New & Renewable Energy 2020. 12 Vol. 16, No. 4
ISSN 1738-3935 (Print)
ISSN 2713-9999 (Online)
https://doi.org/10.7849/ksnre.2020.0015
[2020-12-LC-002]

CO_2 배출, 원자력에너지, 신재생에너지 발전량과의 관계분석: 한국, 일본, 독일을 중심으로

윤정혜[1] · 강상목[2]*

Study on the Relationship between CO_2, Nuclear, and Renewable Energy Generation in Korea, Japan and Germany

Junghye Yun[1] · Sangmok Kang[2]*

Received 3 June 2020 **Revised** 22 September 2020 **Accepted** 25 November 2020 **Published online** 14 December 2020

ABSTRACT This study analyzed the short- and long-term effects of nuclear and renewable energy generation on CO_2 emissions in Korea, Japan, and Germany from 1987 to 2016 by using the unit root test, Johansen cointegration test, and ARDL model. The unit root test was performed, and the Johansen cointegration test showed cointegration relationships among variables. In the long run, in Germany, the generation of both nuclear and renewable energy was found to affect CO_2 emission reduction, while South Korea's renewable energy generation, including hydropower, increased the emissions. Japan only showed significance in fossil fuels. In the short run, in the three countries, the generation of nuclear and renewable energy, excluding hydropower, affected CO_2 emission. However, in Korea and Germany, nuclear and renewable energy generation, respectively, affected CO_2 emission reduction. Although the rest are significant, the results showed that they increased CO_2 emissions.

Key words CO_2 emissions(CO_2 배출량), Fossil fuels(화석연료), Nuclear(원자력에너지), Renewable energy(신재생에너지), ARDL model(ARDL모형)

1. 서 론

2016년 기준으로 연료 연소로 인한 전세계의 CO_2 배출량 중 일본 5위, 독일 6위, 한국은 7위를 차지하였다[1]. Enerdata의 세계 에너지 통계에서도 최고 배출량 국가 순위가 일본 5위, 독일 6위, 한국 7위로 비슷한 모습을 보였다. 전세계적으로 높은 CO_2 배출량을 감축시키는데 동참하기 위하여 최근 한국의 환경부는 '2030 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본로드맵 수정안'과 '제2차 계획기간 국가배출권 할당계획 2단계 계획'을 국무회의에서 최종 확정하였다[1]. 2030년 배출량에서 배출량을 5억 3,600만 톤

1) M.A. Candidate, Department of Economics, Pusan National University
2) Professor, Department of Economics, Pusan National University
***Corresponding author:** smkang@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2586 Fax: +82-51-581-3143

1) 감축 로드맵 수정안에 근거하여 배출권거래제 적용대상 업체들에게 2018-2020년까지 3년간 배출할 수 있는 온실가스 총량(배출허용총량)을 정하는 한편, 이를 개별업체에 나누어 주기 위한 기준을 세우는 계획이라고 환경부에서 정의하고 있다.

Copyright ⓒ 2020 by the New & Renewable Energy
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 낮추기 위한 온실가스배출 전망치(BAU) 대비 37% 중국내 감축량을 이전의 25.7%에서 32.5%로 상향 조정하기로 결정하였다. 이로 인하여 전환(발전, 집단에너지) 부문에서는 미세먼지 저감과 친환경에너지 전환정책으로 약 2,400만 톤 감축을 확정하는 등 온실가스 배출에서 가장 영향을 미치는 CO_2 배출량을 이전보다 더 많이 줄여야하는 상황이다[2]. 일본은 2015년 파리협정 당시 온실가스 삭감 목표를 2030년에 2013년 대비 26%로 높이겠다고 선언하였다. 이를 달성하기 위해서 전력 정책에서 비(非)화석전력원(신재생에너지, 원자력)을 17%에서 44%로 높이고 화석연료 사용은 83%에서 56%로 낮추겠다는 계획을 세웠다(資源エネルギー庁, 2017)[3]. 독일은 에너지·기후변화의 정책목표로서 온실가스를 2050년까지 1990년 대비 80~95% 감축하는 것으로 결정하였다. 에너지 수요 증가를 억제시키고 에너지공급 구조를 탈석탄, 신재생에너지 체제로 전환하여 온실가스 감축목표를 달성하고자 한다. 하지만 IEA Atlas of Energy[1]의 통계에 의하면 2016년 기준으로 전력생산에서 화석연료 발전량의 비중은 한국 68%, 일본 80%, 독일 56% 등 여전히 높은 비율을 차지하고 있다. 반면 전력생산에서 차지하는 비중은 CO_2 배출 저감에 도움을 주는 신재생에너지(한국 3%, 일본 14%, 독일 29%)와 원자력(한국 29%, 일본 2%, 독일 13%)의 발전량에 비하여 여전히 화석연료 의존도가 더 높은 상황이다.

소득과 환경오염, 에너지소비와 CO_2 배출에 대한 영향을 분석한 연구들은 이전부터 존재하였다. Grossman and Krueger(1995)[4]에 따르면 소득과 환경오염과의 관계에서 역U 자형의 환경쿠즈네츠 곡선(EKC; Environmental Kuznets Curve)이 나타난다고 주장한다. 또한 국가가 발전할수록 오염된 제품을 생산하는 것을 그만두고 대신에 다른 국가로부터 이러한 제품들을 수입하기 시작할 것이라고 하였다. Soytas et al.(2007)[5]은 미국의 에너지 소비, 소득과 탄소 배출 간의 연관성을 살펴보았다. 이들은 장기적으로 미국의 CO_2 배출의 원인이 에너지 소비이며 소득과는 관계가 없음을 보였다. 그러므로 배출량을 줄이기 위해 소득을 감소할 필요가 없다고 주장하였다. 또한 배출량을 줄이기 위해서는 관련 변수인 에너지 소비를 줄여야 하고 환경적인 압박을 완화하기 위하여 재생에너지 사용에서 에너지 효율성을 증가시킬 수 있는 시간이 필요하다고 하였다. 정수관·강상목(2013)[6]은 소득 및 에너지소비량과 CO_2 배출량은 장기균형이 존재하고 일시적인 충격에 의해 불균형이 발생할지라도 균형이 빠르게 회복 될 수 있으며 소득과 CO_2 배출량은 N자형 관계를 보여주었다. 또한 에너지소비량과 CO_2 배출량은 쌍방향의 인과관계가 존재하고 에너지소비는 소득과 인과성이 존재하여도 역의 관계는 존재하지 않는다고 주장하였다. 도만흥(2019)[7]은 동일한 관계를 베트남 사례를 중심으로 분석하였다. 경제 성장이 에너지 소비와 환경오염에 미치는 관계를 분석하여 베트남에서 환경쿠즈네츠 곡선이 존재하는지 확인하였다. 장·단기적으로 1인당 GDP와 CO_2 배출량 간 역 U자의 존재 여부는 밝혀내지 못했으나, 경제 성장이 계속 진행되면 역 U자가 나타날 가능성이 있음을 예측하였다.

에너지소비가 CO_2 배출에 미치는 영향에 관한 선행연구로는 김재화·김현석(2015), Baek(2016), Pata, U, K (2018), 원두환·이연정·정수관(2018)[8~11]을 찾을 수 있다. 김재화·김현석(2015)[8]은 한국의 경제성장, 전력소비의 증가가 환경오염에 미치는 영향을 살펴보았다. 즉, 전력부문의 총 발전량과 신재생에너지 발전량의 변화가 온실가스 배출에 미치는 장단기 영향을 ARDL 모형을 이용하여 추정하였다. 장기적으로 경제성장과 CO_2 배출량과의 관계는 1970년대 이후 소득과 CO_2 배출이 함께 증가하였으나 소득 임계점을 지나면서 소득이 증가해도 CO_2 배출이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 전력소비량과 CO_2는 경제성장에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났으나 신재생에너지 발전량의 경우 1%로 증가하면 CO_2 배출이 감소하는 것으로 나타났다. Baek(2016)[9]은 미국에서 원자력과 재생에너지가 환경에 영향을 주는지를 살펴보았다. 주어진 소득수준이 초기에는 역 U자형 곡선을 보인 후 장기적으로 CO_2 배출을 증가시켜 미국이 N자형 EKC를 가지는 것으로 확인하였다. 그리고 단기와 장기적으로 에너지 소비가 CO_2 배출을 증가시키지만 원자력에너지의 소비는 CO_2 배출을 감소시킨다는 것을 확인하였다. 그러나 재생에너지는 단기적으로만 CO_2 배출을 감소시키는 것으로 확인하였다. Pata(2018)[10]는 터키의 재생에너지소비, 도시, 금융개발, 소비와 CO_2배출에 관하여 분석하였다. 즉, 경제성장, 금융개발과 도시화는 장기적으로 1인당 이산화탄소 배출량을 증가시켜서 환경 악화를 증가시키지만, 총 재생에너지 소비, 수력 소비, 대체에

너지 소비는 CO_2 배출을 줄이기 위한 바람직한 수준에 도달하지 못하므로 아무런 영향을 미치지 못하였다. 그는 재생 가능한 에너지 소비의 장려가 터키의 환경오염을 줄이기 위한 효과적인 정책이 아니라고 주장하였다. 그런데 일본의 CO_2 배출, 원자력에너지, 신재생에너지 소비의 중·단기 관계를 분석한 원두환 외(2018)[11]는 지금까지 CO_2 배출량을 줄이는데 신재생에너지의 비중이 미미하고 일본이 기후협약 준수 부담을 덜고 온실가스 감축을 위하여 대안이 될 수 있는 것은 원자력에너지 사용임을 주장하였다.

