

타워형 태양열 발전을 위한 열유속 분포 측정기술 개발

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

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

Development of Flux Mapping Technique for the Solar Power Tower Plant

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

*Dept. of Solar Energy, KIER(ckk@kier.re.kr), **Dept. of Solar Energy, KIER(hj.lee@kier.re.kr),
Dept. of Solar Energy, KIER(mokim@kier.re.kr), *Dept. of Solar Energy, KIER(hkyoon@kier.re.kr),
*****Dept. of Solar Energy, KIER(snlee@kier.re.kr),
*****Dept. of Solar Energy, KIER(yhkang@kier.re.kr),
*****Dept. of Mechanical Eng., Inha University(seotb@inha.ac.kr)

Abstract

Daegu Solar Power Tower Plant of 200 kW thermal capacity was developed for the first time in Korea, 2011. Measurement of the heat flux distribution is essential to evaluate the solar energy concentrated by reflectors and to design a suitable receiver. The flux mapping technique, which uses a radiometer and a diffuse plate, is common for measurement of the heat flux distribution. Because the solar power tower plant has a wide concentration area, the flux mapping technique using a fixed diffuse plate is difficult to apply. Therefore, the flux distribution in the solar power tower plant should be measured by the flux mapping technique using a small moving bar. In this study, we measured flux distributions with the moving-bar system developed at the KIER solar furnace and evaluated its applicability for the solar power tower plant.

Keywords : 타워형 태양열 발전(Solar Power Tower Plant), 태양로(Solar furnace), 열유속(Heat flux), 플럭스맵핑(Flux mapping)

1. 서론

2011년 한국 최초로 200 kW 열용량의 대구 타워형 태양열 발전소가 개발됐다. 이 타워형 태양열 발전을 포함한 모든 집광형 태

양열 발전 방식에서 반사판들에 의한 집광 성능을 평가하고, 목적에 맞는 흡수기 형상을 디자인하기 위해서는 열유속 분포의 측정이 필수적이다.

이러한 열유속 분포의 측정 방법은 라디오

미터(Radiometer)¹⁾와 확산판을 사용하는 플럭스맵핑(Flux mapping)²⁾³⁾이 일반적이다. 라디오미터가 설치된 고정된 확산 표면에서 반사되는 빛의 강도를 CCD 카메라로 찍어서 얻어진 이미지를 수치로 변환하고 라디오미터 측정값과 비교하여 집광 열유속 분포를 얻는 방식이다. 하지만 타워형 태양열 발전은 흡수부의 면적이 상대적으로 크기 때문에 일반적인 소형 고정형 확산판 방식으로는 열유속 측정이 힘들다. 그래서 작은 면적의 움직일 수 있는 확산표면 막대(Moving bar)를 사용하여 측정하는 방법이 적합하다.⁴⁾

따라서 이 연구의 목적은 태양열 타워에 적용하기 전에 Moving bar 시스템을 개발하여 KIER 태양로에서 검증함으로써 측정 기술을 확보하는데 있다.

2. 측정장치 및 측정방법

2.1 측정장치

고집광 태양 열유속을 측정하는 방법인 플럭스맵핑 기술의 개략도를 측정이 이루어진 태양로의 시스템에 맞게 그림 1에 도시하였다. 플럭스맵핑에 필요한 대표적인 장치로는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라, 확산표면, 라디오미터(Radiometer), 직달일사량계(Pyreheliometer), 반사율측정기 등이 있다.

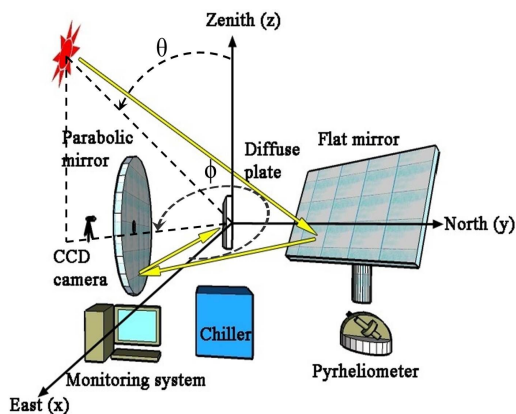


그림 1. Flux mapping 시스템 개략도

플럭스맵핑 기술의 하나인 Moving bar 측정법은 구성적으로 확산표면이 움직이는 막대 형식으로 되어 있는 점이 고정형 확산판 방식과 다르다할 수 있다. 주요 측정 장치의 특성은 참고자료(Chai et al, 2011)³⁾에 자세하게 설명되어 있기 때문에 추가적 요소인 확산표면에 대해서만 기술하였다.

