

단열층을 이용한 광디스크 기판의 서브 마이크론 성형에 대한 수치 해석

배재철* · 김영민* · 김홍민* · 강신일**

(2003년 10월 9일 접수)

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 from 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 of an optical disk substrate.

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 전사는 고밀도 광디스크의 성능에 크게 영향을 미친다. 광디스크 기판 성형에 있어서 전사는 스탬퍼의 피트 또는 랜드-그루브 패턴의 형상이 성형공정을 통해 광디스크 기판에 전이되는 것을 의미한다. 특히, 고밀도 광저장매체에서 성형에 있어서 전사가 충분히 일어나지 못할 경

우 정보의 기록/재생시 cross-talking과 cross-erasing을 유발하게 되어 결과적으로 신호 특성을 저하시킨다. 이에 Kang등⁽¹⁾은 주요 공정 조건들의 전사성에 대해 미치는 영향을 실험적으로 분석하였고 최적의 공정조건을 결정하기 위한 방법론을 제시하였다. Miyagaya등⁽²⁾과 Staoh등⁽³⁾은 랜드-그루브 구조의 전사성이 급형 온도와 압축력에 크게 영향을 받음을 규명하였다. Masaki등⁽⁴⁻⁵⁾은 성형조건과 전사성 간의 관계를 정량적으로 규명하였으

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학부

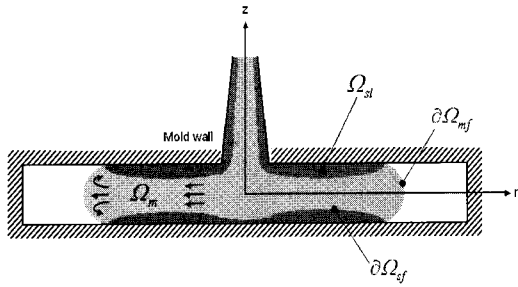


Fig. 1 The development of solidified front; Ω_m refers to polymer melt, $\partial\Omega_{mf}$ to the melt front, Ω_{sl} to the solidified layer, $\partial\Omega_{sf}$ to the solidified front

며, 미세 그루브에 대한 전사 모델을 제안하였다. 광디스크 기판은 일반적으로 사출성형에 의해 제작된다. 충전과정 동안, 용융 수지가 금형으로 주입되면서 금형의 벽면온도에 의해 스탬퍼와 경면 부근에서 급격히 고화 된다. 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. Fig. 1은 광디스크의 금형 캐비티 내에서 고화층이 발생하는 것을 개략적으로 보여주고 있으며, 충전 과정동안 발생한 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. 이로 인하여 용융 수지가 유리화 되기 전에 미세 패턴을 충전할 수 있다. 충전과정동안 캐비티 벽면온도를 증가시키기 위해, Kim과 Suh⁽⁶⁾, Liou와 Suh⁽⁷⁾, Kim과 Niemeyer⁽⁸⁾은 캐비티에서 금형으로의 전달되는 열을 지연시키는 단열된 금형 인서트를 제안하였다. 그러나 이 연구들은 이완에 의해 발생하는 잔류 응력과 복굴절 감소에 초점을 맞추었다. 본 연구에서는, 단열층에 의해 고화층의 발생이 지연되는 것을 규명하기 위해서 단열층을 포함하여 용융 수지의 유동을 해석하였다. 단열층의 두께에 따른 스탬퍼 표면 온도에 대한 효과를 평가하고, 고화층의 성장, 용융 수지의 점성 및 유동성을 예측하였다. 이로 인한 전사성 향상을 확인하기 위해서 단열층을 이용하여 광디스크 기판을 제작하였고, 광디스크 기판의 전사성을 측정하였다.

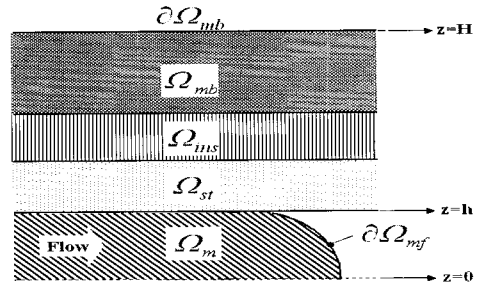


Fig. 2 Schematic view of Multi-layer structure for numerical analysis; Ω_m refers to the polymer melt, $\partial\Omega_{mf}$ to the melt front, Ω_{st} to the stamper, Ω_{ins} to the insulation layer, Ω_{mb} to the mold block, $\partial\Omega_{mb}$ to the mold block surface

2. 이론적 배경

단열층을 포함한 사출 성형의 유동 해석 수행하기 위해서, Fig. 2에서 나타난 것처럼 캐비티, 스탬퍼, 단열층 및 금형 블록으로 구성된 영역에서 수학적 모델을 구성하여야 한다.

