

2013년 2월
석사학위논문

태양광을 이용한 광생물반응기용
도광판 설계 및 제작에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술평학과

김 훈

태양광을 이용한 광생물반응기용
도광판 설계 및 제작에 관한 연구

Design and Fabrication of Light-guiding Plate
for a Photobioreactor Utilizing Sunlight

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술훈공학과

김 훈

태양광을 이용한 광생물반응기용
도광판 설계 및 제작에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 훈

김 훈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 권민기 인

위원 조선대학교 교수 김현수 인

위원 조선대학교 교수 박종락 인

2012년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

| | |
|---------------------------------|----|
| 제1장 서 론 | 1 |
| 제2장 조명광학 기초이론 및 태양광 조명시스템 | 3 |
| 제1절 조명광학 이론 | 3 |
| 1. 복사측정학과 광도측정학 | 3 |
| 2. 광도측정학 단위 | 3 |
| 제2절 태양광 조명시스템 구성 | 8 |
| 1. 집광 시스템 | 8 |
| 2. 광전달 시스템 | 8 |
| 3. 도광판 | 9 |
| 제3장 태양광용 도광판 설계 | 14 |
| 제1절 도광판 모델링 | 14 |
| 1. 광원 | 14 |
| 2. 반사필름 | 14 |
| 3. 도광판 패턴 | 15 |
| 제2절 도광판 설계 | 23 |
| 1. 테스트용 도광판 제작 및 특성 측정 | 23 |
| 2. 도광판 패턴 모델 파라미터 결정 | 23 |
| 3. 도광판 설계 | 24 |

| | |
|-------------------------|----|
| 제4장 도광판 제작 및 성능평가 | 34 |
| 제1절 도광판 제작 | 34 |
| 제2절 도광판 성능평가 | 37 |
| 제3절 논의 | 42 |
| 제5장 결론 | 46 |
| [참고문헌] | 47 |
| [감사의 글] | 51 |

그림 목차

| | |
|---|----|
| 그림. 2.1 눈의 분광시각효율 곡선 | 6 |
| 그림. 2.2 태양광 조명시스템의 하부 시스템의 모습 (a) 집광 시스템, (b) 광전송 시스템, (c) 도광판 | 10 |
| 그림. 2.3 IR 차단 필터 투과율 측정결과 | 11 |
| 그림. 3.1 광전송 시스템의 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습 | 16 |
| 그림 3.2 광섬유 끝단으로부터 15 cm 떨어져 있는 위치에서 측정한 조도분포 | 17 |
| 그림 3.3 본 논문에서 사용한 광원(광전송 시스템의 광섬유 끝단)의 각도별 상대 광도분포 | 18 |
| 그림. 3.4 LightTools에 모델링된 광원(광전송 시스템의 광섬유 끝단)의 모습 | 19 |
| 그림. 3.5 양방향 반사율 분포함수에서 $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 의 정의 | 20 |
| 그림. 3.6 본 논문에서 사용한 반사필름(SY 64~70, SK)에 대해 측정된 | |

| | |
|--|----|
| BRDF 데이터 | 21 |
| 그림. 3.7 도광판 하면에 형성된 도광판 패턴의 단면사진 | 22 |
| 그림. 3.8 테스트 도광판에 대한 조도분포 측정 결과 | |
| (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우 | 26 |
| 그림. 3.9 도광판 패턴의 모습을 보여주고 있는 LightTools 레이아웃 | 27 |
| 그림. 3.10 (a) 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 | |
| (b) 부착되지 않은 경우에 대해 계산한 평균 오차 δ | 28 |
| 그림. 3.11 반사필름 부착된 경우와 부착되지 않는 경우를 모두 고려한 | |
| 총 평균오차 계산 결과. 붉은 점선으로 그려진 원은 총 평균오차의 | |
| 최소점($R = 70\%$, $d = 2.4$ mm)을 나타냄 | 29 |
| 그림. 3.12 태양광용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃 | 30 |
| 그림. 3.13 태양광용 도광판에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균 편차) | 31 |
| 붉은 점선으로 그려진 원은 평균 편차 최소점을 나타냄.(a) 최대 패턴 | |
| 간격 8 mm(최소점: 최소 패턴간격 3 mm, 가우시안 함수 폭: 250 mm), | |
| (b) 9 mm(최소점: 최소 패턴간격 4 mm, 가우시안 함수 폭: 300 mm), | |
| (c) 10 mm(최소점: 최소 패턴간격 6 mm, 가우시안 함수 폭: 400 mm), | |
| (d) 11 mm(최소점: 최소 패턴간격 8 mm, 가우시안 함수 폭: 300 mm) | |
| 그림. 3.14 태양광용 도광판에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과 | |
| (평균 조도, 단위: lx) (a) 최대 패턴간격 8 mm, (b) 9 mm, | |
| (c) 10 mm, (d) 11 mm | 32 |
| 그림. 3.15 그림 3.15 최종 설계된 태양광용 도광판에 대한 Auto-CAD 도면 | 33 |
| 그림. 4.1 광섬유 광원용 어댑터 CAD 도면 | 35 |
| 그림. 4.2 제작된 태양광용 도광판 및 광섬유 광원용 어댑터 사진 | 36 |
| 그림. 4.3 태양광용 도광판에 대한 조도 분포 측정 결과 | 39 |
| 그림. 4.4 광태양광용 도광판에 대한 PFD 분포 측정 결과 | 40 |
| 그림. 4.5 표준 태양광 스펙트럼 | 41 |
| 그림. 4.6 선형 프레넬 렌즈를 이용한 집광 구조와 도광판의 모습 | 43 |
| 그림. 4.7 선형 프레넬 렌즈 집광 구조와 도광판 시스템에 대한 집광 효율 | |

| | |
|--|----|
| 시뮬레이션 결과 | 44 |
| 그림. 4.8 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 집광 구조와 도광관의 모습 | 45 |

표 목차

| | |
|---|----|
| 표 2.1 광도 측정학과 복사 측정학에서 사용되는 기본 단위 | 7 |
| 표 2.2 집광 시스템 구성요소 사양 | 12 |
| 표 2.3 광전송 시스템에 사용된 광섬유의 주요 사양 | 13 |

ABSTRACT

Design and Fabrication of Light-guiding Plate for a Photobioreactor Utilizing Sunlight

By Hun Kim

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

With rapid global industrialization, resource exhaustion and global environmental problems have become widespread and critical issues. In order to solve these problems, the use of new and renewable energy has attracted considerable attention. Among renewable energy sources, bioenergy from microalgae is considered to be very promising.

In this thesis, results of the optical design and fabrication of a light-guiding plate (LGP) to be used as an illumination system for photobioreactors are presented. A solar daylighting system was used as the light source for the LGP. This system consists of two parts: a light collector and a light transmitter. The light collector is made up of circular Fresnel lenses and is capable of solar tracking. The light transmitter is composed of plastic optical fibers (POFs) and delivers the sunlight collected by the light collector to the sides of the LGP.

First, we carried out modeling of light sources (exit ports of the POFs), a reflection film, and LGP patterns. Measured illumination distribution was used to model the light source. To model the reflection film, we used measured bidirectional reflective distribution function data. To model the LGP patterns, we

assumed that they were Lambertian scatterers. The modeling parameters, i.e., the reflectance R and the scatterer width d of the LGP patterns, were determined by matching simulations with the experimentally measured illuminance distribution of a test LGP and were found to be $R = 70\%$ and $d = 2.4$ mm, respectively.

Next, we designed and fabricated an LGP that was optimized for the average deviation of the illuminance distribution by varying the maximum pattern spacing, minimum pattern spacing, and width of the Gaussian pattern-spacing function. A computerized numerical control (CNC) machine was used for the fabrication. The size of the fabricated LGP was 1000 mm \times 500 mm \times 10 mm. The measured optical characteristics of average illuminance and uniformity of illuminance distribution were 7,986 lx (photon flux density: 117.6 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) and 75.4%, respectively.

The LGP designed and fabricated in this work is intended to reduce energy consumption for biomass production. The LGP will be used as an illumination system for a flat-panel photobioreactor developed at the Biorefinery Center, Chosun University, and the overall energy efficiency will be tested.

제1장 서 론

최근 전 세계적으로 과도한 산업화로 인해 화석연료의 사용량이 급격히 증가하면서, 대표적 화석연료인 석유, 천연가스, 석탄의 매장량은 각각 40년, 60년, 200년 동안 사용할 수 있는 정도이다.^[1] 이러한 전 세계적인 화석연료 고갈에 따른 자원 위기와 지구환경문제의 주원인인 이산화탄소 저감을 동시에 해결 가능한 신재생에너지 개발이 국내외적으로 매우 중요한 쟁점으로 언급되고 있다.^[2, 3] 이 문제를 해결할 수 있는 방법으로 광생물반응기를 이용한 미세조류 배양기술이 큰 주목을 받고 있으며,^[4,5] 국내외적으로 바이오 연료의 보급률을 높이기 위한 바이오 연료 대량생산 기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.^[6,7]

또한 유네스코의 분석에 따르면 전 세계의 바이오에너지 생산 잠재량은 전체 에너지 소비량의 30%에 이르는 것으로 조사되었으며 화석연료 고갈에 대한 실질적인 대안이 될 수 있음을 보여주고 있다.^[8] 현재 바이오 에너지 생산을 위한 연료로는 식용작물이 주로 사용되고 있으나 특정 지역에 자원이 편중되어 있고 작물의 증산에 따른 환경오염등의 문제점이 꾸준히 제기 되고 있다. 이에 따라, 빠른 성장력과 다양한 환경에서의 성장이 가능하며 고농도의 이산화탄소, 산성가스 등에 강한 내성을 지닌 미세조류가 신재생에너지원으로 큰 주목을 받고 있다.^[9-11] 현재 바이오 에너지 생산을 증대를 위한 다양한 미세조류용 광생물반응기가 사용되고 있다.^[12,13]

효율성 있는 광생물반응기 개발을 위해 효율적인 광원이 활용된 다양한 광학시스템이 제안되었다.^[14-17] 에너지효율 관점에서 실질적인 이득을 얻기 위해서는 태양광을 이용한 조명시스템이 필수적이다. 광생물반응기에 사용되는 대부분의 태양광 조명시스템은 크게 집광, 광전송, 배광 시스템으로 구성되어 있다. 집광 시스템은 렌즈 또는 반사판을 이용하여 태양광을 광전송 시스템에 집광시키는 역할을 수행한다. 광전송 시스템은 광도파관, 광섬유 등으로 구성될 수 있으며 집광된 태양광을 배광 시스템으로 전달시켜준다. 배광 시스템은 시트(sheet) 형태의 산란체, 산란 표면을 갖고 있는 광섬유, 도광판(Light-guiding Plate, LGP) 등으로 구성될 수 있으며, 전송된 태양광이 광생물반응기에 균일하게 조사되도록 만들어 주는 역할을 수행한다.

본 논문에서는 광생물반응기 조명 시스템으로 활용될 태양광용 도광판에 대한 광학설계 및 제작 결과에 대해 보고한다. 태양광 추적기 가능하고 원형 프레넬 렌즈를 구

비한 태양광 주광 시스템(Solar Daylighting System)을 이용하여 태양광을 집광하였고, 광섬유 다발을 사용하여 집광된 태양광을 도광판까지 전송하였다. 광전송 시스템의 광섬유 끝단(exit port)을 광원으로 사용하는 도광판을 설계, 제작하였다. 도광판의 광학설계를 위하여 조명광학설계 소프트웨어인 LightTools (Optical Research Associates, USA)를 사용하였다.^[18] CNC(Computerized Numerical Control) 가공을 통해 광생물반응기용 도광판을 제작하고 광학특성에 대한 성능을 평가하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 조명광학 일반이론과 태양광 조명시스템에 대해 소개하였다. 제3장에서는 태양광용 도광판 설계 방법에 대해 자세히 서술하였다. 제4장에서는 도광판 제작과정과 제작된 도광판의 성능 측정 결과를 정리하였고, 마지막 제5장에서는 본 논문의 연구결과를 종합하여 기술하였다.

제2장 조명광학계

제1절 조명광학 이론

1. 복사측정학과 광도측정학^[19-22]

빛의 측정과 관련된 학문분야인 복사측정학(Radiometry)과 광도측정학(Photometry)에 대해 간단히 소개하도록 하겠다. 복사측정학은 전자기파 복사(Electromagnetic Radiation)의 전 파장 영역에서의 에너지 측정과 관련된 분야이다. 단위로는 복사속(W), 복사조도(W/m^2), 복사광도(W/sr), 복사휘도($W/m^2/sr$) 등을 사용하는데, 각각 단위 시간당 에너지, 단위 면적당 복사속, 단위 입체각당 복사속, 단위 면적 및 단위 입체각당 복사속을 의미한다.

