

Center-gated 디스크에 대한 사출/압축 성형공정의 수치적 모델링 (1)

— 압축성을 고려한 점탄성유체 모델의 사출성형 —

김일환* · 박성진* · 정성택* · 권태현*

(1997년 2월 1일 접수)

Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-gated Center-gated Disk (Part I)

— Injection Molding with Viscoelastic Compressible Fluid Model —

Ilhwan Kim, Seong Jin Park, Seong Taek Chung and Tai Hun Kwon

Key Words : Center-gated Disk (Center-gated 디스크), Injection/Compression Molding (사출/압축 성형공정), Viscoelastic Compressible Fluid Model (점탄성유체 모델)

Abstract

The present study attempted to numerically simulate the process in detail by developing an appropriate physical modeling and the corresponding numerical analysis for precision injection and injection/compression molding process of center-gated disk. In Part I, a physical modeling and associated numerical analysis of injection molding with a compressible viscoelastic fluid model are presented. In the distribution of birefringence, the packing procedure results in the inner peaks in addition to the outer peaks near the mold surface, and values of the inner peaks increase with the packing time. Also, values of the density in the core region increase with the packing time. From the numerical results, we also found that birefringence becomes smaller as the melt temperature gets higher and that it is insignificantly affected by the flow rate and the mold temperature. As far as the density distribution is concerned, mold temperature affected the distribution of density especially near the wall. But it was not significantly affected by flow rate and melt temperature. Numerical results of birefringence coincided with experimental data qualitatively but didn't quantitatively.

1. 서 론

오늘날 광학 및 물리적 성질이 안정된 우수한 엔지니어링 플라스틱의 개발에 따라서 사진기용 렌즈, 대형 projection TV용 렌즈, CD용 Pick-up

렌즈 등 각종 정밀렌즈, 그리고 CD, 메모리 디스크 등과 같은 고부가 가치의 다양한 정밀 플라스틱 광학 제품을 대량 생산하기 위하여 정밀 사출성형 공정의 중요성이 점점 높아지고 있다. 정밀광학 제품은 사출속도, 사출압력, 사출온도, 금형온도, 보압정도 등 수많은 사출성형공정조건에 따라서 사출성형 충전과정과 보압과정, 그리고 냉각과정중의 재료의 유동과 열전달에 의한 냉각 및 유리화 과정

*회원, 포항공과대학교 기계공학과

이 영향을 받게 되고, 사출성형 후에도 재료의 변형 및 열적 변화에 따른 잔류응력(residual stress), 복굴절(birefringence), 뒤틀림변형(warpage), 수축(shrinkage) 등이 결정되어 이에 따라서 최종 품질이 결정된다. 따라서, 정밀 광학 제품의 품질을 고려할 때 최종 제품에 남아 있는 잔류응력, 복굴절과 함께 정밀도와 관련된 뒤틀림변형, 수축 등이 매우 중요한 요소가 된다. 보통의 열가소성 고분자 재료의 사출성형과 달리 정밀 플라스틱광학 제품의 사출성형 제조를 위한 과학적인 설계방식이 아직 확립되지 못한 주요 이유는 충전과정과 보압과정 및 냉각과정 중, 그리고 사출성형 후의 재료의 점탄성 거동, 열적 특성, 그리고 광학적 성질 등에 대한 과학적 이해가 아직 부족했기 때문이다. 이러한 이해의 부족은 특히 유리화(vitrification) 과정에 일어나는 물리적 현상의 이해부족, 그리고 플라스틱재료의 점탄성효과를 고려한 해석의 어려움 등에 기인한다. 이러한 여러가지 어려움을 극복하고 정밀광학 제품의 품질을 높이기 위해서는 사출/압축 성형제품의 품질과 직결된 잔류응력, 복굴절, 뒤틀림변형, 수축 등을 예측할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

정밀 플라스틱광학 제품의 연구에서 중요한 부분을 차지하는 것이 복굴절에 관한 것이다. 사출성형 공정후 광학 제품에 남아 있는 복굴절 값이 크면 제품의 광학적 기능에 문제를 야기시키기 때문에 복굴절 값을 감소시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Jehuda Greener 등은 광디스크 형상 제품에 radial flow 모델을 써서 복굴절에 대한 연구를 하였다.⁽¹⁾ 최근에 플라스틱재료의 점탄성효과를 고려한 구성방정식으로 Leonov 모델을 많이 사용하고 있다.^(2,3) Isayev와 Hieber는 간격이 좁은 두 평판 사이의 유동에 Leonov 모델을 사용하여 고분자의 점탄성효과를 고찰하였다.⁽⁴⁾ Shia Chung Chen과 Yung Cheng Chen은 두께가 얇은 평판 모형의 사출성형공정에 Leonov 모델을 적용하여 복굴절에 대하여 연구하였으며, 이 연구에는 사출성형공정조건이 복굴절 분포에 미치는 영향에 대한 언급도 되어 있다.⁽⁵⁾ 권태현은 center-gated 디스크에 Leonov 모델을 적용하여 사출공정 및 사출/압축 공정후 디스크에 존재하는 복굴절분포에 대하여 연구하였다.^(6,7) 윤경환은 center-gated 디스크형상의 정밀 사출성형에 관해 실험적인 연구를 수행하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 물리적 모델의 개발을 위해서 우선적으로 간단한 형상으로서 center-gated 디스크에 대한 사출성형공정에 대해 유한차분법을 사용하여 수치해석 시스템을 개발하였고, 수치해석 결과는 실험결과와 비교하였으며, 사출성형공정조건이 복굴절 및 밀도분포에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다. 물리적 모델의 개발에 있어서는 비선형 점탄성유체의 구성방정식으로 Leonov 모델을 사용하였으며, 온도와 압력의 변화에 따른 밀도의 변화를 고려하기 위한 압축성 모델링으로써 Tait 상태방정식을 사용하였다. Center-gated 디스크를 이용한 실험데이터⁽⁶⁾와 수치해석 시스템의 해석결과를 비교한 결과 정성적으로 일치함을 알 수 있었다.

2. 이 론

2.1 물리적 모델링

Fig. 1의 center-gated 디스크와 같은 두께가 비교적 얇은 금형 공간내의 사출성형공정을 지배하는 연속방정식, 모멘텀방정식, 그리고 에너지방정식은 Hele-Shaw 근사($v_z=0$, $\partial/\partial z \gg \partial/\partial r$)에 의하여 각각 다음과 같이 정리된다.⁽⁹⁾

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

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \tau_{rz} \frac{\partial v_r}{\partial z} \quad (4)$$

지배방정식들을 풀기 위해 사용되는 경계조건들은 다음과 같다.

