

태양열 집광기의 플럭스 밀도 분포 특성에 관한 연구

강 명철¹⁾, 강 용혁²⁾, 윤 환기³⁾, 유 창균⁴⁾

An Experimental Study on the Characteristics of Flux Density Distributions produced by Solar Concentrating System

Myeongcheol Kang, Yongheack Kang, Hwanki Yoon, Changkyun Yu

Key words : Solar Concentrating System(태양열 집광기), Flux Density(플럭스밀도), Receiver(흡수기), Concentration ratio(집광비), focal region(초점지역), aperture(개구부)

Abstract : This experimental study represents the results of an analysis on the characteristics of flux density distribution in the focal region of solar concentrator. The characteristics of flux density distributions are investigated to optimally design and position a cavity receiver. This was 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. The total integrated power and percent power was 2467W and 85.8%, respectively, in the case of small dish, and also 2095W and 79%, respectively, in the case of KIERDISH II. As a result of the percent power within radius, approximately 90% of the incident radiation is intercepted by about 0.06 m radius. The minimum radius of receiver in KIERDISH II is found to be 0.15m and approximately 90% of the incident radiation is intercepted by receiver aperture.

1. 서론

고효율 고집광 기술의 대표적인 것이 Dish형 태양열 집광시스템으로서 시스템의 성공적인 운전을 위해서는 반사경과 흡수기의 설계가 매우 중요하다.

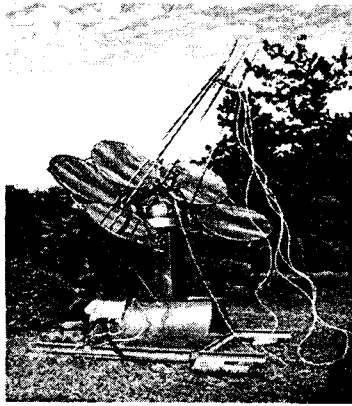
반사경은 집광시스템 구조에 가장 적합하고 dead area를 최소화하도록 설계하는 것이 중요하며 흡수기는 집광되는 태양 플럭스를 최대한 흡수할 수 있도록 설계되어야 한다. 물론 집광시스템의 초점지역에 형성되는 플럭스 밀도분포에 따라 흡수기의 설계가 달라지기 때문에 정확한 플럭스 밀도분포의 측정이 필요하다.

태양열 집광시스템의 초점지역 플럭스 밀도 분포 측정방법으로는 현재 세계적으로 표준기술로 채택되고 있는 CCD(Charged Coupled Device) 카메라를 이용하는 방법이 있다. 이 측정방법은 CCD 카메라를 이용하여 화상을 촬영한 뒤 플럭스 맵핑 기법을 적용하여 집광된 에너지밀도를 관찰할 수 있다. 촬영된 플럭스의 특성을 파악함으로써 흡수기의 최적화된 직경을 결정할 수 있는 중요한 자료가 된다.

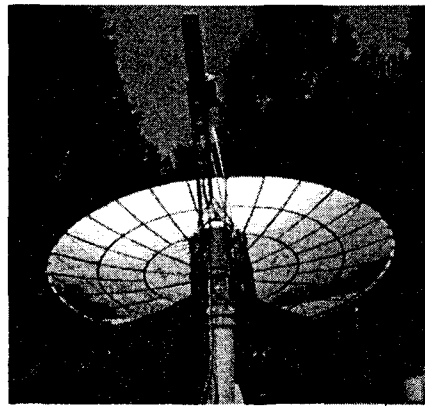
본 연구에서는 설계된 초점지역에 반사타겟을 설치하고 CCD 카메라를 이용하여 각각의 반사판

