

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 24, No. 4, 2004

KIERDISH II 태양열 집광시스템의 플럭스밀도 분포

강명철*, 강용혁*, 유성연**

* 한국에너지기술연구원 고온태양열연구센터(mckang21@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr)

** 충남대학교 기계설계공학과(syyooh@cnu.ac.kr)

Flux Density Distribution of the Dish Solar Concentrator (KIERDISH II)

Kang, Myeong-Cheol*, Kang, Yong-Heack*, Yoo, Seong-Yeon**

* Advanced Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research
(mckang21@kier.re.kr, yhkang@kier.re.kr)

** Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University(syyooh@cnu.ac.kr)

Abstract

A solar concentrator, named KIERDISH II, was built at KIER in order to investigate the feasibility of high temperature solar energy application system. The constructed concentrator is a dish type solar concentrator with a focal length of 4.68m and a diameter of 7.9m.

To successfully operate KIERDISH II, optimal design of the absorber is very important and flux density distribution has to be known. The focal flux density distribution on the receiver was measured. We have observed the shape and size of flux images and evaluated percent power within radius. Flux density distribution is usually measured by a CCD(charge coupled device) camera and a radiometer. In this paper, we present a flux mapping method to estimate the characteristic features of the flux density distribution in the focal region of solar concentrator. The minimum radius of receiver is found to be 0.15m and approximately 90% of the incident radiation is intercepted by receiver aperture.

Keywords : Dish형 태양열 집광기(Dish Solar Concentrator), 초점지역(focal region), 플럭스밀도 분포(flux density distribution), 흡수기(absorber, receiver)

1. 서론

태양열 고집광 관련 기술은 매우 빠른 성장기에 있으며 향후 중장기적인 관점에서 태양열이용 극대화를 달성하기 위해서는 보다 새로운 개념의 고효율 집광기술 개발과 설계, 그리고 이용기술의 최적화가 필요하다. 이런 고효율 고집광 기술의 대표적인 것이 Dish형 태양열 집광시스템으로서 시스템의 성공적인 운전을 위해서는 반사경과 흡수기의 설계가 매우 중요하다.

따라서 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. 초점지역에 나타나는 플럭스 분포

를 측정하여 특성을 파악함으로써 흡수기의 최적화된 직경을 결정할 수 있고 흡수기와 집광기의 최적설계를 위한 중요한 자료가 된다.

본 연구에서는 설계된 초점지역에 반사타겟을 설치하고 CCD 카메라를 이용하여 각각의 반사판에 대한 플럭스 분포를 측정하였다. 모듈별 그리고 반사판 각각에 대한 플럭스를 측정 후 분석하여 집광된 플럭스 분포의 형상과 크기를 관찰하였고 초점반경에 따른 에너지비율을 평가하였다. 초점거리에서 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. Flux Mapping 시스템

2.1 실험장치

그림 1은 한국에너지기술연구원에 설치된 태양열 집광시스템과 실험을 위한 촬영순서를 보여주는 그림이다. 그림 1의 우측에 보이는 것처럼 집광기에 부착된 반사판은 10개의 모듈로 이루어져,

