

국내 제조업에 대한 비가격 신재생에너지의 암묵가격, 대체가능성, 생산성 파급효과 분석[†]

이 명 현*

요약 : 본 논문에서는 국내 제조업을 대상으로 통합개념의 '비가격'의 신재생에너지 투입에 대한 기업의 최적화 행태를 분석하기 위하여 투입요소의 가격에 대한 정보없이 추정이 가능한 투입물거리함수를 추정한다. 신재생에너지의 연도별 암묵 (shadow) 가격을 도출하여 변화 패턴을 근거로 향후 신재생에너지의 잠재가격을 예측한다. 신재생에너지와 화석에너지 간 대체 가능성에 대한 측정 등 잠재 생산성에 영향을 줄 수 있는 제반 환경을 평가하고, 기술변화와 기술 효율성 변화의 Malmquist 생산성 지수를 계측하여 신재생에너지 투입의 생산성 지수에 대한 파급효과 여부 및 크기를 분석한다. 분석 결과, 1992-2012년 기간 동안 신재생에너지의 암묵가격은 매년 평균 17%씩 증가하는 것으로 나타났으며, 신재생에너지와 비재생에너지는 대체가능성이 상호 낮은 것으로 측정되었다. 신재생에너지 투입량을 1% 증가시키면 산업 생산성은 연평균 약 0.04% 감소하는 것으로 나타났다.

주제어 : 비가격 신재생에너지, 투입물거리함수, 암묵가격, Morishima 간접 대체탄력성, Malmquist 생산성 지수, 제조업

JEL 분류 : C61, L60, Q42

접수일(2015년 7월 4일), 수정일(2015년 10월 15일), 게재확정일(2015년 11월 10일)

[†] 이 논문은 인하대학교의 지원과 2015년 해양수산부 재원의 KIMST 해양에너지 융복합 인력양성 과제의 지원 및 2013년 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013S1A3A2055150).

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

An Analysis on Shadow Price, Substitutability, and Productivity Growth Effect of Non-Priced Renewable Energy in the Korean Manufacturing Industries

Myunghun Lee*

ABSTRACT : This paper analyzes the firms' optimization behavior in response to rising demand for non-priced renewable energy in the manufacturing industries by using an input distance function. The annual estimates of the shadow price of renewable energy is derived and the trend of its shadow price over time is analyzed. The degree of substitution of renewable energy for fossil-fuels is examined. The input-based Malmquist productivity index, defined as a composite of the technical efficiency and technical change measures, is measured. The contribution of renewable energy input growth to the Malmquist index is analyzed. Empirical results indicate that the shadow price of renewable energy declined at an average annual rate of 17% over the period 1992-2012. Substitutability between renewable energy and fossil-fuels was limited. On average, a 1% increase in renewable energy would decrease Malmquist index by 0.04% per year.

Keywords : Non-priced renewable energy, Input distance function, Shadow price, Indirect Morishima elasticity of substitution, Malmquist productivity growth index, Manufacturing industries

Received: July 4, 2015. Revised: October 15, 2015. Accepted: November 10, 2015.

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

I. 서론

중국, 인도 등 신흥 개발도상국의 경제성장 정책 추진과정에서 산업화, 공업화의 주 에너지원으로서 화석연료는 지속적으로 투입되어 왔으며 이로 인하여 화석에너지의 자원고갈과 대기오염의 심화, 기후변화 등의 글로벌 환경문제 등이 대두되었다. 단기적으로는 에너지기기의 효율화 작업과 에너지 수요 절감 정책과 함께 궁극적으로는 화석에너지를 대체할 수 있는 신재생에너지를 개발하고 관련 산업을 육성, 발전시키는 방안이 요구되는 시점이다. 최근 IEA는 2040년 세계 전력시장에서 태양광, 풍력, 연료전지 등 신재생에너지가 차지하는 비중이 현재의 두 배인 약 7%수준에 이를 것이며, 관련 산업은 가격경쟁력을 바탕으로 2030년까지 연평균 15%로 성장할 것으로 전망하였다. 한국의 경우 에너지의 해외의존도가 97%에 이르고 전자, 철강, 조선, 화학 등 기존 수출 주요 산업의 국제 경쟁력이 중국의 추격으로 점점 하락하는 국면에서 에너지 자립도를 높이고 한국 경제의 새로운 신 성장 동력을 모색하는 상황에서 그 필요성은 절실하다. 마침 현 정부도 기술혁신과 일자리 창출을 내용으로 하는 창조경제의 활성화를 정책기조로 삼고 그 일환으로 기후변화 대응 에너지산업을 미래 전략 산업으로 정하여 민간 주도의 신 시장 개척을 선점하기로 하였으며, 태양전지, 연료전지, 바이오에너지, 2차 전지, 전력 IT, 이산화탄소 포집처리 등을 6대 핵심기술로 선정하여 집중 육성, 지원하기로 하였다. 특히 작년 6월 이후 미국 발 셰일가스의 공급확대와 산유국의 전략적 대응으로 초래된 저유가 시대를 맞이하여 에너지 신산업에 대한 국가 차원의 적극적인 투자를 통하여 선진국에 비해 상대적으로 열세에 있는 신재생에너지 산업의 기술력 및 경쟁력을 제고시키는 기회로 활용하는 전략적 사고가 요구된다.

