

환경을 고려한 에너지 전환정책의 잠재적 효과분석[†]

이명현*

요약 : 본 논문은 원전 비중 축소와 신재생발전 비율 확대를 핵심 내용으로 하는 에너지 전환 정책의 잠재적 성과를 실증적으로 평가하고 그 파급효과를 분석하고자 한다. 발전산업을 대상으로 에너지원 간 수요가격탄력성을 측정하여 그 대체 여부 및 정도를 조사한 후, 원전과 신재생발전 비중 확대 시 CO₂ 발생량 변화를 추산한다. 원자력과 신재생에너지의 암묵가격을 산출하여 두 에너지원간 전력생산의 잠재적 비용을 비교하고, 원전 혹은 신재생발전을 각각 늘릴 경우 전력공급가격에 미치는 파급효과에 대한 시뮬레이션 분석을 실시한다. 원자력과 신재생에너지는 서로 보완적인 것으로 측정되었다. 원전 확대가 신재생발전을 늘리는 것보다 CO₂ 감축하는 데 효과적인 것으로 나타났다. 2002~2016년 기간에 걸쳐 대부분 연도에서 원전 확대의 전력공급가격 파급효과는 대체로 신재생발전보다 높게 추산되었으며 변동 폭은 상대적으로 크게 나타났다.

주제어 : 에너지전환정책, 요소가격탄력성, CO₂ 순변화량, 전력공급가격

JEL 분류 : C33, D22, Q48

접수일(2021년 4월 26일), 수정일(2021년 5월 25일), 게재확정일(2021년 5월 26일)

[†] 이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

* 인하대학교 국제통상학과 교수, 교신저자(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

The Analysis of the Potential Effects of Energy Conversion Policy Considering Environment

Myunghun Lee*

ABSTRACT : In this paper, we empirically evaluate the potential performance of energy conversion policy and analyze its effects on power generation sector. We first examine the degree of substitutability between energy inputs by measuring the price elasticities of energy demands and then estimate the changes in CO₂ generation when the proportions of nuclear power plants and renewable power generation are increased. The shadow prices of nuclear power and renewable energy are calculated to compare the potential costs of power generation between the two energy sources. We analyze the impacts of the expansion of nuclear power plants and renewable power generation on power supply price. Nuclear and renewable energy were measured to be complementary to each other. The expansion of nuclear power plants has been more effective in reducing CO₂ emissions than increasing renewable power generation. In most years over 2002 to 2016, the impact of nuclear power expansion on the power supply price was generally higher than that of renewable power generation, with relatively large range of fluctuations.

Keywords : Energy Conversion Policy, Input Price Elasticity, Net CO₂ Change, Power Supply Price

Received: April 26, 2021, Revised: May 25, 2021, Accepted: May 26, 2021.

* Professor, Department of International Trade, Inha University, Corresponding author(e-mail: leemh@inha.ac.kr)

I. 서론

정부는 2020년 발표한 제9차 전력수급기본계획에서 석탄 및 원전발전 비중을 줄이고 신재생에너지 설비를 확대하며 2030년 전환 부문 온실가스 배출량 목표 달성방안을 구체화하였다. 재생에너지 3020, 수소경제활성화 로드맵, 그린뉴딜 계획 등에 따라서 국내 전체 에너지 설비에서 신재생에너지 설비가 차지하는 비중은 2020년 15.8%에서 2034년 40.3%로 증가하고, 석탄은 28.1%에서 15%로, 원자력은 18.2%에서 10.1%로 줄어든다.¹⁾ 그리고 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 반영해 2030년 기준 온실가스 배출 목표치를 1.93억t으로 설정함으로써 에너지원별 발전량 비중은 2019년 대비 신재생은 14.3%p 확대되고 석탄은 10.5%p, 원자력은 0.9%p씩 축소된다. 따라서 발전부문 미세먼지 배출도 2030년 9,000톤으로 2019년 대비 약 57% 줄어들 것으로 예상된다. 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위하여 제10차 전력수급기본계획에서 전력수요 전망, 중장기 전원믹스 등을 법제화할 계획이다.

국내 신재생발전 비중은 2002년 발전차액지원제(FIT)를 도입한 이후 2007년 2.17%에서 매년 조금씩 증가하여 왔다. 정부는 재정적 이유로 2013년 신재생에너지 의무할당제(RPS)로 대체하고, 신재생발전의 RPS 의무공급량 비율 목표를 2012년의 2%에서 매년 늘리면서 2024년 10%로 설정하였다. 신재생에너지 산업의 기술발전으로 신재생발전 단가는 꾸준히 낮아지고 있는 추세이다. 화석연료와 비교하여 풍력은 대등한 수준으로 접근하였고 태양광의 경우에는 아직 격차가 존재하나 하락속도는 가파르게 이루어지고 있다.²⁾ 하지만 태양광과 풍력은 기후나 자연조건에 취약하여 신재생발전 설비 대비 실가동률이 15% 정도로써 원전 가동률의 20%에도 못 미치는 수준이다. 또한 단위 면적당 발전량을 측정하는 설비이용률이 원전 대비 20~35%에 불과한 점도 국내의 신재생발전 확대에 장애요인으로 지적되고 있다. 이는 대규모 신재생발전 설비 건립에 필요한 부지

-
- 1) 국내 전력수급기본계획에서는 발전설비를 정격용량과 실효용량 개념으로 구분하고 있는데 정격용량은 발전설비용량 그대로를, 실효용량은 최대전력수요에 기여하는 전력설비용량을 나타낸다. 여기서는 정격용량을 기준으로 에너지원별 설비용량을 비교하였다.
 - 2) 국제에너지 컨설팅기업 우드 매킨지(Wood Mackenzie)는 ‘미래를 위한 전쟁 2020: 아시아태평양의 전력 및 재생에너지 경쟁력’ 보고서에서 한국은 환경비용 등 사회적 비용을 포함한 신재생에너지 균등화발전비용(LCOE)은 2020년 석탄화력발전보다 25% 비싸지만 2021년에 역전되어 2030년까지 화석연료 발전비용보다 30% 정도 싸질 것으로 전망하였다.

확보가 용이하지 않은 국내 상황을 고려하면 시설 입지로 일정 부분 산림, 해양 등 자연 생태계 훼손이 초래될 수 있기 때문이다.

발전산업의 투입 에너지 간 전환의 용이성은 여러 요인들에 의해 영향을 받는다. 에너지원 간 상대가격 변화뿐만 아니라 발전 기술 및 규모, 각 에너지 집약도 등에 따라서 대체 정도가 결정된다. 이는 에너지 전환정책의 실효성을 평가하는 데 있어서 발전산업에 대한 생산함수의 제반 특성을 분석하는 미시적·포괄적 연구가 선행되어야 함을 의미한다. 특히 발전단가가 낮은 원전과 석탄발전의 의존도를 줄이는 대신 단가가 상대적으로 비싼 LNG와 신재생에너지의 비중을 늘릴 경우 향후 신재생발전 단가가 하락해도 유가 급등 시 발전비용의 상승으로 이어져 장기적으로 전력요금의 인상이 예상된다.³⁾ 대외 무역의존도가 높은 우리나라의 경우 제품의 가격경쟁력이 중요한 만큼 안정적 물가관리를 위하여 에너지 전환정책이 전력가격에 미치는 파급효과에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 분석결과에 따라서 에너지·환경정책과 산업정책 간 완급을 조율하는 신축적인 정책운용이 필요할 것이다.

