

태양열 발전시스템 경제성 분석

김진수*, 강용혁**, 김종규***

*한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터 (jnskim@kier.re.kr),

**한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부 (yhkang@kier.re.kr),

***한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터 (rnokim@kier.re.kr),

Economic Assessment of Solar Thermal Power System

Kim, Jin-Soo*, Kang, Yong-Heack**, Kim, Jong-Kyu***

*Advanced Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research (jnskim@kier.re.kr),

**New & Renewable Energy Research Division, Korea Institute of Energy Research (jnskim@kier.re.kr),

***Advanced Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research (rnokim@kier.re.kr),

Abstract

Economic assessment of solar thermal power generation systems was carried out by calculating the levelized electricity cost. Four different commercial (or near commercial) solar thermal power systems (parabolic trough system, power tower system with saturated steam, power tower system with molten salts, and dish-stirling system) were considered for assessment. The assessment also included sensitivity analysis covering the effects of system capacity, direct normal insolation, and the system efficiency.

Keywords : 태양열(Solar Thermal), 태양열발전(Solar Thermal Power), 경제성분석(Economic Assessment), 발전단가(Electricity Cost), 재생에너지 (Renewable energy)

1. 서 론

태양열 발전시스템은 집광을 통하여 얻어진 고온의 열에너지를 이용하여 발전을 행하는 장치로, 집광방식 및 적용되는 요소기술에 따라 매우 다양한 시스템의 구성이 가능하다. 또한, 현재 보급 초기단계에 머물고 있는 관계로 기술 개발의 진척에 따라 향후 어떠한 구성의 시스템

이 주도적이 대규모 시장 형성을 이루어갈지 단언할 수 없는 상황이다. 본 분석에서는 현재 상용화 단계에 있는 대표적인 4종의 발전시스템을 분석을 위한 기준시스템으로 삼고 문헌자료¹를 통하여 얻어진 이들의 설계 인자 및 성능 특성 그리고 요소비용 등을 분석을 위한 자료로 사용하였다.

1-1. 대상 발전시스템

(1) Parabolic Trough형 발전시스템 / 이하 PTC
태양의 고도만을 추적하는 1축 제어 집광시스템을 사용, 태양빛을 Trough형 반사경 전단에 선형으로 집광하여 얻어진 열에너지를 이용하는 발전시스템으로 현재 가장 널리 상용화되어 있는 대규모 태양열 발전시스템이다. 단위 발전시스템의 규모는 10~80MW 수준이다.

(2) Molten Salts 이용 Power Tower형 발전시스템 / 이하 Tower(Molten Salts)

수백~수천개에 이르는 2축 제어 반사경을 이용, 태양빛을 Tower의 상단에 집광하여 얻어진 열에너지를 이용하는 발전시스템으로 단위 발전시스템의 규모는 1~20MW 수준이다. Tower의 상단에는 집광된 에너지를 열이송 매체로 전달하는 흡수기가 장착되어 있으며, 열이송매체로 용융염 혼합물인 Molten Salts를 사용한다.

(3) Saturated Steam 이용 Power Tower형 발전시스템 / 이하 Tower (Sat. Steam)

시스템의 구성은 (2)의 경우와 동일하나 흡수기에서 전달된 열을 이용하여 물을 증발시키고 얻어진 포화수증기(Sat. Steam)를 열이송매체로 사용한다.

(4) Parabolic Dish형 발전시스템 / 이하 Dish

2축 제어 방식으로 태양을 추적하는 Dish형 반사경을 이용하여 집광을 행하고 집광장치 전단에 Stirling엔진 등을 장착하여 고효율의 발전을 행하는 태양열 발전시스템이다. 단위 발전시스템 규모는 10~25kW 수준이다.

2. 경제성 분석

2.1. 분석기법

본 분석에서의 경제성 평가는 '균등화 발

전원가(LEC, Levelized Electricity Cost)' 기법을 사용하여 수행하였다.

균등화 발전원가 기법은 수식(1)과 같이 분석 대상 발전소 혹은 발전장치에 대한 고정비(초기투자비)와 운전유지비를 포함한 모든 비용을 장비 혹은 장치의 수명기간 이내에 이용을 고려한 순(net)발전량으로 나누어 계산하는 방법이다. 즉, 발전소 혹은 발전장치의 수명기간 동안에 생산된 모든 전력이 균등화 발전 가격으로 판매된다고 가정하였을 경우 판매 수입은 모든 비용의 합과 일치하게 된다.

