

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 22, No. 3, 2002

태양열 집광기의 초점 지역에 형성된 플럭스 밀도 분포의 특성

An Experimental Study on the Characteristics of Flux Density Distributions in the Focal Region of a Solar Concentrator

현성택*, 강용혁*, 윤환기*, 유창균*, 강명철*

S. T. Hyun*, Y. H. Kang*, H. G. Yoon*, C. K. Yoo*, M. C. Kang*

Key words : 플럭스분포(Flux Distribution), 집광기(Concentrator), 흡수기(Receiver), 집광비(Concentration ratio)

Abstract

This experimental study represents the results of an analysis on the characteristics of flux density distributions in the focal region of solar concentrator. The characteristics of flux density distributions are investigated to optimally design and position a cavity receiver. This deemed very useful to find and correct various errors associated with a dish concentrator. We estimated the flux density distribution on the target placed along with focal lengths from the dish vertex to experimentally determine the focal length. It is observed that the actual focal point exists when the focal length is 2.17 m. We also evaluated the position of flux centroid, and it was found that there were errors within 2 cm from the target center. The total integrated power of 2467 W was measured under focal flux distributions, which corresponds to the intercept rate of 85.8%. As a result of the percent power within radius, approximately 90% of the incident radiation is intercepted by about 0.06 m radius.

* 한국에너지기술연구원 고온태양열연구팀

* *Advanced Solar Thermal Research Team, KoreaInstitute of Energy Research More-In Energy Inc.*

1. 서론

태양열 집광기는 흡수기(absorber)에서의 열 손실과 반사경에 의한 집광도에 의해 성능이 크게 좌우된다. 그 중에서도 초점 지역(focal region)에서 집광기로부터 집광된 태양 광속을 최대한 잘 흡수할 수 있도록 흡수기 공동(cavity)의 크기를 최적으로 결정하는 것은 성능 향상에 매우 중요한 역할을 한다. 흡수기의 공동이 너무 크게 결정이 된다면 많은 열손실을 감수해야 하며, 너무 작다면 집광되어 들어오는 빛을 다 받아들이지 못하여 광학적 손실을 초래하기 때문이다. 그러므로 초점 지역에서의 집광 플럭스 밀도 분포의 특성을 정확하게 파악하는 것은 흡수기 공동의 크기를 최적으로 결정할 수 있으며, 또한 집광기의 설계 오차도 찾아낼 수 있는 장점이 있다.

따라서, 본 논문은 초점 지역에서의 플럭스 밀도 분포의 특성 파악을 위해 반사 타겟의 위치를 전, 후방으로 움직이면서 플럭스 밀도 분포의 모양 및 크기를 관찰하였고, 실제 초점 거리에서 반경에 따른 에너지 비율을 평가함으로써 흡수기 공동의 최적화된 직경을 결정하였다. 또한 플럭스 밀도 분포의 이미지를 분석함으로써 반사 타겟에 의해 차단된 에너지의 양을 계산하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

태양열 집광 시스템의 핵심 구성 요소는 집광기와 흡수기 두 부분으로 나눌 수 있다. 집광기는 5개의 반사경과 이를 고정하기 위한 지지대로 구성되어 있다. 각각의 반사경의 직경은 1m, 집광기 전체의 직경은 3m, 그리고 림 각(rim angle)은 37°로서 이론적 초점 거리가 2.20m이다. 집광기의 초점 지역에 설치한 흡수

기의 내부는 동관을 동심원으로 만들어서 집열하도록 제작하였다.

