



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2013년 2월

석사학위논문

열성형을 이용한 미세조류 배양용 평판형
광생물 반응기 케이스 금형 개발에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

안 영 수

열성형을 이용한 미세조류
배양용 평판형 광생물 반응기
케이스 금형 개발에 관한
연구

Investigation into the development of
thermoforming mould of the flat panel
photobioreactor case for the cultivation of
microalge

2013 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

안 영 수

열성형을 이용한 미세조류
배양용 평판형 광생물 반응기
케이스 금형 개발에 관한
연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2012 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

안 영 수

안영수의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조규재



위원 조선대학교 교수 한길영



위원 조선대학교 교수 안동규



2012 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	v
ABSTRACT	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 이론적 배경	3
1. 광생물 반응기 케이스에 관한 연구	3
2. 열성형에 관한 연구	5
제 3 절 연구 목적 및 방법	9
제 2 장 평판형 광생물 반응기 케이스 3차원 제품 설계 및 강성 특성 분석	10
제 1 절 광생물 반응기 케이스 3 차원 제품 설계	10
제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 구조해석 특성 분석	16
1. 케이스 구조해석 방법	16

2. 케이스 구조해석 결과	18
제 3 장 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 유한 요소 해석	21
제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료 고온 인장 특성 분석	21
1. 고온 인장 물성시험 방법	21
2. 고온 인장 물성시험 결과	23
3. 고온 인장 물성시험을 이용한 G'sell 모델 도출	25
제 2 절 반응기 케이스 유한요소 해석	27
제 4 장 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 설계 및 진공 열성형 실험 특성 분석	38
제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 설계	38
제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 진공성형	41
제 3 절 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 특성 분석	43
제 5 장 평판형 광생물 반응기 케이스 조립 및 배양 실험	49

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 접합 실험	49
1. 기초 접합/융착 및 내압실험	49
2. 광생물 반응기 케이스 열융착 실험	55
3. 광생물 반응기 케이스 접합/융착 및 내압 실험	58
제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 배양실험	60
제 6 장 결론 및 향후과제	63
REFERENCES	65
감사의 글	

LIST OF TABLES

Table 1 Design alternatives of the flat panel photo-bioreactor cases	14
Table 2 Material properties of polycarbonate	17
Table 3 Estimated material constants of G'sell model	26
Table 4 Meshs of thermoforming analysis	28
Table 5 Conditions of thermoforming experiments	42
Table 6 Comparison of deflections of design 6 with those of finally designs	48
Table 7 Results of preliminary pressure resistant experiment	53
Table 8 Conditions of thermal welding experiment	57
Table 9 Ingredients of Castenholz D medium	60

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Classification of photobioreactor	2
Fig. 2 Flat panel airlift photobioreactor	3
Fig. 3 15 L Airlift flat panel photobioreactor	4
Fig. 4 500 L Flat plate glass photobioreactor	4
Fig. 5 Vacuum forming process	5
Fig. 6 Pressure forming process	6
Fig. 7 Twin sheet forming process	6
Fig. 8 Drape forming process	7
Fig. 9 Plug-assist forming process	7
Fig. 10 Mechanical forming process	8
Fig. 11 Basic design of flat panel photo-bioreactor case	10
Fig. 12 Design of flat panel photo-bioreactor cases with stiffeners	11
Fig. 13 Connector design of the flat panel photo-bioreactor case	12
Fig. 14 Blade design of the flat panel photo-bioreactor case	13
Fig. 15 Design of stiffener shapes for the flat panel photo-bioreactor case	13
Fig. 16 ADRs, ARTs and LDRs for different stiffener designs	15
Fig. 17 Analysis model of flat panel photo-bioreactor cases condition	17
Fig. 18 Deflection distributions of Design 6	18
Fig. 19 Stress distributions of Design 6	19
Fig. 20 Variation of the deformed shape of flat panel photobioreactor case according to stiffener design	20
Fig. 21 Variation of maximum deflection of flat panel photobioreactor case according to stiffener design	20
Fig. 22 Design of specimen for high temperature tensile test	21
Fig. 23 Manufactured specimen for high temperature tensile test	21
Fig. 24 Experimental set-up for high temperature tensile test	22
Fig. 25 True strain-true stress curves for different cross head speed and furnace	

temperatures	24
Fig. 26 True strain-true stress curves for different G'sell models	26
Fig. 27 FE model of thermoforming analysis	27
Fig. 28 Thickness distribution of the deformed PC sheet after the gravity step	28
Fig. 29 Thickness distribution of the deformed sheets after stamping process	29
Fig. 30 Temperature distribution in the deformed sheets after stamping process	30
Fig. 31 Thickness distributions in the deformed sheets for vacuuming process	31
Fig. 32 Temperature distribution in the deformed sheets for vacuuming process	32
Fig. 33 Estimated depth of stiffener for vacuuming process (Left side)	34
Fig. 34 Estimated depth of stiffener for vacuuming process (Right side)	36
Fig. 35 Design of vacuum forming mould	39
Fig. 36 Manufacturing process of vacuum forming mould for the flat panel photobioreactor case	40
Fig. 37 Fabricated mould set for the flat panel photobioreactor case	40
Fig. 38 Procedure of thermoforming of the flat panel photobioreactor case	41
Fig. 39 Thermoforming machine	42
Fig. 40 Thermoformed flat panel photobioreactor cases for different vacuum forming time	43
Fig. 41 Measure locations for the depth of stiffener	44
Fig. 42 Depths of stiffener for different measured locations	44
Fig. 43 Measured regions for the thickness of the thermoformed flat panel photobioreactor cases	45
Fig. 44 Thickness distributions of the thermoformed flat panel photo-bioreactor cases	46
Fig. 45 Deflection distributions for finally designed flat panel photobioreactor cases (SF = 2.0)	47
Fig. 46 Stress distributions for finally designed flat panel photobioreactor cases (SF = 2.0)	48
Fig. 47 Ultra sonic welding machine (ACE-228HP)	49
Fig. 48 Set-up of thermal welding experiments	50
Fig. 49 Result of thermal welding experiment	51
Fig. 50 Fabricated specimen for water proofing and pressure resistant experiments	52
Fig. 51 Set-up of preliminary pressure resistant experiment	53

Fig. 52 Morphology in the vicinity of the joined region	54
Fig. 53 Morphology in the vicinity of the welded region	54
Fig. 54 Design of thermal welding heater	55
Fig. 55 Fabricated thermal welding heater	56
Fig. 56 Thermal welding system	56
Fig. 57 Unified flat panel photobioreactor case via thermal welding process	57
Fig. 58 Specimens for full-scale durability experiments of the finally fabricated flat panel photobioreactor case	58
Fig. 59 Set-up full-scale durability experiments of the finally fabricated flat panel photobioreactor case	59
Fig. 60 Results of the microalgae cultivation using the fabricated flat panel photobioreactor case	61
Fig. 61 Measurement devices of optical density	61
Fig. 62 Variation of the optical density according to type of flat panel photobioreactor case	62

ABSTRACT

Investigation into the development of thermoforming mould of the flat panel photobioreactor case for the cultivation of microalgae

Ahn, Yeong-Su

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Renewable and sustainable energy has paid attention to cope with global warming and resource depletion. The bio-fuel, including bio-diesel and bio-ethanol, has proposed as one of a renewable and sustainable energy sources. Recently, microalgae have widely used as the biomass to produce bio-diesel. An amount of the bio-diesel is proportional to the quantity of the microalgae. Hence, the development of mass cultivation system for the microalgae is one of hot issues in the research field related on bio-fuels.

The objective of this thesis is to investigate into the development of thermoforming mould of the flat panel photobioreactor case for the mass cultivation of the microalgae. Basic formability, structure and rigidity analyses have been performed to obtain a proper design of the flat panel photobioreactor case. Using the proper design of the flat panel photobioreactor case, the thermoforming mould has been designed. In order to examine the formability of the designed flat panel photobioreactor case and thermoforming mould, three-dimensional thermoforming analysis has been performed. Thermoforming material has been chosen as polycarbonate (PC) with thickness of 4.5 mm. High temperature tensile tests have been carried out to obtain constants of temperature dependent material modeling. From the result of the thermoforming analysis, proper thermoforming conditions, in

which the desired flat panel photobioreactor case can be manufacture, have been estimated.

The thermoforming mould with several vacuum holes has been manufactured from CNC machining process. The material of thermoforming mould has been chosen as poly vinyl chloride. Using the fabricated thermoforming mould, the thermoforming experiments have been carried out. The results of the thermoforming experiments have been shown that the desired plastic flat panel photobioreactor cases are successfully manufactured when the proposed designs of the flat panel photobioreactor cases and thermoforming mould.

Through welding and bonding experiments, proper bonding and welding processes of fair of flat panel photobioreactor case have been chosen. The flat panel photobioreactor has been fabricated using thermal welding and bonding. Using the fabricated flat panel photobioreactor, the cultivation experiments have been performed. The results of the culture experiments have been shown that the fabricated flat panel photobioreactor can effectively cultivate the microalage.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

최근 전 세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화와 고유가에 의한 에너지 자원 위기에 효과적인 대처를 위하여 신재생 에너지에 대한 관심이 대두되고 있다. 지구 온난화 현상은 산업 발달에 따라 석유와 석탄과 같은 화석연료의 무분별한 사용에 의해 온실 효과의 영향이 커지고 있다. 이로 인한 19 세기 후반 이후 지구의 연평균 기온이 0.6 °C 정도 상승하였다. 지구온난화방지를 위하여 전 세계에서는 이산화탄소 (CO₂) 가스 배출량을 2020 년까지 최대 30 % 감축을 목표로 탄소 배출을 규제하고, 탄소 배출량을 종량제 제도를 도입할 것으로 예상되어 탄소배출에 대한 경제적 부담이 늘어날 것으로 예상하고 있다. 특히 우리나라는 화석연료의 에너지 의존도가 높아 신재생에너지에 대한 국가적인 차원에서 관심이 대두되고 있다. 현재 총 에너지의 5 % 를 신재생 에너지로 보급한다는 장기적인 목표를 가지고 신재생에너지 기술 개발 및 보급 사업에 대한 지원을 강화하고 있다.

특히, 신재생에너지 중에서 바이오 디젤과 같은 바이오 연료는 광합성을 통한 CO₂ 고정 가능한 장점을 가지고 있어 많은 관심을 모으고 있다.¹⁾ 바이오 에너지는 현재 대부분 생물자원으로 생산된다. 현재 가장 많이 사용하고 있는 바이오 연료의 생물자원은 대두, 옥수수, 해바라기씨 등의 식량자원이다. 식량 자원을 사용한 바이오 디젤 생산은 인간의 식자재가 감소하는 영향을 발생시킨다. 이에 따라 바이오 연료 생산 시 대량 생산이 가능하고 인간의 식량자원에 영향을 미치지 않는 새로운 생물자원 개발에 대한 연구가 시작되고 있다.²⁾ 최근 바이오 연료용 생물자원으로 광합성을 통한 CO₂ 고정 또한 가능한 미세조류 (Microalgae) 를 활용한 방법에 대한 관심이 높아지고 있다.³⁾ 특히, 미세 조류의 대량 생산 및 생산성 향상을 위하여 다양한 광생물 반응기들이 개발되고 있다.⁴⁾

광생물 반응기의 종류로는 Fig. 1 과 같이 개방형과 밀폐형으로 나눌 수 있다. 개방형 배양은 가장 단순한 형태로 개방된 연못 등에서 배양하는 것으로 초기 설비 투자와 유지 비용이 저렴하고 보수가 용이한 장점이 있다.⁵⁾ 그러나 내부까지 효과적인 광전달이 이루어지지 않아 미세조류 성장 속도가 느리고 오염에 대한 미세조류의 생존량이 적고 설치 공간에 많은 제약이 필요하다는 단점이 있다. 밀폐형 배양은 크게 관형/개

선된 관형/평판형 등이 있다.⁶⁻¹¹⁾ 밀폐형 배양은 광생물 반응기를 이용하여 미세조류를 배양하는 방법으로 초기 비용은 많지만 배양 시 고농도의 배양이 가능하고 오염에 대한 요소가 생존율이 높다는 장점을 가지고 있다.¹²⁾

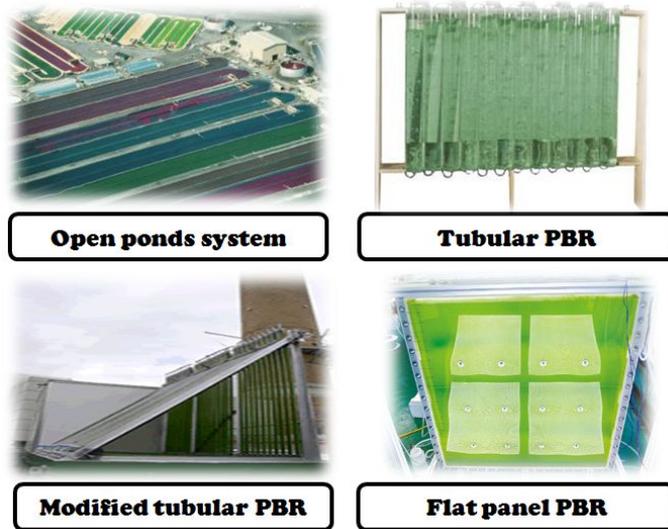


Fig. 1 Classification of photobioreactor

고농도의 배양을 위해서는 빛의 효율적인 전달이 가장 중요한데, 이를 위해서는 광생물 반응기의 단위부피당 표면적이 넓은 것이 가장 좋은데 이를 위해 다양한 형태의 반응기가 연구되고 있다.¹³⁾ 특히 고농도/고효율 배양을 위한 빛의 효율적인 전달을 위한 여러 가지 반응기를 설계/제작하고 있다.^{14,15)}

제 2 절 이론적 배경

1. 광생물 반응기 케이스에 관한 연구

광생물 반응기는 연못형, 관형, 평판형 등 다양한 종류의 광생물 반응기들이 있다. 그 중 평판형 광생물 반응기는 다른 광생물 반응기 보다 넓은 광조사면적과 높은 미세조류의 생산성에 대한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들을 가지고 있어 여러 가지 형태의 평판형 광생물 반응기를 설계/제작 하고 있다.^{16,17)} 또한 미세조류의 최대 생산성을 얻기 위해서 광생물 반응기 케이스 재료에 대한 높은 광학특성이 높은 재료를 선택하고 있다. 광생물 반응기 소재 중 기존에 많이 사용하고 있는 유리의 광투과율이 90 ~ 92 % 이고, 플라스틱 재료들의 광투과율이 85 ~ 93 % 인 플라스틱 재료를 사용하여 다양한 형태의 성형 및 강성 개선을 통한 여러 가지 형태의 평판형 광생물 반응기에 대한 연구가 진행 중에 있다.

J. Degen 은 평판형 광생물 반응기에 자가 순환이 가능하도록 격막의 지지구조를 설치하여 에어리프트 반응기와 버블칼럼 반응기를 설계 및 제작하여 미세조류 배양 시험을 통한 배양효율 및 배양조건에 관하여 연구를 수행하였다.¹⁸⁾ 에어리프트 반응기의 경우 Fig. 2 와 같이 에어리프트 반응기 케이스를 설계하여 격막의 지지구조를 설치 내부유체의 자가 순환이 가능한 반응기를 설계/제작하였다.

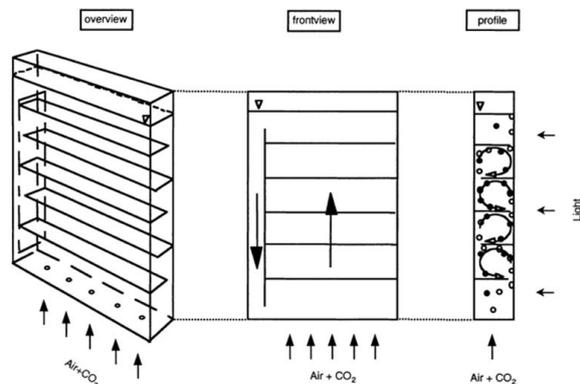


Fig. 2 Flat panel airlift photobioreactor¹⁸⁾

Gang Yu 등은 Fig. 3 과 같이 15 L 급 평판형 광생물 반응기를 제작하여 반응기 내부에 순환이 가능할 수 있게 격벽을 설치하여 격벽의 높이 별 내부순환에 대하여 연구를 수행하였다.¹⁹⁾ 격막의 너비 및 높이에 따라 9 가지의 모델을 변수를 주어 CFD 프로그램을 사용하여 유체의 내부순환에 대하여 해석을 수행하였다. 이를 통하여 반응기 내의 유체 유동의 정략적 분석을 통한 내부 간격과 높이에 대한 최적의 모델을 확인 할 수 있었다.

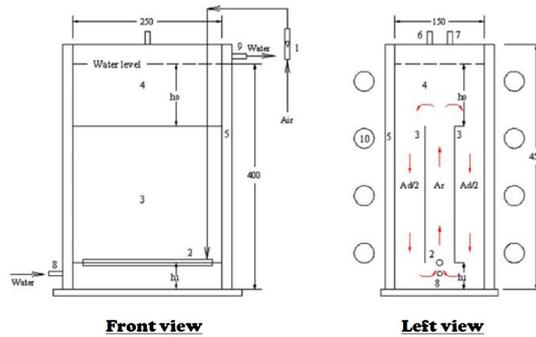


Fig. 3 15 L Airlift flat panel photobioreactor¹⁹⁾

A. Richmond 등은 Fig. 4 와 같이 500 L 급 평판형 광생물 반응기를 제작하여 *Nannochloropsis* sp. 미세조류를 배양함으로써 대량 배양 시 고효율의 바이오 디젤 생산을 위하여 배양 효율에 대한 연구를 수행하였다.²⁰⁾ 또한 여러 가지 부피의 평판형 유리 광생물 반응기를 설계하여 최적의 배양 효율을 도출하였다.

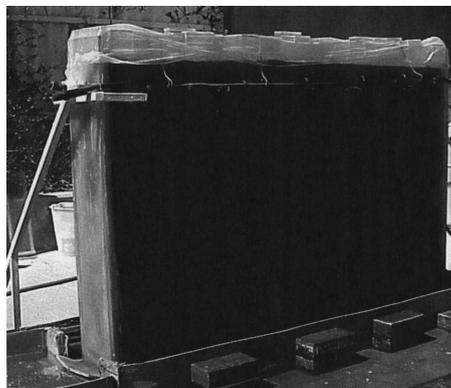


Fig. 4 500 L Flat plate glass photobioreactor²⁰⁾

2. 열성형에 관한 연구

열성형 (Thermoforming) 이란 열가소성 수지의 판재를 사용하여 원하는 형상을 성형하는 방법이다.²¹⁾ 그러나 열성형은 균일한 두께를 가진 제품을 얻기 어려운 단점을 가지고 있다. 판재의 두께 분포는 판재의 온도분포에 많은 영향이 있어 히터 온도 조절이 매우 중요하다.²²⁾ 판재의 성형에 있어서는 유리전이온도 이상에서 용융온도 미만으로 가열된 필름을 진공 또는 공압을 사용하여 금형에 접촉하여 형상을 제작하는 방법이다.²³⁾ 열성형 공정은 얇은 판재의 열가소성수지 재료를 히터를 이용하여 가열하고 연화시킨 후 클램프 이송에 의해 시트를 금형 위에 위치시키고, 판재에 압력을 부가하여 성형 시키는 방법이다.^{24,25)} 열성형 공정은 생산 설비와 금형 제작 비용이 저렴하고, 짧은 성형 사이클로 대형 제품도 생산 가능하다는 특징을 가지고 있지만 적용 가능한 제품형상이 제한적이며 판재에 균일한 두께를 가져가기 힘들다는 단점이 있다.^{26,27)}

열성형 방법은 공정 방법이나 압력 부여 방법에 따라 여러 가지 형태로 분류가능하다. 금형에 진공압력을 부여하는 방법에 따라 진공성형, 압력성형, 곁판재성형으로 나눌 수 있다. 금형에 추가적인 부품을 사용한 방법에 따라 드레이프 성형, 플러그 활용 성형, 기계적성형으로 나누어 진다.²⁸⁾

Fig. 5 는 진공성형에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 진공성형은 금형 표면에 판재를 대기압을 활용하여 성형하는 방법이다.²⁹⁻³¹⁾ 성형하는 최대 압력은 0.1 MPa 로 열화된 판재를 금형 위에 배치하여 성형하는 방법이다. 이로 인하여 두께가 가장 얇아지는 구간은 금형과의 접촉이 가장 늦은 금형의 코너부에서 나타나게 된다.³²⁾

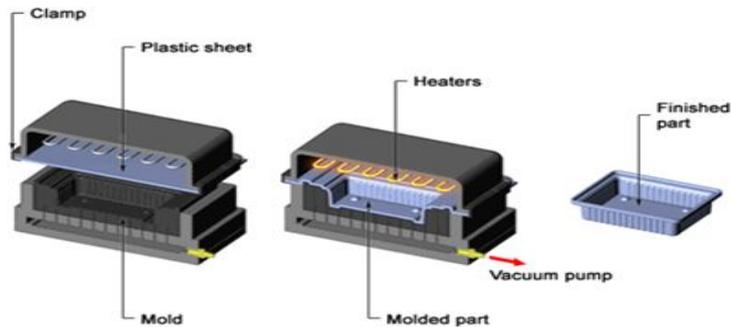


Fig. 5 Vacuum forming process²⁸⁾

Fig. 6 는 압력성형에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 압력성형은 플라스틱 성형 방법인 블로우 성형 (Blow forming) 과 유사하다. 사용되는 압력은 펌프 용량에 따라 작용 압력이 설정 가능하다.³³⁾ 진공성형의 경우 작용압력이 판재의 하단부에서 작용한다면, 압력성형의 경우 판재의 상단부에서 압력이 작용하는 것으로 압력방향이 반대로 작용하게 된다. 공압을 사용하는 성형 공정의 장점은 진공을 사용하는 것보다 사이클이 짧고, 시트에 가하는 압력이 커 낮은 온도에서 성형이 가능하다.³⁴⁾

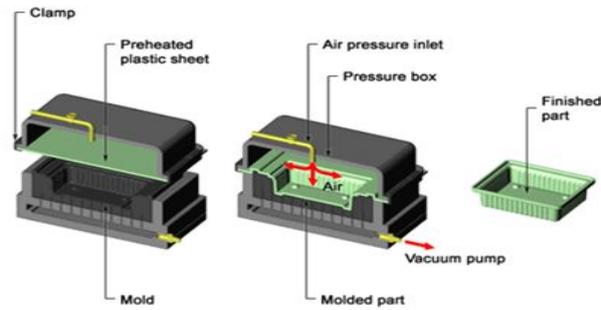


Fig. 6 Pressure forming process³³⁾

Fig. 7 는 겹판재 성형에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 겹판재 성형은 두 개의 금형을 이용하여 성형하는 방법이다.³⁵⁾ 진공압력과 공압을 동시에 사용하는 방법으로 두 개의 판재 사이로는 공압이 작용하고 금형 양면에는 진공압력이 작용하여 진공성형을 한다. 두 개의 제품을 동시에 성형 가능하고 양쪽 판재에 접합 없이 붙일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 진공성형 기계가 비싸다는 단점을 가지고 있다.