에 대한 플럭스 분포를 측정하였다. 적용된 시스템은 본 연구원에서 개발한 두 가지 형태의 태양열 집광기가 사용되었는데 이 시스템들의 커다란 특징은 반사판의 형태가 다르다는 것이다. 소형 dish 모델은 원형의 곡면을 갖는 반사판을 채택하고 있고 KIERDISH II 모델은 사다리꼴 형상의 반사판을 적용하고 있다. 이는 기존 원형의 반사판을 적용하는 경우 dead area가 크다는 단점을 보완한 시스템이다. 플럭스 측정은 모듈별 그리고 반사판 각각에 대하여 측정한 후 분석하여 집광된 플럭스 분포의 형상과 크기를 관찰하였고 초점반경에 따른 에너지비율을 평가하였다. 초점거

-
- 1) 한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터
E-mail : mckang21@kier.re.kr
Tel : (042)860-3511 Fax : (042)860-3739
 - 2) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3518 Fax : (042)860-3739
 - 3) 한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터
E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042)860-3739
 - 4) 한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터
E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042)860-3739



소형 Dish



KIERDISH II

Fig. 1 Parabolic dish concentrating system(소형Dish와 KIERDISH II)

리에서 반경에 따른 에너지 비율을 평가함으로써 흡수기 개구부의 최적 직경을 결정하였다.

따라서 초점지역에 형성되는 플럭스 분포 특성을 파악하여 제작된 집광기와 반사판의 제작오차를 평가함으로써 흡수기 개구부의 최적화된 직경을 결정할 수 있는 흡수기의 최적설계를 위한 데이터를 획득하는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 한국에너지기술연구원에 설치된 태양열 집광시스템의 두 가지 모델이다. 그림 1에서 왼쪽은 원형 반사판이고 우측에 보이는 것은 집광기에 부착된 반사판이 10개의 모듈로 이루어져, 모듈별 5개씩 총 50개의 사다리꼴 형상의 반사판으로 구성되었다. 두 모델의 초점지역 플럭스 분포를 측정하기 위한 Flux Mapping 시스템의 개략도는 그림 2와 같다.

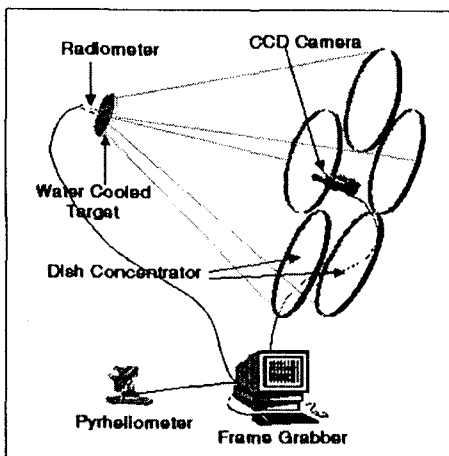


Fig. 2 Schematic of Flux Mapping system

Flux Mapping 시스템의 구성은 초점지역에 직경 0.5m인 원형판을 설치하였고 원형판 중앙부에는 intensity 측정을 위한 radiometer를 설치하였다. 원형판은 빛의 반사가 균일하게 이루어지도록 하기 위해서 401~900℃에 견디는 백색 Super Therm 페인트로 도포를 하였고 집광된 열에 의해 페인트가 녹는 것을 방지하기 위해서 물로 냉각할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

원형판 중앙에 설치한 radiometer는 Dish형 집광시스템의 이론적 집광비(900suns)를 고려하여 최대 2.27MW/m²까지 가능하고 카메라에 의해 촬영된 플럭스 이미지(image)의 픽셀(pixel)값을 실제 에너지 강도(intensity)로 변환하는데 사용하였다.

Flux Mapping 시스템은 위에서 언급한 것과 같이 반사타겟, radiometer, 그리고 CCD 카메라 등을 설치함으로써 전체적인 구성이 이루어진다.

집광플럭스 이미지의 촬영을 위한 CCD 카메라는 Dish형 집광기 꼭지점에서 약 50cm 떨어진 지점에 반사타겟 표면과 수직이 되도록 설치하였다. 초점지역에 생기는 이미지의 고광도 때문에 CCD array가 포화(saturation)되는 것을 막기 위해서 카메라 렌즈 앞에는 고밀도 흡수 필터를 설치하였다. 카메라에 의해서 촬영된 플럭스 이미지는 컴퓨터에 장착된 8bit frame grabber 카드를 사용하여 디지털화되고 intellicam사의 이미지 캡처 프로그램에 의해서 순간 촬영 이미지를 저장하였다.

