



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](#)

2018년 2월
박사학위 논문

섬유강화 고분자 복합재료의
압축성형에서 성형품의
표면상태에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 정 훈

섬유강화 고분자 복합재료의
압축성형에서 성형품의
표면상태에 관한 연구

Study on the Surface State of the Molded Product
in Compression Molding of Fiber Reinforced
Polymer Composite Materials

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 정 훈

섬유강화 고분자 복합재료의
압축성형에서 성형품의
표면상태에 관한 연구

지도교수 양 인 영

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 정 훈

이정훈의 박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 김진우 (인)

위원 동강대학교 교수 양용준 (인)

위원 조선대학교 교수 이동기 (인)

위원 조선대학교 명예교수 심재기 (인)

위원 조선대학교 교수 양인영 (인)

2017년 12월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목적	4
제 2 장 실 험	
제 1 절 실험재료	8
제 2 절 압축성형의 실험장치	17
제 3 절 압축성형의 실험방법	21
제 3 장 리브 성형품의 수축과 뒤틀림	
제 1 절 리브 성형품의 수축과 뒤틀림 측정	29
제 2 절 수축과 뒤틀림의 생성과정	58
제 3 절 천판 상면 중앙부의 부풀음 생성과정	65
제 4 절 맺음 말	69
제 4 장 치수 정밀도	
제 1 절 리브 성형품의 치수 정밀도	71
제 2 절 맺음 말	86

제 5 장 표면 거칠기

제 1 절 리브 성형품의 표면 결함 유형	88
제 2 절 리브 성형품의 표면 거칠기	96
제 3 절 맺음 말	100

제 6 장 결 론

101

참 고 문 헌

103

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Application examples of automotive parts of glass fiber reinforced polymer composite materials	15
Fig. 2-2 Schematic diagram of the experimental apparatus used for compression molding	18
Fig. 2-3 Measuring the location of temperature and pressure in mold	19
Fig. 2-4 Shape of rib molded product	20
Fig. 2-5 Sequence of temperature and pressure in the cooling experiment	26
Fig. 2-6 Location of the heating medium circulation holes ($\phi 10$ mm) in mold	27
Fig. 2-7 Cooling patterns in the rapid cooling experiment (\circ : Rapid cooling)	28
Fig. 3-1 Molding shrinkage and warpage of the rib molded product	30
Fig. 3-2 Relationship between mold releasing temperature and molding shrinkage	33
Fig. 3-3 Relationship between mold releasing temperature and molding warpage	34
Fig. 3-4 Relation between molding load and molding shrinkage	37
Fig. 3-5 Relation between molding load and molding warpage	38
Fig. 3-6 Relationship between top board thickness and molding shrinkage	40
Fig. 3-7 Relationship between top board thickness and molding warpage	41
Fig. 3-8 Relationship between mold temperature and molding	

shrinkage	43
Fig. 3-9 Relation between mold temperature and molding	
warpage	44
Fig. 3-10 Relationship between mold punch speed and molding	
shrinkage	47
Fig. 3-11 Relationship between mold punch speed and molding	
warpage	48
Fig. 3-12 Relationship between fiber content and molding	
shrinkage	51
Fig. 3-13 Relationship between fiber content and molding	
warpage	52
Fig. 3-14 Relationship between molding shrinkage and cooling	
patterns in rapid cooling experiments	56
Fig. 3-15 Relationship between molding warpage and cooling	
patterns in rapid cooling experiments	57
Fig. 3-16 Molding shrinkage formation process of X-sheet	
(XS 40wt%), polypropylene(PP) and polystyrene(PS)	60
Fig. 3-17 Relationship between molding pressure and holding	
pressure time of X-sheet(XS 40wt%)	63
Fig. 3-18 Relationship between mold temperature and holding	
pressure time of X-sheet(XS 40wt%)	64
Fig. 3-19 Creation process of swelling of top surface of top	
board	67
Fig. 3-20 PVT diagram of polystyrene(PS) and	
polypropylene(PP)	68
Fig. 4-1 Relationship between mold releasing temperature and	
molded product width	73
Fig. 4-2 Relationship between molding load and molded	
product width	74

Fig. 4-3 Relationship between fiber content and molded product width	75
Fig. 4-4 Relationship between distance from center of top board and top board thickness dimension	78
Fig. 4-5 Relationship between distance from center of top board and fiber content	79
Fig. 4-6 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness (PP)	82
Fig. 4-7 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness (XS 40wt%)	83
Fig. 4-8 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (PP)	84
Fig. 4-9 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (XS 40wt%)	85
Fig. 4-10 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (PS)	86
Fig. 5-1 Fiber swelling	90
Fig. 5-2 Blank and blister	92
Fig. 5-3 Swelling of glass fiber ends	93
Fig. 5-4 Show of glass fiber	95
Fig. 5-5 Relationship between mold releasing temperature and maximum roughness	98
Fig. 5-6 Relationship between molding load and maximum roughness	99

LIST OF TABLES

Table. 2-1 Abbreviations and applications of thermoplastics	10
Table. 2-2 Comparison of thermal and mechanical properties of polypropylene(PP), polystyrene(PS) and steel	11
Table. 2-3 Properties of reinforcing fibers	14
Table. 2-4 Mechanical properties of X-sheet (P4038-G sheet)	16

ABSTRACT

Study on the Surface State of the Molded Product in Compression Molding of Fiber Reinforced Polymer Composite Materials

By Lee, Jung-Hoon

Advisor : Prof. Yang, In-Young. Ph. D.

Dept. of Mechanical System Engineering

Graduate School of Chosun University

The present study investigated experimentally how defects on the surface of rib molded products developed in the compression molding process of fiber reinforced polymer composite materials have an effect on molding conditions and material characteristics. Particularly, defects formation process after an charge mold cycle are technically described in details. Main findings obtained from experimental investigations are summarized as :

For all materials investigated in the present study including Polypropylene(PP), Polystyrene(PS), and X-sheet(XS 40wt%), the measured molding warpage was reduced with increases in the mold releasing temperature while the measured molding shrinkage was increased.

The behavior of each of materials was found to vary with the molding load. For Polypropylene(PP) and Polystyrene(PS), the was observed to protrude in the opposite direction.

The empirical relationship that can be used to determine the molding shrinkage, molding warpage, and maximum roughness using the mold releasing temperature and molding load was proposed as part of this

study.

The measured molding shrinkage and molding warpage of the X-sheet(XS 40wt%) were larger compared to those of single material (PP, PS) independent of molding conditions for both molding and cooling process. For rib molded products made of X-sheet(XS 40wt%), heterogeneity effects became dominant due to the anisotropy of fibers and parent materials caused by charge process.

The dimensional accuracy for the rib molded products made of Polystyrene(PS) was found to be closely associated with the mold releasing temperature rather than the molding load and the effect of the rib thickness. A small change in dimensional shrinkage of the rib molded products was observed as the mold releasing temperature approaches the material solidification temperature.

Increases in the molding load and reductions in the mold releasing temperature during the molding and cooling process were found to suppress the shrinkage in the width dimension for Polypropylene(PP) and Polystyrene(PS) rib molded products, lowering the surface roughness for the X-sheet(XS 40wt%).

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

고분자(Polymer)와 여러 첨가제의 화합물을 의미하는 플라스틱(Plastics)은 다양하고 독특한 성질들로 인하여 자동차, 민간용 및 군수용 항공기, 스포츠용품, 사무기기들에서 점점 금속부품을 대체하여 현재 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 대체는 플라스틱의 장점인 높은 비강도(중량 대비 강도), 다양한 색상과 투명성, 비교적 저렴한 가격, 성형가공의 용이성, 화학물질에 대한 안정성, 녹이 슬지 않으며 전기불량도체인 점에서 기존 재료에 대체하여 사용되고 있다.

석유를 원료로 하여 싼값으로 얻어지는 폴리스티렌(PS), 폴리프로필렌(PP), 폴리에틸렌(PE), 폴리염화비닐(PVC) 등을 범용 플라스틱이라 한다. 플라스틱의 성형가공은 금속가공의 경우와 유사한 점이 많으나, 설계 시 주의할 점은 플라스틱의 기계적, 물리적 성질이 재료나 공정의 선정과정과 제품설계에 있어서 치수 정밀도, 변형방지, 싱크마크방지 등이 고려되어야 한다.

플라스틱의 종류는 매우 다양하므로, 그 가운데서 적절한 재료를 선정하려면, 제품의 사용 시 요구되는 조건과 치수 안정성이나 마모처럼 장기간 사용 시 변화되는 성질과 거동을 고려하여야 한다. 플라스틱은 금속보다 강도나 강성이 낮지만, 섬유강화 플라스틱 복합재료의 경우에는 비강도나 비강성이 높다. 따라서 필요한 강성을 줄 수 있을 만큼 충분한 단면계수를 갖도록 단면의 크기가 결정되어야 하고, 이를 위해서는 섬유로 강화함으로써, 단면적 대비 관성모멘트가 높은 단면을 설계할 수 있다. 플라스틱을 응용한 것 중에서 가장 중요한 발전은 섬유강화 플라스틱 복합재료의 개발이라 할 수 있다.

섬유강화 플라스틱 복합재료를 사용함으로써 설계상 얻을 수 있는 가장 큰 이점은 재료의 강도가 방향성을 갖고 있는 점으로, 제품에 가해진 하중은 수지 모재로부터 강도 및 강성이 높은 강화섬유로 전달되므로, 강화

재인 유리섬유가 한 방향으로 배열된 경우에는 유리섬유 방향으로 매우 높은 강도를 나타낸다. 이러한 성질은 섬유강화 플라스틱 복합재료의 성형품 설계 시 유용하게 이용되고, 두 방향으로 강도를 높일 때는 한 방향 재료를 일정한 각도로 어긋나게 적층하여 가공한다. 두께방향으로 강도를 높일 때는 다른 종류의 재료를 사용하여 샌드위치 구조로 만든다.

플라스틱의 물리적 성질 중에서 열팽창계수는 특히 높은 편으로, 제품의 설계나 조립이 부적절하면 성형 수축(Molding shrinkage)이나 성형 뒤틀림(Molding warpage)이 일어난다. 유동성형에서 치수조절, 표면의 정밀도에서 문제가 생기지 않도록 성형품 및 금형이 설계되어야 한다. 성형품의 품질을 높이고 금형 수명을 향상시키려면, 단면의 크기에 변화가 심하거나 형상의 갑작스런 변화를 가급적 피해야 한다. 단면이 큰 부분에서는 수축이 일어나서 플라스틱 제품에 기공을 발생시키기도 한다. 또한 단면이 너무 얇은 부분은 강성이 부족하여 성형 후에 금형에서 이탈시키기가 곤란하다. 플라스틱의 탄성계수는 낮은 편이므로 부품의 강성을 향상시키기 위해서는 적절한 형상을 선택하여야 하며, 재료의 절감을 요할 때는 이 점이 특히 중요하다.

플라스틱의 성형은 사출성형의 대표되는 유동성형이다. 섬유강화 플라스틱 복합재료의 프레스 압축성형(X-Sheet, Stampable Sheet 가공법 등)도 유동성형에 속한다. 유동성형은 원판시트를 금형에 대응한 형상으로 절단한 블랭크(Blank)를 적외선 가열로에서 용융상태까지 예열한 후, 프레스에 장착된 금형 내에 삽입하여 충전·보압·냉각·이형이라는 일련의 성형과정을 거친다. 이 유동성형은 단시간 내에 원판시트로부터 최종부품까지를 순식간에 만들어낼 수 있는 매우 생산성이 우수한 성형법이다.

그러나 성형조건에 따라서는 성형품의 수축 및 뒤틀림으로 인한 치수불량인 싱크마크(Sink mark) 등의 여러 가지 불량현상이 발생하게 되는 단점이 있다. 싱크마크는 성형품의 표면에 생기는 오목한 현상으로 금형 내에 주입된 용융수지가 냉각·고화될 때 체적수축으로 생긴다. 즉 금형에 접하는 표면이 빨리 냉각·고화되어 수축하고, 중심부는 늦게 냉각 수축되기 때문에 빨리 수축되는 표면 쪽으로 수지가 움직여 늦게 냉각되는 중심부분은 수지량이 부족하게 되어 함몰되는 부분이 생기는 현상이다. 싱

크마크는 리브(Rib)와 천판(Top board)이 만나는 반대편의 표면 등에 주로 발생한다. 또한 성형품의 형상에 따라서는 살 두께 내부에도 싱크마크가 발생하는데 이것을 공동(Void)이라고 한다. 싱크마크는 성형품의 기계적 특성에 영향을 미치지 않는 않지만, 요철 때문에 미관상 좋지 않다. 특히 자동차의 후드(Hood) 등과 같이 페인팅하여 광채가 나야하는 평면인 경우에 문제가 된다¹⁻⁴⁾.

최근, 수요자의 요구에 따라 고품질 제품의 정밀화 경량화에 수반되어, 플라스틱 성형품의 요구 성능에 충족하도록 성형불량을 없애고 정밀도가 우수한 성형품을 얻는 것이 큰 과제로 되어있다. 이 문제점에 대처하기 위해 CAE에 의해 성형품의 형상 예측이 가능하지만, 충전과정의 유동해석에서 보압·냉각과정 또는 성형품의 이형후의 냉각과정에 있어서 형상변화를 포함한 예측 가능한 단계에는 이르지 않았다⁵⁾. 성형불량현상의 대부분은 플라스틱 특유의 열수축성에 의한 부분으로 충전과정 후에 발생한다. 그러므로 보압·냉각의 방법에 크게 의존하기 때문에 보압·냉각과정, 이형후의 냉각과정의 관찰은 매우 중요하다.

제 2 절 연구 목적

플라스틱 성형품의 두께는 균일이어야 하는 것이 원칙이다. 성형품의 두께가 불균일한 경우, 두꺼운 부분과 얇은 부분에서의 재료 유동성이 크게 다르다. 또한 냉각조건이 다르기 때문에 성형품의 변형이나 내부응력 발생의 원인이 된다. 특히 열가소성 수지의 경우에는 두꺼운 부분에 수축에 의한 굴곡이 생긴다. 그러므로 성형품에 강도보강을 해주고, 재료의 유동성을 돕고 충전효과를 개량시키거나, 내부응력에 의한 변형을 방지하기 위하여 보강 리브(Rib)를 사용한다. 리브는 성형품의 두께를 두껍게 하지 않고 강성이나 강도를 유지할 수 있고, 또 넓은 평면의 변형을 방지하기 때문에 이용되는 형상이다.

유동성형에 있어서 리브를 가지는 성형품(이하 리브 성형품이라 한다.)의 성형이 가장 어렵다. 리브 성형품은 제품 살 두께 변화 때문에 리브의 배면에서의 변형이 일어나는 원인이 된다. 실제 리브 성형품의 성형불량 발생의 원인은 단순하지 않고, 몇 가지 원인이 서로 복잡하게 연관되어 발생하는 일이 많다. 리브 성형품의 생산성을 향상시키기 위해서는 성형불량의 원인과 그 대책에 대해 충분한 이해와 성형과정에서의 관찰과 경험을 쌓아서 대응할 수 있도록 해야 한다¹⁻⁴⁾.

그러나 리브 성형품의 성형불량의 발생 원인에 관한 연구는 단일재료를 사용한 사출성형에 대해서는 연구가 진행되어왔지만, 섬유강화 플라스틱 복합재료를 사용한 압축성형에 대해서는 연구가 많지 않다. Lee⁶⁻¹³⁾ 등은 섬유를 세로로 길게 규칙적으로 배열한 일방향 섬유강화 복합재료의 강도 계산, 섬유의 배향상태 측정하여 정량적으로 나타낸 방향성 측정기술, 섬유함유량과 섬유배향상태에 따른 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도 예측, FRP의 사출성형에 있어서 금형형상 변화에 따라서 섬유배향상태와 섬유함유량분포에 미치는 영향 등에 관한 연구 등을 활발히 진행하고 있다.

Chung¹⁴⁾ 등은 단섬유 보강 이방성 사출성형품의 휨 해석에서 섬유배향에 따른 이방성 물성과 잔류응력을 효과적으로 연계시키기 위하여 배향

텐서를 도입하였고, 간단한 탄성모델을 적용하여 냉각에 의한 수축과 고화 압력에 의한 이형 후 팽창효과를 고려한 잔류응력을 계산하였다.

Lee¹⁵⁻¹⁸⁾ 등은 GFRP 복합재료의 압축성형에서 성형품의 표면요철에 영향을 미치는 성형하중과 금형온도의 성형조건에 따라 표면의 섬유돌출 높이와 중심선 평균 거칠기 및 여과굴곡곡선 값을 정량적으로 예측할 수 있는 관계식을 제시하였다. 또한 GMT-Sheet 성형품 표면의 현미경 관찰에 의해 표면에는 구멍, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀, 여과굴곡곡선 등의 결함을 발견했다. 이 결함들은 요철의 발생 원인이고, 표면 광택에 영향을 주는 현상이다. 그리고 표면 거칠기에 영향을 주는 요철의 가장 주요한 발생원인은 성형 및 냉각 과정에서 발생하는 모재의 수축임을 규명하였다. 그리고 모재의 PVT 특성을 고려하여, 성형품의 표면요철 생성과정과 섬유돌출 높이를 규명하고, 폴리프로필렌 시트의 피복층에 의해서 GMT-Sheet 표면불량의 현상인 표면 거칠기가 어느 정도 개선되는지를 고찰하였다.

본 연구에서는 섬유강화 고분자 복합재료를 사용한 리브 성형품을 대상으로 성형불량의 발생 원인을 연구하였다. 섬유강화 플라스틱 복합재료의 유동성형에서 충전과정 후에 리브 성형품에 나타나는 성형불량 발생의 주원인으로서 다음과 같은 사항들을 들 수 있다.

1. 성형재료의 특성

- 가. 수축성(PVT특성, 결정성, 변형의 시간 의존성 등)
- 나. 이방성(분자배향, 섬유배향 등)
- 다. 불균일성(복합물의 분산상태 등)

2. 성형조건

- 가. 온도상태(수지온도, 금형온도, 블랭크온도, 냉각방법 등)
- 나. 압력상태(성형하중, 성형압력 등)
- 다. 시간적 요소(냉각속도, 냉각시간, 성형시간 등)
- 라. 성형장치(금형 자체의 변형 등)

3. 성형품의 형상

본 연구에서는 위와 같은 성형불량 발생의 요인과 관련하여 섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 리브 성형품의 성형불량 현상이 성형조건이나 재료특성과 어떠한 관계가 있는지를 명확히 하고, 성형과정에 대해서 특히 충전후의 과정을 대상으로 다음과 같이 실험하였다.

첫째 성형재료의 특성에 대해서는 열가소성수지를 섬유로 보강한 섬유강화 고분자 복합재료인 X-시트(X-Sheet: 이하 XS이라한다.)의 모재(Matrix)를 중심으로 유동성형에 사용되는 결정성수지의 폴리프로필렌(PP)과 비결정성수지의 폴리스티렌(PS)을 대상으로 한다⁵⁾. 이 폴리프로필렌(PP)은 기계적 강도가 나일론에 거의 필적하고 내산성이나 내알칼리성이 요구되는 가정용품이나 자동차부품 등의 공업용 재료에 매우 적합하다. 폴리스티렌(PS)은 투명성, 성형성이 우수한 범용플라스틱이지만 깨지기 쉬운 결점이 있다.

둘째 성형조건에 대해서는 재료를 금형 캐비티 안에 넣은 후 금형자체를 성형온도까지 가열하여 압축성형한 후, 금형과 재료를 냉각하였다. 각 성형과정에 있어서 재료와 금형의 온도는 동등하게 하였다. 단, 보압·냉각과정은 크게 나누어서 서냉 실험과 급냉 실험의 2종류로 한다. 서냉 실험에서는 보압·냉각과정에서 금형온도를 균일하게 유지하면서 냉각하여 여러 변수가 성형품 성형에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 급냉 실험에서는 보압·냉각과정에서 금형을 부분적으로 급속 냉각하여 성형품 성형에 미치는 수축이나 뒤틀림의 영향에 대해 고찰하였다. 또한, X-시트(XS)에 대해서는 재료의 재결정온도보다 낮은 온도에서 가열한 블랭크를 금형 캐비티 안에 넣고 압축성형한 후 재료를 냉각하였다. 이는 재료를 금형 벽면에서 급격하게 냉각시켜 생산성 향상을 위해 생산현장에서 사용하고 있는 것과 동일한 방법이다.

셋째 성형품의 형상에 대해서 좌우대칭의 T자 형태로서 리브두께를 4 mm와 12 mm의 2종류로 한다.

본 연구에서 수행한 연구내용을 요약하면, 2장에서는 실험재료와 프레스

압축성형의 실험장치 및 실험방법을 나타냈다. 3장에서는 성형조건과 수축(Shrinkage), 뒤틀림(Warpage)의 관계를 조사하여 불량현상의 발생 원인에 대하여 고찰하였다. 4장에서는 재료의 성형조건과 성형품의 치수 정밀도와의 관계를 고찰하였다. 5장에서는 섬유강화 고분자 복합재료의 리브 성형품에 있어서 표면 결함의 분류와 성형조건과의 관계를 고찰하였다. 6장에서는 본 연구에 의해 얻어진 결론을 나타냈다.

제 2 장 실 험

제 1 절 실험재료

1. 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)

섬유강화 고분자 복합재료는 모재인 플라스틱과 강화재인 섬유로 구분된다. 섬유강화 고분자 복합재료에서 모재의 기능은 외부의 하중을 지지하여 강화섬유에 전달하고 강화섬유가 하중의 대부분을 담당하도록 한다. 또한 복합재료 내의 강화섬유를 물리적 손상과 주위환경으로부터 보호한다. 그리고 플라스틱 모재의 연성과 인성으로 복합재료 내에 생긴 균열의 전파를 억제한다²⁾.

섬유강화 고분자 복합재료의 모재로 사용되는 열가소성 플라스틱 군에는 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 폴리에틸렌 및 폴리염화비닐수지 등이 사용된다. 열가소성 플라스틱 복합재료의 모재로 사용되는 가장 대표적인 무정형 및 반결정성 고분자로는 Table 2-1과 같이 범용수지, 범용엔지니어링, 슈퍼엔지니어링 고분자로 분류하고 약어와 그 용도를 함께 나타내었다^{19, 20)}. 무정형 고분자는 특정한 용융점을 갖지 않지만, 저온에서는 경하고 강성이 있으며 취성이고 유리 같으나, 고온에서는 고무상(Rubbery) 또는 가죽상(Leathery)이 된다.

폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)의 고분자는 체적에 대한 유리섬유의 함량을 10~65 wt% 배합하면 인장강도, 내충격성, 내크립성, 탄성률 등의 기계적 성질을 현저히 향상하고 아연이나 알루미늄의 다이캐스트에 필적하는 치수 안정성을 갖는 성형재료로 된다. 고분자 시험재료로는 자동차 범퍼 빔, 배터리 케이스 등에 적용된 섬유강화 플라스틱 복합재료의 모재로 적합한 범용수지인 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)을 사용한다. 고분자 물질의 성질은 일정한 게 아니라 온도, 압력 및 상변화에 따라 변하나, 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)의 열적 물성 및 기계적 성질을 강철(Steel)과 비교하여 Table 2-2에 나타내었다²⁾.

폴리프로필렌(PP)은 폴리에틸렌과 비슷한 성질을 가지고 있으나 용융점, 투명성, 내굴곡성 등이 보다 우수하며 플라스틱 중에서 가장 가볍다. 인장강도, 압축강도 등과 같은 기계적 강도가 크고 내열 온도 및 열변형 온도가 높으며 내열성이 우수하다. 폴리스티렌(PS)은 용해 때의 열안정성 및 유동성이 양호하기 때문에 성형가공성이 뛰어나다. 특히 사출성형에 적합하고 성형 수축이 작아 성형품의 치수 안정성도 좋고 값이 저렴하다. 그러나 연화온도가 비교적 낮고 깨지기 쉬운 결점이 있다.

본 연구의 실험에서 사용된 폴리프로필렌(PP)은 日本 出光石油化學(株)의 사출성형용 Y200G, 폴리스티렌(PS)은 日本 出光石油化學(株)의 사출성형용 日本 出光石油化學(株) US311이다.

Table 2-1 Abbreviations and applications of thermoplastics

고분자	폴리머 종류	약어	용도	비고
범용 고분자	Polypropylene	PP	자동차의 외장 및 부품 (범퍼, 인스트루먼트 패널)	결정성
	Polyethylene	PE	트림 몰딩, 핸들, 손잡이, 배터리 케이스, 배관	결정성
	Polystyrene	PS	자동차 내부 및 TV/라디오의 부품	비결정 (무정형)
	Acrylonitrilestyrene	AS	투명 부품	비결정 (무정형)
	Acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS	가전 제품	비결정 (무정형)
	Polymethylmethacrylate	PMMA	자동차 Tail lamp, LCD 도광판	비결정 (무정형)
	Polyvinylchloride	PVC	자동차의 앞유리, 파이프	비결정 (무정형)
범용 엔지니어링 고분자	Polyamide	PA	Connector	결정성
	Polyacetal	POM	기어, 롤러	결정성
	Polyethyleneterephthalate	PET	PET병, 블로우 성형	결정성
	Polybutyleneterephthalate	PBT	Connector	결정성
	Polycarbonate	PC	자동차 Head light	비결정 (무정형)
슈퍼 엔지니어링 고분자	Polyphenylenesulfide	PPS		결정성
	Polyetheretherketone	PEEK	내열성(고열)	결정성
	Liquidcrystalpolymer	LCP	고유동	결정성
	Polytetrafluoroethylene	PTFE	유압 Seal 부품(Teflon), 불소수지	결정성
	Polyetherimide	PEI		결정성
	Polysulfone	PSF		결정성
	Polyethersulfone	PES		결정성

Table 2-2 Comparison of thermal and mechanical properties of polypropylene(PP), polystyrene(PS) and steel

Type	PolyPropylene(PP)	PolyStyrene(PS)	Steel
Specific gravity	0.905	1.05	7.854
Specific heat (KJ/kg °C)	1.93	1.34	0.434
Thermal conductivity (W/m/K)	0.24	0.15	60.00
Coefficient of thermal expansion (μm/m/k)	100	80	10~18
Thermal diffusivity (m ² /s) × 10 ⁻⁷	0.65	0.6	14.1
Max. temperature (°C)	100	50	800
Glass-transition temperature T _g (°C)	-14	100	-
Melting temperature T _m (°C)	176	239	1,100~1,500
Ultimate tensile strength (MPa)	20~35	14~83	340~830
Modulus of elasticity E(GPa)	0.7~1.2	1.4~4	190~210
Elongation (%)	500~10	60~1	40~10
Poisson's ratio ν	-	0.35	0.27~0.30

2. X-시트(XS)

섬유강화 고분자 복합재료는 강화재인 섬유와 플라스틱 모재로 구분된다. 보통 사용되는 섬유로는 유리, 탄소, 아라미드, 보론 등이 있다. 이들 섬유는 강하고 강성이 높으며 Table 2-3에 나타낸 바와 같이 높은 비강도(중량대비 강도)와 비강성(중량대비 강성)을 갖고 있다²⁾. 그러나 섬유는 일반적으로 취약하고 마모되기 쉬우며 인성이 떨어지므로, 그 자체로는 구조용 가치가 별로 없다. 플라스틱 모재는 섬유보다 강도 및 강성이 떨어지나 인성이 높다. 따라서 섬유강화 고분자 복합재료는 두 성분의 장점만을 조합한 것이다. 섬유강화 고분자 복합재료는 높은 비강도와 비강성 및 충격강도 등의 기계적 특성 외에도, 섬유강화 되지 않은 플라스틱에 비해 높은 열전도도, 피로저항, 인성, 크리프저항, 마모저항을 갖는다. 실제로 사용될 수 있는 섬유의 최고 함유량은 65wt% 정도이며, 이보다 높은 경우에는 구조적 성질이 떨어진다.

각종 섬유강화 고분자 복합재료 중에서 열가소성 고분자를 모재로 한 재료는 리사이클이 가능하고, 최종처리로써 소각도 용이하다. 또한, 열가소성 고분자계의 복합재료는 내식성 및 생산성이 뛰어나기 때문에 최근 자동차의 연비개선과 경량화의 추세에 힘입어 그 용도가 확대되고 있다²¹⁾. 주요 용도는 자동차의 범퍼 및 좌석 프레임(Seat frame) 등 주로 자동차용 구조부재에 사용된다. Fig. 2-1은 섬유강화 고분자 복합재료의 자동차 부품의 적용 예를 나타내고 있다.