광도측정학은 인간의 눈이 감지할 수 있는 가시광 파장 영역(380 nm ~ 780 nm)에서의 전자기파 복사에너지를 인간의 분광시감효율을 고려하여 측정하는 학문분야이다. 단위로는 광속(lm), 조도(lx, lm/m^2), 광도(cd, lm/sr), 휘도(nt, $lm/m^2/sr$) 등을 사용하며, 각각 복사측정학의 복사속, 복사조도, 복사광도, 복사휘도에 대응한다. 그림 2.1은 전자기파의 파장 λ 에 대한 눈의 분광시감효율 곡선 $V(\lambda)$ 를 보여주고 있다.^[22] 표 2.1에 복사측정학과 광도측정학에서 사용되는 기본 단위를 정리하였다.

2. 광도측정학 단위^[22]

가. 광속(Luminous Flux)

광속은 눈의 분광시감효율을 고려하여 환산한 전자기파 복사의 단위 시간당 전달 에너지를 의미하며, 단위로는 lm(lumen)을 사용한다. 일반적으로 Φ_v 로 표기하며, 주로 조명용 광원의 총 방출광량을 나타낼 때에 사용한다. 1 cd의 점광원으로부터 1 sr의 입체각으로 방사되는 광속이 1 lm이며, 1 cd의 점광원으로부터 방사되는 총 광속은 4π lm이다.

나. 조도(Illuminance)

조도는 단위 면적당 광속의 양을 의미하며, 단위로는 lx(lux, $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$)를 사용한다. 일반적으로 E_v 로 표기하며, 입사된 광속과 입사면적이 각각 Φ_v , A 일 때, 다음 관계식을 만족한다.

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (2.1)$$

다. 광도(Luminous Intensity)

광도는 단위 입체각(Solid Angle, 단위: sr)당 광속의 양을 의미하며, 단위로는 cd(candela, $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$)를 사용한다. 일반적으로 I_v 로 표기하며, 광속과 입체각이 각각 Φ_v , Ω 일 때, 다음 관계식을 만족한다.

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (2.2)$$

광원으로부터 입사 영역까지의 거리와 입사 영역의 면적이 각각 r , A 일 때, 입체각 Ω 는 다음과 같이 표현된다.

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

라. 휘도(Luminance)

휘도는 단위 면적(투영면적)당 단위 입체각당 광속의 양을 의미하며, 단위로는 nt(nit, $1 \text{ nt} = 1 \text{ lm/m}^2/\text{sr} = 1 \text{ cd/m}^2$)를 사용한다. 일반적으로 L_v 로 표기하며, 인간이 인지하는 밝기와 가장 유사한 측정량으로 알려져 있다. 광속, 광원의 투영면적, 입체각이 각각 Φ_v , A' , Ω 일 때, 휘도 L_v 는 다음 관계식을 만족한다.

$$L_v = \frac{\Phi_v}{A' \cdot \Omega} \quad (2.4)$$

광원의 면적과 광원면의 수직 방향으로부터 관측방향이 이루는 각이 각각 A , θ 일 때, 투영면적 A' 은 $A' = A \cos \theta$ 이므로, 휘도 L_V 은 다음 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$L_V = \frac{\Phi_V}{A \cos \theta \cdot \Omega} \quad (2.5)$$

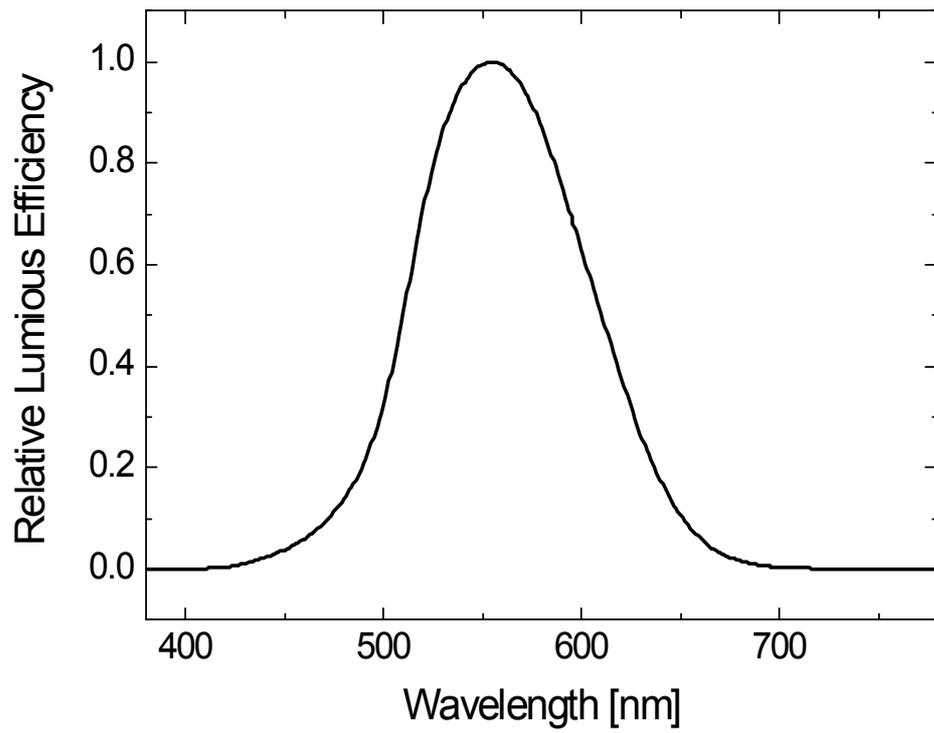


그림 2.1 눈의 분광시감효율 곡선.^[22]

표 2.1 복사측정학과 광도측정학에서 사용되는 기본 단위.^[22]

| 복사 측정학 | | 광도 측정학 | |
|--------|----------------------|--------|--|
| 양 | 기호 | 양 | 기호 |
| 복사속 | W | 광속 | lm |
| 복사조도 | W/m ² | 조도 | lx (lm/m ²) |
| 복사광도 | W/sr | 광도 | cd (lm/sr) |
| 복사휘도 | W/m ² /sr | 휘도 | nt (cd/m ² , lm/m ² /sr) |

제2절 태양광 조명시스템 구성

본 논문에서 구성한 태양광 조명시스템은 집광 시스템, 광전송 시스템, 도광판으로 이루어져 있다. 그림 2.2는 각 하부 시스템의 모습을 보여주고 있다. 아래에 각 하부 시스템에 대해 간략히 정리하였다.

1. 집광 시스템^[23]

본 논문에서 사용한 태양광 집광 시스템은 태양광 추적을 위한 센서 및 추적 구동장치, 태양광 집광을 위한 원형 프레넬 렌즈, 시스템 보호를 위한 투명 돔으로 구성되어 있다. 추적 구동장치는 태양광 추적 센서(2-Axis Solar Tracking Sensor and Controller, HANUL Solar Energy)의 출력 신호에 따라 전동 모터 및 전동 실린더를 구동하여 태양의 방위각과 고도각 추적을 수행한다. 직경이 60 mm, 초점거리가 63 mm인 원형 프레넬 렌즈 총 64개를 사용하고 있다. 각 프레넬 렌즈 초점에는 광전송 시스템에 사용되는 광섬유 입력단이 위치해 있다. 투명 돔은 두께 5 mm인 Poly methyl methacrylate(PMMA) 재질로 구성되어 있으며, 직경 1200 mm인 반구형의 형태를 갖고 있다. 표 2.2는 집광 시스템의 주요사양을 보여주고 있다.

2. 광전송 시스템^[24,25]

본 논문에서 사용한 광전송 시스템은 플라스틱 광섬유(SK-80, MITSUBISHI)를 이용하여 구성되어 있다. 플라스틱 광섬유는 직경 2 mm인 PMMA 재질로 만들어졌으며, 총 길이가 8 m이었다. 광전송 손실은 150 dB/km이다. 적외선 차단과 집광에 의해 발생하는 열의 발산을 위해 IR(Infra-red) 차단 필터와 알루미늄 재질의 방열핀이 광섬유 입력단 앞쪽에 부착되었다. 그림 2.3는 IR 차단 필터의 투과율 스펙트럼 측정 결과를 보여주고 있다. 표 2.3에 광전송 시스템에 사용된 광섬유의 주요 사양을 정리하였다.

3. 도광판

일반적으로 도광판은 광원, 반사필름, 도광판 패턴으로 구성된다. 본 논문에서는 광전송

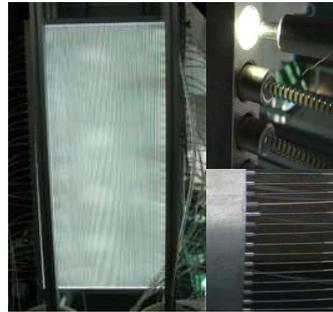
시스템의 광섬유 끝단(exit port)을 광원으로 사용하는 엣지형(edge-lit or side-lit) 도광관을 설계 및 제작하였다. 엣지형 도광관은 도광관의 측면에 광원이 위치해 있고, 내부전반사를 통하여 광원으로부터 출사된 빛이 도광관을 통해 전파되는 구조를 갖고 있다. 도광관 내부를 통해 전파되던 빛이 도광관 패턴을 만나게 되면 내부전반사 조건이 깨지게 되고 빛은 도광관의 상면이나 하면으로 방출되게 된다. 하면으로 방출된 빛을 다시 상면으로 되돌리기 위해 반사필름이 사용된다. 이러한 방식으로 도광관 측면에 위치한 광원을 이용하여 면형태의 광원을 구현할 수가 있는 것이다. 제3장과 제4장에서 각각 도광관 설계와 제작에 대해 자세히 서술하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 2.2 태양광 조명시스템의 하부 시스템의 모습.

(a) 집광 시스템, (b) 광전송 시스템, (c) 도광판

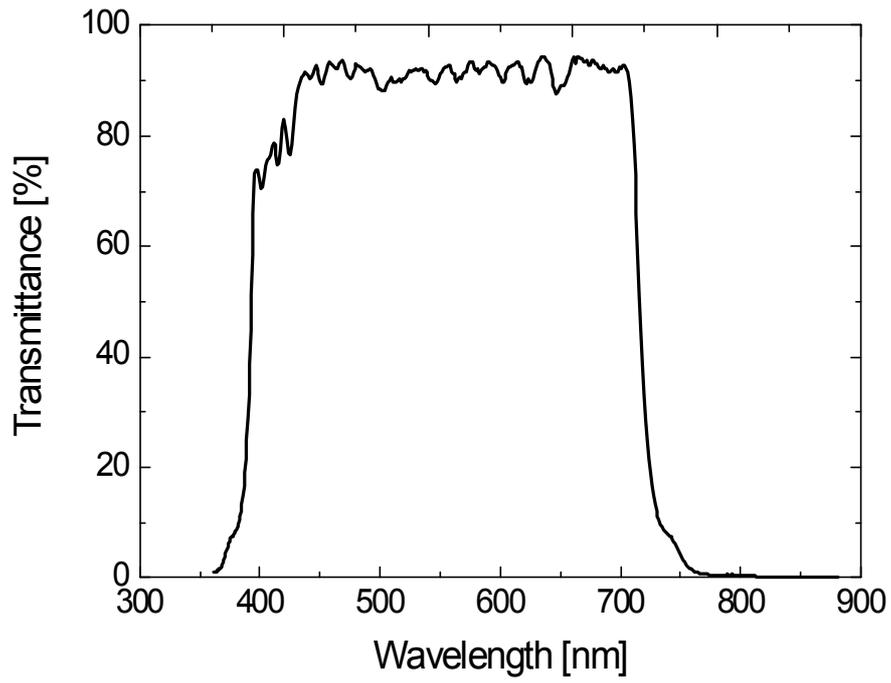


그림 2.3 IR 차단 필터 투과율 측정결과.