Moving bar는 어디를 고정해서 만들지에 따라 움직이는 모양이 여러 가지 인데, 이번 타워형 태양열 발전을 겨냥한 실험의 경우에는 BLDC 모터를 이용하여 x축 상에서 등속도로 움직이는 형식의 측정 장치를 구상하였다.



그림 2. KIER 태양로에 제작된 Moving bar 확산표면

그림 2는 Moving bar 확산표면의 전면부 모습이다. 좌측에 길다란 확산표면에 나란하게 라디오미터가 설치되어 있어서 z축으로 자동으로 움직이면서 집광된 열유속의 중심부를 측정할 수 있도록 설계하였다. 또한 양쪽 끝단에 한계 센서를 장착하여 테이블과 라디오미터가 지정된 경로를 이탈하지 않도록 하였다.

이 실험 장치에 사용된 BLDC 모터는 한국 SPG사의 제품으로써 정격출력은 75 W, 최대속도 3000 rpm이며 여기에 실험 조건에 맞는 속도와 하중을 위해 1:15 감속기를 사

용하여 최대 200 rpm으로 제한하였고 허용
 추력 하중은 150/15 N/kgf 이다. 이러한 모
 터 제어박스는 속도 제어를 장치하고 x-z
 이동식 조이스틱 형식으로 만들어서 속도의
 정교함 및 컨트롤의 편리함을 추구하였다.

2.2 측정방법

Moving bar를 이용한 열유속 분포 측정은
 그림 3의 4단계로 나눌 수 있다. 집광 전에
 한 화소의 크기를 결정하기 위해 Moving
 bar의 밑 부분에 일정한 간격으로 찍은 점을
 촬영한다(그림 3 (a)). 집광 중에는 라디오미
 터를 초점의 중심부에 정확히 위치시키고 열
 유속을 측정한다(그림 3 (b)). 열유속을 측정
 하고 Moving bar를 움직여 촬영한 뒤 다시
 원점으로 돌아오기까지는 적어도 30초 이상
 의 시간이 걸리기 때문에 비슷한 일사량의
 데이터 확보를 위해 충분한 열유속 측정 시
 간 필요하다.

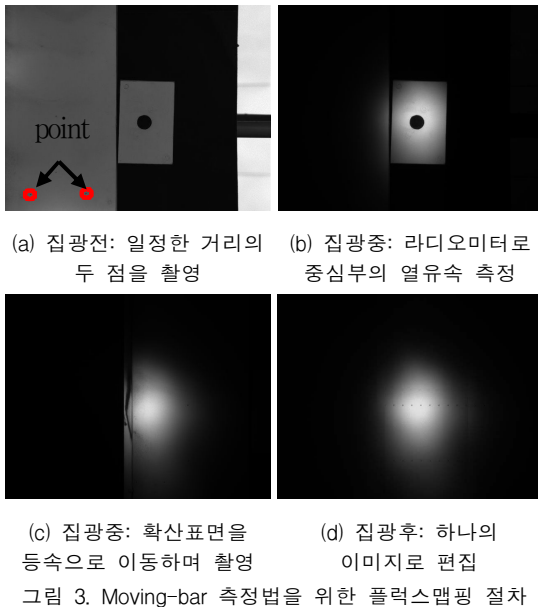


그림 3의 (c)는 Moving bar가 움직이고 있
 는 모습이다. Moving bar를 좌측에서 우측
 혹은 우측에서 좌측으로 같은 속도로 이동시

키면서 CCD 카메라로 확산표면 막대에 비
 췌진 이미지를 Frame rate를 지정하여 연속
 으로 촬영한다. 이때 Frame rate의 설정에
 따라서 1초안에 찍히는 사진의 수가 정해지
 고 이에 따라서 셔터 속도와 Iris의 미세조정
 이 가능하기 때문에 적절한 Frame rate의 설
 정이 중요하다.

그림 3 (d)는 집광 후에 Moving bar의 이
 동에 따라 차례로 찍힌 확산표면의 이미지를
 확산표면의 가운데 부분만 세로로 일정하게
 잘라서 하나의 이미지로 편집한 것이다.

