

## 광생물반응기의 CO<sub>2</sub> 공급 멤브레인의 최적 조건 도출을 위한 실험적 연구

김하늘\* · 이재환\* · 최은지\*\* · 오유관\*\* · 김정배†

### Experimental Study to reveal Optimum Condition of CO<sub>2</sub> Supply Membrane at Photobioreactor

H. N. Kim, J. H. Lee, E. J. Choi, Y. G. Oh and Jeongbae Kim

**Key Words:** Photobioreactor(광생물반응기), Two-phase Flow(이상유동), Air-Water(공기-물), Pressure head(압력수두), Membrane(멤브레인)

#### Abstract

This study was performed to reveal the relationships between various gas supply conditions including inlet numbers and positions for Photobioreactor. To do that, this study was installed the experimental apparatus. All experiments were performed for the cases with 1, 2, 3, and 4 inlets and for gas flow rate of 4~8 lpm. Through the experiments, this study showed that the case with 3 or 4 inlets could reduce about 50% of the pressure loss head for all gas path than that of one inlet base case. So, these results can be used as basic data to design the gross or multiple photobioreactor.

#### 기호설명

lpm : 체적유량 [liter/min]  
Left : CO<sub>2</sub> 배출구 좌측 Hole  
Center : CO<sub>2</sub> 배출구 중앙 Hole  
Right : CO<sub>2</sub> 배출구 우측 Hole

#### 1. 서 론

최근 광합성을 통한 CO<sub>2</sub> 고정이 가능한 미세조류

(Microalgae)를 바이오 질량으로 활용하는 방법과 미세 조류의 대량생산 시스템의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(1-3)</sup>.

미세조류를 대량 생산하기 위한 광생물반응기의 생산 성과 에너지 효율은 반응기 케이스 및 연결 시스템의 설계에 매우 의존적이다<sup>(4)</sup>.

광생물반응기는 반응기에 담겨진 물을 기본용액으로 하는 클로렐라 용액과 클로렐라 광합성에 필요한 CO<sub>2</sub>의 공급을 위한 공급부로 구성된다. 이렇게 반응기 내부에 형성되는 액체-기체 이상유동장에 대하여 다양한 이상유동 해석모델을 이용하여 실험적인 이상유동의 결과와의 비교 검토를 통해 본 연구의 대상과는 다른 버블 칼럼 형태의 반응기 해석에 적절한 모델을 선정하였다<sup>(5)</sup>.

그러나, 본 논문의 연구범위에 해당하는 일반적인 형태의 반응기에 대하여, 기체를 전체적으로 일정하게 공급하는 조건과 동일한 기체 유량을 좀 더 낮은 펌프 에너지로 공급할 수 있는 최적의 조건을 도출하는 등의 결과로 연결되지 못하였다.

Received: 31 Jul 2014, Received in revised form: 17 Sep 2014, Accepted: 18 Sep 2014)

\*한국교통대학교 에너지시스템공학과

\*\*한국에너지기술연구원

†책임저자, 회원, 한국교통대 에너지시스템공학과

E-mail : jeongbae\_kim@ut.ac.kr

TEL : (043)841-5282 FAX : (043)841-5280

또한, 광생물반응기에 공기 유량을 증가시키면서 클로렐라의 성장 특성을 검토하는<sup>(2)</sup> 것도 필요하지만, 이상유동을 고려한 최저의 차압으로 전체 반응기에 걸쳐 가장 균일하게 CO<sub>2</sub> 혹은 기체를 공급할 수 있는 조건에 대한 검토가 필요하다. 이러한 실험적 검토는 클로렐라의 대량 재배를 위한 대규모 반응기의 설계를 위해서도 반드시 필수적인 사전 검토사항이다.

그럼에도, 대부분의 반응기 설계에 대한 연구들이 광생물반응기의 제작<sup>(6,7)</sup> 및 케이스 가공<sup>(8)</sup>을 위한 연구에 많이 집중되어 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 소형 광생물반응기의 공기 공급배관에서 발생하는 차압 등의 유동 특성을 규명하기 위하여 실험장치를 제작하고, 펌프로부터 반응기로의 CO<sub>2</sub> 공급을 위한 다양한 유로방식을 제안하고, 그 중에서 최적의 유로조건을 실험적으로 도출하고자 하였다.