표 2.2 집광 시스템의 주요 사양.^[24]

| 구성요소 | 사 양 | |
|--------------|--------|-----------------------|
| 태양광 추적센서 | 추적 방식 | 센서 상하좌우 광량 비교 및 2축 추적 |
| | 추적 정밀도 | 0.01° |
| 태양광 추적장치 | 방위각 추적 | 0° ~ 270° |
| | | 전동모터 추적방식 |
| | 고도 추적 | 17° ~ 80° |
| | | 전동실린더 추적방식 |
| 집광용 프레넬 렌즈 | 직경 | 60 mm |
| | 초점거리 | 63 mm |
| | 개수 | 64 |
| 시스템 보호용 투명 돔 | 재질 | PMMA |
| | 두께 | 5 mm |
| | 직경 | 1200 mm |

표 2.3 광전송 시스템에 사용된 광섬유의 주요 사양.^[25]

| 항목 | 사양 |
|---------|---------------------|
| 코어 재질 | PMMA |
| 클래딩 재질 | Fluorinated Polymer |
| 코어 굴절률 | 1.49 |
| 클래딩 굴절률 | 1.40 |
| 투과 손실 | 150 dB/km |
| 코어 직경 | 1960 μm |
| 클래딩 직경 | 2000 μm |

제3장 태양광용 도광판 설계

제1절 도광판 모델링

1. 광원

본 논문에서는 앞서 서술한 바와 같이 광전송 시스템의 광섬유 끝단(exit port)을 광원으로 사용하였다. 그림 3.1은 광전송 시스템의 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습을 보여 주고 있다. 광원 모델링을 위하여 광섬유 끝단으로부터 15 cm 떨어져 있는 위치에서 조도분포를 측정하였고, 이를 바탕으로 각도별 광도분포를 계산하였다. 그림 3.2와 그림 3.3은 각각 측정된 조도분포와 각도별 상대 광도분포를 보여주고 있다. 조도분포 측정시 태양 직사광의 조도는 93,000 lx이었고, 하나의 광섬유 끝단으로부터 출사되는 광속은 107.5 lm이었다. 각도별 상대 광도분포를 LightTools에 있는 Apodization 파일에 적용하여 광섬유 광원의 모델링을 수행하였다. 이때 광원의 크기는 광섬유의 직경인 2 mm로 설정 하였다. 그림 3.4는 LightTools에 모델링된 광원의 모습을 보여주고 있다.

2. 반사 필름

일반적으로 반사필름은 거울반사(Specular Reflection) 특성뿐 만 아니라, 확산반사(Diffuse Reflection) 특성을 나타내며, 입사각(Angle of Incidence, AOI)에 따라 현저히 다른 특성을 보인다. 반사필름의 반사 특성은 양방향 반사율 분포함수(Bidirectional Reflective Distribution Function, BRDF)를 이용하여 표현할 수 있는데, BRDF는 다음과 같이 정의 된다.^[26,27]

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (3.1)$$

여기서, θ_i 와 θ_r 은 각각 입사광과 반사광의 편각(Polar Angle)을 의미하며, ϕ_i 와 ϕ_r 은 각각 입사광과 반사광의 방위각(Azimuth Angle)을 의미한다.(그림 3.5 참조) dE_i 와

dL_r 는 각각 입사광의 분광복사조도, 반사광의 분광복사휘도를 나타낸다.

본 논문에서는 SK사의 반사필름(모델명: SY 64 ~ 70)을 사용하였는데, 제이엔씨테크의 RT-300S 장비를 사용하여 반사필름의 BRDF를 측정하였다. 입사광의 편각을 0° 부터 70° 까지 5° 간격으로 변화시켰으며, 편각 -90° 부터 90° 까지 10° 간격마다, 방위각 -80° 부터 80° 까지 2° 간격마다 반사광을 측정하였다. 그림 3.6은 측정된 BRDF 데이터 중 입사각이 0° , 20° , 40° , 60° 인 경우를 보여주고 있다. 측정된 BRDF 데이터를 LightTools의 반사필름 모델의 표면특성(Surface Finishes)에 적용하여 광학설계 및 시뮬레이션 수행하였다.

3. 도광판 패턴

도광판 패턴은 인쇄 가공, 레이저 가공, Stamping 가공, V-cut 가공 등의 방법으로 제작된다.^[28] 인쇄 가공 방식은 두꺼운 도광판을 제작할 때 적합한 가공 방식으로 높은 원가 경쟁력과 수율확보에 용이하다는 장점을 갖고 있으며, 인쇄용 접착으로 인한 환경물질 배출과 고온에서의 신축성 저하, 마스크 변경등의 단점을 갖고 있다. 레이저 가공은 고휘도 제품 제작시에 많이 쓰이는 방식으로 모델 변화가 용이하며, 표면 품질이 우수하다는 장점을 지니고 있다. 반면, 낮은 생산성과 레이저 출력 유지가 쉽지 않은 단점을 갖고 있다. Stamping 가공 방식은 상하면 동시 패턴을 새기는 마크제작에 많이 쓰이는 방식으로 원가 경쟁력과 높은 생산성의 장점을 갖고 있지만, 금형 수명이 짧고 작업자에 따라 제품 편차가 크다는 단점을 갖고 있다. 마지막으로 V-cut 가공 방식은 저렴한 투자비용과 패턴 변경에 용이한 장점을 갖고 있지만, 표면 품질과 패턴 정밀도 저하의 단점을 갖고 있다.

본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 PMMA 재질의 도광판을 사용하였고, 다이아몬드 컷터를 사용하는 V-cut 가공을 통해 도광판 패턴을 제작하였다. 설계된 위치에 V-cut을 정확하게 형성하기 위해 CNC 가공기를 사용하였다. 그림 3.7은 도광판 하면에 형성된 도광판 패턴의 단면을 보여주고 있다. 이 때 사용한 다이아몬드 컷터의 각도는 60° 이었다.



그림 3.1 광전송 시스템의 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습.

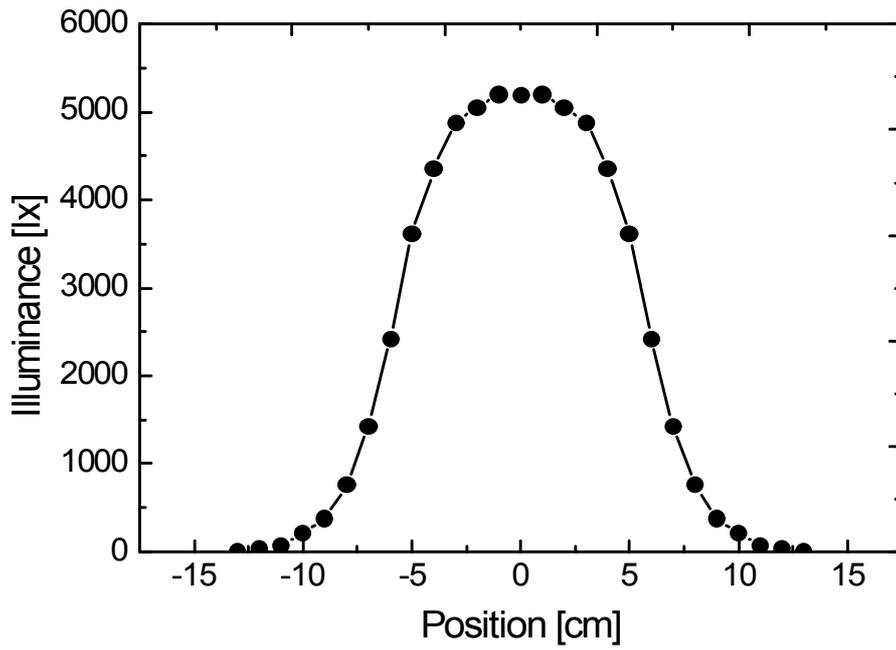


그림 3.2 광섬유 끝단으로부터 15 cm 떨어져 있는 위치에서 측정한 조도분포.

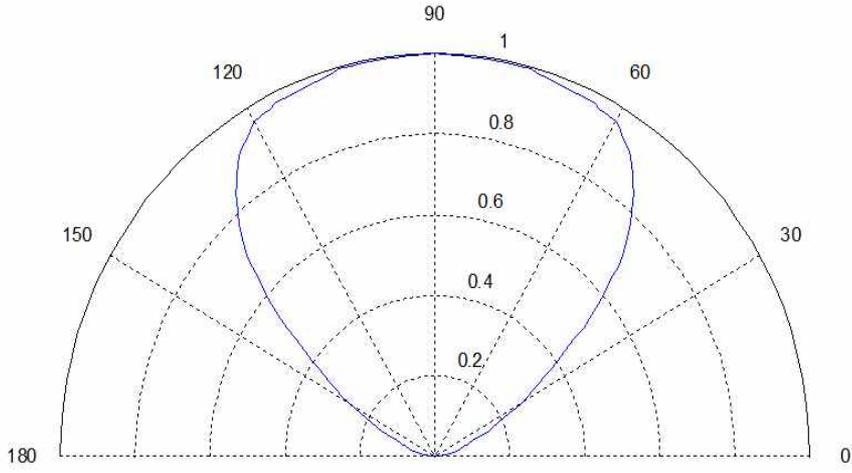


그림 3.3 본 논문에서 사용한 광원(광전송 시스템의 광섬유 끝단)의 각도별 상대 광도분포.

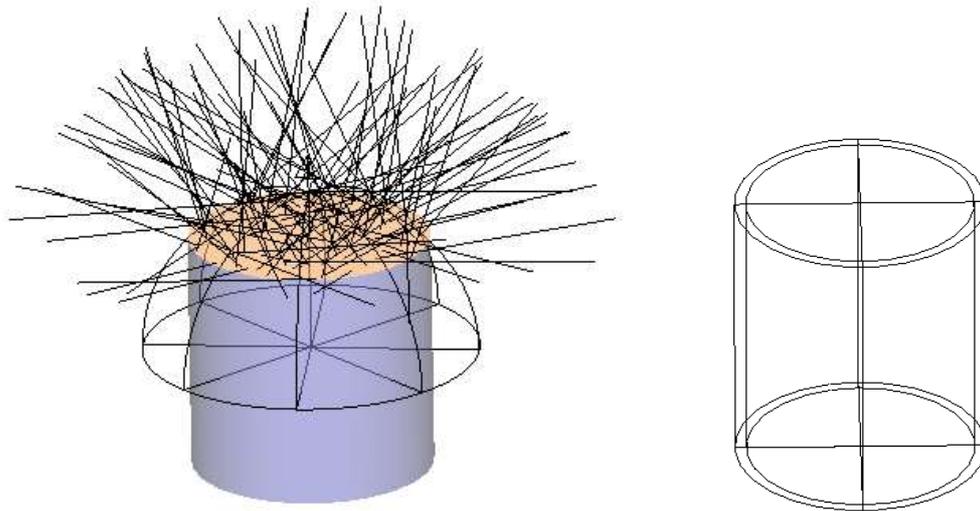


그림 3.4 LightTools에 모델링된 광원(광전송 시스템의 광섬유 끝단)의 모습.

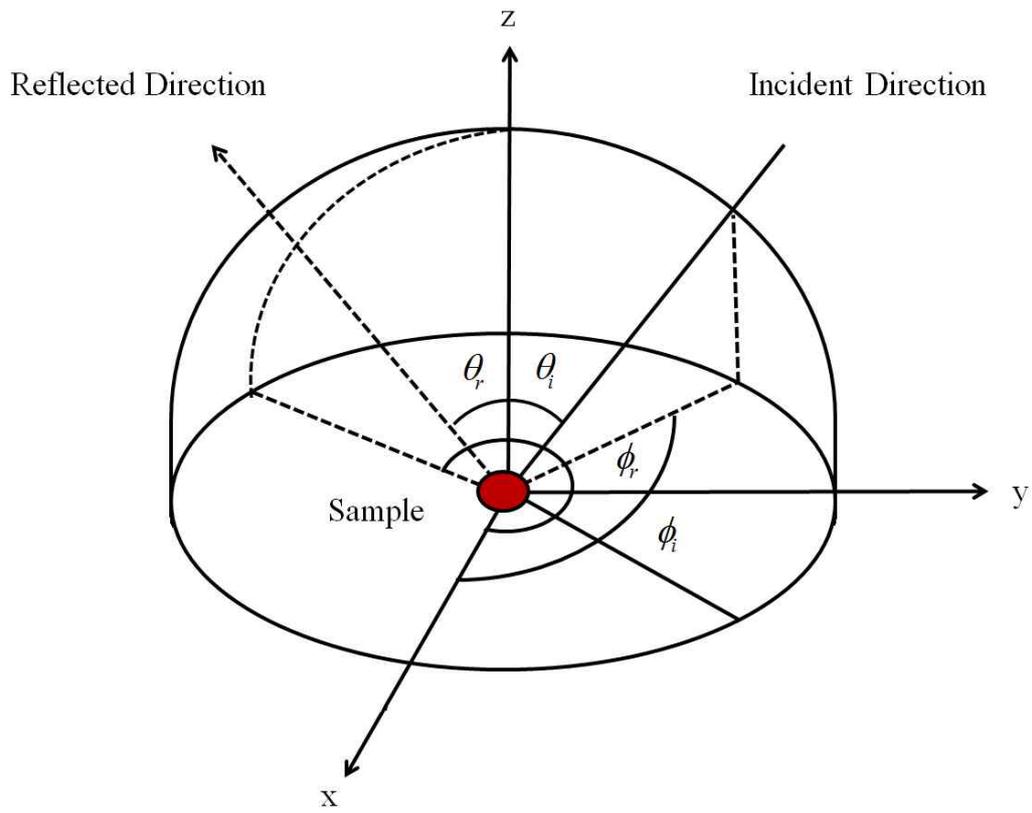


그림 3.5 양방향 반사율 분포함수에서 $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 의 정의.

