

碩士學位論文

Dish형 태양열 집광 시스템의 플럭스
분포에 관한 연구



濟州大學校 大學院

에너지工學科

玄 城 宅

2001년 12월

Dish형 태양열 집광 시스템의 플럭스 분포에 관한 연구

指導教授 千院基

玄城宅

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



玄城宅의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 信 印

委 員 姜 龍 燮 印

委 員 千 院 基 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

Study on Flux Distributions Produced by Dish Solar Concentration System

Sung-Taek Hyun

(Supervised by professor Won-Gee Chun)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2001. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iv
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구 동향	2
3. 연구 목적 및 연구 내용	5
II. 이론적 배경	7
1. Dish형 집광기의 집광 이론	7
1) 집광기 초점길이 및 립각	7
2) 집광비	8
3) 각수용함수	9
4) 차단 에너지	13
5) 광학 오차	13
2. Flux Mapping	14
1) 음영장 수정	14
2) Radiometer 이미지 보정	15
3) 에너지량 측정	16

4) 화소의 크기	17
III. 실험 장치	19
1. Dish형 태양열 집광 시스템	19
1) 본체	19
2) 구동 장치	20
3) 제어 장치	21
2. Flux Mapping 시스템	21
1) 반사 타겟	23
2) Radiometer	24
3) CCD 카메라	24
4) Frame grabber	25
5) Neutral Density Filter	26
3. 이미지 분석 도구 IDL(Interactive Data Language)	26
IV. 실험방법 및 절차	29
1. CCD 카메라의 보정(Calibration)	29
2. 초점 지역 촬영	33
3. 촬영 이미지 분석	34
V. 실험결과 및 고찰	36
1. 집광 플럭스 분포 특성	36
1) 단일 반사경의 집광 플럭스 분포	36
2) 집광기의 집광 플럭스 분포	45
3) 집광 플럭스의 변위	50
2. Intercepted Energy 분포 특성	53

1) Intercepted Energy 비율(PIR)	53
2) 집광비(Concentration Ratio)	56
3) Intercepted Energy	56
 VI. 결 론	 58
 참 고 문 헌	 60
 Appendix	 62



LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Schematic of paraboloid	7
Fig. 2.2 Parabolic dish reflector	10
Fig. 2.3 Angular acceptance function for parabolic dish with flat receiver	12
Fig. 2.4 Image for calibration of radiometer image	16
Fig. 2.5 Image for scale measurement of pixels	18
Fig. 3.1 Parabolic dish concentration system	19
Fig. 3.2 Flux mapping system	22
Fig. 3.3 Arrangement of flux mapping equipments	23
Fig. 3.4 CCD camera and neutral density filters	25
Fig. 3.5 Structure of image analysis program	28
Fig. 3.6 Window for image analysis	28
Fig. 4.1 Schematic of experimental apparatus for camera calibration	29
Fig. 4.2 CCD camera response to filter transmission factor	31
Fig. 4.3 CCD camera response to calibrated light level	32
Fig. 4.4 Arrangement of reflectors	34
Fig. 4.5 Flux mapping procedure	35
Fig. 5.1(a) Flux cross sections of reflector 1 through x-direction	39
Fig. 5.1(b) Flux cross sections of reflector 1 through y-direction	39
Fig. 5.2(a) Flux cross sections of reflector 2 through x-direction	40
Fig. 5.2(b) Flux cross sections of reflector 2 through y-direction	40
Fig. 5.3(a) Flux cross sections of reflector 3 through x-direction	41
Fig. 5.3(b) Flux cross sections of reflector 3 through y-direction	41
Fig. 5.4(a) Flux cross sections of reflector 4 through x-direction	42
Fig. 5.4(b) Flux cross sections of reflector 4 through y-direction	42
Fig. 5.5(a) Flux cross sections of reflector 5 through x-direction	43

Fig. 5.5(b) Flux cross sections of reflector 5 through y-direction	43
Fig. 5.6 Contour plot of reflector 1 at focal length 2.17m	44
Fig. 5.7 Comparison of peak flux for 5 reflectors	44
Fig. 5.8(a) Flux cross sections of total reflector through x-direction	46
Fig. 5.8(b) Flux cross sections of total reflector through y-direction	46
Fig. 5.9 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.11m	47
Fig. 5.10 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.14m	47
Fig. 5.11 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.17m	48
Fig. 5.12 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.20m	48
Fig. 5.13 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.23m	49
Fig. 5.14(a) X-directional deviation of flux centroid from target center	51
Fig. 5.14(b) Y-directional deviation of flux centroid from target center	51
Fig. 5.15 X and y directional deviation of flux centroid from target center for concentrator	52
Fig. 5.16 Percent power within radius at target positions	55
Fig. 5.17 Percent power within radius from center and centroid at focal length 2.17m	55
Fig. A-1 Calibration graph of radiometer	62

LIST OF TABLES

Table 1 Intercepted energy and intercept factor for 5 reflectors	56
Table A-1 Coefficients of polynomial fit equation 2-12 to angular acceptance function, with $v_1 = \overline{\theta_1}\sqrt{c}$ and $v_2 = \overline{\theta_2}\sqrt{c}$	63



SUMMARY

Solar energy is one of the most promising energy resources on Earth and in space, because it is clean and inexhaustible. This is one of the reasons that we were interested in developing a solar-powered high efficient system which can be heated using thermal radiation from a solar receiver maintained at a high temperature by concentrated solar irradiation.

In order to utilize the solar energy at high temperatures, here we used a solar energy collecting system that mainly consists of a parabolic dish concentrator and a cavity receiver. For the system considered, it is essential to minimize thermal losses and maximize the energy density for the procurement of high temperature, high efficiency systems. In solar energy applications, parabolic reflectors are employed to concentrate incoming radiation onto a smaller receiver. This is why concentrators can reduce heat losses in thermal collectors.

The characteristics of the focal plane flux distributions produced by a dish solar concentration system were investigated to design and rightly position a cavity receiver. This deemed also very useful to find and correct various errors associated with a dish concentrator. The videographic flux mapping was used to investigate flux distributions in the focal plane located at the aperture of the cavity receiver.

The concentrator used in this study consists of 5 parabolic reflectors, each with 1m in diameter, which are made of 3mm thick back-silvered glass. The nominal focal length of the concentrator is 2.20m.

In this study,

1) We estimated the flux density distribution on the target placed at 2.11m, 2.14m, 2.17m, 2.20m, 2.23m, 2.26m from the dish vertex to experimentally determine the focal length. It is observed that the actual focal point exists when the focal length is 2.17m with a maximum flux density of 1.89 MW/m^2 .

2) By evaluating the position of flux centroid, it was found that there are errors within 2cm from the target center. This validates that our system is well designed and suitably arranged.

3) The total power contained within a given radius from the center of the target is measured to design optimum size of a receiver. It is measured that 90% of the incident radiation is intercepted with a radius of 0.06m.

4) The area concentration ratio normalized to 800 W/m^2 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%.



I. 서 론

1. 연구배경

1, 2차 석유 파동을 겪으면서 지금까지 줄곧 대체 에너지 개발의 중요성이 강조되어 왔으나 그 이후의 저유가 시대에 따른 영향으로 실질적으로 대체 에너지의 개발을 위한 투자는 매우 미진한 실정이었다.

기후변화협약에 따른 온실가스 배출억제, 화석에너지 사용제한, 에너지/탄소세 도입, 에너지 효율 기준 강화 등에 대한 국제적 압력이 경제 성장의 제약요인으로 등장하고 있으나, 에너지 다소비형 산업구조로 형성되어 있는 우리나라의 경우 이산화탄소 등 온실 가스 배출량은 지속적으로 증가될 수밖에 없어 우리 경제에 엄청난 영향을 초래할 것으로 보인다.

최근 국내 여건을 보면 국제유가상승에 따른 무역수지 악화와 IMF 외환위기 이후 에너지 소비가 다시 증가세로 전환하여, 외환위기 직전인 1997년 수준을 완전히 회복 그 수준을 넘겼고, 국내의 온실가스 배출량은 세계 배출량의 1.8%로 세계 11위에 해당한다.

이런 여러 국내, 외 여건과 지구 온난화 문제 등 주변 환경이 크게 변하고 있으며, 특히 기후변화협약에 따른 온실가스 저감을 위하여 청정 에너지이며 환경 친화적인 대체 에너지의 개발이 크게 주목받고 있다.

태양열을 이용한 에너지 시스템들은 기존의 연료를 대체할 다양한 신 재생 에너지들과 함께 매우 경쟁력이 있는 분야중의 하나로 평가받고 있다. 일반적으로 태양 에너지의 이용 분야는 집열 온도에 따라 저온(100℃ 이하), 중온(100~300℃), 고온(300℃ 이상) 활용 분야로 세분된다. 우리나라의 경우, 지금까지 가정에 온수를 공급할 목적으로 저온 활용 분야인 자연형 태양열 온수급탕 분야에 개발이 집중되어 실용화되었을 뿐, 중·고온 이용 분야의 연구 수준은 선진국에 비해 기초 단계에 머무르고 있는 실정이다. 이러한 온수기들은 65℃ 이상으로 온도가 올라갈수록 외기로의 열손

실이 크기 때문에 집열 효율이 저하되어 냉방이나 산업 공정열, 또는 태양열 발전을 위한 중·고온을 얻고자 할 경우는 적합하지 않다. 그러나 집광형 집열기는 100 ~ 500℃의 온도를 얻을 수 있으며, 에너지의 효율적 이용과 환경 보전의 요구에 매우 잘 들어맞고 있기 때문에, 선진국들의 경우 태양열 발전 및 산업 공정열 등에 널리 보급되어 활용되고 있다. 이런 태양열 발전 및 산업 공정열의 이용 분야는 주로 고집광 시스템을 이용하게 되는데 고집광 시스템중의 하나가 Parabolic Dish형 태양열 집광 시스템이다.

Dish형 태양열 집광 시스템은 미국에서 가장 활발하게 연구가 진행되어 태양열 발전의 경우 이미 상용 운전을 하고 있으며, 독일, 일본, 호주, 프랑스 등에서도 매우 활발한 연구가 진행되고 있으나, 국내의 경우 전력 생산 및 산업 공정열의 실용화 단계에는 미치지 못하고 있는 실정이다.

Dish형 집광 시스템은 크게 집광부와 집열부의 두 핵심 부분으로 나눌 수 있는데, 집광부에 속하는 집광기(concentrator)는 태양 빛을 반사경을 이용하여 초점 지역으로 집광시킬 수 있도록 설계되어야 하며, 집열부에 속하는 흡수기는 집광된 태양광속이 최대한 잘 흡수 될 수 있도록 설계되어야만 한다. 집광부로부터 반사된 빛이 초점 지역에 형성되는 집광 분포에 따라서 흡수기의 설계가 달라질 수 있으므로 초점 지역에서의 집광 플럭스의 특성을 정확하게 파악해야만 흡수기의 설계가 가능하다. 그러나 외국의 경우 집광 시스템들마다 집광부의 형태가 매우 다르고, 복사 플럭스의 형상, 크기 및 플럭스 밀도는 입사 일사량, 집광기의 제작에 따른 오차 및 기타 변수 등에 의해 변하기 때문에, 이러한 흡수기의 설계 기술은 외국에서 상용화된 흡수기의 외형만을 모방해서 설계하기란 불가능하다. 이런 이유로 인해 집광 시스템의 초점 지역에서의 플럭스 분포 특성을 측정, 관찰하는 것은 집광기의 설계 오차를 찾아낼 수 있을 뿐만 아니라 흡수기 설계를 위해 매우 중요하다고 할 수 있다.

2. 연구 동향

집광 시스템은 공동 흡수기에서의 열손실과 반사경에 의한 집광도에 의해 성능이

크게 좌우된다. 반사경에서 반사된 태양 복사 플럭스의 특성 분석과 흡수기에서 발생하는 열손실 현상에 대한 수많은 실험적, 수치적 해석들이 이루어졌다. 그 중에서도 초점 지역에서 집광기로부터 반사된 복사 플럭스를 정확하게 해석하여 흡수기 개구부의 크기를 최적으로 결정함으로써 열손실을 대폭 줄이고, 집광 시스템의 성능을 향상시키기 위한 많은 시도들이 있었다.

1981년 Harris 와 Duff는 기본적인 네 가지 형태의 집광기에 의해 생성되는 플럭스 분포에 대한 계산식을 제공했는데, cone 형태의 반사경에서의 오차, 반사경의 기계적인 결합 부분, 선형 초점을 가지는 집광기에 의한 플럭스 분포, 그리고 점 초점을 가지는 집광기의 플럭스 분포를 주로 다루었다. 여기서는 반사경의 곡면은 완벽할 수가 없으며, 수많은 포인트들이 모여 만들어진 타겟의 플럭스는 실제 표면에 대해 확률밀도함수의 적분으로 나타낼 수 있음을 언급하였다.

Abdurakhmanov(1994)는 빛을 흡수할 수 있는 평면에 태양 복사 플럭스의 밀도를 나타내었고, 복사 플럭스에 대한 밀도를 표현하기 위해 곡면의 반사율을 완벽한 것으로 가정하였다. 이 연구는 실험이나 수치해석이 없이 진행된 분석이었으며, 그 결과 태양 복사의 계산량은 초점이 모아지는 평면상에 비가우시안 분포를 보였다.

Jones 와 Wang(1995)은 정형화된 태양 복사의 밀도 분포에 의해 Sunshape를 Uniform model, Empirical model, 그리고 Gaussian model 각각의 플럭스 분포로 제시, 비교하였다. 결과에 의하면, Uniform model은 일반적으로 매우 높은 집광을 보여 주었으며, Empirical model은 낮은 집광을 보였다. 그리고 Gaussian model은 이 두 모델의 중간 정도였다. 집광 시스템의 완전도는 태양복사의 표준편차와 집광기의 각도에 대한 표준오차를 고려하여 계산되었다.

Disayed, Fathalah 그리고 Al-Rabghi(1995)는 비디오 카메라 없이도 흡수기 표면에서의 플럭스 밀도 분포를 측정할 수 있는 기술을 제안했는데, 이 실험에서는 평판 흡수기와 초소형의 태양열 센서가 이용되었다. 검출용의 측정장치와 추적장치가 제조되었으며, 이들을 제어하기 위한 컴퓨터 코드가 개발되었다. x축과 y축 평면 좌표의 grid point 상에서 플럭스 밀도 분포를 측정, 표현하기 위하여 "TOWER" 라는 소프트웨어가 사용되었고, Elsat 와 Fathalah가 만든 수학적 모델과 비교되었다.

Jenkins, Winston, Bliss, Bliss 그리고 Bingham(1996)은 집광에 있어 96,000 suns 까지가 열역학적인 한계임을 설명하였다. Nonimaging optics의 원리를 이용하여,

50,000개의 sunlight를 집광시킬 수 있는 집광기를 개발했다. 1단계의 image concentrator와 이상적인 2단계의 nonimaging concentrator로 구성되어 있는 2단계 집광 시스템을 이용하여 성취할 수 있는 집광비는 거의 열역학적 한계치에 근접할 수 있음을 보여주었다.

Pirmatov, Riskiev 그리고 Segatove(1998)등은 초점 평면상에서의 플럭스 밀도를 계산할 수 있는 정확한 이론식을 제안했다. 반사 표면에 입사된 비규칙적인 복사 플럭스를 초점 평면상에서 복사 vector를 계산하는데 사용하였다.

Schubnell, Keller 그리고 Lmhof는 태양열 집광 시스템의 특성을 파악하는데 보름달이 매우 적합한 복사 광원임을 보여주었다. 달의 플럭스 밀도는 태양의 밀도에 비해 약 10^{-6} 정도 작기 때문에, 종이가 초점 평면에서 타겟으로 사용될 수 있으며, 이미지 분석 시스템을 사용하여 초점의 명암도를 분석함으로써 상대적인 밀도 분포를 결정하는 것이 가능하다. 이런 간단한 방법을 이용하여 초점의 크기, 모양, 평균 플럭스 밀도, 그리고 순 플럭스 등을 쉽게 얻을 수 있었다. 하지만 보름에만 이 방법이 응용될 수 있었다.

Johnston은 몇 편의 논문에서 CCD 카메라를 이용한 videographic flux mapping 기법을 적용함으로써 태양 집광 장치의 초점지역에서의 플럭스 분포의 특성 연구했다. 호주 국립 대학교의 $20 m^2$ 의 Dish와 $400 m^2$ 의 Big Dish 에 대한 flux mapping은 집광기의 성능을 매우 정확하게 파악할 수 있음을 보여주었다.

대부분의 연구에서 태양열 집광 장치의 초점지역에서의 플럭스 분석 기술들은 대부분 Ray Tracing 법을 이용한 전산 해석이며, 실제로 설치된 집광 시스템에서 직접 측정에 의해 실험된 연구는 Johnston이나 Schubnell에 의한 논문을 제외하면 거의 미진한 상태이다. 더욱이 Schubnell, Keller 그리고 Lmhof의 논문은 태양을 대신하여 보름달을 광원으로 하고 있어, 실제 태양을 광원으로 했을 때에 비해 어느 정도의 신뢰성이 있는지는 미지수이다. 이렇게 실측에 의한 연구가 부진한 요인은 고집광기를 이용하는 연구가 넓은 범위에 걸쳐 수행되지 않은 채 태양열이라는 한정된 분야에서만 연구되었고, Ray Tracing을 이용한 플럭스 분포의 수학적 모델이 대부분 흡수기의 에너지 분포에 대한 평가만을 위한 것이었기 때문이다. 따라서, 고온으로 집광된 초점 평면에서의 플럭스 분포를 실험적으로 측정하여 플럭스 분포에 관한 해석기술을 정립

시킨 경우는 매우 미흡하며, 앞으로 상당한 실험적 연구를 해야할 것으로 판단된다.

