

## ◆ 특집 ◆ 바이오매스 대량생산용 광생물반응기 개발

### 광생물 반응기를 위한 도광판 설계

#### Design of Light Guide Plate for Photobioreactor

박기찬<sup>1</sup>, 김훈<sup>1</sup>, 김종태<sup>2</sup>, 박정우<sup>3</sup>, 정상화<sup>4</sup>, 박종락<sup>1,✉</sup>  
Gi Chan Park<sup>1</sup>, Hun Kim<sup>1</sup>, Jongtye Kim<sup>2</sup>, Jeong Woo Park<sup>3</sup>, Sanghwa Jeong<sup>4</sup> and Jong Rak Park<sup>1,✉</sup>

1 조선대학교 광기술공학과 (Department of Photonic Engineering, Chosun Univ.)

2 조선대학교 바이오 리파이너리 연구센터 (Bio-refinery Research Center, Chosun Univ.)

3 조선대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ.)

4 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: ejrpark@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7036

Manuscript received: 2010.12.16 / Accepted: 2010.12.22

We have performed optical design of light guide plates (LGP) for a photobioreactor by using an illumination design tool. An LGP having light emitting diodes (LEDs) as a light source on the four sides was designed by optimizing the distribution of LGP patterns and design of another LGP, on top of which sunlight was focused by a Fresnel lens, was executed. Finally, a hybrid-solar-and-LED-lighting scheme was described. Detailed design process and optical performances of the designed LGPs are presented.

Key Words: Photobioreactor (광생물반응기), Light Guide Plate (도광판), Light-Emitting Diode (발광 다이오드), Sunlight (태양광), Fresnel Lens (프레넬 렌즈), Optical Design (광학설계)

## 1. 서론

최근 들어 지구온난화의 주원인인 이산화탄소의 저감 기술 개발과 화석연료 고갈에 따른 자원 위기 대처를 위한 신재생에너지 개발이 국내외적으로 매우 중요한 화두로 언급되고 있다.<sup>1,2</sup> 이 문제를 동시에 해결할 수 있는 방법으로 광생물반응기를 이용한 미세조류 배양기술이 매우 큰 주목을 받고 있다.<sup>3-7</sup>

실효성 있는 광생물반응기 개발을 위해서는 광원의 활용 효율을 극대화 할 필요가 있으며, 이를 위해 다양한 형태의 광학 시스템들이 제안되었다.<sup>8-10</sup> 광원으로는 태양광과 발광다이오드(light-emitting diode, LED)를 포함한 인공광원이 사용되고 있으며, 광생물반응기의 실질적인 활용을 위해서

는 태양광 에너지의 활용 효율을 높이는 것이 중요하다 하겠다. 태양광의 효율적인 집광을 위해 렌즈나 거울을 이용한 광학 시스템이 사용되고 있으며, 집광된 광의 저손실 전송을 위해 광섬유나 도광판(light guide plate, LGP) 등을 이용하고 있다.

본 논문에서는 광생물반응기 조명에 활용될 도광판의 광학설계에 대해 보고한다. 광학설계를 위하여 Optical Research Associates 사의 조명광학설계 소프트웨어인 LightTools를 사용하였다.<sup>11</sup> 먼저, LED를 광원으로 사용하는 도광판에 대한 광학설계를 수행하였고, 이어 프레넬 렌즈를 이용하여 집속된 태양광을 광원으로 사용하는 도광판에 대한 광학설계를 실시하였다. 설계된 각 도광판의 광학적 성능을 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 마지막으로 태양광과 LED를 광원으로 함께 사용하

는 하이브리드 광원용 도광판에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

제 2 장에서는 도광판 설계 방법에 대해 상세히 소개하였고, 제 3 장에서는 LED, 태양광 및 하이브리드 광원용 도광판의 설계 및 광학성능 시뮬레이션 과정에 대해 자세히 서술하였으며, 마지막 제 4 장에서는 본 논문의 연구결과를 종합하여 기술하였다.

