

< 논문 >

마이크로 패턴을 가진 초박육 사출성형의 성형성 개선

권오경* · 윤재호* · 박 근**

(2006년 9월 15일 접수, 2007년 4월 24일 심사완료)

Improvement of Moldability for Ultra Thin-Wall Molding with Micro-Patterns

Oh-Kyung Kwon, Jae-Ho Yun and Keun Park

Key Words: Injection Molding(사출성형), Mold Heating(금형 가열), Thin Wall Molding(박육 사출성형), Micro Pattern(미세 패턴), Flow Simulation(유동해석)

Abstract

The rapid thermal response(RTR) molding is a novel process developed to raise the temperature of mold surface rapidly in the injection stage and then cool rapidly to the ejection temperature by air or water. The objectives of this paper are to investigate the effect of mold temperature, pressure and thickness of micro pattern molding and to provide a optimization of RTR injection molding for micro pattern from Moldflow simulation. Optimal minimum temperature and pressure was found without shortcut according to thickness. Filling percentage was influenced by glass transition temperature with the kinds of resin. Optimal temperature is slightly higher than glass transition temperature irrespectively of pressure, thickness, the kinds of resin in the micro pattern molding.

1. 서 론

최근 디스플레이 장치나 정보 저장 매체의 발전으로 인해 마이크로 사출성형에 대한 관심이 높아지고 있다. 마이크로 사출성형은 제품의 전체 크기가 수 mm 이하인 정밀 부품의 사출성형 기술로 생각할 수 있는데, 마이크로 기어 등이 대표적인 예이다. 한편 전체 제품의 크기는 수십 mm 이상의 대면적에 마이크로 혹은 나노 스케일의 미세 구조물이 포함된 경우도 역시 마이크로 사출성형으로 간주할 수 있는데, CD, DVD 등의 광디스크나 LCD 백라이트용 도광판 등이 이러한 범주에 해당한다.⁽¹⁾ 특히 후자의 경우 사출성형시

용융된 고분자수지가 미세패턴 충전시 유동성이 급속하게 저하되어 패턴의 전사에 많은 어려움이 뒤따른다.⁽²⁾

미세패턴 충전시 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지사용, 강건한 구조의 금형 설계 등이 적용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나, 이러한 특화된 공정조건으로 인해 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제한을 받게 된다. 그 해결방법으로 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 수지의 응고를 완화시킴으로써 유동특성을 개선하는 방법이 연구되고 있다,^(3,4) 이는 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. Yao와 Kim은 이러한 문제점을 극복하기 위해 1초에 100℃ 이상의 속도로 금형을 가열하는 급속 가열 사출성형(Rapid Thermal Response molding; RTR molding) 공정을 개발하였으며,⁽⁵⁾ 이를 적용하여 마이크로 패턴을 가진 사출성형품의 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구를

† 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀
E-mail : kwonok@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330

* 회원, 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

** 회원, 서울산업대학교 기계설계-자동화공학부

수행하였다.⁽⁶⁾ Park과 Kim은 박육 사출성형에 대해서 급형가열에 따른 온도변화를 고려한 유동특성의 향상에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 급속 급형가열 기법을 사용한 마이크로 패턴 사출성형의 유동특성을 고찰하고, 실험결과와 비교하여 검증하였다. 또한 마이크로 패턴의 두께, 압력, 수지온도 조건에 대한 충전을 고찰하여 급형가열에 적용할 수 있는 최소의 가열 온도와 사출압력을 알아보려고 한다.

2. 마이크로 패턴의 사출성형

2.1 성형품의 형상특성

본 연구에서는 급형가열에 의한 초박육 제품의 성형성을 분석하기 위해 Yao와 Kim⁽⁶⁾의 실험결과와 동일한 형상의 제품을 선정하였다. Fig. 1에 마이크로 패턴을 가진 성형품의 개략적인 형상을 도시하였다. 전체 제품의 두께는 2.0mm이며, 여기에 두께 40 μ m, 폭 225 μ m, 깊이 225 μ m, 높이는 400 μ m인 미세 격벽으로 구성되어 있다. 격벽은 가로와 세로 각각 25칸으로 총 625개의 격벽으로 구성되어 있다.