3. 연구 목적 및 연구 내용

본 연구의 목적은 Dish형 태양열 집광기로부터 반사된 태양 빛이 모이게 되는 초점 지역을 CCD 카메라로 촬영한 뒤 videographic flux mapping 기법을 적용함으로써 초점 지역에서의 집광 분포의 특성을 파악하는 것이다. 초점 지역에 형성되는 집광 분포를 분석하는 것은 집열부를 설계하고, 반사경에서의 제작 오차를 찾아내는데 있어 가장 중요한 단계이다. 따라서 플럭스 분포 특성을 정확하게 파악하는 것은 flux mapping을 하는 가장 큰 목적이라 하겠다. 이러한 태양열 집광 시스템의 초점지역에서의 플럭스 분포(flux distribution)를 측정하는 방법 중의 하나가 CCD(Charged Coupled Device) 카메라를 사용하여 초점 평면을 촬영하고, 그 이미지를 분석하는 방법이다.

본 논문은 첫째로, 초점 지역에 설치된 반사 타겟의 위치를 일정 간격으로 움직이면서 반사경 각각 및 전체에 대한 실제 초점 거리를 측정하였다. 이것은 반사경 전체의 이론적인 초점거리에 위치되어 있는 흡수기를 실제 초점거리의 위치로 바로잡음으로써 보다 높은 집광비를 얻고, 열손실 또한 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 플럭스 분포의 형상을 관찰함으로써 각각의 반사경들이 가지고 있는 여러 제작상의 오차들을 찾아냄으로써 보다 정확한 반사경을 만드는데 중요한 자료로 활용할 수 있다.

둘째로, 플럭스 도심(centroid)의 위치가 반사 타겟의 중심으로부터 어느 정도의 오차가 있는지 평가함으로써 흡수기를 정확한 위치에 설치하는데 그 목적이 있다.

셋째, 실제 초점 거리에서 반경에 따른 에너지 비율을 평가함으로써 흡수기 개구부의 직경 및 형태를 결정할 수 있다. 이것은 흡수기를 최적으로 설계, 제작하는 것을 가능케 하며, 흡수기의 성능을 예측할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 흡수기 개구부의 형태는 다루지 않았으며, 단지 최적의 크기를 결정함으로써 광학적 손실을 최소화하는데 중점을 두었다.

넷째, 수광 면적에 비해 어느 정도까지 집광이 되는지를 집광비를 통해 나타내었

으며, 플럭스 이미지를 분석함으로써 반사 타겟에 의해 차단된 에너지의 양을 계산하였다. 이것은 시스템의 실질적인 성능 예측을 가능하게 하였다.



II. 이론적 배경

1. Dish형 집광기의 집광 이론

1) 집광기 초점길이 및 림각

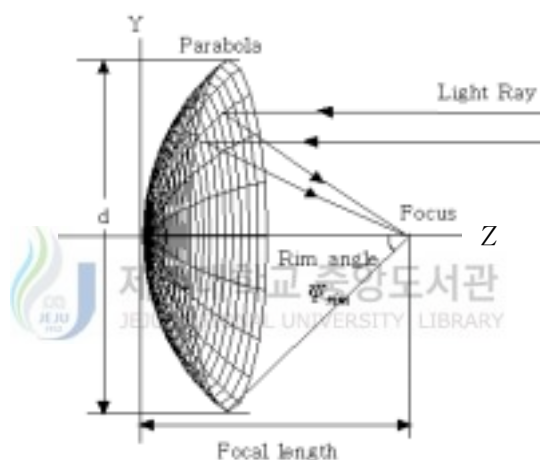


Fig. 2.1 Schematic of paraboloid

포물면은 Fig. 2.1과 같이 포물선 축을 중심으로 360°회전시켜 만들어진다. 포물면은 포물선 축에 수직한 태양 빛이 초점을 관통하여 표면으로부터 반사하게 된다. 포물선형 dish는 포물면 일부분이 잘려나간 형상이고 직각 좌표계에서 다음과 같이 표시된다.

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (2-1)$$

x, y는 개구부 면적에서의 좌표계이고, z는 포물면 대칭축에 평행한 정점으로부터 거리이고 f는 초점길이를 나타낸다.

초점길이 대 직경비(focal-length-to-diameter ratio), f/d 는 포물면의 형상과 상대적 위치를 정의한다. Fig. 2.1은 이러한 형상을 림각(rim angle), ψ_{rim} 에 의해 묘사하고 있다. ψ_{rim} 은 포물선 축에서부터 포물면이 잘려나간 가장자리까지 초점에서 측정된 각을 말한다. f/d 와 림각, ψ_{rim} 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f/d = \frac{1}{4 \tan(\psi_{rim}/2)} \quad (2-2)$$

예를 들면 45°의 림각을 갖는 포물면은 f/d 가 0.6을 갖는다. 림각, ψ_{rim} 이 감소함에 따라 f/d 는 증가한다.

2) 집광비



Dish형 집광기는 태양빛을 집광하는 집열기이다. 즉, 집광기는 커다란 개구부를 통해서 태양 에너지를 수집하고 이러한 에너지를 집광기 면적에 비해 작은 면적을 갖는 흡수기로 반사시켜 흡수기에서 반사된 태양광을 열에너지로 전환 시킨다. 유용 에너지를 최대화하기 위해서 집광기의 개구부 면적은 커야 하고 흡수기 개구부의 면적은 가능한 한 작아야 한다.

흡수기 개구부 면적이 집광기 개구부 면적에 비해서 줄어들 수 있는 정도를 기하학적 집광비라고 하고 다음과 같이 표현된다.

$$CR_g = A_{app}/A_{rec} \quad (2-3)$$

그러나 기하학적 집광비를 증가시키는 것과 가격을 줄이는 것 사이의 관계는 반비례한다. 왜냐하면 집광기의 정확도와 집광기의 가격 사이에는 직접적인 상관 관계가 존재하기 때문이다.

위에서 정의한 기하학적 집광비는 태양광 플럭스가 흡수기 개구부 면적에 균일하게 분포될 때 정의되는 태양광 플럭스의 이상적 집광도의 평균 측정치이다. 실제 집광도는 균일하게 분포되지 않고 흡수기 개구부 면적의 위치에 따라서 고 플럭스와 저 플럭스가 존재하게 된다. 일반적으로 플럭스 분포는 흡수기 중심에서 최대점을 갖고 가장자리로 갈수록 감소한다. 임의의 점에서 집광비는 광학적 집광비, CR로 정의되는데, 임의의 점에서의 플럭스 대 입사광 플럭스 $I_{b,n}$ 으로 정의된다.

$$CR = I / I_{b,n} \quad (2-4)$$

여기서 I 는 임의의 점에서의 플럭스 강도를 나타낸다.

3) 각수용함수

집광 시스템의 광학 분석은 computer ray-trace program 방법으로 실행된다(Biggs & Vittoe; Schrenk 1963). 이런 선 추적 방법은 많은 수치 정보를 제공할 수 있는 방법이지만 함수적 관계로 나타내기는 매우 힘들다. 함수적인 관계를 얻어내는 것은 최적의 설계를 하는데 매우 유용하다. 최근에, 평판형 흡수체를 가진 포물선형 dish 집광 시스템의 광 성능을 분석하는 해법이 O'Neill & Hudson에 의해 보여졌다. 광 성능을 분석하기 위한 방법은 복사원을 균일한 판이라 가정하게 된다. 대부분의 상황들은 복사원이 균일하지 않기 때문에 매우 복잡해진다.

포물선의 off축 변이를 설명하기 위해서, 각수용 함수(angular acceptance function)를 도입하는데, 이것은 반사체가 광학적으로 완전하다고 가정했을 때, 흡수기의 개구부에 도달할 수 있는 입사빔의 각 범위로 정의되어진다. 실제 집광기의 흡수체에 의해 차단되는 복사량은 각수용 함수, 광학적 오차 분포, 복사원의 각도에 따른 밝기 분포(angular brightness distribution)로 얻어진다.

각수용 함수의 형태는 반사체와 흡수체의 기하학에 의존한다. 회전 대칭성을 가진 집광기만을 고려하였으며, 실제적 적용에서는 집광비가 충분히 크고 (100 이상), 입사각 θ 가 너무 작아 $\sin \theta$ 가 θ 로 접근이 가능할 정도의 입사각인 경우만 고려하여 해석을 단순화시킬 수 있다.

Fig. 2.2에는 포물선형 dish을 묘사하기 위해서 이용되는 원통좌표를 서술했다. 광학

축은 z이고 dish에서의 p점은 다음 좌표를 가진다.

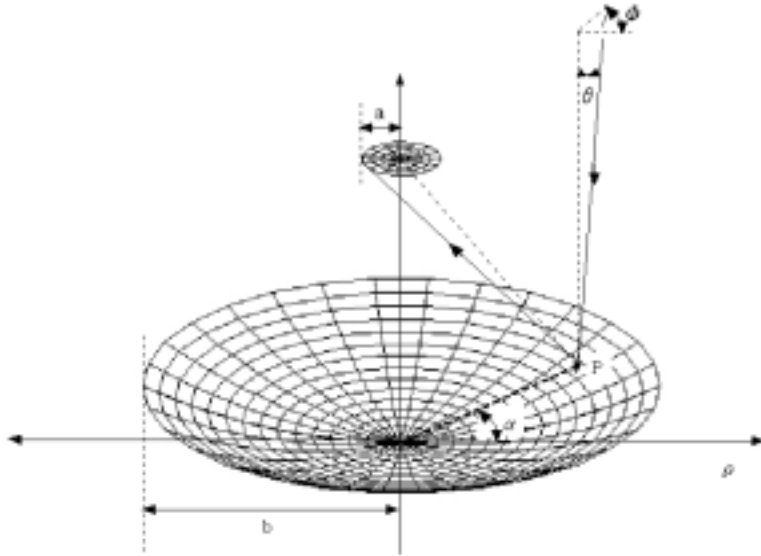


Fig. 2.2 Parabolic dish reflector

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$p = (\rho, \alpha, z = \frac{\rho^2}{4}) \quad (2-5)$$

초점길이 f는 1이다. p로의 입사선을 고려하면, 천정각 θ , 방위각 ϕ

$$f_p(\theta, \phi, \rho, \alpha) = \begin{cases} 1, & \text{if ray reaches receiver} \\ 0, & \text{if ray does not reaches receiver.} \end{cases} \quad (2-6)$$

dish에서의 수용각 함수 $f(\theta, \phi)$ 는 개구부 위의 점함수 f_p 의 평균이다.

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b d\rho \rho \int_0^{2\pi} d\alpha f_p(\theta, \phi, \rho, \alpha) \quad (2-7)$$

광학축에 대한 회전 대칭은

$$f_p(\theta, \phi, \rho, \alpha) = f_p(\theta, \phi + \gamma, \rho, \alpha + \gamma) \text{ for any } \gamma \quad (2-8)$$

$\gamma = -\alpha$ 이다. $\beta = \phi - \alpha$ 라 놓고 식 2-7에서 α 에 대해서 적분하면, 식 2-7이 다음과 같이 변화한다.

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b d\rho \rho \int_0^{2\pi} d\beta f_p(\theta, \beta, \rho, 0) \quad (2-9)$$

방위각의 대칭으로 예상한 것처럼, $f(\theta, \phi)$ 는 ϕ 에 의존하지 않는다.

$$f(\theta, \phi) = f(\theta) \quad (2-10)$$

함수 f_p 는 흡수기에 입사하는 복사량에 관하여 정의된다. 복사선의 방향이 바뀌더라도 진로가 변하지는 않는다. 따라서, 방사체처럼 흡수기를 다룰 수 있으며 흡수기에서 복사선이 방사하고 (θ, β) 방향에서 개구부의 p에서 반사된다.

$$f_p(\theta, \beta, \rho, \alpha) = \begin{cases} 1, & \text{if yes} \\ 0, & \text{if no} \end{cases} \quad (2-11)$$

방위각의 대칭으로 인하여 반경선 위에 있는 $f_p(\theta, \phi, \rho, \alpha)$ 의 값을 구하는데 충분하다는 것을 식 2-9에서 보여주고 있다. 평판형 흡수기의 경우 수용각 함수(angular acceptance function)를 계산하는 것은 방사체 위의 p점으로부터 보여지므로 더 복잡하고 흡수기는 비스듬히 보이며 타원형으로 나타난다.

평판형 흡수기를 가진 dish형 방사체의 수용각 함수(angular acceptance function) $f(\theta)$ 는 다음 식 2.121)와 같이 요약된다. 중간 영역에서 수용각 함수(angular

1) Paul Nendt and Ari Rabl, 1980, "Optical Analysis of Point Focus Parabolic Radiation Concentrators",

acceptance function)가 변수 $\theta\sqrt{c}$ 에서 다항 전개식에 의해 접근이 가능하다면 충분히

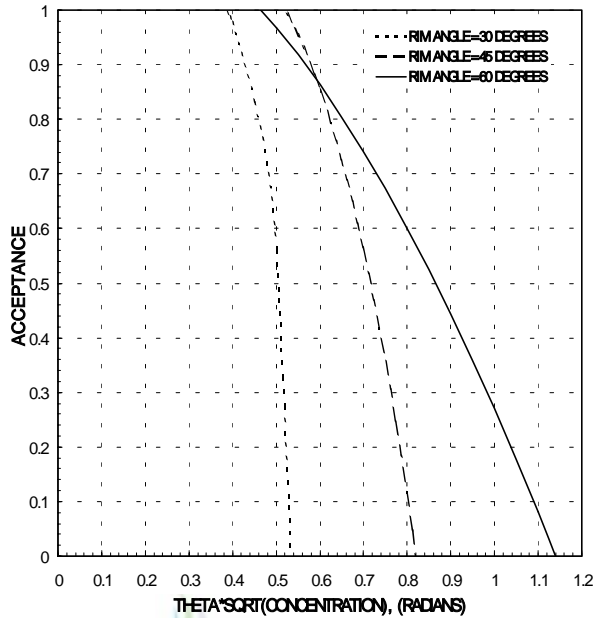


Fig. 2.3 Angular acceptance function for parabolic dish with flat receiver

정확하다고 할 수 있다.

$$f(\theta) \approx \begin{cases} 1, & \text{for } \theta \leq \bar{\theta}_1 \approx \theta_1 = \frac{\sin \phi \cos \phi}{\sqrt{c}} \\ a + b(c\theta^2) + c(c\theta^2)^2 + \dots & \text{for } \bar{\theta}_1 \leq \theta \leq \bar{\theta}_2 \\ \frac{2}{c} \tan \frac{\phi}{2} & \text{for } \theta \geq \bar{\theta}_2 \approx \theta_2 \end{cases} \quad (2-12)$$

계수 a, b, c, ...는 림각 ϕ 에 의존하며, Table A-1에 실려 있다.

$v_1 = \bar{\theta}_1 \sqrt{c}$, $v_2 = \bar{\theta}_2 \sqrt{c}$ 의 Table A-1에 나열된 각도 $\bar{\theta}_1$, $\bar{\theta}_2$ 는 각각 1, 0 값을 갖는 다항식의 각이다. 두 개의 계수는 Table A-1에서 주어지며 정확한 값이 요구된다. Table A-1은 림각 $\phi = 30^\circ$ 에서 $\phi = 60^\circ$ 까지 5° 씩 증가하면서 3항 전개식을 제공한다. 다른 림각의 값은 보간법에 의해 결정된다.

4) 차단 에너지

Dish형 집광기에 대한 광학적 계산으로부터 반사 타겟에 의해 차단된 에너지는 다음과 같다

$$\text{Intercepted energy} = \rho \gamma A I_b \quad (2-13)$$

I_b = 포물선형 반사체의 개구부에서의 입사 플럭스 (w/m^2)

A = 반사체의 개구부 면적

ρ = 반사체의 반사도

γ = 차단인자(Intercept factor)

5) 광학 오차

실제 작동되는 집광기는 포물면이 이론적 광학 근거에서 벗어나기 때문에 몇 가지 광학적 오차를 갖는다. 복사광들은 직선으로 입사하지만 반사각의 폭은 광학적인 오차에 의해 증가하게 된다. 광학적 오차들은 무질서(random)하고 이로 인하여 집광기에서 반사된 광은 초점에서 퍼지게 된다(spreading). 이러한 오차들을 줄이는 것은 집광기 가격을 증가시키는 결과를 낳는다. 가장 최적의 집광기라 할지라도 제조상의 오차로 인하여 이상적 곡선과는 편차를 보이게 된다. 이러한 편차를 기울기 오차(slop error)라고 하고 실제 표면 기울기가 이상적 표면 기울기와 비교해서 벗어난 각을 측정하게 된다. 기울기 오차는 표면에 걸쳐서 변하기 때문에 통계적으로 평균에서부터의 표준 편차에 의해 정의되고 단위는 mrad로 표현된다. 일반적으로 광학적 표면 오차가 감소할수록 할수록 집광기 가격은 증가하게 된다. 제조가 잘된 포물선형 dish 집광기 표면은 2.5mrads의 기울기 오차를 갖는다(약 0.15°).

광학 오차의 두 번째 원인은 반사 표면 자체에서 발생한다. 평행 광선이 반사 표면에 입사할 때 그 반사광은 산란될 수 있다. 반사광이 산란되는 정도를 nonspecular reflectance라고 한다.

두 개의 광학적 배열 오차로 인하여 초점의 위치가 달라지게 된다. 첫 번째 오차는 집광기에 대해서 흡수기를 배치하는데서 발생한다. 다른 하나는 추적 오차(tracking error)라고 하는데 집광기 축이 태양과 직접 향해 있지 않을 때 일어난다.

마지막 오차는 제조상의 오차를 줄임으로써 수정될 수 없는 태양의 외관상의 너비와 관련된다. 태양은 점원(point source)이 아니기 때문에 태양광선은 평행하지 않고 따라서 반사된 영상(image)은 대략 9.31mrads(0.533°)정도 퍼지게 된다. 이것을 sunshape이라고 한다. sunshape의 효과는 다른 광학적 오차들과 마찬가지로 반사된 태양광이 초점에서 발산하게 만든다.