차량 경량화는 기존 내연기관 차량의 연비 향상으로 인한 환경 오염 방지와 에너지 절감에도 큰 의미가 있으나, 자동차 제조사마다 향후 성장 동력으로 준비하는 전기자동차의 항속거리(1회 충전으로 운행거리)를 늘리기 위한 방법이다²²⁾.

섬유강화 고분자 복합재료는 모재와 강화재의 종류 및 형태에 따라 기계적 물성이 변화 한다. 1980년대부터 유리섬유(Glass fiber) 및 카본섬유(Carbon fiber)와 에폭시(Epoxy)수지로 경화시킨 복합소재로 스틸을 대체 하여 경량화하려는 노력을 기울여 왔다. 이를 바탕으로 현재 대표적인 제

조업체로는 미국의 AZDEL, 독일의 BASF, 일본의 出光石油化學, 한국의 한화화학과 롯데화학 등이 소재 개발에 있어서도 큰 진전을 이루었다²³⁾.

본 연구의 실험에 사용된 섬유강화 고분자 복합재료는 일본 出光石油化學(株)의 폴리프로필렌(PP) 모재에 장섬유로 강화한 X-시트이며, 섬유 함유량은 25 wt%, 40 wt%, 53 wt%이다. X-시트(P4038-G)의 기계적 성질을 Table 2-4에 나타내었다²⁴⁾.

Table 2-3 Properties of reinforcing fibers

Type	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Relative cost
Boron	3,500	380	2,600	Highest
Carbon				
High strength	3,000	275	1,900	Low
High modulus	2,000	415	1,900	Low
GlaXS				
E type	3,500	73	2,480	Lowest
S type	4,600	85	2,540	Lowest
Kevlar				
29	2,800	62	1,440	High
49	2,800	117	1,440	High

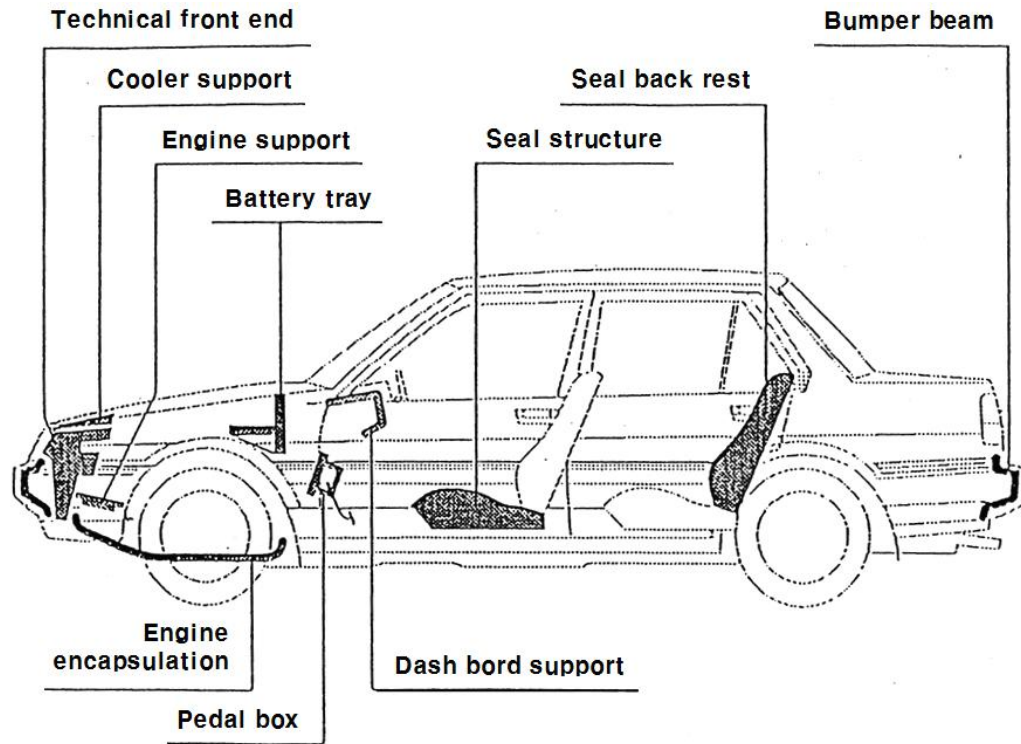


Fig. 2-1 Application examples of automotive parts of glass fiber reinforced polymer composite materials

Table 2-4 Mechanical properties of X-sheet (P4038-G sheet)

Type	ASTM	Unit	Properties
Specific gravity	-	-	1.19
GlaXS fiber content	-	wt%	40
Void content	-	%	3.0~5.0
ThickneXS	-	mm	3.8
Filament diameter	-	μm	22
Fiber length	-	mm	55
Number of filament	-	ea	60
Weight of sheet	-	kg/m ²	4.5 ± 0.2
Tensile strength	D - 638	kg/cm ²	750
Flexural strength	D - 790	kg/cm ²	1,400
Tensile elastic modulus	D - 638	kg/cm ²	45,000
Flexural elastic modulus	D - 790	kg/cm ²	48,000
Izod impact strength	D - 256	kg·cm/cm	60
Thermal deformation temp. (18.6 kg/cm ²)	D - 648	℃	155
Coefficient of thermal expansion	D - 696	cm/cm/℃	2.69 × 10 ⁻⁵

주) 측정온도 : 상온 23℃

제 2 절 압축성형의 실험장치

압축성형은 섬유강화 고분자 복합재료를 금형의 캐비티(Cavity)에 넣고 압력과 열을 가하여 성형한다. 즉, 금형의 하형에 성형재료를 넣고 가열하여 고분자를 연화시켜 유동성을 가지게 한 후 상형을 맞추고 압력을 가하여 성형한다. 이 압력을 성형하중이라 한다. 이때 유압 실린더의 후퇴운동을 억제하는 형태로 실린더 측에 거는 약간의 압력을 성형(molding)이라 한다. 금형온도의 조절은 성형 싸이클(Cycle) 시간의 단축, 성형성의 개선, 성형품의 표면상태 개선, 성형품의 강도 저하 방지, 성형품의 형상과 치수 정밀도 유지 등과 밀접한 관계가 있다.

본 실험의 압축성형에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 2-2에 나타냈다. 이 유압프레스((주)우진기계 80ton)는 하중제어가 가능하다. 금형내의 압력 및 온도의 측정위치는 Fig. 2-3에 나타냈다. 금형내의 압력은 더미 핀(Dummy pin) ①~④를 끼워 스트레인 게이지식 압력센서(Strain gage type pressure sensor : 최대하중 4kN)에 의해 측정했다. 금형온도는 캐비티 표면으로부터 1mm의 위치에 설치한 접지형 시스 열전대(Earth-type sheathed thermocouple : ϕ 1mm) ⑤에 의해 측정했다. 또한 실험조건에 따른 블랭크의 예열은 적외선 가열기를 사용했다^{25, 26)}.

성형수축이 큰 재료(폴리프로필렌, 폴리에틸렌, 폴리아세탈 등)에서는 약간의 두께 불균일, 혹은 살 두께가 두꺼운(4mm이상) 것만으로도 싱크마크(Sink mark)가 생긴다. 성형조건과 수축, 뒤틀림의 관계를 고찰하기 위해 본 실험에서 성형하는 리브 성형품의 형상을 Fig. 2-4에 나타냈다. 이 리브 성형품은 좌우대칭의 T자 형태로서 리브두께(T_2)는 4mm와 12mm로 하였다. 리브 성형품 T자의 위 표면(이하 천판(Top board)이라 한다.) 두께 T_1 은 금형에 삽입하는 블랭크의 양에 의해 변화가 가능하다. 금형 상면의 편치는 서냉과 급냉 실험용의 2종류로 하였다.

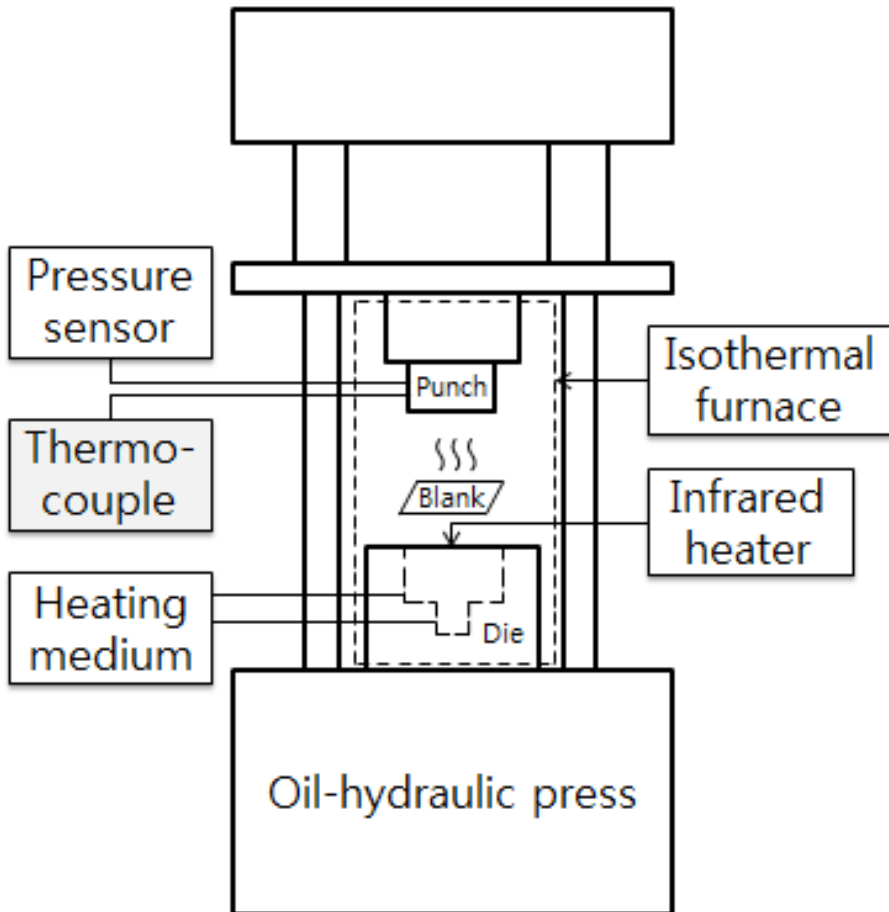


Fig. 2-2 Schematic diagram of the experimental apparatus used for compression molding

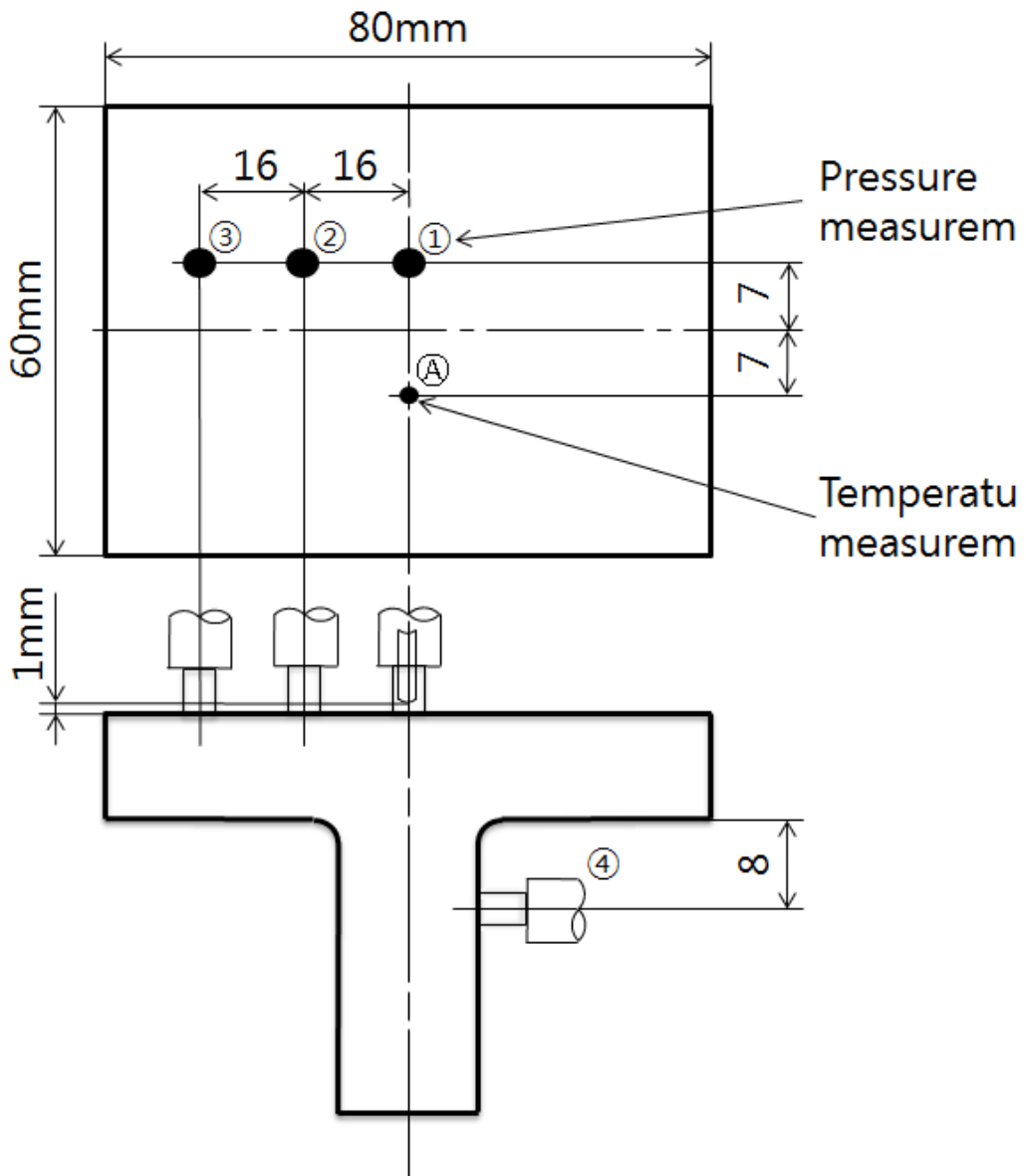


Fig. 2-3 Measuring the location of temperature and pressure in mold

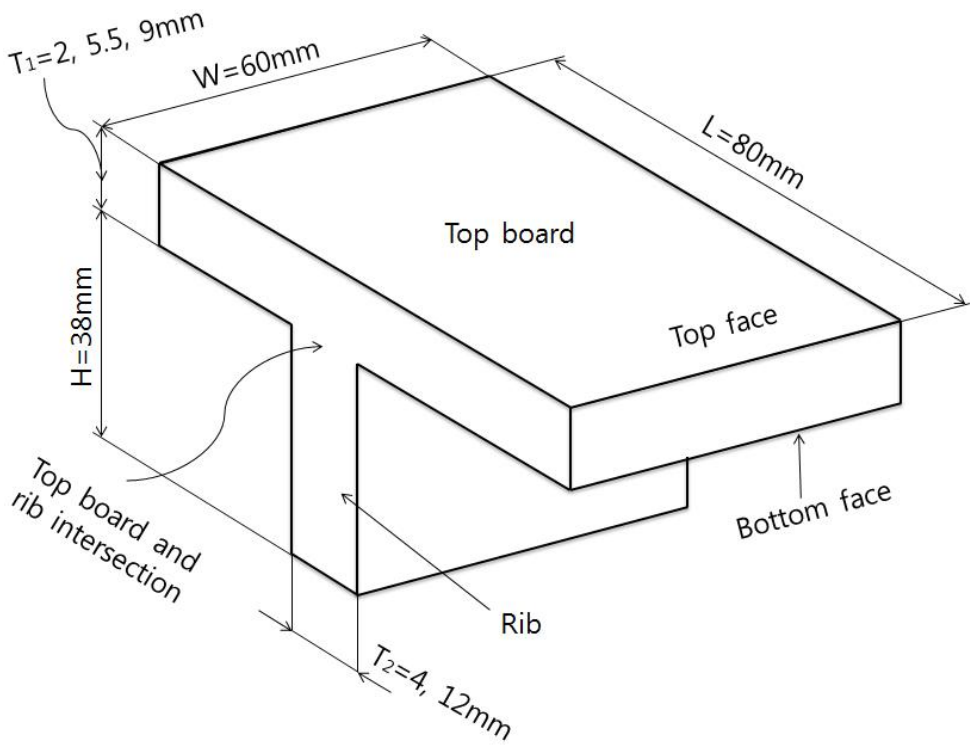


Fig. 2-4 Shape of rib molded product

제 3 절 압축성형의 실험방법

냉각속도는 최종 성형품의 치수 안정성(Dimensional stability)과 직접적 관련성이 있다. 성형품의 3대 요소인 외관, 물성 및 치수 정밀도의 유지는 금형의 온도제어에 의존하는 비율이 대단히 높다. 따라서 금형 온도제어의 목적은 성형 Cycle 시간의 단축, 성형품의 표면상태 개선, 성형품의 강도 저하 방지, 성형품의 형상과 치수 정밀도 유지 등과 밀접한 관계가 있다¹⁻⁴⁾. 서냉 및 급냉 실험에서 시간변화에 따른 온도와 압력의 시퀀스를 Fig. 2-5에 나타냈다. 시험재료인 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(XS) 3종류의 판 두께는 모두 3.8 mm이다. 시험편은 원판시트를 금형에 대응한 60 mm × 80 mm × 3.8 mm 형상으로 절단한 블랭크를 2~4매 적층하여 금형 내에 삽입하였다.

1. 서냉 실험

본 서냉 실험에서는 보압·냉각과정에서 금형내의 온도를 균일하게 유지하면서 냉각하였다. 금형내의 열매체유(냉각수) 순환구멍(ϕ 10 mm)의 위치는 Fig. 2-6에 나타냈다. Fig. 2-3의 압력열전대 ㉠로부터 측정되는 온도를 기록하고, 이온도를 금형온도로 하였다. 서냉 실험 순서는 다음과 같다^{25, 26)}.

가. 예열과정

- (1) 금형온도 80℃일 때 실온의 블랭크를 금형 내에 삽입하고 금형온도 조절기에 의해 금형을 가열한다.
- (2) 금형온도 조절기의 열매체유(냉각수)의 온도가 소정의 온도에 도달한 후, 열매체유의 온도를 30분간 일정하게 유지하고 블랭크의 온도를 균일하게 한다.

나. 충전과정

- (3) 금형 상면의 펀치를 하강시켜 블랭크를 가압하고, 재료를 리브부에 유입시킨다.

다. 보압 · 냉각과정

- (4) 성형하중을 일정하게 유지하면서 금형내부를 냉각시킨다.
- (5) 성형품의 표면온도가 소정의 이형온도가 되었을 때 성형품을 꺼낸다.

라. 이형후의 과정

- (6) 금형에서 꺼낸 성형품은 자연방열에 의해 실온까지 냉각한다. 이 과정에서 성형조건을 변화시켰다. 이형온도는 금형과 성형품 이형 시 Fig. 2-3의 열전대 ①로부터 측정되는 온도로 하였다.

2. 급냉 실험

본 급냉 실험의 섬유강화 플라스틱 복합재료에 대해서는 X-시트(XS) 가공법에 의한 성형 실험에 의해 비교하였다. 이 X-시트(XS)의 복합재료 경우에는 대부분 생산현장에서 생산성 향상을 위해 등온냉각 급냉한다. 급냉 실험 순서는 다음과 같다^{25, 26)}.

가. 금형온도

(1) 금형 내부온도는 50℃로 일정하게 하였다.

나. 예열과정

(2) 적외선 가열기에 의해 블랭크를 200℃로 예열하였다.

다. 충전과정

(3) 200℃로 예열된 블랭크를 금형 내에 삽입한 후, 금형 상면의 펀치를 하강시켜 블랭크를 가압하여 리브부에 유입시킨다.

라. 보압·냉각과정

(4) 성형하중을 일정하게 60초간 유지한다.

(5) 금형으로부터 성형품을 꺼낸다.

마. 이형후의 과정

(6) 금형에서 꺼낸 성형품은 자연방열에 의해 실온까지 냉각한다.

3. 급냉각 실험

본 급냉각 실험에서는 보압·냉각과정에서 저온의 열매체유(냉각수) 유입에 의해 금형내의 부분적, 집중적으로 냉각한다. Fig. 2-7에 냉각과정의 냉각수 구멍 위치 패턴을 나타냈다. Fig. 2-6에 금형내의 열매체유(냉각수) 순환구멍을 나타냈다. Fig. 2-3에 온도 및 압력의 측정위치를 나타냈다. 급냉각 실험 순서는 다음과 같다.

가. 예열과정

- (1) 실온의 블랭크를 금형온도 80℃인 금형 내에 삽입하고, 고온용 온조기로부터 열매체유(온수)를 서냉용 열매체유(냉각수) 순환구멍에 유입시켜 금형을 가열한다.
- (2) 온조기의 열매체유 온도가 소정의 온도에 도달한 후 열매체유의 온도를 30분간 일정하게 유지하여 수지의 온도를 균일하게 한다.

나. 충전과정

- (3) 금형의 상 편치를 하강시켜 수지를 리브부에 유입시킨다.

다. 성형·냉각과정

- (4) 성형품에 프레스의 하중을 50 kN 으로 유지하면서, 저온용 온조기로부터 저온(40℃, 60℃)의 열매체유를 집중냉각부에 유입시켜, 금형 내부를 10분간 냉각한다.
- (5) 금형으로부터 성형품을 꺼낸다.

라. 이형후의 과정

- (6) 금형에서 꺼낸 성형품은 자연방열에 의해 실온까지 냉각한다.

3. 섬유 함유량비

섬유강화 고분자 복합재료를 사용한 Fig. 2-4의 리브 성형품 천판부의 섬유 함유량(Fiber content)은 연소법에 의해 구하였다. 섬유 함유량을 구하기 위해, 리브 성형품의 천판 중립면에서 단부까지 3부분 60mm(가로)×10mm(세로)을 채취해서, 전기로에서 해당 영역을 620℃로 30분간 가열·연소했다. 연소 전·후의 무게는 정밀전자저울(Ohaus, Switzerland, No. AP250D:1/10,000g)로 측정하였다.

섬유강화 고분자 복합재료를 열압축 유동성형한 후, 리브 성형품 천판부의 섬유 함유량(Q_{fr})은 다음 식 (1)에 의하여 구하였다²⁷⁾.

$$Q_{fr} = \frac{Q_f}{Q_{f0}} \times 100(\%) \quad (1)$$

Q_{f0} 은 성형 후의 채취 부분별 연소 전의 무게, Q_f 는 연소 후의 무게이다.

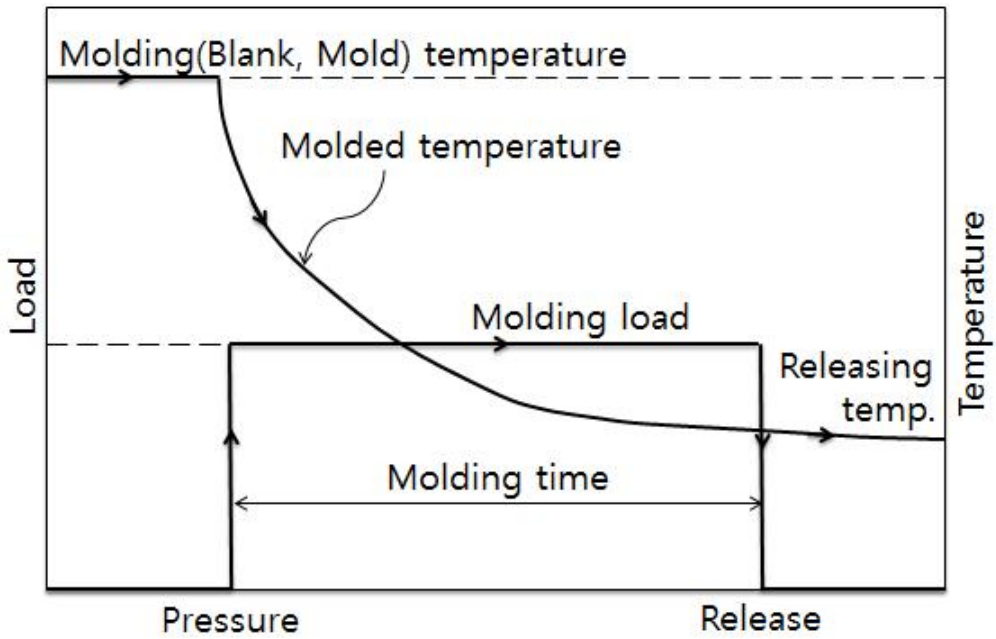


Fig. 2-5 Sequence of temperature and pressure in the cooling experiment

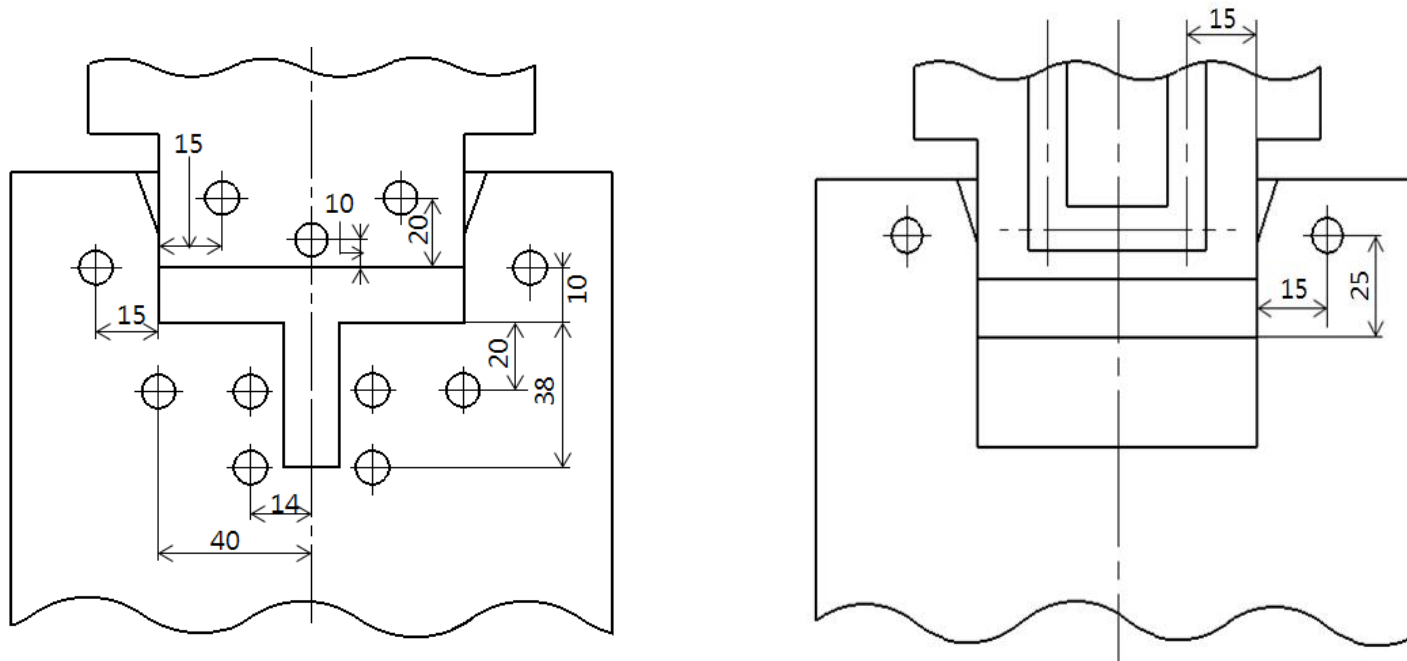


Fig. 2-6 Location of the heating medium circulation holes($\phi 10$ mm) in mold

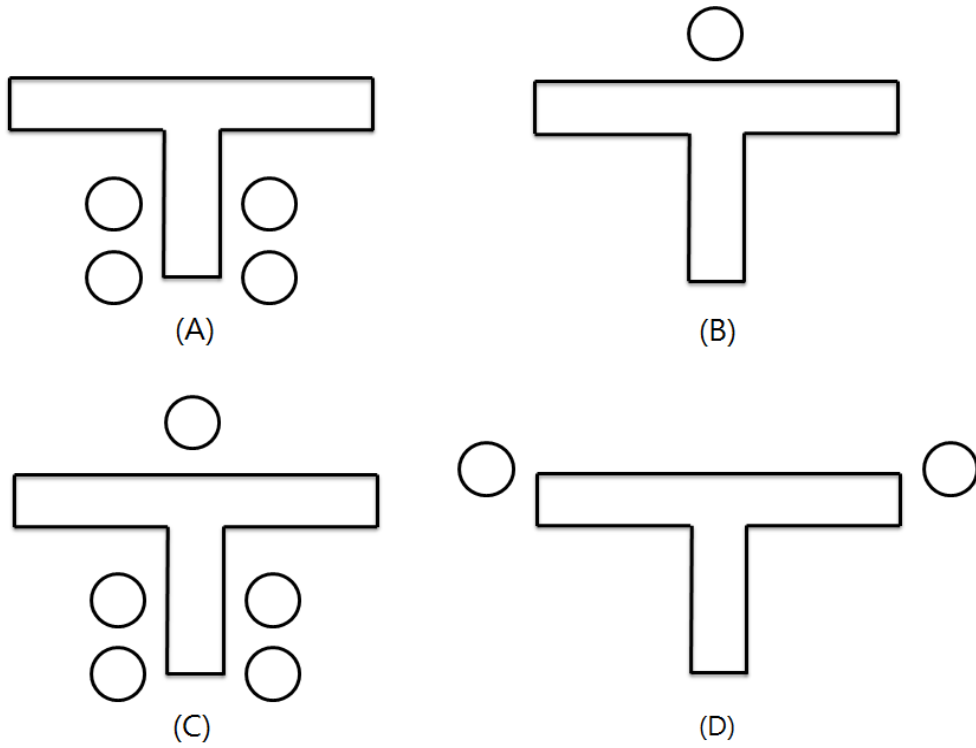


Fig. 2-7 Cooling patterns in the rapid cooling experiment (○: Rapid cooling)

제 3 장 리브 성형품의 수축과 뒤틀림

제 1 절 리브 성형품의 수축과 뒤틀림 측정

리브 성형품의 품질을 높이려면 단면의 크기에 심한 변화를 가급적 피해야 한다. 단면이 큰 부분에서는 수축이 일어나고, 역으로 너무 얇은 부분은 강성이 떨어져 성형 후에 금형에서 이탈시키기가 곤란하다. Fig. 3-1과 같이 리브 성형품에서 천판과 리브가 만나는 반대편의 표면에 수지가 과다한 단면(Resin-rich area)이 존재한다. 수지가 과다한 단면은 주위보다 수축이 잘 되므로, 이형온도로부터 리브 성형품이 식으면 약간 들어가게 된다. 이 수축으로 인하여 표면에 오목하게 들어간 부분을 싱크마크(Sink mark)라고 한다. 또한, 뒤틀림은 성형품 두께 및 냉각속도 등의 불균일로 인하여 수축이 불균일하게 되면 발생한다. 이러한 이유 때문에 성형품의 단면은 가능하면 일정한 두께로 설계하여야만 한다. 뒤틀림의 다른 요인은 유동에 의하여 발생한 섬유의 방향성에 기인한 이방성 열팽창 계수이다. 이와 같은 이방성 열팽창 계수는 불균일한 수축과 잔류응력을 발생 시킨다. 이 잔류응력은 성형 시에 냉각의 불균일, 수지흐름의 방향성에 의한 팽창, 수축의 차이로 성형품 내부에 잔존하는 응력이다. 두꺼운 단면의 잔류응력은 두께와 단면적 방향으로 발생하는 불균일한 냉각에 의한다. 즉, 먼저 냉각된 영역은 압축 잔류응력 상태에 있고, 나중에 냉각된 영역은 인장 잔류응력 상태에 있게 된다^{1,2)}. 이 잔류응력은 뒤틀림을 일으킨다.

