

원자력 및 신재생에너지 발전의 CO₂ 감축 비용 효율성 비교

이용성* · 김현석**

요약 : 본 연구는 우리나라 발전 부문의 원자력과 신재생에너지 발전의 온실가스 감축효과를 추정하고, 원자력 발전의 사고위험에 따른 외부비용을 포함한 발전 비용을 고려하여 두 발전원의 온실가스 감축비용의 효율성을 비교하였다. 모형의 추정결과, 원자력 및 신재생에너지 발전 1% 증가는 각각 0.744%와 0.127%의 CO₂ 배출량을 감축시키는 것으로 분석되었다. 이는 CO₂ 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 원자력 발전은 1.344%, 신재생에너지 발전은 7.874% 증가시켜야 함을 의미한다. 추정된 계수와 원자력 발전의 외부비용 포함 발전비용을 사용하여 1%의 CO₂ 배출량 감축을 위한 총 비용을 도출한 결과, 전체 발전량이 1MWh로 가정할 때 CO₂ 배출량 1%를 감축시키기 위한 원자력 발전비용은 외부비용에 따라 0.72~1.49달러로 계산되었으며, 신재생에너지 발전비용은 6.49달러로 나타났다. 이를 2020년 우리나라 총 화석연료 발전량(352,706GWh)을 기준으로 계산할 경우, 원자력 발전은 2.54억~5.26억 달러, 신재생에너지 발전은 22.89억 달러로 신재생에너지 발전이 원자력 발전보다 4.35~9.01배의 비용이 더 소요되는 것으로 분석되었다. 따라서 발전 부문의 온실가스 감축을 위해서는 원자력 발전이 신재생에너지 발전에 비해 높은 비용 효율성을 가지는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 발전 부문 CO₂ 감축 비용, 신재생에너지 발전, 원자력 발전, 비용 효율성

JEL 분류 : C22, Q54

접수일(2021년 8월 11일), 수정일(2021년 11월 26일), 게재확정일(2021년 12월 13일)

* 서울대학교 농경제사회학부 석사과정 졸업, 제1저자(e-mail: 84yslee@gmail.com)

** 서울대학교 농경제사회학부, 글로벌스마트팜 융합전공 부교수, 농업생명과학연구원 겸임연구원, 교신저자(e-mail: hs0308@snu.ac.kr)

Comparison of Cost-Efficiency of Nuclear Power and Renewable Energy Generation in Reducing CO₂ Emissions in Korea

Yongsung Lee* and Hyun Seok Kim**

ABSTRACT : The objective of this study is to estimate the relationship between CO₂ emissions and both nuclear power and renewable energy generation, and compare the cost efficiencies of nuclear power and renewable energy generation in reducing CO₂ emissions in Korea. The results show that nuclear power and renewable energy generation should be increased by 1.344% and 7.874% to reduce CO₂ emissions by 1%, respectively. Using the estimated coefficients and the levelized costs of electricity by source including the external costs, if the current amount of electricity generation is one megawatt-hour, the range of generation cost of nuclear power generation to reduce 1% CO₂ emissions is \$0.72~\$1.49 depending on the level of external costs. In the case of renewable energy generation, the generation cost to reduce 1% CO₂ emissions is \$6.49. That is, to mitigate 1% of CO₂ emissions at the total electricity generation of 353 million MWh in 2020 in Korea, the total generation costs range for nuclear power is \$254 million~\$526 million for the nuclear power, and the cost for renewable energy is \$2.289 billion for renewable energy. Hence, we can conclude that, in Korea, nuclear power generation is more cost-efficient than renewable energy generation in mitigating CO₂ emissions, even with the external costs of nuclear power generation.

Keywords : CO₂ mitigation cost, Cost efficiency, Nuclear generation, Renewable energy generation

Received: August 11, 2021. Revised: November 26, 2021. Accepted: December 13, 2021.

* Former graduate student in the Department of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul National University, First author(e-mail: 84yslee@gmail.com)

** Associate Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University, Corresponding author(e-mail: hs0308@snu.ac.kr)

1. 서론

IPCC(2013) 5차 보고서에 따르면, 최근 인간이 배출한 인위적 온실가스의 양은 관측 이래 최고 수준이며, 이로 인한 기후변화는 인간계와 자연계에 광범위한 영향을 주고 있다. 인간의 활동에 의한 온실가스 배출량은 1970년부터 2011년까지의 배출량이 그 이전 기간의 배출량보다 많은 것으로 추정되고 있다. 이처럼 인간의 활동에 의해 대량으로 배출된 온실가스로 인한 기후변화는 다양한 문제를 일으키고 있다. 또한 IPCC(2013)에 따르면 이미 지구의 기온은 1850년 대비 1.0°C 이상 상승하였으며, 인간의 온실가스 감축 노력 없이 현재와 같이 지속적으로 온실가스를 배출할 경우, 2100년에는 전 지구의 평균 기온이 산업혁명 전 대비 약 4°C에서 5°C 정도 증가할 것으로 평가하고 있다.

이러한 지구 온난화는 산업화에 따른 경제성장에 의해 지속되고 있다. 이에 따라 전 세계는 지구 온난화를 억제하기 위하여 1997년 교토의정서를 채택하였고, 2015년에는 파리 기후변화협정을 채택하여 자발적감축기여(intended nationally determined contribution, INDC)에 따라 온실가스감축을 위해 노력하고 있다. 우리나라는 2030년 배출 전망 대비 37% 감축을 목표로 한 INDC를 제출하고 이를 달성하기 위해 노력하고 있다.

