

단열층을 이용한 광디스크 기판 성형에 대한 수치 해석

배재철*·김영민*·김홍민*·강신일**

Modeling of Passive Heating for Replicating Sub-micron Patterns in Optical Disk Substrates

J. Bae, Y. Kim, H. Kim and S. Kang

Abstract

Transcribability of pit or land groove structures in replicating an optical disk substrate greatly affects the performance of a high-density optical disk. However, a solidified layer, generated during the polymer filling, deteriorates transcribability because the solidified layer prevents the polymer melt in filling the sub-micro patterns. Therefore, the development of the solidified layer during filling stage of injection molding must be delayed. For this delay, passive heating by insulation layer has been used. In the present study, to examine the development of the solidified layer delayed by passive heating, the flow of polymer melt with passive heating was analyzed. Passive heating markedly delayed the development of the solidified layer, reduced the viscosity of the polymer melt, and increased the fluidity of the polymer melt in the vicinity of the stamper surface with the sub-micro patterns. As a result, we predict that passive heating can improve transcribability of an optical disk substrate. To verify our prediction, we fabricated an optical disk substrate by using passive heating of a mold and measured the transcribability.

Key Words : optical disk, injection molding, passive heating, insulation layer, transcribability, solidified front, solidified layer

1. 서론

광디스크 기판을 성형함에 있어 피트 또는 랜드-그루브의 불충분한 전사는 고밀도 광디스크의 신호 특성에 크게 영향을 미친다. 이에 Kang⁽¹⁾ 등은 주요 공정 조건들의 전사성에 대해 미치는 영향을 실험적으로 분석하였으며, 최적화된 공정조건을 제시하였다. Masaki⁽²⁾ 등은 성형조건과 전사성 간의 관계를 정량적으로 규명하였으며,

미세 그루브에 대한 전사 모델을 제안하였다.

Fig.1에서 나타낸 것처럼 충전과정에서 발생한 고화층(solidified layer)은 높은 점성과 낮은 유동성을 가지기 때문에 용융 수지가 미세 패턴에 충전되는 것을 방해하여 피트와 랜드-그루브의 전사를 크게 악화시킨다. 고화층의 경계를 고화선단(solidified front)이라 한다. 따라서, 고화층으로 인한 전사성을 악화시키는 것을 방지하기 위해서는 충전과정동안 스탬퍼와 경면의 표면온도를 유리

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 책임저자, 연세대학교 기계공학부

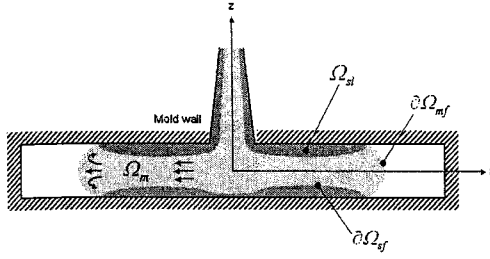


Fig. 1 The development of solidified front

전이온도이상으로 유지시킴으로써 고화층의 발생을 지연시켜야한다. 캐비티 벽면온도를 증가시키기 위해, Kim과 Suh⁽³⁾는 캐비티에서 금형으로의 전달되는 열을 지연시키는 단열된 금형 인서트를 제안하였다. 그러나 이 연구는 이완에 의해 발생하는 잔류 응력과 복굴절 감소에 초점을 맞추었다.

본 연구에서는, 단열층에 의한 고화층의 발생의 지연을 규명하기 위해서 단열층을 고려한 폴리머 유동 해석을 수행하였다. 이를 통해 단열층의 두께에 따른 스템퍼 표면 온도 변화를 분석하였으며, 고화층의 성장과 폴리머의 점성을 예측하였다. 전사성을 향상 확인 하기 위해서 단열층을 이용하여 광디스크 기판을 제작하여, 광디스크의 전사성을 측정하였다.

