

유리섬유로 보강된 수지에서 제품설계 및 성형조건에 따른 휨의 연구: Part 2. 결정성 수지

이 민* · 김 혁 · 류민영**†

서울과학기술대학교 대학원, *서울과학기술대학교, (현)영남이공대학교 기계자동차공학부 기계계열,

**서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2012년 1월 20일 접수, 2012년 3월 27일 수정, 2012년 3월 29일 채택)

A Study on the Warpage of Glass Fiber Reinforced Plastics for Part Design and Operation Condition: Part 2. Crystalline Plastics

Min Lee*, Hyeok Kim, and Min-Young Lyu**†

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology,
172 Gongneung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Dev. of Mechanical Eng. Tech., School of Mechanical and Automotive Eng. Tech.,

Yeungnam College of Science & Technology, 170 Daemyeong-dong, Nam-gu, Daegu 705-703, Korea

**Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received January 20, 2012; Revised March 27, 2012; Accepted March 29, 2012)

초록: 사출성형공정은 고온으로 수지를 가소화시키고 고압으로 금형에 흘려 보내어 제품을 성형하는 방법이다. 이 과정에서 고분자 수지는 온도의 변화에 따라 수축을 하게 되는 성형수축이 발생된다. 그리고 시간이 흐른 뒤에도 제품에 변형이나 휨이 발생하게 되는데 이는 제품에 포함되어 있는 잔류응력의 이완 때문이다. 이러한 휨을 막기 위해 수지에 무기물을 첨가하여 수축을 줄이거나, 수지에 유리섬유나 카본섬유 등 섬유를 사용하여 휨의 저항성을 높인다. 그리고 성형품을 강건하게 설계하여 응력에 따른 휨의 저항을 향상시킨다. 본 연구에서는 강건설계를 위해 리브를 설치한 성형품에 나타나는 휨을 실험을 통하여 조사하였다. 성형조건에 따라서, 그리고 금형설계에 따라서 즉, 게이트의 위치에 따라서 휨의 변화를 조사하였다. 수지의 흐름방향과 흐름의 직각방향의 휨도 조사하였다. 게이트 근처와 게이트에서 먼 부분의 휨도 비교분석 하였다. 수지는 유리섬유로 보강된 결정성 수지인 PP와 PA66를 사용하였다. 유리섬유가 포함된 결정성 수지는 유리섬유가 포함된 비결정성 수지보다 휨이 컸다. 결정성 수지는 비결정성 수지에 비해 휨이 성형조건에 다소 적게 영향을 받았지만 제품의 설계에 따라서는 크게 변하였다.

Abstract: Injection molding process is a popular polymer processing involving plasticizing and enforcing the material flow into the mold. A polymer material shrinks according to temperature variations during the shaping process, and subsequently molding shrinkage developed. Developed deflections or warpages after molding process in part are caused by residual stress relaxation contained in the part. Adding inorganic materials or fibers such as glass and carbon to control shrinkage and enhance warpage resistance are common. In this study, warpages according to part design have been investigated through experiment. Warpings for molding conditions and mold designs such as gate locations were measured. Warpings along flow direction and perpendicular to the flow direction were also measured. Warpings near gate and far from gate were compared. Glass fiber reinforced crystalline polymers, PP and PA66 have been used in this experiment. Glass fiber reinforced crystalline polymers showed large warpage compared with glass reinforced amorphous polymers. Warpings in crystalline polymers were less influenced by molding conditions compared with amorphous polymers, however warpings of crystalline polymers significantly depend on part design.

Keywords: warpage, injection molding, part design, glass fiber reinforced PP, glass fiber reinforced PA66.

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

서 론

고분자의 쓰임은 일상생활용품은 물론 기계부품, 전기전자 제품, 건축부품, 그리고 IT관련 제품 등 사회의 전반에 걸쳐서 갈수록 증가해 가고 있다. 이러한 고분자재료의 응용이 증가함에 따라 이를 성형하는 공정 역시 중요시 되고 있다.¹ 고분자성형공정은 대부분 고온으로 수지를 가소화시키고 고압으로 금형이나 다이를 통해 제품을 성형한다. 그리고 이를 상온으로 냉각시킨다. 이러한 과정 속에서 제품은 성형 후의 모양이 금형의 모양과 일치하지 않고 다소 변하게 된다. 고분자성형공정 중 가장 많이 활용되고 있는 사출성형에서도 고온 고압을 받은 수지가 성형 후에 금형의 모양과는 다른 치수로 성형된다. 이는 수지의 냉각에 의한 수축으로 성형수축이라 한다.^{2,3} 그러나 성형 후 하루 이상, 또는 길게는 수개월의 오랜 시간이 지난 후 제품에 변형이 있어나는 경우가 있는데 이를 성형 후 변형이라 부른다.⁴ 이것은 제품에 남아있는 잔류응력 때문이라 알려져 있다.^{5,6} 제품의 후 변형을 막기 위해서는 성형 시 잔류응력을 최소화하거나 성형 후 열처리를 통하여 제품 안에 있는 잔류응력을 완전히 해소시키는 방법이 있다.⁷ 그러나 성형방법을 최적화하더라도 잔류응력은 어느 정도 존재하게 되고, 열처리를 통하여 잔류응력을 해소하기 위해서는 공정이 추가되고 또한 잔류응력이 해소되면서 제품에 변형이 있어나는 경우가 많다. 따라서 성형품 자체에 강성이 있어 잔류응력이 이완되더라도 제품에 후 변형이 나타나지 않도록 제품을 설계하는 것이 중요하다 하겠다.