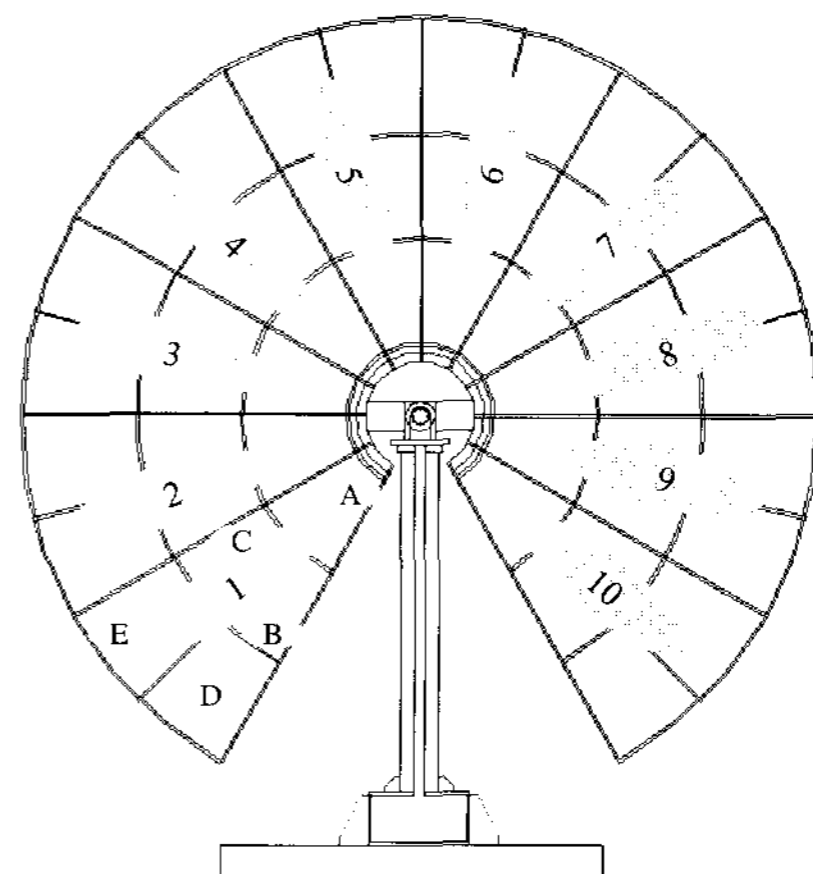
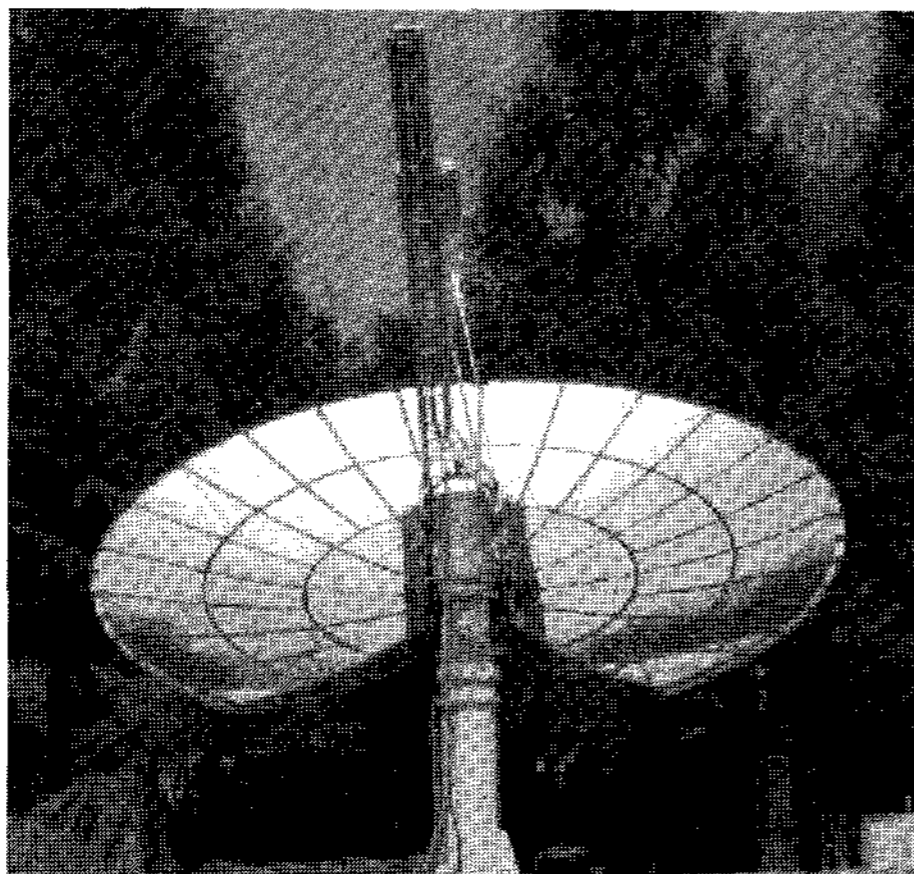


그림 1. KIERDISH II 시스템과 촬영순서

모듈별 5개씩 총 50개의 사다리꼴 형상의 반사판으로 구성되었다. KIERDISH II 집광 시스템의 초점지역 플럭스 분포를 측정하기 위한 Flux Mapping 시스템의 개략도는 그림 2와 같다.

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°C에 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

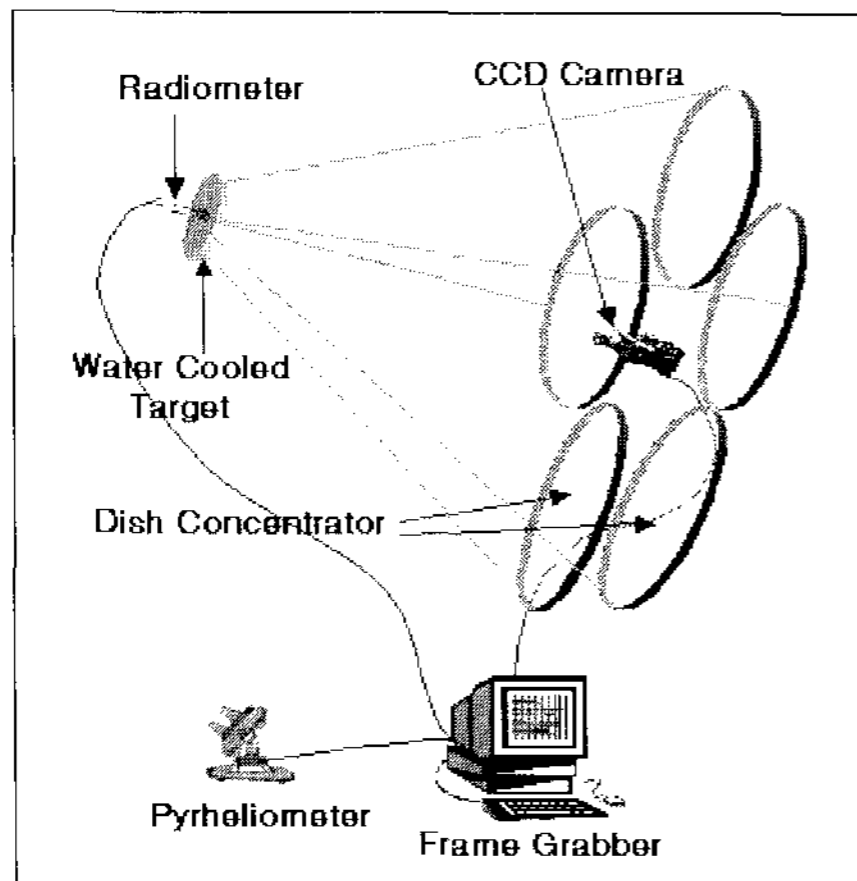


그림 2. Flux Mapping 시스템의 개략도

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 이미지들은 컴퓨터에 장착된 8bit frame grabber 카드를 사용하여 디지털화되고 intellicam사의 이미지 캡처 프로그램에 의해서 순간 촬영 이미지를 저장하였다.

