



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](#)

工學碩士 學位論文

핫프레스 성형 시 금형의 냉각온도 변화에 따른
열가소성 복합재료의 결정화도 및 기계적 특성
평가

Evaluation of crystallinity and mechanical properties of
thermoplastic composite material cooled by die during hot press
forming



2019年 02月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科
韓 錫 熙

本 論 文 을 韓 錫 熙 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위 원 장 : 문 경 만 인

위 원 : 김 윤 해 인

위 원 : 신 도 훈 인



2018年 12月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 재료 및 실험방법	6
2.1. 재료와 이론적 배경	6
2.1.1. 탄소섬유	6
2.1.2. PolyPhenylene Sulfide	7
2.1.3. 결정화도	9
2.2. 실험 과정	10
2.2.1. Hot-Press Forming	10
2.2.2. Vacuum Bag-Only forming	20
2.2.3. Differential Scanning Calorimetry	23
2.2.4. 기계적 물성 시험	25
2.2.5. Scanning Electron Microscope	26
3. 실험 결과	29
3.1. 핫프레스 성형 온도 사이클	29
3.2. 결정화도	31
3.3. 기계적 물성시험 결과	34
3.3.1. 0° 인장시험 및 압축시험 결과	34
3.3.2. 90° 인장시험 결과	36
3.3.3. short beam 시험 결과	37
3.3.4. 파단면 분석	38
4. 결론	43

감사의 글..... 45

참고문헌..... 48



List of Tables

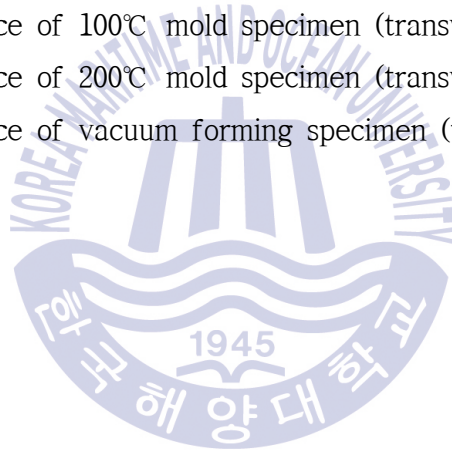
Table 1 Comparison between thermosetting and thermoplastic.....	2
Table 2 Property of PPS resin.....	7
Table 3 Temperature data of DSC.....	23
Table 4 Cooling rate according to mold temperature until crystalline temperature and glass transition temperature.....	29
Table 5 Crystallinity of PPS specimen.....	30



List of Figures

Fig. 1 PPS chemical structure	7
Fig. 2 Hot-Press Machine	10
Fig. 3 Schematic of hot press forming process using preheater	11
Fig. 4 Hot-press forming process of Carbon/PPS specime	14
Fig. 5 Thermocouples in each layer	15
Fig. 6 Position of the thermocouples in middle layer	15
Fig. 7 Temperature data at each layer (8ply)	16
Fig. 8 Temperature data at each layer (18ply)	16
Fig. 9 Temperature data at each position in middle layer (room temperature)	17
Fig. 10 Temperature data at each position in middle layer(100°C)	17
Fig. 11 Temperature data at each position in middle layer(200°C)	18
Fig. 12 Vacuum forming process of Carbon/PPS specimen	20
Fig. 13 Forming time - temperature curve of vacuum forming	21
Fig. 14 Differential Scanning Calorimetry	23
Fig. 15 Test Specimen (Tensile 0°,90°, Compressive, short beam)	25
Fig. 16 Tensile test (longitudinal and transverse direction)	25
Fig. 17 Compressive test	26
Fig. 18 Short beam test	26
Fig. 19 Scanning electron microscopy	27
Fig. 20 Press time - Temperature curve of hot-press forming	29
Fig. 21 DSC curve of Room Temperature mold	31
Fig. 22 DSC curve of 100°C mold	31
Fig. 23 DSC curve of 200°C mold	32
Fig. 24 DSC curve of vacuum forming	32
Fig. 25 Tensile test result (longitudinal direction)	33

Fig. 26 Compressive test result.....	34
Fig. 27 Tensile test result (transverse direction).....	35
Fig. 28 Interlaminar shear stress test result.....	36
Fig. 29 Fracture surface of room temperature mold specimen (longitudinal tensile)	38
Fig. 30 Fracture surface of 100°C mold specimen (longitudinal tensile).....	38
Fig. 31 Fracture surface of 200°C mold specimen (longitudinal tensile).....	39
Fig. 32 Fracture surface of vacuum forming specimen (longitudinal tensile)...	39
Fig. 33 Fracture surface of room temperature mold specimen (transverse tensile)	40
Fig. 34 Fracture surface of 100°C mold specimen (transverse tensile).....	40
Fig. 35 Fracture surface of 200°C mold specimen (transverse tensile).....	41
Fig. 36 Fracture surface of vacuum forming specimen (transverse tensile)....	41



핫프레스 성형 시 금형의 냉각온도 변화에 따른 열가소성 복합재료의 결정화도 및 기계적 특성 평가

한석희

조선기자재공학부
한국해양대학교 대학원

초록

고분자 기반의 섬유 강화 복합재료는 금속재료 대비 우수한 내식성, 비강도 및 비강성을 가지고 있어, 항공기, 선박, 자동차 등 수송 산업 분야에 금속재료의 대체품으로 적용 가능성이 확대되고 있다. 특히, 열경화성 고분자 복합재료와 비교하여 가공성이 용이하고 재활용이 가능한 열가소성 고분자 복합재료의 연구가 많이 진행되고 있다.

열가소성 고분자 복합재료는 열성형(Thermoforming)이 가능하며 가열, 가압 성형 및 냉각 과정을 통해 성형을 이루어진다. 대부분의 열가소성 고분자 복합재료는 반결정질 (Semi-Crystalline) 분자 구조를 이루며, 냉각 온도에 따른 결정화도에 따라 성형 후의 기계적 특성이 달라진다. 기존의 열경화성 복합재료는 오토클레이브를 이용해 높은 기계적 물성을 획득할 수 있는 장점이 있지만 높은 제작 단가와 성형시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 반면에, 열가소성 복합재료의 경우, 열성형을 비롯하여 오토클레이브 공정 없이 프레스 장비 등을 이용한 탈오토클레이브(Out-Of-Autoclave) 공정이 가능하기 때문에, 공정 비용 및 제작 시간의 효율성을 증가시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 항공기의 2차 구조물이나 단순 부품에 적용 가능한 Polyphenylene Sulfide(PPS)를 이용하여 프레스 성형 공정 변수를 도출하고 냉각 속도에 따른 시편 제작을 통해 물성 평가를 수행하였다. 일반적으로 Hot-Press

를 이용한 공정은 가열, 가압 성형, 냉각 과정을 통하여 열가소성 복합재료의 성형을 수행한다. 본 논문에서는 적외선(InfraRed)을 이용하여 열가소성 복합재료의 성형가능온도(Processing Temperature)까지 가열한 이후, 압력을 가하여 성형 공정을 수행하였으며, 냉각 속도에 따른 물성 평가를 위하여 금형 온도를 변화시키며 시편을 제작하였다. 또한, 오븐을 이용한 진공성형공정으로 동일한 시편을 제작하여 Hot-Press 성형공정으로 제작한 시편과 비교 및 분석을 진행하였다.

냉각 속도에 따른 결정화도는 Differential Scanning calorimetry(DSC)를 이용하였고 냉각 속도가 느릴수록 높게 측정되는 경향을 보였다. 또한, 인장 및 압축 등 기계적 특성 역시 결정화도가 높을수록 높게 측정됨을 알 수 있었고, 결정화도에 따른 재료의 표면상태 및 파단 거동을 분석하기 위하여 Scanning Electron Microscope(SEM) 으로 표면 및 파단면을 관찰하였다.

본 연구를 통해 열가소성 복합재료를 이용한 Hot-Press 성형 시 냉각 속도에 따른 결정화도와 기계적 특성 변화의 양상을 살펴 보았다. 본 연구 결과를 토대로 PPS 및 PEKK(Poly Ether Ketone Ketone) 등의 열가소성 복합재료를 이용한 실제 부품 성형 시 활용될 수 있을 것이라 예상된다.

Evaluation of crystallinity and mechanical properties of thermoplastic composite material cooled by die during hot press forming

Han, Seok Hee

Major of Materials Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Polymer-based fiber-reinforced composites have superior corrosion resistance, specific strength and specific rigidity compared to metal materials, and are being applied as a substitute for metal materials in transportation industry such as aircraft, ship, and automobile. Particularly, research on thermoplastic polymer composites which can be easily processed and recycled compared to a thermosetting polymer composite material is being studied.

Thermoplastic polymer composites can be thermoformed and molded through heating, pressing, and cooling processes. Most thermoplastic polymer composites have a semi-crystalline molecular structure, and the mechanical properties after molding depend on the degree of crystallization depending on the cooling temperature. Conventional thermosetting composites have the advantage of obtaining high mechanical properties by using an autoclave, but they are disadvantaged in that they require high production cost and long molding time. On the other hand, in the case of the thermoplastic composite material, since the out-of-autoclave process using the press equipment can be performed without the autoclave process, including the thermoforming process,

the process cost and the production time efficiency can be increased It has advantages.

In this study, the parameters of the press forming process were derived by using Polyphenylene Sulfide (PPS) applicable to the secondary structure or simple parts of the aircraft and physical properties were evaluated by preparing specimen according to the cooling rate. Generally, the process using Hot-Press performs molding of a thermoplastic composite material through heating, press-molding, and cooling processes. In this paper, Infrared is used to heat up to the processing temperature of thermoplastic composites, and then the molding process is performed by applying pressure. The mold temperature is changed to evaluate the properties according to the cooling rate, Respectively. In addition, the same specimen was fabricated by the vacuum forming process using the oven and compared with the specimen produced by the hot-press molding process.

The crystallization degree according to the cooling rate was measured by differential scanning calorimetry (DSC) and the higher the cooling rate, the higher the tendency to be measured. In addition, the mechanical properties such as tensile and compression were also measured to be higher as the crystallinity was higher. Surface and fracture surfaces were observed with a Scanning Electron Microscope (SEM) to analyze the surface state and fracture behavior of the material according to the degree of crystallization.

Through this study, we investigated the crystallization and mechanical properties of hot - press molding using thermoplastic composite according to the cooling rate. Based on the results of this study, it is expected that it can be utilized in the actual part molding using thermoplastic composite materials such as PPS and PEKK (Poly Ether Ketone Ketone).

제 1 장 서론

1.1. 열가소성 복합재료 개요

무게 대비 강도가 높은 특성으로 금속을 대체하여 조선 해양·항공·자동차 등 산업 전반에 걸쳐 사용되어 복합재료의 가벼운 특징으로 연비 절감을 할 수 있는 큰 장점이 있다. 그리고 최근 세계 GDP가 성장함에 따라 항공 여객의 수요 또한 증가하고 있어 그에 맞춰 복합재료를 이용한 제품 제작이 활발히 이루어지고 있다.¹⁾ 다른 성질을 가진 재료의 장점만을 뽑아 새로운 특성을 가진 재료를 복합재료라고 한다. 산업에서 금속과 비교하여 우수한 경량성 및 내식성을 위해 고분자 수지 기반 섬유 강화 복합재료를 주로 이용한다. 이런 고분자 기반 복합재료는 3세대로 분류할 수 있다. 1세대는 가격이 낮은 유리섬유와 에폭시, 폴리에스터 수지를 사용하여 경량화를 위해 개발하였다. 하지만 이는 비강도는 우수하지만 비강성이 낮은 단점이 있었다. 2세대는 강화재를 탄소섬유, 아라미드 섬유 등으로 고강도, 고강성을 지닌 복합재료를 항공·우주 분야를 시작으로 많이 진출하고 있다. 고분자 재료는 점도가 낮고 섬유와 젖음성이 좋은 에폭시 수지가 많이 사용되었다. 이는 열경화성 수지인 에폭시 수지의 한계로 경화반응을 고려하여 성형 사이클 시간의 증가 등의 개량과제가 있다. 3세대는 이런 열경화성 수지의 단점을 개량하기 위해 열가소성 수지를 이용하는 것을 특징으로 한다. 경화 반응이 필요 없고 화학반응이 일어나지 않아 성형 사이클 시간을 단축하는 것이 가능하여 생산성이 좋은 장점이 있다. 하지만 열가소성 수지는 낮은 내열성 및 섬유와의 젖음성이 나쁘다는 단점이 있다. 최근에는 이런 단점을 개량하고 인성도 우수한 섬유강화 열가소성 플라스틱(Fiber

1) 장태진, 2016, pp.4~53

reinforced thermoplastics : FRTP)가 활발히 개발되고 있다.²⁾

열가소성 플라스틱은 또한 프레스 등의 성형공정이 기존의 금속 공정과 유사한 부분이 있어 그 노하우를 살릴 수 있다는 장점도 가지고 있다. 기존 설비의 활용이 가능하다면 초기 설비 투자를 줄임으로써 생산비용에서 큰 이점을 볼 수 있다. 이런 금속 소재를 다루는 공정과 비슷한 부분은 환경적인 측면에서도 열가소성 플라스틱이 큰 이점을 볼 수 있는데 재활용이 용이하다는 점이다. 열경화성 플라스틱은 경화반응 후 가열을 시켜도 다시 연화되지 않지만 열가소성 플라스틱은 이 부분에서 가역성이 있어 재활용에 적합하고 환경 친화적이다. 가열하면 용융을 하고 냉각시키면 다시 결정화가 되어 플라스틱으로 사용할 수 있다. Table 1에 열경화성 플라스틱과 비교하여 열가소성 플라스틱의 기능적인 장점을 나타내었다.³⁾

Table 1 Comparison between thermosetting and thermoplastic

	Thermosetting	Thermoplastic
Recycle	Irreversible	Repeatable
Part assembly	Bolting, Nutting	Possible to weld

2) 김기석, 2012, pp.65~74

3) 정선호, 2018, pp.14~17

1.2. 열가소성 복합재료 성형공정

열가소성 복합재료를 제작하는데 이전부터 사용되었던 공정은 사출성형이다. 사출성형은 단섬유와 혼합된 열가소성 플라스틱을 고온에서 용융하여 고압으로 밀어내고 냉각하는 공정이다. 단시간에 다량의 제품을 제작할 수 있는 장점이 있지만 상당히 고가의 초기 설비비, 제조비 및 유지비가 들고 소량의 부품을 제조하기에도 가격적인 단점이 있다. 또한 변수가 너무 많이 달라져 품질이 균일하지 않을 수 있다. 이에 항공 분야에서는 부품 제작에 대부분 오토클레이브(Autoclave) 공정을 사용한다. 높은 기계적 물성과 섬유 체적율, 낮은 기공률을 제공하지만 6~12시간의 장시간 성형시간이 소요되며, 초기 설비와 높은 용융온도, 점도로 인한 재작비가 매우 고가인 점, 노동 집약적 제조환경 그리고 복잡한 형상의 구조물 제작 시 기술적 어려움으로 적용 범위에 한계를 가지고 있다. 이런 한계점을 극복하기 위하여 최근 Out of Autoclave(OOA) 공정 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 공정으로서 핫프레스 장비를 이용한 Hot-Press forming 공정이다. 자재를 예열(Preheating), 프레스 내부로 이송, 가압, 그리고 냉각 과정으로 성형이 된다. 예열은 자재를 녹는점 이상인 성형 가능 온도(Process temperature)로 균일하게 가열하고 자재가 성형 가능 온도를 벗어나지 않도록 단시간 내에 금형 내부로 이송한다. 가압 시에 금형의 온도, 압력 그리고 가압 속도를 제어하고 냉각하여 상온에서 사용 가능한 제품으로 완성시킨다.⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ 이러한 성형 시 각 공정의 변수에 따라 결정성 열가소성 복합재료의 성형성, 열적, 기계적 특성에 차이가 발생한다.