2.3 측정결과 처리방법

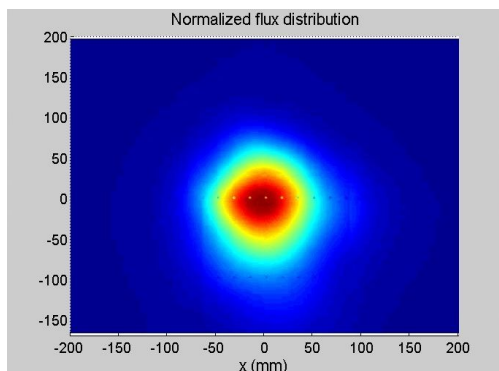
Moving bar 측정법의 결과 처리 방법은 우
 선 집광 전에 촬영한 이미지를 불러들여서
 미리 10 cm 간격으로 표시해둔 두 점 사이
 의 화소의 수를 계산함으로써 화소의 크기를
 결정한다. 연속 촬영된 여러 장의 사진들
 에서 Moving bar의 속도를 고려하여 원하는
 픽셀 크기로 계산 후 자른다. 일정한 크기로
 잘라진 사진을 이어지도록 순서대로 붙여 넣
 는 방식으로 여러 장을 이어서 한 장의 이미
 지로 편집한다.

편집된 열유속 이미지에서 집광 후 촬영된
 간섭된 배경 이미지의 명암도 값을 감산함으
 로써 음영장에 의한 오차를 보정한다. 보정
 된 열유속 분포에서 최대값이 라디오미터에
 서 측정된 열유속 값과 같게 하여 이미지 전
 체의 열유속 값을 변환한다. 측정 당시의 직
 달일사량 값과 반사율 값을 설계치인 1,000
 W/m^2 의 직달일사량, 그리고 깨끗한 반사경
 의 반사율인 0.84의 평면반사경 반사율, 0.94
 의 포물반사경 반사율로 열유속 분포를 정규
 화 한다.

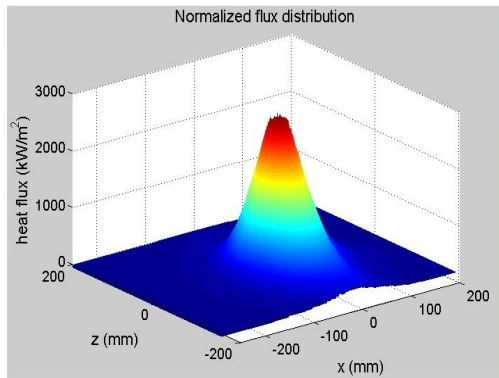
3. 측정 결과 및 고찰

그림 4는 Moving bar 측정법으로 얻어진 6
 개의 편집된 이미지중 하나로써, 태양로의
 열유속 분포를 나타낸 것이다. 그림 4 (a)에

선 초점과 수평하게 찍힌 점들이 보인다. 원래는 Moving bar의 가운데에 하나만 찍힌 점인데 이미지를 일정하게 잘라서 같은 픽셀 크기로 붙였기 때문에 점들이 일정하게 정렬되어 있다. 그림 4 (b)는 3차원으로 나타낸 열유속 분포로써 수직축 밑 부분이 약간 잘려져 있는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 태양로 반사판의 곡률이 수직방향으로 아래쪽으로 편향되어 있기 때문이다.



(a) 편집된 열유속 분포의 등고선 이미지



(b) 3차원 열유속 분포

그림 4. Moving bar 측정법으로 얻어진 열유속 분포

그림 5는 측정으로 얻어진 3차원 평균 열유속 분포 그래프를 초점을 기준으로 각각 수평축과 수직축으로 자른 단면으로써, 같은 태양로에서 고정형 확산판으로 측정한 참고자료(Chai et al, 2011)³⁾와 비교하여 나타낸 것이다.

