대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 C pp. 251~256 KSME 01S324

사출 성형품의 금형내 잔류응력과 이형후 냉각에 의한 후변형 해석

양상식* • 권태헌*

Deformation Analysis of Injection Molded Articles due to In-mold Residual Stress and Cooling after Ejection

SangSik Yang and TaiHun Kwon

Key Words : 변형(Deformation), 수축(Shrinkage), 굽힘(Warpage), 잔류응력(Residual Stress), 사출성형(Injection Molding)

Abstract

Deformation analysis of injection molded articles whose geometry is considered as the assembly of the thin flat plates has been conducted. For the in-mold analysis, thermo-viscoelastic stress calculation of rheologically simple amorphous polymer and in-mold deformation calculation considering the in-plane mold constraint has been done. Free volume theory has been used for the non-equilibrium density state by the fast cooling. At ejection, the redistribution of stress together with instantaneous deformation has been considered. During out-of-mold cooling after ejection, thermoelastic model based on the effective temperature has been adopted for the calculation of deformation. Two typical mold geometries are used to test the numerical simulation.

기호설명

$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$:Cauchy 응력, 변형률 텐서의 요소

s_{ij}, e_{ij} :편차 응력, 변형률 텐서의 요소

p, T, T_{eff} :압력, 온도, 유효온도

ρ, V, δ :밀도, 비체적, 비자유체적

$a_T, f(T)$:전이 함수

$\mu(t)$:전단 계수

ξ :물질시간

u, v, w :각 축 방향의 속도 또는 변위의 요소

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$:각 축 방향의 회전 자유도

$[K_p] \backslash [K_m]$:판굽힘 요소와 막변형 요소의 강성행렬

$[B_p] \backslash [B_m]$:판굽힘 요소와 막변형 요소의 변위-변형률 행렬

α, Θ :열팽창 계수

1. 서 론

사출 성형제품은 성형과정과 이후의 냉각과정을 통해 변형된다. 정밀한 제품의 사출에 대한 요구가 늘어남에 따라 사출된 제품의 변형의 정확한 예측이 필요하게 되었다.

사출 성형제품의 변형은 제품에 남아있는 잔류응력과 온도의 변화에 따른 제품의 열변형에 의해 결정된다. 이중 잔류응력은 그 발생원인에 따라 유동으로 인한 잔류응력과 열로 인한 잔류응력으로 나누어 생각할 수 있다.

유동으로 인한 잔류응력은 충전 및 보압 과정의 속도장의 구배로 인하여 발생한 응력이 급격한 냉각에 의해 제대로 이완되지 못하고 굳은 응력을 말한다. 이것은 이방성을 야기하며 복굴절등에 많은 영향을 주는 요소이지만, 그 값이 열로 인한 잔류응력에 비해 훨씬 작기 때문에 변형에는 큰

* 포항공과대학교 기계공학과

영향을 주지 않는다.

열로 인한 잔류응력(열응력)은 냉각시의 두께방향으로의 온도구배로 인한 불균일한 밀도분포에 의해 발생한다. 이를 예측하기 위하여 지금까지 여러 연구가 이루어져 왔다. 그 연구들은 크게 재료를 탄성체로 보고 접근한 것[1,2]과, 점탄성체로 보고 접근한 것[3-8]으로 나뉘어질 수 있다. 탄성모델을 사용한 연구들은 정성적인 면에서는 잘 예측을 하지만 정량적인 면에서는 응력을 실제보다 크게 예측하는 경향이 있다. 이는 고분자의 응력완화 현상을 예측하지 못하기 때문이다. 또한 급격한 냉각에서 발생하는 비평형 상태의 밀도에 의한 체적 이완현상도 고려되어야 한다.[4]

본 연구에서는 금형 내에서의 냉각 과정에서의 평면 방향으로의 구속조건을 고려한 고분자의 열응력과 내부변형을 알아 보았고, 이형이 일어나는 순간 경계조건이 바뀜에 따라 응력의 재분배에 의한 변형, 이형 이후의 냉각에서 일어나는 변형을 관찰하였다. 금형 내부에서의 변형은 이형시 일어나는 변형을 고려할 때 초기 변형으로써 함께 고려되었고, 이형후의 변형은 따로 관찰하였다. 전 과정에서 자유 체적 이론에 근거하여 재료가 실제 온도가 아닌 유효온도에 따라 반응한다고 가정하였다.