각 고분자에 의한 수축과 뒤틀림은 성형품의 종, 횡방향보다 두께와 성형조건의 영향이 크다. 그러므로 본 실험에서는 리브 성형품에 발생하기 쉬운 수축 및 뒤틀림과 성형조건과의 관계를 명확히 하고 이 생성과정에 대하여 고찰한다. 리브 성형품의 수축 및 뒤틀림의 표기를 Fig. 3-1에 나타냈다. 축침식 표면형상측정기((株)東京精密 Surfcom 570A)에 의해 천판상면의 중심선을 기준으로 단면곡선을 측정한다. 리브 성형품의 성형 수축은 천판상면에 그은 접선으로부터 수축된 밑면까지의 길이로 한다. 리브 성형품의 뒤틀림은 천판상면의 중심선으로부터 12 mm의 위치로부터 20 mm 위치까지의 수직방향의 길이를 좌우측정하여 평균한다.

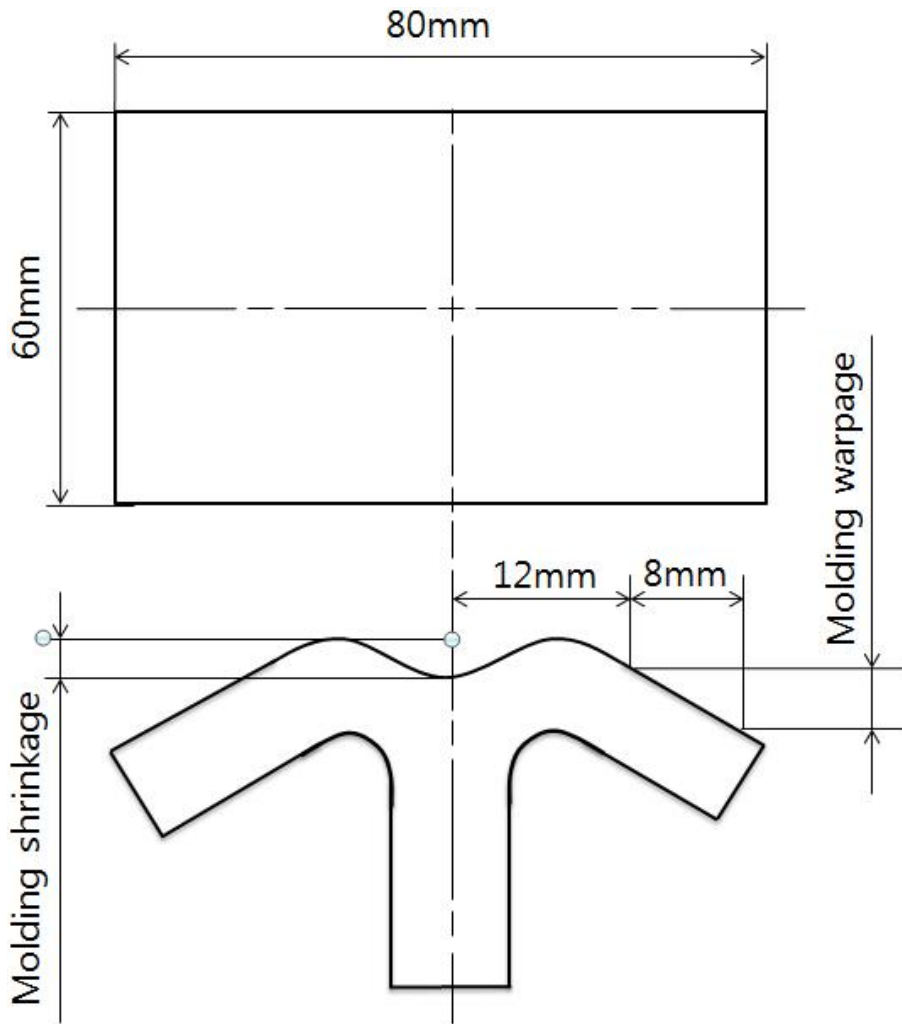


Fig. 3-1 Molding shrinkage and warpage of the rib molded product

1. 이형온도와 수축 · 뒤틀림의 관계

리브 성형품의 수축에 영향을 주는 요인 중 하나는 성형공정에서 수지의 결정화에 따라 나타나는 수축이다. 서냉 실험에서 리브 성형품의 이형온도에 대한 성형 수축을 고찰하고자한다. 이 결정화에 의한 수축을 고찰하기 위해 사용된 시험재료는 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(XS, 모재 : PP, 섬유함유량 : 40wt%)이다. 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 176℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm 이다. 리브 성형품의 이형온도와 성형 수축의 관계를 Fig. 3-2에 나타냈다. 3종류의 시험재료에 대해 리브두께(T_2) 12 mm의 경우, Fig. 3-2로부터 리브 성형품의 성형 수축은 X-시트(XS 40wt%)가 가장 크고, 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS)의 순서로 작아졌다. 폴리스티렌(PS)은 수지 고유의 열팽창률에 의해 나타나는 열적 수축이 작은 수지이다. 결정성 고분자인 폴리프로필렌(PP)의 재결정온도는 108℃이며, 무정형 고분자인 폴리스티렌(PS)의 유리전이온도는 100℃이다⁵⁾. 그러므로 폴리프로필렌(PP)과 X-시트(XS 40wt%)는 재결정온도 이상에서 곡선경사가 급격하게 변화하는 것을 알 수 있다. 또한, 폴리스티렌(PS)은 유리전이온도 부근에서 수축 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 3-2로부터 폴리프로필렌(PP)의 경우, 수축에 미치는 리브두께(4 mm, 12 mm)의 영향에 대하여 조사한 결과 리브두께 12 mm 보다 4 mm 가 수축이 작음을 알 수 있다. 이는 리브 두께가 두꺼울수록 리브와 천편의 접촉 반대편에 수지가 과다한 영역이 존재한다. 수지가 과다한 영역은 이형온도로부터 성형품이 냉각되면 주위보다 수축이 잘됨을 알 수 있다. 본 실험의 결과로부터 리브두께에 대한 영향이 크기 때문에 수축을 줄이기 위해서 리브의 두꺼운 단면은 피해야 한다.

Fig. 3-2에서 측정값의 관계를 최소제곱 회귀분석법을 이용하여 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 시 이형온도(30℃, 60℃, 90℃, 100℃)에 따른 리브 성형품의 수축량을 계산하는 실험식을 제시하였다. X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 리브 성형품의 수축량(δ_{ST})과 이형온도(T)와의 관계식을 나타내면 다음 식(2)와 같다²⁵⁾.

$$\delta_{ST}(\mu\text{m}) = 79.28 + 1.53T(^{\circ}\text{C}) - 0.01T^2(^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(모재:PP, 섬유함유량:40 wt%)에 대해 이형온도(30°C, 60°C, 90°C, 100°C)와 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-3에 나타냈다. 이 서냉 실험의 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 176°C, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm 이다. 리브두께 12 mm의 경우, 리브 성형품의 성형 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%)가 가장 크고, 폴리스티렌(PS), 폴리프로필렌(PP)의 순서로 작아졌다. 또한, 폴리프로필렌(PP)의 경우 뒤틀림에 미치는 리브두께(4 mm, 12 mm)의 영향에 대하여 조사한 결과 75°C이하에서는 리브두께 4 mm 보다 12 mm 가 뒤틀림이 작고, 75°C이상에서는 리브두께 12 mm 보다 4 mm 가 뒤틀림이 작음을 알 수 있다. 본 실험의 결과로부터 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), X-시트(XS 40wt%)의 시험재료 3종류 모두 뒤틀림은 이형온도가 높을수록 증가함을 알 수 있다.

Fig. 3-3의 측정값으로부터 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형에 있어서 이형온도에 따른 리브 성형품의 뒤틀림량을 계산하는 실험식을 제시하였다. 서냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 리브 성형품의 뒤틀림량(δ_{WT})과 이형온도(T)와의 관계식을 최소제곱 회귀분석법을 이용하여 나타내면 다음 식(3)과 같다²⁶⁾.

$$\delta_{WT}(\mu\text{m}) = 62.64 + 1.76T(^{\circ}\text{C}) + 0.0078T^2(^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

Fig. 3-2와 Fig. 3-3으로부터 이형온도가 높을수록 성형 수축은 감소하고, 성형 뒤틀림은 증가함을 알 수 있다. 또한, 폴리프로필렌(PP)의 경우 리브두께 12 mm 보다 4 mm 가 수축과 뒤틀림 모두 작음을 알 수 있다. 즉, 리브 성형품의 품질을 향상시키려면 가급적 단면의 크기 변화나 형상의 갑작스런 변화를 피해야함을 알 수 있다.

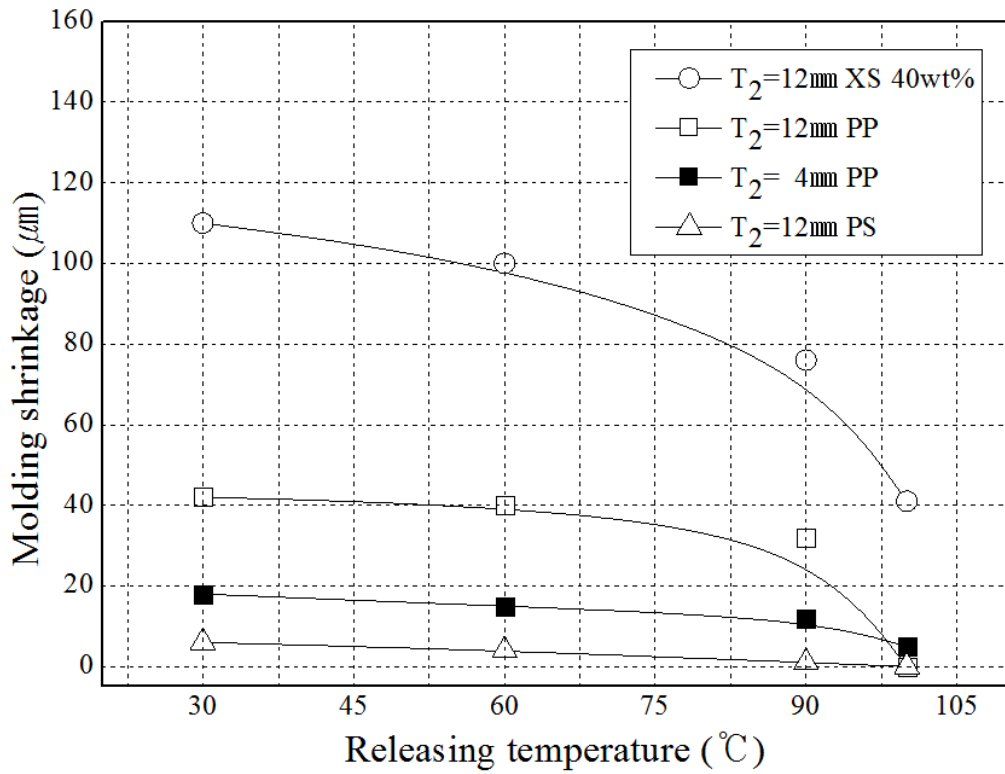


Fig. 3-2 Relationship between mold releasing temperature and molding shrinkage

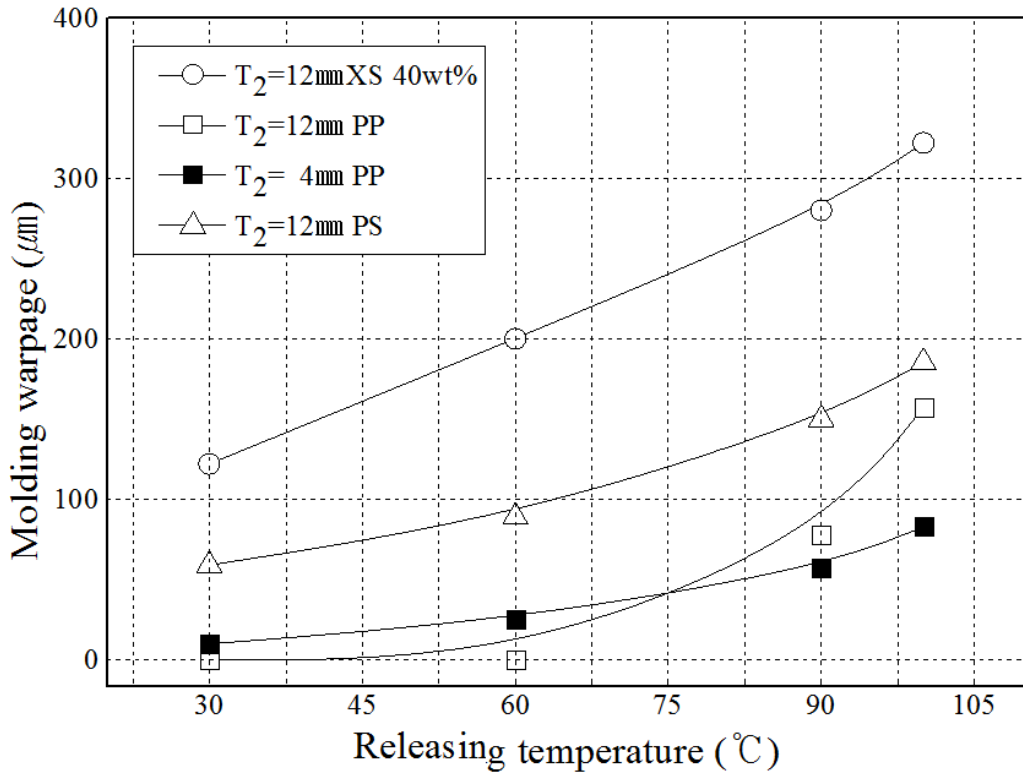


Fig. 3-3 Relationship between mold releasing temperature and molding warpage

2. 성형하중과 수축 · 뒤틀림의 관계

리브 성형품의 수축에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 성형하중이다. 서냉 실험에서 리브 성형품의 성형하중에 대한 성형 수축을 고찰하고자한다. 이 성형하중에 의한 수축을 고찰하기 위해 사용된 시험재료는 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(XS, 모재 : PP, 섬유함유량 : 40wt%)이다. 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다.

리브 성형품의 성형하중과 성형 수축의 관계를 Fig. 3-4에 나타냈다. X-시트(XS 40wt%)의 경우는 성형하중이 높아질수록 수축이 감소하는 경향을 보인다. 이는 성형하중을 높게 하면 용융수지의 압축성으로 밀도가 높아져 성형수축이 작게 됨을 알 수 있다. 폴리프로필렌(PP)의 경우는 성형하중이 증가와 동시에 수축이 급격하게 감소하여 100 kN 이상에서 수축되지 않음을 알 수 있다. 폴리스티렌(PS)의 경우는 성형하중의 증가와 관계없이, 이형온도 80℃가 유리전이온도 부근이어서 수축되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3-4의 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 리브 성형품의 수축량(δ_{SP})과 성형하중(P)과의 관계식을 나타내면 다음 식(4)와 같다²⁵⁾.

$$\delta_{SP}(\mu\text{m}) = 79.7 + 0.11P(\text{kN}) - 0.0011P^2(\text{kN}) \quad (4)$$

시험재료인 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(모재 : PP, 섬유함유량 : 40wt%)에 대해 성형하중과 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-5에 나타냈다. 이 서냉 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. X-시트(XS 40wt%)는 성형하중이 증가할수록 성형 뒤틀림이 감소하고, 폴리프로필렌(PP)은 성형하중이 증가할수록 성형 뒤틀림이 급격하게 감소한다. 그러나 폴리스티렌(PS)은 성형하중이 증가할수록 성형 뒤틀림이 급격하게 증가하였다. 이것은, 이형후의 자연 냉각 시에 무정형 고분자인 폴리스티렌(PS)의 유리전이온도(고체화온도)가 약 100℃이므로 리브 두께 방향으로 수축을 일으키고 리브를 붙인 천판 상면의 경

계면의 고온부가 다른 부분에 비해 크게 순간 탄성회복하기 때문이라고 생각된다. 성형하중과 성형 뒤틀림의 관계에서 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)은 서로 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3-5의 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 리브 성형품의 뒤틀림량(δ_{WP})과 성형하중(P)와의 관계식을 나타내면 다음 식(5)와 같다²⁶⁾.

$$\delta_{WP}(\mu m) = 340.2 - 0.58P(kN) + 2.71P^2(kN) \quad (5)$$

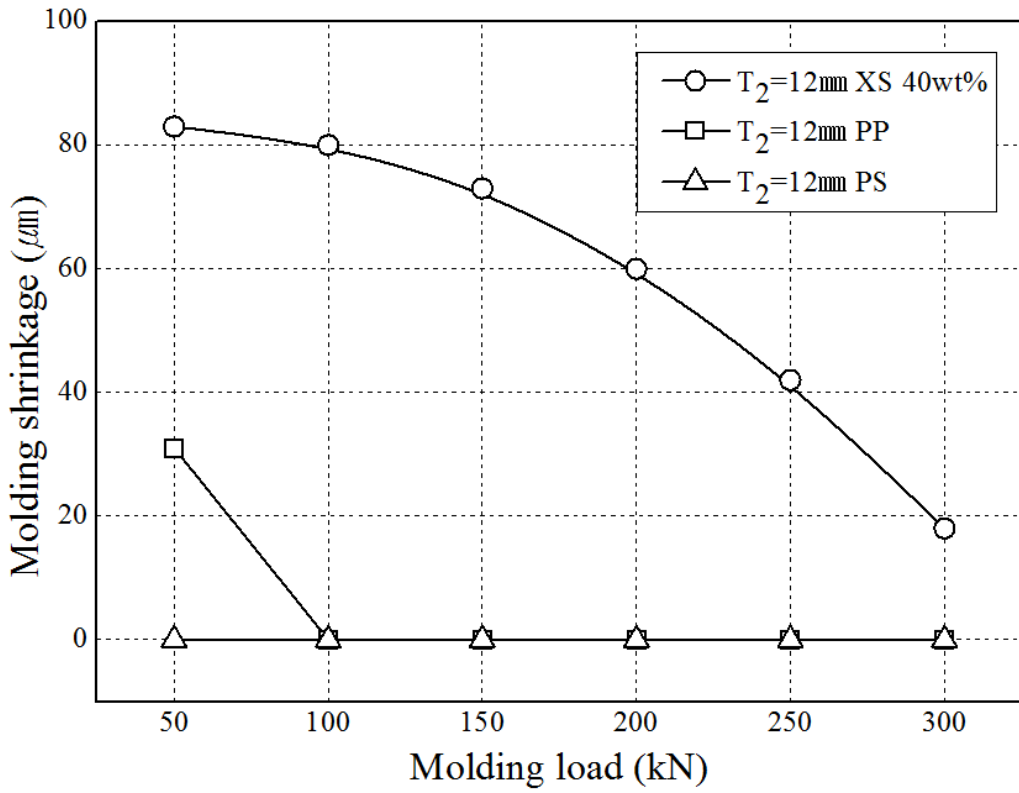


Fig. 3-4 Relation between molding load and molding shrinkage

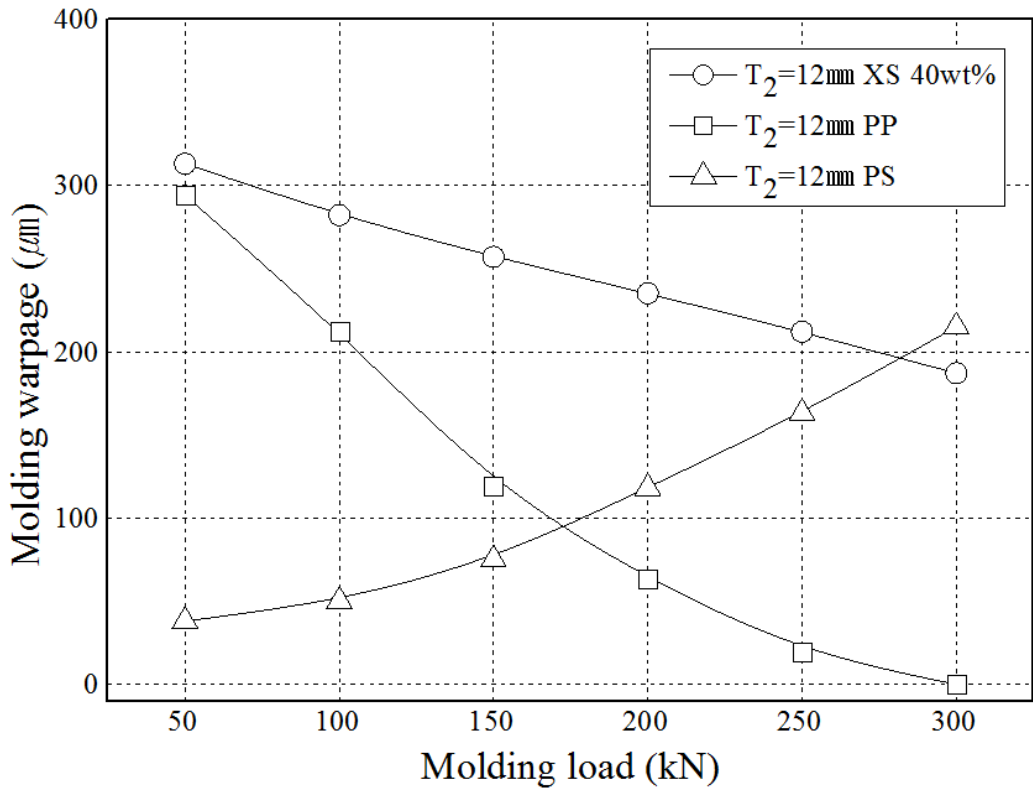


Fig. 3-5 Relation between molding load and molding warpage

3. 천판두께(T_1)와 수축 · 뒤틀림의 관계

폴리프로필렌(PP)과 X-시트(모재 : PP, 섬유함유량 : 40wt%)의 서냉 실험에서 리브 성형품의 천판두께와 성형 수축의 관계를 고찰하고자한다. 이 성형조건은 금형 압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 리브두께 (T_2) 12 mm 이다. 리브 성형품의 천판두께(2 mm, 5.5 mm, 9 mm)와 성형 수축의 관계를 Fig. 3-6에 나타냈다. 성형 수축은 X-시트(XS 40wt%)가 폴리프로필렌(PP)보다 크며, 천판두께(T_1) 2 mm의 경우가 가장 작게, 천판두께(T_1) / 리브두께 (T_2)의 비가 약 0.5인 5.5 mm의 경우가 가장 크게 나타났다²⁵⁾.

폴리프로필렌(PP)과 X-시트(XS 40wt%)의 천판두께(2 mm, 5.5 mm, 9 mm)와 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-7에 나타냈다. 이 서냉 실험에서 성형조건은 금형 압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 성형 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%)가 폴리프로필렌(PP)보다 크며, 천판두께(T_1) 2 mm의 경우가 가장 크고, 천판두께(T_1) / 리브두께(T_2)의 비가 약 0.5인 5.5 mm의 경우가 가장 적게 나타났다. 폴리프로필렌(PP)과 X-시트(XS 40wt%)의 2종류 시험재료 모두 성형 뒤틀림은 천판두께의 증가에 따라 약간 작아지는 경향이 있다²⁶⁾.