본 논문에서는 에너지 전환정책의 잠재적 성과를 예측하고 그 파급효과를 분석하고자 한다. 즉, 발전산업에서의 에너지원 간 대체 용이성과, 그로 인한 CO₂ 잠재적 증감량, 그리고 전력공급가격에 미치는 파급효과를 시뮬레이션을 위한 계량분석을 실시한다. 방법론적으로는 신재생에너지와 원자력 투입량을 적정수준으로 준고정(quasi-fixed) 시킨 후, 화석에너지 비용을 최소화하여 제약비용함수(restricted cost function)를 도출한다. 신재생에너지는 통상적으로 풍력, 태양광 등 여러 유형의 에너지를 통합한 개념으로서 단일가격으로 일반화하는 것이 용이하지 않다. 원자력 투입비용은 원자로 설치 및 운영비용이 대부분을 차지하고 있기 때문에 이에 대한 자본가격 산정 또한 관련 자료의 부족으로 쉽지 않다. 이윤극대화 조건으로부터 공급관계식(supply relation)을 추가로 도출하고 제약비용함수와 함께 구성된 연립방정식체계를 추정한다.

3) 에너지경제연구원(2017)은 2030년 발전비용은 2016년 실적 대비 21%(11.6조 원) 증가하며, 유가가 배럴당 70 달러로 올라가면 24.2%(13.4조 원) 추가 상승할 것으로 전망하였다. 국회 입법조사처(2017)는 2035년까지 발전비용은 매년 11조 원이 추가 증가하며, 전력요금은 2024년에 2016년 대비 20% 이상 인상될 것으로 예상하였다. 현대경제연구원(2017)은 2030년 기준으로 원자력 20%, 석탄 24%, 신재생 20%, LNG 35%의 발전비중을 가정할 경우 2016년 대비 2030년에 발전비용은 6.6조 원(14.5%) 더 늘어나고, 가구당 전력요금은 5,572원(11.9%) 추가 상승할 것으로 추정하였다.

신재생에너지 및 원전의 성과분석과 관련된 주요 선행연구를 살펴보면, Apergis and Payne(2009), Sadorsky(2009), Chang et al.(2015) 등은 국가별 신재생에너지 확대와 경제 성장 간 인과관계(causality)를 검증하였다. 김수일(2006)은 로짓모형을 사용하여 전력 산업의 석탄, 석유, 가스, 수력, 원자력 등 에너지 투입요소에 대한 가격탄력성을 추정하였다. 이명현(2015)은 국내 제조업을 대상으로 거리함수를 측정하여 신재생에너지의 암묵가격 변화추이, 화석연료와의 대체 정도, 그리고 신재생에너지 투입확대의 생산성 파급효과 등을 분석하였으나 재화 공급가격에 미치는 영향 분석까지 이어지지 않았다. 이우평 외(2018)는 30개 국가의 패널 확률변경분석(SFA) 모형으로 시간 가변적 비효율성이 고려된 생산함수를 추정하여 신재생에너지 확대와 에너지 저감이 국내 GDP에 미치는 영향을 분석하였다. 이명현(2018)은 신재생발전의 성과분석을 실시하였으나 현실적으로 총발전량에서 30%대의 비중을 차지하는 원전 상황을 고려하지 않았다. 따라서 원자력과 화석연료, 원자력과 신재생에너지 간 연관분석이 이루어지지 않은 점을 한계로 들 수 있다. 박경원·강성원(2020)은 신재생에너지 사용을 유도하는 에너지 부문에 대한 상·하류 탄소세 부과와 온실가스 감축과 경제적 파급효과를 비교 분석하였다.

제약비용함수의 추정계수를 사용하여 원자력과 신재생에너지, 그리고 화석연료 간 대체성 여부 및 정도를 분석하기 위하여 수요의 가격탄력성을 측정한다. 원자력 또는 신재생에너지가 화석연료를 대체가능할 경우 원자력 및 신재생에너지 투입 확대 시 CO₂ 잠재감축량을 추산한다. 원자력 및 신재생에너지의 단위 투입당 실제비용을 나타내는 원자력과 신재생에너지의 암묵가격(shadow price)을 각각 산출하여 잠재적 비용부담의 추이를 비교, 분석한다. 공급관계식의 추정계수를 사용하여 원전 혹은 신재생발전을 각각 1% 늘릴 경우 전력공급가격의 파급효과에 대한 시뮬레이션 분석을 실시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 실증분석을 위한 이론모형을, III장에서는 에너지수요의 가격탄력성 공식을 도출하였다. IV장에서는 계량분석에 사용한 통계자료의 설명과 함께 분석결과를 바탕으로 에너지전환정책의 시사점을 제시하였다. V장에서는 분석결과를 요약하고 이를 토대로 환경연계 적정 전력믹스를 위한 제언을 담았다.

II. 분석모형

자본(k)과 석탄(c), 석유(o), 가스(g) 등으로 구성된 화석연료, 원자력(n), 신재생에너지(r) 등의 에너지 생산요소를 투입하여 전력(Q)을 생산하는 전력산업의 생산함수를 나타내면 다음과 같다.⁴⁾

$$Q = Q(k, \mathbf{f}, n, r, t), \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{f} \in R_3^+$ 은 화석에너지 벡터이며, t 는 기술변화를 고려한 시간지표이다. 관련 자료의 부족으로 원자력 가격뿐만 아니라 다양한 형태의 에너지원으로 구성된 신재생에너지에 대한 통합(composite) 가격 산정에 어려움이 수반된다. 따라서 적정수준의 원자력과 신재생에너지의 투입량을 제약조건으로 추가하여 화석에너지비용을 최소화함으로써 다음과 같이 생산함수 (1)에 대한 쌍대(dual) 제약(에너지) 비용함수를 도출할 수 있다(Lau, 1976; McFadden, 1978; Berndt and Morrison, 1981; Halvorsen and Smith, 1986; Lee, 2008).⁵⁾

$$RCK = RCK(\mathbf{w}_f, n, r, Q, t), \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{w}_f \in R_3^+$ 은 화석에너지의 가격벡터이다. 여기서 RCK 는 자본스톡 한 단위당 화석에너지비용이다.

전력산업의 시장구조에 따라 기업 수입이 영향을 받는 일반적인 상황을 고려하면 기업의 한계수입은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Atkinson and Halvorsen, 1998; Ellis and Halvorsen, 2002).

