

## KIER 태양로의 열유속 분포 특성

채관교\*, 이현진\*\*, 김종규\*\*\*, 윤환기\*\*\*\*, 이상남\*\*\*\*\*, 강용혁\*\*\*\*\*, 서태범\*\*\*\*\*

\*인하대학교 기계공학과, 한국에너지기술연구원(ckk@kier.re.kr), \*\*한국에너지기술연구원(hj.lee@kier.re.kr),  
\*\*\*한국에너지기술연구원(rnokim@kier.re.kr), \*\*\*\*한국에너지기술연구원(hkyoon@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*한국에너지기술연구원(snlee@kier.re.kr), \*\*\*\*\*한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*인하대학교 기계공학과(seotb@inha.ac.kr)

### Characteristics of the Radiation Heat Flux Distribution for the KIER Solar Furnace

Chai, Kwan-Kyo\*, Lee, Hyun-Jin\*\*, Kim, Jong-Kyu\*\*\*, Yoon, Hwan-Ki\*\*\*\*,  
Lee, Sang-Nam\*\*\*\*\*, Kang, Yong-Heack\*\*\*\*\*, Seo, Tae-Beom\*\*\*\*\*

\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(ckk@kier.re.kr),  
\*\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(hj.lee@kier.re.kr),  
\*\*\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(rnokim@kier.re.kr),  
\*\*\*\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(hkyoon@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(snlee@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*Dept. of Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER(yhkang@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr)

#### Abstract

---

Concentration characteristics of the KIER solar furnace are analyzed with a heat flux measurement technique. Total heat capacity of 40kW was confirmed within 1.04% average error, and the normalized maximum heat flux of 3,452 kW/m<sup>2</sup> was proved. Non-Gaussian flux distribution in the vertical direction implies that reflectors should not be random rather inclined downwards. Moreover, we characterized flux distribution variations with furnace blind opening ratio, distance from the focal plane, and misalignment of the measurement system. Based on the results, the heat flux distribution can be simply estimated once reflectivity and direct normal insolation values are known. This study will be helpful to the design and the performance evaluation of receivers or chemical reactors.

Keywords : 태양로(Solar furnace), 열유속(Heat flux), 플럭스 맵핑(Flux mapping), 라디오미터(Radiometer), 한국에너지기술연구원(KIER)

---

## 1. 서론

태양로는 태양에너지를 고정된 건물 안에 고집광하여 고온 열에너지를 공급하는 장치이다. 태양로는 다른 태양열 장치들에 비하여 초점부에 장치가 용이하고 작업이 편리하기 때문에 태양열발전용 흡수기나 태양연료를 생산하는 화학 반응기를 개발하는데 사용된다. 2009년 한국에너지기술연구원(KIER)은 국내 최초로 40 kW 용량의 태양로를 개발하였다.(그림1 참조)

이러한 태양로는 크게 집광부와 흡수부로 나눌 수 있다. 집광부는 평면반사경과 포물반사경으로 구성되고, 흡수부는 목적에 따라 입구부의 넓이나 형상 등을 다르게 하여 반응기나 발전기 등으로 구성된다. 집광부의 성능은 태양일사량에 대한 초점면에 도달하는 열유속의 비율인 집광비로 결정된다. 열유속 분포 특성의 분석은 집광 평가의 수단이 될 뿐만 아니라 흡수기 설계에 필요한 정보도 제공한다. 따라서 본 연구는 플럭스 맵핑(Flux mapping)<sup>1)2)3)</sup>이라는 고집광 열유속 측정 방법을 두 가지로 나누어 적용하여 KIER 태양로의 집광 특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험 장치



그림 1. KIER 태양로

### (1) 플럭스 맵핑

플럭스 맵핑은 고집광 태양 열유속을 측정하는 방법으로써 개략도를 그림2에 도시하였다. 라디오미터(Radiometer)가 설치된 확산 표면에서 반사되는 빛의 강도를 CCD 카메라로 찍는다. 여기서 얻어진 이미지를 수치로 변환하고 라디오미터 측정값과 비교하여 집광 열유속 분포를 얻는다.

### (2) 태양로의 재원

KIER 태양로에서 평면반사경의 면적은  $9.305 \times 9.387 \text{ m}^2$ , 포물반사경의 외경은 4.5 m, 내경은 0.75 m이고, 평면반사경과 포물반사경 간의 거리는 35 m 이다. 포물반사경과 초점 간의 거리는 4.98 m 로 설계되어 상응하는 림각은  $48^\circ$  이다.<sup>4)</sup> 차광막, 포물 반사경의 틀 등에 의해 가려지는 면적을 제외한 실제 집광 유효 면적 비율은 85%이다.