2.2 이미지 분석도구

실험순서는 먼저 CCD 카메라의 특성 파악을 위한 카메라의 보정실험이 선행되어야 하고 그 후에 각 반사판에 의해 형성된 이미지를 촬영하게 된다. 그리고 촬영된 이미지는 이미지 분석도구를 이용하여 분석이 진행되었다.

CCD 카메라에 의한 플럭스 분포의 촬영은 직달일사량의 변화가 거의 없는 맑은 날을 선택하여 행하였으며 KIERDISH II 시스템이 10모듈, 총 50개의 반사면으로 이루어졌기 때문에 각각의 반사면에 대하여 플럭스 분포를 측정하였고 모듈별로도 측정이 이루어 졌다. 각 이미지의 촬영중에는 선택된 반사판 이외의 반사판은 이미지가 형성되지 않도록 가리개로 빛을 차단하는 것이 필수적이다.

촬영된 플럭스 분포 이미지를 분석하기 위해서는 이미지 분석 도구 프로그램이 필요한데 본 연구에서는 IDL(Interactive Data Language)를 사용하여 플럭스 분포를 분석하였다. IDL 프로그램은 공학용 데이터 처리 언어로서 다양한 데이터 입출력과 수많은 수학/통계학 데이터 처리 라이브러리, 그리고 2D, 3D, Volume Display, Animation 등을 쉽게 구현할 수 있는 통합 환경이다. IDL은 Command line 처리가 가능하므로 이미지 분석을 순서대로 Command line에서 처리할 수가 있으나 반복과정이 복잡하므로 프로그램 형식으로 구현해서 실행하는 것이 보다 편리하고 능률적이다.

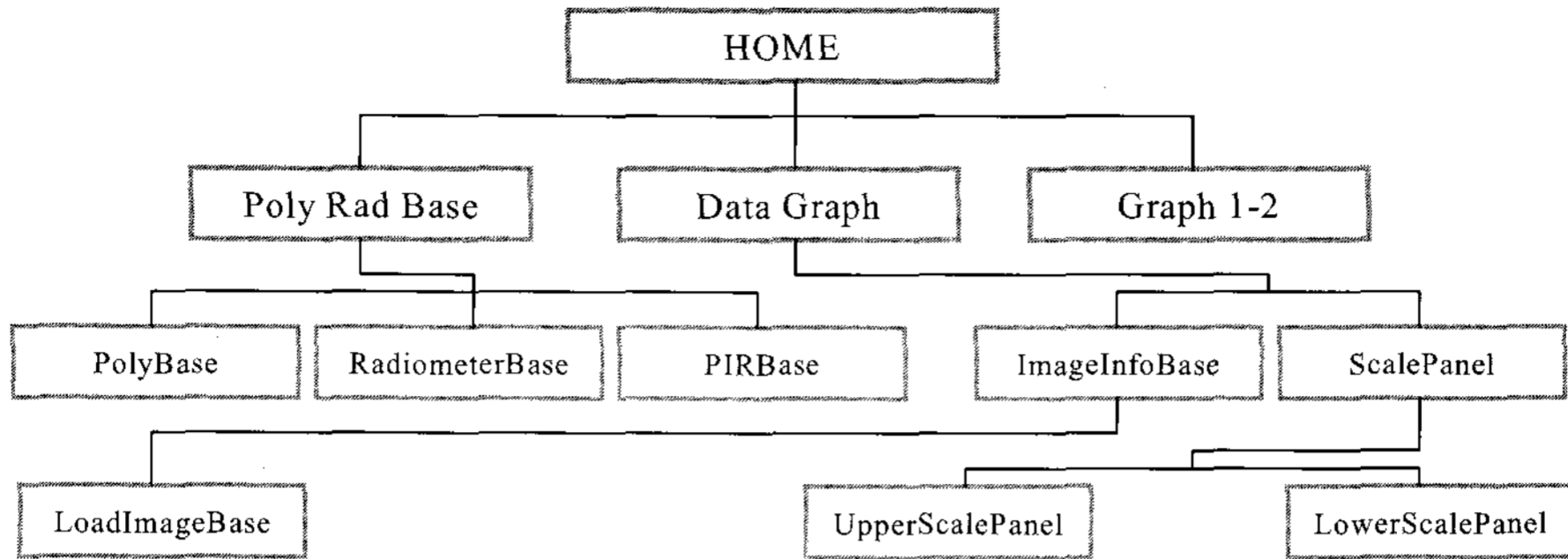


그림 3. Structure of image analysis program

그림 3은 플렉스 이미지를 분석하기 위해 작성된 프로그램 구조를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것처럼 Base를 세부적으로 나누었고 하부에는 PolyBase, RadiometerBase, PIRBase, ImageInfo-Base와 ScalePanel 등으로 구성되었다. PolyBase는 CCD 카메라의 특성을 파악하는 과정에서 보정에 사용되는 6차 다항식의 계수값들에 관계된 것으로 그림 4의 왼쪽상단의 P0~P6이라고 표시된 부분이다. RadiometerBase는 radiometer의 gray level과 관계되고 PIRBase는 반경거리에 따른 에너지 비율측정에 관한 내용이다. ImageInfoBase는 초기 화면상에 표현되는 저장된 이미지를 불러들이는 메시지에 대한 것이며 ScalePanel은 화소의 거리측정에 대한 내용을 포함하고 있다.

