

비선형 공적분모형을 이용한 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정[†]

이성로* · 김효선**

요약 : 본 논문은 이산화탄소 배출량과 소득과의 비선형적인 관계를 시간변동계수를 갖는 공적분모형으로 추정하였다. 특히 이산화탄소배출량의 소득효과를 시간에 따라 서서히 변하는 것으로 모형화하였고, 이를 비모수적 방법을 이용하여 추정하였다. 추정결과 선진국의 경우 소득탄력성이 시간에 대해 감소하는 것으로 추정된 반면에 개발도상국의 소득탄력성은 시간에 따라 점차 증가하는 것으로 추정되었다. 이 같은 결과는 경제 발전단계에 따라 소득이 이산화탄소 배출량에 미치는 영향이 다르다는 환경쿠즈네츠곡선에서 의미하는 것과 일치하는 결과이고, 또한 기후변화협약과 교토의정서 상에서 의무준수 대상국(Annex I)과 Non-Annex I 국가 구분이 필요하다는 것을 반증한다. 이러한 차이는 선진국에 비하여 개도국의 경우 소득에 따른 이산화탄소 배출이 상대적으로 더욱 가속화될 수 있음을 의미하며, 이는 기후변화협약 상에서 개도국에 대한 기술이전 및 재정지원이 지속적으로 필요하다는 것에 대한 근거로 활용될 수 있다.

주제어 : 이산화탄소 배출량, 시간변동계수 공적분모형, 환경 쿠즈네츠곡선

JEL 분류 : C51, O44, Q54

접수일(2014년 8월 4일), 게재확정일(2014년 8월 26일)

[†] 본 논문 작성과정에서 유익한 논평을 해주신 경희대학교 오형나 교수님과 논문에 대한 세밀한 검토 및 수정에 도움주신 심사위원께 감사드립니다.

* 한국가스공사 경영연구소 선임연구원, 제1저자(e-mail: sungro@kogas.or.kr)

** 한국가스공사 경영연구소 책임연구원, 교신저자(e-mail: hyosun@kogas.or.kr)

Time-Varying Income Elasticity of CO₂ emission Using Non-Linear Cointegration

Sungro Lee* and Hyo-Sun Kim**

ABSTRACT : This paper intends to test the non-linear relationship between CO₂ emissions and income by employing cointegration model of the time-varying income elasticity. We select France, UK, Italy, Japan, US, China, India, Mexico and Korea and use non-parametric time series analysis on each country in order to estimate its own effect of income on CO₂ emission. The main results indicate that the CO₂ emission-income elasticities vary over time and the income elasticities of the Annex I countries tend to be higher in absolute terms than those of developing countries. In addition, we find that emission-income elasticities decrease for Annex I countries over time, whereas those for developing countries increase.

Keywords : CO₂ emission, Cointegrating model with time-varying coefficient, Environmental Kuznets curve

Received: August 4, 2014. Accepted: August 26, 2014.

* Senior Researcher, Center for Gas and Economics & Management, Korea Gas Corporation(e-mail: sungro@kogas.or.kr)

** Principal Researcher, Center for Gas and Economics & Management, Korea Gas Corporation(e-mail: hyosun@kogas.or.kr)

I. 서론

우리나라는 기후변화협약 및 교토의정서 상에는 개도국의 입장에 놓여있지만, OECD 회원국으로서 의무감축의 압력을 지속적으로 받고 있다. 이에 정부는 자발적 감축목표를 수립하고, 이를 이행하기 위한 정책패키지를 내놓고 있다. 가장 획기적인 정책전환은 2015년 시행을 목표로 한 배출권거래제 도입이다. 배출권거래는 총량규제를 근간으로 함에 따라 양적인 감축이행이 따라줘야 한다. 즉, 배출량에 대한 장기전망과 이행수단에 따른 저감비용 정보가 필수적이다.

국내 온실가스 배출량은 2011년 총배출량 기준, 94.8%가 에너지 및 산업공정이 차지하고 있으며, 그 추세를 보더라도 에너지부문과 산업공정 부문의 증가율이 평균 증가율을 상회한다¹⁾. 즉, 1990년 대비 2011년 에너지부문과 산업공정의 온실가스 배출량은 각각 148.1%와 213.5%로 동기간의 총배출 증가율인 136.0%와 큰 차이를 보이고 있다. 다만, 경기위축으로 전년대비 2011년 배출증가율이 산업공정부문에서 평균이하로 실적이 저조하나, 제조업과 건설업의 연료연소로 인한 온실가스 배출은 2010년 대비 2011년 증가율이 13.3%로 가장 높은 수준이다. 게다가 정부는 국내 온실가스 감축목표를 경제성장을 고려한 BAU 대비 30%로 설정하고 업종별 감축상한을 상이하게 제한하고 있어 이산화탄소 배출량에 대한 장기전망이 정교하지 않을 경우 산업부문의 대외경쟁력 약화는 물론, 부문 간 형평성이 심하게 왜곡될 우려가 있다.

이에 본 연구는 이산화탄소 배출량의 장기전망에 앞서, 배출량과 소득과의 관계를 모형화하려는 의도에서 출발하였다. 구체적으로 소득 변수에 대한 계수를 시간에 따라 변화도록 설정하여, 이산화탄소 배출량과 소득과의 비선형관계를 모형화하였다. 기존의 환경 쿠즈네츠곡선에 대한 연구에서 많은 경우에 배출량을 소득에 대한 2차 다항식 형태의 모수적인 방법을 사용하였다. Wagner(2008)는 이 같은 모형 설정에 대해 비정상 시계열의 비선형 변환된 변수를 사용하는 경우에는 기존의 통계적 방법을 그대로 사용할 수 없어 허구적인 회귀가 발생할 수 있음을 지적하였다.

1) 온실가스종합정보센터의 「국가온실가스 인벤토리보고서」(2013)를 참조하였음.

이 같은 문제점을 극복하기 위해 본 연구는 이산화탄소 배출량과 소득과의 비선형 관계를 비모수적인 추정하였고, 특히 소득변수의 계수를 시간에 대해 변하는 것으로 설정하여 비선형적인 관계를 모형화하였다.

비모수적 방법론을 사용한 것이 본 연구가 처음은 아니며, 이며 여러 연구(Bertinelli and Strobl, 2005; Millimet et al., 2003; Schmalensee et al, 1998)에서 비모수 및 반모수 방법론을 적용하였다. 이들 연구와 본 연구와는 몇 가지 차이점이 있다. 첫째는 상기 연구들이 모두 패널모형을 고려한 반면, 본 연구는 단일 국가 시계열 자료를 이용했다는 점이다. 두 번째는 상기 연구들은 소득에 대한 비선형함수를 직접 추정하였지만, 본 연구에서는 소득변수의 계수를 변동계수로 모형화함으로써 소득의 비선형 효과를 고려하였다는 것이다. 이 같은 차이점은 비정상 시계열 자료를 기반으로 한 공적분 방정식에 대한 커널추정법에 대한 이론적 연구가 최근에서야 개발되기 시작했기 때문이다(Wang and Phillips, 2009 참고). 따라서 본 연구는 단일 국가 시계열모형을 이용할 때 이러한 한계점을 극복하기 위해 Park and Hahn(1999)이 제시한 시간변동계수를 갖는 공적분모형을 이용하였다.

공적분모형에서 계수가 시간에 따라 변한다는 것은 장기균형관계를 모형화하는 공적분모형의 특성을 반영한 것이다. 일반적으로 공적분모형은 10년 혹은 20년 이상의 긴 기간의 자료를 사용하여 변수의 관계를 모형화하는, 해당 기간 동안 변수들 간의 관계를 고정된 상수라고 보기보다는 시간에 대해 서서히 변한다고 보는 것이 자연스럽다.