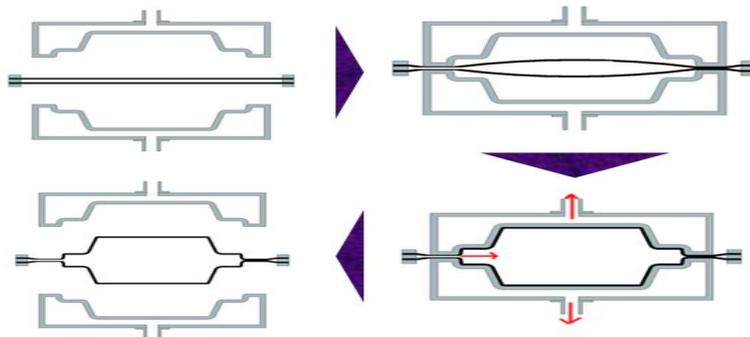


Fig. 7 Twin sheet forming process³⁵⁾

Fig. 8 는 드레이프 성형 에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 드레이프 성형은 진공 성형 방법과 기계적 성형 공정을 결합한 공정이다.³⁶⁾ 앞서 설명한 세가지 공정 모두 음각 금형을 사용하여 열성형을 수행 하지만 이 공정에서는 양각 금형을 사용 하여 성형하는 공정이다. 공정순서에서 양각 금형이 상승하여 1 차 성형을 수행하고, 금형의 상승으로 늘어난 판재에 진공 압력을 주어 성형하는 방법이다. 양각 금형은 성형 제품 내부에 균일한 두께가 필요한 경우 사용한다. 드로잉의 깊이를 성형 후의 두께 분포가 과도하게 얇아지는 현상이 없이 균일성 있는 두께 분포를 보여 음각 금형에서 성형하는 것보다 우수하다.

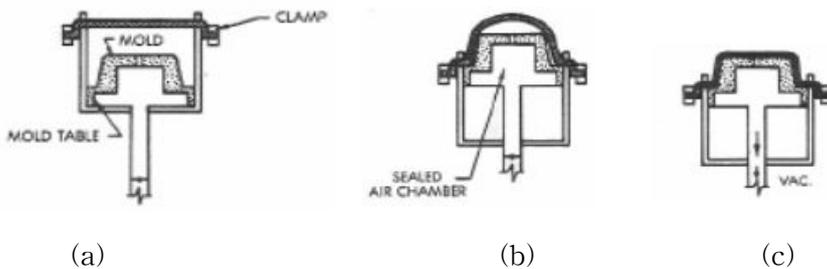


Fig. 8 Drape forming process³⁶⁾

Fig. 9 는 플러그 활용 성형에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 플러그 활용 성형은 진공 및 압력 성형을 통한 성형 방법보다 판재의 벽두께의 균일성을 가져갈 수 있는 방법이다.^{37,38)} 플러그를 이용하여 판재를 사전 변형을 시키는 방법으로 금형의 코너 부에 있어서 더 균일한 두께 분포를 얻을 수 있다. 상대적으로 판재의 두께가 얇아지는 부분에 미리 재료를 이동시켜 스트레칭량을 지정가능하다.

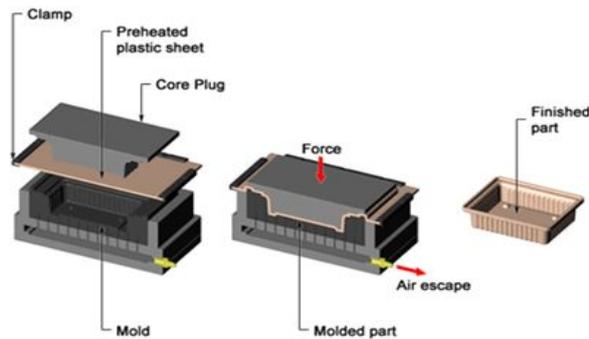


Fig. 9 Plug-assist forming process³⁷⁾

Fig. 10 는 기계적 성형에 대해 간략하게 나타낸 것이다. 기계적 성형은 Plug 를 이용하는 것에 있어서는 플러그 활용 성형과 비슷하게 성형 방법이다.³⁹⁾ 하지만 공정 방법에 있어서 금형에서는 공압을 부여하여 스트레칭 방향을 반대로 하여 미리 스트레칭 후 플러그를 하강시켜 판재를 하강시키는 방법으로 두꺼운 바닥과 얇은 벽을 가진 제품을 생산하는데 사용하는 방법이다.

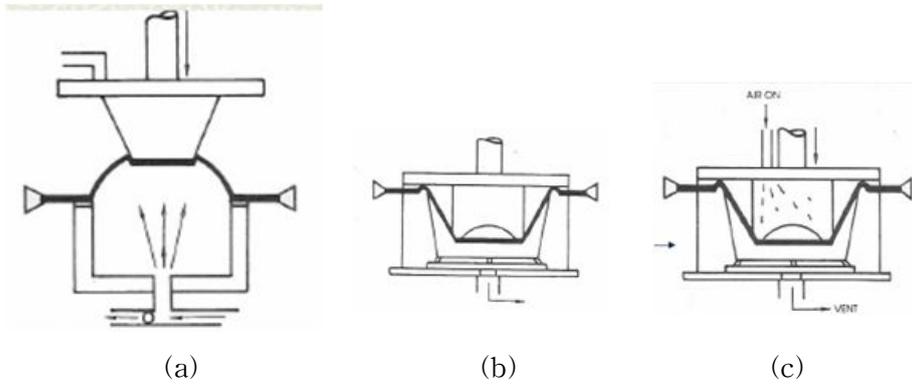


Fig. 10 Mechanical forming process³⁹⁾

제 3 절 연구 목적 및 방법

본 논문의 목적은 열성형을 이용한 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 개발에 관한 연구이다. 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스를 개발하기 위하여 반응기 케이스 안에 대한 구조해석을 수행하여 강성 특성이 가장 우수한 평판형 광생물 반응기 케이스를 도출하고, 이 결과를 이용하여 열성형 유한요소 해석을 수행하여 최적의 진공성형 금형을 제작한 후, 진공 열성형 실험을 수행하여 평판형 광생물 반응기 케이스의 제작성을 분석/고찰 하였다.

평판형 광생물 반응기 케이스는 반응기 내부의 배지액과 미세조류의 압력으로부터 충분한 강성을 가져야하기 때문에 3차원 설계안에 대하여 구조해석을 통한 강성해석이 필요로 하다. 또한, 열성형 시 재료의 유동은 온도에 가장 큰 지배를 받기 때문에 성형시 열특성이 가장 중요하다. 따라서, 진공 열성형 시 실제 반응기 케이스 제작에 앞서 유한요소해석을 통한 제품의 특성 분석을 바탕으로 진공 열성형 공정을 최적화 할 수 있는 연구가 대두되고 있다.

본 연구에서는 3차원 반응기 케이스 설계 시 강성 향상을 위하여 보강재 구조를 부여하여 보강재 배치/구조 형상/깊이에 따른 구조해석을 통한 강성 특성 분석을 수행하여 최적의 반응기 케이스 도출을 수행하고자 한다. 진공 열성형 공정을 이용한 케이스의 특성을 분석/고찰하기 위하여 PAM-FORM 을 이용한 유한요소 해석을 수행하고자 한다. 케이스 성형 재료의 고온 인장 특성 분석을 통한 G'sell 상수를 도출하고, 유한요소해석을 통하여 제품의 온도 분포, 두께 분포 및 성형 깊이 분포 특성 분석을 통하여 최적의 성형 공정을 도출하고자 한다. 유한요소 해석 결과를 통한 최적의 금형을 설계하고, 열성형 실험을 통한 케이스의 성형성 평가를 수행하고자 한다. 열성형된 반응기 케이스를 조립하기 위하여 기초 열융착 실험을 통하여 최적의 실험 조건을 도출하고, 케이스 전체 열융착 실험을 통한 케이스 융착을 수행하고자 한다. 이러한 열융착을 통하여 제작된 케이스를 배양실험을 통하여 동급의 광생물 반응기와 배양 효율 분석 및 내부 순환 특성을 검증하고자 한다.

제 2 장 평판형 광생물 반응기 케이스 3차원 제품 설계 및 강성 특성 분석

제 1 절 반응기 케이스 3차원 제품 설계

미세조류의 대량 배양을 위해 중형급 평판형 광생물 반응기 케이스 설계가 이루어졌다. 광생물 반응기 케이스 설계를 위해서는 설계 요소를 고려해야 한다.⁴⁰⁾ 반응기 설계 시 고려되는 제한사항으로는 미세조류 성장에 필요한 빛의 조사면적, 내부로의 원활한 가스 전달, 배지액와 미세조류에 의해 발생하는 내부 압력에 의해 케이스의 과도 변형이 발생하지 않으며 진공 성형을 사용하여 제품을 제작하므로 성형성이 우수하도록 제품 설계가 고려되어야 한다. Fig. 11 는 광생물 반응기 케이스의 초기 설계안이다. 케이스 초기 설계 시 반응기 케이스 내부에 약 50 L 의 내부 부피를 갖도록 설계하고, 반응기에 내부 순환이 가능한 격막 (Blade) 의 지지구조를 갖도록 설계하였다. 평판형 광생물 반응기 크기는 1,400 mm X 660 mm X 110 mm 이며 케이스 두께는 4 mm, 제작 재료는 폴리카보네이트(Polycarbonate : PC) 이다.⁴¹⁾ 또한 최종 배양 후 미세조류 및 배지액의 원활한 배출을 위하여 반응기 케이스 하단에 관을 설치하고 반응기 케이스 하단부를 평면이 아닌 각을 부여하여 설계하였다. 반응기 케이스 상단에는 중앙 부분을 가장 높게 설계하여 배양 시 발생하는 가스의 포집이 가능하도록 하였다. 그리고 반응기 외부에 구배각(Draft angle) 을 10° 부여하여 원활한 진공성형이 가능하도록 하였다.

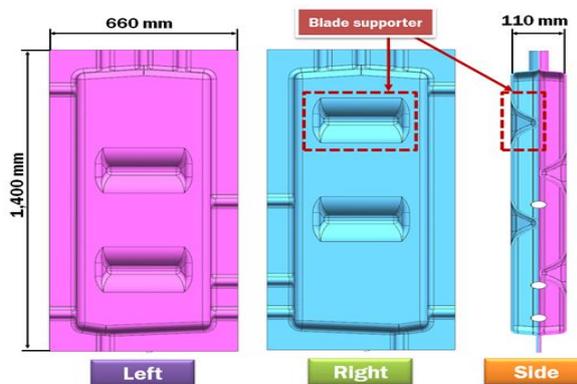


Fig. 11 Basic design of flat panel photo-bioreactor case

케이스 설계에 있어 중요한 요소 중에 하나가 케이스의 강성이다. 초기 설계 안에 배지액와 미세조류에 의해 발생하는 내부 압력에 의해 케이스의 과도 변형을 막기 위하여 특정 형상의 보강재 (Stiffener) 를 수직/수평 방향으로 배치하여 케이스의 강성을 높이도록 하였다. 또한 정수압은 높이 방향에 가장 크게 영향을 받는 정수압 특성을 고려하여 수평 방향의 보강재 배치에 있어서는 케이스 하단부로 갈수록 조밀하게 배치하였다. Fig. 12 는 케이스 보강재의 배치 간격을 나타낸다. 수직 보강재의 경우 중간 보강재를 중심으로 140 mm 간격으로 배치하였다. 또한 수평 보강재의 경우 케이스 보강재 부분을 3 부분으로 나누어 상부, 중간부, 하부로 나타낸다. 케이스 설계에 있어서 보강재 간격은 상부 100 mm, 중간부 80 mm, 하부 60 mm 로 구성되었다.

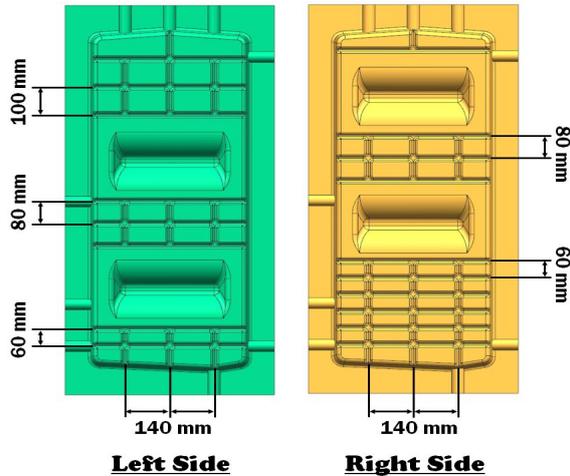


Fig. 12 Design of flat panel photo-bioreactor cases with stiffeners

반응기 케이스 설계와 함께 케이스에 들어가는 부품에 대하여 설계하였다. 케이스에 들어가는 설계 부품은 크게 2 가지이다. 첫 번째는 케이스와 센서 및 공기 튜브들이 연결 가능하도록 연결부를 설계하였다. 연결부 설계는 진공성형 후 성형된 반응기 케이스에 대하여 깊이를 측정 후 3 차원 설계를 통하여 형상에 맞게 연결부를 설계하였다. 또한 제작시 대량 생산에는 사출성형 공정을 사용하고, 소량 생산 시 절삭 가공을 통하여 제작하게 된다. 연결부 내부 치수의 경우 실제 배양시 사용되는 내부관 및 측정 기구의 치수에 맞게 각각 다르게 제작하였다. 연결부는 반응기 케이스 제작을 진공 열성형 공정을 통하여 설계하기 때문에 연결부를 성형을 통하여 제작하기 어렵기

때문에 사출성형이나 절삭가공을 통하여 제작을 하기위하여 기초 설계를 통하여 제작 하려 한다. 반응기 케이스의 연결부 개수는 총 9개이다. Fig. 13 는 연결부의 설계안 및 연결부의 위치이다.

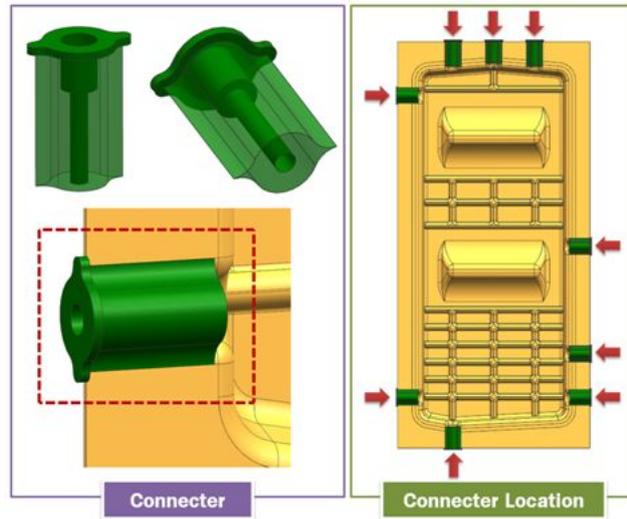


Fig. 13 Connector design of the flat panel photo-bioreactor case

두 번째는 케이스 안쪽에 들어가는 격막 (Blade) 설계이다. 격막 역할은 케이스 하단에서 산소와 이산화탄소로 구성된 기포가 케이스 최상단까지 연속적인 이동에 있어 광생물 반응기에서 내부 유체, 영양분, CO₂ 및 미세조류의 혼합을 일으키는 원동력이 될 수 있도록 하였다. 반응기 케이스 내부에 설계된 지지구조에 격막을 부착하여 내부 유체의 내부 혼합을 유도하였다. 미세조류의 혼합은 효율적인 배양을 위해서는 필요한 부품으로 격막이 없는 경우 반응기 내부의 미세조류가 정적인 상태로 커진다. 케이스 내부에 공간적 제약을 고려하여 미세조류 상호간의 그림자 효과 및 미세조류에 의한 광흡수에 의하여 광생물 반응기 내부 깊이 방향으로 광합성 차이가 발생하지 않도록 내부 순환을 돕는 격막을 설계하였다. 또한 미세조류가 반응기 케이스 하단으로 밀집하며 반응기 내부에 배양조건이 다르게 분포하는 것을 방지하는 역할도 하게 된다. Fig. 14 는 격막 의 설계안이다.

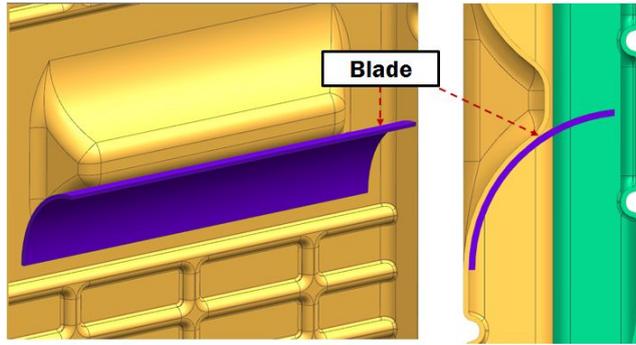


Fig. 14 Blade design of the flat panel photo-bioreactor case

보강재 형상 및 형상 깊이에 따라 구조 특성 분석을 위하여 여러 가지 형상으로 보강재를 설계하였다. 보강재 구조는 내압에 의한 반응기 케이스의 휨 변형을 적게 하여 반응기 케이스 자체에 강성을 높여 주는 효과를 나타낸다. 또한 보강재 형상을 통한 빛의 산란을 통하여 내부로 전달되는 광효율을 높이는 기능을 한다. 이러한 보강재 역할을 하기 위하여 첫 번째로 보강재 형상에 따라 구조 특성을 분석하고자 한다. Fig. 15은 설계한 보강재 형상이다. 보강재 형상은 원형과 사다리꼴형의 두 가지 형상으로 설계하였다. 두 번째는 보강재 깊이를 다르게 하여 깊이를 5 가지 조건으로 하여 설계하였다. 설계안에 대하여 최종적으로 종합하여 보강재 구조가 없는 기본형 구조와 각각의 형상 및 깊이에 따라 11 가지 설계에 대하여 구조해석을 수행하였다.

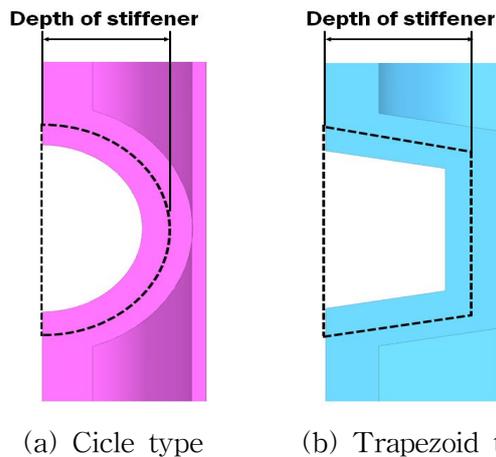


Fig. 15 Design of stiffener shapes for the flat panel photo-bioreactor case

Table 1 Design alternatives of the flat panel photo-bioreactor cases

		D _L (mm)	D _R (mm)
Without stiffeners	Design 1	X	X
Trapezoid type	Design 2	4	5
	Design 3	5	6
	Design 4	6	7
	Design 5	7	8
	Design 6	8	9
	Circle type	Design 7	4
Design 8		5	6
Design 9		6	7
Design 10		7	8
Design 11		8	9

진공 열성형을 이용한 반응기 케이스 제작 시 가장 중요한 부분은 케이스의 두께 분포이다. 반응기 케이스의 두께는 케이스의 강성 및 배플립에 가장 큰 영향을 미친다. 형상 설계된 평판형 광생물 반응기 케이스의 성형성을 예측하기 위하여 식 (1), (2) 및 (3) 을 이용하여 면적 드로잉율 (Aerial draw ratio : ADR), 선형 드로잉율 (Linear draw ratio : LDR) 및 평균 두께 감소율 (Average reduction rate of thickness : ART) 를 예측하였다.⁴²⁾ ADR 값의 경우 면적을 이용하여 성형두께 예측하는 방법으로 판재의 성형 전후 면적을 이용하는 방법으로 성형 후 형성된 부분의 표면적을 시트의 일부를 구성하는데 사용하는 표면 면적으로 나눈 값으로 이 값은 항상 1 보다 큰 값을 나타낸다. 또한 LDR 값은 진공 열성형 제품의 절단면을 이용하여 제품의 성형 두께 변화를 예측하는 방법으로 성형 후의 선 (Line) 길이를 성형 전의 Line 길이로 나눈 값이다. ART 값은 1 로 ADR 값을 나눈 값으로 판재의 두께의 평균 감소를 결정하는데 사용한다.

$$ADR = \frac{M_{fs}}{M_s} \quad (1)$$

$$LDR = \frac{\lambda_{fs}}{\lambda_s} \quad (2)$$

$$ART = \frac{1}{ADR} \quad (3)$$

여기서, M_{fs} 와 M_s 는 열성형 후 판재의 단면적과 열성형 전 판재의 단면적이다. 여기서, λ_{fs} 와 λ_s 는 열성형 후 판재의 절단면 길이와 열성형 전 판재 절단면 길이이다.

케이스 설계 안들에 대한 ADR, LDR, ART 값을 측정 하여 Fig. 16 와 같이 비교하였다. 11 가지 설계 안에 대하여 ADR 값은 1.11 ~ 1.14 범위를 나타내고, LDR 값은 각각 1.07 ~ 1.07 범위를 나타내었다. 플라스틱 재료의 한계 면적 드로잉율과 선형 드로잉율이 3.00 ~ 9.00 임을 고려하면 케이스에 결함이 발생하지 않을 것으로 판단된다. ART 값은 0.90 ~ 0.88 범위를 나타내었다. 이 결과로부터 원소재의 두께가 4.5 mm 로 열성형 시 3.96 ~ 4.05 의 두께 분포를 나타낼 것으로 판단되었다.

