

사출성형물의 잔류응력 예측 및 측정

권영일, 윤재륜

서울대학교 섬유고분자공학과

1. 서론

고분자 용융액은 사출 성형 공정 동안 위치와 시간에 따라 다양한 온도와 압력을 겪게 되므로 사출품 속에 잔류응력이 생기게 된다. 잔류응력은 휨, 비틀림, 표면의 갈라짐 등 형태의 변화와 인장력, 화학적 내성 등 사출품의 물성에도 영향을 미치기 때문에 이를 측정하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 초기 유량, 보압, 틀의 모양, 냉각 온도, 보압시간과 냉각시간 등으로 부터 유동 해석을 통하여 금형 안의 고분자 용융액의 온도와 압력분포를 계산해 내고 이 결과를 이용해서 고분자 사출품 안에 생긴 최종 잔류응력을 예측하는 것이 본 연구의 목적이다. 또한 이를 현재 널리 쓰이고 있는 방법을 이용한 잔류응력 측정결과와 비교 하였다

2. 이론적 연구

대부분의 사출성형제품은 평면방향으로의 길이와 너비에 비해서 두께가 상대적으로 얇은 형태를 띠고 있다. 따라서 사출성형품 내의 흐름은 이러한 기하학적 특성을 이용하여 두께 방향으로의 압력은 일정하다고 보고 평면 방향으로의 압력강하만을 다루게 된다. 전도는 두께방향 성분만을 고려하고 대류는 평면방향으로만 고려한다. 관성효과를 무시하고 완전히 자란 층상흐름(fully developed laminar flow)으로 가정할 수 있으므로 헬레쇼의 근사법을 사용하여 문제를 다룬다. 또한 길이 방향에 대한 두께의 변화율이 그리 크지 않으므로 윤활 근사법을 썼다. 참고문헌 [6]에 제시된 수식화의 과정을 따라서 G와 F 항을 사용하여 표현하면 수치해석에 사용되는 최종적인 지배방정식을 얻게 된다.

$$G \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = -F \quad (1)$$

$$G = \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial P} \right)_T dz + \int_x^h \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial P} \right)_T dz \quad (2)$$

$$F = \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial T} \right)_P \frac{\partial T}{\partial t} dz + \int_x^h \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial T} \right)_P \frac{\partial T}{\partial t} dz + (\rho_l - \rho_s)_{z=x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3)$$

위의 ρ_l 과 ρ_s 는 각각 액체 상태고체 상태에서의 밀도를 나타내고 x 는 액상-고

상 경계면의 위치이다. 다음과 같은 수정된 크로스 모델을 사용한다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left[\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right]^{1-n}} \quad (4)$$

n 은 멱법칙 지수이고 η_0 는 전단을 속도가 0인 경우의 점성값 으로 온도와 압력의 함수이다. τ^* 는 뉴턴 유체와 멱법칙 사이의 근사적인 전이영역을 나타내는 응력값이다.

$$\eta_0(T, P) = B \exp\left[\frac{T_b}{T}\right] \exp(\beta P) \quad T > T_g \quad (5)$$

$$\eta_0(T, P) = \infty \quad T \leq T_g \quad (6)$$

여기에서 T_g 는 재료의 유리전이 온도이고, T_b 는 η_0 의 온도민감도, β 는 압력계수이고 B 는 매개변수이다. 액상과 고상의 2상을 다룰 수 있고 압축성을 고려할 수 있는 타이트 상태방정식을 썼다. 여기에서 $C=0.0894$ 이다.

$$v(T, P) = v_0(T) \left[1 - C \ln\left(1 + \frac{P}{B(T)}\right) \right] \quad (7)$$

$$v_0(T) = \begin{cases} b_{1,l} + b_{2,l} \bar{T} & (T > T_t) \\ b_{1,s} + b_{2,s} \bar{T} & (T < T_t) \end{cases} \quad (8)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,l} \exp(-b_{4,l} \bar{T}) & (T > T_t) \\ b_{3,s} \exp(-b_{4,s} \bar{T}) & (T < T_t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{T} \equiv T - b_5 \quad (10)$$