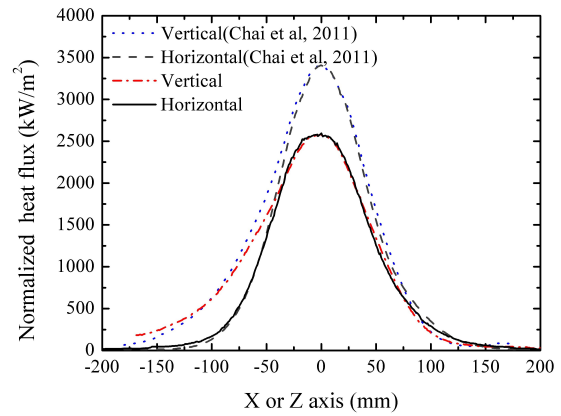


그림 5. 측정 방법에 따른 정규화된 열유속 분포 비교

고정형 확산판으로 29회의 평균 직달일사량 781 W/m^2 에서 측정된 평균 최대 열유속을 초기 설계치로 정규화한 평균 최대 열유속은 $3,406 \text{ kW/m}^2$ 이고, Moving bar 측정법으로 6회의 평균 직달일사량 162.5 W/m^2 에서 측정된 정규화된 평균 최대 열유속은 $2,585 \text{ kW/m}^2$ 으로 24.1% 낮아졌다. 하지만 $Z = -150 \text{ mm}$ 인 지점에서는 참고값 173.3 kW/m^2 에서 측정값 239.1 kW/m^2 로 오히려 27.5% 더 높아졌는데, 초점에서 멀어질수록 그러한 경향을 보였다.

측정이 이루어진 날은 평균 DNI(direct normal insolation)가 162.5 W/m^2 로 매우 낮았고, 구름이 많은 날이었다. 최대 열유속이 낮아진 이유는 Moving bar 측정법이 일사량에 따라 1분에 수차례씩 변화하는 라디오미터의 값을 실시간으로 측정할 수 없는 단점 때문인 것으로 보인다. 또한, 상대적으로 낮은 직달일사량에선 약간의 일사량 변화에도 256개 내에서 명암도 차이의 폭이 커진다. 고정형 확산판 측정법으로 촬영한 사진을 Moving bar 측정법의 결과 처리 방법과 똑같이 이미지를 보정하여 같은 조건으로 계산한 결과가 같게 나왔기 때문에 이미지 편집 오차가 아닌 상대적으로 낮은 일사량과 높은 일사량 변화에 기인된 오차라 할 수 있다.

태양 광선의 에너지는 태양 디스크(sun's

disk)의 중심 반경에서 멀어질수록 강도가 줄어든다(주연감광). 또한 태양광은 태양 디스크 범위 내에서 균일한 방향으로 방사하는데, 지구의 지름보다 109배가 더 크기 때문에 태양 디스크의 가장자리는 지구와 0.266°(4.65 mrad)의 반각을 이루어 직사광선만이 아닌 기울어진 태양광도 DNI에 포함되어 들어온다. 뿐만 아니라 태양 빛이 대기 중에서 산란하여 발생하는 태양 주변의 후광(circumsolar aureole)도 복사에너지에 포함되어 2.5°(43.6 mrad) 범위 내에서 영향을 준다. 이러한 태양 주변의 효과는 날씨나 대기 상태에 크게 의존하며, Neumann et al⁵⁾의 연구 결과에 따르면 직달 일사량이 200 W/m² 이하로 낮을 때는 DNI에 35% 이상의 CSR(Circumsolar ratio: 전체 태양광 에너지 중 태양 주변의 후광 비율)이 포함될 확률이 매우 크다. 따라서 초점에서 멀어질수록 낮은 일사량의 열유속 값이 더 증가하는 현상은 초점부에 와야 할 열유속이 주위로 난반사 된 것을 의미하며, 낮은 직달일사량에 의한 태양의 주변 효과에 기인된 것이다.

따라서 본 측정법을 타워형 태양열 발전 시설에 적용해도 일사량이 높거나 변화가 적은 날에 측정한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

[그림 6]은 정규화된 열유속 분포를 적분하여 입구부의 크기에 따라 초점에 놓인 정사각형 모양의 흡수기가 받아들이는 열용량을 측정방법별로 평균하여 나타낸 것이다. 이 그래프를 통해 흡수기의 입력 열량을 알면, 흡수기의 설계 또는 성능 평가가 모두 가능하다.

가로축은 흡수기의 모양이 정사각형이라면 변의 반, 즉 반변의 길이이다. 흡수기의 지름이 320 mm일 때, 집광된 태양에너지의 대부분을 흡수하며 그 값은 37.3 kW가 된다. 표시된 정점에서 고정형 확산판으로 측정된 참고값은 39.4 kW였고, 측정값은 35.6 kW로 9.82%의 차이가 났다.