2. 이론

2.1 충전 및 보압 과정

충전 및 보압과정의 모사는 간략히 설명하였다. 자세한 설명은 [7-8]을 참조하기 바란다.

충전 및 보압과정의 모사의 지배방정식으로 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식이 있으며 적절한 경계조건과 구성방정식, 상태방정식을 이용하여 모사를 충전 및 보압과정을 모사한다

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \tag{1}$$

$$0=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z},0=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z},0=-\frac{\partial p}{\partial z} \tag{2}$$

경계조건으로 벽면에서는 유동이 없으며 ($u=0, v=0$), 게이트의 조건은 충전과정에서는 일정한 유량이, 보압과정에서는 일정한 압력을 부여하였다.($Q=Q_{gate}$ 또는 $p=p_{gate}$) 또한 유동선단에서의 압력은 0 이 되게 하였다.($p_{meltfron}=0$)

$$\rho c_p(T)\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial z}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\tau_{xz}\frac{\partial u}{\partial z}+\tau_{yz}\frac{\partial v}{\partial z} \tag{3}$$

에너지 방정식을 위한 경계조건으로, 이형 되기 전의 제품이 금형 내부에 있을 때에는 각 벽면에서의 온도를 지정하였다. 두께방향으로 보았을 때 위와 아래 벽면에서의 온도를 독립적으로 지정할 수 있도록 하여, 비대칭적 온도조건을 알아볼 수 있게 하였다.($T=T_{w1}$,z=0 그리고 $T=T_{w2}$,z=b) 이형 이후에는 대류 경계조건이 부과되었다.

$$\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_{amb}),\text{z=0,z=b} \tag{4}$$

비선형 점탄성 유체의 거동을 표현하기 위해서 Leonov 의 점탄성 모델을 도입하였다.

$$\tilde{\tau}=2\eta_0 s\tilde{d}+\sum_{k=1}^{N}\frac{\eta_k}{\theta_k}\tilde{c}_k \tag{5}$$

압축성을 고려하기 위해서 Tait 방정식을 사용하여 밀도를 압력과 온도의 함수로 표현하였다.

$$\rho(T,p)=\rho_0(T)\left\{1-0.0894\ln\left[1+\frac{p}{B(T)}\right]\right\}^{-1} \tag{6}$$

$$\frac{1}{\rho_0(T)}=\begin{cases}b_{1,l}+b_{2,l}(T-b_5), T>T_g(p)\\ b_{1,s}+b_{2,s}(T-b_5), T\le T_g(p)\end{cases} \tag{7}$$

$$B(T)=\begin{cases}b_{3,l}\exp(-b_{4,l}T), T>T_g(p)\\ b_{3,s}\exp(-b_{4,s}T), T\le T_g(p)\end{cases} \tag{8}$$

$$T_g(p)=D_2+D_3 p \tag{9}$$

2.2 자유 체적 이론

사출 성형 공정에서는 고분자 재료가 금형 외벽의 낮은 온도로 인하여 급격한 온도 하강이 이루어지며, 이러한 현상을 다루기 위하여 자유 체적 이론을 도입하였다. Fig. 1 과 같이 고분자 물질이 Ti 에서 Tfinal 로의 급격한 온도변화를 겪을 때, 고분자 재료는 평형부피를 따라 부피가 변하지 않고 AB 경로를 통하여 부피가 순간적으로 감소한 이후, BC 경로를 통하여 점차적으로 평형 부피에 도달하게 된다.

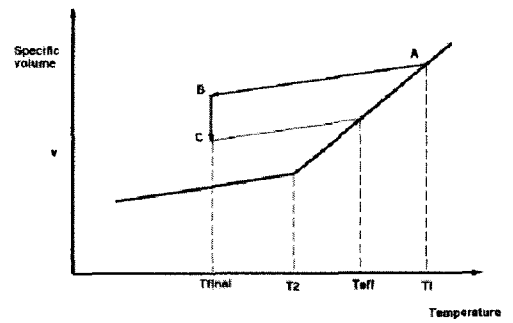


Fig. 1 Change of specific volume of polymer from Ti to Tfinal.

이러한 과정을 다음과 같은 일차미분방정식으

로 표현할 수 있다고 가정한다.

