

접시형 태양열 집광 시스템의 에너지 분포 특성에 관한 연구

현 성 택[†], 강 용 혁, 천 원 기*

한국에너지기술연구원, *제주대학교 에너지공학과

A Study on Energy Distributions Produced by Dish Solar Concentrating System

Seong-Taek Hyun[†], Yong-Heack Kang, Won-Gee Chun*

Advanced Solar Thermal Research Team, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

(Received April 29, 2002; revision received August 30, 2002)

ABSTRACT: An experimental study on energy density distributions produced by dish solar concentrating system was performed to optimally design and rightly position a cavity receiver. This deemed also very useful to find and correct various errors associated with a concentrator. It is observed that the actual focal length is 2.17 m with a maximum energy density of 1.89 MW/m². By evaluating the position of flux centroid, it was found that there are errors within 2 cm from the target center. As a result of the percent power within radius, approximately 90% of the incident radiation is intercepted by about 0.06 m radius. The area concentration ratio normalized to 800 W/m² insolation and 90% mirror reflectivity was 347 suns. The total integrated power of 2467 W was measured under focal flux distributions, which corresponds to the intercept rate of 85.8%.

Key words: Flux distribution(플럭스 분포), Dish solar concentrating system(접시형 태양열 집광 시스템), Reflector(반사경), Absorber(흡수기)

1. 서 론

접시형 태양열 집광 시스템의 집열부에 속하는 흡수기(absorber)는 집광된 태양 플럭스를 최대한 잘 흡수할 수 있도록 설계되어야 하며, 초점 지역에 형성되는 집광 에너지 밀도 분포에 따라 그 설계가 달라질 수 있으므로, 에너지 밀도 분포를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다.

접시형 태양열 집광 시스템의 에너지 밀도 분포 측정에는 CCD(charge coupled device) 카메라로 초점 평면을 촬영한 뒤 플럭스 맵핑(flux mapping) 기법을 적용함으로써 집광 에너지 밀도 분

포를 관찰할 수 있는 방법이 있다.

본 연구에서는 집광 시스템의 초점거리에 따른 집광 에너지 분포 파악을 위해 반사 타겟의 위치를 전, 후방으로 움직이면서 집광 에너지 분포의 모양 및 크기를 관찰하였고, 실제 초점거리에서 반경에 따른 에너지 비율을 평가함으로써 흡수기 개구부의 최적화된 직경을 결정하였다. 또한 집광된 플럭스 이미지를 분석함으로써 반사 타겟에 의해 차단된 에너지의 양을 계산하였다.

정확한 설계에 의해 시스템이 제작된다고 하더라도 반드시 제작, 설치상의 여러 오차들이 발생하기 마련이며, 이런 오차를 미리 예측하여 실제 흡수기의 설계 및 위치 선정을 한다는 것은 많은 어려움이 있다. 따라서 본 실험은 여러 복합적인 제작상의 문제로 인해 나타나는 반사경의 곡률 및 설치 오차 등을 구체적으로 측정하는 것에 목

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3093; Fax: +82-42-860-3739

E-mail address: -haesarang-@hanmail.net

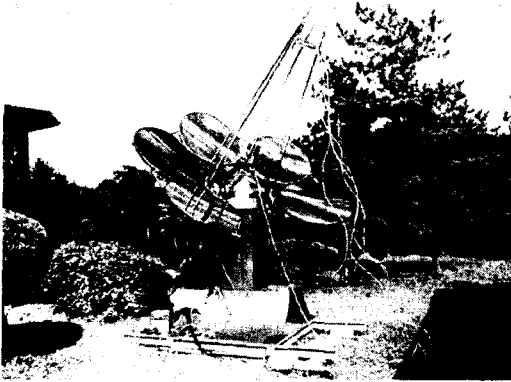


Fig. 1 Parabolic dish concentrating system.

적을 두는 것이 아니라, 이미 여러 오차들이 존재하는 유일한 시스템에 대하여, 초점 지역에서 나타나는 플럭스의 특성을 파악함으로써 적합한 흡수기의 설계 및 최적의 위치를 선정하며, 그 에너지를 평가하는 데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 접시형 태양열 집광 시스템의 집열 밀도 분포 특성 평가를 위해 설치된 시스템을 보여주고 있으며, Fig. 2는 플럭스 맵핑 시스템의 구성도를 보여주고 있다.