이러한 단일 반응기에서의 CO<sub>2</sub> 공급 최적조건은 대형 반응기의 설계시에 반응기 전체의 가장 큰 에너지 소비장치 중의 하나인 CO<sub>2</sub> 공급 펌프의 용량을 최소화 하면서도, 전체 유로에 균일하게 CO<sub>2</sub>를 공급할 수 있는 조건 설계의 기초 자료로 활용가능하다. 또한, 동일한 차압을 유지하도록 설계를 한다면 더 빠른 기포의 속도를 얻을 수 있어 CO<sub>2</sub> 기포의 유동방향으로의 한쪽 쓸림 현상을 해결할 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

현재의 소형 광생물반응기는 Fig. 1과 같이 비닐 두겹에 일정한 간격으로 원형 부분과 가장자리를 압착하여 접합하는 방식으로 채널이 형성된 구조로서, 그 크기는 가로 1 m, 세로 2 m 이다.

반응기 내부는 미세조류를 포함한 액체를 채우고 반응기의 하부에 약 80 cm 정도 길이의 마이크로 포러스(Micro porous)를 가진 멤브레인을 설치한 뒤, 한쪽은 막고 개방된 다른 한쪽으로 CO<sub>2</sub>를 공급하고 있다. 멤브레인을 통해 공급되는 CO<sub>2</sub> 기포들은 수직상향으로 유동하면서 미세조류의 광합성에 활용된다. 반응기 상부에는 공급되는 CO<sub>2</sub>의 배출을 위한 약 1.75 m 높이가 위치한 세 개의 배출구를 가지고 있다.

CO<sub>2</sub> 공급을 위한 최적조건을 찾기 위한 본 연구의 실험장치는 Fig. 2와 같은데, 반응기 내부는 물을 유체로 하여 클로렐라 배양시의 높이와 동일하게 배출구 바로



Fig. 1 Photobioreactor used for this study

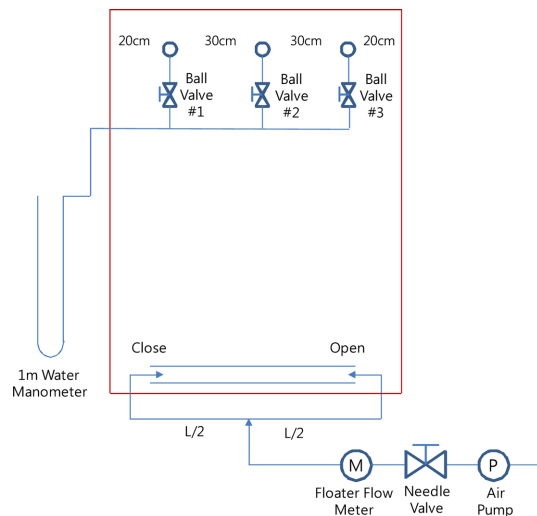


Fig. 2 Experimental apparatus for this study

아래까지로 유지하였다. 멤브레인을 통해 공급하는 CO<sub>2</sub>는 공기로 대체하여 실험을 실시할 수 있도록 공기펌프, 유량 조절을 위한 니들밸브, 그리고 공기유량 측정을 위한 플로터 유량계를 설치하였다.

하부에서 공급하는 공기 주입구의 숫자와 유량에 따른 배출구의 위치별로 압력손실을 Fig. 2에서와 같이 1 m 높이의 물 마노미터를 설치하여 볼밸브의 열림/닫

힘을 조절하면서 측정하였다.

2.2 실험방법 및 조건

광생물반응기 내부의 클로렐라 용액은 일반적으로 물 1L당 최대 2g 정도의 낮은 농도를 가지고 있어, 본 연구의 실험에서는 클로렐라 용액은 물을 대신 이용하였다. 클로렐라의 광합성을 위해 투입되는 CO<sub>2</sub>는 본 실험에서 사용한 공기보다 약 1.5배 정도 밀도가 높지만, 물에 대한 밀도비를 고려하면 반응기에서의 실제 이상유동 특성에는 큰 오차 없이 상사하여 실험할 수 있다고 판단하였다. 이는 실제 반응기에서 가시적으로 확인된 유동양식이 기포류 유동이었고, 본 연구에서도 적용한 물-공기 이상유동에서 공기의 실험 유량 범위에 대하여 명확하게 동일한 기포류 유동 특성이 발생함을 육안으로 확인하였다.

반응기 내의 물은 1차 증류수로 모든 공기 공급조건에 대하여 세 개의 배출구 바로 아래까지 투입하여 동일한 위치 압력수두를 유지하였다.

