

고세장비 미세형상 사출성형시 금형온도의 영향 고찰

박정민* · 도범석* · 엄혜주** · 박근†

Effect of Mold Temperature on Injection Molding of Micro-Features with High Aspect Ratio

Jung-Min Park, Bum-Suk Do, Hye-Ju Eom and Keun Park

Key Words : Injection Molding(사출성형), Mold Heating(금형 가열), Micro Feature(미세형상); Flow Simulation(유동해석), Thin-Wall Molding(박육사출성형)

Abstract

Thin-wall injection molding is associated with many advantages, including increased portability, the conserving of materials, and the reduction of the molding cycle times. In the application of the thin-wall molding, a considerable reduction of the effective flow thickness results in filling difficulty. High-frequency induction is an efficient way to overcome this filling difficulty by means of heating the mold surface by electromagnetic induction. The present study applies the induction heating to the injection molding of thin-walled micro structures with high aspect ratio. The feasibility of the proposed heating method is investigated through a numerical analysis. The estimated filling characteristics of the micro-features are investigated with variations of mold temperature and part thickness, of which results are also compared with experimental measurements.

1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자 제품을 제작할 수 있는 생산기술로서 제품의 경량화와 생산성 향상을 위해 많이 사용되는 방법이다. 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 백

라이트용 도광판 등이 이러한 범주에 해당한다. 특히 후자의 경우 사출성형시 용융된 고분자수지가 미세패턴 충전시 유동성이 급속하게 저하되어 패턴의 전사에 많은 어려움이 뒤따른다.^(1,2)

사출성형 과정을 살펴보면 고온으로 분사된 고분자수지가 금형 벽면을 채우며 성형이 이루어지는데, 이 과정에서 고온의 수지 내부에서 금형면으로 열전달이 발생하면서 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 두께가 매우 얇은 제품의 경우 응고층의 상대적인 비율이 증가하게 되고, 결과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(short shot)을 유발할 가능성이 높다. 따라서 초미세 사출성형의 경우 유동특성을 개선하기 위해 일반적인 경우와는 차별화된 사출성형 조건의 적절한 설정이 필요하다.⁽³⁾

사출성형시 발생하는 고화층을 제거하기 위해 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하는 방법이 연구되었는데,^(4,5) 이는 금형의 가열과 냉각에 소요

† 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

E-mail : kpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6358 FAX : (02)974-8270

* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 원

** 서울산업대학교 에너지환경경대학원

되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사출금형에 고주파 전류를 인가할 때 발생하는 근접효과(proximity effect)를 이용하여 급속으로 금형을 가열함으로써 미세패턴 사출성형시 유동특성을 개선하기 위한 실험적인 연구가 수행되었다.⁽⁶⁾ 그러나 상기 방법은 금형의 절연을 위한 구조상의 제약이 있어 복잡한 형상의 금형에 적용하기에는 다소 제한이 따른다.⁽⁷⁾

최근에는 금형 구조의 변경 없이 비접촉 형태로 가열이 가능한 고주파 유도가열(high-frequency induction heating)을 적용하여 사출금형의 표면만을 급속으로 가열하기 위한 연구가 진행되어왔다. Chen 등⁽⁸⁾은 고주파 유도가열을 사용하여 마이크로 형상 사출성형에 활용하였고, Kim 등⁽⁹⁾은 도광판 나노 패턴의 성형성 향상을 위해 고주파 유도 가열을 적용하였다. 또한 Park 등⁽¹⁰⁾은 마이크로 치형을 포함한 박육 제품의 성형에 고주파 유도 가열 기술을 적용하였다.

본 연구에서는 고세장비 미세형상의 사출성형시 성형성을 향상시키기 위해 고주파 유도가열을 적용하였다. 특히 사출성형 충전과정의 유한요소해석을 통해 다양한 두께의 마이크로 리브의 성형특성을 비교함으로써 금형온도가 미세형상의 성형성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 또한 상기 해석결과와 실험 결과와의 비교를 통해 해석의 신뢰도를 검증하도록 하겠다.