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{\delta}{\tau} - \Delta\alpha\frac{dT}{dt} \tag{10}$$

δ 는 자유 체적 분율로서 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = \frac{V(t) - V_\infty(T,p)}{V_{ref}} \tag{11}$$

V, V_∞, V_{ref} 는 각각 현재 시간 t 에서의 비체적과 평형상태에서의 비체적, 기준 온도에서의 비체적을 나타낸다. $\Delta\alpha = \alpha_l - \alpha_s$ 는 액체상태와 고체상태에서의 열팽창 계수의 차이이며 $\tau = \tau_0 a_T$ 는 자유체적의 이완시간이다. 유효온도는 비평형상태를 자유체적으로 표현한 것으로써 다음과 같이 정의된다.

$$T_{eff} = T + \frac{\delta}{\Delta\alpha} \tag{12}$$

2.3 열로 인한 응력

응력의 변화는 두께 방향으로 일어나며 용융수지의 중심 부위는 이미 유리화된 물질로 둘러싸여 있고 시간이 지남에 따라 재료의 고화가 진행되어 간다.

열 응력의 계산이 이루어지는 영역을 정하기 위하여 유동정지(no-flow) 온도가 도입되었으며 그 온도는 $T_g + 30K$ 이다. 또한 수지는 열유변학적으로 간단성을 갖는다고 가정한다. 따라서 다른 온도에서의 전단계수의 시간에 따른 반응은 하나의 기준온도에서의 주곡선으로부터 변이 함수를 이용하여 구할 수 있게 된다.

$$\mu_T(t) = \mu_{Tr}(tf(T)) \tag{13}$$

여기에서 μ_{Tr} 은 기준온도에서의 전단계수이며 $f(T)$는 변이 함수이다.

앞에서의 가정에 따라 점탄성 고체의 미소변형은 다음과 같이 나타내어진다.

$$s_{ij} = \int_0^\xi 2\mu(\xi - \xi')\frac{\partial e_{ij}}{\partial \xi'}d\xi' \tag{14}$$

$$\sigma_{ii} = 3K(\varepsilon_{ii} - 3\alpha_0\Theta) \tag{15}$$

$\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ 는 각각 Cauchy 응력과 변형률 텐서의 요서이며 s_{ij}, e_{ij}는 각각 편차 응력과 편차 변형률 물질시간과 열팽창 계수는 유효온도의 함수로써 정의된다.

$$\xi = \int_0 f(T_{eff})dt' = \int_0 \frac{1}{a_T(T_{eff})}dt' \tag{16}$$

$$\Theta = \frac{1}{\alpha_0}\int_{T_o}^{T_{eff}} \alpha(T')dT' \tag{17}$$

식 (13), (16), (17)에서 사용된 변이 함수는 높은 온도에서는 WLF 형을, 낮은 온도에서는 Arrhenius 형을 사용한다.

$$\frac{1}{f(T)} = a_T = \begin{cases} \exp\left[-\dfrac{A_1(T-T_r)}{A_2+T-T_r}\right], T > T_g - 20 \\ \exp[A_3 - A_4(T-273)], T \le T_g - 20 \end{cases} \tag{18}$$

전단 계수를 Prony 급수형태로 나타내고 이를 이용하여 재귀적 형으로 나타난 응력의 증가 수식을 얻었다. 두께방향은 3, 평면 방향을 1 과 2 로 가정하면, 유동으로 인한 잔류응력은 고려하지 않으므로 전단응력은 고려하지 않는다.

$$\sigma_{11} + p = \int_0^\xi 2\mu(\xi - \xi')\frac{\partial}{\partial \xi'}(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33})d\xi' \tag{19}$$

$$\sigma_{22} + p = \int_0^\xi 2\mu(\xi - \xi')\frac{\partial}{\partial \xi'}(\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})d\xi' \tag{20}$$

$$\sigma_{11} + \sigma_{22} - p = 3K(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} - 3\alpha_0\Theta) \tag{21}$$

여기에서 $\sigma_{33} = -p$ 이며 $i \neq j$ 이면 $\sigma_{ij} = \varepsilon_{ij} = 0$ 이다.

Prony 급수는 다음과 같이 여러 모드의 감소하는 지수 함수의 조합으로 나타내어진다.

$$\mu(\xi) = \mu_0 + \sum_{i=1}^{n} \mu_i e^{-\xi/\tau_i} \tag{22}$$

사출품의 형태로 인한 변형의 구속을 고려하기 위해서 경계조건에 대한 적절한 가정이 있어야 한다. 제품이 평판들의 조합으로 이루어 졌다고 가정하면 다음의 경우들을 생각할 수 있다.

