



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2012년 2월

석사학위논문

미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기
케이스 개발

조선대학교 대학원

기계공학과

조 창 규

미세조류 배양용 평판형
광생물 반응기 케이스 개발

Development of flat panel photobioreactor
case for cultivation of microalgae

2012 년 2 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

조 창 규

미세조류 배양용 평판형
광생물 반응기 케이스 개발

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로
제출함.

2011 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

조 창 규

조창규의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한길영



위원 조선대학교 교수 정상화



위원 조선대학교 교수 안동규



2011 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
제 2 절 연구 목적 및 방법	3
제 2 장 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료 특성 분석	4
제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료의 기초 광학 특성	4
제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료 고온 인장 특성	9
1. 고온 인장 물성시험 방법	9
2. 고온 인장 물성시험 결과	13
3. 고온 인장 물성시험 결과를 이용한 G'sell 모델 상수	

도출	26
----------	----

제 3 장 10 L 급 평판형 광생물 반응기 3 차원 제품

설계 및 제작	30
---------------	----

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 3 차원 제품

설계	30
----------	----

제 2 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형

해석 및 성형성 분석	35
-------------------	----

제 3 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 제작 45

제 4 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 미세조류 배양

시험	52
----------	----

제 4 장 180 L 급 평판형 광생물 반응기 3 차원

제품 설계 및 열성형 해석	63
----------------------	----

제 1 절 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 3 차원

설계	63
----------	----

제 2 절 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 열성

형 해석 및 성형성 분석	68
---------------------	----

1. 열성형 공정	68
-----------------	----

2. 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 모델링	70
-------------------------------	----

3. 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과 및 성형성 분석	72
제 5 장 결론 및 향후과제	77
REFERENCES	79
감사의 글	

LIST OF TABLES

Table 1 Transmissivity for different plastic material	5
Table 2 The shape of PC, PMMA Accura-60 specimen	5
Table 3 The shape of specimen	10
Table 4 Condition of the high temperature uniaxial tensile tests	11
Table 5 Estimated material constants of G'Sell model (material : PC, thickness = 2mm)	28
Table 6 Estimated material constants of G'Sell model (material : PC, thickness = 3mm)	29
Table 7 Estimated material constants of G'Sell model (material : PMMA, thickness = 2mm)	29
Table 8 Estimated material constants of G'Sell model (material : PMMA, thickness = 3mm)	29
Table 9 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	36
Table 10 Process parameters and Boundary condition	36
Table 11 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	41
Table 12 Process parameters and Boundary condition	41
Table 13 Properties of the Accura-60 materials	46
Table 14 Manufacturing conditions for the flat panel photobioreactor	47
Table 15 Microalgae cultivation conditions (Unit structure type)	52
Table 16 Microalgae cultivation conditions (Flask type)	58
Table 17 Microalgae cultivation conditions	61
Table 18 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	71
Table 19 Process parameters and Boundary condition	71

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Illustration for the reflection, absorption, and transmission of light in the photobioreactor case	4
Fig. 2 The equipment for vertical light transmittance	6
Fig. 3 The equipment for Diffuse light transmittance and reflectance	6
Fig. 4 Vertical light transmittance for plastic material	7
Fig. 5 Diffuse light transmittance and reflectance for plastic material	8
Fig. 6 ASTM D 638 (Type 1)	9
Fig. 7 Time chart of test	10
Fig. 8 The equipment for tensile tests	12
Fig. 9 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	13
Fig. 10 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)	14
Fig. 11 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	14
Fig. 12 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)	15
Fig. 13 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	15
Fig. 14 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)	16
Fig. 15 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	16
Fig. 16 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)	17
Fig. 17 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	17
Fig. 18 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)	18
Fig. 19 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)	18
Fig. 20 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	19
Fig. 21 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	19
Fig. 22 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)	20
Fig. 23 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)	20
Fig. 24 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	21
Fig. 25 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	22
Fig. 26 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)	22

Fig. 27 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	23
Fig. 28 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)	23
Fig. 29 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)	24
Fig. 30 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)	24
Fig. 31 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)	25
Fig. 32 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)	25
Fig. 33 Estimated G'sell parameters	28
Fig. 34 Surface to volume ratio of the flat panel photobioreactor with a polygon surfaces	31
Fig. 35 Design of the 10 L class flat panel photobioreactor case - Airlift type	33
Fig. 36 Design of the 10 L class flat panel photobioreactor case design - Unit structure type	34
Fig. 37 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	35
Fig. 38 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Thickness distribution)	38
Fig. 39 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Thickness distribution)	38
Fig. 40 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Distance between die and blank)	39
Fig. 41 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Distance between die and blank)	39
Fig. 42 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	40
Fig. 43 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Thickness distribution)	43
Fig. 44 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Thickness distribution)	43
Fig. 45 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Distance between die and blank)	44
Fig. 46 The result of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Distance between die and blank)	44
Fig. 47 CAD Model (Photobioreactor case of Airlift type and Unit structure type)	45
Fig. 48 Rapid prototyping apparatus	46

Fig. 49 Manufactured photobioreactors from the SLA apparatus	48
Fig. 50 Polishing operations of case airlift type and unit structure type	49
Fig. 51 Spary coating operations	49
Fig. 52 Finally fabricated flat panel photobioreactor case	50
Fig. 53 Assembled flat panel photobioreactor case	51
Fig. 54 Gas flow control according to the cultivation of microalgae	53
Fig. 55 Microalgae cultivation system (Unit structure type)	53
Fig. 56 Results of the microalgae cultivation (Unit structure type)	54
Fig. 57 The equipment for OD value measurement	55
Fig. 58 Results of the OD value measurement (Unit structure type)	56
Fig. 59 Microalgae cultivation system (Airlift type)	57
Fig. 60 Result of the OD value measurement (Airlift type)	58
Fig. 61 Result of the OD value measurement (Flask type)	59
Fig. 62 The results of unit volume according to the microalgae cultivation type (Algae : Dunaliella	60
Fig. 63 Results of the microalgae cultivation (Chlorella sp.)	61
Fig. 64 Results of the OD value according to the microalgae cultivation type (Algae : Chlorella sp.)	62
Fig. 65 Schematics of the relationship between mean light intensity andspecific growth rate of microalgae	63
Fig. 66 Variation of photosynthesis regions in the depth direction of photobioreactor	64
Fig. 67 Schematics of influence of cell density and gas input on productivity	65
Fig. 68 Design of the 180 L flat panel photobioreactor case	66
Fig. 69 Design of the 180 L flat panel photobioreactor case internal structure	67
Fig. 70 Vacuum forming process	68
Fig. 71 Mechanical forming process	69
Fig. 72 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case	70
Fig. 73 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1100 × 2200 (Thickness distribution & Distance between die and blank)	72
Fig. 74 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1200 × 2300 (Thickness distribution & Distance between die and blank)	73

Fig. 75 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1300 × 2400
 (Thickness distribution & Distance between die and blank) 74

Fig. 76 The results of thermoforming analysis according to the thickness distribution
 (Thickness : 3 mm) 75

Fig. 77 The results of thermoforming analysis according to the Distance between die and
 blank (Thickness : 3 mm) 76

ABSTRACT

Development of flat panel photobioreactor case for cultivation of microalgae

Cho, Chang-Gyu

Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu, Ph. D

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

In recent, the development of renewable energy is needed, due to main energy depletion has been more serious about the demanding for oil, coal, natural gas. Also, the study of the alternative energy that is eco-friendly products by convention on climate change has been carried out. Especially, the main cause of greenhouse gas including carbon dioxide that is available renewable energy production is increasing. The study about photobioreactor development that is cultivated microalgae mass production and the method using biomass is lively performing for a photosynthetic microorganism can fix carbon dioxide.

Therefore, this study carried out research on cultivation efficiency, product quality and characteristics that are cultivated microalgae for photobioreactor using design, manufacturing of photobioreactor case for microalgae cultivation. Plastic materials combining superior optical characteristic that is suit with flat panel photobioreactor case manufacturing by performing light transmittance test using light transmittance measurement system are selected. With the result of the selected plastics showed that can draw high temperature fluid model constants in performing high temperature tensile property tests according to temperature and crosshead velocity. For this study, we examined flat panel photobioreactor forming analysis through thickness distribution of photobioreactor designed the three dimensional flat panel photobioreactor in 10-liter grade with finite element analysis

program, PAM-FORM applied by PC, PMMA and forecasting pattern change. From the result of the finite element analysis showed that a superior optimal thermoforming process condition and the design plan demending manufacture of flat panel photobioreactor. From the design plan, photobioreactor characteristic was constructed through cultivation tests that is made three dimensional product using rapid prototyping process. Through this 10-liter grade design plan, we analyzed the influence about quality, formability of mould shape, process variable and material thickness from thermoforming analysis of flat panel photobioreactor case based on designed three dimensional 180-liter grade flat panel photobioreactor.

From the result of the analysis, the superior optimal design plan of microalgae for mass production 180-liter grade flat panel photobioreactor case.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

최근 국내는 물론이고 전 세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화와 고유가에 의한 자원위기에 효과적으로 대처하기 위해 녹색성장이 국가전략으로 대두되고 있다. 지구 온난화는 인류생존을 위협하는 요인으로 작용하여 지난 100 년간 세계 평균기온은 0.74 °C 상승하였고 금세기말에는 최고 6.4 °C 상승을 예상하고 있다. 또한 기후변화로 인해 경제적 손실은 매년 세계 GDP 의 5 ~ 20 % 으로 보고되고 있다. 또한 전 세계적인 경제성장 및 신흥경제국의 에너지 수요 증가로 에너지 수급 및 불균형 현상이 심화되었으며 화석연료 중심의 에너지 소비구조는 전 세계 에너지원의 85 % 를 화석연료에 의존함으로써 자원고갈을 가속화 시키고 있는 실정이다. 특히 우리나라는 에너지의 97 % 를 수입에 의존해하며 화석연료에 대한 의존도가 높아 신재생에너지에 대한 국가적인 차원에서 관심이 대두되고 있다. 현재 2011 년 총에너지의 5 % 를 신재생에너지로 보급한다는 장기적인 목표를 세워 신재생에너지기술 개발 및 보급 사업 등에 대한 지원을 강화하고 있다.

특히, 신재생에너지 중 바이오에너지는 태양광을 이용하여 광합성 되는 유기물 및 동 유기물을 소비하여 생성되는 바이오매스를 이용한 에너지원으로서 풍부한 자원과 큰 파급효과, 환경친화적인 생산시스템, 온실가스의 저감, 생성에너지의 연료화 등 다양한 장점을 가지고 있는 에너지원이다. 국내·외 동향을 살펴보면 미국은 현재 연료용 알코올 보급 (28.1 억 gal, 2003), 바이오디젤보급 (2,000 만 gal, 2003), LFG 이용 (1998, 360 개소, 730 MW) 에 주력하고 있으며 1999 년 대통령령으로 바이오 연료/화학원료 개발 촉진을 선언한바 있으며 2010 년엔 바이오 에너지 공급을 3 개로 확충 한다는 계획을 수립하였다. EU 는 나무를 이용한 지역 열병합발전으로 22 백만 toe/년, 쓰레기 소각열 발전으로 2.1 GW 의 전력설비를 가동하였으며 세계 최초 바이오가스 열차를 운행 (스웨덴, 2005. 10) 하였으며 늪이나 습지에서 유기물의 micro-bacteria 의 분해로 바이오 가스를 생성한바 있다. 국내에서는 70 년대 초부터 대학과 연구소를 중심으로 연구를 시작하여 88 년부터 대체에너지개발촉진법에 따라 정부 차원에서 기술을 개발하기 시작하였으며 1999 년 까지 바이오에탄올, 메탄가스화 기술개발 위주로 추진되었으며 1999 년대 이후 LFG 이용기술, 바이오수소생산 기술개발 등이 주요 분야로 추진

되었다. 현재는 고효율 메탄발효 공정은 상용화 단계로서 보급이 추진되고 있는 상황이다. 또한 바이오 디젤 증장기 보급 계획에 따라 디젤 연료내 바이오 디젤 혼합 비율을 5% 까지 확장할 예정이며, 바이오디젤/에탄올/가스 등 바이오 에너지를 대량 생산하기 위한 기술개발의 관심이 높아지고 있다. 최근 광합성을 통한 이산화탄소 고정이 가능한 미세조류(Microalgae)를 바이오 질량으로 활용하는 방법과 미세조류의 대량생산 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁹⁾ 특히, 미세조류 대량생산 시스템으로 광생물 반응기(Photobioreactor)가 사용되고 있으며, 미세 조류의 생산성 향상을 위해 개방형 및 밀폐형으로 다양한 광생물 반응기들이 개발되고 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾ 개방형 배양은 가장 단순한 형태로 자연적으로 영양원 공급이 풍부한 개방된 연못 등에서 배양하는 것으로 초기 설비투자과 운전비용이 저렴하고 유지 및 보수가 용이한 장점이 있다. 그러나 배양장치 내부로 효과적인 빛 전달이 이루어지지 않아 균체의 성장속도가 느리고 오염으로 인한 미세조류의 생존량과 더불어 많은 양의 이산화탄소를 제거하기 위해서는 넓은 설치 공간이 필요한 단점이 있다.¹⁵⁻¹⁹⁾ 밀폐형 배양은 밀폐된 환경에서 배양하며 주로 광생물반응기를 이용하여 미세조류를 배양한다. 고농도 배양을 위해 빛, 기체전달, 배지의 공급, 충분한 광원 등의 제한인자로 작용한다.²⁰⁻²⁴⁾ 빛의 효율적인 전달을 위해서 태양광, 집광판, 광섬유 이용 등의 다양한 방법이 시도되고 있다.²⁵⁻²⁹⁾ 고농도 배양에서 빛의 효율적인 전달을 위해서는 광생물반응기의 단위부피당 표면적을 증가시켜야하는데 이를 위해 다양한 형태의 반응기가 연구되고 있다.³⁰⁻³⁷⁾ 미세조류 대량 배양을 위해 이와 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Michael 등은 버블칼럼 반응기, 에어리프트 반응기, 칼럼형 반응기, 평판형 반응기를 설계 및 제작하여 미세조류 배양 시험을 통한 배양효율 및 배양조건에 관하여 연구를 수행하였다.³⁸⁾ Peer M 등은 여러종류의 미세조류를 배양함으로써 고효율의 바이오 디젤 생산을 위한 미세조류 분석을 수행하였다.³⁹⁾ Sebastiaan 등은 2.4 L 급 평판형 광생물 반응기를 제작하여 미세조류 박테리아를 시험 배양함으로써 반응기 효율에 관하여 연구를 수행하였다.⁴⁰⁾ Rodolfo 등은 50 L 급 평판형 광생물 반응기를 제작하여 *Spirulina* sp. 미세조류를 배양 연구를 수행하였다.⁴¹⁾ E.Sierra 등은 250 L 급 평판형 광생물 반응기를 제작하여 온도조절, 빛의 광양 등에 따른 배양 효율을 분석하였다.⁴²⁾ Jae 등은 *Chlorella* sp. HA-1 의 미세조류를 이용하여 광원의 양이 미세조류의 성장에 미치는 영향에 관하여 연구를 수행한 바 있다.⁴³⁾

제 2 절 연구 목적 및 방법

본 논문의 목적은 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스 개발에 관한 연구이다. 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스를 개발하기 위하여 플라스틱 재료에 관한 광학 특성 및 고온 인장 시험을 통해 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스에 관한 반응기 특성 및 품질 평가 와 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스의 열성형 해석을 통해 제품 성형성 및 품질에 미치는 영향에 대하여 분석/고찰하고자 한다.

미세조류 배양은 광전달, 반응기 내부의 유체역학적 특성 및 대사 반응에 큰 영향을 받기 때문에 빛 투과율이 높은 케이스 재료와 생산량 및 광량을 증가 시키기 위한 S/V ratio (Surface to volume ratio : S/V ratio) 가 증가되는 표면 형상과 유체역학적 특성을 향상 시킬 수 있는 부품/요소, 대사 반응과 관련된 CO₂, O₂, pH 조절을 최적화할 수 있는 연구가 대두되고 있다. 본 연구에서는 빛 투과율이 높은 케이스 재료를 선정하기 위해 다양한 플라스틱 재료에 대한 광투과율 시험을 실시하여 광생물 반응기 케이스 재료에 관한 연구를 수행하였으며, S/V ratio 가 최대가 되는 평판형 광생물 반응기 케이스를 설계 제작하여 미세조류 배양 시험을 통해 반응기 배양효율을 분석하였다. 또한 10 L 급 간이형 평판형 광생물 반응기 케이스에 관한 열성형 해석을 통해 반응기 형상과 재료 두께 및 공정 조건에 대하여 PAM-FORM 을 이용한 3 차원 유한요소 해석을 수행하고자 한다. 3 차원 유한요소 해석을 통하여 제품 성형성 및 품질 영향성을 분석/고찰하여 미세조류 대량 배양이 가능한 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 설계안에 적용하여 금형형상/공정변수/재료두께가 제품 성형성과 품질에 미치는 영향성을 분석/고찰하여 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스의 최적 열성형 해석 공정조건을 도출하고자 한다.

제 2 장 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료 특성 분석

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료의 기초 광학 특성

미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스는 광생물 반응기 내부로 투과되는 광속 및 광 조도에 의하여 반응기 내부에서 미세조류가 성장하게 된다. 미세조류의 최대 성장률을 얻기 위해서는 광생물 반응기 케이스 재료에 대한 우수한 광학특성을 가진 재료의 선택이 바람직하다.

평판형 광생물 반응기 케이스 제작을 위해 다양한 재료에 대한 사전 연구가 선행되었다. 광원으로부터 조사된 빛은 Fig. 1 과 같이 광생물 반응기 케이스에 의하여 반사, 흡수, 및 투과 현상이 일어난다. 조사된 빛이 광생물 반응기 내부로 많이 전달되기 위해서는 광투과율이 높은 물질을 광생물 반응기 케이스 재료로 선정하여야 한다. Tabel 1 은 평판형 광생물 반응기 케이스 제작에 많이 사용되는 플라스틱 재료와 유리의 투과율을 나타낸것이다. 재료 중 PC(Polycarbonate) 및 PMMA(Polymethymethacrylate)의 재료는 유리의 투과율과 비슷한 가장 우수한 광학특성을 가진 플라스틱 재료임을 알 수 있다.

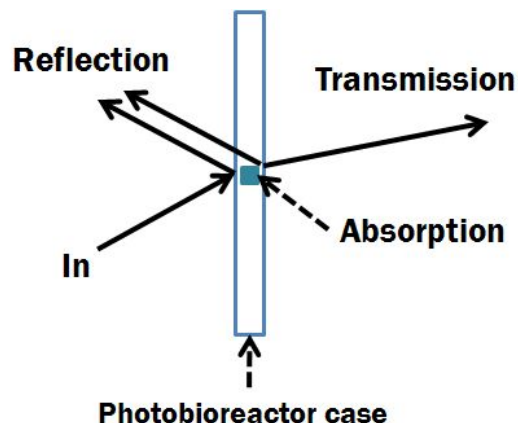


Fig.1 Illustration for the reflection, absorption, and transmission of light in the photobioreactor case

Table 1 Transmissivity for different plastic material

Material	PMMA	PC	ABS	PS	PVC	Glass
Transmissivity (%)	92-93	85-91	88-90	≅89	≅84	90-92

평판형 광생물 반응기 케이스 재료 중 우수한 광학특성을 보인 PC 및 PMMA 재료와 10 L 급 평판형 광생물 반응기 제작에 사용되는 RP(Rapid prototyping) 제작 재료인 광경화성수지(Accura-60)에 대한 기초 광투과율 시험을 진행하였다. 또한 RP 제작 공정중 후가공 공정인 Polishing 및 Spray-coating 효과에 대한 특성 분석도 함께 시험하였다. Spray-coating은 재료의 단면에 분사하였을 경우 재료의 광학적 특성을 높여주는 역할을 한다. 재료의 광투과율 시험은 시편에 대한 평행 투과율, 확산 투과율 및 재료의 반사율에 대한 측정 시험을 각각 진행하였다. Table 2는 광투과율 측정을 위한 PC, PMMA, Accura-60 재료의 두께 및 Polishing 과 Spray-coating에 대한 플라스틱 시편 제작 형상을 보여주고 있다.

Table 2 The shape of PC, PMMA, Accura-60 specimen




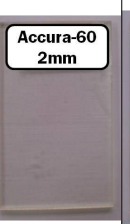
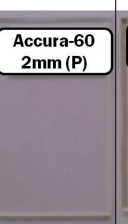

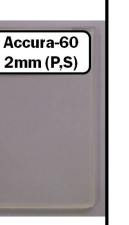
Material & Thickness	PC 1mm	PC 2mm	PMMA 2mm	Accura-60 2mm	Accura-60 2mm	Accura-60 2mm	Accura-60 2mm
Specimen							
Polishing	×	×	×	×	○	×	○
Spray-coating	×	×	×	×	×	○	○

Fig. 2 는 평행 광투과율 측정시험에 사용된 장치의 모습을 나타낸 것이다. 측정 장치는 F 사의 F-20 시험기기를 사용하였으며 두께 측정 범위는 15 nm ~ 100 μm, 측정가능한 주파수 범위는 380 ~ 1050 nm 이다. 두께 및 광학상수를 1 초안에 측정할 수 있는 장치이다. 측정방법은 시편에 광을 투과시켜 가시광선영역인(380 ~ 780 nm)의 영역을 측정하여 이 영역 중 최대값을 나타내는 평행 광투과율을 측정하였다.

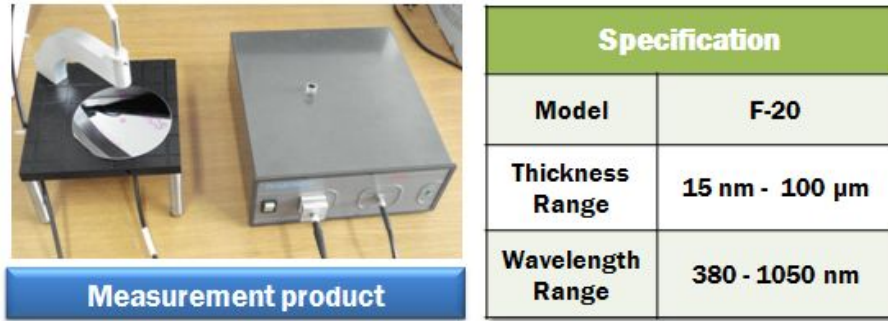


Fig. 2 The equipment for vertical light transmittance

Fig. 3 은 확산 광투과율 과 반사율 측정시험에 사용된 장치의 모습을 나타낸 것이다. 측정 장치는 J 사의 V-670 Spectrophotometer 시험기기를 사용하였으며 측정 속도는 10 ~ 8000 nm/min, 측정가능한 주파수 범위는 190 ~ 2700 nm 이다. 측정방법은 평행 광투과율 측정과 같은 시편에 광을 투과시켜 가시광선영역인(380 ~ 780 nm)의 영역을 측정하여 이 영역 중 최대값을 나타내는 확산 광투과율 및 반사율을 측정하였다.

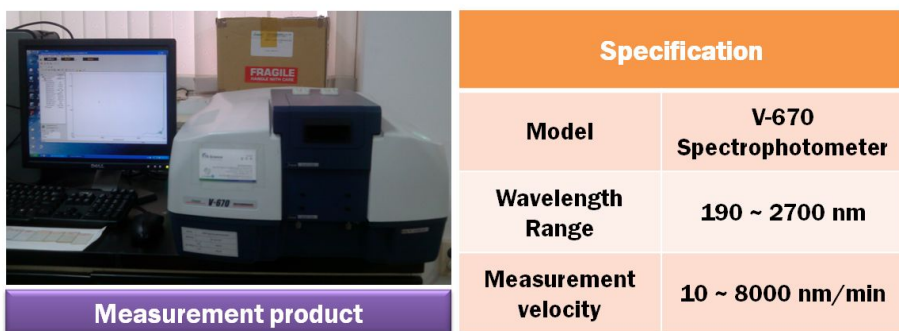


Fig. 3 The equipment for Diffuse light transmittance and reflectance

Fig. 4 는 PC, PMMA, Accura-60 재료에 대한 수직 광투과율 측정 결과를 나타낸 것이다. PC 및 PMMA 플라스틱 재료는 RP 제작 재료인 Accura-60 의 재료보다 수직 광투과율이 최대 약 60 % 이상 우수함을 알 수 있었으며, RP 제작 후가공 공정인 Polishing 공정은 Accura-60 재료의 광투과율을 약 10 % 이상 상승시킴을 알 수 있었다. 또한 Spray-coating 공정은 약 20 % 이상 광투과율이 상승하였으며, Polishing 과 Spray-coating 을 적용할 경우 약 23 % 이상 광투과율이 상승됨을 확인 할 수 있었다. Polishing 과 Spray-coating 공정은 원재료의 광학특성을 우수하게 함을 알 수 있었다.

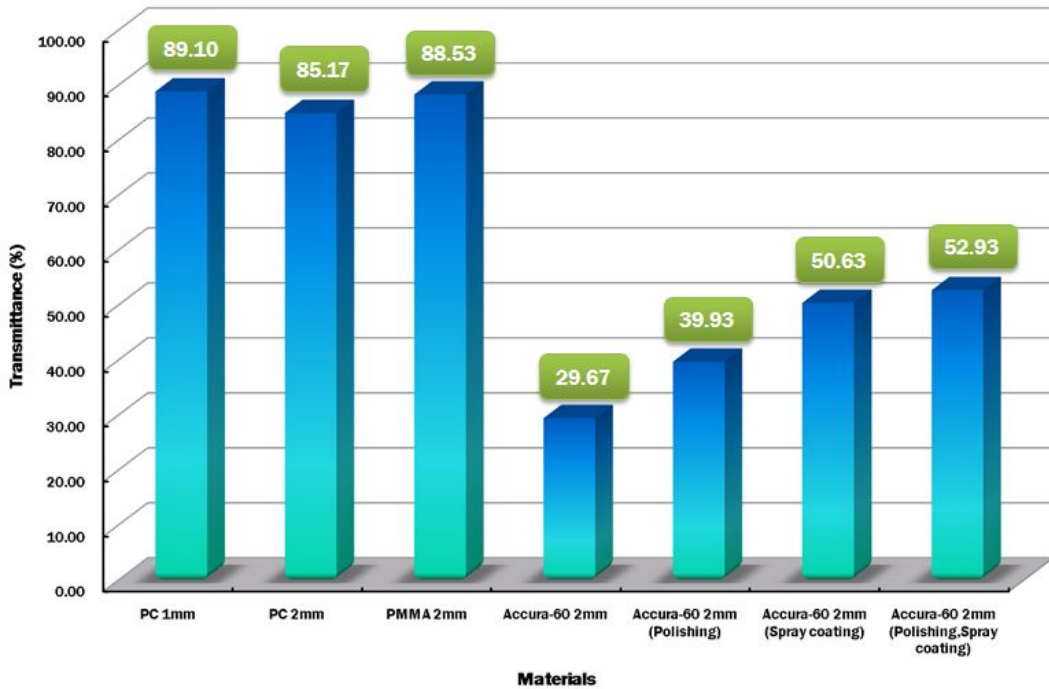


Fig. 4 Vertical light transmittance for plastic material

Fig. 5 는 PC, PMMA, Accura-60 재료에 대한 확산 광투과율 및 반사율을 측정된 결과를 나타낸 것이다. PC 및 PMMA 플라스틱 재료는 Accura-60 재료보다 확산 광투과율이 최대 약 43 % 이상 우수함을 알 수 있었으며, Polishing 과 Spray-coating 의 효과 또한 재료의 확산 광투과율을 상승시킴을 확인 할 수 있었다. 반사율의 측정결과를 살펴보면 PC 및 PMMA 재료는 Accura-60 재료보다 약 1 ~ 2 % 정도 반사율이 높게 측정되었다. PC 및 PMMA 재료는 확산 광투과율과 반사율의 합이 거의 100 % 에 가까움을 알 수 있는데 이는 재료가 빛에 대해 흡수를 거의 하지 않고 반사 및 투과를 시킴을 의미한다. 즉 PC 및 PMMA 재료는 우수한 광투과율을 보이는 재료이며 광생물 반응기 케이스 재료에 가장 적합한 재료임을 확인 할 수 있었다.

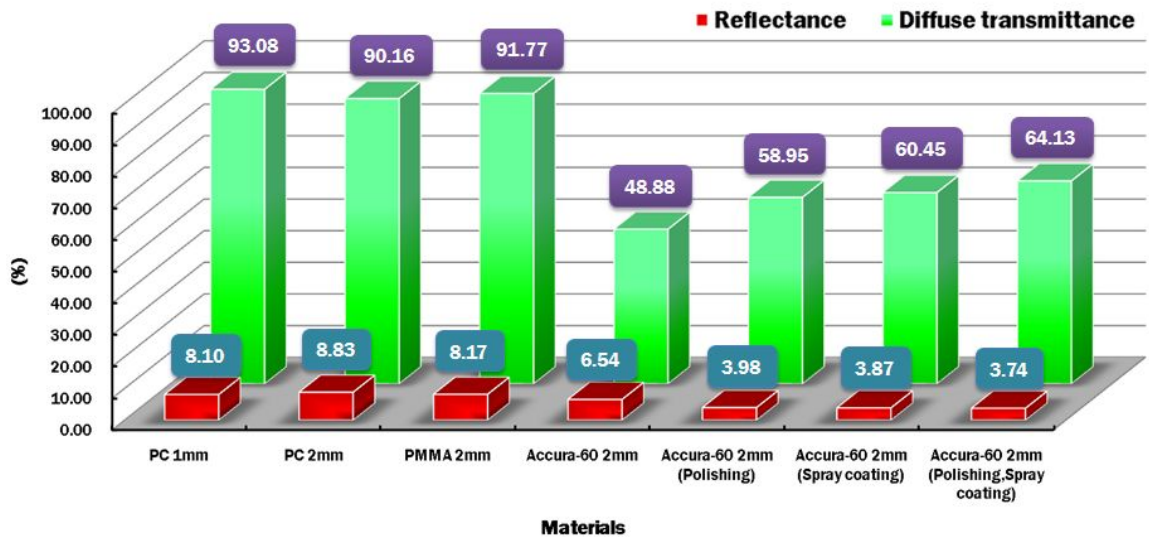


Fig. 5 Diffuse light transmittance and reflectance for plastic material

제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료 고온 인장 특성

1. 고온 인장 물성시험 방법

본 연구대상 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료에 대한 정확한 유동학적 거동을 묘사하기 위해 고온 단축인장시험을 PC 및 PMMA 재료에 대해 수행하였다. 인장 시험용 시험편은 허리부가 잘록한 형상의 압출된 솔리드 시편을 사용하였다. PC 및 PMMA 재료의 고온 단축인장시험 수행을 위해 Fig. 6 과 같은 ASTM D 638 (Type 1) 에서 규정하는 규격 시험편을 제작하였다.

