

태양광 발전 시스템의 eco efficiency 분석

문영수 · 박복재^{*,†}

전남대학교 여수창업보육센터 · *전남대학교 물류통상학부

(2019년 11월 18일 접수, 2019년 11월 29일 수정, 2019년 12월 3일 채택)

Eco Efficiency Analysis of Photovoltaic Generation System

Young-Soo Moon · Bok-Jae Park^{*,†}

Yeosu Business Incubator, Chonnam National University

**Division of Business & Commerce, Chonnam National University*

(Received 18, November 2019, Revised 29 November 2019, Accepted 3, December 2019)

Abstract

The The purpose of this study is to analyze the previous research on the life cycle assessment of photovoltaic power generation system and to derive the eco efficiency of the photovoltaic power generation system based on it. Research results The most efficient eco efficiency power generation system for greenhouse gases is nuclear power, followed by natural gas, coal-fired power generation, geothermal, wind power, hydropower, and solar power. This is because the power generation unit price of renewable energy is higher than the power sales unit price. However, due to technological development, the unit cost of electricity (LCOE) for solar power is gradually decreasing, and the environmental economy of renewable energy power generation systems is expected to gradually improve. In this study, the greenhouse gas emissions, power generation unit price and sales unit price were taken into consideration, so there is a limit to what can be seen as a fixed evaluation result of eco efficiency. Therefore, it is necessary to conduct research by reflecting more diverse environment and various indicators for economic efficiency calculations, and by developing technologies for renewable power generation systems including solar power, greenhouse gas emissions and energy generation unit costs can be calculated. Efforts to lower it are necessary.

Keywords : Photovoltaic generation system, LCA, Eco efficiency

1. 서론

온실가스 배출의 상당 부분은 전기 에너지의 생산과 사용에서 발생된다. 이에 따라 우리나라는 물론 전 세계 국가에서 신재생에너지의 활성화를 위해 태양광 발전에 대한 다

양한 정책 지원을 실시하고 있다.

국내에서는 각 지자체 별로 주택형 미니태양광 보급사업 등이 추진 중이며, 공공기관을 포함하여 다양한 지역에서 태양광 발전소가 건립, 운영되고 있다. 그러나 현재 기술수준에서 태양광 발전을 통해 생산된 전기는 기

[†]Corresponding author E-mail: bjpark73@jnu.ac.kr

존의 화력발전에 비해 환경에 미치는 영향은 매우 낮지만, 전기 판매 금액보다 발전 원가가 더 높아 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 또한 태양광 발전을 통해 생산되는 전기는 미세먼지가 발생하지 않는 친환경 에너지이지만, 발전 시스템의 건립 및 운영, 폐기 단계에서 온실가스 배출이 발생된다. 따라서 환경영향 측면에서는 장점에도 불구하고 경제성 측면에서의 단점이 존재하므로 이를 함께 고려한 환경경제성을 살펴보고자 한다.

본 연구는 현재 기술 수준에서 태양광 발전 시스템의 환경성과 경제성을 함께 고려한 eco efficiency를 다른 신재생 에너지 발전 시스템 및 전통적 발전 방식인 원자력, 화력 발전과 함께 비교 연구하였다. 이를 위해서 각 발전 시스템에 대해 전과정평가 (LCA: Life Cycle Assessment)를 수행한 국내외의 선행연구를 분석하고, 이를 토대로 태양광 발전 시스템을 포함한 다양한 발전원의 Eco efficiency를 도출하였다.

2. 태양광 발전의 전과정평가 가이드라인

태양광 발전의 환경성 평가를 위해 국제 에너지기구(International Energy Agency, IEA)에서 태양광 발전 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)의 일관성, 균형 및 결과의 신뢰성을 보장하기 위해 가이드라인을 개발하였다. 가이드라인은 2011년 초판이 발행되었으며, 2012년 개정판에 이어 2016년 3판 [8]이 출간되었다.

