



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 2월
석사학위논문

LED와 태양광 하이브리드
광원을 이용한 광생물반응기용
도광판 설계 및 제작에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술훈공학과
임현철

LED와 태양광 하이브리드 광원을
이용한 광생물반응기용
도광판 설계 및 제작에 관한 연구

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

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술평학과
임현철

LED와 태양광 하이브리드 광원을 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

임 현 철

임현철의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 인

위 원 조선대학교 교수 박 종 락 인

2014년 10월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 논문 구성	2
제2장 광원, 반사필름 및 도광판 패턴 모델링	3
제1절 LED와 태양광 광원	3
제2절 반사필름	4
제3절 도광판 패턴	5
제3장 도광판 설계	23
제1절 LED용 도광판	23
제2절 태양광용 도광판	24
제3절 하이브리드 광원용 도광판	24
제4장 도광판 제작 및 성능 평가	34
제1절 LED용 도광판	34
제2절 태양광용 도광판	35
제3절 하이브리드 광원용 도광판	35
제5장 하이브리드 광원용 도광판을 위한 제어 시스템	45

제1절 제어 시스템 구성	45
제2절 제어 실험 결과	45
제6장 결 론	51
[참고문헌]	53
[감사의 글]	57

그림 목차

그림 2.1 LightTools로 모델링된 LED 광원의 외관	8
그림 2.2 LED 광원의 각도별 상대 광도 분포 곡선	9
그림 2.3 태양광 집광 및 전송 시스템	10
그림 2.4 (a) 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습, (b) LightTools로 모델링된 광섬유 광원의 외관	11
그림 2.5 태양광 광원의 각도별 상대 광도 분포	12
그림 2.6 반사필름(SY-80S)에 대해 측정된 BRDF 데이터	13
그림 2.7 LED용 테스트 도광판에 대한 조도 분포 측정 결과. (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우	14
그림 2.8 태양광용 테스트 도광판에 대한 조도 분포 측정 결과. (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우	15
그림 2.9 도광판 모델의 패턴에 산란체를 적용한 모습. (a) LED용 도광판 모델, (b) 양광용 도광판 모델	16
그림 2.10 LED용 도광판 LightTools 모델 기본 레이아웃	17
그림 2.11 LED용 도광판에 평균 오차 δ 를 계산한 결과. (a) 반사필름이 부착된 경우, (b) 반사필름이 부착 되지 않은 경우	18

그림 2.12 LED용 도광판에 대한 총 평균 오차 δ_{total} 에 대한 결과	19
그림 2.13 태양광용 도광판 LightTools 모델 기본 레이아웃	20
그림 2.14 태양광용 도광판에 평균 오차 δ 를 계산한 결과. (a) 반사필름이 부착된 경우, (b) 반사필름이 부착 되지 않은 경우	21
그림 2.15 태양광용 도광판에 대한 총 평균 오차 δ_{total} 에 대한 결과	22
그림 3.1 LED용 도광판의 설계 파라미터에 따른 평균 편차 계산 결과	25
그림 3.2 LED용 도광판의 설계 파라미터에 따른 평균 조도 계산 결과	26
그림 3.3 LED용 도광판 최적 시뮬레이션을 통해 얻은 (a) 최대 패턴 간격에 따른 평균 편차, 평균 조도 결과, (b) 최대 패턴 간격에 따른 상대 조도 변화 폭 ..	27
그림 3.4 LED용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면	28
그림 3.5 태양광용 도광판의 설계 파라미터에 따른 평균 편차 계산 결과	29
그림 3.6 태양광용 도광판의 설계 파라미터에 따른 평균 조도 계산 결과	30
그림 3.7 LED용 도광판 최적 시뮬레이션을 통해 얻은 (a) 최대 패턴 간격에 따른 평균 편차, 평균 조도 결과, (b) 최대 패턴 간격에 따른 상대 조도 변화 폭 ..	31
그림 3.8 태양광용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면	32
그림 3.9 하이브리드 광원용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면	33
그림 4.1 (a) 도광판 전용 가공기 MR-CA24, (b) 다이아몬드 커터	36
그림 4.2 제작된 LED용 도광판의 사진	37
그림 4.3 제작된 LED용 도광판의 조도 분포 측정 결과	38
그림 4.4 제작된 태양광용 도광판의 사진	39
그림 4.5 제작된 태양광용 도광판의 조도 분포 측정 결과	40
그림 4.6 제작된 하이브리드 광원용 도광판의 사진	41
그림 4.7 (a) 하이브리드 광원용 도광판에 LED 광원만 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과	42
그림 4.8 (a) 하이브리드 광원용 도광판에 태양광 광원만 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과	43
그림 4.9 (a) 하이브리드 광원용 도광판에 LED와 태양광을 동시에 광원으로 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과	44
그림 5.1 하이브리드 광원용 제어 시스템의 신호 흐름도	46

그림 5.2 제어 시스템의 하드웨어 사진 47
그림 5.3 제어 시스템 흐름도 48
그림 5.4 LabVIEW 블록 다이어그램 49
그림 5.5 제어 실험 결과 50

ABSTRACT

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

By Hyon-Chol Lim

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

Microalgae can be used as a future energy source that can replace fossil fuel. Recently, the use of microalgae for carbon dioxide fixation through a photosynthetic process to produce high-value materials that can be used for cosmetics and pharmaceuticals has gathered significant attention. In this paper, we report the results of a study on the design and fabrication of a light-guiding plate (LGP) using a hybrid light-emitting diode (LED) and sunlight source that can be applied to a photobioreactor for the mass production of microalgae. We used the LightTools illumination design software (Synopsys, Inc.) for optical modeling and design.

First, the LED light and sunlight sources were modeled. For modeling the LED (LWH1056N, LUXPIA) light source, the intensity data measured using the LED test and measurement system (OL770 UV/VIS, Optronic Laboratories) were used. Sunlight was collected with a circular Fresnel lens, transmitted through an

optical fiber (SK-80, MITSUBISHI), and finally radiated from the exit port of the optical fiber. The light illuminance distribution measured at a plane 15 cm away from the exit port was utilized for modeling the sunlight. Second, the reflective film (SY-80S, SK) was modeled by experimentally measuring its bidirectional reflective distribution function. The LGP pattern was modeled as a Lambertian scatterer with its reflectivity R and scatterer width d as the model parameters. The size of the LGP used for testing was 1,010 mm (height) \times 510 mm (width) \times 10 mm (thickness). Sixty LEDs were arranged at equal intervals in the direction of width on each side, and 32 sunlight sources, i.e., 32 exit ports of the optical fibers, were arranged at equal intervals in the direction of height. Two test LGPs were fabricated: one for the LED sources and the other for the sunlight sources. On the rear surface of each test LGP, LGP patterns of an equal interval (1.5 mm) were engraved along the direction of width (for the LEDs) or along the direction of height (for the sunlight sources). The model parameters for LGP patterns were determined by matching illuminance distributions obtained by optical simulations with experimentally measured distributions. The model parameters determined for the LED light and sunlight sources were $R = 80\%$ and $d = 0.18$ mm and $R = 70\%$ and $d = 0.17$ mm, respectively.

The design parameters of the LGP, more specifically the LGP patterns, comprised the maximum pattern interval, minimum pattern interval, and interval constant of the pattern interval function expressed in the form of an exponential function. These parameters were varied during the optical simulation for the LGP design. The average deviations, defined by the ratio of the standard deviation of illuminance and average illuminance, of LED- and sunlight-LGPs were calculated, and each LGP design was optimized in terms of the average deviation. LGPs with LED light and sunlight sources were fabricated using the LGP manufacturing machine (MR-CA24, Mirae LNS). The values of average illuminance and illuminance distribution uniformity of the LED-LGP were 2,933

lx and 89%, respectively, and those of the sunlight-LGP when the sunlight illuminance was approximately 111,000 lx were 8,174 lx and 90%, respectively. A hybrid-type LGP was fabricated by engraving the LGP patterns, obtained for the width direction from the LED-LGP design and the height direction from the sunlight-LGP design, along both directions on a single LGP. When only LEDs were used as the light source in this hybrid LGP, the average illuminance and illuminance distribution uniformity achieved were 2,908 lx and 89%, respectively, whereas those achieved using sunlight alone as the light source were 8,362 lx and 89%, respectively. When LEDs and sunlight were simultaneously used as the light source, the illuminance distribution uniformity was maintained at approximately 90%.

A light-level control system for the hybrid LGP was designed for maintaining the output light from the LGP at a constant value, which is the most important factor in achieving the required photon flux density for culturing microalgae. The entire control system was designed using LabVIEW (National Instruments, Inc.) and consisted of an optical sensor (LT-40S, RIXEN Tech Co.) used for monitoring the light output and a switch-mode power supply employed for controlling the duty cycle of the operation of the LEDs. When the target value of the LGP output was set to $70 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the error range of the LGP output was found to be within $\pm 2\%$.

제1장 서 론

제1절 연구 배경

급속한 산업화로 인한 자원고갈과 환경문제의 해결을 위해 신재생에너지 개발에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있다^[1,2]. 신재생에너지원 중 이산화탄소 저감과 동시에 바이오 에너지, 바이오 연료 등 다양한 분야에 활용이 가능한 미세조류가 전세계적으로 큰 주목을 받고 있다^[3-5]. 미세조류는 화석에너지를 대체 할 수 있는 청정에너지 및 소재자원으로 사용될 수 있으며^[6], 좁은 면적에서 대량생산이 가능하고^[7], 빛을 에너지원으로 이산화탄소를 고정화하여 제약, 고급 화장품 등의 고부가가치 유용물질을 생산하는데 활용될 수 있다^[8].

미세조류 배양시스템은 크게 개방형과 폐쇄형 시스템으로 나눌 수 있다^[9]. 폐쇄형 시스템은 광효율, 온도 조절 등의 측면에서 개방형 시스템보다 더 나은 특징을 가지고 있다. 폐쇄형 시스템은 세부적으로 관형 광생물반응기와 평판형 광생물반응기로 분류할 수 있다. 평판형 광생물반응기는 바이오매스(biomass) 생산을 위한 에너지 요구량의 측면에서 관형 광생물반응기에 비해 더 나은 특징을 보이고 있어 최근 활발한 연구가 수행되고 있다^[10].

미세조류의 연속적인 배양을 위해서는 내구성이 높고 효율이 좋은 광원이 필요하다. 이러한 광원 중 하나가 발광 다이오드(light-emitting diode, LED)이다^[11]. LED는 작고, 가벼워서 어떤 형태의 광생물반응기에도 직접 조명 및 도광관을 이용한 간접 조명이 용이할 뿐만 아니라, 평균 수명과 효율 또한 우수하다^[12]. 한편, 태양광은 에너지 효율 측면에서 필수적인 광원이다^[13]. 본 논문에서는 평판형 광생물반응기의 조명 시스템으로 활용될 수 있는 LED와 태양광 하이브리드 광원을 이용한 광생물반응기용 도광관 설계 및 제작에 대해 보고한다.

제2절 논문 구성

논문 구성을 살펴보면 다음과 같다. 제2장에서는 광원, 반사필름 및 도광판 패턴 모델링에 대해 소개한다. 배광특성을 기초로 LED와 태양광 광원에 대한 모델링을 각각 수행하였고, 실험적으로 측정된 반사 특성을 고려하여 반사필름을 모델링하였으며, 산란특성을 반영하여 도광판 패턴에 대한 모델링을 수행하였다.

제3장에서는 도광판 설계 과정 및 결과에 대해 자세히 기술하였다. 최대 패턴 간격, 최소 패턴간격과 간격함수의 간격상수(interval constant)를 설계 파라미터로 설정하였으며, 조도분포의 평균편차(average deviation)와 상대 조도 변화폭(relative illuminance range) 관점에서 최적화된 도광판 설계를 LED용 도광판과 태양광용 도광판 각각에 대해 수행하였다.

제4장에서는 도광판 제작 및 특성 측정결과에 대해 정리하였다. 도광판 전용 가공기를 사용하여 LED용 도광판, 태양광용 도광판, 하이브리드 광원용 도광판을 각각 제작하였으며, 조도 분포 등의 광학 특성을 측정하였다.

제5장에서는 하이브리드 광원 제어 시스템 구성 및 제어 실험 결과에 대해 소개하였다. 본 논문에서 제작한 하이브리드 광원용 도광판은 태양광을 주광원으로 사용하고 LED를 보조광원으로 사용하고 있다. 태양광의 광량이 변동할 경우 LED 광원의 광량을 능동적으로 제어하여 항상 일정한 광량을 유지하도록 제어 시스템을 구성하였으며, 실험적으로 이를 구현하였다.

제6장에서는 본 논문의 연구결과에 대한 결론을 기술하였다. 연구의 필요성, 연구 과정 및 연구 결과에 대해 요약하고 종합적으로 정리하였다.

제2장 광원, 반사필름 및 도광판 패턴 모델링

제1절 LED와 태양광 광원

1. LED 광원

본 논문에서는 LUXPIA사의 LWH1056N^[14]을 LED용 도광판의 광원으로 사용하였다. 그림 2.1과 그림 2.2는 각각 LED 광원의 모델링된 외관과 각도별 상대 광도(intensity) 분포를 보여주고 있다. 본 논문에서는 조명설계 소프트웨어인 LightTools를 사용하여 도광판의 모델링 및 설계를 수행하였다. 광원의 외관은 제조사의 제원을 참조하였으며, 광도분포는 LED 테스트 및 측정 시스템인 Gooch and housego PLC사의 OL770 UV/VIS^[15]를 사용하여 측정하였다. 이 때, 하나의 LED로부터 출사되는 총 광속은 19.13 lm이었다. 측정된 광원의 배광 데이터를 LightTools에 있는 Apodization 파일에 적용하여 모델링을 수행하였다.

2. 태양광 광원

태양광 집광 및 전송 시스템으로 (주)에이비엠그린텍의 Daylighting System^[16]을 사용하였다. 집광 시스템은 태양광 추적 센서, 시스템 구동 장치와 원형 프레넬 렌즈로 구성되어 있으며, 광전송 시스템은 플라스틱 광섬유, 적외선 차단 필터, 방열핀으로 구성되어 있다. 태양광 집광 및 전송 시스템의 사진은 그림 2.3과 같다.

광전송 시스템의 플라스틱 광섬유(SK-80, MITSUBISHI사)^[17] 끝단(exit port)을 광원으로 모델링 하였다. 그림 2.4는 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습과 모델링된 광섬유 광원의 외관을 보여주고 있다. 광섬유의 끝단으로부터 15 cm 떨어진 평면에서 조도분포를 측정하였고, 이를 이용해 태양광 광원의 각도별 광도 분포를 계산하였다. 그림 2.5는 태양광 광원의 각도별 상대 광도 분포를 보여주고 있다. 태양 직사광의 조도가 111,000 lx일 때, 하나의 광섬유 끝단으로부터 출사되는 광속은 102.1 lm이었다.

