

# 오차수정모형을 이용한 한국의 탄소배출량 결정요인 분석\*

신 석 하\*\*

**논문 초록** 본 연구는 탄소배출량의 비정상 시계열적 특성에 초점을 맞추어 1970~2011년 기간의 우리나라 탄소배출량 결정요인을 오차수정모형을 통해 추정하였다. 짧은 시계열로 인한 낮은 검정력과 오차 크기 왜곡의 문제를 보완하고자 다양한 단위근 검정과 공적분 검정 방법을 이용한 결과, 탄소배출량과 소득수준, 기술수준, 에너지 가격 간에 상대적으로 견고한 공적분 관계가 존재하며, 소득수준의 향상은 탄소배출량을 증가시키고 기술수준의 향상과 에너지 가격 상승은 탄소배출량을 감소시키는 것으로 추정되었다. 한편 에너지원 및 에너지소비 구성은 단기적으로 탄소배출량에 영향을 미치는데, 원자력과 신재생 및 기타 에너지 비중이 커지면 탄소배출량이 줄어들고, 수송 부문의 소비 비중이 커지면 탄소배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

**핵심 주제어:** 탄소배출량, 비정상시계열, 오차수정모형

**경제학문헌목록 주제분류:** Q2, C2

투고 일자: 2013. 12. 31. 심사 및 수정 일자: 2014. 4. 20. 게재 확정 일자: 2014. 6. 11.

\* 본 연구는 숙명여자대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음 (과제번호 1-1403-0107).

\*\* 숙명여자대학교 경성대학 경제학부 조교수, e-mail: shin89kr@sm.ac.kr

## I. 서 론

본 연구에서는 우리나라 탄소배출량과 거시경제변수 간의 관계를 비정상시계열의 특성을 고려하여 분석하였다. 최근 기후변화와 관련하여 온실가스 배출량 감축이 중요한 과제로 부각되고 있다. 이산화탄소는 온실가스의 대부분(2011년 89.4%)을 차지하고 있어 최근 탄소배출권 거래제 등이 국가온실가스 감축의 중요 의제로 논의되고 있다.

국가마다 온실가스 배출 감축 목표의 설정 방식에 다소 차이가 있으나, 선진국의 경우 대체로 특정 연도 배출량을 기준으로 하고 있다. 예를 들어 EU는 교토의정서에서 2012년까지 1990년 배출량 대비 8%를 감축하는 목표를 설정하였다. 반면 우리나라는 감축목표를 BAU(Business as usual) 전망을 기준으로 설정하고 있다. 2009년 유엔기후변화협약 당사국총회에서 우리나라는 2020년까지 온실가스를 BAU 대비 30% 감축하는 국가온실가스 감축목표를 공약한 바 있다. 따라서 우리나라의 경우 온실가스 배출량 감축 수준이 향후 배출 전망과 상당히 밀접하게 연관될 수 밖에 없는 상황이다.

현재 우리나라 온실가스 BAU 전망은 기본적으로 상향식(bottom up) 방식으로 이루어지고 있다. 부문 및 업종, 에너지원별로 세분하여 에너지수요 및 온실가스 배출량을 전망하고 이를 합산하여 경제 전체의 온실가스 배출량을 전망하는 방식이다.<sup>1)</sup> 이러한 상향식 방식은 에너지 가격이나 정부 정책이 미치는 영향 등을 세부 부문별 추정식의 설정에 반영할 수 있다는 장점이 있는 반면, 세부 부문의 총합인 경제 전체의 온실가스 배출량이 거시경제 지표와 정합성을 가지지 못할 수 있다는 단점이 있다.<sup>2)</sup> 온실가스 감축 목표가 궁극적으로 경제 전체의 배출량을 대상으로 한다는 점을 감안하면, 경제 전체 차원에서 온실가스 배출량과 관련 경제 지표 간의 관계를 검증하는 작업은 상향식 전망 방식의 단점을 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

1) 대표적인 예가 에너지경제연구원의 KEEI-LEDS, KEEI-EGMS 모형이다. 모형의 구조 및 특성 등은 김수일(2008)에 제시되어 있다.

2) 한편 McKittrick, Strazicich and Lee(2013)는 대규모 모형을 이용한 탄소배출 전망이 모형에 사용되는 파라미터, 예를 들어 에너지효율 개선추세, 에너지원별 대체탄력성, 에너지절약 기술의 사용가능성 및 비용 등의 설정에 따라 상당히 큰 불확실성을 내포한다는 점을 제기하고 있다.

온실가스 등 환경오염과 관련된 대표적인 거시경제 변수는 소득이다. 소득이 증가할수록 에너지 소비도 증가하며 환경오염물질의 배출도 증가하는 것이 일반적이다. 다만 소위 환경 쿠즈네츠곡선(Environmental Kuznets Curve, 이하 EKC) 가설에서 제기하듯이 환경오염과 소득 간에 비선형관계가 존재할 가능성이 있다. 이 가설은 경제발전 초기 단계에서는 소득 수준이 향상되면서 환경이 악화되지만, 소득이 일정 수준을 넘어서면 소득 수준의 향상이 환경 개선과 함께 진행될 수 있다는 것이다.<sup>3)</sup> EKC는 다양한 환경오염 지표에 대해 추정되어 왔으나, 최근에는 온실가스, 특히 그 중에서도 주된 요소인 이산화탄소에 대해 EKC를 추정하는 연구도 많이 이루어지고 있다. EKC와 관련된 연구들이 진행되면서 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 변수로서 소득 수준 이외에 기술변화, 에너지 가격, 에너지 구성 등이 고려되었다. 김정인·김진욱·박창원(1999) 이래 이산화탄소에 대한 EKC를 추정한 국내연구도 다수 존재한다. 선행 연구에 대해서는 제Ⅱ장에서 좀 더 자세히 논의하고자 한다.

본 연구에서도 EKC와 같이 이산화탄소 배출량과 소득 간의 관계를 분석의 출발점으로 삼고 있으나, EKC 가설의 검정이 주된 목적은 아니다. 본 연구가 기존 국내연구와 차별성을 지니는 부분은 이산화탄소 배출량이 비정상 시계열일 가능성에 주목하여 오차수정모형을 이용하여 이산화탄소와 다양한 경제 변수 간 관계를 분석하였다는 점이다. 이산화탄소 배출량과 소득수준은 비정상 시계열일 가능성이 높다. 비정상 시계열인 경우 전통적인 회귀분석은 가성 회귀(spurious regression) 결과를 제공하게 되므로, 공적분 검정을 통해 공적분 관계의 존재 여부를 확인한 후 공적분 관계가 존재하는 경우에는 오차수정모형을 이용하고, 공적분 관계가 존재하지 않는 경우에는 변수들의 일차 차분으로 회귀식을 구성하는 것이 바람직하다. 또한 오차수정모형은 비정상 시계열(nonstationary time series) 간의 장기적인 공적분 관계뿐 아니라 단기적인 동학관계도 고려할 수 있으며, 관련 정상 시계열 변수도 설명변수로 포함할 수 있다는 장점이 있다.

3) 물론 Arrow et al. (1995), Copeland and Taylor (2004), Dasgupta et al. (2002) 등과 같이 EKC의 존재와 의의에 대한 비판적인 견해가 존재한다. 이들은 EKC가 존재한다고 하더라도 대부분 국제무역을 통해 오염산업이 재분배되는데 불과한 현상일 수 있다고 보고 있다. 이러한 의미에서 Arrow et al. (1995)은 소득 수준의 향상이 환경개선을 의미하는 것은 아니며 더욱 엄격한 환경정책이 필요하다는 의견을 제시하고 있다.

기존 국내 연구 중 조상섭·강신원·김동엽(2001)과 김지옥(2002)은 비정상 시계열의 가능성을 고려하여 패널 공적분 분석을 시행하였으나, 환경오염물질과 소득 수준 간의 관계에만 초점을 맞추었으며 기술변화, 에너지 가격, 에너지 구성 등의 변수는 고려하지 않았다. 본 연구에서는 소득수준 이외에 기술수준 및 에너지 가격 등을 공적분 분석에 고려하였으며, 에너지원 및 에너지소비 구성은 변수의 특성상 정상 시계열일 가능성이 높으므로 공적분 분석에 포함시키지는 않고 오차수정모형에 이산화탄소 배출량을 설명하는 변수로 포함하여 분석하였다. 또한 상대적으로 짧은 시계열 자료로 인해 발생하게 되는 낮은 검정력과 오차 크기 왜곡의 문제를 보완하고자 다양한 단위근 검정과 공적분 검정 방법을 이용하였다.

