

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

김 옹 빈^{*1)}

요약

최근 세계 각 국가들은 신 기후변화체제에 맞추어 탄소 배출량이 거의 없는 원자력과 신재생에너지의 비중을 늘림으로써 온실가스 배출량을 효과적으로 감축하고 있다. 현 경제상황에 맞게 효율적으로 원자력과 신재생에너지 비중을 조절하기 위해서는 다방면의 분석을 실시하여 경제변수들과 주고받는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 환경쿠즈네츠곡선의 이론을 바탕으로 온실가스 배출변화량, 원자력, 신재생에너지 사용량, GDP 등 변수들 사이의 관계를 살펴보고자 한다. 본 논문은 ARDL, VECM, LMDI 분석을 실시하였으며 에너지 부문과 에너지 부문에 속하는 전력부문으로 나누어 ARDL, VECM 분석을 실시하여 장, 단기 영향과 충격반응 함수를 살펴봄으로써 환경쿠즈네츠 곡선 이론과 일치하는지 확인하였다. 끝으로 LMDI 분석을 통해 인구 효과, 경제성장 효과, 에너지집약도 효과, 화석연료의존도 효과, 배출계수 효과를 살펴보고 원자력, 신재생에너지사용량이 화석연료 사용량으로 전환되었을 때의 화석연료의존도효과를 세부적으로 분석하여 원자력과 신재생에너지 비중의 중요성을 강조하였다.

주요 단어 : 온실가스, 원자력, 신재생, ARDL, VECM, LMDI
경제학문헌목록 주제분류 : 사회과학-경제학-분야별경제-자원/환경경제

1) * 온실가스종합정보센터 감축목표팀 전문위원, subaq725@gmail.com

I. 서 론

전 세계는 산업혁명이후 화석연료를 바탕으로 급격한 경제성장을 이룩하였지만 성장의 대가로 환경오염 문제를 떠안게 되었다. 특히 대기 환경오염 물질 중 온실가스의 배출량이 점차 증가함에 따라 발생한 평균기온의 상승은 심각한 자연환경의 변화를 가져오고 있다. 이에 심각성을 인정한 선진국들은 대기환경의 개선을 위하여 1997년 교토의정서에 따라 온실가스 배출 감축의 의무를 지었으며, 2015년 파리기후협약에서는 선진국뿐만 아니라 다수의 국가들도 온실가스 배출량을 감축하겠다는 자발적 감축목표안인 INDC(Intended Nationally Determined Contributions)를 제출하여 기후변화에 대응하기 위한 국제사회의 노력이 진행되고 있다.²⁾

우리나라 온실가스 배출량의 80%이상은 화석연료의 사용으로 발생하고 있으며³⁾ 온실가스뿐만 아니라 황산화물, 질소산화물 등 다양한 대기오염물질도 함께 배출하고 있다. 공기가 인간의 생명에 필수적인 요소인 것을 생각하면 화석연료의 사용은 건강상의 피해를 비롯하여 경제적 피해, 재산적 피해를 동시에 가져와 부정적인 영향이 크다. 하지만 부정적인 측면을 단숨에 해결하기 위하여 급격히 화석연료의 사용을 감축한다면 경제적인 측면은 심각한 타격을 입을 수밖에 없을 것이다. 그렇기 때문에 복잡한 이해관계 속에서 효율적

2) 세계 13위의 경제규모 선진국인 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출전망치인 851백만 톤 대비 37%(국내 25.7%, 국제 11.3%)를 감축하겠다는 INDC를 제출하였으며, 2012년 신재생에너지 공급의무화제도와 2015년 1월에 탄소배출권 거래 제도를 시행하는 등 적극적으로 친환경에너지의 산업을 육성하고 기술 개발을 유도하는 등 온실가스 배출량을 감축하기 위하여 노력하고 있다.

3) 화석연료를 사용한 전력발전믹스부문에서 이산화탄소 배출량의 40%가 발생하고 있다. 만약 석탄발전소 1기에서 생산할 수 있는 100만kW를 원전으로 대체한다면 연간 600만 톤 이상의 CO₂ 배출량을 억제 할 수 있다.

인 온실가스 감축 정책을 시행하기 위해서는 온실가스 배출량과 경제변수간의 관계를 다방면의 분석을 통해 정확히 파악하는 것이 중요하다.

친환경적이며 안전측면에서도 우수한 신재생에너지는 높은 초기 투자비용의 장벽이 존재하며 저렴한 연료비의 장점이 있는 원자력은 안전상의 문제가 존재한다. 경제상황을 고려하며 효율적인 온실가스 배출량 감축목표를 달성하기 위해 즉각적인 원전 포기, 파격적인 신재생에너지 투자 증가는 불가능하다. 즉, 세계 화석연료 시장으로부터 받는 불안정성의 리스크를 최소화하는 에너지 안보차원에서 원자력과 신재생에너지의 상생 경영은 필수적이다. 탄소 배출 감축 측면에서 기후변화에 대응하기 위하여 원자력발전 비중을 적절히 조절하며 신재생발전량을 늘리는 것은 중요하며 이 두 에너지자원의 비중은 앞으로도 주요 분석의 대상이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 원자력과 신재생에너지 비중을 합한 값과 경제변수들과의 장, 단기적 영향을 살펴보고 에너지 전환 효과가 온실가스 배출량에 미치는 영향을 살펴봄으로써 향후 정부 정책을 위한 근거를 만들고자 한다.

본 논문의 기여는 1990-2014 기간을 대상으로 ARDL 분석을 실시하여 환경쿠즈네츠곡선(EKC)이론을 검증하고 온실가스 배출량과 경제변수와의 장, 단기 영향을 분석하였다는 것과 VECM 분석으로 장기 관계에 있는 변수를 확인하고 충격반응 함수를 통하여 균형으로의 수렴여부를 확인하였다는 점이다. 그리고 환경쿠즈네츠 이론 검증결과에 따라 온실가스 배출량을 감소시키는 요인들의 크기를 살펴보기 위하여 LMDI 분석을 통해 원자력, 신재생에너지에 따른 온실가스 배출량 변화요인을 분석하였다. 이후 원자력, 신재생에너지 발전량을 화석연료로 전환하였을 때 배출되는 온실가스 배출량을 직접 계산하여 화석연료의존도효과의 크기를 살펴봄으로써 온실가스 배출량을 효과적으로 감축하기 위해서는 화석연료의 비중을 줄여 원자력과 신재생에너지로의 에너지 전환을 높이는 것이 중요하다는 것을 수치로써 분석하였다.

본 논문의 진행은 2장에서 선행연구를 살펴보고 3장에서 ARDL모형, VECM모형, LMDI모형에 대한 방법론을 설명하였다. 그리고 4장에서는 에너

지부문과 에너지부문에 포함되어있는 전력부문으로 나누어 실증분석 결과를 제시하였으며 5장에서는 결론을 요약하고 정책적 시사점을 제시하였다.

II. 선행연구 분석

경제성장이 일어나면 에너지 소비량은 증가할 것이고 따라서 환경오염을 증가시킬 것이라는 환경쿠즈네츠이론(EKC)을 바탕으로 환경오염과 소득, 에너지 소비량 간의 관계를 검증한 연구는 꾸준히 진행되고 있다.⁴⁾ 환경쿠즈네츠이론은 환경오염과 경제성장 사이의 장기적인 관계를 추정하여 미래를 예측하고, 국가 정책을 살펴보고 시행하기에 앞서 매우 유용하다. 따라서 본 논문에서는 원자력, 신재생에너지의 영향을 살펴보고 환경쿠즈네츠이론을 검증하고자 역 U자형인 2차식을 가정하고 분석하였다.

경제성장과 환경오염, 에너지소비는 내생적 관계가 있을 수 있다는 가정하에 ARDL모형과 VECM모형을 활용한 다양한 연구가 논의되고 있다. 초기 에너지 분야 시계열 분석은 주로 차분한 시계열 데이터를 활용한 Granger (1969)의 방법론을 사용하였다. 이 방법론은 안정성(Stationary)에 위배되는 불안정한 시계열 분석에서는 변수 사이에 연관이 없더라도 유의성이 높은 회귀 추정식이 발생할 수 있어 변수를 차분하여 분석하였다. 하지만 차분을 한다는 것은 변수가 가지는 장기적 정보인 고유한 성질을 잃어버려 장기적 인과관계를 살펴볼 수 없다는 한계를 가질 수밖에 없다. 이러한 문제를 개선하고자 공적분(Cointegration)검정방법이 제시되었지만 장기 균형관계의 문제만

4) 경제성장과 환경오염 간에 역 U자 형태를 가질 것이라는 환경쿠즈네츠이론(EKC)은 De Bruyn(1997)과 Galeotti and Lanza(1999)에 의해 역 U자 형태뿐만 아니라 감소했다가 다시 증가하는 N자형 곡선 등 다양한 형태가 나타날 수 있음을 보여주었다. 환경쿠즈네츠이론의 다양한 형태에 관한 연구는 Galeotti and Lanza(1999), De Bruyn(1997)을 시작으로 국내에서는 정군오, 정연근(2004), 최충익, 김지현(2006), 이광훈(2012), 김용빈(2015)가 있다.

해결했을 뿐 변수간의 인과관계는 설명하지 못하였다. 하지만 ARDL모형과 VECM모형은 장기관계와 인과관계까지 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. 최근 Jamalludin Sulaiman et al.(2013)은 말레이시아 전력부문의 CO₂배출량에 대하여 신재생에너지의 영향력을 ARDL모형을 사용하여 장, 단기 요인들을 살펴본 후, VECM을 활용하여 Granger검정을 실시하였다. 김재화, 김현석(2015)은 ARDL모형을 이용하여 전력 소비에 대한 신재생에너지의 영향력을 분석하여 신재생에너지 발전의 1% 증가는 16.8%의 CO₂배출을 감소시키는 것을 확인하였다. Domenico Vitale and Massimo Bilancia(2012)은 대기오염물질과 기온과의 영향을 VECM으로 분석하여 100년 동안 상승할 지구 온도를 계산하였으며, 박기현, 김진경(2013)은 한국의 산업, 수송, 가정, 상업부문에서 에너지소비와 경제성장과의 인과관계를 벡터오차수정모형(VECM)으로 분석하였다. 그리고 김수이(2015)는 온실가스 배출량이 경제성장, 원유수입가격, 냉난방도일, 비 화석연료 비중과 주고받는 관계를 VECM으로 분석하였다.

변화요인을 분석하는 요인분해 방법은 1970년 후반에서 1980년 초반에 주로 사용한 라스파이레스 인덱스(Laspeyres Index)에서 1990년 이후의 디비지아 인덱스(Divisia Index)로의 발전하였다.⁵⁾ 본 논문에서 사용한 로그평균 디비지아지수(LMDI; Log-Mean Divisia Index)는 변화량(difference)을 기준으로 분석하였다. LMDI 분석의 장점은 간단한 이론, 적용 용이성, 사용의 편리성 등이 있다(Ang, 2004; Muller, 2005). 또한, 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서도 국가별 온실가스 배출량의 변화요인을 효과적으로 분석하기 위해 LMDI 분석 방법을 추천하고 있다(UNFCCC, 2004). Ang(2005)은 캐나다의 에너지 소비 요인과 CO₂배출과의 관계를 분석하였는데 LMDI 방법론이 가장 우수하고 효율적인 방법론이라고 언급하였다.⁶⁾ 그리고 Bacon and Bhattacharya

5) 디비지아 인덱스(Divisia Index)는 가법적(Additive)요인분해와 승법적(Multiplicative)요인분해로 나눌 수 있으며, 전자는 변화량(difference), 후자는 변화율(ratio)을 기준으로 분석한 것이다. 김수이, 김현석(2011)을 참고하면 라스파이레스 인덱스와 디비지아 인덱스에 관한 자세한 흐름을 알 수 있다.

6) LMDI방법론은 온실가스 배출 변화량을 인구 효과, 경제성장 효과, 에너지집약도 효과, 화석연료의존도 효과, 배출계수 효과의 다섯 가지 영역의 영향을 살펴본 것이며 방법론

(2007)은 1994년부터 2004년까지 전 세계 70개국을 대상으로 CO₂ 배출량을 화석연료 사용량, 총 소비량의 화석연료 비중, GDP 대비 총 에너지 소비량, 1인당 GDP, 인구에 대한 관계를 LMDI 분해분석방법으로 분석하였다. 김수이, 김현석(2011)은 국내 제조업부문에서 에너지 소비에 대한 요인분석을 LMDI 방법론을 활용하여 분석하였으며, 제조업의 에너지 소비는 생산효과에 의해서 증가하였고 집약도 효과는 2005년 이후 에너지 소비를 감소시키는 요인으로 작용하였음을 보였다. 박정욱, 김수이(2013)은 1990년부터 2009년까지 한국과 일본의 산업부문에서 에너지 소비에 대한 요인분석을 LMDI 방법으로 분석하였으며 일본은 상대적으로 우리나라와 비교하여 이미 에너지 저소비형으로 전환되었다는 점과 우리나라 에너지 효율 개선과 산업 구조 전반을 전환해야 한다는 정책적 함의를 제시하였다. 마지막으로 황인창(2008)은 Bacon and Bhattacharya(2007) 방법론을 근거로 CO₂ 배출변화 요인 분석 중 배출계수효과와 화석연료 의존도 효과에 대하여 세부적인 분석방법론을 제시하였다.

