

LCA 및 LCC 기법을 이용한 태양광 및 풍력 발전의 환경·경제적 편익 분석

김경환, *허 탁

한국생산기술연구원 자원순환기술지원센터, *건국대학교 신소재공학과

Benefit analysis of environmental and economic aspects on Photovoltaic and
Wind power applying LCA and LCC methodologies

Kyung Hwan Kim, *Tak Hur

Center for Resources Information & Management, Korea Institute of Industrial Technology,

*Dept. of Materials Chemistry & Engineering, Konkuk University

Received: 21 August 2012 / Accepted: 10 September 2012

Abstract

In these last years, the globe faces energy-related problems due to the rational use of resources, greenhouse gases (GHGs) emission and pollutants by the combustion of non-renewable resources. Furthermore, the international oil price has been rapidly increasing with depletion of fossil fuels. For mitigation of these problems, many projects are being planned to use of not traditional fuels and of renewable resources, such as solar, wind, hydro, geothermal, and biomass in the world. Especially, solar and wind power have received particular attention as very important energy source of pollution free and unlimited new renewable energy. Many countries have introduced a policy to promote the installation of PV (Photovoltaic) and wind power systems in accordance with the reduction obligation of greenhouse gases in Climatic Change Convention. For this reason, the global demand for the PV and wind power system is increasing every year.

Korea has also established to national energy policy for PV and wind power system up to 47.1% of total renewable energy supply by 2030. In order to achieve this goal, the amount of electricity generation by PV system will increase from 812 GWh (2010) to 1,972 GWh (2030) and the amount of electricity generation by Wind power will increase from 1,073 GWh (2010) to 16,620 GWh (2030).

Thus, this study analyses the environmental impacts about PV system including sc-Si (single crystalline silicon) and mc-Si (multi crystalline silicon) PV system and wind power system throughout its life cycle. Added to this, economic impacts of target system are estimated based on the life cycle costing (LCC) method that consider total costs, which is capital cost, operation and maintenance (O&M) cost and decommissioning cost.

1. 서론

전 세계적으로 기술과 산업이 발전함에 따라 화석연료의 사용량이 급격히 증가함으로써, 온실가스 및 대기오염물 배출에 의한 범지구적인 환경문제가 주요 이슈로 대두되었다. 특히 온실가스 배출량 증가에 따른 지구온난화로, 다양한 기상이변 현상이 전세계에 걸쳐 발생하고 있다. 또한 화석연료의 무분별한 사용으로 인해 국제유가가 매년 지속적으로 상승하면서, 안정적인 화석연료 수급에 대한 불확실성이 점차 증대되고 있다. 화석연료 사용에 따라 발생하는 다양한 문제들을 해결하기 위하여, 세계 각국에서는 에너지 수급시스템의 전반적인 변화를 시도하고 있으며, 그 일환으로 태양광, 풍력, 수력, 지열 및 바이오매스 등과 같은 신·재생에너지 보급 확대를 위한 국가 차원의 노력이 선진국들을 중심으로 활발히 전개되고 있다. 특히 태양광 및 풍력 발전은 발전 단계에서 오염물질의 배출이 없으며, 무한 사용이 가능한 청정에너지로써 미래 주요 에너지원으로 각광을 받고 있다.

신·재생에너지에 대한 국제적 관심이 증대됨에 따라 국내에서도 저탄소 녹색성장을 위한 다양한 탄소 감축 정책이 추진되고 있다. 그 일환으로 2008년 그린에너지 산업을 차세대 동력으로 육성하기 위한 국가 전략을 발표하였으며, 총 9개 그린에너지 산업 중 태양광, 풍력, 수소·연료전지, 석탄가스화 복합발전을 포함하는 4개의 신·재생에너지 분야가 선정되었다. 또한 2009년 ‘제 3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본계획’을 수립하여 2030년까지 태양광 전력 공급을 1,972GWh (2010년 대비 2.4배 증가), 풍력발전 전력 공급은 16,620GWh (2010년 기준 15.5배 증가)로 확대할 것을 목표로 정책을 추진하고 있다. 특히 태양광 및 풍력 산업을 핵심 분야로 선정하여 지속적인 투자 및 보급 확대를 계획하고 있다.

2. 연구 수행 내용

2.1 연구 목적 및 범위

2.1.1 연구 목적

본 연구에서는 국내 신·재생에너지 산업에서 높은 비중을 차지하고 있는 태양광 (단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템) 및 풍력 발전 시스템을 대상으로 전과정평가와 전과정비용평가 기법을 활용하여 환경성과 경제성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 기반으로 환경성 및 경제성 측면에서 대상 시스템의 경쟁력을 분석하고 개선점을 도출하여 국내 태양광과 풍력 발전의 효율적인 보급 확대를 위한 방안을 제시하고자 한다.

2.1.2 연구 범위

2.1.2.1 대상 시스템

본 연구에서는 발전량을 기준으로, 국내 신·재생에너지 산업에서 높은 점유율을 차지하고 있으며, 국가 차원에서 지속적인 개발 및 보급 전략이 추진중인 태양광 및 풍력 발전을 대상 시스템으로 선정하였다. 태양광 발전 시스템의 경우, 결정질계 태양전지가 전체 태양광 발전 중 약 99.1%를 차지하고 있으며, 또한 결정질 태양전지는 단결정 및 다결정 실리콘 태양전지가 대부분을 차지하고 있기 때문에 이를 대상 시스템으로 선정하였다. 풍력 발전 시스템은 국내에서 가장 많이 설치되어 가동되고 있는 육상 풍력/수평축 계통 연계 방식을 고려하였다. 환경성 및 경제성을 동등하게 비교하기 위하여 대상 시스템의 발전용량은 2MW급으로 선정하였다.

태양광 및 풍력 발전 시스템은 다양한 하부 모듈을 포함하고 있기 때문에 본 연구에서는 이를 모두 고려하였다. 태양광 및 풍력 발전 시스템을 구성하고 있는 하부 모듈은 Fig. 1.과 같으며, 하부 모듈별 주요 기능은 Table 1.과 같다.

