

## 사출압축성형 공정에 대한 유한요소 해석

이호상\*

(2003년 12월 4일 접수)

### Finite Element Analysis of Injection/Compression Molding Process

H. S. Lee

#### Abstract

A computer code was developed to simulate the filling stage of the injection/compression molding process by a finite element method. The constitutive equation used here was the compressible Leonov model. The PVT relationship was assumed to follow the Tait equation. The flow-induced birefringence was related to the calculated flow stresses through the linear stress-optical law. Simulations of a disk part under different process conditions including the variation of compression stroke and compression speed were carried out to understand their effects on birefringence variation. The simulated results were also compared with those by conventional injection molding.

**Key Words :** Birefringence, Viscoelasticity, Injection Molding, Injection/Compression Molding, Polystyrene

#### 1. 서 론

광학 렌즈, LCD 도광판, CD 기판 등 정밀 플라스틱 광 부품 성형기술의 중요성은 점차 커지고 있다. 플라스틱은 유리에 비하여 가볍고 재료손실이 적다는 장점이외에도 다른 부품과 단일 공정으로 일체 성형이 가능하다는 특징을 갖고 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 사출성형 공법에서는 캐비티에서 불균일한 수축과 잔류응력이 발생하고, 최종적으로 복굴절로 인하여 광학 특성이 나빠지는 문제가 자주 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 사출압축성형 공법이 널리 사용되어 왔다. 캐비티에 부분적인 수지 충전을 한 후 금형 압축 공정을 추가하여 낮은 압력으로 성형품의 분자배향을 줄이고 광학 특성을 향상시키는 것이 가능하다.<sup>(2)</sup>

Klepke<sup>(3)</sup>는 두꺼운 광학 렌즈를 성형하기 위하여 사출압축성형을 사용하였으며, Yang<sup>(4)</sup> 등은 사출압축성형에 의한 디스크의 품질 특성을 실험적으로 연구하였다. Michaeli와 Wielputz<sup>(5)</sup>는 사출압축성형 공정에서 광 특성에 영향을 주는 주요 공정 변수에 관하여 연구하였다.

그럼에도 불구하고 아직까지 광 부품의 사출압축성형에 대한 과학적인 설계기법이 정립되어 있지 않은데, 그 이유는 고분자 수지의 점탄성 거동에 대한 이해 부족과 점탄성 영향을 고려한 공정 해석이 까다롭기 때문이다. Isayev와 Hieber<sup>(6)</sup>는 비선형 점탄성과 분자배향의 관계를 이론적으로 설명하였으며, Isayev와 Azari<sup>(7)</sup>는 비선형 점탄성 구성방정식을 사용하여 압착유동에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다.

\* 충주대학교 기계설계학과

Lee<sup>(8~9)</sup>등은 축대칭 형상의 사출압축성형에 대한 점탄성 수치해석을 수행하기 위하여 두께면 좌표계에 기초한 유한차분법을 사용하였다. 또한 Chen<sup>(10~12)</sup> 등도 사출압축성형에 대한 점탄성 수치해석을 수행하고 거시적으로 게이트에서의 거리에 따른 평균 복굴절을 관찰하였으나 두께에 따른 속도, 복굴절 등의 세부적인 해석결과는 제시하지 않았다.

본 논문에서는 일반적인 2 차원 좌표계에 기초한 유한요소법을 사용하여 사출압축성형 공정에 대한 유동해석 프로그램을 개발하였다. 점탄성을 고려하기 위하여 압축성 Leonov 모델을 사용하였으며, 유동에 의한 복굴절을 예측하기 위하여 선형 광응력 법칙을 사용하였다. 개발한 프로그램을 적용하여 디스크의 사출압축성형에서 중요한 압축 스트로크와 압축속도가 복굴절에 미치는 영향을 관찰하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 지배방정식

사출압축성형에서의 총전공정은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 하나는 금형을 약간 개방한 상태에서 수지를 사출하는 단계이며, 다른 하나는 금형을 닫으면서 수지를 압축 성형하는 단계이다. 수지를 사출하는 단계에 대한 지배방정식은 기존의 사출성형 공정에 대한 것으로서 선행 연구논문<sup>(13)</sup>에 자세히 언급되어 있다. 본 논문에서는 금형을 닫으면서 수지를 압축하는 공정에 대한 지배방정식을 유도하도록 한다.