우리나라 에너지 발전부문은 높은 원자력 발전량과 신재생에너지발전량의 꾸준한 증가, 전력부문에서는 배출계수가 높은 화석연료 사용량의 감소와 원자력발전의 증가로 향후 온실가스 배출량은 감소할 여지가 충분하다. 더구나 최근 구축된 2014년 온실가스 배출량은 외환위기 이후 첫 감소를 보였다. 따라서 본 논문에서는 Jamalludin Sulaiman et al.(2013)에서 활용한 ARDL모형을 설정하여 분석범위를 에너지부문과 에너지부문에 속해있는 전력부문으로 나누어⁷⁾ 우리나라 온실가스 배출량에 대한 환경쿠즈네츠이론의 역 U자형을 검증하고 온실가스 배출량과 경제변수들 간에 주고받는 장, 단기적 영향을 살

에 대한 자세한 설명은 다음 장의 방법론 설명에 자세히 적어 놓았다.

7) 원자력, 신재생에너지 비중의 합(에너지부문의 화석연료비중은 80%대이며, 전력부문의 화석연료비중은 40%대)은 전력부문에 집중되어있지만 두 부문으로 나눈 이유는 화석연료비중 크기에 따라 LMDI분석 시 화석연료의존도 효과의 크기가 다른 요인들보다도 중요시되며, 우리나라는 산업전반에 걸쳐 전력의 수요가 증가하고 있어 두 부문으로 나누어 분석하여 비교하는 것은 의미가 있다. 그리고 화석연료를 원자력, 신재생에너지로의 전환을 계산하였을 경우에도 그 값의 폭은 달라지기 때문에 두 부분을 유지하며 분석을 진행하였다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

펴본 후, VECM분석을 통해 변수들 사이에 장기 관계가 있는지 확인하고 충격반응함수를 통해 수렴여부를 확인하고 예측하고자 한다. 시계열 분석을 통해 역U자형이 발견되었다면 1990 - 2014 기간 동안 Bacon and Bhattacharya (2007)의 방법론에 따라 LMDI 분해분석을 실시하여 우리나라 온실가스 배출 변화 요인의 크기를 계산하고 비교함으로써 향후 온실가스를 지속적으로 감축할 수 있는 요인들을 살펴보고자 한다. 그리고 추가적으로 황인창(2008)의 방법론을 적용하여 2014년도에 원자력과 신재생에너지로 얻은 에너지량을 화석연료로 전환하였을 때 증가하는 온실가스 배출량을 계산해봄으로써 화석연료 의존도 효과에 따른 화석연료비중 감소의 중요성을 강조하고자 한다.

Ⅲ. 분석 모형 및 방법론

1. ARDL, VECM분석

Pesaran et al.(2001)에서는 ARDL 모형은 변수들이 $I(0)$, $I(1)$ 에 상관없이 사용가능하다고 하였으며 Pesaran and Pesaran (1997), Pesaran et al.(2001)은 critical value를 500~1000개의 샘플크기가 있어야 구할 수 있다고 하였다. 하지만 Narayan(2005)은 소표본에서 time trend의 유무, $I(0)$, $I(1)$ 에 상관없이 Lower Critical Bounds(LCB)과 Upper Critical Bounds(UCB)을 제시하면서 critical value를 계산하였다. 즉, ARDL(Autoregressive Distributed Lag)모형은 소표본에서 변수들 간에 장, 단기적 영향을 분석하고 환경쿠즈네츠곡선(EKC)이론을 검증하기에 유용하다. 그리고 VECM(Vector Error Correction Model)모형은 내생적 관계뿐만 아니라 충격반응함수와 분산분해분석, 향후 예측을 분석하여 우리나라 온실가스 배출량의 영향력을 살펴보기에 유용하다.

본 논문에선 2차식을 가정한 환경쿠즈네츠곡선(EKC) 이론을 검증하기 위하여 Iwata et al.(2010)에 따라 온실가스 배출량과 경제성장, 총에너지사용량, 원자력과 신재생에너지 사용량, 화석연료수입가격사이에 장기적 관계를 살펴보고자 아래와 같은 로그형태의 추정식(1)을 설정하였다.

$$\ln(GHG)_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(GDP)_t + \alpha_2 \ln(GDP)_t^2 + \alpha_3 \ln(TE)_t + \alpha_4 \ln(NRE)_t + \alpha_5 \ln(OIL)_t + \epsilon_t \quad \text{식(1)}^8$$

위의 식(1)이 환경쿠즈네츠(EKC)이론에 따라 역 U자형태의 곡선을 갖는다면 $\alpha_2 < 0$ 인 계수값이 추정될 것이고 총에너지사용량의 증가는 온실가스 배출량의 증가요인이 되므로 $\alpha_3 > 0$, 원자력과 신재생에너지 사용량이 증가하면 온실가스 배출량의 감소요인이 되므로 $\alpha_4 < 0$, 원유가격의 상승은 온실가스 배출량의 감소요인이 되므로 $\alpha_5 < 0$ 으로 예상할 수 있다.

식(2)는 온실가스 배출량에 영향을 미치는 변수들 사이의 장, 단기적 영향을 분석하기 위하여 위 식(1)을 Pesaran et al.(2001)에 의해 제시된 ARDL모형을 확장시켰다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln(GHG)_t = & \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_{1k} \Delta \ln(GHG)_{t-k} + \sum_{k=0}^n \alpha_{2k} \Delta \ln(GDP)_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^n \alpha_{3k} \Delta \ln(GDP)_{t-k}^2 + \sum_{k=0}^n \alpha_{4k} \Delta \ln(TE)_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^n \alpha_{5k} \Delta \ln(NRE)_{t-k} + \sum_{k=0}^n \alpha_{6k} \Delta \ln(OIL)_{t-k} \\ & + \phi_1 \ln(GHG)_{t-1} + \phi_2 \ln(GDP)_{t-1} + \phi_3 \ln(GDP)_{t-1}^2 \\ & + \phi_4 \ln(TE)_{t-1} + \phi_5 \ln(NRE)_{t-1} + \phi_6 \ln(OIL)_{t-1} + \epsilon_t \end{aligned} \quad \text{식(2)}^9$$

여기서 α_0 는 drift component이고 ϵ_t 는 white noise이다. 그리고 α_k

8) GHG는 1인당 온실가스 배출량, GDP는 1인당 GDP, TE는 총 에너지사용량, NRE는 원자력과 신재생에너지를 합친 에너지사용량, OIL은 원유수입가격을 나타낸다.

9) ARDL 모형에서 GDP의 2차식이 포함되어 있지만 시계열분석 시 해당 변수의 Lag 값이 추가됨으로 인해 다중공선성의 문제는 해결된다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

(k=1,...,6)은 오차수정계수이고 ϕ_k (k=1,...,6)은 장기균형계수(공적분)이다. 위의 변수들의 단위근 검정을 실시한 후, 장기관계가 존재한다고 여겨지면 아래와 같은 오차수정모형(Error Correction Model, ECM)을 설정 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln(GHG)_t = & \delta_0 + \sum_{k=1}^n \delta_{1k} \Delta \ln(GHG)_{t-k} + \sum_{k=0}^n \delta_{2k} \Delta \ln(GDP)_{t-k} \quad \text{식(3)} \\ & + \sum_{k=0}^n \delta_{3k} \Delta \ln(GDP)_{t-k}^2 + \sum_{k=0}^n \delta_{4k} \Delta \ln(TE)_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^n \delta_{5k} \Delta \ln(NRE)_{t-k} + \sum_{k=0}^n \delta_{6k} \Delta \ln(OIL)_{t-k} \\ & + \theta ECT_{t-1} + \epsilon_t \end{aligned}$$

여기서 ECT_{t-1} 의 계수 θ 는 장기 균형관계로 얼마나 빨리 돌아오는지를 나타내는 조정계수이며 균형으로 수렴한다면 음(-)값으로 나타날 것이다. Pesaran et al. (2001)의 방법론에 따라 장, 단기 관계를 추정한 후 CUSUM(Cumulative Sum)와 CUSUMSQ(Cumulative Sum of Squares)를 분석하여 coefficient 안정성 검증을 하였다.¹⁰⁾

이후 벡터오차수정모형(Vector Error Correction Model, VECM)을 사용하여 충격반응 함수와 예측을 살펴봄으로써 변수들 간에 장기 균형관계를 살펴 보았다.¹¹⁾ 본 논문에서 추정한 벡터오차수정모형의 식(4)은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \ln(GHG)_t \\ \ln(GDP)_t \\ \ln(TE)_t \\ \ln(NRE)_t \\ \ln(OIL)_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_{11,1} & j_{12,1} & j_{13,1} & j_{14,1} & j_{15,1} \\ j_{21,1} & j_{22,1} & j_{23,1} & j_{24,1} & j_{25,1} \\ j_{31,1} & j_{32,1} & j_{33,1} & j_{34,1} & j_{35,1} \\ j_{41,1} & j_{42,1} & j_{43,1} & j_{44,1} & j_{45,1} \\ j_{51,1} & j_{52,1} & j_{53,1} & j_{54,1} & j_{55,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln(GHG)_{t-1} \\ \ln(GDP)_{t-1} \\ \ln(TE)_{t-1} \\ \ln(NRE)_{t-1} \\ \ln(OIL)_{t-1} \end{bmatrix} + \dots$$

10) CUSUM test는 회귀 계수가 체계적으로 변경하는 경우를 표시하는데 도움이 되며, CUSUMSQ test는 계수 회귀가 갑자기 변경하는 경우 표시에 도움이 된다.

11) 벡터오차수정모형은 차분한 자료가 아닌 원자료를 사용하기 때문에 Granger 검정으로 도출할 수 있는 단기적인 인과관계뿐만 아니라 장기적인 인과관계까지 파악할 수 있는 장점이 있다.

$$+ \begin{bmatrix} j_{11,k} & j_{12,k} & j_{13,k} & j_{14,k} & j_{15,k} \\ j_{21,k} & j_{22,k} & j_{23,k} & j_{24,k} & j_{25,k} \\ j_{31,k} & j_{32,k} & j_{33,k} & j_{34,k} & j_{35,k} \\ j_{41,k} & j_{42,k} & j_{43,k} & j_{44,k} & j_{45,k} \\ j_{51,k} & j_{52,k} & j_{53,k} & j_{54,k} & j_{55,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln(GHG)_{t-k} \\ \ln(GDP)_{t-k} \\ \ln(TE)_{t-k} \\ \ln(NRE)_{t-k} \\ \ln(OIL)_{t-k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \\ \psi_5 \end{bmatrix} [ECT_{t-1}] + \begin{bmatrix} \gamma_{1t} \\ \gamma_{2t} \\ \gamma_{3t} \\ \gamma_{4t} \\ \gamma_{5t} \end{bmatrix} \quad \text{식(4)}$$

ECT_{t-1} 은 오차 수정 항이고, 잔차인 γ 은 평균이 0인 uncorrelated random disturbance를 따른다.

3. LMDI분석

본 논문에서 LMDI 분석에 사용한 항등식은 식(5)와 같다. Kaya(1990) 식을 확장한 Bacon and Bhattacharya(2007)에서와 같이 온실가스 배출량을 인구, 경제성장, 에너지집약도, 화석연료의존도, 배출계수의 곱으로 구성하였으며, 국제에너지기구(IEA)와 기후변화에 관련한 국제 패널(IPCC) 등에서 국가 에너지 소비량과 온실가스 배출량을 분석하고 전망하는데 사용하고 있다.

$$GHG \equiv \text{인구} \times \frac{GDP}{\text{인구}} \times \frac{\text{총에너지소비량}}{GDP} \times \frac{\text{화석연료소비량}}{\text{총에너지소비량}} \times \frac{GHG}{\text{화석연료소비량}} \quad \text{식(5)}$$

위의 식(5)을 양변에 로그함수를 취한 다음 미분하고 정리하여 산출한 다음 식(6)을 바탕으로 5가지 효과를 분석하였다.

$$\Delta GHG = GHG(T) - GHG(0) = P_{eff} + G_{eff} + I_{eff} + S_{eff} + C_{eff} \quad \text{식(6)}$$

위의 P_{eff} , G_{eff} , I_{eff} , S_{eff} , C_{eff} 은 분석연도와 기준연도 사이의 온실가스 배출량변화에 영향을 준 인구 효과, 경제성장 효과, 에너지집약도 효과, 화석연료의존도 효과, 배출계수 효과를 나타낸다. 각각의 효과는 다음 식(7)을 이용하

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

여 계산하며 X는 P, G, I, S, C를 의미한다.

$$X_{eff} = \frac{GHG(T) - GHG(0)}{\ln[GHG(T)/GHG(0)]} \times \ln \frac{X(T)}{X(0)}, (T: \text{분석연도}, 0: \text{기준연도}) \quad \text{식(7)}^{12)}$$

인구효과는 온실가스 배출 변화량에 인구변화가 미친 영향을 나타낸다. 인구가 증가한다는 것은 소비와 생산의 증가로 이어지며 이에 따라 온실가스 배출량이 증가한다. 하지만 인구가 감소한다면 인구효과는 음(-)의 값을 나타낼 것이고 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 진행될 것이다.

