

대형 직교 보강 플라스틱 평판의 성형특성에 관한 연구

이성희*(한국생산기술연구원 정밀금형팀), 김백진(한국생산기술연구원 청정시스템팀)

A Study of Molding Characteristic for Large-Sized Orthogonal Stiffened Plastic Plate

Sunghee Lee(Precision Molds & Dies Team, KITECH), Baekjin Kim(Clean System Team, KITECH)

ABSTRACT

The molding characteristics of large-sized orthogonal stiffened plastic plates were investigated in the present study. Models with the geometry of 1800×600×12mm and 1200×600×12mm were designed for injection molding(IM) and injection-compression molding(ICM), respectively. To determine a mold system and reduce the warpage of the presented model after molding process, IM and ICM analyses using MOLDFLOW™ were performed. Also, the experiments were performed to verify the suggested mold system. It was shown that the change of molding method could significant effect on the warpage of designed model.

Key Words : Orthogonal stiffened plastic plates (직교보강플라스틱평판) Injection molding (사출성형), Injection compression molding (사출압축성형), Mold system (금형시스템), Warpage (휨)

1. 서론

본 연구에서는 대형 직교 보강 플라스틱 평판의 성형특성에 대해 조사하였다. 연구의 근본적인 목적은 건축에서 사용되는 토목 구조물의 플라스틱 대체 기술개발을 위한 기초연구이다. 플라스틱은 재활용이 가능한 친환경적인 소재이지만, 재료의 특성상 용융상태에서 고화상태로 진행되는 과정에서 반드시 수축현상을 동반하게 된다. 이러한 수축률은 재료에 따라 다르지만 일반적으로 5%이내의 값을 갖는다^[1]. 하지만 성형제품의 크기가 커지게 되면 비록 작은 수축률이라도 정밀하게 조절되어야 한다. 물론 금형 설계에서는 수축률을 감안하여 금형의 설계가 이루어지지만, 이러한 보상은 단순히 부피수축에 대한 치수보정에 지나지 않고, 만약 제품의 두께에 대해 수축의 편차가 발생되면 제품은 휘게 된다. 휨(warpage)에 대한 정도를 사전에 미리 평가 하는 것은 그리 쉬운 문제는 아니다. 왜냐하면 고분자 성형 후 발생할 수 있는 휨에 영향을 미치는 요인은 재료(material), 제품 설계(part design), 금형 설계(tooling) 그리고 공정 조건(processing parameters) 등 매우 많기 때문이다^[2-3]. 그런데 심각한 휨 결과는 제품 자체의 허용 공차를 초과할 수도 있으며, 제품의 품질을

저하시키고 조립시 많은 문제점을 유발하며, 심한경우 기능상 사용이 불가능하게 할 수도 있다. 더욱이 제품의 전체적인 치수가 크게 되면 이러한 휨 현상은 더욱 증폭되어 발생하게 되므로, 치수 정밀도를 만족시키기 위해서는 매우 주의를 요구하게 된다. 물론 이러한 휨과 관계된 연구는 많은 연구자에 의해 조직적으로 연구되어 왔다^[4-8]. 그러나 본 연구에서처럼 대형 직교 리브 평판의 성형특성에 대해서는 아직까지 제시된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 초대형 직교 리브 평판의 성형특성에 대해 살펴보았다. 이를 위해 가로 세로가 각각 1800mm×600mm, 1200mm×600mm인 두 모델을 선정하였고, 기저판 두께는 4mm로 하였다. 또한 각각의 모델에는 굽힘에 대한 비강성을 증가시키기 위해 두께 3mm인 직교 리브를 보강 설계하였다. 전자의 경우는 사출성형해석 및 실험을 통해 성형특성을 살펴보았으며, 후자의 경우는 사출압축성형해석 및 실험을 통해 마찬가지로 제품의 성형특성을 살펴보았다. 각 모델에 대해 성형조건의 변화를 주어 실험을 수행하였으며, 사출 성형 전문 해석 프로그램을 사용하여 실험결과와 해석 결과를 비교하였다. 이러한 연구를 통해 대형 직교 리브 평판 구조물의 성형과정에서의 성형방법이 휨에 미치는 영향을

조직적으로 살펴보았다.