Fig. 1과 같은 좌표계에서 2 차원 운동방정식, 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (3)$$

여기서 x, y는 평면좌표계이고 z는 두께방향 좌표를 나타내며  $\tau$ 는 전체응력을 나타낸다. 그리고  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도성분

을 나타내며, 밀도  $\rho$ 는 다음과 같이 Tait 식으로 표현될 수 있다.

$$V(P, T) = V_0(T) \left\{ 1 - c \ln \left[ 1 + \frac{T}{B(T)} \right] \right\} \quad (4)$$

이때  $c$ 는 상수이며,  $B$ 는 온도의 함수이다. 에너지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} (\kappa \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi \quad (5)$$

여기서  $C_p$ 와  $\kappa$ 는 각각 비열, 열전도율을 나타내며,  $\Phi$ 는 디시페이션 함수 (dissipation function)이다.

구성방정식은 Leonov 모델을 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\underline{\underline{\tau}} = -P \underline{\underline{\delta}} + \eta_0 s (\nabla \underline{\underline{v}} + \nabla \underline{\underline{v}}^T) + \sum_k \frac{\eta_k}{\theta_k} C_k \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 압력이며,  $s$ 는 유변학적 물성치, 그리고  $\eta_k$ 와  $\theta_k$ 는 각각  $k^{th}$  모드의 전단접성 (shear viscosity) 및 이완시간(relaxation time)이다. 또한  $C_k$ 는 Leonov모델에서  $k^{th}$  모드의 탄성 변형률 텐서이다.<sup>(13)</sup>

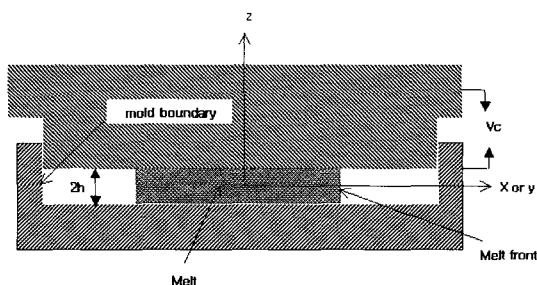


Fig. 1 Schematic diagram of compression molding

해석에 필요한 경계조건은 다음과 같이 부여될 수 있다.

$$v_x = v_y = 0, \quad v_z = -v_c \quad \text{at } z = h \quad (7)$$

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

$$P = 0 \quad \text{at the melt front} \quad (9)$$

$$Q = Q_0 \quad \text{at the gate or entry} \quad (10)$$

$$T = T_w \quad \text{at } z = h \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (12)$$

$$G \frac{\partial P}{\partial t} + H - \frac{\partial}{\partial x} (S_x \frac{\partial P}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (S_y \frac{\partial P}{\partial y}) - \rho_{z=h} v_c = 0 \quad (19)$$

여기서

$$G = \int_0^h \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) dz \quad (20)$$

$$H = \int_0^h \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) dz \quad (21)$$

$$S_x = \int_0^h (z \int_0^z \rho dz') \frac{dz}{\eta_x} \quad (22)$$

$$S_y = \int_0^h (z \int_0^z \rho dz') \frac{dz}{\eta_y} \quad (23)$$

식 (6)을 식 (1)과 식 (2)에 대입하고  $z$ 에 관하여 적분한 후에 경계조건식 식 (8)을 이용하면 속도 구배식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{z}{\eta_x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial y} \frac{z}{\eta_y} \quad (14)$$