현재 열가소성 복합재료를 제작하는데 있어서 원하는 재료의 특성을 얻기 위해 각 변수들을 제어하여 평가하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. K. Friedrich 등은 범용 열가소성 고분자인 폴리프로필렌과 유리섬유 복합재의 프레스 성형 시 예열된 자재가 몰드의 속도가 빨라짐에 따라 성형 중 온도가 빠

4) Sanjak, K, 2002

5) 이병연, 2018, pp.60~65

6) Centea, T.G, 2015, pp.132~154

7) Jamin, T, 2014, pp.22~26

르게 감소됨과 성형된 제품의 주름이 형성됨을 확인하였다.⁸⁾ John J. Tierney 등은 PEEK 재료를 가열, 냉각속도에 따라서 달라지는 고분자의 결정화도를 평가하였다.⁹⁾ In-Gyu Lee 등은 폴리프로필렌의 냉각속도가 낮을수록 결정의 크기가 커지고 인장강도는 높게, 층간전단강도는 낮게 나온 것을 확인하였다.¹⁰⁾ B. Vieille 등은 Carbon/PPS의 적층 배열을 다르게 하여 기존의 제작방법과 프레스 공정의 기계적 물성을 비교하였다.¹¹⁾

본 연구는 이러한 Hot-Press 성형 공정의 다양한 변수 중 냉각속도가 열가소성 복합재료의 열적 특성과 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하고자 한다. 핫프레스 장비에 예열을 위한 적외선 히터를 설치 후 성형 온도 확인을 통한 최적의 제작 시간 확립과 여러 변수 중 금형의 온도로 냉각속도에 변화를 주어 그에 따른 결정화도 및 기계적 물성을 평가하려 한다. FRTP인 Carbon/PPS를 이용하여 먼저 성형 가능 온도에 도달하는 시간을 측정하고 가압 및 냉각 시의 온도 측정으로 각 금형 온도에 대한 냉각속도를 계산한다. 이때 금형은 Room Temperature, 100°C, 200°C로 설정하였다. 제작된 시편은 열량 분석으로 결정을 이루는 정도인 결정화도를 계산하고 섬유 방향 인장시험과 압축시험, 섬유 수직 방향 인장시험 및 층간 전단 강도 시험을 통하여 결정화도에 따른 기계적 물성을 평가하여 추후 형상이 있는 부품 제작 시에 동일하게 적용할 사전 연구로서 진행해보고자 한다.

8) Friedrich, K, 1998, pp.217-226

9) Tierney, J.J, 2004, pp.574~558

10) Lee, I.G. 2017, pp.28~37

11) Vieille, B.A, 2013, pp.821~834

제 2 장 재료 및 실험방법

2.1. 재료와 이론적 배경

2.1.1. 탄소섬유

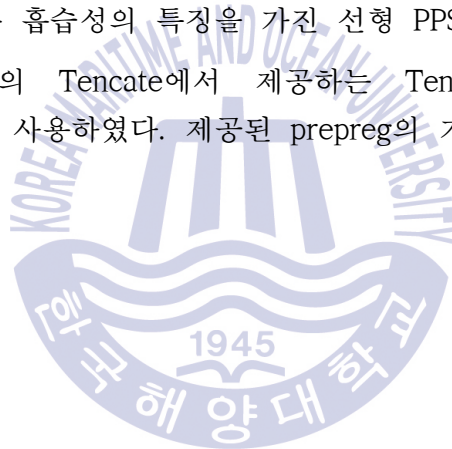
탄소섬유는 유리섬유보다 고강도, 고탄성, 고강성의 재료로써 항공기부터 배드민턴 라켓, 골프채 그리고 드론 등의 정밀하며 경량성, 고강도를 요구하는 산업에 대부분 사용되는 섬유다. 탄소 모재를 좁은 실린더에서 방사하여 제조하고 대표적으로 PAN(Poly acrylonitrile)계와 Pitch계가 있다. PAN계 탄소섬유는 예비체를 고분자화 시킨 후 방사하고 Pitch계는 석탄의 pitch 등을 직교이방성 pitch로 변환하여 방사시키는 공정이다. 그 뒤 두 공정 모두 산화, 탄소화, 표면처리 공정을 거쳐 탄소섬유로 만들어낸다.

또한 탄소섬유는 기계적 성능을 기준으로도 분류한다. 탄성을 200 GPa, 인장강도 3500 MPa 이하의 저 탄성을(Low modulus) 탄소섬유라 말하고 상대적으로 저렴하다. 고성능 탄소섬유는 고강도(High Tensile), 중 탄성을(Intermediate Modulus), 고 탄성을(High Modulus) 탄소섬유를 모두 말하며 특히 인장탄성을 600 GPa 이상인 것을 초고탄성을 탄소섬유라 부른다. 일반적인 탄소섬유는 인장강도 3000 MPa, 인장탄성을 220~260 GPa 이상인 것을 말하고 인장강도가 6000 MPa 이상이 되면 초고강도(Ultra High Tensile) 탄소섬유라고 부르기도 한다.¹²⁾

12) 이태호, 2011, pp.511~514

2.1.2. PolyPhenylene Sulfide

PolyPhenylene Sulfide(이하 PPS)는 다른 열가소성 플라스틱에 비해 뛰어난 내화학적, 전기적 성질, 난연성, 내마모성 등의 특징으로 PolyEtherEtherKethon(PEEK), PolyEtherKethonKethon(PEKK)와 함께 슈퍼 엔지니어링 플라스틱이라 불리며 조선, 항공 등의 고성능을 요구하는 산업에서 많이 이용되고 있다. p-다이클로로벤젠과 황화소듐의 축중합에 의해 만들어지는 PPS는 높은 용융온도를 갖는 결정성 재료이다. 200℃ 이하에서 유기용매에 녹지 않는 특징과 난연제 없이도 난연화가 가능한 환경친화적이다. 중합과정 중 가열경화 시키는 가교형 PPS에서 중합반응 개선으로 높은 고분자 순도로 우수한 내충격성, 낮은 흡습성의 특징을 가진 선형 PPS가 많이 이용된다.¹³⁾¹⁴⁾ 본 연구에서는 해외의 Tencate에서 제공하는 Tencate Cetex[®] TC1100 Carbon/PPS prepreg를 사용하였다. 제공된 prepreg의 기초 PPS 물성은 Table. 2와 같다.



13) 이영준, 2007, pp20-25

14) Joel, R. F., 2015.

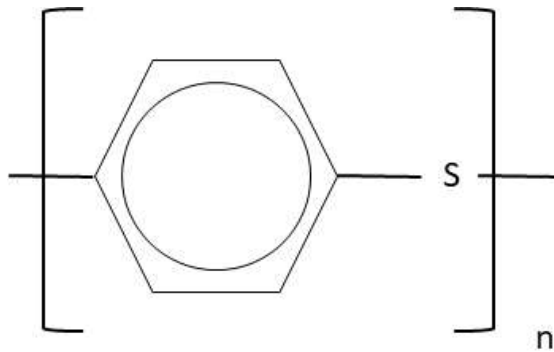


Fig. 1 PPS chemical structure

Table 2 Property of PPS resin

Properties	Unit	Value
Specific gravity	g/cc	1.35
Glass Transition Temperature	°C	90
Melt temperature	°C	280
Moisture absorption	1945%	0.02
Tensile Strength	MPa	90.3
Compressive Strength	MPa	148

2.1.3. 결정화도

많은 수의 고분자는 결정이 없는 비정질로 꼬이고 엉켜있는 형태의 구조를 갖고있다. 이 비정질 고분자의 경우 온도를 높이면 분해는 되지만 용융하지 않는다. 그리고 규칙적인 결정의 형태를 이루고 있는 결정성 고분자는 온도를 높이면 결정 사이의 결합이 끊어지며 용융이 된다. 하지만 고분자는 100% 결정성을 띠지 않고 결정성 고분자는 비정질 영역과 결정 영역이 존재한다. 여기서 결정 영역이 온도에 따라 결정을 형성하는 정도를 결정화도(Crystallinity)라 한다.¹⁵⁾

결정화도는 결정성 고분자의 다양한 특성에 영향을 끼치는 매우 중요한 요소이다. 이 결정화도는 Differential Scanning Calorimetry(이하 DSC)를 통한 용융 및 결정화 엔탈피를 이용하여 계산할 수 있다.

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m \times 100}{\Delta H_{f100} \times x} \quad (1)$$

여기서 X_c 는 고분자의 결정화도를 의미하고 ΔH_m 은 용융 엔탈피, ΔH_{f100} 은 이론적인 100% 결정화의 용해열, x 는 복합재료 내의 수지 분율이다. 여기서 PPS의 이론적 100% 결정화의 용해열은 150.4 J/g이다[13].

열가소성 고분자의 결정화도는 성형 후에 냉각속도에 따라서 차이가 발생한다. 냉각속도가 빠른 열가소성 고분자의 결정화도는 낮아지고 느리면 높아진다. 또한 그 결정화도에 따라 고분자의 결정 크기, 기계적 물성 및 파단면 등이 달라진다.

15) Christopher, S. B., 2016

2.2. 실험 과정

2.2.1. Hot-Press Forming

핫프레스 성형방법은 고온, 고압으로 단시간에 성형할 수 있는 장점을 가진 성형방법이다. 가열, 가압, 냉각의 순서로 이루어진다. 가열 시에 자재를 녹는 점 이상으로 온도를 높여 성형이 용이한 상태를 만들고 가압 시에 자재에 압력을 가하여 성형을 진행한다. 그 뒤 냉각하여 성형을 마친다. 국내의 대부분 핫프레스 장비들은 그 금형 위에서 본 성형공정이 모두 이루어진다. 금형의 하판에서 자재를 가열하는 작업은 자재의 상, 하 온도가 균일하게 올라가지 않아 상, 하의 온도가 상이하여 제품의 특성에 영향을 끼치거나 하판은 성형 가능 온도를 벗어나지만 상판은 성형 가능 온도에 도달하지 못 하는 경우가 발생할 수 있다. 그리고 대부분 물 또는 공기로 냉각을 하여 날씨 등의 영향으로 그 냉각온도의 조절이 어려운 점이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 적외선 가열 방식의 Preheater를 설치하여 자재를 성형 가능 온도로 가열, 금형으로 이송시킨 뒤 일정 온도의 금형으로 가압 및 냉각을 하는 공정을 진행한다. Fig. 2, 3은 핫프레스 장비와 성형 공정의 개략도이다.

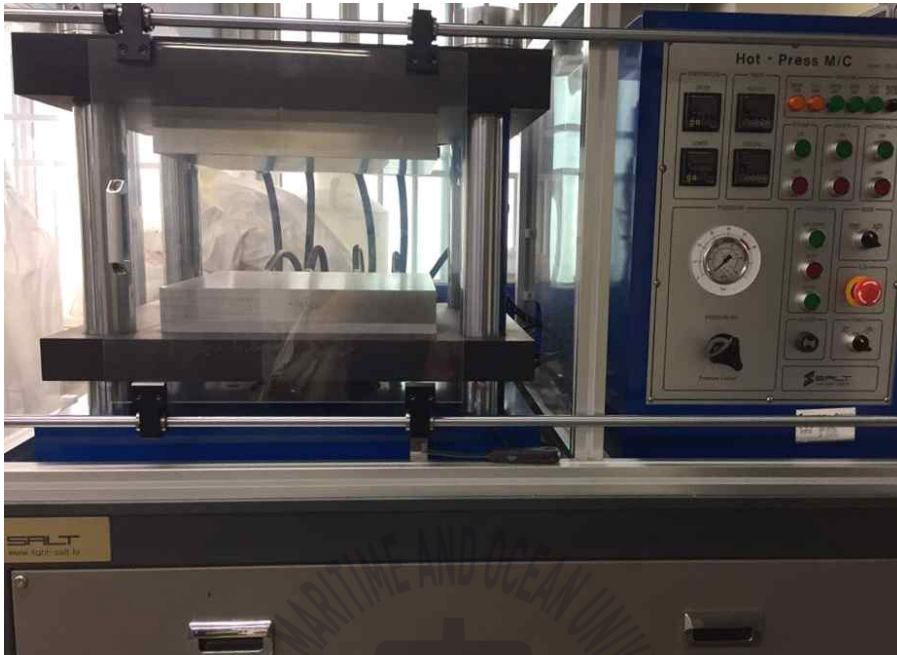


Fig. 2 Hot-Press machine

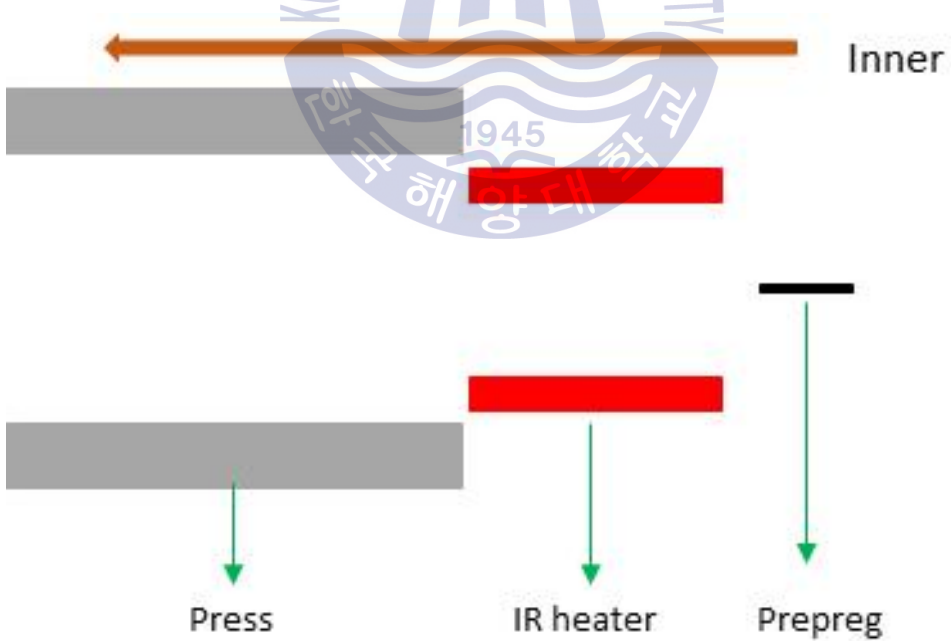


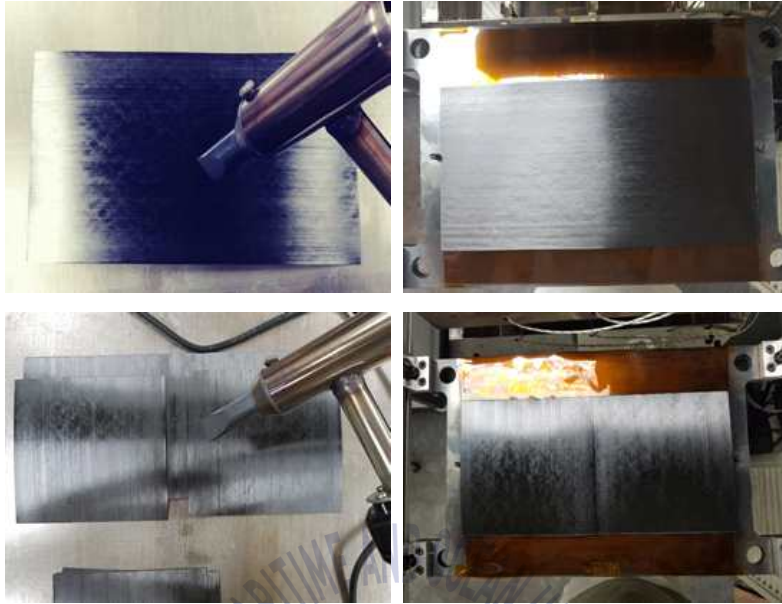
Fig. 3 Schematic of hot press forming process using preheater