전이온도 (T_t)는 반결정 재료의 경우에 용융온도이고 비결정 재료의 경우에는 유리 전이 온도로 다음과 같이 압력의 선형적인 함수로 모형화 하였다.

$$T_t(P) = b_5 + b_6 P \quad (11)$$

한 부피 요소 안에서는 압력, 액상-고상의 경계면의 위치, 탄성계수, 포아슨비, 두께에 따른 온도분포가 평면방향으로 일정하다고 가정하고 Jansen[4] 등의 수식화 과정을 사용하여 사출품의 잔류응력을 계산하였다.

$$\sigma_{xx}^{MO}(z, t) = -K[P_s - \bar{P}_s] + \frac{E}{1-\nu} [\bar{\epsilon}_{xx}^j(t) - \epsilon_{xx}^j(z, t)] \quad (12)$$

3. 실험

본 연구에서는 고분자 재료의 잔류응력을 측정하는데 현재 가장 널리 쓰이고 있는 결벗기기 법을 사용하였다. 시편을 한 겹 벗겨 내었을 때 깎여 나간 부분의 응력과 시편의 곡률과의 관계는 탄성계수와 포아슨비가 상수로 주어졌을 때 힘의 평형 방정

식을 이용하여 Read[7]가 유도한 다음 관계식을 사용한다.

$$\sigma_x(z_1) = \frac{-E}{6(1-\nu)} \left\{ (z_1 + b)^2 \frac{d_x(z_1)}{dz_1} + 4(z_1 + b)x_x(z_1) - 2 \int_{z_1}^b x_x(z) dz \right\} \quad (13)$$

여기에서 z_1 은 시편의 두께 방향의 좌표로서, 원점은 실험 시작전에 아직 깎아 내지 않은 상태의 시편의 가운데로 정하고, 시편의 바깥면의 위치는 $+b$ 와 $-b$ 로 정한다. $\sigma_x(z_1)$ 은 z_1 위치에서 길이 방향인 x 방향으로의 응력이고, x 는 곡률이다. 재료는 PP을 사용했다. 금형의 모양은 직사각형 평판 모양의 (20×4 cm) 일정한 두께(0.3 cm)를 가진 cavity와 삼각형 모양의 입구, 사다리꼴의 러너와 원뿔형의 스프루로 이루어져 있다. 금형의 온도는 30℃이고 배럴의 온도는 210℃, 보압시간은 8초, 냉각시간은 25초로 하였다. 이 조건을 수치모사에서도 동일하게 사용하였다. 수치모사에서 필요한 물질 상수 값은 참고문헌[8]의 값을 사용하였다. 사출이 끝난 시편은 80mm×22mm×2.9mm의 크기로 시편(200×40×2.9mm)의 중앙 부위에서 신틸을 이용해 잘라내었다. 밀링머신을 써서 바깥쪽 부터 한 겹씩 깎아 내었다. 얻은 흰 높이와 길이를 가지고 (14)식을 이용해서 시편의 곡률을 계산하였고, 곡률과 절삭 두께의 자료를 가지고 (13)식을 이용해서 잔류응력을 계산 하였다.

