

## ◆ 특집 ◆ 녹색생산 및 응용기술

## 얇은 평판형 광생물 반응기 케이스 개발에 관한 연구

## A Study on the Development of a Thin Flat Panel Photo-bioreactor Case

안동규<sup>1,✉</sup>, 안영수<sup>1</sup>, 정상화<sup>1</sup>Dong-Gyu Ahn<sup>1,✉</sup>, Yeong-Su Ahn<sup>1</sup>, and Sang-Hwa Jeong<sup>1</sup>

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

✉ Corresponding author: smart@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7043

Manuscript received: 2012.7.1 / Accepted: 2012.8.6

*The objective of this paper is to investigate into the development of a thin flat panel photo-bioreactor case with characteristics shapes. The thin flat panel photo-bioreactor case was designed to be manufactured from a plastic thermoforming process. A proper design with a relatively high rigidity was obtained through the structural analyses for different designs of the photo-bioreactor case. The thermoforming analyses were performed. From the results of the thermoforming analyses, a proper forming condition and the formability of the designed plastic photo-bioreactor case were estimated. The thermoforming moulds for the flat panel photo-bioreactor cases were manufactured. The thermoforming experiments were performed to examine the manufacturability of the designed flat panel photo-bioreactor cases. From the results of the thermoforming experiments, it was shown that thin flat panel photo-bioreactor cases with characteristic shapes can be manufactured from the designed thermoforming mould and process.*

Key Words: Thin Flat Panel Photo-bioreactor Case (평판형 광생물 반응기 케이스), Microalga (미세조류), Vacuum Forming (진공성형), Characteristic Shape (특징 형상), 유한요소해석 (Finite Element Analysis)

## 기호설명

 $\lambda$  = aerial draw ratio $\Pi_{fs}$  = surface area of the formed section $\Pi_s$  = surface area of the sheet used to form the part $\mu$  = maximum linear draw ratio $\Lambda_{mfp}$  = maximum line length on the formed part $\Lambda_f$  = line length before forming $\psi$  = average reduction rate of thickness $P_z$  = hydrostatic pressure $\eta$  = safety factor $\rho$  = density of the culture media $g$  = gravity $Z_c$  = distance from the free surface to a surface in the Z direction $\delta_R$  = relative deflection $\delta_{m,d}$  = maximum deflection for each design of the photo-bioreactor case $\delta_{m,b}$  = maximum deflection for basic design of the photo-bioreactor case $t$  = vacuum time

## 1. 서론

산업혁명 이후 전세계 에너지의 많은 부분을 화석연료로부터 생산하고 있다.<sup>1</sup> 화석연료의 지속

적인 사용으로 인해 최근에는 에너지 자원 고갈, 지구온난화 및 환경오염 문제가 발생하기 시작하고 있다.<sup>2,3</sup> 이러한 이유로 화석 연료의 대안을 얻기 위하여 깨끗하고 재생이 가능하며 지속 가능한 에너지 자원의 개발에 대한 폭넓은 연구가 전세계적으로 폭넓게 진행되어 왔다.<sup>1,4,5</sup>

바이오 디젤, 바이오 에탄올 등 바이오 연료는 가능성 있는 재생/지속가능 에너지 자원으로 많은 관심을 모으고 있다.<sup>3,4,6,7</sup> 바이오 디젤은 온실 가스 감소와 수송기계 배기가스의 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 를 감소시킬 수 있어 연료원의 다양화를 제공할 수 있다.<sup>6</sup> 바이오 연료는 대부분 생물자원 (Biomass) 으로부터 생산된다. 현재 상용화된 바이오 연료의 주요 생물자원은 대두, 옥수수, 야자수, 해바라기 씨 등의 식량자원이다.<sup>8,9</sup> 이 식량자원들은 인간의 먹거리와 관계되어 있어, 대량의 바이오 연료 생산을 위해서는 인류의 식량재가 감소하는 모순을 발생시킨다.<sup>7,9</sup> 이에 따라 바이오 연료의 대량 생산이 가능하고 인간의 식량자원에 영향을 미치지 않는 새로운 생물자원 개발에 대한 연구가 시작되고 있다.<sup>1,6,9</sup>

최근 제 3 세대 바이오 연료용 생물자원으로 광합성을 통한 CO<sub>2</sub> 고정 또한 가능한 미세조류 (Microalgae) 활용방법에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>1,6,9</sup> 또한 생물자원의 대량 확보를 위한 미세조류 대량 배양/생산 방법에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 미세조류 대량 배양/생산 방법으로 광생물반응기 (Photo-bioreactor) 를 많이 사용하고 있으며, 개방형, 밀폐형 및 하이브리드형 등 다양한 광생물반응기들이 개발되고 있다.<sup>10-13</sup> 밀폐형의 광생물반응기의 경우 수직 기둥형 (Vertical column type), 수직/수평 관형 (Vertical & Horizontal tubular type) 및 평판형 (Flat plane type) 의 3 가지로 개발되고 있다.<sup>11-13</sup>

평판형 광생물반응기의 경우 넓은 광조사 면적, 큰 체적 대비 표면적, 옥외배양 적합성, 높은 생물자원 생산성, 낮은 에너지 사용률 등의 장점 때문에 최근에 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>4,12</sup> Cheng-Wu 등은 8 mm 와 10 mm 두께의 유리판을 이용하여 단위 케이스를 만든 후, 이 단위 케이스들을 접합하여 500 L 급 평판형 광생물반응기를 제작하였다.<sup>14</sup> Hoekema 등은 PC (Polycarbonate) 재료와 스테인레스강 프레임 (Frame) 을 이용하여 2.4 L 급 평판형 광생물반응기를 제작하였다.<sup>15</sup> Sierra 등은 U 자형 플라스틱 가방과 철재 프

레이를 이용하여 250 L 급 평판형 광생물반응기를 제작하였다.<sup>16</sup> 대부분의 평판형 광생물반응기 제작 관련 연구에서는 광생물반응기 표면이 모두 평면형상이어서 성형과 표면 형상 구현에 대한 공정이 소요되지 않았다. 그러나 독일의 Fraunhofer 연구소와 Subitec Inc. 의 연구에서는 평판형 광생물반응기의 혼합 및 광조사 특성을 개선을 위하여 격벽형 정적 혼합기와 표면의 특징형상을 광생물반응기 케이스에 부여 하였다.<sup>17-22</sup> 이들의 연구에서는 PVC (Polyvinyl chloride) 재료를 성형하여 특징형상을 가진 광생물반응기 케이스 제작하였다.<sup>17,18,22</sup>

본 논문에서는 곡면형 정적 혼합기 (Static mixer) 지지대 (Supporter) 와 보강 구조 (Stiffener) 와 같은 특징 표면형상을 가지는 얇은 평판형 광생물반응기 케이스 개발에 관한 연구를 수행하였다. 6 가지 케이스 설계안에 대한 구조해석을 수행하여, 상대적으로 강성이 우수한 평판형 광생물반응기 케이스 설계를 도출 하였다. 이 결과를 이용하여 케이스 진공성형 금형을 설계하고, 3 차원 진공 열성형공정 해석을 수행하여 적절한 평판형 광생물반응기 케이스 성형조건을 도출하였다. 최종적으로 케이스 제작용 진공성형 금형을 제작한 후, 진공 열성형 실험을 수행하여 특징 표면형상을 가지는 평판형 광생물반응기 케이스의 제작성을 분석/고찰 하였다.