섬유 방향(0°) 시편은 폭 150mm의 자재를 300mm로 재단하여 8장을 중앙에 가접하였고, 섬유의 수직방향(90°) 시편은 섬유를 150mm로 재단하여 중앙에 가접하여 길이 300mm의 시트 18장을 만든 뒤 전체를 중앙에 가접하였다. 여기서 가접은 프리프레그의 한 지점을 높은 온도를 주어 임시로 고정하는 작업이고 성형 중 프리프레그가 흐트러지지 않기 위함이다. 가접을 너무 많이 하거나 섬유의 방향을 고려하지 않고 작업하게 되면 고정된 부분의 섬유가 흐트러져 제품에 주름이 생기거나 올바른 압력을 받지 못하여 두께에도 차이가 발생한다. 가접 한 뒤 Preheating을 위한 몰드 위에 적층한다. 여기서 금속의 몰드 위에 바로 자재를 두면 성형 후 일정 부분은 수지가 충분하지 않는 등의 결함이 발생하게 되어 이형제를 바른 진공백필름을 부착하여 표면상태를 개선한다. 그 후 측정된 시간으로 Preheating한 후 핫프레스 금형 내부로 이송한다. Room Temperature, 100°C , 200°C 의 온도로 설정한 핫프레스 금형으로 이송시킨 자재와 preheating 몰드를 함께 가압하여 성형한다. 여기서 압력은 10bar로 설정하였다. 금형 온도 100°C , 200°C 의 경우 가압 및 냉각을 마친 뒤에 공기 중에서 상온까지 냉각하였다.

이때 시편을 제작하기에 앞서 자재의 시간에 따른 가열 온도 및 냉각 온도를 확인하기 위하여 Thermocouple을 층별, 중앙에서의 위치별로 설치하여 측정한다. (Fig. 5, Fig. 6) 층별 온도 측정은 두께별로 온도가 균일하게 상승함을 확인하는 작업이고, 중앙의 위치별 온도 측정은 시편 전체적으로 온도가 균일하게 상승하는지를 확인하는 작업이다. 층별 온도 측정은 Thermocouple을 18장의 프리프레그 가장 아래쪽, 4장 위, 5장 위, 5장 위, 그리고 제일 상단에 설치하였다. 8장의 프리프레그는 제일 하단, 4장 위, 제일 상단에 설치하였다. 중앙의 위치별 온도 측정은 Thermocouple을 중앙의 가장 중앙과 그곳에서 일직선 방향으로 3개, 대각선 끝까지 3개를 설치하였다. Figs. 7, 8를 통하여 다소 차이는 있으나 동일한 시간에 Process Temperature 내에 포함되는 온도 상승을 확인하였고 이는 적외선 방식의 특성상 열이 내부로 균일하게 침투하기 때문으로 판단된다. Figs. 9, 10, 11를 통하여 거리에 따른 온도 분포의 그래프를 확인하여 최적의 가열시간을 성립하였다. 대체로 균일하게 상승하나 가장자리에 있는 f

점은 다른 지점과 비교하여 온도 상승이 더딘 것을 확인할 수 있다. 이는 다른 지점에서는 적외선이 중첩되어 배가 되나 가장자리는 중첩되는 파장이 없어 열 에너지를 적게 받기 때문이다. 가열 이후 핫프레스 금형으로 이송시에 온도가 낮아지지만 f 지점을 제외하고 모두 Process Temperature 내에 포함되어 성형이 가능함을 확인하였다. 본 과정으로 최적의 Preheating 시간은 8장 약 29분, 18장 약 31분 36초인 것을 확인하였다.



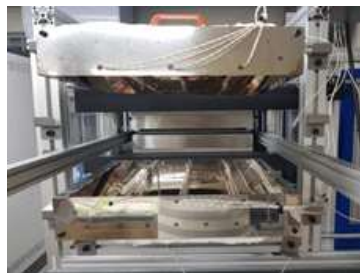


(a) Tack weld and lay on the preheating mold



(b) Preheating

(c) Transfer to the mold



(d) Press the layers by 10 bar

Fig. 4 Hot-press forming process of Carbon/PPS specimen

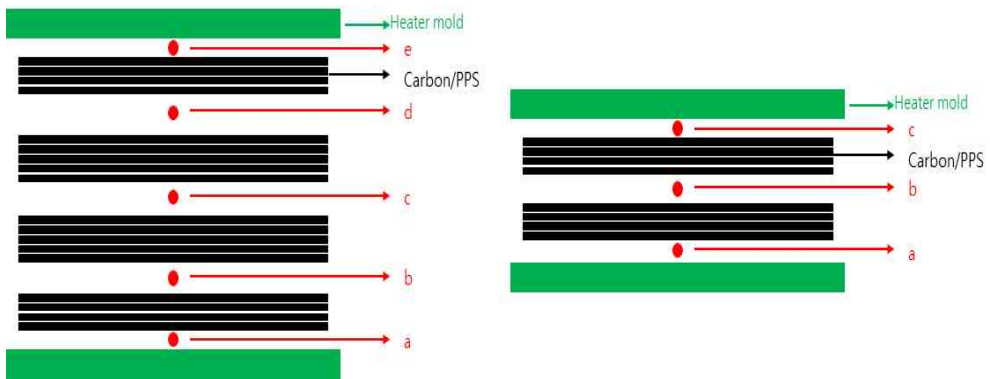


Fig. 5. Thermocouples in each layer

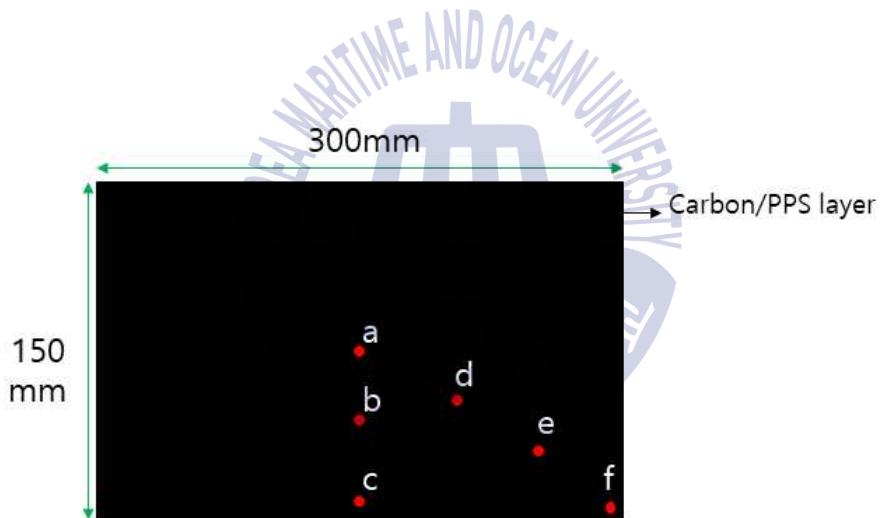


Fig. 6 Position of the thermocouples in middle layer

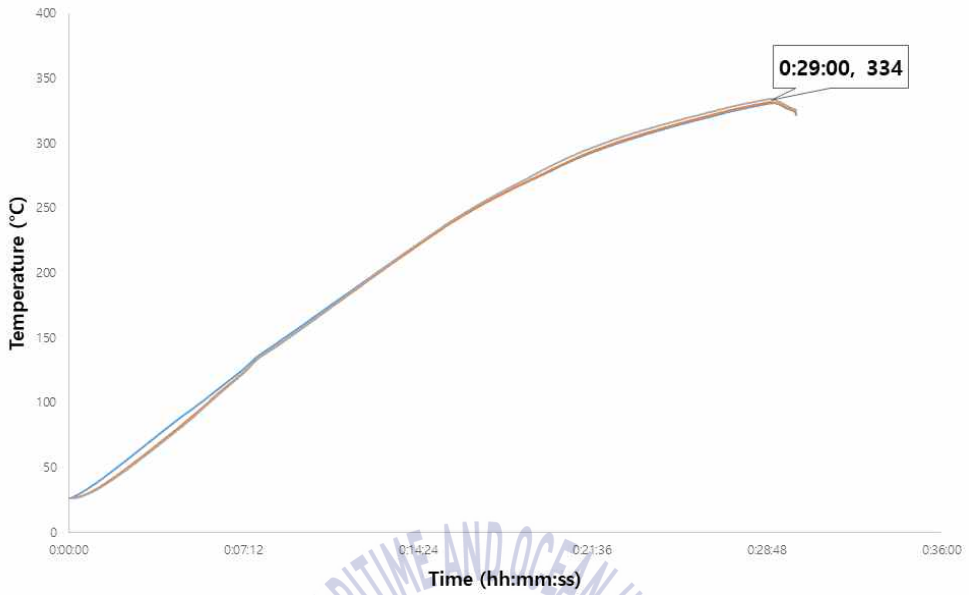


Fig. 7 Temperature data at each layer (8 ply)

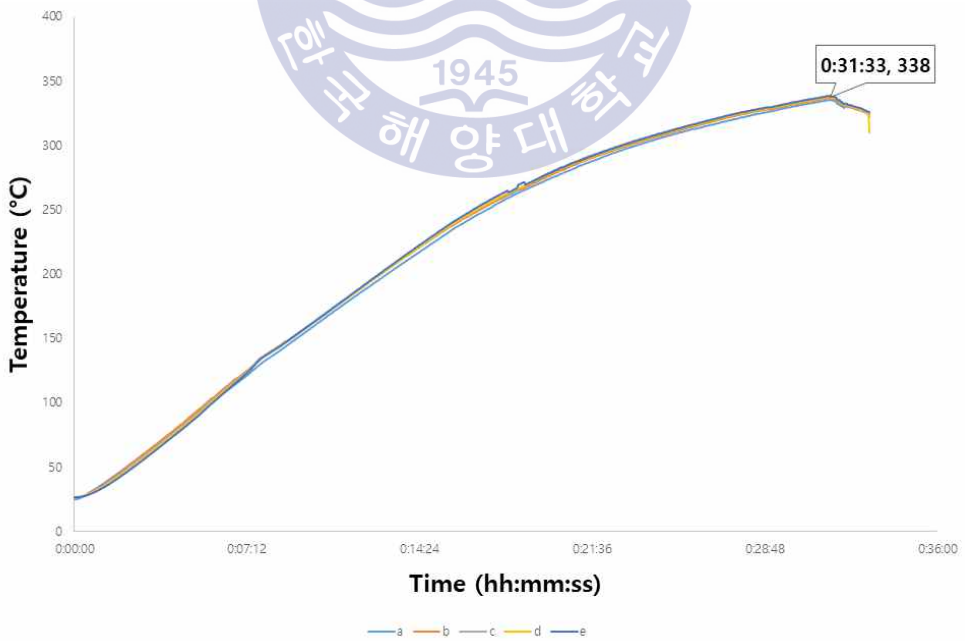


Fig. 8 Temperature data at each layer (18 ply)

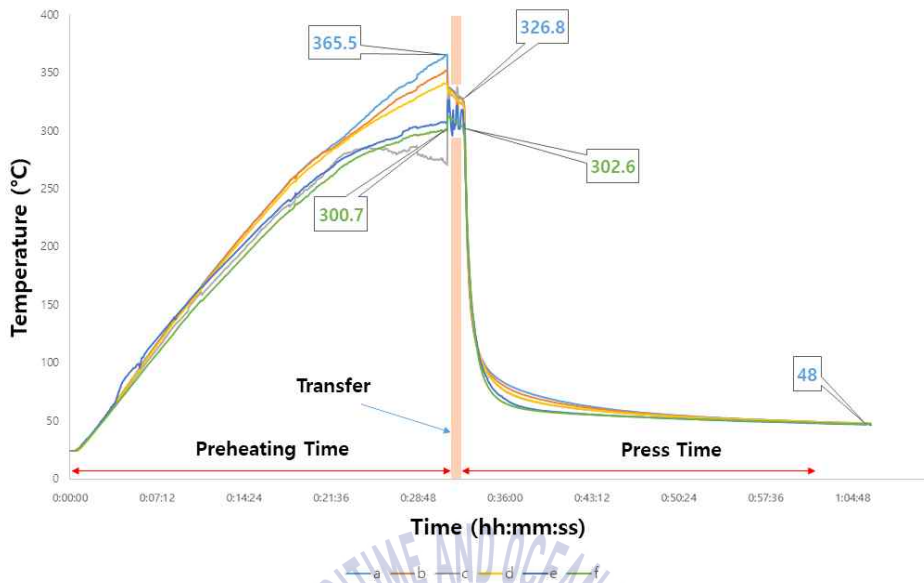


Fig. 9 Temperature data at each position in middle layer (room temperature)