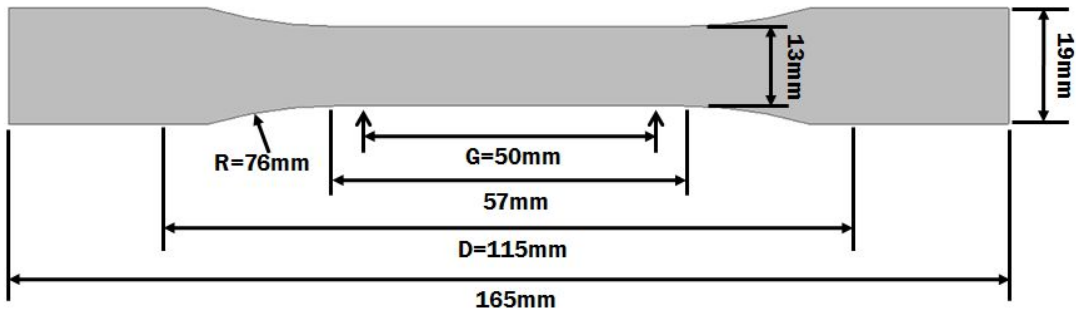






Fig. 6 ASTM D 638 (Type 1)

Table 3 은 ASTM D 638 (Type 1) 의 규격에 따른 PC 및 PMMA의 두께별로 실제 제작된 시험편의 모습이다. Fig. 7 은 플라스틱 재료의 경우 고온에서의 유지시간이 달라지면 열화에 의해 재료 물성이 크게 변하기 때문에 동일한 가열/유지 시간을 적용하는 것이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 모든 목표 실험 온도가 정상상태가 될 수 있도록 하기 위하여 가열시간을 5 분으로 가열/유지 한 후 목표 실험 온도에서 고온 단축인장시험을 하였다.

Table 3 The shape of specimen

Material & Thickness	Specimen
PC 2mm	
PC 3mm	
PMMA 2mm	
PMMA 3mm	

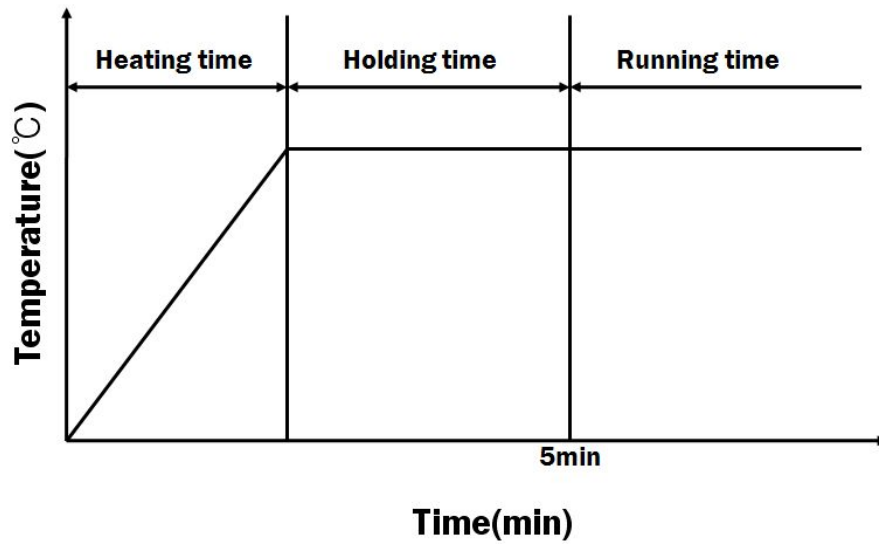


Fig. 7 Time chart of test

Table 4 는 고온 단축인장시험의 구체적인 시험조건을 나타낸 것이다. 시험재료는 PC, PMMA 를 두께 2mm, 3mm 로 하였으며 시험온도는 PC (20°C, 60°C, 100°C, 120°C), PMMA (20°C, 50°C, 80°C, 100°C) 로 하여 시험을 진행하였다. 각 재료의 두께에 따른 온도별로 3 종류의 크로스헤드 속도 조건 (10 mm/min, 50 mm/min, 250 mm/min) 을 주어 각각 인장시험편 3 개씩 시험을 수행하였다.

Table 4 Conditions of the high temperature uniaxial tensile tests

Thick- ness (mm)	PC (Polycarbonate)		PMMA (Polymethy Methacrylate)		Heating/ Holding time (minutes)
	Temperature (°C)	Velocity of the crosshead (mm/min)	Temperature (°C)	Velocity of the crosshead (mm/min)	
2 mm	20	10, 50, 250	20	10, 50, 250	5
	60	10, 50, 250	50	10, 50, 250	
	100	10, 50, 250	80	10, 50, 250	
	120	10, 50, 250	100	10, 50, 250	
3 mm	20	10, 50, 250	20	10, 50, 250	
	60	10, 50, 250	50	10, 50, 250	
	100	10, 50, 250	80	10, 50, 250	
	120	10, 50, 250	100	10, 50, 250	

Fig 8 은 고온 인장시험에 사용된 장비 및 가열 챔버에 시험편이 장착된 모습을 나타낸 것이다. 인장시험기는 위드랩사의 UTM(WL 21000A) 의 시험기기를 사용하였으며 시험방법은 ASTM D-638 을 조건으로 하였다. 표점거리는 115 mm 이며 로드셀은 3000 N 을 사용하여 시험하였다. 시험편을 가열 챔버 속의 고정 척에 장착한 후 5 분 동안 목표 온도로 가열/유지 한 후 목표 실험 온도에서 단축 인장시험을 수행하였다.

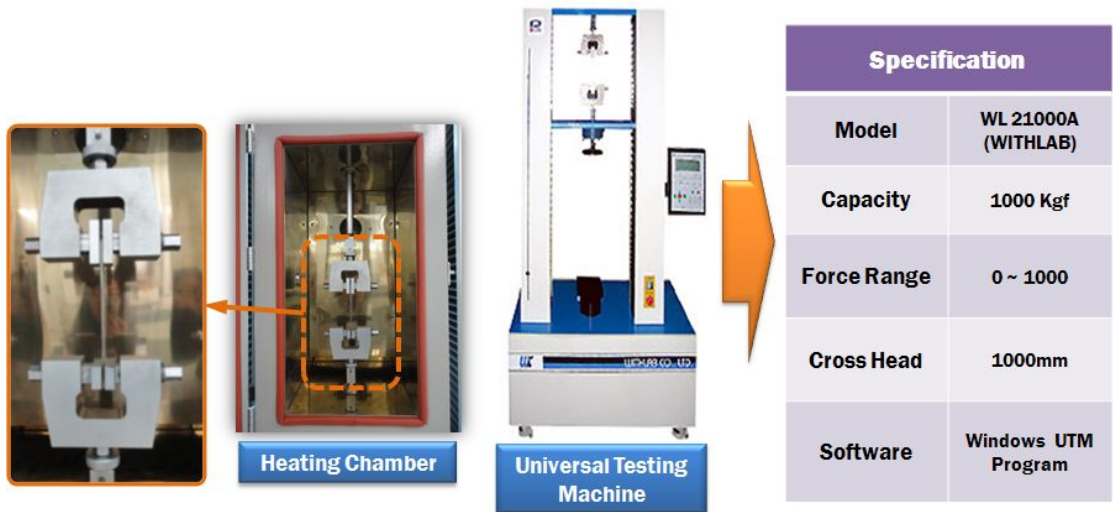


Fig. 8 The equipment for tensile tests

2. 고온 인장 물성시험 결과

본 연구에서 PC(20°C, 60°C, 100°C, 120°C), PMMA(20°C, 50°C, 80°C, 100°C) 에서의 고온 인장단축 시험을 통해 얻어진 진응력-진변형률 선도를 각각 Fig.9 ~ Fig.24 에 나타내었다. 시험결과로부터 상온에서는 크로스헤드 속도가 높을때 시험편의 변형량이 적게 나타나 파단에 이르는 시간이 크로스헤드 속도가 낮을때 보다 빠르게 나타난다. 반면 고온에서는 크로스헤드 속도가 높을수록 변형량이 커지게 되어 파단에 이르는 시간이 속도가 낮을때보다 길어짐을 알 수 있었다. 또한 실험온도가 높아질수록 PC 및 PMMA 의 응력이 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 유리전이온도 PC (100°C ~110°C), PMMA(80°C ~90°C) 이상에서는 온도가 상승함에 따라 시험편의 연화현상이 심해 유동저항이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 진응력 - 진변형률 값의 떨림 현상은 더욱 심하게 나타남을 알 수 있었다.

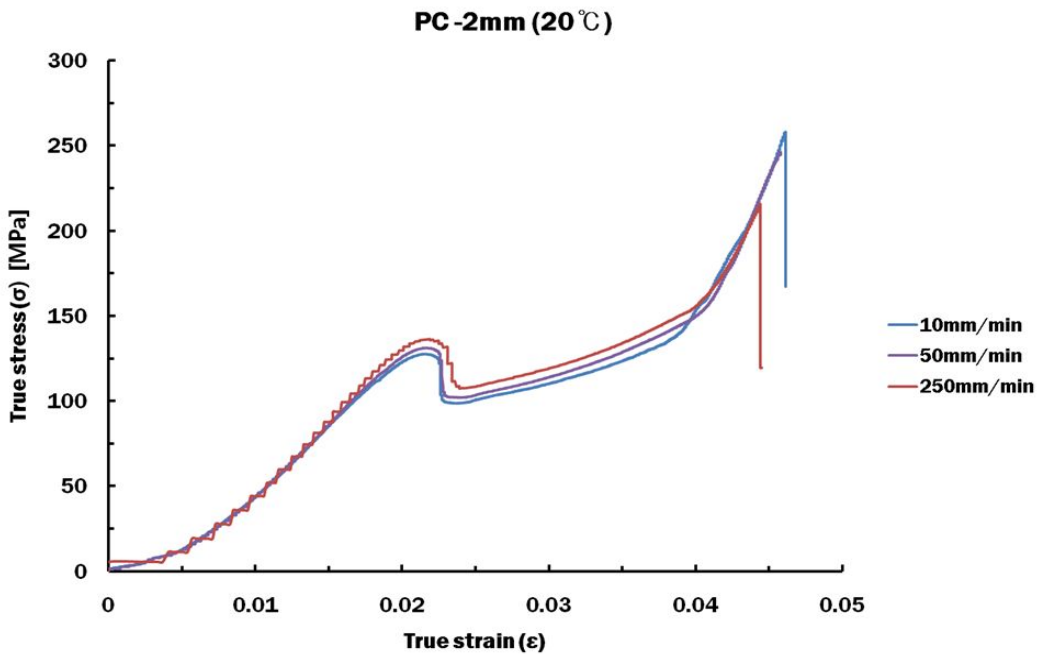


Fig.9 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

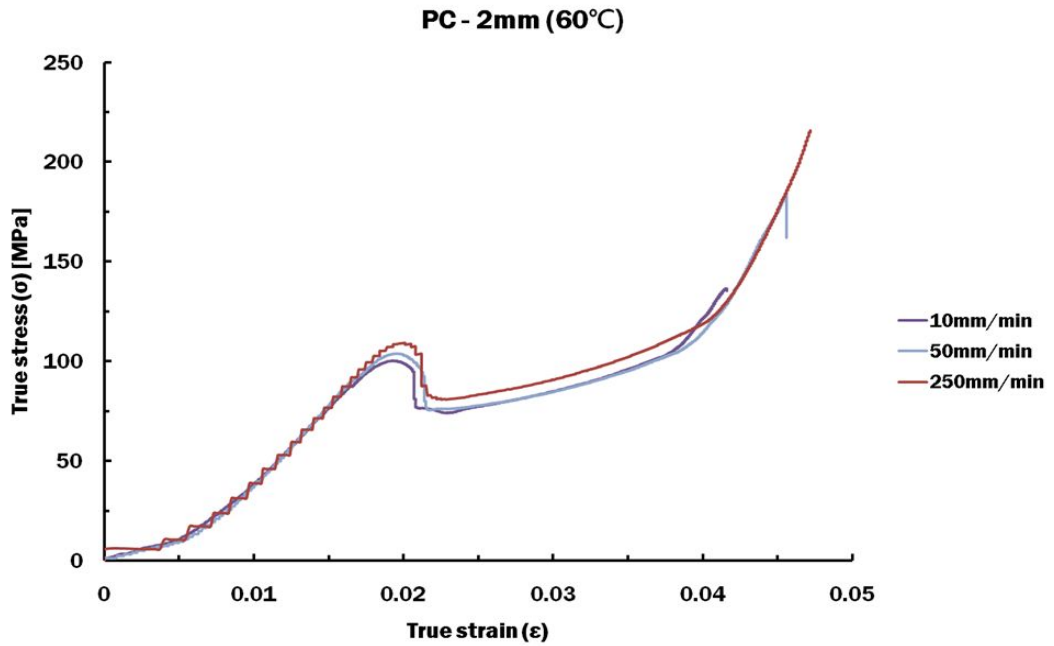


Fig.10 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)

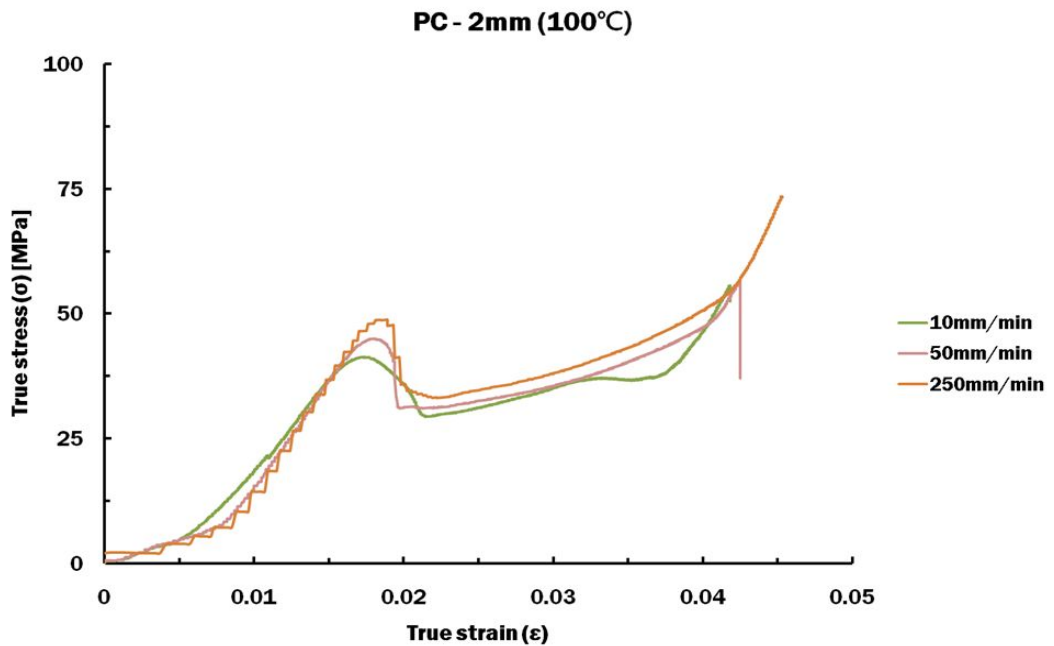


Fig.11 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

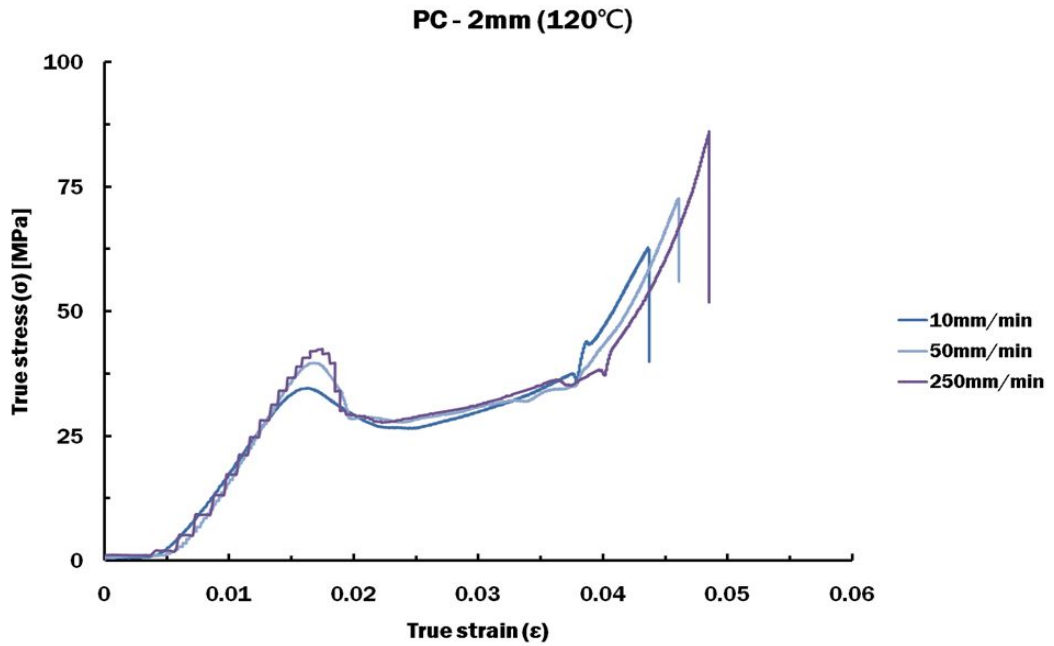


Fig.12 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)

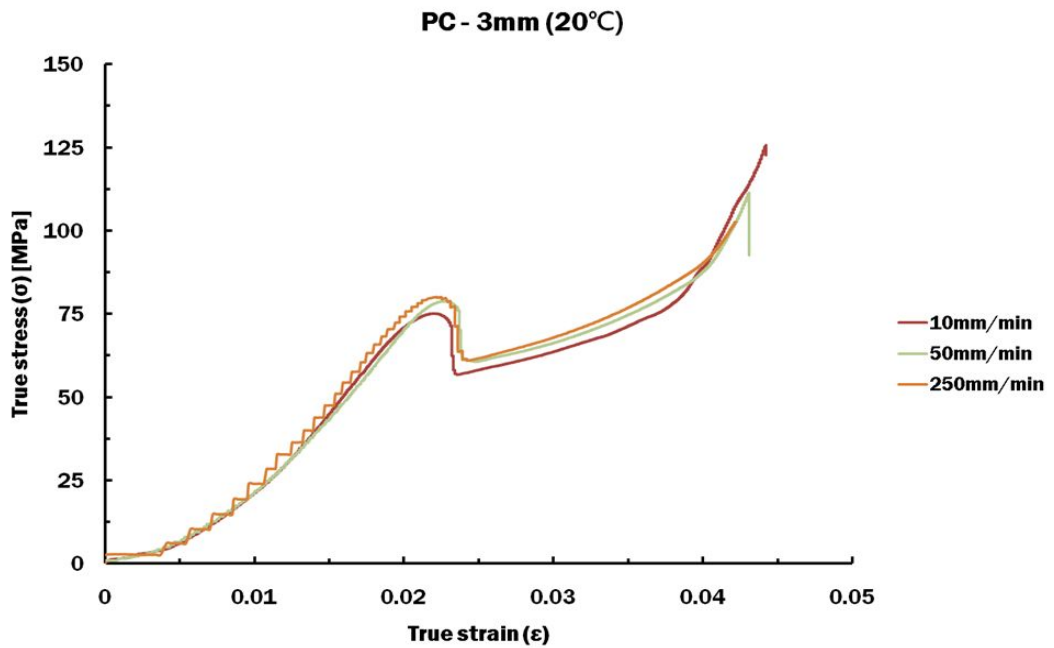


Fig.13 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

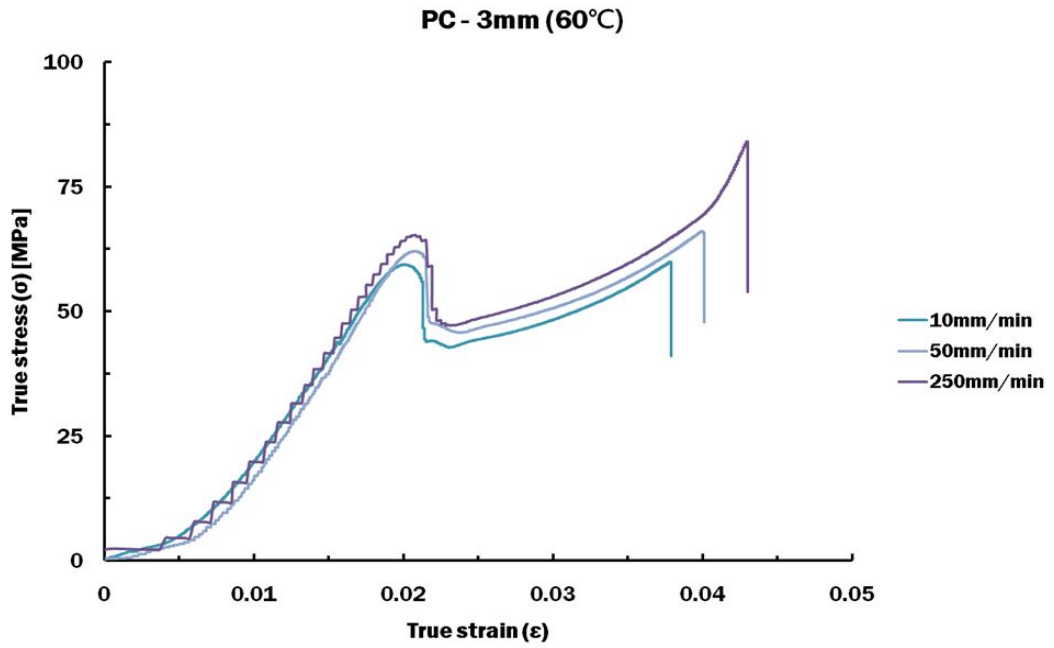


Fig.14 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)

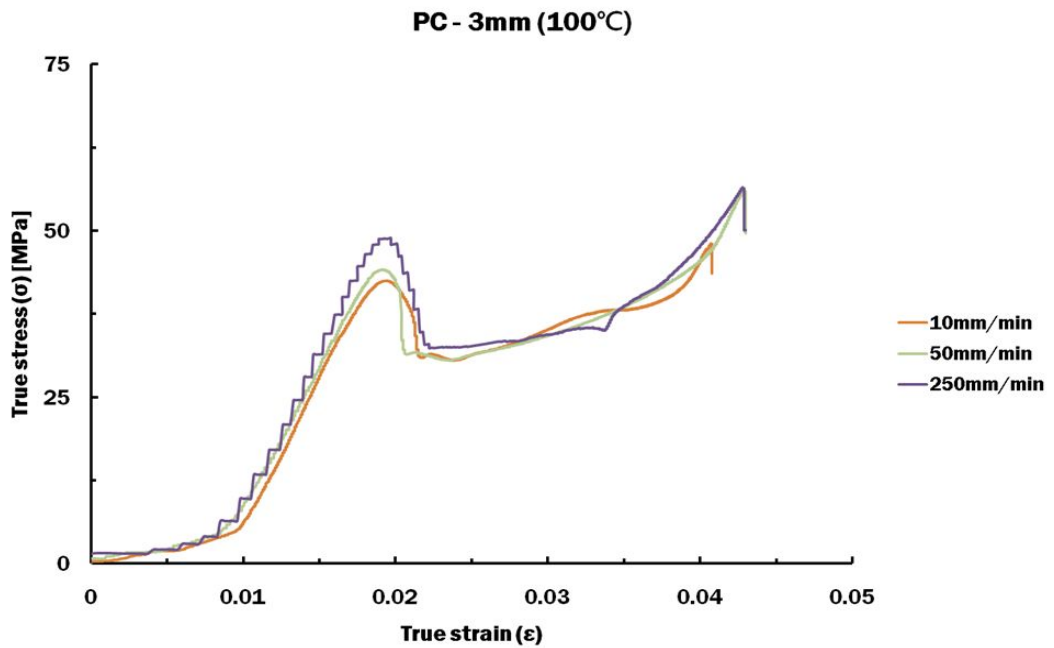


Fig.15 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

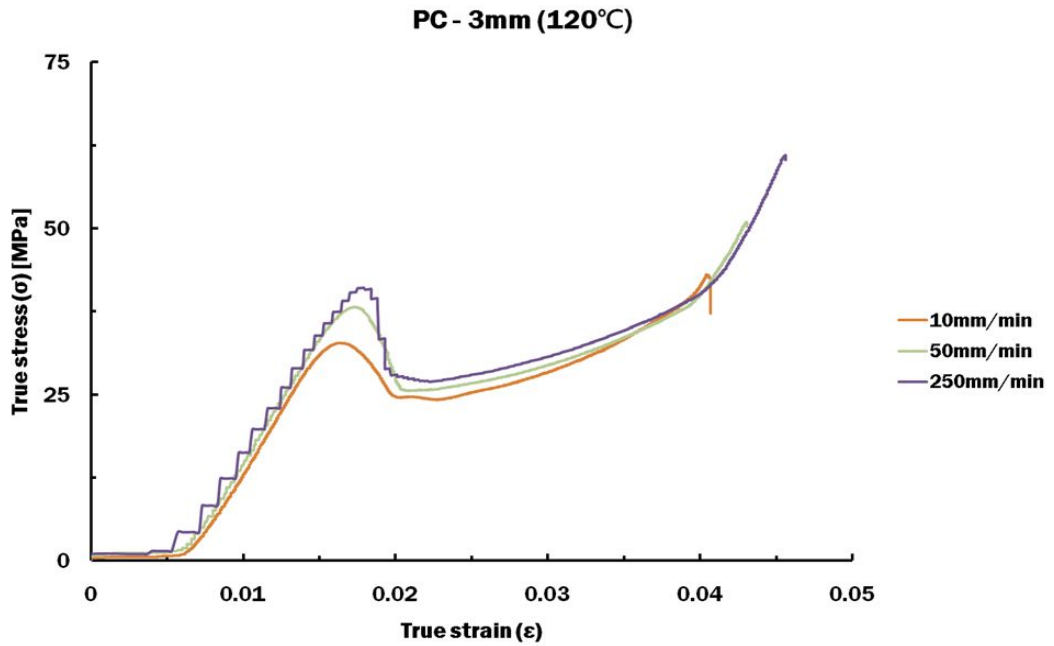


Fig.16 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)

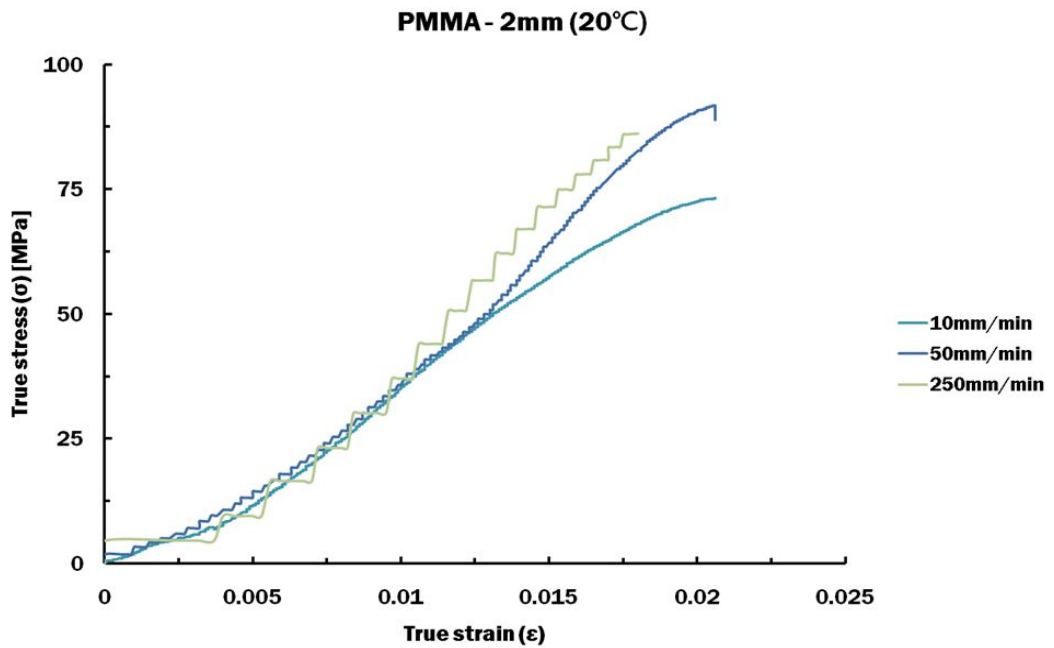


Fig.17 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

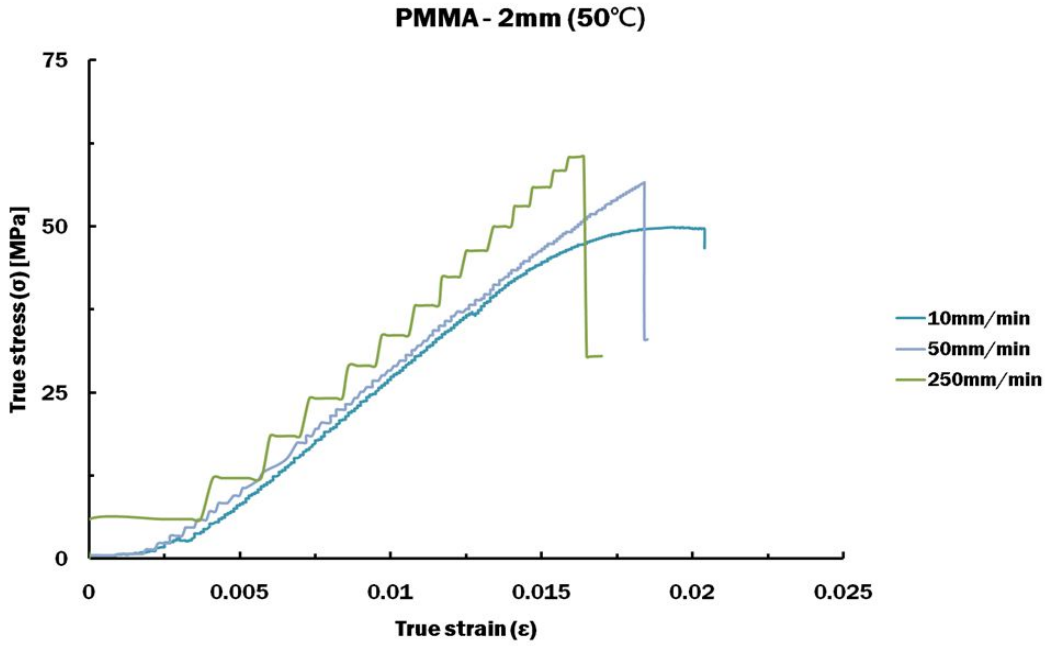


Fig.18 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)