반사경은 뒷면을 은코팅 처리한 유리거울을 사용하였다. 제작시 반사율은 90%이며, 직경 1m, 두께 2mm의 원형 반사경 5개가 하나의 집광기를 형성한다. 집광기는 5개의 반사경과 이를 고정하기 위한 지지대로 구성되어 있다. 전체의 높이는 지면에서 3.5m이며, 구동축의 중심은 1.8m에 놓이게 된다. 집광기 전체 직경은 3m이며, 림각(rim angle)은 37°로서 이론적 초점거리가 2.20m이다.

집광기에서 반사된 빛이 집광되어지는 원형의 반사 타겟은 고온 내열성의 백색 도료를 칠하였으며, 집광기 개구부의 수직한 축에 평행한 방향을 따라 움직일 수 있도록 설치하였다.

반사 타겟에 집광된 에너지 밀도 분포의 형상을 촬영하기 위해 반사 타겟으로부터 약 1.2m 전방에 CCD 카메라를 설치하였고, 반사 타겟 표

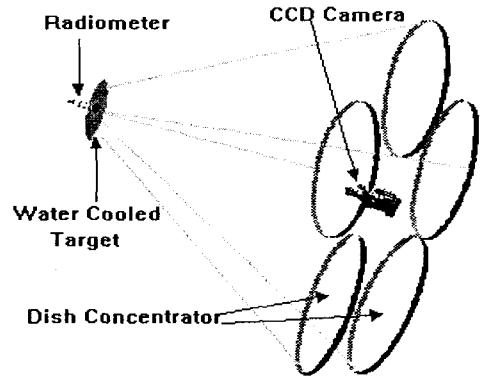


Fig. 2 Arrangement of the flux mapping equipment.

면과 시각 관점이 수직이 되도록 설치하였다. 카메라에 의해 촬영되는 플럭스 이미지들은 컴퓨터 내에 장착된 8비트의 프레임 그레버(frame grabber) 카드를 사용하여 디지털화한 후, Matrox Intellicam Software를 사용하여 모니터상에 이미지를 형상화시켰다.

집광기로부터 집광되는 빛의 강도(intensity)를 연속적으로 측정하기 위해, 라디오미터(radiometer)를 반사 타겟의 중앙에 수직으로 설치하였고, 이 절대값을 기준으로 CCD 카메라에 의해 촬영된 이미지상의 화소(pixel)들이 가지고 있는 빛의 강도값을 상대적으로 측정하였다.

2.2 실험방법

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

화소들의 정확한 명암도(gray level)을 측정하는 것은 집광된 에너지 밀도 분포를 분석하는 데 결정적 요소로 작용한다. 그러므로 카메라의 보정은 접시형 집광 시스템의 플럭스 분포를 촬영하기 전에 이루어져야 하는 필수 단계이며, 카메라의 특성을 파악하는 작업이라고 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 것이므로, CCD는 빛의 강도에 매우 선형

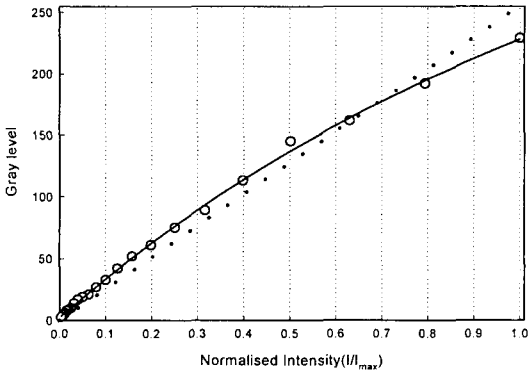


Fig. 3 CCD camera response to calibrated light level.

적인 반응을 나타낸다. 즉, CCD의 출력은 빛의 세기에 직접 비례한다. 그러나 영상 장치를 만들기 위해 사용되는 인광성 물질은 비선형이므로, 빛의 밝기에 따른 영상 장치의 출력은 밝기값이 클 때 또는 작을 때에 대해 그 변화율이 서로 다르다. 따라서 빛의 명암도 측정에 영향을 주는 CCD 카메라와 영상 출력 장치의 응답 특성을 초점 지역의 에너지 밀도 분포 측정 전에 실험을 통하여 보정하였다. Fig. 3은 CCD 카메라의 보정 결과로써, 빛의 세기에 대한 CCD 카메라의 반응 특성을 보여주고 있다. 점선은 CCD 소자 고유의 선형적 특성이며, 실선은 실제 촬영에 의한 영상 출력 장치의 응답 데이터를 추세선(curve fitting)으로써 나타내었다 이 결과로부터 CCD 소자 고유의 응답 특성과 영상 출력 장치로부터 나타난 응답 특성간의 보정식을 도출할 수 있다.