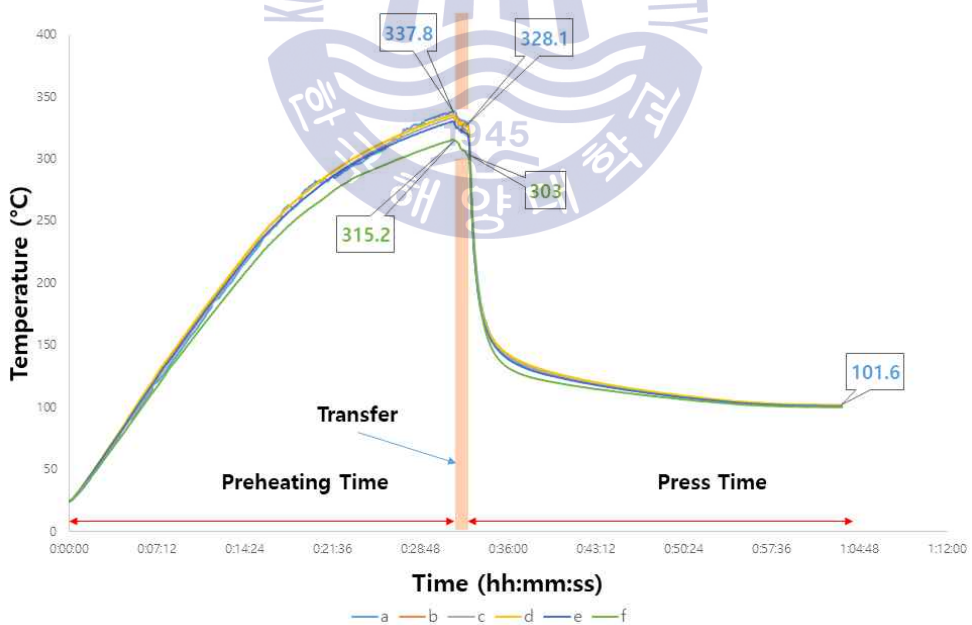


Fig. 10 Temperature data at each position in middle layer (100°C)

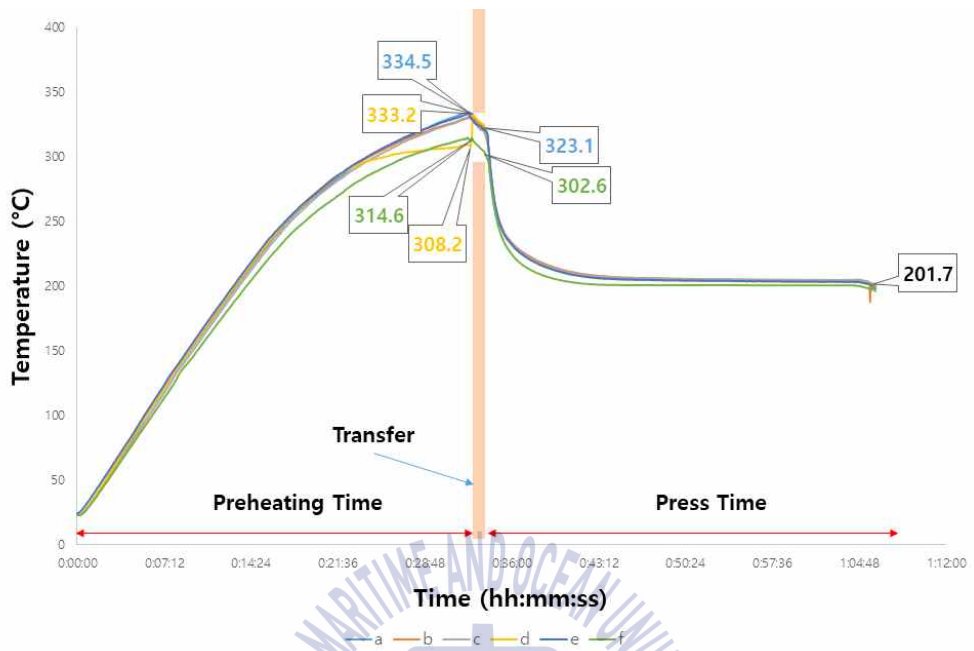
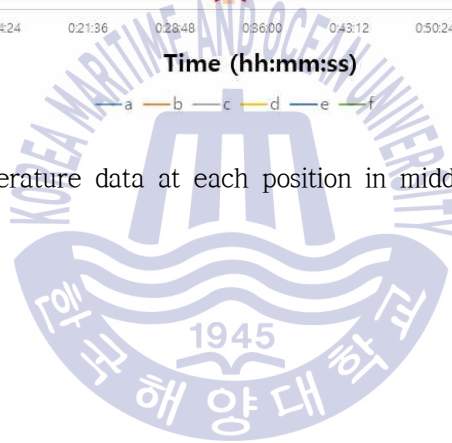


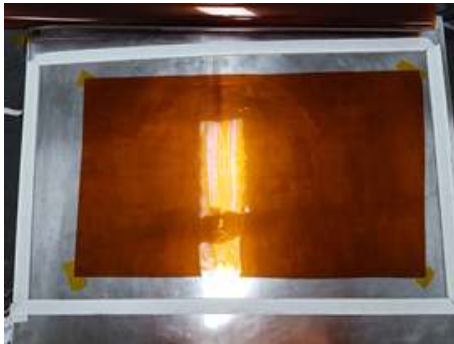
Fig. 11 Temperature data at each position in middle layer(200°C)



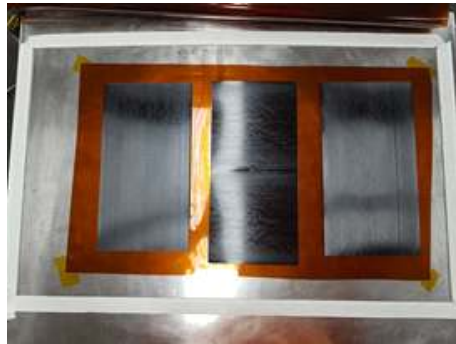
2.2.2. Vacuum forming

진공성형법은 자재를 진공 분위기 하에 오븐에서 가열, 성형, 냉각 과정을 거쳐 성형하는 방법이다. 오토클레이브와 같이 온도 조절이 용이하다는 장점이 있는 성형법으로 핫프레스 성형에 앞서 비교 시편을 제작하였다. 그리고 본 공정 또한 온도 측정을 통하여 성형 온도 사이클을 만들었다.

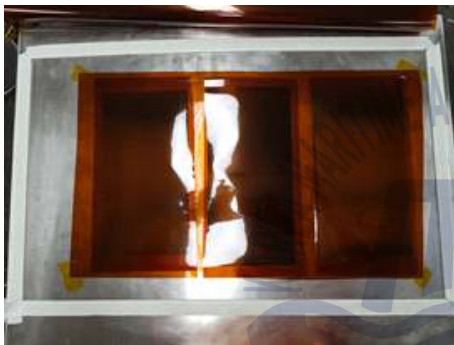
진공성형을 위한 금형에 이형제를 바른 진공백필름을 부착한다. 이는 핫프레스 성형과 동일하게 표면 개선을 위함이다. 그 뒤 고온용 실란트를 부착하고 가접한 프리프레그를 적층한다. 저온의 진공성형법 공정은 제작된 복합재와 진공 부자재의 원활한 탈형을 위한 이형필름과 그 위에 진공 분위기를 만들기 위해 공기의 길을 만들어주는 브리더를 적층한다. 330°C의 고온 성형시에 이 부자재들은 타는 등 버티지 못한다. 그리하여 이형필름 대신 고온용 진공백필름에 이형제를 바른 뒤 브리더를 대신하여 유리섬유를 적층한다. 진공백필름을 실란트에 부착한 뒤 진공벨브를 설치하여 진공 상태를 만든다. 그 과정을 fig. 12에 나타내었다. 제작시에 Thermocouple을 자재의 중앙, 금형, 오븐 내에 부착하여 오븐의 입력값과 자재 및 금형의 균일한 온도 상승 여부를 판단한다. 입력값은 Room Temperature(30°C)부터 330°C까지 3시간, 330°C에서 30분 유지, 330°C에서 120°C까지 2시간으로 설정하였다. 측정 결과값을 Fig. 13에 나타내었다. 오븐의 분위기 온도와 자재, 금형의 온도는 거의 동일한 상승 경향을 보이고 최대온도 차이 또한 2~4°C 차이다. 이는 PPS의 Process Temperature 내에 포함되고 30분 유지시간 뒤에도 동일하므로 성형 시에 설정한 시간과 전체적인 시간차는 있지만 동일한 상승 및 냉각 시간으로 성형하기 적합함을 확인하였다. 핫프레스 성형과 동일한 크기로 0° 인장 시편, 압축시편, 90° 인장 시편을 위한 평판을 제작하였다.



(a) Place vacuum bag with pre-coat



(b) Laminate Carbon/PPS laminates



(c) Place vacuum bag with pre-coat



(d) Place the glass fiber



(e) Vacuum bag film coating



(f) vacuum forming in the oven

Fig. 12 Vacuum forming process of Carbon/PPS specimen

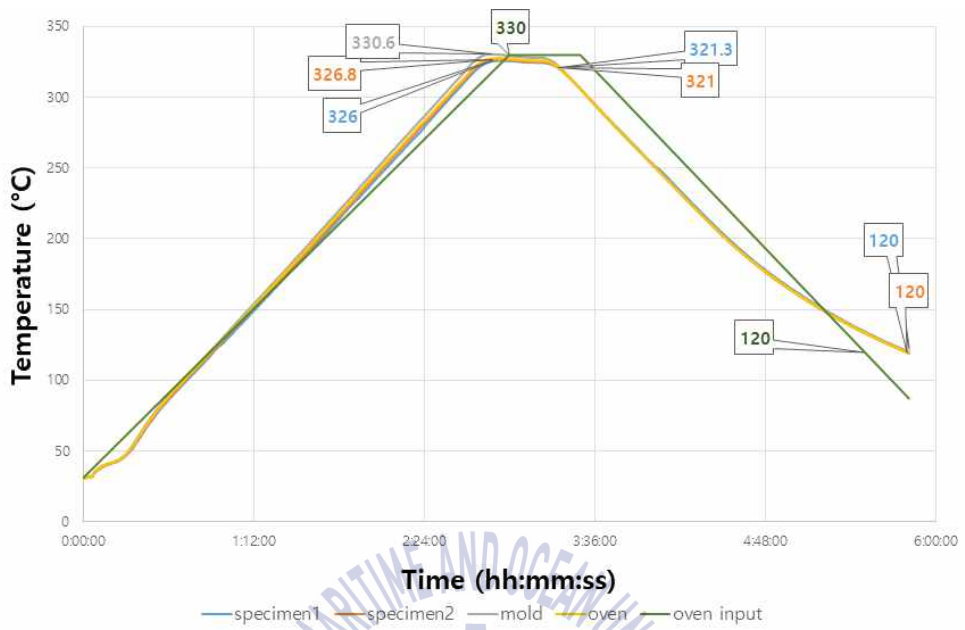
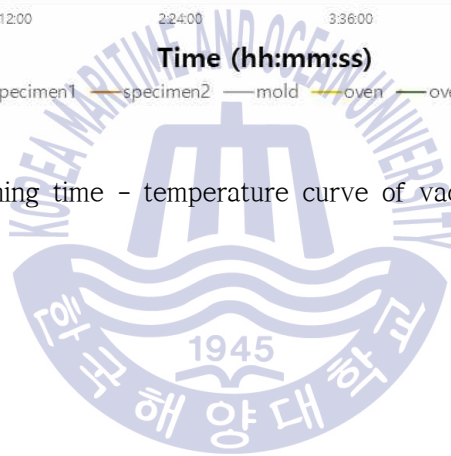


Fig. 13 Forming time - temperature curve of vacuum forming



2.2.3. Differential Scanning Calorimetry

냉각속도의 변화에 의한 결정화도를 계산하기 위해 Differential Scanning Calorimetry (DSC)를 이용하였다. 시료와 기준물질을 가열, 냉각하며 그 열량의 차이를 기록하는 방법으로 데이터를 산출한다. 시료의 물리·화학적 성질을 알 수 있으며 피크의 변화로 정량적, 열량 정보를 얻을 수 있다. 측정 가능한 정보로는 유리전이온도(T_g), 용융온도(T_m), 결정화온도(H_m), 용융열(T_m), 결정화열(H_c), 반응열, 비열, 열용량, 증발열 등이 있다. 본 실험에서는 scinco 社の DSC N-650 장비를 사용하였다. 장비의 온도와 관련한 기본적인 제원은 Table 3과 같다. 본 실험에서는 제작된 시편의 결정화도를 알아보기 위하여 승온 및 냉각 조건을 $15\text{ }^\circ\text{C} / \text{min}$ 로 동일하게 설정하였다.





Fig. 14 Differential Scanning Calorimetry

Table 3 Temperature data of DSC

Data	Unit	Value
Temperature Range	°C	-150 ~ 725
Temperature Accuracy	°C	± 0.5
max heating&cooling rate	°C / min	60

2.2.4. Mechanical Test

DSC를 이용하여 측정된 결정화도와 강도의 상관관계를 확인하기 위하여 기계적 물성시험을 진행하였다. 경도정밀 社의 만능재료시험기인 KDMT-156을 이용하여 0°, 90° 인장시험, 0° 압축시험 그리고 층간 전단시험을 진행하였다. 인장시험은 재료의 가장 기초적인 시험으로 ASTM D3039의 규격에 따라 시험편 제작 후 시험속도 2mm/min로 진행하였다. 이때 시험 중 시험편이 시험기의 grip부에서 파단이 나는 것을 방지하기 위해 탭을 부착하였다. 압축시험은 ASTM D695의 규격으로 성형된 시험편의 압축강도를 시험하였다. 시험속도는 1.3 mm/min이다. 인장시험과 압축시험은 동일한 식 (2)로 최대인장강도를 계산한다.

$$F^{tu} = P^{\max}/A \quad (2)$$

여기서 F^{tu} 는 최대인장강도(MPa), P^{\max} 는 파단 전 최대 하중, A 는 시험편의 평균 단면적이다.

ASTM D2344에 따라 short beam test로 시험편의 층간 전단 강도 특성을 시험하였고 시험속도는 1mm/min이고 short beam 최대 강도는 식 (3)와 같다.

$$F^{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (3)$$

여기서 F^{sbs} 는 short beam 강도, P_m 은 최대 하중, b 는 시험편의 폭, h 는 시험편의 두께이다.

시험은 모두 7개를 진행하였고 최대, 최솟값을 제외한 5개의 평균값들을 비교하였다.

Fig. 15에 가공한 시험편의 개략도를 나타내었다.