이 같은 내용을 본 연구에서 고려하는 이산화탄소 배출량과 소득과의 관계에서 살펴보면 이산화탄소의 소득 효과가 시간에 따라 변한다는 설정하는 것이다. 이는 이미 환경 쿠즈네츠곡선이 내포하는 내용이다. 환경 쿠즈네츠곡선에 따르면 오염물질 배출량은 소득이 일정수준이 될 때 까지는 소득수준 상승에 따라 증가하지만, 소득이 그 수준을 넘어서면 이산화탄소 배출량이 다시 감소한다는 것이다. 즉, 소득수준 혹은 경제발전 단계에 따라 이산화탄소 배출량의 소득에 대한 효과가 다르게 나타난다는 것을 의미한다.

이 같은 시간변동 소득탄력성은 에너지 수요예측모형에서는 많이 알려진 사실이다. Galli(1998), Medlock and Soligo(2001)은 소득탄력성의 시간에 대한 가변성의

실증적 증거로 부가가치당 에너지 사용량으로 정의되는 에너지 원단위의 소득에 대한 역 U자 형태의 패턴을 제시하였다. 그 외 Chang and Hsing(1991), Dargay(1992), Hass and Schipper(1998)에서도 유사한 결과를 보여주고 있고, Chang and Martinez-Chombo(2003)와 Park and Zhao(2010)는 소득탄력성을 시간에 대해 가변적으로 설정하는 것이 모형의 예측력을 향상시키는 결과를 제시하였다. 국내연구로는 박준용 외(2011)과 김인무 외(2011)는 전력 및 천연가스수요의 예측모형에 시간변동 소득탄력성을 사용하여 모형 분석 및 예측력 향상을 보고하였다. 이산화탄소 배출량이 에너지 소비에서 대부분 발생한다는 점을 고려하면 이산화탄소 배출량의 시간변동 소득탄력성은 자연스러운 설정으로 판단된다.

또한 앞서도 밝혔듯이 본 연구는 시계열 자료를 이용하여 분석을 진행하였지만, 기존 문헌에서는 연구의 목적에 따라 패널자료를 이용한 경우도 많았다. 패널자료를 이용한 연구는 Holtz-Eakin and Selden(1995)와 Liao and Cao(2013)이 대표적이다. Holtz-Eakin and Selden(1995)의 연구결과는 2025년까지의 CO₂ 배출이 연간 1.8%의 증가율을 보일 것이라는 전망을 포함하고 있다. Holtz-Eakin and Selden(1995)와 Liao and Cao(2013)는 대상범위를 달리하면서 쿠즈네츠 곡선의 일인당 소득 turning point를 각각 \$35,428와 \$22,000로 제시하고 있다. Liao and Cao(2013)는 특히, 모형에 포함시킨 소득 외의 설명변수(인구밀도, 교역, 에너지믹스, 경제 환경)가 절대적인 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 반면, 소득탄력성의 구조를 변화시키지 않는다고 주장하였다. Bertinelli and Strobl(2005)은 Millimet et al.(2003)이 미국에 대하여 semi-parametric 방식을 환경 쿠즈네츠에 적용한 연구를 122개국 패널로 확장시켰다.

이러한 패널분석은 다양한 국가정보를 이용하여 이산화탄소와 소득 간의 관계를 일반화한다는 점에서 편의성을 제공하나, 특정국가에만 유의한 소득 이외 변수가 포함될 경우 소득자체의 설명력이 저하되거나 모형자체의 robustness가 약화되는 문제를 초래한다. 또한 패널분석은 공통된 변수를 포함하는 샘플구간이 상대적으로 짧아지는 단점이 있어 통계분석에 제약이 따른다.

이러한 패널분석의 단점을 보완하기 위하여 개별국가 시계열자료를 이용한 연구는 Fosten et al(2012), Verbeke and De Clercq(2006), Iwata et al(2010), Baek and

Kim(2013) 등과 같이 다양하다. Fosten et al(2012)는 공적분과 오차수정모형을 이용하여, 영국의 경우 CO₂와 SO₂ 배출량과 소득관계가 역 U자형으로 나타나고 쿠즈네츠곡선은 장기균형 의 조정과정에서 비대칭성(asymmetric adjustment)이 나타남을 설명하였다. 여기서 비대칭적 조정에 부분적으로 기여하는 요인으로 기술변화(technical change)를 꼽고 있는데, 이러한 연구결과는 Copeland and Taylor(1995)의 연구와 일치한다. Copeland and Taylor(1995)는 1인당 국민소득이 1만 달러 수준에서는 기술효과가 규모효과를 압도하여 소득이 증가해도 환경오염을 줄일 수 있음을 설명하였다. 본 연구도 이 같은 이유로 시계열자료를 이용하여 국가별 배출량과 소득과의 관계를 추정하였다.

상기 서술한 모형을 통해 선진국 5개국인 영국, 프랑스, 이태리, 일본, 미국과 한국, 중국, 인도, 멕시코의 주요 개발도상국에 대해서 이산화탄소의 배출량의 소득탄력성을 추정하였다. 추정결과 두 그룹 간의 뚜렷한 차이를 발견하였다. 선진국의 경우는 소득탄력성이 시간에 대해서 감소하는 경향을 보이는 반면, 개발도상국은 반대로 시간에 따라 상승하는 것으로 추정되었다. 이 같은 경향의 차이는 경제발전 단계에 따른 소득탄력성이 다를 것이라는 환경 쿠즈네츠곡선과 일맥상통하는 결과이다. 여기서 본 연구의 목적은 이산화탄소 배출량과 소득과의 관계를 정교하게 추정하여 향후 이산화탄소 배출량 전망에 대한 사전적인 분석에 있다. 환경 쿠즈네츠곡선의 존재 여부를 검증하는 것이 목적이 아니라는 것을 밝혀둔다.

이후 논문은 II장에서 이산화탄소 배출량의 소득효과 추정을 위한 비선형 공적분모형을 정의하고 이에 대한 추정방법을 상세히 살펴볼 것이다. 특히 소득탄력성 추정에 대한 이론을 중점적으로 다룰 것이다. 구체적인 실증분석 결과는 III장에 나타냈고, IV장에서 결론을 도출한다.

II. 모형

1. 비선형 공적분모형

본 논문에서는 일인당 이산화탄소 배출량과 소득과의 관계를 추정하기 위한 다음의 비선형 공적분모형을 고려하였다.

$$c_t = \alpha + \beta_t y_t + \gamma X_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

여기서 c_t , y_t 는 각각 1인당 이산화탄소 배출량과 1인당 GDP를 나타내고, X_t 는 소득이외에 이산화탄소 배출량에 영향을 주는 변수 벡터를 나타낸다. 이산화탄소 배출량과 소득 변수는 로그를 취하여 사용하였기 때문에 β_t 와 이산화탄소 배출량의 소득탄력성으로 해석된다. 본 연구는 이산화탄소 배출량의 소득탄력성을 Park and Hahn(1999)이 제시한 방법을 사용하여

$$\beta_t = \beta\left(\frac{t}{n}\right) \quad (2)$$

와 같이 시간에 따라 서서히 변하는 부드러운 함수로 설정하였다. 여기서 n 는 표본 개수를 의미한다. Park and Hahn(1999)이 제시한 방법은 직관적으로 살펴보면, 식 (2)의 시간변동계수를 다음과 같은 푸리에 플렉서블 폼(Fourier flexible form)을 이용하여 근사시키는 것이다.

$$\beta_k(r) = \theta_{k,0} + \theta_{k,1}r + \theta_{k,2}r^2 + \sum_{i=1}^k (\theta_{k,2i+1}, \theta_{k,2(i+1)})\pi_i(r) \quad (3)$$

여기서 $r \in [0,1]$, $\pi_i(r) = (\cos 2\pi ir, \sin 2\pi ir)'$, $\theta_{k,j} \in R$, $j = 0,1,\dots,2(k+1)$ 이다. Park and Hahn(1999)은 식 (3)에서 표본 개수에 따라 k 를 충분히 증가시키면 β 에 대한 일치추정량을 얻을 수 있음을 보였다.²⁾ 또한 $\theta_k = (\theta_{k,0}, \theta_{k,1}, \dots, \theta_{k,2(k+1)})'$, $f_k(r) = (1, r, r^2, \pi_1(r)', \dots, \pi_k(r)')$ 로 정의하면, 식 (3)은

$$\beta_k(r) = f_k(r)' \theta_k \quad (4)$$

과 같이 나타낼 수 있고, 따라서 식 (1)을 다음과 같이 변환할 수 있다.