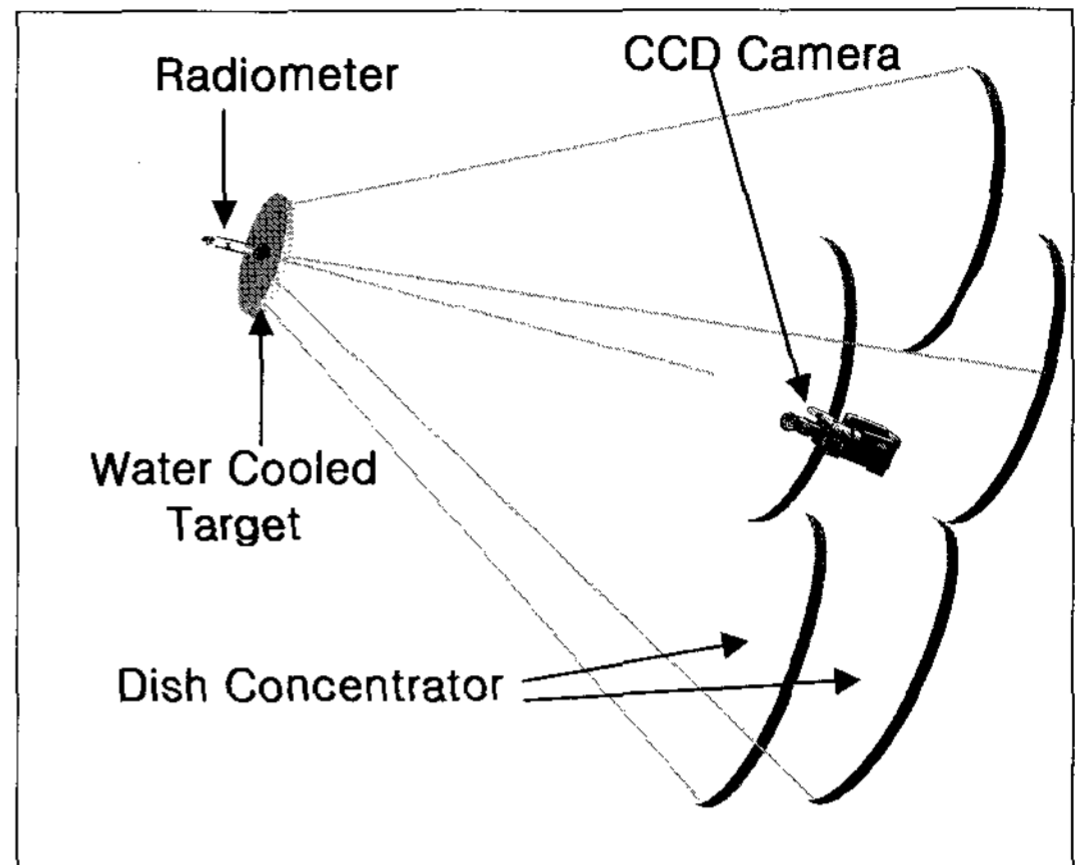


그림 1. Arrangement of the flux mapping equipment.

그림 1은 flux mapping 시스템의 구성도를 보여주고 있다. Flux Mapping 시스템은 태양열 집광 시스템에 반사 타겟, radiometer, 그리고 CCD 카메라 등을 설치함으로써 구성하였다.

우선 집광기에서 반사된 빛이 모이는 초점 지역에 고온 내열성의 원형 반사 타겟을 위치시켰다. 앞면에 백색의 도료를 칠하였으며 집광기 개구부의 수직축에 평행한 방향을 따라 움직일 수 있도록 설계하였다. 반사 타겟에 형성된 집광 플럭스의 이미지를 촬영하기 위해, 반사 타겟으로부터 약 1.2m 전방에 CCD 카메라를 반사 타겟 표면과 시각 관점이 수직이 되도록 설치하였다. 카메라에 의해 촬영되는 플럭스 이미지들은 컴퓨터에 장착된 8 bit의 frame grabber 카드를 사용하여 디지털화하고, Matrox Intellicam 이라는 소프트웨어를 사용하여 모니터 상에 이미지를 형상화시켰다. 집광기로부터 집광된 빛의 강도(intensity)를 연속적으로 측정하기 위해 반사 타겟의 중앙에 radiometer를 수직으로 설치하였다.

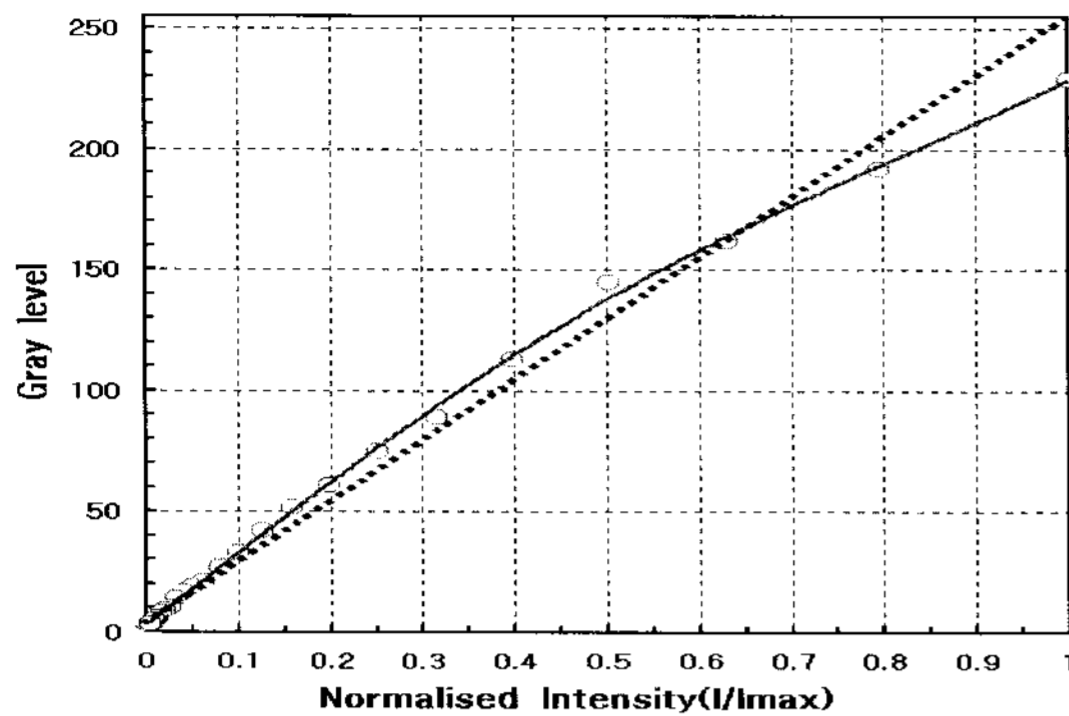


그림 2. CCD camera response to calibrated light level.