제2절 반사필름

반사필름의 광학적 특성은 양방향 반사율 분포 함수(bidirectional reflective distribution function, BRDF)를 통해 측정된다^[18,19]. 입사광의 편각(polar angle)과 방위각(azimuth angle)이 각각 θ_i 와 ϕ_i 일 때, BRDF는 다음 식과 같이 정의되어 있다^[20].

$$BRDF = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (2.1)$$

여기서, θ_r 과 ϕ_r 은 각각 반사광의 편각과 방위각을 의미하며, dE_i 와 dL_r 는 각각 입사광의 분광 복사 조도(단위: $W/m^2/nm$)와 반사광의 분광 복사 휘도(단위: $W/sr/m^2/nm$)를 나타낸다.

본 논문에서는 도광판의 반사필름으로 SK사의 SY-80S를 사용하였으며, (주)제이엔씨테크의 RT-300S 장비^[21]를 사용하여 BRDF를 측정하였다. 0° 부터 70° 까지 5° 간격으로 입사각을 변화시켰고, 방위각은 -90° 부터 90° 까지 10° 간격으로, 편각은 -80° 부터 80° 까지 2° 간격으로 변화시키며 반사광을 측정하였다. 그림 2.6은 측정 결과 중 입사각(angle of incidence, AOI)이 0° , 20° , 40° 일 때의 BRDF값을 보여주고 있다. 측정된 BRDF 데이터를 LightTools의 표면특성(surface finishes)에 적용하여 반사필름에 대한 모델링을 수행하였다.

제3절 도광판 패턴

본 논문에서는 PMMA(Polymethyl methacrylate) 재질의 도광판을 사용하였으며, 도광판 전용 가공기(MR-CA24, Mirae LNS)^[22]를 통해 도광판 하면에 형성된 V-cut 형태의 홈을 도광판 패턴으로 사용하였다. 도광판 전용 가공기의 다이아몬드 컷터(45°)를 통해 형성된 도광판 패턴은 매우 강한 산란 특성을 나타내었으며, 이 때문에 본 논문에서는 도광판 패턴을 램버시안 산란체(Lambertian scatterer)로 모델링하였다.

1. 테스트용 도광판 제작 및 특성 측정

도광판 패턴 모델링을 위하여 크기가 1,010 mm(높이) × 510 mm(폭) × 10 mm(두께)인 테스트용 도광판을 제작하였다. LED용 테스트 도광판의 경우 도광판 패턴을 1.5 mm 등 간격(높이 방향)으로 폭 방향을 따라 형성시켰으며, LED를 8 mm 간격으로 60개씩 도광판의 상부와 하부에 배치하였다. 태양광용 테스트 도광판의 경우 도광판 패턴을 1.5 mm 등 간격(폭 방향)으로 높이 방향을 따라 형성시켰으며, 광섬유의 끝단을 30 mm 간격으로 32개씩 도광판의 양 측면에 배치하였다.

조도분포 측정을 위해 조도계(LI-210 Photometric Sensor, LI-COR, Inc.)^[23]를 사용하였다. 도광판 전체 면적을 20 × 10 셀로 나누어 각 셀의 중심부에서의 조도 값을 측정하였다. 그림 2.7과 그림 2.8은 각각 LED용 테스트 도광판과 태양광용 테스트 도광판의 조도 측정 결과를 보여주고 있다.

2. 도광판 패턴 모델 파라미터 결정

앞서 서술한 바와 같이 도광판 패턴을 램버시안 산란체로 모델링하였고, 실험 결과와의 매칭 시뮬레이션을 통해 모델 파라미터인 반사율 R , 산란체 폭 d 의 값을 결정하였다. 그림 2.9는 산란체 특성이 적용된 도광판 패턴의 모습을 보여주고 있다.

매칭 시뮬레이션을 위해 LED용 도광판의 경우 산란체의 폭 d 를 0.05 mm부

터 3 mm까지 0.01 mm씩 변경하고, 동시에 산란체의 반사율 R 을 0%부터 100%까지 10%씩 변경하며 도광판의 조도분포에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2.10은 매칭 시뮬레이션을 위한 LED용 도광판 LightTools 시뮬레이션 기본 레이아웃을 보여주고 있다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 다음 식과 같이 정의된 평균 오차(average error) δ 를 사용하였다^[24,25].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{ij} (E_{ij} - S_{ij})^2} \quad (2.2)$$

여기서, i 와 j 는 각각 조도 측정을 위해 분할한 각 셀의 행과 열을 위치를 뜻하며, E_{ij} 와 S_{ij} 는 각각 각 셀에 대해 실험적으로 측정된 조도값과 시뮬레이션을 통해 계산된 조도값을 뜻한다. N 은 비교에 사용된 총 셀의 개수를 의미한다. 그림 2.11 (a)와 (b)는 각각 LED용 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대해 평균 오차 δ 를 계산한 결과이다. 도광판에 반사필름이 부착된 경우, 평균 오차는 반사율에 거의 무관하고 산란체 폭에 따라 변화하는 경향을 보였고, 도광판에 반사필름이 부착되지 않은 경우, 평균 오차는 역으로 산란체 폭에 거의 무관하고 반사율에 의존하여 변화하는 양상을 보였다. 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대한 결과를 모두 사용하여 도광판 패턴에 대한 모델 파라미터를 최종적으로 결정하기 위해 다음 식과 같이 정의된 총 평균오차 δ_{total} 를 계산하였다^[24,25].

$$\delta_{total} = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)/2} \quad (2.3)$$

여기서, δ_1 와 δ_2 는 각각 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대한 평균 오차이다. LED용 도광판에 대한 총 평균오차 δ_{total} 에 대한 결과는 그림 2.12와 같다. 총 평균오차 δ_{total} 이 최소가 되는 반사율 $R = 80\%$, 산란체 폭 $d = 0.18$ mm를 LED용 도광판 패턴의 모델 파라미터로 결정하였다.

태양광용 도광판의 경우 매칭 시뮬레이션을 위해 산란체의 폭 d 를 0.05 mm부터 2 mm까지 0.01 mm씩 변경하고, 동시에 산란체의 반사율 R 을 0%부터 100

%까지 10%씩 변경하며 도광판의 조도분포에 관한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2.13은 매칭 시뮬레이션을 위한 태양광용 도광판 LightTools 시뮬레이션 기본 레이아웃을 보여주고 있다. 그림 2.14(a)와 (b)는 각각 태양광용 도광판에 반사필름이 부착된 경우와 부착되지 않은 경우에 대해 평균 오차 δ 를 계산한 결과이다. LED용 도광판과 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 태양광용 도광판에 대한 총 평균오차 δ_{total} 에 대한 결과는 그림 2.15와 같다. 총 평균오차 δ_{total} 이 최소가 되는 반사율 $R = 70\%$, 산란체 폭 $d = 0.17 \text{ mm}$ 를 태양광용 도광판 패턴의 모델 파라미터로 결정하였다.

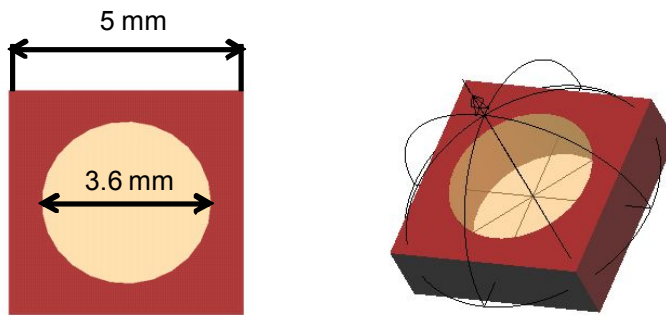


그림 2.1 LightTools로 모델링된 LED 광원의 외관

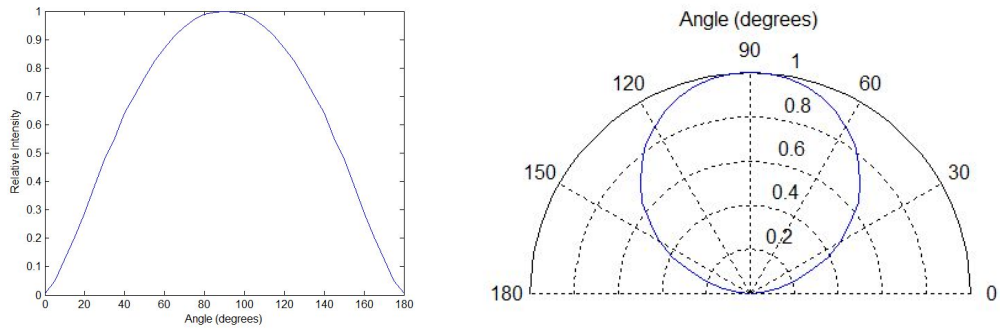
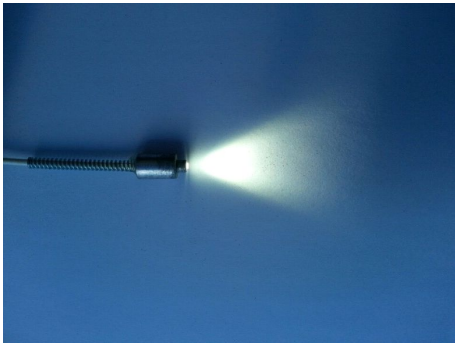


그림 2.2 LED 광원의 각도별 상대 광도 분포 곡선



그림 2.3 태양광 집광 및 전송 시스템



(a)



(b)

그림 2.4 (a) 광섬유 끝단으로부터 태양광이 출사되는 모습, (b) LightTools로 모델링된 광섬유 광원의 외관

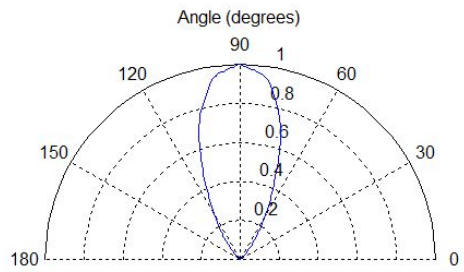
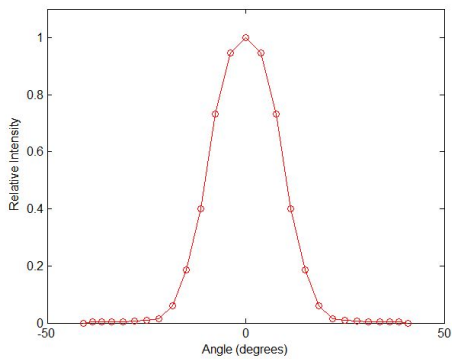


그림 2.5 태양광 광원의 각도별 상대 광도 분포

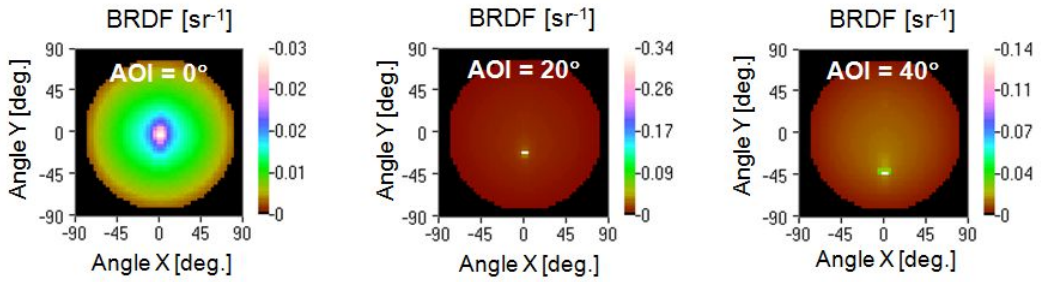


그림 2.6 반사필름(SY-80S)에 대해 측정된 BRDF 데이터

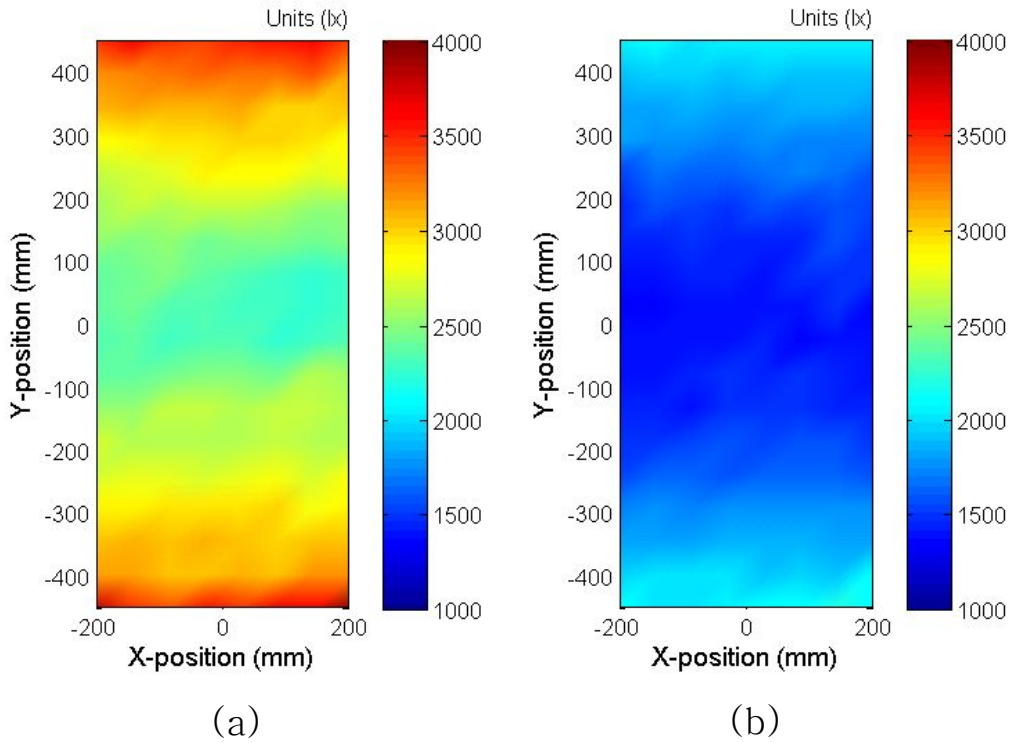


그림 2.7 LED용 테스트 도광판에 대한 조도 분포 측정 결과. (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우

