

< 論 文 >

사출성형시 두께방향으로의 유동특성에 관한 유한요소 해석

이 호 상* · 신 호 철**

(1987년 9월 7일 접수)

Finite Element Analysis for the Flow Characteristics along the Thickness Direction in Injection Molding

Ho Sang Lee and Hyo-Chol Sin

Key Words: Orientation(방향성), Residual Stress(잔류응력), Weld Line(웰드라인), Non-Newtonian Fluid(비뉴우튼유체), Unsteady State(비정상상태), Free Surface(자유표면), Isothermal Flow(등온유동), Non-isothermal Flow(비등온유동), Steady Elongational Flow(정적 인장유동)

Abstract

The injection molding process is used in the fabrication of a large variety of plastic articles. A numerical simulation of the filling stage along the thickness direction is proposed by combining the free surface boundary condition with the relevant governing equations. The mathematical model is based on the equations of continuity, momentum and energy along with inelastic power-law model and relevant boundary conditions. Due to the significant implications for microstructure development in the product, the fountain effect at the advancing free surface is explicitly taken into consideration in the simulation. The model yields data on free surface shape as well as velocity, pressure, temperature and shear stress distributions within the mold cavity. The rearrangement of the velocity and temperature profiles in the vicinity of the melt front is considered in detail.

기 호 설 명

B_r : 브링크만(Brinkman) 수
 C_r : 비열
 ds : 곡선을 따른 미소변위
 H : 두께의 반
 I : 반복 계산횟수
 k : 열전도 계수

n : Power law 지수
 \underline{n} : 법선방향 단위벡터
 p : 압력
 P : 무차원화된 압력
 Pe : 페크레트(Peclet) 수
 Re : 레이놀즈(Reynolds) 수
 \underline{t} : 접선방향 단위벡터
 T : 온도
 \bar{T} : 잉여응력(extra stress) 텐서

* 정희원, 서울대학교 대학원
** 정희원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

- T_{xx} : 전단응력 성분
- T_{xx}, T_{yy} : 고분자물질 및 금형벽 온도
- u, v : 축방향 및 횡방향 속도
- U, V : 무차원화된 축방향 및 횡방향 속도
- U_{ave} : 평균속도
- U_{in} : 입구 최대속도
- W : 가상 속도벡터
- x, y : 축방향 및 횡방향 거리
- X, Y : 무차원화된 축방향 및 횡방향 거리
- $Xdiff$: 접촉점에서 중심선의 선단까지 거리
- η_0 : 최대 점성계수
- η' : 점성계수
- t : 무차원화된 전단변형률
- θ : 무차원화된 온도
- ρ : 밀도
- $\bar{\sigma}$: 전체 응력 (total stress) 벡터
- ψ, ϕ : 형상함수

1. 서 론

사출성형시 고분자 물질의 충전과정 해석은 방향성 (orientation), 잔류응력 (residual stress) 및 웰드라인 (weld line) 등 성형품의 기계적 성질과 정밀도를 예측하여 적절한 성형조건 및 금형설계의 변수를 결정하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 고분자 물질은 비뉴우튼 유체 (non-newtonian fluid) 이고 그 유동은 비정상상태 (nonsteady state) 로 열전달이 일어나면서 이동 자유표면 (moving free surface) 을 동반하게 된다.

Schmidt⁽¹⁾에 의해 고분자 물질이 진전하면서 벽쪽으로 흘러지는 현상, 즉 "fountain effect"가 실험적으로 발견된 이래 Tadmor⁽²⁾는 정적인장유동 (steady elongational flow) 을 가정하여 준 정량적인 해석을 하였고, Gogos 와 Huang^(3,4), Kamal 등⁽⁵⁾, Lafleur 와 Kamal⁽⁶⁾ 등은 에너지를 고려하여 MAC (Marker-and-Cell) 방법을 이용한 유한차분법으로 유동특성을 연구하였다. 그러나 위 방법으로는 진전하는 자유표면의 구체적인 형상을 구하기에는 많은 문제점이 남아 있다. 그 이외에도 Hieber 와 Shen⁽⁷⁾, Wang 등⁽⁸⁾이 유한요소법/유한차분법을 적용했던 Hele-Shaw 모델은 "fountain effect" 를 고려하지 않았으며, Mavridis 등⁽⁹⁾은 "fountain effect" 를 효과적으로 고려하였지만 열전달을 고려하지 않은 등온과정 (isothermal process) 인 경우만 생각했기 때문에 실제 현상과는 거리가 먼 것이었다.

따라서 본 연구에서는 두께방향에 따른 유동을 해석

하는데 "fountain effect" 및 열전달 현상을 동시에 고려하면서 진전하는 자유표면의 형상을 정확히 구하기 위한 유한요소법을 이용한 수치해석법을 제안하고 그 방법을 적용하여 금형벽의 온도를 변화시켜가면서 구체적인 유동특성을 해석하였다.

2. 지배방정식

충진시 응고층의 형성은 두께에 비해 매우 작으므로 무시하고 비압축성, 준 정적상태를 사용했으며 구성방정식 (constitutive eq.) 으로는 온도가 고려된 비탄성 power-law 모델을 택했다.