정부는 2030년 신재생에너지의 보급률, 보급량의 목표를 각각 11%, 33,027천 TOE로 설정하고 R&D 투자액을 지속적으로 증가시키고 있다. 현재 한국의 신재생에너지 기술 수준은 세계 최고 수준의 86%로 R&D 투자를 통하여 이를 사업화 및 산업화하는 다각적인 노력이 필요하나 전력기금에서 지원된 R&D에서 사업화 성공률이 12.1%에 그치고 있으며 이는 독일, 일본, 미국 등 신재생에너지 선진국에 비하여 매우 미흡한 수준이다. 이는 신재생에너지에 대한 초기 투자비용이 높고 신재생

에너지 확대에 따른 경제적 성과에 대한 확신이 결여되어 관련 기술의 본격적인 사업화 및 산업화 추진이 지연되고 있는 것으로 해석된다. 신재생에너지 기술사업화 과정은 많은 비용과 시간이 소요되므로 제한된 환경 하에서 R&D 투자 및 사업화의 단계적, 시기적 추진의 속도 및 규모를 조정하고 신재생에너지 산업의 효율적인 육성 및 지원이 이루어지기 위하여 신재생에너지 투입의 비용편익 분석과 신재생에너지 수급을 둘러싼 현실적 여건 및 상황에 관한 종합적인 검토 및 진단이 요구된다. 특히 정부의 신재생에너지의 다양한 보급사업 및 기술개발에 막대한 예산과 자금 투입이 예상됨에 따라 이에 대한 성과를 경제적 측면에서 측정, 평가 및 분석하는 작업이 필요하다.

구체적으로 생산과정에서의 신재생에너지 투입에 대한 기업의 최적화 행태분석으로서 기업이 현실적으로 얼마만큼 비용부담을 느끼고 있는지, 기존 화석에너지를 어느 정도 대체 가능한지, 그리고 생산성이 어느 정도 영향을 받는지 등에 대한 실증적 산업 연구가 이루어져야 한다. 신재생에너지 사용은 환경질을 향상시키는 긍정적인 효과가 있는 반면 현재의 국내 기술사업화 수준을 고려할 때 신재생에너지 생산의 높은 비용단가로 인하여 산업 생산성에는 단기적으로 부정적 영향이 불가피하겠지만 기술사업화 성공률이 선진국 수준의 정상 궤도에 진입할 경우 장기적으로는 긍정적인 국면으로 전환될 개연성이 있다.

신재생에너지 확대의 경제적 분석을 시도한 선행연구에서는 주로 시계열 분석에 기초한 경제성장 간 인과관계 또는 환경 효율성 측정에 주로 초점이 맞추어져 왔으나 기업 및 산업의 반응 행태를 분석한 미시경제학적 접근법에 의한 심층적인 연구는 상대적으로 소홀히 다루어져 왔다. 기존 문헌에서는 국가별 자료를 이용하여 신재생에너지 확대와 경제성장과의 Causality test에 대한 연구가 진행되어 왔는데 대상국가와 기간 및 분석방법에 따라, 두 변수 간 인과관계 존재 및 쌍방향관계의 유무 등 상호 엇갈리는 다양한 결과가 도출되었다(Apergis et al., 2010; Apergis and Payne, 2011, 2012; Menegak, 2011; Pao and Fu, 2013; Payne, 2009, 2011; Sadorsky, 2009; Salim and Rafiq, 2012; Sari et al., 2008). 신재생에너지와 환경오염 감축을 연계한 연구는 주로 온실가스 감축을 목표로 신재생에너지 투입 대비 환경오염 감축량을 나타내는 효율성을 측정, 비교 분석하는 형태로 이루어져 왔다

(Castillo and Linn, 2011; Cullen, 2013; Joskow, 2011; Kaffine et al., 2013; Lamont, 2008). 그 근본 배경으로는 신재생에너지의 본격적인 생산 및 상용화, 그리고 기술발전 역사가 화석에너지 및 원전에 비해 상대적으로 짧아서 관련 미시적 자료의 충분한 축적이 이루어지지 않았을 뿐 아니라, 풍력, 태양에너지, 바이오에너지, 해양에너지, 수소에너지, 연료전지 등을 지칭한 신재생에너지는 통합 개념의 시장 단가를 산출하는 것은 거의 불가능하여 시장 가격이 존재하지 않는 일종의 ‘비가격 (Non-priced)’ 투입요소이기 때문이다.

특정 산업, 기업의 생산함수의 특성을 실증적으로 분석할 때 통상적으로 쌍대성이론 (duality theory)을 이용하여 비용함수를 추정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 비용함수접근법은 생산요소의 가격을 산정하는 데 상대적으로 많은 통계자료 및 정보의 제공이 전제되어야 한다. 특히 신재생에너지 산업 및 이용의 역사가 일천하여 관련 자료가 충분히 축적이 되지 않은 국내의 경우 이에 대한 시장가격을 산출하는 것은 매우 어려운 작업이며 설사 가능하다고 하더라도 그 가격은 신재생에너지 시장상황을 제대로 반영하지 못하고 따라서 도출된 결과는 현실과 괴리되어 신뢰성을 확보할 수 없게 된다.