## 2. 도광판 광학설계

### 2.1 광원

광원의 모델링에 있어서 가장 중요한 사항은 정확한 배광 분포를 사용하는 것이다. LED의 경우 각도 별로 측정된 광도(intensity) 분포를 사용한다.

Fig. 1 은 본 논문에서 사용한 LED(모델명: KL-WH5450-2NT, KOSEMI)의 광도 분포를 보여주고 있다. 측정치는 제조사에서 제공한 데이터이며, 시뮬레이션 결과는 측정 광도 분포를 LED 광원 모델의 Apodization 파일에 적용한 후 광선추적을 수행하여 얻은 결과이다. 두 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 태양광은 평행광으로 모델링할 수 있다.

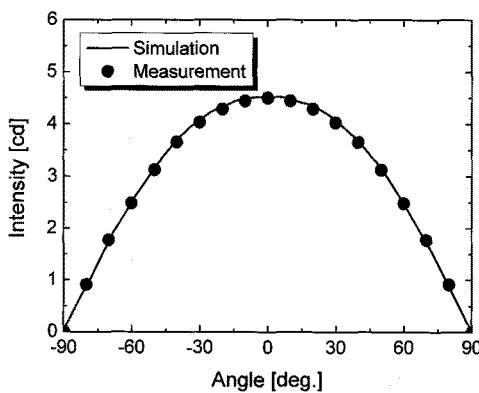


Fig. 1 Luminous intensity profile of the LED source (KL-WH5450-2NT, KOSEMI) used for optical modeling and simulation of this paper

### 2.2 반사필름

일반적으로 도광판의 밑면에 반사필름을 설치하여 도광판으로부터 도광판 패턴을 통해 하부로 방출된 광을 도광판의 상부로 출사하도록 한다. 반사필름의 반사 특성은 매우 복잡하여 거울반사

(specular reflection) 특성과 확산반사(difuse reflection) 특성을 모두 포함하고 있으며, 입사각(angle of incidence, AOI)에 따라 현저히 다른 특성을 보인다.

Fig. 2 는 본 논문의 도광판 광학설계를 위해 사용한 반사필름(모델명: SY 64~70, SK)의 양방향 반사율 분포함수(bidirectional reflective distribution function, BRDF) 데이터를 보여주고 있다. BRDF는 반사필름 표면으로부터 산란된 광의 산란각도 별 휘도(luminance) 분포에 해당하며,<sup>12</sup> 제이엔씨테크의 RT300S 장비를 사용하여 측정하였다. 본 논문에서는 측정된 BRDF 데이터를 반사필름 LightTools 모델의 표면특성(Surface Finishes)에 입력하여 보다 실제에 가까운 시뮬레이션이 수행되도록 하였다.

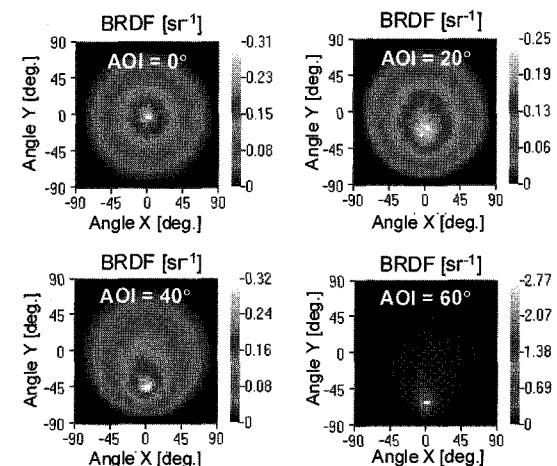


Fig. 2 Measured BRDF data of the reflection film (SY 64~70, SK) used for optical modeling and simulation of this paper

### 2.3 도광판 패턴

내부전반사(total internal reflection, TIR)를 통해도 광판 내부에 갇혀있는 광을 외부로 출사시키기 위해 도광판 패턴을 사용한다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 도광판 재질은 기계적 강도 및 광 투과율이 좋은 polymethylmethacrylate(PMMA)이다. 도광판 표면에 광산란 잉크를 점 형태로 도포하거나, 도광판 자체에 V-cut 형태의 홈을 형성하여 도광판 패턴을 제작할 수 있다.<sup>13</sup>

Fig. 3 은 PMMA 표면에 computerized numerical control(CNC) 가공을 통해 제작한 도광판 패턴의

실물 사진과 이를 바탕으로한 LightTools 모델의 단면을 보여주고 있다.

