

사출 및 사출/압축이 투명 디스크의 복굴절 분포에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

민인기¹, 이경범¹, 윤경환^{1,*}

An Experimental Study of The Effect of Injection-only and Injection/Compression on The Birefringence Structure in Transparent Disks

I. K. Min, K. B. Lee and K. H. Yoon

Abstract

Recently, injection/compression molding process became more popular than ever to produce many transparent optical products of high precision. Especially, optical disk for read/write is the best example. But those optical disks can cause sensorial problems because of high birefringence or deformation from the residual stresses in the media. Therefore, it is necessary to study the effects of various process conditions on the final birefringence structure in injection-only and injection/compression molded disks for producing precision injection-molded products. In the present paper we have focused on the effect of injection, holding and compression processes on the optical anisotropy(i.e. birefringence) remaining in the MOD by examining the gapwise distribution of birefringence and extinction angle. The effect of holding pressure was found to form the inner two birefringence peaks. But the effect of compression pressure on the birefringence distribution was found to make the uniform distribution near the center in the gapwise direction and inversion of extinction angle far from the gate.

Key Words: Injection/compression molding (사출/압축성형), Birefringence (복굴절), Optical Disk (광 디스크)

1. 서론

최근에 사출성형은 기어 등 정밀 부품이나 디스크, 렌즈 류의 광학 제품 등 고부가가치 제품을 대량 생산하는 가장 유력한 방법으로 많이 이용되고 있으며, 특히, 제품의 경량화, 생산 자동화의 이점이 있어 여러 제품들에 대해 이전에 사용되던 금속이나 유리등의 고가의 재질들이 플라스틱으로 대체되고 있다. 하지만 이런 이점에도 불구하고 성형 과정에서 발생하는 잔류 응력으로 인한 성형후의 변형 등은 고 정밀 제품을 생산하는데 있어서 아직도 문제점으로 남고 있으며, 최근

에는 광학제품내의 이방성, 즉, 복굴절의 양이 제품의 성능에 영향을 미치는 제품들이 속속 개발되고 있어 공학적 측면에서 사출 및 사출/압축 성형품의 성형과정에 대한 이해와 더불어 문제점 해결에 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 일반사출성형과 사출/압축성형에 대하여, 성형조건을 변화시키며 MOD(magneto-optical disk)의 두께방향의 복굴절의 분포를 측정함으로써 단순 사출 시 보압 과정의 영향, 사출/압축 시 압축과정이 최종 사출품의 광학적 이방성의 구조, 특히, 두께 방향의 복굴절 구조에 어떠한 영향을 미치는가에 초점을 맞추었다.

1. 단국대학교 대학원 기계공학과

* 교신저자: 단국대학교 기계공학과, E-mail: khyoon@dku.edu

2. 이론적 배경

2.1 사출 및 사출/압축 성형의 개요

일반적인 사출성형에서는 용융 수지를 게이트를 통해 고속, 고압으로 주입한 후 냉각에 따르는 수축 분을 보압 과정을 거쳐 보충하여 성형한다. 때문에 성형 과정 중 게이트 부근에서 금형 내 수지 압력이 높고 게이트에서 떨어질수록 압력이 낮아지는 압력 분포를 가지며, 이 후 보압과정을 거친 후 냉각 고화되므로 통상 게이트 부근의 이방성이 크게 남는다. 반면에 사출/압축성형은 사출 후 충전된 수지를 금형 전체에 또는 부분적으로 압력을 가하여 금형면 전체에 균일한 압력을 걸어 주어(Fig. 1) 유동의 배향을 완화시키고 잔류 응력의 분포도 균일하게 하게 하며 전체 양도 줄일 수 있는 장점이 있다[1].

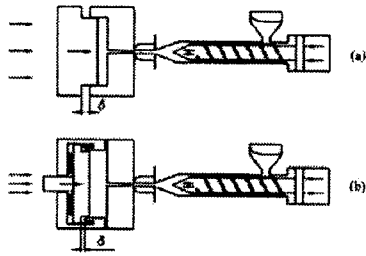


Fig. 1 Two different types of injection/compression molding: total compression (a) and partial compression (b).