2. 이론적 배경

단열층을 고려한 사출 성형의 유동 해석을 수행하기 위해서, Fig.2에서 나타낸 것처럼 캐비티, 스템퍼, 단열층 및 금형 블록으로 구성된 영역에서 수학적 모델을 구성하였다

온도 분포를 결정하기 위해서, 폴리머(Ω_m), 스템퍼(Ω_s), 단열층(Ω_{ms}) 과 금형 블록(Ω_{mb})에 비정상 1차원 열전도 방정식을 사용하였다. 경계면에서의 접촉저항은 무시하였다.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$T = T_w \quad \text{at } z = H \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (3)$$

캐비티($\Omega_m + \partial\Omega_{mf}$)에서 유동 해석을 수행하기 위해서,

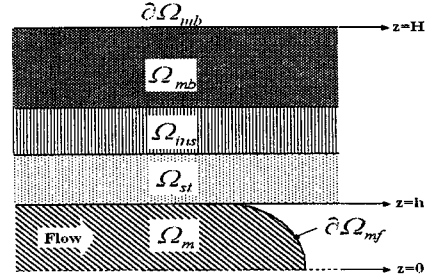


Fig. 2 Schematic view of Multi-layer structure for numerical analysis

폴리머 유동을 반경 방향으로 1차원 유동으로 가정하여, Hele-Shaw 근사식⁽⁴⁾을 적용하면 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (7)$$

여기서, ρ 는 밀도, T 는 온도, t 는 시간, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도를 나타내며 k 는 thermal conductivity, c_p 는 specific heat coefficient, η 는 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 shear rate 이다.

경계조건은 다음과 같다.

$$u = 0 \quad \text{at } z = h \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (9)$$

$$p = 0 \quad \text{at the melt point}(\partial\Omega_{mf}) \quad (10)$$

$z=h$ 에서 온도 경계조건은 식(1)에서 계산된 스템퍼 표면 온도를 사용하였다. viscosity에 Cross-WLF 모델을 적용하였으며, p - v - T 거동에 대해서 double-domain Tait model을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 단열층의 스템퍼 표면온도에 대한 영향

시뮬레이션에 사용한 광디스크 기판은 두께 0.6mm,

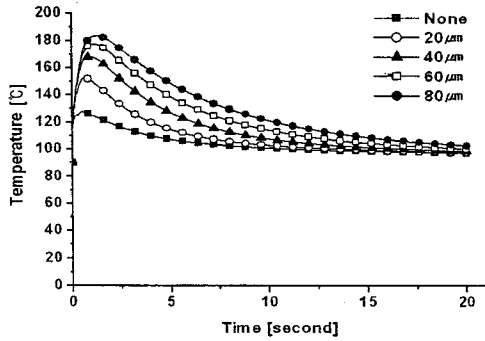


Fig. 3 Temperature history of the stamper surface for different insulation layer thickness

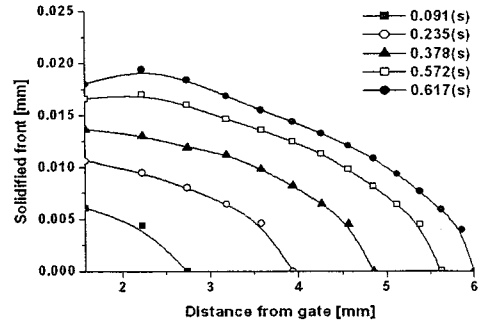
지름 120mm이고 용융 수지의 초기온도와 금형온도는 320°C, 90°C로 설정하였다. 수지 재료로 폴리카보네이트 (polycarbonate, Lexan 141)을 사용하였으며, 스탬퍼 재료로는 니켈, 금형 재료로는 공구강을, 단열층 재료로는 폴리이미드(polyimide)를 사용하였다.

Fig. 3은 용융수지가 스탬퍼 표면에 접촉 후 단열층 두께에 따른 스탬퍼 표면온도이력을 나타낸다. 스탬퍼 최고 표면온도는 단열층 두께가 증가 할수록 증가하며, 40 μm 이상의 단열층에서는 스탬퍼 표면온도가 수 초간 유리전이온도(144°C)이상으로 유지됨을 확인할 수 있다. 이것은 단열층이 용융수지에서 금형으로 전달되는 열을 지연시킴으로써 단열층이 스탬퍼 표면을 재가열시키기 때문이다. 결과적으로 이는 충전과정동안 용융 수지와 스탬퍼 표면의 온도차를 효과적으로 감소시키게 된다.