온실가스 감축을 위한 각국의 노력은 기술적 혹은 정책적 수단을 이용하여 다양한 방법으로 이루어지고 있는데, 그 대표적인 것은 화석연료 에너지를 무탄소 에너지원으로 전환하는 것이다. 우리나라의 경우에도 INDC 목표를 달성하기 위하여 다양한 정책을 시행하고 있는데, 그중에서도 발전(發電) 부문의 화석연료의 발전 비중을 줄이고 무탄소 발전원인 신재생에너지 발전으로 대체하는 정책이 대표적이라 하겠다. 특히 우리나라는 화석연료 발전과 함께 과거 발전원의 중요한 역할을 해 온 원자력 발전 또한 신재생에너지 발전으로 대체하고 있다. 원자력 발전의 대체는 2011년 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후, 원전 사고 발생 위험에 대한 국민의 인식이 부정적인데 기인한 것이다. 그러나 일각에서는 우리나라의 전력 수요와 발전 환경, 비용 효율성 등을 고려할 때 원자력 발전의 중요성을 강조하고 있다.

그간 신재생에너지 발전과 원자력 발전의 온실가스 감축에 관한 연구는 다수 진행되었다(Richmond and Kaufman, 2006; Iwata et al., 2010, 2011, 2012; Baek and Kim, 2013; Baek and Pride, 2014; Shafiei and Salim, 2014; Baek, 2015; Dogan and Seker,

2016; Zoundi, 2017). 이들 연구는 모두 원자력과 신재생에너지 발전의 증가가 온실가스 감축에 효과적이라는 결론을 제시하고 있다. 최근에는 원자력 발전과 신재생에너지 발전의 온실가스 감축 효율성을 비교한 연구도 진행되었다 (Suna and Resch, 2016; Wang et al., 2018). Suna and Resch(2016)는 EU를 대상으로 한 연구에서 신재생에너지 발전이 원자력 발전에 비해 온실가스 감축에 더 효율적이라는 결과를 제시하였다. 이와 반대로 Wang et al. (2018)은 중국의 경우 신재생에너지 발전보다 원자력 발전이 온실가스 감축에 있어 상대적으로 더 효율적임을 보였다. 그러나 이들의 연구는 실질 발전 비용 대신 신규 발전소 건설 지원금을 사용하거나, 각 발전원의 외부비용을 고려하지 않은 한계점을 가진다. 특히 우리나라의 원자력 발전 감축은 사고 위험과 인체 건강에 미치는 부정적 영향 등에 대한 우려가 크기 때문이므로, 이들을 외부비용으로 반영하여 두 발전원 간 발전 비용을 비교 분석하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구는 우리나라의 발전 부문의 온실가스 감축에 있어서 원자력과 신재생에너지 발전의 감축효과를 추정하고, 원자력 발전의 사고위험 외부비용을 포함한 발전 비용을 고려하여 두 발전원의 온실가스 감축 비용 효율성을 비교하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 먼저 경제성장률과 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전량과 온실가스 배출량 간의 관계를 자기회귀분배시차(autoregressive distributed lag, ARDL) 모형을 사용하여 추정한다. 모형을 통해 추정된 계수들과 원자력 발전의 사고 위험을 반영한 외부 비용을 고려하여 온실가스 감축을 위한 원자력과 신재생에너지 두 발전원의 발전 비용을 비교한다.

논문의 구성은 II 장에서는 분석모형과 분석에 사용된 자료에 대해 설명하고, III 장에서는 경제성장률과 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전량이 온실가스 배출에 미치는 영향에 대한 실증분석 결과를 제시하고, 이를 이용한 원자력 발전과 신재생에너지 발전의 CO₂ 배출 감축비용을 비교한다. 그리고 마지막 IV 장에서는 실증분석 결과를 바탕으로 결론을 요약하고 그 시사점을 도출하기로 한다.

II. 분석모형 및 분석자료

1. 분석모형의 설정

온실가스 배출량은 한 국가의 경제성장 및 에너지 사용량과 밀접한 관련이 있음은 많

은 선행연구에 의해 증명되었다(Kraft and Kraft, 1978; Yu and Choi, 1985; Glasure and Lee, 1997; Soyats and Sari, 2006; Akinlo, 2008, Baek and Kim, 2011, 2013; 김재화·김현석, 2015). 이에 따라 경제성장과 에너지 사용량이 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위한 기본 모형은 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$G_t = f(Y_t, E_t) \quad (1)$$

여기서 G_t 는 t 기의 온실가스 배출량, Y_t 는 소득, E_t 는 에너지 소비량을 의미한다. 이 기본모형을 바탕으로 우리나라의 주요 발전원인 석탄과 원자력, 신재생에너지 발전이 온실가스 배출량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이들을 변수로 추가하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 재구성된다.¹⁾

$$G_t = f(Y_t, E_t, CL_t, NU_t, RE_t) \quad (2)$$

위 식에서 CL_t 와 NU_t , RE_t 는 각각 석탄 발전량과 원자력 및 신재생에너지 발전량을 나타낸다. 그런데 본 연구에서 사용한 변수들 간의 상관관계를 분석한 결과 1인당 총 에너지 소비량과 1인당 소득이 0.99 이상의 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 식 (2)에서 1인당 총 에너지 소비량 변수, E_t 는 모형에서 제외하고 이를 식 (3)과 같이 재정의하였다.

$$G_t = f(Y_t, CL_t, NU_t, RE_t) \quad (3)$$

한 국가의 경제성장과 환경의 질의 관계에 관한 연구는 흔히 환경쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC)으로 대표되는데, 이는 경제성장과 환경오염 사이

1) 국내 주요 발전원 중 하나인 천연가스는 1987년 이후 자료만이 존재하기 때문에 변수로 추가할 경우, 추정에 사용되는 샘플 수를 감소시키는 동시에 추정해야 할 변수의 수는 증가해 신뢰성 있는 추정의 어려움으로 본 연구에서는 포함하지 않았다. 천연가스 발전은 1985년 이후 2000년대 초반까지 전체 화석연료 발전 중 약 20%를 차지하였으나 그 이후 지속적으로 그 비중이 증가하여 2020년에는 약 40%의 비중을 차지하고 있다. 석탄 발전은 1985년 이후 화석연료 발전 중 차지하는 비중이 최대 73%까지 증가하였다가 최근까지 약 60%정도 비중을 차지하였으나, 2018년 이후 그 비중이 감소하기 시작하여 2020년에는 약 54%의 비중을 차지하고 있어 아직까지는 전체 화석연료 발전에서 차지하는 비중이 가장 큰 발전원이다.