-
- 4) 일반적으로 전력산업뿐만 아니라 특정산업에 대한 생산구조를 연구하거나 정부정책의 파급효과를 실증적 분석할 때 생산함수에 쌍대성이론(duality theory)을 적용하여 비용함수를 추정한다. 이는 요소수요의 가격탄력성을 산정하는 데 용이할 뿐만 아니라 추정결과의 신뢰성을 제고할 수 있기 때문이다(Halvorsen and Smith, 1986). 대표적으로 Gollop and Roberts(1983)와 Lee(2002)는 환경규제의 미국 전력산업 생산성 파급효과를 분석하였고, Atkinson and Halvorsen(1984)은 미국 전력산업의 규모경제, 에너지요소의 수요가격탄력성을 측정하였다. 국내 전력산업을 대상으로 한 연구사례로서, 이명현(2018)은 신재생발전의 성과분석을, Lee(2019)는 연료요소간 분배효율성 달성의 성과분석을 실시하였다.
- 5) k 은 자본투입함수로서 비체감성(non-decreasing), 오목성(concavity), 1차동차성(linear homogeneity)이 성립한다.

$$MR = P + Q \frac{\partial P}{\partial Q}, \quad (3)$$

여기서 P 는 전력가격이다. $\partial P/\partial Q$ 은 수요곡선의 기울기로서 기업 간 전략적 행위를 고려한 기업의 생산량에 대한 가격 변화효과를 반영한다. 식 (2)의 자본 단위당 제약에너지비용에 대한 한계비용과 한계수입을 일치시킴으로써 다음과 같이 이윤극대화를 만족시키는 공급관계식을 도출할 수 있다.

$$P = \frac{\partial RCK}{\partial Q} - Q \frac{\partial P}{\partial Q}, \quad (4)$$

여기서 $\partial RCK/\partial Q$ 은 자본 단위당 한계제약에너지비용이며, $-Q(\partial P/\partial Q)$ 은 시장지배력에 따른 가격 markup이다. $P(Q) = \delta(t) - \theta(t)Q$ 로 나타낼 경우 공급관계식 (4)는 다음과 같이 정리된다(Diewert, 1982).

$$P = \frac{\partial RCK}{\partial Q} + \theta(t) Q, \quad (5)$$

여기서 $\delta(t)$ 와 $\theta(t)$ 은 시간에 대한 다항식이다.

제약에너지비용함수를 추정하기 위하여 다음과 같이 초월대수함수 형태를 취한다.⁶⁾

$$\begin{aligned} \ln RC = & \ln k + \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_n \ln n + \alpha_r \ln r + \alpha_t t + 0.5\gamma_{QQ} (\ln Q)^2 \\ & + 0.5\gamma_{nn} (\ln n)^2 + 0.5\gamma_{rr} (\ln r)^2 \\ & + \sum_i \alpha_i \ln w_i + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i \ln Q \\ & + \sum_i \gamma_{in} \ln w_i \ln n + \sum_i \gamma_{ir} \ln w_i \ln r + \gamma_{Qn} \ln Q \ln n \\ & + \gamma_{Qr} \ln Q \ln r + \gamma_{nr} \ln n \ln r, \quad i, j = c, o, g, \quad \gamma_{ij} = \gamma_{ji}, \quad i \neq j, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 RC 는 화석연료비용의 제약에너지비용함수이며, 시간지표 t 는 전이변수(shift variable)이다.

6) 제약비용함수가 화석에너지 가격에 대하여 선형 동차성(linear homogeneity)이 성립하기 위해서는 다음의 제약조건이 충족되어야 한다:

$$\sum_i \alpha_i = 1, \quad \sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \gamma_{iQ} = \sum_i \gamma_{in} = \sum_i \gamma_{ir} = 0, \quad i, j = c, o, g.$$

쉐퍼드(Shephard) 정리를 이용하여 다음과 같이 각 화석에너지의 비용뭉방정식(M_i)을 도출할 수 있다.

$$M_i = \frac{\partial \ln RC}{\partial \ln w_i} = \frac{w_i f_i}{RC} = \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \ln w_j + \gamma_{iQ} \ln Q + \gamma_{in} \ln n + \gamma_{ir} \ln r, \quad (7)$$

$$i, j = c, o, g.$$

식 (6)으로부터 $\partial RC / \partial Q$ 을 도출하여 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 공급관계식을 추정가능한 형태로 나타낼 수 있다.

$$P = (\alpha_Q + \gamma_{QQ} \ln Q + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i + \gamma_{Qn} \ln n + \gamma_{Qr} \ln r) \times \exp(\ln k + \alpha_0) \quad (8)$$

$$+ \alpha_Q \ln Q + \alpha_n \ln n + \alpha_r \ln r + \alpha_t t + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 + 0.5 \gamma_{nn} (\ln n)^2$$

$$+ 0.5 \gamma_{rr} (\ln r)^2 + \sum_i \alpha_i \ln w_i + 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i \ln Q$$

$$+ \sum_i \gamma_{in} \ln w_i \ln n + \sum_i \gamma_{ir} \ln w_i \ln r + \gamma_{Qn} \ln Q \ln n + \gamma_{Qr} \ln Q \ln r$$

$$+ \gamma_{nr} \ln n \ln r) / Q + \theta(t) Q, \quad i, j = c, o, g.$$

Q 와 n , 그리고 r 이 모두 내생변수이므로 제약에너지비용함수 (6)과 각 에너지별 비용뭉 방정식 (7)로 구성된 연립방정식 체계를 공급관계식 (8)과 결합하여 반복-3단계 최소자승법(iterative three-stage least squares)으로 추정한다. 도구변수(instrumental variables)로는 전력, 가스, 수도부문의 생산자가격지수와 화석연료 가격, 그리고 시간지표 등을 사용하였다.

III. 에너지 수요의 가격탄력성

신재생발전 확대 및 원전 축소 시 화석에너지 투입량의 변화를 분석하기 위하여 원자력 또는 신재생에너지와 화석에너지 간 수요의 가격탄력성 측정을 통한 대체관계를 규명해야 한다. 이때 적정 수준에서 준고정된 원자력 혹은 신재생에너지로부터 도출된 단기 탄력성보다는 가변적인 장기 탄력성을 사용하는 것이 적절하다. 쉐퍼드 정리를 사용하여 총에너지비용함수로부터 장기 수요가격탄력성을 산출하면 다음과 같다.

$$E_{ij} = \frac{w_j \cdot EC_{ij}}{EC_i}, \quad i, j = c, o, g, n, r, \quad (9)$$

여기서 EC 은 RC 에 원전 및 신재생발전 비용을 합산한 값이다. EC 의 아래첨자는 각 에너지의 1차 및 2차 도함수 값을 나타낸다.

EC 와 RC 의 도함수 값 관계를 이용하여 RC 부터 식 (9)의 관계식을 도출할 수 있다 (Brown and Christensen, 1982). 이로부터 에너지 수요의 자기 및 교차 가격탄력성 공식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_{ii} = \frac{\gamma_{ii} - M_i + (M_i)^2}{M_i} - \left[\frac{(\gamma_{in} + M_i M_n)(M_{rr}(\gamma_{in} + M_i M_n) - H_{nr}(\gamma_{ir} + M_i M_r))}{H \cdot M_i} + \frac{(\gamma_{ir} + M_i M_r)(M_{nn}(\gamma_{ir} + M_i M_r) - H_{nr}(\gamma_{in} + M_i M_n))}{H \cdot M_i} \right], \quad i = c, o, g, \quad (10)$$

$$E_{ij} = \frac{\gamma_{ij} + M_i M_j}{M_i} - \left[\frac{(\gamma_{in} + M_i M_n)(M_{rr}(\gamma_{jn} + M_j M_n) - H_{nr}(\gamma_{jr} + M_j M_r))}{H \cdot M_i} + \frac{(\gamma_{ir} + M_i M_r)(M_{nn}(\gamma_{jr} + M_j M_r) - H_{nr}(\gamma_{jn} + M_j M_n))}{H \cdot M_i} \right], \quad i, j = c, o, g, \quad i \neq j, \quad (11)$$

$$E_{ix} = \frac{M_x(H_{yy}(\gamma_{ix} + M_i M_x) - H_{xy}(\gamma_{iy} + M_i M_y))}{H \cdot M_i}, \quad i = c, o, g, \quad x, y = n, r, \quad x \neq y, \quad (12)$$

$$E_{xi} = -\frac{H_{yy}(\gamma_{ix} + M_i M_x) - H_{xy}(\gamma_{iy} + M_i M_y)}{H}, \quad i = c, o, g, \quad x, y = n, r, \quad x \neq y, \quad (13)$$

$$E_{xx} = \frac{M_x \cdot H_{yy}}{H}, \quad x, y = n, r, \quad (14)$$

$$E_{xy} = \frac{M_y \cdot H_{xy}}{H}, \quad x, y = n, r, \quad x \neq y, \quad (15)$$