### (3) 확산표면

열유속이 투영되는 표면은 반사되는 빛이 균일하게 퍼져야 정확한 명암도를 나타내기 때문에 확산표면으로 만들어야 한다. 균일한 확산표면으로 만들기 위해 초고온용 단열보드 위에 알루미늄 스프레이로 코팅한 후  $80^\circ\text{C}$  이상의 온도에서 소결 시켰다. 이 확산 표면은 포물반사경과 수직으로 초점부에 위치하여 x, y, z축으로 움직일 수 있도록 고안된 실험대 위에 설치하였다.

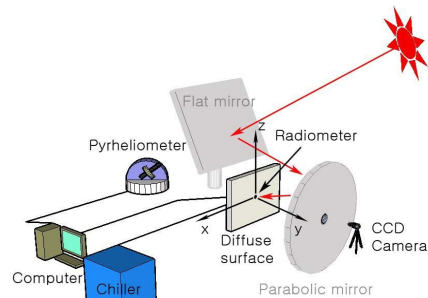


그림 2. Flux mapping 시스템 개략도

#### (4) 라디오미터

라디오미터는 흡수하는 복사에너지에 상응하는 열기전력을 나타내는 센서로써 Gardon 게이지 형식을 사용하였다.<sup>5)6)</sup> 이 라디오미터는 최대 열유속  $3,270 \text{ kW/m}^2$ 까지 측정할 수 있고, 온도를 유지하기 위해 냉각기를 연결하였으며, 확산 표면 좌측 중앙부에 표면과 일치하게 장착하였다.

#### (5) CCD 카메라

포물반사경의 정중앙부에는 라디오미터를 포함하면서 원하는 확산표면의 면적만을 볼 수 있도록 CCD 카메라를 설치하였다. 고광도의 빛으로 인해 CCD 배열이 포화되지 않도록 ND(Neutral Density) 필터를 장착하였으며<sup>6)</sup>, 초기 설정이 변하지 않도록 줌이나 포커스는 원하는 면적에 맞춰두고 셔터 속도와 Frame rate를 조절하여 촬영하였다. 줌, 포커스, Iris 등의 조절을 위해 카메라 앞에 줌렌즈를 장착하였다. 촬영되는 이미지의 해상도는  $640 \times 480$  화소이고, 256개의 명암비를 갖는다.

#### (6) 반사율 측정기

반사율 측정기는  $360 \sim 740 \text{ nm}$ 의 가시광선 범위에서  $10 \text{ nm}$  간격으로 반사율을 측정할 수 있는 분광측색기를 사용하였다. 포물반사면과 평면반사면의 반사율을 각각 동일 지점 3번, 다른 지점 10번씩 측정하여 평균하였다.

### 2.2 실험 방법

플릭스 맵핑 방법에 의한 초점 지역에서의 열유속 분포 촬영은 직달일사량의 변화가 가장 없는 맑은 날의 오전 10시에서 오후 3시 사이에 이루어졌으며, 집광 전, 집광 중(라디오미터 포함), 집광 중(라디오미터 제외), 집광 후의 4 단계로 나누어 진행하였다.

렌즈의 포커스에 따라 CCD 카메라 한 화소에 찍힌 이미지의 길이가 달라진다. 따라서 한 화소가 차지하는 길이를 계산하기 위해 집광 전에 확산 표면에 미리 표시해둔 두

점에 포커스를 맞춘 후 촬영한다. 집광 중에는 고광도의 빛이 확산표면에 집중되어 CCD의 배열이 포화되므로 모든 카메라의 설정은 그대로 두고 Frame rate와 셔터 속도로 명암도를 조절하여 명암도가 255를 넘지 않는 최대값 내에서 촬영한다. 이때 라디오미터의 원리상<sup>5)</sup> 온도구배가 중심점에서 바깥쪽으로 이동하기 때문에 최대한 초점부의 중심점과 일치하도록 놓고 측정 한다. 이후 같은 설정으로 라디오미터가 없는 확산 표면으로 x축만 이동하여 촬영한다. 암전류나 배경에 의한 열유속 간섭 부분을 상쇄하기 위해 집광 후에도 집광 중에 촬영 했던 설정 그대로 두고 어두운 화면에서 촬영한다.

