

## 집광 열유속 측정과 모델링의 비교를 통한 집광 오차 평가

### Concentration Error Assessment by Comparison of Solar Flux Measurement and Modeling

채관교\* · 윤환기\*\* · 이현진\*\*\*† · 이성욱\*\*\*\* · 김시석\*\*\*\*\*

Chai Kwan-kyo\*, Yoon Hwan-Ki\*\*, Lee Hyun-Jin\*\*\*†, Lee Seong-Uk\*\*\*\* and Kim Si-Seok\*\*\*\*\*

(Submit date: 2013. 4. 15. Judgment date: 2013. 4. 15. Publication decide date: 2013. 6. 21.)

**Abstract :** Concentration errors critically affect the performance of solar concentrator, so their evaluation is important to the concentrated solar power technology. However, the evaluation is very challenging because error sources are various and not easy to measure individually. Therefore, the integrated effect of concentration errors is often more interesting and useful for large-scale applications. In the present work, we analytically investigate and classify various concentration error sources and then explain that the effect of various concentration errors can be represented in terms of a root mean square value of reflector surface slope error. We present an indirect approach to assessing the reflector surface slope error by comparing solar flux measurement data with modeling calculations. We apply the approach for solar furnaces with different thermal capacity and investigate its advantages and disadvantages.

**Key Words :** 집광(Solar concentration), 오차(Error), 반사판 표면 기울기(Reflector surface slope), 플럭스 맵핑법(Flux mapping method), 광선 추적법(Ray tracing method)

#### 기 호 설 명

$\mathbf{n}$ : 반사 표면 법선벡터	$\zeta$ : $\tan\theta$ , 반사 표면 법선벡터의 기울기
$P$ : 확률분포함수	$\theta$ : 반사 표면 법선벡터의 천정각
$R$ : 난수 (random number)	$\sigma$ : 반사 표면 기울기의 제곱평균제곱근
	$\phi$ : 반사 표면 기울기의 방위각

\*\*\*† 이현진(교신저자) : 한국에너지기술연구원  
E-mail : [hj.lee@kier.re.kr](mailto:hj.lee@kier.re.kr), Tel : 042-860-3464  
\*채관교 : 한국에너지기술연구원  
\*\*윤환기 : 한국에너지기술연구원  
\*\*\*\*이성욱 : 나노씨엠에스(주)  
\*\*\*\*\*김시석 : 나노씨엠에스(주)

\*\*\*† Lee Hyun-Jin(corresponding author) : Korea Institute of Energy Research.  
E-mail : [hj.lee@kier.re.kr](mailto:hj.lee@kier.re.kr), Tel : 042-860-3464  
\*Chai Kwan-Kyo : Korea Institute of Energy Research.  
\*\*Yoon Hwan-Ki : Korea Institute of Energy Research.  
\*\*\*\*Lee Seong-Uk : NANOCMS Co., Ltd.  
\*\*\*\*\*Kim Si-Seok : NANOCMS Co., Ltd.

## 1. 서 론

태양열로 가열된 작동 유체로 터빈이나 엔진을 구동하여 전기를 생산하는 태양열 발전 (concentrated solar power) 시스템은 크게 집광부, 흡수부, 발전부, 저장부로 구성된다. 집광부는 입사되는 태양 복사에너지를 반사판을 이용하여 흡수부로 모으는 역할을 한다. 태양열 발전 기술은 발전사업자에게 적합한 중앙 집중형으로 규모가 커질수록 경제적으로 유리하다. 대규모의 발전소를 위해서는 넓은 면적에서 태양 복사에너지를 받아야한다. 예를 들어, 직달일사량(direct normal insolation)이  $1,000 \text{ W/m}^2$ 인 지역에서 효율 15%로 전기 100 MW를 생산하는 태양열 발전소라면, 약 820 m 길이의 정사각형 면적을 반사판으로 덮어야 한다. 결과적으로 집광부는 태양열 발전소 초기 투자비의 약 3분의 1을 차지할 뿐만 아니라 발전소 성능을 크게 좌우하기 때문에 발전 단가에서 차지하는 비중이 매우 높다.<sup>1)</sup>