2. 유동이론

2.1 고분자 유동이론

얇은 삼차원 캐비티내에서 용융 고분자 수지의 흐름에 대해 Hele-Shaw 유동 모델은 비교적 정확한 결과를 제시하여 왔다. 즉, 비탄성, 비등온 비뉴턴 유체유동 가정이 적용된 일반사출성형에 대한 지배방정식은 다음과 같다^[9-11].

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0 \quad (3)$$

$$\rho C_p (T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

여기서 P , T , u 그리고 v 는 압력, 온도, x 방향 용융수지속도 그리고 y 방향 용융수지속도를 각각 의미한다. $\partial \gamma / \partial t$, η , ρ , C_p 그리고 k 는 용융수지의 각각 전단률, 점성, 밀도, 비열 그리고 열전도도를 의미한다. 용융고분자수지점도의 비뉴턴 특성은 다음과 같이 수정 Cross 모델에 의해 표시될 수 있다^[9].

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + (\eta_0(T, p) \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (5)$$

여기서 n 은 Power-law지수이고, τ^* 는 Power-law와 뉴턴 유동 사이의 근사 천이 영역에서의 응력레벨이고, $\eta_0(T, p)$ 는 유효 전단률이 영일 때의 점도를 의미한다. η_0 의 가장 단순한 형태는 Arrhenius 형태로 다음과 같다^[9].

$$\eta_0(T, p) = B \exp \left(\frac{T_b}{T} \right) \exp(-\beta p) \quad (6)$$

넓은 온도영역에서 사용가능한 또 다른 형태는 WLF (Williams, Landel and Ferry)의 형태로 다음과 같다.

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left(- \frac{A_1 (T - T^*(p))}{\tilde{A}_2 + D_3 p + (T - T^*(p))} \right) \quad (7)$$

여기서 $T^*(p) = D_2 + D_3 p$ 이다. 따라서 식 (5)와 식

(7)은 7개의 상수를 포함하며, 각각의 값은 Table 1에 제시하였다.

Table 1 Constants for Eqs. (5) and (7)

η	τ^* (Pa)	D_1 (Pa-s)	D_2 (K)	D_3 (K/Pa)	A_1	\tilde{A}_2 (K)
0.2784	19133	2.22e+018	263.15	0	39.013	51.6

2.2 고분자 수지의 특성

본 연구에서 사용된 수지는 LNP Engineering Plastics의 Thermocomp MEV-1006으로써 결정성수지인 PP이다. 30%의 유리섬유가 보강된 수지이며, 성형시 사용조건에 대한 자료는 Table 2에 제시하였다. 또한 사용된 PP수지의 점도특성과 PVT선도는 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 제시하였다.

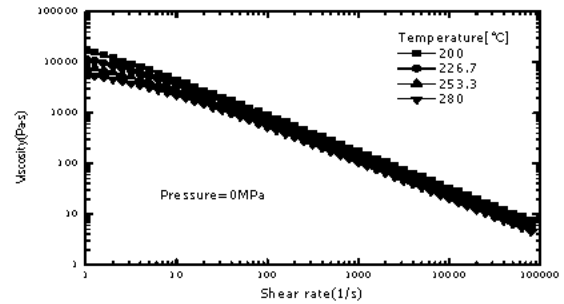


Fig. 1 Viscosity vs. shear rate

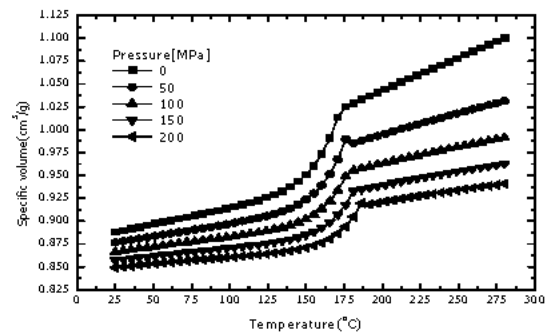


Fig. 2 Specific volume vs. temperature

Table 2 Recommended processing parameters & operating conditions

Recommended mold temperature range(°C)	20~80
Recommended melt temperature range(°C)	200~280
Absolute max. melt temp.(°C)	320
Ejecting temperature(°C)	93