- 금형 벽면에서의 속도

$$v_r = 0 \quad \text{at } z = b \quad (5)$$

- 금형 벽면의 온도

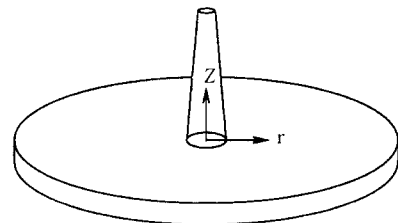


Fig. 1 Coordinate system in center-gated disk.

$$T = T_w \quad \text{at } z = b \quad (6)$$

• 금형 내부의 유동장이 금형의 중심선에 대하여 서로 대칭이다.

$$\tau_{zr} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (8)$$

• 유동선단에서의 압력

$$p = 0 \quad (9)$$

비선형 점탄성유체의 구성방정식으로는 Leonov 모델을 사용하였다.^(2,3) Leonov 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = 2\eta_0 s \bar{d} + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \bar{c}_k \quad (10)$$

여기서, $\bar{\tau}$ 는 정수압을 제외한 응력텐서, \bar{d} 는 변형률텐서, \bar{c}_k 는 고분자재료의 탄성변형을 나타내는 k 번째 모드의 Finger 스트레인텐서를 뜻한다. 또한 η_k 와 θ_k 는 각각 k 번째 모드의 점성계수와 이완시간 (relaxation time)을 나타낸다. Leonov 모델과 같은 점탄성 구성방정식의 비등온 과정에서의 적용을 위해 열적·유변학적 간단성(thermo·rheological simplicity) 개념을 도입하여야 온도변화와 변형 history에 의존하는 구성 방정식이 표현될 수 있게 된다. 유동 중의 온도(T) 영향을 다음과 같이 Arrhenius 방정식에 의존하는 WLF shift factor를 도입하여 고려할 수 있다.⁽¹⁰⁻¹³⁾

$$\theta_k(T) = \theta_k(T_0) \frac{a_T}{a_{T_0}} \quad (11)$$

$$a_T = \begin{cases} a_{Tg} & \text{if } T \leq T_g \\ \exp \left[-\frac{c_1(T - T_{ref})}{c_2 + T - T_{ref}} \right] & \text{if } T > T_g \end{cases} \quad (12)$$

온도와 압력(p)의 변화에 따른 밀도(ρ)의 변화에 관한 압축성 모델링으로써 Tait 상태방정식을 이용하였으며, 다음과 같이 표현된다.^(10, 11, 14)

$$\rho(T, p) = \rho_0(T) \left\{ 1 - \text{Cln} \left[1 + \frac{p}{B(T)} \right] \right\}^{-1} \quad (13)$$

식 (13)에서,

$$C = 0.0894 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\rho_0(T)} = \begin{cases} b_{1,t} + b_{2,t}(T - b_5) & \text{for } T > T_g(p) \\ b_{1,s} + b_{2,s}(T - b_5) & \text{for } T \leq T_g(p) \end{cases} \quad (15)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,t} \exp(-b_{4,t}T) & \text{for } T > T_g(p) \\ b_{3,s} \exp(-b_{4,s}T) & \text{for } T \leq T_g(p) \end{cases} \quad (16)$$

$$T_g(p) = D_2 + D_3 p \quad (17)$$

식 (15)~식 (17)에서 $b_{1,t}$, $b_{2,t}$, $b_{3,t}$, $b_{4,t}$, $b_{1,s}$, $b_{2,s}$, $b_{3,s}$, $b_{4,s}$, b_5 , D_2 , D_3 는 모두 물질상수이다. 한편, 복굴절과 잔류응력의 관계는 오래전부터 실험적으로 연구되어 등방성 물질이 응력을 받으면 편광된 광학 주축방향의 굴절률(n_i)의 차이가 주응력(σ_i)의 차이에 비례한다는 사실이 알려져 있다. 이를 stress-optical law라고 하며, 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$n_i - n_j = C(\sigma_i - \sigma_j) \quad (18)$$

식 (18)에서 C 는 온도의 함수인 물질상수이지만, 폴리스티렌의 경우는 온도에 상관없는 물질 상수임이 알려져 있다.⁽¹⁶⁾

2.2 수치적 모델링

식 (10)을 식 (3)에 대입하면 두께방향의 수직응력 σ_{zz} 에 대한 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\sigma_{zz} = -p + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} C_{zz,k} = f(r) \quad (19)$$

식 (19)로부터 두께방향의 수직응력은 z 와 무관하다는 것을 알 수 있으며, 이 때 $p = p(r, z, t)$ 인 점에 유의해야 한다. 식 (19)의 양변을 r 에 대하여 미분하면 반지름방향으로의 σ_{zz} 의 변화에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Lambda(r) \equiv \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} C_{zz,k} \right) \quad (20)$$

식 (20)을 이용하여 식 (2)를 0에서 z 까지 z 에 대하여 적분하여 얻게 되는 τ_{zr} 에 구성방정식을 도입하여 정리하면, 두께방향으로의 속도변화에 대한 식을 다음과 같이 얻게 된다.

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{\eta_0 s} \left[-\Lambda(r) z - \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} C_{zr,k} + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \int_0^z \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} dz \right] \quad (21)$$

그리고, 식 (21)을 b 에서 z 까지 z 에 대하여 적분을 하면 속도분포에 대한 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$v_r = \frac{1}{s} \left[\Lambda(r) \int_0^b \frac{\bar{z}}{\eta_0} d\bar{z} + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \left\{ \int_0^b \frac{C_{zr,k}}{\eta_0} d\bar{z} - b \int_0^b \frac{1}{\eta_0} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} d\bar{z} + z \int_0^z \frac{1}{\eta_0} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} d\bar{z} + \int_0^b \frac{\bar{z}}{\eta_0} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} d\bar{z} \right\} \right] \quad (22)$$

한편, 충전과정의 유동인 경우에 질량보존법칙으로부터 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\int_0^b v_r dz = \frac{Q}{4\pi r} \quad (23)$$

식 (23)에서 Q 는 전체 유량이다. 식 (22)를 0부터 b 까지 z 에 대하여 적분하고, 식 (23)에 대입하면 $\Lambda(r)$ 에 대한 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\Lambda(r) = \frac{1}{S} \left[\frac{Q}{4\pi r} - \frac{1}{s} \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \left\{ \int_0^b \frac{\bar{z}}{\eta_0} C_{zr,k} dz - \int_0^b \frac{b^2 - z^2}{2\eta_0} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} dz \right\} \right] \quad (24)$$

식 (24)에서 S 는 flowability constant로서 아래와 같이 정의된다.

$$S \equiv \frac{1}{s} \int_0^b \frac{z^2}{\eta_0} dz \quad (25)$$

한편, Leonov 모델에서 \bar{c}_k 의 변화방정식(evolution equation)은 Hele-Shaw 근사($v_z=0$, $\partial/\partial z \gg \partial/\partial r$)를 적용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial C_{rr}}{\partial t} + v_r \frac{\partial C_{rr}}{\partial r} = 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} C_{rr} + 2 C_{zr} \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{1}{2\theta} (c_{rr}^2 + c_{zr}^2 - 1 - \alpha C_{rr}) \quad (26)$$

$$\frac{\partial C_{zr}}{\partial t} + v_r \frac{\partial C_{zr}}{\partial r} = -\frac{v_r}{r} C_{zr} + C_{zz} \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{1}{2\theta} [(C_{rr} + C_{zz}) C_{zr} - \alpha C_{zr}] \quad (27)$$

$$\frac{\partial C_{zz}}{\partial t} + v_r \frac{\partial C_{zz}}{\partial r} = -\frac{1}{2\theta} (c_{zr}^2 + c_{zz}^2 - 1 - \alpha C_{zz}) \quad (28)$$

$$\frac{\partial C_{\theta\theta}}{\partial t} + v_r \frac{\partial C_{\theta\theta}}{\partial r} = 2 \frac{v_r}{r} C_{\theta\theta} - \frac{1}{2\theta} (c_{\theta\theta}^2 - 1 - \alpha C_{\theta\theta}) \quad (29)$$

식 (26)~식 (29)에서 α 는 다음과 같이 정의되었다.

$$\alpha \equiv \frac{1}{3} \left[(1 - C_{\theta\theta}) (C_{rr} + C_{zz}) + \frac{1}{C_{\theta\theta}} (c_{\theta\theta}^2 - 1) \right] \quad (30)$$

위의 식 (26)~식 (30)에서 모두를 나타내는 아래첨자 k 는 편의상 생략하였다.