여기서 M_i 은 식 (7)의 각 화석에너지의 비용뭉치며, 호텔링(Hotelling) 정리를 적용하면 $M_x \equiv \partial \ln RC / \partial \ln x = -w_x \cdot x / RC$, $x = n, r$ 가 성립한다. $H_{xx} \equiv \gamma_{xx} - M_x + (M_x)^2$, $H_{xy} \equiv \gamma_{xy} + M_x M_y$, $H \equiv H_{xx} H_{yy} - H_{xy}^2$, $x, y = n, r, x \neq y$ 이다.

IV. 분석결과 및 해석

본 연구에서는 원전과 신재생발전의 파급효과를 비교, 분석하는 데 있어서 FIT가 도입된 2002년부터 2016년까지의 발전산업에 대한 연도별 시계열 자료를 사용하였다. 통계자료 출처는 다른 명시가 없으면 한국전력의 『한국전력통계』와 에너지경제연구원의 『에너지통계연보』이다. 전력 생산량(Q)은 화력 및 원자력, 그리고 소수력과 대체에너지 발전량의 합산한 총량이다. 석탄 투입량(c)과 가격(w_c)은 유연탄 사용량과 수입가격을 각각 사용하였다. 석유 투입량(o)과 가격(w_o)은 중유 사용량과 한전 『경영통계』의 발전용 B-C유 가격을 각각 사용하였다. 가스 투입량(g)과 가격(w_g)은 각각 LNG 사용량과 수입가격을 사용하였다. 원자력 투입량(n)은 원전 설비용량으로 대체하였고, 신재생에너지 투입량(r)을 구하기 위하여 소수력과 대체에너지 발전설비 용량을 합산하였다. 제약에너지비용은 각 화석연료 사용량에 가격을 곱하여 구하였다. 전력 공급가격(P)은 전

〈표 1〉 통계자료 요약

변수	단위	평균	표준편차	최대	최소
Q	TWh	339.15	48.272	404.24	258.13
n	GW	18.68	2.21	23.12	15.72
r	GW	2.136	2.348	7.681	0.053
w_c	원/kg	92.80	36.13	153.12	41.36
w_o	원/l	494.22	220.70	858.33	211.03
w_g	원/kg	580.45	211.29	891.23	286.53
RC	조 원	14.37	7.53	26.87	4.43
k	GW	27.44	3.59	33.75	21.75
M_c	-	0.439	0.076	0.580	0.337
M_o	-	0.119	0.054	0.231	0.059
M_g	-	0.442	0.067	0.564	0.325
P	원/kWh	88.61	15.07	111.57	73.88

력 판매단가를 사용하였다.) <표 1>은 분석모형의 변수별 통계자료를 요약한 것이다.

계약비용함수 (6)과 화석연료별 비용몫 (7), 그리고 공급관계식 (8)로 구성된 연립방정식체계를 동시에 추정하였다. 추정계수를 사용하여 원전 및 신재생발전 확대에 따른 발전비용 및 전력가격 상승효과의 유의성 여부를 확인하기 위하여 관련 귀무가설에 대한 가설검증을 실시하였다. 귀무가설 ‘원전 비중의 조정은 전력산업의 발전비용과 장기적으로 전력가격에도 영향을 미치지 않는다.’ 기각 여부를 확인하기 위하여 다음과 같이 계약비용함수의 해당 계수에 제약조건을 부여하여 가설검증을 실시하였다.

$$\alpha_n = \gamma_{nn} = \gamma_{cn} = \gamma_{on} = \gamma_{gn} = \gamma_{Qn} = \gamma_{nr} = 0. \quad (16)$$

Wald 검증법을 실시한 결과 제약식 (16)의 귀무가설은 1% 유의수준에서 기각되었다.⁸⁾

신재생발전 비율의 확대로 발전비용 상승이 초래되고 잠재적으로 전력가격의 인상이므로 작용할 수 있는지 여부를 검증하기 위하여 다음의 제약조건을 가한다.

$$\alpha_r = \gamma_{rr} = \gamma_{cr} = \gamma_{or} = \gamma_{gr} = \gamma_{Qr} = \gamma_{nr} = 0. \quad (17)$$

검증결과, 1% 유의수준에서 제약조건 (17)의 귀무가설은 기각되었다.⁹⁾ 이는 신재생에너지 투입 확대 시 발전비용의 상승을 통하여 장기적으로 전력가격의 인상으로 이어질 수 있음을 의미한다.

‘발전산업의 시장지배력은 존재하지 않는다.’에 대한 귀무가설의 기각여부를 검증하기 위하여 공급관계식 (8)의 markup 계수를 다음과 같이 제약한다.

$$\theta_0 = \theta_t = \theta_{tt} = 0. \quad (18)$$

7) 전력공급가격을 측정하는 데 있어서 발전가격 자체만을 고려한다면 정부규제를 일정부분 받는 전력 판매단가에 비하여 연료별 비중에 따라 변하는 도매가격인 계통한계가격(SMP)을 사용하는 것이 에너지정책 변화에 대한 단기적인 발전소의 대응을 분석하는 데 합리적이라고 할 수 있다. 하지만 본 연구의 계량모형을 제시하는 과정에서 식 (4)의 공급관계식을 도출할 때 전력가격은 산업구조 형태에 영향을 받으며 전력 소비자를 대상으로 기업 간 전략적 행위를 반영하는 시장가격이어야 한다. 또한 단기적으로는 발전비용 상승이 전력가격 인상에 반영되는 속도 및 폭은 제한될 수 있지만 안정적 전력수급을 위하여 발전소의 수익을 고려하지 않을 수 없는 상황에서 장기적으로 발전비용과 전력가격의 연계성은 성립되어야 하므로 본 연구처럼 연간 시계열자료를 사용한 장기분석의 경우 공급가격을 판매단가로 측정 가능할 것으로 판단된다.

8) χ^2 의 통계량은 유의수준 1%에서의 임계치 16.81에 대하여 33.88이 계산되었다.

9) χ^2 의 통계량은 유의수준 1%에 대한 임계치 16.81을 초과하는 35.15가 산출되었다.