본 연구는 기존의 에너지소비가 아닌 1차 에너지원, 원자력, 신재생에너지의 전력 발전량 중에서 어떤 에너지원이 이산화탄소(CO_2) 배출량에 더 많은 영향을 주는지 살펴보고자 한다. 또한 본 연구에서는 Pesaran et al.(2001)[12]의 ARDL(Auto-regressive Distributed Lag) 모형을 이용하여 한국, 일본, 독일 등 세 국가로 확대하였다. 나아가 선행연구에서는 신재생에너지에 수력을 포함하였지만 본 연구에서는 수력을 포함한 모형과 분리한 모형을 동시에 분석한다는 점에서 차별성을 갖는다.

세 국가를 비교한 이유는 다음과 같다. 우선 한국과 일본의 경우, 같은 에너지수입국으로서 1970년대 두 번의 오일쇼크로 석유공급의 불안을 겪었다. 하지만 한국은 에너지 안보 강화 대신에 석유 집약적 경제 건설을 지속하였는데 2차 석유파동 때 경제적 어려움을 겪은 후에 에너지체계의 구조적 변화를 시행하여 80년대 초가 되면서 제도와 기구가 정비되었다. 반면 일본은 1차 충격 이후 지금의 에너지절약법(省エネ法, 쇼에네법)의 기반이 되는 "Moonlight 계획"(1978년)을 시행하며 에너지 전환효율을 향상시키고 이용하지 않는 에너지를 회수하고 이용기술을 개발하는 등 계획을 진행하였다. 그 결과, 일본 산업은 세계 최고 수준의 에너지 소비효율을 달성하였으며 일본의 에너지절약법은 세계적으로 에너지 절약 부분에서 인정받고 있다. 또한 독일은 두 국가와 비슷한 시기에 1980년대 체르노빌 원전 사고를 계기로 원자력 단계적 폐지와 신재생에너지 확대에 대한 논의와 정책 수립이 시행되어 왔고 성공적인 에너지 전환국가 중 하나라는 점에서 세 국가를 비교할 필요가 있다고 보았다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 한국, 일본, 독일의 에너지 정책 변화에 대해서 기술할 것이다. III장에서는 CO_2 배출량과 1차 에너지원들, 신재생에너지, 원자력의 전력발전량을 나타낸 변수들을 본 연구의 방법론인 ARDL 모형 및 연구가설에 적용시켜 간략하게 소개한다. IV장에서는 통계자료들을 활용하여 기술적 통계 및 그래프로 나타낸 후 추정 방법과 모형의 실증 분석 결과들을 제시하고 V장은 결론으로서 요약과 정책적 시사점을 제시한다.

2. 세 국가의 에너지 정책 변화

2.1 한국

한국의 에너지정책 변화는 Table 1[13~14]과 같이 요약할 수 있다. 한국은 1990년대까지는 경제성장을 위해 석유를

Table 1. Changes in Korea's Energy Policy

~1990s	□ Stable and affordable supply of energy for economic growth, people's lives, and industrial production – For short-term effective quantitative growth, the energy industry structure was a monopolistic system of public enterprises and energy prices were directly regulated by the government.
Early 2000	□ Promotion of competition in the energy industry – Minimized government intervention in the market and allowed energy demand, supply and prices to be determined in the market as much as possible.
~2008 (primary plan)	□ Sustainable development is the highest goal while considering energy security, efficiency, environment, and economic growth at the same time as 3E of energy policy – A global response to climate change and GHG reduction policies have raised rapidly.
2008~ 2019	□ The 1st Basic Energy Plan (2008~2030) – The core policy goal is "low carbon, green growth," and strive to achieve sustainability in the energy industry and create new growth engines for the country. □ The 2nd Basic Energy Plan (2014~2035) – Change energy policy from supply-oriented to demand management, stable supply and demand, and harmonize stable supply and demand, and promote energy policy with the people. □ The 3rd Basic Energy Plan (2019-2040) – The motto is to improve sustainable growth and quality of life for the people through energy conversion by creating a foundation to promote energy supply, consumption, and industry transformation and energy transformation.

비축하고, 해외자원개발을 하는 동시에 석유처럼 공급 불안이 적은 원자력, 천연가스 등의 산업을 발전시키기 시작하였다. 1990년대 들어서 정부는 에너지 산업의 경쟁체제를 도입하고 공기업들은 민영화를 추진하였다. 90년대 이후부터는 지구온난화, 기후변화 대응이 전 세계적으로 화두가 되면서 CO_2 배출량을 감소시키고자 대체 에너지원으로 신재생에너지 보급 확대 정책을 시작하면서 저탄소 녹색성장과 지속가능한 발전을 위해 온실가스 인벤토리 보고서 등 국가 자체적으로 기후변화 대응을 위해 국제사회에 자발적으로 보고하고 있었다[15]. 2008년부터는 새롭게 에너지 기본계획[2]을 세우게 되면서 2008년~2030년 제1차 기본계획 수립을 시작으로 2014년~2035년 2차 기본계획, 현재 2019년~2040년 3차 기본계획을 수립하였다. 이처럼 20년을 계획기간으로 5년마다 수립 및 시행을 해왔다. 또한 계획의 수립과정부터 최종 단계까지 워킹그룹을 운영하며 총 5개 분과(총괄, 수요, 공급, 갈등관리·소통, 산업·일자리)에서 산·학·연 전문가, 시민단체 인사들을 포함한 75명의 민간위원들이 주도적으로 참여하고 있다.

한편, Fig. 1은 한국의 1차 에너지 발전량을 나타낸다. 2006년 화석연료(석유, 석탄, 천연가스)는 248.4 TWh, 원자력에너지는 148.7 TWh, 수력을 합친 신재생에너지 발전량은 4.0 TWh의 비중을 차지하고 있었다. 그 후 10년이 지난 뒤 2016년에는 화석연료에너지 376.4 TWh, 원자력에너지 162.0 TWh, 신재생에너지(수력 포함) 16.7 TWh의 비중을 차지하였다. 화석연료에너지가 발전에서 여전히 많은 비중을 차지하고 있지만 원자력에너지와 신재생에너지를 사용한 발전량이 조금 늘어났음을 알 수 있다.

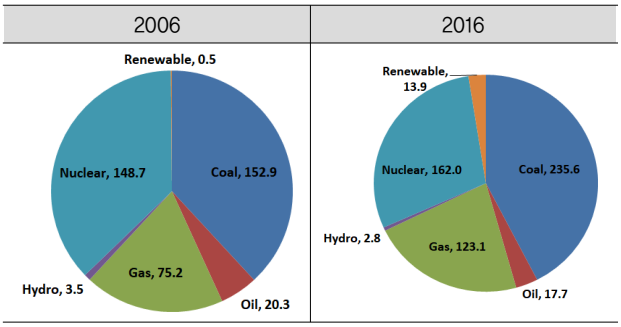


Fig. 1. Electricity generation (by fuel) in Korea (Unit: TWh)

2) 에너지 기본계획은 저탄소녹색성장기본법 제41조와 에너지법 제10조 제1항을 법적 근거로 하고 있다.