3. 사출성형(Injection Molding)

본 연구에서는 대형 직교 리브 평판 구조물의 사출성형과정에서 발생할 수 있는 휨 현상에 대해 성형해석 및 실험을 통하여 살펴보았다. 제시된 대형 모델의 성형해석을 위해서는 사출전용유한요소 해석 프로그램(MOLFLOW™)을 사용하였다. 제품의 충전성을 고려하여 설계된 대표적인 게이트 및 런너 그리고 냉각채널의 유한요소 결과를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 또한 사출시간의 변화에 따른 게이트에서의 압력변화 결과를 역시 Fig. 3에 제시하였다. 결과에서 보듯이 사출시간이 약 8-9초인 경우 최소 압력 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 물론 이 사출시간을 기준으로 사출시간이 짧아지면 점성의 영향력이, 길어지면 온도의 영향력이 증가하여 두 경우 모두 다 압력이 증가하게 된다. 한편 본 연구에서는 사출성형과정에서 발생하는 휨을 최소화하기 위해 게이트, 런너의 변경, 냉각채널의 설계 변경 및 금형 상/하측 온도변화, 사출시간과 보압 조건들의 변화, 온도의 변화 등 많은 조건변화에 대한 사출성형해석을 수행하였다. 또한 금형을 제작하여 성형실험도 수행하였으며, 실험에 사용된 금형을 Fig. 4에 제시하였다.

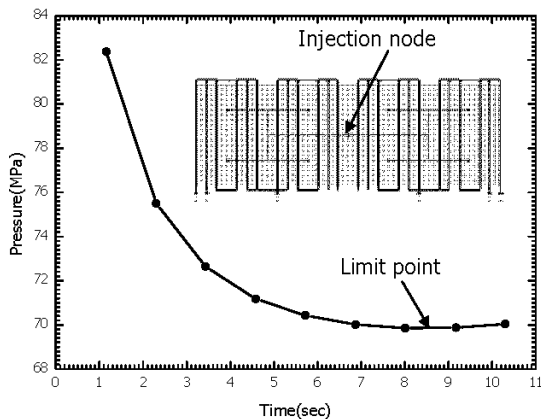


Fig. 3 Finite element model and pressure result with variation of injection time

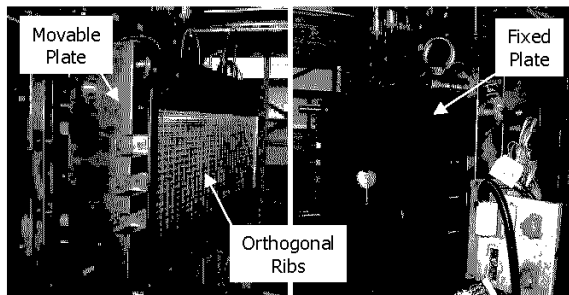


Fig. 4 Manufactured mold of large-sized orthogonal stiffened plastic plate(1800mm×600mm×12mm) and setup for injection molding experiment

비록 본 연구에서는 많은 조건에 대한 사출성형 해석을 수행하였지만, 해석 결과 최소 약 60mm에서 최대 300mm의 휨 결과 변화를 얻었다. 또한 제품의 대형성으로 인해 비록 충전부에서의 압력은 100MPa 이하로 아주 좋은 편이었으나, 형체력이 약 2500톤 정도 발생하여 Fig. 4에서도 제시하였듯이 초대형 사출기가 필요하였다. 사출 성형 후 변형이 발생한 시편을 Fig. 5에 제시하였다. 또한 함께 사출성형해석을 통해 얻어진 휨 결과도 함께 제시하였다. 비록 본 연구에서는 정량적인 휨 양을 비교하지는 않았으나, 비교 결과에서 보듯이 동일한 형태로 휨이 매우 크게 발생되었음을 볼 수 있었다.