한편 본 연구에서는 국가패널 자료를 이용하지 않고 우리나라 단일 시계열을 이용하여 분석하였다. EKC의 존재 자체를 검증하는 경우에는, 상이한 경제 발전 단계에 있는 국가들의 시계열 자료를 함께 사용함으로써 EKC 검증이 용이해질 수 있기 때문에 국가패널 자료가 많이 사용되고 있다. 그러나 향후 우리나라 이산화탄소 배출량 전망치의 거시경제적 타당성을 점검하는 목적으로는 우리나라 단일 시계열을 이용하여 분석하는 것이 더 적합할 수 있다. 패널 자료를 이용한 추정결과는 패널에 포함된 국가의 범위에 따라 달라지는 경우가 많고, 국가간 상호 영향을 고려해야 하는 어려움이 존재한다. 또한 통상적으로 패널 자료를 사용할 때 랜덤효과 모형보다 고정효과 모형이 적합한 것으로 나타나는 경우가 많은데,<sup>4)</sup> 고정효과 모형에 시간효과 더미변수가 포함되게 되면 전망에 활용할 수 없는 문제점이 존재한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 제Ⅱ장에서는 선행연구에 대해 간략히 검토하고, 제Ⅲ장에서는 추정모형 및 자료, 실증분석 결과를 제시하며, 제Ⅳ장에서는 결론을 도출한다.

## Ⅱ. 선행연구 검토

선행연구에서 검토된 이산화탄소 배출량의 대표적인 결정요인은 소득이다. 소득이 이산화탄소 배출량에 영향을 미친다는 점에 대해서는 이견이 없지만, 소득과 이

4) Stern and Common(2001)은 국가 패널자료를 이용한 기존 연구들에서 하우스만 검정을 통해 고정효과 모형과 랜덤효과 모형 간의 적합성을 검정하면 대부분 고정효과 모형이 적합한 것으로 나타나고 있음을 지적하고 있다.

산화탄소 배출량 간의 관계가 선형관계인지 비선형관계인지에 대해서는 의견이 일치되지 않고 있다. 일인당 소득과 환경 간에 역(逆) U자 관계가 존재한다는 EKC 가설은 Grossman and Krueger(1991)<sup>5)</sup>에 의해 처음 제기된 이후 많은 이론적<sup>6)</sup>·실증적 연구가 이루어져 왔으나, 이산화탄소의 경우 EKC의 존재 여부에 대해서는 아직까지 뚜렷한 합의가 이루어지지 않은 것으로 보인다.<sup>7)</sup> 특히 패널자료를 이용한 경우에는 분석 대상 국가와 기간에 따라서 상이한 결과가 제시되고 있다. Schmalensee, Stocker and Judson(1998)는 EKC 가설을 지지하는 결과를 제시하였으나, Sharfik(1994)은 EKC 가설에 반대되는 결과를 제시하였고, Holtz-Eakin and Selden(1995)과 Unruh and Moomaw(1998)는 유보적인 결과를 제시하였다.<sup>8)</sup> 우리 나라 단일 자료를 이용한 연구에서도 정용훈·김수이(2012)는 EKC를

5) 초기의 연구들은 Grossman and Krueger(1991)과 같이 SPM, SO<sub>2</sub>, 수질, NO, 일산화탄소 등의 환경오염물질을 대상으로 EKC의 존재를 검증하였다. Stern(2004)에 기존 EKC 연구들에 대한 정리가 제시되어 있다.

6) EKC에 대한 이론적 설명은 주로 소득 수준이 향상되면서 환경 개선의 한계 편익이 한계 비용보다 빠르게 증가하는 경우 변곡점이 존재할 수 있다는 것이다. 다만 환경 개선이 시작되는 변곡점의 소득수준은 경제 주체의 선호, 기술, 규제 등 여러 요인에 의해 영향 받는 것으로 이해되고 있다. McConnell(1997)은 소득이 일정 수준 이상 높아지면 환경의 질에 대한 수요가 다른 재화나 서비스에 대한 수요보다 빠르게 증가할 가능성을 제기하였으며, Lopez(1994)의 경우에는 환경오염이 생산에 부정적인 영향을 미쳐 소득과 환경오염 간 관계에 변곡점이 존재할 수 있음을 제기하였다. 한편 Brock and Taylor(2010)는 일정 수준 이상의 소득에서 환경오염 저감기술의 한계 편익이 한계 비용보다 높아지면서 소득과 환경오염 간 관계에 변곡점이 존재할 수 있음을 제기하였고, Stokey(1998)는 소득이 일정 수준을 넘어서면서 환경오염의 한계비용이 높아지면, 활용가능한 여러 가지 생산 기술 중에서 환경 오염을 상대적으로 적게 유발하는 생산 기술을 채택함에 따라 변곡점이 존재할 가능성을 제기하였다.

7) McConnell(1997)은 다른 오염물질에 비해 이산화탄소에서 EKC에 대한 결과가 혼재되어 나타나는 이유로 이산화탄소 배출 저감 비용이 높으며, 이산화탄소 배출의 피해가 지역적 차원에서 나타나지 않고 전 세계적으로 나타난다는 점을 제기하였다. 이산화탄소 배출량 조절을 위한 정책도 국가 차원에서 이루어질 수 없으므로 국가 단위의 소득이 일정 수준 이상으로 높아진다고 해서 이산화탄소 배출이 줄어들기 어렵다는 것이다. 역명의 심사자도 유사한 논지로 이산화탄소에서 EKC가 성립하기 어려움을 지적하였으며, 이산화탄소의 경우 에너지구조가 중요한 요인이 됨을 제기하였다.

8) Sharfik(1994)은 1960~90년 기간의 149개국 패널자료에 회귀분석을 시행하였으나, 이산화탄소의 경우 소득 증가에 따라 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 반면 Schmalensee, Stocker and Judson(1998)은 1950~1990년 기간의 47개국 패널자료를 이용하여 10개 소득 구간 별로 추정하였는데, 주로 OECD 국가로 구성된 최상위 소득구간에서 이산화탄소 배출량의 소득탄력성이 음으로 나타나 EKC 가설을 지지하는 결과를 얻었다. 한편 Holtz-Eakin and Selden(1995)은 1951~86년 기간의 130개국 패널자료에 회귀분석을 시행하여 이산화탄

지지하는 반면, 김원규(2011)는 EKC 가설을 기각하는 등 연구마다 상이한 결과를 제시하고 있다.<sup>9)</sup>

소득수준 이외에 이산화탄소 배출량에 영향을 미치는 다른 요인으로는 에너지 가격, 기술진보 등이 사용되었다. Agras and Chapman(1999), 이광훈(2010), 이광훈·이춘화(2009), 이광훈(2012), 정용훈·김수이(2012) 등에서 에너지 가격은 이산화탄소 배출에 영향을 미치는 중요한 요인으로 고려되었으며, 김원규(2011)는 기술진보를 주요 설명변수로 사용하였다. 에너지원 및 에너지소비 구성은 정용훈·김수이(2012)에서 추가적인 설명변수로 고려되었다. 한편 국가 패널 또는 지역 패널 자료를 사용하는 경우에는 인구 밀도, 도시화, 산림감소, 제조업 비중, 무역의존도, 최종에너지소비량, 환경오염방지 투자비용, 정부소비비율 등의 변수가 사용되기도 하였다.

한편 환경오염과 소득수준의 비정상 시계열적 특성에 주목한 연구들도 진행되었다. Stern, Common and Barbier(1996)와 Stern(2004) 등은 EKC를 추정한 연구들의 계량경제학적 문제로서 이분산성, 동시성(simultaneity), 누락변수 뿐 아니라 비정상 시계열 및 공적분 문제를 제기하였다. 이후 Richmond and Kaufmann(2006), Galeotti, Manera and Lanza(2009) 등은 패널 공적분이나 부분 적분(fractional integration) 등 비정상시계열 분석 방법을 이산화탄소 배출량과 소득 간의 관계에 적용하였다. 국내 연구 중 조상섭·강신원·김동엽(2001)은 비정상 시계열의 특성을 고려하여 이산화탄소의 EKC에 대해 분석하였는데, 1980~97년 기간의 우리나라를 포함한 OECD 17개국 자료에 패널 단위근 검정, 패널 공적분 검정,

---

소에 대해 통계적으로 유의한 EKC의 존재를 확인하였으나, 변곡점의 소득 수준이 분석 자료의 범위를 넘어서는 큰 값이라는 문제가 발생하였다. Unruh and Moomaw(1998)은 비선형 동태시스템 분석을 통해 16개국에서는 EKC 형태의 변화를 관측하였으나, 변곡점 소득수준이 국가 간에 크게 차이가 날 뿐 아니라 같은 소득구간에 속하면서도 EKC를 나타내지 않는 7개 국가가 존재함을 들어 소득 수준만을 감안한 EKC의 한계도 지적하였다. 한편 국내 연구 중 김정인·김진욱·박창원(1999), 정군오·정영근(2004), 최충익·김지현(2006), 이광훈(2012) 등은 국가 패널회귀분석을 실시하여 대체로 EKC를 지지하는 결과를 제시하였다.