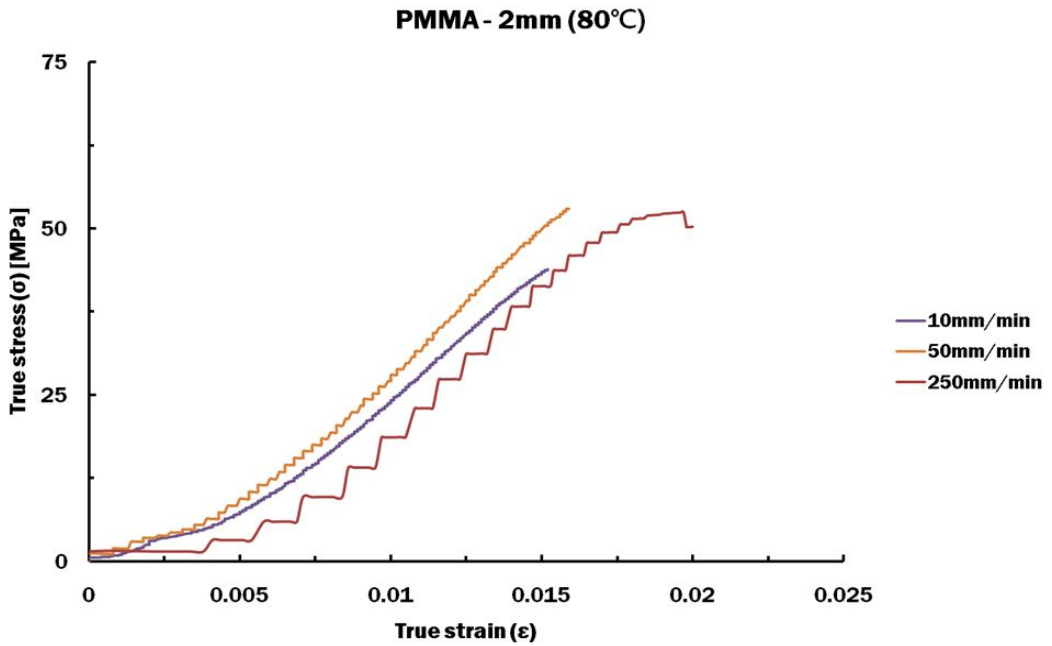


Fig.19 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)

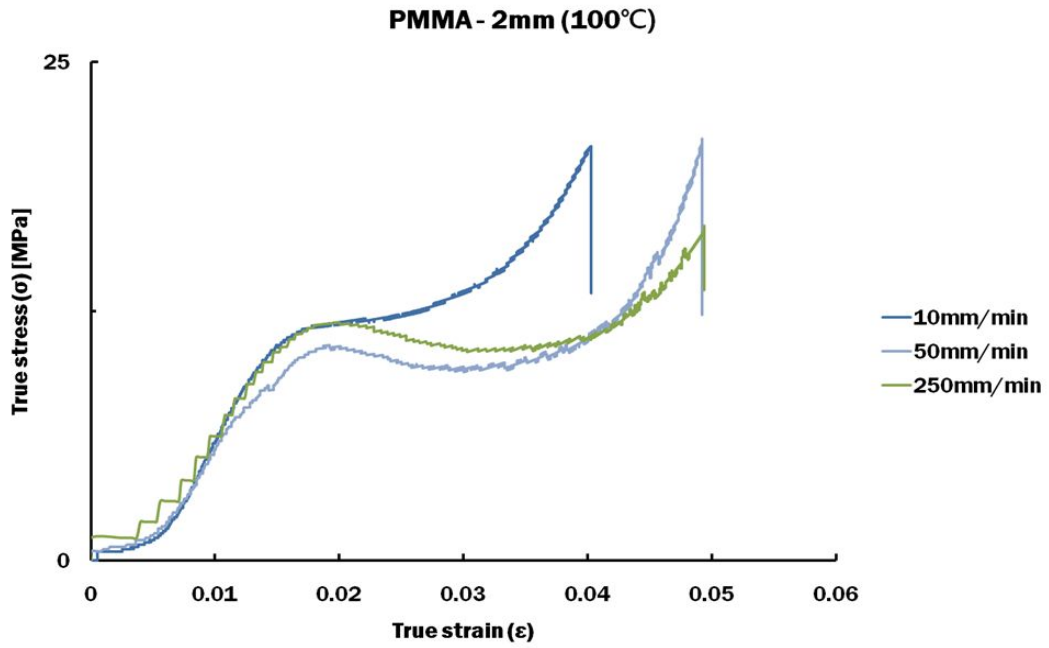


Fig.20 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

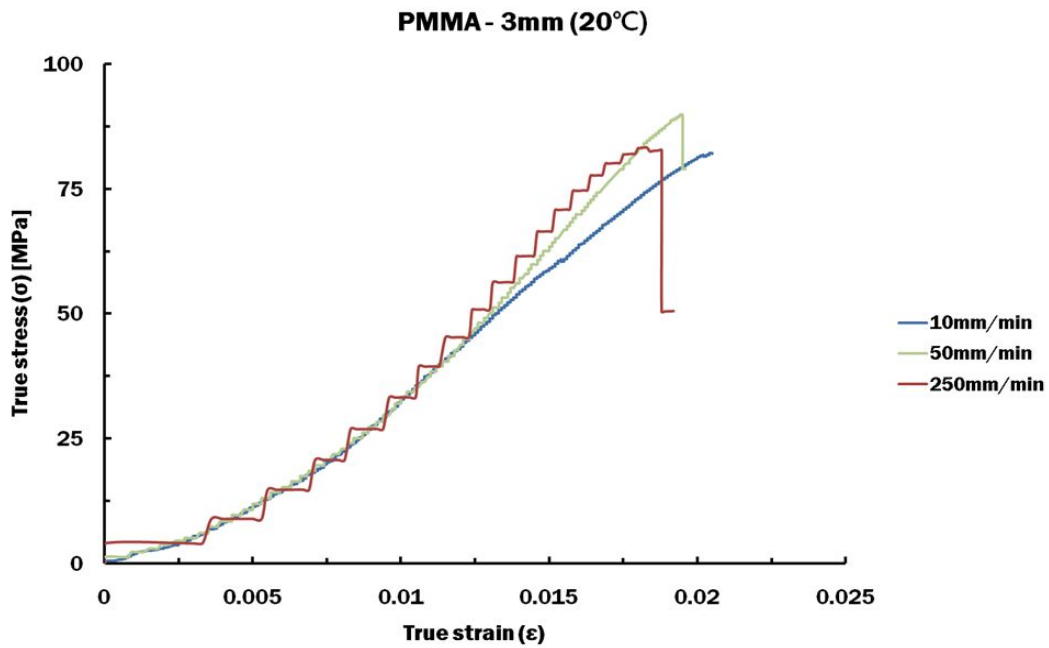


Fig.21 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

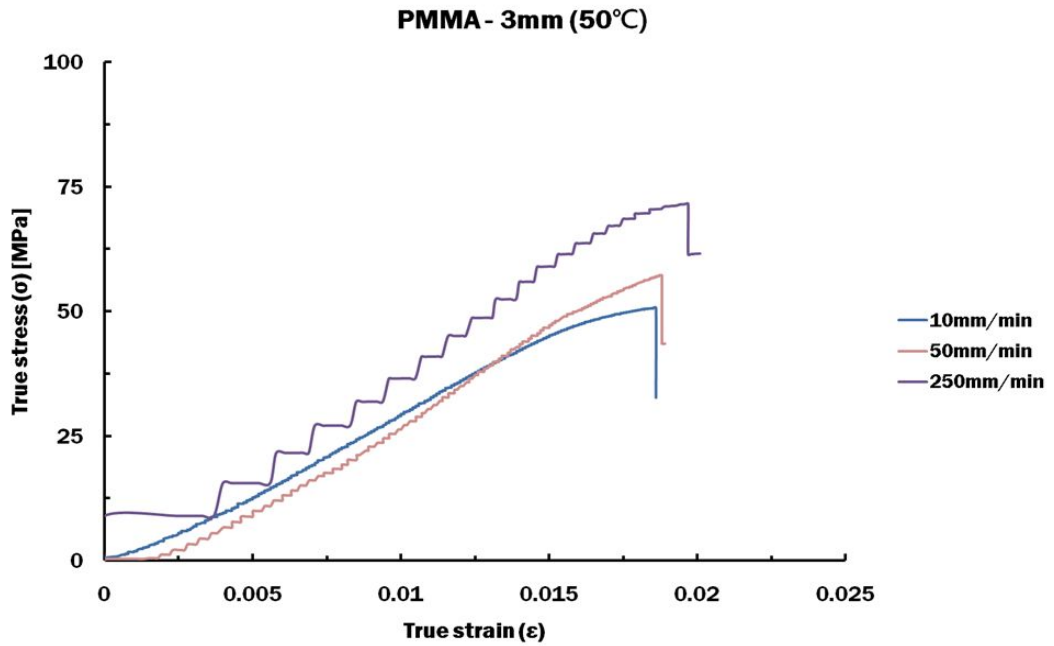


Fig.22 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)

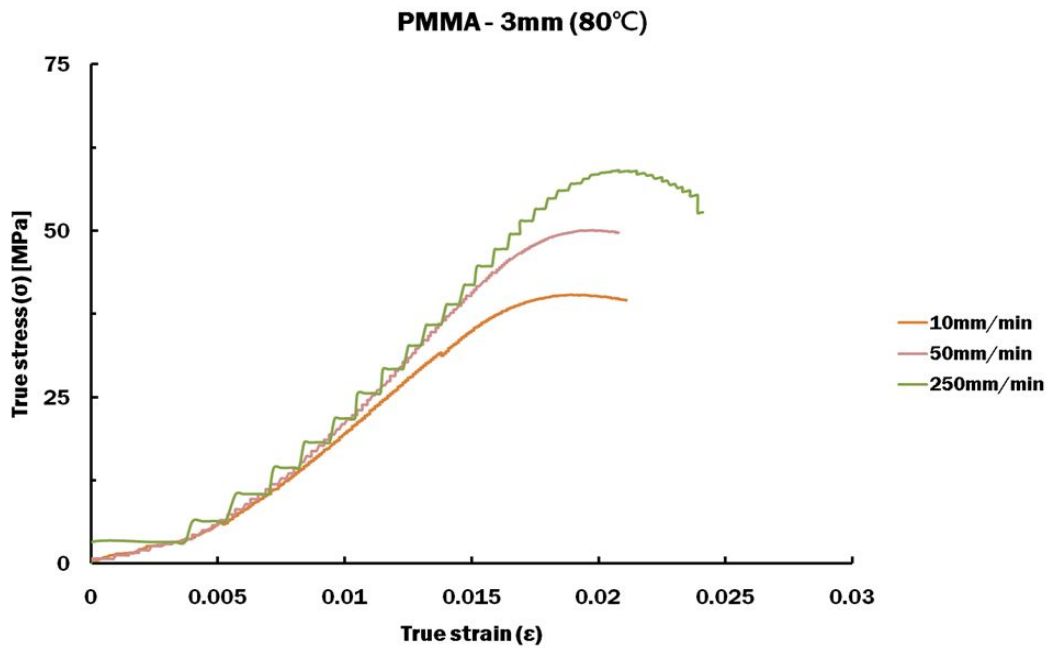


Fig.23 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)

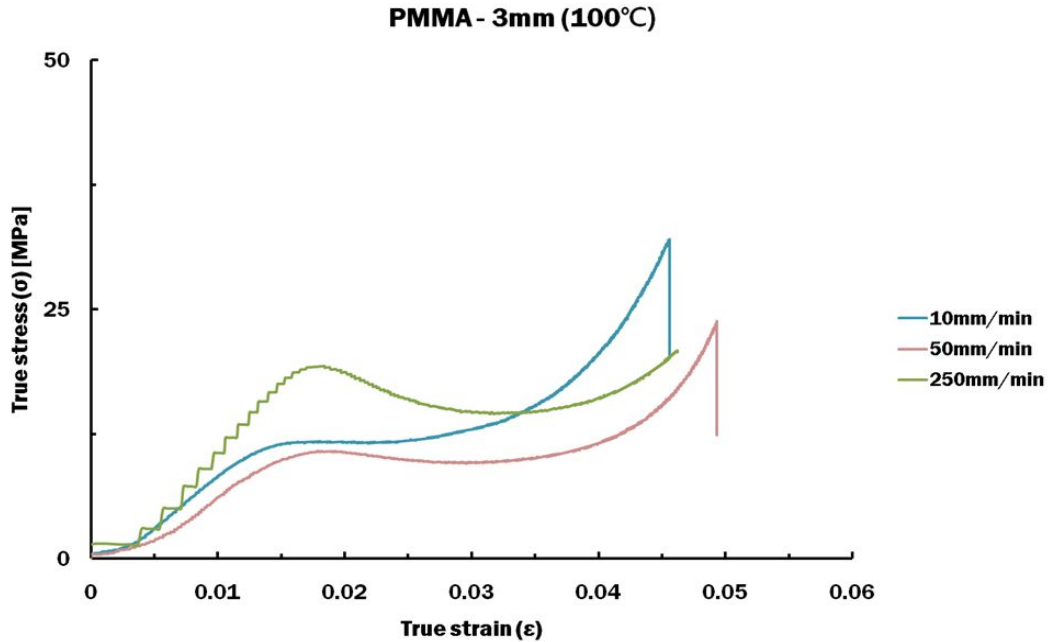


Fig.24 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

Fig. 25 ~ Fig. 32 는 같은 재료에서 시험시편 두께의 변화에 따른 고온 단축인장 시험결과의 진응력 - 진변형을 선도이다. 재료 PC, PMMA 의 두께 2 mm, 3 mm 의 고온 인장시험 결과 실험온도가 높아질수록 응력이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 시편의 같은 면적에서 두께가 클수록 응력은 작아지기 때문이다. 상온에서는 두께 3 mm 보다 2 mm 의 응력이 높게 나타나는 경향을 보였다. 반면 고온으로 갈수록 두께에 따른 뚜렷한 응력의 차이는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었으며 이는 성형 시 가열온도가 높게 되면 재료의 연화현상에 의해 유동저항이 거의 발생하지 않아 응력은 두께의 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

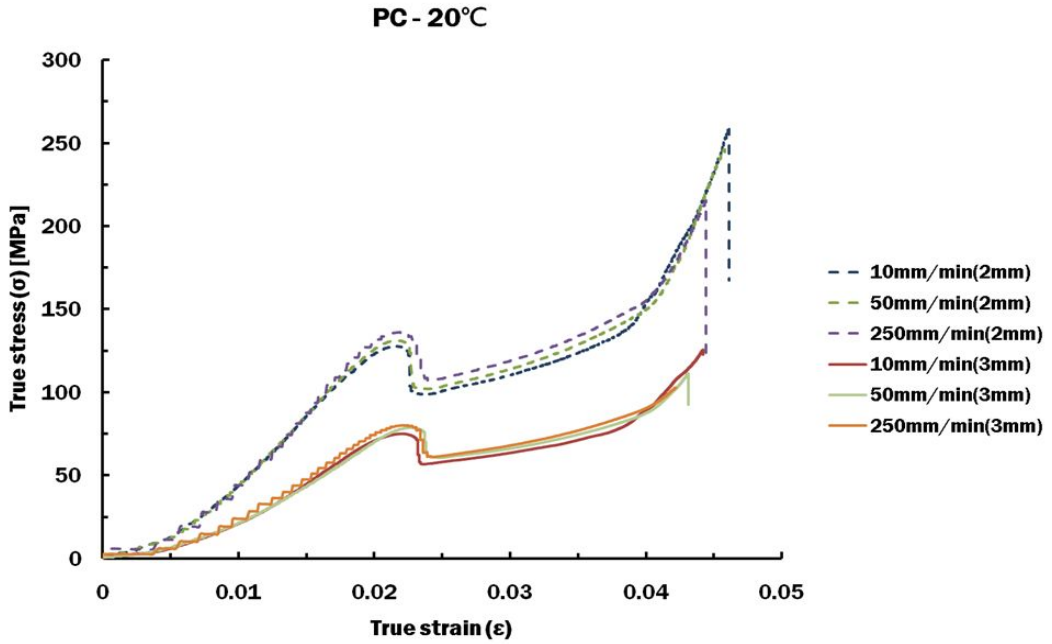


Fig.25 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

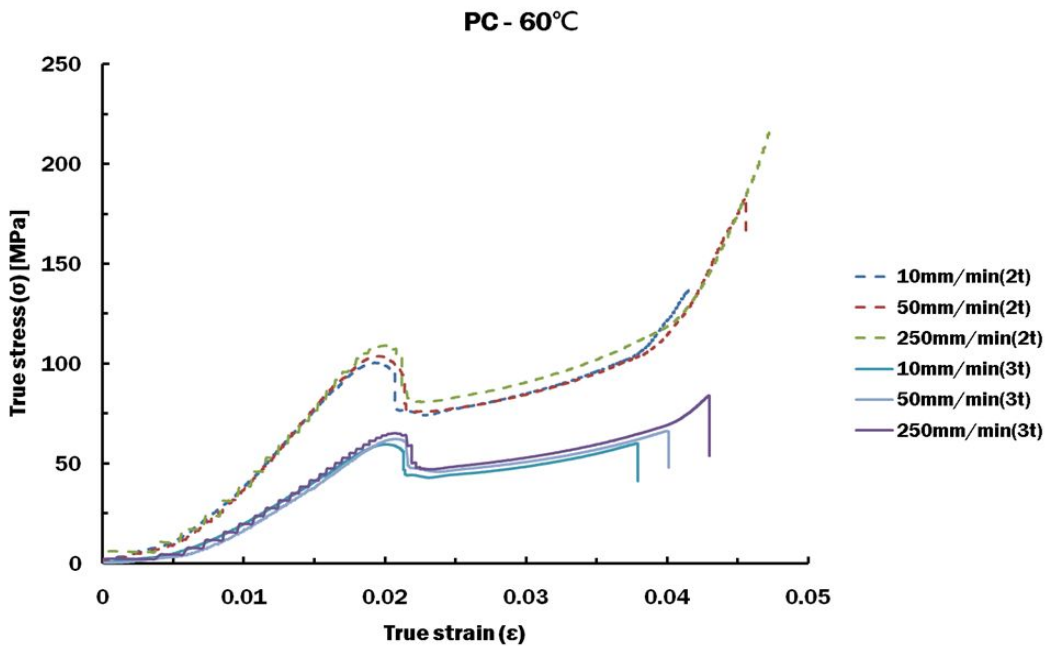


Fig.26 The results of tensile tests at various crosshead velocities (60°C)

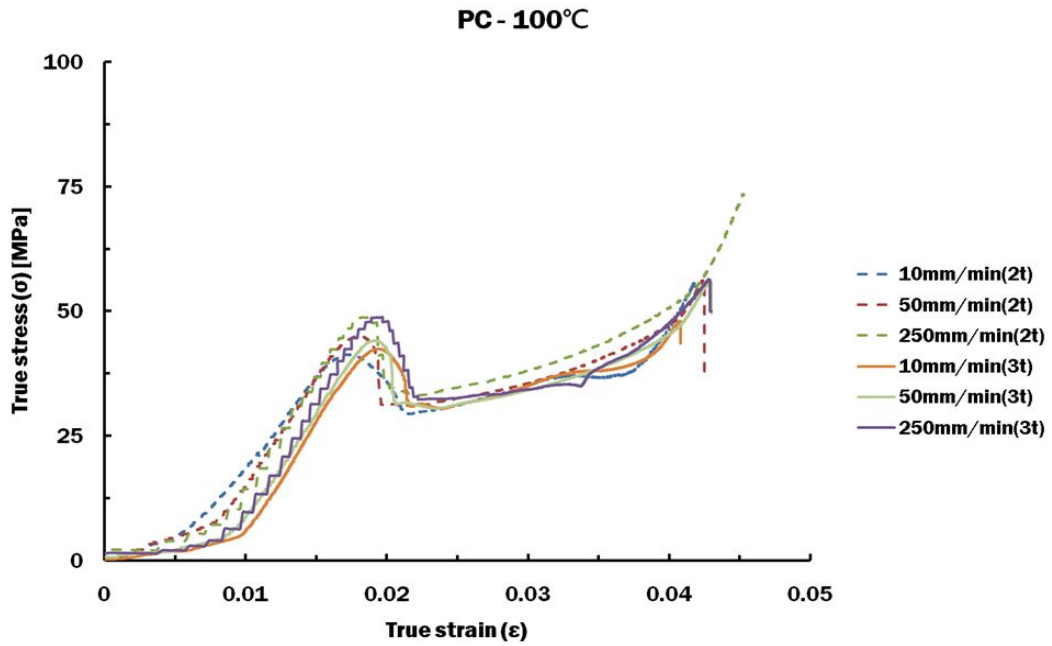


Fig.27 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

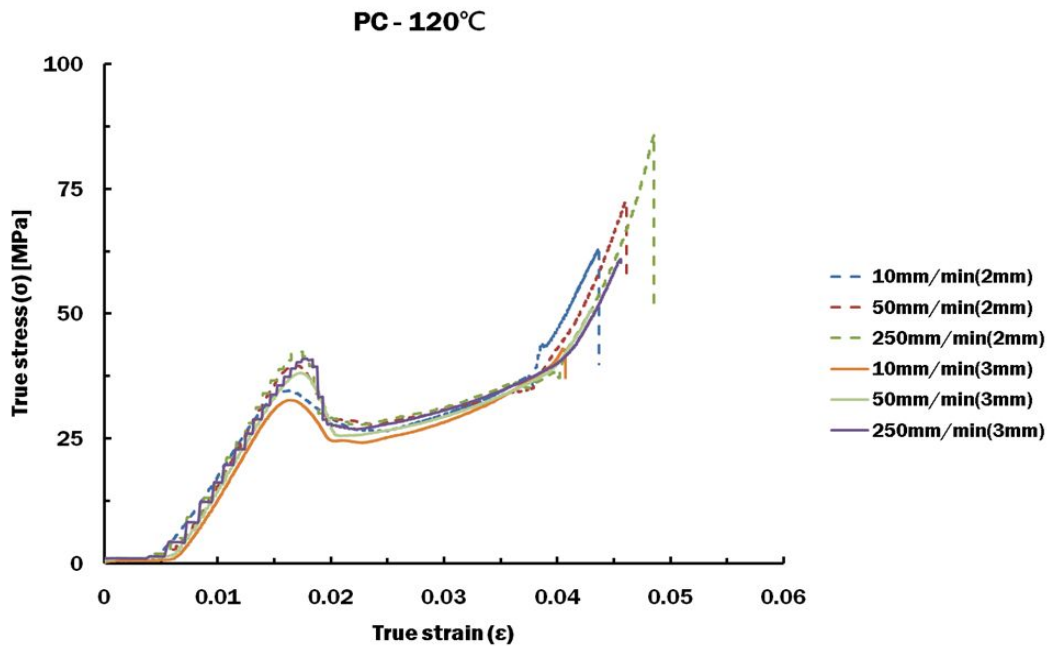


Fig.28 The results of tensile tests at various crosshead velocities (120°C)

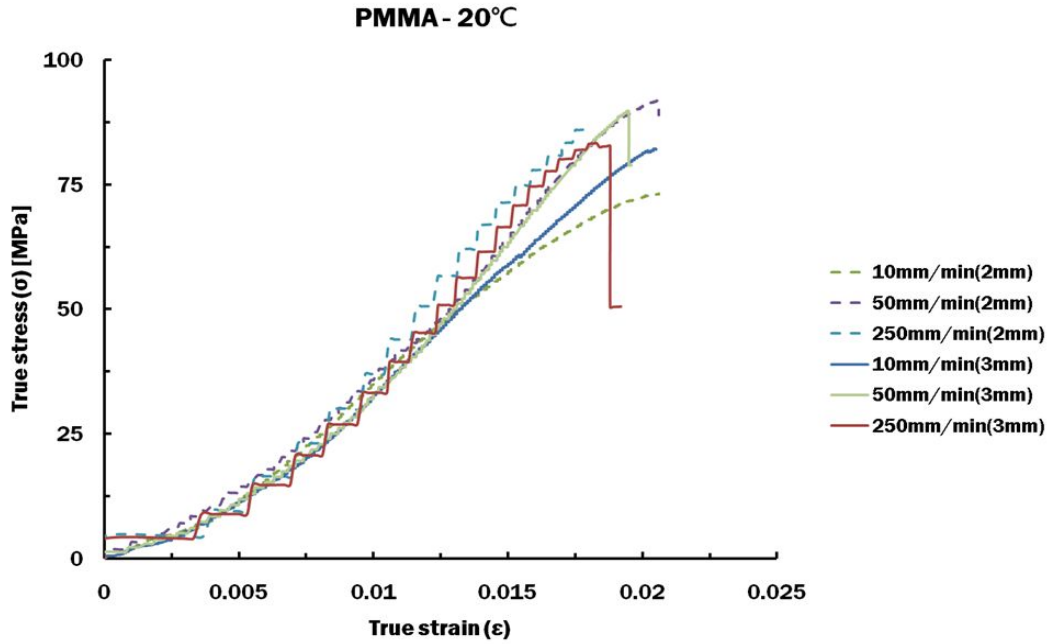


Fig.29 The results of tensile tests at various crosshead velocities (20°C)

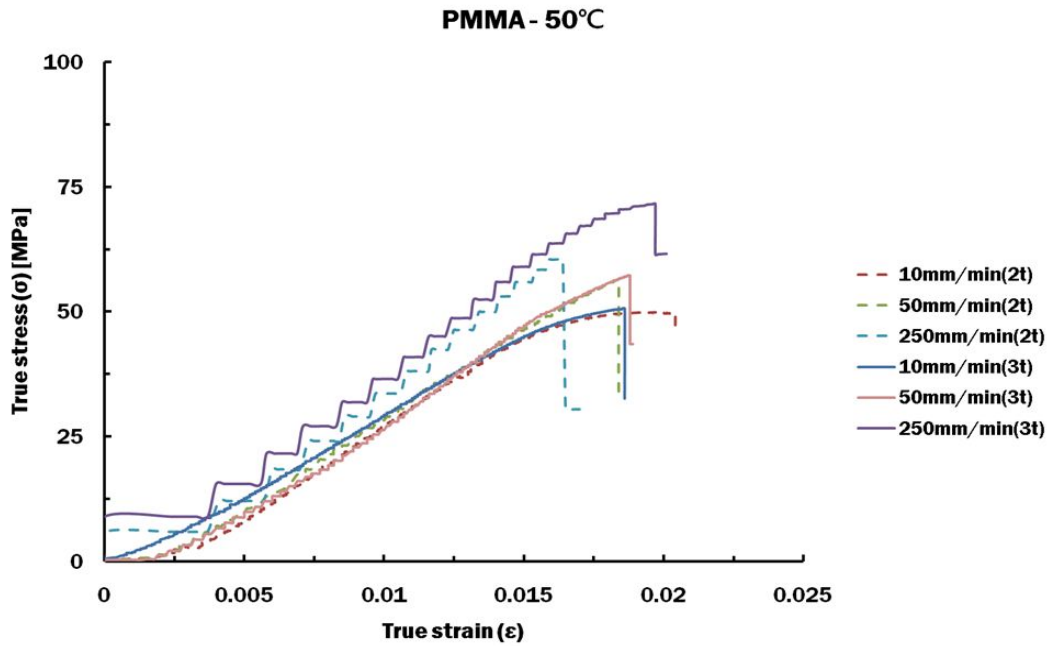


Fig.30 The results of tensile tests at various crosshead velocities (50°C)

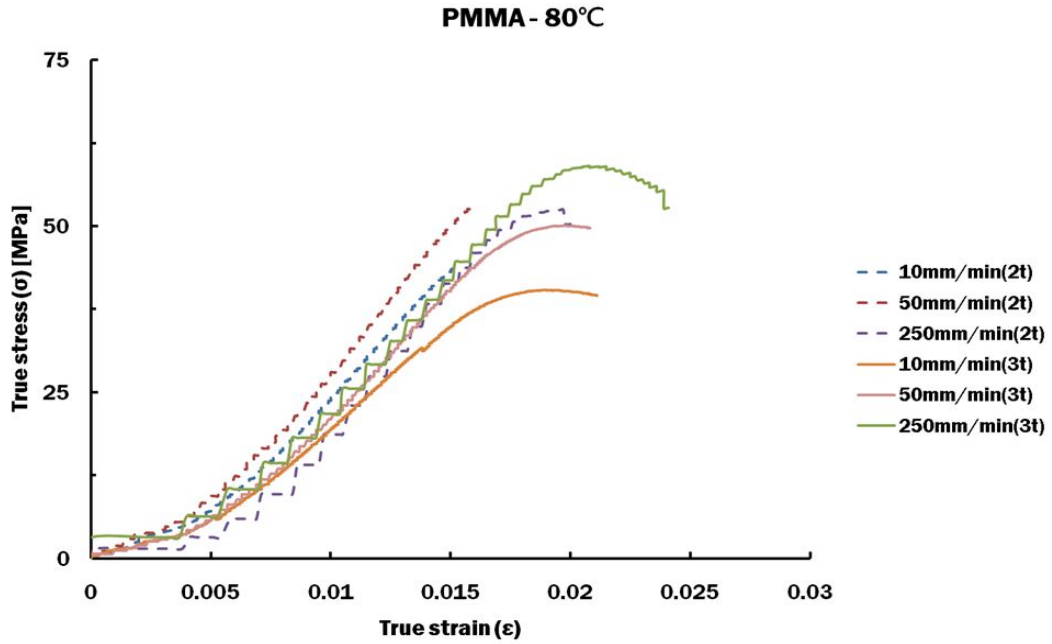


Fig.31 The results of tensile tests at various crosshead velocities (80°C)

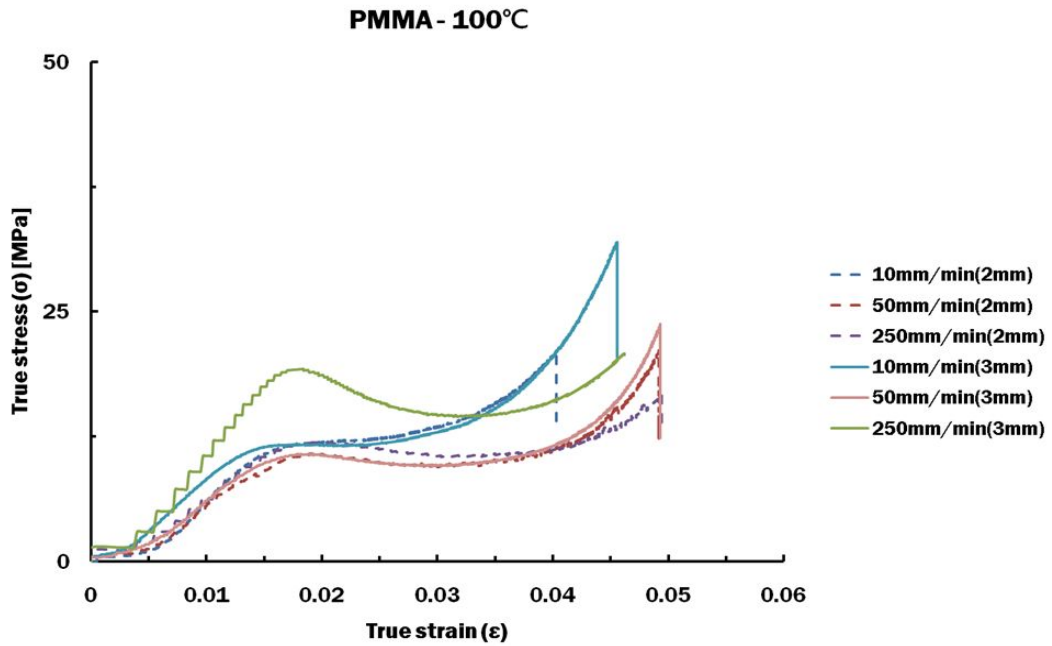


Fig.32 The results of tensile tests at various crosshead velocities (100°C)

3. 고온 인장 물성시험 결과를 이용한 G'sell 모델 상수 도출

평판형 광생물 반응기 케이스 제작에 있어서 사용되는 열성형 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하기 위해 각 해석에 적합한 플라스틱 재료 고온 유동 모델이 적용되어야 한다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 PAM-FORM 2011 을 사용하였다.