## 2. 평판형 광생물반응기 케이스 설계

### 2.1 형상 설계 및 재료 선정

Fig. 1 은 곡면형 정적 혼합기 지지대와 보강 구조를 가지는 평판형 광생물반응기 케이스의 형상 설계이다. Fig. 1(a) 와 같이 외관 형상과 곡면형 정적 혼합기 지지대 형상 및 연결부 (Connector) 형상을 생성하여 케이스 기초형상을 설계하였다. 그 후, 평판형 광생물반응기를 이용한 미세조류 배양시 케이스에 발생할 가능성이 있는 배불림 (Bulging) 현상<sup>14</sup> 을 방지하기 위하여 Fig. 1(b) 와 같이 기초 형상에 수직/수평 보강구조 (Vertical and horizontal stiffeners) 를 추가하여 최종 케이스 형상 설계를 도출하였다. 수직 보강구조들은 균일 간격으로 배치하였다. 수평 보강구조들은 배지액과 미세조류 누적에 의하여 발생하는 케이스 표면에 수직하게 작용하는 압력분포를 고려하여, 수직 방향으로 아랫면에 수평 보강구조가 조밀하게 들어 갈 수 있도록 설계 하였다. 수평/수직 보강구조들의 설

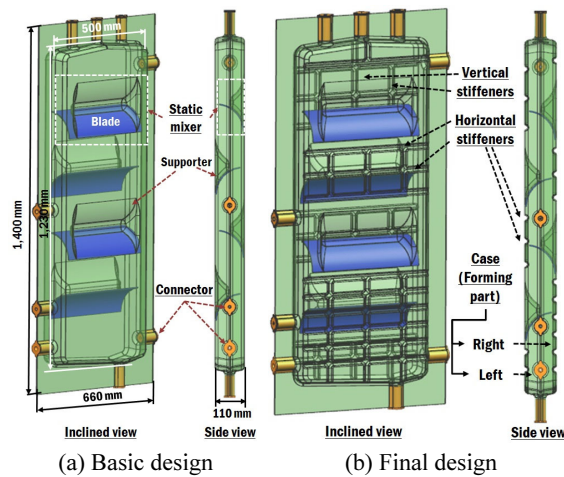


Fig. 1 Shape design of flat panel photo-bioreactor case

계는 Fig. 2 와 같이 A 형 과 B 형 단면형상을 가지도록 하였다. 각 설계안들에 대한 보강구조 단면의 평균 폭 및 평균 깊이는 Fig. 2 와 같다. 보강구조의 바닥부는 진공 열성형 중 진공 압력에 의하여 자유곡면이 생성되도록 설계 하였다. 구조 해석에는 케이스의 평균두께를 2.5 mm 로 가정 하였다.

성형 재료는 평판형 광생물반응기 케이스 재료

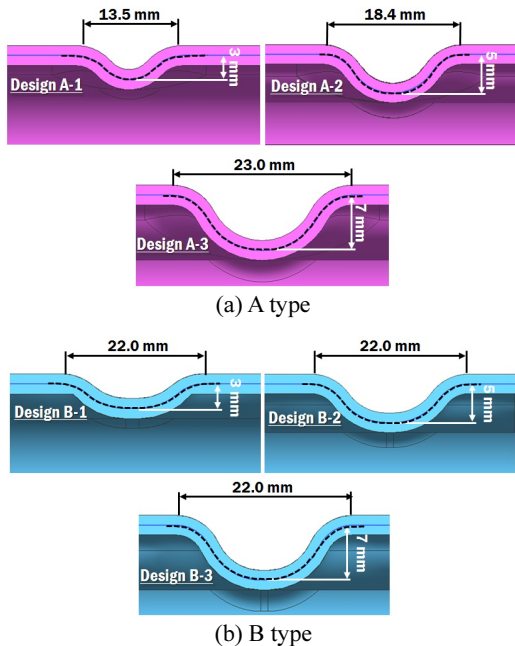


Fig. 2 Designs of sectional shape of stiffeners

Table 1 Optical and mechanical properties of PC<sup>13,23</sup>

Reflection index	Transmittance (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
1.54-1.59	85-91	1.25×10 <sup>3</sup>	2.0	0.38	58.8

로 많이 사용되고 있는 PC 를 선정하였다. PC 의 광학적/기계적 물성들은 Table 1 과 같다.

형상 설계된 광생물반응기 케이스의 기초 성형성 예측을 위하여 식 (1), (2) 및 (3)을 이용하여 면적 드로잉율 (Aerial draw ratio), 최대 선형 드로잉율 (Maximum linear draw ratio) 및 평균 두께 감소율 (Average reduction rate of thickness) 를 예측하였다.<sup>24</sup>

$$\lambda = \frac{\Pi_{fs}}{\Pi_s} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\Lambda_{mfp}}{\Lambda_f} \quad (2)$$

$$\Psi = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

## 2.2 구조 해석

평판형 광생물반응기에서 미세조류 배양시 발생하는 케이스의 배블럼 현상을 완화 할 수 있는 적절한 케이스 설계안을 도출하기 위하여 3 차원 구조 해석을 수행하였다. 3 차원 구조 해석을 ABAQUS V6.11 Standard module 을 이용하였다.

