

# 수력학을 고려한 평판형 광생물 반응기의 스케일업에 관한 연구

김광호\*, 이동운\*\*, 정상화\*\*,#

\*프로텍코리아(주), \*\*조선대학교 기계공학과

## Scale-up of Flat Panel Photobioreactor considering Hydrodynamics

Gwang-Ho Kim\*, Dong-Woon Lee\*\*, Sang-Hwa Jeong\*\*,#

\*PROTECH KOREA Co. LTD., \*\*Department of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.,

(Received 19 December 2017; received in revised form 29 January 2018; accepted 30 January 2018)

### ABSTRACT

Due to the growing concerns of energy resource depletion and environmental destruction, the mass production of microalgae has been studied. The scale-up of a photobioreactor (PBR) is required for the mass production of biomass. In this paper, the geometric parameters and oxygen transfer rate (OTR) are considered, to scale up a flat panel photobioreactor (FP PBR). The PBR is designed using the goal-driven optimization (GDO) method to accomplish the scale-up. The local sensitivity of each output parameter with respect to the input parameter is analyzed through the design of experiment (DOE), and the design candidates are evaluated with the screening sampling method. The volumetric mass transfer coefficient is measured by the dynamic method.

**Key Words :** Flat Panel Photobioreactor(FP PBR, 평판형 광생물 반응기), Scale-up(스케일업), Goal Driven Optimization(GDO, 귀납적 최적화), Oxygen Transfer Rate(OTR, 산소 전달 속도), Central Composite Design(CCD, 중심 합성 계획법)

### 1. 서 론

화석 연료는 글로벌 오일 고갈과 온실가스 방출로 인해 지속 불가능한 에너지원이다. 지속 가능성, 운영 효율, 환경 영향의 최소화, 사회경제적인 고려는 신재생에너지 관리에 중요한 요소이다<sup>[1]</sup>.

미세조류는 바이오 연료, 환경정화, 그리고 다양한 응용 산업을 위한 합리적인 대체 자원으로 부각

되고 있다. 따라서 미세조류를 이용한 바이오매스 대량 생산에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 하지만 상업적 규모의 바이오매스 생산은 아직 초기 단계에 머물러 있다<sup>[2-3]</sup>. 반응기의 규모 확장을 위해서는 시스템의 물리적 특성, 생화학적 특성, 운영 조건, 반응기의 기하학적 설계 요소에 대한 고려가 필요하다<sup>[4]</sup>. 반응기의 설계는 공정 속도에 관한 지식에 기반하고, 반응기의 수율 범위는 질량과 에너지 보존으로부터 유도되는 기본 원칙에 의해 제한된다.

빛은 미세조류의 광합성 속도에 영향을 주는 가

# Corresponding Author : shjeong@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7178

장 중요한 요소이다. 빛은 세포에 의해 흡수되거나 흩어지기 때문에 미세조류 농도가 높은 경우에는 깊이 침투하지 못하고, 미세조류에 균질한 영향을 미치지 못하게 된다<sup>5-6)</sup>. 따라서, 미세조류가 가능한 많은 빛을 흡수할 수 있도록 광생물 반응기의 체적 대 표면적비를 크게 설계하여야 한다. 또한, 반응기의 폭을 넓히거나 높이를 키우는 것이 광경로의 길이를 늘리는 것보다 조금 더 효과적이다<sup>7)</sup>. 평판형 광생물 반응기는 높은 체적대 표면적비를 갖으며, 최소의 광경로를 갖는 직육면체 밀폐형 투광 배양기이다<sup>8-9)</sup>. 본 연구에서는 평판형 광생물 반응기의 기하학적 설계 요소와 물리적 특성에 대해 연구하였다.