◆ 평면방향으로의 구속이 없을 때

$$\int_0^b \sigma_{11}(z)dz = \int_0^b \sigma_{22}(z)dz = 0 \text{ (z=3 방향)} \tag{23}$$

◆ 한 방향으로만 구속이 있을 때

$$\varepsilon_{11} = 0; \int_0^b \sigma_{22}(z)dz = 0 \tag{24}$$

◆ 모든 평면 방향으로 구속이 있을 때

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = 0 \tag{25}$$

2.4 이형과 그 이후의 변형

이형 과정과 그 이후에서의 변형을 보기 위해서 열변형을 수반하는 탄성체로 가정하였다. 이형 과정에서는 응력의 재분배가 일어나 정적 평형을 이루며 그 결과 순간 변형이 발생한다. 이형 이후에는 냉각에 따른 변형이 일어난다.

이 과정에서 고분자는 다음과 같은 정적 평형 방정식을 따른다.

$$\sigma_{ij,j} = 0 \tag{26}$$

변형률이 작고($\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$) 등방성을 가정

하면, 탄성체의 응력과 변형은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = (\lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + 2\mu\delta_{ik}\delta_{jl})(\varepsilon_{kl} - \varepsilon^0_{kl}) + \sigma^0_{ij} \quad (27)$$

λ, μ 는 Lamé 상수이며, ε^0_{ij}와 σ^0_{ij}는 초기 변형률과 초기 응력 텐서의 요소이다. 이 시스템은 선형이기 때문에 초기 변형률과 초기 응력텐서는 이형과정에서의 것과 이형이후의 것으로 나누어질 수 있으며 그 결과 나타나는 변형률역시 가해진 초기 변형률과 응력에 따라 나뉘어질 수 있다.

$$\varepsilon^0_{ij} = \varepsilon^{0,(1)}_{ij} + \varepsilon^{0,(2)}_{ij} \quad (28)$$

$$\sigma^0_{ij} = \sigma^{0,(1)}_{ij} + \sigma^{0,(2)}_{ij} \quad (29)$$

$$\varepsilon^r_{ij} = \varepsilon^{r,(1)}_{ij} + \varepsilon^{r,(2)}_{ij} \quad (30)$$

윗 첨자에서 (1)은 이형과정중의 것이고 (2)는 이형이후의 것을 나타낸다. 그리고 ε^r_{ij} 은 결과로 얻어진 변형률이다.

2.4.1 이형과정의 변형($\varepsilon^{r,(1)}_{ij}$)

엄밀히 이야기하면 금형 내부에서 일어난 변형은 이형과정에서 발생하는 변형이 아니지만 이것을 이형과정을 살펴볼 때 초기변형으로 볼 수 있다. 잔류응력의 재분배 과정에서 평형상태에 있지 않은 응력분포는 초기 응력이 된다.

2.4.2 이형 이후의 변형($\varepsilon^{r,(2)}_{ij}$)

이형 이후의 변화는 열변형이므로 초기 응력에 의한 효과는 없다. 즉, $\sigma^{0,(2)}_{ij} = 0$ 이다.

유효온도에 따른 열변형은

$$\varepsilon^{(2)}_{11} = \varepsilon^{(2)}_{22} = \int_{T^{(2)}_{(1)}} \alpha(T_{eff})dT_{eff}\ ,\ \varepsilon^{(2)}_{12} = 0 \quad (31)$$

이며 α는 Tait 상태방정식(식 (6))에서 구해진다.

2.5 구조해석

앞에서 구한 응력과 변형 상태를 바탕으로 전체의 변형을 보기 위하여 변위에 기반한 쉘구조의 유한 요소해석을 하였다.[9-10] 쉘은 얇은 평면의 삼각형의 조합으로 이루어 졌다고 가정하였다.

변형을 평면방향으로의 막 변형과 판 굽힘변형의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_m + z\kappa \quad (32)$$

ε_m 은 두께 방향으로 평균한 막 변형이고 κ 는 곡률이다. 변형이 작은 경우 막변형과 판굽힘변형은 서로 독립적으로 일어난다고 가정할 수 있다. 얇은 판을 고려하고 있으므로 평면 응력 조건($\sigma_{zz} = 0$)을 가정하였고 횡 전단응력(τ_{xz}, τ_{yz})의 효과는 무시하였다.