1% 유의수준에서 제약식 (18)은 강하게 기각되었다.¹⁰⁾ 이는 국내 전력 독점시장을 고려하면 현실에 부합한 검증결과이다.

제약비용함수의 투입요소에 대한 정규성(regularity) 충족여부를 확인한 결과, 화석연료 가격에 대한 오목성(concavity)과 원자력과 신재생에너지 투입량에 대한 볼록성(convexity)이 모든 연도에서 위반되었다.¹¹⁾ 이를 해결하기 위한 방법으로서 Jorgenson and Fraumeni(1982)의 방식을 적용하여 제약조건 $\gamma_{ij} = 0, i, j = c, o, g$ 를 가하고 연립방정식체계를 재추정하였다. 최종 모형에 대한 재추정결과는 <표 2>에서 보는 바와 같다. 공급관계식(8)에서 $\theta(t)$ 는 2차 다항식인 경우 각 계수의 t -통계량이 가장 크게 나타났다.

<표 2> 최종 모형의 추정결과

계 수	추정치	계 수	추정치
α_0	-0.0019(0.3127)	γ_{gn}	2.1896(1.6201)
α_Q	-7.4543(2.0770)**	γ_{cr}	0.5378(0.2652)*
α_n	-11.5530(6.0705)*	γ_{or}	-0.4624(0.2423)*
α_r	-0.8683(0.8941)	γ_{gr}	-0.0755(0.2012)
α_t	0.8223(0.3292)**	γ_{QQ}	-73.1840(25.2680)**
α_c	0.3332(0.1632)*	γ_{Qn}	6.5140(25.2550)
α_o	0.2871(0.1707)*	γ_{Qr}	3.9264(2.7619)
α_g	0.3797(0.1473)**	γ_{nn}	47.1620(55.7990)
γ_{cQ}	-5.3130(2.4376)*	γ_{nr}	0.6515(4.5727)
γ_{oQ}	5.0317(2.3733)*	γ_{rr}	-0.3557(0.5006)
γ_{gQ}	0.2813(1.7380)	θ_0	90.3870(1.1471)**
γ_{cn}	-1.1375(1.8137)	θ_t	1.9615(0.4591)**
γ_{on}	-1.0521(1.7433)	θ_{tt}	0.4856(0.0936)**

주: 괄호 안의 숫자는 표준오차이며, ** (*) 표시는 1% (5%) 수준에서 유의적임을 나타냄.

10) χ^2 의 통계량은 1% 유의수준의 임계치 11.34 대비 9815.44로 산출되었다.

11) 제약비용함수는 화석연료 가격에 대하여 오목해야 하며, 원자력 및 신재생에너지 투입량에 대해서는 볼록해야 한다. 이를 위해서는 헷시안 행렬(Hessian matrix)이 화석연료 가격에 대해서는 음의 준정부호(negative semi-definite), 원자력과 신재생에너지 투입량에 대해서는 정의 준정부호(positive semi-definite)이어야 한다.

<표 3>은 식 (10)~(15)를 사용하여 각 에너지요소에 대한 수요탄력성을 측정한 결과를 제시하고 있다. 모든 에너지 수요의 자기가격탄력성은 예상대로 음수로 나타났다. 석탄과 석유가 각각 가격변화에 대한 수요의 민감도가 상대적으로 높은 반면 원자력 수요의 탄력도는 가장 낮았다. 이는 화력발전 및 신재생발전과 비교하여 원전 비중을 늘리는데 있어서 수반되는 발전 부지 및 설비 확보와 핵폐기물 처리 관리 등 원전 건설 및 가동에 막대한 투자비용과 사회적 비용이 초래됨으로써 같은 비율의 발전단가 변화 시 원전 확대 및 축소의 신축성은 상대적으로 많이 떨어지기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

석탄과 석유, 석탄과 가스 간 교차가격 탄력성은 양의 값으로 추정됨에 따라 석탄-석유, 석탄-가스는 서로 대체관계인 것으로 나타났다. 원자력과 화석연료의 관계에서 원자력은 석탄과는 대체가능한 반면 석유와 가스와는 보완성을 보였다. 특히 원전 단가의 변화에 대하여 석탄 수요는 매우 탄력적으로 반응하였다. <표 3>의 에너지 수요의 가격탄력성 추정값을 이용하여 원전 비중의 확대에 의한 화석연료 수요의 증감 정도를 추산할 수 있다.¹²⁾ 원전 비율을 1% 증가시키면 다른 조건들이 변하지 않는다면 석탄 수요량은 평균 21.26% 큰 폭으로 줄어드는 것으로 나타났다. 반면 석유 및 가스의 수요량은 각각 5.69%와 3.21% 늘어났다. 이들 화석연료 투입의 증감량과 각 화석연료의 탄소배출계수를 사용하여 CO₂의 잠재 감축량을 추산한 결과, 1%의 원전 설비용량 확대는 평균적으로 3,600만 톤의 CO₂의 감축효과를 거둔 것으로 나타났다.¹³⁾

<표 3> 에너지원 수요의 가격탄력성(E_{ij}) 추정결과

$j \backslash i$	c	o	g	n	r
c	-2.2883	1.2145	0.7655	0.0694	-0.7815
o	1.0465	-2.1968	0.4413	-0.0160	0.6969
g	0.8725	-0.4813	-1.0000	-0.0120	0.4207
n	2.4060	-0.6441	-0.3637	-0.1132	-0.9548
r	-2.0367	2.1078	0.9621	-0.0718	-1.2908

12) 원전 또는 신재생발전 확대에 의한 각 화석연료의 수요 탄력성을 구하면 다음과 같다.

$$\partial \ln f_i / \partial \ln x = (\partial \ln f_i / \partial \ln w_x) / (\partial \ln x / \partial \ln w_x) = E_{ix} / E_{xx}, \quad i = c, o, g, \quad x = n, r.$$

13) 발전 화석연료 투입량에 대한 CO₂ 발생량의 계산식은 다음과 같다.

$$dCO_2 = \sum_i df_i \times (cv^i / 10^7) \times tc^i \times cr^i \times (44/12), \quad i = c, o, g,$$

여기서 df_i 는 각 화석연료의 투입량, cv^i 는 발열량, tc^i 는 탄소배출계수(톤/TOE), 그리고 cr^i 는 연소율이다.

신재생에너지의 경우 석탄과는 보완관계를, 석유 및 가스에 대해서는 대체관계가 성립하였다. 신재생발전 증가에 대한 화석연료 수요량의 변화를 계산한 결과 신재생발전 1% 확대 시 석탄 사용량은 평균 1.58% 증가하고 석유와 가스 투입량은 각각 1.63%와 0.75% 감소하였다. 각 화석연료의 증감량에 탄소배출계수를 적용하여 계산한 결과, 신재생발전 1% 확대로 CO₂ 배출량은 250만 톤이 증가한 것으로 나타났다. 종합하면, 전력 산업에서 신재생발전보다는 원전 비중을 늘리는 정책이 CO₂ 배출을 감축하는 데 더 효과적인 것으로 나타났다.

