

고집광 태양열 시뮬레이터의 광학 특성 평가

Optical Characterization of a High-Flux Solar Thermal Simulator

채관교* · 이현진**† · 윤환기*** · 김종규**** · 강용혁***** · 이성욱*****
Chai Kwan-Kyo*, Lee Hyun-Jin**, Yoon Hwan-Ki***, Kim Jong-Kyu****,
Kang Yong-Heack***** and Lee Sung-Wook*****

(Received 25 May 2015; accepted 24 June 2015)

Abstract : A solar thermal simulator is suitable for indoor experiments of solar receivers and reactors when solar insolation and weather conditions are not favorable. Moreover, due to the easy control of electric power input, the solar thermal simulator allows the adjustment of power input incident on solar receivers and reactors and thus the implementation of accurate experiments. We manufactured a solar simulator, which is comprised of three sets of a xenon lamp and an elliptical reflector. In order to serve as a test facility, optical characterization of the solar simulator via radiation heat flux measurement is a critical prerequisite. We applied the flux mapping method to measuring the heat flux distribution of the three lamps. We presented the measurement results in terms of the heat flux distribution, the peak heat flux, the power distribution, the maximum power, and the efficiency for electric power conversion into radiation power. Characterization results show that our solar simulator provides the peak heat flux of 3,019 kW/m², the maximum power of 16.9 kW, and the conversion efficiency of 45%, additionally with a 10% operation margin for output increase.

Key Words : 태양열 시뮬레이터(Solar thermal simulator), 열유속 분포(Heat flux), 플럭스 맵핑(Flux mapping), 태양열 에너지(Solar thermal energy)

1. 서 론

태양열 시뮬레이터는 장마철과 같이 일기가

안 좋은 때에도 실내에서 태양에너지를 이용한 장치에 관한 실험을 진행하기 위해 제작된다. 또한, 태양과 달리 열원을 제어할 수 있

**† 이현진(교신저자) : 국민대학교 기계시스템공학부
E-mail : hyunjinlee@kookmin.ac.kr, Tel : 02-910-5466
*채관교 : 한국에너지기술연구원
***윤환기 : 한국에너지기술연구원
****김종규 : 한국에너지기술연구원
*****강용혁 : 한국에너지기술연구원
*****이성욱 : 나노씨엠에스(주)

**† Lee, Hyun-Jin(corresponding author) : Kookmin University
E-mail : hyunjinlee@kookmin.ac.kr, Tel : 02-910-5466
*Chai, Kwan-Kyo : Korea Institute of Energy Research
***Yoon, Hwan-Ki : Korea Institute of Energy Research
****Kim, Jong-Kyu : Korea Institute of Energy Research
*****Kang, Yong-Heack : Korea Institute of Energy Research
*****Lee, Seong-Uk : NANOCMS Co., Ltd.

므로 공급 열량이나 집광 방식을 자유롭게 조절하기가 용이하기 때문에 정밀 실험에 적합하다. 이러한 태양열 시뮬레이터는 램프와 반사경 그리고 전원장치 등으로 구성된다.¹⁻³⁾ 램프로는 자연광과 유사한 빛을 내는 제논(xenon)램프를 많이 사용한다. 일반적인 태양 시뮬레이터는 태양광선의 성질에 맞추어, 수평광을 유지하기 위한 반사경을 사용하고 에너지 밀도가 대체로 넓은 면적에 고루 분포하도록 하여 자연적인 태양 복사에너지가 조사되는 것과 유사한 환경을 만드는 것이 주된 목적이다.

고온을 필요로 하는 태양열 기술의 경우에는 반사경을 특수 제작하여 광선이 한 점에 모이도록 조정해서 사용하고 있다. 일반적으로 두 개의 초점을 갖고 있는 타원체의 한 초점에서 나온 빛이 다른 한 초점에 모이는 특징을 이용하여 광원 램프와 실험 장치를 설계한다. 한국에너지기술연구원(KIER)에서는 스위스 PSI에서 개발된 태양열 시뮬레이터를 벤치마킹하여 제논램프와 타원 반사경을 이용한 태양열 시뮬레이터를 제작하였다.³⁾ 그림 1에 제시된 바와 같이 태양열 시뮬레이터 시스템 전체는 3개의 램프와 반사경 세트들로 구성된다. 각 제논램프는 15 kW 용량이고, 각 반사경은 초점거리는 3,000 mm인 타원을 직경이 950 mm되도록 절단하여 제작하였다. 중앙에 위치한 2번 램프를 기준으로 1번과 3번 램프는 약 20도 가량 틀어져서 3개 램프의 초점이 한 점에 중첩되도록 설계하였다.

