

사출성형과정에서 직교리브가 구조물의 휨에 미치는 영향

이성희[†]·황철진*·강정진*·허영무*

The Effects of Orthogonal Ribs on Structural Warpage During Plastic Injection Process

Sunghee Lee, Chul Jin Hwang, Jung-Jin Kang and Young-Moo Heo

Key Words: Injection Molding(사출성형), Orthogonal Rib(직교리브), Warpage(휨), Polymer Resin(고분자 수지), Injection Mold(사출금형), Delivery System(이송시스템), Flow Analysis(유동해석), Deflection(변형)

Abstract

In the present study, the effects of orthogonal ribs on structural warpage during injection molding process were investigated. Basic ribbed models for the evaluation of degree of warpage were introduced and designed. Injection molds for these models are manufactured based on the full 3D CAD/CAM technology and specimens are prepared for experiment. Numerical analysis using commercial plastic injection molding analysis software was also performed to compare the results with experimental ones. The variations of materials and parameters such as injection time, mold temperature, melt temperature, holding time were considered in the present work. It was shown that orthogonal ribs have significant effect on the reduction of warpage during the injection molding process.

1. 서 론

플라스틱 사출 제품의 설계 및 성형에 있어서 예측하기 가장 어려운 현상중의 하나는 사출성형 후 발생할 수 있는 제품의 휨(Warpage) 정도이다. 심각한 휨현상은 제품 자체의 허용 공차를 초과할 수도 있으며, 제품의 품질을 저하시키고 조립시 많은 문제점을 유발하며, 심한경우 기능상 사용이 불가능하게 할 수도 있다. 이러한 이유 때문에 플라스틱 사출 성형품의 휨을 최소화하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 휨의 근본 원인을 이해하는 것이 필요하다.

일반적으로 사출성형과정에서 발생하는 제품 내부의 잔류응력이 제품의 구조적인 본래의 형태를 변형시킬 만큼 충분히 강하다면 제품은 취출시 변형되게 된다. 대표적으로 고온의 성형제품이 냉각과정에서 불균일한 수축차를 겪게 되면 휨이 발생되며, 플라스틱 재료(material), 제품 설계(part design), 금형 설계(tooling) 그리고 공정 조건(processing parameters)들의 변화가 휨 발생에 크게 영향을 미친다.

사출성형과정에서 고분자 수지의 캐비티 내부 거동에 관한 연구로, 구분홍 등^[1]이 얇은 두께를 가진 캐비티의 보압 및 냉각과정에 대한 수학적 모델 및 수치해석적 방법을 제시하였으며, 제품의 두께 측면에서 중앙부의 밀도가 상대적으로 벽면에 비해 낮으며, 보압을 증가시킬 경우 내부의 밀도가 증가되므로 조밀한 성형품을 얻을 수 있음을 보였다. 정성택 등^[2]은 단점유 보강된 사출성형품의 휨 해석을 수행하기 위한 프로그램을 제시하였으며, 섬유배양에 따른 이방성 변형해석

† 한국생산기술연구원 정밀금형팀
E-mail : birdlee@kitech.re.kr
TEL : (032)234-0604 FAX : (032)234-0607

