에 비해 생산 효과도 큰 값으로 나타났다.

4.2.2.3 구조 효과

Steenhof(2007)는 중국의 전력부문에서 발생하는 이산화탄소 배출요인을 분석하면서, 총 전력발전량 대비 화력발전량을 의미하는 화력발전 비중을 구조 효과라고 정의하고 이를 요인으로 포함하여 분해분석을 수행하였다. 김규남 외(2010)의 연구에서도 전력산업의 이산화탄소배출 요인을 분석할 때 화력발전 비중을 이용하여 구조 효과를 분석하였다. 따라서 본 연구에서도 화력발전 비중이 전력산업의 이산화탄소 배출에 큰 영향을 주는 요인이라는 것을 인식하고 화력발전 비중 효과를 구조 효과를 대변하는 요인으로 간주하였다.

1980년 대비 2010년까지 OECD 20개국의 화력발전 비중 효과의 변화는 기준연도를 기준으로 비교연도의 변화율을 계산하여 살펴보았으며, 다음의 [그림 7]은 그 결과를 보여주고 있다.

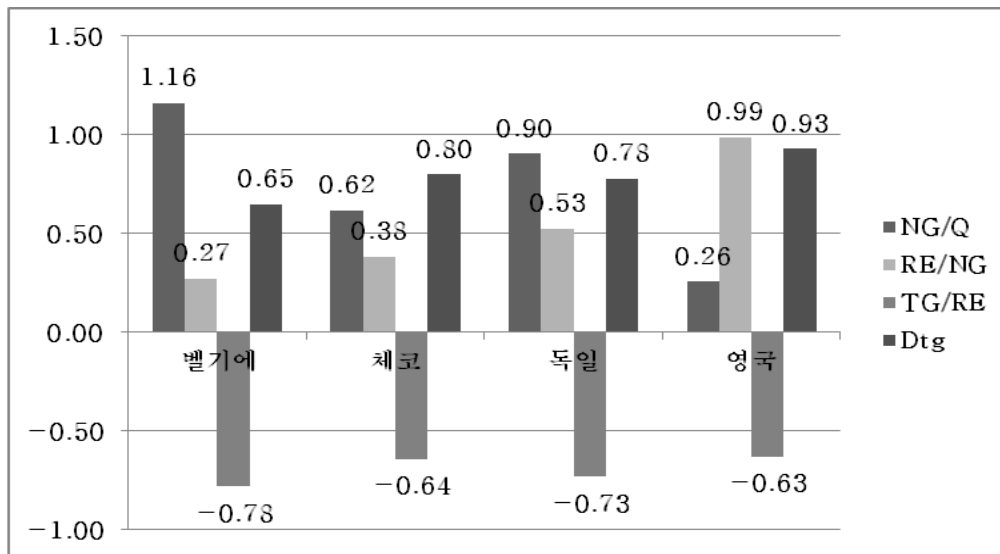


[그림 7] OECD 20개국의 화력발전 비중 효과

[그림 7]을 보면, 화력발전 비중 효과로 이산화탄소 배출이 증가한 국가와 감소한 국가는 모두 10개로 동일하게 나타났다. 벨기에, 체코, 프랑스는 화력발전 비중이 감소하여, 이산화탄소 배출량이 많이 감소한 것으로 나타났다. 하지만, 화력발전 비중의 변화는 원자력 발전 및 신재생에너지 발전에 서로 영향을 주고 받기 때문에, 위의 결과만을 가지고 정확하게 상황을 판단하기에 어려움이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 화력발전 비중효과를 3장의 방법론에서 언급했듯이 세가지 효과로 다시 나누어 살펴보았다. 그런데, 이탈리아, 노르웨이, 오스트리아, 호주, 폴란드 터키의 경우에는 원자력 발전소가 존재하지 않고, 멕시코와 네덜란드는 신재생에너지와 원자력발전소가 전체 전력 생산에서 차지하는 비중이 매우 낮기 때문에 세 가지 효과를 제대로 살펴보기에 어려움이 있다. 따라서 세 종류의 발전소 중 하나라도 가지고 있지 않거나 생

산량이 아주 미미한 국가들은 분석에서 제외하였다.

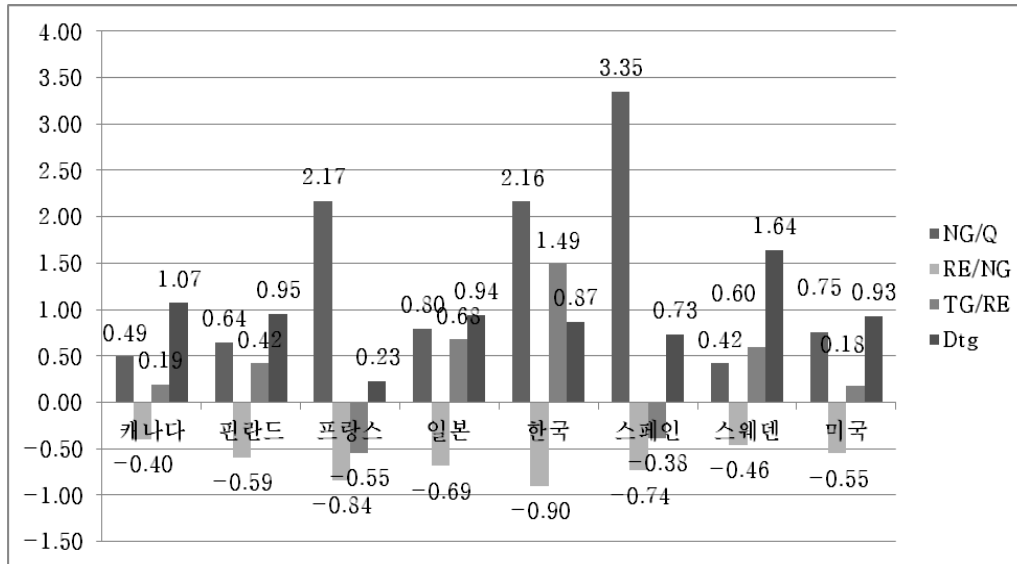
아래의 [그림 8]과 [그림 9]는 신재생에너지가 증가한 국가와 원자력발전 소가 증가한 국가를 나누어서 화력발전 비중효과를 분석한 것이다.



[그림 8] OECD 4개국의 화력발전 비중 효과

신재생에너지의 비중이 증가한 국가들은 모두 화력발전 비중 효과를 통해 이산화탄소 배출량이 감소한 것으로 나타났다. 벨기에의 경우, 원자력발전과 신재생에너지가 모두 증가하여 이산화탄소배출량을 가장 크게 줄어든 반면, 영국은 원자력발전 대비 신재생에너지는 크게 증가하였지만 원자력발전 비중이 낮아졌기 때문에 이산화탄소배출에는 큰 영향을 주지 못한 것으로 보인다. 그렇지만, 이들 네 국가는 신재생에너지 비중을 높이고 화력발전을 줄이는 방향으로 전력 구조가 바뀌고 있기 때문에 이산화탄소 저감의 방향으로 진행되

는 국가라 생각할 수 있다.



[그림 9] OECD 8개국의 화력발전 비중 효과

다음 [그림 9]는 원자력발전 대비 신재생에너지가 감소한 국가들을 나타내고 있다. 이 국가들 중 프랑스는 압도적인 수치로 화력발전 비중 효과에서 이산화탄소 배출량을 줄인 것으로 나타났다. 프랑스와 스페인의 경우에는, 이산화탄소배출이 없는 원자력발전 비중을 높이고 화력발전 비중을 낮추었기에 이 효과가 크게 나타났다. 한국의 경우에는 원자력발전 비중과 신재생에너지 대비 화력발전 비중이 크게 증가한 국가인데, 원자력발전량이 증가했지만, 그 효과가 크지 않았다. 스웨덴은 신재생에너지 대비 화력발전 증가가 원자력발전 증가보다 큰 값이 나왔으며, 결과적으로 화력발전 비중 효과는 이산화탄소 배출량을 높인 것으로 나타났다. 최근에는 이들 국가들이 신재생에너지를 증

가시키려는 노력을 하고 있으나, 아직까지는 많은 효과를 보고 있지 못하며, 신재생에너지를 늘리는 것 못지 않게 원자력발전과 화력발전의 비중을 잘 관리하는 것이 중요한 것으로 보인다.

