

# 금형온도 능동제어 시스템 적용을 위한 고 내구성 마이크로 히터의 설계 및 제작

노철용<sup>†</sup>, 김영민, 최용, 강신일<sup>\*\*</sup>

## Design and Fabrication of Durable Micro Heater for Intelligent Mold System

Cheolyong Noh, Youngmin Kim, Yong Choi and Shinill Kang

**Key Words :** Active heating/능동가열법, Micro molding system/초미세 고분자 복제공정, Thin film heater/박막히터, Stamper surface temperature/스탬퍼 표면온도

### ABSTRACT

Stamper surface temperature is very critical in replicating the high density optical disc substrates using injection molding as the pit or land/groove patterns on the optical disc substrate have decreased due to the rapid increase of areal density. During the filling stage, the polymer melt in the vicinity of the stamper surfaces rapidly solidifies and the solidified layer generated during polymer filling greatly deteriorates transcribability and fluidity of polymer melt. To improve transcribability and fluidity of polymer melt, stamper surface temperature should be controlled such that the growth of the solidified layer is delayed during the filling stage. In this study, the effect of heating on replication process was simulated numerically. Then, an injection mold equipped with instant active heating system was designed and constructed to raise the stamper surface temperature over the glass transition temperature during filling stage of the injection molding. Also, the closed loop controller using the Kalman filter and the linear quadratic Gaussian regulator was designed. As a result, the stamper surface temperature was controlled according to the desired reference stamper surface temperature.

### 1. 서론

광 디스크 기판을 성형함에 있어 스탬퍼 또는 랜드-그루브의 불충분한 전사는 고밀도 광디스크의 신호 특성에 크게 영향을 미친다. 이에 Kang<sup>(3)</sup> 등은 주요 공정 조건들의 전사성에 대해 미치는 영향을 실험적으로 분석하였으며, 최적화된 공정

조건을 제시하였다.

Fig.1 에서 나타난 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 유리전이온도이상으로 유지시킴으로써 고화층의 발생을 지연시켜야 한다.

본 연구에서는 이러한 초미세 성형공정에 있어서, 스탬퍼 표면온도를 유리전이온도 이상 능동적으로 제어할 수 있는 몰드 시스템을 설계, 구축

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : ncyong@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4679 FAX : (02)362-2736

<sup>\*\*</sup> 책임저자, 연세대학교 기계공학부

하였다. 이를 위해 먼저, 초미세 고분자 복제공정에 대한 스탬퍼 표면의 영향을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 능동 가열법을 실제 미세 패턴 사출성형에 적용함에 있어 저항 발열부의 경우 형상에 따라 기계적 강성 및 신뢰성에 영향을 미쳤다. 이러한 신뢰성 확보를 위해 발열부의 구조를 변경시키는 설계 및 제작을 통해 높은 압력 및 온도변화에서도 내구성 및 재현성을 갖는 발열부를 제작하고, 이의 내구성을 평가하였다.

## 2. 이론 및 해석 결과

### 2.1 이론

단열층을 고려한 사출 성형의 유동 해석을 수행하기 위해서, Fig. 1에 나타낸 것처럼 캐비티, 스탬퍼, 단열층 및 급형 블록으로 구성된 영역에서 수학적 모델을 구성하였다.

온도 분포를 결정하기 위해서, 폴리머( $\Omega_m$ ), 스탬퍼( $\partial\Omega_s$ ), 단열층( $\Omega_{ins1}, \Omega_{ins2}$ ), 발열층( $\Omega_h$ ) 과 급형 블록( $\Omega_{mb}$ )에 비정상 1 차원 열전도 방정식을 사용하였다. 경계면에서의 접촉저항은 무시하였다.