스탬퍼 표면 온도 분포를 결정하기 위해서, 폴리머(Ω_m), 스탬퍼(Ω_{st}), 단열층(Ω_{ins}) 과 금형 블록(Ω_{mb})에 식 (1)과 같이 비정상 1차원 열전도 방정식을 사용하였다. 경계면에서의 열전도율은 조화평균⁽⁹⁾으로 계산되며, 열접촉 저항은 무시된다.

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

초기 온도 조건은 폴리머(Ω_m)는 T_m , 스탬퍼(Ω_{st}), 단열층(Ω_{ins}) 및 금형 블록(Ω_{mb})은 T_w 이며, 경계조건은 다음과 같다.

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

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

또한, 캐비티($\Omega_m + \partial\Omega_{mf}$)에서의 유동 해석을

수행하기 해서, 폴리머 유동을 반경 방향으로 1 차원 유동으로 가정하여 Hele-Shaw 근사식⁽¹⁰⁾을 사용하였으며, 적용한 식 (4)~(7)은 이를 나타내고 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

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

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

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

여기서, ρ 는 밀도, T 는 온도, t 는 시간, u 와 w 는 각각 r 과 z 방향으로의 속도를 나타내며, k 는 thermal conductivity, C_p 는 specific heat coefficient, η 는 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 shear rate 로 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 이다.

경계조건은 다음과 같다.

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

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

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

$z=h$ 에서 온도 경계조건은 식 (1)에서 계산된 스탬퍼 표면 온도를 사용하여, 단열층의 영향을 고려하였다. Viscosity 는 Cross-WLF 모델⁽¹¹⁾을 적용하였으며, p-v-T 거동에 대해서 double-domain Tait model⁽¹²⁾을 사용하여 밀도와 압력과 온도에 대한 관계를 표현하였다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 해석결과

3.1.1 단열층의 스탬퍼 표면온도에 대한 영향

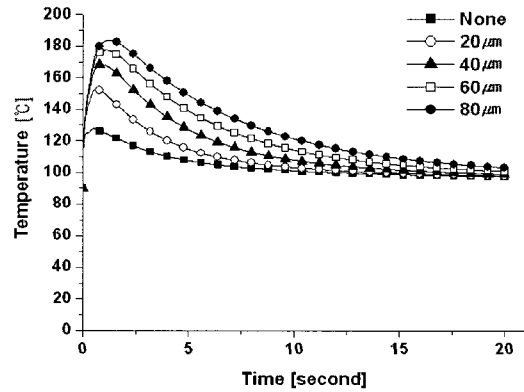


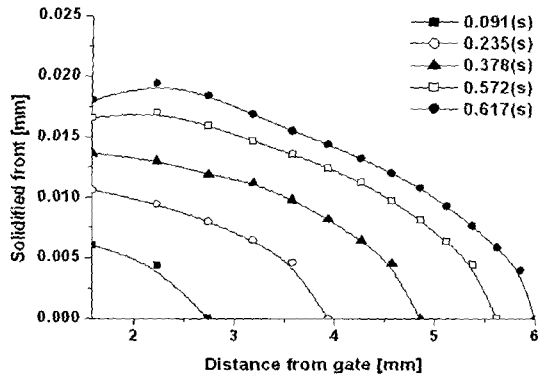
Fig. 3 Temperature history of the stamper surface for different insulation layer thickness

스탬퍼 표면은 용융 수지와 스탬퍼 사이의 경계면이기 때문에 스탬퍼 표면온도이력은 스탬퍼 표면 부근에서 용융 수지 유동에 크게 영향을 미친다. 따라서 스탬퍼 표면 온도에 대한 단열층의 영향을 분석하였다. 시뮬레이션에 사용한 광디스크 기판은 두께 0.6mm, 지름120mm이고 용융 수지의 초기온도는 320°C, 스탬퍼, 단열층 및 금형 초기온도는 90°C로 설정하였다. 수지 재료로 폴리 카보네이트(polycarbonate, Lexan 141)를 사용하였으며, 스탬퍼 재료로는 니켈, 금형 재료로는 공구강을 사용하였고, 단열층 재료로는 폴리이미드(polyimide)를 사용하였다.