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

촬영된 플럭스 이미지는 IDL(interactive data language)을 사용하여 에너지 분포 특성을 분석하였다. 음영장(dark field)으로 인해 나타나는 오차는 촬영된 플럭스 이미지에서 배경 이미지를 감산함으로써 수정하였고, 라디오미터 이미지로 인

하여 발생하는 오차는 라디오미터 이미지 경계 외곽에 근접한 화소들의 명암도를 평균값으로 보정하였다. 라디오미터에서 측정된 에너지의 세기를 각 화소에 상대적으로 적용하여 각 화소가 가지고 있는 에너지량을 구하였으며, 적산함으로써 초점 평면에 집광된 전체 에너지량을 계산하였다. 화소들 사이의 간격을 실제의 거리로 환산하여 플럭스 이미지의 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

Fig. 4는 초점 지역의 반사 타겟을 실제 초점 거리로 측정된 2.17m에 위치시켰을 때, 집광 에너지 밀도 분포를 보여주고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 집광기의 꼭지점으로부터 반사 타겟의 거리가 2.11m로부터 2.23m까지 3cm씩 거리를 증가시키면서 타겟상의 집열 밀도 분포를 측정하는 것이다. 이론적 초점거리는 2.20m이지만, 촬영된 이미지를 분석한 결과 실제 초점거리는 2.17m에서 형성되는 것으로 나타났다. 또한, 실제 초점거리를 기준으로 멀어질수록 에너지값이 작게 나타나고 있으며, 좌우 대칭의 형태에서 벗어나고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 다섯 개의 반사경이 똑같이 정확한 곡률로 제

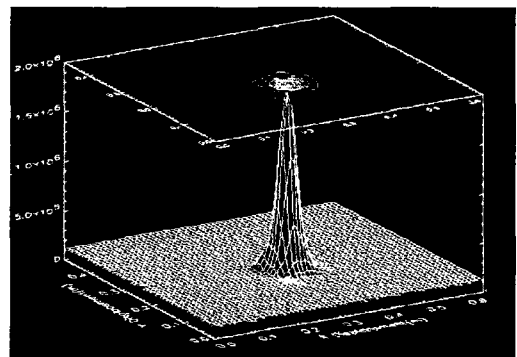


Fig. 4 A combination display of surface and contour plots for concentrator at focal position 2.17m.

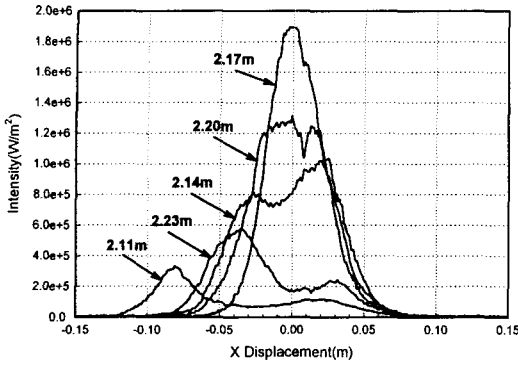


Fig. 5 Flux cross sections of total reflector through x-direction.

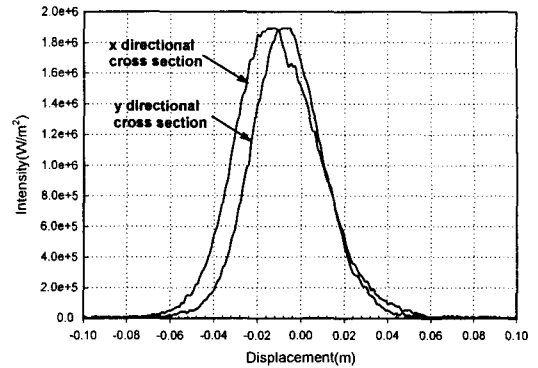


Fig. 7 X and y directional deviation of flux centroid from target center.

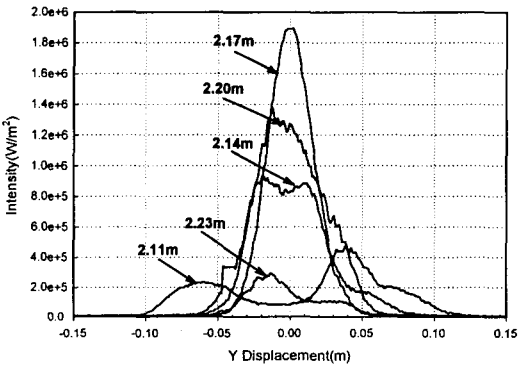


Fig. 6 Flux cross sections of total reflector through y-direction.