2. Flux Mapping

Flux mapping이란 태양열 집광 시스템의 초점 지역에서의 플럭스 분포를 촬영하여 그 이미지를 분석함으로써 여러 특성들을 해석하는 기술을 말한다.

1) 음영장 수정

촬영된 이미지는 음영장(dark field)에 대한 수정을 해주어야만 집광기에 의해 집광된 플럭스 분포를 정확히 측정할 수 있다. CCD(Charge Coupled Device)가 완전한 어둠 속에 놓여지더라도 모든 CCD는 자연스럽게 화소들 사이에 축적된 전자를 방출하여 일정수의 gray level 값을 가진다. 또한, 반사경에 의해 집광된 것이 아니라 주위 환경의 산란 일사에 의해 형성된 gray level 값도 플럭스 이미지에 포함되어 있다. 이 두 요인은 집광을 시키지 않은 상태에서 반사 타겟을 촬영한 배경 이미지의 gray level 값으로 나타난다. IDL 환경에서 플럭스 이미지와 배경 이미지는 각 화소의 gray level 정보를 가지고 있는 2차원 array로 나타난다. 따라서 음영장에 대한 수정은 촬영된 플럭스 이미지의 array에서 배경 이미지의 array를 감산함으로써 성취할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_{11} - b_{11} & a_{12} - b_{12} & \cdots & a_{1n} - b_{1n} \\ a_{21} - b_{21} & a_{22} - b_{22} & \cdots & a_{2n} - b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} - b_{m1} & a_{m2} - b_{m2} & \cdots & a_{mn} - b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix}$$

수정된 이미지 = 촬영 플럭스 이미지 - 배경 이미지

2) Radiometer 이미지 보정

초점 지역의 반사 타겟 중앙에 위치한 radiometer는 그 면적이 전체 플럭스 이미지의 상당한 부분을 차지하고 있으며, 집광도가 특히 높은 지역에 위치하고 있기 때문에 플럭스 분포를 해석하는데 많은 오차를 발생하게 된다. 즉, 이 면적으로 들어오는 빛들이 반사가 이루어지지 않기 때문에 실제의 빛의 세기를 CCD 카메라에서 측정할 수 없다. 따라서 radiometer 이미지가 형성되어 있는 지역의 gray level을 주위의 gray level 값으로 보정하게 된다.

Fig. 2.4를 보면 집광된 플럭스 내에 radiometer의 이미지가 검은색으로 뚜렷하게 구분되고 있다. 이미지 분석 프로그램은 이미지 상에서 어느 한 개의 특정 화소를 선택할 수 있으며, 그 화소에 대한 정보 즉, gray level 값을 기억하게 된다. Fig. 2.4에서 radiometer 이미지의 중앙 부분의 특정 화소 한 개를 선택한다. IDL은 지정된 화소의 gray level 값을 기준으로, 설정된 최대·최소 범위 내의 gray level 값들을 가지고 있는 화소들을 찾아낼 수 있다. 이것은 지정된 화소를 기준으로 하여 반경 방향으로 검색을 시작하며, radiometer 이미지와 플럭스 이미지의 경계 부분에서 검색이 멈추게 된다. 주의할 것은 경계에 근접한 화소들은 플럭스 이미지 상에서 가장 낮은 gray level 값들을 가지고 있으므로, 범위를 설정하는 과정에서 이 외곽에 근접한 화소의 gray level 값보다 낮게 설정하지 않도록 해야만 정확한 radiometer의 이미지만을 선택할 수 있다. radiometer의 이미지에 해당하는 부분만을 정확히 선택했다면, 이 면적에 대해서 신뢰할 수 있는 gray level 값으로 보정해야 한다. Fig. 2.4에서 $P_1 \sim P_2$ 는 위치 $(x_1, y_1) \sim (x_4, y_4)$ 에서의 gray level 값을 나타낸다. 위치 선정에 있어 주의할 것은 radiometer 이미지의 영향을 받지 않으면서, radiometer 이미지에 가장 근

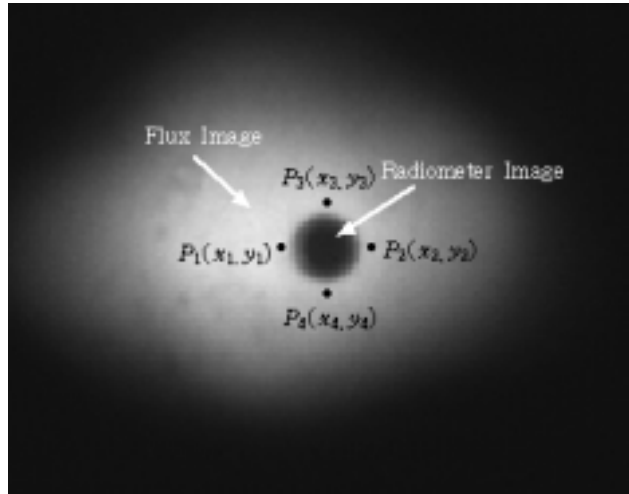


Fig. 2.4 Image for calibration of radiometer image

접한 곳에 마름모 형태로 지정해야 한다. 이 네 지점에서의 gray level 평균값은 radiometer 이미지가 차지하고 있는 면적에서의 gray level 값이라 할 수 있으며, 다음과 같이 $P_{radiometer}$ 로 나타낼 수 있다.

$$P_{radiometer} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4} \quad (2-14)$$

그리고 난 후, radiometer 이미지로 검색된 부분의 gray level 값을 네 지점의 평균 gray level 값으로 바꾼다.

3) 에너지량 측정

Radiometer가 반사 타겟의 중앙에 수직으로 설치되어 집광기(concentrator)로부터 집광되는 에너지의 절대값을 계속하여 측정하게 된다. 이 절대값을 기준으로 CCD 카메라에 의해 읽혀진 각 화소들의 에너지값을 상대적으로 측정할 수 있다.

$P_{radiometer}$ 는 radiometer 이미지가 차지하는 면적에서의 gray level 값이며, radiometer가 위치한 지점에 입사하는 에너지에 상당하는 gray level 값이다. 즉,

radiometer가 측정 한 에너지의 절대값을 $E_{radiometer}$ 라 하면, 단위 화소 당 에너지의 절대값 E_{unit} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{unit}(W/pixel) = \frac{E_{radiometer}}{P_{radiometer}} \quad (2-15)$$

이것은 gray level 값 1이 가지고 있는 에너지의 절대값을 의미하며, 각 화소들이 가지고 있는 에너지 값 E_{pixel} 은 다음과 같이 표현된다.

$$E_{pixel} = E_{unit} \times P(x, y) \quad (2-16)$$

$P(x, y)$ 는 플럭스 이미지 상에서 임의의 점 (x, y) 에 위치하는 화소의 gray level 값이며, 위의 식은 (x, y) 의 위치에 있는 화소 한 개가 가지는 에너지량의 절대값이다. 또한, 초점 지역으로 입사되어 형성되는 플럭스 이미지의 전체 에너지 값은 각각 화소들의 에너지 값을 전부 합산함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{total} = \int_0^{2\pi} \int_0^R E_{pixel} \, dr d\theta \quad (2-17)$$

R 은 타겟의 반경이다.

4) 화소의 크기

촬영을 통해 형상화된 플럭스 이미지는 그 화소 한 개에 상당하는 정확한 크기를 계산해 냄으로써 흡수기를 설계하는데 중요한 자료로 이용된다. 본 실험에서는 radiometer의 직경이 0.7cm라는 정확한 정보를 가지고 있으므로, 실제 직경을 플럭스 이미지 상에서 radiometer의 직경에 해당하는 화소의 수로 나눠 화소 한 개가 가지는 실제 거리를 계산했다. 즉, radiometer 이미지의 가장자리 위의 한 점 (x_1, y_1) 를 선택하고, 또 다른 한 점 (x_2, y_2) 는 가장자리의 마주보고 있는 위치를 선택한다. 이 두 지

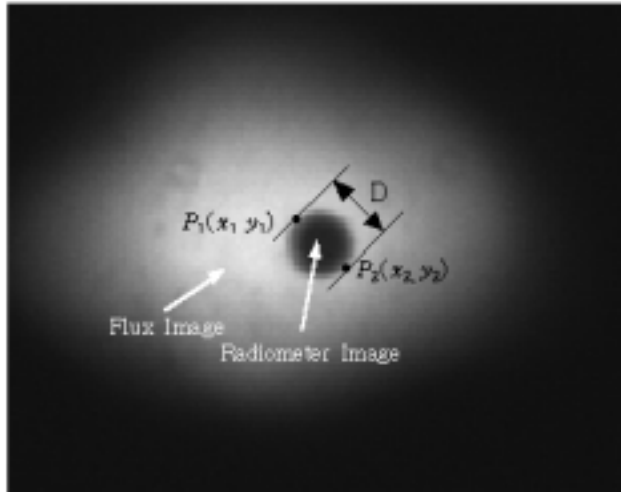


Fig. 2.5 Image for scale measurement of pixels

점의 실제 거리는 $D=0.7\text{ cm}$ 이므로, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Scale} &= \frac{\text{Real distance}}{\text{Number of pixels}} \\
 &= \frac{D}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (2-18)
 \end{aligned}$$

위의 식으로부터 화소 한 개가 나타내는 실제 크기를 계산할 수 있으며, 이것은 타겟 중심으로부터의 반경에 따른 에너지의 비율을 측정하는데 매우 중요한 정보이다.

이와 같은 작업을 거친 후 정확한 플럭스 분포의 특성들을 해석하여 dish 집광 시스템 전체에 대한 오차 또는 반사경 각각의 오차를 찾아낼 수 있으며, 또한 흡수기의 크기, 형상 등의 설계를 위한 자료를 얻을 수 있다.

Ⅲ. 실험 장치

1. Dish형 태양열 집광 시스템



Fig. 3.1 Parabolic dish concentration system

Dish형 집광 시스템의 기본 구성 요소는 시스템을 지지하게 되는 설치대, 집광기 및 흡수기를 포함하는 본체, 태양을 추적하는 구동 장치, 그리고 구동 장치를 통제하는 제어 장치로 구성된다. Fig. 3.1은 현재 한국 에너지 기술 연구원에 설치된 것으로 본 실험에 사용된 dish형 집광 시스템을 보여주고 있다.

1) 본 체

Dish형 집광 시스템의 본체는 집광 시스템을 지지하게 되는 설치대, 그리고 집광부와 집열부로 나눌 수 있다. 설치대는 안정성을 최우선으로 하여 스테인레스 및 아연도금 스틸로 제작하였다.

집광기는 5개의 반사경과 이를 고정하기 위한 지지대로 구성되어 있다. 전체의 높이는 지면에서 3.5m이며, 구동축의 중심은 1.8m에 놓이게 된다. 집광기의 지지대는 녹이 슬지 않는 스테인레스로 만들었다. 흡수기의 집광비에 맞춰 설계된 집광기의 직경은 3m이며, 림 각(rim angle)은 37°로서 초점 거리가 2.20m이다. 5개의 반사경의 틀 재질은 부식방지를 고려하여 알루미늄으로 제작하였다.

반사경은 고정 틀에 설치 시 각각의 반사경 뒷면에서 집광 조정 및 체결이 용이하도록 설계 제작했다. 반사경은 뒷면을 은코팅(back-silver coating)으로 처리한 유리거울을 사용하였다. 반사율을 90% 이상으로 맞추었고, 사양은 직경 1m, 두께 2mm의 원형 반사경 5개를 설치하였다. 이론적 초점부의 직경을 60mm로 계산한다면 집광비는 1090 suns²⁾으로 설계되지만, 반사경 제작 및 부착 오차와 추적오차를 감안하여 실제 집광비는 600 suns 이상 초점 직경 90mm 이하가 되도록 제작하였다.

집광기의 초점에 설치한 흡수기는 동심원형으로 구리관을 말아서 집열하도록 설계, 제작하였다. 흡수기를 지지하는 지지대는 흡수기의 하중에 견디는 구조와 강도에 맞게 설계하였고, 사용 재질은 고온에 견디는 스테인레스를 사용하여 만들었다. 공동(cavity) 개구부의 폭은 200mm, 높이는 120mm로 제작하였다. 공동의 보온 단열은 세라믹 10mm와 압면 90mm로 제작하여 보온 단열부를 포함한 전체 외형의 크기는 직

한 줄일 수 있도록 설계하였다.

경 300mm × 250mm로 제작되었으며 공동과 케이스와의 고정은 열교환 현상을 최대

2) 구동 장치

Dish형 집광기는 태양 빛을 항상 집광기 축에 평행하게 입사시키기 위해 방위 및 고도의 독립된 두 개 축을 중심으로 태양을 추적하게 된다. 따라서, 본 실험에 사용된 dish형 집광 시스템의 구동장치 역시 방위각과 고도각으로 구동할 수 있도록 설계하였다.

구동 모터는 초정밀 서보모터(AC 220V, 400W)와 감속기(1/15)로 이루어졌다. 고도 추적 범위는 전체 135°로, 집광기 개구부 면이 지면에 수직이 되도록 했을 경우를

2) 집광비의 단위. 수광 면적에 대한 집광된 면적의 비

기준으로 하여 아래쪽으로 45°, 위쪽으로는 집광기 개구부 면이 하늘과 수평을 이루게 되는 90°까지 움직일 수 있다. 방위각 추적 범위는 정남을 기준으로 하여 좌우 165°로 전체 330. 까지 움직일 수 있다. 구동축의 속도는 최대 태양 방위각 변화율과 최대 태양 고도각 변화율이 약 0.02. /sec와 0.004. /sec인 것을 감안하여 정격 3000 rpm을 기준으로 구동축 최대 회전 속도를 각축 ± 0.6 . /sec ~ ± 0.9 . /sec로 움직일 수 있게 설계하였다. 추적 장치의 안전 장치는 최대 추적 범위에서 +1°를 초과하면 limit switch가 작동하여 전원이 차단되도록 하였다.

3) 제어 장치

제어장치는 태양 추적을 위해 서보 모터(servo motor)를 이용하였으며, 전체 시스템의 제어를 위한 PC 시스템 운영 프로그램으로 구성했다.

태양추적신호체계는 program/sensor 복합 방식으로 시스템의 태양 추적을 위한 주신호는 태양고도 및 위치 계산식을 입력한 program으로 하고, 오차 보정 보조 신호는 sensor에 의해 처리되는 자동 추적 장치가 제작되었으나, 본 실험에서는 고도 방향 및 방위각 방향으로 구동축을 제어할 수 있는 수동 컨트롤러를 사용하여 그림자를 육안으로 직접 확인하는 수동 방식을 사용하였다.

2. Flux Mapping 시스템

Fig. 3.2 는 flux mapping 시스템을 Fig. 3.3은 flux mapping 시스템의 구성도를 보여주고 있다. Flux Mapping 시스템은 dish형 집광 시스템에 반사 타겟, radiometer, 그리고 CCD(Charge Coupled Device) 카메라 등을 설치함으로써 구성하였다.

우선 집광부인 집광기에서 반사된 빛이 집열부인 흡수기에 모여지게 되는데, 고온 내열성의 백색 페인트가 칠해져 있는 원형의 반사 타겟을 흡수기를 대신하여 설치하였다. 초점은 집광기 개구부의 수직인 축에 평행한 방향을 따라 움직일 수 있도록 설계된 얇은 반사 타겟으로 입사한다.

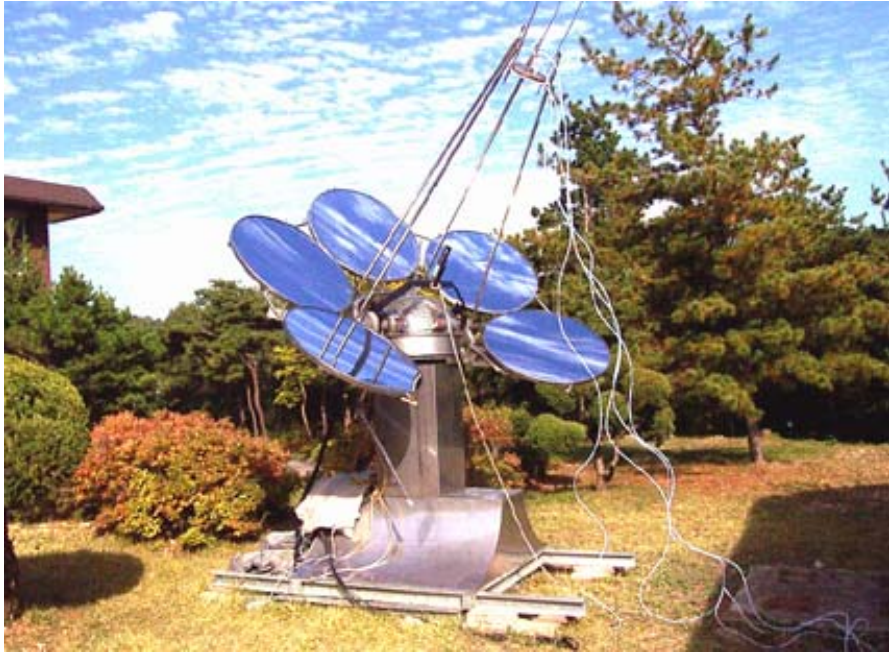


Fig. 3.2 Flux mapping system

반사 타겟에 형성된 초점의 특성 관측을 위해 반사 타겟으로부터 약 1.2m 정도의 거리를 두고 CCD 카메라를 설치하였고, 반사 타겟 표면에 시각 관점을 수직이 되도록 하였다. 광원이 반사경에 의해 반사된 후 반사 타겟 표면으로 입사하게 되고, 여기에 집광된 플럭스의 이미지를 CCD 카메라로 촬영한다. 카메라에 의해 촬영되는 플럭스 이미지들은 컴퓨터에 장착된 8bit의 Frame Grabber 카드를 사용하여 디지털화하고, 이미지를 형상화시키는 Matrox Intellicam 이라는 소프트웨어를 사용하여 모니터 상에 이미지를 나타낸다.