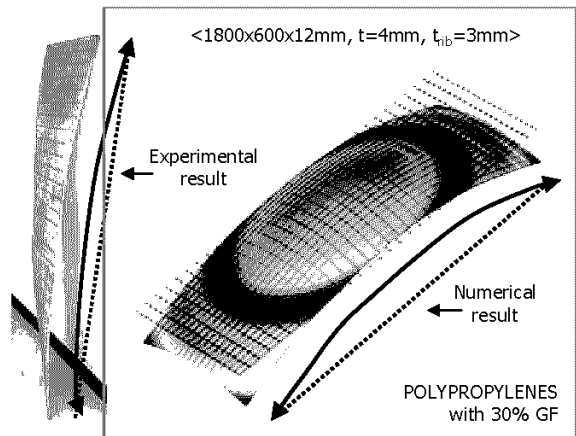


Fig. 5 Comparison of warpage between experimental and numerical result

4. 사출압축성형(Injection-Compression Molding)

앞 절에서는 초대형 직교 리브 플라스틱 평판 구조물의 사출성형에 대해 살펴보았다. 성형해석 및 실험을 통해 매우 큰 휨이 발생되었음을 확인하였다. 이러한 결과의 가장 큰 원인 중 하나는 재료 및 성형과정에서의 배향성으로 사료된다^[9]. 일반적으로 재료의 경우는 제품 또는 구조물의 기능과 연결되어 있어 설계 단계에서 사전에 결정되므로, 거의 변경이 불가능한 경우가 많다. 그래서 성형과정에서 배향성조절하고 및 잔류응력을 최소화하여 휨을 제어해야 하지만, 대형제품의 경우는 용융수지의 유동길이 상대적으로 커지게 되므로 배향성과 잔류응력을 최소화하는데 매우 제한적이게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 제한성을 극복할 수 있는 사출 압축성형공정에 대해 살펴보았다. 일반적인 사출 압축성형공정의 개념은 Fig. 6에 제시된 것처럼 금형을 일정간격 연 후 용융수지를 채우고, 금형을 닫으면서 형체력으로 제품을 성형하게 된다. 따라서 용융수지 측면에서는 주입 및 성형과정 전체에 걸쳐

사출성형보다는 매우 적은 압력으로 성형이 가능하게 된다. 결과적으로 낮은 압력에서 성형이 가능하고 유동거리의 제한이 상대적으로 적어 비교적 치수 안정성이 양호한 제품을 얻을 수 있게 된다.

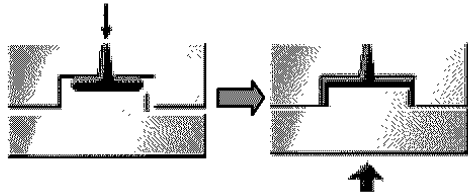


Fig. 6 Injection-compression molding process

사출압축성형해석에 사용된 성형조건을 Table 3에 제시하였다. 표에서 보듯이 사출성형해석에서와는 달리 금형열립시간, 압축지연시간, 압축시간 및 압축력의 추가 입력 사항이 있음을 알 수 있다. 또한 여기서의 압축력은 형체력과 유사한데, 앞 절에서의 사출성형과정에서 발생된 약 2500톤보다도 10분의 1 이하의 작은 힘이 요구됨을 알 수 있다.