- 9) 김원규(2011)는 기술진보를 설명변수로 추가한 STR 방법을 이용하였으며, 정용훈·김수이(2012)는 1982~2008년 기간의 우리나라 단일 시계열 자료에 에너지 구성을 설명변수로 추가한 도구변수 회귀분석을 시행하였다. 한편 이광훈·이춘화(2009)와 이광훈(2010)은 우리나라 지역별 자료를 이용하여 이산화탄소의 EKC 존재 여부를 분석하였는데, 인구밀도와 에너지가격을 통제한 후 SUR(seemingly unrelated regression) 방법을 이용한 결과 각각 1990~2007년 기간의 수도권과 5개 광역경제권에서 EKC 존재를 확인하였다.

패널 DOLS(dynamic OLS) 추정 등을 시행하여 EKC가 존재함을 보였다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 우리나라 이산화탄소 배출량 전망치의 거시경제적 타당성 점검을 염두에 두고 우리나라 단일 시계열을 분석하므로, 기존 연구에서 제기된 요인들 중 소득, 에너지가격, 기술진보를 이산화탄소 배출량의 결정요인으로 고려하고자 한다. 또한 이들 변수들이 비정상 시계열일 가능성을 고려하여 오차수정모형을 사용하고자 한다. 소득수준은 거시경제 분야에서는 단위근 검정결과 등을 기반으로 대체로 비정상 시계열로 인식되고 있다. 만약 이산화탄소 배출량이 정상 시계열이라면, 비정상 시계열인 소득수준과 통계학적으로나 경제학적으로 의미 있는 관계를 갖기 힘들다. 이산화탄소 배출량이 비정상 시계열인 경우에도 소득 수준과 공적분 관계를 갖지 않는다면, 두 변수 간 장기적인 관계에 대한 분석은 의미가 없게 된다. 또한 공적분 관계가 존재하는 경우에 단순히 일차 차분한 형태로 변환하여 추정하는 것은 장기적 정보의 손실 뿐 아니라 잘못된 형태의 식별문제(misspecification)를 야기한다. 한편 공적분 관계는 장기적인 관계만 반영하여 단기적인 동학관계는 포함되지 못하며, 정상 시계열의 특성을 지닌 관련 변수를 고려하기 어렵다. 따라서 두 변수 간의 공적분 관계가 존재하는 경우에는 오차수정모형을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 관련 변수 중 에너지원 및 에너지소비 구성을 정상 시계열로 간주하여 단기 동학 부분에서 고려하고자 한다.

### Ⅲ. 실증분석 결과

#### 1. 추정 모형 및 자료

본 연구에서는 1인당 탄소배출량에 영향을 미치는 거시경제 변수로 1인당 소득, 기술 진보, 에너지 가격을 고려한다. 소득이 증가하면 에너지 소비량이 증가하며 탄소배출량이 증가할 것이다. 반면 기술 진보는 동일한 생산에 소요되는 에너지 소비량을 감소시키거나 동일한 에너지소비에서 발생하는 탄소배출을 줄일 것이다. 에너지 가격의 상승도 에너지 소비의 감소를 통해 탄소배출량을 줄일 것으로 예상된

10) 김지욱(2002)은 1985~99년 기간의 수도권 지역 패널 자료에 패널 공적분 검정을 시행하고 확률계수모형을 추정하여 분진, 일산화탄소, 질소산화물의 경우 EKC의 존재를 확인했으나, 이산화탄소는 분석하지 않았다.

다.

이들 변수들이 비정상시계열인 경우, 장기적인 관계인 공적분 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\ln(em_t) = \alpha + \beta_1 \ln(y_t) + \beta_2 \ln(tfp_t) + \beta_3 \ln(oilp_t) + \epsilon_t \quad (1)$$

여기서  $em$ 은 1인당 이산화탄소 배출량,  $y$ 는 1인당 국내총생산,  $tfp$ 는 총요소생산성,  $oilp$ 는 유가를 각각 나타낸다. 모든 변수가 I(1) 변수이고 식 (1)과 같은 공적분 관계가 존재한다면, 오차항  $\epsilon$ 은 I(0) 변수가 된다. EKC 가설은 식 (1)에 소득의 공급항을 추가하고, 소득 공급항의 계수가 음이 될 것임을 의미한다.

공적분 관계가 존재하는 경우, 오차수정모형은 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln(em_t) = & \delta + \sum_{i=1}^n \gamma_i \Delta \ln(em_{t-i}) + \sum_{j=1}^m \psi_j \Delta \ln(y_{t-j}) \\ & + \sum_{j=1}^m \pi_j \Delta \ln(tfp_{t-j}) + \sum_{j=1}^m \phi_j \Delta \ln(oilp_{t-j}) \\ & + \sum_{j=1}^m \alpha_j \ln(x_{t-j}) + \zeta \epsilon_{t-1} + v_t \end{aligned} \quad (2)$$

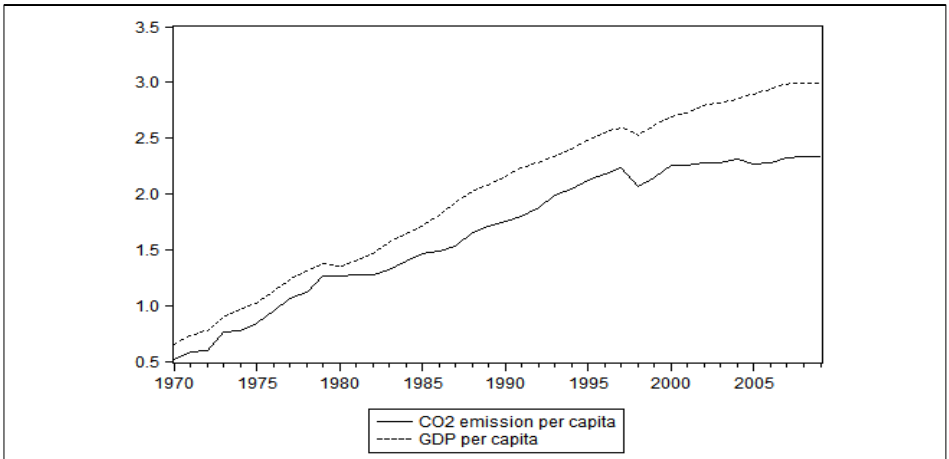
식 (2)의 마지막 설명변수인  $\epsilon_{t-1}$ 이 오차수정항으로서, 식 (1)의 장기적 관계로부터 전기에 이탈한 부분 중  $\zeta$ 만큼이 이번 기에 회복됨을 의미한다. 한편  $x$ 는 탄소배출량에 단기적으로 영향을 미치는 정상시계열 변수로서 본 연구에서는 변수의 특성상 비정상 시계열로 보기 어려운 에너지원 구성과 최종에너지소비 구성을 사용하였다.

본 연구의 분석 기간은 1970~2011년이며, 최종에너지소비 부문별 구성이 포함된 경우는 1978~2011년이다. 1인당 탄소배출량은 World Bank의 WDI 자료를 사용했으며 2010년과 2011년의 자료는 『2013 국가 온실가스 인벤토리 보고서』를 이용하여 연장하였다. 1인당 실질 GDP는 한국은행 국민계정 자료를 사용하였다. 국제유가는 IMF의 IFS 자료를 사용하였는데 이는 두바이, 브렌트, WTI 가격의 평균



값이다.<sup>11) 12)</sup> 한편 기술 수준을 나타내는 변수로는 신석하·황수경·이준상·김성태(2013)의 총요소생산성 자료를 사용하였으며,<sup>13)</sup> 1차 에너지원(석탄, 석유, 가스, 원자력, 신재생 및 기타) 구성과 최종에너지소비 부문별 구성(산업, 가정상업, 수송, 공공기타) 자료는 에너지경제연구원의 에너지통계연보 자료를 이용하였다. 사용된 변수의 측정단위 및 기초통계량은 <부표 1>에 제시되어 있다.