세포의 상호차광(mutual shading)에 의해 미세조류의 조사되는 빛의 분포가 차이를 보이며, 특히 높은 세포 농도에서 두드러진다. 따라서 미세조류에 균일한 빛을 조사하기 위해서는 반응기 내에 난류를 생성하여 세포가 밝은 영역과 어두운 영역을 반복적으로 순환되도록 하여야 한다<sup>10-12)</sup>. 물질전달은 반응기의 형태, 생체 촉매, 운전 변수의 선택에 중요한 역할을 한다. 총괄 물질 전달계수를 구하는 것은 반응기의 설계, 운영, 크기 확장을 위한 중요한 요소이다. 하지만 다른 현상들이 동시에 발생하기 때문에 물질전달계수를 측정하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 수력학을 고려하여 기하학적 요소와 물리적 특성에 기초하여 200L 평판형 광생물 반응기를 설계하였다. 귀납적 최적화 기법(goal driven optimization)을 사용하여 기하학적 파라미터를 최적화하였다. 배양기 패널의 두께, 보강재의 두께, 보강재의 높이를 설계 변수로 설정하고, 설계 후보군 도출과 민감도 분석을 통해 변수의 영향력을 평가하였다. 반응기의 누수를 방지하기 위한 적절한 볼트의 수를 계산하였다. 또한, 반응기의 크기 확장에 따른 적합한 통기량이 유지될 수 있도록 총괄 물질 전달 계수를 측정하였다.

## 2. 스케일업

### 2.1 기초 설계

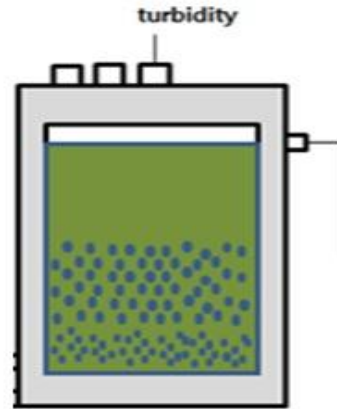


Fig. 1 Schematic Diagram of FP PBR

높은 체적대 표면적비(200)를 갖으며 70% 이상의 배양 균일도를 갖는 200L 평판형 광생물 반응기를 설계하였다<sup>13-14)</sup>. 투명한 사각 패널은 광합계II와 관련이 있는 패널을 사용하였다<sup>15)</sup>. Fig. 1은 평판형 광생물반응기의 개략도를 나타낸 것이다. 외형 크기가 확장됨에 따라 배양기 내의 배양액은 패널의 배불림을 야기한다. 패널의 배불림은 장기적으로 배양기의 구조적 내구성을 저하시키고, 배양기의 밀폐력이 약해져 누수가 발생할 수 있다. 또한, 누수로 인해 미세조류의 오염을 야기할 수도 있다. 따라서, 배양기 크기를 확장하기 위해서는 정수압에 의한 배양기의 영향에 대해 고려되어야 한다. 정수압에 의한 배불림 현상을 줄이기 위해서 Fig. 2과 같이 최대 굽힘 모멘트가 발생하는 위치에 보강재를 설치하였다.

보강재의 개수에 따른 최대 응력, 최대 변형, 안전 계수를 평가하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 보강재의 변형량과 응력을 나타내었고, Fig. 3(b)는 패널의 변형량과 응력을 나타내었다. 보강재가 없는 경우에는 패널의 최대 변형과 최대 등가 응력이 각각 327mm와 197MPa로 예측되었다. 보강재를 추가할수록 최대 변형과 등가 응력은 감소하였고, 보강재와 패널의 최종 변형은 2mm와 4.8mm까지 감소하였고, 이 때 안전계수는 2.9로 예측되었다. 예측된 결과들로부터 보강재의 위치와 개수를 결정하였다.

