Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 40, No. 4, pp. 358-365, August 2014.
ISSN 1225-0988 | EISSN 2234-6457
http://dx.doi.org/10.7232/JKIIE.2014.40.4.358
© 2014 KIIE
<Original Research Paper>

DEA를 이용한 국내 신재생에너지 보급 및 기술개발 투자의 효율성 분석

김홍희 · 이덕주† · 김경택 · 박성준

경희대학교 산업경영공학과

Measuring the Efficiency of Investment in the Deployment and Technology Development of Renewable Energy in Korea Using the DEA

Hong-Hee Kim · Deok-Joo Lee · Kyung-Taek Kim · Sung-Joon Park

Department of Industrial and Management Systems Engineering, Kyung Hee University

The purpose of this paper is to analyze the efficiency of government investment in the deployment and technological development of three technological areas - wind power, photovoltaic and fuel cell - of renewable energy in Korea using the DEA (data envelopment analysis). The efficiencies of government investment in renewable energies are measured and compared among three kinds of technologies using the actual data during 2007~2009. In the present DEA model, R&D investment and government subsidies for renewable energy usage promotion are selected as input variables, and the number of patents, supply level, and the production cost as output variable. As a result, it is found that the wind power is the most efficient renewable energy in Korea in the perspective of the efficiency of government investment.

Keywords: Renewable Energy, Efficiency, Investment, Data Envelopment Analysis

1. 서 론

신재생에너지는 기후변화협약 발효 및 고유가 시대에 대응할 수 있는 핵심대안으로 자리 잡고 있으며, 화석에너지에 비해 친환경적이고 지속가능한 에너지라는 장점을 가지고 있다. 또한, 우리나라의 경우 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있어 에너지 자립도를 높이기 위한 신재생에너지 활성화의 필요성이 날로 절실해지고 있다.

신재생에너지의 체계적인 육성을 위해 우리나라에서는 기술개발과 보급에 관련된 국가계획을 10년 단위로 수립하고 있다. 제 1차 기본계획(1997~2006)은 신재생에너지 기술개발 위주로 수립되었으며, 「제2차 신 · 재생에너지 기술개발 및 이용 · 보급 기본계획(2003~2012)」은 기술개발과 보급을 포함하고 있다. 이어서 수립된 「제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용 · 보급 계획(2009~2030)」에서는 2030년까지 1차 에너지 중 신재생에너지 공급비율을 11%까지 확대하겠다는 목표를 제시하였다. 특히 3차 계획에서는 2차 계획의 문제점으로 지적받았던 예산 확보 미흡과 보급위주의 정책추진을 극복하기 위해 기술개발과 보급의 연계를 위한 관련 목표를 새롭게 수립하였다.

신재생에너지 관련 예산은 2010년 8,546억 원으로 2003년 대비 7.5배 증가하였으며, 향후 신재생에너지 관련 투자는 3차 계획에서 제시된 목표 달성을 위해서 지속적으로 이루어질 것으로 보인다. 이때 현 시점에서 신재생에너지 정책운영의 가장 큰 이슈는 기술개발과 보급에 대한 정책의 '효율성'이라고

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012R1A1A2007445).
† 연락저자 : 이덕주 교수, 446-701, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 경희대학교 산업경영공학과, Tel : 031-201-2911, Fax : 031-203-4004, E-mail : ldj@khu.ac.kr
2013년 7월 4일 접수; 2014년 1월 23일 수정본 접수; 2014년 2월 20일 게재 확정.

할 수 있다(Kim, 2007). 특히 신재생에너지의 경우 다양한 종류의 에너지원이 존재하기 때문에 우리나라의 현실에 맞는 효율적인 신재생에너지 투자가 이루어지기 위해서는 반드시 에너지원별 효율성 분석이 선행되어야 한다. 또한, 기술개발과 보급의 연계라는 측면에서 효율성 분석을 위해서는 신재생에너지 기술개발사업과 신재생에너지 보급사업이 별개로 이루어지기 보다는 하나의 투자시스템 관점에서 평가가 함께 이루어져야 한다(Park *et al*., 2012). 그러나 지금까지 신재생에너지와 관련된 투자의 효율성을 분석하는 연구들은 기술개발사업 또는 보급사업을 개별적으로 고려하고 있는 것으로 보인다(Park *et al*., 2009; Ha, 2009; Lee, 2010; Lee *et al*., 2010; Jin and Kim, 2011; Jin and Hwang, 2011; Kim, 2012).

신재생에너지의 효율성 분석이 신재생에너지 기술개발과 보급사업과 관련한 정책 수립 및 수행에 중요한 역할을 할 것이라는 것은 매우 자명한 사실이다. 따라서 신재생에너지 투자에 대한 효율성을 체계적이고 과학적으로 분석할 필요가 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 기존의 연구들은 투자의 효율성을 분석하기 위해 전문가의 판단에 의지하거나, 단순한 정성적 평가에 머무르고 있는 실정이다(Kim, 2012). 체계적으로 국내 신재생에너지에 대한 투자시스템을 정의하고, 자료포락분석법과 같은 과학적인 방법론을 이용하여 투자 효율성을 분석한 연구는 매우 드물다.