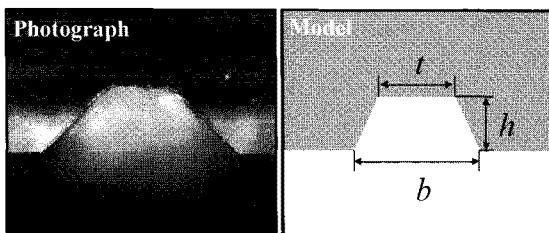


Fig. 3 Cross section of the LGP pattern ( $t = 0.42$  mm,  $h = 0.35$  mm,  $b = 1.10$  mm) used for optical modeling and simulation of this paper

도광판 설계는 원하는 휘도 혹은 조도 (illuminance) 분포를 달성하기 위한 도광판 패턴의 조밀도 분포(pattern density)를 구하는 과정이다. 일반적으로 광원으로부터 멀어질수록 도광판 내부의 광의 세기가 감소하므로 균일한 휘도 혹은 조도 분포를 얻기 위해서는 광원으로부터 멀어질수록 도광판 패턴의 조밀도를 증가시켜야 한다. LightTools 등 현재 널리 사용되고 있는 대부분의 조명광학설계 소프트웨어에서는 도광판 패턴 조밀도 분포의 최적화 기능을 제공하고 있다.<sup>14</sup>

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 LED 용 도광판

Fig. 4는 LED용 도광판 설계를 위한 LightTools 레이아웃을 보여주고 있다. 도광판의 크기는 600 mm × 500 mm × 10 mm이며, PMMA 재질을 사용하였다. LED는 도광판의 외곽 4면 모두에 7.5 mm 간격으로 배치하였으며, 장축 600 mm 양면에는 각각

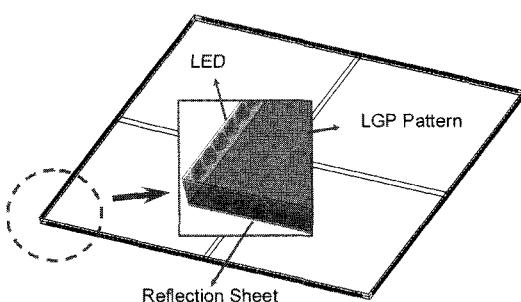


Fig. 4 LightTools simulation layout of an LGP for LED light source

74 개, 단축 500 mm 양면에는 각각 62 개의 LED를 배치하여 총 272 개의 LED를 사용하였다. Fig. 5는 LED에서 방출된 광이 내부전반사 과정을 통해 도광판을 따라 전파되어가는 모습과 도광판 패턴에 의해 외부로 출사되는 모습을 보여주고 있다.