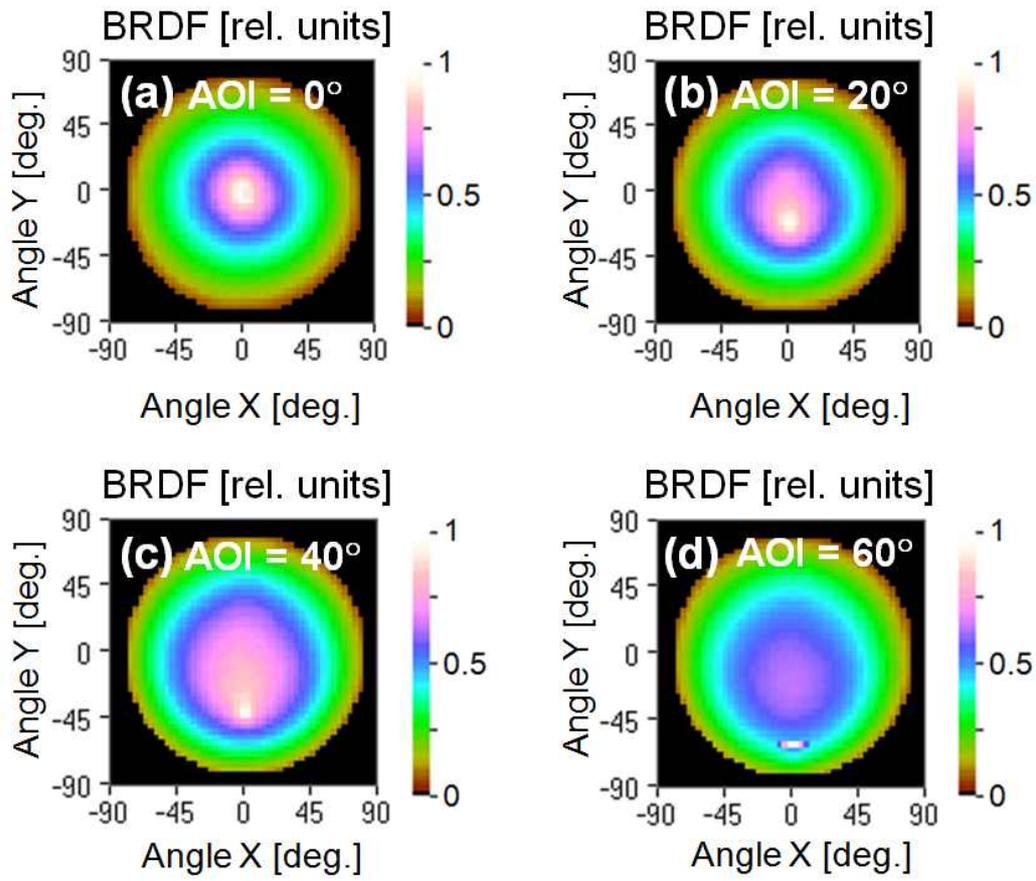


그림 3.6 본 논문에서 사용한 반사필름(SY 64 ~ 70, SK)에 대해 측정된 BRDF 데이터.

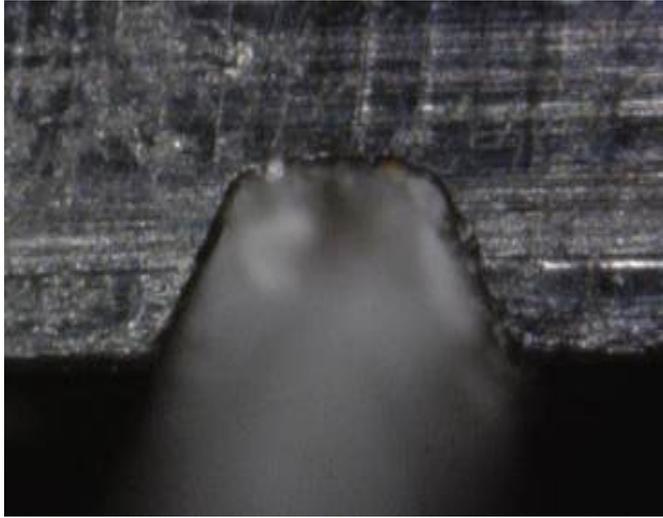


그림 3.7 도광판 하면에 형성된 도광판 패턴의 단면사진.

제2절 도광판 설계

1. 테스트용 도광판 제작 및 특성 측정

본 논문에서는 테스트용 도광판을 제작하여 측정 결과를 바탕으로 도광판 설계를 위한 도광판 패턴 모델링을 수행하였다. 테스트용 도광판 크기는 1000 mm (장축) × 500 mm (단축) × 10 mm(두께)이며, 도광판 패턴은 5 mm 등 간격(단축 방향)으로 장축 방향을 따라 제작하였다. 광섬유 광원은 장축 양 측면에 32개씩 30 mm 간격으로 총 64개를 배열하였다. 반사필름 부착 유·무에 따라 조도분포를 측정하였는데, 도광판 전체 면적을 10 × 5 셀로 나누어 각 셀의 중심부의 조도값을 측정하였다. 조도측정에는 KONICA MINOLTA사의 T-10을 사용하였다. 그림 3.8은 (a) 반사필름이 부착되어 있는 경우와 (b) 반사필름이 부착되어 있지 않은 경우에 대한 조도분포를 보여주고 있다. 이 때, 평균조도는 각각 (a) 8,569 lx, (b) 4,234 lx이었고, 태양 직사광의 조도는 각각 (a) 106,000 lx, (b) 95,000 lx이었다. 두 측정 결과를 바탕으로 도광판 패턴 모델링을 위한 매칭 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 도광판 패턴 모델 파라미터 결정

먼저, 도광판 패턴의 실제 모습인 사다리꼴 모양의 기하학적 형상을 사용하여 도광판 패턴에 대한 모델링을 수행하고 매칭 시뮬레이션을 시도하였으나, 테스트용 도광판에 대한 측정 조도분포와 부합하는 결과를 얻을 수 없었다. CNC 가공을 통한 도광판 패턴 형성과정에서 패턴 가공면이 광학적으로 매끈한 면이 아닌 산란특성을 지닌 산란면으로 형성되었기 때문인 것으로 판단되었다.

따라서, 도광판의 패턴을 가장 단순한 산란체인 램버시안 산란체로 모델링하여 매칭 시뮬레이션을 다시 수행하였다. 이 때, 도광판 패턴에 대한 모델 파라미터는 산란체의 반사율과 산란체의 폭으로 설정하였다. 그림 3.9는 도광판 패턴의 모습을 보여주고 있는 LightTools 레이아웃을 보여주고 있다. 산란체의 반사율 R 과 산란체의 폭 d 를 각각 10%부터 90%까지 10%씩, 1.6 mm부터 3.4 mm까지 0.2 mm씩 변경하며 도광판의 조도분포에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 다음 식과 같이 정의된 평균 오차 δ 를 사용하였다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{ij} (E_{ij} - S_{ij})^2} \quad (3.2)$$

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 의미한다. N 은 총 셀의 개수(50)를 나타낸다. 그림 3.10은 (a) 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 (b) 부착되지 않은 경우에 대해 계산한 평균 오차 δ 를 보여주고 있다. 평균 오차 δ 는 도광판에 반사필름이 부착된 경우 반사율 R 에 거의 무관하고 산란체의 폭 d 에 의존하여 변화하며, 도광판에 필름이 부착되지 않은 경우 산란체의 폭 d 에 거의 무관하고 반사율 R 에 의존하여 변화하는 양상을 보였다.

도광판에 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 종합하여 도광판 패턴에 대한 모델 파라미터를 최종적으로 결정하기 위해 다음 식과 같이 정의된 총 평균오차 δ_{total} 을 계산하였다.

$$\delta_{total} = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)/2} \quad (3.3)$$

여기서, δ_1 과 δ_2 는 각각 반사필름이 부착되어 있는 경우와 부착되어 있지 않은 경우에 대한 평균오차를 의미한다. 총 평균오차 δ_{total} 에 대한 계산결과는 그림 3.11과 같다. 도광판 패턴에 대한 모델 파라미터는 총 평균오차 δ_{total} 이 최소가 되는 파라미터인 $R = 70\%$, $d = 2.4 \text{ mm}$ 로 결정하였다.

3. 도광판 설계

본 논문에서는 최적의 도광판 패턴 위치 설계를 위하여 식 (3.4)와 같이 주어진 가우시안 함수(Gaussian Function)를 이용한 인접 패턴 사이의 간격 s 에 대한 표현식을 사용하여 광학 시뮬레이션을 수행하였다.^[29]

$$s = b - a \exp(-2y^2/w^2) \quad (3.4)$$

여기서, y 는 도광판 패턴을 배열할 축 상의 좌표를 w 는 가우시안 함수의 폭을 각각 나타낸다. 상수 a 와 b 는 최대 및 최소 패턴간격에 의해 결정된다.

그림 3.12는 태양광용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃을 보여주고 있다. 설계에 사용한 도광판의 크기는 1000 mm × 500 mm × 10 mm 이다. 최대 패턴간격이 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm인 경우에 대해 최소 패턴간격과 가우시안 함수 폭을 변화시키며 평균 편차(Average Deviation)와 평균 조도(Average Illuminance)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 평균 편차는 조도 균일도를 대표하는 물리량으로 조도 표준편차와 평균 조도의 비로 정의된다. 평균 편차와 평균 조도에 대한 시뮬레이션 결과는 각각 그림 3.13과 그림 3.14와 같다. 그림 3.13은 각 최대 패턴간격에 대해 평균 편차가 최소가 되는 최소 패턴간격과 가우시안 함수 폭이 존재함을 보여주고 있다. 그림 3.14를 살펴보면 최대 패턴간격이 같을 경우 최소 패턴간격이 작을수록 가우시안 함수 폭이 클수록 평균 조도 값이 증가함을 알 수 있다. 또한, 평균적으로 최대 패턴간격과 최소 패턴간격이 작을수록 평균조도 값이 증가하고 있다.

위의 결과를 바탕으로 평균 조도 값이 크고 평균 편차가 최소인 지점에 대한 파라미터, 최대 패턴간격 8 mm, 최소 패턴 간격 3 mm, 가우시안 함수 폭 250 mm을 최종 설계 파라미터로 결정하고 태양광용 도광판을 제작하였다. 그림 3.15는 설계된 도광판 패턴에 대한 Auto-CAD 도면을 보여주고 있다.

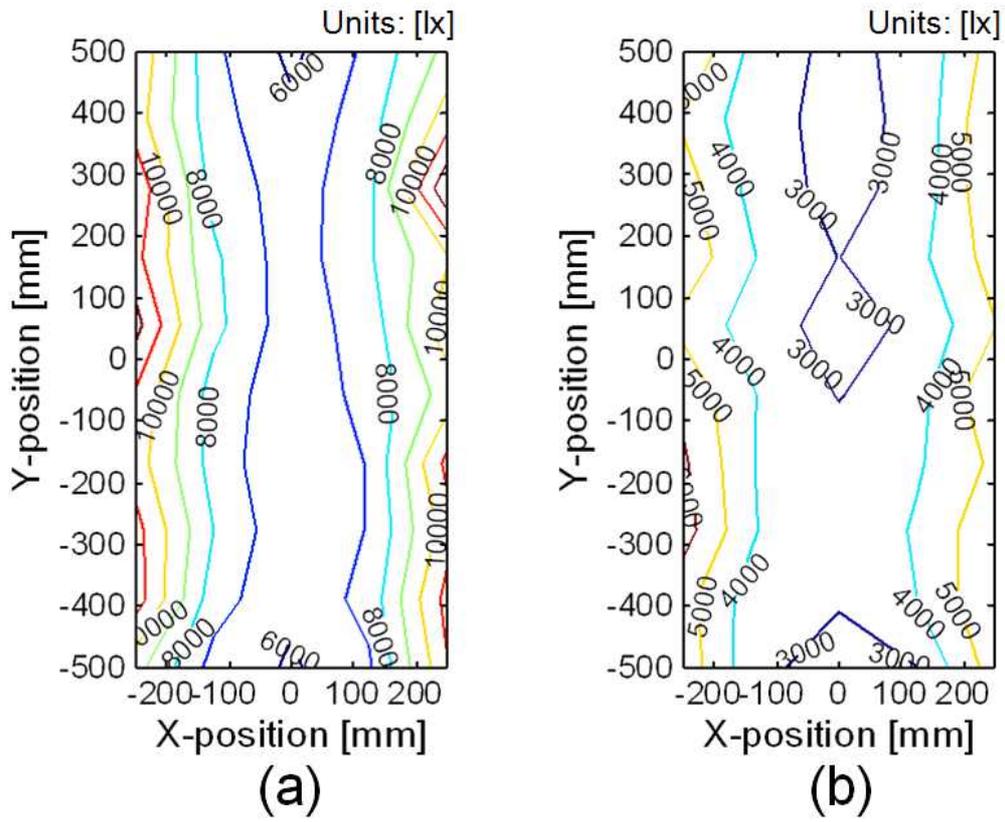


그림 3.8 테스트 도광판에 대한 조도분포 측정 결과, (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우.