* 한국생산기술연구원 정밀금형팀

의 중요성을 제시하였다. 하지만 리브와 같이 형상이 급격히 변하는 부분에서 발생할 수 있는 국부적인 삼차원 열/유동 및 섬유배양효과 등에 대해서는 고려하지 못했다. 또한 Choi와 Im^[3]은 비결정수지 사출모델이 보압과 냉각과정에 겪게 되는 잔류응력을 고려할 수 있는 수치해석을 수행하였으며, 선형 삼차원 유한요소해석을 통해 사출성형품이 취출된 후 잔류응력에 의해 변형되는 정도를 평가하였다. 한편 Lee와 Kim^{[4][5]}이 사출성형품의 휨을 최소화하기 위한 최적화 기법을 제시하였다. 일차적으로 변형을 최소화 할 수 있는 모델의 두께를 주어진 범위에서 최적화하였으며, 사출시간(injection time), 후충진시간(postfill time), 보압시간(packing time), 보압(packing pressure), 용융수지온도(melt temperature) 그리고 냉매온도(coolant temperature)의 6가지 중요한 인자에 대해 변형을 한층 더 줄일 수 있는 방법에 대해 제시하였다. 그리고 Huang과 Tai^[6]는 얇은 셸 구조물의 사출성형조건을 결정하기위해 다구찌의 실험계획법을 사용하였고, 사출전용 상용 S/W인 C-MOLDTM를 사용하여 성형조건 및 여러 영향인자들이 단일 모델의 휨에 미치는 영향을 조직적으로 조사하였다. 연구를 통해 보압의 크기, 금형 온도, 수지온도 그리고 보압시간 순으로 휨에 큰 영향을 미침을 보였다. 하지만 사출성형과정에서 발생하는 휨에 대한 구조적인 측면에서의 연구를 찾아보기 힘들며, 현장에서 실무자의 경험에 의존하여 금형의 일부분에 홈을 형성함으로써 제품측면에서 리브가 생성되도록 하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 원인으로는 사출성형과정 자체의 복잡성으로 인해 현재까지 리브의 구조적인 측면을 고려한 휨 최소화 성형 방안이 제시된 바 없기 때문이다. 비록 대외적으로 수지 제조업체인 DuPont사에서 Engineering Plastic의 휨 현상을 방지하기 위한 전용 Warpage Software를 개발하여 기술지원을 수행하고는 있으나, 보강 형상에 따른 Warpage 최소화 방안에 대해서는 제시하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사출성형과정에서 발생하는 휨을 최소화하기 위한 보강리브에 대한 조직적인 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 연구 대상 모델 3종을 선정하였고, 각 모델에 대해 결정성 수지와 비결정성 수지 및 성형조건의 변화를 주어 실험을 수행하였으며, 사출성형 유한요

소전문 프로그램을 사용하여 실험결과와 해석 결과를 비교하였다. 또한 삼차원 측정기를 사용하여 모델의 측정된 변형결과 비교를 통해 직교리브가 사출성형과정에서 전체 구조물의 휨에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 평가모델선정 및 설계

직교리브가 사출성형구조물의 휨에 미치는 영향을 살펴보기 위해 본 연구에서는 Fig. 1와 같은 평가 모델(3종)을 선정하였다. 모델의 형상치수(a, b, h)는 200mm×100mm×8mm로 하였으며 최외각 리브와 판의 두께는 2mm로 하였다. 이러한 모델의 내부에 Fig. 1과 같은 단면 형상을 갖는 리브^[7]를 가로, 세로 동일한 개수(1~2)로 추가 하였으며, 이때 리브사이의 간격(span)거리는 일정하게 하였다. 여기서 t_b , t_r , f , R , h_r 은 각각 바닥판의 두께, 보강 리브의 두께, 편측 테이퍼각, 리브 교차부 필렛반경 그리고 리브의 높이를 의미한다. 그림에서 보듯이 리브단면형상에서 리브의 두께는 리브와 기저판(base plate)의 교차점에서 사출성형시 발생할 수 있는 sink mark를 최소화 하기위해 바닥판 두께의 약 60%로 설계 하였으며, 사출성형후 제품의 취출을 용이하게 하기위해 리브의 양쪽면에 테이퍼를 각각 1/2도씩 부여 하였다.