본 연구는 신재생에너지를 둘러싼 환경 변화 속에서 우리나라의 신재생에너지 관련 투자시스템을 기술개발사업과 보급사업을 포괄하여 정의하고, 이를 기반으로 에너지원별 투자의 효율성을 분석하는 것을 그 목적으로 한다. 특히, 신재생에너지와 관련된 정량적 데이터를 이용하여 에너지원별 효율성을 분석하고자 하였으며, 효율성을 분석하기 위한 방법으로는 자료포락분석(data envelopment analysis, 이하 DEA)을 이용하였다.

DEA는 효율성을 정량적으로 분석하기 위한 비모수적 방법론으로 복수의 투입요소와 복수의 산출요소를 특징으로 하는 의사결정단위(decision making unit, 이하 DMU)의 상대적 효율성을 분석한다. DEA는 DMU의 상대적 효율성을 비모수적으로 평가하기 때문에 함수형태로 정의되지 않으며, 투입 및 산출변수가 단일척도로 구성되지 않아도 효율성을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 효율성 분석을 위한 실증연구에 매우 활발하게 이용되고 있다. 국내의 경우 다양한 분야에서 DEA를 이용한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Jeon *et al*., 2011; Kim *et al*., 2012; Koo *et al*., 2013; Chun *et al*., 2013; Park *et al*., 2014; Sim *et al*., 2012). 특히, 에너지와 환경 분야에서도 최근 DEA를 이용한 분석이 활발히 이루어지고 있다(Zhou, 2008). 이 중 에너지와 관련된 연구를 중심으로 살펴보면, 이는 크게 국가 또는 지역별로 DMU가 선정되거나(Hu and Wang, 2006; Chien and Hu, 2007; Honma and Hu, 2008), 특정 에너지원 분야의 발전설비를 DMU로 선정하는 분석(Barros and Peypoch, 2007; Barros and Peypoch, 2008; Barros, 2008; Nakano and Managi, 2008), 에너지원 또는 에너지 기술을 DMU로 선정하는 분석(San Crisóbal, 2011)으로 구분된다. 먼저 국가 또는 지역별로 DMU가 선정된 경우는 대부분 해당 지역의 에너지 효율성을 분석하는 것을 목적으로 하고 있다. Honma and Hu (2008)의 연구에서는 1993년부터 2003년까지 일본의 47개 현을 대상으로 3개의 투입요소(노동 고용, 개인, 공공 자본 스톡)와 1개의 산출요소(GDP)가 선정되어 분석되었으며, Hu and Wang(2006)의 연구도 이와 유사하게 중국 지역의 에너지 효율성을 분석하고 있다. Chien and Hu(2007)의 연구는 45개국을 대상으로 OECD 가입국(26개국)과 비가입국(19개국)을 구분하여 2001~2002년 동안 신재생에너지 기술적 효율성(technical efficiency)을 분석한 바 있다. 해당 연구에서는 효율성 분석을 위한 투입요소로 노동(labor), 자본스톡(capital stock), 에너지 소비(energy consumption)의 3가지 요소를 가정하였으며, 산출요소는 GDP를 단일요소로 가정하였다. 특정 에너지원 분야의 발전설비를 DMU로 선정한 Barros and Peypoch(2007, 2008)의 경우 포르투갈의 수력발전소, 열전발전소의 효율성을 비교하였으며, Nakano and Managi(2008)의 경우 일본의 9개 화력발전기업의 효율성을 분석하였다. 이와는 달리 San Crisóbal(2011)의 연구는 전통적인 DEA와 MCDEA(multiple criteria data envelopment analysis)를 이용하여 풍력, 수력, 태양열, 바이오매스와 관련된 13개 신재생에너지 기술의 효율성을 분석하였다.

우리나라의 경우에는 에너지 분야와 관련하여 Lee(1999), Kim *et al*.(2000), Lee(2006), Ko *et al*.(2008) 등의 연구들이 전력회사의 효율성을 분석하고 있다. 그러나 에너지 분야에 DEA가 활용된 국내연구는 많지 않은 것으로 보인다. Kim(2010)과 Ku *et al*.(2011)의 연구가 예외적으로 시도된 바 있다. Kim(2010)의 경우 다양한 방법론을 이용하여 국가연구개발사업의 투자효율성을 분석하고 이에 대한 예산조정시스템 개선에 대해서 연구하고 있는데, 세부방법론 중 하나로 DEA를 이용하여 순수연구개발 유형 사업의 누적투자비와 논문 건수, 특허 출원등록 건수를 이용하여 신재생에너지 사업의 효율성을 분석하였다. Ku *et al*.(2011)의 연구에서는 수익가변(variable returns to scale)을 고려한 DEA 모형을 이용하여 한국과 일본의 광역경제권별 에너지 효율성을 분석하였다. 분석을 위해 1996년에서 2007년까지 12년 동안의 데이터가 활용되었으며, DEA 모형의 투입요소는 취업자, 자본의 2개 요소로 산출요소는 지역내총생산이 단일요소로 제시되었다.

