

# 태양광/풍력/수력발전에 대한 에코효율성 평가 연구

차경훈

스마트에코 주식회사

## An Eco-efficiency Study on Photovoltaic/Wind/Hydro power

Kyoungsoon Cha

Green Business Dept., SMaRT Eco Corporation

cha0527@smart-eco.co.kr

### ABSTRACT

The indiscreet use of fossil fuel for the economic growth caused the environmental problem such as global warming and resource depletion. Recently, the world has recognized the seriousness of environmental problem and makes an effort to solve the trouble. The renewable energy goes down as a solution in other to improve the energy system that has environmental problems. Renewable energy is energy which comes from natural resources such as sunlight, wind, rain, tides, and geothermal heat, which are renewable (naturally replenished). In 2008, about 19% of global final energy consumption came from renewables, with 13% coming from traditional biomass, which is mainly used for heating, and 3.2% from hydro electricity. Renewables (small hydro, modern biomass, wind, solar, geothermal, and biofuels) accounted for another 2.7% and are growing very rapidly. The share of renewables in electricity generation is around 18%, with 15% of global electricity coming from hydro electricity and 3% from renewables. In Korea, wind, hydro, and photovoltaic power are mainly researched and developed in the sorts of renewable energy, because they have high turnover in the sorts of renewable energy and are involved in the main technology of green growth policy.

This study aims at identifying the effective introduction method of renewable energy in the context of the environmental and economic aspects using eco-efficiency. As a result, wind power has the high environmental priority and hydro power has the high economic priority in the target renewable energy. Wind power is the best alternative in the context of eco-efficiency aspect. It is reason that wind power has a little input materials, energy and a simple infrastructure.

**keywords:** eco-efficiency, renewable energy, wind power, hydro power, Photovoltaic power

### 요약문

경제성장을 위한 화석연료의 사용은 지구온난화, 자원고갈과 같은 환경문제를 야기하였고, 최근 들어 이러한 환경문제는 전세계로 하여금 풀어야 할 숙제로 받아들여지고 있다. 환경문제에 대한 해법으로서 에너지 시스템의 신재생에너지화가 논의되고 있는데 이는 신재생에너지가 태양, 바람, 비, 조수차, 지열 등 자연으로부터 발생되는 친환경 에너지이기 때문이다. 2008년을 기준으로 약 18%가 신재생에너지로부터 발생되었고 세부 항목을 보면 13%가 바이오매스, 3.2%가 수력, 1.8%가 기타이다. 신재생에너지는 연간 약 2.7%의 성장률을 보이며 발전하고 있고, 우리나라 역시 18%가 신재생에너지의 점유율로 그중 15%가 수력, 3%가 기타 기원의 에너지원이다. 이렇듯 우리나라 역시 풍력, 수력, 태양광 등의 신재생에너지에 대한 많은 관심을 가지고 있으며 이를 정책적으로 활용하기 위해 다양한 노력을 하고 있다.

본 연구는 환경성과 경제성을 동시에 평가하는 에코효율성 측면에서 신재생에너지의 도입 방안을 마련하고자 하는 것을 목적으로 가지고 있다. 연구 결과 풍력이 환경적으로, 수력이 경제적으로 가장 경쟁력이 있고, 에코효율성 측면에서는 풍력발전이 가장 좋은 대안으로 도출되었다. 이는 풍력발전의 경우 타 에너지에 비해 작은 투입물질 및 에너지가 요구되고, 상대적으로 간단한 인프라가 필요하기 때문이다.