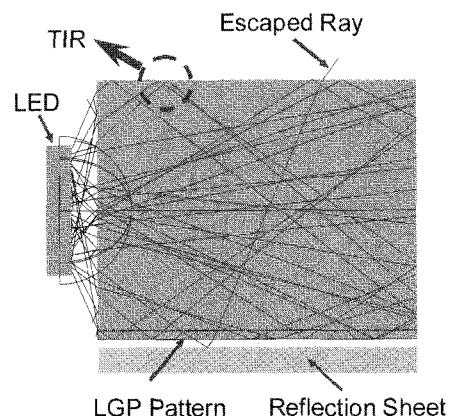


Fig. 5 Simulation example of an LGP for LED light source

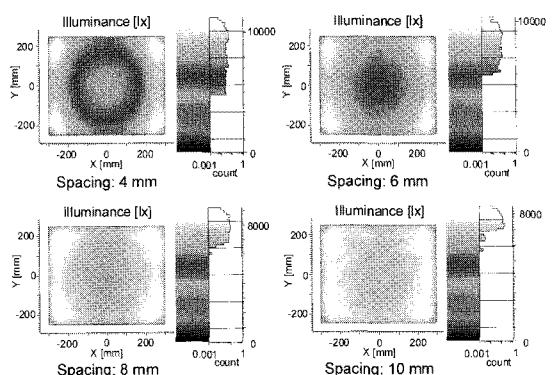


Fig. 6 Simulation results of LGPs (for LED light source) with equally placed LGP patterns

먼저 도광판 패턴을 가로, 세로 양방향 모두에 대해 등 간격(4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm)으로 배치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 조도분포에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 6 과 같다. 패턴간격이 넓어질수록 평균 조도는 감소하고 조도 균일도는 향상되고 있다. 그러나 항상 도광판 외곽부에 비해 중심부에서의 조도값이 작음을 알 수 있다. 따라서 균일한 조도분포를 얻기 위해서는 중심부의 도광판 패턴이 외곽부에 비해 조밀하게 배치되어야 함을 확인할 수 있다.

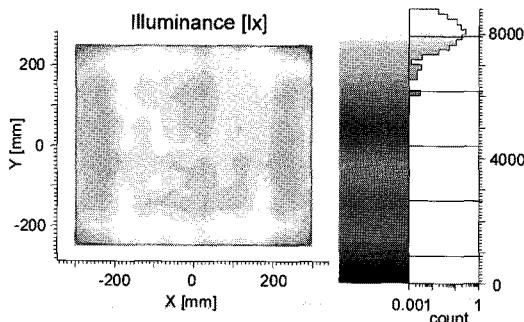


Fig. 7 Illuminance distribution of the optimized LGP for LED light source

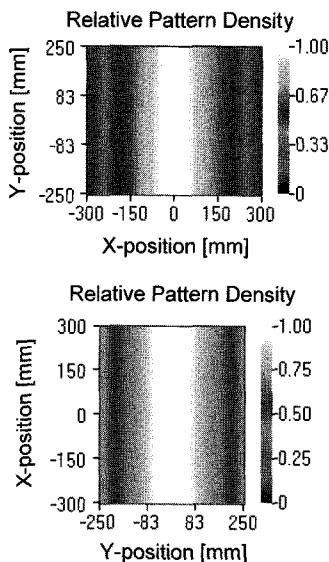


Fig. 8 Relative pattern density of the optimized LGP for LED light source

LightTools의 최적화 기능을 사용하여 균일한 조도분포를 얻기 위한 도광판 패턴의 설계를 수행하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같다. 이 때, 설계된 도광판 패턴의 조밀도 분포는 Fig. 8과 같다. 패턴 조밀도가 가장 높은 중심부에서의 패턴 간격은 가로방향 3.68 mm, 세로방향 3.66 mm이었다. 평균조도는 8033.4 lx이었으며, 조도분포의 표준편차와 평균조도의 비로 정의된 평균편차(average deviation)는 0.041이었다. 평균편차가 4% 수준으로 매우 높은 조도분포 균일도를 달성하였음을 확인할 수 있다. 약 8000 lx의 조도조건에서 미세조류의 성장율이 최대가 된다는 보고가 있었으며,<sup>15</sup> 본 논문의 설계 결과가 이 수준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 태양광용 도광판

먼저, 2011년 3월 21일, 6월 21일, 12월 21일에 광주광역시 지역에서의 태양 방위각(azimuth angle) 및 고도(elevation angle)에 대해 조사하였다.<sup>16</sup> Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 오후 1시경에 최대 고도(각 날짜별로 54.6°, 77.0°, 30.0°)에 도달한다. 3월 21일의 최대 고도 값인 54.6°를 기준으로 태양광용 도광판 설계를 진행하였다.