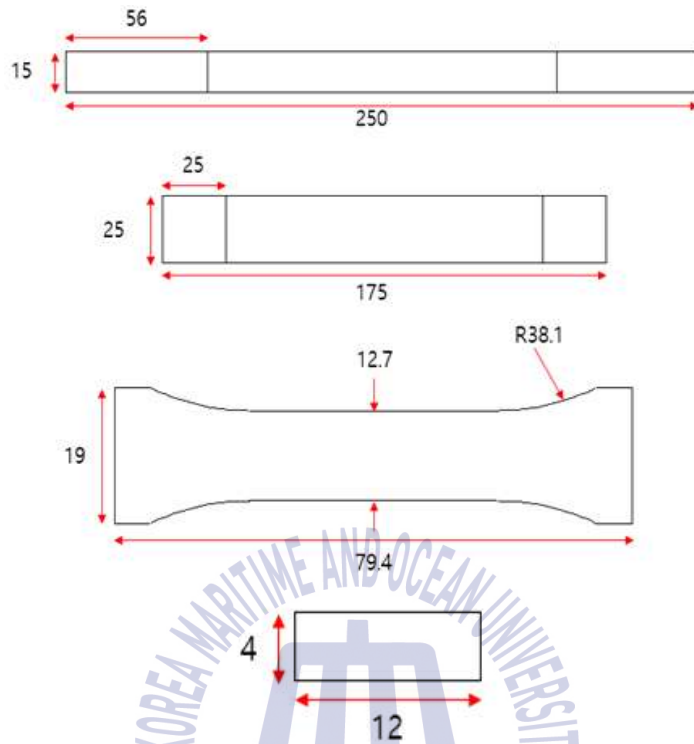


Fig. 15 Test specimen (Tensile 0° ,90° , Compressive, short beam)



Fig. 16 Tensile test (longitudinal and transverse direction)

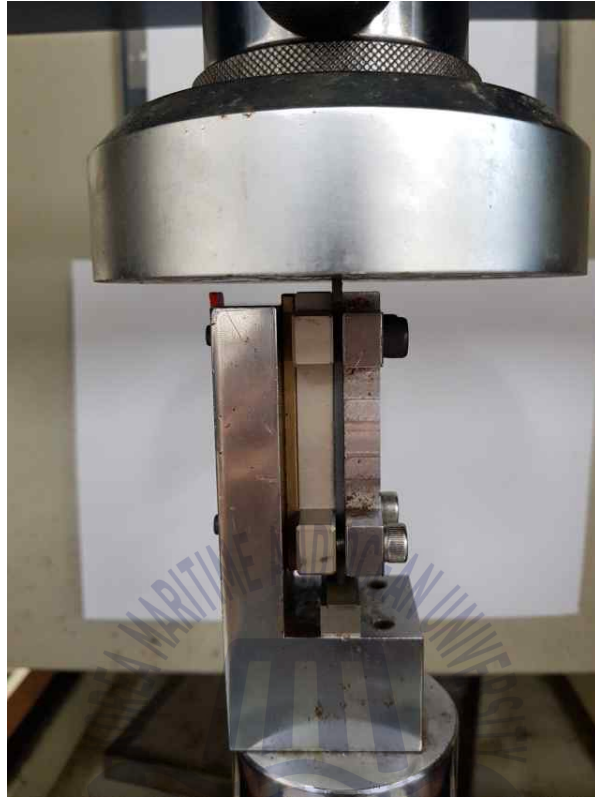


Fig. 17 Compressive test

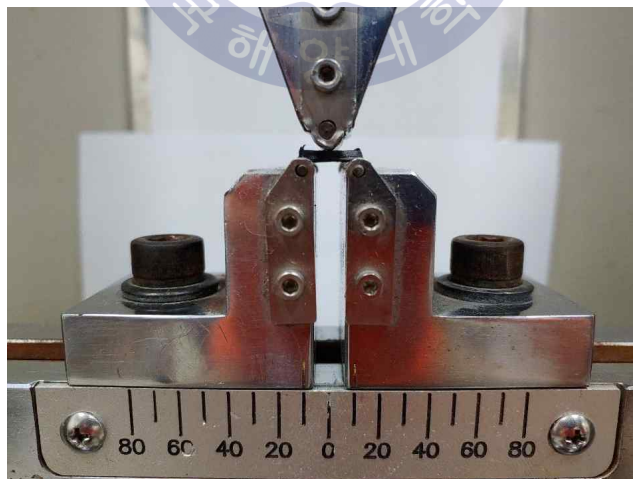


Fig. 18 Short beam strength test

2.2.5. Scanning Electron Microscope

기계적 물성시험 이후 파단면 분석을 위하여 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, 이하 SEM) 으로 파단면을 관찰하였다. Tescan 社의 MIRA-3를 이용했으며 파단면에 전도성 부여를 위한 전처리 작업으로 백금 코팅을 진행하였다.



Fig. 19 Scanning electron microscopy

제 3 장 실험 결과

3.1. 핫프레스 성형 온도 사이클

시편 제작 시 Thermocouple을 이용하여 측정한 전체 성형 온도 사이클을 Fig. 20에 나타내었다. 가운데 층의 f 지점을 제외한 나머지 부분의 평균값의 그래프를 그렸다. 기계적 물성에 영향을 끼치는 요인은 결정화도이고 이는 냉각속도의 변화로 차이가 발생하기 때문에 각 금형 온도의 냉각속도는 결정화 온도까지의 평균속도를 내었다. 그 온도는 220°C 부근이다. 금형 온도가 높아질수록 느린 냉각속도를 보였다. 그리고 금형 온도 200°C와 100°C에서 가압이 끝난 뒤에 공기중에서 냉각하였기 때문에 냉각속도가 변화하게 된다. PPS의 유리전이온도인 90°C 부근까지의 냉각속도를 구하였고 그 결과값은 결정화 온도까지의 냉각속도와 반대로 100°C일 때 더 느렸다. 그 결과값을 Table 4에 나타내었다.

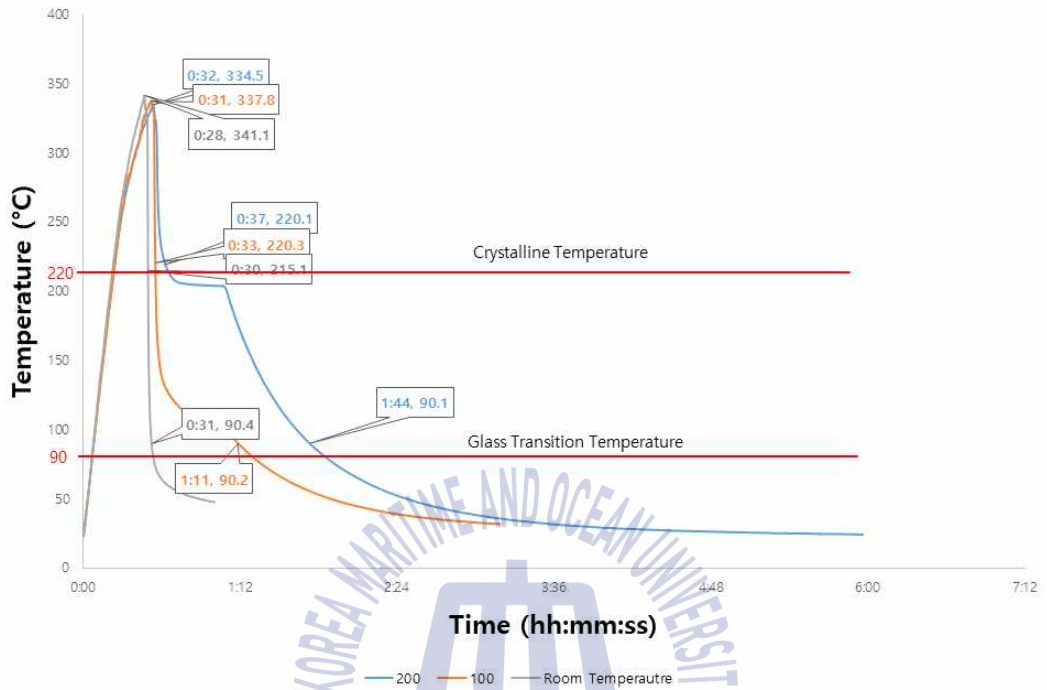


Fig. 20 Press time - temperature curve of hot-press forming

Table 4 Cooling rate according to mold temperature until crystalline temperature and glass transition temperature

Cooling rate (°C/min)	Room Temperature	100 °C	200 °C	Vacuum Forming
Contact molding temperature ~ Crystalline Temperature	96	76.5	20.7	1.75
Demolding ~ Glass Transition Temperature	87.39	1.59	3.2	

3.2. 결정화도

각 금형 온도의 시편을 DSC 측정하여 결정화도를 계산하였고 Table 5에 나타내었다. 측정결과 H_m 이 냉각속도가 느릴수록 커지는 경향을 보이고 이는 계산식에 따라 계산한 결정화도에도 동일하다. 이는 냉각속도가 느릴수록 결정이 더 성장하여 결정화도 값이 커진다고 판단된다. 이에 반하여 냉각속도가 빠르다면 결정의 생성이 저하되고 이로 인해 결정화도가 낮게 나오는 경향을 보이게 된다.

Table 5 Crystallinity of PPS specimen

Mold temperature	Room temperature	100°C	200°C	vacuum forming
Crystallinity (%)	20.18	25.05	27.29	28.54

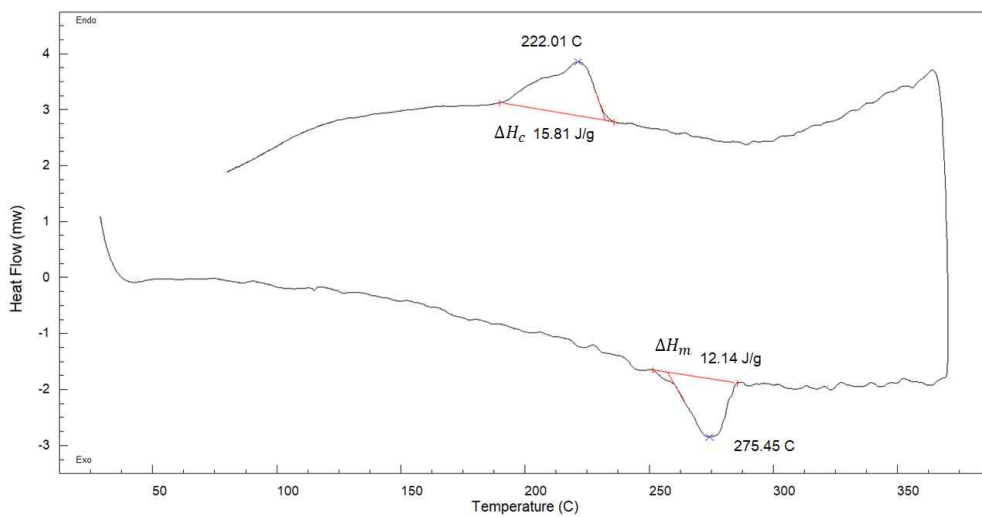


Fig. 21 DSC curve of room temperature mold

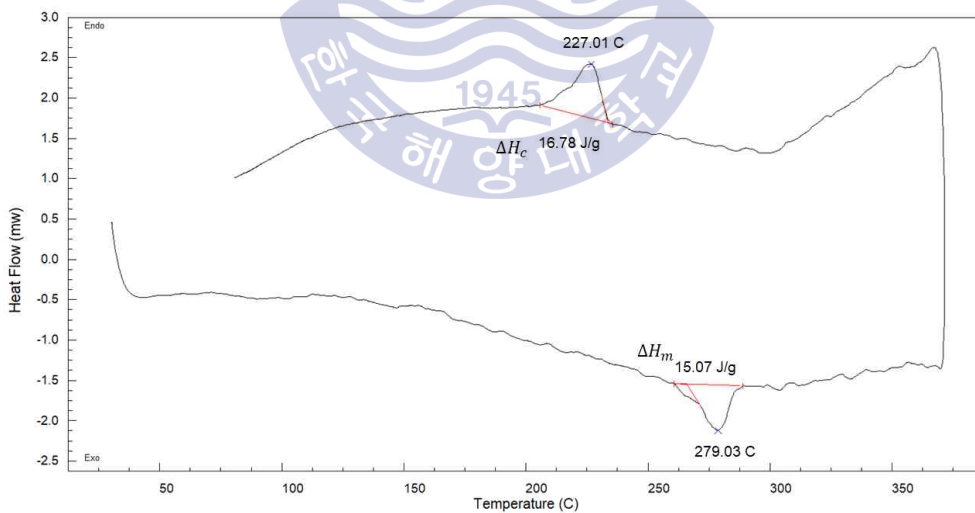


Fig. 22 DSC curve of 100°C mold

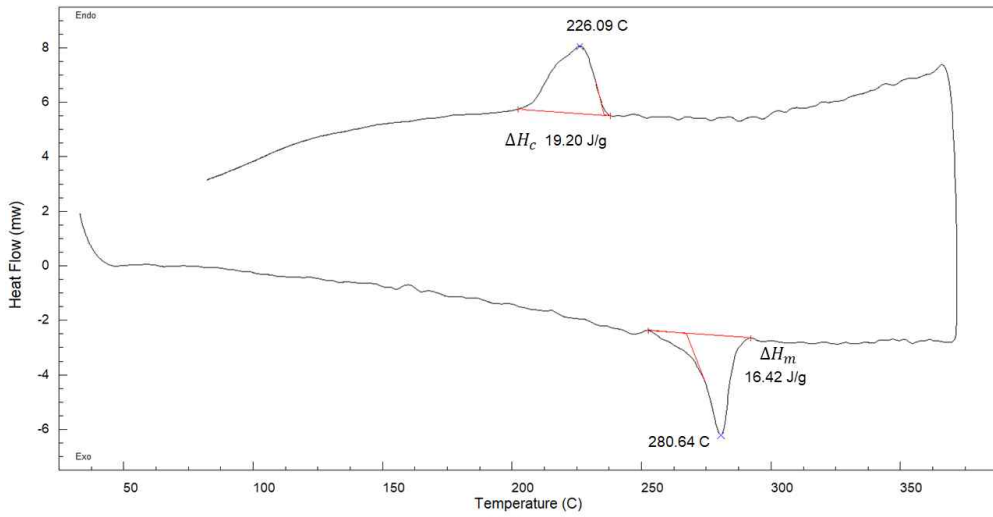


Fig. 23 DSC curve of 200°C mold

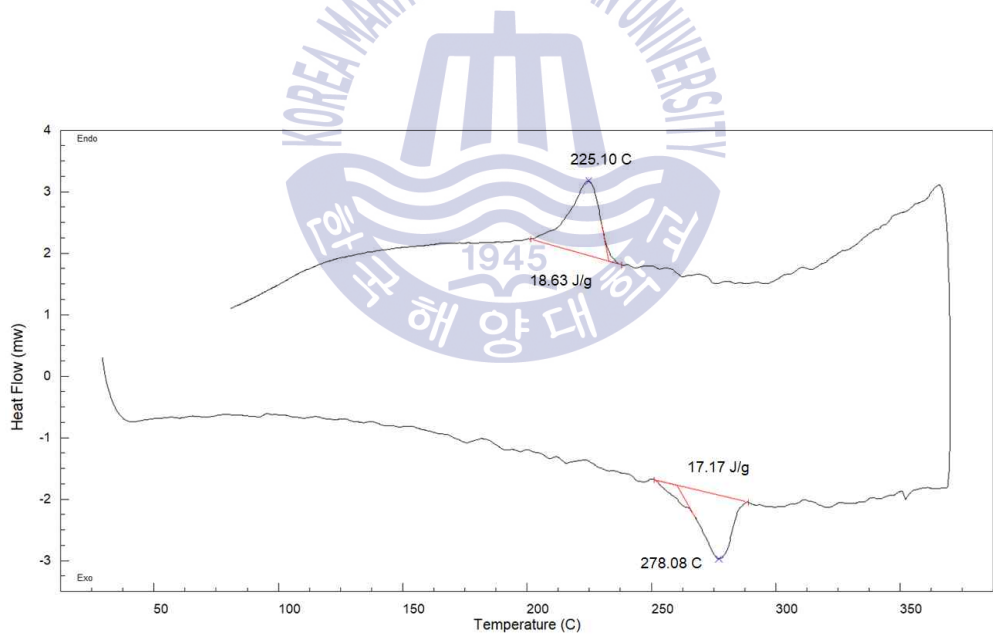


Fig. 24 DSC curve of vacuum forming

3.3. 기계적 물성시험

3.3.1. 0° 인장시험 및 압축시험 결과

0° 인장시험 및 압축시험 결과의 비교를 Figs. 25, 26에 나타내었다. 금형 온도가 높을수록 즉, 결정화 온도까지의 냉각속도가 느려질수록 인장강도가 높게 나온 것으로 확인되었다. 이는 결정 성장이 더딘 빠른 냉각속도 즉 낮은 금형 온도에서 결정이 성장하지 않고 비정질 영역이 많아 재료의 강성이 낮아진 영향으로 판단된다.