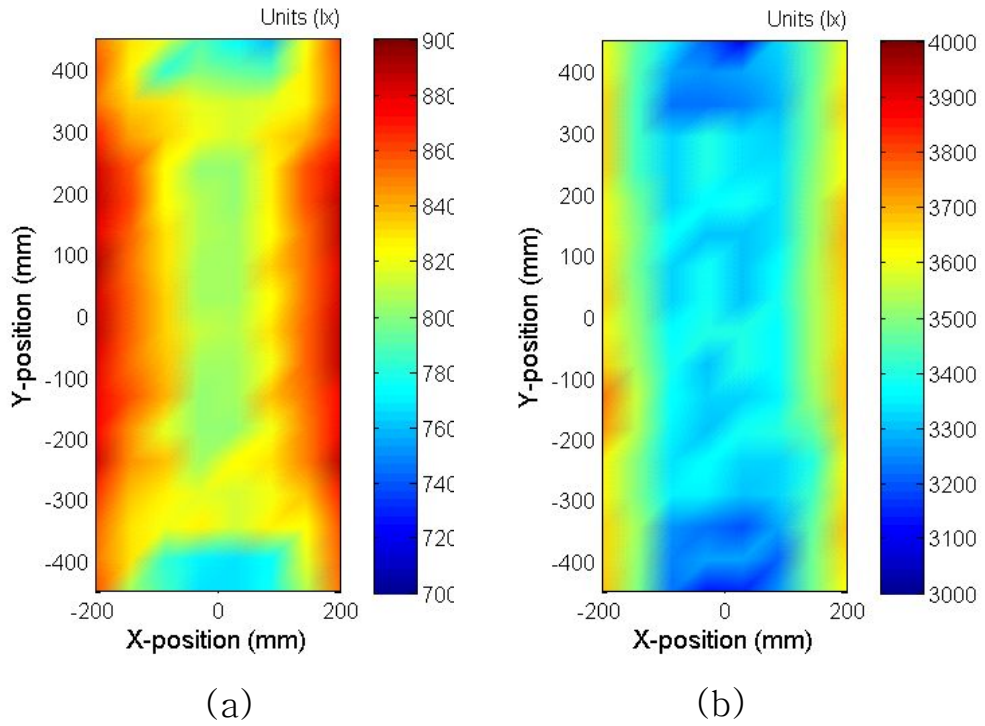


그림 2.8 태양광용 테스트 도광관에 대한 조도 분포 측정 결과. (a) 반사필름이 있는 경우, (b) 반사필름이 없는 경우

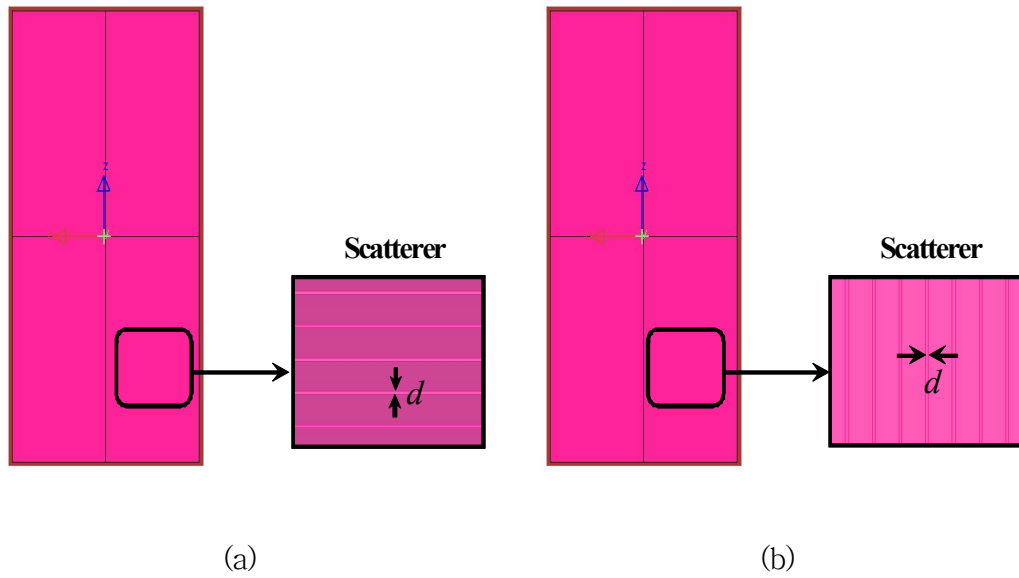


그림 2.9 도광판 모델의 패턴에 산란체를 적용한 모습.

(a) LED용 도광판 모델, (b) 태양광용 도광판 모델

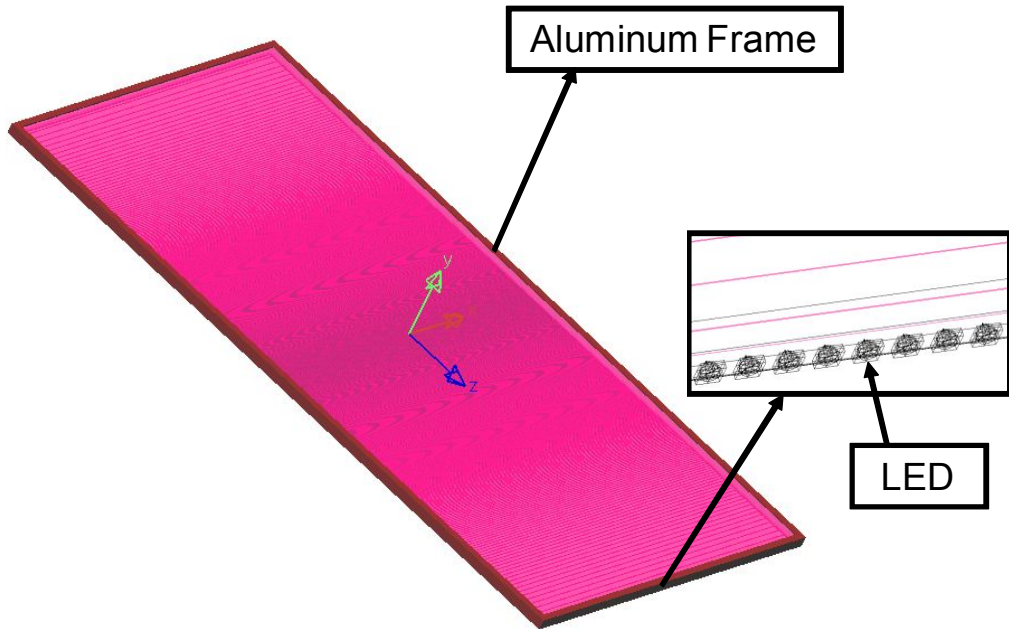
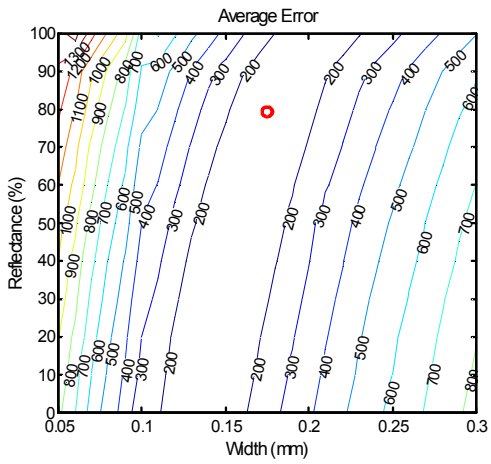
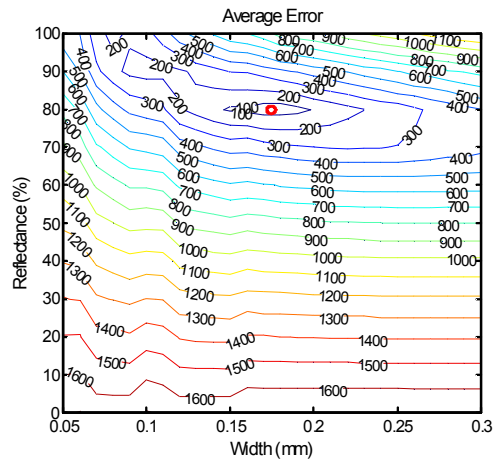


그림 2.10 LED용 도광판 LightTools 모델 기본 레이아웃



(a)



(b)

그림 2.11 LED용 도광판에 평균 오차 δ 를 계산한 결과.