이 세가지 효과를 통해 전체적으로 해당 국가들의 전력구조 변화를 한눈에 살펴볼 수 있고, 이산화탄소를 저감하는 전력구조 방향으로 진행되고 있는지를 알 수 있다. [그림 8]과 [그림 9]를 보면 실제로 신재생에너지 대비 화력발전 비중 효과가 작은 국가일수록 화력발전 비중효과로 인한 전체 이산화탄소 배출량이 감소하는 것을 알 수 있다.

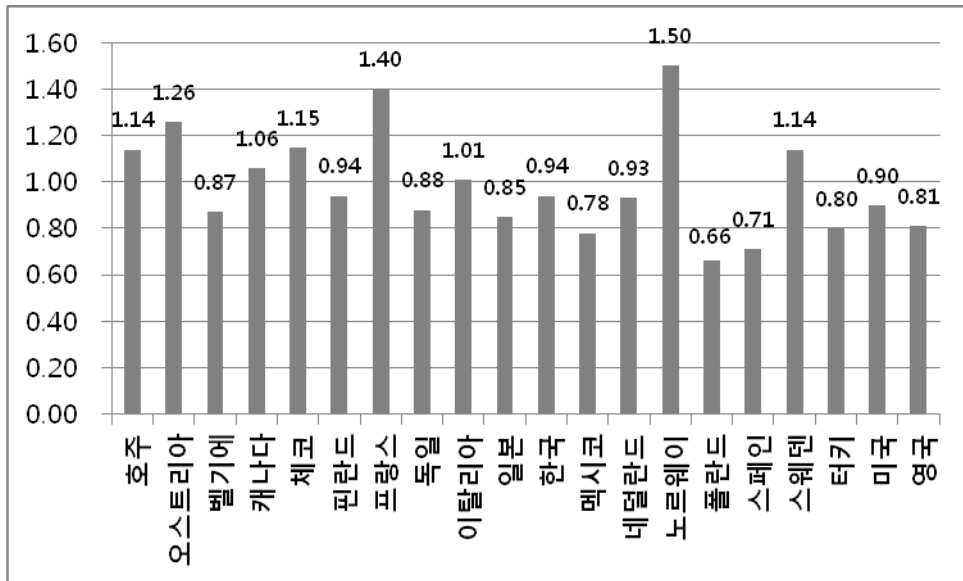
이번 절에서는 세 종류 발전원의 비중에 따른 효과를 살펴봄으로써, 그래프의 형태가 유사한 국가들에서는 전력구조변화가 유사한 방향으로 일어난 것을 한눈에 확인할 수 있었다. 한국은 캐나다, 스웨덴, 핀란드, 미국과 비슷한 전력 구조 개편이 되고 있어 비교적 바람직한 방향으로 진행되고 있는 것으로 보이지만, 화력발전의 비중을 조금 더 줄여야 할 필요가 있다고 판단된다. 특히 한국은 급격한 경제 성장으로 전력 생산량이 크게 변화한 국가이기 때문에 안정적인 전력 수급을 위해서 올바른 전력구조를 유지하는 것이 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

4.2.2.4 화력 발전 효율 효과

세 번째로 전력생산의 60% 이상을 차지하는 화력발전소의 효율에 따른 이

산화탄소 배출 효과를 살펴보기 위해, 화력발전소의 효율은 전력생산에 투입되는 연료 당 전력 생산량으로 구하였고, 이를 1980년부터 2010년까지 비교하였다. 화력발전의 효율 효과로 인한 이산화탄소 배출이 증가하는 경우는 화력발전 기술이 향상되지 못하였거나, 효율이 좋지 않은 연료를 이용하여 전력을 생산했기 때문에 전력생산 효율이 떨어질 수 있으며, 그로 인해 단위 전력당 이산화탄소 배출량이 증가했을 수 있다. 또한 1990년대에는 에너지 절약을 위해, 폐기물을 이용한 전력생산량이 증가한 것이 화력발전소의 효율에 영향을 주었을 가능성이 있다. 폐기물은 다른 화석연료에 비해 전력 발생 효율이 상대적으로 낮기 때문에 폐기물을 많이 사용하는 국가는 전체 화력발전 효율이 낮을 가능성이 있다.

아래 [그림 10]은 국가별 화력발전 효율 효과의 결과를 보여주고 있다. 수치가 크게 나타난 노르웨이는 화력발전소가 거의 전무한 상태에서 1990년 이후 화력발전소를 조금씩 도입하였고, 이로 인해 화력발전 효율이 조금씩 향상되면서 다른 국가에 비해 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 또한, 노르웨이는 다른 국가들과 달리 화력발전의 비중이 전체 전력생산에서 차지하는 비중이 낮은 편이어서 이 수치가 중요한 의미를 갖는다고 하기에 어려움이 있다.



[그림 10] OECD 20개국의 화력발전 효율 효과

프랑스, 오스트리아의 경우는 화력발전 효율 효과로 이산화탄소 배출량이 크게 증가하였다. 먼저, 오스트리아는 분석기간 동안 화력발전에서 사용되는 연료 중 폐기물의 비중이 급격히 늘어났으며 효율이 좋지 않은 LNG 사용 역시 증가하였다. 프랑스는 원자력 발전 비중을 높인 대신 화력발전의 규모는 일정하게 유지했는데, 화력발전에서 사용되는 연료를 석탄에서 천연가스 및 폐기물로 변화한 것이 주 요인으로 작용하였다. 또한 호주, 캐나다, 이탈리아 역시 화력발전 효율 효과로 인해 이산화탄소 배출량이 증가하였다.

반면, 멕시코, 폴란드, 스웨덴, 터키, 영국은 화력발전 효율 효과로 약 20% 이상 이산화탄소를 감축한 국가들이다. 이들 국가는 화력발전이 국가의 주된 전력 생산 수단으로, 화력발전 비중이 높은 이들 국가들은 이산화탄소 배출량

을 줄이기 위한 기술적 진보를 이루었거나 효율이 높은 연료를 주로 사용한 것으로 판단된다.

한국의 화력발전 효율 효과는 분석 대상 국가 20개국 중에서 10번째 순위를 나타내고 있다. 한국은 분석 기간 동안 전력수요가 급격히 증가한 국가이며, 건설 시간이 비교적 짧은 화력발전을 통해 증가하는 전력수요를 해결하는 정책을 시행하였다. 그러나 화력발전의 효율성을 크게 향상시키지 못하였고, 전체적으로 약 5%만의 이산화탄소를 감축하는 데 그쳤다.

그 외 다른 국가들은 대부분 화력발전 효율 효과를 통해 이산화탄소 배출량을 감소한 것으로 나타났는데, 화력발전의 효율성 향상은 열병합발전의 도입에 영향을 받았을 가능성이 높다. 실제로, 유럽지역에서는 1993년에 벨기에를 중심으로 열병합발전이 빠르게 보급되었다.⁷ 유럽공동체는 2010년까지 유럽 전체의 전력생산량 중 열병합발전의 비중을 1997년 기준 9%에서 18%까지 끌어올리는 목표를 잡았으며, 미국과 일본의 경우에도 교토의정서 이행을 위하여 이산화탄소 배출량을 줄이고 전력 효율을 높이기 위해 열병합발전 비중을 늘리기 시작했다. 한국의 경우에도 1990년대 초부터 한국가스공사 연구개발원, 에너지관리공단 산하의 에너지자원기술개발지원센터를 중심으로 정부 정책 차원에서 열병합발전 기술개발을 지원하였으며, 동시에 열병합발전 보급량은 점차 늘어나는 추세이다. 실제 에너지 통계연보 2011에 따르면 국내 복

⁷ 김동섭, 손정락(2007)

합화력 발전은 1981년 36.69%의 열효율에서 2010년 46.45%로 증가하였다.