소득의 증가효과와 소비의 증가효과를 반영하는 경제성장효과는 일반적으로 대부분의 국가들에서 온실가스 배출량에 가장 큰 영향을 주는 요인이다. 경제성장 효과는 1인당 GDP(생산량)가 증가할수록 국가 에너지소비량은 증가하며 이에 따라 온실가스배출량은 증가한다. 일반적으로 생산량이 높을수록 소득이 높을 것이고, 소득이 높을수록 에너지소비량은 많아질 것이다. 만약 경기침체가 발생한 국가의 경제성장 효과는 음(-)의 방향으로 진행되어 온실가스 배출량을 감소시킬 것이며 그 예로 우리나라 1998년 외환위기가 있다.

World Bank(2007)은 대다수의 선진국들에서 온실가스 배출량을 줄이는 가장 효율적인 방법으로 에너지 집약도 효과를 언급하였다. 에너지집약도 효과는 에너지효율의 개선, 산업구조의 전환, 에너지소비의 절약 등의 효과를 반영한다. 예를 들어, 제조업이 높은 국가가 제조업 비중을 줄이고 서비스업 비중을 늘린다던지, 2차 산업 중에서도 화학, 철강 등 에너지 집약적 산업에서 비에너지 집약적 산업으로 구조변화가 일어난다면, 에너지집약도 효과는 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 진행할 것이다. 그리고 가정, 공공, 산업 등에서 등급이 높은 고효율 제품 사용이 늘어나 에너지소비량이 감소한다면 온실가스 배출량을 감소시킬 것이다.

12) 식(7)으로 계산된 값의 부호가 양수이면 분석기간 동안 해당 요소는 온실가스 배출량을 증가시키는 방향으로, 부호가 음수이면 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 작용하였다는 것을 의미한다.

화석연료 의존도 효과는 온실가스 배출량 변화에 대하여 총에너지소비량에서 화석연료소비량이 차지하는 비중의 변화효과를 나타낸다. 만약 비 화석연료인 원자력과 신재생에너지의 비중이 증가한다면 화석연료 의존도 효과는 음(-)의 방향으로 진행하여 온실가스 배출량을 감소시킬 것이다. 황인창(2008)은 독일을 포함한 유럽의 국가들은 신재생에너지 사용의 증가에 따른 화석연료의존도 효과가 온실가스 배출량을 줄이는데 중요한 역할을 한다고 언급하였다. 그러나 2011년에 발생한 후쿠시마 원전사고로 인한 원자력 발전의 비중 축소와 높은 초기비용과 개발비용으로 인하여 신재생에너지의 보급이 지연될 경우 화석연료의 사용은 증가할 것이고 이에 따라 화석연료의존도 효과는 양(+)의 방향으로 진행하여 온실가스 배출량을 증가시킬 것이다.

배출계수 효과는 화석연료에서 비 화석연료 간의 전환이 아닌 화석연료간의 대체나 기술개선으로 인한 효과를 나타낸다. 즉, 탄소배출계수가 높은 석탄에서 탄소배출계수가 작은 천연가스로 전환되거나 기술개선으로 동일한 연료를 사용하더라도 온실가스 배출량을 줄일 수 있다면 배출계수 효과는 온실가스 배출량을 감소시키는 음(-)의 방향으로 진행할 것이다. 황인창(2008)은 1990년대 영국은 석탄 소비량을 줄이고 천연가스 소비량을 늘림으로써 온실가스 배출량을 감소시킬 수 있었다고 하였다. 만약 전 세계적으로 고유가가 지속되어 상대적으로 저렴한 석탄의 소비량이 강제적으로 증가한다면 배출계수 효과는 양(+)의 방향으로 진행하여 온실가스 배출량을 증가시킬 것이다.

황인창(2008)은 이산화탄소 배출량의 변화요인을 세부적으로 분석하기 위해 화석연료간의 전환으로 인한 배출계수효과와 화석연료 비중변화에 따른 화석연료 의존도 효과를 분해 분석하였다. 하지만 본 논문에서는 신재생에너지와 원자력에너지의 비중에 따른 영향력만을 살펴보기 위하여 화석연료의존도 효과만을 추가적으로 분해 분석하였다. 화석연료의존도 효과를 분석하면서 원자력발전과 신재생에너지 발전은 온실가스 배출을 하지 않는다고 가정하였고 식(8)을 이용하여 계산하였다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

$$S_{eff}^* = \frac{GHG(T) - GHG(0)}{l[GHG(T)/GHG(0)]} \times \ln[S(T)/S(0)] \quad \text{식(8)}$$

S_{eff}^* 는 (화석연료+원자력), (화석연료+신재생)의 비중변화효과를 나타낸다. 원자력과 신재생에너지를 화석연료로 대체할 경우, 온실가스 배출량은 증가할 것이므로 S_{eff}^* 을 계산할 때 GHG(T)와 GHG(0)는 원자력과 신재생에너지를 화석연료로 대체한 온실가스 배출량을 사용하였다. 그리고 화석연료소비량도 원자력 에너지와 신재생에너지를 포함한 비중을 사용하였다.

IV. 실증 분석

<표 1>에서 OECD 30개국과 우리나라의 1인당 온실가스 배출량 추이를 살펴보면 OECD 온실가스 배출량 추이는 2000년대 중반부터 급격히 감소하는 모습을 보여주고 있지만 우리나라는 1998년 외환위기를 제외하고는 2013년까지 꾸준히 지속하는 모습을 보여주고 있어 OECD 평균 흐름과 동일한 방향으로 진행하지 않고 있다. 그리고 우리나라 1인당 GDP는 1990년도에 OECD 평균과 약 15,000\$차이만큼 벌어져 있었지만 2013년에 약 4,000\$까지 격차를 줄였다. 하지만 국가 전체 에너지 사용량 대비 원자력과 신재생 에너지 비율에 대한 OECD 평균은 1990년보다 2013년에 2.24%증가한 것과 달리 우리나라는 오히려 1990년보다 2013년에 1.41%감소한 것으로 나타났다. 또한, 1990년에 OECD와 우리나라 에너지집약도는 각각 5.8, 5.9로 차이가 거의 없었으며 이후 감소하는 방향의 추이를 보이고는 있지만 크기 차이는 점점 벌어지고 있는 것으로 나타나 격차를 줄이기 위해서는 에너지집약도 개선에 힘써야 한다는 것을 시사한다. <표 2>는 전력생산비중에서 원자력의 비중과 신재생에너지의 비중을 나타낸다. OECD 원자력 평균비중은 1990년 대비 2013

년까지 2.1% 감소하였지만 전체 생산량을 고려해봤을 때, 원자력 발전량은 지속적으로 늘었다는 것을 알 수 있다. 2011년 후쿠시마 원전사태이후 급격히 원자력 발전량을 제로수준으로 떨어뜨린 일본도 있지만 프랑스는 2013년까지 전력 생산의 75%를 원자력으로 유지하고 있다. 그리고 영국과 미국에서 소비하는 전력량을 생각한다면 영국과 미국에서의 원자력 20%내외 비중은 큰 수치이다. 다음으로 신재생비중을 살펴보면 OECD 평균은 1990년에 1.61%, 2013년에 13.46%이다. 하지만 우리나라는 2013년까지에도 1%를 넘지 못하고 있다. 특히, 앞선 원전의 비중이 높은 국가들도 신재생에너지 비중을 점차 늘리고 있는 것으로 나타나 우리나라에서도 신재생에너지의 비중을 높이기 위한 적극적인 노력을 필요로 한다.

〈표 1〉 OECD 30개국과 우리나라 비교

1인당 온실가스배출량(ton/per)	1990	1995	2000	2005	2010	2013
OECD	13.62	12.51	12.43	12.63	11.78	11.04
Korea, Rep	6.82	9.62	10.61	11.55	13.22	13.83
1인당 GDP (2011, ppp)	1990	1995	2000	2005	2010	2013
OECD	27,056	26,731	31,472	34,855	35,985	36,634
Korea, Rep	12,087	16,798	20,757	25,541	30,440	32,684
총 에너지 사용량 대비 원자력, 신재생 비중	1990	1995	2000	2005	2010	2013
OECD	15.07	15.50	16.01	15.91	16.59	17.31
Korea, Rep	15.43	12.25	15.30	18.36	15.70	14.02
GDP당 온실가스배출량	1990	1995	2000	2005	2010	2013
OECD	0.58	0.52	0.43	0.38	0.35	0.32
Korea, Rep	0.59	0.58	0.51	0.45	0.43	0.42

〈표 2〉 전력생산비중(원자력, 신재생), 팔호 안 신재생

전력생산비중(%)	1990	2000	2010	2013
OECD	17.55(1.61)	16.69(3.03)	15.79(7.93)	15.43(12.16)
Korea, Rep.	50.19(0.00)	37.77(0.04)	29.92(0.50)	25.80(0.84)
Japan	24.21(1.39)	30.70(1.61)	26.00(3.82)	0.90(5.51)
France	75.28(0.46)	77.57(0.57)	75.92(2.77)	74.68(4.59)
Germany	27.84(0.30)	29.64(2.40)	22.43(12.38)	15.51(20.62)
United Kingdom	20.69(0.19)	22.72(1.30)	16.41(5.87)	19.82(13.75)
United States	19.10(3.00)	19.81(1.92)	19.27(4.10)	19.17(6.32)

1. ARDL, VECM 분석

<표 3>는 우리나라 에너지부문과 에너지 부문에 속하는 전력부문의 연간 정보를 나타낸다. 1인당 온실가스 배출량을 살펴보면 에너지부문은 1990년 5.5ton에서 2014년 11.8ton으로 약 2배가량 증가한 것과 비교하여 전력부문은 1990년 0.8ton에서 2014년 4.7ton으로 약 6배가량 증가하였다는 점은 전력부문에서 온실가스 배출량 비중은 점차 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 총 에너지 소비량을 살펴보면 에너지부문에서 1990년 93,192(천 toe)에서 2014년 282,938(천 toe)로 3배정도 증가한 것에 비해 전력부문에서는 1990년 26,055(천 toe)에서 106,279(천 toe)로 4배정도 증가한 것도 온실가스 배출에 전력부문의 영향이 커지고 있다는 것을 보여주고 있다. 끝으로 원자력, 신재생 에너지 소비량은 매년 증가하고 있으며 전력부문에서 전체 에너지 소비량의 30%를 담당하고 있다. 따라서 우리나라 온실가스 배출량이 원자력, 신재생에너지와 장, 단기적인 관계에 있는지를 살펴보기 위하여 에너지부문과 전력부문으로 나누어 ARDL, VECM분석을 실시하였다.

