

보압 및 압축이 원반형 사출품내의 복굴절 분포에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

손 정 진* · 윤 경 환**
(1999년 8월 30일 접수)

An Experimental Study on the Effect of Holding and Compression Pressures on The Birefringence Distribution in Injection-Molded Disks

Jungjin Son and Kyunghwan Yoon

Key Words : Injection Molding(사출성형), Birefringence(복굴절), Optical Disk(광디스크)

Abstract

Recently, injection molding process became more popular than ever to produce large quantities of high precision products or optical products. Especially, optical disk that was made by injection molding process has been used for many years as a music play media or computer sub-device. The density of data in disk media has been increased continuously. 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-molded disks for producing precision injection-molded products. In the present paper we have focussed on the effect of holding and compression pressures on the optical anisotropy 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. Finally, the value of the birefringence near the wall decreased as the mold temperature increased.

1. 서 론

최근에 들어서 고분자 수지를 이용한 사출 성형 법으로 정밀 부품류나 광학 제품등의 고부가가치 제품을 대량 생산하는 사례가 늘고 있다. 특히, 제품의 경량화, 생산 자동화의 이점이 있어 여러 제품들에서 이전에 사용되어지던 금속이나 유리등의 고가의 재질들이 플라스틱으로 대체되고 있다. 하지만 이런 이점에도 불구하고 성형 과정에서 발생하는 잔류 응력으로 인한 성형후의 변형등은 고정밀 제품을 생산하는데 있어서 아직도 문제점으로 남고 있다. 최근에는 광학제품내의 이방성, 즉, 복굴절의 양이 제품의 성능에 영향을 미치므로 공학

적 측면에서 사출 성형품의 성형 과정에 대한 이해와 더불어 문제점 해결에 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 성형 조건을 변화시키며 MOD (magneto-optical disk)의 두께방향의 복굴절의 분포를 측정함으로써 성형 조건의 변화가 최종 사출품의 광학적 이방성의 구조에 어떠한 영향을 미치는가에 초점을 두었다. 구체적으로, 단순 사출과 단순 사출에 보압을 준 경우, 단순 사출에 압축을 준 경우, 그리고 단순 사출에 보압과 압축을 함께 준 경우의 최종 성형품의 복굴절을 측정하므로써 각기 다른 성형 조건이 최종 제품의 품질에 미치는 영향을 밝히고자 하는데 목표를 두었다.

2. 이론적 배경

2.1 사출 및 사출/압축 성형의 개요
사출 성형은 성형기의 가소화 장치에서 용융된

* 단국대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 단국대학교 기계공학과
E-mail : khyoon@dankook.ac.kr
TEL : (02)709-2825 FAX : (02)796-9529

수지를 금형의 내부에 충전시키고 사출된 수지를 냉각, 고화시켜 원하는 성형품을 만드는 제조 기술이다. 일반적인 사출성형에서는 용융 수지를 게이트에서 고압으로 주입한 후 냉각에 따르는 수축분을 보압 과정을 거쳐 보충하여 성형한다. 때문에 성형품은 게이트 부근에서 금형 내 수지 압력이 높고 게이트에서 떨어질수록 압력이 낮아지는 압력 분포를 가진 채 냉각 고화되므로 변형이 발생하게 된다. 반면에 사출/압축성형은 Fig. 1처럼 사출 후 충전된 수지를 (a)의 경우와 같이 금형 전체에 압력을 가하거나 (b)와 같이 압축 기구를 사용하여 금형면 전체에 균일한 압력을 걸어 주어 유동의 배향을 완화시키고 잔류응력의 분포도 균일하게 하게 하며 전체 양도 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 이를 위해 특수한 gate sealing 방법을 강구해야 하고 금형의 가공 정밀도 향상 및 정밀 제어가 요구된다.^(1,5)

2.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성(photoelasticity)이라 하며 광학적으로 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의한 복굴절은 주응력차에 비례한다. 그러므로 어떤 시편에 대해서 응력의 분포가 일정하지 않다면 복굴절 또한 다르게 나타날 것이다. 선형 광탄성 이론을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$n_i - n_j = C(\sigma_i - \sigma_j) \tag{1}$$