태양열 시뮬레이터는 전원 공급 장치를 통해 램프에 전달되는 입력 파워를 조절한다. 전기 입력 파워 중 일부가 램프에서 빛으로 변환되고, 그 빛 중 일부가 반사경의 다른 초점에 모이게 된다. 여기에 흡수부를 설치함으로써 태양열 실험을 수행하므로, 초점 근처에서 모이는 열유속 분포, 최대값, 파워 등을 알아야

태양열 시뮬레이터도 안전하게 운전할 수 있고 흡수 실험도 정밀하게 수행할 수 있다. 본 연구에서는 태양열 시뮬레이터에서 오는 집광 열유속을 측정하였고, 그 결과를 분석하여 태양열 시뮬레이터의 광학 특성을 평가하였다.



Fig. 1 Solar thermal simulator in KIER

2. 광학 특성 평가 방법

집광 열유속 측정의 가장 널리 알려진 방법은 플럭스 맵핑법(flux mapping method)이다.⁴⁻⁶⁾ 정확도 및 측정 방법에 관한 자세한 내용은 참고문헌⁶⁾을 통해 얻을 수 있는데, 중요한 내용을 정리하면 아래와 같다. 플럭스 맵핑법으로 열유속 분포를 측정했을 때, 파워는 평균 2.8%, 최대 6.6%의 차이를 보였다. 그리고 열유속 분포의 최대값은 평균 5.9%, 최대 18.4%의 차이를 보였다.

플럭스 맵핑법을 이용한 측정 시스템의 중요 요소는 확산판(diffuse target), 열유속 게이지, CCD(charge coupled device) 카메라이다. 확산판에서는 집광된 빛의 산란이 발생하고, CCD 카메라로 산란 빛의 강도 이미지를 촬영하고, 이를 영상처리 하여 수치 값으로 변환하고, 열유속 게이지인 라디오미터(radiometer)로 측정된 참조 값을 바탕으로 수치 값들을

보정하여 집광 열유속 분포를 얻는다. 그림 2는 이 시스템을 사용하여 진행한 열유속 측정의 절차를 보여준다.

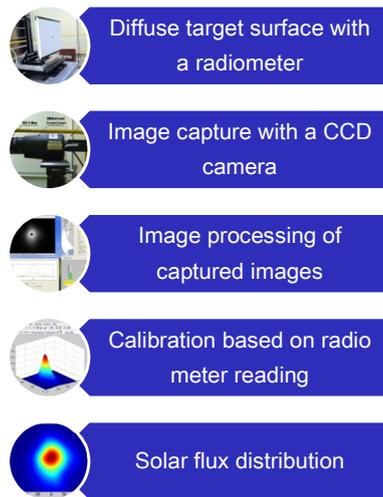


Fig. 2 Measurement procedure in the flux mapping method

CCD 카메라로 촬영한 열유속 분포 이미지를 수치 변환하는 이미지 프로세싱 과정은 Matlab을 사용하여 프로그래밍화 하였다. 측정 전에 기준판을 촬영한 이미지를 불러들여서 표시된 두 점 사이의 화소의 수를 계산함으로써 화소의 크기를 결정한다. 집광된 이미지는 화소 단위의 행렬로 변환 시켜 빛의 강도 분포를 수치 분포로 나타낸다. 라디오미터 영역에서는 라디오미터의 높은 흡수율 때문에 CCD 카메라의 이미지는 크게 왜곡된다. 라디오미터 영역의 실제 열유속을 유추하기 위해서 가우시안 분포함수를 이용하여 라디오미터 영역의 측정값을 보간한다. 마지막으로 측정 당시 반사경의 반사율 값을 제작할 당시 반사경 최대 반사율인 0.86으로 열유속 분포를 정규화한다. 이러한 측정 절차를 3개 램프 각각에 대해 입력 파워를 바꾸면서 반복하여 진행하였다.



Fig. 3 Light concentrated on the diffuse target surface during flux measurement

3. 측정 결과 및 고찰

각 램프별로 전원 공급 장치에서 입력 전류의 스위치를 돌리면서 증가 시킬 수 있고, 그 때의 전압 값이 표시되기 때문에 전류와 전압의 곱으로 전기 입력 파워를 계산할 수 있다. 위에서 서술한 플럭스 맵핑법으로 초점면에 도달하는 열유속 분포를 얻으면, 열유속 분포를 적분해서 파워 분포를 계산 가능하다. 파워 분포에서 최대값은 도달 총 에너지를 의미하고 이를 전기 입력 파워에 대한 비로 계산하여 램프의 전기 에너지에서 광학에너지로 변환 효율을 얻었다.