2.2 실험방법

본 실험은 CCD 카메라 특성 파악을 위한 카메라 보정(calibration), 카메라에 의한 초점 지역 촬영, 그리고 촬영 이미지의 분석 순으로 진행하였다.

화소의 정확한 명암도(gray level)를 측정하는 것은 집광된 플럭스 분포를 분석하는데 매우 중요한 요소로 작용한다. 그러므로 카메라의 보정은 태양열 집광 시스템의 플럭스 분포를 촬영하기 전에 이루어져야 하는 필수 단계이며, 카메라의 특성을 파악하는 작업이라 할 수 있다. CCD 카메라는 고유적으로 선형성을 가지고 있다. 영상에 기록되는 화소의 명암도와 같은 몇몇 카메라 특성들은 제조자들에 의하여 결정되는 반면에 CCD의 감도는 검출기 그 자체에 대하여 본질적인 것이기 때문에, CCD는 빛의 강도에 매우 선형적인 반응을 나타낸다. 즉, CCD의 출력은 빛의 세기에 직접 비례한다. 그러나 영상장치를 만들기 위해서 사용되는 인광성 물질은 비선형이므로, 빛의 밝기에 따른 영상 장치의 출력은 밝기 값이 클 때 또는 작을 때에 대하여 그 변화율이 서로 다르다. 따라서 빛의 명암도 측정에 영향을 주는 CCD 카메라와 영상출력장치의 응답 특성을 초점 지역의 플럭스 분포 측정 전에 보정하였으며, 그 결과를 그림 2에서 보여주고 있다.

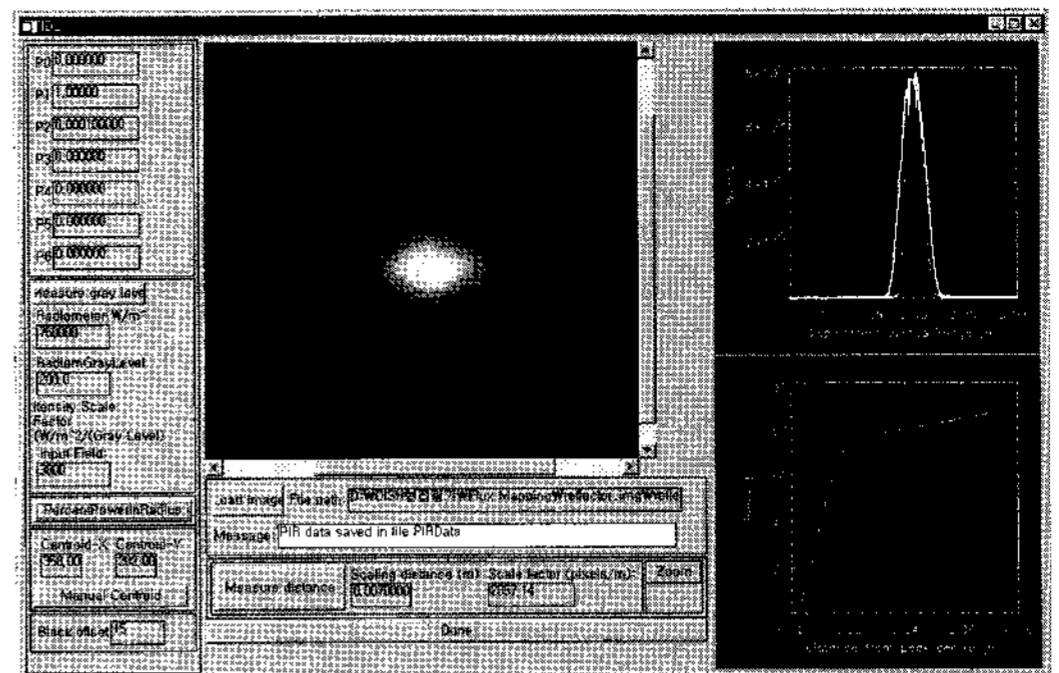


그림 3. Window for image analysis

카메라에 의한 초점 지역에서의 플럭스 분포 촬영은 직달 일사량의 변화가 가장 없는 맑은 날을 고려하여 오전 11시에서 오후 2시 사이 행하였으며, 집광기로부터 반사 타겟까지의 거리는 이론적 초점 거리인 2.20m를 기준으로 2.11m, 2.14m, 2.17m, 2.20m, 2.23m, 2.26m 씩 3cm의 간격을 두고 촬영하였다. 고밀도의 흡수 필터 셋을 카메라 렌즈 앞에 위치시켜 고광도의 빛으로 인해 발생하게 되는 CCD array에서의 포화(saturation) 현상이 나타나지 않도록 하였다.