2.2 실험방법

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

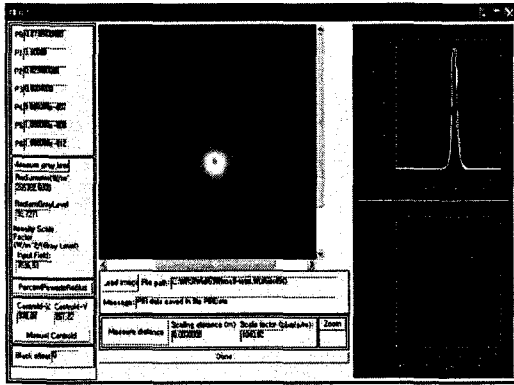
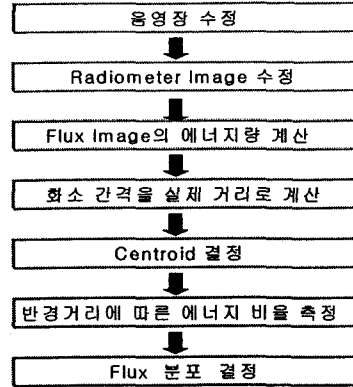


Fig. 3 IDL window for image analysis and flux mapping procedure



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 작업이다. 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 보정하였다.

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 초점 거리인 2.20 m를 기준으로 2.11 m, 2.14 m, 2.17 m, 2.20 m, 2.23 m, 2.26 m 씩 3 cm의 간격을 두고 촬영하였다.

Fig. 3은 촬영을 통하여 얻어진 집광 플럭스의 이미지를 분석하기 위해 IDL(Interactive Data Language)를 이용하여 작성한 프로그램의 배경화면을 보여주고 있으며, Fig. 4는 분석과정을 순서대로 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 실제 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 플럭스 분포

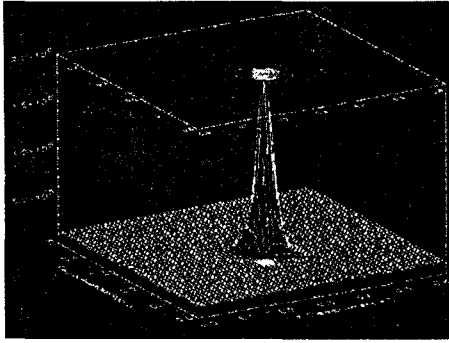
Fig. 4는 반사경의 개구부 면적이 유사한 두 시스템의 에너지 밀도를 비교하기 위해 소형 Dish에서는 전체 반사경의 에너지 밀도를 측정하였고 KIERDISH II 시스템은 한 Module만을 측정하여 얻어진 에너지 밀도 분포이다.

소형 Dish의 이론적 초점거리는 2.20 m이지만, 2.11m로부터 2.23m까지 거리를 변화시키면서 집열밀도를 측정한 후 촬영된 이미지를 분석한 결과 실제 초점거리는 2.17 m에서 형성되는 것으로 나타났다. 실제 초점거리로 판측된 2.17 m에서의 빛의 최대 강도는 약 1.89 MW/m²로 측정되었으며, 이론적 초점거리와 3 cm 정도의 오차를 보였다.

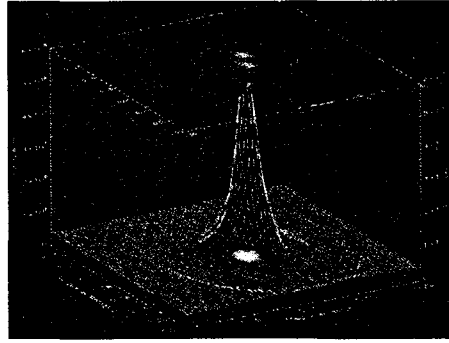
KIERDISH II의 한 Module만을 측정할 경우 대체로 중심에 이미지가 형성되는 것으로 나타났고 플럭스의 최대 강도는 5.7MW/m²로 측정되었다. 전체적으로 가우시안 분포를 보이고 있으며 플럭스가 차지하는 면적이 비교적 적게 나타났다.