(a) 반사필름이 부착된 경우, (b) 반사필름이 부착 되지 않은 경우

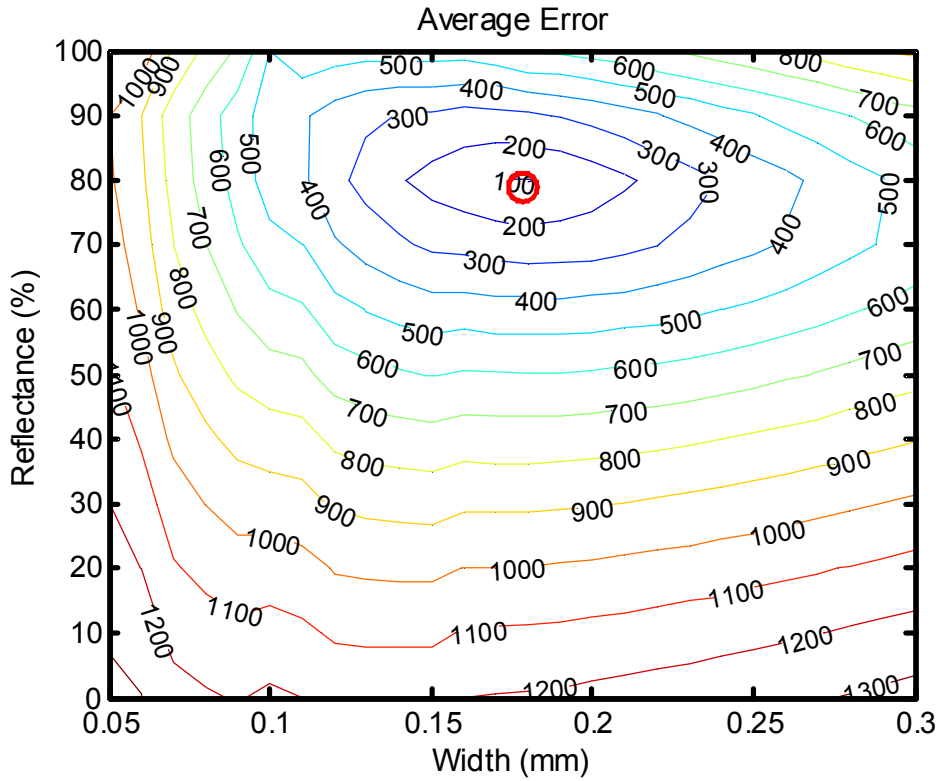


그림 2.12 LED용 도광판에 대한 총 평균 오차 δ_{total} 에 대한 결과

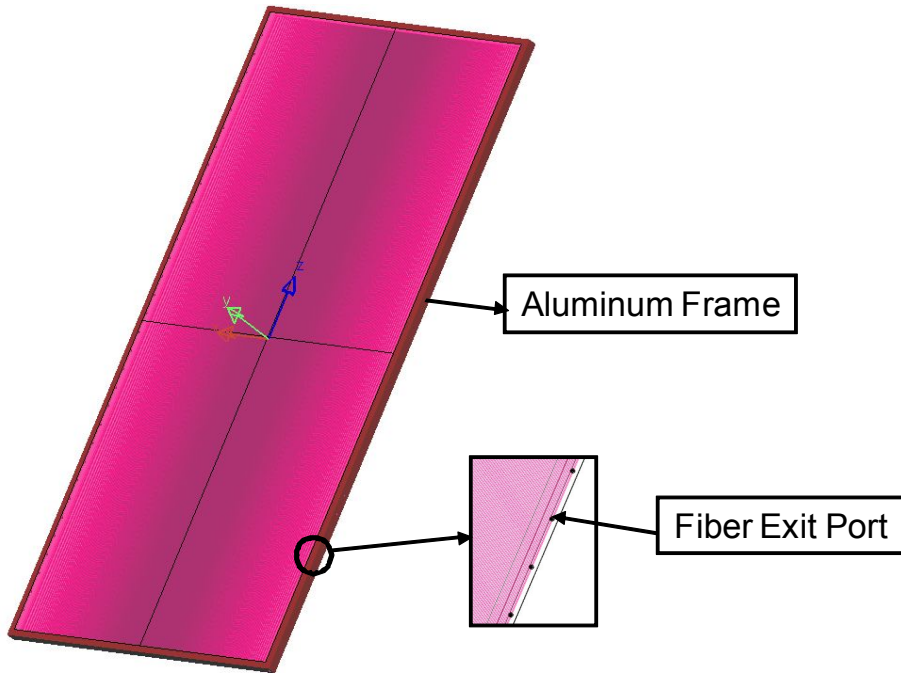


그림 2.13 태양광용 도광판 LightTools 모델 기본 레이아웃

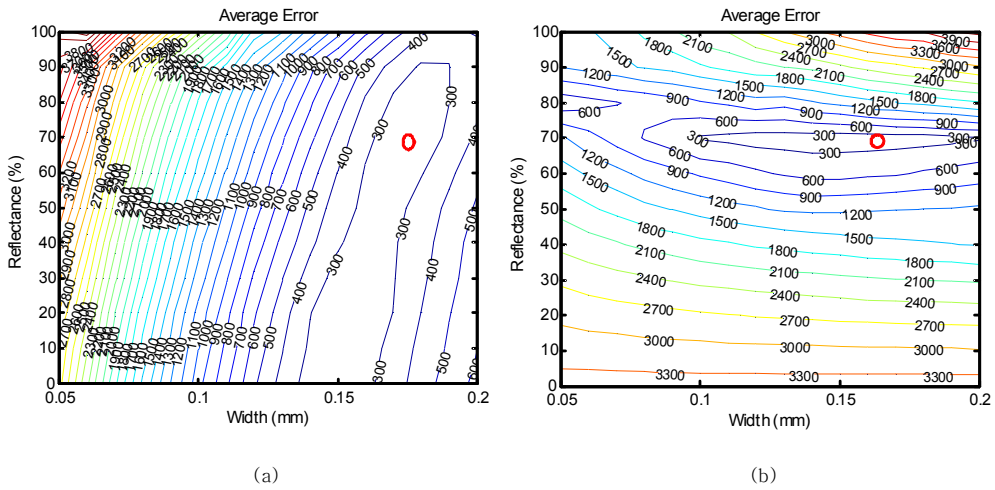


그림 2.14 태양광용 도광관에 평균 오차 δ 를 계산한 결과.
 (a) 반사필름이 부착된 경우, (b) 반사필름이 부착 되지 않은 경우

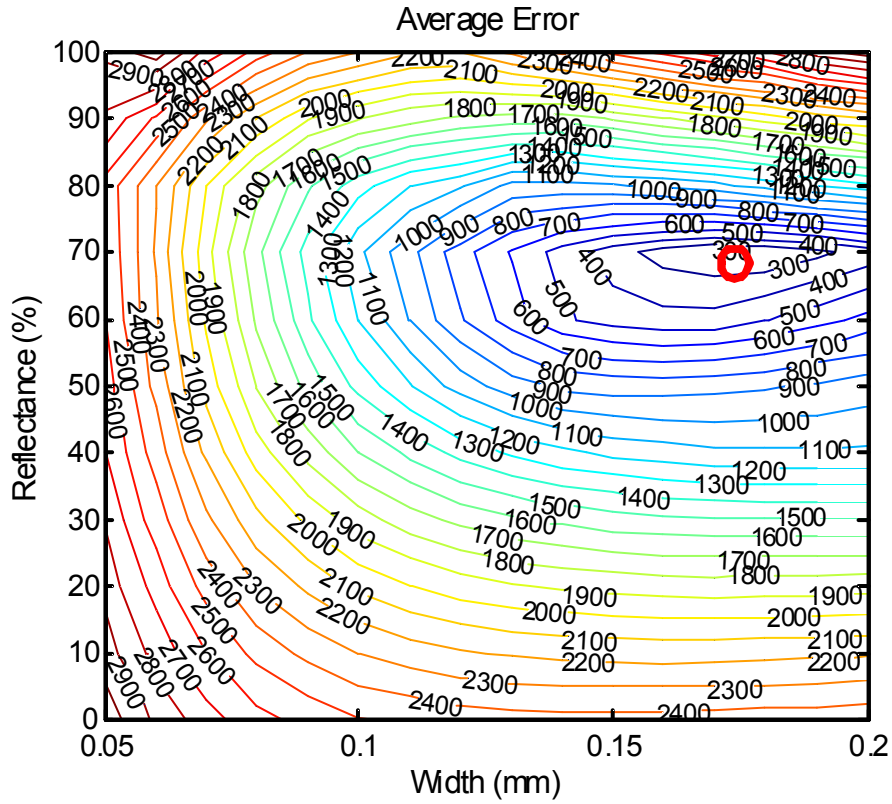


그림 2.15 태양광용 도광판에 대한 총 평균 오차 δ_{total} 에 대한 결과

제3장 도광판 설계

제1절 LED용 도광판

균일한 조도 분포를 얻기 위해서는 체계적인 방법으로 도광판 패턴의 위치를 결정해야 한다. 일반적으로 도광판 내부의 광의 세기는 광원으로부터 멀어질수록 감소하게 되며, 광원으로부터 멀어질수록 도광판 패턴의 조밀도를 증가시켜야 균일한 조도 분포를 얻을 수 있다. 패턴 조밀도는 다양한 종류의 함수를 사용한 패턴 간격 함수를 통해 지정할 수 있는데, 본 논문에서는 다음과 같이 지수 함수를 사용하여 표현된 패턴 간격 함수를 사용하였다^[26].

$$y = A \left[\exp\left(\frac{x}{\sigma}\right) + \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right) \right] + B \quad (3.4)$$

여기서, x 는 도광판 패턴을 배열할 축 상의 위치를, σ 는 패턴 간격 함수의 간격 상수를 의미한다. A 와 B 는 최대 패턴 간격과 최소 패턴 간격에 의해 결정되는 상수이다.

최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 패턴 간격 함수의 간격 상수를 변화시키며 평균 편차와 평균 조도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 평균 편차는 조도 분포의 표준편차와 평균 조도의 비로 정의된 파라미터이다. 그림 3.1과 그림 3.2는 각각 LED용 도광판 최적 설계 시뮬레이션을 통해 얻은 평균 편차와 평균 조도 결과를 보여주고 있다. 그림 3.1을 살펴보면, 각 최대 패턴 간격에 대해 평균 편차가 최소가 되는 최소 패턴 간격과 간격 상수 조합이 존재함을 알 수 있다. 또한, 그림 3.2를 통해 최대 패턴 간격이 같을 경우 최소 패턴 간격이 작을수록 평균 조도 값이 증가함을 발견할 수 있다. 그림 3.3(a)는 시뮬레이션 된 각 최대 패턴 간격에 대해 얻은 최소 평균 편차 값과 그 때의 평균 조도 값을 보여주고 있다. 최대 패턴 간격이 4-6 mm 사이의 값을 갖고 있을 때, 거의 동일한 평균 편차 값과 평균 조도 값을 보이고 있음을 알

수 있다. LED용 도광판의 설계 파라미터를 최종적으로 결정하기 위해 시뮬레이션 된 각 최대 패턴 간격에 대해 최소의 평균 편차를 나타낼 때의 상대 조도 변화 폭을 계산해 보았다. 그 결과는 그림 3.3(b)와 같다. 최대 패턴 간격이 6 mm일 때, 최소 상대 조도 변화 폭을 보였으며, 이 결과를 바탕으로 최대 패턴 간격 6 mm, 최소 패턴 간격 2 mm, 패턴 간격 함수의 간격 상수 30 mm를 LED용 도광판의 설계 파라미터로 결정하였다. 그림 3.4는 설계된 LED용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면을 보여주고 있다.

제2절 태양광용 도광판

그림 3.5와 그림 3.6은 각각 태양광용 도광판 최적 설계 시뮬레이션을 통해 얻은 평균 편차와 평균 조도 결과를 보여주고 있다. 태양광용 도광판에 대해서도 LED용 도광판과 비슷한 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3.7에 나타내었다. 태양광용 도광판의 경우 최대 패턴 간격이 4 mm일 때, 최소의 평균 편차, 최대의 평균 조도 및 최소의 상대 조도 변화 폭을 보였다. 최적 설계 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최대 패턴 간격 4 mm, 최소 패턴 간격 1.5 mm, 패턴 간격 함수의 간격 상수 4 mm를 태양광용 도광판의 설계 파라미터로 최종 결정하였다. 그림 3.8은 설계된 태양광용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면을 보여주고 있다.

제3절 하이브리드 광원용 도광판

최적 설계 시뮬레이션을 통해 구한 LED용 도광판 패턴과 태양광용 도광판 패턴을 조합하여 하이브리드 광원용 도광판 패턴으로 사용하였다. 양 패턴 간의 혼선(cross talk)으로 인해 도광판 성능의 저하가 우려 되었으나, 제작 후 측정을 수행한 결과 3가지 도광판 모두 조도 균일도 면에서 비슷한 성능을 보였다. 그림 3.9는 하이브리드 광원용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면을 보여주고 있다.

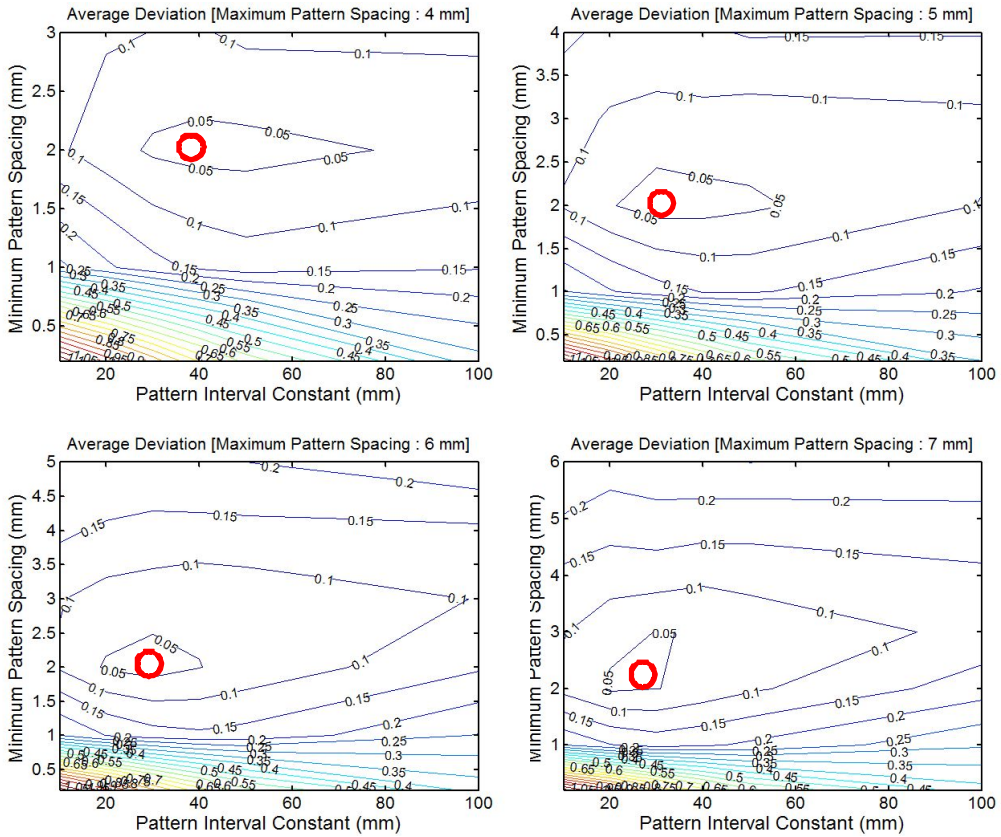


그림 3.1 LED용 도광판의 설계 파라미터

(최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 간격 상수 변화)에 따른 평균 편차 계산 결과

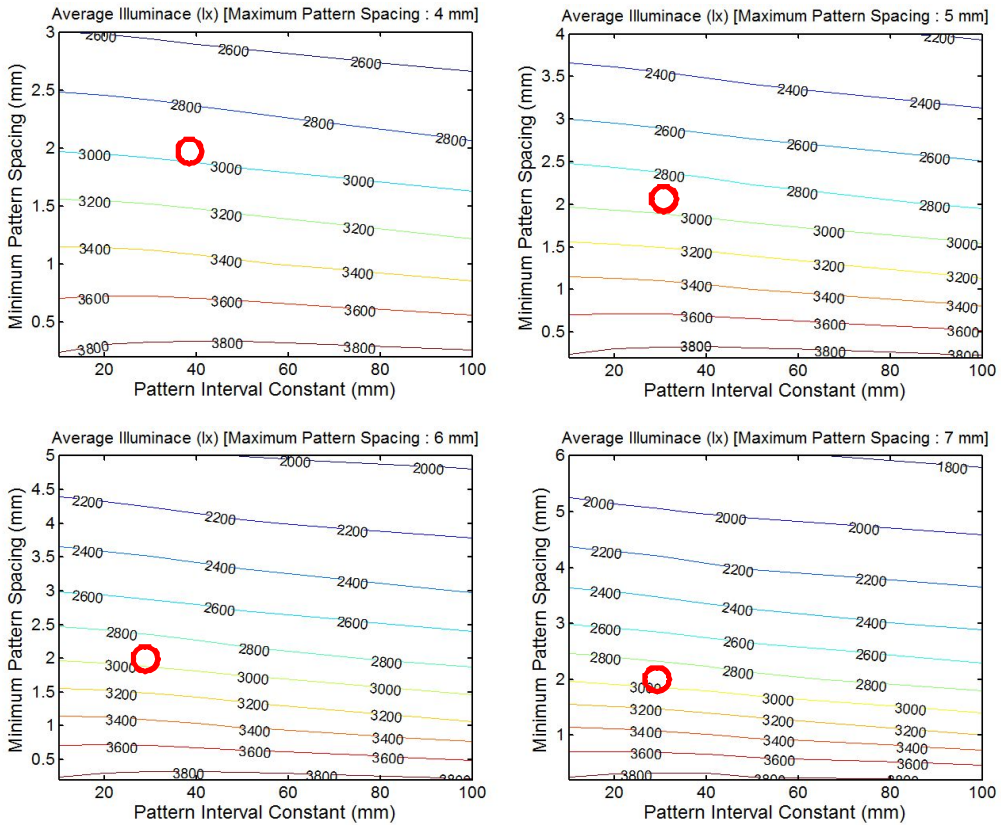
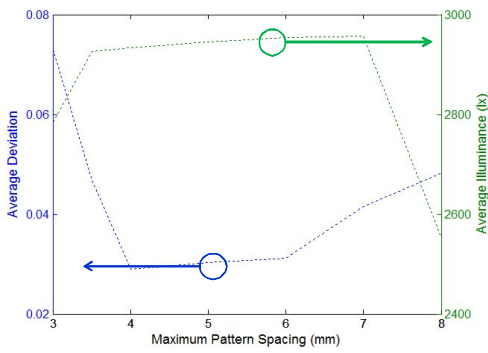
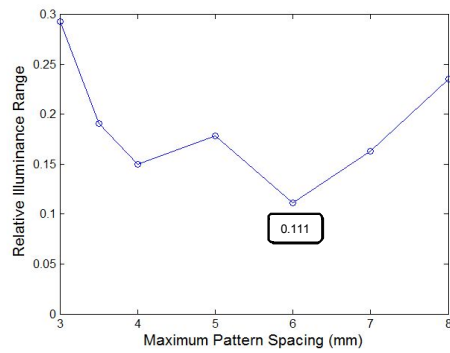


그림 3.2 LED용 도광판의 설계 파라미터

(최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 간격 상수 변화)에 따른 평균 조도 계산 결과



(a)



(b)

그림 3.3 LED용 도광판 최적 시뮬레이션을 통해 얻은 (a) 최대 패턴 간격에 따른 평균 편차, 평균 조도 결과, (b) 최대 패턴 간격에 따른 상대 조도 변화 폭