여기서 격벽의 두께는 전체 두께의 1/50에 해당하는 초박육 성형으로 볼 수 있으며, 격벽의 높이와 두께의 비는 10으로 고세장비 패턴에 해당한다. 이러한 초박육 고세장비 패턴은 일반적인 사출성형 조건에서는 성형이 매우 어려워 보다 차별화된 공정조건의 선정이 필요하다.

2.2 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 사출성형 시스템은 이러한 표피 효과를 이용하여 금형의 표면만을 순간적으로 가열하는 방법이다. 급형 표면만이 순간적으로 가열되기 때문에 금형의 냉각에 소요되는 시간도 여타 급형 가열 방법에 비하여 크게 감소하여, 생산성을 저하시키지 않으면서도 유동특성을 향상시킬 수 있다.⁽⁵⁾

Fig. 2는 급속 반응 사출성형 시스템의 개념도를 도시하고 있으며, Fig. 3에는 급속 가열 시스템을 사용하여 금형을 가열한 경우 가열시간에 따른 금형 표면의 온도 변화⁽⁶⁾를 도시하였다. 이중 2.0초간 가열한 경우의 그래프를 보면 온도가

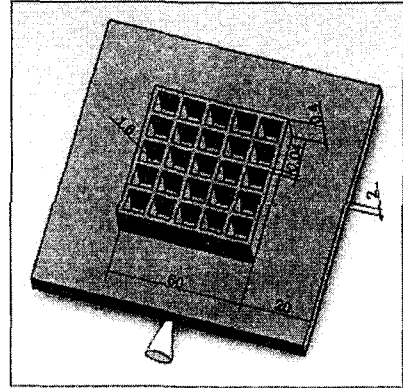


Fig. 1 Schematic geometry of the analysis model with micro patterns

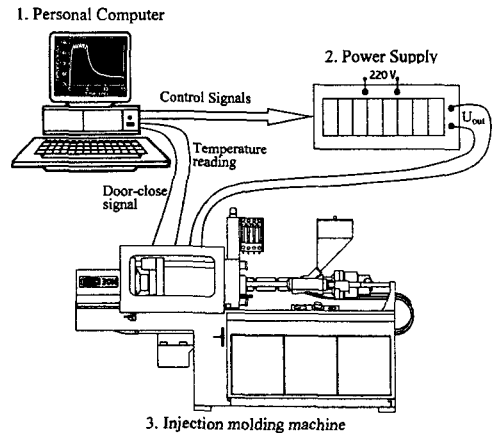


Fig. 2 Schematic setup for the RTR molding

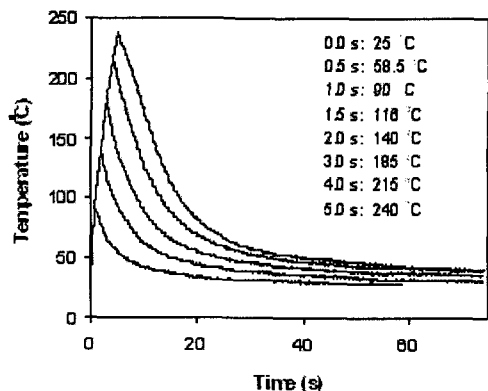


Fig. 3 Temperature profiles for the RTR molding

최대 140℃까지 상승되어 대부분 수지의 유리전이 온도 이상으로 증가함을 알 수 있다. 또한 가열 완료 후 10초 후에 50℃이하로 온도가 내려감을 알 수 있는데, 이는 금형 표면만이 가열되어 금형 전체적인 온도 상승이 이루어지지 않았기 때문이다. 따라서 전체적인 성형시간의 큰 증가 없이 성형성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

3. 급속 가열 사출성형의 수치해석

3.1 사출성형의 이론적 배경

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u)_i, i = 0 \tag{1}$$

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

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

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

$$n(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{n_0(T, p)}{1 + \left(\frac{n_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \tag{4}$$

여기서 n은 지수법칙 지표(power-law index), τ^* 는 전단 전이응역(transition stress), n_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.⁽⁷⁻⁹⁾

$$n_0(T, p) = D_1 \left[- \frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \tag{5}$$

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

$$T^* = D_2 + D_3 p \tag{6}$$

3.2 금형온도에 따른 유동특성 고찰

마이크로 패턴에서 금형가열온도에 따른 충전율을 고찰하기 위해 유동해석을 수행하였다. 수지는 High-density polyethylene (HDPE)를 사용하였으며, 수지의 유리전이 온도는 105℃이다. 사출온도는 250℃, 충전시간은 0.1초로 설정하였다. 해석은 Moldflow Plastic Insight (MPI) 5.0을 사용하였으며, 마이크로 패턴을 적절히 묘사하기 위해 요소의 수가 증가하는 관계로 대칭성을 고려하여 1/2만을 해석하였다.