작되어졌고, 설치상의 오차가 없다면 좌우 대칭의 경향을 보일 것이나, 일부 반사경이 설계치의 초점거리보다 멀거나 가깝게 제작되었으며, 설치상의 오차도 큰 원인이 될 수 있다. 초점거리가 짧게 설계된다면 곡률은 큰 값을 가지며, 초점거리가 길게 설계된다면 곡률은 작은 값을 가지게 되는데, 본 실험 방법으로 정확한 수치의 곡률을 측정하는 것은 불가능하다. 단지, 다섯 개의 반사경 전체를 집광시켰을 경우, 초점거리가 설계값보다 가깝게 형성되고 있어 평균적으로 곡률이 크게 제작되었다고 평가할 수 있다. 또한, 반사경에 대한 곡률 측정은 본 집광 시스템에 전체에 대한 실험과 더불어 각각 반사경의 특성 분석을 통해 좀더 자세히 다뤄져야 할 것으로 사료된다. 본 실험에서 실제 초점거리로 관측된 2.17 m에서의 빛의 최대 강도는 약 1.89 MW/m^2 로 측정되었으며, 이론적 초점거리와 3 cm 정도의 오차를 보였다.

3.2 집광 플럭스 변위

집광 시스템에서 흡수기의 동공에 빛을 정확하게 집광시키지 못함으로써 집광된 빛의 일부가 동공 밖으로 빠져나가는 열손실을 최소화하기 위해서는 집열 밀도 분포와 도심의 위치를 정확하게 파악할 필요가 있다.

Fig. 7은 집광 에너지 밀도 분포의 도심이 원형 타겟의 중심으로부터 벗어난 정도를 보여주고 있다. 음의 x, y 방향으로 치우쳐 있으며, x축 방향으로 좀더 많이 치우쳐 있음을 볼 수 있지만, 역시 2 cm 이내의 오차를 보이고 있어 집광기에 의해 반사된 빛이 대체로 정확한 지점에 비추고 있음을 알 수 있다.

3.3 차단 에너지 비율(PIR)

흡수기의 동공이 너무 크게 결정이 된다면 많은 열손실을 감수해야 하며, 너무 작다면 집광되어 들어오는 빛을 다 받아들이지 못하여 광학적 손실을 초래한다. 그러므로, 타겟 중심으로부터 반경거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 들어오는지를 평가하는 것은 흡수기에서 동공의 크기를 결정하는 데 가장 중요한 요소이다.

Fig. 8은 반사경 전체 꼭지점으로부터 원형 타겟까지의 거리가 2.11 m부터 2.23 m까지 3 cm의 간격을 두면서 촬영한 이미지를 분석한 것으로서, 집열 밀도의 도심을 중심으로 하였을 때 반경거리에 따른 에너지 비율을 나타낸 것이다. 실제 초점거리로 측정된 2.17 m에서의 그래프가 같은 반경거리 내에서 가장 많은 에너지 비율을 포

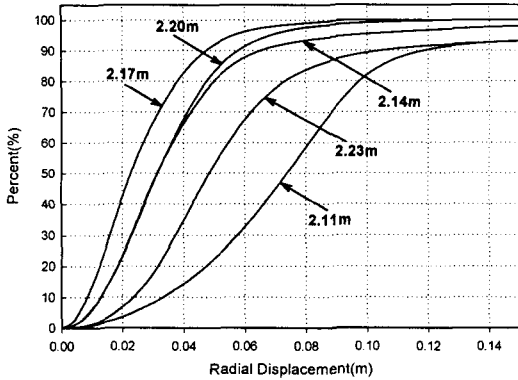


Fig. 8 Percent power within radius at focal lengths.

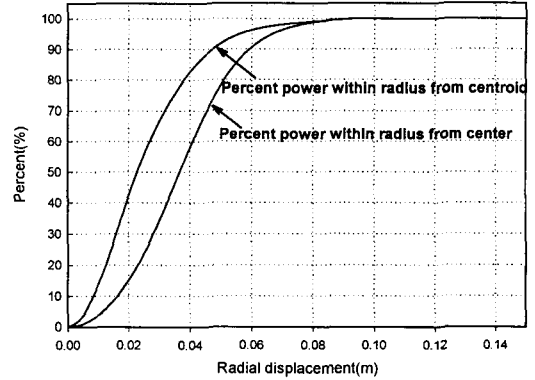


Fig. 9 Percent power within radius from center and centroid at focal point 2.17 m.