그러므로 본 논문에서는 투입요소의 가격에 대한 정보 등 많은 자료가 필요하지 않은 거리함수접근법을 사용하여, 신재생에너지 추가 투입 시 감소하는 다른 생산요소의 투입량으로 측정한 기회비용 개념의 신재생에너지의 암묵가격 (shadow price)에 대한 연도별 변화궤적을 추적, 분석한다.¹⁾ 또한 신재생에너지 투입에 대한 기업의 반응 행태들, 즉 신재생에너지와 기존 화석에너지 간 대체정도를 측정하고, 거리함수로부터 산정된 기술변화와 기술효율성 변화의 Malmquist 생산성 지수를 추계하여 신재생에너지 투입의 생산성 지수에 대한 파급효과 여부 및 크기를 분석한다.

본 논문의 체계는 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 실증분석을 위한 계량모형을 주제별로 제시하였고, III장에서는 분석결과의 내용과 함께 해석을 담았다.

1) 거리함수접근법의 장점으로는 두 개 이상의 산출물에 대한 분석이 가능하고, 미시경제이론에서 기본적으로 가정하고 있는 비용최소화나 이윤극대화 등 기업의 비현실적인 상황을 전제하지 않는다는 점들을 들 수 있다.

IV장은 결론부분이다.

II. 분석모형

1. 신재생에너지에 대한 암묵가격 및 대체가능성 측정

일정기간 동안 자본 (k), 노동 (l), 신재생에너지 (re), 비재생에너지 (ne) 등으로 구성된 요소 벡터 $x \in R_+^4$ 을 투입하여 최종산출물 $y \in R_+$ 을 생산하는 제조업에 대한 Shephard (1970)의 투입물거리함수를 정의하면 다음과 같다. 이때 함수값은 산출량 저감 없이 모든 투입물을 동일하게 감축시킬 수 있는 최대 비율을 측정한다 (Färe and Grosskopf, 1990; Hailu and Veeman, 2000).

$$I(x, y, t) = \sup\{\delta > 0 : x/\delta \in B(y)\}, \quad (1)$$

여기서 $B(y)$ 는 y 를 생산할 수 있는 투입요소의 집합을 나타내며 t 는 기술변화를 허용하는 시간지표이다. 그리고 $x \in B(y)$ 와 $I(y, x, t) \geq 1$ 는 상호 성립을 위한 필요충분조건이다. 거리함수는 x 에 대하여 1차 동차함수로서 비체감하며 y 에 대해서는 비체증한다.

거리함수 값의 역수, $1/I(y, x, t)$ 는 Farrell (1957)의 기술효율성을 측정할 수 있는데 거리함수 값이 1일 때 기술적으로 효율적인 생산이 이루어지고 있음을 뜻한다. 만약 생산이 등량곡선 위에서 이루어지지 않는다면 투입물거리함수 값은 1보다 크게 되고, 따라서 생산 효율성은 100%에 못 미치게 된다.

투입물거리함수를 제약조건으로 비용최소화를 전제하지 않고 Atkinson and Halvorsen (1984) 형태의 암묵 (shadow) 비용함수를 도출하면 다음과 같다.

$$C^s(y, w^s, t) = \min_x \{w^s x : I(y, x, t) \geq 1\}, \quad (2)$$

여기서 $w^s \in R_+^4$ 은 투입요소의 암묵가격 벡터이다.

Färe and Grosskopf (1990)를 따라서 식 (2)로부터 Shephard 투입물거리함수, $I(y, x, t) = \min_{w^s} \{w^s x : C^s(y, w^s, t) \geq 1\}$ 을 도출한 후 Shephard lemma를 적용하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\nabla_x I(y, x, t) = w^{s*}(y, x, t), \quad (3)$$

여기서 $w^{s*} \in R_+^4$ 은 암묵비용을 최소화시키는 투입물 가격의 벡터이다. 100% 생산 효율성을 상징하는 $I(y, x, t) = 1$ 을 제약조건으로 암묵비용최소화의 1차 필요조건식을 도출하면 다음과 같다.

$$w^s = \lambda(y, x, t) \nabla_x I(y, x, t), \quad (4)$$

여기서 λ 는 Lagrangian 승수이다. 식 (3)과 Shephard (1970), Jacobsen (1972)이 입증한 최적상태의 관계식, $\lambda(y, x, t) = C^s(y, w^s, t)$ 을 대입하면 식 (4)는 다음과 같이 정리된다.

$$w^s = C^s(y, w^s, t) w^{s*}(y, x, t). \quad (5)$$

노동 (l)의 암묵가격이 시장가격과 같다고 가정하고 다음과 같이 신재생에너지 (re)의 암묵가격을 계산할 수 있다.

$$w_{re}^s = w_l \frac{\partial I(y, x, t) / \partial re}{\partial I(y, x, t) / \partial l}, \quad (6)$$

이는 신재생에너지 한 단위 추가 투입에 따른 기회비용으로서 줄어드는 노동 투입량으로 측정한다.