〈그림 1〉 1인당 탄소배출량과 1인당 GDP (로그변환)



## 2. 단위근 검정 및 공적분 검정 결과

오차수정모형을 추정하기 전에, 고려하는 변수들이 비정상시계열인지를 검정하고 이들 변수간에 공적분 관계가 존재하는지 살펴봐야 한다. 대부분 단위근 검정과 공적분 검정방법들이 소규모 샘플에서 낮은 검정력 또는 오류의 크기 왜곡(size

- 11) 어떤 국제유가 자료를 사용하더라도 전반적인 분석 결과는 크게 달라지지 않는다. 현재 우리나라의 수입비중이 높은 두바이 가격도 사용하여 보았으나, 평균가격을 사용하는 경우 오차수정모형의 설명력이 좀 더 높게 나타나 평균가격을 사용하였다.
- 12) 기존 연구에서는 실질 에너지가격을 설명변수로 사용하였으며 경제 이론적으로도 실질 에너지가격 변수가 더 타당한 것으로 사료되나, 실질 에너지가격 변수가 추가하여 공적분 검정을 시행하면 공적분 관계가 존재하지 않는 반면 명목 에너지가격을 추가하면 안정적인 공적분 관계가 존재하는 것으로 나타나 본 연구에서는 명목 에너지가격을 사용하였다.
- 13) 기존 연구에서는 환경개선 기술투자 등의 변수를 사용하기도 하였으나, 본 연구에서는 분석기간 동안 시계열 확보가 용이한 총요소생산성을 사용하였다.

distortion) 등의 문제점을 지니는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 분석대상 관측치가 40개 내외로 많지 않으므로 다양한 검정방법을 사용하여 견고성(robustness)을 지닌 검정결과를 얻고자 하였다.

사용된 단위근 검정방법은 Elliot, Rothenberg and Stock(1996)의 ADF-GLS 검정(이하 ADF-GLS) 및 point optimal 검정(ERS), Phillips and Perron(1988, PP), Ng and Perron(2001), Kwiatkowski et al. (1992, KPSS) 등이다. 이 중에서 KPSS 검정의 귀무가설은 '시계열이 단위근을 갖지 않는다'이며, 다른 검정들의 귀무가설은 '시계열이 단위근을 갖는다'이다. 시차변수는 최대 시차변수를 4로 설정한 후 AIC(Akaike Information Criteria)를 이용하여 선택하였으며, 장기공분산 행렬 추정이 필요한 경우에는 Quadratic-Spectral Kernel에 Newey and West(1994)의 automatic bandwidth 방법을 적용하였다. 1인당 탄소배출량, 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가는 로그변환하였으며, 각각 시간추세를 포함하는 것으로 가정하고 단위근 검정을 시행하였다.

단위근 검정 결과는 <표 1>에 제시되어 있는데, 1인당 탄소배출량, 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가 모두 단위근을 보유하는 비정상시계열일 가능성이 높은 것으로 나타났다. 1인당 탄소배출량과 1인당 GDP는 모든 검정에서 단위근을 보유하는 것으로 나타났으며, 총요소생산성과 국제유가의 경우 KPSS 검정에서는 단위근을 갖지 않는 것으로 나타났으나, 다른 검정에서는 단위근을 갖는 것으로 나타났다.

공적분 검정 역시 검정방법의 소규모 샘플에서의 문제점을 감안하여, Engle and Granger(1987, 이하 EG), Phillips and Ouliaris(1990, PO), Hansen(1992), Park(1990), Johansen(1991) 등의 다양한 검정방법을 적용하였다. 이 중에서 EG와 PO검정의 귀무가설은 '공적분이 존재하지 않는다'이며, Hansen과 Park 검정의 귀무가설은 '공적분이 존재한다'이다. 시차변수의 선택 및 장기공분산 행렬 추정 방법은 단위근 검정과 동일하다.<sup>14)</sup>

14) 익명의 심사자가 시차 선택이 검정결과에 영향을 줄 가능성을 지적하였다. 계량이론 측면에서는 모형에서 사용한 시차가 실제 시차보다 작을 경우 일치성(consistency)에 문제가 발생할 수 있으며, 반면 모형에서 사용한 시차가 실제 시차보다 클 경우 효율성(efficiency)이 낮아지는 것으로 알려져 있다. 연간 자료임을 감안할 때 최대 시차 4년은 지나치게 짧은 것은 아니라고 판단하였으며, VECM 형식의 Johansen 방법의 경우 최대시차를 크게 설정하면 설명변수가 시계열에 비해 너무 많아지는 문제가 발생하는 점도 고려하였다. 통상적으로 시차를 선택

〈표 1〉 단위근 검정 결과

		1인당 탄소배출량	1인당 GDP	총요소 생산성	국제유가
ADF-GLS		-1.36	-0.42	-1.95	-1.96
ERS		42.84	72.60	16.68	21.26
PP		-1.46	-0.07	-2.49	-2.94
Ng and Perron	$MZ_{\alpha}^{GLS}$	-1.69	0.31	-6.16	-5.32
	$MZ_t^{GLS}$	-0.74	0.16	-1.75	-1.61
	$MSB^{GLS}$	0.44	0.53	0.28	0.30
	$MP_t^{GLS}$	39.63	58.09	14.79	17.05
KPSS <sup>1)</sup>		0.18**	0.20**	0.08	0.10

주: 1) KPSS검정의 귀무가설은 ‘시계열이 단위근을 갖지 않음’이며, 다른 검정들의 귀무가설은 ‘시계열이 단위근을 가짐’임.

- 2) 검정통계량의 윗첨자 \*\*\*, \*\* 및 \*는 유의수준 1%, 5% 및 10%에서 각각 귀무가설이 기각됨을 나타냄.
- 3) 모든 변수는 자연로그값을 취한 후, 상수항과 추세항을 포함시켜 검정하였음.

〈표 2〉에 공적분 검정 결과가 제시되어 있다. 개별 모형별로 모형에 포함된 변수가 표시되어 있는데, 변수  $em$ 은 1인당 탄소배출량을, 변수  $y$ 는 1인당 GDP를, 변수  $tfp$ 는 총요소생산성을, 변수  $oilp$ 는 국제유가를 각각 나타낸다. 모형 A는 1인당 탄소배출량과 1인당 GDP 간의 관계를 검정한 것이며, 모형 B는 기본적인 EKC

택하는 방법으로 AIC, SIC 등 정보기준법과 최대시차로부터 시작하여 유의한 계수가 나타날 때까지 시차를 줄여가는 general-to-specific 방법이 많이 사용된다. 공적분 검정 방법 중 EG와 Johansen 방법이 시차 선택에 상대적으로 민감하며, PO, Hansen, Park 검정은 장기공분산 행렬의 계산 시 Pre-whitening 과정에서만 시차길이에 영향을 받으므로 검정결과가 상대적으로 시차 선택에 민감하지 않다. 본문에 보고하지는 않았으나, EG 검정에 general-to-specific 방법을 적용하여도 공적분 기각 여부가 변하지 않는 것으로 나타났으며, SIC 기준을 PO, Hansen, Park, Johansen 검정에 적용하는 경우, PO 검정 결과는 공적분 기각 여부에 변화가 없었으며 Hansen 검정 결과는 모형 C에서만, Park 검정은 모형 F에서만 변화가 있었다. Johansen 검정은 상대적으로 변화가 컸는데, 이는 SIC를 적용하면 거의 모든 모형에서 최소시차(1)가 선택되었기 때문이다. 반면 AIC는 모형에 따라 시차 1~4까지 다양하게 선택되었다. 통상적으로 SIC가 AIC보다 짧은 시차를 선택하는 경향이 있는 것으로 알려져 있는데, 실제 시차보다 짧은 시차를 사용하여 발생하는 일치성 문제가 실제 시차보다 긴 시차를 사용하여 발생하는 효율성 문제보다 심각할 수 있다는 점에서 본 연구에서는 AIC 기준을 사용하였다.