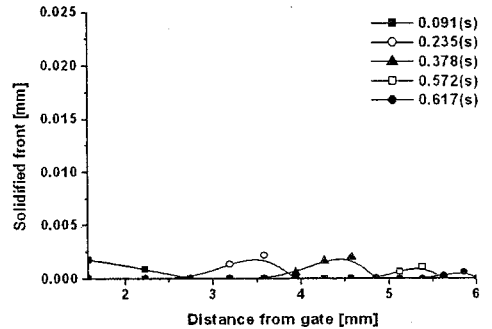
3.2 단열층의 고화층에 대한 영향

기본 공정조건으로 사출시의 flow rate을 11.88cm³/s, 보압을 13.8Mpa으로 설정하였다. 또한 용융 수지의 기본 설정온도는 320°C로 하였다. 고화층의 발생을 예측하기 위해, p-v-T 상태방정식에 의해 결정되는 유리전이온도를 사용하였다.

Fig. 4는 충전과정동안의 시간에 따른 고화선단의 형상변화를 나타낸다. 여기서 용융 수지의 충전시간은 0.617초이다. 단열층이 없는 경우, 고화선단은 시간이 진행됨에 따라 발달한다. 그러나 Fig. 4(b)처럼 80 μm 두께의 단열층의 경우, 초기에 발생한 고화선단이 시간이 진행됨에 따라 사라지고 다시 새로운 고화선단이 발생하게 된다. 이것은 단열층에 의한 스탬퍼 표면온도의 증가와 소산 가열(dissipating heating)⁽⁶⁾에 의한 용융 수지 온도의 증가에 기인하며, 그 결과로 충전과정동안 고화층은 용융상태가 된다. 이 현상은 충전과정동안에 고화층의 발생이 현저하게 지연될 수 있다는 것을 보여준다.



(a) without insulation layer



(b) with insulation thickness of 80 μm

Fig. 4 Advancement of solidified front with respect to time

3.3 단열층의 용융수지의 점성에 대한 영향

용융수지의 점성이 감소 할 경우 캐비티 내에서 용융 수지의 유동이 향상되기 때문에 미세 패턴을 전사함에 용융수지의 점성은 중요한 특성이다. Fig. 5는 단열층 두께에 따른 광디스크 두께 방향으로 의 용융 수지의 점성 분포를 나타낸다. 80 μm 두께의 단열층의 경우 스탬퍼 표면 부근에서 용융 수지의 점성이 현저히 감소하였다. 그러나 단열층에 관계없이 충전과정동안 캐비티 중앙부근에서의 용융수지의 점성은 변화지 않았다. 이것은 단열층이 미세 패턴을 갖는 스탬퍼 표면 부근에서의 용융 수지의 점성을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보여주며, 유동성을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

4. 측정 결과

시뮬레이션 결과들을 토대로 단열층이 고밀도 광디스크 기관의 전사성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 단층을 포함하여 사출 성형을 이용하여 RAM형의 고밀도 광디스크 기관을 제작하였다. 형체력이 35톤인 사출성형기를 사용하였다. 광디스크 기관에 쓰이는 재료로 폴리카보네이트(polycarbonate, Lexan OQ 1020c-112)를

