

급속 금형가열에 의한 박육 사출성형의 유동특성 개선에 관한 연구

박 근#. 김병훈¹

A Study on Improvement of Flow Characteristics for Thin-Wall Injection Molding by Rapid Mold Heating

Keun Park, Byung H. Kim

(Received September 9, 2005)

Abstract

The rapid thermal response (RTR) molding is a novel process developed to raise the temperature of mold surface rapidly to the polymer melt temperature prior to the injection stage and then cool rapidly to the ejection temperature. The resulting filling process is achieved inside a hot mold cavity by prohibiting formation of frozen layer so as to enable thin wall injection molding without filling difficulty. The present work covers flow simulation of thin wall injection molding using the RTR molding process. In order to take into account the effects of thermal boundary conditions of the RTR mold, coupled analysis with transient heat transfer simulation is suggested and compared with conventional isothermal analysis. The proposed coupled simulation approach based on solid elements provides reliable thin wall flow estimation for both the conventional molding and the RTR molding processes

Key Words : Injection Molding, Mold Heating, Rapid Thermal Response Molding, Thin Wall Molding, Finite Element Analysis, Flow Simulation, Solid Element

1. 서론

최근 휴대용 전자기기의 보급 확산에 의해 박육 사출성형(Thin-wall injection molding)의 수요가 점차적으로 증가되고 있다. 박육 사출성형은 일반적으로 제품의 두께가 1mm 이하이거나 유동길이와 두께의 비율이 100:1 이상인 제품으로 정의된다[1]. 사출성형 과정에서 고온의 수지 내부에서 상대적으로 온도가 낮은 금형면으로 열전달이 발생하고, 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로

알려져 있다[2]. 이러한 응고층의 두께는 보통 전체 두께에 비해 상대적으로 적은 부분으로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 두께가 매우 얇은 제품의 경우 응고층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(short shot)이 유발될 가능성이 높다. 예를 들어 두께 1mm의 제품인 경우 응고층의 총 두께는 0.5mm로 전체의 50%만이 유효 두께에 해당되어 수지의 유동특성이 현저하게 저하된다.

박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지 사용,

1. Dept. Mechanical & Industrial Engineering, University of Massachusetts Amherst, USA

교신저자: 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부,
E-mail: kpark@snut.ac.kr

강건한 구조의 금형설계 등이 적용되고 있는데 [1], 이러한 특화된 공정조건은 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제약이 뒤따른다. 그밖에 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 수지의 응고를 완화시킴으로써 유동특성을 개선하는 방법이 연구되었는데 [3~4], 이는 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. Yao 와 Kim 은 이러한 문제점을 극복하기 위해 1 초에 100°C 이상의 속도로 금형을 가열하는 급속 가열 사출성형 (Rapid Thermal Response molding; RTR molding) 공정을 개발하였으며 [5], 이를 적용하여 박육 사출성형의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구를 수행하였다 [6].

한편 박육 사출성형에서의 유동특성을 수치적으로 묘사하기 위한 연구도 진행되었다. Maloney 와 Poslinski [7], Mashih [8] 등은 박육 사출성형에서의 압력의 급속한 증가를 반영하기 위해 압력에 의존적인 점성모델을 사용하여 충진해석을 수행하였다. Yu 등 [9]은 Hele-Shaw 가정에 근거한 박막해석으로는 국부적인 박육 사출성형을 적절히 묘사할 수 없다는 연구결과를 발표하였다. Park [10]은 박막요소와 입체요소를 사용한 경우에 제품의 두께에 따른 해석의 신뢰도를 비교하였다.

본 연구에서는 수치해석을 통해 급속 가열 사출성형 기법을 사용한 박육 사출성형의 유동특성을 고찰하고, 실험결과와 비교해보고자 한다. 특히 급속 가열을 위한 금형의 열전달 특성을 반영하여 해석의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 수행하고자 한다.