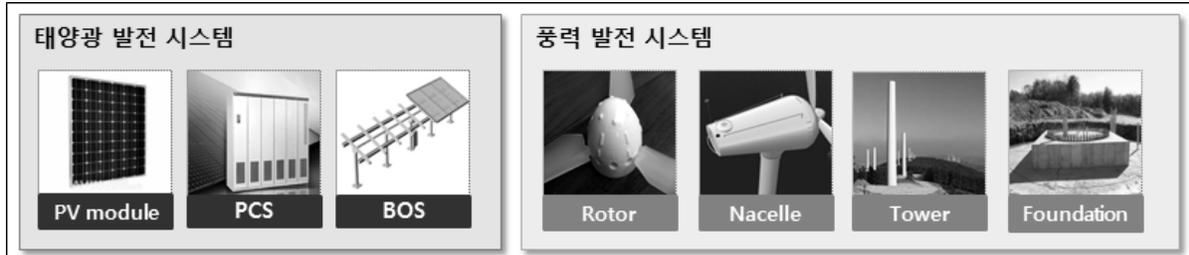


Fig. 1. 태양광 및 풍력 발전 시스템 하부 모듈

Table 1. 태양광 및 풍력 발전 시스템 하부 모듈별 주요 기능

발전 유형	구분	기능
태양광 발전	PV module (Photovoltaic module)	- 태양에너지를 통해 전자를 이동시켜 전력을 생산
	PCS (Power Control System)	- PV module을 통해 생산된 직류 전력을 교류 전력으로 전환
	BOS (Balance Of System)	- PV module 및 PCS 이외의 태양광 발전 시스템 운영을 위해 사용되는 기타 모든 부분 - 지지대, 케이블, 스위치 등이 포함
풍력 발전	Rotor	- Blade(회전날개)를 통해 바람이 가지는 운동에너지를 회전 에너지로 전환
	Nacelle	- Rotor에서 얻어진 회전력을 전기로 변환 - 발전기, Yawing(전력안정화 장치) 등으로 구성
	Tower	- 풍력 발전기 지지를 위한 구조물
	Foundation	- Tower 하부 콘크리트 구조물

2.1.2.2 시스템경계

본 연구에서는 대상 시스템의 환경성 및 경제성을 평가하기 위하여 원료채취, 구성 모듈 제조, 사용, 폐기 단계를 모두 고려하는 전과정 단계를 시스템경계로 선정하였다. 태양광 및 풍력 발전 시스템의 시스템경계는 Fig. 2.와 같다. 제조 및 설치 단계는 태양광과 풍력 발전 시스템을 제조하기 위한 모든 원자재의 채취 및 가공과 이를 통한 구성 부품들의 생산, 최종 조립 및 설치하는 단계로 정의하였으며, 운영 및 유지 단계는 설치된 대상 발전 시스템의 수명 동안 전력을 생산하는 단계로 정의하였다. 또한 폐기 단계는 사용이 완료된 대상 발전 시스템을 다양한 처리 유형을 통해 폐기하는 단계로 정의하였다.

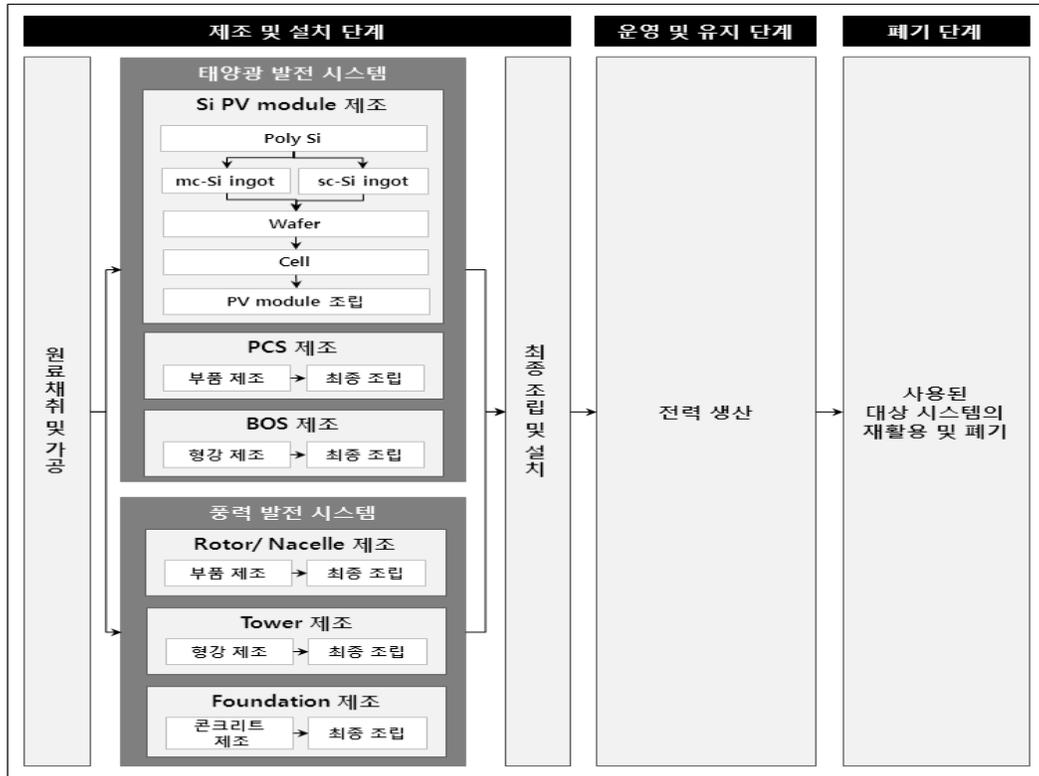


Fig. 2. 태양광 및 풍력 발전 시스템의 시스템경계

2.1.2.3 기능, 기능단위 및 기준흐름

대상 발전 시스템의 환경성 및 경제성을 평가하고 비교 분석을 수행하기 위해서는 동등한 비교 기준을 선정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 대상 발전 시스템의 기능, 기능단위 및 기준흐름을 다음 Table 2.와 같이 정의하였다.

Table 2. 기능, 기능단위 및 기준흐름

	태양광 발전		풍력 발전
	단결정	다결정	
기능	대상 시스템 발전을 통한 전력생산		
기능단위	전력 1kWh 발전		
기준흐름	PV module : 2.31E-03kg PCS : 3.56E-04kg BOS : 2.15E-03kg	PV module : 2.44E-03kg PCS : 3.56E-04kg BOS : 2.30E-03kg	Nacelle : 8.83E-04kg Rotor : 4.88E-04kg Tower : 2.18E-03kg Foundation : 1.10E-02kg

2.1.2.4 환경성 평가 항목

본 연구에서는 태양광 및 풍력 발전 시스템에 대한 환경성 평가를 위해 신·재생에너지 분야에서 가장 중요한 환경 측면인 지구온난화를 주요 이슈로 정의하였다. 또한 에너지와 CO₂ 측면에서 태양광 및 풍력 발전 시스템의 효율성을 평가하기 위하여 EBPT (Energy PayBack Time) 및 CO₂ PBT (CO₂ PayBack Time)를 산정하였다.