2.2 일본

일본은 장기적으로 안정된 지속적·자립적인 에너지 공급에 기초하여 자국 경제 사회의 발전과 국민생활의 향상, 세계의 지속적인 발전에 대한 공헌을 목표로 한다. 3E+S의 원칙 아래에서 안정적이며 부담이 적고 환경에 적합한 에너지 수급 구조를 실현하려고 노력하고 있다[3]. Fig. 2[16]는 일본의 에너지 정책의 기본 방침인 3E+S을 보여준다. 일본 에너지 정책은 에너지원별 강점이 최대한으로 발휘되고 약점이 보완될 수 있도록 다층적 에너지 공급 구조를 실현하고자 한다. 에너지자급률(Energy Security)의 경우 동일본 대지진 전에 약 20%를 넘어섰고 현재 9.5%에서 25% 정도로 달성하려고 한다. 전력비용의 경제적 효율(Economic Efficiency)의 경우 에너지 믹스를 책정하였을 때 현재보다 더 낮추는 것을 목표로 한다[4]. 온실가스 배출량의 환경(Environment)요소는 미국과 유럽에 못지않은 온실가스 삭감목표를 실현하려고 한다[5].

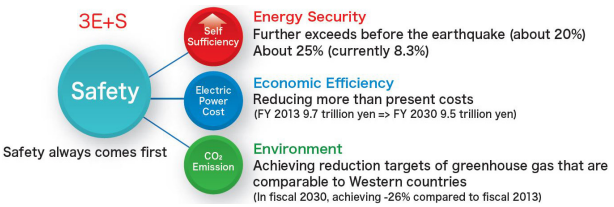


Fig. 2. Basic Energy Policy in Japan

Fig. 3은 일본의 1차 에너지발전량을 나타낸다. 화석연료 발전량은 2006년 736.4 TWh에서 2016년에는 810.1 TWh로 증가하였다. 또한 신재생에너지 발전량도 수력을 합쳐 2006년 총 113.4 TWh에서 2016년 163.0 TWh로 증가하였음을 볼 수 있다. 이는 2006년 원자력이 304.3 TWh에서 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 2016년 17.7 TWh까지 줄어드는 대신 정부 정책으로 인해 신재생에너지 비중이 늘어났다는 것을 알 수 있다.

3) 여기서 3E+S는 안전최우선(Safety), 자원자급률(Energy security), 환경적합(Environment), 국민부담억제(Economic efficiency)를 말한다.

4) 즉, 전력비용을 2013년도 9.7조 엔→2030년 9.5조 엔으로 낮춘다.

5) 온실가스배출량을 2030년도에 2013년도 대비 −26% 감축을 목표한다.

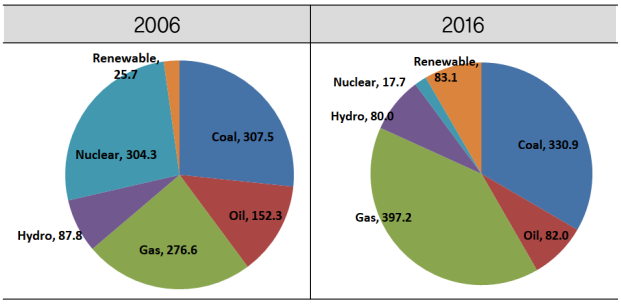


Fig. 3. Electricity generation (by fuel) in Japan (Unit: TWh)

2.3 독일

독일은 석유 파동 이후 1986년 일어난 체르노빌 원전사고로 원전 폐지와 신재생에너지 확대에 관한 정책 논의가 지속되어 왔다. 2009년 메르켈 정부가 출범하였고 2010년에는 Table 2와 같이 '에너지구상 2010(Energy Concept 2010)[17]'을 발표하였고 2050년까지 장기적인 에너지 정책 방향과 신재생에너지의 역할을 강조하였다. 하지만 2011년 원전 사고가 발생하면서 2022년까지 모든 원자력 발전소를 폐쇄하기로 선언하였으며 '에너지 패키지(Energy Package)'도 발표하였다.

Table 2. Target of Energy Concept 2010

	2012	2020	2030	2040	2050
GHG emissions (compared to 1990)	−27%	−10%	−55%	−70%	−80%
Percentage of Renewable Energy in Final Energy Consumption	10%	18%	30%	45%	60%
Percentage of Renewable Energy in Total Electricity Consumption	20%	35%	50%	65%	80%
Primary energy consumption (compared to 2008)	−5%	−20%			−50%
Electricity consumption (compared to 2008)	−1%	−10%			−25%
Final energy consumption in transport sector (compared to 2008)		−10%			−40%

Fig. 4는 독일의 1차 에너지 발전량을 나타낸다. 2006년 375.2 TWh 였던 화석연료에너지가 2016년에는 348.9 TWh로 줄어들었다. 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 독일 정부 정책으로 노후 원전을 폐쇄하면서 화석연료 에너지 사용이 크게 줄어들진 못했다. 하지만 원자력의 단계적 폐지와 신재생에너지 개발 확대를 지원하고 있기에 신재생에너지(수력 포함)의 경우 2006년 71.6 TWh에서 2016년 189.7 TWh로 약 2.6배 증가하였으며 원자력에너지는 167.4 TWh에서 84.6 TWh로 줄어든 것으로 보인다.

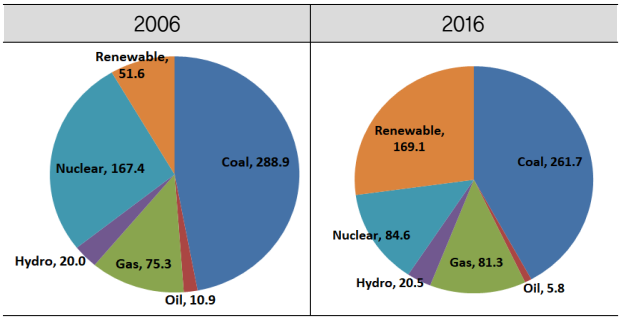


Fig. 4. Electricity generation (by fuel) in Germany (Unit: TWh)

3. 모 형

본 연구에서는 변수의 표본크기가 작더라도 변수 간의 단기와 장기 영향을 추정해 낼 수 있는 자기회귀분배시차(ARDL) 모형을 사용할 것이다. ARDL 모형은 앞서 언급한 것과 같이 표본 수가 작아도 추정계수의 안정성을 획득할 수 있다는 점과 자기시차분포 변수들의 내생성을 통제할 수 있다는 점과 그리고 시계열 자료가 I(0) 혹은 I(1)과 같이 적분차수가 달라도 실행이 가능하다는 강점을 가지고 있다. 이러한 ARDL모형을 이용한 본 연구의 목표는 총화석연료발전량, 수력 발전량, 원자력 발전량, 신재생에너지 발전량이 한국, 일본, 독일의 이산화탄소 배출에 미치는 영향을 확인하는 것이다. 이를 위한 이론모형으로 CO_2 배출량과 전력발전량, 에너지원별 간의 관계를 선형로그형태 식으로 나타내면 아래와 같이 3가지로 나타낼 수 있다. 특히 본 연구에서는 원자력과 화석연료의 성질이 다르기 때문에 원자력 발전량이 분리되어있는 총화석연료 에너지발전량(TFG; Total Fossil fuel Generation)이 포함된 식 (2)와 (3)을 중심으로 분석할 것이다[6].

6) 식 (1)의 경우 본 연구에서 중점적으로 분석하지 않는다. 하지만 두 에너지원을 합쳤을 때 CO_2와의 관계가 어떻게 나타나는지 살펴보

$$\ln(CO_2)_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GDP_t + \alpha_2 (\ln GDP_t)^2 + \alpha_3 \ln TFGNG_t + \alpha_4 \ln HRG_t + \epsilon_t \quad (1)$$

$$\ln(CO_2)_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GDP_t + \alpha_2 (\ln GDP_t)^2 + \alpha_3 \ln TFG_t + \alpha_4 \ln NG_t + \alpha_5 \ln HG_t + \alpha_6 \ln RG_t + \epsilon_t \quad (2)$$

$$\ln(CO_2)_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GDP_t + \alpha_2 (\ln GDP_t)^2 + \alpha_3 \ln TFG_t + \alpha_4 \ln NG_t + \alpha_5 \ln HRG_t + \epsilon_t \quad (3)$$

위의 식에서 $\ln CO_2 t$는 t기의 1인당 이산화탄소 배출량, lnGDPt는 t기의 1인당 GDP, lnTFG_NGt는 t기의 1인당 총 화석연료에너지발전량(원자력 포함), lnHRGt는 t기의 1인당 수력과 신재생에너지 발전량, lnHGt는 t기의 1인당 수력 발전량, lnRGt는 t기의 1인당 신재생에너지 발전량, lnTFGt는 t기의 1인당 총 화석연료에너지발전량(원자력 제외), lnNGt는 t기의 1인당 원자력에너지 발전량을 나타낸다. 그리고 ε는 오차항을 나타낸다. 식 (2)에서 수력과 신재생에너지를 분리하여서 분석한 이유는 수력은 1960년대부터 세 국가 모두 사용하여 왔기 때문에 발전량 자료가 존재하였고 태양광, 풍력 등의 신재생에너지의 경우는 1990년대부터 이용하기 시작하였기 때문에 두 에너지를 분리하여 분석하였을 때 차이가 있을 것이라 생각하였다.

