

교토의정서 Annex B 국가의 CO₂ 배출량 구조변화 분석

김민정* · 양지혜** · 김현석***

요약 : 본 연구는 교토의정서 Annex B 국가들의 CO₂ 배출량 변화를 분석하였다. Quandt-Andrews 검정을 이용하여 CO₂ 배출량의 구조변화 시점을 우선적으로 파악하여 그 시점을 기준으로 CO₂ 배출요인의 변화를 비교 분석하였다. Quandt-Andrews 검정 결과 교토의정서 발효 3년 후인 2008년 CO₂ 배출량의 구조변화가 확인되었다. 에너지 소비량의 1% 증가가 구조변화 이전에는 1%의 소득 증가를 가져왔으며, 그 이후에는 0.31%의 소득 증가를 가져온 것으로 나타났다. 분석기간 중 분석대상국의 CO₂ 배출량은 소득에 대해 단조 증가하는 것으로 분석되었다. 신재생에너지 소비량의 증가는 구조변화 시점을 전후로 CO₂ 배출량을 각각 0.1%와 0.09% 감소시킨 것으로 나타났다. 구조변화 시점 이후 에너지 효율성의 상대적으로 감소와 소득 증가에 따른 CO₂ 배출량의 지속적 증가, 신재생에너지 정책 효과의 미미함 등으로 미루어 볼 때, 교토의정서의 발효가 Annex B 국가들의 온실가스 감축을 가져왔다고 판단하기 어려운 것으로 나타났다.

주제어 : 경제위기, 교토의정서, 구조변화, 이산화탄소 배출

JEL 분류 : C23, Q54

접수일(2016년 10월 25일), 수정일(2017년 5월 17일), 게재확정일(2017년 6월 7일)

* 한국농촌경제연구원, 경북대학교 농업경제학과 석사과정 졸업, 주저자(e-mail: greens1231@naver.com)

** 농협경제지주, 경북대학교 농업경제학과 석사과정 졸업, 공동저자(e-mail: ycbee@naver.com)

*** 경북대학교 농업경제학과, 조교수, 노스캐롤라이나 주립대학교 농업 및 자원경제학과 방문학자, 교신저자(e-mail: hyun.kim@knu.ac.kr)

Structural Change in CO₂ Emissions of Annex B Countries Under the Kyoto Protocol

Min Jung Kim* · Ji Hye Yang** and Hyun Seok Kim***

ABSTRACT : This study estimates the effect of the Kyoto Protocol on CO₂ emissions with a Quandt-Andrews test for detection of structural break with Annex B countries data. The structural break on CO₂ emissions took place in 2008 which is 3 year after ratification of the Kyoto Protocol. According to the empirical results, 1% increase in energy consumption leads to 1% and 0.31% increases in income before and after the structural break, respectively. This study also finds the monotonic increase relationship between CO₂ emission and income. Regarding to the relationship between renewable energy use and CO₂ emissions, 1% increase in renewable energy consumption leads to 0.1% decrease in CO₂ emissions until year 2007 and 0.09% decreases after year 2008, respectively. Based on the results of empirical study, we find little evidence of the effect of the Kyoto Protocol on reduction of CO₂ emissions for Annex B countries.

Keywords : CO₂ emissions, Economic crisis, Kyoto protocol, Structural break

Received: October 25, 2016. Revised: May 17, 2017. Accepted: June 7, 2017.

* Assistant Researcher, Korea Rural Economic Institute(e-mail: greens1231@naver.com)

** National Agricultural Cooperative Federation(e-mail: ycbee@naver.com)

*** Assistant Professor at the Dept. of Agricultural Economics, Kyungpook National University; Visiting Research Scholar at the Dept. of Agricultural and Resource Economics, North Carolina State University, Corresponding author(e-mail: hyun.kim@knu.ac.kr)

I. 서론

기후변화 대응이 국제 사회의 주요 관심사로 부각되고 있는 가운데, 1992년 기후변화에 관한 국제연합기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)이 채택된 이후 온실가스 배출 규제에 대한 국제적 논의가 본격화되었다. 이후 지구온난화의 주범인 온실가스의 전 세계 배출량을 이행 기간 동안 1990년 수준보다 약 5.2%가량 줄이는 것을 주된 내용으로 하는 교토의정서(Kyoto Protocol)가 2005년에 정식 발효되면서, 의무이행 대상국인 Annex B 국가들은 온실가스 감축을 위한 조치를 취하고 있다. 교토의정서 참여국들은 신재생에너지 사업의 확대, 자동차 배기가스 규제 강화, 환경세 도입 등 여러 정책 수단을 통해 온실가스 배출량을 조절하여 감축 의무를 이행하고 있다. 온실가스종합정보센터(2014)에 따르면 감축 대상 가스는 온실효과를 일으키는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 이산화질소(N₂O)를 포함한 6가지로, 2012년 총배출량 중 온실가스별 비중은 CO₂가 약 90.9%로 가장 크다. 이러한 가운데 CO₂ 배출량에 미치는 여러 요인들과 그 영향에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 경제성장이 CO₂의 배출 증가를 유발했다는 다양한 연구가 발표되었다.