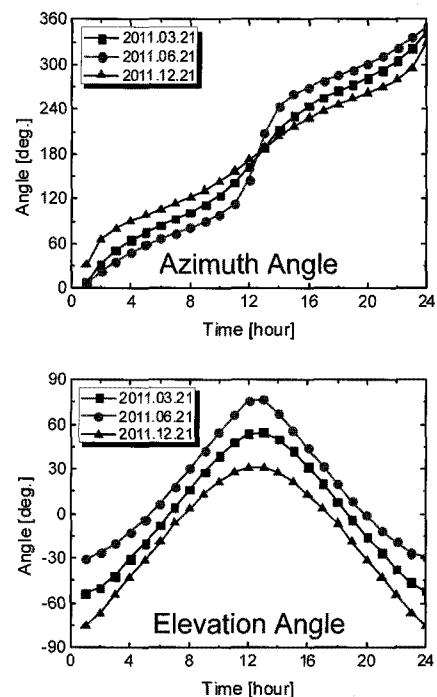


Fig. 9 Azimuth angle and elevation angle of the Sun on 3 different days in 2011 at Gwangju region

Fig. 10은 태양광과 LED 를 광원으로 함께 사용하는 하이브리드 광원용 도광판 설계를 위한 LightTools 레이아웃을 보여주고 있다. 도광판 윗쪽면(길이 500 mm, 폭 10 mm)에 태양광이 프레넬 렌즈를 통해 집속되고 있으며, 양 옆면(길이 600 mm, 폭 10 mm)에 LED 광원이 위치하고 있다. 태양광만을 사용한 도광판 설계를 수행하기 위해 양 옆면에 위치한 LED 를 제거해 주었다. 시뮬레이션에 사용된 프레넬 렌즈(PMMA 재질)는 500 mm × 200 mm 의 크기를 갖고 있으며, 초점거리는 200 mm 이었다. 고도 54.6°의 태양광을 수직으로 세워진 도광판의 윗쪽면에 집속할 수 있도록 배치하였다. Fig. 11은 집속된 태양광이 내부전반사를 통해

도광판을 따라 전파되어가는 모습과 집속된 태양 광이 도광판 패턴과 반사필름에 의해 외부로 출사되는 모습을 보여준다. 도광판 패턴을 단축 방향으로 만 등 간격(2 mm, 10 mm)으로 배치하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 12 와 같다. 태양광은 조도 80000 lx 인 평행광으로 가정하였다. 태양광의 집속면 근처에서 대부분의 광이 출사되고 있으며, 패턴간격이 큰 경우 태양광 집속면의 반대편으로 좀 더 깊숙이 광이 전파되고 있다. 균일한 조도분포를 얻기위해서는 도광판 패턴이 집속면의 반대편으로 갈수록 조밀하게 배치되어야 함을 알 수 있다.