보강구조가 부가되지 경우와 Fig. 2 의 6 가지의 설계안들과 같이 보강구조가 부가된 경우에 대해서 3 차원 구조 해석을 수행하였다. 광생물반응기 케이스 내부에 부가되는 정수압 (Hydrostatic pressure) 는 식 (4)를 이용하여 산출하였다. 안전계수 (Safety factor) 는 2.0 을 적용하였다. 식 (4) 의 Z<sub>c</sub> 는 광생물반응기 내부의 배지액이 채워진 부분과 채워지지 않은 부분의 경계인 자유면으로부터 반응기 표면에 정수압이 부가되는 면까지의 수직 거리이다.

$$P_z = \eta\rho gZ_c \quad (4)$$

실제 미세조류 배양시험을 수행할 때, 평판형 광생물반응기 케이스의 테두리 평면부를 체결도구로 프레임에 체결 한다. 그러므로, 구조 해석에서는 케이스의 테두리 평면부를 고정하고 해석을 수행하였다. 구조해석에서 요구되는 PC 재료의 탄성계수, 포아송비, 밀도는 Table 1 의 데이터를 사용하였다. 반응기 케이스 사면체 입체 요소 (Tetrahedral solid elements) 로 유한요소격자를 생성하였다.

상대적 처짐량을 척도로 하여 6 가지 광생물반응기 케이스 설계안들의 상대적 강성을 계산하였다. 상대적 처짐량은 식 (5) 와 같이 기초 형상의 최대 처짐량에 대한 각 케이스 설계안들의 최대 처짐량으로 정의하였다.

$$\delta_R = \frac{\delta_{m,d}}{\delta_{m,b}} \times 100 \quad (5)$$

**2.3 형상 설계 및 구조 해석 결과 고찰**

Table 2 는 Fig. 2 의 6 가지 광생물반응기 케이스 설계안에 대한 기초 성형성을 예측한 결과이다.

Table 2 와 같이 6 가지 설계안의 면적 드로잉율은 1.12-1.13 의 범위를 나타내었다. 진공 열성형 공정으로 플라스틱 재료를 성형할 경우 일반적인 한계 면적 드로잉율은 3.0 이상 이다.<sup>24</sup> 그러므로 6 가지 광생물반응기 케이스 설계안 모두 진공 열성형으로 성형이 가능함을 알 수 있었다. 최대 선형 드로잉율은 6 가지 설계안 모두 1.08 정도를 나타내었다. 평균 두께 감소율은 0.89-0.90 범위로 예측 되었다. 위 결과들로부터 6 가지 광생물반응기 설계안 모두가 진공 열성형시 성형성 양호함을 알 수 있었다.

Table 2 Aerial draw ratios, maximum linear draw ratios and average reduction rates of thickness for different case designs

	Design	$\lambda$	$\mu$	$\psi$
A type	Design A-1	1.12	1.08	0.90
	Design A-2	1.12	1.08	0.89
	Design A-3	1.13	1.08	0.89
B type	Design B-1	1.12	1.08	0.90
	Design B-2	1.12	1.08	0.89
	Design B-3	1.13	1.08	0.89

Table 3 Maximum effective stresses for different case designs

Design		$\delta_{m,b}$ & $\delta_{m,d}$ (mm)	$\delta_R$ (%)
Basic shape		1.19	-
A type	Design A-1	1.05	88.2
	Design A-2	0.86	72.3
	Design A-3	0.76	63.9
B type	Design B-1	0.82	68.9
	Design B-2	0.79	66.4
	Design B-3	0.72	60.5

Table 3 과 보강구조가 부가되지 않은 기본 형상과 6 가지 광생물반응기 케이스 설계안들에 대한 구조해석 결과 얻어진 설계안들에 따른 최대 처짐량 및 상대적 처짐량이다. Table 3 에서 B 형 케이스 설계안이 A 형 케이스 설계안보다 최대 처짐량이 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 B 형 케이스 설계안중 Design B-2 와 B-3 케이스 설계안들의 최대 처짐량이 기본 형상의 최대 처짐량에 비하여 각각 33.6 % 와 39.5 % 정도 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 6 가지 설계안들에 대한 케이스의 최대 처짐은 Fig. 3 과 같이 케이스 하단 중앙부에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

진공 열성형 공정의 경우 진공 압력과 하부 금형으로 제품을 성형하고, 제품 성형 후 냉각과정에서 수축과 형상회복이 발생한다. 그 결과 정밀한 형상을 구현하기 어렵다. 이러한 이유로 상대적인 최대 처짐량이 적게 발생하는 B 형 형상을 수직/수평 보강구조 기본 형상으로 선정하였으며, 수평과 수직 보강 구조들의 깊이는 각각 최소 6 mm 및 최소 7.0 mm 이상 성형 될 수 있도록 케이스

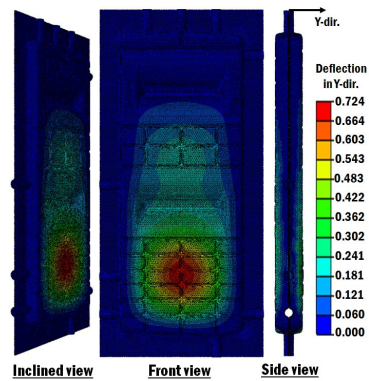


Fig. 3 Deflection distribution for Design B-3

설계를 결정하였다. 광생물반응기 케이스의 하단부에는 수평 보강구조의 깊이를 6.0-7.5 mm 범위로 설정하고 수평 보강구조의 간격을 좁게 하였다. 중앙부에는 수평 보강구조 깊이를 6.5-8.0 mm 범위로 설정하였고, 상단부의 보강구조 깊이는 수평 7.0-8.5 mm 범위로 설계하였다. 하단부에서 상단부로 갈수록 수평 보강구조의 간격을 증가 시켰다.

### 3. 케이스 진공 열성형 해석 및 특성 고찰

#### 3.1 진공 열성형 해석

2.3 절에서 선정된 광생물반응기 케이스 설계에 대한 제품 형상 구현 가능성과 성형성을 분석/고찰 하기 위하여 3 차원 진공 열성형 공정 해석을 수행하였다. 케이스의 진공 열성형 공정 해석에는 PAMFORM 2G 를 사용하였다.

열성형 해석을 위한 금형면 데이터는 제품의 두께 방향 최하단면 데이터로부터 도출하였다. 그러나 수직/수평 보강구조들의 하부면은 자유곡면으로 성형하기 위하여 금형의 수직/수평 보강구조 채널의 깊이는 실제 제품의 보강구조 깊이보다 4 mm 이상 깊게 설계하였다. 케이스 성형을 위한 PC 재료의 초기 형상은 사각 판재 형상으로 크기는 900 mm × 1,650 mm 이다. PC 재료의 초기 두께는 성형 후 두께 감소를 고려하여 3 mm 로 선택하였다. Fig. 4 는 케이스 진공 열성형을 위한 초기 PC 판재 및 금형의 유한요소 격자이다. 금형면들은 강체 표면 (Rigid surface) 들로 가정하였다. Table 4 는 케이스 진공 열성형 해석에 이용된 PC 판재와 금형의 유한요소 격자종류, 유한요소 격자수 및 절점수이다.