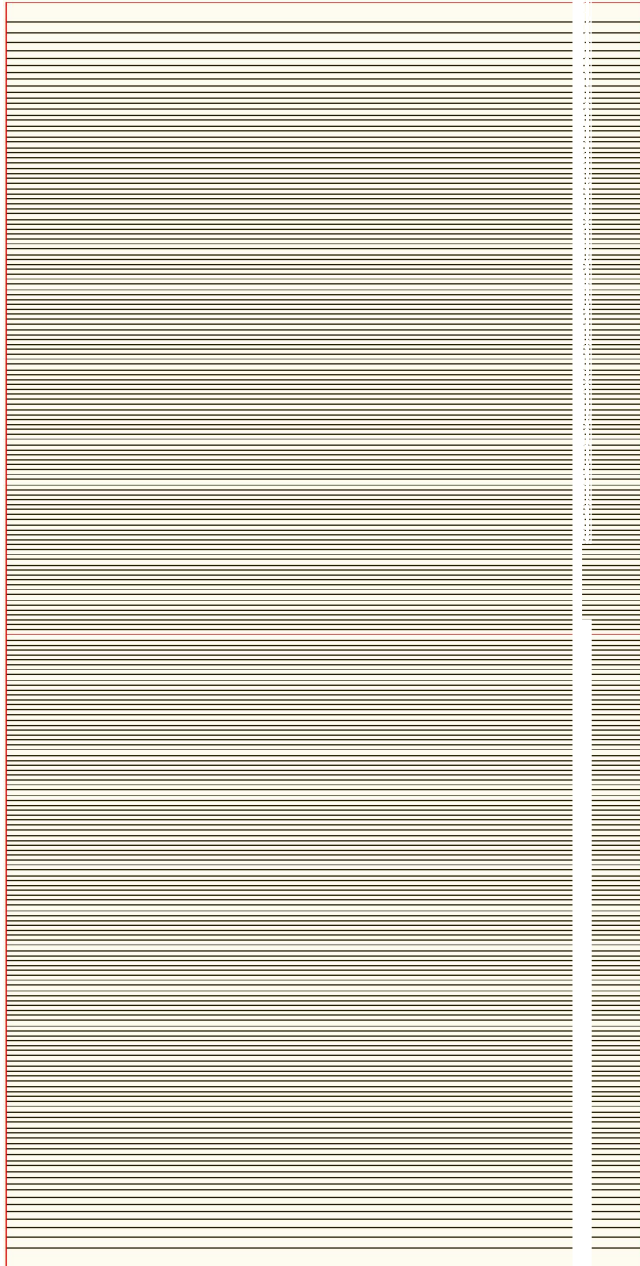


그림 3.4 LED용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면

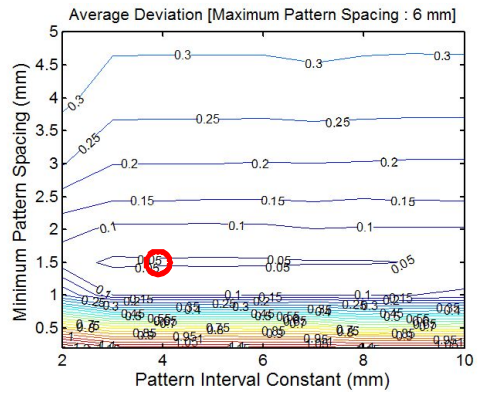
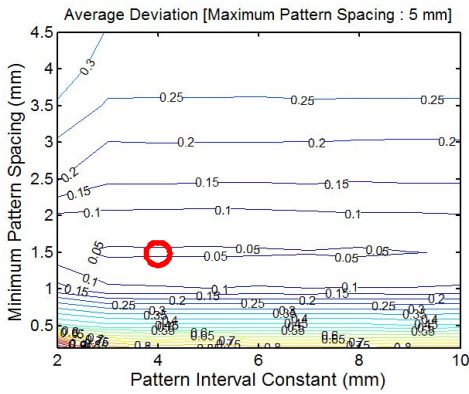
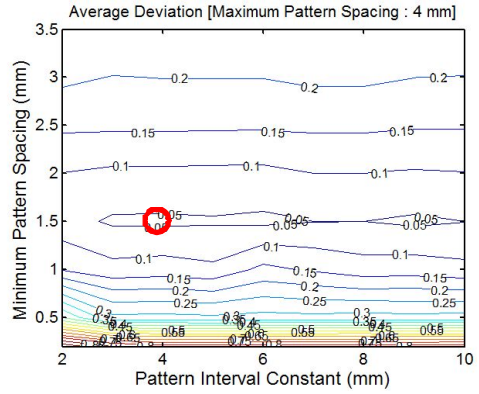
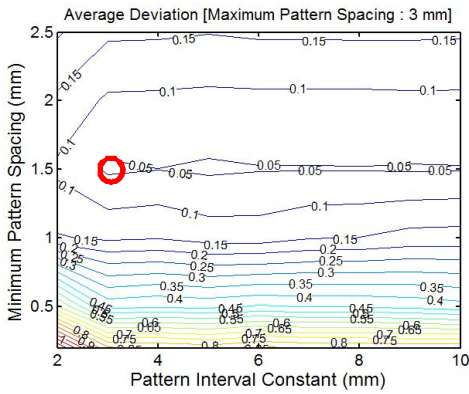


그림 3.5 태양광용 도광판의 설계 파라미터

(최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 간격 상수 변화)에 따른 평균 편차 계산 결과

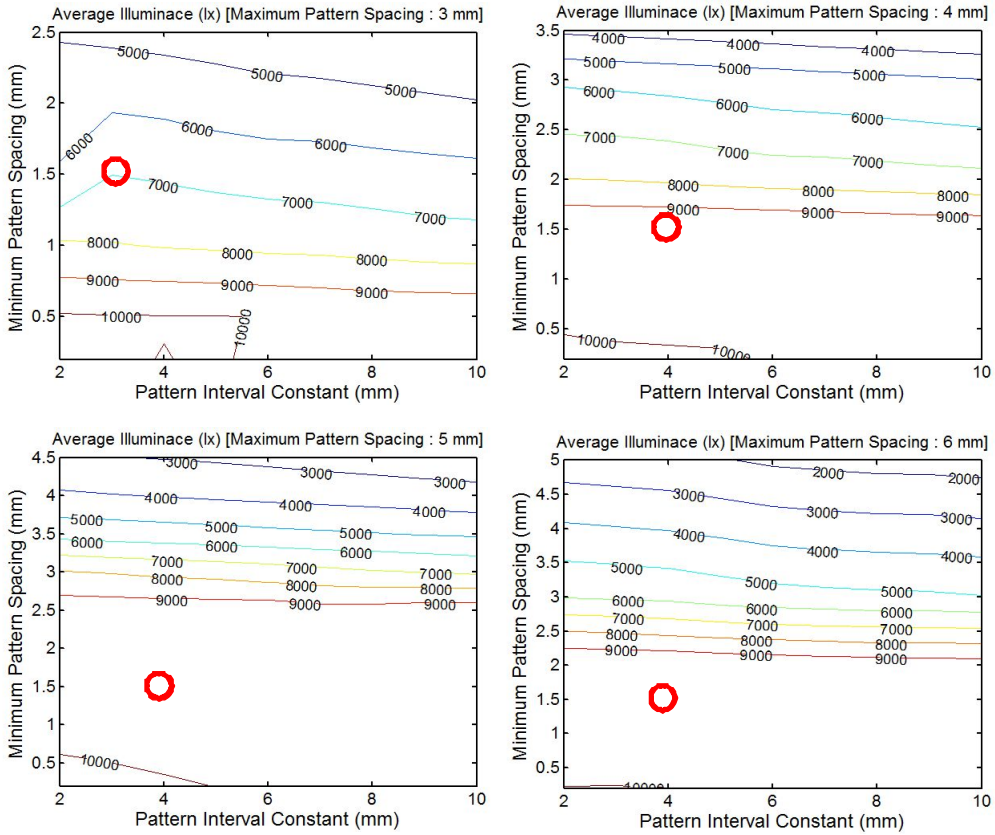
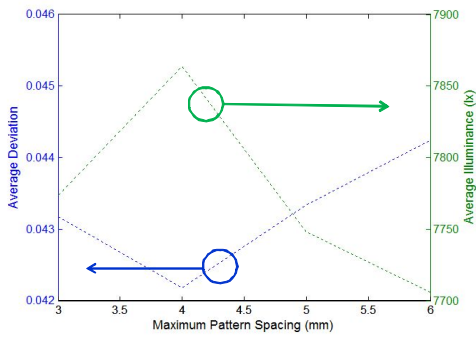
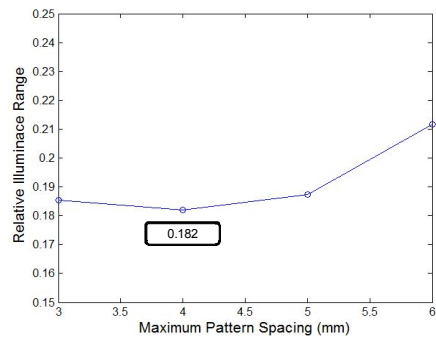


그림 3.6 태양광용 도광관의 설계 파라미터

(최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 간격 상수 변화)에 따른 평균 조도 계산 결과



(a)



(b)

그림 3.7 LED용 도광판 최적 시뮬레이션을 통해 얻은 (a) 최대 패턴 간격에 따른 평균 편차, 평균 조도 결과, (b) 최대 패턴 간격에 따른 상대 조도 변화 폭

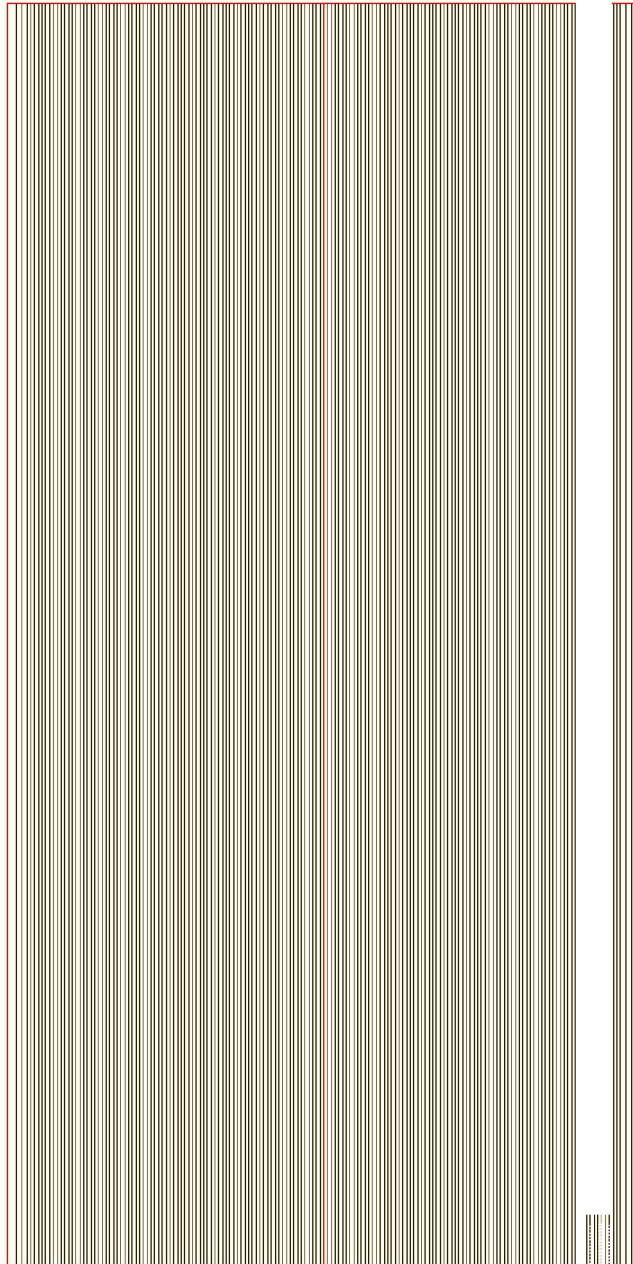


그림 3.8 태양광용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면

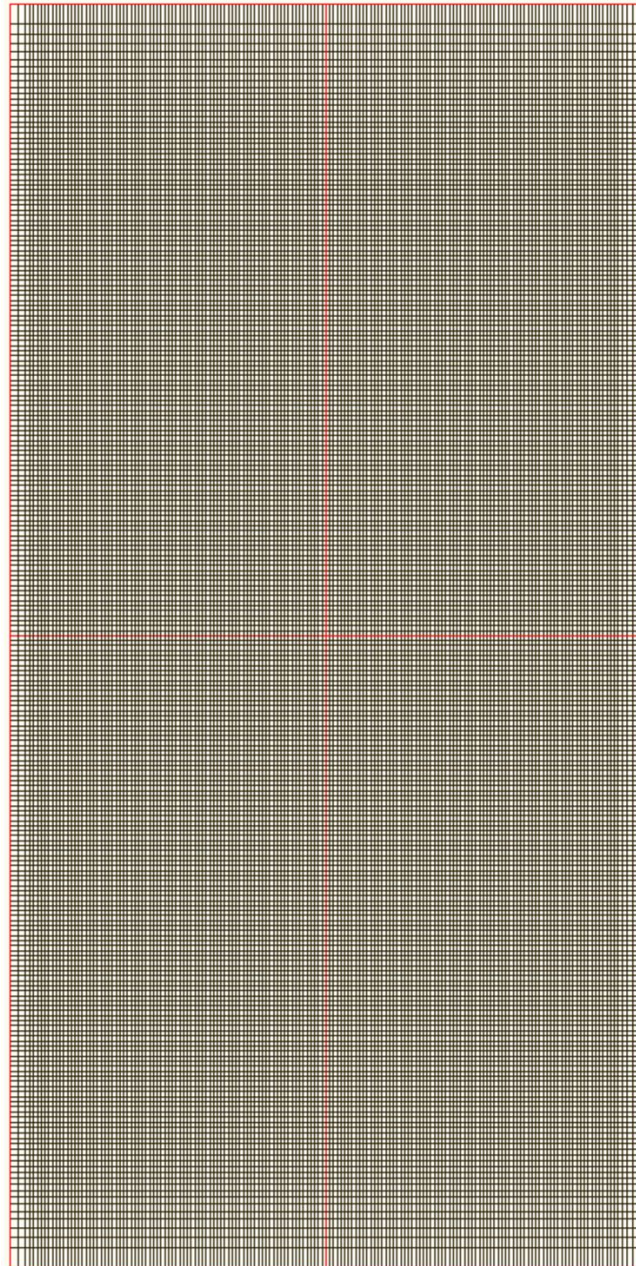


그림 3.9 하이브리드 광원용 도광판 패턴의 AutoCAD 도면

제4장 도광판 제작 및 성능 평가

제1절 LED용 도광판

앞서 기술한 바와 같이 도광판 전용 가공기인 Mirae LNS의 MR-CA24를 사용하여 도광판을 제작하였다. 그림 4.1은 도광판 전용 가공기 MR-CA24와 다이아몬드 커터의 사진을 보여주고 있다. 제작된 도광판의 크기는 테스트용 도광판과 같이 1,010 mm × 510 mm × 10 mm이었으며, 제3장에서 결정된 LED용 도광판 패턴을 사용하였다. 그림 4.2는 제작된 LED용 도광판의 사진이다.

제작된 도광판을 20 × 10 셀로 나누고 최외곽의 셀들을 제외한 18 × 8 개의 셀에 대해 조도계를 사용하여 조도 분포를 측정하였다. 배광 균일도(illuminance distribution uniformity, IDU)는 KS C IEC 61747-6 규격을 준용하여 다음과 같이 계산하였다^[27].

$$IDU = \left[1 - \max \left(\left| \frac{E_i - E_{av}}{E_{av}} \right| \right) \right] \times 100 \% \quad (5.1)$$

여기서, E_i 와 E_{av} 는 각각 개별 셀에 대해 측정된 조도 값과 평균 조도 값을 뜻한다. 그림 4.3은 제작된 LED용 도광판의 조도 분포 측정결과를 보여주고 있다. 평균 조도, 조도 표준 편차, 배광 균일도는 각각 2,933 lx, 183 lx, 89%이었다.