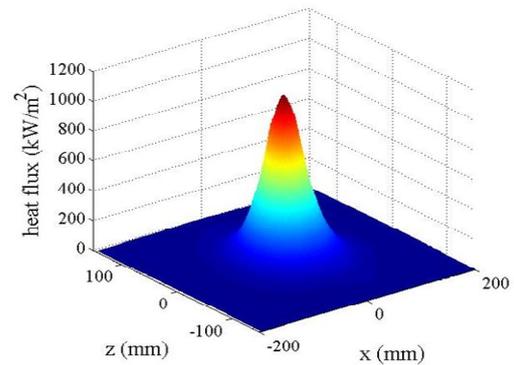


Fig. 4 Flux distribution of No. 1 lamp at the max power input

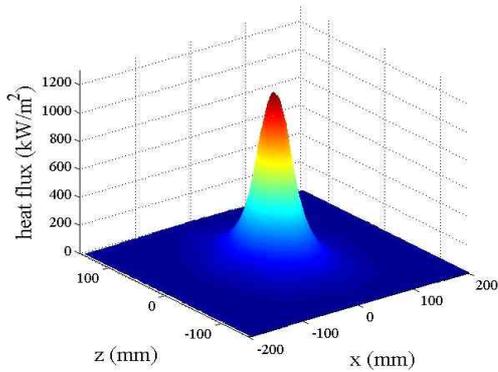


Fig. 5 Flux distribution of No. 2 lamp at the max power input

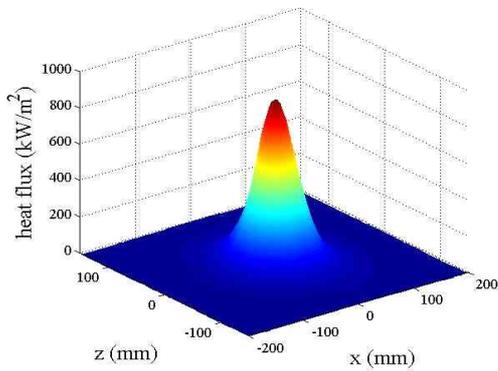


Fig. 6 Flux distribution of No. 3 lamp at the max power input

그림 3은 열유속 측정 시, 빛이 모인 지점에 설치한 확산판의 모습이다. 확산판은 중심 부위에 구멍을 뚫어 라디오미터를 장착한 상태에서, 태양열 시뮬레이터에서 반사경의 초점에 해당하는, 램프로부터 3,000 mm 떨어진 지점에 설치하였다. 실험은 그림 1에 보이는 1, 2, 3번 램프 각각에 대해 입력 전류를 360 A, 380 A, 320 A까지 올리면서 진행하였다. 제조사에 의한 램프의 최대 전류는 400 A이지만, 안전을 고려하여 2번 램프에서는 380 A까지 사용하였다. 1번과 3번 램프는 빛의 일부가 그림 3에 보이는 태양열 시뮬레이터를 격리하는 방

의 창문에 걸칠 염려가 있어서 좀 더 낮은 전류에서 실험하였다. 각 램프의 최대 입력 전류에 따른 최대 전기 입력 파워는 12.96 kW, 13.68 kW, 10.88 kW가 되었다.

그림 4-6은 최대 전기 입력 파워에서 1, 2, 3번 램프에 의한 집광 열유속 분포를 보여준다. 전반적으로 가우시안 분포에 가깝고, 집광 부위는 원으로 대칭적인 형태를 지닌다. 중심부에서 최대 열유속 값은 각 램프별로 1,024 kW/m², 1,136 kW/m², 859 kW/m²으로 나타났다. 3개 램프 전체 3,109 kW/m²가 되고, 평균하여 1,006 kW/m²이 얻어진다.