Radiometer를 반사 타겟의 중앙에 수직으로 설치하여 집광기로부터 집광되는 빛 강도(intensity)의 절대값을 연속적으로 측정하고, 이 절대값을 기준으로 CCD 카메라에 의해 읽혀진 화소(pixel)의 빛 강도를 상대적으로 측정한다.

시스템 외부에는 dish형 태양열 집광 시스템이 단지 직달 일사량만을 이용하는 시스템이므로, Pyrheliometer를 설치하여 태양으로부터의 직달 일사량을 측정하였다. 이것은 위도 및 방위 방향으로 구동이 가능하여 태양을 추적하면서 법선면 직달 일사량을 측정할 수 있다.

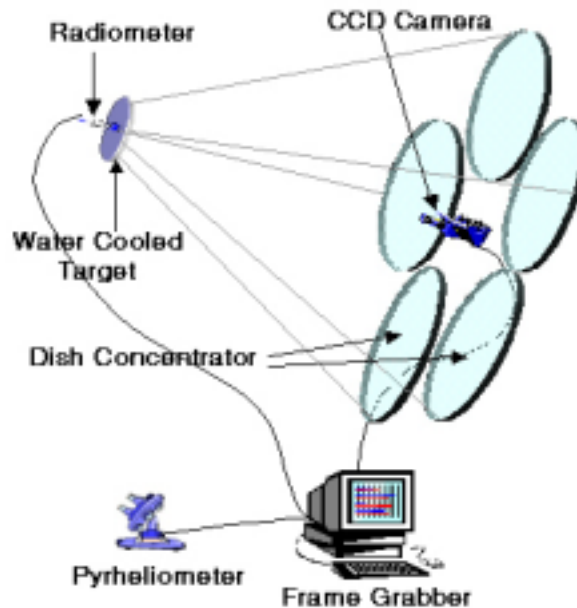


Fig. 3.3 Arrangement of flux mapping equipments



1) 반사 타겟

Dish형 집광 시스템의 초점지역 플럭스 분포를 측정하기 위한 반사 타겟은 초점지역에 직경 30cm인 원형판을 설치하였고 원형판 중앙부에는 radiometer를 설치하기 위한 직경 0.7cm의 구멍을 뚫었다. 원형판은 빛이 반사가 균일하게 이루어져 초점 형상을 쉽게 판별할 수 있도록 내열 백색의 특수 도료로 도장하였다. Tempil사의 Pyromark 2500의 백색을 사용하였는데, 고온에 페인트가 타버리거나 색깔이 변하는 현상을 막기 위해서 4mm 두께/1회로 2회 도포한 후 2시간 후 4mm/회 두께로 필요에 따라 수 회 바른다. 그늘진 곳에서 완전히 말린 후 250℃에서 2시간 정도 전기로에 구운다. 이렇게 경화가 된 후 다시 600℃에서 1시간 정도 구워 유리화를 시키면, 최대 1000℃에 견딜 수 있다. 페인트가 녹거나 중앙에 설치된 radiometer에 너무 많은 열이 전달되어지는 것을 고려하여 반사 타겟의 후면에는 등근 형태의 물통을 용접하여 반사 타겟을 냉각하였다.

2) Radiometer

원형의 반사 타겟 중앙부의 radiometer는 플럭스 이미지의 어느 한 지점의 빛의 강도를 측정함으로써, 카메라에 의해 촬영된 플럭스 이미지(image)의 gray level을 실제 에너지 강도(intensity)로 변환하는데 사용한다. radiometer는 두 종류가 있는데, Schmidt-Boelter type은 한쪽 표면에서 열을 흡수하고 열흡수 표면과 수직인 방향으로 열을 전달한다. Gardon type radiometer는 얇은 금속 원형의 박막에서 열을 흡수하고 박막의 원주에 부착되어 있는 heat sink로 열을 반경 방향으로 전달한다. 그 중에 dish형 집광 시스템의 반사경 한 개로부터 집광되는 에너지 범위와 5개 전체를 합쳤을 때 집광되는 에너지 범위를 고려하여 최대 범위가 2270kW/m^2 까지 측정이 가능한 Gardon type의 radiometer를 Medtherm사로부터 구입하였다.

Radiometer는 들어오는 대류 열전달을 제거하기 위한 Sapphire window와 고온에 견디기 위한 냉각 장치가 옵션으로 부착되어 있으며, 직경이 5/8 inch, 그리고 160° 의 viewing angle³⁾을 가지고 있다.

3) CCD 카메라

Fig. 3.4는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라와 ND filter들을 보여주고 있다. 집광기의 중앙부에서 약 50cm 떨어진 지점에 초점지역 플럭스 이미지 촬영을 위한 CCD 카메라를 위치시켰다. 초점지역에 생기는 이미지의 고광도 때문에 CCD array가 포화(saturation)⁴⁾되므로, 이것을 막기 위해서 카메라 렌즈 앞에 고밀도 흡수 필터를 설치하였다.

CCD는 영상을 획득하기 위해 사용되는 빛의 센서이다. CCD는 빛의 강도에 따라 전류의 흐름을 결정하는 일종의 반도체로 미세한 감광 소자로 구성되어 있다. CCD가 이미지를 만들어 내기 위해서는 다음과 같이 반드시 4가지 작업이 이루어져야 한다.

3) Radiometer 내의 센서로 빛이 들어올 수 있는 각도.

4) CCD array에 일정 빛 이상이 들어오면 더 이상의 빛의 세기를 감지하지 못하고 같은 값으로 인식하는 현상.



Fig. 3.4 CCD camera and neutral density filters

첫 번째 과정은 '광전 효과'를 통해 광자들이 자유전자들을 만들어 내는 것이다. 두 번째 단계에서 자유전자들은 가장 가까운 불연속적인 장소인 화소에 축적되어 진다. 이 화소들은 CCD의 표면을 이루고 있는 'gate'라고 불리는 전극의 배열로 이루어진다. 세 번째 단계인 전하 이동은 규칙적인 방법으로 각 'gate'의 전압을 바꿈으로써 이루어지며, 그 과정을 통하여 전자들은 한 화소에서 이웃한 것으로 수평적으로 이동한다. 각 열의 끝에는 출력 레지스터(output register)라고 불리는 것이 존재하여, 모든 다른 것들에 대하여 수직적으로 작용한다. 그것은 전하의 묶음을 차례로 한 단위씩 출력 증폭기(out amplifier)에 보낸다. 이 출력 증폭기에서는 마지막 단계로 전자들의 개수가 세어지고 컴퓨터에 저장 가능하며 모니터에 출력이 가능한 형태의 정보로 전환된다.

4) Frame grabber

카메라는 전면에 위치한 CCD 칩에 각각의 픽셀에 대한 정보들이 입력됨으로써 그것들을 디지털화 한다. 이것은 완벽한 화소 정보의 등록과 함께 적은 노이즈의 이미지를 최종적으로 형성할 수 있게 한다. 화소에 대한 정보를 아날로그 신호로 변환하

고 8비트의 frame grabber에서 다시 디지털화가 이루어진다.

5) Neutral Density Filter

ND(Neutral Density) Filter는 카메라의 보정 및 초점지역의 플릭스 이미지를 촬영하는 과정에서 CCD 카메라 렌즈의 앞부분에 장착하여 사용한다. 카메라를 보정하는 과정에서 0.1 ~ 1.0까지의 Optical Density를 가지고 있으며, 75×75×0.1 mm 크기의 ND Filter 10개를 사용하였다. 초점지역의 플릭스 이미지를 촬영하는 과정에서 사용된 ND Filter는 Optical Density가 4이며, 두께가 2mm이다. 집광된 매우 강한 빛들로부터 카메라의 CCD 센서를 보호하고, 포화현상을 막는다.

3. 이미지 분석 도구 IDL(Interactive Data Language)



플릭스 분포 이미지를 분석하기 위해서 이미지 분석 프로그램인 IDL (Interactive Data Language)를 사용하여 플릭스 분포를 분석하였다. IDL 프로그램을 간단히 소개하면 과학 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.

Fig. 3.5는 플릭스 이미지를 분석하기 위해 IDL 언어로 짜여진 프로그램 구조를 보여주고 있다. Fig. 3.5에 보이는 것처럼 모체가 되는 Base를 세 부분으로 나누었다. 즉 Poly Rad Base, Data Graph, Graph 1-2로 되어있고 그 밑으로 하부 Base들로 구성하였다. 이러한 하부 Base에는 특정작업을 수행할 수 있도록 하였다.

Poly Rad Base의 하부구조를 보면 PloyBase, RadiometerBase, 그리고 PIRBase가 있다. PloyBase는 CCD 카메라의 특성을 파악하는 과정에서 보정에 사용되는 6차 다항식의 계수값들에 관계된 것들로서 Fig. 3.6의 왼쪽 상단에 P0 ~ P6이라고 표시된

부분이며, RadiometerBase는 radiometer 이미지의 gray level 및 그와 관계된 버튼, 그리고 Intensity Scale Factor들에 대한 것이며, Fig. 3.6의 왼쪽 중간 부분에 나타나고 있다. PIRBase는 반경 거리에 따른 에너지 비율 측정과 그에 관계된 버튼들에 대한 것이며, Fig. 3.6에서 왼쪽 하부에 나타나고 있다.

Data Graph는 이미지 분석을 위해 만들어진 프로그램에서 초기 화면에 관계된 것이며 하부구조로 ImageInfoBase 와 ScalePanel을 가지고 있다. ImageInfoBase 초기 화면상에 표현되었듯이 TIF 포맷으로 저장된 이미지를 불러들이라는 메시지에 대한 것이며, Fig. 3.6에서 중간의 이미지가 나타난 부분이다. 이것은 다시 밑 하부구조로 LoadImageBase를 가지고 있다. 이미지를 불러들이는 버튼과 이미지가 저장된 경로에 관계된 것으로써, Fig. 3.6에서 이미지가 나타난 그림 밑의 버튼과 'Message'라고 쓰여있는 부분이다. ScalePanel은 다시 하부구조로서 UpperScalePanel과 LowerScalePanel를 가지고 있는데, UpperScalePanel은 화소의 거리 측정에 관계된 버튼, 화소의 거리, 그리고 그와 거리에 관계된 계수 등을 포함한다. 또한 LowerScalePanel에서는 렌즈와 타겟의 거리와 여기서 발생하는 오차등에 관계된 것들이다. 이것들은 Fig. 3.6에서 중간의 맨 밑 하부에 "Measure distance" 등등에 해당한다.

마지막으로 Graph 1-2 는 분석한 이미지에서 얻어낸 자료를 초기화면상에 Graph로 나타내는 것과 관계가 있다. 즉, 3차원 가우시안 분포의 플릭스 이미지를 도심(centroid)이나 타겟의 중심(center)을 중심으로 x, y 축 방향으로 잘라낸 그래프나, 반경 거리에 따른 에너지 분포 비율에 대한 그래프이다. Fig. 3.6에서 오른쪽 상단과 하부에 두 개의 그래프가 이것에 해당한다. Fig. 3.6에 이 구조로 짜여진 분석 프로그램의 초기 화면을 보여주고 있다.

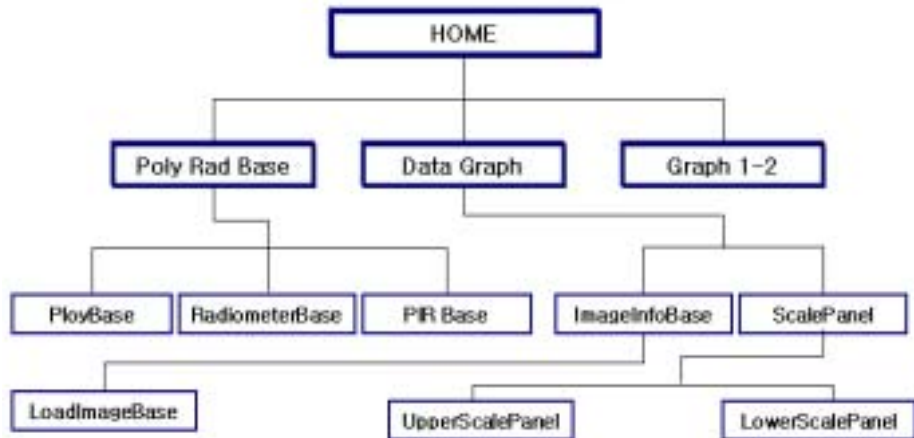


Fig. 3.5 Structure of image analysis program

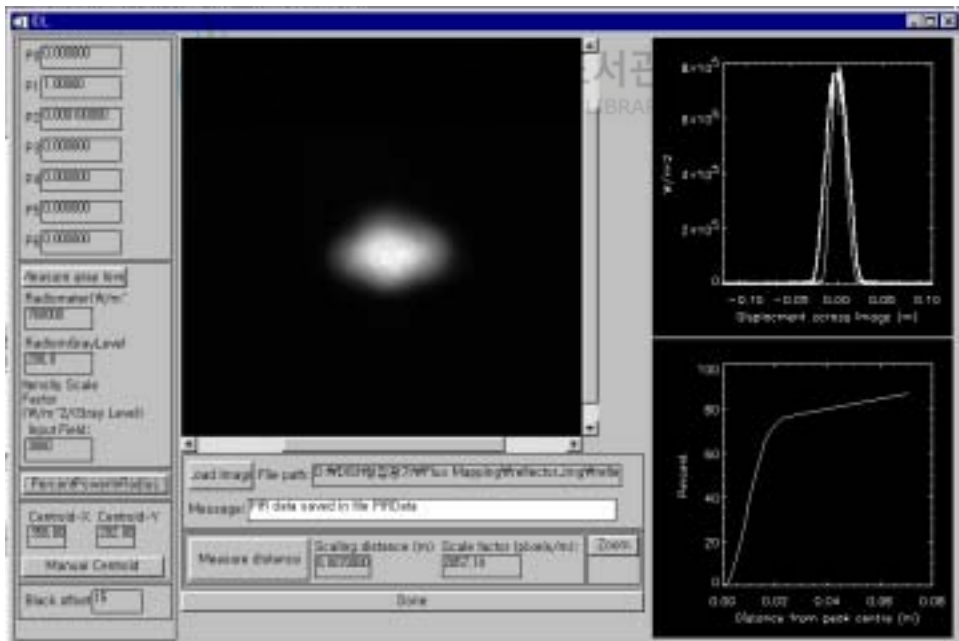


Fig. 3.6 Window for image analysis

IV. 실험방법 및 절차

실험 절차는 CCD 카메라 특성 파악을 위한 카메라 보정(calibration), 카메라에 의한 초점 지역 촬영, 촬영 이미지 분석 순으로 진행하였다.

1. CCD 카메라의 보정(Calibration)

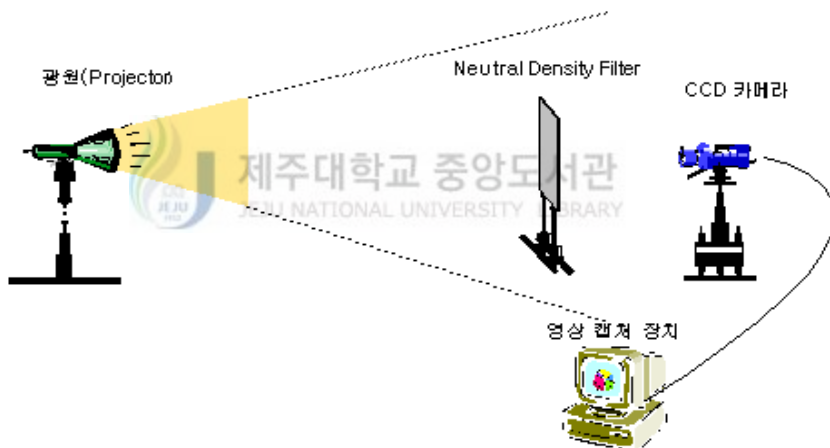


Fig. 4.1 Schematic of experimental apparatus for camera calibration

화소의 정확한 gray level을 측정하는 것은 집광된 플럭스 분포를 분석하는데 결정적 요소로 작용한다. 그러므로 카메라의 보정은 dish형 집광 시스템의 플럭스 분포를 촬영하기 전에 이루어져야 하는 필수 단계이다. 즉 카메라 보정은 카메라의 특성을 파악하는 작업이다. CCD 카메라는 고유적으로 선형성을 가지고 있다. 영상에 기록되는 화소의 gray level과 같은 몇 개의 카메라 특성들은 제조자들에 의하여 결정되는 반면에 CCD의 감도는 검출기 그 자체에 대하여 본질적인 것이다. 따라서 CCD는 빛의 강도에 매우 선형적인 반응을 나타낸다. 즉, CCD의 출력은 빛의 세기에 직접 비례

한다. 그러나 영상장치를 만들기 위해서 사용되는 인광성 물질은 비선형이다. 빛의 밝기에 따른 영상 장치의 출력은 밝기 값이 클 때 또는 작을 때에 대해 그 변화율이 서로 다르다. CCD 카메라의 위와 같은 특성을 조사하기 위해서 Fig. 4.1과 같은 실험장치를 설치하였다.