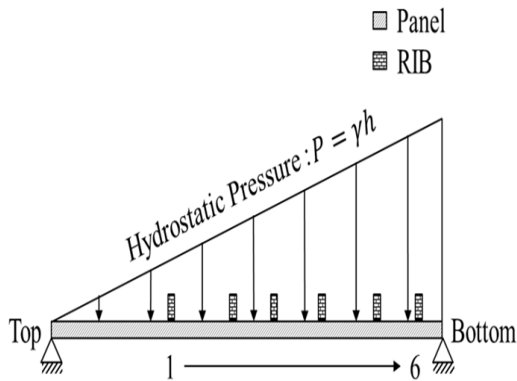


Fig. 2 Initial and boundary conditions for structural analysis of FP PBR

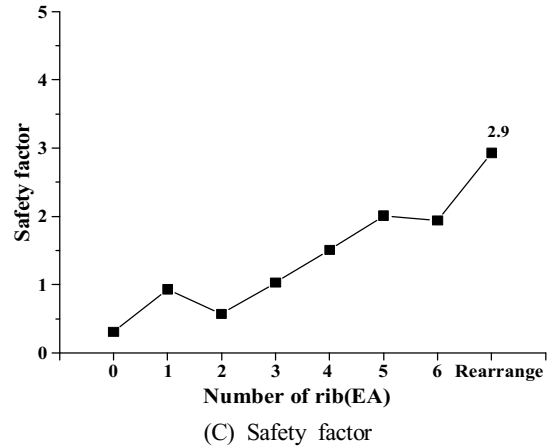
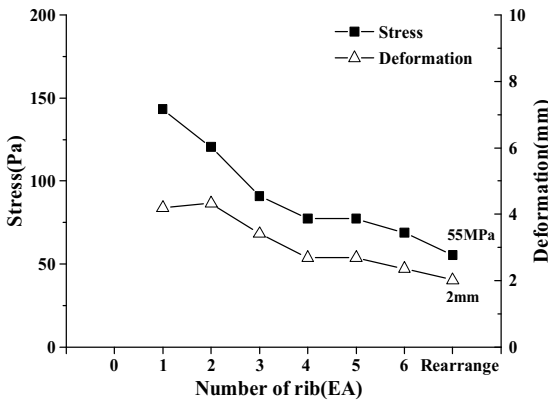
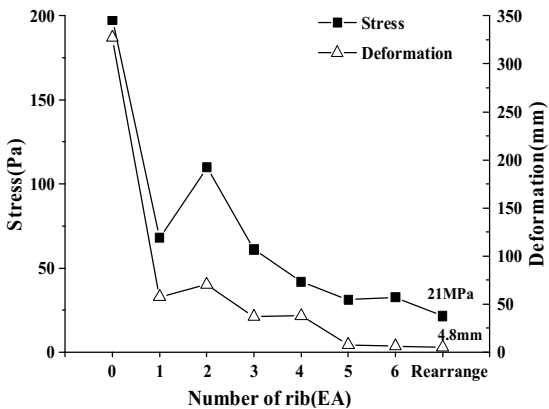


Fig. 3 Structural analysis of FP PBR so as to prevent the ballooning caused by hydrostatic pressure



(a) Stress and deformation of rib



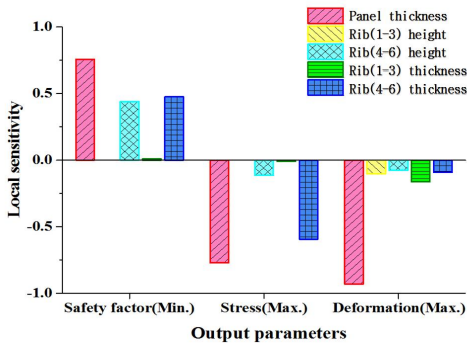
(b) Stress and deformation of panel

## 2.2 설계 최적화

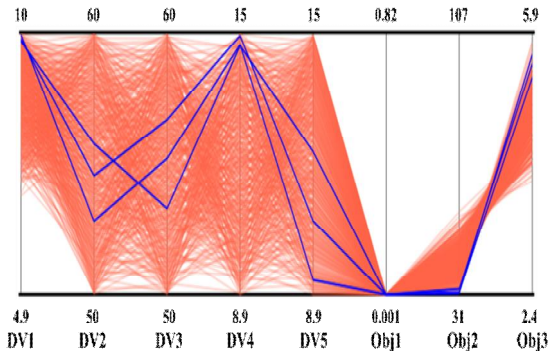
보강재의 위치와 개수를 결정하고, 보강재의 두께와 크기, 패널의 두께를 설계하기 위해서 귀납적 최적화 기법(GDO)을 적용하여 평가하였다. 이를 위해서 초기 모델을 설계하고, 파라미터를 정의한 후 반응표면을 분석함으로써 최적의 해를 도출한다. 반응표면은 여러 개의 설계 변수가 목적 함수에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 해석 영역은 입력 변수의 각각에 대해 최소값 및 최대값에 의해 정의되고, 해석에 필요한 추출점(design point)은 중심합성법(central composite design)에 의해 생성된다<sup>[16-17]</sup>. 중심합성법에 의해 생성된 추출점은 27개이다. 이에 따른, 평판형 광생물반응기의 설계 파라미터의 입력 조건을 Table 1에 나타내었다. 설계 변수는 패널의 두께, 보강재의 두께, 보강재의 높이로 선정하였다. 목적 함수는 변형량, 등가 응력, 그리고 안전 계수를 검토하였다. 중심합성법에 의해 생성된 실험점에 대해 반응표면을 산출하고, 민감도(sensitivity)를 이용하여 입력 파라미터에 대한 출력 파라미터의 상대적 영향을 분석하였다. 패널의 두께와 보강재에 따른 반응기의 구조 안정성에 대한 민감도 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 변수의 민감도가 1에 가까울수록 목적 함수에 큰 영향을 미친다.