2) Park and Hahn (1999, Lemma 2) 참고.

$$c_t = \alpha + y_{kt}\theta_k + \gamma X_t + \varepsilon_{kt} \quad (5)$$

여기서 $y_{kt} = f_k\left(\frac{t}{n}\right)' y_t$ 이고 소득탄력성은 $\hat{\beta}_k\left(\frac{t}{n}\right) = f_k\left(\frac{t}{n}\right)' \hat{\theta}_k$ 을 통하여 추정하게 된다.

식 (5)에 대한 OLS 추정은 y_{kt} 의 내생성으로 인해 점근적으로 비효율적인 추정치를 만들고 극한분포도 정규분포를 따르지 않아 t -test 혹은 F -test와 같은 표준적인 검정을 사용할 수 없게 된다.

이에 본 연구는 Park and Hahn(1999)과 마찬가지로 Park(1992)이 제시한 정준공적분회귀(Canonical Cointegrating Regression) 모형을 사용하였다. 식 (5)에 대한 정준공적분회귀모형은 변환된 변수에 기반을 둔 회귀모형에 대한 최소제곱추정(OLS)을 통해 이루어진다³⁾. 변환된 회귀모형에 대한 OLS 추정량은 소득탄력성을 푸리에 플렉서블 폼으로 근사함으로써 발생한 내생성과 오차항의 계열 상관 문제를 효과적으로 다룰 수 있고, 또한 최우추정량과 점근적으로 동일한 극한분포를 갖는다는 점에서 효율적인 추정량으로 알려져 있다.

III. 실증 분석

1. 자료

이산화탄소 배출량자료가 연단위로 집계되므로, 기본적으로 연별 자료를 이용하였다. 이산화탄소 배출량, 인구, 신재생 및 원자력 에너지비중, 산업비중은 World Development Indicator⁴⁾ 자료를 이용하였다. GDP는 Penn world table⁵⁾에서 제공하는 2005년 미 달러 기준의 실질 GDP를 사용하였다. 이산화탄소 배출량과 GDP는 인구를 이용하여 일인당 변수로 변화하여 사용하였다⁶⁾. 자료 기간은 기본적으로

3) 정준공적분모형을 통한 추정과정은 Park and Hahn(1999) 4장 참고.

4) <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>

5) <https://pwt.sas.upenn.edu>

6) 논의의 편의를 위해 이후 분석과정에서는 일인당 이산화탄소 배출량과 일인당 GDP를 이산화탄소 배

1960년에서 2010년이지만 신재생 및 원자력 에너지비중과 산업비중은 국가별로 자료 기간이 상이하어 이에 따라 모형을 추정하였다. 또한 국가별 차이를 보기 위해 선진국과 개발도상국을 함께 고려하였다. 구체적으로 선진국 국가는 미국, 영국, 프랑스, 이태리, 일본을 고려하였고, 개발도상국으로는 한국, 멕시코, 중국, 인도를 고려하였다.

연도별 이산화탄소 배출량 추이를 <표 1>에 나타내었다. 2010년을 기준으로 보면 미국의 이산화탄소 배출량이 17.6톤으로 가장 큰 것을 알 수 있다. 영국이나 프랑스 등 다른 선진국과 비교하여도 두 배 이상 큰 수치를 보이고 있다. 개발도상국에서는 한국이 11.5톤으로 가장 높은 수준을 나타내고, 인도와 멕시코가 가장 낮은 수준의 이산화탄소 배출량을 보이고 있다. 1960년 이후의 증가율을 살펴보면, 선진국의 경우 1960~1970년에는 모든 국가에서 이산화탄소 배출량이 증가하였다. 특히 일본과 이태리의 경우는 1.5배에서 약 2배로 크게 증가하였다. 하지만 이후 70년에서 80년 사이에는 미국과 영국의 이산화탄소 배출량이 감소하였고, 이후 80년대는 프랑스도 감소추세로 돌아섰고, 2000년 이후에는 고려하는 모든 선진국의 이산화탄소 배출량이 감소하는 모습을 보인다.

이에 반해 개발도상국의 경우는 최근까지도 대체로 증가하고 있다. 한국의 경우는 60년에서 70년 사이에 무려 2.3배가 증가하였고, 이후에도 두 자릿수의 높은 증가추세를 유지하고 있다. 중국의 경우도 70년까지 감소추세를 보였지만, 70년 이후에는 두 자릿수 증가율을 보였고, 2000년에서 2010년 사이에는 약 130%의 높은 증가율을 기록했다. 인도의 경우는 60년 이래로 꾸준히 30-40% 수준의 증가추세를 유지하고 있다. 개발도상국 중에서 멕시코의 경우는 다른 나라와 다소 상이한 증가패턴을 보인다. 1980년에서 1990년 사이에 이산화탄소 배출량이 4.3% 감소하였고 이후에도 증가추세가 거의 없는 것으로 나타났다.

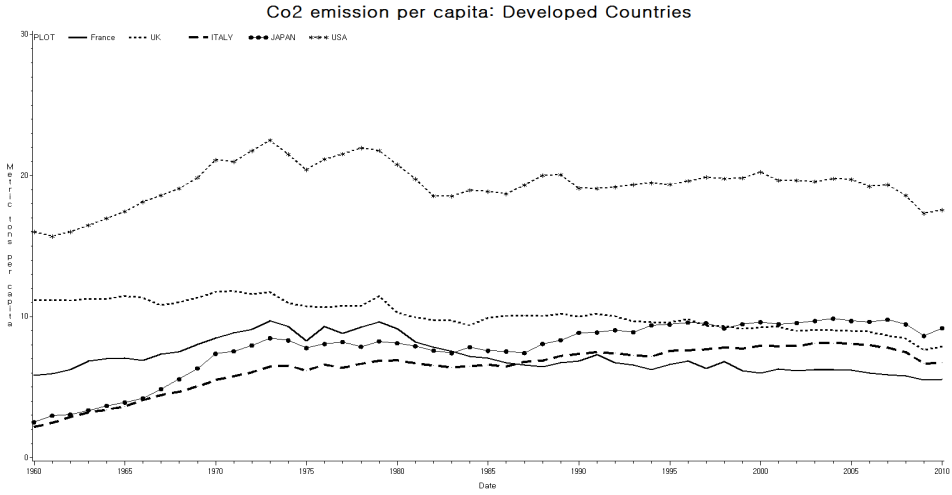
출량과 GDP로 사용하겠다.