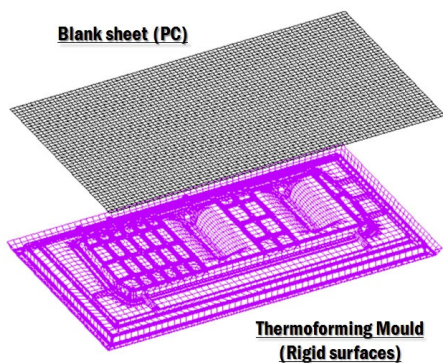


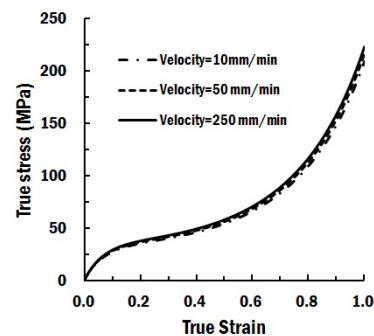
Fig. 4 Modeling of thermoforming analysis for the designed photo-bioreactor case (Right side)

Table 4 Meshes of thermoforming analysis

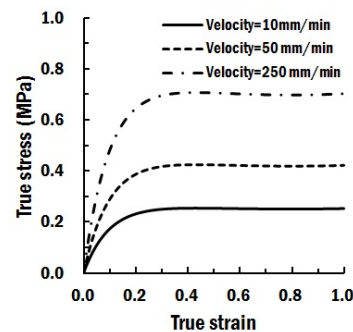
Part	Element type	Left		Right	
		Initial no. of elements (EA)	Initial no. of nodes (EA)	Initial no. of elements (EA)	Initial no. of nodes (EA)
Blank	Shell	53,822	55,445	55,271	56,885
Mould	Shell	28,632	25,801	31,951	28,921
Total		82,443	81,246	87,222	85,806

PC 판재의 성형중 격자 세분화 수준 (Refinement level) 은 3 으로 적용하였다. 케이스의 진공 열성형 해석 압력과 최대 성형 시간은 각각 0.1 MPa 및 24 초이다. PC 판재의 초기 온도는 PC 재료의 유리전이 온도 보다 높은 165 °C 를 적용하였다. 금형 소재는 PVC 로 선정하였다.

진공 열성형 해석은 PC 판재의 초기 스트레칭 공정에 대한 성형해석과 두 번째 단계인 진공 열성형 해석의 2 단계로 수행하였다. 진공 열성형 해석에 사용되는 온도별 변형을 속도효과가 고려된



(a) Temperature = 100 °C



(b) Temperature = 165 °C

Fig. 5 True stress - true strain relationships for different velocities and temperatures



진응력 - 진변형을 선도는 3 가지 속도 조건에 대한 온도별 인장 시험을 수행하여 취득하였다. 이 온도/속도별 인장시험 데이터를 이용하여 G'sell 모델<sup>25,26</sup>의 상수를 도출하였다. 진공 열성형 해석에서는 G'sell 모델의 상수들을 온도별로 입력하여 온도별 진응력 - 진변형을 선도를 예측하는 방식을 사용하였다. Fig. 5 는 G'sell 모델을 적용하여 예측된 각 온도/속도별 진응력 - 진변형을 선도이다.

**3.2 진공 열성형 해석 결과 및 고찰**

Fig. 6 과 7 은 오른쪽과 왼쪽의 광생물반응기 케이스에 대한 진공 열성형 해석 결과 얻어진 진공 열성형 시간별 제품 형상, 제품내 온도분포 및 제품 내 두께 분포이다. Fig. 6 과 같이 진공 압력을 5 초 정도의 부여한 후 보강재와 연결부 영역을 제외한 제품의 전체적 외관형상은 성형되었다. 연결부들과 케이스의 미세조류/배지액 저장부가 만나는 부분은 진공 압력을 20 초 이상 부과 하였을 때,

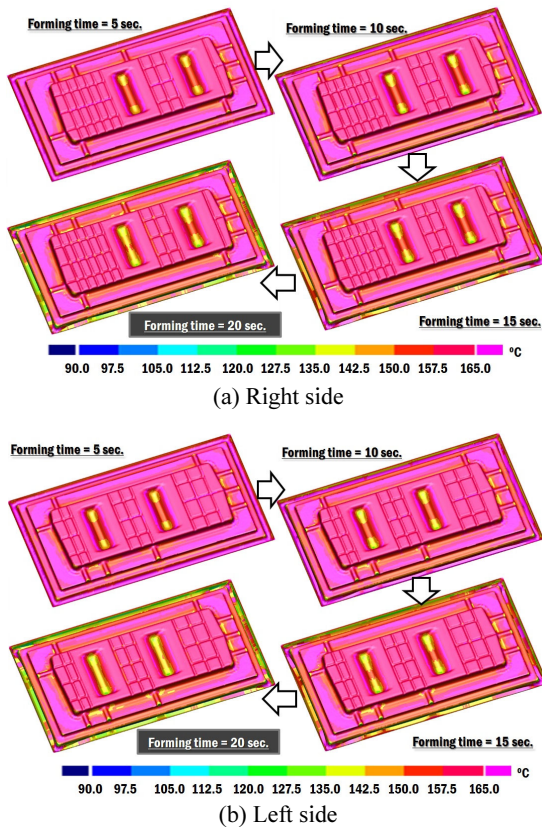


Fig. 6 Deformed shapes and temperature distributions for thermoforming of photo-bioreactor cases

성형이 완료되는 것을 알 수 있었다. 연결부들과 케이스의 미세조류/배지액 저장부가 만나는 부분의 온도분포는 성형 시간 15 초를 초과될 때 이 부분 전체의 온도가 PC 재료 유리전이온도인 149 °C 이하로 감소되기 시작하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 진공 열성형을 15 초 이하로 수행하면 연결부들과 저장부가 만나는 부분이 제품 냉각시 수축 및 잔류 응력에 의하여 형상 복원될 가능성이 높음을 알 수 있었다. 성형 시간이 20 초 이상 되어야 정적 혼합기 지지부 전체의 온도가 PC 재료의 유리전이 온도 이하로 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 정적 혼합기 지지부의 형상을 구현하기 위해서는 20 초의 진공 열성형 시간이 필요함을 알 수 있었다.