일반적으로 집광 시스템의 성능은 반사판의 반사율과 집광 방향에서 벗어나는 정도-집광 오차에 의존한다. 반사판의 반사율은 쉽게 측정 가능하다. 하지만, 집광 오차는 다양한 원인으로 발생하므로 각각을 파악하는 것도 어렵고 오차 원인들 간 상호 작용 때문에 직접적으로 집광 오차를 평가하는 것은 거의 불가능하다.

본 연구에서는 다양한 집광 오차의 원인에 대한 이론적 분석을 바탕으로 집광 오차를 나타내는 지표로서 반사판 표면 기울기를 이용하였다. 집광 시스템의 산출 결과라 할 수 있는 집광 열유속을 측정하고, 측정값을 모델링 결과와 비교하면서 간접적으로 반사판 표면 기울기를 결정하였다.

## 2. 집광 오차에 대한 고찰

집광 시스템의 성능은 직달일사량을 흡수기 개구부 안으로 얼마만큼 모을 수 있는가에 의해 결정된다. 즉, 집광 시스템에서 반사시 에너지 손실이 적어야 하고 반사 방향은 목표지점으로부터 최대한 적게 벗어나야 한다. 전자는 반사율을 측정함으로써 얻을 수 있지만, 집광 정확도를 나타내는 후자는 다양한 오차를 고려해야 얻을 수 있다. 집광 오차는 종류도 다양하고 서로 서로 연관되어 있지만, 크게 다음과 같이 분류할 수 있다: 1) 산란 오차, 2) 표면 기울기 오차, 3) 형상 오차, 4) 추적 오차.

산란 오차는 반사판 표면에 미세한 거칠기 (roughness)나 불순물이 있을 때 발생한다 (그림 1 참조). 산란 오차는 빛이 반사된 방향을 중심으로 퍼지는 현상으로 나타난다. 태양열 발전에서는 주로 유리 후면에 은이 코팅된 반사판을 사용한다. 거칠기는 유리판 제작 시 성형이나 가공 공정 중에 전면이나 후면에 생성될 수도 있다. 또한, 유리 후면에 은 코팅이 균일하게 형성되지 않아 발생할 수도 있다. 표면 거칠기는 아니지만, 유리의 용융 공정에서 불순물이 들어가거나, 원료가 완전히 용융되지 않아 고체 조성으로 남거나, 원료 사이에 존재 하던 공기 기포 등이 남거나 하여도 산란의 원인이

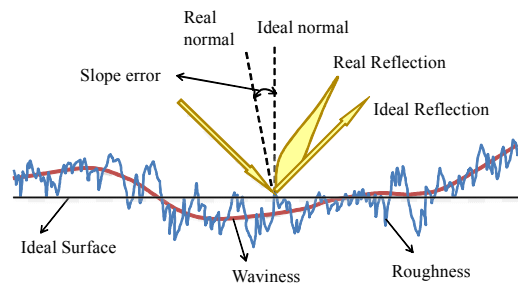


Fig. 1 Schematic sketch of reflector surface and reflection deviation due to slope error

된다. 엄밀하게 말하면 물리적으로 산란 현상은 아니지만, 산란 오차는 다양한 광학적 오차를 포함할 수도 있다. 예를 들어, 유리판 전면과 후면 사이에서 다중 반사가 발생하면서 빛의 퍼짐이 증가할 수도 있고 반사나 굴절과정에서 수차(aberration)가 발생하여 빛이 목표 지점으로 향하지 않을 수도 있다.