에는 역U자형의 관계가 존재한다는 가설이다. 즉 한 국가가 산업화 초기에는 경제정책이 성장에 초점을 맞추기 때문에 에너지 다소비 산업의 증가로 환경오염이 증가하지만, 일정 소득수준 이상이 되면 경제 정책이 환경개선에도 초점을 맞추게 되어 환경오염이 줄어든다는 것이다. EKC를 이용한 국민소득과 환경오염 간의 관계를 실증적으로 분석하는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다 (Shafik, 1994; Heil and Selden, 1999; Friedl and Getzner, 2003; Managi and Jena, 2008; 박창원·김지욱·김정인, 1999; 정수관·강상목, 2013). 이에 따라 한 국가의 경제성장과 환경오염 사이의 역U자형 관계를 반영하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_t = f(Y_t, Y_t^2, CL_t, NU_t, RE_t) \quad (4)$$

또한 우리나라의 경제성장과 발전량에 직접적으로 영향을 준 1997년 IMF 구제금융 사태와 2008년 세계경제위기를 반영하기 위하여 식 (5)와 같이 더미변수를 추가하였다.

$$G_t = f(Y_t, Y_t^2, CL_t, NU_t, RE_t, D_t) \quad (5)$$

여기서 더미변수, D_t 는 실제적으로 경제위기가 우리 경제에 영향을 미친 기간을 고려하여 t 가 1997, 1998, 1999, 2008일 때는 1, 그 외에는 0으로 정의하였다. 식 (5)의 함수를 선형로그 형태의 추정식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\ln G_t = a_0 + a_1 \ln Y_t + a_2 (\ln Y_t)^2 + a_3 \ln CL_t + a_4 \ln NU_t + a_5 \ln RE_t + a_6 D_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

여기서 ε_t 는 오차항을 나타낸다. 우리나라에서 EKC 가설이 성립할 경우, 온실가스 배출량과 소득 사이에는 양의 관계($a_1 > 0$)가 존재하고 소득의 제곱과의 사이에는 음의 관계($a_2 < 0$)를 가져 온실가스 배출량과 소득 간 역U자형 관계가 성립하게 된다. 석탄 발전량의 증가는 온실가스 배출량을 증가시키므로 온실가스 배출량과 정의 관계($a_3 > 0$)가 존재하며, 이와 반대로 원자력과 신재생에너지 발전량의 증가는 화석에너지를 사용한

발전을 대체하여 온실가스 배출량을 감소시키므로 온실가스 배출량과 음의 관계 ($a_4 < 0, a_5 < 0$)를 가질 것으로 예상할 수 있다. 또한 경제위기는 산업 생산을 감소시켜 에너지 소비가 줄어들고 그에 따라 온실가스 배출이 감소하므로 부의 관계($a_6 < 0$)를 가질 것이다.

온실가스 배출량과 소득, 각 발전원의 발전량 간의 장·단기 영향을 분석하기 위해 Pesaran et al.(2001)에 따라 식 (6)을 식 (7)과 같이 오차수정형 형태의 ARDL 체계로 재구축할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln G_t = & \beta + \sum_{k=1}^p \gamma_k \Delta \ln G_{t-k} + \sum_{k=0}^p \delta_k \Delta \ln Y_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^p \zeta_k \Delta (\ln Y_{t-k})^2 + \sum_{k=0}^p \eta_k \Delta \ln CL_{t-k} + \sum_{k=0}^p \theta_k \Delta \ln NU_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^p \lambda_k \Delta \ln RE_{t-k} + \sum_{k=0}^p \xi_k \Delta D_{t-k} + \phi_1 \ln G_{t-1} \\ & + \phi_2 \ln Y_{t-1} + \phi_3 (\ln Y_{t-1})^2 + \phi_4 \ln CL_{t-1} + \phi_5 \ln NU_{t-1} \\ & + \phi_6 \ln RE_{t-1} + \phi_7 D_{t-1} + \mu_t \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 Δ 는 각 변수의 차분을 의미하며, p 는 각 변수의 시차를 나타내는데 각 변수마다 다른 시차를 가진다. 식 (7)을 ARDL에서의 오차수정모형이라고 하는데, 이는 ϕ 계수로 나타나는 시차변수들의 선형결합이 오차수정모형의 오차수정항(ec_{t-1})을 대신하기 때문이다. 즉, ϕ 로 나타나는 계수들은 장기적인 공적분 관계를 나타내며, γ 를 따르는 각 변수의 계수들($\gamma, \delta, \zeta, \eta, \theta, \lambda, \xi$)은 단기적 관계를 나타낸다.

식 (6)에서 추정된 계수를 이용하여 각 발전원별로 온실가스를 1% 감축하기 위한 총 비용(TC)은 식 (8)과 같이 도출할 수 있다.

$$TC_k = \left(H_k \times \frac{1}{\hat{\alpha}_k} \times \frac{1}{100} \right) \times (LCOE_k + EXC_k) \quad (8)$$

H_k 는 k 발전원($k =$ 원자력 or 신재생)의 발전량을 나타내며, $\hat{\alpha}_k$ 은 식 (6)에서 각 발전원의 발전량이 온실가스 배출량에 미치는 장기적 영향을 나타내는 a_4 와 a_5 의 추정치이다.