만약 한 국가에서 소득수준과 CO_2 배출과의 관계는 환경쿠즈네츠 가설이 성립할 경우 역U자를 나타낼 것이다. Grossman and Krueger(1995)[4] CO_2와 GDP는 양의 관계($\alpha 1 > 0$)로, CO_2 배출량과 소득의 제곱과의 관계는 음의 관계($\alpha 2 < 0$)가 성립하면서 역U자의 관계를 가지게 될 것이다. 총 화석연료에너지발전량의 증가는 CO_2 배출을 증가시킬 수 있기에 $\alpha 3 > 0$ 일 것으로 예상된다. 또한 수력에너지, 원자력에너지와 신재생에너지의 발전은 다른 1차 에너지원들과는 다르게 CO_2 배출을 낮출 수 있기 때문에 $\alpha 4 < 0$, $\alpha 5 < 0$, $\alpha 6 < 0$으로 음(−)의 관계일 것으로 예상된다[7].

CO_2 배출량과 다른 변수들 간의 장·단기 영향 관계의 분석을 위하여 Pesaran et al.(2001)[12]에 따라서 식 (2), (3)을 오차수정항 형태의 ARDL 모형으로 표현하면 식 (4) 및 (5)와 같아진다. 즉,

$$\begin{aligned} d\ln(CO_2)_t = {} & \alpha_0 + \sum_{k=1}^{a1} \alpha_{1k} d\ln(CO_2)_{t-k} + \sum_{k=0}^{b1} \alpha_{2k} d\ln GDP_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^{c1} \alpha_{3k} d(\ln GDP_{t-k})^2 + \sum_{k=0}^{d1} \alpha_{4k} d\ln TFG_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^{e1} \alpha_{5k} d\ln NG_{t-k} + \sum_{k=0}^{f1} \alpha_{6k} d\ln HG_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^{g1} \alpha_{7k} d\ln RG_{t-k} + \theta_1 \ln(CO_2)_{t-1} + \theta_2 \ln GDP_{t-1} \\ & + \theta_3 (\ln GDP_{t-1})^2 + \theta_4 \ln TFG_{t-1} + \theta_5 \ln NG_{t-1} \\ & + \theta_6 \ln HG_{t-1} + \theta_7 \ln RG_{t-1} + \epsilon_t \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} d\ln(CO_2)_t = {} & \alpha_0 + \sum_{k=1}^{a1} \alpha_{1k} d\ln(CO_2)_{t-k} + \sum_{k=0}^{b1} \alpha_{2k} d\ln GDP_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^{c1} \alpha_{3k} d(\ln GDP_{t-k})^2 + \sum_{k=0}^{d1} \alpha_{4k} d\ln TFG_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^{e1} \alpha_{5k} d\ln NG_{t-k} + \sum_{k=0}^{f1} \alpha_{6k} d\ln HRG_{t-k} \\ & + \theta_1 \ln(CO_2)_{t-1} + \theta_2 \ln GDP_{t-1} + \theta_3 (\ln GDP_{t-1})^2 \\ & + \theta_4 \ln TFG_{t-1} + \theta_5 \ln NG_{t-1} + \theta_6 \ln HRG_{t-1} + \epsilon_t \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식에서 d는 변수의 차분을, a1~g1까지 변수의 시차길이를 나타내며 각 변수마다 다르게 나타낸다. θ는 조정계수이며 장기적으로 공적분 관계를, ∑의 계수들은 변수들의 단기적 관계를 나타낸다. 그 외 다른 변수들은 식 (1), (2), (3)에서의 정의와 같은 의미를 지닌다.

4. 자료 및 실증분석

이론모형의 실증에는 1987년부터 2016년까지 한국, 일본, 독일의 30년간의 CO_2 배출량 자료가 사용되었다. 연간 CO_2 배출량의 단위는 1인당 $MtCO_2$이다. 또한 경제성장을 나타내기 위해 1인당 실질 GDP를 사용하고, 에너지원별 발전량은 석탄, 석유, 천연가스, 원자력 그리고 신재생에너지(태양광, 풍력, 지열, 바이오메스 등)와 수력을 별도로 구분하여 데이터를 사용하였다. 사용된 자료들은 영국의 BP,P.L.C[8][18], KOSIS[9][19], IEA Atlas[10][1], World

기 위해 분석모델을 만들었다.

7) 한 국가의 소득수준을 나타내는 GDP와 CO_2 배출은 밀접한 관계에 있기 때문에 모형으로 포함시켰다. 하지만 본 연구에서는 EKC 가설이 아닌 에너지원들과 CO_2 배출과의 관계만을 집중적으로 다룬다.

8) 석탄, 석유, 천연가스, 원자력에너지, 신재생에너지, 수력에너지의 발전량에 대한 데이터를 이용하였다.

Table 3. Descriptive Statistics

	Mean			Std. Dev.			Minimum			Maximum		
	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany
CO2	8.72	8.76	10.24	2.28	0.55	1.11	4.05	7.08	8.88	12.45	9.59	12.78
GDP	15246	35822	32189	7521	6513	9561	3511	20745	16678	27811	48603	47960
TFG_NG	6.54	7.19	6.19	2.92	0.87	0.40	1.80	5.06	5.27	10.51	8.36	6.66
TFG	4.29	5.46	4.40	2.15	1.00	0.18	0.86	3.53	4.14	7.61	7.53	4.74
NG	2.25	1.73	1.80	0.80	0.83	0.33	0.94	0.00	1.03	3.23	2.56	2.10
HG	0.07	0.66	0.25	0.02	0.06	0.02	0.04	0.53	0.20	0.11	0.78	0.31
RG	0.04	0.20	0.57	0.07	0.13	0.67	0.00	0.09	0.02	0.27	0.65	2.08
HRG	0.11	0.85	0.82	0.07	0.13	0.67	0.05	0.64	0.22	0.33	1.28	2.31

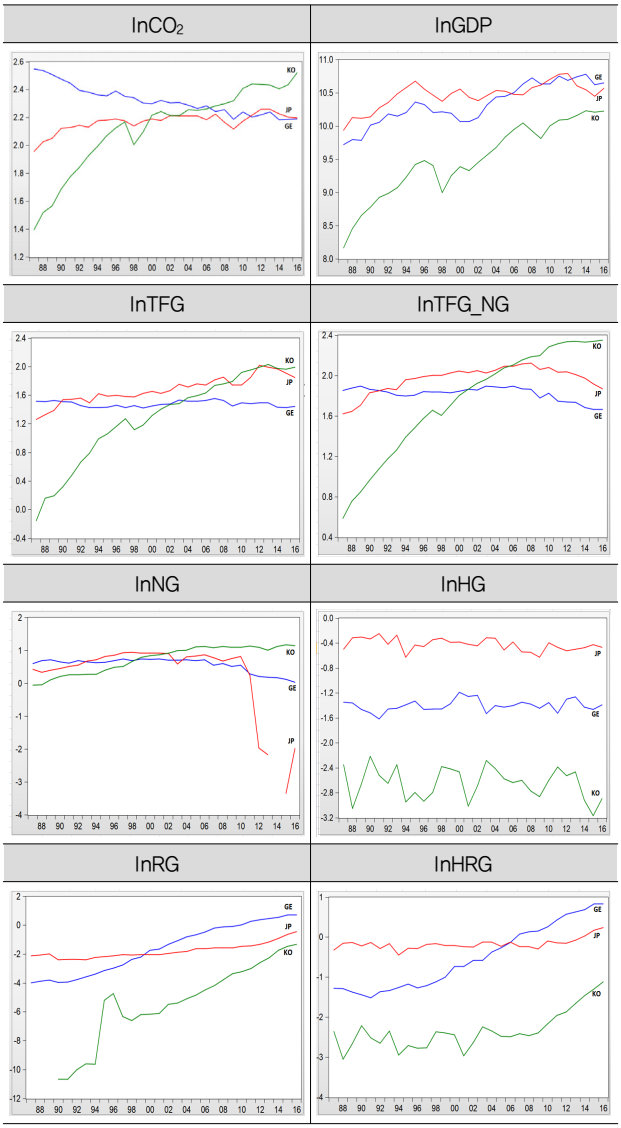
주 1) 인당으로 계산함. 인구, CO_2배출량, GDP의 단위는 각각 천명, $MtCO_2$, 달러임.
2) TFG_NG(원자력 포함한 화석연료발전량), TFG(원자력을 제외한 화석연료발전량), NG(원자력발전량), HG(수력 발전량), RG(신재생에너지 발전량), HRG(=HG+RG)을 의미하고 이들의 단위는 모두 TWh임.