그림 4는 촬영을 통하여 얻어진 집광 플럭스의 이미지를 IDL 언어(Interactive Data

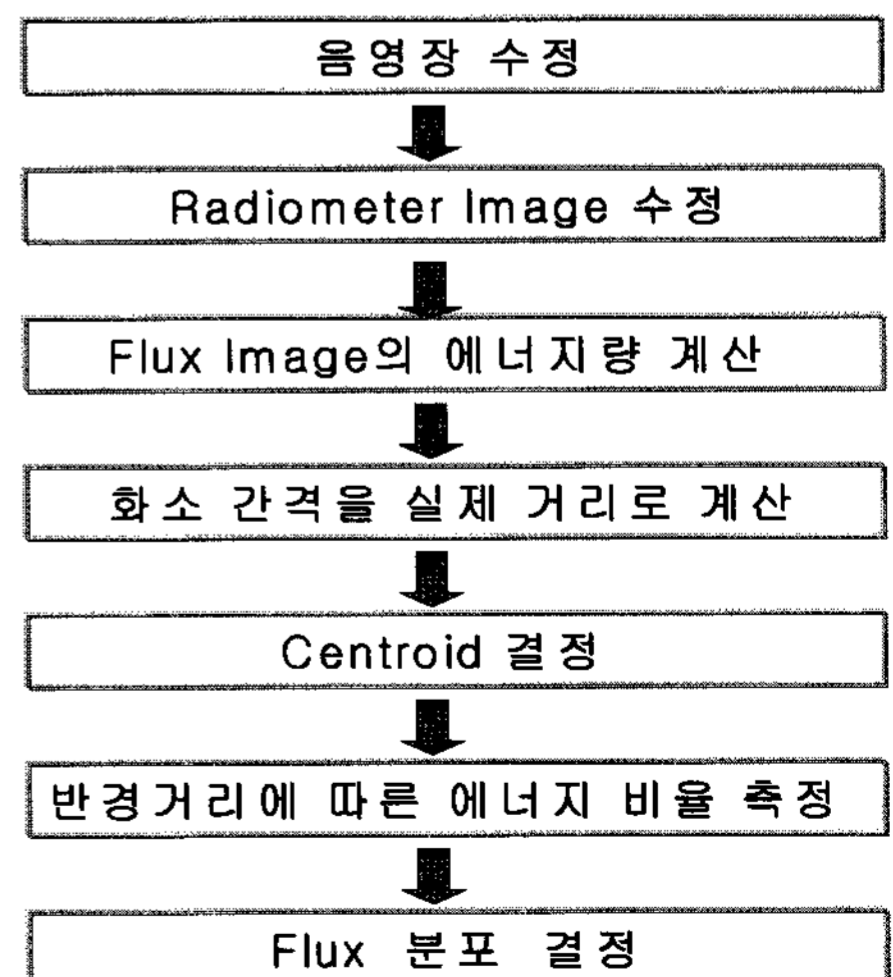


그림 4. Flux mapping procedure.

Language)를 이용하여 분석하고 있는 배경화면을 보여주고 있으며, 그림 5는 분석과정을 순서도로 보여주고 있다.

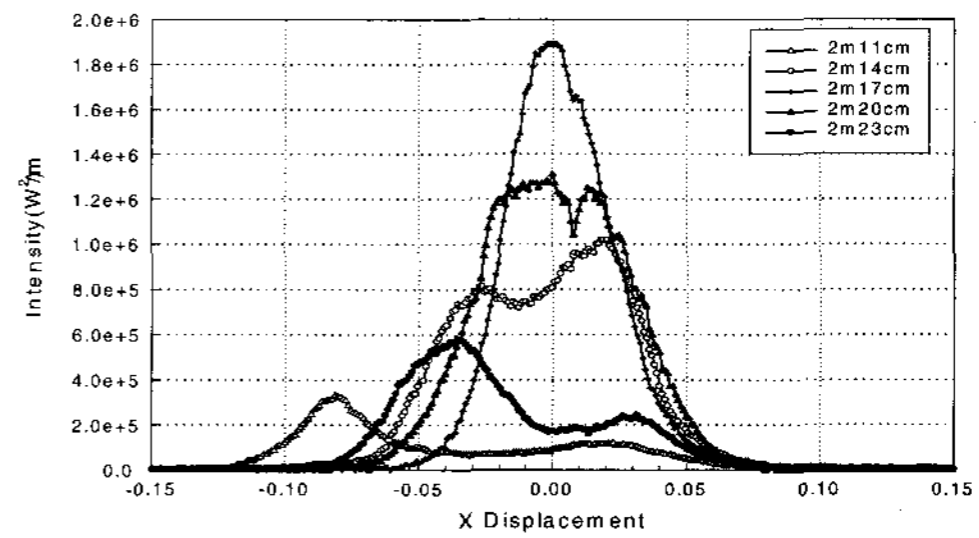
분석 방법은 우선, 촬영된 플럭스 이미지에서 배경 이미지를 감산함으로써 음영장에 의한 오차를 수정한 후, radiometer 이미지로 인하여 발생하는 오차를 보정하였다. Radiometer에서 측정된 에너지의 세기를 각 화소에 상대적으로 적용하여 각 화소가 가지고 있는 에너지량을 구하였으며, 적산함으로써 초점평면에 집광된 에너지량을 계산하였다. 화소의 간격을 실제의 거리로 계산함으로써 플럭스 이미지 크기 등을 결정하였으며, 플럭스의 도심을 결정하여 타겟의 중심으로부터 집광된 플럭스의 도심이 어느 정도 편차가 있는지를 결정하였다. 최종적으로 플럭스 이미지 반경에 대한 집광된 에너지 분포율을 결정하였다.

