

Dish형 태양열 집광기의 플럭스 분포 해석

현성택* · 강용혁** · 천원기***

An Analysis of Flux Distribution of Dish Solar Concentrator

Sung-Taek Hyun*, Yong-Heack Kang** and Won-Gee Chun***

ABSTRACT

This paper was presented an experimental study to analyze focal plane flux distributions produced by solar concentrating reflectors. Videographic flux mapping was used to investigate flux distributions in the focal plane located at the aperture of the cavity receiver. Peak fluxes in the focal region of 765.5 kW/m^2 have been recorded, which corresponds to a concentration ratio of 1150 suns for 663 W/m^2 insolation and 90% mirror reflectivity. Total integrated power of 403 W was measured under focal flux distributions. As a result of the percent power within radius, approximately 90% of the incident radiation is intercepted by 0.037m radius.

Key words : Flux mapping, flux distribution, dish solar concentrating system

1. 서론

환경 친화적인 대체 에너지의 개발이 국내외적으로 주목받고 있는 시점에서 태양열을 이용한 기술들은 전력 및 산업 공정열의 이용에 매우 적합하다고 여겨진다.

태양열 발전은 주로 Parabolic Dish형 태양열 집광 시스템과 같은 고집광 시스템을 이용하게 된다. 집열부에 속하는 흡수기는 집광된 태양광속을 매우 잘 받아들일 수 있도록 설계되어야 하며, 초점 지역에 형성되는 집광 분포에 따라 그 설계가 달라질 수 있으며

로 플럭스 분포의 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 또한 초점 지역에서의 플럭스 분포의 특성을 관찰함으로써 실제 반사판에서의 여러 오차들을 찾아낼 수 있다.

본 연구에서는 Parabolic dish 태양열 집광 시스템으로부터 반사된 태양광이 모이게 되는 초점 지역을 CCD 카메라로 촬영한 뒤 videographic flux mapping 기법을 적용함으로써 초점 지역에서의 집광 분포의 특성을 분석하고자 하였다.^{1) 2)}

II. 실험장치 및 방법

2.1 Flux mapping 시스템

태양열 집광 시스템의 초점 지역에서의 플럭스 분포 특성 평가를 위한 Dish형 시스템이 Fig. 1에서 보

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 한국에너지기술연구원

Korea Institute of Energy Research

*** 제주대학교 기계에너지 생산공학부, 산업기술연구소

Faculty of Mechanical, Energy & Prod. Engineering, Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

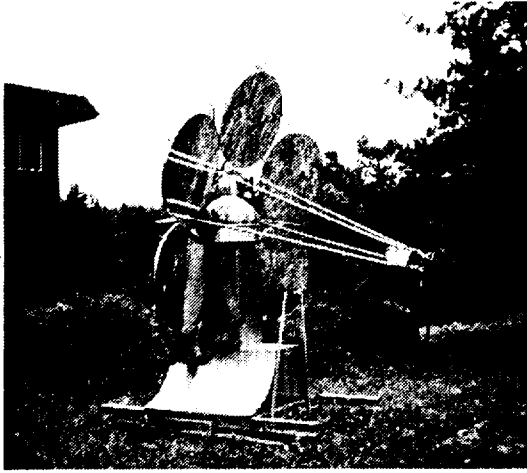


Fig. 1. Parabolic Dish Concentration System.

여지고 있다. 시스템은 전체 높이가 4 m, 폭이 3 m. 림각(rim angle)이 37° 이며, 집광기(Concentrator)의 전체 수광 면적이 $4 m^2$ 이다. 집광기는 직경이 1 m인 반사경 5 개를 원형의 틀에 나열시킨 형태이다. 5 개의 반사경은 각각의 초점거리가 2.2m이며, 뒷면을 은 코팅(back-silver coating)으로 처리한 유리거울로 만들었다. 반사율은 90%, 림각은 9.5° , 그리고 두께 3 mm이다.

이론적 초점부의 직경을 60 mm로 계산하여 기하학적 집광비는 1090 sun으로 설계하였지만, 반사경 제작 및 부착 오차와 추적오차를 감안하여 실제 집광비는 600 sun 이상, 초점 직경 90 mm 이하가 되도록 제작 조립하였다.