E_{nr} 과 E_{rn} 모두 음수로 추정됨에 따라 원자력과 신재생에너지는 서로 보완적 관계임이 입증되었다. 신재생발전 단가 변화에 대한 원전 수요의 반응은 미미한 반면, 원전 단가 1% 하락에 대하여 신재생발전 수요는 거의 같은 비율로 증가하였다. E_{nn} 과 E_{rr} 의 추정치를 사용하여 원자력과 신재생에너지 가격변화에 대한 수요의 비교정태분석이 가능하다. 기술혁신으로 신재생발전 단가가 1% 하락할 경우 다른 조건들이 일정불변하면 신재생발전 수요는 약 1.3% 증가시키지만 원전 수요는 증가율 0.07%로서 거의 영향을 주지 못하였다. 신재생발전 1% 확대 시 다른 조건들이 일정불변할 때 원전 수요는 0.12% 증가하는 데 그쳤다.¹⁴⁾

원전 단가 1% 하락 시 원전과 신재생발전 수요는 각각 0.1%와 0.95% 늘어나는 것으로 나타났다. 원전을 1% 증가시킬 경우 다른 조건들이 일정불변하면 신재생발전은 약 18% 확대로 이어졌다.¹⁵⁾ 이러한 시뮬레이션 결과를 종합하면 원전과 신재생발전은 상호 보완관계이며 원전 확대에 의한 신재생발전 증가효과가 신재생발전 확대에 의한 원전 증가효과를 크게 능가한 것으로 나타났다. 그러므로 신재생발전과 원전 확대 정책을 함께 추진하면 비용효과적인 RPS 목표 달성이 가능하나 원전 비중을 낮추고 RPS 확대 정책을 도입할 경우 원전 축소로 인하여 동반 감소되는 신재생발전의 상쇄분을 고려하면 일정 기간 내 RPS 목표에 도달하는 데 차질이 빚어질 수 있다.

Hotelling(1932) 정리를 이용하여 다음과 같이 제약비용함수 (6)을 $\ln n$ 과 $\ln r$ 로 각각 편미분함으로써 원자력과 신재생에너지의 암묵가격(shadow price)을 도출할 수 있다. 이를 통하여 각 에너지를 단위 투입하여 발전하는 데 실제 얼마만큼 비용을 지불하는지

14) $\partial \ln n / \partial \ln r = E_{nr} / E_{rn}$ 을 계산하여 결과를 도출하였다.

15) 사용한 계산식은 $\partial \ln r / \partial \ln n = E_{rr} / E_{nr}$ 이다.

를 서로 비교할 수 있다.

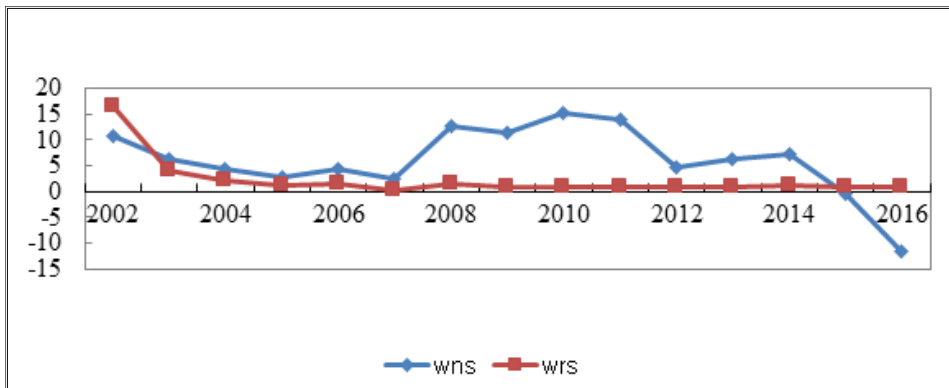
$$\hat{w}_x^s = -\frac{\partial \ln RC}{\partial \ln x} \cdot \frac{\widehat{RC}}{x} = -[\alpha_x + \gamma_{xx} \ln x + \sum_i \gamma_{ix} \ln w_i + \gamma_{Qx} \ln Q + \gamma_{yx} \ln y] \cdot \frac{\widehat{RC}}{x}, \quad (19)$$

$x, y = n, r, x \neq y.$

<그림 1>은 원자력과 신재생에너지의 각 연도별 암묵가격 추정치의 궤적을 제시하고 있다. 신재생에너지의 암묵가격(‘wrs’로 표기)은 2002~2007년 기간에는 하향추세를 나타내다가 이후에는 정체된 모습을 보였다. wrs의 변화추이를 신재생에너지 정책과 연관하여 살펴보면, 신재생발전 사업자에게 발전차액을 지원하는 FIT가 도입된 2002년 이후 신재생발전의 비용부담은 크게 줄어들기 시작하였으며, FIT에서 RPS로 전환된 2013년 이후에도 비용부담의 증가는 없는 것으로 나타났다. 원자력의 암묵가격(‘wns’로 표기)은 크고 작은 등락을 반복하였다. 2002~2007년 기간 동안 wns 또한 안정적인 하향추이를 보였으나 2008년에 큰 폭으로 상승한 후 등락을 거듭하면서 wrs를 크게 능가하였다. 2012년부터 wns는 wrs와의 격차를 좁히기 시작하였고 2014년 이후 음수 값으로 전환되며 추세가 급격히 꺾였다.

두 암묵가격의 시간에 따른 차이 및 변화추이 양상을 해석하면 다음과 같다. 신재생발전 설비는 표본기간 동안 매년 꾸준하게 연속적으로 확대해 온 반면 상대적으로 규모가 큰 원전 용량은 몇 년 단위로 계단식의 증가 추이를 보여 왔다. 그 결과 신재생에너지의

<그림 1> 원자력과 신재생에너지 암묵가격 연도별 변화 추이



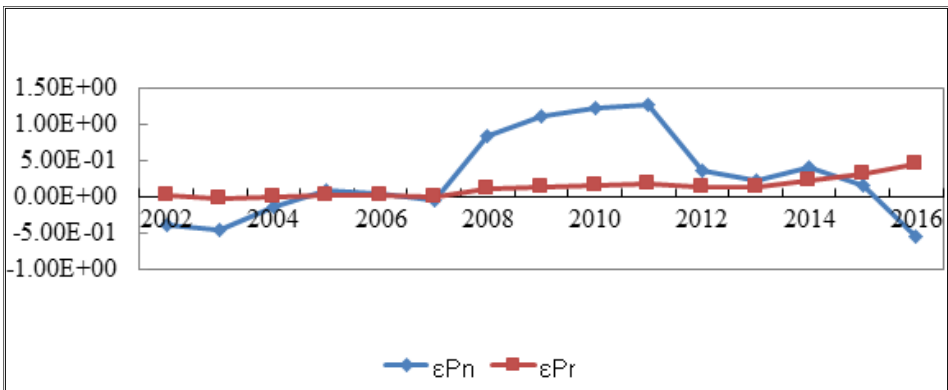
잠재적 발전단가는 규모의 경제로 인하여 완만하게 떨어진 반면 원자력의 발전단가는 설비 확대 전후로 높게 상승했다가 시차를 두고 하락 추세이며 장기적으로는 규모의 경제효과가 설비투자의 비용상승효과를 상쇄하는 단계에 도달하게 된다.