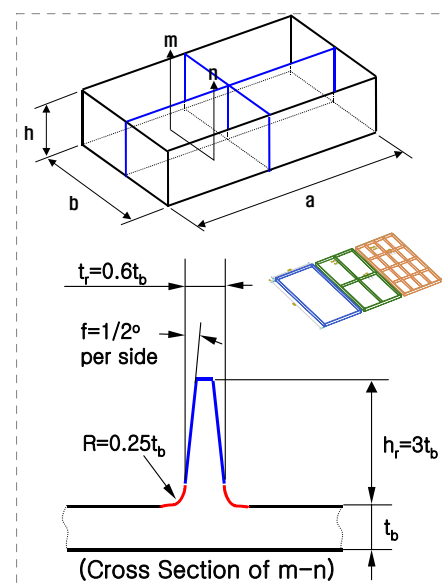


Fig. 1 Geometry of plastic plate cross-stiffened by two sets of equidistant stiffeners

3. 실험

3.1 실험 범위

고분자 수지를 이용하여 플라스틱 제품을 설계 제작할 경우 최종 제품의 휨에 영향을 줄 수 있는 인자로는 Fig. 2에 제시된 것처럼 재료, 제품 설계, 금형가공 및 성형조건을 들 수 있다. 우선 일차적으로 재료의 선정은 최종제품의 치수안정성에 매우 큰 영향을 준다. 즉, 재료의 결정성과 비결정성 그리고 보강섬유 및 첨가재료의 유무에 따라 최종 제품의 휨이 크게 달라 질 수 있다.

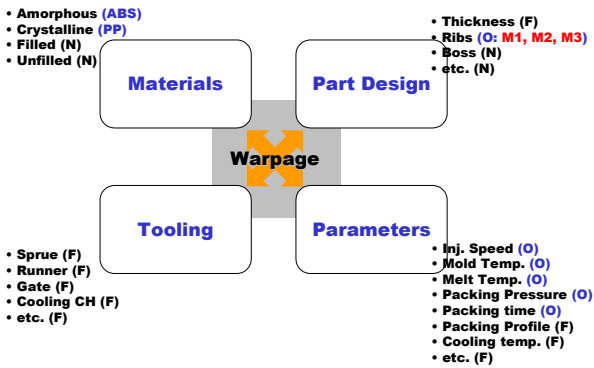


Fig. 2 Scope of experiment(F: Fixed, N: Not considered, O: considered parameter)

본 연구에서는 대표적인 결정성수지(PP)과 비결정성수지(ABS)에 대해서만 고려하기로 한다. 두 번째로 제품설계가 사출성형 후 최종제품의 휨에 영향을 줄 수 있으며, 이때 가장 중요한 영향 인자는 제품이 두께이다. 이외에 리브(rib), 보스(boss), 구멍(hole)등이 휨에 영향을 줄 수 있으나, 본 연구에서는 리브의 개수 변화에 대해서만 고려하였다. 세 번째로 금형설계, 즉, 스프루(sprue), 런너(runner), 게이트(gate) 등의 delivery 시스템이 휨에 영향을 줄 수 있는데 이는 유동에 의한 고분자 수지의 배양성 및 압력에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 하지만 이러한 delivery 시스템의 변경은 금형 및 금형을 포함하는 몰드베이스(moldbase)의 형상설계를 변경시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 가공성 및 제품 성형성을 고려한 다이렉트 스프루에 의한 delivery 시스템으로 고정하여 실험을 수행하였다. 마지막으로 사출성형조건이 사출구조물의 휨에 미치는 영향을 살피기 위해 사출속도, 금형온도, 용융수지온도, 보압력, 보압시간 등의 변화에 대한 실험을

수행하였으며, 냉각에 대한 조건은 고정시켰다.

3.2 금형설계 및 사출성형기

사출금형을 설계하는데 있어 제품설계 다음으로 가장 중요한 것은 냉각시스템의 설계라고 할 수 있다. 냉각설계에 있어 가장 중요한 원칙은 제품의 두께 측면에서의 균일 냉각이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 Fig. 3에서와 같이 냉각채널의 직경(d) 및 제품으로부터의 위치(D) 및 냉각 채널간의 거리(W)가 중요한 설계인자가 된다^[8].