또한, 복굴절과 응력성분과의 관계는 stress-optical law에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$N_1 = \sigma_{rr} - \sigma_{zz} = 2\eta_0 s \frac{\partial v_r}{\partial r} + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} (C_{rr,k} - C_{zz,k}) \quad (31)$$

$$N_2 = \sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta} = -2\eta_0 s \frac{v_r}{r} + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} (C_{zz,k} - C_{\theta\theta,k}) \quad (32)$$

$$N_3 = \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} = 2\eta_0 s \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) + \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} (C_{rr,k} - C_{\theta\theta,k}) \quad (33)$$

$$n_{11} - n_{22} \equiv \Delta n = C(T) [N_1^2 + 4\tau_{zr}^2]^{1/2} \quad (34)$$

$$n_{22} - n_{33} = C(T) N_2 \quad (35)$$

$$n_{11} - n_{33} = C(T) N_3 \quad (36)$$

한편, 식 (1)로부터 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_0^b \rho dz \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\int_0^b \rho r v_r dz \right) = 0 \quad (37)$$

식 (37)을 Leibnitz rule을 사용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\int_0^b \frac{\partial \rho}{\partial t} dz + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\int_0^b \rho r v_r dz \right) = -F_i \quad (38)$$

식 (38)에서, F_i 는 무결정형 고분자의 경우에 생길 수 있는 밀도의 불연속성로부터 생기며, 다음과 같이 나타내어진다.

$$F_i = (\rho_i - \rho_s)_{z=\chi} \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (39)$$

식 (39)에서 $z=\chi$ 는 고체상태와 액체상태의 계면의 위치에 해당된다.

밀도가 압력과 온도의 함수임을 이용하여 시간에 따른 밀도의 변화에 대한 식을 chain rule을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_r \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (40)$$

식 (40)을 식 (38)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_r \frac{\partial p}{\partial t} dz + \int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\int_0^b \rho r v_r dz \right) = -F_i \quad (41)$$

식 (19)의 양변을 시간에 대하여 미분하면 시간

에 따른 압력의 변화에 대한 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} + \sum_{k=1}^N \frac{n_k}{Q_k} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial t} \quad (42)$$

식 (42)를 사용하여 식 (41)의 첫번째 항을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t} dz = -G \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} + F_n \quad (43)$$

식 (43)에서, G 와 F_n 은 각각 다음과 같이 정의되었다.

$$\begin{aligned} G &\equiv \int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T dz \\ &= \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p} \right)_T dz + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial p} \right)_T dz \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} F_n &\equiv \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial t} dz \\ &= \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \left[\int_0^x \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial t} dz + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial p} \right)_T \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial t} dz \right] \end{aligned} \quad (45)$$

그리고, 식 (41)의 두번째 항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_r &\equiv \int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} dz \\ &= \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} dz + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} dz \end{aligned} \quad (46)$$

또한, 식 (22)를 사용하여 ρv_r 을 0에서부터 b 까지 z 에 대하여 적분하면 식 (41)의 세번째 항을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\int_0^b \rho v_r dz \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left[\bar{S} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} + \bar{E}_s + \bar{E}_n \right] \right) \quad (47)$$

식 (47)에서, \bar{S} , \bar{E}_s , \bar{E}_n 은 각각 다음과 같이 정의되었다.

$$\begin{aligned} \bullet \begin{cases} \phi(z, r) &\equiv \int_0^b \frac{\bar{z}}{\eta_0 S} d\bar{z} \\ \bar{S}(r) &\equiv \int_0^b \rho \phi(z, r) dz \end{cases} \quad (48) \\ \bullet \begin{cases} \varphi_s(z, r) &\equiv \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \int_z^b \frac{C_{zz,k}}{\eta_0} d\bar{z} \\ \bar{E}_n(r) &\equiv \int_0^b \rho \varphi_s(z, r) dz \end{cases} \quad (49) \end{aligned}$$

$$\bullet \begin{cases} \varphi_n(z, r) &\equiv \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \int_0^z \frac{1}{\eta_0} \frac{C_{zz,k}}{\partial r} dz \\ \xi_n(z, r) &\equiv \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{\theta_k} \int_z^b \frac{\bar{z}}{\eta_0} \frac{\partial C_{zz,k}}{\partial r} d\bar{z} \\ \bar{E}_n(r) &\equiv \int_0^b \rho z \varphi_n(z, r) dz - b \int_0^b \rho \varphi_n(b, r) dz \\ &\quad + \int_0^b \rho \xi_n(z, r) dz \end{cases} \quad (50)$$

결과적으로, 식 (41)은 식 (43)~식 (50)을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} G \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{S} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial r} \right) \\ = F_r + F_n + F_t + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\bar{E}_s + \bar{E}_n)] \end{aligned} \quad (51)$$

2.3 해석순서

압축성을 고려한 사출성형공정을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같은 간단한 형상에 대해서 유한차분법을 이용하여 해석 시스템을 개발하였고, Fig. 2에 제시된 유한차분 격자에서 해를 구하였다. 압축성을 고려한 사출성형공정은 크게 충전과정과 보압과정 그리고 냉각과정으로 이루어지며 다음과 같은 순서로 해석하였다.

• 충전과정

- (1) 입구에서 $v_r(r_i, z)$ 과 $\bar{c}_k(r_i, z)$ 를 부여한다.
- (2) 유동선단을 시간간격(Δt_{adv})에 대하여 전진시키고, 시간 $t = t_{prev} + \Delta t_{adv}$ 에서 $\bar{c}_k(r, z)$ 를 식 (26)~식 (30)으로부터 4차 Runge-Kutta method를 써서 구한다.
- (3) 식 (4)를 사용하여 $T(r, z)$ 를 구한다.
- (4) 식 (26)~식 (30)에서 $\bar{c}_k(r, z)$ 를 4차 Runge-Kutta method를 써서 구한다.
- (5) 식 (24)를 사용하여 $\Lambda(r)$ 를 구한다.
- (6) 식 (22)를 사용하여 $v_r(r, z)$ 을 구한다.
- (7) 식 (21)을 사용하여 $\partial v_r / \partial z(r, z)$ 를 구한다.
- (8) 식 (13)~식 (17)을 사용하여 $p(r, z)$ 를 구한다.
- (9) 금형 내부 공간이 다 채워질 때까지 (2)~(8)을 반복한다.

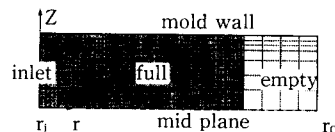


Fig. 2 Finite difference grid for center-gated disk.