상기에서 살펴본 바와 같이 아직까지 국내외적으로 신재생에너지원별 효율성분석을 위해 DEA를 활용한 사례는 극히 드물다. 본 연구는 신재생에너지원별 효율성을 분석한다는 관점에서 San Crisóbal(2011)의 연구와 유사하나 신재생에너지 기술의 효율성이 아니라 기술별 투자에 대한 효율성을 고려하고 있다는 점에서 기존연구와 차별성을 가진다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 본 연구에서 신재생에너지 투자 효율성 측정을 위해 우리나라의 신재생에너지 관련 정책을 살펴보고, 이를 기반으로 수립한 신재생에너지 투자시스템에 대해서 소개한다. 제 3장에서는 신재생에너지 투자의 효율성 분

석을 위한 DEA 방법론과 DEA 방법론 중 본 연구에서 분석에 이용한 BCC(Banker, Charnes, and Cooper model, 이하 BCC) 모형, 일반가중치범위제한(assurance region global model, 이하 ARG) 모형을 소개하였으며, 제 4장에서는 BCC 모형과 ARG 모형을 이용한 분석결과를 살펴본다. 마지막으로 제 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 신재생에너지 투자시스템

우리나라의 신재생에너지 투자효율성을 분석하기 위해서 먼저 신재생에너지 투자시스템을 체계적으로 정립하여야 한다. 이를 위해서 우리나라의 신재생에너지 관련 정책을 살펴보면, 크게 보급지원 정책과 기술개발 정책의 2가지 유형으로 구분할 수 있다(Park *et al*., 2012). 보급지원 정책은 수요자 중심의 정책으로서 신재생에너지 보급에 대한 지원을 통하여 수요량을 늘리는 정책이며, 지원금 등을 통한 수요량 증가는 민간투자를 유인하여 산업이 자생할 수 있는 토대를 마련하도록 한다. 기술개발 정책은 공급자 중심의 산업기반을 조성하기 위한 정책이며, 산업기반을 조성하기 위해 기술상용화 이전 단계까지 집중적으로 연구개발에 투자한다.

이러한 점을 고려해 보았을 때 신재생에너지 관련 투자시스템은 신재생에너지의 활성화를 위해 투자되는 투입(input), 신재생에너지원별 프로세스(process), 투자의 결과로 발생하는 산출(output)로 나타낼 수 있으며, 이는 <Figure 1>과 같다.

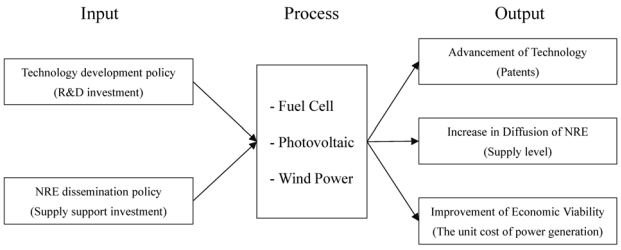

Figure 1. System of renewable energy investment

각 단계별로 보면, 투입요소의 경우 보급지원 정책에 대한 '보급지원 투자액'과 기술개발을 위한 '기술개발 투자액'의 2가지 요소를 고려한다. 보급지원 투자액은 연도별/분야별 신재생에너지 보급지원 정책에 대한 투자액 합계를 적용하였으며, 보급지원 정책에 해당되는 사업은 그린홈 100만호 보급사업, 일반보급사업, 지방보급사업, 금융지원사업, 발전차액지원제도이다. 기술개발 투자액은 연도별/분야별 신재생에너지 연구개발비 투자실적을 적용하였다. 투입요소는 투자대상인 신재생에너지원별로 고려되며, 본 연구에서는 신재생에너지원 중 우리나라의 3대 핵심 분야로 선정된 연료전지, 태양광, 풍력을 분석대상으로 선정하였다(Ministry of Industry and Resource, 2003). 이러한 신재생에너지원이 투자시스템의 프로세스 역할을 하며, DEA 분석에서는 DMU에 해당한다. 산출요소의 경우 기술향상에 대한'특허 수'를 기술개발 투자에 대응하여 고려하였으며, 보급지원정책의 목표는 전체 에너지 공급 중 신재생에너지 공급비중을 높이는데 있으므로 보급지원 투자와 관련된 산출요소는 '공급량'을 선정하였다. 또한, 신재생에너지의 기술력이 향상되고 공급비중이 확대되기 위해서는 궁극적으로 신재생에너지의 경제성이 확보되어야 하므로 '발전단가'를 신재생에너지 투자 시스템의 산출요인으로 추가하였다.

신재생에너지원별 기술개발 투자비용, 보급지원 투자비용은 에너지관리공단 신재생에너지센터가 발간한 신재생에너지백서 자료를 활용하였으며, 발전단가는 에너지관리공단 신재생에너지센터의 통계 자료를 활용하였다. 신재생에너지원별 공급량 자료는 에너지관리공단 신재생에너지센터가 발간한 신재생에너지 보급통계 자료를 활용하였으며, 신재생에너지원별 특허 수는 한국건설교통평가원의 자료를 활용하였다. 분석 대상의 기간은 신재생에너지 3대 핵심 분야인 연료전지, 태양광, 풍력의 투입·산출 요인의 데이터를 모두 확보 가능한 2007년부터 2009년까지의 3년이다. 발전단가의 경우 낮을수록 경쟁력을 가지는 요인이므로, 역수를 취하여 DEA 분석에 사용하였다. 신재생에너지원별 투입 및 산출요소 현황은 다음 <Table 1>과 같이 정리된다.