거리함수는 생산기술이 내포된 투입요소 집합 $B(y)$ 의 경계선을 결정하기 때문에

거리함수를 통하여 $B(y)$ 의 표면과 경계선을 따라서 투입요소 사이의 대체가능 정도를 나타내는 굴곡의 특성을 파악할 수 있다. Blackorby and Russell (1989)과 Grosskopf et al. (1995)를 따라서 식 (1)의 투입물거리함수로부터 다음과 같이 투입요소 x_i 와 x_j 간 Morishima 간접 대체탄력성을 계산할 수 있다.

$$M_{ij} = x_i I_{ij}(y, x, t) / I_j(y, x, t) - x_i I_{ii}(y, x, t) / I_i(y, x, t), \quad i, j = k, l, re, ne, \quad (7)$$

여기서 거리함수의 아래첨자 표기는 각 투입요소에 대한 편미분을 나타낸다. M_{ij} 는 x_i 와 x_j 간 대체에 필요한 투입요소 가격의 상대적 변화 정도를 측정한다. M_{ij} 의 절댓값이 작으면 대체관계가 성립할 가능성이 높으며, 클수록 대체가능성은 제한됨을 의미한다.

식 (6)과 (7)을 각각 계산하는 데 있어서 Aigner and Chu (1968)과 Färe et al. (1993)을 따라서 선형계획 (linear programming) 기법을 사용하여 다음의 초월대수 투입물거리함수의 계수들을 구한다.

$$\begin{aligned} \ln I(y, x, t) = & \alpha_0 + \alpha_t t + \sum_{i=1}^4 \alpha_i \ln x_i + \alpha_y \ln y + 0.5 \sum_{i=1}^4 \sum_{i'=1}^4 \gamma_{ii'} \ln x_i \ln x_{i'} \quad (8) \\ & + 0.5 \gamma_{yy} (\ln y)^2 + 0.5 \gamma_{tt} t^2 + \sum_{i=1}^4 \gamma_{iy} \ln x_i \ln y \\ & + \sum_{i=1}^4 \gamma_{it} (\ln x_i) t + \gamma_{yt} (\ln y) t, \quad i, i' = k, l, re, ne. \end{aligned}$$

선형계획을 설정하는 데 있어서 목적함수는 거리함수 값으로 측정된 관찰치와 생산이 가장 효율적인 지점 간 차이이며 다음의 제약조건들 하에서 최소화를 추구한다.

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_j [\ln I(y^j, x^j, t^j) - \ln 1] & (9) \\
 & \text{s.t. } \ln I(y^j, x^j, t^j) \geq 0, \\
 & \quad \partial \ln I(y^j, x^j, t^j) / \partial \ln x^j \geq 0, \quad \partial \ln I(y^j, x^j, t^j) / \partial \ln y^j \leq 0, \\
 & \quad \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1, \quad \sum_{i'=1}^4 \alpha_{i'} = \sum_i \gamma_{iy} = 0, \\
 & \quad \alpha_{i'} = \alpha_{i'}
 \end{aligned}$$

여기서 j 는 관찰치를 표시한다. 제약조건으로 제시한 첫 번째 부등식은 투입물거리 함수의 속성, 두 번째 부등식은 투입물거리함수의 투입물과 산출물에 대한 단조성, 세 번째와 네 번째 등식은 투입물에 대한 거리함수의 동차성과 계수 간 대칭성을 각각 나타낸다.

2. 생산성 파급효과

투입물 기반의 기술변화율 측정은 산출물이 고정인 상황에서 시간에 따른 투입물의 비례적 감소율로 정의된다. 본 연구에서는 Hailu and Veeman (2000)을 따라서 거리함수의 시간에 대한 편도함수 값으로 측정한다. 즉, $TC_x(y, x, t) = \partial I(y, x, t) / \partial t$. 앞에서 서술한 것처럼 Farrell type의 기술효율성은 $TE_x(y, x, t) = 1 / I(y, x, t)$ 이다.

Caves et al. (1982)은 기술변화와 기술효율성의 변화에 의한 생산성 증가를 측정하는 데 용이한 생산성 개념을 제안하였다. Hailu and Veeman (2000)을 따라서 t 와 $t+1$ 시점에서의 생산성을 비교함으로써 다음과 같이 투입물 기반의 Malmquist 생산성 지수를 정의할 수 있다.

$$MQ(x^{t+1}, x^t, y^{t+1}, y^t) = \left[\frac{I^t(y^t, x^t)}{I^t(y^{t+1}, x^{t+1})} \cdot \frac{I^{t+1}(y^t, x^t)}{I^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

식 (10)의 Malmquist 지수는 다음과 같이 기술효율성과 기술변화의 요인으로 분해할 수 있다.

$$MQ(x^{t+1}, x^t, y^{t+1}, y^t) = \frac{I^t(y^t, x^t)}{I^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})} \left[\frac{I^{t+1}(y^{t+1}, x^{t+1})}{I^t(y^{t+1}, x^{t+1})} \cdot \frac{I^{t+1}(y^t, x^t)}{I^t(y^t, x^t)} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

식 (11)의 Malmquist 생산성 지수 증가율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\ln MQ(x^{t+1}, x^t, y^{t+1}, y^t) = [\ln I(y^t, x^t, t) - \ln I(y^{t+1}, x^{t+1}, t+1)] + [TC_x(y^{t+1}, x^{t+1}, t+1) + TC_x(y^t, x^t, t)]/2. \quad (12)$$

신재생에너지 공급확대가 생산성에 미치는 파급효과 여부, 속도 및 정도를 측정하기 위하여 다음과 같이 신재생에너지 투입량에 대한 2차 방정식 형태의 회귀분석을 실시한다.