〈표 3〉 온실가스배출량, 총에너지소비량, 원자력, 신재생에너지 소비량 추이

에너지부문 1인당 온실가스 배출량						
(Unit: ton/per)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
1인당 온실가스 배출량	5.5	7.8	8.7	9.6	11.4	11.8
에너지부문 총 에너지 소비량						
(Unit: 천 toe)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
총 에너지 소비량	93,192	150,437	192,887	228,622	263,805	282,938
에너지부문 원자력, 신재생에너지 소비량						
(Unit: 천 toe)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
원자력, 신재생에너지 소비량	14,019	17,808	29,371	40,656	38,012	43,958
전력부문 1인당 온실가스 배출량						
(Unit: ton/per)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
1인당 온실가스 배출량	0.8	1.7	2.5	3.3	4.8	4.7
전력부문 총 에너지 소비량						
(Unit: 천 toe)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
총 에너지 소비량	26,055	43,272	60,993	85,704	101,171	106,279
전력부문 원자력, 신재생에너지 소비량						
(Unit: 천 toe)	1990	1995	2000	2005	2010	2014
원자력, 신재생에너지 소비량	13,222	16,757	27,241	36,695	31,948	33,002

가. 에너지부문, 전력부문 ARDL, VECM 추정자료

본 논문에서 이용한 자료는 1990년부터 2014년까지의 연간 데이터이며, 데이터 설명은 <표 4>와 같다. 전력부문에서 발생한 온실가스 배출량과 사용한 에너지량은 전체 에너지 소비량에서 차감하여 배출량을 계산하여 사용하였다. 분석은 단위근 검정, ARDL분석, 공적분 검정, VECM분석으로 진행하였다. 변수는 로그변환을 시킨 후 분석을 실시하였으며 AIC기준으로 검정한 ADF 단위근 검정 결과는 <표 5>와 같다. 모든 수준변수는 단위근을 가지고 있는 것으로 나타났으며 1차 차분하여 단위근 검정한 결과는 모두 정상성을 가지므로 모든 변수는 I(1)인 것으로 확인되었다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

〈표 4〉 기본 데이터 설명

변수	변수설명	단위	출처
GHG	1인당 온실가스 배출량	Gg of CO2 eq.	에너지 통계 연보
GDP	1인당 GDP	\$ (2011 ppp)	World Bank
TE	총 에너지 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
NRE	원자력, 신재생에너지 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
OIL	원유 수입가격	\$	OECD
	유연탄 수입가격	\$	OECD

〈표 5〉 에너지부문, 전력부문 ADF 단위근 검정 결과¹³⁾

	변수	ADF t값	1차 차분한 ADF t값	결정
에너지 부문	ln(GHG)	-3.913	-3.892 **	I(1)
	ln(GDP)	-3.038	-4.149 ***	I(1)
	ln(GDP) ²	-3.011	-4.169 ***	I(1)
	ln(TE)	-2.627	-5.145 ***	I(1)
	ln(NRE)	-0.883	-3.981 **	I(1)
	ln(OIL)	-2.716	-4.557 ***	I(1)
전력 부문	ln(GHG)	-2.026	-3.186 *	I(1)
	ln(GDP)	-3.038	-4.149 ***	I(1)
	ln(GDP) ²	-3.011	-4.169 ***	I(1)
	ln(TE)	-0.525	-4.13 **	I(1)
	ln(NRE)	-0.722	-3.659 **	I(1)
	ln(OIL)	-2.601	-4.260 **	I(1)

나-1. 에너지부문 ARDL, VECM 결과

ARDL분석 전에 변수들 사이의 최적 시차(lag) p를 결정해야한다. 최적 시차는 LM(Lagrange Mutiplier)검정을 이용하여 변수 간 serial correlation이 없는 것 중에 AIC값이 가장 작은 것으로 설정하였다.¹⁴⁾ [그림 1]와 같이 ARDL 모형의 최적인 ARDL(1,1,0,1,0,1)을 얻었으며 공적분 관계를 확인하는 ARDL cointegration Bounds Test의 결과는 <표 6>와 같다. ARDL cointegration의

13) 1%는 ***, 5%는 **, 10%는 *로 표기하였다.

14) 본 논문에서의 시차 p는 1로 나왔으며 ln(GHG), ln(GDP), ln(GDP)², ln(TE), ln(NRE), ln(OIL) 순으로 변수를 입력하였다.

F-statistic 값은 5.65로 Upper I(1)의 모든 값보다 크게 나와 Cointegration이 존재한다. <표 7> 장기 균형결과를 살펴보면 1차식인 소득(GDP)변수만 제외하고는 전부 통계적으로 유의하며 소득(GDP)은 양(+)의 부호, 소득의 제곱은 음(-)의 부호를 나타내 환경쿠즈네츠곡선(EKC) 이론이 성립하고 있다.¹⁵⁾ 특히 소득(GDP)은 2차 항이 포함되어 있기 때문에 해석에 유의해야한다.¹⁶⁾ 즉, 소득 평균 \$15,615.8일 때, 1.068만큼 배출량은 감소한다. 그리고 총에너지사용량이 1%증가하면 온실가스 배출량은 1.01%증가하고, 원자력, 신재생에너지 사용량이 1%증가하면 -3%의 온실가스 배출량 감소를 가져오는 것으로 나타나 원자력, 신재생에너지 사용량 증가는 온실가스 배출량을 감축시키는데 효과적임을 알 수 있다. 끝으로 원유수입가격인 경우 가격이 1%상승 시 온실가스 배출량은 0.08%증가하는 결과가 나타났다.¹⁷⁾ ARDL 단기 결과인 <표 8>에서 조정계수를 나타내는 오차수정항인 ΔECT_{t-1} 의 계수 -0.54는 통계적으로 1% 유의수준에서 유의하고 음(-)의 부호를 갖는다. 이는 만약 외부 충격으로 온실가스 배출량과 변수들 간에 장기불균형이 발생한다면 1년 동안 54%씩 장기균형관계로 조정된다는 것을 의미하며 전체적으로 약 1.85년(1년/0.54)의 시간이 장기균형으로 수정하기 위하여 필요하다. 그리고 Pesaran et al. (2001)의 방법론에 따라 장, 단기 분석 후 CUSUM과 CUSUMSQ를 이용하여 coefficient 안정성 검증을 실시한 결과는 [그림 1]와 같으며 밴드 내에 모두 안정하게 들어와 coefficient은 안정하다고 할 수 있다.

이후 온실가스 배출량에 대해 충격반응함수 분석을 실시하기 위하여 식 (4)에 따라 VECM을 진행하였으며¹⁸⁾, 적정 시차는 Johansen 최우추정법을 이용

15) EKC 소득전환점은 김용빈(2015)에 오염물질별로 다양한 모형에 맞춰 계산한 논문을 살펴보면 자세히 알 수 있다.

16) 예를 들면 $\Delta y = \beta_1 \Delta x + 2\beta_2 \Delta x X$; $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \beta_1 + 2\beta_2 X$ 이므로 X(GDP)는 평균값이나 특정한 값을 넣어 해석한다.

17) 이와같은 결과는 온실가스 배출량의 경우 분석기간 동안 꾸준히 증가하는 트렌트를 나타낸 반면에 원유수입가격은 트렌트를 가지지 않았기 때문인 것으로 보인다.

18) 소득(GDP)의 제곱변수는 잔차에 white noise를 발생시킬 수 있다고 판단하여 제외하

하여 SC기준인 1로 정하였으며.¹⁹⁾ 공적분 검정 결과, cointegration은 1개인 것으로 나타났다.²⁰⁾ <표 9> VECM 추정 결과를 살펴보면 $\Delta \ln(TE)$, $\Delta \ln(OIL)$ 의 t값은 5%유의수준으로 통계적 유의성이 있지만 나머지 변수인 경우 통계적 유의성은 없었다. 이는 통계적 유의성을 갖는 두 변수를 제외하고는 장기적인 인과관계가 존재한다는 것을 의미하며, 원자력, 신재생에너지 사용량과 온실가스 배출량사이에 서로 영향을 주고받는 것으로 나타났다. 그리고 VECM 분산분해 결과는 총 에너지사용량이 1기에 61%, 원유수입가격 28%순이며 5기 때가 되면 총에너지사용량에 대한 영향은 70%로 증가하는 것으로 나타났다. 온실가스 배출량 예측을 살펴보면 [그림 2]에서와 같이 에너지부문의 온실가스 배출량은 증가하는 추세를 보여주고 있다. 하지만 밴드가 두껍게 나타나 정부의 규제와 같은 급작스러운 변화에 따라 충분히 감소할 소지가 있다. [그림 3]은 각 변수 오차항에 1σ 만큼 충격을 준다면 어떻게 되는지를 보여주는 충격반응함수 결과이다. 초기 원유가격은 온실가스 배출량을 증가시키는 강한 요인으로 작용하였지만 2기가 되어서 급격히 감소하여 0으로 수렴하는 모습을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 원자력, 신재생에너지의 경우도 1기에는 온실가스 배출량이 음(-)의 방향으로 작용하였지만 2기가 되어서 0에 수렴하였다. 하지만 총 에너지 사용량과 GDP, 온실가스 배출량의 충격에는 균형으로 돌아오지 못하는 모습을 보여주고 있다.

고 분석하였다.

19) AIC의 lag는 2가 나왔지만, SC와 HQ는 1로 나왔다. 소표본임을 고려하여 SC기준 lag 1로 설정하였다.

20) VECM을 사용하기 위하여 본 논문에서는 외생변수라고 판단되는 순서대로 LOIL LNRE1 LTE1 LGDP LGHG1 순으로 Cholesky Ordering을 정하였으며, 공적분 검정 결과는 Trace, Maximum Eigenvalue 모두 공적분이 1개로 나왔다.

〈표 6〉 ARDL cointegration (Bounds Test)

	F-statistic		결과
[GHG GDP, GDP ² , TE, NRE, OIL] AIC optimal lags (1,1,0,1,0,1)	5.65		Cointegration
Critical Value Bounds	Lower I(0)	Upper I(1)	
10%	2.08	3.00	
5%	2.39	3.38	
2.5%	2.70	3.73	
1%	3.06	4.15	

〈표 7〉 ARDL 장기 결과

변수	Coefficient	t-statistic	P-value
ln(GDP)	1.99	1.70	0.11
ln(GDP) ²	-0.11	-1.71	0.10
ln(TE)	1.01	11.39	0.00
ln(NRE)	-3.00	-4.79	0.00
ln(OIL)	0.08	2.36	0.03
C	-16.45	-3.00	0.01
Serial Correlation LM Test	F-statistic Prob.		0.17

〈표 8〉 ARDL 단기 결과

변수	Coefficient	t-statistic	P-value
$\Delta \ln(\text{GDP})$	0.94	2.55	0.02
$\Delta \ln(\text{GDP})^2$	-0.05	-2.41	0.03
$\Delta \ln(\text{TE})$	1.03	18.01	0.00
$\Delta \ln(\text{NRE})$	-0.16	-6.43	0.00
$\Delta \ln(\text{OIL})$	0.03	2.86	0.01
ΔECT_{t-1}	-0.54	-6.89	0.00

〈표 9〉 VECM 추정 결과 (Cholesky Ordering: LOIL LNRE1 LTE1 LGDP LGHG1)

변수	$\Delta \ln(\text{OIL})$	$\Delta \ln(\text{NRE})$	$\Delta \ln(\text{TE})$	$\Delta \ln(\text{GDP})$	$\Delta \ln(\text{GHG})$
ECT	-0.012523 [-2.13035]	-0.003810 [-1.40357]	0.003245 [2.40458]	0.005547 [1.52792]	0.002934 [1.49986]

VECM 분산분해 결과

Period	S.E.	LOIL	LNRE1	LTE1	LGDP	LGHG1
1	0.151	28.453	7.750	61.300	0.123	1.065
2	0.209	14.271	3.884	68.311	6.621	2.394
3	0.270	10.539	2.839	69.236	7.782	3.051
4	0.298	9.483	2.549	69.978	7.531	3.314
5	0.319	8.312	2.301	70.771	7.936	3.473

나-2. 전력부문 ARDL, VECM 결과

전력부문에서도 ARDL모형으로 분석하기 전에 변수들 사이의 최적 시차p는 1로, [그림 1]과 같이 ARDL(1,1,0,0,1,0)로 나타났으며 ARDL cointegration Bounds Test결과는 <표 10>과 같다. ARDL cointegration의 F-statistic 값은 1.38로 Upper I(1)의 모든 값보다 작게 나와 기술적으로 Cointegration이 존재한다고는 말할 수는 없다. 하지만 Kremers et al.,(1992)은 ΔECT_{t-1} 의 계수 값이 유의미한 음(-)의 값을 가지므로 cointegration이 존재한다고 가정하며 분석을 진행한 선례에 따라 동일하게 진행하였다. <표 12>에서 조정계수를 나타내는 ΔECT_{t-1} 의 계수는 -0.44로 2.27년(1/0.44)의 매우 빠른 조정과정을 보여준다. 그리고 <표 11>장기 균형결과를 살펴보면 1차, 2차식 소득(GDP)변수의 부호는 환경쿠즈네츠곡선(EKC)이론과 부합하지만 통계적 유의성을 갖지는 못했다. 하지만 총 에너지 사용량과 원자력, 신재생에너지 사용량은 이론적으로 일치하는 부호이면서 통계적으로도 유의한 값을 도출하였다. 소득계수는 평균 \$15,615.8일 때, 2.925만큼 배출량이 감소하여 에너지부문보다 소득의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 그리고 총에너지사용량이 1%증가하면 온실가스 배출량은 1.46%증가하고, 원자력, 신재생에너지 사용량이 1%증가하면 -0.48%의 온실가스 배출량 감소를 가져오는 유의미한 값을 나타내 이는 전력부문에서 원자력, 신재생에너지의 사용량을 증가시키는 것은 온실가스 배출량을 효율적으로 감축하는 방안임을 확인할 수 있었다. coefficient 안정성 검증을 실시한 결과는 [그림 1]와 같다. test 결과, 빨간색으로 되어있는 밴드 내에 모두 안정하게 들어와 있어 안정하다고 할 수 있다. 분석을 진행함에 있어 cointegration이 존재한다고 가정하였기 때문에 추가적으로 전력부문 OLS를 추정하였으며, <표 14>과 같이 OLS 분석결과는 통계적으로 유의미한 계수값과 부호로 환경쿠즈네츠 이론과 일치함을 보여주고 있다.