이 방법론을 따라서 전과정평가를 수행할 경우, 태양광발전 시스템 간 또는 타 발전 시스템과의 비교, 그리고 현재 전력망 내 태양광발전 시스템의 환경영향을 평가하는 데 일관성과 신뢰성을 유지하면서 평가가 가능하다. ISO 표준에 따른 전과정평가 방법에 대한 지침으로 수립되었으나, 전과정평가 초보자가 가이드라인을 따라 태양광발전 전과

정평가를 수행하기에는 다소 미흡한 면이 있다. 따라서 IEA의 가이드라인 이외에 전과정평가와 관련된 다른 서적 및 지침을 참고하는 것도 하나의 방법이다. LCA는 ISO 14040과 ISO14044를 따라 평가하여야 한다. 따라서 IEA의 가이드라인은 ISO 지침을 근거로 3.1절 태양광발전 시스템 관련 기술적 특성, 3.2절 전과정목록분석, 3.3절 전과정영향평가, 3.4절 해석, 3.5절 보고와 소통 등 5개의 하위 절로 구성되어 있다.

2.1. 태양광발전 시스템의 기술적 특성

2.1.1. 기대수명

태양광발전 부품과 시스템의 전과정평가에서는아래와 같이 부품별 기대수명을 사용한다.

- 모듈: 30년, 호일 캡슐화는 PV 모듈 보증 기간에 기초하여 수명 산정(25년 후 80% 감가상각)
- 인버터: 15년(소규모 발전), 30년(대규모 발전, 10년마다 10% 부품 교체 시)
- 변압기: 30년
- 구조물: 30년(옥상과 건물 정면), 30-60년(지면 설치 시설물), 지면 설치 구조의 서비스 기간이 다양하여 민감도 분석 수행 필요
- 케이블: 30년
- 제조 공장(자본 설비): 30년 이하(빠른 기술 발전 고려), 가정 사항 기술 필요

2.1.2. 일조량

모듈로 수집된 일조량은 위치와 방향에 따라 다르며, 연구의 목적에 따른 2가지 권고사항은 다음과 같다.

- 산업평균 및 최상 시스템 분석 : 지면의 모든 시스템은 위도에 최적 방향으로 배치된 일조량으로 가정, 옥상 설치에 대한 방향과 각도는 최적화된 것으로 가정

, 정면 시스템 분석을 위해서는 특정 일조량 값을 사용하여야 함.

-그리드망 내 설치된 시스템의 평균 분석 : 실제 방향과 일조량을 사용하며, IEC 61724에 일조강도(irradiance, W/m²)와 일조량(irradiation, kWh/m²/yr)에 대한 설명을 참조한다.

2.1.3. 성능계수

성능계수(Performance ratio, PR)는 모듈의 DC 정격 성능(조사 및 모듈 효율의 제품)과 실제 AC 전력 생산의 차이를 나타낸다. 이는 설치 종류에 따라 다르다. 주거 시스템에서 수집된 연간 평균 성능계수 데이터는 1991년 0.64에서 2005년 0.74로 상승 추세를 나타낸다. 2005년부터 인버터 효율성 개선으로 현재 시스템은 더 높은 값(0.72-0.82 고정 틸트 시스템의 접지 마운트)을 갖는다.

일반적으로, 성능계수는 ①온도 감소 ② 초기 결함을 감지하고 조정하는 PV 시스템 모니터링을 갖춘 경우 향상된다.

차광은 성능계수에 악영향을 미칠 수 있으며, 설계가 잘되고 환기가 잘되는 대규모 시스템에서 높은 성능계수를 갖는다는 것을 의미한다.

장소별 PR 값 또는 옥상 PR 기본값 0.75, 접지 장착 유틸리티 설치의 PR 기본값은 0.80 중 하나의 사용을 권장한다. 이러한 기본값은 연령에 의한 감소가 포함되어 있다.

초기 성능에 따라 장소별 PR 값을 사용하는 경우, 저감 관련 손실에는 성능의 장기 전망에 추가해야 한다.

가능한 경우 설치 기술의 실제 성능 데이터(설치량 기준, 실제 생산)를 사용하여, 또는 그리드 네트워크에 설치할 시스템의 평균을 분석할 때 실제 성능 데이터를 반영하는 합리적인 가정을 한다.