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 주응력이

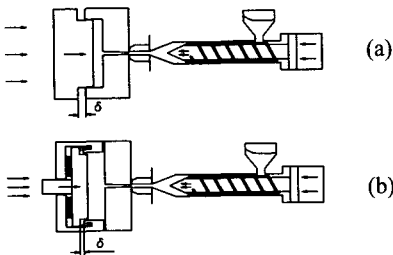


Fig. 1 Two different types of injection/compression molding: total compression(a) and partial compression (b)

며 n_i 는 주축 i 방향으로 편광된 빛의 굴절률이며 C 는 광탄성계수(stress-optical coefficient)이다. 이 선형 광탄성 관계식은 여러 고분자들에 대하여 상당히 넓은 범위에서 증명되어 있고 본 논문의 실험에 사용한 폴리카보네이트(PC)의 광탄성계수는 유리 전이온도(T_g) 이상에서 약 $3,600 \text{ Br}(1\text{Br} = 10^{12} \text{ Pa}^{-1})$ 이고 유리 전이온도 이하에서는 $60\sim 70 \text{ Br}$ 로 알려져 있다.⁽⁶⁾ Fig. 2는 center-gated disk에서 발생하는 굴절률 텐서를 Mohr's circle로 표시한 것으로 simple shear의 경우에 유체 입자 주위에서의 응력 분포를 나타낸 것이며, 주축 I, II와 1, 2 사이의 각도를 extinction angle χ 로 정의하였다. Extinction angle χ 를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.^(7,8)

여기에서 Δn 은 1-2 평면에서의 최대 굴절률의 차이를 의미하며 일반적으로는 복굴절량으로 정의하며 그 절대값은 다음과 같은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta n \sin 2\chi = 2n_{12} = 2C\sigma_{12} \tag{2}$$

$$\Delta n \cos 2\chi = n_{11} - n_{22} = 2C(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \tag{3}$$

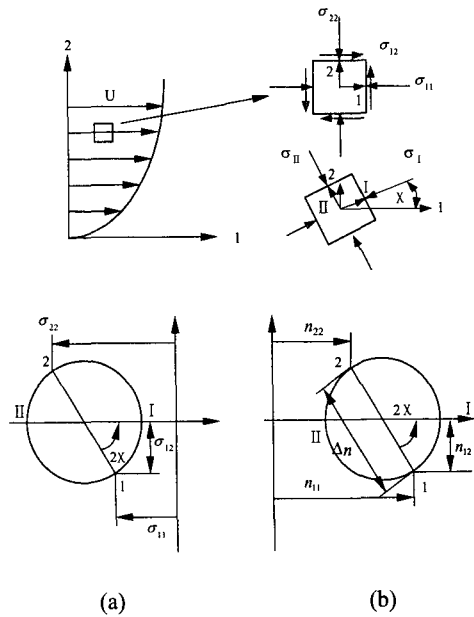


Fig. 2 Stress distribution on the fluid element and its Mohr's circle of stresses for the simple shear case (a). And Mohr's circle representation for the index of refraction tensor for positive C(b)

$$|\Delta n| = C \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2\sigma_{12})^2} \quad (4)$$

선형 광탄성 이론에서 광탄성계수의 부호에 주의 를 기울이면 복굴절의 값은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 광탄성 계수가 온도와 시간의 함수라고 생각할 때 이를 광점탄성이론이라 한다.

$$\Delta n = C \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2\sigma_{12})^2} \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{|\sigma_{11} - \sigma_{22}|} \quad (5)$$

2.3 복굴절의 측정 원리

복굴절은 방향에 따라 굴절률이 다르게 되는 현 상으로 광학적 이방성의 정도에 따라 그 크기도 다르다. 이 복굴절을 측정하는 방법으로 편광 현 미경을 사용하여 두께 방향의 각 지점에서의 소멸 각(extinction angle)을 측정하고 또 그 위치에서의 경로차를 구하여 최종적인 복굴절 값을 구하게 된다. 이러한 측정 원리는 Fig. 3 에서 보는 바와 같다.