**Table 1 Input conditions of goal driven optimization for FP PBR design**

Parts		Panel	Rib
Input variables	Thickness	5 ~ 20mm	9 ~ 22mm
	Height	-	40 ~ 80mm
Output variables	Max. Deformation	≤ 2mm	
	Max. Stress	Minimize	
	Min. SF	≥ 2	
DOE	Type	Central Composite Design	
	Design points	27 EA	



**Fig. 4 Local sensitivity of each output parameter with respect to the input parameters**



**Fig. 5 Sample chart of design candidates by screening sampling method**

안전계수는 패널의 두께와 하부 보강재의 영향을 많이 받았다. 패널의 두께가 크고 보강재의 두께가 클수록 등가응력과 변형량을 감소시키는 경향을 나타내었다. 등가응력은 패널의 두께와 리브의 두께가 유의한 영향을 주었으나, 변형량은 패널의 두께가 다른 파라미터에 비해 많은 영향을 주었다. 보강재는 상부 보강재에 비해 하부 보강재가 구조 안정에 좀 더 큰 영향을 주었으며, 보강재의 높이보다는 두께가 좀 더 주요한 파라미터임을 확인할 수 있다.

많은 경우에 최적화 문제는 유일한 해가 아닌 몇 가지 후보군을 갖는다. 반응표면을 이용하여 생성한 10,000개의 표본 설계안 중에서 귀납적 최적화 방법을 이용하여 최적설계안을 추출하였다. Hammersley 알고리즘에 기반한 스크리닝 추출법<sup>[18]</sup>을 통해 세 개의 후보군을 추출하고, Fig. 5에 나타내었다.

여기에서, DV1은 패널 두께, DV2,3는 보강재 높이, DV4,5는 보강재 두께, Obj1,2,3는 변형, 응력, 안전계수이다. 최적 설계값은 오차범위를 포함하고 있기 때문에 설계에 적용 가능한 합리적 값을 선정하여 반응기를 설계하였다.

### 2.3 전단 볼트 체결

평판형 광생물반응기의 조립을 위해 요구되는 볼트의 수를 식 (1)을 통해 구하였다<sup>[19]</sup>.

$$N = \frac{W}{YA_s} \times S.F. \quad (1)$$

여기서, N은 필요한 볼트의 수, Y는 항복응력,  $A_s$ 는 응력단면적, W는 총 설계 하중, S.F.은 안전 계수이다. Fig. 6는 볼트 체결 조건을 구현하여 ANSYS를 이용한 구조해석을 통해 예측된 광생물 반응기의 변형량과 응력 분포를 나타내었다. 응력은 반응기의 하단 프레임과 보강재 체결 위치에 집중되었다. 이 때 최대 볼트 장력은  $2.0 \times 10^{-2}$  mm이다. 나사의 허용 볼트 장력이  $7.4 \times 10^{-2}$  mm이기 때문에 반응기를 체결하기에 충분하다.