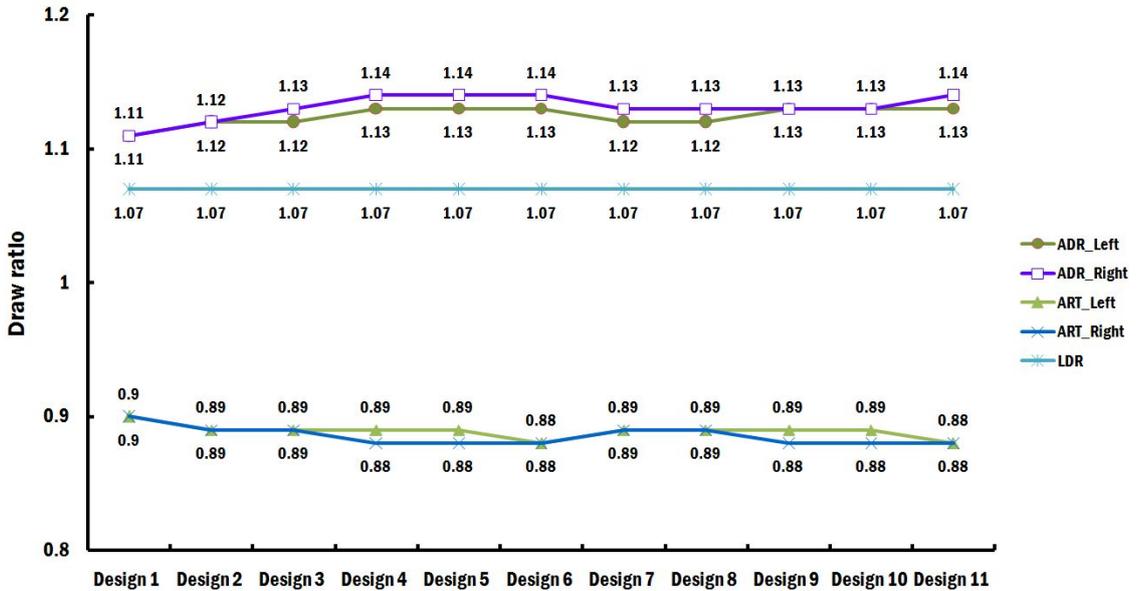


Fig. 16 ADRs, ARTs and LDRs for different stiffener designs

제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 구조해석 특성 분석

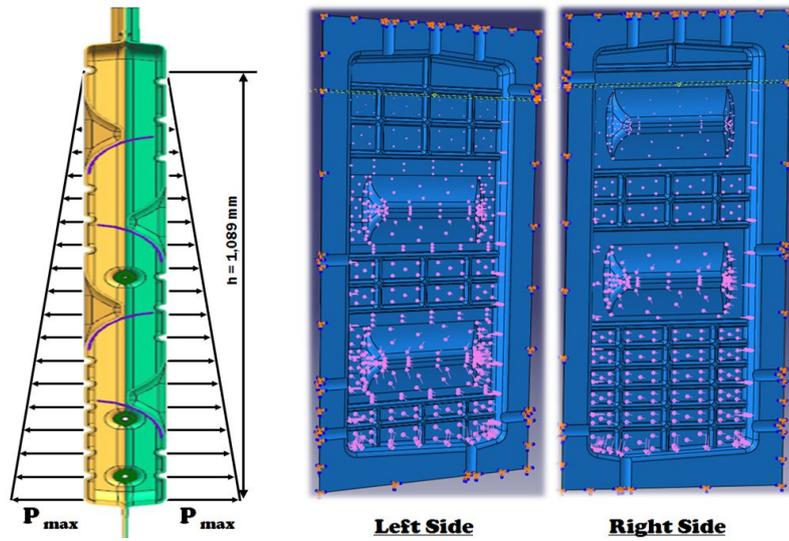
1. 케이스 구조해석 방법

본 연구에서는 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기를 이용한 미세조류 대량 생산을 위해 케이스 구조해석을 이용하여 광생물 반응기 케이스의 내압에 대한 강성을 분석하고자한다. 구조해석 조건에서는 케이스에 부가되는 내부압력, 케이스 재료의 항복응력, 보강재 구조에 따른 형상 변형 등이 최종 제품의 변형과 강성 특성에 크게 영향을 미친다. 그러므로 평판형 광생물 반응기 케이스의 안전 설계를 위해서는 형상 변수의 영향성을 분석/고찰하여 최적 설계안을 도출해야 한다. 본 연구에서는 현재 설계된 평판형 광생물 반응기의 11 가지 설계안에 대하여 3 차원 유한요소해석을 수행하여 케이스의 변형 형상/응력 영향성을 분석하였다. 본 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 상용 프로그램인 ABAQUS V6.11 Implicit module 이다. Fig. 16 는 케이스 구조해석을 위한 정수압 부여 방법을 나타내었다. 평판형 광생물 반응기 케이스의 구조해석을 위해서는 먼저 케이스에 부가되는 압력에 대하여 선형 분포로 가정하여 압력을 도출하였다. 배지액과 미세조류이 케이스에 작용하는 압력을 정수압으로 하고 식 (4) 과 같다.

$$P_{ap} = S_F \times \gamma \times h \quad (4)$$

여기서, P_{ap} , S_F , γ 및 h 는 각 미세조류와 배양액의 압력, 안전계수 (Safety factor), 유체의 비중 및 내부 유체의 높이이다.

식 (4)에서 안전계수는 2.0 를 적용하였다. 식 (4) 을 이용하여 평판형 광생물 반응기 케이스에 작용하는 최대 압력 0.02 MPa 를 도출하였다. Fig. 17 은 반응기 케이스의 구조/강성해석 조건이다. 실제 평판형 광생물 반응기 케이스의 배양 실험 시 케이스의 내부 부분을 제외한 평면부에 용착이나 접착을 통한 결합하게 된다. 이러한 결합을 구조 해석 시 적용하기 위하여 평면부를 고정하여 해석을 수행하였다. 압력은 내부에 모든 면에 대해서 적용하였다.



(a) Pressure distribution (b) Boundary conditions

Fig. 17 Analysis model of flat panel photo-bioreactor cases condition

평판형 광생물 반응기 케이스 구조/강성 해석 조건은 8 절점 입체 솔리드 요소 (Hexahedral solid element) 를 사용하여 케이스를 격자로 구성하였다. 반응기 케이스를 구성하는 총 요소의 절점수는 49,436 ~ 55,117 개 그리고 총 요소수는 149,080 ~ 167,918 개다. 평판형 광생물 반응기 케이스의 3 차원 유한요소를 위하여 반응기 케이스 제작 시 사용되는 재료의 물성치를 사용하였다. 재료의 물성치는 문헌자료에서 취득한 결과를 사용하였다. 재료의 종류는 PC (Polycarbonate) 이고, 구조해석을 위한 물성 데이터는 Table 2 와 같다.

Table 2 Material properties of polycarbonate

Young's modulus (MPa)	Poisson' ratio	Density (kg/m ³)
2,000	0.38	1.25 × 10 ⁻³

2. 케이스 구조해석 결과 고찰

케이스 설계 안에 대하여 최대 변위량을 측정된 결과 다음과 같이 비교 하였다. Fig. 18 는 대표적인 케이스 형상 (Design 6) 에 대하여 최대 변위량을 나타낸 결과이다. 양쪽의 케이스에 대한 최대 변위 발생 위치는 오른쪽 케이스 하단 부분에서 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 정수압의 특성상 하단부분에 정수압이 가장 크게 작용하는 특성과 일치하는 것을 알 수 있었다. 왼쪽의 케이스는 하단 부분의 격막의 지지구조 형상에 의한 강성이 증가하여 최대 변위가 발생하는 위치가 하단 부분이 아닌 격막의 지지구조 위쪽에서 발생하게 되는 것을 확인 하였다.

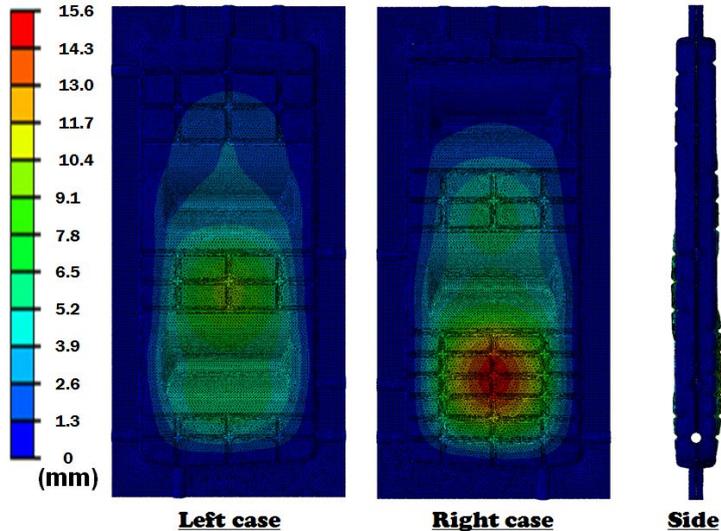


Fig. 18 Deflection distributions of Design 6

평판형 광생물 반응기 케이스의 응력 분포에 대하여 Fig. 19 과 같이 나타내었다. 내부압력에 대하여 왼쪽의 케이스의 경우 저장부 하단에서는 2.3 ~ 27.2 MPa 의 응력 분포를 보이며, 저장부 좌·우 부분에 대하여는 1.0 ~ 13.9 MPa 의 응력분포를 나타내었다. 이를 통하여 저장부 하단에서 응력이 가장 크게 작용하는 것을 알 수 있었다. 오른쪽의 케이스의 경우 저장부 하단에서는 2.5 ~ 30.4 MPa 의 응력 분포를 보이며 저장부 좌·우 부분에 대하여 2.2 ~ 43.6 MPa 로 가장 높게 나타내었다. 이를

통하여 저장부 좌·우 부분에서 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 케이스 재료인 폴리카보네이트 소재의 항복응력이 62.0 MPa 이므로 내부압력에 대하여 충분한 강성을 가질 것으로 사료된다.

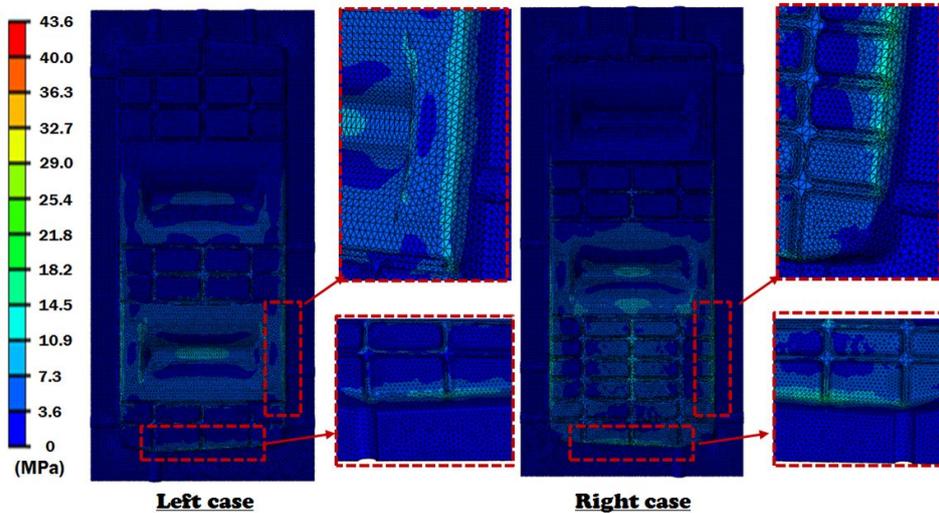


Fig. 19 Stress distributions of Design 6

Fig. 20 와 21 는 기초 형상, 사다리꼴 및 원형 보강형상에 대한 최대변위를 나타낸 것이다. 보강 구조에 대한 특성은 초기 보강구조가 없는 기초 형상에 있어서는 최대 변위량이 23.2 mm 로 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 보강구조의 깊이에 대한 최대 변위량의 차이를 분석한 결과 왼쪽 보강구조 깊이 4 mm, 오른쪽 보강구조 깊이 5 mm 의 Design 2 에서 18.2 mm 의 변형이 발생한다. 왼쪽 보강구조 8 mm, 오른쪽 보강구조 9 mm 의 Design 6 에서 15.6 mm 변형이 발생하여 보강 구조의 깊이가 변형에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 보강재 구조 형상 깊이가 케이스의 변형에 있어서 배불림 현상을 최소화 할 수 있는 것을 확인하였다.

보강구조의 형상에 따른 최대 변형은 사다리꼴형상이 원형 형상의 보강구조보다 최대 0.8 ~ 3.4 mm 까지 좋은 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 배불림 현상을 최소화하기 위하여 보강형상 단면은 사다리꼴 구조이고 보강재 단면 치수가 왼쪽 깊이 8 mm, 오른쪽 깊이 9 mm 인 Design 6 설계안이 강성 측면에서 가장 우수한 케이스 설계안으로 사료된다.

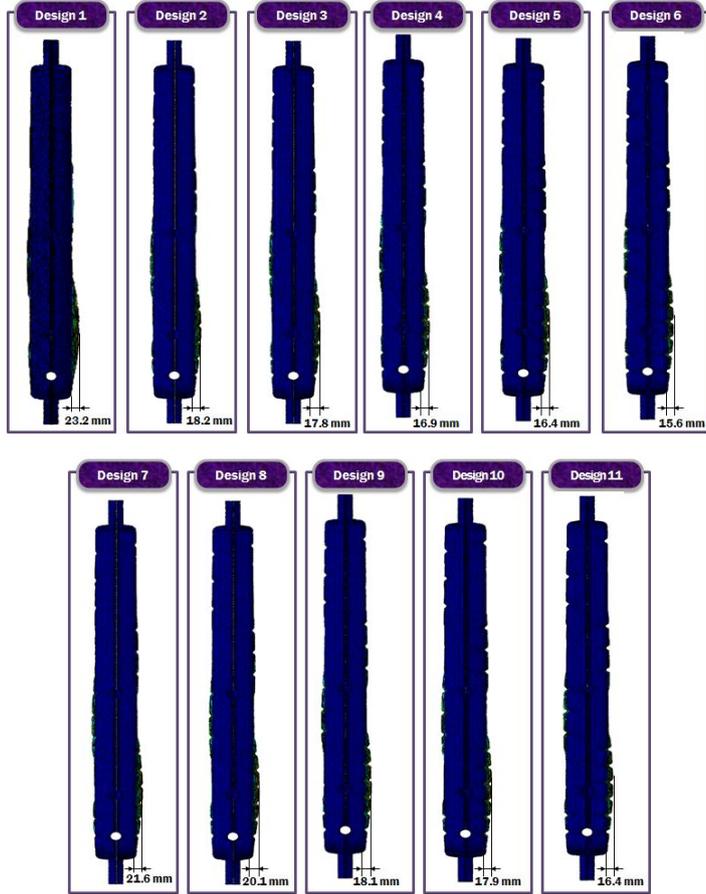


Fig. 20 Variation of the deformed shape of flat panel photobioreactor case according to stiffener design

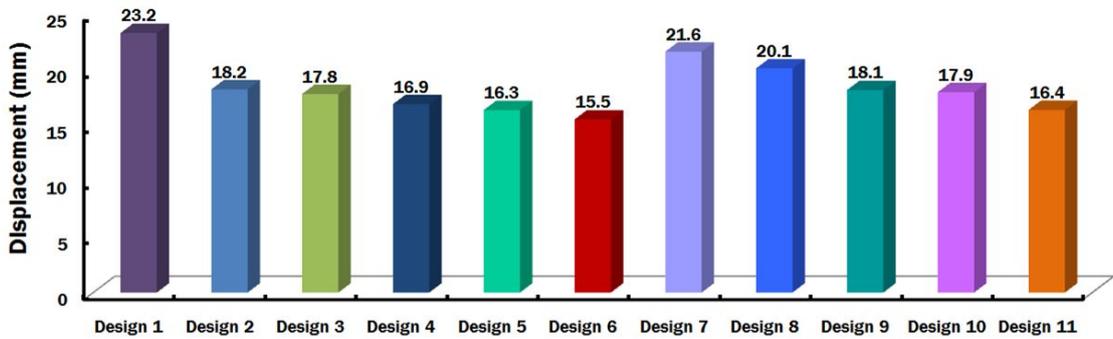


Fig. 21 Variation of maximum deflection of flat panel photobioreactor case according to stiffener design

제 3 장 평판형 광생물 반응기 케이스 열성형 유한요소 해석

제 1 절 반응기 케이스 성형 재료 고온 인장 특성

1. 고온 인장 물성시험 방법

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료의 온도에 따른 정확한 유동학적 거동을 묘사하기 위해 고온 단축인장시험을 PC 재료에 대해 수행하였다.⁴³⁾ 고온 인장 시험용 시편은 허리부가 잘록한 형상의 압출된 솔리드 시편을 제작하여 인장시험에 사용하였다. Fig. 22 는 ASTM D 638 (Type 1)에서 규정하는 규격 시험편의 치수이다. Fig. 23 는 시편 규격에 맞게 제작된 시편에 대하여 나타내었다.

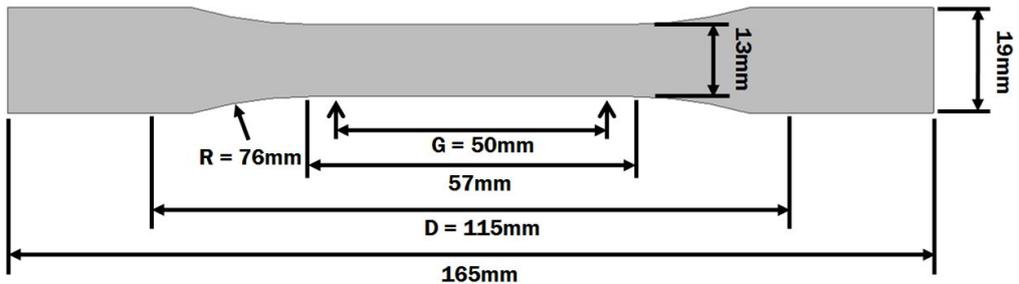


Fig. 22 Design of specimen for high temperature tensile test



Fig. 23 Manufactured specimen for high temperature tensile test

플라스틱 재료의 경우 고온에서 가열/유지 시간을 조절하는 것이 가장 중요하다. 고온 인장 물성시험에서는 목표된 실험 온도가 정상상태가 될 수 있도록 하기 위하여 가열시간을 5 분으로 한 후 고온 단축인장시험을 실시하였다. 시험재료는 케이스의 재료인 PC 이고, 재료 두께는 4.5 mm 로 하였으며 시험온도는 20 ~ 175 °C 로 시험을 수행하였다. 재료의 온도 조건에 대하여 크로스헤드 속도 조건을 10 mm/min, 50 mm/min 및 250 mm/min 에 대하여 각각 3 회씩 시험을 수행하였다.

Fig 24 은 고온 단축인장시험에 사용된 장비 및 장착된 시험편을 나타내었다. 고온 인장시험기기는 WL 21000A 의 UTM 시험기기를 사용하였으며, 시험 방법은 ASTM D-638 에서 규정된 방법을 사용하였다. 시험 시 표점거리는 115 mm 를 적용하였다.

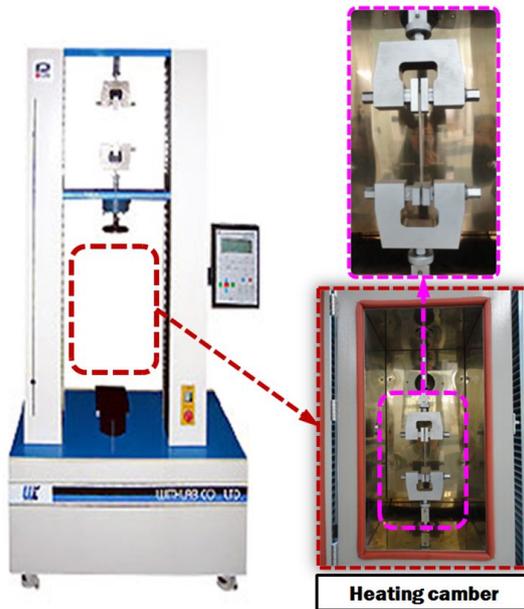


Fig. 24 Experimental set-up for high temperature tensile test

2. 고온 인장시험 결과

본 연구에서는 PC 재료의 온도별 (20°C, 60°C, 100°C, 130°C, 160°C, 175°C) 고온 인장시험을 통해 얻어진 진응력-진변형률 선도를 각각 Fig. 25 에 나타내었다. 고온 인장시험 결과로부터 상온에서 100°C 까지는 인장강도가 100 MPa 이상으로 나타나며 온도가 높아짐에 따라 인장강도가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한 PC 재료의 유리전이온도 (150°C) 이상의 고온 인장시험에서는 6 MPa 이하로 낮게 나타난다. 고온 인장시험에서 변형률 또한 상온에서 고온으로 갈수록 0.6 에서 유리전이온도이상에서는 1.0 에 가깝게 나타난다. 각각의 온도 조건에서 크로스 헤드 속도가 높을 때 시험편의 변형량이 적게 나타나 파단에 이르는 시간이 크로스 헤드 속도가 낮을 때보다 빠르게 나타난다. 하지만 고온에서는 크로스 헤드 속도가 높을수록 변형량이 커지게 되어 파단에 이르는 시간이 속도가 낮을때보다 길어진다. 이를 통하여 PC 재료의 연신율 및 인장강도는 유리전이온도를 전·후로 크게 변화함을 알 수 있었다. 그리고 유리전이온도 이상에서는 온도가 상승함에 따라 시험편의 연화현상이 심해져 유동저항이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었고, 탄성구간과 항복구간의 구분이 없어지는 현상이 발생함을 알 수 있었다. 또한 시험편의 온도 상승에 따라 시험편의 연화현상이 심하여 유동저항이 급격히 감소하며 진응력-진변형률 값의 떨림현상이 더욱 심하게 발생함을 알 수 있었다.

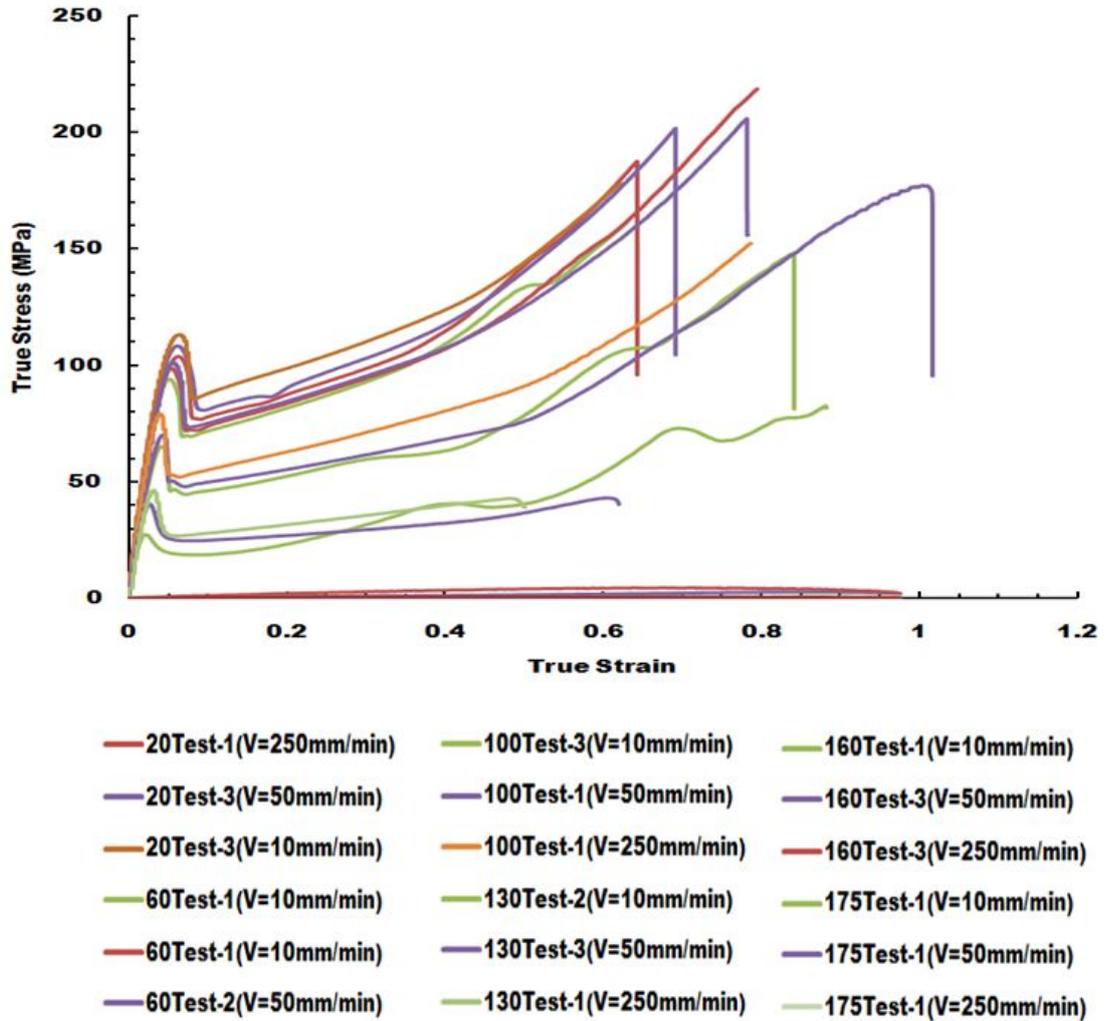


Fig. 25 True strain-true stress curves for different cross head speed and furnace temperatures

3. 고온 인장시험 결과를 이용한 G'sell 모델 상수 도출

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스 제작을 위하여 진공성형 공정의 유한요소해석을 수행하여 최적의 공정조건을 도출하기 위한 PC 재료의 고온 유동 모델을 적용하기 위한 물성 데이터를 도출하였다. PC 재료의 온도별 (20°C, 60°C, 100°C, 130°C, 160°C, 175°C) 고온 인장시험을 통해 얻어진 진응력-진변형률을 사용하여 진공성형 공정에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 재료의 상수를 산출하였다. 유한요소해석 프로그램은 상용 소프트웨어인 PAM-FORM 2011 을 사용하였다.