빛의 명암도 측정에 영향을 주는 CCD 카메라와 영상출력장치의 응답 특성이 초점의 플럭스를 측정하기 전에 보정되어진다. 실험장치를 보면 광원으로 Projector를 사용하였고, 카메라를 Projector와 서로 마주보게 설치하며, Projector가 카메라를 충분히 조사할 수 있는 거리에 설치한다. VCR에 이미지가 기록되는 동안 카메라 앞에 ND(neutral density) Filter가 위치하였다. ND Filter를 조합하여 투과율이 다른 25가지 경우에 대해 조명된 영상을 촬영하였다. ND Filter의 조합에 따른 투과율은 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$T=10^{-D} \quad (4-1)$$

T: 투과율(transmission)

D: optical density



보정 결과는 ND Filter가 없는 경우에서부터 투과율이 다른 경우 25회를 촬영하여 화소들의 평균 gray level을 구하였다. 그 이미지는 VCR로부터 디지털화되고, 화면상에 화소의 평균강도가 ND Filter의 투과계수에 대하여 Fig. 4.2에 그려졌다. 결과 그림에서 보여주는 것처럼 투과율에 따라서 이미지의 평균 gray level은 선형성을 보여주지 못하고 있다. 화소는 'full-well capacity'라는 전자를 축적할 수 있는 최대 능력을 가지고 있어서 이 양을 넘게 되면 CCD는 포화(saturation)가 일어난다. Fig. 4.2에서 투과 계수가 80% 이상일 경우 화소의 gray level이 248이라는 일정한 수치를 나타냈으며, 이러한 상태를 CCD array가 포화되었다고 한다. 포화된 CCD는 그 기능을 수행할 수 있는 범위를 완전히 초과한 상태이므로 포화 이후의 데이터는 아무 의미가 없어지게 된다. 즉, 포화가 시작되는 시점의 투과 계수에서 최대 강도의 빛이 CCD에 들어온다고 할 수 있으며, 이 시점에서의 투과율이 최대 투과율이 된다. 따라서 태양을 광원

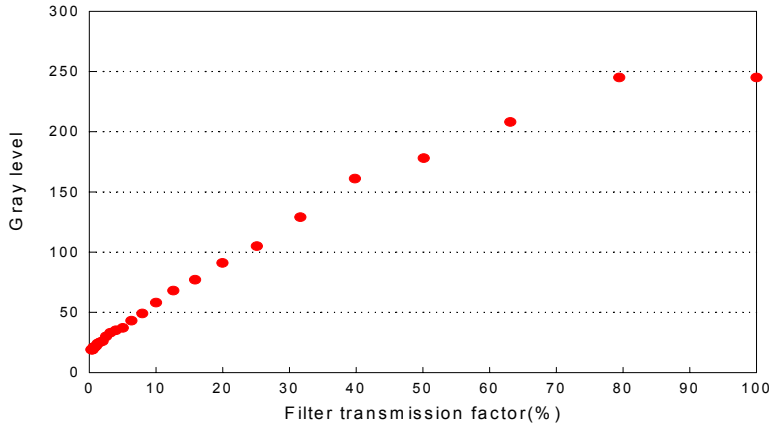


Fig. 4.2 CCD camera response to filter transmission factor

으로 하는 실제 실험에 있어서 ND Filter를 적절히 추가하여 포화가 일어나는 일이 없도록 해야만 정확한 이미지의 gray level을 얻을 수 있다.

이것은 빛의 세기에 따라 바뀌게 되는 카메라 및 VCR의 응답특성을 제공한다. 응답 특성 곡선은 다항식 곡선으로 나타낼 수 있고, 측정된 플럭스 분포를 보정하는데 사용하였다. 측정된 픽셀 값들은 실제 강도를 보다 정확하게 반영할 수 있도록 선형화 되었다.

Fig. 4.3은 빛의 세기에 대한 CCD 카메라의 반응 특성을 보여주는 그림이다. 포화가 시작 되는 시점(투과율 80%)을 빛의 최대강도(I_{max})로 설정하여 그에 따른 상대적인 빛의 강도 값을 x축으로 설정하였으며, y축은 빛의 강도에 따른 화소들의 gray level을 평균한 값으로 나타내었다. 점선 부분이 CCD array 고유의 선형적 특성을 보여주는 그래프이고 실선 그래프는 실제 촬영하여 나타낸 그래프이다. 즉, 이러한 결과로부터 빛의 강도가 커짐에 따라 실제 카메라의 선형적 성향과는 매우 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 실제 이상적인 반응특성 기울기는 다음과 같다.

$$m = \frac{P_{max}}{NI_{max}} \quad (4-2)$$

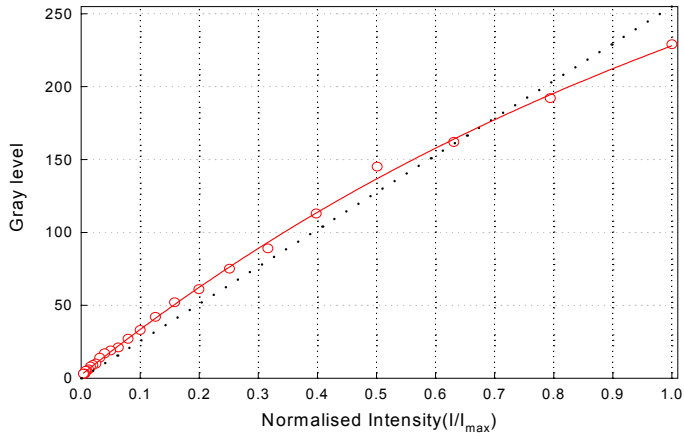


Fig. 4.3 CCD camera response to calibrated light level

여기서 P_{\max} 는 최대값을 가지는 화소의 gray level 이고, $NI_{\max} = 1$ 이다. 그러므로 이상적인 gray level 값, P_i 는

$$P_i = m \times NI \quad (4-3)$$

가 된다.

즉, 실제 gray level 값, P_a 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_a = f(NI) \quad (4-4)$$

$P_i = P_{\max} f^{-1}(P_a)$, 여기서 f 는 데이터를 fitting 한 다항 6차 함수이다.

이러한 보정 데이터는 측정된 플렉스 분포 이미지를 수정하는데 사용하였다.

2. 초점 지역 촬영

초점평면에서의 플릭스 분포 촬영은 직달 일사량의 변화가 가장 없을 때를 고려하여 오전 11시에서 오후 2시 사이에 촬영하였다. 추적 시스템을 가동한 후 초점지역에 집광이 시작되면, 컴퓨터 모니터의 화면 캡처 프로그램인 Matrox Intellicam 상에 초점지역에서의 플릭스 이미지가 하얗게 나타난다. 플릭스 이미지는 빛의 세기가 큰 지역에서는 분명하게 흰색 계통으로 나타나지만 빛이 약하게 조사되는 지역은 시각적으로 배경 이미지와 구별하기가 거의 힘든 검정 계통으로 나타난다. Dish형 집광 시스템에 설치된 CCD 카메라의 렌즈를 조절하여 이미지의 크기를 분석하기에 가장 적합하다고 판단되는 크기로 확대한다. Gray level 값이 작은 지역에서는 플릭스 이미지와 배경 이미지가 시각적으로 구별이 안되므로 플릭스 이미지가 잘리지 않도록 충분한 여유를 두고 확대한다. 또한 고밀도의 흡수 필터 셋이 카메라 렌즈 앞에 위치하는데, 이것은 고광도의 빛으로 인해 발생하게되는 CCD array에서의 포화현상을 막기 위한 것이다. 흡수 필터의 개수는 경험적으로 결정하게 된다. Matrox Intellicam 화면상에 나타난 이미지를 보았을 때 플릭스 이미지가 검은색에서 완전한 흰색까지 색깔에 있어 구배가 있어야 하며, 빛의 강도가 높다고 판단되는 타겟의 중앙에서 명암에 구배가 없다고 판단되면 포화가 일어나는 것으로 판단해야 한다. 포화가 일어난다고 생각될 때는 흡수 필터의 개수를 늘리거나, 투과율이 낮은 필터로 교체하며 시행착오를 거치게 된다. 또한 플릭스 이미지가 너무 희미하게 나타나 radiometer의 이미지가 플릭스 이미지에 비해 너무 많은 비율을 차지하고 있다면 흡수 필터를 제거하거나, 투과율이 높은 필터로 교체하여 준다.

반사경으로부터 이론적 초점거리 2.20m인 반사 타겟을 기준으로 -6cm, -3cm, 0cm, 3cm, 6cm 씩 전, 후로 움직여 가면서 가장 왼쪽의 1번 반사경부터 가장 오른쪽에 위치한 5번 반사경까지 총 다섯 개에 대해 총 25회의 실험을 반복 수행하였다. 또한 다섯 개의 반사경 전부를 이용하여 집광시켰을 경우에 대한 실험도 같은 방법으로 수행하였다. 다음 Fig. 4.4는 각 반사경의 배열 위치를 보여주고 있다.

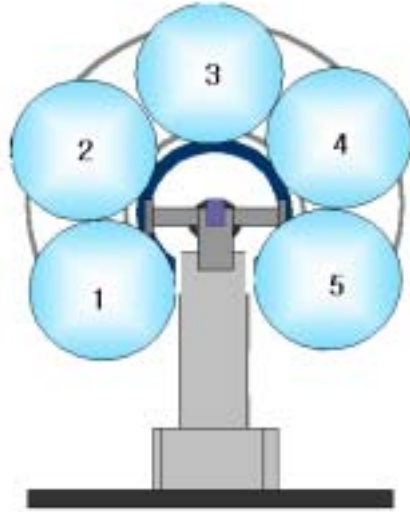


Fig. 4.4 Arrangement of reflectors

3. 촬영 이미지 분석



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4.5는 촬영한 플럭스 분포의 이미지를 분석하는 과정이다. 촬영까지의 과정을 마치고 난 후 이미지는 TIF 파일로 얻어지며, 촬영된 플럭스 이미지에서 배경 이미지를 감산함으로써 음영장으로 인해 나타나는 오차를 수정한다. 또한, radiometer의 이미지로 인하여 발생하는 오차를 보정한다. Radiometer에서 측정한 에너지의 세기를 각 화소에 상대적으로 적용하여 각 화소가 가지고 있는 에너지량을 구하며, 적산함으로써 초점평면에 집광된 에너지량을 계산한다. 그리고 난 후 화소의 간격을 실제의 거리로 계산함으로써 플럭스 이미지의 크기 등을 결정한다. 또한 플럭스의 도심(centroid)을 결정하여 타겟의 중심으로부터 집광된 플럭스의 도심이 어느 정도 편차가 있는지를 결정한다. 최종적으로 반경에 따른 집광된 에너지 분포율을 결정한다.

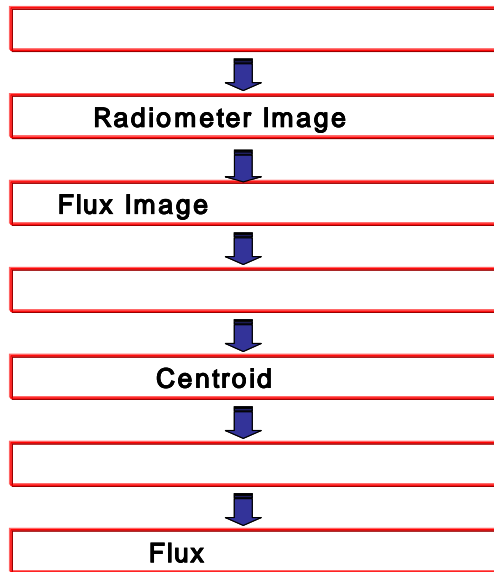


Fig. 4.5 Flux mapping procedure

V. 실험결과 및 고찰

1. 집광 플렉스 분포 특성

1) 단일 반사경의 집광 플렉스 분포

Dish형 태양열 집광 시스템의 초점 지역에 형성되는 집광 플렉스 분포에 대한 분석에서 dish형 집광기의 초점 거리는 2.20m로 설계되었으나 집광기의 제작 및 광학 오차 등에 따라 실제 초점 거리는 설계한 초점 거리와는 다를 수 있다. 이러한 영향을 분석하기 위해서 dish형 집광기의 꼭지점으로부터 타겟의 거리가 2.14m에서부터 2.26m까지 3cm씩 거리를 증가시키면서 타겟 상의 플렉스 분포를 측정하여 초점 거리 변화에 따른 집광 에너지 분포 및 에너지량을 평가하였다.

초점 지역에 형성되는 집광 플렉스 분포를 분석하기 위해서 개개의 반사경에 대한 집광 플렉스를 CCD 카메라로 촬영하여 집광 플렉스의 초점 거리에 따른 에너지 분포 특성을 분석하였다.

Fig. 5.1에서 Fig. 5.5까지는 타겟 거리를 달리하였을 경우에 얻어지는 플렉스 분포를 도심(centroid)을 기준으로 x 및 y 방향의 단면(cross section)을 그린 것이다.

반사경 2, 3, 4, 5번의 그래프인 Fig. 5.2에서 Fig. 5.5까지는 일반적으로 가우시안 분포를 가지고 있으나, 반사경 1번의 그래프인 Fig. 5.1은 비가우시안 형태의 분포를 보여주었다. 반사경 1번의 경우 거리에 따른 최대 강도 값들이 다른 반사경들에 비해 매우 낮게 형성되었는데, 이것은 반사경 제조과정에서의 오차로 인해 포물면이 불완전하게 형성되면서 초점이 세 지점으로 분산되었기 때문이다. 이렇게 반사경 1번의 초점이 세 지점으로 분산되어 나타나는 원인은 반사경의 형태가 완벽한 포물면의 형태에서 벗어나 포물면의 꼭지점이 되는 중앙부분에서 설계치보다 완만한 곡률이 불규칙하게 형성되었기 때문이다. 이것은 반사경의 제작과정에서 원형의 평면 유리를 포물면으로 만들기 위해 노에서 고온의 열을 가하는 과정에서 적정온도보다 더 높은 온도

에서 가열함으로써 중앙 부분에 변형이 생겼기 때문으로 사료된다.

Fig. 5.6은 실제 초점거리가 2.17m로 관측된 반사경 1번의 contour plot을 보여주고 있으며, 세 지점의 초점이 분산되어 있는 것을 관측할 수 있다. Fig. 5.2에서 Fig. 5.5까지는 일반적으로 하나의 peak가 형성되었으며, 플럭스의 도심 위치와 최대 강도 값을 가지는 지점의 위치가 거의 일치하였다. 그러나 Fig 5.1과 같이 peak가 여러 곳으로 나누어질 경우의 도심은 최대 강도 값을 가지는 지점이 아닌 다른 곳에 위치하게 되며, 도심을 기준으로 자른 단면의 그래프로는 실제 초점 거리를 찾아내기가 쉽지 않다. 이런 경우, 반사경의 꼭지점으로부터 반사 타겟의 거리를 바꿔가며 촬영된 다섯 개의 이미지를 contour plot으로 비교 분석해 봄으로써 실제 초점거리를 알아낼 수 있다. Contour plot의 면적 크기를 비교해 보았을 경우 2.17m에서 가장 적게 형성되었으며, contour 경사가 가장 급하게 나타났다. 또한, 이 초점거리를 기준으로 앞뒤로 멀어질수록 contour plot의 면적 크기가 커지며 경사가 완만하게 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 surface plot에서 전체적인 강도(intensity)를 관찰해보았을 경우에도 뚜렷하게 구별할 수 있었다.

Fig. 5.2에서 나타나고 있는 반사경 2번의 최대강도 크기는 초점 거리가 2.20m, 2.23m, 2.26m, 2.17m 그리고 2.14m의 순으로 나타났다. 2.20m에서의 최대 강도가

729.6 kW/m^2 으로 두 번째로 높게 형성되고 있는 2.23m에서의 675 kW/m^2 와 많은 차이를 보였다. 2.17m에서의 최대 강도가 세 번째로 높아야 할 것으로 판단되지만, 분석결과 2.26m와 거의 비슷하며, 오히려 낮게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 반사경 2번은 실제 초점거리가 2.20m로 측정되었으나 2.23m 쪽으로 좀 더 길게 초점거리가 나타날 것으로 판단된다. Fig. 5.2(a)와 Fig. 5.2(b)의 2.20m 그래프에서 최대 강도를 비교해보면 y축 방향의 단면 그래프가 약간 적게 나타나고 있는데, 이것은 플럭스 도심과 peak가 정확하게 일치하지 않는 경우이며, 플럭스 분포의 모양이 한쪽으로 기울어져 있기 때문이다. 또한 2.14m 거리에서의 최대 강도가 매우 낮게 형성되고 있으며, x축 방향으로 가우시안 분포가 흩어지기 시작함을 관찰할 수 있다. Fig. 5.2(b)에서는 평면화 현상이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 평면화 현상은 초점이 형성되는 지역에서의 에너지를 측정하기 위해 설치된 radiometer의 이미지 때문에 나타나는 현상이다. 촬영된 직후 radiometer의 이미지는 검은 색으로 나타나며, 축 방향의 단면을 그렸을 때 함몰된 형태를 보이지만, 주변 빛 세기의 평균값으로 보정하는 과정에서 평평한

형태를 가지게 된다. 평면화 현상은 다른 그래프에서도 자주 관찰할 수 있다.

반사경 3번에 대한 최대 강도 값들이 Fig. 5.3에서 나타나고 있다. 이론적 초점거리

인 2.20m에서 최대 강도 값이 713.3 kW/m^2 으로 가장 높게 형성되었다. 초점거리로부터 전, 후 3cm 떨어진 2.17m와 2.23m에서 거의 비슷하게 두 번째로 높은 최대 강도를 형성하였으며, 실제 초점거리가 이론 값에 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5.3(b)에서 알 수 있듯이 실제 초점거리로 관측되고 있는 2.20m로부터 전, 후 간격이 6cm에 이르는 2.14m에서부터 비가우시안 분포를 보이기 시작하여, 2.26m에서 완전히 흩어지는 모습을 보였다.

Fig. 5.4에서 반사경 4번에 대한 최대 강도 값들을 보여주고 있다. 2.17m에서 798.1

kW/m^2 로 가장 높은 강도를 보여주었으며, 2.14m에서도 785.6 kW/m^2 으로 거의 비슷한 최대 강도 값을 보였다. 다음으로 2.20m, 2.23m, 2.26m 순으로 되어있어 실제 초점거리가 2.14m와 2.17m 사이에서 형성될 수 있음을 예측할 수 있었다. 전체적으로 가우시안 분포를 잘 보여주었다.