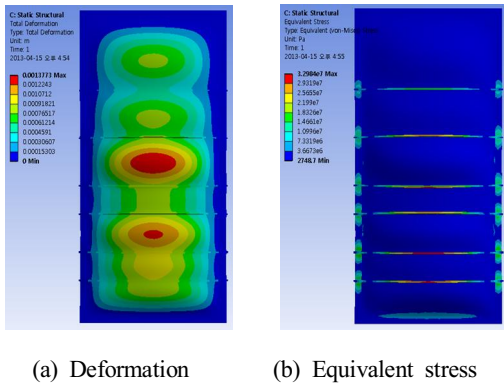
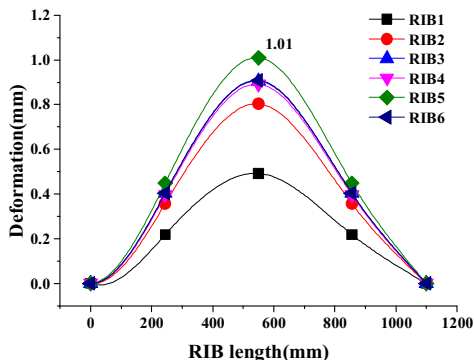
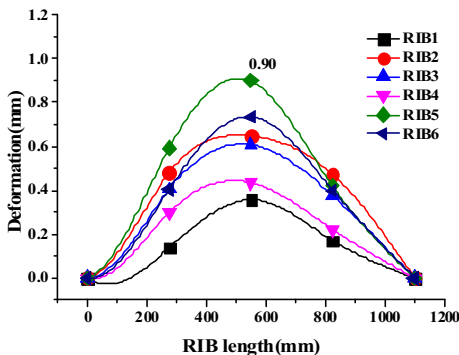


Fig. 6 Deformation and stress distribution of 200L FP PBR



(a) Simulation results



(b) Experimental results

Fig. 7 Deformation of ribs

## 2.4 반응기 패널의 변형량 측정

광생물반응기의 크기를 확장하면서 밀폐 구조를 유지하기 위해 패널의 배플림 변형을 최소화할 수 있도록 설계하였다. 따라서 보강재 각각에 대해 변형량을 측정하여 구조해석 결과와 비교하였다. 보강재의 위치를 구분하기 위해서 반응기의 상부에서부터 순차적으로 번호를 부여하였다. 구조해석을 통해 예측된 보강재의 변형량을 Fig. 7(a)에 나타내었고, *chlorella* sp.를 100일 동안 배양하고 보강재의 변형을 반복적으로 측정한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 예측된 결과와 실험결과 모두 5번째 보강재에서 최대 변형이 발생하였다. 보강재의 변형량은 해석결과 1.0mm로 예측되었고, 측정결과 0.9mm로 유사한 결과를 관측할 수 있었다. 구조해석 결과와 측정 결과의 미소한 차이는 방해판에 의해 발생하는 반응기 내부의 난류 영향으로 판단된다.

## 3. 스케일업을 위한 물리적 특성

### 3.1 총괄 물질 전달 계수

반응기에서 총괄 물질 전달 계수(overall mass transfer coefficient)는 통기(aeration) 효율을 확립하고 작동 변수가 산소 공급에 미치는 영향을 정량화하기 위해 필요하다. 잘 혼합된 액상의 용존 산소에 대한 물질 수지(mass balance)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. OTR(oxygen transfer rate)은 기체에서 액체로의 산소 전달 속도를 나타내며, OUR(oxygen uptake rate)은 미생물에 의한 산소섭취속도를 나타낸다.  $K_L a$ 는 용존 산소 농도의 측정 프로파일로부터 결정된다. 정상상태에서, 산소 전달 속도는 산소 소비 속도와 동일하다<sup>4,20</sup>. OUR은 생성물  $q_{O_2} C_x$ 로 표현될 수 있으며,  $q_{O_2}$ 는 미생물의 산소섭취속도이고  $C_x$ 는 바이오매스농도를 나타낸다.

$$\frac{dC_L}{dt} = OTR - OUR \quad (2)$$

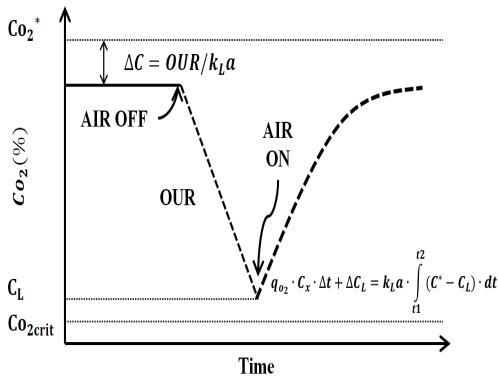


Fig. 8 Schematic description of the direct measuring of OTR in bioprocess classical dynamic technique