• 보압과정

- (1) 식 (4)에서 $T(r, z)$ 를 구한다.
- (2) 식 (26)~식 (30)에서 $\bar{c}_k(r, z)$ 를 4차 Runge-Kutta method를 써서 구한다.
- (3) 식 (51)에서 $\sigma_{zz}(r)$ 를 구한다.
- (4) 식 (20)에서 $\Lambda(r)$ 을 구한다.
- (5) 식 (22)에서 $v_r(r, z)$ 을 구한다.
- (6) 식 (21)에서 $\partial v_r / \partial z(r, z)$ 를 구한다.
- (7) 식 (13)~식 (17)을 사용하여 $\rho(r, z)$ 를 구한다.
- (8) 보압 시간동안 (1)~(7)을 반복한다.

• 냉각과정

- (1) 식 (4)에서 온도분포 $T(r, z)$ 를 구한다.
- (2) 식 (26)~식 (30)에서 $\bar{c}_k(r, z)$ 를 4차 Runge-Kutta method를 써서 구한다.
- (3) 식 (13)~식 (17)을 사용하여 $\rho(r, z)$ 를 구한다.
- (4) $T(r, z) \leq T_{fz}$ 까지 (1)~(3)을 반복한다.

위에서 T_{fz} 는 플라스틱재료가 응고되어 더 이상 유동이 발생하지 않는 온도를 나타낸다.

상기의 해석방법에서, 충전과정에서는 유체의 압축성을 무시한 것이다. 충전과정도 보압과정과 같은 방식으로 처음부터 압축성을 고려하게 되는 경우의 해석결과와 위에 기술된 바와 같이 충전과정 중에는 압축성을 무시한 경우의 해석결과가 예상했던 바와 같이 차이가 없이 나타났음을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과는 충전과정에서는 비압축성 유체로 위에 기술한 바에 따라 얻어진 결과임을 밝힌다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물성데이터 및 사출성형공정조건

본 연구에서 개발된 해석 시스템을 실험데이터가 있는 경우와 비교하기 위하여, 권태현 등⁽⁶⁾에 제시된 실험에서 사용한 center-gated 디스크의 형상과 재료를 사용하여 수치적으로 해석하였다. 수치해석에 사용된 center-gated 디스크의 지름은 10.16 cm이고, 두께는 2.01 mm이며, 사용된 재료는 폴리스티렌수지다. 그리고 수치해석에 사용된 폴리스티렌수지의 물성데이터 및 사출성형공정조건은 아래와 같다.

열적특성치

- $b_{1,t}=1.00 \text{ cm}^3/\text{g}$, $b_{1,s}=0.982 \text{ cm}^3/\text{g}$
- $b_{2,t}=5.718 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{K}$,
 $b_{2,s}=2.304 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{K}$
- $b_{3,t}=239.5 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$, $b_{3,s}=280.5 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}^2$
- $b_{4,t}=4.112 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $b_{4,s}=2.810 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- $b_5=423 \text{ K}$
- $D_2=373 \text{ K}$, $D_3=0.023 \text{ cm} \cdot \text{K} \cdot \text{sec}^2/\text{g}$
- $c_{p,t}=2.0 \times 10^7 \text{ erg/g} \cdot \text{K}$,
 $c_{k,t}=1.5 \times 10^4 \text{ erg/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$
- $c_{p,s}=1.4 \times 10^7 \text{ erg/g} \cdot \text{K}$
 $c_{k,s}=1.7 \times 10^4 \text{ erg/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$

유변학적 물성치

- $s=0.09$
- $T_0=463 \text{ K}$
- $\theta_1(T_0)=0.800 \text{ sec}$, $\eta_1(T_0)=5.44 \times 10^4 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$
- $\theta_2(T_0)=0.027 \text{ sec}$, $\eta_2(T_0)=1.50 \times 10^4 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$

WLF shift factor 상수

- $c_1=20.378$, $c_2=101.6 \text{ K}$
- $T_{ref}=407 \text{ K}$

Stress-optical coefficient

- $C=4.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{dyne}$

Frozen temperature

- $T_{fz}=373 \text{ K}$

공정조건

- 유량 $Q=23.8 \text{ cm}^3/\text{sec}$
- 용융 수지온도 $T_m=493 \text{ K}$
- 금형 온도 $T_w=313 \text{ K}$

수치해석에 사용된 유한차분 격자는 Fig. 2와 같고, Fig. 2에서 r_i 는 0.5 cm이고, 해석에 사용된 유한차분 격자수는 반지름방향으로 37개, 두께방향으로 36개이다.

3.2 사출성형공정에 대한 수치해석

보압이 16.5 MPa이고, 보압시간이 6.0초인 경우의 사출성형공정에 대한 수치해석결과를 주요 단계별로 Fig. 3부터 Fig. 8까지 제시하였다. Fig. 3부터 Fig. 5까지는 충전과정이 끝난 순간의 수치해석 결과를 제시하였다. Fig. 3은 반경방향으로 다섯 곳에서의 두께방향으로의 온도 및 밀도 분포를 각각 보여주고 있다. 이 결과들로부터 벽면 근처에서

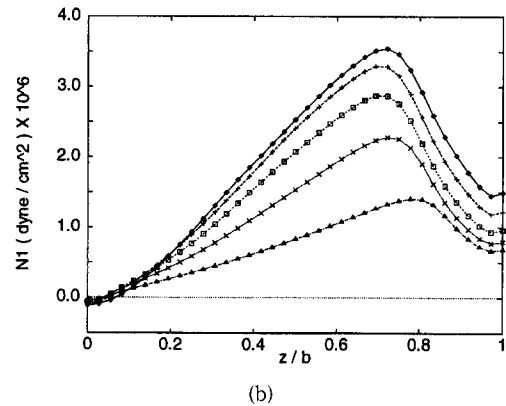
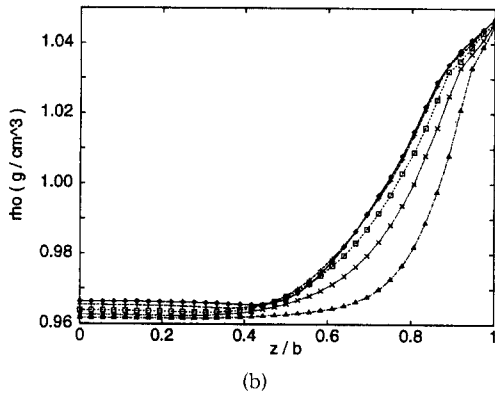
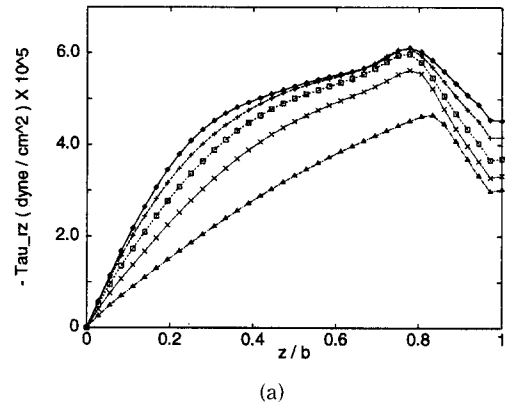
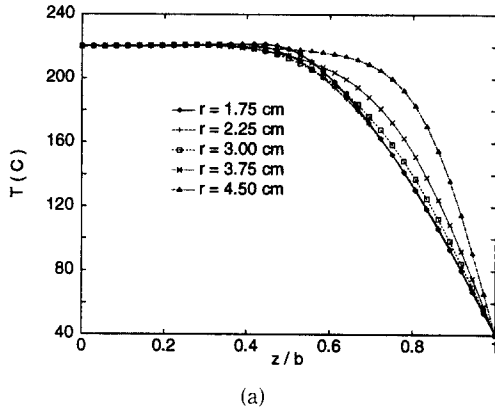


Fig. 3 Gapwise distribution of temperature T (a) and density ρ (b) at various radial locations at the end of filling ($t=0.678$ sec).

