

사출압축성형에서의 유동에 의한 복굴절 해석

이호상* · A.I. Isayev**

Numerical Simulation of Flow-Induced Birefringence in Injection/Compression Molding

H.-S. Lee and A. I. Isayev

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 processing conditions including the variation of compression stroke and compression speed were carried out to understand their effects on flow-induced birefringence. The simulated results were also compared with those by conventional injection molding and with experimental data from literature.

Key Words: Injection/Compression Molding, Viscoelastic Simulation, Velocity, Pressure, Birefringence

1. 서론

사출압축성형 공법은 금형을 약간 개방한 상태에서 캐비티에 부분적인 수지 충전 후 금형을 압축하면서 성형하는 방법으로 성형압력을 줄이고, 휨이나 분자배향을 감소시켜 광학 특성을 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 그럼에도 불구하고 아직까지 광 부품의 사출압축성형에 대한 과학적인 설계기법이 정립되어 있지 않은데, 그 이유는 고분자 수지의 점탄성 거동에 대한 이해 부족과 점탄성 영향을 고려한 공정해석이 까다롭기 때문이다. Isayev와 Hieber⁽²⁾는 비선형 점탄성과 분자배향의 관계를 이론적으로 설명하였으며, Isayev와 Azari⁽³⁾는 비선형 점탄성 구성방정식을 사용하여 압축유동에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. Lee 등^(4,5)은 축대칭 형상의 사출압축성형에 대한 점탄성 수치해석을 수행하기 위하여 두께

면 좌표계에 기초한 유한차분법을 사용하였다. 또한 Chen 등^(6,7)도 사출압축성형에 대한 점탄성 수치해석을 수행하고 거시적으로 게이트에서의 거리에 따른 평균 복굴절을 관찰하였으나 두께에 따른 속도, 복굴절 등의 세부적인 해석결과는 제시하지 않았다.

본 연구에서는 일반적인 2차원 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. 이론

* 충주대학교 기계설계학과

** Institute of Polymer Engineering,
The University of Akron

2.1 지배방정식

Fig.1 과 같은 좌표계에서 운동방정식, 연속 방정식을 적용하여 다음과 같은 지배방정식을 유도할 수 있으며, 사용 변수에 관한 설명은 참고문헌⁽⁸⁾에 언급된 바와 같다.

$$G \frac{\partial P}{\partial t} + H - \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(S_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \rho_{z=h} v_c = 0 \quad (1)$$

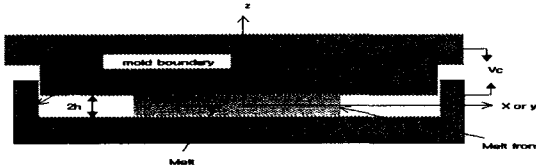


Fig.1 Schematic diagram of compression molding

삼각형요소에 기초를 둔 유한요소법을 적용하여 지배방정식 (1)을 풀 수 있다. 탄성 변형율 텐서 C_k 는 유선을 따르는 좌표계 (r, θ, z) 에서 수치적분법을 이용하여 계산된다. 이때 r 은 유동방향, θ 는 r 에 직각방향, 그리고 z 는 두께방향이며, 자세한 설명은 참고문헌⁽⁹⁾에 언급된 바와 같다. rz 면에서의 유동에 의한 복굴절은 선형 광응력 법칙에 따라 다음과 같이 계산될 수 있다.

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

여기서 C_{σ}^n 은 용융상태에서의 응력-광 계수이다.