합하였으며, 2.14m와 2.20 m의 경우 플럭스의 도심으로부터 반경 0.05m까지는 약 80%의 비슷한 에너지 포함 비율을 보여주다가 반경 0.05 m 이상에서부터는 2.14 m일 때가 산란이 많은 것을 알 수 있다. 특히, 2.11 m와 2.23 m을 관찰해 보면 도심에서부터 에너지 포함 비율이 매우 낮게 형성되어 있는 것으로 보아 한 곳으로 집광되지 않고 넓게 퍼져 있는 것을 알 수 있다. 하지만 반경 거리에 따른 에너지 비율을 측정함에 있어 플럭스 도심을 중심으로 에너지 비율을 평가하는 것은 단지 플럭스가 얼마나 집광이 잘되는지 정도만 파악할 수 있을 뿐 흡수기 동공의 크기를 결정한다는 것은 타당치 않다. 플럭스가 한 지점으로 매우 잘 집광되었다 하더라도 플럭스 도심이 흡수기 동공의 중심으로부터 크게 벗어나 광학적 손실을 초래할 수도 있기 때문이다. 그러므로, 원형 반사 타겟의 중심으로부터 반경 거리에 따른 에너지 비율을 알아내는 것이 중요하다.

Fig. 9은 실제 초점거리로 관측된 2.17 m에서의 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 흡수기 동공의 크기를 결정함에 있어 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 때 90%의 에너지를 포함하는 반경을 선택한 결정적 이유이다. 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 경

우 0.059 m 이내에 전체 에너지의 90%를 포함하였으며 동공의 크기를 직경 약 0.12 m로 결정할 수 있다. 만약, 플럭스의 도심이 위치한 지점에 흡수기 개구부 중심과 일치시켜 설치한다면, 흡수기 동공의 반경을 0.047 m, 즉, 직경을 0.094 m 까지도 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

3.4 집광비

집광된 에너지는 기하학적 집광비(Concentration ratio)와 광학적 집광비에 의해서 표현된다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면, 실제 초점거리 2.17 m에서 최대 플럭스 강도는 1.89 MW/m^2 이며, 이것은 최대 광학적 집광비가 2356 suns에 해당하는 값이다. 측정했을 때의 직달 일사량은 802 W/m^2 이었으며, 반사경 제조 당시의 반사율은 90%였다. 또한, 90%의 에너지를 포함하는 반경 0.06 m 내의 면적을 흡수기 개구부 면적이라고 한다면 기하학적 집광비는 347 suns에 이른다.

3.5 차단 에너지(Intercepted energy)

반사경 각각의 반사율을 제작 당시의 반사율 90%, 그리고 직달 일사량을 800 W/m^2 라 하였을 경우, 본 접시형 태양열 집광 시스템을 이용하여 얻을 수 있는 최대 에너지는 이론상 2827 W로 계산할 수 있으며, 본 실험을 통하여 직접 측정 한 결과 2467 W의 에너지가 얻어졌다. 이것은 이론상 얻을 수 있는 최대 에너지의 85.8%에 해당하는 값이다. 이것은 여기에 언급된 실제 초점거

리뿐만 아니라 촬영이 행하여졌던 다른 거리에서도 비슷한 에너지값을 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 커진 결과임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 접시형 태양열 집광 시스템의 초점 지역에 형성되는 플럭스 분포를 해석함으로써 최적의 흡수기를 설계하고, 흡수기의 정확한 위치를 설정하기 위해 수행되었다. 뿐만 아니라 플럭스 분포를 측정 관찰함으로써 집광기가 가지고 있는 여러 가지 오차들을 찾아내기 위한 것이기도 하다. 따라서, 본 연구를 함으로써 도출된 결과들은 다음과 같다.

(1) 접시형 태양열 집광 시스템을 이용하여 반사 타겟에 집광시켰을 경우, 설계치의 초점거리보다 3 cm 앞쪽에서 가장 적은 집광 면적 내에 가장 높은 집광 밀도를 보였다. 반사경 전체를 집광시켰을 경우, 실제 초점거리를 기준으로 전, 후 간격이 벌어질수록 반사경 각각에 대한 초점이 여러 개로 분산되어지면서 집광 면적이 넓어지고, 최대 peak도 낮아졌다. 따라서 흡수기 개구부의 위치를 실제 초점거리인 2.17 m로 결정하였다.