원전 또는 신재생발전 비율의 변화가 전력공급가격에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다음과 같이 공급관계식 (8)을 $\ln n$ 과 $\ln r$ 로 각각 편미분하였다. 이로부터 계산된 연도별 추정치를 꺾적으로 나타내면 <그림 2>에서 보는 바와 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{\epsilon_{Px}} = \frac{\partial \ln P}{\partial \ln x} &= \frac{\partial P}{\partial \ln x} \cdot \frac{1}{P} = \frac{1}{Q} \times \exp(\ln k + \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_n \ln n + \alpha_r \ln r + \alpha_t t) \quad (20) \\ &+ 0.5\gamma_{QQ}(\ln Q)^2 + 0.5\gamma_{nn}(\ln n)^2 + 0.5\gamma_{rr}(\ln r)^2 + \sum_i \alpha_i \ln w_i \\ &+ 0.5 \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i \ln Q + \sum_i \gamma_{in} \ln w_i \ln n \\ &+ \sum_i \gamma_{ir} \ln w_i \ln r + \gamma_{Qn} \ln Q \ln n + \gamma_{Qr} \ln Q \ln r + \gamma_{nr} \ln n \ln r \\ &\times [\gamma_{Qx} + (\alpha_Q + \gamma_{QQ} \ln Q + \sum_i \gamma_{iQ} \ln w_i + \gamma_{Qn} \ln n + \gamma_{Qr} \ln r) \\ &\times (\alpha_x + \gamma_{xx} \ln x + \sum_i \gamma_{ix} \ln w_i + \gamma_{Qx} \ln Q + \gamma_{xy} \ln y)] \cdot \frac{1}{P}, x, y = n, r, x \neq y. \end{aligned}$$

신재생발전 확대 시 전력 공급가격에 미치는 영향(‘εPr’로 표기)은 규모 및 변동 폭에서 원전(‘εPn’로 표기)과 비교하여 상대적으로 크지 않았다. εPr은 2002~2007 기간 동안 0.02 미만으로 거의 반응이 없는 것으로 나타났으나 2008년부터는 전반적으로 조금씩 증가하는 추이를 보였다. 이는 폐기물에너지, 수력에 편중된 신재생발전이 발전 단가

<그림 2> 연도별 원자력과 신재생에너지의 전력 공급가격 파급효과



가 상대적으로 비싼 풍력과 태양광 등 현대식 신재생에너지에 대한 의존도를 점차 높여 가는 추이를 어느 정도 반영한 결과라고 할 수 있다. eP_n 은 2002~2004년 기간에 걸쳐 $-0.15 \sim -0.47$ 의 범위를 보임에 따라 원전 확대가 전력가격을 하락시키는 데 기여한 것으로 나타났으나 2004년 이후 2007년까지 전력가격 인하효과는 미미하였다. 2008~2016년 기간 동안 eP_n 의 궤적은 <그림 1>의 w_n 의 변화추이를 상당 부분 반영한 결과라고 볼 수 있다. 즉, 2008~2012년 기간에 걸쳐 원전 단가의 증가는 전력가격의 상승으로 이어졌고 2016년 원전 단가의 급격한 하락은 전력가격을 인하시키는 요인으로 작용하였다.

V. 요약과 정책 시사점 및 제언

2020년 발표된 9차 전력수급기본계획의 주요 내용은 원전과 석탄발전을 단계적으로 감축하고 신재생에너지 비중을 확대하는 것이라고 요약할 수 있다. 이러한 에너지 전환 정책의 실효성 및 성과는 각 에너지의 상대가격 변화, 발전 기술 및 규모, 에너지 집약도 등 발전 산업의 생산함수 특성과 관련한 여러 요인들에 의해 영향을 받게 된다. 발전 단가가 상대적으로 비싼 에너지원으로 대체되어 전력요금 인상으로 이어질 경우 제품의 가격경쟁력을 관리하는 산업정책과의 통합 운영 및 조율 과정이 요구되는 상황이다. 본 논문에서는 2002~2016년 기간에 걸쳐 국내 발전 산업을 대상으로 제약비용함수 접근법을 이용하여 에너지 전환정책의 성과를 예측, 평가하고자 하였다. 이를 위하여 에너지 원간 특히 원자력과 신재생에너지의 대체 또는 보완 정도를 측정하고, 원전 및 신재생발전 비율의 변화가 CO_2 잠재발생량과 전력공급가격에 미치는 파급효과를 분석하였다.

원자력과 화석연료와의 관계에서 석탄은 대체가능하였으나 석유와 가스와는 보완관계를 나타냈다. 수요의 가격탄력성 추정치를 가지고 시뮬레이션을 실시한 결과, 원전을 1% 확대할 경우 다른 조건들이 변하지 않는다면 석탄 수요량은 평균 21.26% 감소하고, 석유 및 가스 수요량은 각각 5.69%와 3.21% 증가하였다. 이들 화석연료 투입의 증감량과 각 화석연료의 탄소배출계수를 사용하여 CO_2 의 잠재적 순변화량을 추산한 결과, 1%의 원전 설비용량 확대는 2018년 국내 실제 배출량 대비 약 5.7%의 CO_2 감축효과를 거둔 것으로 나타났다.

신재생에너지는 석탄과는 보완관계를, 석유 및 가스와는 대체관계를 보였다. 신재생

발전 1% 확대 시 석탄 사용량은 평균 1.58% 증가하고, 석유와 가스 투입량은 각각 1.63%와 0.75% 감소하였다. 마찬가지로 화석연료의 증감량과 탄소배출계수를 사용하여 CO₂의 잠재적 순변화량을 계산한 결과, 신재생발전 1% 확대 시 CO₂ 배출량은 오히려 2018년 실제 배출량 대비 약 0.4% 증가한 것으로 나타났다. 따라서 원전 확대정책이 전력산업의 CO₂ 배출량 감축목표의 달성 시기를 앞당기는 데 매우 효과적인 것으로 드러났다.

원자력과 신재생에너지는 서로 보완적인 것으로 측정되었다. 신재생발전을 1% 확대 하면 다른 조건들이 일정불변할 때 원전 수요는 불과 0.12% 증가에 지나지 않았으나 원전 비중을 1% 증가시킬 경우 다른 조건들이 일정불변하면 약 18%의 신재생발전 증가효과를 가져다주는 것으로 나타났다. 즉, 원전 확대에 의한 신재생발전 증가효과가 신재생발전 확대의 원전 증가효과를 압도한 것이다. 이는 신재생발전의 비율 목표를 효과적으로 달성하는 데 있어서 원전 비중의 유지 또는 축소 정책보다 병행 확대가 더 유효한 전략임을 시사한다.

원전과 신재생발전 확대의 전력공급가격 탄력성을 분석하였다. 신재생에너지의 경우 표본 기간 중반까지는 전력공급가격에 미치는 효과가 미미하였으나 그 이후부터는 발전단가가 상대적으로 높은 현대식 신재생에너지의 비중이 늘어나면서 영향력이 조금씩 커지기 시작하였다. 원전 확대는 초반까지 전력공급가격 인하효과를 가져왔으나 발전설비가 증설되는 시기 전후로 큰 폭의 전력공급가격 상승을 유발시킨 것으로 나타났다. 몇 년 경과 후 인상효과는 점점 줄어들기 시작하며 결국은 다시 전력공급가격의 하락으로 이어졌다.