본 분석에서 사용된 발전시스템, 분석을 위한 주요 변수 및 지표들은 다음과 같다.

$$LEC = \frac{aC_{inv} + C_{O\&M}}{E_{net}} \quad (1)$$

$a = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$: 고정비 원리금 상환 인자

r : 이자율

n : 장치 수명

C_{inv} : 고정비 (초기 투자 비용)

$C_{O\&M}$: 연간 유지, 보수 비용

E_{net} : 연간 순발전량

2-2 주요 변수 및 지표

(1) 단위 발전시스템 규모 및 성능

분석에 사용된 발전시스템별 단위 발전시스템 규모 및 평균 발전 효율에 관한 정보는 표 1과 같다.

표 1. 단위 발전시스템 규모

	PTC	Tower (Molten Salts)	Tower (Sat. Steam)	Dish
단위 발전장치 규모, MW	50	17	11	0.025
평균 발전 효율, %	14	16	13.6	16.7

(2) 경제성 분석 주요 지표

경제성 분석을 위해 사용된 주요 변수 및 지표에 관한 요약은 표 2와 같다.

표 2. 주요 지표별 입력값 및 고려사항

주요 지표	입력값 및 고려사항
년간 직달 일사량	2,000 kWh/m ² (스페인 남부 고일사 지역)
분석 시스템 규모	약 50 MW
고정비 (초기 투자비)	집광장치 비용 열저장장치 비용 발전장치 비용 엔지니어링 및 시스템 구축 비용 (장치비의 20%) 토지 비용
유지 보수 비용	장치 운전 인력 30명 장치 보수 인력 13명 (Dish의 경우 21명) 장치비의 1%
이자율	년 7%
장치 수명	20년

2-3 균등화 발전원가

분석에 사용된 각 기준시스템 별 비용 및 발전량을 이용하여 수식 (1)을 통한 균등화 발전원가(LEC)를 계산한 결과는 표 3 및 그림 1과 같다.

표 3. 기준 시스템별 균등화 발전원가(LEC)

	PTC	Tower (Molten Salts)	Tower (Sat. Steam)	Dish
년 이자율, %		7		
장치수명, 년		20		
초기투자 비용, 억원	2315.9	2290.9	2214.5	5423.4
년간 유지보수 비용, 억원	54.0	54.0	54.0	87.3
년간 순발전량, GWh	123.7	146.6	126.5	116.9
균등화 발전원가, 원/kWh	220	184	208	513

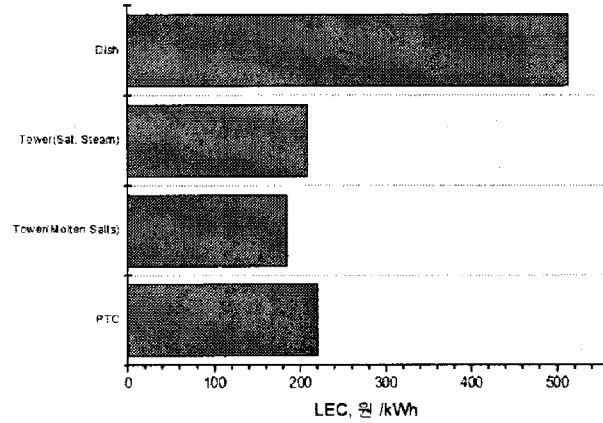


그림 1. 기준 시스템별 균등화 발전원가(LEC)

3. 민감도 분석

3-1 시스템 규모

태양열 발전시스템은 장치가 대규모화 될 수록 고정비가 낮아져, 50MW급 기준 시스템의 발전원가를 100으로 가정할 경우, 10MW급 시스템은 약 166으로, 100MW급은 약 81로 변화될 수 있다. 이와 같은 수치를 고려한 시스템 규모별 발전원가의 변화는 표 4와 같다.

표 4. 시스템 규모의 변화에 따른 균등화 발전원가 변화

시스템 규모 변화	PTC	Tower (Molten Salts)	Tower (Sat. Steam)	Dish*
10MW	366	306	345	-
50 MW (기준)	220	184	208	513
100MW	179	149	168	-

*Dish 시스템의 경우 복수설치에 의한 대형화로, 고정비 절감효과 없음

3-2 직달 일사량

직달 일사량(DNI, Direct Normal Insolation)은 태양열 발전시스템의 에너지원으로 장치의 경제성을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 기준시스템들의 분석에 사용된 연간 직달 일사

량은 2,000kWh/m²으로 앞서 언급된 바와 같이 스페인 남부 고일사지역의 일사조건을 고려한 값이다. 연간 직달일사량이 매우 낮은 경우(600kWh/m², 국내의 경우와 유사)와 매우 높은 경우(2,700kWh/m², 사막지역)에 대한 발전원가의 변화는 표 5와 같다.