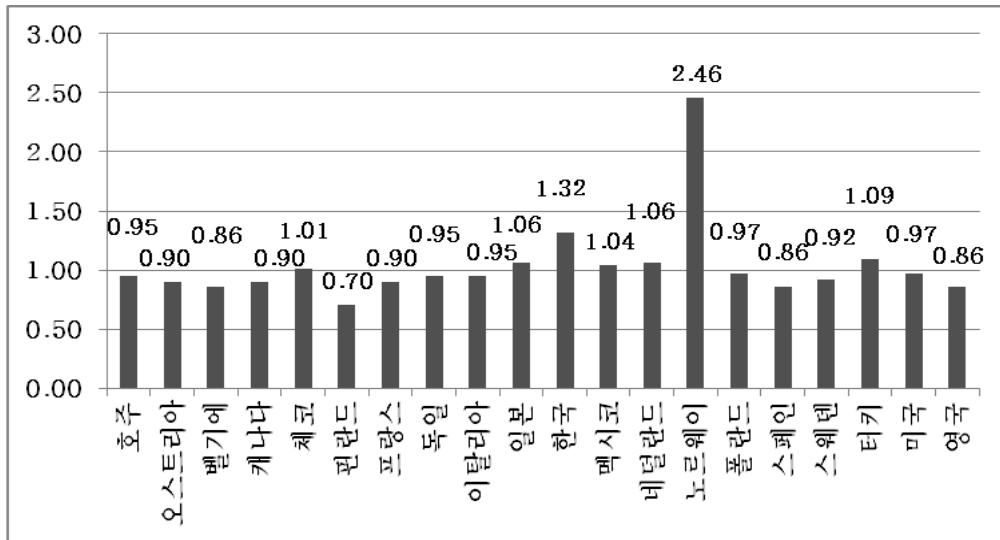
열병합발전은 열과 전력을 동시에 생산할 수 있기 때문에 전체적인 효율이 높은 장점이 있기 때문에 시간이 지날 수록 기술도 꾸준히 발전되고 있다. 화력발전과 전력생산 효율을 비교해 때, 열병합발전은 전력생산 효율에서 화력발전과 큰 차이가 없을 만큼 기술의 지속적인 발전이 이루어졌다. 이러한 열병합발전의 등장과 기술개발은 화력발전 효율을 높이는 데 기여하였고, 이산화탄소 배출량을 줄이는 결과를 가져온 것으로 보인다⁸.

4.2.2.5 연료믹스 효과

네 번째로 전력 생산에 투입되는 연료 변화에 따른 이산화탄소 배출량의 변화를 의미하는 연료 믹스 효과를 살펴보면 다음과 같다. 연료 믹스 효과는 Ang(1997)의 연구에서 중국, 한국, 타이완의 제조업 부문 이산화탄소 배출에 중요한 요인으로 나타났고, Mavrotas et al.(2000)의 그리스 제조업 이산화탄소 배출량에 관한 요인분해분석에서도 중요한 역할을 하였으며, Oh(2010)의 연구 등 많은 기존 연구에서 이산화탄소 배출과 관련된 중요한 요인으로 나타난 효과이다. IPCC 2006 자료에 따르면, 전력생산에 투입되는 연료의 탄소 배출계수는 각각 다른데, 폐기물의 배출계수가 가장 크며, peat,

⁸ 에너지 관리공단(2003)

갈탄, 무연탄 순서이며 LPG와 석유의 탄소 배출 계수가 가장 낮다. [그림 11]은 OECD 20개 국의 연료 믹스 효과를 나타내고 있다.



[그림 11] OECD 20개국의 연료 믹스 효과

노르웨이는 앞서 언급한 전력 구조의 변화로 인해 연료 믹스 효과도 가장 크게 나타났다. 체코, 일본, 한국, 멕시코, 네덜란드, 노르웨이, 터키를 제외하면 대부분의 나라에서는 연료 믹스 효과로 이산화탄소 배출량을 감소시킨 것으로 나타났다. 이 중에서 한국, 멕시코, 터키의 경우 위에서도 언급했듯이 급격한 경제성장으로 전력생산도 급증한 국가이다. 이들 국가는 증가하는 전력 수요를 만족시키기 위해, 화력발전 비중을 높이는 데 초점을 맞추는 데 급급했기 때문에 이산화탄소 배출이 낮은 연료 사용으로의 이동이 더뎠을 것으로

추측할 수 있다. 이 중에서도 한국은 연료 믹스 효과가 크게 나타났으며 전체 국가 가운데 2위를 기록했다. 한국은 1990년에 생산된 전력의 20.8%를 차지했던 석탄 혼합 발전소를 2005년에는 36.7%으로 늘렸으며 (Oh, 2010), 1980년부터 수입연료에 대한 의존성을 줄이기 위하여, 석탄과 원자력 발전에 초점을 맞추었다. 원자력 발전의 증가와 천연가스를 통한 발전량 증가로 이산화탄소 배출량을 줄이는 것처럼 보였으나 국내 석탄 발전이 증가하면서 이 효과를 상쇄하였고, 연료 믹스에 긍정적인 효과를 주지 못하고 오히려 이산화탄소 배출량이 증가한 것으로 판단된다.⁹

네덜란드의 경우, 국가정책적으로 LNG를 통한 전력생산량이 급격히 늘어난 것을 주 요인으로 볼 수 있다. 반면 핀란드는 저탄소 배출 연료로의 전환이 성공적으로 진행되어 분석 기간 동안 약 30%의 감축 효과를 이끌어 냈다. 이는 핀란드 국가의 저탄소 정책이 효과적으로 시행되었음을 의미한다. 스페인은 석탄 및 복합발전 발전량이 감소하고 있는 반면 수력과 풍력 등 신재생에너지의 비중이 증가하여 연료 믹스 효과에서 이산화탄소 배출량을 줄인 것으로 판단된다.

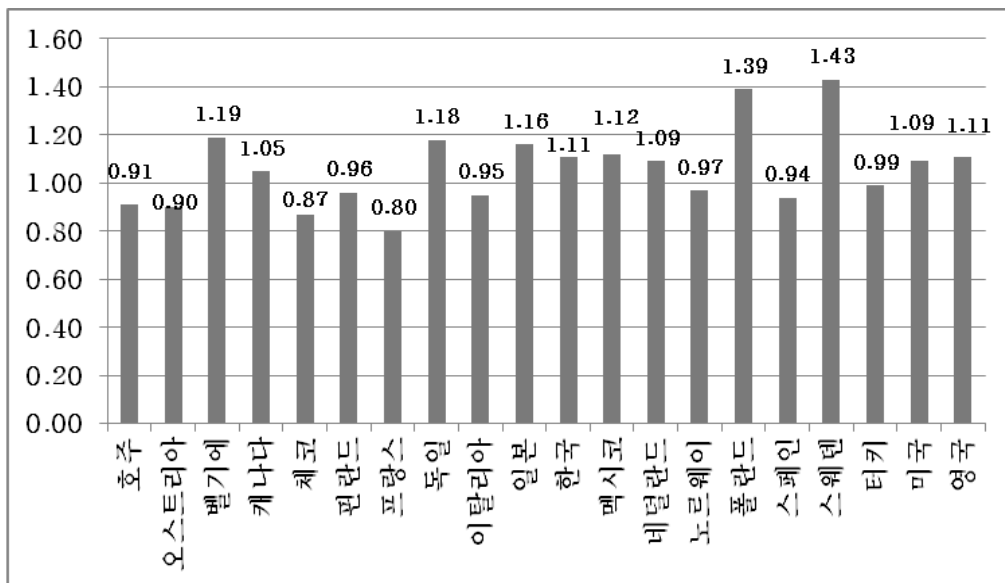
결과적으로 대부분의 국가는 연료 믹스 효과를 통해, 이산화탄소 배출을 감소시키는 데 성공하였다. 이는 세계적으로 이산화탄소가 많이 배출되는 석탄에서 이산화탄소가 상대적으로 적게 배출되는 석유나 천연가스로 연료 전환이

⁹ 에너지 경제연구원(2006)

진행되고 있음을 의미한다.

4.2.2.6 연료 효율 효과

전력 생산에 투입되는 연료 효율 효과는 앞에서 언급한 화력발전의 효율과는 다르게 발전에 사용되는 개별 연료의 효율을 의미한다. OECD 20개국은 투입되는 연료에 따라 전력생산도 다르게 나타나고 있으며, 그 결과는 [그림 12]에서 보듯이 큰 차이가 있다. 많은 국가들에서 연료 효율 효과는 이산화탄소 배출량을 증가시킨 것으로 나타나고 있다.