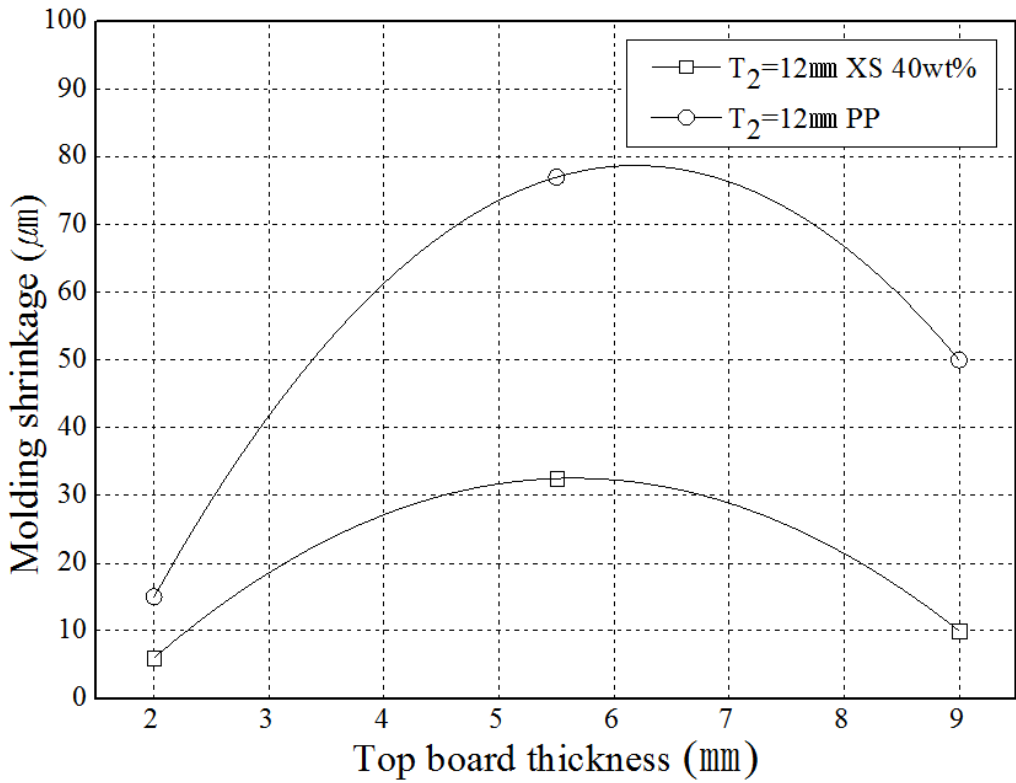


Fig. 3-6 Relationship between top board thickness and molding shrinkage

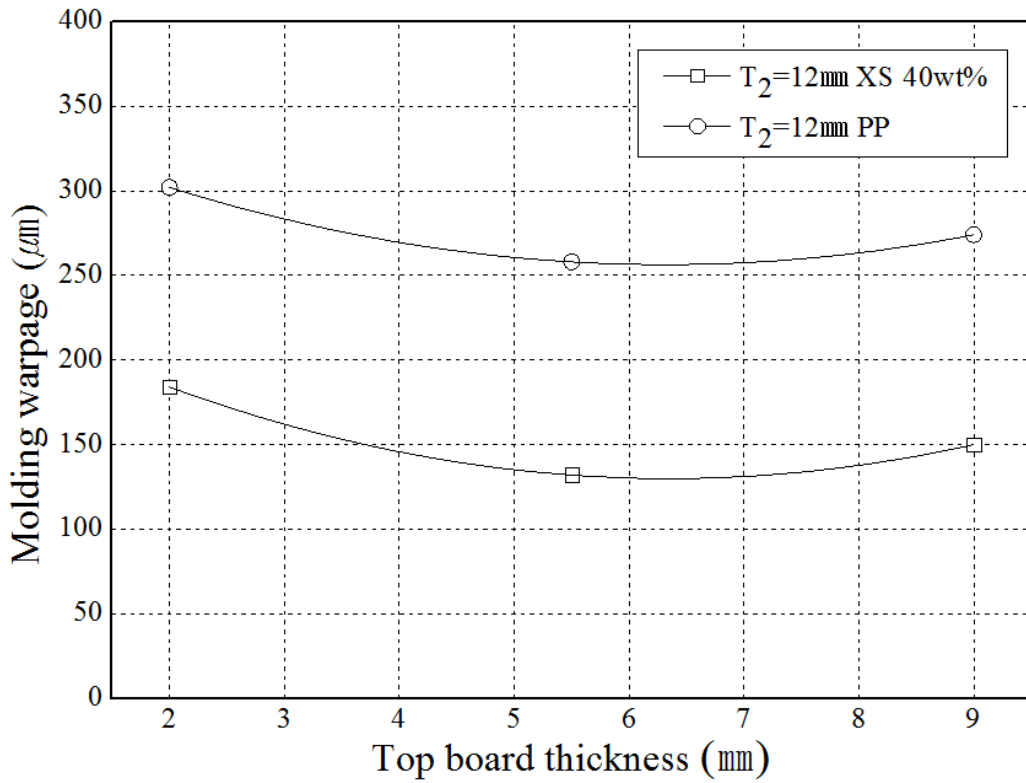


Fig. 3-7 Relationship between top board thickness and molding warpage

4. 금형온도와 수축·뒤틀림의 관계

금형온도는 리브 성형품의 성형에서 수축과 뒤틀림에 큰 영향을 미치는 인자이다. 금형 캐비티에 충전된 블랭크의 열량에 대해서 냉각이 부적당할 경우 성형품은 불균일한 수축에 의해서 뒤틀림이 생긴다. X-시트(모재:PP, 섬유함유량:40wt%), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS)의 서냉 실험에서 리브 성형품의 금형온도에 대한 성형 수축을 고찰하고자한다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 리브 성형품의 금형온도와 성형 수축의 관계를 Fig. 3-8에 나타냈다. 성형 수축은 X-시트(XS 40wt%)가 가장 크며, 금형온도가 193℃의 경우가 가장 크게 나타났다. 폴리프로필렌(PP)의 경우는 금형온도가 173℃의 경우가 가장 크게 나타났다. 폴리스티렌(PS)의 경우는 금형온도와 관계없이 성형 수축이 0으로 나타났다²⁵⁾. 이는 성형온도의 증가와 관계없이, 이형온도 80℃가 유리전이온도 부근이어서 수축되지 않음을 알 수 있다.

서냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 재료를 사용한 리브 성형품에 대해 금형온도(164℃, 173℃, 193℃)와 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-9에 나타냈다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 이형온도 80℃, 성형하중 5 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 성형 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%)가 가장 크게, 폴리스티렌(PS)이 가장 적게 나타났다. 또한, 성형 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS)의 3종류 모두 금형온도 173℃에서 가장 적게 나타났다. 그리고 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS)의 2종류의 시험재료는 금형온도 164℃와 193℃에서 성형 뒤틀림이 유사하게 나타났으나, X-시트(XS 40wt%)의 성형 뒤틀림은 금형온도 변화와 관계없이 유사하게 나타났다. 이 X-시트(XS 40wt%)의 경우는 블랭크를 금형 내에 삽입하고 가열시 강화재인 유리섬유의 부풀어 오름으로 인해 자유부피(free volume)가 많은 상태로 고체화되기 때문이라 생각된다²⁶⁾.

Fig. 3-8과 Fig. 3-9로부터 X-시트(XS 40wt%)는 성형 수축과 뒤틀림 모두 큰 변화가 없다. 폴리프로필렌(PP)의 경우는 성형 뒤틀림이 가장 낮아지는 금형온도에서 성형 수축이 가장 크게 나타났다.

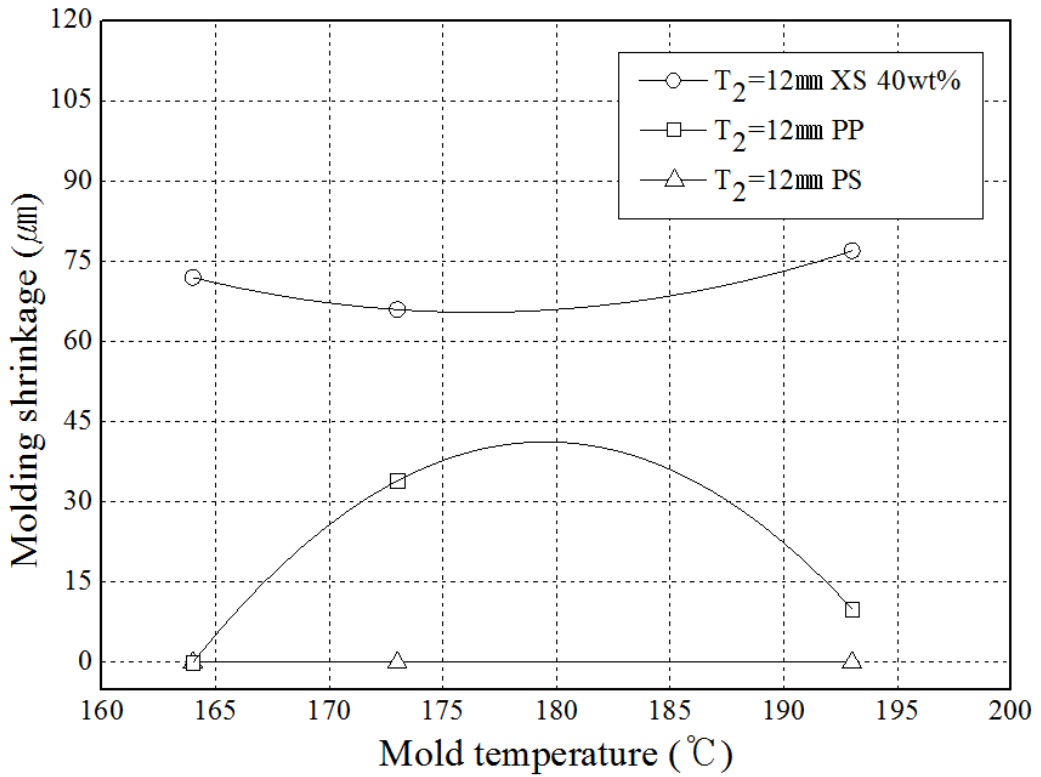


Fig. 3-8 Relationship between mold temperature and molding shrinkage

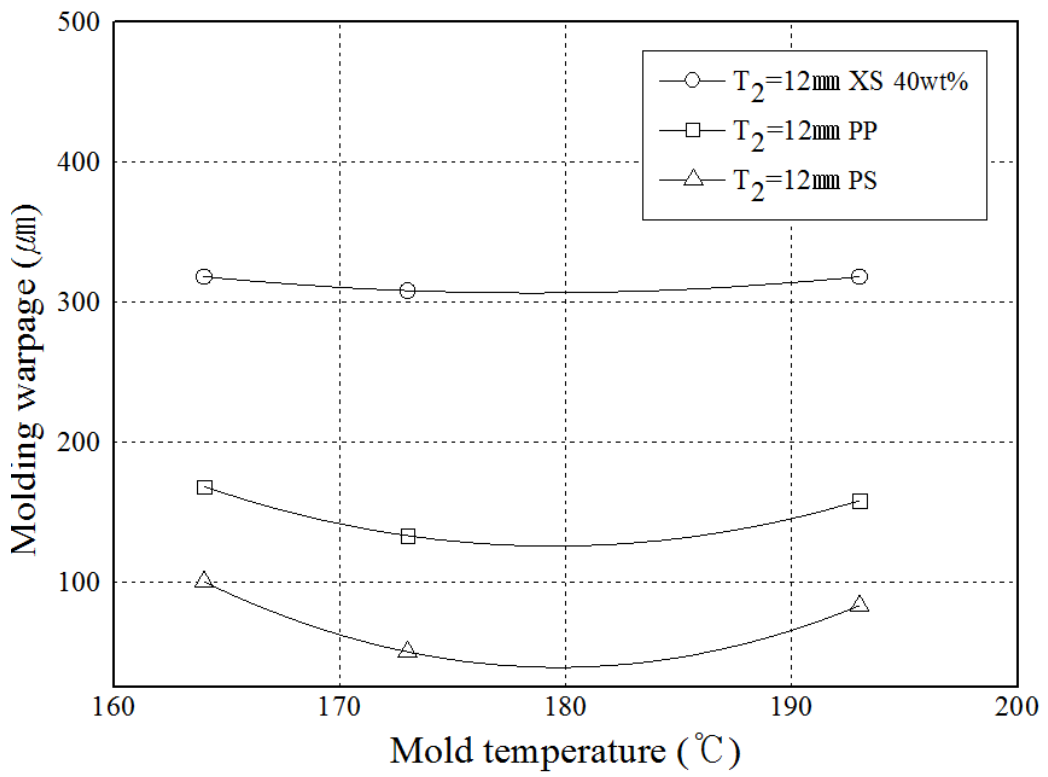


Fig. 3-9 Relation between mold temperature and molding warpage

5. 금형압축속도와 수축·뒤틀림의 관계

섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에서 금형 내의 유동은 매우 복잡한 현상이며, 리브 성형품의 품질을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 유동현상은 금형 내의 블랭크의 충전 정도를 결정 할 뿐만 아니라 성형품의 섬유의 방향성, 섬유의 분포, 수축, 뒤틀림, 표면의 결함 정도, 다공성 정도를 결정한다. 압축성형에서 블랭크의 두께가 두껍거나 얇거나 금형의 표면에서는 슬립이 발생한다. 금형 내에 블랭크 2~4매를 적층한 유동성형에서 금형압축속도가 빠르면 블랭크의 바깥층은 내부층보다 멀리 유동하지 않는다. 금형압축속도가 느리면 층간의 상대운동이 없이 균일하게 금형압축속도가 빠른 경우보다 더 멀리 유동한다.

X-시트(XS 40wt%)의 서냉 및 급냉 실험에서 금형압축속도와 성형 수축의 관계를 실험하였다. 서냉 실험에서 성형조건은 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 그리고 급냉 실험의 성형조건은 블랭크온도 200℃, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 성형시간 60 sec, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 이 2개의 성형조건에서 실험하여 금형압축속도와 성형 수축의 관계를 Fig. 3-10에 나타냈다. 서냉 및 급냉 실험의 금형압축속도와 성형 수축의 관계에서는 금형 압축속도는 X-시트(XS 40wt%)의 수축에 영향이 거의 없었다. 그러나 X-시트(XS 40wt%)의 성형 수축은 서냉 성형의 경우가 급냉 성형 보다 약 1.7배 크게 나타났다²⁵⁾.

고분자는 용융상태에서 고분자 사슬들 사이에 빈공간이 있어 분자들이 자유롭게 움직일 수 있다. 자유부피는 냉각할 때 일부 남아 있는 상태로 고체화될 수 있다. 결정화할 때 이상적으로 부피가 최대한 작은 비체적 값으로 줄어들어야 한다. 냉각 후에 남아 있는 자유부피의 크기는 재료의 냉각속도에 따라 달라진다. 냉각속도가 빠르면 그 만큼 자유부피가 많이 남게 된다. 위 실험 결과로부터 냉각속도는 최종부품의 치수안정성과 직접적 관련성이 있음을 알 수 있다.

X-시트(XS 40wt%)의 서냉 및 급냉 실험에서 금형압축속도(13 mm/sec, 50 mm/sec, 80 mm/sec)와 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-11에 나타냈다. 이 서냉

실험의 성형조건은 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 5 kN, 천판두께 (T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 또한 급냉 실험의 성형조건은 블랭크 온도 200℃, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 5 kN, 성형시간 60 sec, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. Fig. 3-11로부터 X-시트(XS 40wt%)의 급냉에서 성형 뒤틀림이 금형압축속도가 증가할수록 급격히 줄어들었으나, 서냉에서 성형 뒤틀림은 금형압축속도가 증가할수록 서서히 줄어들었다.

냉각 후에 남아 있는 자유부피의 크기는 재료의 냉각속도에 따라 달라진다. 냉각속도가 빠르면 그 만큼 자유부피가 많이 남게 되어 뒤틀림이 급격히 나타나는 것을 알 수 있다. 위 실험 결과로부터 냉각속도는 최종부품의 치수 안정성과 직접적 관련성이 있음을 알 수 있다²⁶⁾.

서냉 실험에서 Fig. 3-10과 Fig. 3-11로부터 수축보다는 뒤틀림이 약 3배 높게 나타났다. 금형압축속도와 수축의 관계에서는 금형압축속도의 증가와 관계 없이 변화가 거의 없었다.

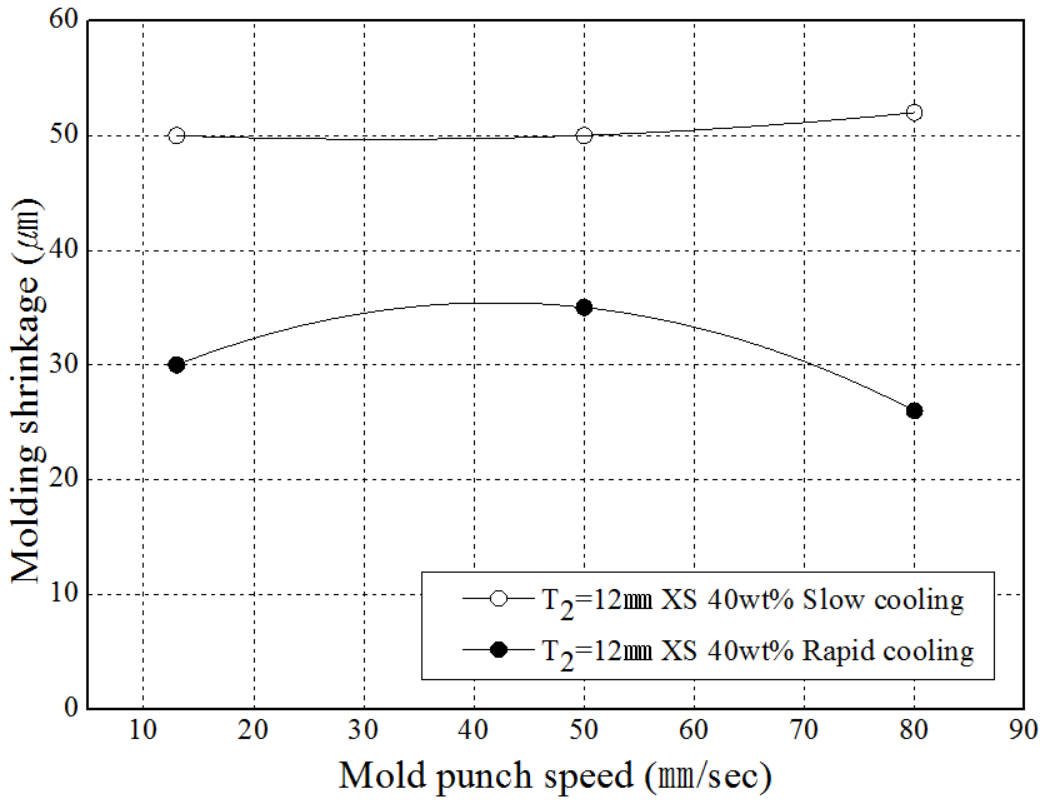


Fig. 3-10 Relationship between mold punch speed and molding shrinkage

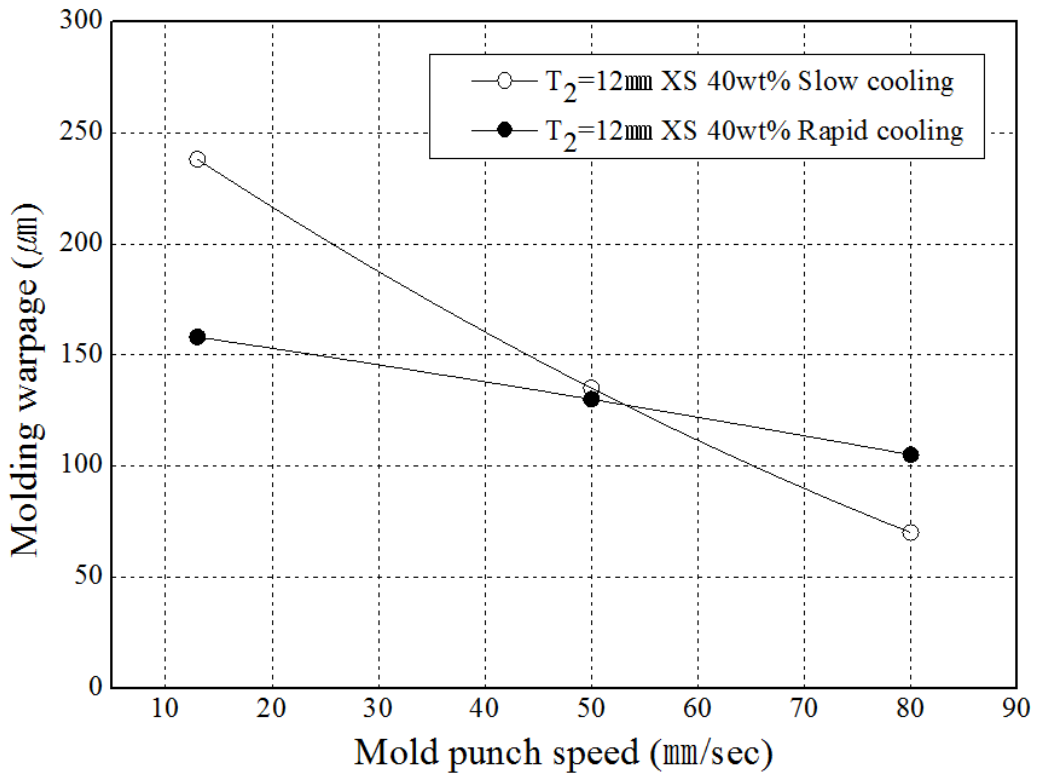


Fig. 3-11 Relationship between mold punch speed and molding warpage

6. 섬유함유량과 수축 · 뒤틀림의 관계

X-시트(XS 40wt%)의 서냉 실험에서 리브 성형품의 섬유함유량에 대한 성형 수축을 고찰하고자한다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm이다. 이 성형조건에서 실험하여 섬유함유량과 성형 수축의 관계를 Fig. 3-12에 나타냈다. 리브두께(T_2)가 수축에 미치는 영향은 12 mm가 4 mm 보다 폴리프로필렌(PP)의 층이 더 두꺼워 수축이 크다. 즉 리브 성형품의 수축에 미치는 영향은 섬유함유량 보다는 리브두께(T_2)가 지배적임을 알 수 있다. 리브두께(T_2) 12 mm인 경우는 X-시트(XS 25wt%)가 수축이 크고, 리브두께(T_2) 4 mm인 경우에도 X-시트(XS 25wt%)가 수축이 크게 나타났다. 이는 모재인 폴리프로필렌(PP)의량이 많아 수축이 크게 나타남을 알 수 있다.

그리고 X-시트(XS)의 급냉 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 블랭크온도 200℃, 성형하중 5 ton, 성형시간 60 sec, 천판두께(T_1) 5.5 mm 이다. 이 성형 조건에서 실험하여 리브 성형품의 섬유함유량과 성형 수축의 관계를 Fig. 3-12에 나타냈다. 리브두께(T_2) 4 mm 보다 12 mm가 더 두꺼워 수축이 크며, 섬유함유량이 수축에는 큰 변화가 없다. 급냉 실험에서는 리브두께(T_2) 4 mm, 12 mm 모두 X-시트(XS)의 섬유함유량이 25wt% 보다 증가할수록 수축이 작아졌다. 급냉 실험에서도 리브 성형품의 수축에 미치는 영향은 섬유함유량 보다는 폴리프로필렌(PP)과 밀접한 관계가 있는 리브두께(T_2)가 지배적임을 알 수 있다.

본 X-시트(XS)의 서냉 및 급냉 실험으로부터 섬유함유량이 낮을수록 폴리프로필렌(PP)의 증가로 수축이 잘 되므로, 성형온도로부터 성형품이 냉각되면 리브와 보스가 만나는 반대편의 표면이 약간 들어가게 된다. 그러므로 리브 성형품의 수축을 감소하기 위해서는 압축성형 후 이형 시 급냉 하고, 리브의 두께를 줄이고, 섬유함유량을 높여야함을 알 수 있다²⁵⁾.

X-시트(XS 40wt%)의 서냉 및 급냉 실험에서 리브 성형품의 섬유함유량에 대한 성형 뒤틀림을 고찰하고자한다. 서냉 실험의 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 5 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm 이다. 그리고 급냉 실험의 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 블랭크온도

200℃, 성형하중 5 kN, 성형시간 60 sec, 천판두께(T_1) 5.5 mm 이다. X-시트의 서냉 및 급냉 실험에서 리브 성형품의 섬유함유량(25wt%, 40wt%, 53wt%)과 성형 뒤틀림의 관계를 Fig. 3-13에 나타냈다. 성형 뒤틀림에 미치는 영향은 리브두께(T_2) 12 mm가 4 mm보다 폴리프로필렌(PP)의 두께가 더 두꺼워 뒤틀림이 크다. 섬유함유량이 증가할수록 뒤틀림이 크게 감소함을 알 수 있다. 섬유함유량과 뒤틀림의 관계에서 서냉 및 급냉 실험 모두 리브두께(T_2)가 같을 경우, 섬유함유량이 뒤틀림에 미치는 영향은 유사하게 나타났다. 본 실험의 결과로부터 리브 성형품의 뒤틀림에 미치는 영향은 섬유함유량과 더불어 폴리프로필렌(PP)과 밀접한 관계가 있는 리브두께가 더 지배적임을 알 수 있다²⁶⁾.

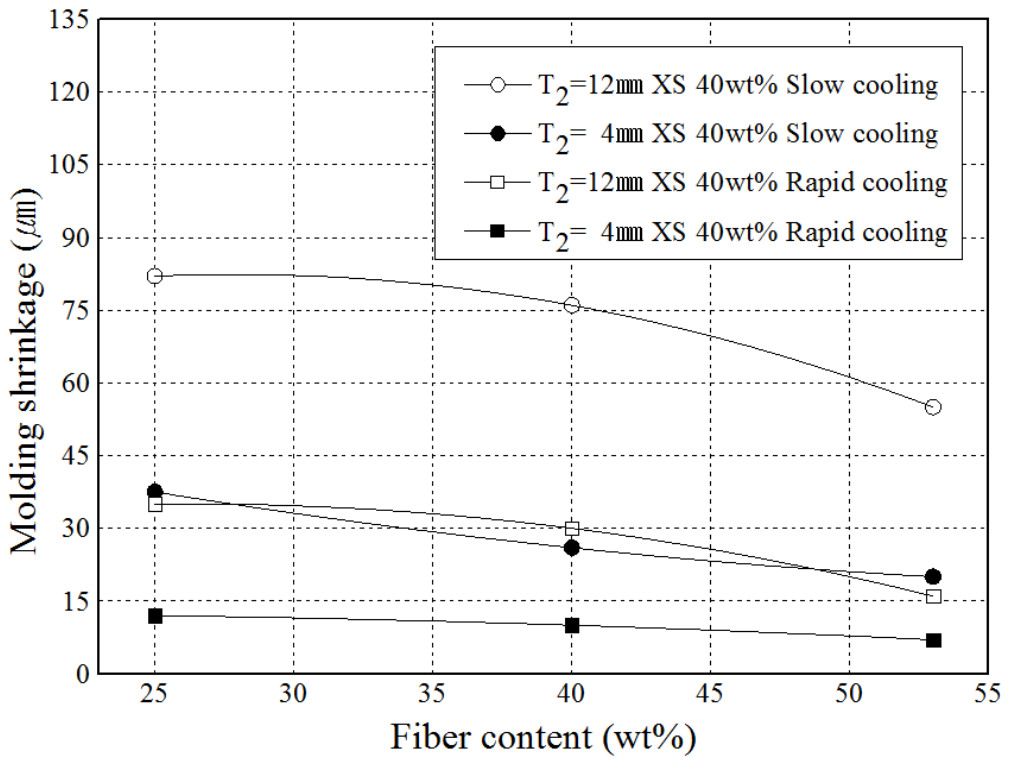


Fig. 3-12 Relationship between fiber content and molding shrinkage

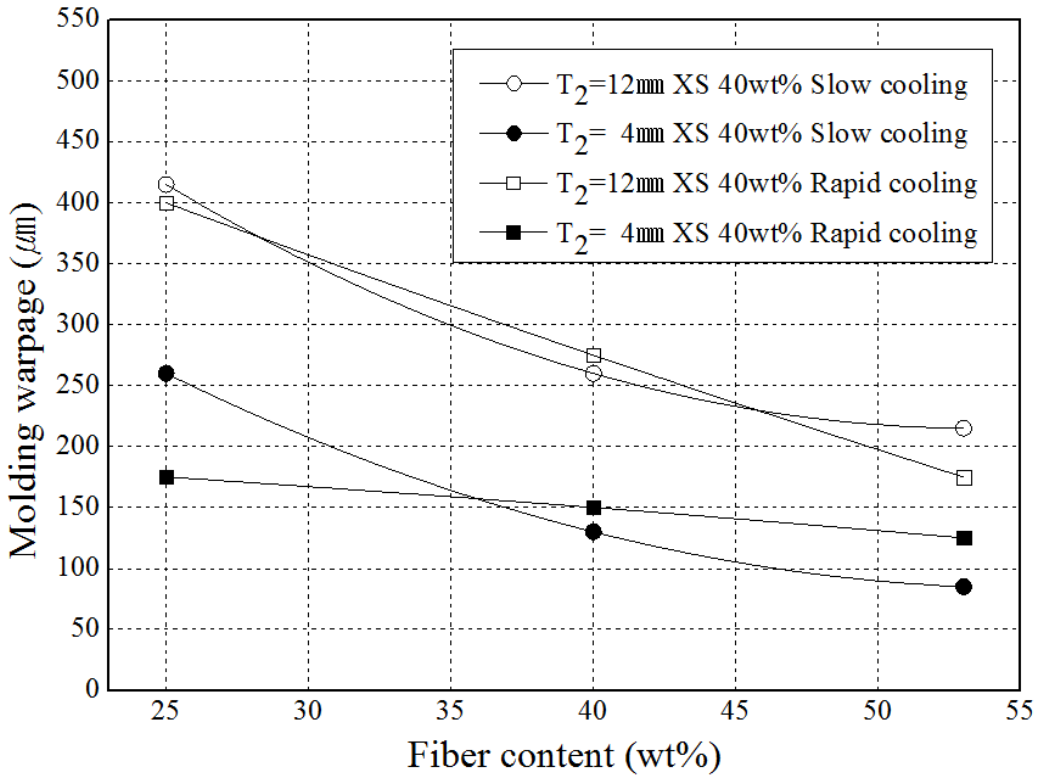


Fig. 3-13 Relationship between fiber content and molding warpage

7. 냉각유형과 수축·뒤틀림의 관계

금형의 급냉각과정에서 리브 성형품의 수축과 뒤틀림에 미치는 영향을 고찰하고자한다. 금형내의 열매체유(냉각수) 순환구멍($\phi 10\text{ mm}$)의 위치를 Fig. 2-6에 나타냈다. 리브 성형품 급냉각과정의 열매체유(냉각수) 구멍 위치 유형을 Fig. 2-7에 나타냈다.