3.2 차단 에너지 비율

집광시스템에서 흡수기의 크기를 결정하는 것은 매우 중요한 문제로서 흡수기의 동공이 크면 열손실이 크게 되고 너무 작으면 집광된 빛을 다



소형 Dish



KIERDISH II

Fig. 4 Surface and Contour plot of flux distribution

받아들이지 못하는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 초점의 중심점으로부터 전체에너지의 몇 %가 들어오는지 평가함으로써 흡수기의 동공의 크기를 결정하게 된다.

Fig. 5는 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 경우 0.059 m 이내에 전체 에너지의 90%를 포함하였으며 동공의 크기를 직경 약 0.12 m로 결정할 수 있다. 만약, 플럭스의 도심이 원형 타겟의 중심과 매우 잘 일치한다면, 플럭스의 도심을 영점으로 하여 흡수기 동공 반경을 0.047 m, 즉, 직경을 0.094 m까지도 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 집광된 Flux에 대한 반경안에서의 에너지포함비율을 나타내고 있다. 이는 흡수면 중심으로부터 반경 거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 들어오는지 평가하는 것으로 흡수기에서 동공의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 집광된 세가지 Flux의 에너지비율이 반경 0.05m까지 약 80%를 포함하고 있다는 것을 볼 수 있다. 이 에너지 포함 비율이란 반경거리에 따른 에너지 비율을 측정함에 있어 도심을 중심으로 에너지 비율을 평가하는 것은 단지 플럭스가 얼마나 집광이 잘 되는지 정도만 파악할 수 있을 뿐이다. 플럭스가 한 지점으로 매우 잘 집광되었다 하더라도 도심이 흡수기 동공의 중심으로부터 크게 벗어났다면 집광된 빛을 흡수기에서 효율적으로 받아들일 수 없다. 그러므로 원형흡수기의 중

심으로부터 반경 거리에 따른 에너지비율을 알아 내는 것이 매우 중요하다.

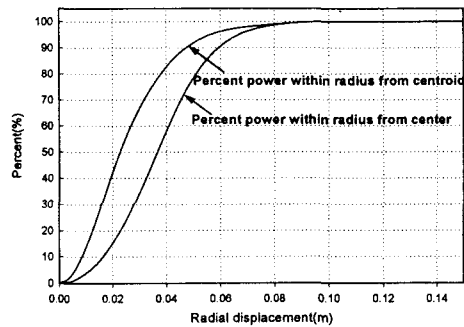


Fig. 5 Percent power within radius at focal point 2.17m(소형 Dish)

3.3 차단 에너지량

집광된 에너지는 기하학적 집광비(Concentration ratio)와 광학적 집광비에 의해서 표현된다. 실제 초점거리 2.17m에서 최대 플럭스 강도는 1.89 MW/m²이며, 이것은 최대 광학적 집광비가 2356 suns에 해당하는 값이다. 측정했을 때의 직달 일사량은 802 W/m²이었으며, 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.

반사경 각각의 반사율을 제작 당시의 반사율 90%, 그리고 직달 일사량을 800 W/m²라 하였을 경우, 본 접시형 태양열 집광 시스템을 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 여기에 언급된 실제 초점거리뿐만

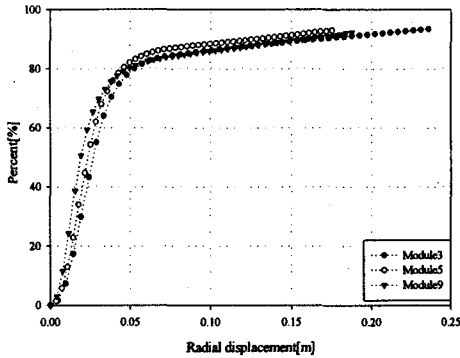


Fig. 6 Flux분포 반경 안에서의 에너지포함비율

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.