[그림 12] OECD 20개국의 연료 효율 효과

앞에서 화력발전 효율 효과를 볼 때, 많은 국가들은 기술적 진보나 효율성

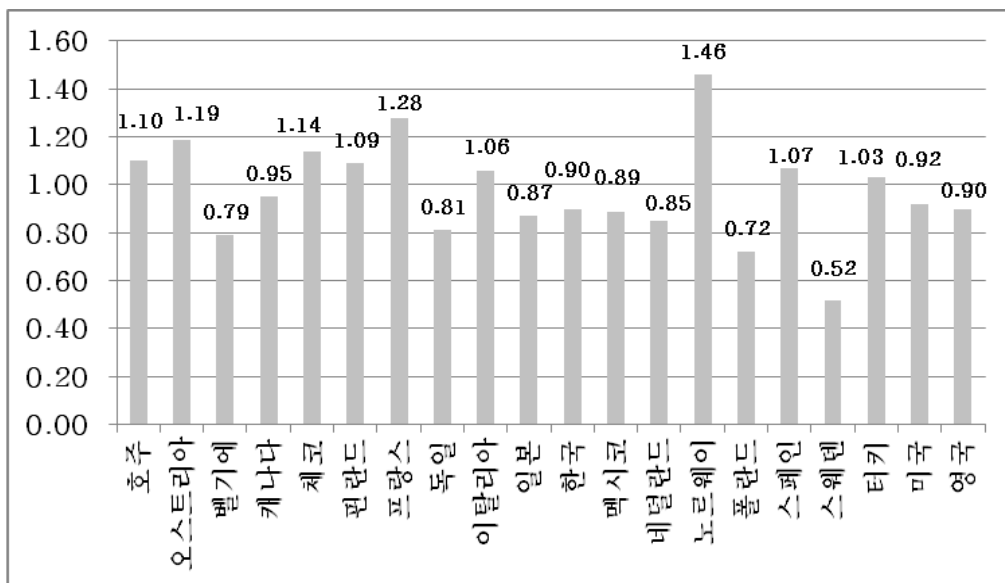
이 높은 연료를 사용하면서 이산화탄소 배출량을 줄이는 데 성공하였다. 하지만, 이 연료 효율 효과는 많은 국가에서 이산화탄소 배출량을 늘리는 결과를 초래했다. 특히, 오스트리아는 연료 효율 효과로 인해 이산화탄소 배출량이 급격히 증가한 것으로 나타나는데, 이는 석유 사용량이 줄고 석탄 사용량이 급격히 늘어난 것에 기인한 것으로 보인다. 즉, 오스트리아는 이산화탄소 배출량이 많고, 효율성이 좋은 석탄의 비중이 늘어난 것이다.

벨기에, 폴란드, 스웨덴의 경우를 살펴보면, 연료 효율 효과로 이산화탄소 배출량이 크게 증가한 것으로 나타난 반면 체코와 프랑스는 연료 효율 효과로 이산화탄소가 감소한 것으로 나타났다. 한국은 20개 국가의 평균 연료 효율 효과인 1.07에 비해 약간 높은 수치로 이산화탄소 배출량이 증가하였다.

여기서 한 가지 지적할 사항은 연료 효율 효과라는 수치의 한계점이다. 만약, 효율이 높은 연료가 이산화탄소 배출도 적게 한다면, 이산화탄소 배출을 줄이는 양(+)의 효과를 가져오겠지만, 효율이 높은 연료가 이산화탄소 배출량도 높다면 이산화탄소 배출에 실제 어떤 영향을 미치는지를 파악하기에 어려움이 있다. 즉 연료 효율성의 증가 방향과 이산화탄소 배출 방향이 다를 수 있다는 것이다. 그러므로 추가적인 연료 믹스 효과 및 탄소 배출 계수 효과를 통해 국가의 연료 전환 방향이 기후변화 협약에 맞게 가는 지를 파악해야 할 것이다.

4.2.2.7 탄소 배출 계수 효과

탄소 배출 계수 효과는 각 연료의 전력생산량에 따른 이산화탄소 배출 효과로, Torvanger(1991), Paul et al.(2004), 김수이 · 정경화(2011)의 연구 등에서 사용되었다.



[그림 13] OECD 20개국의 탄소 배출 계수 효과

[그림 13]을 살펴보면, 탄소 배출 계수 효과는 각 국가별로 심한 편차를 보이는 것을 알 수 있다. 전력부문은 전력의 배출 계수 조정에 의해서 발생하는 데, 배출 계수에 의한 온실가스 감소는 배출 계수가 낮은 LNG나 석유의 증가 또는 원자력 발전이나 신재생발전이 늘어났다는 것을 의미한다. 폴란드와 스웨덴의 경우에는 1보다 작은 수치를 보이고 있으며, 이 국가들은 저탄소 배출

방향으로 연료 전환이 진행되고 있는 것으로 보인다. 노르웨이는 앞에서 살펴 보았듯이 화력발전의 도입으로 이산화탄소 배출량이 급격히 증가한 국가이며, 탄소 배출 계수효과도 가장 크게 나타났다.

대부분의 국가에서 탄소 배출 계수 효과는 1보다 작은 것으로 나타났으며, 이는 분석 대상 국가들이 탄소 배출 계수의 관점에서는 이산화탄소의 배출이 감소하는 방향으로 진행되고 있음을 의미한다. 한국의 경우에도 탄소 배출 계수가 0.9를 기록하여 비교적 이산화탄소 배출량을 잘 줄이고 있는 것으로 나타났다.

4.2.2.8 실증분석 소결

지금까지 LMDI 방법론 중 승법적 LMDI를 이용하여 OECD 20개국을 대상으로 이산화탄소 배출을 분해분석 하였다. 승법적 요인은 국가별 비교 시 특히, 전력생산량이 큰 국가와 전력 생산량이 적은 국가 사이의 경우에 분석과 해석이 용이하다. 본 연구에서는 이산화탄소 배출을 여섯 가지 요인인 생산 효과, 구조 효과, 화력발전 효율 효과, 연료 믹스 효과, 연료 효율 효과, 탄소 배출 계수 효과로 분해하여 분석하였다.¹⁰

분석 결과, 한국, 멕시코, 터키와 같이 1980년 이후에 급격히 경제가 성장

¹⁰ 개별 국가들에 대한 분석 결과는 부록을 참조.

한 국가들은 우리가 주목해야 할 국가로 보여진다. 이들 국가들은 전력생산량과 이산화탄소 배출량 증가도 다른 국가에 비해 두드러졌는데, 이산화탄소 배출 요인 또한 다른 국가들과는 조금 다르게 생산 효과의 영향이 크게 나타났다. 반면, 벨기에, 체코, 프랑스, 핀란드, 스페인과 같이 원자력 발전의 비중이 늘어난 방향으로 전력구조가 변화한 국가는 이산화탄소 배출요인에서 특히 구조 효과가 크게 나타났으며, 이는 온실가스 감축에 큰 기여를 하였다. 스웨덴의 경우 화력발전 비중이 상승하여, 구조 효과로 인해 이산화탄소 배출량이 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그 밖에 미국, 영국, 핀란드, 프랑스, 스페인 등은 여러 요인들을 통해 이산화탄소가 감축되고 있는 것으로 나타났다. 즉, 이들 국가들은 연료 믹스와 연료 효율 측면에서 비교적 온실가스 저감 정책이 적절하게 진행되고 있는 국가로 판단된다.

다른 국가의 결과들을 살펴볼 때, 한국은 이산화탄소 감축을 위해 개선의 노력이 필요함을 알 수 있다. 한국은 화력발전 비중의 변화를 통해 온실가스 감축을 이루어냈고 동시에 화력발전의 효율성을 향상시켰지만 연료 효율과 연료 믹스 효과에서는 상대적으로 낮은 성과를 보이고 있다. 다르게 말하면, 연료 효율성과 연료 믹스는 이산화탄소 배출량에 부정적인 영향을 주었지만, 이 연료들을 사용하여 화력발전 효율을 개선한 점은 국내 화력 발전의 기술적 진보를 의미한다고 할 수 있다.

본 장에서 수행한 LMDI 분해분석 방법은 분석 대상 국가들의 이산화탄소 배출요인을 찾을 수 있는 장점이 있지만, 분해된 6가지 요인들이 서로 연관되

어 있어 이산화탄소 배출에 영향을 주는 직접적인 요인을 찾을 수는 없는 한계가 있다.

5. 선형 회귀 분석

5.1 선형 회귀 모형

본 연구에서 지금까지 이산화탄소 배출량을 결정하는 요인의 영향을 구하기 위해 LMDI 방법론을 통하여 분해분석 하였다. 이 방법론은 각 요인 별 효과를 분석하는 장점을 가지고 있지만, 동시에 주요 요인들이 서로 연관되어 있어 구하려는 결과의 해석이 약간의 어려움이 존재한다. 따라서 이번 장에서는 OECD 국가의 전력원단위 당 이산화탄소 배출량 변화에 영향을 주는 요인들을 회귀 분석을 통해 살펴본다..

선형회귀 모형의 장점은 종속변수에 영향을 주는 독립변수의 크기 및 방향성을 알 수 있다는 것이다. 일반적인 선형회귀 모형은 다음과 같다.

$$Y = \alpha + \beta X_i + \varepsilon \quad (5.1)$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

여기서 α 와 β 는 추정해야할 파라미터이며, 일반적으로 파라미터의 추정은 최소자승법(OLS)을 사용한다.