그림 4는 위와 같은 구조로 짜여진 프로그램을 IDL 내에서 실행했을 경우 나타나는 플렉스 분포 이미지 분석 프로그램을 보여주고 있다. 프로그램을 간단히 설명하면 CCD 카메라로 촬영한 이미지는 Load Image라는 버튼을 클릭하면 이미지 파일이 속한 폴더로 이동하여 이미지를 그림 4에 보이는 것처럼 좌측 창에 이미지가 나타난다. 그 다음에는 Scaling distance라는 곳에 이미지의 실제 거리를 표시하고 나서 Measure distance라는 버튼을 클릭하면 Scale factor에 1m 당 픽셀의 수가 나타난다. 좌측 상단에 보면 P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6가 보이는데 이것은 카메라 보정 실험을 통하여 결정되는 상수들이다. Measure gray level 버튼 밑에 있는 Radiometer라는 곳에 Radiometer에 의해 측정된 Intensity를 표시하고 Measure gray level 버튼을 클릭하면 Intensity Scale factor라는 곳에 gray level 당 Intensity가 표시된다. 이렇게 radiometer에서 측정된 에너지를 각 화소에 적용하여 각 화소당 가지고 있는 에너지량을 구하게 된다.

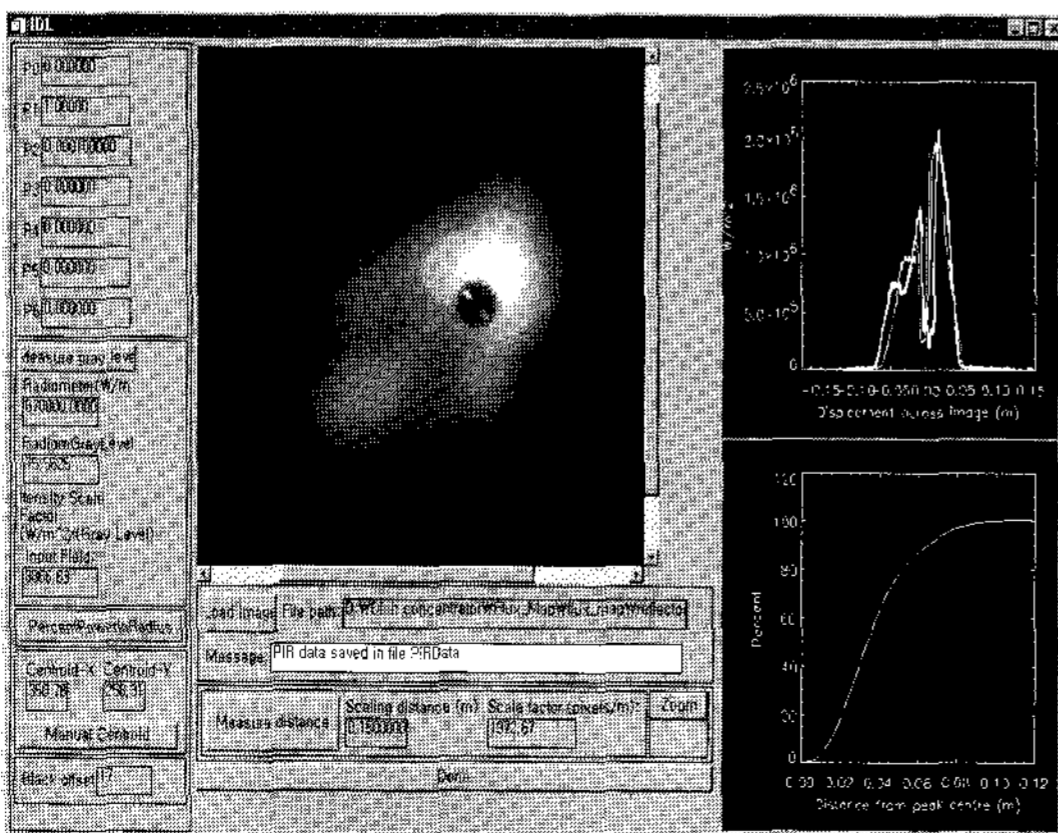


그림 4. IDL window for image analysis

3. 결과 및 분석

3.1 플렉스 분포

그림 5에서 그림 7까지는 선택된 3개의 반사판 모듈, 즉, 3, 5, 9번째 모듈의 초점지역에 집광된

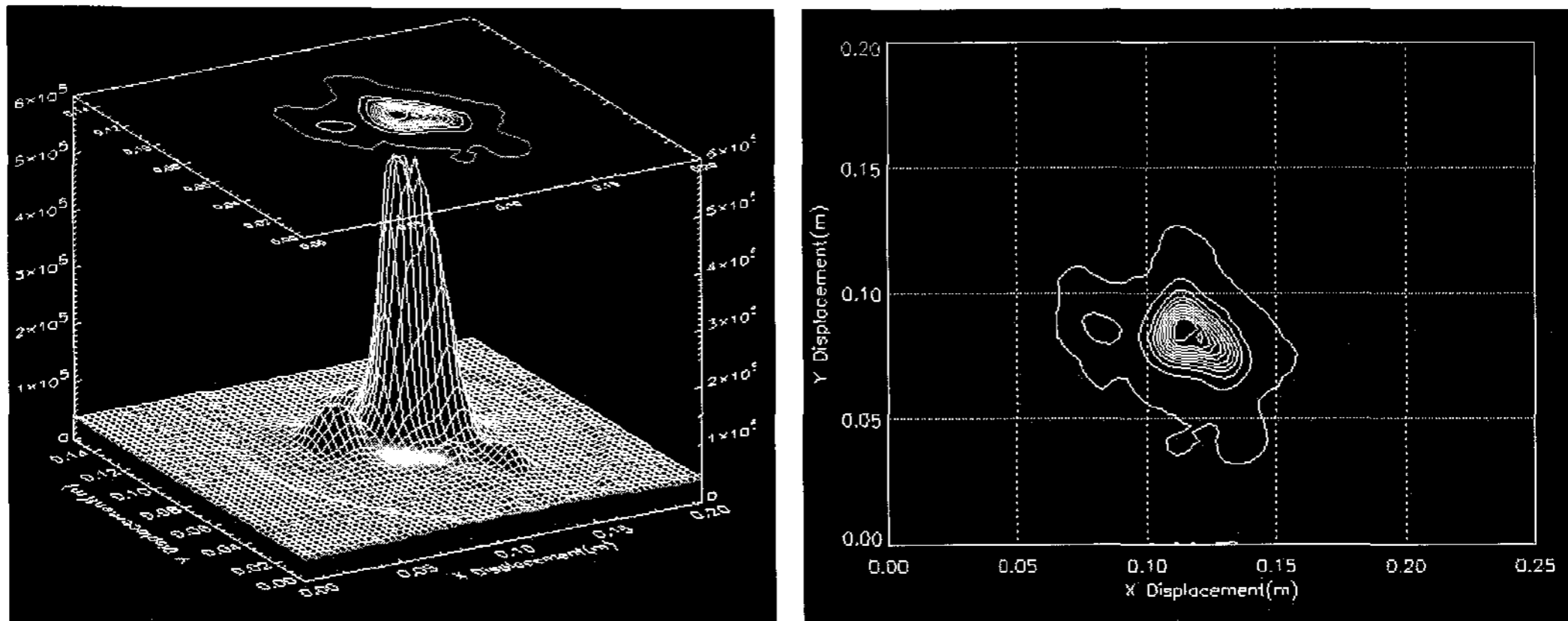


그림 5. Flux 분포의 contour & surface plot(반사판모듈3)

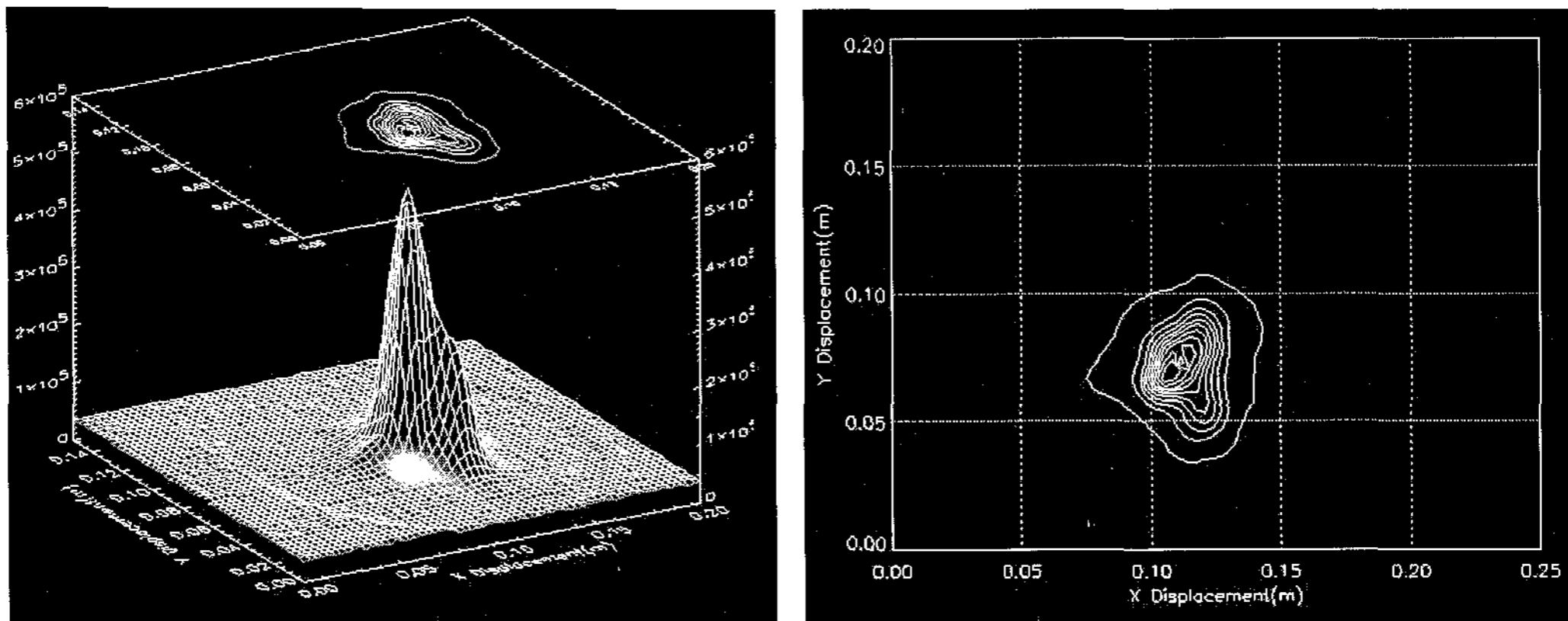


그림 6. Flux 분포의 contour & surface plot(반사판모듈5)