### 2.3 측정 결과 처리 방법

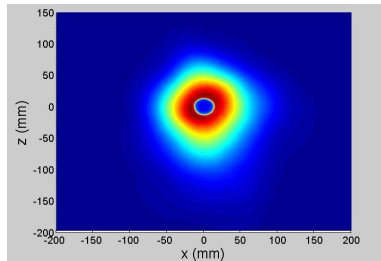
플릭스 맵핑 중 라디오미터 영역 보간 측정법과 라디오미터 영역 제외 측정법의 두 가지 방법을 비교하여 실험하였다.

우선 라디오미터 영역 보간 측정법은 CCD 카메라로 촬영한 열유속 분포 이미지를 수치처리 도구로 불러들여 화소 단위의 행렬로 변환시킨 후 열유속을 계산하기 위해 Matlab을 사용하였다. 집광 전에 촬영한 이미지를 불러들여서 표시된 두 점 사이의 화소의 수를 계산함으로써 화소의 크기를 결정한다. 유사한 방법으로 촬영된 열유속 이미지에서 집광 후 촬영된 간섭된 배경 이미지를 감산함으로써 음영장에 의한 오차를 수정한다. 라디오미터 영역에서는 라디오미터의 높은 흡수율 때문에 CCD 카메라 측정값이 크게 왜곡된다. 라디오미터 영역의 실제 열유속을 유추하기 위해서 x축과 z축을 따라 선형 가우시안 분포함수를 이용하여 측정값을 보간한다. 보간된 라디오미터 이미지 값의 평균이 라디오미터에서 측정된 열유속 값과 같게하여 이미지 전체의 열유속 값을 변환한다. 그리고 측정 당시의 직달일사량 값과 반사율 값을 설계치인  $1,000 \text{ W/m}^2$ 의 직달일사량, 0.84 평면반사경 반사율, 0.94 포물반사경 반사율로 열유속 분포를 정규화한다.

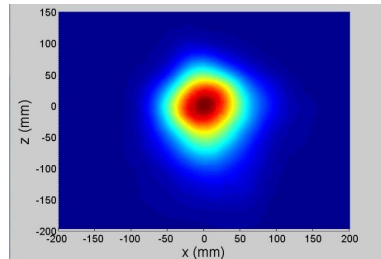
라디오미터 영역 제외 측정법에서의 열유속 분포는 위의 방법에서 라디오미터를 보간하는 순서만 생략되고 나머지는 같다.

### 3. 측정 결과 및 고찰

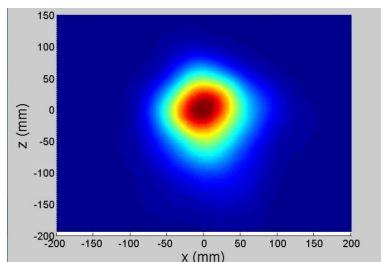
그림3의 (a)는 보간 전에 촬영한 하나의 이미지 값이다. 측정 당시 법선면 직달일사량은  $730.1 \text{ W/m}^2$ , 포물반사경 반사율은 0.87, 평면반사경 반사율은 0.83 이다.



(a) 보간 전 열유속 분포  
(라디오미터 영역 포함)



(b) 보간 후 열유속 분포  
(라디오미터 영역 보간)



(c) 열유속 분포(라디오미터 영역 제외)

그림 3. 열유속 분포 비교

(b)는 라디오미터 영역의 보간 후에 얻어진 열유속 분포이다. (c)는 라디오미터가 없는 확산 표면을 찍은 이미지 값이다.

이 중에서 (c)에 해당하는 라디오미터 영역 제외 측정법으로 측정된 열유속 분포의 단면을 x-y축의 2차원적으로 그림4에 도시하였다. 수평방향 열유속은 비교적 가우시안 분포에 가깝지만 수직방향은 다소 비대칭인 경향을 보인다. 따라서 KIER 태양로 반사판의 곡률이 랜덤하지 않고 수직방향으로는 아래 쪽으로 편향되어 있다고 판단할 수 있다.

그림4의 측정 당시 직달일사량, 반사율, 집광면적에 근거한 KIER 태양로의 집광 에너지는 27.10 kW가 된다. 플럭스 맵핑을 통해 측정된 열유속 분포를 적분하여 얻어진 에너지는 26.61 kW이다. 따라서 전체 집광 에너지 측면에서 약 1.79% 오차를 보였다.