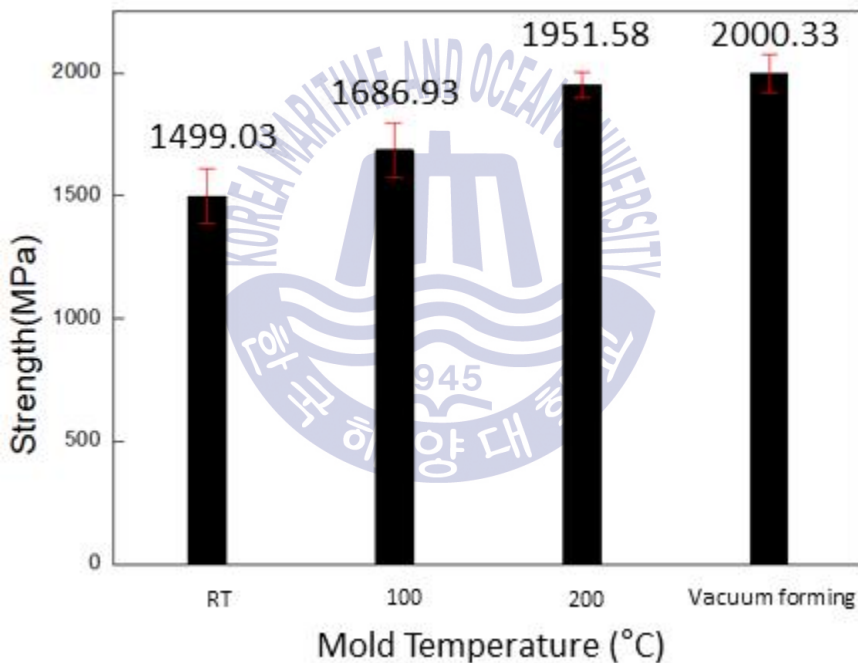


Fig. 25 Tensile test result (longitudinal direction)

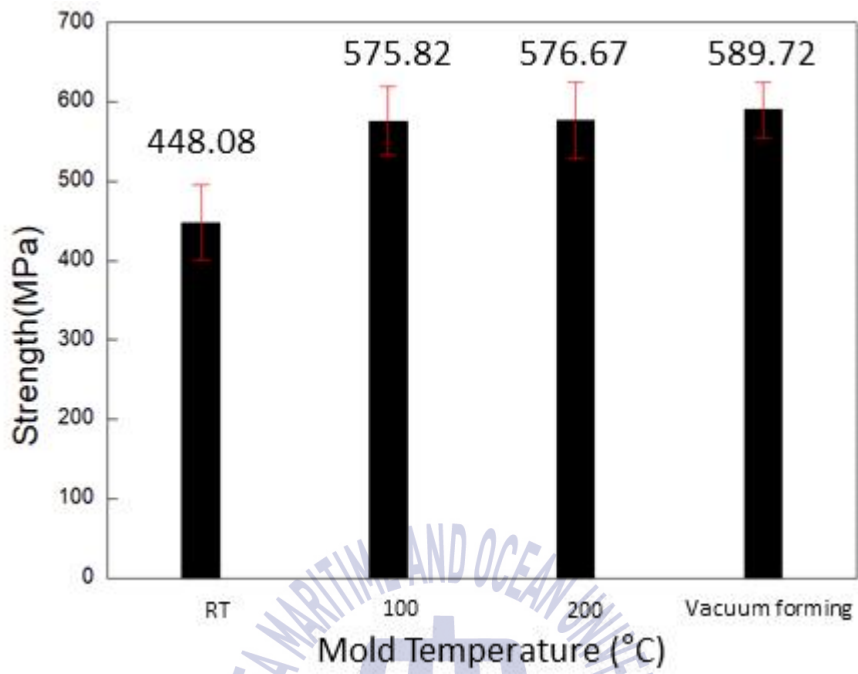


Fig. 26 Compressive test result

3.3.2. 90° 인장시험 결과

섬유의 특성이 지배적인 0° 시험에 반하여 수지의 특성이 지배적인 90° 인장시험 결과를 나타내었다. 핫프레스 성형법을 비교하면 금형 온도 100°C 일 때 가장 높은 인장강도 값을 나타내고 있다. 금형 온도 100°C와 200°C의 성형 사이클에서 가압 후 공기 중 냉각 시 유리전이온도 부근을 지나가게 된다. 결정화 온도까지의 냉각속도와 반대로 이 때의 냉각속도가 금형 온도 100°C 일 때 더 낮다. 비정질 고분자의 비체적은 냉각속도가 빨라짐에 따라 증가한다.¹⁶⁾ 따라서 유리전이온도 부근의 느린 냉각속도가 비정질 영역 비체적이 감소하여 밀도가 증가한 영향으로 판단된다. 그리고 진공성형 결과는 가장 낮게 나타났는데 이는 제작 시 가해지는 압력이 프레스 성형과 비교하여 충분한 압력이 가해지지 않아 기공 등의 내부 결함에 의한 것으로 판단된다.

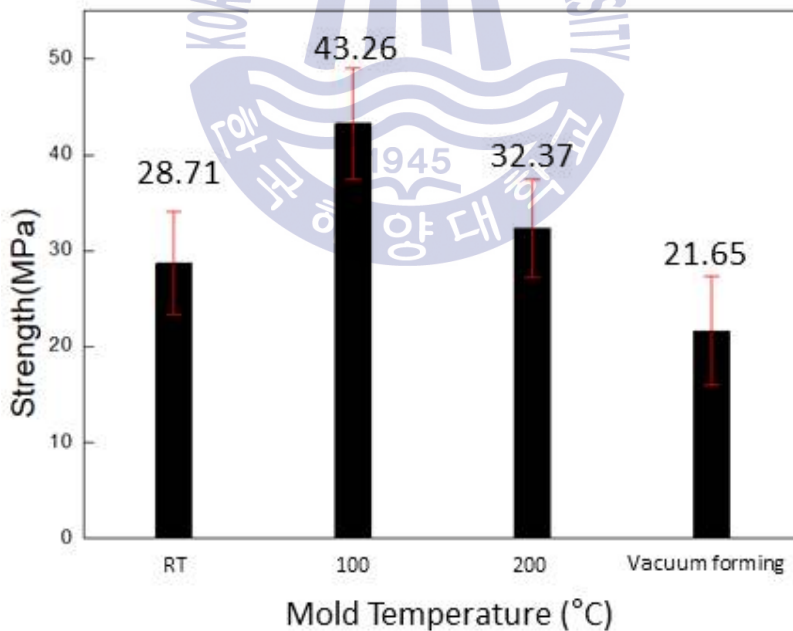


Fig. 27 Tensile test result (transverse direction)

16) R.Y.CHANG., 1996, pp.1789~1795

3.3.3. Short beam 시험 결과

Short beam 시험으로 얻은 층간 전단 강도의 비교 그래프를 Fig. 28에 나타내었다. 결정화도가 높을수록 강도가 높은 경향을 보였다. 이는 섬유 사이에서 수지의 결정이 낮은 냉각속도에서 더 많이 생성된 것으로 판단된다.

진공성형 된 시편은 압력이 충분하지 않아 기공 등의 결함이나 재료의 층 사이에 결합이 핫프레스 성형 시편에 비해 불충분하다고 판단된다.

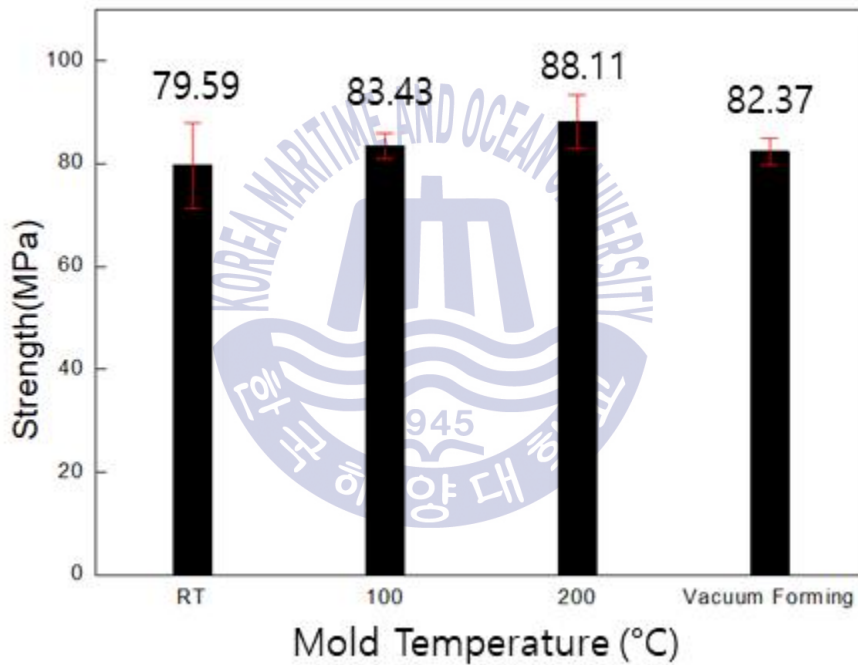


Fig. 28 Interlaminar shear stress test result

3.3.4. 파단면 분석

SEM을 이용하여 인장시험의 파단면을 분석하였다. 금형 온도 Room Temperature일 때 0° 인장시험 파단면이 다른 금형온도의 파단면 보다 섬유에 수지가 많이 없는 것을 볼 수 있다. 금형 온도 100°C의 경우 수지가 강하게 뜯겨나간 현상이 관찰되었고 금형 온도 200°C에서는 대체적으로 섬유에 파단된 수지가 많이 있음이 관찰되었다. 90° 인장시험에서 금형 온도 Room temperature일 때 낮은 결정화로 파단면이 깨끗함을 보인다. 금형 온도 100°C와 200°C일 때 비교하면 두 경우 모두 수지가 뜯겨나간 파단면을 관찰할 수 있다. SEM 사진으로는 두 경우의 강도 차이에 대한 근거를 찾을 수 없었고 이는 다른 장비를 이용하여 수지의 밀도 및 비체적을 측정하면 판단할 수 있을 것으로 사료 된다. 진공성형법으로 제작한 공법은 대체적으로 울퉁불퉁한 파단면을 보이고 있다.



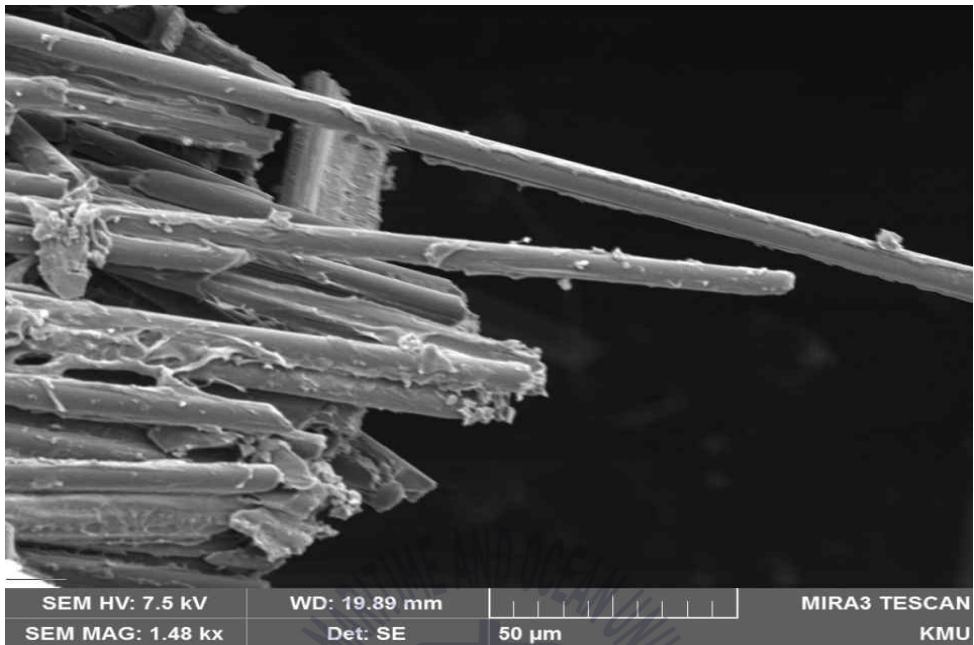


Fig. 29 Fracture surface of room temperature mold specimen (longitudinal tensile)