2.1.2.5 경제성 평가 항목

본 연구에서는 태양광 및 풍력 발전 시스템에 대한 경제성 평가를 수행하기 위해 대상 발전 시스템의 전과정에 걸쳐 투입되는 비용을 고려하였다. 또한 경제적 측면에서 태양광 및 풍력 발전 시스템의 경쟁력을 분석하기 위하여 Cost PBP (Cost PayBack Period) 및 ROI (Return On Investment)를 산정하였다.

2.1.2.6 가정 및 제한사항

본 연구에서는 태양광 및 풍력 발전 시스템의 환경성과 경제성을 평가하기 위하여 Table 3.과 같은 가정 및 제한사항을 적용하였다.

Table 3. 가정 및 제한사항

평가 항목	가정 및 제한사항
환경성	본 평가의 환경성 평가는 ‘지구온난화 영향’을 대상으로 수행하였다.
	각 투입물질에 대한 데이터베이스 구축 시, 투입물을 생산하기 위한 인프라는 전과정 측면에서 상대적으로 환경영향이 매우 적기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.
	국내 운송에 의한 환경영향은 매우 적은 환경 기여도를 가지기 때문에 본 연구에서는 제외하였다.
	대상 발전 시스템 개별 모듈을 최종 조립하고 설치 시 발생하는 환경영향은 제외하였다.
	일반적으로 대상 발전 시스템을 통해 전력을 생산하는 사용단계에서 발생하는 환경부하는 미비하기 때문에 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다.
	현재 국내에서는 태양광 및 풍력 발전 시스템의 폐기 및 재활용이 수행되지 않기 때문에, 해외 문헌 데이터를 적용하여 원료물질별 폐기 데이터를 구축하였으며, 폐기단계에서 발생하는 폐기물 처리에 대한 부분은 제외하였다.
	단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 전환효율은 데이터 수집 대상 국내 제조업체에서 제공하는 값인 15.96%, 14.91%로 적용하였다.
	한국에너지기술연구원 데이터를 기반으로 국내 일조량을 1301.35kWh/m ² /yr로 적용하였다.
경제성	대상 시스템의 수명 동안 연간 발생하는 운영 및 기타 비용은 2011년을 기준으로 수집한 후, 매년 동일한 비용이 소모된다고 가정하여 현재가치화 하였다.
	대상 시스템의 폐기 비용은 원료물질별 재활용을 통한 취득비용만을 고려하였으며, 재활용 공정, 매립 및 소각 시 소요비용은 제외하였다.
	태양광 및 풍력 발전 시스템을 통해 생산된 전력 거래 단가는 최근 5년간 평균값인 116.59원/kWh, 117.13원/kWh로 산정하였다.
	할인율은 최근 5년간 물가상승률 및 장기예금금리를 고려하여 4.94%로 산정하였다.
공통	대상시스템은 특정 제조사의 발전 시스템을 선정하여 진행한 것으로, 동일 발전시스템이더라도 그 제조/운영사의 차이에 따라 결과가 변동될 수 있다.
	태양광 발전 시스템을 구성하는 하위 모듈별 수명은 다음과 같이 적용하였다. - PV module : 30년, PCS : 30년, BOS : 30년 이상
	풍력 발전 시스템의 수명은 20년으로 적용하였다.

2.2 환경성 평가 수행

대상 발전 시스템의 환경성 평가 결과를 도출하기 위해서는 다양한 데이터의 수집 및 적용이 요구된다. 본 연구에서는 대상 발전 시스템의 전과정에 걸친 투입/산출물과 관련된 다양한 데이터를 수집하기 위하여, 관련 업체를 대상으로 한 현장 방문을 우선적으로 수행하였으며, 방문 수집이 불가능할 경우 문헌자료를 통하여 데이터를 수집하고 현장 전문가들의 자문을 받아 데이터를 산출하였다.

2.2.1 태양광 발전 시스템

본 연구에서는 단결정 및 다결정 실리콘 PV module, PCS, BOS를 포함하는 태양광 발전 시스템에 대한 제조공정 데이터를 규명하기 위하여, 국내에 존재하는 다양한 제조 업체를 대상으로 관련 데이터를 수집하였다. Table 4.는 태양광 발전 시스템에 대한 데이터 수집 현황을 나타낸다.

Table 4. 태양광 발전 시스템 데이터 수집 현황

하위 모듈	구성부품	출처	데이터 품질
PV module	폴리실리콘	Eco-invent	2차 데이터
	단결정 실리콘 잉곳	(주)렉서	1차 데이터
	다결정 실리콘 잉곳	미리넷솔라	1차 데이터
	웨이퍼	Eco-invent	2차 데이터
	셀	미리넷솔라	1차 데이터
	모듈	SDN	1차 데이터
PCS		카코뉴에너지 등	1차 데이터
BOS		우리에너지뱅크, 썬트랙, 솔라테크	1차 데이터

본 연구에서는 단결정 및 다결정 실리콘 PV module을 제조하는 일련의 단위공정인 폴리실리콘, 잉곳, 웨이퍼, 셀 및 모듈 제조공정 별로 투입되는 금속, 화학물질, 에너지, 윤활유 등 다양한 유형의 투입물 데이터 및 배출물 데이터를 고려하였다. 다음 Table 5.는 대상 태양광 발전 시스템의 환경성 평가 수행을 위해 수집된 제조공정 별 투입물 데이터 현황을 나타낸다.

Table 5. 태양광 발전 시스템 투입물 데이터

하위 모듈	제조공정	데이터 분류	투입물
PV module	폴리 실리콘	원료물질	Hydrochloric acid 35%, Hydrogen, MG-Si
		보조물질	Caustic soda 50%
		에너지	Electricity, Heat
	단결정 실리콘 잉곳	원료물질	Poly-Si
		보조물질	Industrial water, Caustic soda 50%, Argon, Ceramic tiles
		에너지	Electricity

PV module	다결정 실리콘 잉곳	원료물질	Poly-Si
		보조물질	Industrial water, Argon, Ceramic tiles
		에너지	Electricity
	웨이퍼	원료물질	Ingot
		보조물질	Industrial water, Filtered water, Caustic soda Hydrochloric acid 30%, Linear alkyl benzene sulfonate acid, Glass wool, Brass roll, Hot rolled steel coil
		보조물질	Silicon carbide, Acetic acid 98%, Triethylene glycol, Dipropylene glycol monomethyl ether, Acrylic binder
		에너지	Electricity
	셀	원료물질	Ammonia, Phosphoric acids, Wafer, Silicon tetrahydride, Silver, Aluminium
		보조물질	Hydrochloric acid 35%, Nitric Acids 65%, Hydrogen fluoride 50%, Potassium hydroxide 45%, Sodium hydroxide 30%, Hydrogen peroxide 50%
		에너지	Electricity
	모듈	원료물질	Cell, Polyethylene film, Copper wire, Busbar wire Aluminum frame, Solder(Sn60Pb40), Ethylvinylacetate foil, Low iron tempered glass, Polyvinylfluoride film, Silicon
		보조물질	-
에너지		Electricity	
PCS	구성부품	Inverter enclosure, Fan, Outlet filter, Cover support, Duct, PEBB enclosure, Current transducer 등 총 29종	
BOS	원료물질	Steel	
	보조물질	-	
	에너지	Electricity	

대상 태양광 발전 시스템의 환경영향을 기능단위인 전력 1kWh 생산 기준으로 도출하기 위해서는 전체 수명 동안의 총 발전량을 산정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 최근 5년간 국내에 설치되어 운영중인 태양광 발전 시스템의 발전용량 및 연간 발전량 데이터를 기반으로 수명 동안의 총 발전량을 Table 6.과 같이 산정하였다.