한편 무차원 변수를 다음과 같이 정의할 수 있고

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{U_{in}}, V = \frac{v}{U_{in}}$$

$$P = \frac{pH}{\eta_0 U_{in}}, \eta = \frac{\eta'}{\eta_0}, \theta = \frac{T - T_{in}}{T_{in} - T_{in0}} \quad (1)$$

식 (1) 을 사용하여 무차원화된 지배방정식을 표현하면 아래와 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

운동방정식

$$X \text{ 방향 } - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X} \left(2\eta \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\eta \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \right) = Re \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right)$$

$$Y \text{ 방향 } - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\eta \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(2\eta \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = Re \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \quad (3)$$

에너지방정식

$$Pe \left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + B_r \eta \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서

$$Re = \frac{\rho U_{in} H}{\eta_0}, Pe = \frac{\rho C_p U_{in} H}{k}, B_r = \frac{\eta_0 U_{in}^2}{k(T_{in} - T_{in0})}$$

이때 경계조건은 다음과 같다.

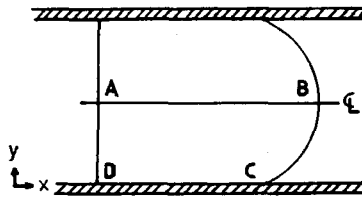


Fig. 1 Schematic diagram of flow domain

Fig. 1에서

$$AD, U = U_{avg} \left(\frac{2n+1}{n+1} \right) \left[1 - (1-Y)^{1+\frac{1}{n}} \right],$$

$$V=0, \theta=1 \tag{5}$$

$$DC, U=0, V=0, \theta=0 \tag{6}$$

$$AB, T_{xy}=0, V=0, \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0 \tag{7}$$

$$BC, \text{표면장력을 무시할 때}$$

$$\text{접선응력 } (\bar{\sigma} \cdot \bar{n}), \bar{t}=0 \tag{8}$$

$$\text{법선응력 } (\bar{\sigma} \cdot \bar{n}), \bar{n}=0 \tag{9}$$

여기서

$$\bar{\sigma} = -P + \bar{T}$$

3. 유한요소해석

3.1 지배방정식의 유한요소화

형상함수를 이용하여 속도, 압력 및 온도를 근사화 하면

$$U(X, Y) = \sum_{j=1}^M U_j \phi_j(X, Y),$$

$$V(X, Y) = \sum_{j=1}^M V_j \psi_j(X, Y)$$

$$P(X, Y) = \sum_{j=1}^N P_j \phi_j(X, Y),$$

$$\theta(X, Y) = \sum_{j=1}^M \theta_j \psi_j(X, Y) \tag{10}$$

위 방정식 (2), (3), (4)에 식 (10)을 적용하고 가중잔류법(WRM)을 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^M (A_{ij} U_j + C_{ij} V_j) + \sum_{k=1}^M (Re IX_{ijk} U_j U_k) + Re IY_{ijk} V_j U_k - \sum_{j=1}^M D_{ij} P_j = 0 \tag{11}$$

$$\sum_{j=1}^M (C_{ji} U_j + B_{ji} V_j) + \sum_{k=1}^M (Re IX_{ijk} U_j V_k) + Re IY_{ijk} V_j V_k - \sum_{j=1}^N E_{ij} P_j = 0 \tag{12}$$

$$\sum_{j=1}^M (-D_{ji} U_j - E_{ji} V_j) = 0 \tag{13}$$

$$\sum_{j,k=1}^M (Pe IX_{ijk} U_j \theta_k + Pe IY_{ijk} V_j \theta_k)$$

$$+ \sum_{j=1}^M F_{ij} \theta_j = S_i \tag{14}$$

여기서

$$A_{ij} = 2 \langle \eta \phi_{i,x} ; \phi_{j,x} \rangle + \langle \eta \phi_{i,y} ; \phi_{j,y} \rangle$$

$$B_{ij} = 2 \langle \eta \phi_{i,y} ; \phi_{j,y} \rangle + \langle \eta \phi_{i,x} ; \phi_{j,x} \rangle$$

$$C_{ij} = \langle \eta \phi_{i,y} ; \phi_{j,x} \rangle$$

$$D_{ij} = \langle \phi_{i,x} ; \phi_j \rangle, E_{ij} = \langle \phi_{i,y} ; \phi_j \rangle$$

$$F_{ij} = \langle \phi_{i,x} ; \phi_{j,x} \rangle + \langle \phi_{i,y} ; \phi_{j,y} \rangle$$

$$S_i = \langle \phi_i ; B_i \eta \bar{t} \rangle$$

$$IX_{ijk} = \langle \phi_i ; \phi_j \phi_k \rangle, IY_{ijk} = \langle \phi_i ; \phi_j \phi_k \rangle$$

$$t^2 = 2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2$$

3.2 Upwinding 기법

에너지 방정식에서 나타나는 콘벡티브(convective) 항에 관련된 항렬식은 비대칭이다. 특히 일반적인 고분자 물질에서의 같이 Pe 값이 10^3 이상되는 경우 수렴 과정에서 위굴(wiggle) 현상이 심하게 나타나므로 해의 정확도에 상당한 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 Brooks와 Hughes⁽¹⁰⁾가 제안한 Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Technique을 응용하여 다음과 같이 사용하였다.