광생물반응기 관련 분야에서는 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 혹은 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 의 단위를 갖고 있는 PFD(photon flux density)가 조도 보다 더 의미있는 물리량으로 사용된다^[28]. PFD는 단위면적당 PF(photon flux)를 의미하며, 다음 식과 같이 정의되어 있다^[29].

$$PF = \frac{1}{6.02 \times 10^{17}} \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} \frac{\Phi_e(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (5.2)$$

여기서, $\Phi_e(\lambda)$, h , c 와 λ 는 각각 분광복사속, 플랑크 상수, 진공 중에서의 광속과 파

장을 의미한다. PF의 단위는 $\mu\text{mol/s}$ 혹은 $\mu\text{E/s}$ 이다. PFD는 양자 측정기(LI-210 Quantum Sensor, LI-COR, Inc.)^[30]를 사용하여 측정 하였는데, LED용 도광판의 경우 평균 PFD는 $45 \mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 이었다.

제2절 태양광용 도광판

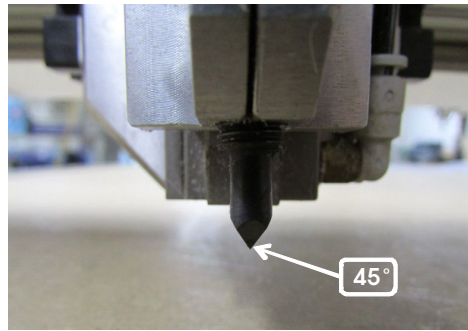
그림 4.4와 그림 4.5는 각각 제작된 태양광용 도광판 사진과 조도 분포 측정결과를 보여주고 있다. LED용 도광판과 같은 방식으로 측정하였다. 평균 조도, 조도 표준 편차, 배광 균일도는 각각 8,174 lx, 256 lx, 90%이었고, 평균 PFD는 $122 \mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 이었다. 측정시 태양 직사광의 조도는 111,000 lx이었다.

제3절 하이브리드 광원용 도광판

그림 4.6은 제작된 하이브리드 광원용 도광판 사진을 보여주고 있다. 평균 조도, 조도 표준 편차, 배광 균일도는 하이브리드 광원용 도광판에 LED만을 광원으로 사용한 경우(그림 4.7 참조), 각각 2,908 lx, 225 lx, 89%이었고, 태양광만을 광원으로 사용한 경우(그림 4.8 참조), 각각 8,362 lx, 351 lx, 89%이었으며, LED와 태양광을 동시에 광원으로 사용한 경우(그림 4.9 참조), 각각 12,368 lx, 441 lx, 90%이었다. 세가지 경우 모두 89-90%의 배광 균일도를 보이고 있어 우려되었던 양 패턴(LED용 도광판 패턴과 태양광용 도광판 패턴) 간의 혼선에 인한 도광판 성능 저하는 발생하지 않은 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 4.1 (a) 도광판 전용 가공기 MR-CA24, (b) 다이아몬드 커터

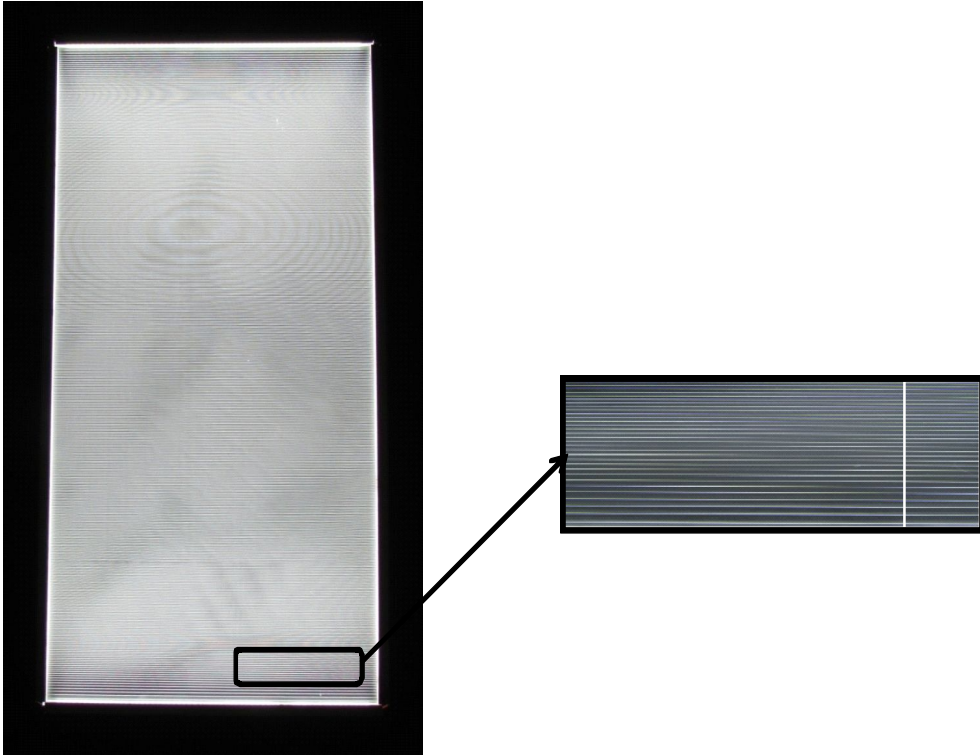


그림 4.2 제작된 LED용 도광판의 사진

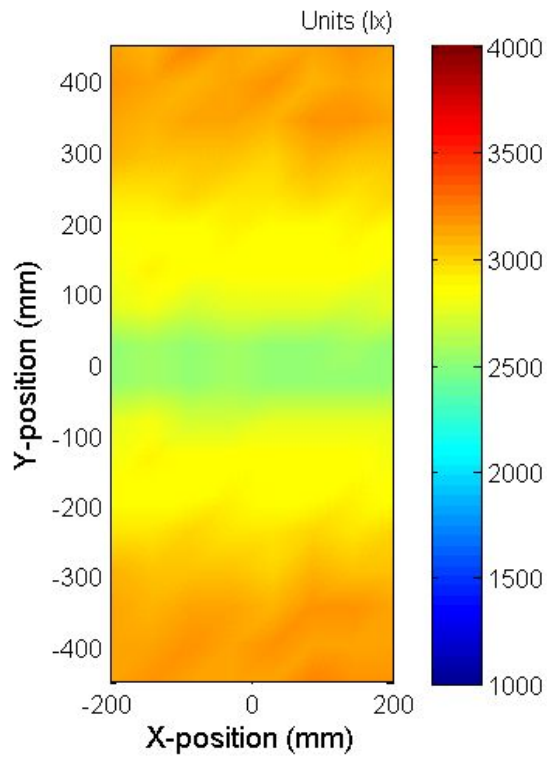


그림 4.3 제작된 LED용 도광판의 조도 분포 측정 결과

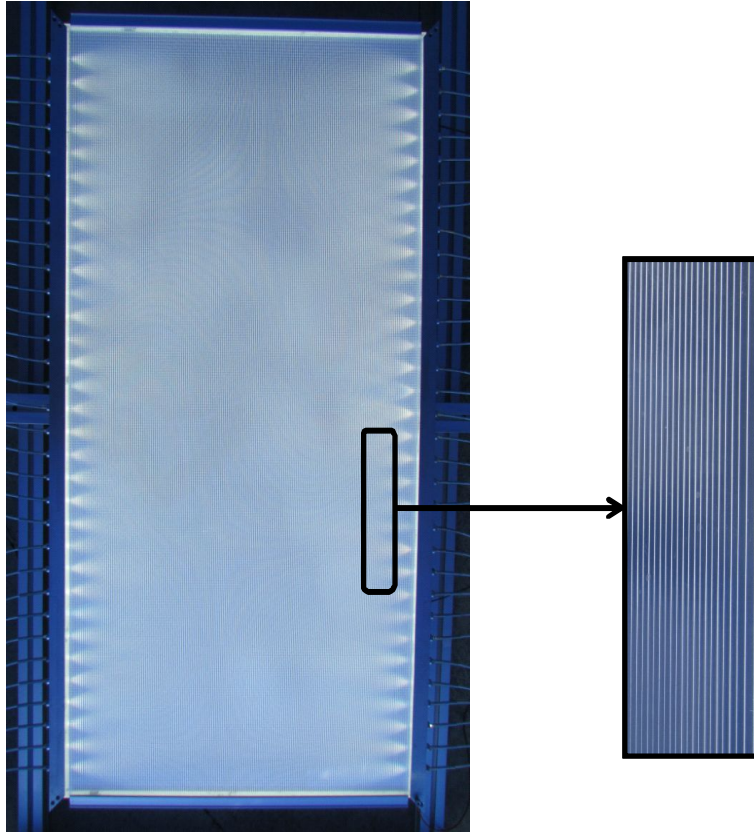


그림 4.4 제작된 태양광용 도광판의 사진

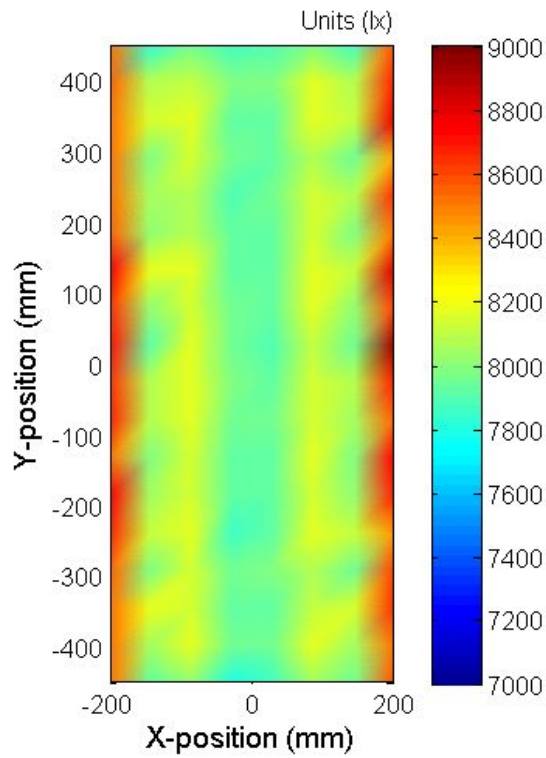


그림 4.5 제작된 태양광용 도광판의 조도 분포 측정 결과

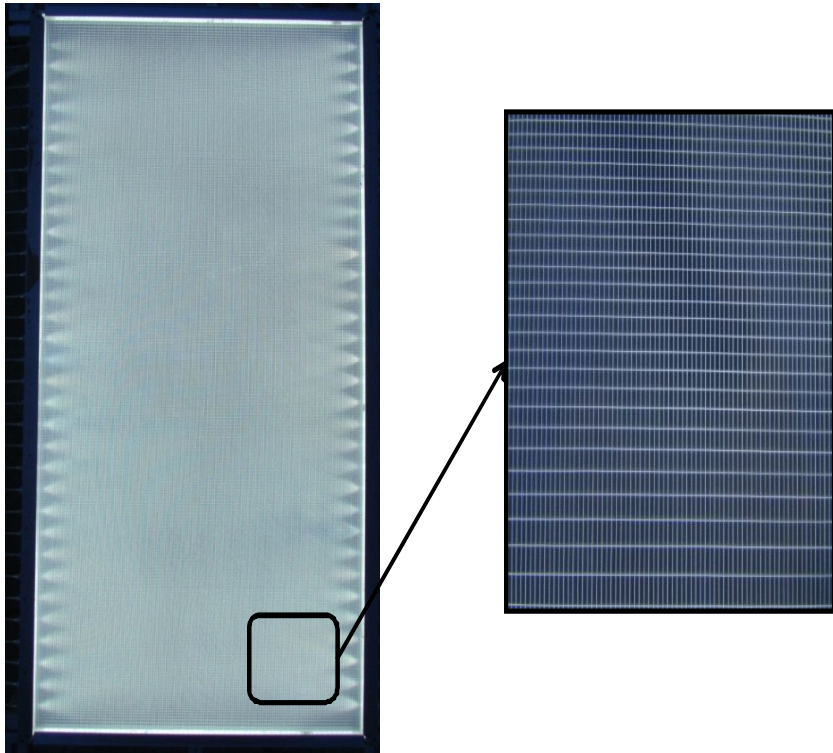
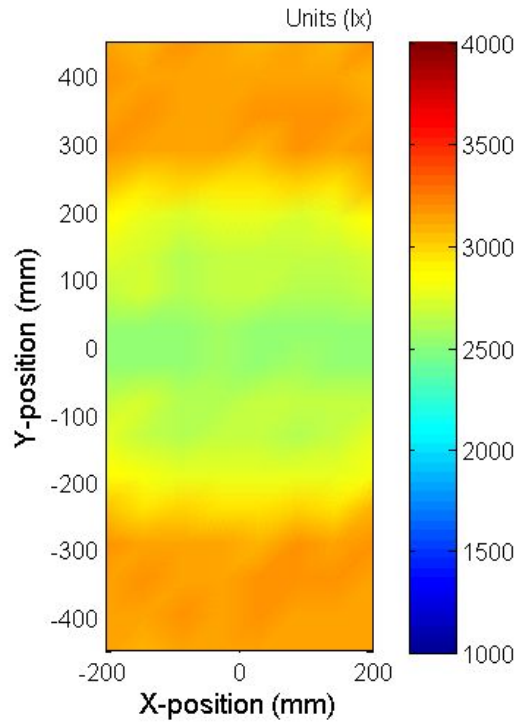


그림 4.6 제작된 하이브리드 광원용 도광판의 사진

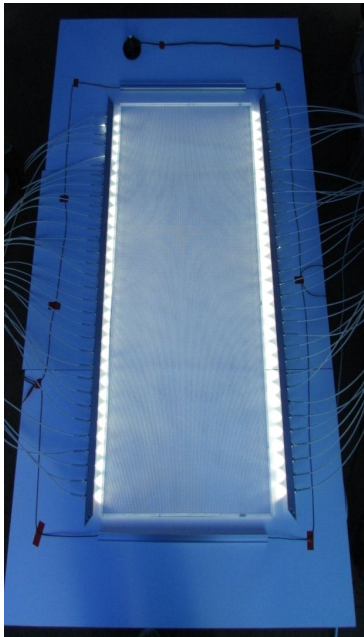


(a)