Bank[11][20] 자료들을 참고하여 직접 수집하여 작성하였다.

Table 3은 로그를 사용하기 이전에 자료들의 기초 통계량을 보여준다. 세 나라의 1987년과 2016년의 1인당 기초 통계량을 비교했을 때 다음과 같다. 한국의 경우 HG가 0.04 TWh 감소하였으며, GDP가 $24,097.26, CO_2가 8.40 $MtCO_2$, NG가 2.22 TWh, RG가 0.27 TWh, TFG가 6.49 TWh, TFG_NG가 8.71 TWh, HRG가 0.23 TWh 증가하였다. 일본의 경우 NG는 1.39TWh 감소하였으며 GDP는 $18,049.08, CO_2는 1.92 $MtCO_2$, HG는 0.02 TWh, RG는 0.53 TWh, HRG는 0.55 TWh, TFG는 2.81 TWh, TFG_NG는 1.42 TWh 증가하였다. 독일의 경우 CO_2가 3.85 $MtCO_2$, TFG가 0.31 TWh, TFG_NG가 1.10 TWh, HG가 0.01 TWh, NG가 0.79 TWh 감소하였으며, GDP는 $25,421.41, HRG는 2.03 TWh, RG는 2.04 TWh 증가하였다.

본 연구에서 사용되는 변수들에 자연로그로 전환하여 추이를 시계열로 나타내면 Table 4와 같다. CO_2 배출량의 경우, 한국은 계속해서 증가하는 추세를 보이지만 독일은 계속 감소하는 추세를 보였고, 일본은 2007년부터 2009년 사이는 급격히 감소한 후 2009년부터는 다시 배출량이 증가하기 시작하였지만 2014년부터는 감소 추세를 보이고 있다. GDP의 경우, 세 국가 모두 증가하는 경향을 보이고 있

Table 4. Trends of Variables (1987~2016)



9) Korean Statistical Information Service (KOSIS) 장래인구추계 데이터를 세 나라의 총인구로 사용하였다.
10) 세 국가의 CO_2 배출량 자료를 사용하였다.
11) World Bank Data에서는 1인당 GDP 자료를 이용하였다.(단위: current US$)

Table 5. Results of the Unit root tests

		ADF			PP		
		Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany
lnCO2	Levels	−2.92(0)	−3.18(1)	−2.75(1)	−2.92(0)	−3.56(0)*	−2.92(2)
	1st Differences	−4.44(1)**	−5.11(0)***	−9.09(0)***	−4.78(0)***	−5.11(0)***	−9.09(0)***
lnGDP	Levels	−3.24(1)	−2.64(1)	−1.97(0)	−3.35(0)*	−2.58(0)	−2.08(2)
	1st Differences	−4.54(1)**	−3.86(1)**	−4.82(0)***	−4.81(0)***	−4.06(0)**	−4.82(1)***
lnGDP2	Levels	−3.27(1)*	−2.69(1)	−1.96(0)	−3.25(1)	−2.54(0)	−2.06(2)
	1st Differences	−4.59(1)**	−3.86(1)**	−4.83(0)***	−4.78(0)***	−4.03(0)**	−4.84(1)***
lnTFG_NG	Levels	−1.48(0)	−0.41(0)	−0.18(1)	−1.48(0)	−0.41(0)	−1.00(0)
	1st Differences	−4.74(1)***	−6.81(0)***	−7.19(0)***	−6.16(0)***	−6.81(0)***	−7.19(0)***
lnTFG	Levels	−2.49(0)	−4.90(2)***	−2.18(0)	−2.49(0)	−3.27(0)*	−2.16(1)
	1st Differences	−6.38(0)***	−4.82(2)***	−6.03(0)***	−6.38(0)***	−5.04(0)***	−6.05(2)***
lnNG	Levels	−0.72(0)	0.71(2)	−0.11(1)	−0.72(1)	−2.51(1)	−0.90(0)
	1st Differences	−5.26(0)***	−3.03(2)	−4.35(2)**	−5.26(0)***	−4.24(2)**	−7.29(0)***
lnHG	Levels	−4.40(1)**	−5.62(0)***	−3.92(0)**	−4.21(0)**	−5.62(0)***	−3.92(0)**
	1st Differences	−5.76(1)***	−9.85(0)***	−6.72(0)***	−6.73(0)***	−9.85(0)***	−6.72(0)***
lnRG	Levels	−3.38(1)*	−0.29(0)	−1.82(2)	−2.72(0)	−0.31(1)	−1.17(0)
	1st Differences	−4.82(1)***	−5.12(0)***	−1.97(1)	−4.84(0)***	−5.12(2)***	−3.68(2)**
lnHRG	Levels	−0.23(2)	−0.44(1)	−3.20(0)	−2.50(0)	−2.20(0)	−3.37(1)*
	1st Differences	−6.14(1)***	−8.84(0)***	−5.21(0)***	−7.30(0)***	−8.84(0)***	−5.21(0)***

주 1) *는 $p < 0.10$, **는 $p < 0.05$, ***는 $p < 0.01$ 수준에서 유의함.
2) ( )는 단위근 검정시 적용 시차를 나타냄.

다. 총화석연료발전량(lnTFG, TFG_NG)은 원자력(lnNG)을 포함시켰을 때와 포함되지 않았을 때 모두 한국은 꾸준히 증가하는 추세이지만 일본은 반대로 증가 후 감소하는 추세를 보였고 독일은 일정함을 보인 후 감소추세를 보였다. 원자력에너지 발전량(lnNG)만을 보면 한국은 증가하는 추세를 보였고 독일은 지속적으로 감소하는 추세를 보였으며 일본의 경우 2011년 원전사고 이후 급격히 감소하는 추세를 보이다가 다시 증가하는 추세에 있다. 반면 신재생에너지 발전량(lnHRG, lnRG, lnHG)의 경우 수력 발전량(lnHG)은 세 나라 모두 증가와 감소를 계속 반복하지만, 신재생에너지(lnRG)와 수력을 합친 신재생에너지 발전량(lnHRG)에서는 세 나라 모두 증가하는 추세를 보인다.

Table 5는 각 변수들의 안정성에 대한 검정방법으로 ADF 검정과 PP 검정을 이용하여 단위근 검정(Unit Root Test)의 결과를 보여준다[12]. 시계열 자료들을 사용하였기 때문에 단위근 검정을 사용하였고 AIC 기준에 의하여 적정 시차를 결정하였다. 두 가지 검정들의 귀무가설(Null Hypothesis)은 '시계열이 불안정하다'이고 수준변수에서는 유의확률값(p-value)이 0.01, 0.05, 0.1보다 큰 경우도 있어서 모두 귀무가설을 기각하지 못하였지만 차분변수들까지 고려하였을 때는 귀무가설을 기각하였다. 따라서 단위근 검정결과 모든 변수들이 1차 차분 후에는 안정성을 회복하는 I(1)임을 확인하였다.

한편, Table 6은 이론모형에서 제시한 식 (1), 식 (2) 그리고 식(3)에 대하여 요한슨 공적분 검정(Johansen's cointegration test)을 시행한 결과를 보여준다. 요한슨 공적분 검정의 귀무가설은 '공적분 위수(rank)의 수가 0이다'를 의미한다. 모형 1에서 한국과 일본은 적어도 1개의 공적분 관계가 있다는 것을 확인하였으나 독일의 경우 공적분 검정에서 0에서 유의하다고 나타났다. 하지만 본 연구에서는 모형 1보다 모형 2와 모형3을 중심으로 분석한다는 점에서 모형 1에서 공적분 관계가 존재한다고 보았다. 모형 2에

12) ADF = Augmented Dickey-Fuller
PP = Phillip-Perron

Table 6. Results of Johansen Cointegration test

Hypothesized No. of CE (s)	Model 1			Model 2			Model 3		
	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany
0	105.42*** (69.82)	84.42*** (69.82)	75.67** (69.82)	208.49*** (125.62)	218.51*** (125.62)	198.82*** (125.62)	126.80*** (95.75)	135.87*** (95.75)	118.05*** (95.75)
1	55.79** (47.86)	50.31** (47.86)	43.12 (47.86)	132.59*** (95.75)	151.11*** (95.75)	139.96*** (95.75)	77.47** (69.82)	82.59*** (69.82)	69.77** (69.82)
2	24.94 (29.80)	23.55 (29.80)	17.35 (29.80)	80.81** (69.82)	101.00*** (69.82)	87.15*** (69.82)	46.93* (47.86)	45.89* (47.86)	38.00 (47.86)
3	7.31 (15.49)	5.83 (15.49)	5.24 (15.49)	48.57** (47.86)	58.17*** (47.86)	48.54** (47.86)	20.86 (29.80)	24.92 (29.80)	16.82 (29.80)
4	0.14 (3.84)	0.02 (3.84)	0.48 (3.84)	28.93* (29.80)	25.13 (29.80)	19.27 (29.80)	10.37 (15.49)	9.03 (15.49)	4.82 (15.49)
5				10.41 (15.49)	8.76 (15.49)	5.71 (15.49)	0.29 (3.84)	0.25 (3.84)	0.08 (3.84)
6				0.87 (3.84)	0.11 (3.84)	0.78 (3.84)			

주 1) Trace와 ( )는 임계치(5%)를 나타냄
2) *는 $p<0.10$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 수준에서 유의함.
3) Johansen 방법은 AIC 혹은 SIC 기준에 의해 최적 시차를 1로 선택함.