**주제어:** 에코효율성, 신재생에너지, 태양광, 풍력, 수력

## 1. 서론

산업혁명 이후 세계는 무한발전, 대량생산, 대량소비 등 물질을 중심으로 하는 패러다임 하에 놓이게 되었고, 전 세계 국가들은 경쟁적으로 경제발전 중심의 고성장 정책을 펴게 되었다. 기업은 규모 중심의 발전을 거듭하면서 질적 성장보다는 양적 성장에 관심을 기울이게 되었고, 그 결과 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료의 고갈문제와 화석연료의 대량 소비로 인해 발생하는 많은 이산화탄소의 영향으로 발생하는 지구온난화현상이 발생하게 되었고, 전 세계는 이러한 환경문제의 심각성을 인지하기 시작하였다. 이러한 문제는 과거 저유가 시대의 에너지 대책에서 탈피하여 에너지 공급시스템의 전반적인 혁신이 요구되고 있으며, 그 일환으로 세계 각국은 대체 에너지로서 태양광, 풍력, 수력 등의 신재생 에너지 개발에 많은 노력을 경주하고 있다. 우리나라도 2011년까지 전체 1차 에너지의 5%를 신재생에너지로 공급한다는 목표 (신재생에너지 기본계획, 2003년 12월)를 설정하고, 예산, 조직, 법령 등 정책기반을 강화하는 동시에 본격적인 기술개발 및 보급 사업을 적극 추진 중에 있다. 우리나라는 「대체 에너지개발 및 이용·보급촉진법」을 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법」으로 전문 개정하여 “대체에너지”를 “신재생에너지”로 법령칭을 변경하고 신재생에너지 기술의 국제 표준화지원, 신재생에너지 설비 및 부품의 공용화 제도 도입, 신재생에너지 전문 기업 제도 도입, 신재생에너지통계전문기관 지정, 신재생에너지기술의 사업화지원 제도 등의 지원근거를 마련하여 신재생에너지 사업화에 대한 지원을 강화하였다. 우리나라는 반도체, LCD, IT, 기계 등 세계 최고 수준의 산업 기반 기술력을 가지고 있고, 세계 10대 에너지 소비국으로서 온실가스 감축과 관련한 시장수요가 막대하기 때문에 신기술의 시장창출이 용이하다는 점에서 성장 잠재력이 크다고 할 수 있다. 이렇듯, 신재생에너지 분야의 성장 잠재력을 가지고 있고 세계 9위의 온실가스 배출 및 에너지 소비국의 지위를 가지고 있는 우리나라는 신재생에너지의 효과적인 도입을 통해 저탄소 녹색 성장을 위한 발판을 마련할 수 있다. 이는 앞서 설명한 신재생에너지의 폭포효과 (Cascade effect)로 인해 신재생에너지를 통한 국가 전 산업 분야의 환경적, 경제적인 개선을 이룩할 수 있는 기반을 마련할 수 있다는 사실에 기인한다. 지금까지의 신재생에너지와 관련된 연구들은 환경성과 경제성을 각각의 관점에서 평가하는 단편적인 관점에서의 접근이었기 때문에 환경성과 경제성 사이의 트레이드오프(trade-off) 고려에 대한 한계성을 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 환경성과 경제성 사이의 트레이드오프 효과까지 고려하기 위해 환경성과 경제성 측면을 동시에 고려하는 에코효율성 개념을 신재생에너지에 적용하여 대상 신재생에너지인 태양광, 풍력, 수력발전 및 수소에너지의 에코효율성 결과를 도출하였다.

## 2. 방법론

### 2-1. 전과정평가 (Life cycle assessment)

전과정평가는 제품의 전과정에 걸쳐 발생하는 다양한 환경영향을 정량화하는 방법론으로 대상 시스템에 의해 발생하는 환경영향을 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 전과정평가 수행을 위한 국제 표준인 ISO14040과 ISO14044를 기준으로 환경성평가를 수행하였다.

## 2-2. 전과정 비용평가 (Life cycle costing)

전과정 비용평가는 직접 및 간접적으로 발생하는 비용, 지속적인 비용, 일시적인 비용 등에 대한 고려를 통해 대상 시스템의 전 과정에 걸쳐 발생하는 전체 비용을 산정하는 경제성 평가 방법이다. 본 연구에서는 Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC, 국제환경독성학회)과 U.S. Department of Energy (DOE, 미국 에너지부) 등의 국제기관에서 발간하는 전과정 비용평가 가이드라인을 벤치마킹하여 신재생에너지의 경제성 평가를 수행하였다.

## 2-3. 에코효율성 (에코효율성)

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 세계 지속가능발전기업협의회)에 의해 도입된 에코효율성 개념은 지속가능한 발전 개념에 공헌하는 주요 방법 중의 하나로 전 세계적으로 널리 받아들여지고 있는 도구이다. WBCSD는 에코효율성을 'Doing more with less'로 간략하게 정의하며, 최소한의 자원 및 투입물을 가지고 최대의 가치를 창출하는 것으로 공표하였다.

본 연구에서는 WBCSD의 에코효율성 정의를 수정하여 환경측면의 효율성(Environmental-efficiency)과 경제측면에서의 효율성(Economic-efficiency)으로 구분하여 접근하였고 그 세부적인 형태는 다음과 같다.

### 2-3-1 Environmental-efficiency

Environmental-efficiency는 대상 신재생에너지의 환경성 부문 경쟁력을 도출하는 indicator로서 신재생에너지가 대체하는 기존 전력 grid의 환경성 결과를 기준으로 대상 신재생에너지의 환경성 결과를 상대적인 비율로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 평가 대상이 신재생에너지라는 특징을 고려하여 신재생에너지 측면에서 중요한 환경영향인 지구온난화영향을 Environmental-efficiency 평가를 위한 주요 인자로 선정하였다. 다음은 Environmental-efficiency를 나타낸 것이다.

$$\text{Environmental -efficiency} = \frac{\text{GWP ref.}}{\text{GWP alt.}}$$

- GWP ref. : 기존 전력 grid의 지구온난화영향 결과
- GWP alt. : 대상 신재생에너지의 지구온난화영향 결과

Environmental-efficiency 는 기존 전력 grid 대비 대상 신재생에너지의 지구온난화영향의 상대적인 값으로 결과 값이 클수록 대상 신재생에너지의 지구온난화영향이 작다는 의미를 갖는다. 즉 Environmental-efficiency 값이 '2'일 경우 대상 신재생에너지의 지구온난화영향이 기존 전력 grid와 비교해 1/2이라는 의미를 갖는다.