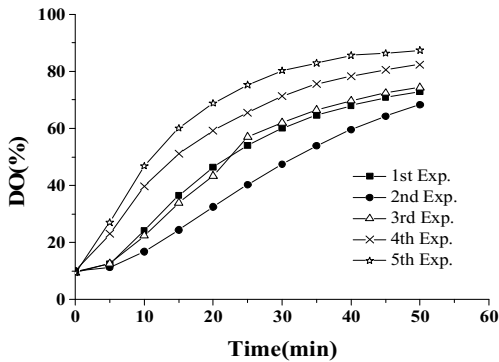


Fig. 9 Time-dependent DO profiles of airflow rate

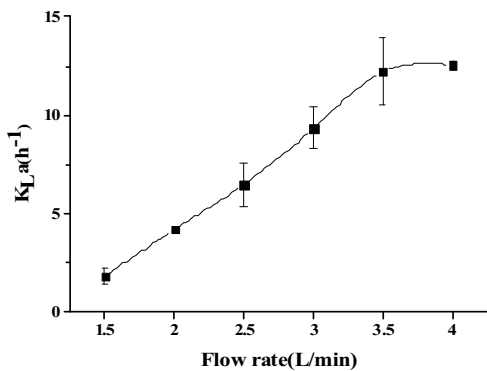


Fig. 10 Volumetric transfer coefficient as function of airflow rate

$$q_{O_2} \cdot C_X \cdot \Delta t + \Delta C_L = k_L a \cdot \int_{t_1}^{t_2} (C^* - C_L) \cdot dt \quad (3)$$

여기서,  $C_L$ 은 배양액(broth)의 용존 산소 농도,  $t$ 는 시간,  $dC_L/dt$ 는 산소 농도의 변화율(산소 전달 속도),  $K_L a$ 는 물질전달계수,  $C^*$ 는 포화상태의 용존산소농도이다. 반응기에서 물질전달계수를 측정하는 방법은 아황산염법(sulfite method), 비정상상태 방법(unsteady - state method), 정상상태 방법(steady - state method), 동역학적 방법(dynamic method) 등이 있다. 동역학적 측정법은 반응기에서 활발히 성장하고 있는 미생물의 호흡 활동을 측정한다. 만약에 반응기에 공급되는 가스의 공급이 중지되면 용존 산소 농도는 미생물의 호흡에 의한 산소 소비와 같은 속도로 감소한다. 이러한 조건에서 용존 산소 농도의 기울기로부터 산소섭취속도를 구할 수 있다. 통기가 다시 시작되면, 용존 산소의 농도는 정적 산소 농도에 도달할 때까지 증가한다. 기울기를 측정하여 산소전달속도를 구할 수 있다<sup>[4,20]</sup>.

### 3.2 공기 유입 속도 측정

물질전달계수를 측정하기 위해 동역학적 방법을 사용하였다. 에어 공급을 중단하고, 용존 산소가 점차 감소하여 포화되었을 때 공기를 재공급하였다. 용존 산소의 농도가 정상상태 농도에 도달할 때까지 공기를 공급하였다. 5회 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 선형 회귀를 사용하여 기울기를 구하고, 측정 결과의 평균값을 구하였다. 통기 속도를 변경하면서 동일한 방법으로 기울기를 구하였다. 유속에 따른 물질전달계수를 Fig. 10에 나타내었다. 물질전달계수는  $12.2h^{-1}$ 에 도달하였고, 안정화되었다.

