

2012년 2월  
석사학위논문

# 광생물 반응기를 위한 도광판 설계 및 제작

조선대학교 대학원

광기술훈공학과  
박기찬

# 광생물 반응기를 위한 도광판 설계 및 제작

Design and Fabrication of Light Guiding Plate for  
Photobioreactor

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과  
박 기 찬

# 광생물 반응기를 위한 도광판 설계 및 제작

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과  
박 기 찬

# 박 기 찬의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 한국광기술원 박사 장 원 근 인

위 원 조선대학교 교수 박 종 락 인

2011년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제1장 서 론 .....	1
제2장 조명광학 일반이론 및 도광판 설계 .....	3
제1절 조명광학 일반이론 .....	3
1. 광복사의 계측 .....	3
2. 광도측정법 .....	3
제2절 도광판 설계 .....	8
2.1 도광판 모델링 .....	8
1. 광원 .....	8
2. 반사필름 .....	8
3. 도광판 패턴 .....	9
2.2 LED용 도광판 설계 .....	9
1. 테스트용 도광판 제작 및 특성 측정 .....	9
2. 도광판 설계를 위한 모델 파라미터 추출 .....	11
3. 도광판 설계 .....	12
2.3 태양광용 도광판 설계 .....	14
제3장 도광판 제작 및 성능 측정 .....	44
제1절 도광판 제작 .....	44
1. LED용 도광판 제작 .....	44
2. 태양광용 도광판 제작 .....	45

제2절 도광판 성능 측정 .....	54
제3절 결과 및 논의 .....	61
<b>제4장 결론</b> .....	64
<b>[참고문헌]</b> .....	75
<b>[감사의 글]</b> .....	79

## 그림 목차

그림. 2.1 분광시감효율 곡선 .....	6
그림. 2.2 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 외관도면 .....	16
그림. 2.3 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 각도별 상대 광도분포 곡선 .....	17
그림. 2.4 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 파장별 상대 복사강도 .....	18
그림. 2.5 LightTools로 모델링된 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI) 광원 .....	19
그림. 2.6 LED 광원 모델에 Apodization 파일 적용한 후 시뮬레이션한 결과와 측정치와의 비교 .....	20
그림. 2.7 양방향 반사율 분포함수에서 $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 의 정의 .....	21
그림. 2.8 반사필름(SY 64~70, SK)에 대해 측정된 BRDF 데이터 .....	22
그림. 2.9 제작된 도광판 패턴의 단면 .....	23
그림. 2.10 제작된 테스트용 도광판에 대해 측정된 조도분포. (a) 반사필름 유, (b) 반사필름 무 .....	24
그림. 2.11 LightTools에 적용된 도광판 패턴의 단면 .....	25
그림. 2.12 LightTools에서 도광판 밑면에 산란체를 적용한 모습 .....	26
그림. 2.13 테스트 도광판에 대한 조도분포 시뮬레이션의 예 ( $d = 2.8 \text{ mm}$ , $R = 90 \%$ ) (a)반사필름 유, (b)반사필름 무 .....	27

그림. 2.14 반사필름이 부착된 경우에 대한 평균오차 계산 결과 .....	28
그림. 2.15 반사필름이 부착되지 않는 경우에 대한 평균오차 계산 결과 .....	29
그림. 2.16 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않는 경우를 모두 고려한 총 평균 오차 계산 결과 .....	30
그림. 2.17 LED용 도광판의 설계과정 .....	31
그림. 2.18 LED용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃 .....	32
그림. 2.19 LED용 도광판의 시뮬레이션 예 .....	33
그림. 2.20 LED용 도광판에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균편차). (a) 최대 패턴간격 9 mm, (b) 10 mm, (c) 11 mm, (d) 12 mm, (e) 13 mm .....	34
그림. 2.21 LED용 도광판 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균조도). (a) 최대 패턴간격 9 mm, (b) 10 mm, (c) 11 mm, (d) 12 mm, (e) 13 mm .....	35
그림. 2.22 Auto-CAD를 이용하여 그린 LED용 도광판 패턴. (a) 최대 패턴 간격 9 mm, (b) 최대 패턴 간격 10 mm .....	36
그림. 2.23 광주광역시 지역에서의 태양 (a) 방위각 및 (b) 고도 .....	37
그림. 2.24 태양광 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃 .....	38
그림. 2.25 태양광용 도광판 최적화 시뮬레이션 수행 결과.(평균편차) .....	39
그림. 2.26 Auto-CAD를 이용하여 그린 태양광용 도광판 패턴 .....	40
그림. 3.1 LED 구동회로 .....	47
그림. 3.2 PCB 설계도면 .....	48
그림. 3.3 LED 구동회로 제작 과정 .....	49
그림. 3.4 방열판의 CAD 도면과 방열판 금형도면 .....	50
그림. 3.5 최종 제작된 LED용 방열판 .....	51
그림. 3.6 제작된 LED용 도광판 .....	52
그림. 3.7 태양광용 도광판의 집광구조체 .....	53
그림. 3.8 제작된 태양광용 도광판 .....	54
그림. 3.9 LED용 도광판의 조도 측정결과.(최대 패턴간격: 9 mm) .....	56

그림. 3.10 LED용 도광판의 조도 측정결과.(최대 패턴간격: 10 mm) .....57

그림. 3.11 태양광용 도광판의 조도 측정결과 .....58

그림. 3.12 디포커스된 태양광의 조도 분포 .....65

그림. 3.13 실험에 사용한 LED(LWH1056N, LUXPIA)의 스펙트럼 .....66

그림. 3.14 (a) 대기권 밖에서의 태양스펙트럼, (b) 직사광과 산란광을 포함한  
지표면(AM1.5 조건, AM: Air Mass)에서의 태양스펙트럼,  
(c) 직사광만을 포함한 지표면(AM1.5 조건)에서의 태양스펙트럼 .....67

## 표 목차

표 2.1 광도측정법과 복사측정법에서 사용되는 기본 단위 .....7

표 2.2 LED의 전기 광학적 특성.( $I_F = 60 \text{ mA}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) .....41

표 2.3 도광판 종류와 가공 방법에 따른 분류 .....42

표 2.4 PMMA의 일반적 특성 .....43

표 2.5 최대 패턴간격에 따른 설계 파라미터 .....44

표 3.1 LED용도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과,  
(최대 패턴간격: 9 mm) .....58

표 3.2 LED용도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과,  
(최대 패턴간격: 10 mm) .....59

표 3.3 태양광용도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과 .....60

표 3.4 제작한 LED용 도광판의 특성 .....68

표 3.5 선형 프레넬 렌즈의 투과효율 .....69

표 3.6 집광효율에 대한 시뮬레이션 결과 .....70

표 3.7 LED용 도광판의 Photon Flux Density 측정결과.(최대 패턴간격: 9 mm) ..71

표 3.8 LED용 도광판의 Photon Flux Density 측정결과.(최대 패턴간격: 10 mm) 72



# **ABSTRACT**

## **Design and Fabrication of Light Guiding Plate for Photobioreactor**

**By Park Gi Chan**

**Advisor : Prof. Jong Rak Park, Ph.D.**

**Department of Photonic Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

Recently, fossil fuel depletion and global warming have become critical issues in need of urgent solutions. One approach toward this, the use of new and renewable energy, has attracted considerable attention. Among renewable energy sources, bio-fuel developed using microalgae is considered promising. This thesis presents results of optical design and fabrication of light guiding plates (LGPs) to be used as illumination systems for photobioreactors, with which mass production of microalgae is commonly accomplished.

First, modeling of light sources, reflection films, and LGP patterns was performed. The LGP patterns were modeled as Lambertian scatterer. The modeling parameters (Reflectance: 50 %, Scatterer Width: 1.8 mm) were determined through matching simulations with the experimentally measured

illuminance distribution for a test LGP. LGPs for an LED (light emitting diode) source and sunlight were designed with the extracted model parameters. In the case of the LGP for sunlight, a linear Fresnel lens was employed for light focusing. Design parameters for the LGPs included maximum pattern spacing, minimum pattern spacing, and the width of the Gaussian function for pattern spacing.

LGPs for photobioreactors were fabricated using a CNC (computerized numerical control) machine. In the case of the LGP (size: 500 mm × 500 mm × 10 mm) for an LED source, the driving circuits for LEDs and plates for the heat sink were also designed and fabricated. In the case of the LGP (size: 500 mm × 600 mm × 10 mm) for sunlight, a mechanical frame for holding the Fresnel lens and the LGP was designed and fabricated. Two types of LGPs were fabricated and tested for LED source. The average illuminance for these two LGPs was 20,300 lx (photon flux density: 261  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and 17,150 lx (photon flux density: 198  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and the uniformity of the illuminance distribution was 71.8 % and 50.1 %, respectively. For the LGP for sunlight, the average illuminance and the uniformity of illuminance distribution were 21,110 lx (photon flux density: 372  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) and 67.8 %, respectively.

The LGPs fabricated in our work are presently being utilized as an illumination system for a flat-panel photobioreactor developed at the Biorefinery Center, Chosun University. This photobioreactor is being used to grow *Chlorella* and *Dunaliella*, and bio-diesel will be extracted from the biomass produced by these microalgae species. Modification of the light collecting system for sunlight and development of the LED-solar hybrid type LGPs are actively underway.

## 제1장 서 론

최근 석유, 천연가스 등 주요 에너지 자원의 매장량은 각각 약 40년, 약 60년 정도로 예측되고 있다.<sup>[1]</sup> 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)의 발표에 따르면 세계 에너지수요가 2008년부터 2035년 까지 연평균 2.1 %, 총 36 % 증가하며, 원유 가격 또한 약 2배 정도 증가할 것으로 보인다. 또한 비 OECD(Organization for Economic Cooperation and Development) 국가의 급속한 경제성장에 의해 에너지 소비는 계속 증가할 것으로 예상되고 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 전 세계적인 화석연료의 고갈 현상에 대처하기 위하여 신재생에너지의 개발이 절실히 요구되고 있으며,<sup>[3,4]</sup> 이와 별도로 1997년에 제정된 도쿄의정서에 의해 2012 년까지 지구온난화를 유발하는 이산화탄소, 메탄 등 6종류의 온실가스의 배출량을 1990년 배출 기준으로 평균 5.2 % 이상 감축해야 하는 상황이다.<sup>[5]</sup>

국내외적으로 화석연료의 고갈 문제와 지구온난화 문제의 해결을 위해 신재생에너지의 생산과 온실 가스의 주요 성분인 이산화탄소의 저감이 동시에 가능한 바이오 연료 관련 기술 개발이 큰 주목을 받고 있다. 또한, 국내적으로는 바이오 연료의 보급률을 2020년 까지 7 % 까지 확장 하고자하는 국가 주도의 바이오 연료 보급 확대 계획에 따라 바이오 연료 대량생산을 위한 기술개발에 관심이 높아지고 있다.<sup>[6]</sup>

현재 바이오에너지 생산을 위한 원료로는 옥수수, 콩, 사탕수수 등의 식용작물이 주로 사용되고 있으나, 이러한 식용작물을 바이오에너지의 원료로 사용하는 데에서 발생하는 윤리적 문제, 그리고 이들 작물의 증산에 수반되는 환경오염 문제 등이 꾸준히 제기 되고 있다. 이에 따라, 최근에는 식물에 비해 증식속도가 빠르고 유전자 조작에 의한 기능향상이 비교적 용이하며, 기존의 식용작물이 아니라는 점에서 재생 에너지원으로서의 장점을 고루 갖추고 있는 미세조류가 큰 주목을 받고 있다.<sup>[7-9]</sup>

미세조류의 대량 생산을 위해 여러 종류의 광생물 반응기(Photobioreactor)가 제안 되어 사용되고 있다.<sup>[10~14]</sup> 효과적인 광생물 반응기 개발을 위해서는 효율적인 광원 활용이 필수적이며, 이를 위해 다양한 광학 시스템이 제안 되었다.<sup>[15~19]</sup> 광생물 반응기에서 사용되는 광학 시스템은 크게 집광, 광전송, 배광 시스템으로 구성되어 있다. 집광 시스템은 렌즈 또는 반사판을 이용하여 광을 집광 시켜 전송 시스템으로 입사

시킨다. 광전송 시스템은 광섬유, 광도파관 등을 이용하여 집광 시스템으로부터 입사된 광을 배광 시스템까지 전송한다. 배광 시스템은 전송된 광을 광생물 반응기에 균일하게 조사하기 위해 도광판(Light Guiding Plate, LGP), 광섬유 등을 이용하고 있다.

본 논문에서는 광생물 반응기의 조명 시스템으로 활용될 도광판의 광학설계 및 제작에 대해 보고한다. 광학설계를 위하여 Optical Research Associates 사의 조명광학설계 소프트웨어인 LightTools를 사용하였다.<sup>[20]</sup> 먼저, LED(Light Emitting Diode)를 광원으로 사용하는 도광판에 대한 광학설계를 수행하였고, 다음으로 프레넬 렌즈를 이용하여 집광시킨 태양광을 광원으로 사용하는 도광판에 대한 광학설계를 수행하였다. 설계결과를 바탕으로 CNC(Computerized Numerical Control) 가공을 통해 광생물 반응기용 도광판을 제작 하였으며, 그 특성을 측정하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 조명광학 일반이론과 도광판 설계 방법에 대해 소개하였고, LED용 도광판과 태양광용 도광판 설계과정에 대해 자세히 서술하였다. 제 3장에서는 도광판 제작과정과 제작된 도광판의 성능 측정 결과를 정리하였고, 마지막 제 4장에서는 본 논문의 연구결과를 종합하여 기술하였다.

## 제2장 조명 광학계

### 제1절 조명 광학 이론

#### 1.1 광복사의 계측

광복사의 계측방법은 크게 복사측정법(Radiometry)과 광도측정법(Photometry)으로 나뉜다. 복사측정법에서는 전 파장 영역(10 nm ~ 1000  $\mu$ m)에서의 전자기파 복사(Electromagnetic Radiation) 에너지를 다루며, 단위로는 복사속(W), 복사강도(W/sr), 복사조도(W/m<sup>2</sup>), 복사휘도(W/m<sup>2</sup>/sr) 등을 사용한다. 광도측정법에서는 사람의 눈으로 인지 할 수 있는 가시광선(Visible light, 380 nm ~ 780 nm) 영역에서의 복사 에너지를 다룬다. 광도측정법에서 사용하는 측광량은 국제조명위원회(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)에 의해 정의된 분광시감효율(Spectral Luminous Efficiency)에 의해 결정되며, 단위로는 광속(lm), 조도(lx, lm/m<sup>2</sup>), 광도(cd, lm/sr), 휘도(nt, lm/sr/m<sup>2</sup>) 등을 사용한다. 분광시감효율은 광의 파장별 사람 눈의 감도를 의미하며, 눈이 가장 민감하게 느끼는 파장인 555 nm에 대한 값을 기준으로 상대적으로 정의된 값을 갖고 있다. 분광시감효율 곡선( $V(\lambda)$ ,  $\lambda$ : 파장)은 그림 2.1과 같다.<sup>[21-24]</sup>

#### 1.2 광도측정법

본 절에서는 광도측정법에서 사용하는 측광량의 단위에 대해 좀 더 상세히 소개하도록 한다.

##### 가. 광속(Luminous Flux)

광속은 사람 눈의 시감 특성을 고려한 전자기파의 단위 시간당 전달 에너지를 의미하며 단위는 루멘[lm]을 사용한다. 조명용 광원의 광량을 나타낼 때에 주로 사용한다. 일반적으로  $\Phi$ 로 표기하며, 분광복사속( $\Phi_e(\lambda)$ , 단위: W/nm)로부터 다

음 식을 사용하여 구할 수 있다.<sup>[21-24]</sup>

$$\Phi = K_m \int V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

여기서,  $K_m$ 은 최대 시감 효과도에 해당하는 상수로 683 lm/W 이다.

### 나. 조도(Illuminance)

조도는 광원에서 물체를 향하여 복사된 광속 중 단위면적당 입사하는 광속의 양을 의미하며, 단위로는 렉스[lx](1lx = 1lm/m<sup>2</sup>)가 사용된다. 일반적으로  $E$  로 표기하며, 입사된 광속  $\Phi$ , 입사면적  $A$ 와 다음관계 식을 만족한다.<sup>[21-24]</sup>

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2.2)$$

### 다. 광도(Luminous Intensity)

광도란 광원의 밝기를 평가하는 양으로서 광원으로부터 발산되는 단위 입체각 (Solid Angle, 단위: sr) 당 광속의 세기를 의미하며, 단위는 칸델라[cd] (1 cd = 1lm/sr)를 사용한다. 일반적으로  $I$ 로 표기한다. 특정 방향에 위치한 입사 영역의 면적을  $A$ 라 하고, 점광원으로부터 입사 영역까지의 거리를  $r$ 이라고 할 때 입체각  $\Omega$  와 광도  $I$  는 다음과 같이 표현된다.<sup>[21-24]</sup>

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.3)$$

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2.4)$$

### 라. 휘도(Luminance)

휘도는 사람이 인지하는 밝기에 가장 근접한 광도측정법의 측광량으로 알려져

있으며, 단위 입체각 당 단위 면적(투영면적)당 광속의 세기에 해당한다. 단위로는 니트[nt]( $1\text{nt} = 1\text{lm}/\text{sr}/\text{m}^2 = 1\text{cd}/\text{m}^2$ )를 사용하며, 일반적으로  $L$ 로 표기한다. 조도와 달리 투영면적을 적용하여야 하는데, 광원의 면적이  $A$ , 광원면의 수직한 방향으로부터 관측방향이 이루는 각이  $\theta$  일 때, 투영면적  $A'$ 은 다음과 같다.

$$A' = A \cos \theta \quad (2.5)$$

따라서, 휘도  $L$ 은 다음 수식과 같이 표현된다.

$$L = \frac{\Phi}{\Omega \cdot A'} = \frac{\Phi}{\Omega \cdot A \cos \theta} \quad (2.6)$$

## 마. 단위 요약

가 ~ 라의 설명을 통해 광도측정법에서 기본적으로 사용되는 광속, 조도, 광도, 휘도에 대해 알아보았고, 각 단위들은 서로 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있었다.<sup>[21-24]</sup> 광도측정법의 광속에 대응하는 복사측정법의 물리량을 복사속이라 하며 와트[W]( $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$ )를 기본단위로 사용한다. 복사속이외의 복사측정법 물리량인 복사조도, 복사강도, 복사휘도는 각각 광도측정법 물리량인 조도, 광도, 휘도에 대응되며 비슷한 방식으로 정의된다. 표 2.1은 광도측정법과 복사측정법에서 사용되는 기본 단위를 정리한 것이다.<sup>[21-24]</sup>