2.1.4. 효율저하

모듈의 효율저하로 수명기간 동안 효율이 감소하며, 저하율은 다음과 같다.

-원수 모듈 기술 : 수명 30년 도래 시점에 초기 효율의 80%에 달하는 선형적 효율 감소를 가정(예: 연간 0.7% 또는 평균 10%), 실제 데이터가 없다면, 그에 대한 설명이 필요함. 현장 데이터에서 외삽하는 경우, 저하 고려 여부를 명시하여야 함

2.1.5. 보완 시스템(Back-up System)

PV LCA의 시스템 경계에서 보완 시스템은 제외한다. 만약 보완 시스템을 포함하는 경우 명확하게 명시하여야 한다.

2.2. 전과정평가 모델링

2.2.1. 기능단위 및 참고흐름

다양한 PV 시스템과 다른 발전 시스템과의 비교를 위한 기능이 기능 단위 및 참고흐름으로 구체화 된다. 참고 흐름은 기능 단위로 정량화(kWh 또는 m², 또는 kWp)된다. 지역, 사용 모듈 기술, 전압 수준 및 송·배전 손실이 설명되어야 한다.

2.2.2. 시스템 경계

제품 시스템의 분석 범위를 정의하며, 전과정 목록분석에서 포함 또는 제외되는 사항에 대한 가이드를 제공한다.

- 제품 단계 : 원료 및 에너지 공급, 패널 제조, 마운팅 시스템 제조, 케이블 제조, 인버터 제조, 전력 생산 및 그리드에 공급에 필요한 모든 부품을 포함
- 건설 공정 단계 : 발전소 현장으로의 운송 및 기초 및 지지 구조물
- 사용 단계 : 보조 전력 수요, 패널 청소 및 유지보수, 수리 및 교체
- 폐기 단계 : 해체, 운송, 폐기물 처리, 재활용 및 재사용, 폐기

-제의 대상 : 통근, 관리 및 마케팅, R&D 활동

2.2.3. 물 사용

물 사용 모델링의 주요 기준은 물발자국에 대한 국제표준인 ISO2014를 적용한다.

2.2.4. 할당 및 재활용

다기능 프로세스, 물질 재활용, 폐열 이용 등에 일관된 할당 규칙을 적용한다. ISO 14044 4.3.4 절 할당 규칙을 따른다.

2.2.5. 데이터베이스

IEA PVPS Task 12는 특정 LCI DB를 권장하지 않는다. 그러나 단위공정 정보와 데이터의 가용성 및 문서화의 투명성을 중시한다.

2.2.6. 전과정영향평가

PV 전기의 전과정영향평가는 유럽 제품의 중간 점 표시기 환경 발자국(PEF) 권장 사항(European Commission 2013)은 다음과 같아야 한다.

-PV 전기에 대한 PEF 파일럿이 제안한 지표를 포함하여 사용 한다.

2.3. 전과정 해석

몇몇 영향 지표는 에너지회수기간(EPBT), 에너지투자수익률(EROI) 또는 영향완화잠재력(IMP)으로 처리될 수 있다.

3. 태양광 발전의 eco efficiency

3.1. 태양광 발전 시스템의 탄소발자국

태양광 발전 등 재생에너지 시스템은 생산 단계에서 환경에 영향을 주지만, 청정에너지 생산으로 화석 연료 사용을 피함으로써 상당한 양의 온실가스 배출량을 줄일 수 있다. 이에 따라 태양광 발전이 환경에 미치

는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 전과정평가 방법론으로 전력생산에 따른 온실가스 배출량을 산정한 다양한 연구가 진행되었다.