실험에 적용한 공기의 유량 범위는 현재 반응기에 적용하고 있는 5 lpm을 포함하도록 4, 6, 8 lpm으로 결정하였다.

멤브레인을 통해 공급되는 공기 입구의 숫자는 1개에서 4개까지를 고려하는데, 이는 Fig. 3-6에서와 같이 동일한 입구 숫자에서도 공기를 투입하는 위치 변화를 고려한 다양한 공급 조건으로 설정하였다.

하나의 입구에 대해서는 좌우 한쪽으로부터 공급하는 경우는 기존 반응기 공급 위치와 동일하게 우측에서 공급하도록 하였고, 중앙에서 공급하는 경우만을 추가적으로 검토하였다.

두 개의 입구는 양쪽(#2-1), 중앙부 각 1/3 지점에 두 개의 입구를 가진 경우(#2-2)로 선정하였다.

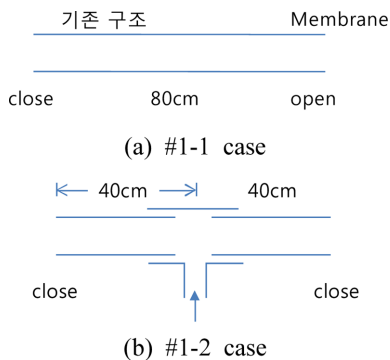


Fig. 3 Experimental case for one air supplying inlet

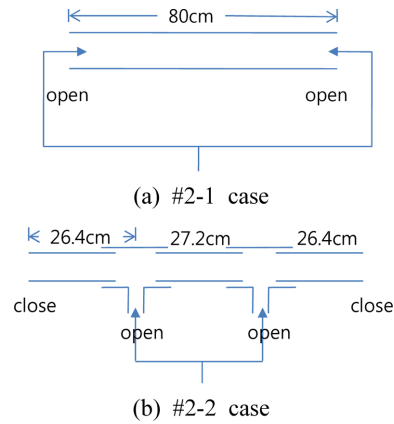


Fig. 4 Experimental case for two inlets

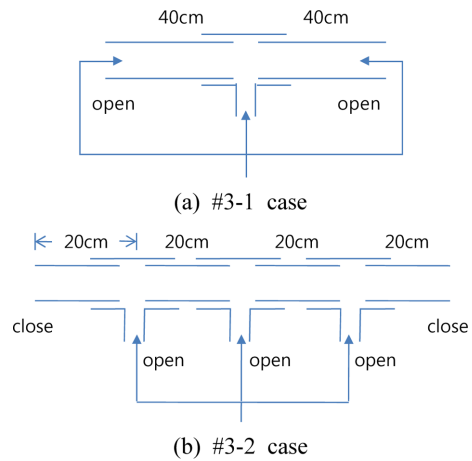


Fig. 5 Experimental case for three inlets

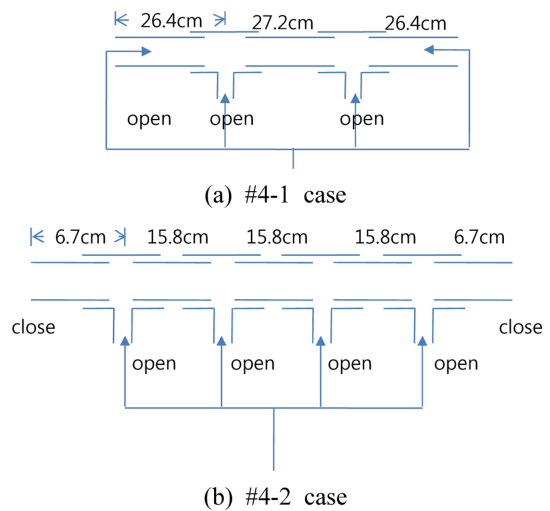


Fig. 6 Experimental case for four inlets

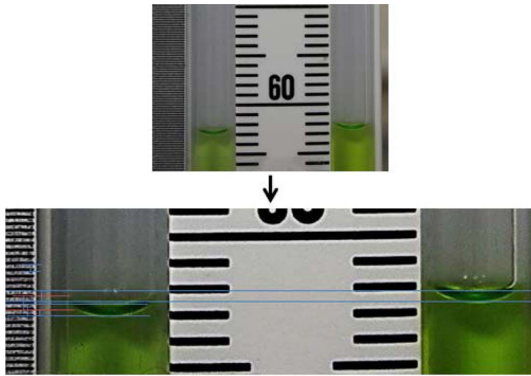


Fig. 7 U-tube manometer used and the image captured in this study

세 개의 입구는 양쪽과 중앙(#3-1), 중앙부 각 1/4 지점에서 세 개의 입구를 가진 경우(#3-2)를, 네 개의 입구에 대해서는 세 개의 입구와 유사하게 양쪽과 중앙(#4-1), 중앙부 각 1/5 지점에서 네 개의 입구를 가진 경우(#4-2)로 구분하였다.