사출성형품에 나타나는 성형수축은 성형 시 위치마다 온도와 압력이 다르기 때문에 위치 별로 다양하게 분포된다. 또한 고분자 사슬의 배향으로 흐름방향과 흐름의 직각방향으로 수축이 다르게 나타난다.^{2,3} 결정성 수지와 비결정성 수지는 근본적으로 온도에 따른 체적의 변화가 다르기 때문에 성형수축은 크게 다르게 나타난다.^{2,4} 또한 이러한 수축의 차이는 잔류응력의 형성에도 영향을 주어 성형 후 휨을 유발하는 정도도 다르다. 성형품의 휨을 줄이기 위해 무기물을 첨가하여 전체적인 성형수축을 줄이고, 또한 흐름방향과 흐름직각방향을 수축의 차이를 줄이기도 한다.⁸⁻¹² 유리섬유나 카본섬유 등의 섬유를 첨가하여 강성을 증가시켜 변형을 방지하는 방법도 있다.¹³⁻¹⁷ 그리고 성형품의 형상설계를 강건하게 하여 변형을 방지하는 방법이 있는데 제품의 형상설계에 따른 수축, 그리고 휨의 연구가 요구되고 있다. 최근에 본 연구실에서 제품의 형상설계에 따른 비보강수지와 유리섬유로 보강된 비결정성 수지에 대한 연구가 있었다.^{18,19}

본 연구에서는 유리섬유가 포함된 결정성 수지인 PP와 PA66를 이용하여 여러 형태의 제품형상에 따라 나타나는 휨을 분석하였다. 휨은 분자 배향방향에 따라서도 다르게 나타나기 때문에 흐름방향과 흐름의 직각방향으로 휨을 분석하였

다. 또한 금형에서 게이트의 위치가 다를 때도 다르게 나타나므로 이 역시 고려하여 연구하였다. 성형조건으로는 사출 온도, 금형온도, 그리고 보압의 크기를 다르게 하여 조사하였다. 본 연구의 결과는 플라스틱 사출성형품의 휨을 최소화하기 위한 제품설계 및 금형설계, 그리고 성형조건 설정에 활용될 것으로 기대된다.

실 험

시편. 사출성형품은 성형 전후의 재료 수축에 의해 휨이나 변형이 발생한다. 따라서 일반적으로 사출성형품은 변형에 대한 강성을 부여하기 위해 다양한 리브를 설계하게 된다. 따라서 본 연구에서는 사출성형품의 리브 설계에 따른 휨을 관찰하고자 평판에 리브가 세워져 있는 시편을 고안하였다.¹⁹ 시편 1의 형상은 리브가 없는 정사각형의 평판으로 가로, 세로 길이가 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 이고 두께는 3 mm이다. 시편 2와 3은 시편 1과 같은 형상에서 보강 리브의 설계가 수지의 흐름과 직각인 방향과 수지의 흐름방향으로 놓여있다. 리브의 두께는 2 mm이고 높이는 6 mm이다. 시편 2와 3에서 리브의 수는 각각 4개씩이며 리브간 간격은 같고, 두 시편에서 리브 방향만 다르다.

재료, 성형조건 및 성형기. 본 연구에서 사용한 수지는 결정성 수지에 유리섬유가 30% 첨가된 PP(Lupol GP-2300, LG Chemical)수지와 역시 유리섬유 30%로 보강된 PA66(Zytel 70G30L NC010, DuPont)수지이다. 첨가된 유리섬유의 지름은 10 mm, 길이는 2 mm이다.

Table 1은 본 연구의 실험조건들을 보여 주고 있다. 수지에 따라 보압의 크기, 금형 온도, 수지 온도를 변경하여 실험을 수행하였다. 두 수지의 유변학적 물성이 다르므로 두 수지의 성형조건을 다르게 설정하였다.

실험에 사용된 사출성형기는 ENGEL의 VC330/80으로 형체력은 80 ton이다.

휨의 측정 방법. 시편에서 나타나는 휨을 측정하기 위해 3차원 레이저 측정 장비(DE Meet 404, Schut Geometrical Metrology Co., Netherland)를 이용하였다.¹⁸ 휨을 정량적으로

Table 1. Injection Molding Conditions for Glass Fiber Reinforced PP and PA66

Resin	Packing pressure (MPa)	Mold temperature (°C)	Injection temperature (°C)
PP +30%GF	24	60	220
	36	70	230
	48	80	240
PA66 +30%GF	24	80	300
	36	90	310
	48	100	320

평가하기 위해 시편의 양 끝 두 점과 중앙의 한 점의 좌표를 측정하였다. 그리고 양 끝 두 점 즉, Point 1과 3을 잇는 직선상에서 중앙 점 즉, Point 2의 높이 방향의 거리(Y값)를 휨의 양으로 정의하고 이를 측정하였다.

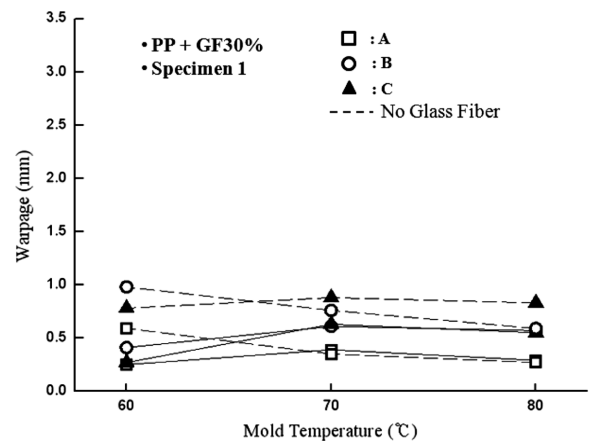
휨을 각 시편의 세 영역에서 측정하였다. 게이트 쪽의 변(A), 게이트와 반대쪽에 있는 변(B), 그리고 수지가 흐르는 방향의 변(C), 즉 시편의 옆 부분의 변이다. 휨의 측정은 사출 성형 후 하루가 경과한 후에 수행하였다.