이 후, 전력부문에서 원자력, 신재생에너지의 내생적 관계를 살펴보기 위하

여 식(4)에 따라 VECM을 진행하였다.²¹⁾ 적정 시차는 AIC, SC기준인 1로 정하였으며 cointegration은 1개인 것으로 나타났다.²²⁾ <표 13>의 VECM 추정 결과를 살펴보면 GDP와 온실가스 배출량사이에 서로 장기 영향을 주고받는다. 그리고 분산분해 결과 총에너지사용량이 1기에 88%, 5기 77%로 앞선 에너지부문보다 더 큰 영향으로 남아있는 것으로 나타났다. 온실가스 배출량을 예측한 결과, [그림 2]에서와 같이 전력부문 온실가스 배출량은 증가하는 추세를 보여주며 전력부문에서도 밴드가 두껍게 나타나 원자력과 신재생에너지의 비율을 늘리는 정책을 펼치거나 전력믹스부문에서 화석연료간의 온실가스 배출을 적게 하는 연료로의 교체와 같은 변화가 발생한다면 방향이 전환될 수 있다. 끝으로 [그림 3]은 전력부문 분석에 사용한 변수 오차항에 대하여 1σ만큼 충격을 주었을 때의 충격반응 함수를 보여주고 있다. 초기 수입 석탄 가격은 온실가스 배출량을 증가시키는 요인으로 작용하여 3기가 되어서야 0으로 수렴하는 모습을 보인다. 원자력, 신재생에너지 추이는 온실가스 배출량과 동일한 추이를 보이기 때문에 충격반응결과는 증가하는 방향으로 나타나 해석시 반대부호로 해석해야 할 것이다.

〈표10〉 ARDL cointegration (Bounds Test)

	F-statistic		결과
[GHG GDP, GDP ² , TE, NRE, OIL] AIC optimal lags (1,0,0,0,1,0)	1.38		Cointegration (ΔECT_{t-1} =-0.44)
Critical Value Bounds	Lowe I(0)	Upper I(1)	
10%	2.08	3.00	
5%	2.39	3.38	
2.5%	2.70	3.73	
1%	3.06	4.15	

21) 전력부문 또한 소득(GDP)의 제곱변수는 잔차에 white noise를 발생시킬 수 있다고 판단하여 제외하고 분석하였다.

22) VECM을 사용하기 위하여 본 논문에서는 외생변수라고 판단되는 순서대로 LFPR LNRE2 LTE2 LGDP LGHG2 순으로 Cholesky Ordering을 정하였다. 전력부문의 공적분 검정결과에서도 모두 공적분은 1개인 것으로 나타났다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

〈표 11〉 ARDL 장기 결과

변수	Coefficient	t-statistic	P-value
ln(GDP)	5.19	1.36	0.19
ln(GDP) ²	-0.27	1.40	0.18
ln(TE)	1.46	4.93	0.00
ln(NRE)	-0.48	-2.54	0.02
ln(FPR)	0.06	0.85	0.40
C	-35.27	-2.03	0.06
Serial Correlation LM Test		F-statistic Prob.	0.82

〈표 12〉 ARDL 단기 결과

변수	Coefficient	t-statistic	P-value
$\Delta \ln(\text{GDP})$	2.33	2.26	0.04
$\Delta \ln(\text{GDP})^2$	-0.12	2.27	0.04
$\Delta \ln(\text{TE})$	1.42	12.50	0.00
$\Delta \ln(\text{NRE})$	-0.41	-5.70	0.00
$\Delta \ln(\text{FPR})$	0.01	0.52	0.61
ΔECT_{t-1}	-0.44	-2.95	0.01

〈표 13〉 VECM 추정 결과 (Cholesky Ordering: LFPR LNRE2 LTE2 LGDP LGHG2)

변수	$\Delta \ln(\text{FPR})$	$\Delta \ln(\text{NRE})$	$\Delta \ln(\text{TE})$	$\Delta \ln(\text{GDP})$	$\Delta \ln(\text{GHG})$
ECT	-0.047824 [-3.11007]	-0.022476 [-3.42643]	-0.007732 [-1.63744]	-0.001012 [-0.06639]	.001596 [0.18868]

VECM 분산분해 결과

Period	S.E.	LFPR	LNRE2	LTE2	LGDP	LGHG2
1	0.143685	0.994425	1.751222	88.26076	3.363759	5.629833
2	0.276302	0.723326	9.62228	76.26203	1.810949	11.58141
3	0.340206	0.518252	12.59327	75.26338	1.248172	10.37693
4	0.385868	0.401111	11.42748	76.94731	1.346404	9.877701
5	0.435708	0.342008	10.58572	77.01148	1.792228	10.26857

3. LMDI 분해분석

〈표 15〉는 에너지부문 온실가스 배출량, 총 에너지 소비량, 화석연료 소비량의 추이를 보여준다. 1990년이래로 1998년 외환위기를 제외하고는 온실가스 배출량은 증가추세에 있다. 1990년 기준으로 2014년도에는 온실가스 배출량은

2.48배 증가, 총 에너지 소비량은 3.03배 증가, 화석연료 소비량은 3.05배로 크게 증가하였다. <표 17>는 전력부문 온실가스 배출량, 총 에너지 소비량, 화석연료 소비량의 추이는 에너지부문과 마찬가지로 1998년 외환위기를 제외하고는 온실가스 배출량은 증가추세에 있다. 1990년 기준으로 2014년도에는 온실가스 배출량은 6.57배 증가, 총 에너지 소비량은 4.07배 증가, 화석연료 소비량은 5.58배로 크게 증가하였다. 그리고 <표 16>, <표 18>은 에너지부문과 전력부문에서 연도별 원자력, 신재생 에너지 사용 추이를 보여준다. 에너지부문을 살펴보면 원자력은 2006년에 최대 사용치를 나타내었다가 이후 다소 감소하였으며, 2014년에는 1990년 대비 2.49배 증가하였다. 신재생 에너지는 총 에너지 사용량에 비해서는 다소 작은 비중을 나타내고 있지만 매년 꾸준히 증가하는 추세를 나타내어 2014년에는 1990년 대비 13.74배 증가하였다. 전력부문을 분석하는 기간은 1990년이 아닌 2008년 기준으로 나타냈다.²³⁾ <표 16>에 나타난 신재생에너지 소비량은 온실가스를 배출시키는 에너지량을 제외한 값을 사용하였으며, 2014년도에 전력부문에서 원자력 에너지 소비량은 총 에너지 소비량의 약 30%를 담당하고 있으며 신재생 에너지 소비비중은 꾸준히 늘어나고 있는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 에너지부문과 전력부문으로 나누어 원자력과 신재생에너지의 비중에 따른 영향력을 분석하였다. 요인별로 온실가스 배출량에 영향을 살펴본 후, 원자력, 신재생에너지 소비량을 화석연료로 전환하였을 때의 영향인 화석연료의존도 효과를 통해 화석연료비중 감소의 중요성을 강조하고자 한다.

23) 신재생에너지는 2002년부터 '신재생에너지보급통계'에서 전력부문의 자료를 제공하지만 2008년 기준으로 이전에 제공되지 않았던 신재생에너지 부문에서의 온실가스 배출량 수치 데이터를 제공하기 때문이다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

〈표 15〉 에너지부문 온실가스배출량, 총에너지소비량, 화석연료소비량 추이

에너지 부문 온실가스 배출량					
(Unit:Gg of CO ₂ eq.)	1990	1997	1998	2013	2014
온실가스 배출량	241,367	410,097	350,306	606,444	598,605
(1990=100)	100.00	169.91	145.13	251.25	248.01
총 에너지 소비량					
(Unit:천 toe)	1990	1997	1998	2013	2014
총 에너지 소비량	93,192	180,638	165,932	280,290	282,938
(1990=100)	100.00	193.83	178.05	300.77	303.61
화석연료 소비량					
(Unit:천 toe)	1990	1997	1998	2013	2014
화석연료 소비량	77,583	158,671	140,459	240,249	237,329
(1990=100)	100.00	204.52	181.04	309.67	305.90

〈표 16〉 에너지부문 원자력, 신재생에너지 사용 추이

(Unit:천 toe)	1990	1997	1998	2013	2014
총 에너지소비량	93,192	180,638	165,932	280,290	282,938
(1990=100)	100.00	193.83	178.05	300.77	303.61
원자력 소비량	13,222	19,272	22,422	29,283	33,002
(1990=100)	100.00	145.76	169.58	221.47	249.60
신재생 소비량	797	1,344	1,526	8,987	10,956
(1990=100)	100.00	168.63	191.47	1127.60	1374.65

〈표 17〉 전력부문 온실가스배출량, 총에너지소비량, 화석연료소비량 추이

전력부문 온실가스 배출량					
(Unit:Gg of CO ₂ eq.)	1990	1997	1998	2013	2014
온실가스 배출량	35,962	104,676	88,458	249,565	236,553
(1990=100)	100.00	291.07	245.98	693.97	657.79
총 에너지 소비량					
(Unit:천 toe)	1990	1997	1998	2013	2014
총 에너지 소비량	26,055	52,221	49,486	108,597	106,278
(1990=100)	100.00	200.43	189.93	416.80	407.90
화석연료 소비량					
(Unit:천 toe)	1990	1997	1998	2013	2014
화석연료 소비량	11,243	31,598	25,539	70,884	62,758
(1990=100)	100.00	281.05	227.15	630.48	558.20

〈표 18〉전력부문 원자력, 신재생에너지 사용 추이

(Unit: 천 toe)	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
총에너지소비량	91,451	93,778	101,171	104,290	106,174	108,598	106,279
(1990=100)	100.00	102.54	110.63	114.04	116.10	118.75	116.21
원자력소비량	32,456	31,771	31,948	33,265	31,719	29,283	33,002
(1990=100)	100.00	97.89	98.43	102.49	97.73	90.22	101.68
신재생소비량	3,661.6	3,902.5	4,293.4	4,652.8	5,897.3	6,657.9	8,866.6
(1990=100)	100.00	106.58	117.25	127.07	161.06	181.83	242.15

가. 에너지부문, 전력부문 LMDI 분석 자료

에너지부문, 전력부문 LMDI 분해 분석에 사용한 데이터는 1990년부터 2014년도까지 연간자료를 이용하였으며 데이터는 <표 19>와 같다. LMDI 분석을 위해 수집한 기본 데이터를 가공하여 인구 효과, 경제성장 효과, 에너지 집약도 효과, 화석연료의존도 효과, 배출계수 효과를 각각 계산하였다.

〈표19〉 기본 데이터 설명

변수	단위	출처
온실가스 배출량	Gg of CO2 eq.	kesis, 인벤토리 보고서
총 에너지 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
화석연료 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
석탄 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
석유 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
천연가스 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
수력 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
원자력 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
신재생 소비량	천 toe	에너지 통계 연보
GDP	\$ (2011 ppp)	World Bank
인구	명	World Bank

나-1. 에너지부문 LMDI 분석 결과

에너지부문의 LMDI 분석 결과는 <표 20>와 같다.²⁴⁾ [그림 4]은 우리나라 GDP 증가율과 GDP 대비 산업별 비중크기를 보여주고 있다. 우리나라 GDP 증가율은 외환위기인 1998년을 제외하고는 양(+)의 값을 보여주고 있으며 산업비중에서 제조업 비중과 농업 비중은 점차 줄어들고 있다.

에너지부문 LMDI 분해 분석한 결과는 다음과 같다. 인구 효과는 1990년 이래로 온실가스 배출량을 증가시키는 양(+)의 방향으로 작용한 것으로 보인다. 하지만 수치는 분석 기간 동안 인구증가세가 둔화되는 요인이 작용하여 급격히 감소하는 모습을 나타내고 있다. 경제성장 효과는 경기침체기인 외환 위기를 포함한 1995-2000기간을 제외하고는 온실가스 배출량 변화에 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 앞서 경제성장 효과를 설명한 개념에서와 같이 대부분의 국가들과 마찬가지로 우리나라의 경제성장 효과는 온실가스 배출량 변화에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 분석되었다. 에너지집약도 효과는 2000년대 이후로 온실가스 배출량을 감소시키는 음(-)의 방향으로 진행하였다. 특히 2010년 이후로 온실가스 총 배출량 변화량이 급격히 감소하는 가장 큰 요인으로 나타났다. 에너지집약도 효과가 음(-)의 방향으로 진행되기 위해서는 산업 구조의 변화와 에너지 소비효율이 증가되어야 한다. [그림 4]에서와 같이 우리나라 산업은 농업, 제조업의 비중은 줄어들고 서비스업이 늘어나고 있어 산업 구조의 변화가 서서히 진행 중이다. 또한, 2011년부터 ‘에너지소비 총량제’에 맞춰 건축물을 허가하고, 연 면적 1,000제곱미터 이상의 공공기관의 건물은 에너지소비량의 12%이상을 신재생에너지로 공급하여 소비하도록 하는 신재생에너지설비설치 의무화와 같은 노력으로 에너지효율을 증대시킨 효과가 나타난 것으로 보인다. <표 16>에서와 같이 화석연료의존도 효과는 1990년부터 2005년까지 원자력 비중이 점차 늘어나는 기간에는 온실가스 배출량

24) 본 논문에서는 전체 연도에 해당하는 추이를 논문에서 한눈에 보기 어려운 점을 고려하여 1990년부터 2010년까지는 5년 간격으로 2010년 이후는 1년 간격으로 분석하였다.