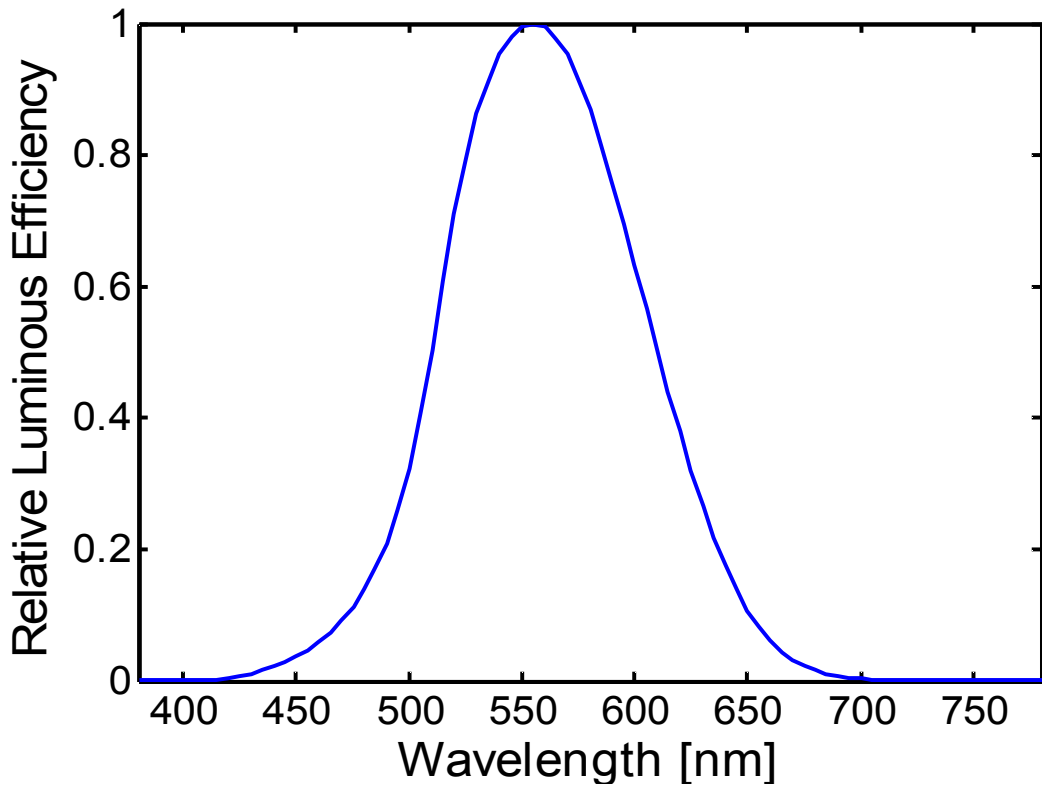


그림 2.1 분광시감효율 곡선.<sup>[21]</sup>



표 2.1 광도측정법과 복사측정법에서 사용되는 기본 단위.

광도측정법		복사측정법	
양	기호	양	기호
광속	lm	복사속	W
조도	lx ( $\text{lm}/\text{m}^2$ )	복사조도	$\text{W}/\text{m}^2$
광도	cd ( $\text{lm}/\text{sr}$ )	복사강도	$\text{W}/\text{sr}$
휘도	nt ( $\text{cd}/\text{m}^2$ , $\text{lm}/\text{m}^2/\text{sr}$ )	복사휘도	$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$

## 제2절 도광판 설계

### 2.1 도광판 모델링

#### 1. 광원

본 논문에서는 LED 광원으로 KOSEMI사의 3칩 백색 LED인 KL-WH5450-2NT를 사용하였다.<sup>[25]</sup> KL-WH5450-2NT의 외관도면, 전기 광학적 특성, 각도별 상대 광도분포, 파장별 상대 복사강도는 각각 그림 2.2, 표 2.2, 그림 2.3, 그림 2.4와 같다. 외관도면, 전기 광학적 특성표, 각도별 상대 광도분포는 제조사에서 제공한 데이터이며, 파장별 상대 복사강도는 적분구(PMS - 80, EVERFINE Co., LTD.)를 사용하여 측정된 결과이다. 파장별 상대 복사강도를 측정하면서 LED의 광속을 함께 측정하였는데, LED 개당 평균 광속은 약 16.18 lm 이었다.

본 논문에서는 조명설계 소프트웨어인 LightTools를 사용하여 도광판의 모델링 및 설계를 수행하였다. 그림 2.5는 제조사도면을 참조하여 모델링한 LED 광원의 외관을 보여주고 있다. LED광원 설계에 있어서 가장 중요한 사항은 광원의 정확한 배광 분포와 광속을 사용해야 한다는 것이다. LightTools에서는 Apodization 파일을 이용하여 광원의 배광분포를 지정해 줄 수 있다. LED 개당 광속은 측정치인 16.18 lm 인 것으로 가정하고, 앞서 제시한 각도별 상대 광도분포를 Apodization 파일에 적용하여 LED 광원을 모델링 하였다. 그림 2.6은 Apodization 파일 적용 후 시뮬레이션을 통해 얻은 LED의 각도별 광도 분포와 제조사에서 제공한 실험 데이터를 함께 보여주고 있는데, 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

태양광은 약  $\pm 0.27^\circ$ 의 발산각을 갖고 있는 것으로 알려져 있으나,<sup>[26]</sup> 본 논문에서는 그 값이 매우 작기 때문에 평행광으로 가정하여 태양광을 모델링 하였다. 맑은날 태양광에 의한 실외 조도는 약 100,000 lx인 것으로 알려져 있다.<sup>[27]</sup> 이를 기준으로 본 논문에서는 태양광의 조도를 100,000 lx인 것으로 가정하였다.

#### 2. 반사필름

반사필름은 일반적으로 도광판의 아랫면에 설치하여 도광판 밑면으로 빠져나가는

빛을 반사시켜 도광판 윗면으로 출사하도록 한다. 반사필름의 반사 특성은 매우 복잡하여 거울반사(Specular Reflection) 특성과 확산반사(Diffuse Reflection) 특성을 모두 포함하고 있고, 입사각(Angle of Incidence, AOI)에 따라 다른 특성을 보인다. 반사필름의 반사 특성은 일반적으로 양방향 반사율 분포함수(Bidirectional Reflective Distribution Function, BRDF)를 사용하며 그림 2.7과 같이 나타낸다. 반사필름의 BRDF  $f_r$ 은 다음과 같이 정의 된다.<sup>[28,29]</sup>

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (2.6)$$

여기서,  $\theta_i$ 와  $\phi_i$ 는 각각 입사광의 편각(Polar Angle)과 방위각(Azimuth Angle)이며,  $\theta_r$ 과  $\phi_r$ 은 각각 반사광의 편각과 방위각을 나타낸다.  $dE_i$ 는 입사광의 분광복사조도(단위: W/m<sup>2</sup>/nm)이며,  $dL_r$ 은 반사광의 분광복사휘도(단위: W/sr/m<sup>2</sup>/nm)이다.

본 논문에서는 도광판의 반사필름으로 SK사의 제품(모델명: SY 64 ~ 70)을 사용하였다. 제이엔씨테크의 RT-300S 장비를 사용하여 본 논문에 사용된 반사필름의 BRDF를 측정하였는데, 그림 2.8은 입사각이 0°, 20°, 40°, 60° 일 때 측정된 BRDF 값을 보여주고 있다. 실제 측정에서는 입사각을 0°부터 70°까지 5° 간격으로 변화시켰으며, 반사광의 경우 방위각은 -80°부터 80°까지 2° 간격으로, 편각은 -90°부터 90°까지 10° 간격으로 측정 하였다. 측정된 BRDF 데이터를 LightTools의 반사필름 모델의 표면특성(Surface Finishes)에 적용하여 도광판 모델링과 설계 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2.3 도광판 패턴

도광판은 도광판의 측면 또는 하면에 위치한 광원에서 방출된 광선이 균일한 휘도 또는 조도 분포를 가지며 도광판 상면을 통해 방출 되도록 하는 역할을 한다. 이를 위해 도광판 하면에 산란체로 사용되는 백색 잉크를 인쇄하거나 홈을 형성하고 그 외부에 반사필름을 설치하여 내부전반사에 의해 도광판 내에 갇혀 있던 광선을 도광판 상면으로 출사 시키는 방식을 주로 사용한다. 도광판 패턴은 이 때 인쇄된 잉크

또는 형성된 흠을 의미한다.

도광판은 형태와 출광방식에 따라 구분할 수 있다.<sup>[30]</sup> 형태에 따라서는 평판방식, 썬기방식으로 구분할 수 있는데, 썬기방식이 평판방식에 비해 광효율이 우수하고 박형화가 용이한 것으로 알려져 있다. 출광방식에 따라서는 인쇄방식, 무인쇄 방식으로 구분할 수 있다. 인쇄 방식은 광산란 잉크를 도광판 하부에 인쇄하여 입사된 광선의 수직산란을 통해 출광시키는 방식으로 균일도 조절이 상대적으로 용이한 장점을 갖고 있다. 무인쇄 방식은 기하광학적인 기능(반사, 굴절, 회절, 산란)을 갖는 구조체를 도광판에 가공하여 도광판 내의 광선을 그 구조체를 통하여 출광하도록 하는 방식이다. 일반적으로 무인쇄 방식은 인쇄 방식에 비해 양산 수율 및 도광판 광효율상의 장점이 있으며, V-cut 패턴을 이용한 도광판의 경우 기존 인쇄방식 보다 약 10 % 정도 광효율이 높은 것으로 알려져 있다. 표 2.3에 인쇄방식과 무인쇄 방식 도광판의 다양한 가공 방법을 정리하였다.<sup>[30,31]</sup>

현재 가장 많이 사용되고 있는 도광판 재료는 PMMA (Polymethyl Methacrylate)이다. PMMA는 기계적인 강도가 높고, 쉽게 변형되지 않으며, 가볍고, 내화학성이 강한 장점을 갖고 있다. 그 외에 PMMA는 가시광 영역에서 매우 높은 광투과율(약 93%)의 장점을 갖고 있는데, 이 때문에 도광판의 가장 핵심적인 소재로 사용되고 있다. 표 2.4에 PMMA의 특성을 나타내었다.<sup>[30]</sup>

본 논문에서는 PMMA를 사용하여 도광판을 제작 하였고, 다이아몬드 컷터를 이용하여 제작한 V-cut 패턴을 도광판 패턴으로 사용하였다. 그림 2.9은 도광판 하면에 CNC 가공을 통해 제작한 도광판 패턴의 단면을 보여주고 있다. 이 때 사용한 다이아몬드 컷터의 각도는 60° 이었다.

## 2.2 LED용 도광판 설계

### 1. 테스트용 도광판 제작 및 특성 측정

도광판 모델링을 위하여 크기가 500 mm × 600 mm × 10 mm인 테스트용 도광판을 제작하였다. 도광판 패턴은 가로 세로 모두 5 mm 등간격으로 제작하였으며, 반사

필름 유·무에 따라 조도분포를 측정하였다. LED는 600 mm 장축에 74개, 500 mm 단축에 62개를 7.5 mm의 간격으로 배열하여 총 4개의 면에 272개를 배치하였다. 조도분포 측정을 위해 LI-COR, Inc.의 Photometric Sensor LI-210을 사용하였는데, 도광판 전체 면적을 10 × 12개의 셀(각 셀의 크기: 50 mm × 50 mm)로 분할하여 각 셀의 중심부에서의 조도값을 측정 하였다. 그림 2.10 (a)은 반사필름이 부착되어 있을 때의 조도분포를 보여주고 있다. 이 때, 평균조도는 12,260 lx 이었다. 또한 반사필름이 부착되어 있지 않은 경우에 대해 측정한 조도분포 결과는 그림 2.10 (b)와 같다. 이 경우 평균조도는 6,567 lx 이었다. 두 가지의 측정 결과를 이용하여 매칭 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 도광판 설계를 위한 모델 파라미터 추출

먼저, 도광판 패턴의 기하학적 형상을 모델링 하여 실험 결과와 비교를 통한 모델 파라미터 추출을 시도 하였다. 그림 2.11은 도광판 하면에 CNC 가공을 통해 제작한 패턴의 실물 사진과 LightTools 모델의 단면을 보여주고 있다. 이 패턴(사다리꼴)의  $t$ (윗면 폭),  $b$ (아랫면 폭),  $h$ (높이)를 변경하며 매칭 시뮬레이션을 수행 하였으나. 테스트용 도광판에 대한 실험결과와 매우 큰 차이를 보이고 있음을 발견하였다. 그 이유는 그림 2.11에서 살펴볼 수 있는 것과 같이 패턴의 사면과 윗면이 깨끗이 연마되어 있지 않아 산란특성을 나타내고 있기 때문인 것으로 판단된다.

도광판의 패턴을 산란체(램버시안 산란체로 가정, 모델 파라미터: 산란체의 폭, 반사율)로 모델링하여 매칭 시뮬레이션을 다시 수행 하였다. 그림.2.12는 도광판에 산란체를 적용한 모습을 보여주고 있다. 산란체의 폭  $d$ 를 0.4 mm부터 2.8 mm 까지 0.2 mm씩 변경하고, 동시에 산란체의 반사율  $R$ 을 10 %부터 90 % 까지 10 %씩 변경하며 도광판의 조도분포에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 다음 식과 같이 정의된 평균 오차  $\delta$  사용하였다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{ij} \left( \frac{E_{ij}}{E_{average}} - \frac{S_{ij}}{S_{average}} \right)^2} \quad (2.7)$$

여기서,  $i$ 와  $j$ 는 각각 조도 측정을 위해 분할한 셀의 행과 열을 의미하며,  $E_{ij}$  와  $S_{ij}$  는 각각 각 셀에서 측정된 조도값과 시뮬레이션된 조도값을 뜻한다.  $E_{average}$ 와  $S_{average}$  는 각각 측정된 조도 평균값과 시뮬레이션된 조도 평균값을 의미한다.  $N$ 은 총 셀의 개수(120)를 나타낸다.

그림 2.13 (a), (b)는 5 mm 등간격 패턴을 갖는 도광판의 반사필름 유·무에 따라 시뮬레이션된 조도분포의 예를 보여주고 있다. 이 때, 산란체의 폭  $d$  는 2.8 mm, 반사율  $R$  은 90 % 이었다. 그림 2.14와 2.15는 각각 도광판에 반사필름이 장착된 경우와 장착되지 않은 경우에 대해 수식 (2.7)을 사용하여 계산한 평균 오차  $\delta$  에 대한 결과를 보여주고 있다. 도광판에 반사필름이 장착된 경우(그림 2.14), 평균 오차  $\delta$  는 반사율  $R$ 에 거의 무관하고 산란체의 폭  $d$ 에 따라 변화하는 경향을 보였다. 도광판에 필름이 장착되지 않은 경우(그림 2.15), 평균 오차  $\delta$  는 반사율  $R$ 과 산란체의 폭  $d$  모두에 의존하여 변화하는 양상을 보이고 있다. 특히, 반사율이 크고 산란체의 폭이 작은 경우 주로 산란체의 폭에 따라 변화하며, 반사율이 작고 산란체의 폭이 큰 경우 주로 반사율에 따라 변화함을 알 수 있다. 도광판 패턴에 대한 모델 파라미터를 결정하기 위해 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대한 실험결과를 모두 사용하여 총 평균오차  $\delta_{total}$  을 다음 식을 사용하여 계산 하였다.

$$\delta_{total} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \quad (2.8)$$

여기서,  $\delta_1$ 은 반사필름이 부착되어 있는 경우에 대한 평균오차이며,  $\delta_2$ 는 반사필름이 부착되어 있지 않는 경우에 대한 평균오차를 의미한다. 총 평균오차  $\delta_{total}$ 에 대한 결과는 그림 2.16과 같다. 반사율  $R$ 이 50 %, 산란체의 폭  $d$ 가 1.8 mm 일 때, 총 평균오차  $\delta_{total}$ 이 최소가 됨을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 램버시안 산란체로 모델링한 도광판 패턴의 모델 파라미터를  $R = 50 \%$ ,  $d = 1.8$  mm로 결정 하였다.

### 3. 도광판 설계

도광판 설계는 원하는 휘도 또는 조도 분포를 달성하기 위한 도광판 패턴의 조밀도 분포를 구하는 과정이다. 균일한 패턴 조밀도를 갖는 도광판의 경우 광원으로부터 멀어질수록 도광판 내부의 광의 세기가 감소한다. 따라서 균일한 휘도 또는 조도 분포를 얻기 위해서는 광원으로부터 멀어질수록 도광판 패턴의 조밀도를 증가시켜야 한다. 패턴 조밀도는 인접한 패턴 사이의 간격에 의해 결정된다. 다양한 종류의 함수를 사용하여 인접 패턴 사이의 간격을 지정할 수 있는데, 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 가우시안 함수(Gaussian Function)를 이용하였다.<sup>[32]</sup> 다음 식은 가우시안 함수로 표현된 인접 패턴 사이의 간격에 대한 표현식을 보여 주고 있다.

$$y = b - a \exp(-2x^2/w^2) \quad (2.7)$$

여기서,  $x$  는 도광판 패턴을 배열할 축 상의 위치를,  $w$  는 가우시안 함수의 폭을 의미한다.  $a$  와  $b$  는 최대 및 최소 패턴 간격에 의해 결정되는 상수이다.

그림 2.17는 LED용 도광판 설계과정을 보여주고 있다. 또한, 그림 2.18은 도광판 설계의 기본 레이아웃을 나타낸다. 그림 2.19은 LED에서 방출된 광이 내부전반사 과정을 통해 도광판을 따라 전파되어가는 모습과 도광판 패턴에 의해 외부로 출사되는 모습을 보여주고 있다.

설계한 도광판의 크기는 500 mm × 500 mm × 10 mm 이며, 최대 패턴 간격은 9 mm부터 13 mm 까지 1 mm 간격으로 변경 하였고, 최소 패턴 간격은 최대 패턴 간격에서 5 mm를 뺀 값부터 최대 패턴 간격에서 1 mm 뺀 값까지 변경하였다. 동시에 가우시안 함수의 폭  $w$  를 250 mm부터 500 mm 까지 50 mm 간격으로 변경 하여 조도 균일도(Illuminance Uniformity)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때, 좌우 양면 조사를 가정하여 도광판의 좌우 방향으로만 도광판 패턴을 배열하였다. 조도 균일도를 대표하는 물리량으로 조도 표준편차와 평균 조도의 비로 정의된 평균편차(Average Deviation)을 사용하였다.

