

Dish-Stirling 태양열 발전시스템 운전 및 성능분석

김진수¹⁾, 강용혁²⁾, 이상남³⁾, 윤환기⁴⁾, 유창균⁵⁾, 김종규⁶⁾, 조덕기⁷⁾

Performance of Dish-Stirling Solar Power System

Jin-Soo Kim, Yong-Heack Kang, Sang-Nam Lee, Hwan-Ki Yoon, Chang-Kyun Yu, Jong-Kyu Kim, Dok-Ki Jo

Key words : Energy(에너지), Renewable Energy(재생에너지), Solar Energy(태양에너지), Solar Thermal(태양열), Solar Power(태양열발전), Stirling Engine(스터링엔진)

Abstract : As a final step for developing a small-scale solar thermal power generation technology, a demonstration project for a dish-stirling power system has been carried out by KIER. During the two years project period, 10 kW solar-only power system was built in Jinhae city and successful solar operations were demonstrated. In this paper an example of typical clean day operation and analysis results was introduced.

1. 서론

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 태양열을 이용해 전기를 생산하는 태양열 발전시스템의 개발을 위한 다양한 연구를 수행해오고 있다¹⁾. 태양열 발전²⁾을 위해서는 태양 복사에너지를 고배율로 집광하여 고온의 열원을 제공할 수 있는 있는 집광장치의 개발이 필요한데, 특별히 작은 반사면적으로도 고배율의 집광이 가능한 Dish형 집광장치의 경우 소형 태양열 발전시스템의³⁾ 구축에 유용하게 사용될 수 있어 이에 관한 각종 핵심요소기술 개발을 수행한 바 있으며, 최근에는 이러한 Dish형 집광기술을 Stirling 엔진이 적용된 발전장치와 연계하여 10kW급 Dish-Stirling 태양열 발전 전체시스템을 구축하고 운전하는 실증연구를 완료하였다.

그림 1은 실증연구를 위하여 구축된 Dish-Stirling 발전시스템으로 경남 진해시에 소재한 에너지환경과학공원 내에 위치하고 있으며 약 42m²의 집광면적을 가지는 태양추적이 가능한 Dish형 집광장치와 10kW급 Stirling 엔진 발전장치로 구성되어 있다.

본 논문에서는 실증연구를 통하여 구축된 10kW급 Dish-Stirling 발전시스템의 운전과 그 결과의 분석에 관한 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

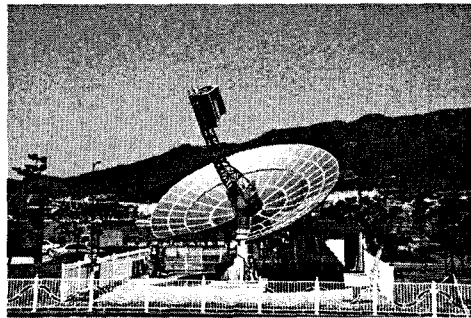


Fig. 1 KIER 10kW Dish-Stirling Power Generation System (Jinhae City)

- 1) 한국에너지기술연구원 재생에너지연구부
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042)860-3739
- 2) E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3500 Fax : (042)860-3739
- 3) E-mail : snlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042)860-3739
- 4) E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042)860-3739
- 5) E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042)860-3739
- 6) E-mail : rnokim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3477 Fax : (042)860-3739
- 7) E-mail : dokkijo@kier.re.kr
Tel : (042)860-3561 Fax : (042)860-3739

2. Stirling 엔진

고온으로 집광된 태양열을 이용해 발전을 행하기 위해서는, 열을 동력으로 전환시키는 적절한 사이클의 엔진과 얻어진 동력으로 전기를 생산하는 발전기가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 외연기관인 Stirling 엔진을 주축으로 하는 발전시스템을 발전부 구성을 위해 적용하였다. Stirling 엔진은 오토 혹은 디젤 엔진과 같은 내연기관과 달리 외부 열원에 의해 구동되는 폐쇄 사이클로서 태양열에 의한 동력의 생산에 매우 적합한 엔진이다. Stirling 엔진은 엔진 내부에서의 연소 과정이 없는 관계로 소음이 매우 적다는 것이 특징이며, 태양열 뿐만 아니라 목재, LFG 등 바이오에너지를 이용해 손쉽게 전기를 생산할 수 있다는 장점을 지니고 있어, 다양한 신재생에너지의 효과적 활용을 위해서 널리 주목받고 있다. 사용된 엔진에 관한 보다 상세한 정보는 표 1과 같다.