$$MQ(x^{t+1}, x^t, y^{t+1}, y^t) = \alpha_0 + \alpha_{re} re_t + \alpha_{re^2} (re)_t^2 + \epsilon_t. \quad (13)$$

III. 분석 결과

본 연구의 실증분석을 위하여 국내 제조업을 대상으로 1992-2012년 기간의 자료를 사용한다. 산출물량 (y)은 통계청의 ‘광공업통계조사보고서’ (이하, ‘광공업’)에 나타난 명목생산액을 생산자물가지수로 나눈 실질생산액을 사용한다. 자본투입량 (k)은 ‘광공업’의 유형자산 연말잔액을 생산자물가지수로 나눈 실질가치를 사용하고, 노동투입량 (l)은 ‘광공업’의 월평균종사자수로 측정한다. 노동가격 (w_l)은 ‘광공업’의 연간급여액을 월평균종사자수로 나누어 구한다. 신재생에너지투입량 (re)은 에너지경제연구원의 ‘에너지통계연보’에 제시한 ‘1000 toe’ 단위로 측정된 신재생에너지 사용량을 사용하고, 비재생에너지투입량 (ne)은 석탄과 석유사용량의 합계이다. <표 1>에서 변수별 자료에 대한 기초통계를 요약하였다. 식 (8)에서 대수형태의 변수는 중간연도 2002년에서 1로, 시간 지표의 경우 0이 되도록 표준화하였다.

〈표 1〉 자료 통계

변수	단위	평균	표준편차	최대	최소
y	10조원	830.49	323.06	1392.2	368.82
k	10조원	320.34	72.122	444.90	176.88
l	백만명	2.5576	0.2428	2.9519	2.1901
re	백만 toe	2.4939	1.5361	5.8000	0.4820
ne	백만 toe	62.596	11.800	83.619	39.642
w_l	백만원/명	21.902	8.5695	35.811	9.0079

식 (9)와 같이 초월대수 투입물거리함수를 선형계획기법으로 추정하여 얻은 계수 값을 <표 2>에 제시하였다. 이들 계수 값을 식 (8)에 대입하여 투입물거리함수 값의 역수인 Farrell 기술효율성을 측정한 결과 연도별로 최대 100%에서 최소 92.7% (2012년)의 범위를 나타냈으며, 평균 99.3%를 기록하였다.

〈표 2〉 추정결과

계수	추정값	계수	추정값
α_0	0.0076	γ_{rere}	-0.8490
α_y	-0.1931	γ_{rene}	1.0777
α_k	0.2731	γ_{nene}	0.3246
α_l	0.1784	γ_{ky}	-1.3504
α_{re}	0.1399	γ_{ly}	0.0464
α_{ne}	0.4086	γ_{rey}	0.0529
α_t	-0.0090	γ_{ney}	1.2511
γ_{kk}	1.2814	γ_{kt}	0.0798
γ_{kl}	-0.1809	γ_{lt}	0.0129
γ_{kre}	0.1772	γ_{ret}	0.0743
γ_{kne}	-1.2777	γ_{net}	-0.1669
γ_{ll}	0.7113	γ_{yy}	2.5952
γ_{lre}	-0.4059	γ_{yt}	-0.1649
γ_{lne}	-0.1245	γ_{tt}	0.0019

식 (6)을 이용하여 추정한 연도별 신재생에너지 암묵가격 (w_{re}^s)을 <표 3>에 제시하였다. 표본기간 동안 연평균 36천원/toe으로서 1993년에 최저 3천원/toe에서 2011년 최대 149천원/toe의 범위를 기록하였으며, 2000년과 2001년에 일시 주춤한 양상을 보였으나 전반적으로 상승추세를 나타냈다. 기후변화에 대응한 온실가스 감축과

<표 3> 연도별 신재생에너지 및 비재생에너지에 대한 추정 암묵가격의 변화 추이 비교
(단위: 천원/toe)

연도	w_{re}^s	w_{ne}^s	w_{re}^s/w_{ne}^s
1992	- ^a	0.35	-
1993	3.17	- ^b	-
1994	8.66	- ^b	-
1995	8.63	2.63	3.29
1996	8.21	4.67	1.76
1997	15.69	7.29	2.15
1998	15.72	- ^b	-
1999	16.63	7.54	2.21
2000	10.70	27.21	0.39
2001	9.00	42.34	0.21
2002	16.64	48.60	0.34
2003	23.31	51.69	0.45
2004	- ^a	181.04	-
2005	18.63	100.04	0.19
2006	29.47	96.36	0.31
2007	47.14	103.92	0.45
2008	73.09	126.63	0.58
2009	92.91	17.61	5.27
2010	113.37	3.16	35.83
2011	149.23	- ^b	-
2012	- ^c	- ^c	-
평균	36.68	51.32	-

^{a(b,c)} 신재생에너지 (비재생에너지, 노동)의 한계생산이 0에 근접함에 따라 해당 에너지의 암묵가격을 산출하지 못하였음.

