

## 플라스틱 직교 보강 구조물의 휨특성에 대한 실험과 해석적 접근

김무연\*, 조용주, 이성희(한국생산기술연구원)

### Experimental and Numerical Approach for Warpage Characteristics of Plastic Orthogonal Stiffened Structure

M. Y. Kim, Y. J. Cho, Sunghee Lee(Korea Institute of Industrial Technology)

#### ABSTRACT

In this work, the effects of orthogonal ribs on warpage of plastic structure through injection molding process were investigated. Three kinds of injection molds were prepared to perform injection molding experiments of orthogonal stiffened plastic plate. The warpage of each injection molded specimen was measured using 3D CMM. And plastic injection molding analysis with commercial code was performed for the presented model. Numerical results of injection molding analysis were compared with those of experiments. It was shown that orthogonal ribs have a significant effect on the warpage of the structure in both cases of experiment and numerical analysis.

**Key Words** : 플라스틱(Plastic), 직교리브(Orthogonal Rib), 휨(Warpage), 사출성형(Injection Molding), 고분자수지(Polymer Resin), 유동해석(Flow Analysis), 잔류응력(Residual Stress), 변형(Deflection)

#### 1. 서론

플라스틱 사출성형에서 성형 직후 또는 성형 후에 초기 금형설계자가 의도한 허용공차를 초과하여 형태가 왜곡되는 결과가 발생되기도 한다. 이러한 변형은 금형설계자에게 있어 가장 큰 관심사항이므로 휨을 최소화하기 위해 근본적인 원인을 이해할 필요가 있다. 휨은 성형된 제품의 국부적인 수축의 차이에 의해서 발생한다. 수축 차이의 원인은 고분자 수지의 분자 또는 섬유 배향차이, 불균일한 금형의 냉각, 제품두께에 의한 냉각속도 차이, 제품형상에서의 비대칭, 불합리한 성형공정 등으로 발생한다. 수축을 균일화하는 것은 많은 수축차이 발생 요소들의 상호 작용 때문에 매우 복잡한 작업이다.

지금까지 사출성형에 있어 휨을 발생시키는 고분자 수지의 유동현상, 수축과 잔류응력을 예측하기 위한 성형조건 연구가 많이 이루어지고 있다. 즉 Lee와 Kim<sup>[1]</sup>이 사출성품의 휨을 최소화하기 위한 6가지 중요한 인자에 대해 변형을 제어할 수 있는 최적화 기법을 제시하였다. 또한 Huang과 Tai<sup>[2]</sup>는 얇은 셸 구조물의 사출성형조건을 결정하기

위해 실험 계획법을 사용하였고, 사출전용 상용 S/W를 사용하여 성형조건 및 여러 영향인자들이 단일 모델의 휨에 미치는 영향을 조사하였다. 한편 금형 설계, 제작, 성형이 직접 이루어지는 현장의 경우는 기 발생된 휨 현상을 제어하는 방법으로 금형의 일부분에 홈을 형성함으로써 제품측면에서 리브가 생성되도록 하는 방법을 사용하고 있다. 하지만 이러한 리브를 추가 변경 설계 제작하는 과정에서 리브자체의 휨제어 특성에 대해서는 고려되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 사출성형과정에서 사출평판구조물의 직교리브 보강이 휨에 미치는 영향을 연구하고 이를 사출성형전용 프로그램을 통한 CAE 성형해석과 비교 분석한다. 이를 위해서 3종류의 연구모델을 선정하였고, 대표적 결정성 수지인 PP(Polypropylene)를 사용하여 각 모델에 대해 성형조건을 변화시켜 주어 실험을 수행하였다. 성형된 각 모델을 삼차원 측정기(CMM)를 사용하여 변형결과를 측정하였으며 서로 비교하였다. 또한 사출성형전용 유한요소 프로그램을 사용하여 성형품의 측정결과와 CAE 해석 결과를 비교하여 사출성형에서

직교리브보강이 구조물의 휨에 미치는 영향을 살펴 보았다.