PAM-FORM 에서는 플라스틱 유동 모델을 온도와 변형률 속도 영향을 동시 고려한 G'sell 모델을 사용하고 있다. 그래서 본 연구에서는 고온 인장시험 결과를 이용하여 G'sell 모델에 적합한 재료 상수들을 산출하였다.

G'sell 모델로 표현되는 고분자 재료는 Maxwell 의 모델 형태의 등방성 비선형 점탄성 특성으로 정의된다. 이것은 무정형(Amorphous) 또는 준결정성(Semi-crystalline) 고분자들의 거동을 표현 하는데 사용될 수 있다. G'sell 모델은 식 (1) 과 같이 주어진다.

$$\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}) = k[1 - \exp(-w\epsilon)] \exp(h\epsilon^2) (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^m \quad (1)$$

여기서, k 는 비례 상수이고, $[1 - \exp(-w\epsilon)]$ 는 $\sigma - \epsilon$ 선도의 초기영역인 점탄성 구산을 나타낸다. $\exp(h\epsilon^2)$ 는 큰 변형 또는 큰 변형률 속도에서 자주 나타나는 가공경화효과를 고려하는 것이다. 그리고 $(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^m$ 구간은 변형률 속도 민감성을 나타내며, $\dot{\epsilon}_0$ 는 초기 변형률 속도이며 일반적으로 1 s^{-1} 으로 둔다.

식 (1) 은 일정한 변형률 속도를 제어하는 조건에서 만들어진 구성식이지만 본 연구에서 사용되는 PC 및 PMMA 와 같이 두께가 얇고 가열 시에 뒤틀림이 발생하는 재료는 단축 인장시험 시에 단면변화량을 정확하게 측정하기 어려우므로 일정한 변형률 속도를 제어하는 것이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 일정한 변형률 속도 대신에 일정한 크로스헤드 속도를 유지하는 조건에서도 G'sell 의 모델을 적용할 수 있도록 다음과 같은 과정을 통해 변형하였다. 일반적으로 진변형률 속도는 식 (2), 속도는 식 (3) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2)$$

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (3)$$

공칭변형률은 식 (4), 식 (5) 와 같이 나타낼 수 있으며, 이 식들을 정리하면 식 (6) 을 얻을 수 있다.

$$e = \exp(\epsilon) - 1 \quad (4)$$

$$e = \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

$$\exp(\epsilon) = \frac{l+l_0}{l_0} \quad (6)$$

여기서, 식 (6) 을 시간 (t) 에 대하여 미분하면 식 (7) 을 얻을 수 있다.

$$\exp(\epsilon) \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \quad (7)$$

식 (2) 와 식 (3) 을 식 (7) 에 대입하여 다시 정리하면 식 (8) 을 얻을 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_0 \cdot \exp(\epsilon)} \quad (8)$$

식 (8) 을 G' sell 의 구성식 식 (1) 에 대입하면 변형된 G' sell 의 모델을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma = k[1 - \exp(-w\epsilon)] \exp(h\epsilon^2) \left(\frac{v}{l_0 \cdot \exp(\epsilon)} \right)^m \quad (9)$$

변형된 G' sell 의 모델을 일정한 크로스헤드 속도(v) 하에서 얻은 진응력 - 진변형을 선도에 적용할 수 있다. 이 모델에서 k, w, h 파라미터는 기존의 G' sell 의 모델과 유사한 거동을 묘사하고, 파라미터 m 은 크로스헤드 속도와 변형률 민감성을 나타낸다.

온도, 속도별 단축인장시험 결과를 이용하여 G' sell 파라미터인 k, w, m, h 를 계산하기 위해서 상용 프로그램 Optimizer-G' sell 를 사용하였다. Optimizer-G' sell 의 입력 데이터는 단축인장시험에서 얻어진 하중-변위 곡선이다. Fig. 33 은 PC, PMMA 재료의 온도별로 10mm/min, 50mm/min, 250mm/min 크로스헤드 속도에 따른 하중-변위 값을 입력한 후 프로그램상에서 G' sell 파라미터 값이 계산된 결과이다.

```

*****
*
*           GSELL PARAMETERS OPTIMIZATION
*
* Version 2.0                               Developed by ESI*
*****
Mon Mar 14 01:07:59 2011

```

K	M	H1	W	Min	i	Elapsed time
10.000	0.100	1.000	10.000	1629.693	1	0.02
4.972	0.098	4.031	90.819	1333.625	6	0.02
5.405	0.631	10.499	20.124	1219.951	41	0.02
2.834	0.031	7.565	5.427	987.614	174	0.03
1.513	0.139	6.443	70.589	867.034	179	0.03
4.326	0.351	7.073	15.840	736.800	1526	0.09
18.836	0.325	2.579	1.773	690.874	2225	0.14
5.341	0.132	4.185	7.237	326.755	3486	0.22
2.544	0.050	5.875	8.857	324.703	19598	2.41
4.073	0.095	5.050	7.545	293.773	23721	3.28
10.099	0.105	3.478	1.701	264.844	42069	6.75
4.579	0.081	4.243	4.574	248.917	46427	7.50
11.225	0.116	2.959	1.928	219.073	47969	7.75

Fig. 33 Estimated G'sell parameters

이러한 과정을 통하여 PC 및 PMMA 재료 의 각각 두께에 따른 k, w, m, h 파라미터 값을 Tables 5 ~ 8 와 같이 도출 하였다. 도출된 파라미터 상수는 PAM-FORM 성형 해석 시 재료에 따른 두께별 물성 데이터에 추가하여 해석을 수행 할 수 있게 하였다.

Table 5 Estimated material constants of G' Sell model
(material : PC, thickness = 2 mm)

Parameters	Temperature			
	20°C	60°C	100°C	120°C
k	95.006	76.602	33.817	26.028
m	0.002	0.014	0.031	0.004
w	37.214	40.242	41.308	34.959
h	0.309	0.284	0.192	0.270

Table 6 Estimated material constants of G' Sell model
(material : PC, thickness = 3 mm)

Parameters \ Temperature	20°C	60°C	100°C	120°C
k	59.248	47.681	30.903	27.053
m	0.018	0.025	0.020	0.022
w	32.353	31.014	28.945	28.794
h	0.205	0.049	0.216	0.215

Table 7 Estimated material constants of G' Sell model
(material : PMMA, thickness = 2 mm)

Parameters \ Temperature	20°C	50°C	80°C	100°C
k	132.680	100.845	222.234	8.129
m	0.059	0.068	0.001	0.016
w	23.001	23.819	6.203	52.483
h	18.935	4.345	32.002	0.035

Table 8 Estimated material constants of G' Sell model
(material : PMMA, thickness = 3 mm)

Parameters \ Temperature	20°C	50°C	80°C	100°C
k	166.732	68.212	123.147	11.970
m	0.024	0.007	0.043	0.063
w	13.291	30.766	11.948	72.153
h	15.579	9.801	3.082	0.062

제 3 장 10 L 급 평판형 광생물 반응기 3 차원 제품 설계 및 제작

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 3 차원 제품 설계

본 연구에서는 미세조류 배양을 위한 광생물 반응기 케이스 3 차원 설계가 이루어졌다. 반응기 설계 시 고려되는 제한사항으로는 미세조류 성장에 필요한 빛(광원 및 전달과 분포), 기체(이산화탄소와 산소) 전달, 영양분 유지, 미세조류 상호 간섭에 의한 공간적 제한 요소들이 고려되어야 한다. 동일한 조도에서 광생물 반응기 표면에 흡수되는 광속을 증가시키기 위해서는 광점축이 최대화 되도록 설계하여야 한다. 광생물 반응기로 미세 조류를 배치 또는 연속 배양할 경우, 단위 체적당 미세조류 생산량을 향상시키기 위해서는 광생물 반응기의 체적 대비 표면적 비를 증가시켜야 한다. Fig. 34 는 정다각형 표면 형상을 가진 평판형 광생물 반응기의 깊이에 따른 S/V(Surface to volume ratio : S/V ratio) 비의 변화이다. Fig. 34 에서 큰 S/V 비를 얻기 위해서는 평판형 광생물 반응기의 깊이가 짧아야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 미세조류배양에서 산소와 이산화탄소의 배출과 공급은 필수적이다. 이산화탄소는 배지로의 용해 속도가 미세조류 세포의 생리와 성장에 매우 중요하다. 높은 용존 산소 농도는 미세 조류의 성장을 저해하므로 광합성의 결과로 생산되는 산소를 배지로부터 제거해 줄 필요가 있다. 이러한 산소를 얻기 위해 Sparger 를 이용한 이산화탄소 및 산소를 공급해야 한다. 배지 성분 유지를 위해서 배양용액내의 여러 영양성분의 분포 또는 분포의 변화는 세포 생리학적으로 세포의 성장에 중요한 영향을 주기 때문에 고농도 배양에서 이에 대한 고려가 이루어져 광생물 반응기 케이스 설계가 이루어져야한다. 이 밖에 미세조류 상호간의 그림자 효과 및 미세조류에 의한 광 흡수에 의하여 광생물 반응기 깊이 방향으로 광합성 반응차이가 발생하지 않도록 해야하며, 케이스내부 미세조류의 유체역학적 특성 향상이 가능하도록 하여야한다. 난류 발생 기구와 미세조류의 마찰에 의한 미세조류에 전단응력이 부가가 이루어지지 않도록 해야한다. 이와 같은 설계조건을 적용하여 2 가지 종류에 대한 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스를 설계하였다.

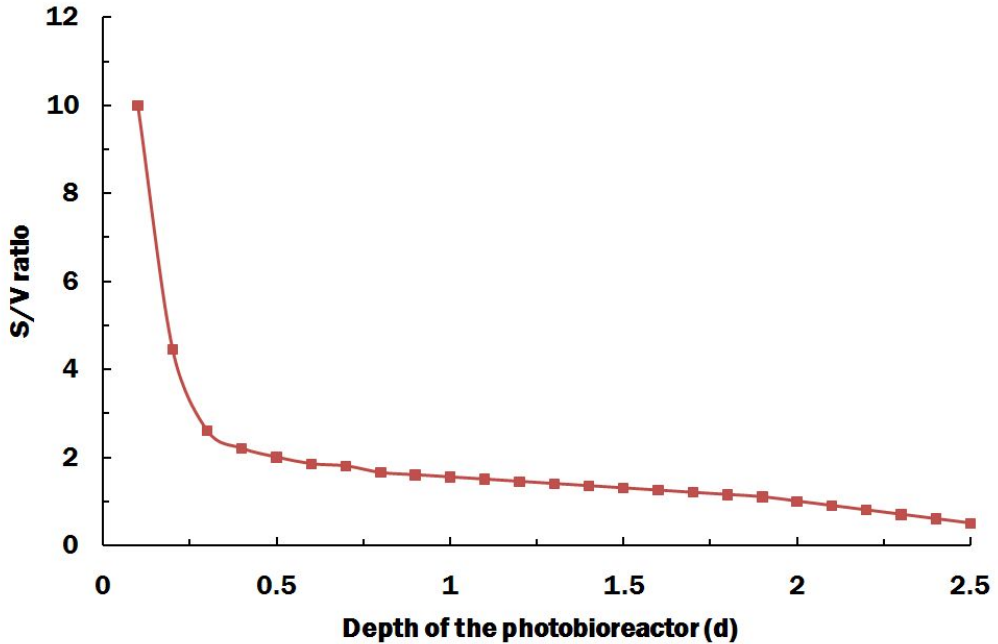
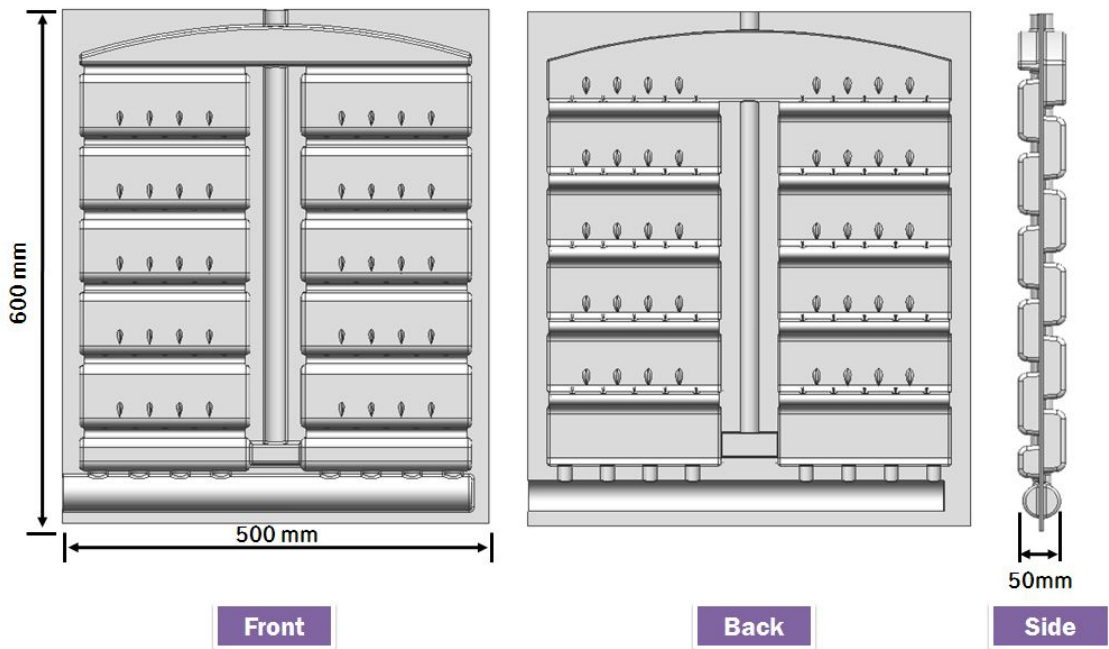


Fig. 34 Surface to volume ratio of the flat panel photobioreactor with a polygon surfaces

Fig. 35 는 Airlift 구조형식인 평판형 광생물 반응기 케이스 설계안이다. 이 광생물 반응기 케이스는 태양광 조도를 높이기 위해 체적 대비 표면적율이 최대값을 나타내는 사각형 평면을 가진 각 분실들이 연속적으로 연결되어 있으며 공기와 이산화탄소로 구성된 기포가 Sparger 를 이용해 기저면에서 부터 케이스 최상단까지 연속적으로 이송 할 수 있도록 하였다. Sparger 는 직경 1 mm 이하의 미세구멍으로 이루어진 튜브 형상이며 여기에 공급된 혼합가스는 미세조류의 마찰에 의한 미세조류에 전단응력이 부가가 이루어지지 않도록 미세한 기포로 생성되어진다. 또한 광생물 반응기에서 내부 유체, 영양분, CO₂ 및 미세조류의 혼합을 일으키는 원동력이 될 수 있도록 하였다. 반응기 케이스 내부표면에 와류발생기(Vortex generator) 를 설계하여 각 분실에서 유체와 미세조류의 자기 순환 속도를 증가시킴으로써 미세조류 배양속도를 높일 수 있도록 구조화 하였다. 와류발생기는 일반적으로 항공기의 날개표면이나 동체 단면이 복잡하게 변화된 부분에 설치를 하여 바람을 쪼게 되면 날개 끝에 소용돌이의 흐름(Vortex) 가 발생하는 데, 이 소용돌이로 인해 공기저항은 작으나 박리되기 쉬운 층류 경계층으로부터 저항은 많지만 에너지가 풍부한 난류 경계층으로 바뀌게 된다. 이러한 와류발생기를 케이

스 내부 단면에 형상화 시켜 Sparger 를 이용한 미세 기체방울이 이 부분을 지나면서 미세조류와 내부 유체에 상호작용에 의한 난류가 생성되어 미세조류의 자기순환에 의해 성장을 증대시킬 수 있다. Vortex generator 는 $8 \times 20 \times 8$ mm 크기로 케이스 내부 벽면에 4 ~ 5 개를 패턴화 하였다. 케이스 내부 공간적 제약 조건을 고려하여 미세조류 상호간의 그림자 효과 및 미세조류에 의한 광 흡수에 의하여 광생물 반응기 깊이 방향으로 광합성 반응차이가 발생하지 않도록 케이스 깊이는 23 mm 로 설계를 하였으며, 광생물 반응기 상단 부분은 배양 시 발생하는 가스의 포집이 가능하도록 공간을 확보하였다. Airlift 구조형 광생물 반응기 케이스 크기는 600 mm \times 500 mm \times 50 mm 이며 케이스 두께는 2 mm 이다. 반응기 케이스 내부의 전체적인 용량은 약 10 L 내외로 설계되었다.

10 L Class Flat-panel photobioreactor case design - Airlift type



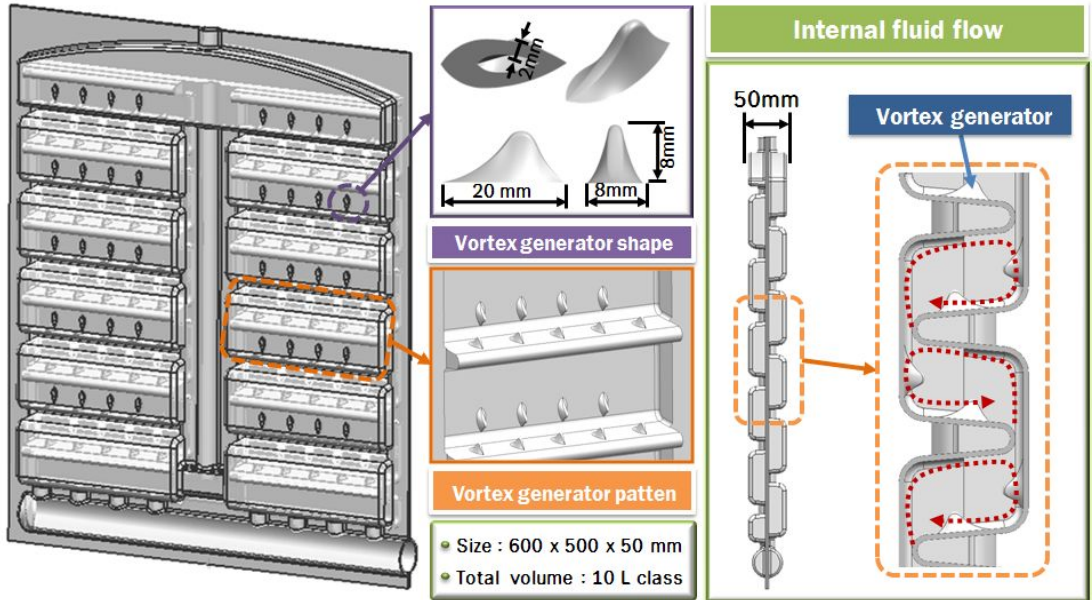


Fig. 35 Design of the 10 L class flat panel photobioreactor case - Airlift type

Fig. 36 은 단위 구조형상을 가진 평판형 광생물 반응기 케이스 설계안이다. 단위구조형상은 각각 약 2.5 L 이며 전체 체적은 10 L 급이다. 이 광생물 반응기 케이스 역시 체적 대비 표면적율 (Surface to volume ratio : S/V ratio) 가 최대값을 나타내는 사각형 평면을 가진 단위 구조형상 광생물 반응기 케이스이다. 케이스 내부 공간적 제약 조건을 고려하여 미세조류 상호간의 그림자 효과 및 미세조류에 의한 광 흡수에 의하여 광생물 반응기 깊이 방향으로 광합성 반응차이가 발생하지 않도록 케이스 깊이는 40 mm 로 설계를 하였다. 설계된 단위 구조형 평판형 광생물 반응기의 최대 특징은 각각 독립적 내부 순환구조를 가지고 있으며 각 구조에 같은 미세조류에 공기 및 이산화탄소의 유량을 변화하여 다양한 시험조건으로 미세조류 배양 시험을 할 수 있다는 점이다. 또한 같은 실험조건하에 서로 다른 미세조류 배양시험이 가능하여 미세조류의 최적 배양조건을 도출하는데 그 설계 목적이 있다. 반응기 공급부에는 미세조류, 배지액, 혼합된 이산화탄소와 산소를 공급할 수 있으며, 배출부에는 생성된 가스, 산소, 성장된 미세조류를 추출하는 부분으로 구분되어 진다. 반응기 케이스 크기는 550 mm × 510 mm × 85 mm 이며, 두께는 4 mm 로 외부 충격에 충분히 견딜 수 있도록 하였으며 반응기 외곽 부분에 Stiffness 을 주어 반응기가 휨으로 인한 변형을 적게 하였으며 반응기 자체에 강성도를 주는 효과를 나타내었다. 또한 광생물 반응기 상단 부분은 배양 시 발생하는

가스의 포집이 가능하도록 공간을 확보하였으며 단위구조 하단부분에는 공급되는 가스로 인해 단위구조 내부에서 미세조류 및 유체가 자기순환이 가능하도록 설계되었다.

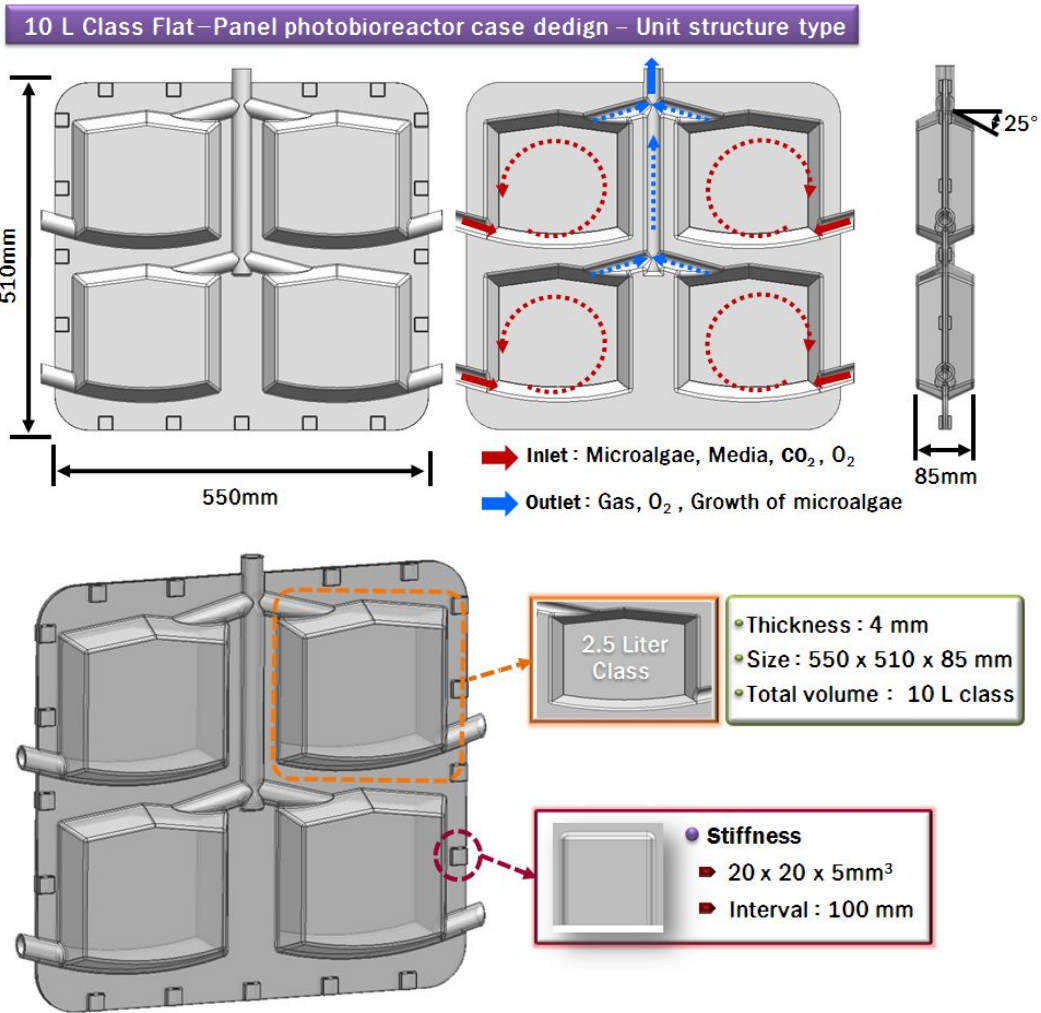


Fig. 36 Design of the 10 L class flat panel photobioreactor case design - Unit structure type

제 2 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 및 성형성 분석

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스를 이용한 미세조류 대량생산을 위해 열성형 공정을 이용하여 광생물 반응기 케이스를 대량생산 하고자한다. 열성형 공정에서는 금형의 형상, 진공조건, 재료 종류와 두께 및 성형시간 등이 최종 제품의 성형성과 품질에 크게 영향을 미친다. 그러므로 평판형 광생물 반응기 케이스 대량 생산용 금형과 공정개발을 위해서는 형상/공정/재료 변수와 제품 성형성/품질 영향성을 분석/고찰하여 최적 설계안을 도출해야 한다. 본 연구에서 현재 설계된 평판형 광생물 반응기 형상과 재료 두께 및 공정 조건에 대하여 3 차원 유한요소해석을 수행하여 형상/공정/재료 변수와 제품 성형성/품질 영향성을 분석하였다. 본 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 상용 프로그램인 PAM-FORM 2011 이다.

Fig. 37 은 10 L 급 단위구조형상 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 3 차원 열성형 해석 모델이다. Table 9 는 유한요소해석을 위한 성형조건을 나타낸것이다. Blank 재료의 고온 물성은 2 장 2 절에서 도출된 고온 인장 물성시험 결과에 따른 G'sell 파라미터 상수를 사용하였고, 비열 및 열전도율은 문헌자료에서 취득한 결과를 사용하였다. Table 10 은 제 3 공정인 진공 성형 공정의 경계조건이다. 진공성형시 Die 와 Holder 에 고정경계조건을 부여하여 진공성형이 구현될 수 있도록 하였다.

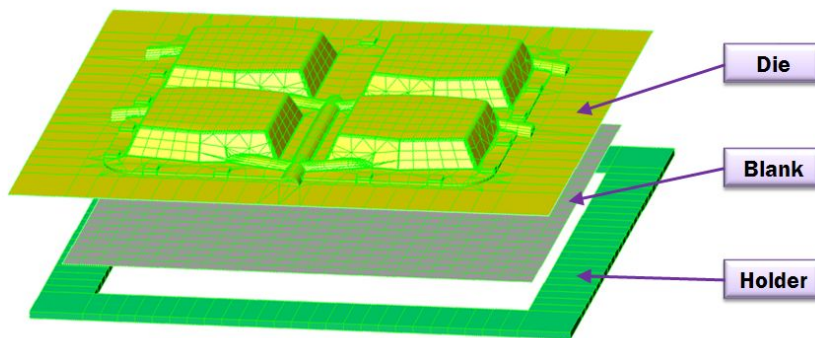


Fig. 37 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

Table. 9 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

No.	Object	Specification	
1.	Die	No. of elements	15,686
		No. of nodes	13,922
		Type	Rigid surface
		Temperature	80°C
2.	Blank	Initial no. of elements	648
		Initial no. of nodes	700
		Refinement Level	2
		Type	Shell element
		Material	PC, PMMA
		Initial temperature	PC(100°C), PMMA(80°C)
3.	Holder	No. of elements	294
		No. of nodes	392
		Type	Rigid surface

Table 10 Process parameters and Boundary condition

No.	Process	Objects	Specification	Details
1	Vaccuming	Die	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation: X,Y,Z
		Holder	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation: X,Y,Z

Fig. 38 ~ Fig. 41 은 유한요소해석 프로그램인 PAM-FORM 2011 이용한 10 L 급 단위 구조형상 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과이다. PC 및 PMMA 재료별로 블랭크 두께 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm 로 각각 해석을 수행하였으며 해석 결과는 반응기 케이스 두께분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리 분포를 해석하여 열성형 특성을 보고자 하였다. PC 재료의 블랭크 두께 1.5 mm 에서 최대 두께값은 1.532 mm, 최소 두께값은 0.13 mm 로 블랭크 두께 3 mm에서 최대 두께값 3.09 mm, 최소 두께값 0.57 보다 성형성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 PMMA 재료에서도 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 두께값은 1.53 mm, 최소 두께값은 0.10 mm 로 블랭크 두께 3 mm에서 최대 두께값 3.19 mm , 최소 두께값 0.17 mm 보다 성형성이 우수함을 확인하였다. 성형후 다이와 블랭크간의 거리 분포의 해석 결과를 살펴보면 PC 재료의 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 거리값은 9.20 mm, 최소 거리값은 0.13 mm 이며, 두께 3 mm에서 최대 거리값은 13.20 mm, 최소 거리값은 -0.14 mm 보다 성형 후 다이와 블랭크 사이의 거리가 가장 가깝게 나타남을 확인할 수 있었다. PMMA 재료에서도 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 거리값은 10.22 mm, 최소 거리값은 -0.09 mm 이며 블랭크 두께 3 mm에서 최대 17.71 mm, 최소 거리값은 -0.14 mm 로 얇은 두께의 블랭크가 다이와 블랭크 사이의 거리가 최소가 됨을 확인하였다. 이는 블랭크에 열을 가하여 진공성형을 수행하는 열성형은 두께가 두꺼운 블랭크의 경우 얇은 블랭크보다 가열 시간이 더 길어져야 하며 진공압력 또한 더 높게 주어져야 다이에 형성되는 케이스 형상의 두께 분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리 분포 특성이 더 우수하게 됨을 알 수 있었다. 또한 해석 수행결과 모든 두께 분포에서 블랭크 두께 절반 보다 더 얇게 성형되는 결과가 나왔는데 이는 성형 후 찢어짐이 나타나는 현상이며 각 두께 별로 최적의 성형 조건을 찾아내어 블랭크 두께에 맞는 열성형 기술을 확보해야함을 알 수 있었다.