2.2 압축공정에서의 유동선단 진전

절점 i 에서 제어체적을 채우는데 소요되는 시간증분 Δt_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

유동 선단에 위치한 모든 절점들에 대하여 Δt_i 를 구하고, 그 중에서 가장 작은 값을 Δt 로 선택한다. 새로운 충전계수 f_i^{k+1} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$f_i^{k+1} = \frac{f_i^k h^k}{h^k - v_c \Delta t} + \frac{\sum_N q_{Ni} \Delta t}{\rho_{avg} \sum_N \frac{A_{Ni}}{3} 2(h^k - v_c \Delta t)} \quad (4)$$

유동 캐비티로 주입된 수지의 양이 제품의 체적과 동일할 때 사출단계에서 압축단계로 전환되며, 압축공정에서의 계산영역으로는 유동선단의 위치와 두께의 변화가 고려된다. 해석은 충전계수를 체크하면서 캐비티가 완전히 채워질 때까지 계속된다.

3. 결 과

적용모델로는 Chen⁽⁶⁾의 실험데이터에 기초하였다. 두께 0.1 cm, 직경 14 cm 이며, 중심에 게이트가 설치된 디스크이다. 사용된 수지는 폴리스틸렌 (CHI MEI/PG33)이며 사용된 물성치는 C-MOLD 데이터베이스 값을 활용하여 Leonov 모델 변수를 계산하였다.⁽⁸⁾ 공정조건으로는 사출 온도 240 °C, 금형온도 40 °C, 그리고 유량 76.6 cm³/s이다. 해석에서는 대칭성을 고려하여 1/4 부분만을 모델링하였다.

사출압축성형 공정조건중에서 압축 스트로크와 압축속도의 영향을 관찰하기 위하여 Table 1과 같이 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)	0.05	0.1	0.1
Compression speed (cm/sec)	2.0	2.0	1.0

3.1 압력분포

Fig.2는 사출성형(CIM)과 사출압축성형(ICM)에 대한 충전후 게이트 근처에서의 해석결과와 Chen⁽⁶⁾에 의한 실험 결과를 비교한 것이다. 예측된 압력분포는 실험결과와 잘 일치하고 있으나, 약 0.2 초의 압축전환 시간 근처에서 압력 크기에 차이가 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 사출압축성형기에서 압축공정으로 전환하는 동안 약 0.025 초 정도의 응답시간 차이에 기인한 것으로 판단된다. 예측되는 바와 같이 사출성형에서는 반경방향 위치에 따른 압력차이가 크게 발생함을 Fig.3에서 볼 수 있다. 그러나 Fig.4에서 보는 바와 같이 사출압축성형에서는 그 차

이가 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.

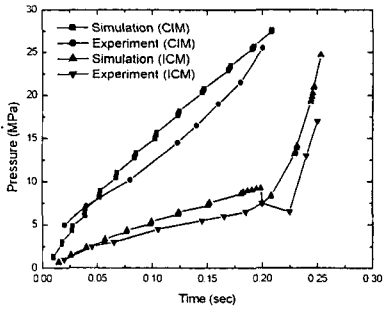


Fig. 2 Comparison of predicted cavity pressure profiles near the gate for CIM and ICM with experiments measured by Chen et al. (6)

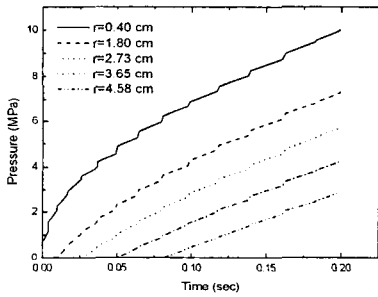


Fig. 3 Simulated pressure traces at various radial positions during filling stage of injection molding process

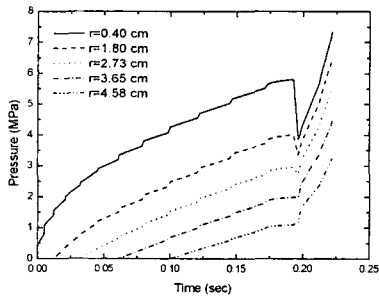


Fig. 4 Simulated pressure traces at various radial positions during injection and compression stage of injection/compression molding process under Case A