Table 1. Input and output data

Renewable energy sources	year	R&D investment (million KRW)	Supply support investment (million KRW)	Patent (unit)	Supply level (TOE)	Unit cost of power generation (KRW/kWh)
Fuel cell	2007	62,000	2,256	832	1,832	282.5
	2008	118,700	6,056	663	4,367	282.4
	2009	98,100	22,103	696	19,193	274.1
Photovoltaic	2007	28,200	197,421	125	15,325	677.4
	2008	86,000	376,043	287	61,128	677.4
	2009	103,800	423,649	476	121,731	590.9
Wind power	2007	26,600	16,914	137	80,763	107.3
	2008	26,900	39,829	146	93,747	107.3
	2009	70,300	29,455	403	147,351	105.1

분석대상인 앞서 제시한 투입・산출요소에 대한 기술통계량은 <Table 2>와 같다. 이를 살펴보면, 신재생에너지원별 산출・투입 요소 간 차이가 매우 크다는 사실을 확인 할 수 있다. 세부적으로는 투입변수의 경우 지원금은 최소 22.6억 원에서 최대 4,236.5억 원으로 매우 큰 차이를 보이고 있으며, R&D 투자비용은 약 4.5배, 특허 수는 약 6.7배, 공급량은 약 80.4배, 발전단가는 약 6.4배의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 분석 결과는 산출변수의 범위 값과 동시에 고려해 볼 때 신재생에너지원별 효율성 차이가 매우 클 수 있음을 암시한다.

Table 2. Descriptive statistics of data

	Input variable		Output variable		
	R&D investment (million KRW)	Supply support investment (million KRW)	Patent (unit)	Supply level (TOE)	Unit cost of power generation (KRW/kWh)
Max	118,700	423,649	832	147,351	677.4
Min	26,600	2,256	125	1,832	105.1
Avg	68,956	123,747	418	60,604	206.8
SD	35,536	167,821	267	53,792	283.8

3. 모형

신재생에너지와 관련된 정량적 데이터를 이용하여 에너지원별 효율성을 분석하기 위해 DEA를 이용하였다. DEA는 투입과 산출의 명확한 인과관계를 밝히기 어려운 비영리적이며 공적인 DMU간의 상대적인 효율성을 평가하기 위하여 개발된 기법으로서, 다수의 산출을 생산하기 위하여 다수의 투입요소를 사용하는 조직의 상대적 효율성을 평가하기 위한 기법이다. 이 방법은 DMU들로부터 산출과 투입을 상호 비교함으로써 효율성을 측정하고, 측정대상이 되는 DMU를 다른 DMU들과 비교하여 상대적 개념에서의 비효율성을 나타내준다.

DEA에는 하나의 모형만이 존재하는 것이 아니라, 응용문제의 성격과 주어진 자료의 특성에 맞추어 여러 가지 모형이 존재한다. 다양한 DEA 모형들을 구분하기 위한 대표적인 판단기준이 있으며, 각 기준을 조합하면 특정한 속성을 가진 모형을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 DEA 모형 중 가장 기본적인 속성을 가진 CCR(Charners, Cooper and Rhodes 모형, 이하 CCR) 모형과 BCC 모형 중 기술개발 투자와 특허, 보급지원 투자와 공급량의 관계가 대부분 비선형이라는 기존 연구들의 결과를 반영하여 신재생에너지원별 투자 효율성 분석에 BCC 모형을 이용하였다. 또한 비효율적 집단의 낮은 효율성점수에 대한 개선치 분석을 ARG 모형을 통해 수행하였다.

Banker, Charnes, and Cooper(1984)는 규모의 가변보수성(variable returns to scale)을 모형에 반영할 수 있는 DEA 모형을 제시하였다. 이 모형은 CCR 모형과 대비해서 통상 BCC 모형이라 하며, 그 수리적 모형은 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
&Max \sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0} - u_0 \qquad (1)\\
&s.t \ \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \le 0 \ (j = 1,\ 2,\ \cdots,\ n)\\
&\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0} = 1\\
&u_r,\ \ v_i \ge 0 \ \ \text{for} \, all \ r \ \text{and} \ i,\ \ u_o \ free \, sign
\end{aligned}
$$

한편 위 모형에서 가중치 값에 일정한 범위를 부여하는 제약식을 추가한 모형을 가중치범위제한모형(assurance region model, 이하 AR)은 가상적 투입승수(virtual input multipliers) 또는 가상적 산출승수(virtual output multipliers)를 일정 범위로 제한한다. 즉, AR 모형은 전문가의 의견 또는 고객의 선호를 반영한 가중치를 투입요소 또는 산출요소에 하한과 상한의 범위를 설정하여 효율성을 측정한다. 투입요소 i에 대한 제약식은 다음과 같이 표시된다.

$$LB_i \le \frac{v_i}{v_1} \le UB_i \ \ (i = 2,\ \cdots,\ m) \qquad (2)$$

$$LB_r \le \frac{u_r}{u_1} \le UB_r \ \ (r = 2,\ \cdots,\ s) \qquad 3)$$

여기에서, LB_i = 투입요소 i 가중치의 하한(lower bound)
UB_i = 투입요소 i 가중치의 상한(upper bound)
LB_r = 산출요소 r 가중치의 하한(lower bound)
UB_r = 산출요소 r 가중치의 상한(upper bound)