Fig. 4에 금형온도를 60, 90, 116, 140℃로 변화시켜가며 수행하여 얻어진 유동패턴을 도시하였다. 이때 사출압력은 30MPa로 설정하였다. 금형온도 60℃의 경우 마이크로 격벽 부분이 거의 충전되지 않는 것으로 나타난 반면, 금형온도가 유리전이 온도보다 약간 낮은 90℃의 경우에는 게이트에 가까운 부분은 충전되지 않고 먼 부분이 충전됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 격벽 부분에서의 급격한 두께 감소로 인해 해당 부위에서의 유동의 정체 현상이 발생한 상태에서 바닥면의 충전 완료 후 여분의 수지가 고화가 상대적으로 덜 진행된 후면부터 충전되기 때문으로 분석된다. 한편 금형온도가 유리전이 온도 이상인 116℃ 및 140℃의 경우에는 100% 충전이 완료됨을 알 수 있다.

Fig. 5에 금형온도에 따른 충전율을 Yao의 실험결과⁽⁶⁾와 비교하였다. 전반적으로 60℃이하에서는 마이크로 패턴이 거의 전사되지 않은 반면 100℃이상에서 일정 비율로 전사되어가는 과정이 실험결과와 일치하여 해석의 신뢰성을 입증할 수 있었다. 다만 수지의 유리전이온도 부근인 80~100℃ 영역에서 해석결과로부터 얻어진 충전율이 실험결과와 다소 상이하게 나타났으며, 특히 미충진의 형태 및 발생 위치에서도 차이가 발생하였다. 이는 제품의 바닥면과 마이크로 패턴과의 급격한 두께 변화에 따른 국부적인 유동의 변화가 효과적으로 고려되지 못하였기 때문으로 분석되며, 이를 적절히 묘사하기 위해서는 3차원 요소를 사용한 해석을 수행해야 한다.⁽²⁾