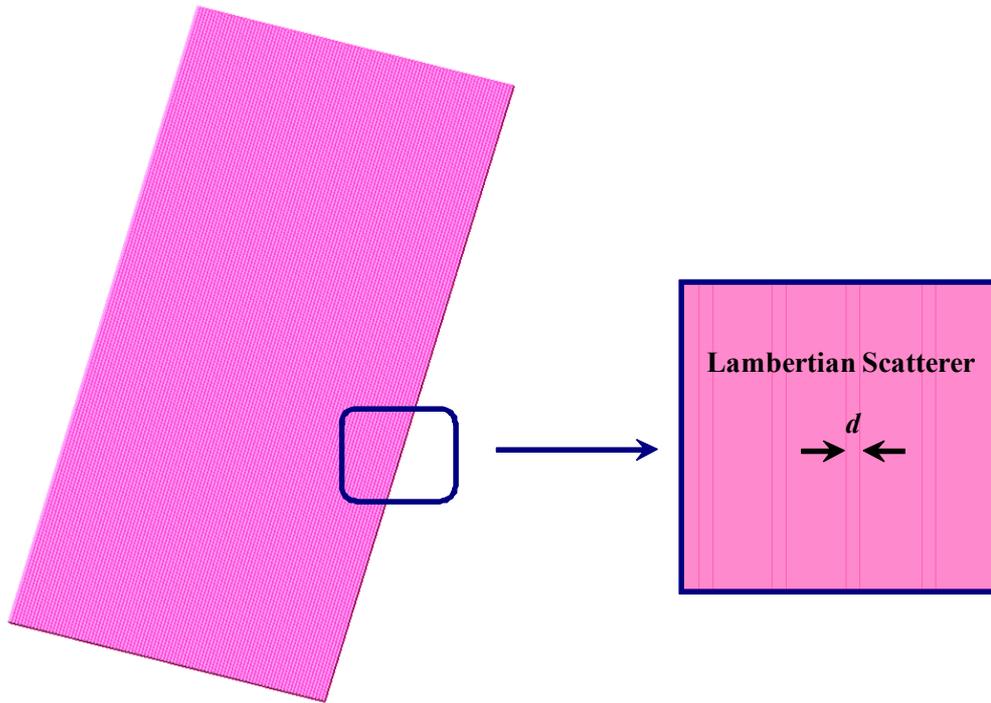


그림 3.9 도광판 패턴의 모습을 보여주고 있는 LightTools 레이아웃.

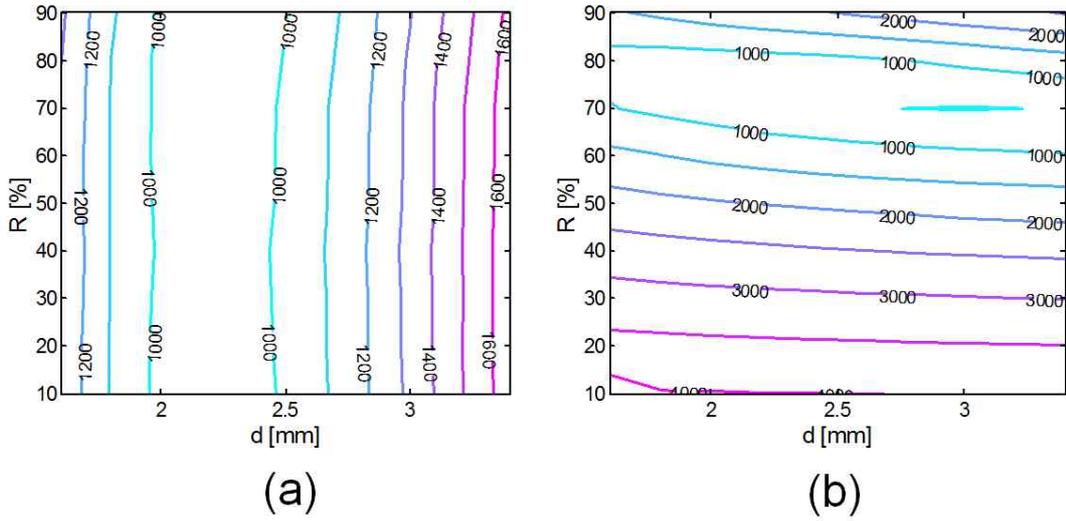


그림 3.10 (a) 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 (b) 부착되지 않은 경우에 대해 계산한 평균 오차 δ .

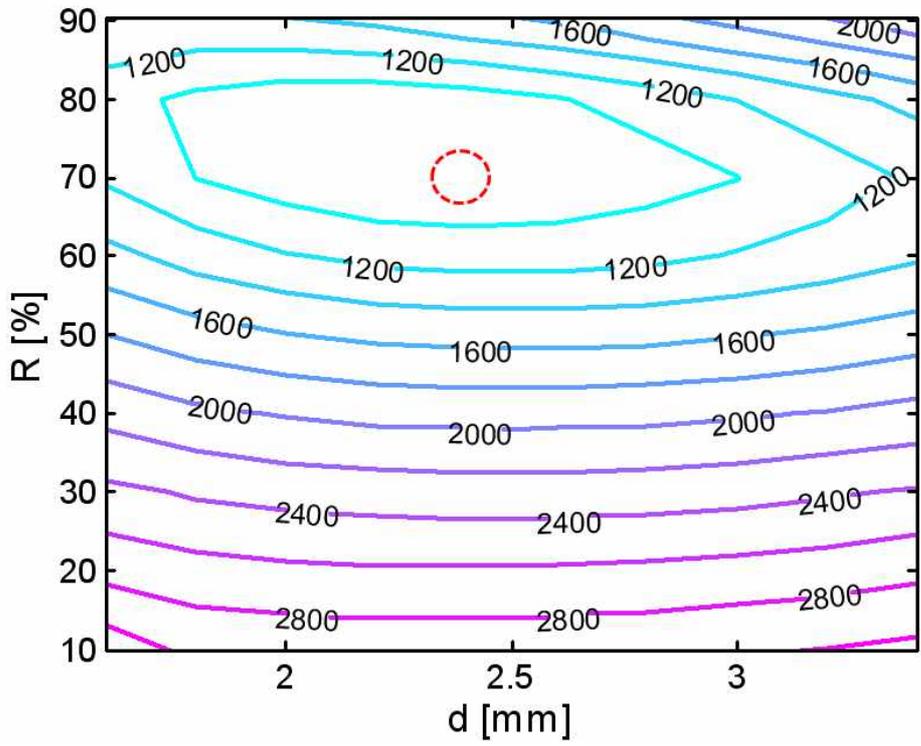


그림 3.11 반사필름 부착된 경우와 부착되지 않는 경우를 모두 고려한 총 평균오차 계산 결과. 붉은 점선으로 그려진 원은 총 평균오차의 최소점($R = 70\%$, $d = 2.4$ mm)을 나타냄.

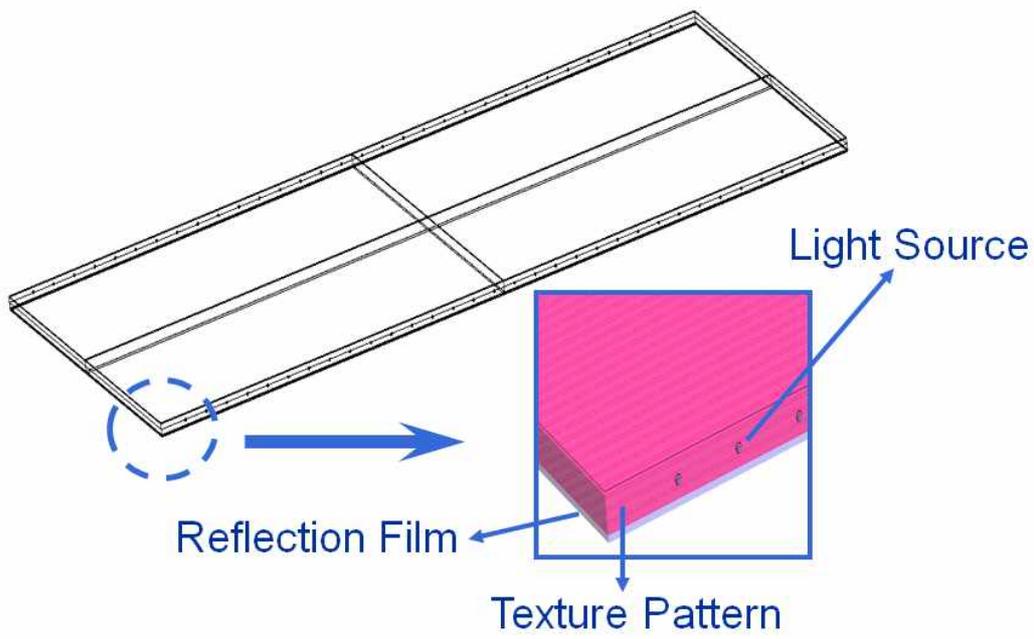


그림 3.12 태양광용 도광판 설계를 위한 LightTools 기본 레이아웃.

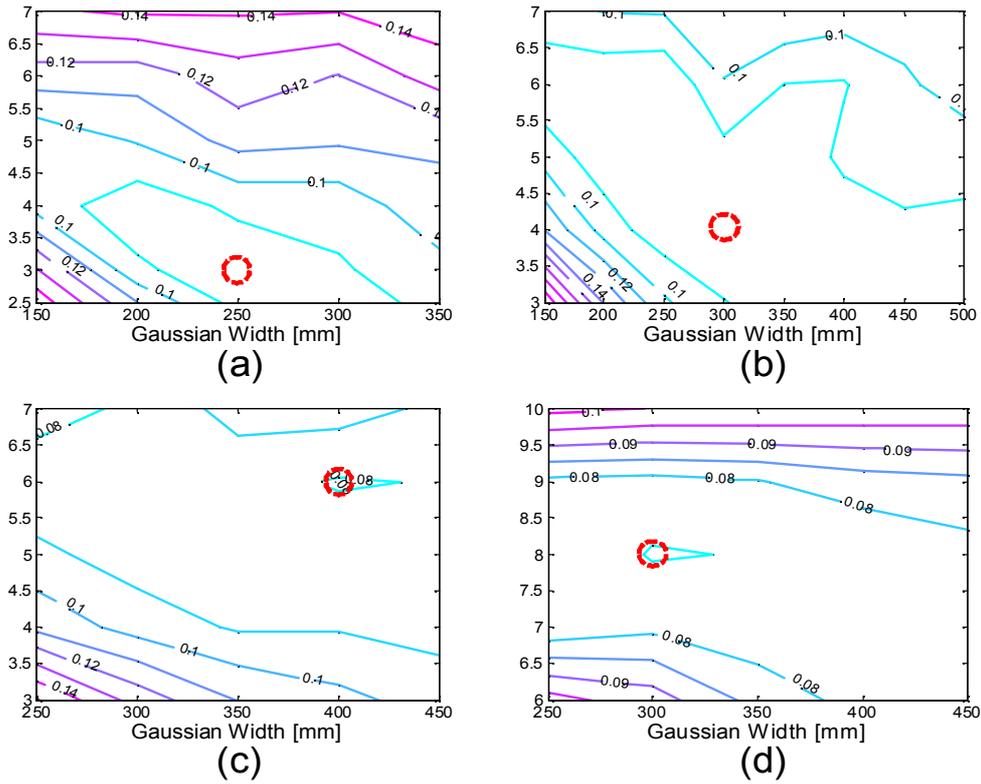
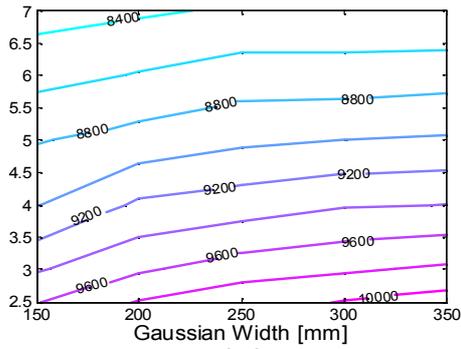
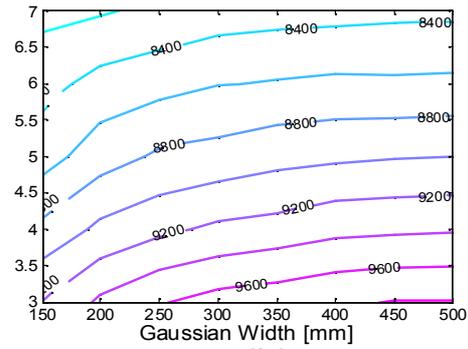


그림 3.13 태양광용 도광관에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균 편차). 붉은 점선으로 그려진 원은 평균 편차 최소점을 나타냄.