## 2. 금형설계

### 2.1 평가 모델의 선정

직교리브 보강의 휨 영향을 알아보기 위해 리브 개수의 변화를 고려한 평가 모델(3종)을 선정하였다<sup>14)</sup>. Fig. 1과 같이 평가모델은 200mm<sup>2</sup> 100mm<sup>2</sup> 8mm(a, b, h) 길이의 평가모델두께 및 최외각 리브가 2mm 두께를 가지도록 설계 하였으며, 가로 및 세로로 동일한 개수의 리브를 갖는다. 즉 각 방향으로 리브간 간격은 일정하게 하였다. 여기서 모델의 리브 형상치수  $t_b$ ,  $t_r$ ,  $f$ ,  $R$ ,  $h_r$ 은 각각 사출평판구조물의 상판 두께, 보강 리브의 두께, 편측 테이퍼각, 리브 교차부 필렛 반경 그리고 리브의 높이를 의미한다. 리브의 두께는 기저판 두께의 약 60%로 설계하였으며, 성형제품의 취출을 쉽게 하기 위해 리브에 양쪽에 빼내기 구배를 각 1/2 씩 적용하였다.

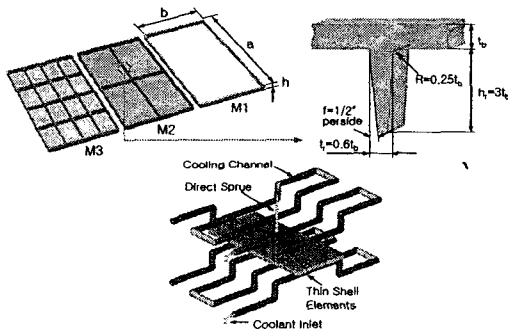


Fig. 1 Geometry of plastic plate cross-stiffened by two sets of equidistant stiffeners and enlarged view of rib

### 2.2 금형의 설계

본 연구에서 제시된 3종의 모델에 대해서 각각 최적의 냉각채널설계가 이루어져야 하지만, 본 연구는 사출 평판 구조물에 직교리브 보강이 휨에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이므로 3종의 모델에 대해 모두 파팅 라인을 기준으로 동일한 직경( $d=10\text{mm}$ )과 높이( $D=2.5d$ ), 간격( $W=4d-5d$ )으로 설계하였다<sup>14)</sup>. Delivery 시스템은 단순히 수지를 채우는 수단이 아니라 성형수지의 배향성과 압력에 직접 영향을 끼쳐 잔류 응력을 유발하여 제품의 휨을 가져오지만, 본 연구는 직교리브 보강의 휨 영향을 알아보기 위한 것이므로 제품 성형성을 고려하여 direct gate로 고정하였다. 선정된 3종의 모델은 하

측 몰드베이스의 코어 교체 방식으로 제작하였다.

Table 1 Comparison of recommended processing parameters & operation conditions

PP		Value	Unit
Recommended mold temp.		50	°C
Recommended meld temp. range		200~260	°C
Coolant temp.		45	°C
Cooling time		18	sec
Injection time		1.1	sec
Packing control method	time	2.0, 5.0	sec
	ratio	80% / 60%	MPa
	pressure	34 / 26	MPa
	switch-over	88% (%volume filled)	

Table 2 Factors used in experiments

Case	Packing time	Packing pressure
1	2 sec (1:1)	80 / 60 %
2	2 sec (1:1)	34 / 26 MPa
3	5 sec (3:2)	80 / 60%
4	5 sec (3:2)	34 / 26 MPa