또한 $LCOE_k$ 는 k 발전원의 균등화 발전 원가이고 EXC_k 는 k 발전원의 외부 비용을 나타낸다. 즉, k 발전원의 발전량이 1% 증가할 때 그 온실가스가 $\hat{\alpha}_k\%$ 만큼 감축되므로, 1%의 온실가스를 감축하기 위해서 증가시켜야 하는 k 발전원의 발전량은 $(H_k \times 1/\hat{\alpha}_k)\%$ 가 된다. 따라서 온실가스를 1% 감축시키기 위한 k 발전원의 감축비용은 온실가스 1% 감축을 위해 증가시켜야 하는 발전량인 $(H_k \times 1/\hat{\alpha}_k \times 1/100)$ 에 각 발전원의 $LCOE$ 와 EXC 의 합을 곱하여 도출할 수 있다.

2. 분석자료

본 연구는 앞 절에서 정의된 모형의 추정을 위하여 모든 변수의 가용한 시계열 자료인 1985년부터 2020년까지 연도별 자료를 사용하였다. 온실가스 배출량을 나타내는 지표로는 1인당 CO_2 배출량을 사용하였으며,²⁾ 1인당 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전량 자료는 Our World in Data에서 제공하는 통계자료로부터 총 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전량을 수집한 후, 이를 세계은행(World Bank)에서 제공하는 통계자료인 세계개발지표(World Development Indicator, WDI)에서 수집한 우리나라의 연도별 인구수로 나누어 사용하였다. 경제성장 지표로는 WDI에서 제공하는 우리나라의 1인당 실질 GDP (2015=100)를 사용하였다. 본 연구에서 CO_2 배출량 추정에 사용된 각 변수의 정의와 단위는 <표 1>과 같다.

<표 1> 사용 변수의 정의 및 단위

변수	정의	단위
G	1인당 CO_2 배출량	tonnes
Y	1인당 실질 GDP	US\$ (2015=100)
CL	1인당 석탄 발전량	kWh
NU	1인당 원자력 발전량	kWh
RE	1인당 신재생에너지 발전량	kWh

2) IPCC(2013)에 따르면 CO_2 는 1970년~2010년간 전체 온실가스 배출량의 78%를 차지한다.

<표2>는 분석 기간의 각 변수별 기초 통계량을 보여준다. 개별 변수별로 살펴보면 우리나라의 1인당 CO₂ 배출량은 분석 기간 간 평균 9.492 tonnes였으며, 1인당 GDP의 분석 기간 간 평균은 19,102.53달러로 나타났다. 1인당 석탄 발전과 원자력 발전, 신재생에너지 발전량의 분석 기간 간 평균은 각각 2,600.565kWh 및 2,137.517kWh, 155.173kWh인 것으로 나타났다.

<표 2> 사용 변수의 기초 통계량

변수	최대	최소	평균	표준편차
<i>G</i>	13.014	4.137	9.492	2.749
<i>Y</i>	31,610.919	5,950.800	19,102.530	8,123.495
<i>CL</i>	4,547.159	567.322	2,600.565	1,364.667
<i>NU</i>	3,093.068	410.385	2,137.517	801.627
<i>RE</i>	609.244	47.217	155.173	148.198

원자력과 신재생에너지 발전의 CO₂ 배출 감축비용을 도출하기 위한 발전단가는 OECD(2020)에서 제공하는 균등화발전단가(levelized cost of electricity, LCOE)를 사용하였다.³⁾ <표 3>은 원자력 및 신재생에너지 발전의 LCOE를 보여주는데, 각 발전에 대해 운용상 발생하는 비용뿐만 아니라 건설과 발전소 수명 종료 후 폐기 비용까지 합산하여 추정된 원가를 나타낸다. 그런데 OECD(2020)는 신재생에너지 발전의 경우 국내 태양광과 풍력 발전의 LCOE만을 제공하고 있다. 따라서 본고에서 신재생에너지 발전의 LCOE는 국가에너지통계종합시스템(KESIS)에서 제공하는 가장 최근(2018년)의 태양광과 풍력 발전량의 상대적 비중을 각각의 LCOE에 곱하여 가중 평균한 값을 사용하였다.

3) LCOE에 관한 국내 자료는 단일 발전 원천의 장기적인 LCOE의 변화에 관한 자료이거나, 동일 시점에 동일 기준을 적용한 소수의 발전원별 자료는 존재하나, 다양한 발전 원천에 대한 발전소 건설비용과 같은 기초 데이터를 포함해 발전원별 LCOE를 직접 계산한 자료를 찾을 수 없었다. 이에 반해, OECD(2015)의 자료는 국가별 발전 원천을 태양광 3종류, 풍력 2종, 천연가스 2종, 석탄 2종, 원자력 1종 총 10종으로 구분하여, 각 발전에 대한 운용상 발생 비용뿐만 아니라 건설과 발전소 수명 종료 후 폐기 비용까지 합산하여 추정된 LCOE를 제공하고 있어 본고에서는 이 자료를 활용하였다.

〈표 3〉 원자력 및 신재생에너지 발전의 LCOE (달러/MWh)

구분	할인율 ¹⁾		
	3%	7%	10%
원자력 발전	39.42	53.30	67.17
신재생에너지 발전 ²⁾	82.47	111.40	136.36

자료: OECD(2020)

주: 1) 초기 건설비용에 대한 할인율에 따른 단가 변화를 의미

2) OECD(2020)에서 국내 신재생에너지의 LCOE는 태양광과 풍력 발전에 한해 제공하고 있기 때문에, 신재생에너지 발전 LCOE는 KESIS에서 제공하는 2018년 태양광과 풍력의 발전량의 상대적 비중을 각각의 LCOE에 곱하여 가중평균하였음.

OECD(2020)에서는 3%, 7%, 10%의 각 할인율에 대해 다음과 같은 적용 사례를 제시하고 있다. 3%의 경우 자본에 대한 사회적 비용만을 추산하고 있는 경우, 7%의 경우 규제가 심하거나 재구조화 중인 업종의 경우, 10%의 경우 변동성이 극히 심한 환경인 경우이다. 이에 따라 본 연구에서는 원자력 발전을 ‘규제가 심하거나 재구조화 중인 업종’으로 보고 7%의 할인율을, 신재생 발전은 사회적 비용만을 추산하는 경우로 보아 3%의 할인율을 적용한 LCOE를 분석에 사용하였다.