표면 기울기 오차는 표면파(waviness)라고 불리는 거칠기 보다는 큰 스케일에서 반사판 표면이 왜곡될 때 발생한다. 거칠기와 표면파를 구분하는 명확한 기준점은 없지만, 대체로 빛의 파장보다 작으면 거칠기로 크면 표면파로 간주할 수 있다. 표면파는 유리판 제작 공정 또는 은과 보호 코팅을 덮는 공정에서 발생할 수도 있지만, 주로 제작된 반사판을 지지대에 부착하는 과정에서 응력으로 휘면서 발생한다. 그래서 일반적으로 지지대와 부착이 일어나는 접점이나 가장자리에서 표면 기울기 오차가 크다. 빛의 파장보다 큰 영역에서 표면파가 영향을 주므로 기하광학(geometric optics) 영역에서 반사 현상을 해석할 수 있다. 이렇게 되면 표면파에 의한 반사된 빛의 방향은 기울기의 분포에 비례하여 오차를 갖게 된다.<sup>2)</sup>

집광 장치가 매우 커질 경우 다수의 반사판 조각면(facet)으로 전체 반사면을 형성하여 집광을 하게 된다. 조각면 각각이 설치 시에 정위치에서 벗어나거나 틀어질 수 있는데, 형상 오차는 이렇게 집광 장치의 반사면이 설계 곡면으로부터 나타내는 차이를 가리킨다. 조각면 각각의 형상 오차도 있지만, 집광 장치를 필드에 설치 위치를 정하거나 세울 때 정확성이 결여되어 생길 수도 있다. 추적 시 태양을 따라 회전을 하게 되는데, 회전축이 반사 표면 뒤에 위치할 경우 표면과 회전축과 동일 평면에 있지 않게 된다. 그러면 회전함에 따라 반사면의 형상도 설계에서 벗어나게 된다. 그

밖에도 열에 의한 팽창, 응력의 풀어짐, 바람의 의한 휨이나 흔들림, 자중에 의한 처짐 등도 형상 오차에 영향을 준다.

추적 오차는 태양 추적 시 태양을 정확하게 가리키지 못해서 발생하는 오차를 총괄한다. 태양 위치 계산을 통해 추적을 할 때, 태양 위치 알고리즘은 태양과 지구의 불규칙 운동까지 반영할 수 없으므로 본질적인 오차를 내재한다. 센서를 써서 태양의 위치를 추적하는 경우에도 오차는 존재한다. 모터, 기어, 감속기, 실린더 등의 기계 구동장치와 이들을 제어하는 시스템의 불완전한 거동 역시 추적 오차를 만든다.

이와 같은 집광 오차들은 발생 원인이 다르더라도 겉보기에는 동일하게 표현된다. 그림 1의 국부적인 반사 표면을 참조하면서 볼 때, 흡수기로 정확한 집광을 위해서 정반사(specular reflection) 법칙에 의해 요구되는 이상적인 표면의 법선벡터  $\mathbf{n}$ 이 있다. 하지만, 오차의 원인이 무엇이든 간에, 실제로 반사된 빛은 정반사 방향에서 벗어나는 현상으로 나타나게 되고, 이는 이상적인 표면과 실제 표면의 법선벡터 사이에 존재하는 기울기 오차로 해석할 수 있다. 결과적으로, 넓은 의미로 집광 시스템 전체에서 반사 표면 기울기 오차는 다양한 집광 오차를 포괄적으로 함축하는 지표로 사용 가능하다.

집광 오차가 구조적인 문제로 발생한다면 기울기 오차가 방향성이 있을 수도 있다. 하지만 대용량 태양열 발전 시스템에서는 다양한 원인으로 넓은 반사면적에 걸쳐서 일어난다. 즉, 평균적인 의미에서 이상적인 법선벡터를 기준으로 방위각에 따른 편향성 없이 정규분포를 따른다고 볼 수 있다. 실제로 Petit은 많은 반사판 소재에서 일어나는 산란의 영향이 정규분포로 설명될 수 있음을 밝혔다.<sup>3)</sup>

정규분포를 규정하는 파라미터는 제곱평균 제곱근(root mean square, 이하 rms) 또는 표준편차(standard deviation)이다. 표면 기울기의 rms에 대해서는 조금 더 깊이 살펴볼 필요가 있다. 그림 2에서 법선벡터의 x 방향의 기울기를  $\zeta_x$ 라 하면  $\zeta_x = n_x/n_z = \tan\theta_x$ 가 된다.  $\zeta_x$ 와  $\theta_x$ 는 x 방향에 따라 양의 값 또는 음의 값을 갖는다. 반사판 표면의 기울기  $\zeta_x$ 의 rms가  $\sigma_x$ 라면 아래와 같은 정규분포를 만족하고, y 방향에 대해서도 동일한 분포를 갖게 된다.