PAM-FORM 에서는 플라스틱 재료의 유동 모델을 나타내기 위하여 G'sell 모델을 사용하였다.⁴⁴⁾ G'sell 모델은 등방성 비선형 점탄성 특성과 무정형 (Amorphous) 또는 준결정성 (Semi-crystalline) 고분자들의 거동을 표현하는데 사용된다. G'sell 모델의 구성식은 식 (5) 과 같이 정의된다.

$$\sigma(\epsilon, \epsilon') = k[1 - \exp(-w\epsilon)]\exp(h\epsilon^2)(\epsilon'/\epsilon'_0)^m \quad (5)$$

여기서, k , w , h 및 m 은 각각 재료 밀도, 점탄성 계수, 변형속도 경화지수 및 변형 경화 계수이다.

식 (3) 과 같은 경우 일정한 변형률 속도 포함하는 식이지만 플라스틱 재료가 얇아 가열시 뒤틀림이 발생하는 재료는 고온 인장시험 시 단면의 변화량이 정확한 측정이 어려워 일정한 변형률 속도를 제어하는 것은 어렵다. 이러한 문제를 위하여 G'sell 모델에 적용 가능하도록 수정하였다. 수정한 식은 다음 식 (6)와 같다. 이 식을 이용하여 k , w , m , h 를 도출하였다.

$$\sigma = k[1 - \exp(-w\epsilon)]\exp(h\epsilon^2)\left(\frac{v}{l_0 \times \exp(\epsilon)}\right)^m \quad (6)$$

온도별 고온 인장시험 결과를 이용하여 k , w , m , h 를 도출하기 위하여 Optimizer G'sell 상용 프로그램을 사용하여 도출하였다. PC 재료의 온도별 10 mm/min, 50 mm/min 및 250 mm/min 의 크로스헤드 속도에 따른 진응력-진변형률 값을 입력한 후 프로그램을 활용한 G'sell 상수의 계산된 결과값을 Table 3 와 같이 도출하였다.

도출된 물성재료의 상수는 PAM-FORM 프로그램을 이용한 유한요소 해석 시 재료의 진공성형해석에 사용된다. Fig. 26 은 G'sell 모델을 사용하여 진응력-진변형률에 대해 나타내었다.

Table. 3 Estimated material constants of G'sell model

Parameters \ Temperature	k (MPa)	m	w	h
20 °C	85.997	0.005	46.735	1.981
60 °C	85.902	0.009	47.720	1.800
100 °C	64.637	0.004	54.097	1.210
130 °C	27.290	0.023	85.402	1.750
160 °C	14.016	0.474	3.206	0.551
175 °C	0.659	0.392	40.751	0.013

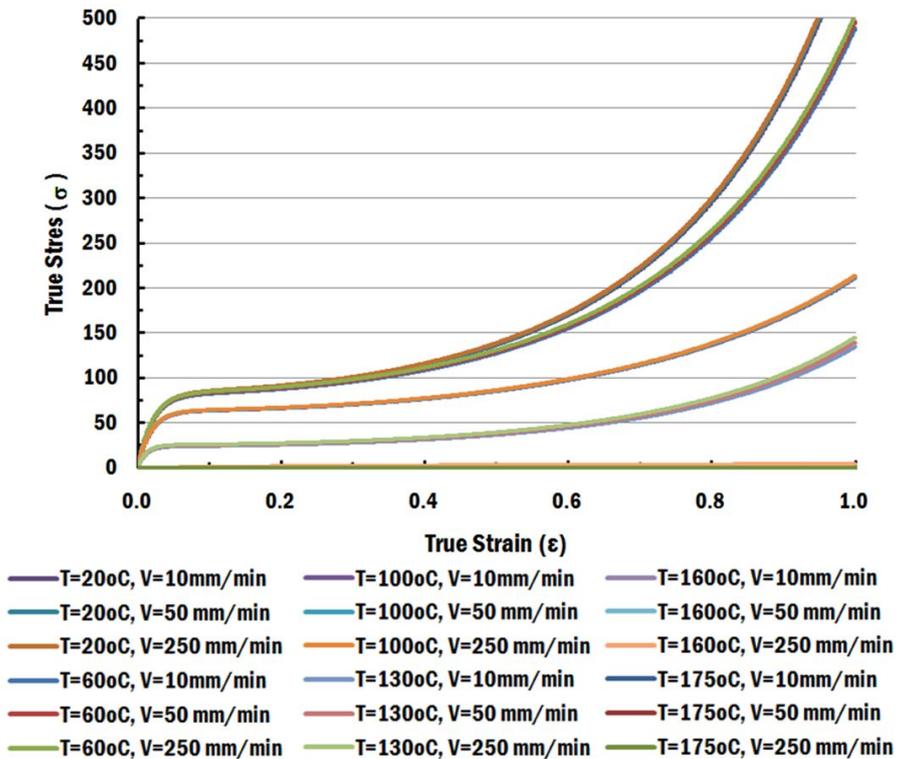


Fig. 26 True strain-true stress curves for different G'sell models

제 2 절 반응기 케이스 유한요소 해석

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스를 이용하여 제품 제작 시 진공 열성형 공정을 이용하여 성형하고자한다. 진공 열성형 공정은 금형의 형상, 성형 공정 조건, 성형재료의 종류, 두께 등이 제품의 성형성에 가장 크게 영향을 미친다. 그러므로 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 설계와 공정조건의 개발을 위하여 금형에서는 형상 변형, 공정에 있어서는 공정 설계, 성형압력 및 성형 시간 변수의 영향성을 분석/고찰하여 최적의 금형설계안과 공정설계안을 도출하고자 한다. 본 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 상용 프로그램인 PAM-FORM 2011 이다.

Fig. 27 는 앞서 설계된 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 3 차원 유한요소 해석에 대한 성형해석 설계이다. 평판형 광생물 반응기 케이스 제작의 경우 케이스 내부에 대해 두께가 고르게 분포하여야하기 때문에 양각 금형으로 설계하여 유한요소해석을 수행하였다. 이 유한요소해석을 통하여 광생물 반응기 케이스에 두께분포, 온도변화 및 변형률에 관하여 예측하고 분석/고찰하고자 한다. 진공성형 공정 순서는 중력(Gravity), 성형(Stamping), 진공성형(Vacuuming)의 순서로 진행되었다. 중력 공정에서는 판재에 부여되는 중력을 수행하고, 성형 공정에서는 중력에 의해 처진 판재에 금형이 이동하면서 변형이 발생하는 것이다. 이중 가장 중요한 공정인 진공성형 공정은 판재에 진공압력인 0.1 MPa의 압력이 작용하며 케이스를 성형하게 된다.

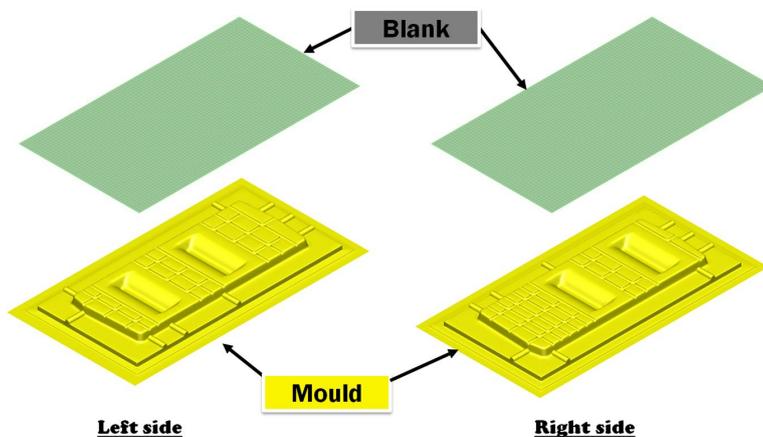


Fig. 27 FE model of thermoforming analysis

Table 4 는 케이스 진공 열성형을 위한 초기 판재 및 금형의 유한요소 격자종류, 유한요소격자수 및 절점수이다. 초기 판재의 크기는 1,650 mm X 900 mm 초기형상은 사각 판재 형상으로 구성되어 있다. 판재의 성형중 격자의 세분화 수준 (Refinement lever) 은 3 을 적용하였다. 유한요소 해석 조건은 성형압력 0.1 MPa, 초기 판재 온도는 175 ℃, 판재의 초기 두께 4.5 mm, 진공압력 시간 30 sec 를 적용하여 해석을 수행하였다.

Table. 4 Meshs of thermoforming analysis

Part	Element type	Initial no. of elements (EA)	Initial no. of nodes (EA)
Blank	Shell	3,818 EA	3,948 EA
Mould	Shell (Rigid surface)	24,774 EA	22,500 EA
Table		28,592 EA	26,448 EA

진공 열성형 공정에 있어서 첫 번째 중력 공정이다. 초기 판재 두께 변화에 영향을 주는 해석공정으로 해석 시간은 60 초로 하여 중력에 의한 변형 해석을 수행하였다. Fig. 28 는 중력 공정 후 판재의 두께 분포에 대한 결과이다. 유한요소해석 결과 판재의 중앙 부분에 중력에 의해 84 mm 의 처짐이 발생하였다. 두께 분포에 있어서 최소 두께가 4.37 mm 로 중앙부분에서 가장 얇아지는 것을 알 수 있었다.

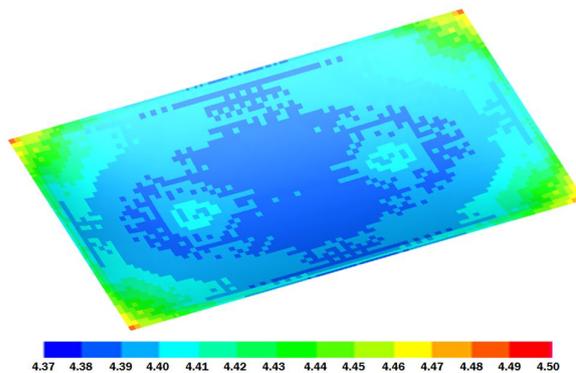
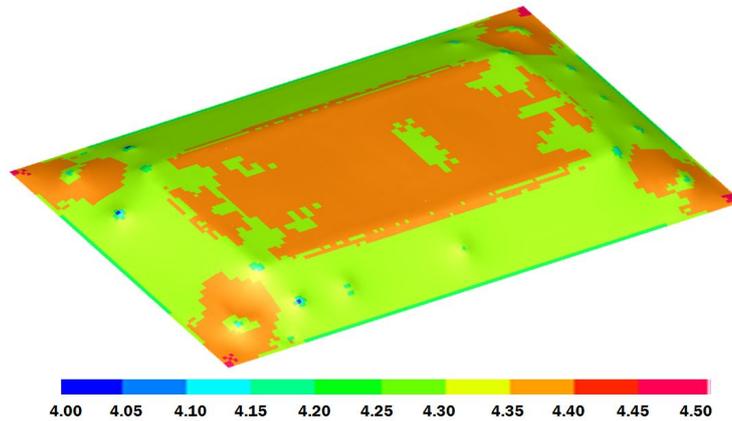
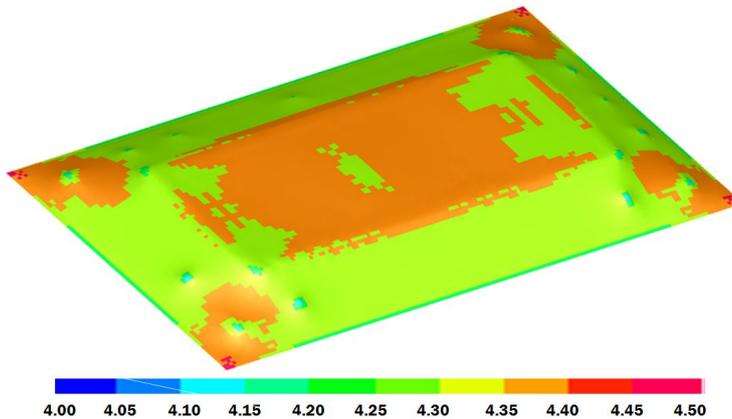


Fig. 28 Thickness distribution of the deformed PC sheet after the gravity step

진공 열성형 공정에 있어서 두 번째 성형 공정이다. 성형 공정은 금형을 상승하여 판재를 스트레칭 시키는 공정이다. 금형을 161 mm 상승시켜 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 29 은 성형 공정 후 판재의 두께 분포에 대한 결과이다. 판재의 두께 분포에 있어서는 제품의 연결부 부분의 끝에서 두께가 4.0 mm 이내로 가장 얇아지며 반응기 케이스 내부가 되는 부분에서 두께 4.3 mm 내외의 두께 분포를 나타내었다. 또한 왼쪽과 오른쪽의 판재를 비교에 있어서 격막의 지지구조의 형상이 두께 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



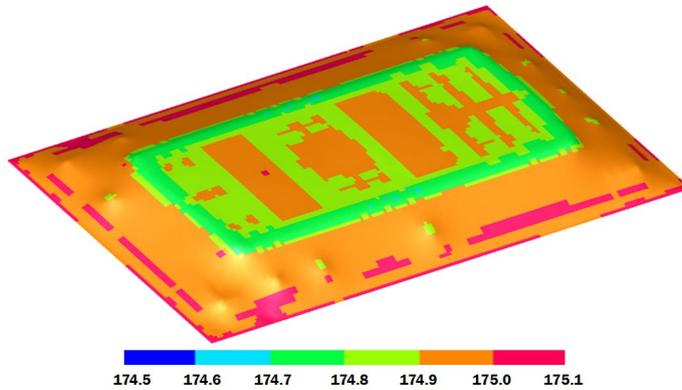
(a) Left side



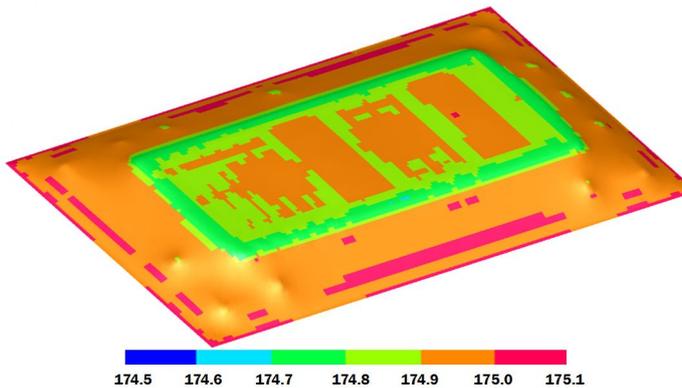
(b) Right side

Fig. 29 Thickness distribution of the deformed sheets after stamping process

Fig. 30 은 성형 공정 후 판재의 온도 분포에 대한 결과이다. 금형의 상승으로 인하여 판재가 접촉하기 시작하면서 금형 온도에 따라 판재의 온도가 하강되는 현상이 나타나기 시작하였다. 판재의 온도 분포에 있어서는 금형과 접촉이 가장 먼저 일어나는 반응기 케이스의 미세조류/배지액 저장부와 연결부 부분에 있어서 온도가 가장 낮게 나타났다.



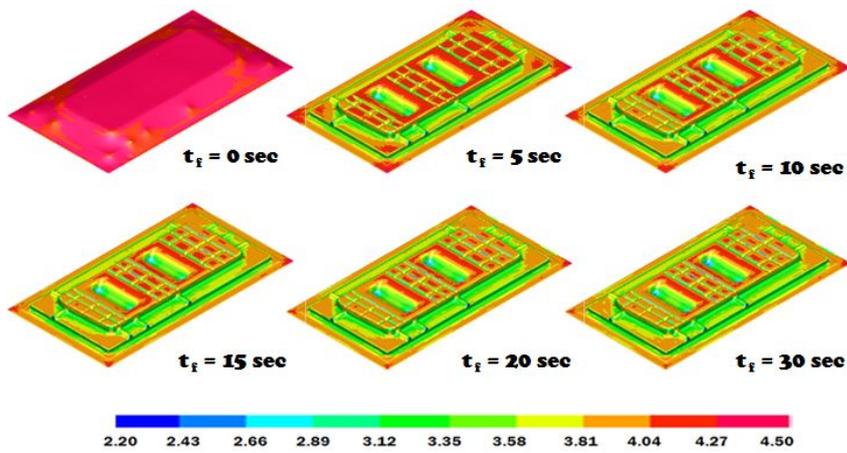
(a) Left side



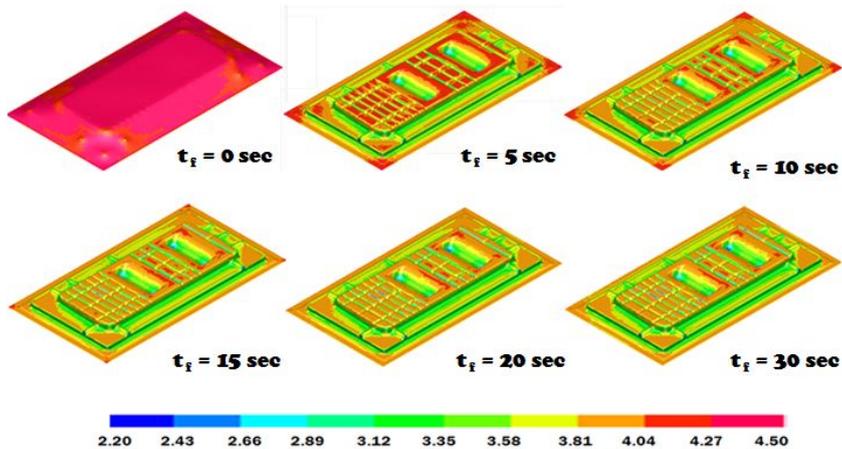
(b) Right side

Fig. 30 Temperature distribution in the deformed sheets after stamping process

진공 열성형 공정에 있어서 세 번째 진공성형 공정이다. 진공성형 공정은 판재에 진공압력을 부여하여 판재를 성형하는 공정이다. Fig. 31 는 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 진공성형 공정을 통해 얻어진 각 성형시간 (t_f) 에 따른 판재의 두께 분포이다. 케이스의 두께 분포는 강성을 결정하는 가장 중요한 공정으로 형상이 급격하게 변하는 격막의 지지구조 및 연결부를 제외한 나머지 부분에 있어서는 4.0 mm 내외의 두께 분포를 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 격막의 지지구조에서는 2.6 ~ 3.6 mm 의 두께 범위를 보이고, 보강재 구조에 있어서는 2.4 ~ 3.4 mm 의 판재 두께 범위를 나타내었다.



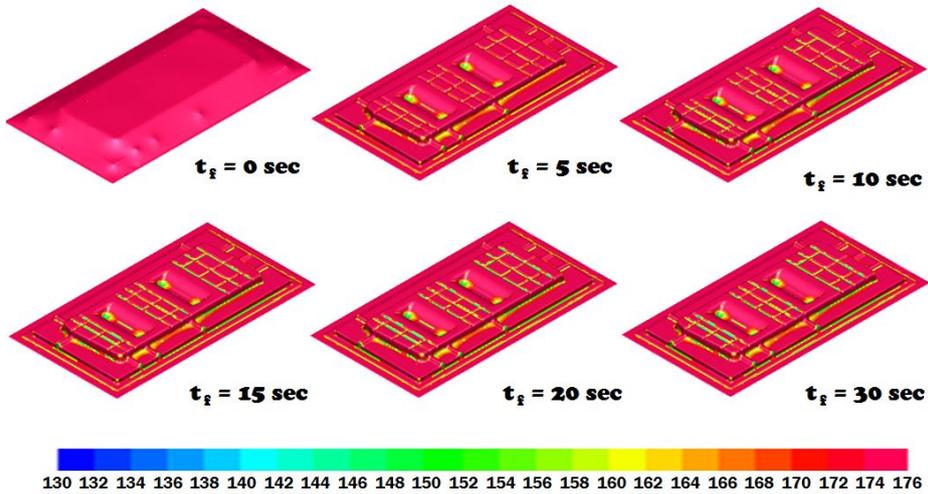
(a) Left side



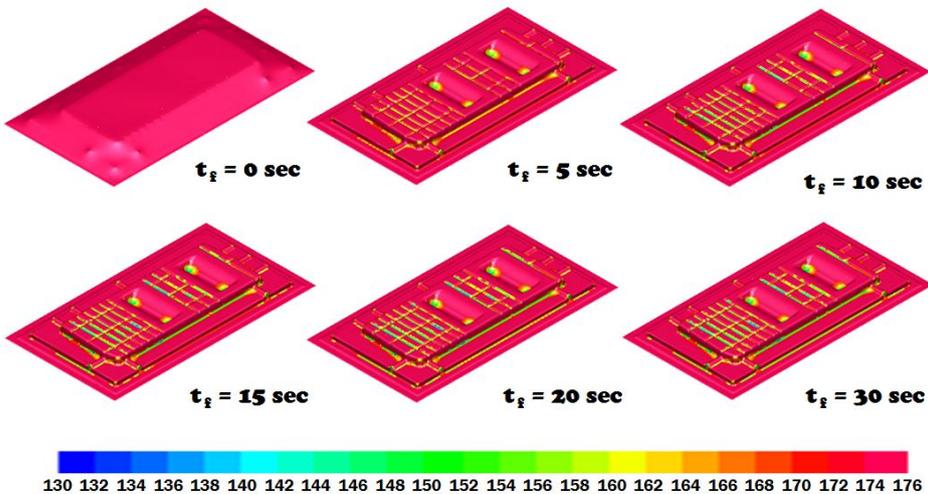
(b) Right side

Fig. 31 Thickness distributions in the deformed sheets for vacuuming process

Fig. 32 는 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 진공 해석 공정을 통해 얻어진 판재의 온도분포이다. 케이스의 미세조류/배지액 저장부의 경우 170 °C 이상의 고온의 분포를 보이는 것을 알 수 있었다. 하지만 보강재 부분과 격막의 지지구조의 경우 온도가 시간에 따라 변하게 되며 진공 시간이 15 초 이상의 경우 판재 재료인 PC 재료의 유리전이온도인 150 °C 이하로 감소되기 시작하는 것을 알 수 있었다.