### 2-3-2 Economic-efficiency

Economic-efficiency는 대상 신재생에너지의 경제성 부문 경쟁력을 도출하는 indicator로서 신재생에너지가 대체하는 기존 전력 grid의 경제성 결과를 기준으로 대상 신재생에너지의 경제성 결과를 상대적인 비율로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 에너지원을 평가 대상으로 하고 있기 때문에 경제적 측면을 발전비용으로 정의하였다. 다음은 Economic-efficiency를 나타낸 것이다.

$$\text{Economic-efficiency} = \frac{\text{Cost ref.}}{\text{Cost alt.}}$$

- Cost ref. : 기존 전력 grid의 발전비용
- Cost alt. : 대상 신재생에너지의 발전비용

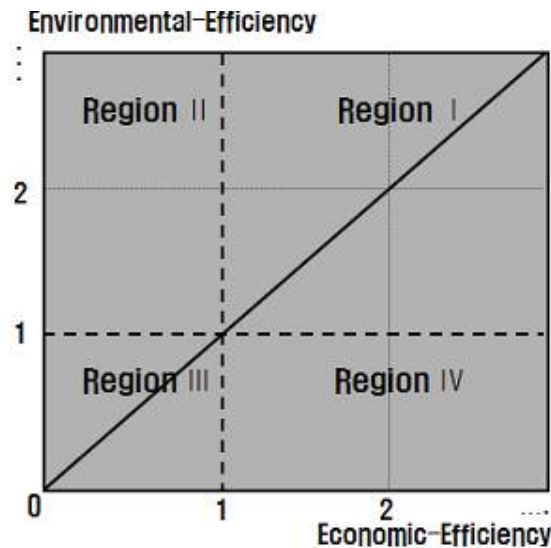
Economic-efficiency는 기존 전력 grid 대비 대상 신재생에너지 발전비용의 상대적인 값으로 결과 값이 클수록 대상 신재생에너지의 발전비용이 작다는 의미를 갖는다. 즉 Economic-efficiency 값이 '2'일 경우 대상 신재생에너지의 발전비용이 기존 전력 grid와 비교해 1/2이라는 의미를 갖게된다.

### 2-3-3 에코효율성 평가

에코효율성의 분모에 들어가는 Environmental-efficiency 는 효율성의 의미를 갖기 때문에 값이 클수록 긍정적인 결과를 나타내게 된다. 때문에 에코효율성 평가를 위해 도출된 Environmental-efficiency 결과를 역의 값을 취해서 적용하게 된다.

에코효율성은 효율성의 의미를 지니고 있기 때문에 결과 값이 1일 경우 기존 전력 grid와 동일한 환경-경제 효율성을 갖는 것이고, 1 이상의 값을 가질 경우 대상 신재생에너지가 기존 전력 grid 보다 더욱 높은 환경-경제 효율성을 갖는 것으로 해석할 수 있다.

또한, 본 연구에서는 정량적으로 도출되는 에코효율성 결과 값 외에 환경성 부문과 경제성 부문에서 기존 전력 grid와 대상 신재생에너지 간의 결과를 한 눈에 비교할 수 있도록 도식화시켜 표현하였다. 다음은 에코효율성 도식화 결과를 나타내는 그림이다.



구분	Region I	Region II	Region III	Region IV
환경측면	Good	Good	Bad	Bad
경제측면	Good	Bad	Bad	Good

Fig. 1. Eco-efficiency method.

### 3. 환경성/경제성 평가 수행

#### 3-1. 대상 신재생에너지원

본 연구는 국내 신재생에너지 산업에서 높은 매출액 규모를 가지고 있고, 저탄소 녹색성장을 위한 9대 중점 기술 분야에 포함되어 있는 태양광, 풍력, 수력발전에 대한 에코효율성 평가를 통해 환경성과 경제성 측면에서 대상 신재생에너지의 경쟁력 비교와 개선점을 도출하여 대상 신재생에너지의 효과적인 도입을 위한 방안을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 평가 대상은 태양광, 풍력, 수력발전이고, 세부적으로 나열하면 태양광의 경우 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, CdTe, CIGS 태양광으로 나뉜다.

#### 3-2. 시스템 경계 설정

환경성 및 경제성 평가를 위한 대상 신재생에너지의 시스템 경계는 원료채취, 제조, 사용단계로 정의된다. 다음의 Fig. 2는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 신재생에너지의 시스템 경계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 대상 신재생에너지의 전과정단계를 원료채취, 제조, 사용단계로 정의하였다. 신재생에너지의 전과정 중 폐기단계의 경우 신재생에너지 도입 역사가 오래되지 않아 대상 신재생에너지 설비에 대한 폐기 데이터 부재로 연구 범위에서 제외하였다.