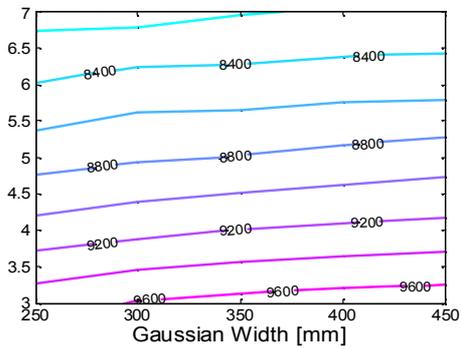
(a) 최대 패턴간격 8 mm(최소점: 최소 패턴간격 3 mm, 가우시안 함수 폭: 250 mm), (b) 9 mm(최소점: 최소 패턴간격 4 mm, 가우시안 함수 폭: 300 mm), (c) 10 mm(최소점: 최소 패턴간격 6 mm, 가우시안 함수 폭: 400 mm), (d) 11 mm(최소점: 최소 패턴간격 8 mm, 가우시안 함수 폭: 300 mm)



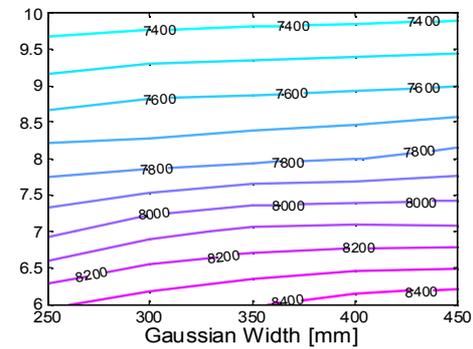
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.14 태양광용 도광판에 대한 최적화 시뮬레이션 수행 결과(평균 조도, 단위: lx).

(a) 최대 패턴간격 8 mm, (b) 9 mm, (c) 10 mm, (d) 11 mm

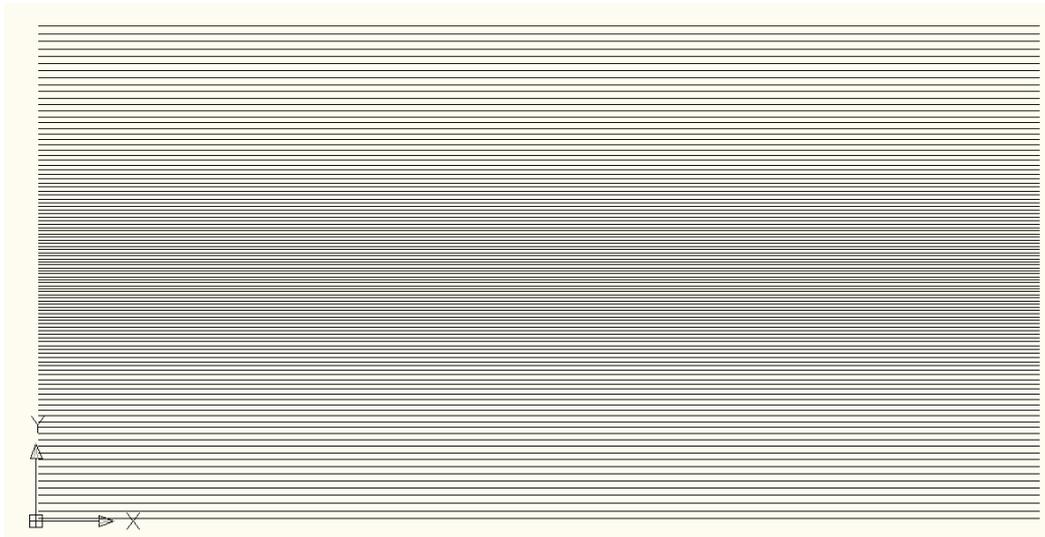


그림 3.15 최종 설계된 태양광용 도광관에 대한 Auto-CAD 도면.

제4장 도광판 제작 및 성능 측정

제1절 도광판 제작

광섬유 광원을 도광판 측면에 고정시키기 위하여 광섬유 광원용 어댑터를 설계 및 제작하였다. 그림 4.1은 광섬유 광원용 어댑터의 CAD 도면을 보여주고 있다. 광섬유 광원용 어댑터는 알루미늄 재질로 구성되어 있으며, 30 mm 간격으로 광섬유 광원의 장착을 위한 Hole이 한 면에 34개씩 총 64개 형성되어 있다.

제3장에서 최종 설계된 파라미터(최대 패턴간격 8 mm, 최소 패턴 간격 3 mm, 가우시안 함수 폭 250 mm)를 갖는 도광판 패턴을 PMMA 도광판 하면에 CNC 가공기를 이용하여 가공하였다. 제작된 태양광용 도광판의 크기는 1000 mm × 500 mm × 10 mm이다. 도광판 하면 아래쪽에 반사필름을 부착하였고, 총 64개의 광섬유 광원을 광섬유 광원용 어댑터를 이용하여 도광판 장축 두 측면에 각각 32개씩 총 64개를 설치하였다. 그림 4.2는 제작된 태양광용 도광판 및 광섬유 광원용 어댑터 사진을 보여주고 있다.

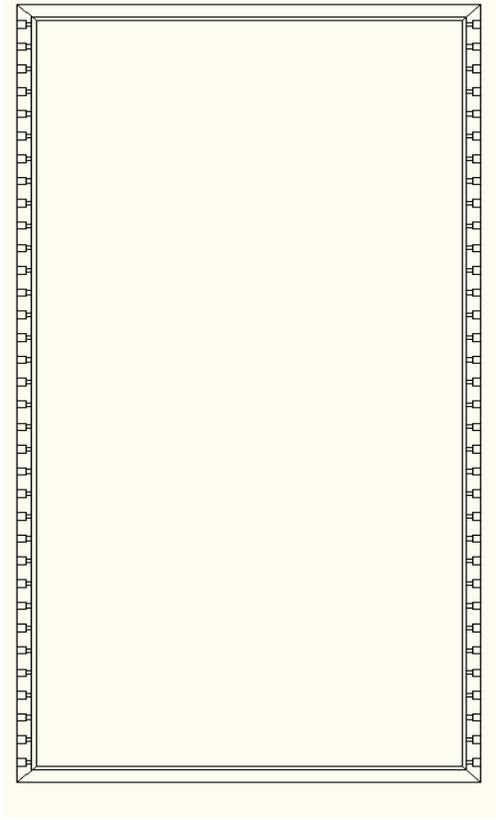


그림 4.1 광섬유 광원용 어댑터 CAD 도면.



그림 4.2 제작된 태양광용 도광판 및 광섬유 광원용 어댑터 사진.

제2절 도광판 성능평가 결과

제작된 태양광용 도광판의 광학적 성능(평균 조도, 배광 균일도)을 측정하기 위해 도광판을 10×5 개의 셀로 분할하고 조도 측정기(LI-210 Photometric Sensor, LI-COR, Inc.)를 이용하여 조도분포를 측정하였다. 배광 균일도(IDU, Illuminance Distribution Uniformity)는 KS C IEC 61747-6 규격에 의거해 다음 공식을 사용하였다.^[30]

$$IDU = \left[1 - \max \left(\left| \frac{E_i - E_{av}}{E_{av}} \right| \right) \right] \times 100 \% \quad (4.1)$$

위 식에서 E_i 와 E_{av} 는 각각 임의의 셀에서의 조도값과 평균 조도값을 의미한다. 그림 4.3은 조도 분포 측정 결과를 보여주고 있다. 이 때, 태양 직사광의 조도는 100,000 lx이었다. 10×5 전체 영역에 대한 평균 조도와 조도 표준편차는 각각 7,986 lx, 1,431 lx 이었으며, 배광 균일도는 75.4%이었다.

광생물반응기 분야에서는 단위 시간당 광자(photon)의 몰(mole)수에 해당하는 PF(Photon Flux, 단위: $\mu\text{mol/s}$ or $\mu\text{E/s}$)와 단위 시간당 단위 면적당 광자의 몰수로 정의되는 PFD(Photon Flux Density, 단위: $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 또는 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)를 더욱 중요한 값으로 사용한다.^[31,32] PFD는 단위 면적 당 PF임을 알 수 있다. PF(Photon Flux, 단위: $\mu\text{mol/s}$ or $\mu\text{E/s}$)는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.^[32]

$$PF = \frac{1}{6.02 \times 10^{17}} \int_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \frac{\Phi_e(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (4.2)$$

위 식에서 h 는 플랑크 상수, c 는 진공 중에서의 광속, $\Phi_e(\lambda)$ 는 분광복사속을 의미한다. 한편, 광속(Luminous Flux, LF)는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.^[22]

$$LF = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

위 식에서 K_m 은 최대 시감 효과도 상수라 부르며, $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 의 값을 갖고 있다.

양자 측정기(LI-210 Quantum Sensor, LI-COR, Inc.)를 사용하여 제작된 태양광용 도광

판의 PFD 분포를 측정하였다. 그 결과는 그림 4.4와 같다. 이 때, 태양 직사광의 PFD 1,712 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 이었다. 10 × 5 전체 영역에 대한 평균 PFD와 PFD 표준편차는 각각 117.6 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 20 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 이었으며, PFD 기준 배광 균일도는 69.0%이었다.

식 (4.2)와 식 (4.3)에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 LFD(Luminous Flux Density)에 해당하는 조도값과 PFD값은 광원의 분광복사속에 의존한다. 태양광의 분광복사속에 해당하는 태양광 스펙트럼에 대한 두 개의 국제 표준(ASTM G-173-03) 데이터가 일반적으로 사용되고 있다.^[33] 그림 4.5는 표준 태양광 스펙트럼을 보여주고 있다. AM1.5 Global은 직사광과 산란광을 포함한 지표면에서의 태양광 스펙트럼을 대표하고, AM1.5 Direct는 직사광과 직사광 2.5° 이내의 각도를 갖고 있는 태양광 성분만을 포함한 지표면에서의 태양광 스펙트럼을 대표한다. 이 두 가지 스펙트럼을 이용하여 조도값(단위: lx)과 PFD값(단위: $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) 사이의 환산계수(Conversion Factor, 조도값/PFD값)를 계산할 수 있다. AM1.5 Global은 55.3, AM1.5 Direct는 56.0의 환산계수를 갖고 있는 것으로 계산되었다. 태양광 직사광의 경우 측정된 환산계수는 58.1(= 104,000 lx/1,780 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)으로 AM1.5 Global보다 AM1.5 Direct의 결과에 더 근접함을 알 수 있다. 한편, 태양광용 도광관으로부터 방출되는 출력광에 대한 환산계수는 67.9(= 7,986 lx/117.6 $\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)로 계산되는데, 표준 태양광 스펙트럼으로부터 계산된 값들과 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 태양광이 집광, 광전송, 배광 과정에서 돔, 프레넬 렌즈, IR 차단 필터, 광섬유, 도광관 등을 통과하면서 흡수 및 산란 과정을 통해 스펙트럼의 변화가 크게 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

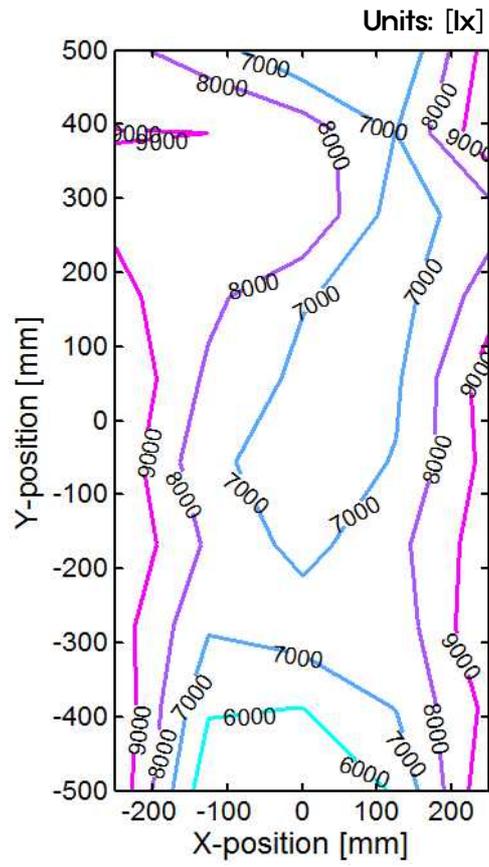


그림 4.3 태양광용 도광관에 대한 조도 분포 측정 결과.