$$\frac{I''}{I_0} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (6)$$

위의 식 에서 I'' 는 검광자(detector)의 intensity, I_0 는 빛의 세기, θ 는 샘플의 빠른축과 편광기의 편 광축 사이의 각도이며 ϕ 는 위상차이다. I'' 를 0 으로 만들 수 있는 조건은 Isoclinic ($\sin 2\theta = 0$) 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 다

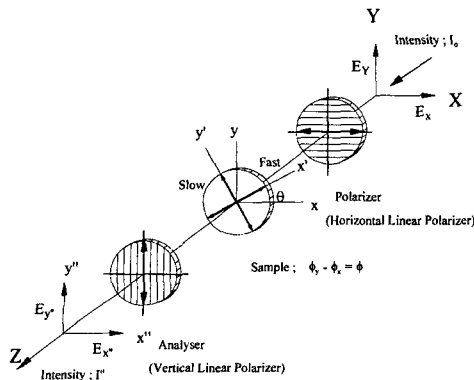


Fig. 3 A plane polariscope setup

음과 같이 $\theta = m\pi/2$ (여기서 m 은 정수)가 된다. Rotation stage 를 사용하여 샘플을 360° 회전시 킬 경우 90° 간격을 두고 4번의 extinction 을 관찰 할 수 있다. 이때 일단 주축을 발견한 후 I'' 가 최대가 되는 상태로 고정하고 빠른 축과 느린 축 을 미리 알고 있는 quarter-wave plate 등을 사용하 며 위상차 ϕ 가 감소되는 현상을 통해 샘플 내의 빠른 축과 느린 축을 쉽게 발견할 수 있다. 주축 을 발견한 후 I'' 이 최대가 되는 상태로 rotation stage 를 사용하여 extinction 상태로부터 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 위상차를 보상하 여 총 위상차를 0으로 만들어 주면 샘플내의 위 상차를 구할 수 있게 된다. 백색광을 사용하는 편 광현미경에서는 berek compensator의 angle에 대 한 calibration function에 의해 이 위상차를 구할 수 있게 되며 다음식을 이용하여 복굴절의 양을 구할 수 있다.

한편, 위에서 구한 위상차를 다음 식 (7)을 이용 하면 샘플을 통과시 발생하는 경로차 Γ 는 다음 과 같다.

$$\Gamma = \frac{\lambda}{2\pi} \phi \quad (7)$$

이 식에서 λ 는 사용하는 laser의 파장이다. 최종 적으로 복굴절의 값은 이 경로차 Γ 를 샘플의 두께로 나누면 구할 수 있다.

3. 실험적 배경

3.1 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에 사용한 사출 성형기는 ㈜진화기계의 VDCII-IC로 Fig. 4와 같다. 이 사출 성형기 외에도 제품을 형성할 금형과 수지를 건조시킬 수 있는 건조기, 가동축과 고정축 금형을 일정한 온도로 유지시켜주는 온도 제어기, 그리고 공압을 공급하 는 air compressor가 필요하다.

본 실험에 사용한 MOD 시편의 재료는 帝人化成株式會社の AD-9502이며 이 재료를 120°C 로 4 시간 이상 건조한 다음 노즐부분의 온도를 320°C 로 설정하였다. 또한, 금형의 온도는 가동부, 고정부 모두 같은 온도로 설정하였고 실린더내 잔류된

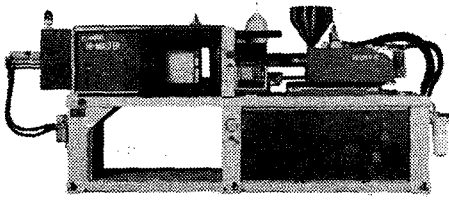


Fig. 4 Injection molding machine (VDCII-1C)