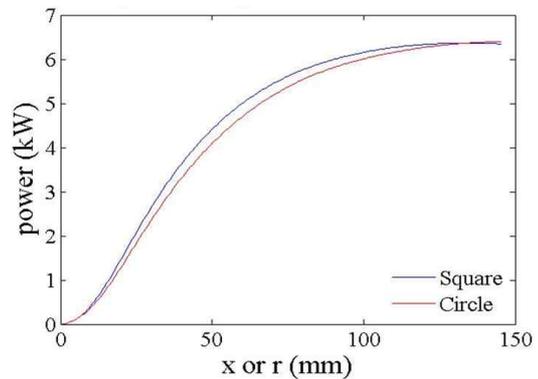


Fig. 7 Concentration power distribution of No. 2 lamp at the max power input

열유속 분포를 적분하면 파워 분포를 얻을 수 있는데, 그림 7은 중심에 위치한 2번 램프의 최대 전기 입력 파워에서 파워 분포이다. 집광부의 크기가 약 150 mm 반경의 원이라면, 전체 집광 파워 6.16 kW를 모두 받아들일 수 있는 것으로 나타났다. 유사하게 최대 전기 입력 파워에서 1, 3번 램프 최대 집광 파워가 6.04 kW와 4.73 kW으로 측정되었다. 결과적으로, 태양열 시뮬레이터 전체적으로 최대 집광 파워는 16.9 kW가 되고, 램프 3개의 평균으로는 5.6 kW가 된다. 또한, 이때의 전기-광 에

너지 변환 효율은 각 램프별로 46.6%, 45.0%, 43.5%가 된다. 램프의 전기에너지의 광학에너지로 변환 효율은 평균적으로 45%가 되었다. 최대 입력 파워에서 태양열 시뮬레이터의 성능평가 주요 값들은 표 1에 요약되어있다.

Table. 1 Optical characteristics at the max power input

Lamp No.	1	2	3
Max Power Input (kW)	12.96	13.68	10.88
Peak Concentration Flux (kW/m ²)	1,024	1,136	859
Max Concentration Power (kW)	6.04	6.16	4.73
Conversion Efficiency (%)	46.6	45.0	43.5

그림 8-10은 램프별로 전기 입력 파워에 따른 집광 출력 파워와 효율의 변화를 보여준다. 선형 보간한 추세선을 보면, 전반적으로 집광 파워와 효율이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 집광 파워 추세선의 기울기에 따르면 1, 2, 3번 램프 순으로 입력 파워에 따른 집광 파워의 증가 속도가 높다. 즉, 동일한 입력 파워에 대한 전기-광 변환 효율도 1번 램프가 가장 좋고, 3번 램프가 가장 나쁘다. 램프와 반사경의 설치 정밀도, 램프 전극의 접촉부의 품질, 램프 냉각 라인의 성능, 창문에 의한 빛의 가림 정도 등에 따라 램프마다 다른 전기-광 변환 효율의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

그림 11은 집광 출력 파워에 따른 최대 열 유속 값으로, 빛으로 변환된 전체 에너지 중에 중심부에 집광된 에너지의 비율을 가리킨다. 2번 램프는 중앙에 설치되어 있기 때문에 가장 높은 값을 나타내고, 1번과 3번 램프는 20도 정도 비스듬히 설치되었기 때문에 낮을 수밖에 없다. 같은 조건이라면, 기본적으로 반사경 표면 곡률 정밀도, 표면 거칠기, 램프 및 반

사경의 설치 정밀도와 관련이 있다.⁷⁾ 따라서 유사한 설치 조건을 가진 1번과 3번 램프를 비교해 보면, 상대적으로 3번 램프가 보다 정밀하게 제작되었음을 알 수 있다.

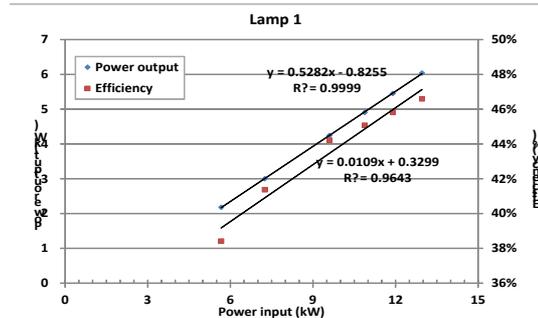


Fig. 8 Concentration power and efficiency of No. 1 lamp according to power input

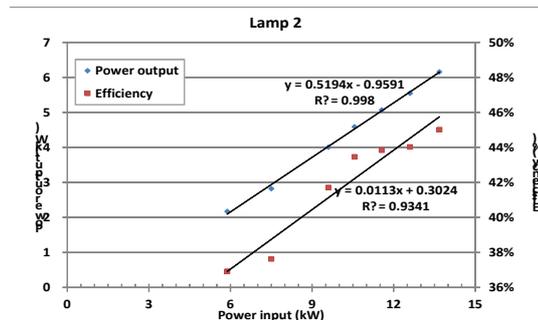


Fig. 9 Concentration power and efficiency of No. 2 lamp according to power input

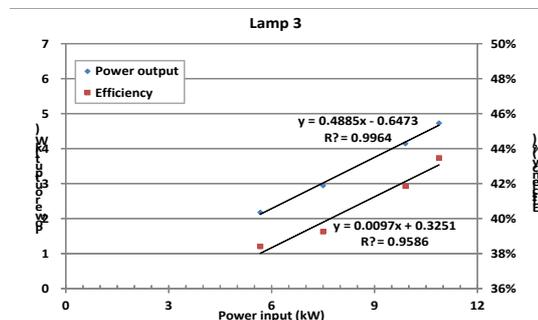


Fig. 10 Concentration power and efficiency of No. 3 lamp according to power input