우리나라 전체 에너지 소비 가운데 전력 비율은 약 20%이며 나머지 80%는 석탄, 석유, LNG 등 화석연료이다. 2050 탄소중립의 목표를 달성하기 위해서는 20% 전력뿐만 아니라 수송, 건물, 산업 등 80% 비전력을 전력화하는 동시에 그 전력을 무탄소로 공급해야 한다. 에너지 효율에서 전기가 화석연료보다 2배 정도 높다는 점을 감안하면 현재보다 2.5배 전력이 필요하다. 게다가 AI, 빅데이터, 자율주행차, IoT, 5G통신, 클라우드 등 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 전력 수요는 크게 늘어날 전망이다. 탄소배출 없이 전력을 공급하는 데 있어서 태양광, 풍력, 지열 등 신재생에너지에 과도하게 의존하는 것은 바람직하지 않다. 신재생발전은 날씨, 계절 등 자연환경에 영향을 받을 뿐 아니라 생

산된 전력을 저장하는 배터리 기술도 여의치 않기 때문이다. 특히 우리나라는 신재생에너지를 대량으로 안정적으로 확보하는 데 불리한 지형과 기후를 갖고 있다. 우리나라 전력 생산구조를 분석하여 도출한 본 연구의 결과를 토대로 환경연계의 에너지전환정책을 제안컨대, 2050 탄소중립 목표를 수립하고 에너지의 전력화를 추구하는 데 있어서 원전 축소지향의 신재생에너지 확대정책은 실효성에서 현실적 한계가 예상되는 만큼 사회적 적정 수준의 원전 비중에 대한 산정을 전제로 신재생발전과 원전 비율을 동시 확대하는 것이 합리적, 효율적 방안으로 판단된다.

본 연구의 목적은 기존 자료로부터 전력산업에 대한 생산함수의 특성을 조사하고 이를 토대로 정책변화의 비교정태분석을 실시하여 정책효과의 시사점을 제시하며, 정책목표의 효과적인 달성을 위한 적정 방향을 모색하는 데 유용한 자료 및 정보를 제공하는 데 있다. 본 분석모형의 한계로는, 기존 자료로는 향후 신재생발전의 기술변화로 인한 생산구조의 변화 가능성까지 고려하지 못하며, 비교정태분석을 통한 정책효과의 시뮬레이션 결과를 도출하는 데 있어서 부득이 ‘다른 조건들이 일정하면’이라는 전제조건을 가함으로써 현실적 상황에 대한 제한된 해석이 이루어질 수 있다는 점을 들 수 있다.

[References]

- 김수일, 『계량경제모형을 통한 발전부문의 연료대체에 관한 연구』, 에너지경제연구원, 2006.
- 박경원·강성원, “에너지 세제 개편의 경제효과 분석: 에너지 부문의 상류탄소세와 하류탄소세에 대하여”, 『환경정책』, 제28권 제2호, 2020, pp. 49~77.
- 에너지경제연구원, “신정부 전원구성안 영향 분석”, 『보도자료』, 2017.
- 이명현, “국내 제조업에 대한 비가격 신재생에너지의 암묵가격, 대체가능성, 생산성 파급효과 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제24권 제4호, 2015, pp. 727~745.
- 이명현, “에너지-기후변화정책 연계를 위한 신재생발전의 성과분석: 제약비용함수접근법”, 『자원·환경경제연구』, 제27권 제2호, 2018, pp. 339~362.
- 이명현, 『탄소경제학』, 학현사, 2017.
- 이우평·강상목·이명현, “신재생에너지 확대와 에너지 저감이 GDP에 미치는 영향”, 『신재생에너지』, 제14권 제3호, 2018, pp. 54~66.

- 최현정, “탈원전·탈석탄 정책의 문제점: 그 경제성과 지속가능성은?”, 「이슈브리프」, 2018-05, 아산정책연구원, 2018.
- 현대경제연구원, “친환경 전력정책의 비용과 편익”, 「VIP RETPOR」, 17-27호, 2017.
- Apergis, N. and J. E. Payne, “Energy Consumption and Economic Growth: Evidence from the Commonwealth of Independent States,” *Energy Economics*, Vol. 31, 2009, pp. 641~647.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand in U.S. Electric Power Generation,” *International Economic Review*, Vol. 25, 1984, pp. 647~662.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric Tests for Static and Dynamic Equilibrium,” *Journal of Econometrics*, Vol. 85, 1998, pp. 33~50.
- Berndt, E. R. and C. J. Morrison, “Capacity Utilization Measures: Underlying Economic Theory and an Alternative Approach,” *American Economic Review*, Vol. 71, 1981, pp. 48~52.
- Brown, R. S. and L. R. Christensen, “Estimating Elasticities of Substitution in a Model of Partial Static Equilibrium: An Application to U.S. Agriculture 1947 to 1974,” in: E.R. Berndt and B.C. Field(eds.), *Modeling and Measuring Natural Resource Substitution*. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press, 1982.
- Chang, T., R. Gupta, R. Inglesi-Lotz, B. D. Simo-Kengne, D. Smithers, and A. B. Trembling, “Renewable Energy and Growth: Evidence from Heterogeneous Panel of G7 Countries Using Granger Causality,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, 2015, pp. 1405~1412.
- Diewert, W. E., “Duality Approaches to Microeconomic Theory,” in: K.J. Arrow and M.D. Intriligator(eds.), *Handbook of Mathematical Economics*, Vol. 2. Amsterdam: North-Holland, 1982.
- Ellis, G. M. and R. Halvorsen, “Estimation of Market Power in a Nonrenewable Resource Industry,” *Journal of Political Economy*, Vol. 110, 2002, pp. 883~899.
- Gollop, F. M. and M. J. Roberts, “Environmental Regulations and Productivity Growth: The Case of Fossil-fueled Electric Power Generation,” *Journal of Political Economy*, Vol. 91, 1983, pp. 654~674.
- Halvorsen, R. and T. R. Smith, “Substitution Possibilities for Unpriced Natural Resources: Restricted Cost function for the Canadian Metal Mining Industry,” *Review of Economics and*

- Statistics*, Vol. 68, 1986, pp. 398~405.
- Kmenta, J., *Elements of Econometrics*, NY: Macmillan, 1986.
- Lau, L. J., "A Characterization of the Normalized Restricted Profit Function," *Journal of Economic Theory*, Vol. 12, 1976, pp. 131~163.
- Lee, M., "The Effect of Sulfur Regulations on the U.S. Electric Power Industry: A Generalized Cost Approach," *Energy Economics*, Vol. 24, 2002, pp. 491~508.
- Lee, M., "Environmental Regulations and Market Power: The Case of the Korean Manufacturing Industries," *Ecological Economics*, Vol. 68, 2008, pp. 205~209.
- Lee, M., "Allocative Efficiency, Potential Cost Savings, and Power Supply Price Markdown in Korean Electric Power Sector," *Energy and Environment*, Vol. 30, 2019, pp. 617~628.
- McFadden, D., "Cost, Revenue, and Profit Functions," in: M. Fuss and D. McFadden(eds.), *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Application*, Vol. 1. Amsterdam: North-Holland, 1978.
- Sadorsky, P., "Renewable Energy Consumption and Income in Emerging Economies," *Energy Policy*, Vol. 37, 2009, pp. 4021~4028.