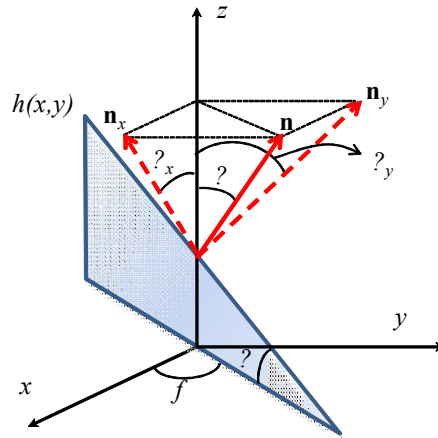


Fig. 2 Schematic diagram of zenith and azimuth angles to express surface slope

$$P(\zeta_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{\zeta_x^2}{2\sigma_x^2}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$P(\zeta_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{\zeta_y^2}{2\sigma_y^2}\right) \dots\dots\dots (2)$$

두 방향에 따라 상관관계가 없고 rms 값이  $\sigma$ 로 동일하다고 가정하면, 2차원 정규분포는 다음과 같다.

$$P(\zeta_x, \zeta_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\zeta_x^2 + \zeta_y^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (3)$$

그런데, 반사판 표면의 기울기를 지칭할 때, 다음 관계식에 근거하여 반사판 표면의 법선벡터의 천정각(zenith angle)  $\theta$ 와 방위각(azimuth angle)  $\phi$ 으로 흔히 표현한다. 그림 2에서 천정각은 표면 수직방향으로부터 기울어진 각도로 양의 값만을 갖는다.  $\zeta = \tan\theta$ 라 하고 표현을 바꾸게 되면 식 (3)으로부터 아래와 같은 분포함수가 된다.<sup>4)</sup>

$$P(\zeta) = \frac{\zeta}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma^2}\right) \dots\dots\dots (4)$$

결론적으로  $\theta_x$ 와  $\theta_y$  표현하게 되면,  $\zeta_x$ 와  $\zeta_y$ 는 각각이 정규분포를 따르게 된다. 하지만  $\theta$ 와  $\phi$ 로 표현하게 되면,  $\zeta$ 는 레일리(Rayleigh) 분포를 따르게 된다. 일반적으로 태양열 발전용 반사판의 기울기 값은 매우 작으므로  $\zeta = \tan\theta \approx \theta$ 가 되고, 천정각  $\theta$ 도 레일리 분포를 따른다.

지금까지 내용을 정리하면, 반사 표면 기울기는 집광 오차를 대표하는 지표가 된다. 평균적인 의미에서 반사 표면 기울기는 정규분포를 만족하므로 rms 값으로 나타낼 수 있다. 그리고 rms  $\sigma$ 는 재료 본질에 의한 산란 오차  $\sigma_{sp}$ , 반사 표면에서 기울기 오차  $\sigma_{sl}$ , 반사 표면의 형상 오차  $\sigma_{sh}$ , 집광 장치의 추적 오차  $\sigma_{tr}$ 로 구성된다. 산란 오차는 빛의 진행 방향에 대해 벗어난 각도를 의미한다. 그런데, 표면 기울기 오차, 형상 오차, 추적 오차에서 반사된 빛의 벗어난 각도는 반사 법칙에 의해 표면이 기울어진 각도의 두 배가 된다. 이를 반영하여 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\sigma^2 = \sigma_{sp}^2 + 4\sigma_{sl}^2 + 4\sigma_{sh}^2 + 4\sigma_{tr}^2 \dots\dots\dots (5)$$