Fig. 2. System boundary.

#### 3-3. 평가 기준 설정

본 연구는 앞서 나타낸 것과 같이 우리나라의 지속가능한 에너지 시스템 구축을 위해 주요 신재생에너지에 대해 환경, 경제적 측면에서의 최적의 대안을 제시하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 각 신재생에너지에 대한 동등한 비교 기준을 선정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 대상 신재생에너지의 환경성 평가를 위한 기능, 기능단위 및 기준흐름을 다음의 Table 1과 같이 정의하였다.

Table 1. Function, functional unit, and reference flow

	태양광발전	풍력발전	수력발전
기능	에너지 생산		
기능단위	에너지량 1MJ		
기준흐름	1MJ		

정의된 기준흐름과 같이 평가 대상 신재생에너지 발전 방식으로 생산된 동일한 양 (1MJ)의 에너지를 기준으로 환경성 및 경제성을 평가하여 각 측면에서의 동등비교를 가능하도록 하였다.

### 3-4. 데이터 수집 및 계산

대상 신재생에너지의 환경성 및 경제성 평가 결과 도출을 위해서는 다양한 데이터의 수집 및 적용이 요구된다. 본 연구에서 환경성 및 경제성 평가를 위해 사용하는 전과정평가 기법은 투입물, 산출물과 관련된 다양한 데이터의 활용을 통해 결과를 도출하기 때문에 데이터의 수집과 계산은 연구의 결과에 큰 영향을 미치는 인자라 할 수 있다. 다음의 Table 2는 평가에 사용된 데이터 품질 및 출처를 나타낸 것이다.

Table 2. Data quality and reference

대상	전과정단계		데이터 품질	데이터 출처
태양광 발전	원료채취		2차 데이터	국가 LCI D/B, Ecoinvent
	제조	모듈	1차 데이터	미리넷 솔라, 렉서, First Solar
		인버터	1차 데이터	카코뉴에너지
		BOS (Balance of sheet)	1차 데이터	우리에너지뱅크
	사용		1차 데이터	First Solar
풍력발전	원료채취		2차 데이터	국가 LCI D/B, Ecoinvent
	제조		2차 데이터	Vestas
	사용		1차 데이터	행원, 한경 풍력발전소
수력발전	원료채취		2차 데이터	국가 LCI D/B, Ecoinvent
	제조		2차 데이터	수자원공사, 환경부
	사용		2차 데이터	수자원공사, 환경부

대상 신재생에너지에 대한 환경성 평가를 위해 사용된 영향평가 방법론은 영향범주별로 분리된 목록 파라미터들에 대해서 영향범주별 상응인자를 사용하여 잠재적인 기여도를 나타내는 방법으로 다음의 식과 같이 목록항목별 환경부하량에 목록항목에 대한 상응인자를 곱함으로써 도출하였다.

$$C_{ij} = E_j W_{ij}$$

- $C_{ij}$  = 투입/산출물  $j$ 로부터 발생하는 영향범주  $i$ 에 대한 잠재적 공헌도
- $E_j$  =목록항목  $j$ 의 환경부하량
- $W_{ij}$ =항목별 상응인자

경제성 평가의 경우 각 신재생에너지별 발전비용을 도출하였다. 발전비용은 각 대상 신재생에너지 1MJ을 생산할 때 소요되는 비용으로 일반적으로 자본비용과 운영비용의 합으로 산정된다.

$$\text{Generation cost} = \text{CC} + \text{OC} + \text{M\&RC}$$

- CC (Capital Cost) = 에너지 생산을 위한 설비비용에 따른 감가상각액
- OC (Operational Cost) = 에너지 생산을 위한 투입물 및 에너지 비용
- M&RC (Maintain & Repair Cost) = 설비의 유지 및 보수, 세금, 보험료 등의 비용

태양광발전, 풍력발전, 수력발전의 경우 이미 국내에서 상용화된 발전방식이기 때문에 에너지 생산과 관련된 발전비용이 널리 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상용화된 세 가지 에너지에 대해서는 최대한 기존 설비를 대상으로 실제 데이터를 기준으로 경제성 평가를 수행하였다.

## 4. 연구결과

본 연구의 대상은 앞서 언급한 것과 같이 태양광 (단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, CdTe, CIGS), 풍력, 수력에너지 이다. 환경성과 경제성 평가 결과는 평가 대상이 신재생에너지이기 때문에 결과에 대한 동등비교를 위해 에너지 단위인 1MJ을 기준으로 평가하였다.

### 4-1. 환경성 평가 결과

대상 신재생에너지의 환경성 평가는 지구온난화 영향을 기준으로 수행되었다. 지구온난화 영향에 대한 결과는 다음의 Fig. 3과 같이 나타났다.