여기서

$$\eta_x = \eta_0 s + \frac{1}{\partial v_x} \sum_k \frac{\eta_k}{\theta_k} C_{xz,k} \quad (15)$$

$$\eta_y = \eta_0 s + \frac{1}{\partial v_y} \sum_k \frac{\eta_k}{\theta_k} C_{yz,k} \quad (16)$$

식 (13)과 식 (14)를 적분하고 식 (7)을 이용하면 다음과 같이 속도식을 구할 수 있다.

$$v_x = -\frac{\partial P}{\partial x} \int_0^h \frac{z'}{\eta_x} dz' \quad (17)$$

$$v_y = -\frac{\partial P}{\partial y} \int_0^h \frac{z'}{\eta_y} dz' \quad (18)$$

식 (7), (17), (18)을 연속방정식 식 (3)에 대입하여 다음과 같은 지배방정식을 유도할 수 있다.

삼각형요소에 기초를 둔 유한요소법을 적용하여 지배방정식 식 (19)를 풀 수 있다. 탄성 변형율 텐서  $C_k$ 는 유선을 따르는 좌표계( $r, \theta, z$ )에서 수치적분법을 이용하여 계산된다. 이때  $r$ 은 유동 방향,  $\theta$ 는  $r$ 에 직각방향, 그리고  $z$ 는 두께방향이며, 자세한 설명은 참고문헌<sup>(13)</sup>에 언급된 바와 같다.

$rz$  면에서의 유동에 의한 복굴절은 선형 광응력 법칙에 따라 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta n = C_\sigma^R \sqrt{(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + 4 \tau_{rz}^2} \quad (24)$$

여기서  $C_\sigma^R$ 은 용융상태에서의 응력-광 계수이다.

## 2.2 압축공정에서의 유동 선단 진전

Fig. 1과 같이 금형이 속도  $v_c$ 를 갖고 압축하면서 발생하는 질량유량(mass flow rate)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q_c = 2 \frac{\sum_i \rho_i f_i V_i}{2 h_k} v_c \quad (25)$$

여기서  $h_k$ 는 시간  $t = k$ 인 경우의 1/2 두께,  $f_i$ 는 제어체적(control volume)  $i$ 의 충전계수(fill factor), 그리고  $V_i$ 는 제어체적(control volume)  $i$ 의 체적이다.

압력구배를 이용하여 요소  $e$ 로 부터 절점  $i$ 의  
제어체적으로 들어가는 유량  $q_{ei}$ 를 계산할 수 있  
으며, 이때 속도는 요소내에서 일정하다는 가정을  
적용한다. 시간  $t = k+1$ 에서의 새로운 체적은 시간  
 $t = k$ 에서의 체적과  $\Delta t$  동안 들어간 유량의 합과  
같다는 다음 식으로부터 각 절점에 대한 충전계  
수  $f_i^{k+1}$ 를 계산할 수 있다.

$$\rho_i^{k+1} f_i^{k+1} V_i^{k+1} = \rho_i^k f_i^k V_i^k + \sum_e q_{ei} \Delta t \quad (26)$$

시간단계  $k$ 에서 체적  $V_i^k$ 는 다음과 같다.

$$\rho_i^k V_i^k = \rho_{avg} \sum_e \frac{A_{ei}}{3} 2h^k \quad (27)$$

또한 시간단계  $k+1$ 에서 새로운 체적  $V_i^{k+1}$ 는  
다음과 같다.

$$\rho_i^{k+1} V_i^{k+1} = \rho_{avg} \sum_e \frac{A_{ei}}{3} 2(h^k - v_c \Delta t) \quad (28)$$

여기서  $\rho_{avg}$ 는 두께별 평균 밀도를 나타낸다.  
식 (27)과 식 (28)을 식 (26)에 대입하고,  $f_i^{k+1} = 1$   
을 놓으면 절점  $i$ 에서 제어체적을 채우는데 소요  
되는 시간증분  $\Delta t_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_i = \frac{\rho_{avg} (1 - f_i^k) \sum_e \frac{A_{ei}}{3} 2h^k}{\sum_e (q_{ei} + 2v_c \frac{A_{ei}}{3} \rho_{avg})} \quad (29)$$

