

핫엠보싱 충전공정에 관한 수치해석

강태곤¹, 권태현²

Numerical simulation of hot embossing filling

T.G. Kang and T.H. Kwon

Abstract

Micro molding technology is a promising mass production technology for polymer based microstructures. Mass production technologies such as the micro injection/compression molding, hot embossing, and micro reaction molding are already in use. In the present study, we have developed a numerical analysis system to simulate three-dimensional non-isothermal cavity filling for hot embossing, with a special emphasis on the free surface capturing. Precise free surface capturing has been successfully accomplished with the level set method, which is solved by means of the Runge-Kutta discontinuous Galerkin (RKDG) method. The RKDG method turns out to be excellent from the viewpoint of both numerical stability and accuracy of volume conservation. The Stokes equations are solved by the stabilized finite element method using the equal order tri-linear interpolation function. To prevent possible numerical oscillation in temperature field we employ the streamline upwind Petrov-Galerkin (SUPG) method. With the developed code we investigated the detailed change of free surface shape in time during the mold filling. In the filling simulation of a simple rectangular cavity with repeating protruded parts, we find out that filling patterns are significantly influenced by the geometric characteristics such as the thickness of base plate and the aspect ratio and pitch of repeating microstructures. The numerical analysis system enables us to understand the basic flow and material deformation taking place during the cavity filling stage in microstructure fabrications.

Key Words: Hot Embossing, Filling Simulation, Stabilized Finite Element Method, Level set Method, Discontinuous Galerkin Method

1. 서 론

최근 초소형 기계기술의 발전과 함께 고분자 미세 구조물을 대량 생산할 수 있는 생산기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.[1,2] 이러한 미세 구조물을 대량 생산할 수 있는 방법으로는 미세사출성형 (micro injection molding), 핫엠보싱 (hot embossing), 반응성형 (reaction molding) 등이 있다.

본 연구에서는 이러한 방법들 중에서 얇은 고분자 기관위에 미세 구조물을 형성하는데 많이 이용되는 핫엠보싱 공정에 관한 충전해석에 관해 소개한다.

핫엠보싱 공정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 예열, 성형, 이형공정으로 구성되어 있다. 충전해석에서는 유리전이 온도 이상으로 가열된 고분자 기판을 스템프로 압축하여 미세 구조를 채우는 과정

1. 포항공과대학교 기계공학과
2. 교신저자: 포항공과대학교 기계공학과,
Email: thkwon@postech.ac.kr

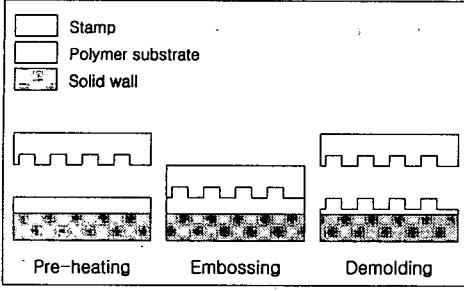


Fig. 1 Schematic representation of hot embossing process

에서 발생하는 고분자 재료의 유동과 열전달, 충전 형태를 유한요소법에 기초한 수치해석으로 모사한다. 이러한 수치해석을 통하여 미세구조의 형상, 고분자 기판의 두께, 미세구조물 간의 간격등이 충전 형태에 미치는 영향을 체계적으로 살펴보는 것을 목표로 한다.

2. 유한요소 수식화

2.1 지배방정식의 유한요소 수식화

핫엠보싱 충전공정은 운동량 보존식, 질량보존식, 에너지 보존식으로 나타낼 수 있다. 먼저 유동장은 일반적인 고분자 가공 공정처럼 점성의 영향이 지배적이므로 식 (1)과 같은 비압축성 유체에 대한 Stokes equation 으로 표현할 수 있다. 온도장을 기술하는 에너지 식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla \cdot (2\mu\mathbf{D}) - \nabla p = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \mu \dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 \mathbf{D} 는 변형률 텐서, \mathbf{u} 는 속도 벡터, p 는 압력, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, T 는 온도, k 는 열전도 계수, μ 는 점도를 각각 나타낸다. Franca [2] 등이 제안한 stabilized FEM 을 도입하여 식(1)에 대한 weak form 을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (2)의 weak form 은 SUPG (Streamline upwind/Petrov-Galerkin) 법을 사용하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\int_{\Omega} 2\mu\mathbf{D}(\mathbf{u}) : \mathbf{D}(\mathbf{v})d\Omega - \int_{\Omega} p(\nabla \cdot \mathbf{v})d\Omega + \int_{\Omega} q(\nabla \cdot \mathbf{u})d\Omega + \sum_K \int_K (\nabla \cdot (2\mu\mathbf{D}) - \nabla p) \cdot (\tau \nabla q)d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v}d\Gamma \quad (3)$$

