

◆ 특집 ◆ 바이오매스 대량생산을 위한 평판형 광생물반응기 개발

태양광과 선형 프레넬 렌즈를 이용한 광생물반응기용 도광판 설계 및 제작

Design and Fabrication of Light-guiding Plate for a Photobioreactor by Using Sunlight and Linear Fresnel Lens

김훈¹, 신성선¹, 황민영¹, 임현철¹, 김광호², 김종태², 정상화³, 박종락^{1,✉}
Hun Kim¹, Seong Seon Shin¹, Min Yong Hwang¹, Hyon Chol Lim¹, Gwang Ho Kim², Jong Tye Kim²,
Sang Hwa Jeong³, and Jong Rak Park^{1,✉}

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

² 조선대학교 바이오리파이너리연구센터 (Biorefinery Research Center, Chosun Univ.)

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

✉ Corresponding author: ejrpark@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7036

Manuscript received: 2012.12.13 / Accepted: 2012.12.19

We present results of the optical design and fabrication of a light-guiding plate (LGP) for a photobioreactor by using sunlight and a linear Fresnel lens. LGP patterns were designed by optical simulations with an illumination design tool, LightTools, and fabricated by using a computerized numerical control machine. Optical characteristics of average deviation of illuminance distribution and light throughput efficiency were measured and compared with simulation results.

Key Words: Light-guiding Plate (도광판), Photobioreactor (광생물반응기), Sunlight (태양광), Linear Fresnel Lens (선형 프레넬 렌즈), Illumination Design (조명설계)

1. 서론

화석연료의 사용과 고갈에 따른 범지구적 온난화와 에너지 문제를 해결하기 위해 신재생 에너지 개발과 에너지 효율 향상에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행 중에 있다.^{1,4} 신재생 에너지 분야 중 광합성을 통한 이산화탄소 고정과 바이오연료 추출이 가능한 미세조류에 대한 관심이 최근 급속히 증가하고 있다.⁵ 미세조류의 대량 배양을 위하여 개방형 및 밀폐형의 다양한 광생물 생산 시스템이 개발되고 있으며,⁶⁻¹⁰ 이 중 생산성과 투입 에너지 관점에서 큰 장점을 지니고 있는 평판형 광생물반응기가 큰 주목을 받고 있다.^{1,8}

본 논문에서는 평판형 광생물반응기의 조명시스템으로 사용될 수 있는 태양광과 선형 프레넬 렌즈를 이용한 태양광용 도광판(LGP, light-guiding plate)의 설계 및 제작 결과에 대해 보고한다. Optical Research Associates 사의 조명설계 소프트웨어인 LightTools 를 사용하여 광학설계를 수행하였다.¹¹ 제 2 장에서는 도광판 설계에 사용한 반사필름 및 도광판 패턴에 대해 소개하였고, 태양광용 도광판의 설계 과정 및 설계 결과에 대해 서술하였다. 제 3 장에서는 제작된 도광판에 대하여 측정된 조도 분포에 대한 평균 편차 및 광 효율 결과에 대해 기술하였고, 이를 광학 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 마지막 제 4 장에서는 본 논문의 연구결과

를 종합하여 정리하였다.

2. 도광판 설계 과정 및 결과

2.1 도광판 모델링

본 논문에서는 태양광, SK 사의 반사시트(모델명: SY 64~70), CNC(computerized numerical control) 가공을 통해 제작한 V-cut 패턴을 각각 도광판을 위한 광원, 반사필름, 도광판 패턴으로 사용하였다. 태양광은 평행광으로 모델링하였고, 도광판 제작에 사용된 반사필름의 양방향 반사율 분포함수 BRDF(bidirectional reflective distribution function) 데이터를 측정하고 LightTools 모델의 표면 특성(Surface Finishes)에 입력하여 반사필름을 모델링하였다.¹²

CNC 가공을 통해 PMMA(Poly(methyl methacrylate)) 도광판 밑면에 제작한 V-cut 형태의 도광판 패턴은 산란체로 가정할 수 있으며, 본 논문과 동일한 방식(60° 다이아몬드 컷터 사용)으로 제작한 도광판 패턴의 경우 산란체의 폭이 1.8 mm, 반사율이 50%인 램버시안 산란체(Lambertian scatterer)로 모델링할 수 있음이 알려져 있다.¹³ 본 논문에서는 참고문헌 13의 도광판 패턴에 대한 모델링 파라미터를 차용하여 도광판 설계 및 광학 시뮬레이션에 사용하였다.