Dish형 집광기는 태양광이 항상 집광기 축에 평행하게 입사되기 위해서 두 개의 독립된 축을 중심으로 태양을 추적하게 된다. 따라서, 본 실험에 사용된 dish 시스템의 구동장치 또한 방위각과 고도각으로 구동할 수 있도록 집광기 중앙부에 구동 모터를 설치하였다.

Fig. 2는 dish 상에 CCD 카메라와 플럭스 이미지 시스템의 전체적인 구성 설제도를 보여주고 있다. Flux Mapping 시스템은 Dish형 집광 시스템에 측정 장비 및 그 외의 몇 가지 장비를 추가적으로 설치하여 구성하였다. 우선 집광기에서 반사된 빛이 모이게 되는 집열부에 흡수기 대신 원형의 반사 타겟을 위치

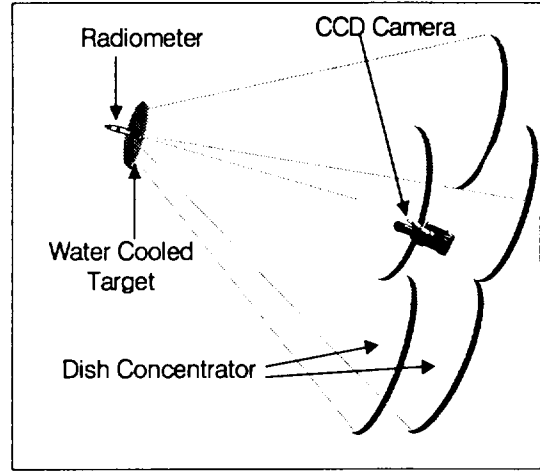


Fig. 2. Arrangement of the flux mapping equipment.

시켰다. 직경 30 cm인 원형의 반사 타겟은 앞면에 반사가 균일하게 이루어져 초점 형상을 쉽게 판별하고 $400 \sim 900^\circ C$ 의 고온에 견딜 수 있도록 내열 백색의 특수 페인트를 칠하였고, 후면에는 페인트가 타는 것을 방지하기 위해서 물로 냉각할 수 있도록 동관을 코일 형태로 말아 용접하여 타겟을 냉각시키도록 하였다.

Radiometer는 반사 타겟의 중앙에 수직으로 설치하여 집광기로부터 집광되는 빛의 강도를 연속적으로 측정할 수 있도록 하였다. 이 절대값을 기준으로 CCD(Charge Coupled Device) 카메라에 의해 읽혀진 화소(pixel)들의 명암도(gray level)를 상대적으로 측정하게 된다. 반사 타겟에 형성된 초점의 특성 관측을 위해 타겟으로부터 약 1.2 m 정도의 거리를 두고 집광기의 중앙부에 CCD 카메라가 설치하였으며, 반사 타겟 표면에 대한 시각 관점이 수직이 되도록 하였다. 고밀도의 흡수 필터들이 카메라 렌즈 앞에 위치하게 되는데, 이것은 고광도의 빛으로 인해 발생하게 되는 CCD array에서의 포화현상을 막기 위한 것이다. 그리고 시스템 외부에는 직달 일사량계를 설치하여 태양을 계속적으로 추적하며 일사량을 측정하였다.

2.2 Flux mapping 방법

Fig. 3은 초점 지역에서 플럭스 분포의 특성을 분석하는 과정을 보여주고 있다. 가장 중요한 것은 이

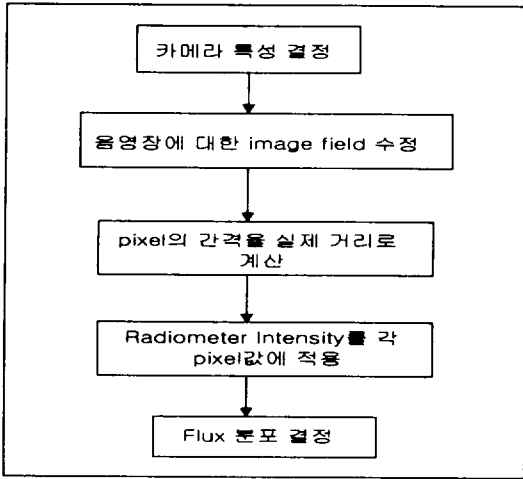


Fig. 3. Flux mapping procedure.

미지를 촬영하게 될 카메라의 특성을 정확하게 파악하는 것이다. 그러므로 카메라의 보상(calibration)⁴⁾은 Dish형 집광 시스템의 플럭스 분포를 촬영하기 전에 이루어져야 하는 매우 중요한 단계이다.