유동 선단에 위치한 모든 절점들에 대하여  
 $\Delta t_i$ 를 구하고, 그 중에서 가장 작은 값을  $\Delta t$ 로  
선택한다. 새로운 충전계수  $f_i^{k+1}$ 는 식 (26)으로  
부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$f_i^{k+1} = \frac{f_i^k h^k}{h^k - v_c \Delta t} + \frac{\sum_e q_{ei} \Delta t}{\rho_{avg} \sum_e \frac{A_{ei}}{3} 2(h^k - v_c \Delta t)} \quad (30)$$

### 3. 결 과

작용모델로는 복굴절 예측결과가 Yoon<sup>(14)</sup>의 실  
험결과와 잘 일치하는 것으로 확인된 참고문헌  
<sup>(13)</sup>의 것과 동일한 것으로 선정하였으며, 이는 두  
께 0.2cm, 직경 10.16cm이며, 중심에 게이트가 설  
치된 디스크이다. 사용된 수지는 폴리스틸렌  
Styron 615APR/DOW이며 사용된 물성치는 참고문  
헌<sup>(13)</sup>에 나타나 있다. 공정조건으로는 사출온도  
225 °C, 금형온도 40 °C, 그리고 유량 23.8  
cm<sup>3</sup>/s이다. 해석에서는 대칭성을 고려하여 1/4  
부분만을 모델링하였다.

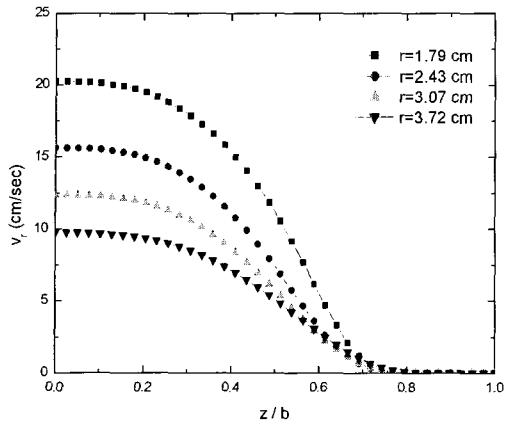
사출압축성형 공정조건중에서 압축 스트로크와  
압축속도의 영향을 관찰하기 위하여 Table 1과 같  
이 3 가지 경우에 대하여 해석을 수행하고 기존  
사출성형에 대한 해석결과와 비교하였다.

Table 1 Processing Parameters

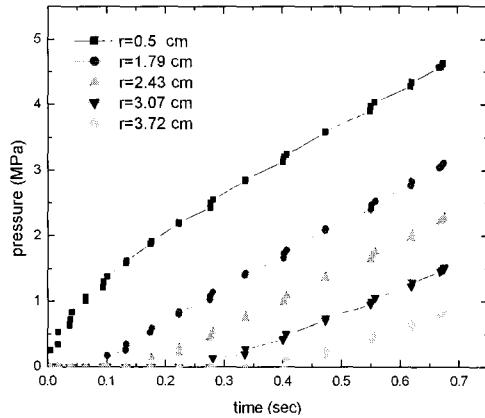
Processing parameters	Case A	Case B	Case C
Compression stroke (cm)	0.0625	0.1275	0.1275
Compression speed (cm/sec)	1.0	1.0	0.5

사출성형에 의한 충전과정에서의 두께별 속도  
분포는 Fig. 2와 같이 게이트에서 멀어질수록 반비  
례하여 작아지고 있으며, 금형 벽면으로부터 1/2  
두께의 약 30% 근처까지는 속도 성분이 존재하지  
않고 있음을 볼 수 있다. 이는 벽면 근처에서 수  
지의 온도가 유리전이온도 이하로 급격히 낮아져  
유동이 되지 않기 때문이다.