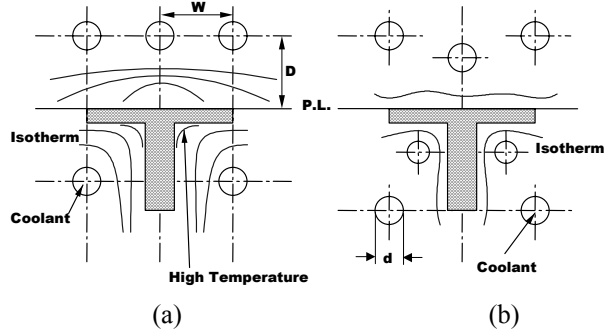
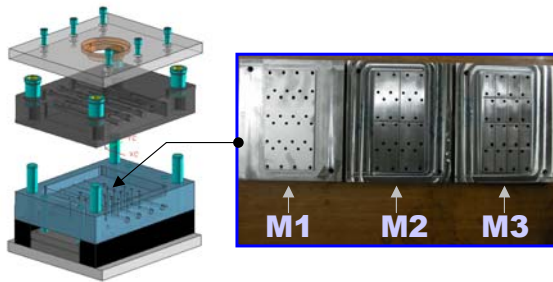


Fig. 3 Effect of cooling channel design on the temperature distribution of mold

하지만 이러한 일반적인 설계원칙을 따르더라도 Fig. 3(a)와 같이 "T"형의 코너부에서는 다른 부위에 비해 상대적으로 많은 열이 발생되므로 이부분의 충분한 냉각이 필요하다. 만약 냉각이 원활하지 못하게 되면 이부분에서 수축이 발생되어 제품은 화살표 모양으로 휨이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에도 이러한 현상을 고려하기 위해서는 각 모델(3종)에 대한 최적냉각 시스템을 설계해야 하나 본 연구의 목적이 보강 리브가 제품의 휨에 미치는 영향을 살피는 것이므로 냉각 시스템은 모두 동일하게 하였으며, 냉각 채널의 직경은 $d=10\text{mm}$ 로 하고 파팅 라인(P.L.: Parting Line)을 기준으로 D 는 $2.5d$ 로 하였으며, $W=4d\sim 5d$ 로 하였다.

냉각시스템을 결정한 후 삼차원 설계제품을 이용하여 삼차원 금형설계 및 금형가공을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 실험의 효율성을 증대시키기 위해 제품의 형상을 결정하는 코어 부분만 교체하여 다른 종류의 제품을 성형할 수 있는 금형 및 몰드베이스를 설계하였다. 따라서 표준 몰드베이스는 한개 만 있으면 되고, 리브의 개수를 변화시키기 위한 추가적

인 작업이 필요한 경우는 리브의 개수를 결정하는 Fig. 4(b)와 같은 코어 블록만 새로 가공하면 된다. 이렇게 제작된 금형 및 몰드베이스를 사출기성형기에 장착후 시편을 제작하는 대표적인 과정을 Fig. 5에서 보여 주고 있다. 실험에 사용된 사출기는 ENGEL사 형체력 100톤인 일반 사출기이며, 사출 성형과 관계된 사양은 Table 1에 제시하였다.



(a) 3D Moldbase (b) Insert core blocks

Fig. 4 Designed mold, moldbase, and insert core blocks for manufacturing specimens

Table 1 Specification of plastic injection machine

Item	Value	Unit
Screw diameter	40	mm
Max. machine injection speed	114	mm/s
clamping force	100	ton _f
Max. injection pressure	1800	bar