즉, 콘벡티브 항에서의 형상함수

$$\tilde{\phi}_i = \phi_i + P_i \tag{15}$$

여기서

$$P_i = \hat{R} \hat{U}_i \phi_{i,j} / \| \underline{U} \|$$

이때

$$\hat{R} = (\tilde{\xi} U_i h_{\xi} + \tilde{\eta} U_i h_{\eta}) / 2$$

여기서

$$\tilde{\xi} = \coth(Pe U_i h_{\xi} / 2) - \frac{2}{Pe U_i h_{\xi}}$$

$$\tilde{\eta} = \coth(Pe U_i h_{\eta} / 2) - \frac{2}{Pe U_i h_{\eta}}$$

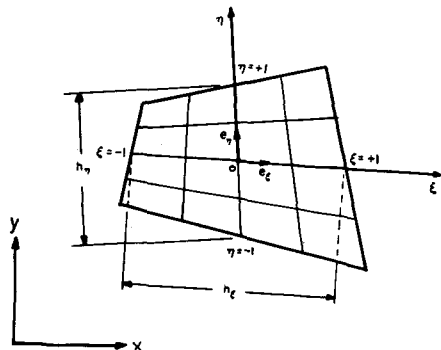


Fig. 2 Typical finite element geometry

$$U_t = e_{2t} \cdot U, \quad U_r = e_{2r} \cdot U$$

단위벡터 e_{2t} 와 e_{2r} 및 요소특성길이 h_t 와 h_r 는 Fig. 2에 표시되고 있으며 U 는 요소 중심에서의 속도이다.

3.3 자유표면의 계산방법

등온유동의 경우에는 Mavridis 등⁽⁹⁾과 같이 급형벽을 유동 반대 방향으로 평균속도만큼 움직여 자유표면을 통한 유량이 없도록 그 형상을 구할 수 있으나 비등온유동의 경우에는 벽면을 움직임으로 인해 온도분포가 달라지게 되므로 실제현상과는 다르게 된다. 따라서 여기서는 "fountain flow" 현상이 단순히 유체역학적인 현상임을 고려하여 자유표면에 다음과 같은 경계 조건을 부여하고 그 형상을 구하는데 이용하였다. 즉,

$$\underline{W} \cdot \underline{n} = 0 \quad (16)$$

여기서

$$\underline{W} = W_x i + W_y j = (U - U_{ave}) i + V_j$$

우선 자유표면의 형상을 적절히 가정하고 경계조건식 (5), (6), (7), (8), (9)를 만족하는 식 (11), (12), (13), (14)를 Newton-Raphson 방법을 이용하여 동시에 풀면 속도, 압력 및 온도분포가 계산되나 식 (16)을 만족하지 않는다. 따라서 식 (16)을 만족하는 자유표면의 형상을 구하기 위해 다음과 같은 과정을 생각할 수 있다. 즉, Caswell과 Virayuthakorn⁽¹¹⁾, Nickell 등⁽¹²⁾이 die swell 문제를 풀기 위해 사용했던 방법을 일부 수정하여 Fig. 3에서 \underline{W} 를 생각할 때 updated free surface를 통한 유동은 없으며 old surface를 통한 유입량이 절점 j 에서의 속도 V_j 를 갖고 Y 방향으로 전부 흘러 나가게 되므로 old surface에서의 절점 j 를 바로 X 방향으로 옮기면서 반복 계산하였다.

이 계산과정은 다음과 같다.

$$X_j^{i+1} = X_j^i + \int_0^{Y_j^i} (\underline{W} \cdot \underline{n}) ds / W_{Y_j}$$

즉,

$$X_j^{i+1} = X_j^i + \int_0^{Y_j^i} [(U - U_{ave}) i + V_j] \cdot \underline{n} ds / V_j \quad (17)$$

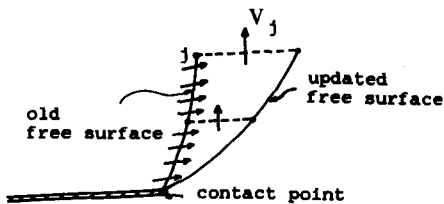


Fig. 3 Free surface updating scheme

이와같이 식 (17)을 사용하여 새로운 자유표면의 형상을 예측하고 다시 반복하면 불과 2~3번만에 정확한 자유표면의 형상을 구할 수 있다. 이와같이 하여 계산된 형상을 다음 시간단계에서의 초기조건으로 가정하고 같은 반복법을 통해 각 순간에서의 유동특성 및 자유표면 형상을 계산할 수 있다.