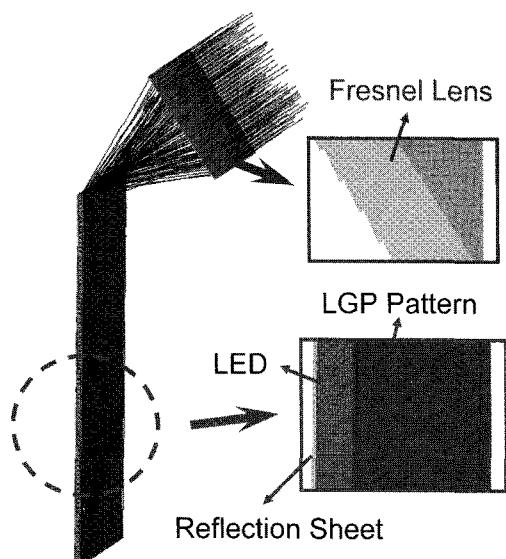


Fig. 10 LightTools simulation layout of an LGP for hybrid-solar-and-LED-lighting

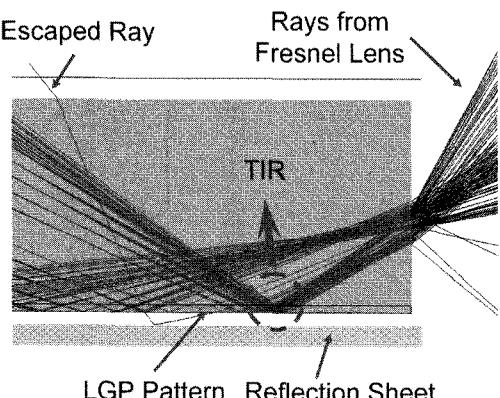


Fig. 11 Simulation example of an LGP for sunlight

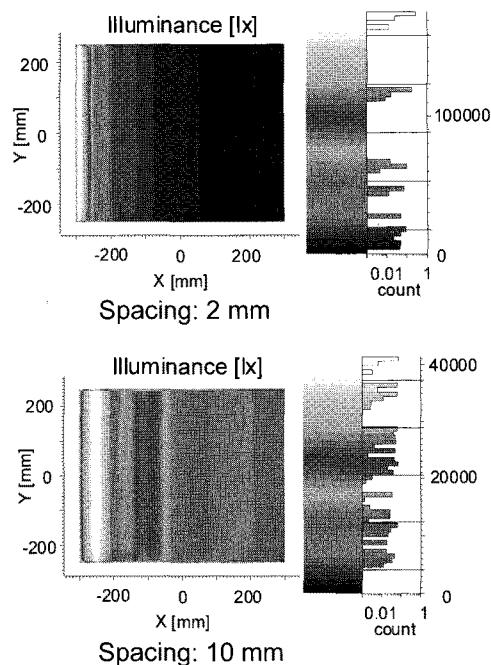


Fig. 12 Simulation results of LGPs (for sunlight) with equally placed LGP patterns

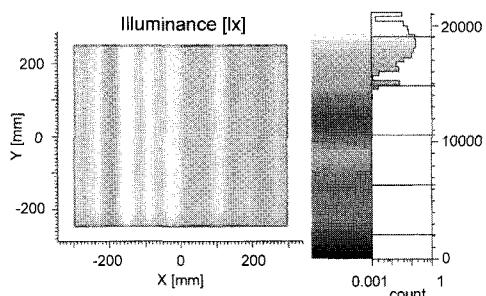


Fig. 13 Illuminance distribution of the optimized LGP for sunlight with the elevation angle of 54.6°

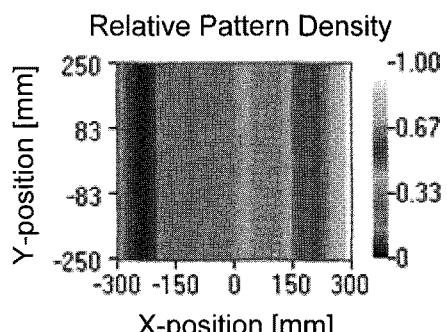


Fig. 14 Relative pattern density of the optimized LGP for sunlight with the elevation angle of 54.6°

Fig. 13 은 최적화 설계 수행 후 얻은 조도분포를 보여준다. 평균조도는 18359.0 lx 이었으며, 평균편차는 0.064 이었다. 도광판 패턴 방향으로의 줄무늬가 발생하였는데, 최적화 과정을 통해 이를 완벽히 없앨 수는 없었다. 이 현상은 도광판 패턴의 폭(1.1 mm)이 크기 때문에 발생한 것으로 좀 더 작은 도광판 패턴을 사용할 경우 개선이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 14 는 설계된 도광판 패턴의 조밀도 분포를 보여주고 있다. 예측한 바와 같이 도광판 패턴이 태양광 접속면의 반대편으로 갈수록 조밀하게 배치되어 있다. 패턴 조밀도가 가장 높은 부분에서의 패턴 간격은 3.17 mm 이었다.