### 3. 집광 열유속 모델링

집광 열유속 모델링은 몬테카를로 광선추적법(Monte Carlo ray-tracing method)을 주로 이용한다. 몬테카를로 광선추적법은 다수의 광선을 생성하여 반사나 흡수와 같은 물리적 현상을 고려하면서 각각을 추적하고, 전체 광선의 추적결과를 바탕으로 모델링 결과를 도출한다. 난수(random number)를 이용하여 확률적으로 접근하기 때문에 복잡한 광학이나 복사열전달 현상에 적용이 용이하고 확장성도 뛰어나다. 본 연구에서는 이미 개발된 모델을 사용하였는데, 이 모델에서는 태양의 주연감광(limb darkening), 반사판 표면의 기울기 오차, 반사율 변화 등을 고려할 수 있다.<sup>5)</sup>

반사판 표면의 기울기 오차는 반사 현상이 발생하는 지점의 국부좌표계에서 고려하고 이를 전체좌표계로 변환하여 계산한다. 예를 들어, 그림 2에서 보이는 표면의 z축을 정반사 방향으로 간주하고, 법선벡터의 천정각을 식 (4)의 분포를 따르도록 0에서 1사이에서 균일한 분포를 갖는 난수  $R$ 로써 결정한다.<sup>5)</sup> 몬테카를로 방법에서는 생성된 난수가 누적분포함수(cumulative distribution function)의 값과 동일할 때, 하나의 변수값이 결정되므로 (sampling) 천정각과 방위각이 아래와 같이 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\sqrt{-2\sigma^2 \ln R_1}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi = 2\pi R_2 \dots\dots\dots (7)$$

### 4. 집광 열유속 측정

집광 열유속 측정의 가장 널리 알려진 방법은 플럭스 맵핑법(flux mapping method)이다.<sup>6-8)</sup> 플럭스 맵핑법에 대한 자세한 내용은

참고문헌을 통해 얻을 수 있는데, 중요한 사항만 간단하게 요약하면 아래와 같다.

측정 시스템의 중요 요소는 확산판(diffuse target), 열유속 게이지, CCD(charge coupled device) 카메라이고 측정값을 표준화하기 위해서는 반사율 측정기와 직달일사량계가 필요하다. 확산판에서는 집광된 태양빛의 산란이 발생하고, CCD 카메라로 산란 이미지를 촬영하고, 이를 영상처리 하여 수치 값으로 변환하고, 열유속 게이지인 라디오미터(radiometer)로 측정된 참조 값을 바탕으로 수치 값들을 보정하여 집광 열유속 분포를 얻는다.

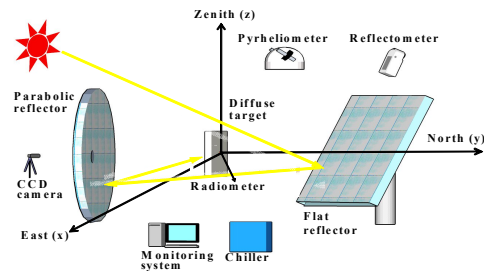


Fig. 3 Schematic diagram of a flux mapping system

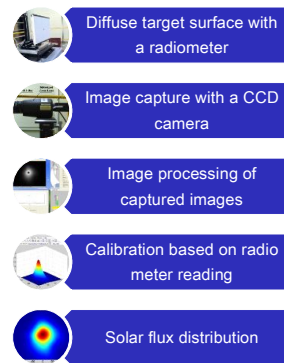


Fig. 4 Measurement procedure in the flux mapping method

그림 3은 40 kW KIER 태양로에서 열유속 측정을 위해 제작한 플럭스 맵핑 시스템의 개략도이다. 그림 4는 이 시스템을 사용하여 진

행한 열유속 측정의 절차를 보여주고 있다. KIER 태양로의 측정 결과를 바탕으로 측정 정확도를 평가했을 때, 열유속을 적분하여 얻은 파워 측면에서 측정 정확도는 평균적으로 2.8%의 오차가 있고 최대 6.6%까지 증가하였다.<sup>8)</sup> 또한, 열유속 분포 값에서 변동계수(표준편차/평균)를 계산해 보았을 때, 열유속 값이 1 MW/m<sup>2</sup>이 넘는 값들에 대해 평균적으로 5.9%, 최대 18.4%의 변화의 정도를 나타냈다.