〈표 1〉 이산화탄소 배출량 추이

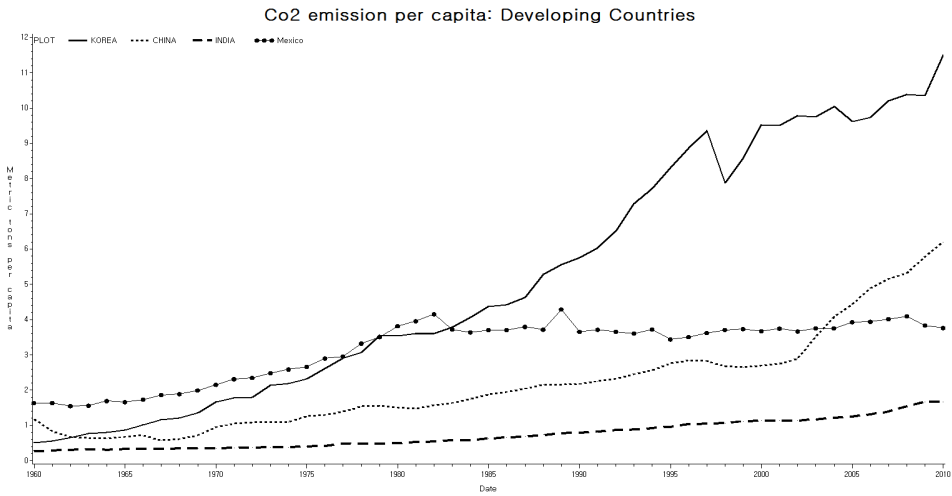
| 국가/연도 | 1인당 이산화탄소 배출량 (Metric tons per capita) | | | | | | 증가율(%) | | | | |
|-------|---|------|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 60'-70' | 70'-80' | 80'-90' | 90'-00' | 00'-10' |
| 미국 | 16.0 | 21.1 | 20.8 | 19.1 | 20.2 | 17.6 | 31.9 | -1.6 | -8.1 | 6.0 | -13.3 |
| 프랑스 | 5.8 | 8.5 | 9.2 | 6.8 | 6.0 | 5.6 | 45.5 | 8.2 | -25.3 | -12.2 | -7.4 |
| 영국 | 11.2 | 11.7 | 10.3 | 10.0 | 9.2 | 7.9 | 5.2 | -12.3 | -3.0 | -7.5 | -14.8 |
| 이태리 | 2.2 | 5.5 | 6.9 | 7.4 | 7.9 | 6.7 | 153.1 | 25.0 | 6.8 | 7.7 | -15.3 |
| 일본 | 2.5 | 7.4 | 8.1 | 8.9 | 9.6 | 9.2 | 192.8 | 10.1 | 9.2 | 8.5 | -4.4 |
| 한국 | 0.5 | 1.7 | 3.5 | 5.8 | 9.5 | 11.5 | 232.4 | 112.1 | 62.8 | 65.3 | 20.6 |
| 멕시코 | 1.6 | 2.2 | 3.8 | 3.7 | 3.7 | 3.8 | 31.9 | 77.2 | -4.3 | 0.6 | 2.5 |
| 중국 | 1.2 | 0.9 | 1.5 | 2.2 | 2.7 | 6.2 | -19.4 | 58.6 | 45.0 | 24.4 | 129.7 |
| 인도 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.1 | 1.7 | 31.1 | 41.9 | 59.4 | 43.3 | 46.3 |

아래 <그림 1>과 <그림 2>는 이산화탄소 배출량의 증가 추세를 선진국과 개발도상국의 경우를 나누어 나타낸 것이다. 먼저 선진국의 경우를 보면, 미국의 배출량은 1970년을 기점으로 증가추세가 사라진 것으로 나타났다. 1차 오일쇼크 이후에 원유 사용량 감소로 인한 결과로 판단된다. 영국을 제외한 다른 국가들도 모두 1970년 이후에 이산화탄소 배출량이 점차 감소하거나 일정한 수준을 유지하는 모습을 보인다. 영국의 경우에는 70년도 이전에도 증가추세가 크지 않았고, 이후에도 서서히 감소하는 모습을 보인다. <그림 2>에 나타낸 개발도상국의 경우는 선진국과 반대로 이산화탄소 배출량이 증가 추세를 보인다. 한국이 가장 빠르게 성장하는 모습을 보이고 있고, 2000년 이후 중국의 급격한 증가 추세가 두드러진 현상이다.

〈그림 1〉 선진국의 1인당 이산화탄소 배출량 추이



〈그림 2〉 개발도상국의 1인당 이산화탄소 배출량 추이

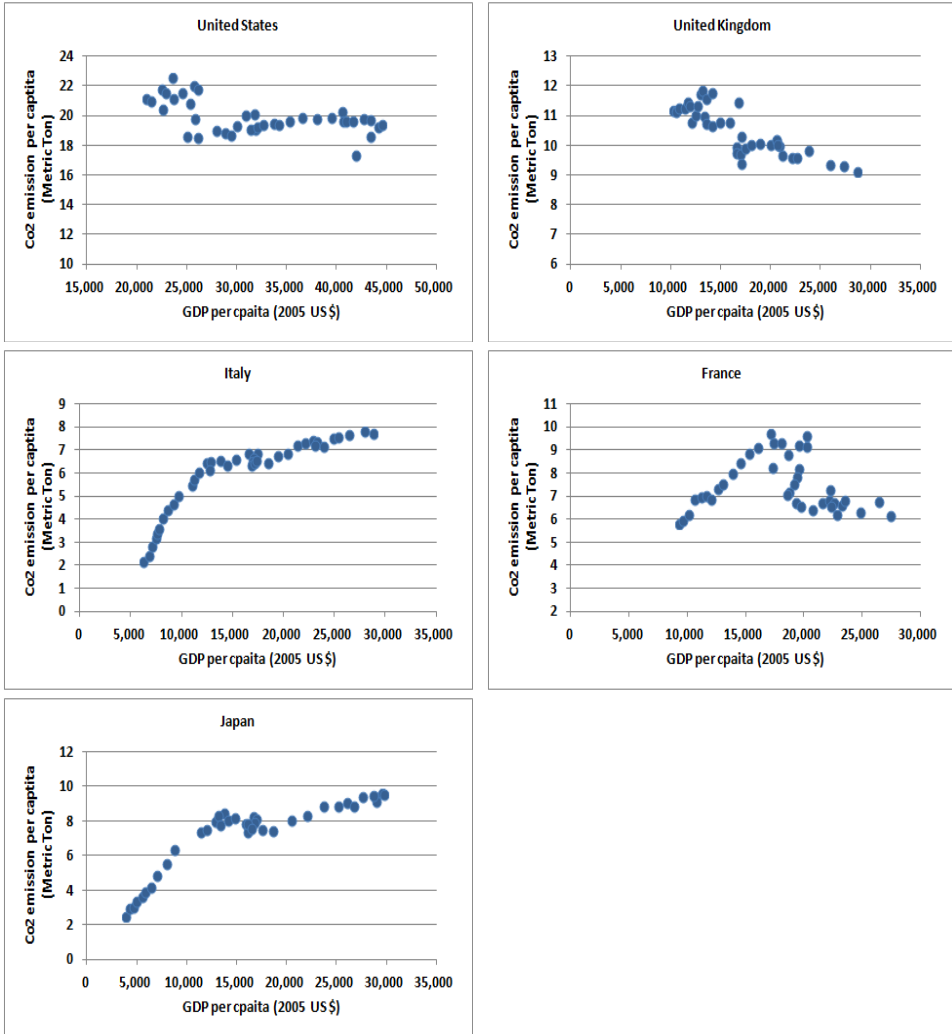


<그림 3>과 <그림 4>는 이산화탄소 배출량과 소득의 산포도를 선진국과 개발도상국을 구분하여 나타낸 것이다. 일반적으로 환경 쿠즈네츠곡선에 따르면 경제 발전 초기에는 소득 상승에 따라 이산화탄소 배출량이 증가하지만, 소득이 일정 수준을 넘어서면 다시 감소하는 역 U자 패턴을 보인다고 한다. 먼저 선진국을 살펴보면, 미국은 전반적으로 소득에 대해 비탄력적인 움직임을 보인다. 소득이 증가함에도 불구하고 이산화탄소 배출량은 정체되어 있거나 다소 감소하였다. 영국은 이산화탄소 배출량과 소득이 음의 관계를 갖는 것을 볼 수 있다. 프랑스는 1인당 소득이 대략 \$20,000 넘어서는 경우에는 이산화탄소 배출량이 다시 감소하는 모습을 보인다. 이태리와 일본도 프랑스와 유사하게 1인당 소득이 약 \$15,000에서 증가하던 배출량이 감소하였으나, 이후 다시 소득에 따라 증가하는 패턴을 보이고 있다. 이상의 결과를 요약하면 미국, 영국, 프랑스는 소득증가에 대해서 이산화탄소 배출량이 정체되어 있거나 감소하는 패턴을 보이는 반면, 이태리와 일본은 일시적으로 배출량이 감소하여 증가 추세는 감소하였지만 여전히 소득에 따라 증가하는 모습을 보인다.