2.2 도광판 설계 결과

Fig. 1 은 도광판 설계 및 광학 시뮬레이션에 사용된 LightTools 레이아웃을 보여주고 있다. 선형 프레넬 렌즈는 PMMA 재질을 갖고 있으며, 크기와 초점거리가 각각 200 mm × 500 mm × 2 mm, 200 mm

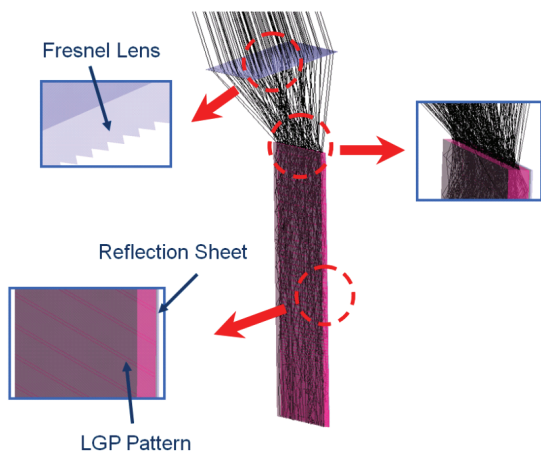


Fig. 1 LightTools simulation layout

이었다. PMMA 재질 도광판은 500 mm × 600 mm × 10 mm 의 크기를 갖고 있으며, 길이가 500 mm 인 위쪽 가로 측면에 선형 프레넬 렌즈에 의해 선 형태로 집속된 태양광이 입사하게 된다. 도광판 밑면에 도광판 패턴이 형성되어 있으며, 그 아래쪽에 반사필름이 부착되어 있다.

도광판 설계는 원하는 조도 균일도를 달성하기 위해 도광판 패턴의 위치를 결정하는 과정이다. 도광판 패턴의 위치 지정을 위해 다음과 같이 정의된 인접 패턴 사이의 간격 PS (pattern spacing)에 대한 표현식을 사용하였다.¹³

$$PS = p_1 - p_2 \exp(-2x^2 / w^2) \quad (1)$$

위 식에서 x 와 w 는 패턴을 배열할 축 상의 좌표와 가우시안 함수의 폭을 각각 의미하며, p_1 과 p_2 는 최대 및 최소 패턴 간격에 의해 결정되는 파라미터이다. 본 논문에서는 최대 패턴 간격을 20 mm, 가우시안 함수 폭을 600 mm 로 고정하고 최소 패턴 간격만을 변화시켜 최적의 조도 균일도를 갖는 도광판을 설계하였다. 조도 균일도를 대표하는 물리량으로는 조도 분포의 표준 편차값과 평균 조도값의 비율로 정의되는 평균 편차(Average Deviation)를 사용하였다.

Fig. 2 는 최소 패턴 간격 변화에 따른 조도 분포의 평균 편차에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이 때, 태양광의 고도(elevation angle)는 54.6°(광주지역의 춘분기준)이었다.¹⁴ 최소 패턴 간격이 4 mm 일 때, 평균 편차가 최소임을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 최대 패턴 간격 20 mm,

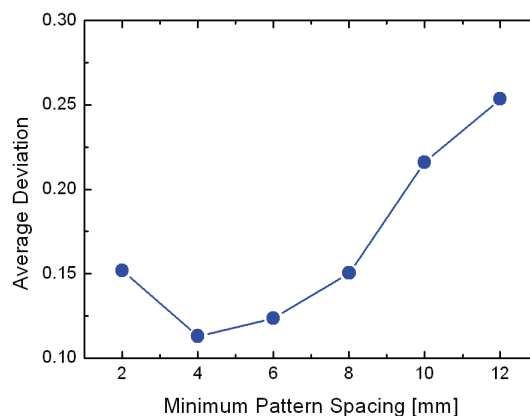


Fig. 2 Average deviation of illuminance distribution as a function of minimum pattern spacing

최소 패턴 간격 4 mm, 가우시안 함수 폭 600 mm 인 도광판 패턴을 제작하였다. 이 도광판 패턴에 대한 Auto-CAD 도면은 Fig. 3 과 같다.

3. 도광판 제작 및 특성 측정

3.1 도광판 제작

선형 프레넬 렌즈는 Nihon Tokushu Kogaku Jushi 사의 제품(모델명: LF200-B)을 사용하였는데, 시뮬레이션에 사용한 사양과 같이 PMMA 재질을 갖고 있으며, 크기는 200 mm × 500 mm × 2 mm 이었다. 또한, 초점거리와 피치(pitch)는 각각 200 mm 와 0.3 mm 이었다. 도광판 패턴은 앞서 설명한 바와 같이 60° 다이아몬드 컷터를 사용하여 CNC 가공을 통해 제작하였다. 선형 프레넬 렌즈와 도광판을 지지하기 위한 간이형 프레임을 제작하였는데, 선형 프레넬 렌즈의 집광을 용이하게 하기 위해 렌즈의 각도와 위치 조정시 3 개의 자유도를 갖도록 하였다. Fig. 4 는 제작된 도광판의 사진을 보여주고 있다.