CCD 카메라는 고유적으로 선형성을 갖고 있다. 즉, CCD의 출력은 빛의 세기에 직접 비례한다. 그러나 디스플레이에 사용되는 발광성 물질은 비선형이다. 전형적으로 발광성 물질은 어두운 부분에서는 더 작은 신호로 출력되고 밝은 부분에서는 더 큰 신호를 출력하게 된다. 카메라의 보상은 빛의 세기에 따라서 선형성을 갖도록 화소의 명암도를 수정하기 위한 과정이다.

Fig. 4는 빛의 세기에 대한 CCD 카메라의 반응 특성을 보여주는 그림이다. 점선 부분이 카메라 CCD의 특성을 보여주는 그래프이고, 다른 실선이 실제 촬영한 후 디스플레이에 나타나는 명암도를 보여주는 그림이다. 즉, 이러한 결과로부터 빛의 강도가 커짐에 따라 실제 성향과는 많은 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다. 이러한 효과를 보상에 주어야만 정확한 화소의 명암도를 얻을 수 있다. 필터를 투과한 빛의 세기가 어느 한계치를 넘길 경우 명암도는 동등하게 나타나게 되는데, 이러한 상태를 CCD array가 포화(saturation)가 되었다고 하며, 포화가 시작되는 곳에서의 투과율을 100%로 놓게 된다.

카메라 특성이 결정된 다음에는 음영장(dark-field)

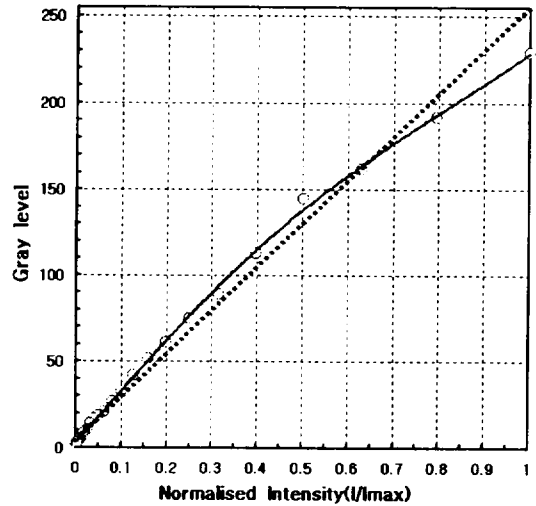


Fig. 4. CCD camera response to calibrated light level.

에 대한 수정을 하여주어야 한다. 음영장에 대한 수정 과정은 집광된 플럭스 이미지에서 집광된 플럭스 이미지가 없는 배경의 백색 원형판 자체를 촬영한 이미지를 제거해 주는 작업을 말한다. 그리고 초점 지역에서 각 화소 간격의 실제 거리를 계산하게 된다. 이 작업은 Fig. 5에서 보이듯이 중앙에 radiometer 이미지의 실제 크기를 화소의 수로 나눔으로써 이루어진다. 그 다음 단계로 radiometer에서 측정된 intensity를 각 화소의 명암도에 적용한다. 즉, radiometer가 설치된 주위 화소의 명암도가 radiometer에서 측정된 intensity를 나타낸다. 최종적으로 플럭스 이미지 반경에 대한 집광된 에너지 분포율을 결정한다.

III. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 다섯 개의 반사경 중에 오른쪽의 첫 번째 반사경에 대한 실험만을 기술하였다.

3.1. 이미지 분석

Fig. 5와 Fig. 6은 꼭지점으로부터 2.2 m의 초점 거리를 가지도록 설계된 Dish의 초점 평면에서의 플럭스 분포를 촬영한 이미지와 이것을 surface plot으로

형상화한 그림을 보여주고 있다. Fig. 5에서 중앙에 보이는 검은 구멍은 radiometer의 이미지이며, Fig. 6은 정상에서 약간 벗어난 뒤쪽으로 평평한 형상을 관찰할 수 있는데, 이것은 Fig. 5의 구멍을 보정한 것이다.