현재 국내에서는 태양광 발전 시스템의 폐기가 이루어지지 않고 있기 때문에, 해외 문헌 정보를 기반으로 시스템 원료물질별 폐기 및 재활용 비율을 수집하여 개별 중량을 산정한 다음, 처리 유형에 따라 국내 및 국외 LCI 데이터베이스를 연결하여 폐기 단계의 환경영향을 도출하였다.

Table 6. 태양광 발전 시스템 총 발전량

년도	발전용량(kW)	발전량(kWh/yr)
2006	6,350	2,857,460
2007	32,287	15,313,750
2008	403,099	238,898,000
2009	404,584	553,599,700
2010	492,674	1,052,238,810
평균	267,799	372,581,544
*총 발전량 산정식 $\text{평균 발전량} / \text{평균 발전용량} \times \text{대상 시스템 용량} \times \text{수명}$ $= 372,581,544 \text{ kWh/yr} / 267,799 \text{ kW} \times 2,000\text{kW} \times 30\text{년}$ $= 60,252,437.71 \text{ kWh}$		

2.2.2 풍력 발전 시스템

국내에서는 아직까지 2MW급 대형 풍력 발전 시스템 제조 기술이 널리 보급되어 있지 않으며, 또한 관련 기술의 특성상 정보 수집에 한계점이 있기 때문에, 세계 최대 풍력 발전 시스템 제조업체인 VESTAS의 2차 데이터를 수집하여 대상 발전 시스템의 환경성을 규명하였다. 본 연구에서는 풍력 발전 시스템을 제조하기 위해 투입되는 다양한 유형의 투입물 및 배출물 데이터를 고려하였다. 다음 Table 7.은 대상 풍력 발전 시스템의 환경성 평가 수행을 위해 수집된 투입물 데이터 현황을 나타낸다.

Table 7. 풍력 발전 시스템 투입물 데이터

대상 시스템	데이터 분류	투입물
풍력 발전 시스템	원료물질	Unalloyed / low alloyed steel, Highly alloyed steel, Cast iron, Steel and iron materials (unspecified), Aluminium and aluminium alloys, Copper, Thermoplastics, Elastomers / elastomeric compounds, Duromers, Polymeric compounds, Lacquers, Modified organic natural materials, Ceramic / glass, Concrete, Electronics, Electrics, Magnets
	보조물질	Lubricants, SF ₆ gas
	에너지	Electricity

풍력 발전 시스템의 총 발전량은 태양광 발전과 마찬가지로 최근 5년간 국내에 설치되어 운영 중인 풍력 발전 시스템의 발전용량 및 연간 발전량 데이터를 수집하여 7,585,565,892 kWh로 산정하였으며, 폐기 단계의 환경영향은 해외 문헌 정보를 기반으로 시스템 원료물질별 폐기 및 재활용 비율을 수집하여 개별 중량을 산정한 다음, 처리 유형에 따라 국내 및 국외 LCI 데이터베이스를 연결하여 도출하였다.

2.3 경제성 평가 수행

대상 발전 시스템의 경제성 평가 결과를 도출하기 위해서는 전과정에 걸쳐 발생하는 다양한 유형의 비용 데이터의 수집이 요구된다. 본 연구에서는 발전 용량을 기준으로 주요한 비중을 차지하는 국내 태양광 및 풍력 발전 단지를 대상으로 설문지 작성을 통한 실제 비용 데이터를 수집하였다. 전과정비용 항목으로는 자본비용, 운영비용, 기타비용 및 폐기비용을 고려하였으며, 과거 시점에서 발생한 비용은 식 1), 매년 동일하게 발생하는 미래 비용은 식 2)를 적용하여 현재가치화 하였다. 대상 시스템의 전과정 동안 발생하는 투입/배출물의 환경영향은 시간의 흐름에 따라 일정한 값을 가지는 반면, 비용의 가치는 지속적으로 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 30년의 수명을 가지는 태양광 발전 시스템이 풍력 발전 시스템과 동일한 시점에 설치되어 풍력 발전 시스템의 수명인 20년 동안 운영된다고 가정하여, 최종 10년에 대한 감가상각비 (기물 설비가 제품이나 서비스 등을 생산하면서 노후한 만큼의 가치)를 반영함으로써, 대상 시스템 간 경제성을 동등하게 비교하였다.

$$PV = H_t(1+d)^t \tag{식 1}$$

d =할인율, PV =과거시점에서 수취하거나 지불하는 현금의 현재가치,

H_t = t 년 말에 수취하거나 지불한 현금

$$PV = A_0 \times \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+d)^t} = A_0 \times \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \tag{식 2}$$

자본비용은 대상 발전 시스템을 구축하기 위해 초기에 투자된 비용으로써, 시스템을 구성하는 주요 장비 및 보조 장비 구입 비용, 시스템 설치 시 소요되는 건설비용 및 인건비용, 기타 경비 등을 포함하였다. 운영비용은 대상 발전 시스템을 통해 전력을 생산하는 동안 발생하는 유지/보수와 관련된 비용으로 정의하였으며, 자본비용 및 운영비용 이외의 부수적으로 소비되는 비용들을 기타 비용 (세금, 보험료 등)으로 분류하였다. 또한 폐기비용은 사용이 완료된 대상 발전 시스템을 다양한 처리 유형으로 폐기 될 시 발생하는 비용으로, 본 연구에서는 물질 재활용을 통한 판매비용을 고려하였다. 2MW급 기준 태양광 및 풍력 발전 시스템의 전과정비용 데이터는 Table 8.과 같다.