평균편차에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 2.20과 같다. 그림 2.20 (a), (b), (c), (d), (e)는 각각 최대 패턴 간격이 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 13 mm인 경우에 대한 결과 이다. 조도 분포를 구하기 위해 500 mm × 500 mm 영역을 10 × 10의 셀로 분할하였으며, 도광판 가장자리에서의 급격한 조도 변화에 대한 영향을 배제하기 위해

도광판의 중앙부  $8 \times 8$ 의 셀에 대한 조도 데이터만을 사용하였다. 그림. 2.20을 살펴 보면, 평균편차는 최소 패턴간격이 클 경우, 가우시안 함수 폭에 거의 무관함을 알 수 있다. 최소 패턴간격이 작아지면서 평균편차를 최소로 하는 최적화된 가우시안 함수 폭이 존재함을 알 수 있다. 그림. 2.20 (a)의 경우(최대 패턴간격: 9 mm), 최소 패턴간격 4.0 mm, 가우시안 함수 폭 350 mm일 때, 평균편차는 최소값이 3.0 %이었으며, 그림 2.20 (b)의 경우(최대 패턴간격: 10 mm), 최소 패턴간격 6.2 mm, 가우시안 함수 폭 340 mm일 때, 평균편차는 최소값인 2.6 %이었다. 그림. 2.21은 평균조도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 최대 패턴간격이 일정할 경우, 최소 패턴간격이 작아질수록 평균조도 값이 증가하고 있다. 또한, 평균적으로 보았을 때, 최대 패턴간격이 작아질수록 평균조도 값이 증가함을 알 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 최대 패턴간격이 9 mm, 10 mm인 2개의 LED용 도광판을 제작하였다. 각각의 설계 파라미터는 표.2.5와 같다. 실제 제작 시에는 사면조사를 고려하여 도광판의 상하방향으로도 좌우방향과 동일한 패턴을 형성시켰다. 그림. 2.22 (a)와 (b)는 각각 최대 패턴간격이 9 mm, 10 mm인 경우의 도광판 패턴에 대한 Auto-CAD 도면을 보여주고 있다.

## 2.3 태양광용 도광판 설계

본 논문에서는 태양광을 집광시켜 도광판에 전송하기 위해 선형 프레넬 렌즈 (Linear Fresnel Lens)를 사용 하였다. 먼저, 2011년 3월 21일, 6월 21일, 12월 21일에 광주광역시 지역에서의 태양 방위각(Azimuth Angle) 및 고도(Elevation Angle)에 대해 조사하였다.<sup>[34]</sup> (그림 2.23 참조) 그림 2.23에서 확인할 수 있는 바와 같이 오후 1 시경에 최대 고도( 54.6°, 77.0°, 33.0°)에 도달한다. 본 논문에서는 3월 21일의 최대 고도 값인 54.6° 를 기준으로 태양광용 도광판 설계를 수행하였다. 그림 2.24는 태양광용 도광판 설계의 레이아웃을 보여주고 있다. 도광판의 크기는 500 mm × 600 mm × 10 mm 이었고, 500 mm 길이를 갖는 측면에 프레넬 렌즈로부터 집속된 태양광이 입사되도록 하였다. 프레넬 렌즈는 200 mm × 500 mm의 크기를 갖고 있으며, 초점거리가 200 mm이었다.

태양광용 도광판 설계 또한 가우시안 함수를 이용하여 패턴의 위치를 선정하였다.



가우시안 함수의 폭과 최대 패턴 간격을 각각 600 mm와 20 mm로 고정하고, 최소 패턴 간격은 2 mm부터 20 mm 까지 2 mm 간격으로 변경하였다. 그 결과는 그림 2.25 과 같다. 최소 패턴 간격이 감소하면서 평균편차는 4 mm 까지 감소하는 경향을 보이다가 2 mm부터 다시 증가하였다. 이 결과를 바탕으로 최소 패턴 간격을 4 mm로 결정하였다. 그림 2.26은 태양광용 도광판 제작에 사용된 도광판 패턴에 대한 Auto-CAD 도면을 보여주고 있다.

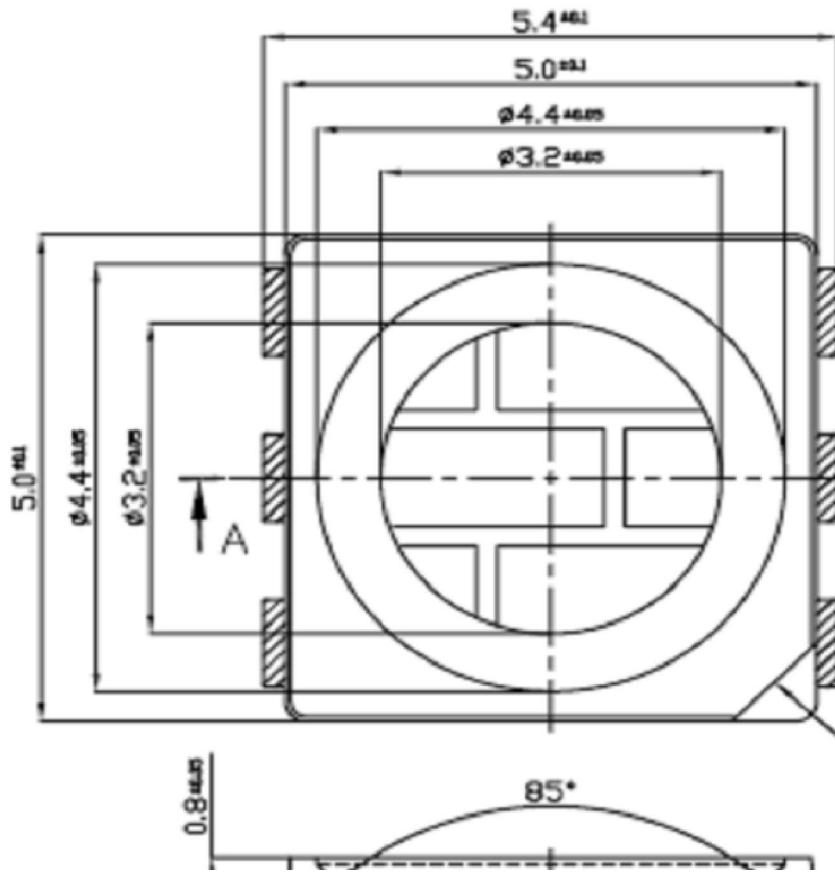


그림 2.2 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 외관도면.<sup>[25]</sup>

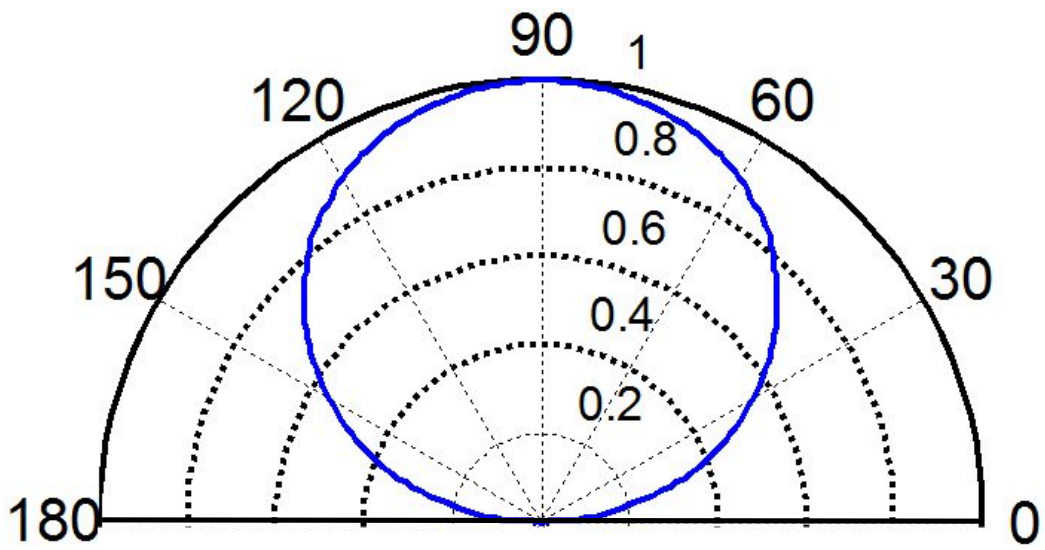


그림 2.3 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 각도별 상대 광도분포 곡선.<sup>[25]</sup>

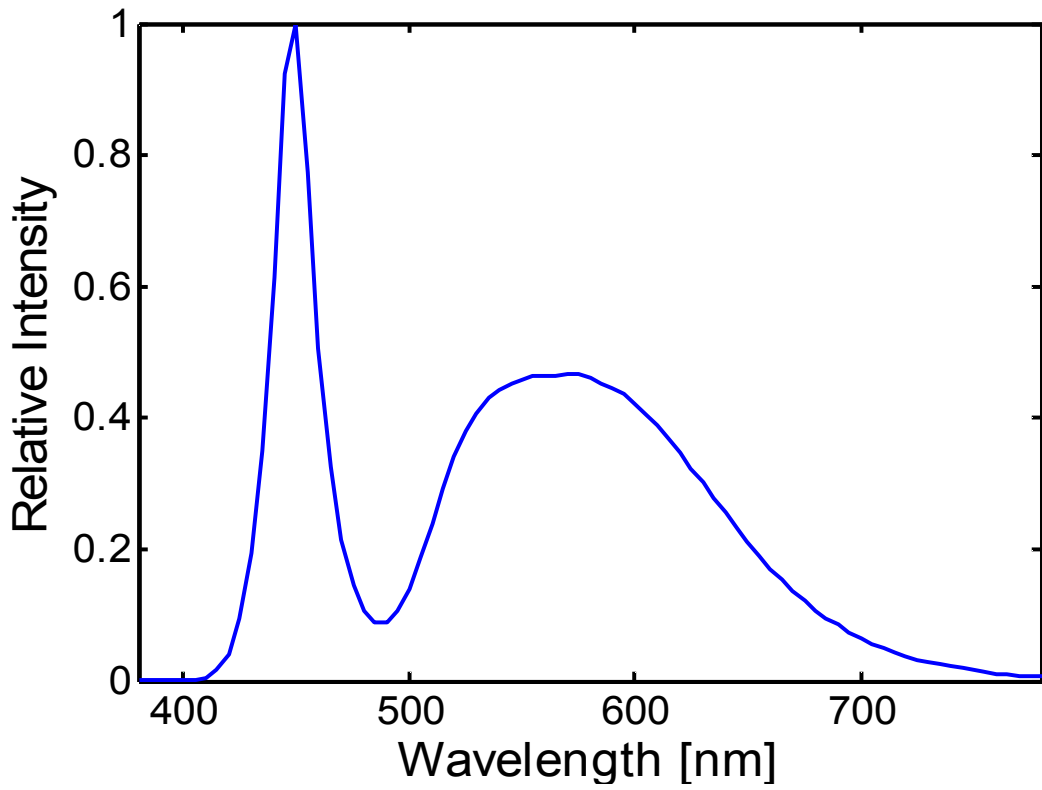


그림 2.4 LED((KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 파장별 상대 복사강도.<sup>[25]</sup>

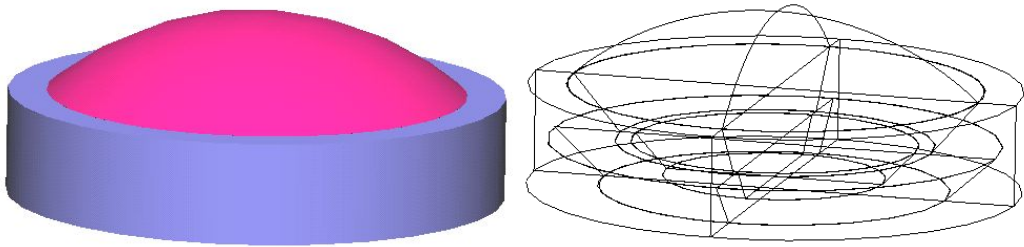


그림 2.5 LightTools로 모델링된 LED(KL-WH5450-2NT, KOSEMI) 광원.

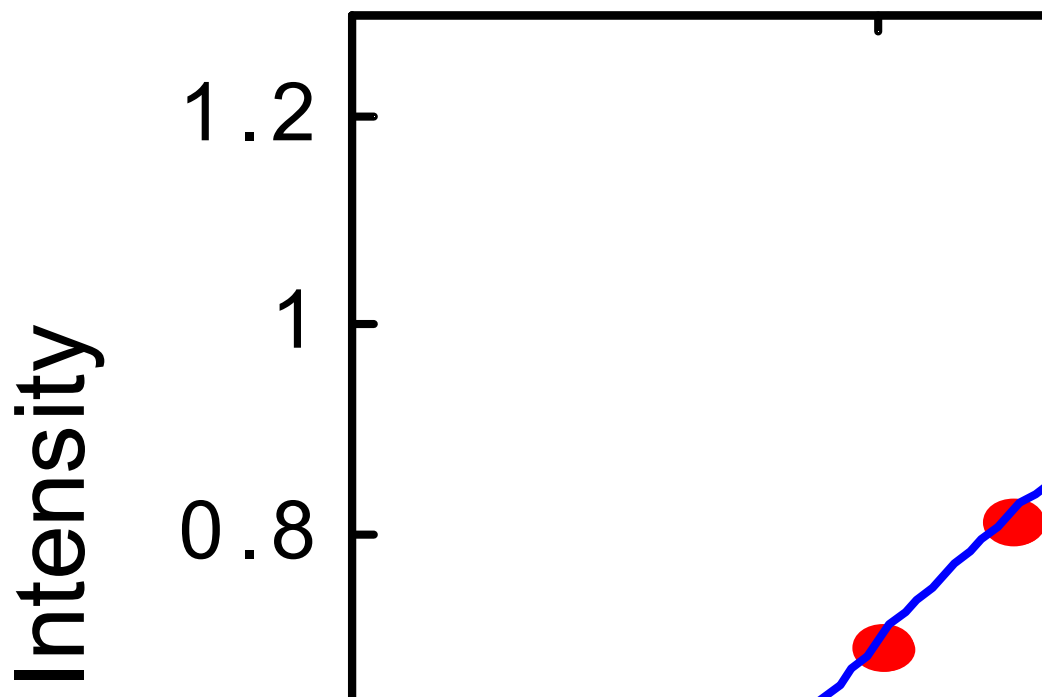


그림 2.6 LED 광원 모델에 Apodization 파일 적용한 후 시뮬레이션한 결과와 측정치와의 비교.

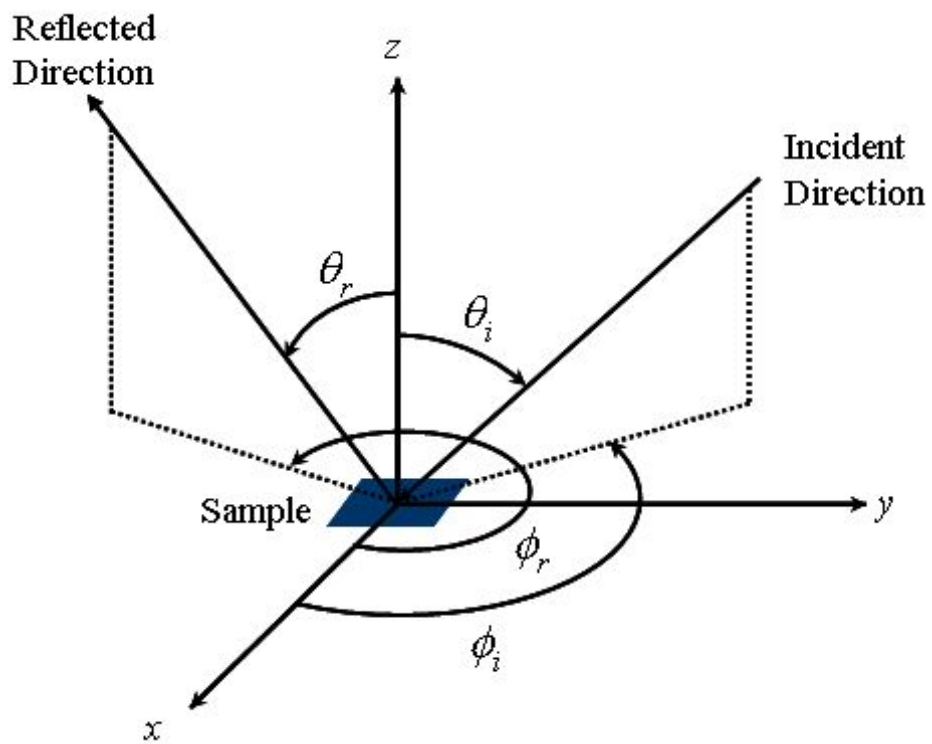


그림 2.7 양방향 반사율 분포함수에서  $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 의 정의.

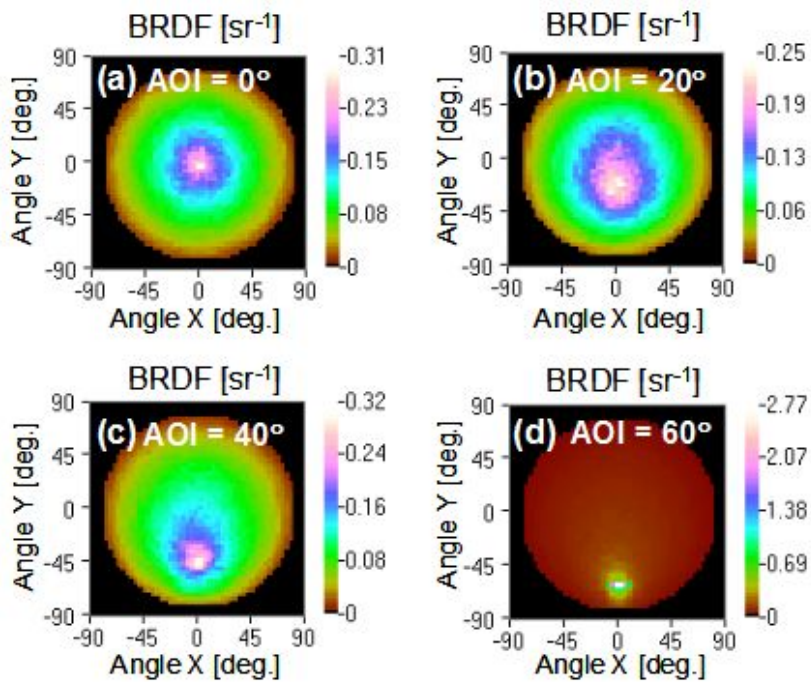


그림 2.8 반사필름(SY 64~70, SK)에 대해 측정된 BRDF 데이터.