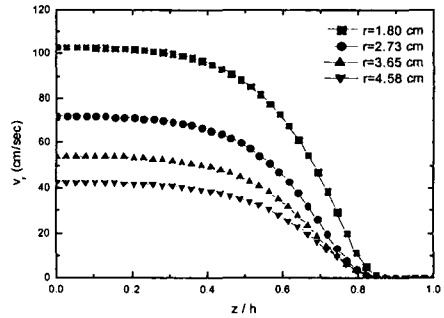


Fig. 5. Predicted gapwise distribution of velocity V_r at various radial positions at the end of filling in injection molding process ($t=0.21$ s)

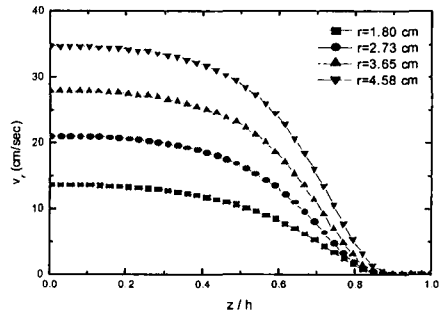


Fig. 6 Predicted gapwise distribution of velocity V_r at various radial positions at the end of compression stage ($t=0.222$ s) in injection/compression molding process under Case A

3.2 속도분포

사출성형에 의한 충전과정에서의 두께별 속도 분포는 Fig. 5 와 같이 게이트에서 멀어질수록 반비례하여 작아지고 있으며, 금형 벽면으로부터 1/2 두께의 약 20% 근처까지는 속도 성분이 존재하지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 벽면 근처에서 수지의 온도가 유리전이온도 이하로 급격히 낮아져 유동이 되지 않기 때문이다.

반면에 사출압축성형(Case A)을 적용한 경우의 두께별 속도분포는 Fig. 6 과 같이 게이트에서 멀어질수록 비례하여 커지고 있음을 볼 수 있다. 이는 게이트에서 멀리 떨어질수록 금형 압축에 의한 수지 유입량이 많아지게 되므로 질량보존

법칙에 의해 반경방향 속도 성분이 커지기 때문이다.

3.3 복굴절 분포

사출성형에 의한 충전이 완료된 후 두께에 따른 복굴절 분포가 Fig. 7 에 나타나 있다. 복굴절은 $z/h \approx 0.85 \sim 0.9$ 근처에서 최대를 보이고 있는데, 이는 전단응력 보다는 고화층의 영향을 받은 1 차 법선응력차이가 크게 영향을 주었기 때문이다. 그리고 게이트로부터 멀어짐에 따라 복굴절의 최대값은 작아지고 있으며 최대값을 갖는 위치는 금형 벽쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다.

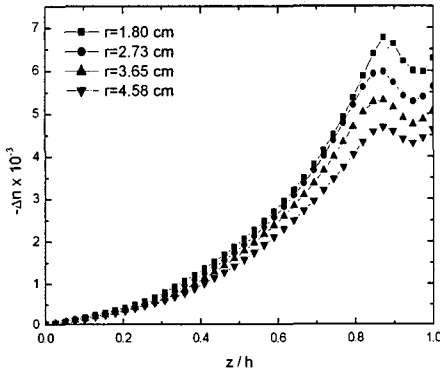
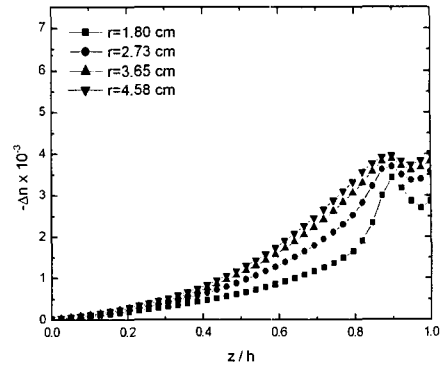


Fig. 7 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial positions at the end of filling in injection molding process ($t=0.21$ s)

