

한국의 CO₂ 배출, 경제성장 및 에너지믹스와의 관계 분석*

정용훈**·김수이***

〈요 약〉

환경과 경제성장과의 관계는 환경경제학 분야에서 오랜 동안 논란이 되어왔으며, 논란의 핵심은 두 변수간의 내생성(endogeneity)과 생략변수(omitted variables)들에 관한 문제들이다. 본 연구는 논란의 핵심들을 고려하여 우리나라의 1981년~2008년까지의 시계열자료를 바탕으로 CO₂ 배출량과 경제성장 간의 인과관계 및 에너지믹스의 영향을 실증적으로 분석하였다. 에너지믹스와 계량경제학 문제들을 고려한 대부분의 모형에서 CO₂ 배출량과 경제성장의 관계가 역 U자형이라는 EKC 가설을 확인할 수 있었으며, 에너지믹스가 국내 온실가스 감축에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 에너지믹스가 CO₂ 배출에 미치는 영향은 원자력에너지가 다른 에너지원에 비해 CO₂ 배출량 감축에 가장 큰 기여를 하였으나, 신재생에너지는 CO₂ 감축에 거의 기여하지 못한 것으로 분석되었다. 이는 지금까지 국내에서 신재생에너지 비중이 다른 에너지원에 비해 적었기 때문이다. 또한 최종 에너지 소비부문은 CO₂ 증가와 수송부문의 연관성이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

주제어 : CO₂ 배출, 환경쿠즈네츠곡선, 에너지믹스

* 이 논문은 2011학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행되었음.

** 에너지경제연구원 부연구위원 (제1저자).

*** 원광대학교 국제통상학부 조교수 (교신저자).

The relationship between environment and economic growth has been controversial for a long time. The cores of controversy are endogeneity problem and omitted variable bias. This paper tests EKC (Environmental Kuznets Curves) hypothesis by considering econometric issues and estimates the effects of energy mix on CO₂ emissions empirically and tests with time series during 1981~2008. By the results of this analysis, we convince EKC Hypothesis which the relationship between CO₂ emissions and economic growth is the inverted U-shaped and the national energy mix contributes significantly to GHG mitigation. We also find that the nuclear energy has the greatest contribution for CO₂ mitigation and the renewable energy does not seem to contribute little to the CO₂ mitigation because the proportion of renewable energy in Korea is negligible. In terms of final energy consumption, CO₂ increases and transportation sector is statistically and significantly associated.

Keywords : greenhouse gas emissions, EKC, energy mix

JEL 분류 : Q40, Q54

I. 서 론

2009년 코펜하겐 기후변화 당사국 총회를 전후하여 우리나라는 2020년에 온실가스를 BAU(Business as Usual) 대비 30% 감축하기로 대내외에 선언하였다. 따라서 기후변화 대응 온실가스 감축은 우리나라가 향후 10년 동안 달성해야 하는 당면과제가 되었다.

온실가스 배출에서 에너지 부문의 CO₂ 배출이 차지하는 비중은 85% 이상으로 절대적이기 때문에 온실가스 감축을 위해서는 대부분 에너지 연소에서 발생하는 CO₂ 감축이 뒤따를 수밖에 없다. 그러나 이러한 CO₂ 감축은 에너지 소비 감소로 이어지며, 이는 경제성장의 둔화가 우려된다. 따라서 지금까지 대부분의 CO₂ 배출량의 결정요소에 관한 연구는 환경쿠즈네츠곡선¹⁾의 성립 여부에 초점이 맞추어져 있었다. 하지만 반드시 CO₂ 배출량 감축이 경제성장을 저해시키는 것은 아니다. 환경쿠즈네츠가설(Environmental Kuznets Curves : EKC 가설)에 따르면 경제 수준이 일정 수준 이상에 이르면 환경오염과 경제성장이 비례하지 않기 때문이다.

우리나라의 경우, 온실가스 배출과 경제성장 간의 상관관계에 대한 분석은 이광훈(2010), 이광훈·이춘화(2009) 등의 연구가 있다. 이광훈(2010)은 우리나라 전국을 5개 광역 경제권으로 구분하여, 권역별로 이산화탄소 배출량에 대한 EKC를 추정·비교하였다. 이 분석에 의하면 5개 권역 모두에서 CO₂ 배출에 대한 EKC의 존재를 상당히 일관되게 확인하였다. 이광훈·이춘화(2009)는 수도권 서울·인천·경기 3개 지역의 이산화탄소 배출에 대한 EKC 가설을 검증

1) Selden and Song(1994)과 Grossman and Krueger(1995)의 연구는 EKC 가설을 지지하고 있으며, Holtz-Eakin and Selden(1995)과 Huang *et al*(2008)은 이러한 가설을 지지하지 않고 있다. 특히 Brock and Taylor(2004, 2005)와 Galeotti *et al*(2009), Marrero(2010)의 연구에서와 같이 CO₂로 한정하여 환경변수를 지정한 분석에서는 EKC 가설을 지지하지 않고 있다.

하였으며, SUR 모형을 통해 EKC의 존재를 확인하였다. 그 외에도 우리나라에만 국한된 연구는 아니지만 최충익·김지현(2006)은 CO₂ 배출량을 중심으로 30개 OECD 국가의 1990년~2002년에 걸친 패널자료를 바탕으로 EKC 가설이 통계적으로 유의한 가설임을 증명하였으며, 정군오·정영근(2004)은 83개 국가에 대한 1961년~1996년 패널자료를 이용하여 소득구간별로 이산화탄소 배출에 대한 EKC를 추정하고 일부 소득구간에서 EKC 가설의 존재를 확인하였다. 김정인·김진욱·박창원(1999)도 주요 OECD 국가의 1985년~1994년 자료를 이용하여 이산화탄소, 아황산가스, 이산화질소 및 질소산화물, 분진, 휘발성 유기화합물 등에 대한 EKC의 존재 여부를 검증하였다. 이상의 연구는 EKC 가설 검증에 대한 연구가 대부분이다.

해외연구에서는 온실가스 배출과 경제성장 그리고 에너지의 상호관계를 연구한 최근 몇몇 문헌들이 존재하는데 Alvarez *et al.*(2005), Brock and Taylor (2004, 2005), Marrero(2010), Ang(2007, 2008)의 연구를 들 수 있다. 대부분의 문헌들에서 경제성장뿐만 아니라 에너지 부문도 온실가스 배출량에 영향을 미치는 중요한 변수라는 것을 발견하였다. 특히 Marrero(2010)는 EU 국가들에 대한 패널데이터를 활용하여 온실가스 배출과 성장 그리고 에너지믹스에 대한 연관관계를 종합적으로 분석하였다. 이들의 연구는 Alvarez *et al.*(2005)과 Brock and Taylor(2004, 2005)의 연구에 에너지 변수를 추가하였다. 한편 Ang(2007, 2008)은 시계열분석 기법인 VAR를 활용하여 각각 프랑스와 말레이시아에서의 온실가스 배출, 에너지, 경제성장에 대한 관계를 분석하였다. Ang(2007, 2008)의 연구에서는 에너지 소비와 배출량의 관계에 초점을 맞추어 분석하였는데 반해 Marrero(2010)의 연구에서는 비록 유럽연합(European Union)의 경우에 국한되었지만 에너지 소비뿐만 아니라 에너지믹스 변수를 추가하여 이것이 미치는 효과도 동시에 분석하였다.

기존 CO₂ 배출량 감축에 관한 우리나라 연구들의 문제점들은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 CO₂ 배출량의 결정요소로서 경제성장 외에 다른 요소에 대한 고려가 거의 없었다는 것이다. 특히 지금까지 살펴본 대로 우리나라

라의 경우 온실가스 배출과 경제성장과의 관계를 분석한 연구는 다수 존재하지만, 에너지 변수를 종합적으로 고려하여 상관관계를 분석한 연구는 아직 없다. 이는 분석을 위한 충분한 데이터 부족과 에너지 부문이 CO₂ 배출에 미치는 영향의 중요성을 간과하였기 때문이다.²⁾ 해외연구의 사례에서와 같이 에너지 부문의 에너지믹스는 배출량에 영향을 줄 수 있는 또 하나의 요소가 될 수 있다. 따라서 EKC 가설을 검증함에 있어서도 에너지믹스를 종합적으로 고려하여 분석하는 것이 바람직하다. 둘째, CO₂ 배출량과 경제성장 간의 관계를 설명하는 EKC 가설을 확인하기 위한 분석에서 두 변수간의 내생성 문제와 에너지 소비를 독립변수로 고려시 에너지 소비와 경제성장 간에 발생하는 다중공선성(multicollinearity) 문제를 고려하지 않은 계량분석은 두 변수의 명확한 관계를 확인할 수 없게 한다는 것이다. 따라서 위에서 언급한 계량경제학적 문제들을 종합적으로 고려하였을 때, EKC 가설의 명확한 확인이 가능하며, 명확한 CO₂ 배출량과 경제성장과의 관계 속에서 다른 요소들을 고려해야만 CO₂ 배출량에 영향을 미치는 다른 요인을 발견할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 기존 연구에서 고려하지 않았던 계량경제학적 문제들을 고려하여 EKC 가설을 확인하고, 두 변수의 명확한 관계 속에서 에너지 부문 특히 에너지믹스가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 본 연구는 논란이 되고 있는 CO₂ 배출량과 경제성장과의 관계를 보다 명확히 해 줄 뿐만 아니라, 경제성장이 CO₂ 배출량에 미치는 영향을 제외하고 국내 및 해외의 많은 기존연구들이 소홀히 다루어 온 온실가스 배출량에 영향을 미치는 다른 요소를 발견하는 데 크게 기여할 것이다.