그림 2.9 제작된 도판판 패턴의 단면.

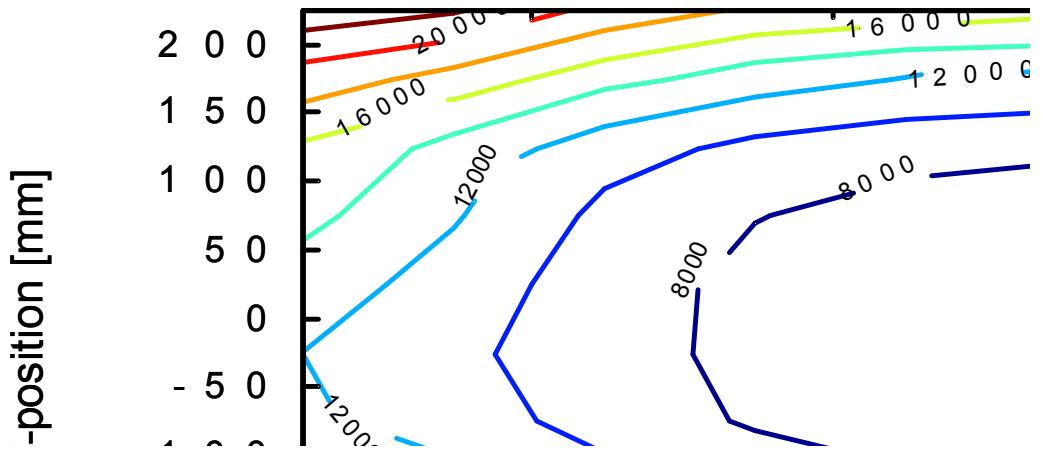


그림 2.10 제작된 테스트용 도광판에 대해 측정된 조도분포.  
 (a) 반사필름 유, (b) 반사필름 무

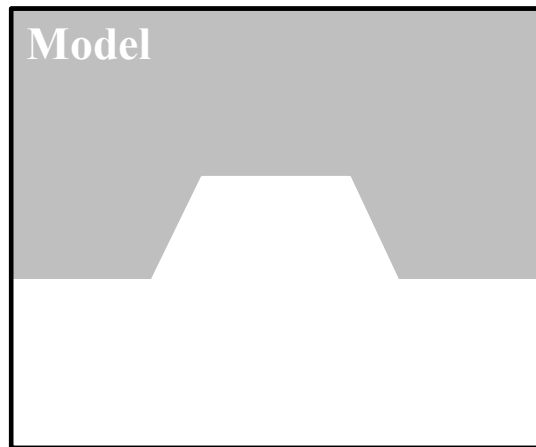


그림 2.11 LightTools에 적용된 도광판 패턴의 단면.

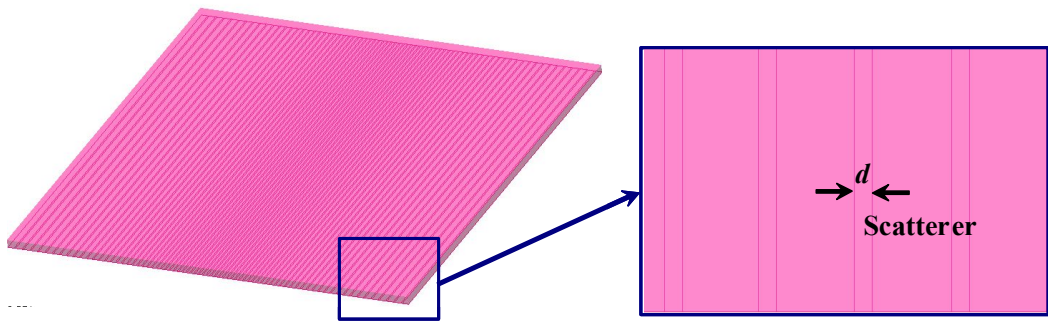


그림 2.12 LightTools에서 도광판 밑면에 산란체를 적용한 모습.

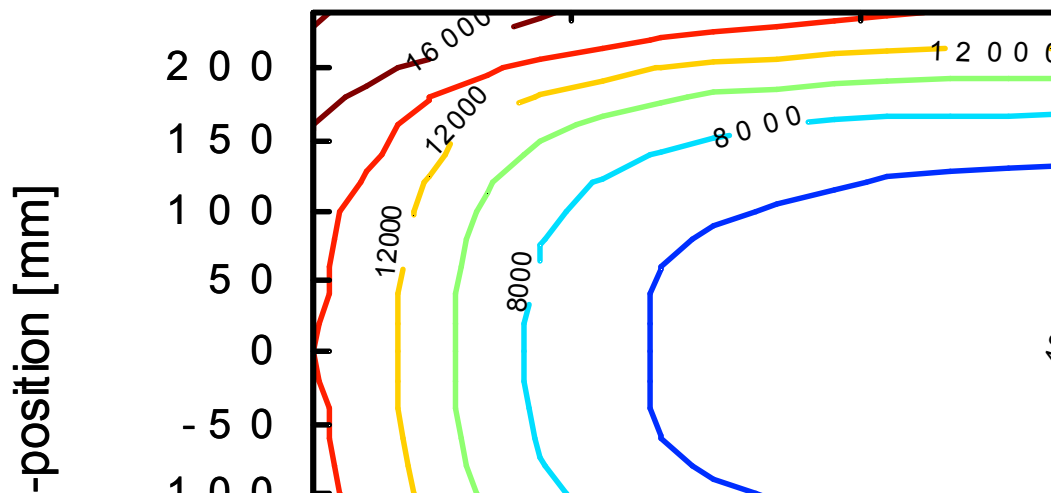


그림 2.13 테스트 도광관에 대한 조도분포 시뮬레이션의 예( $d = 2.8 \text{ mm}$ ,  $R = 90 \%$ ).  
 (a)반사필름 유, (b)반사필름 무

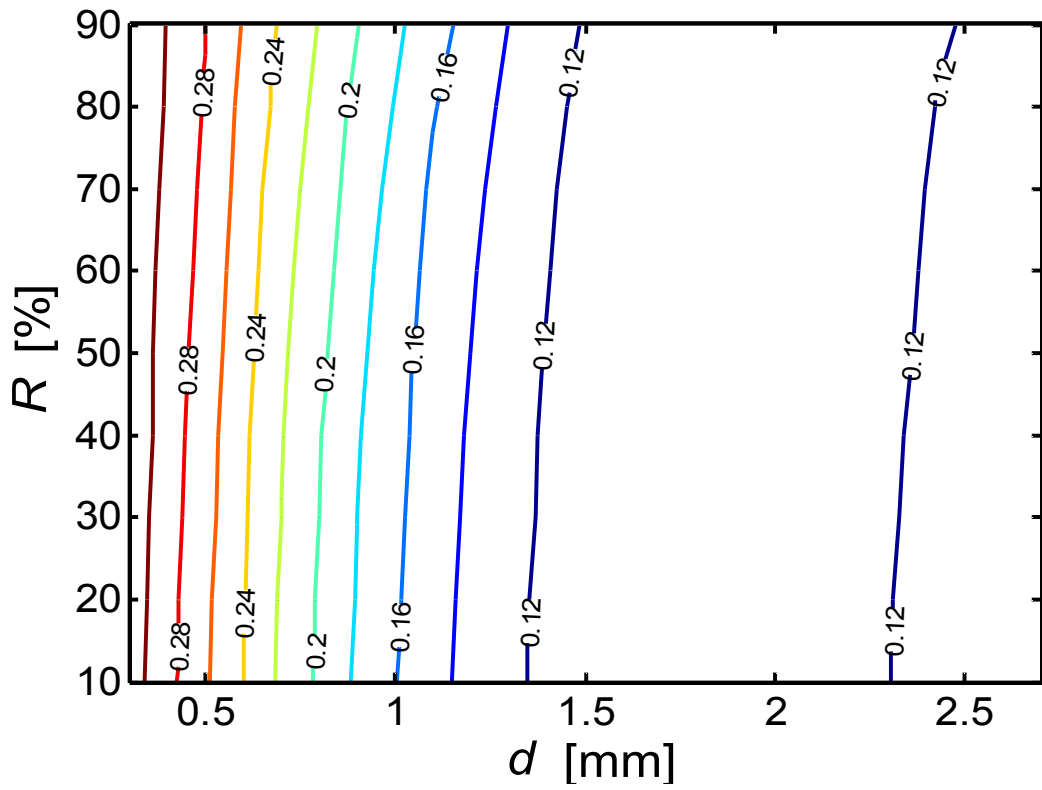


그림 2.14 반사필름이 부착된 경우에 대한 평균오차 계산 결과.

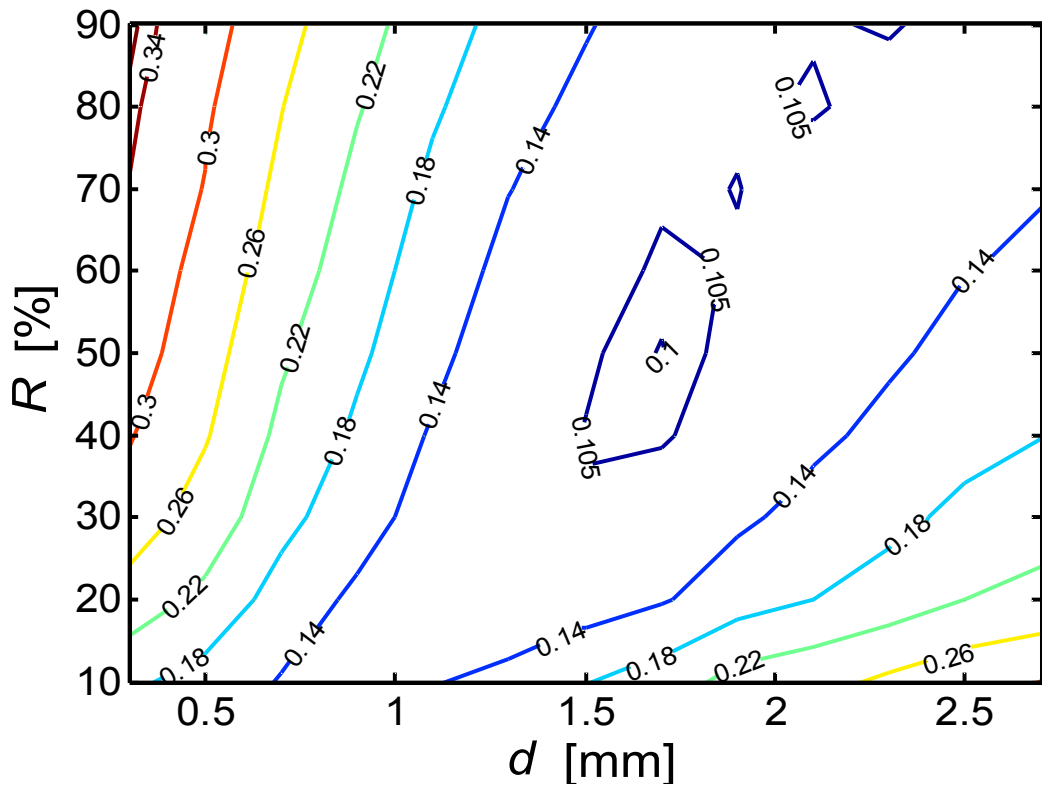


그림 2.15 반사필름이 부착되지 않는 경우에 대한 평균오차 계산 결과.

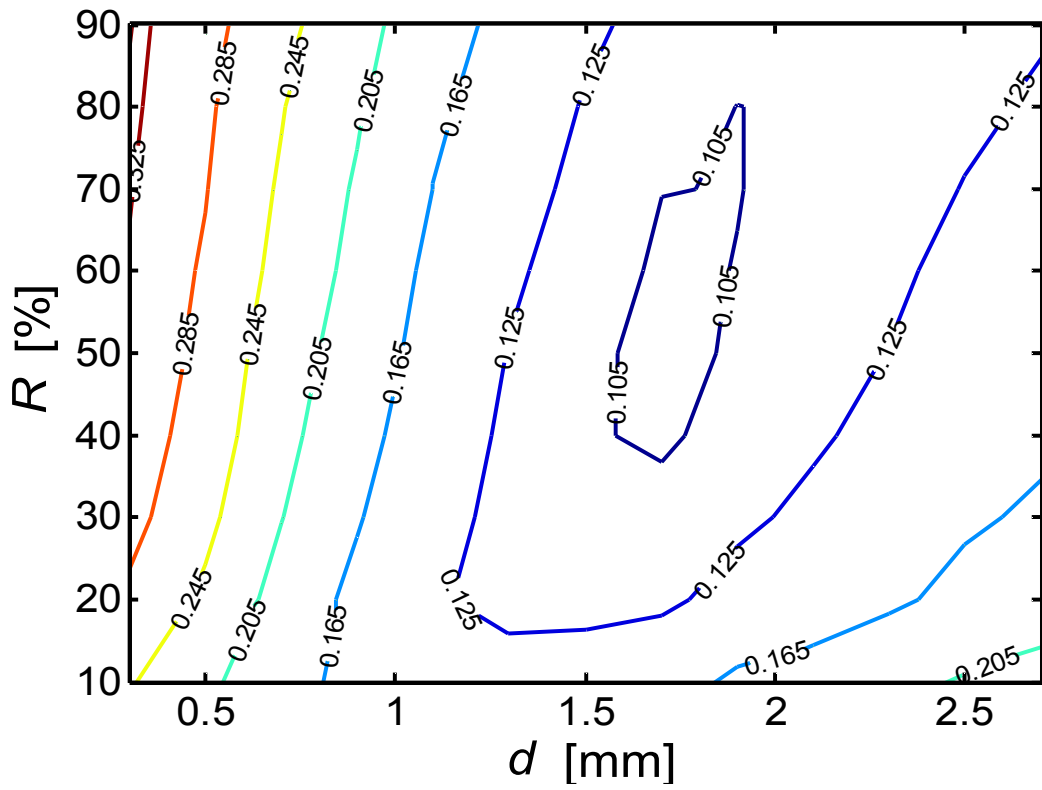


그림2.16 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않는 경우를 모두 고려한 총 평균 오차 계산 결과.



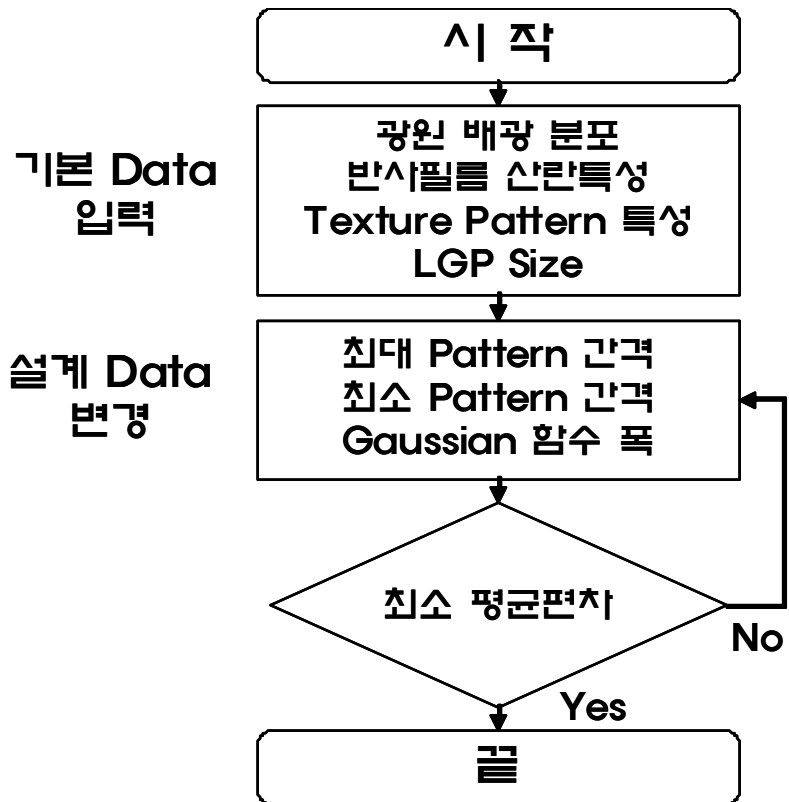


그림 2.17 LED용 도광판의 설계과정.

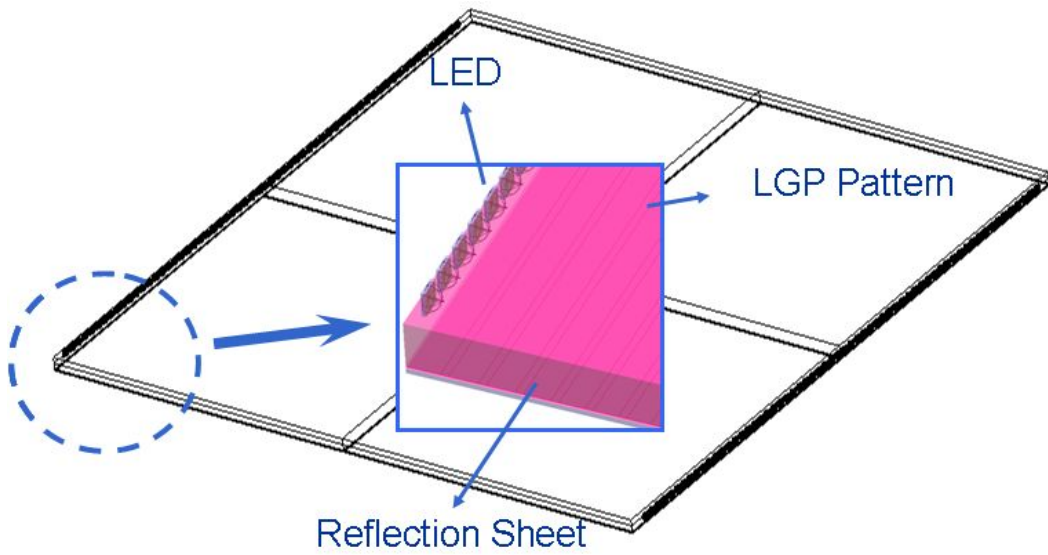


그림 2.18 LED용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃.