Fig. 7 은 20 초동안 진공 열성형 된 평판형 광생물반응기 케이스의 각 단면의 형상분포이다. Fig. 7 에서 20 초 동안 진공 열성형을 수행할 경우, 2.3 절에서 도출된 보강구조 설계와 유사하게 케이스의 보강구조가 성형될 수 있음을 알 수 있었다. 수직 보강구조들의 깊이는 7.5-8.5 mm 범위 내에 형성되었다. 하단부, 중앙부 및 상단부 수평 보강구조들의 깊이가 각각 6.5-7.5 mm, 6.9-7.7 mm 및 7.5-8.2 mm 범위내에 형성됨을 알 수 있었다. 20 초 이상 진공 열성형을 수행하여도 케이스 보강구

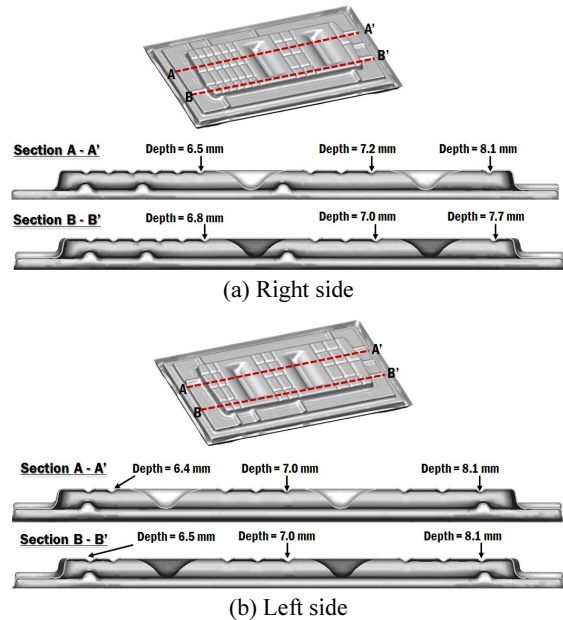


Fig. 7 Sectional shape of the thermoformed photo-bioreactor cases (t = 20 seconds)

조의 깊이 증가는 0.1 mm 미만 이었다.

Fig. 8 은 20 초 동안 진공 열성형된 평판형 광생물 반응기 케이스의 두께 분포이다. 보강구조들과 정적 혼합기 지지부들, 케이스의 저장부와 연결부가 만나는 부분들 및 프레임 체결부를 제외한 전체 60 % 내외를 차지하는 최종 제품의 일반적인 형상부에서는 두께가 2.5 mm 이상인 것을 알 수 있었다. 그러나 정적 혼합기 지지부들과 보강구조들에 서는 각각 1.9-2.2 mm 및 2.1-2.5 mm 범위의 두께를 나타내었다. 또한 케이스의 저장부와 연결부가 만나는 부분들 및 프레임 체결부에서는 두께가 각각 1.8-2.2 mm 및 2.1-2.5 mm 범위를 나타내었다.

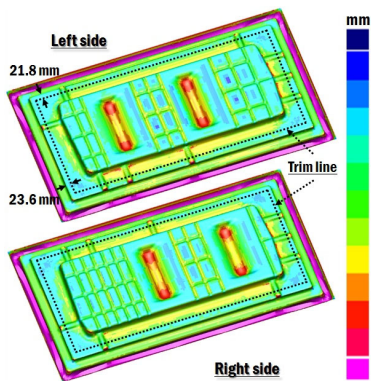


Fig. 8 Thickness distribution of the thermoformed photo-bioreactor cases (t = 20 seconds)

Fig. 9 는 20 초 진공 열성형 후 평판형 광생물 반응기 케이스 내부의 소성변형을 분포이다. 케이스의 전체적인 소성변형율은 0.12 이상으로 예측

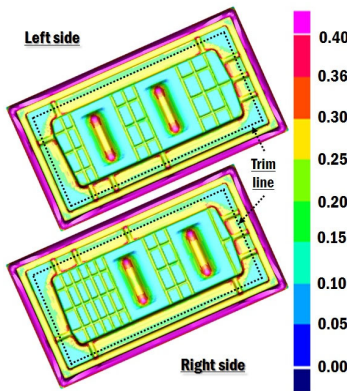


Fig. 9 Plastic strain distribution in the thermoformed photo-bioreactor cases (t = 20 seconds)

되었다. 구조해석에서 가정된 균일 두께인 2.5 mm 보다 두께가 적게 예측된 보강구조들과 정적 혼합기 지지부들, 케이스의 저장부와 연결부가 만나는 부분들 및 프레임 체결부의 소성변형율은 0.25 이상으로 예측되었다. 소성변형이 발생하면 재료의 연속적 항복에 의하여 항복강도가 증가함과 아울러 제품 내부에 발생하는 잔류응력에 의하여 제품의 실제적인 강성이 증가하게 된다. 그러나 이러한 현상은 구조해석에서 고려하기 어렵다. 이와 같은 사유로 케이스 진공 열성형 후 두께가 구조해석에서 가정된 균일 두께인 2.5 mm 보다 실제 제품 두께가 작아진 부분의 실제적인 강성은 구조해석에서 예측된 강성보다 우수할 것으로 사료되었다. 또한 성형된 케이스의 전체적인 소성변형에 의한 재료 항복 강도 증가와 아울러 제작된 케이스 내부에 잔류응력이 발생하여 실제 제품의 강성은 구조해석에서 예측된 강성보다 높을 것으로 판단되었다.

20 초 에서 24 초의 진공 열성형을 수행한 케이스의 형상, 온도분포, 두께 분포 및 소성 변형을 분포를 분석/고찰한 결과 20 초 동안 진공 열성형을 수행한 경우와 20 초를 초과하여 열성형을 수행한 경우가 거의 유사한 제품 형상 및 온도/두께/소성변형을 분포를 나타내는 것을 알 수 있었다.

위 결과로부터 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 시간을 20 초로 선정하였다.

#### 4. 케이스 진공 열성형 금형 설계/제작

평판형 광생물 반응기 케이스 성형 금형의 형상은 진공 열성형 해석에서 사용된 금형 표면 CAD 데이터를 이용하였다. 수직/수평 보강구조가 생성되는 채널들의 깊이는 11 mm 로 선정하였다. 금형 재료는 PVC 를 사용하였다. 좌/우 금형의 크기는 700 mm × 1,450 mm × 82.4 mm 로 동일하였다.