최봉하 외[5]의 연구에서는 전과정평가를 이용한 태양광발전의 환경영향 분석하였다. 연구 대상은 실제 운영 중인 100kW급 태양광발전 시스템이며, 시스템 구축에 들어가는 PV module 등의 제조부터 운송, 건설, 발전까지의 과정으로 폐기단계를 제외한 전과정을 분석 범위로 수행하였다. 시스템 전과정에 걸쳐 76,028kg의 이산화탄소가 배출되었으며, 연간 발전량인 187,276 kWh가 수명기간인 20년동안 지속되었을 경우 1kWh의 에너지를 생산하는데 20.3g의 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 세부 구성 요소별로는 이산화탄소 배출량의 36.8%가 Array Support의 제조에 소요되어 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로는 24.3%의 PV module 제조 공정이 두 번째로 큰 비중을 차지하였다. 운송 과정에서의 이산화탄소 배출량은 23.0%로 세 번째로 큰 비중을 차지하고 있다.

류화영 외[2]의 연구는 LCA 기법으로 국내의 20kW급 PV시스템의 환경성능을 평가하였다. 분석대상은 부산지역 대학의 건물 옥상에 적용된 20kW급 태양광 발전 시스템이다. 분석 범위는 PV 모듈을 비롯해 인버터, 구조물, 부속재료를 포함한 제조, 운반, 건설, 발전, 폐기까지의 전과정을 분석 범위로 하였다. 각 과정에 투입된 에너지량 산출을 통해 배출물인 이산화탄소량을 결정하였다. 대상 PV 시스템의 구축과정에 투입된 에너지량은 총 1,006,407 MJ이며, 연간 발전 실적량은 26,863 MJ이다. 이를 바탕으로 PV 시스템 환경성능을 산출한 결과, 온실가스 배출량은 68.69 g CO₂/kWh으로 나타났다.

김경환 외[1]의 연구에서는 태양광 및 풍력 발전을 대상으로 환경성 분석을 하였다. 대상 시스템의 발전용량은 2MW급으로 선정

Table 1. 태양광 발전의 LCA 선행연구

저자	연구 개요	온실가스 배출량 산정 결과
최봉화 외	100KW급의 태양광 발전 시스템에 대해 제조부터 발전까지(폐기 제외) 전과정에 대한 환경영향 분석	20.3g CO ₂ / kWh 배출
류화영 외	20kW의 건물 옥상 태양광 발전 시스템에 대해 제조부터 폐기까지 전단계에 걸쳐 에너지량 산출을 통해 이산화탄소량 분석	68.69g CO ₂ / kWh 배출
김정환 외	2MW급의 태양광 및 풍력발전을 대상으로 제조부터 폐기단계까지 환경경제성 분석	단결정 46.5 CO ₂ /kWh 배출 다결정 31.7 g CO ₂ /kWh

하여 원료채취, 구성 모듈 제조, 사용, 폐기 단계를 모두 고려하는 전과정 단계를 시스템경계로 하였다. 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 제조 및 설치 단계 지구온난화 영향은 46.5 g CO₂ /kWh로 도출되었다. 이 중에서 PV module의 지구온난화 영향이 41.8 g CO₂/kWh이며, 총 지구온난화 영향의 89.9%를 차지함으로써, 가장 높은 환경영향을 나타내었다. PCS와 BOS의 지구온난화 영향은 각각 3.69 g CO₂/kWh와 1.06 g CO₂/kWh로 도출되었다. 다결정 실리콘 태양광 발전 시스템의 제조 및 설치 단계 지구온난화 영향은 31.7 g CO₂/kWh로 도출되었다. 하위 모듈별 지구온난화 영향은 PV module이 26.9 g CO₂/kWh, PCS가 3.69 g CO₂/kWh, BOS가 1.14 g CO₂/kWh로 도출되었다. 단결정 실리콘 태양광 발전 시스템과 마찬가지로 PV module의 지구온난화 영향이 가장 높게 나타났다. 특히 폴리실리콘을 제조하는 단계에서 다량의 에너지를 소비하기 때문에 폴리실리콘 제조공정에서의 지구온난화 영향이 가장 높게 도출되었다.

이러한 국내 연구에서 도출된 태양광 발전의 온실가스 배출량은 Table 1과 같다.