Fig. 5.5에서 반사경 5번은 2.17m에서 실제 초점거리가 형성되고 있음을 보여주었

다. 최대 강도가 803.5 kW/m^2 으로 가장 높고, 2.20m와 2.14m가 거의 비슷한 최대 강도를 보였다. 전반적으로 최대 강도가 작을수록 가우시안 분포의 폭이 넓어지고 있으며, 최대 강도가 크면 그 폭이 작게 나타났다. 플럭스 이미지가 타겟의 거리에 관계없이 타원이나 원 형태로 일정하게 나타날 경우, 이것은 다른 반사경에서도 전반적으로 나타나야 하는 현상이지만, 다른 반사경의 경우 반사경의 불완전성으로 인해 많은 이미지들이 일정한 형태를 보이고 있지 않으므로 타겟이 실제 초점거리로부터 멀어질수록 폭이 넓어지는 현상은 나타나지 않는 경우가 많다.

Fig. 5.7은 지금까지 다섯 개 반사경에 대한 최대 강도를 비교하기 쉽게 보여주고 있다. 즉, 2번과 3번 반사경의 최대 강도 값만이 이론적 초점거리인 2.20m와 일치하고 있으며, 반사경 4, 5번은 이론적 초점거리인 2.20m 보다 앞쪽인 2.17m 부근에서 최대 강도를 형성하고 있다. 반사경 1번 또한 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 2.17m에서 초점거리가 형성됨을 알 수 있었다. 반사경 1번을 제외하면, 실제 초점거리에서의 최대 강도를 중심으로 좌, 우로 오르내림 없이 계속 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 이것은 실제 초점 거리로부터 멀어질수록 최대 강도가 낮아짐을 가리킨다.

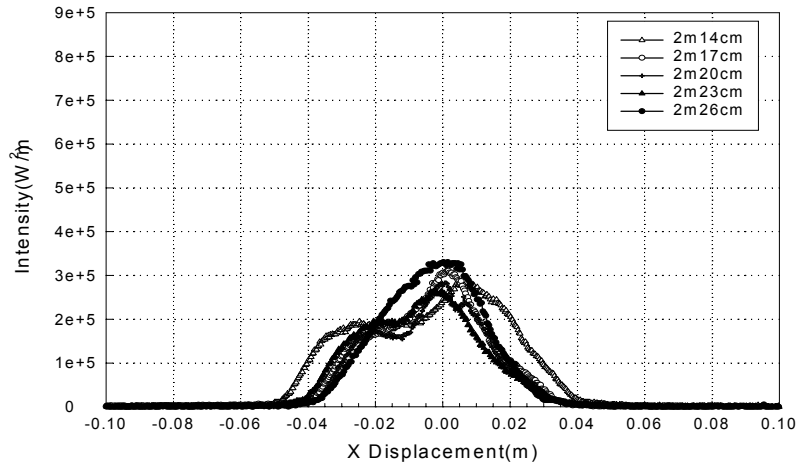


Fig. 5.1(a) Flux cross sections of reflector 1 through x-direction

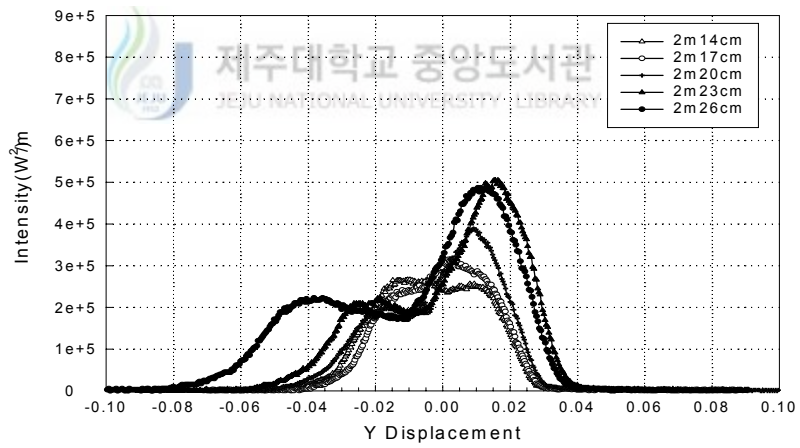


Fig. 5.1(b) Flux cross sections of reflector 1 through y-direction

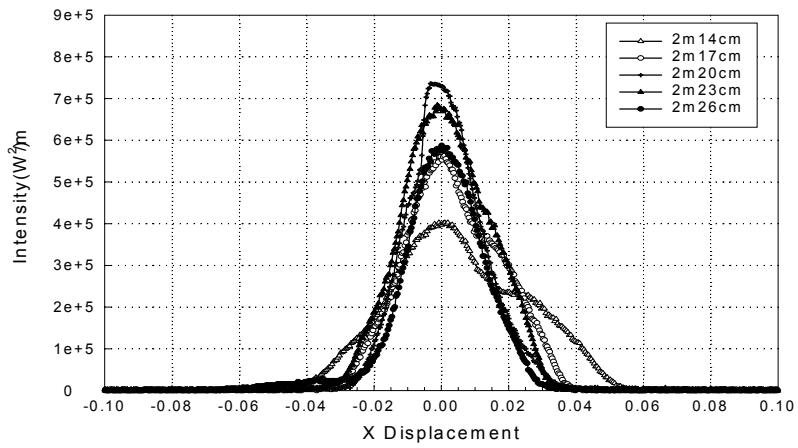


Fig. 5.2(a) Flux cross sections of reflector 2 through x-direction

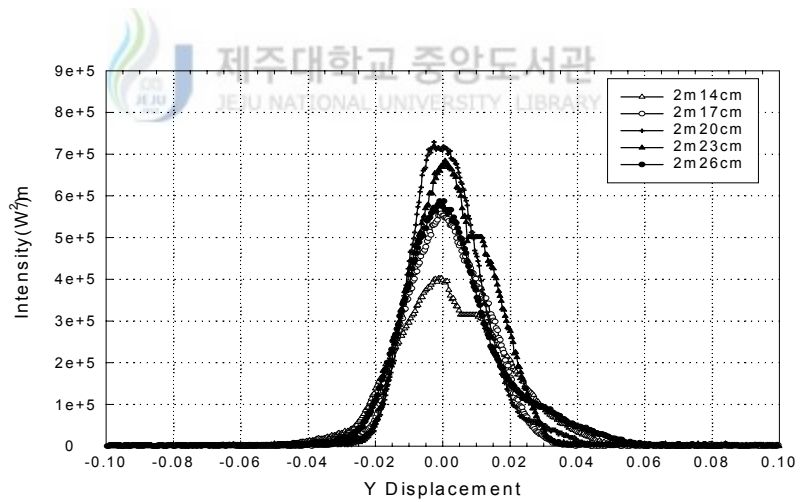


Fig. 5.2(b) Flux cross sections of reflector 2 through y-direction

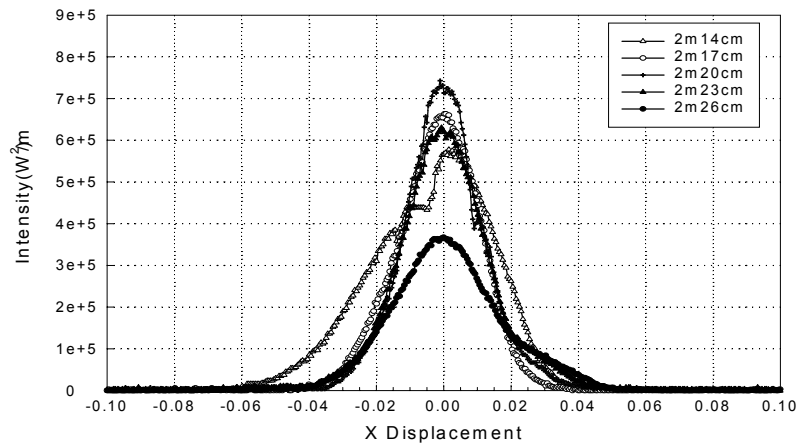


Fig. 5.3(a) Flux cross sections of reflector 3 through x-direction

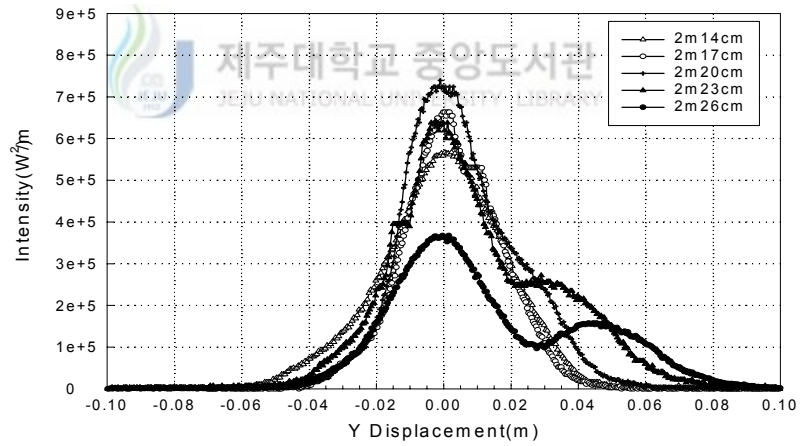


Fig. 5.3(b) Flux cross sections of reflector 3 through y-direction

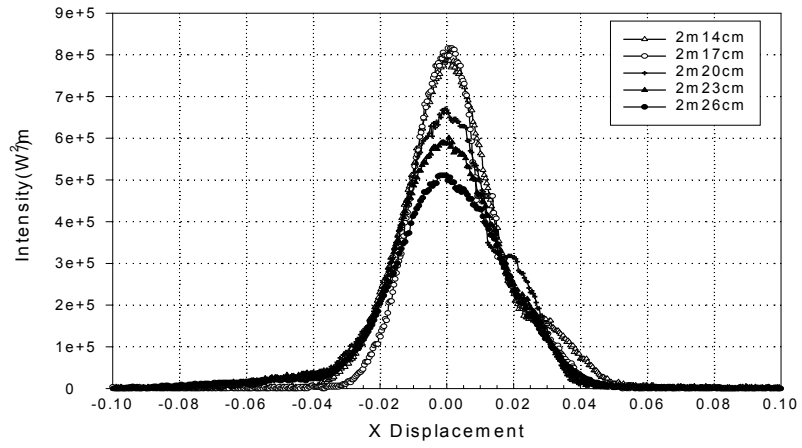


Fig. 5.4(a) Flux cross sections of reflector 4 through x-direction

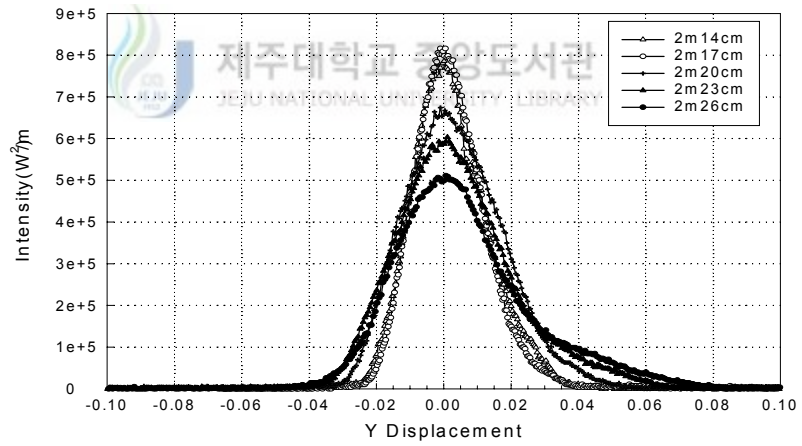


Fig. 5.4(b) Flux cross sections of reflector 4 through y-direction

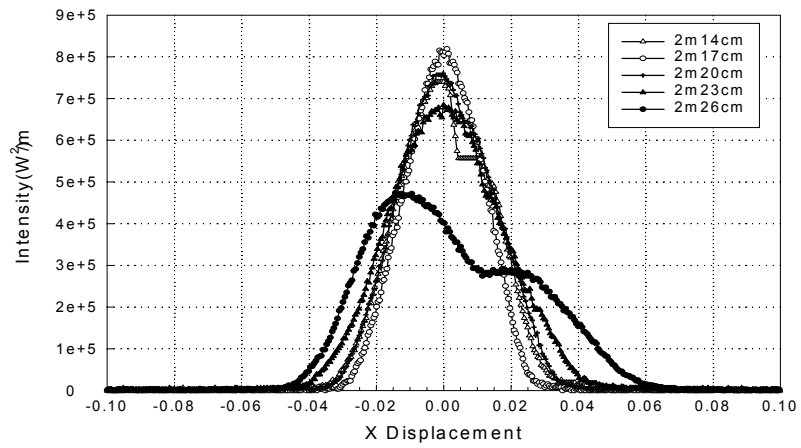


Fig. 5.5(a) Flux cross sections of reflector 5 through x-direction

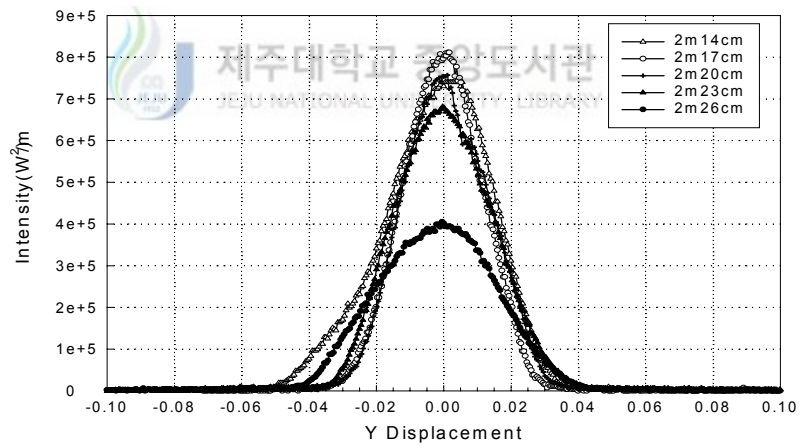


Fig. 5.5(b) Flux cross sections of reflector 5 through y-direction

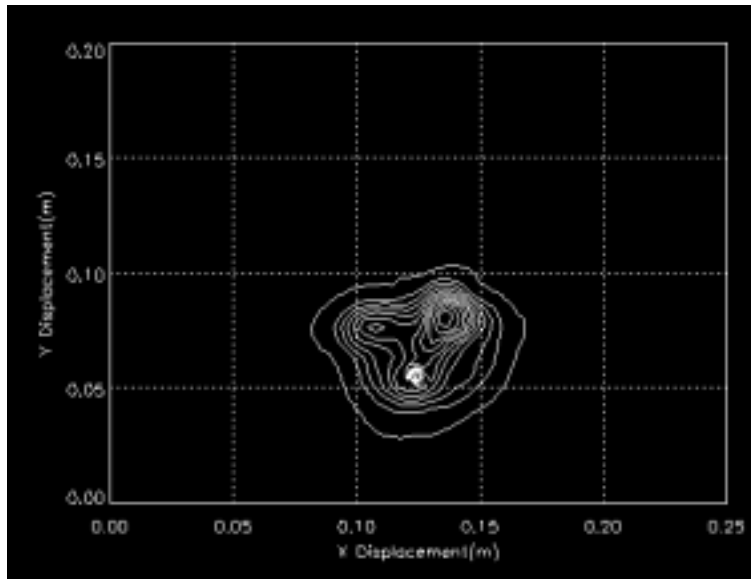


Fig. 5.6 Comparison of peak flux for 5 reflectors (1.0m x 1.0m x 0.15m)

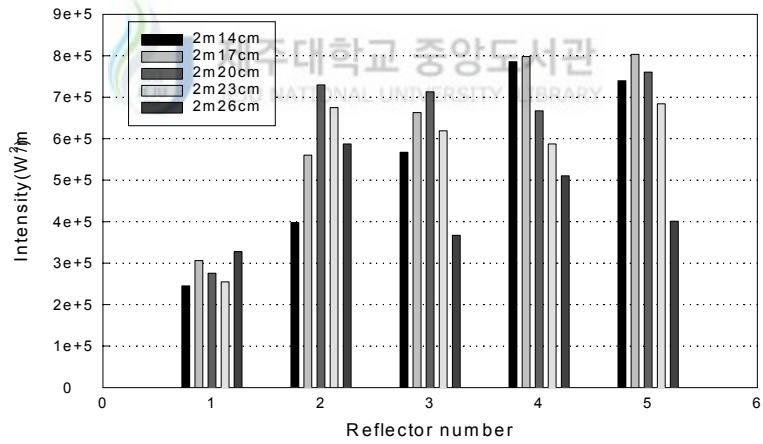


Fig. 5.7 Comparison of peak flux for 5 reflectors

2) 집광기의 집광 플럭스 분포

Fig 5.8은 5개의 반사경 전체로 집광시켰을 경우, dish의 꼭지점으로부터 타겟의 거리가 2.11m로부터 2.23m까지 3cm씩 거리를 증가시키면서 타겟상의 플럭스 분포를 측정한 것이다. 이론적 초점거리가 2.20m이지만, 실제 초점거리는 2.17m로 측정되었다. 실제 초점거리인 2.17m를 기준으로 전, 후 방향에서의 플럭스 형상을 살펴보기 위해 2.11m, 2.14m, 2.17m, 2.20m, 2.23m의 거리에서 촬영된 플럭스 분포를 나타내었다. 실제 초점거리로 관측된 2.17m에서 최대 강도는 약 $1.89 MW/m^2$ 으로 상당히 높은 에너지가 한 지점으로 집광되고 있으며, 이론적으로 설계된 초점거리에 비해 3cm 정도의 오차를 보였다.