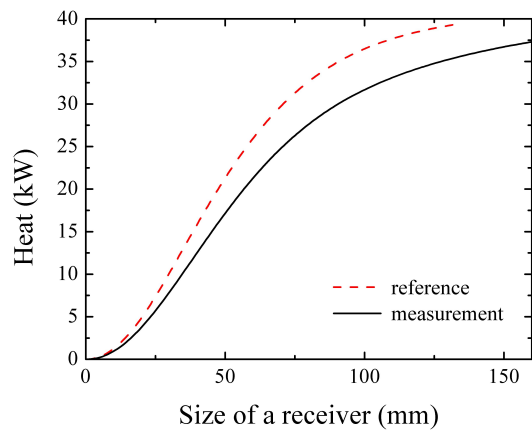


그림 6. 흡수기의 크기(반변)에 따른 흡수기의 열용량
Reference: Chai et al, 2011

Moving bar 측정법으로 측정할 경우 이미지의 개수를 얼마나 해야 할지, 잘게 쪼개면 더 좋을지 알아보기 위해 이미지 개수에 따른 오차율의 변화를 알아보았다. 이미지는 같은 구간의 이미지를 사용하여 각 개체의 라디오미터 값과 직달일사량 값을 같다.

표 1. 이미지의 개수 선정에 따른 오차율의 변화

Number of images	measured total heat	calculated total heat	error
	(kW)	(kW)	
18	5.69	6.01	5.37%
9	5.66	6.01	5.82%
4	5.85	6.01	2.78%
2	5.60	6.01	6.84%

표 1은 이미지의 개수만 다르게 하여 정리한 오차율이다. 이미지의 수가 4개일 때 오차율이 제일 낮은 2.78%로 나타났지만 표에서는 어떠한 경향성도 보이지 않았으며, 이미지의 개수는 상관없이 이미지가 포함하는 명암도의 변화와 밀접한 관련이 있었다. 이는 역시 일사량 변화에 의해서 기인된 것인데, 이미지의 열유속 분포가 높은 곳이 많은 비율을 포함할수록 오차가 가장 적고 정확도

가 높게 나왔다.

Frame rate의 설정에 따라서 1초안에 찍히는 사진의 수가 정해지고 이에 따라서 셔터 속도와 Iris의 미세조정이 가능하기 때문에 적절한 Frame rate의 설정이 중요하다. 그래서 FPS(Frame Per Second)를 5, 10, 20의 세 가지로 조절하여 측정해본 결과 FPS 설정에 따라서 Iris와 셔터속도의 미세조정이 가능하기 때문에 명암도가 255를 넘지 않도록 미세조정 하는 효과만 있었다.

4. 결론

본 연구는 플릭스맵핑이라는 고집광 태양 열유속 측정 방법 중에 Moving bar 측정법을 대구 태양열 타워에 적용하기 위하여 태양로에서 우선적으로 검증하였고, 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) Moving bar 측정법으로 측정한 결과 평균 직달일사량 162.5 W/m^2 에서 정규화된 최대 평균 열유속은 $2,585 \text{ kW/m}^2$ 였고, 이를 적분한 평균 집광 에너지는 5.45 kW 로 나타났다.
- (2) 정규화된 열유속 수평면 그래프에서 측정값의 초점부 최대 열유속은 참고값 보다 24.1% 낮아졌고, 흡수기의 크기에 따른 열용량에선 측정값이 참고값 보다 정점에서 9.82% 낮았다.
- (3) 오차는 낮은 직달일사량에서 기인되었기 때문에 일사량이 높고 고른 날에 측정한다면 더 정확한 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.
- (4) 태양로에서 Moving bar를 이용한 측정 장치를 개발하였고, 열유속 분포 측정 방법도 검증되어 대구 태양열 타워에 확장하여 적용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝힌다. (과제번호 : GP2012-0015-3)

참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. Chai, K. K. et al., 2011, Characteristics of the Radiation Heat Flux Distribution for the KIER Solar Furnace, KSES 2011 Autumn Annual Conference, pp. 74-79.
4. Ulmer, S., 2004, Calibration corrections of solar tower flux density measurements, Energy, Vol. 29, pp. 925-933.
5. Neumann, A., Witzke, A., Jones, S. A., and Schmitt, G., 2002, Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles, J. of Solar Engineering, Vol. 124, pp. 198-204.