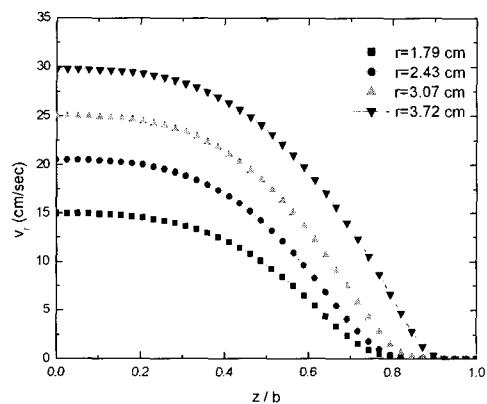
반면에 사출압축성형(Case A)을 적용한 경우의  
두께별 속도분포는 Fig. 3과 같이 게이트에서 멀어  
질수록 비례하여 커지고 있음을 볼 수 있다. 이는  
게이트에서 멀리 떨어질수록 금형 압축에 의한  
수지 유입량이 많아지게 되므로 질량보존법칙에  
의해 반경방향 속도 성분이 커지기 때문이다. Fig.  
3에서는 금형 벽면으로부터 1/2두께의 약 20% 근  
처까지는 속도 성분이 존재하지 않고 있음을 볼  
수 있는데 이는 사출성형에서의 30%보다 작은 값  
으로, 사출압축성형에서는 두께방향에 대한 속도  
구배가 작아지게 됨을 나타낸다. 그 이유는 압축



**Fig. 2 Predicted gapwise distribution of velocity  $V_r$  at various radial positions at the end of filling in injection molding process( $t=0.67443$  s)**



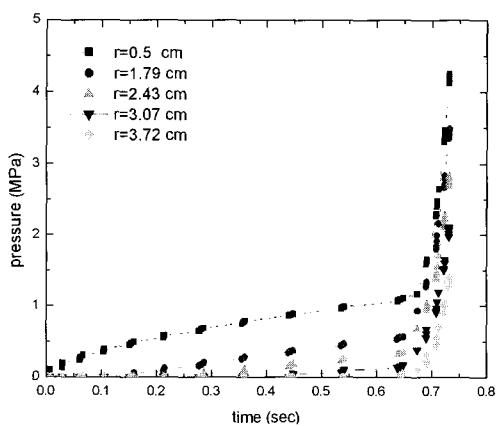
**Fig. 4 Simulated pressure traces at various radial positions during the filling stage of injection molding process**



**Fig. 3 Predicted gapwise distribution of velocity  $V_r$  at various radial positions at the end of filling ( $t=0.73138$  s) in injection/compression molding process under Case A**

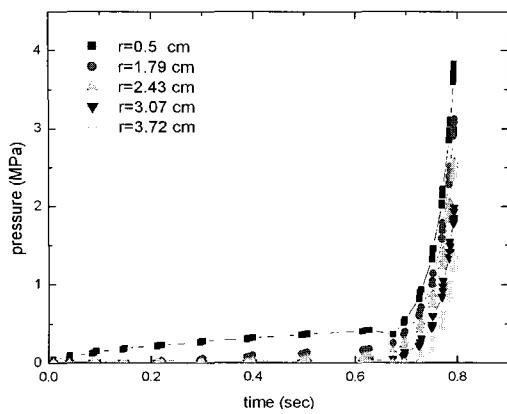
스트로크만큼 금형을 열어놓고 사출하므로 두께가 두꺼워지게 되어 사출성형 공정동안 열전달이 작고 유리전이온도 이하로 낮아지게 되는 두께가 작아지기 때문이다.