### 5. 집광 시스템 성능평가

아래에서는  $\sigma$ 를 파라미터로 하여 모델링 결과가 열유속 측정값과 유사하도록 맞추어 비교함으로써 집광 오차를 간접적으로 평가한 내용을 보여주고 있다.

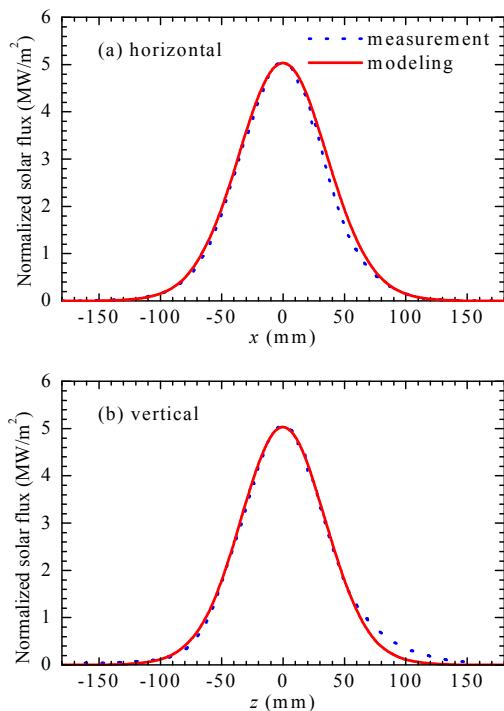


Fig. 5 Comparison of the concentrated solar flux at the 40 kW KIER solar furnace

그림 5는 40 kW KIER 태양로에서 측정한 집광 열유속 분포에 모델링을 비교한 결과이다.<sup>8)</sup> 태양로는 포물 반사판과 평면 반사판 두 개로 구성되어 있기 때문에 각각의 반사판에서 동일한  $\sigma$ 를 갖는다고 가정하였다. 기울기 오차의 rms 값이 약 2.2 mrad에서 열유속 분포가 잘 일치하였다. 따라서 40 kW KIER 태양로의 집광 시스템의 집광 오차는 2.2 mrad으로 평가할 수 있다.

40 kW 태양로는 평면 반사판의 면적이 9.305 × 9.387 m<sup>2</sup>에 중심의 높이가 5 m에 달한다. 여러 장의 반사판을 쉽게 교체하는 것이 어렵기 때문에, 반사판이나 추적 장치변경 후 집광 오차의 변화를 조사하기에는 적합하지 않다. 이런 경우에는 그림 6에 나타난 5 kW 소형 태양로를 이용하여 조사하는 것이 상대적으로 수월하다. 소형 태양로는 1 × 1 m<sup>2</sup> 평면 반사판 조각 9장만 필요하고 이에 따라 무게가 많이 나가지 않기 때문에 부속품 교체가 쉽다.