Fig.8~Fig.10 은 사출압축성형을 적용한 경우의 두께에 따른 복굴절 분포를 나타낸 것으로 각각 Case A, Case B 그리고 Case C 의 경우에 대한 해석 결과이다. 사출압축성형의 경우에는 사출성형의 경우와는 반대로 게이트로 근처에서 복굴절이 가장 작으며, 멀어질수록 커지고 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 사출성형에서는 게이트 근처에서 속도가 크고, 멀어질수록 속도가 작아지는 반면, 사출압축성형에서는 반대의 경향을 갖기 때문에 속도구배의 영향을 크게 받는 복굴절 값도 반대의 거동을 보이는 것으로 판단된다. Fig. 8 의 경우보다 압축스트로크를 크게 한 경우의 결과인 Fig. 9 을 보면 게이트 근처를 포함하여 전체적으로 복굴절이 약간 줄어들고 있으나, 그 효과는 크지 않음을



알 수 있다. Fig. 10 은 Fig. 8 의 경우보다 압축스트로크를 크게 한 경우의 결과인 Fig. 9 을 보면 게이트 근처를 포함하여 전체적으로 복굴절이 약간 줄어들고 있으나, 그 효과는 크지 않음을

Fig. 8 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial positions at the end of compression ($t=0.222$ s) in injection/compression molding process under Case A

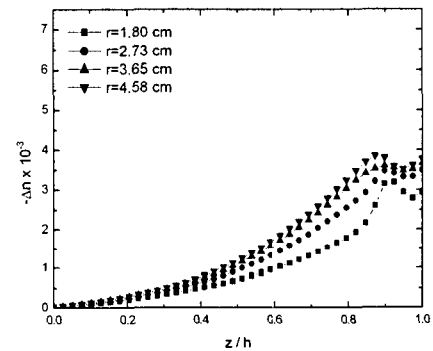


Fig.9 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial positions at the end of compression ($t=0.246$ s) in injection/compression molding process under Case B

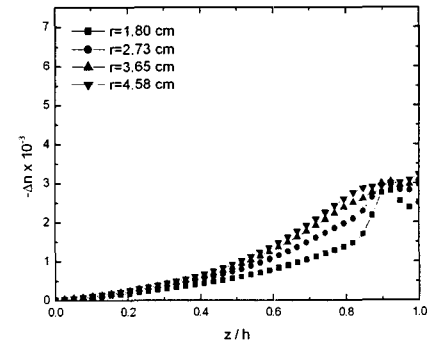


Fig.10 Predicted gapwise distribution of birefringence Δn at various radial positions at the end of compression ($t=0.294$ s) in injection/compression molding process under Case C

참고 문헌

트로크를 크게 하고, 압축 속도를 줄인 경우로서 복굴절의 크기가 매우 작아지고 균일해짐을 볼 수 있다. 사출성형을 적용한 Fig. 7 과 비교할 때 전체적으로 복굴절 크기가 1/2 정도 작아지고 있으며, 특히 게이트에서 멀어질수록 변하는 복굴절 크기의 차이가 매우 작음을 볼 수 있다. 이는 앞서 살펴본 바와 같이 캐비티 압력의 감소와 위치별 균일성에 기인한 것으로 판단된다. 결과적으로 사출성형에 의하여 발생하는 복굴절 크기를 사출압축성형을 적용함으로써 크게 감소시킬 수 있으며, 위치별로 비교적 균일한 복굴절을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

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) 예측된 압력분포는 실험결과와 잘 일치하였다.

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

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

(4) 기존의 사출성형을 적용한 경우보다 사출압축성형을 적용한 경우 유동에 의한 복굴절이 1/2 이하로 크게 작아짐을 볼 수 있었다. 특히 압축 속도를 줄이는 경우 복굴절이 크게 감소함을 알 수 있었다.

후 기

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

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) H.-S. Lee and A.I. Isayev, 2004, "Numerical simulation of flow-induced birefringence: comparison of injection and injection/compression molding", PPS-20 Conference Proceedings, Paper No. 173, pp. 1~16.
- (9) 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.