경제성장과 환경오염 간의 관계는 흔히 환경쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznet curve, EKC)에 의해 설명되는데, 이는 경제성장 초기 단계의 낮은 소득 수준에서는 경제가 성장함에 따라 환경이 악화되지만 일정한 소득 수준에 도달하면 환경 개선에 대한 인식의 확대로 환경오염이 개선된다는 가설이다. 따라서 경제성장과 환경오염 사이에는 역U자형 관계가 성립한다는 가설로 이에 대한 실증적 검증은 다양한 연구에서 수행되었다(Shafik, 1994; Agras and Chapman, 1999; Friedl and Getzner, 2003; 박창원 외, 1999; 유병철, 2001; 정군오·정영근, 2004; 김지욱, 2010; 이광훈, 2010).

또한 한 국가의 경제성장이 에너지 소비량의 증가를 가져와 환경오염을 유발시킨다는 가설을 바탕으로 이들 간의 관계를 실증 분석한 연구가 다수 진행되어 왔다(Kraft and Kraft, 1978; Glasure and Lee, 1998; 모수원·김창범, 2003; Soytaş and Sari, 2006; Akinlo, 2008, Baek and Kim, 2011; 조정환·강만옥, 2013). 그러나 이들 연구에서 사용한 에너지 소비량 자료는 화석에너지가 대부분의 비중을 차지하고 있기 때문에 신재생 에너지 등 대체에너지의 온실가스 저감에 미치는 영향을 검증하지 못하였다는 한계가

있다. 이에 김재화·김현석(2015)은 이들 변수 외에 신재생에너지 발전량 변수를 모형에 추가하여 분석한 결과, 신재생에너지 발전량의 증가가 CO₂ 배출을 감소시키는 것을 입증하였다.

최근에는 교토의정서 발효 이후 온실가스 배출이 실질적으로 감소하였는가에 대한 연구들도 활발하게 진행되어 왔다(Ringquist and Tatiana, 2005; Aichele and Felbermayr, 2013). 이들 연구에서는 기후변화협약을 비준한 국가들과 그렇지 않은 국가들의 온실가스 배출량을 비교 분석하여 기후변화협약의 체결이 온실가스 배출량의 감소를 가져왔다는 결과를 입증하였다. 그러나 이들 연구에서는 기후변화협약 체결에 따른 온실가스 배출의 구조적 변화가 존재하였는지에 대한 검증이 이루어지지 않았다는 한계가 있다. 이에 Kumazawa and Callaghan (2012)은 교토의정서가 발효된 2005년에 구조변화가 발생했다고 가정하고 패널 Chow 검정을 통해 2005년을 기준으로 구조변화가 발생했음을 입증하였다. 그러나 이들의 연구에서는 구조변화가 교토의정서 발효시점인 2005년에 발생하였다고 가정한 점과 그 시점을 기준으로 온실가스 배출 요인별 변화를 분석하지 않았다는 한계를 가지고 있다. 또한 교토의정서 발효 이후 미국을 중심으로 세계 경제위기를 맞이하여 온실가스 감축의 효과가 교토의정서 발효에 따른 것인지 세계 경제위기에 따른 영향인지에 대한 의견이 대립되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Quandt-Andrews 검정을 이용하여 1995년 이후 온실가스 배출의 구조적 변화 시점을 도출하고¹⁾, 교토의정서하에서 온실가스 감축의무를 가진 Annex B 국가를 대상으로 CO₂ 배출량과 소득 및 신재생에너지 소비 사이의 구조적 변화를 비교분석하여 그 시사점을 도출하고자 한다.

논문의 구성은 다음 장에서 분석모형 및 분석 자료에 대해 설명하고, III장에서는 교토의정서 발효에 따른 CO₂ 배출의 구조변화 및 관련 변수 간의 영향 등에 대한 실증분석 결과를 제시한다. 그리고 마지막 IV장에서는 실증분석 결과를 바탕으로 결론을 요약하고 시사점을 도출한다.

1) Quandt-Andrews 검정은 구조변화가 특정 시점에 발생한 것으로 가정하지 않고 모든 시점을 잠재적 구조변화 시점으로 간주하고 구조변화 여부를 검정하여 그 시점을 결정하는 분석기법이다.