평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 금형은 PVC 재료를 CNC 가공하여 외형을 제작한 후, 진공 압력을 부가하기 위한 구멍들을 드릴로 생성하였다. 구멍들의 직경은 약 3 mm 이다. 최종적으로 표면 사상작업을 수행하여 Fig. 10 과 같은 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 금형을 제작하였다. 금형의 제작시간은 약 11 일 정도 소요되었다.

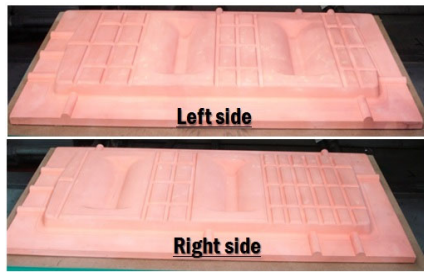


Fig. 10 Fabricated thermoforming moulds

5. 진공 열성형 실험 및 제품 특성 분석/고찰

5.1 진공 열성형 실험

제작된 진공 열성형 금형과 두께 3 mm 의 PC 판재를 이용하여 진공 열성형 실험을 수행하였다. 진공 열성형 실험은 재료 가열, 재료 이동, 재료 스트레칭 (Stretching), 스트레칭된 재료 진공 성형, 제품 냉각 및 취출의 6 가지 단계로 수행하였다. Fig. 11 과 Table 5 는 각각 진공 열성형 실험 구성 과 실험 조건이다. 진공 열성형 시간을 변화시키 면 실험을 수행하여 열성형 시간에 따른 제품 형 상 변화를 고찰하였다. 시제품 성형 후 두께 분포, 단면 형상 구현 정도 및 보강구조 깊이를 분석/ 고찰하였다.

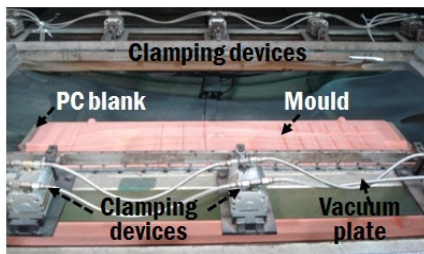


Fig. 11 Experimental set-up

Table 5 Experimental conditions

Initial temp. of blank (°C)	Forming time (sec.)	Vacuum pressure (MPa)	Heater temp. (°C)	Ejection temp. (°C)
165	0-20	0.1	290	90

5.2 제품 특성 분석 및 고찰

Fig. 12 와 13 는 진공 열성형 실험 결과 얻어 진 진공압력 유지시간에 따른 제작된 케이스의 형상 변화이다.

진공 압력이 20 초 보다 적게 유지 되었을 때 에는 케이스의 저장부 모서리 부분 및 케이스의 저장부와 연결부가 만나는 영역에서 미성형이 발 생하는 것을 관찰할 수 있었다. 진공 압력이 20 초 미만으로 유지되었을 경우에는 실제 실험과정에서 진공 압력이 유지 될 때까지는 PC 재료가 케이스 형상을 유지하다가 진공압력이 제거후 냉각/취출 과정 동안 케이스의 저장부 모서리 부분 및 케이 스의 저장부와 연결부가 만나는 영역에서 형상이 천천히 복원되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 각

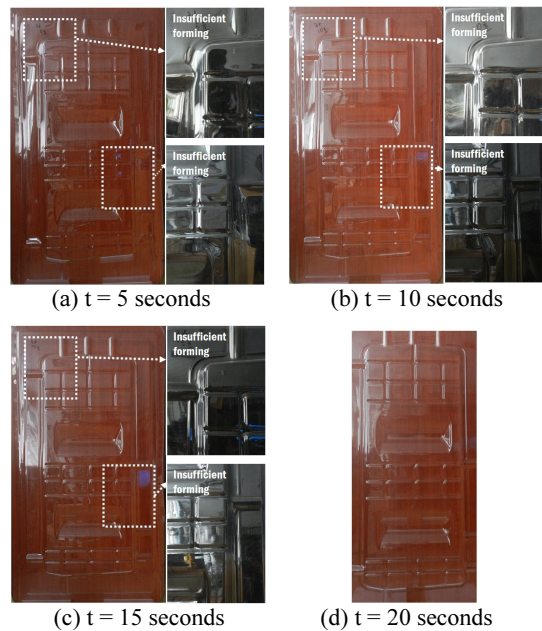


Fig. 12 Thermoformed flat panel photo-bioreactor case (Left side)

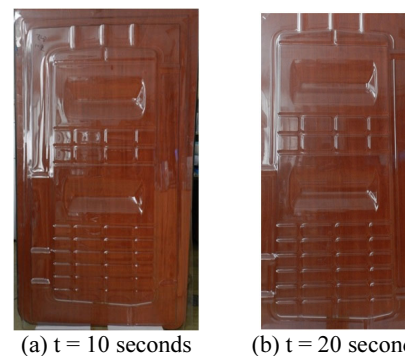


Fig. 13 Thermoformed flat panel photo-bioreactor case (Right side)

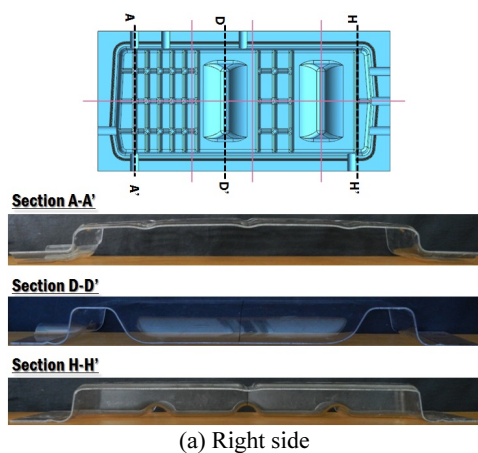


진공 압력 유지 시간별 케이스의 보강구조 깊이 변화를 고찰한 결과, 진공 압력 유지 시간이 15 초 미만일 경우 수직/수평 방향 보강구조의 깊이가 설계 데이터보다 적게 성형됨을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 설계된 특징형상을 가진 얇은 평판형 광생물반응기 케이스 진공 열성형 공정으로 제작하기 위해서는 진공압력을 20 초 이상 작용시켜야 함을 알 수 있었다. 케이스 진공 열성형 실험 과정에서 PC 재료가 과도하게 가열되거나, 원소재의 수분이 충분히 제거되지 않았을 경우 진공 열성형 공정중 케이스 내부에 기포와 부풀림 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

