

10 kW급 접시형 태양열발전시스템 사업모델 개발 및 운전특성 분석

김종규*, 이상남**, 강용혁***

*한국에너지기술연구원(mokim@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(snlee@kier.re.kr),
***한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr)

Development of 10 kW Dish-Stirling System for Commercialization and Analysis of Operating Characteristics

Kim, Jong-Kyu* Lee, Sang-Nam** Kang, Yong-Heack***

*Korea Institute of Energy Research(mokim@kier.re.kr),
**Korea Institute of Energy Research(snlee@kier.re.kr),
***Korea Institute of Energy Research(yhkang@kier.re.kr)

Abstract

In order to develop commercial model of 10 kW dish-Stirling solar thermal power system, modification for the existing facility was taken for a year as a Leading Project in KIER. During the project, solar tracking system, control and monitoring system and high durability reflector were developed and long term operation were performed.

The solar tracking system was tested for four months to investigate the degree of precision and adapted to the control system for an actual operation from October in 2009. The sun tracking accuracy of ± 4 mrad using modified control system was obtained and the system operated successfully during the experimental period. The monitoring system displays engine pressure, electric generation amounts, generator RPM, receiver temperatures, and etc. from Stirling engine and weather data of Direct Normal Irradiation, Horizontal Global Insolation, wind speed & direction, and atmosphere temperature from weather station. According to the operating results in a clear sky day, electric power of 6,890 W was generated at the DNI value of 850 W/m² and the averaged solar-to-electricity efficiency during a whole day reached to 18.99%. From the overall operating results, linear power generation trend could be observed with increasing DNI value. The solar-to-electricity efficiency achieved to 19% around the DNI value of 700 W/m² and increased to 20% when the DNI value goes up to 900 W/m².

Keywords : 집광기(Concentrator), 스텔링엔진(Stirling engine), 접시형 태양열발전(Dish-Stirling System), 직달일사량(Direct Normal Insolation)

투고일자 : 2010년 9월 2일, 심사일자 : 2010년 9월 21일, 게재확정일자 : 2010년 12월 9일
교신저자 : 김종규(mokim@kier.re.kr)

1. 서 론

태양에너지는 지구상에서 가장 풍부한 에너지자원으로 전 세계 사막면적의 약 1%로 세계 전력수요량에 해당하는 전기를 생산할 수 있다. 에너지 밀도가 낮고 비연속적인 공급 특성이 있지만, 집광을 할 경우 가득온도를 높일 수 있다. 예를 들어 1,000배(1000sun) 집광하면 이론적으로 약 2,000 K까지 얻을 수 있으며 이상적인 발전 사이클인 경우 약 1,100K에서 최고 67% 시스템 효율을 달성할 수 있는 열원이 된다. 태양열발전은 태양을 추적하는 반사체를 이용하여 태양의 복사성분 중 직달 일사량만을 고 비율로 집광하여 작동유체로 회수된 고온의 열에너지를 이용, 발전설비를 구동하여 전기에너지를 얻는 것이다.

2009년 세계 CSP전망 보고서에 따르면 신재생에너지 자원 중에 CSP(Concentrated Solar Power)에 의한 전력생산량은 2030년까지 세계 에너지원의 7%이상을 차지하게 된다는 전망이 나왔다. 유럽, 남아프리카, 중동, 인도의 일부, 중국, 미국남부와 오스트레일리아와 같은 나라들은 정전, 전력비용의 상승과 같은 문제를 겪고 있으며, 일사량이 풍부한 이들 나라들에 적합한 방법으로 조사되고 있다. 2009년 현재 CSP에 의한 발전규모는 560 MW이며 984 MW가 건설중에 있고 계획중인 프로젝트를 포함하면 7,463 MW에 이른다¹⁾. 현재 단일 규모로 가장 큰 태양열 발전 프로젝트는 미국의 SES사에서 추진하는 접시형 태양열 발전으로 Solar One, Two로 총 1.74 GW 규모이다.