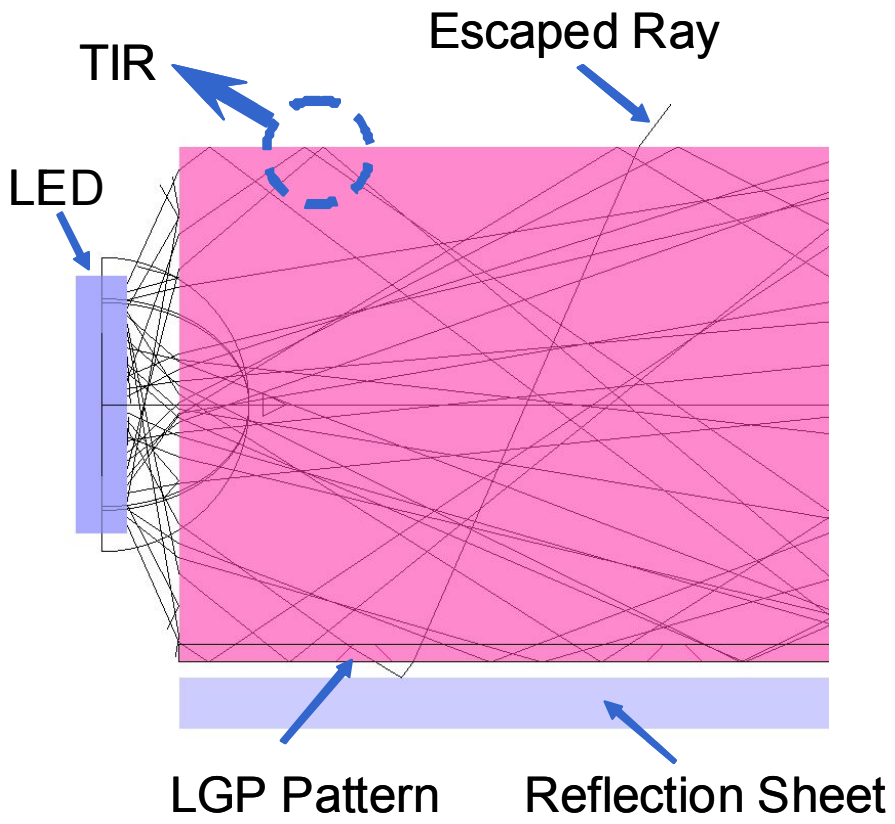


그림 2.19 LED용 도광판의 시뮬레이션 예.

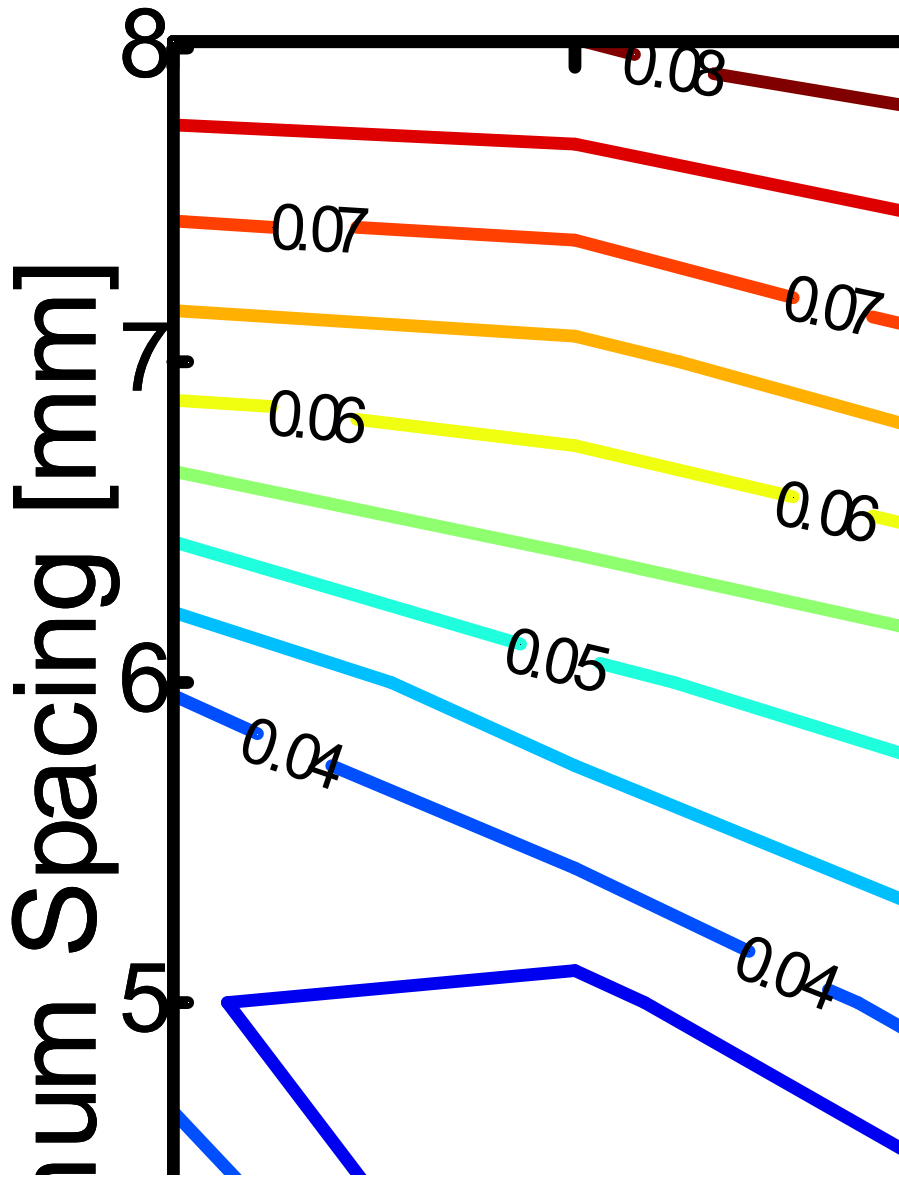


그림 2.20 LED용 도광판에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균편차).  
 (a) 최대 패턴간격 9 mm, (b) 10 mm, (c) 11 mm, (d) 12 mm, (e) 13 mm

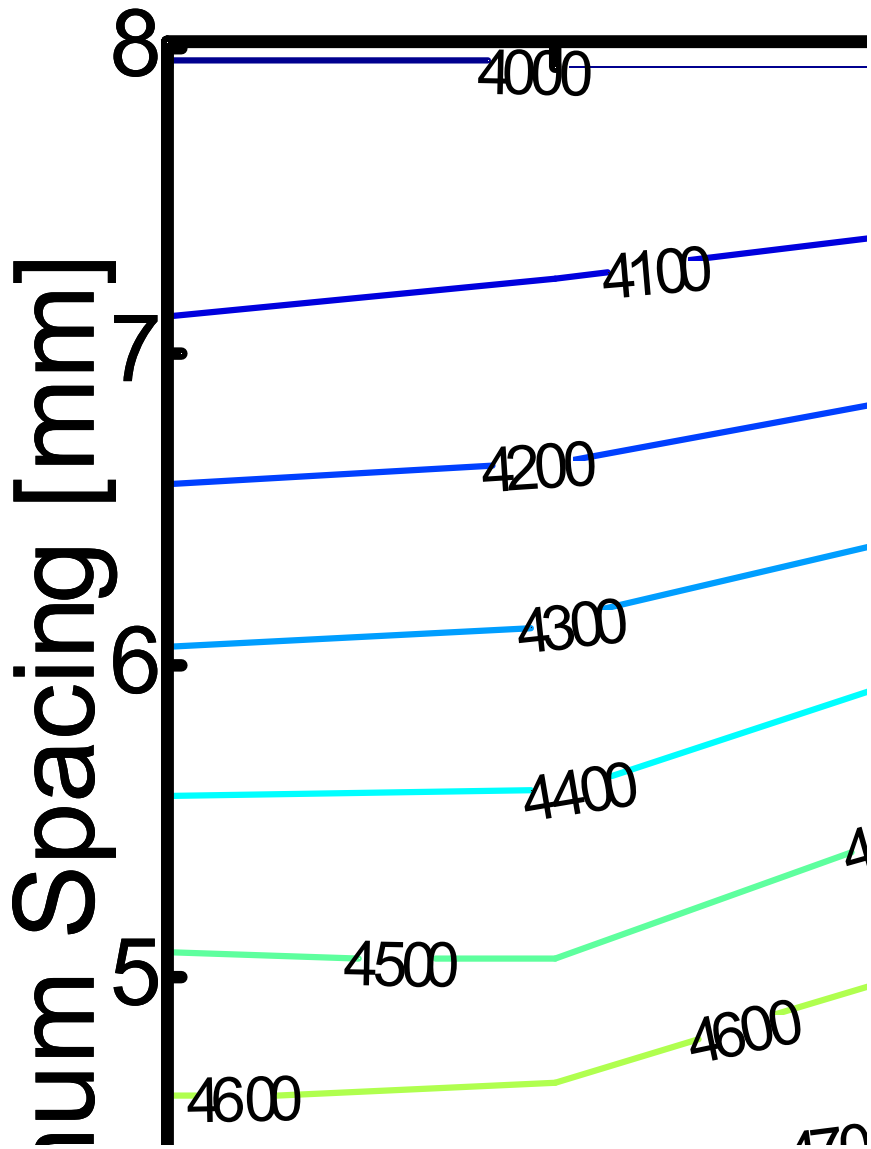
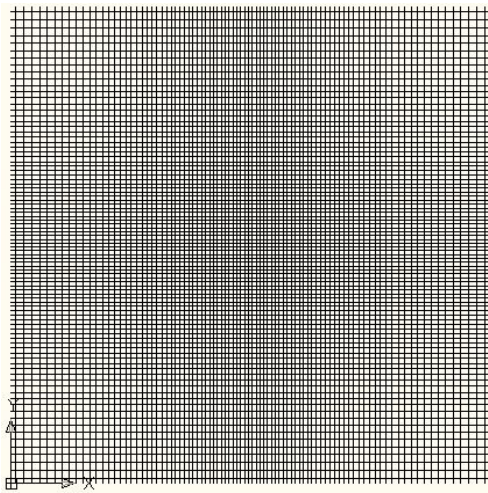
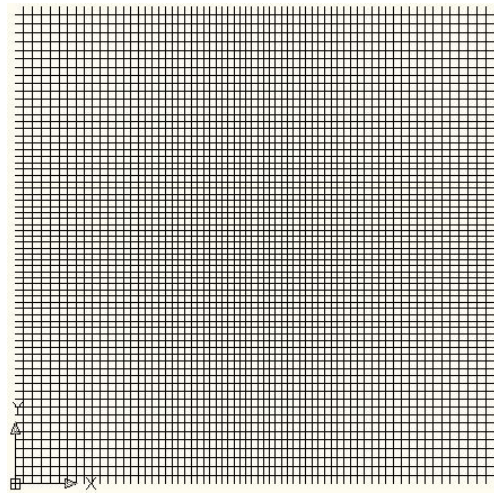


그림 2.21 LED용 도광판 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균조도).  
 (a) 최대 패턴간격 9 mm, (b) 10 mm, (c) 11 mm, (d) 12 mm, (e) 13 mm



**(a)**



**(b)**

그림 2.22 Auto-CAD를 이용하여 그린 LED용 도광판 패턴. (a) 최대 패턴 간격 9 mm, (b) 최대 패턴 간격 10 mm

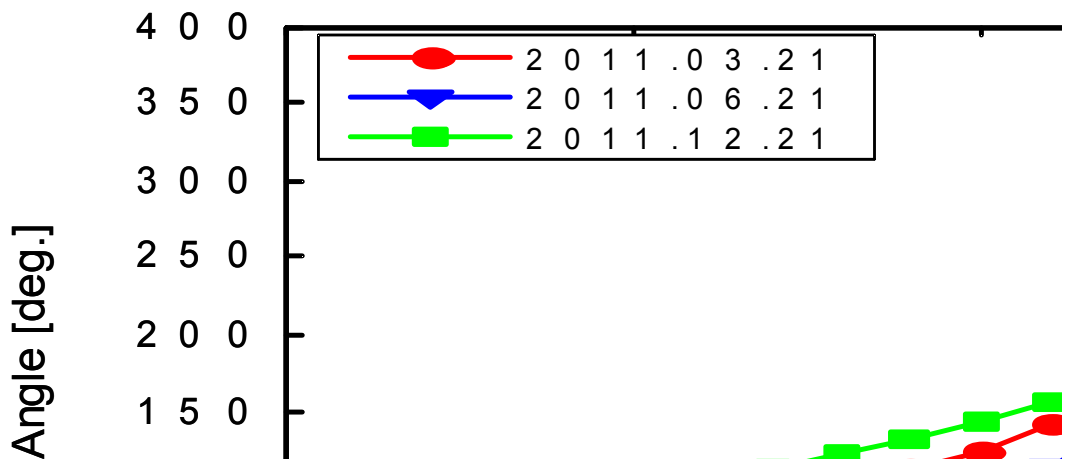


그림 2.23 광주광역시 지역에서의 태양 (a) 방위각 및 (b) 고도.<sup>[34]</sup>

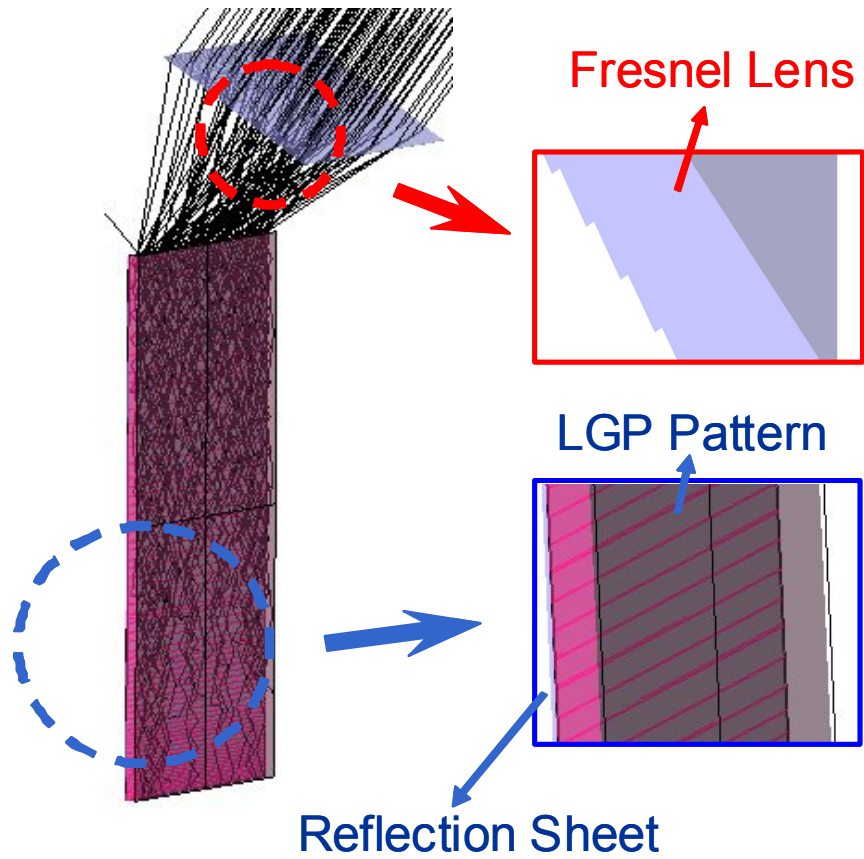


그림 2.24 태양광용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃.



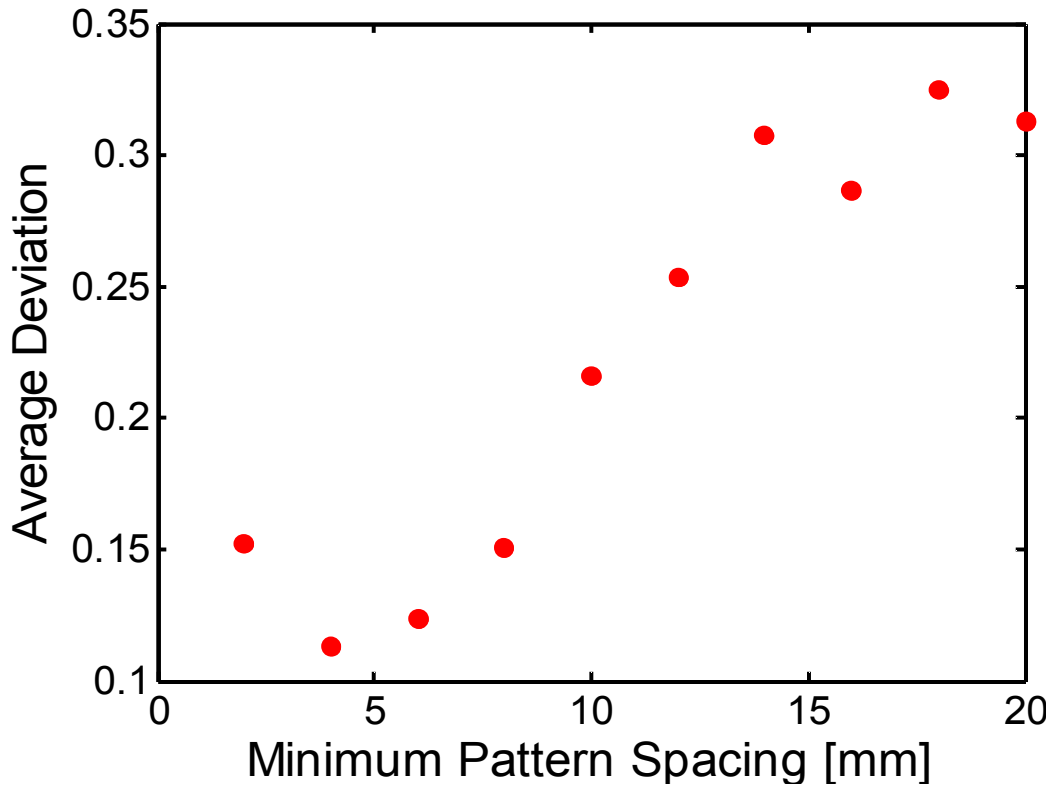


그림 2.25 태양광용 도광판 최적화 시뮬레이션 수행 결과.(평균편차)

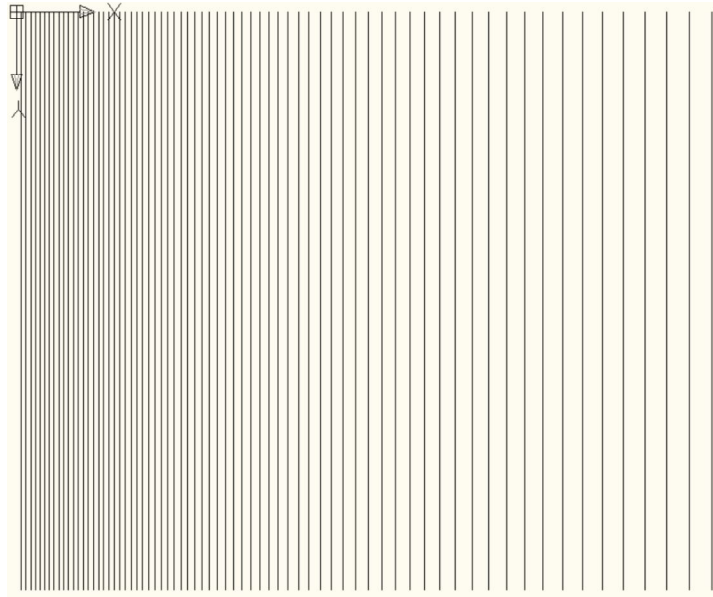


그림 2.26 Auto-CAD를 이용하여 그린 태양광용 도광판 패턴.