3. 실험결과 및 분석

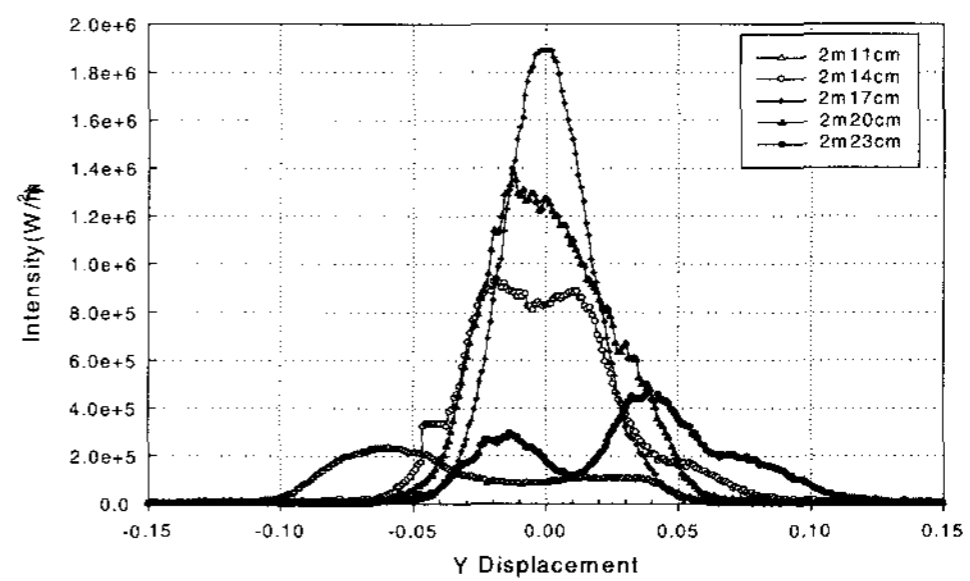
3.1. 집광 에너지 분포

그림 5는 다섯 개의 반사경 전체로 집광시켰을 경우, 집광기의 꼭지점으로부터 타겟의 거리가 2.11m로부터 2.23m까지 3cm 씩 거리를 증가시키면서 타겟상의 플럭스 분포를 측정하는 것이다. 이론적 초점거리는 2.20m로 설계하였지만, 실제 초점거리가 2.17m에서 형성되었다. 이것은 다섯 개의 반사경을 제작하는 과정에서 포물면의 곡률이 대체적으로 이론적인 값보다 더 크게 제작되어 초점 거리가 짧아졌다고 설명할 수 있다. 실제 초점거리로 관측된 2.17m에서의 최대 강도는 약 1.89MW/m^2 로 측정되었으며, 이론적 초점거리와 3cm 정도의 오차를 보였다.

그림 6은 초점 지역에 형성된 플럭스 분포가 거리에 따라 그 형상이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 5. Flux cross sections of total reflector through x(a) and y(b) direction.

그림 6(a)를 관찰해 보면, 2.11m의 거리에서 이미지 앞쪽으로 세 지점의 peak가 형성되었고, 뒤쪽으로 낮은 강도의 peak가 한 개 더 형성된 것을 볼 수 있다. 이렇게 각기 다른 강도의 플럭스 이미지로 나타나는 이유는, 반사경 각각이 서로 다른 실제 초점 거리를 가지고 있으나 집광기라는 일률적인 틀에 반사경이 고정되어 있어 실제로 각각의 반사경들이 자신의 초점 거리로 조정되어 있지 않기 때문이다.