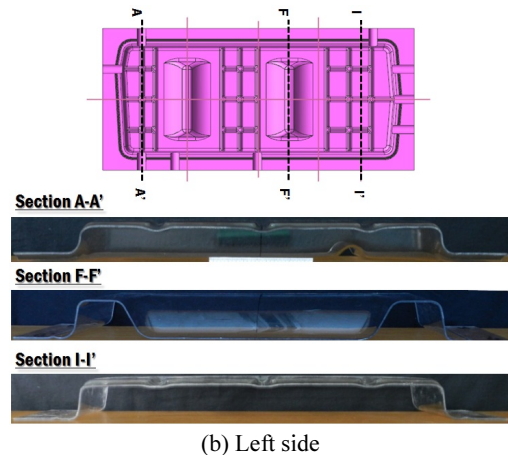
진공 압력을 20 초 동안 유지 시킨 열성형 공정으로 제작된 좌/우 케이스의 보강구조 깊이 분포를 측정하였다. 수직 보강구조의 깊이는 오른쪽 케이스의 경우 대부분 7.0-7.9 mm 범위로 측정되었고, 왼쪽 케이스의 경우 7.0-8.5 mm 범위를 나타내었다. 하단부, 중단부 및 상단부 수평 보강구조의 깊이는 좌/우 케이스 모두 각각 6.9-7.6 mm 와 6.8-7.7 mm 및 7.2-8.2 mm 범위를 나타내었다. 실제 제품의 보강 구조 깊이는 해석 결과 예측 보강구조 깊이와 거의 유사하였다. 또한 제품의 보강 구조 깊이는 케이스 설계에서 제안된 보강구조들의 형상 조건을 충족시키는 것을 알 수 있었다.

Fig. 14 및 15 은 진공 압력을 20 초 동안 유지 시킨 열성형 공정으로 제작된 케이스의 단면 형상, 및 두께 분포이다.

Fig. 14 의 단면형상을 분석한 결과, 진공압력을 20 초 동안 유지시켜서 제작한 평판형 광생물반응기 케이스의 단면 형상이 설계 데이터의 단면 형상과 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 또한



(a) Right side



(b) Left side

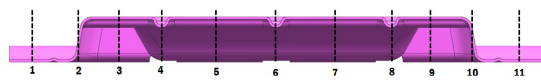
Fig. 14 Sectional shapes of the thermoformed flat panel photo-bioreactor cases (t = 20 seconds)

특징 형상인 정적 혼합기 지지대와 수직/수평 보강구조 및 연결부가 설계 형상과 유사하게 제작된 것을 알 수 있었다.

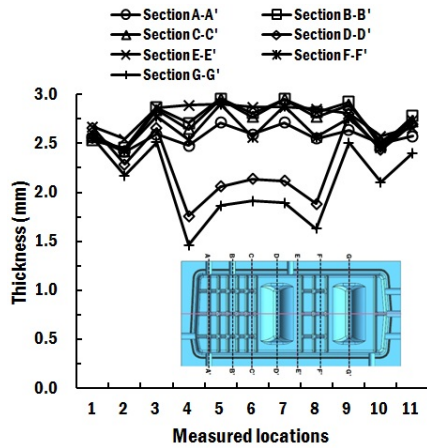
Fig. 15 의 각 단면별 두께 분포를 고찰한 결과, 평면 형상으로 성형된 부분의 경우 2.5-3.0 mm 의 두께를 나타내었다. 정적 혼합기 지지대와 보강구조들의 두께는 각각 1.5-2.2 mm 와 2.2-2.8 mm 범위로 측정되었다. 케이스의 저장부와 연결부가 만나는 부분 및 프레임 체결부는 각각 2.1-2.6 mm 및 2.2-2.8 mm 범위 두께분포를 나타내었다. 오른쪽과 왼쪽 케이스중 오른쪽 케이스의 두께 범위가 0.1 mm 정도 넓게 나타났으며, 오른쪽 케이스의 두께가 0.1-0.3 mm 정도 두껍게 측정되었다.

해석결과와 실험결과를 두께 측면에서 비교한 결과 정적 혼합기 지지대 부분을 제외하고는 실험결과가 해석결과보다 약 0.1-0.3 mm 정도 두껍게 나타났다. 그러나 정적 혼합기 지지대에서는 4 와 5 번 위치에서 실험결과가 해석결과 보다 약 0.2-0.4 mm 정도 얇은 두께를 나타내었다. 이 결과들로부터 변형이 가장 심한 정적 혼합기 지지대 모서리 부분을 제외한 전체 형상에서는 해석결과가 실제 성형공정을 유사하게 묘사하고 있는 것을 알 수 있었다.

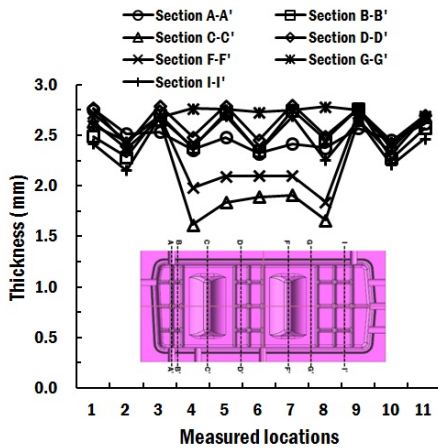
위 결과들로부터 제안된 제품/금형 설계와 진공 열성형 공정을 적용할 경우 특징형상을 가진 얇은 광생물반응기 케이스를 제작할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 재료의 강성 문제로 인하여 8 mm 이상의 두꺼운 PC 판재를 적용 했던 광생물반응기



(a) Measured locations of the thickness for each section



(b) Right side



(c) Left side

Fig. 15 Thickness distribution of the thermoformed flat panel photo-bioreactor cases ( $t = 20$  seconds)

케이스의 두께를 현저히 감소 시킴으로써 무게/재료 감소 뿐만 아니라 케이스의 광학적 특성도 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### 6. 결론

본 논문에서는 특정 표면형상을 가지는 얇은 평판형 광생물반응기 케이스 개발에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 유동학/광학적 특성 고려 설계와 구조해

석을 통하여 미세조류 혼합특성 개선, 광생물반응기 광학 특성 향상 및 케이스 배플립 현상을 최소화할 수 있는 얇은 평판형 광생물반응기 형상 및 보강구조 설계를 도출할 수 있었다.

둘째, 3 차원 비선형 진공 열성형 공정 해석을 수행하여 설계된 평판형 광생물반응기 케이스들의 성형성 및 제품 제작 특성을 예측하였다. 또한 이 결과로부터 진공 열성형 공정으로 설계 형상과 유사한 케이스를 성형할 수 있는 진공 압력 유지 시간을 도출할 수 있었다.