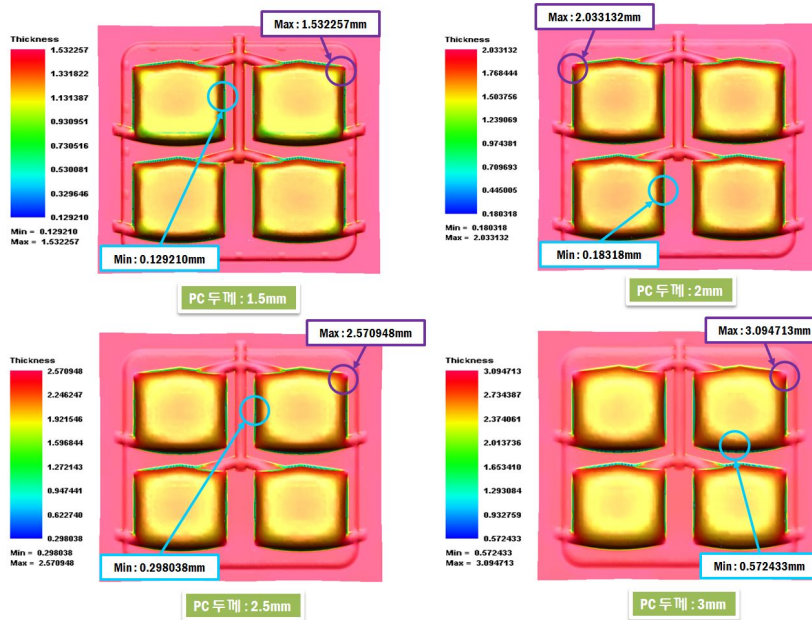


Fig. 38 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Thickness distribution)

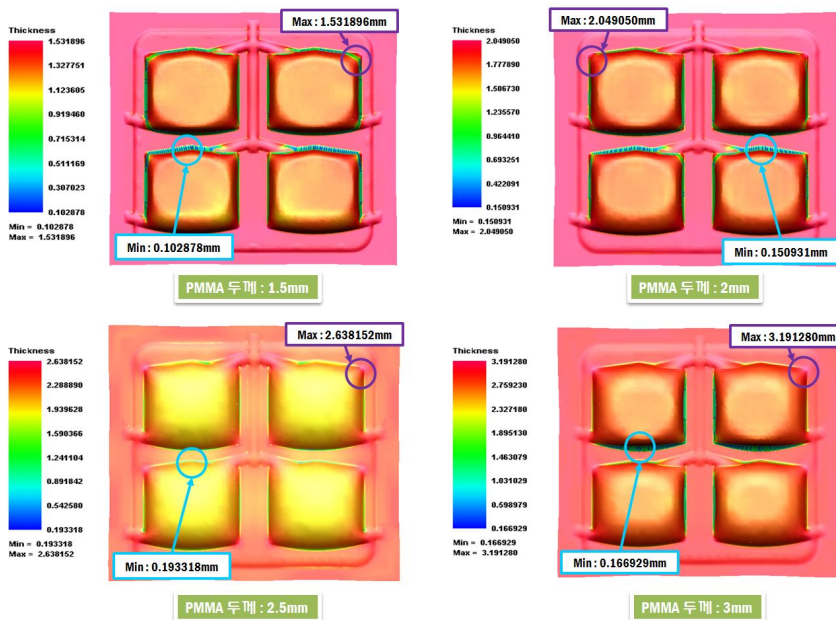


Fig. 39 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Thickness distribution)

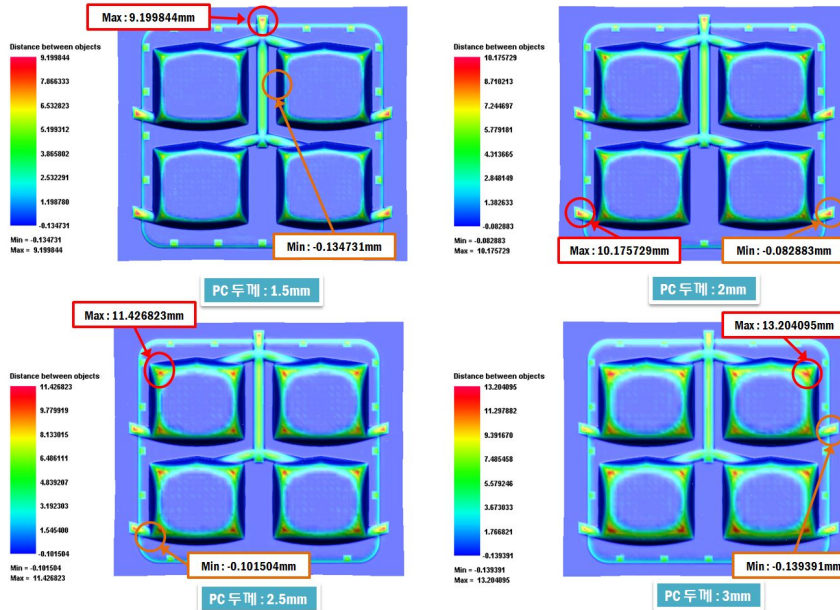


Fig. 40 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Distance between die and blank)

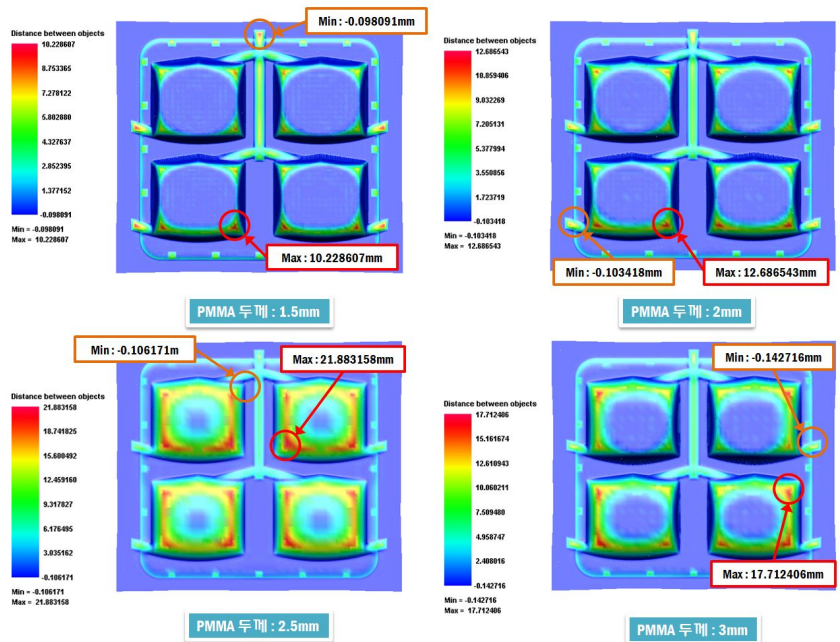


Fig. 41 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Distance between die and blank)

Fig. 42 는 10 L 급 Airlift 구조형 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 3 차원 열 성형 해석 모델이다. Table 11 은 유한요소해석을 위한 성형조건을 나타낸 것이다. Blank 재료의 고온 물성은 2 장 2 절에서 도출된 고온 인장 물성시험 결과에 따른 G'sell 파라미터 상수를 사용하였고, 비열 및 열전도율은 문헌자료에서 취득한 결과를 사용하였다. Table 12 는 제 3 공정인 진공 성형 공정의 경계조건이다. 진공 성형시 Die 와 Holder 에 고정경계조건을 부여하여 진공성형이 구현될 수 있도록 하였다.

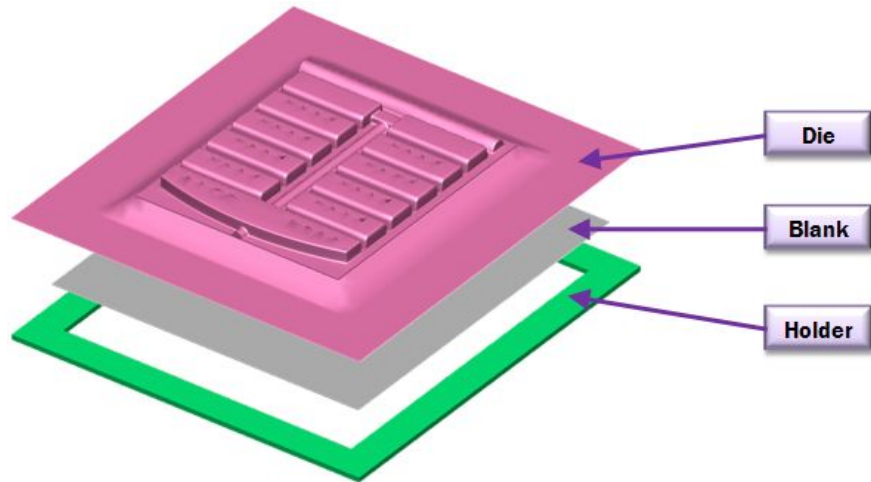


Fig. 42 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

Table 11 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

No.	Object	Specification	
1.	Die	No. of elements	29,965
		No. of nodes	13,922
		Type	Rigid surface
		Temperature	80°C
2.	Blank	Initial no. of elements	1054
		Initial no. of nodes	700
		Refinement Level	8
		Type	Shell element
		Material	PC, PMMA
		Initial temperature	PC(100°C), PMMA(80°C)
3.	Holder	No. of elements	294
		No. of nodes	392
		Type	Rigid surface

Table 12 Process parameters and Boundary condition

No.	Process	Objects	Specification	Details
1	Vaccuming	Die	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation: X,Y,Z
		Holder	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation: X,Y,Z

Fig. 43 ~ Fig. 46 은 유한요소해석 프로그램인 PAM-FORM 2011 이용한 10 L 급 Airlift 구조형 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과이다. PC 및 PMMA 재료별로 블랭크 두께 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm 로 각각 해석을 수행하였으며 해석 결과는 반응기 케이스 두께분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리 분포를 해석하여 열성형 특성을 보고자 하였다. PC 재료의 블랭크 두께 1.5 mm 에서 최대 두께값은 1.54 mm, 최소 두께값은 0.03 mm 로 블랭크 두께 3 mm에서 최대 두께값 3.89 mm, 최소 두께값 1.22 보다 성형성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 PMMA 재료에서도 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 두께값은 1.53 mm, 최소 두께값은 0.03 mm 로 블랭크 두께 3 mm에서 최대 두께값 3.39 mm , 최소 두께값 1.36 mm 보다 성형성이 우수함을 확인하였다. 성형후 다이와 블랭크간의 거리 분포의 해석 결과를 살펴보면 PC 재료의 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 거리값은 34.08 mm, 최소 거리값은 -0.30 mm 이며, 두께 3 mm에서 최대 거리값은 36.68 mm, 최소 거리값은 -0.31 mm 보다 성형 후 다이와 블랭크 사이의 거리가 가장 가깝게 나타남을 확인할 수 있었다. PMMA 재료에서도 블랭크 두께 1.5 mm에서 최대 거리값은 34.11 mm, 최소 거리값은 -0.30 mm 이며 블랭크 두께 3 mm에서 최대 36.78 mm, 최소 거리값은 -0.18 mm 로 얇은 두께의 블랭크가 다이와 블랭크 사이의 거리가 최소가 됨을 확인하였다. 이는 블랭크에 열을 가하여 진공성형을 수행하는 열성형은 두께가 두꺼운 블랭크의 경우 얇은 블랭크보다 가열 시간이 더 길어져야 하며 진공압력 또한 더 높게 주어져야 다이에 형성되는 케이스 형상의 두께 분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리 분포 특성이 더 우수하게 됨을 알 수 있었다.

10 L 급 단위구조형상 평판형 광생물 반응기와 Airlift 구조형 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과 Blank 의 두께가 얇을수록 두께분포 및 거리 분포에서 우수한 성형특성을 보였으나, 반응기의 크기가 커질수록 반응기 케이스 내부압력을 견디기 위해서는 보다 Blank의 두께가 두꺼워져야한다. 후에 설계된 180 L 평판형 광생물 반응기의 열성형을 통한 케이스 제작시 Blank 의 두께를 최대한 얇게 함으로써 열성형 제작을 통해 성형특성이 우수한 광생물 반응기 케이스를 제작 할 수 있음을 알 수 있었다.

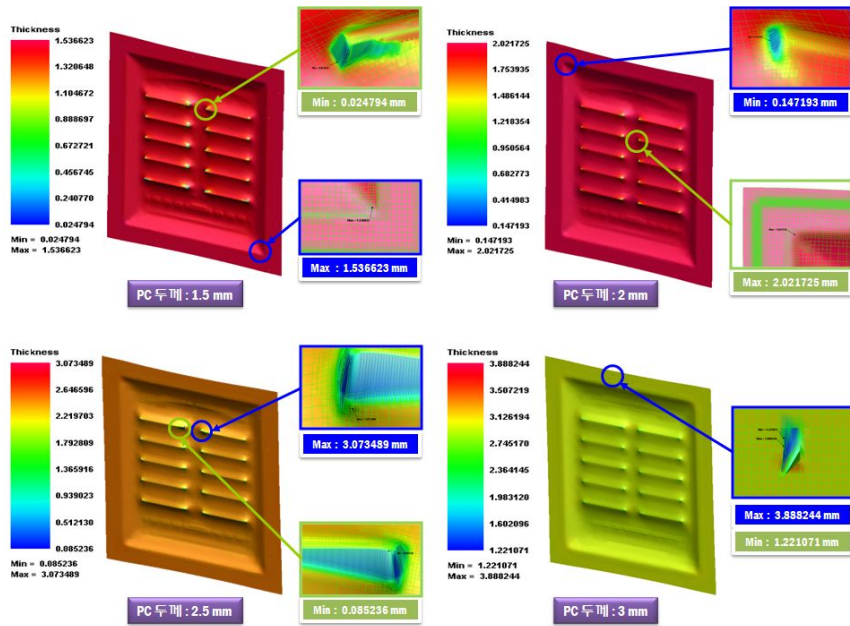


Fig. 43 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Thickness distribution)

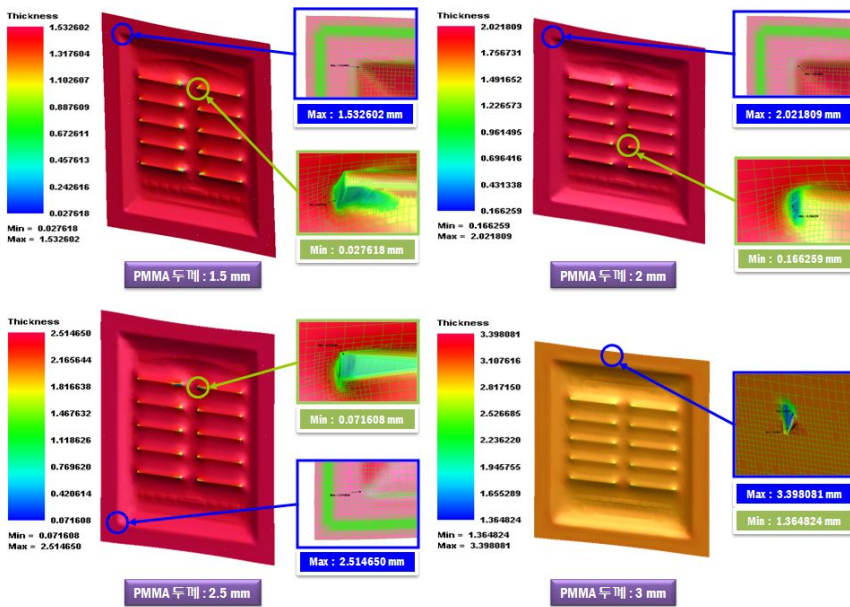


Fig. 44 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Thickness distribution)

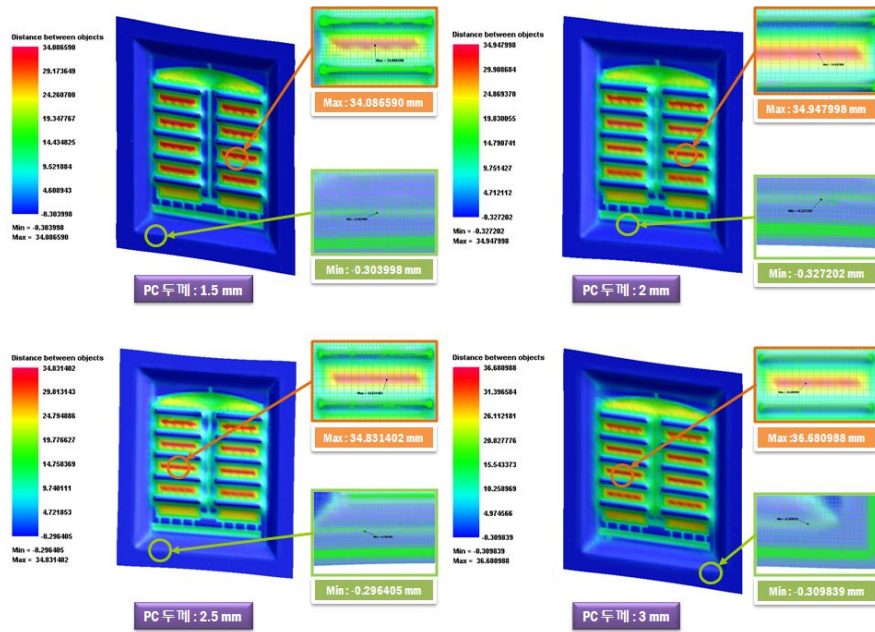


Fig. 45 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PC material (Distance between die and blank)

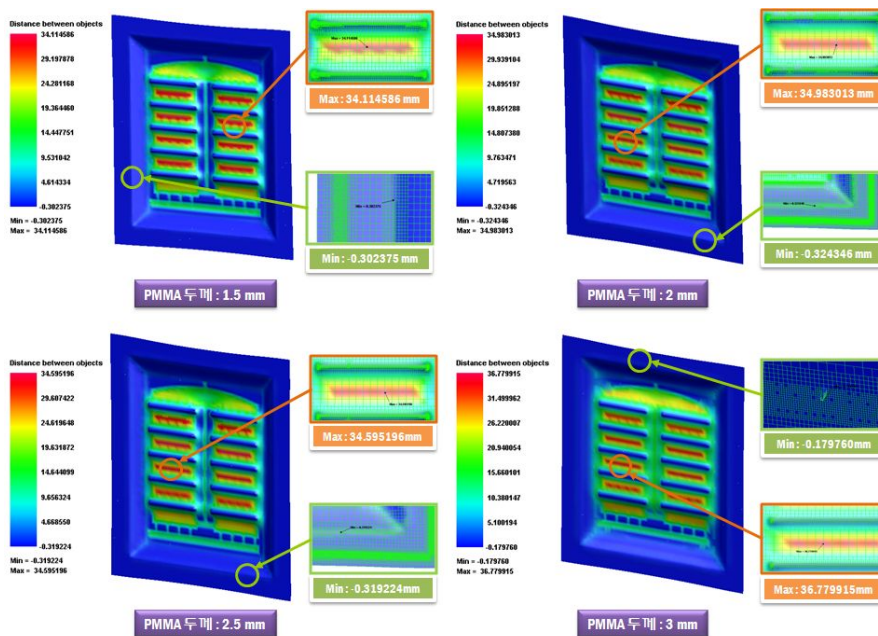


Fig. 46 The results of thermoforming analysis according to the thickness of the PMMA material (Distance between die and blank)

제 3 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 제작

3장 1절에서 설계된 10 L 급 평판형 광생물 반응기 설계안을 쾌속조형공정 통해 실제 3 차원 제품으로 제작하였다. 쾌속조형기술은 3 차원 모델의 2 차원 단면화를 통해서 재료를 체계적으로 한층씩 적층하여 실제 3 차원 모델을 빠른 시간안에 제작할 수 있는 기술로서 제품 개발과정중 시제품 제작에 많이 이용되는 기술이다. 쾌속조형기술 중 광조형(Stereo Lithography : SL) 기술은 광경화성 수지에 레이저 광선을 주사하여 주사된 부분이 경화되는 원리를 이용한 장치로서 레이저 광선을 이용하기 때문에 성형 속도가 빠르며 성형정밀도가 높은 장점이 있기 때문에 SL 기술을 이용하여 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 시제품을 제작하였다.

Fig. 47 은 쾌속조형공정을 이용한 케이스 제작을 위한 CAD 데이터 변환과정을 나타낸것이다. 광생물 반응기 케이스 설계안 A 와 B 의 Solid Model 을 STL 데이터로 변환한 후, STL 파일을 높이 방향으로 슬라이싱하여 각 층 제작에 필요한 단면 데이터를 생성하였다.

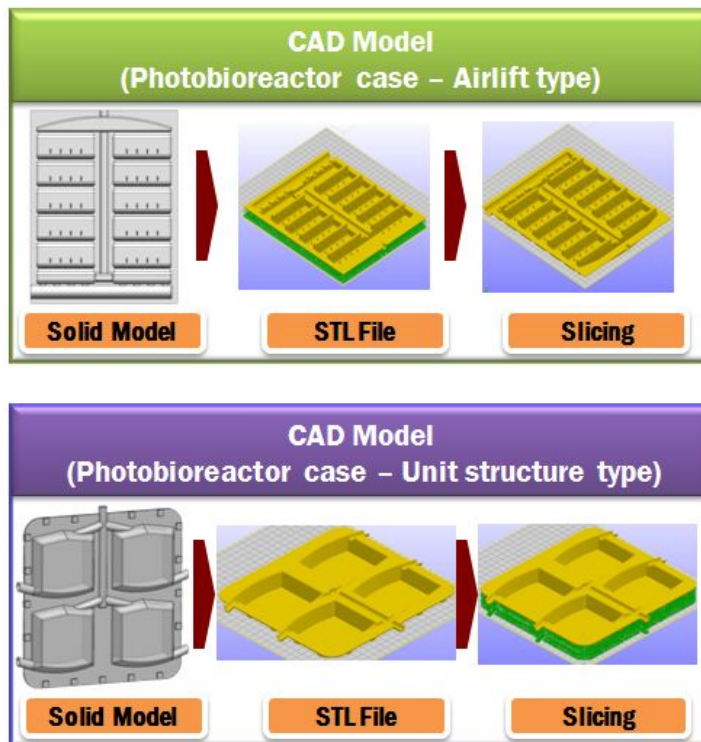


Fig. 47 CAD Model (Photobioreactor case of Airlift type and Unit structure type)

Fig. 48 은 본 기술개발에 사용된 SLA 쾌속조형장치이다. 본 기술개발에서는 iPro 9000 모델 중 RDM 750F 장비를 사용하였다. 최대 제작가능 사이즈는 650 × 750 × 550 mm 이며 적층이 가능한 최대 두께는 0.15 mm 이며 본 케이스 제작시에는 0.1 mm 를 사용하였다. 제작에 사용된 재료는 광경화성 수지인 Accura-60 플라스틱이다. Table 13 은 Accura-60 플라스틱의 물리적 성질을 나타낸 것으로서 기계적 강도 및 투명성이 우수한 재료임을 확인할 수 있다.

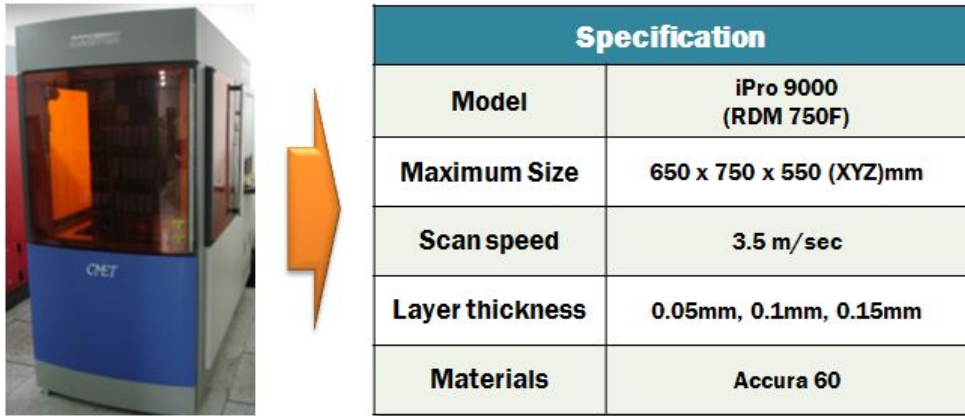


Fig. 48 Rapid prototyping apparatus

Table 13 Properties of the Accura-60 materials

Measurement	Condition	Metric
Tensile Strength	ASTM D 638	56 ~ 68 MPa
Tensile Modulus	ASTM D 638	2,690 ~ 3,100 MPa
Elongatin at Break(%)	ASTM D 638	5 ~ 13 %
Flexural Strength	ASTM D 790	87 ~ 101 MPa
Flexural Modulus	ASTM D 790	2,700 ~ 3,000 MPa
Impact Strength (Notched Izod)	ASTM D 256	15 ~ 25 J/m
Hardness, shore D		86

Table 14 는 본 기술개발에서 평판형 광생물 반응기 케이스 제작시 사용된 쾌속조형조건들이다. 변환된 STL 파일 및 Slicing 된 데이터를 RP 장비 컴퓨터에 입력을 하게 되면 제작 공정이 시작될때 장비의 Platform 은 용기속의 액체수지 표면으로부터 한층의 적층두께(0.1 mm) 만큼 아래에 위치한다. 단면의 윤곽을 따라 수지 표면을 레이저로 스캔을 해서 레이빔에 노출된 수지는 굳어진다. 한 층의 공정을 마치고 나면 Platform 은 다음 한층의 두께만큼 아래로 내려가게 되고 같은 방법으로 다음 층이 만들어 지는 원리를 이용한 것이다. Fig. 49 는 RP 장비 안에서 SLA 기술에 의해 만들어진 광생물 반응기 케이스의 제품을 나타낸 것으로 제작시간은 광생물 반응기 케이스에 대하여 Airlift 형상은 약 58 시간, 단위구조형상은 약 60 시간이 소요되었다.

Table 14 Manufacturing conditions for the flat panel photobioreactor

	Case (Airlift type)	Case (Unit structure type)
Model	iPro 9000 (RDM 750F)	
Size	500 × 600 × 50 (XYZ) mm	550 × 510 × 85 (XYZ) mm
Scan speed	3.5 m/sec	
Layer thickness	0.1 mm	
Materials	Accura-60	
Time	58 h	60 h

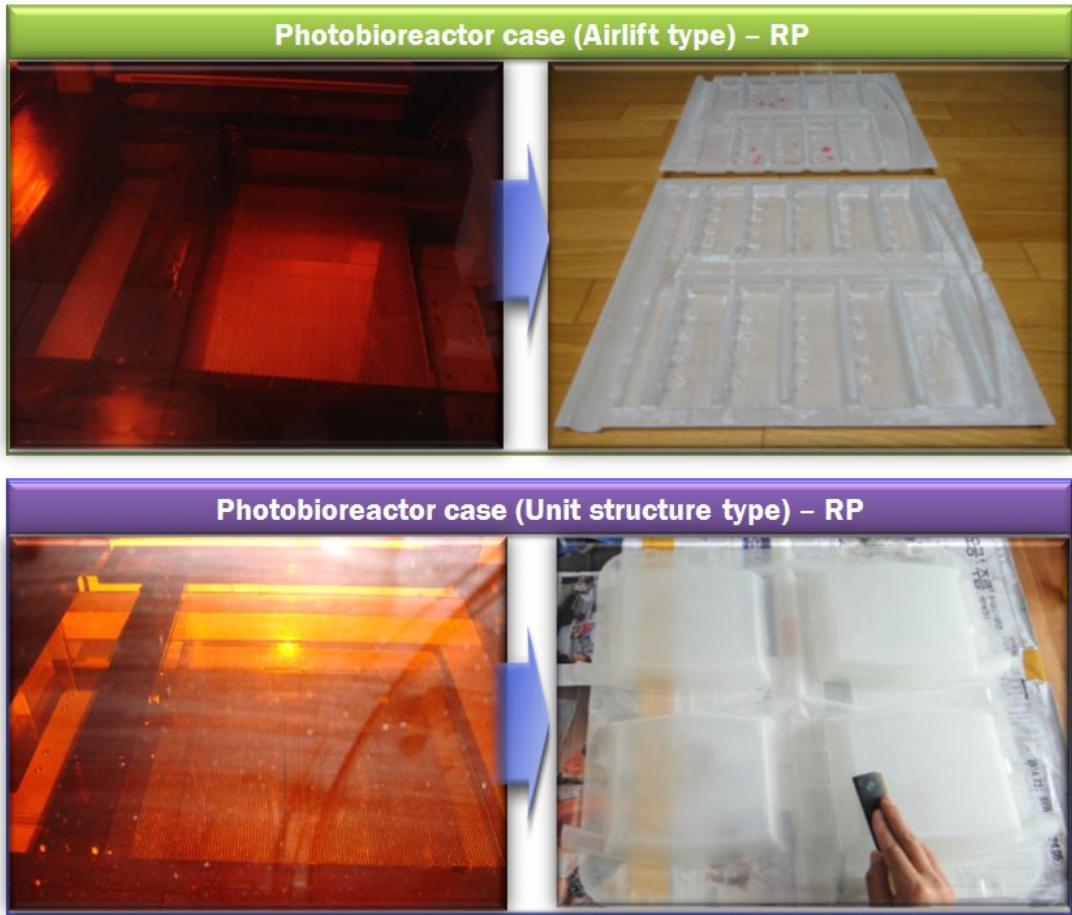


Fig. 49 Manufactured photobioreactors from the SLA apparatus

제작된 케이스는 후가공 공정을 통하여 표면조도가 향상되게 된다. Fig. 50 은 제작된 평판형 광생물반응기 케이스의 후가공 과정을 나타낸 것이다. 후처리는 작업자가 직접 사포를 사용해 표면을 문질러 표면을 매끈하게 다듬질 하는 과정이다. 사포는 적은 입방수를 가진 220, 320, 400, 800 순으로 사포질을 한 다음 1000, 1500, 2000 과 같은 고운 사포를 이용하여 다듬질 한다. 케이스의 후가공 공정 소요 시간은 약 7 일 정도 소요되며 얇은 제품은 형상에 따라 깨질 우려가 있는 작업공정이다.

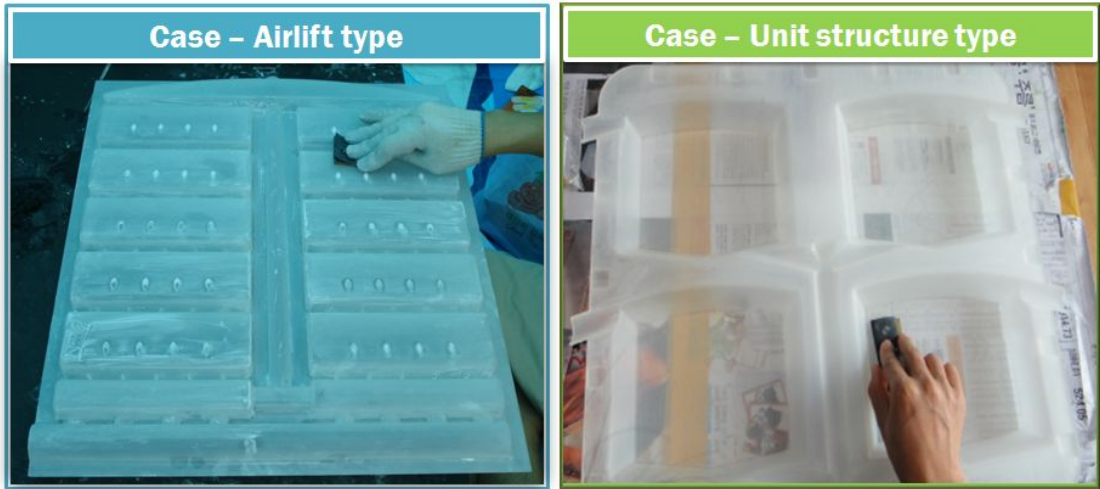


Fig. 50 Polishing operations of case airlift type and unit structure type

Fig. 51 은 후가공 공정 과정을 마친 반응기 케이스의 최종 후가공 과정인 투명 스프레이 코팅 작업을 나타낸 것이다. 투명 스프레이 코팅 작업은 케이스 표면에 일정하게 분사되는 정밀한 작업으로 모든 면에 골고루 분사한 후 1 일 ~ 2 일 동안 자연 건조 시킨다.



Fig. 51 Spary coating operations

Fig. 52 는 후가공 과정을 마친 광섬유 반응기 케이스의 형상이다. 제작된 광섬유 반응기 케이스 모두 3 차원 CAD 데이터와 크기가 일치했으며 투명 스프레이 코팅으로 인해 우수한 투명성을 보임을 알 수 있다.