4. 자동메쉬생성 (Automotive Mesh Generation)

자유표면의 형상이 변화하고 고분자 물질이 충전됨에 따라 계산영역이 변화하게 되므로 자동메쉬생성이 요구되어 본 연구에서는 Thompson 등⁽¹³⁾이 사용했던 수치모사에 의한 Boundary-Fitted 좌표계를 이용하여 문제를 해결하였다.

(X, Y)좌표로 정의된 실제영역을 (ξ, η)좌표로 표시된 계산영역으로 모사할 때

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi(X, Y) \\ \eta(X, Y) \end{bmatrix} \text{이며}$$

(X, Y)에서 (ξ, η)로의 모사관계식은 Dirichlet 경계조건을 갖는 Laplace 방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \xi_{,xx} + \xi_{,yy} &= 0 \\ \eta_{,xx} + \eta_{,yy} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

이 식은 최대치 원리를 이용하여 해의 유일성이 증명되어 있다⁽¹⁴⁾. Fig. 4의 계산영역 (ξ, η)좌표에 대응하는 실제영역의 (X, Y)좌표는 역사상 (inverse mapping)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \alpha X_{,\xi\xi} - 2\beta X_{,\xi\eta} + \gamma X_{,\eta\eta} &= 0 \\ \alpha Y_{,\xi\xi} - 2\beta Y_{,\xi\eta} + \gamma Y_{,\eta\eta} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} \alpha &= X_{,\xi}^2 + Y_{,\xi}^2 \\ \beta &= X_{,\xi} X_{,\eta} + Y_{,\xi} Y_{,\eta} \\ \gamma &= X_{,\eta}^2 + Y_{,\eta}^2 \end{aligned}$$

위 식을 SOR (Successive Over Relaxation)을 이용한

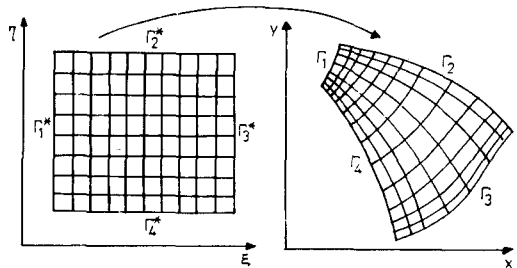


Fig. 4 Boundary-fitted coordinate system

유한차분법(FDM)으로 풀면 계산영역에서 단순하게 정의된 메쉬가 복잡한 실제영역에서의 메쉬로 사상되므로 짧은 계산시간으로 양호한 메쉬를 생성시킬 수 있다.

5. 결과 및 검토

본 연구에서는 Polystyrene 을 재료로 택했으며 수치 계산에 사용된 물성치는 Table 1^(15,16,18)과 같으며 계산에 사용된 성형조건은 Table 2 와 같이 금형의 온도

Table 1 Material properties of polystyrene (DOW STYRON 678)

$\eta' = 6700 \times 10^1 \exp(-0.017(T - 220^\circ\text{C})) t^{0.356} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$
$k = 0.1295 \times 10^6 \text{ dyne/sec}^\circ\text{K}$
$\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$
$C_p = 1.733 \times 10^7 \text{ dyne} \cdot \text{cm/g}^\circ\text{K}$
$n = 0.356$

Table 2 Processing conditions

Cond. number	Melt temp. ($^\circ\text{C}$)	Mold temp. ($^\circ\text{C}$)	Flow rate (cm^3/sec)	Thickness (cm)
Cond. 1	190	40	0.492	2.
Cond. 2	190	60	0.492	2.

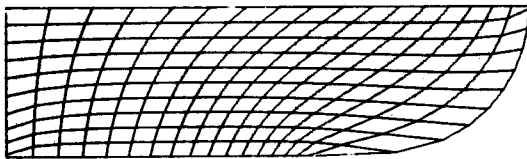


Fig. 5 Typical mesh

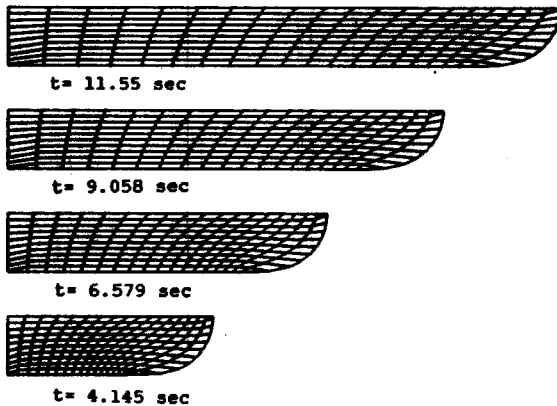


Fig. 6 The free surface shape at each time(Cond. 1)

Table 3 Xdiff versus time for conditions 1 and 2

Time(sec)	Xdiff	
	Cond. 1	Cond. 2
4.1	1.41	1.39
6.5	1.35	1.33
9.0	1.32	1.31
11.5	1.30	1.28

를 변화하였고 Fig. 5 와 같이 자동적으로 생성된 메쉬가 사용되었다.