Fig. 6 Picture of the 5 kW KIER solar furnace



Fig. 7 Diffuse target surface image at the 5 kW KIER solar furnace

그림 7은 고반사율의 반사판으로 5 kW 태양로의 집광 시스템을 개선한 후에 열유속을 측정하기 위해 CCD 카메라로 찍은 확산판 이미지이다. 40 kW KIER 태양로의 집광 이미지와는 다르게 집광 면적이 고르지 않다. 그림 8에서 보듯이 영상처리를 통해 얻은 집광 열유속 분포도 왼쪽 위로와 오른쪽 아래로 다소 넓게 빛이 모이고 있다. 그림 8과 같은 불균일한 열유속 분포는 반사판 조각의 개수가 충분히 많지 않아 한 두 개의 반사판 조각이 집광 정확도에 영향을 크게 주기 때문이다. 한 장의 반사판 조각이라도 설치 시 정위치에서 벗어나게 되면, 무작위적이거나 체계적인 반사판 기울기 오차 분포를 야기하여 모델링에서 사용했던 가정인 정규분포를 따르지 않게 된다. 만약 열유속 분포를 갖고 측정값과 모델링을 비교하게 된다면, 그림 5와 달리 열유속 분포의 회전 방향에 따라 기울기 오차의 rms 값이 변해야 할 것이다.

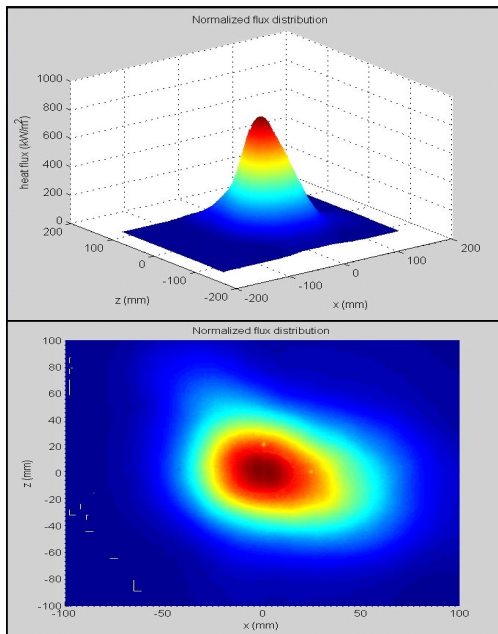


Fig. 8 Solar flux distribution at the 5 kW KIER solar furnace

따라서 열유속 분포 자체 값보다는 열유속 분포를 적분해서 얻은 파워 분포를 비교하는 것이 보다 효과적이다. 그림 9는 정사각형 흡수기가 초점면에 있다는 가정 하에 정사각형의 크기에 따라 도달하는 집광 파워를 보여주고 있다. 그림 8에서 예상되듯이 중심에서 벗어날수록 실제 집광 성능이 떨어지게 되고 모델링 보다 큰 값을 갖게 된다. 열유속 분포에서 모델링과 비교하는 것과 달리, 파워 분포로 비교했을 때 정사각형 중심부에서 크게 벗어나지 않는 범위에서는 기울기 오차의 rms 값이 1.7 mrad 정도에서 잘 일치하였다.

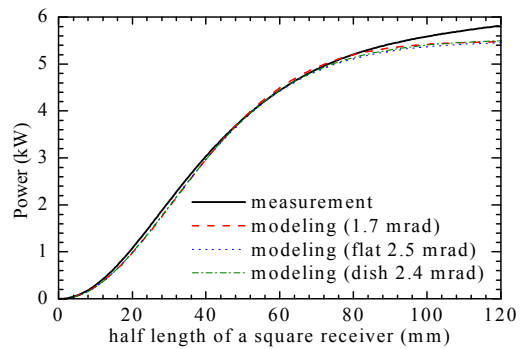


Fig. 9 Comparison of the concentrated power at the 5 kW KIER solar furnace

지금까지의 결과는 평면 반사판과 포물 반사판이 동일한 표면 기울기 오차를 갖고 있다는 가정을 바탕으로 모델링 결과를 비교하였다. 하지만, 평면 반사판은 태양 추적을 하지만 포물 반사판은 고정되어 있으므로 추적 오차가 없고 그 만큼 기울기 오차가 작을 것이다. 그럼에도 불구하고 여기서 제시하는 간접적인 오차 평가 방법에는 추적 오차의 비율을 알 수 없으므로 임의로 평면 반사판과 포물 반사판의 기울기 오차 rms 값을 부여할 수는 없다. 동일한 rms 값을 사용하여 평균적인 의미에서만 집광 오차를 추측할 수밖에 없는 것