Fig. 4는 사출성형을 적용할 경우 충전이 완료된 시간에서의 압력분포를 나타내는 것으로 게이트 근방에서의 압력이 가장 높고 위치에 따라 압력차이가 크게 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 사출압축성형(Case A)을 적용한 경우의 압력분포를 나타낸 것으로 사출단계에서는 압력이 매우 낮고 압축단계에서는 금형의 압축으로 인하여 압

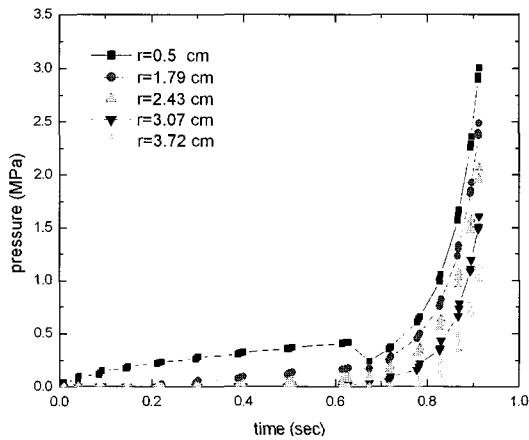


**Fig. 5 Simulated pressure traces at various radial positions during the filling stage of injection/compression molding process under Case A**

력이 상승하는 기울기가 커거나 위치에 따른 압력차이는 Fig. 4에 비하여 매우 작고, 균일함을 알 수 있다. Fig. 6은 압축 스트로크를 증가시킨 사출 압축성형(Case B)을 적용한 경우의 압력분포를 나타낸 것으로 압축 스트로크의 증가로 위치별 압력 차이가 더욱 줄고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 7은 압축속도를 감소시킨 사출압축성형(Case C)을 적용한 경우의 압력분포를 나타낸 것으로 압축속도가 느릴 경우 압력의 크기가 작아지고 있음을 볼 수 있는데, 이는 상대적으로 금형 압축

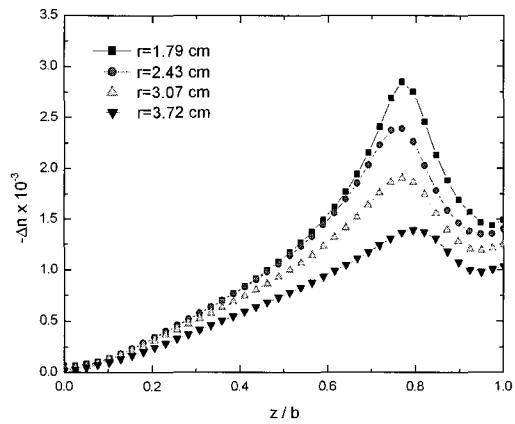


**Fig. 6** Simulated pressure traces at various radial positions during the filling stage of injection/compression molding process under Case B

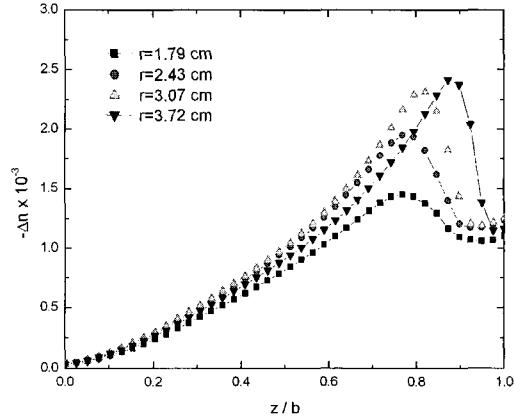


**Fig. 7** Simulated pressure traces at various radial positions during the filling stage of Injection/compression molding process under Case C

벽의 감소에 따른 결과로 판단된다. 결과적으로 압축스트로크의 증가는 게이트로부터 위치별 압력차이를 줄여 균일한 압력을 갖도록 하는데 효과적이며, 압축속도의 감소는 전체적인 압력의 크기를 줄이는데 영향을 주는 것으로 판단된다. 사출성형에 의한 충전이 완료된 후 두께에 따른 복굴절 분포가 Fig. 8에 나타나 있다. 복굴절은  $z/h \approx 0.7 \sim 0.8$  근처에서 최대를 보이고 있는데, 이는 전단응력 보다는 고화층의 영향을 받은 1차 법선응력차이가 크게 영향을 주었기 때문이다. 그리고 게이트로부터 멀어짐에 따라 복굴절의 최대값은 작아지고 있으며 최대값을 갖는 위치는 금