5.1 자유표면의 형상

Fig. 6 은 조건 1 의 경우 충전과정에 따른 자유표면의 형상을 나타낸 것이고 접촉점에서 중심선의 선단까지의 거리 Xdiff가 조건 1 과 조건 2 의 경우에 대해 Table 3 에 나타나 있다. 동온의 경우 Behrens⁽¹⁷⁾, Mavridis⁽¹⁸⁾ 등의 결과에 따르면 이 값들이 0.91~0.94 정도이다. 따라서 비동온의 경우, 조건 1 에서 50% 정도, 조건 2 에서 48% 정도 더 뾰족한 형상을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 충전되면서 자유표면의 모양이 조금씩 평평해짐을 볼 수 있는데 이것은 열전도와 대류에 의해 열을 더욱 빼앗기게 되어 자유표면에서의 온도구배가 줄어들기 때문이다.

5.2 속도분포

조건 1 에서 계산된 속도벡터가 Fig. 7 에 나타나 있는데 자유표면 부근의 속도벡터가 벽쪽을 향하고 있음을 통해 "fountain flow" 현상을 볼 수 있으며 중심선을 따라 속도 크기가 점차 증가하다가 자유표면에 가까울수록 다시 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이 모습은 Fig. 8 과 Fig. 9 에서 더욱 잘 확인할 수 있는데 이것은 비동온유동의 특징으로 벽 부근에는 온도가 매우 낮아 점성이 큰 반면 중심부근에서는 여전히 온도가 190 $^\circ\text{C}$ 를 유지하여 점성이 작기 때문에 중심선을 따라 속도가 증가하게 되지만 자유표면 근방에서는 온도분포가 비슷해지고 "fountain flow" 현상 때문에 오히려 축방향속도는 감소하게 된다. 또한 Fig. 8 의 조건 2 에서 축방향속도가 작어진 모습은 금형벽의 온도가 높아질수록 자유표면이 평평해지는 현상을 설명해 주고 있다. Fig. 10 은 횡방향속도를 나타낸 것으로 접촉점과 중심선 사이에서 가장 큰 속도성분이 존재함을 알 수 있다. Fig. 11 은 각 X좌표에서의 축방향 속도들 그런 것으로 자유표면에서의 속도는 두께방향으로 거

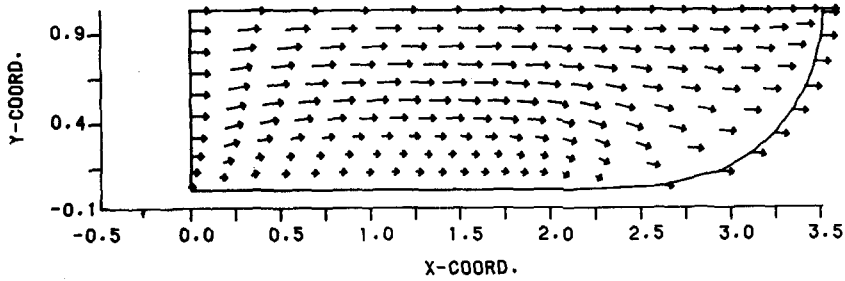


Fig. 7 Instantaneous velocity vector(Cond. 1)

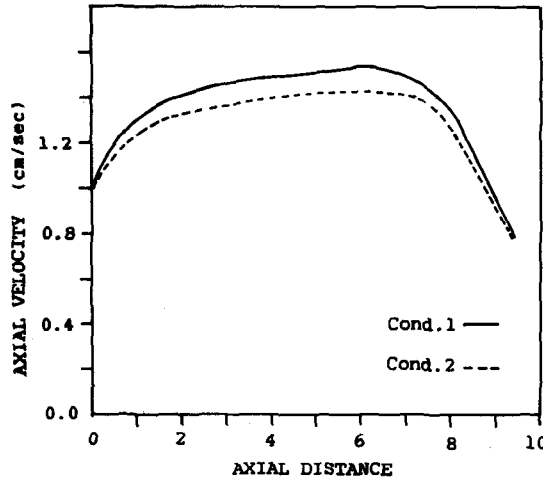


Fig. 8 Axial velocities along the centerline

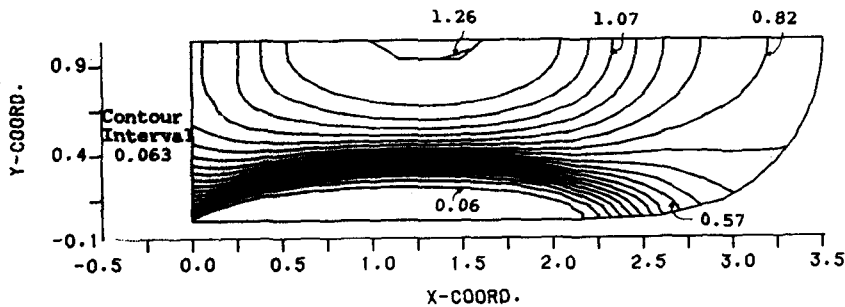


Fig. 9 Axial velocity contour(Cond. 1)

의 일정하다가 벽부근에 가서 급격히 떨어지고 있는데 이것은 "fountain flow" 현상 때문이며 결국 두께방향에 대한 축방향속도 변화가 적다는 사실을 통해 선단부근에서의 유동은 인장유동이 지배적임을 알 수 있다.