국소 좌표 시스템에서 초기 변형과 초기 응력의 효과를 고려한, 각 요소의 행렬식은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$Ka = \begin{bmatrix} [K_m] & 0 \\ 0 & [K_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_{zi} \\ w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}_{i=1,2,3} = \begin{Bmatrix} f_{xi} \\ f_{yi} \\ M_{xyi} \\ f_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{Bmatrix}_{i=1,2,3} = f_e \quad (33)$$

오른쪽의 행렬은 초기응력과 초기변형의 효과를 나타내고 있다.

$$f_e = f_{e,initialstress} + f_{e,initialstrain} \quad (34)$$

$$f_{e,initialstress} = -\int_A \begin{bmatrix} [B_m] & 0 \\ 0 & [B_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \int_0^b \sigma^0 dz \\ \int_0^b \sigma^0 (z - \frac{b}{2}) dz \end{Bmatrix} dA \quad (35)$$

$$f_{e,initialstrain} = \int_A \begin{bmatrix} [K_m B_m] & 0 \\ 0 & [K_p B_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \int_0^b \varepsilon^0 dz \\ \int_0^b \varepsilon^0 (z - \frac{b}{2}) dz \end{Bmatrix} dA \quad (36)$$

여기에서 $[B_m], [B_p]$ 는 각각 막요소와 평판굽힘 요소에서의 각 절점의 자유도와 변형을 연결하는 행렬이고 $[K_m], [K_p]$ 는 각각의 강성행렬이다. 각 요소에서 계산된 행렬식은 일반 좌표계로 변환을 거쳐 전체 행렬식에 더해지게 된다.

3. 수치해석

3.1 모형

수치해석을 위하여 Fig. 2 와 같은 형태들을 수치모사 하였다. 두 경우 모두 두께는 0.2cm 이다.

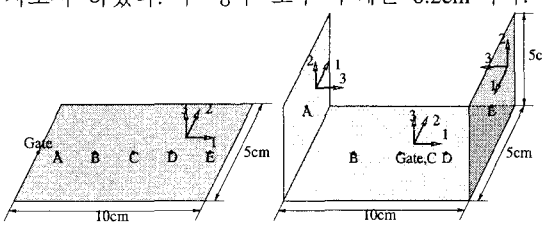


Fig. 2 Geometrical models:(a) model A,(b) model B

Fig. 2(a) 의 평판은 평면방향으로의 금형으로 인한 구속조건이 없기 때문에 식 (23)을 적용한다. Fig. 2(b) 의 "ㄷ"자 모형에서 옆면은 평판과 같은 조건이 적용되지만, 밑면은 옆면으로인한 평면방향의 구속을 고려하여 식 (24)를 적용하였다. 또한 A, B, C, D, E 다섯 곳에서, 두께방향으로의 온도와 잔류응력의 분포를 관찰하였다.

3.2 재료 및 성형조건들

사용된 수지는 PS 이다.

◆ 상태방정식

$b_{1,l}=1.00cm^3/g$, $b_{1,s}=0.982cm^3/g$,

$b_{2,l}=5.718\times10^{-4}cm^3/g\cdot K$,

$b_{2,s}=2.304\times10^{-4}cm^3/g\cdot K$,

$b_{3,l}=239.5g/cm\cdot s^2$, $b_{3,s}=280.5g/cm\cdot s^2$,

$b_{4,l}=4.112\times10^{-3}K^{-1}$, $b_{4,s}=2.810\times10^{-3}K^{-1}$

$b_5=423K$

◆ Prony 급수

μ_0	$2.64\times10^4 dynes/cm^2$		
μ_1	$2.32\times10^9 dynes/cm^2$	τ_1	$9.976\times10^{-4}s$
μ_2	$4.34\times10^9 dynes/cm^2$	τ_2	$9.976\times10^{-3}s$
μ_3	$1.12\times10^9 dynes/cm^2$	τ_3	$9.976\times10^{-2}s$
μ_4	$1.16\times10^6 dynes/cm^2$	τ_4	$9.976\times10^{-1}s$
μ_5	$7.86\times10^6 dynes/cm^2$	τ_5	$9.976\times10^{-0}s$
μ_6	$1.68\times10^5 dynes/cm^2$	τ_6	$9.976\times10^{1}s$
μ_7	$2.70\times10^5 dynes/cm^2$	τ_7	$9.976\times10^{2}s$
μ_8	$1.63\times10^6 dynes/cm^2$	τ_8	$9.976\times10^{3}s$