결과 및 토론

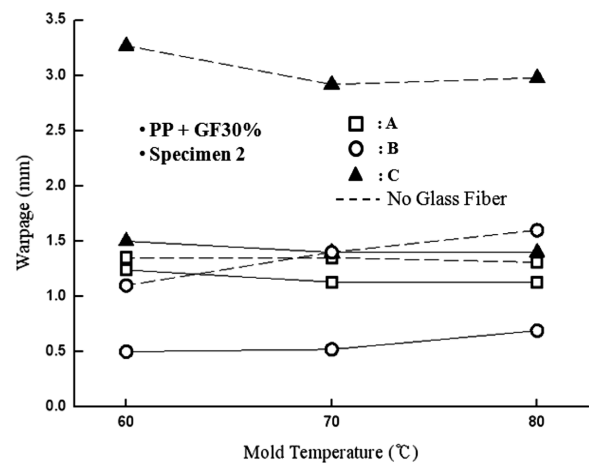
시편의 형상 디자인에 따른 휨의 금형온도에 대한 영향

Figure 1은 유리섬유가 30% 포함된 PP수지에 대한 각각의 시편에서 금형온도에 따른 변형을 보여주고 있다. 점선은 유리섬유가 포함되지 않은 PP수지에 대한 변형을 비교를 위해 참고로 나타내었다.¹⁸ 리브가 없는 시편 1(Figure 1(a))에서 유리섬유가 함유된 PP는 A방향, 즉 게이트 부분의 휨이 가장 작게 나타났다. 이는 게이트 주변의 효과적인 보압 때문으로 판단된다. 게이트에서 먼 쪽의 흐름직각방향(B)과 흐름방향의 휨(C)은 유사하게 나타났으며 게이트 부분(A)보다는 크게 나타났다. 유리섬유가 포함되므로써 유리섬유가 없는 경우보다 휨이 줄어들음을 볼 수 있다. 금형온도에 따른 휨의 변화는 크지 않았다. 유리섬유가 포함된 PP수지에서 시편2(Figure 1(b))에 대한 휨을 보면 흐름방향(C)으로 가장 컸고, 그 다음이 게이트 부분의 흐름직각방향(A), 게이트에서 먼 쪽의 흐름직각방향(B) 순서로 휨이 작았다. 시편 2에서는 리브가 흐름의 직각방향으로 놓여 있어서 흐름의 직각방향으로 강성이 커 휨이 작게 나타난 것으로 판단된다. 유리섬유가 없을 때와 비교해 보면 평판인 시편 1에 비해 휨이 크게 줄어들었는데 B와 C의 휨이 크게 줄어들었다. 그것은 리브에 대한 강성(B방향)과 유리섬유의 배향에¹⁹ 의한 강성(C 방향) 때문인 것으로 판단된다. A방향은 게이트에 가까워 보압이 잘 전달되기 때문에 유리섬유의 유무에 관계없이 다른 영역에 비해 큰 차이가 없었다. 전체적으로 유리섬유가 첨가됨으로써 휨의 이방성이 줄어들었다. 리브가 흐름방향으로 놓인 시편 3(Figure 1(c))의 결과를 보면 흐름의 직각방향의 휨 A와 B에 비해 흐름방향으로의 휨 C가 현저히 줄어들었다. 이는 유리섬유의 강성과 리브의 강성이 더해져서 나타난 현상이라 판단된다. 역시 유리섬유가 포함되면서 모든 방향의 휨이 크게 줄어들었는데, 흐름의 직각방향인 A와 B는 그 감소폭이 상대적으로 흐름방향인 C보다 작았다. 이는 C방향과는 달리 유리섬유의 배향과 리브의 강성이 작용되지 않았기 때문이다. 전체적으로 유리섬유가 포함된 PP수지에서 시편에 관계없이 즉 제품의 디자인에 관계없이 휨은 금형의 온도에 크게 의존되지 않았다.

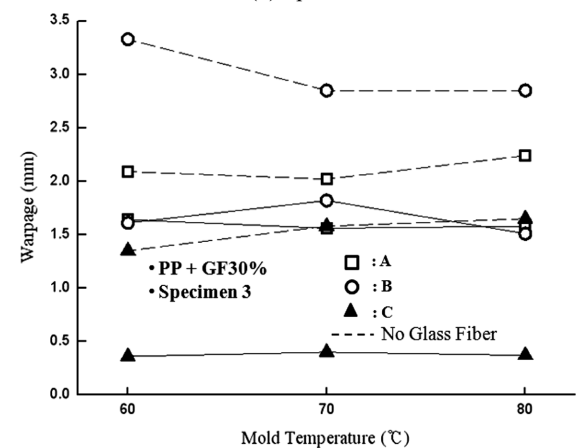
유리섬유가 포함된 PA66수지에서 휨의 결과가 Figure 2에



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



(c) Specimen 3

Figure 1. Warpages in the glass fiber reinforced PP specimens vs mold temperature.