5.2 데이터

분석을 위해, 먼저 종속변수는 이산화탄소 배출량이 아닌 전력생산원 단위당 이산화탄소 배출량으로 정의하였다. 이산화탄소 배출량의 증감을 살펴보는 것만으로는 국가별로 전력 생산량이 다를 경우 이산화탄소 배출량 감축이 잘 진행되고 있는지를 파악하기 어렵기 때문이다. 따라서, 전력생산원 당위당 이산화탄소 배출량으로 종속변수를 설정함으로써, 국가간 비교가 훨씬 용이해지며, 이를 통해 국가별로 이산화탄소 배출량 변화를 비교하여 살펴볼 수 있다.

독립변수는 화력발전 비중, 원자력 발전 비중, 신재생에너지 비중, 화력발전 효율, 화력발전의 탄소 배출 계수, 석유가격, 천연가스 가격, 석탄가격으로 놓았다. 화력발전 비중, 원자력 발전 비중, 신재생에너지 비중은 우리가 요인분해분석을 할 때의 구조 효과와 비슷하다. 화력발전의 효율은 앞서 본 화력발전 효율 효과와 같은 개념이며, 화력발전의 탄소 배출계수는 배출계수 효과와 비슷하다. 석유, 천연가스, 석탄의 연도별 가격변화는 연료 믹스에 영향을 주는 요인으로 보고 독립변수로 설정하였다.

각 독립변수와 종속변수는 1980년, 1990년, 2000년, 2010년 각각 20개국의 자료를 통합하여, 총 80개의 자료를 사용하였다. 각 발전원별 비중과 화력발전 효율 및 탄소 배출계수는 본 논문에서 사용한 데이터를 그대로 사용하였으며, 석유, 천연가스, 석탄 가격은 BP(2011) 자료를 사용하여 모든 국가에 같은 가격으로 적용하였다.

5.3 분석 결과

주어진 자료를 OLS로 추정한 결과는 <표 1>과 같다. 분석 결과, 분석에 포함된 여러 변수들 중에서 화력발전비중과 화력발전효율, 그리고 화력발전탄소계수만이 유의한 것으로 나타났으며, 다른 변수들은 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.

먼저, 화력발전비중의 계수값은 양의 값으로 나타났는데, 이는 화력발전 비중이 커질 수록 전력생산원 당 탄소배출량이 증가함을 의미한다. 반면 화력발전 효율은 음의 값을 가진 것으로 나타나는데, 이는 화력발전의 효율이 증가할수록, 탄소 배출량을 감소함을 의미한다. 화력발전비중의 계수와 화력발전 효율 계수를 비교해 볼 때, 화력발전비중이 탄소 배출에 미치는 영향이 약 7.5배 크다는 사실을 알 수 있다.

<표 1> 선형분석 결과

설명변수	비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
(상수)	-133.455	217.738		-0.613	0.542
화력발전비중	244.018	92.387	0.835	2.641	0.010
원자력비중	5.773	88.058	0.014	0.066	0.948
신재생비중	42.533	89.850	0.130	0.473	0.637
화력발전효율	-149.697	42.134	-0.110	-3.553	0.001
화력발전탄소계수	0.564	0.051	0.404	11.007	0.000

석유가격	-0.716	3.257	-0.229	-0.220	0.827
LNG가격	10.049	39.189	0.157	0.256	0.798
석탄가격	1.872	8.654	0.269	0.216	0.829

이와 같은 선형회귀 모형을 이용한 분석은 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 직접적인 변수들을 구할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 이 과정은 단순 OLS 추정방법만을 이용한 경우여서 오차가 많이 존재한다. 각 독립변수 사이의 상관관계가 존재하거나 내생성이 존재할 가능성이 있기 때문이다.

본 논문에서는 보다 깊은 통계 분석은 생략하였지만, 위의 결과를 통해, 화력발전이 이산화탄소 배출에 미치는 방향성을 다시 한번 검증할 수 있었다.

6. 결론 및 시사점

6.1 결론

본 연구에서는 지난 30년간 발전부문에서 증가하고 있는 이산화탄소 배출요인을 알기 위하여, 로그 평균 디비지아 지수를 이용하여 7가지 요인으로 분해분석 하였다. 분석은 먼저 OECD 20개국 전체를 대상으로 실시하였으며, 이후 추가적으로 각 국가에 대한 분석을 진행하였다.

먼저, OECD 20개국의 전체 이산화탄소 배출량 분석 결과는 다음과 같다. 첫째, OECD 20개국의 발전부문 이산화탄소 배출요인 중 생산 효과는 이산화탄소 배출을 증가시키는 역할을 하였다. 둘째, 국가별 생산 효과를 살펴보면, 전체생산량 대비 국가의 생산량 비중에 따른 이산화탄소 배출 변화는 거의 미미한 것으로 나타났다. 셋째 연료 믹스 효과는 주로 이산화탄소 배출량을 감소시킨 것으로 나타났는데, 이는 OECD 국가들이 전체적으로 저탄소 연료인 석유, 천연가스로의 전환이 진행되고 있음을 의미한다. 넷째, 화력발전 효율 효과는 점점 개선되어 분석 첫 시기인 1980년과 1990년 사이에는 이산화탄소 배출량이 증가되었지만, 그 이후 시기에는 점점 이산화탄소 배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 화력발전 기술의 꾸준한 향상, 그리고 1990년대에 도입된 열병합발전 기술의 발전에 기인한 것으로 보여진다. 다섯번째 연료 효율 효과는 이산화탄소 배출량을 증가시켰는데, 석유와 천연가스의 가격 상승이 지속되고, 연료 효율과 탄소 배출이 모두 높은 석탄의 사용량이 증가하

면서, 이와 같은 결과가 나온 것으로 보여진다. 여섯째, 탄소 배출 계수 효과는 온실가스 배출량을 증가시킨 역할을 하였지만, 생산 효과에 비해서는 미미한 것으로 나타났다. 이는 탄소 배출 계수가 큰 석탄 및 폐기물의 사용 증가가 큰 역할을 한 것으로 보여진다. 마지막으로 구조 효과를 살펴보면, OECD 20개국은 화력발전 비중의 변화에 따라 이산화탄소 배출량은 변화하지 않은 것으로 나타났다. 원자력 발전 비중의 증가는 이산화탄소 배출을 줄이는 데 기여하였고, 신재생에너지 발전의 증가는 그 전력 생산량이 많지 않기 때문에 이산화탄소 배출의 감소에 큰 기여를 하지 못한 것으로 나타났다.

다음으로 한국의 이산화탄소 배출 요인을 살펴보면, 다음과 같다. 먼저, 한국은 다른 국가들에 비해 전력생산량과 이산화탄소 배출량 증가 폭이 매우 높은 국가이다. 전력 생산량 증가는 20개 국에서 가장 높은 13.43배 상승했고, 이산화탄소 배출량은 두 번째로 큰 폭으로 증가했다. 노르웨이는 이산화탄소 배출량 증가 폭이 가장 큰 국가이나 이는 다른 국가들과는 다른 특별한 상황에 기인한 것으로 예외적이라고 할 수 있다. 즉, 노르웨이는 수자원이 풍부한 환경조건 하에서 수력발전으로 전력 생산을 하는 국가였으나, 2000년대 들어 폐기물 소각을 통해 전력을 생산하였고, 이로 인해 전력 생산 시 이산화탄소가 배출되어 상대적으로 큰 폭의 이산화탄소 증가가 발생한 것이다. 따라서 실질적으로 이산화탄소 배출량 증가 비율의 측면에서 한국은 분석 대상 20개국 중에서 1위라고 할 수 있다.

따라서 한국은 이산화탄소 배출량을 보다 감축하기 위해 다음과 같은 사항들을 고려해야 한다. 첫째, 한국은 지난 시기 구조 효과 측면에서 이산화탄

소 배출량이 감소하였다. 한국은 그 동안 원자력 발전량을 꾸준히 증가시켰지만, 2000년대 이후로 화력발전이 더욱 빠른 속도로 증가하였고, 이는 프랑스, 벨기에와 같이 원자력 발전이 중심인 국가들에 비해 이산화탄소 배출량을 줄이지 못한 결과를 가져왔다. 이는 한국정부가 2000년대에 들어 녹색성장을 정책 이념으로 삼고 신재생에너지원 발전에 노력을 기울였지만, 독일과 노르웨이, 핀란드 같은 녹색선진국에 비해 효율성이 높은 녹색기술에 도달하지 못하였고, 신재생에너지를 증가시키지 못한채 화력발전과 원자력 발전을 오히려 증가하게 되고 탄소 배출량을 줄이는 데 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

둘째, 화력발전 효율 효과는 탄소배출량을 감소시키는 역할을 하였으며, 여기에는 열병합발전 기술의 향상이 주된 이유라고 할 수 있다. 특히 탄소 배출계수 효과를 고려해 볼 경우, 국내 화력발전은 저탄소 연료를 이용하여 화력발전 효율을 증가시켰기 때문에 적절한 방향으로 탄소 저감정책이 시행 중이라 할 수 있겠다.