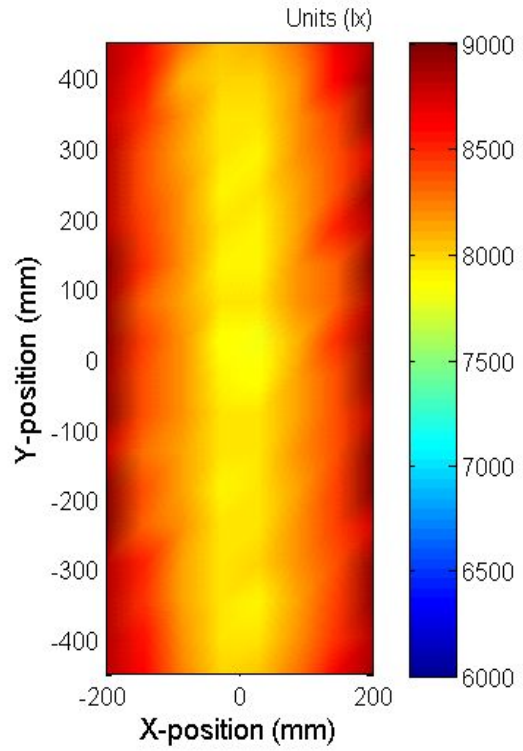


(b)

그림 4.7 (a) 하이브리드 광원용 도광관에 LED 광원만 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과



(a)



(b)

그림 4.8 (a) 하이브리드 광원용 도광관에 태양광 광원만 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과

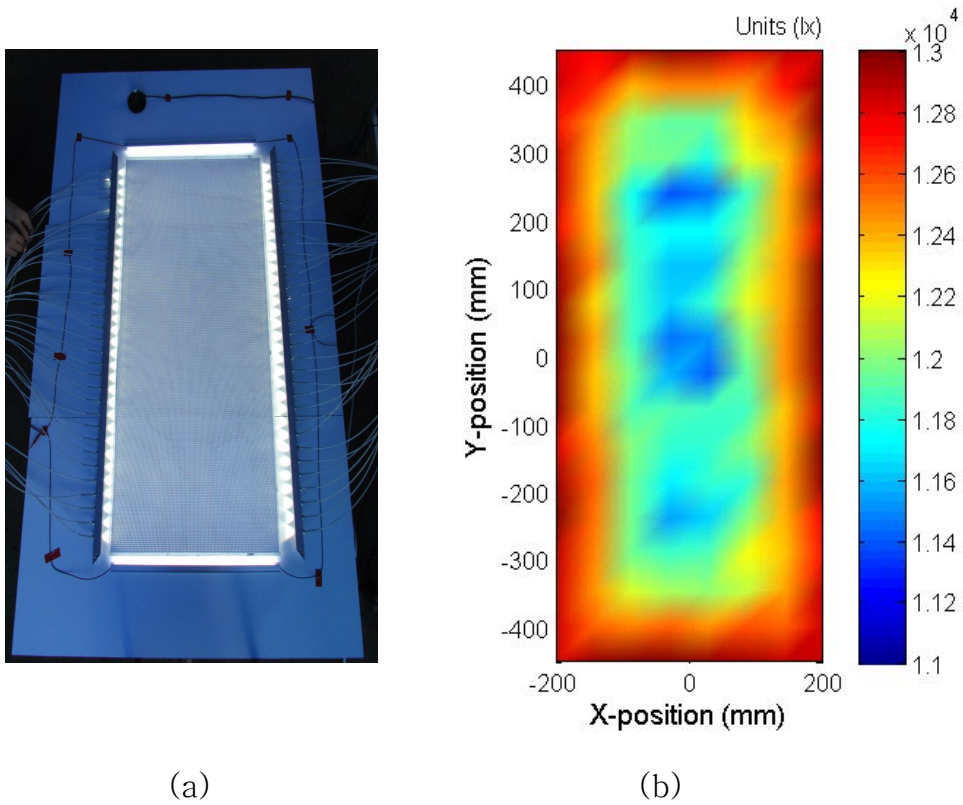


그림 4.9 (a) 하이브리드 광원용 도광판에 LED와 태양광을 동시에 광원으로 사용한 실험 사진, (b) 조도 분포 측정 결과

제5장 하이브리드 광원용 도광판을 위한 제어 시스템

제1절 제어 시스템 구성

날씨 등의 외적 조건과 관련 없이 미세조류 배양을 위한 최적의 광량을 유지하기 위해 하이브리드 광원용 제어 시스템을 설계 및 제작하였다. 제어 시스템은 광량을 측정할 수 있는 포토 센서(LT-40S, RIXEN Tech Co.)^[31], LED광원의 사용율(duty cycle)을 제어 할 수 있는 NI-ELVISmx(National Instrument)^[32], 전원 공급을 위한 SMPS(switch mode power supply), 측정값 표시 및 교정을 위한 패널 미터로 구성 되어 있으며, LabVIEW를 사용하여 전체 제어 시스템을 구동 시켰다.

그림 5.1은 하이브리드 광원용 제어 시스템의 신호 흐름도이다. 포토 센서의 측정값은 패널 미터에 표시 되고 이어 LabVIEW 프로그램에서 디지털 및 펄스 신호로 변환되어 NI-ELVISmx에 전달된다. 변환된 펄스 신호는 SMPS를 통해 LED를 제어 한다. 포토 센서의 측정값이 LabVIEW에 설정된 PFD 목표값을 넘어서는 경우에는 LED 사용율을 떨어뜨리고, PFD 목표값을 넘어서지 못하는 경우에는 LED 사용율을 높이는 방식으로 제어가 이루어진다. 그림 5.2는 제어 시스템의 하드웨어 사진이다. 그림 5.3과 그림 5.4는 각각 제어 시스템 흐름도와 LabVIEW 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

제2절 제어 실험 결과

PFD 목표값을 $70 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 으로 설정하고 제어 실험을 수행하였다. 제어 실험 결과는 그림 5.5와 같다. 제어 시작점 이전까지 일기 변화에 의해 $10\text{-}40 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 사이의 PFD 값 변화를 보였다. 제어를 시작한 후 약 20 s 이후부터 PFD 값이 $70 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 을 유지하였으며, 오차범위 약 $\pm 2\%$ 이내에서 제어가 이루어짐을 확인하였다.

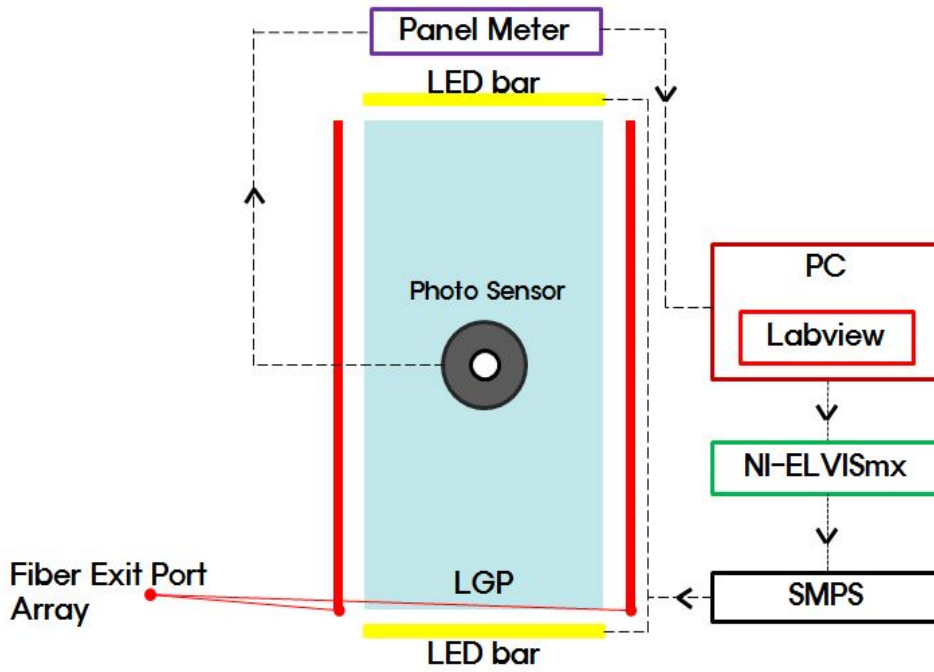


그림 5.1 하이브리드 광원용 제어 시스템의 신호 흐름도

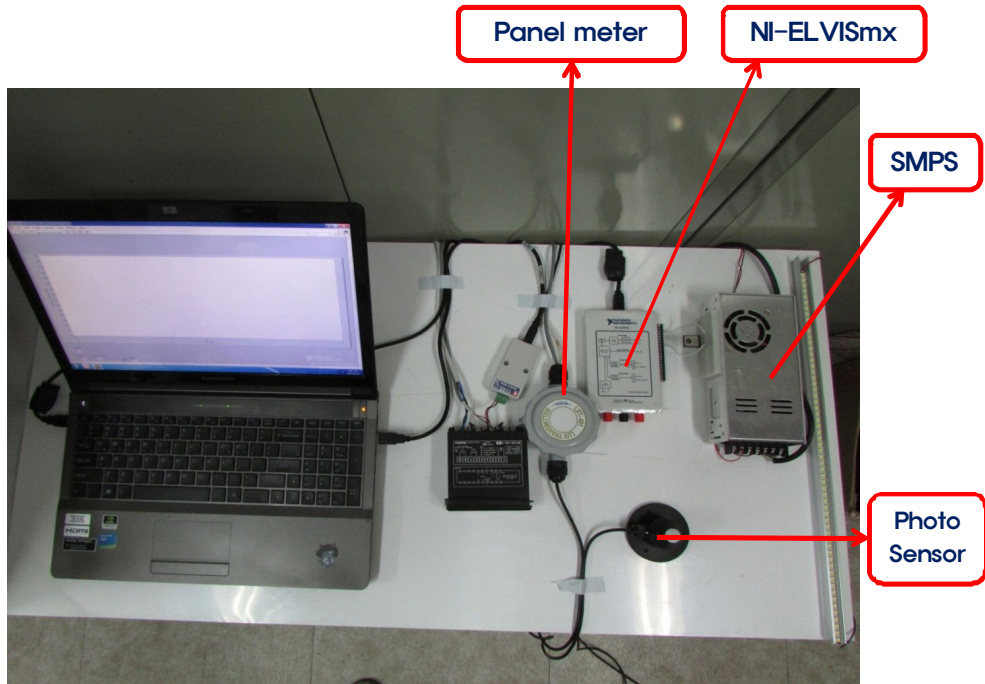


그림 5.2 제어 시스템의 하드웨어 사진

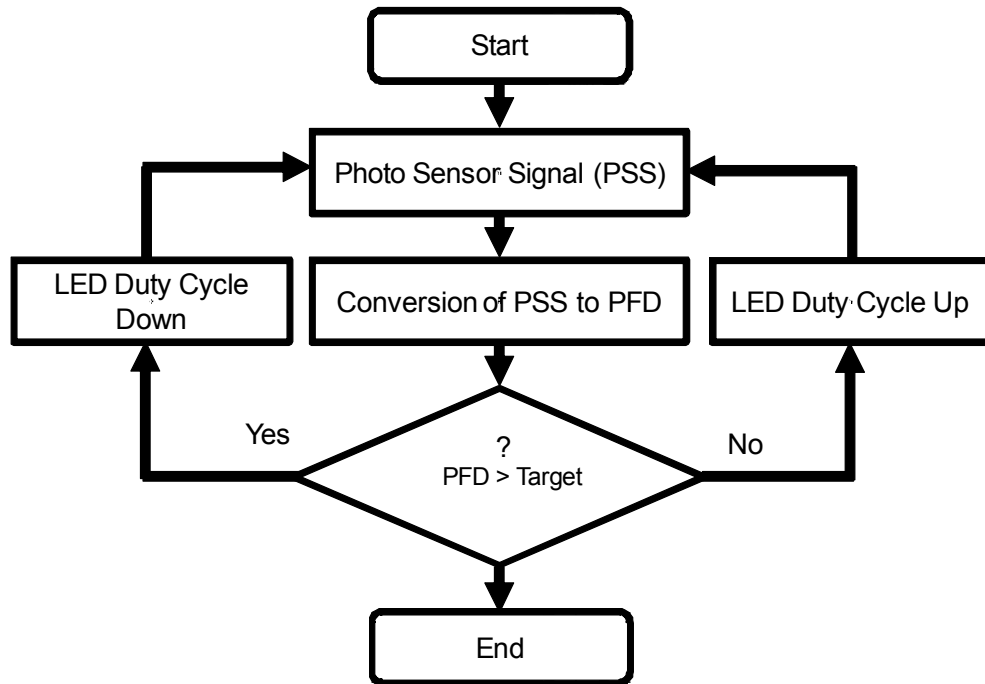


그림 5.3 제어 시스템 흐름도

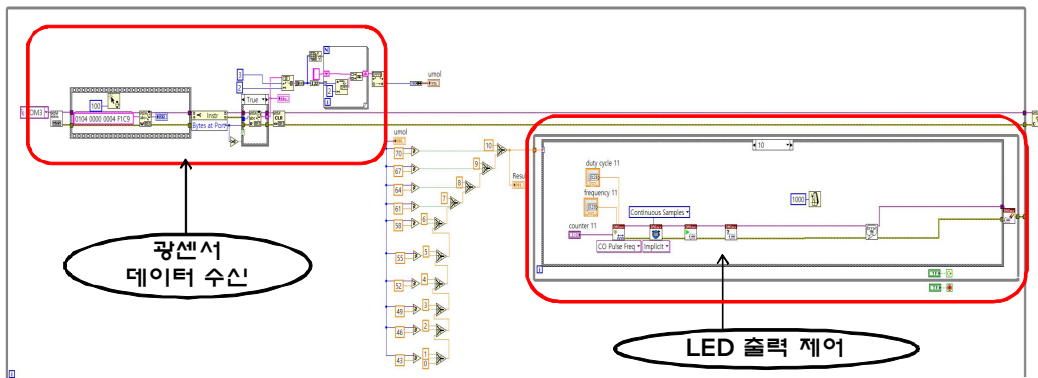


그림 5.4 LabVIEW 블록 다이어그램

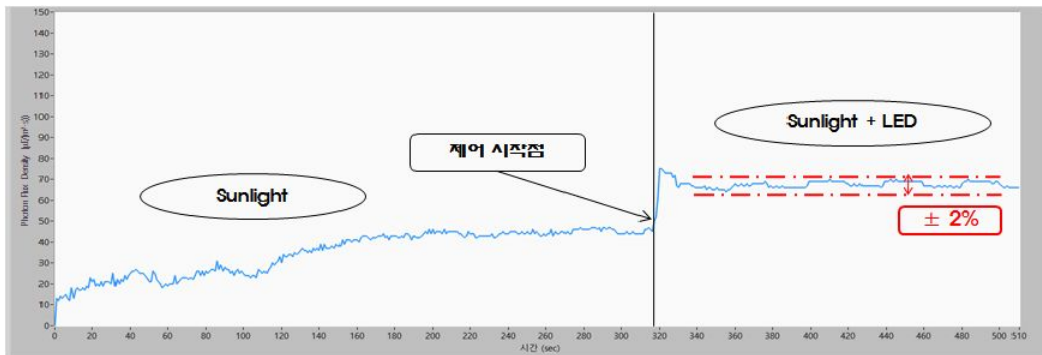


그림 5.5 제어 실험 결과

제6장 결 론

미세조류는 빛을 에너지원으로 이산화탄소를 고정화하여 의약품 및 고급 화장품 등에 사용할 수 있는 고부가가치 유용물질을 생산할 수 있을 뿐만 아니라 화석연료를 대체할 수 있는 미래 에너지원 생산에 활용될 수 있어 최근 매우 큰 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 미세조류 대량 생산용 광생물 반응기에 적용할 수 있는 LED와 태양광 하이브리드 광원을 이용한 도광판의 설계 및 제작 결과에 대해 보고한다. 광학모델링과 설계를 위해 조명설계 소프트웨어인 LightTools(Optical Reasearch Associates)를 사용하였다.