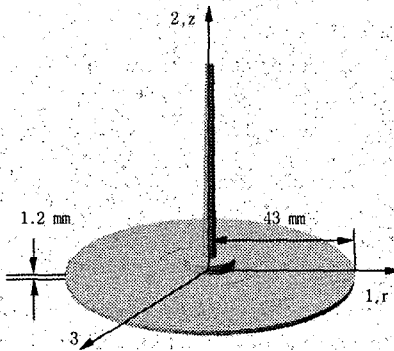


Fig. 5 A geometry and its coordinate system of MOD sample

어 있는 잔량의 수지를 밖으로 내 보내며 기포의 정도나 수지의 색이 투명할 정도로 나오는 것을 확인한 후 short shot을 하며 사출량을 결정하였으며 원하는 조건의 보압과 압축을 주어 Fig. 5와 같이 공칭 직경이 86 mm 이고 공칭 두께가 1.2 mm 인 MOD 를 제작하였다.

3.2 성형 조건

본 실험에 사용한 사출 성형기의 성형 조건은 Table 1과 같이 각 case 별로 구분하여 fill time 0.5 초로 실험하였다. Case # 1-1에서는 보압과 압축을 걸지 않고 성형한 경우이며 case #1-2와 #1-3은 압축은 가하지 않고 일반적인 사출 성형법과 동일하게 보압과정만을 건 경우이고 case #1-4와 1-5의 경우에는 압축의 효과를 보기 위하여 보압은 걸지 않고 압축만을 가한 실험을 실시하였다. 한편, case #2-1과 #2-2는 case #1-2와 #1-3와 같은 조건에서 금형의 온도를 증가시킨 경우이다. 특히, 압축과정은 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 수지로 캐비티를 채운 후 독립적인 가압 기구를 사용하여

디스크면 전체에 고르게 압력을 가하는 것이 일반적인 보압을 중심에 크게 건 경우와 다른 점이다. 압축과정에 의해 두께는 최대 0.2 mm 까지 감소할 수 있도록 금형을 조절하였으며 이 때 두께의 변화는 약 0.1 mm 이다.

Table 1 Molding conditions for all case

Case number	Holding pressure	Compression / Time	Mold temp. Cavity Side / Core Side	
	/ Time			
Unit	bar / sec	bar / sec	°C	
MOD	1-1	-	75 / 75	
	1-2	10 / 3	75 / 75	
	1-3	20 / 3	75 / 75	
	1-4	-	10 / 3	75 / 75
	1-5	-	20 / 3	75 / 75
2-1	10 / 3	-	90 / 90	
2-2	20 / 3	-	90 / 90	

4. 결 과

본 논문에서는 폴리카보네이트를 재료로 하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 공칭 지름이 86 mm 이고, 공칭 두께가 1.2 mm 인 MOD의 복굴절을 중심에서 반지름 방향으로 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 cm 인 위치에서 두께 방향으로의 복굴절의 분포를 측정하였다. 그리고, 스프루가 있는 쪽을 양의 방향으로 설정해서 표시하였다. Extinction angle은 Fig. 2에 정의한 바와 같으며 같은 그래프에 표시하기 위하여 각 위치마다 50°씩 이동시켜 나타내었고, 두께 방향의 각 위치를 반두께(half-gap thickness)h로 나누어 무차원화된 값으로 표현하였다.

Case 1-1은 단순 사출 조건만 주어 시편을 제작하였으며 복굴절 분포는 Fig. 6(a)와 같다. Fig. 6(a)에서 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 과정시 유동에 의해 발생한 복굴절로 잘 알려져 있다.⁽⁹⁻¹¹⁾ Fig. 6(b)는 각 위치에서의 두께방향의 extinction angle을 나타낸 것으로 z/h가 0인 중심에서 전단응력도 0이므로 extinction angle 값이 거의 0에 가깝게 분포함을 알 수 있다.