3.3 사출압력과 금형온도의 영향 분석

Fig. 6은 금형의 가열온도와 사출압력에 따른

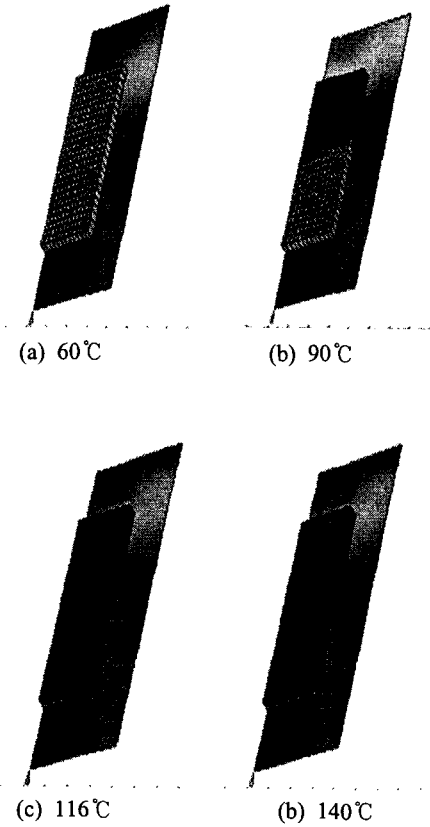


Fig. 4 Comparison of flow patterns for various mold temperatures

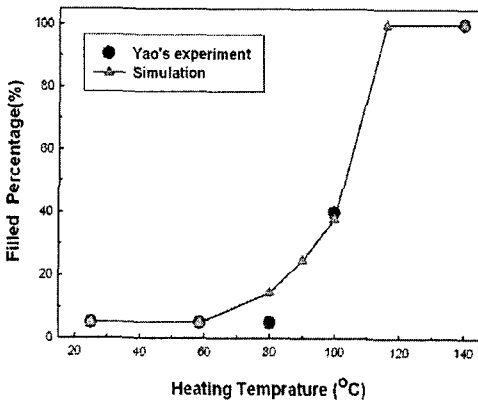


Fig. 5 Comparison of estimated filling ratio with experimental results

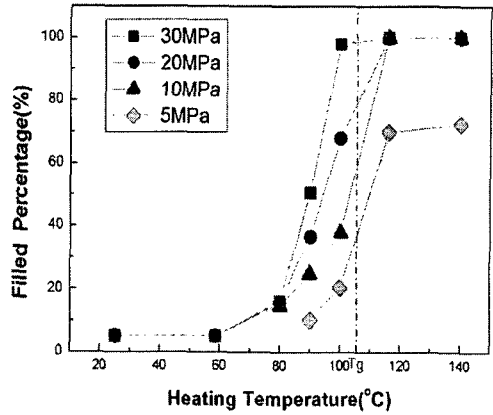


Fig. 6 Comparison of filling percentages with various mold temperatures and pressures

충전율을 알아보기 위해 사출압력을 5, 10, 20, 30MPa로 변화시키면서 해석을 수행한 것이다. 금형의 가열온도가 증가하면서 압력에 관계없이 유리전이온도(T_g) 부근에서 급격한 충전을 향상을 볼 수 있었다. 이는 금형 내부표면을 유리전이온도 이상으로 가열하게 되면 사출 충전시 금형내부 표면부에서 급격한 응고가 생기는 것을 방지하며, 폴리머가 유리전이온도 이상이 되면 폴리머의 결합이 느슨해져 유동성을 많이 가지는 특성과 관계가 있는 것으로 판단된다. 반면에 30MPa의 경우는 높은 압력으로 인해 비교적 낮은 온도 영역에서 충전이 이루어졌다. 높은 압력은 잔류응력이나 복굴절 등을 수반하므로 낮은 압력의 상태인 10MPa, 금형가열온도 116°C가 최적의 성형조건임을 알 수 있다.

3.4 격벽의 두께 변화에 대한 충전해석

전술한 결과에서 확인할 수 있듯이 급격한 두께변화가 유동특성에 많은 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 유동정체가 일어나는 마이크로 패턴의 두께에 따라 적절한 사출압력과 금형가열온도를 예측하기 위한 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 마이크로패턴 격벽의 두께를 40에서 20 μ m로 수정한 모델을 해석하여 충전율을 나타낸 그래프이다. 전이온도 105°C 근처에서 급격한 유동향상을 보여주는 것은 Fig. 5의 해석결과와 유사한 반면 얇은 격벽의 두께(20 μ m)만큼 더 높은 사출압력(20MPa)을 필요로 함을 알 수 있다. 그

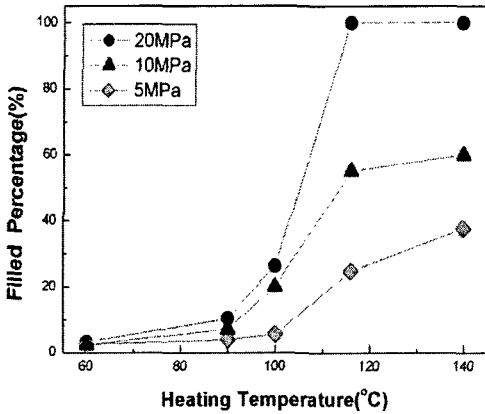


Fig. 7 Comparison of the filling ratio with various mold temperatures (thickness: 20 μm)

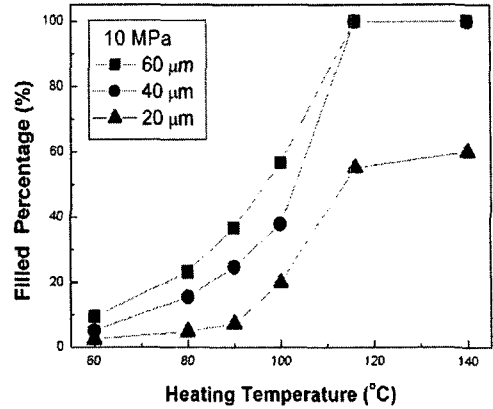


Fig. 9 Comparison of the filling ratio with various pattern thicknesses at 10MPa

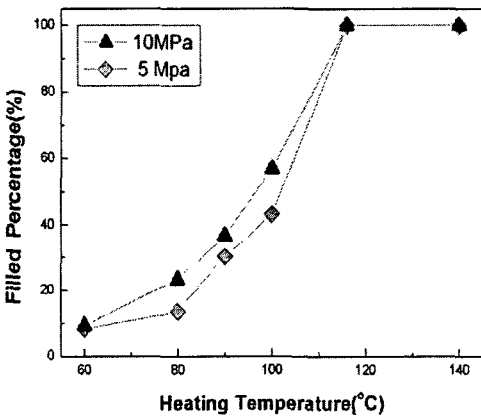


Fig. 8 Comparison of the filling ratio with various mold temperatures (thickness: 60 μm)