우리나라에서는 2007년 하반기에 한국에너지기술연구원에서 10 kW급 Dish형 집광시스템 이용 태양열발전 실증연구를 수행하여 전력을 생산하였다. 이로 인하여 기반기술의 실증은 완료되었으나, 태양자동추적시스템 정밀도 및 집광반사판 내구성에 대한 개선 필요성이 대두되었다.

따라서 이번 연구에서는 실증연구를 통해 개발된 기술의 산업체 이전을 위하여 지금까지 나타난 몇 가지 문제점을 보완하고, 안정적인 운전이 가능한 Dish형 태양열발전시스템을 구축하고자 하였다. 본 논문은 이러한 개선과정과 발전시스템의 국내 운전 결과에 대해서 기술하였다.

2. 산업이전 모델 구축

태양열 발전은 집광방식에 따라 분류될 수 있는데, 접시형 태양열 발전시스템은 포물면형상의 접시형 반사경을 통해 태양광을 전면의 초점부로 집광하고, 초점부에 스테링엔진(Stirling Engine)을 설치하여 이를 엔진의 열원으로 사용하고 전력을 생산하는 발전시스템이다. 포물면 집광기(Concentrator)는 집광비 1,000sun 이상을 모을 수 있으며 각각의 접시형 집광기 마다 엔진을 설치할 수 있어 소형 분산형 발전에 적합하며 공냉식 엔진을 사용한다. 그림 1에 한국에너지기술연구원에서 개발한 10 kW급 접시형 태양열발전시스템을 나타내었다.



그림 1. 10 kW급 접시형 태양열발전시스템

2.1 반사판 개선

접시형 집광기는 호의 각이 20°인 15개의

모듈로 구성되어 총 300°를 이루고 있으며 총 120매의 반사판이 부착되어 있다. 각 반사판은 포물선형태의 알루미늄 프레임과 약 1 mm 두께의 반사유리를 붙여 만들었다²⁾.

2007년에 제작한 집광부의 경우 약 2년의 기간 동안 반사유리의 부식으로 인한 열룩이 발견되었다. 기존의 반사유리와 동일한 사용되지 않은 반사유리에 대해 30,000배 확대한 SEM 촬영결과 약 42~47 μm 두께의 보호 코팅면에 그림 2와 같이 약 160 nm~1.96 μm 크기의 미세한 기공들과 균열이 발견되었다.

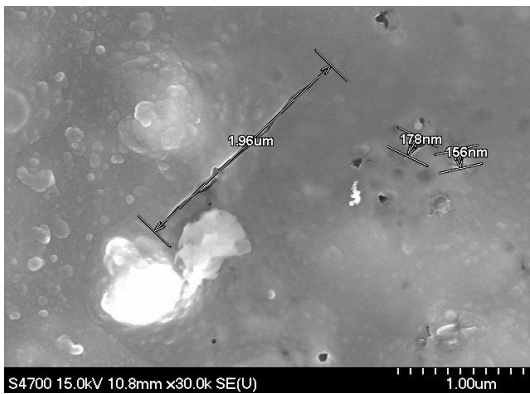


그림 2. 기존 반사유리의 후면 보호코팅 확대사진

이에 보호코팅 두께를 약 68 μm로 증가시킨 반사유리의 몇 가지 샘플에 대한 후면 촬영을 실시하여 기공이나 균열이 없음을 확인후 반사유리로 사용하였다. 앞으로 장시간 사용에 따른 보호코팅의 균열발생 현상은 더 관찰할 사항이지만 보호코팅의 두께 및 상태로 보아 내구성이 향상될 것으로 판단된다. 이와 더불어 반사판의 제작 방식을 개선하였다. 기존의 반사판 제작 방식에서 반사유리와 프레임 사이에 0.4 mm의 알루미늄 박판을 대어 반사유리 전면에 동일한 온도분포를 갖도록 하였다. 이렇게 제작된 반사판을 내구성 시험을 실시하였다. 내구성 가속시험은 다음과 같은 DIN 규정을 따랐는데, 한 사이클이 12시간으로 50 사이클을 반복하여 반사판의 내구성을 확인하였다³⁾.