플럭스 분포에 대하여 플럭스분포를 surface plot 과 contour plot으로 보여주고 있다. 그림들을 관찰해 보면, 측정된 플럭스 이미지의 peak가 형성된 모습과 주위로 산란된 플럭스를 이미지로 보여주고 있다. 이런 주위의 형성된 미세한 플럭스들은 반사면의 오차에 의해 형성된 경우로 반사경 제조과정의 오차로써 포물면의 불완전하게 형성되었다는 것을 의미한다.

그림 6과 7의 contour 와 surface plot을 관찰해 보면 3번 모듈의 플럭스와 비교하였을 경우, 반사판 5번 모듈과 9번 모듈에서가 플럭스의 형성이 선형적인 것을 알 수 있다. 이는 집광된 플

럭스가 차지하는 면적이 작다는 것을 의미한다. 그러나 반사판 모듈9는 surface plot으로는 선명하게 나타나지 않지만 contour plot을 보면 하단에 미세한 강도의 이미지 성분들이 나타나는 것을 볼 수 있다.

그러나 전체적으로 초점이 상당 부분 한 곳으로 모여 Gaussian 분포를 보이고 있고, 플럭스가 차지하는 면적이 대폭 축소된 형상을 보여주었다.

집광시스템에서 빛을 모으고자 하는 흡수기의 동공에 정확하게 집광시켜 손실이 없도록 하는 것은 집광시스템의 운영에 있어 매우 중요하다. 여러개의 포물면 반사경으로 이루어진 집광시스템의

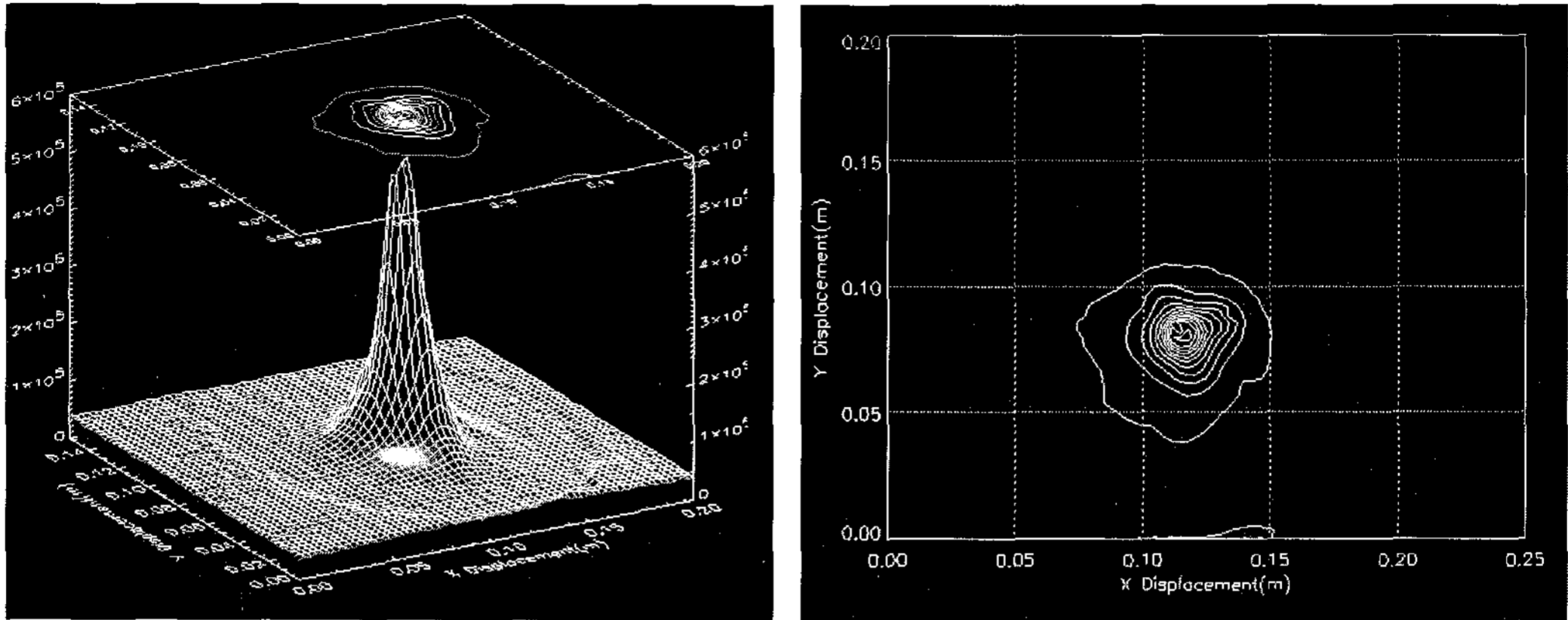


그림 7. Flux 분포의 contour & surface plot(반사판모듈9)

경우, 반사경 각각에 대하여 초점의 위치가 흡수기의 동공에 정확하게 위치하도록 조절하는 것은 어려운 문제이다. 그러므로 집광된 플럭스가 원형 흡수기의 중심을 기준으로 플럭스의 도심이 X, Y 방향으로 어느정도 벗어나고 있는지를 이미지 분석을 통하여 평가하였다.