그림 6(b)의 2.14 m에서는 초점이 상당 부분 한 곳으로 모여 있으며, 플럭스가 차지하는 면적이 대폭 축소된 형상을 보여주었다. contour plot으로는 반사경 개개의 이미지가 뭉쳐있어 자세히 분간할 수는 없지만, surface plot에서는

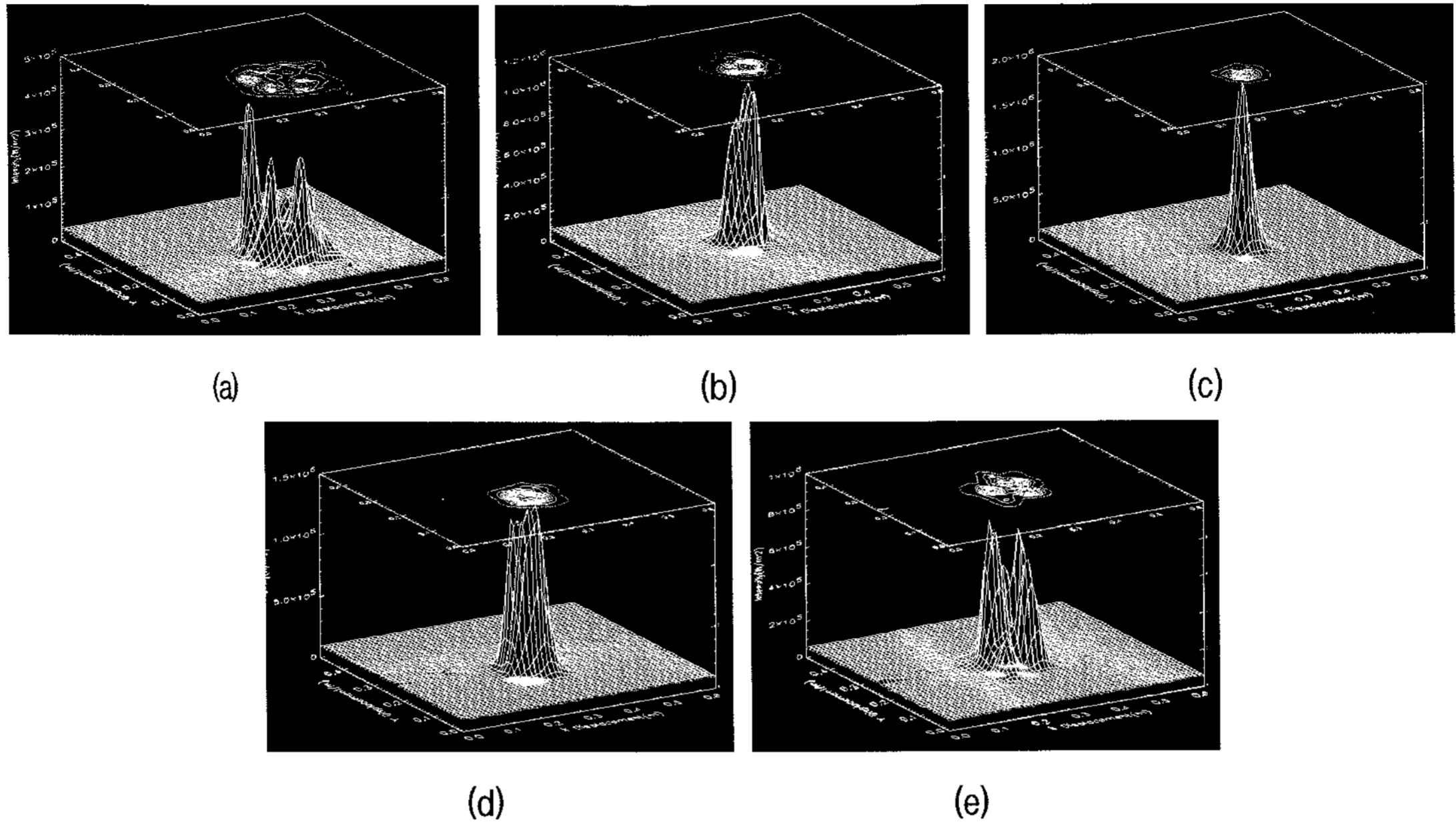


그림 6. A combination display of surface and contour plots for concentrator at focal plane 2.11 m(a), 2.14 m(b), 2.17 m(c), 2.21 m(d), and 2.23 m(e)

여전히 2~3개의 peak가 분리되어 나타나는 것을 관측할 수 있었다. 그림 6(c)의 2.17m에서 거의 가우시안 분포에 가깝게 초점이 한 지점으로 집중되었으며, contour plot 또한 흠어짐 없이 일정한 모습을 보였다. 실제 초점 거리로 관측된 2.17m를 넘으면서 다시 분산된 형태를 보였으며, 2.23m에서는 반사경 각각의 이미지가 완전히 분리된 형태로 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.2 집광 플럭스 변위

태양열 집광기에서 흡수기의 공동에 빛을 정확하게 집광시킴으로서 공동 외부로 누출되는 광학적 열손실을 최소화하기 위해서는 플럭스 밀도 분포와 도심의 위치를 정확하게 파악할 필요가 있다. 그림 7은 집광기에 의해 형성된 집열 밀도 분포의 도심이 원형 타겟의 중심으로부터 벗어난 정도를 보여주고 있다. 음의 x, y 방

향으로 치우쳐 있으며, x 축 방향으로 좀 더 많이 치우쳐 있음을 볼 수 있지만, 2cm 이내의 오차를 보이고 있어 집광기에 의해 반사된 빛이 대체로 정확한 지점에 비추고 있음을 알 수 있다.