나타나 있다. 시편 1에서 금형의 온도가 80 °C일 때 휨의 크기가 높게 나타났지만 대체로 게이트에서 먼 부분인 B에서 가장 큰 휨을 보였고, 수지의 흐름방향의 휨 C와 게이트 근

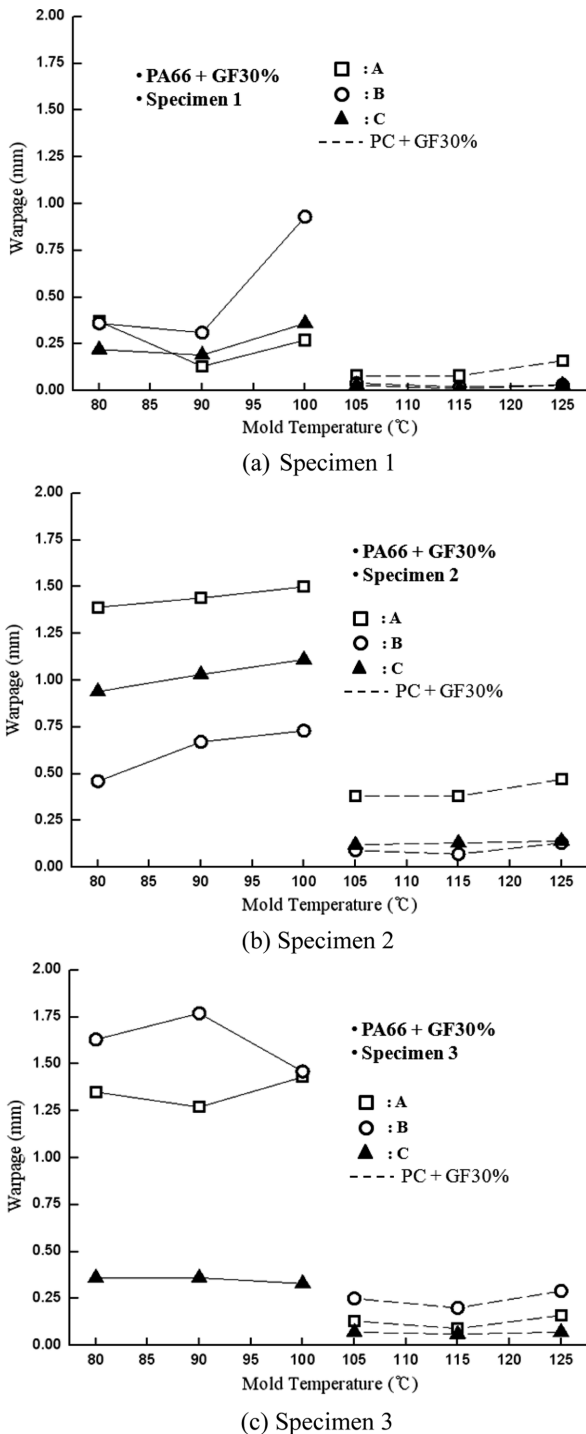


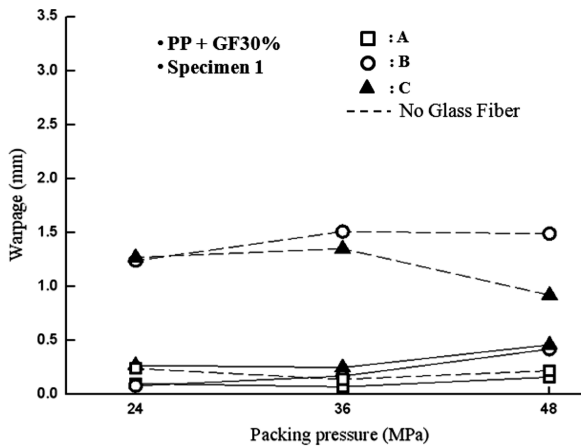
Figure 2. Warpages in the glass reinforced PA66 specimens vs mold temperature.

처인 A의 휨이 작게 나타났다. 게이트 부분에서는 보압이 잘 작용하였고 게이트에서 먼 부분은 보압이 효과적으로 작용되지 않아서 나타난 것으로 판단된다. 유리섬유가 함유된 비결정성 수지인 PC의 결과도¹⁹ 점선으로 나타냈는데 휨의 경향

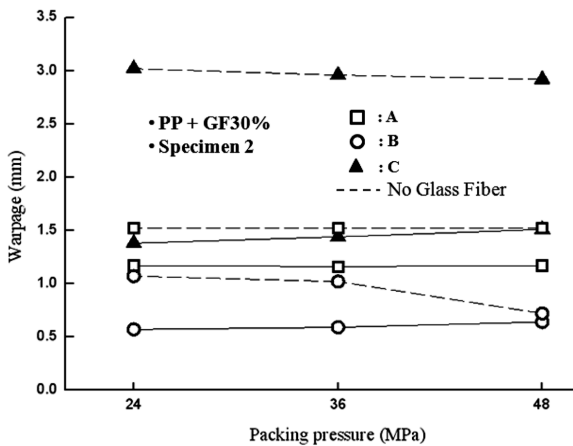
이 매우 유사하다. PC의 경우 점도가 높아 성형하기 위한 금형의 온도가 PA66보다 높다. 결정성 수지인 PA66은 PC보다 휨이 크게 나타났다. 리브가 흐름의 직각으로 놓인 시편 2에 대한 결과를 보면, 게이트 근처인 A부분이 휨이 가장 크고, 게이트에서 먼 영역인 B부분이 가장 작다. 리브가 흐름방향에 직각으로 놓여있어 게이트 근처에서는 과도한 압력을 받아 휨이 컸고, 게이트에서 먼 곳의 B는 리브의 강성 때문에 휨이 작게 나타난 것으로 보인다. 역시 PC와 경향이 같으며 휨의 크기는 PC보다 매우 크다. 이는 PA66이 결정성이 큰 수지이기 때문에 결정화를 이루면서 성형수축이 커서 나타난 현상이다.^{2,3} 리브가 흐름방향으로 놓여있는 시편 3의 경우를 보면 게이트에서 먼 쪽인 B에서 휨이 가장 컸고, 흐름방향인 C가 휨이 가장 작았다. 흐름과 직각방향인 B영역은 리브의 보강이 없고, C는 리브의 보강과 유리섬유의 보강이 함께 작용되어 나타난 것으로 판단된다. 역시 PC보다 큰 휨을 보이고 있다. 이상으로 살펴본 유리섬유로 보강된 PA66에서 각 시편의 휨은 대체로 금형온도가 높아짐에 따라 다소 증가하는 경향인데 이는 금형의 온도가 높을수록 수지가 서서히 냉각되고 따라서 결정화도가 증가되며 수축이 커져서 나타난 것으로 판단된다.^{2,3}