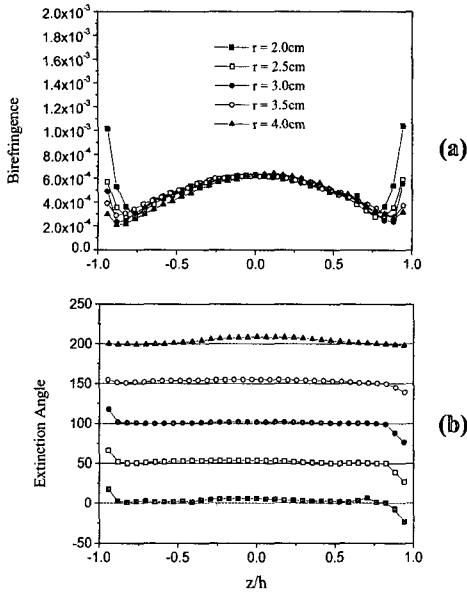


Fig. 6 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection-only at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

Case 1-2, 1-3 은 단순 사출 후 보압을 준 경우로 각각 보압 10, 20 bar 를 준 경우이다. Fig. 7 에서는 보압 10 bar 가 가해졌을 때의 복굴절과 extinction angle 을 보이고 있다. 보압 10 bar 가 가해진 경우 안쪽에 두개의 복굴절 정점이 보이기 시작했음을 알 수 있다. 이것은 단순 사출의 경우와 비교해 볼 때 보압에 의한 영향임을 알 수 있으며 스프루에서 멀어질수록 복굴절 값이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 벽면 근처에서의 정점은 단순 사출의 경우와 마찬가지로 유동에 의한 복굴절로 인해 형성된 것이며 두께 방향으로 0 인 곳에서는 냉각에 의한 복굴절로 인하여 발생한 것이다. 그래서 보압의 증가에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있다. Extinction angle 도 단순 사출에서는 거의 일정했지만 보압의 영향으로 $|z/h|$ 가 0.4 ~ 0.6 사이에서 약 20° 까지의 peak 가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 보압이 걸릴 때 추가로 낮은 온도에서의 유동이 발생했기 때문이다.

Fig. 8 은 보압 20 bar 가 가해졌을 때로 보압 10 bar 가 가해진 경우와 비교해 볼 때 안쪽에 두개의 복굴절 정점이 현저히 커졌음을 알 수 있다. 이것으로 안쪽에 발생하는 정점이 보압 과정에 의한

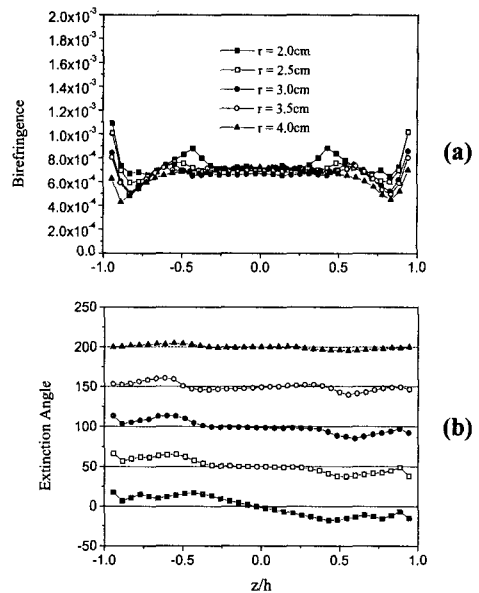


Fig. 7 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and hydraulic holding pressure of 10 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

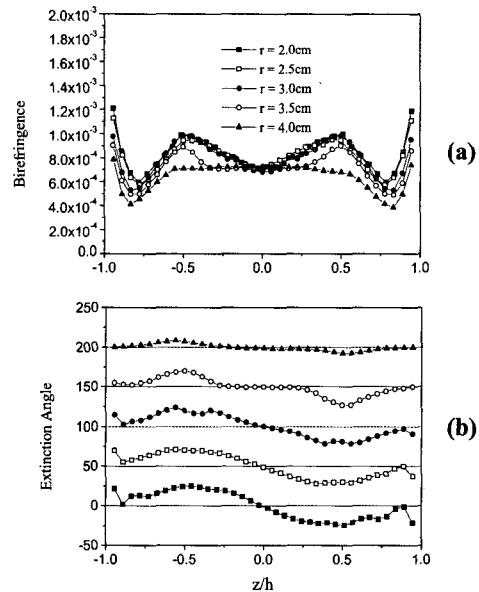


Fig. 8 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and hydraulic holding pressure of 20 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