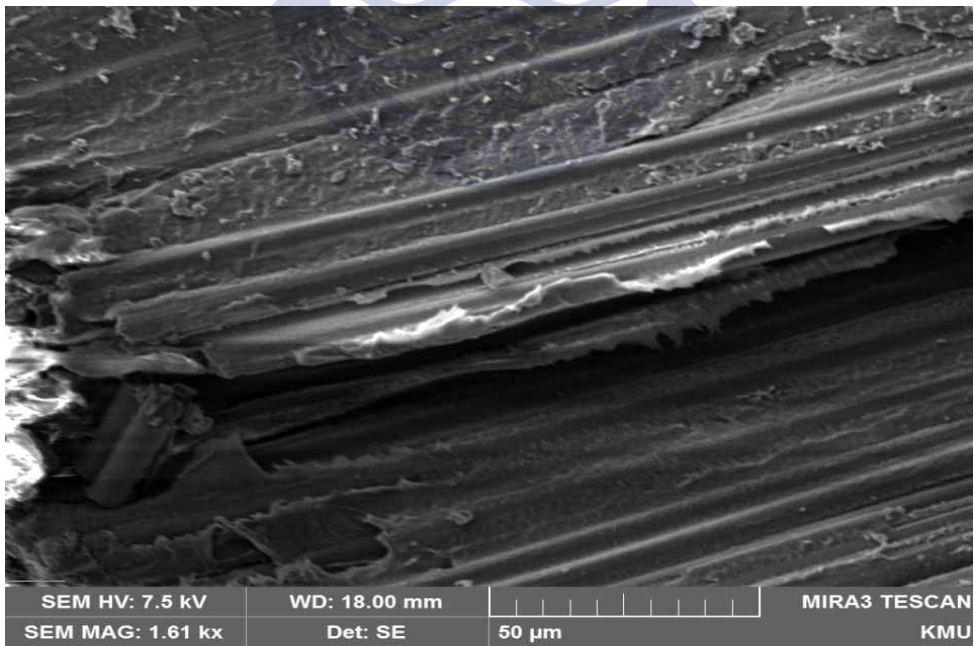


Fig. 30 Fracture surface of 100°C mold specimen (longitudinal tensile)

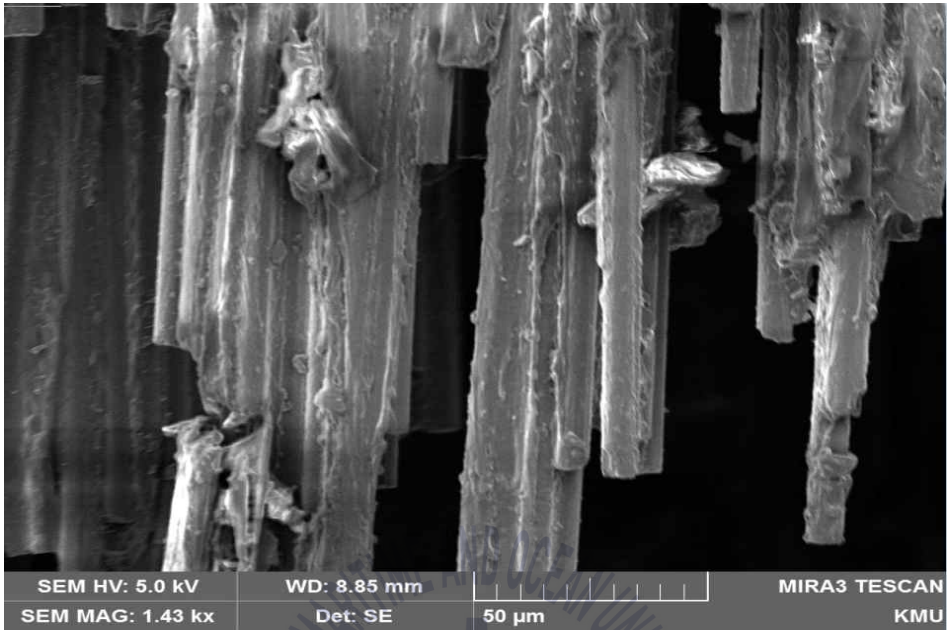


Fig. 31 Fracture surface of 200°C mold specimen (longitudinal tensile)

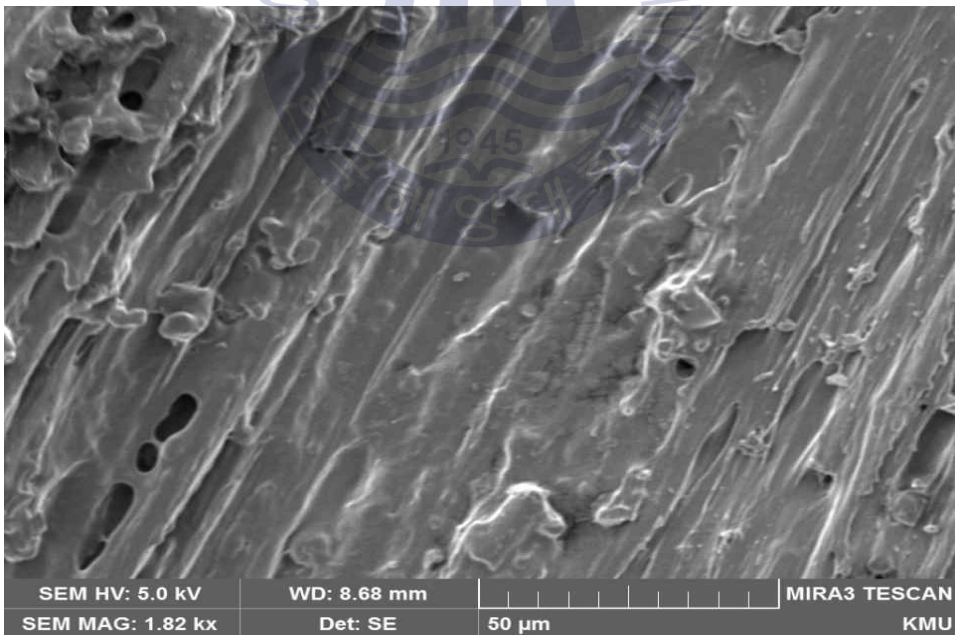


Fig. 32 Fracture surface of Vacuum forming specimen (longitudinal tensile)

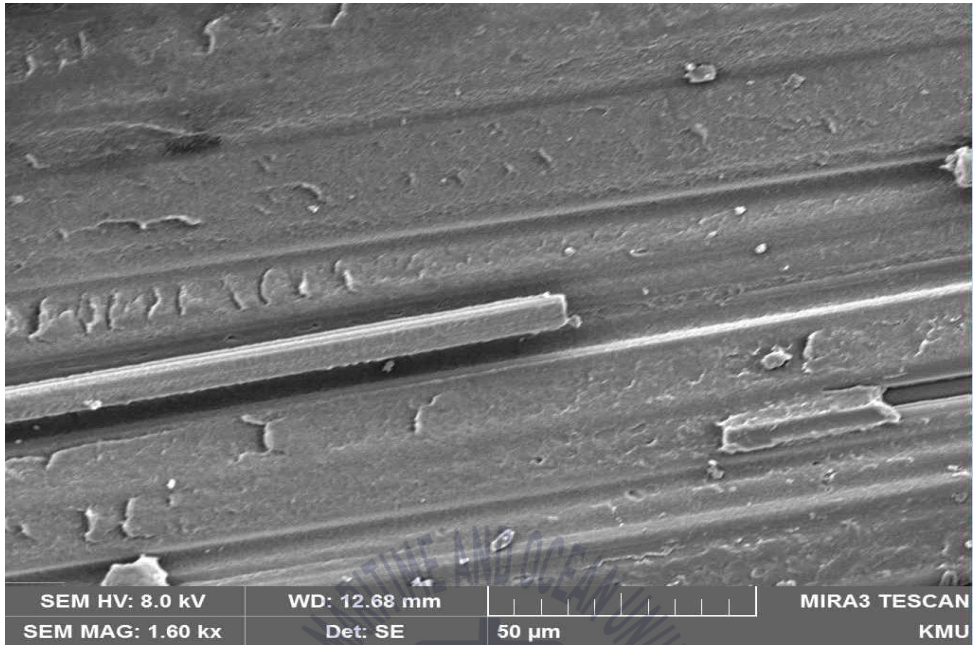


Fig. 33 Fracture surface of room temperature mold specimen (transverse tensile)

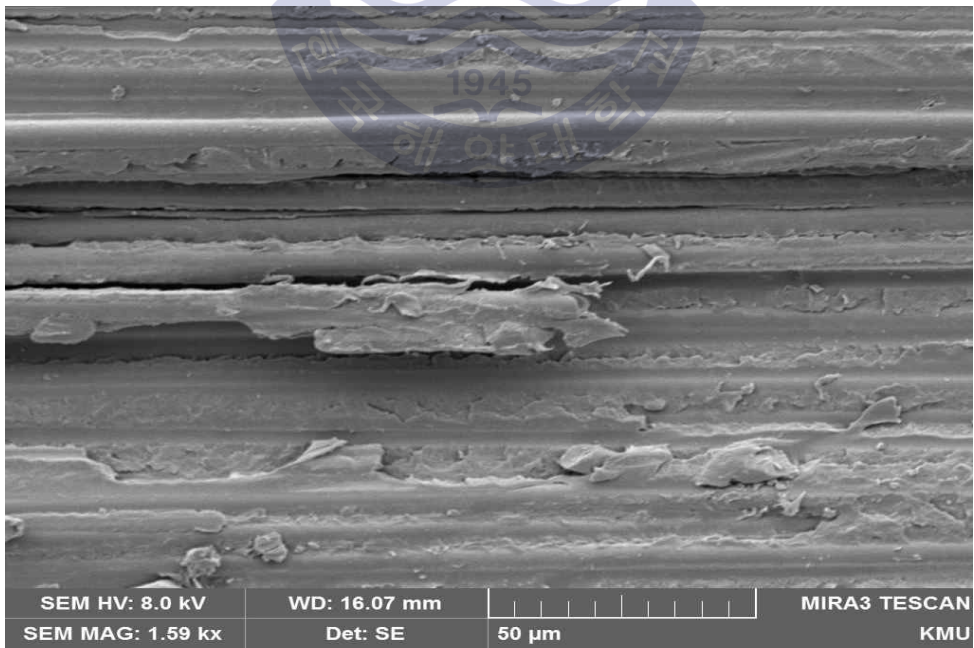


Fig. 34 Fracture surface of 100°C mold specimen (transverse tensile)

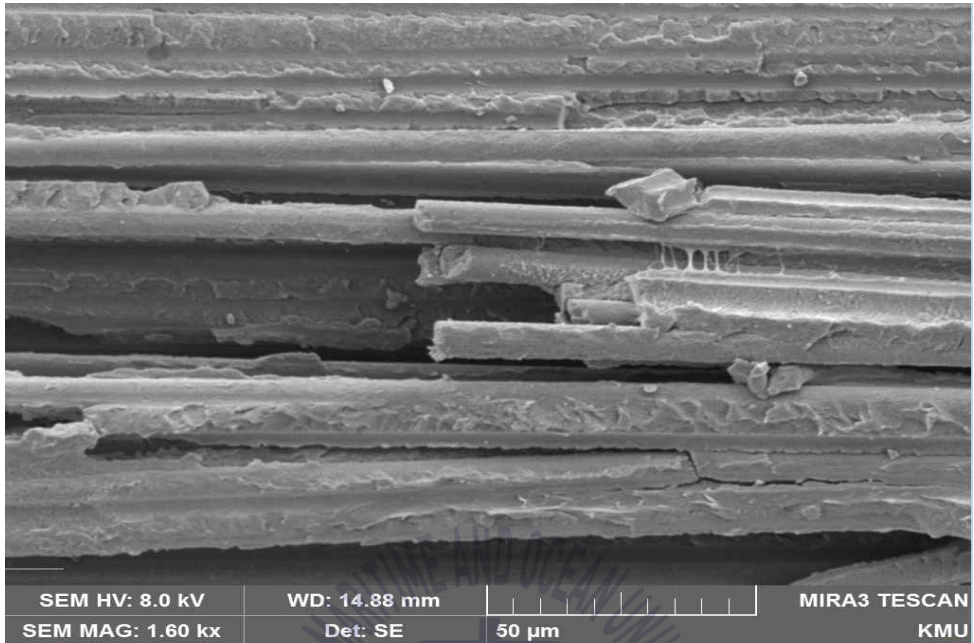


Fig. 35 Fracture surface of 200°C mold specimen (transverse tensile)

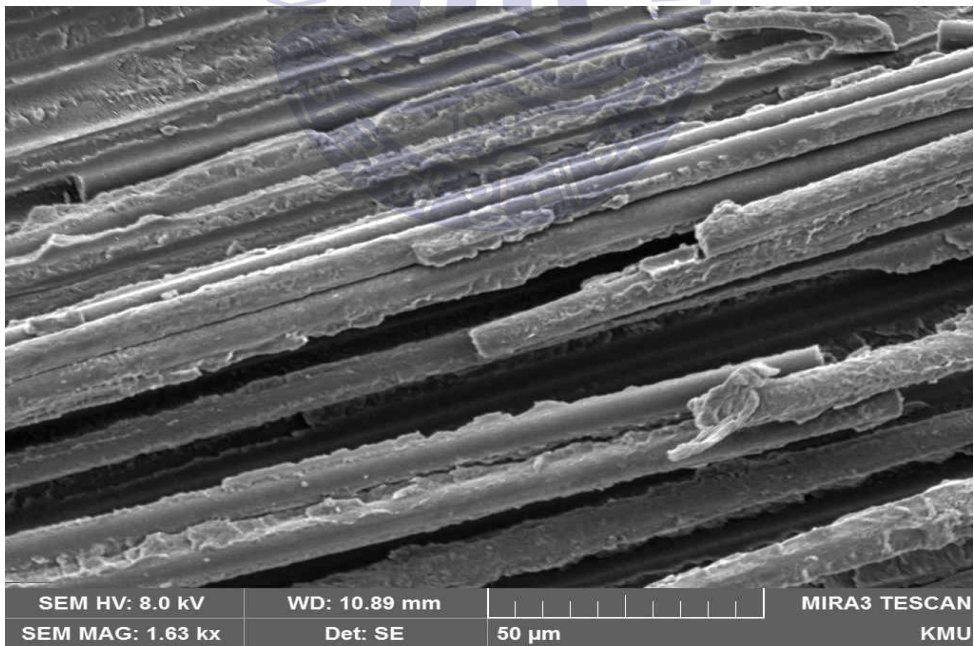


Fig. 36 Fracture surface of vacuum forming specimen (transverse tensile)

제 4 장 결 론

본 연구에서는 열가소성 복합재료인 Carbon/PPS 프리프레그를 핫프레스 성형 시에 금형으로 냉각속도에 변화를 주어 시편을 제작하였다. 제작 전 온도 측정을 통해 각 성형 온도 사이클을 얻어내었다. 각 시편의 냉각속도를 계산하고 결정화도를 측정 및 계산한 뒤 기계적 물성시험을 진행하였다. 그리고 진공 성형공법으로 동일한 과정을 거쳐 핫프레스로 성형된 시편들과 비교하였고 다음과 같은 결과를 얻어내었다.

1. 금형 온도 Room Temperature, 100°C, 200°C 일 때 가압 시작부터 결정화 온도까지 냉각속도는 금형 온도가 높아질수록 느려졌고, 결정화도는 냉각속도가 느릴수록 높았다. 이는 냉각속도가 느릴수록 성장하는 결정이 많아지기 때문으로 판단된다. 이때 진공성형법의 냉각속도가 가장 느리고 결정화도도 가장 높게 계산되었다.