표 2.2 LED의 전기 광학적 특성.( $I_F = 60 \text{ mA}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ )<sup>[25]</sup>

Item	Condition	Symbol	Value			Unit
			Min.		Max.	
Luminous Intensity	$I_F = 60 \text{ mA}$	$I_V$	3,000		4,000	mcd
			4,000		5,000	
			5,000		6,000	
Forward Voltage	$I_F = 60 \text{ mA}$	$V_F$	3.0		3.1	V
			3.1		3.2	
			3.2		3.3	
			3.3		3.4	
			3.4		3.5	
			3.5		3.6	

표 2.3 도광판 종류와 가공 방법에 따른 분류.<sup>[25]</sup>

도광판 종류	가공 방법
인쇄방식 도광판	사출 방식
무 인쇄방식 도광판	Etching type
	Blasting etching type
	Sand blast type
	Enplus type
	Printed - mold pattern type
	Optical insertion type
	Stanley type
	Double-side prism type
	Hologram pattern type
	V-cut type
	Diomond-shape etching type

표 2.4 PMMA의 일반적 특성.<sup>[25]</sup>

구분	일반적 특성
굴절률 (파장: 587 nm)	1.49
광학적 에너지 갭	3.8 eV
광투과율	93 %

표 2.5 최대 패턴간격에 따른 설계 파라미터.

Max [mm]	Min [mm]	Width [mm]	Average Illuminance [lx]	Average Deviation [%]
9.0	4.0	350	4,798	2.97
10.0	6.2	340	4,357	2.64

## 제3장 도광판 제작 및 성능 측정

### 제1절 도광판 제작

#### 1. LED용 도광판 제작

본 논문에서 사용된 LED를 구동하기 위한 구동회로를 설계, 제작하였다. 그림 3.1은 LED 구동회로를 보여주고 있다. 브릿지 정류회로를 이용하여 220 V 교류를 전파정류시키고, 2개의 트랜지스터를 연결한 달링턴 증폭기(Darlington Amplifier)를 이용하여 LED에 전류를 공급하는 방식을 이용하였다. LED 구동회로를 위한 PCB(Printed Circuit Board) 또한 설계, 제작하였는데, 그 설계 도면은 그림 3.2와 같다. 제작된 PCB에 LED 등을 부착하여 LED용 구동회로를 완성하였다. 크립 솔더 도포, LED 부착, SMT(Surface Mount Technology) 공정, 회로 완성의 전체 제작 과정을 그림 3.3에 나타내었다.

LED 구동시 발생하는 열을 효과적으로 방출하여 LED 출력 안정화 및 수명 연장을 달성하기 위해 LED 회로용 방열판을 설계, 제작 하였다. 효과적인 방열을 위해 알루미늄 합금을 압출 성형하여 제작 하였다. 그림 3.4는 설계된 방열판의 CAD 도면과 방열판 금형 제작시 사용된 금형 도면을 보여주고 있다. PCB와 도광판의 크기를 고려하여, 방열판의 내부 너비는 11 mm, PCB가 장착될 부분은 12.8 mm로 제작하였다. 최종 제작된 LED용 방열판은 그림 3.5와 같다.

그림 3.6은 제작된 LED용 도광판(최대 패턴간격 9 mm)의 사진을 보여주고 있다. 도광판의 크기는 500 mm × 500 mm × 10 mm이며, 광학용 아크릴을 사용하였다. 총 240개의 LED를 도광판 외곽 4면에 7.5 mm 간격으로 배치하였다. 도광판 제작에 사용된 LED는 LUXPIA사의 3칩 백색 LED인 LWH1056N으로 1개의 LED 평균 광속은 28 lm 으로 측정되었다. 설계에 사용된 LED(KL-WH5450-2NT)와 거의 동일한 배광분포를 갖고 있다.<sup>[35]</sup>

## 2. 태양광용 도광판 제작

프레넬 렌즈와 도광판을 장착하기 위해 집광구조체를 제작하였다.(그림 3,7) 실험의 편리성을 위해 프레넬 렌즈의 회전과 초점방향 및 그 수직방향으로의 위치 조절이 가능하도록 설계하였다.

그림 3.8은 제작된 태양광용 도광판의 사진을 보여주고 있다. 도광판의 크기는 500 mm × 600 mm × 10 mm이며, 광학용 아크릴을 사용하였다. 선형 프레넬 렌즈를 사용하여 500 mm 길이를 갖는 도광판의 측면에 태양광이 집속되고 있는 모습을 살펴볼 수 있다. 태양광이 집속되는 측면의 반대면과 600 mm 길이를 갖는 도광판의 양 측면에 반사필름을 부착하였다.



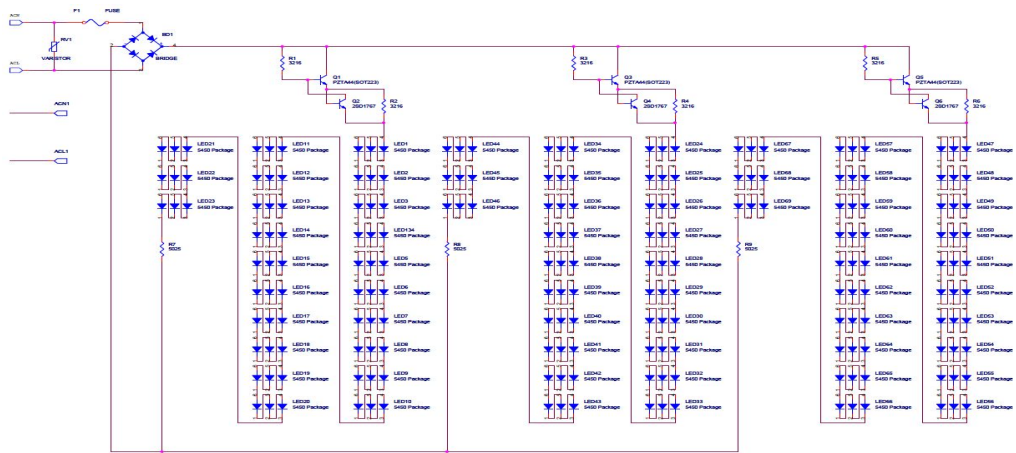


그림 3.1 LED 구동 회로.

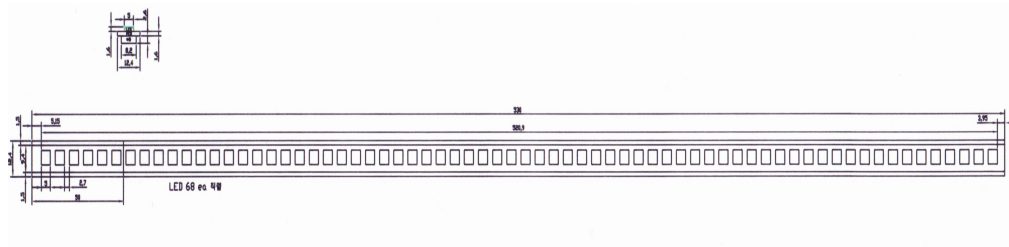


그림 3.2 PCB 설계도면.

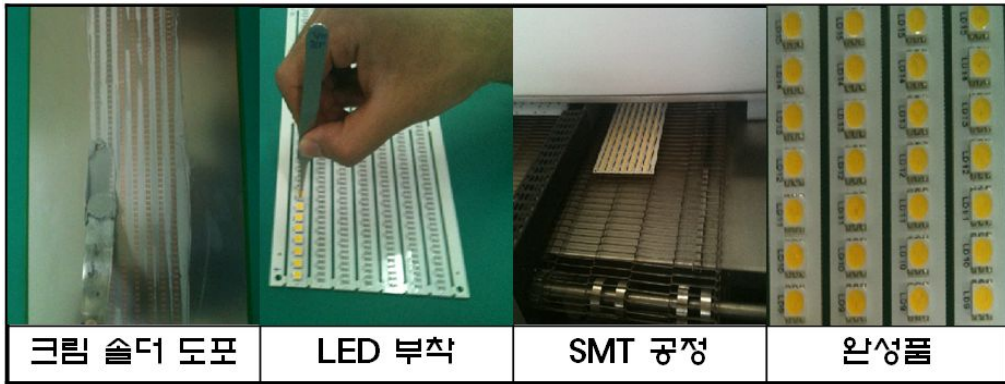


그림 3.3 LED 구동회로 제작 과정.

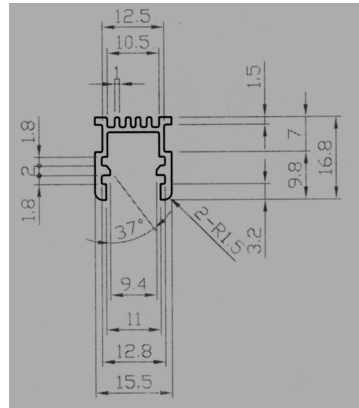
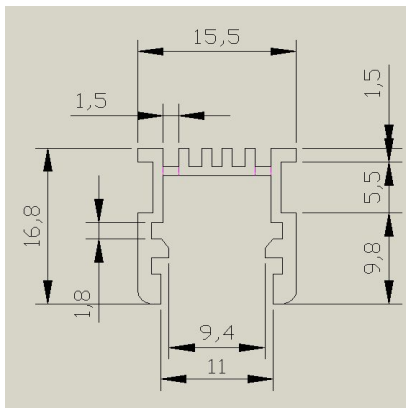


그림 3.4 방열판의 CAD 도면과 방열판 금형도면.

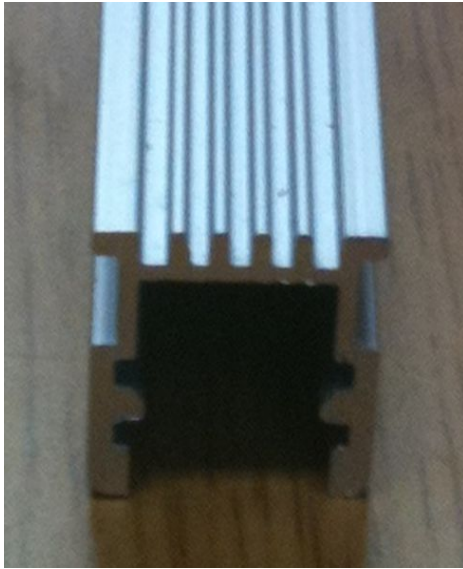


그림 3.5 최종 제작된 LED용 방열판.

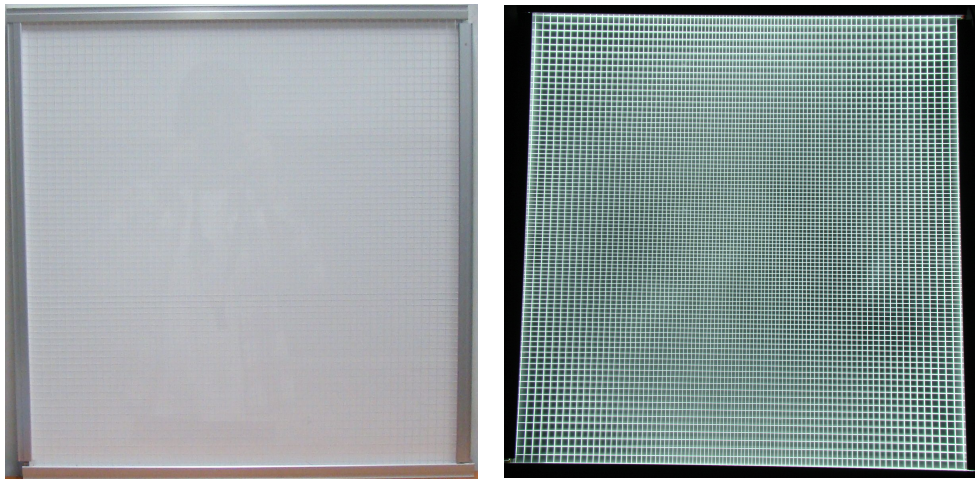


그림 3.6 제작된 LED용 도광판.(최대 패턴 간격: 9 mm)

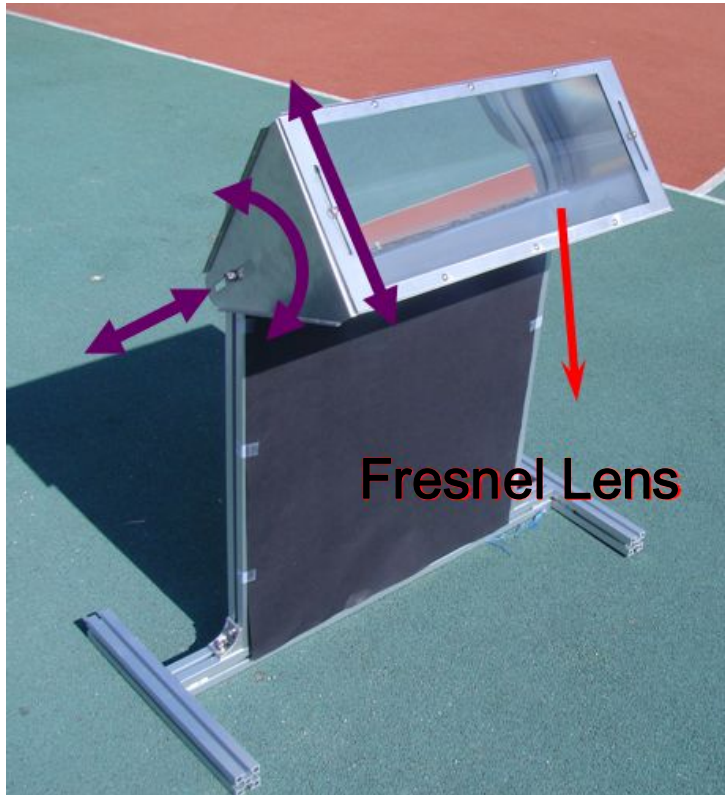


그림 3.7 태양광용 도광판의 집광구조체.



그림 3.8 제작된 태양광용 도광판.



## 제2절 성능 측정

### 1. LED용 도광판

제작된 도광판을 10 × 10 셀로 나누어 조도계(LI-210 Photometric sensor, LI-COR, Inc.)를 이용하여 배광분포를 측정하였다. 배광 균일도(IDU, Illuminance Distribution Uniformity)는 KS C IEC 61747-6 규격에 의거해 다음 공식을 사용하였다.

$$IDU = \left[ 1 - \max \left( \left| \frac{E_i - E_{av}}{E_{av}} \right| \right) \right] \times 100 \% \quad (3.1)$$

여기서  $E_i$ 는 측정된 개별 셀에서의 조도값,  $E_{av}$ 는 평균 조도값을 의미한다. 그림 3.9와 표 3.1은 최대 패턴간격이 9 mm인 도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과를 보여주고 있다. 10 × 10 전체영역에 대한 평균조도와 조도 표준편차는 각각 20,299 lx, 2,735 lx 이었으며, 배광 균일도는 71.8 %이었다. 도광판의 가장자리 데이터를 제외한 8 × 8 영역에 대한 평균조도와 조도 표준편차는 각각 19,026 lx, 1,943 lx 이었으며, 배광 균일도는 79.1 %이었다. 그림 3.10과 표 3.2는 최대 패턴간격이 10 mm인 도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과를 보여주고 있다. 10 × 10 전체영역에 대한 평균조도와 조도 표준편차는 각각 17,153 lx, 2,837 lx 이었으며, 배광 균일도는 50.1 %이었다. 도광판의 가장자리 데이터를 제외한 8 × 8 영역에 대한 평균조도와 조도 표준편차는 각각 16,534 lx, 2,653 lx 이었으며, 배광 균일도는 57.4 %이었다.

### 2. 태양광용 도광판

100 mm 간격 5 × 6영역에 대해 LED용 도광판과 같은 방식으로 배광 균일도를 측정하였다. 2011년 3월 10일 오후 12시에 측정하였으며, 이 때 태양직사광의 조도는 10,1200 lx 이었다. 조도 측정기로는 Konica Minolta사의 T-10을 사용하였다.

그림 3.11과 표 3.3는 태양광용 도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과를 보여주고 있다. 평균조도와 조도 표준편차는 각각 21,110 lx, 3,387 lx 이었으며, 배광 균일도는 67.8 %이었다.