것임을 다시 한번 확인할 수 있게 해 준다. 반면, $r=4.0$ cm 부근에서의 Fig. 7 과 Fig. 8 을 비교해 보면 보압의 영향으로 발생한 복굴절의 차는 거의 없다. 다시 말해서 스포우에서 멀어질수록 보압의 증가에 따른 영향은 거의 없어지게 되는 것을 알 수 있다. Extinction angle 도 보압 10 bar 를 준 경우에 비해 더욱 큰 정점으로 양의 값에서 음으로 진행되는 것을 볼 수 있다.

Case 1-4, 1-5 는 단순 사출 후 보압과정 없이 압축 만을 가해 준 경우로 각각 압력을 10, 20 bar 를 준 경우이다. Fig. 9 는 Fig. 7 과 Fig. 8 을 비교하여 볼 때 중심 부근에서의 복굴절 값은 정점이 보이지 않는 상당히 일정한 분포로 변했음을 알 수 있다. Fig. 10 은 압력을 20 bar 로 준 경우로 중심에서의 복굴절 값이 거의 7.0×10^{-4} 로 일정하게 나타남을 알 수 있다. 현재 사용되고 있는 광학 디스크 기판은 레이저 광이 두 번 통과하여야 하므로 광학적 이바영을 줄이기 위해서는 일반적인 사출 성형에 의해 성형된 기판보다 압축 성형을 가미한 기판이 더 유용하리라는 판단을 할 수 있는 대표

적인 결과이다.

Extinction angle 의 분포를 보면 보압 만을 가해준 경우와 비교해 볼 때, 스포우에서 가장 먼쪽에 extinction angle 의 부호가 바뀌는 부분이 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.

금형의 온도가 복굴절의 분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 case 2-1, 2-2 는 금형의 고정축, 가동축 모두 90°C로 하여 case 1-1, 2, 3, 4, 5 에서의 75°C 보다 15°C 올려 냉각 속도로 인한 복굴절치의 변화를 측정하였다. 이를 위해 case 2-1, 2-2 는 각각 같은 사출 조건에서 보압 10, 20 bar 를 가하여 실험하였다. Fig. 11 은 case 2-1 로 복굴절의 분포가 case 1-2 와 거의 같은 형태의 분포를 나타냄을 보여준다. 또한, extinction angle 도 양의 방향에서 음의 방향으로 진행되는 것을 알 수 있다.

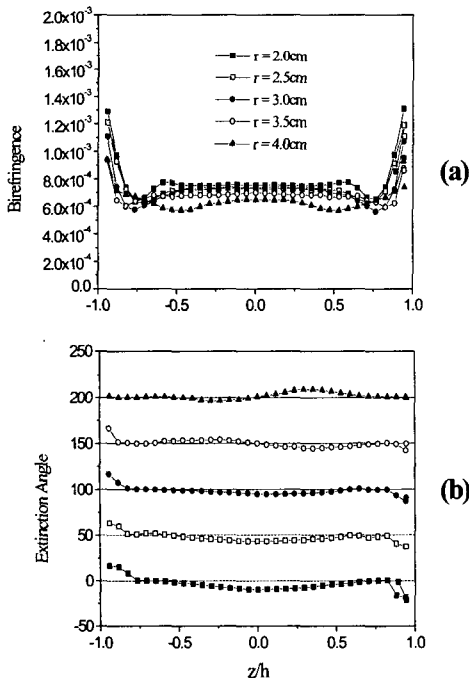


Fig. 9 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and compression of 10 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