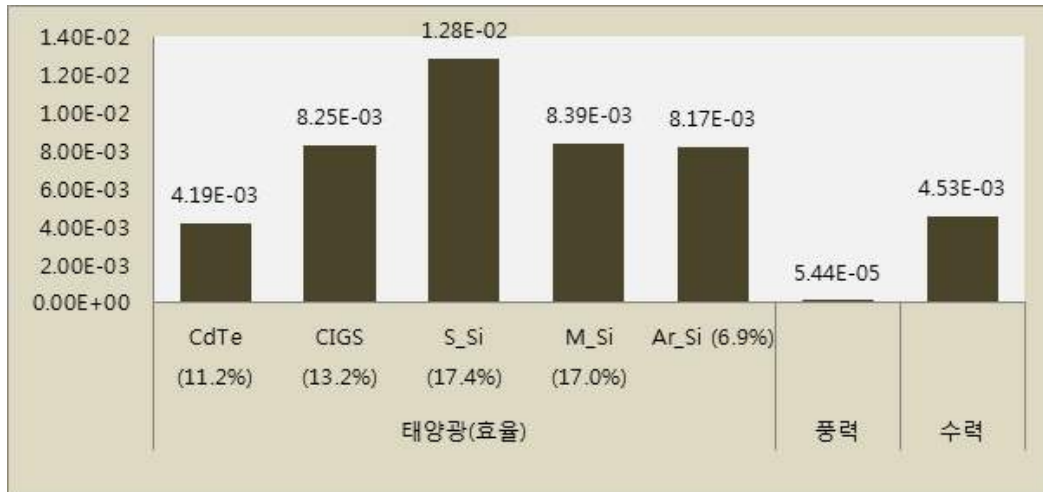


Fig. 3. Results of environmental assessment.

평가 대상 신재생에너지의 지구온난화 영향은 풍력발전, CdTe 태양광발전, 수력발전, Ar\_Si 태양광발전, CIGS 태양광발전, M\_Si 태양광발전 등의 순으로 작은 것으로 나타났다. 기존전력의 지구온난화 영향은 1.38E-01 kg CO<sub>2</sub>equiv./MJ로 모든 대상 신재생에너지가 기존전력 보다 지구온난화 영향 측면에서 큰 경쟁력을 나타내는 것으로 도출되었다. 이는 우리나라의 기존전력의 경우 화력발전의 비중이 상대적으로 크기 때문에 화석연료를 연소시킬 때 발생하는 온실가스의 배출로 인한 것으로 나타났다.

대상 신재생에너지의 전체적인 지구온난화 영향 추세를 보면 풍력발전이 가장 친환경적이고, 그 다음으로 수력발전 그리고 마지막으로 태양광발전이 뒤를 잇고 있다. 풍력발전의 경우 다른 대상 신재생에너지에 비해 간단한 설비 형태를 가지고 있고, 이에 따라 인프라스트럭처를 구축하는데 발생하는 지구온난화 영향이 낮게 나타났다. 반면 태양광발전과 수력발전은 관련 설비의 복잡성으로 인해 생산을 위해 발생하는 지구온난화 영향이 크게 나타났다. 특히, 수력발전의 경우 생산되는 전기량도 많지만 댐 설치 및 모터 등의 시설 구축을 위해 막대한 양의 지구온난화 영향을 발생시킨다. 태양광발전 내에서는 기존의 실리콘을 기초로 하는 1세대 태양광발전 보다는 박막형 형태를 갖는 2세대 태양광발전의 지구온난화 영향이 작게 나타났다. 이는 실리콘을 녹이는데 발생하는 공정에서 매우 큰 전력 소모가 발생하기 때문이다. 향후 활발하게 진행되고 있는 박막형 태양광발전의 연구 및 개발활동이 자리를 잡아 효율성 측면에서 1세대 태양광 전지를 따라 잡을 경우 환경측면에서의 효율성이 더욱 커질 것으로 예상된다.

#### 4-2. 경제성 평가 결과

본 연구에서는 대상 신재생에너지에 대한 경제성 평가를 위해 전과정비용평가 방법론을 사용하여 결과를 도출하였다. 대상 신재생에너지 중 태양광발전 (단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 비정질 실리콘, CdTe, CIGS), 풍력발전에 대해서는 자본비용과 운영비용을 도출하여 전과정비용을 도출하였고, 수력발전에 대해서는 데이터의 정확성 문제로 인해 기존연구 결과를 차용하여 발전원가를 도출하였다. 대상 신재생에너지의 경제성 평가 결과는 다음의 Fig. 4와 같다.