그림 8에서는 반사판 모듈9의 A에서 E면의 플럭스분포를 보여주고 있는데 그림에서 보이는 것처럼 플럭스 분포가 완전한 Gaussian 분포를 보이고 있다. A면과 E면의 플럭스 분포는 Gaussian 분포뿐만 아니라 X, Y축 방향 모두 중심점에 완전히 일치하는 것을 볼 수 있다.

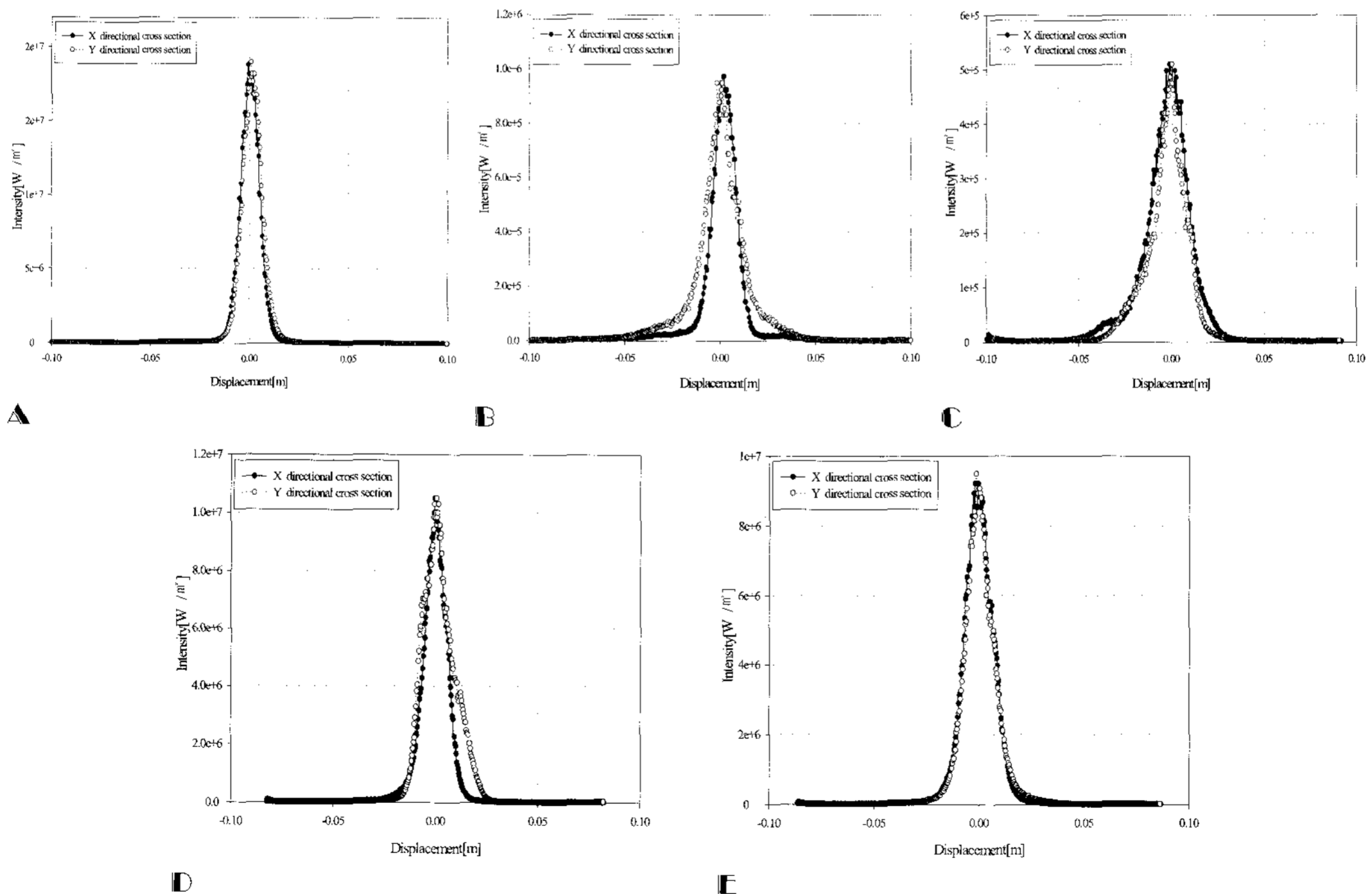


그림 8. 반사판모듈9 A~E면의 Flux분포

그림의 A를 보면 중심에 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있고 B면에 의한 플럭스분포 또한 측정된 플럭스가 중심에 대체로 집광시키고 있음을 알 수 있다. 그림 C는 반사판 C면의 플럭스 분포를 나타내는 그림으로 X, Y축방향으로 중심에 대체로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 D는 D면의 플럭스분포를 보여주고 있는데 중심에 집광이 이루어진 것을 알 수 있다. 그림 E는 E면에 의해 형성된 집광플럭스의 분포를 보여주고 있는데 보여지는 것처럼 X, Y방향 모두 매우 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

3.2 에너지포함 비율

집광시스템에서 흡수기의 크기를 결정하는 것은 매우 중요한 문제로서 흡수기의 동공이 크면 열손실이 크게 되고 너무 작으면 집광된 빛을 다 받아들이지 못하는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 초점의 중심점으로부터 전체에너지의 몇 %가 들어오는지를 평가함으로써 흡수기의 동공의 크기를 결정하게 된다.