공기공급을 위한 공기 탱크의 압력이 일정하게 유지 되도록 하면서 마노미터의 높이가 일정하게 유지됨을 확인한 뒤, Fig. 2와 같이 반응기 상부 3개의 공기 토출부의 Hole들을 U자관 마노미터의 왼쪽에 연결하고 오른쪽은 대기압에 오픈시켜 주어진 조건별로 압력 차이를 물의 수두 높이차이로 측정하였다.

고해상도 디지털카메라를 이용하여 U자관 마노미터에서의 수두 높이차이를 사진으로 촬영하였는데, 모든 실험조건에서 동일하게 카메라의 촬영조건을 고정하였다. 측정의 정확도를 높이기 위하여 촬영된 이미지를 1500배 확대하여 높이를 측정하였다(Fig. 7 참조). 마노미터의 베이스 유체는 물이며, 사진 촬영시 명확한 구분을 위해 착색용 녹색 염료를 투입하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험의 오차분석

모든 실험들은 동일 유량에서 최소 3회 이상 측정하여 그 결과를 평균하여 나타내었다. 마노미터에서 측정하는 수두차이는 각각의 배출구와 대기압과의 압력차에 의한 물의 수두차이( $\Delta h$ , mm)를 나타내는 것이다.

반응기의 공기 배출구의 위치는 측정자의 정면방향에서 왼쪽 배출구는 Left, 중앙은 Center, 오른쪽은 Right

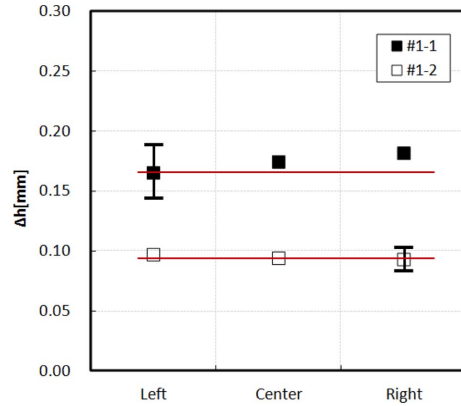


Fig. 8 Experimental error and deviation

로 표시하였다.

3회 이상 측정시 실험의 오차는 Fig. 8에서와 같이 최대  $\pm 13.0\%$ 로 나타났으며, 최대 오차가 발생하는 조건은 입구의 수가 가장 적으면서 동시에 유량도 가장 적은 #1-1의 4 lpm 조건으로, 이는 공기 유량이 적어 차압이 가장 작은 조건에서 오차가 제일 크게 발생함을 의미한다.

#1-1을 제외한 실험 조건들에서의 Left, Center 및 Right 위치에서의 차압수두 오차는 약  $\pm 5\%$  이내로 평가되었다.

Fig. 8에 나타낸 #1-1의 평균값들에 대하여 위치에 따른 Left, Center 및 Right에서의 수두차이가 다른 조건들에 비하여 가장 큰  $\pm 9.70\%$ 로 나타났다.

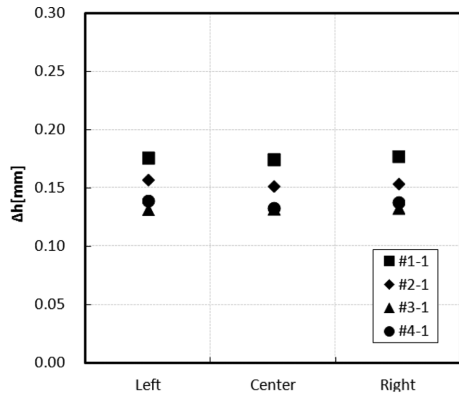
또한, 1개의 입구를 가진 경우에 실험 유량범위인 4~8 lpm 유량에서 한쪽으로 치우쳐 공기가 투입되는 경우보다 중앙에서 공급되는 조건이 약 55%에서 80% 수준의 낮은 압력수두를 나타냄을 알 수 있다.