가설을, 모형 C, D, E는 EKC 가설에 총요소생산성과 국제유가를 추가하여 검정한 것이다. 모형 F, G, H는 1인당 GDP의 공급항을 포함하지 않고 1인당 탄소배출량과 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가 간의 공적분 관계를 검정한 것이다. <표 3>에는 Johansen 방법과 Phillips and Hansen (1990)의 FM-OLS로 추정한 모형 B, C, D, E, H의 공적분이 제시되어 있다.

모형 B~E의 결과는 다소 혼재되어 있지만 대체로 EKC를 지지하지 않는 것으로 해석된다. 통상적인 EKC의 경우(모형 B), Hansen과 Park의 검정 결과는 공적분 관계의 존재를 지지하지만, EG와 PO검정에서 공적분이 존재하지 않는 것으로 나타나고 있다. Johansen 검정의 경우 공적분 관계가 존재함을 지지하고 있으나, 1인당 GDP 및 공급항의 공적분 계수 부호가 EKC 가설과 반대로 추정되었다.

한편 통상적인 EKC에 총요소생산성을 추가한 모형 C에서는 Johansen 검정을 제외한 모든 검정에서 공적분 관계가 기각되었으며, Johansen 검정에서도 공적분 관계가 4개로 나타나는데 이는 모든 변수가 단위근을 갖지 않음을 의미하므로 단위근 검정결과와 상반되는 결과이다. 따라서 공적분 관계가 존재하는 것으로 보기 어렵다. 이외에도 모형 C의 경우 FM-OLS 방법으로 추정한 1인당 GDP 공급항의 계수 부호가 EKC와 반대로 나타나고 있으며, Johansen 방법으로 추정한 총요소생산성의 부호가 양의 값을 갖는 것으로 나타났다.

통상적인 EKC에 국제유가를 추가한 모형 D에서는 EG, PO검정에서 공적분이 존재하지 않는 것으로 나타나고 있으며, FM-OLS 방법으로 추정한 국제유가 계수가 양의 값을 갖는 것으로 나타나는 문제점이 있다.

통상적인 EKC에 총요소생산성과 국제유가를 함께 추가한 경우(모형 E)에는, Hansen 검정을 제외한 모든 검정에서 공적분이 존재하는 것으로 나타났으나, FM-OLS 방법으로 추정한 1인당 GDP 공급항의 계수 부호가 EKC와 반대로 나타났다.

이와 같이 1인당 GDP 공급항을 통해 1인당 탄소배출량과 1인당 GDP 간의 비선형관계를 의미하는 EKC 가설은 공적분 검정 결과가 건고하지 않을 뿐 아니라, 공적분 계수가 경제 이론이 시사하는 바와 다르게 추정되는 경우가 발생하고 있다.

이러한 결과를 고려하여 1인당 GDP 공급항을 제외한 모형 F, G, H를 검토하였

다. 1인당 GDP와 총요소생산성을 고려한 모형 F는 Park's  $H(0, 1)$  과 Johansen 검정에서 공적분 관계가 기각되었으며, 1인당 GDP와 국제유가를 고려한 모형 G는 Johansen 검정을 제외한 모든 검정에서 공적분 관계가 기각되었다.

검토된 여러 모형 중에서 가장 견고한 공적분 관계는 1인당 탄소배출량, 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가를 고려한 모형 H이다. 모든 공적분 검정에서 공적분 관계가 존재하는 것으로 나타났으며, 공적분 계수의 추정치도 경제이론과 부합하며 FM-OLS와 Johansen 방법 간의 추정결과 차이도 크지 않은 것으로 판단된다. FM-OLS와 Johansen 추정 결과 모두 소득수준의 증가는 1인당 탄소배출량을 증가시키는 반면 기술수준의 개선과 에너지 가격의 상승은 1인당 탄소배출량을 줄이는 요인임을 시사하고 있다.

〈표 2〉 공적분 검정 결과

		EG	PO	Hansen	Park's $H(0, 1)$	Johansen	
						$\lambda_{trace}$	$\lambda_{max}$
A:	$em, y$	-3.43*	-2.35	0.28	6.96***	0	0
B:	$em, y, y^2$	-3.63	-2.88	0.16	0.00	1	1
C:	$em, y, y^2, tfp$	-3.70	-3.68	2.39***	16.94***	4	4
D:	$em, y, y^2, oilp$	-3.63	-2.87	0.31	1.85	2	2
E:	$em, y, y^2, tfp, oilp$	-4.62*	-4.77*	0.77	11.38***	4	4
F:	$em, y, tfp$	-3.72*	-3.69*	0.19	2.90*	0	0
G:	$em, y, oilp$	-3.41	-2.30	0.85***	6.67***	1	1
H:	$em, y, tfp, oilp$	-4.50**	-4.44**	0.38	0.12	1	1

- 주: 1) EG와 PO 검정의 귀무가설은 ‘공적분이 존재하지 않음’이며, Hansen과 Park's  $H(0,1)$ 검정의 귀무가설은 ‘공적분이 존재함’임.
- 2) Johansen 검정 결과는 공적분 갯수를 나타냄.
- 3) 검정통계량의 \*\*\*, \*\* 및 \*는 유의수준 1%, 5% 및 10%에서 각각 귀무가설이 기각됨을 나타냄.
- 4) 모든 변수는 자연로그값을 취하였으며 추세항을 포함하고 있으나, 공적분 관계식에는 추세항이 포함되지 않은 것으로 상정하고 공적분 검정을 시행.

〈표 3〉 공적분 추정 결과

	(B)		(C)		(D)		(E)		(H)	
	<i>FM- OLS</i>	<i>Johansen</i>	<i>FM- OLS</i>	<i>Johansen</i>	<i>FM- OLS</i>	<i>Johansen</i>	<i>FM- OLS</i>	<i>Johansen</i>	<i>FM- OLS</i>	<i>Johansen</i>
$y_t$	1. 083 (0. 145)	-2. 722 (0. 655)	0. 841 (0. 060)	1. 264 (0. 043)	1. 153 (0. 158)	1. 307 (0. 288)	1. 200 (0. 038)	1. 201 (0. 079)	1. 158 (0. 055)	1. 193 (0. 027)
$y_t^2$	-0. 077 (0. 037)	0. 582 (0. 141)	0. 040 (0. 023)	-0. 244 (0. 043)	-0. 094 (0. 039)	-0. 121 (0. 058)	0. 014 (0. 016)	-0. 009 (0. 022)		
$tfp$			-0. 823 (0. 212)	1. 148 (0. 432)			-1. 419 (0. 160)	-1. 196 (0. 167)	-1. 147 (0. 159)	-1. 337 (0. 077)
$oilp$					0. 005 (0. 029)	-0. 041 (0. 015)	-0. 043 (0. 009)	-0. 060 (0. 006)	-0. 041 (0. 013)	-0. 061 (0. 005)

주: 1) 괄호 안의 값은 표준오차임.  
2) 모든 변수는 자연로그값을 취하였으며, 공적분 관계식에는 상수항이 포함됨.

3. 오차수정모형 추정 결과

앞에서 검정된 1인당 탄소배출량, 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가의 공적분 관계를 기반으로 단기 동학 및 관련 변수를 고려한 오차수정모형을 추정하였다. 오차수정항은 FM-OLS로 추정된 공적분 관계로부터 도출하였으며, 오차수정모형은 OLS로 추정하였다. 오차수정 모형 추정결과는 〈표 4〉에 제시되어 있다. 오차수정 모형의 피설명변수는 (로그) 1인당 탄소배출량의 1차 차분이며, 설명변수에는 오차수정항 이외에 공적분 분석에서 고려된 1인당 GDP, 총요소생산성, 국제유가의 1차 차분변수, 1차 에너지원 구성비( $m_t^i$ ,  $i$ =석유, 가스, 원자력, 신재생 및 기타)와 최종에너지소비 부문별 비중( $s_t^j$ ,  $j$ =산업, 가정상업, 수송, 공공기타)을 고려하였다. 모형 A는 기본 모형으로서 공적분 분석에 포함된 변수들로만 구성되었으며, 모형 B는 기본 모형에 1차 에너지원 구성비를 추가한 것이며, 모형 C는 기본모형에 최종에너지소비 부문별 비중을 추가한 것이다. 모형 D와 E는 기본모형에 1차 에너지원 구성비와 최종에너지소비 부문별 비중을 함께 고려한 모형이다.