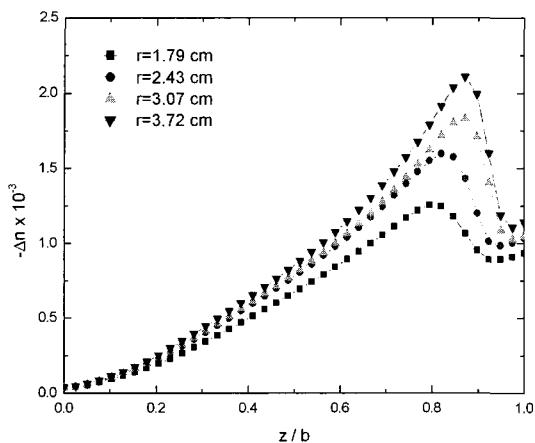
**Fig. 8** Predicted gapwise distribution of birefringence  $\Delta n$  at various radial positions at the end of filling in injection molding process ( $t = 0.67443$  s)



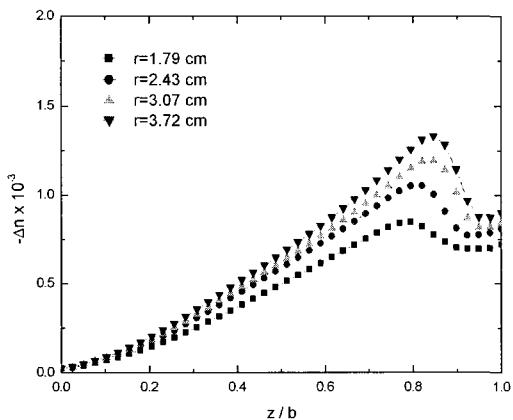
**Fig. 9** Predicted gapwise distribution of birefringence  $\Delta n$  at various radial positions at the end of filling ( $t = 0.73138$ s) in injection/compression molding process under Case A

형 벽쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9~Fig. 11은 사출압축성형을 적용한 경우의 두께에 따른 복굴절 분포를 나타낸 것으로 각각 Case A, Case B 그리고 Case C의 경우에 대한 해석 결과이다. 사출압축성형의 경우에는 사출성형의 경우와는 반대로 게이트로 근처에서 복굴절이 가장 작으며, 멀어질수록 커지고 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 2~Fig. 3에서 설명한 바와 같이 사출성형에서는 게이트 근처에서 속도가 크고, 멀어질수록



**Fig. 10 Predicted gapwise distribution of birefringence  $\Delta n$  at various radial positions at the end of filling ( $t = 0.7936s$ ) in injection/compression molding process under Case B**



**Fig. 11 Predicted gapwise distribution of birefringence  $\Delta n$  at various radial positions at the end of filling ( $t = 0.9127s$ ) in injection/compression molding process under Case C**

속도가 작아지는 반면, 사출압축성형에서는 반대의 경향을 갖기 때문에 속도구배의 영향을 크게 받는 복굴절 값도 반대의 거동을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 9의 경우보다 압축스트로크를 크게 한 경우의 결과인 Fig. 10을 보면 케이트 근처를 포함하여 전체적으로 복굴절이 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 9의 경우보다 압축스트로크를 크게 하고, 압축 속도를 줄인 경우로서 복굴절

의 크기가 더욱 작아지고 균일해짐을 볼 수 있다. 특히, 사출성형을 적용한 Fig. 8과 비교할 때 전체적으로 복굴절 크기가 1/2정도 작아지고 있으며, 특히 케이트에서 멀어질수록 변하는 복굴절 크기의 차이가 매우 작음을 볼 수 있다. 이는 위의 Fig. 4~Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 캐비티 압력의 감소와 위치별 균일성에 기인한 것으로 판단된다. 결과적으로 사출성형에 의하여 발생하는 복굴절 크기는 사출압축성형을 적용하므로서 크게 감소시킬 수 있으며, 위치별로 비교적 균일한 복굴절을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

압축성 Leonov 모델과 선형 광응력 법칙을 사용하여 유한요소법에 기초한 사출압축성형 공정에 대한 유동해석 프로그램을 개발하였다. 이를 적용하여 압축 스트로크와 압축속도가 캐비티 압력 및 복굴절에 미치는 영향을 관찰하고 기존 사출성형 해석 결과와 비교하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 사출성형 공정에서 속도의 크기는 케이트에서 멀어질수록 반비례하여 감소하지만, 사출압축성형의 경우에는 비례하여 커지고 있음을 볼 수 있었다.