3.3 차단 에너지(Intercepted energy)

반사경 각각의 반사율을 제작 당시의 반사율 90%, 그리고 직달 일사량을 800 W/m^2 라 하였을 경우, 본 태양열 집광기를 이용하여 얻을 수 있는 최대 에너지는 이론상 2827 W로 계산할 수 있으며, 본 실험을 통하여 직접 측정된 결과 2467 W의 에너지가 얻어졌다. 이것은 이론상 얻을 수 있는 최대 에너지의 85.8%에 해당하는 값이다. 이것은 실제 초점거리로 측정된 2.17 m 뿐만 아니라 다른 거리에서도 비슷한 에너지 값을 보여주었다. 이런 사실은 타겟에 집광된 에너지가 타겟과 반사경의 거리에 따라

큰 변화가 없으며, 단지 타겟에 형성된 플럭스의 면적에 영향을 주어 실제 초점거리로부터 멀어질수록 플럭스가 차지하는 면적이 커지고 반대로, 실제 초점 거리에 근접할수록 집광된 플럭스의 면적이 작아짐으로서 보다 작은 흡수기로 집광시킬 수 있으며, 그 결과 열손실 면적을 줄일 수 있음을 의미한다.

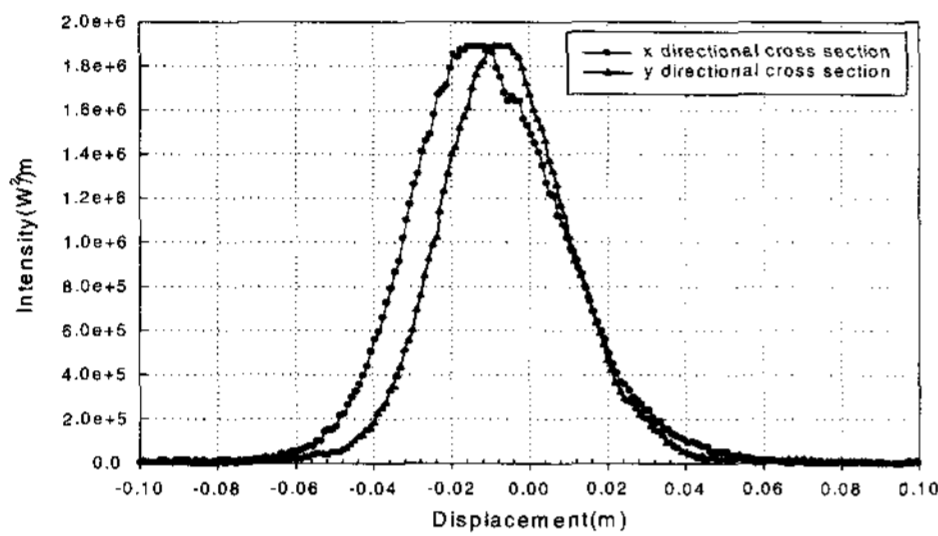


그림 7. X and y directional deviation of flux centroid from target center.

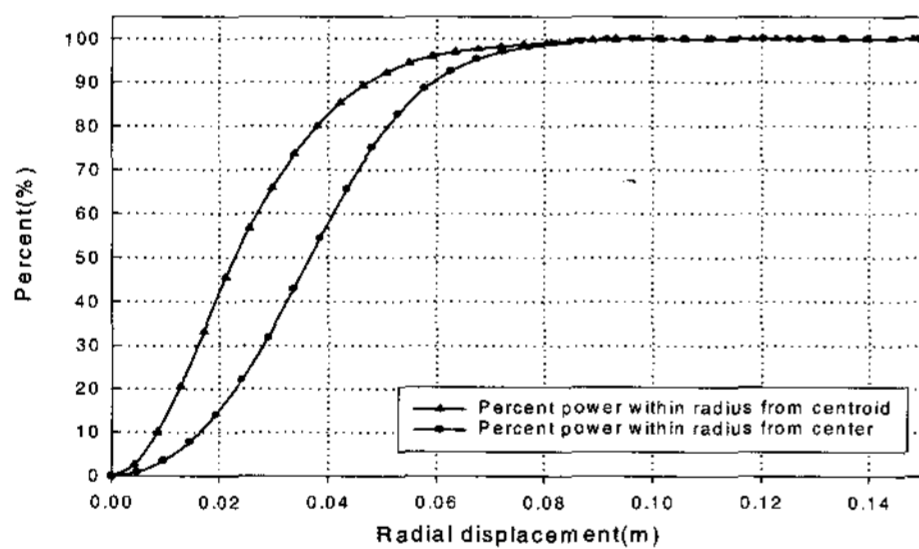


그림 8. Percent power within radius from center and centroid at focal point 2.17m.