셋째, 연료 믹스 효과와 연료 효율 효과는 탄소배출량을 증가시키고 있다. 대부분의 유럽 선진국들은 저탄소 연료인 석유 및 천연가스로의 연료전환에 성공하였다. 하지만, 한국은 수입연료인 석유의 의존성을 줄이는 노력을 한 결과, 석탄과 같은 고탄소 배출연료를 사용하게 되었다. 석탄은 열효율도 뛰어나고 탄소 배출량도 높은 연료이기 때문에 이산화탄소 배출량 증가에 기여하고 있다.

추가적인 선형회귀 분석에서는 화력발전 비중과 탄소배출계수는 전력생산

원단위 당 이산화탄소 배출에 양(+)의 효과를 주었고, 화력발전 효율은 음(-)의 효과를 나타내어, 이산화탄소 배출에 영향을 주는 변수는 화력발전과 직접적인 관련이 있는 변수이기 때문에 화력발전의 중요성을 다시 한번 확인할 수 있다.

6.2 시사점

본 논문은 OECD 20개 국가에서 지난 30년간 전력 부문에서 이산화탄소 배출에 영향을 준 여러 변화 요인들을 분석하였으며, 이는 다음과 같이 한국의 발전 부문 저탄소화와 기후변화협약에 대응한 정책적 시사점을 줄 수 있다.

첫째, 한국은 전력 저 소비 국가의 형태로 나아가야 한다. 현재 전력 생산량이 많을 수록, 이산화탄소 배출량도 같이 증가하는 양의 상관관계를 보이고 있다. 따라서 여러 산업부문의 구조조정을 통해 사용되는 전력량이 줄어들거나, 전력 소비량이 적은 고부가 가치 산업 위주로 갈 필요가 있다.

둘째, 화력발전의 비중을 지속적으로 낮추어야 한다. 화력발전은 탄소를 배출하는 주요 발전원이며, 특히 연료의 대부분을 수입에 의존하는 한국의 경우에는 에너지 수급에 있어서 불안함을 유발할 수 있다. 장기적인 관점의 국가 정책 차원에서 화력발전 비중을 낮출 수 있도록, 원자력 발전과 신재생에너지원에 대한 지원을 강화해야 한다. 후쿠시마 원전 사태 이후로 세계 여러 국가들은 원전을 줄이려고 시도를 하고 있다. 하지만 신재생에너지원 발달이 지지

부진한 한국은 친환경적이고 에너지 효율적인 원자력 발전을 줄이는 것은 재고할 필요가 있다.

셋째, 저탄소 연료로의 전환이 이루어질 필요가 있다. 석유 의존도가 큰 한국은 2000년대 이후로는 석유를 사용한 화력발전을 더 이상 늘리지 않고, 석탄과 천연가스를 사용한 화력발전량을 늘려왔다. 저탄소 연료로 전환되지 않고 그 반대 방향으로의 연료 전환이 이루어진 것이다. 최근 5년간 유가는 급등하였지만, 천연가스 가격은 하락 하였고, 특히 미국의 셰일가스 혁명에 따라 가스의 공급 물량이 풍부해져 천연가스 가격이 더 하락할 가능성이 있다. 즉, 정부는 석탄, 석유의 의존도를 줄이고 대신에 천연가스를 사용하는 발전에 더욱 지원을 해줄 필요가 있다. 가스 발전소를 더 늘리고, 기술지원을 해준다면 자연스럽게 가스연료로의 전환이 이루어질 것이다.

넷째, 석탄 발전에서 탄소 배출량을 줄이는 기술을 개발해야 한다. 화력발전 효율은 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 주요 요인으로 드러났다. 한국은 원자력 발전이나 신재생에너지 만으로 전력 공급을 할 수 없는 지정학적 요소와 기후적인 조건을 가지고 있다. 즉, 화력발전을 통한 전력생산은 필수적이기 때문에 사용하고 있는 연료에서 탄소배출량을 줄이는 것이 무엇보다 중요하다. 1990년대 등장한 열병합발전소는 정부의 지원 아래에서 꾸준히 열효율을 향상시켰으나, 현재에도 여전히 개선해야 할 부분이 많은 것이 사실이다. 따라서 탄소포집 및 저장 기술을 향상시키고, 전력 생산 과정에서의 공정혁신 등을 통해 온실가스를 줄이는 노력이 이루어져야 할 것이다. 이를 위해서는

관련 기술을 개발하는 기업이나 학교, 정부기관에게는 탄소세를 낮춰 주는 방법과 같은 인센티브를 부여해줄 필요가 있다.

국내 발전부문의 온실가스를 줄이기 위해서는 개선해야 할 사항이 많이 존재한다. 2008년 세계 금융위기를 겪은 후, OECD 국가들에서는 경기침체로 인해 비자발적으로 전력 생산량이 감소하였다. 이 영향은 국내 및 OECD 다른 국가들이 이산화탄소 배출량 감소를 잘 이행하고 있다는 착각을 줄 수 있다. 즉, 경기침체로 인한 이산화탄소 증가의 정체에 안주하여 저탄소 사회로의 전환 노력을 게을리하지 않아야 한다는 것이다. 특히 한국은 IMF 경제위기 이후 경기회복과 함께 온실가스 배출량이 다시 위기 이전으로 회복된 국가이다. 현재 한국은 금융위기에서 빠르게 회복되었지만, 아직 경기가 본격적으로 상승하고 있지 않은 시기이기 때문에 온실가스 배출량 관리에 더욱 주의할 필요가 있다고 보여지며, 본 연구는 이러한 한국의 온실가스 배출량 관리에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 강희찬, 글로벌 금융위기와 녹색성장, *삼성경제연구소*, 제 284호, 2010
- 김규남 · 김강석 · 김연배, 국내 전력산업의 탄소배출 변화요인 분석: 로그평균 디비지아지수를 이용한 수요와 공급 측면 분석, *자원 · 환경경제연구*, 19권, 2010, pp.243~282
- 김동섭 · 손정락, 열병합발전 현황분석 및 전망, *플랜트합본*, 3호, 2007
- 김수이 · 정경화, LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분 해분석, *자원 · 환경경제연구*, 20권, 2011, pp.229~254
- 김현진, 포스트 교토의정서 논의와 한국의 대응, *삼성경제연구소*, 제 543호, 2006
- 에너지 관리공단, 열병합기술 가이드북, 2003
- 에너지 경제연구원에너지 통계 연보, 2006
- 정해식 · 이기훈, 로그평균 디비지아 지수 기법을 이용한 이산화탄소 배출량 변화의 요인분해, *자원 · 환경경제연구*, 19권, 2001, pp.569~589
- 전력거래소, 해외전력산업 정보집, 2011
- 환경부, 환경부문의 온실가스배출량 조사 및 통계구축, 2002

Ang, B.W., & Lee, S.Y. Decomposition of industrial energy consumption: Some methodological and application issues, *Energy Economics*, Vol.16, 1994, pp.83~92

Ang, B.W., & Zhang, F.Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies, *Energy*, Vol.25, 2000, pp.1149~1176

Ang, B.W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? , *Energy Policy*, 2004, Vol.32, pp.1131~1139

Ang, B.W., & Liu, N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach, *Energy Policy*, Vol.35, 2007, pp.238~246

Ang, B.W., & Liu, F.L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation, *Energy*, Vol.26, 2001, pp.537~548

BP Statistical review of world energy 2011

Boyd, G.A., Hanson, D.A., & Sterner, T. Decomposition of changes in energy intensity: A comparison of the Divisia index and other methods, *Energy Economics*, Vol. 10, 1988, pp.309~312

Hatzigeorgiou, E., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. CO₂ emissions in Greece for 1990–2002: A decomposition analysis and comparison of results using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index techniques, *Energy*, Vol.33, 2008, pp.492~499