이 여기서 제시한 방법의 한계이다. 평면 반사판이나 포물 반사판 중에 하나에만 집광 오차가 있고 다른 하나에는 집광 오차가 없다는 가정에서 오차를 평가해 보았다. 그림 9에서 보듯이 평면 반사판에만 2.5 mrad을 부여하거나 포물 반사판에 2.4 mrad을 부여할 경우에 유사한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 KIER 5 kW 태양로의 집광 오차는 적어도 2.5 mrad 보다는 작을 것으로 판단할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 집광 시스템의 집광 오차를 평가하는 방법을 제시하였고 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 다양한 집광 오차의 원인이 있는데, 반사판 표면의 기울기 오차는 대면적 시스템에 대해서 집광 오차를 대표하는 지표로 삼을 수 있다.
- (2) 집광 열유속의 측정값을 모델링 파라미터인 반사 표면 기울기 오차의 제곱평균제곱근 값을 바꾸면서 비교함으로써 간접적으로 집광 오차를 예상하였다.
- (3) 집광 면적이 충분히 넓은 시스템에 대해서는 열유속 분포의 직접 비교가 가능하고, 그렇지 않을 경우에는 열유속 분포 대신 이를 적분한 파워 분포를 비교하는 것이 바람직하다.
- (4) KIER에 설치된 40 kW 태양로와 5 kW 태양로의 집광 오차는 각각 2.2 mrad과 1.7 mrad 정도이다.
- (5) 제시된 방법은 집광 오차를 짐작하게 함으로써 집광 시스템의 성능을 상대 비교하거나 집광 오차의 범위를 유추하는데 의미가 있다. 직접적으로 얻은 집광 오차와 다양한 비교를 통해 제시된 방법의 장단점 및 적용 범

위를 파악하는 것이 추가적으로 연구되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원(사업화연계 기술개발 N0000424)을 통한 지식경제부의 연구비지원으로 수행되었음을 밝힌다. 본 논문은 한국태양에너지학회 2013년 춘계학술발표대회에서 발표되었던 내용을 수정하여 작성되었다.

## 참 고 문 헌

1. Romero-Alvarez, M., Zarza, E., Concentrating Solar Thermal Power in Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Taylor & Francis, New York, 2007.
2. Lee, H.J., Chen, Y.B., Zhang, Z.M., Directional Radiative Properties of Anisotropic Rough Silicon and Gold Surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No. 23-24, pp. 4482-4495, 2006.
3. Petit, R.B. Characterization of the Reflected Beam Profiles of Solar Mirror Materials. Solar Energy, Vol. 19, 733-741, 1977.
4. Johnston, G., On the Analysis of Surface Error Distributions on Concentrated Solar Collectors, J. Sol. Energ. T. ASME, Vol. 117, pp. 294-296, 1995.
5. Lee, H.J., Kim, J.K., Lee, S.N., Kang, Y.H., Heat-Flux Analysis of Solar Furnace Using the Monte Carlo Ray-Tracing Method, Trans. KSME B, Vol. 35, No. 10, pp. 989-996, 2011.



6. Ulmer, S., Reinalter, W., Heller, P., Lüpfer, E., Martínez, D., Beam Characterization and Improvement with a Flux Mapping System for Dish Concentrators, J. Sol. Energ. T. ASME, Vol. 124, No. 2, pp. 182-188, 2002.
7. Chai, K.K., Lee, H.J., Kim, J.K., Yoon, H.K., Lee, S.N., Kang, H.Y., Seo, T.B., Characteristics of the Radiation Heat Flux Distribution for the KIER Solar Furnace, The Korean Solar Society Conference, Vol. 31, No. 2, pp. 74-79, 2011.
8. Lee, H.J., Kim, J.K., Lee, S.N., Yoon, H.K., Yu, C.K., Kang, H.Y., Solar Flux Analysis of the KIER Solar Furnace, SolarPACES Symposium 2012.