II. 분석모형 및 분석자료

1. 분석모형의 설정

경제성장이 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위한 이론적인 기본모형은 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$E_{i,t} = f(Y_{i,t}) \quad (1)$$

여기서 E 와 Y 는 각각 온실가스 배출량과 소득을 나타내며, i 는 분석에 사용된 국가(Annex B), t 는 연도를 의미한다. 즉 온실가스 배출량은 한 국가의 경제성장에 따라 영향을 받는다는 것이다. 여기서 소득은 에너지 소비량(TE)의 함수로 표현될 수 있다. 이는 한 국가의 에너지 소비의 증가가 그 국가의 전체 생산량 증가를 가져오게 되고, 이를 통한 소득의 증대가 온실가스 배출에 영향을 준다는 가정 때문이다.²⁾ 따라서 식(1)은 다음과 같이 다시 정의될 수 있다.

$$E_{i,t} = f(Y_{i,t}(TE_{i,t})) \quad (2)$$

또한 본 연구에서는 대체에너지가 환경개선에 미치는 효과를 분석하지 못하는 한계 점을 극복하기 위하여 김재화·김현석(2015)의 연구에서와 같이 신재생에너지 발전량 변수(RE)를 추가하여 식(2)를 식(3)과 같이 확장하였다.³⁾

$$E_{i,t} = f(Y_{i,t}(TE_{i,t}), RE_{i,t}) \quad (3)$$

식(3)을 Annex B 국가들의 CO₂ 배출에 미치는 영향과 구조변화 시점을 검증하기 위

-
- 2) 김수이(2015) 연구에서 에너지소비가 생산에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 또한 본 연구에서 분석 기간별 내생성 검정을 통해 에너지 소비가 소득에 영향을 주고 이를 통해 CO₂ 배출에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 내생성 검정 결과는 저자에게 요청 시 제공할 수 있다.
- 3) 2000년대 후반 발생한 고유가가 온실가스 배출량에 영향을 미쳤을 수 있으나, 고유가의 경우 총 에너지 소비량의 감소를 유발한다는 가정 하에 식(2)의 TE 변수에 반영되었다고 볼 수 있다.

한 식으로 나타내기 위해 식 (4)와 같이 에너지 소비($TE_{i,t}$)가 소득($Y_{i,t}$)에 미치는 영향을 우선 추정한다.

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 TE_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (4)$$

여기서 $\epsilon_{i,t}$ 는 오차항을 나타낸다. 식 (4)에서 추정된 소득($\hat{Y}_{i,t}$)을 2단계 추정에 사용하면 추정모형은 식 (5)와 같다.

$$E_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \hat{Y}_{i,t} + \beta_2 \hat{Y}_{i,t}^2 + \beta_3 RE_{i,t} + \nu_{i,t} \quad (5)$$

여기서 ν_{it} 는 오차항을 나타내며, 한 국가의 경제성장과 환경오염 사이에 환경쿠즈네츠 가설이 성립할 경우 소득과 환경오염 변수 간에 역U자형 관계가 나타나게 되고 온실가스 배출량은 소득의 2차 함수를 통해 표현될 수 있다.

또한 식 (4)와 (5)의 경우 오차항의 자기상관 가능성과 그룹간의 이분산성이 존재할 수 있다. 또한 패널 데이터를 OLS 모형으로 추정하는 경우 관측되지 않은 표본의 이질성을 고려하지 못하는 단점으로 인해 비효율적인 추정량이 도출될 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 고정 효과 또는 확률 효과를 반영한 패널 모형을 식 (6) 및 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{Y}_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 TE_{i,t} + u_i + \epsilon_{i,t} \quad (6)$$

$$E_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \hat{Y}_{i,t} + \beta_2 \hat{Y}_{i,t}^2 + \beta_3 RE_{i,t} + \eta_i + \nu_{i,t} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서 오차항은 각각 시간에 따라 변하지 않는 패널 개체의 특성을 나타내는 오차항 u_i 와 η_i , 그리고 시간과 개체에 따라 변하는 순수 오차항인 $\epsilon_{i,t}$ 및 $\nu_{i,t}$ 로 구성된다. 고정효과 모형은 오차항 u_i 및 η_i 와 설명변수의 상관관계를 허용하며, 오차항 u_i 및 η_i 를 추정해야 할 모수(parameter)로 간주하는 모형이다. 반면, 확률효과 모형은 오차항 u_i