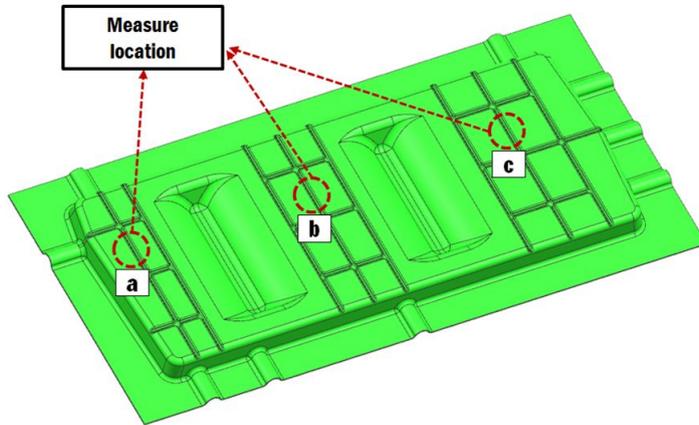
(a) Left side



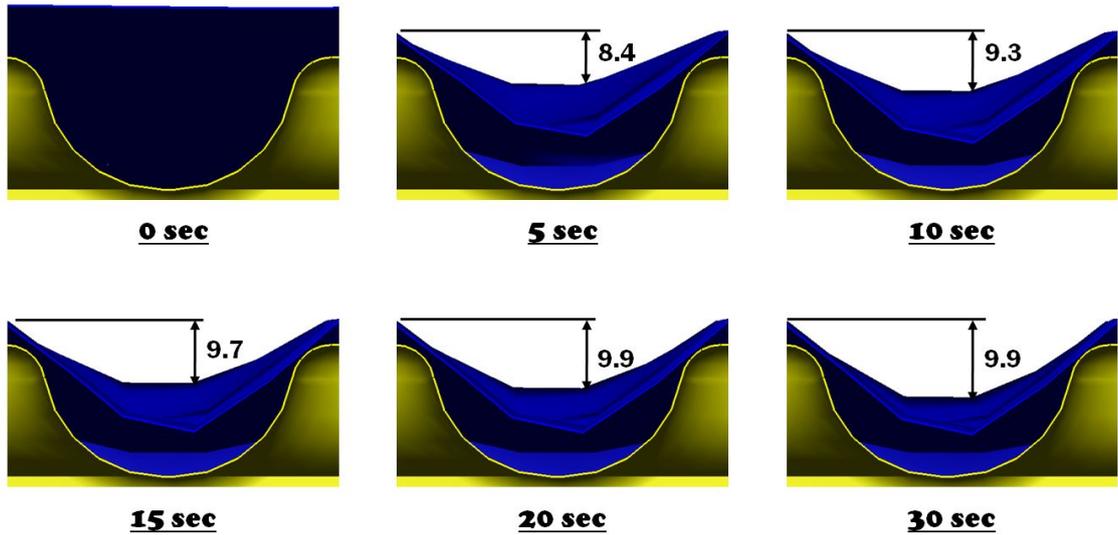
(b) Right side

Fig. 32 Temperature distribution in the deformed sheets for vacuuming process

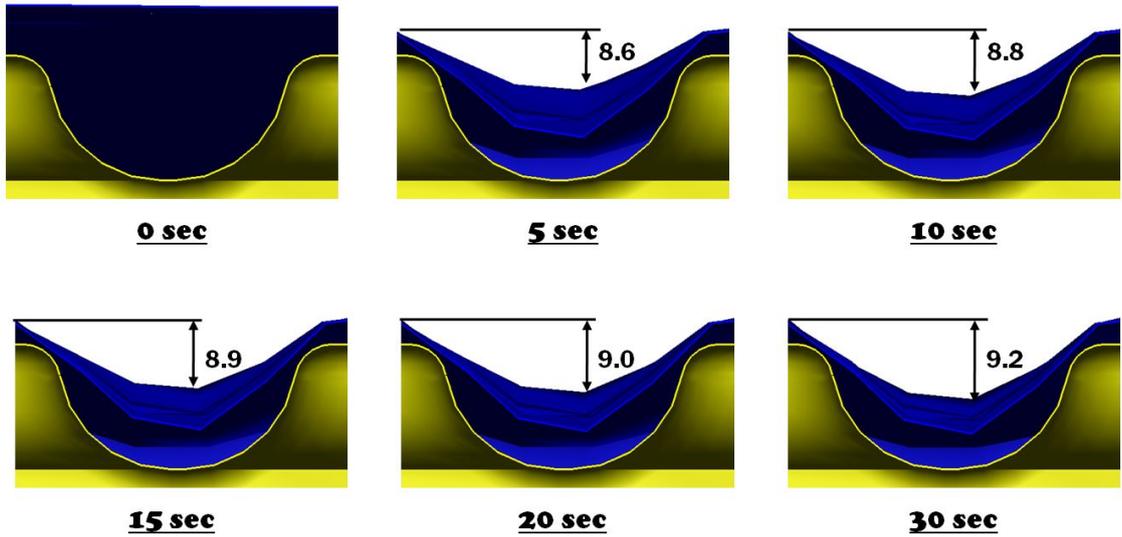
Fig. 33 와 34 는 평판형 광생물 반응기 케이스에 대한 진공 해석 공정을 통해 얻어진 보강재의 깊이 결과이다. 케이스의 성형성을 평가하기 위하여 보강재 부분의 성형 깊이를 확인이 중요하다. 이를 확인하기 위하여 각각의 시간별 보강재 깊이를 확인하였다. 보강재 구조를 통하여 성형에 있어서 성형 압력이 부족하여 미성형이 발생하였다.



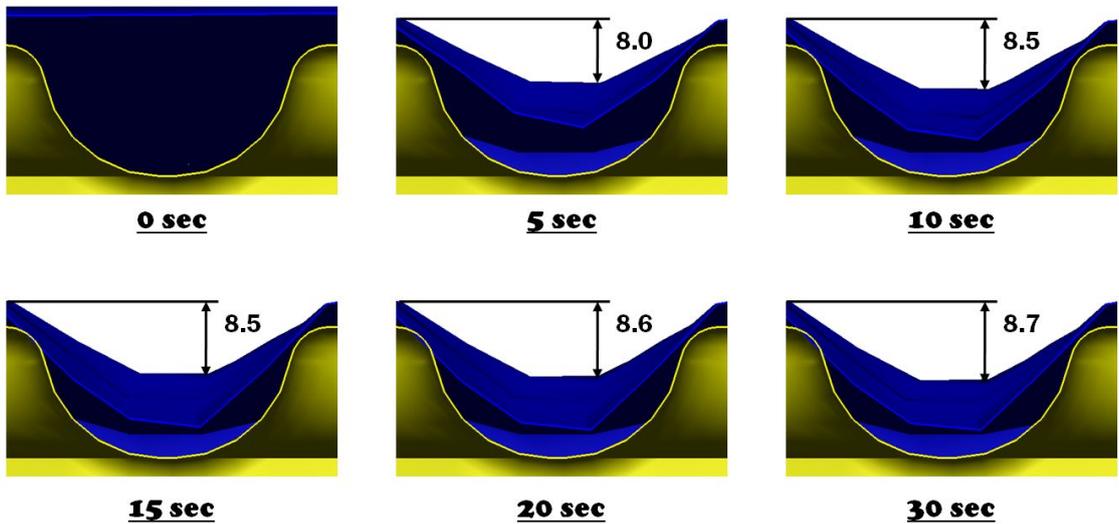
(a) Measured location of depth of stiffener



(b) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-a)

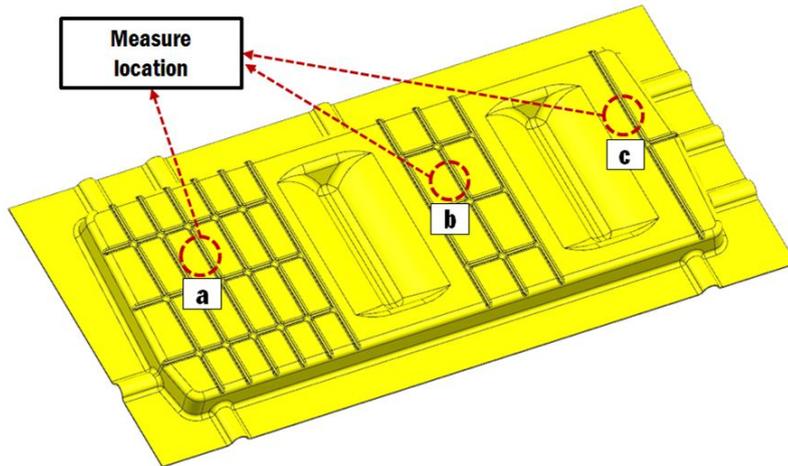


(c) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-b)

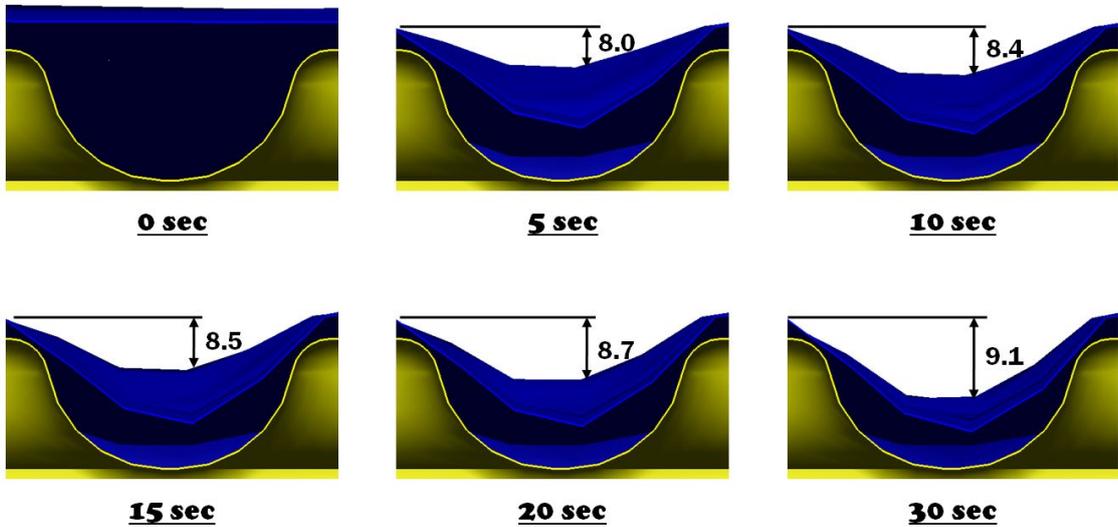


(d) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-c)

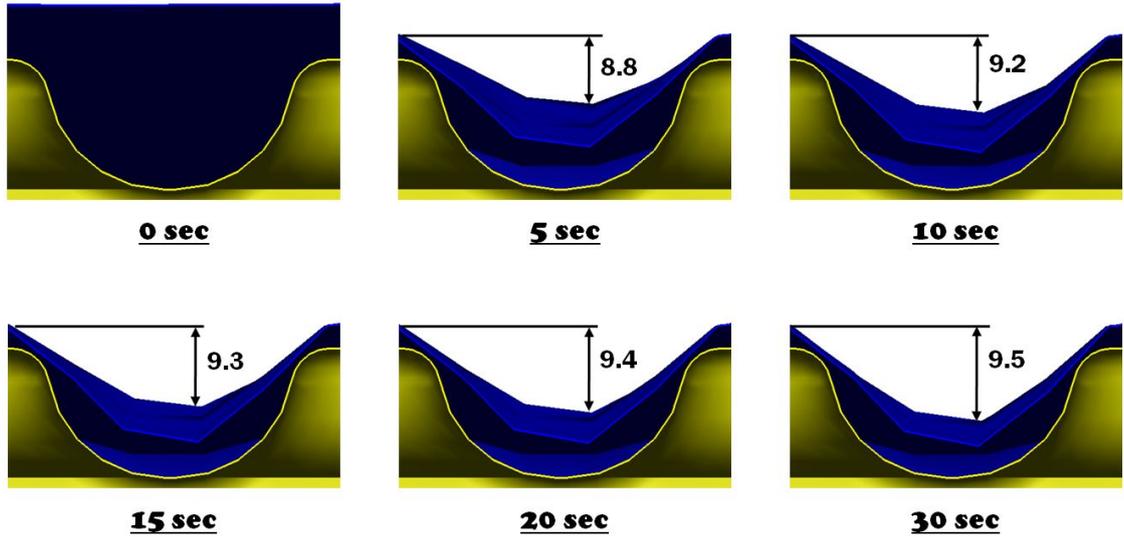
Fig. 33 Estimated depth of stiffener for vacuuming process (Left side)



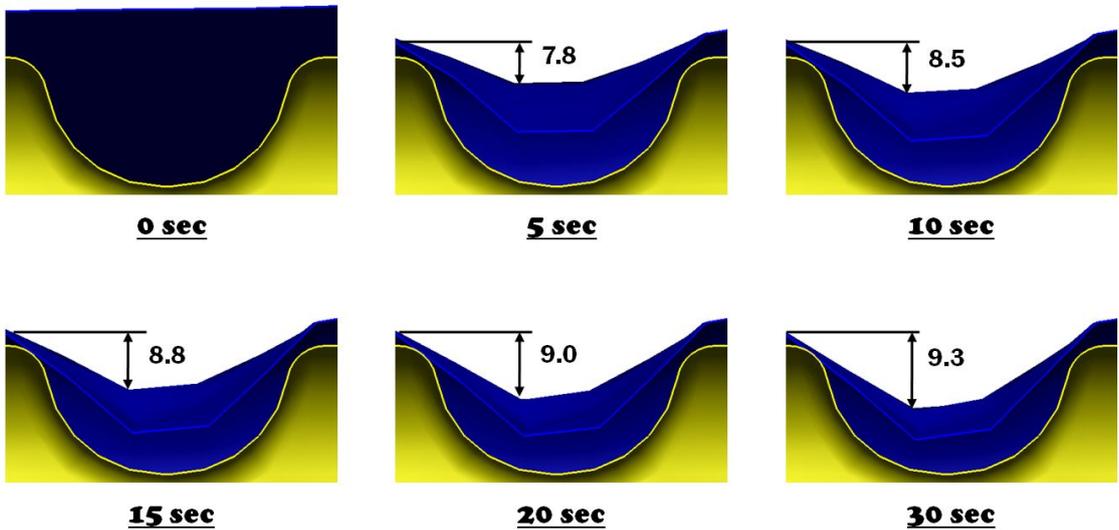
(a) Measured location of depth of stiffener



(b) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-a)



(c) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-b)



(d) Depths of stiffener for different vacuuming times (Location-c)

Fig. 34 Estimated depth of stiffener for vacuuming process (Right side)

유한요소 해석결과를 이용하여 PC 재료의 초기 판재 두께가 4.5 mm 에서 30 초까지 성형 후 최대 두께는 4.5 mm 최소 두께는 2.2 mm 까지 성형되었다. 성형 최대 두께 부분은 성형 클램프 영역에서 두께가 변하지 않고 초기 두께가 그대로 유지하는 것

을 확인할 수 있었다. 하지만 트리밍된 실제 필요로 하는 평판형 광생물 반응기 케이스의 최대 두께 부분은 반응기 내의 저장부에서 4.0 mm 로 반응기 내부에 상면에 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 최소 두께 부분은 드로잉 깊이가 가장 깊은 격막의 지지 부분에서 가장 크게 변형이 발생함을 알 수 있었다. 보강재의 시간에 따른 깊이 변형은 Stamping 공정을 통하여 판재가 금형 위에 위치하게 되며 30 초 성형 후 판재의 성형 깊이는 6.4 mm 로 성형 후 거리가 최소화됨을 알 수 있었다. 성형 깊이가 가장 깊은 반응기 내부에 속하는 격막의 지지구조에 최소 두께가 발생하지만 변형에 의한 잔류응력이 증가하기 때문에 격막 부분에 두께는 얇지만 강성이 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 재료의 온도 분포는 격막의 지지구조와 보강재구조에 있어서 판재 재료의 유리전이 온도 이하로 감소시키기 위하여 최소 15 초 이상의 진공압력을 부여하여 냉각 시 수축 및 잔류 응력에 의한 형상 복원 가능성을 낮출 것으로 사료된다.

제 4 장 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 설계 및 진공 열성형 실험 특성 분석

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 금형 설계

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스 성형에 있어서 금형을 설계하였다. 진공 열성형 공정은 낮은 압력에서 성형이 이루어지기 때문에 금형의 재료가 다양하다. 금형의 재료는 알루미늄, 나무재질의 하드우드, 에폭시 재료, 열경화성 수지 등 이용하여 금형을 제작 가능하다. 열성형 금형의 설계는 일반적으로 측면면에 $2^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 의 빼기구배를 주어 설계한다. 이 빼기구배는 진공 열성형 후 제품의 취출을 용이하게 하도록 하기위해 주어지는 값이다. 금형 형상에 있어서도 판재의 두께 분포에 따라 음각 금형과 양각 금형으로 나눌 수 있다. 음각 금형의 경우 열성형에서 가장 많이 사용하는 금형으로 측면면에 두께 분포가 중요한 경우 음각 금형을 사용한다. 양각 금형의 경우 내부에 명확한 표면 또는 정밀한 치수 조절이 필요할 때 사용한다. 이러한 이유는 판재가 금형과 접촉하는 부위가 제품의 내부가 되기 때문이다. 양각 금형을 이용하여 성형을 하는 것을 드로잉의 깊이를 성형 후 시트의 두께 분포가 과도하게 얇아짐 없이 만들 수 있다는 장점에 있어 성형 후 두께 균일성은 음각 금형에서 만든 것보다 우수하다. 적절한 금형 형상으로 금형을 가공한 후 홀 가공을 해야 한다. 홀 가공은 금형과 판재 사이에 공기를 배출하기 위하여 가공을 하는데 홀의 크기와 수는 판재의 종류와 제품형상에 의존적이다. 홀 크기가 클 경우 제품 표면에 흔적이 남는 현상이 발생하므로 홀 크기와 개수를 최소화하는 것이 가장 이상적인 금형 설계/제작 방법이다. 금형을 설계함에 있어 가장 중요한 부분은 금형의 코너 부분인데 이는 판재가 금형과 닿게 되는 부분으로 코너 반경 값이 적으면 스트레스가 집중되어 판재를 성형에 있어 부분이 약해지게 되어 큰 코너 반경 값을 주어 코너 부분을 두껍고 강하게하여 스트레스를 줄여야한다. 또한 금형 설계 시 영향을 미치는 또 다른 원인 중 하나는 성형 시 주름 현상이다. 주름 현상은 금형의 기본영역과 관련하여 성형 깊이가 너무 깊을 경우, 최소 경사각이 너무 작아 모서리가 수직일 경우, 내부 형상이 서로 너무 인접해 있는 경우에 이러한 현상이 발생한다. 또한 영향을 주는 요인은 경사 각도인데 이는 금형의 표면 품질 및 성형 깊이 등 여러 가지 요인에 따라 각도 변화주어야 한다. 경사각은

판재 성형 후 냉각에 의한 수축 시 금형에서 쉽게 취출 할 수 있도록 5° 이상의 값을 주어야 한다. 판재 재료에 따라 폴리카보네이트나 폴리스틸렌과 같은 비결정성 재료는 최소 3° 이상의 각을 주고, 폴리에틸렌과 같은 결정성 재료에서는 최소 5° 이상의 경사각을 필요로 한다. 금형 형상에 있어서도 경사각을 다르게 하는데 양각 금형의 경우 각을 최소 5° ~ 7°, 음각 금형의 경우 최소 2° ~ 3° 의 각을 부여하여야 한다.

금형 제작은 PCV (Polyvinyl chloride) 재료를 사용하여 제작하였다. 또한 Fig. 35 는 평판형 광생물 반응기 케이스를 이용하여 성형 시 발생 가능한 수축을 고려하여 1.05 mm 의 오프셋 간격을 주어 금형을 설계하였다.

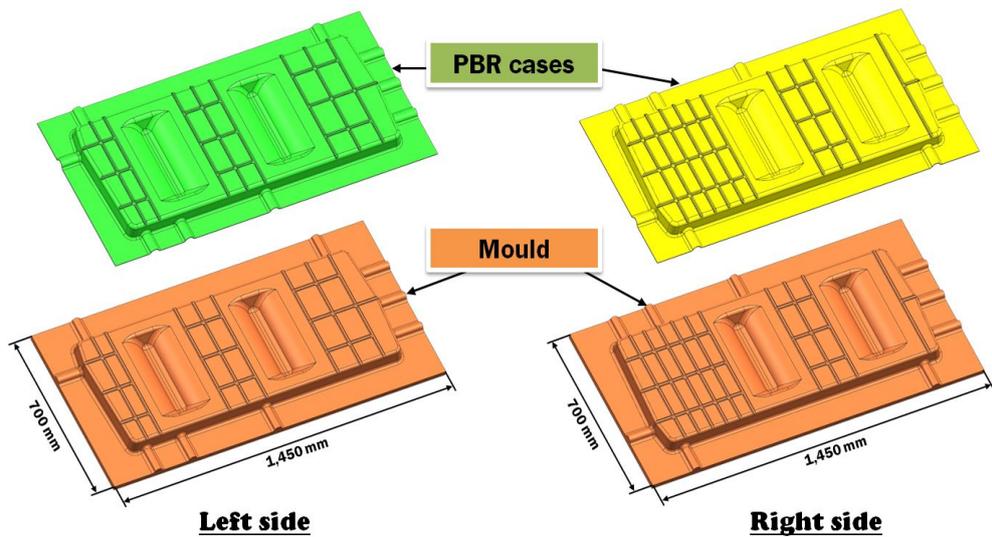
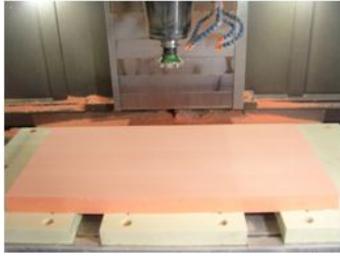


Fig. 35 Design of vacuum forming mould

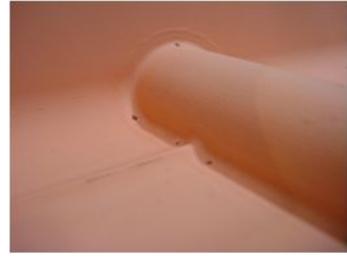
Fig. 36 은 PVC 재료를 이용하여 CNC 가공한 금형을 나타냈다. 초기 1,450 mm X 700 mm 의 PVC 판재를 CNC 머신을 이용하여 가공하였다. 또한 가공 후 진공 열성형이 가능하도록 금형에 $\varnothing 3$ mm 의 구멍을 왼쪽 반응기 케이스에 800 개, 오른쪽 반응기 케이스에 810 개의 구멍을 가공하여 진공 압력이 금형을 통하여 판재에 전달될 수 있도록 금형을 제작하였다. 구멍 가공에 있어서 형상이 어려운 보강재 부분과 격막의 지지구조에 구멍을 조밀하게 가공하여 진공 열성형 시 원활한 제작이 될 수 있도록 하였다.