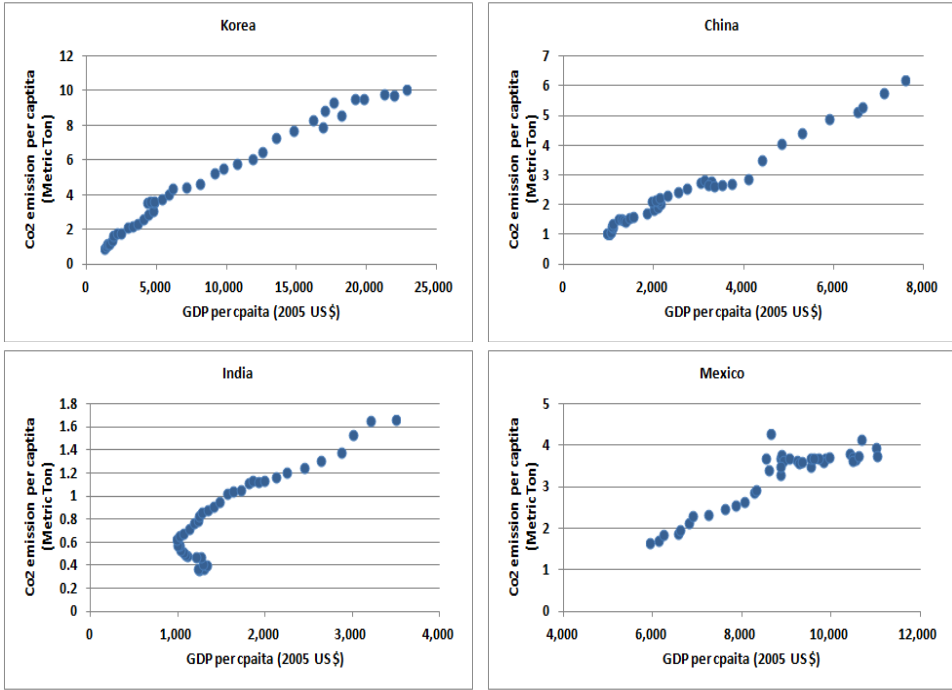
<그림 4>의 개발도상국의 이산화탄소와 소득과의 관계를 보면, 선진국의 경우와 많은 차이를 보이고 있다. 멕시코는 1인당 소득 \$9,000 이상인 경우에 이산화탄소 배출량이 정체되었지만 대체로 모든 국가에서 전반적으로 소득 증가에 따라 이산화탄소 배출량도 함께 증가하고 있다. 한국의 이산화탄소 배출량은 1인당 소득이 \$20,000이후에 증가 추세가 다소 감소하였지만, 여전히 증가하고 있다. 중국과 인도의 경우에는 지속적으로 소득에 따른 가파른 증가추세를 유지하고 있다.

이상의 결과를 정리하면 선진국과 개발도상국의 이산화탄소 배출량과 소득의 관계는 환경쿠즈네츠곡선에서 의미하는 바와 대체로 일치하는 것을 알 수 있었다. 대체로 1인당 소득이 \$20,000 넘어가면 이산화탄소 배출량이 감소하거나 증가추세가 감소하는 것을 알 수 있었다.

〈그림 3〉 선진국의 이산화탄소 배출량과 소득의 관계



〈그림 4〉 개발도상국의 이산화탄소 배출량과 소득의 관계



<표 2>는 신재생 및 원자력 발전량 비중 추이를 국가별로 나타낸 것이다. 전반적으로 선진국이 개발도상국에 비하여 신재생 비중이 높은 것을 알 수 있다. 특히 프랑스, 일본, 한국의 신재생 비중이 높은 수준을 보이는데, 이는 이들 국가들이 원자력 발전 비중이 높은 것에 기인한다. 기간별 증가 추이를 보면 대체로 신재생 비중이 70년대와 80년대 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 대부분의 국가에서 이 시기에 원자력 발전이 증가했기 때문으로 보인다.

〈표 2〉 신재생 및 원자력에너지 비중

| 국가/연도 | 신재생 및 원자력에너지 비중(%) | | | | | 기간별 증가율(%) | | | |
|-------|--------------------|------|------|------|------|------------|-------|-------|-------|
| | 1971 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 71-80 | 80-90 | 90-00 | 00-10 |
| 미국 | 2.1 | 5.4 | 10.3 | 10.8 | 11.7 | 155.4 | 89.8 | 4.5 | 8.8 |
| 영국 | 3.6 | 5.0 | 8.5 | 10.2 | 8.7 | 40.6 | 69.8 | 19.2 | -15.0 |
| 프랑스 | 4.2 | 11.5 | 38.7 | 45.3 | 45.2 | 172.4 | 237.2 | 17.1 | -0.2 |
| 이태리 | 6.2 | 5.2 | 3.9 | 4.7 | 6.0 | -16.5 | -24.8 | 21.8 | 27.2 |
| 일본 | 3.5 | 8.7 | 14.4 | 18.4 | 17.2 | 148.9 | 65.6 | 27.9 | -6.6 |
| 한국 | 0.7 | 2.6 | 15.4 | 15.3 | 15.7 | 290.6 | 489.6 | -0.7 | 2.7 |
| 중국 | 0.7 | 0.8 | 1.3 | 2.2 | 3.9 | 27.0 | 50.1 | 78.6 | 72.6 |
| 멕시코 | 2.9 | 2.4 | 5.9 | 7.0 | 5.9 | -18.2 | 150.0 | 18.2 | -14.5 |
| 인도 | 1.7 | 2.3 | 2.5 | 2.4 | 2.6 | 34.2 | 5.2 | -2.1 | 7.2 |

<표 3>의 GDP 대비 산업부문 비중을 살펴보면, 선진국은 70년대 이후 전반적으로 감소하는 추세를 보인다. 1971년에 선진국의 산업부문 부가가치 비중이 30-40% 수준이던 것이 점진적으로 감소하여 2010년에는 20% 중후반대로 감소하였다. 이태리와 일본의 경우도 시간에 따라 산업부문 부가가치가 감소하고 있으나, 다른 선진국에 비하여 감소폭이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이에 반해 개발도상국에서는 반대의 상황을 볼 수 있다. 즉 70년대 이후 산업비중이 점진적으로 상승하는 패턴을 보이고 있다. 특히 한국은 1971년에 25%에서 2010년에 38.8%로 거의 두 배 정도 증가하였다. 나머지 중국, 멕시코, 인도는 증가폭이 크진 않지만 증가하는 패턴을 보인다.

기간별 증가율에서도 선진국의 경우 80년 이후 매 기간 두 자릿수의 감소 추세를 보인다. 또한 이 같은 감소 패턴을 최근에 더욱 가속화되는 양상을 보인다. 개발도상국은 70년대에 크게 증가한 이후에는 증가폭이 크지 않은 것을 알 수 있다.

〈표 3〉 GDP대비 산업부문 부가가치 비중

| 국가/연도 | 산업부문 부가가치 비중(%) | | | | | 기간별 증가율(%) | | | |
|-------|-----------------|------|------|------|-------|------------|-------|-------|-------|
| | 1971 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 71-80 | 80-90 | 90-00 | 00-10 |
| 미국 | 33.4 | 32.4 | 27.4 | 23.1 | 18.8 | -2.9 | -15.3 | -15.9 | -18.4 |
| 영국 | 41.5 | 40.7 | 33.8 | 27.0 | 21.3 | -1.8 | -17.0 | -20.2 | -21.0 |
| 프랑스 | 34.7 | 31.8 | 27.1 | 22.9 | 19.1* | -8.3 | -14.9 | -15.4 | -16.9 |
| 이태리 | 38.3 | 38.1 | 32.0 | 28.2 | 25.3 | -0.6 | -16.0 | -11.7 | -10.6 |
| 일본 | 43.0 | 39.0 | 37.5 | 31.1 | 27.5 | -9.3 | -3.9 | -17.1 | -11.8 |
| 한국 | 25.0 | 36.6 | 41.6 | 38.1 | 38.8 | 46.0 | 13.7 | -8.4 | 2.0 |
| 중국 | 42.2 | 48.2 | 41.3 | 45.9 | 46.7 | 14.4 | -14.3 | 11.1 | 1.7 |
| 멕시코 | 31.1 | 33.6 | 28.4 | 35.7 | 34.8 | 8.0 | -15.5 | 25.7 | -2.5 |
| 인도 | 21.2 | 24.3 | 26.5 | 26.0 | 27.6 | 14.4 | 9.1 | -1.9 | 6.0 |

*프랑스는 자료의 한계로 인하여 2009년 산업부가가치를 사용하였다.