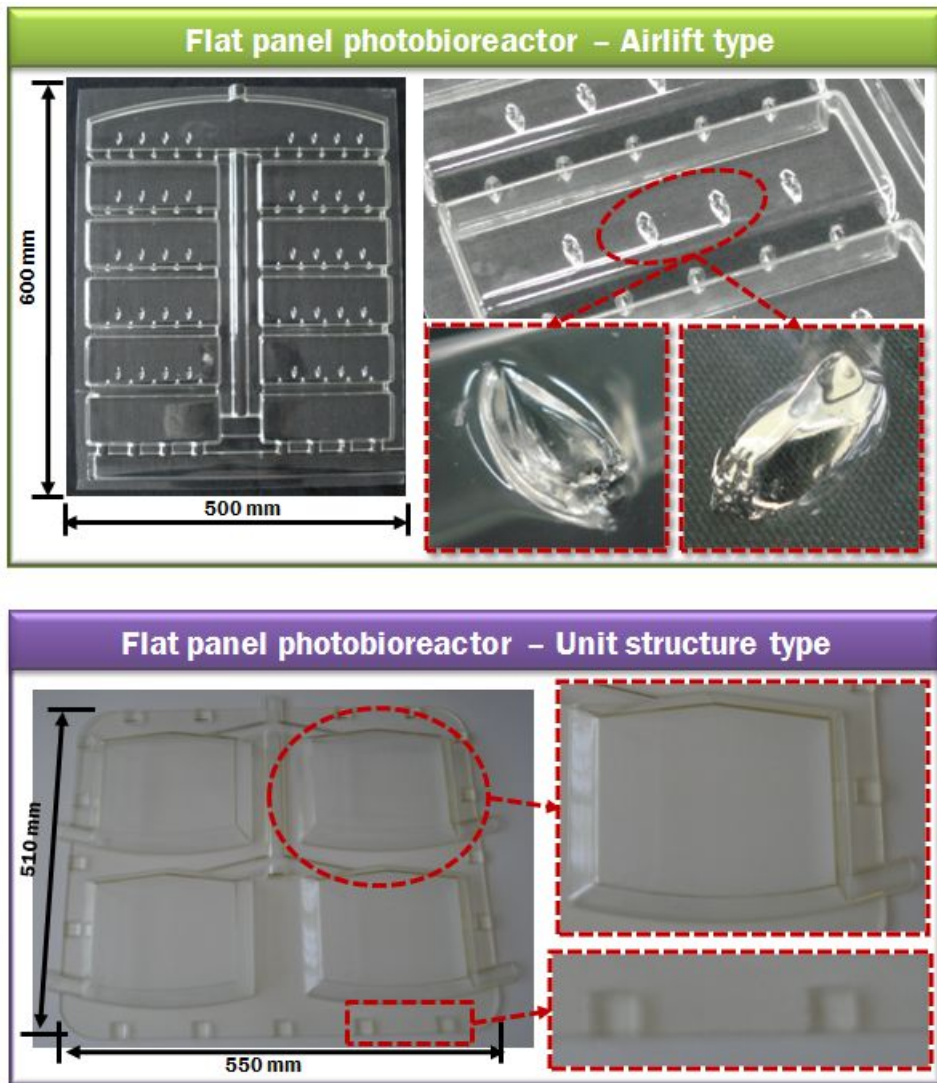


Fig. 52 Finally fabricated flat panel photobioreactor case

Fig. 53 은 최종 조립된 평판형 광생물 반응기 케이스의 모습을 나타낸 것이다. 반응기 내부 기밀 유지를 위해 실리콘판 두께 1 mm 을 케이스 중간에 삽입하여 밀착이 되게 하였으며 케이스 간에는 진공구리스를 도포하여 실리콘과 함께 케이스 내부 기밀을 유지하였다. 최종적으로 미세조류를 이용한 반응기 시험을 위해 가이드바를 제작하여 반응기 케이스 가장자리에 부착하여 시스템 설치가 이루어지도록 하였다.

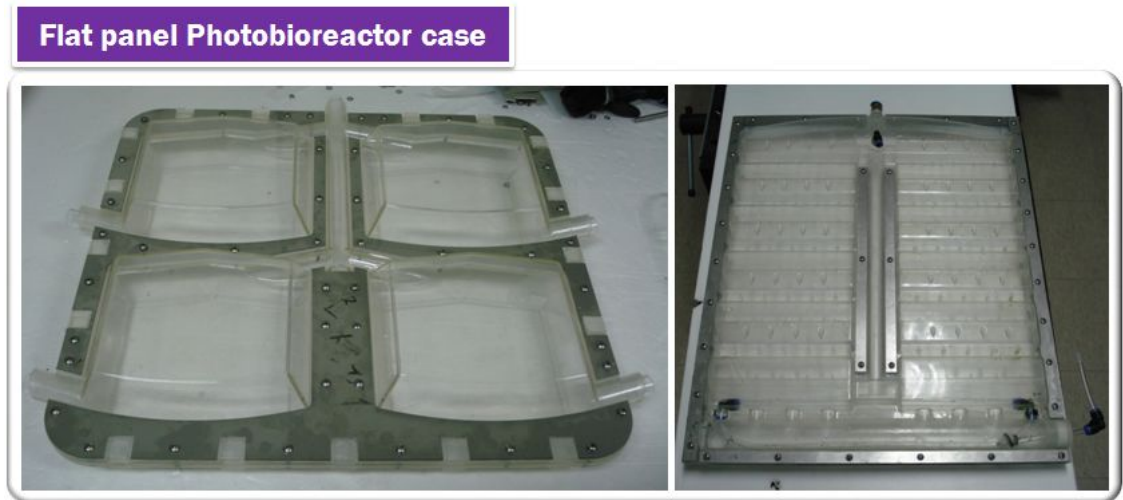


Fig. 53 Assembled flat panel photobioreactor case

제 4 절 10 L 급 평판형 광생물 반응기 미세조류 배양시험

3 장 3 절에서 최종 조립된 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스에 실제 미세조류를 배양하여 반응기 배양 효율 및 그 특성을 분석하였다. Table 15 는 미세조류 배양을 위한 배양 조건을 나타낸 것이다. 미세조류는 *Dunaliella* 를 사용하였으며 주입된 가스는 제작된 Sparger 에 CO₂ 5 % 와 N₂ 95 % 혼합된 가스를 주입하여 반응기 내부에 에어레이션(Aeration) 이 가능하게 하였다. pH 는 D. media 를 이용하여 약 pH 8 로 유지하였다. D. media 는 2M Tris-HCl (pH 7.4) 242.2 g/L, 1M KNO₃ 101.1 g/L, 1M MgCl₂·6H₂O 203.3 g/L, 1M MgSO₄·7H₂O 246.5 g/L, 60mM CaCl₂ 8.82 g/L, 20mM K₂HPO₄ 4.56 g/L, 0.4mM FeCl₃ 0.11 g/L, NaHCO₃ 84 M.W. 로 구성하였다. 평판형 광생물 반응기 외부엔 6000 Lux 의 광량을 유지할 수 있는 도광판을 설치하였으며 배양실 내부 온도는 온도조절 장치를 이용하여 28 °C 를 항상 유지 할 수 있도록 하였다.

Table 15 Microalgae cultivation conditions (Unit structure type)

Microalgae	Gas	pH	Illumination	Cultivation Temperature
<i>Dunaliella</i>	CO ₂ 5 % + N ₂ 95 %	pH 8	6000 Lux	28 °C

Fig. 54 는 단위구조형 평판형 광생물 반응기의 각 단위구역을 Section A ~ D 까지 설정하여 각 단위구조에 주입되는 가스의 유량을 제어하여 미세조류 *Dunaliella* 의 배양에 필요한 최적의 가스 유량을 확인 할 수 있는 배양시험을 실시하였다. Section A 는 가스를 전혀 주입하지 않았으며 가스로 인한 에어레이션 효과도 가능하지 않은 상태이다. Section B 는 가스 유량 조절기에서 최대로 주입할 수 있는 250 cc/min 을 유지 하였으며 가스로 인한 에어레이션이 가능하게 하였다. Section C 는 120 cc/min 을 주입하였으며 Section B 와 마찬가지로 에어레이션이 가능하게 하였다. Section D 는 가스 유량이 가장 적은 50 cc/min 으로 유지하였으며 에어레이션이 가능하게 하였다. 단위구조형 평판형 광생물 반응기는 위와 같이 조건을 달리하여 미세조류의 성장에 맞는 최적의 조건을 찾는 데 사용이 용이하도록 제작되었다.

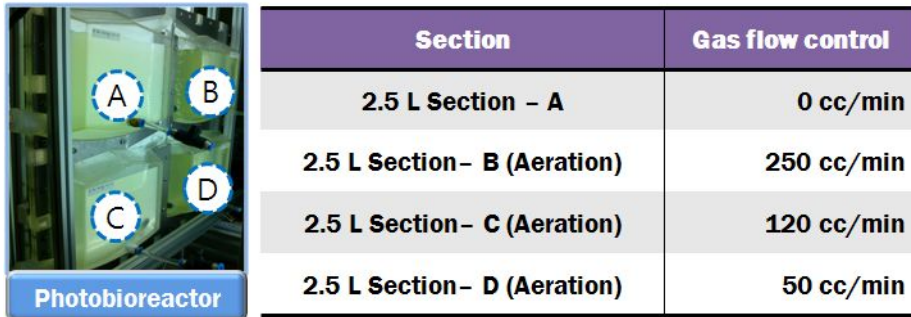


Fig. 54 Gas flow control according to the cultivation of microalgae

Fig. 55 는 미세조류 *Dunaliella* 의 배양시험을 실시하기 위하여 단위구조형 평판형 광생물 반응기에 연결된 미세조류 배양 시스템의 각 부품들을 보여준것이다. 배양실의 온도를 유지 할 수 있는 온도조절기와 가스유량을 제어하는 가스 유량 조절 밸브, 가스 배출구에 설치된 필터장치, 가스가 혼합된 용기 등이 반응기에 연결되어 미세조류 배양 시험을 가능하게 하였다.

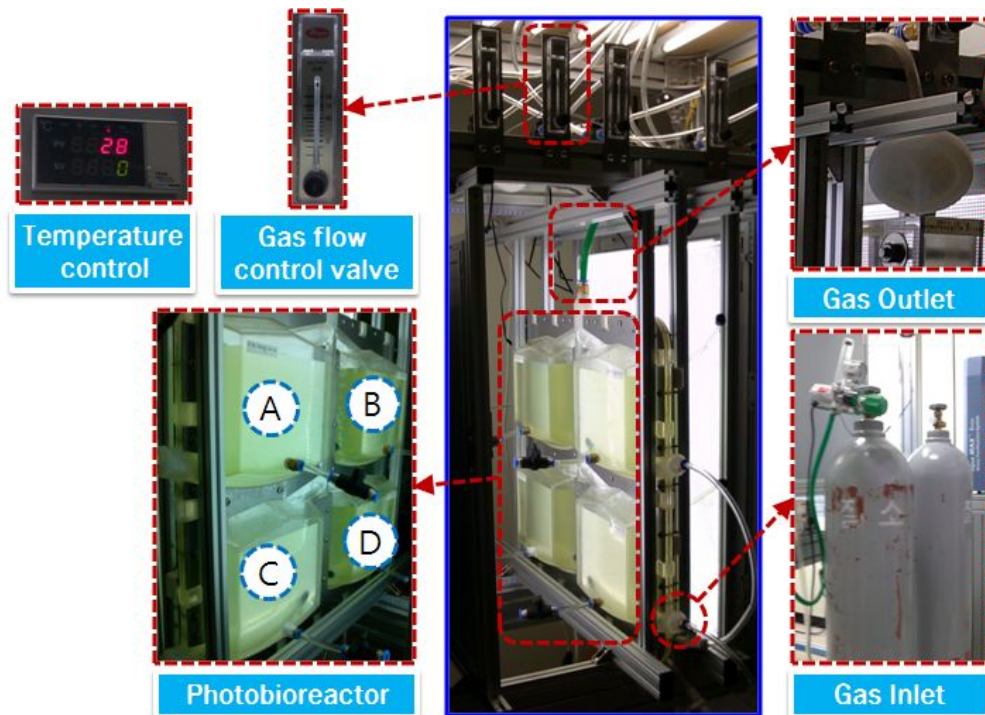


Fig. 55 Microalgae cultivation system (Unit structure type)

Fig. 56 은 단위구조형 평판형 광생물 반응기에 미세조류 *Dunaliella* 배양시험 결과를 사진으로 나타낸것이다. 총 배양시간은 10 일이며, 그 이후에는 반응기 내부 미세조류가 모두 더 이상 배양되지 않은 상태가 되어 배양시험을 중단하였다. 미세조류가 최대 성장을 보이는 5 일에는 육안상으로도 조류의 색깔이 짙어 최대 성장이 이루어졌음을 확인 할 수 있었다.







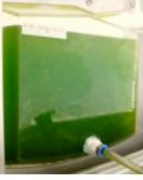


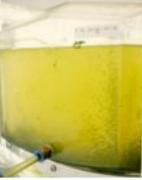


	Section - A	Section - B	Section - C	Section - D
0 day				
5 day				
10 day				

Fig. 56 Results of the microalgae cultivation (Unit structure type)

Fig. 57 은 미세조류를 배양하여 균체성장 정도를 측정할 수 있는 OD (Optimal Density) 값 측정장비이다. 장비는 B 사의 Libra-S22 모델이며, 운용 프로그램은 Acquire multi wavelength 를 사용하였다. OD 측정 방법은 측정하려는 미세조류를 Sample case 1, 2, 3 에 같은 양을 주입한 후, Reference case 에는 증류수를 주입하면 측정준비가 완료가 된다. 미세조류의 OD 값은 증류수와 비교되어 총 3 개의 OD 값이 도출되며 Sample 1, 2, 3 의 평균값이 균체의 OD 값이 된다. Fig. 53 의 OD 값 또한 위와 같은 방법으로 측정되었으며 반응기가 설치되어 미세조류가 배양된 시점부터 매일 같은 시간에 OD 값을 측정하여 그 결과를 도출하였다.

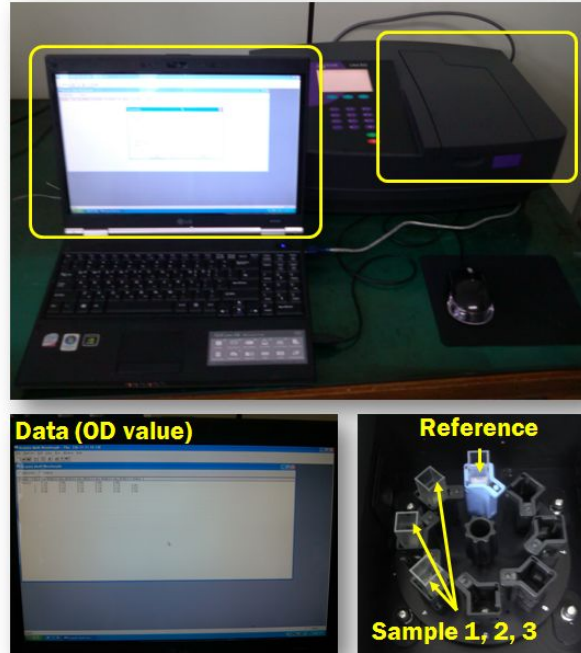


Fig. 57 The equipment for OD value measurement

Fig. 58 은 OD 값 측정장비를 이용하여 조건별로 미세조류가 배양된 단위 구조형상 평판형 광생물 반응기 케이스의 Section A ~ D 의 OD 값을 나타낸것이다. 최대 균체 성장률은 Section A 는 0.948, Section B 는 0.959, Section C 는 0.998, Section D 는 0.911 을 나타냈었다. 가스의 유량 제어를 통해 에어레이션 효과와 가스를 공급한 Section B, C, D 의 경우 균체성장률이 최대값을 나타낸 4 일 ~ 5 일은 Section - A 의 (6일) 보다 빠른 균체성장률을 나타냄을 확인할 수 있었다. 에어레이션을 통한 가스의 공급은 미세조류의 성장을 빠르게 진행시킬 수 있으며 만약, 이 단위구조형상 평판형 광생물 반응기가 연속배양이 가능한 구조로 이루어진다면 성장된 미세조류가 최대 배양과 동시에 추출이 이루어져 대량의 미세조류를 얻는 시간을 감소할 수 있게 됨을 확인 할 수 있었다. 시험결과로부터 미세조류 *Dunaliella* 의 경우 가스의 적정한 주입 유량은 Section - C 인 120 cc/min 으로 확인되어지며, 5 일 정도 배양 후 미세조류를 추출할 경우 최대 성장된 미세조류를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

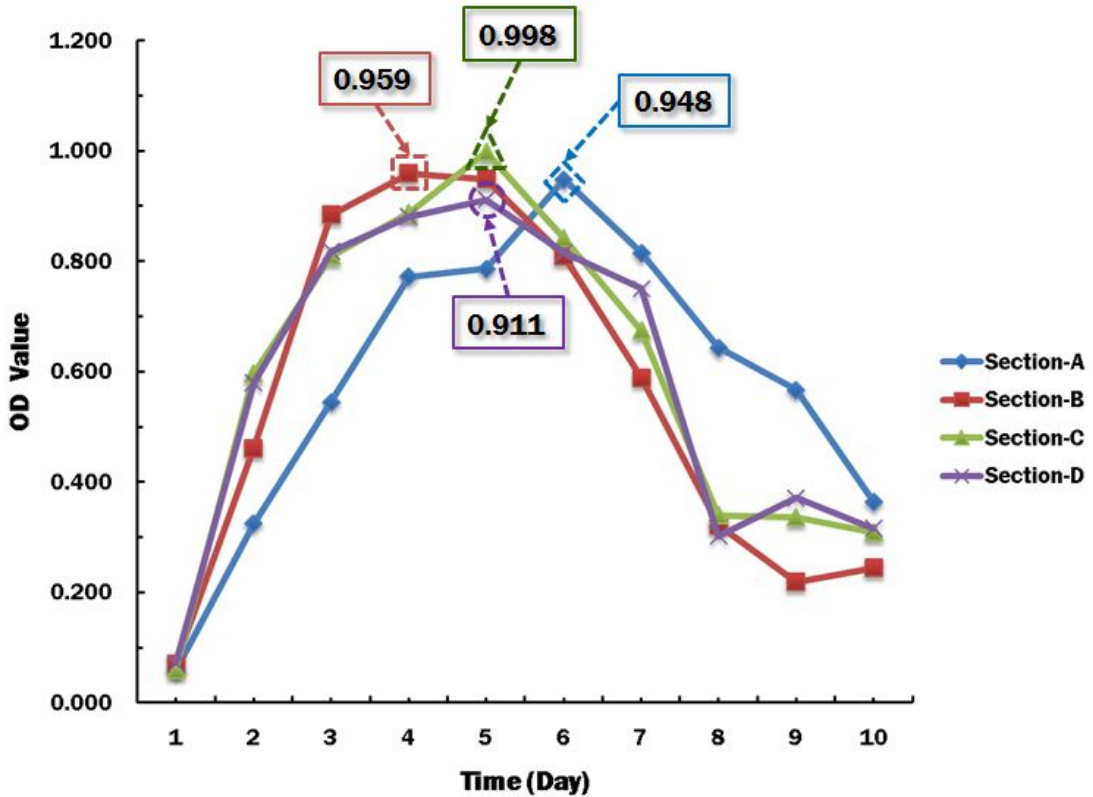


Fig. 58 Results of the OD value measurement (Unit structure type)

Fig. 59 는 단위구조형 평판형 광생물 반응기 미세조류 배양시험을 통해 도출된 *Dunaliella* 의 최적 배양조건을 Airlift 구조형 평판형 광생물 반응기에 적용하여 미세조류 배양시험을 실시하였다. 반응기 케이스 내부표면의 와류발생기(Vortex generator) 가 각 분실에서 유체와 미세조류의 자기 순환 속도를 증가시킴으로써 미세조류 최대 배양속도를 높일 수 있도록 배양시험을 실시하였다. 시험을 실시하기 위하여 Airlift 구조형 평판형 광생물 반응기에 연결된 미세조류 배양 시스템의 각 부품들을 보여준 것이다. 배양실의 온도를 유지 할 수 있는 온도조절기와 가스유량을 제어하는 가스 유량 조절 밸브, 가스 배출구에 설치된 필터장치, 가스가 혼합된 용기가 반응기에 연결되어 미세조류 배양 시험을 가능하게 하였다. 주입된 가스는 제작된 Sparger 에 CO₂ 5 % 와 N₂ 95 % 혼합된 가스를 주입하여 반응기 내부에 에어레이션(Aeration) 이 가능하게 하였다. pH 는 D. media 를 이용하여 약 pH 8 로 유지하였다. D. media 는 단위구

조형 평판형 광생물 반응기 미세조류 배양시험에 사용된 혼합된 조성과 같은 양을 적용하였으며, 평판형 광생물 반응기 외부엔 6000 Lux 의 광량을 유지할 수 있는 도광판을 설치하였다. 배양실 내부 온도는 온도조절 장치를 이용하여 28 ℃ 를 항상 유지할 수 있도록 하였다.

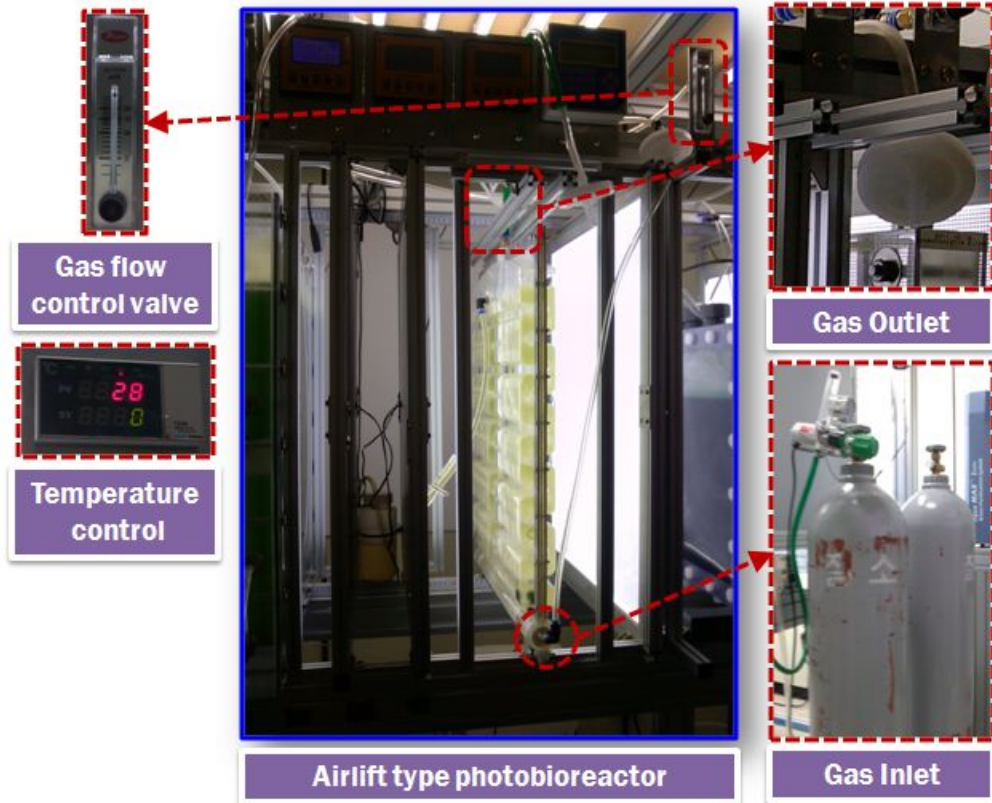


Fig. 59 Microalgae cultivation system (Airlift type)

Fig. 60 은 OD 값 측정장비를 이용하여 미세조류가 배양된 Airlift 구조형상 평판형 광생물 반응기의 OD 값을 나타낸것이다. 최대 균체 성장률은 배양을 시작한 날부터 6 일 뒤에 최대 균체성장률 1.540 을 나타냈었다. 반응기 케이스 내부표면의 와류발생기 (Vortex generator) 가 각 분실에서 유체와 미세조류의 자기 순환 속도를 증가시킴으로써 Dunaliella 의 최대 성장된 미세조류를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

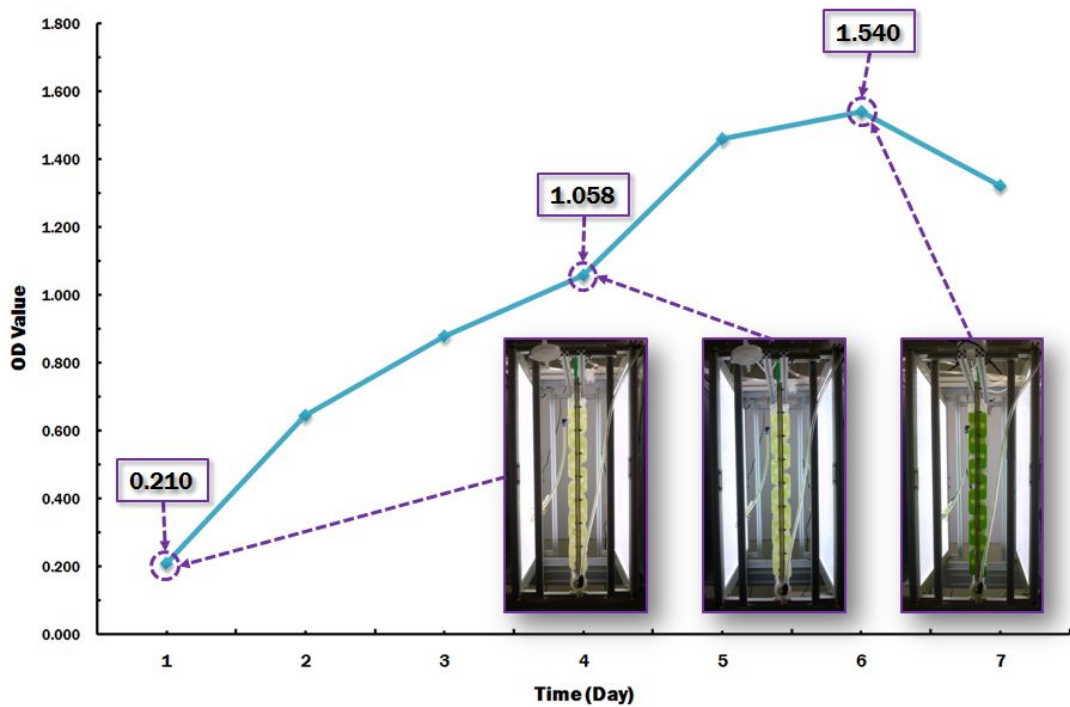


Fig. 60 Results of the OD value measurement (Airlift type)

10 L 급 광생물 반응기 미세조류 배양시험 효율을 비교 검증하기 위하여 미세조류 배양용 플라스크에 *Dunaliella* 를 시험 배양하였다. Table 16 은 시험 배양 조건이며 pH 는 D. media 를 이용하여 약 pH 8 로 유지하였다. D. media 조성은 광생물 반응기 미세조류 배양시험의 조성 과 같도록 유지하였으며 조도는 6000 Lux, 배양온도는 28 °C 를 유지하여 배양시험을 수행하였다.

Table 16 Microalgae cultivation conditions (Flask type)

Microalgae	pH	Illumination	Cultivation Temperature
<i>Dunaliella</i>	pH 8	6000 Lux	28 °C

Fig. 61 은 미세조류 배양용 플라스크에서 배양된 *Dunaliella* 의 OD 값 측정 결과를 나타내었다. *Dunaliella* 의 최대균체 성장률을 보인 배양 6 일째에 OD 값 0.748 을 나타내었다. 그 이후에는 더 이상 미세조류가 성장하지 않아 배양 시험을 중단하였다. 미세조류 배양에 필요한 CO₂ 및 O₂ 의 가스 주입이 이루어지지 않아 광생물 반응기 시험결과보다 균체성장률이 낮게 측정되었음을 알 수 있었다.

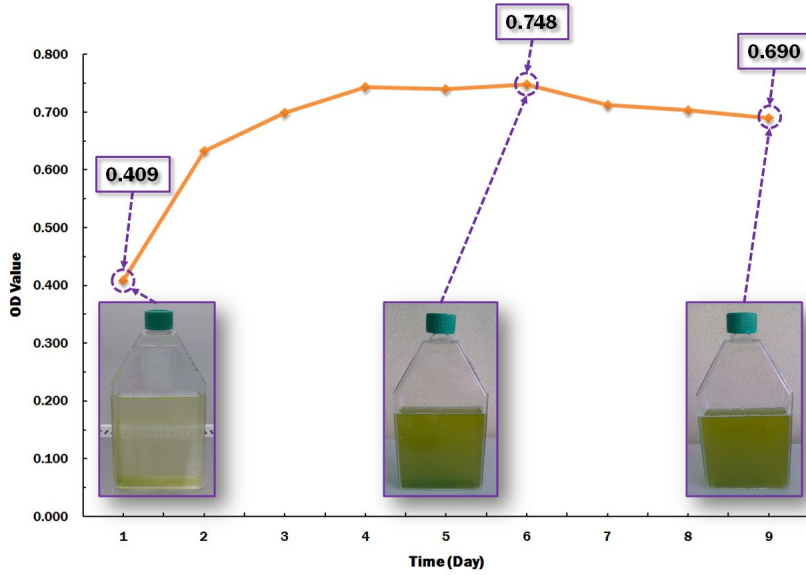


Fig. 61 Results of the OD value measurement (Flask type)

Fig. 62 은 미세조류 *Dunaliella* 를 플라스크, 단위구조형 반응기, Airlift 반응기에 각각 배양하여 도출된 미세조류 배양 OD 값을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 전체적인 배양효율은 Airlift type 의 반응기가 플라스크 타입보다 최대 51.43 %, 단위구조형 반응기 보다는 최대 35.2 % 배양효율이 높음을 알 수 있었다. 본 *Dunaliella* 미세조류 시험을 통해 Airlift 구조의 반응기가 미세조류 배양에 최적의 구조임을 확인할 수 있었다.