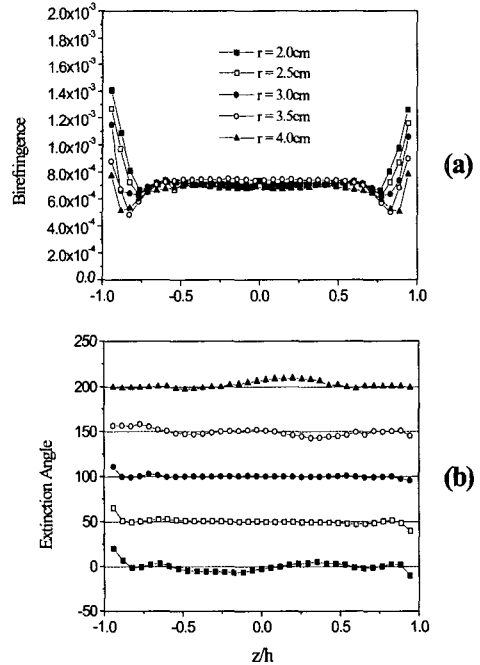


Fig. 10 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and compression of 20 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

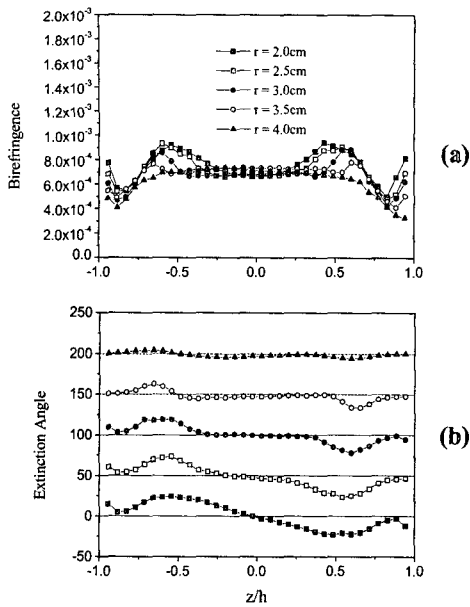


Fig. 11 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and hydraulic holding pressure of 10 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

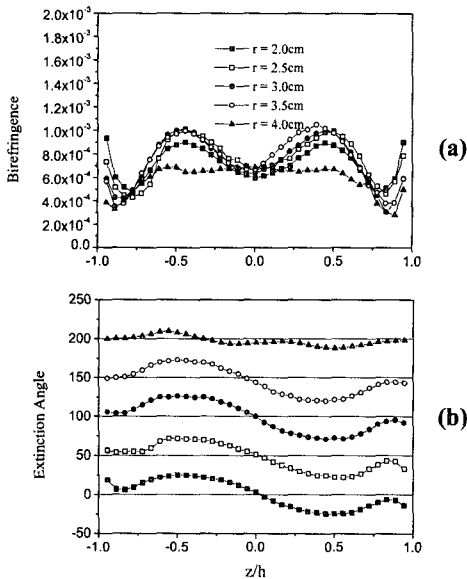


Fig. 12 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD made with injection and hydraulic holding pressure of 20 bar at various radial locations (Extinction angles are shifted by 50 degrees)

Fig. 12 에서 보인 case 2-2 도 마찬가지로 보압에서의 전형적인 형태의 복굴절 분포를 보여 주고 있다. 하지만 Fig. 11 과 Fig. 12 를 자세히 보면 벽면 근처에서의 복굴절과 정점에서의 복굴절의 변화가 case 1 의 경우들과 다름을 알 수 있다. 즉, Fig. 13 에 정리한 바와 같이 $r=2.5$ cm 에서의 case 1-2, case 2-1, case 1-3, case 2-2 로 복굴절과 extinction angle 을 함께 표시하여 mold temperature 의 변화에 따른 영향임을 알 수 있다. 결국, mold temperature 를 75°C에서 90°C로 증가시켰을 때 벽면에서의 복굴절 값은 충전과정과 충전 이후에 높은 금형 온도에 의해 응력 완화 현상이 빠르게 진행하여 줄어들었지만, 두께방향으로 중심 부근에서는 금형 온도의 증가로 인해 유동성이 좋아지며 충전 이후 과정에서 발생하는 복굴절의 값이 오히려 증가한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