해외의 연구에서도 태양광 발전 시스템에 대한 전과정 분석은 다양하게 시도되었다. Milousi et al[7]의 연구에서는 태양광과 태양열 집열기의 전과정평가를 실시하였다. 이를 통해 기존의 다른 재생에너지 생산 방식과의 온실가스 배출량을 비교하여 환경적으로 유

Table 2. 재생에너지의 온실가스 배출량

구분	Carbon Footprint g CO ₂ -eq/kWh
a-Si PV	43.5
CIS PV	39.5
mc-Si PV	44.3
sc-Si PV	52.4
Flat plate collector	23.8
Vacuum tube collector	22.2
Wind	9-35
Geothermal	6-79
Hydroelectric	1-24
Nuclear	4-110
Natural gas	410-650
Oil	778
Coal	740-1050

용한 재생에너지원의 적합성을 평가하였다. Table 2는 이러한 태양광 및 태양열 집열기, 풍력, 수력 등 재생에너지와 함께 원자력 및 화석 연료 기반 발전의 탄소발자국에 대해 온실가스 배출량을 분석한 결과이다. 온실가스 배출량은 태양광 발전의 경우 39.5~52.4 g CO₂/kWh의 범위를 보였으며, 석탄발전은 740g~1050g CO₂/kWh로 가장 높게 나타났다.

3.2. 태양광 발전의 eco efficiency

3.2.1. eco efficiency 평가

eco efficiency를 측정하기 위한 경제성 평가를 위한 방법론으로 전과정 비용분석이

주로 활용된다. 그러나 경제성 평가에 대한 분석 방법에 대해서는 표준화된 방법론이 제시되어 있지 않은 상태이다. eco efficiency에서 경제 가치에 대한 측정은 생산량, 매출액, 생산성, ROE, ROI 등을 사용 할 수도 있다.

이러한 eco efficiency는 환경부하가 적으면서 경제적 가치가 높은 차원의 원자재, 제품, 산업부문의 공정 및 서비스 개선 등을 의미한다. 따라서 제품의 eco efficiency는 아래 식과 같이 환경 영향과 창출된 제품의 경제적 가치의 상대적인 비율로 정의된다.

$$eco\text{-}efficiency = \frac{\text{창출된 제품의 경제적 가치}}{\text{환경 영향}}$$

본 연구에서는 전력생산의 발전단가와 전력 판매단가를 기준으로 경제성 평가를 수행하였다.

Table 3에서는 2017년 기준 국내 에너지 균등화발전원가(LCOE: Levelized Cost Of Electricity)를 나타내었다. 태양광 발전은 kWh생산에 약 142.3원의 원가가 소요되며, 풍력 발전 150원, 지열 발전 108원, 수력 134.9원, 원자력 발전 64.51원, 천연가스 92원, 석탄 화력 발전 81.22원을 나타내었다.[3][4][6]

그리고 Table 4는 전력거래소의 연도별 전력 판매 단가를 나타낸 것이다. eco efficiency 계산에는 2018년 평균값인 109원을 적용하였다.

3.2.2. 평가 결과

태양광을 포함한 발전 시스템의 eco efficiency를 계산한 결과는 Table 5와 같다. 태양광, 풍력, 수력 등은 전력 판매 단가보다 발전단가가 높아 eco efficiency는 음의 수치를 보였다. 가장 높은 수치를 나타낸 것은 원자력 발전이며, 태양광 발전 시스템이 가장 낮게 나타났다.

Table 3. 에너지 발전단가(LCOE)

구분	균등화 발전단가(kWh/원)
PV	142.3
Wind	150
Geothermal	108
Hydroelectric	134.9
Nuclear	64.51
Natural gas	92
Coal	81.22

Table 4. 연도별 전력 판매 단가(원)

구분	2015	2016	2017	2018
주택용	124	122	109	107
일반용	130	130	130	130
교육용	113	112	103	104
산업용	107	107	107	106
농사용	47	47	48	47
가로등	113	113	113	114
십야	67	68	67	68
평균	112	111	110	109

Table 5. eco efficiency 분석 결과

구분	온실가스 배출량(CO ₂)	경제성 (원)	eco efficiency
PV	44.9	-33.3	-7.42E+01
Wind	22	-41	-1.86E+02
Geothermal	42.5	1	2.35E+00
Hydroelectric	12	-25.9	-2.16E+02
Nuclear	53	44.49	8.39E+01
Natural gas	530	17	3.21E+00
Coal	895	27.78	3.10E+00

4. 결론

본 연구에서는 태양광 발전을 포함하여 신재생에너지 발전에 대한 온실가스 배출량과 발전단가의 경제성을 고려한 eco efficiency를 분석하였다.