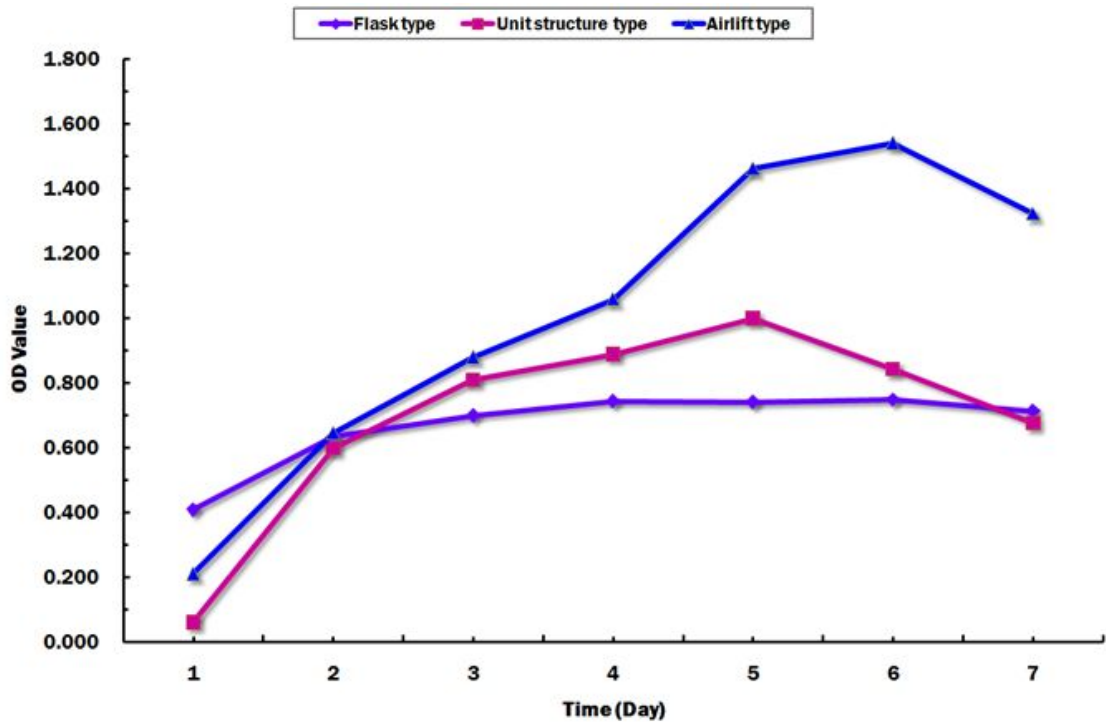


Fig. 62 Results of the OD value according to the microalgae cultivation type (Algae : *Dunaliella*)

미세조류 *Dunaliella* 와 배양 조건이 비슷한 미세조류 *Chlorella* sp. 를 플라스크, 단위구조형 반응기, Airlift 반응기에 각각 시험 배양을 실시하였다. Table 17 은 *Chlorella* sp. 시험 배양 조건이며 Medium 은 TAP 를 사용하였으며, 주입된 가스는 제작된 Sparger 에 CO₂ 5 % 와 N₂ 95 % 혼합된 가스를 주입하여 반응기 내부에 에어레이션(Aeration) 이 가능하게 하였다. 또한 평판형 광생물 반응기 외부엔 6300 Lux 의 광량을 유지할 수 있는 도광판을 설치하였으며 배양실 내부 온도는 온도조절 장치를 이용하여 28 °C 를 항상 유지하여 배양시험을 수행하였다.

Table 17 Microalgae cultivation conditions

Microalgae	Medium	Illumination	Light/Dark	Cultivation Temperature
<i>Chlorella</i> sp.	TAP	6300 Lux	12h/12h	28 °C

Fig. 63 은 플라스크, 단위구조형 반응기, Airlift 반응기에 미세조류 *Dunaliella* 배양 시험 결과를 사진으로 나타낸것이다. 총 배양시간은 8 일이며, 그 이후에는 반응기 내부 미세조류가 모두 더 이상 배양되지 않은 상태가 되어 배양시험을 중단하였다. 미세조류가 최대 성장을 보이는 8 일에는 육안상으로도 미세조류의 색깔이 짙어 최대 성장이 이루어졌음을 확인 할 수 있었다.

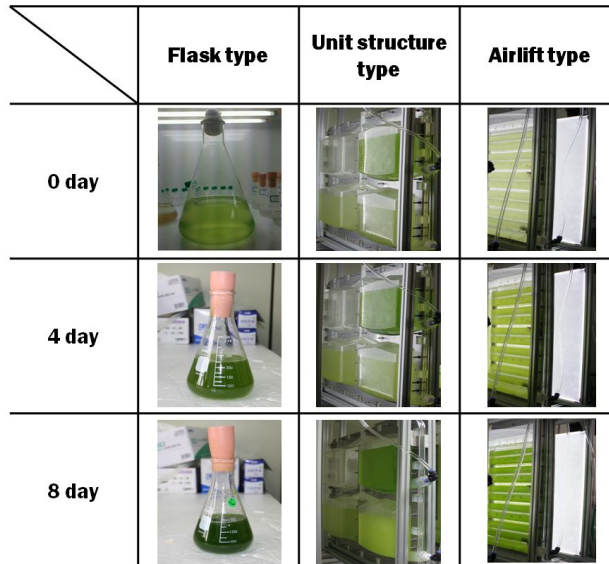


Fig. 63 Results of the microalgae cultivation (*Chlorella* sp.)

Fig. 64 는 미세조류 *Chlorella* sp. 를 플라스크, 단위구조형 반응기, Airlift 반응기에 각각 배양하여 도출된 미세조류 배양 OD 값을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 전체적인 배양효율은 Airlift type 의 반응기가 플라스크 타입보다 최대 38.63 %, 단위구조형 반응기 보다는 최대 19.21 % 배양효율이 높음을 알 수 있었다. 본 *Chlorella* sp. 미세조류 시험을 통해 Airlift 구조의 반응기가 미세조류 배양에 최적의 구조임을 확인할 수 있었다.

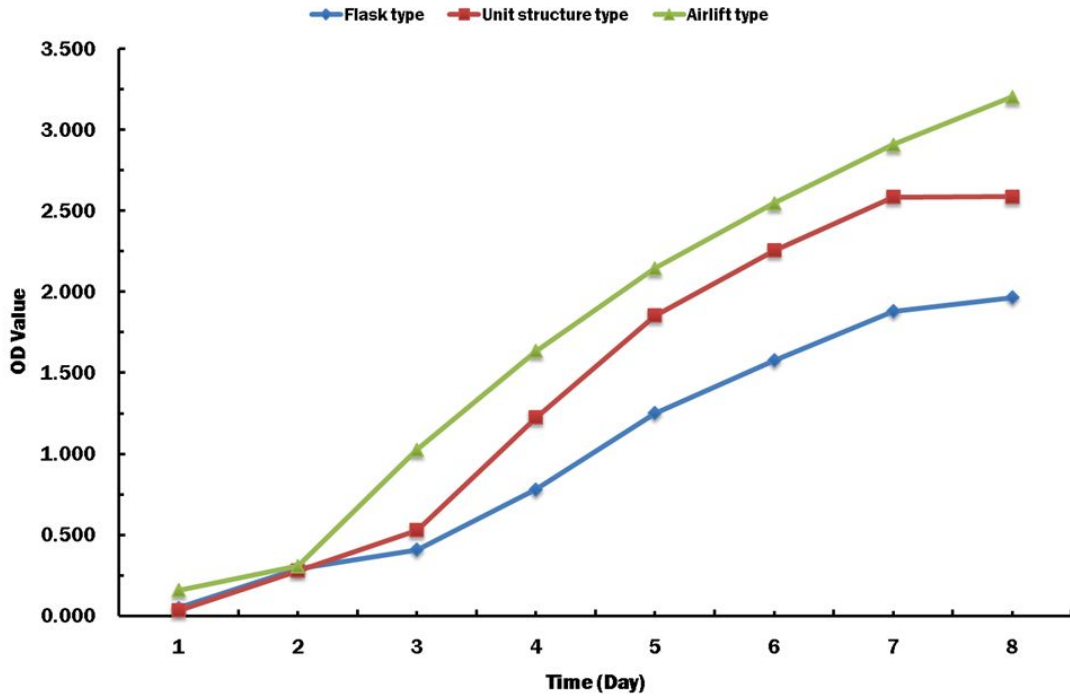


Fig. 64 Results of the OD value according to the microalgae cultivation type (Algae : *Chlorella* sp.)

제 4 장 180 L 급 평판형 광생물 반응기 3 차원 제품 설계 및 열성형 해석

제 1 절 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 3 차원 설계

미세조류를 대량배양을 위해 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 설계가 이루어졌다. 광생물 반응기 케이스 설계를 위해서는 설계 요소를 고려해야한다. 케이스 표면을 통과하여 광생물 반응기 내부로 전달되는 광속의 양을 고려해야 한다. 동일 조도에서 광생물 반응기 표면에 흡수되는 광속을 증가시키기 위해서는 빛이 조사되는 표면적을 증가시켜야한다. 그러므로 광생물 반응기 케이스의 외관 형상은 표면적이 최대화되는 형상으로 설계해야한다. 광생물 반응기 내부로 투과된 광속 및 광 조도에 의하여 반응기 내부에서 미세조류가 성장하게 된다. Fig. 65 은 평균 광조도와 미세조류 비 성장률의 전형적인 상관관계를 나타내었다. 이 상관관계는 Fig. 65 에서와 같이 최대 비 성장률이 발생하는 포화 광조도 보다 작은 광조도가 부과되는 광 제한 영역과 포화 광조도 보다 큰 광조도가 부과되는 광 억제 영역으로 구분할 수 있다.

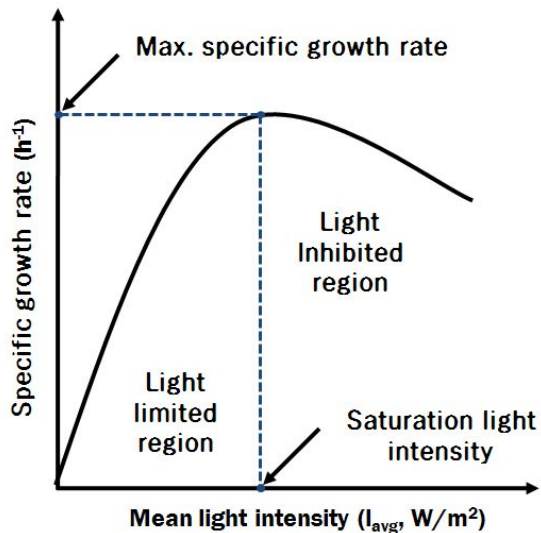


Fig. 65 Schematics of the relationship between mean light intensity and specific growth rate of microalgae

미세조류가 배양되는 광생물 반응기 내부는 최대 비 성장률을 얻을 수 있는 포화 광 조도를 유지하는 것이 바람직하나, 미세조류에 의한 빛의 산란, 미세조류간의 상호 그림자 효과 및 미세조류의 광 흡수에 의하여 광생물 반응기 깊이 방향으로 광합성 반응 정도의 차이가 발생하게 된다. 그러므로 180 L 급 대응량급 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스를 제작하기 위해서는 Fig. 66 과 같이 광생물 반응기 내부 깊이 방향에 따라 균일한 미세조류 생산성을 얻기 위해서 광생물 반응기 케이스의 깊이를 최소화하도록 설계해야한다.

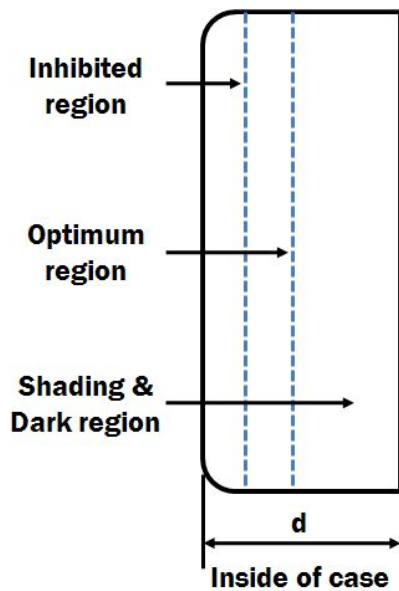


Fig. 66 Variation of photosynthesis regions in the depth direction of photobioreactor

광생물 반응기 설계시 유체역학적 특성 고려사항들은 주로 미세조류의 영양분/CO₂ 간 향상 및 O₂ 의 제거능력 향상 및 pH 유지에 관련되어 있다. 또한 미세 조류의 침전과 반응기 표면 부착을 방지하는 방법에도 연관된다. 이와 관련된 부품/요소로써 살포기와 혼합기가 해당된다. 기포 주입형과 공기 부양형 광생물 반응기에서 내부 유체, 영양분, CO₂ 및 미세조류의 혼합을 일으키는 원동력이 살포기로부터 분산되는 기포이다. 이 기포에 의하여 미세조류의 와류(Vortex) 도 발생하게 된다. 또한 살포된 기포에 의하여 전단응력이 발생하는데, 과도한 전단응력은 미세조류의 생존율 감소와 붕괴를 발생 시킨다. 살포되는 기포의 광생물 반응기내 속도가 임계치 이상이 되면 미세조류에 전단응력을 작용하여 미세조류의 생존율(Viability) 를 감소 시킴으로써 미세조류 생산성을 감소시키게

된다. 광생물 반응기 내의 가스 속도와 광생물 반응기 유효 직경에 의하여 기포 형성 특성이 달라진다. 기포가 커질수록 기포 파열에 의한 미세조류 손상이 커지므로, 미세균일 기포가 발생하도록 광생물 반응기의 유효 직경과 광생물 반응기내 기포 속도의 비를 조절하여야 한다. Fig. 67 과 같이 전단 응력에 의하여 미세조류의 생산성이 감소하는 현상은 살포기의 기포 주입구 직경과 개수는 유지하고, 광생물 반응기내 가스 유량을 증가시키기 위하여 가스 공급장치와 연결된 광생물 반응기의 기포 주입구 입구 속도만을 증가 시켰을 때 미세 조류의 사망률이 증가하기 때문이다. 또한 광생물 반응기내 기포 유량과 속도를 증가 시키기 위해 기포 주입구 입구 속도는 유지하고 주입구 직경을 증가시켰을 경우, 미세조류 사망률을 감소 시킬 수 있다. 이 현상은 주입구당 생성되는 기포 발생 주기가 감소하기 때문이다.

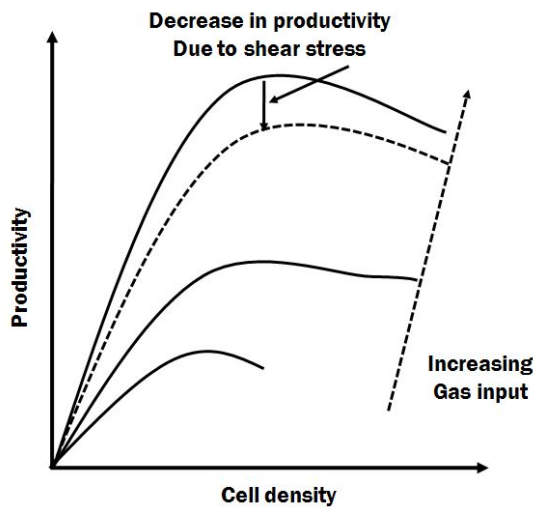


Fig. 67 Schematics of influence of cell density and gas input on productivity

기포의 주입만으로 광생물 반응기내 미세조류, 영양분 및 CO₂ 의 혼합하는 경우, 희석율과 미세조류 와류 발생을 위하여 높은 단위 유체당 입력 동력이 요구되며 기포 전단응력/파열에 의한 미세조류 사망률이 증가 할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서 공기 부양식 광생물 반응기에 기포 부양율은 감소시키고, 정적 혼합기를 활용하여 광생물 반응기 내부 유동을 발생시킨다. 미세조류의 광생물 반응기 내부 유동을 통하여 미세조류 희석율을 높이고, 미세조류 집중에 의한 상호 그림자 현상 및 빛의 산란을 감소 시킬 수 있다. 또한 그림자 및 어두운 영역에 위치한 미세조류를 광생물 반응기 케이스 내벽 가까이 에 위치한 최적 성장 영역으로 이동 시켜, 미세 조류에 전달되는 광조도를 증가시켜 미세 조류 성장률과 생산성을 높일 수 있다.

Fig. 68 은 광생물 반응기 케이스 설계를 위해 설계 요소를 고려하여 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 설계안의 Airlift 형식을 이용한 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 설계안이다. 광생물 반응기 케이스는 태양광 조도를 높이기 위하여 체적 대비 표면적율 (Surface to volume ratio : S/V ratio) 가 최대값을 나타내는 사각형 평면되어 있으며 공기와 CO₂ 로 구성된 기포가 기저면에서 부터 케이스 최상단까지 연속적으로 이송 할 수 있도록 설계하였다. 또한, 반응기에서 내부 유체, 영양분, CO₂ 및 미세 조류의 혼합을 일으키는 원동력이 되는 살포기를 설치할 수 있으며, 반구 모양을 형상화한 내부 구조를 설계하여 반응기 내부에서 유체와 미세조류의 자기 순환 속도를 증가시킴으로써 미세조류 배양속도를 높일 수 있도록 구조화 하였다. 광생물 반응기 케이스 크기는 1100 mm × 2200 mm × 140 mm 이며 케이스 두께는 2 mm 이다. 반응기 케이스 내부의 전체적인 용량은 약 183 L 내외로 설계가 이루어졌다.

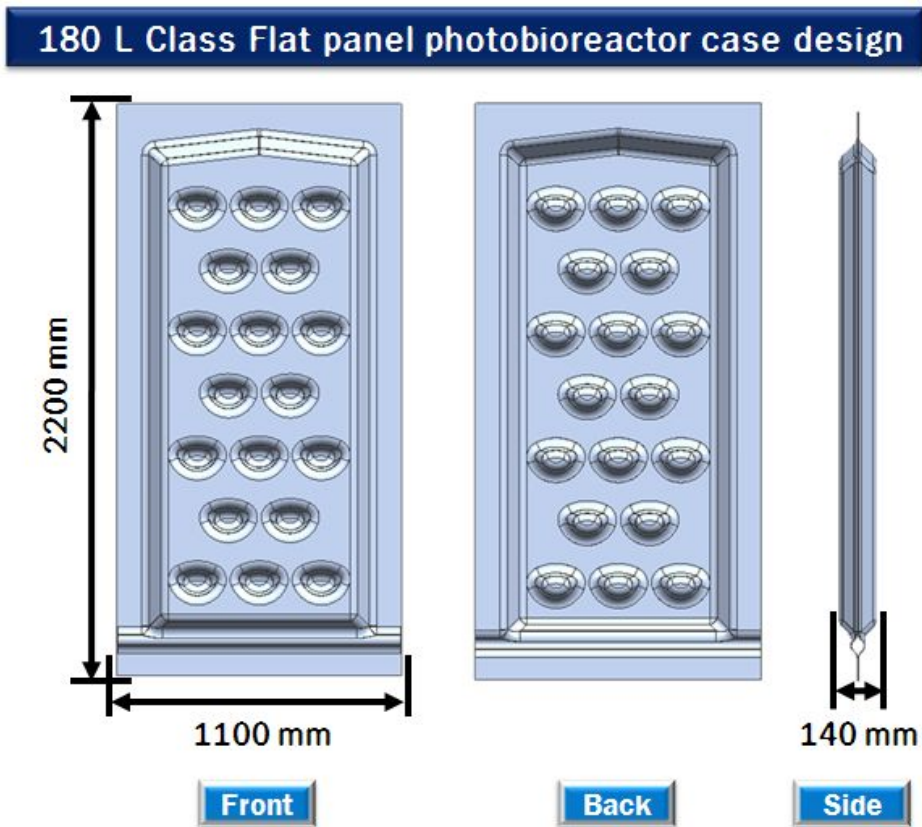


Fig. 68 Design of the 180 L flat panel photobioreactor case

Fig. 69 는 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 내부 반구체 모양의 구조를 나타낸 것이다. 케이스 하단에서 공급된 CO_2 와 O_2 의 혼합가스는 미세버블 발생장치 Sparger 를 통해 공급이 이루어져 반구체 구조 사이로 유체의 흐름이 이동하게 된다. 이 유체의 흐름은 조사된 빛이 생물 반응기 깊숙이 전달될 수 있게 해주며, 미세방울의 상승 작용이 유체의 흐름과 수직 방향으로의 혼합을 유도할 수 있게 작용된다. 반구체 모양의 구조체는 $220 \times 180 \times 68$ mm 크기이며 Draft 각도는 30° , R 값은 R 30 ~ 40 로 설계하였다. 반응기 내부 깊이는 68 mm 이며 제작 가능한 최대 시트 사이즈를 고려하였으며, 180 L 급 체적이 가능하도록 깊이를 설계하였다. 설계 반응기 케이스는 제품으로 제작시 두 개의 케이스가 서로 맞닿아서 조립하게 되는데 반구체 구조의 서로 맞닿는 부분에 후가공을 통해 구멍을 내어 볼트로 체결을 할 수 있게 하였다. 케이스 내부 압력을 견디기 위해 각 반구체 구조 모두에 적용되어야 한다.

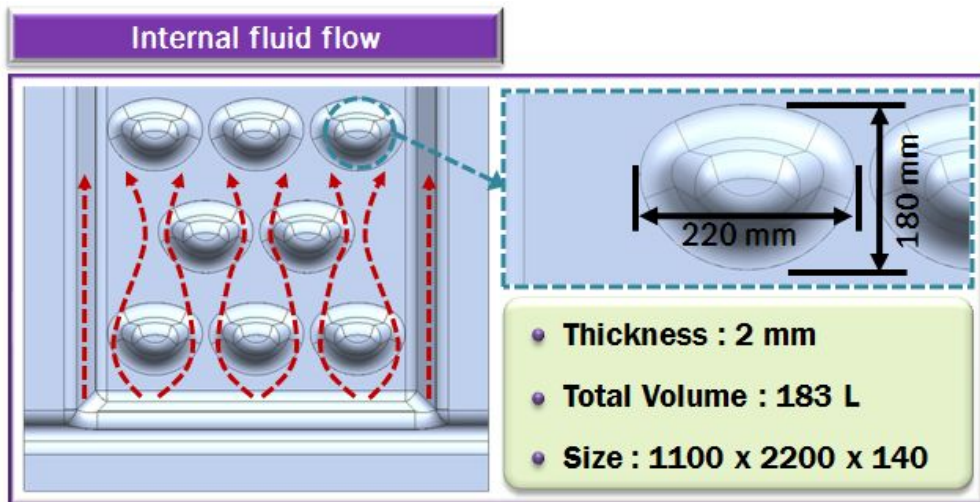


Fig. 69 Design of the 180 L flat panel photobioreactor case internal structure

제 2 절 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 및 성형성 분석

1. 열성형 공정

열성형법 (Thermoforming) 이란 플라스틱 판재를 가열하여 연화시키고 여기에 외력을 가해 성형하는 방법이다. 외력의 형태에 따라 진공성형법 (Vacuum forming) 과 램이나 플러저를 이용한 기계적성형법 (Mechanical forming) 으로 나눈다. 진공성형의 원리는 열가소성 판재를 가열한 다음 금형 쪽으로 이송하거나, 판재를 금형 위에 고정하고 히터로 가열해 연화시킨 후 진공으로 금형에 흡착시켜 성형하는 것이다. 진공성형의 압력은 1 기압 이하이므로 금형은 금속, 석고, 목재, 열경화성 수지 등을 사용할 수 있지만 대량생산의 경우에는 금속을 사용한다. 플러저를 이용한 방법은 연화된 판재를 플러저 또는 펀치로 눌러 판재가 금형의 캐비티에 압착되게 하는 성형 방법이다. Fig. 70 은 진공성형 공정을 나타낸 그림이며, Fig. 71 은 기계적성형 공정을 나타낸 그림이다.

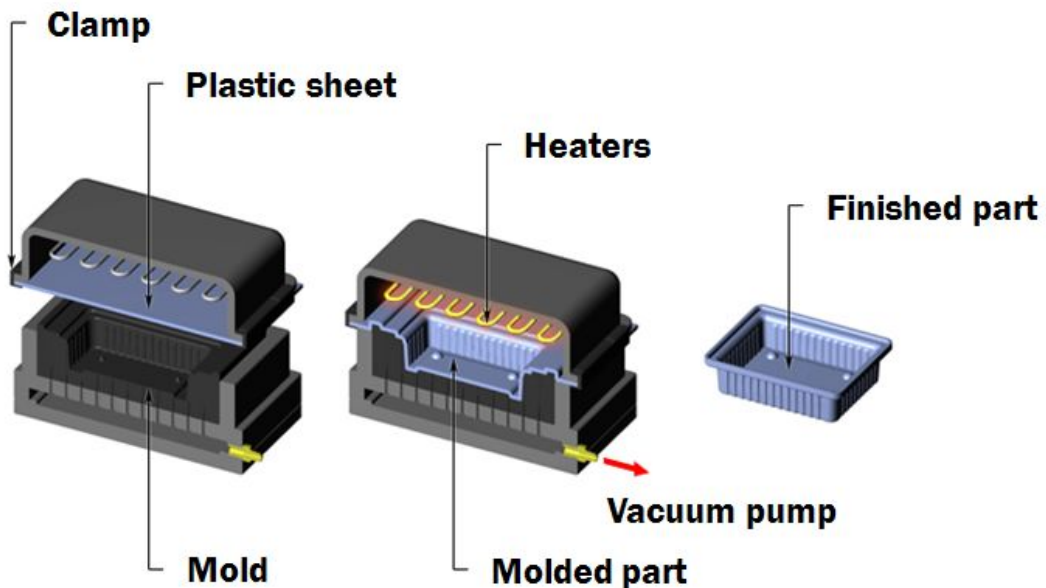


Fig. 70 Vacuum forming process

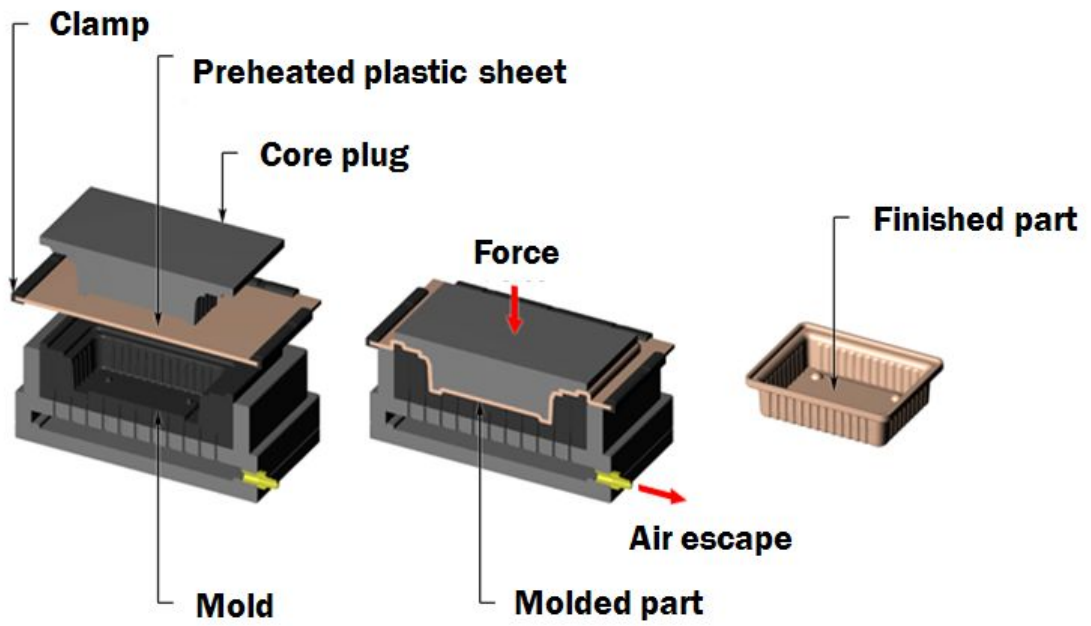


Fig. 71 Mechanical forming process

2. 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 모델링

Fig. 72 는 180 L 급 공기부양식 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 3 차원 열성형 해석 모델이다. Die, Blank, Holder 로 구성되어지며 열성형 해석은 Blank 크기를 $1100 \times 2200 \times 2$ mm, $1200 \times 2300 \times 2$ mm, $1300 \times 2400 \times 2$ mm 의 3 가지 타입으로 크기를 정하여 해석을 수행하였다. Table 18 은 유한요소해석을 위한 성형조건을 나타낸것이다. Blank 재료의 고온 물성은 2 장 2 절에서 도출된 고온 인장 물성시험 결과에 따른 G'sell 파라미터 상수를 사용하였고, 비열 및 열전도율은 문헌자료에서 취득한 결과를 사용하였다. Table 19 는 제 3 공정인 진공 성형 공정의 경계조건이다. 진공압력은 1.5 MPa 이며, 진공성형시 Die 와 Holder 에 고정경계조건을 부여하여 진공성형이 구현될 수 있도록 하였다. 공정은 Gravity, Holding, Vacuuming 순서로 성형 해석이 수행된다.

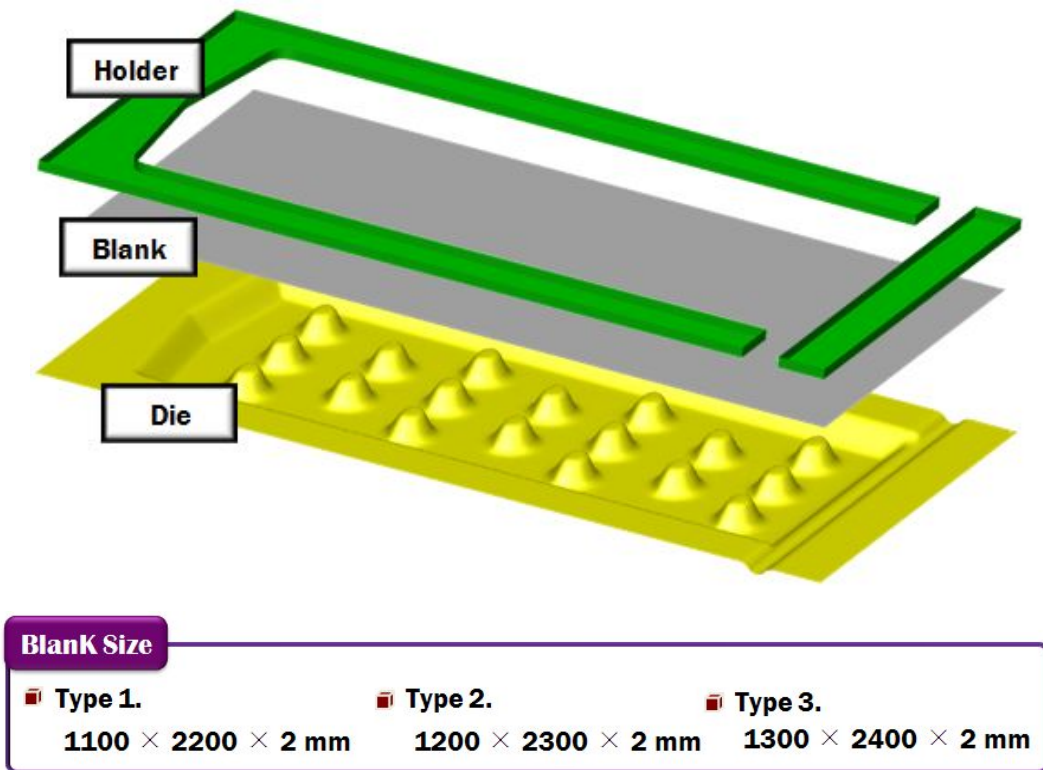


Fig. 72 FE model of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

Table. 18 Conditions of thermoforming analysis for the flat panel photobioreactor case

No.	Object	Specification	
1.	Die	No. of elements	28,686
		No. of nodes	26,922
		Type	Rigid surface
		Temperature	80°C
2.	Blank	Initial no. of elements	648
		Initial no. of nodes	700
		Refinement Level	2
		Type	Shell element
		Material	PC, PMMA
		Initial temperature	PC(100°C), PMMA(80°C)
3.	Holder	No. of elements	294
		No. of nodes	392
		Type	Rigid surface

Table 19 Process parameters and Boundary condition

No.	Process	Objects	Specification	Details
1	Vaccuming	Die	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation : X,Y,Z
		Holder	Lock	Translation : X,Y,Z
				Rotation : X,Y,Z

3. 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과 및 성형성 분석

Fig. 73 은 유한요소해석 프로그램인 PAM-FORM 2011 이용한 180 L 급 Airlift 형식의 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 해석 결과이다. PC 재료, 블랭크 두께 2 mm, 블랭크 사이즈 1100 × 2200 mm 으로 해석을 수행하였으며 해석 결과는 반응기 케이스 두께분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리 분포를 해석하여 열성형 특성을 보고자 하였다. PC 재료의 블랭크 두께 2 mm 에서 반응기 케이스 두께분포는 최대 두께값 2.06 mm, 최소 두께값 0.21 mm 로 나타났으며, 거리분포에서는 최대 거리값 13.35 mm, 최소 거리값 -0.33 으로 나타났다. 두께분포의 최소 두께값이 1 mm 이하로 성형 해석결과 블랭크에 찢어짐이 발생할 가능성이 높음을 알 수 있었으며, 또한 성형된 케이스 내부 구조와 구조 사이에 주름이 발생함을 확인하였다.