이는 중앙에서 공기를 공급하는 것이 펌프의 부하를 저감할 수 있음을 의미하므로, 중앙에서 공급하는 경우에 동일한 차압조건을 유지한다면 유량이 상대적으로 약 1.16배 수준에서 최대 2배 정도 증가시킬 수 있음을 나타낸다.

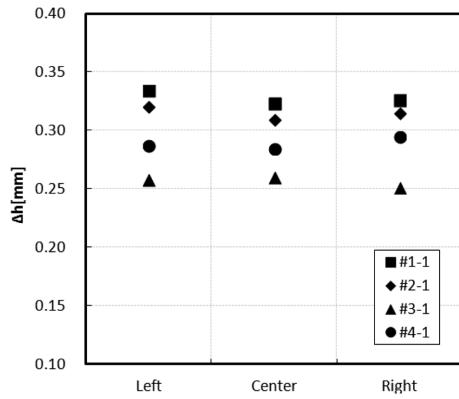
#### 3.2 실험조건별 차압특성

먼저, 양쪽 측면을 입구로 활용하는 경우에 대하여 입구 개수별(#1-1, #2-1, #3-1, #4-1)로 비교한 수두차이 결과는 Fig. 9와 같다.

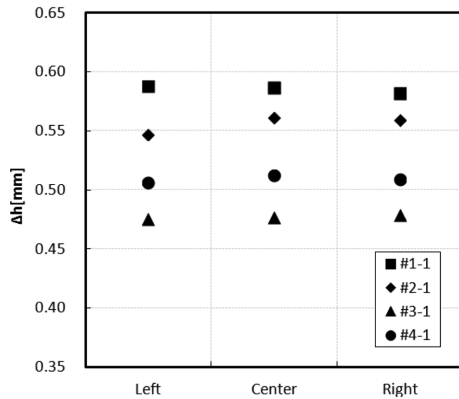
멤브레인의 양쪽을 입구로 활용하는 경우에 유량별로 측정된 압력 수두차이는 널리 알려진 바와 같이 유량이 낮을수록 수두차이가 적게 나타남을 알 수 있다.



(a) at 4 lpm



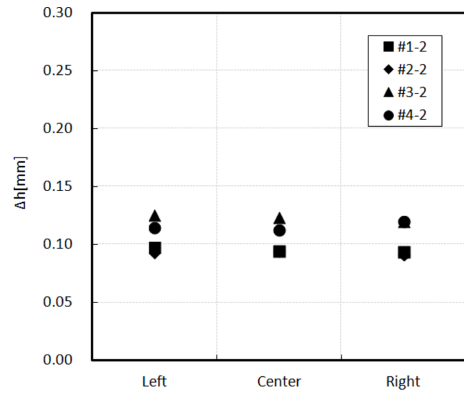
(b) at 6 lpm



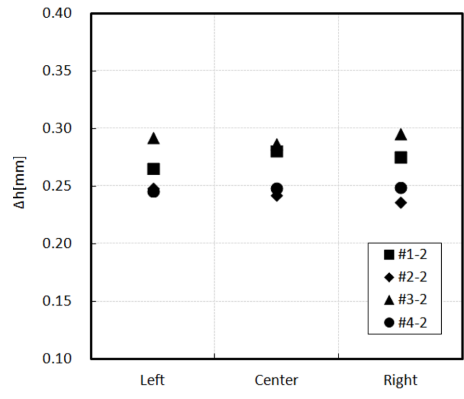
(c) at 8 lpm

Fig. 9 Measured pressure head results for #1-1, #2-1, #3-1, #4-1 cases

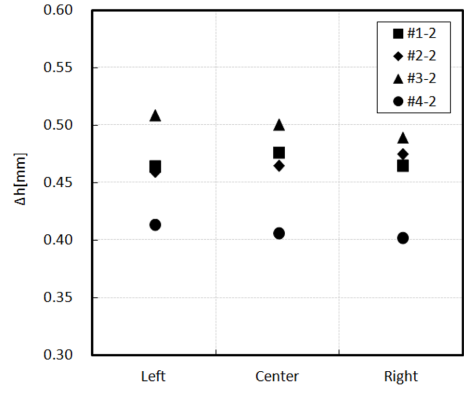
또한, Fig. 9의 (a)~(c)에서와 같이 양쪽을 공기의 입구로 활용하는 경우에는 유량에 관계없이 3개의 입구를 가진 경우가 가장 낮은 수두차이를 보여주고 있음을 확인할 수 있다.