고도 54.6°의 태양광에 대해 최적화된 도광판에 다른 고도(30.0°, 77.0°)의 태양광을 접속하여 조도분포에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 15((a) 30.0°, (b) 77.0°)과 같다. 고도 30.0°의 태양광을 접속한 경우 태양광 접속부 근처 60 mm 를 제외한 540 mm × 500 mm 영역에서 평균조도 15979.6 lx, 평균편차 0.18 을 얻을 수 있었다. 고도 77.0°의 경우에도 같은 영역에서 평균조도 19174.3 lx, 평균편차 0.13 을 얻었다. 태양광의 고도가 최적 설계에 사용된 고도보다 약  $\pm 20^\circ$  정도 변화하

였음에도 불구하고 평균조도는 최대 13% 정도의 변화(30.0°의 경우 13.0% 감소, 77.0°의 경우 4.5% 증가)만을 보였으며, 평균편차는 모두 20% 이내이었다. 추후 실험을 통한 검증이 이루어져야 하겠으나, 특정 태양 고도에 대해 최적화된 도광판을 사용하더라도 태양 고도의 변화에 둔감한 도광판 성능을 얻을 수 있음을 보이고 있는 긍정적인 결과로 판단된다.

### 3.3 하이브리드 광원용 도광판

태양광과 LED 를 광원으로 함께 사용하는 하이브리드 광원용 도광판에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 태양광을 위한 도광판 패턴으로는 3.2 절의 설계 결과를 사용하였고, LED를 위한 도광판 패턴으로는 3.1 절의 결과 중 장축 방향에 대한 설계 결과를 사용하였다. LED는 총 148 개가 사용되었으며, 태양광은 고도 54.6°, 조도 80000 lx 로 가정하였다. 하이브리드 광원을 사용한 경우의 조도분포에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 16 과 같다. 평균조도 20135.0 lx, 평균편차 0.087 을 얻을 수 있었다. 평균조도는 향상되었으며, 평균편차는 크게 나빠지지 않았다. 태양광이 약한 흐린 날이나 태양광을 얻을 수 없는 야간에도 광생물반응기 조명을 위해 하이브리드 광원을 사용한 도광판을 사용할 수 있다. LED 광원의 광량을 적극적으로 제어하여 태양광의 광량 변화와 무관하게 항상 일정한 조도를 유지할 수 있는 도광판 구현이 가능하다.

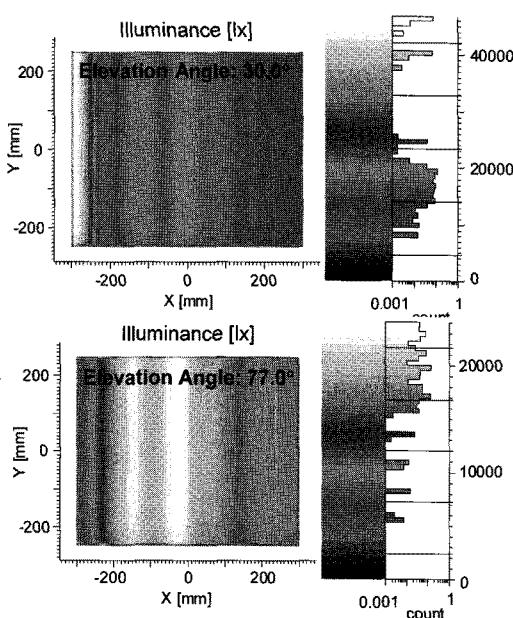


Fig. 15 Illuminance distributions of the LGP optimized for sunlight with the elevation angle of 54.6° and illuminated by sunlight with the elevation angles of 30.0° and 77.0°