2. 고세장비 미세형상의 사출성형해석

2.1 사출성형의 충전과정 해석

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

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

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

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

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

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

여기서 n 은 지수, τ^* 는 전단 전이응력(transition stress), η_0 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 미세형상 사출에서의 압력증가 효과를 고려하기 위해 식 (5)와 같이 WLF 형태의 모델을 사용하여 계산하였다.⁽⁷⁾

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

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

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

2.2 미세형상을 포함한 사출성형품 충전해석

고세장비 미세형상을 포함한 사출성형 특성을 살펴보기 위해 Fig. 1 과 같이 6 개의 마이크로 리브를 포함한 사각평판에 대한 해석을 수행하였다. 사각평판의 치수는 길이 60mm, 폭 30mm, 두께 1.5mm 이며, 리브의 두께는 40, 60, 80, 100um 로 Fig. 1 에는 마이크로 리브의 두께를 10 배 확대하여 도시하였다.

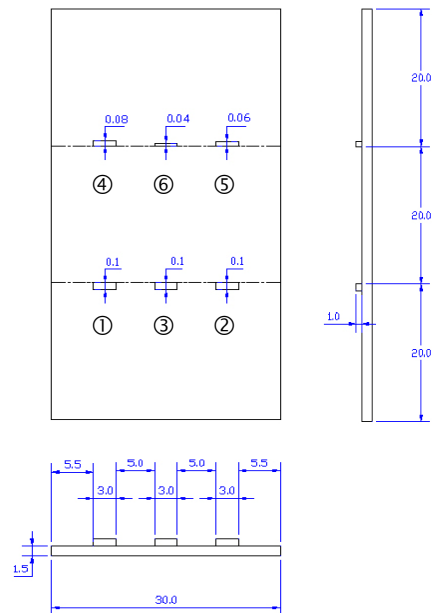


Fig. 1 Dimension of a rectangular plate with micro-ribs

Table 1 Comparison of thermal and electric properties

Rib no.	Position	Thickness (um)	Aspect ratio
1	front / side	100	10.0
2	front / side	100	10.0
3	front / center	100	10.0
4	rear / side	80	12.5
5	rear / side	60	16.7
6	rear / center	40	25.0

Table 1 에 6 개의 마이크로 리브에 대한 위치, 두께 및 세장비를 요약하였다. 우선 위치에 따른 유동특성을 비교하기 위해 전열에 동일한 두께 (100um)의 리브를 3 개 설치하였고, 후열에는 두께의 영향을 분석하기 위해 두께를 40, 60, 80um 로 변화시켜가며 리브를 설치하였다.

사출성형 해석은 Moldflow Plastic Insight®을 사용하였다. 수지는 제일모직 ABS SR-0320 을 사용하였으며, Fig. 2 에 유동안내부를 포함한 해석모델을 도시하였다. 사출온도는 230℃로 설정하였고, 금형 온도를 150℃와 200℃로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. Fig. 3 의 해석결과를 보면 전열에 위치한 리브의 경우 모두 충전이 완료되었으며, 위치와 관계없이 동일하게 수지의 충전이 진행되었음을 알 수 있다. 반면에 후열에 위치한 리브는 모두 미성형이 발생하였으며, 리브 두께가 얇을수록 미성형의 정도가 심함을 알 수 있다.

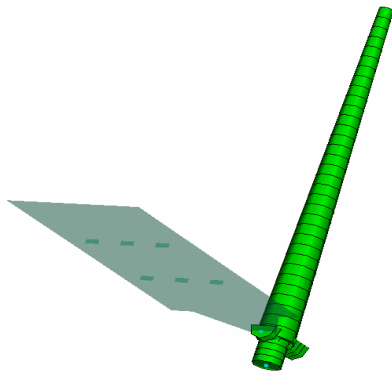


Fig. 2 Analysis model with a delivery system

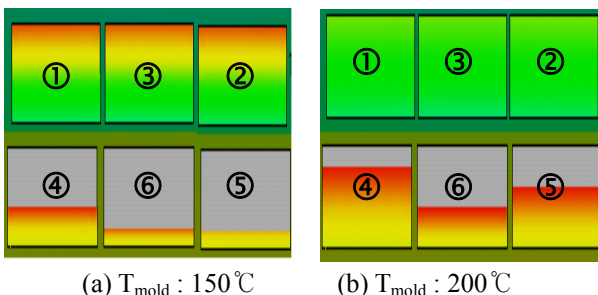


Fig. 3 Schematic description of the heating section

2.3 금형온도에 따른 성형성 비교

금형 온도에 따른 마이크로 리브의 성형성을 비교하기 위해 금형온도를 100℃부터 230℃까지 변화시켜가며 해석을 수행하였다. Fig. 4에 금형온도에 따른 리브의 두께(3번~6번)별 성형성을 비교하였다. 이때 2.2절에서 언급한 바와 같이 전열에 위치한 3개의 두께 0.1mm 의 리브는 동일한 성형성을 보인 관계로 1, 2번 리브는 제외하였다.