## 3. 사출 성형 실험 및 해석

사출 성형 공정의 여러 변수 중 사출속도 (injection speed), 충전시간(filling time), 보압(packing pressure), 보압시간(packing time), 금형온도(mold temperature), 수지용융온도(meld temperature), 냉각시간(cooling time) 또한 최종 사출품의 치수 안정성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 각각의 연구모델에 보압 (2단 제어, 일정보압) 및 보압시간(2s, 5s)을 변화하고 기타의 변수를 고정한 다음 실험을 수행하였다. 성형사출품은 사출기가 안정화 된 이후의 각 공정당 5개를 취하였다. 성형에 사용된 수지는 대표적 결정성 수지로 수축률이 큰 PP(LG-Caltex Oil, Hi-Prene M540)를 사용하여 성형실험 및 CAE 성형 해석을 수행하였다. 성형공정에는 recommended processing data를 사용하였다. Table 1&2에는 성형에 관계된 파라미터와 성형시편의 실험 변수를 제시하였다. 시편을 제작에는 Engel사의 형체력 220톤의 일반 사출기가 사용되었다. 사출기의 램속도프로파일(ram speed profile) 중 한 예를 Fig. 2에 제시하였다. 또한 본 연구에서는 사출성형에서의 직교리브 보강이 휨에 미치는 영향을 보다 면밀히 알아보기 위해서 사출성형전용 유한요소해석 프로그램 (Moldflow)을 사용하여 성형실험에서의 성형공정조건을 동일하게 CAE 성형해석에 적용하였다. 성형 해석을 위해 해석모델을 shell 요소를 사용한 mid-plane과 fusion 모델과 solid 요소를 사용한

3D(tetrahedral) 모델을 준비하였다. 냉각해석, 유동 해석, 보압해석, 힘해석의 각 단계별 해석결과를 분석하였고 전체적으로 사출 성형품의 충전 패턴과 변위와 변형에 대해 집중적으로 검토하였다.

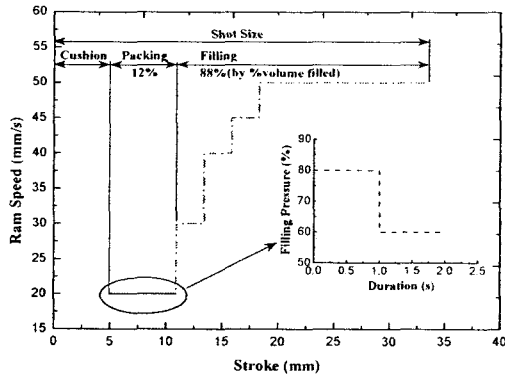


Fig. 2 An example profile of stroke vs. ram speed in Case 1-m1(Shot size=33.1mm)

#### 4. 결과 및 고찰

측정범위 700mm? 00mm? 50mm의 5 $\mu$ m 반복정도를 가지는 Mitutoyo사의 3차원 측정기(CMM)를 이용하여 힘을 측정하였다. 힘의 측정위치 및 방향은 참고문헌<sup>[4]</sup>과 동일한 방법을 사용하였다. Fig. 3은 Table 2에 제시된 성형공정 변화 중 각 M1, M2, M3 모델의 Case 1의 성형실험에 대한 측정변형정도를 제시하고 있다. 이때의 성형공정은 사출시간 1.1s, 급형온도 50 $^{\circ}$ C, 수지온도 250 $^{\circ}$ C, 보압 전환(Switch-over) 88%, 보압 2단 제어(최고 사출압의 80%, 60%)이다. Fig. 3의 X방향에 대한 힘 측정 결과에서 보듯이 직교리브 보강은 사출평판구조물의 변형을 매우 크게 감소시킴을 알 수 있으며 Y방향의 변형결과 또한 리브 추가에 따른 힘감소 경향을 보여주고 있다. Fig. 4는 성형공정 Case 1의 각 모델 M1, M2, M3에 대한 성형실험과 mid-plane, fusion, full 3d 유한요소모델에 대한 해석의 X, Y방향의 변형정도를 제시하고 있다. Fig. 4의 힘 측정 결과에서 보듯이 직교리브의 보강은 사출성형품과 CAE 성형해석에서도 변형을 감소시킴을 볼 수 있으며 사출평판구조물에 대한 직교리브의 보강이 CAE 성형해석보다 사출성형품에 더 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. Table 2에 제시된 Case 1의 사출공정에서의 mid-plane, fusion, full 3d 유한요소모델의 힘해석 결과를 비교해 볼 때 mid-plane, fusion, full 3d 모델순으로 리브 추가시 힘감소에 대한 경향이 큰 것으로 나타났다. Fig. 5는 성형공정 Case1의 각 모델 M1, M2, M3이 보압이 끝났을 때의 힘 측정 위치에 대한 급형내의 고화층과 수지