국내 원자력 발전의 외부비용을 추정 한 선행연구들은 조성진(2015)의 연구에 잘 정리되어 있는데, 이들 연구에서 사고위험대응비용과 정책비용만을 고려한 원자력 발전의 외부비용은 최소 0.11원/kWh에서 최대 63.7원/kWh로 추정되고 있다<표 4>.

〈표 4〉 국내 선행연구의 원자력 발전 외부비용 추정결과

선행연구	외부비용 추정결과
박원석 의원	7.5원/kWh
김승래	24원/kWh
국회예산정책처	3.98원/kWh ~ 63.7원/kWh
예기본	1.80원/kWh ~ 5.75원/kWh
조성진	0.11원/kWh ~ 24.54원/kWh

자료: 박원석 의원(2013), 김승래(2013), 국회예산정책처(2014), 에너지기본계획 원전 민관위킹 그룹(2013), 조성진(2015)

따라서 본고에서는 국내 선행연구들을 참고하여 원자력 발전의 외부비용을 최소 0.11

원/kWh에서 최대 63.7원/kWh일 때 원자력 발전의 온실가스 감축비용을 계산하여 그 범위를 제시한다. 신재생에너지 발전의 경우 사고위험대응비용에 대한 사회적 이슈가 나타나지 않기 때문에 외부비용이 없다고 가정하여 온실가스 감축비용을 계산한다.

III. 실증분석 결과

1. 단위근 및 공적분 검정 결과

우리나라의 CO₂ 배출량과 요인변수 간의 장·단기 관계를 나타내는 식 (6)과 (7)을 추정하기 위해서 먼저 단위근 검정을 시행하였다. ARDL 모형은 Engle and Granger(1987)이나 Johansen(1995)와 같은 전통적인 공적분 방법과 달리 사용 변수들의 값이 $I(0)$ 혹은 $I(1)$ 에 상관없이 사용할 수 있어 변수의 사전검정(pre-testing)이 필요하지 않다. 그러나 변수들의 값이 $I(2)$ 이상의 진행을 따를 경우에는 사용할 수 없기 때문에 이를 확인하기 위해 ADF(augmented Dickey-Fuller) 검정을 사용하여 단위근 검정을 실시하였다. <표 5>는 본고에서 사용한 변수들에 대한 단위근 검정 결과를 보여준다.

<표 5> ADF 단위근 검정 결과

변수	Z-value		결과
	수준변수	차분변수	
$\ln G$	-0.894	-4.140***	$I(1)$
$\ln Y$	-1.767	-4.040***	$I(1)$
$(\ln Y)^2$	-1.439	-4.301***	$I(1)$
$\ln CL$	-0.736	-3.243**	$I(1)$
$\ln NU$	-5.927***	-	$I(0)$
$\ln RE$	-1.735	-7.817***	$I(1)$

주: ***, **는 각각 1%, 5% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

1인당 원자력 발전량($\ln NE$)을 제외한 모든 수준변수들이 단위근을 가지고 있는 것으로 나타났고, 이를 차분한 변수들은 정상성을 가지는 것으로 나타나 1인당 원자력 발전량은 $I(0)$ 를, 나머지 모든 변수들은 $I(1)$ 진행을 따르는 것으로 나타났다. 따라서 우리

나라의 CO₂ 배출량과 그 요인 변수들 간의 관계를 추정하기 위해서 ARDL 모형을 사용하는 것은 적절하다고 할 수 있다.

단위근 검정을 통해 ARDL 모형의 사용의 적합성이 확인되었으므로, Pesaran et al.(2001)의 ARDL 한계검정법을 이용하여 사용된 변수 간 공적분 관계의 존재 유무를 검정하였다. 이를 위해 식 (7)의 오차수정모형에서 각 변수 간 공적분 관계가 성립하지 않는다는 귀무가설($H_0 : \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \phi_5 = \phi_6 = \phi_7 = 0$)을 F -검정하였다. 한계검정에서 F -통계값이 6.269로 나타났는데, 이 값은 Pesaran et al. (2001)이 제시한 1% 유의수준에서의 F -한계통계량 상한값인 4.43보다 크므로 추정 변수들 사이에 장기적 균형관계가 존재함을 알 수 있다.

2. 모형 추정 결과

우리나라의 CO₂ 배출에 미치는 소득 및 1인당 원자력 에너지 발전량, 1인당 신재생에너지 발전량의 장기적 영향을 나타내는 식 (6)의 추정 결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> CO₂ 배출량의 장기 영향계수 추정결과

변수	추정치	t-통계값
$\ln Y$	9.855	4.78***
$(\ln Y)^2$	-0.446	-4.40**
$\ln CL$	0.166	2.83**
$\ln NU$	-0.744	-10.10***
$\ln RE$	-0.127	-5.50***
D	-0.076	-3.03**
상수항	-71.858	-3.62**

주: ***, **은 각각 1%, 5% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

CO₂ 배출량의 추정에 사용된 모든 변수가 5% 통계적 유의수준에서 유의하며, 앞 장의 모형에서 설명한 이론과 그 부호가 일치하는 것으로 나타났다. 이를 변수별로 자세하게 살펴보면, 소득($\ln Y$)과 소득의 제곱($(\ln Y)^2$)에 대한 추정치가 각각 양(+), 음(-)의 부호를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 소득이 일정 소득 수준 이상이 되면서 CO₂

배출이 줄어드는 EKC 가설이 우리나라의 경우 성립하고 있음을 의미한다. 두 변수에 대한 추정치는 1985년 이후 소득이 1% 증가함에 CO₂ 배출량은 약 9.855%씩 빠르게 증가하다가 소득 임계점을 지나면서 약 0.446%씩 감소하고 있음을 의미한다. 이들 추정치를 가지고 온실가스 배출량이 최대에 이른 후 감소세로 전환되는 임계 소득수준을 계산하면 62,217 달러로 소득 수준이 아직 그 임계값에 도달하지 못했음을 알 수 있다. 이는 우리나라의 소득이 어느 정도 수준까지 증가했음에도 불구하고 아직까지 주요 산업구조가 에너지 다소비 산업 중심이고, 에너지 저소비 산업으로의 산업구조 전환이 더디기 때문인 것으로 생각된다.