먼저 LED와 태양광에 대한 광원 모델링을 수행하였다. LED(모델명: LWH1056N, 제조사: LUXPIA)의 경우 LED 테스트 및 측정 시스템(OL770 UV/VIS, Gooch & Housego, PLC.)을 사용하여 얻은 광도 데이터를 활용하였으며, 태양광의 경우 원형 프레넬 렌즈를 통해 집광된 태양광이 최종적으로 출사하는 광섬유 끝단(SK-80, MITSUBISHI)으로부터 15 cm 떨어진 위치에서의 조도분포를 활용하였다. 다음으로 반사필름(SY-80S, SK)의 BRDF를 실험적으로 측정하였고, 이를 활용하여 반사필름에 대한 광학적 모델링을 수행하였다. 도광판 패턴은 램버시안 산란체로 가정하였으며 반사율 R 과 산란체 폭 d 를 모델 파라미터로 설정하였다. 테스트용 도광판은 1,010 mm(길이) × 510 mm(폭) × 10 mm(두께)의 크기를 갖고 있었다. LED는 폭방향 양 측면에 각각 60개를 등 간격으로 배열하였으며, 태양광이 출사하는 광섬유 끝단은 길이방향 양 측면에 각각 32개를 등 간격으로 배열하였다. LED 광원에 대한 테스트 도광판의 경우 도광판 패턴은 폭방향을 따라 형성되었으며 패턴 간 간격은 길이 방향으로 모두 1.5 mm이었다. 태양광용 테스트 도광판의 경우 도광판 패턴은 길이방향을 따라 형성되었으며 패턴 간 간격은 폭 방향으로 모두 1.5 mm이었다. 테스트용 도광판을 제작하여 실험적으로 측정된 조도분포와의 매칭 시뮬레이션을 통해 도광판 패턴의 모델 파라미터를 결정하였다. 결정된 모델 파라미터는 LED용 도광판의 경우 $R = 80\%$, $d = 0.18$ mm이었고, 태양광용 도광판의 경우 $R = 70\%$, $d = 0.17$ mm이었다.

도광판 설계 파라미터로 도광판 패턴의 최대 패턴간격, 최소 패턴간격, 지수함수

형태로 주어진 패턴 간격 함수의 간격 상수를 사용하였다. 이 파라미터들을 변화시키 가며 광학 시뮬레이션을 수행하였고, 평균 편차(조도 표준편차/평균 조도), 평균 조도, 상대 조도 변화 폭의 관점에서 최적화된 LED용과 태양광용 도광판을 각각 설계 하였다. 설계결과를 바탕으로 도광판 전용 가공기(MR-CA24, Mirae LNS)를 사용하여 LED용 도광판과 태양광용 도광판을 각각 제작하였다. LED용 도광판의 평균 조도는 2,933 lx, 배광 균일도는 89% 이었고, 태양광용 도광판은 태양광의 조도가 약 111,000 lx일 때, 평균조도는 8,174 lx, 배광 균일도는 90%이었다. 설계된 LED용 패턴(폭방향) 과 태양광용 패턴(길이방향)을 단일 도광판에 가공하여 하이브리드형 도광판을 제작 하였다. 하이브리드형 도광판에 LED만을 광원으로 사용한 경우 평균조도는 2,908 lx, 배광 균일도는 89%이었고, 태양광만을 광원으로 사용한 경우 평균조도는 8,362 lx, 배광 균일도는 89%이었다. LED와 태양광을 동시에 광원으로 사용할 경우에도 배광 균일도는 약 90%정도를 유지하였다.

하이브리드형 도광판의 경우 미세조류를 배양하는데 가장 중요한 요소인 PFD를 일정하게 유지시켜주기 위해 LED의 출력 광량을 제어하는 시스템을 별도로 제작하 였다. 광량 모니터링을 위해 광센서(LT-40S, RIXEN Tech Co.)를 사용하였고, LED 광량제어를 위해서는 사용율(duty cycle)변화가 가능한 SMPS를 사용하였으며, LabVIEW를 이용하여 전체 제어시스템을 구성하였다. 도광판의 출력 PFD 목표값을 $70 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 로 설정하였을 경우 오차범위 $\pm 2\%$ 이내에서 제어가 이루어짐을 확인하 였다.

[참고문헌]

- [1] A. M. Kunjapur and R. B. Eldridge, "Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae," *Ind. Eng. Chem. Res.* **49**, 1 3516-3526 (2010).
- [2] G. C. Park, H. Kim, S. S. Shin, H. K. Shin, J. Kim, S. Jeong, and J. R. Park, "Design and Fabrication of Light Guiding Plate for Photobioreactor," *Korean J. Opt. Photon.* **23**, 55-62 (2012).
- [3] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae," *Biotechnol. Adv.* **25**, 294-306 (2007).
- [4] Z. Kang, B. H. Kim, S. Y. Shin, H. M. Oh, and H. S. Kim, "Municipal Wastewater Treatment and Microbial Diversity Analysis of Microalgal Mini Raceway Open Pond," *Korean Journal of Microbiology* **48**, 192-199 (2012).
- [5] I. A. Guschina and J. L. Harwood, "Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae," *Prog. Lipid Res.* **45**, 160-186 (2006).
- [6] 조성제, "미래의 자원으로 각광받는 미세조류," *SERI 경영노트* 170호, 1-13 (2012).
- [7] Y. Chisti, "MICROALGAE AS SUSTAINABLE CELL FACTORIES," *Environ. Eng. Manage J.* **5**, 261-274 (2006).
- [8] Z. Cohen, *Chemicals from Microalgae* (Talyor & Francis Inc., Philadelphia, USA, 1999), Chapter 8.
- [9] L. Xu, P. J. Weathers, X.-R Xiong, and C.-Z. Liu, "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities," *Eng. Life Sci.* **9**, 178-189 (2009).
- [10] C. Posten, "Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae," *Eng. Life Sci.* **9**, 165-177 (2009).
- [11] B. R. Choi and T. Y. Lee, "Correlation Conditions for Marine Microalgae *Isochrysis galbana* under Illumination of Light Emitting Diodes," *KSBB Journal* **27**, 263-267 (2012).
- [12] D. G. Kim and Y. E. Choi, "Microalgae Cultivation Using LED Light," *Korean Chem. Eng. Res.* **52**, 8-16 (2014).
- [13] K. H. Chang, "HIGH EFFICIENCY PHOTO-BIOREACTOR FOR CULTURING MICROALGAE," *Korea Patent* 0103739 (2007).

- [14] http://www.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/pdf_kor/267858/LUXPLA/LWH1056.html.
- [15] <http://goochandhousego.com/product/ol-770-led-test-and-measurement-system/>.
- [16] http://www.abmarch.co.kr/ebook/04_Eco_solar_lighting/EBook.htm.
- [17] http://fiberopticpof.com/pdfs/Product_Specs/SK-80_Product_Information.pdf.
- [18] J. C. Stover, Optical Scattering : Measurement and Analysis (SPIE, Washington, USA, 1995), 19-22.
- [19] Optical Research Associates, LightTools Core Module User's Guide (Optical Research Associates, Philadelphia, USA, 2010), 354-398.
- [20] J. S. Hwang, "Measurement System of Bidirectional Reflectance Distribution Function," Korean J. Opt. Photon. **21**, 46-52 (2010).
- [21] http://www.jnctech.co.kr/eng/brdf_measurement_system.html
- [22] http://www.miraelns.com/board/bbs/board.php?bo_table=e22&wr_id=4
- [23] LI-COR, Inc., LI-COR Terrestrial Radiation Sensors : Instruction Manual (LI-COR, Inc., Nebraska, USA, 2007) Section 8.
- [24] 김훈, "태양광을 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구," 석사학위논문, 조선대학교 (2013).
- [25] 박기찬, "광생물반응기를 위한 도광판 설계 및 제작," 석사학위논문, 조선대학교 (2012).
- [26] Y. C. Kim, D. W. Kim, T. S. Oh, Y. M. Lee, S. J. Ahn, and H. S. Kim, "LGP Pattern Design by Using a Pattern Density Function with Simple Exponential Function," J. Opt. Photon. Korea. **21**, 97-102 (2010).
- [27] Korean Agency for Technology and Standards, "Liquid crystal display devices - part 6: measuring methods for liquid crystal module - transmissive type," Korea KS C IEC 61747-6 (2010).
- [28] W. W. Biggs, Principles of Radiation Measurement (LI-COR, Inc., Nebraska, USA), http://www.licor.com/env/pdf/light/Rad_Meas.pdf
- [29] P. S. Nobel, Physicochemical and environmental plant physiology (Elsevier, London, UK, 2009) 185-188.
- [30] LI-COR, Inc., LI-COR Terrestrial Radiation Sensors: Instruction Manual (LI-COR, Inc., Nebraska, USA, 2007) Section 6.
- [31] <http://www.rixen.com.tw/images/19.LXT-401.pdf>.
- [32] <http://www.ni.com/white-paper/11420/en/>.

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20137106	과 정	석 사
성 명	한글: 임 현 철 한문 : 林 鉉 哲 영문 : Hyeon Cheol Lim				
주 소	광주광역시 서구 금호동 남양아파트 105동 101호				
연락처	E-MAIL : limhyunchol@gmail.com				
논문제목	<p>한글 : LED와 태양광 하이브리드 광원을 이용한 광생물반응기 용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구</p> <p>영어 : Design and Fabrication of Light-guiding Plate for a Photobioreactor Utilizing a Hybrid LED and Sunlight Source</p>				

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()

2015년 2월

저작자: 임 현 철 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

[감사의 글]

대학원에 입학한지 벌써 3년이라는 시간이 지났습니다. 지나고 나니 감사함이라는 마음 갖게 되는 시간이었습니다. 먼저 바쁘신 가운데에도 제 학위논문의 심사위원을 맡아주시고 좋은 조언을 해 주신 김현수 교수님, 박종락 교수님, 주기남 교수님께 감사드립니다. 제 연구논문의 대부분을 지도해 주시고 많은 조언들로 큰 도움을 주신 박종락 교수님, 매번 쓸데없는 질문에도 성의껏 답해 주신 주기남 교수님께 감사드립니다. 교수님들의 지도를 통해 연구자가 어떤 생각을 가져야 하는지, 제게 부족한 점이 무엇이고 어떤 방향으로 나아가야 할 지에 대해 알 수 있었던 것 같습니다. 교수님들의 제자로서 부족함이 없는 연구자가 될 수 있도록 항상 성실히 노력하도록 하겠습니다.

학부과정 시절부터 함께했던 실험실 선배, 후배님들께 깊은 감사드립니다. 지금의 실험실이 있게 만들어주신 태원이형, 진우형, 기찬이형, 훈이형, 성선이에게 진심으로 감사드리며, 대학원생활 동안 많은 도움을 준 훈국이형, 찬영이, 일신이형, 승종이형, 판주, 유민, 용범, 선율, 현철, 종현, 우영, 두형, 병권, 한범이, 동원이, 회원이, 기동이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 건국 대학교 구인이형, 지선이 누나, 한별이에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다.

앞으로 실험실을 이끌어 나갈 경민이, 재영이, 준혁이, 승진이에게 마지막까지 실험 도와 달라고 귀찮게 한거 미안해 돕느라 수고 많았고 앞으로도 항상 “웃으면서” 대학원 생활 할 수 있길 바래ㅋㅋㅋㅋㅋ 항상 부를 때마다 같이 산책해주는 지성이, 주말마다 같이 스트레스 풀어주는 홍석이, 정래, 영륜이 정말 고맙다. 항상 재밌는 에피소드 만들어주는 응답하라 06모임 동기들 고마워!!

마지막으로 이 자리에 오기까지 묵묵히 믿고 뒷바라지 해주신 아버지, 어머니께 감사드립니다. 앞으로는 여러분께 힘이 될 수 있는 존재가 될 수 있도록 노력하겠습니다!!!!!!

2014 年 12 月

林 鉉 哲

이 력 서

성 명 : 임 현 철 (林 鉉 哲)

생 년 월 일 : 1987년 12월 10일(양력)

출 생 지 : 광주 광역시

주 소 : 광주광역시 서구 금호동 남양파크 아파트 105동 101호

학 력

2003.3. - 2006.2. 광덕고등학교

2006.3. - 2013.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2013.3. - 2015.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

학위 논문

[1] “LED와 태양광 하이브리드 광원을 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2015).

학술지 게재 논문

- [1] 김훈, 신성선, 황민영, 임현철, 김광호, 김종태, 정상화, 박종락, “태양광과 선형 프레넬 렌즈를 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작,” 한국정밀공학회지, 제30권, 제2호, pp. 143-147 (2013).

국내·외 학회 발표

- [1] 김훈, 박종락, 신성선, 황민영, 임현철, 김광호, 김종태, 정상화, “도광판을 이용한 광생물반응기용 조명시스템 설계 및 제작에 관한 연구, 한국정밀공학회 2012년 추계 학술대회논문집, 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 Young 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] 신성선, 김훈, 임현철, 박종락, “선형프레넬 렌즈를 이용한 태양광용 도광판 설계 및 제작에 관한 연구,” 한국광학회 2013년도 동계 학술발표회 논문집, pp. 184-185 (2013).

- [5] 임현철, 신성선, 김훈, 박종락, “레이저흡수에 의한 피부 내부의 온도 분포에 관한 시뮬레이션,” 한국광학회 2013년도 동계 학술발표회 논문집, pp. 200-201 (2013).

프로젝트 수행

- [1] “바이오리파이너리 기반 고효율 평판형 광생물반응기 개발,” 한국에너지기술평가원 (2012.3 - 2013.5).
- [2] “레이저 촉감 제시 기술 개발,” 한국연구재단 (2012.8 - 현재).