### 3.3 미세조류 배양

설계된 200L급 평판형 광생물 반응기의 예상 성능을 확인하기 위해서 50L 평판형 광생물 반응기에서의

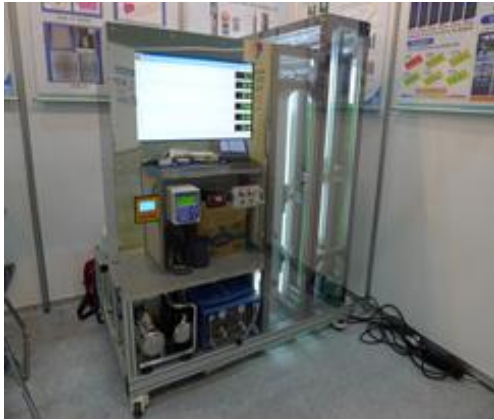


Fig. 11 Photograph of 50L FP PBR

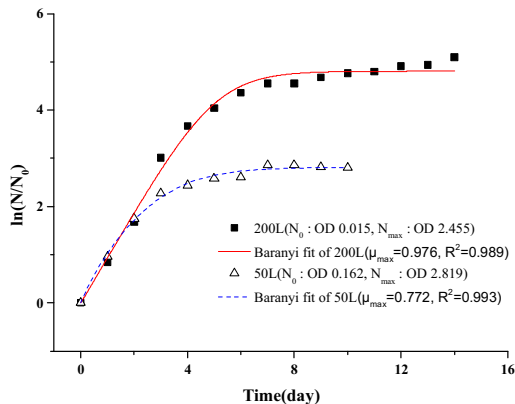


Fig. 12 Growth curve of *Chlorella* sp.

*Chlorella* sp.의 성장속도를 비교하였다. Fig. 11은 50L 평판형 광생물 반응기의 실험장치 사진을 나타낸 것이다. *Chlorella* sp.는 62일 동안 회분 배양하였다. 682nm에서 측정된 샘플의 광학밀도를 이용하여 바이오매스를 추정하였다. 회분 배양에서의 미세조류 성장을 모델링하기 위해서 일반적으로 비구조, 비정형 성장 모델인 Logistic 모델을 사용한다. 비구조, 비정형화된 모델은 단순하다는 장점을 가지고 있다<sup>[21]</sup>. 그러나 Logistic 방정식은 시간에 따른 미세조류 농도로부터 최대 비성장계수를 결정할 때 유용하지 못하다. 따라서, *Chlorella* sp.의 비성장계수를 추정하기 위해 Baranyi 방정식을 사용하였다. 미세조류는 지수적으로 성장하기 때문에 Fig. 12에서와 같이 시간

에 대한 상대적인 농도를 로그 플롯으로 나타내는 것이 유용하다<sup>[22]</sup>. 50L 평판형 반응기에서 최대 비성장 계수는  $0.772 \text{ day}^{-1}$  이고, 지수 성장기 동안에 평균 성장 계수는  $0.759 \text{ day}^{-1}$ 이다. 200L 평판형 반응기의 최대 비성장 계수는  $0.976 \text{ day}^{-1}$ 로 추정되고, 평균 성장 계수는  $0.727 \text{ day}^{-1}$ 로 측정되었다. 200L 평판형 광생물 반응기의 평균 성장 속도와 50L의 평균 성장 속도가 유사한 결과를 보였다.

#### 4. 결론

평판형 광생물 반응기를 스케일업하기 위해서 기하학적 파라미터 및 물리적 특성과 관련된 설계 요소를 연구하였다. 높은 빛 투과율과 내구성을 갖는 패널을 사용하였다. 광생물반응기의 높이 증가에 의해서 야기되는 배플림 현상을 최소화하기 위해서 구조해석을 통해 보강재의 개수와 위치를 결정하였다. 귀납적 최적화 기법을 사용하여 적절한 안전계수를 갖는 200L 평판형 광생물 반응기를 설계하였다. 세포의 최적 성장을 달성하기 위해서는 배양액에 균질한 산소 농도를 유지하는 것은 매우 중요하다. 최대 세포 성장 속도를 유지하기 위해서는 일정하고 연속적인 빛, 영양분, 용존 산소를 미세조류에 공급해야 한다. 난류 유도를 통해 반응기에서 균질한 세포 농도를 유지하도록 방해판을 일정 간격으로 설치하였다. 또한, 물질전달계수를 측정하여 배양기의 스케일업에 따른 적절한 통기량을 설정하였다. 이러한 결과들로부터 평판형 광생물 반응기를 200L 까지 스케일업 하였다.

#### 후 기

“이 논문은 2016년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.”