표 5. 직달일사량의 변화에 따른 균등화 발전원가 변화

직달 일사량 변화	PTC	Tower	Tower	Dish
		(Molten Salts)	(Sat. Steam)	
균등화 600kWh/m ²	735	614	693	1,709
발전원가, 2,000kWh/m ²	220	184	208	513
원/kWh 2,700kWh/m ²	163	137	154	380

3-3 발전 효율

표 1에 나타낸 평균 발전효율(Solar to Electricity)은 실제 운전 결과를 바탕으로 얻어진 값이다. 이러한 발전효율은 요소시스템의 성능이 향상되면 증가될 수 있으며 그 결과 발전원가는 낮아지게 된다. 각 기준시스템 별 평균 발전효율이 추가로 1% 및 3% 높아졌을 경우에 대한 민감도 분석 결과는 표 6과 같다.

표 6. 발전 효율의 추가 상승에 따른 균등화 발전원가 변화

발전 효율 상승	PTC	Tower	Tower	Dish
		(Molten Salts)	(Sat. Steam)	
균등화 기준	220	184	208	513
발전원가, + 1%	206	173	194	484
원/kWh + 3%	181	155	170	435

3-4 최소 및 최대 발전원가 비교

민감도 분석을 위해 앞서 고려된 3가지 변수 즉, 발전규모, 직달 일사량 및 발전효율을

모두 동시에 고려하면 각 발전시스템은 총 27가지의 서로 다른 발전원가를 가지게 된다. 이중 최소 발전원가 및 최대 발전원가만을 기준시스템의 원가와 비교하여 나타내면 표 7 및 그림 2와 같다. 즉, 최소 발전원가는 최고의 일사조건에서 보다 향상된 발전효율을 가지는 100MW급 발전시스템을 구축하여 운전하는 경우에 얻어진 값이며, 최대 발전원가는 열악한 일사조건에서 현재의 성능수준 시스템을 약 10MW 설치하여 운전하는 경우를 고려한 수치이다.

표 7. 발전 효율의 추가 상승에 따른 균등화 발전원가 변화

최대, 최소 비교	PTC	Tower	Tower	Dish
		(Molten Salts)	(Sat. Steam)	
최소	109	93	102	323
균등화 기준	220	184	208	513
발전원가, 시스템	220	184	208	513
원/kWh 발전원가				
최대	1,221	1,019	1,150	1,710

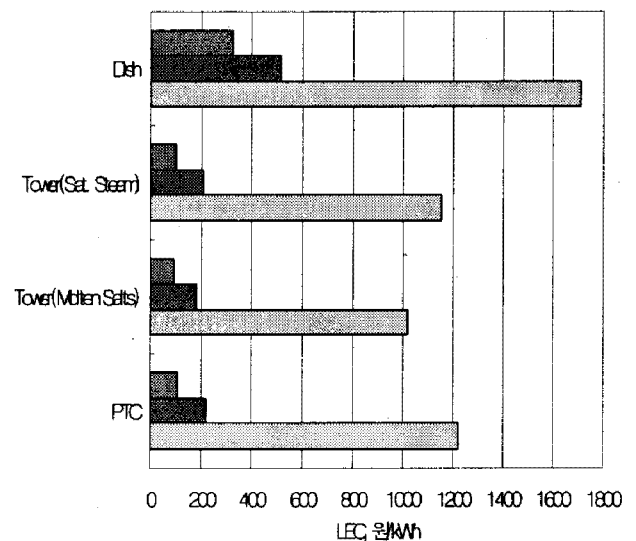


그림 2. 발전 효율의 추가 상승에 따른 균등화 발전원가 변화 (최소, 기준시스템, 최대 발전원가 순)

4. 결론

태양열 발전의 경제성을 균등화 발전원가 분석을 통하여 발전시스템별로 분석하였다. 또한 민감도 분석을 통하여 단위시스템의 규모가 작고, 직달 일사량이 양호하지 못한 지역의 경우와, 일사량이 매우 높고, 단위시스템의 규모가 클 뿐아니라 발전효율의 향상된 이상적인 경우의 상대적인 비교도 함께 제시하였다. 본 논문은 발전단가의 정확한 예측을 목적으로 행하여진 전문적인 분석이 아니라, 발전시스템 종류 및 규모, 일사량, 효율 등이 발전단가에 미치는 영향을 상대적으로 비교하기 위하여 수행된 분석 결과이다.

참고문헌

1. European Concentrated Solar Thermal Road- Mapping, DLR, 2003.