을 감소시키는 음(-)의 방향으로 진행되고 있다. 원자력 발전량은 두 차례 감소 추세를 보였는데 하나는 2007년 고리 1호가 수명이 만료되어 급격히 감소된 경우이고 다른 하나는 2011년 후쿠시마 원전사고로 인하여 감소된 경우이다. 이 시기에는 원자력발전비중이 감소하고 화석연료 비중이 증가함으로써 화석연료의존도 효과는 온실가스 배출량을 증가시키는 양(+)의 방향으로 작용하였다. 하지만 원자력 발전비중을 늘린 기간을 살펴보면 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 작용하는 것으로 나타나 우리나라에서 온실가스 배출량을 감축시키는 요인으로 원자력 발전이 중요한 비중을 차지한다는 것을 알 수 있다. 배출계수 효과는 1990-1995 기간 동안에 가장 크게 온실가스 배출량이 감소시키는 음(-)의 방향으로 진행되었다. 이와 같은 이유는 [그림 5]을 살펴보면 분석기간 동안에 화석연료 소비량은 거의 2배 가까이 증가하였지만, 온실가스 배출량을 가장 많이 배출하는 요인인 화석연료보다 온실가스 배출량이 상대적으로 적은 석유와 천연가스의 급격한 증가효과로 보인다. 예를 들면 영국이 석탄을 대신하여 온실가스 배출량이 비교적 적은 천연가스를 사용한 것과 같이 우리나라도 영국과 마찬가지로 온실가스 배출량을 효과적으로 감축하기 위하여 지속적으로 천연가스의 비중을 늘림으로써 화석연료간의 전환을 시도하는 노력을 해오고 있다는 것을 알 수 있다.

〈표 20〉 에너지부문 LMDI 분석 결과

Gg of CO ₂ eq.	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010
인구 효과	14,672.16	15,761.05	10,327.47	13,319.95
경제성장 효과	181,194.10	-14,203.70	193,790.43	87,641.11
에너지집약도 효과	-56,928.89	92,630.07	-130,220.34	-27,873.39
화석연료의존도 효과	13,619.09	-14,184.50	-12,577.42	20,912.94
배출계수 효과	-37,176.46	-24,024.93	-5,799.13	4,079.38
총 변화량	115,380.00	55,978.00	55,521.00	98,080.00
Gg of CO ₂ eq.	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014
인구 효과	4,281.55	2,666.94	2,566.04	2,428.28
경제성장 효과	49,843.60	7,254.26	36,577.75	44,149.50
에너지집약도 효과	-26,801.01	-5,529.58	-35,740.66	-40,953.30
화석연료의존도 효과	-600.45	1,261.75	3,905.40	-12,939.06
배출계수 효과	1,764.32	-2,311.37	1,545.47	-145.42
총 변화량	28,488.00	3,342.00	8,854.00	-7,460.00

나-2. 에너지부문 원자력, 신재생 전환 LMDI 분석 결과

원자력과 신재생에너지 사용 증가는 화석연료의 비중을 줄이고 비화석연료 비중을 늘림으로써 온실가스 배출량을 효과적으로 줄일 수 있는 방법이다. 본 파트에서는 화석연료의존도 효과를 세부적으로 살펴봄으로써 원자력과 신재생에너지의 비중을 빠르게 늘려가야 한다는 것을 강조하고자 한다. 화석연료 의존도 효과를 세부적으로 살펴보기 위해서는 원자력과 신재생에너지 소비량을 화석연료 소비량으로 전환하는 것이 중요하다. 아래 식(9)은 본 논문에서 사용한 온실가스 배출량 계산식이다. 식(9)에서 연료사용량은 온실가스 인벤토리보고서에서 제공하는 전환계수, 배출계수 등을 이용하여 계산하였다.

$$\text{온실가스배출량} = \text{연료사용량} \times 41.868 \times \text{전환계수} \times \text{배출계수} \times \text{산화율} \times \frac{44}{12} \times 10^3 \quad \text{식(9)}$$

[그림 6]은 에너지 전환별 온실가스 배출량 추이를 보여주고 있다. 원자력, 신재생에너지를 석탄으로 전환하는 것보다 원유로 전환했을 경우에 탄소배출계수의 크기차이만큼 보다 많은 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 화석연료의존도 효과의 부호는 비교하려는 년도사이에 화석연료 비중이 늘어나면 양(+)의 값, 화석연료 비중이 줄어들면 음(-)의 값을 갖는다. 식(9)에서와 같이 원자력, 신재생에너지를 사용량을 화석연료 사용량으로 전환하여 온실가스 배출량을 계산한 후 화석연료의존도 효과를 분석한 결과는 <표 21>와 같다.²⁵⁾ 만약 2013-2014년 사이에 원자력 발전량을 석탄발전량으로 전환한다면 총 15,777단위만큼 온실가스 배출량이 증가하며 증가한 온실가스 배출량 중 화석연료 비중효과로 의해 11,091단위만큼을 증가한다. 즉, 화석연료 비중효과

25) 이와 같은 결과를 도출하기 위해서는 우선 화석연료 비중에 원자력, 신재생에너지를 화석연료로 전환한 소비량을 포함하여 계산한 후, 화석연료 비중에 원자력, 신재생에너지를 화석연료로 전환한 소비량을 포함하지 않고 계산해야한다. 이 둘의 값들을 차감하면 원자력, 신재생에너지의 전환에 따른 화석연료의존도 효과를 얻을 수 있다.

는 다른 효과들에 비해 영향력이 크므로 에너지 정책을 시행하여 온실가스 배출량을 줄이는 방법으로 화석연료비중을 줄이는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 끝으로 2013-2014년도에 온실가스 총 변화량은 -7,460단위만큼 감소하였는데 이러한 결과가 탈동조화라고 해석 가능한지에 대해서는 전봉걸, 김용빈, 2016 “2014년 에너지부문 온실가스 배출량 감소요인 분석”보고서를 참고하면 자세히 분석되어 있다.

〈표 21〉 최종 화석연료 비중효과

	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010
원자력→석탄	-12,989.33	16,342.13	13,519.97	-29,974.82
원자력→원유	-12,387.59	15,515.48	12,689.77	-28,245.59
신재생→석탄	-659.55	1,955.60	3,548.08	3,004.30
신재생→원유	-657.32	1,947.00	3,522.22	2,973.89
	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014
원자력→석탄	-529.45	-5,003.94	-7,582.47	11,091.87
원자력→원유	-502.91	-4,727.49	-7,140.74	10,435.29
신재생→석탄	660.28	3,439.87	2,169.73	5,383.50
신재생→원유	652.74	3,389.23	2,129.27	5,267.14

다-1. 전력부문 LMDI 분석결과

전력부문 LMDI 분해 분석에 앞서 신재생에너지 데이터는 2008년부터 신재생에너지에 대한 온실가스 배출량 통계자료가 제공되며, 전력부문에서 신재생에너지는 전력거래소와 에너지경제연구원의 통계자료에서 전력 발전원에 포함을 시키지 않지만 신재생에너지 보급통계에는 전력발전량과 에너지 사용량이 제공되고 있어 이를 포함하여 분석하는 것은 의미 있는 결과를 보여줄 것이다. 따라서 신재생에너지 통계체제에 따른 에너지원의 분류에서 전력을 포함하는 부분을 선택하여 각 에너지원에서 사용한 에너지량(천 toe)를 토대로 온실가스 배출량을 직접 계산하여 전력거래소와 에너지경제연구원(kesis)에서 제공하는 데이터와 합하여 에너지 사용량과 온실가스 배출량 데이터를 가공

하였다. 그리고 앞선 에너지부문과는 다르게 전력부문에서는 석유사용비중이 매우 낮기 때문에 석탄으로의 전환효과만을 계산하였다.

전력부문 LMDI 분해 분석한 결과는 <표 24>와 같다. 인구 효과는 분석한 기간 동안 온실가스 배출량을 증가시키는 요인으로 작용하고 있으며 2010년 이래로 증가세가 감소하고 있어 전력부문에서도 인구효과는 둔화되고 있음을 확인하였다. 경제성장 효과는 전 세계 금융위기가 발생한 2008년에는 온실가스 배출량에 음(-)의 효과를 보이고 있지만 그 외의 기간 동안에는 꾸준히 온실가스 배출량을 증가시키는 요인으로 작용하고 있는 것으로 나타났다. 에너지집약도 효과는 2012년 이후로 온실가스 배출량을 급격히 감소시키는 음(-)의 방향으로 작용하였다. 에너지집약도 효과가 음(-)의 방향으로 진행되기 위해서는 산업 구조의 변화와 에너지 소비효율이 증가되어야 하는데 <표 22>와 같이 화력발전소의 열효율은 2008년 40.8에서 2014년 41.2로 증가한 원인으로 보인다. 화석연료의존도 효과는 2013-2014년 기간 동안 큰 수치로의 감소원인은 2014년도에 2013년 정지했던 원전을 재가동하여 원자력 발전비중이 크게 늘어 온실가스 배출량을 감소시켰기 때문이다. 2014년도에 배출계수 효과는 크게 증가하였는데, 그 이유는 전력부문 발전연료 소비 점유량(%)을 나타낸 <표 23>에서와 같이 2014년도에 단위당 탄소배출량이 많은 석탄의 사용량이 증가한 것이 요인이 될 수 있다.

<표 22> 화력발전소 열효율(%)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
발전단	40.8	40.6	40.8	40.4	40.5	39.6	41.2
송전당	39.1	38.8	39.1	38.8	38.9	37.9	39.4

<표 23> 전력부문 발전연료 소비 점유량(%)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
석탄	43.4	47.1	45.1	44.5	43.0	44.7	46.2
석유	2.4	3.4	2.9	2.2	3.3	3.5	1.7
LNG	15.7	12.7	17.5	18.1	20.4	22.3	16.3
원자력	37.1	35.5	33.1	33.5	31.7	29.3	34.1

〈표 24〉 전력부문 LMDI 분석 결과

단위:Gg of CO ₂ eq.	2008-2009	2009-2010	2010-2011
인구 효과	949.21	1,026.72	1,770.23
경제성장 효과	-21,992.31	41,868.37	20,608.06
에너지집약도 효과	26,059.04	-26,074.86	-15,154.78
화석연료의존도 효과	4,889.15	7,674.07	-2,956.83
배출계수 효과	8,435.91	1,542.70	1,625.32
총 변화량	18,341.00	26,037.00	5,892.00
Gg of CO ₂ eq	2011-2012	2012-2013	2013-2014
인구 효과	1,094.18	1,060.78	986.49
경제성장 효과	2,976.23	15,120.95	17,935.70
에너지집약도 효과	271.71	-10,606.32	-24,167.97
화석연료의존도 효과	3,970.30	8,554.46	-24,340.95
배출계수 효과	-4,725.42	-8,985.88	16,574.73
총 변화량	3,587.00	5,144.00	-13,012.00

다-2. 전력부문 원자력, 신재생에너지 전환 LMDI 분석 결과

전력부문 원자력, 신재생 에너지 전환에 대한 LMDI 분석 방법은 앞선 에너지부문의 분석방식과 동일하다. <표 25> 최종 결과를 살펴보면 2013-2014년 기간 동안에 원자력 발전량을 석탄으로 전환 하였을 경우 28,800단위만큼 화석연료 의존도 효과로 인하여 증가하였다. 전력발전 부문은 에너지부문보다도 화석연료 비중효과로 인한 온실가스 배출량의 단위가 훨씬 높았는데, 이는 국내 전력 발전 믹스에서 원자력의 비중 수치가 에너지부문에서의 원자력비중 수치보다 크기 때문이다. 또한, 신재생에너지를 석탄으로 전환하였을 때의 화석연료 의존도 효과는 11,695단위만큼이나 온실가스 배출량을 증가시키는 것으로 나타나 신재생에너지의 비중이 늘리는 것은 온실가스 배출량을 효과적으로 감축시키는 방안임을 확인할 수 있다.