이러한 방법으로 차광막과 초점 위치가 같은 조건에서 11회의 측정을 비교한 결과, 라디오미터 영역 제외 측정법은 절대 오차가 최소 1.20%에서 최대 6.77%로써 평균 절대 오차율이 3.06%로 나타났다.

라디오미터 영역 보간 측정법으로 측정된 평균 최대 열유속은  $2,447 \text{ kW/m}^2$ 이고, 정규화된 평균 최대 열유속은  $3,452 \text{ kW/m}^2$ 이다.

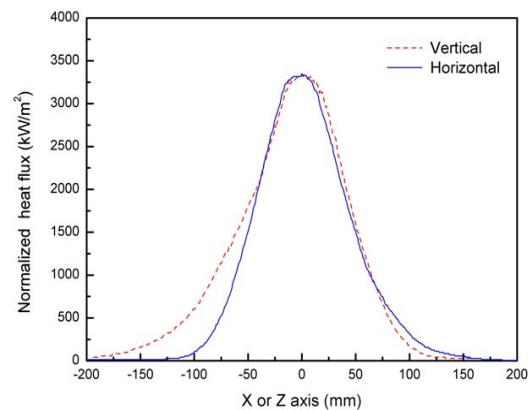


그림 4. 정규화된 열유속 분포(Radiometer 제외)

이는 차광막과 초점 위치가 같은 조건에서

29회의 측정을 평균한 값이다. 각각의 경우에 대하여 위의 실험과 마찬가지로 비교한 결과, 절대 오차가 최소 0.02%에서 최대 3.20%로써 평균 절대 오차율이 1.04%로 나타났다. 태양로 예서는 고도각에 따라 평면 반사경에서 포물 반사경에 비취지는 반사광의 형상이 점차 마름모가 길어지는 형태로 변한다. 이때 포물 반사경의 좌우 양쪽 변에 비집광 면적이 점차 커지게 되는데, 시간에 따른 이러한 비집광 면적의 변화까지 계산하여 정확도를 더욱 높였다.

따라서 플럭스 맵핑 방법 중 라디오미터 영역 보간 측정법이 제외 측정법보다 오차 등락이 적고 오차율도 낮게 나타났다. 이는 제외 측정방법이 일사량에 따라 1분에 수차례씩 변화하는 라디오미터의 값을 실시간으로 측정할 수 없는 단점 때문인 것으로 보인다.

그림5는 입구부의 크기에 따라 초점에 놓인 정사각형 모양의 흡수기가 받아들이는 열용량을 나타낸다. 흡수기의 지름이 300 mm일 때, 집광된 태양에너지의 대부분을 흡수하며 그 값은 설계치와 일치하는 40 kW가 된다. 라디오미터 영역 제외 측정법의 경우에는 라디오미터 영역 보간 측정법보다 정점에서의 열용량이 2.55% 더 낮게 나타났다.

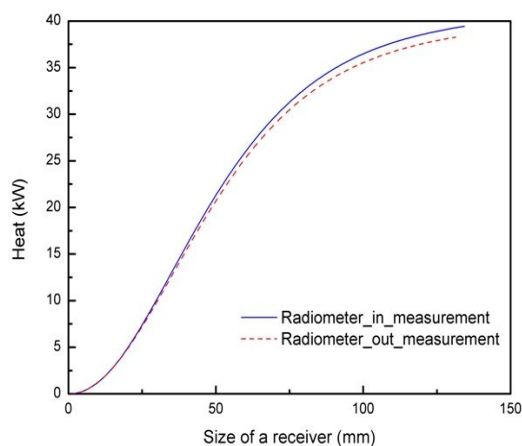


그림 5. 흡수기의 반경에 따른 열용량

이 그래프를 통해 흡수기의 입력 열량을 알면, 흡수기의 설계 또는 성능 평가가 가능하다.

라디오미터 영역 보간 측정법에서 라디오미터 중심점이 초점에서 멀어짐으로써 발생하는 오차를 측정된 결과 x축 방향으로 5 mm 이동했을 때 3.74%의 오차가 더 발생했다. 따라서 이 측정 방법은 중심부가 초점과 일치해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

흡수부에서는 흡수기의 용도에 따라서 원하는 열유속의 크기와 출구 온도가 다를 수 있다. 그림6은 초점으로부터 y축의 위치를 이동하며 측정된 정규화된 열유속 분포이다.