4.결과 및 고찰

수치해석은 초기 유입률, 보압압력, 금형의 온도를 각각 다르게 하면서 이들이 잔류응력에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였다. 초기 유입률은 33, 42, 52 cm/sec로 변화를 주었고, 보압은 140, 160 MPa로 변화를 주었으며, 금형의 온도는 30, 40, 50℃로 하였다. 우선 금형의 온도가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 보기 위해 그린 그림이 Fig. 1이다. 전체적인 그래프의 모양은 바깥쪽에 인장응력이 걸리고 그 안쪽에서는 압축응력이, 중심부에서는 인장응력이 생겼음을 볼 수 있다. 세 곡선을 비교해 보면 가장 바깥쪽의 인장력의 크기가 다를 수 있다. 보압이 잔류응력에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. 보압이 높을 수록 잔류응력의 전체적인 크기가 크게 나타남을 알 수 있다. 초기 유입률이 잔류응력에 미치는 영향을 나타낸 그림이 Fig 3이다. 세 곡선을 비교해 보면 인장력에서 압축력으로 넘어가는 부분의 기울기가 변함을 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합해 보면 초기 유량은 사출 성형품에서 바깥쪽 인장력이 나타나는 부분의 너비와 압축력이 나타나는 부분의 위치를 결정하게 되고 보압은 전체적인 응력의 크기에 영향을 미치고 금형의 온도는 바깥쪽 인장력 부분의 크기와 압축력이 나타나는 영역의 위치에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 실험에서는 이론적으로 예측 되는 바깥쪽의 인장력 부분이 나타나지 않고 자유 냉각조건 일 때 처럼 바깥쪽이 압축력, 안쪽이 인장력이 작용하는 것으로 나타 났다(Fig 4). 이 문제를 해결하기 위해 바깥 부분의 경계 조건을 자유경계조건으로 하고 수치 해석 프로그램을 실행하였다. 결과는 예측한 대로 바깥쪽은 압축력, 안쪽은 인장력의 두 부분으로 이루어

졌는데 이는 실험 결과와 정성적으로 같은 경향을 보인다(Fig. 5). 이상에서 PP와 같이 고분자와 몰드의 마찰력이 작아서 가장 바깥쪽에 인장력이 거의 나타나지 않는 경우에는 자유 경계조건으로 응력을 계산하는 것이 좀 더 타당한 것으로 생각된다.

5. 결론

고분자의 사출품내에서의 응력분포에 대한 수식화의 연구와 사출시의 유동해석을 연계하여 사출품에서의 잔류응력 분포를 예측하였다. 간단한 모델을 사용하여 이전의 이론적인 연구 결과들과 잘 맞는 형태를 얻을 수 있었다. 고분자 공정변수중 가장 중요한 요소들인 초기 유량, 보압, 금형 온도와 잔류 응력 분포와의 관계를 살펴보았다. 이들은 가장 바깥 부분의 인장력이 작용하는 부분의 넓이와 크기, 압축력이 미치는 부분의 위치, 전체적인 응력 크기 등을 결정하는데 중요한 요소임을 알 수 있었다. PP와 같이 금형 벽면과의 마찰력이 작은 재료의 응력 분포를 예측하기 위해서는 금형 벽면에서의 마찰을 무시한 모형을 사용해야 한다.

참고문헌

1. C. A. Hieber and S. F. Shen, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 7, 1(1980)
2. H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, Polym. Eng. and Sci., 31, 116(1991)
3. H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, Polym. Eng. and Sci., 31, 125(1991)
4. K. M. B. Jansen and G. Titomanlio, Polym. Eng. Sci., 36, 2029(1996)
5. K. M. B. Jansen and G. Titomanlio, Polym. Eng. Sci., 36, 2041(1996)
6. A. I. Isayev (ed.), "Injection and Compression Molding Fundamentals", Marcel Dekker, New York(1987)
7. R. G. Treuting and W. T. Read, Jr. J. Applied Physics, vol. 22, no. 2, (1951)
8. 이상찬, 박사학위 논문, 한국과학기술원(1996)
9. 정정훈, 석사학위 논문, 서울대학교 대학원(1997)

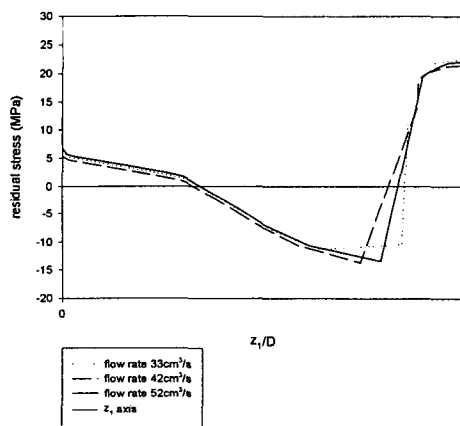


Fig. 1 Predicted residual stress with varying flow rate, packing pressure is 140MPa and temperature is 40°C.