캐비티에서 유동해석을 수행하기 위해서, 용융된 폴리머 유동을 반경 방향으로 1 차원 유동으로 가정하여, Hele-Shaw 근사식을 적용하면 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u}{\partial r} = 0, \quad r \in \Omega_m \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0, \quad r, z \in \Omega_m \quad (2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad z \in \Omega_m \quad (3)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2, \quad z \in \Omega_m \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $u, w$ 는 각각  $r, z$  방향방향으로의 속도를 나타내며,  $k$ 는 thermal conductivity,  $C_p$ 는 specific heat,  $\eta$ 는 점성계수,  $\dot{\gamma}$ 는 shear rate 이다.

$$\dot{\gamma} = \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (5)$$

Viscosity에 Cross-WLF 모델을 적용하였으며,

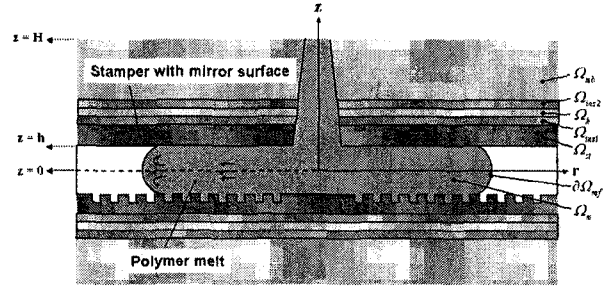


Fig. 1 Schematic of multi-layer structure for numerical analysis:  $\Omega_m$  refers to the polymer melt,  $\partial\Omega_{mf}$  to the melt front,  $\Omega_s$  to the stamper,  $\Omega_{ins1}$  and  $\Omega_{ins2}$  to the insulation layer,  $\Omega_h$  to the heating layer,  $\Omega_{mb}$  to the mold.

p-v-T 거동에 대해서 double-domain Tait model (CIMP 1993)을 사용하였다.

급속 능동가열 시스템의 발열특성을 분석하기 위하여, 1차원 열전도 방정식을 사용하였다.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (6)$$

여기서, S는 Heat source를 나타낸다.

$$S = \frac{\dot{W}}{dV} \quad (7)$$

$\dot{W}$ 는 power density, V는 발열층의 부피이다.

초기조건으로, 용융된 폴리머의 온도는  $T_m$ 이고, 스탬퍼, 절연층, 발열층, 몰드의 온도는 모두 같은  $T_w$ 로 가정하였다.

경계조건은 다음과 같다.

몰드 표면에서,

$$T = T_w \text{ at } z = H \quad (8)$$

캐비티 내에서,

$$u = 0 \quad \text{at } z = h \quad (9)$$

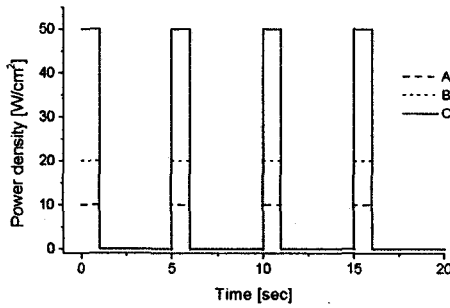
$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (10)$$

$$p = 0 \quad \text{at the melt front } (\partial\Omega_{mf}) \quad (11)$$

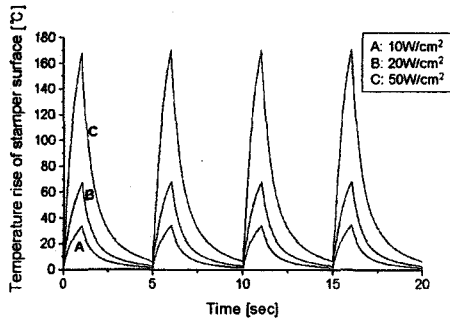
캐비티 내부 유동에 대해서, finite element and finite difference hybrid scheme (Hieber and Shen 1980)을 적용하였다. 이를 이용하여, 급속 능동 가열 시스템이 적용된 사출성형에서 몰드 내부의 용융수지의 유동 및 온도 분포를 시뮬레이션 하였다.

Layer	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]	$k$ [W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
Polymer	1017	2232	0.294
Stamper	8880	460	60.7
Insulation layer	1610	1092	0.155
Heating layer	8880	460	60.7
Mold	7800	460	26

Table 1 Thermal properties layers



(a) History of power density



(b) Temperature rise of stamper surface by micro heater

Fig. 2 Numerical simulation results

## 2.2 해석결과

시뮬레이션에 사용한 광디스크 기판은 두께 0.4mm, 지름 47mm 이고, 용융 수지의 초기온도와 금형온도는 320°C, 100°C로 설정하였다. 각 재료에 대한 열 특성은 Table 1에 나타나있다.