$$\int_K \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) w d\Omega + \int_K \alpha \nabla T \cdot \nabla w d\Omega - \int_K \frac{\mu \dot{\gamma}^2}{\rho c_p} w d\Omega \quad (4)$$

$$+ \sum_K \int_K \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T - \alpha \nabla^2 T - \frac{\mu \dot{\gamma}^2}{\rho c_p} \right) \tau (\mathbf{u} \cdot \nabla w) d\Omega = 0$$

위의 식 (3)과 (4)에서 안정화 상수 τ 는 Franca 등이 제안한 식을 사용하였다 [3]. 이때 속도, 압력, 온도에 대해서 모두 tri-linear 육면체 요소를 사용하였다.

2.2 레벨셋 법 (Level set method)

레벨셋 법은 고정 격자계에서 자유표면을 표현하는 기법으로 다양한 분야에 최근 많이 응용되고 있다 [4]. 초기의 레벨셋 법은 유한차분법을 기초로 하여 개발되었다. 하지만 본 연구에서는 레벨셋 법에서 풀어야 하는 식 (5)와 (6)을 DGM (discontinuous Galerkin method)을 사용하여 풀었다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial d}{\partial t} + S(\phi)(|\nabla d| - 1) = 0 \quad (6)$$

$$S(\phi) = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + \epsilon^2}}$$

식(5)는 레벨셋 함수 ϕ 에 대한 advection 이며 식 (6)은 식 (5)에 의해서 계산된 ϕ 를 초기 조건으로 하여 함수 ϕ 의 구배의 크기가 1 이 되도록 하는 reinitialization 식이다. 이 때 DGM 에 Lesaint-Raviart 등이 제안한 수식화 과정이 사용되었으며 식 (7)-(8)과 같이 표현된다.

$$\int_K \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi \right) \phi d\Omega - \int_{\Omega_i} (\phi - \bar{\phi})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \phi d\Gamma = 0 \quad (7)$$

$$\int_K \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \nabla d \right) \phi d\Omega - \int_{\Omega_i} (d - \bar{d})(\mathbf{w} \cdot \mathbf{n}) \phi d\Gamma = \int_K S(\phi) \phi d\Omega \quad (8)$$

식 (8)에서 \mathbf{w} 는 전파속도 (propagation velocity)에

해당하는 변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{w} = S(\phi) \frac{\nabla d}{|\nabla d|} \quad (9)$$

시간에 대한 차분은 외연적 방법인 Runge-Kutta 법을 도입하여 요소단위의 행렬식 계산이 가능하도록 하였다.

2.2 벽면의 이동에 대한 고려

핫엠보싱 공정 중 스템프의 이동에 따라 고분자 기관이 압축되고 계산 영역이 변하게 된다. 이를 고려하기 위해서 수직방향의 격자속도 (mesh velocity) 를 정의한 후 ALE 방법을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 해석 조건

해석에 사용된 형상은 Fig. 2 와 같이 동일한 미세형상이 반복적으로 있을 경우에 대해서 형상의 대칭성을 이용하여 하나의 단위 형상 (unit cell)을 정의하여 충전해석을 수행하였다. 실제 해석에 사용된 계산 영역은 Fig. 3 에 나타나 있는 것과 같이 형상의 대칭성을 이용하여 단위 형상의 1/4 만을 사용하였다.

해석에 사용된 수지는 PMMA 로서 점도 모델은 식 (10)과 같이 표현되는 Cross model 을 사용하였으며 그 계수들은 Table 1 과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_0 &= D_1 \exp\left(-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+T-T^*}\right) \\ A_2 &= \tilde{A}_2 + D_3 p \\ T^* &= D_2 + D_3 p \\ \mu &= \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{\mu_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \end{aligned} \quad (10)$$