2. 비선형모형 추정결과

<표 4>에 모형식 (1)에 대한 추정결과를 나타냈다. 소득 이외에 관련 변수로 신재생 및 원자력에너지 비중(이후 신재생 비중으로 칭함)과 GDP에서 산업이 차지하는 비중(이후 산업 비중으로 칭함)을 고려하였다. 신재생 비중이 증가하게 되면 자연스럽게 화석연료 사용량이 감소할 것이므로 이산화탄소 배출량은 감소하게 될 것이다. 또한 신재생 에너지의 비중은 기술혁신을 나타내는 변수로도 생각할 수 있다. 일반적으로 국가 전체 에너지 소비에서 산업부문에서 소비하는 부문이 크므로 산업비중이 증가하는 경우에는 이산화탄소 배출량이 증가할 것이다.

〈표 4〉 모형 추정결과

| 선진국 | | | | | | | | | | |
|-------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | 프랑스 | | 영국 | | 이태리 | | 일본 | | 미국 | |
| 변수 | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value |
| 상수항 | -5.352 | -2.793 | -3.168 | -2.699 | -5.728 | -3.190 | -5.394 | -7.535 | -5.737 | -3.334 |
| 신재생 | -0.169 | -2.756 | -0.066 | -2.945 | -0.527 | -6.583 | -0.198 | -3.863 | | |
| 산업비중 | | | | | | | | | 0.157 | 1.390 |
| 추정기간 | 1960-2010년 | | 1960-2010년 | | 1960-2010년 | | 1960-2010년 | | 1970-2010년 | |
| 개발도상국 | | | | | | | | | | |
| | 한국 | | 중국 | | 멕시코 | | 인도 | | | |
| 변수 | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | | |
| 상수항 | -2.058 | -2.852 | -2.523 | -3.631 | -5.158 | -8.488 | -3.593 | | | |
| 신재생 | | | -0.091 | -1.302 | | | -0.199 | -4.904 | | |
| 산업비중 | 0.490 | 3.378 | 0.037 | 6.808 | 0.096 | 1.429 | | | | |
| 추정기간 | 1965-2010년 | | 1971-2010년 | | 1965-2010년 | | 1971-2010년 | | | |

신재생 비중과 산업비중 변수는 추정치의 부호를 고려하여 국가별로 상이하게 모형에 반영하였다. 미국, 한국, 중국, 멕시코를 제외한 국가에서는 산업비중 변수가 양의 값으로 추정되지 않았고, 반대로 나머지 국가에서는 신재생 비중이 이론과 일치하게 추정되었다.

시간변동 소득탄력성을 모형화한 푸리에 플렉서블 폼에 대한 추정치는 <표 5>에 나타냈다. 대부분의 국가의 경우, 1차 시간추세와 삼각함수 1차 항으로 모형화하였다. 영국, 중국, 한국, 인도의 경우는 삼각함수 항을 2차까지 포함하였다. 기본적으로 푸리에 플렉서블 폼에서 항의 개수는 추정하려는 미지의 함수 형태와 관련이 있다. 즉 함수가 시간에 대한 변동이 많은 경우에는 항의 개수를 증가시켜서 추정하는 것이 일반적이다. 본 모형에서는 이 같은 특성과 추정치의 부호 및 유의성을 기준으로 항의 개수를 선택하였다.

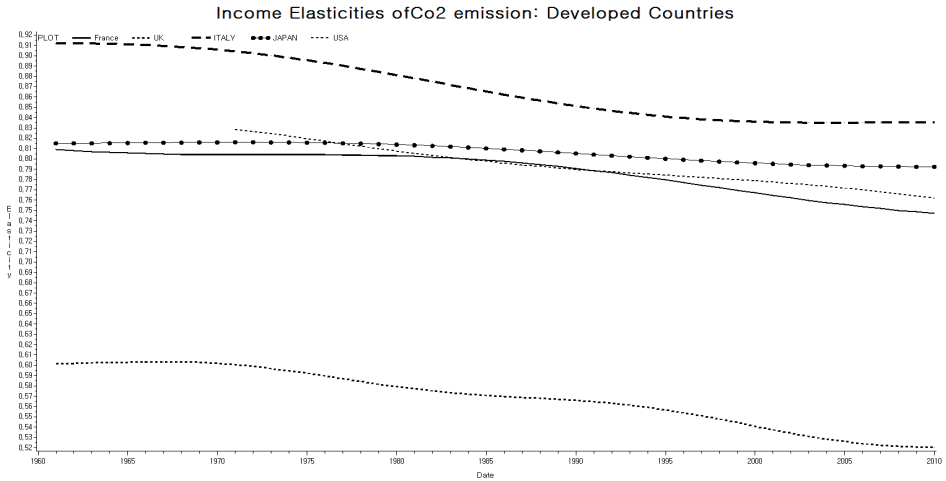
비선형으로 추정된 이산화탄소 배출량의 소득탄력성은 선진국 그룹과 개발도상국을 구분하여 <그림 5>과 <그림 6>에 나타내었다. 먼저 <그림 5>의 선진국의 추정결과를 살펴보면, 대체로 모든 국가들에서 소득탄력성이 시간에 따라 감소하는 형태로 추정되었다. 영국의 경우 다른 국가와 달리 소득탄력성이 낮은 수준으로 추

정되었지만, 시간에 따라 감소하는 모습은 동일하게 나타난다. 이에 반해 <그림 6>의 개발도상국의 경우는 선진국 결과와 다소 상이한 모습을 보인다. 구체적으로 멕시코를 제외한 국가에서 시간에 대해 증가하는 형태의 소득탄력성을 볼 수 있다. 멕시코의 경우는 소득탄력성이 1965년 이후 약간 상승하는 모습을 보였지만 이내 다시 감소하여 이전과 큰 차이가 없는 모습을 보이고 있다. 멕시코의 경우, 다른 개도국과 상이한 소득탄력성의 패턴을 보이는 것은 <그림 2>에서 볼 수 있듯이 1980년 이후 이산화탄소 배출량의 증가추세가 현저히 감소하였기 때문이다.