- 90 °C에서 1.5시간 유지
- 90 °C ~ -40 °C에서 1.5시간에 급강하
- -40 °C에서 1.5시간 유지
- -40 °C ~ 38 °C, 습도 98%(RH)가 되도록 0.5시간에 상승
- 38 °C, 습도 98%(RH)에서 6.5시간 유지
- 38 °C ~ 90 °C까지 0.5시간에 상승

2.2 태양추적 정밀도

태양의 추적은 태양의 방위와 고도 위치를 실시간으로 계산하여 10 kW급 접시형 태양열발전시스템의 구동부를 작동하여 집광기가 태양을 수직으로 마주보며 직달일사를 받도록 한다. 발전시스템의 태양 추적정밀도에 따라 엔진으로의 열량 공급에 차이가 발생됨으로 시스템의 운전에 영향을 주게 된다. 또한 엔진의 구동 및 안정성에 영향을 미치는데, 집광된 태양광의 위치가 엔진의 흡수부에서 벗어나면 흡수기 개구부의 바깥 테두리에 설치되어 있는 퓨즈와이어가 고온으로 녹아 끊어지게 된다. 이는 스테어링엔진의 안전을 위하여 엔진 제어시스템에서 추적중지 신호를 발생시켜 구동부(방위 및 고도각 구동)의 서보모터로 하여금 집광기를 홈 위치로 향하도록 명령을 내려 운전이 멈추게 된다.

추적정밀도 실험을 위한 집광초점 타켓을 제작하여 초점위치에 설치하였다. 초점 타켓의 재질은 사용온도가 최대 약 1,800 °C인 고온용 단열보드를 이용하였으며, 중앙의 구멍 크기는 실제 흡수기 개구부 사이즈와 동일한 직경 180 mm⁴⁾가 되도록 가공하였다.

시스템의 안정적인 운전 및 추적정밀도 실험은 약 3개월간 지속되었으며 아침 일찍부터 오후 늦게까지 자동으로 태양을 추적하면서 타켓의 중앙 홀 안으로 집광초점이 정확히 통과하는지 여부를 확인하면서 실시하였다. 계절에 따른 태양의 방위와 고도 변화에 따라서 태양열발전시스템의 자중이 추적정밀도에 미치는 영향과 태양 자동추적장치의 성능을

관찰하기 위해서 일정한 간격으로 디지털카메라를 이용해서 촬영하여 분석하였다. 그림 3은 집광면에 직경 180 mm의 구멍을 낸 단열보드를 설치한 후 시간에 따라 측정된 사진으로 집광면이 최소, 최대한 벗어난 정도를 산출하는 자료로 사용되었다. 추적정밀도를 검토한 결과 접시형 집광기의 집광거리 4,980 mm에서 최대 ± 20 mm의 추적오차가 측정되어 약 ± 4 mrad의 정밀도를 확보하였다.

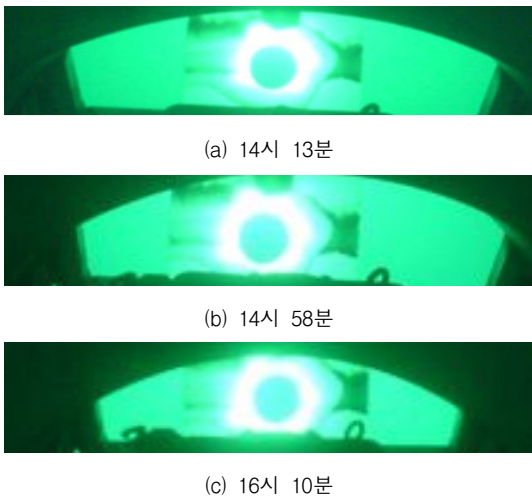


그림 3. 시간에 따른 추적정밀도 사진

2.3 모니터링 시스템

발전시스템이 운전하는 동안 엔진으로부터 많은 데이터가 전송된다. 엔진 작동유체 압력, 엔진 회전수, 흡수기 각 부의 온도, 냉각수 입 출구 온도 및 발전량 등 5초 간격으로 데이터가 전송되며 이들 데이터를 통하여 발전시스템의 운전상황을 파악할 수 있다. 이와 더불어 발전시스템의 에너지원인 직달일사량과 외기온도 및 풍속 등 기상 측정 장치로부터 전송되어 오는 데이터도 발전시스템의 성능을 분석하는데 필요하다. 이러한 데이터를 일간, 월간, 연간으로 정리하고 현재의 성능 데이터를 알기 쉽게 화면에서 보여주는 모니터링 시스템을 개발하였다. 모니터링 화면에서는 그

림 4와 같이 발전량, 효율, 일사량, 엔진 회전수 등 중요 성능 지표를 보여주고 있다.