3번 리브, 즉 두께가 0.1mm 인 경우 금형온도가 160℃ 이상일 경우 충진이 완료됨을 확인할 수 있었다. 이는 해당 수지의 유리전이온도가 107℃ 보다 높은 온도이며, 초박육 사출성형의 경우 유리전이온도 이상의 온도로 금형온도를 유지시켜주어야 함을 알 수 있다. 반면에 두께가 0.08mm 인 4번 리브는 금형온도가 증가함에 따라 서서히 성형높이가 증가되다 금형온도가 사출온도와 동일해지는 230℃일 경우에만 충진이 완료됨을 확인할 수 있었다. 한편 두께가 0.06, 0.04mm 인 경우에는 금형온도의 증가에 의한 성형성 향상 속도가 점차적으로 완화되며 금형온도가 230℃인 경우 각각 70%, 50%정도의 충전율을 보임을 알 수 있다.

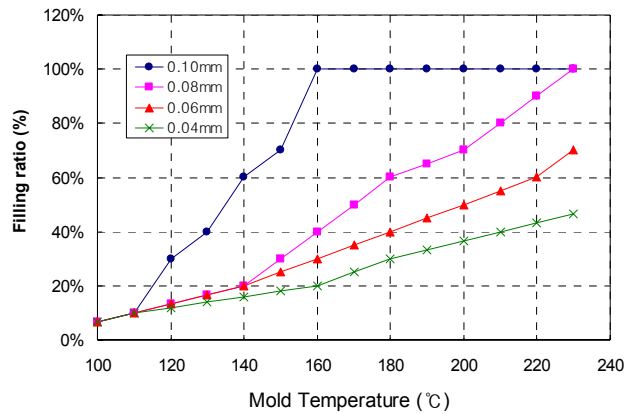


Fig. 4 Comparison of the filling ratio w.r.t. various mold temperatures and the rib thicknesses

3. 실험적 검증

3.1 고주파 유도가열을 사용한 금형가열 시스템

고주파 유도가열은 교번자계 내부에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 또는 히스테리시스손을 이용하여 피가열체를 가열시키는 방식이다. 피가열체가 도체인 경우 고주파 유도가열에 의해 피가열체의 표면에 와전류(Eddy current)가 유도되고 이로 인한 저항 손실에 의해 표면에 열이

발생된다. 따라서 피가열체에 에너지를 짧은 시간에 인가할 수 있으므로 급속 가열이 가능하고 표면층만을 가열할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 사출금형의 급속가열을 위한 고주파 가열 시스템을 구축하였다. 구성 요소를 살펴보면 고주파 가열기, 가열코일, 코일이 연결된 보조 컨트롤 박스, 냉각장치 및 데이터 처리장치로 구성된다. 실험에 사용된 고주파 가열기는 (주)백마고주파의 BMHF-P227 모델을 사용하였으며, 출력전력은 최대 15 kW 이다. 실험장치는 고주파 가열기 및 보조 컨트롤 박스를 Fig. 5와 같이 이동식 프레임에 장착하여 사출성형기에 삽입이 가능하도록 구성하였다.



Fig. 5 Experimental setup for induction heating

3.2 금형온도에 따른 성형성 비교

마이크로 리브를 포함한 사각평판 사출성형을 대상으로 고주파 유도가열 실험을 실시하였다. 고주파 가열기의 출력은 2.5kW로 설정하였고, 160kHz의 주파수로 3~5초에 걸쳐 가열하였다. 특히 가열효율 제고를 위해 금형 온도조절기를 사용하여 금형의 온도를 90℃로 유지시켜준 상태에서 금형표면에 대해 고주파가열을 수행하였다.