Table 8. 태양광 및 풍력 발전 시스템의 전과정비용(2MW급 기준)

비용항목		태양광 발전 시스템		풍력 발전 시스템(원)	
		단결정(원)	다결정(원)		
자본비용	시스템 구입 비용	PV module	7.24E+08	5.80E+08	3.52E+09
		PCS	1.54E+08	1.54E+08	
		BOS	7.46E+07	7.99E+07	
	보조장비 구입비용		1.47E+08	1.47E+08	5.26E+08
	설치비용		1.48E+08	1.48E+08	1.58E+09
	기타자본비용		5.72E+05	5.72E+05	1.50E+08
운영비용		6.10E+08	6.10E+08	1.38E+09	
기타비용	세금	2.06E+07	2.06E+07	1.78E+07	
	보험료	2.20E+07	2.20E+07	3.06E+07	
폐기비용		-6.79E+07	-6.65E+07	-1.07E+08	

3. 연구 결과

3.1 환경성 평가 결과

3.1.1 지구온난화 영향

다음 Fig. 3은 태양광 및 풍력 발전 시스템의 지구온난화 영향 결과를 나타낸다.

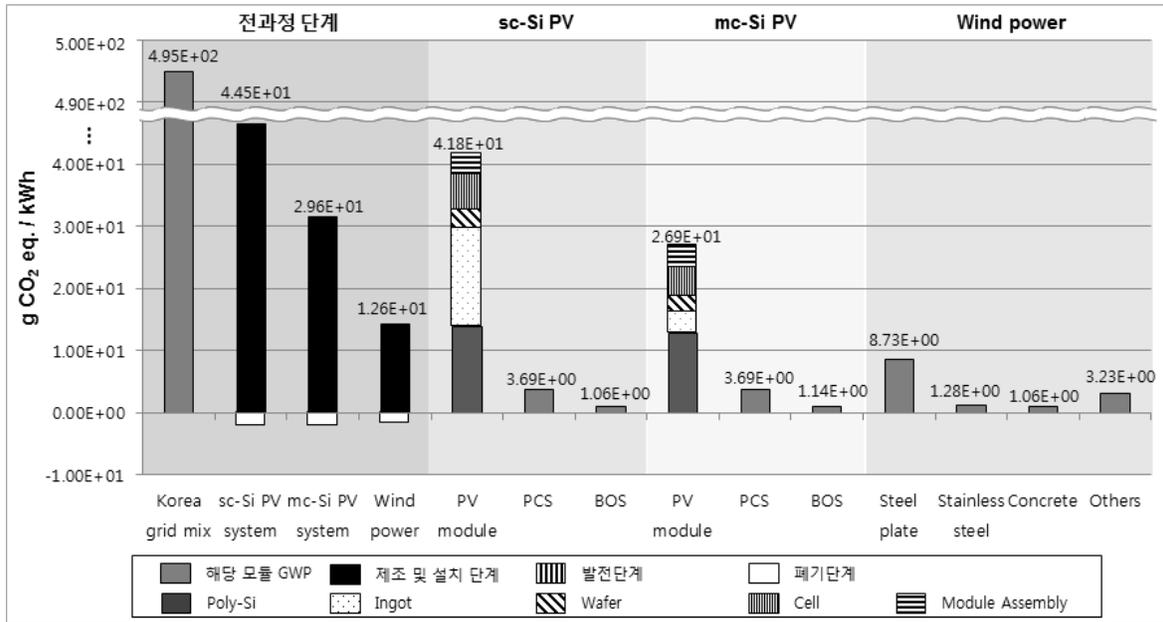


Fig. 3. 태양광 및 풍력 발전 시스템의 지구온난화 영향 결과

대상 발전 시스템과 국가 전력 통합 그리드 간 지구온난화 영향 결과를 비교하면, 먼저 단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 경우, 국가 전력 대비 8.99%, 5.98%의 지구온난화 영향이 발생하였으며, 풍력 발전 시스템의 경우, 2.54%의 지구온난화 영향이 발생하는 것으로 도출됨으로써, 환경성 측면에서 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 대상 발전 시스템 간 비교 결과에서는, 풍력 발전 시스템의 지구 온난화 영향이 가장 적게 발생하였다 (단결정 대비 29.60%, 다결정 대비 44.50%). 국내의 경우, 국가 전력 발전 방식 중 화력 발전이 67.4%를 차지하고 있으며, 이를 통한 전력 생산 시 다량의 온실가스 배출로 인한 지구온난화 영향이 발생한다. 따라서 풍력 발전 시스템에 비해 상대적으로 많은 에너지를 사용하는 태양광 발전 시스템에서 보다 높은 지구온난화 영향이 발생하는 것으로 분석되었다.

전과정 단계 중 가장 높은 지구온난화 영향을 발생하는 제조 및 설치 단계의 지구온난화 영향을 비교해보면, 먼저 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 경우, PV module의 지구온난화 영향이 제조 및 설치 단계의 89.9%를 차지함으로써, 가장 높은 환경영향을 나타내었다. PV module 제조과정 중 잉곳 제조 단계의 지구온난화 영향이 가장 높은 이유는 상대적으로 많은 에너지를 소비하는 공정인 Czochralsky 공정을 통해 단결정 잉곳이 생산되기 때문인 것으로 분석되었다. 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 지구온난화 영향은 3.17E+01 g CO₂ eq./kWh로 나타났으며, 하위 모듈별 지구온난화 영향 기여도는 PV module이 84.9%, PCS가 11.7%, BOS가 3.4%로 도출되었다. 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템과 마찬가지로 PV module의 지구온난화 영향이 가장 높게 나타났으며, 특히 MG-Si을 정제하여 폴리실리콘을 제조하는 단계에서 다량의 에너지를 소비하기

때문에 폴리실리콘 제조과정에서의 지구온난화 영향이 가장 높게 도출되었다. 반면 casting 공정을 통한 잉곳 제조 단계에서는 단결정 실리콘 태양광 모듈과는 달리 비교적 적은 지구온난화 영향 결과를 나타내었다. 풍력 발전 시스템의 제조 및 설치 단계 지구온난화 영향은 1.43E+01 g CO₂ eq./kWh로 도출되었으며, 하위 모듈은 Rotor, Nacelle의 주요 부품 및 Tower의 주요 원료물질인 후판 및 스테인레스 스틸의 지구온난화 영향 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다.