#### REFERENCES

1. Brennan, L. and Owende, P., “Biofuels from microalgae-A review of technologies for



- production processing, and extractions of biofuels and co-products,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 2, pp. 557-577, 2010.
2. Grobbelaar, J. U., “Microalgae mass culture: the constraint of scaling-up,” *Journal of Applied Phycology*, Vol. 24, pp. 315-318, 2012.
  3. Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Park, J. W. and Jeong, S. H., “Recent Trends of the Development of Photobioreactors to Cultivate Microalgae,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 28, No. 2, pp. 125-132, 2011.
  4. García-Ochoa, F. and Gómez Castro, E., “Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview,” *Biotechnology Advances*, Vol. 27, pp. 153-176, 2009.
  5. Yun, Y. S. and Park, J. M., “Kinetic modeling of the light-dependent photosynthetic activity of the green microalga *Chlorella vulgaris*,” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 83, No. 3, pp. 303-311, 2003.
  6. Ecofys, Global Bioenergy Partnership and FAO, “Algae-Based Biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries,” FAO publications, 2009.
  7. Zhang, K., Kurano N. and Miyachi, S., “Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor,” *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 97-101, 2002.
  8. Singh, R. N. and Sharma, S., “Development of suitable photobioreactor for algae production-A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 2347-2353, 2012.
  9. Tsoglin, L. N., Gabel, B. V., Fal’kovich, T. N. and Semenenko, V. E., “Closed Photobioreactors for Microalgal Cultivation,” *Russian Journal of Plant Physiology*, Vol. 43, No. 1, pp. 131-136, 1996.
  10. Kunjapur, A. M. and Eldridge, R. B., “Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 49, pp. 3516-3526, 2010.
  11. Barbosa, M. J. G. V., “Microalgal photobioreactors: scale-up and optimization,” Ph.D. Thesis, Wageningen University, Netherlands, 2003.
  12. Wang, B., Lan, C. Q. and Horsman, M., “Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses,” *Biotechnology Advances*, Vol. 30, pp. 904-912, 2012.
  13. Park, G. C., Kim, H., Kim, J. T., Park, J. W., Jeong, S. H. and Park, J. R., “Design of Light Guide Plate for Photobioreactor”, *J. of KSPE*, Vol. 28, No.2, pp. 133-139, 2011.
  14. Kim, G. H., Ahn, D. G., Park, J. R., Choi, G. H., Kim, J. T., Kim, K. W. and Jeong, S. H., “Bioprocess Control for Continuous Culture of *Dunaliella Salina* in Flat Panel Photobioreactor,” *J. of KSPE*, Vol. 30, No. 2, pp. 137-142, 2013.
  15. Miyamoto, K., “Renewable biological systems for alternative sustainable energy production,” *FAO Agriculture Services Bulletin*, Vol. 128, 1997.
  16. “User’s Manual : Workbench 13.0,” ANSYS Inc., 2010.
  17. Han, P. K. and Lee, J. S., “A response surface based sequential approximate optimization using constraint-shifting analogy,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 2903~2912, 2009.
  18. Kapitler, M., Samec, N. and Kokalj, F., “Operation of waste-to-energy-plant optimisations by using design exploration,” *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 7 No. 2, pp. 101-112, 2012.
  19. *Mechanical Design Data Manual*, N.S.W. TAFE Commission, Manufacturing and Engineering Educational Services, pp. 285-308, 2000.



20. García-Ochoa, Gómez Castro, F., E. and Santos, V. E., "Oxygen transfer and uptake rates during xanthan gum production," *Enzyme and microbial technology*, Vol. 27, pp. 680-690, 2000.
21. M. Y. Corapcioglu, "Advances in Porous Media," Elsevier Science B.V., Vol. 3, pp. 35-36, 1996.
22. M. H. Zwietering, I. Jongenburger, F. M. Rombouts and K. van't Riet, "Modeling of the bacterial growth curve, *Applied and Environmental microbiology*," Vol. 56, No. 6, pp. 1875-1881, 1990.
23. Choo, S. W., Jeong, S. H., "Structural and dynamic characteristic analysis of feeder for automatic assembly system of LED convergent lighting module" *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16 No. 1, pp. 124-133, 2017.
24. Han, M. S., Jo, J.u., "A Study on Durability of Under Bar at car through Structural and Fatigue Analysis," *J. Korean Society of Manufacturing Process Eng.*, Vol. 14, No. 2, pp. 44-50, 2015.
25. Lee, J. H., Gwon, H. J., Kang, J. H., "A study on structure analysis and material improvement lightweight of special-purpose vehicles axle" *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 136-142, 2009.