시편의 형상 디자인에 따른 휨의 보압에 대한 영향. Figure 3은 유리섬유로 보강된 PP에서 시편 디자인에 따른 휨의 양상을 보압에 따라서 나타내고 있다. 시편 1에서 측정 위치 별 휨의 차이가 매우 적으나 게이트 근처인 A의 휨이 가장 작았다. 보압이 클 때 휨의 크기가 다소 증가되고 있으나 휨이 보압에 영향을 받는다고 판단하기는 어려운 정도이다. 시편 2에서의 휨을 보면 게이트에서 먼 쪽인 B에서 휨이 가장 작았다. 시편 2는 리브가 흐름의 직각방향으로 놓여있어 전체 캐비티의 충전을 위해 높은 압력이 소요되어 게이트 근처는 과도한 압력을 받고 있다. 그러나 게이트에서 먼 B쪽은 과도한 압력을 받지 않고 리브의 강성에 의해 휨이 작았다고 판단된다. 시편 1에서 유리섬유로 보강된 PP에서의 휨과 유리섬유가 없는 PP의 휨(점선)과 비교해 보면 유리섬유가 첨가됨으로써 휨이 크게 줄어 들었다.¹⁸ 그리고 유리섬유를 포함하지 않은 것과 경향이 같은 것으로 보아 유리섬유가 전체적으로 휨의 양을 줄이지만 휨의 경향에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 시편 3에서도 유리섬유가 포함된 경우와 그렇지 않은 경우와 휨의 양상은 같았다. 휨은 게이트에서 먼 쪽인 B에서 가장 컸고, 흐름방향의 휨인 C가 가장 작았다. 이는 리브의 보강과 유리섬유의 배향이 중복되어 휨이 크게 줄었다고 판단된다. 전체적으로 유리섬유가 들어가도 유리섬유가 없는 것과 각 시편에서 휨의 경향은 유사하였으며, 각 시편마다 위치 별 휨은 다양하게 나타났다. 보압의 크기가 휨에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

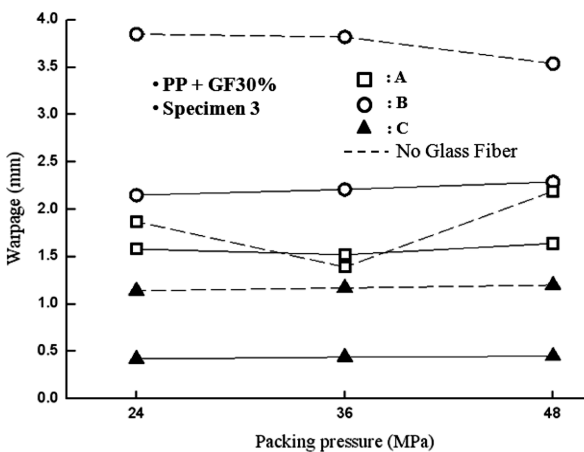
Figure 4는 유리섬유로 보강된 PA66에서의 보압에 따른 휨의 결과이다. 시편 1의 휨을 보면 보압에 따라 큰 차이를 보



(a) Specimen 1



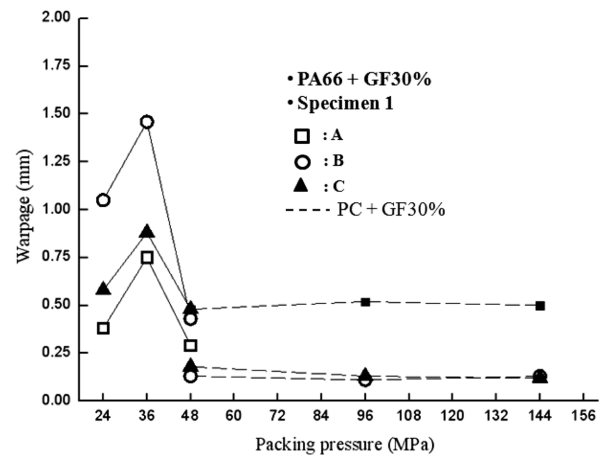
(b) Specimen 2



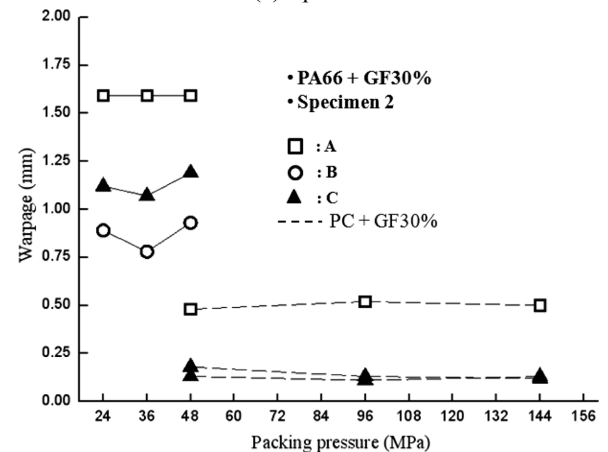
(c) Specimen 3

Figure 3. Warpages in the glass reinforced PP specimens vs packing pressure.