5.3 압력분포

Fig. 12는 압력분포를 나타낸 것으로 자유표면과 벽면의 접촉점에서 압력의 특이(singularity)현상이 나타

나고 있다. 이것은 no slip 경계조건이 원인이며, 등온유동의 경우와는 달리 입구부분에서 등압선이 수직선이 되지 않는때 이는 벽에서의 온도 경계조건과 고분자 물질의 온도 경계조건이 갑자기 달라지기 때문이다. Fig. 13은 게이트 부근에서의 높은 압력이 자유표면에서는 대기압으로 떨어지고 있음과 고분자 물질이 충전됨에 따라 모든 부분에서의 압력이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

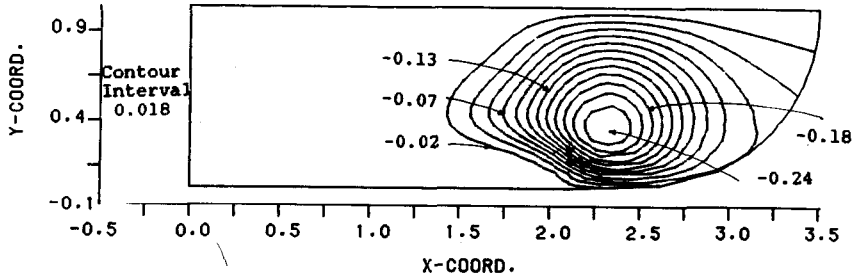


Fig. 10 Transverse velocity contour(Cond. 1)

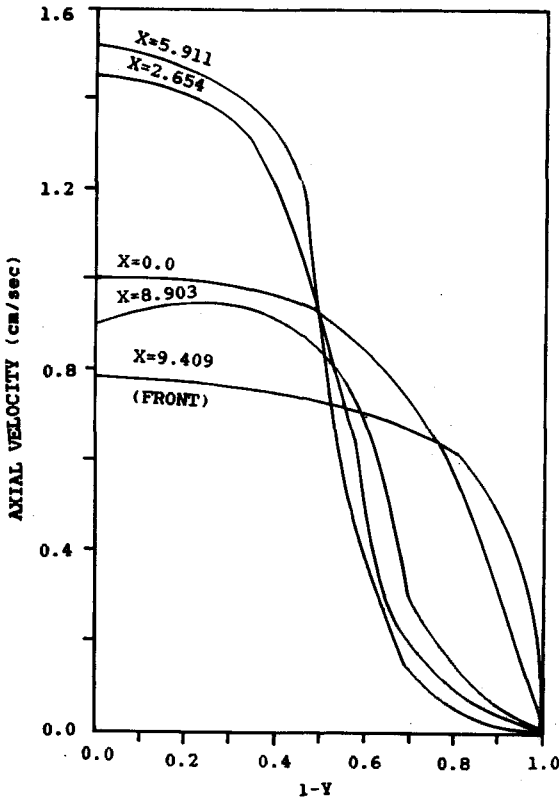


Fig. 11 Gapwise distribution of axial velocities (Cond. 1)

5.4 온도분포

Fig. 14는 온도를 나타낸 것으로 게이트에서 멀러 멀어질수록 벽부근에서의 온도는 더욱 낮아지지만 자유표면 부근에서의 온도는 오히려 높아진다. 이것은 "fountain flow" 현상 때문에 중심에 있던 뜨거운 고분자 물질이 벽쪽으로 흐르기 때문이다. 중심선을 따른 온도변화를 나타낸 Fig. 15를 통해 이 현상을 확인해 볼 수 있다. Fig. 16은 $X=2.654$ 지점의 온도분포로 벽부근으로 갈수록 층전에 따른 온도 변화가 다소 적어짐을 볼 수 있는데 이것은 벽면으로의 열전도보다는 점성에 의한 열발생(heat generation)이 약간 더 크기 때문이다. Fig. 17은 온도 분포선을 나타낸 것으로 표시되지 않은 부분은 모두 190°C 의 온도를 유지하는 것을 의미한다.

5.5 전단응력

Fig. 18은 각 X 지점에서 두께방향의 전단응력을 나타낸 것으로 중심에서는 0이고 벽에서 최대값을 가지며 게이트에서 멀어짐에 따라 더욱 증가하고 있음을 볼 수 있다. 또한 금형벽의 온도가 높아지면 자유표면 부근으로 갈수록 전단응력이 더욱 멀어짐을 알 수 있다.