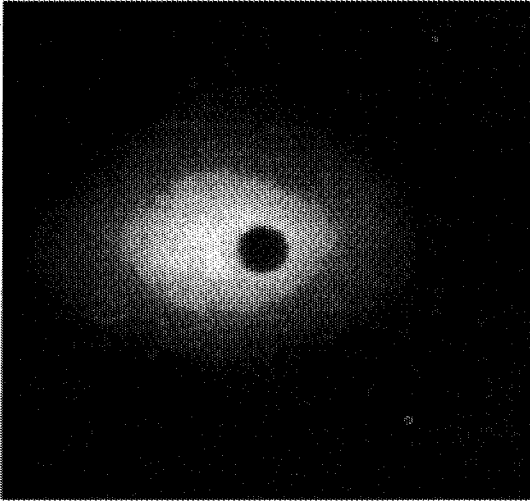


Fig. 5. Image of flux distribution.

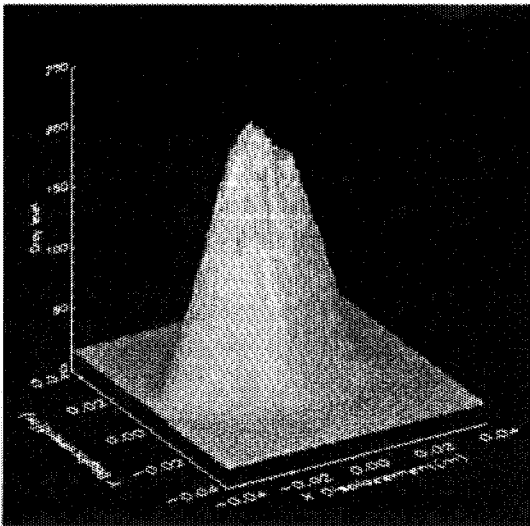


Fig. 6. Surface plot of the flux distribution.

Fig. 7은 초점 상에서 측정된 분포의 contour plot를 보여주고 있다. 한가운데의 radiometer의 이미지로

인한 형태가 뚜렷하게 나타나고 있으며, x 축 방향으로가 y 축 방향에 비해 좀 더 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. radiometer를 원형판의 중심에 설치하였으므로, 이것을 기준으로 보면 플럭스의 도심(centroid)이 원형판의 중심으로부터 약간 벗어나 초점이 정확하게 맞지 않고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 초점 타겟에 형성된 이미지를 타겟의 중심 및 플럭스의 도심을 기준으로 x, y 축 방향의 단면(cross section)으로 자른 Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)에서 확실히 알 수 있다. 여기서 주의할 것은 radiometer의 이미지로 인해 나타나는 중앙의 검은 구멍을 보정하여 나타낸 그림이며, Fig. 8(a)는 타겟의 중심과 플럭스의 도심을 $x=0$ 에 일치시킨 값이므로, 보이는 것과 같이 플럭스의 도심이 양의 x 방향으로 치우친 것이 아니라 실제 음의 방향으로 치우쳐 있다는 것이다.

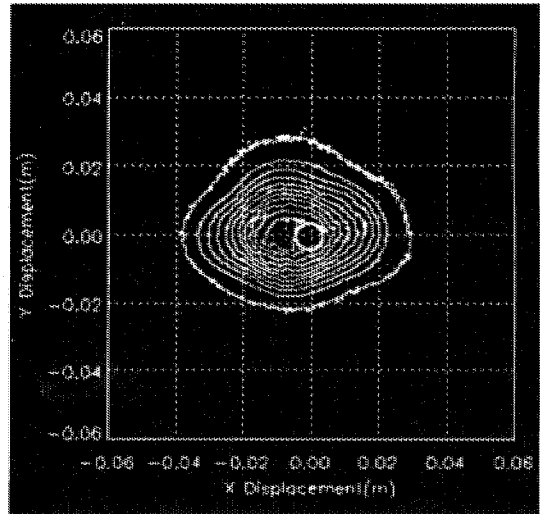


Fig. 7. Contour plot of the flux distribution.