본 연구에서는 우리나라를 대상으로 온실가스배출, 에너지, 경제성장에 대한

2) 다른 환경변수와는 달리 기후변화 관련 CO₂ 배출에 대한 환경쿠즈네츠가설을 검증함에 있어서 에너지 부문을 반드시 고려해야 하는 이유는 에너지원별로 탄소배출계수가 상이하며, 이로 말미암아 에너지믹스의 변화는 전체 CO₂ 배출에 큰 영향을 미치기 때문이다. IPCC의 탄소배출계수는 대표적으로 원유(20 C kg/GJ), 휘발유(18.90 C kg/GJ), LNG(15.30 C kg/GJ), 무연탄(26.80 C kg/GJ) 등으로 석탄류, 석유류, 가스류 순으로 배출계수가 높다. 원자력과 신재생의 경우에는 배출계수를 0으로 간주한다.

상관관계를 종합적으로 분석하기 위하여 다양한 계량경제학적 분석 방법과 에너지 소비 및 믹스 변수를 활용하였다. 각 변수들간의 상호 연관관계를 다양한 분석 방법을 사용함으로써 가장 설명력이 높은 모형을 판별하였으며, 우리나라에 대한 분석 결과와 Marrero(2010)의 분석 결과를 상호 비교하여 유럽과 우리나라의 에너지, 온실가스 배출, 에너지믹스 사이에 어떠한 구조적인 차이점이 있는지를 밝혀내었다.

본 연구는 온실가스 배출 중에서도 이산화탄소(CO₂)에 초점을 맞추어 분석하였다. 이는 우리나라의 온실가스 배출에 대한 데이터가 1990년부터 가능한 데 반해 이산화탄소에 대한 데이터는 그 이전부터 가능할 뿐만 아니라 온실가스의 대리변수(proxy variable)로서 이산화탄소를 사용하여도 연구의 일반적인 결론을 왜곡하지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 따라서 본 연구를 위한 충분한 시계열을 확보하기 위해서 분석대상을 이산화탄소(CO₂)로 한정하였으며, 이는 에너지 소비 및 믹스와의 종합적인 분석을 위한 연구범위를 1981년~2008년까지 28년으로 확장할 수 있게 해주었다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ장에서는 우리나라의 온실가스 배출, 경제성장, 에너지믹스에 대한 현황을 살펴보고, 제Ⅲ장과 제Ⅳ장에서는 분석모형을 제시하고 회귀분석의 주요 결과를 분석하면서 여러 선행연구 결과와 상호 비교한다. 마지막 제Ⅴ장에서는 본 연구 결과를 마무리하고 시사점을 제공한다.

Ⅱ. CO₂ 배출량, 에너지 소비 및 믹스

국내 온실가스 배출량은 <표 1>에서 보는 바와 같이, 1990년에는 3억 540만 톤 CO₂ 배출에서 2007년에는 6억 2,000만 톤 CO₂ 배출로 증가하였다. 이는 1990년~2007년까지 불과 17년 동안 연평균 4.7% 증가율로 우리나라 온실가스 배출량은 이 기간 동안 거의 2배가 되었다. 2007년 기준으로 우리나라의 온실

가스 배출량 중 에너지 연소에 의한 배출량 증가가 총배출량의 84.7%를 차지하고 있다. 한편 산업공정, 농업, 폐기물에서 나오는 온실가스 배출량은 각각 9.8%, 3.0%, 2.5%를 차지하고 있다.

본 연구에서는 이러한 우리나라의 온실가스 배출량 중 에너지 연소에 의한 온실가스 배출량을 대상으로 한다. 에너지 연소에 의한 온실가스 배출량이 전체 배출량의 84.7%를 차지하고 있을 뿐만 아니라 경제성장과도 밀접한 관계가 있기 때문이다. 게다가 에너지 연소에 의한 온실가스 배출은 대부분이 CO₂ 배출이다. 따라서 에너지 소비와 경제성장 및 온실가스 배출 간의 관계에 대한 고려는 본 연구의 실증분석을 보다 의미 있게 하는 출발점이다.

<그림 1>은 국내 1인당 CO₂ 배출량과 1인당 에너지 소비, 그리고 1인당 GDP 현황을 나타내고 있다. 규모(scale)는 비록 다르다고 할지라도 이 세 가지

<표 1> 국내 온실가스 배출 현황

(단위: 백만 톤 CO₂)

	1990	1995	2000	2005	2006	2007	1990~2007 증가율(%)
에너지	247.8 (81.1)	372.2 (80.7)	438.8 (82.1)	498.9 (83.6)	505.9 (83.9)	525.4 (84.7)	4.5
산업공정	19.9 (6.5)	47.1 (10.2)	58.3 (10.9)	64.8 (10.9)	63.7 (10.6)	60.9 (9.8)	6.8
농업	15.2 (5.0)	22.4 (4.9)	20.6 (3.9)	18.2 (3.1)	17.5 (2.9)	18.4 (3.0)	1.1
폐기물	22.5 (7.4)	19.5 (4.2)	16.7 (3.1)	14.7 (2.5)	15.6 (2.6)	15.3 (2.5)	-2.2
총배출량	305.4 (100.0)	461.2 (100.0)	534.4 (100.0)	596.7 (100.0)	602.6 (100.0)	620.0 (100.0)	4.3

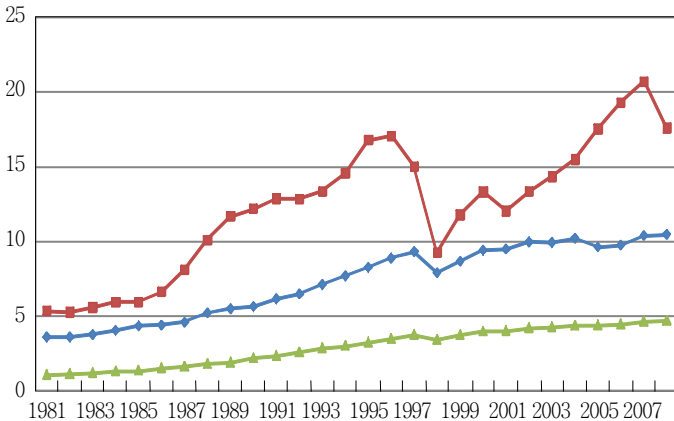
주 : 산림부문의 흡수원에 대한 통계는 제외함.

자료: 에너지경제연구원.

변수의 추세는 비슷한 패턴을 보이고 있다. 다만, <그림 1>에서 1인당 에너지 소비의 변화량보다는 1인당 CO₂ 배출량의 변화량이 더 크고, 1인당 CO₂ 배출량의 변화량보다는 1인당 GDP의 변화가 더 커 보인다는 것을 알 수 있다. 따라서 정확한 두 변수들간의 상관관계는 다음 장에서 분석하는 계량경제학 분석을 통해서 나타날 것이다. 특히 1인당 GDP와 1인당 에너지 소비의 추세는 비록 표본의 수가 많이 부족하더라도 상당히 높은 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 실증분석에서 다중공선성의 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 모형에서 이 두 변수의 대리변수를 사용하여 이러한 문제점을 해결하였다.

한편 CO₂ 배출량은 에너지 소비 구성의 변화와도 연관관계가 있다. 왜냐하면 에너지믹스의 변화는 동일한 열량을 소비하더라도 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있기 때문이다. 우리나라 에너지믹스의 변화를 살펴보면 다음과 같다. <그림 2>에서 보는 바와 같이, 1981년에 석탄의 비중은 33.3%였는데, 점점 늘어나 1985년에는 39.1%까지 증가하였다. 그 이후 점점 감소하여 1995년에 18.8%를 기록

<그림 1> 국내 CO₂ 배출량, 에너지 소비량, 국민소득

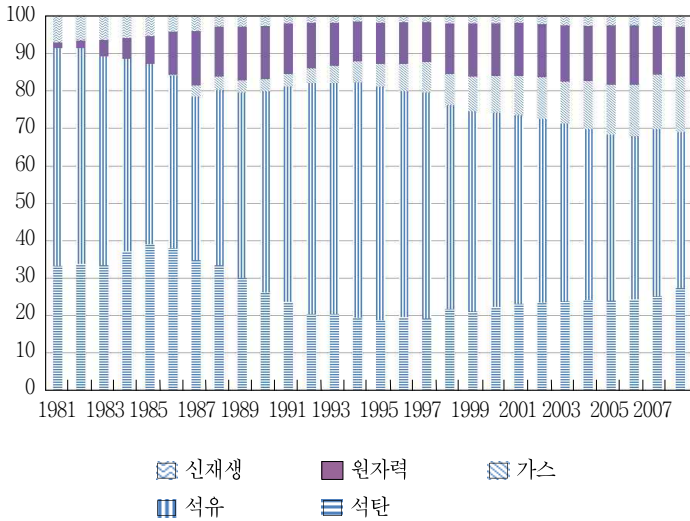


◆ 1인당 배출량(톤) ■ 1인당 GDP(천달러) ▲ 1인당 에너지 소비(TOE)

자료: World Economic Indicators, 한국은행.