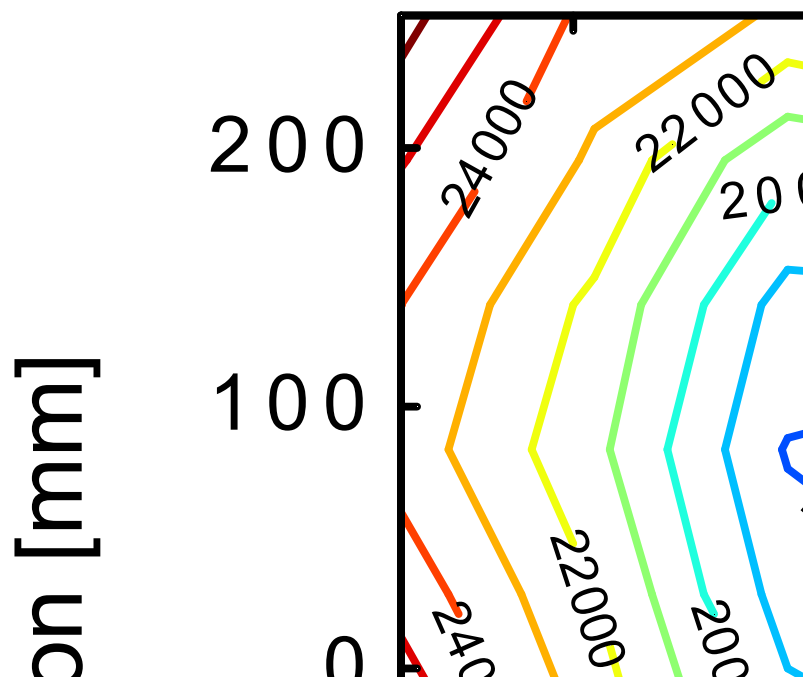


그림 3.9 LED용 도광판의 조도 측정결과.(최대 패턴간격: 9 mm)

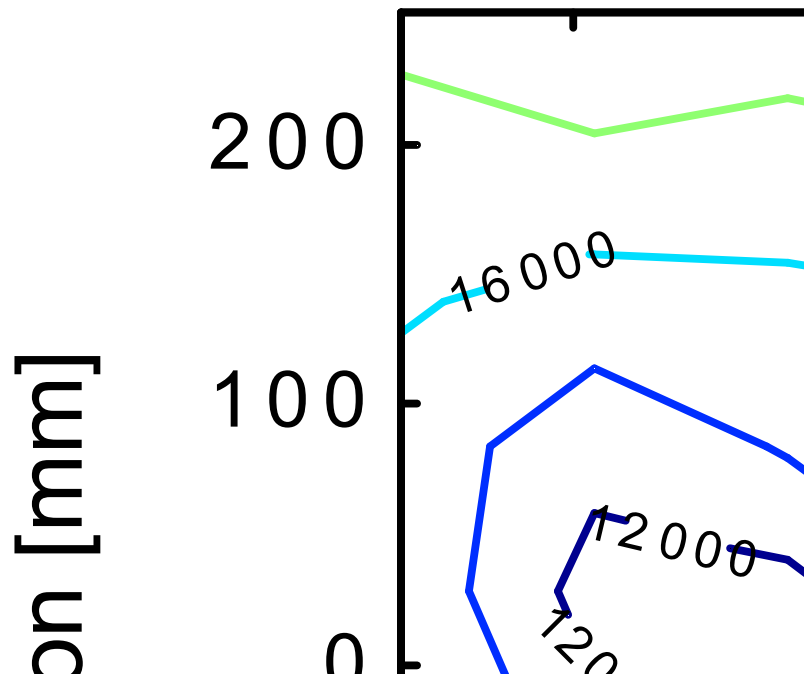


그림 3.10 LED용 도광판의 조도 측정결과.(최대 패턴간격: 10 mm)

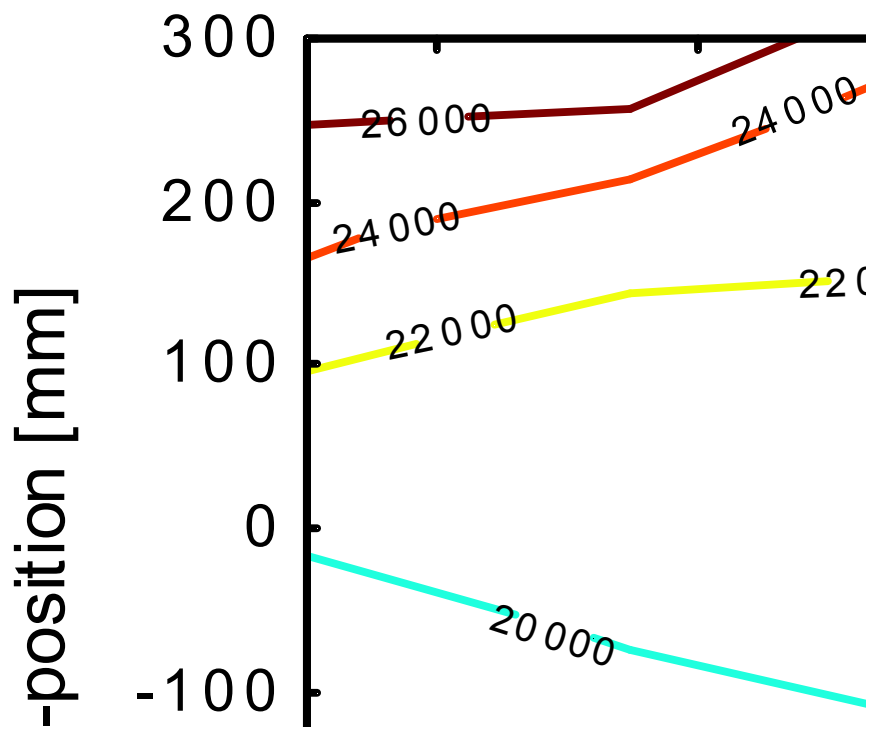


그림 3.11 태양광용 도광관의 조도 측정결과.

표 3.1 LED용도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과.  
(최대 패턴간격: 9 mm)

units: [lx]

26,020	21,440	20,630	21,495	20,400	20,575	20,495	20,240	20,465	20,260
25,195	23,000	20,175	19,588	18,522	18,331	18,353	19,112	20,805	19,729
24,865	21,745	18,909	18,248	16,944	17,522	16,661	17,430	18,344	19,492
24,800	22,340	18,704	17,894	16,893	17,181	16,699	16,613	18,191	19,166
25,925	22,700	19,497	18,722	18,214	18,371	17,037	15,334	16,555	19,240
24,650	22,050	18,507	17,883	18,093	17,712	16,712	16,272	17,161	19,558
23,555	21,245	17,937	17,456	17,650	17,961	18,068	17,947	17,967	19,384
24,000	21,775	18,600	18,691	19,820	20,257	20,044	20,110	19,240	19,734
25,040	22,820	20,130	20,675	21,710	22,525	22,765	21,565	21,705	20,345
26,390	23,630	22,870	23,810	25,265	25,520	25,720	25,055	24,765	22,470

	10 × 10 Area	8 × 8 Area
Average	20,300 lx	19,030 lx
Standard Deviation	2,735 lx	1,944 lx
Maximum	26,390 lx	23,000 lx
Minimum	15,330 lx	15,330 lx
IDU	71.8 %	79.1 %

표 3.2 LED용도광판에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과.  
(최대 패턴간격: 10 mm)

units: [lx]

18,818	20,480	20,530	21,380	22,270	22,200	25,710	22,940	21,090	19,676
17,660	17,732	17,979	19,242	19,969	20,800	23,580	20,710	20,160	17,565
14,354	14,711	16,489	17,737	15,858	17,883	22,300	19,212	17,439	15,035
16,404	13,368	13,808	15,206	15,005	15,126	20,820	16,277	14,737	13,570
16,035	12,984	11,732	13,464	14,969	14,495	19,671	16,191	14,711	14,191
15,555	11,161	11,368	14,131	15,737	14,812	19,727	16,227	15,131	15,040
15,055	12,706	14,171	15,227	16,535	14,095	19,570	16,216	14,464	15,055
16,237	15,095	15,510	15,883	16,635	15,505	19,424	16,897	15,378	14,686
17,206	17,768	17,212	17,580	17,161	16,994	20,360	18,115	17,035	16,176
18,585	19,075	19,080	20,270	20,020	19,282	21,560	18,934	18,115	17,237

	10 × 10 Area	8 × 8 Area
Average	17,150 lx	16,530 lx
Standard Deviation	2,837 lx	2,624 lx
Maximum	25,710 lx	23,580 lx
Minimum	11,160 lx	11,160 lx
IDU	50.1 %	57.4 %

표 3.3 태양광용도광관에 대한 조도 및 배광 균일도 측정결과.

units: [lx]

25,540	24,120	27,900	27,300
23,060	22,430	22,470	24,390
22,470	20,280	20,890	20,980
23,250	22,220	20,180	19,460
19,520	17,980	18,790	17,060
16,170	17,700	17,820	15,470

Average	21,110 lx
Standard Deviation	3,387 lx
Maximum	27,900 lx
Minimum	15,470 lx
IDU	67.8 %

### 제3절 결과 및 논의

본 논문에서 설계, 제작한 LED용 도광판의 특성을 표. 3.4에 정리하였다. 도광판 A(최대 패턴간격 9 mm)가 도광판 B(최대 패턴간격 10 mm)보다 평균조도 및 배광 균일도면에서 우수한 성능을 보였다. 제 2장에서 살펴본 LED용 도광판 설계결과에 따르면 최대 패턴간격이 작아질수록 평균 조도가 증가할 것으로 예측되는데, 이와 부합하는 결과이다. 향후 최대 패턴간격을 9 mm 미만으로 줄여 설계해볼 필요가 있는 것으로 판단된다.

표 3.3은 본 논문에서 설계, 제작한 태양광용 도광판의 특성을 보여주고 있다. 배광 균일도는 67.9 %로 측정되었는데, LED용 도광판(도광판 A, 10 × 10 영역, IDU: 71.8 %)보다 다소 작은 결과이다. 향후, 가우시안 함수의 폭과 최대 패턴 간격을 변화시켜 가며 최적화 설계를 수행한다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

태양광용 도광판의 집광효율에 대해 살펴보았다. 태양광의 집광 효율은 프레넬 렌즈의 투과효율과 도광판 상부에서의 광 투과도의 곱으로 결정된다. 프레넬 렌즈의 투과효율은 측정이 가능하여 실험적으로 그 값을 결정하였으나, 도광판 상부에서의 광 투과도는 측정이 불가능하여 시뮬레이션을 통해 그 값을 추정하였다. 먼저, 프레넬 렌즈의 투과효율의 측정 결과에 대해 서술하도록 한다. 프레넬 렌즈를 이용하여 태양광을 집속시키고 초점위치를 지나 디포커스된 지점에서의 조도분포를 조도 측정기(LI-210 Photometric Sensor, LI-COR, Inc.)를 사용하여 측정하였다. 총 2회의 실험을 수행하였으며 그 결과는 그림 3.12과 같다. 그림 3.12 (a)와 (b)의 경우 그래프의 적분 값은 각각 10,200 lx·m, 11,425 lx·m이다. 그림 3.12 (a) 및 (b) 실험 수행시 프레넬 렌즈에 입사한 태양광의 조도는 각각 57,330 lx와 62,990 lx였다. 따라서, 프레넬 렌즈의 투과효율은 프레넬 렌즈의 크기(0.5 m x 0.2 m)를 고려하여 표 3.5와 같이 평균 0.90(90 %)로 측정되었다.

도광판 상부에서의 광 투과도를 추정하기 위해 LightTools를 이용한 광학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 레이아웃은 그림 2.24와 같다. 광원은 태양광의 스펙트럼(LightTools 내장 데이터)을 갖고 있는 평행광을 사용하였고, 본 연구에서 사용한 것과 동일한 사양의 프레넬을 통하여 도광판 상부에 집속시켰다. 프레넬 렌즈를 통과한 후의 광량과 도광판 내부로 투과 입사된 광량을 시뮬레이션을 통해 계산하고 그 비율을 이용하여 도광판 상부에서의 광 투과도를 추정하였다. 태양의 고도에 따라



도광판 상부에서의 광 투과도가 달라지므로 2011년 3월 21일(춘분)을 기준으로 오전 10시 ~ 오후 4시 사이에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 표 3.6과 같다. 태양의 고도 데이터는 한국천문연구원의 자료를 참고하였다.<sup>[34]</sup>

먼저, 프레넬 렌즈 투과 후의 광속을 살펴보면 약 90.6 %의 프레넬 렌즈 투과 효율을 보이는 것으로 계산되어 실험적으로 측정된 값(90.0 %)과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 도광판 상부의 광 투과 효율은 태양의 고도가 낮아질수록 감소하는 경향을 보였으며, 오전 10시 ~ 오후 4시 사이에 모두 86 % 이상의 값을 갖는 것으로 계산이 되었다. 이 값들을 기초로 집광 시스템의 집광 효율을 추정해 보면 표 3.6의 제일 오른쪽 열에 계산된 것과 같이 최소 77 % 이상의 효율을 갖는 것으로 판단된다.

실제 광생물 반응기 분야에서는 조도값 보다는 PFD(Photon Flux Density, 단위:  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  or  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )를 더욱 의미있는 값으로 사용하고 있다.<sup>[36]</sup> PF(Photon Flux, 단위:  $\mu\text{mol}/\text{s}$  or  $\mu\text{E}/\text{s}$ )는 다음식과 같이 정의된다.<sup>[37]</sup>

$$PF = \frac{1}{6.02 \times 10^{17}} \int \frac{\Phi_e(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (3.2)$$

여기서,  $h$ 와  $c$ 는 각각 플랑크 상수와 진공 중에서의 광속을 나타낸다. PFD는 단위면적당 PF를 의미한다.

표 3.7은 최대 패턴간격이 9 mm인 도광판에 대한 PFD 및 PFD 값으로 계산한 배광 균일도 측정결과를 보여주고 있다. PFD는 양자 측정기(LI-210 Quantum Sensor, LI-COR, Inc.)를 사용하여 측정 하였다.  $10 \times 10$  전체영역에 대한 평균 PFD 값은  $261 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  이었으며, 도광판의 가장자리 데이터를 제외한  $8 \times 8$  영역에 대한 평균 PFD값은  $244 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  이었다. 표 3.8은 최대 패턴간격이 10 mm인 도광판에 대한 PFD 및 PFD 값으로 계산한 배광 균일도 측정결과를 보여주고 있다.  $10 \times 10$  전체영역에 대한 평균 PFD값은  $198 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  이었으며, 도광판의 가장자리 데이터를 제외한  $8 \times 8$  영역에 대한 평균 PFD값은  $190 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  이었다. 평균 조도값과 평균 PFD값으로 계산한 환산계수(Conversion Factor, PFD값/조도값)는 0.0129이다. 그림 3.13은 실험에 사용된 LED의 스펙트럼을 보여주고 있다. 식 3.2

와 LED 스펙트럼을 사용하여 계산한 PFD값 환산계수는 0.0132이었는데, 실험적으로 측정된 값과 2.3 % 오차 안에서 일치하고 있음을 알 수 있다.

태양광의 경우 PFD값 환산계수는 약 0.0176인 것으로 측정되었다. 그림 3.14은 표준 태양스펙트럼을 보여주고 있다.<sup>[38]</sup> 그림 3.14 (a), (b), (c)는 각각 대기권 밖에서의 태양스펙트럼, 직사광과 산란광을 포함한 지표면(AM1.5 조건, AM: Air Mass)에서의 태양스펙트럼, 직사광만을 포함한 지표면(AM1.5 조건)에서의 태양스펙트럼을 나타낸다. 그림 3.14 (b)와 (c) 스펙트럼 데이터를 사용하여 계산한 PFD 환산계수는 각각 0.0181 와 0.0179 이었는데 측정치와 각각 2.8 %, 1.7 %의 오차를 보였다. 이 오차값으로 판단할 때 지표면에서의 표준 태양스펙트럼 중 직사광만을 포함한 태양스펙트럼이 실험결과와 더 부합하는 결과를 보여주고 있다.

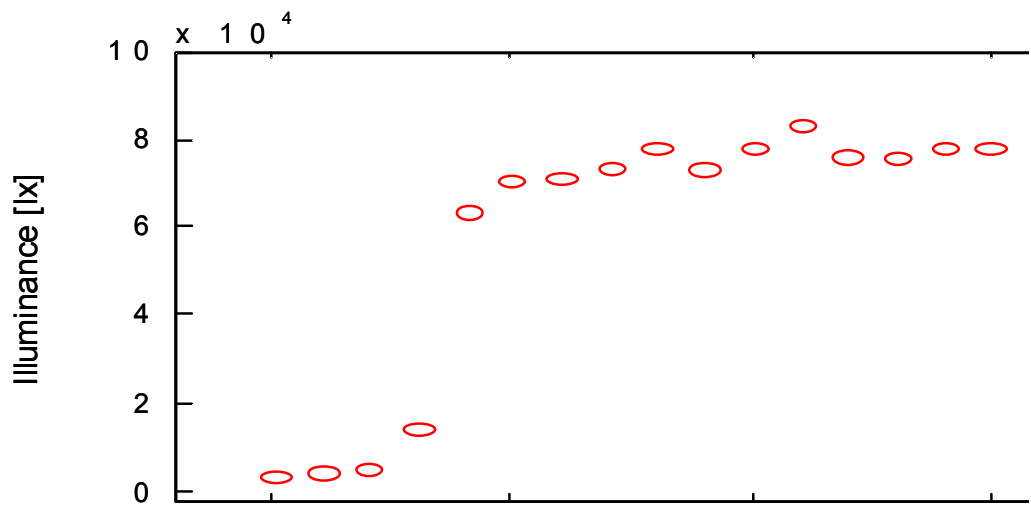


그림 3.12 디포커스된 태양광의 조도 분포.