(a) PVC board



(b) CNC machining



(c) Hole machining

Fig. 36 Manufacturing process of vacuum forming mould for the flat panel photobioreactor case

Fig. 37 은 CNC 가공을 통하여 완성된 평판형 광생물 반응기 케이스의 금형을 나타내었다. 최종 금형이 제작되었으며, 소요시간은 총 7 일간 가공을 통하여 금형을 제작하였다.



(a) Left side

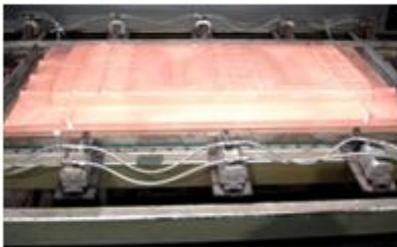


(b) Right side

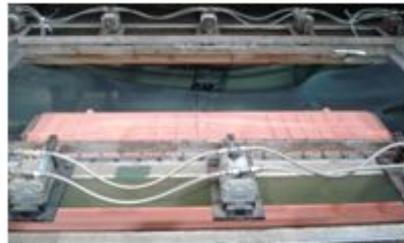
Fig. 37 Fabricated mould set for the flat panel photobioreactor case

제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 실험

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 열성형 실험을 통하여 케이스를 제작하였다. 케이스 진공 열성형 실험은 재료의 가열, 재료의 이동, 금형의 이동에 의한 스트레칭, 진공성형, 냉각 및 취출의 6 가지의 단계로 실험을 수행하였다. Fig. 38 는 진공 열성형의 대표적인 공정 순서를 나타낸 것이다. 판재의 예열 단계에서는 초기 판재재료를 클램핑하여 열히터에 이송시켜 판재를 유리전이온도이상으로 예열시킨다. 스탬핑 공정에서는 예열된 판재를 금형을 이용하여 스트레칭 시키는 공정으로 금형을 상승시켜 재료를 진공 열성형 전 미리 스트레칭 시키는 단계이다. 진공 성형 공정은 스트레칭된 판재를 진공압을 이용하여 판재를 성형하는 공정이다. 취출 공정은 제품을 금형에서 분리시키는 공정으로 성형된 제품을 유리전이온도 이하로 냉각 후 금형의 진공 홀에 진공성형과 반대로 공기를 불어 넣어 제품을 분리 후 금형을 하강시켜 분리시킨다. 진공 열성형 실험 시 공정조건은 앞서 수행 시 유한요소해석과 동일한 공정 조건에서 실험을 수행하였으며 평판형 광생물 반응기 케이스 진공 성형을 위한 공정 조건은 Table 5 와 같다.



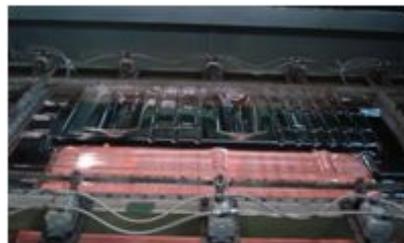
(a) Preheating of blank



(b) Stamping



(c) Vacuum forming



(d) Ejection

Fig. 38 Procedure of thermoforming of the flat panel photobioreactor case

Table. 5 Conditions of thermoforming experiments

Blank thickness	Forming temperature	Vacuum forming time	Vacuum forming pressure	Heater temperature	Ejecting temperature
4.5 mm	175 °C	30 sec	0.1 MPa	290 °C ~310 °C	110 °C

진공 열성형 실험에 사용한 진공 열성형기는 MJ-2012 로 Fig. 39 와 같다. 진공 성형기를 이용하여 실험 시 가열 공정은 매우 중요한 공정이며, 성형물의 양호 및 불량에 매우 중요하다. 판재의 가열은 히터를 이용한 복사열에 의한 판재 가열을 사용한다.



Fig. 39 Thermoforming machine

제 3 절 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 특성 분석

본 연구에서는 시성형된 평판형 광생물 반응기 케이스에 대하여 품질 및 특성을 분석/고찰하고자 한다. 평판형 광생물 반응기 케이스의 특성을 분석하기 위하여 진공압력 유지 시간에 따른 케이스의 형상변화, 보강재 깊이변화 및 반응기 케이스 절단면의 두께 분포 총 3 가지를 이용하여 평판형 광생물 반응기 케이스의 제품 특성을 분석하였다.

진공 열성형의 진공압력 부여 시간별 형상 특징을 비교하기 위하여 진공압력 유지시간을 각각 5, 10, 15, 30 초로 하여 진공압력 시간을 부여하였다. Fig. 40 는 각각 진공압력 부여 시간에 따른 반응기 케이스 형상을 나타낸 것이다. Fig. 40에서 t 는 진공성형 실험 시 진공 압력이 작용하는 시간이다. 진공 압력을 유지하는 시간이 30 초 보다 적게 유지 시 케이스 내부 모서리 부분 및 연결부 부분에서 미성형이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 진공 열성형 시 진공압력이 30 초 미만일 경우 판재가 케이스 형상을 유지하다가 진공압력이 제거하게 되면 냉각 시간 동안 판재가 형상이 천천히 회복되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 진공성형 시 30 초 미만의 성형시간에서 진공압력이 제거되면 판재의 잔류응력에 의하여 판재가 서서히 회복되는 것을 알 수 있었다.

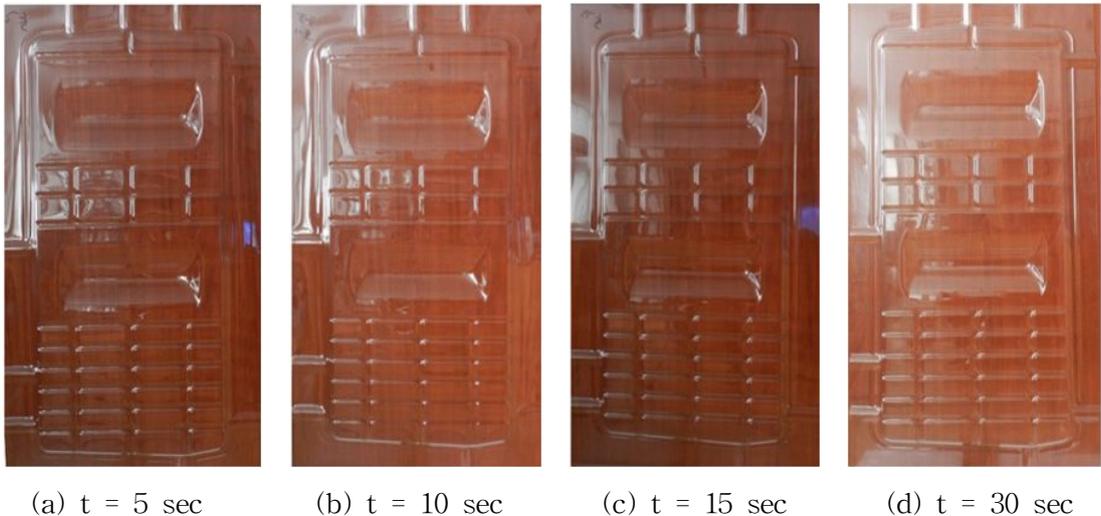


Fig. 40 Thermoformed flat panel photobioreactor cases for different vacuum forming time

앞서 제 2 장 2 절을 통해 수행한 반응기 케이스의 구조/강성해석을 통하여 케이스에 변형형상에 있어서 가장 중요한 요소는 보강재의 깊이가 가장 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통해 보강재 형상의 성형성 평가를 위하여 케이스 깊이 측정을 수행하였다. 열성형 실험을 통해 제작된 반응기 케이스에 대하여 보강구조의 깊이 분포를 측정하였다. Fig. 41 은 반응기 케이스의 깊이 측정 위치를 나타낸 것이다.

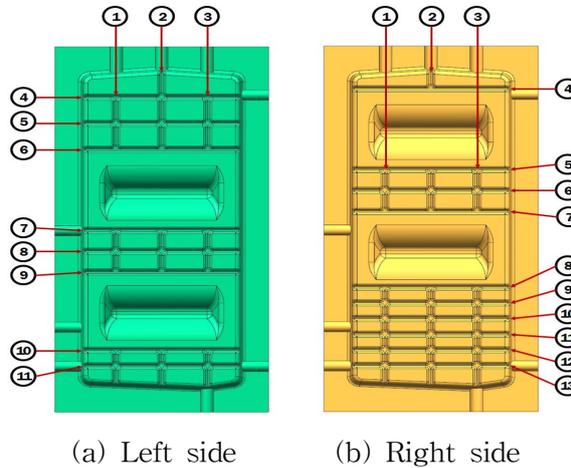


Fig. 41 Measure locations for the depth of stiffener

평판형 광생물 반응기 케이스의 깊이 측정 결과는 Fig. 42 과 같다. 왼쪽 케이스는 7.3 mm ~ 8.8 mm 의 분포를 보인다. 또한 오른쪽 케이스는 8.6 mm ~ 9.8 mm 로 평균적으로 0.7 mm ~ 1.7 mm 로 오른쪽 케이스가 더 깊게 성형됨을 알 수 있었다.

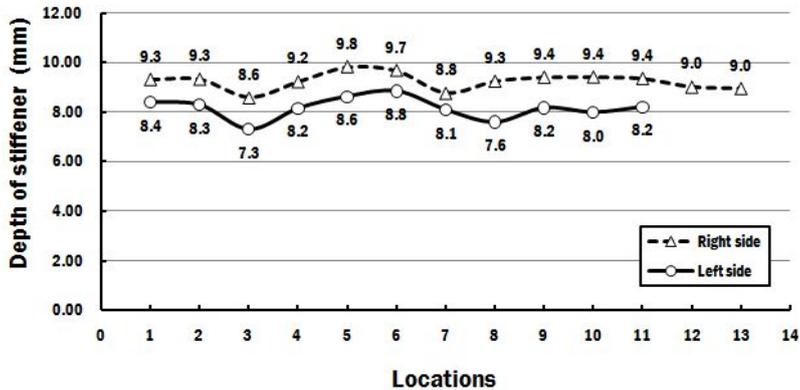
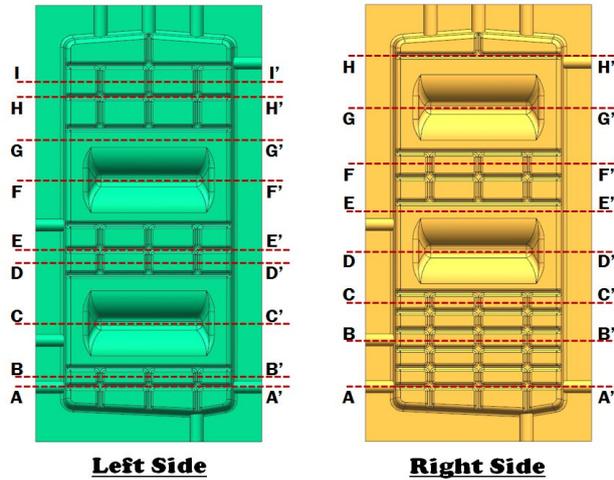
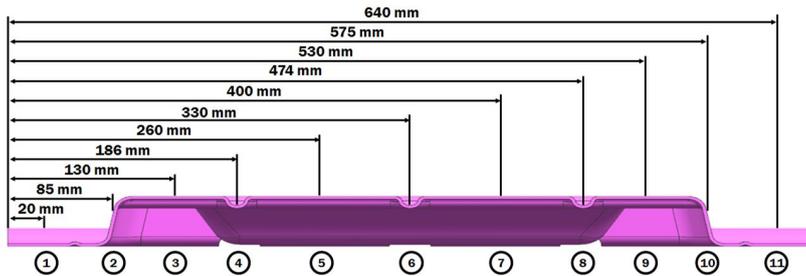


Fig. 42 Depths of stiffener for different measured locations

평판형 광생물 반응기 케이스의 성형성을 평가하기 위한 방법으로 케이스 두께 측정 방법이 있다. 케이스의 성형 시 진공 압력을 30 초 동안 유지 시킨 열성형 공정으로 제작된 케이스의 두께 분포를 측정하였다. Fig. 43 은 단면 두께를 측정하기 위한 위치를 나타낸 것이다.



(a) Measured lines

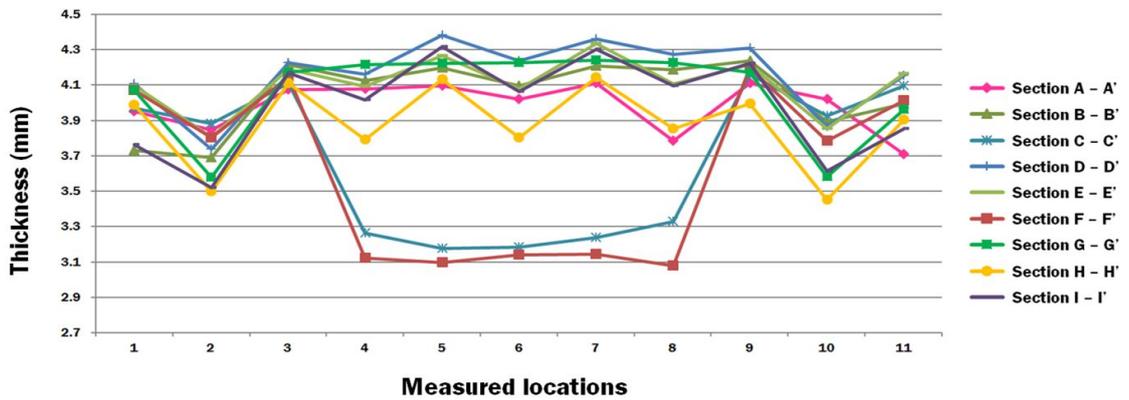


(b) Measured locations

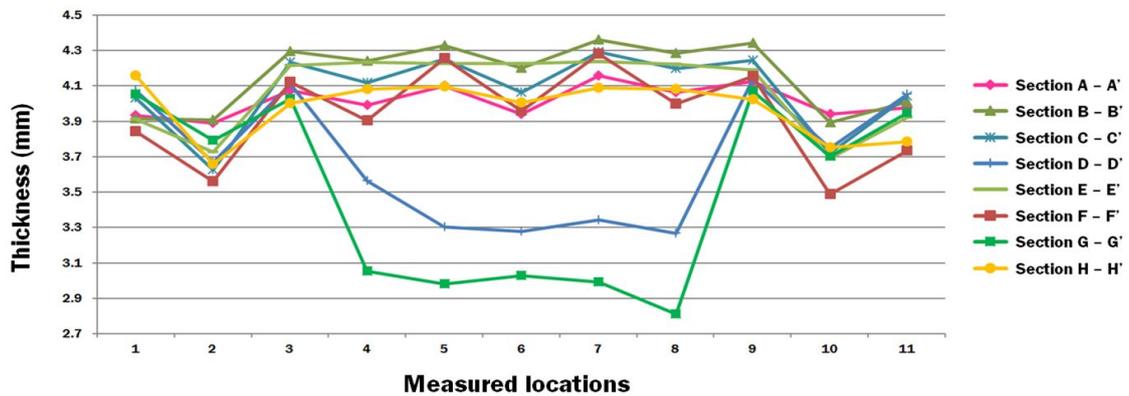
Fig. 43 Measured regions for the thickness of the thermoformed flat panel photobioreactor cases

Fig. 44 은 측정한 두께 분포에 대하여 측정한 결과를 그래프로 나타내었다. 케이스의 단면별 두께 분포를 고찰한 결과, 진공 압력을 30 초 동안 유지시켜서 제작한 평판형 광생물 반응기 케이스의 단면 형상이 설계한 데이터의 단면 형상과 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 또한 특징 형상인 격막의 지지 구조와 보강재 구조 및 연결부가 설계 형상과 유사하게 제작된 것을 알 수 있었다. 먼저 왼쪽 케이스의 두께 분포를 측정

한 결과, 평판형 광생물 반응기의 내부가 되는 평면형상의 경우 4.0 ~ 4.4 mm 의 두께를 나타내었다. 보강재 형상의 두께는 3.8 ~ 4.3 mm 의 범위로 측정 되었다. 격막 지지구조의 경우 3.1 ~ 3.3 mm 의 두께 분포를 나타내었으며, 연결부와 케이스 외곽의 융착 부분에 있어서는 3.7 ~ 4.2 mm 의 두께분포를 나타내었다. 오른쪽 케이스의 두께 분포의 경우 내부 평면 형상은 4.0 ~ 4.7 mm 의 두께 분포를 나타내고, 보강재 부분에 있어서는 3.8 ~ 4.3 mm, 격막 지지구조의 경우 2.8 ~ 3.6 mm, 연결부와 케이스 외곽부분은 3.8 ~ 4.2 mm 의 두께 분포를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 전체적인 형상에서 볼때 오른쪽의 케이스가 왼쪽의 케이스 보다 0.1 ~ 0.3 mm 정도 두껍게 측정된 것을 확인하였다.



(a) Left side



(b) Right side

Fig. 44 Thickness distributions of the thermoformed flat panel photo-bioreactor cases

PAM-FORM 해석결과와 진공 열성형 실험 결과 두께 측면에서 비교한 결과 격막 지지구조 부분을 제외하고 실험 결과가 해석결과보다 0.1 ~ 0.3 mm 정도 두께 나타났다. 이 결과로부터 변형이 가장 심한 격막 지지구조를 제외한 전체 형상에서는 해석 결과가 실제 성형 공정과 유사한 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다.

측정된 반응기 케이스 두께 및 성형 깊이를 이용하여 3 차원 재설계를 수행 하였다. 케이스 두께는 각 부분에 있어서 평균 두께를 적용하여 설계에 적용하였고, 보강재 부분의 깊이에 있어서 측정 결과 평균을 이용하여 각 부위에 수직/수평 보강재에 대하여 설계를 적용하였다. Fig. 45 은 3 차원 재설계된 반응기 케이스의 구조/강성해석을 수행한 결과이다. 초기 반응기 케이스 설계 시 제품의 두께를 4.0 mm 로 설계하였으나 실제로 제작된 반응기 케이스에 대하여 보강재 부분 및 격막의 지지구조에 대하여 4.0 mm 보다 두께가 얇아지는 현상이 발생하며, 보강재 깊이에 있어서도 초기 설계에 있어서 보강재 깊이가 9.0 mm 를 설계하였으나 실제 성형된 제품은 최대 8.6 ~ 6.1 mm 의 깊이 분포로 설계하였다. 이를 통하여 구조/강성 해석을 수행한 결과 반응기 케이스는 16.5 mm 의 최대 변위를 나타내었다. 왼쪽의 반응기 케이스의 구조/강성 해석 결과를 통하여 격막의 지지구조 역시 두께가 3.3 mm 이하의 두께 분포를 나타내었으나 실제적으로 최대 변형 형상에 있어서는 보강재 부분이 가장 많은 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다.

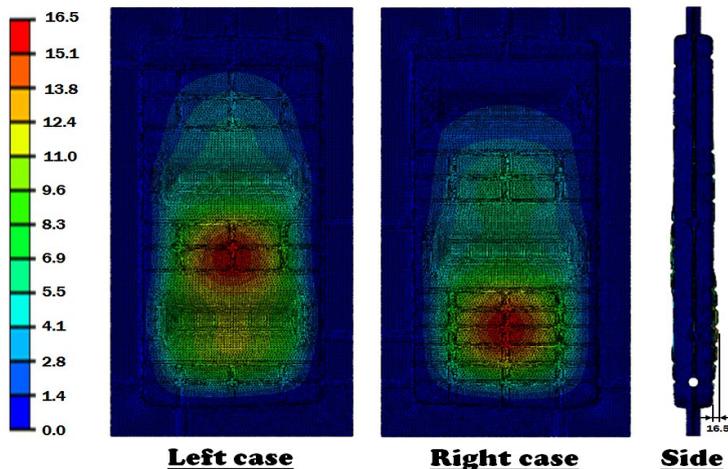


Fig. 45 Deflection distributions for finally designed flat panel photobioreactor cases

$$(S_F = 2.0)$$

재설계된 반응기 케이스의 응력 분포에 대하여 Fig. 46 과 같이 나타내었다. 내부압력에 대하여 오른쪽 케이스의 저장부 좌·우에서 최대 응력 52.2 MPa 의 응력 분포를 나타내었다. 이는 반응기 케이스 소재인 폴리카보네이트의 항복응력이 62 MPa 이므로 케이스 재료가 내부응력에 대하여 충분한 강성을 가지는 것을 알 수 있었다.

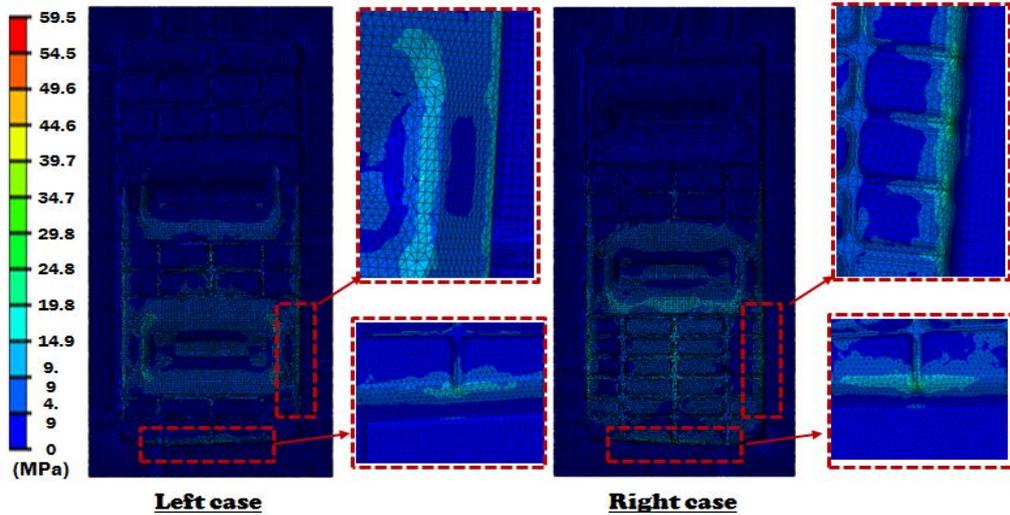


Fig. 46 Stress distributions for finally designed flat panel photobioreactor cases ($S_F = 2.0$)

평판형 광생물 반응기 케이스의 구조/강성해석 시 안전계수를 최초 2.0 을 적용하여 해석을 수행한 결과와 실제 적용하는 상용적으로 적용하는 안전계수 1.2 를 적용한 결과를 Table 6 과 같이 나타내었다. S_F 는 안전계수를 나타낸 것이다. 위 결과들로부터 평판형 광생물 반응기 케이스 및 금형 설계와 진공 열성형 공정을 적용할 경우 특징 형상을 가진 평판형 광생물 반응기 케이스를 제작할 수 있었다.