모니터링 시스템은 5초마다 저장되는 성능 데이터를 기반으로 10분 평균 데이터를 가공하고 이를 바탕으로 매일 발전보고서를 자동으로 작성한다. 한 달간 일일 데이터가 모여 월간 보고서를 작성하며 다시 연간 보고서가 제작되는 과정을 거친다. 발전시스템의 운전 시 문제가 발생되면 이에 대한 에러코드를 표시하며 이를 동시에 정해진 이동전화기로 문자 메시지를 보내어 현 상황을 알려주는 기능도 수행한다.



그림 4. 태양열발전시스템의 모니터링부 화면

무인운전 중 발전시스템의 상태를 파악하기 위하여 흡수기 표면의 태양광 집광형태를 촬영하고 이를 인터넷을 통해 모니터링 화면과 함께 원격으로 감시 할 수 있는 기능을 갖추었다. 본 연구를 위해 구축한 태양열발전시스템의 상세사양은 표 1과 같다.

2.4 태양열발전실험

추적정밀도 실험의 완료 후, 타켓 대신 스테어링엔진을 그림 5와 같이 발전시스템에 설치하여 실험을 수행하였다. 스테어링엔진의 흡수기 표면에 고온의 집광초점을 비추면, 고압으로 충전된 흡수기 내부의 수소가스에 전달 되어 V실린더에 직선운동 에너지가 발생되고, 이것은 다시 발전기에 회전운동을 일으켜 전기

를 발생시킨다. 스테링엔진은 일사량 변화에 적절히 대응하여 엔진구동이 최적화 되도록 하는 자체 제어시스템이 내장되어 있기 때문에 별도로 스테링엔진의 발전과 관련된 제어 장치는 구축하지 않았다. 다만 엔진 자체 제어 시스템에서 이상 유무 시 에러코드에 따른 출력신호를 받아서 태양열발전시스템의 구동부로 하여금 안전조치가 이루어질 수 있도록 태양자동추적장치와 통신할 수 있는 통신망을 구축하였다. 접시형 태양열발전시스템에서 생산된 전력은 부하 소모기(Load Bank)에서 열로 소모토록 하고였다.

표 1. 10 kW급 접시형 태양열발전시스템 상세 사양

구분		상세사양
구동부	방위각	감속비: 1/30,000 서보모터: 800 W
	고도각	감속비: 1/30,000 서보모터: 800 W
집광부	직경	9 m
	반사면적	40.25 m ²
	반사판	알루미늄 프레스가공
	반사경수	120매
	초점거리	4,980 mm
발전부	독일SBP	용량: 10 kW 모델: SOLO V161
태양자동추적부		Embedded GUI Interface
모니터링부		HMI Software 등