금형 내에서 열매체유(냉각수)의 유입과 급냉각 실험 순서는 다음과 같다.

가. 예열과정

- (1) 실온의 블랭크를 금형온도 80°C 인 금형 내에 삽입하고, 온조기로부터의 열매체유(냉각수) 순환구멍에 유입시켜 금형을 173°C 로 가열한다.
- (2) 온조기의 열매체유의 온도가 173°C 의 온도에 도달한 후 열매체유의 온도를 30분간 일정하게 유지하여 수지의 온도를 균일하게 한다.

나. 충전과정

- (3) 금형의 상 펀치를 하강시켜 수지를 다이 내의 리브부에 유입시킨다.

다. 보압·냉각과정

- (4) 성형품에 프레스의 하중을 50 kN 으로 유지하면서, 온조기로부터 열매체유(냉각수 40°C , 60°C)를 집중적으로 냉각부에 유입시켜, 금형 내부를 10분간 냉각한다.
- (5) 금형으로부터 성형품을 꺼낸다.

라. 이형후의 과정

- (6) 금형에서 꺼낸 성형품은 자연방열에 의해 실온까지 냉각한다.

리브 성형품 금형의 급냉각 유형과 수축의 관계를 시험재료별로 Fig. 3-14에 나타냈다. 이 금형의 급냉각 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec , 성형온도 173°C , 성형하중 50 kN , 성형시간 10 min , 천판두께(T_1) 5.5 mm , 리브 두께(T_2) 12 mm 이다.

Fig. 3-14로부터 X-시트(XS 40wt%)의 리브 성형품 수축은 유형 B, C와 같이 천판 상면 중심부를 집중적으로 냉각시켜 감소시켰다. 그러나 리브 성형품

수축은 천판 양단부에서 집중적으로 냉각하는 유형 D에서 가장 크게 발생했다.

폴리프로필렌(PP)의 리브 성형품 수축은 유형 A와 같은 리브부의 집중적 냉각조건에서 가장 크게 발생했다. 수축을 없애기 위해서는 유형 B, C와 같이 천판 중앙, 리브부의 양쪽을 집중적으로 냉각하는 것이 효과적이다. 유형 D와 같이 천판 양단부를 집중적으로 냉각해도 현저하게 수축이 작아지지 않는았다.

폴리스티렌(PS)의 리브 성형품 수축은 폴리프로필렌(PP)과 동일한 경향을 나타냈다. 그리고 Fig. 3-14로부터 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)은 냉각용 매체유 온도 60℃일 때가 수축이 작아짐에 비해, X-시트(XS 40wt%)는 반대로 수축이 커지는 경향을 나타냈다.

리브 성형품 금형의 급냉각 유형과 뒤틀림의 관계를 시험재료별로 Fig. 3-15에 나타냈다. 이 금형의 급냉각 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 성형온도 173℃, 성형하중 50 kN, 성형시간 10 min, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다.

급냉각 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 뒤틀림은 냉각 유형에 의존하지 않고, 냉각용 열매체유 온도 40℃가 60℃보다 약간 크게 나타났다. 또한, 뒤틀림은 폴리프로필렌(PP)과 비교하여 X-시트(XS 40wt%)가 약 1.5~2배 정도 크게 나타났다. 이는 냉각용 열매체유 온도가 낮을수록 냉각속도는 빠르게 되어 그만큼 자유부피(free volume)가 많이 남아 있는 상태로 고체화되기 때문이다. 즉 X-시트(XS 40wt%)는 블랭크를 금형 내에 삽입하고 가열시 강화재인 유리섬유의 부풀어 오름으로 인해 폴리프로필렌(PP)보다 자유부피(free volume)가 많은 상태로 고체화되기 때문이라 생각된다.

폴리프로필렌(PP)의 뒤틀림을 작게 억제하기 위해서는 유형 A와 같이 리브부를 집중적으로 냉각하는 것이 효과적이다. 또한, 유형 C와 같이 천판 중앙, 리브부의 양쪽을 집중 냉각하는 것도 효과적이다. 유형 B와 같이 천판 상면 중심부만을 냉각한 경우와 유형 D와 같이 양단부를 집중적으로 냉각한 경우에도 뒤틀림이 크다.

폴리스티렌(PS)의 뒤틀림을 작게 억제하기 위해서는 유형 A와 같이 리브부를 집중적으로 냉각하는 것이 가장 효과적이다. 유형 B, C, D의 뒤틀림은 유사하게 나타났다.

그리고 Fig. 3-15로부터 X-시트(XS 40wt%)와 폴리스티렌(PS)은 냉각용 열매체유 온도 60℃일 때가 뒤틀림이 작아짐에 비해, 폴리프로필렌(PP)은 반대로 뒤틀림이 커지는 경향을 나타냈다. 본 실험의 Fig. 3-14와 Fig. 3-15로부터 리브 성형품의 수축과 뒤틀림은 폴리프로필렌(PP) 단일재료가 X-시트(XS)의 복합재료에 비해 아주 작게 나타났다. 또한, 냉각속도는 성형품의 최종 치수 안정성(dimensional stability)과 직접적 관련성이 있음을 알 수 있다.

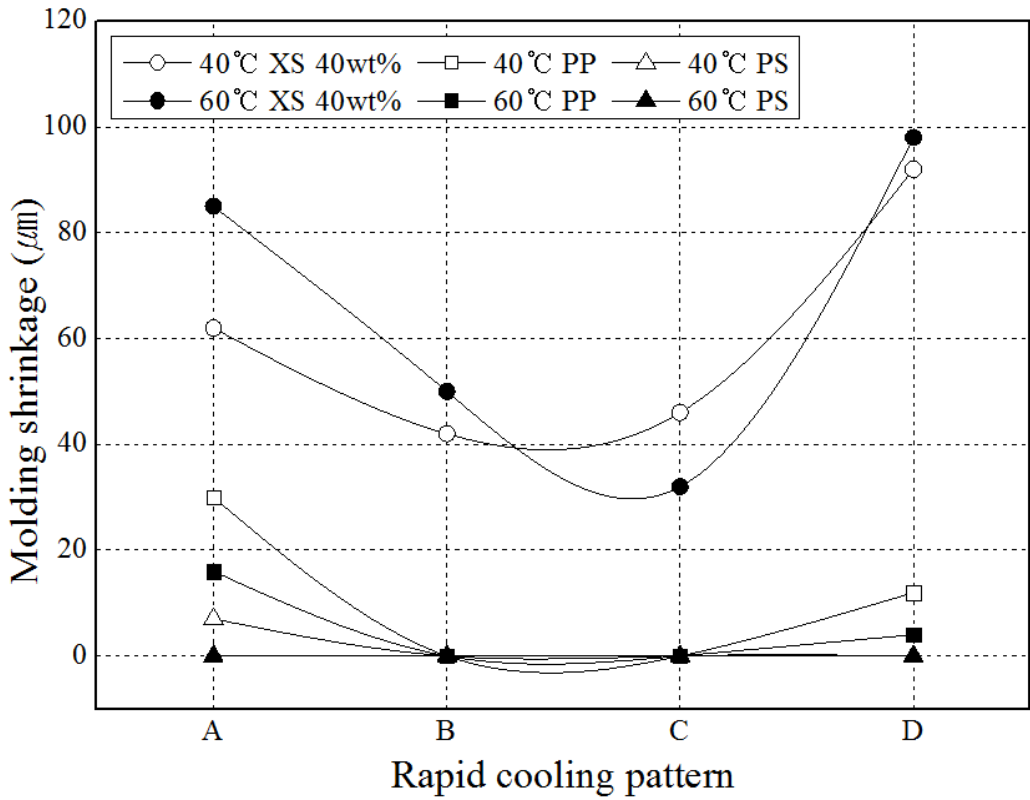


Fig. 3-14 Relationship between molding shrinkage and cooling patterns in rapid cooling experiments

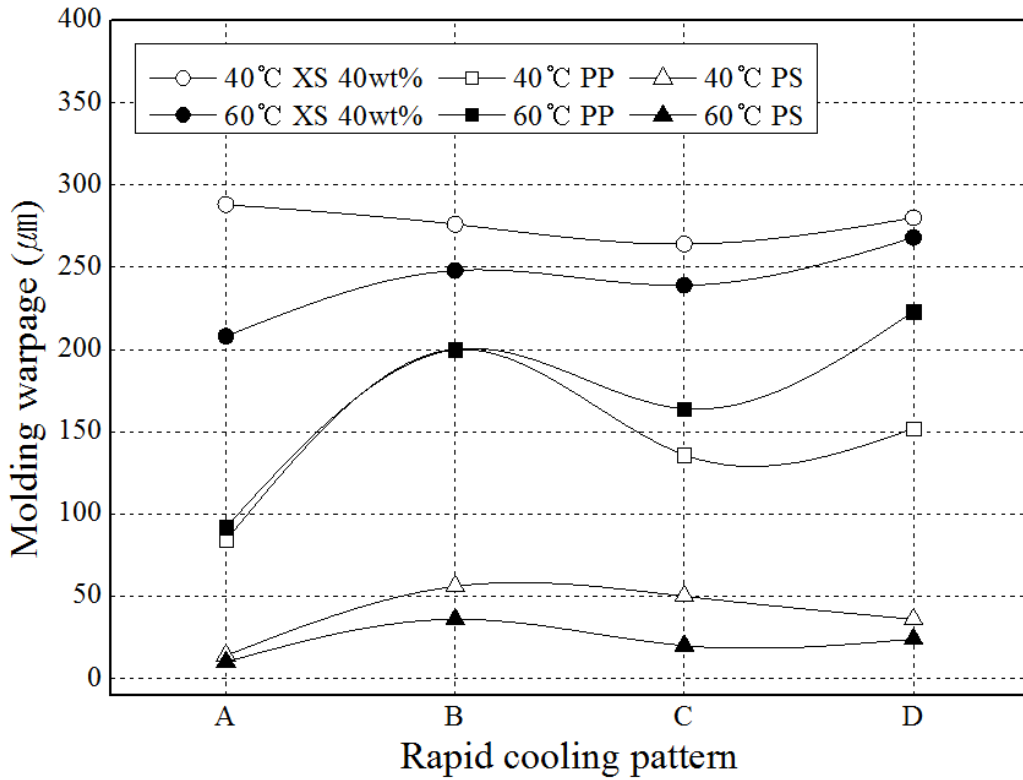


Fig. 3-15 Relationship between molding warpage and cooling patterns in rapid cooling experiments

제 2 절 수축과 뒤틀림의 생성과정

X-시트(XS 40wt%)와 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)의 각 시험재료는 Fig. 3-16과 같이 충전·보압·냉각·이형의 성형과정에서 수축과 뒤틀림이 발생한다고 생각한다.

1. 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)

폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)의 재료를 사용한 리브 성형품의 성형시 충전·보압·냉각·이형의 성형과정에서 수축 및 뒤틀림의 생성과정을 고찰하고자한다. 서냉 실험의 Fig. 3-2 ~ Fig. 3-9로부터 리브 성형품의 수축과 뒤틀림은 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS) 단일재료가 X-시트(XS)의 복합재료에 비해 아주 작게 나타났다. 이 원인에 대해 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)은 다음과 같은 충전·보압·냉각·이형의 성형과정에서 수축이 생성되고 이로 인하여 뒤틀림이 발생한다고 생각한다.

가. 충전과정

(1) 등온상태의 블랭크는 금형 내에 Fig. 3-16 (a)와 같이 충전된다.

나. 보압·냉각과정

(2) 용융상태의 블랭크는 Fig. 3-16 (b)와 같은 보압·냉각과정에서 거의 등압 상태에서 냉각된다.

다. 천판부의 응고과정

(3) 폴리프로필렌(PP)에서는 재결정화, 폴리스티렌(PS)에서는 유리화에 따라 유동성이 현저히 나빠지기 때문이다. 본 실험에서는 Fig. 3-16 (c)와 같이 이 과정을 응고라고 한다.

(4) 천판부의 응고와 동시에 천판부에서의 블랭크의 유동이 없어진다. 그 결과 리브부에 압력 전달이 끊어지며, 이후 리브부는 수축된다.

(5) 최고 온도인 리브를 붙인 천판 아래 부분은 열 수축성이 큰 상태이며 냉각에 따라 주위의 재료를 끌어 당기는 힘이 발생한다. 그 결과 천판

중앙부와 리브부는 압력이 감소한다. 성형하중이 낮은 경우는 리브부에서 압력이 0이 되어 재료가 금형으로부터 떨어져 버린다.

- (6) 성형품의 중앙부 표면에 생기는 오목한 현상은 금형 내에 주입된 블랭크 용융수지가 냉각·응고화 될 때, 중심부는 늦게 냉각 수축되기 때문에 빨리 수축되는 천판 양단부 쪽으로 수지가 움직여 수지량 부족으로 함몰되는 부분이 생기는 현상이다.

라. 이형후의 과정

- (7) 이형 후 성형압력이 제거되면 Fig. 3-16 (d)와 같이 원래 상태로 되돌아갈 때 발생하는 탄성회복과 자연냉각 시 수지 고유의 열팽창률에 의해 수축과 뒤틀림이 발생한다. 이형온도가 낮을수록 성형 시의 리브 윗부분으로부터 수축이 커진다. 반대로 이형온도가 높을 경우는 수축은 작아지고 뒤틀림은 커진다.

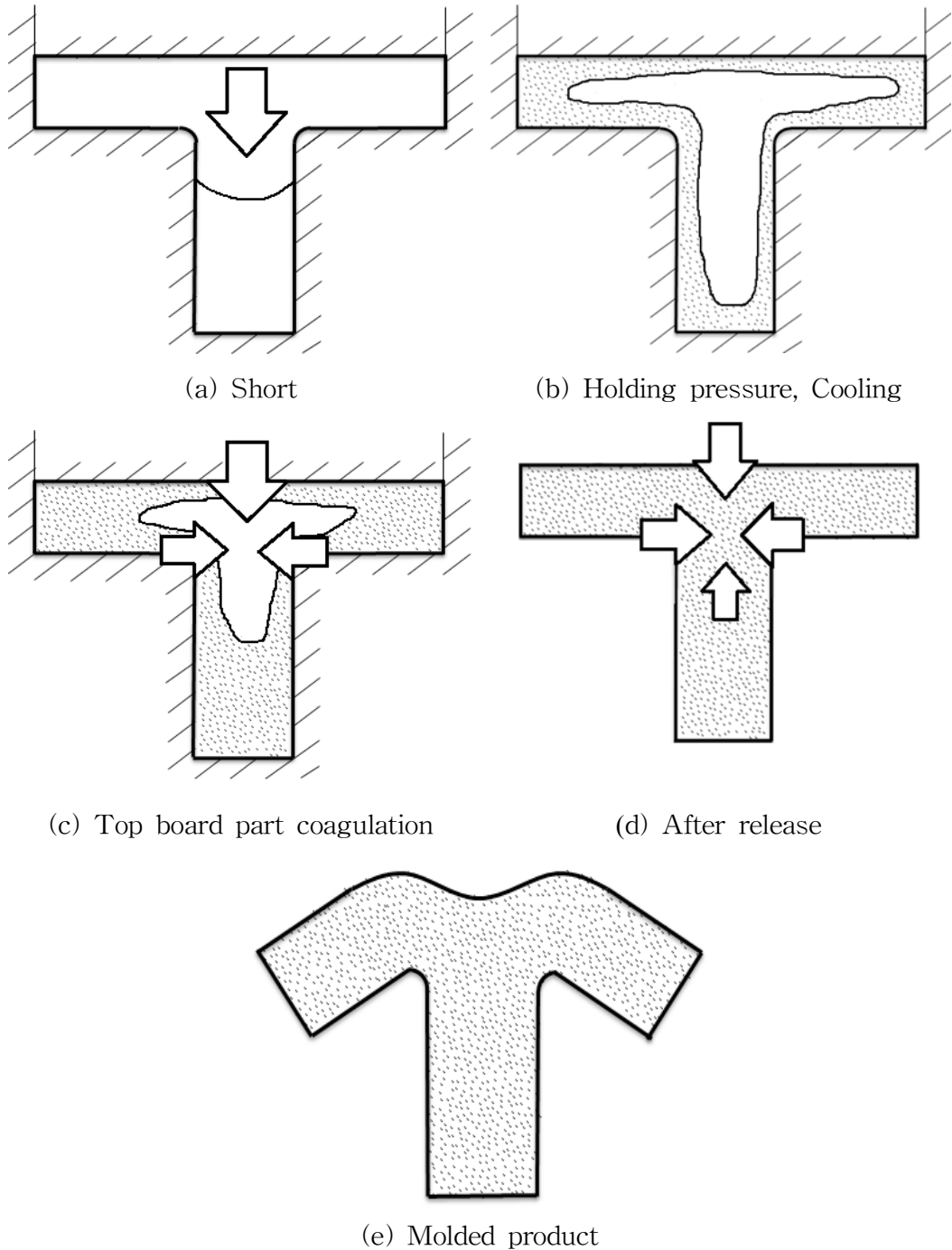


Fig. 3-16 Molding shrinkage formation process of X-sheet(XS 40wt%), polypropylene(PP) and polystyrene(PS)

2. X-시트(XS 40wt%)

X-시트(XS 40wt%)의 복합재료를 사용한 리브 성형품의 성형 시 충전·보압·냉각·이형의 성형과정에서 수축 및 뒤틀림의 생성과정을 고찰하고자한다. 서냉 실험의 Fig. 3-2 ~ Fig. 3-9로부터 리브 성형품의 수축과 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%)의 복합재료가 폴리프로필렌(PP) 단일재료에 비해 크게 나타났다. 이 원인에 대해 X-시트(XS 40wt%)는 다음과 같은 충전·보압·냉각·이형의 성형과정에서 수축과 뒤틀림이 발생한다고 생각한다.

X-시트(XS 40wt%)의 보압·냉각과정에서 보압 시간 변화에 따른 금형내의 압력의 관계를 Fig. 3-17에 나타냈다. 그리고 보압 시간 변화에 따른 금형내의 온도의 관계를 Fig. 3-18에 나타냈다. 이 서냉 실험의 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm이다. 금형내의 압력 측정위치는 Fig. 2-3의 평면도 ① ~ ④에, 금형 온도 측정위치는 Fig. 2-3의 평면도 ㉠에 나타냈다.

가. 충전과정

(1) 등온상태의 블랭크는 금형 내에 Fig. 3-16 (a)와 같이 충전된다.

나. 보압·냉각과정

(2) 보압·냉각과정에서 Fig. 3-16 (b)와 같이 천판에 리브를 붙인 경계면에서 유리섬유 매트가 리브내로 유입한다. 이때 섬유는 유동방향으로 배향한다. 천판에 리브를 붙인 경계면에서 유리섬유 매트가 리브내로 유입 시 강화재인 유리섬유보다 모재인 폴리프로필렌(PP)의 유동속도가 빠르다.

(3) 보압 시간 변화에 따른 금형내부 압력의 관계를 나타낸 Fig. 3-17로부터 용융상태의 블랭크는 거의 등압상태에서 냉각됨을 알 수 있다.

다. 천판부의 응고과정

(4) 천판부의 응고와 동시에 천판부에서의 블랭크의 유동이 없어진다. 그 결과 Fig. 3-17에 나타난 바와 같이 리브부에 압력 전달이 끊어지며, 이후 Fig. 3-16 (c)와 같이 리브부는 수축된다.

(5) 용융상태의 블랭크는 보압 시간 변화에 따른 금형내부 온도의 관계를

나타낸 Fig. 3-18과 같이 냉각됨을 알 수 있다.

라. 이형후의 과정

- (6) 이형 후에는 Fig. 3-16 (d)와 같이 수축이 더욱더 커짐과 동시에 크게 뒤틀림이 발생한다. 이 원인은 Fig. 3-16 (c)에서와 같이 천판에 리브를 붙인 경계면에서 리브 두께 방향의 열수축률이 타 부분에 비해 커지게 된다.
- (7) 또한 천판의 펀치 측보다 다이 밑 측의 섬유함유량이 작아져 다이 밑 측의 열수축률이 커지는 것이 가중된다고 생각된다.

X-시트(XS 40wt%)의 보압·냉각과정에서 보압 시간 변화에 따른 금형내부 압력의 관계를 Fig. 3-17에 나타냈다. 이 Fig. 3-17로부터 압력변화 ②③①④의 위치 순서로 단위면적당 섬유함유량이 작아지고 모재인 폴리프로필렌(PP)의 량이 많아져서, 응고 시 모재 수축률이 커져 압력이 내려가 낮게 나타난다. 섬유층은 천판 단부로부터 리브 중심으로 향해 유입되어 경계면 앞부분(압력측정 ②)의 섬유함유량이 많아진다. 또한 천판에 리브를 붙인 경계면에서 섬유함유량이 작아지는 부분(압력측정 ④)을 발생한다. 본 실험으로부터 섬유함유량은 금형내의 압력변화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

X-시트(XS 40wt%)의 수축과 뒤틀림의 생성과정의 실험결과 고찰로부터 리브를 붙인 경계면에서 냉각이 늦어지는 것과 섬유배향이나 섬유와 모재의 분리 상태가 더해져 수축과 뒤틀림이 발생 된다고 생각된다. 이 섬유배향 및 섬유와 모재의 분리 상태는 충전과정에서 일어나는 과정이다²⁸⁻³²⁾.

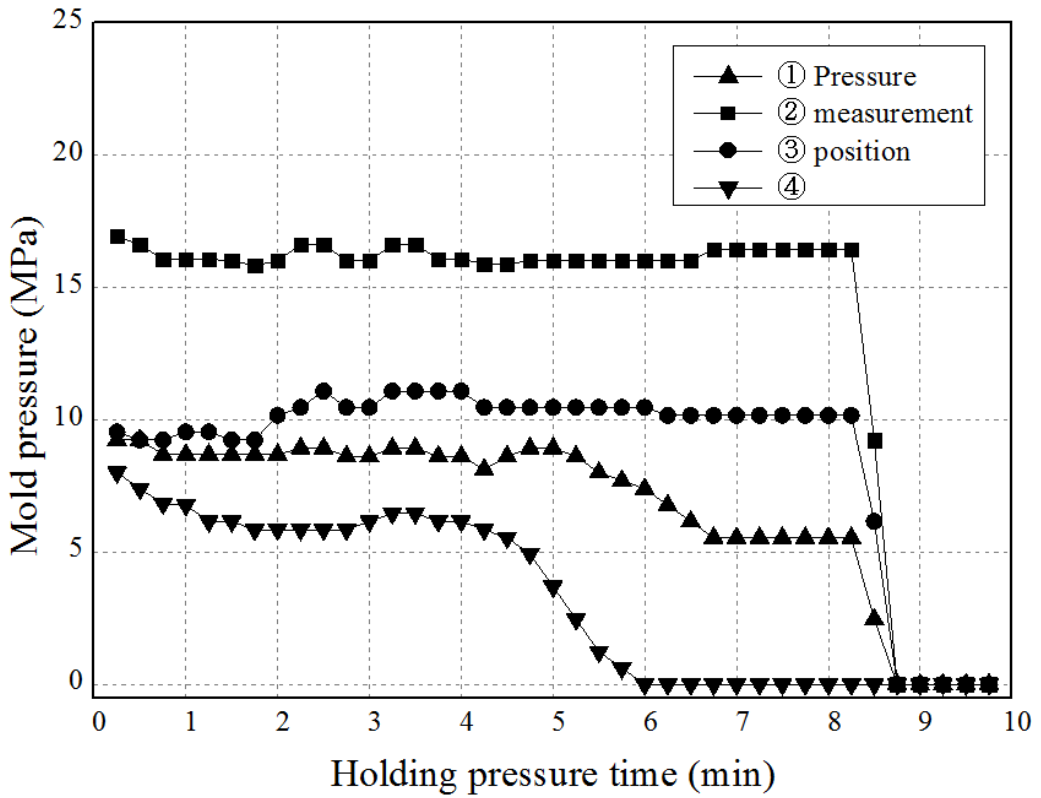


Fig. 3-17 Relationship between mold pressure and holding pressure time of X-sheet(XS 40wt%)

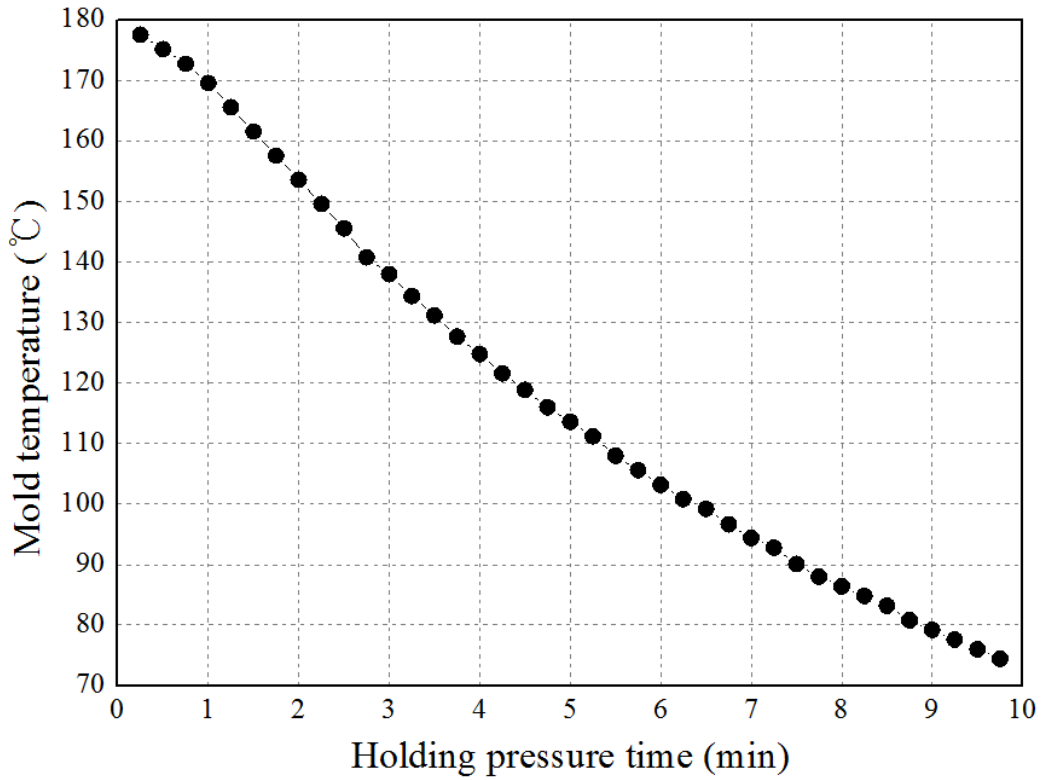


Fig. 3-18 Relationship between mold temperature and holding pressure time of X-sheet(XS 40wt%)

제 3 절 천판 상면 중앙부의 부풀음 생성과정

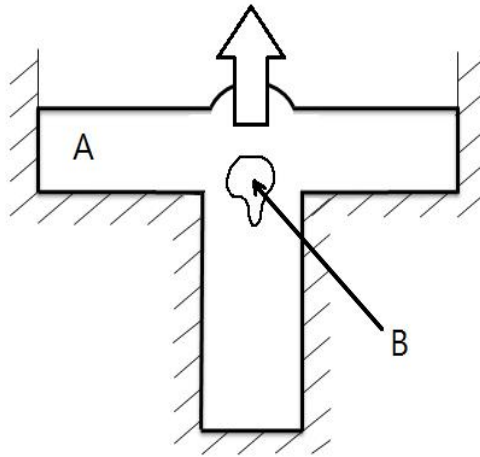
성형수축에 영향을 주는 요인 중 하나는 성형압력이 제거되어 원상태로 되돌아갈 때 발생하는 탄성회복에 의한 팽창이다. 이 탄성회복을 고찰하기 위해 천판 상면 중앙부의 부풀음(Blister) 생성과정을 Fig. 3-19에 나타냈다. 천판 상면 중앙부의 부풀어 오름은 표면 결함의 일종으로서 한계가 뚜렷한 상태의 표면 원형 부풀음이다. Fig. 3-4에서 이미 표시한 것과 같이 폴리프로필렌(PP)와 폴리스티렌(PS)에 대해서도 보압·냉각과정에 있어서 고온으로 성형 후, 성형하중을 제거하여 이형하면 리브를 붙인 천판 상면의 경계면 수축에서는 역으로 부풀어 오름이 보인다. 폴리스티렌(PS)의 경우는 성형하중의 증가와 함께 뒤틀림이 커진다. 이것은, 하중제거 시에 리브를 붙인 천판 상면의 경계면의 고온부가 다른 부분에 비해 크게 순간 탄성회복하기 때문이라고 생각된다.