기본 모형(모형 A)에서 1인당 GDP와 총요소생산성의 1차 차분항은 유의한 것으로 나타난 반면, 국제유가의 1차 차분항은 유의하지 않은 것으로 나타나 제외하였으며, 1인당 GDP와 총요소생산성의 1차 차분항 시차변수도 유의하지 않게 나타나

제외하였다. 이는 소득과 기술수준의 변화가 단기적으로도 탄소배출량에 영향을 미치지만, 국제유가의 변화는 탄소배출량에 장기적으로만 영향을 미침을 의미한다.

〈표 4〉 1인당 탄소배출량 오차수정모형 추정 결과

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
1인당 GDP ( $\Delta y_t$ )	1.259*** (0.253)	1.741*** (0.333)	2.021*** (0.453)	2.126*** (0.361)	2.004*** (0.354)
총요소생산성 ( $\Delta tfp_t$ )	-0.766*** (0.365)	-1.332*** (0.443)	-1.891*** (0.550)	-1.914*** (0.461)	-1.984*** (0.469)
오차수정항	-0.503*** (0.185)	-0.664*** (0.165)	-0.568*** (0.195)	-0.626*** (0.145)	-0.749*** (0.148)
석유비중 ( $m_t^{oil}$ )		0.000 (0.001)		-0.009*** (0.002)	-0.005*** (0.001)
가스비중 ( $m_t^{gas}$ )		0.005*** (0.002)		-0.014** (0.005)	
원자력비중 ( $m_t^{nuc}$ )		-0.008*** (0.003)		-0.021*** (0.004)	-0.021*** (0.004)
신재생 및 기타 비중 ( $m_t^{ren}$ )		-0.008** (0.003)			-0.022** (0.008)
산업용비중 ( $s_t^{ind}$ )			0.046** (0.020)	0.049** (0.018)	0.034* (0.017)
가정상업비중 ( $s_t^{hc}$ )			0.047** (0.023)	0.043** (0.020)	0.039* (0.020)
수송비중 ( $s_t^{tra}$ )			0.037** (0.018)	0.059*** (0.017)	0.044* (0.017)
상수항	-0.0159 (0.013)	0.029 (0.088)	-4.376** (2.000)	-4.018** (1.716)	-3.069* (1.792)
$N$	40	40	34	34	34
$R^2$	0.60	0.75	0.66	0.84	0.84
adjusted $R^2$	0.57	0.69	0.58	0.78	0.77

주: 1) 괄호 안의 값은 표준오차이며, 추정계수의 윗첨자\*\*\*, \*\* 및 \*는 유의수준 1%, 5% 및 10%에서 각각 유의함을 나타냄.

2) 1인당 배출량, 1인당 GDP, 총요소생산성은 로그변환되어 사용되었으며, 비중변수는 %로 측정됨.  $\Delta$ 은 1차 차분을 나타냄.

한편 오차수정항의 계수가  $-0.503$ 으로 추정되고 통계적으로도 유의하게 나타났다. 이는 전년도에 1인당 탄소배출량이 장기 관계에서 벗어난 부분 중 약 절반이 금년에 조정되는 것을 의미한다.

모형 B에서는 에너지원 구성을 추가하여 추정하였는데, 모든 에너지원별 비중을 포함하면 상수항과 공선성 문제가 발생하므로, 석탄 비중은 포함시키지 않았다. 추정 결과는 석탄에 비해 원자력, 신재생 및 기타 비중이 높아지면 1인당 탄소배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 한편 석유비중은 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 가스비중은 석탄에 비해 탄소배출량을 높이는 것으로 추정되고 5% 수준에서 유의한 것으로 나타났다. 이산화탄소 배출량이 세분된 에너지원별로 이산화탄소 배출계수를 적용하여 산출된다는 점을 감안할 때, 석유 및 가스 비중의 추정결과는 납득하기 어렵다. 그러나 최종에너지소비 부문별 비중도 함께 포함한 모형(D, E)에서는 석유 및 가스비중의 계수가 통계적으로 유의하며 부호도 예상과 부합하는 방향으로 나타난다는 점을 고려하면, 모형 B에서의 석유비중과 가스비중의 추정결과는 누락변수에 기인할 가능성이 있는 것으로 생각된다.<sup>15)</sup>

모형 C에서는 최종에너지소비 부문별 비중을 추가하여 추정하였는데, 공선성 문제를 피하기 위해 공공기타부문의 비중은 포함시키지 않았다. 추정 결과, 공공기타 부문에 비해 산업, 가정상업, 수송비중이 높아지면 탄소배출량이 늘어나는 것으로 나타났다.

모형 D와 E에서는 최종에너지소비 부문별 비중과 에너지원 구성을 모두 포함하여 추정하였는데, 에너지원별 구성 중 가스비중과 신재생 및 기타 비중을 함께 포함하면 유의하게 나타나지 않아, 모형 D에서는 가스비중만을 포함하고, 모형 E에서는 신재생 및 기타 비중만을 포함시켰다.<sup>16)</sup> 모형 D와 E 모두에서 원자력과 신재생 및 기타 비중이 높아지면 탄소배출량이 감소하고, 수송비중이 높아지면 탄소배

15) 다른 한편으로 우리나라에서 가스가 에너지원으로 사용된 것은 1986년 이후이며 그 이전 기간에는 비중이 0으로 고정되어 있다는 통계자료 상의 문제도 가스비중의 추정계수 부호가 최종에너지소비 비중 포함 여부에 따라 달라지는 결과와 관련되어 있을 것으로 생각된다.

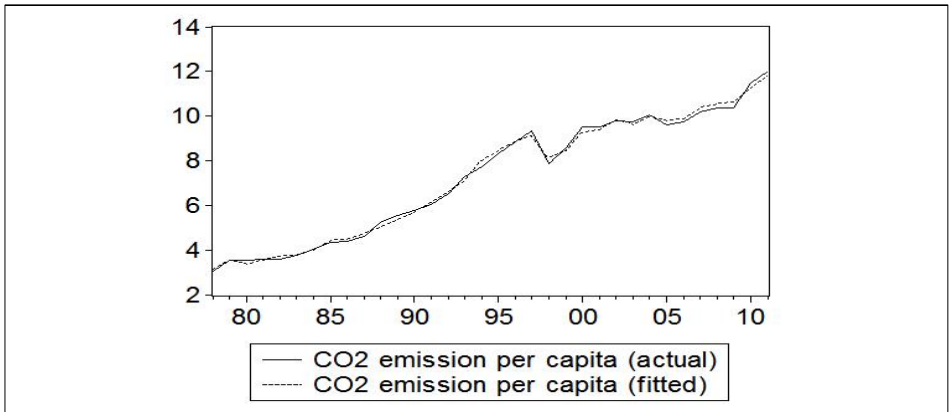
16) 모형 D와 E의 adjusted  $R^2$ 는 각각 0.837, 0.835로 크게 차이가 없으며, Log likelihood도 80.946, 80.778로 차이가 매우 작다. 본문에는 포함시키지 않았으나 가스비중과 신재생 및 기타 비중을 모두 포함한 모형은 adjusted  $R^2$ 이 0.783, Log likelihood는 82.153으로 추정되었다. 따라서 가스비중 또는 신재생 및 기타비중을 제외하는 것은 모두 LR 테스트에서 기각되지 않으나, 어느 변수를 제외하는 게 좋은지는 통계적으로 판단하기 어렵다.



출량이 늘어나는 것으로 나타났다. 석유는 석탄에 비해 탄소 배출량이 소폭 낮은 정도이며, 원자력, 신재생 및 기타는 석탄에 비해 탄소배출량을 상당 폭 감소시키는 것으로 나타났다. 한편 산업, 가정상업, 수송 부문 모두 공공기타부문에 비해 탄소배출량을 증가시키는 것으로 나타났으며, 증가 폭은 수송 부문에서 가장 크게 나타났다.<sup>17)</sup> 에너지원별 구성과 에너지소비 구성을 고려하는 모형 D의 경우 오차 수정항 계수의 절대 값이 0.626으로 다소 높아져, 1인당 탄소배출과 소득, 총요소생산성, 에너지가격 간의 장기 관계로의 복귀가 비교적 빨리 이루어짐을 나타내었다.

통계적으로 유의한 차이는 아니지만 모형 E에 비해 모형 D의 설명력(adjusted  $R^2$ )이 소폭 높고 설명변수들의 통계적 유의성도 높게 나타나고 있다. 모형 D에 의한 탄소배출량 추정치와 실제 탄소배출량을 비교하면 1978~2011년 기간 동안 평균 절대 백분율 오차(Mean absolute Percentage Error)가 2.0% 수준인 것으로 나타나, 일인당 탄소배출량의 변화에 대해 어느 정도 설명력을 지니는 것으로 보인다.<sup>18)</sup>

〈그림 2〉 일인당 탄소배출량과 오차수정모형의 추정치



17) 정용훈·김수이(2012)에서도 원자력이 석탄에 비해 탄소배출량이 작고, 수송부문에서 탄소 배출량이 제일 크게 나타났다. 반면 신재생에너지는 본 연구와 달리 탄소배출량 감축에 거의 기여하지 못하는 것으로 나타났다.