2.2 광탄성 이론 및 복굴절의 측정

1816년 David Brewster는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광 탄성(photoelasticity)이라 하며 광학적으로 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의한 복굴절은 주 응력 차에 비례한다. 선형 광 탄성 이론을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$n_i - n_j = C(\sigma_i - \sigma_j) \quad (1)$$

여기에서 $i, j, k = I, II, III$ 이며 $i \neq j \neq k \neq i$ 이다. 또한 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ 는 각각 세 방향의 주 응력이며 n_i 는 주축 i 방향

으로 편광된 빛의 굴절률이며 C 는 광 탄성계수(stress-optical coefficient)이다. 본 실험에 사용한 폴리카보네이트(PC)의 광 탄성계수는 유리 전이온도

(T_g) 이상에서 약 $3,600 \text{ Br} (\text{Br} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1})$ 이고 유리 전이온도 이하에서는 $60 \sim 70 \text{ Br}$ 로 알려져 있다 [2].

Centered-gated disk 에서 발생하는 굴절률 텐서는 Mohr's Circle 로도 표현할 수 있는데 Simple shear 의 경우에 유체입자 주위에서의 응력분포를, 주축과 입자 사이의 각도를 extinction angle χ 로 정의하여 나타낼 수 있으며, 이를 수식적으로 표현하면 다음의 식 (2)와 같다[3, 4]. 또한, Δn 은 1-2 평면에서의 최대 굴절률의 차이 즉, 복굴절의 양으로 정의하며 광 탄성계수의 부호에 주의를 기울이면 복굴절의 값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 광 탄성 계수가 온도와 시간의 함수라고 생각할 때, 이를 광 점탄성 이론이라 한다.

$$\Delta n \cos 2\chi = n_{11} - n_{22} = 2C(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \quad (2)$$

$$\Delta n = C \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2\sigma_{12})^2} \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{|\sigma_{11} - \sigma_{22}|} \quad (3)$$

복굴절을 측정하는 방법은 편광 현미경을 사용하여 두께 방향의 각 지점에서의 소멸각(extinction angle)을 측정하고, 또 그 위치에서의 경로차를 구하여 최종적인 복굴절 값을 구하게 된다.

$$\frac{I''}{I_0} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서 I'' 는 검광자(detector)의 intensity, I_0 는 빛의 세기, θ 는 샘플의 빠른축과 편광기의 편광축 사이의 각도이며 ϕ 는 위상차이다. I'' 를 0 으로 만들 수 있는 조건은 Isoclinic ($\sin^2 2\theta = 0$)과 Isocromatic ($\sin(\phi/2) = 0$)의 두 가지 경우이며, 이러한 상태를 일반적으로 extinction 이라 부른다.

Isoclinic 은 샘플의 광학주축이 편광기나 분석기의 편광축중 하나와 만날 때마다 발생하며, θ 가 $\sin^2 2\theta = 0$ 의 조건을 만족시키기 위해서는 다음과 같이 $\theta = m\pi/2$ (여기서 m 은 정수)가 된다. Rotation stage 를 사용하여 샘플을 360° 회전시킬 경우 90° 간격을 두고 4 번의 extinction 을 관찰할 수 있다. 이때 일단 주축을 발견한 후 I'' 가 최대가 되는 상태로 고정하고 빠른 축과 느린 축을 미리 알고 있는 quarter-wave plate 등을 사용하며 위상 차 ϕ 가 감소

Table 1 Molding conditions for all experiments

Exp. #	Holding pressure/time	Compression /time	Mold temp.(°C)
1	-	-	75
2	20/3		75
3	-	20/3	75
4	-	20/3	120

하는 현상을 통해 샘플 내의 빠른 축과 느린 축을 쉽게 발견할 수 있다. 주축을 발견한 후 I'' 이 최대가 되는 상태로 rotation stage 를 사용하여 extinction 상태에서부터 샘플을 45° 회전시키면 $\sin^2 2\theta = 1$ 이 되어 I'' 은 위상차 ϕ 만의 함수가 된다. 그 후 보상판(Berek compensator)을 사용해서 원하는 위치의 색이 검게 바뀔 때까지 기판에서 야기되는 위상 차를 보상하여 총 위상 차를 0 으로 만들어 주면 샘플내의 위상 차를 구할 수 있게 된다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 (주)진화기계의 VDCII-IC 를 사용하였으며 재료는 폴리카보네이트(PC)로 帝人化成株式會社の AD-9502 를 사용하였으며, Fig. 2 와 같이 공칭 직경이 86 mm 이고 공칭 두께가 1.2 mm 인 MOD 를 제작하였다. 성형 조건은 Table 1 과 같이 각 Exp 별로 구분하여 fill time 0.5 초로 실험하였다.