3.1.2 EPBT (Energy PayBack Time)

EPBT는 대상 발전 시스템의 전과정 동안 소비되는 에너지량과, 수명 동안 생산된 전력만큼을 기존 전력 방식으로 발전하기 위해 필요 시 되는 에너지량과 비교 분석하여, 대상 발전 시스템의 전과정에 걸쳐 사용되는 에너지 소비량과 저감할 수 있는 에너지량이 같아지는 시점을 의미한다. 본 연구에서 수행한 EPBT 산정식은 다음과 같다.

$$EPBT[yr] = \frac{\text{총 에너지 투입량 [MJ]}}{\text{대상 시스템 연간 발전량 [kWh/yr]} \times \text{국내 전력 통합 grid 에너지 환산 계수 [MJ/kWh]}}$$

총 에너지 투입량은 대상 발전 시스템의 전과정에 걸친 국내 전력 사용량을 의미하며, 연간 발전량은 전체 발전량을 수명으로 나누어 산정하였다. 국내 전력 통합 그리드 에너지 환산 계수는 전력 단위(kWh)를 에너지 단위(MJ)로 환산할 때 사용되는 인자로서, 현재 국내 발전 방식을 고려하여 1kWh의 전력을 생산하기 위해 요구되는 에너지량(MJ)을 고려하여 도출하였다. 다음 Table 9.는 태양광 및 풍력 발전 시스템의 EPBT를 산정하기 위해 사용된 데이터이며, 단결정 및 다결정 실리콘 태양광, 풍력 발전 시스템의 EPBT 결과는 각각 2.65년, 1.74년, 0.24년으로 도출되었다.

Table 9. 대상 발전 시스템 EPBT 산정 결과

구분	태양광 발전 시스템		풍력 발전 시스템
	단결정	다결정	
총 에너지 투입량(MJ)	58,350,267	38,438,225	9,868,707
국내 전력 에너지 환산 계수 (MJ/kWh)	10.97	10.97	10.97
대상 시스템 연간 발전량 (kWh/yr)	2,008,415	2,008,415	3,792,783
EPBT(yr)	2.65	1.74	0.24

3.1.3 CO₂ PBT (CO₂ PayBack Time)

CO₂ PBT는 대상 발전 시스템의 전과정에 대한 이산화탄소 발생량과, 수명 동안 생산된 전력량이 기존 발전 방식으로 발전된 전력량을 대체할 때 저감 가능한 이산화탄소량을 비교 분석하여, 전과정 동안의 이산화탄소 발생량과 저감되는 이산화탄소량이 같아지는 시점을 의미한다. CO₂ PBT 산정식은 다음과 같다.

$$CO_2PBT[yr] = \frac{\text{전과정 CO}_2\text{배출량 [kg]}}{\text{연간 CO}_2\text{감축량 [kg/yr]}}$$

전과정 이산화탄소 배출량은 대상 발전 시스템의 전과정에 걸쳐 배출되는 이산화탄소의 양을 의미하며, 연간 이산화탄소 감축량은 기존 발전 방식에 대한 이산화탄소 배출량과 비교했을 때 대상 발전 시스템을 통해 저감되는 이산화탄소의 양을 의미한다. 이는 대상 발전 시스템의 연간 발전량에 국내 전력 CO₂ 배출계수를 곱하여 산정한다. 다음 Table 10.은 태양광 및 풍력 발전 시스템의 CO₂ PBT를 산정하기 위해 사용된 데이터이며, 단결정 및 다결정 실리콘 태양광, 풍력 발전 시스템의 CO₂ PBT 결과는 각각 2.67년, 1.78년, 0.45년으로 도출되었다.

Table 10. 대상 발전 시스템 CO₂ PBT 산정 결과

구분	태양광 발전 시스템		풍력 발전 시스템
	단결정	다결정	
전과정 CO ₂ 배출량(kg)	2,656,814	1,773,528	836,179
대상 시스템 연간 발전량 (kWh/yr)	2,008,415	2,008,415	3,792,782
국내 전력 CO ₂ 배출계수 (kg/kWh)	0.49	0.49	0.49
연간 CO ₂ 감축량(kg/yr)	993,939	993,939	1,877,000
CO ₂ PBT(yr)	2.67	1.78	0.45

3.2 경제성 평가 결과

3.2.1 전과정비용

다음 Fig. 4.은 태양광 및 풍력 발전 시스템의 전과정비용 산정 결과를 나타낸다.

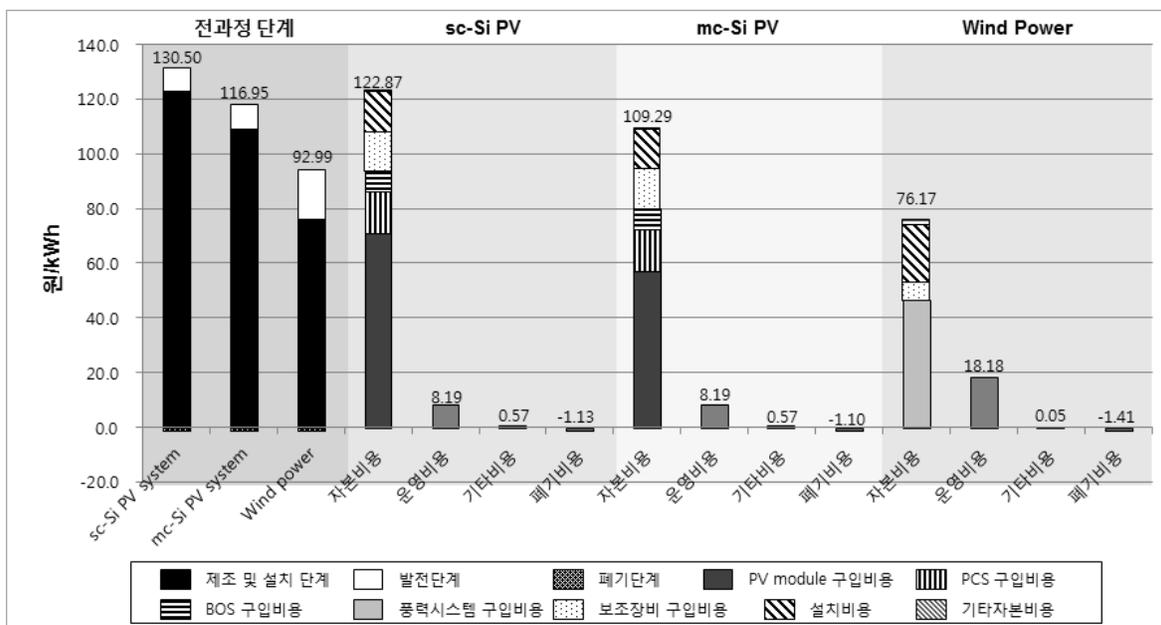


Fig. 4. 태양광 및 풍력 발전 시스템의 전과정비용 산정 결과

태양광 발전 시스템의 경우, 전과정비용 중 자본 비용이 122.87원/kWh (단결정), 109.29원/kWh (다결정)으로 도출되어 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 또한 자본비용 내에서 PV

module, PCS, BOS를 포함하는 시스템 구입비용이 76.29% (단결정), 73.35% (다결정)로 도출되어 주요 원가동인으로 작용하였으며, 보조장비 (조작봉, 검증기, 멀티네트 등) 구입비용 및 설치비용이 각각 14.46원/kWh, 14.61원/kWh로 높은 비율을 차지하였다. 태양광 발전 시스템의 운영비용은 8.19원/kWh, 기타비용은 0.57원/kWh로 산정되었으며, 폐기비용은 재활용된 원료물질 판매에 의한 이득으로 (-)값이 도출되었다.