Fig. 2(a)는 공급한 power density의 각각의 분포, Fig. 2(b)는 그에 따른 급속 능동가열 시스템이 부착된 스탬퍼 표면의 온도 분포를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과에 따르면 Power density가 50W/cm<sup>2</sup> 일 때, 스탬퍼 표면의 온도가 100°C에서 270°C까지 1초 이내에 상승하게 된다.

Fig. 3은 충전과정에서 급속 능동가열 시스템의 유무에 따라 스탬퍼 표면에서 성장하는 고화층의 두께를 비교하였다. 이때 사용된 power density는 20 W/cm<sup>2</sup>이다. 이 결과를 통해 스탬퍼 표면온도를 급속 능동 가열 시스템을 통해 증가시키면 고화층은 감소하게 됨을 알 수 있다. 이를 이용하여 초 미세 패턴의 사출성형에서 급속 능동 가열 시스템의 적용으로 패턴의 전사성을 향상시킬 수 있다.

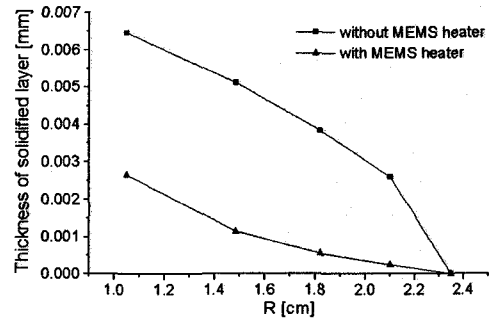


Fig. 3 Solidified layers in the radial direction

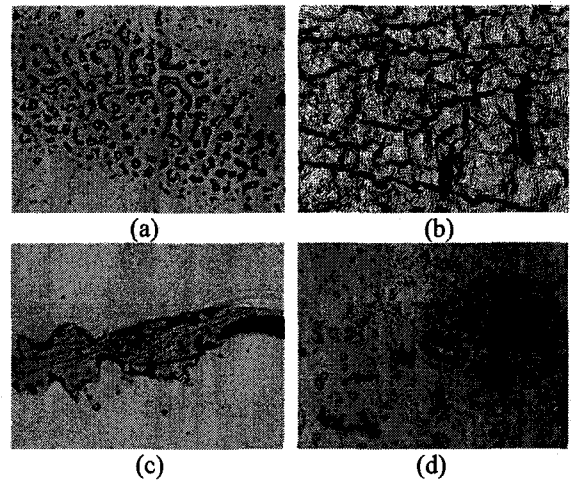


Fig. 4 The cracks of heating layer by thermal stress

## 3. 급속 능동 가열 시스템

### 3.1 발열층 제작

스탬퍼에 장착될 급속 능동가열 시스템은 다음과 같은 방법으로 제작되었다. 우선, 미세패턴이 있는 스탬퍼 뒷면에 폴리이미드 코팅을 하여 절연층을 제작하였다. 이는 폴리이미드가 높은 열적 안정성을 가지며 전류를 통하지 않는 장점을 가지고 있기 때문이다. 코팅된 폴리이미드 필름위에 금속을 증착하고 패터닝하는 방법으로 설계된 발열부를 제작하게 된다. 이후 두번째 폴리이미드 코팅을 통해 바깥쪽 절연층을 제작함으로써 내부 발열층을 보호하게 된다.

급속 능동가열 시스템의 발열부는 초기에는 임의의 두께로 제작되었다. 간단한 형상을 가지는 초기 발열부는 간단한 제작공정으로 제작되었다. 하지만 이러한 방법으로 제작된 급속 능동가열 시스템의 경우, 발열 테스트를 반복함에 따라 발열층 구조물의 형상이 안정되지 못하여, 높은 압력 및 온도변화에 따른 피로가 누적되고, 이로 인하여 발열층 구조물이 쉽게 손상이 가게 되었다.