Fig. 4 Gapwise distribution of shear stress τ_{rz} (a) and the first normal stress difference N_1 (b) at various radial locations at the end of filling ($t=0.678$ sec). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

재료가 냉각되어 밀도가 높고 반경이 증가할수록 냉각이 덜 되어 밀도가 낮음을 알 수 있다. Fig. 4는 반경방향으로 다섯 곳에서의 두께방향으로의 전단응력과 N_1 의 분포를 각각 보여주고 있으며, Fig. 5은 Δn 의 분포를 보여주고 있다.

Fig. 4~Fig. 5에서 알 수 있듯이 반경이 증가할수록 전단응력, N_1 , Δn 이 작아짐을 알 수 있고, 특히 이 경우에는 전단응력보다 N_1 이 Δn 에 미치는 영향이 커서 N_1 과 Δn 의 분포의 형태가 유사함을 보여주고 있다. 같은 반경위치에서 두께방향의 변화를 관찰해 보면, 복굴절은 원판두께의 중심과 벽면사이에 극대점이 한개 존재함을 알 수 있다.

Fig. 6부터 Fig. 7까지는 보압과정이 끝난 순간의 수치해석결과를 제시하였다. Fig. 6은 반경방향으로 다섯 곳에서의 두께방향으로의 온도분포 및 밀도분포를 각각 보여주고 있다. 이 결과들로부터 중심의 밀도가 충전과정이 끝났을 때보다 증가한 것

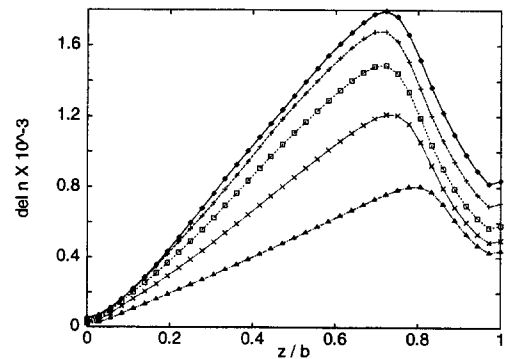
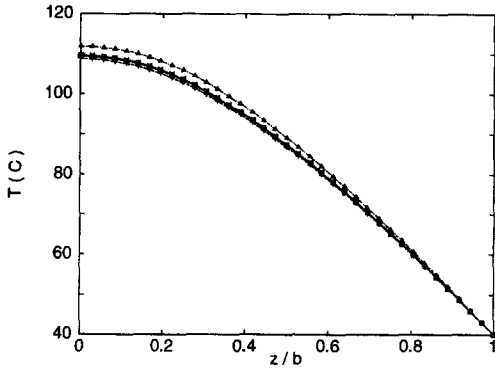
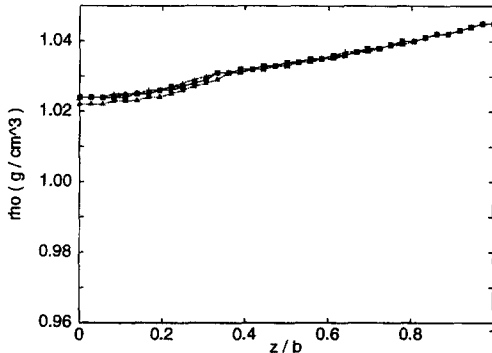


Fig. 5 Gapwise distribution of birefringence Δn at various radial locations at the end of filling ($t=0.678$ sec). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

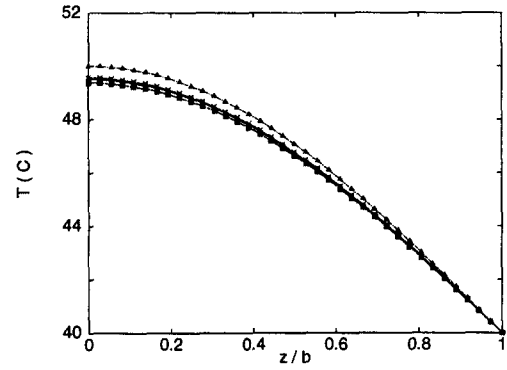


(a)

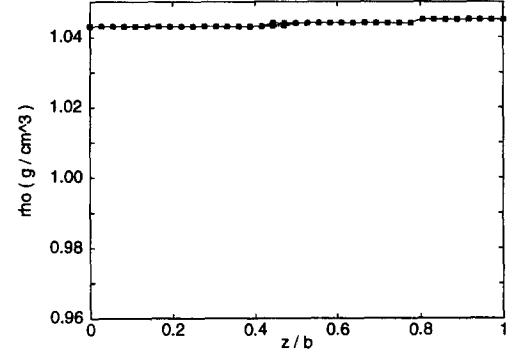


(b)

Fig. 6 Gapwise distribution of temperature T(a) and density ρ (b) at various radial locations at the end of packing ($t=6.644$ sec). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).



(a)



(b)

Fig. 8 Gapwise distribution of temperature T(a) and density ρ (b) at various radial locations at the end of cooling ($t=13.677$ sec). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

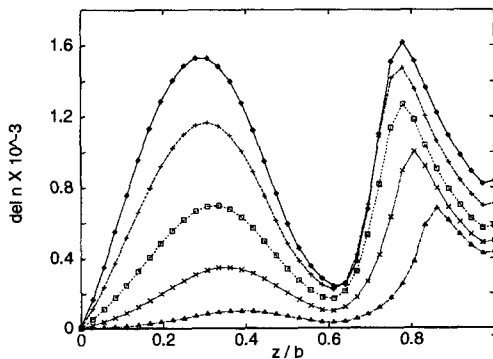


Fig. 7 Gapwise distribution of birefringence Δn at various radial locations at the end of packing ($t=6.644$ sec). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

을 알 수 있다(Fig. 3과 비교). Fig. 7은 Δn 의 분포를 보여주고 있는데, 충전과정이 끝난 직후에 비해

중심층에 가까운 부근에서 새로운 극대점이 생겼으며, 벽면근처에서는 변화가 없음을 알 수 있다(Fig. 5와 비교).

보압과정이 끝난 후 냉각과정에서, 제품 내의 모든 위치에서의 온도가 $f_{1/2}$ 보다 낮아지는 순간, 반경방향으로 다섯곳에서의 두께방향으로의 온도 및 밀도분포가 Fig. 8에 제시되어있다. 특기할 사항으로는 냉각과정 중에 밀도의 분포가 반경이나 두께 방향에 무관하게 거의 일정하게 변했다는 사실이다. 복굴절분포는 냉각과정이 끝난 순간의 수치해석결과가 보압과정이 끝난 순간의 수치해석결과(Fig. 7)와 거의 차이가 없어 새로운 그림을 추가하지 않기로 하였는데, 이것은 보압과정 동안 충분히 냉각되었기 때문에 잔류응력이 고착되었기 때문이다.