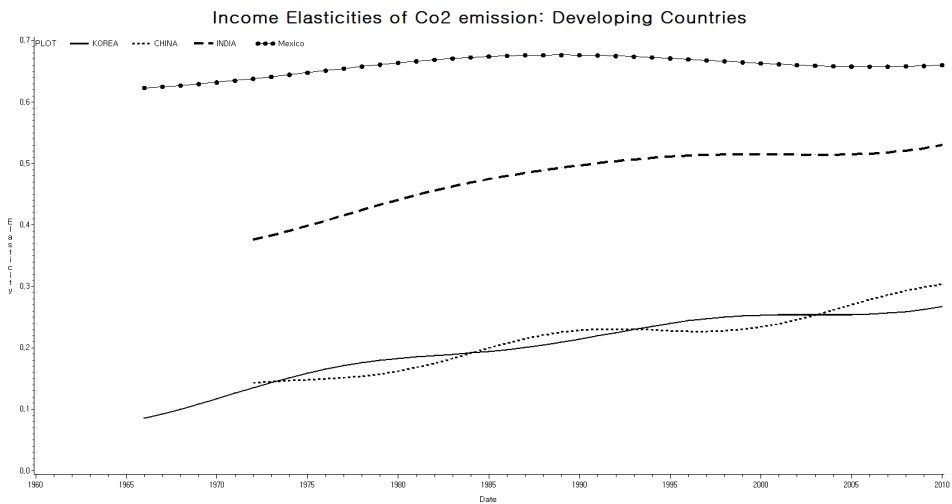
<표 5> 푸리에 플렉서블 폼 추정결과

| 변수 | 선진국 | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | 프랑스 | | 영국 | | 이태리 | | 일본 | | 미국 | |
| | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value |
| $\hat{\theta}_{k,0}$ | 0.820 | 4.131 | 0.610 | 4.821 | 0.908 | 4.889 | 0.818 | 11.078 | 0.828 | 4.797 |
| $\hat{\theta}_{k,1}$ | -0.063 | -1.717 | -0.081 | -6.076 | -0.076 | -3.071 | -0.023 | -1.166 | -0.069 | -4.968 |
| $\hat{\theta}_{k,2}$ | -0.010 | -3.045 | -0.005 | -3.588 | 0.004 | 2.019 | -0.003 | -1.340 | 0.003 | 4.524 |
| $\hat{\theta}_{k,3}$ | 0.000 | -0.108 | 0.004 | 2.599 | 0.013 | 7.053 | 0.003 | 1.208 | -0.003 | -2.338 |
| $\hat{\theta}_{k,4}$ | -0.169 | -2.756 | -0.004 | -4.349 | | | | | | |
| $\hat{\theta}_{k,5}$ | | | 0.004 | 3.790 | | | | | | |
| 변수 | 개발도상국 | | | | | | | | | |
| | 한국 | | 중국 | | 멕시코 | | 인도 | | | |
| | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | 추정치 | t-value | | |
| $\hat{\theta}_{k,0}$ | 0.105 | 1.265 | 0.131 | 1.178 | 0.639 | 9.302 | 0.398 | 12.461 | | |
| $\hat{\theta}_{k,1}$ | 0.187 | 6.682 | 0.164 | 7.339 | 0.038 | 5.475 | 0.159 | 34.686 | | |
| $\hat{\theta}_{k,2}$ | -0.015 | -3.858 | -0.004 | -3.558 | -0.018 | -22.767 | -0.024 | -22.027 | | |
| $\hat{\theta}_{k,3}$ | 0.004 | 2.511 | 0.007 | 3.085 | 0.003 | 1.960 | 0.006 | 8.080 | | |
| $\hat{\theta}_{k,4}$ | -0.011 | -6.999 | 0.012 | 6.957 | | | -0.003 | -8.575 | | |
| $\hat{\theta}_{k,5}$ | 0.002 | 1.351 | -0.004 | -2.595 | | | 0.001 | 2.057 | | |

〈그림 5〉 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정결과: 선진국의 경우



〈그림 6〉 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정결과: 개발도상국의 경우



앞서 살펴본 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정치를 <표 4>에 구체적인 수치로 나타내었다. 1975년을 기준으로 선진국의 경우는 대체로 소득탄력성이 0.6에서 0.9 사이에 분포되어 있고, 개발도상국은 0.15에서 0.65 사이에 있어, 선진국의 경우보다 넓은 범위에 분포되어 있다. 1971년 이후의 소득탄력성의 시간에 대한 변화를 살펴보면, 선진국들은 모두 감소한 모습을 보였고, 개발도상국은 선진국이 감소한 것보다 크게 증가하는 것으로 추정되었다.

이상의 추정결과를 종합해보면, 선진국의 소득탄력성은 시간에 대해 점진적으로 감소하는 형태를 보이거나 감소하는 절대적인 양은 크지 않은 것으로 나타났다. 이에 반해 개발도상국은 증가하는 형태로 소득탄력성이 추정되었고, 절대적인 양도 큰 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 이산화탄소 배출량의 소득에 대한 효과가 선진국의 경우와 개발도상국의 경우가 다르다는 것은 환경 쿠즈네츠곡선에 대한 연구에서 제시한 결과에 일치한다.

이 결과는 환경쿠즈네츠 곡선에 대한 해석과 한편으로는 일치하면서, 다른 한편으로는 쿠즈네츠 곡선의 한계를 보여준다. <표 4>에서 나타낸 바와 같이 국가별로 배출량에 대한 소득탄력성이 시간에 따라 상이한 패턴을 보이는 것은 경제 성장단계에 따라 이산화탄소 배출량 패턴이 다르다는 환경쿠즈네츠곡선의 연구결과와 일맥상통한다. 중국, 한국, 인도와 같은 개도국의 소득탄력성이 증가 추세인 것은 아직 소득이 일정수준에 이르지 않았기 때문으로 해석될 수 있고, 반대로 프랑스, 영국, 이탈리아, 미국 등의 경우는 소득이 일정수준을 넘었기 때문에 소득효과가 감소한다고 볼 수 있다. 또한 배출량에 대한 소득탄력성이 국가별로 상이한 것은 소득 이외에 에너지감축 기술수준, 정부 정책효과, 시민들의 환경에 대한 인식 수준 등 관측되지 않은 변수에 의해서도 영향 받을 수 있기 때문에, 쿠즈네츠 곡선과 같은 일정한 패턴이 모든 국가에 적용되지는 않는다는 점을 강조하고 싶다. 이는 본 연구에서 이산화탄소의 소득탄력성을 단순히 시간에 대한 함수로 설정한 것도 위와 같이 관측되지 않지만 중요한 요인들의 영향을 포괄적인 ‘시간’ 변수를 이용하여 모형을 설정한 이유이기도 하다.

〈표 6〉 국가별 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정치

| 연도 | 프랑스 | 영국 | 이태리 | 일본 | 미국 | 한국 | 중국 | 인도 | 멕시코 |
|------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1971 | 0.804 | 0.600 | 0.904 | 0.816 | 0.829 | 0.126 | | | 0.635 |
| 1975 | 0.804 | 0.592 | 0.896 | 0.816 | 0.819 | 0.159 | 0.148 | 0.399 | 0.648 |
| 1980 | 0.803 | 0.579 | 0.881 | 0.814 | 0.808 | 0.183 | 0.162 | 0.441 | 0.664 |
| 1985 | 0.799 | 0.571 | 0.865 | 0.810 | 0.797 | 0.194 | 0.199 | 0.475 | 0.674 |
| 1990 | 0.791 | 0.566 | 0.851 | 0.805 | 0.790 | 0.214 | 0.228 | 0.497 | 0.676 |
| 1995 | 0.780 | 0.557 | 0.841 | 0.800 | 0.784 | 0.240 | 0.228 | 0.511 | 0.671 |
| 2000 | 0.767 | 0.541 | 0.836 | 0.796 | 0.779 | 0.253 | 0.234 | 0.515 | 0.663 |
| 2001 | 0.765 | 0.538 | 0.836 | 0.795 | 0.777 | 0.254 | 0.239 | 0.515 | 0.662 |
| 2002 | 0.762 | 0.534 | 0.835 | 0.795 | 0.776 | 0.254 | 0.246 | 0.514 | 0.660 |
| 2003 | 0.760 | 0.531 | 0.835 | 0.794 | 0.775 | 0.254 | 0.253 | 0.514 | 0.659 |
| 2004 | 0.758 | 0.528 | 0.835 | 0.794 | 0.773 | 0.254 | 0.261 | 0.514 | 0.658 |
| 2005 | 0.756 | 0.526 | 0.835 | 0.793 | 0.772 | 0.254 | 0.270 | 0.515 | 0.658 |
| 2006 | 0.754 | 0.524 | 0.835 | 0.793 | 0.770 | 0.255 | 0.278 | 0.516 | 0.658 |
| 2007 | 0.752 | 0.522 | 0.835 | 0.793 | 0.768 | 0.256 | 0.286 | 0.518 | 0.658 |
| 2008 | 0.750 | 0.521 | 0.835 | 0.793 | 0.766 | 0.259 | 0.293 | 0.521 | 0.658 |
| 2009 | 0.749 | 0.521 | 0.836 | 0.793 | 0.764 | 0.262 | 0.299 | 0.525 | 0.659 |
| 2010 | 0.747 | 0.520 | 0.836 | 0.792 | 0.762 | 0.267 | 0.303 | 0.530 | 0.660 |
| 변화량 | -0.057 | -0.08 | -0.068 | -0.024 | -0.067 | 0.141 | 0.155 | 0.131 | 0.025 |