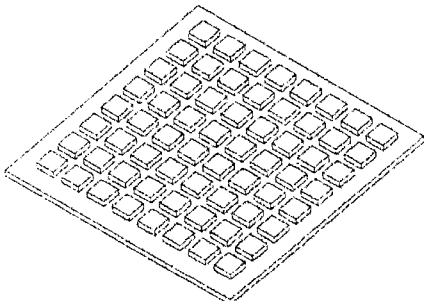


Fig. 2 Shape of the cavity with repeating micro structures

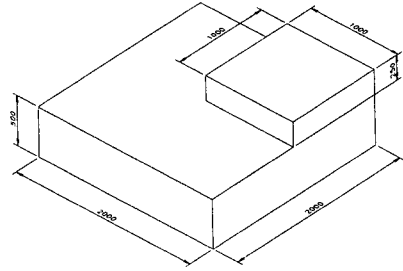


Fig. 3 Quarter model of a unit cell, Length unit: 10^{-6}m

Table 1 Coefficients of the Cross WLF viscosity model for the PMMA used in filling simulation

n	2.5450×10^{-1}
τ^*	$7.9120 \times 10^4 \text{ Pa}$
D_1	$4.3800 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{sec}$
D_2	$3.7715 \times 10^2 \text{ K}$
D_3	0
A_1	$4.7280 \times 10^1 \text{ K}$
A_2	$5.1600 \times 10^1 \text{ K}$

3.2 해석 결과

충전 해석은 Fig. 3 에 나타나 있는 형상에 대해 충전시간을 60 초로 고정하여 수행하였다. 초기 고분자 기관의 온도는 유리전이 온도보다 30 도 높게 설정하였다. Fig. 4 는 충전이 1/3 정도 되었을 때의 속도벡터의 그린 것이다. Fig. 5 는 충전이 진행됨에 따라서 고분자 재료의 변형을 나타낸 그림이다. 충전이 거의 완료되는 시점에서 유동선단의 모습은 Fig. 6 과 같다. Fig. 6 에서 알수 있듯이 모서리 부분과 미세구조의 중심부분에서 가장 늦게 충전이 된다. 따라서 이부분에 공기간흡과 같은 현상이 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

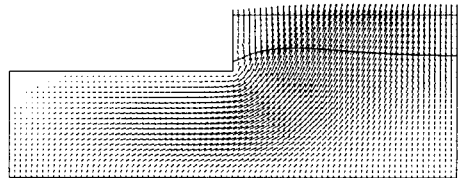


Fig. 4 Cross sectional velocity vector plot on the yz-plane. Solid line is the position of interface at

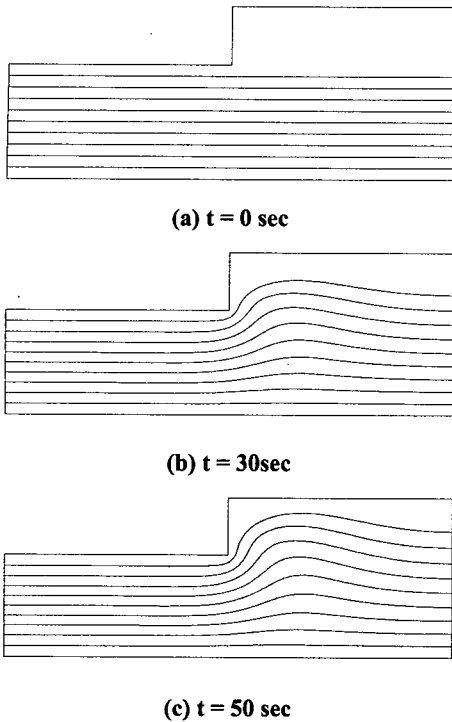


Fig. 5 Cross sectional velocity vector plot on the symmetric plane. Solid line is the position of interface at $t=20\text{sec}$.

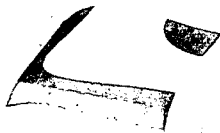


Fig. 6 Free surface at time $t = 55\text{ sec}$. Blue surface is the flow front.

4. 결론

핫엠보싱 충전공정을 해석하기 위한 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 수치해석 시스템을 이용하여 핫엠보싱 충전공정 중 발생하는 재료의 변형과 충전형상을 성공적으로 모사할 수 있었다. 향후 공기간힘에 의한 압축효과 등을 고려하면 실제 공정을 모사할 수 있는 공정설계 도구가 되리라 기대한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (2000-N-NL-01-C-148)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Hecke and W.K. Schomburg, 2004, "Review on micro molding of thermoplastic polymers", J. Micromech. Microeng. Vol. 14, pp. R1-R14
- [2] H.D. Rowland and W.P. King, 2004, "Polymer deformation and filling modes during microembossing", J. Micromech. Microeng. Vol. 14, pp.1625-1632
- [3] L.P. Franca and S.L. Frey, 1992, "Stabilized finite element methods: II. The incompressible Navier-Stokes equations", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol. 99, pp. 209-233
- [4] S. Osher and R. Fedkiw, 2003, Level set methods and dynamic implicit surfaces (New York: Springer-Verlag)