Table 1 Specification of Stirling Engine

계통연계 생산 전력	0-9.5 kW
최대효율 (heat to electricity)	30% (15°C 냉각온도 기준)
고온부 작동가스 온도	약 650 °C
작동가스 평균 압력	3-15 MPa
피스톤 부피	160 cm ³
엔진 스피드	1800 RPM
작동 가스	수소(H ₂), 헬륨(He)
내부장착 가스 용기 부피	5 liter
엔진 내부 가스 부피	2.5 liter
사용 윤활유 / 부피	5W30, 0W40 / 1.7 liter
냉각수 용량	10 liter
계통 연계 전원	380V, 3P, 60Hz
제어용 전원	24V
안전장치용 전원	12V

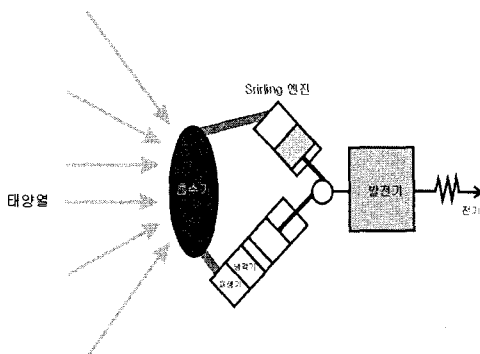


Fig. 2 Scheme of Power Generation Unit with Stirling Engine

3. 태양열 발전실험

태양열 발전실험 결과의 한 예로 본 논문에서는 장치의 운전성과 발전효율에 대한 신뢰성 있는 정보와 각종 분석을 위해, 유용한 실증 시험 결과를 얻는 것이 가능한 정도의 맑은 기상조건을 유지하며 발전시스템이 연속 운전되었던 실험 결과를 사용하였다. 그림 3은 집광장치에 의해 태양 복사에너지가 Stirling엔진의 전면부로 전달되어 발전장치가 가동되고 있는 상태를 ND 필터를 통하여 촬영한 사진이다. 발전시스템이 가동되는 동안의 일사조건, 발전량 및 효율과 관련된 분석은 다음과 같다.

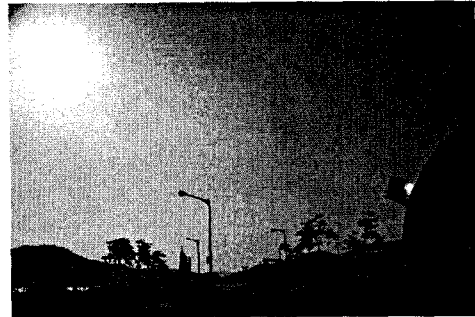


Fig. 3 Dish-Stirling System under Operation (captured through ND filter)

3.1 발전실험 결과

먼저 실험이 수행된 날(2006년 9월)의 일간 직달일사량(DNI, Direct Normal Insolation) 분포를 도시한 그림은 그림 4와 같다. 본 실증연구를 위하여 구축된 Dish형 태양열 발전 시스템은 구축 장소의 여건상(2006년 9월 기준) 아침 8시 30분 이전에는 인근의 건축물로 인하여 태양광의 유입이 불가능하며, 오후 5시 30분 이후에는 장치 근처의 나무 등 장애물로 인하여 정상적인 일사조건을 가지지 못하는 관계로, 실제로 의미 있는 실험 결과의 도출 및 분석은 아침 8시 30분 이후부터 오후 5시 30분 사이의 시간대에서 가능하다.

그림 4의 직달일사량 측정 결과를 살펴보면 오후 약 3시경을 전후하여 구름으로 인한 일시적 일사량 감소를 제외하고는 매우 쾌청한 일사조건을 가짐을 알 수 있으며 따라서 일사량 측정이 이루어진 시간대에서 매우 일관성 있고 신뢰성 있는 태양열 발전의 수행이 가능한 기상 조건에서 실험이 가능함을 알 수 있다.