Table 3 Recommended processing parameters & operating conditions for ICM

Mold Temperature	50	℃
Melt Temperature	240	℃
Injection Time	5	sec
Cooling Time	150	sec
Coolant	water	
Coolant Temperature	24	℃
Mold Open Distance	6	mm
Compression Delay Time	6	sec
Compression Time	20	sec
Compression Force	150-160	ton _f

앞의 사출성형해석에서와 마찬가지로 실험전에 여러 경우에 대한 사출압축성형해석을 수행하였다. 성형상의 가장 큰 문제는 사출 압축 성형시 필요한 게이트의 수를 결정하는 것이었다. 이를 위해 대표적으로 게이트가 1개, 2개, 3개인 경우에 대해 각각 해석을 수행하였으며, 대표적인 충전패턴해석 비교결과를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7(a)는 사출성형에 의한 결과이고, Fig. 7(b)는 사출압축성형해석에 의한 충전 결과를 나타낸다. 결과에서 보듯이 사출압축성형이 사출성형보다 제품의 전체 영역에 대해 빨리 충진이 이루어짐을 볼 수 있으며, 특히 게이트가 1개인 경우는 용융수지가 모델의 길이 방향에 대해 양단으로 갈수록 거의 수평 충전 이동이 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 결과는 재료의 특성상 길이방향의 강성을 증가시킬 것이며, 결과적으로 적은 힘 결과를 발생시킬 것이다. 이러한 해석결과로부터 본 연구에서는 사출압축실험을 위한 게이트수를 1개로 결

정하였다. 실험에 사용된 금형 및 장비 셋업을 Fig. 8에 제시하였다. 일반적인 프레스위에 금형이 장착되어 있고, 사출성형에서와는 달리 수지가 측면에서 공급됨을 그림에서 볼 수 있다.

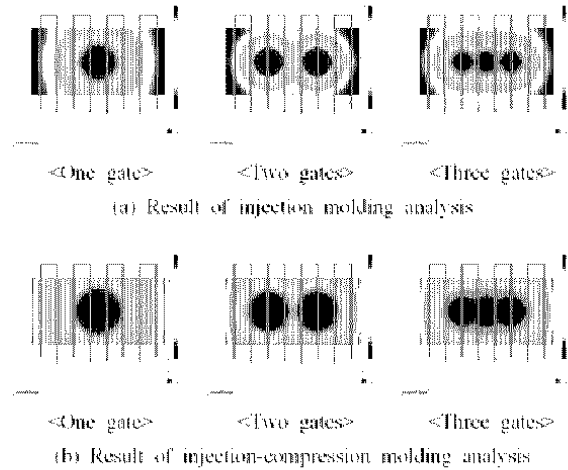


Fig. 7 Comparison of filling results between injection molding and injection-compression molding

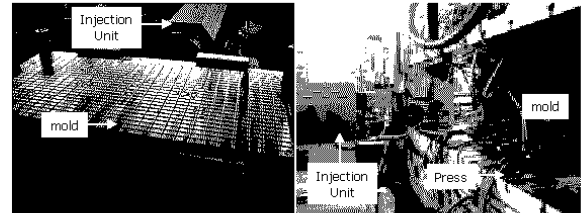


Fig. 8 Experimental setup of injection compression molding for large-sized(1200mm×600mm×12 mm) orthogonal stiffened plastic plate

본 연구에서 사출압축성형에 의해 제작된 대형 직교 보강 평판 구조물을 Fig. 9에 제시하였다. 또한 사출압축성형해석결과도 함께 제시하였는데, 결과에서 보듯이 힘 결과가 실험결과와 매우 유사함을 볼 수 있다. 거의 모델의 두께정도의 모델 코너부 힘이 발생되었음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 앞의 사출성형해석결과와 비교해서 매우 만족스러운 결과라고 할 수 있다. 특히 제품을 성형하는 과정에서 사출성형의 경우는 거의 3000톤에 이르는 형체력이 발생되었으나, 사출압축성형에서는 약150톤 정도로도 제품을 성형할 수 있어 결과적으로 제품이 낮은 압력으로 성형되어, 성형후 치수 안정성이 확보되었다고 볼 수 있다. 하지만 이러한 모델을 양산 제품으로서 사용하기 위해서는 몇 가지 해결해야 하는 문제가 있다. 따라서 이를 위해서는 좀 더 많은 연구가 진행되어야 한다고 판단된다.