위와 같은 AR 모형은 다음과 같이 전환된다.

$$
\begin{aligned}
&\frac{x_1}{x_1 + UB_2 x_2 + \cdots + UB_m x_m} \le \frac{v_1 x_1}{v_1 x_1 + v_2 x_2 + \cdots + v_m x_m} \qquad (4)\\
&\le \frac{x_1}{x_1 + LB_2 x_2 + \cdots + LB_m x_m}\\
&\frac{y_1}{y_1 + UB_2 y_2 + \cdots + UB_m y_m} \le \frac{v_1 y_1}{v_1 y_1 + v_2 y_2 + \cdots + v_m y_m} \qquad (5)\\
&\le \frac{y_1}{y_1 + LB_2 y_2 + \cdots + LB_m y_m}
\end{aligned}
$$

위의 식은 투입요소 1의 상대적 가중치가 의사결정단위 1의 투입요소 값들에 따라 변화한다는 것을 의미한다. 하지만 ARG 모형은 상대적 가중치를 모든 의사결정단위들에 공통적인 일정한 한계치(constant bounds)로 제약한다. 직관적으로 이러한 방법이 전통적인 가중치 범위제한 모형보다 더 합리적이라고 볼 수 있다(Allen *et al*., 1997).

ARG 모형은 모든 투입요소들(산출요소들)의 가상적 가중치의 합에 대한 각 투입요소(산출요소)의 가상적 가중치의 비율이 하한과 상한 사이에 존재하도록 투입요소들(산출요소들)에 대한 가중치의 범위를 제한한다. 따라서 의사결정단위 k의 투입요소에 대한 ARG 모형은 다음과 같이 표시된다.

$$LB_i \le \frac{v_i x_{ik}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij}} \le UB_i \quad \text{for } i=1,\ 2,\cdots,\ m,\ j=1,2,\ \cdots,\ n \quad (6)$$

또한 의사결정단위 k의 산출요소에 대한 ARG 모형은 다음과 같이 표시된다.

$$LB_r \le \frac{u_r y_{rk}}{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj}} \le UB_r \quad \text{for } r=1,\ 2,\ \cdots,\ s,\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ n \quad (7)$$

모든 투입요소들 또는 모든 산출요소들의 가중치의 범위가 제한되는 경우에 투입요소들 또는 산출요소들의 가중치의 하한합(sum of lower bound)은 1 이하가 되어야 하고 상한합(sum of upper bounds)은 1 이상이 되어야 한다(Yoo, 2008).

4. 분석

본 논문은 DEA 기법을 활용하여 2007년부터 2009년까지 3년간 우리나라의 3대 핵심 분야인 연료전지, 태양광, 풍력 분야의 기술개발 및 보급지원 투자에 대한 효율성을 분석하였다. DEA 효율성 점수는 규모의 수익가변을 가정한 BCC 모형을 이용하였으며, 목표투입량이 주어진 상태로 산출량을 최대화하여 효율성을 개선하기 위한 모형인 산출기준 모형(Output oriented model)을 적용하였다. 분석은 'DEA-Solver Pro5.0'을 통해 수행하였다.

본 논문에서는 신재생에너지원과 연도를 하나의 DMU로 간주하였다. 연료전지는 FC, 태양광은 PV, 풍력은 WP로 표기하였으며, 2007년 태양광에 해당하는 DMU는 PV07로 표기하였다. 신재생에너지 3대 핵심 분야인 연료전지와 태양광, 풍력에 대한 효율성을 분석한 결과는 <Table 3>과 같다. 여기에서 효율성 점수 1은 상대적 효율성을, 그리고 1보다 적은 값은 상대적 비효율성을 나타낸다. BCC 모형을 이용한 분석결과를 살펴보면, 효율적 DMU로 나타난 신재생에너지는 총 9개 DMU 중에서 4개이며, 전체의 44.4%를 차지하고 있다. 다시 말하면 모두 9개의 DMU 중 4개의 DMU가 효율적인 프론티어를 형성하고 있으며 나머지 5개 DMU는 상대적으로 비효율적인 것으로 측정되었다.

BCC 모형을 이용한 분석결과에 따르면, 2007년부터 2009년까지의 3년 동안 풍력의 효율성점수는 평균 1로 연료전지, 태양광, 풍력 중 풍력이 가장 효율적인 신재생에너지원으로 분석되었으며, 전반적으로 풍력, 연료전지, 태양광의 순으로 효율성 점수가 높은 것으로 분석되었다. 따라서 현재 화석에너지와 경쟁하였을 때 가장 경쟁력 있고 잠재력이 가장 큰 풍력부문의 투자가 가장 효율적으로 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 3. Results of BCC model

DMU	BCC-Efficiency	Rank	Reference set
FC07	1.0000	1	FC07
FC08	0.8444	7	FC07, WP09
FC09	0.8987	6	FC07, WP09
PV07	0.7292	8	FC07, WP08
PV08	0.5579	9	FC07, WP09
PV09	0.9970	5	FC07, WP09
WP07	1.0000	1	WP07
WP08	1.0000	1	WP08
WP09	1.0000	1	WP09

다음으로 연료전지 분야를 살펴보면, 2008년과 2009년의 연료전지는 2007년의 연료전지와 2009년의 풍력을 참조집단으로 하고 있으며, 기술개발 투자액과 보급지원 투자액을 줄이는 동시에 특허와 공급량을 증가시키고 발전단가를 낮추어야 효율적인 집단이 될 수 있는 것으로 나타났다.