2. 급속 가열 사출성형 공정

2.1 급속 가열 사출성형 시스템

고주파 전류가 도체에 흐를 때 전류가 도체 표면 가까이 집중하여 흐르는 현상, 즉 표피 효과 (skin effect)가 발생한다. 급속 가열 사출성형은 이러한 표피 효과를 이용하여 금형의 표면만을 순간적으로 가열하는 방법이다. 금형 표면만이 순간적으로 가열되기 때문에 금형의 냉각에 소요되는 시간도 여타 금형 가열 방법에 비하여 크게 감소하여, 생산성을 저하시키지 않으면서도 유동특성을 향상시킬 수 있다 [5]. Fig. 1 에 급속 가열 사출성형 시스템의 개념도를 도시하였다.

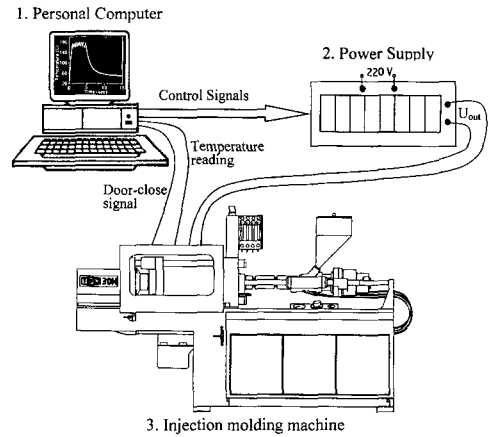


Fig. 1 The schematic setup for the RTR molding

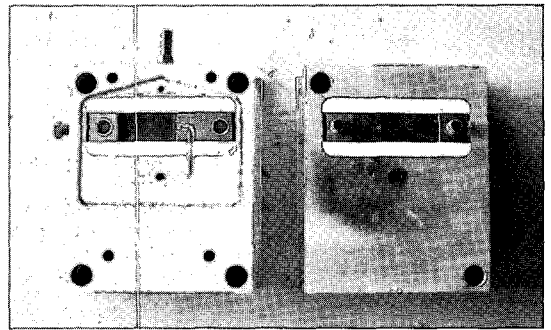


Fig. 2 RTR mold containing side insulation elements

2.2 금형의 온도분포 고찰

Fig. 2 에 박육 사각 평판 (폭 30mm, 길이 80mm, 두께 0.5mm) 성형을 위한 급속 가열 사출성형용 금형의 구조를 도시하였다. 금형은 성형부 측면에 전기적 절연을 위해 세라믹 절연체를 삽입한 구조로 제작되었다. 급속 가열시 발생하는 금형의 온도분포 고찰을 위해 열전달 해석을 수행하였다. 해석은 ANSYS™를 사용하였으며, 대칭성을 고려하여 단면의 1/4만을 해석하였다. 온도조건은 금형 표면이 6.5초동안 265°C로 가열되고, 성형후 20초동안 냉각되는 것으로 설정하였다. Fig. 3에 가열 직후의 금형 내부의 온도분포를 도시하였는데, 세라믹 절연체의 영향으로 인해 측면으로의 열전달이 상대적으로 적게 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 현상을 보다 정량적으로 고찰하기 위해

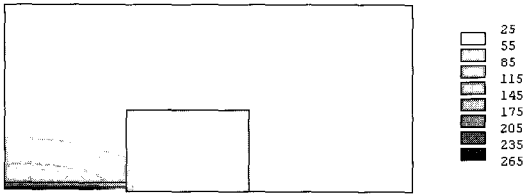


Fig. 3 Temperature distribution at the end of the heating stage

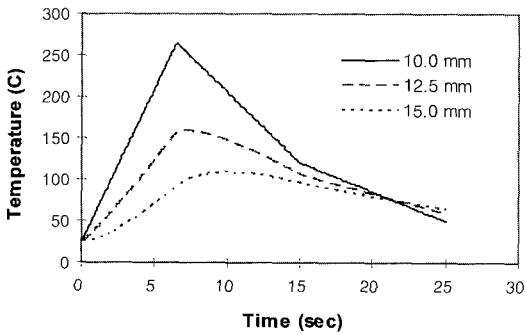


Fig. 4 Temperature variations on the mold surface at various locations

Fig. 4에 중심부로부터 10mm, 12.5mm, 15mm에서의 금형 표면 온도의 변화를 시간대별로 관찰하였다. 가열 직후의 시점에서 보았을 때, 캐비티 측면(중심부로부터의 거리 15mm)의 경우 최대온도가 100°C 정도로 유리전이온도 이하임을 알 수 있다.