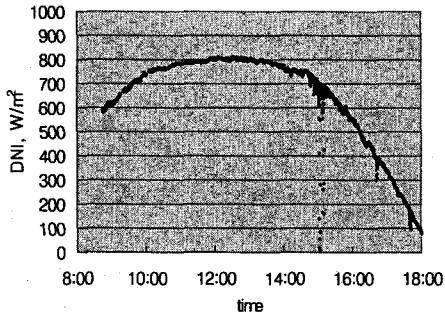


Fig. 4 DNI (Direct Normal Insolation) Values During the Operation

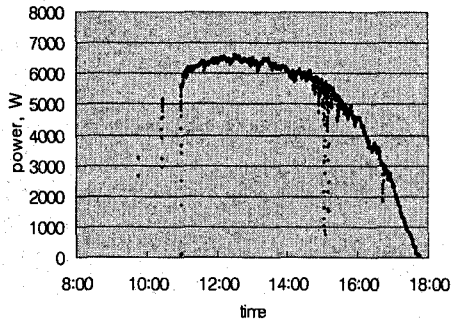


Fig. 5 Power Generation by the System

그림 5의 발전량 결과에서는 11시 경부터 지속적인 발전이 이루어진 것을 확인할 수 있는데 11시 이전의 경우 Stirling엔진 내부에 충분한 작동가스 충진을 위하여 약 2차례의 일시적 엔진 가동만을 수행하였다. 이는 현재 장착된 엔진의 제어 특성상 운전 중 자동적으로 작동가스를 충전시킬 수 없어, 가스충진 후 일시적 발전과 재충진의 반복 과정을 통하여 내부 가스의 압력을 충분한 수준으로 상승시켜야 하는 과정이 필수적으로 수행되어야 하는 이유에 따른 것이다.

연속적 발전이 이루어진 11시 이후부터의 데이터를 살펴보면, 직달일사량의 세기에 연동하는 유사한 경향의 발전이 태양열 발전시스템에서 이루어졌음을 확인할 수 있다. 한편 오후의 일시적 일사량 감소의 경우에는 이전단계의 시험 운전과 유사하게 발전량이 일시적으로 감소하고 이에 따른 계산 효율의 일시적 상승 및 감소가 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2 실험결과 분석

태양열 발전시스템의 성능을 나타내기 위한 중요한 지표 중 하나는 발전효율로, 발전량을 Dish형 집광장치로 유입되는 직달 복사에너지의 량으로 나누어 백분율로 표시하는 다음과 같은 수식을 통하여 계산되었다.

$$\text{발전효율} = [\text{발전량} / (\text{DNI} \times \text{Dish면적})] \times 100 \quad (1)$$

이때 발전량은 발전기에서 생산된 전력 중 냉각시스템의 가동을 위해 일정량이 소모된 후 계통선을 통하여 역전송 되는 순수 발전량을 의미하며, DNI는 동일한 시간에 측정된 직달일사량, 그리고 Dish면적은 집광장치에 장착된 반사경의 투영면적으로 약 42m²이다.

이와 같은 계산을 통하여 발전효율을 나타낸 그림 6을 보면 발전이 이루어진 11시 경부터 직달일사량의 값이 약 400W/m² 근처로 낮아진 오후 5시 경까지 19% 내외의 고효율 발전이 이루어진 것을 확인할 수 있는데, 이러한 결과는 본 태양열 발전시스템의 성능특성을 잘 나타내어 주는 결과로 일사조건에 따른 발전량 분석, 장기 발전량 및 경제성 분석 등 본 시스템을 사용하는 태양열 발전과 관련된 각종 지표를 도출하는데 사용되기에 충분한 결과들이라고 할 수 있다.

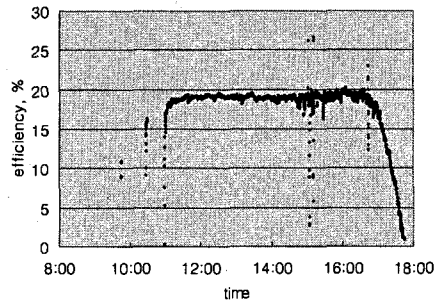


Fig. 6 Efficiency of Solar Power Generation System

한편 실험결과를 일사량과 연관지어 도시하고 상관지은 결과는 그림 7, 8과 같다. 그림 7을 살펴보면 위의 발전실험 결과에서 확인할 수 있었던 바와 같이 약 400W/m² 이상 및 이하의 일사조건에서 일사량에 따른 발전량의 변화가 매우 선형적인 관계를 가짐을 확인할 수 있는데, 상대적으로 낮은 영역의 일사조건에서는 일사량 감소에 따른 발전량의 감소가 높은 일사조건에 비해 더 빠르게 나타남을 알 수 있다.