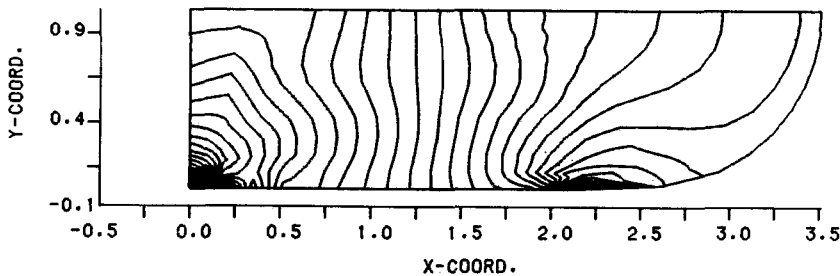


Fig. 12 Pressure contour(Cond. 1)

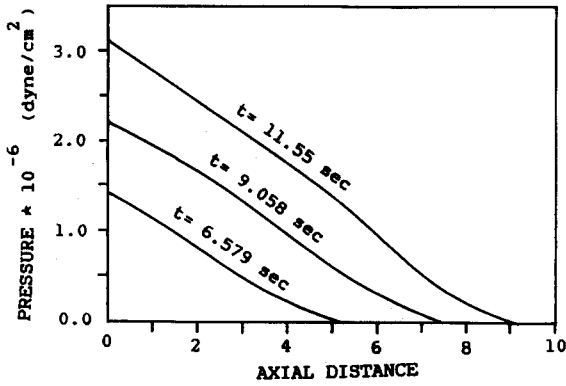


Fig. 13 Axial pressure distribution at centerline (Cond. 1)

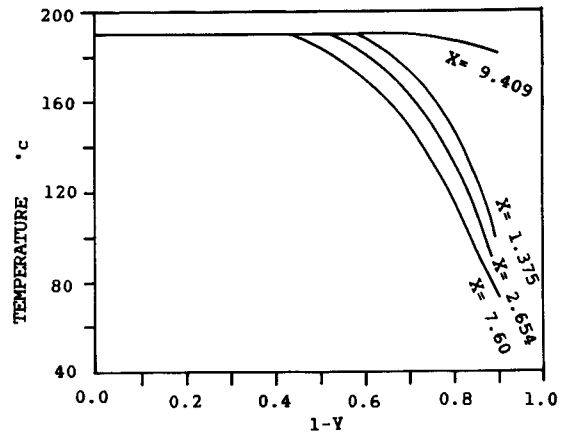


Fig. 14 Gapwise distribution of the temperature (Cond. 1)

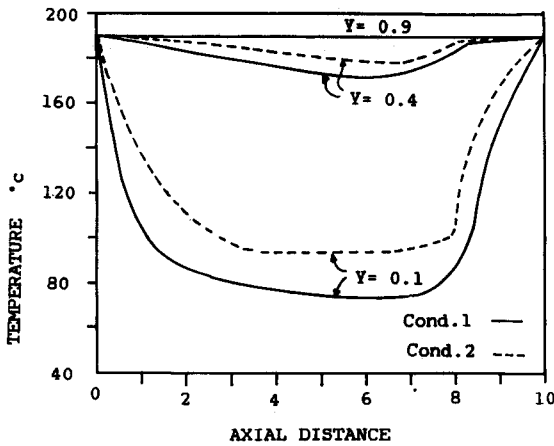


Fig. 15 Temperature variation as a function of axial distance

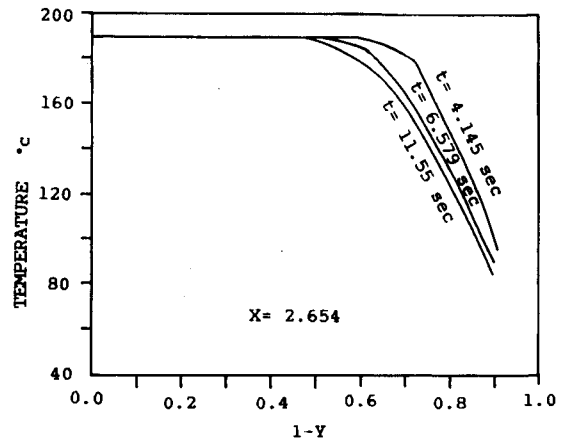


Fig. 16 Temperature distribution as a function of time (Cond. 1)

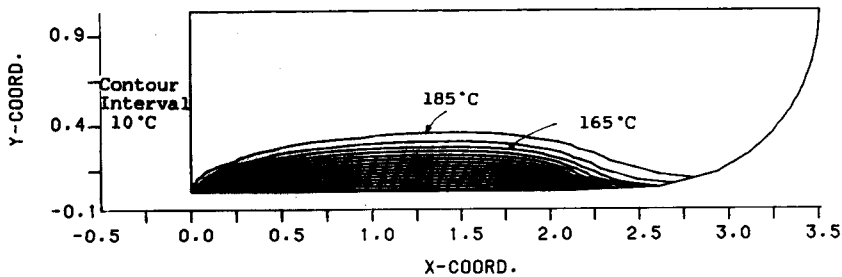


Fig. 17 Temperature contour (Cond. 1)