Fig. 5.9에서 Fig. 5.13까지는 초점 거리를 2.11m부터 2.23m까지 3cm의 간격을 두고 각각에 대한 플럭스 분포를 surface plot과 contour plot으로 보여주고 있다. Fig. 5.9를 관찰해 보면, 2.11m의 거리에서 이미지 앞쪽으로 세 지점의 peak가 형성되었고, 뒤쪽으로 낮은 강도의 peak가 한 개 더 형성된 것을 볼 수 있다. 또한, surface plot에서는 제대로 관찰되지 않으나, contour plot에서 나머지 한 개의 peak도 형성되어 있어 반사경 다섯 개에 대한 이미지가 서로 다른 위치에 모두 나타나고 있다. 이렇게 각기 다른 강도의 이미지로 나타나는 것은 반사경들이 집광기에 고정되어 있어 실제 초점거리가 집광기에 맞춰져 있을 뿐 반사경 각각의 실제 초점거리로는 맞춰져 있지 않기 때문이다. 또한, surface plot 안쪽으로 꽃잎 형태의 실제 이미지가 형성되어있는 것을 관찰할 수 있었다.

2.14m에서는 초점이 상당 부분 한 곳으로 모여있어, 플럭스가 차지하는 면적이 대폭 축소된 형상을 보여주었다. contour plot으로는 반사경 개개의 이미지가 뭉쳐있어 자세히 분간할 수는 없지만, surface plot에서는 여전히 2~3개의 peak가 분리된 것을 관측할 수 있었다. 2.17m에서 거의 가우시안 분포에 가깝게 초점이 한 지점으로 집중되었으며, contour plot 또한 흩어짐 없이 일정한 모습을 보였다. 실제 초점 거리로 관측된 2.17m를 넘으면서 다시 분산된 형태를 보였으며, 2.23m에서 반사경 각각의 이미지가 완전히 분리된 형태로 나타났다.

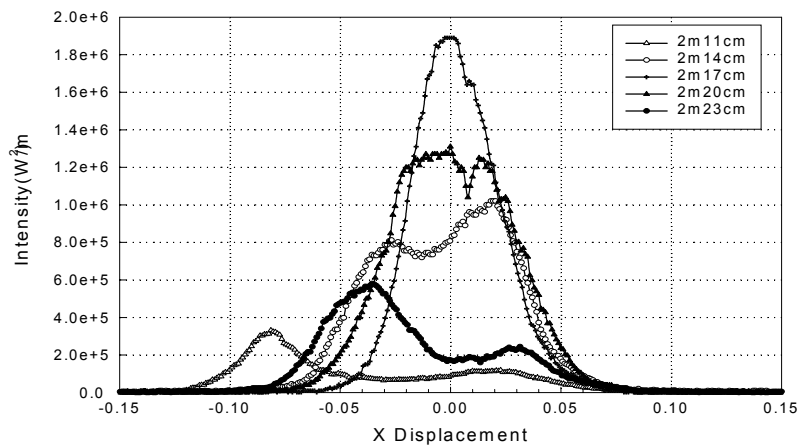


Fig. 5.8(a) Flux cross sections of concentrator through x-direction

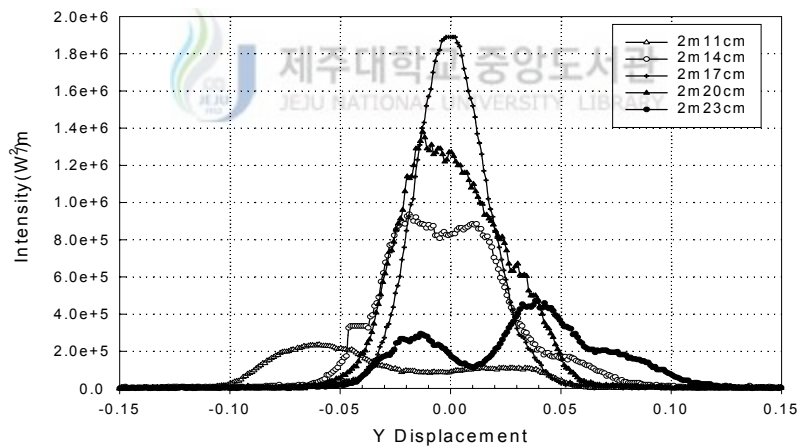


Fig. 5.8(b) Flux cross sections of concentrator through y-direction

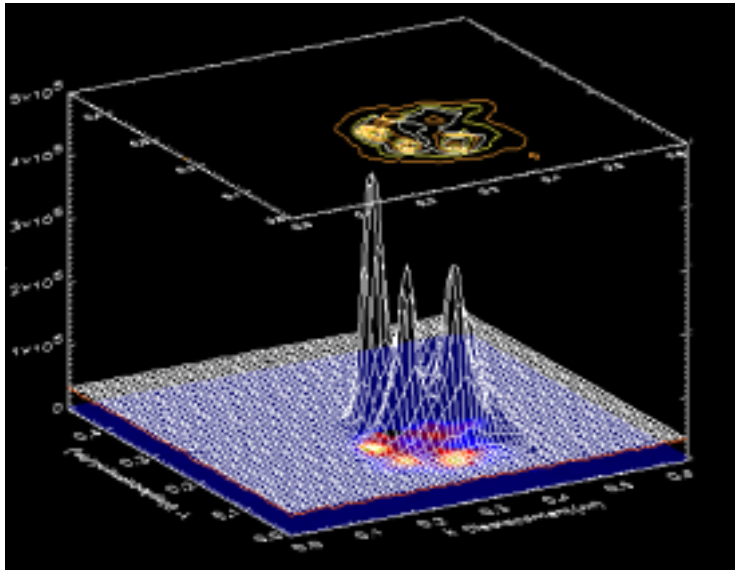


Fig. 5.9 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.11m

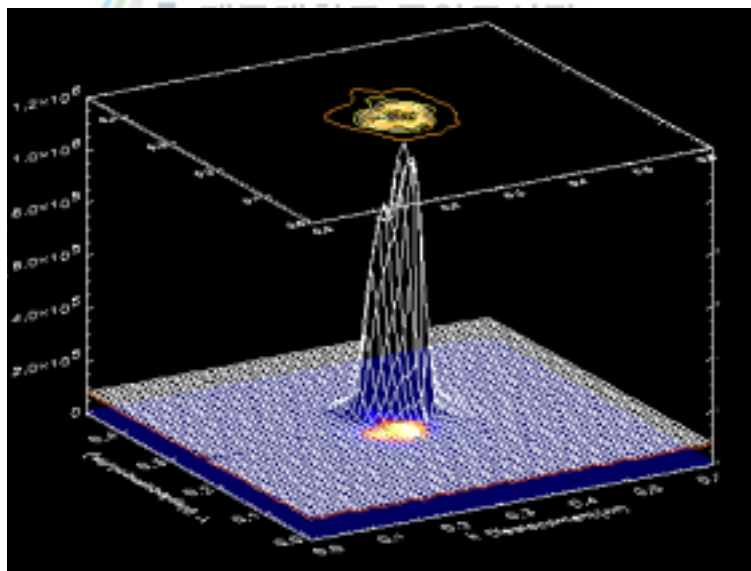


Fig. 5.10 A combination display of surface and contour plots for concentrator at target position 2.14m

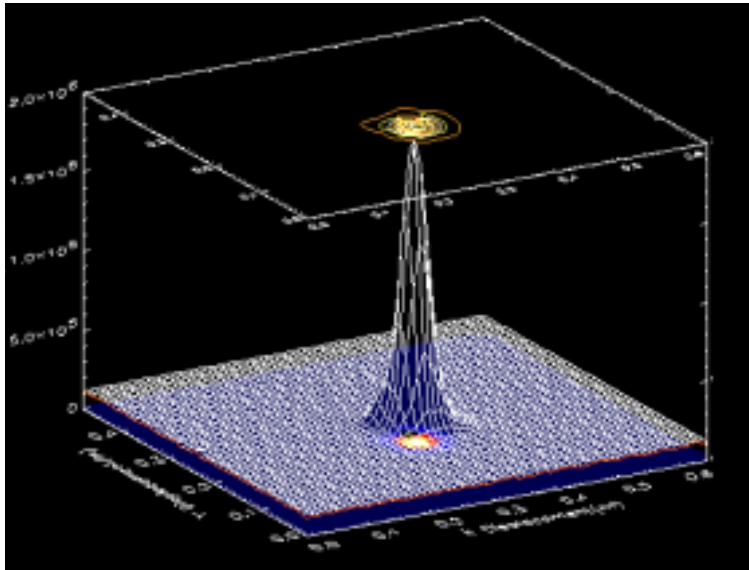


Fig. 5.11 A combination display of surface and contour plots for concentrator at focal position 2.17m

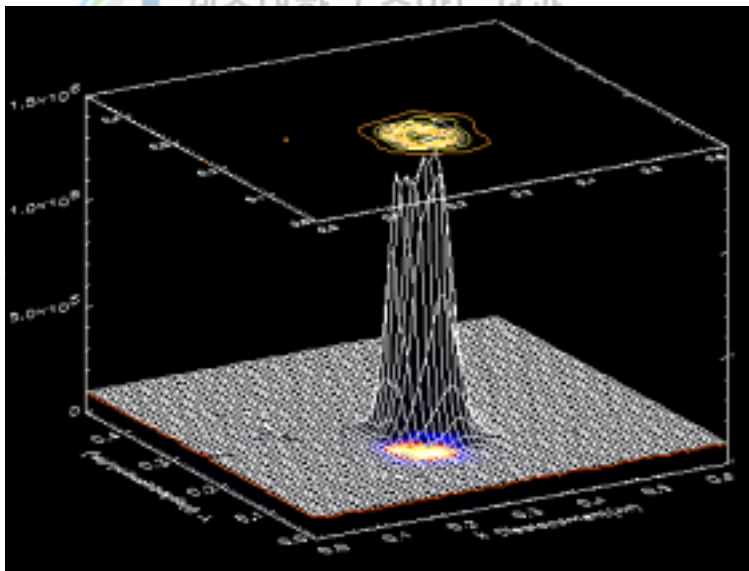


Fig. 5.12 A combination display of surface and contour plots for concentrator at focal position 2.20m

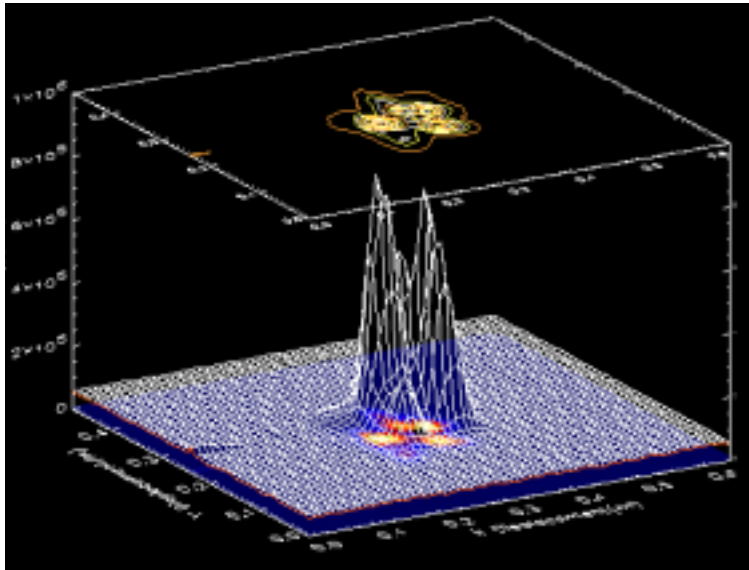


Fig. 5.13 A combination display of surface and contour plots for concentrator at focal position 2.23m

3) 집광 플럭스의 변위

집광 시스템에서 빛을 모으고자 하는 흡수기의 동공에 정확하게 집광시켜 손실이 없도록 하는 것은 매우 중요하다. 본 시스템과 같이 여러개의 포물면 반사경으로 이루어진 집광 시스템의 경우, 반사경 각각에 대해서 초점의 위치가 흡수기의 동공에 정확하게 위치하도록 조정하는 일은 매우 힘든 일이다. Fig. 5.14와 Fig. 5.15는 원형 타겟의 중심을 기준으로 플럭스의 도심이 x, y 방향으로 어느 정도 벗어나고 있는지를 이미지 분석을 통하여 평가하였다.

Fig. 5.14에서 영점은 타겟의 중심, 즉 흡수기 동공의 중심이 되는 지점이다. peak가 세 지점으로 분산되는 1번 반사경을 제외한 나머지 반사경들은 최대 peak가 위치하는 지점과 도심의 위치가 거의 일치하였다. Fig. 5.14에서 3, 4, 5 번 반사경이 타겟의 중심으로부터 좌측 아래 방향으로, 2번 반사경이 우측 위쪽 방향으로 벗어남을 관측할 수 있었다. 반사경 1번의 경우 여러 개의 peak가 나타나므로, 최대 peak가 나타나는 지점이 반드시 플럭스의 도심이라고 할 수 없으며, 계산된 플럭스의 도심과 타겟 중심을 비교했을 때 초점이 타겟의 중심에 거의 일치하는 것으로 나타났다. 하지만 전체적으로 평가했을 경우, x, y축 양쪽으로 2cm 이상 벗어나고 있지 않아 대체적으로 정확한 위치로 집광시키고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 5.15는 다섯 개의 반사경 전체를 집광시켰을 경우 원형 타겟으로부터 도심이 벗어난 정도를 보여주는 그래프이다. 음의 x, y축 방향으로 벗어나 있으며, 특히 x축 방향으로 좀 더 많이 벗어났음을 관측할 수 있지만, 역시 2cm 이내의 오차를 보이고 있어, 집광기에 의해 반사된 빛이 대체로 정확한 지점에 비추고 있었다.

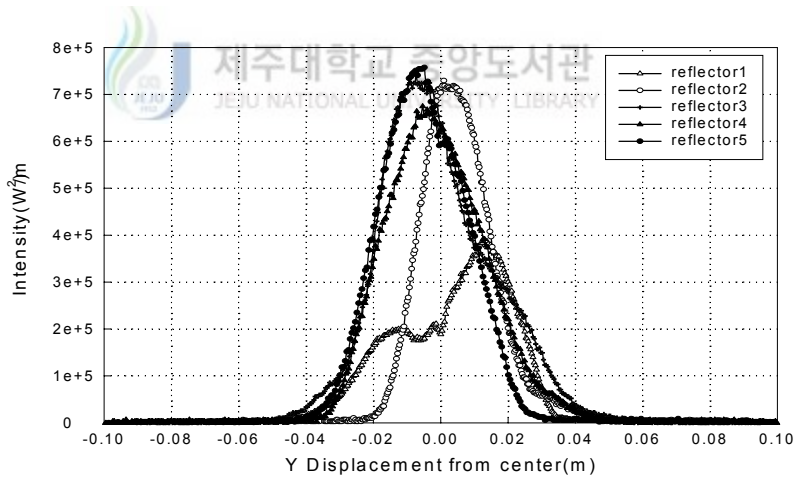
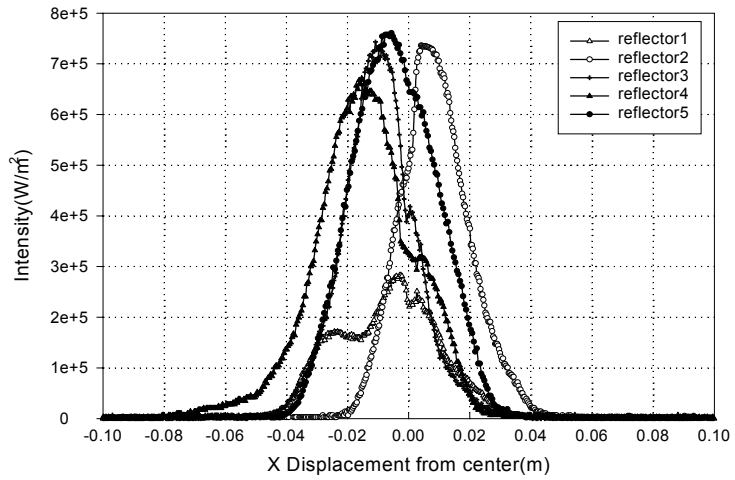


Fig. 5.14(b) Y-directional deviation of flux centroid from target center

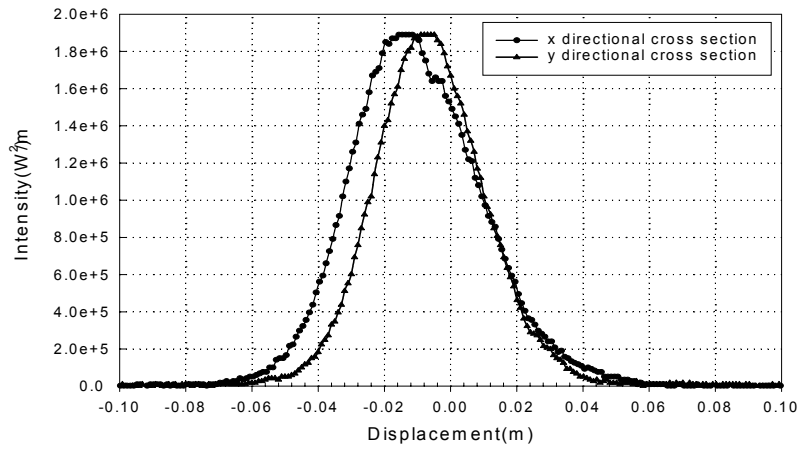


Fig. 5.15 X and y directional deviation of flux centroid from target center for total reflector

2. Intercepted Energy 분포 특성

1) Intercepted Energy 비율(PIR)

흡수기의 동공이 너무 크게 결정이 된다면 많은 열손실을 감수해야 하며, 너무 작다면 집광되어 들어오는 빛을 다 받아들이지 못하는 결과를 초래한다. 그러므로, 타겟 중심으로부터 반경 거리에 따라 전체 에너지의 몇 %가 들어오는지 평가하는 것은 흡수기에서 동공의 크기를 결정하는데 가장 중요한 요소이다.