Fig. 6에 금형온도에 따른 리브의 두께(3번~6번) 별 성형성을 비교하였다. 두께가 0.1mm인 3번 리브는 4초 이상 가열을 실시한 경우 충전이 거의 완료됨을 확인할 수 있었다. 반면에 두께가 0.08, 0.06, 0.04mm인 경우에는 가열시간의 증가에 의한 성형성 향상 속도가 점차적으로 완화된 채 가열시간이 5초인 경우 각각 85%, 73%, 61%의 충전율을 보였다. 특히 리브의 두께에 따른 성형성의 차이는 Fig. 6의 해석결과와 유사함을 알 수 있다.

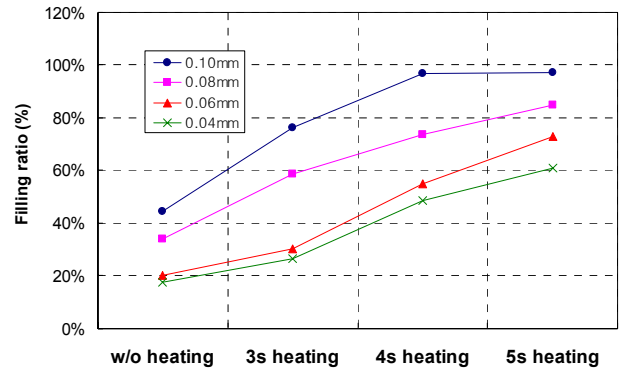


Fig. 6 Comparison of the filling ratio w.r.t. various mold temperatures and the rib thicknesses

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 망크로 형상의 사출성형시 금형온도가 미세형상의 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사출성형 충전과정의 유한요소해석을 통해 다양한 두께의 마이크로 리브의 성형특성을 비교함으로써 금형온도가 미세형상의 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다.
- (2) 해석결과로부터 두께 0.1mm의 마이크로 리브의 경우 금형온도가 수지의 유리전이온도 이상으로 유지되어야 충전이 완료되는 반면 두께 0.1mm 이하인 경우에는 금형온도를 수지의 용융온도까지 유지해도 미성형이 발생됨을 확인하였다.
- (3) 고세장비 미세형상의 사출성형시 성형성을 향상시키기 위해 고주파 유도가열을 적용하였고, 가열조건이 미세형상의 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다.

상기 연구결과로부터 향후 박육 사출성형, 초미세사출성형 등의 고부가가치 기술에 고주파 유도가열을 적용이 가능할 것으로 전망되며, 특히 제안된 해석기법을 활용함으로써 개발과정의 체계화 및 효율화를 추구할 계획이다.

후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업(사업명: 초정밀 마이크로 부품성형을 위한 공정설계 및 해석인력 양성)의 연구결과로 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) Yu, L., Koh, C. G., Lee, L. J., Koelling, K. W., 2002, "Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro- features", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 871 ~ 888.
- (2) Kwon, O. K., Yun, J. H. and Park, K., 2007, "Improvement of moldability for ultra thin-wall molding with micro-patterns," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 31, pp. 556 ~ 561.
- (3) Seldén, R., 2000, "Thin wall molding of engineering plastics – a literature survey," *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 4, pp. 159 ~ 166.
- (4) Kim, B. H. and Suh, N. P., 1986, "Low thermal inertia molding,," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73 ~ 93.
- (5) 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.
- (6) D. Yao and B. Kim, 2002, "Injection Molding high aspect ratio microfeature", *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 6, pp. 11 ~ 17.
- (7) Park, K., Kim, B. and Yao, D., 2006, "Numerical simulation for injection molding with a rapidly heated mold, Part I: Flow simulation for thin wall parts," *Polym. Plast. Technol. Engng.* Vol. 45, pp. 897 ~ 902.
- (8) Chen, S. C., Jong, W. R., Chang, Y. J., Chang, J. A., and Cin, J. C., 2006, "Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology," *J. Micromech, Microeng.*, Vol. 16, pp. 1783 ~ 1791.
- (9) S. Kim, C. S. Shiau, B. Kim, and D. Yao, 2007, "Injection molding nanoscale features with the aid of induction heating," *Polym Plast Tech Eng*, Vol. 46, pp. 1031 ~ 1037.
- (10) Park, K., Choi, S., Lee, S. J. and Kim, Y. S., 2008, "Injection molding for a ultra thin-wall part using induction heating," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 32, pp. 95 ~ 102.