(2) 본 시스템의 집광 플럭스의 변위를 평가했을 경우, 타겟 중심에서 좌측 아래 방향으로 도심이 형성되었는데, 거의 2 cm 미만의 오차를 보이고 있어 집광기가 대체로 타겟의 중심에 정확하게 빛을 집광시키는 것으로 평가되었다. 이것은 각각의 반사경의 설치 오차에 기인하는 것이 첫번째 이유이며, 다섯 개의 반사경 중 일부 반사경이 초점거리에 비해 타겟의 위치가 더 먼 곳에 설치되었을 경우, 그 상이 반대로 나타나며 상의 위치 또한 반사경의 위치와 반대 방향으로 타겟과 멀어지게 된다. 타겟의 위치가 초점거리보다 가까울 경우는, 상이 정상적으로 나타나지만, 이 또한 타겟 중심으로부터 반사경이 설치된 방향으로 타겟 중심으로부터 멀어져 나타나게 된다. 이런 각각의 반사경의 영향으로 인해, 전체 반사경을 집광시킨 본 실험의 경우 플럭스의 도심의 변위가 타겟 중심과는 다르게 나타나고 있

다. 여러 복합적인 원인으로 나타나는 플럭스의 형상 및 변위를 예측하여 흡수기를 설계, 위치시키기란 매우 어려운 점이 있으며, 본 시스템의 경우, 초점 타겟의 플럭스를 직접 촬영하여 플럭스의 특성에 맞는 흡수기를 설계할 수 있다.

(3) 초점거리에서 반경에 따른 차단 에너지 비율 평가에서 반사 타겟의 중심으로부터 반경 0.059 m 이내에 90%의 에너지를 포함하고 있어, 흡수기 공동의 입구 크기를 약 0.12 m로 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 0.047 m, 즉 직경 0.094 m 까지 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 90%의 에너지를 포함하는 반경 0.06 m 내의 면적을 흡수기 동공 입구 면적이라고 한다면 기하학적 집광비는 347 suns였다.

(5) 반사 타겟에 차단된 에너지 평가에서, 태양열 집광 장치의 집광기에서 수광된 에너지는 반사율 90%, 일사량 800 W/m^2 일 때 이론적으로 2827 W의 에너지가 차단되어진다. 그러나 본 실험을 통해 얻어진 실제 차단 에너지값은 2467 W로써 이론적으로 계산된 최대 에너지의 85.8%만이 차단되었다. 나머지 약 14%에 해당하는 에너지는 반사경 제작시의 왜곡에 의해 타겟을 벗어나는 양이 대부분이며, 반사경이 오랫동안 외부에 노출되면서 제작 당시 측정됐던 반사율보다 많이 저하되었기 때문에 실제 평가된 에너지량이 적게 나타난다. 또한, 타겟 표면이 받은 빛의 100% 전부를 산란 반사시킨다고 할 수 없기 때문에 실제 차단된 에너지가 적게 평가된다.

참고문헌

- Schubnell, M., Keller, J. and Imhof, A., 1991, Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System, ASME J. Solar Energy Engineering, Vol.113, pp. 112-116.
- Johnston, G., 1995, Flux Mapping the 400 m² "Big Dish" at the Australian National University, ASME J. Solar Energy Engineering, Vol. 117, pp. 290-293.
- Johnston, G., 1998, Focal Region Measure-

- ments of the 20 m² Tiled Dish AT the Australian National University, Solar Energy, Vol. 63, No. 2, pp. 117-124.
4. Neumann, A. and Schmitz, A., 1999, The SCATMES Device for Measurement of Concentrated Solar Radiation, ASME J. Solar Energy Engineering, Vol. 121, pp. 116-120.
 5. Feuermann, D., Gordon, J.M. and Ries, H., 1999, High-Flux Solar Concentration with Imaging Designs, Solar Energy, Vol. 65, No. 2, pp. 83-89.
 6. Jones, S. A. and Neal, D. R., 1996, VSHOT: A Tool for Characterizing Large, Imprecise Reflectors. SNL Report SAND96-2272C.
 7. Kang, Y. H. and Kack, H. Y., 1999, Development of Solar Thermal Concentrating System With Paraboloidal Dish, Report of Korea Institute of Energy Research, KIER-994601.