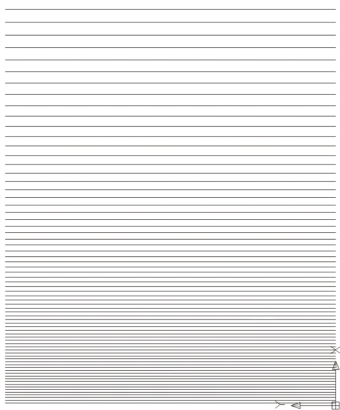


Fig. 3 Auto-CAD drawing of the designed LGP patterns

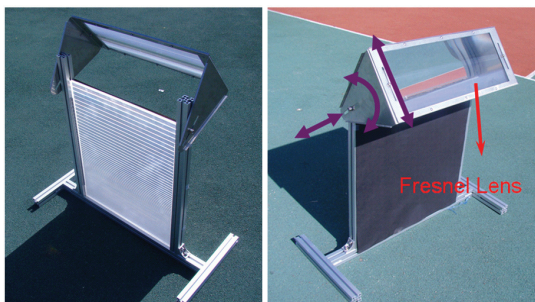


Fig. 4 Photographs of the fabricated LGP for sunlight

3.2 특성 측정 및 시뮬레이션 결과와의 비교

제작된 도광판의 광학적 특성을 측정하였다. Fig. 5 는 태양 고도가 72° 일 때 측정된 조도 분포를 보여주고 있다. 측정된 평균 조도, 평균 PFD (photon flux density), 평균 편차는 각각 19,680 lx, 346 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 0.10 이었다. 측정 시 태양 직사광의 조도는 110,000 lx 이었는데, 도광판으로부터 출사된 총 광속과 선형 프레넬 렌즈에 입사된 태양광 총 광속의 비로 정의한 광 효율(light throughput efficiency)은 54%이었다.

태양 고도 72° 이외에 45°, 49°, 53°, 64° 일 때 조도 분포를 추가적으로 측정하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. Fig. 6 은 태양 고도에 따른

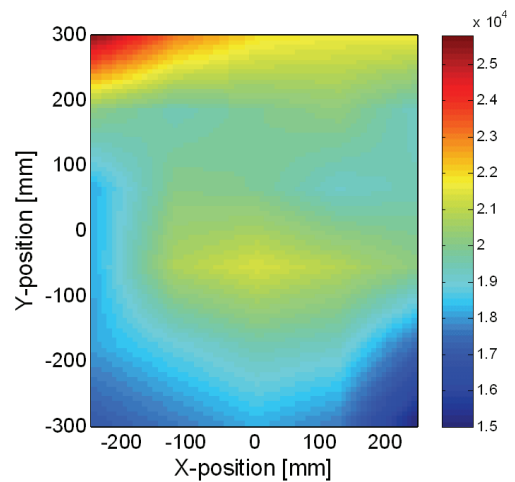


Fig. 5 Measured illuminance (units: lx) distribution of the fabricated LGP for sunlight

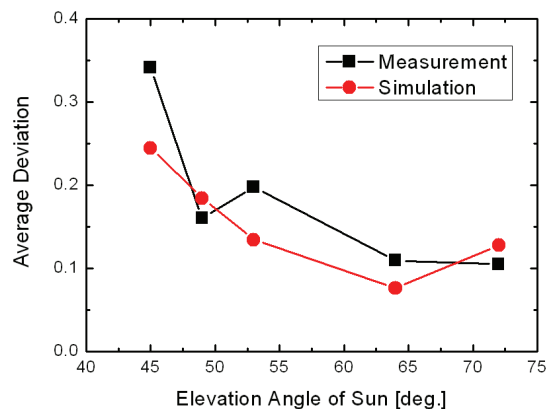


Fig. 6 Measured and simulated results of average deviation as a function of the elevation angle of Sun