Table. 6 Comparison of deflections of design 6 with those of finally designs

Design 6	$S_F = 2.0$	$S_F = 1.2$	Final design	$S_F = 2.0$	$S_F = 1.2$
Left case	9.8	5.9	Left case	10.6	6.4
Right case	15.5	9.3	Right case	16.5	9.9

제 5 장 평판형 광생물 반응기 케이스 조립 및 배양 실험

제 1 절 평판형 광생물 반응기 케이스 기초 용착 실험

1. 기초 접합/용착 및 내압 실험

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스의 접합을 위하여 접합/용착 방법에 따른 케이스의 결합 특성변화에 대한 연구를 수행하였다. 평판형 광생물 반응기 케이스를 접합하기 위하여 여러 가지 방법을 용착 및 접착을 수행하였다. 본드를 이용한 접합 방법과 재료를 고온에서 분자 재료의 체인을 끊어서 새로운 체인을 형성시키는 용착 방법 2 가지 방법으로 구분하였다. 첫 번째로 접합방법에 대하여 분류하였다. 접합 방법의 종류는 이액형 본드, 마이티 퍼티, PC 본드 세 가지 종류로 수행하였다. 이액형 본드는 3M DP460 본드이고, PC 본드의 경우 MC 100 의 모델이다. 용착 방법은 열용착 방법과 초음파 용착 방법을 이용하였다. 열용착 방법은 재료를 유리전이온도 이상으로 올린 후 압력을 가하여 재료를 접합하는 방법이다. 초음파 용착은 열가소성 수지 재료를 고정구를 이용하여 고정 후 혼 (Horn) 을 이용하여 초당 1 만회 이상의 초음파 주파수로 일정한 진폭에 따라 플라스틱 부속품이 마찰되면서 용융, 압력에 의해 분자결합하여 응고되게 된다. 초음파 용착은 ACE-228HP 모델을 이용하여 사용하였다. Fig. 47 는 초음파 용착기를 나타낸다. 출력은 200 ~ 400 W, 주파수는 28 ~ 39 KHz, 가압 방법은 Hand press 방법, 냉각시간은 자연공냉 방법이다.



Fig. 47 Ultra sonic welding machine (ACE-228HP)

열융착은 Fig. 48 과 같은 실험 Set 으로 구성되어 있다. 열융착 히터는 내부에 냉각 채널을 설계하여 제작후 주물을 이용하여 설계하였다. 열융착 실험을 위하여 히터의 온도를 확인하기 위하여 융착 히터에 대하여 4 부분에 센서를 부착한후 열융착 실험을 통하여 실험시 온도를 측정하였다. 플라스틱 열융착을 위하여 일정 온도 후 압력을 가할 수 있도록 바이스에 고정 후 실험을 준비하였다.

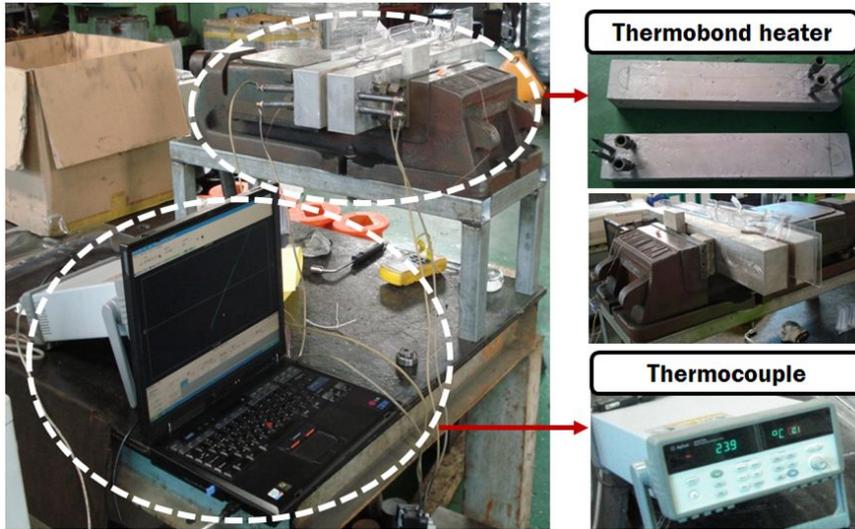


Fig. 48 Set-up of thermal welding experiments

열 융착 온도는 유리전이온도 이상의 조건에서 융착을 수행하였다. 또한 반응기 케이스 연결부 형상의 열융착 조건을 도출하기 위하여 온도 조건 및 히터간의 거리 및 설정 시간에 대하여 실험 조건을 설정하여 실험을 수행하였다. 히터의 온도는 155 ℃, 165 ℃, 175 ℃ 에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 49 는 각 조건별 실험 사진이다. 155 ℃ 조건에 있어서는 융착히터의 거리가 7.5 mm 이하로 좁혀지지 않음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 PC 재료의 충분한 연화가 이루어지지 않아 거리가 좁혀지지 않았으며 165 ℃ 에서는 융착히터 시간이 5 분 이상일 경우에만 융착이 이루어짐을 알 수 있었다. 175 ℃ 에서는 온도가 높아 재료에 기포가 발생함을 알 수 있었다.



(a) Welding temperature = 155 °C (b) Welding temperature = 165 °C (c) Welding temperature = 175 °C

Fig. 49 Result of thermal welding experiment

본딩 집합을 이용한 집합 방법은 이액형 집합은 접착영역에 접착제와 경화제를 섞은 액을 고르게 도포 후 C 형 클램프를 사용하여 시편을 고정시켰다. PC 집합제 시편의 경우 모세관 현상을 이용하여 집합제를 주입하였다. 마이티 퍼티 시편은 경화제와 마이티 퍼티를 반죽 후 시편에 고르게 퍼 다른 시편과 붙여 제작하였다. 3 가지의 집합 방법 모두 24 시간 동안 경화시켜 시편을 제작하였다.

위와 같은 5 가지의 방법을 사용하여 광생물 반응기 케이스 제작에 사용되는 재료인 PC 재료를 사용하여 200 mm X 200 mm 의 평판 형태로 두 개의 시편을 제작하였다. 이때 한 개의 시편에 구멍 가공을 하였으며 외측 50 mm 범위를 집합/융착 하였다. 집합/융착은 방법에 따라 5 가지의 방법으로 시편을 제작하였다. Fig. 50 은 제작된 시편을 이용하여 내압 실험 및 내수 특성을 분석하였다. 시편제작 방법에 있어서 초음파 융착 시편의 경우 초음파 융착기를 이용하여 10 초 동안 균일 간격으로 융착 하였고, 열융착 시편은 열융착 히터를 통하여 5 분 동안 설정 온도를 유지하여 7.5 mm 까지 압축하여 융착 하였다. 집합 방법은 위에서 설명한 방법으로 3 가지 시편을 제작하였다.

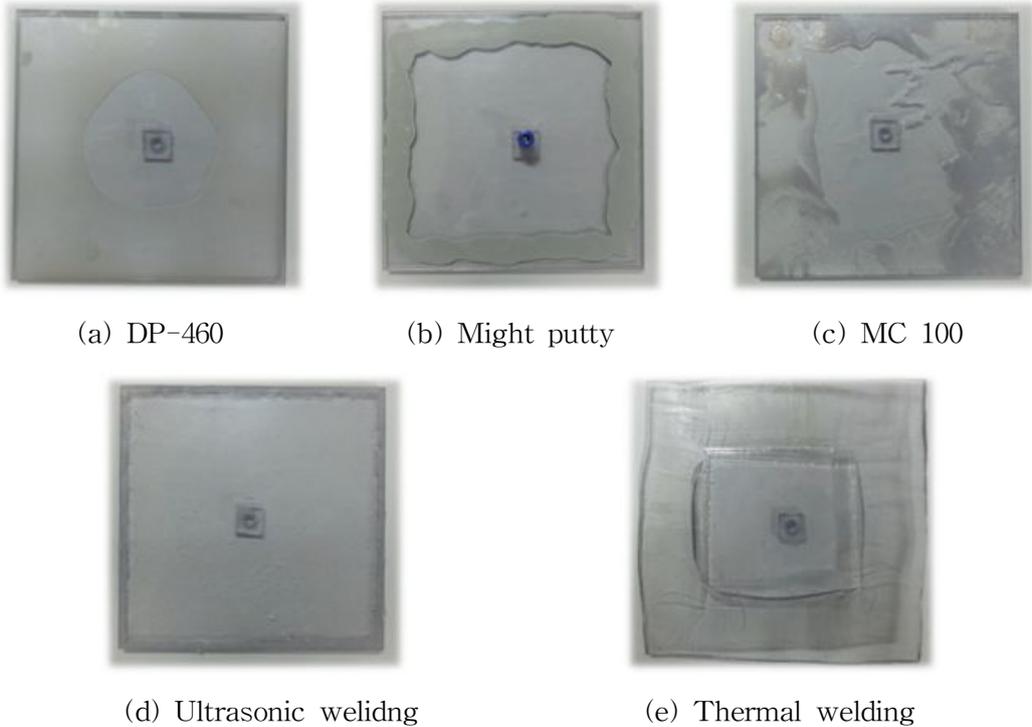


Fig. 50 Fabricated specimen for water proofing and pressure resistant experiments

내수 특성과 내압실험을 위해 다음과 같은 실험 Set 을 제작하여 실험 가능하도록 하였다. Fig. 51 은 용착 및 접합된 시편의 내압실험을 위하여 제작한 실험 Set 이다. 내압실험시 시편 내부의 기밀을 확인하기 위하여 수조에 서 내압실험을 수행하고 압력은 공압으로 공기압축기를 이용하여 압력을 부여하였다. 또한 시편에 부가되는 압력을 조절하기 위하여 압력 조절기를 부착하였다. 시편에 부가되는 압력을 확인하기 위하여 압력 게이지를 확인하며 실험을 수행하였다. Table 7 는 실험을 통해 얻어낸 결과 다음과 같다. 접합된 시편의 내압 강도는 이액형, 마이티 퍼티, PC 접합체 시편이 0.01 MPa 을 기준으로 각각 3 배, 5 배 28 배의 높은 내압 강도를 보이고, 용착된 시편의 경우 초음파 용착의 경우 0.01 MPa 경우 압력에 의해서 균일한 용착이 되지 않아 낮은 압력에 대해서도 기포가 발생하였다. 열용착 시편의 경우 0.36 MPa 의 높은 압력에 대해서 시편에 파손되지 않았다. 내수 특성 측면에서도 마이티 퍼티 시편이 수중 노출 18 일 만에 표면에서 접합체 분리현상이 일어나는 것을 제외하고 나머지 다른 시편에 대해서는 모두 양호한 결과를 나타내었다.

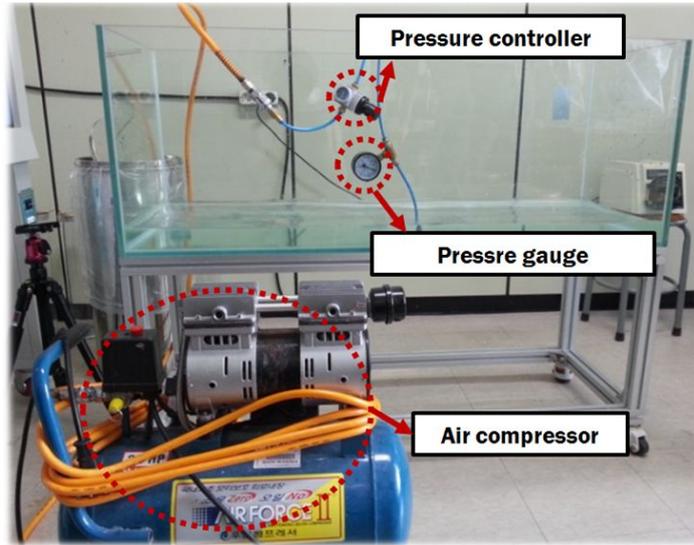


Fig. 51 Set-up of preliminary pressure resistant experiment

Table 7 Results of preliminary pressure resistant experiment

Joining technology	Water resistance	Pressure (MPa)	Location of crack initiation
DP 460	Good	0.05	Joined region
MC 100	Good	0.47	Specimen
Mighty putty	Bad	0.09	Joined region
Ultrasonic welding	Good	0.01	Joined region
Thermal welding	Good	0.36	Specimen

위 결과를 이용하여 접합/용착 특성을 분석하기 위하여 SEM 촬영을 통하여 결합특성을 분석하고자 하였다. Fig. 52 에서 나타난 것처럼 접착시편의 결합 특성을 분석한 결과, 이액형 접합제와 마이티 퍼티 시편은 시편 재료에 화학반응 없이 일반적인 접합 특성이 나타났으나 마이티 퍼티 시편에 있어서 국부적으로 접합이 안되는 부분이 발생하는 것을 확인 하였다. PC 접합제 시편은 접합면의 화학반응이 발생하여 시편의 접합 경계 없이 결합되는 것을 확인하였다. Fig. 53 은 용착 시편의 결합부의 특성분석을 한 결과이다. 초음파 용착은 불안정한 용융이 발생하여 국부적으로 미용착이 발생하였

다. 열융착 시편은 용착 온도 155 °C 조건에서 미융착 영역이 발생하였으며, 용착 온도 175 °C 조건에서는 첨가된 재료의 기화에 의해 시편에 기포가 발생하였다. 그러나 용착 온도 165 °C 조건은 용착부에 결함 발생없이 용착되는 확인 할 수 있었다. 이를 통해 케이스를 접합하는데 있어 가장 좋은 방법은 열융착과 PC 본드를 이용한 접착이 가장 좋은 것으로 확인 가능하였다.

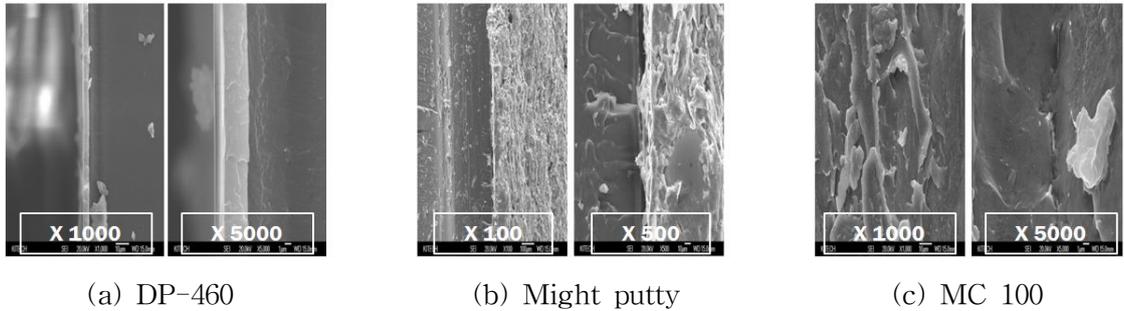


Fig. 52 Morphology in the vicinity of the joined region

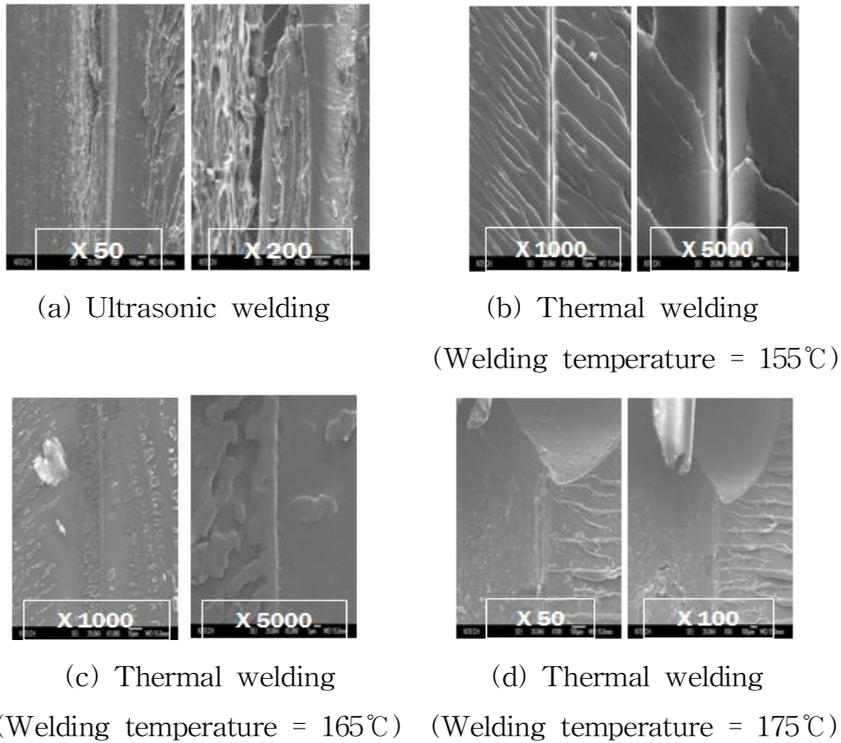


Fig. 53 Morphology in the vicinity of the welded region

2. 평판형 광생물 반응기 케이스 열융착 실험

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스의 기초 용착/접합 실험을 통하여 선정된 최적 결합 방법인 열융착 방법을 사용하여 케이스를 용착하였다. 반응기 케이스 외부 용착을 위하여 먼저 히터를 설계하였다. 열융착 히터 설계는 히터 두께를 90 mm 로 하여 반응기 케이스에 맞게 설계를 하였다. Fig. 54 은 열융착 히터에 대한 설계이다. 히터는 상하 총 12 개로 구성되어 있다. 케이스의 상부와 하부에 있어서는 케이스 형상에 맞게 높이를 낮은 부분은 70 mm 높은 부분은 90 mm 로 설계하였다. 또한 연결부 형상에 맞게 한쪽은 길이 700 mm 열융착 히터를 2 개 로 하여 제작을 하고, 다른 한쪽부분은 연결부가 반응기 케이스의 중간에 있어 히터 길이를 동일하게 제작할 경우 열융착시 미용착의 가능성이 커 열융착 히터를 800 mm 와 600 mm 로 나누어 히터를 설계하였다.

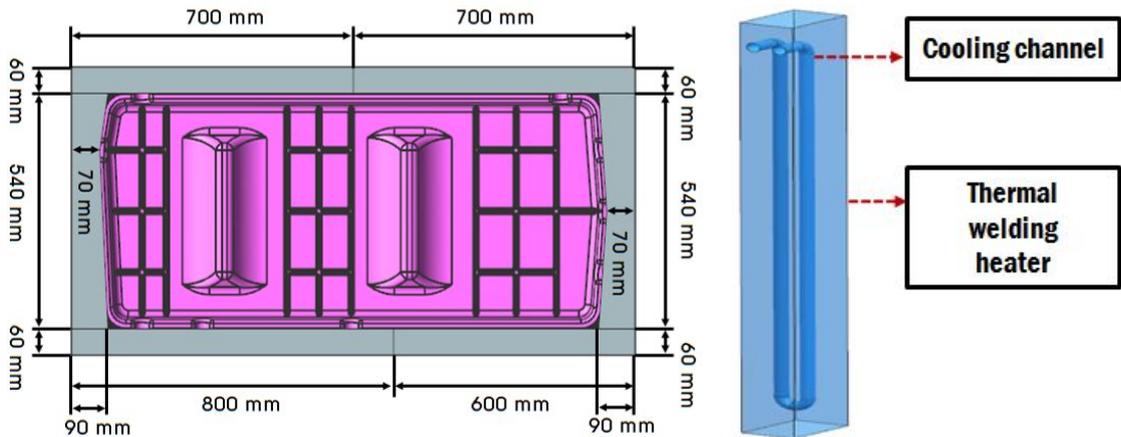


Fig. 54 Design of thermal welding heater

설계한 열융착 히터의 경우 먼저 내부 냉각 채널을 제작한 후 알루미늄 주물을 이용하여 열융착 히터를 제작하였다. 주물 제작된 열융착 히터에 연결부 형상을 제작하여야 한다. 연결부 형상은 실제 제작된 반응기 케이스의 외관 치수를 측정된 후 절삭 가공을 통하여 제작을 하였다. Fig. 55 는 열융착 히터의 연결부 제작 전후의 형상이다.



(a) Original heater



(b) Finally fabricated heater

Fig. 55 Fabricated thermal welding heater

Fig. 56 은 열융착을 위하여 제작한 열융착 실험 Set 이다. 열융착 히터를 결합 후 상부 히터를 공압을 이용하여 열융착 실험시 상승 및 하강이 가능하도록 하였다. 또한 히터에 압력을 부하 가능하도록 클램프를 부착하였다. 히터의 사이간격은 기초 열융착 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 6.9 mm 로 하였다. 또한 열융착 히터에 온도를 측정하기 위한 센서를 부착 후 각각 개별적인 온도 조절이 가능하도록 스위치를 부착하였다.



Fig. 56 Thermal welding system

반응기 케이스 열융착 실험은 Table 8 와 같다. 또한 열융착 시 미융착이 발생한 부분에 있어서는 2 차 융착실험을 통하여 열융착을 수행하였다. Fig. 57 은 열융착을 통해 제작된 반응기 케이스이다. 열융착시 미융착 부분에 대하여서는 평면부에는 초음파 융착 방법을 사용하고, 곡면부에는 이액형 본드와 PC 본드를 이용하여 케이스를 융착하였다.

Table. 8 Conditions of thermal welding experiment

Welding temperature	Welding time	Distance between heaters	Ejection temperature
165 °C	7 min	6.9 mm	60 °C



Fig. 57 Unified flat panel photobioreactor case via thermal welding process

3. 광생물 반응기 케이스 접합/융착 및 내압 실험

본 연구에서는 평판형 광생물 반응기 케이스의 기초 접합/융착 실험을 통하여 진공 열성형된 케이스를 접합하여 내압실험을 통하여 실제 반응기 케이스의 내압에 대한 변형을 확인하고자 하였다. 접합/융착 방법은 앞서 실험한 방법 중 접합 강도가 높은 세 가지 유형으로 실험을 수행하였다. 그 접합 방법은 이액형 본드, PC 본드, 열융착 방법을 이용하여 접합/융착 하였다. Fig. 58 은 3 가지 방법으로 접착/융착된 평판형 광생물 반응기 케이스를 나타낸다. 이액형 본드의 경우 기초 내압 실험을 통하여 접합 강도가 내부 압력보다 낮아 볼트 체결을 통하여 추가적인 케이스 결합 방법을 사용하였다. 또한 PC 본드를 이용하여 접착한 반응기 케이스의 경우 모세관현상이 일어나지 않아 접착제가 들어가지 않는 부분에 대하여서는 초음파 융착기를 이용하여 반응기 케이스를 추가적으로 융착하였다.