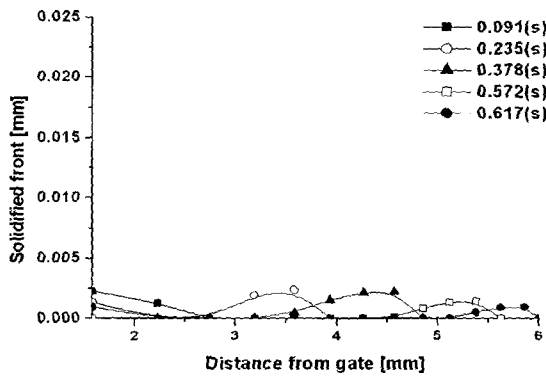
Fig. 3은 용융수지가 스탬퍼 표면에 접촉 후 단열층 두께에 따른 스탬퍼 표면온도이력을 나타낸다. 스탬퍼 최고 표면온도는 단열층 두께가 증가할수록 증가하며, 40μm 이상의 단열층에서는 스탬퍼 표면온도가 수 초간 유리전이온도(144°C) 이상으로 유지됨을 확인할 수 있다. 이것은 단열층이 용융수지에서 금형으로 전달되는 열을 지연 시킴으로써 단열층이 스탬퍼 표면을 재가열시키기 때문이다. 이 과정은 사출 성형동안 용융 수지와 스탬퍼 표면의 온도차를 효과적으로 감소시키게 된다.

3.1.2 단열층의 고화층에 대한 영향

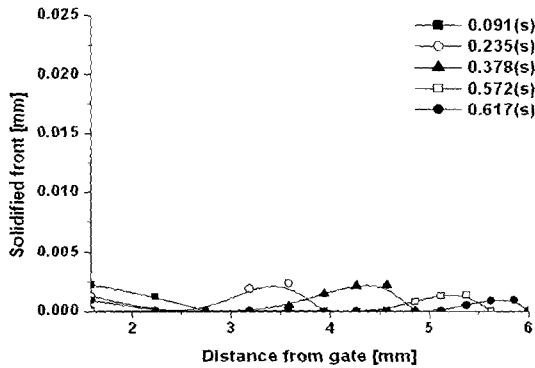
고화층의 발생 및 고화층에 대한 단열층의 영향을 규명하기 위해서 단열층을 포함한 용융 수지 유동을 해석하였다. 기본 공정조건으로 사출시의 flow rate 을 11.88cm³/s, 보압을 13.8MPa 으로 설정



(a) Without insulation layer



(b) With insulation thickness of 40µm



(c) With insulation thickness of 80µm

Fig. 4 Advancement of solidified front with respect to time (Fill time=0.617s)

정하였다. 또한 용융 수지의 기본 설정온도는 320°C로 하였다. 고화층의 발생을 예측하기 위해, 고화온도로써 p-v-T 상태방정식에 의해 결정되는 유리전이온도를 사용하였다.

Fig. 4는 충전과정동안의 시간에 따른 고화선단

의 형상변화를 나타낸다. 여기서 용융 수지의 충전시간은 0.617 초이다. 단열층이 없는 경우, 고화선단은 시간이 지남에 따라 발달한다. 그러나 Fig. 4(b)와 (c)처럼 40µm와 80µm 두께의 단열층의 경우, 초기에 발생한 고화선단이 시간이 지남에 따라 사라지고 다시 새로운 고화선단이 발생하게 된다. 또한 고화 선단의 두께도 현저히 감소함을 확인할 수 있다. 이것은 단열층에 의한 스템퍼 표면온도의 증가와 소산 가열(dissipating heating)⁽¹³⁾에 의한 용융 수지온도의 증가에 기인하며, 그 결과로 충전과정동안 고화층은 용융상태가 된다. 이 현상은 충전과정동안에 고화층의 발생이 현저하게 지연될 수 있다는 것을 보여준다.