◆ 전이 함수

$A_1=19.79, A_2=68.930K, T_r=382.6K$

$A_3=15.0, A_4=0.09974K^{-1}$

◆ 공정 조건

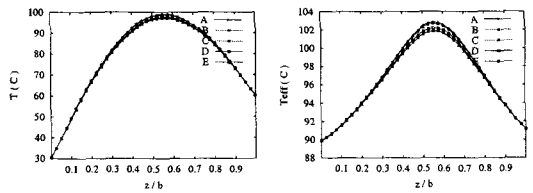
$h=1.47\times10^6 erg/s\cdot cm^2\cdot K, T_{w1}=303.15K, T_{w2}=333.15K$

$Q_{gate}=20cc, p_{gate}=p_{gate}(t_{fill}), t_{pack}=5s$

4. 결과

4.1 금형내부에서와 이형과정중의 변형

4.1.1 평판 모형의 결과



(a) (b)

Fig. 3 (a) Temperature and (b) Effective temprature distribution at ejection.

이형시의 실제온도와 유효 온도의 두께 방향의 분포를 Fig. 3 에서 나타내었다. 중심쪽의 온도는 실제 온도와 유효온도가 비슷하지만, 벽면으로 갈수록 실제온도보다 유효온도가 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 벽면에 가까울수록 빠른 냉각으로 인한 자유 체적이 많이 발생하는 것으로 이해할 수 있다.

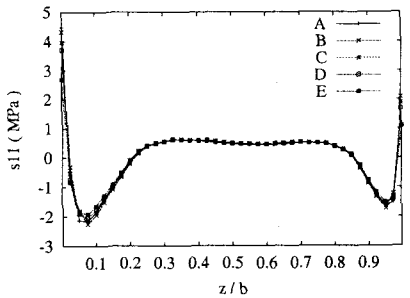
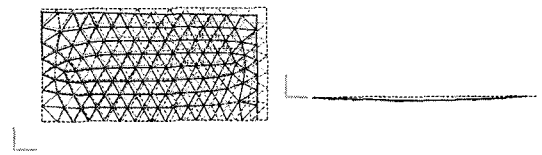


Fig. 4 Residual Stress distribution just before ejection.



(a) (b)

Fig. 5 Deformation just after ejection(magnification factor 50): (a) Top view, (b) Front view

Fig. 4 에서 이형직전의 응력분포를 보여주고 있다. 중심에서부터 인장, 압축, 다시 인장의 변화를 보여주고 있는데 이것은 사출 성형품에서 볼 수 있는 특징적인 응력분포이다. 금형에 의해 굽힘이 제한되어 있기 때문에 아랫부분에서 더 큰 압축 응력이 나타난다. 이형이 되면서 이 응력이 초기응력으로 작용하여 오목한 형태의 변형을 가져온다(Fig. 5). 평면방향으로는 수축을 제한하는 요소가 없기 때문에 금형 내에서 수축이 일어나고 이형과정의 평면방향으로의 수축은 일어나지 않는다.

4.1.2 "ㄷ"자 모형의 결과

Fig. 6 에서 밑면의 구속이 있는 방향으로의 응력분포는(1 방향, B, C, D) 두께방향으로 평형을 이루고 있지 않고 전체적으로 약간의 인장 상태 인데 이는 1 방향으로의 구속에 의해 냉각에 의해 생긴 열수축이 실제 변형으로 실현되지 못하고 인장응력으로 나타난 것이다. 이에 비해 Fig. 7 은 앞의 평판과 같은 경향을 나타낸다.

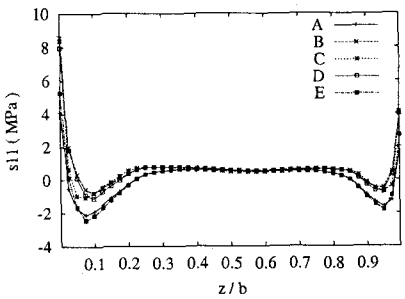


Fig. 6 Residual Stress distribution of direction 1 just before ejection.