3. 급속 가열 사출성형의 수치해석

3.1 사출성형의 이론적 배경

사출성형에서 고분자의 유동을 수학적으로 묘사하기 위한 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_i)_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + \tau_{ji,j} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = k T_{,ii} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

이때 점성계수(η)는 수정된 Cross 점성모델을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

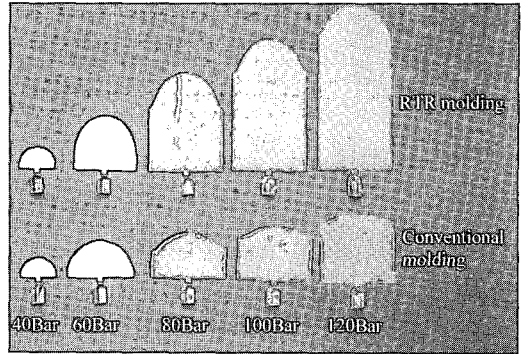


Fig. 5 Experimental results of flow patterns [6]

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 박육 사출에서의 압력 증가 효과를 고려하기 위해 다음과 같이 WLF 형태의 모델을 사용하여 계산하였다[7~8].

$$\eta_0(T, p) = D_1 \left[-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)} \right] \quad (5)$$

여기서 A_1, A_2, D_1 은 재료의 물성계수이며, T^* 는 유리 전이 온도로서 식 (6)과 같이 압력의 함수로 표현된다.

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (6)$$

식 (3)의 에너지방정식을 직교좌표계(Cartesian coordinates)에 대해 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

일반적으로 사출성형에 의해 성형되는 제품의 두께는 유동평면의 특성길이에 비해 매우 작기 때문에 평면내의 열전도량은 두께방향, 즉 급형 벽면으로의 열전도량에 비해 상대적으로 적어 무

시할 수 있다. 또한 두께 방향의 대류열전달 역시 상대적으로 미미하므로 식 (7)을 다음과 같이 간략화시킬 수 있다[11].

$$\rho C_{pl} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (8)$$

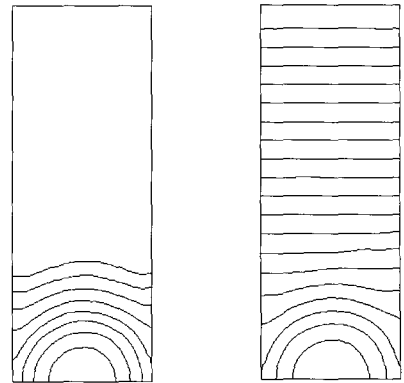
3.2 박막요소를 사용한 등온 충전해석

급속 금형 가열시의 유동특성을 고찰하기 위해 길이 80mm, 폭 30mm, 두께 0.5mm 인 박육 평판에 대해 충전해석을 수행하였다. 수지는 Bayer PC CD2000 을 사용하였으며, 사출온도는 265℃로 설정하였다. Fig. 5 에 와 상온(25℃)에서와 금형 가열시(265℃)의 유동패턴을 비교한 Yao 와 Kim 의 실험결과[6]를 도시하였다. 급속 가열의 경우 수지가 금형을 완전히 충전시킨 반면, 상온에서는 미성형이 발생하였고, 이때의 최대 유동길이가 27.5mm (전체 길이의 35% 해당)로 측정되었다.