〈그림 2〉 국내 에너지원별 1차 에너지 소비

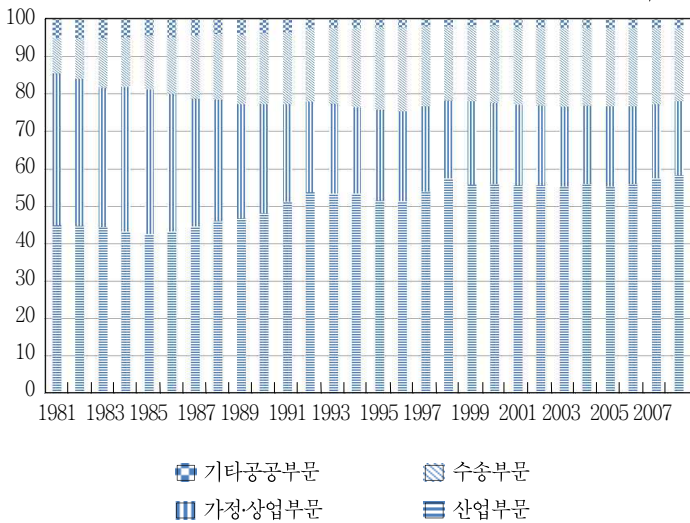
(단위: %)



자료: 에너지경제연구원.

〈그림 3〉 국내 에너지 부문별 에너지 수요

(단위: %)



자료: 에너지경제연구원.

한 이후 그 비중은 다시 늘어나기 시작하였다. 한편 석유비중은 1981년에 58.1%를 차지한 이후 점점 감소하여 1987년에는 46.4%로 감소하였으나 다시 증가하여 1994년에는 62.9%까지 증가하였다. 그 이후 석유비중은 다시 감소하여 2008년 41.6%에 머무르고 있다. 그리고 가스에 대한 비중은 해마다 증가하고 있다. 1987년 3.1%이던 것이 2008년에는 14.8%로 증가하였다. 한편 원자력에 대한 비중은 지난 20년 동안 10.7%에서 16.15%로 등락을 거듭하고 있다. 신재생(수력 포함) 비중은 1981년 6.9%이던 것이 점점 감소하여 1994년 1.4%로 감소하였다. 1980년대에 이 비중이 높은 것은 대부분 수력발전의 비중이 높았기 때문이다. 1994년 이후에는 낮은 비중이기는 하지만 조금씩 증가하여 2008년에는 2.7%를 보이고 있다. 이는 태양력, 풍력 등의 다양한 신재생에너지 도입이 증가하고 있기 때문이다. 이와 같은 에너지원 구성 비중은 전체 CO₂ 배출량에 영향을 미치게 된다. 비록 저탄소 에너지원의 비중 증가가 CO₂ 배출을 줄이는 역할을 하지만 <그림 1>에서 보는 바와 같이 에너지 소비가 증가하므로 CO₂ 배출이 증가한다.

<그림 3>은 국내 에너지 부문별 에너지 수요를 나타내고 있다. 각 에너지 부문별 에너지믹스에 의해서도 CO₂ 배출량에 영향을 미치게 된다. 산업부문에 대한 에너지 비중은 시기별로 다소 등락하지만 대체로 꾸준히 비중이 늘어나고 있다. 1981년에 44.5%이던 산업부문의 에너지 비중은 2008년에는 58.3%로 증가하였다. 가정·상업부문 에너지 수요는 해마다 그 비중이 감소하고 있다. 1981년에 40.6%에서 2008년에는 19.8%로 감소하였다. 수송부문의 에너지 수요는 1981년에 9.5%에 불과하였으나 1996년에 22.3%까지 증가하였고 그 이후에는 20%대를 유지하고 있다. 기타공공부문은 비중이 5% 이하로서 1981년에 4.8%였다가 그 이후 점점 감소하여 2008년에는 2.2%를 유지하고 있다. 이와 같이 산업부문과 수송부문의 에너지 비중은 증가한 반면 가정·상업부문과 기타공공부문의 에너지 비중은 감소하고 있다. 특히 산업부문의 에너지 비중이 증가한 이유는 철강산업, 석유화학산업, 시멘트산업 등 에너지 다소비업종의 비중이 증가하였기 때문이다.

〈표 2〉 변수의 기본통계량

	관측수	평균	표준편차	최소값	최대값
Log (1인당 CO ₂ 배출량, 톤)	28	1.92	0.37	1.28	2.35
Log (1인당 GDP, 천달러)	28	2.43	0.42	1.66	3.03
Log (1인당 에너지 소비량, TOE)	28	0.96	0.50	0.04	1.54
석유비중	28	52.39	6.65	41.61	62.92
가스비중	28	6.50	5.00	0.00	14.82
원자력비중	28	11.74	3.97	1.58	16.05
신재생비중	28	2.92	1.66	1.41	6.93
석탄비중	28	26.46	6.37	18.67	39.12
산업용비중	28	51.32	5.23	42.59	58.31
가정·상업비중	28	27.07	7.11	19.79	40.66
수송용비중	28	18.61	3.47	9.55	22.56
기타공공비중	28	2.99	1.20	1.75	5.12

본 연구는 1981년~2008년까지 우리나라의 온실가스배출량, 에너지 관련 변수들과 경제 수준을 대표하는 변수를 활용하였다. <표 2>는 본 연구에서 사용한 변수들의 기본통계량을 나타내고 있다. 1인당 CO₂ 배출량의 Log 평균값은 1.92이고, 최소값은 1.28, 최대값은 2.35를 나타내고 있다. 1인당 GDP의 Log 평균값은 2.43이고, 최소값은 1.66, 최대값은 3.03이다. 1인당 에너지 소비량의 Log값의 평균은 0.96이고, 최소값은 0.04, 최대값은 1.54이다. 석유, 가스, 원자력, 신재생에너지에 대한 값은 비중을 사용하였으며, 평균은 석유비중이 52.4%로 가장 높은 값을 나타내고 있다. 수요 부문별 비중은 산업용의 평균값이 51.3%로 가장 높은 값을 나타내고 있고, 가정·상업, 수송용이 그 뒤를 잇고 있다.

Ⅲ. 계량분석 모형 및 자료

본 연구의 분석모형은 기존의 분석모형에 비하여 계량경제학의 두 가지 측면에서 개선을 시도하였다. 첫 번째는 독립변수를 구성하는 1인당 GDP와 1인당 에너지 소비 사이의 다중공선성(multicollinearity)에 의하여 발생하는 EKC 가설에 대한 불명확성을 불식시켰으며, 둘째는 도구변수를 활용하여 1인당 GDP와 1인당 CO₂ 배출량 사이에 존재하는 내생성(endogeneity) 문제를 해결하려고 시도하였다. 이와 같은 계량경제학 측면의 개선은 경제성장과 CO₂ 배출량 사이에 역 U자형의 관계가 있다는 EKC 가설의 사실 여부를 명확히 해줄 수 있으며, 경제성장을 제외한 CO₂ 배출량에 영향을 주는 다른 요소들의 효과(최종 에너지원별 소비비중과 최종에너지 부문별 소비비중)를 정확하게 추정할 수 있게 해준다.

실증분석의 개선된 점을 확인하기 위하여 우선 1인당 에너지 소비와 에너지 관련 변수들을 포함한 기존의 회귀분석을 실행하여 문제점을 확인하고, 문제점을 개선하기 위하여 1인당 GDP와 1인당 에너지 소비 간의 선형관계를 고려한 새로운 변수를 생성한 후 같은 회귀분석을 실행하였다. 또한 1인당 CO₂ 배출량과 1인당 GDP 간의 내생성 문제를 해결하기 위하여 도구변수를 활용한 1차 회귀방정식을 통해 1인당 GDP에 대한 새로운 변수를 추정하여 2차 회귀방정식을 실행하였으며, 시간 및 다양한 비관찰요소(unobserved factor)들을 배제하기 위하여 차분 방정식을 활용한 회귀분석을 통해 EKC 가설과 경제성장 이외의 에너지믹스의 변화가 1인당 CO₂ 배출량에 미치는 효과에 대한 일관된 결과를 도출하는지 여부를 분석하였다.

본 연구에서 사용한 1인당 CO₂ 배출량과 에너지 소비량은 World Bank의 World Economic Indicators를 활용하였다. 1인당 실질 GDP는 한국은행의 1인당 명목 GDP(달러)를 한국은행의 소비자 물가지수(2005 = 1)로 나누어서 구하

였으며, 최종 에너지원별 소비 비중과 최종에너지 부문별 소비 비중은 에너지경제연구원의 「에너지통계연보」 각 연호에서 가져왔다.