화석연료 의존도 축소의 국가 장기 정책 기조 하에서 산업 현장에서의 신재생에너지 상용화 기술수준의 개선이나 기존 화석연료에서 환경 친화적인 생산 공정으로의 전환이 단기간에 용이하지 않은 현실적 상황을 고려한다면 신재생에너지 생산 및 투입 비중이 점차 확대될수록 기업의 비용부담은 상대적으로 늘어날 수밖에 없다. 특히 2006년 이후 상승속도는 이전과 비교하여 상대적으로 가파른 모습이다. w_{re}^s 의 연평균 증가율을 구하기 위하여 w_{re}^s 의 로그값을 시간지표 t 에 대하여 OLS 회귀 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\ln(w_{re}^s)_t = 3.0821 + 0.1691 t + \epsilon_t, \\ (0.0940) \quad (0.0168) \quad R^2 = 0.86,$$

여기서 괄호 안의 숫자는 표준오차이다. 1993-2011 기간에 걸쳐 w_{re}^s 는 매년 약 17%씩 증가하는 것으로 측정되었다.

식 (6)을 이용하여 동일한 방법으로 비재생에너지의 암묵가격 (w_{ne}^s)을 추정하여 두 에너지의 암묵가격 변화추이를 비교하였다(<표 3> 참조). w_{ne}^s 의 연도별 추이는 1992년 0.35천원/toe에서 출발하여 2004년 181천원/toe로 급상승할 때까지 증가세를 이어갔으나 이후 하락과 재반등을 거쳐 2008년까지 상승하였다. 2009년부터는 급격히 하강하는 양상인데 이는 2008년 글로벌 금융위기로 인한 유가 폭락이 산업의 비재생에너지 투입비용을 대폭 떨어뜨린 결과로 볼 수 있다. 표본기간 동안 비재생에너지 암묵가격은 평균 51천원/toe로 측정되었다.

<표 3>에서 보는 바와 같이 1999년까지는 w_{re}^s 가 w_{ne}^s 보다 상대적으로 높았으나 그 이후부터 2008년까지는 역전되는 상황이 전개되었다. 이는 신재생에너지 점유율이 미약한 표본 기간 초반 투입 비용이 기존 화석연료보다 비싼 흐름을 이어가다가 2000년대 세계경기의 호황으로 유가상승이 대세국면에 접어들면서 투입 비용단가에서 상대적으로 신재생에너지의 비교우위가 확보된 것으로 해석할 수 있다. 글로벌 금융위기 이후 유가 폭락의 영향으로 2009년부터 두 에너지의 암묵가격 비율 (w_{re}^s/w_{ne}^s)은 급등하였다. 전체 표본기간 동안 비재생에너지의 평균 암묵가격이 신

재생에너지보다 상대적으로 높았는데 이는 신재생에너지 사용의 실질비용이 전반적으로 더 낮았다고 보기보다는 2000년대 들어서 유가 상승 추세가 글로벌 금융위기 이전까지 비교적 장기간 유지되어 온 사실에 주로 기인한 것으로 판단된다.

〈표 4〉 Morishima 간접 대체탄력성 측정 결과(중간연도 2002년에서 측정)

대체탄력성	측정값	대체탄력성	측정값
M_{kl}	-4.7057	M_{lre}	-5.8883
M_{lk}	-3.6490	M_{rel}	4.7950
M_{kre}	-2.4245	M_{lne}	-3.2913
M_{rek}	7.7187	M_{nel}	-0.4922
M_{kne}	-6.8189	M_{rene}	9.7073
M_{nek}	-4.4725	M_{nere}	7.9099

식 (7)을 이용하여 투입요소 간 상대적 대체 용이성을 중간연도 2002년에서 측정 한 결과 노동과 비재생에너지 사이가 가장 대체가능성이 높은 것으로 나타났다. 신재생에너지와 비재생에너지는 서로 간 대체가 용이하지 못한 것으로 조사되었는데, 이는 정부의 신재생에너지 산업 육성 정책으로 신재생에너지 생산 및 기술 수준, 사용 기반 여건 등이 향상되고 있지만은 산업 현장에서의 화석연료에 의존하는 기존 생산 공정을 고려할 때 단기간에 신재생에너지의 투입을 확대하는 데 현실적 한계가 있음을 시사한다. 두 에너지 사이에서는 비재생에너지에 대한 신재생에너지의 대체가능성이 반대 방향보다 약간 높게 나타났다. 자본이 신재생에너지를 대체하는 데는 한계가 있으며, 오히려 신재생에너지가 자본을 용이하게 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 <표 1>에서 알 수 있듯이 비록 측정 단위는 다르지만 제조업 생산공정에서 투입된 생산요소의 규모에서 자본이 신재생에너지를 압도하는 표본기간 동안, 정부의 신재생에너지 보급증대 정책기조에 따라 자본 투자를 줄이고 신재생에너지 투입을 확대할 가능성이 더 높은 현실적 상황을 반영한 결과로 볼 수 있다.2) 에너지와 자본 간 대체가능성을 에너지 유형별로 비교하면, 신재생에너지보다

2) 신재생에너지를 생산과정에 투입하는 데 있어서 천연자원으로부터 신재생에너지를 얻는 별도의 시설 및 공정 등이 필요하므로 신재생에너지 투입을 확대하는 과정에서 기존 생산 자본에 대한 투자 감소가 불가피하다.

비재생에너지에 대한 자본의 대체가능성이 더 높은 반면, 자본에 대한 대체가능성은 신재생에너지가 비재생에너지보다 더 높은 것으로 측정되었다.