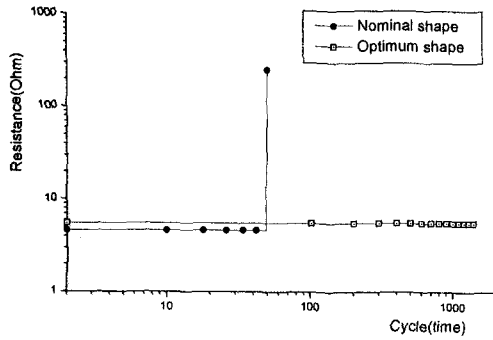


Fig. 5 Reliability test of heating layer

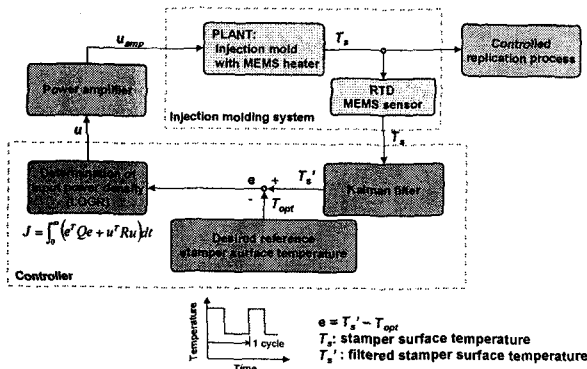


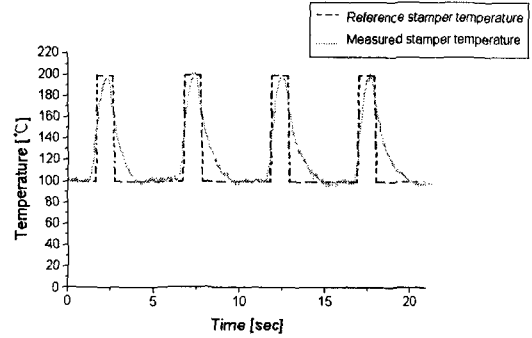
Fig. 6 Schematic of closed loop control system for stamper surface temperature

Fig. 4 은 여러 차례 반복된 발열실험을 통해 발열층 구조물에 발생한 다양한 크랙 사진이다. 이렇게 발열층이 손상에 의한 크랙이 발생되면, 급속 능동가열 시스템의 저항은 증가하게 되고 더 이상 정상적인 작동을 할 수가 없다. 이러한 손상을 줄이기 위하여 발열층의 구조를 변경, 최적화 구조를 설계, 제작하여서 안정성 및 신뢰성을 확보할 수 있게 하였다.

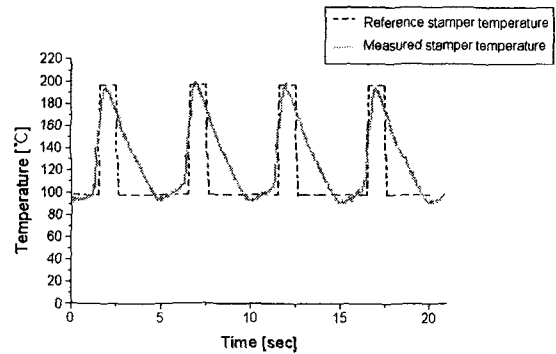
Fig. 5 는 발열 테스트 횟수에 따른 발열층 저항을 측정하여, 발열부의 안정성을 검증하는 실험 결과이다. 초기 임의 제작된 발열부를 지닌 능동가열 시스템의 경우는 대부분 100 번 미만의 테스트에서 발열층이 손상을 입고, 최적화된 구조로 설계 제작된 가열 시스템은 수 천번에 걸친 테스트에도 높은 안정성을 보여주고 있다.

### 3.2 제어시스템 설계 및 제작

최적화된 스탬퍼 표면온도 이력을 위하여 Fig. 1 에 묘사된 히터의 구조를 바탕으로, close loop control system 을 디자인하였다.