식 (1)은 재생성과 다중공선성을 고려한 후 회귀방정식에 적용되는 기본 분석 모형이다. 본 연구 분석모형의 시계열은 1981년~2008년까지 28년을 분석대상으로 하였다. 우리나라 데이터를 활용한 최초의 분석이며, 경제성장 이외에 에너지 부문의 다양한 변수들을 고려하였기 때문에 경제학적으로 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

$$p_t = time + \lambda_1 y_t + \lambda_3 y_t^2 + \theta_1 e_t + \sum_{j=1}^{J-1} \delta_j m_{jt} + \sum_{k=1}^{K-1} \psi_k s_{kt} + \epsilon_t$$

$$t = 1982, \dots, 2008 \quad (1)$$

p_t 는 t 기의 1인당 CO₂ 배출량, y_t 는 t 기의 1인당 실질 GDP, 그리고 e_t 는 t 기의 1인당 1차 에너지 소비이다. 그리고 y_t^2 은 t 기의 배출량과 경제성장 간의 역 U자형 관계를 확인하여 EKC 가설을 검증하기 위한 조정변수(control variable)이다. 1인당 1차 에너지 소비를 나타내는 e_t 는 총에너지 사용효과(aggregate energy use effect)를 나타낸다. m_{jt} 는 j 에너지원의 비중을 나타내는데 이는 1차 에너지 소비의 배분을 나타낸다. 에너지원별 비중을 나타내는 변수들은 에너지믹스 효과(energy mix effects)를 나타낸다. 따라서 $m_{oil,t}$ 는 석유의 비중, $m_{gas,t}$ 는 가스의 비중, $m_{clear,t}$ 는 원자력의 비중, $m_{renew,t}$ 는 신재생의 비중을 나타낸다. 따라서 Δm_{jt} 는 j 에너지원의 t 기의 차분변수이다.

s_{kt} 는 부문별 에너지 소비의 비중이며, 이는 에너지 구성 효과(energy composition effect)를 나타낸다. $s_{industry,t}$ 는 각각 t 기의 산업용 수요의 비중, $s_{house,t}$ 는 가정용 수요의 비중, $s_{trans,t}$ 는 수송용 수요의 비중을 나타낸다.

1차 에너지는 석유, 석탄, 가스, 원자력, 신재생의 다섯 가지로 분류한다. 따라서 여기에서 $J = 5$ 이고, m_{ij} 는 총에너지 소비에 대하여 각각의 에너지 소비의 비중이며, $\sum_{j=1}^J m_{ij} = 1, \text{ for } \forall t$ 으로 나타난다. 부문별 에너지 소비에 대해

서도 동일한 방법을 적용한다. 여기에서는 산업부문, 수송부문, 가정부문, 기타공공 부문으로 나눈다. 따라서 $K = 4$ 이고, s_k 는 전체 에너지 소비에서 각 부문이 차지하는 비중이며, $\sum_{j=1}^K s_{kt} = 1$, for $\forall t$ 이다.

식 (1)에서 선형종속(linearly dependent)의 문제를 해결함과 동시에 에너지 원별과 소비별에 따른 CO₂ 배출량에 미치는 효과를 측정하기 위하여 여러 개의 m_j 중에서 하나와 여러 개의 s_k 중에서 하나를 제거한다. 여기에서는 제거되는 m_j 는 m_{coal} , 즉 석탄의 비중이며, 제거되는 k_j 는 k_{others} , 즉 기타공공부문이다.

마지막으로 식 (1)에서 불편추정량을 추정하여 ϵ_t 는 백색잡음(white noise)으로 아래와 같이 가정한다. 즉, 평균은 0이고 i.i.d를 가정한다.

$$E(\epsilon_t) = 0 \text{ for } t = 2, \dots, T; \quad E(\epsilon_t \epsilon_s) = 0 \text{ for } t = 2, \dots, T; \quad (2)$$

시계열분석을 통한 차분 방정식의 경우에는 CO₂ 배출량, GDP 에너지 소비량이 모두 단위근을 가지고 있기 때문에 시계열을 안정화하기 위하여 Log 차분 방정식을 이용하기로 하였다. 따라서 본 분석모형은 각 로그변수를 차분하여 시계열을 안정화한 후 상호 연관관계를 분석하였다. 식 (2)는 본 연구에서 활용한 로그차분 시계열분석 모형이다.

$$\Delta p_t = \lambda_1 \Delta y_t + \lambda_3 \Delta y_t^2 + \theta_1 \Delta e_t + \sum_{j=1}^{J-1} \delta_j \Delta m_{jt} + \sum_{k=1}^{K-1} \psi_k \Delta s_{kt} + \epsilon_t$$

$$t = 1982, \dots, 2008 \quad (3)$$

Δp_t 는 t 기의 1인당 CO₂ 배출량의 Log 차분변수, Δy_t 는 t 기의 1인당 실질 GDP의 Log 차분변수, 그리고 Δe_t 는 t 기의 1인당 1차 에너지 소비의 Log 차분변수이다. 그리고 Δy_t^2 은 식 (1)의 수준 방정식과 마찬가지로 t 기의 배출량과 경제성장 간의 역 U자형 관계를 확인하여 EKC 가설을 검증하기 위한 조정변수(control variable)이며, Δm 과 Δs 는 j 와 i 부문의 t 기의 차분변수이다. 그 외의 모든 가정은 식 (1)에서와 마찬가지로이다.

IV. 분석 결과

본 논문의 기여는 첫째, EKC 가설을 검증함에 있어 기존 연구의 계량경제학적 방법론에 대한 문제점을 제시하였다는 것과 둘째, 기존 연구에서 생략된 에너지믹스 변수들을 활용하여 본 연구에서 제기된 계량경제학적 문제점을 검증한 후 경제성장과 CO₂ 배출량 간의 역 U자형 관계인 EKC 가설을 확인하였다는 것이다.

과거 논문들은 EKC 가설을 검증함에 있어서 패널데이터를 주로 사용하였다. 이러한 패널데이터는 주로 OECD 국가나 EU 국가들을 대상으로 해서 분석하게 되는데 본 논문에서와 같이 특정 국가를 대상으로 해서 분석할 경우에도 패널데이터와 마찬가지로 고려해야만 하는 공통적인 계량경제학적인 문제들을 내포하고 있다. 본 연구에서 다룬 계량경제학적 문제점은 첫 번째 내생성의 문제이다. 즉, CO₂ 배출량, 에너지, GDP 등의 변수는 상호간에 영향을 미침으로써 어떤 변수가 일방향으로 영향을 미쳤다고 보기에는 힘들다. 이를 해결하기 위해서 본 연구에서는 회귀방정식의 내생성이 존재하는지 여부를 통계적으로 검증한 후 내생성이 존재할 경우 도구변수³⁾를 사용하여 내생성 문제를 해결하도록 하였다. 내생성의 문제를 해결하기 위해서 VAR나 VECM 방법론을 사용할 경우 그 방향성은 분석에 의해서 도출할 수 있으나 우리가 궁극적으로 관심을 가진 환경쿠즈네츠가설을 검증함에 있어서는 그 계수값에 대한 확신을 가질 수 없다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 도구변수를 사용한 것이다. 두 번째 문제점은 다중공선성의 문제이다. 이러한 다중공선성은 에너지 변수와 GDP 변수 간에 존재할 수 있다. 즉, 경제가 성장함에 따라 에너지 수요가 이에 비례해서 증가하는 것이다. 이러한 다중공선성의 문제점을 해결하기 위해서 우

3) 1차 회귀방정식에서 활용된 도구변수들의 계수 유의성을 검증하는 F -test를 통하여 도구변수의 적절성 여부를 검증하였다.

선 다중공선성이 존재하는지⁴⁾를 검증하였으며, 이러한 검증 하에 계량경제학적인 문제점을 해결하였다.

구체적으로 위에서 언급한 계량경제학 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서 어떻게 적용하였는지 살펴보도록 하자. 우선, GDP와 CO₂ 배출량 간의 내생성 문제가 존재하는지 여부를 판단해야 하는데 이를 위해 직관적인 방법과 Hausman test를 활용하였다. 두 변수의 내생성에 대한 직관적인 판단을 다음과 같은 예를 통해 고려할 수 있다. CO₂ 배출량의 증가는 환경오염에 의한 부(-)의 외부효과로서 경제발전을 저해할 수 있다는 것이다. 다시 말하면, GDP 증가에 의한 경제성장은 CO₂ 배출량을 증가시키고, 동시에 CO₂ 배출량의 증가는 사람들의 건강을 해침으로써 GDP를 감소시킨다는 경제성장과 환경오염의 역방향 인과관계(reverse causality)를 의미하고, 또 한편으로 경제성장과 환경오염의 증가는 거의 동시에 발생한다는 것이다.