및 η_i 와 설명변수의 상관관계를 허용하지 않으며, 오차항 u_i 및 η_i 를 확률변수로 취급하는 모형이다. 고정효과 모형과 확률효과 모형을 판단할 때 선행되어야 할 것은 패널 개체 특성을 나타내는 오차항 u_i 에 대한 추론이다. 패널 개체들이 무작위로 추출된 표본의 개념이라면 오차항 u_i 는 확률 분포를 따른다고 가정할 수 있다. 그러나 주어진 패널 개체들이 연구자의 연구 목적에 따라 선정된 특정 모집단이라면 오차항 u_i 는 확률 분포를 따른다고 말할 수 없다. 본 연구에서의 분석대상 국가들은 임의 표본에서 무작위 추출하지 않고 온실가스 감축의무를 지니고 있는 Annex B 국가를 표본으로 선정하였기 때문에 고정효과 모형을 채택하였다. 식 (6)과 (7)을 선형로그형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\ln \widehat{Y}_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln TE_{i,t} + u_i + \epsilon_{i,t} \quad (8)$$

$$\ln E_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln \widehat{Y}_{i,t} + \beta_2 \ln \widehat{Y}_{i,t}^2 + \beta_3 \ln RE_{i,t} + \eta_i + \nu_{i,t} \quad (9)$$

여기서 총 에너지 소비의 증가는 생산의 증가를 가져오므로 에너지 소비와 소득의 관계는 정(+)의 관계($\alpha_1 > 0$)가 나타날 것으로 예상할 수 있다. 또한 분석대상국들에서 환경 쿠즈네츠 가설이 성립할 경우 β_1 과 β_2 는 각각 정(+)과 부(-)의 값을 가질 것으로 예상되며, 신재생에너지 소비의 증가는 CO₂ 배출을 감소시키므로 β_3 는 부(-)의 값을 가질 것으로 기대할 수 있다.

교토의정서의 발효가 Annex B 국가의 온실가스 배출량 감소에 실질적인 영향을 미치기 시작한 구조변화 시점을 찾기 위하여 본 연구에서는 Quandt-Andrews 검정(Quandt, 1960; Andrews, 1993)을 사용한다. Quandt-Andrews 검정은 Chow 검정(Chow, 1960)을 기반으로 알려지지 않은 구조변화 시점(unknown structural break point)을 찾아내는 검정법이다.

$$F(T_1) = \frac{(\widehat{u}'\widehat{u}) - (u_1'u_1 + u_2'u_2)/k}{(u_1'u_1 + u_2'u_2)/T - 2k}, \underline{T} \leq T_1 \leq \overline{T} \quad (10)$$

식 (10)에서 $F(T_1)$ 는 T_1 을 구조변화 시점으로 하는 Chow 통계량 나타내는데 $\hat{u}'\hat{u}$ 은 전체 모형에서 추정된 잔차 제곱의 합이며, $u_1'u_1$ 와 $u_2'u_2$ 는 각각 기준 시점 이전과 이후 모형에서 추정된 잔차의 제곱 합을 나타낸다. k 와 T 는 각각 추정계수의 수와 분석 기간을 의미한다. \bar{T} 와 \underline{T} 는 표본의 상한과 하한으로 보통 자료의 15~85%로 설정한다. 이를 바탕으로 Quandt-Andrews 검정은 표본기간을 가능한 모든 기준시점으로 나누어 각 기간에 대한 모형의 모수가 일정하다는 귀무가설과 모형의 모수 중 적어도 하나 이상이 변화했다는 대립가설을 세운 후 식 (11)과 같은 검정통계량을 계산한다(신동현 외, 2014).

$$F(v) = \max F(T_1) \tag{11}$$

즉 Quandt-Andrews 검정은 모든 시점을 잠재적 구조변화 시점으로 간주하고 식 (11)을 통해 Chow 검정통계량의 최댓값을 구조변화 발생 유무에 대한 검정통계량으로 이용한다.4)

2. 분석자료

본 연구에서는 모형의 추정을 위해 World Bank (2016)의 World Development Indicators (WDI)의 자료를 이용하였다. 교토의정서 비준국가인 Annex B 국가 중 시장 경제로의 전환 국가(economies in transition, EIT)를 제외한 23개국을 대상으로 1995년부터 2012년까지 연도별 자료를 사용하였다(<표 1> 참고).5)

<표 1> 분석 대상국 및 제외국

구분	Annex B 국가
분석 대상국(23)	오스트리아, 호주, 벨기에, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 그리스, 아이슬란드, 아일랜드, 이탈리아, 일본, 룩셈부르크, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 포르투갈, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 미국
분석 제외국(6)	체코공화국, 에스토니아, 헝가리, 폴란드, 슬로바키아, 슬로베니아

4) Andrews and Ploberger (1994)에서는 Chow 통계량에 대한 지수평균과 단순평균값을 접근법을 제시하고 있으나 본 연구에서는 오차항들의 동분산성을 가정하여 최댓값을 이용한 검정을 수행하였다.

5) 본 연구에서는 Annex B 국가 중 EIT 국가의 경우 경제발전을 고려하여 공동이행제도(Joint Implementation, JI)를 통한 온실가스 감축의무 이행 등이 허용되어 그 감축의무가 다른 Annex B 국가들에 비해 적다고 볼 수 있기 때문에 분석대상에서 제외하였다.