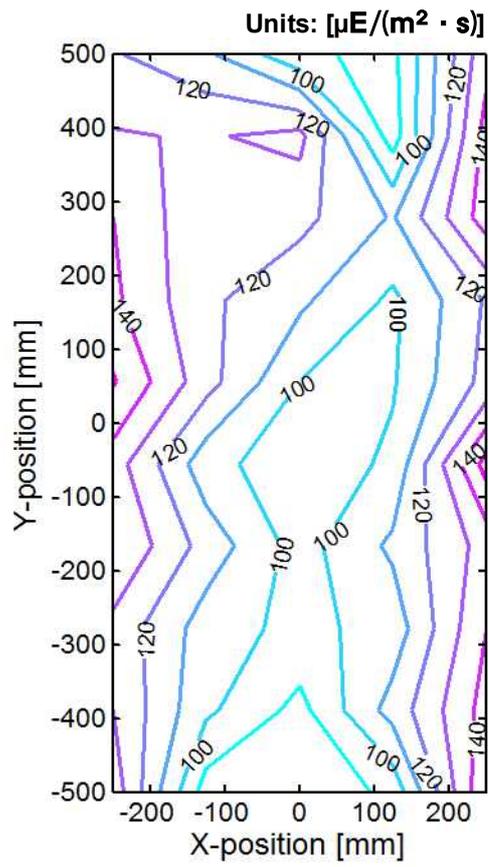


그림 4.4 태양광용 도광판에 대한 PFD 분포 측정 결과.

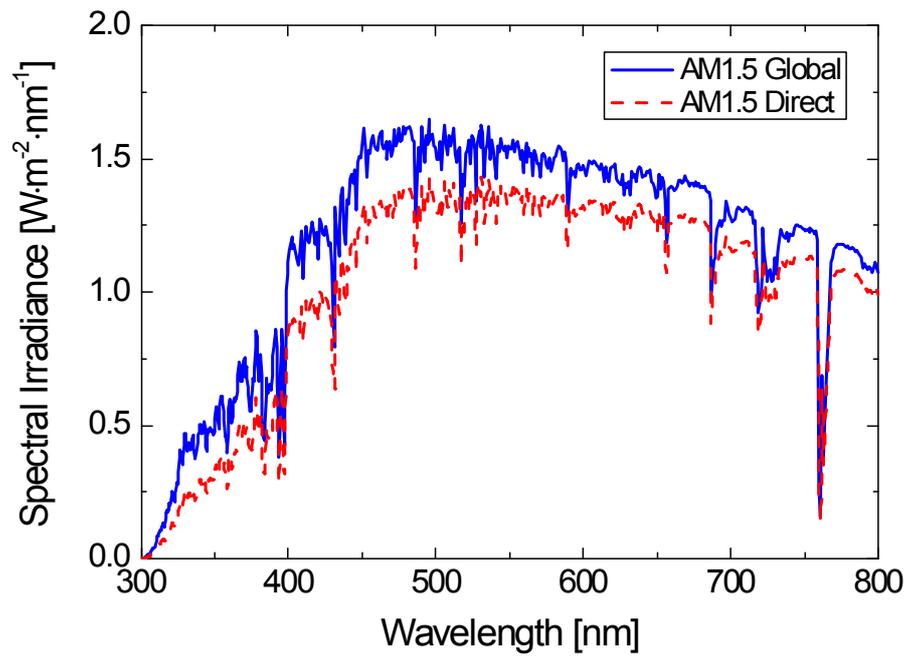


그림 4.5 표준 태양광 스펙트럼^[33]

제3절 논의

현재 태양광을 이용한 광생물반응기용 도광관의 집광 구조는 크게 두 종류가 제안되어 실험에 사용되고 있다. 하나는 선형 프레넬 렌즈를 이용하여 태양광을 도광관 위쪽 측면에 선 형태로 집광하는 구조이고,^[34 35] 또 다른 하나는 본 논문에서 사용한 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 구조이다.

그림 4.6은 선형 프레넬 렌즈(크기: 200 mm × 500 mm, 초점거리: 200 mm)를 이용한 집광 구조와 도광관(크기: 500 mm × 600 mm × 10 mm)의 모습을 보여주고 있다. LightTools를 이용하여 이 광학 시스템의 집광 효율에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 집광 효율은 LGP 상부를 투과하여 LGP 내부로 입사된 광속과 태양광 광속의 비로 정의하였다. 그 결과는 그림 4.7과 같다. 선형 프레넬 렌즈를 이용한 구조는 구성이 단순한 장점을 갖고 있으나, 그림 4.7의 결과와 같이 태양광의 고도에 따라 도광관에 입사하는 빛의 입사각이 변화하여 태양광 고도에 따른 집광 효율(Capturing Efficiency) 변화가 발생하는 단점을 지니고 있다.

이에 반하여 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 구조는 태양광의 고도와 무관하게 항상 동일한 집광 효율을 달성할 수 있는 장점을 갖고 있으나, 광섬유 입사면 및 출사면에서의 광손실이 추가적으로 발생하는 단점을 갖고 있다. 그림 4.8은 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 집광 구조에 대한 광학 시뮬레이션을 수행하기 위한 LightTools 레이아웃을 보여주고 있다. 원형 프레넬 렌즈와 광섬유는 본 논문의 실험에 사용된 것과 동일한 사양을 갖고 있는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 결과 이 구조에 대한 집광 효율은 80.1%이었다.

선형 프레넬 렌즈를 이용한 집광 구조는 프레넬 렌즈의 설치와 구동시 발생하는 프레넬 렌즈의 변형으로 인해 큰 크기로 시스템을 확장할 때 큰 제약이 있는 것으로 판단된다. 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 구조는 프레넬 렌즈의 개수를 증가시켜 시스템을 크게 만들 수 있으므로 원리적으로 시스템 확장에는 제약이 없으나, 광전송을 위한 광섬유의 개수도 증가하게 되어 실제 시스템 구성은 그리 용이하지 않을 것으로 판단된다. 두 구조의 개선에 대한 연구와 더불어 높은 집광 효율과 용이한 시스템 확장성을 갖춘 새로운 구조의 태양광 집광 시스템에 대한 연구가 필요하다.



그림 4.6 선형 프레넬 렌즈를 이용한 집광 구조와 도광판의 모습.

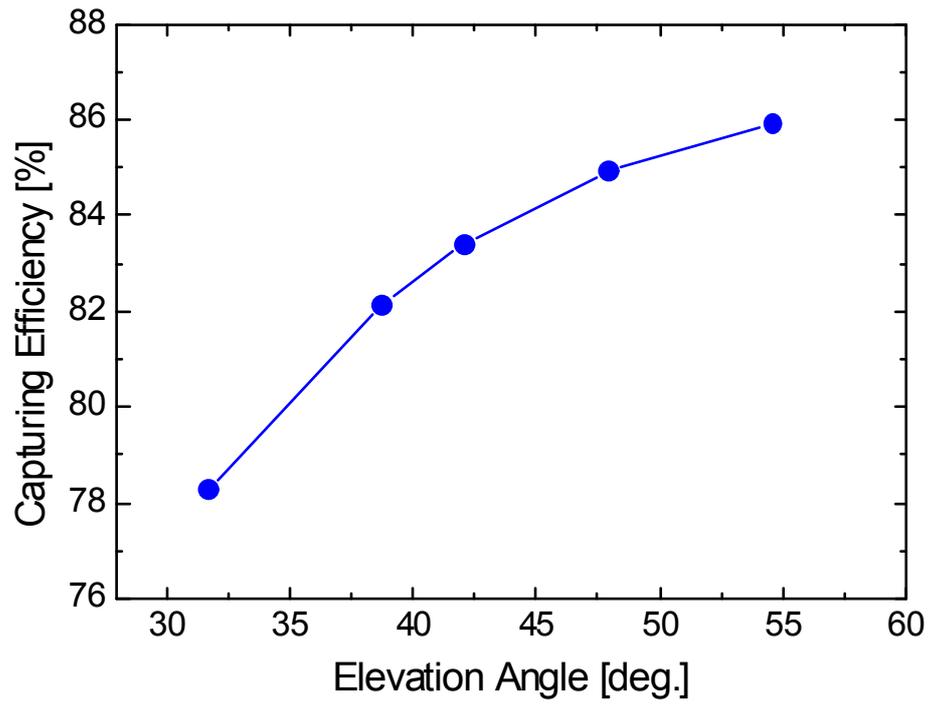


그림 4.7 선형 프레넬 렌즈 집광 구조와 도광관 시스템에 대한 집광 효율 시뮬레이션 결과.

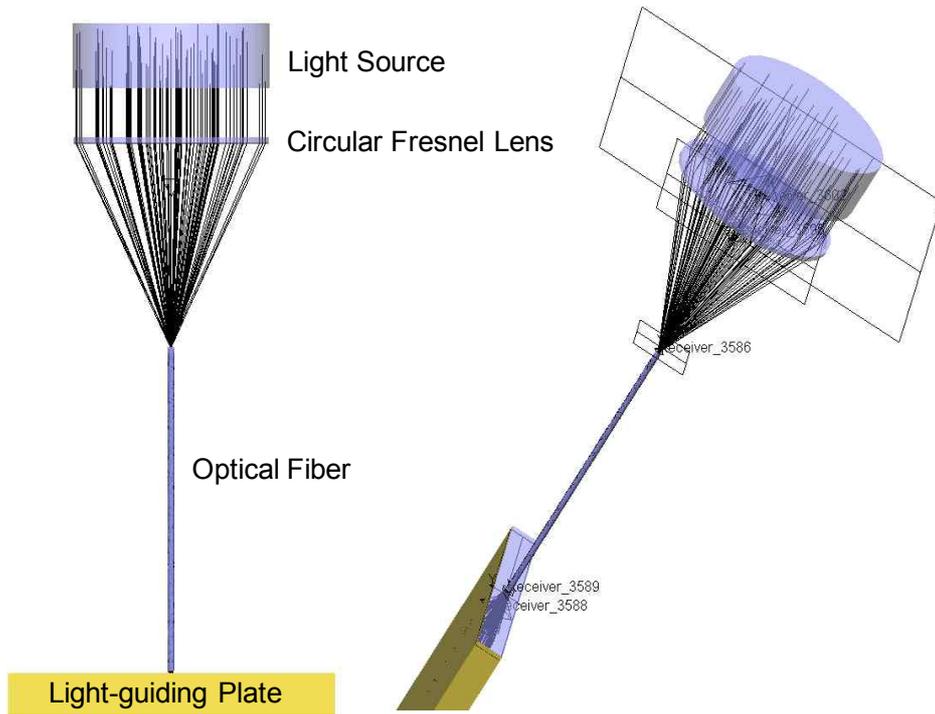


그림 4.8 원형 프레넬 렌즈와 광섬유를 이용한 집광 구조와 도광판의 모습.

제5장 결론

급속한 산업화와 더불어 범지구적 자원고갈과 환경문제가 빠른 속도로 확산되고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위하여 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 미세조류로부터 생산되는 바이오에너지가 매우 큰 주목받고 있다. 본 논문에서는 미세조류 대량배양에 사용되는 광생물반응기용 조명시스템으로 활용될 수 있는 도광판(Light-guiding Plate, LGP)의 광학 설계 및 제작 결과에 대해 보고한다. LGP의 광원으로는 태양광 추적을 위한 센서 및 추적 구동장치, 태양광 집광을 위한 원형 프레넬 렌즈로 구성되어 있는 태양광 집광 시스템과 플라스틱 광섬유(Plastic Optical Fiber, POF) 다발로 구성된 광전송 시스템이 사용되었다. 광전송 시스템의 광섬유 끝단(exit port)이 최종적으로 도광판의 측면에 위치하여 광원의 역할을 수행하도록 하였다.

먼저, 광섬유 광원의 출력에 대해 측정된 조도분포를 각도별 광도분포로 환산하여 광원에 대한 모델링을 수행하였다. 반사필름을 광학적으로 모델링하기 위해 양방향 반사율 분포함수(Bidirectional Reflective Distribution Function, BRDF)를 측정하였다. LGP 패턴은 램버시안 산란체(Lambertian Scatterer)로 가정하였는데, 테스트 도광판에 대해 실험적으로 측정된 조도분포와의 매칭 시뮬레이션을 통해 LGP 패턴의 모델 파라미터인 반사율 $R(= 70\%)$ 과 산란체 폭 $d(= 2.4 \text{ mm})$ 의 값을 결정하였다.