본 연구에서는 위와 같은 내생성 문제를 약화시킴과 동시에 경제성장에 대한 불편 추정량을 추정하기 위하여 기존 문헌에서 활용하지 않은 도구변수(instrument variable)를 활용한 회귀분석을 시도하였으며 이를 통해 에너지믹스 변수를 고려하지 않은 기존 실증분석의 문제점을 제기하였다. 사용된 도구변수들은 총통화(M2)⁵⁾와 연령 의존성 비율⁶⁾이다. 이들 두 변수들은 GDP에 대한 도구들로서 합리적이고 신뢰할 만하다고 판단된다. 왜냐하면, 두 도구변수들은 GDP와 관련이 있지만, CO₂ 배출량과는 연관이 없기 때문이다. 총통화량의 증가가 GDP에 영향을 주어 CO₂ 배출에 간접적으로 영향을 미칠 수 있는 가능성

4) 다중공선성의 존재와 해결책을 모색하기 위해 다양한 회귀분석을 통하여 독립변수의 계수의 부호 및 크기가 급변하는지 여부와 변수간의 상관관계를 파악하였으며, 두 변수(GDP와 에너지)의 계수간에 선형관계를 고려하여 두 변수의 합을 새로운 대리변수로 생성하거나 둘 중의 한 변수를 생략하여 다중공선성을 해결하려고 하였다.

5) 협의통화(M1)는 현금통화와 요구불예금 수시입출식예금(투신사 MMF 포함)의 합계를 의미하며, 총통화(M2)는 협의통화(M1)와 만기 2년 미만 금융상품(예적금, 시장형 및 실적 배당형, 금융채 등)의 합계이다. 마지막으로 금융기관 유동성(Lf, 종전 M3)은 총통화(M2)와 2년 이상 유동성 상품, 생보사 보험계약준비금 등을 합한 것과 같다.

6) 전체 경제활동인구에 대한 65세 이상 인구의 비율이다.

은 있지만, 총통화량이 증가하였다고 CO₂ 배출이 증가할 것이라는 논리는 신빙성이 없다. 또한 연령 의존성 비율의 경우, 전체인구 중 높은 노인인구의 비중은 낮은 경제 수준과 성장률을 기록하도록 영향을 미치지만, CO₂ 배출과는 거의 관련이 없다. 이러한 도구변수를 활용한 방법은 CO₂ 배출량에 대해 경제성장과 총에너지 소비 그리고 에너지믹스가 미치는 영향을 올바르게 밝혀낼 것이다.

다중공선성의 문제는 변수들의 상관관계와 다양한 회귀방정식에서 독립변수들의 구성에 따라 계수가 민감하게 변화하는 모습을 통해 판별할 수 있었다. 본 연구에서는 에너지 소비량은 CO₂ 배출량과 관련된 가장 중요한 변수이기도 하지만 GDP와 밀접한 관계를 맺고 있기 때문에 다른 변수와의 관계를 왜곡시킬 수 있는 높은 가능성을 가지며, 다중공선성으로 인한 회귀 결과의 왜곡은 독립변수들에 총에너지 소비량 변수의 포함 여부에 따라 <표 3>의 일관성 없는 회귀분석 결과를 통해 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 에너지 소비량을 회귀방정식의 독립변수에서 제외하거나 에너지 소비량과 GDP의 일정한 선형관계를 가정하여 CO₂ 배출량의 중요한 요소인 에너지 소비량을 포함시키면서 GDP와 에너지 소비량 간의 다중공선성을 해결하도록 하였다.

우선 EKC 가설을 검증해온 기존 연구와 마찬가지로 에너지믹스 변수들의 고려 없이 회귀방정식을 실행하여 <표 3>의 결과를 얻었다. 첫 번째 회귀 결과의 GDP와 GDP 제곱의 계수를 살펴보면 우리나라에서 EKC 가설이 성립함을 알 수 있다. 하지만 앞에서 언급했듯이 GDP와 CO₂ 배출량 간에서 내생성 문제가 있을 수 있기 때문에 경제성장을 나타내는 두 변수들의 계수가 불편추정량이라고 확정지을 수가 없다. 따라서 회귀방정식 내에서 내생성 여부를 판단하기 위해 적절한 도구변수를 활용하여 Hausman test를 실행하였을 때 내생성이 존재하는 것으로 나타났다. <표 3>의 식 (2)는 회귀방정식 내의 내생성 문제를 해결하기 위해 적절한 도구변수를 활용하여 추정된 결과이다. 내생성 문제를 해결하였을 때, 우리나라에서 경제성장과 CO₂ 배출량 간의 역 U자형 관계는 존재하지 않는 것으로 나타났다. 또한, EKC 가설을 검증함에 있어 중요한 변수로 고려되고 있는 총에너지 소비를 추가한 식 (3)의 결과에서도 EKC 가설

〈표 3〉 온실가스 배출량과 CO₂ 배출과 에너지믹스, 경제성장과의 연관관계

	(1) 일인당 배출량 (p_1)	(2) 일인당 배출량 (p_2)	(3) 일인당 배출량 (p_3)	(4) 일인당 배출량 (p_4)	(5) 일인당 배출량 (p_5)	(6) 일인당 배출량 (p_6)	(7) 일인당 배출량 (p_7)
연도(time)	0.0335*** (0.00353)	0.0319*** (0.00406)	-0.00655 (0.00398)	0.0274*** (0.00336)	0.0328*** (0.00422)		
1인당 GDP(y_t)	1.451*** (0.449)	-0.272 (0.520)	-0.421 (0.254)		-0.388 (0.415)	0.736 (0.558)	0.0965 (0.945)
(1인당 GDP) ² (y_t^2)	-0.263** (0.0988)	0.117 (0.114)	0.0878 (0.0522)	-0.275** (0.0741)	0.147 (0.0944)	-0.0942 (0.113)	0.0117 (0.107)
1인당 에너지 소비량(e_t)			0.856*** (0.0791)				0.578** (0.208)
GDP+ 에너지($y_t + e_t$)				1.464*** (0.327)			
Hausman test	F(1, 22)=16.32 Prob>F=0.0005		F(1, 21)=0.30 Prob>F=0.5883	F(1, 22)=15.44 Prob>F=0.0007			
IV relevance	F(1,22)=26.35 Prob>F=0.0000		F(1,22)=0.51 Prob>F=0.4845	F(1, 22)=27.50 Prob>F=0.0000			
	F(2, 23)=52.63 Prob>F=0.0000		F(2, 22)=71.97 Prob>F=0.0000	F(2, 23)=34.65 Prob>F=0.0000			
	F(2, 23)=33.17 Prob>F=0.0000		F(2, 22)=57.65 Prob>F=0.0000	F(2, 23)=19.38 Prob>F=0.0000			
N	28	28	28	28	28	27	27
R ²	0.963	0.951	0.994	0.971	0.954	0.480	0.610
adi. R ²	0.958	0.945	0.993	0.967	0.948	0.437	0.560
F	205.7	154.3	928.8	265.6	166.1	11.09	12.01

주: 1) 1인당 GDP, 1인당 에너지 소비량, 1인당 배출량은 모두 로그값을 취했음.

2) 식 (2), 식 (5)는 1단계 회귀방정식에서 도구변수(금융과 인구관련 변수)들을 활용하여 회두한 추정치를 활용한 2단계 회귀방정식의 결과임.

3) 식 (6), 식 (7)은 종속변수와 독립변수들을 차분하여 안정적인 시계열로 변환한 후 얻은 결과임.

4) 도구변수의 적절성과 내생성에 대한 검증에서 첫 번째는 GDP와 관련된 결과이며, 두 번째는 GDP 제곱에 관련된 결과임.

5) Standard errors in parentheses, * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 임.

은 성립되지 않았다. 식 (3)에서도 Hausman test를 통하여 GDP와 CO₂ 배출량의 내생성이 존재하는 것으로 검증되었고, 도구변수를 활용하여 회귀분석한 결과 식 (4)와 같이 EKC 가설이 성립하지 않는다는 결과를 얻었다. 식 (3)의 경우 식 (1)과는 다르게 GDP와 총에너지 소비 간의 다중공선성 문제가 회귀변수들의 계수값을 왜곡시킬 수 있기 때문에 식 (5)와 같이 GDP와 총에너지 소비 간의 관계를 활용한 새로운 변수를 생성하여 회귀분석을 실행하였다. 다중공선성을 해결⁷⁾한 회귀분석 결과는 식 (1)과 식 (4)에서 나타난 것과 같이 EKC 가설이 성립함을 보여주고 있다. 하지만 변수들간의 내생성을 고려할 경우 식 (2)와 식 (5)의 결과와 같이 우리나라에서 경제성장과 CO₂ 배출량 간의 역 U 자형 관계를 설명하는 EKC 가설은 성립하지 않는다. 또한 식 (6)과 식 (7)에서와 같이 차분을 통하여 안정된 시계열을 확보한 후 실행한 회귀분석에서도 EKC 가설이 성립하지 않고 있다는 것을 보여주고 있다.

그렇다면 지금까지의 회귀분석 결과를 통해 우리나라에서 EKC 가설은 성립하지 않는다고 결론지어야 하는가?