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

〈표 25〉최종 화석연료 비중효과

단위:Gg of CO ₂ eq.	2008-2009	2009-2010	2010-2011
원자력→석탄	-8,483.53	-12,623.33	2,773.23
신재생→석탄	192.87	-228.18	1,040.06
	2011-2012	2012-2013	2013-2014
원자력→석탄	-10,155.78	-15,833.13	28,800.01
신재생→석탄	3,956.43	1,462.27	11,695.65

V. 결론 및 토의

본 연구는 우리나라 에너지관련 시계열 통계 자료의 경우 축적된 기간이 길지 않기 때문에 소표본 분석이 가능한 ARDL 분석을 실시하여 1990-2014 기간을 대상으로 에너지부문과 전력부문에서 환경쿠즈네츠곡선이론의 성립 여부를 확인하고 장, 단기 영향을 분석하였다. 그리고 내생적인 관계와 충격 반응함수를 확인하기 위해 VECM 분석을 실시하였다. 시계열 분석을 통해 역 U자형의 환경쿠즈네츠이론이 성립하였기 때문에 향후 온실가스 배출량을 감축시킬 수 있는 요인들을 살펴보기 위하여 LMDI 분석을 실시하였으며 화석연료에서 비 화석연료로의 전환 효과를 추가적으로 살펴봄으로써 원자력, 신재생에너지 발전 비중의 중요성을 강조하였다.

에너지부문의 ARDL 모형은 단, 장기적 균형관계에서 역 U자형인 환경쿠즈네츠곡선이론(EKC)을 만족하는 유의한 계수와 방향을 나타냈다. 그리고 ΔECT_{t-1} 의 조정계수 값은 -0.54의 값을 보여 균형에 도달하기 위해서는 약 1.85년(1년/0.54)의 시간이 필요하다. VECM 분석결과는 원자력, 신재생에너지와 온실가스 배출량이 장기 균형관계에 있었다. 향후 예측은 넓은 밴드를 형성한 증가 형태를 나타내고 있어 원자력과 신재생에너지 사용의 비중을 늘리고 화석연료의 비중을 줄이겠다는 강한 정부 정책이 발효된다면 얼마든지 감소할 수 있는 여지는 충분히 보인다. 충격반응함수 결과는 원자력, 신재생에너지의 경우 1기의 충격이 2기가 되어서 0에 수렴하게 되었지만 총에너지 사

용량과 GDP, 온실가스 배출량의 충격에는 균형으로 돌아오지 못하는 모습을 보여주었다. 전력부문 ARDL 분석 결과는 ARDL cointegration의 F-statistic 값은 1.38로 Upper I(1)의 모든 값보다 작게 나와 기술적으로 Cointegration이 존재한다고는 말할 수는 없었다. 하지만 ΔECT_{t-1} 의 조정계수 값이 유의미한 값을 가지므로 Kremers et al.,(1992)의 방법론에 따라 cointegration이 존재한다고 가정하고 분석을 진행하였다. 장기 균형관계에서는 환경쿠즈네츠곡 선이론과 부합하는 부호를 보였으나 유의하지 않았다. 끝으로 VECM 분석으로 GDP와 온실가스 배출량 사이에 서로 영향을 주고받는 것으로 나타났으며 충격반응함수 결과, 화석연료가격 충격만이 균형으로 수렴하였다.

이후 LMDI 분석을 통해 우리나라 온실가스 배출요인을 분석하였다. 특히 본 논문에서는 선행연구들에서 시도하지 않았던 원자력과 신재생에너지 소비량을 화석연료 소비량으로 전환 시(화석연료의존도효과) 온실가스 배출량에 미치는 영향을 추가 분석하였다. 또한, 전력부문을 면밀히 분석하기 위하여 신재생에너지로부터 발전된 에너지량에 따른 온실가스 배출량을 직접 계산하여 에너지경제연구와 전력거래소에서 제공하는 데이터와 합쳐서 좀 더 정확한 원자력과 신재생에너지로 인한 배출 영향을 살펴보았다. LMDI 분석결과, 경제성장 효과는 1998년 경기침체이후 온실가스 배출량 증가에 가장 큰 기여를 하고 있다. 하지만 에너지 집약도 효과는 온실가스 배출량을 감소시키는 음의 방향으로 진행되고 있는데 이는 제조업에서 서비스업으로의 산업구조 전환과 에너지소비 총량제와 같은 에너지 효율을 증대시킨 노력으로 보인다. 화석연료의존도 효과의 부호는 비교하려는 년도사이에 화석연료 비중이 늘어나면 양(+)의 값, 화석연료 비중이 줄어들면 음(-)의 값을 갖는다. 특히 원자력 발전량을 증가시키는 기간에는 온실가스 배출량을 감소시키는 것으로 나타나 원자력 발전량을 늘리는 것은, 온실가스 배출량을 효과적으로 감축시키는 방안임을 확인하였다. 배출계수 효과는 화석연료 중에서 탄소배출량이 높은 석탄 비중을 줄이고 탄소배출량이 비교적 적은 천연가스를 사용함으로써 온실가스 배출량을 효과적으로 줄일 수 있었다.

끝으로 원자력과 신재생에너지 사용량을 화석에너지 사용량으로 전환했을 경우, 증가하는 온실가스 배출량의 영향을 살펴보았다. 에너지부문 분석 결과, 2013-2014년 사이에 원자력 발전량을 석탄발전량으로 전환한다면 총 15,777단위만큼 온실가스 배출량이 증가하는데 증가한 온실가스 배출량 중 화석연료 비중효과에 의해 11,091단위만큼을 증가시키는 효과가 있다는 것을 확인하였다. 즉, 화석연료 비중효과는 다른 효과들에 비해 영향력이 크므로 에너지 정책을 시행하여 온실가스 배출량을 줄이는 방법으로 화석연료비중을 줄이는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 그리고 2013-2014년도에 온실가스 총 변화량은 -7,460단위만큼 감소하였는데 이러한 결과가 탈동조화의 시초라고 해석 가능한지에 대해서는 추가적인 데이터의 축적과 분석이 향후 진행되어야 할 것이다. 전력부문 분석결과, 에너지집약도 효과는 화력발전소의 열효율 증가 등의 원인으로 온실가스 배출량을 감소시키는 방향으로 진행되고 있으며, 화석연료의존도 효과는 2014년도에 크게 감소하였는데 이는 2013년 정지했던 원전을 재가동하여 원자력 발전 비중이 급격히 늘어난 요인으로 보인다. 2014년 배출계수 효과인 경우에는 탄소배출계수가 높은 석탄 등의 사용량 증가로 인하여 온실가스배출량을 증가시킨 것으로 보인다. 끝으로 원자력, 신재생에너지 사용량을 화석연료 사용량으로 전환한 효과는 2014년도의 경우, 28,800단위만큼 증가시키는 것으로 나타나 화석연료 비중효과는 앞선 에너지부문의 화석연료 비중효과보다 영향력이 컸다.

우리나라는 에너지 빈국임에도 불구하고 효과적인 에너지 정책에 힘입어 에너지 다소비 산업을 중심으로 급격한 경제성장을 일궈낼 수 있었다. 경제발전 초기 60년대 석탄연료 중심에서 70년대 중화학공업의 석유 중심 산업으로, 이후 천연가스, 석유, 석탄, 원자력 등으로 주요 에너지원을 다원화시키면서 정부 주도하에 효율적인 정책을 운용하였지만 여전히 수입의존도는 90%대로 꾸준히 에너지 안보에 위협을 받고 있다. 하지만 우리나라는 최근 OECD 선진국과 같이 신재생에너지 보급 정책을 강화하고 기술개발과 산업 육성에 힘쓰는 등 에너지 안보 위협에 벗어나며 기후변화에 효과적으로 대응하는 녹색

성장을 이루려 노력하고 있다. 이러한 에너지 정책을 시행하기에 앞서 수급안정을 위해 지속가능한 전원인 원자력 발전의 비중을 유지하면서 신재생에너지 발전 비중을 점차 증가시키는 효율적인 상생경영을 운용하는 것이 중요하다. 하지만 원자력 발전을 지속적으로 유지하기 전에 2011년 후쿠시마 원전사고 등으로 인해 불안한 원전의 안전성을 개선하기 위한 제도적 장치와 관리시스템의 확보를 위한 효율적인 방안을 마련해야한다. 또한 원자력 발전의 장점인 저렴한 발전단가에 나타나지 않은 외부비용을 고려하는 연구도 진행되어야 할 것이다. 2016년 12월 한국원자력연구원과 에너지경제연구원은 저탄소 경제시대에 맞추어 원자력 정책 공감대를 확대하고 기술 교류, 원전 추가 건설방안, 핵연료 처리문제, 원전 수용성 확대를 위한 방안들을 교류하고 확대하고자 협약을 맺으며 노력하고 있다. 그리고 후쿠시마 원전사고로 방출된 방사성 세슘에 대한 문제들은 2016년 8월 한국원자력연구원 원전제염해체기술 개발부에서 자성을 이용하여 세슘을 효과적으로 흡착시키는 기술을 개발하는 등 원전 안전을 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있으며 원자력 운용을 설득하기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 그리고 현재 신재생에너지의 전원비용은 원자력에 비해 경제성이 떨어지지만 2014년 세계 신재생에너지 발전설비용량은 전체 45%로 급격히 성장하고 있다. 그렇기 때문에 신재생에너지의 경제성이 개선될 때까지 신재생보급을 위한 정부의 보조정책이 중요하다.

대기환경의 문제는 단시간에 해결할 수 있는 것은 아니다. 따라서 온실가스 배출 감축정책을 만들고 시행하기에 앞서 온실가스 배출량에 영향을 주는 요인들에 대한 심도 있는 분석이 필요하다. 이 논문은 원자력과 신재생에너지의 영향을 다양한 측면에서 분석하였고 비 화석연료인 원자력과 신재생에너지 사용증가는 온실가스 배출량 감축에 효과적인 방안임을 수치로써 확인하였다. 본 논문을 통해 장기 로드맵에 따라 녹색성장을 위한 정책을 검토하고 시행하기에 앞서 유용한 자료가 되었으면 한다.

접수일(2017년 1월 23일), 수정일(2017년 2월 21일), 게재확정일(2017년 2월 23일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 김수이, 김현석, 2011, “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 에너지 소비 요인 분해 분석”, 에너지경제연구 제 10권 1호, 49 - 76
- 김용빈, 2015, “환경 쿠즈네츠 곡선을 활용한 대기오염 배출량의 오일 가격 탄력성과 사회적비용 탄력성 추정”, 에너지경제연구 제14권 3호, 145 - 183
- 김재화, 김현석, 2015, “신재생에너지 발전이 우리나라 CO₂ 배출에 미치는 영향분석”, 에너지경제연구 제 14권 3호, 185 - 201
- 박정순, 2015, 「국제 신재생에너지 정책변화 및 시장분석」, 에너지경제연구, 기본연구 보고서
- 박지민, 2012, 「개도국 KSP를 위한 한국 에너지정책 사례 연구」, 에너지경제연구, 수시연구보고서 12 - 07
- 온실가스종합정보센터, 2013, 「국가 온실가스 배출구조 변화요인 분석」
- 양맹호, 이종희, 김수은, 2016, 「신 기후변화체제와 원자력, 원자력정책, 2016-1」
- 임찬수 외3, 2010, “군집분석을 통해 본 G20 국가의 사회통합유형화에 관한 연구”, 통계연구, 17 : 125 - 135
- 전력거래소, 2014, 「2014년 연간 전력시장운영실적」
- _____, 2014, 「2014 전력계통운영실적」
- 전봉걸, 김용빈, 2016, 「2014년 에너지부문 온실가스 배출량 감소요인 분석」, 에너지경제연구
- 정해식, 이기훈, 2001, “로그평균 디비지아 지수 기법을 이용한 CO₂ 배출량 변화의 요인분해”, 자원.환경경제연구, 제 10권 4호, 569 - 589
- 진상현, 2014, “기후변화협상에서 한국의 위치와 방향-국가별 온실가스 배출특성에 기반한 군집분석 및 전망”, 한국정책학회보, 제23권 4호
- _____, 황인창, 2014, “기후변화협상에서 한국의 위치와 방향 - 국가별 온실가스 배출

- 특성에 기반한 군집분석 및 전망”, 한국정책학회보, 제23권 4호, 115 - 145
- 황인창, 2008, “기후변화 대응전략에 따른 이산화탄소 배출량 변화요인 분석 - 생태적 근대화 전략을 중심으로”, 환경사회학연구 ECO 제 12권 2호, 153 - 184
- Ang, B., 2004, Decomposition Analysis for Policy Making in Energy: which is the Preferred Method?, *Energy Policy*, 32: 1131 - 1139.
- Ang, B., 2005, The LMDI Approach to Decomposition Analysis: a Practical Guide, *Energy Policy*, 33: 867-871.
- Bacon, Robert W.; Bhattacharya, Soma, 2007, “Growth and CO2 emissions : how do different countries fare?”, *Environment department papers*, num 113
- Domenico Vitale, Massimo Bilancia, 2012, Role of the natural and anthropogenic radiative forcings on global warming: evidence from cointegration-VECM analysis, *Environ Ecol Stat*, 20: 413 - 444
- Iwata, H., Okada, K. and S. Samreth, 2010. Empirical study on the environmental kuznets curve for CO2 in France: The role of nuclear energy. *Energy Policy*, 38: 4057 - 4063.
- Jamalludin Sulaiman, Azlinda Azman and Behnaz Saboori, 2013, THE POTENTIAL OF RENEWABLE ENERGY: USING THE ENVIRONMENTAL KUZNETS CURVE MODEL, *American Journal of Environmental Science*, 9 (2): 103-112
- Kaya, Y., 1990, “Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios, IPCC Energy and Industry Subgroup”, *Response Strategies Working Group*, Paris 76.
- IEA, 2015, 「Energy Technology Perspectives 2015」
- Marzio Galeotti, Alessandro Lanza, 1999, “Richer and cleaner? A study on carbon dioxide emissions in developing countries”, *Energy Policy*, Volume 27, Issue 10, 565 - 573
- Muller, A., 2006, "Putting Decomposition of Energy Use and Pollution on a Firm Footing", <http://gupea.ub.gu.se/dspace/handle/2077/2702>
- Narayan, P.K., 2005. “The saving and investment nexus for China: Evidence from

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

cointegration tests.” *Applied Econ.*, 37 : 197

Pesaran, M.H. and B. Pesaran, 1997. 「Working With Microfit 4.0: Interactive Econometric Analysis.」 *Oxford University Press, Oxford*, ISBN-10: 0192685317, pp: 505.