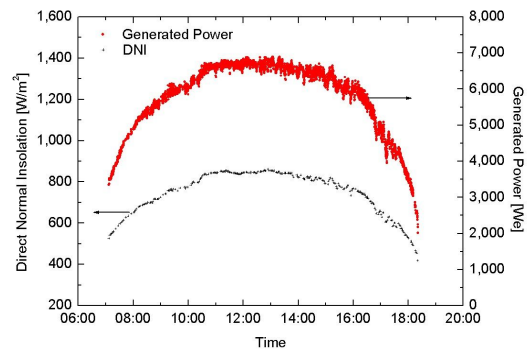


그림 5. 스테링엔진 흡수기 개구부의 집광초점 전경

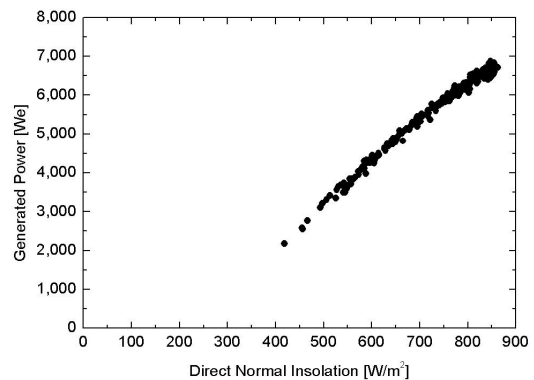
3. 운전결과

3.1 청명일 발전특성

개선된 10 kW급 접시형 태양열발전 시스템을 2009년 10월부터 현재까지 운전하고 있다. 청명일 하루 동안 시간에 따른 일사량 변화와 발전량 데이터를 5초 간격으로 측정하여 그림 6에 나타내었다. 오전 7시부터 저녁 18시 30분까지 구름이 없는 쾌청한 날의 운전 결과를 보이고 있는데, 최대 직달일사량은 약 850 W/m²로 이때 발전시스템은 6,890 W의 전력을 생산하였다. 직달일사량과 발전량은 그림 6(b)와 같이 선형적인 관계를 보이고 있다. 이 날 전체 운전시간 동안 일사량 대비 발전량 평균 효율은 18.99%를 나타내었다.



(a) 시간에 따른 직달일사량 및 그에 따른 발전량



(b) 직달일사량에 따른 전력 생산량

그림 6. 청명일 접시형 태양열발전시스템 운전결과

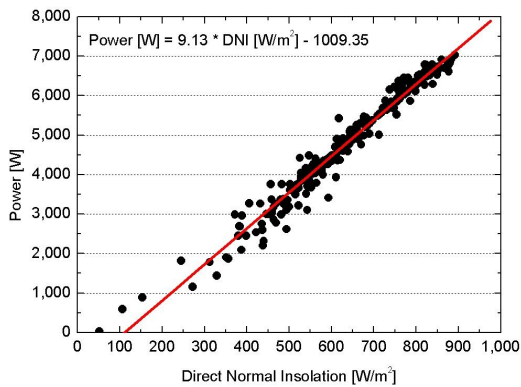
3.2 운전결과

일반적으로 구름이 해를 가릴 때 일사량이 줄어들어 따라 발전량이 감소하고 일사량이 증가함에 따라 발전량이 증가하는데, 엔진은 입사되는 열량의 변화에 따라 작동 엔진 압력, 회전수 등의 변화가 동반되므로 일사량 변화가 발전량에 반영되기에는 일정 시간 지연이 발생한다. 따라서 구름이 많은 우리나라의 특성상 운전 중 구름에 의한 일사량 증감현상이 잦은 경우 5초 간격으로 측정된 데이터를 표시할 때 효율이 낮거나 높게 계산될 수 있어 모니터링 시스템에서 작성한 일일 운전결과인 10분 평균 운전 데이터를 바탕으로 며칠간의 운전 결과를 종합하여 그림 7에 나타내었다.

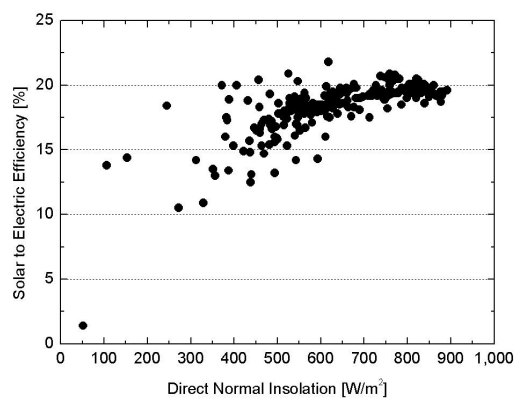
직달일사량의 분포가 100~900 W/m²일 때 발전량의 변화를 그림 7(a)에 나타내었다. 앞서 청명일과 같이 일사량과 발전량은 선형적인 관계를 보여주고 있으며 이를 최소자승법에 의해 직선 식으로 구하면 다음과 같다.

$$\text{발전량(W)} = \text{직달일사량(W/m}^2\text{)} \times 9.13 - 1009.35$$

일반적으로 직달일사량이 1,000 W/m²를 기준으로 발전용량을 나타내는데, 본 시스템은 최대 약 8,100 W를 생산할 것으로 보인다. 직달일사량이 700 W/m² 보다 높을 경우 19% 이상의 발전효율을 보이고 있으며 일사량이 낮은 400 W/m²에서도 약 15% 이상의 발전효율을 달성할 수 있었다.