3.1.3 단열층의 용융수지의 점성과 유동성에 대한 영향

용융수지의 점성이 감소 할 경우 캐비티 내에서 수지의 유동이 향상되기 때문에 미세 패턴을 전사함에 용융수지의 점성은 중요한 특성이다. 따라서 용융 수지의 점성에 대한 단열층의 영향을 예측하고, 용융수지의 유동성의 변화를 평가하였다. Fig. 5는 충전 과정(0.378s)의 단열층 두께에 따른 광디스크 두께 방향으로의 용융 수지 점성 분포를 나타낸다. 40µm와 80µm 두께의 단열층의 경우 스템퍼 표면 부근에서 용융 수지의 점성이 현저히 감소하였다. 그러나 단열층에 관계없이 충전과정동안 캐비티 중앙부근에서의 용융수지의 점성은 변화하지 않았다. 이것은 단열층이 미세 패턴을 갖는 스템퍼 표면 부근에서의 용융수지의 점성을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 6은 충전과정(0.378s)에서 단열층 두께에 따른 광디스크 두께 방향으로의 용융 수지의 유동성을 나타낸다. 40µm과 80µm 두께의 단열층의 경우 스템퍼 표면 부근에서 용융수지의 유동성이 현저히 향상되었다. 이 유동성의 향상은 충전과정동안 단열층에 의해 미세 패턴을 갖는 스템퍼 표면부근에서 용융수지의 유동이 보다 용이해진 것을 의미한다.

3.2 검증실험

시뮬레이션 결과를 토대로 단열층이 고밀도 광디스크 기관의 전사성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 단열층을 포함하는 사출 성형을 이용하여 서환형의 고밀도 광디스크 기관을 제작하였다. 형체력이 35톤인 사출성형기 사용하였다. 광디스크

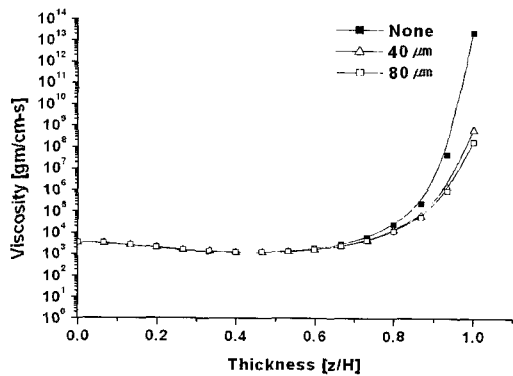


Fig. 5 The viscosity distribution of the polymer melt in the thickness direction for different thicknesses at the polymer filling (0.378s)

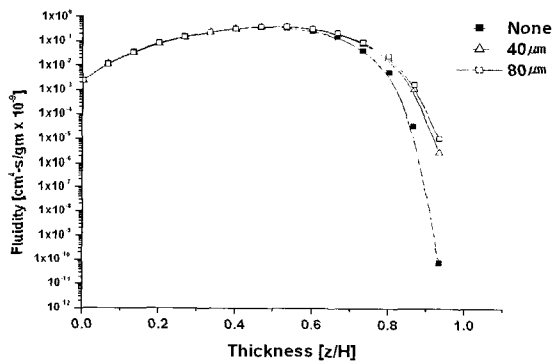
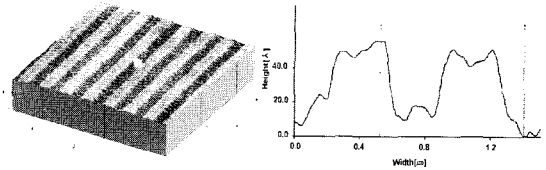


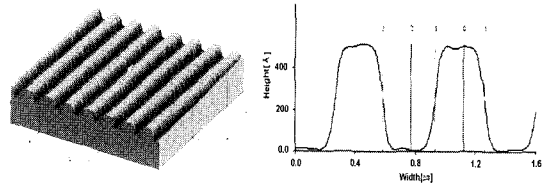
Fig. 6 The fluidity of the polymer melt in the thickness direction for different insulation layer thicknesses at the polymer filling (at 0.378s)

기판에 쓰이는 재료로 실제 생산품에 가장 많이 쓰이는 광학용 폴리카보네이트(polycarbonate, Lexan OQ 1020c-112)를 사용하였으며 지름이 120.0mm 이고 두께가 0.6mm 인 광디스크 기판을 성형하였다. 단열층인 폴리이미드는 금형의 스탬퍼 뒷면에 설치하였다. 단열층의 두께는 33 μ m 및 78 μ m 로 실험을 수행하였다.