Fig. 6 에 박막요소(shell element)를 사용한 2.5 차원 유동해석 결과를 도시하였다. 해석은 Moldflow Plastics Insight[®] 사용하였고, 금형 온도는 등온 경계조건으로 가정하였다. Fig. 5 의 실험결과와 비교하면 상온에서의 경우 유동패턴이 실험결과와 흡사한 반면, 265℃의 경우는 유동패턴이 수평선에 가깝게 예측되어 실험결과와 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 차이는 2.2 절에서 언급한 금형의 온도분포가 적절히 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 즉, 금형 표면의 중심부 온도가 265℃까지 올라가더라도 측면부는 절연체의 영향으로 인해 상대적으로 온도가 낮기 때문에 유동특성이 중심부에 비해 저하되고, 결과적으로 불룩한 형태의 유동선단이 야기된다. 그러나 등온 경계조건으로는 이러한 현상을 적절하게 묘사하기 어려운 한계점이 있다.

3.3 입체요소를 사용한 등온 충전해석

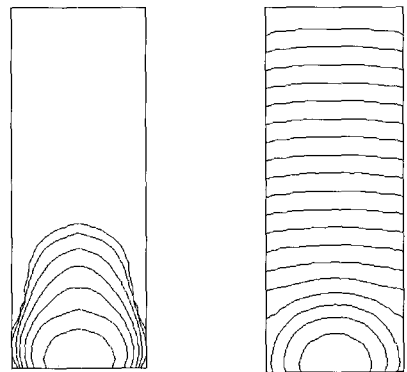
요소의 종류에 따른 유동특성을 비교하기 위해 3 차원 입체요소를 사용하여 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 해석은 3D TIMON[®]을 사용하였으며, 해석 영역에 대해 3 차원 6 면체 요소를 사용하여 격자를 생성하였다. Fig. 7 에 각각 상온 및 금형 가열시의 유동패턴을 비교하였다. Fig. 7 (b)의 경우 Fig. 6 (b)에 비해 다소 불룩한 형태이나 여전히 수평적인 유동패턴을 보여 실험결과와 차이를



(a) T_{mold} : 25°C

(b) T_{mold} : 265°C

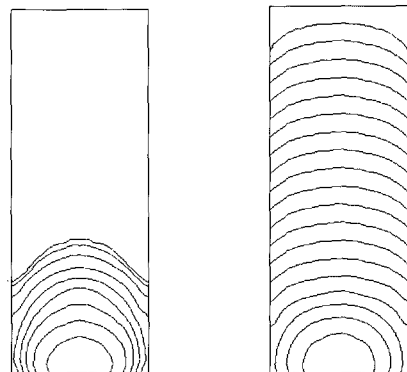
Fig. 6 Flow patterns for isothermal shell analysis



(a) T_{mold} : 25°C

(b) T_{mold} : 265°C

Fig. 7 Flow patterns for isothermal solid analysis



(a) T_{mold} : 25°C

(b) T_{mold} : 265°C

Fig. 8 Flow patterns for coupled solid analysis

보였으며, 이는 앞절의 실험결과와 마찬가지로 등온 경계조건이 부과되었기 때문으로 판단된다.

반면에 상온에서의 충전해석 결과(Fig. 7 (a))를 보면 측면에서의 유동 정체가 지나치게 과장되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 입체요소의 경우 식 (7)에서 기술한 바와 같이 측면으로의 열전달이 고려되었기 때문으로 분석된다. 해석 소프트웨어에서는 단일 급형재료(steel)의 열적 물성만이 입력될 뿐이며, 측면 절연체에 의한 단열 효과를 적절히 고려할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 이유로 식 (8)과 같이 평면 내의 열전도를 무시한 박막해석의 경우(Fig. 6 (a))가 보다 정확한 결과를 보임을 알 수 있다.