셋째, 진공 열성형 해석 결과를 이용하여 특징 형상을 가진 얇은 평판형 광생물반응기 케이스 성형 금형을 제작하고, 이 금형을 이용하여 진공 열성형 실험을 수행하였다. 진공 열성형 실험결과로부터 설계 형상과 유사한 제품을 진공 열성형할 수 있는 공정조건을 도출할 수 있었다. 또한 제안된 케이스/금형 설계와 진공 열성형 공정으로 특징형상을 가진 얇은 평판형 광생물반응기 케이스를 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

넷째, 재료의 강성 문제로 인하여 8 mm 이상의 두꺼운 PC 판재를 적용 했던 광생물반응기 케이스의 두께를 현저히 감소 시킴으로써 무게/재료 감소 뿐만 아니라 케이스의 광학적 특성도 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

추후, 이 연구를 통하여 제작된 평판형 광생물반응기 케이스를 실제 미세조류 대량 배양시험에 적용하여, 제작된 케이스의 적용성과 효율성을 확인할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(과제번호: 20103020090020).

### 참고문헌

1. Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., and Chang, J. S., "Cultivation, Photobioreactor Design and Harvesting of Microalgae for Biodiesel Production: A Critical Review," *Bioresource Technology*, Vol. 102, No. 1, pp. 71-81, 2010.
2. Seo, Y. H., Lee, H. M., Jeon, S. K., Kue, T. W., Kang, B. S., and Kim, J., "Homogenization of Dimpled Tube and Its Application to Structural Integrity

- Evaluation for a Dimple-type EGR Cooler Using FEM,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 2, pp. 183-191, 2012.
3. Brennan, L. and Owende, P., “Biofuels from Microalgae-A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-product,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 14, No. 2, pp. 557-577, 2010.
  4. 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,” *J. of the KSPE*, Vol. 28, No. 2, pp. 125-132, 2011.
  5. Bae, K. and Shim, J. H., “Economic and Environmental Analysis of a Wind Hybrid Power System with Desalination in Hong-do, South Korea,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 4, pp. 623-630, 2012.
  6. Mata, T. M., Martins, A. A., and Caetano, N. S., “Microalgae for Biodiesel Production and Other Application: A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 14, No. 1, pp. 217-232, 2010.
  7. Shin, H. J., Park, J. H., Jung, W. K., Cho, H., and Kim, S. W., “Development of Biorefinery Process Using Microalgae,” *J. of the KSPE*, Vol. 28, No. 2, pp. 154-167, 2011.
  8. Ahmad, A. L., Mat Yasin, N. H., Derek, C. J. C., and Lim, J. K., “Microalgae as a Sustainable Energy Source for Biodiesel Production: A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 15, No. 1, pp. 584-593, 2011.
  9. Singh, R. N. and Sharma, S., “Development of Suitable Photobioreactor for Algae Production - A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 16, No. 4, pp. 2347-2353, 2012.
  10. Carvalho, A. P., Meireles, L. A., and Xavier Malcata, F., “Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances,” *Biotechnology Progress*, Vol. 22, No. 6, pp. 1490-1506, 2006.
  11. Pushparaj, B., Pelosi, E., Tredici, M. R., Pinzani, E., and Materassi, R., “An Integrated Culture System for Outdoor Production of Microalgae and Cyanobacteria,” *Journal of Applied Phycology*, Vol. 9, No. 2, pp. 113-119, 1997.
  12. Bitog, J. P., Lee, I. B., Lee, C. G., Kim, K. S., Hwang, H. S., Hong, S. W., Seo, I. H., Kwon, K. S., and Mostafa, E., “Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling and Designing Photobioreactors for Microalgae Production: A Review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 76, No. 2, pp. 134-147, 2011.
  13. Ahn, D. G., Cho, C. G., Jeong, S. H., and Lee, D. G., “Design of Photobioreactor for Mass Production of Microalgae,” *J. of the KSPE*, Vol. 28, No. 2, pp. 140-153, 2011.
  14. Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., and Richmond, A., “An Industrial-size Flat Plate Glass Reactor for Mass Production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae),” *Aquaculture*, Vol. 195, No. 1-2, pp. 35-49, 2001.
  15. Hoekema, S., Bijmans, M., Janssen, M., Tramper, J., and Wijffels, R. H., “A Pneumatically Agitated Flat-panel Photobioreactor with Gas Re-circulation: Anaerobic Photoheterotrophic Cultivation of a Purple Non-sulfur Bacterium,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1331-1338, 2002.
  16. Sierra, E., Acien, F. G., Fernández, J. M., García, J. L., González, 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.
  17. Subitec, <http://www.subitec.com>
  18. Fraunhofer IGB, [http://www.igb.fraunhofer.de/en/competences/environmental-biotechnology/microalgae/the\\_flat-panel\\_airlift\\_photobioreactor.html](http://www.igb.fraunhofer.de/en/competences/environmental-biotechnology/microalgae/the_flat-panel_airlift_photobioreactor.html)
  19. Trösch, W., “Bioreactor for the Cultivation of Microorganisms, and Method for the Production Thereof,” EP 1 326 959 B1.
  20. Trösch, W., Schmid-staiger, U., Zastrow, A., Retze, A., and Brucker, F., “Photobioreactor with Improved Supply of Light by Surface Enlargement, Wavelength Shifter Bars or Light Transport,” EP 1 169 428 B1.
  21. Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schmid-Staiger, U., and Trösch, W., “A Novel Airlift Photobioreactor with Baffles for Improved Light Utilization through the Flashing Light Effect,” *Journal of Biotechnology*, Vol. 92, No. 2, pp. 89-94, 2001.
  22. Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., and Hankamer, B., “Second Generation Biofuels: High-

- Efficiency Microalgae for Biodiesel Production,”  
Bioenergy Research, Vol. 1, No. 1, pp. 20-43, 2008.
23. <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>
24. Klein, P. W., “Fundamentals of Plastic Thermoforming,” Morgan & Claypool Publishers, pp. 27-59, 2009.
25. G’sell, C. and Jonas, J. J., “Determination of the Plastic Behaviour of Solid Polymers at Constant True Strain Rate,” Journal of Materials Science, Vol. 14, No. 3, pp. 583-591, 1979.
26. Rezgui, F., G’sell, C., Dahoun, A., Hiver, J. M., and Sadoun, T., “Plastic Deformation of Low-Density Polyethylene Reinforced with Biodegradable Polylactide, Part 2: Creep Characterization and Modeling,” Polymer Engineering and Science, Vol. 14, No. 1, pp. 126-132, 2011.