신재생에너지 투입확대가 산업 생산성에 미치는 파급효과를 분석하기 위하여 식 (13)의 회귀방정식을 추정한 결과, 다음과 같이 도출하였다.

$$MQ_t = 0.9703 + 0.0578 re_t - 0.0352(re_t)^2 + \epsilon_t, \quad R^2 = 0.51$$

(0.0160) (0.0349) (0.0160)

여기서 괄호 안의 숫자는 표준오차이다. 신재생에너지의 투입 확대가 산업 생산성에 미치는 파급효과를 분석하기 위하여 탄력성 형태로 $(\partial MQ_t / \partial re_t) \times (re_t / MQ_t)$ 을 측정된 결과 표본기간 동안 생산성지수에 대한 신재생에너지의 탄력성은 연평균 -0.038로 나타났다. 즉 신재생에너지 투입량을 1% 증가시키면 생산성은 약 0.04% 감소함을 의미한다.

정부의 신재생에너지 산업 육성과 비중 확대 정책으로 천연자원에 의존하여 2차 에너지로 전환하는 전력산업에서는 신재생에너지 발전 기술 및 부품소재 개발 등 상당한 성과를 거둔 반면 제조업의 경우 신재생에너지 투입이 점차 늘어나고 있는 추세이지만 표본 기간 동안 국내 신재생에너지의 상용화 수준을 고려할 때 단기간에 기존 화석에너지 의존적인 생산공정에서 친환경적으로 전환이 용이하지 않은 상황이다. 따라서 기업의 실제 비용 부담은 증가하게 되고 이는 산업의 생산성 하락으로 이어지게 된다. 다만 고무적인 발견으로서 신재생에너지 투입에 따른 생산성 감소가 매우 비탄력적으로 나타남으로써 향후 지속적인 정부의 지원과 산업의 친환경 기술 혁신이 이루어질 경우 생산성 감소율이 둔화되는 시점을 기점으로 점차 감소율을 줄이면서 급기야 생산성이 상승하는 국면으로 반전될 수 있음을 예측할 수 있다.

IV. 결론

신재생에너지에 대한 수요를 통한 사업화 및 산업화의 전제 조건으로서 지구 환경 및 생태계 보존의 필요성에 대한 전 인류적인 공동 인식과 실행이 수반되어야 하

지만 환경규제에 대한 반대급부로서 일정기간 동안 경제성장의 둔화, 산업의 생산성 감소 등의 파급효과는 불가피하다. 특히 화석에너지 자원 채굴기술의 발전으로 인한 매장량 증가, 최근 셰일가스의 개발 등으로 화석에너지 가격의 하향 안정화 추세는 신재생에너지의 개발 및 확대에 불리한 환경을 조성하고 있다. 신 성장동력 산업의 발굴 필요성, 일본 원전 사고 이후 원전 비중 확대의 어려움, 높은 에너지 대외 의존도 부담을 낮춰야 하는 한국의 실정을 감안하면 신재생에너지 산업의 육성과 효율적인 투자를 위한 정책개발 및 연구는 시급성을 요하는 현안이라 할 수 있다. 비용효과적인 신재생에너지 기술개발, 기술사업화 및 보급사업을 추진하는 데 있어서 신재생에너지 수급의 현실적 여건 및 상황에 관한 진단과 평가가 선행되어야 한다.

본 논문은 산업부문에서의 신재생에너지 수요 측면을 분석하기 위하여 기업의 최적화 행태분석을 통한 신재생에너지 투입의 경제적 파급효과를 측정하는 연구로서, 1992-2012년 기간 동안 국내 제조업을 대상으로 거리함수접근법을 사용하여 ‘비가격’ 신재생에너지에 대한 암묵가격의 추정, 화석에너지와의 대체 가능성, 생산성 파급효과 등을 분석하였다. 표본기간 동안 신재생에너지의 암묵가격은 전반적으로 상승하는 추세로서 매년 평균 17%씩 증가하는 것으로 나타났으며, 신재생에너지 사용이 점증적으로 확대되는 상황에서 생산 기술혁신에 의한 투입비용 단가 하락속도가 상대적으로 더디게 이루어진 것으로 해석할 수 있다. 비재생에너지와 비교하여 2000년 들어 글로벌 금융위기 이전까지 신재생에너지의 암묵가격이 상대적으로 낮았는데, 이는 세계 경기 호황으로 유가가 급등하여 화석연료를 조달하는 데 더 많은 비용이 들어갔기 때문이다. 신재생에너지와 비재생에너지는 대체가능성이 서로 낮은 것으로 측정된 바, 단기간에 기존 화석연료 사용의 생산공정에 대한 의존도를 줄이고 신재생에너지 투입을 확대하는 데는 한계가 있음을 의미한다.

1992-2012년 기간 동안 제조업 부문에서 신재생에너지 투입량이 1% 증가하면 생산성은 연평균 약 0.04% 감소하는 것으로 나타났다. 표본기간 동안 국내 신재생에너지의 생산 기술의 산업화 수준이 환경 선진국에 비해 매우 저조한 상황임을 고려할 때 친환경적인 생산 공정의 도입 및 설비 시설에 대한 투자는 기업의 지속적인 비용 증가와 생산성 하락을 초래한 것이다. 하지만 신재생에너지 투입에 따른 생산성 감소가 매우 비탄력적으로 나타남에 따라 향후 생산성 상승 반전 여부는 정부의

신재생에너지 산업의 육성, 지원 정책과 친환경 기술혁신으로 신재생에너지 투입 비용 단가를 감소시키는 데 얼마나 성과를 내느냐에 달려있다고 할 수 있다.