본 연구는 EKC 가설 성립 여부를 분석할 때 경제성장과 CO₂ 배출량 및 총에너지 소비만을 고려할 경우 계량경제학적 방법론을 활용하더라도 계수값에 대한 불편추정량을 검증하는 데에는 한계가 있음을 지적하고 있다. EKC 가설을 검증하기 위하여 CO₂ 배출량의 변화를 GDP와 총에너지 소비만을 고려할 경우 CO₂ 배출량에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 에너지믹스 변수들을 생략함으로써 GDP와 CO₂ 배출량 간의 진실된 관계를 왜곡할 수 있다는 것이다. 따라서 EKC 가설을 명확히 검증하기 위해서는 우선 내생성 여부를 판단하여 내생성이 존재할 경우 적절한 도구변수를 활용하여 내생성을 제거한 후, 기존에 고려된 변수들뿐만 아니라 에너지믹스와 관련한 변수들(최종 에너지원별 소비 비중과 최종에너지 부문별 소비 비중)까지 고려하여 회귀분석을 실행해야만 EKC 가설의 명확한 검증이다.

7) 본 연구에서는 GDP와 에너지 소비 간의 다중공선성 문제를 해결하기 위해 에너지 소비 변수를 제외하거나 두 변수 사이의 일정한 선형관계를 가정하여 새로운 변수를 도출하였다.

<표 4>의 식 (1)은 GDP, 총에너지 소비와 CO₂ 배출량과 함께 에너지믹스 변수들을 모두 고려한 회귀방정식 결과이다. <표 4>에서 확인할 수 있는 것은 두 가지 측면이 있다. 하나는 에너지믹스와 배출량 간의 관계이며, 다른 하나는 부문별 에너지 수요와 배출량 간의 관계이다. 에너지믹스 변수들을 고려한 후 기존의 회귀방정식과 마찬가지로 도구변수를 설정하여 내생성을 검증한 결과 내생성이 없는 것으로 나타났으며, 회귀방정식의 결과는 <표 4>의 식 (1)과 같이 GDP와 CO₂ 배출량 간의 역 U자형의 관계가 분명하게 존재하고 있음을 보여주고 있다. 총에너지 소비와 GDP 사이에 존재하는 다중공선성의 문제도 식 (2)의 결과에 비추어 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며, 식 (3)과 같이 총에너지 소비와 GDP 간의 선형관계를 고려한 새로운 변수를 생성하여 다중공선성 문제를 해결하였을 때에도 경제성장과 CO₂ 배출량 사이의 역 U자 관계를 보이고 있기 때문에 EKC 가설이 일관되게 성립함을 알 수 있다. 따라서 이를 유럽의 국가별 패널데이터를 활용하여 EKC 가설을 검증한 Marrero(2010)의 연구 결과와 비교해 보았을 때, 에너지 소비, 에너지믹스 등을 고려한 Marrero(2010)의 연구에서는 EKC 가설이 확인되지 않는 반면, 우리나라의 경우에는 에너지 부문의 요인을 고려하였을 때, EKC 가설이 뚜렷이 확인되었다는 점에서 차이가 있다. Marrero(2010)의 연구가 패널데이터를 활용하였다는 점에서는 한 국가만을 활용한 본 연구에 비해 통계적 우위에 있을 수 있으나, 본 연구는 EKC 가설을 검증하는 과정에서 내포된 내생성, 다중공선성 및 중요 변수의 생략과 같은 계량경제학적 문제들을 체계적으로 측정하고 해결하면서 우리나라에서 EKC 가설을 확인하였다. 이는 EKC 가설을 명확히 검증하였다는 것뿐만 아니라 향후 EKC 가설과 관련된 연구 방법에 대한 기본적인 틀을 제공하고 있다.

두 번째는 CO₂ 배출량은 다른 일반 환경변수와는 달리 에너지 사용량에 대부분 의존한다는 것이다. 따라서 경제발전단계보다는 국내 에너지믹스와 연관관계가 높다는 것이다. 에너지믹스와 배출량 간의 관계를 보면 <표 4>의 결과에서 보는 바와 같이 CO₂ 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 원자력에

<표 4> 온실가스 배출량과 CO₂ 배출과 에너지믹스, 경제성장과의 연관관계 (수준변수)

	(1) 일인당 배출량 (p_t)	(2) 일인당 배출량 (p_t)	(3) 일인당 배출량 (p_t)
연도 (time)	0.0457*** (0.00853)	0.00861 (0.0171)	0.0370*** (0.00741)
1인당 GDP (y_t)	1.737*** (0.480)	1.129** (0.493)	
(1인당 GDP) ² (y_t^2)	-0.369*** (0.0959)	-0.231** (0.102)	-0.355*** (0.0808)
1인당 에너지 소비량 (e_t)		0.596** (0.247)	
GDP + 에너지 ($y_t + e_t$)			1.690*** (0.409)
석유비중 ($m_{oil,t}$)	0.00847* (0.00420)	-0.00192 (0.00568)	0.00588 (0.00396)
가스비중 ($m_{gas,t}$)	0.0185* (0.00927)	0.00860 (0.00915)	0.0155* (0.00887)
원자력비중 ($m_{clear,t}$)	-0.0175** (0.00668)	-0.0215*** (0.00612)	-0.0190*** (0.00636)
신재생비중 ($m_{renew,t}$)	-0.0283 (0.0232)	-0.00885 (0.0220)	-0.0216 (0.0222)
산업용비중 ($s_{industry,t}$)	0.0346 (0.0275)	0.0173 (0.0253)	0.0298 (0.0259)
가정상업비중 ($s_{house,t}$)	0.0667** (0.0264)	0.0321 (0.0274)	0.0579** (0.0249)
수송비중 ($s_{trans,t}$)	0.0690** (0.0268)	0.0388 (0.0268)	0.0610** (0.0254)
<i>Hausman test</i>	F(1, 15)=1.47 Prob>F=0.2437 F(1,15)=1.45 Prob>F=0.2469	F(1, 14)=0.51 Prob>F=0.4851 F(1,14)=0.53 Prob>F=0.4772	F(1, 15)=1.68 Prob>F=0.2141 F(1, 15)=1.65 Prob>F=0.2185
<i>IV Relevance</i>	F(1, 17)=5.62 Prob>F=0.0298 F(1, 16)=2.14 Prob>F=0.1621	F(1, 16)=5.26 Prob>F=0.0356 F(1, 16)=2.14 Prob>F=0.1630	F(1, 17)=4.98 Prob>F=0.0393 F(1, 17)=1.64 Prob>F=0.2175
<i>N</i>	28	28	28
<i>R²</i>	0.997	0.998	0.998
adj. <i>R²</i>	0.996	0.997	0.996
<i>F</i>	614.5	717.7	695.3

- 주: 1) 1인당 GDP, 1인당 에너지 소비량, 1인당 배출량은 모두 로그값을 취했음.
 2) 도구변수(인구 관련 변수만 활용)의 적절성과 내생성에 대한 검증에서 첫 번째는 GDP와 관련된 결과이며, 두 번째는 GDP 제곱에 관련된 결과임.
 3) Standard errors in parentheses, * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 임.

너지를 들 수 있다. 즉, 여러 가지 에너지원 중에서 지금까지 일관되게 통계적으로 유의하게 CO₂ 배출량에 영향을 미친 요인은 원자력에너지라는 것을 알 수 있다. 이는 과거 20년 동안 원자력에너지가 국내에서 급속히 확대되었고, 이러한 원자력에너지 확대는 경제성장에 따른 에너지 수요의 상당한 부문을 감당해 왔으며, 결과적으로 CO₂ 감축에 기여한 것이라 해석할 수 있다. 그 외에도 여전히 부문별 에너지 소비는 가정·상업, 수송 부문의 비중 증가가 공공부문에 비해 CO₂ 배출량 증가에 기여하는 것으로 나타났으며, 식 (2)를 제외하고는 95%의 신뢰구간에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 석유비중의 경우에는 식 (1)에서만 비록 낮은 90% 신뢰구간에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 가스 비중의 경우에는 식 (1)과 식 (3)에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 비록 석유보다는 가스가 온실가스 배출계수가 낮아 저탄소에 기여하는 것으로 알려져 있지만 국내의 경우에는 가스의 비중이 그리 높지 않아 통계적으로 저탄소에 기여한 것으로 나타나지는 않았다. 하지만 이러한 결과는 우리나라에서 가스의 사용비중이 증가하고 보다 보급이 활성화된다면 향후에는 통계적으로 저탄소에 기여할 것으로 판단된다. 이러한 원자력비중, 석유비중, 가스비중의 결과를 종합해 볼 때 본 회귀식에서 제외된 변수인 석탄비중의 계수값이 양(+)의 값을 나타낼 것이라고 추정할 수 있다.⁸⁾ 즉, 온실가스 배출계수가 큰 석탄은 배출량 증가에 기여했다고 판단된다. 또한 부문별 에너지 수요와 배출량 간의 관계에서는 가정·상업 부문과 수송부문의 비중이 커질수록 배출량이 증가하는 것으로 나타났으며, 식 (1)과 식 (3)에서 가정·상업 부문과 수송부문을 통계적으로 유의한 것으로 나타냈다.⁹⁾ <표 4>의 결과를 종합해 보면, 분명한

8) 석탄비중을 포함하여 석유비중, 가스비중, 신재생비중을 회귀분석해본 결과 석탄비중의 경우 99%의 신뢰구간 하에서 CO₂ 증가에 기여하는 것으로 확인되었다. 또한 석유비중과 가스비중도 CO₂ 증가에 기여하는 것으로 확인되었다. 그리고 석탄비중이 가장 높은 계수값을 나타내고 있어 CO₂ 증가에 가장 크게 기여한다고 판단된다. 다만, 이러한 경우의 수를 모두 고려하여 분석할 경우, 너무 많은 분석 결과를 제시하게 되므로 본 논문에서는 분석 결과를 따로 제시하지 않았다.