리고 낮은 압력에서도 전이온도 근처에서 충전율의 급격한 향상을 보이며 전이온도 이후로는 완만한 유동특성 향상을 볼 수 있었다. 즉, 전이온도 구간보다 높은 영역에서는 가열의 효율이 떨어지기 때문에 전이 온도구간 이상의 가열은 필요가 없음을 알 수 있다.

Fig. 8는 격벽두께 60 μm에서의 충전율을 그래프로 도시한 것이다. 전이온도 근처에서 급격한 유동향상을 보여주는 경향은 타 결과와 유사한 반면, 완전 충전을 위해 필요한 압력은 5MPa이었다. 전이온도 부근으로 가열한 상태라면 격벽의 두께가 두꺼워짐에 따라 낮은 압력에서도 100% 충전됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 10MPa의 사출압력에서 격벽의 두께에 따른 충전율 비교한 그림이다. 금형 가열온도가 100°C가 되는 경우에는 두께 60, 40, 20 μm 순으로 충전율의 차이가 나타났으며, 116°C가 되면 60, 40 μm의 경우 충전율이 100%가 되지만, 20 μm인 경우는 55%로 나타났다. 따라서 20 μm의 경우 Fig. 6에 나타낸바와 같이 20MPa의 보다 높은 사출압력이 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 마이크로 제품 성형시 생산성을 크게 저하시키지 않으면서 유동성을 개선시키기 위하여 급속 금형가열 사출성형에서 적절한 금형가열 온도와 사출압력을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 이러한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 생산성 향상을 위해 미성형이 발생하지 않는 한도내에서 최저의 온도로 금형을 가열해야 하는데 이는 전이온도보다 10°C정도 높은 온도임을 알 수 있었다.

(2) 압력조건에 상관없이 전이온도 근처에서 충전율의 급격한 향상을 보이며, 전이온도 이후로는 완만한 유동특성 향상을 볼 수 있었다.

(3) 마이크로 패턴의 두께에 따른 충전율 해석을 통해 60, 40, 20 μm의 두께에서 각각 5, 10, 20MPa의 사출압력이 최적의 사출조건임을 확인할 수 있었다.

상기의 연구 결과부터 마이크로 패턴의 두께에

다른 최적의 금형가열온도와 사출압력을 알 수 있었으며, 차후 고주파 유도가열의 실무 및 실험시 조건으로 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 일환으로 수행중인 「기능성고분자소재 성형용 마이크로 금형시스템」의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yoo, Y. E., Seo, Y. H., Je, T. J. and Choi, D. S., 2005, "Injection Molding Technology for Micro/Nano Pattern," *J Kor. Soc. Precision Engng.*, Vol. 22, pp. 23~29.
- (2) Yu, L., Koh, C. G., Lee, L. J. and Koelling, K. W., 2002, "Experimental Investigation and Numerical Simulation of Injection Molding with Micro-Features," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 871~888.
- (3) Kim, B. H. and Suh, N. P., 1986, "Low Thermal Inertia Molding," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73~93.
- (4) Jansen, K. M. B. and Flaman, A. A. M., 1994, "Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp. 894~897.
- (5) Yao, D. and Kim, B., 2002, "Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 2471~2481.
- (6) Yao, D. and Kim, B., 2002, "Injection Molding High Aspect Ratio Microfeature," *J Injection Molding Tech.*, Vol. 6, pp. 11~17.
- (7) Park, K. and Kim, B., 2006, "A Study on Improvement of Flow Characteristics for Thin-Wall Injection Molding by Rapid Mold Heating," *Trans. of Mat. Proces.*, Vol. 15, pp. 15~20.
- (8) Chiang, H. H. Hieber, C. A. and Wang, K. K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Post Filling Stages in Injection Molding," Part I: Formulation, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 31, pp. 116~124.
- (9) Park, K. Ahn, J. H. and Choi, S. R., 2002, "Application of Design of Experiments and Numerical Analysis to Optimal Design for Injection Molding Processes of Electrical Parts," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 7, pp. 1348~1356.