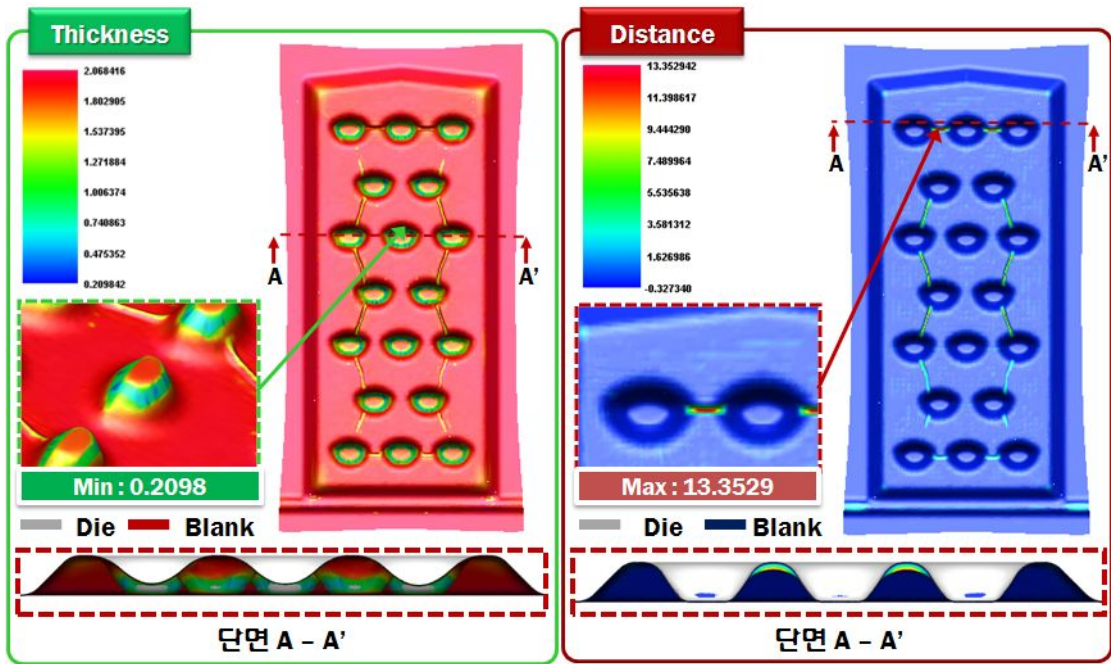


Fig. 73 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1100 × 2200 (Thickness distribution & Distance between die and blank)

Fig. 74 는 PC 재료, 블랭크 두께 2 mm, 블랭크 사이즈 1200 × 2300 mm 으로 해석을 수행하였으며 해석 결과는 반응기 케이스 두께분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리분포를 해석하여 열성형 특성을 보고자 하였다. PC 재료의 블랭크 두께 2 mm 에서 반응기 케이스 두께분포는 최대 두께값 2.05 mm, 최소 두께값 0.19 mm 로 나타났으며, 거리분포에서는 최대 거리값 7.84 mm, 최소 거리값 -0.30 으로 나타났다. 두께분포의 최소 두께값이 1 mm 이하로 성형 해석결과 블랭크에 찢어짐이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있었으며, 또한 성형된 케이스 내부 구조와 구조 사이에 주름이 발생함을 알 수 있었다.

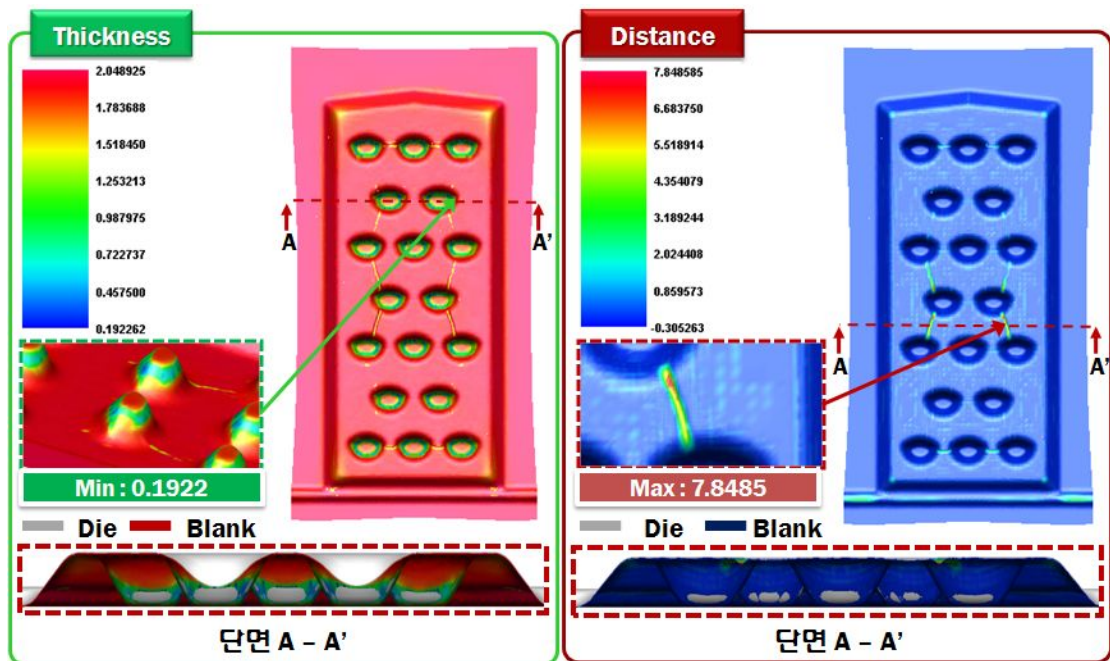


Fig. 74 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1200 × 2300
(Thickness distribution & Distance between die and blank)

Fig. 75 는 PC 재료, 블랭크 두께 2 mm, 블랭크 사이즈 1300 × 2400 mm 으로 해석을 수행하였으며 해석 결과는 반응기 케이스 두께분포 및 다이와 블랭크 사이의 거리분포를 해석하여 열성형 특성을 보고자 하였다. PC 재료의 블랭크 두께 2 mm 에서 반응기 케이스 두께분포는 최대 두께값 2.04 mm, 최소 두께값 0.17 mm 로 나타났으며, 거리분포에서는 최대 거리값 3.51 mm, 최소 거리값 -0.32 으로 나타났다. 두께분포의 최소 두께값이 1 mm 이하로 성형 해석결과 블랭크에 찢어짐이 발생할 가능성이 많으며, 성형된 케이스 내부 구조와 구조 사이에 주름 발생은 Blank size 1100 × 2200 mm, 1200 × 2300 mm 보다 주름발생이 부분이 줄어들어 양호함을 알 수 있었다.

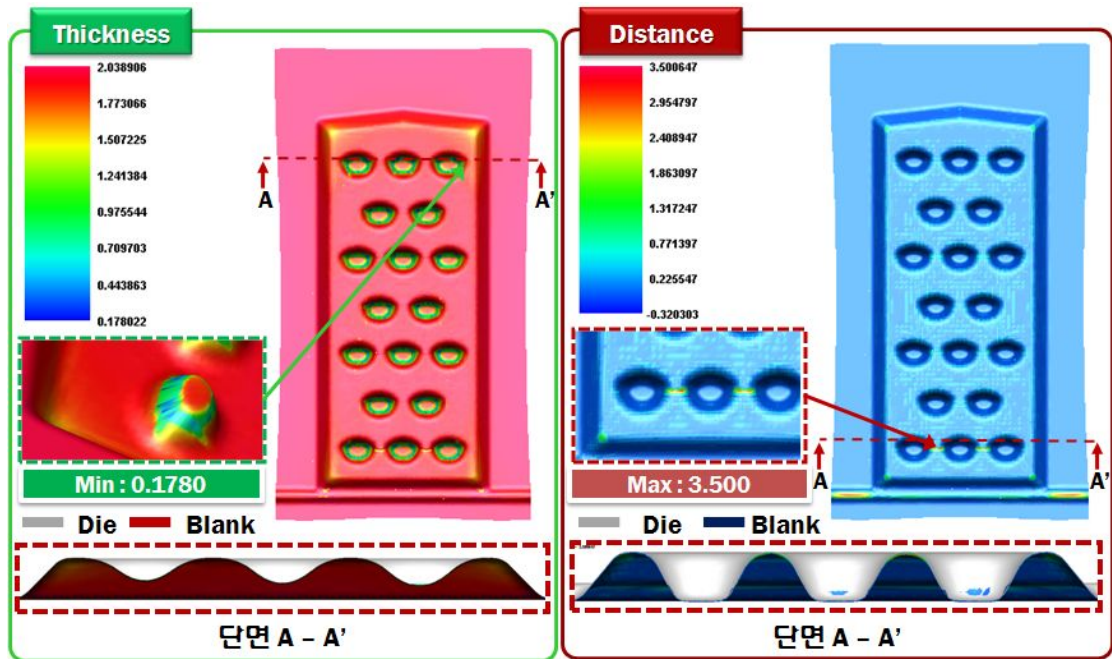


Fig. 75 The results of thermoforming analysis - Blank size : 1300 × 2400
(Thickness distribution & Distance between die and blank)

블랭크 사이즈별 해석결과 블랭크 두께 분포에서는 내부 구조체 부위에서 가장 얇게 블랭크가 생성됨을 알 수 있었으며 이는 제품 열성형을 이용한 제품 제작 시 찢어질 가능성이 많음을 확인할 수 있다. 또한 케이스 내부 구조간 발생한 주름을 줄이고자 블랭크 두께를 3 mm 로 변경하였으며, 구조체간 사이거리 변경, R 값 변경을 통하여 열성형 해석을 수행하였다.

Fig. 76 은 PC 재료, 블랭크 두께 3 mm, 블랭크 사이즈 1100 × 2200 mm 으로 해석을 수행한 해석결과를 나타낸 것이다. 반응기 케이스 두께분포를 살펴보면 블랭크 두께 3 mm 에서 반응기 케이스 최대 두께값 4.00 mm, 최소 두께값 0.27 mm 로 나타났다.

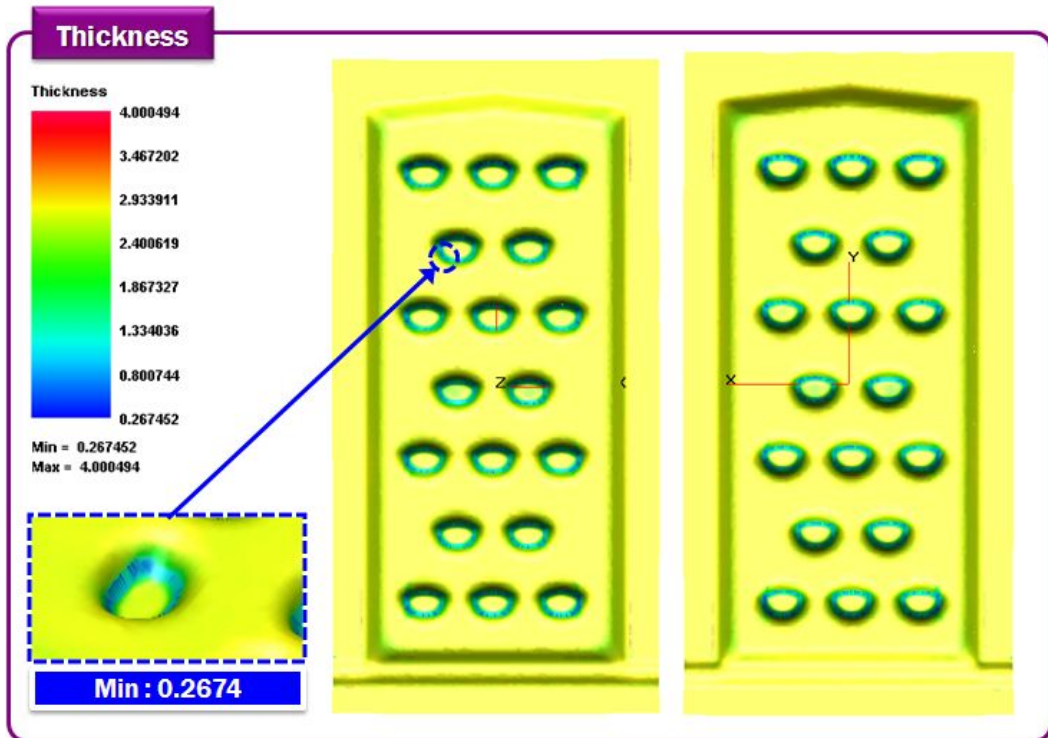


Fig. 76 The results of thermoforming analysis according to the thickness distribution (Thickness : 3 mm)

Fig. 77 은 PC 재료, 블랭크 두께 3 mm, 블랭크 사이즈 1100 × 2200 mm 으로 해석을 수행한 해석결과를 나타낸 것이다. 반응기 케이스 거리분포를 살펴보면 블랭크 두께 3 mm 에서 반응기 케이스 최대 거리값 9.67 mm, 최소 거리값 -0.50 mm 로 나타났다. 최초 성형해석한 2 mm 와 3 mm 의 두께분포와 거리분포는 비슷한 성형 수치를 나타냈다. 하지만 케이스 내부 구조간 생기는 주름부분은 많이 향상됨을 확인 할 수 있었다. 반응기 내부 구조에 대한 Draft 각 변화와, 구조와 구조사이의 거리간격, 반응기 성형깊이의 변화, 케이스 R 값 조정을 통해 180 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스의 최소 두께분포를 1 mm 이상으로 나타낼 수 있을것으로 판단된다.

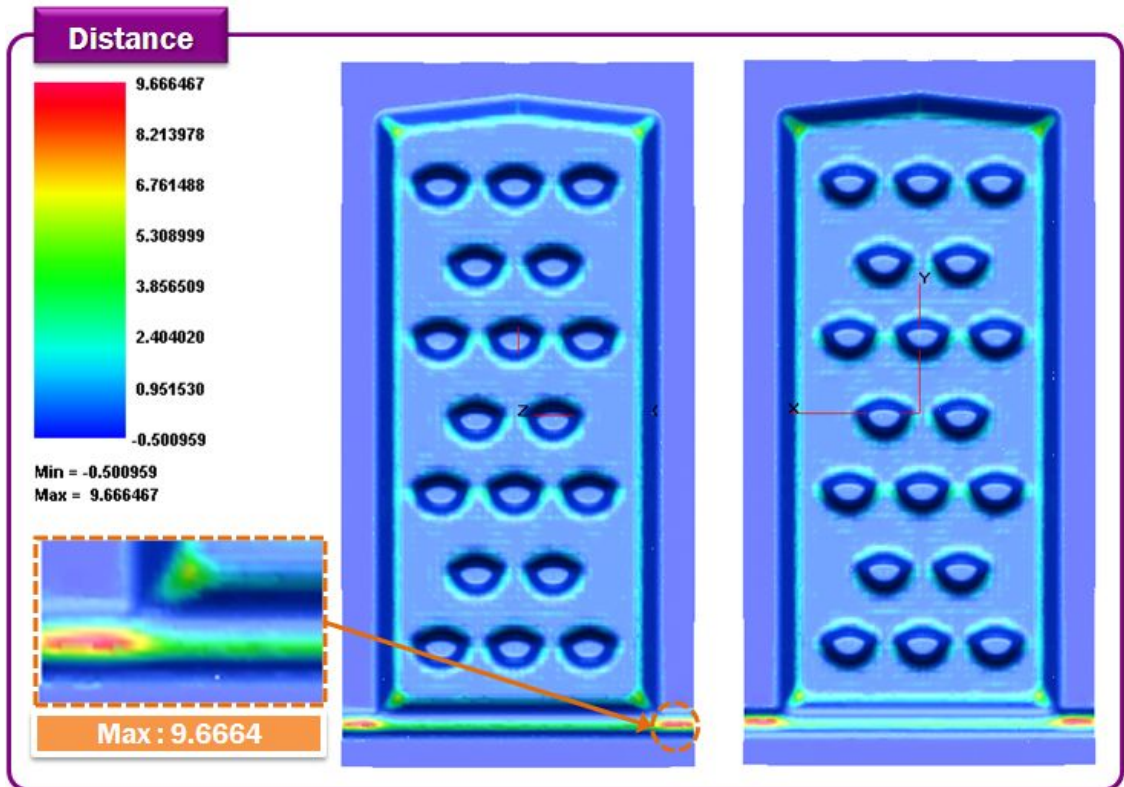


Fig. 77 The results of thermoforming analysis according to the Distance between die and blank (Thickness : 3 mm)

제 5 장 결론 및 향후과제

본 연구에서는 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스 개발을 위해서 광생물 반응기 케이스 플라스틱 재료에 관한 광학 시험과 고온 인장 시험을 수행하였으며 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스의 설계 및 제작을 통해 180 L 급 평판형 광생물 반응기 설계 및 열성형 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 광생물 반응기 케이스 제작을 위해 빛 투과율이 높은 재료를 선정하여 재료에 대한 광투과율 시험을 실시하여 광생물 반응기 케이스 제작에 적합한 재료를 도출하였다.

2. 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료인 PC 및 PMMA 의 정확한 유동학적 거동을 묘사하기 위해 두께에 따른 온도와 크로스헤드 속도별로 고온 인장 시험을 실시하여 고온 유동 모델 상수를 도출하였다.

3. 2 가지의 10 L 급 평판형 광생물 반응기 케이스를 설계 및 제작하였으며 반응기에 대해 열성형 해석을 수행하여 180 L 급 대량 배양용 광생물 반응기 케이스에 관한 설계안 및 실제 미세조류 배양 시험을 통해 광생물 반응기의 효과적인 배양효율을 얻을 수 있었다.

4. 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스를 설계하여 3 차원 유한요소 해석을 통해 금형형상/공정변수/재료두께가 제품 성형성과 품질에 미치는 영향성을 분석/고찰하여 180 L 급 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스의 열성형 해석 공정을 도출하였다.

추후, 180 L 급 미세조류 대량 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스에 미세조류 배양에 사용될 수 있도록 다음과 같은 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

첫째, 열성형 해석을 통해 케이스 내부 구조에 찢어짐이 발생하지 않는 구조 설계 및 최적 공정 조건 도출에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

둘째, 미세조류 배양을 위해 케이스 외부에 기타 부품을 적용 할 수 있는 추가적인 설계안이 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. Juan A. Asenjo, Jose C. Merchuk "Bioreactor system desing", Marcel Dekker Inc, 1995
2. John Florian "Practical thermoforming", M. Dekker Inc, 1987
3. Peter Klein, "Fundamentals of Plastics Thermoforming", Morgan & Claypool, 2009
4. Inci Eroglu, Altan Tabanoglu, "Hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* O.U.001 in a flat plate solar bioreactor", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp 531 ~ 541, 2008.
5. Zhang Cheng-Wu, Odi Zmora, "An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp" Aquaculture, Vol. 195, pp 35 ~ 49, 2001
6. Rosa Rosello Sastre, Zsuzsa Csogor, "Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors-A concepnual approach", Journal of Biotechnology, Vol. 132, pp 127 ~ 133, 2007
7. S.R. Chae, E.J. Hwang, "Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor", Bioresource Technology, Vol. 97, pp 322 ~ 329, 2006
8. Daniel Baquerisse, Stephanie Nouals, "Modelling of a continuous pilot photobioreactor for microalgae production", Journal of biotechnology, Vol. 70, pp 335 ~ 342, 1999
9. Chih-Hung Hsieh, Wen-Teng Wu, "A novel photobioreactor with transparent rectangular chambers for cultivation of microalgae", Biochemical Engineering Journal, Vol. 46, pp 300 ~ 305, 2009
10. Chuan Zhang, Xun Zhu, "Performance of a groove-type photobioreactor for hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp 5284 ~ 5292, 2010
11. D. Briassoulis, P.Panagakis, M. Chionidis, "An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp", Bioresource Technology, Vol. 101, pp 6768 ~ 6777, 2010

12. Eduardo Jacob-Lopes, Carlos Henrique Gimenes Scoparo, "Rates of CO₂ removal by *Aphanothece microscopica* Nageli in tubular photobioreactors", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 47, pp 1365~1373, 2008
13. Chun-Yen Chen, Ganesh D. Saratale, "Phototrophic hydrogen production in photobioreactors coupled with solar-energy-excited optical fibers", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp 6886~6895, 2008
14. ANATOLY A, TSYGANKOV, YOSHIKI HIRATA, "Photobioreactor with photosynthetic bacteria immobilized on porous glass for hydrogen photoproduction", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol. 77, NO. 5, pp 575~578, 1994
15. J. Gutierrez, M.A. Porta-Gandara, "Passive temperature solar control of an outdoor photobioreactor", *Renewable Energy*, Vol. 33, pp 1892~1903, 2008
16. E. Molina Grima, J.A. Sanchez Perez, "Outdoor culture of *Isochrysis galbana* AL-4 in a closed tubular photobioreactor", *Journal of biotechnology*, Vol. 37, pp 159~166, 1994
17. Sontaya Krichnavaruk, Worapanee Loataweesup, "Optimal growth conditions and the cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 105, pp 91~98, 2005
18. Christian Walter, Torsten Steinau, "Monoseptic cultivation of phototrophic microorganisms development and scale-up of a photobioreactor system with thermal sterilization", *Biomolecular Engineering*, Vol. 20, pp 261~271, 2003
19. G.L. Rorrer, R.K. Mullikin, "Modeling and simulation of a tubular recycle photobioreactor for macroalgal cell suspension cultures", *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, pp 3153~3162, 1999
20. Jose A. Del Campo, Herminia Rodriguez, "Lutein production by *Muriellopsis* sp. in an outdoor tubular photobioreactor", *Journal of Biotechnology*, Vol. 85, pp 289~295, 2001
21. Kerati Issarapayup, Sorawit Powtongsook, "Flat panel airlift photobioreactor for cultivation of vegetative cells of microalga *Haematococcus pluvialis*", *Journal of Biotechnology*, Vol. 142, pp 227~232, 2009
22. MARK HARKER, ALEX J. TSAVALOS, "Autotrophic Growth and Carotenoid

- Production of *Haematococcus pluvialis* in a 30 Liter Air-Lift Photobioreactor", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol. 82, No. 2, pp 113~118, 1996
23. Toru Sato, Shinsuke Usui, "Invention fo outdoor closed type photobioreactor for microalgae", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp 791~799, 2006
 24. Toshihiko Kondo, Tatsuki Wakayama, Jun Miyake, "Efficient hydorgen production using a multi-layered photobioreactor and a photosynthetic bacterium mutant with reduced pigment", *International Journal of Hydorgen Energy*, Vol. 31, pp 1522~1526, 2006
 25. Zhi-Yong Li, Si-Yuan Guo, Lin Li, "Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor", *Bioresource Technology*, Vol. 98, pp 700~706, 2007
 26. Carlos Rodrigo Jacome-Pilco, Eliseo Cristiani-Urbina, "Continuous Cr(VI) removal by *Scenedesmus incrassatulus* in an airlift photobioreactor", *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp 2388~2391, 2009
 27. Fernando R. Silva-Aciares, Carlos E. Riquelme, "Comparisons of the growth of six diatom species between two configurations of photobioreactors", *Aquacultural Engineering*, Vol. 38, pp 26~35, 2008
 28. Chao-Fan Ji, Jack Legrand, "Characterization of hydrogen production by *Platymonas Subcordiformis* in torus photobioreactor", *International Journal of Hydorgen Energy*, Vol. 35, pp 7200~7205, 2010
 29. Yong-Zhong Wang, Qiang Liao, Xun Zhu, "Characteristics of hydrogen production and substrate consumption of *Rhodopseudomonas palustris* CQK 01 in an immobilized-cell photobioreactor", *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp 4034~4041, 2010
 30. Xin Tian, Qiang Liao, Xun Zhu, "Characteristics of a biofilm photobioreactor as applied to photo-hydrogen production", *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp 977~983, 2010
 31. SATOSHI HIRATA, MASAO HAYASHITANI, "Carbon Dioxide Fixation in Batch Culture of *Chlorella* sp. Using a Photobioreactor with a Sunlight-Collection Device", *Journal of Fermentation and Bioengineering*", Vol. 81, No. 5, pp 470~472, 1996
 32. Eduardo Jacob-Lopes, Carlos Henrique Gimenes Scoparo, "Biotransformations of carbon

- dioxide in photobioreactors", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp 894~900, 2010
33. In Soo Suh, Hyun-Na Joo, Choul-Gyun Lee, "A novel double-layered photobioreactor for simultaneous *Haematococcus pluvialis* cell growth and astaxanthin accumulation", *Journal of Biotechnology*, Vol. 125, pp 540~546, 2006
 34. EIJU NAKADA, YASUO ASADA, TAKA AKI ARAI, "Light Penetration into Cell Suspensions of Photosynthetic Bacteria and Relation to Hydrogen Production", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol. 80, No. 1, pp 53~57, 1995
 35. Karine Loubiere, Jeremy Pruvost, "Investigations in an external-loop airlift photobioreactor with annular light chambers and swirling flow", *Chemical Engineering Research and Design*, 2010
 36. Benoit Degrenne, Jeremy Pruvost, "Investigation of the combined effects of acetate and photobioreactor illuminated fraction in the induction of anoxia for hydrogen production by *Chlamydomonas reinhardtii*", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010
 37. Reza Ranjbar, Ryota Inoue, "High Efficiency Production of Astaxanthin in an Airlift Photobioreactor", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 106, No. 2, pp 204~207, 2008
 38. Michael Morweiser, Olaf Kruse, "Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production", *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 87, pp 1291~1301, 2010
 39. Peer M. Schenk, Skye R. Thomas-Hall, "Second Generation Biofuels : High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production", *Bioenerg. Res*, Vol. 1, pp 20~43, 2008
 40. Sebastiaan Hoekema, Martijn Bijmans, Marcel Janssen, "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, pp 1331~1338, 2002
 41. Rodolfo Reyna-Velarde, Eliseo Cristiani-Urbina, "Hydrodynamic and mass transfer characterization of a flat-panel airlift photobioreactor with high light path", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 49, pp 97~103, 2010

42. E. Sierra, F.G. Acien, J.M. Fernandez, "Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, pp 136~147, 2008
43. Jae-Young Lee, Tae-Soon Kwon, "생물학적 CO₂ 고정화를 위한 스케일-업된 광생물반응기에서 *Chlorella* sp. HA-1 의 성장에 미치는 빛의 영향", *한국생물공학회지*, Vol. 18, No. 4, pp 340~345, 2003

감사의 글

지금의 학위 논문이 나오기까지 연구자로서 목적을 이루고 올바른 길을 갈 수 있도록 여러 방향으로 도움을 주신 많은 분들께 감사의 말씀을 드리고자 합니다. 대학원 2 년여 시간동안 힘든 시간도 많았지만 학업적 지식뿐만 아니라 많은 것을 느끼고 배우게 되는 시간이었습니다.

대학원 생활동안 공학자로서 학업적 지식뿐만 아니라 올바르게 살아가는 사람의 도리를 일깨워주신 안동규 교수님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 미국에 계시는 기간에도 저희 때문에 편히 주무시지 못하며 걱정해주시는 마음에 항상 고맙게 생각합니다. 교수님께서 전해주시는 주옥같은 말씀은 힘든 시기때 저를 다시 일으켜 세우는 큰 원동력이었습니다. 부모님과 같은 이 은혜 평생 잊지 않도록 하겠습니다. 또한, 논문이 완성되기까지 교정 및 심사를 하시느라 고생하신 한길영 교수님과 정상화 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

전산설계실험실 선·후배님께도 감사의 말씀을 전합니다. 저희 후배들이 전산설계실험실에서 마음껏 연구하며 공부할 수 있었던 것은 모두 존경하신 교수님과 선배님들이 오랜 세월동안 다져오신 큰 기틀이 있었기 때문입니다. Home coming day 때 항상 후배들에게 좋은 말씀과 격려를 해주신 이상훈 선배님, 후배들에게 항상 밝은 웃음과 좋은 충고를 해주신 김민수 선배님, 제가 개인적으로 닳고 싶었던 김진석 선배님, 후배들 앞날에 걱정을 많이 해주시는 슬기로운 문경재 선배님, 지금도 네이트온으로 저희 걱정해 주시고 생활 잘 할 수 있도록 염려해주신 변경원 선배님, 제가 처음 실험실에 들어왔을때 저의 환영회 자리가 광운이형 송별회 자리여서 아쉬움이 많았던 정광운 선배님, 만날 때마다 우리 실장님 하면서 저를 부끄럽게 했던 김대원 선배님, 전화드리면 항상 적극적으로 도와주시고 오실 때 마다 통닭시켜주신 정많은 김현우 선배님, 술이고픈 저에게 많은 술을 사주시면서 제 고민상담도 들어주신 남경흠 선배님, 실험실 초기 아침마다 옆동아파트 현관문 두드리면서 같이 출근했던 기억이 많은 박승화 선배님, 제 친한 친구와 곧

인연을 맺게될 송동한 선배님, 양복이 하나 새로 생겨 동한이 형이 얼마나 고마운지 모릅니다. 가까운 고향 친구이자 실험실 선배인 세훈이, 세훈이의 개그 코드는 정말 제가 배우고 싶었습니다. 그리고 저에게 지금 가장 행복한 순간을 갖게해준 민우에게 정말 고마운 마음을 전합니다. 그리고 대학에 와서 같은 동아리에서부터 현재 실험실 생활까지 참 인연이 많았고 이제는 목포에 가지 않고 힘든 시간을 같이 보낸 동기 향선이에게 고마운 마음을 전합니다. 우유부단한 선배 밑에서 열심히 도와주고 같이 일했던 실험실 최고미남 영수와 친동생 같았던 귀여운 우철이, 열심히 매사에 임하는 새벽기인 나라에게도 함께한 시간들이 너무 소중한 앞으로 살아가면서 평생 잊을 수 없는 좋은 기억을 갖게 해주어서 진심으로 감사의 말을 전하고 싶습니다.

논문이 완성되기까지 함께 프로젝트를 수행하며 여러 가지로 도움을 주시고 지도해주신 바이오 리파이너리 연구센터에 김종태 박사님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 마지막까지 바쁜 와중에 제 논문을 위해 많은 시간을 내준 센터 식구들에게도 진심으로 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 저의 가장 큰 버팀목이자 세상에서 가장 존경하는 아버지, 어머니 그리고 사랑하는 누나들, 매형들, 귀여운 조카들까지 우리 가족 모두에게 진심으로 사랑한다는 말과 함께 감사하다는 말을 전하고자 합니다.

2011 년 12 월
조 창 규