밀도(Density) 또는 그 역수인 비체적은 고분자 물질의 대표적 물성의 하나이다. 비체적을 압력과 온도의 함수로 나타낸 PVT 특성에서 폴리스티렌(PS)인 경우에는 Fig. 3-20 (a), 폴리프로필렌(PP)인 경우에는 Fig. 3-20 (b)에 나타냈다⁵⁾. 유리전이온도(T_g , glass transition temperature)는 플라스틱에 있어서 녹는점이나 연화온도와 같이 대단히 중요한 온도이다. 보통의 유리는 그 분자 구조상 무정형이므로 과학적으로는 액체 구조를 가지고 있는 것이며, 고체의 구조(결정)는 가지지 않는다. 즉 액체의 구조 그대로 동결한 것이라고 말할 수 있다. 온도가 낮아지면 분자의 열운동은 완만해지며 이론적으로는 -273°C 에서 분자의 열운동은 정지된다. 이와 같이 열운동이 정지된 상태로 되었을 때를 마이크로브라운운동이 동결되었다고 하며, 온도가 상승하면 분자의 열운동이 점차 왕성하게 되어 분자의 간격은 점차 커진다.

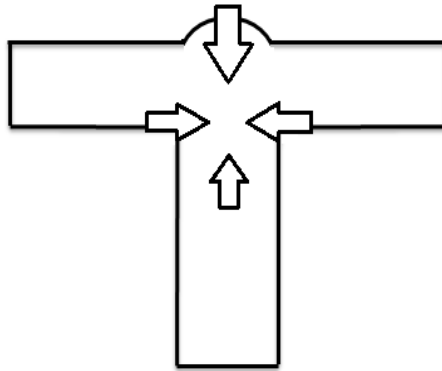
무정형 고분자인 폴리스티렌(PS)의 경우에는 Fig. 3-20 (a)에 표시한 바와 같이 고분자가 무정형 고체인 온도 범위에서 비용적(Specific volume, 단위질량의 물질이 차지하는 부피, 밀도의 역수)이나 비열 등의 그래프에 곡절점(Fig. 3-20 (b)의 녹는점 T_m 에 상당한다.) 생기며 이 곡절점 온도를 유리전이온도(T_g)라고 한다. 이 곡절점은 마이크로브라운운동이 시작되는 온도이며 이 온도 이하에서는 마이크로브라운 운동이 동결된 상태에 있다. 결정성 고분자인 폴리

프로필렌(PP)의 경우에는 Fig. 3-20 (b)에 표시한 바와 같이 그 모양이 다르게 된다. 플라스틱의 유동성형에서 중요한 것은 폴리스티렌(PS)의 유리전이온도가 75~100℃이고, 폴리프로필렌(PP)의 유리전이온도가 -4~-43℃ 이므로 성형조건에서 플라스틱 성형품의 이형온도이다.

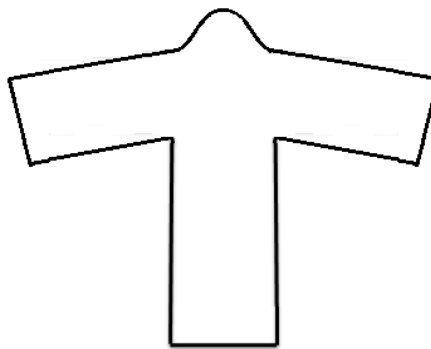
위의 폴리스티렌(PS)의 PVT 특성 Fig. 3-20 (a)에서 언급된 바와 같이 금형으로부터 리브 성형품의 이형 시 Fig. 3-19 (a)의 B부분은 A부분에 비해 고온이기 때문에 순간 탄성 회복량이 커짐을 알 수 있다. 탄성회복은 하중 제거 직전에 A, B부분이 등압이며 B부분이 아직 용융상태라 하면 매우 커진다. 따라서 본 실험과 같이 이형 시에 천판 윗부분으로부터 금형 상면의 편치가 상승될 경우, 리브부는 구속되어 있기 때문에 순간적으로 천판과 리브부가 만나는 윗부분에만 블록(Dome)해진다. 그리고 이형후의 자연 냉각 시에는 리브 두께 방향으로도 수축을 일으키고 이 블록해짐이 원래대로 되돌아오지 않고 천판이 리브 방향으로 처지게 된다.



(a) Release time

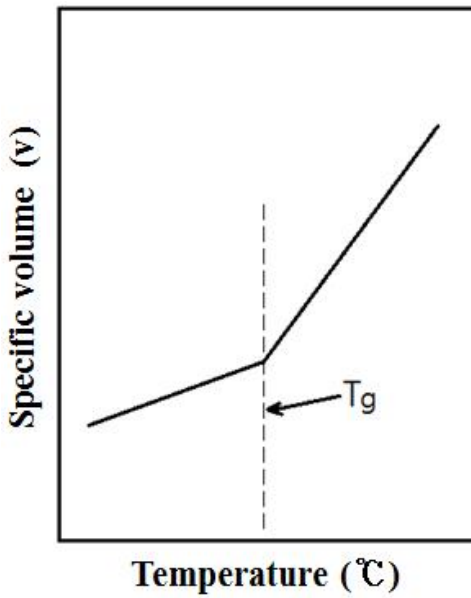


(b) After release

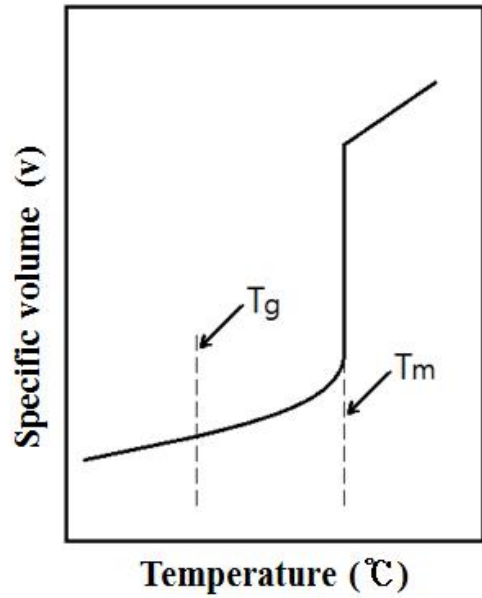


(c) Molded product

Fig. 3-19 Creation process of swelling of top surface of top board



(a) Polystyrene(PS)



(b) Polypropylene(PP)

Fig. 3-20 PVT diagram of polystyrene(PS) and polypropylene(PP)

제 4 절 맺음 말

리브를 가지는 압축 성형품의 성형조건에 대한 수축, 뒤틀림의 관계를 실험하여 주요한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), X-시트(XS 40wt%)의 3종류 재료 모두가 이형온도를 높게 할수록 뒤틀림이 증대하고, 수축이 감소한다.

(2) X-시트(XS 40wt%)는 성형하중이 증가할수록 수축과 뒤틀림이 감소한다. 폴리프로필렌(PP)은 성형하중 100 kN 이상에서 수축되지 않고, 성형하중이 증가할수록 뒤틀림이 급격하게 감소한다. 폴리스티렌(PS)은 성형하중이 수축에 무관 하나, 성형하중이 증가할수록 뒤틀림이 급격하게 증가한다.

(3) 금형온도의 관계에서 수축과 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%)가 가장 크게, 폴리스티렌(PS)이 가장 적게 나타났다. 또한, 뒤틀림은 X-시트(XS 40wt%), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS)의 3종류 모두 금형온도 173℃에서 가장 적게 나타났다.

(4) X-시트(XS 40wt%)의 수축은 금형과 성형품과의 이형 시 급냉의 경우가 서냉 보다 약 1.7배 적게 나타났다. 리브 성형품의 수축과 뒤틀림에 미치는 영향은 섬유함유량과 더불어 폴리프로필렌(PP)과 밀접한 관계가 있는 리브두께가 지배적이다.

(5) X-시트(XS 40wt%)의 유동성형에서 이형온도와 성형하중을 대입하면 수축량과 뒤틀림을 구할 수 있는 실험식을 다음과 같이 제안했다.

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 수축량(δ_{ST})은

$$\delta_{ST}(\mu\text{m}) = 79.28 + 1.53T(^{\circ}\text{C}) - 0.01T^2(^{\circ}\text{C})$$

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 뒤틀림량(δ_{WT})은

$$\delta_{WT}(\mu\text{m}) = 62.64 + 1.76T(^{\circ}\text{C}) + 0.0078T^2(^{\circ}\text{C})$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 수축량(δ_{SP})은

$$\delta_{SP}(\mu\text{m}) = 79.7 + 0.11P(\text{kN}) - 0.0011P^2(\text{kN})$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 뒤틀림량(δ_{WP})은

$$\delta_{WP}(\mu\text{m}) = 340.2 - 0.58P(kN) + 2.71P^2(kN)$$

(6) X-시트는 폴리프로필렌(PP) 단일재료에 비해 수축과 뒤틀림 모두 보압·냉각과정의 성형조건에 의존하지 않고 크다. 이것은 X-시트의 복합재료 특성상 충전과정에서 발생하는 이방성, 불균질성의 영향이라고 생각된다.

제 4 장 치수 정밀도

제 1 절 리브 성형품의 치수 정밀도

본 실험에서는 서냉 실험으로부터 얻어지는 리브 성형품의 치수 정밀도에 대하여 고찰한다. 리브 성형품의 폭(W), 천판두께(T_1), 리브두께(T_2)를 측정하고 재료의 성형조건과 각 치수와의 관계를 명확히 하고자 한다.

상은 약 20℃에서 리브 성형품의 폭 치수는 버니어캘리퍼스(최소눈금 0.05 mm)을 사용하여, 천판두께와 리브두께의 치수는 마이크로미터(최소눈금 0.001 mm)을 사용하여 측정하였다.

1. 리브 성형품의 폭

수지는 유동방향으로 늘어나지만 냉각 시 배분성이 완화되어 당기어 늘어난 분자가 원래의 상태로 되돌아가려고 하여 수축이 일어난다. 이 분자배향의 완화에 의한 수축을 고찰하고자한다. X-시트(XS 40wt%)와 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)의 서냉 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 금형치수 폭 60.09 mm이다. 이 성형조건에서 실험하여 이형온도 변화에 대한 리브 성형품의 폭(W) 치수의 관계를 Fig. 4-1에 나타냈다.

본 실험으로부터 폴리프로필렌(PP)의 경우 리브두께(T_2)가 수축에 미치는 영향은 12 mm가 4 mm보다 더 두꺼워 수축이 크게 나타났다. 본 실험의 결과로부터 성형품의 수축은 리브두께에 대한 영향이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 폴리프로필렌(PP)은 금형 치수에 대해 1~2% 수축하고 있는 것에 비해, X-시트(XS 40wt%)는 수축되지 않음을 알 수 있다. 이것은 강화재인 유리섬유가 모재인 폴리프로필렌(PP)의 수축을 방지하고 있기 때문이며, 리브 성형품 내부에서는 큰 잔류응력이 존재하고 있다고 생각된다. 또한, 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)의 경우는 이형온도가 저온일 때 수축이 적어진다. 본

서냉 실험으로부터 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)은 이형 시 온도가 낮아져도 재료 내부에서 흐름이 발생하고 있음을 나타내고 있다.

서냉 실험에서 성형하중 변화에 대한 리브 성형품의 폭(W) 치수의 관계를 Fig. 4-2에 나타냈다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 본 실험으로부터 각 시험재료 모두 성형하중의 상승과 동시에 수축이 작아지고 있다. 그러나 X-시트(XS 40wt%)경우는 100 kN 이상에서 금형치수 보다도 리브 성형품의 폭(W) 치수가 더 크게 나타났다. 이 원인으로서 금형 펀치와 다이의 가열로 팽창과 탄성회복이라고 생각된다. 폴리프로필렌(PP)의 경우가 폴리스티렌(PS)에 비해 리브 성형품의 폭 치수 변화의 구배가 큰 이유는 폴리프로필렌(PP)의 탄성 회복량이 더 크기 때문이다.

서냉 실험에서 X-시트(XS)의 섬유함유량 변화에 대한 리브 성형품의 폭 치수의 관계를 Fig. 4-3에 나타냈다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 성형온도 173℃, 금형온도 50℃, 성형하중 50 kN, 이형온도 80℃, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 또한 급냉 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 블랭크온도 200℃, 금형온도 50℃, 성형하중 50 kN, 성형시간 60 sec, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm 이다. 본 서냉 및 급냉 실험으로부터 모두 섬유함유량의 증가에 의해 리브 성형품의 폭 방향 수축이 현저히 작아짐을 알 수 있다. 또한 X-시트(XS)의 섬유함유량 25wt%와 40wt%에서는 서냉이 급냉보다 리브 성형품의 폭 방향 수축이 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 서냉 및 급냉 실험 모두 리브두께가 두꺼울수록 수축이 크기 때문에 수축을 줄이기 위해서 리브의 두꺼운 단면을 피해야 함을 알 수 있다.

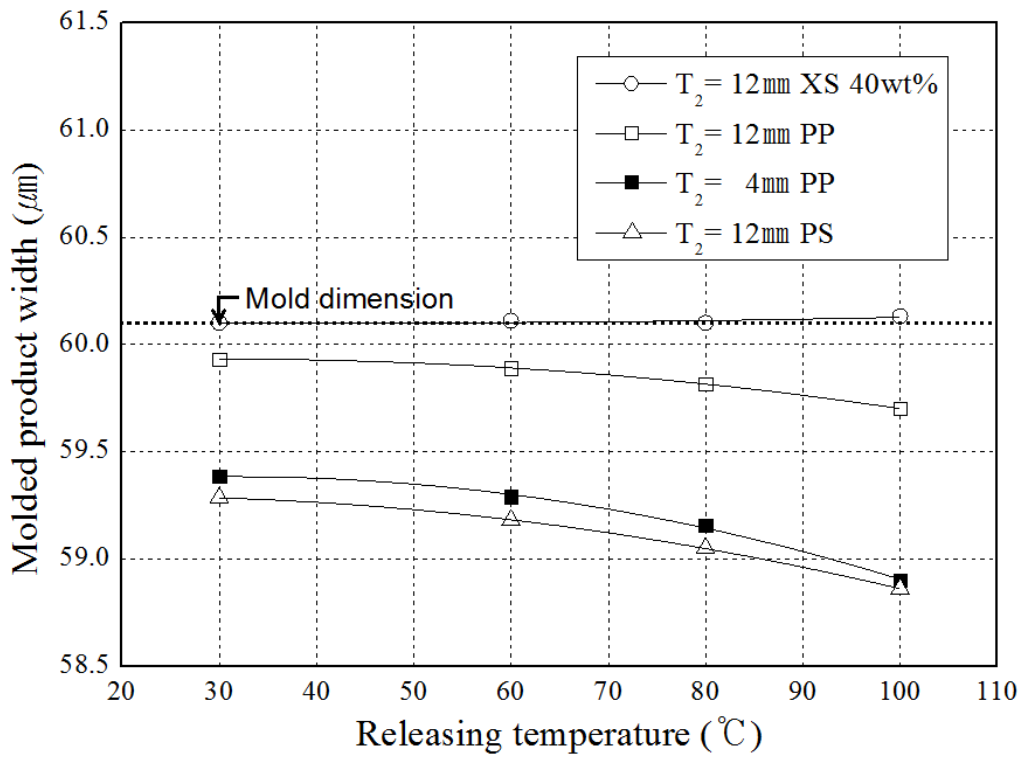


Fig. 4-1 Relationship between mold releasing temperature and molded product width

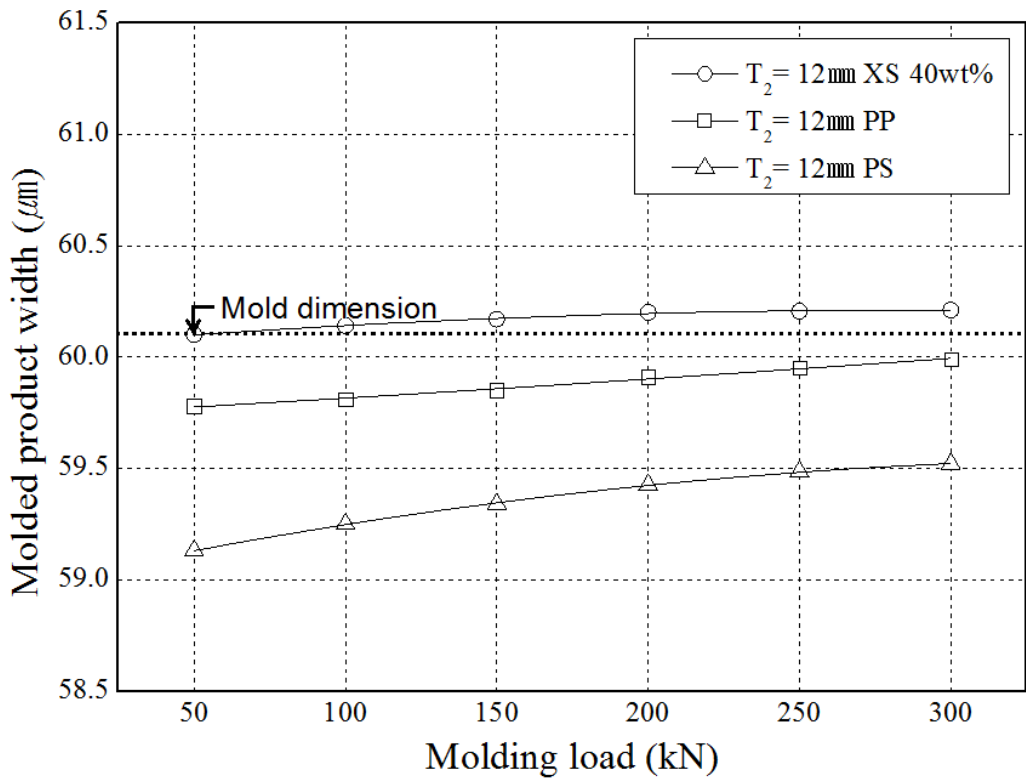


Fig. 4-2 Relationship between molding load and molded product width

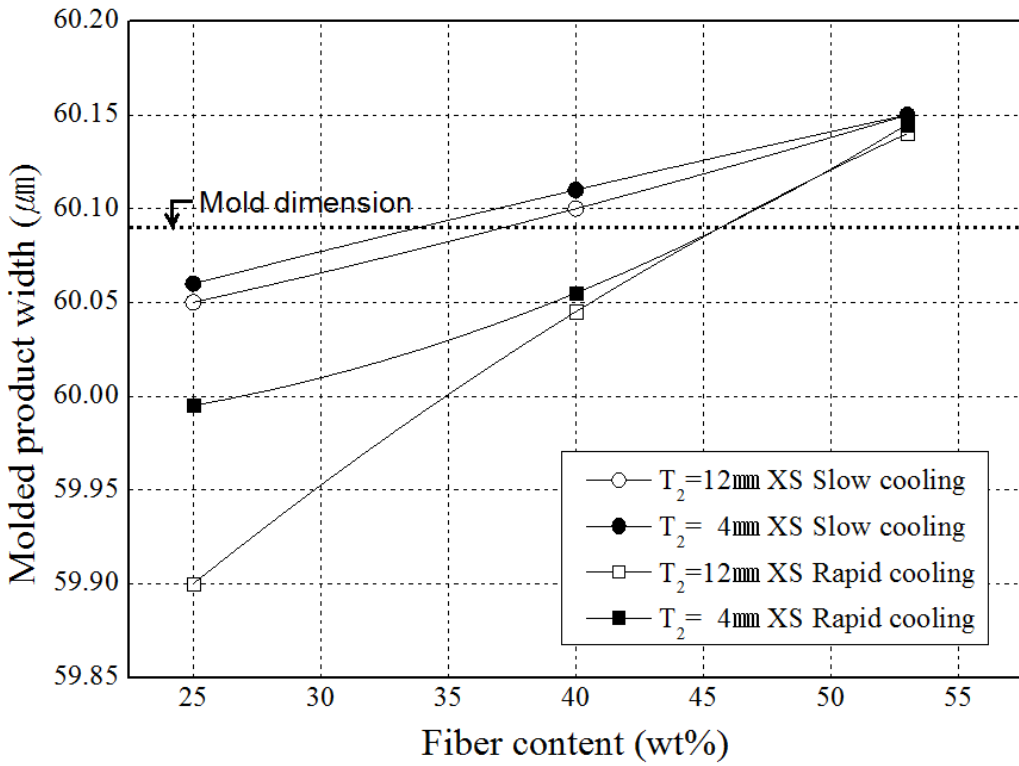


Fig. 4-3 Relationship between fiber content and molded product width

2. 리브 성형품의 천판두께

X-시트(XS 40wt%)와 폴리프로필렌(PP) 및 폴리스티렌(PS)의 서냉 실험에서 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173°C, 이형온도 80°C, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm이다. 이 성형조건에서 실험하여 천판중심으로부터의 거리에 대한 리브 성형품의 천판두께(T_1) 치수의 관계를 Fig. 4-4에 나타냈다. 그리고 X-시트(XS 40wt%)의 경우는 천판중심으로부터의 거리에 대한 리브 성형품의 섬유함유량의 관계를 Fig. 4-5에 나타냈다.

본 실험의 Fig. 4-4로부터 리브 성형품의 천판두께 치수는 X-시트(XS 40wt%), 폴리스티렌(PS), 폴리프로필렌(PP) 순서로 작게 나타났다. X-시트(XS 40wt%)의 경우는 천판중심으로부터 단부에 가까워짐에 따라 리브 성형품의 천판두께 치수가 약간 작아 졌다. 이는 X-시트(XS 40wt%)의 고온압축 프레스 성형 시 강화재인 유리섬유는 고체이고, 모재인 폴리프로필렌(PP)은 액체이므로 유동속도 차가 발생한다. 이로 인하여 단부에 가까워질수록 섬유함유량이 적어지고 폴리프로필렌(PP)량이 많아져서 수축이 커지게 되어 천판 두께가 작아지게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 천판중심으로부터의 거리가 멀어질수록 리브 성형품의 섬유함유량이 감소함을 Fig. 4-5로부터 확인할 수 있다. 이 섬유함유량은 식 (1)로 구하였다.

그러나 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)의 경우는 천판중심으로부터 단부까지의 거리에 관계없이 리브 성형품의 천판 두께가 거의 균일하게 나타남을 알 수 있다. 이는 섬유강화 고분자 복합재료가 아닌 단일재료이기 때문이다. 또한 천판 두께의 감소는 폴리프로필렌(PP)이 폴리스티렌(PS)보다 크게 나타났다. 결정성 고분자인 폴리프로필렌(PP)의 고체화온도는 약 -4~-43°C이며, 무정형 고분자인 폴리스티렌(PS)의 고체화온도는 약 75~100°C이다⁵⁾. 그러므로 폴리스티렌(PS)은 폴리프로필렌(PP)보다 이형온도 80°C 부근에서 수축변화가 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4-5에서 측정값의 관계를 최소제곱 회귀분석법을 이용하여 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 시 천판중심으로부터 단부까지의 거리(mm)에 따른 리브 성형품의 섬유함유량을 계산하는 실험식을 제시하였다.

X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 리브 성형품의 섬유함유량 (Q_{fr})과 천판중심으로부터 단부까지의 거리(mm)의 관계식을 나타내면 다음 식 (6)과 같다.

$$Q_{fr}(wt\%) = 61.36 - 1.21L(mm) + 0.015L^2(mm) \quad (6)$$

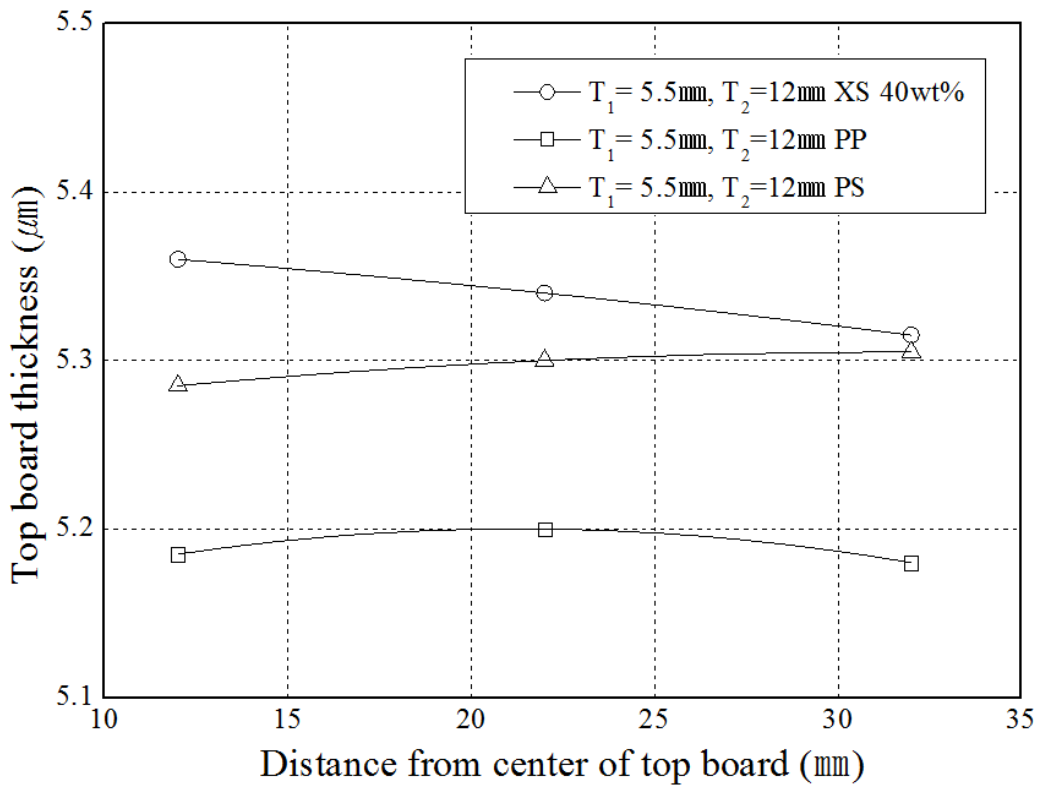


Fig. 4-4 Relationship between distance from center of top board and top board thickness dimension

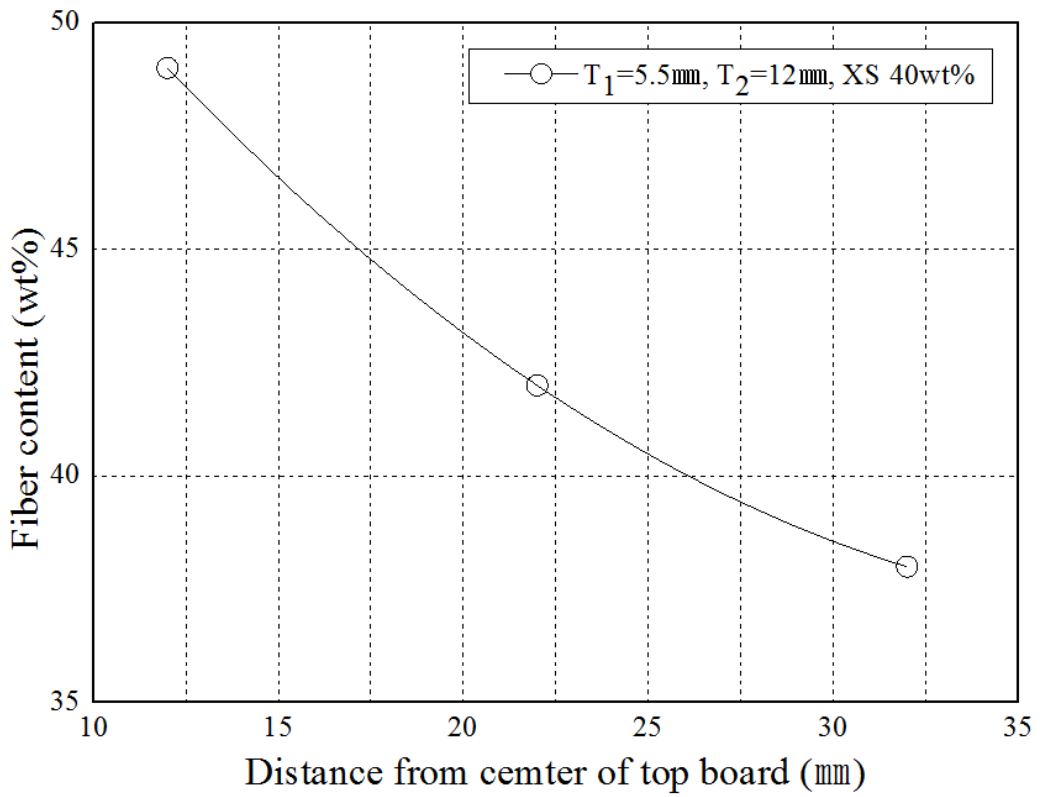


Fig. 4-5 Relationship between distance from center of top board and fiber content

3. 리브 성형품의 리브두께

폴리프로필렌(PP)와 X-시트(XS 40wt%)의 서냉 실험에서 천판에 리브를 붙인 경계면으로부터의 리브 선단부 까지 거리에 대한 리브두께 치수의 관계를 고찰하고자한다. 이 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 80℃, 성형하중 50 kN, 천판두께(T_1) 2.0 mm 5.5 mm 9.0 mm, 리브두께(T_2) 12 mm이다.