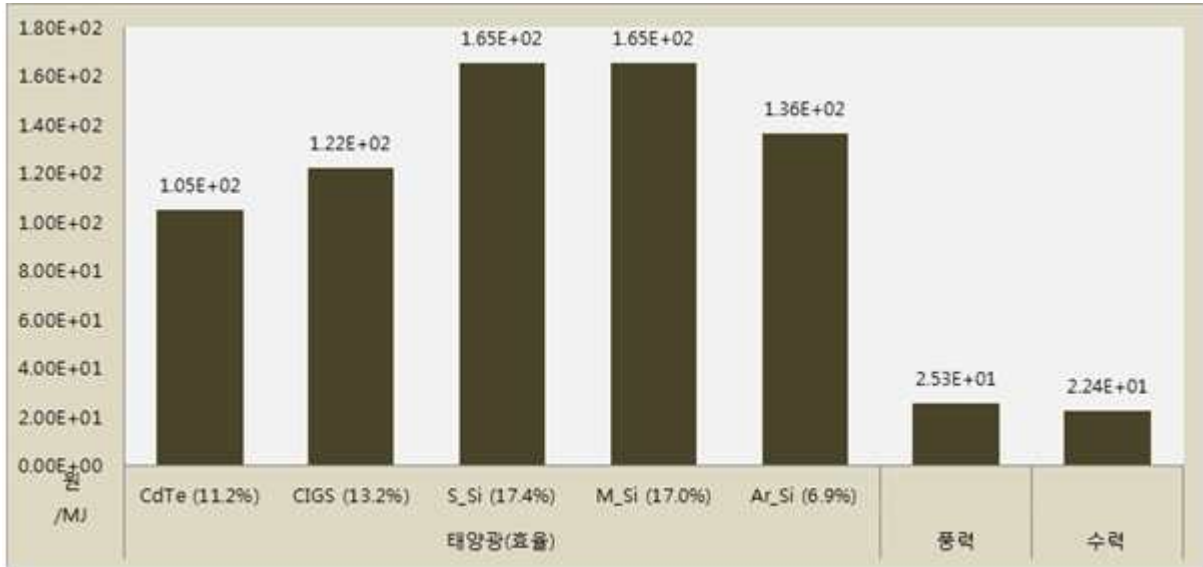


Fig. 4. Results of economic assessment.

평가 대상 신재생에너지의 경제성 평가 결과는 수력발전, 풍력발전, 태양광발전 순으로 경제성 측면에서 높은 경쟁력을 갖는 것으로 나타났다. 이는 태양광발전의 경우 태양광 모듈 및 PCS 등 태양광발전 설비 모두가 아직까지는 연구 개발 단계에 있기 때문에 발전 설비 생산단가가 높기 때문이다. 반면 이미 많은 부문에 있어서 상용화 단계에 있는 수력발전과 풍력발전은 상대적으로 대상 신재생에너지 중 가장 경제성이 좋은 것으로 나타났다. 기존전력의 발전비용은 1.86E+01원/MJ 로 대상 신재생에너지 모두에 비해 낮은 발전비용을 나타내는 것이다.

경제성이 가장 좋은 수력발전 역시 운영비용에 비해 댐, 수로, 발전기 등으로 구성된 자본비용의 비율이 절대적으로 큰 것으로 나타났다. 수력발전의 경우 절대 비용은 발전시설의 규모로 인해 대상 신재생에너지 중 가장 큰 것으로 나타났으나 생산되는 전력량 역시 가장 크기 때문에 kWh 당 비용은 낮은 것으로 도출되었다.

수력발전에 이어 두 번째로 경제성이 좋은 풍력발전의 경우 주설비, 보조설비, 관련공사비, 설계/감리비, 보험료, 인허가 및 관세 등으로 이루어진 자본비용이 전체 비용의 97.5%로 2.5%의 운영비용에 비해 크게 나타났다. 이는 풍력발전의 운영단계에서 윤활유, 구리스, 시동을 위한 전력, 소모품 교체, 수리 등과 관련된 비용만이 발생하기 때문에 풍차, 터빈, PCS 등 높은 비용이 발생하는 자본비용에 비해 상대적으로 매우 작은 비용이 도출된 것이다.