18) 상대적으로 관심이 더 큰 최근(2000년 이후) 기간의 평균 절대 백분율 오차는 모형 D에서는 1.6%로, 모형 E에서는 2.1%로 측정되어 최근 기간에 대해서도 모형 D가 더 설명력이 높은 것으로 판단된다.

#### IV. 결론 및 시사점

오차수정모형을 이용하여 1인당 탄소배출량의 결정요인을 분석한 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 가장 견고한 공적분 관계는 1인당 탄소배출량, 1인당 소득, 중요소생산성, 에너지가격 간에 존재하는 것으로 나타났다. 사용된 모든 공적분 검정에서 공적분 관계가 존재하는 것으로 나타났을 뿐 아니라, 추정된 공적분 계수도 추정방법에 따른 차이가 크지 않았다. 이러한 결과는 우리나라 탄소배출량이 장기적으로는 소득, 기술수준, 에너지가격에 의해 결정됨을 시사한다.

둘째, 단기적으로는 소득, 기술수준, 에너지원 구성 및 에너지소비 구성의 변화가 탄소배출량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 에너지원별로는 원자력과 신재생 및 기타 에너지 비중이 커지면 탄소배출량이 감소하고, 에너지소비별로는 수송 부문의 비중이 커지면 탄소배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 에너지원 및 에너지 소비 구성을 고려하는 경우, 오차수정항 계수의 절대 값이 높아지며 장기 관계로의 복귀가 비교적 빠르게 이루어짐을 시사하였다.

한편 소득의 제곱항으로 대변되는 소득과 이산화탄소 배출량 간의 비선형관계는 안정적이지 않은 것으로 나타났다. 일부 공적분 검정에서는 비선형관계가 지지되지만, 대부분 공적분 검정에서 선형관계의 견고성이 더 높게 나타났다. 또한 추정방법에 따라서는 공적분 계수의 부호가 가설과 반대로 나타나는 등 안정적인 결과를 얻기 힘들었다. 그러나 이러한 결과가 이산화탄소 배출량과 소득 간 비선형관계를 직접적으로 기각하는 것으로 해석하기는 어렵다. 아직까지 우리나라의 소득 수준이 변곡점에 도달하지 못하였거나 이산화탄소 저감 기술이 상용화될 정도로 개발되지 않았기 때문에 나타나는 결과일 수도 있다. 만약 소득과 이산화탄소 간에 비선형관계가 존재하고 향후 우리나라의 소득 수준이 변곡점에 도달하게 되면, 본 연구의 오차수정모형을 이용한 1인당 탄소배출량 전망치는 과다 전망될 것이다. 하지만 탄소배출량 감축 목표의 기반이 되는 BAU 전망치가 현재의 에너지소비 행태가 지속되는 경우의 전망치를 의미하므로, 본 연구의 오차수정모형은 상향식 전망 결과의 거시경제적 타당성을 점검하는 목적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

상대적으로 짧은 시계열에 따르는 문제점을 보완하고자 다양한 검정방법을 사용하였지만, 여전히 짧은 시계열로 인한 문제점이 완전히 극복된 것은 아니다. 또한

본 연구에서 추정한 공적분 관계 및 오차수정모형이 다른 국가에서도 타당한 결과를 가져오는지 확인할 필요가 있으며, 국가패널자료로 확대하여 분석한 결과와 비교하는 작업도 의미가 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 자료의 가용성에 따른 제약으로 이산화탄소 배출량만을 분석하였으나, 향후 이산화탄소 이외의 온실가스 배출 자료가 축적되면 동일한 분석방법을 여타 온실가스에도 적용하여 타당성을 평가할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## ■ 참 고 문 헌

1. 김수일, 『장기 에너지수요 전망모형 개선연구』, 에너지경제연구원, 2008.  
(Translated in English) Kim, Soo-Il, *Forecasting Model for Long-Term Energy Demand System*, Korea Energy Economics Institute, 2008.
2. 김원규, “주요국별 1인당 CO<sub>2</sub> 배출량 결정요인 비교분석과 시사점,” 『KIET 산업경제』, 2011년 4월, 산업연구원, 2011, pp. 41-53.  
(Translated in English) Kim, Wonkyu, “Comparative Analysis on the Determinants of CO<sub>2</sub> Emission Per Capita of Main Countries,” *KIET Monthly Industrial Economics*, 2011 No. 4, Korea Institute for Industrial Economics & Trade, 2011, pp. 41-53.
3. 김정인 · 김진욱 · 박창원, “주요 OECD 국가의 환경쿠즈네츠곡선 검증,” 『환경경제연구』, 제8권 제1호, 1999, pp. 77-108.  
(Translated in English) Kim, Jung-In, Jinwook Kim, and Changwon Park, “Testing on the Environmental Kuznets Curve of OECD Countries,” *Environmental Economic Review*, Vol. 9, No. 1, 1999, pp. 77-108.
4. 김지욱, “확률계수모형을 이용한 수도권지역의 환경쿠즈네츠가설에 관한 재고찰,” 『자원 · 환경경제연구』, 제11권 제3호, 2002, pp. 377-396.  
(Translated in English) Kim, Ji uk, “Re-examining of the Environmental Kuznets Curve Hypothesis in the Seoul Metropolitan Area by Random Coefficient Model,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 11, No. 3, 2002, pp. 377-396.
5. 신석하 · 황수경 · 이준상 · 김성태, 『한국의 장기 거시경제변수 전망』, 한국개발연구원, 2013.  
(Translated in English) Shin, Sukha, Sookyeong Hwang, Junsang Lee and Seongtae Kim, *Long-term Forecasts of Main Macroeconomic Indicators of Korea*, Korea Development Institute, 2013.
6. 이광훈 · 이춘화, “수도권 지역 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 탐색 및 정책적 함

의,” 『서울도시연구』, 제10권 제3호, 서울시정개발연구원, 2009, pp. 83-95.

(Translated in English) Lee, Gwanghoon and Chun Hua Li, “Searching for an Environmental Kuznets Curve for CO<sub>2</sub> Emissions in the Seoul Metropolitan Area and Its Policy Implications,” *Seoul City Research*, Vol. 10, No. 3, The Seoul Institute, 2009, pp. 83-95.

7. 이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교,” 『환경정책연구』, 제9권 제4호, 2010, pp. 53-76.

(Translated in English) Lee, Gwanghoon, “Estimation and Comparison of Regional Environmental Kuznets Curves for CO<sub>2</sub> Emissions in Korea,” *Journal of Environmental Policy*, Vol. 9, No. 4, 2010, pp. 53-76.

8. ———, “환경 쿠즈네츠 가설하의 일인당 이산화탄소 배출량의 에너지 가격 탄력성 추정,” 『환경정책연구』, 제11권 제2호, 2012, pp. 55-71.

(Translated in English) Lee, Gwanghoon, “Estimation of Energy Price Elasticity of per Capita CO<sub>2</sub> Emissions under Environmental Kuznets Hypothesis,” *Journal of Environmental Policy*, Vol. 11, No. 2, 2012, pp. 55-71.

9. 정군오 · 정영근, “경제성장과 이산화탄소 배출에 관한 다국가 비교분석,” 『산업경제연구』, 제17권 제4호, 2004, pp. 1077-1098.

(Translated in English) Jung, Kun-Oh and Young-Keun Chung, “The Pollution and Economic Growth Based on the Multi-country Comparative Analysis,” *Journal of Industrial Economics and Business*, Vol. 17, No. 4, 2004, pp. 1077-1098.

10. 정용훈 · 김수이, “한국의 CO<sub>2</sub> 배출, 경제성장 및 에너지믹스와의 관계 분석,” 『자원 · 환경경제연구』, 제21권 제2호, 2012, pp. 271-297.

(Translated in English) Jung, Yonghoon and Sooy Kim, “Analysis on the Relationship between CO<sub>2</sub> Emissions, Economic Growth and Energy Mix,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 21, No. 2, 2012, pp. 271-297.