(2) 사출압축성형시 압축 스트로크의 증가는 위치별 압력차이를 줄이는 역할을 하며, 압축 속도의 감소는 전체적인 캐비티 압력의 크기를 줄이는데 영향을 미침을 볼 수 있었다.

(3) 기존의 사출성형을 적용한 경우보다 사출압축성형을 적용한 경우 유동에 의한 복굴절이 1/2 이하로 크게 작아짐을 볼 수 있었다. 특히, 압축 스트로크를 크게 하고, 압축 속도를 줄이는 경우 복굴절은 더욱 감소함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 육성지원연구 과제(과제번호 : R05-2002-000-00669-0)의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Anonymous, 1984, "Optics with plastics : an alternative to glass", Plast. Eng., Vol. 40, pp.

- 57~65.
- (2) A. I. Isayev, 2000, Molding Processes in Handbook of Industrial Automation, R. L. Shell and E. L. Hall, Eds., Marcel Dekker, New York, Chapter 6.8, pp. 573~606.
- (3) G. Klepek, 1987, "Manufacturing Optical Lens by Injection Compression Molding", Kunststoffe, Vol. 77, p. 13.
- (4) S. Y. Yang and Y. C. Chen, 1998, "Experimental Study of Injection-Charged Compression Molding of Thermoplastic", Advances in Polymer Technology, Vol. 17, pp. 353~360.
- (5) W. Michaeli and M. Wielpuetz 2000, "Optimization of the optical quality of polymer glasses in the injection compression molding process", Macromol. Mater. Eng., Vol. 284/285, pp. 8~13.
- (6) A. I. Isayev and C. A. Hieber, 1980, "Toward a Viscoelastic Modeling of the Injection Molding of Polymers", Rheol. Acta., Vol. 19, pp. 168~182.
- (7) A. I. Isayev and A. D. Azari, 1986, "Viscoelastic Effect in Compression Molding of Elastomers: Shear-Free Squeezing Flow", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 59, pp. 868~882.
- (8) Y. B. Lee, T. H. Kwon and K. Yoon, 2002, "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk: Part 1. Basic Modeling and Results for Injection", Polym. Eng. Sci., Vol. 42, pp. 2246~2272.
- (9) Y. B. Lee, T. H. Kwon and K. Yoon, 2002, "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk: Part 2. Effects of Processing Conditions", Polym. Eng. Sci., Vol. 42, pp. 2273~2292.
- (10) S. C. Chen, Y. C. Chen and N. T. Cheng, 1998, "Simulation of Injection-Compression Mold-Filling Process", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 907~917.
- (11) S. C. Chen, Y. C. Chen and H. S. Peng, 2000, "Simulation of Injection-Compression-Molding Process 2.,Influence of Process Characteristics in Part Shrinkage", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 75, pp. 1640~1654.
- (12) S. C. Chen, Y. C. Chen and H. S. Peng, 2002, "Simulation of Injection-Compression-Molding Process, Part 3: Effect of Process Conditions on Part Birefringence", Advance in Polymer Technology", Vol. 21, pp. 177~187.
- (13) G. -D. Shyu, A. I. Isayev and H. -S. Lee, 2003, "Numerical Simulation of Flow-Induced Birefringence Injection Molded Disk", Korea-Australia Rheology Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 159~166.
- (14) K. Yoon, 1995, "An Experimental Study on Precision Injection Molding of Center-gated Disks", Korean J. of Rheol. Vol. 7, pp. 19~27.