조도 분포의 평균 편차 변화에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 측정과 시뮬레이션 결과가 거의 동일한 경향을 보여주고 있는데, 태양 고도가 감소함에 따라 조도 분포의 평균 편차가 대체적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 태양 고도에 따른 광 효율의 변화에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 태양 고도가 감소함에 따라 광 효율이 서서히 증가하다가 태양 고도 49° 이후에는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 동일한 경향을 보여주고 있으나, 태양 고도가 감소함에 따라 시뮬레이션 결과 보다 측정된 광 효율이 더 작음을 알 수 있다. 시뮬레이션 수행 시 도광판과 도광판 패턴에서의 광 흡수는 고려하지 않았는데, 태양 고도가 감소함에 따라 전반사에 의한 도광판 내부에서의 광경로가 길어지게 되고 광 흡수 또한 증가하여 광 효율이 저하되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광과 선형프레넬 렌즈를 이용한 광생물반응기용 도광판에 대한 광학설계, 제작 및 특성 측정 결과에 대해 보고하였다. 최대 패턴 간격, 가우시안 함수 폭을 고정하고 최소 패턴 간격을 변화시켜 최적의 조도 균일도를 갖는 도광판을 설계 및 제작하였는데, 태양 고도 49° 이상에서 조도 분포의 평균 편차가 약 0.2 이하이었으며, 태양 고도 45°~72°에 대해 54% 이상의 광

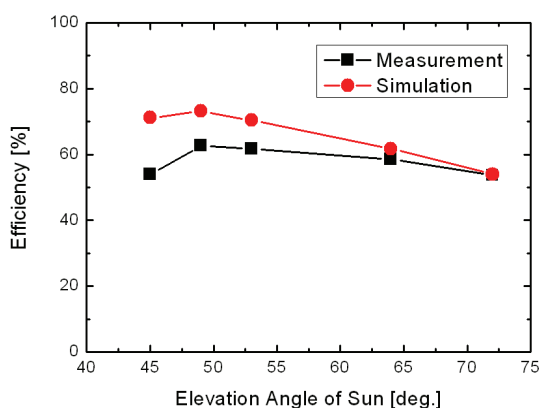


Fig. 7 Measured and simulated results of light throughput efficiency as a function of the elevation angle of Sun

효율을 갖는 것으로 측정되었다. 향후 최대 패턴 간격, 최소 패턴 간격, 가우시안 함수 폭을 모두 변화시켜 보다 최적화된 설계를 수행한다면 더욱 우수한 광학 특성을 갖는 도광판 제작이 가능할 것으로 판단된다.

태양 고도 변화에 따른 조도 분포의 평균 편차와 광 효율에 대한 광학 시뮬레이션을 수행하여 측정 결과와 비교하였다. 조도 분포의 평균 편차에 대한 두 결과는 거의 일치하고 있었고, 광 효율에 대한 두 결과는 동일한 경향을 보였으나, 태양 고도가 감소함에 따라 두 결과의 차이가 증가함을 알 수 있었다. 향후 시뮬레이션 수행 시 도광판과 도광판 패턴에서의 광 흡수에 대한 추가적 고려가 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 광학 시뮬레이션의 정확도가 더욱 향상될 것으로 예측된다.

후 기

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

참고문헌

- Ahn, D.-G., Cho, C.-G., Jeong, S.-H., and Lee, D.-G., "Design of Photobioreactor for Mass Production of Microalgae," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 140-153, 2011.
- Kim, J., Ahn, D.-G., Park, J. R., Park, J. W., and Jeong, S.-H., "Recent Trends of the Development of Photobioreactors to Cultivate Microalgae," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 125-132, 2011.
- 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.
- Lee, G.-B., Ko, M.-J., and Ku, T.-J., "Analysis of energy efficiency in PCB manufacturing process," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 7, pp. 1215-1220, 2012.
- Shin, H.-J., Park, J.-H., Jung, W.-K., Cho, H., and Kim, S.-W., "Development of Biorefinery Process Using Microalgae," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 154-167, 2011.

6. 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, pp. 207-218, 2000.
7. 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.
8. 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, pp. 136-147, 2008.
9. 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.
10. Posten, C., "Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae," *Eng. Life Sci.*, Vol. 9, No. 3, pp. 165-177, 2009.
11. Optical Research Associates, <http://www.opticalres.com>
12. Park, G. C., Kim, H., Kim, J., Park, J.-W., Jeong, S.-H., and Park, J. R., "Design of Light Guide Plate for Photobioreactor," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 2, pp. 133-139, 2011.
13. Park, G. C., Kim, H., Shin, S. S., Shin, H. K., Kim, J., Jeong, S.-H., and Park, J. R., "Design and Fabrication of Light Guiding Plate for Photobioreactor," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 23, No. 2, pp. 55-63, 2012.
14. Korea Astronomy and Space Science Institute, <http://www.kasi.re.kr>