마지막으로 태양광 분야를 살펴보면, 2007년의 태양광은 2007년 연료전지와 2008년 풍력을 참조집단으로 하고 있으며, 보급지원 투자액을 줄이는 동시에 특허와 공급량을 증가시키고 발전단가를 낮추어야 효율적인 집단이 될 수 있는 것으로 나타났다. 2008년과 2009년의 태양광은 2007년의 연료전지와 2009년의 풍력을 참조집단으로 하고 있으며, 기술개발 투자액과 보급지원 투자액을 줄이는 동시에 특허와 공급량을 증가시키고 발전단가를 낮추어야 효율적인 집단이 될 수 있는 것으로 나타났다. 태양광 분야의 경우 전반적으로 보급지원 투자가 과도한 것으로 분석되었는데, 이는 정부가 태양광을 빠르게 보급시켜 산업을 형성하기 위해 막대한 투자를 하였으나 아직 태양광 분야는 초기 단계여서 다른 에너지원과 비교하였을 때 경쟁력이 낮기 때문인 것으로 판단된다.

BCC 모형을 이용하여 분석한 결과 총 9개의 DMU 중 44%에 해당하는 4개의 DMU가 효율적 집단으로 분석되었으며, 효율적 집단인 2007년 연료전지, 2007~2009년 풍력의 효율성 차이를 구분할 수 있다면 보다 의미 있는 분석이 될 것이다. BCC 모형의 경우 가중치가 '0'의 값을 가지는 요소가 존재하므로 개선치 분석을 수행하는 경우 효율성 개선치가 무한대의 값으로 나오는 문제가 존재하며, 개선치를 정확히 산정하기 위해서는 투입요소와 산출요소가 적절한 범위 내에서 가중치를 선정할 수 있도록 개선할 필요가 있다.

이를 위해서 본 연구에서는 ARG 모형을 사용하여 분석을

추가적으로 수행하였으며, 본 연구에서는 ARG 모형으로 분석하기 위해 가중치의 범위를 하한치 0.01에서 상한치 1까지로 설정하였다. ARG 모형 분석 결과는 아래의 <Table 4>와 같다.

ARG 모형 분석 결과 BCC 모형의 분석결과와 동일하게 연료전지07, 풍력07, 풍력08, 풍력09의 효율성 점수가 1로 가장 효율적인 집단으로 나타났으며, 참조집단만이 변경되었다.

Table 4. Results of ARG model

DMU	BCC-Efficiency	Rank	Reference set
FC07	1.0000	1	FC07
FC08	0.4623	7	FC07, WP07
FC09	0.5567	5	FC07, WP08
PV07	0.4167	8	FC07, WP08
PV08	0.3534	9	FC07, WP08
PV09	0.5026	6	FC07, WP08
WP07	1.0000	1	WP07
WP08	1.0000	1	WP08
WP09	1.0000	1	WP09

ARG 모형을 통한 분석결과도 에너지원별로 보았을 때 BCC 모형의 분석결과와 동일하게 풍력, 연료전지, 태양광순으로 효율성이 높은 것으로 분석되었다. 즉, ARG 모형을 통한 분석에서도 태양광은 가장 낮은 투자 효율성을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 효율성 개선치를 도출하기 위하여 우리나라의 신재생에너지 3대 핵심 분야 중 투자효율성이 가장 낮게 나타난 태양광 분야에 대해 예시적으로 개선치 분석을 수행하였다. 이를 위해 가장 최근 자료인 2009년 태양광의 투입 및 산출요소에 대하여 효율성 값이 1이 되기 위해서는 개별 투입 및 산출요소가 각각 얼마나 개선되어야 하는지에 대한 분석을 실시하였으며, 그 결과는 <Table 5>와 같다.

Table 5. Results of improvement analysis for PV09

		Original	Improved	Variations	Variation rate
Input	R&D investment (million KRW)	103,800	104,608	808	0.8%
	Supply support investment (million KRW)	423,649	97,276	-326,373	-77.0%
Output	Patent (unit)	476	887	411	86.2%
	Supply level (TOE)	121,731	226,724	104,993	86.2%
	Unit cost of power generation (KRW/kWh)	590.9	40.5	-550.4	-93.1%

세부적으로 살펴보면, 투입요소의 경우 2009년 태양광의 기술개발 투자액이 1,038억 원에서 0.8% 증가한 1,046억 원, 보급지원 투자액이 4,236억 원에서 77.0% 감소한 973억 원, 산출요소의 경우 특허등록 건수가 476건에서 86.2% 증가한 887건, 공급량이 121,731 TOE에서 86.2% 증가한 226,724 TOE, 발전단가의 경우 590.9원/kWh에서 93.1% 감소한 40.5원/kWh로 변경되어야 효율성 점수가 1이 될 수 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 태양광 분야의 보급지원 투자를 줄이면서 특허와 공급량을 증가시키고, 또한 발전단가를 낮춰 경쟁력을 높여야 한다는 사실을 지적하고 있다. 태양광 분야가 아직 초기단계 수준임을 생각한다면 보급지원 투자를 줄이고 산출요소를 개선시키는 방안은 현실적으로 매우 어려운 것이 사실이나, 태양광 분야의 투자 효율성을 높이기 위한 노력이 매우 중요하다는 사실을 지적하고 있다고 볼 수 있다.