#### 4-3. 에코효율성 평가 결과

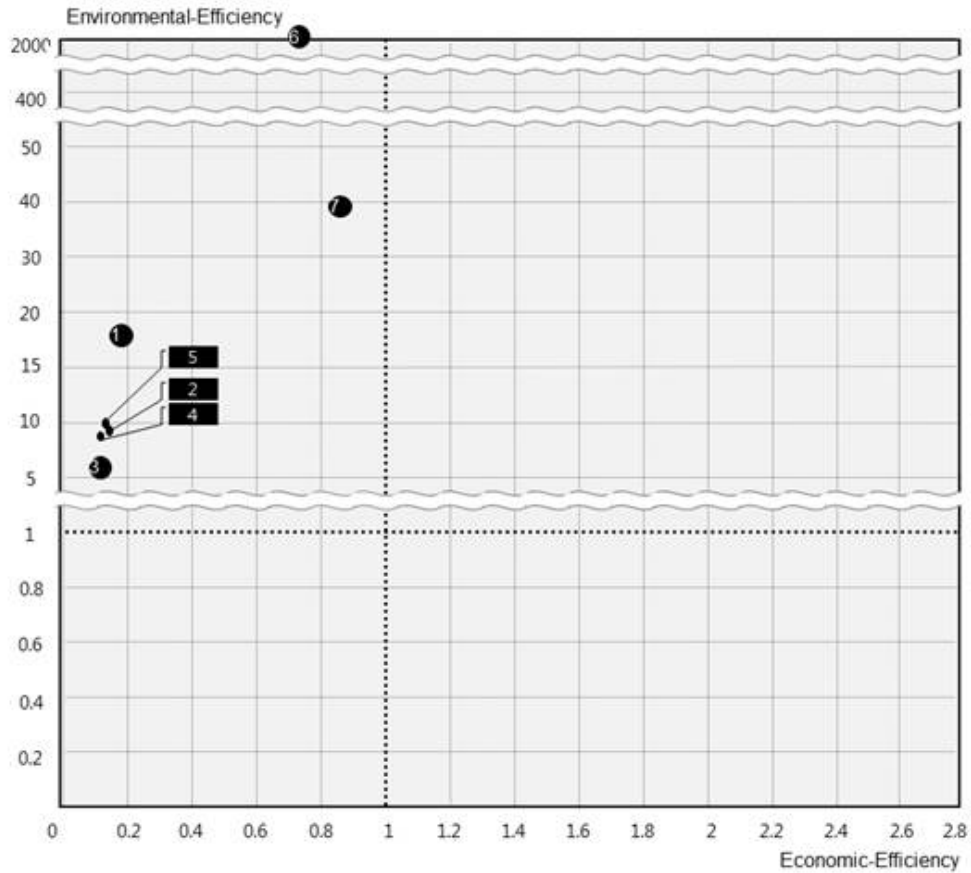


Fig. 5. Results of eco-efficiency assessment.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 신재생에너지의 에코효율성 결과는 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 풍력발전 - 수력발전 - 태양광발전[CdTe] - 태양광발전[CIGS] - 태양광발전[Ar-Si] - 태양광발전[M-Si] - 태양광발전[S-Si] - 순으로 효율적인 것으로 도출되었다.

대상 신재생에너지 전체에 대해서 에코효율성 평가 결과를 보면 태양광발전[CdTe], 태양광발전[CIGS], 태양광발전[M-Si], 태양광발전[Ar-Si], 풍력발전, 수력발전만이 기존전력과 비교해 환경 및 경제 효율적인 것으로 도출되었고, 나머지 신재생에너지의 경우 기존전력과 비교해 효율성이 떨어지는 것으로 나타났다.

에코효율성 측면에서 가장 효과적인 신재생에너지인 풍력발전은 다른 대상 신재생에너지에 비해 환경성이 압도적으로 좋게 나타나 현재 시점에서 에코효율성을 기준으로 분석할 때 가장 최적의 신재생에너지 임이 도출되었다. 수력발전은 대상 신재생에너지 중 가장 높은 Economic-efficiency 결과를 갖고 또한 환경성 평가 결과 역시 상대적으로 우수해 두 번째 순서의 대안으로 도출 되었다. 반면 에코효율성 결과 값이 가장 작은 대상 신재생에너지인 태양광발전[S-Si]의 경우 Environmental-efficiency와 Economic-efficiency 측면에서 모두 낮은 경쟁력을 보이는 것으로 나타났다. 단결정 실리콘 태양광발전의 환경성 및 경제성 측면에서의 낮은 경쟁력으로 인한 것으로 해석된다.

대상 신재생에너지에 대한 에코효율성 결과와 Environmental-efficiency의 결과는 어느 정도 일치하는 추세를 갖는 것으로 나타났으나 Economic-efficiency 결과는 전혀 다른 추세를 나타낸다. 이는 대상 신재생에너지의 에코효율성 결과는 Environmental-efficiency 결과와 더욱 큰 상관관계를 나타낸다는 의미를 갖는데 그 이유는 본 연구에서의 평가는 기존전력을 기본으로 대상 신재생에너지의 효율성을 도출하는 것으로 기존전력과 대상 신재생에너지의 환경영향의 차이가 경제적 측면의 차이보다 크기 때문으로 해석할 수 있다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 대상 신재생에너지 모두가 기존전력 보다 낮은 환경영향을 나타내고 있고 특히, 풍력발전 (6), 수력발전 (7)은 기존전력 대비 각각 약 2000배, 40배 낮은 환경영향을 나타낸다. 그리고 경제성 측면에서는 대상 신재생에너지 모두 기존전력의 발전비용 보다 높은 에너지 생산 비용을 나타내기 때문에 기존전력 대비 경제적으로 효율적인 대상 신재생에너지는 없는 것으로 나타났다. 특히 아직까지 연구·개발단계에 있는 태양광발전 및 수소에너지가 Economic-efficiency가 더욱 낮은 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 화석연료의 사용으로 인한 지구온난화와 자원고갈 같은 환경영향 그리고 최근 불거진 원자력 발전의 안전성 문제 등 기존 에너지 시스템이 가지고 있는 한계를 해결하고자 대체 에너지로서 전 세계적으로 각광받고 있는 신재생에너지 (단결정 실리콘 태양광발전, 다결정 실리콘 태양광발전, CdTe 태양광발전, CIGS 태양광발전, Ar-Si 태양광발전, 풍력발전, 수력발전)에 대한 에코 효율성 분석을 통해 환경성과 경제성 측면에서의 경쟁력과 각 신재생에너지별 환경 및 경제적 측면에서의 개선점을 도출하였다. 대상 신재생에너지에 대한 환경성 평가 결과 풍력발전이 가장 친환경적인 신재생에너지인 것으로 도출되었고 CdTe 태양광발전이 그 뒤를 이었다. 반면 단결정 실리콘 태양광발전의 환경영향이 가장 큰 것으로 나타났고, 다결정 실리콘 태양광발전이 그 뒤를 이었다. 환경성 측면에서 보면 1세대 태양광발전이 2세대 박막형 태양광발전에 비해 낮은 경쟁력을 나타내는데, 1세대 태양광발전의 주원료인 실리콘 처리 공정에서 사용되는 많은 양의 에너지로 인한 영향으로 나타났다. 이는 향후 태양광발전은 환경성 관점에서 볼 때 실리콘을 기반으로 하는 1세대에서 2세대 박막형 특히, CdTe 태양광발전으로 이동하는 것이 친환경적이라는 것을 말한다.