유동층 경계에 발생하는 shear stress의 크기를 나타내고 있다. Shear stress는 잔류응력(residual stress)과 같지는 않지만 일반적으로 shear stress가 클수록 배향성이 커지고 배향성이 커지면 수축량도 배향성이 낮은 부분보다 커지며 결국은 잔류응력을 증가시킨다. 한편 Table 2에 제시된 Case 2~4의 힘 경향은 Case 1의 결과와 다소 값의 차이가 있을 뿐 정성적으로는 유사한 결과가 발생됨을 확인하였다.

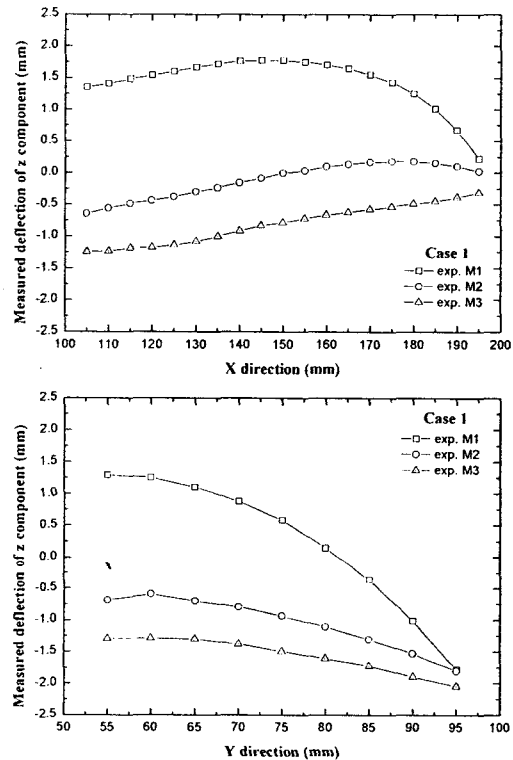


Fig. 3 Comparisons of experimental results of z component deflection (mold temp.= 50 $^{\circ}$ C, melt temp. = 250 $^{\circ}$ C, packing time=2sec)

#### 5. 결론

본 연구에서는 사출성형 평판 구조물의 리브 보강이 힘에 미치는 영향을 살펴보기 위해 성형실험과 CAE 성형해석을 수행하였으며, 그 결과를 비교 분석하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 사출성형 평판구조물의 직교리브 보강은 힘 감소에 효과가 있으며 이를 CAE 사출성형해석을 통해서 확인하였다. 또한 보강 리브수가 증가할수록 힘을 감소시키는 현상을 확인하였으며 이는 CAE 성형해석결과 보다 실제 사출성형품에서 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