KIERDISH II에서의 한 Module당 이론적인 에너지값은 2664W이고 실제 측정된 에너지값은 2095W로서 최대에너지의 79%가 흡수기에 의해 차단된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 반사면에 의해 형성된 플럭스 분포를 측정함으로써 반사면의 설계와 제작에 있어 최적치를 찾고자 하였다. 또한 이런 오차를 적용하여 흡수기의 최적화된 직경을 결정하고 흡수기 설치 위치를 선정하는데 필요한 자료로 기여하게 된다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 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. 따라서 흡수기 개구부의 위치를 실제 초점거리인 2.17m로 결정하였다.

(2) 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 0.12m로 결정할 수 있었다. 이것은 흡수기의 위치를 플럭스 도심 위치와 일치하도록 설치하였을 경우 반경 0.047 m, 즉 직경 0.094 m까지 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

(3) 90%의 에너지를 포함하는 반경 0.06 m 내의 면적을 흡수기 동공 입구 면적이라고 한다면

기하학적 집광비는 347 suns였다. 반사 타겟에 차단된 에너지 평가에서, 태양열 집광 장치의 집광기에서 수광된 에너지는 반사율 90%, 일사량 800 W/m²일 때 이론적으로 2827 W의 에너지가 차단되어진다. 그러나 본 실험을 통해 얻어진 실제 차단 에너지값은 소형 Dish에서는 2467W로써 이론적으로 계산된 최대 에너지의 85.8%만이 차단되었고 KIERDISH II에서는 2095W로 79%가 차단되었다.

(4) 모듈9의 각각의 반사면에 의해 형성된 플럭스를 측정된 결과 플럭스의 변위가 대체로 중심점에 일치하였는데 반사면에 의한 집광이 타겟의 중심에 정확하게 빛을 집광시키는 것으로 평가되었다.

(5) 반경에 따른 차단에너지 비율 평가에서는 반사 타겟의 중심에서 0.15m 이내에 90%이상의 에너지가 집광된다는 것을 알 수 있다. 이는 흡수기의 동공 크기를 결정할 때 반경 0.15m로 결정할 수 있는 근거를 제시해 주는 것으로 평가할 수 있다. 또한 본 연구와 동일한 방법으로 적용함으로써 집광형 시스템을 분석하는데 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] G. Johnston, Flux mapping the 400m² "Big Dish" at the Australian National University, *Journal of Solar Energy Engineering*, 1995, Vol. 117, pp. 290~293.
- [2] G. Johnston, Keith Lovegrove and Andreas Luzzi, Optical performance of spherical reflecting elements for use with paraboloidal dish concentrators, *Solar Energy*, 2003, Vol. 74, pp. 133~140.
- [3] G. Johnston, Focal region measurements of the 20m² tiled dish at the Australian National University, *Solar Energy*, 1998, Vol. 63, pp. 117~124.
- [4] M. Schubnell, etc., Flux density distribution in the focal region of a solar concentrator system, *Journal of Solar Energy Engineering*, 1991, Vol. 113, pp. 112~116.
- [5] S. Ulmer, etc., Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, Vol. 124, pp. 182~188.
- [6] 현성택 외, 태양열 집광기의 초점지역에 형성된 플럭스 밀도 분포의 특성, 태양에너지논문집, 2002, Vol. 22, pp. 31~37.
- [7] 현성택 외, 접시형 태양열 집광 시스템의 에너지 분포 특성에 관한 연구, 설비공학논문집, 2002, Vol. 14, pp. 907~913.
- [8] 강용혁 외, Dish형 집광시스템 적용 산업용 태양열 시스템 실용화 개발, KIER보고서, 2003.
- [9] 강명철 외, KIERDISH II 태양열 집광기의 플럭스 밀도 분포, 태양에너지논문집, 2004, Vol. 24, pp. 11~18.