(a) Measured temperature profile of heater with nominal shape heating layer



(b) Measured temperature profile of heater with optimum shape heating layer

Fig. 7 Control results for stamper surface temperature

Fig. 6 은 스탬퍼 표면온도를 제어하기 위한 close loop control system 의 구성도 이다. 스탬퍼 표면온도( $T_s$ )는 센서에 의해 측정되고 칼만 필터를 이용하여 실시간 노이즈를 제거한 표면온도( $T'_s$ )를 이용하여 최적의 온도이력을 얻기 위해 gain value(K)를 결정하여 선형보상기를 통하여 입력 전압값(U)을 얻을 수 있었다. 이러한 제어 시스템을 이용하여 1 초동안 200°C를 유지하고 4 초동안 100°C를 유지하는 최적화된 온도이력을 얻었다.

### 3.3 측정결과

Fig. 7 은 이러한 제어 시스템을 통해 발열테스트를 진행하여, 급속 능동가열 시스템들의 스탬퍼 표면에서 온도를 측정한 결과를 보여준다. 이렇게 제작된 급속 능동가열 시스템의 경우, 온도제어가 25~250°C까지 제어가 가능하다. 또한, 1 초내에 100°C의 스탬퍼 표면온도 증가를 구현하였으며 동시에 5 초에 단위 공정을 완료할 수 있는 스탬퍼 표면온도 이력을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 사출 성형공정에 있어서 스탬퍼 표면온도를 능동적으로 제어할 수 있는 몰드 시스템을 설계, 구축하였다. 초미세 고분자 복제공정에 대한 스탬퍼 표면의 영향을 분석하기 위해 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과 스탬퍼 표면에 대한 능동 가열법이 공정시 응용된 수지의 고화층 성장 억제에 매우 효율적임을 확인하였다. 이러한 능동 가열법을 실제 미세 패턴 사출성형에 적용함에 있어 초기 임의 구조를 가지는 급속 능동 가열 시스템의 발열부의 경우 기계적 강성이 불량하여 실제 사출성형 공정에 적용함에 있어 많은 문제점이 발생하였다. 이에, 구조를 변경시켜 최적화하는 발열부 설계 및 제작을 통해 높은 압력 및 온도변화에서도 내구성 및 재현성을 갖는 발열부를 제작하고 평가하였다. 스탬퍼 표면을 원하는 온도이력으로 제어하기 위해 칼만 필터와 선형 보상기를 이용하여 제어를 설계, 구축하여 기 제작된 히터에 적용함으로써 1 초 내에 100 도의 스탬퍼 표면온도 증가를 구현하였다. 이렇게 제작된 급속 능동 가열 시스템을 이용하여, 고밀도 광 디스크의 사출성형 공정에 적용하는 실험적 연구가 진행 중에 있다.

#### 후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구 개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN010001-04K1401-00610)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Youngmin Kim, Yong Choi, Shinill Kang, "Replication of high density optical disc using injection mold with MEMS heater", *Microsystem Technologies*, Vol.11, pp.464-469, 2005. 7. 7
- (2) J. Bae, Y. Kim, H. Kim and S. Kang, "Modeling of Passive Heating for Replicating Sub-micron Patterns in Optical Disk Substrates" *Official Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity* Vol.3 Num.1, pp.39-44, 2004. 2. 2.
- (3) Y. Kim, J. Bae, H. Kim and S. Kang, 2004, "Modeling of passive heating for replication of sub-micron patterns in optical disk substrates," *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37:1319-1326.

- (3) S. Kang, J. Kim and S. Kang, 2000, "Birefringence distribution in magneto-optical disk substrate fabricate by injection compression molding," 39:689-694.
- (4) K. Seong, S Moon, and S, Kang, 2001, "An optimum Design of Replication Process to Improve Optical and Geomtrical Properties in DVD-RAM Sustrates", *Journal of Information Storage and Processign System* 3, pp169-176.
- (5) Kim B H and Suh N P, 1986, "Low thermal inertia molding," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 25:73-93.
- (6) Liou M J and Suh N P, 1989, "Reducing residual stresses in molded parts," *Polymer Engineering and Science*, 29:441-447.
- (7) Kim B and Niemeyer M F 1995, "Insulated mold structure for injection molding of optical disks," US Patent No 5,458,818
- (8) CIMP, 1993, Consortium Meeting Notes, Cornell University, June 3.
- (9) CIMP, 1994, Consortium Meeting Notes, Cornell University, November 3.