석탄 발전량($\ln CL$)의 경우 CO₂ 배출량과 정(+)의 관계를 가지며 그 추정치 값이 0.166으로 나타나, 석탄 발전량 1% 증가가 0.166%의 CO₂ 배출 증가를 가져오는 것으로 분석되었다. 이와 반대로 원자력 발전량($\ln NU$)과 신재생 발전($\ln RE$)의 증가는 모두 CO₂ 배출에 부(-)의 효과를 가지는 것으로 나타났으며, 그 추정치가 각각 -0.744와 -0.127로 원자력 발전량 1% 증가는 0.744%의 CO₂ 배출 감소를 가져오고, 신재생에너지 발전량 1% 증가는 0.127%의 CO₂ 배출 감소를 가져오는 것으로 분석되었다. 이는 각 발전원이 CO₂ 배출을 1% 감축시키기 위해서는 원자력 발전은 1.344%(=1/0.744), 신재생에너지 발전은 7.874%(=1/0.127) 증가해야 함을 의미한다. 즉, 원자력 발전 비중의 증가가 신재생 발전량의 증가에 비해 CO₂ 배출량 감축 효과가 약 5.8배 이상 크다고 할 수 있다.

<표 7>은 소득과 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전량이 CO₂ 배출에 미치는 단기적 영향을 나타내는 식 (7)의 추정 결과이다. 소득이 CO₂ 배출에 미치는 영향은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으나, 석탄 및 원자력, 신재생에너지 발전은 단기적으로 CO₂ 배출에 10% 유의수준에서 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다.⁴⁾ 오차수정항의 계수(ec_{t-1})가 음(-)의 부호를 가지고 5% 유의수준에서 유의한 것으로 나타나, 외부 충격으로 발생하는 CO₂ 배출량과 그 요인 변수 사이의 불균형 관계가 단기 조정과정을 통해 장기 균형상태로 회복됨을 알 수 있다. 즉, 앞서 설명한 바와 같이 추정에 사용된 변수들 사이에 장기적인 공적분 관계가 존재함을 의미한다.

4) 각 발전원과 CO₂ 배출량 단기적 관계의 방향을 살펴보면 석탄 발전량과 CO₂ 배출량 간에는 음(-)의 관계를 가지기도 하고, 원자력과 신재생에너지 발전과 CO₂ 배출량 간에는 양(+)의 관계를 가지는 것으로 나타나 일반적인 예측과 상반된 결과를 보여주나, ARDL 모형을 이용한 분석에서 단기적 영향은 장기적 균형관계를 찾아가는 과정으로 그 부호에 큰 의미를 두지 않는다.

〈표 7〉 CO₂ 배출량의 단기 영향 추정결과

변수	추정치	t-통계값
$\Delta \ln Y_t$	14.183	1.91
$\Delta \ln Y_{t-1}$	-6.947	-0.59
$\Delta \ln Y_{t-2}$	-3.389	-0.31
$\Delta (\ln Y)_t^2$	-0.756	-2.02
$\Delta (\ln Y)_{t-1}^2$	0.308	0.52
$\Delta (\ln Y)_{t-2}^2$	0.131	0.24
$\Delta \ln CL_t$	0.333	3.49**
$\Delta \ln CL_{t-1}$	-0.100	-0.67
$\Delta \ln CL_{t-2}$	-0.382	-2.28*
$\Delta \ln CL_{t-3}$	-0.286	-0.23*
$\Delta \ln NU_t$	0.922	2.33*
$\Delta \ln NU_{t-1}$	0.748	2.90*
$\Delta \ln NU_{t-2}$	0.318	1.87
$\Delta \ln RE_t$	0.265	3.48**
$\Delta \ln RE_{t-1}$	0.260	3.47**
$\Delta \ln RE_{t-2}$	0.220	3.62**
$\Delta \ln RE_{t-3}$	0.156	3.75**
ΔD_t	0.078	2.58*
ec_{t-1}	-1.549	-2.97**

주: **, *은 각각 5%, 10% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

마지막으로 식 (8)을 이용하여 1%의 CO₂ 배출 감축을 위한 신재생에너지 발전의 총 비용과 원자력 발전의 총비용 범위를 도출하면 <표 8>과 같다.⁵⁾ 전체 발전량이 1MWh 일 때, 신재생에너지 발전을 통해 CO₂ 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 약 6.49달러가 소요되는 것으로 나타났다. 원자력 발전의 경우 외부비용에 따라 CO₂ 배출량 1%를 감

5) 원자력 발전의 외부비용은 앞의 ‘분석자료’ 절에서 제시한 최소 0.11 원/kWh에서 최대 63.7 원/kWh를 사용하였다. 이를 총비용 도출을 위해 사용된 LCOE의 단위와 통일시키기 위하여 OECD(2015)의 LCOE 산출 시 적용된 원-달러 환율 1,100 원/달러를 사용하고, MWh당 비용으로 계산하여 최소 0.1 달러/MWh에서 최대 57.91 달러/MWh를 사용하였다.