(a) at 4 lpm



(b) at 6 lpm



(c) at 8 lpm

Fig. 10 Measured pressure head results for #1-2, #2-2, #3-2, #4-2 cases

따라서, 양쪽 측면을 공기 투입구로 활용하는 반응기에서는 중앙부에도 공기 공급을 위한 입구를 설치하는 것이 실제 반응기에서 동일한 차압에서 CO<sub>2</sub> 유량을 증가시킬 수 있는 조건임을 알 수 있다.

반면에, 반응기 하단의 중앙부를 중심으로 하여 공기를 투입하는 경우에 대하여 입구 개수별(#1-2, #2-2, #3-2, #4-2)로 비교하면 아래의 Fig. 10와 같다.

반응기의 양쪽을 입구로 활용하지 않고, 일정한 간격을 유지하면서 중앙 부위에 입구가 있는 경우가 앞서 Fig. 8의 한 개의 입구에 대한 실험결과와 마찬가지로 양쪽을 활용하는 경우보다 차압을 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

유량별로 측정된 압력 수두차이는 Fig. 10에서와 같이 대체적으로 유량에 관계없이 4개의 입구를 가진 경우가 가장 낮은 수두차이를 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

클로렐라를 CO<sub>2</sub>와 반응시키는 광생물반응기에 있어서, 클로렐라가 배양되는 반응기에 투입되는 CO<sub>2</sub>의 공급구 개수는 다양한 유량범위에 관계없이 가장 작은 압력수두 손실을 나타내는 3-4개 정도를 가져야 함을 알 수 있었다.

CO<sub>2</sub> 공급을 위한 입구는 양측면만을 활용하는 경우에는 약 50% 정도의 수두차압 증가로 인하여 유량을 감소시키는 효과를 나타내게 됨을 확인하였다.

반응기 아래쪽의 중앙부위에 입구를 다수 설치하여 반응기에 CO<sub>2</sub>를 공급하는 것이 동일한 차압을 유지하도록 하는 조건에서, 대형 반응기 혹은 한 개의 펌프로 여러 개의 반응기를 연결하는 경우에 공급되는 CO<sub>2</sub>의 유량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 이러한 실험 결과를 활용하여 반응기 설계 시에는 반응기의 가로축 길이(현재 반응기 80 cm)에 대하여 CO<sub>2</sub> 투입용 입구 사이의 간격은 가로축 길이의 약 20% 정도로 하는 것이 적합한 수준인 것으로 판단할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2012년도 한국교통대학교의 해외과건연구

교수지원금을 받아 수행한 연구임.

#### 참고문헌

- (1) S. M. Jeon, I. H. Kim, J. M. Ha and J. H. Lee, "Overview of Technology for Fixation of Carbon Dioxide Using Microalgae", *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, No. 2, 2008, pp. 145-150.
- (2) B. R. Choi and T. Y. Lee, "Cultivation of *Chlorella* sp. under Different Aeration Conditions Illuminated by Light Emitting Diode", *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 27, No. 4, 2012, pp. 263-267.
- (3) Y. S. Kim, H. I. Park, D. K. Kim and D. Pak, "The Growth Characteristics of *Spirulina platensis* in Cylindrical Photobioreactor", *Korean J. Biotechnology Bioengineering*, Vol. 18, No. 4, 2002, pp. 277-281.
- (4) I. S. Suh and C. G. Lee, "Photobioreactor Engineering: Design and Performance", *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 8, No. 6, 2003, pp. 313-321.
- (5) J. I. Yoo, I. B. Lee, H. S. Hwang, S. W. Hong, I. H. Seo, J. P. Bitog, K. S. Kwon and Y. H. Kim, "Utilization of CFD Simulation Model for a Bubble Column Photobioreactor", *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 51, No. 5, 2009, pp. 1-8.
- (6) 안동규, 조창규, 안영수, 정상화, 김종태, "광경화 방식의 3차원 프린팅 기술을 이용한 고효율 광생물 반응기 시작품 제작", *한국정밀공학회 2014년 춘계학술대회논문집*, 2014, pp. 1176.
- (7) 안동규, 이호진, "3차원 열성형 해석을 통한 특정형상을 가진 중대형급 평판형 광생물 반응기 성형성 및 성형조건 예측", *2014년 대한기계학회 생산설계부문 춘계학술대회논문집*, 2014, pp. 13-14.
- (8) D. G. Ahn, H. J. Lee and Y. S. Ahn, "Joining Technology of Flat Panel Photobioreactor Case", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No. 2, 2013, pp. 154-163.