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

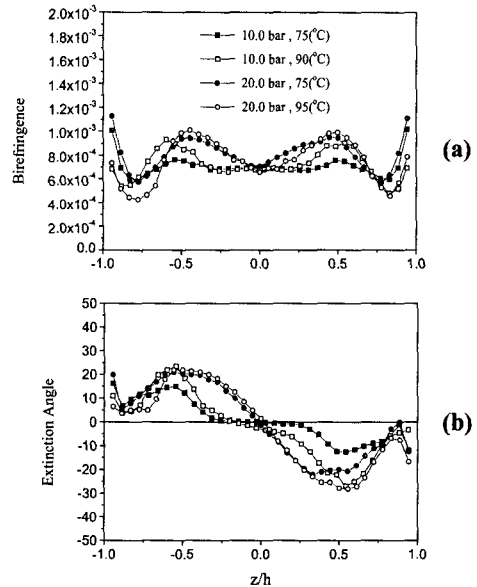


Fig. 13 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of MOD at $r=2.5$ cm for hydraulic holding pressures of 10 and 20 bar at the mold temperature of 75°C and 90°C

(1) 벽면 근처에서 형성되는 복굴절은 충전 과정에서 발생하는 유동 때문에 형성되었으며 금형의 온도가 증가할수록 벽면에서의 복굴절은 작아지고 정점에서의 복굴절은 더 증가한다.

(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 일치했다.

(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 역유동 현상이 발생하였다.

이러한 연구는 광학적 이방성을 줄인 우수한 디스크 기관의 생산에 아주 중요한 결과라 생각한다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국과학재단의 핵심 전문연구과제(981-1008-055-2)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 한편, 디스크 금형을 실험에 사용할 수 있도록 도와 주신 삼성전자 생산기술센터의 정밀기술부에도 감사드립니다.

참고문헌

(1) Isayev, A. I., 1987, "Injection and Compression Molding Fundamentals," *New York and Basel. Marcel Dekker. INC.*

(2) Menges, G. and Wubken, G., 1973, "Influence of processing Conditions on Molecular Orientation in injection Moldings," S.P.E. Technical Papers. Vol. 19, PP. 519~522.

(3) Greener, J., Kesei. R. and Contestable B. A., 1989, "The Birefringence Problem in Optical Disk Substrates: A Modeling Approach," *AIChE journal.*, Vol. 35, No. 3, PP. 449~458.

(4) Kamal, M. R. and Tan, V., 1978, "Orientation in injection Molded Polystyrene," S.P.E. Technical Papers. Vol. 24, PP. 121~126.

(5) White, J. L., Dietz. W. and Clark, E. S. 1978. "Theoretical and Experimental Studies of Orientation Distributions in injection Molded Parts of Glassy Plastics," S.P.E. Technical Papers. Vol. 24, PP. 118~120.

(6) Janeschiz-Kriegl, H. 1983, *Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence*, Berlin, Springer Verlag.

(7) Yoon, K. and Wang, K. K. 1991. "Birefringence Measurements of Injection-Molded Disks," S.P.E. Technical Papers. Vol. 37, PP. 333~337.

(8) 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.

(9) Aggarwala, B. D. and Saibel, E. 1961. "Tempering Stresses in an Infinite Glass Plate," *Phys. Chem. Glasses.*, Vol. 2, PP. 137~140.

(10) Wust, Jr C. J. and Bogue, D. C. 1983. "Stress Optical Behavior in Polystyrene; Residual Stresses and Birefringence in Large, Quenched Samples" *J. of Applied Polymer Science*. Vol. 28, PP. 1931~1947.

(11) Lee, E., Rogers, T., and Woo, T., 1965. "Residual Stresses in a Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces," *J. of the American Ceramic Society.*, Vol. 48, PP. 480.