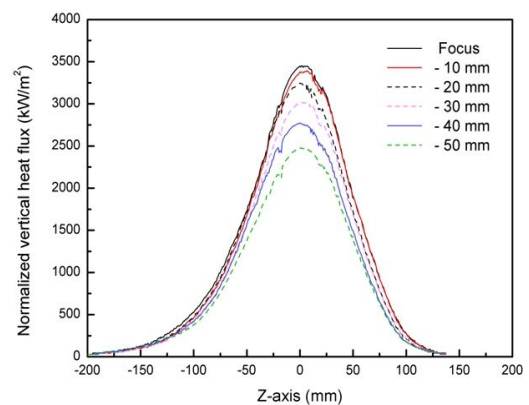


그림 6. Y축의 위치에 따른 정규화된 열유속 분포

초점부를 포물반사경과 반대쪽으로 10 mm 씩 이동하였다. 초점에선 정규화된 최대 열유속이  $3,488 \text{ kW/m}^2$ , 50 mm 뒤의 위치에선  $2,677 \text{ kW/m}^2$  으로 나타났다. 이로 인하여 흡수기의 위치에 따라 기대할 수 있는 최대 열유속과 열용량을 예측할 수 있다.

KIER 태양로에는 집광되는 열유속의 양을 제어하기 위해 차광막이 설치되어 있다. 그림7은 실제 차광막의 개폐율에 따른 열용량이다. 이러한 열용량 분포를 알게 됨으로써 높은 열유속에서 차광막을 조절하였을 때 기대되는 열유속과 열용량을 확인할 수 있게 되었다.

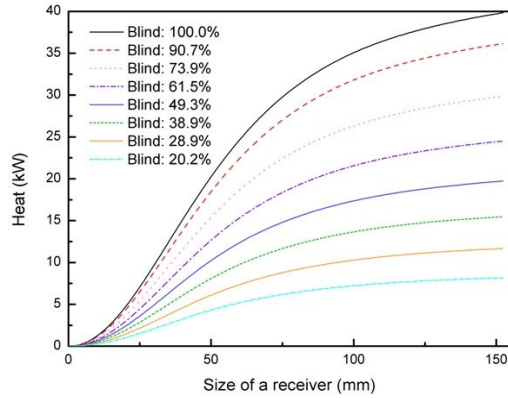


그림 7. 차광막의 개폐율에 따른 열용량 변화

#### 4. 결 론

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

- (1) 라디오미터 영역 보간 측정법에 의해 측정된 전체 집광 에너지는 직달일사량과 반사율 근거로 계산된 값 대비 평균 1.04%의 오차를 보였다.
- (2) 라디오미터 영역 제외 측정법으로 측정된 전체 집광 에너지는 계산된 값 대비 평균 3.06%의 오차를 보였다. 따라서 라디오미터 영역 보간 측정법이 더 정확하게 나타났다.
- (3) KIER 태양로의 40 kW 열용량을 확인하였고, 정규화된 최대 평균 열유속은 3,452 kW/m<sup>2</sup>에까지 도달함을 증명하였다.
- (4) 초점에서 x축으로 5 mm 멀어질 때 오차가 3.74% 더 증가하였다.
- (5) 초점부에서 y축의 위치 변화에 따른 정규화된 열유속 분포와 차광막의 개폐율에 따른 열용량의 변화를 분석함으로써 향후에 반사율과 직달일사량을 알면 KIER 태양로의 최대 열유속과 열유속 분포를 예측할 수 있게 되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝힌다. (과제번호 : GP2011-0005-1)

#### 참 고 문 헌

1. Ulmer, S., et al., 2002, Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators, J. of Solar Engineering, Vol. 124, pp. 182-188.
2. Kang, M. C. et al., 2004, Flux Density Distribution of the Dish Solar Concentrator (KIERDISH II), J. of the Korean Solar Energy, Vol. 24, pp. 11-18.
3. Hyun, S. T., 2001, An Analysis Of Focal Plane Flux Distributions Produced By Dish Solar Concentration System, The Society of Air - Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Ver. 2001, pp. 954-959.
4. Kang, Y. H., 2009, Report to Korea Research Council for Industrial Science and Technology, Development of High-Flux Solar Furnace for Solar Fuel Production, KIER-A92408.
5. Robert Gardon., 1953, An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation, The Review of Scientific Instruments, Vol. 24, No. 5, pp. 366-370.
6. Ulmer, S., 2004, Calibration corrections of solar tower flux density measurements, Energy, Vol. 29, pp. 925-933.