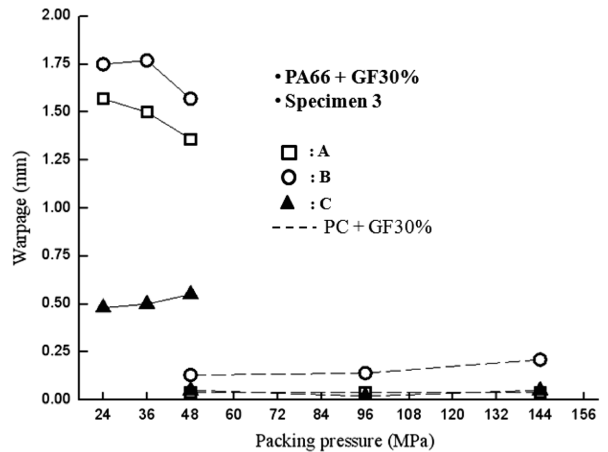
이고 있다. 유리섬유가 포함된 PC도 점선으로 나타내었는데 PC는 보압에 따라 큰 변화가 없다.¹⁹ 두 수지의 흐름특성이 다르기 때문에 성형조건이 달라 보압의 적용영역이 다르다.



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2



(c) Specimen 3

Figure 4. Warpages in the glass reinforced PA66 specimens vs packing pressure.

시편 1에서 유리섬유로 보강된 PA66는 게이트에서 먼 곳인 B에서 휨이 가장 크며, 게이트에서 가까운 A에서 휨이 가장 작게 분포하고 있다. 이것은 압력을 잘 전달받는 게이트 근

처에서는 수축이 작아 휨이 작고, 압력전달이 어려운 게이트에서 먼 곳은 수축이 커 휨이 큼을 알 수 있다. 시편 2에서는 반대로 게이트에 가까운 A에서 휨이 가장 크다. 시편 3에서는 게이트에서 먼 B에서 휨이 크고 수지의 흐름방향인 C에서 휨이 가장 작다. 보압의 크기가 크면 A와 B부분의 휨은 다소 줄어드는 경향인데 C부분의 휨은 다소 커지고 있는 경향이다. 이는 리브가 흐름방향으로 놓여 있어 보압이 클 경우 흐름방향으로 과도한 압력이 전달되어 휨을 크게 유발한 것으로 보인다. 전체적으로 유리섬유가 포함된 PA66는 모든 시편에서 보압의 영향을 받았고, 각 시편에서 위치 별로 나타나는 휨의 경향은 변하지 않았다.

시편의 형상 디자인에 따른 휨의 수지온도에 대한 영향

Figure 5와 Figure 6에는 유리섬유가 포함된 PP와 PA66의 수지에서 사출성형온도에 따른 각 시편 별 휨을 보여주고 있다. 시편 1에서 B방향의 휨을 제외하고는 유리섬유가 포함된 PP와 유리섬유가 포함되지 않은 PP는 휨의 차이가 크지 않다. PP의 시편 2에서의 휨은 시편 1보다 크게 분포하고 있다. 리브 디자인이 추가되면서 시편의 형상 균일성이 떨어지면서 압력의 집중 및 편차가 커져 휨이 증가되었다고 판단된다. 휨이 가장 작은 곳은 게이트에서 가장 먼 B부분으로 나타났는데 유리섬유가 포함되지 않은 경우도 같은 경향이다. 시편 3에서의 휨은 흐름방향으로 리브가 놓여 있어 C방향의 휨이 가장 작았다. 이러한 현상으로 보아 휨을 제한하자 하는 방향으로 리브를 설계하고, 리브의 길이 방향으로 흐름이 일어나도록 게이트를 설계하는 것이 휨을 줄이는데 효과적인 것으로 판단된다. 유리섬유로 보강된 PP의 모든 시편을 종합하여 보면 사출온도는 휨에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

PA66의 시편에 대한 휨 현상을 Figure 6에 나타내었다. 시편 1의 경우 게이트에 가까운 A부분의 휨이 가장 작게 나타났으며, 게이트에서 먼 부분인 B에서 휨이 가장 크게 나타났다. 비결정 수지인 PC와 비교하면 결정성인 PA66의 휨이 크게 분포하고 있다.¹⁹ 사출온도가 높을수록 휨이 다소 커지는 경향을 보이고 있다. 수지온도가 높을수록 냉각속도가 느리고 따라서 PA66의 결정화도가 높아져 수축이 커져 휨이 커진 것으로 판단된다.^{2,3} 시편 2와 시편 3에서의 휨이 시편 1보다 크게 분포하고 있다. PP시편에서와 마찬가지로 시편의 형상이 불균일하여 압력의 집중, 압력의 편차, 그리고 온도분포 등의 불균일 등으로 수축이 불균일하여 휨이 크게 분포한다고 판단된다. 시편 2에서는 각 방향으로 뚜렷한 휨의 차이를 보이고 있다. 게이트에 가까운 A에서 휨이 가장 크고 게이트에서 먼 B에서 휨이 가장 작다. 시편 1과 마찬가지로 사출온도가 높을수록 휨이 크게 일어나고 있다. 시편 3에서는 게이트에서 먼 B에서 휨이 가장 크고, 수지 흐름방향인 C에서 휨이 가장 작게 나타났다. 앞의 금형온도와 보압조건에 따른 결과에서와 마찬가지로 C방향으로 리브가 있어 휨에 대