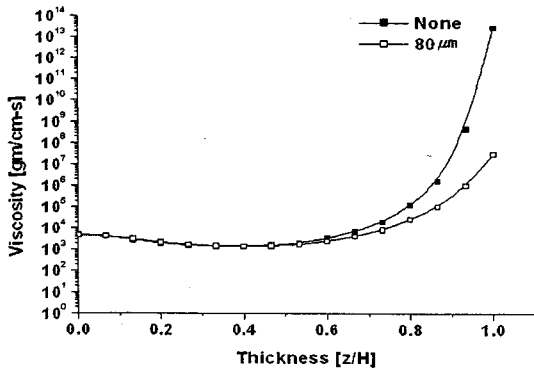


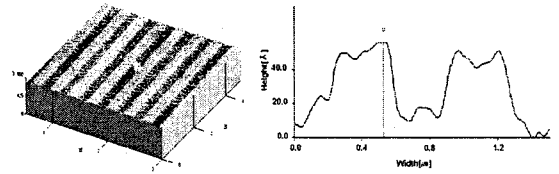
Fig. 5 The viscosity distribution of the polymer melt in the thickness direction for different insulation layer thicknesses at 0.617s

디스크 기판을 성형하였다. 78 μm 두께의 단열층인 폴리이미드는 금형의 스탬퍼 뒷면에 설치하였다.

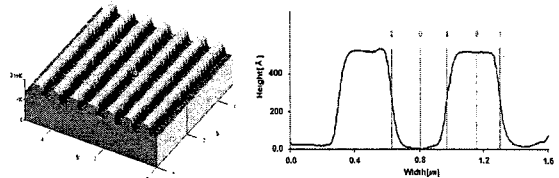
단열층에 대한 전사성의 영향을 분석하기 위해서 제작된 기판의 랜드-그루브 구조를 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하여 측정하였다. Fig. 6는 측정결과를 보여준다. 디스크 기판 성형에 사용된 스탬퍼의 그루브 깊이와 트랙피치는 각각 500Å, 0.68 μm 이다. Fig. 6(a)로부터 금형온도가 90 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 전사성이 떨어져 충분한 랜드-그루브 구조를 가지지 못하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)의 경우를 보면 단열층에 의해 우수한 전사성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이 전사성 향상은 충전과정동안 스탬퍼 표면부근에서 용융수지의 유동성 증가와 고화층 성장을 현저한 지연이 전사성을 향상시킨다는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 고화층의 성장을 규명하고 단열층에 의한 용융수지의 유동성을 평가하기 위해서, 단열층을 포함한 용융수지의 유동을 해석하였다. 시뮬레이션 결과로부터, 단열층은 충전 과정동안 스탬퍼 표면온도를 유리전이온도 이상으로 상승시키고 유지시킬 수 있음을 확인하였고, 충전과정동안 고화층 성장이 현저히 지연됨을 확인할 수 있었다. 또한 미세 패턴을 갖는 스탬퍼 표면부근에서 용융수지의 점성은 현저히 감소하여 용융수지의 유동성은 크게 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다. 측정결과와 충전 과정동안 스탬퍼 표면부근에서 용융수지의 유동성 증가와 고화층 성장을 현저한 지연이 전사성을 향상시킨다는 것을 의미한다. 현재 능동 가열 시스템에 관련된 연구가 진행 중에 있다.



(a) mold temperature: 90 C, insulation layer thickness: zero



(b) mold temperature: 90 C, insulation layer thickness: 78 μm

Fig. 6 Land-groove structure at different insulation layer thickness

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호2003G0203)으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- (1) K. Seong, S. Moon, and S. Kang, 2001, "An Optimum Design of Replication Process to Improve Optical and Geometrical Properties in DVD-RAM Substrates", Journal of Information Storage and Processing Systems 3, pp.169-176.
- (2) Masaki Yoshi and Hiroki Kuramoto, 1994, "Experimental study of transcription of minute width grooves in injection molding", Polymer Engineering and Science Vol. 34(15), pp. 1211-1218.
- (3) B. H. Kim and N. P. Suh, 1986, "Low thermal inertia molding", Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. pp. 73-93.
- (4) C. A. Hieber and S. F. Shen, 1980, "A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process", J. Non-Newt. Fluid Mech., Vol. 7, pp. 1-32.
- (5) K. M. B. Jansen and J. van Dam, 1992, "An analytical solution for the temperature profiles during injection molding, including dissipation effects", Rheol. Acta. Vol. 31, 592-60