5. 결 론

전 세계 에너지 소비 8위에 해당하는 우리나라는 대부분의 에너지를 수입하기 때문에 친환경적이고 지속가능한 신재생에너지의 필요성이 절실하다. 우리나라는 안정적인 에너지수급 기반을 조성하고 미래 성장동력으로 육성하기 위해 신재생에너지 분야에 대한 장기적인 국가계획을 수립하여 기술개발 및 보급 확산을 위한 투자를 지속적으로 수행하고 있으며, 2030년까지 신재생에너지 공급비율 11%를 달성하기 위해 대규모 예산을 투입하고 있는 실정이다. 현 시점에서는 이러한 투자가 적절히 이루어지고 있는지에 대한 논의가 필요하며, 신재생에너지원별 투자 효율성을 확인하는 것이 첫 번째 단계라고 할 수 있다.

본 논문에서는 정량적인 데이터를 이용하여 우리나라의 3대 핵심 신재생에너지원으로 선정된 태양광, 풍력, 연료전지 분야의 투자 효율성을 분석하였으며, 주요 방법론으로는 DEA를 사용하였다. DEA 방법론 중 BCC 모형으로 분석한 결과를 살펴보면, 2007년 연료전지와 2007~2009년까지 풍력분야의 투자 효율성이 가장 높은 것으로 분석되었으며, 전반적으로 풍력, 연료전지, 태양광 순으로 효율성이 좋은 것으로 분석되었다. 또한 보다 의미 있는 개선치 분석을 수행하기 위해 ARG 모형을 이용한 분석을 시도하였으며, 예시적으로 가장 효율성이 낮은 태양광 분야 중 2009년 태양광에 대하여 개선치 분석을 수행하여 투입 및 산출요소별 개선치를 분석하였다. 전반적으로 투자 효율성이 낮다고 분석된 연료전지와 태양광의 경우, 대규모 투자가 이루어지는 현실을 감안하여 투자의 효율성을 높이기 위한 정책적 제고가 필요하다고 판단된다.

본 논문은 정량적인 평가가 어려운 신재생에너지원별 투자 효율성을 분석하기 위해 DEA 모형을 이용하여 분석을 시도하였다는 점에서 의미가 있으며, 향후 신재생에너지원별 전략적 의사결정과 투자 효율성 향상을 위한 정책을 수립하는데 기초

자료로 활용가능 할 것으로 기대된다. 한편 DEA 분석에 있어서 의미 있는 결과를 도출하기 위해서는 DMU의 수가 충분한 자유도를 가질 만큼 커야 하지만, 본 연구에서는 가용자료의 부족으로 인해 적은 DMU를 가지고 분석하였다는 한계점이 있으며, 이산화탄소 배출절감과 같은 요소를 고려하지 못하고 있다는 한계점이 있다, 따라서 추후 연구에서는 좀 더 정확한 분석을 위해 충분한 자료를 확보하여 분석을 수행할 필요가 있으며, 신재생에너지의 핵심변수인 이산화탄소 배출절감효과와 같은 무형 환경효과 등을 고려하여 분석하는 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

Allen, R., Athanassopoulos, A. D., Dyson, R. G., and Thanassoulis, E. (1997), Weights Restrictions and Value Judgements in Data Envelopment Analysis, *Annals of operations Research*, **73**, 13-34.

Anderwen, P. and Pepersen, N. C. (1993), A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis, *Management Science*, **39**(10), 1261-1294.

Banker, R. D., Charnes, A., and Cooper, W. W. (1984), Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, **30**(9), 1078-1092.

Barros, C. P. (2008), Efficiency analysis of hydroelectric generating plants : a case study for Portugal, *Energy Economics*, **30**, 59-75.

Barros, C. P. and Peypoch, N. (2007), The determinants of cost efficiency of hydroelectric generating plants : a random frontier approach, *Energy Policy*, **35**, 4463-4470.

Barros, C. P. and Peypoch, N. (2008), Technical efficiency of thermoelectric power plants, *Energy Economics*, **30**, 3118-3127.

Charnes, A., Cooper, W. W., and Rhodes, E. (1987), Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Reaearch*, **2**(6), 429-444.

Chien, T. and Hu, J. L. (2007), Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies, *Energy Policy*, **35**(7), 3606-3615.

Chun, H. and Lee, H. Y. (2013), A DEA-based portfolio model for performance management of online games, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(4), 260-270.

Ha, Y. J. (2009), An Analysis on Economic Effects of R&D Investment on Energy Technology for Technology Innovation, Ph.D Dissertation, Korea Polytechnic University.

Halkos, G. E. and Tzeremes, N. G. (2012), Analyzing the Greek renewable energy sector : A Data Envelopment Analysis approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**(5), 2884-2893.