Exp 1 에서는 보압과 압축을 걸지 않고 성형한 경우이며 Exp 2 는 압축은 가하지 않고 일반적인 사출 성형법과 동일하게 보압과정 만을 추가한 경우이고 Exp 3 의 경우에는 압축의 효과를 보기 위하여 보압은 걸지 않고 압축 만을 가한 실험을 실시하였다. 그리고 마지막으로 사출/압축 시 금형온도의 영향을 알아보기 위하여 Exp 4 에서와 같이 금형온도를 변화시켜 실험하였다. 특히, 압축과정에서는 형 두께를 최대 0.2 mm 까지 감소할 수 있도록 금형을 조절하였으며 이 때 두께의 변화는 약 0.1 mm 로 측정되었다.

복굴절의 측정은 중심에서 반지름 방향으로 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 cm 인 위치에서 두께 방향으로의 분포를 측정하였다. Extinction angle 은 같은 그래프에 표시하기 위하여 각 위치마다 50° 씩 이동시켜 나타내었고, 두께 방향의 각 위치를 반 두께 (half-gap thickness) h 로 나누어 무차원화 된 값(z/h)으로 표현하였다.

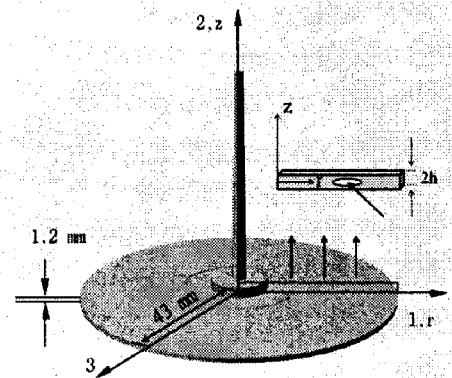


Fig. 2 The geometry and its coordinate system of MOD

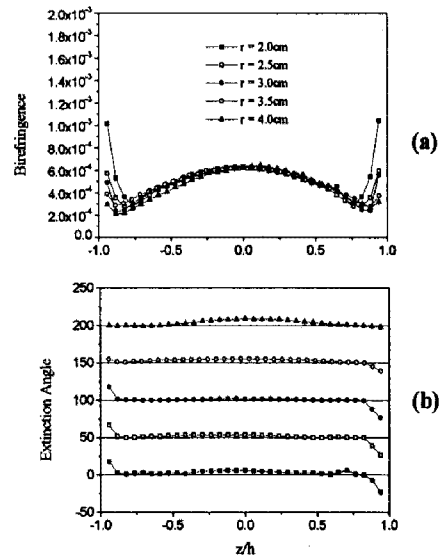


Fig. 3 Gapwise profiles of birefringence (a) and extinction angle (b) of exp. 1 (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

4. 결과

Exp 1 은 단순 사출 조건만 주어 시편을 제작하였으며 복굴절 분포는 Fig. 3(a) 와 같다. 중심 부위의 복굴절은 약 6.3×10^{-4} 정도로 포물선을 형성하였고 이는 열에 의한 복굴절 분포의 대표적 형태로 알려져 있으며 벽면 근처에서 발생하는 복굴절 정점은 충전 과정 시 유동에 의해 발생한 복굴절로 잘 알려져 있다[5-9]. Fig. 3(b) 는 각 위치에서의 두께방향의 extinction angle 을 나타낸 것으로 z/h 가 0 인 중심에서 전단응력도 0 이므로 extinction angle 값이 거의 0 에 가깝게 분포함을 알 수 있다. 본 실험에서 정의한 extinction angle 은 반경방향과 slow axis 와의 각도로 정의한다.

Exp 2 는 단순 사출 후 보압을 준 경우로 복굴절 분포와 extinction angle 의 결과를 Fig. 4 에 보이고 있다. 보압 값은 20 bar 를 적용하였으며 단순 사출과 비교하여 보았을 때, 보압의 영향으로 인해 중심 부분의 복굴절 분포를 관찰하면 뚜렷한 두 개의 정점을 보인다.