2. 0° 인장강도와 압축강도는 냉각속도가 느릴수록 증가하는 경향을 보였다. 빠른 냉각속도는 결정이 성장하지 않아 비정질 영역이 많기 때문에 재료의 강성이 낮아진 영향으로 사료된다. 강도값이 낮은 시편은 섬유에 수지가 적게 붙어있음을 SEM으로 확인하였다.

3. 90° 인장강도는 금형 온도 100°C, 200°C, Room Temperature 일 때 가장 높은 값을 나타내었는데 이는 가압 후 유리전이온도 부근까지의 냉각속도는 금형 온도 100°C가 200°C보다 느려 비정질 영역의 비체적이 감소된 영향으로 판단된다.

4. Short Beam 시험을 통한 층간 전단 강도 시험 결과 냉각속도가 낮을수록 강도가 높아졌다. 섬유 표면에서 수지 결정이 낮은 냉각속도에서 많이 생성된 것으로 판단된다. 이때 진공성형법으로 제작한 시편은 압력이 낮아 가장 낮은 냉각속도에도 강도가 높게 측정이 되지 않은 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 고속 성형을 위한 핫프레스 성형 시에 검토해야 할 변수를 확인하였고, 금형 온도 변화로 냉각속도를 다르게 하여 시편을 제작할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 앞으로 구조물을 제작하기 전 사전 연구로써 기계적 물성시험을 통해 필요에 맞는 금형 온도로 제품을 제작할 수 있다. 하지만 진공성형 된 시편은 핫프레스로 성형한 시편과 섬유체적률과 기공률 등의 차이가 있을거라 판단된다. 따라서 추후 섬유체적률과 기공률의 측정으로 핫프레스로 성형한 시편과 동일하게 조절한 뒤 강도값을 비교한다면 더 정확한 결과를 확인할 수 있을것이라고 판단된다. 그리고 높은 냉각속도에서 강도 값이 높아지는 시험을 통한 비교, 화학적 실험을 통한 고분자 특성의 더 자세한 연구를 통해 더욱 개선할 수 있을 것이라 생각한다.



감사의 글

이 논문을 적기까지 정말 많은 일과 사람들을 거쳐 왔습니다. 고등학교를 졸업한 뒤 부산으로 대학을 올 때부터 ‘내가 과연 잘할 수 있을까’라는 걱정을 많이 하였는데 그 걱정이 무색할 만큼 정말 많은 분들의 인연이 함께하여 지금까지의 제 자신에게 많은 영향을 주었습니다. 학부과정과 휴학, 그리고 석사과정까지 총 8년 동안 감사한 분들이 매우 많아졌습니다.

학부 1학년때 처음 FRP를 접하고 우리 과의 복합재료 실험실의 존재와 속해 있는 윈드서핑 동아리가 복합재료로 만들어졌단 것을 알게 되며 계속해서 복합재료와 인연을 쌓아왔습니다. 그러던 중 4학년 때 예정에 없던 대학원을... 아 니 ‘만약에 한다면 복합재료를 더 공부해보고 싶다’라고 막연히 생각했던 것을 윤성원 형님의 제안, 경석이 수정이의 추천으로 중소조선연구원에 학생연구원으로 1년간 근무하며 본격적으로 복합재료 공부를 하게 되었고 학교에 와서도 더욱 발전하는 자신이 되었습니다. 이 길을 걷도록 도와주신 모든 분들께 진심으로 감사의 말씀을 올립니다.

막연히 알고 있었던 복합재료를 더욱 관심가지고 전문적인 길로 인도해주시며 언제나 믿어주시고 격려해주시는 김윤해 교수님께서는 어떻게 표현해야 이 감사의 마음을 전달할 수 있을까 항상 고민이 됩니다. 정말 감사드립니다. 그리고 제 앞으로의 길에 있어 전공지식을 전달해주시고 보잘 것 없는 저를 좋게 봐주신 문경만 교수님, 이성열 교수님, 이병우 교수님, 김준영 교수님 정말 감사드립니다.

서평보드를 만들며 처음 인연을 만들었던 윤성원 형님. 형님의 중소조선연구원으로의 소개가 없었다면 지금의 저는 없었을 것입니다. 말로 다 표현하지 못할 만큼 감사드립니다. 그리고 많은 지식으로 많은 것을 일깨우게 만들어주신 이진우형님. 이제는 제가 울산 가겠습니다. 거친 표현 속에 부드러운 애정을 담

아 실험실 생활과 제가 궁금한 것들을 잘 알려주신 박창욱 형님. 자주 오셔도 저는 환영입니다. 언제나 아이디어 팩토리에서 제가 모르는 기자재 활용법을 잘 알려주시고 도와주신 홍정효 연구원님. 제가 도와드릴 부분이 있다면 잘 해 보겠습니다. 그리고 실험실 분위기를 한번 썩 환기시켜주는 세윤이. 앞으로 자리 많이 만들어서 보자. 먼 타국에서 와서 조금은 심하게 적응을 잘 한 천우와 쉐. 내가 연구 관련하여 물어보면 잘 알려주어 너무 고맙고 솔직히 너네 중국 말 잘하는 한국인 맞지...? 언제나 옆자리에서 재밌게 해주는 지수. 덕분에 많이 웃고 앞으로 더 열심히 해서 많은 것을 해보자. 실험실 내에서 잘 따라와 주는 학부생 교문이와 성재도 너희가 있어 실험실도 잘 운영되고 항상 재밌다. 언제나 열심히 하는 모습이 너무 좋다.

그리고... 1학년 때 인연이 어느새 세 명 다 같은 실험실과 같은 전공의 길을 걷고 있게 된 경석이와 수정이. 너희들과는 학부시절 이후에도 내가 연구원에 있을 때는 학교에서 도와주고, 내가 학교에 있을 때는 수정이는 실장님으로써, 경석이는 직접 일을 하는 회사원으로써 나에게 너무 많은 도움을 주었다. 내가 힘들 때도 계속 옆에 있어주었던 너희들에게는 정말 많은 것을 해주고 싶은데 내가 아직 능력이 부족하여 조금만 더 기다려주라!

또한 이 연구를 하며 많이 도와주셨던 신도훈 박사님, 이병언 박사님, 박동철 차장님. 앞으로 실험실과 더욱 인연이 계속되도록 노력하겠습니다. 연구 방향을 지도해주시고 모르는 것 가르쳐주셨지만 제가 잘 따라가지 못 하여 죄송하고 더욱 노력하겠습니다.

1년 3개월 중소조선연구원에 있으면서도 잊을 수 없는 많은 인연과 추억을 쌓은 것 같습니다. 첫 사회생활이었던 제게 힘든 일도 있었지만 그보다 더 좋고 즐거운 일이 더 많았던 것 같습니다. 제게 복합재료 연구라는 것을 가르쳐 주신 하종록 선임연구원님. 정말 많이 배웠고 더 배워야 하는 아쉬움도 많이 남고 항상 제 좋은 모습을 보여드리고 싶습니다. 더욱 노력하여 선임님도 뿌듯 하시도록 하고 싶습니다. 그리고 더불어 선임님 덕분에 연구원 생활도 매우 재미있었습니다. 제가 실수 하더라도 다그치지 않고 차분히 더 알려주신 조제형 본부장님. 그리고 모르는 부분 잘 알려주신 배경민 박사님. 감사합니다. 직접

옆에서 복합재료를 하나하나 알려주신 성훈이 형님. 하종록 선임님과 더불어 항상 형님의 가르침이 생각납니다. 항상 일에 대한 이해가 더뎠던 제게 쉽게 알려주신 태엽이 형님. 형님 덕분에 일 처리 편하게 했던 적이 많습니다. 고맙습니다. 같이 들어와서 본인도 바쁘실텐데 가끔씩 제게 격려의 말 해준 윤태형님. 덕분에 힘 많이 났었습니다. 4개월 뒤에 들어왔지만 특유의 재치와 성격으로 빠르게 동화되었던 상민이 형님. 진짜 형님덕분에 웃겨 죽을 뻔 했습니다. 형님들 덕분에 힘든 일이 있더라도 한풀이도 한 번 더 하고 한 번 더 웃어 잘 지냈었습니다. 감사합니다.

우리 10학번 동기들! 경석이 수정이와 더불어 즐겁거나 힘들 때 자주 만나고 같이 놀던 한진이, 성민이, 영준이 너무너무 고맙다. 너희덕분에 내 타지 생활이 정말 재밌고 편안했다! 그리고 재민이, 명조, 경운이, 경원이, 청운이, 광호, 희범이, 주한이 모두 모임때 마다 항상 즐거웠다.

과생활과 같이 학창시절 빼놓을수 없는 나의 영원한 해양대 윈드서핑 동아리. 우리 28기 동기들 항상 연락하며 안부를 묻고 나보다 먼저 졸업하여 배 타고 번 돈으로 참 맛있는거 많이 사주었는데... 그것과 같이 언제나 힘이 되어주고 추억이 참 많은 우리 동기들 정말 사... 좋아한다... 그리고 선, 후배님들 할 것 없이 모이면 언제나 즐거운 우리 동아리. 언제나 평생 함께하도록 열심히 참석하겠습니다.

마지막으로 아무리 멀리 떨어져 있어도 언제나 응원하는 우리 가족의 영원한 안녕을 위하여 이 글을 마칩니다.

References

장태진, 2016. *세계 항공기산업 성과 및 전망[2016~2025]*. 항공우주산업기술 동향 14(1), pp. 41-53

김기석, 배경민, 오상엽, 서민강, 강창기, 박수진, 2012. *자동차 경량화를 위한 탄소섬유강화 복합재료의 동향*, *Elastomers and Composites* Vol. 46 No. 1, pp. 65-74

정선호, 2018. 차세대 친환경 자동차의 기술 동향, 한국자동차공학회, 오토저널 40(3), pp. 14-17

Sanjay, K., Mazumdar, Ph.D., 2002. *COMPOSITES MANUFACTURING Materials, Product, and Process Engineering*, CRC PRESS : Boca Raton.

이병언, 현동근, 신도훈, 2018. 고성능 열가소성 복합재료를 이용한 성형 공정 기술, 한국소성가공학회지, 27(1), pp. 60-65

Centea, T., Grunenfelder, L.K., 2015. *A review of out-of-autoclave prepregs - Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations*, *Applied Science and Manufacturing* Vol. 70, pp.132-154

Jamin, T., Dubé, M., Laberge Lebel, L., 2014. *STAMP FORMING OF THERMOPLASTIC COMPOSITES: EFFECT OF RADIUS AND THICKNESS ON PART QUALITY*, EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS 16, pp.22-26

Friedrich, K., Hou, M., 1998. *On stamp forming of curved and flexible geometry components from continuous glass fiber/polypropylene composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 29(3), pp.217-226

Lee, In. Gyu., Kim, Do. Hyoung., Jung, Ku. Hyun., Kim, Hee. June., Kim, Hak. Sung., 2017. *Effect of the cooling rate on the mechanical properties of glass fiber reinforced thermoplastic composites*, Composite Structures 177, pp.28-37

Tierney, John J., Gillespie Jr, J. W., 2004, *Crystallization kinetics behavior of PEEK based composites exposed to high heating and cooling rates*, Applied Science and Manufacturing 35, pp.574-558

Vieille, B., Albouy, W., Chevalier, L., Taleb, L., 2013. *About the influence of stamping on thermoplastic-based composites for aeronautical applications*, Engineering 45(1), pp.821-834

이태호, 2011. 탄소섬유의 항공우주 분야 적용, *한국추진공학회 2011년도 추계 학술대회 논문집*, pp511-514

이영준, 백남중, 홍창민, 2007. *PPS(Polyphenylene Sulfide)의 특성 및 응용분야*, 고분자과학기술 18(1), pp.20-25

Joel, R. F., 2015. *고분자공학개론*. Translated by 김대수 et al., Pearson Education. Inc: London.

Christopher, S. B., 2016. *고분자 재료의 기본원리*. Translated by 이영관,

John Wiley & Sons: Hoboken.

박동철, 박창욱, 신도훈, 김윤해, 2018. 열가소성 방향족 폴리머의 결정화 특성에 대한 연구, 한국복합재료학회 31(2), pp.63-68

Chang, R. Y., Chen, C. H., Su, K. S., 1996. *Modifying the tait equation with cooling-rate effects to predict the pressure-volume-temperature behaviors of amorphous polymers*. Modeling and experiments, Polymer Engineering and Science 36(13), pp.1737-1846



Bibliography

최기대, 2009. 엔지니어링 플라스틱 기술 동향, 한국고분자학회 20(1), pp3-7

박은조, 2014. 핵제 및 가소제 첨가에 따른 PLA의 결정화도 개선 및 결정구조에 관한 연구, 석사학위논문, 순천:순천향대학교

최재영, 2013. 탄소섬유강화 복합재료의 변형률속도에 따른 인장물성의 평가, 석사학위논문, 대전: KAIST

Beland Sylvie, 1990, *HIGH PERFORMANCE THERMOPLASTIC RESINS AND THEIR COMPOSITES*, NOYES DATA CORPORATION: New Jersey

김늘새롬, 2016. 장섬유 형상의 열가소성 복합재료 제조 및 특성 연구, 석사학위논문, 대구: 경북대학교

Batista, N. L., Olivier, P., Rezende, M. C., Botelho, E. C., 2016. *Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates*, Materials Research 19(1), pp.195-201

Blond, D., Vieille, B., Gomina, M., Taleb, L., 2014. *Correlation between physical properties, microstructure and thermo-mechanical behavior of PPS-based composites processed by stamping*, Reinforced Plastics and Composites 0(0), pp.1-13

Liu, D., Zhu, Y., Ding, J., Lin, X., Fan, X., 2015. *Experimental investigation of*

carbon fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composites prepared using a double-belt press, Composite Part B: Engineering 77, P.363-370

Lee, D. J., Shin, I. J., 2002. *Effects of vacuum, mold temperature and cooling rate on mechanical properties of press consolidated glass fiber/PET composite*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing

Sacchetti, F., Groupe, W. J. B., Warnet, L. L., Villegas, I. F., 2018, *Effect of cooling rate on the interlaminar fracture toughness of unidirectional Carbon/PPS laminates*, Engineering Fracture Mechanics 203, pp.126-136

Lee, T. H., Boey, F. Y. C. & Khor, K. A., 1995. *ON THE DETERMINATION OF POLYMER CRYSTALLINITY FOR A THERMOPLASTIC PPS COMPOSITE BY THERMAL ANALYSIS*, Composites Science and Technology 53, pp.259-274

Gao, S. L., Kim, J. K., 2000, *Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part I. Crystallinity and interface adhesion*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31, pp.517-530

Gao, S. L., Kim, J. K., 2001, *Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part II: interlaminar fracture toughness*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 32, pp.763-774