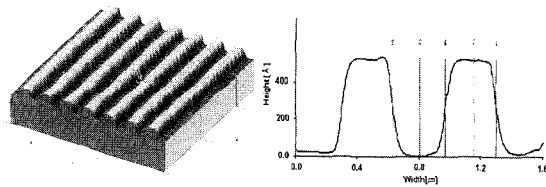
단열층에 대한 전사성의 영향을 분석하기 위해서 제작된 기판의 랜드-그루브 구조를 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하여 측정하였다. Fig. 7은 측정결과를 보여준다. 디스크 기판 성형에 사용된 스탬퍼의 그루브 깊이와 트랙피치는 각각 500 Å, 0.68 μ m 이다. Fig. 7(a)로부터 단열층이 없는 경우에는 그루브의 깊이가 50 Å 정도로, 전사성이 떨어져 충분한 랜드-그루브 구조를 가지지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 비해, 단열층이 존



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



(b) Mold temperature: 90 °C, insulation layer thickness: 33 μ m



(c) Mold temperature: 90 °C, insulation layer thickness: 78 μ m

Fig. 7 AFM images and surface profiles land-groove structure at different insulation layer thickness

재하는 경우인 Fig. 7(b)와 (c)의 경우를 보면, 성형된 기판의 랜드 높이가 500 Å으로 스탬퍼의 그루브의 깊이와 일치하고, 단열층 두께의 차이에 관계없이 우수한 전사성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이 전사성 향상은 충전과정동안 스탬퍼 표면부근에서 용융수지의 고화층 성장을 현저한 지연과 점성의 감소로 인한 유동성 증가가 전사성을 향상시킨다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 광디스크 기판의 성형함에 있어서 고화층이 미세 패턴의 전사에 미치는 영향을 규명하고 단열층에 의한 용융수지의 유동성을 평가하기 위해서, 단열층을 포함한 용융수지의 유동을 해석하였다. 해석결과로부터, 40 μ m 두께 이상의 단열층에서는 충전 과정동안 스탬퍼 표면온도를 폴리카보네이트의 유리전이온도(144 °C) 이

상으로 상승시키고 유지시킬 수 있음을 확인하였고, 충전과정동안 고화층 성장이 현저히 지연됨을 확인할 수 있었다. 또한 미세 패턴을 갖는 스탬퍼 표면부근에서 용융 수지의 점성이 현저히 감소하여 용융수지의 유동성은 크게 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 미세 패턴을 갖는 스탬퍼 부근에서는 약 $10^5 \text{cm}^4 \cdot \text{s} / \text{gm} \times 10^{-9}$ 정도의 유동성 증가가 나타났다. 이는 단열층에 의한 스탬퍼의 수동적 가열이 미세 패턴에 대한 전사성을 크게 향상시킴을 의미한다. 단열층을 포함하여 사출성형으로 제작된 서환형의 고밀도 광디스크 기판의 전사성 측정 결과를 통해 충전 과정동안 단열층에 의한 스탬퍼 표면부근에서 고화층 성장의 현저한 지연과, 용융수지의 유동성 증가가 전사성을 향상시킴을 실험적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21 세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN010001-03K1401-00610)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (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) N. Miyagawa et al., 1993, "Land and groove recording for high track density on phase change optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 32(11B), pp. 5324~5328 .
- (3) L. Satoh et al., 1998, "Key technology for high density rewritable DVD(DVD-RAM)," *IEEE. Transaction of magnetics* Vol. 34(2), pp. 337~342.
- (4) 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.
- (5) Masaki Yoshi, Hiroki Kuramoto and Yuuji Ochiai, 1998, "Experimental study of transcription of minute width grooves by injection molding", *Polymer Engineering and Science* Vol. 38(9), pp. 1587~1594.
- (6) B. H. Kim and N. P. Suh, 1986, "Low thermal inertia molding", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. pp. 73~93.
- (7) M. J. Liou and N. P. Suh, 1989, "Reducing residual stresses in molded parts", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29(7), pp. 441~447.
- (8) B. Kim and M. F. Niemeyer, 1995, "Insulated mold structure for injection molding of optical disks", U.S. Patent No.5, 458,818
- (9) S. Patankar, 1980 "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Taylor & Francis*, pp. 44~47.
- (10) 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.
- (11) CIMP, 1993, Consortium Meeting Notes, Cornell University, June 3.
- (12) CIMP, 1994, Consortium Meeting Notes, Cornell University, November 3.
- (13) 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, pp. 592~600.