그림 9는 집광된 Flux에 대한 반경안에서의 에너지포함비율을 나타내고 있다. 이는 흡수면 중심으로부터 반경 거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 들어오는지를 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 에너지포함 비율이란 반경거리에 따른 에너지 비율을 측정함에 있어 도심을 중심으로 에너지 비율을 평가 하는 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 중심으로부터 반경 거리에 따른 에너지비율을 알아내는 것이 매우 중요하다.

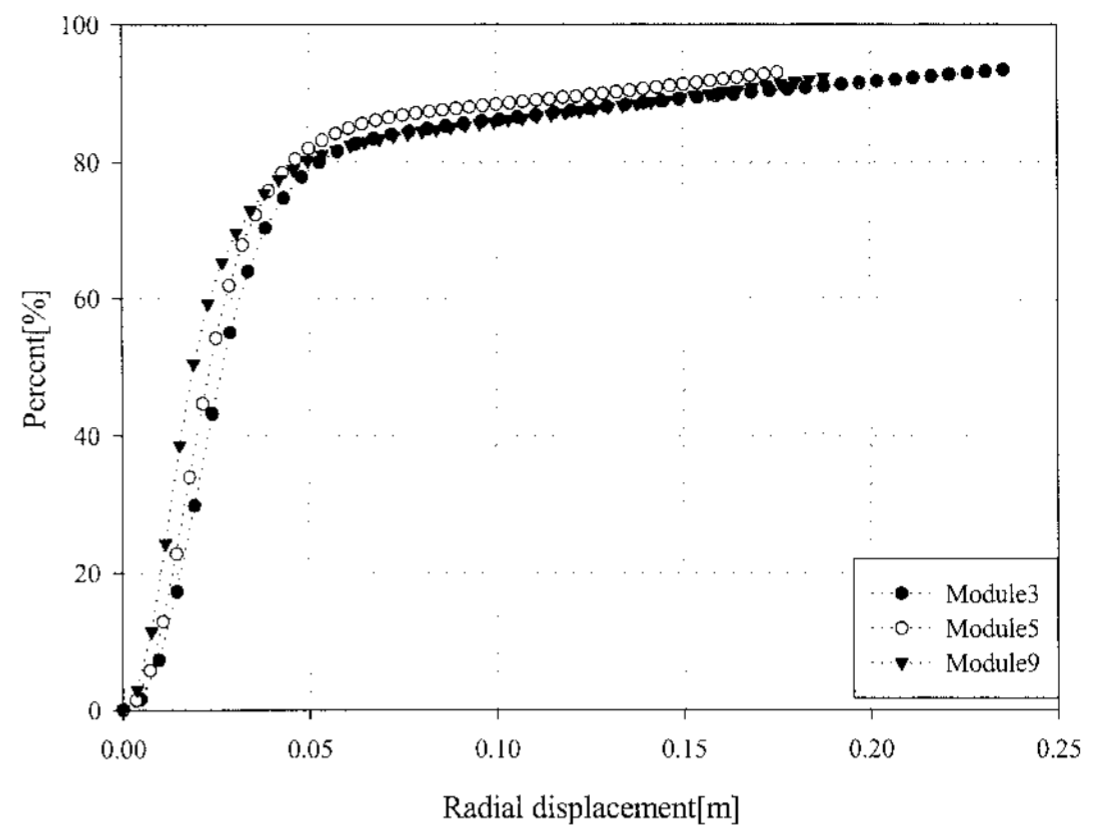


그림 9. Flux분포 반경안에서의 에너지포함비율

4. 결 론

본 연구는 반사면에 의해 형성된 플럭스 분포를 측정함으로써 각각의 반사면이 갖는 제작 및 설치상의 오차를 분석하여 반사면의 설계와 제작에 있어 최적치를 찾고자 하였다. 또한 이런 오차를 고려하여 흡수기의 최적화된 직경을 결정하고 흡수기 설치 위치를 선정하는데 필요한 자료로 기여하게 된다.

본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 세 개의 모듈별 플럭스를 측정된 결과 peak가 형성된 모습과 peak 주위의 산란에 의해 형성된 이미지가 나타나는데 이는 반사면 형상의 제작오차로 볼 수 있다. 대체로 모듈5와 9에서는 플럭스가 선형적으로 형성되었고 플럭스의 전체 면적도 모듈3과 비교하면 작은 결과를 나타냈다.
- (2) 모듈9의 각각의 반사면에 의해 형성된 플럭스를 측정된 결과 플럭스의 변위가 대체로 중심점에 일치하였는데 반사면에 의한 집광이 타겟의 중심에 정확하게 빛을 집광시키는 것으로 평가되었다.
- (3) 반경에 따른 차단에너지 비율 평가에서는 반사타겟의 중심에서 0.15m이내에 90%이상

의 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. 집광시스템의 흡수기를 설계하고자 하는 경우 본 연구와 동일한 방법으로 적용함으로써 태양열 집광시스템을 분석하는데 있어 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

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. 강용혁 외, Dish형 집광기 플럭스분포특성, 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집, 1999.