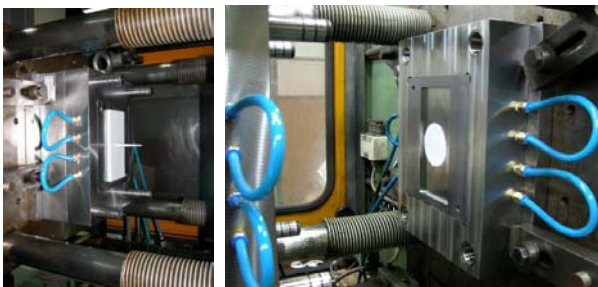


Fig. 5 Photograph of plastic injection process

본 연구에서 사용된 ABS와 PP수지의 성형에 관계된 파라미터를 Table 2에 제시하였다. 표에서 보듯이 금형온도와 용융수지 온도 모두 상호 다른 범위를 보이지만, 각각의 수지에 범위가 있는 조건에 대해서는 괄호안의 값을 사용하여 실험을 수행하였으며, 제작된 시편들을 Fig. 6에서 보여 주고 있다.

Table 2 Comparison of recommended processing parameters & operating conditions

	ABS	PP
Recommended mold temperature range(°C)	40~80 (40,60,80)	20~60 (20,40,60)
Recommended melt temperature range(°C)	215~255 (190,230,260)	
Coolant temperature(°C)	40	
Cooling time(sec)	15	
Injection time(sec)	0.5, 1.0, 1.5	
Packing time(sec)	1~6 (Δ :1)	
Absolute max. melt temp.(°C)	275	300
Ejecting temperature(°C)	89	90



Fig. 6 Manufactured specimens

4. 사출성형해석

본 연구에서는 사출성형과정에서 직교 리브가 평판구조물의 성형후 변형에 미치는 연구를 좀더 조직적으로 수행하기 위해 사출전용유한요소해석 프로그램(MOLFLOW™)을 사용하여 실험의 전체 프로세스를 모사하였다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 유한요소 모델의 대표적인 결과를 Fig. 7에서 보여주고 있다.

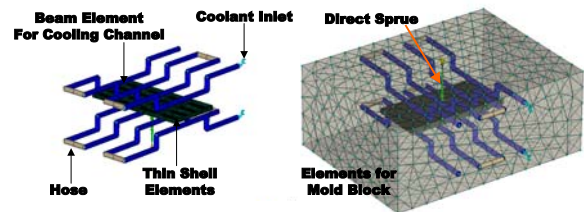
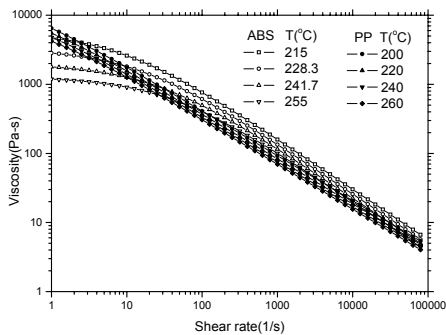
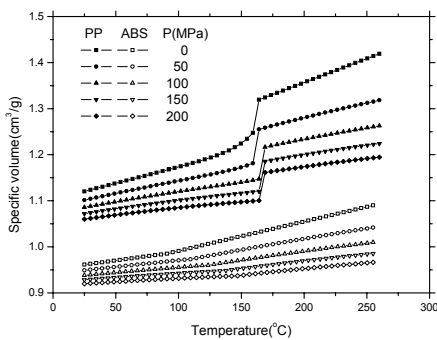


Fig. 7 Example of finite element modeling for model with delivery system and cooling channel

유한요소 생성 결과에서 보듯이 수지를 캐비티 내로 이송시키기 위한 delivery 시스템과 금형을 냉각시키기 위한 cooling channel은 일차원 보 (beam) 요소로 모델링을 하였으며, 성형품 모델은 셀 요소로 모델링을 하였으며, 냉각해석을 위한 금형은 경계요소(boundary element)로 모델링 하였다. 사출성형해석에 사용된 비결정성 ABS 수지와 결정성 PP 수지의 점도 특성 선도와 PVT 선도를 Fig. 8에 제시하였다.