3.4 차단 에너지 비율

흡수기의 동공이 너무 크게 결정이 된다면 많은 열손실을 감수해야 하며, 너무 작다면 집광되어 들어오는 빛을 다 받아들이지 못하여 광학적 손실을 초래한다. 그러므로, 반사 타겟의 중심으로부터 반경 거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 들어오는지 평가하는 것은 흡수기에

서 동공의 크기를 결정하는데 가장 중요한 요소이다.

또한, 플럭스가 한 지점으로 매우 잘 집광되었다 하더라도 플럭스 도심이 흡수기 공동의 중심으로부터 크게 벗어나 외부로 누출되는 광학적 손실을 초래할 수도 있으므로, 원형 반사 타겟의 중심으로부터 반경 거리에 따른 에너지 비율을 알아내는 것이 매우 중요하다. 그림 8은 실제 초점거리로 관측된 2.17m에서의 반경 거리에 따른 에너지 포함 비율을 나타낸 그림으로, 플럭스의 도심을 영점으로 한 것과, 원형 반사 타겟의 중심을 영점으로 한 것을 비교하여 보여주고 있다. 에너지 포함 비율이 90% 정도까지의 기울기가 매우 급하게 나타나고 있으나 그 이상부터는 매우 완만한 형태를 보여주고 있어, 이 반경 내의 에너지 밀도가 매우 높음을 알 수 있다. 이것은 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 때 90%의 에너지를 포함하는 반경을 흡수기 공동의 직경으로 결정한 주된 이유이다. 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 경우 0.059m 이내에 전체 에너지의 90%를 포함하였으며 동공의 크기를 직경 약 0.12m로 결정할 수 있다. 만약, 플럭스의 도심이 원형 타겟의 중심과 매우 잘 일치한다면, 플럭스의 도심을 영점으로 하여 흡수기 동공 반경을 0.047m, 즉, 직경을 0.094m까지도 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 태양열 집광기의 초점 지역에 형성되는 집광 분포를 해석함으로써 흡수기 공동의 크기를 최적화하고, 흡수기의 정확한 위치를 설정하여 불필요하게 누출되는 광학 손실을 최소화하기 위해 수행되었다. 뿐만 아니라 플럭스 분포를 측정 관찰함으로써 집광기가 가지고 있는 여러 가지 오차들을 찾아낼 수 있으며, 차단 에너지를 예측하기 위한 것이기도 하다. 따라서, 본

연구를 함으로써 도출된 결과들은 다음과 같다.

1) 집광 에너지 분포에 대한 평가에서 반사경 전체를 집광시켰을 경우 2.17m에 실제 초점 거리가 형성되었으며, 실제 초점 거리를 기준으로 전, 후 간격이 벌어질수록 초점이 여러 개로 분산되어지면서 최대 peak도 낮아졌다. 따라서 흡수기 개구부의 위치를 실제 초점 거리인 2.17m로 결정하였다.

2) 집광 플럭스의 변위를 평가했을 경우, 음(-)의 x, y 축 방향으로 오차를 보여 타겟 중심에서 좌측 아래 방향으로 도심이 형성됨을 알 수 있었다. 그러나 거의 2cm 미만의 오차를 보이고 있어 집광기가 대체로 타겟의 중심에 정확하게 빛을 집광시키는 것으로 평가되었다.

3) 반사 타겟에 차단된 에너지 평가에서, 태양열 집광 장치의 집광기에서 수광된 에너지는 반사율 90%, 일사량 $800\text{W}/\text{m}^2$ 일 때 이론적으로 2827W의 에너지가 차단되어진다. 그러나 본 실험을 통해 얻어진 실제 차단 에너지 값은 2467 W로써 이론적으로 계산된 최대 에너지의 85.8%만이 차단되었다.

4) 초점 거리에서 반경에 따른 차단 에너지 비율 평가에서 반사 타겟의 중심으로부터 반경 0.059m 이내에 90%의 에너지를 포함하고 있어, 흡수기 공동의 입구 크기를 약 0.12m로 결정할 수 있었다. 이것은 또한 2)의 결론에서와 같이 도심이 좌측 아래 방향에 형성되는 것을 감안하여 흡수기의 위치를 플럭스 도심 위치와 일치하도록 설치하였을 경우 반경 0.047m,

즉, 직경 0.094m까지 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Schubnell, M., Keller, J. and Imhof, A., Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System, J. Solar Energy Engineering, Vol. 113, 1991, pp. 112~116.
2. Johnston, G., Flux Mapping the 400 m^2 "Big Dish" at the Australian National University, J. Solar Energy Engineering, Vol. 117, 1995, pp. 290-293.
3. Johnston, G., 1998, Focal Region Measurements of the 20 m^2 Tiled Dish at the Australian National University, Solar Energy, Vol. 63, No. 2, pp. 117-124.
4. Neumann, A. and Schmitz, A., The SCATMES Device for Measurement of Concentrated Solar Radiation. J. Solar Energy Engineering, Vol. 121, 1999, pp. 116-120.
5. Kang, Y. H. and Kack, H. Y., Development of Solar Thermal Concentrating System With Paraboloidal Dish, Report of Korea Institute of Energy Research, KIER-994601, 1999.