다음으로 LGP 패턴의 최대 간격, 최소 간격, 패턴 간격 함수의 가우시안 함수 폭을 변화시키며 광학 시뮬레이션을 수행하여 평균 편차(조도 표준편차/평균 조도) 관점에서 최적화된 LGP를 설계하였다. CNC 가공기를 사용하여 설계된 도광판을 제작하였는데, 제작된 도광판의 크기는 $1000 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 이었다. 태양 직사광의 조도가 $10,0500 \text{ lx}$ 일 때, 평균 조도는 $7,986 \text{ lx}$ (평균 PFD: $117.6 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 배광 균일도는 75.4% 이었다.

본 논문에서 제작한 LGP는 기존 LED용 LGP에 비해 태양광 센싱 및 추적을 위한 전기 에너지 소비 이외에는 추가적인 에너지 소비가 전혀 없어 에너지 효율 관점에서 큰 이득이 있을 것으로 예측된다. 향후 조선대학교 바이오리파이너리 연구센터에서 개발 중인 평판형 광생물반응기용 조명시스템으로 사용하여 전체 시스템 에너지 효율에 관한 측정 테스트를 진행할 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 김승수, 김여식, 김진수, "국내 신재생에너지로서의 바이오디젤 동향과 전망," 공업화학 전망, 11권, 3호, 1 ~ 10 (2008).
- [2] Kunjapur, A. M. and Eldridge, R. B., "Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 49, No. 8, 3516 ~ 3526 (2010).
- [3] Jeon, S.-M., Kim, I. H., Ha, J.-M. and Lee, J.-H., "Overview of Technology for Fixation of Carbon Dioxide Using Microalgae," J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 19, No. 2, 145 ~ 150 (2008).
- [4] Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X.-R. and Liu, C.-Z., "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities," Eng. Life Sci., Vol. 9, No. 3, 178 ~ 189 (2009)
- [5] Posten, C., "Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae," Eng. Life Sci., Vol. 9, No. 3, 165 ~ 177 (2009).
- [6] 녹색성장위원회, "녹색 성장 5개년 계획," 대한민국 대통령직속 녹색성장위원회 (<http://www.greengrowth.go.kr/>) (2007).
- [7] 생명공학정책연구센터, "바이오에너지 연구 및 기술개발동향," (<http://www.bioin.or.kr>) (2010).
- [8] 이진석, "바이오에너지 기술의 현황과 전망," 대한설비저널, 39권, 1호, 39 ~ 44 (2010).
- [9] 오희목, "미세조류로부터 바이오디젤 생산 현황 및 전망," 생명공학정책연구센터 (<http://www.bioin.or.kr/>), Bioin 스페셜 Zine (2009).
- [10] 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).
- [11] 전선미, 김인혜, 하종명, 이재화, "미세조류를 이용한 이산화탄소 고정화 기술 현황," 공업화학, 19권, 2호, 145 ~ 150 (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] 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).
- [15] E. Ono and J. L. Cuello, "Design parameters of solar concentrating system for CO₂-mitigating algal photobioreactors," Energy, Vol. 29, No. 9-10, 1651 ~ 1657 (2004).
- [16] J. Kim, D.-G. Ahn, J. R. Park, J. W. Park, and S.-H. Jeong, "Recent Trend of the Development of Photobioreactors to Cultivate Microalgae," Journal of the Korean Society for Precision Engineering 28, 125 - 132 (2011).
- [17] 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).
- [18] <http://www.opticalres.com/>.
- [19] C. DeCusatis, Handbook of Applied Photometry (Springer-Verlag, New York, USA), 33 ~ 54 (1997).
- [20] W. J. Smith, Modern Optical Engineering 3th Edition (McGraw-Hill, New York, USA), 219 ~ 250 (2000).
- [21] Y. Ohno, Hand Book of Optics (McGraw-Hill, New York, USA) 37.1 ~ 37.11 (2009).
- [22] 이종춘, 조명헨트북 (성안당, 파주시, 대한민국), 70 ~ 80 (2010).
- [23] 강은철, 최용진, 윤광식, 이의준, "원형 프레넬 집광형 POF 주광 조명시스템 성능 평가 연구," 한국태양에너지학회 논문집, 31권, 1호, 31~36 (2011).
- [24] <http://www.kwlight.co.kr/> .
- [25] <http://www.sunlighting.co.kr/>
- [26] H. C. Lee, Introduction to color imaging science (Cambridge Univ Press, Trinity Lane, United Kingdom), 147 ~ 150 (2005).
- [27] Optical Reasearch Associates, LightTools Core Module User's Guide (Optical

Research Associates, Pasadena, USA), 354 ~ 398 (2010).

- [28] 사중엽, 박종렬, "LCD 백라이트 도광판의 광학 특성에 대한 연구," 대한기계학회 논문집, 28권, 4호 362 ~ 369 (2004).
- [29] 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).
- [30] Korean Agency for Technology and standards, "Liquid crystal display devices - part 6: measuring methods for liquid crystal modules - transmissive type," Korea KS C IEC 61747-6 (2010).
- [31] LI-COR, Inc., LI-COR Terrestrial Radiation Sensors: Instruction Manual (LI-COR, Inc., Lincoln, USA), 6-1 ~ 6-2 (2007).
- [32] P. S. Nobel, Physicochemical and environmental plant physiology (Elsevier, London, UK), 185 ~ 188 (2009).
- [33] ASTM G 173 - 03 (2008), "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance: Direct Normal and Hemisphere on 37° Tilted Surface," ASTM (2008).
- [34] 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).
- [35] 박기찬, "광생물반응기를 위한 도광판 설계 및 제작," 석사학위청구논문, 조선대학교, (2012).

저작물 이용 허락서

| | | | | | |
|------|---|-----|----------|-----|-----|
| 학 과 | 광기술공학과 | 학 번 | 20117104 | 과 정 | 석 사 |
| 성 명 | 한글: 김 훈 한문 : 金 勳 영문 : Hun Kim | | | | |
| 주 소 | 광주광역시 서구 화정4동 염주주공 108동 406호 | | | | |
| 연락처 | E-MAIL : hamacom7@naver.com | | | | |
| 논문제목 | 한글 : 태양광을 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구 영어 : Design and Fabrication of Light-guiding Plate for a Photobioreactor Utilizing Sunlight | | | | |

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()

2012년 10월

저작자: 김 훈 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

[감사의 글]

오늘 이렇게 결실을 맺기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 무사히 석사학위 과정을 마칠 수 있었습니다. 특히 아들의 의사를 항상 존중해 주시고 뒤에서 항상 걱정해주시는 부모님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

학부 4학년때부터 시작한 연구실 생활이 벌써 3년이라는 시간이 지났습니다. 석사 과정 동안 많은 전공 분야 지식과 연구활동에 매진할 수 있도록 도움을 주시고 세심하게 지도해 주신 박종락 교수님께 진심으로 감사드립니다.

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 죄송스럽게 생각합니다. 앞으로 교수님의 가르침을 항상 가슴에 새겨 매사에 최선을 다하는 사람이 되도록 노력하겠습니다. 또한 학부와 대학원 과정동안 훌륭한 가르침을 주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님께 깊은 감사드립니다.

학부과정 시절부터 함께했던 실험실 선배, 후배님들께 깊은 감사드립니다. 지금의 실험실이 있게 만들어주신 태원이형, 진우형, 기찬이형에게 진심으로 감사드리며, 지금은 다른 곳에 있지만 힘든 실험실 생활하는데 많은 조언을 해 주셨던 호형에게도 감사하다는 말 전해드립니다.

그리고 대학원생활 동안 많은 도움을 준 찬영이, 명진이형, 동기 철용이, 광소자 실험실 동기, 후배들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

앞으로 실험실을 이끌어 나갈 성선이, 현철이, 그리고 아쉽게 실험실 나가는 민영이에게 그 동안 부족한 나를 도와 실험실 생활을 같이 해줘서 고맙고 소중한 추억 많이 만들고 나갈 수 있게 해줘서 고맙다는 말 전하고 싶습니다.

그리고 중학교 시절부터 대학시절 까지 함께한 준호, 재량, 유진이에게도 고맙다는 말을 해주고 싶고, 지금까지 저에게 희망의 말을 아끼지 않은 여자친구에게도 감사의 마음을 전합니다.

이제 졸업을 앞두고 사회를 나가는 문턱에 서니 설레임과 두려움이 앞섭니다. 하지만 지금까지 해왔던 것처럼 주위에 모든 분들 실망시키지 않고 후회 없는 삶을 살도록 하루하루 노력하는 사람이 되겠습니다.

마지막으로, 제게 가장 큰 힘이 되어 주신 아버지, 어머니, 남동생, 여동생에게 다시 한번 진심으로 감사하고, 사랑한다고 말씀드립니다. 저에게 도움을 주신 많은 분들 한 분 한 분 언급 하지 못한 점 죄송하게 생각하며, 제게 큰 힘이 되어주신 모든 분들에게

감사의 말씀 올립니다.

2012 年 11 月

金 勳

이 력 서

성 명 : 김 훈 (金 勳)

생 년 월 일 : 1986년 4월 6일(양력)

출 생 지 : 목포

주 소 : 광주광역시 서구 화정4동 엄주주공 108-406

학 력

2002.3. - 2005.2. 광주 대동고등학교

2005.3. - 2011.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2011.3. - 2013.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

학위 논문

[1] “태양광을 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구,”
석사학위논문, 조선대학교 (2013).

학술지 게재 논문

- [1] Tae Won Beom, Gi Chan Park, Jin Woo Lee, Hun Kim, Hye-Rim Kim, Seong Seon Shin, and Jong Rak Park, "Simulation Study of Ghost Image Phenomeon Induced by Contrast Enhancement Film in Plasma Display Panels," *Optical Review*, Vol. 19, No. 4, 282-286 (2012).
- [2] 박기찬, 김훈, 신성선, 신현길, 김종태, 정상화, 박종락, “광생물 반응기를 위한 도광판 설계 및 제작,” *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 23, No. 2, 55-63 (2012).
- [3] 박기찬, 김훈, 김종태, 박정우, 정상화, 박종락, “광생물반응기를 위한 도광판 설계,” *한국정밀공학회지*, 제 28 권, 제 2 호, 133-139 (2011).
- [4] 태양광과 선형 프레넬 렌즈를 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작 (한국정밀공학회지 투고 준비 중).
- [5] Design and Fabrication of Light-guiding Plate for a Photobioreactor Utilizing Sunlight (in Preparation).

국내외 학회 발표

- [1] 김훈, 박종락, 신성선, 황민영, 임현철, 김광호, 김종태, 정상화, “도광판을 이용한 광생물반응기용 조명시스템 설계 및 제작에 관한 연구,” *한국정밀공학회 2012년 추계학술대회논문집*, pp. 951-952 (2012).
- [2] 박종락, 김훈, 신성선, 황민영, 임현철, 김광호, 김종태, 정상화, “태양광과 선형 프레넬 렌즈를 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작,” *한국정밀공학회 2012년 추계학술대회논문집*, pp. 939-940 (2012).

- [3] Hun Kim, Gi Chan Park, Seong Seon Shin, Hyon Chol Lim, Min yong Hwang, Seung jin Lee, Jongtye Kim, Sanghwa Jeong, and Jong Rak Park, "Design and Fabrication of Light Guiding Plate as Illumination System for Flat-panel Type Photobioreactor," International Symposium on Green Manufacturing and Applications, Oral Presentation, Paper No. B-4-1, (2012).
- [4] 김훈, 박기찬, 박종락, "평판형 광생물반응기를 위한 LED 용 도광판 제작에 관한 연구," 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계부문 춘계학술대회 논문집, pp. 229-230 (2012).
- [5] 신성선, 김훈, 박종락, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 레이저-피부 상호작용에 대한 연구," 한국광학회 2012년도 하계학술발표회 논문집, pp. 673-674 (2012).
- [6] 신성선, 박기찬, 김훈, 범태원, 박종락, "PDP용 명암비 향상 필름에 의해 발생하는 고스트 이미지에 관한 연구," 한국광학회 2012년도 동계학술발표회 논문집, pp. 470-471 (2012).
- [7] 김훈, 신성선, 박기찬, 범태원, 박종락, "PDP용 명실 명암비 측정시스템 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구," 한국광학회 2012년도 동계학술발표회 논문집, pp. 472-473 (2012).

프로젝트 수행

- [1] “바이오리파이너리 기반 고효율 평판형(FPA) 광생물반응기 개발,”한국 에너지기술평가원 (2010.6 - 2012.5).
- [2] “레이저 촉감 제시 기술 개발,” 한국연구재단 (2011.7 - 2012.2).
- [3] “친환경 자동차 도로용 LED 투광기 분석(기술지도),” 코세미 주식회사 (2011.1 - 2011.3).
- [4] “전기자동차 조명용 경량, 절전형 LED요소 기술 개발,” 조선대학교 친환경자동차센터 (2010.7 - 2011.4).