태양광 발전 시스템의 온실가스 배출량은 평균 44.9 g CO₂/kWh로 수력(12 g CO₂/kWh), 풍력(22 g CO₂/kWh), 지열(42.5 g CO₂/kWh)에 이어 배출량이 낮은 것으로 나타났다. 원자력

은 53 g CO₂/kWh으로 나타났으며, 천연가스 530 g CO₂/kWh, 석탄화력발전 895 g CO₂/kWh 순으로 나타났다.

eco efficiency 계산은 전력 판매 단가에서 에너지 발전단가를 뺀 금액을 경제성으로 하여 온실가스 배출량과 비교하였다. 그 결과는 Table 5와 같이 나타났다. 온실가스만을 대상으로 한 eco efficiency에서 가장 효율이 높은 발전 시스템은 원자력이며, 천연가스, 석탄화력발전, 지열, 풍력, 수력, 태양광 순으로 나타났다. 즉, 환경성 측면만이 아닌 발전 경제성을 함께 고려하였을 경우에는 태양광을 포함한 신재생에너지의 효율이 매우 낮게 나타났다. 이는 신재생에너지의 발전단가가 전력 판매단가보다 높기 때문이다. 그러나 기술개발 등으로 인해 태양광 등의 발전단가(LCOE)가 점차 낮아지고 있어 신재생에너지 발전 시스템의 환경경제성은 점차 개선될 것으로 보인다.

본 연구를 통해 도출된 결과에서는 태양광을 포함한 신재생에너지의 eco efficiency가 기존의 발전 시스템보다 낮게 나타났으나, 본 연구에서는 온실가스 배출량과 발전단가와 판매단가만을 고려하여 계산하였으므로, eco efficiency의 확정된 평가 결과라고 보기에는 한계가 있다. 따라서 보다 다양한 환경경제성 계산을 위한 다양한 지표를 반영하여 연구할 필요가 있으며, 태양광을 포함한 신재생 발전 시스템의 기술개발을 통해 온실가스 배출량과 에너지 발전단가를 낮추는 노력이 필요하다.

사 사

본 연구과제는 환경부지정 전남녹색환경지원센터의 연구비지원에 의해 수행된 연구과제입니다.

참고문헌

1. 김경환 · 허탁, “LCA 및 LCC 기법을 이용

한 태양광 및 풍력 발전의 환경,경제적 편익 분석”, 한국전과정평가학회지 13권 1호, 한국전과정평가학회, 2012.10

2. 류화영 · 오근숙 · 정근주, “발전실적에 의한 부산지역 20kW 태양광발전시스템의 전과정평가”, 대한건축학회지연합회 추계학술발표대회 논문집, 대한건축학회지연합회, 2011. 10.
3. 이근대, “발전원별 균등화 발전원가 산정에 관한 연구”, 에너지경제연구원, 2018.2
4. 조성진 · 박광수, “발전부문 에너지전환 달성을 위한 세제 개편 방안 연구”, 에너지경제연구원, 2018.12
5. 최봉하 · 박수익 · 이덕기, “LCA를 이용한 태양광 발전의 환경영향 분석”, 신재생에너지 3권 2호, 한국신재생에너지학회, 2007.06
6. IRENA, 「Geothermal Power Technology Brief」, 2017. 10.
7. Milousi, M.; Souliotis, M.; Arampatzis, G.; Papaefthimiou, S. Evaluating the Environmental Performance of Solar Energy Systems Through a Combined Life Cycle Assessment and Cost Analysis. Sustainability 2019, 11.
8. Rolf Frischknecht, Garvin Heath, Marco Raugei, Parikhit Sinha, Mariska de Wild-Scholten, 「Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 3rd edition, IEA PVPS Task 12」, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, 2016.01.