IEA, *IEA Electricity information*, 2012

IPCC, *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*, 1996

IPCC, *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*, 2006

Jung, T.Y., & Park, T.S. Structural Change of the Manufacturing Sector in Korea: Measurement of Real Energy Intensity and CO₂ Emissions, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol.5, 2000, pp 221~238

Li, X.Q., Ang, B.W., & Ong, H.L. The application of the Divisia index to the decomposition of changes in industrial energy consumption, *Energy Journal*, Vol.13, 1992, pp.161~177

Liaskas, K., Mavrotas, G., Mandaraka, M., & Diakoulaki, D. Decomposition of industrial CO₂ emissions: The case of European Union, *Energy Economics*, Vol.22, 2000, pp.383~394

- Mavrotas, G., & Pavlidou, S. Decomposition analysis of CO₂ emissions from the Greek manufacturing sector, *Global Nest*, Vol.2, 2000, No 1, pp.119~127
- Oh, I.Y., Wehrmeyer, W. & Mulugetta, Y. Decomposition analysis and mitigation strategies of CO₂ emissions from energy consumption in South Korea, *Energy Policy*, Vol.38, 2010, pp.364~377
- Park, S.H. Decomposition of industrial energy consumption: An alternative method, *Energy Economics*, 1992, pp.265~270
- Paul, S., & Bhattacharya, R.N. CO₂ emission from energy use in India: a decomposition analysis, *Energy Policy*, Vol.32, 2004, pp.585~593
- Shrestha, R. M., & Timilsina, G. R. SO₂ emission intensities of the power sector in Asia: Effects of generation–mix and fuel–intensity changes, *Energy Economics*, Vol.19, 1997, pp.352~362
- Steenhof, P.A. Decomposition for emission baseline setting in China's electricity sector, *Energy Policy*, Vol.35, 2007, pp.280~294
- Sun, J.W. Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. *Energy Economics*, Vol.20, 1998, pp. 85~100

Torvanger, A. Manufacturing sector carbon dioxide emissions in nine OECD countries, 1973~87: A Divisia index decomposition to changes in fuel mix, emission coefficients, industry structure, energy intensities and international structure, *Energy Economics*, Vol.13, 1991, pp.168~186

부록 1 : IPCC 탄소배출계수 (Carbon emission factor: CEF)

연료 구분			탄소배출계수	
			kg C/GJ	*(ton C/toe)
액체화석연료	1차연료	원유	20.00	0.829
		천연액화가스(NGL)	17.20	0.630
	2차연료	휘발유	18.90	0.783
		항공가솔린	18.90	0.783
		등유	19.60	0.812
		항공유	19.50	0.808
		경유	20.20	0.837
		중유	21.10	0.875
		LPG	17.20	0.713
		납사	(20.00) (a)	0.829
		아스팔트(Bitumen)	22.00	0.912
		윤활유	(20.00) (a)	0.829
		Petroleum Coke	27.50	1.140

		Refinery Feedstock	(20.00) (a)	0.829
고체화석연료	1차연료	무연탄	26.80	1.100
		원료탄	25.80	1.059
		연료탄	25.80	1.059
		갈 탄	27.60	1.132
		Peat	28.90	1.186
	2차연료	BKB & Patent Fuel	(25.80) (a)	1.059
		Coke Oven/Gas Coke	29.50	1.210
		Coke Oven Gas	13.0(b)	
		Blast Furnace Gas	66.0(b)	
기체화석연료	LNG(dry)	15.30	0.637	
바이오매스 (CO ₂ 배출량 계산 시 불 포함)	고체바이오매스	29.90	1.252	
	액체바이오매스	(20.00) (a)	0.837	
	기체바이오매스	(30.60) (a)	1.281	

주) 41,868 TJ/10⁶ toe 적용하여 계수환산

*에너지원별 IPCC Guideline에서 제시하고 있는 용도별 연소율 적용

부록 2 : 분석결과

		Dpro	Dtg	Dtgeff	Dmix	Deff	Demf	Dtot	Qt/Q0	It/Io
Australia	1980~1990	1.61	1.05	1.08	0.98	0.95	1.05	1.79	1.61	1.11
Australia	1990~2000	1.36	1.02	1.00	1.02	0.99	1.01	1.41	1.36	1.04
Australia	2000~2010	1.15	0.99	1.05	0.96	0.96	1.04	1.14	1.15	0.99
Austria	1980~1990	1.17	1.13	1.32	1.05	26.52	0.04	1.91	1.20	1.59
Austria	1990~2000	1.21	0.83	1.01	0.96	1.04	0.95	0.97	1.22	0.80
Austria	2000~2010	1.15	1.30	0.95	0.89	1.12	0.91	1.28	1.16	1.11
Belgium	1980~1990	1.28	0.55	1.02	1.02	1.01	1.06	0.79	1.32	0.60
Belgium	1990~2000	1.18	1.05	0.89	0.92	1.14	0.85	0.98	1.18	0.82
Belgium	2000~2010	1.13	1.12	0.96	0.92	1.04	0.87	1.01	1.13	0.89
Canada	1980~1990	1.29	1.04	1.03	1.00	1.01	0.99	1.37	1.29	1.06
Canada	1990~2000	1.25	1.23	0.95	0.96	1.05	0.95	1.40	1.26	1.11
Canada	2000~2010	0.99	0.84	1.09	0.94	1.00	1.00	0.85	0.99	0.86
Czechrepublic	1980~1990	1.17	0.83	1.18	1.03	0.85	1.18	1.17	1.19	0.99
Czechrepublic	1990~2000	1.17	1.01	0.94	0.98	1.09	0.92	1.09	1.17	0.93
Czechrepublic	2000~2010	1.17	0.80	1.04	1.00	0.94	1.05	0.95	1.17	0.82
Finland	1980~1990	1.33	0.78	0.93	0.81	0.95	1.06	0.78	1.34	0.58
Finland	1990~2000	1.28	1.04	0.90	0.87	0.98	1.04	1.07	1.29	0.83
Finland	2000~2010	1.15	1.17	1.12	1.00	1.04	0.99	1.56	1.15	1.35
France	1980~1990	1.61	0.24	1.01	1.04	1.01	0.98	0.41	1.63	0.25
France	1990~2000	1.27	0.84	1.30	0.93	0.81	1.35	1.41	1.29	1.10
France	2000~2010	1.05	1.15	1.06	0.93	0.97	0.97	1.13	1.05	1.08
Germany	1980~1990	1.18	0.82	0.96	1.03	1.04	0.97	0.96	1.18	0.81
Germany	1990~2000	1.05	0.94	0.89	0.99	1.10	0.90	0.87	1.05	0.83
Germany	2000~2010	1.08	1.01	1.02	0.93	1.03	0.94	1.00	1.08	0.93
Italy	1980~1990	1.16	1.14	1.00	1.01	1.02	0.98	1.34	1.17	1.15
Italy	1990~2000	1.27	0.97	0.98	0.96	0.95	1.05	1.14	1.28	0.89
Italy	2000~2010	1.07	0.97	1.03	0.99	0.98	1.03	1.08	1.08	1.00
Japan	1980~1990	1.45	0.93	0.94	1.01	1.06	0.94	1.28	1.46	0.87
Japan	1990~2000	1.25	0.93	0.96	1.04	1.04	0.97	1.17	1.26	0.93