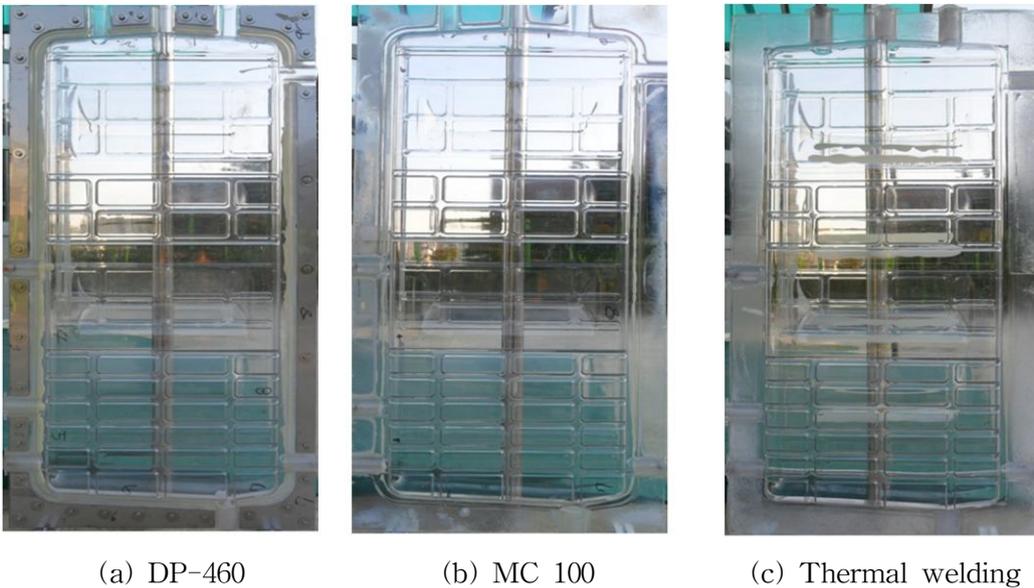


Fig. 58 Specimens for full-scale durability experiments of the finally fabricated flat panel photobioreactor case

위와 같은 케이스 결합 시편을 이용하여 Fig. 59 과 같이 미세조류를 대신하여 물을 이용하여 실제 내압 실험을 수행하였다. 물 높이는 실제 미세조류를 배양하는 높이로

실험을 수행하였고, 세가지 케이스 내압 실험용 시편 모두 10 mm 이내의 배불림 현상이 일어나는 것을 확인하였다. 이를 통하여 케이스 결합은 세가지 모두 내압에 대한 충분한 강성을 가짐을 알 수 있었다.

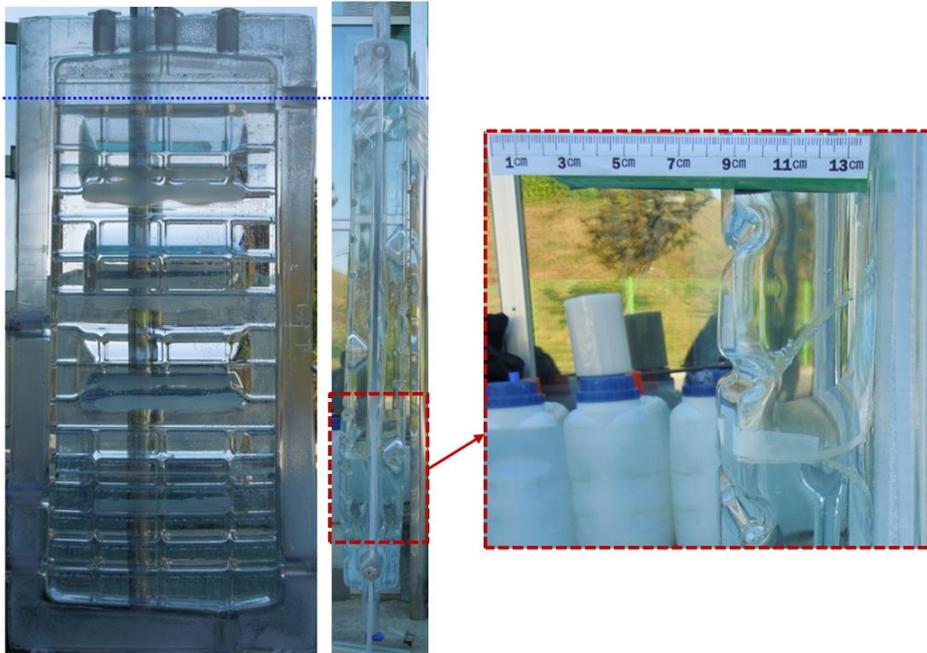


Fig. 59 Set-up full-scale durability experiments of the finally fabricated flat panel photobioreactor case

제 2 절 평판형 광생물 반응기 케이스 배양 실험

본 연구에서는 결합된 평판형 광생물 반응기를 이용하여 실제 배양 실험을 통하여 다른 평판형 광생물 반응기와 배양효율 및 특성을 분석하였다. 배양시험을 위한 균주로는 *Dunaliella salina* DCCBC2를 사용하였다. 배양에 사용된 배지는 Castenholz D medium을 사용하였으며 배지의 조성은 Table 9 과 같다. 배지는 121 °C에서 20 분간 멸균 후 상온까지 냉각 후 사용하였다. 배양 온도는 26 ~ 28 °C, PH 는 7.5 ~8 로 유지하였고, 탄소 공급원으로 CO₂ 5 %를 일반 공기와 혼합하여 주입하였다. 미세조류에 사용되는 빛은 LED 도광판을 사용하여 24 시간 동안 5 일간 조사하였으며 빛의 세기는 80 $\mu E/m^2/s$ 로 공급하였다.

Table. 9 Ingredients of Castenholz D medium

Components	Amount (g/L)	Components	Amount (g/L)
NaCl	58.440000	H ₃ BO ₃	0.000305
Tris	4.844000	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.000198
KNO ₃	0.505000	ZnSO ₄ ·5H ₂ O	0.000023
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.915760	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.000010
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.123250	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.000048
CaCl ₂	0.044100	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.000005
K ₂ HPO ₄	0.022800	NaVO ₃	0.000027
FeCl ₃	0.000550	NaHCO ₃	2.100000
EDTA	0.002450		

Fig. 60 은 평판형 광생물 반응기에 미세조류 배양실험 결과를 사진으로 나타낸 것이다. 총 배양 시간은 6 일이며, 그 이후에는 반응기 내부 미세조류에 대한 추가적인 실험이 필요로 하다. 미세조류 초기 접종 시 육안상으로 미세조류 군체의 색깔이 크게 나타나지 않았으나 5 일차 미세조류의 성장 색깔이 짙은 녹색을 나타내며 배양이 활발하게 이루어짐을 알 수 있었다.



(a) 0 day (b) 1 day (c) 3 day (d) 6 day

Fig. 60 Results of the microalgae cultivation using the fabricated flat panel photobioreactor case

Fig. 61 은 평판형 광생물 반응기를 이용하여 미세조류를 배양시 정략적인 균체 성장 정도를 측정 할 수 있는 OD (Optical density) 값 측정 장비를 사용하였다. 사용되는 장비는 Libra-S22 모델이며, 운용 프로그램은 Acquire multi wavelength를 사용하였다. OD 측정 방법은 측정하려는 미세조류의 샘플을 채취한 후, 기준이 되는 증류수와 비교하는 방법으로 측정을 하게된다. 반응기를 설치후 미세조류가 배양된 시점으로 부터 매일 같은 시간에 OD 값을 측정하여 그 결과를 도출하였다.

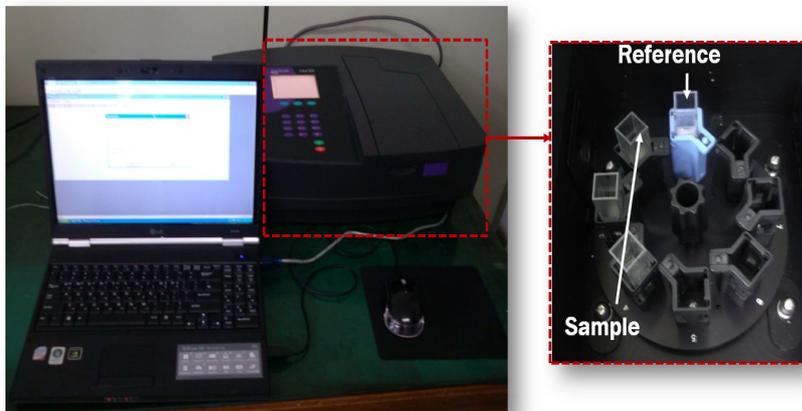


Fig. 61 Measurement devices of optical density

Fig. 62 은 OD 값 측정 장비를 이용하여 기존의 광생물 반응기와 진공 열성형으로 제작된 평판형 광생물 반응기 케이스의 OD₆₈₀ 값을 나타낸 것이다. 균체 성장은 배양한 날부터 5 일까지의 배양 효율을 비교하였다. 5 일간의 균체 성장률은 기존의 광생물 반응기는 균체 성장률이 0.46 값을 나타내고, 열성형을 이용한 케이스의 경우 0.59 값을 나타내며 진공 열성형을 이용한 반응기 케이스에서 더 높은 균체성장률을 보이며 미세조류 배양에는 진공 열성형을 이용한 반응기가 최적의 구조임을 확인할 수 있었다.

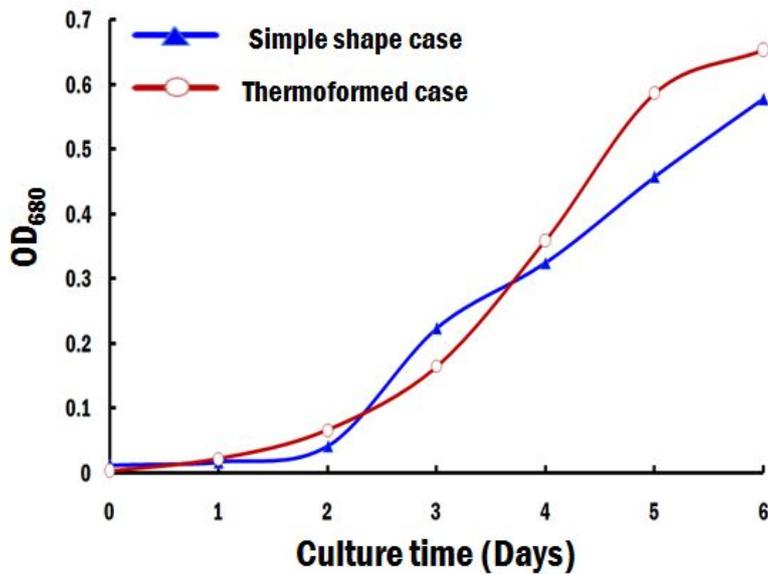


Fig. 62 Variation of the optical density according to type of flat panel photobioreactor case

제 6 장 결론 및 향후과제

본 연구에서는 열성형을 이용한 미세조류 배양용 평판형 광생물 반응기 케이스 급형 개발을 위해서 광생물 반응기 케이스 플라스틱 재료에 관한 고온 인장 시험을 수행하였으며 평판형 광생물 반응기 설계 및 시성형을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 평판형 광생물 반응기 케이스 제작을 위하여 11 가지 형태의 설계에 대한 구조/강성해석과 진공성형 시 발생하는 두께 감소 예측을 통하여 진공 열성형이 가능한 최적의 설계를 도출하였다.

2. 평판형 광생물 반응기 케이스 성형 재료인 PC 의 정확한 유동학적 거동을 묘사하기 위해 두께에 따른 온도와 크로스헤드 속도별로 고온 인장 시험을 실시하여 고온 유동 모델 상수를 도출하고, 열성형 해석을 수행하여 진공 열성형의 최적 공정 조건을 도출하였다.

3. 평판형 광생물 반응기 케이스 제작을 위한 진공 성형용 급형을 설계/제작 하고, 열성형 실험을 수행하였다. 성형된 반응기 케이스의 성형 특성을 분석하여 제품의 성형성을 평가하였다.

4. 제작된 평판형 광생물 반응기 케이스의 접합을 위하여 기초 용착/접합 실험을 통한 케이스의 접합 방법을 연구하고, 열용착 실험의 최적 공정 조건을 도출하였다. 도출한 결과를 이용하여 케이스 전체 접합을 하였다. 접합된 케이스를 미세조류 배양실험을 통해 비슷한 크기의 평판형 광생물 반응기와 진공성형을 이용한 평판형 광생물 반응기와의 배양성을 평가하였다.

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

첫째, 180 L 급 광생물 반응기 설계 후 구조/강성해석을 통해 케이스 변형이 최소화할 수 있는 형상에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

둘째, 진공 열성형 해석을 이용하여 진공 성형을 위한 최적 공정 조건에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. Eduardo, J. L., Carlos Henrique Gimenes Scoparo, "Biotransformations of carbon dioxide in photobioreactors", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp 894~900, 2010
2. Schenk, P.M., Thomas-Hall, S. R., "Second Generation Biofuels : High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production", *Bioenerg. Res*, Vol. 1, pp 20~43, 2008
3. Campanella, A., Muncrief, R., Harold., M. P., Griffith, D. C., Whitton, N. M., "Thermolysis of Microalgae and Duckweed in a CO₂-swept Fixed-bed Reactor: Bio-oil Yield and Compositional Effects", *Bioresource Technology*, Vol. 109, pp 154~162, 2012
4. 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
5. Nasrin Moazami, Alireza Ashori, Reza Ranjbar, Mehrnoush Tangestani, Roghieh Eghtesadi, Ali Sheykhi Nejad, "Large-scale biodiesel production using microalgae biomass of *Nannochloropsis*", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 39, pp 449~453, 2012
6. 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
7. Gang Yu, Odi Zmora, "An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp" *Aquaculture*, Vol. 195, pp 35~49, 2001
8. Cao, G., M, Zhao. Q., X., Sun. Z., B., "Integrated Nitrogen Removal in a Shell-and-tube Co-immobilized Cell Bioreactor", *Process Biochemistry*, Vol. 39, pp 1269~1273, 2004
9. Cao, G. M., Zhao, Q. X., Sun, Z. B., Zhang, T., "Integrated Nitrogen Removal in a Shell-and-tube Co-immobilized Cell Bioreactor", *Process Biochemistry*, Vol. 39, pp 1269~1273, 2004
10. Rosa Rosello Sastre, Zsuzsa Csogor, "Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors-A conceptual approach", *Journal of Biotechnology*, Vol. 132, pp 127~133, 2007

11. 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
12. Toshihiko Kondo, Tatsuki Wakayama, Jun Miyake, "Efficient hydrogen production using a multi-layered photobioreactor and a photosynthetic bacterium mutant with reduced pigment", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp 1522~1526, 2006
13. Fernando R. Silva-Aciaries, Carlos E. Riquelme, "Comparisons of the growth of six diatom species between two configurations of photobioreactors", *Aquacultural Engineering*, Vol. 38, pp 26~35, 2008
14. 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
15. 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.
16. 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
17. 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
18. Degen, J., Uebele, A. Schmid-Staiger, U.m 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.
19. Gang Yu, Yuanguang Li, Guomin Shen, Weiliang Wang, Chen Lin, Hongxi Wu, Zhisheng Chen, "A novel method using CFD to optimize the inner structure parameters of flat photobioreactors", *J Appl Phycol*, Vol. 21, pp 719 ~727, 2009.
20. Amos Richmond, Zhang, C. W., "Optimization of a flat plate glass reactor for mass

- production of *Nannochloropsis* sp. outdoors", *Journal of biotechnology*, Vol. 85, pp 259 ~ 269, 2001.
21. Peter W. Klein, "Fundamentals of Plastics Thermoforming". MORGAN & CLAYPOOL PUBLISHERS, pp 1~16, 2009
 22. Li, Z. Z., Heo, K. S., Seol, S. Y., "Time-dependent Optimal Heater Control in Thermoforming Preheating Using Dual Optimization Steps", *International journal of precision engineering and manufacturing*, Vol. 9, No. 4, pp 51~56, 2008
 23. Hahn, Y. W., Chang, S. H., Ryu, Y. M., Cheon, S. S., "Compressive and Failure Behaviour of Composite Egg-box Panel Using Non-orthogonal Constitutive Model", *Journal of KSCM*, Vol. 4, pp 20~26, 2009
 24. Kim, Y., Kim, J., Kang, B. S., "Analysis of multi-stage deep drawing process for rectangular container using finite element method", *Journal of KSME*, Vol. 1, PP 1453~1456, 2005
 25. S. H. Lee, Scoparo, C. H. G., "Uniform surface temperature control of vacuum-assisted thermoforming mold for insert film injection molding", *KSPE*, pp 727~728, 2008
 26. Hosseini, H., Berdyshev, B. V., "A solution for warpage in polymeric products by plug-assisted thermoforming", *European Polymer Journal*, Vol. 42, pp 1836~1843, 2006
 27. Chen, S. C., Huang, S. T., Lin, M. C., Chien, R. D., "Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp 967~973, 2008
 28. Sala, G., Landro, L. D., Cassago, D., "A Numerical and Experimental Approach to Optimise Sheet Stamping Technologies: polymers thermoforming", *Materials and Design*, Vol. 23, pp 21~39, 2002
 29. Warby, M. K., Whiteman, J. R., Jiang, W. G., Warwick, P., Wright, T., "Finite Element Simulation of Thermoforming Processes for Polymer Sheets", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 61, pp 209~218, 2003
 30. GmbH, K. T., Forschung, K. G., "Industrial Thermoforming Simulation of Automotive Fuel Tanks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp 2391~2409, 2004

31. Kleespies, H. S., Crawford, R. H., "Vacuum Forming of Compound Curved Surfaces with a Variable Geometry Mold", *Journal of Manufacturing System*, Vol. 17, No. 5, pp 325 ~ 337, 1998
32. Yang, H. J., Choi, J. W., Lee, S. H., Jang, T. S., Lee, Y. I., "A Study on Thickness Variation of ABS Sheet in Vacuum Forming Process", *Journal of KSPE*, Vol. 1, pp 663 ~ 666, 2002
33. Nam, G. J., "Finite Element Analysis and Experimental Studies on Thermoforming Process with Complex Geometries", *Doctoral dissertation*, Vol. 1, pp 1 ~ 147, 1999
34. Nam, G. J., Lee, J. S., Park, H. M., Lee, J. W., "Finite Element Analysis of Nonlinear Free Inflation Behaviors in Thermoforming Process", *Theories and Applications of Chem*, Vol. 1, pp 733 ~ 736, 1995
35. <http://www.pmwproducts.com/thermoforming.html>
36. Kim, H. J., Lee, M. G., Cho, K. Z., "A Study on Numerical Analysis of the Vacuum Forming Method", *Journal of KSAE*, Vol. 1, pp 2033 ~ 2038, 2006
37. Rozant, O., Bourban, P. E., Manson, J. A., "Manufacturing of Three Dimensional Sandwich Parts by Direct Thermoforming", *Composites*, Vol. 32, pp 1593 ~ 1601, 2001
38. Bhattacharyya, D., Bowis, M., Jayaraman, K., "Thermoforming Woodfibre-Polypropylene Composite Sheets", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp 353 ~ 365, 2003
39. Hsiao, S. W., Kikuchi, N., "Numerical analysis and optimal design of composite thermoforming process", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 177, pp 1 ~ 34, 1999
40. Ahn, D. G., Cho, C. G., Jeong, S. H., and Lee, D. G., "Design of Photobioreator for Mass Production of Microalgae", *J. of the KSPE*, Vol. 28, No. 2, pp 140 ~ 153, 2011.
41. <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>
42. Ahn, D. G., Ahn, Y. S., Jeong, S. H., "A Study on the Development of a Thin Flat Panel Photo-bioreactor Case", *J. of the KSPE*, Vol. 29, No. 9, pp 946 ~ 957, 2012.
43. Bourgin, P., Cormeau, R., "A first step towards the modelling of the thermoforming of plastic sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, pp 1 ~ 11, 1995

44. 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

감사의 글

학위 논문을 완성하기까지 많은 도움을 주신 여러분들께 감사의 마음을 전합니다. 대학원 생활은 저에게 있어 힘든 부분도 많았지만 학업적 지식뿐만 아니라 사회생활 그리고 인생의 진로 등 많은 것을 배우는 시간이었습니다.

대학원 생활 동안 많은 학문적 지식과 경험적 지식을 가르쳐 주시고, 사회 구성원으로써도 좋은 사람이 될 수 있도록 많은 지도를 해주신 안동규 교수님께 진심으로 감사합니다. 또한, 항상 좋은 말씀해주시고 논문이 작성에서 완성하기까지 교정과 심사 하시느라 고생하신 조규재 교수님, 한길영 교수님께 진심으로 감사드립니다.

전산설계 실험실의 1기로써 항상 후배들에게 좋은 표상이 되어주시고, 항상 오시면 많은 조언 해주시는 이상훈 선배님, 김민수 선배님께 감사의 말씀드립니다. 학술대회 있으면 항상 뵙고 많이 사주시는 김진석 선배님, 대전에 계셔서 자주는 못 찾아 뵙지만 홈커밍데이에 오셔서 항상 잘 챙겨 주시는 문경재 선배님, 취업이나 실험실 생활의 가장 큰 조언자 변경원 선배님, 일본에 계시지만 광주 오시면 꼭 실험실 들리셔서 엄청나게 사주시는 정광운 선배님, 항상 어려워 말고 일있으면 편하게 말하라고 하시는 김대원 선배님, 실험 있으면 야근까지 해주시면서 도와주시는 김현우 선배님, 항상 부드러운 말투로 전화받아주시고 세심하게 배려해주시는 남경흠 선배님, 광주에 교육 있으면 꼭 실험실 오셔서 잘 챙겨주시는 박승화 선배님, 평동에서 학교로 출장오시면 꼭 오셔서 저녁 사주시는 송동한 선배님, 대학원 생활을 시작하면서 인생의 새로운 놀이 문화를 알려주신 세훈이형과 민우형, 같이 일하면서 가장 많이 믿고 따른 창규형, 꼭 한번 다시 스타를 붙고 싶은 향성이형 모두에게 감사의 말씀을 드립니다.

학부생 시절부터 친하게 지내다 실험실 추천해서 대학원 생활을 같이하며 늦게까지 같이 일하고 고생한 우철이에게 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 실험실에서 이상한 말을 담당하는 사람은 착한데 말이 이상한 나라, 바이오리파이너리 센터 일하면서 같이 실험 다니며 고생한 호진이, 약간은 엉뚱하고 캐릭터를 종잡을 수 없는 훈희, 짬뽕의 슬픔을 가진 경규, 항상 웃고 별명 많은 동휘에게도 같이 생활하면서 즐겁고 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

대학원 생활하면서 많은 조언을 해주신 김종태 박사님, 김광호 박사님께 감사드리며 그리고 배양 실험에 있어서 주말에도 나와 반응기에 대한 조언과 배양 방법에 관하여 많이 도움을 준 기원이, 강훈이에게도 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

이 논문이 완성되기까지 함께 프로젝트를 수행하며 여러 가지 도움을 지도와 의견을 말씀해 주신 (주) 한독정공 김용복 사장님, 금형 설계 및 반응기 케이스 제작에 많은 도움을 주신 (주) 썬코리아 군선배 사장님, 그리고 PAM-FORM 사용 시 유한요소 해석 방법에 많은 도움과 조언을 해주신 (주) 한국이에스아이 황상희 대리님께 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 저를 항상 뒤에서 응원해주시는 잘생긴 아버지, 몸 상황까 항상 걱정해 주시는 사랑스러운 어머니 그리고 제가 가장 사랑하는 친가·외가 할머니, 할아버지 감사합니다.

2012 년 12 월
안 영 수