풍력 발전 시스템의 경우, 전과정비용 중 자본 비용이 76.18원/kWh로 도출되어 가장 많은 비중을 차지하였다. 자본비용을 구성하는 세부 항목별 비용 결과를 살펴보면, 시스템 구입비용이 46.39원/kWh (60.90%), 설치비용이 20.87원/kWh로 도출되어 주요한 원가동인으로 작용하였다. 운영비용 및 기타비용은 각각 18.18원/kWh, 0.05원/kWh로 산정되었으며, 폐기비용은 -1.41 원/kWh로 도출되었다.

3.2.2 Cost PBP (Cost PayBack Period)

Cost PBP는 대상 발전 시스템의 전과정에 걸쳐 투입되는 비용과, 수명 동안 생산된 전력을 판매할 때 발생하는 순이익을 비교 분석하여, 전과정 동안 투입되는 비용과 이익이 같아지는 시점을 의미한다. Cost PBP는 다음과 같은 산정식을 통해 도출된다.

$$CostPBP[yr] = \frac{I_c}{B_{ac}} = \frac{C_c \times D_c}{(E_{ag} + E_c) - OMR_{ac}}$$

I_c =총 투입비용, B_{ac} =연간 순이익, C_c =자본비용, D_c =폐기비용, E_{ag} = 연간 전력 생산량, E_c =전력거래가격, $O\&MR_{ac}$ =연간 운영 및 유지보수비용

대상 발전 시스템으로 생산된 전력의 거래가격 (원/kWh)은 전력거래소에서 운영하는 전력통계시스템을 통해 최근 5년간 데이터를 수집하여 산술평균을 적용한 결과, 태양광 발전 시스템이 116.59원/kWh, 풍력 발전 시스템은 117.13원/kWh로 도출되었다. 다음 Table 11.은 대상 발전 시스템의 Cost PBP 산정을 위하여 수집한 데이터 및 그 결과를 나타낸다.

Table 11. 대상 발전 시스템 Cost PBP 산정 결과

구분	태양광 발전 시스템		풍력 발전 시스템
	단결정	다결정	
자본비용(원)	7,403,237,577	6,584,812,224	5,778,466,783
폐기비용(원)	-67,899,144	-66,470,862	-106,870,113
연간 전력 생산량(kWh/yr)	2,008,414	2,008,414	3,792,783
전력거래가격(원/kWh)	116.59	116.59	117.13
연간 운영 및 유지비용(원/yr)	27,419,451	27,419,451	72,811,191
Cost PBP	35.48	31.53	15.27

Cost PBP 결과를 살펴보면, 단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템이 각각 35.48년, 31.53년으로 도출되었으며, 풍력 발전 시스템의 경우, 15.27년으로 도출되었다. 본 연구에서 고려한 태양광 발전 시스템의 Cost PBP는 수명인 30년보다 길게 도출되었으며, 이는 태양광 발전 시스템을 설치하고 운영하는 동안, 경제적인 손실이 발생함을 의미한다. 반면, 풍력 발전 시스템의 Cost PBP는 15.27년으로 도출됨으로써, 자체 수명인 20년에 비해 단축된 기간을 나타내었다. 이는 풍력 발전 시스템 운영할 경우, 전과정 측면에서 경제적인 이득을 얻을 수 있음을 의미한다.

3.2.3 ROI (Return On Investment)

ROI는 대상 발전 시스템으로 생산된 전력을 판매할 때 발생하는 이익을 총 투자액으로 나누어 산정하며, 이를 통해 경제적인 측면에서 대상 발전 시스템의 총괄적인 경영성과를 분석할 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 산정식을 통해 ROI를 도출하였다.

$$ROI = \frac{B_{tc}}{I_{tc}} = \frac{E_{tg} \times E_c}{C_{tc} + OMR_{tc} + D_{tc}}$$

B_{tc} =총 이익, I_{tc} =총 투자비용, C_{tc} =자본비용, D_{tc} =폐기비용, E_{tg} =총 전력 생산량,
 E_c =전력거래가격, OMR_{tc} =총 운영 및 유지보수비용

ROI가 1보다 큰 값을 나타내면 이는 투자 대비 이익을 달성할 수 대안으로 판단할 수 있다. 즉 투자한 금액을 모두 회수할 수 있을 뿐만 아니라 추가적인 이익을 얻을 수 있기 때문에, 투자자의 입장에서 매력적인 대안이 될 수 있다. 반면 ROI가 1보다 작은 값을 나타내면, 이는 경제성 측면에서 경쟁력이 없는 대안으로 분류 할 수 있다. 본 연구에서는 대상 발전 시스템의 전과정에 걸친 경제성을 분석하기 위하여 다음 Table 12.와 같이 ROI를 산정하였다.

Table 12. 대상 발전 시스템 ROI 산정 결과

구분	태양광 발전 시스템		풍력 발전 시스템
	단결정	다결정	
총 전력 생산량(kWh)	60,252,437	60,252,437	75,855,659
전력거래가격(원/kWh)	116.59	116.59	117.13
자본비용(원)	7,403,237,577	6,584,812,224	5,778,208,169
폐기비용(원)	-67,899,144	-66,470,862	-106,870,113
총 운영 및 유지비용(원)	527,814,194	527,814,194	1,382,750,825
ROI	0.89	0.99	1.26

풍력 발전 시스템의 ROI 값은 1.29로 도출되었으며, 이는 전과정 측면에서 투자한 금액보다 더 많은 이익이 발생함을 의미하므로, 투자 의사결정 시 우선적으로 고려될 수 있는 경쟁력을 갖춘 것으로 분석되었다. 반면 태양광 발전 시스템의 경우, 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 ROI 값이 0.89, 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 ROI 값은 0.99로, 아직까지 자발적인 투자를 유도할 수 있는 경쟁력을 갖추지 못한 것으로 분석되었다.