Japan	2000~2010	1.06	1.09	0.95	1.02	1.05	0.95	1.11	1.06	1.05
Korea	1980~1990	2.33	0.58	1.12	1.19	0.93	1.08	1.82	2.83	0.64
Korea	1990~2000	2.67	1.37	0.87	1.09	1.22	0.82	3.46	2.75	1.26
Korea	2000~2010	1.71	1.10	0.97	1.01	0.98	1.02	1.83	1.72	1.06
Mexico	1980~1990	1.66	0.99	0.98	1.08	0.97	1.03	1.75	1.73	1.01
Mexico	1990~2000	1.75	1.05	0.97	0.98	1.03	0.97	1.76	1.76	1.00
Mexico	2000~2010	1.29	1.06	0.82	0.98	1.12	0.89	1.10	1.31	0.84
Netherlands	1980~1990	1.10	1.01	1.00	1.10	1.01	1.03	1.27	1.11	1.14
Netherlands	1990~2000	1.24	1.00	0.99	0.98	1.03	0.94	1.16	1.25	0.93
Netherlands	2000~2010	1.32	0.99	0.95	0.99	1.05	0.88	1.12	1.32	0.85
Norway	1980~1990	1.12	4.3E+05	0.00	2.72	1.05	1.21	4.87	1.45	3.36
Norway	1990~2000	1.14	2.04	0.62	0.96	0.99	0.87	1.18	1.15	1.02
Norway	2000~2010	0.90	9.37	0.72	0.95	0.94	1.40	7.56	0.89	8.50
Poland	1980~1990	1.12	1.00	0.88	1.01	1.04	0.97	1.00	1.12	0.90
Poland	1990~2000	1.07	1.00	0.77	1.00	1.29	0.77	0.82	1.07	0.77
Poland	2000~2010	1.08	1.00	0.97	0.96	1.04	0.96	1.00	1.08	0.92
Spain	1980~1990	1.35	0.71	0.98	1.11	1.03	0.99	1.07	1.37	0.78
Spain	1990~2000	1.47	1.19	0.85	0.97	1.05	0.95	1.44	1.48	0.97
Spain	2000~2010	1.30	0.87	0.85	0.80	0.87	1.14	0.76	1.35	0.56
Sweden	1980~1990	1.37	0.40	1.09	1.07	1.04	0.94	0.61	1.51	0.40
Sweden	1990~2000	0.99	1.68	1.25	0.88	1.25	0.69	1.58	0.99	1.59
Sweden	2000~2010	1.02	2.44	0.84	0.98	1.11	0.80	1.81	1.02	1.77
Turkey	1980~1990	2.13	1.14	0.95	1.17	0.95	1.08	2.75	2.47	1.11
Turkey	1990~2000	2.15	1.27	0.87	0.96	1.07	0.93	2.28	2.17	1.05
Turkey	2000~2010	1.66	0.98	0.97	0.97	0.98	1.02	1.53	1.69	0.91
US	1980~1990	1.32	0.92	0.99	0.96	1.04	0.96	1.16	1.33	0.88
US	1990~2000	1.25	1.01	0.97	1.03	1.00	1.00	1.28	1.26	1.02
US	2000~2010	1.07	0.99	0.94	0.98	1.05	0.95	0.97	1.08	0.90
UK	1980~1990	1.12	0.91	0.95	1.00	1.05	0.95	0.96	1.12	0.86
UK	1990~2000	1.16	0.98	0.89	0.87	1.06	0.95	0.88	1.18	0.74
UK	2000~2010	1.01	1.06	0.95	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99

Abstract

World energy consumption is steadily increasing and electricity production for meeting the energy demand is increasing. Especially, world's carbon dioxide emission reached the peak of all time in 2009. Carbon dioxide share from the generation sector is approaching 39% based on 2010 emissions.

Since Kyoto Protocol, these results mean the world did not reduce the carbon emission so much in spite of all countries had a lot of effort in the reduction of the carbon emission. Therefore, this paper is to find the factor of carbon dioxide emission in the generation sector of the OECD 20 countries over the past 30 years and will decompose it by using Log Mean Divisia Index (LMDI). LMDI is log decomposition Methodology and logical Methodology widely used to analyze the energy consumption and carbon dioxide emissions. In this paper, Greenhouse gas emissions factors are decomposed into production effect, structural effect, thermal power generation efficiency effect, fuel efficiency effect, carbon emission factor effect, and fuel mix effect.

As a result, Korea reduced carbon dioxide emissions in production effects and thermal power generation efficiency effect but increased those in fuel efficiency effect, fuel mix effect and carbon emission factor

effect. Major cause revealed that electricity production has increased in priority of coal-fired power plant from the past rather than low-carbon fuels like oil and natural gas. France and Belgium which execute well in carbon reduction has increased the nuclear power generation share and decreased the thermal power generation share. Also as increasing the natural gas-relative low carbon fuel use, the fuel mix effects affects on Australia and Czech Republic's carbon emission reduction.

Countries have different factor affected carbon dioxide and additionally this paper will find the independent variable about carbon dioxide emission by linear regression analysis for irrelevant countries. Based on the results, our study can confirm again that thermal power generation effects on carbon dioxide, world government need to control the share, efficiency, fuel switching and fuel efficiency in thermal power generation for executing the Climatic Change Convention. After now government can perceive the element for setting the guideline in national energy policy and will make the effective policy for green growth.

Keywords: Log Mean Divisia Index, OECD countries, decomposition, production effect, thermal power efficiency, fuel mix, carbon emission factor.

Student Number: 2011-21141

감사의 글

학부시절 전공인 전자공학을 뒤로 한 채, 큰 꿈을 품고 온 서울대학교 기술경영경제정책 과정에서의 2 년간 생활은 지금까지 살아오면서 경험한 것 중 가장 값진 경험이었습니다. 경제학과 경영학을 공부할 수 있다는 막연한 생각으로 오게 된 대학원에서 한 명의 연구자게 되어 졸업할 수 있게 된 것은 함께 공부했던 동기들과 훌륭한 선배, 후배님들 덕분이었습니다.

훌륭한 동기들과 공부를 하면서, 평생의 스승들을 만날 수 있었다는 사실은 지난 2 년간의 과정생활에서 가장 큰 행운이었습니다. 무엇보다도 저에게 항상 냉철하시며, 따끔한 질타와 조언, 세심한 가르침을 주신 이종수 지도교수님께 정말 감사를 드립니다. 그 동안 혼자만 공부를 해왔기 때문에 너무나 많은 것이 부족했던 저에게 학문적 깊이에서부터 세심한 인생관, 삶의 자세를 가르쳐 주셨습니다. 많이 지적당하고 혼났던 일들로 인해, 지금도 부족한 점이 많지만 항상 머리로 인지하고 개선하려고 노력을 하고 있습니다. 또한 올바른 가치관과 연구자의 자세에 대해서 진심으로 가르쳐주시고 솔선 수범으로 행동을 보여주시는 김태유 교수님께도 감사 드립니다. 국가발전을 위한 교수님의 노력하시는 모습을 보면서, 저 또한 기술정책과정에서 정책연구를 하면서 국가를 위해 더욱 노력해야겠다는 생각을 하였습니다.

저는 인복도 많았습니다. 함께 이종수 연구팀에서 생활하면서, 만나게 된 선배님들께 감사의 말을 전합니다. 학교생활과 프로젝트 일에 힘이 들 때면 공부 뿐만 아니라 생활에 있어서 조언을 자주 해준 신정우박사님께 먼저 감사를 드립니다. 제가 먼저 다가가지 않았지만, 틈틈이 자상하게 대해주시고 제 논문을 도와주시느라 고생하신 구윤모 박사님께도 진심으로

감사 드립니다. 힘이 들 때면 밥을 사주시면서, 인생을 가르쳐 주신 조희천 선배님께도 감사 드립니다. 또한 같이 세미나 준비를 하면서, 날을 새며 같이 고생했던 동기인 곽동환형, 이범준에게도 감사 드립니다. 이 중에서도 저의 석사논문을 처음부터 담당하여, 지도와 조언을 아끼지 않으신 조영상 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 지도학생이 아니었음에도 불구하고, 학교에 직접 찾아오셔서 가르쳐주신 은혜를 항상 마음에 새겨두겠습니다.

끝으로 어릴 적부터 대학원 시절까지 항상 저를 돌봐주시며 지지해 주신 우리 가족에게 감사합니다. 전공을 바꾸면서, 진학한 기술경영경제정책 과정의 선택을 지지해주시고, 밥을 굶지 않도록 스스로 돈을 벌 나이의 아들을 지원해 주신 아버지와 어머니께 감사 드리고 사랑합니다. 힘들 때마다 직접 전화를 자주 주셔서, 마음을 다시 잡을 수 있었습니다. 비슷한 분야에서 공부를 하며 대화를 자주한 형에게도 감사합니다. 마지막으로 대학원에 입학하면서부터 외로웠던 서울생활에 큰 힘이 되 준 여자친구에게도 정말 감사합니다. 연구가 힘들고, 삶이 건조할 때마다 대화의 상대가 되어주고, 기분전환을 할 수 있어 다시 마음을 잡고 학교 생활에 충실할 수 있었습니다.

저는 지난 2 년간의 석사생활을 마치고, 이제 사회에 발걸음을 떼었습니다. 훌륭한 연구실에서 배운 에너지정책 및 통계 방법론은 앞으로 제가 전문연구원으로 시작할 에코시안에서부터 제 인생을 설계해가는 데 많은 도움이 될 것입니다. 훌륭한 동기, 선후배, 스승님들에게 배운 많은 것들을 발판 삼아, 항상 정진해 나가는 사람이 되고자 노력하겠습니다. 응원해주시고, 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사합니다.