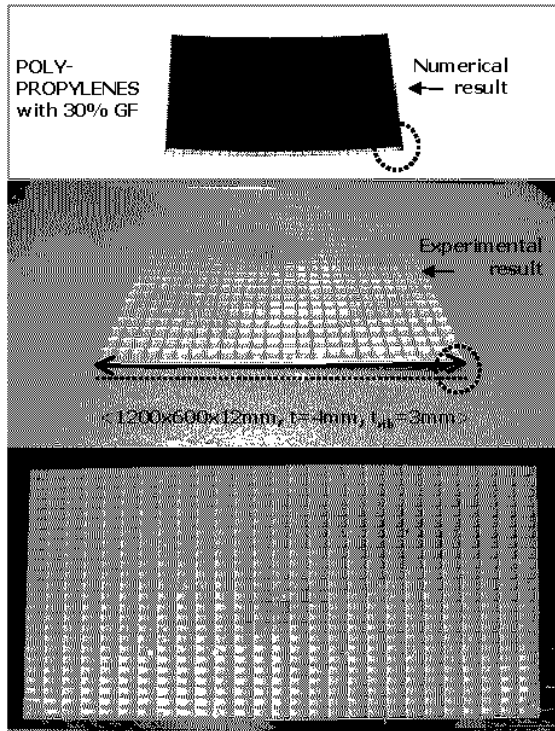


Fig. 9 Comparison of warpage between experimental and numerical result for ICM

5. 결론

본 연구에서는 초대형 직교 보강 플라스틱 평판 구조물의 성형특성에 대해 연구하였다. 즉 사출성형과 사출압축성형을 수행하여 이러한 성형과정이 제시된 모델의 휨에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 가로 세로가 각각 1800mm×600mm, 1200mm×600mm, 전체두께 12mm, 기저판 두께 4mm 그리고 리브의 두께는 3mm인 직교 리브 플라스틱 평판 구조물을 설계/제시 하였다. 제품의 크기 특성상 성형 과정에서 큰 휨이 발생될 수밖에 없는 구조이지만, 각각의 성형방법에 대해 엔지니어링 해석방법을 이용하여 성형조건의 최적화를 수행하였으며, 휨을 최소화 하였다. 사출성형의 경우는 제품의 최대길이 대비 3.3%정도의 휨까지 최소화 작업이 진행되었으며, 사출압축성형을 통해서 1.5%정도의 만족할 만한 결과를 도출하였다. 또한 성형프로세스 측면에서도 거의 유사한 모델에 대해 사출성형 대비 사출압축성형의 형체력이 약 6%정도임을 확인하였으며, 이러한 결과가 제품의 성형성 및 휨에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 즉, 이러한 사출성형과 사출압축성형 프로세스에 대한 해석적 실험적 접근을 시도하여, 성형 프로세스가 제품의 성형성에 미치는 영향성 결과를 제시할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원의 생산기술연구 사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. T. A. Osswald, L. S. Turng, and P. . Gramann, "Injection Molding Handbook," Hanser Gardner Publications, Inc., 2001.
2. 이성희, 황철진, 강정진, 허영무, "사출성형과정에서 직교리브가 구조물의 휨에 미치는 영향," 대한기계학회 춘계학술대회, 2004.
3. Sunghye Lee, C. J. Hwang, O. R. Kim, Y. M. Heo, "The Warpage of Orthogonal Stiffened Structures in Injection Molding," Polymer Processing Society 2004, ASIA/AUSTRALIA Meeting, 2004.
4. 정성택, 김진곤, 구본홍, "단섬유 보강 이방성 사출성형품의 휨 해석," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제8호, pp.1968~1977, 1999.
5. Choi, D.S. and Im, Y.T., "Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding," Composite Structures, Vol.47, pp.655~665. 1999.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. A. I. Isayev and R. K. Upadhyay, "Injection and Compression Molding Fundamentals," Marcel Dekker Inc., New York, 1987.
10. C. C. Lee and J. M. Castro, "Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing," Tucker III, C. L. (ed), Hanser Publisher, New York, 1989.
11. K. H. Huebner and E. A. Thronton, "The finite element method for engineers," Chap. 4 & 5, John Wiley & Sons, New York, 1982.