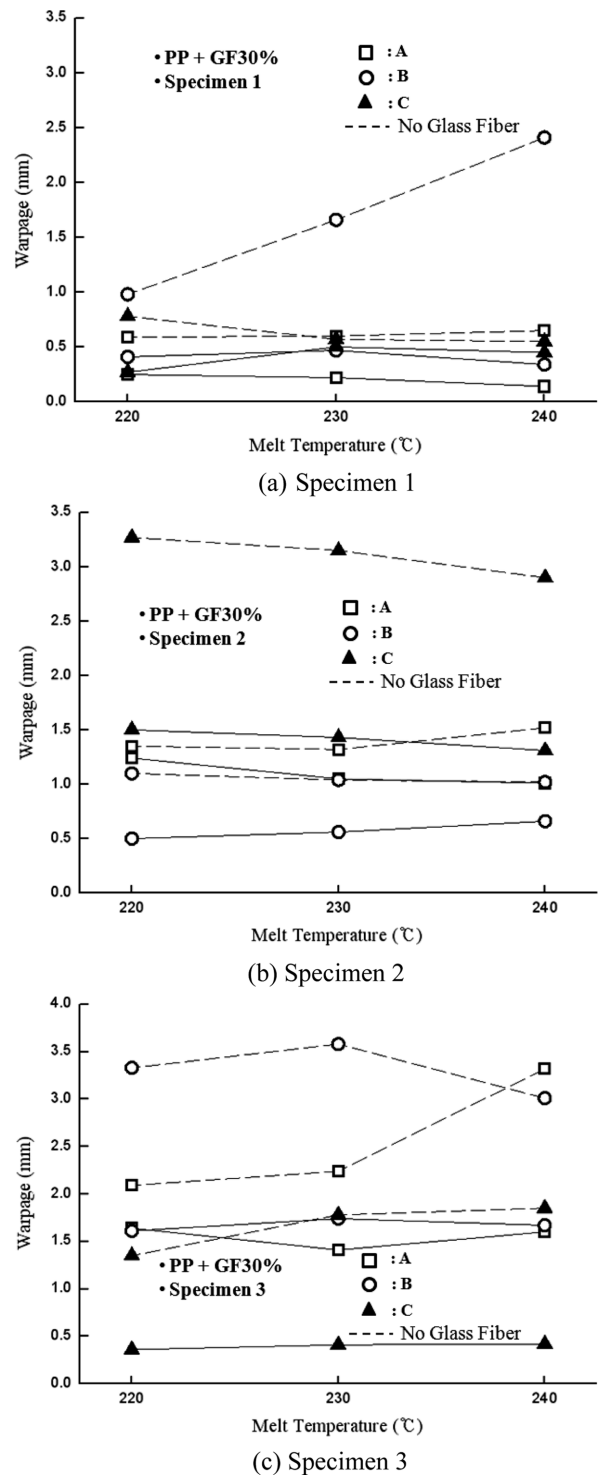


Figure 5. Warpages in the glass fiber reinforce PP specimens vs melt temperature.

한 보강이 되고, 또 흐름방향으로 유리섬유의 보강으로 휨이 작게 분포한다고 판단된다. 시편 3에서의 휨은 수지온도에 크게 의존되는 경향은 없는 것으로 판단된다.

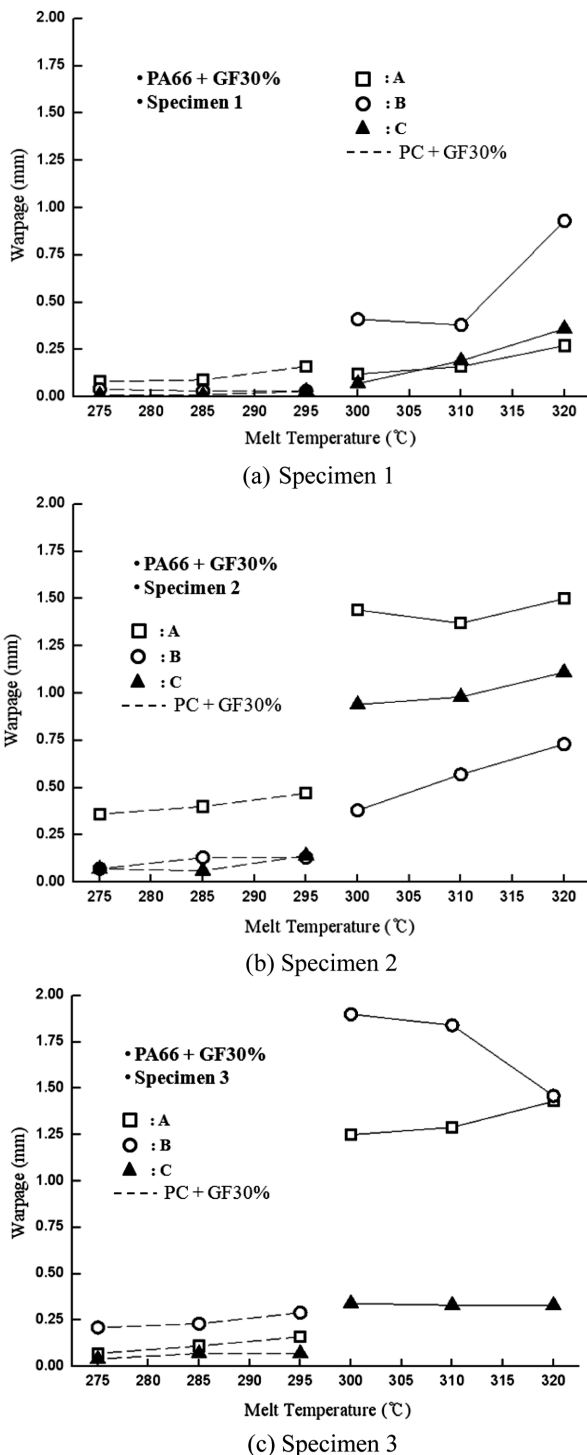


Figure 6. Warpages in the glass fiber reinforce PA66 specimens vs melt temperature.