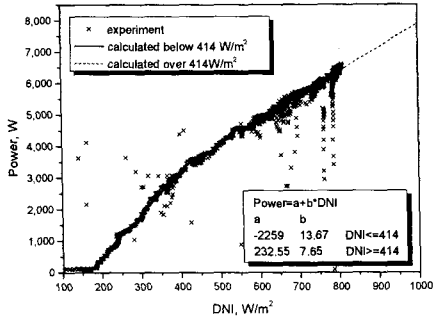


Fig. 7 Power Generation against DNI

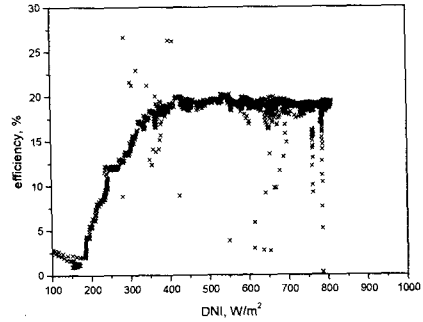


Fig. 8 Power Generation Efficiency against DNI

이러한 결과를 바탕으로 직달 일사조건 414W/m²를 기준으로 일사량이 높은 경우와 낮은 경우로 나누어 수식 2과 같은 두 가지 서로 다른 선형적 상관관계식으로 표현하였다.

$$\text{Power} = a + b \times \text{DNI} \quad (2)$$

이때

Power = net 발전량, W

DNI = 직달 일사량, W/m²

a = -2259 (DNI ≤ 414 W/m²), 232.55 (DNI > 414 W/m²)

b = 13.67 (DNI ≤ 414 W/m²), 7.65 (DNI > 414 W/m²)

이러한 상관관계식은 이론적 장기 성능 및 발전량 분석과 경제성 분석 등의 이론적 해석에 적절히 활용될 수 있다.

한편 그림 8에 도시된 직달일사 조건에 따른 발전효율을 살펴보면, 위에서 언급된 바와 같이 직달일사량 약 400W/m²이상의 조건에서 평균효율 19.2%의 고효율 발전이 균일하게 이루어짐을 확인할 수 있다. 보다 낮은 일사조건에서의 발전효율은 일사량의 감소에 따라 빠르게 감소하여 약 200W/m²의 일사조건에서 더 이상의 순(net)발전이 이루어지지 못함을 알 수 있다. 발전효율을 도시한 선도에서 일시적으로 효율이 급격히 증가 혹은 감소하는 것은 구름 등의 영향에 따른 일시적 일사량 저하의 시기에 동일한 시간에서의 일사량과 발전량 데이터를 대비하여 효율을 분석한 것에 기인한 것으로 엔진의 성능과는 무관한 것들이다.

4. 결론

Dish형 태양열발전 실증연구를 위하여 10kW급 Dish-Stirling 발전시스템을 구축하고 운전을 통한 실증연구를 수행하였다. 운전결과 태양열 발전시스템은 19%이상의 높은 효율로 전기를 생산할 수 있는 매우 효과적인 재생에너지 활용시스템임을 확인할 수 있었으며, 약 400W/m² 이상의 일사조건에서 균일하게 높은 발전효율을 유지함을 알 수 있었다.

이러한 Dish형 태양열 발전시스템은 향후 보다 장기적인 운전성능 분석과 추가적 성능보완을 통하여 효과적이고 안정적인 태양에너지 활용기술로 국.내외에 보급될 수 있을것으로 기대된다.

References

- [1] J.-S. Kim, Y.-H. Kang and, 2006 "Progress of R&D Efforts for Solar Thermal Power Generation in South Korea", SolarPACES 13th International Symposium, Seville Spain, 2006.6.20.
- [2] IEA SolarPACES Summary, Concentrating Solar Power in 2001, IEA SolarPACES Task I: Electric Power Systems.
- [3] W. B. Stine and R. B. Diver, 1996 "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology" Sandia National Lab. Report.