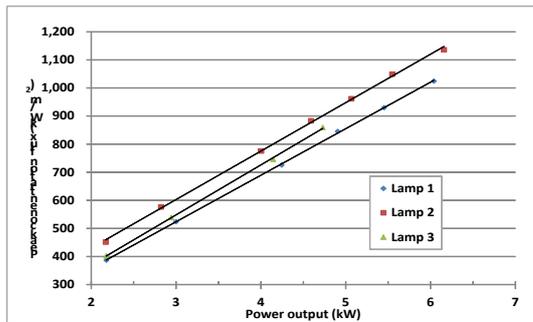


Fig. 11 Peak concentration flux according to power output

위의 실험에서는 안전을 고려하여 1번과 3번 램프의 입력 전류를 제한하였다. 1번과 3번 램프도 380 A까지 추가적으로 입력 전류를 증가해서 입력 파워를 13.68 kW까지 증가한다고 가정하면, 태양열 시뮬레이터는 보다 높은 최대 열유속 값과 파워를 공급할 수 있다. 그림 8, 10, 11에 주어진 결과를 근거로 380 A 입력 시, 최대 열유속 값과 파워를 계산해 보면, 1번 램프는 1,087 kW/m²와 6.40 kW까지 가능하고 3번 램프는 1,088 kW/m²와 6.04 kW까지 가능할 것이다. 이 조건에서 태양열 시뮬레이터는 최대 집광열유속 3,311 kW/m²에 최대 출력 파워는 18.6 kW 정도의 성능을 보일 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 고집광 태양 열유속 분포를 측정하는 플럭스 맵핑 기술을 적용하여 KIER 태양열 시뮬레이터의 집광 특성을 분석하였고, 도출된 결과들은 다음과 같다.

- (1) 중심에 위치한 램프에서 최대 집광 열유속과 집광 파워는 각각 1,136 kW/m²과 6.16 kW로 나타났다.
- (2) 태양열 시뮬레이터 전체적으로 최대 집광

열유속, 집광 파워, 전기-광 전환 효율은 각각 3,019 kW/m², 16.9 kW, 45%로 나타났다.

- (3) 램프 입력 전류를 380 A까지 증가하여 입력 파워를 높이면, 최대 집광 열유속과 집광 파워는 3,311 kW/m², 18.6 kW까지 10% 정도 상승이 가능하다.
- (4) 향후에 반사경의 반사율만 알면, KIER 태양열 시뮬레이터의 최대 열유속, 열유속 분포, 집광 파워를 예측할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B2-2415-02)과 한국에너지기술평가원(에너지기술개발사업 20143030081130)을 통한 지식경제부의 연구비지원으로 수행되었음을 밝힌다.

본 논문은 2013년 한국태양에너지학회 추계학술대회에 발표한 논문¹⁾을 보완하여 작성되었다.

Reference

1. Chai, K. K. et al., Optical Performance Evaluation of a High-Flux Solar Simulator, The Korean Solar Energy Society Annual Fall Conference, pp. 186-189, 2013.
2. Hirsch D. et al., A new 75 kW high-flux solar simulator for high-temperature thermal and thermochemical research, J. of Solar Energy Engineering, Vol. 125, No. 1, pp. 117-120, 2003.
3. Petrasch, D. et al., A novel 50kW 11,000 suns high-flux solar simulator based on an array of xenon arc lamps, J. of Solar Energy Engineering, Vol. 129, No. 4, pp. 182-188, 2007.
4. Ulmer, S., et al., Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators, J. of Solar Engineering, Vol. 124, pp. 182-188, 2002.

5. Kang, M. C. et al., Flux Density Distribution of the Dish Solar Concentrator (KIERDISH II), J. of the Korean Solar Energy, Vol. 24, pp. 11-18, 2004.
6. Lee, H. J. et al., Optical performance evaluation of a solar furnace by measuring the highly concentrated solar flux, Energy, Vol. 66, pp. 63-69, 2014.
7. Lee, H. J., The geometric-optics relation between surface slope error and reflected ray error in solar concentrators, Solar Energy, Vol. 101, pp. 299-307, 2014.