본 연구에 사용된 변수의 정의 및 출처는 <표 2>와 같다. 종속변수는 온실가스 배출량 중 가장 비중이 높은 CO₂ 배출량을 사용하였다. 경제성장 지표로는 실질 GDP (2010=100)를 사용하였으며, 신재생에너지 소비량은 전체 에너지 소비량에서 신재생 에너지 소비 비중을 곱하여 계산하였다. 모든 자료는 1인당 지표를 사용하여 인구 규모에 따른 CO₂ 배출에 대한 영향을 배제하였다.

<표 2> 사용 변수의 정의 및 단위

변수	정의	단위
<i>E</i>	1인당 CO ₂ 배출량	Metric tons
<i>Y</i>	1인당 실질 GDP	US\$ (2010=100)
<i>TE</i>	1인당 에너지 소비량	kg of oil equivalent
<i>RE</i>	1인당 신재생에너지 소비량	kg of oil equivalent

<표 3>은 분석 기간의 각 변수별 기초통계량을 보여준다. 개별 변수를 살펴보면 23개 분석대상 국가의 1인당 평균 소득은 약 45,421달러로 나타났으며, 1인당 CO₂ 배출량은 10.05MT, 1인당 평균 에너지 소비량은 약 5.0TOE이며, 이 중 신재생에너지가 약 22% 인 1.1TOE를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

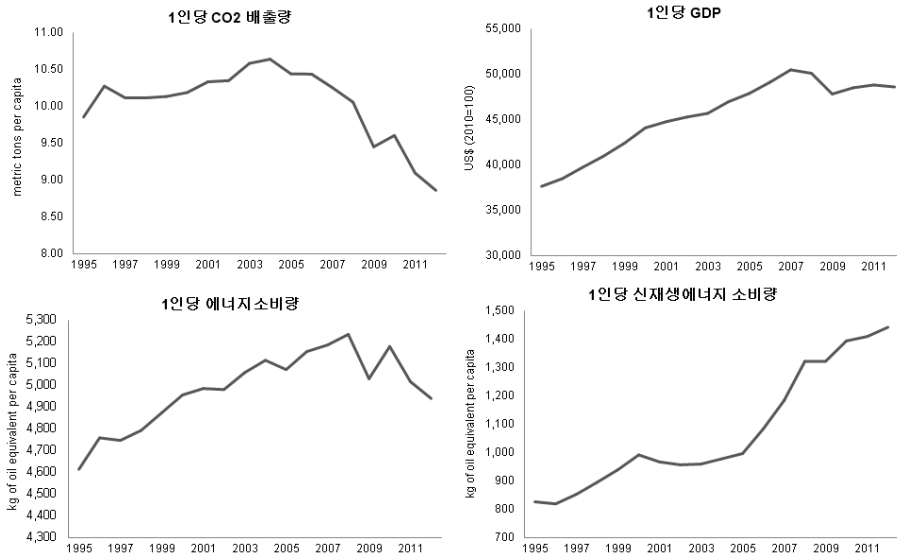
<표 3> 분석 자료의 기초통계량

변수(단위)	평균	표준편차	최솟값	최댓값
<i>E</i> (metric tons per capita)	10.05	4.30	4.38	24.82
<i>Y</i> (US\$ 2010=100)	45,421.13	17,104.39	18,081.62	110,001.05
<i>TE</i> (kg of oil equivalent)	4,984.28	2,404.62	1,986.84	18,157.60
<i>RE</i> (kg of oil equivalent)	1,074.94	1,862.93	33.01	13,887.09

<그림 1>은 본 연구의 분석에 사용되는 각 변수에 대한 Annex B 국가들의 평균값에 대한 시계열 변화추이를 나타내고 있다. Annex B 국가의 CO₂ 배출량은 1995년부터 2005년까지는 전체적으로 증가하는 추세를 보이다가 2006년부터 뚜렷한 감소세를 나타내는데, 특히 2009년에는 CO₂ 배출량이 급감한 것을 볼 수 있다. 이는 교토의정서 발

효에 따른 Annex B 국가들의 온실가스감축 노력 혹은 세계 경제위기에 따른 생산성 감소에 의한 온실가스배출의 자연적 감소 때문일 것으로 추측할 수 있다.

〈그림 1〉 사용변수의 연도별 평균 변화추이(1995년~2012년)



자료: World Bank (2016)

총 에너지 소비량 또한 2008년 이후 큰 폭으로 감소한 후 2010년 증가세를 보였으나, 2011년 다시 감소세로 돌아서 전체적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 이 또한 교토의 정서 발효 또는 세계 경제침체의 영향일 것으로 판단된다. 신재생에너지 소비량의 경우 분석 기간 동안 지속적으로 소폭 증가하는 형태를 나타낸다.