위의 결과들로부터 벽면 근처에서는 충전과정이 후 냉각과정까지 이미 재료가 냉각되어 밀도 및 복

굴절의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 중심부의 밀도가 보압과정과 냉각과정을 거치면서 충전과정이 끝났을 때보다 증가한 것을 알 수 있는데, 이것은 보압과정과 냉각과정을 거치면서 추가적인 재료의 유입이 있었음을 의미한다. 상기의 보압이 16.5 MPa, 보압시간이 6.0초인 경우의 해석결과와 뒤에 언급할 보압이 0 MPa인 경우의 수치해석과 비교할 때 중심부에서 또하나의 정점들이 생겼다는 것이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 이것은 디스크가 완전히 충전된 후 보압으로 인한 추가적인 유동이 생겨 molecular orientation을 유발시키기 때문이다. 이러한 경향은 게이트에 가까운 디스크의 안쪽에서(즉, 반경이 작을수록) 더욱 큰 것을 알 수 있다.

3.3 보압과정이 복굴절 및 밀도에 미치는 영향

사출성형공정에서 보압과정이 복굴절 및 밀도에 미치는 영향을 알아보기 위해 보압과정이 없는 경우와 보압과정이 있는 경우에 대해서는 동일보압(16 MPa)이 작용되는 보압시간을 바꾸면서(1초, 2초, 3초, 4초, 5초, 6초, 7초) 수치해석을 수행하였다. Fig. 9에 보압과정이 포함되지 않은 경우의 복굴절분포 및 16.5 MPa의 보압으로 보압 시간이 1.0초인 경우의 복굴절분포를 대표적으로 제시하였고, 6.0초인 경우는 이미 Fig. 7에 보여준 것과 같다. Fig. 10에 보압과정이 포함되지 않은 경우의 밀도분포 및 16.5 MPa의 보압으로 보압시간이 3.0초와 6.0초인 경우에 반경방향의 평균 밀도분포를 제시하였다. (보압과정 후의 밀도의 분포는 Fig. 6과 Fig. 8에서 보여진 바와 같이 반경방향으로 거의 균일하고, 두께에 따라 변화하는 것을 알 수 있었기 때문에 반경방향의 평균밀도를 제시한 것이다.)

우선 보압과정이 포함되었을 때 나타나는 복굴절분포의 가장 큰 특징은 Fig. 7과 Fig. 9(a)의 비교에서 알 수 있듯이, 보압과정이 포함되지 않았을 때 나타나는 정점들 외에 안쪽에서 또다른 정점들이 생긴다는 것이다. 이것은 디스크가 완전히 충전된 상태에서 보압으로 인한 추가적인 유동이 생기고, 이 유동이 molecular orientation을 유발시켜 복굴절 값을 증가시키기 때문이며, 디스크의 안쪽에서의 복굴절 값이 바깥쪽에서의 복굴절 값보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 보압과정의 추가로 인하여 디스크의 비등방성이 증가하게 되었다는 것

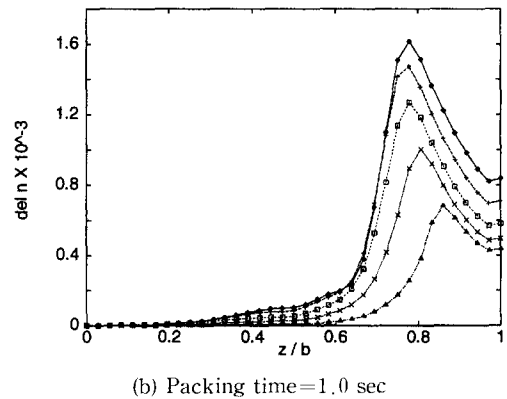
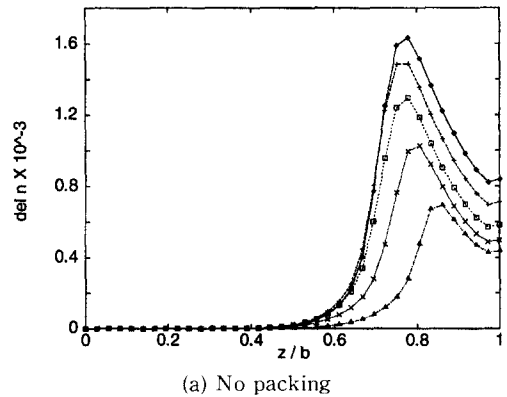


Fig. 9 Gapwise distribution of birefringence Δn at various radial locations at the end of cooling. The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

을 그림에 제시된 복굴절분포로부터 알 수 있다. 그러나, 바깥쪽 정점들은 보압시간에 관계없이 일정한 것을 알 수 있는데, 이것은 바깥쪽 정점들이 이미 frozen되어서 더 이상의 응력 이완화현상을 거치지 못하기 때문이다. 한편, 유동상태인 중심부에서는 보압의 영향으로 추가적인 유동이 생겼다가 응력 이완화현상을 거치게 된다.

상기의 수치해석결과들로부터 알 수 있는 또 다른 사실은 보압시간이 증가함에 따라 안쪽 정점들의 값이 점점 증가하고 최대 복굴절 값이 존재하는 두께방향의 위치가 점점 중심부쪽으로 이동한다는 것이다. 이것은 보압과정이 진행되는 동안에도 냉각이 계속되어 frozen layer가 계속 두꺼워짐에 따라 보압으로 인한 유동이 생길 수 있는 통로가 점점 좁아지기 때문이다. 즉, frozen layer가 점점 두꺼워지기 때문에 최대 복굴절 값들이 존재하는 두께방향의 위치가 점점 중심부쪽으로 이동하게 되

고, 보압시간이 증가할수록 점점 좁아지는 통로에 일정한 보압이 유지되기 때문에 두께방향으로의 속도변화가 증가하여 유동변형 및 복굴절 값이 증가하게 되는 것이다. 그러나, 약 $t=5.0$ 초 후에는 안쪽 정점들의 값이 거의 일정하게 됨을 알 수 있었는데, 이것은 계속되는 냉각으로 인한 점도의 증가가 유동을 방해하기 때문이다. 하지만 Fig. 10에서 알 수 있듯이 밀도가 계속 증가하는 것으로부터 보압효과는 지속되고 있음을 알 수 있다.

한편, 보압시간이 증가할수록 중심부에서의 밀도는 점점 증가하는 반면, 벽면 근처에서의 밀도는 보압 시간에 관계없이 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 보압으로 인한 폴리스티렌의 추가 유입이 이미 냉각된 벽면 근처보다는 유동상태인 중심부에서 이루어져 중심부에서의 밀도를 증가시키기 때문이다.

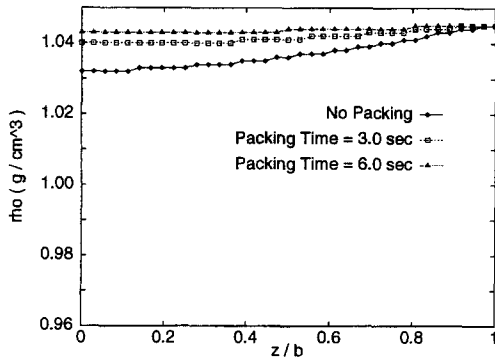


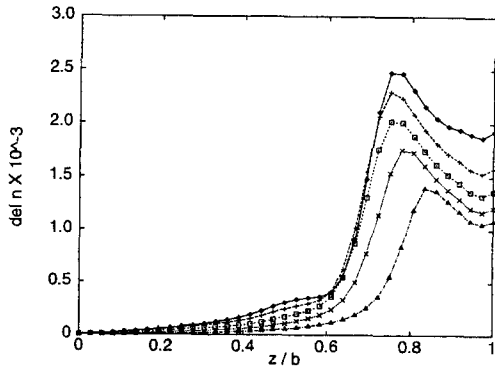
Fig. 10 Effect of packing time on the average density ρ with respect to radial directions at the end of cooling.