9) 본 회귀식에서 제외된 변수인 기타공공부문을 포함하여 회귀분석하여 본 결과 기타공공부문

〈표 5〉 온실가스 배출량과 CO₂ 배출과 에너지믹스, 경제성장과의 연관관계 (차분변수)

	(1) 일인당 배출량 (Δp_t)	(2) 일인당 배출량 (Δp_t)	(3) 일인당 배출량 (Δp_t)
1인당 GDP (Δy_t)	1.521*** (0.520)	1.073* (0.571)	
(1인당 GDP) ² (Δy_t^2)	-0.278** (0.105)	-0.190 (0.114)	-0.264*** (0.0890)
1인당 에너지 소비량 (Δe_t)		0.356 (0.222)	
GDP + 에너지 ($\Delta(y_t + e_t)$)			1.449*** (0.441)
석유비중 ($\Delta m_{oil,t}$)	-0.00386 (0.00507)	-0.00842 (0.00563)	-0.00558 (0.00491)
가스비중 ($\Delta m_{gas,t}$)	-0.00619 (0.0123)	-0.00766 (0.0118)	-0.00739 (0.0118)
원자력비중 ($\Delta m_{clear,t}$)	-0.0282*** (0.00719)	-0.0290*** (0.00690)	-0.0290*** (0.00691)
신재생비중 ($\Delta m_{renew,t}$)	-0.0147 (0.0203)	-0.00868 (0.0198)	-0.0111 (0.0197)
산업용비중 ($\Delta s_{industry,t}$)	0.0342 (0.0261)	0.0267 (0.0254)	0.0306 (0.0252)
가정상업비중 ($\Delta s_{house,t}$)	0.0417 (0.0266)	0.0277 (0.0269)	0.0357 (0.0258)
수송비중 ($\Delta s_{trans,t}$)	0.0604** (0.0273)	0.0486* (0.0272)	0.0553* (0.0264)
<i>N</i>	27	27	27
<i>R</i> ²	0.820	0.845	0.835
adj. <i>R</i> ²	0.725	0.748	0.747
<i>F</i>	8.614	8.725	9.540

주: 1) 사용된 모든 변수는 차분되었으며, 모든 변수들은 안정적인 시계열임을 확인함.

2) 1인당 GDP, 1인당 에너지 소비량, 1인당 배출량은 모두 로그값을 취했음.

3) Standard errors in parentheses, * $p < 0.10$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 임.

이 CO₂ 감소에 기여하였다는 통계적으로 유의한 결과를 보여주지는 못하고 있다. 그러나 계수값은 모두 음(-)의 값을 나타내고 있다.

사실은 원자력에너지가 온실가스 감축에 기여하였다는 것이다.

<표 5>는 다중공선성 및 내생성 문제뿐만 아니라 시계열(time series)에 존재하는 문화적 또는 시대적 흐름과 같은 비관찰적인 요소(omitted variables)를 고려하기 위하여 차분방정식을 고려하였다.¹⁰⁾ <표 5>의 안정된 시계열을 통한 회귀분석 결과는 <표 4>에서와 같이 모든 회귀방정식에서 EKC 가설이 통계적으로 확인되었다. <표 4>의 결과와 그 방향성에 있어서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 단지 석유비중과 가스비중의 통계적 유의성이 다소 감소하고 부호가 음(-)으로 전환되었다. 하지만 이는 통계적으로 유의한 계수값이라고 볼 수 없어 단정적인 해석을 내리기는 힘들다. 부문별 에너지 수요 패턴의 차이에서는 수송용에서 통계적 유의성이 감소하기는 하였으나, 여전히 유의한 결과가 도출된 반면 산업용과 가정·상업용 부문은 배출량 감축과는 통계적으로 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. <표 5>에서도 일관적으로 나타나는 특징은 <표 4>에서와 마찬가지로 원자력 에너지가 온실가스 감축에 크게 기여하였다는 것과 수송부문의 에너지 소비가 온실가스 배출을 주도하고 있다는 것이다.

이상에서와 같이 우리나라에서 에너지믹스를 종합적으로 고려하여 EKC 가설을 검증해 보았을 때, EKC 가설이 뚜렷이 확인되고 있는 것으로 판단되며, 이러한 결과는 경제성장만을 고려하여 EKC 가설을 검증할 때 논란이 되는 문제를 에너지믹스를 고려함으로써 많은 부분이 해결될 수 있음을 보여주고 있다. 위의 회귀 결과들에 따르면 우리나라의 경제발전단계를 고려하였을 때 우리나라는 역 U자형의 하향곡선을 그리고 있다는 것을 의미한다. 또한 CO₂ 배출량은 에너지믹스에 의해 많은 부분이 설명될 수 있으며, 이는 CO₂ 배출량이 에너지믹스와 높은 연관관계를 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 기후변화에 대응한 온실가스 감축 정책을 효율적으로 이행하기 위해서는 지속가능한 경제

10) 본 분석에서의 시계열의 안정성을 검증하기 위해 Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test를 실시하였다. 이 결과에 의하면 1인당 배출량과 1인당 에너지 소비량은 모두 수준 변수가 안정적이지 않아서 차분한 결과 99%의 신뢰구간 하에서 안정적이 되었으며, 1인당 GDP의 경우에는 95%의 신뢰구간 하에서 안정적이었지만 차분한 결과 99% 수준에서 안정적인 시계열이 됨을 알 수 있다.

발전을 도모해야 함과 동시에 국내 에너지믹스에 대한 정책이 중요하다. 이를 위해 원자력에너지 및 신재생에너지에 대한 보급 및 확산 정책을 통해 CO₂ 배출량의 효과적인 감축성과를 향상시킬 수 있을 것이다.

V. 결 론

지금까지 우리나라의 CO₂ 배출량과 경제성장 그리고 에너지믹스의 연관관계에 대한 분석을 살펴보았다. 데이터의 시계열이 짧음에도 불구하고 우리는 몇 가지 상당히 의미 있는 연구 결과들을 도출하였다.

첫째, 비록 모형의 한계를 고려하더라도 본 연구에서는 경제성장과 CO₂ 배출량의 관계가 역 U자형이라는 EKC 가설을 명확히 확인할 수 있었다. GDP와 CO₂ 배출량 간의 관계를 명확히 확인하기 위한 단계에서 항상 장벽으로 존재하는 계량경제학적인 문제인 다중공선성과 내생성 문제에 대하여 변수들간의 선형관계와 도구변수 추정을 통해 계량경제학적 문제들을 해결하기 위한 시도를 통하여 확인된 EKC 가설의 검증은 상당히 의미 있다고 판단된다. 다만, 우리나라만을 대상으로 한 연구이기 때문에 우리나라의 경제발전단계를 고려한 결과의 해석은 향후 다양한 경제발전단계에 위치한 여러 나라들에 대한 패널분석 및 국가별 비교분석이 필요함을 인식하게 해주었다.

둘째, 우리는 에너지원 믹스와 부문별 에너지 소비가 CO₂ 배출량 감축에 경제 성장과 더불어 중요한 요소라는 것을 발견하였다. 에너지믹스를 보면 지금까지 우리나라의 CO₂ 배출량 감소에 가장 큰 영향력을 끼친 에너지원은 원자력인 것으로 나타났다. 모든 회귀모형에서 원자력이 CO₂ 배출량 감축에 가장 큰 역할을 하고 있으며, 통계적으로도 모두 1% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 최종에너지원별 믹스를 고려한 모형들에서는 석유, 가스, 신재생에너지에 대한 계수값이 일부 음(-)으로 나타나 온실가스 감축에 기여한 것으로 나타났지만

모형에 따라서 결과의 일관성이 약한 편이다. 즉, 일부 모형에서 통계적인 유의성을 확보하지 못하였다. 이는 변수에서 제외된 석탄이 온실가스 증가에 기여한 것으로 해석할 수 있으며 부가적인 회귀분석을 통해서 이를 확인하였다. 대표적인 온실가스 감축 에너지원인 신재생에너지의 효과가 예상과는 다르게 통계적인 유의성을 끌고루 확보하지 못한 것은 우리나라 신재생에너지에 대한 비중이 너무 작고 미미했기 때문인 것으로 분석된다. 우리나라보다 신재생에너지의 비중이 큰 선진국들의 연구 결과를 바탕으로 판단할 때 향후 신재생에너지 비중의 확대는 신재생에너지의 온실가스 감축에 미치는 효과를 증가시킬 것으로 예상된다.