서 한국은 적어도 4개의 공적분 관계, 일본과 독일은 적어도 3개의 공적분 관계가 존재하였다. 모형 3에서는 한국과 일본은 적어도 2개의 공적분 관계가 존재함을 확인하였고 독일은 적어도 1개의 공적분 관계가 존재하였다.

이러한 공적분 검정에 기초하여 실행한 3가지의 ARDL 모형의 장기와 단기 추정결과는 Table 7과 Table 8과 같다. 다양한 시차를 고려하여 ARDL 모형을 추정한 결과 한국, 일본, 독일 모두 식 (1)의 경우 ARDL(2,2,2,2,2) (모형 1), 식 (2)의 경우 ARDL(2,2,2,2,2,2,2) (모형 2), 식 (3)의 경우 ARDL(2,2,2,2,2,2) (모형 3)이 적정하였다[13].

Table 7은 ARDL 모형의 장기적 추정 결과들을 보여주고 있다. 장기적으로 한국은 화석연료 발전량(lnTFG)과 수력과 신재생에너지를 합친 발전량(lnHRG)이 1% 증가하면 CO_2 배출량이 각각 0.55%와 0.12% 증가하였다. 이는 신재생에너지도 발전을 하면 CO_2 배출을 하게 됨을 의미한다. 김기만, 정재형, 유진석(2016)[21]에 의하면 신재생에너지 기술은 화석연료 발전에 비해 매우 적은 양의 온실가스를 배출할 수 있다고 언급한 점에서도 알 수 있다. 일본의 경우도 화석연료 발전량(lnTFG)이 1% 증가하면 CO_2 배출량을 0.44% 증가시키는 것으로 나타났다. 하지만 일본의 원자력발전(lnNG)이 단기와는 달리 장기에는 유의하지 않았다. 이는 후쿠시마 이전에 원자력 발전이 1990년 27.3%, 2000년 34.3%, 2010년 28.6%로 각각 높은 비중을 차지하였지만 사고 이후 2013년 모든 원전을 가동 중단시켰고, 이후 '원자력발전 의존도를 가능한 한 저감할 것'과 '안전을 최우선하여 재가동한다.' 라는 2개의 방침을 세웠다. 이후 2015년에 일부 원전을 재가동시키면서 2015년 1%, 2017년 3%, 2018년 9% 수준으로 회복하는 상황이기 때문에 갑작스런 중단으로 장기에는 유의하지 않게 나타난 것으로 보인다. 독일은 화석연료 발전량(lnTFG)이 1% 증가함에 따라서 CO2 배출량이 0.59~0.60% 증가하였으나 수력과 신재생에너지를 합친 lnHRG, 신재생에너지(lnRG), 원자력(lnNG)에서 1% 증가하면 CO_2 배출량은 각각 0.14%, 0.06%, 0.16% 감소하는 것으로 나타났다.

Table 8은 ARDL 모형의 단기적 추정결과를 나타내고

13) ARDL(p,q)에서 종속변수의 시차는 p, 설명변수의 시차는 q로 나타낸다. 시차를 ARDL(2,2)를 기준으로 설정하였을 때 Automatic Selection에서는 변수에 적절한 시차를 적용하지 못하고 0이 되는 경우가 생겨서 단기적 결과에서 변수들의 값들이 생략되어 나왔기 때문에 모든 변수들의 결과를 보기 위해 (2,2) 고정됨(fixed)을 선택하였다.

Table 7. Long-run coefficients from the ARDL model

	Model 1			Model 2			Model 3		
	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany
lnGDP	4.473* (0.084)	0.829 (0.933)	−11.857** (0.012)	0.204 (0.910)	−0.133 (0.991)	−2.656 (0.137)	2.532 (0.130)	3.652 (0.940)	−5.282* (0.055)
lnGDP2	−0.230* (0.086)	−0.031 (0.948)	0.581** (0.013)	−0.017 (0.855)	0.009 (0.987)	0.129 (0.138)	−0.135 (0.116)	−0.159 (0.946)	0.256* (0.059)
lnTFG_NG	0.556** (0.002)	0.083 (0.593)	0.010 (0.951)	–	–	–	–	–	–
lnTFG	–	–	–	0.200 (0.350)	0.442* (0.059)	0.602** (0.016)	0.549*** (0.000)	−0.159 (0.816)	0.586** (0.010)
lnHRG	0.323** (0.014)	0.110 (0.409)	−0.142** (0.007)	–	–	–	0.117* (0.063)	0.339 (0.668)	−0.139*** (0.000)
lnNG	–	–	–	0.020 (0.816)	0.030 (0.560)	−0.064 (0.121)	−0.044 (0.568)	0.032 (0.896)	−0.163** (0.010)
lnHG	–	–	–	−0.078 (0.222)	0.157 (0.195)	0.023 (0.822)	–	–	–
lnRG	–	–	–	0.057 (0.101)	−0.099 (0.160)	−0.056*** (0.000)	–	–	–
C	−20.080 (0.100)	−3.273 (0.950)	62.599*** (0.009)	1.630 (0.851)	1.703 (0.978)	15.119 (0.108)	−10.224 (0.196)	−18.303 (0.942)	28.671** (0.043)

주 1) Coefficient와 ( )는 p-value를 나타냄.
2) *는 $p < 0.10$, **는 $p < 0.05$, ***는 $p < 0.01$ 수준에서 유의함.

있다. 단기적으로 세 국가에서 모두 화석연료(lnTFG)가 1% 증가할 때 CO_2 배출량은 증가하는 것으로 나타났다. 일본은 원자력발전(lnNG)에서 이전 기에는 CO_2 배출량이 약 0.04% 감소로 나타났지만 해당 기에서는 0.04% 증가로 나타났다. 수력발전(lnHG)과 신재생에너지 발전(lnRG)은 각각 0.16%, 0.10% 증가를 보였다. 한국은 수력과 신재생에너지를 합친 lnHRG에서 CO_2 배출량이 0.07% 증가하였다. 두 에너지원을 별도로 본 모형 2에서도 이전기의 신재생에너지(lnRG(−1))를 제외하고 lnRG와 lnHG(−1)이 각각 0.02%, 0.05% 증가하였다. 하지만 원자력의 경우는 두 가지 모형이 다르게 나타났는데, 모형 2(lnTFG, lnNG, lnHG, lnRG)에서는 lnNG가 0.42% 감소, 모형 3 (lnTFG, lnNG, lnHRG)에서는 0.32% 증가로 나타났다. 이는 신재생에너지와 수력에너지가 합쳐졌을 때와 분리되었을 때, 원자력에너지가 CO_2 배출에 미치는 영향이 다른 것을 보여주었다. 그 이유는 사용한 에너지원 자료와도 관련이 있다. 수력의 경우 1960년대부터 현재까지 계속 발전량을 가지고 있었지만 신재생에너지의 경우 평균적으로 1990년대 중후반부터 자료가 존재하였으며 태양력, 풍력 등을 다 합쳐도 발전량이 0에 가까운 수치를 보였기 때문이다. 다른 점은 모형 3에서만 화석연료의 계수가 매우 높으며 유의한 결과가 나타났다는 점인데, 이는 원자력발전을 줄여나가면 신재생에너지 발전량이 충분하지 않아 화석연료 의존도가 높아져서 원자력 발전도 CO_2 배출 증가에 함께 영향을 준다고 볼 수 있다. 실제 Sovacool(2008)[22]는 원자력 발전이 온실가스를 직접 배출을 하는 것은 아니지만 원자력 발전소 운영을 통해 온실가스 배출량이 발생할 수 있다고 하였다. 또한 수력발전이 2010년대 초반까지는 신재생에너지를 합친 값보다 컸기 때문에 모형 2에서는 두 에너지를 분리하였다는 점이 원자력발전 계수에 영향을 미친 것으로 생각된다. 독일의 경우는 lnHRG와 lnRG가 각각 0.11%, 0.04% 만큼 CO_2 배출량을 감소시킨다고 나타났다. 원자력발전량(lnNG)은 이전 기부터 해당 기까지 배출량을 증가시킨다고는 나타났지만 이전 기보다는 해당 기에서 배출량에 미치는 영향이 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 원자력 발전소의 단계적 감소영향도 있다고 생각하지만, 전력공급에서 신재