[References]

1. Aigner, D. J., and S. F. Chu, "On Estimating the Industry Production Function," *American Economic Review*, Vol. 58, 1968, pp. 826~839.
2. Apergis, N., J. E. Payne, K. Menyah, and Y. Wolde-Rufael, "On the Causal Dynamics between Emissions, Nuclear Energy, Renewable Energy, and Economic Growth," *Ecological Economics*, Vol. 69, 2010, pp. 2255~2260.
3. Apergis, N., and J. E. Payne, "The Renewable Energy Consumption-Growth Nexus in Central America," *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, pp. 343~347.
4. Apergis, N., and J. E. Payne, "Renewable and Non-Renewable Energy Consumption-Growth Nexus: Evidence from a Panel Error Correction Model," *Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 733~738.
5. Atkinson, S. E., and R. Halvorsen, "Parametric Efficiency Tests, Economies of Scale, and Input Demand in US Electric Power Generation," *International Economic Review*, Vol. 25, 1984, pp. 647~662.
6. Blackorby, C., and R. R. Russell, "Will the Real Elasticity of Substitution Please Stand Up? (A Comparison of the Allen/Uzawa and Morishima Elasticities)," *American Economic Review*, Vol. 79, 1989, pp. 882~888.
7. Castillo, A. and J. Linn, "Incentives of Carbon Dioxide Regulation for Investment in Low-Carbon Electricity Technologies in Texas," *Energy Policy*, Vol. 39, 2011, pp. 1831~1844.
8. Christensen, L. R., and D. W. Jorgenson, "The Measurement of U.S. Real Capital Input, 1929-1967," *Review of Income and Wealth*, Vol. 15, 1969, pp. 293~320.
9. Cullen, J., "Measuring the Environmental Benefits of Wind-Generated Electricity," *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 5, 2013, pp. 107~133.

10. Färe, R. and S. Grosskopf, "A Distance Function Approach to Price Efficiency," *Journal of Public Economics*, Vol. 43, 1990, pp. 123~131.
11. Färe, R., S. Grosskopf, C. A. K. Lovell, and S. Yaisawarng, "Derivation of Shadow Prices for Undesirable Outputs: A Distance Function Approach," *Review of Economics and Statistics*, Vol. 75, 1993, pp. 374~380.
12. Farrell, M. J., "The Measurement of Productive Efficiency," *Journal of Royal Statistical Society*, Vol. 120, 1957, pp. 253~290.
13. Grosskopf, S., K. Hayes, and J. Hirschberg, "Fiscal Stress and Production of Public Safety: A Distance Function Approach," *Journal of Public Economics*, Vol. 57, 1995, pp. 277~296.
14. Hailu, A., and T. S. Veeman, "Environmentally Sensitive Productivity Analysis of the Canadian Pulp and Paper Industry, 1959-1994: An Input Distance Function Approach," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 40, 2000, pp. 251~274.
15. Jacobsen, S. E., "On Shephard's Duality Theorem," *Journal of Economic Theory*, Vol. 4, 1972, pp. 458~464.
16. Joskow, P. L., "Comparing the Costs of Intermittent and Dispatchable Electricity Generating Technologies," *American Economic Review: Papers and Proceedings*, Vol. 101, 2011, pp. 238~241.
17. Kaffine, D., T. Brannin, J. McBee, and J. Lieskovsky., "Emissions Savings from Wind Power Generation in Texas," *The Energy Journal*, Vol. 34, 2013, pp. 155~176.
18. Lamont, A. D., "Assessing the Long-Term System Value of Intermittent Electric Generation Technologies," *Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 1208~1231.
19. Menegak, A. N., "Growth and Renewable Energy in Europe: A Random Effect Model with Evidence for Neutrality Hypothesis," *Energy Economics*, Vol. 33, 2011, pp. 257~263.
20. Pao, H. T., and H. C. Fu, "Renewable Energy, Non-Renewable Energy and Economic Growth in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, 2013, pp. 381~392.
21. Payne, J. E., "On the Dynamics of Energy Consumption and Output in the US," *Applied Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 575~577.

22. Payne, J. E., "On Biomass Energy Consumption and Real Output in the US," *Energy Sources Part B: Economics Planning and Policy*, Vol. 6, 2011, pp. 47~52.
23. Sadorsky, P., "Renewable Energy Consumption and Income in Emerging Economies," *Energy Policy*, Vol. 37, 2009, pp. 4021~4028.
24. Salim, R. A., and S. Rafiq, "Why Do Some Emerging Economies Proactively Accelerate the Adoption of Renewable Energy?," *Energy Economics*, Vol. 34, 2012, pp. 1051~1057.
25. Sari, R., B. T. Ewing, and U. Soytas, "The Relationship between Disaggregate Energy Consumption and Industrial Production in the United States: An ARDL Approach," *Energy Economics*, Vol. 30, 2008, pp. 2302~2313.
26. Shephard, R. W., *Theory of Cost and Production Functions*, Princeton: Princeton University Press, 1970.