III. 실증분석 결과

CO₂ 배출량과 독립변수들 간 관계의 구조변화가 언제 발생하였는지를 알아보기 위해 Quandt-Andrews 구조변화 검정을 수행한 결과, 1995~2007년 및 2008~2012년 두 기간 사이에서 F -통계치가 최댓값($F_{(21,372)} = 22.16$)을 가지는 것으로 나타나 2008년

이후 구조변화가 발생한 것으로 분석되었다. 즉, Annex B 국가들은 2005년 교토의정서 발효로부터 약 3년 후이면서 교토의정서 1차 공약기간이 시작된 2008년부터 온실가스 배출의 감축이 발생하였음을 의미한다. 그러나 이러한 구조변화가 교토의정서 발효에 따른 Annex B 국가의 온실가스감축 노력으로 인한 것인지, 동 기간 중 발생한 세계 경제 위기에 따른 전 세계적 산업부문 생산의 감소에 따른 것인지 명확하지 않으므로 모형의 분석을 통해 이를 분석할 필요가 있다. 따라서 위 결과를 바탕으로 본 연구에서는 2008년을 기준으로 그 이전과 이후 두 기간에 대하여 각 설명변수가 CO₂ 배출에 미친 영향을 식 (7)과 (8)을 추정하여 비교 분석하였다.

<표 4>는 Quandt-Andrews 구조변화 검정 결과에 따라 Annex B 국가의 CO₂ 배출량의 구조변화가 발생한 2008년을 기준으로 1995~2007년과 2008~2012년 두 기간에 대해 1단계 추정인 식 (7)을 추정한 결과이다.

<표 4> 기간별 Annex B 국가의 1단계 추정결과(종속변수 = ln Y)

변수	1995~2012년		1995~2007년		2008~2012년	
	추정치	t-statistic	추정치	t-statistic	추정치	t-statistic
ln TE	0.43	7.30***	1.00	3.25***	0.31	4.56***
상수	7.04	14.18***	2.23	12.27***	8.13	14.25***

주: ***는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄

총 에너지 소비량의 1% 증가는 전체 분석기간에서는 0.43%의 소득 증가를 가져왔으며, 구조변화 이전과 이후 기간에 대해서는 각각 1%와 0.31%의 소득 증가를 가져온 것으로 나타났다. 구조변화 이후 에너지 소비량 증가에 따른 소득의 증가율이 그 이전에 비해 감소한 것은 2007년 하반기 발생한 세계 경제위기에 따른 산업부문의 생산성 감소 때문일 것으로 유추할 수 있다. 즉, 에너지 소비변수 추정치의 상대적 감소는 에너지 효율성이 감소한 것으로 해석될 수 있으므로 세계 경제위기에 따른 영향으로 사료된다. 다른 측면에서 해석한다면, 교토의정서의 발효에 따라 Annex B 국가들이 친환경 정책의 일환으로 에너지 효율성 증가를 위해 노력하였으나, 에너지 효율성은 상대적으로 감소한 것으로 나타나 그 효과가 유의하지 못했던 것으로 생각할 수 있다.

〈표 5〉 기간별 Annex B 국가의 2단계 추정결과(증속변수 = $\ln E$)

변수	1995~2011년		1995~2006년		2007~2011년	
	추정치	t-statistic	추정치	t-statistic	추정치	t-statistic
$\widehat{\ln Y}$	52.65	17.26***	6.77	11.07***	64.35	2.96***
$\widehat{\ln Y}^2$	-2.37	-16.90***	-0.28	-9.87***	-2.81	-2.78***
$\ln RE$	-0.11	-12.20***	-0.10	-10.86***	-0.09	-2.13**
상수	-288.49	-17.41***	-37.51	-11.34***	-364.01	-3.12***

주: ***, **은 각각 1% 및 5%에서 통계적으로 유의함을 나타냄

〈표 5〉는 앞서 추정된 〈표 4〉를 통해 추정된 소득변수($\widehat{\ln Y}$)를 이용하여 2단계 추정식(8)을 추정한 결과이다. 추정결과 CO₂ 배출량과 소득 및 소득의 제곱값에 대해서는 모두 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하며 각각 정(+)과 부(-)의 관계를 갖는 것으로 나타나 환경쿠즈네츠 가설이 성립함을 알 수 있다. 그러나 전체 분석기간을 기준으로 계산된 소득 변곡점(income threshold)은 약 66,727달러로 분석대상국의 평균인 약 45,421달러보다 높은 것으로 나타나 분석기간 중 분석대상국의 CO₂ 배출량은 소득에 대해 단조 증가하면서 변곡점에 다가가고 있는 상태에 있음을 알 수 있다.⁶⁾ 이 결과를 앞서 설명한 에너지 소비와 소득 간의 관계와 같이 살펴보면, 구조변화 시점인 2008년 이후 에너지 효율성이 그 이전에 비해 상대적으로 감소하였고 소득이 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 지속적인 증가상태를 보이는 것으로 미루어 볼 때, 교토의정서의 발효가 Annex B 국가들의 온실가스 감축을 가져왔다고 판단할 근거는 부족한 것으로 사료된다.