셋째, 우리나라의 최종에너지 부문별 소비를 보면, 산업용 수요와 가정용 수요, 그리고 수송부문의 계수값이 양(+)을 나타내고 있지만 일부 회귀모형에서 수송용 부문을 제외하고 통계적으로 유의한 수준은 아니다. 즉, 에너지 소비부문별로는 수송부문을 제외하고는 CO₂ 감축과 별로 큰 연관관계는 보이고 있지 않다. 온실가스 감축을 위한 정책을 위해 수송부문의 에너지 소비에 대해서 우선순위를 두어야 하는가는 명확한 것으로 사료된다.

본 연구는 우리나라의 에너지 통계가 체계적으로 구축된 것은 1980년 이후이기 때문에 실증분석에 사용된 시계열이 28년으로 계량분석을 하기에는 다소 부족한 점이 있다. 따라서 시계열이 지속적으로 축적된 이후 본 연구에서와 같은 분석은 계속 지속되어야 할 것이다. 특히 향후 충분한 시계열이 확보된다면 구조적인 변화가 있었던 부분기간(sub-periods)을 뽑아내서 이 기간을 전후로 이와 동일한 결과를 얻을 수 있는지, 즉 검증하는 것도 또 하나의 중요한 연구주제가 될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 우리나라뿐만 아니라 우리나라와 연관관계를 가지고 있는 여러 나라, 즉 일본, 중국, 미국 등을 포함한 패널데이터를 구축하여 경제성장뿐만 아니라 에너지 부문이 CO₂ 배출량의 중요한 변수라는 것을 다시 한 번 확인하고 여러 국가들을 경제발전단계에 따라 나누어 분석하여 확고히 EKC 가설을 검증하는 것은 추후 과제로 남겨두기로 한다.

◎ 참고 문헌 ◎

1. 김정인·김진욱·박창원, “주요 OECD 국가의 환경쿠즈네츠곡선 검증”, 「환경경제연구」, 제8권 제1호, 1999, pp. 77 ~ 108.
2. 김지욱, “확률계수모형을 이용한 수도권지역의 환경쿠즈네츠가설에 관한 재고찰” 「자원·환경경제연구」, 제11권 제3호, 2002, pp. 377 ~ 396.
3. 에너지경제연구원, 『에너지통계연보』, 각 연도.
4. 이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교”, 「환경정책연구」, 제9권 제4호, 2010, pp. 53 ~ 76.
5. 이광훈·이춘화, “수도권 지역 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 탐색 및 정책적 함의”, 「서울도시연구」, 제10권 제3호, 2009, pp. 83 ~ 95.
6. 정군오·정영근, “경제성장과 이산화탄소 배출에 관한 다국가 비교 분석”, 「산업경제연구」, 제17권 제4호, 2004, pp. 1077 ~ 1098.
7. 조상섭·강신원·김동엽, “비정태적 패널자료를 이용한 환경쿠즈네츠가설에 대한 실증분석: OECD 17개국 사례 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제10권 제4호, 2001, pp. 619 ~ 632.
8. 최충익·김지현, “경제성장과 환경오염간의 관계에 대한 국제비교연구: CO₂ 환경쿠즈네츠곡선 검증을 중심으로”, 「국토계획」, 제41권 제1호, 2006, pp. 153 ~ 166.
9. Aldy, J., “Per Capita Carbon Dioxide Emissions: Convergence or Divergence?” *Environmental & Resource Economics*, 33(4), 2006, pp. 533 ~ 555.
10. Alvarez, F., G. A. Marrero, and L. A. Uch, Air Pollution and the Macroeconomy Across European Countries, Working Papers-10 (FEDEA), 2005.
11. Ang, J., “CO₂ Emissions, Energy Consumption, and Output in France,” *Energy Policy*, 35, 2007, pp. 4772 ~ 4778.
12. Ang, J., “The Long-run Relationship between Economic Development, Pollutant Emissions, and Energy Consumption: Evidence from Malaysia,” *Journal of Policy Modelling*, 30, 2008, pp. 271 ~ 278.
13. Barro, R. and X. Sala-i-Martin, Convergence, *Journal of Political Economy*, 100, 1992, pp. 223 ~ 251.

14. Brock, W. A. and M. S. Taylor, The Green Slow Model, NBER Working Papers 10557, National Bureau of Economic Research, 2004.
15. Brock, W. A. and M. S. Taylor, Economic Growth and the Environment : A Review of Theory and Empirics, in: Aghion, P. and S. Durlauf (eds.), edition 1. *Handbook of Economic Growth*, 1, Elsevier, 2005, pp. 1749 ~ 1821.
16. Dinda, S., "Environmental Kuznets Curve Hypothesis : A Survey," *Ecological Economics*, 49, 2004, pp. 431 ~ 455.
17. Dinda, S. and D. Coondoo, "Income and Emission : A Panel Data-based Cointegration Analysis," *Ecological Economics*, 57, 2006, pp. 167 ~ 181.
18. Galeotti, M., M. Manera, and A. Lanza, "On the Robustness of Robustness Checks of the Environmental Kuznets Curve Hypothesis," *Environment and Development Economics*, 2009, pp. 551 ~ 574.
19. Grossman, G. and A. Krueger, "Economic Growth and the Environment," *Quarterly Journal of Economics*, 110, 1995, pp. 353 ~ 377.
20. Halkos, G. E., "Environmental Kuznets Curve for Sulphur, Evidence using GMM Estimation and Random Coefficient Panel Data Models," *Environment and Development Economics*, 8, 2003, pp. 581 ~ 601.
21. Holtz-Eakin, D. and T. Selden, "Stoking the Fires? CO₂ Emissions and Economic Growth," *Journal of Public Economics*, 57, 1995, pp. 85 ~ 101.
22. Huang, B. N., M. J. Hwang, and C. W. Yang, "Causal Relationship between Energy Consumption and GDP Growth Revisited : A Dynamic Panel Data Approach," *Ecological Economics*, 67, 2008, pp. 41 ~ 54.
23. International Energy Agency, Key World Energy Statistics, 2008.
24. Jobert, T., F. Karanfil, and A. Tykhonenko, in press, Convergence of Per Capita Carbon Dioxide Emissions in the EU : Legend of Reality? *Energy Economics*, doi:10.1016/j.eneco.2010.03.005.
25. Levine, R., N. Loayza, and T. Beck, "Financial Intermediation and Growth : Causality and Causes," *Journal of Monetary Economics*, 46, 2000, pp. 31 ~ 77.
26. Marrero, G. A., "Greenhouse Gases Emissions, Growth and the Energy Mix in Europe," *Energy Economics*, 32(6), 2010, pp. 1356 ~ 1363.

27. Marvao-Periera, A. and R. M. Marevao-Pereira, "Is Fuel-switching a No-regret Environmental Policy? VAR Evidences on Carbon Dioxide Emissions, Energy Consumption and Economic Performance in Portugal," *Energy Economics*, 32, 2010, pp. 227 ~ 242.
28. Menyah, K. and Y. Wolde-Rufael, in press, Energy Consumption, Pollytant Emissions and Economic Growth in South Africa, *Energy Economics*, doi:10.1016/j.eneco.2010.08.002.
29. Metcalf, G., "An Empirical Analysis of Energy Intensity and It Determinants at the State Level," *The Energy Journal*, 29, 2008, pp. 1 ~ 26.
30. Romero-Availa, D., "Convergence in Carbon Dioxine Emissions among Industrialized Countries Revisited," *Energy Economics*, 30, 2008, pp. 2265 ~ 2282.
31. Sadorsky, P., "Renewable Energy Consumption, CO₂ Emissions and Oil Prices in the G7 Countries," *Energy Economics*, 31, 2009, pp. 456 ~ 462.
32. Selden, T. M. and D. Song, "Environmental Quality and Development : Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?" *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, 1994, pp. 147 ~ 162.
33. Strazicich, M. C. and J. A. List, "Are CO₂ Emission Levels Converging among Industrial Countries?" *Environmental & Resource Economics*, 24, 2003, pp. 263 ~ 271.
34. Verbeke, T. and M. De Clercq, "The Income-environment Relationship : Evidence from a Binary Response Model," *Ecological Economics*, 59, 2006, pp. 419 ~ 428.
35. Wagner, M., "The Carbon Kuzets Curve : A Cloudy Picture Emitted by Bad Econometrics?" *Resource and Energy Economics*, 30(3), 2008, pp. 388 ~ 408.
36. Westerlund, J. and S. A. Baster, "Testing for Convergence in Carbon Dioxide Emissions using a Century of Panel Data," *Environmental & Resource Economics*, 40, 2008, pp. 109 ~ 120.
37. Wooldridge, J. M., *Introductory Econometrics A Modern Approach*, South-Western, CENGATE Learning, 2009.
38. World Bank, *World Economic Indicators*, <http://data.worldbank.org/>

접수일(2012년 1월 27일), 수정일(2012년 5월 29일), 게재확정일(2012년 6월 7일)