3.4 공정조건에 따른 복굴절 및 밀도의 변화

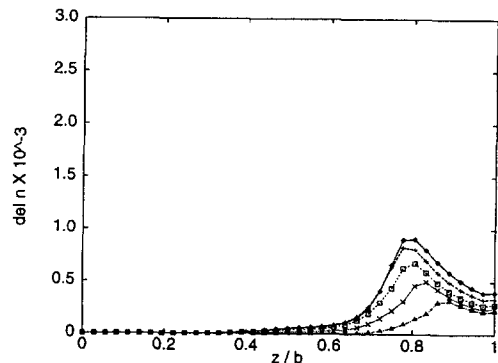
같은 재료를 사용하여 같은 금형으로 사출성형을 할지라도 공정조건에 따라서 사출제품의 성질은 매우 다를 수 있다. 사출제품에 대한 이러한 공정조건의 영향을 알아보기 위해 보압 16.5 MPa, 보압 시간 1.0초는 동일하게 유지한 채 다른 종류의 공정조건의 변화에 따른 복굴절분포를 고찰하였다.

유량을 15.0 cm³/sec로부터 30 cm³/sec까지 점진적으로 증가시키고, 금형의 온도는 20°C~60°C 사이에서 5가지 온도, 그리고 용융 수지온도는 200°C~240°C 사이에서 5가지 온도에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과로부터 사출성형공정에서 유량과 금형온도는 복굴절 값에 거의 영향을 미치지 못했으며, 용융 수지온도의 영향이 큰 것을 알 수 있다. Fig. 11은 복굴절분포에 대한 용융 수지온도의 영향을 보여주고 있는데, $T_m=220^\circ\text{C}$ ($t=8.711$ sec)의 결과는 Fig. 9(b)와 같다. 이 결과들로부터 용융 수지온도가 증가할수록 최대 복굴절 값과 벽면 근처에서의 복굴절 값이 점점 감소하는 것을 알 수 있는데, 이것은 용융 수지온도가 높을수록 frozen layer가 감소하고 응력이 이완되는 시간이 더 길어지기 때문이다. 그러나, 용융 수지온도가 증가할수록 사출성형 전체 공정시간이 길어져 생산성에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다.

한편, 상기와 같은 사출공정의 변화에 따른 밀도 분포를 고찰한 결과로부터 충전과정과 관계있는 조건인 유량과 용융 수지온도는 밀도분포에 거의 영향을 미치지 못함을 알 수 있었고, 금형 온도의 영향은 Fig. 12에 나타난 바와 같다. 금형 온도와 밀도분포의 관계를 보면, 금형 온도가 증가할수록 중



(a) $T_m=200^\circ\text{C}$ ($t=8.090$ sec)



(b) $T_m=240^\circ\text{C}$ ($t=8.412$ sec)

Fig. 11 Gapwise distribution of birefringence Δn at the end of cooling. The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

심부보다는 벽면에서의 밀도가 작아지면서 중심부와 벽면의 밀도차가 점점 감소하게 됨을 알 수 있는데, 이는 금형 온도가 증가할수록 두께방향으로 균일한 밀도분포를 갖는 사출제품을 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

3.5 사출성형공정에 대한 수치해석결과와 실험 결과의 비교

사출성형공정에 대한 수치해석결과를 문헌에 보고된 실험데이터^(6, 7, 8)와 비교하기 위해 보압이 0 MPa인 경우의 실험데이터와 이 실험데이터에 대한 수치해석결과를 Fig. 13에 제시하였다. 우선 복굴절분포의 형상에 있어서 수치해석결과와 실험데이터가 잘 일치하고 있다. 반경이 작을수록 속도가 크기 때문에 ($v_r \sim 1/r$) 속도구배도 커서 탄성변형 텐서인 $\bar{\epsilon}$ 가 커져서 잔류응력도 큼을 알 수 있다. 특히 벽면근처에서 볼 수 있는 정점들의 존재와 그 위치가 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 수치해석결과와 복굴절 값이 그 크기에 있어서 실험데이터에 비해 전반적으로 작은 경향이 있음을 알 수 있고, 중심부에서의 복굴절 값이 실험결과와는 달리 영인 것을 알 수 있다. 한편, 보압이 16.5 MPa이고, 보압시간이 6.0초인 경우의 실험데이터와 이 실험데이터에 대한 수치해석결과를 Fig. 14에 제시하였다. 우선 복굴절분포의 형상과 바깥쪽 정점들의 존재 및 그 위치는 수치해석결과와 실험데이터가 잘 일치하고 있다. 그러나, 수치해석결과와 복굴절 값이 그 크기에 있어서 실험데이터에 비해 전반적으로 작고, 안쪽 정점들의 위치가 실험데이터의 것보다 중심부쪽으로 약간 치우쳐 있음을 알 수

있다.

4. 결 론

본 연구에서는 center-gated 디스크의 사출성형 공정에 대한 수치해석을 수행하였다. 비선형 점탄성유체의 구성방정식으로 Leonov 모델을 사용하였으며, 온도와 압력의 변화에 따른 밀도의 변화를 고려하기 위한 압축성 모델링으로써 Tait 상태방정식을 사용하였다. Center-gated 디스크는 2차원의 간단한 형상이므로 유한차분법을 이용하여 해석 시스템을 개발하였으며, 수치해석결과를 권태현 등⁽⁶⁾의 실험결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻을 수 있었던 결론은 다음과 같다.

(1) 사출성형공정에 대한 복굴절분포의 수치해석

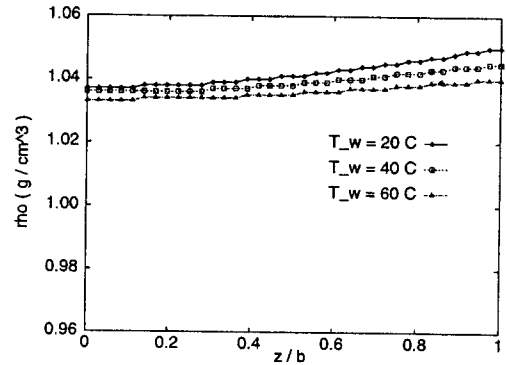
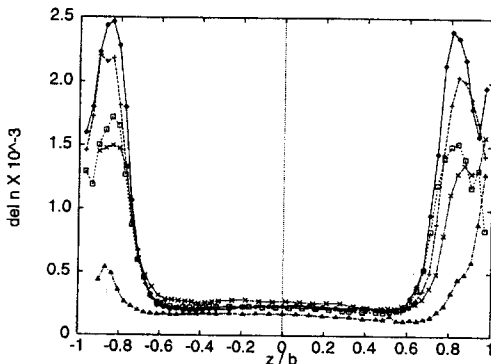
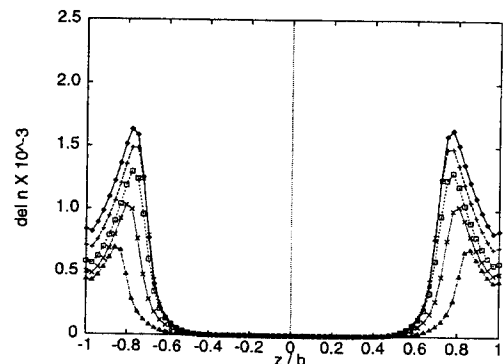


Fig. 12 Effect of mold wall temperature on the average density ρ with respect to radial direction at the end of cooling at $T_w=20^\circ\text{C}$ ($t=7.707$ sec), $T_w=40^\circ\text{C}$ ($t=8.711$ sec) and $T_w=60^\circ\text{C}$ ($t=10.299$ sec).