4. 해석

대상 발전 시스템에 대한 환경성 평가 결과, 지구온난화 영향 측면에서 풍력발전이 가장 친환경적인 신·재생에너지인 것으로 분석되었으며, 태양광 발전 시스템 간 환경성 비교 결과에서는, 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 지구온난화 영향이 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템에 비해 적게 도출되는 것으로 나타나, 환경적으로 우수한 것으로 분석되었다. 대상 발전 시스템의 전과정에 대한 에너지 투입량 및 CO₂ 배출량을 운영 및 유지 단계에서의 전력 생산량 기준으로 보상 받는 시점을 의미하는 EPBT 및 CO₂ PBT 산정 결과 모두 풍력 발전 시스템, 다결정 실리콘 태양

광 발전 시스템, 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템 순으로 낮은 기간이 도출되었다. 이는 단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템이 풍력 발전 시스템에 비해, 상대적으로 많은 에너지를 소비하고, 온실가스 배출이 많이 발생함을 의미하며, 특히 PV module 제조 단위공정 중 에너지 집약적인 공정인 폴리실리콘 및 잉곳 제조 과정에 기인한 것으로 분석되었다.

대상 발전 시스템의 경제성 평가 결과에서는, 전과정비용 측면에서 풍력 발전 시스템이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 이는 태양광 발전과 달리 높은 수준의 기술력 확보를 통한 상용화가 이루어져 특정 수준의 제조비용 저감이 이루어진 상태이기 때문인 것으로 분석되었다. 대상 발전 시스템의 전과정에 걸쳐 투입되는 비용을, 생산된 전력을 판매할 때 발생하는 이익으로 보상받는 시점을 의미하는 Cost PBP는 풍력 발전 시스템이 15.27년, 단결정 및 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템은 각각 35.48년, 31.53년으로 도출되었다. 풍력 발전 시스템의 경우, 자체 수명보다 낮은 Cost PBP를 나타내어, 투자한 비용을 회수할 수 있을 뿐만 아니라, 추가적인 경제적 이득을 얻을 수 있는 것으로 분석되었으나, 태양광 발전 시스템의 경우, 수명보다 높은 Cost PBP가 도출되어, 아직까지 경제적인 측면에서 경쟁력을 확보하지 못한 것으로 분석됨에 따라, 지속적인 연구 개발을 통한 원가 개선이 요구된다. 총 투자비용과 순이익 간의 비율을 의미하는 ROI 산정 결과에서도, 풍력 발전 시스템이 1.26으로 도출되어 비용 경쟁력이 있는 것으로 나타난 반면, 태양광 발전 시스템의 경우, 0.89 (단결정) ~ 0.99 (다결정)의 ROI값을 가짐으로써, 비용 경쟁력을 확보하기 위해서는 0.37원/kWh (단결정) ~ 13.92원/kWh (다결정)의 원가 저감 또는 전력판매가격의 상승이 이루어져야 하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 향후 지속적으로 보급이 확대될 것으로 예상되는 태양광 및 풍력 발전 시스템에 대하여, 환경 및 경제적 측면에서 주요 이슈를 규명하고, 이에 대한 개선 방안을 모색하였다. 대상 발전 시스템의 환경성 및 경제성 평가 수행을 통해, 향후 국내에서 풍력 발전 시스템의 보급을 지속적으로 확산하는 것이 가장 효과적이라는 결론을 도출하였다. 본 연구 수행을 통해 도출된 태양광 및 풍력 발전 시스템의 환경성 및 경제성 평가 결과는 향후 신·재생에너지의 체계적이고 지속가능한 국가 보급 계획을 수립하는데 기반 자료로 활용될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 태양광 및 풍력 발전 시스템의 국내 가용 면적, 지역별 복사량, 지역별 풍속 등을 포함하는 설치 환경과 풍력 발전 시 소음 발생으로 인한 입지 조건의 제한 등과 같은 사회적 요소를 고려하지 못하였으므로, 향후 이러한 요소들에 대한 추가적인 고려를 통해, 보다 신뢰성 높은 환경성 및 경제성 평가가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] T. Markvart, L. Castanger. Practical Handbook of Photovoltaics: fundamentals and applications. 2003
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2011 GLOBAL STATUS REPORT, 2011
- [3] 지식경제부, 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030), 2008
- [4] 전력거래소, 전력통계정보시스템, <http://www.kpx.or.kr/epsis/>
- [5] 한국에너지기술연구원 태양광발전연구센터, 국내·외 태양광발전모듈현황, 2008
- [6] 이건모, 허탁, 김승도, 환경전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 1998
- [7] ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines, ISO; 2006
- [8] ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines; 2006
- [9] Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA, Gregory A. Norris, Int. J. LCA 6 (2), 2001
- [10] 이승복, LCC분석에 의한 시설물 관리의 최적화 방안, Optimization of Facility Management based on a Life-Cycle Cost Analysis, 성균관대학교, 2000
- [11] Sieglinde K. Fuller, Stephen R. Petersen, LIFE-CYCLE COSTING MANUAL for the Federal Energy Management Program, US DOE, 1995
- [12] Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for present and future Power Systems in Europe(ECLIPSE), Photovoltaic (PV) Systems, 2004
- [13] 채인태, 풍력발전 기술과 국내외 시장 및 기술동향, 2006
- [14] 김경해, 이준신, 태양전지 실무 입문, 2008
- [15] 이민식, 태양전지용 잉곳 웨이퍼 산업의 동향과 전망, 산은경제연구소, 2008
- [16] 조신현, 풍력 발전 시스템의 풍력 발전기 및 풍력 발전 컨버터, 2008
- [17] Elsam, Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms, 2004
- [18] Life cycle assessment of a solar module recycling process, Anja Muller, 2005
- [19] VESTAS, V80-2.0 MW : Versatile megawattage, 2008
- [20] VESTAS, Life cycle assessment, of electricity production from a V80-2.0MW gridstreamer wind plant, 2011
- [21] 국토해양부, 생애주기비용 분석 및 평가요령, 2008
- [22] 한국은행, 한국은행 경제통계시스템, <http://ecos.bok.or.kr/>
- [23] Gerald J. Thuesen & W.J. Fabrycky, Engineering Economy, 2003
- [24] London Metal Exchange, <http://www.lme.com/home.asp>
- [25] Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si, Marco Raugei, 2007
- [26] Life cycle assessment study of solar PV systems - An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore, Kannan, 2006
- [27] A preliminary study on potential for very large scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints,

- Masakazu Ito, 2002
- [28] Energy payback times of PV modules and systems, Mariska de Wild-Scholten, 2009
 - [29] Evaluation of CO₂ PayBack Time of power plants by LCA, Kiyotaka Tahara, 1997
 - [30] Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong, H.X. Yang, 2010
 - [31] Yin Hang, Ming Qu, Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States, 2012
 - [32] Kenneth H. Silber, Ph.D, Calculating Return-On Investment, 2002