3.4 급형 열전달해석과 연계한 충전해석

앞절의 결과를 종합해보면 급속 가열 사출성형의 특성을 효과적으로 고려하기 위해서는 급형의 열전달 해석을 통해 얻어진 내부 온도분포를 사출성형 해석시 경계조건으로 설정해주어야 한다. 본 연구에서는 열전달 해석을 통해 계산된 급형 표면의 온도분포(Fig. 3 참조) 데이터를 사출성형 해석을 위한 입력파일로 변환해주었다. 사출성형 해석시 두께에 따른 온도변화를 적절히 고려하기 위해 위해 삼차원 육면체 요소를 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 8에 급형의 열전달해석과 연계한 유동해석 결과를 도시하였다. 상온에서의 유동패턴(Fig. 8 (a))과 고온에서의 유동패턴(Fig. 8 (b)) 모두 Fig. 5의 실험결과와 가장 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 차이는 측면 절연체가 상온에서는 급형의 냉각을 방지하는 역할을, 급형 가열시에는 급형 측면부의 온도 상승을 억제하는 효과를 갖기 때문으로 분석된다. 결과적으로 열전달 해석과의 연계를 통해 측면 절연체의 영향을 효과적으로 고려할 수 있었고, 이를 바탕으로 박육 제품 성형을 위한 급속 가열 성형의 유동특성을 보다 정확하게 예측할 수 있었다.

4. 결 론

이상으로 본 연구에서는 급형을 급속으로 가열하여 생산성을 크게 저하시키지 않으면서 박육 제품의 사출성형시 유동성을 개선하기 위한 제반 연구를 수행하였다. 이러한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 급속 가열 사출성형의 기본 원리 및 급형의 구조를 고찰하였고, 또한 급속 가열 및 냉각과정의 열전달 해석을 통해 급형 온도분포의 변화를 분석하였다.

(2) 급속 가열 사출성형법을 두께 0.5mm의 박육 제품의 사출성형에 적용하였고, 이때 유동특성이 일반 사출성형에 비해 획기적으로 향상됨을 확인할 수 있었다.

(3) 급속 가열 사출성형 공정의 유동특성을 분석하기 위해 전산모사를 수행하였다. 캐비티 측면부의 절연체에 의한 급형온도의 불균일 효과를 고려하기 위해 급형의 열전달 해석과 연계한 사출성형 충전해석을 실시하여 등온 조건에서의 해석결과와 비교하였다. 이러한 비교를 통해 급형의 온도변화를 고려한 해석방법이 보다 실험치와 근접한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

상기의 연구내용으로부터 급속 가열에 의한 사출성형 과정의 체계적인 예측이 가능해졌으며, 이러한 결과를 토대로 향후 급속 가열에 의한 사출성형 기술을 응용하여 실제 성형이 어려운 제품의 제작과정에 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. M01-2004-000-10140-0).

참 고 문 헌

- [1] R. Seldén, 2000, Thin wall molding of engineering plastics-a literature survey, J Injection Molding Tech., Vol. 4, pp. 159~166.
- [2] F. Jim, 1995, Thin wall molding differences in processing over standard injection molding, SPE ANTEC, Vol. 41, pp. 430~433.
- [3] B. H. Kim, N. P. Suh, 1986, Low thermal inertia molding, Polym. Plast. Technol. Eng., Vol. 25, pp. 73~93.
- [4] K. M. B. Jansen, A. A. M. Flaman, 1994, Construction of fast-response heating elements for injection molding applications, Polym. Eng. Sci., Vol. 34, pp. 894~897.

- [5] D. Yao, B. Kim, 2002, Development of rapid heating and cooling systems for injection molding applications, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 2471~2481.
- [6] D. Yao, B. Kim, 2002, Increasing flow length in thin wall injection molding using a rapidly heated mold, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 415, pp. 819~832.
- [7] R. P. Maloney, A. J. Poslinski, 1998, Viscosity pressure dependence and material degradation effects on thinwall mold filling simulation, *SPE ANTEC*, Vol. 44, pp. 542~546.
- [8] M. Mahishi, 1998, Material characterization for thin wall molding simulations, *SPE ANTEC*, Vol. 44, pp. 547~553.
- [9] L. Yu, L. J. Lee, K. W. Koelling, 2003, Flow and heat transfer simulation of thin-wall injection molding with microstructures, *SPE ANTEC*, Vol. 49, pp. 602~606.
- [10] K. Park, 2004, A study on flow simulation and deformation analysis for injection-molded plastic parts using three-dimensional solid elements, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 43, pp. 1569~1585.
- [11] H. H. Chiang, C. A. Hieber, K. K. Wang, 1991, A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I: Formulation, *Polym. Eng. Sci.* Vol. 31, pp. 116~124.