신재생에너지 소비량($\ln RE$)의 경우 구조 변화시점 전후 모두 부(-)의 부호를 가지며, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하여 양 기간 간 신재생에너지 소비량의 증가가 CO₂ 배출을 감소시킨 것으로 나타났다. 기간 별 추정결과를 비교해보면 구조변화 발생 이전인 1995~2007년에는 신재생에너지 소비량이 1% 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 0.10% 감소한 것으로 나타났으며, 2008년 이후에는 신재생에너지 소비량 1% 증가가 0.09%의

6) 식 (8)을 추정한 값에 대해 소득변곡점은 $e^{-\beta_1/2\beta_2}$ 으로 계산되며, 구조변화 이전과 이후에 대해서도 각 기간의 소득 평균이 약 44,131달러와 48,777달러로 CO₂ 배출량은 소득이 증가함에 따라 단조 증가하는 상태에 있음을 알 수 있다.

CO₂ 배출량 감소를 가져온 것으로 분석되었다. 구조변화 시점을 기준으로 신재생에너지 소비가 CO₂ 배출량의 감축에 미친 영향이 아주 미미하면서 낮아진 것으로 보아 Annex B 국가들의 신재생에너지 정책 효과 또한 크지 않았음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때, 교토의정서 Annex B 국가들의 CO₂ 배출량 변화는 교토의정서의 발효에 따른 영향보다는 세계 경제위기에 따른 영향이 더 큰 것으로 유추할 수 있다.

IV. 결론 및 시사점

기후변화에 대응하기 위한 교토의정서가 2005년 발효된 이후 온실가스 감축 의무대상국으로 분류되는 Annex B 국가들은 온실가스 감축을 위하여 에너지 소비 효율의 향상, 신재생에너지 증가 및 환경세 도입 등 다양한 정책적 조치를 취하고 있다. 이와 같은 기후변화에 대한 국제적인 공조와 더불어 기후변화협약이 실제 온실가스 감축에 미친 영향에 관한 관심이 증대되고 있다. 그러나 교토의정서 발효 이후 2007년 세계 경제위기의 발발로 이들 국가의 온실가스 감축의 효과가 환경정책에 따른 것인지 생산성 감소에 따른 것인지에 대한 대립의견이 존재하고 있다. 따라서 본 연구는 교토의정서의 Annex B 국가들을 대상으로 CO₂ 배출량과 소득 및 신재생에너지 소비 간의 구조적 변화가 언제 발생하였는지를 Quant-Andrews 구조변화 검정을 통해 규명하고, 이 시점을 기준으로 하여 CO₂ 배출의 변화를 비교분석하였다.

Quandt-Andrews 구조변화 검정 결과 교토의정서 발효 3년 후인 2008년에 CO₂ 배출량의 감축이 발생한 것으로 나타났다. 분석결과 에너지 소비량의 1% 증가가 구조변화 이전에는 1%의 소득 증가를 가져왔으며, 그 이후에는 0.31%의 소득 증가를 가져온 것으로 나타났는데, 이는 2007년 하반기 발생한 세계 경제위기에 따른 산업부문의 생산성 감소에 따른 영향이며, Annex B 국가들의 에너지 효율 증가 정책의 효과가 유의하지 못했던 것으로 사료된다. 소득과 CO₂ 배출량의 관계를 추정한 결과 분석 대상국가에 대해서 환경쿠즈네츠 가설이 성립함을 알 수 있다. 그러나 전체 분석기간을 기준으로 계산된 소득 변곡점(약 66,727달러)이 분석 대상국가의 평균(약 45,421달러)보다 높은 것으로 나타나 분석기간 중 분석대상국의 CO₂ 배출량은 소득에 대해 단조 증가하면서 변곡점에

다가가고 있는 상태에 있음을 알 수 있었다. 신재생에너지 소비량의 증가는 CO₂ 배출을 감소시킨 것으로 나타났으나, 구조변화 시점을 기준으로 신재생에너지 소비가 CO₂ 배출량의 감축에 미친 영향이 아주 미미하면서 낮아진 것으로 분석되어 Annex B 국가들의 신재생에너지 정책 효과 또한 크지 않았음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합해 보면, 구조변화 시점인 2008년 이후 에너지 효율성이 그 이전에 비해 상대적으로 감소하였고 소득이 증가함에 따라 CO₂ 배출량이 지속적인 증가 상태를 보이며, 신재생에너지 정책의 효과 또한 미미한 것으로 나타나 교토의정서의 발효가 Annex B 국가들의 온실가스 감축을 가져왔다고 판단할 근거는 부족한 것으로 유추 가능하였다. 따라서 교토의정서 Annex B 국가들의 CO₂ 배출량 변화는 교토의정서의 발효에 따른 영향보다는 세계 경제위기에 따른 영향이 더 큰 것으로 유추할 수 있었다.