IV. 결론

지금까지 본 연구는 선진국 5개 국가와 신흥 개발도상국 4개 국가에 대해 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정에 대해 살펴보았다. 소득탄력성은 시간변동계수 공적분모형을 통해 시간에 대해 변하는 것으로 설정하여, 국가별 소득탄력성의 시간에 대한 추이를 살펴보았다. 추정결과 선진국의 소득탄력성은 대체로 시간에 따라 감소하는 형태로 추정되었으나 개발도상국의 경우는 반대로 증가하는 형태로 추정되었다. 이 같은 차이는 경제 성장단계에 따라 이산화탄소 배출량의 증가 패턴이 다르다는 것을 의미한다. 이러한 연구결과는 기후변화협약과 교토의정서 상에서 의무 준수 대상국(Annex I)과 Non-Annex I 국가 구분이 필요하다는 것을 반증한다.

본 연구에서 시도한 시간변동 소득탄력성 모형은 기존의 단일 국가 시계열자료를 이용한 경우에 발생하는 계량경제학적 문제점을 해결함과 동시에 배출량의 증가추세를 소득탄력성으로 모형화함으로써 보다 경제학적으로 접근할 수 있었다. 향후에는 패널자료도 함께 고려하여 소득탄력성의 시간에 따른 변화뿐만 아니라 소득수준에 따른 변동 또한 중요한 정책적 함의를 가질 것으로 보인다. 최근 Chang et al. (2014)는 전력수요의 소득탄력성을 시간과 소득의 함수로 설정한 모형에 대한 이론을 제시하였다. 이 방법은 이산화탄소 배출량의 소득탄력성 추정에도 적용할 수 있는 것으로 향후 연구과제로 진행하려 한다.

[References]

1. 김인무·김창식·박성근, “에너지 상대가격 변화에 따른 에너지 수요 예측”, 「경제학연구」, 제59권, 제4호, 2011, pp. 199~228.
2. 박준용·김인무·김창식·이성로, “선도추급과정을 이용한 새로운 예측기법: 장기전력 수요예측에의 응용”, 「경제학연구」, 제59권, 제3호, 2011, pp. 113~147.
3. 온실가스종합정보센터, 「국가온실가스 인벤토리보고서」, 2013.
4. Baek, J. and H. S. Kim, “Is Economic Growth Good or Bad for the Environment? Empirical Evidence from Korea,” *Energy Economics* Vol. 36, 2013, pp. 744~749.
5. Bertinelli, L. and E. Strobl, “The Environmental Kuznets Curve Semi-Parametrically Revisited,” *Economics Letters* Vol. 88, 2005, pp. 350~357.
6. Chang, H. and Y., Hsing, “The Demand for Residential Electricity: New Evidence on Time-Varying Elasticities,” *Applied economics*, Vol. 23, No. 7, 1991, pp. 1251~1256.
7. Chang, Y. and E. Martinez-Chombo, “Electricity Demand Analysis Using Cointegration and Error-Correction Models with Time Varying Parameters: The Mexican Case,” *Working Paper*, Rice University, Department of Economics, 2003.
8. Chang, Y., Y. Choi, C. S. Kim, J. Park, and J. I. Miller, “Disentangling Temporal Patterns in Elasticities: A Functional Coefficient Panel Analysis of Electricity Demand,” *Working paper*, Indiana University, 2013.

9. Copeland, B. and M. Taylor, "Trade, Spatial Separation and the Environment," *NBER Working Papers* 5242, National Bureau of Economic Research, 1995.
10. Dargay, J., *Are Price and Income Elasticities of Demand Constant?*, Oxford Institute for Energy Studies, 1992.
11. Fosten, J., B. Morley, and T. Taylor, "Dynamic Misspecification in the Environmental Kuznets Curve: Evidence from CO₂ and SO₂ Emissions in the United Kingdom," *Ecological Economics*, Vol. 76, 2012, pp. 25~33.
12. Galli, R., "The Relationship between Energy Intensity and Income Levels: Forecasting Long Term Energy Demand in Asian Emerging Countries," *Energy Journal*, Vol. 19, No. 4, 1998, pp. 85~106.
13. Haas, R. and L., Schipper, "Residential Energy Demand in OECD-Countries and the Role of Irreversible Efficiency Improvements," *Energy Economics*, Vol. 20, No. 4, 1998, pp. 421~442.
14. Holtz-Eakin, D. and T. Selden, "Stoking the Fires? CO₂ Emissions and Economic Growth," *Journal of Public Economics*, Vol. 57, 1995, pp. 85~101.
15. Iwata, H., K. Okada, and S. Samreth, "Empirical Study on Environmental Kuznets Curve for CO₂ in France: The Role of Nuclear Energy," *Energy Policy*, Vol. 38, 2010, pp. 4057~4063.
16. Liao, H. and H. Cao, "How Does Carbon Dioxide Emission Change with the Economic Development? Statistical Experiences from 132 Countries," *Global Environmental Change*, Vol. 23, 2013, pp. 1073~1082.
17. Liddle, B., "Population, Affluence, and Environmental Impact across Development: Evidence from Panel Cointegration Modeling," *Environmental Modeling & Software*, Vol. 40, 2013, pp. 255~266.
18. Medlock III, K. and R. Soligo, "Economic Development and End-Use Energy Demand," *Energy Journal*, Vol. 22, No. 2, 2001, pp. 77~106.
19. Millimet, D. L., J. A. List, and T. Stengos, "The Environmental Kuznets Curve: Real Progress or Misspecified Models?" *Review of Economics and Statistics*, Vol. 85, No. 4, 2003, pp. 1038~1047.
20. Park, J. Y. and S. B., Hahn, "Cointegrating Regressions with Time Varying Coefficients," *Econometric Theory*, Vol. 15, 1999, pp. 664~703.

21. Park, J. Y., "Canonical Cointegrating Regressions," *Econometrica*, Vol. 60, No. 1, 1992, pp. 119~143.
22. Park, S. Y. and G. Zhao, "An Estimation of U.S. Gasoline Demand: A Smooth Time-Varying Cointegration Approach," *Energy Economics*, Vol. 32, No. 1, 2010, pp. 110~120.
23. Romero-Avila, D., "Convergence in Carbon Emissions among Industrialized Countries Revisited," *Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 2265~2282.
24. Schmalensee, R., T. M. Stoker, and R. A. Judson, "World Carbon Dioxide Emissions: 1950-2050," *The Review of Economics and Statistics*, 1998, 15-27.
25. Stern, D., M. Common, and E. Barbier, "Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development", *World Development*, Vol 24, No 7, 1996, pp. 1151~1160.
26. Strazicich, M. C. and J. A. List, "Are CO₂ Emission Levels Converging among Industrial Countries?" *Environmental and Resource Economics*, Vol. 24, No. 3, 2003, pp. 263~271.
27. Verbeke, T. and M. De Clercq, "The Income-Environment Relationship: Evidence from a Binary Response Model," *Ecological Economics*, Vol. 59, No. 4, 2006, pp. 419~428.
28. Wagner, M. "The Carbon Kuznets Curve: A Cloudy Picture Emitted by Bad Econometrics," *Resource and Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 388~408.
29. Wang, Q. and P. C. Phillips, "Structural Nonparametric Cointegrating Regression," *Econometrica*, Vol. 77, No. 6, 2009, pp. 1901~1948.