또한, 벽면 근처에서의 정점은 단순 사출의 경우와 마찬가지로 유동에 의한 복굴절로 인해 형성된 것이지만

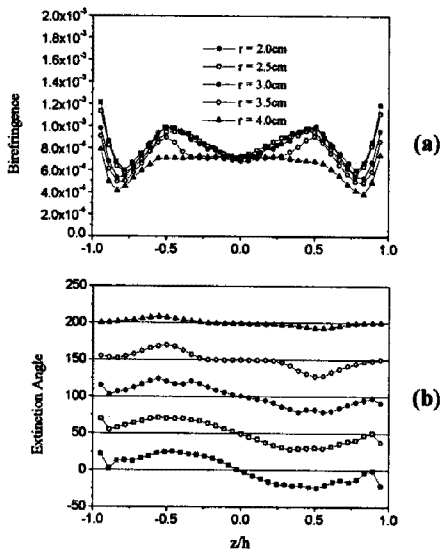


Fig. 4 Gapwise profiles of birefringence (a) and extinction angle (b) at exp. 2 (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

보압 과정시 추가로 발생한 것이고, 두께 방향으로 0 인 곳의 복굴절 값은 Fig. 3 와 거의 같은 값으로 냉각에 의한 복굴절로 인하여 발생한 것이다. Extinction angle 도 단순 사출에서는 거의 일정했지만 $|z/h|$ 가 보압의 영향으로 0.4 ~ 0.6 사이에서 약 25° 까지 peak 가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 보압이 걸릴 때 추가로 낮은 온도에서의 유동이 발생했기 때문이다. 하지만, $r=4.0$ cm 부근에서의 복굴절의 차는 거의 없다. 이는 스프루에서 멀어질수록 보압의 증가에 따른 영향이 거의 없어짐을 의미한다. 또한, Extinction angle 도 단순 사출과 비교하여 볼 때, 더욱 큰 정점으로 양의 값에서 음으로 변하는 차이를 뚜렷하게 볼 수 있다.

Exp 3 은 단순 사출 후 보압과정 없이 압축만을 가해 준 경우에 대하여 결과를 Fig. 5 에 보이고 있다. 복굴절 분포는 단순 사출 후 보압만을 적용한 경우와 비교하여 볼 때, 중심 부근에서의

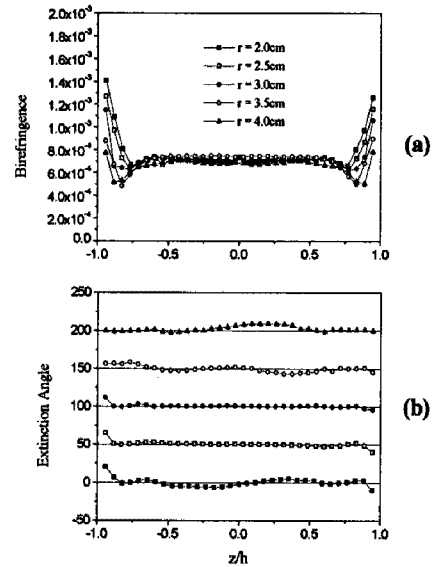


Fig. 5 Gapwise profiles of birefringence (a) and extinction angle (b) of exp. 3 (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

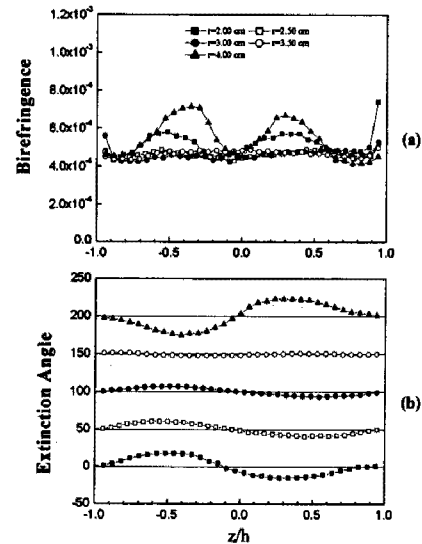


Fig. 6 Gapwise profiles of birefringence (a) and extinction angle (b) at exp. 4 (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

복굴절 값은 정점이 보이지 않는 상당히 일정한 분포로 변했음을 알 수 있다.

사출/압축의 경우, 복굴절 값은 중심에서 약 7.0×10^{-4} 로 일정하게 나타남을 보이고 있다. 현재 사용되고 있는 광학 디스크 기관은 레이저 광이 두 번 통과하여야 하므로 광학적 이방성을 줄이기 위해서는 일반적인 사출 성형에 의해 성형된 기관보다 압축 성형을 가미한 기관이 더 유용하리라는 판단을 할 수 있는 대표적인 결과이다.