11. 조상섭 · 강신원 · 김동엽, “비경제적 패널자료를 이용한 환경 쿠즈네츠가설에 대한 실증분석: OECD 17개국 사례분석,” 『자원 · 환경경제연구』, 제10권 제4호, 2001, pp. 619-632.

(Translated in English) Cho, Sang-Sup, Shin-Won Kang and Dong-Yeub Kim, “Panel Study on the Environmental Kuznets Hypothesis in the Case of OECD 17 Countries,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 10, No. 4, 2001, pp. 619-632.

12. 최충익 · 김지현, “경제성장과 환경오염간의 관계에 대한 국제비교연구: CO<sub>2</sub>의 환경쿠즈네츠곡선 검증을 중심으로,” 『국토계획』, 제41권 제1호, 2006, pp. 153-166.

(Translated in English) Choi, Choong-Ik and Ji-Hyun Kim, “An International Comparative Study on the Relationship Between Economic Growth and Environmental Pollution: Testing the Existence of EKC in CO<sub>2</sub>,” *Journal of Korea Planners Association*, Vol. 41, No. 1, 2006, pp. 153-166.

13. Agras, J. and D. Chapman, “A Dynamic Approach to the Environmental Kuznets Curve Hypothesis,” *Ecological Economics*, 28(2), 1999, pp. 267-277.

14. Arrow, K., B. Bolin, R. Costanza, C. Folke, C. S. Holling, B. Janson, S. Levin, K. Maler, C. Perrings, and D. Pimental, “Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment,” *Science*, 15, 1995, pp. 91-95.

15. Brock, W. A. and M. Taylor, "The Green Solow Model," *Journal of Economic Growth*, 15(2), 2010, pp.127-153.
16. Copeland, B. and M. Taylor, "Trade, Growth and the Environment," *Journal of Economic Literature*, 42, 2004, pp.7-71.
17. Dasgupta, S. B. Laplante, H. Wang and D. Wheeler, "Confronting the Environmental Kuznets Curve," *Journal of Economic Perspectives*, 16, 2002, pp.147-168.
18. Elliot, G., T. Rothenberg and J. Stock, "Efficient Tests for an Autoregressive Unit Root," *Econometrica*, 64, 1996, pp.813-836.
19. Engle, R. and C. Granger, "Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing," *Econometrica*, 55, 1987, pp.251-276.
20. Galeotti, M., M. Manera and A. Lanza, "On the Robustness of Robustness Checks of the Environmental Kuznets Curve Hypothesis," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 42, No. 4, pp.551-574.
21. Grossman, G. M., and A. B. Krueger, "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement," NBER Working Paper 3914, 1991.
22. Hansen, B., "Efficient Estimation and Testing of Cointegrating Vectors in the Presense of Deterministic Trends," *Journal of Econometrics*, 53, 1992, pp.87-121.
23. Holtz-Eakin, D., and T. M. Selden, "Stoking the Fires. CO<sub>2</sub> Emissions and Economic Growth," *Journal of Public Economics*, 57, 1995, pp.85-101.
24. Johansen, S., "Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models," *Econometrica*, 59, 1991, pp.1551-1580.
25. Kwiatkowski, D, P. Phillips, P. Schmidt and Y. Shin, "Testing the Null Hypothesis of Stationary Against the Alternative of a Unit Root," *Journal of Econometrics*, 54, 1992, pp.159-178.
26. Lopez, R., "The Environment as a Factor of Production: The Effects of Economic Growth and Trade Liberalization," *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, 1994, pp.163-184.
27. McConnell, K. E., "Income and the Demand for Environmental Quality," *Environment and Development Economics*, 2, 1997, pp.383-399.
28. McKittrick, R., M. Strazicich, and J. Lee, "Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per Capita Approach," *Journal of Forecasting*, 32, 2013, pp.435-451.
29. Newey, W. and K. West, "Automatic Lag Selection in Covariance Matrix Estimation," *Review of Economic Studies*, 61, 1994, pp.631-653.
30. Ng, S. and P. Perron, "Lag Length Selection and the Construction of Unit Root Tests with Good Size and Power," *Econometrica*, 69, 2001, pp.1519-1554.
31. Park, J. Y., "Testing for Unit Roots and Cointegration by Variable Addition," *Advances in Econometrics*, 8, 1990, pp.107-133.
32. Phillips, P. and B. Hansen, "Statistical Inference in Instrument Variables Regression with I(1) Processes," *Review of Economic Studies*, 1990, pp.99-125.
33. Phillips, P. and S. Ouliaris, "Asymptotic Properties of Residual Based Tests for

- Cointegration," *Econometrica*, 58, 1990, pp.165-193.
34. Phillips, P. and P. Perron, "Testing for a Unit Root in Time Series Regression," *Biometrika*, 75, 1988, pp.335-346.
35. Richmond, A. K. and R. Kaufmann, "Is there a Turning Point in the Relationship between Income and Energy Use and/or Carbon Emissions?," *Ecological Economics*, 56, 2006.
36. Schmalensee, R., T. M. Stoker, and R. A. Judson, "World Carbon Dioxide Emissions: 1950 - 2050," *Review of Economics and Statistics*, 80, 1998, pp.15-27.
37. Shafik, N., "Economic Development and Environmental Quality: An Econometric Analysis," *Oxford Economic Papers*, 46, 1994, pp.757-773.
38. Stern, D., "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve," *World Development*, 32(8), 2004, pp.1419-1439.
39. Stern, D. and M. Common, "Is there an Environmental Kuznets Curve for Sulfur?," *Journal of Environmental Economics and Management*, 41, 2001, pp.162-178.
40. Stern, D. I., M. S. Common, and E. B. Barbier, "Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development," *World Development*, 24, 1996, pp.1151-160.
41. Stokey, N. L., "Are there Limits to Growth?," *International Economic Review*, 39(1), 1998, pp.1-31.
42. Unruh, G. and W. Moomaw, "An Alternative Analysis of Apparent EKC-type Transitions," *Ecological Economics*, 25, 1998, pp.221-229.

〈부표 1〉 사용 변수의 기초통계량

	평균	표준편차	최소값	최대값	관측수
1인당 탄소배출량(톤)	6.3	3.2	1.7	12	42
1인당 GDP (백만원, 2005년 기준)	9.9	6.4	1.9	21.7	42
총요소생산성 (10억원, 2005년 기준)	5.8	1.3	4.1	8.1	42
국제유가(달러/배럴)	28.8	24.1	2.2	104.0	42
석유 비중(%)	52.6	7.2	38.1	63.3	42
가스 비중(%)	5.5	5.7	0.0	16.8	42
원자력 비중(%)	8.8	6.0	0.0	16.1	42
신재생 및 기타 비중(%)	5.9	5.9	1.4	23.1	42
석탄 비중(%)	27.3	5.3	18.7	39.1	42
산업용 비중(%)	51.3	6.0	40.4	61.6	34
가정사업 비중(%)	27.4	7.7	18.2	40.7	34
수송 비중(%)	18.2	3.4	9.6	22.6	34
공공기타 비중(%)	3.1	1.3	1.8	5.8	34

## An Error-correction Model on the Determinants of CO<sub>2</sub> Emissions of Korea\*

Sukha Shin\*\*

### Abstract

Focusing on nonstationarity of the time series of CO<sub>2</sub> emissions, we analyze the relationship between CO<sub>2</sub> emissions and macroeconomic variables in the framework of an error correction model. To mitigate low power and size distortion of unit root tests and cointegration tests in a small sample, various testing methods are employed. Cointegration test results suggest a relatively robust long-run relation among CO<sub>2</sub> emissions, income, technology and energy price. We also find that energy mix and final energy consumption mix play important roles in explaining short-run CO<sub>2</sub> emission changes. The nuclear energy and the renewable energy contributes to mitigation of CO<sub>2</sub> emissions, whereas transportation sector's energy consumption is associated with an increase of CO<sub>2</sub> emissions.

**Key Words:** CO<sub>2</sub> emission, non-stationarity, error correction model

**JEL Classification:** Q2, C2

---

*Received: Dec. 31, 2013. Revised: April 20, 2014. Accepted: June 11, 2014.*

\* This Research was supported by the Sookmyung Women's University Research Grants (No. 1-1403-0107).

\*\* Assistant Professor, Division of Economics, Sookmyung Women's University, 100 Cheonpa-ro 47-gil, Yongsan-gu, Seoul 140-742, Korea, Phone: +82-2-2077-7557, e-mail: shin89kr@sm.ac.kr