축시키기 위해서는 최소 0.72달러에서 최대 1.49달러가 소요되는 것으로 분석되었다. 외부비용을 그 중간값인 29.01달러/MWh를 적용할 경우, CO₂ 배출량 1%를 감축하기 위한 원자력 발전의 총비용은 1.11달러로 나타났다. 이를 2020년 우리나라의 총 화석연료 발전량 352,706GWh를 기준으로 계산할 경우, 발전 부문에서 CO₂ 배출 1%를 감축하기 위해서 신재생에너지 발전은 약 22.89억 달러, 원자력은 최소 2.54억에서 5.26억 달러의 비용이 발생함을 나타낸다. 이는 발전 부문의 CO₂ 배출을 원자력 또는 신재생에너지 발전을 통해 감축할 경우, 신재생에너지 발전을 통한 감축비용이 원전력 발전을 통한 감축비용에 비해 약 4.35~9.01배 더 크다는 것을 의미한다.

〈표 8〉 CO₂ 배출량 1% 감축을 위한 발전원별 감축 총비용¹⁾

발전원	외부비용	감축 총비용(달러)
신재생에너지	없음	6.49
원자력	최소(0.1달러/MWh)	0.72
	중간(29.01달러/MWh)	1.11
	최대(57.91달러/MWh)	1.49

주: 총 발전량이 1MWh일 때를 기준으로 CO₂ 배출량을 1% 감축하기 위한 총비용.

IV. 결론 및 시사점

산업화 이후 인간이 배출한 인위적 온실가스로 인해 야기된 기후변화는 전 지구적으로 광범위하게 생태 환경에 부정적 영향을 주고 있음은 의심할 여지가 없다. 또한 IPCC(2013)에 따르면 인간의 활동에 의한 온실가스 배출량은 1970년부터 2011년까지의 배출량이 그 이전 전 기간의 배출량보다 많은 것으로 추정되고 있다. 이에 따라 전 세계는 기후변화를 억제하기 위해 1997년 교토의정서를 채택하였고, 2015년에는 파리기후변화협정을 채택하는 등 온실가스 감축을 위해 노력하고 있다. 온실가스 감축을 위한 노력은 다양한 방법으로 이루어지고 있는데, 화석연료 에너지원을 무탄소 에너지원으로 전환하는 것이 대표적이라 할 수 있다. 우리나라도 발전(發電) 부문의 화석연료의 발전 비중을 줄이고 무탄소 발전원인 신재생에너지 발전으로 대체하는 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 특히 우리나라는 무탄소 발전원으로써 전력공급에 중요한 역할을 해

온 원자력 발전 또한 신재생에너지 발전으로 대체하고 있다. 이는 원전 사고 발생 위험에 대한 국민의 인식이 부정적인 데 기인하고 있으나, 일각에서는 우리나라의 전력 수요와 발전 환경, 비용 효율성 등을 고려할 때 원자력 발전의 중요성을 여전히 강조하고 있다.

본고는 우리나라의 발전 부문의 원자력과 신재생에너지 발전의 온실가스 감축효과를 추정하고, 외부비용을 포함한 발전 비용을 고려하여 두 발전원의 온실가스 감축비용의 효율성을 비교하였다. 이를 위해 경제성장과 원자력 및 신재생에너지 발전량과 온실가스 배출량 간의 관계를 ARDL 모형을 사용하여 추정하고, 그 추정 결과 및 외부 비용을 반영한 발전 비용을 이용해 두 발전원의 온실가스 감축비용을 비교하였다. 모형의 추정 결과 원자력 발전과 신재생 발전 모두 CO₂ 배출에 부(-)의 효과를 가지는 것으로 나타났으며, 원자력 및 신재생에너지 발전량 1% 증가는 각각 0.744%와 0.127%의 CO₂ 배출 감축 효과를 가지는 것으로 분석되었다. 다시 말하면, CO₂ 배출을 1% 감축시키기 위해서는 원자력 발전은 1.344%, 신재생에너지 발전은 7.874% 증가시켜야 함을 의미한다. 추정된 계수와 외부비용을 포함한 발전비용을 이용하여 1%의 CO₂ 배출 감축을 위한 총비용을 도출한 결과, 전체 발전량이 1MWh일 때 CO₂ 배출을 1% 감축시키기 위한 원자력 발전비용은 적용시키는 외부비용에 따라 최소 0.72달러에서 최대 1.49달러로 계산되었으며, 신재생에너지 발전비용은 약 6.49달러인 것으로 나타났다. 이를 2020년 우리나라의 총 화석연료 발전량(352,706GWh)을 기준으로 계산할 경우, 원자력 발전은 최소 2.54억에서 최대 5.26억 달러, 신재생에너지 발전은 22.89억 달러로 신재생에너지 발전이 원자력 발전보다 최소 4.35배에서 최대 9.01배의 비용이 더 소요됨을 알 수 있었다. 따라서 발전 부문의 온실가스 감축을 위해서는 원자력 발전의 사고위험대응비용을 포함한 외부비용의 최대치를 감안하더라도 현재의 발전단가 수준에서는 원자력 발전의 비용 효율성이 신재생에너지 발전의 비용 효율성보다 상당히 높은 것으로 결론 내릴 수 있다. 또한 CO₂ 배출량 1%를 감축시키기 위한 신재생에너지와 원자력 발전의 발전비용이 같아지기 위해서는 원자력 발전의 외부비용을 최대치로 가정하더라도 신재생에너지 발전단가가 18.89/MWh까지 하락해야 함을 알 수 있다. 즉, 이는 현재 신재생에너지 발전단가 수준에서 탄소중립 2050 목표를 달성하기 위해 화석연료 발전원 대부분을 신재생에너지 발전원만으로 대체하기에는 그 사회적 비용이 상당히 크게 발생할 수 있음을 시사한다.