Extinction angle 의 분포를 보면 보압 만을 가해 준 경우와 비교해 볼 때, 스프루에서 가장 먼 쪽에 Extinction angle 의 분포를 보면 보압 만을 가해준 경우와 비교해 볼 때, 스프루에서 가장 먼 쪽에 extinction angle 의 부호가 바뀌는 부분이 일부 발생하는 결과로부터 캐비티의 끝 부분에서는 더 이상의 유동의 진행이 되지 못하고 압축의 영향으로 압축 과정에서 수지의 유동이 반대로 나타난다는 사실을 발견할 수 있다. Extinction angle 의 분포도 일반적인 사출 후 보압을 건 경우의 유동에 의한 extinction angle 의 분포와는 판이하며 이는 고기능의 디스크 기판의 성능 향상에 도움이 된다.

Exp 4 에서는 사출/압축에서 금형온도가 복굴절의 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 금형온도를 120°C 로 설정하여 냉각속도로 인한 복굴절 값과 Extinction Angle 의 변화를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6 에 보인다.

금형 온도가 높아질수록 벽면에서 발생하는 유동에 의한 복굴절 값은 현저하게 감소됨을 볼 수 있지만 중심부근에서의 정점은 Fig. 5 에 보이는 것보다(금형온도 75°C) 증가되었음을 볼 수 있다. 그리고 스프루에서 가장 먼 곳($r = 4.00$ cm)에서의 extinction Angle 의 부호가 반대로 변화하는 양상이 낮은 금형온도와 현저한 차이를 보이며 이는 역유동이 일어나는 것을 더욱 확실히 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문은 폴리카보네이트를 재료로 하여 각각의 조건으로 사출 및 사출/압축 성형된 MOD의 성형품에 남아 있는 두께 방향의 복굴절을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 벽면 근처에서 형성되는 복굴절은 충전 과정에서 발생하는 유동 때문에 형성됨을 알 수 있었으며, 보압과정 시 발생하는 두 정점도 같은 유동의 영향이다..

(2) 두께 방향의 중심에서는 압력의 변화에 따른 복굴절의 변화가 거의 없는데 이것은 냉각에 의해 발생하는 복굴절이며, MOD의 경우 $6.3 \times 10^{-4} \sim 7.0 \times 10^{-4}$ 으로 일치하였다. 한편, Exp. 4에서는 금형의 온도를 현저히 올려 약 4.0×10^{-4} 으로 감소했다.

(3) 사출 후 보압을 걸어주는 대신 압축 공정을 가미한 경우 복굴절의 값은 두께 방향으로 거의 균일한 분포를 보이며 이는 충전이 끝난 후 균일한 압력을 전 캐비티에 가하여 냉각시킨 결과이다. 한편, 압축이 가해진 경우는 보압만을 걸어준 경우와는 판이하게 다르게 스프루에서 먼 쪽부터 역 유동 현상이 발생하였으며, 이는 금형 온도가 높은 경우 더욱 뚜렷하다.

본 연구가 광학적 이방성을 줄인 우수한 디스크 기판 및 고정밀 투면 기판의 생산에 아주 중요한 결과라 생각한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원 하에 지식경제 기술혁신사업(과제명: 대면적 복합 광학부품 정밀 R-I/C molding 기술개발 (Project No. 10033710))의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Isayev, A. I., 1987, "Injection and Compression Molding Fundamentals", New York and Basel. Marcel Dekker. INC.
- [2] Janeschiz-Kriegl, H. 1983, "Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence", Berlin, Springer Verlag.
- [3] Yoon, K. and Wang, K. K. 1991. "Birefringence Measurements of Injection-Molded Disks", S.P.E. Technical Papers. Vol. 37, PP. 333-337.
- [4] Yoon, K. 1995, "An Experimental Study on Precision Injection Molding of Center-gated Disks", The Korean J. of Rheology, Vol. 7, No. 1, pp. 19-27.
- [5] Y. B. Lee, T. H Kwon and K.H. Yoon, 2002, "Numerical Prediction of Residual Stress and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk. Part I: Basic Modeling and Result for Injection Molding", S.P.E. Vol. 42, No. 11
- [6] Y. B. Lee, T. H Kwon and K.H. Yoon, 2002, "Numerical Prediction of Residual Stress and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk. Part II: Effects of Processing Conditions", S.P.E. Vol. 42, No. 11
- [7] H. S. Lee and A. I. Isayev, 2007, "Numerical Simulation of Flow-Induced Birefringence: Comparison of Injection Molding", KSPE, Vol.8, No.1
- [8] W. B. Young, 2005, "Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens", Applied Mathematical Modeling, 29, 955-971
- [9] C. H. Wu and W. S. Chen, 2005, "Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of DVD pickup lens", Sensor and Actuators A, 125, 367-375.