천판에 리브를 붙인 경계면으로부터의 거리에 대한 리브 성형품의 리브두께(T_2) 치수의 관계를 폴리프로필렌(PP)의 경우는 Fig. 4-6에 나타냈다. 그리고 X-시트(XS 40wt%)의 경우는 Fig. 4-7에 나타냈다. 폴리프로필렌(PP)과 X-시트(XS 40wt%) 두 시험재료 모두 리브두께 치수는 천판에 리브를 붙인 경계면으로부터의 거리가 멀어질수록 수축이 작아 두께가 안정적으로 나타났다. 즉 수축이 적게 나타남을 알 수 있다.

본 실험의 Fig. 4-6으로부터 폴리프로필렌(PP)를 사용한 리브 성형품의 리브두께 치수는 천판두께(T_1)가 얇을수록 리브부의 수축이 작아짐을 알 수 있다. 이는 천판두께가 얇을수록 천판부의 응고시간이 빠르기 때문이다. 또한 천판에 리브를 붙인 경계면 부근에서는 수지의 과다로 주위보다 수축이 잘 된다. 이는 리브 내부의 축열량이 커져 수축이 증가한다고 생각된다. 그리고 천판에 리브를 붙인 경계면으로부터의 거리가 먼 리브 선단부 쪽으로 냉각시간이 빨라져 리브두께(T_2) 치수가 더 안정적임을 알 수 있다. 본 실험의 결과로부터 리브부의 수축을 줄이기 위해서는 리브의 반대편은 두꺼운 단면을 피해야함을 알 수 있다.

Fig. 4-7로부터 X-시트(XS 40wt%)의 리브부 수축은 천판두께와 리브두께의 관련성을 찾을 수 없었다. X-시트(XS 40wt%)의 경우는 모재가 응고하면 섬유에 의해 모재의 움직임이 구속되기 때문에 수축에 따라 내부에서는 부압(negative pressure)이 커진다. 이 때문에 내부에서는 공간이 발생하여 리브부의 수축은 리브두께와 무관하다고 생각된다. 그러나 천판에 리브를 붙인 경계면 부근에서는 단일 수지를 사용한 리브 성형품과 같이 수지의 과다로 주위보다 수축이 잘 됨을 알 수 있다. 본 실험의 결과로부터 리브 성형품 제조 시 단

일 수치보다는 섬유강화 고분자 복합재료를 사용하면 리브부의 수축을 더 줄일 수 있다.

성형하중(50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN, 300 kN) 변화에 따른 천판에 리브를 붙인 경계면으로부터의 리브 선단부 까지 거리에 대한 리브두께 치수의 관계에서 폴리프로필렌(PP)의 경우는 Fig. 4-8, X-시트(XS 40wt%)의 경우는 Fig. 4-9, 폴리스티렌(PS)의 경우는 Fig. 4-10에 나타냈다.

Fig. 4-8과 Fig. 4-9로부터 리브 성형품의 모재가 동일재료인 폴리프로필렌(PP)과 X-시트(XS 40wt%)는 성형하중이 클수록 수축이 적어, 리브 선단부로 향해 리브두께가 커져 치수가 더 안정적임을 알 수 있다. 결정성 고분자인 폴리프로필렌(PP)은 고체화온도가 영하이므로 이형 시 리브두께 방향으로서의 탄성회복이 크다고 생각된다.

그러나 Fig. 4-10으로부터 무정형 고분자인 폴리스티렌(PS)의 경우는 고체화온도가 이형온도와 겹친다. 그러므로 폴리스티렌(PS)을 사용한 리브 성형품의 치수 정밀도는 성형하중과 리브두께의 관계 보다는 이형온도와 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있다.

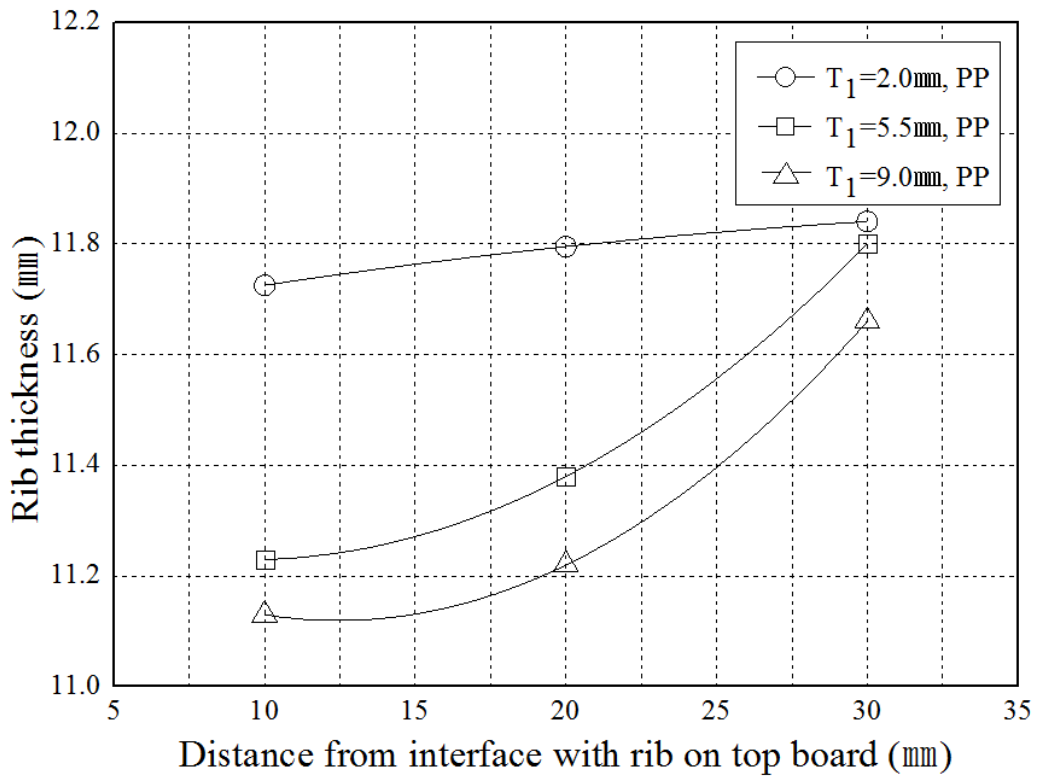


Fig. 4-6 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness (PP)

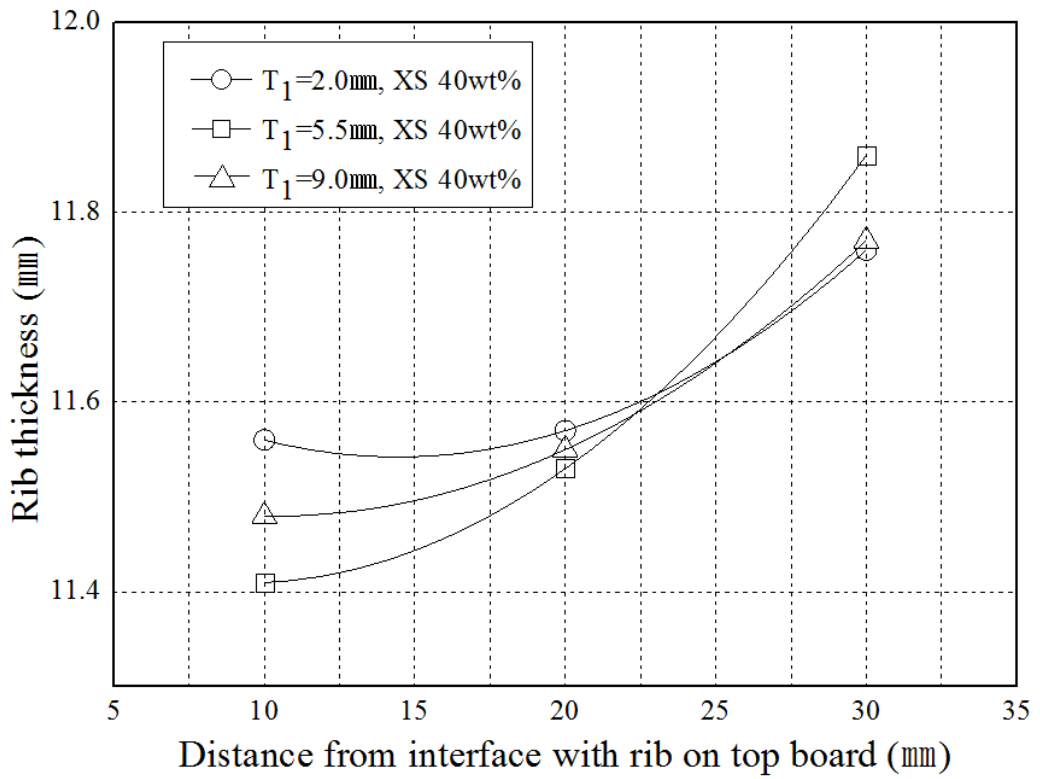


Fig. 4-7 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness (XS 40wt%)

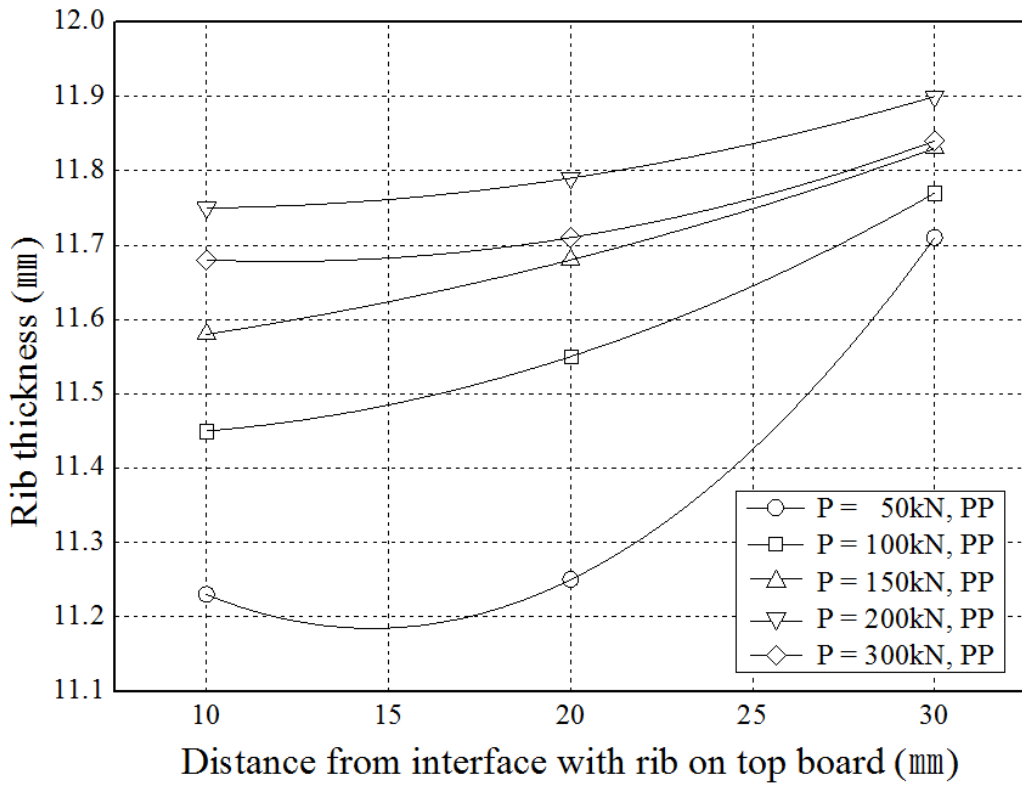


Fig. 4-8 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (PP)

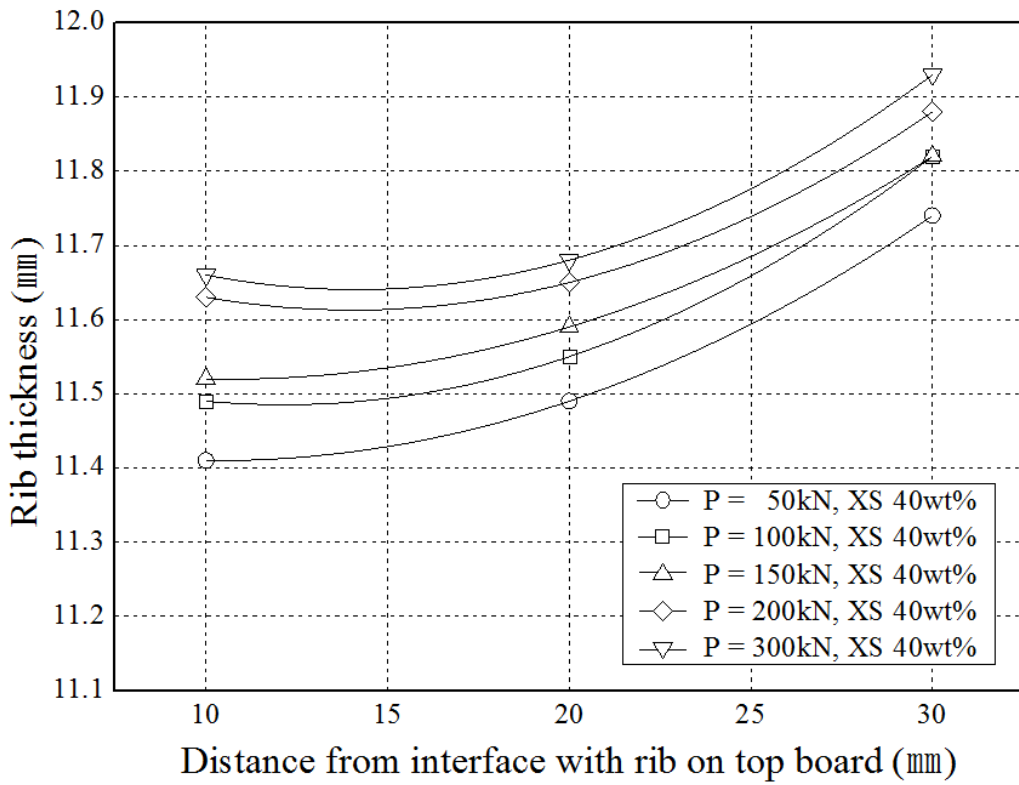


Fig. 4-9 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (XS 40wt%)

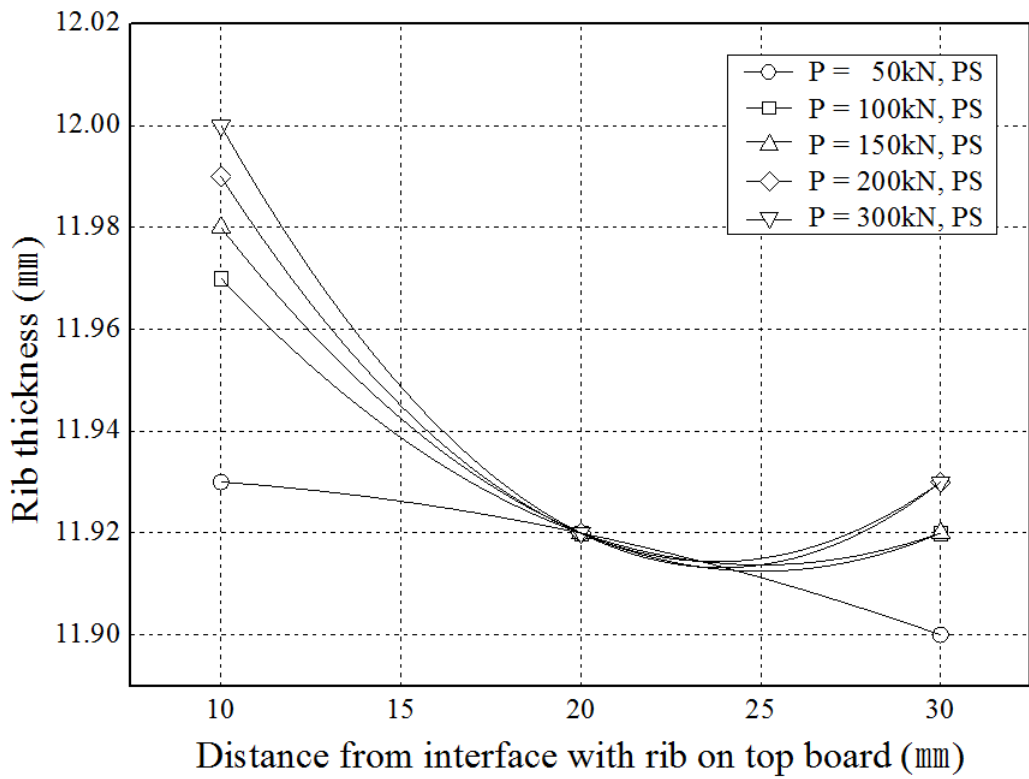


Fig. 4-10 Relationship between distance from interface with rib on top board and rib thickness at molding load (PS)

제 2 절 맺음 말

리브를 가지는 압축 성형품의 성형조건에 대한 치수 정밀도의 관계를 실험하여 주요한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)은 보압·냉각과정에 있어서 이형온도는 낮고, 성형하중은 크게 하여 리브 성형품의 폭 방향 수축을 억제할 수 있다. 리브부의 수축을 줄이기 위해서는 리브의 반대편은 두꺼운 단면을 피해야한다.

(2) 폴리스티렌(PS)을 사용한 리브 성형품의 치수 정밀도는 성형하중과 리브두께의 영향보다는 이형온도와 밀접한 관계가 있고, 이형온도는 고체화온도 부근에서 리브 성형품의 치수 수축변화가 작게 나타났다.

(3) X-시트(XS)는 보압·냉각 시 성형조건에 의해 치수 수축변화가 작고, 섬유함유량의 증가에 의해 리브 성형품의 폭 방향 수축이 현저히 개선됨을 알 수 있다.

(4) X-시트(XS 40wt%)의 유동성형에서 천관중심으로부터 단부까지의 거리(mm)을 대입하면 리브 성형품의 섬유함유량(Q_{fr})을 구할 수 있는 실험식을 다음과 같이 제안했다.

$$Q_{fr}(wt\%) = 61.36 - 1.21L(mm) + 0.015L^2(mm)$$

(5) X-시트(XS 40wt%)는 고온압축 프레스 성형의 충전과정에 있어서 유리섬유와 폴리프로필렌의 유동속도 차로 인하여 리브 성형품이 불균질하게 되어 냉각 이후에 치수변화가 발생한다.

제 5 장 표면 거칠기

제 1 절 리브 성형품의 표면 결함 유형

압축성형공정에 의하여 제조된 섬유강화 고분자 복합재료의 성형품은 표면이 나 내부에 여러 가지 결함(Defects)을 가질 수가 있다. 표면 결함인 싱크마크(Sink mark)와 표면 거칠기(Surface roughness) 등을 가지는 섬유강화 고분자 복합재료의 성형품은 자동차 차체 패널과 같이 외관이 미려하여야만 하는 부분에는 사용할 수 없다. 이를 개선하기 위해서 표면의 외관은 버핑(Buffing) 한 후에 페인팅을 하거나 코팅을 하여 향상시킬 수가 있다. 내부 결함인 기포(Blister), 섬유배향(Fiber orientation), 뒤틀림(Warpage)과 수지과다영역(Resin-rich area) 등은 성형품의 기계적 성질에 영향을 미친다. 이와 같이 섬유강화 고분자 복합재료의 표면 거칠기가 큰 것은 이 재료의 큰 결점이라고 말할 수 있다. 본 장에서는 서냉 및 급냉 실험에서의 성형품의 표면 결함과 성형조건의 관계를 명확히 하고, 표면 결함의 발생 원인을 고찰하였다. 성형품의 표면을 현미경을 이용한 관찰과 측정식 표면형상측정기에 의해 결함을 구성하고 있는 몇 가지의 형태가 발견되었으며 다음과 같다.

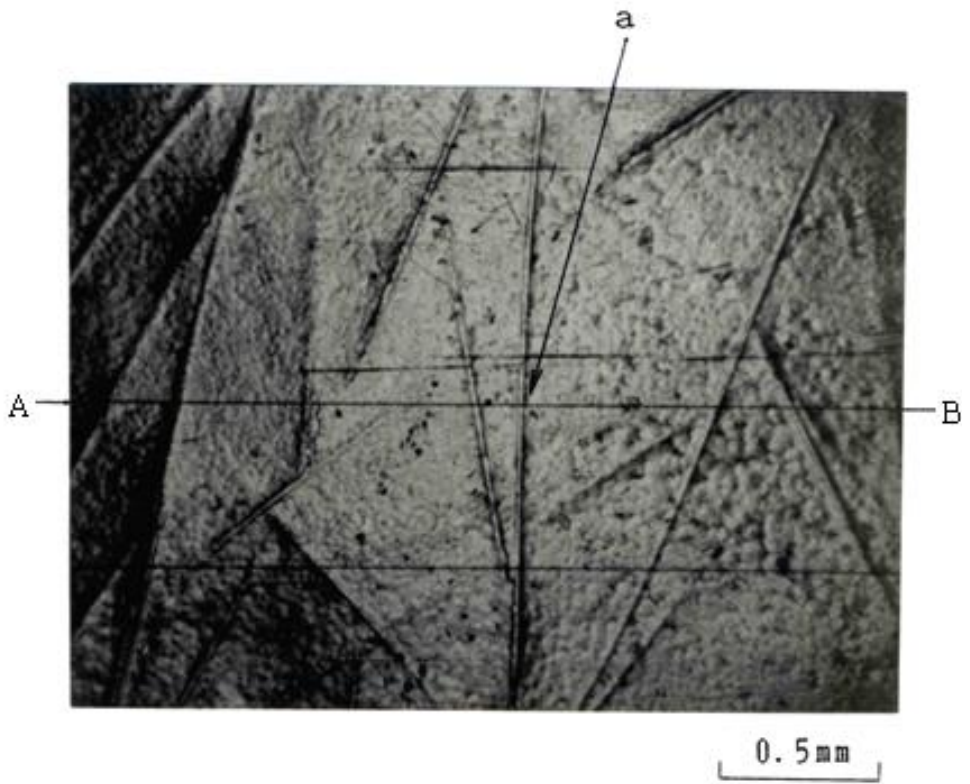
1. 유리섬유의 부풀어 오름

서냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형품 표면은 Fig. 5-1과 같이 유리섬유의 부풀어 오름이 냉각과정에서 발생한다. 유리섬유의 부풀어 오름은 성형품을 금형으로부터 이형온도에서 이형 한 직후에서는 그다지 두드러지지 않지만, 표면이 금형 외에서 실온까지 냉각됨에 따라 표면에 거칠기가 두드러지게 나타났다.

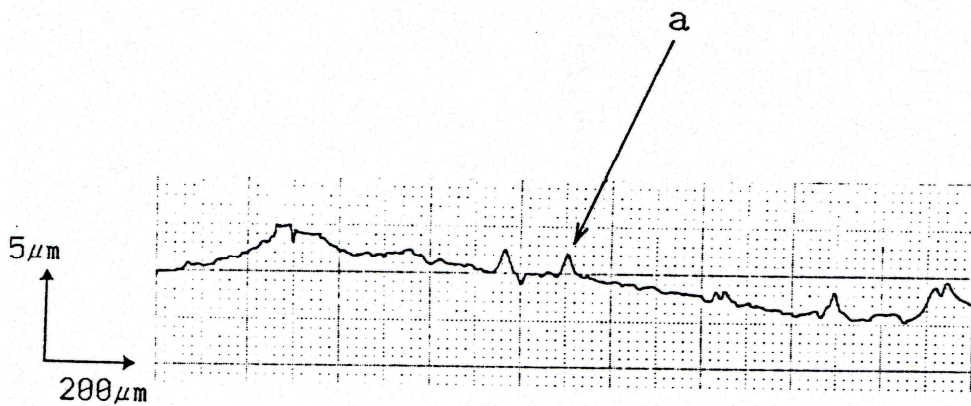
즉, 이와 같은 리브 성형품의 표면 결함 형상은 이형후의 냉각과정에 있어서 상온까지 성형품이 냉각될 때 유리섬유와 폴리프로필렌(PP)의 수축차로 인하여 표면 근처에 접한 유리섬유의 노출로 발생한다. 이 유리섬유의 부풀어 오름은

성형품의 표면 거칠기를 악화시키는 중요한 원인중의 하나라고 생각된다.

그러므로 이와 같은 유리섬유의 부풀어 오름의 표면 결함을 줄이기 위해서는 금형 내에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형 시 표면에 폴리프로필렌(PP)-시트를 피복하여야하며, 이 피복층으로 인하여 성형품의 표면 거칠기가 매우 효과적으로 개선되어 평활도가 향상될 것이다.