플럭스 분포의 정상 근처에 나타나는 평면화 현상은 CCD 카메라의 포화 때문이 아닌 실제적인 영향 때문인데, radiometer의 이미지로 인해 형성된 구멍을 그 주위 화소의 평양도와 같은 값으로 보정했기 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 8(a)에서 플럭스의 도심이 타겟의 중심으로부터 음의 방향으로 0.5 cm 정도 치우쳐 있으며, 플럭스의 폭 또한 0.07 m에 이르고 있다. Fig. 8(b)는 도심의 위치가 타겟의 중심인

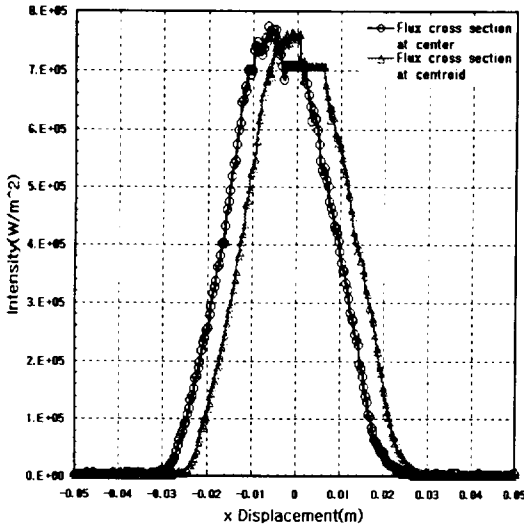


Fig. 8(a). Cross section through x-direction of the flux distribution.

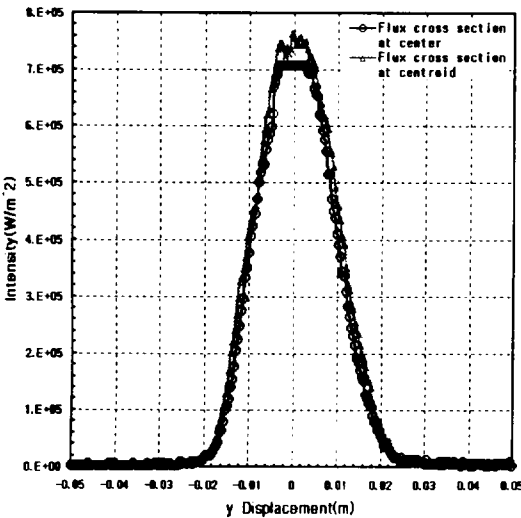


Fig. 8(b). Cross section through y-direction of the flux distribution.

y=0에 거의 일치하고 있으며, 폭이 0.05 m 정도이나, 자른 단면이 서로 다르므로 플럭스의 크기에서 차이를 보인다. x 방향으로의 폭이 더 넓은 것은 반사판의 경사면 오차가 원인일 수도 있지만, 반사경이 집광기(concentrator)의 증앙에 위치해 있는 것이 아니라 가장자리를 따라 원형으로 배치되어 있어 원형

판과 서로 수평으로 마주보고 있지 않기 때문에 나타나는 현상이다.

3.2. 에너지 분석

Fig. 6에서 타겟 증앙에 설치된 radiometer에 의해 계산된 플럭스 분포의 적산 에너지와 dish의 광학적 특성으로부터 계산된 에너지간의 비교는 이런 종류의 다른 실험에서 매우 유용하게 비교 분석되어질 수 있다. 이런 수치적인 합산을 통하여, Fig. 6에서의 적산 에너지를 구해보면 403W라는 값을 얻을 수 있다.

Table. 1은 Dish에 대한 광학적 계산으로부터 intercepted power를 계산하는데 요구되는 관련 변수들이다. 이 방법으로 intercepted power를 계산하면,

$$P = IA\rho_r \tag{1}$$

이므로, 여기에서의 intercepted power는 468W이다. 앞의 두 가지 방법으로 계산한 intercepted power를 비교해 보면 약 15% 정도의 오차를 보이고 있다. 이것의 가장 큰 원인은 radiometer의 이미지가 전체 플럭스 분포의 면적에 비해 상대적으로 많은 면적을 플럭스 분포의 정상 부분에서 차지하고 있으며, 보정하는 과정에서 radiometer 주변 네 지점의 명암도의 평균값을 radiometer 이미지가 차지하고 있는 부분에 그대로 적용했기 때문이다.

Table 1. Parameters for dish optics calculations

집열 면적(A, m ²)	0.785
Dish의 반사율(ρ _r , %)	90
직달 일사량(I, W/m ²)	663

두 번째로 집열부를 지지하고 있는 지지대의 위치가 반사경으로부터 집열부로 집광되어지는 경로에 위치하고 있어 일정 부분 차단이 있을 것으로 판단된다.