[References]

- 국회예산정책처, “원자력 발전비용의 쟁점과 과제”, 사업평가현안분석 제50호, 2014.
- 김승래, “에너지세제 현황과 개편방향; 에너지 가격체계 진단과 개선”, 경제인문사회연구회 정책현안 종합연구 시리즈, 2013, pp. 63~98.
- 김재화·김현석, “신재생에너지 발전이 우리나라 CO₂ 배출에 미치는 영향분석”, 「에너지경제 연구」, 제12권 3호, 2015, pp. 185~201.
- 박원석 의원, “탄소세 도입을 위한 정책 방향 및 설계: 기후정의세 신설을 중심으로”, 진보정의 당 박원석 의원 국회 발제문, 2013.
- 박창원·김진욱·김정인, “주요 OECD 국가의 환경쿠즈네츠곡선 검증”, 「자원·환경경제연구」, 제8권 1호, 1999, pp. 77~108.
- 에너지기본계획 원전 민관위킹 그룹, 민관위킹 그룹 보고서, 2013.
- 조성진, “원자력발전 외부비용의 이해”, 「원자력산업」, 12월호, 2015, pp. 66~77.
- 정수관·강상목, “소득 및 에너지소비와 환경오염의 관계에 대한 분석”, 「환경정책연구」, 제 12권 3호, 2013, pp. 97~122.
- Akinlo, A. E., “Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from 11 African Countries,” *Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 2391~2400.
- Baek, J., and D. Pride, “On the Income-Nuclear Energy-CO₂ Emissions Nexus Revisited,” *Energy Economics*, Vol. 43, 2014, pp. 6~10.
- Baek, J., and H. S. Kim, “Is Economic Growth Good or Bad for the Environment? Empirical Evidence from Korea,” *Energy Economics*, Vol. 36, 2013, pp. 744~749.
- Baek, J., and H. S. Kim, “Trade Liberalization, Economic Growth, Energy Consumption and the Environment: Time Series Evidence from G-20 Economies.” *Journal of East Asian Economic Integration*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 3~32.
- Dogan, E., and F. Seker, “Determinants of CO₂ Emissions in the European Union: The Role of Renewable and Non-renewable Energy,” *Renewable Energy*, Vol. 94, 2016, pp. 429~439.
- Ecofys, *Subsidies and Costs of EU Energy*. Project number: DESNL14583, United Kingdom, 2014.
- Engle, R. F., and C. W. J. Granger, “Cointegration and Error Correction Representation: Estimation and Testing,” *Econometrica*, Vol. 55, 1987, pp. 251~276.

- Friedl, B., and M. Getzner, "Determinants of CO₂ Emission in a Small Open Economy," *Ecological Economics*, Vol. 45, 2003, pp. 133~148.
- Glasure, Y. U., and A. R. Lee. "Cointegration, Error-correction, and the Relationship between GDP and Energy: The Case of South Korea and Singapore," *Resource and Energy Economics*, Vol. 20, pp. 17~25.
- Heil, M. T., and T. M. Selden, "Panel Stationarity with Structural Breaks: Carbon Emissions and GDP," *Applied Economic Letter*, Vol. 6, 1999, pp. 223~225.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change*, Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2013.
- Iwata, H., K. Okada, and S. Samreth, "A Note on the Environmental Kuznets Curve for CO₂: A Pooled Mean Group Approach," *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, pp. 1986~1996.
- Iwata, H., K. Okada, and S. Samreth, "Empirical Study on the Determinants of CO₂ Emissions: Evidence from OECD Countries," *Applied Economics*, Vol. 44, 2012, pp. 3513~3519.
- Iwata, H., K. Okada, and S. Samreth, "Empirical Study on the Environmental Kuznets Curve for CO₂ in France: the Role of Nuclear Energy," *Energy Policy*, Vol. 38, 2010, pp. 4057~4063.
- Johansen, S., *Likelihood-based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Model*, Oxford, Oxford University Press, 1995.
- Kraft, J., and A. Kraft, "On the Relationship between Energy and GNP," *Journal of Energy and Development*, Vol. 3, 1978, pp. 401~403.
- Managi, S., and P. R. Jena, "Environmental Productivity and Kuznets Curve in India." *Ecological Economics*, Vol. 65, 2008, pp. 432~440.
- OECD, *Projected Costs of Generating Electricity*, France, 2015.
- Pesaran, M. H., Y. Shin, and R. J. Smith, "Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships," *Journal of Applied Economics*, Vol. 16, 2001, pp. 289~326.
- Richmond, A. K., and R. K., Kaufman, "Is There a Turning Point in the Relationship between Income and Energy Use and/or Carbon Emissions?" *Ecological Economics*, Vol. 56, 2006, pp. 176~189.
- Shafiei, S., R. A. Salim, "Non-renewable and Renewable Energy Consumption and CO₂ Emissions in OECD Countries: A Comparative Analysis," *Ecological Economics*, Vol. 62, 2014, pp. 482~489.

- Shafik, N., "Economic Development and Environmental Quality: An Economic Analysis," *Oxford Economic Papers*, Vol. 46, 1994, pp. 757~773.
- Soytas, U., and R. Sari, "Energy Consumption and Income in G-7 Countries," *Journal of Policy Modeling*, Vol. 28, 2006, pp. 739~750.
- Stern, N., *Stern Review: The Economics of Climate Change*, United Kingdom, 2006.
- Suna, D., and G. Resch, "Is Nuclear Economical in Comparison to Renewables?" *Energy Policy*, Vol. 98, 2016, pp. 199~209.
- Wang, N., J. Chen, S. Yao, and Y-C. Chang, "A Meta-frontier DEA Approach to Efficiency Comparison of Carbon Reduction Technologies on Project Level," *Renewable & Sustainable Energy Review*, Vol. 82, 2018, pp. 2606~2612.
- Yu, E. S. H., and J. Y. Choi, "The Causal Relationship between Energy and GNP: An International Comparison," *Journal of Energy and Development*, Vol. 10, 1985, pp. 249~272.
- Zoundi, Z., "CO₂ Emissions, Renewable Energy and the Environmental Kuznets Curve, a Panel Cointegration Approach," *Renewable & Sustainable Energy Review*, Vol. 72, 2017, pp. 1067~1075.