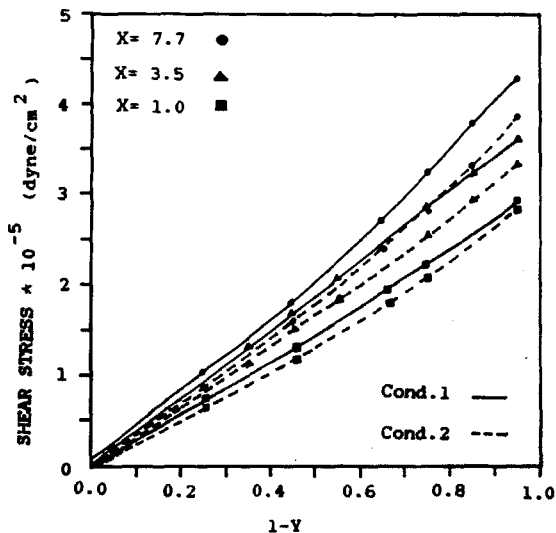


Fig. 18 Gapwise distribution of shear stresses

6. 결 론

이상의 결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 사출성형과 같은 열역학적, 유체역학적 거동과 함께 이동 자유표면을 갖는 복잡한 연성계문제를 본 연구에서 제시한 수치해석 방법을 이용하여 효과적으로 풀 수 있다.

(2) 비등온유동의 경우 자유표면형상은 등온유동의 경우와는 달리 조건 1일 때는 50% 정도, 조건 2일 때는 48% 정도 더 뾰족한 모양을 갖고 있으며, 금형 벽의 온도가 높아질수록 그리고 고분자 물질이 진전될 때 따라 점차 평평해짐을 알 수 있다.

(3) "fountain flow" 현상은 유체역학적인 현상이지만 그것이 온도 분포에 미치는 영향은 매우 크다.

(4) 전단응력은 벽으로 갈수록 그리고 게이트에서 멀어질수록 점점 커지고 있으며 금형의 온도가 증가하면 자유표면 부근으로 갈수록 더욱 감소한다.

(5) 여기서 계산된 결과는 고분자 물질의 미세 구조의 방향성 분포와 같은 기계적 성질을 예측하는데 사용될 수 있으며 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

(1) Schmidt, L.R., 1974, "A Special Mold and Tracer Technique for Studing Shear and Extensional Flows

in a Mold Cavity During Injection Molding", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 14, pp. 797~800.

(2) Tadmor, Z., 1974, "Molecular Orientation in Injection Molding", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 18, pp. 1753~1772.

(3) Gogos, C.G. and Huang, C.F., 1986, "The Process of Cavity Filling Including the Fountain Flow in Injection Molding", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 26, pp. 1457~1466.

(4) Huang, C.F., 1978, "Simulaion of Cavity Filling Process with MAC Method in Injection Molding", Ph. D. Thesis, Stevens Institute of Technology.

(5) Kamal, M.R., Chu, E. and Lafleur, P.G., 1986, "Computer Simulation of Injection Mold Filling for Viscoelastic Melts with Fountain Flow", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 26, pp. 190~196.

(6) Lafleur, P.G. and Kamal, M.R., 1986, "A Structure-Oriented Computer Simulation of the Injection Molding of Viscoelastic Crystalline Polymers", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 26, pp. 92~102.

(7) Hieber, C.A. and Shen, S.F., 1980, "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 1~32.

(8) Wang, K.K. et al., 1977, *Computer-Aided Injection Molding System*, Rep. 4.

(9) Mavridis, H., Hrymak, A.N. and Vlachopoulos, J., 1986, "Finite Element Simulation of Fountain Flow in Injection Molding", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 26, pp. 449~454.

(10) Brooks, A.N. and Hughes, T.J.R., 1982, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 32, pp. 199~259.

(11) Caswell, B. and Viriyayuthakorn, M., 1983, "Finite Element Simulation of Die Swell for a Maxwell Fluid", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 12, pp. 13~29.

(12) Nickell, R.E., Tanner R.I. and Caswell, B.,

- 1974, "The Solution of Viscous Incompressible Jet and Free-Surface Flows Using Finite-Element Methods", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp. 189~206.
- (13) Thompson, J.F., Thames, F.C. and Mastin, C. W. "Coordinate Systems for Solution of Partial Differential Equations on Fields Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies", *Mississippi State, Mississippi*, 39762.
- (4) Levinson, N. and Redheffer, R.M., 1970, "Complex Variables", *Holden Day San Francisco*.
- (15) Janeschitz-Kriegl, H., 1977, "Injection Molding of Plastics: Some Ideas about the Relationship between Mould Filling and Birefringence", *Rheologica Acta*, Vol. 16, pp. 327~339.
- (16) Dietz, W. and White, J.L., 1978, "Ein einfaches Modell zur Berechnung des Druckverlustes während des Werkzeugfulvorgangs und der eingefrorenen Orientierung beim Spritzgießen amorpher Kunststoffe", *Rheologica Acta*, Vol. 17, pp. 676~692.
- (17) Behrens, R.A., 1983, "Transient Domain Free Surface Flows and Their Applications to Mold Filling", *Ph.D. Thesis, Uni. of Delaware*.
- (18) Wijngarden, H.V. and Dijkstra, J.F., 1982, "Non-isothermal Flow of a Molten Polymer in a Narrow Rectangular Cavity", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp. 175~199.