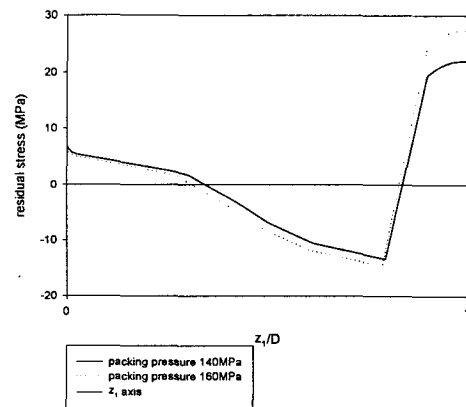


Fig. 2. Predicted residual stress with varying packing pressure, flow rate is 52cm³/s and temperature is 40°C.

Table 1. Cross 5-constant model constants for PP.

n	0.204
τ^* (dyne/cm ²)	3.07×10^9
B (poise)	1.44
T_b (°C)	483.0
β (°C cm ² /dyne)	4.39×10^{-10}

Table 2. Specific-volume model constants for PP.

$b_{1,l}$ (cm ³ /gm)	1.3193
$b_{2,l}$ (cm ³ /gm °C)	1.1563×10^8
$b_{3,l}$ (dyne/cm ²)	6.617×10^8
$b_{4,l}$ (°C ⁻¹)	3.7557×10^{-3}
$b_{1,s}$ (cm ³ /gm)	1.2304
$b_{2,s}$ (cm ³ /gm °C)	7.64×10^{-4}
$b_{3,s}$ (dyne/cm ²)	9.7292×10^8
$b_{4,s}$ (°C ⁻¹)	2.4623×10^{-3}
b_5 (°C)	118.0
b_6 (°C cm ² /dyne)	2.25×10^{-8}

Table 3. Thermal properties of PP.

C_{pl} (erg/gm °C)	2.7×10^4
C_{ps} (erg/gm °C)	2.0×10^4
kl (erg/s cm °C)	1.75×10^4
ks (erg/s cm °C)	2.2×10^4
L (erg/gm)	2.34×10^9

Table 4. Elastic modulus and Poisson's ratio of PP

E(MPa)	1032
ν	0.4

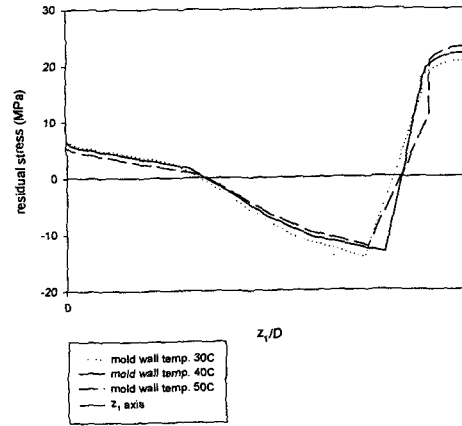


Fig. 3. Predicted residual stress with varying mold wall temperature, flow rate is 52cm³/s, and packing pressure is 140MPa.

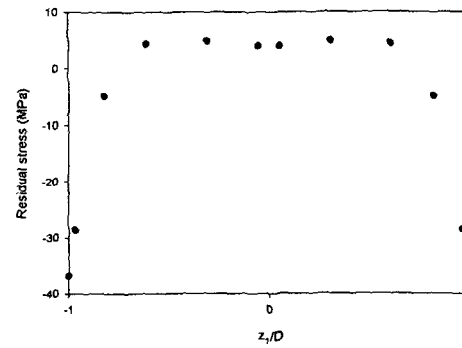


Fig. 4. Measured residual stress with respect to the normalized thickness.

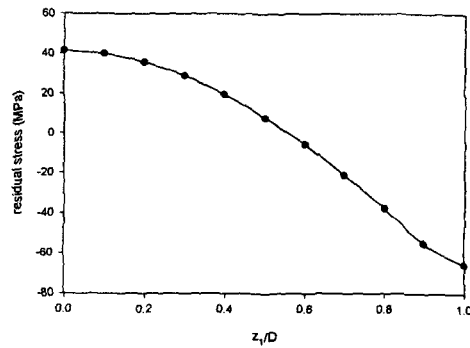


Fig. 5. Predicted residual stress at the center of the product assuming the free boundary condition