(a) Microscope picture



(b) Section A-B

Fig. 5-1 Fiber swelling

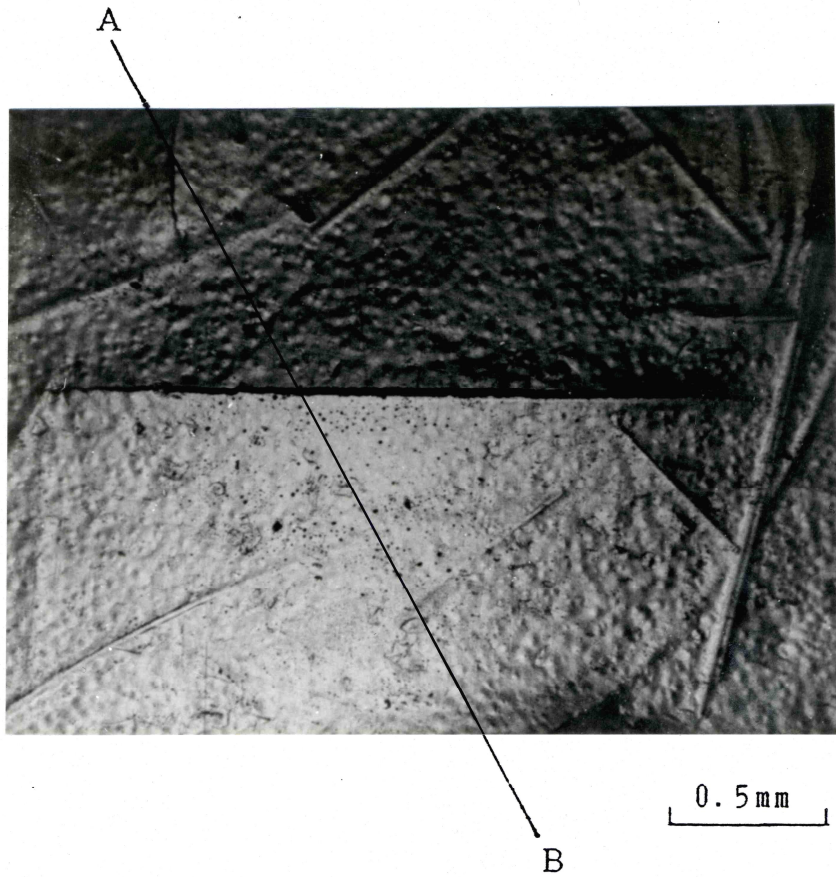
2. 블랭크 및 기포

서냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형품의 표면은 Fig. 5-2와 같이 블랭크(Blank)와 기포(Blister)가 발생한다. 이와 같은 표면 결함 형상은 서냉 실험의 냉각과정에서 성형하중이 작고 이형온도가 높을 경우의 성형품에 많이 발생하였다.

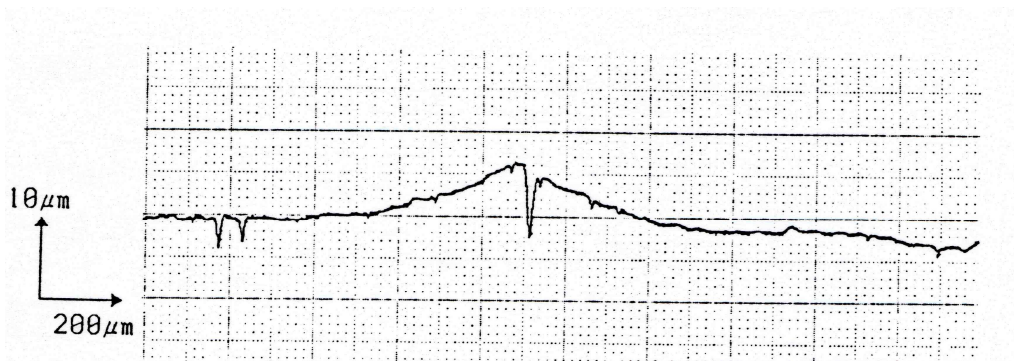
블랭크는 유리섬유의 부풀어 오름이 더더욱 진행 한 것이고 생각되어진다. 또한 섬유의 묽음이 있는 곳에서 자주 나타났다. 이 블랭크는 성형온도에서 고온압축 유동성형 한 성형품을 높은 이형온도에서 꺼내어 자연방열에 의해 실온까지 냉각될 때, 폴리프로필렌(PP)과 유리섬유와의 수축 차로 성형품의 표면에서 발생하는 표면장력 현상이라 생각된다.

그리고 Fig. 5-1과 Fig. 5-2에서 성형품 표면의 기포는 성형품의 표면에 생기는 층간균열(Interlayer crack)로 돔(Dome) 모양으로 튀어나온 것이다. 이와 같은 표면 결함 형상은 가열된 금형 안에 삽입된 복합재료 내 유리섬유의 부풀어 오름으로 포집된 공기나 폴리프로필렌(PP)에 의한 휘발성 물질의 내부압력에 의하여 발생한다고 생각된다.

그러므로 이와 같은 블랭크와 기포의 표면 결함을 줄이기 위해서는 금형 내에서 성형재료인 X-시트(XS 40wt%)의 유동성을 좋게 하며, 진공 내에서 성형하여 공기와 휘발성 물질의 포집을 최소화 하고, 금형을 열기 전에 적당한 온도에 도달하게 하여야한다.



(a) Microscope picture



(b) Section A-B

Fig. 5-2 Blank and blister

3. 유리섬유 단부의 부풀어 오름

급냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형품의 표면은 Fig. 5-3과 같이 유리 섬유 단부의 부풀어 오름이 발생한다. 이와 같은 표면 결함 형상은 X-시트(XS 40wt%)를 고온압축 프레스 성형 시 강화재인 유리섬유는 고체이고, 모재인 폴리프로필렌(PP)은 액체이므로 유동속도 차에 의해서 압축비가 높을 때 발생한다. 또한 이와 같은 현상은 복합재료의 형태나 섬유와 모재의 재질에 의해 나타나는 형태가 크게 다르다고 생각된다.

이 유리섬유 단부의 부풀어 오름의 표면 결함을 줄이기 위해서는 금형 내에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형 시 압축비를 낮게 하거나 표면에 폴리프로필렌(PP)-시트를 피복하여야한다. 이 폴리프로필렌(PP)-시트의 피복층으로 인하여 성형품의 표면 거칠기가 매우 효과적으로 개선되어 평활도가 향상될 것이다.



Fig. 5-3 Swelling of glass fiber ends

4. 유리섬유의 노출

급냉 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 성형품의 표면은 Fig. 5-4와 같이 유리섬유가 플라스틱으로 덮여지지 않고 강화플라스틱의 표면에 나타나거나 표면위로 노출상태로 많이 관찰되었다. 이와 같은 유리섬유 노출(Show of glass fiber)의 표면 결함 형상은 급냉에 의한 금형 표면에서 모재인 폴리프로필렌(PP)의 유동성이 나빠져 섬유 상면에 모재가 흘러 들어가지 않은 상태에서 고체화 되어 나타나는 현상이다. 이것은 충전과정에서 발생한다. 또한 모재인 폴리프로필렌(PP)이 유리섬유를 덮고 있어도 용접점이 형성된다고 생각된다. 이러한 현상은 폴리프로필렌(PP) 수지의 온도가 극단적으로 낮고 금형온도도 극히 낮을 경우 금형 표면에 접촉한 재료가 급속히 고체화하기 때문에 일어난다고 생각된다.

그러므로 이와 같은 유리섬유 노출의 표면 결함을 줄이기 위해서는 금형 내에서 성형재료인 X-시트(XS 40wt%)의 유동성을 좋게 모재인 폴리프로필렌(PP) 수지의 온도를 올리고, 성형 시에는 금형온도가 낮지 않도록 하여 수지의 고체화를 느리게 하여야한다.

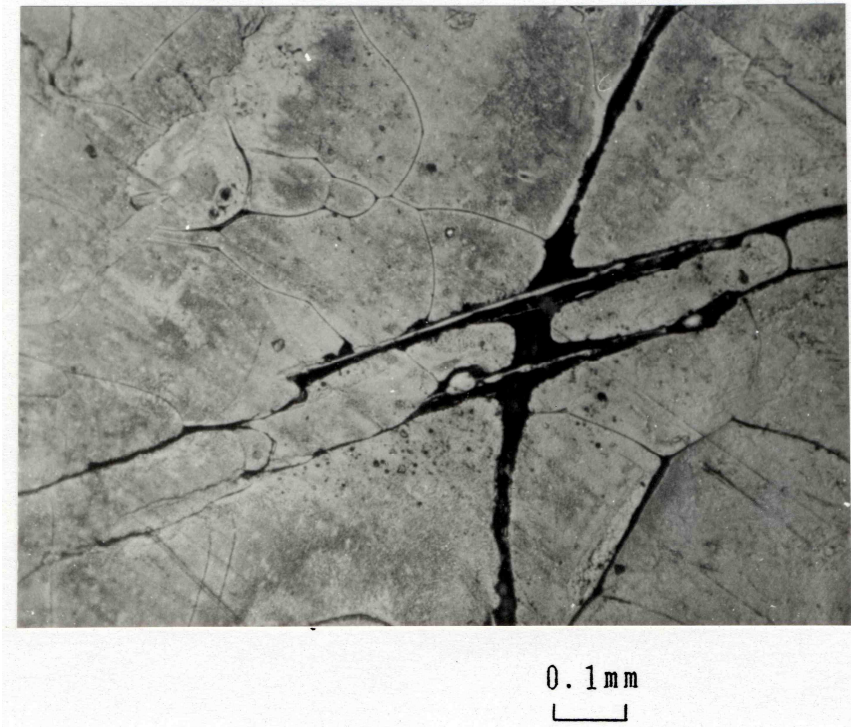


Fig. 5-4 Show of glass fiber

제 2 절 리브 성형품의 표면 거칠기

X-시트(XS 40wt%)의 서냉 실험에서 리브 성형품의 이형온도 및 성형하중에 대한 표면 거칠기를 고찰하고자한다. 성형조건은 금형압축속도 13 mm/sec, 금형온도 173℃, 이형온도 30℃ 60℃ 80℃ 100℃, 성형하중 50 kN 100 kN 150 kN 200 kN 300 kN, 천판두께(T_1) 5.5 mm, 리브두께(T_2) 12 mm이다. 이 성형조건에서 실험하여 리브 성형품의 표면 거칠기를 고찰하였다. 표면 거칠기 측정에는 축침식 표면형상측정기((株)東京精密: Surfcom 570A)를 사용하였다. 천판 상면의 중심으로부터 측정 길이는 10 mm, 기준길이는 0.8 mm를 컷오프 값으로 하여 최대 거칠기($R_{(max)}$)를 구하였다.

Fig. 5-5에 이형온도(30℃, 60℃, 80℃, 100℃) 변화에 대한 리브 성형품의 최대 거칠기의 관계를 나타냈다. 이형온도를 낮게 할수록 표면 거칠기 값이 적게 나타났다. 이것은 이형 후에 표면 거칠기가 작아져서 표면상태가 양호해지는 것이라고 생각된다.

Fig. 5-5에서 측정값의 관계를 최소제곱 회귀분석법을 이용하여 X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 시 이형온도(30℃, 60℃, 80℃, 100℃)에 따른 리브 성형품의 최대 거칠기를 계산하는 실험식을 제시하였다. X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 리브 성형품의 최대 거칠기($R_{T(max)}$)와 이형온도(T)의 관계식을 나타내면 다음 식(7)과 같다.

$$R_{T(max)}(\mu m) = 2.07 + 0.01T(^\circ C) + 1.31 \times 10^{-4}T^2(^\circ C) \quad (7)$$

Fig. 5-6에 성형하중(50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN, 300 kN) 변화에 대한 리브 성형품의 최대 거칠기의 관계를 나타냈다. 성형하중이 클수록 표면 거칠기 값이 적게 나타났다. 이와 같이 리브 성형품의 평활도와 밀접한 관계가 있는 최대 거칠기에는 이형온도와 성형하중 둘 다 큰 영향을 미친다. 그러므로 표면 거칠기 값은 열 수축성과 탄성 회복성의 차가 작을수록 작아진다고 생각된다.

X-시트(XS 40wt%)의 압축성형 서냉 실험에서 Fig. 5-6으로부터 리브 성형품의 최대 거칠기($R_{P(max)}$)와 성형하중(P)의 관계식을 나타내면 다음 식(8)과

같다.

$$R_{P(\max)}(\mu\text{m}) = 5.04 - 0.03P(kN) + 4.97 \times 10^{-5}P^2(kN) \quad (8)$$

본 실험에서 X-시트(XS 40wt%)의 모재인 폴리프로필렌(PP)은 강화재인 유리섬유보다 열 수축성이 크고, 또한 압축율도 크다. 이와 같은 현상 때문에 성형하중을 크게 하면 모재와 섬유간의 열 수축성의 차를 탄성 회복량의 차로 상쇄하게 되어 표면 거칠기가 작아진다고 생각된다.

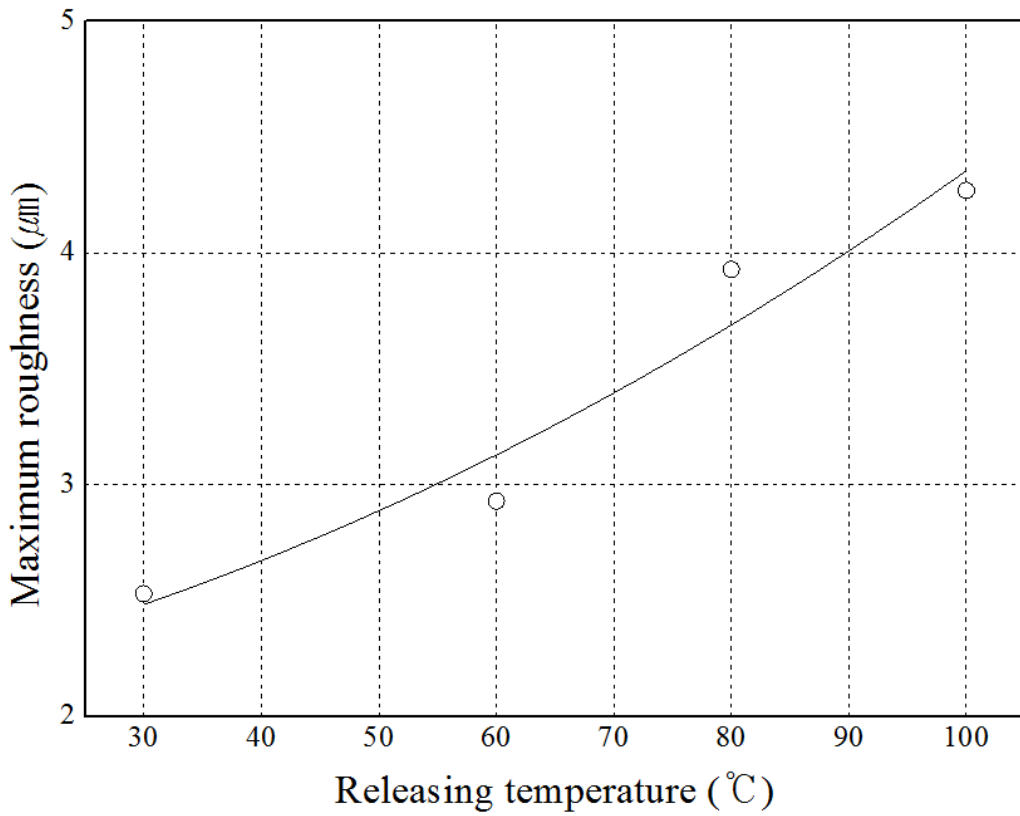


Fig. 5-5 Relationship between mold releasing temperature and maximum roughness

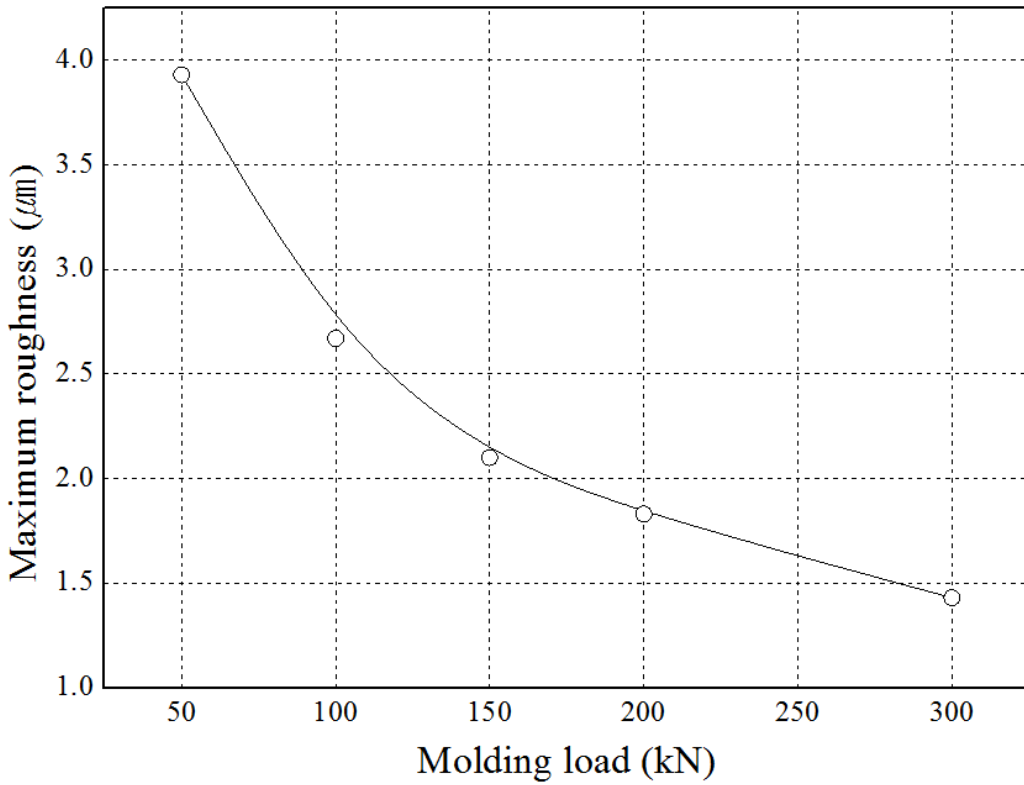


Fig. 5-6 Relationship between molding load and maximum roughness

제 3 절 맺음 말

섬유강화 고분자 복합재료인 X-시트(XS 40wt%)의 압축 성형품의 표면 거칠기를 고찰하여 주요한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 섬유강화 고분자 복합재료의 표면 거칠기는 충전과정, 보압·냉각과정, 이형후의 과정 등 각 과정에 표면 거칠기의 발생 원인이 있다고 생각된다. 이와 같은 원인으로 충전과정에서 발생하는 표면 거칠기와 보압·냉각과정 이후에 발생하는 표면 거칠기의 모양은 다르게 나타남을 알 수 있다.

(2) X-시트(XS 40wt%)의 고온 압축 프레스성형에 있어서 보압·냉각과정의 성형조건으로서는 성형하중이 크고, 또한 이형온도가 낮을수록 표면 거칠기는 억제됨을 알 수 있다.

(3) X-시트(XS 40wt%)의 유동성형에서 이형온도와 성형하중을 대입하면 최대 거칠기($R_{(max)}$)를 구할 수 있는 실험식을 다음과 같이 제안했다.

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 최대 거칠기($R_{T(max)}$)는

$$R_{T(max)}(\mu m) = 2.07 + 0.01 T(^{\circ}C) + 1.31 \times 10^{-4} T^2(^{\circ}C)$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 최대 거칠기($R_{P(max)}$)는

$$R_{P(max)}(\mu m) = 5.04 - 0.03 P(kN) + 4.97 \times 10^{-5} P^2(kN)$$

(4) 복합재료의 형태와 섬유 및 모재의 재질에 의한 표면 상태가 다르기 때문에 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

제 6 장 결 론

유동성형에서는 성형품의 불량현상이 성형조건이나, 재료특성에 크게 의존한다. 본 연구는 섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에서 리브 성형품의 표면에 발생하는 불량현상이 성형조건이나 재료특성과 어떠한 관계가 있는가를 실험적으로 고찰하였다. 또한 이 불량현상의 생성과정에 대해서 특히 충전후의 과정을 대상으로 고찰하였다. 본 연구의 실험적 고찰로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS) 및 X-시트(XS 40wt%) 각 실험재료 모두가 이형온도를 높게 할수록 뒤틀림이 증가하고 수축이 적어졌다.
2. 성형하중에 대한 거동은 각 재료별로 다르고, 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)은 고압으로 하면 수축이 발생하는 부분이 반대로 돌출하는 형태로 되었다. 이것은 이형 시 탄성회복과 관계가 있다고 생각된다.
3. X-시트(XS 40wt%)의 유동성형에서 이형온도와 성형하중을 대입하면 수축량과 뒤틀림량을 구할 수 있는 실험식을 다음과 같이 제안했다.

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 수축량(δ_{ST})은

$$\delta_{ST}(\mu\text{m}) = 79.28 + 1.53T(^{\circ}\text{C}) - 0.01T^2(^{\circ}\text{C})$$

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 뒤틀림량(δ_{WT})은

$$\delta_{WT}(\mu\text{m}) = 62.64 + 1.76T(^{\circ}\text{C}) + 0.0078T^2(^{\circ}\text{C})$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 수축량(δ_{SP})은

$$\delta_{SP}(\mu\text{m}) = 79.7 + 0.11P(\text{kN}) - 0.0011P^2(\text{kN})$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 뒤틀림량(δ_{WP})은

$$\delta_{WP}(\mu\text{m}) = 340.2 - 0.58P(\text{kN}) + 2.71P^2(\text{kN})$$

- 리브 성형품의 이형온도(T)와 최대 거칠기($R_{T(\text{max})}$)는

$$R_{T(\text{max})}(\mu\text{m}) = 2.07 + 0.01T(^{\circ}\text{C}) + 1.31 \times 10^{-4}T^2(^{\circ}\text{C})$$

- 리브 성형품의 성형하중(P)과 최대 거칠기($R_{P(max)}$)는

$$R_{P(max)}(\mu m) = 5.04 - 0.03P(kN) + 4.97 \times 10^{-5}P^2(kN)$$

4. X-시트(XS 40wt%)는 폴리프로필렌(PP) 단일재료와 비교하여 수축과 뒤틀림 모두 보압·냉각과정의 성형조건에 따르지 않고 크게 나타났다. X-시트(XS 40wt%)의 리브 성형품에 대해서는 충전과정에서 발생하는 섬유와 모재의 이방성으로 불균질성의 영향이 크게 나타났다.

5. 폴리스티렌(PS)을 사용한 리브 성형품의 치수 정밀도는 성형하중과 리브두께의 영향보다는 이형온도와 밀접한 관계가 있고, 이형온도는 고체화온도 부근에서 리브 성형품의 치수 수축변화가 작게 나타났다.

6. 폴리프로필렌(PP)과 폴리스티렌(PS)의 리브 성형품은 보압·냉각과정에서 성형하중을 크게 하고 이형온도를 낮게 하면 폭 치수 수축이 억제되고, X-시트(XS 40wt%)에서는 표면 거칠기가 작아졌다.

참 고 문 헌

1. 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조 기술” 시그마프레스, pp. 407-439, 1998.
2. Serope Kalpakjian, “Manufacturing processing for engineering materials” Addison-Wesley Publishing Company, pp.625-681, 1991.
3. 윤경환, “자동차 부품에 사용되는 플라스틱 재료” 한국자동차공학회 오토저널, Vol. 28(1), pp. 33-38, 2006.
4. 이대길, 정명영, 최진호, 전성식, 장승환, 오제훈, “복합재료” 홍릉과학출판사, pp. 287-292, 2007.
5. 박정기, 박오욱, “고분자재료공학” 시그마프레스, pp. 7-17, 211-248, 1998.
6. 한길영, 이동기, “자동차 사이드 도어용 인트루전 비임 개발을 위한 케블라 섬유강화 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구” 한국해양공학회지, Vol. 14(2), pp. 89-98, 2000.
7. J. W. Kim, D. G. Lee, “Creep and tensile properties of press molding joined GMT-Sheets” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 21(1), pp. s170-s174, 2011.
8. J. W. Kim, D. G. Lee, “Effect of fiber orientation and fiber contents on the tensile strength in fiber-reinforced composites” Journal of Nano science and Nanotechnology, Vol. 10(5), pp. 3650-3654, 2010.
9. 김진우, 이동기, “섬유배향과 섬유함유량이 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도에 미치는 영향” 한국복합재료학회지, Vol. 20(5), pp. 13-19, 2007.
10. J. W. Kim, H. S. Kim, D. G. Lee, “Study on fibre orientation of weld line parts during injection moulding of fibre reinforced plastic by image processing” Materials Research Innovations, Vol. 15(1), pp. 303-306, 2011.
11. 이동기, 심재기, 김진우, “FRP의 사출성형에 있어서 섬유배향상태와 섬유함유량분포에 관한 연구” 한국공작기계학회논문집, Vol. 15(4), pp. 1-7, 2006.
12. 이동기, 한길영, 김이곤, “섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 분리·배향에 미치는 금형온도의 영향” 한국해양공학회지, Vol. 9(2), pp.

- 123-132, 1995.
13. H. Yaguchi, H. Hojo, D. G. Lee, E. G. Kim, "Measurement of planar orientation of fibers for reinforced thermoplastics using image processing" The Journal of the Polymer Processing Society, Vol.10(3), pp. 262-269, 1995.
 14. 정성택, 김진곤, 구본홍, "단섬유 보강 이방성 사출성형품의 휨 해석" 대한기계학회논문집(A), Vol. 24(8), pp. 1968-1977, 2000.
 15. 김형석, 김진우, 김용재, 이동기, "GMT-Sheet 성형품의 표면요철에 미치는 섬유돌출의 영향" 한국복합재료학회지, Vol. 24(6), pp. 31-36, 2011.
 16. 김형석, 김진우, 김용재, 이동기, "GFRP 복합재료의 압축성형에서 표면요철에 미치는 성형조건의 영향" 대한기계학회논문집(A), Vol. 34(11), pp. 1649 - 1657, 2010.
 17. J. W. Kim, H. S. Kim, D. G. Lee, "Effect of molding condition on Waviness Profile of GFRP Composites in Compression Molding" ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 123, 2013
 18. J. W. Kim, H. S. Kim, D. G. Lee, "Effect of molding condition on arithmetical average roughness of GMT-Sheet moldings" Advanced Science Letters, Vol. 8, pp. 682-686, 2012.
 19. 김병규, 정환모, 민경은, 김원호, 문창권, 조남주, "고분자공학원론" 시그마프레스, pp. 7-18, 1999.
 20. 문창권, "고분자복합재료" 시그마프레스, pp. 11-13, 145-185, 2000.
 21. 김상범, 최명재, "폐플라스틱의 재활용 기술 동향" 공업화학 전망, Vol. 10(3), pp. 10-21, 2007.
 22. 이종욱, 김세훈, 김혁, 송석우, "직조 및 장섬유 유리강화소재의 하이브리드 성형(프레스-사출성형)으로 제조된 자동차 범퍼 빔의 충돌성능 검증" 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp. 2549-2553, 2011.
 23. 김형석, "GFRP 복합재료의 압축성형에 있어서 균질분포에 관한 연구" 조선대학교 대학원, pp. 1-10, 2012.
 24. "X·SHEET 技術資料" 出光NSG株式會社, pp. 20, 1996.

25. 이동기, 이정훈, 김진우, “스탬퍼블 시트의 압축성형에서 리브 성형품의 수축에 미치는 성형조건의 영향” 한국생산제조학회, Vol. 26(5), pp. 479-485, 2017.
26. 김진우, 이정훈, 이동기, “섬유강화 플라스틱 복합재료의 압축성형에서 리브 성형품의 휨에 미치는 성형조건의 영향” 조선대학교 공학기술논문지, Vol. 10(3), pp. 285-290, 2017.
27. Jin-Woo Kim, Hyoung-Seok Kim, and Dong-Gi Lee, “Manufacturing and Characterization of Glass Fiber/Polypropylene Prepreg for Automotive Bumper Beam” Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol 12, 842-846, 2015
28. H. Hojo, H. Yaguchi, T. Onodera, E. G. Kim, “Simulation of compression molding with matrix-fibre separation and fibre orientation for long fibre-reinforced thermoplastics” International Polymer Processing, Vol. 3(1), pp. 54-61, 1988.
29. 조수근, 김석호, 김이곤, “장섬유강화플라스틱복합판의 압축성형에 관한 연구 (제2보)” 대한기계학회 춘계학술대회초록집, Vol. 1, pp. 660-663, 1988.
30. 이동기, “섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 분리·배향의 상관관계에 관한 연구” 국민대학교 대학원, pp. 1-107, 1992.
31. 이동기, 조광현, “섬유강화 플라스틱 복합판의 구조와 분리·배향에 관한 연구” 한국정밀공학회지, Vol. 10(2), pp. 104-113, 1993.
32. 강건, 조선형, 이동기, 김이곤, “섬유강화 열가소성 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 평균분리계수에 관한 연구” 대한기계학회논문집(A), Vol. 20(4), pp. 1146-1153, 1996.