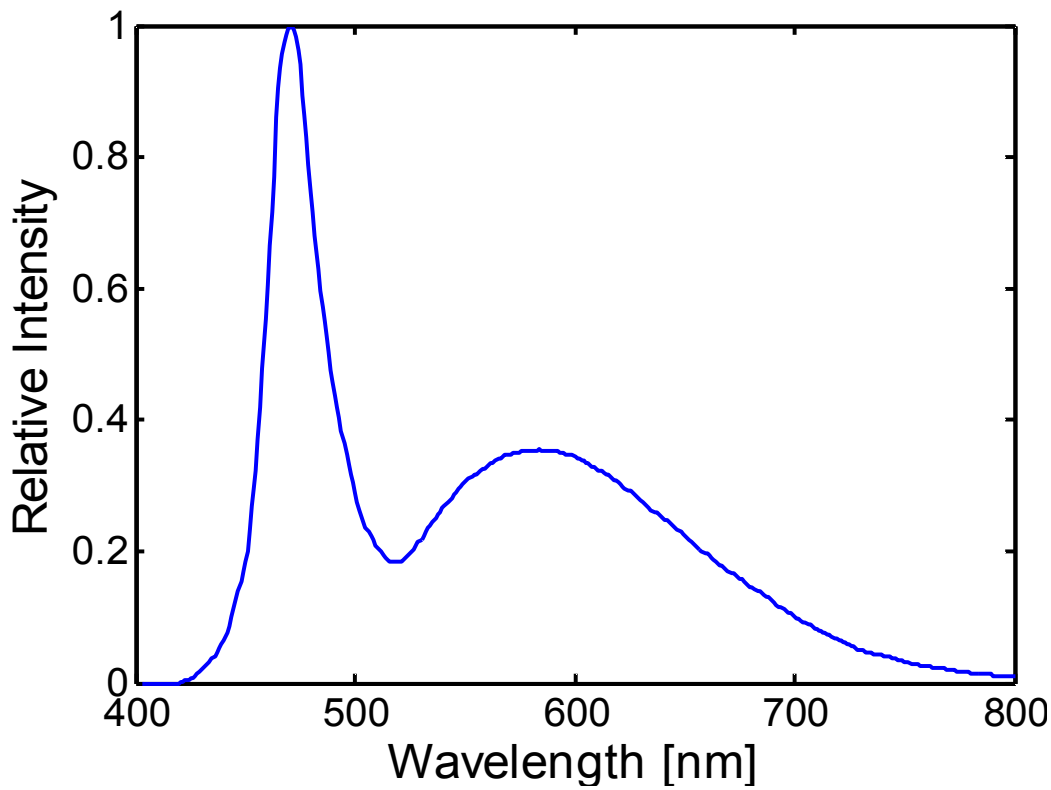
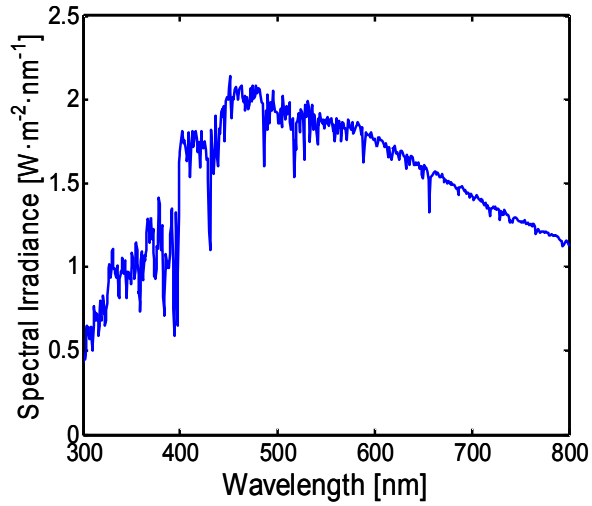


그림 3.13 실험에 사용한 LED(LWH1056N, LUXPIA)의 스펙트럼.<sup>[35]</sup>



(a)

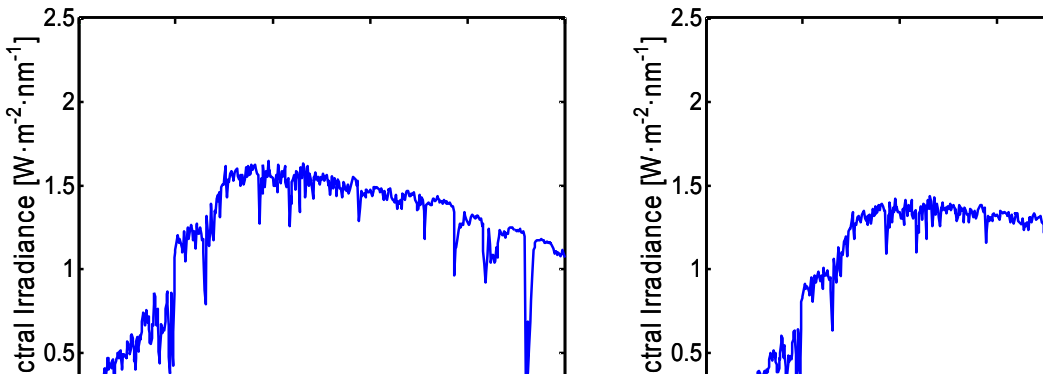


그림 3.14 (a) 대기권 밖에서의 태양스펙트럼, (b) 직사광과 산란광을 포함한 지표면(AM1.5 조건, AM: Air Mass)에서의 태양스펙트럼, (c) 직사광만을 포함한 지표면(AM1.5 조건)에서의 태양스펙트럼.<sup>[37]</sup>

표 3.4 제작한 LED용 도광판의 특성.

	<b>Light Guiding Plate A</b> <b>(Max Pattern Spacing: 9 mm)</b>		<b>Light Guiding Plate B</b> <b>(Max Pattern Spacing: 10 mm)</b>	
	10 × 10 Area	8 × 8 Area	10 × 10 Area	8 × 8 Area
Average	20,300 lx	19,030 lx	17,150 lx	16,530 lx
Standard Deviation	2,735 lx	1,944 lx	2,837 lx	2,624 lx
Maximum	26,390 lx	23,000 lx	25,710 lx	23,580 lx
Minimum	15,330 lx	15,330 lx	11,160 lx	11,160 lx
IDU	71.8 %	79.1 %	65.1 %	67.5 %

표 3.5 선형 프레넬 렌즈의 투과효율.

	Incident Flux [lm] ( $F_I$ )	Focused Flux [lm] ( $F_F$ )	Transmission Efficiency ( $E_{Fres} = F_F/F_I$ )	Average ( $E_{Fres}$ )
a	$57,330 \times 0.5 \times 0.2$ = 5,733	$10,199.76 \times 0.5 =$ 5,099.880	0.89	0.90
b	$62,990 \times 0.5 \times 0.2$ = 6,299	$11,424.53 \times 0.5 =$ 5,712.265	0.91	

표 3.6 집광효율에 대한 시뮬레이션 결과.

일자 2011. 03.21	태양 고도	광속 [lm]			도광관 상부 광투과효율 ( $E_{LGP} = F_2/F_1$ )	집광 효율 = $E_{Fres}(\text{실험}) \times E_{LGP}(\text{시뮬레이션})$
		광원	프레넬렌즈 투과 후 ( $F_1$ )	도광관 상부 투과 후 ( $F_2$ )		
오전 10시	38.8°	100	90.613	82.120	0.91	$0.90 \times 0.91 = 0.82$
오전 11시	47.9°	100	90.605	84.924	0.94	$0.90 \times 0.94 = 0.85$
오후 1시	54.6°	100	90.603	85.915	0.95	$0.90 \times 0.95 = 0.86$
오후 3시	42.1°	100	90.612	83.399	0.92	$0.90 \times 0.92 = 0.83$
오후 4시	31.7°	100	90.620	78.260	0.86	$0.90 \times 0.86 = 0.77$



표 3.7 LED용 도광판의 Photon Flux Density 측정결과.(최대 패턴간격: 9 mm)

	<b>Light Guiding Plate A</b> <b>(Max Pattern Spacing: 9 mm)</b>	
	10 × 10 Area	8 × 8 Area
Average	261 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	244 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Standard Deviation	38.8 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	28.2 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Maximum	349 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	305 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Minimum	195 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	195 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
IDU	66.2 %	75.3 %

표 3.8 LED용 도광판의 Photon Flux Density 측정결과.(최대 패턴간격: 10 mm)

	<b>Light Guiding Plate B</b> <b>(Max Pattern Spacing: 10 mm)</b>	
	10 × 10 Area	8 × 8 Area
Average	198 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	190 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Standard Deviation	37.5 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	33.6 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Maximum	318 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	273 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Minimum	118 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	118 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
IDU	39.6 %	56.4 %

## 제4장 결론

전 세계적으로 화석연료의 고갈과 지구온난화의 문제가 조속히 해결해야 할 큰 이슈로 부각되고 있다. 이를 위해 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그 중 미세조류를 이용한 바이오 연료의 개발이 큰 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 미세조류의 대량생산을 위한 광생물 반응기의 조명 시스템으로 활용될 수 있는 도광판의 광학설계 및 제작 결과에 대해 보고하였다.

먼저, 도광판 설계를 위해 광원, 반사필름, 도광판 패턴에 대한 모델링을 수행하였다. 특히, 도광판 패턴의 경우 램버시안 산란체로 모델링을 수행하였는데, 테스트용으로 제작된 도광판의 조도분포와 부합하는 모델링 파라미터(반사율: 50 %, 산란체의 폭: 1.8 mm)를 매칭 시뮬레이션을 통하여 추출하였다. 추출된 모델 파라미터를 바탕으로 LED용 도광판에 대한 광학설계를 수행하였고, 다음으로 프레넬 렌즈를 이용하여 집광시킨 태양광을 광원으로 사용하는 도광판에 대한 광학설계를 수행하였다. 설계 파라미터로는 최대 패턴간격, 최소 패턴간격, 패턴 간격에 대한 가우시안 함수 폭 등을 사용하였다.

설계결과를 바탕으로 CNC가공을 통해 광생물 반응기용 도광판을 제작하였다. LED용 도광판(크기: 500 mm × 500 mm × 10 mm)의 경우 LED 구동회로, 방열판 등을 직접 제작하였으며, 태양광용 도광판(크기: 500 mm × 600 mm × 10 mm)의 경우 프레넬 렌즈와 도광판을 장착하기 위한 집광 구조체를 제작하였다. 2종의 LED용 도광판을 제작하였는데, 각각 평균조도 20,300 lx(PFD: 261  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 17,150 lx(PFD: 198  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 배광 균일도 75.5 %, 50.1 %의 성능을 보였다. 태양광용 도광판의 경우 평균조도는 21,110 lx (PFD: 382  $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )이었고 배광 균일도는 67.8 % 이었다.

본 논문에서 제작된 도광판은 조선대학교 바이오리파이너리센터에서 제작한 평판형 광생물 반응기의 조명 시스템으로 활용될 예정이며, 미세조류 클로렐라(*Chlorella*)와 두날리엘라(*Dunaliella*)를 광 배양하여 최종적으로 바이오 디젤을 생산할 예정이다. 현재 태양광 집광 시스템에 관한 개선 및 태양광과 LED 광원을 동시에 사용하는 하이브리드 타입의 도광판에 대한 연구가 수행 중이다.

## [참고문헌]

- [1] Beyond Petroleum, "BP Statistical Review of World Energy June 2010," BP Statistical Review (<http://bp.com/statisticalreview>) (2010).
- [2] 한국LP가스공업협회, "세계 에너지전망 2010 - 에너지수요 '08부터 '35까지 36%, 연평균 1.2% 증가" LP가스: LPG산업 종합전문지, 11·12월호, 19-23 (2010).
- [3] A. M. Kunjapur and R. B. Eldridge, "Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae," *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 49, No. 8, 3516 ~ 3526 (2010).
- [4] S.-M. Jeon, I. H. Kim, J.-M. Ha and J.-H. Lee, "Overview of Technology for Fixation of Carbon Dioxide Using Microalgae," *J. Korean Ind. Eng. Chem.* Vol. 19, No. 2, 145 ~ 150 (2008).
- [5] S. Oberthür and H. E. Ott, *The Kyoto Protocol: International Climate Policy for the 21<sup>st</sup> Century* (Springer-Verlag, New York, USA), 1 ~ 136 (1999).
- [6] 녹색성장위원회, "녹색 성장 5개년 계획," 대한민국 대통령직속 녹색성장위원회 (<http://www.greengrowth.go.kr/>) (2007).
- [7] D. Pimentel and Tad. W. Patzek, "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower," *Natural Resources Research*, Vol. 14, No. 1, 65 ~ 76 (2005).
- [8] J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky and D. Tiffany, "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels," *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 103, No. 30, 11206 ~ 11210 (2006).
- [9] 오희목, "미세조류로부터 바이오디젤 생산 현황 및 전망," 생명공학정책연구센터 (<http://www.bioin.or.kr/>), Bioin 스페셜 Zine (2009).
- [10] M. Janssen, J. Tramper, L. R. Mur and R. H. Wiifels, "Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light Regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-Up, and Future Prospects," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 81, No. 2, 193 ~

- 201 (2003).
- [11] E. Sierra, F. G. Acien, J. M. Fernandez, J. L. Garcia, C. gonzalez, and E. Molina, "Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae." *chemical Engineering Journal* Vol. 138, No. 1-3 136 ~ 147 (2008).
- [12] C. Posten, "Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae," *Eng. Life Sci.*, Vol. 9, No. 3, 165 ~ 177 (2009).
- [13] L. Xu, P. J. Weathers, X.-R Xiong and C.-Z. Liu, "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities," *Eng. Life Sci.*, Vol. 9, No. 3, 178 ~ 189 (2009).
- [14] 김종태, 안동규, 박종락, 박정우, 정상화, "미세조류 배양을 위한 광생물반응기 개발의 기술동향," *한국정밀공학회지*, 28권, 2호, 125 ~ 132 (2011).
- [15] J. C. Ogbonna and H. Tanaka, "Light requirement and photosynthetic cell cultivation - Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors," *Journal of Applied Phycology*, Vol. 12, No. 3-5, 207 ~ 218 (2000).
- [16] J. M. Gordon, "Tailoring optical systems to optimized photobioreactors," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 11-12, 1175 ~ 1184 (2002).
- [17] E. Ono and J. L. Cuello, "Design parameters of solar concentrating system for CO<sub>2</sub>-mitigating algal photobioreactors," *Energy*, Vol. 29, No. 9-10, 1651 ~ 1657 (2004).
- [18] J.-W. F. Ziffers, M. Janssen, J. Tramper, and R. H. Wijffers, "Design Process of an Area-Efficient Photobioreactors," *Mar. Biotechnol.*, Vol. 10, No. 4, 404 ~ 415 (2008).
- [19] J. Masojidek, M. Sergejevová, K. Rottnerová, V. Jirka, J. Korecko, J. Kopecky, I. Zat'ková, G. Torzillo and D. Stys, " A two-stage solar photobioreactor for cultivation of microalgae based on solar concentrators," *J. Appl. Phycol.*, Vol. 21, 55 ~ 63 (2009).
- [20] <http://www.opticalres.com/>.

- [21] C. DeCusatis, Handbook of Applied Photometry (Springer-Verlag, New York, USA), 33 ~ 54 (1997).
- [22] W. J. Smith, Modern Optical Engineering 3th Edition (McGraw-Hill, New York, USA), 219 - 250 (2000).
- [23] Y. Ohno, Hand Book of Optics (McGraw-Hill, New York, USA) 37.1 ~ 37.11 (2009).
- [24] 이종춘, 조명핸드북 (성안당, 파주시, 대한민국), 70 ~ 80 (2010).
- [25] <http://www.kosemi.co.kr/>.
- [26] A. Luque, and S. Hegedus, HANDBOOK OF PHOTOVOLTAIC SCIENCE AND ENGINEERING (Wiley, New York, USA), 414 (2011).
- [27] <http://www.kriss.re.kr/>.
- [28] H. C. Lee, Introduction to color imaging science (Cambridge Univ Press, Trinity Lane, United Kingdom), 147 ~ 150 (2005).
- [29] Optical Reasearch Associates, LightTools Core Module User's Guide (Optical Reasearch Associates, Pasadena, USA), 354 ~ 398 (2010).
- [30] 한국과학기술정보연구원, "BLU용 도광판," 부품 소개 종합 정보망 (<http://www.mctnet.org/>) (2007).
- [31] S. Lim, Liquid Crystal Display Backlight., (DanKook University Press, Gyeonggi-do, Korea), 67 ~ 84 (2005).
- [32] S.-W. Oh, N. Kim, E.-S. Kim, and J.-W. An, "Optimization of the Dual-layer for Improving Luminance and Uniformity of Edge Type Back Light Unit," Vol. 21, No. 6, 247 ~ 253 (2010).
- [33] R. Leutz, A. Suzuki, Nonimaging Fresnel lenses: Design and performance of solar concentrators (Springer, New York, USA), 56 ~ 58 (2001).
- [34] <http://www.kasi.re.kr/>.
- [35] <http://www.luxpialed.com/kr/>.
- [36] LI-COR, Inc., LI-COR Terrestrial Radiation Sensors: Instruction Manual (LI-COR, Inc., Lincoln, USA), 6-1 ~ 6-2 (2007).
- [37] P. S. Nobel, Physicochemical and environmental plant physiology (Elsevier,

London, UK), 185 ~ 188 (2009).

- [38] ASTM G 173 - 03 (2008), "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance: Direct Normal and Hemisphere on 37° Tilted Surface," ASTM (2008).

## 저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20107128	과 정	석 사
성 명	한글: 박 기 찬    한문 : 朴 基 贊    영문 : Park Gi Chan				
주 소	광주광역시 북구 두암동 920-8				
연락처	E-MAIL : pkpkoo@naver.com				
논문제목	한글 : 광생물 반응기를 위한 도광판 설계 및 제작 영어 : Design and Fabrication of Light Guiding Plate for Photobioreactor				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다                      음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(  )    반대(     )

2011년    10월

저작자: 박 기 찬    (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**



## [감사의 글]

2년이라는 시간은 제게 앞만 보고 달려와 놓친 것, 잃은 것도 많은 시간이었지만 그 만큼 제 인생 전체를 볼 때 가장 큰 발전과 발돋움의 기간이었습니다. 이렇게 변화할 수 있게 도와주신 제 주위에 모든 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

먼저 석사 과정 동안 연구에 매진할 수 있도록 아낌없는 격려와 지도를 해주신 박종락 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 저의 논문 심사를 맡아주시고, 소중한 충고와 조언을 해주셨던 김진태 교수님, 김현수 교수님, 장원근 박사님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 그리고 주기남 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

연구실 생활을 시작할 때부터 지금까지 교수님께서 세심하게 지도해 주시고 많은 기회를 주셨기 때문에 지금에 제가 있을 수 있었습니다. 학부생으로서 시작한 연구실 생활은 저에게 어려움이 많았지만, 교수님의 훌륭한 가르침 덕분에 잘 극복해 나갈 수 있었습니다. 하지만, 교수님께서 보여주신 열정과 노력만큼 훌륭한 학생이 되지 못한 것 같아 죄송합니다. 앞으로 교수님의 가르침을 가슴에 새겨 매사 최선을 다하는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

학부과정 시절부터 함께했던 실험실 선배님들과 후배님들께 깊은 감사드립니다. 실험실의 제일 큰 형님으로 지금도 후배들을 챙겨주시는 호형, 지금의 실험실이 있기 까지 초석을 놓아주셨던 태원이형, 진우형에게 진심으로 감사드립니다. 이제 연구실에 기둥이 될 훈이, 성선이 에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

그리고 대학원생활 동안 언제나 가까이에서 저의 많은 부분을 공유해주고 큰 힘이 되어준 동준이형, 동석이형, 건국이형, 회석이형, 훈국이형, 일신이형에게도 늘 고맙습니다. 학부시절부터 저에게는 존재만으로도 큰 힘과 용기가 되어준 수민이, 명진이, 지선이, 현진이, 철용이 에게도 감사합니다. 그리고 고등학교 시절부터 대학시절 까지 함께한 소중한 재영이, 지은이에게도 고맙다는 말을 해주고 싶고, 지금까지 저에게 희망의 말을 아끼지 않은 우현이, 강직에게도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 늘 저를 믿어주신 사랑하는 아버지, 어머니 그리고, 누나들이 없었더라면 저는 석사학위를 받을 수 없었을 것이라 생각합니다. 그리고 항상 옆에서 응원해주고 격려 해준 사랑하는 소라에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

이제 졸업을 앞두고 사회를 나가는 문턱에 서니 설렘과 두려움이 앞섭니다. 하

지만 지금까지 해왔던 것처럼 주위에 모든 분들 실망시키지 않고 후회 없는 삶을 살도록 하루하루 노력하는 사람이 되겠습니다.

마지막으로 지면으로 통해서 일일이 언급을 하지 못했지만 그 동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한번 진심으로 감사드립니다.

2010 年 11 月

朴 基 贊