[References]

- 김수이, “동아시아 국가의 에너지소비, GDP, 무역의 상호 연관관계 분석”, 「에너지경제연구」, 제14권 제1호, 2015, pp. 35~64.
- 김재화·김현석, “신재생에너지 발전이 우리나라 CO₂ 배출에 미치는 영향분석”, 「에너지경제연구」, 제14권 제3호, 2015, pp. 185~201.
- 김지욱, “아시아 국가들 환경오염배출량의 확률수렴성과 환경쿠르즈네츠크선가설 검증”, 「자원·환경경제연구」, 제19권 제3호, 2010, pp. 571~598.
- 모수원·김창범, “에너지 소비와 경제성장의 동태적 인과관계”, 「자원·환경경제연구」, 제12권 제2호, 2003, pp. 327~346.
- 박창원·김진욱·김정인, “주요 OECD 국가의 환경쿠르즈네츠크선 검증”, 「자원·환경경제연구」, 1999, 제8권 제1호, pp. 77~108.
- 신동현·김동하·조하현, “구조변화를 고려한 우리나라 전력소비의 변동성 증가에 관한 연구”, 「에너지경제연구」, 2014, 제13권 제2호, pp. 131~169.
- 온실가스종합정보센터, 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 2014.
- 유병철, “OECD 국가들의 경제성장과 이산화탄소 배출: 패널공적분에 의한 분석”, 「국제

- 경제연구」, 제7권 제3호, 2001, pp. 125~143.
- 이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교”, 「환경 정책연구」, 제9권 제4호, 2010, pp. 53~76.
- 정군오·정영근, “경제성장과 이산화탄소 배출에 관한 다국가 비교분석”, 「산업경제연구」, 제17권 제4호, 2004, pp. 1077~1098.
- 조정환·강만옥, “한국의 전력소비와 경제성장의 인과관계 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제21권 제3호, 2012, pp. 573~593.
- Agras, J, and D. Chapman, “A Dynamic Approach to the Environmental Kuznets Curve Hypothesis,” *Ecological Economics*, Vol. 28, 1999, pp. 2391~2400.
- Aichele, R., and G. Felbermayr, “The Effect of the Kyoto Protocol on Carbon Emissions,” *Journal of policy analysis and management*, Vol. 32, No. 4, 2013, pp. 731~757.
- Akinlo, A. E, “Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from 11 Sub-Sahara African Countries.” *Energy Economics*, Vol. 30, No. 5, 2008, pp. 2391~2400.
- 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.
- Friedl, B. and M. Getzner, “Determinants of CO₂ Emissions in a Small Open Economy,” *Ecological Economics*, Vol. 45, No. 1, 2003, pp. 133~148.
- Glasure, Y. U. and A. -R. Lee, “Cointegration, Error-correction, and the Relationship between GDP and Energy: The case of South Korea and Singapore,” *Resource and Energy Economics*, Vol. 20 No. 1, 1998, pp. 17~25.
- Kraft, J. and A. Kraft, “Relationship between energy and GNP,” *J. Energy Dev(United States)*, Vol. 3, No. 2, 1978.
- Kumazawa, R. and M. S. Callaghan, “The Effect of the Kyoto Protocol on Carbon Dioxide Emissions,” *Journal of Economics and Finance*, Vol. 36, No. 1, 2012, pp. 201~210.
- Ringquist, E. J. and K. Tatiana, “Assessing the Effectiveness of International Environmental Agreements: the Case of the 1985 Helsinki Protocol,” *American Journal of Political Science*, Vol. 49, No. 1, 2005, pp. 86~102.
- Shafik, N., “Economic Development and Environmental Quality: an Econometric Analysis,” *Oxford Economic Papers*, 1994, pp. 757~773.
- Soytas, U. and R. Sari, “Energy Consumption and Income in G-7 Countries,” *Journal of*

Policy Modeling, Vol. 28, No. 7, 2006, pp. 739~750.

World Bank, World Development Indicator, Website <http://databank.worldbank.org/data/views/variableSelection/selectvariables.aspx?source=world-development-indicators>. Accessed February 14, 2016.