Fig. 5.16은 집광기의 꼭지점으로부터 원형 타겟까지의 거리가 2.11m에서 2.23m까지 3cm의 간격을 두면서 촬영한 이미지를 분석한 것으로서, 플럭스의 도심을 중심으로 하였을 때 반경 거리에 따른 에너지 비율을 나타내고 있다. 실제 초점거리로 측정된 2.17m에서의 그래프가 같은 반경에서 다른 그래프와 비교했을 때 가장 많은 에너지를 포함하고 있다는 것을 알 수 있었다. 다음으로 2.14m와 2.20m일 때 반경 0.05m까지 약 80%의 에너지 비율을 보여주었다. 특히, 실제 초점거리에서 많이 떨어져 있는 2.11m와 2.23m을 관찰해 보면 도심에서부터 에너지 포함 비율이 매우 낮게 형성되어 있어, 한 지점으로 집광이 제대로 이루어지지 못하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 반경 거리에 따른 에너지 비율을 측정함에 있어 도심을 중심으로 에너지 비율을 평가하는 것은 단지 플럭스가 얼마나 집광이 잘되는지 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, 원형 타겟의 중심으로부터 반경 거리에 따른 에너지 비율을 알아내는 것이 중요하다.

Fig. 5.17은 실제 초점거리로 관측된 2.17m에서의 반경 거리에 따른 에너지 포함 비율을 나타낸 그림으로, 플럭스의 도심을 영점으로 한 것과, 원형 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 반경내의 에너지 밀도가 매우 높음을 알 수 있었다. 이것은 흡수기 동공의 크기를 결정함에 있어 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 때 90%의 에너지를 포함하는 반경

을 선택할 수 있는 충분한 이유가 된다. 원형 타겟의 중심을 영점으로 하였을 경우 0.059m 이내에 전체 에너지의 90%를 포함하였으며 동공의 크기를 직경 약 0.12m로 결정할 수 있었다. 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.



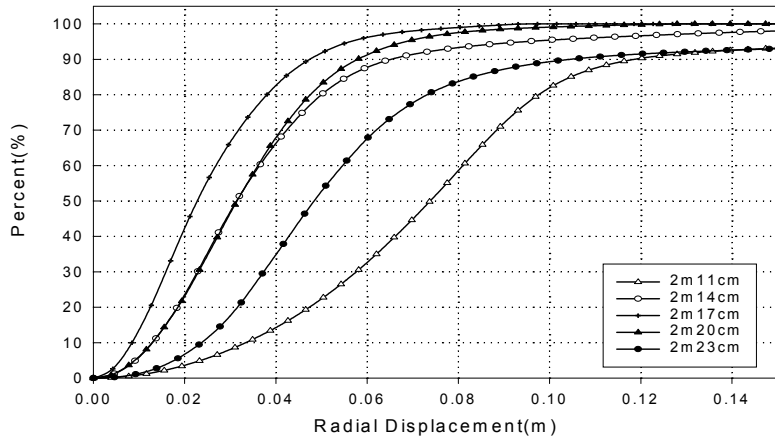


Fig. 5.16 Percent power within radius at target positions

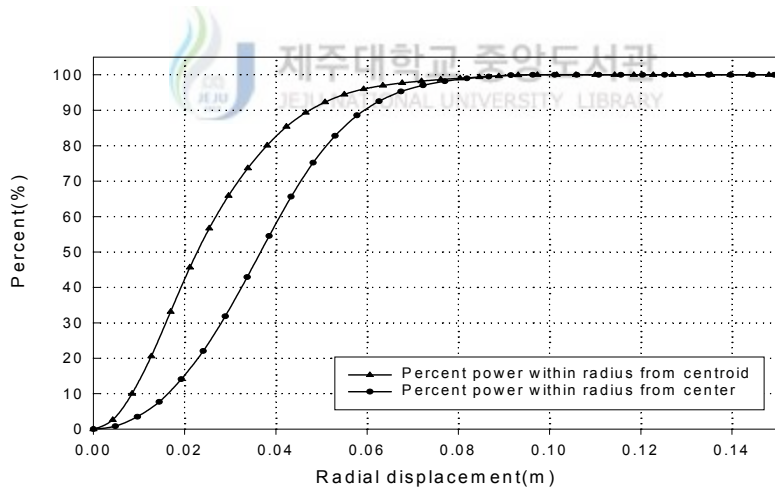


Fig. 5.17 Percent power within radius from center and centroid at focal length 2.17m

2) 집광비(Concentration Ratio)

집광된 에너지는 기하학적 집광비와 광학적 집광비에 의해서 표현된다. Fig. 5.8을 보면, 실제 초점거리 2.17m에서 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 0.06m내의 면적을 흡수기 개구부 면적이라고 한다면 기하학적 집광비는 347 suns에 이른다

3) Intercepted energy

Table 1 Intercepted energy and intercept factor for 5 reflectors

Reflector	반사경 1	반사경 2	반사경 3	반사경 4	반사경 5	집광기 (전체반사경)
초점거리(m)	2.17	2.20	2.20	2.17	2.17	2.17
Intercepted energy (W)	496	489	517	518	492	2467
Intercept factor	0.878	0.865	0.915	0.917	0.871	0.858

Table 1은 각각의 반사경에 대해서 실제 초점거리로 확인된 지점에서의 원형 타겟 상에 형성된 플럭스의 에너지, 즉 실제 intercepted energy의 계산 값을 보여주고 있다.

반사경 각각의 반사율을 제작 당시의 반사율 90%, 그리고 직달 일사량을 $800 W/m^2$ 라 하였을 경우, 반사경 한 개에 대해 이론적으로 계산된 값은 $565 W$ 이며, 전체의 반사경에 대해서는 $2827 W$ 였다. 그러나 실제 intercepted energy는 $489 W$ 에서 $518 W$ 까지, 약 85%부터 91% 사이에서 집광되고 있어 반사 타겟에 집광된 에너지는 각각의 반사경에 대해 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한, 집광기로 집광시켰을 경우, $2467 W$ 로써 약 85.8% 정도가 반사 타겟에 집광되었다. 이것은 여기에 언급된 실제

초점거리뿐만 아니라 촬영을 했던 다른 거리에서도 마찬가지였다. 이런 사실은 집광된 에너지가 타겟과 반사경의 거리에 따라 큰 변화가 없으며, 단지 집광되어 형성된 플럭스의 면적에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.



VI. 결 론

본 연구는 dish형 집광 시스템의 초점 지역에 형성되는 집광 분포를 해석함으로써 최적의 흡수기를 설계하고, 흡수기의 정확한 위치를 설정하며, 반사경 제작에서의 오차를 줄이기 위한 중요한 자료를 얻기 위해 수행되었다. 실험에 사용된 시스템은 반사경 5개로 이루어진 집광기와 이론적 초점 거리 2.20m에 위치한 반사 타겟으로 구성되어 있으며, 반사경은 직경이 1m, 두께 2mm, 그리고 뒷면이 은코팅 처리된 반사율 90%의 포물면 유리 거울로 되어있다.

이러한 시스템에 대해서, 흡수기의 개구부를 정확한 지점에 위치시키기 위한 실제 초점거리와 플럭스 도심의 변위를 도출해 냈으며, 반사경 제작과정에서 나타나는 오차의 원인을 밝혀내었다. 실제 초점 거리에서 반경에 따른 에너지 비율을 평가함으로써 흡수기 개구부의 최적 직경을 도출하였으며, 수광 면적에 대한 집광비와 반사 타겟에 차단된 에너지의 양을 계산해 냈다. 또한, 연구를 수행하는 과정에서 flux mapping 시스템의 구성, 그리고 시스템에 사용된 계측기의 선정 및 보정 방법, 재료의 사용 방법 등을 습득 제시하였다.

본 연구를 함으로써 도출된 결과들은 다음과 같다.

1) 집광 에너지 분포의 평가를 위해 이론적 초점 거리인 2.20m를 기준으로 전, 후 -6cm, -3cm, 0cm, 3cm, 6cm의 간격을 두고 반사 타겟상에 집광된 플럭스를 촬영·분석한 결과, 반사경 1~5 까지의 실제 초점 거리는 2.17m, 2.20m, 2.20m, 2.17m, 2.17m로 각각 평가되었다. 이것은 이론적 초점 거리인 2.20m에 비해 반사경 1, 4, 5 번의 경우 3cm 정도 앞쪽으로 초점이 형성된 것이다. 반사경 1번의 경우 peak가 세 지점으로 분산되었는데, 이것은 평면의 유리를 포물면의 유리로 만드는 제작 과정에서 노의 온도가 최적의 온도보다 높게 형성되어 변형이 생겼기 때문인 것으로 사료된다. 반사경 전체로 집광시켰을 경우 2.17m에 실제 초점 거리가 형성되었으며, 전, 후로 간격이 벌어질수록 초점이 여러 개로 분산되어지면서 반사경 각각에 대한 플럭스

이미지들이 뚜렷해졌으며, 플럭스의 최대 강도 또한 낮아졌다.

2) 집광 플럭스의 변위 평가에서, 반사경 각각 및 전체에 의해 반사 타겟에 집광된 플럭스의 이미지를 촬영, 분석하여 플럭스의 도심이 반사 타겟의 중심으로부터 어느 정도의 오차가 있는지를 평가하였다. 그 결과 반사경 3, 4, 5 번이 타겟 중심을 기준으로 좌측 아래 방향으로, 반사경 2번이 우측 위쪽 방향으로 약간의 오차를 보였다. 반사경 전체로 집광 시켰을 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 비추고 있는 것으로 평가되었다.

3) 초점 거리에서의 반경에 따른 Intercepted energy 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 흡수기 동공 중심의 위치를 도심 위치와 일치하도록 설치하였을 경우 반경 0.047m, 즉, 흡수기 공동의 개구부 직경을 0.094m 까지 줄일 수 있을 것으로 사료되었다.

4) 90%의 에너지를 포함하는 반경 0.06m 내의 면적을 흡수기 공동의 입구 면적으로 결정한다면 기하학적 집광비는 347 suns 였다. 이것은 수광 면적의 1/347배에 해당하는 좁은 면적으로 태양 빛을 집광시킬 수 있음을 의미한다.

5) 반사 타겟 상의 intercepted energy 에너지 평가에서, 반사경 한 개 면적에서 수광된 에너지는 반사율 90%, 일사량 $800 W/m^2$ 일 때 이론적으로 565 W의 에너지가 반사 타겟에 집광 되어지며, 다섯 개의 반사경에 대해서는 2827 W의 에너지가 집광 되어진다. 그러나 실제 intercepted energy 값은 반사경 각각에 대해 489 ~ 518 W까지 이론값의 약 85 ~ 91% 정도가 집광되고 있으며, 집광기로 집광시켰을 경우 2467 W로서 이론 값의 85.8%가 집광되었다.

초점지역에 형성되는 플럭스 분포를 카메라로 촬영하여 적절한 분석 도구로 이미지를 분석함으로써 그 특성을 파악할 수 있는 flux mapping 방법은 형태 및 크기가 다른 반사경, 또는 개수가 다른 경우에도 본 연구와 동일한 방법으로 적용함으로써 시스템을 분석하는데 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, Inc.

Goodman, J. H., Krom, L. S. and Davis P., 1994, A Spherical Dish Concentrator for Process Heat, Proceeding of the 1994 Annual Conference ASES. pp.191~196.

Johnston, G., 1995, Flux Mapping the 400 m^2 "Big Dish" at the Australian National University, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol.117, pp.290~293.

Johnston, G., 1998, Focal Region Measurement of the 20 m^2 Tiled Dish at the Australian National University, Solar Energy, Vol.63, No.2, pp.117~124.

Jones, P. D. and Wang, L., 1995, Concentration Distributions in Cylindrical Receiver/Paraboloidal Dish Concentrator Systems, Solar Energy, Vol.54, No.2, pp.115~123.

Jones, S. A. and Neal, D. R., VSHOT : A Tool for Characterizing Large, Imprecise Reflectors, SAND96-2272C, Sandia National Laboratories.

Leonard, D.J., 1989, Test Results on Parabolic Dish Concentrators for Solar Thermal Power Systems, Solar Energy, Vol.42. No.2. pp.173~187.

Nendt, P. and Rabl, A., 1980, Optical Analysis of Point Focus Parabolic Radiation Concentrators, SERI/TR-631-336, Solar Energy Research Institute.

Neumann, A. and Schmitz, A., 1999, The SCATMES Device for Measurement of Concentrated Solar Radiation, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol.121, pp. 116~120.

Schubnell, M., 1992, Sunshape and Its Influence on the Flux Distribution in Imaging Solar Concentrators, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol.114, pp. 260~266.

Schubnell, M. and Keller, J., 1991, Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol. 113, No.2, pp.112~116.

Shortis, M. R. and Johnston, G. H., 1996, Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part I: Measurements of Surfaces, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol.118, pp.146 ~ 150.

Shortis, M. R. and Johnston, G. H., 1997, Photogrammetry: An Available Surface Characterization Tool for Solar Concentrators, Part II : Assessment of Surfaces, Int. J. Solar Energy Engineering, Vol.119, No.4, pp.286~291.

강용혁 외 8명, 1999, Dish형 태양열 집광시스템 개발, KIER-994601, 한국에너지기술연구원.

Appendix

Fig A-1 Calibration graph of radiometer

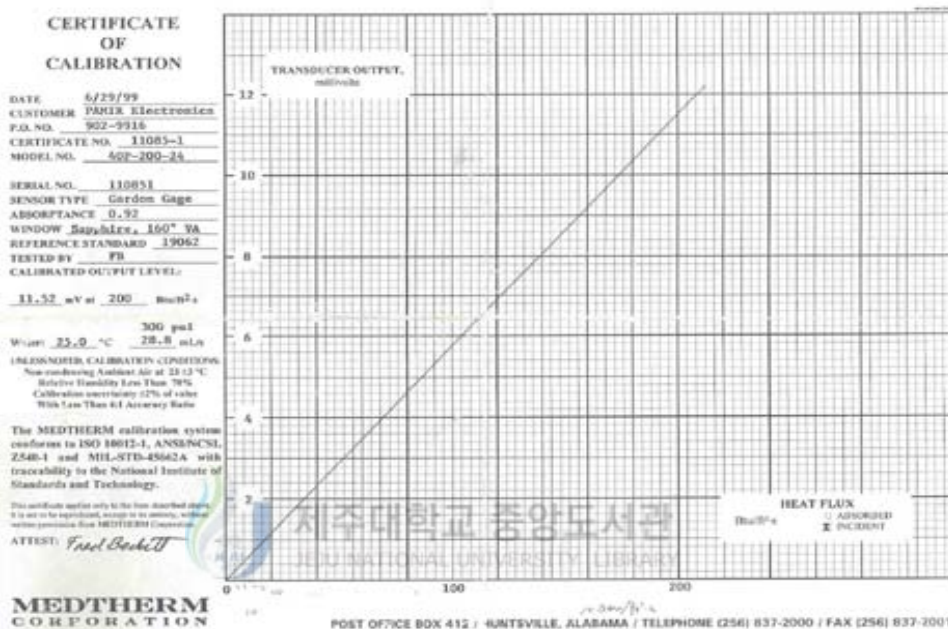


Table A-1. Coefficients of polynomial fit Equation 2-12 to angular

acceptance function, with	a	b	c	v_1	v_2
30 [degrees]	-1.8660	32.1042	-89.5992	0.4355	0.5342
35	0.2309	8.7987	-23.7599	0.4785	0.6284
40	0.8866	2.4950	-8.0311	0.5053	0.7226
45	1.1738	0.0861	-2.7177	0.5189	0.8205
50	1.2646	-0.7577	-0.8522	0.5179	0.9231
55	1.2466	-0.9444	-0.2199	0.4969	1.0290
60	1.2075	-0.9682	0.0309	0.4645	1.1407

논문을 마치며...

여기 한국에너지기술연구원에서 생활한지도 2년이 지나 이제 마무리할 때가 다 되었습니다. 언제나 자신이 한 일에 대해서 만족하기가 힘든가 봅니다. 항상 도움을 주셨던 분들 앞에서 내가 해야 할 일이나 제대로 하는 모습 보여주었는지 부끄러울 때가 많습니다.

여러 가지 부족했던 저를 정으로 돌봐주시고, 많은 가르침을 주셨던 강용혁 박사님, 광희열 박사님, 윤환기 선생님, 유창균 선생님께 진심으로 깊은 감사드립니다.

멀리 떨어져 계신 곳에서도 항상 제 앞길을 걱정해주시고, 논문 지도해주신 천원기 교수님께 이 자리를 빌려 다시 감사드립니다.

이윤준 교수님, 박재우 교수님, 이현주 교수님, 그리고 김 신 교수님께 열정적으로 강의하시던 모습 떠올리며, 사회에서도 그 배움들 잊지 않도록 노력하겠습니다.

이 논문을 시작하면서부터 마무리 할 때까지 옆에서 끝없는 도움을 주었고, 친형 같은 형제애를 느끼게 해주었던 저의 사랑하는 이동규, 강명철 선배님께도 고맙다는 말 드리고 싶습니다.

무더운 여름날 뜨거운 햇볕 아래서 함께 땀흘려 주었던 최종윤님 감사합니다. 종윤님이 사오셨던 선 크림 많이 생각나네요.

그리고 주위에서 항상 도움을 주셨던 태양열 이용 연구팀원 여러분들께 여기서 함께 했던 시간 잊지 않을 거라고 말씀드리고 싶습니다.

마지막으로, 아무말 없이 제가 하는 것을 믿고 지켜봐 주신 부모님과 저의 형님들께 깊은 감사의 말씀드리겠습니다.

2001년 12월 29일

현 성택 올림