Honma, S. and Hu, J. L. (2008), Total-factor energy efficiency of regions in Japan, *Energy Policy*, **36**(2), 821-833.

Hu, J. L. and Wang, S. C. (2006), Total-factor energy efficiency of regions in China, *Energy Policy*, **34**(17), 3206-3217.

Jeon, S. J. and Lee, C. U. (2011), Measure the productivity of airports in Korea considering environment factor : An application of DEA, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **37**(4), 350-357.

Jin, S. H. and Hwang, I. C. (2011), An Analysis on Policy Performance of New Renewable Energy Dissemination by Region and by Energy Sources, *Journal of the Korean Regional Development Association*, **23**(1), 15-32.

Jin, S. H. and Kim, S. W. (2011), A Study on the Economic Effects of New and Renewable Energy Program by Using Input-Output Table, *Korean Resource Economics Review*, **20**(2), 309-333.

Kim, C. Y. (2010), *Study on the improvement of investment efficiency and budget control system of government Research and development*, Research report, Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning.

Kim, H. (2007), Renewable Energy and Sustainable Development, *Proc. of the spring conference of The Korean Society For New And Renewable Energy*, 747-752.

Kim, J. B. (2012), The Basic Study on the Ripple Effect of Industrial and Technological Policy for New and Renewable Energy, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **32**(5), 18-24.

Kim, J. H., Kim, H. S., Leem, B. N. and Yoon, J. H. (2012), Analyzing the national medical service efficiency of OECD countries using DEA and malmquist productivity Index, *A Journal of the Korean OR and MS Society*, **37**(4), 125-138.

Kim, K. T., Lee, D. J., and Park, S. J. (2012), Evaluation of the economic values and optimal deployment timing of R&D investment in new and renewable energy using real option approach, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(2), 144-156.

Kim, T. W. and Jo, S. H. (2000), Measuring Efficiency of Global Electricity Companies Using Data Envelopment Analysis Model, *Korean Resource Economics Review*, **9**(2), 349-371.

Ko, S. C., Sim, G. S., and Kim, J. Y. (2008), An Operating Efficiency Evaluation Regarding the Use of DEA in Korea's Electric Power Generation Industry, *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, **34**(1), 61-77.

Koo, H. Y. and Min, D. K. (2013), Forecasting renewable energy using delphi survey and the economic evaluation of long-term generation mix, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(3), 183-191.

Ku, J. Y. and Kim, S. D. (2011), An Analysis of Energy Efficiency in Korean and Japanese Economic Regions Using Data Envelopment Analysis, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **48**(1), 79-88.

Lee, D. G., Moon, C. G., and Heo, E. Y. (2010), Outcome Analysis on Renewable Energy Dissemination Program through Correlation Analysis and Effectiveness Indicator, *Journal of the Korean Society For New And Renewable Energy*, **6**(2), 33-39.

Lee, H. J. (1999), *Non-parametric data envelopment analysis of efficiency and productivity : An application to electric industry*, Ph.D Dissertation, Seoul National University.

Lee, Y. S. (2006), *The research about changes of structure and efficiency of the electric power industry according to environmental changes of the electric power industry*, Research report, Korea Energy Economics Institute.

Lee, Y. S. (2010), *A Study on More Efficient Performance Management and Promotion Strategy of Commercialization System of Renewable Energy R&D Program*, Ph.D dissertation, Chonbuk National University.

Ministry of Industry and Resource (2003), *The second basic plan for technology development and usage promotion of renewable energy in Korea*, mimeo.

Nakano, M. and Managi, S. (2008), Regulatory reforms and productivity : an empirical analysis of the Japanese electricity industry, *Energy Policy*, **36**, 201-209.

Park, J. H., Kim, J. H. and Heo, E. Y. (2010), Peer Review of Renewable Energy Dissemination Program, *Journal of The Korean Society*

for New and Renewable Energy, **6**(2), 40-48.

Park, S. J., Lee, D. J., and Kim, K. T. (2012), Forecasting the Grid Parity of Solar Photovoltaic Energy Using Two Factor Learning Curve Model, *IE Interfaces*, **25**(4), 441-449.

Park, S. M. (2014), Identification of DEA determinant input- output variables : an illustration for evaluating the efficiency of government-sponsored R&D projects, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **40**(1), 87-99.

San Crisȯbal, J. R. (2011), A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the renewable energy technologies, *Renewable Energy*, **36**(10), 2742-2746.

Sim, G. S. and Kim, J. Y. (2012), The development of the DEA-AR model using multiple regression analysis and efficiency evaluation of regional corporation in Korea, *Journal of the Korean OR and MS Society*, **37**(1), 29-43.

Yoo, K. R. (2008), Efficiency Evaluation of the Public Sector Reflecting Experts Opinions or Customer Preferences : An Application of the Assurance Region Global Model, *Journal of the Korea Association For Policy Analysis and Evaluation*, **18**(2), 75-97.

Zhang, X., Cheng, X., Yuan, J., and Gao, X. (2011), Total-factor energy efficiency in developing countries, *Energy Policy*, **39**(2), 644-650.

Zhou, P., Ang, B. W., and Poh, K. L. (2008), A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies, *European Journal of Operational Research*, **189**(1), 1-18.