결론

본 연구는 유리섬유가 30% 함유된 결정성 수지인 PP와 PA66를 이용하여 시편의 형상 설계에 따라 보이는 휨을 조

사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유리섬유 30%로 보강된 PP의 경우 리브가 없는 시편 1에서는 0.1~0.6 mm(0.1~0.6%), 리브가 흐름의 직각으로 놓인 시편 2에서는 0.5~1.55 mm(0.5~1.55%), 그리고 리브가 수지의 흐름방향으로 놓인 경우는 0.4~1.8 mm(0.4~1.8%)수준으로 휨이 나타났다. 유리섬유 30%로 보강된 PA66의 경우 리브가 없는 시편 1에서는 0.1~1.5 mm(0.1~1.5%), 리브가 흐름의 직각으로 놓인 시편 2에서는 0.4~1.7 mm(0.4~1.7%), 그리고 리브가 수지의 흐름방향으로 놓인 경우는 0.3~1.9 mm(0.3~1.9%)수준으로 휨이 나타났다. 시편 2와 3에서 PP와 PA66는 유사한 정도의 휨을 보였으나 시편 1에서는 PA66가 휨이 더 컸다. 비결정성 수지(유리섬유로 보강된 PC, ABS)에¹⁹ 비해 휨의 크기는 3배 이상으로 컸다. 따라서 형상품질이 중요한 제품의 경우는 결정성 수지보다는 비결정성 수지를 이용하는 것이 유리하다.

(2) 디자인이 다른 각 시편에서 보이는 휨은 비결정성 수지와 마찬가지로¹⁹ 리브가 없는 편평한 시편 1에서 휨의 양이 작았다. 그리고 리브가 흐름방향으로 놓인 시편 3이 리브가 흐름방향의 직각으로 놓인 시편 2보다 휨이 작았다. 편평한 성형품이라면 변형을 방지하기 위한 리브의 설계가 필요없지만 휨을 방지하기 위해 리브를 설계한다면 흐름방향으로 설계하는 것이 휨을 줄이는데 효과적임을 보였다. 금형설계 측면에서 본다면 성형품에 리브가 있으면 리브가 서있는 방향으로 수지의 흐름이 일어나도록 게이트의 위치를 설정해야 휨을 방지할 수 있다. 각 시편 별로 휨의 양상도 다소 다르게 나타났는데, 시편 1에서는 게이트 영역에서, 시편 2에서는 게이트에서 먼 영역에서, 그리고 시편 3에서는 흐름방향에서 휨이 가장 작게 분포하였다.

(3) 사출성형조건은 각 시편에서 휨의 경향에 큰 영향을 주지 않았지만, PA66 수지에서 성형조건에 따라 미소한 편차를 보였다. 비결정성 수지에 비해 상대적으로 성형조건에 따라 다소 영향을 받았다.

감사의 글: 본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

참고 문헌

1. T. A. Osswald, L.-S. Turng, and P. J. Gramann, *Injection Molding Handbook*, Hanser, Munich, 2001.
2. M.-Y. Lyu and H.-Y. Kim, *Polymer Science and Technology*, **20**, 157 (2009).
3. M.-Y. Lyu, J.-H. Mo, and W.-J. Jeong, *Elastomers and Composites*, **38**, 295 (2003).
4. J. H. Mo and M.-Y. Lyu, *Transact. Mater. Proc.*, **13**, 515 (2004).
5. J. S. Hong, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **35**, 1 (2011).

6. K. Park, J.-H. Ahn, and C.-H. Yim, *KSME*, **27**, 507 (2003).
7. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 131 (2012).
8. S. J. Liao, D. Y. Chang, H. J. Chen, L. S. Tsou, J. R. Ho, H. T. Yau, and W. H. Hsieh, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 917 (2004).
9. H. Oktem, T. Erzurumlu, and I. Uzman, *Materials & Design*, **28**, 1271 (2007).
10. M.-A Kang and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **32**, 502 (2008).
11. Z. Lu and K. F. Zhang, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1661 (2009).
12. P. Larpsuriyakul and H.-G. Fritz, *Polym. Eng. Sci.*, **51**, 411 (2011).
13. Y. Zhou and P. K. Mallick, *Mater. Sci. Eng.*, **393**, 303 (2005).
14. J. L. Thomason, *Compos. Sci. Technol.*, **59**, 2315 (1999).
15. A. Bernasconi, P. Davoli, A. Basile, and A. Filippi, *Inter. J. Fatigue*, **29**, 199 (2007).
16. E. Kontou and A. Kallimanis, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 1588 (2006).
17. C. M. Sonsino and E. Moosbrugger, *Inter. J. Fatigue*, **30**, 1279 (2008).
18. M. Lee, J. H. Kim, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Elastomers and Composites*, **44**, 373 (2009).
19. H. Kim, M. Lee, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 555 (2012).