(a) Viscosity



(b) PVT

Fig. 8 Comparisons of rheological and PVT properties between ABS and PP

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 사출성형품의 성형중 발생될 수 있는 휨을 줄이기 위한 방법인 보강 직교 리브의 설계에 대해 조직적인 연구를 수행하였다. 즉, 리브의 개수, 금형온도, 수지온도, 보압시간, 사출시간 등의 변화에 따른 사출성형품의 성형후 휨 거동을 조사하였으며, 실험 결과 중 사출시간, 금형온도, 용융수지온도가 각각 1.0 sec, 60°C, 260°C 인 경우에 대해 사출성형해석결과와 실험결과의 충전패턴비교 및 직교리브개수와 재질변화에 따

른 사출성형품의 휨 특성을 평가 하였다. 실험결과와 사출유동해석결과의 비교를 Fig. 9에 제시하였다. 결과에서 보듯이 충전패턴은 거의 일치함을 볼 수 있다. 하지만 휨 결과는 휨는 경향성은 비슷하나 정량적인 값에서 차이가 있어 사출기 조건과 해석조건의 정확한 Mapping이 추후 해결과제로 남았다.

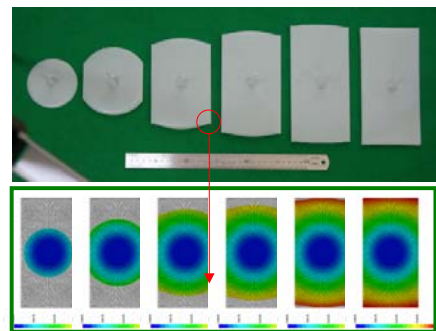


Fig. 9 Comparison of filling pattern between experiment and numerical analysis

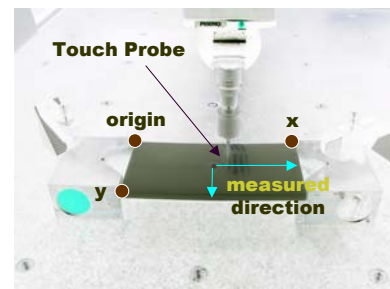
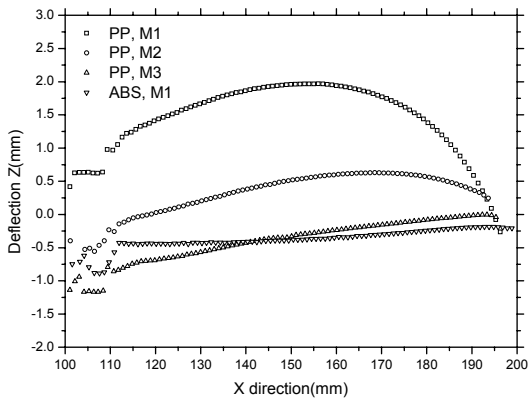


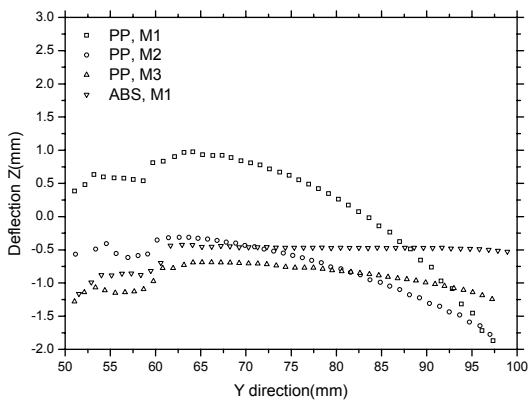
Fig. 10 Example of finite element modeling for model with delivery system and cooling channel