(a) Experimental data



(b) Numerical analysis result

Fig. 13 Gapwise distribution of birefringence Δn at various radial locations at the end of cooling. (Packing pressure=0 MPa). The meaning of symbols is the same as explained in Fig. 3(a).

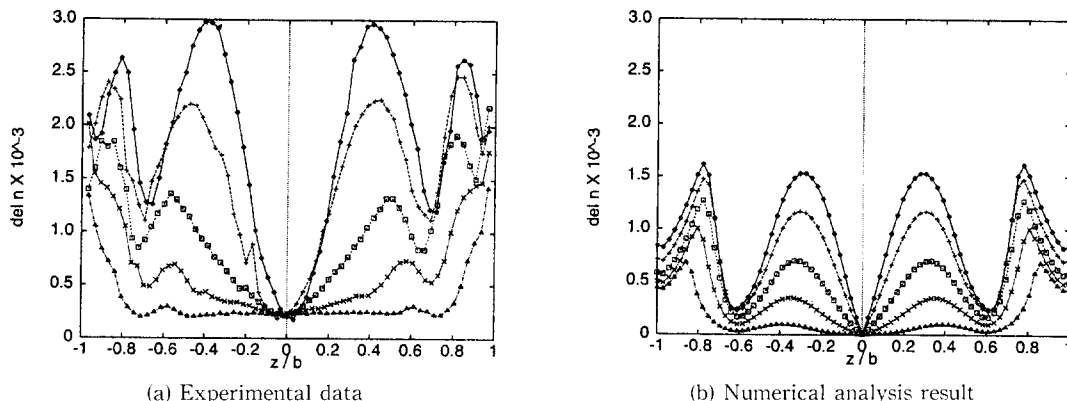


Fig. 14 Gapwise distribution of birefringence Δn at various locations at the end of cooling. (Packing pressure = 16.5 MPa). The meaning of symbols is the same explained in Fig. 3(a).

결과가 권태현 등⁽⁶⁾의 실험결과와의 비교에 있어서 정성적으로는 일치하나 정량적으로는 차이가 있다. 특히, 중심부의 복굴절 값에 있어서 수치해석 결과는 영인 반면에 실험결과는 그렇지 않다.

(2) 보압과정과 냉각과정을 거치면서 중심부의 밀도가 증가하는 것으로부터 추가적인 재료의 유입이 있음을 알 수 있다.

(3) 보압과정이 포함되면 복굴절분포에서 바깥쪽 뿐만 아니라 안쪽에도 또 하나의 정점들이 생겨 제품의 비등방성이 증가함을 알 수 있고, 보압시간이 커짐에 따라 그 값이 점점 증가함을 알 수 있다. 한편, 보압시간이 증가함에 따라 중심부의 밀도값도 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

(4) 유량, 금형 온도 및 용융 수지온도 등의 공정조건에 따라 제품의 성질이 달라짐을 알 수 있다. 용융 수지온도가 높을수록 복굴절 값이 작아지지만 유량 및 금형 온도는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 한편, 금형 온도는 밀도분포에 영향을 주지만, 유량 및 용융 수지온도는 밀도분포와 관계가 없음을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 개발된 물리적 모델링 및 수치해석 시스템은 디스크 형태의 정밀 광학 제품의 사출성형공정의 이해를 증진시키고, 나아가서 공정의 과학적 확립에 도움을 줄 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 94년도 한국과학재단 연구지원에 의한 결과(과제번호 : 94-0200-04-3)로서 관계 당국에 감사드리고, 한편 LG 전자(주)의 산학협동 연구 지

원과 기술적 논의에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jehuda Greener, Raymond Kesel and Beverly A. Contestable, 1989, "The Birefringence Problem in Optical Disk Substrates: A Modeling Approach," *AICHE Journal*, Vol. 35, No. 3, pp. 449~458.
- (2) Leonov, A. I., 1976, "Nonequilibrium Thermodynamics and Rheology of Viscoelastic Polymer Media," *Rheol. Acta*, Vol. 15, pp. 85~98.
- (3) Leonov, A. I., Lipkina, E. H., Pashkin, E. D. and Prokunin, A. N., 1976, "Theoretical and Experimental Investigation of Shearing in Elastic Polymer Liquids," *Rheol. Acta*, Vol. 15, pp. 411~426.
- (4) Isayev, A. I. and Hieber, C. A., 1980, "Toward a Viscoelastic Modeling of the Injection Molding of Polymers," *Rheol. Acta*, Vol. 19, pp. 168~182.
- (5) Chen, Shia Chung and Chen, Yung Cheng, 1995, "Effect of Process Conditions on Birefringence Development in Injection-Molded Parts. I. Numerical Analysis," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 55, pp. 1757~1769.
- (6) 권태현, 윤경환, 김승우, 1995, "정밀 플라스틱 광학 제품제조를 위한 정밀 사출성형 기술에 관한 연구," 한국과학재단 제1차 중간보고서.
- (7) 권태현, 윤경환, 김승우, 1996, "정밀 플라스틱 광학 제품제조를 위한 정밀 사출성형 기술에

- 관한 연구,” 한국과학재단 제2차 중간보고서.
- (8) 윤경환, 1995, “원반 형상의 정밀사출성형공정에 관한 실험적 연구,” *The Korean Journal of Rheology*, Vol. 7, No. 1, pp. 19~27.
- (9) Kennedy, 1995, “Flow Analysis of Injection Molds,” *Hanser Publishers*, Chapter 5~6, New York.
- (10) Chiang, H. H., Hieber, N. and Wang, K. K., 1991, “A United Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I: Formulation and Part II: Experimental Verification,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 31, pp. 116~124 and pp. 125~139.
- (11) Chiang, H. H., Himasakhar, K., Santhanam, N. and Wang, K. K., 1993, “Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection Molding for the Prediction of Shrinkage and Warpage,” *J. Eng. Mat. and Tech.*, Vol. 115, pp. 37~47.
- (12) Isayev, A. I., 1987, *Injection and Compression Molding Fundamentals*, Marcel Dekker Inc., New York.
- (13) Famili, N. and Isayev, A. I., 1991, “Viscoelastic Modeling of Injection Molding of a Strip and a Center Gated Disk-Cavity,” *Modeling of Polymer Processing*, Hanser Publisher, New York.
- (14) Chen, B. S. and Liu, W. H., 1994, “Numerical Simulation of the Post-Filling Stage in Injection Molding with a Two-Phase Model,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, No. 10, pp. 835~846.
- (15) White, J. L., 1990, “Principles of Polymer Engineering Rheology,” *Polymer Engineering Center, Department of Polymer Engineering, The University of Arkon.*
- (16) Matsumoto, T. and Bogue, D. C., 1977, “Stress Birefringence in Amorphous Polymer under Nonisothermal Conditions,” *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, Vol. 15, No. 9, pp. 1663.