Table 8. Error correction model (short-run coefficients) from the ARDL model

	Model 1			Model 2			Model 3		
	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany	Korea	Japan	Germany
D(lnGDP)	1.539* (0.090)	4.704 (0.250)	0.210 (0.878)	4.219*** (0.009)	−0.218 (0.959)	0.090 (0.916)	2.152** (0.034)	6.768 (0.191)	−1.690 (0.157)
D(lnGDP(−1))	0.679 (0.356)	−3.964 (0.118)	3.601** (0.031)	−0.827 (0.352)	−3.675 (0.152)	0.816 (0.223)	−0.062 (0.934)	−1.165 (0.695)	1.060 (0.333)
D(lnGDP2)	−0.087* (0.070)	−0.221 (0.255)	−0.007 (0.914)	−0.207** (0.010)	0.002 (0.992)	−0.008 (0.843)	−0.115** (0.032)	−0.320 (0.194)	0.081 (0.163)
D(lnGDP2(−1))	−0.040 (0.311)	0.185 (0.127)	−0.175** (0.031)	0.047 (0.320)	0.172 (0.157)	−0.041 (0.207)	0.001 (0.975)	0.057 (0.690)	−0.052 (0.323)
D(lnTFG_NG)	1.947*** (0.000)	0.383** (0.012)	0.715*** (0.000)	–	–	–	–	–	–
D(lnTFG_NG(−1))	0.911** (0.029)	−0.216 (0.155)	0.224 (0.209)	–	–	–	–	–	–
D(lnTFG)	–	–	–	−0.122 (0.585)	0.783*** (0.001)	0.856*** (0.000)	0.909*** (0.000)	0.436*** (0.008)	0.772*** (0.000)
D(lnTFG(−1))	–	–	–	0.002 (0.992)	0.147 (0.209)	0.445*** (0.004)	0.131 (0.430)	0.056 (0.684)	0.248 (0.100)
D(lnHRG)	0.082*** (0.001)	0.011 (0.849)	−0.021 (0.460)	–	–	–	0.073*** (0.003)	0.118 (0.102)	−0.109*** (0.001)
D(lnHRG(−1))	−0.013 (0.418)	0.003 (0.955)	0.090** (0.010)	–	–	–	−0.019 (0.284)	−0.050 (0.446)	0.002 (0.924)
D(lnNG)	–	–	–	−0.423** (0.045)	0.044** (0.020)	0.084*** (0.007)	0.317** (0.010)	0.022 (0.186)	0.032 (0.444)
D(lnNG(−1))	–	–	–	−0.025 (0.815)	−0.036** (0.037)	0.112** (0.013)	0.325** (0.022)	−0.027 (0.140)	0.120** (0.046)
D(lnHG)	–	–	–	−0.035 (0.184)	0.162** (0.012)	−0.004 (0.801)	–	–	–
D(lnHG(−1))	–	–	–	0.053** (0.028)	−0.048 (0.246)	−0.007 (0.721)	–	–	–
D(lnRG)	–	–	–	0.024*** (0.009)	0.100* (0.054)	−0.040** (0.022)	–	–	–
D(lnRG(−1))	–	–	–	−0.026*** (0.008)	0.145* (0.076)	−0.010 (0.509)	–	–	–
CointEq(−1)*	−0.395*** (0.000)	−0.634*** (0.004)	−0.521*** (0.000)	−1.122*** (0.003)	−1.954*** (0.006)	−1.110*** (0.000)	−0.725*** (0.000)	−0.476*** (0.023)	−1.019*** (0.000)
R-squared	0.935	0.720	0.868	0.968	0.906	0.970	0.940	0.763	0.919

주 1) Coefficient와 ( )는 p-value를 나타냄.
2) *는 $p < 0.10$, **는 $p < 0.05$, ***는 $p < 0.01$ 수준에서 유의함.

생에너지는 약 30%인 반면 석탄이 약 40%로 화석연료 사용량이 많은 비중을 차지하고 있기 때문에 에너지 효율 개선[14]을 하더라도 아직까지 화석연료가 신재생에너지보다 CO_2 배출에 큰 영향을 준 것으로 생각된다[23]. 그리고 오차수정항(CointEq(−1)) 계수가 음(−)의 부호를 가지고 세

14) 경제적인 에너지효율 개선을 위해서는 부가가치 에너지 원단위 개선이 필요하다. 부가가치 에너지 원단위는 1차 에너지공급량을 총 부가가치(GDP)로 나눈 값을 의미하며 부가가치 에너지 원단위가 낮아질수록 국가의 에너지 이용효율이 좋다는 것을 말한다. 여기서 1차 에너지공급량이 낮아질수록 부가가치 에너지원단위가 낮아지는데 한국은 0.159인 반면 독일은 0.086로 나타났다[24].

국가의 세 가지 모형에서 전부 유의한 것으로 나타났으므로 일시적으로 외부 충격 이후 에너지소비 및 소득의 감소로 CO_2 배출량이 균형에서 벗어나서 감소하여도 다음 해 불균형 관계가 빠르게 회복 및 조정되는 과정을 거쳐서 다시 균형상태가 될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 ARDL 모형을 이용하여 CO_2 배출, 원자력에너지, 신재생에너지 관계를 중심으로 한국, 일본, 독일의 장·단기 영향을 살펴보았다. 국가별로 상이한 에너지 증가가 이산화탄소 배출량에 미치는 영향은 다르게 나타나는데 이는 각 국가가 추진해온 에너지 소비형태와 에너지정책의 방향이 상이하였기 때문이다. 세 국가의 에너지소비 형태 및 에너지 정책과 이러한 실증결과를 연계시켜 시사점을 제시하면 다음과 같다.

첫째, 독일은 세계최초로 2000년 재생에너지법(Renewable Energy Sources Act, EEG)을 통해 발전차액지원제도(FIT)를 도입하였다. 또한 2011년 후쿠시마 원전사고 발생 이후에는 2022년까지 모든 원전을 폐쇄하기로 하였으며 2010년 수립했던 '에너지구상 2010'을 좀 더 발전시킨 에너지패키지(Energy Package)'를 2011년 발표하면서 신재생에너지법을 계속 개정하고 있다[25]. 독일은 이러한 정책과 더불어 신재생에너지사용량이 증가하면서 CO_2 배출량은 799.1 $MtCO_2$(2006년)에서 734.5 $MtCO_2$(2016년)으로 감소하였다. 또한 신재생에너지 발전도 71.6(2006년)TWh에서 189.7 TWh(2016년)만큼 크게 증가하였다. 이처럼 CO_2 배출 감소와 신재생에너지 발전의 증가가 동시에 이루어졌기에 모형 2,3에서 장·단기적으로 신재생에너지 발전이 CO_2 배출 감소에 영향을 준 것으로 나타났다.

둘째, 일본은 재생에너지사업을 1974년부터 본격적으로 시작하였고 2011년 동일본대지진 이후 신재생에너지 고정가격매입제도(FIT)를 시행하고 있다[26]. 투자액도 2016년 279억 달러로 2014년 443억 달러보다 16% 감소하였지만 2016년 기준 세계적으로 상위 5위에 속할 정도로 높은 수준을 유지하였다. 하지만 CO_2 배출량이 1,050 Mtoe(2016년)로 지난 10년 간 다른 두 국가보다 약 2배 정도 매우 높은 수준이었다. 반면에 신재생에너지 발전(2006년 113.4 TWh → 2016년 163.0 TWh)이 49.6 TWh로 소폭 증가하였기에 실증결과에서도 CO_2 감소에 큰 영향이 없는 것으로 보인다. 원자력 사용이 2006년보다 크게 줄어든 상황(−286.6 TWh)에서 만약 신재생에너지 사용을 늘인다면 장기적으로는 신재생에너지 발전이 CO_2 배출 감소에 영향을 미친다는 결과가 나올 수 있을 것이다.