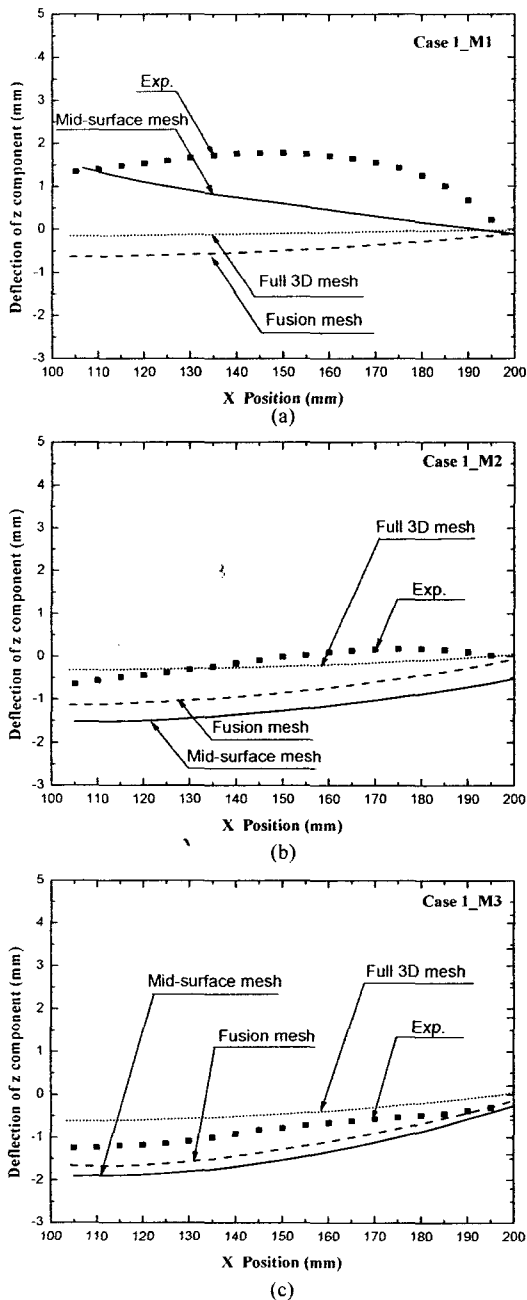


Fig. 4 Comparisons of warpage results between experiment and numerical analysis (mold temp.=50°C, melt temp.= 250°C, packing time=2sec)

### 후기

본 논문은 한국생산기술연구원 생산기술 주요목적 연구 사업에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여

러분께 감사드리며, 성형실험에 도움을 준 한국생산기술연구원 정밀금형팀의 박준호 연구원께도 감사드립니다.

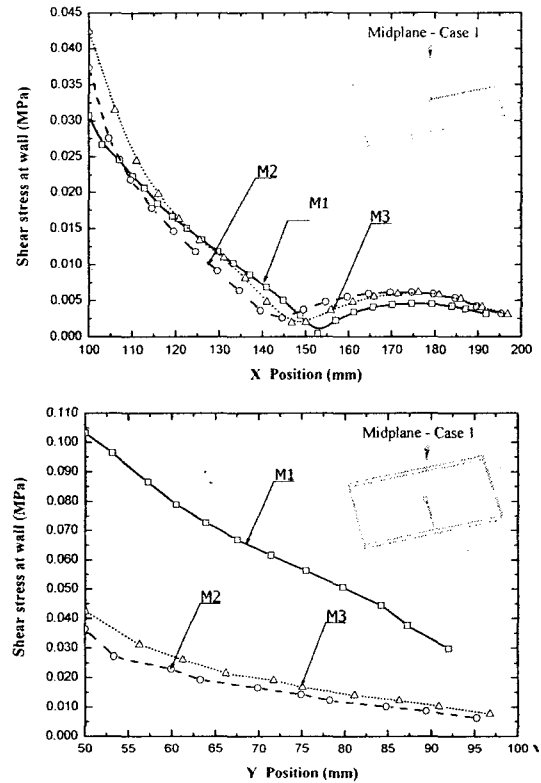


Fig. 5 Comparisons of shear stress at wall in numerical analysis

### 참고문헌

1. Lee, B.H. and Kim, B.H., "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, 1995.
2. Lee, B.H. and Kim, B.H., "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, 1997.
3. Huang, M.C., Tai, C.C., "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, 2001.
4. Sunghee Lee, Chul-Jin Hwang, Ok-Rae Kim, Young-Moo Heo, "The Warpage of Orthogonal Stiffened Structures in Injection Molding," *PPS Asia/Australia meeting*, pp. 45~46, 2004.