경제성 평가 결과에서는 수력발전이 가장 낮은 발전비용으로 경제적 측면에서의 가장 높은 경쟁력을 확보하는 것으로 나타났고, 그 뒤로 풍력발전이 높은 경쟁력을 나타냈다. 반면 태양광발전은 높은 발전비용으로 인해 경제적 측면에서 낮은 경쟁력을 나타냈다.

환경성과 경제성 평가 결과를 토대로 도출된 에코효율성 결과의 경우 풍력발전, 수력발전, CdTe 태양광발전 순으로 높은 경쟁력을 갖는 것으로 나타났다. 에코효율성 결과를 토대로 풍력발전의 경우 상대적으로 경쟁력이 떨어지는 경제성 측면에서의 개선이 요구되고, 수력발전은 환경성 측면에서의 개선이 우선 요구되는데 이를 위해서는 가장 큰 환경영향을 발생시키는 건축자재의 재활용 증대를 위해 높은 재활용성을 갖는 자재의 사용이 요구된다. 태양광발전의 경우 환경성과 경제성 개선 모두를 위해서 1세대에서 2세대로의 전환이 요구된다. 평가된 에코효율성 결과를 통해 본 연구에서

제시하는 연구 범위와 평가 항목을 기준으로 한 환경과 경제성 측면에서 볼 때 대상 신재생에너지 중 풍력발전의 경쟁력이 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만 풍력발전의 경우 설치되는 지역의 내·외부적인 여건에 따라 설치가 어려울 수 있기 때문에 에코효율성 평가로 도출된 경쟁력 순서를 기준으로 설치 지역의 여건에 따라 선택을 하는 것이 신재생에너지 도입을 위한 환경 및 경제적 측면에서의 최적의 방안이라 할 수 있을 것이다. 또한, 태양광발전 부문에서는 환경성 측면에서는 CdTe 태양광발전이, 경제성 부문에서는 Ar-Si 태양광발전이 가장 높은 경쟁력을 나타냈고, 환경성과 경제성을 통합한 에코효율성 측면에서는 Ar-Si 태양광발전이 최적의 대안으로 나타났다. 이는 RPS 제도 하의 별도 의무에 대해 Ar-Si 태양광발전으로 이행을 하는 것이 에코효율성 측면에서 가장 효과적인 대응이라고 할 수 있다.

## 6. 참고문헌

- 1) Anite system, A First Set of 에코효율성 Indicators for Industry : Pilot Study, (1999).
- 2) 부경진, 태양광발전 시스템의 경제성 분석, 에너지경제연구원, (2006).
- 3) ISO 14040: 2006(E) Environmental management-life cycle assessment-principles and framework, (2006).
- 4) ISO 14044: 2006(E) Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines, (2006).
- 5) Ji-Yong Lee, Moosang Yoo, Kyoung-hoon Cha, Tae Won Lim, Tak Hur, Life cycle cost analysis to examine the economical feasibility of hydrogen as an alternative fuel, Journal of hydrogen energy 34, pp4243 ~ 4255, (2009).
- 6) Ji-Yong Lee, Kyoung-Hoon Cha, Tae-Won Lim, Tak Hur, 에코효율성 of H<sub>2</sub> and fuel cell buses, Journal of hydrogen energy 36, pp1754 ~ 1765, (2011).
- 7) 박순철, 김덕근, 김미선, 신재생에너지 경제성 분석, 한국에너지기술연구원, (2007).
- 8) 김유진, 신재생에너지 발전차액 지원제도의 변화와 그에 따른 차액규모 비교평가, 아주대학교, (2008).
- 9) U.S DOE, 2008 Solar technologies market report, (2010).