Pesaran, M.H., Y. Shin and R.J. Smith, 2001. “Bounds testing approaches to the analysis of level relationships.” *J. Applied Econ.*, 16: 289 - 326.

S.M. de Bruyn, J.B. Opschoor, 1997, “Developments in the throughput - income relationship: theoretical and empirical observations”, *Ecological Economics*, Volume 20, 255 - 268

Sulkowski, Adam & D. Steven White, 2014, "Emitting Happiness? Using Model-Based Cluster Analysis to Group Countries by Wealth, Development, Carbon Emissions, and Happiness" *Social Science Research Network Working Papers Series*.

Suyi Kim, 2015, “What factors cause an increase of greenhouse gas emissions in Korea?”, *에너지경제연구* 제 14권 3호, 83 - 112

UNFCCC, 2004, 「Report on the Workshop on the Preparation of Fourth National Communications from Parties included in Annex I to the Convention. 」

World Bank, 2007, 「Growth and CO2 Emissions Washington : World Bank Environmental Department.」

ABSTRACT

Driving Forces of the changes in GHG Emissions
of Nuclear, New Renewable Energy

Yong Been Kim*

Today, the majority of countries are reducing greenhouse gas emission in an efficient way, along with the Paris Agreement, by making more room for nuclear and renewable energy which produce little carbon dioxide. In order to control the proportion of nuclear and renewable energy efficiently, it is crucial to know the influences that come out with economic variables, through an analysis in various angles.

This paper is focusing on those relationships between the change in greenhouse gas emission amount and the variables such as nuclear and renewable energy usage, GDP, etc., based on the Environmental Kuznets Curve(EKC) theory. This paper conducted ARDL, VECM, LMDI tests and has observed South Korea's status among OECD. In energy sector and electricity sector, it had ARDL and VECM analysis that confirmed whether they correspond with EKC theory in both long and short term.

In conclusion it has reviewed the population effects, economic growth effects, energy intensity effects, dependence effects on fossil fuels and emission index effects through LMDI analysis, and has emphasized the importance of proportion of nuclear and renewable energy by specifically analyzing the dependence effects on fossil fuels when those energies are transformed into fossil fuels.

Keywords : GHG, Nuclear, New Renewable Energy, ARDL, VECM, LMDI

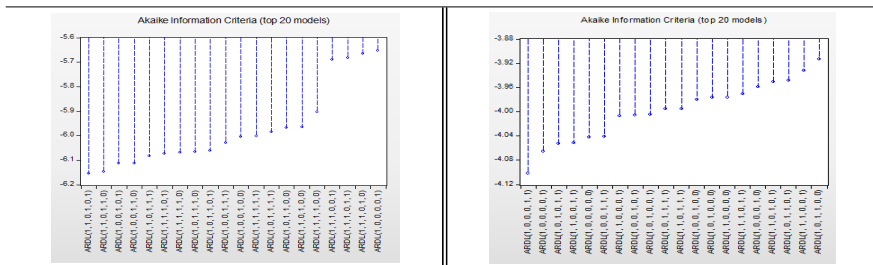
* Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GHG Mitigation Research Team, Researcher), subaq725@gmail.com

원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

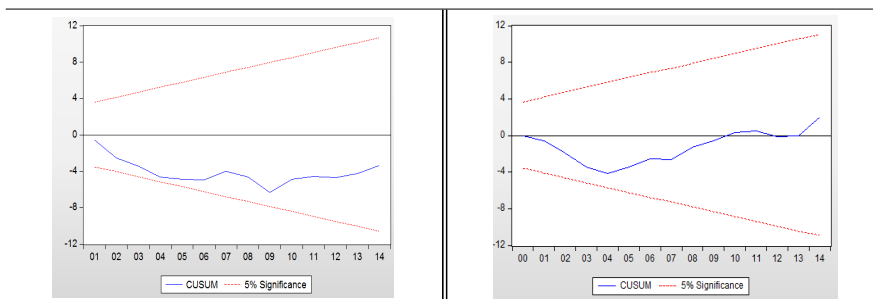
〈부록〉

[그림 1] 에너지부문, 전력부문 ARDL 분석 결과

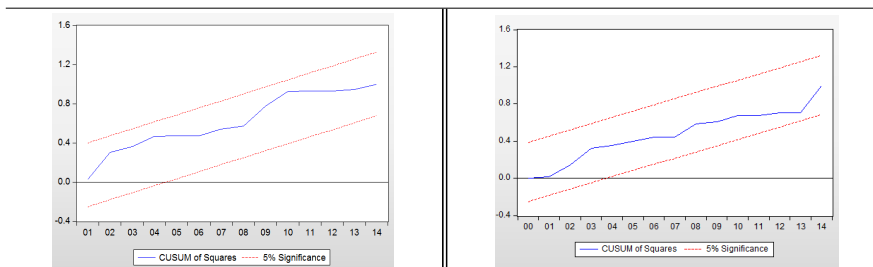
AIC기준 적정 lag 결정 결과



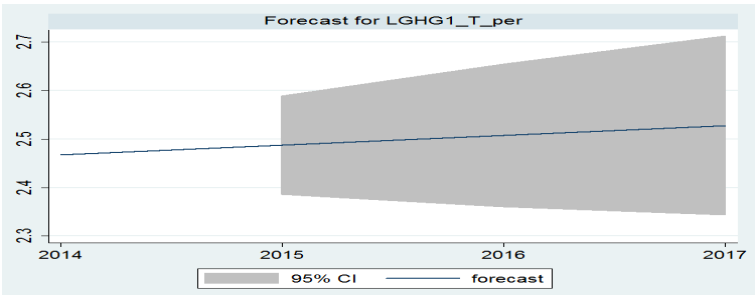
parameters stability test (Cusum Test) 결과



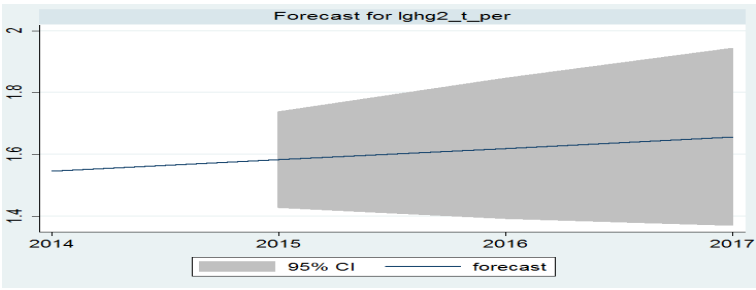
CUSUMSQ 결과



[그림 2] 에너지부문 향후 예측(forecast)



전력부문 향후 예측(forecast)

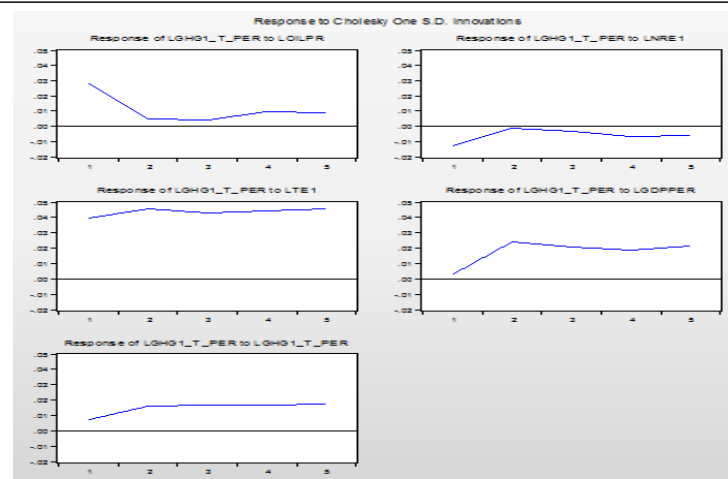


〈표 14〉 전력부문 OLS 결과

변수	Coefficient	t-statistic	P-value
ln(GDP)	2.92	3.18	0.00
ln(GDP) ²	-0.16	-3.32	0.00
ln(TE)	1.68	18.72	0.00
ln(NRE)	-0.56	-7.66	0.00
ln(FPR)	0.02	0.68	0.50
C	-25.35	-5.84	0.00

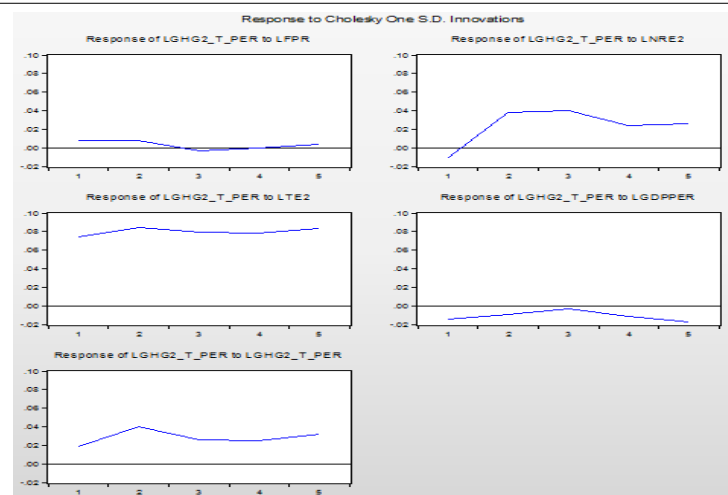
원자력, 신재생 에너지의 영향력에 따른 우리나라 에너지부문 온실가스 배출 요인 분석

[그림 3] 에너지부문 충격반응함수



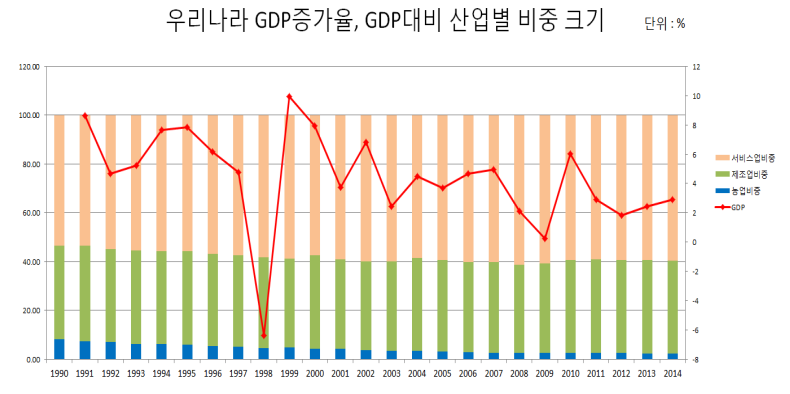
Cholesky ordering : loilpr lnre1 lte1 lgdpper lghg1_t_per

전력부문 충격반응함수

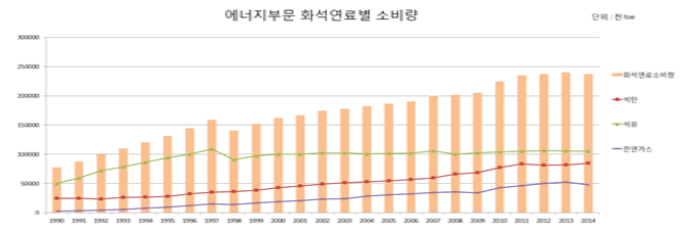


Cholesky ordering : lfpr lnre2 lte2 lgdpper lghg2_t_per

[그림 4] 우리나라 GDP 증가율, GDP대비 산업별 비중 크기



[그림 5] 에너지부문 화석연료별 소비량



[그림 6] 에너지 전환별 온실가스 배출량 추이