셋째, 한국은 2000년대부터 본격적으로 신재생에너지 보급 확대를 시작하면서 전력부문에서 각 에너지원별 발전차액지원제도(FIT)를 시행하였다. 하지만 2012년부터 재정 부담과 신재생에너지 시장 촉진을 위해 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율을 신재생에너지로 공급하도록 의무화하는 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)를 시작하였다. 정부지원도 1988년부터 시작하여 투자액이 29억 달러(2016년)를 기록하며 점차 증가하고 있다. 그러나 한국의 신재생에너지 R&D 투자액을 일본의 4.90억 달러(2015년)와 비교하면 1.80억 달러(2015년)수준으로 낮은 편이고 신재생에너지의 전력생산량은 원자력 비중보다 매우 낮다[27]15). 실증결과에서 볼 수 있듯이 신재생에너지 발전이 단기에는 CO_2 배출 감소에 영향을 주지만 장기까지 연결되지 않았다. 이는 2016년 화석연료와 CO_2 배출이 각각 376.4 TWh(+128), 589.21 $MtCO_2$(+124.5)로 2006년 248.4 TWh, 464.71 $MtCO_2$에 비해 상당히 증가하였으나 그에 비해 신재생에너지 발전량(2006년 4.0 TWh → 2016년 16.7 TWh(+12.7))이 소폭 증가한 데 기인한 것으로 볼 수 있다.

향후 한국도 신재생에너지 확대가 CO_2 배출량 감소라는 가시적인 성과를 얻기 위해서는 원전의 단계적 폐쇄와 함께 신재생에너지 발전을 위한 전력 공급망 확대와 전력 가격 안정 정책을 실시한 독일의 현황을 참고하여 벤치마킹할 필요가 있다. 또한 독일과 동일하게 화석연료 사용 증가 문제가 유의한 결과로서 나타나고 있기 때문에 화석연료 사용을 줄이고 에너지효율 향상에 필요한 노력들을 실천해야 할 것이다.

본 연구의 한계점은 두 가지가 있다. 첫 번째는 ARDL 모형을 사용할 때 단기적 결과들이 생략되게 나타나 모든 변수들의 결과를 추정하기 위해 ARDL(2,2)라는 고정된 시

15) 한국은 최근 사고 위험성이 높은 원자력과 화석연료 의존율을 낮추는 방향의 정책을 실시하고 있다.

차 설정을 하여 변수들 간의 관계를 분석하였다는 점이다. 두 번째는 에너지 안보와 온실가스 배출 절감을 위해 세계적으로 사용되고 있는 에너지 믹스 변수를 실증모형에 반영하지 못한 점이 본 연구에서 보완해야 할 점이다.

이러한 한계점들이 존재하지만 본 연구는 경제와 사회적으로 비슷한 체계를 가지고 있는 일본과 한국이 에너지 정책을 벤치마킹하고자 하는 독일을 함께 추정하였다는 점과 두 국가의 배출량 절감 정책이 반영된 데이터들을 이용하여 실증결과를 증명하고 결과를 한국과 비교해 볼 수 있었다는 점에서 의의를 갖고 있다고 볼 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2020S1A5B8103268).

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2020S1A5B8103268).

References

[1] IEA Atlas of Energy, "CO_2 Emissions from Fuel Combustion", http://energyatlas.iea.org

[2] Yi, W.P., Kang, S.M., and Lee, M.H, 2018, "Impact of renewable energy expansion and energy reduction on GDP in Korea", New. Renew. Energy, **14**(3), 54-66.

[3] Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for Natural Resources and Energy, 2017, "Measures to realize the Energy Mix in 2030 ~Nuclear Power, Thermal Power, Fossil Fuels, Heat~", https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/023/pdf/023_005.pdf

[4] Grossman, G.B., and Krueger, A.b., 1995, "Economicgrowth and the environment", Q. J. Econ., **110**(2), 353-377.

[5] Soytas, U., Sari, R., and Ewing, B.T., 2007, "Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States", Ecol. Econ., **62**(3-4), 482-489.

[6] Jung, S.K., and Kang, S.M, 2013, "The Dynamic analysis between environmental quality, energy consumption, and income", Journal of Environmental Policy and administration, **12**(3), 97-1222, https://www.kei.re.kr/elibList.es?mid=a10103010000&elibName=environmentalpolicy&act=view&c_id=69901.

[7] Do, M.H., 2018, "A study on the relationship between income, energy consumption and environmental pollution-the case of Vietnam-", Doctoral thesis, Graduate School of Mokpo National University, Mokpo, http://www.riss.kr/link?id=T15066835&outLink=K.

[8] Kim, J.W., and Kim, H.S., 2015, "The effect of electricity generation through renewable energy on CO_2 emissions in Korea", Korean Energy Economic Review, **14**(3), 185-201, http://www.keei.re.kr/keei/download/keer/KEER15_14-3_60.pdf.

[9] Baek. J, 2016, "Do nuclear and renewable energy improve the environment? Empirical evidence from the United States", Ecol. Indic., **66**, 352-356.

[10] Pata, U.K., 2018, "Renewable energy consumption, urbanization, financial development, income and CO_2 emissions in Turkey: Testing EKC hypothesis with structural breaks", J. Clean. Prod., **187**, 770-779.

[11] Won, D.H., Lee, Y.J., and Jung, S.K., 2018, "CO_2-nuclear-renewable nexus in Japan: evidence from ARDL bounds tests", Korean Energy Economic Review, **17**(2), 89-114.

[12] Pesaran, M.H., Shin, Y., and Smith, R.J., 2001, "Bounds testing approaches to the analysis of level relationships", J. Appl. Econom., **16**(3), 289-326.

[13] Ministry of Trade, Industry, and Energy, 2014, "The 2nd energy basic plan", MOTIE, Sejong, https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=16&bbs_seq_n=78654&file_seq_n=3.

[14] Ministry of Trade, Industry, and Energy, 2019, "The 3rd energy basic plan", MOTIE, Sejong, https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161753&file_seq_n=1.

[15] Korean Resource Economics Association, 2013, "2012 economic development experience modularization project: energy policy", MOTIE, Sejong, https://www.kdi.re.kr/research/subjects_view.jsp?pub_no=13319.

[16] Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for

Natural Resources and Energy, 2017, “Japan’s Energy 20 Questions to understand the current energy situation”, Agency for Natural Resources and Energy, Tokyo.

[17] International Energy Agency (IEA), 2013, “Energy policies of IEA countries: Germany 2013 review”, IEA, Paris.

[18] BP p.l.c, 2018, “BP Statistical Review of World Energy June 2018”, London, UK, https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

[19] Korean Statistical Information Service (KOSIS), “World Population Prospects”, https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?menuId=M_02_01_01&vwcd=MT_RTITLE&parmTabId=M_02_01_01#SelectStatsBoxDiv

[20] The World Bank, “GDP per capita (Current US$)”, https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?view=chart.

[21] Kim, K.M., Jung, J.H., and Yoo, J.S., 2016, “Opportunities and leaps of renewable energy for the realization of a low-carbon future energy society”, Green Technology Center, Seoul, https://www.gtck.re.kr/frt/center/insight/gtcPublication.do?pageMode=View&nttId=24761&nowNum=75.

[22] Sovacool, K.B., 2008, “Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: a critical survey”, Energy Policy, **36**, 2940-2953.

[23] Ministry of Trade, Industry, and Energy, 2019, “Energy efficiency innovation strategy”, MOTIE, Sejong, https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=161993&file_seq_n=4.

[24] Korea Energy Agency, 2019, “2019 energy fact book”, KEA, Ulsan, http://www.energy.or.kr/web/kem_home_new/energy_issue/mail_vol116/pdf/2019_07_201902.pdf.

[25] Korea Energy Economic Institute (KEEI), 2013, “Background and Prospect of German Energy Transition Policy”, World Energy Market Insight, **13**(22), http://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/72EE117AD092394A49257B8A0041E5E9/$file/WEMI1322.PDF.

[26] Yang, E.S., and Im, J.Y., 2019, “Changes in energy supply in Japan 2018 and policy issues for 2019”, World Energy Market Insight, **19**(7), 3-17, http://www.keei.re.kr/keei/download/WEMI1907.pdf

[27] Jang, W.S., and Lee, J. H., 2018, “Domestic and Foregin Energy New Industry Trends and Activation Challenges”, Hyumdai Research Institute, http://hri.co.kr/upload/publication/201812175955[1].pdf.