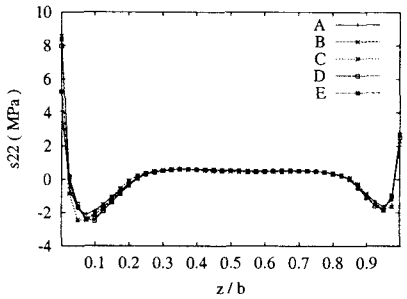
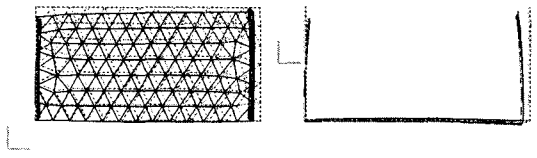


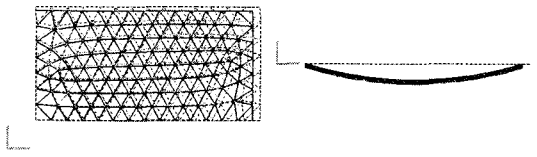
Fig. 7 Residual Stress distribution of direction 2 just before ejection.



(a) (b)

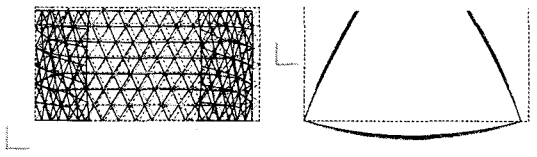
Fig. 8 Deformation just after ejection(magnification factor 100): (a) Top view, (b) Front view

4.2 이형후 냉각에 의한 변형



(a) (b)

Fig. 9 Deformation of model A(2 minutes after ejection, magnification factor 50):(a) Top view, (b)Front view



(a) (b)

Fig. 10 Deformation of model B(2 minutes after ejection, magnification factor 50):

Fig. 9 와 Fig. 10 은 이형후 2 분이 흐른 후의 냉각에 따른 변형($\varepsilon^{r,(2)}$)이다. 이 변형은 앞의 변형과는 독립적으로 생각할 수 있는 것이며 냉각에 의한 수축에 의해 발생한다. 결과를 보면 온도가 높은 방향으로 오목하게 휘는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 10(b) 와 Fig. 8(b) 에서 밑면에서의 변형 방향이 반대로 나타나는 것을 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 금형 내부에서의 변형, 열 응력의 발달과 이형과정 및 그 이후에 일어나는 변형을 관찰하였다. 그 결과 금형에 의해 생성된 열 응력이 이형되는 과정에서 순간 변형을 일으키는 것을 볼 수 있었다. 앞으로 점탄성을 고려하고 유효온도의 시간에 따른 변화를 관찰하는 것이 이형된 이후의 변형을 좀더 엄밀히 예측하기 위하여 필요하다.

후 기

이 연구는 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

(1) Michael St. Jacques, 1982, "An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat Parts Due to Unbalanced Cooling", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 22, No. 4, pp.241-247

(2) K.M.B. Jansen, 1994, "Residual Stresses in Quenched and Injection Moulded Products", *International Polymer Processing*, IX, pp.82-89

(3) N. Santhanam, H.H. Chiang, K. Himasekhar, Peter Tuschak, and K.K. Wang, 1992, "Postmolding and Load-Induced Deformation Analysis of Plastic Parts in the Injection Molding Process", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 11, No.2, pp. 77-89

(4) K.K. Kabanemi, H. Vaillancourt, H. Wang, and G. Salloum, 1998, "Residual Stressed, Shrinkage, and Warpage of Complex injection Molded Products: Numerical Simulation and Experimental Validation", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 21-37

(5) H. Wang, K.K. Kabanemi and G. Salloum, 2000, "Numerical and Experimental Studies on the Ejection of Injection-Molded Plastic Products", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 40, No. 3, pp. 826-840

(6) E.H. Lee, T.G. Rogers and T.C. Woo, 1965, "Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 48, No. 9, pp. 480-487

(7) H.H. Chiang, C.A. Hieber and K.K. Wang, 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part I: Formulation", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 116-124

(8) H.H. Chiang, C.A. Hieber and K.K. Wang, 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part II: Experimental Validation", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 125-139

(9) P.G. Bergan and C.A. Felippa, 1985, "A Triangular Membrane Element with Rotational Degrees of Freedom", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 50, pp. 25-69

(10) J.C. Batoz and C.J. Bathe and L.W. Ho, 1980, "A Study of Three-Node Triangular Plate Bending Elements", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 15, pp. 1771-1812