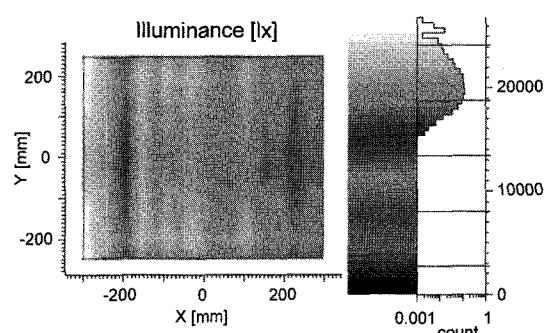


Fig. 16 Illuminance distribution of the LGP for a hybrid-solar-and-LED-lighting

### 4. 결론

본 논문에서는 광생물반응기 조명을 위한 LED 용, 태양광용, 하이브리드 광원용 도광판에 대한

광학설계 및 시뮬레이션 결과에 대해 보고하였다. 측정치에 근거하여 LED, 반사필름, 도광판 패턴 모델링을 각각 수행하였고, 이를 바탕으로 도광판 패턴 분포에 관한 광학설계 진행하였다. LED 용 도광판의 경우 최적화 광학설계를 통해 미세조류의 최대 성장을 달성 조도 조건으로 알려진 8000 lx 를 구현할 수 있었으며, 태양광용 도광판의 경우 태양의 고도변화에 비교적 둔감한 도광판 설계가 가능함을 보였다. LED 용 도광판과 태양광용 도광판에 대한 설계결과를 사용하여 하이브리드 광원 용 도광판을 모델링해 보았고 하이브리드 광원용 도광판 구현 및 활용 가능성에 대해 알아보았다. 본 논문의 연구 결과에 기초하여 각 광원별 도광판을 제작하고 성능평가 및 개선에 대한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20103020090020)

## 참고문헌

- Kunjapur, A. M. and Eldridge, R. B., "Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 49, No. 8, pp. 3516-3526, 2010.
- 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, pp. 145-150, 2008.
- Posten, C., "Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae," *Eng. Life Sci.*, Vol. 9, No. 3, pp. 165-177, 2009.
- Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X.-R. and Liu, C.-Z., "Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities," *Eng. Life Sci.*, Vol. 9, No. 3, pp. 178-189, 2009.
- Sierra, E., Acien, F. G., Fernandez, J. M., Garcia, J. L., Gonzalez, C. and Molina, E., "Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, No. 1-3, pp. 136-147, 2008.
- Janssen, M., Tramper, J., Mur, L. R. and Wiiffels, R. H., "Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light Regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-Up, and Future Prospects," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 81, No. 2, pp. 193-210, 2003.
- Ogbonna, J. C. and Tanaka, H., "Light requirement and photosynthetic cell cultivation - Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors," *Journal of Applied Phycology*, Vol. 12, No. 3-5, pp. 207-218, 2000.
- Gordon, J. M., "Tailoring optical systems to optimized photobioreactors," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1175-1184, 2002.
- Ono, E. and Cuello, J. L., "Design parameters of solar concentrating systems for CO<sub>2</sub>-mitigating algal photobioreactors," *Energy*, Vol. 29, No. 9-10, pp. 1651-1657, 2004.
- Zijffers, J.-W. F., Janssen, M., Tramper, J. and Wiiffels, R. H., "Design Process of an Area-Efficient Photobioreactor," *Mar. Biotechnol.*, Vol. 10, No. 4, pp. 404-415, 2008.
- Optical Research Associates, <http://www.opticalres.com>
- Optical Research Associates, "LightTools Core Module User's Guide," pp. 354-398, 2010.
- Lim, S., "Liquid Crystal Display Backlight," Dankook University Press, pp. 67-84, 2005.
- Optical Research Associates, "LightTools Optimization Module User's Guide," pp. 129-174, 2010.
- Won, S. W., "Studies on the growth of the Five Species of Microalgae and that of Rotifers, Brachionus Pilicatilis," Master Degree Thesis, Fishery Biology, Cheju University, 1992.
- Korea Astronomy and Space Science Institute, <http://www.kasi.re.kr>