3.3. 집광비 분석

Fig. 8(a), Fig. 8(b)를 보면, 초점거리(2.2m)에서 최대 플럭스 강도는 765.5 kW/m² 인데, 이것은 최대

광학적 집광비가 1150 suns에 해당하는 값이다. 측정했을 당시의 직달 일사량은 663 W/m^2 이며, Dish의 반사율은 90%였다. 이것은 법선면 직달 일사량이 1000 W/m^2 , Dish의 반사율이 100% 일 때의 최대 광학적 집광비가 1280 suns에 이르는 값이다.

3.4. 반경에 따른 에너지 비율 분석

특히, 관심을 가질 또 한가지는 타겟 중심으로부터 반경 거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 반경 내 면적으로 들어오는가 하는 문제이다. Fig. 9는 초점거리 2.2 m에 위치한 타겟에서 각각 주어진 반경 내에 포함되는 에너지의 비율을 표시한 그림이다.

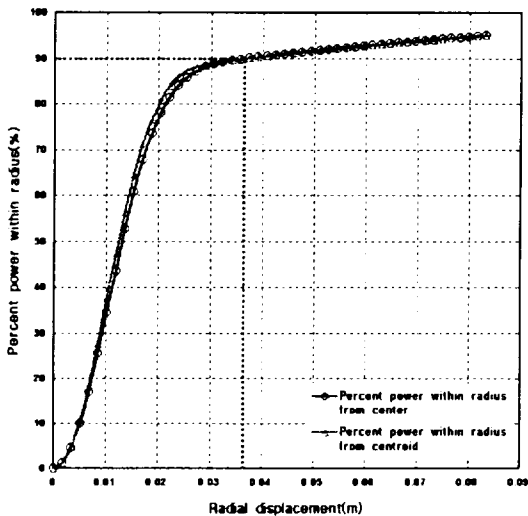


Fig. 9. Percent power within radius for focal point flux distribution.

Fig. 9에서 반경이 0.037 m 일 경우에 입사 에너지의 약 90% 정도를 포함하고 있다. Fig. 8(a), Fig. 8(b)에서 타겟의 중심과 도심의 위치는 약간의 차이를 보이지만, 플럭스 분포의 가장자리에서는 거의 일치하고 있어 결국 반경에 따른 에너지 분포의 90%를 포함하는 곳에서는 거의 일치하게 된다. 이 경우에 기하학적 집광비는 180 suns이며, 본 연구에 사용된 반사경 한 개만을 사용할 경우 흡수기의 개구부 직경을 대략 0.08 m로 결정할 수 있다.

IV. 결론

한국에너지기술연구원에서의 4 m^2 Dish 중 반사경 한 개에 대한 Flux Mapping 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일반적으로 초점평면에서 Gaussian 분포의 외형을 가지고 있으나, x 방향으로 좀 더 많은 퍼짐이 있었으며, 도심이 타겟의 중심으로부터 음의 x 방향으로 약간의 기울었음이 관찰되었다. 또한 초점지역의 플럭스 분포에서 이미지는 외형상 높은 대칭성을 가지고 있는데, 이것은 Dish 형태 및 표면 에러 분포 또한 매우 유사한 대칭성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

(2) 663 W/m^2 의 일사량, 90%의 반사율 일 때, 타겟 위의 intercepted power 는 403 W였고, 이것은 이론적으로 계산한 광학적 intercepted power인 468W 에 15%의 오차를 보였다.

(3) 위와 동일한 일사량 및 반사율일 경우 1150 suns이라는 최대 광학적 집광비를 얻었으며, 기하학적 집광비는 180 suns이었다.

(4) 타겟의 중심으로부터 반경 0.037 m 내에 전체 에너지의 90%를 포함하고 있으며, 이 경우 흡수기 개구부의 직경을 0.08 m로 결정할 수 있다.

참고 문헌

- 1) Johnston G., 1995. "Flux Mapping the 400m² 'Big Dish' at the Australian National University". Journal of Solar Energy Engineering Vol.117, No.4. pp.290-293.
- 2) M. Schubnell, 1991. "Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System". Journal of Solar Energy Engineering Vol.113, pp.112-116.
- 3) A. Neumann, 1999. "The SCATMES Device for Measurement of Concentrated Solar Radiation". Journal of Solar Energy Engineering Vol.121, pp.116-120.
- 4) Korea Institute of Energy Research, 1999 "Development of Solar Thermal Concentrating System with Paraboloidal Dish".