한편 수지의 변화 및 리브개수 변화에 따라 성형된 시편에 대한 변형량 측정을 수행하였으며, 측정방법에 대한 그림을 Fig. 10에 제시하였다. 측정범위 1200mm x1000mm x750mm이고, 반복정도 3 μ m의 Sheffield사 측정기를 사용하여 시편의 변형정도를 측정하였으며, 각 방향에 대한 변형비교 결과를 Fig. 11에 제시하였다. 이때 각각의 점 데이터는 5개를 산술평균한 값이다. 또한 그림에서 M1, M2, M3는 Fig. 1과 Fig. 4에서 제시되었듯이 리브가 없는 경우, XY방향으로 각각 1개 그리고 2개인 경우의 모델을 의미한다. 그리고 그래프의 시작에서 약 10mm 정도는 평평한 측정값 부분이 존재하는데 이는 스프루에 의해 형성된 부분이 측정된 결과이다. 우선 Fig. 11(a)

의 X방향 변형결과에서 보듯이 결정성수지 PP를 사용한 모델에서 리브의 증가는 사출성형품의 변형을 매우 크게 감소시킴을 볼 수 있다. 하지만 리브가 없더라도 비결정 수지 ABS를 사용한 모델의 변형 결과는 상대적 매우 안정적인 결과를 줌을 볼 수 있다. 이러한 경향성은 Y축 방향 측정결과에서도 찾아볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison of measured warpage results between specimens(Inj. time=1.0sec, mold temp.=60°C, melt temp.=260°C)

6. 결론

본 연구에서는 일반적인 사출성형과정에서 발생하는 휨을 최소화하기 위한 방법 중의 하나인 제품설계측면에서의 직교리브에 대해 기초적인 연구를 수행하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

직교리브의 보강은 사출성형품의 성형과정에서 발생할 수 있는 휨을 억제하는 효과가 있음을 확

인하였다. 보강 리브수가 증가할수록 보강 리브 스펠사이의 chord height가 감소하여 결과적으로 휨이 줄어드는 현상을 확인하였다. 또한 이러한 변형억제 효과는 비결정성 수지 보다 결정성 수지에서 훨씬 상대적으로 크게 발생됨을 알 수 있었으며, 이는 고분자 수지가 갖는 수축의 특성과 매우 밀접한 관계가 있다.

하지만 좀더 조직적인 연구를 위해서는 휨 측정을 위한 정밀 지그의 제작이 필요하며, 온도센서 및 압력센서를 이용하여 캐비티내의 온도, 압력특성을 평가함으로써 최종 제품의 휨 현상과의 상관관계를 규명할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 생산기술연구사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 구분홍, 신호철, 이호상, 1993, “사출성형시 보압 및 냉각 과정이 성형품에 미치는 영향,” 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp.1150-1160.
- (2) 정성택, 김진곤, 구분홍, 1999, “단섬유 보강 이방성 사출성형품의 휨 해석,” 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제8호, pp.1968-1977.
- (3) Choi, D.S. and Im, Y.T., 1999, "Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding," Composite Structures, Vol.47, pp.655-665.
- (4) Lee, B.H. and Kim, B.H., 1995, "Optimization of Part Wall Thickness to Reduce Warpage of Injection Molded Parts Based on the Modified Complex Method", Polymer Plastics Technology & Engineering Journal, Vol.34, No.5, pp.793-811.
- (5) Lee, B.H. and Kim, B.H., 1997, "Variation of Part Wall Thicknesses to Reduce Warpage of Injection Molded Part-Robust Design Against Process Variability", Polymer Plastics Technology & Engineering Journal, Vol.36, No.5, pp.791-807.
- (6) Huang M.C., Tai, C.C., 2001, "The effective factors in the warpage problems of an injected-molded part with a thin shell feature," Journal of Materials Processing Technology, Vol.110, pp.1-9.
- (7) Robert A. Mally, 1994, "Plastic Part Design for Injection Molding," Hanser Gardner Publications, Inc.
- (8) Georg Menges, Walter Michaeli, and Paul Mohren, 2001, "How to Make Injection Molds," Hanser Gardner Publications, Inc.