(a) 일사량에 따른 발전량



(b) 일사량에 따른 발전효율

그림 7. 접시형 발전시스템의 운전결과

4. 토 의

본 시스템과 10 kW 동급으로 2001년에 최종 모델이 개발되어 현재 상용화 단계에 있는 EuroDish 접시형 태양열발전과 본 시스템을 비교하여 보고자 한다. EuroDish의 반사면적은 56.7 m²이며 최대효율은 19%로 직달일사량에 따라 선형적인 발전량 증가 현상을 보이고 있는 시스템이다⁵⁾. 동일한 일사량 조건에서 두 시스템의 발전량을 비교해 보면 본 연구에서 개발된 시스템의 경우 전력생산이 작은 것으로 나타났다. 예를 들어 일사량이 800 W/m²일 때 EuroDish의 경우 약 8,500 W의 전력을 생산할 것으로 볼 수 있으나 본 시스템의 경우 약 6,300 W의 발전량이 예상된다. 이는 집광면적의 차이에 의한 영향으로 본 시스템의 반사면적이 40.3 m²으로 EuroDish 보다 28.9%로 작기 때문이다. 이에 반하여 발전량은 일사량 800 W/m² 기준으로 25.9% 정도 낮게 나오는데, 반사면적 비에 비하여 상대적으로 많은 전력을 생산하는 것으로 볼 수 있다. 이는 본 시스템이 집광측면에서 좀 더 효과적으로 태양을 추적 반사할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

한국에너지기술연구원에서 수행했던 10 kW급 접시형 태양열발전시스템의 산업이전 모델 구축 및 성능평가를 위한 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 반사유리 교체 및 성능시험을 통해 내구성 있는 새로운 반사판을 개발하였으며 이를 설치하였다.
- (2) 자동 정밀추적도 분석결과 ± 4 mrad의 양호한 정밀도를 얻었으며 이를 통해 시스템의 안정적인 운전이 가능하게 되었다.
- (3) 법선면 직달일사량이 약 850 W/m^2 일 때 $6,890 \text{ W}$ 를 생산하였으며 직달일사량이 $1,000 \text{ W/m}^2$ 이라고 가정하면 최대 $8,100 \text{ kW}$ 를 생산할 수 있다.
- (4) 청명일 하루 동안 일사량 대비 전력생산 평균 효율은 18.99%로 높게 나타났으며 직달일사량이 증가함에 따라 발전량이 선형적으로 증가하는 경향을 보이며 이를 식으로 표현하였다.
- (5) 일사량 대비 발전효율은 일사량이 700 W/m^2 까지 최대 19%로 증가하였으며 900 W/m^2 까지는 20%의 발전효율을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원과 코호멤브레인코리아의 연구비지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : KIER A9-2451)

참 고 문 헌

1. Christopher Richter et al., Concentrating Solar Power Global Outlook 09: Why Renewable Energy is Hot, Greenpeace, SolarPACES, and ESTELA, 2009.
2. 강용혁 등, “Dish형 집광시스템 이용 태양열발전 실증연구” 한국에너지기술연구원, 2003-N-S511-P-01, 2006. 9

3. 강용혁 등, “10kW급 접시형 태양열발전시스템 산업이전 모델구축 및 성능평가” 한국에너지기술연구원, KIER-A92451, 2009. 12
4. SOLO STIRLING GmbH, Service and Operator's Manual for the SOLO 161 Solar Stirling Unit, 2006. 7
5. Thomas Mancini et al., Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 125, 2003. 5