[논문] 한국소성가공학회지, 제 22 권 제 1 호, 2013 *Transactions of Materials Processing, Vol.22, No.1, 2013* http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.1.48

정밀 광학부품의 복굴절 분석을 통한 각종 성형법의 영향에 관한 연구

민인기 1 ·조성우 2 ·윤경환[#]

The Effect of Various Molding Methods for Precision Optical Products Using Birefringence Analysis

I. K. Min, S. W. Cho, K. H. Yoon

(Received December 18, 2012 / Revised January 14, 2013 / Accepted January 22, 2013)

Abstract

As the adoption of injection molding technology increases, injected-molded optical products require higher dimensional accuracy and optical stability than ever before. In the present study, four kinds of molding methods, i.e., conventional injection molding (CIM), injection/compression molding (ICM), rapid heat and cooling the mold(RHCM) and rapid injection/compression molding (RICM) were selected in order to investigate the optical anisotropy of a 7 inch Light Guide Plate(LGP) by examining the gap-wise distribution of birefringence and the extinction angle. The results indicate that the compression process can decrease flow-induced birefringence over the whole region and that rapid heating can decrease the birefringence level better than conventional molding. In addition, for the combination of compression and rapid heating a reversal flow was detected from the distribution of the extinction angle near the gate.

Key Words : Injection/Compression Molding, Rapid Heating and Cooling the Mold(RHCM), Rapid-Injection/Compression Molding(RICM), Birefringence, Indicatrix

1. 서 론

광학용 플라스틱 수지의 개발과 대량 생산이 가능한 사출 및 사출/압축 성형 기술의 개발로 유 리제품을 대체하는 투명 플라스틱 광학제품들은 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. CD, DVD, BD(Blu-ray Disk)등의 광 저장장치를 비롯하여, 디 스크 드라이버용 픽업(pick-up) 렌즈나 레이저 프 린터에 사용되는 *f*θ 렌즈, 휴대폰용 카메라렌즈, 그리고, 최근에는 소형부터 대형에 이르는 TFT-LCD용 도광판의 생산에도 적용되고 있다[1]. 많은 광학 부품들이 굴절률, 투과율 및 초점거 리가 주요 관리 포인트가 되겠지만 이러한 부분 들은 제품의 설계단계 또는 재료를 선정하는 단 계에서 고려되며, 제품의 생산과정에서는 제품 내 에 남아있는 잔류응력이나 광학적 이방성, 즉, 복 굴절 또한 중요한 관리기준이 될 수 있다. 성형 후 제품 내에 남아 있는 복굴절은 빛을 이용하여 신호를 만드는 과정에서 데이터의 왜곡을 일으키 게 되며, 이는 제품 외관에서는 볼 수 없었던 성 능상의 결함으로 이어질 수 있다[1, 2]. 이에 본 연 구에서는 휴대용 디스플레이에 사용되는 7인치 크기의 도광판에 대하여 일반사출(CIM) 및 사출/ 압축(ICM), 금형 급속가열(RHCM) 그리고 ICM과

^{1.} Dankook University Graduate School

^{2.} LG Display

[#] Corresponding Author : Dankook University Graduate School , E-mail : khyoon@dku.edu

RHCM 의 장점을 취한 성형 방법인 급속 사출/압 축 성형법(RICM)을 이용하여 제품을 각각 성형하 고 제품 내에 남아있는 복굴절을 측정하여 성형 과정 중 발생하는 수지의 유동특성을 분석하였다. 마지막으로 광학타원의 indicatrix 를 이용하여 복 굴절 값과 소멸각(extinction angle)의 정보를 동시 에 표현하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사출/압축성형 및 금형 급속가열

최근 제품들의 치수정밀도의 증가와 일반사출 성형의 성형성의 한계로 사출/압축이나 RHCM 등 의 성형 기술들이 늘어나고 있는 추세이다. 사출/ 압축 성형법은 금형을 미리 열어놓은 상태에서 수지를 충전 후 금형을 닫음으로써 압축하여 성 형하는 방법이다(Fig. 1(a)). 금형 급속 가열 성형법 인 RHCM(Rapid Heating and Cooling Molding) 기술 은 수지가 캐비티(cavity)안에 사출되기 이전에 금 형의 표면온도를 빠른 속도로 사용수지의 유리전 이온도(T,) 이상으로 가열 후 성형하는 방법으로 (Fig. 1(b)), 성형 과정 중에 제품 내에 발생하는 웰 드라인을 최소화하거나 표면의 광택도 향상을 위 하여 많이 적용된다. RICM(RHCM+ICM) 성형법은 금형 급속가열과 사출/압축성형의 장점을 취합한 성형법으로(Fig. 1(c)) 성형 전에 금형을 초기 설정 된 형개거리(δ)만큼 열어놓은 상태에서 금형의 표 면을 급속으로 가열한 후 수지가 금형 내에 충전 이 완료되면 압축력을 가하여 금형을 닫음으로써 제품을 성형하는 방식이다[3, 4]. 이는 금형 급속가 열로 인한 미세패턴의 전사성 향상과 사출/압축공 정으로 인한 제품 두께의 균일도를 높일 수 있는 장점이 있어 최근 대형 도광판에서 시도되고 있 는 방법이다.

2.2 복굴절 및 광학 타원 표현법

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적으로 이방성을 가지게 되며 횡파인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이 때 가장 빠르게 진행하는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행하는 축을 slow axis 라 부르며 이방성 물질에서는 두 파형 사이에 경로차 또는 위 상차가 생긴다. 이러한 속도차에 의해 발생하는 경 로차 D_{sf} 는 편광된 빛이 두께 d 인 샘플을 통과할 때 다음의 식 (1)로 계산할 수 있다.



Fig. 1 Injection molding mechanism; injection/compression molding(ICM) (a), RHCM(b) and RICM(c)



Fig. 2 Graphical representations of biaxial indicatrix(a) and birefringence ellipse(b)

$$D_{sf} = (t_s - t_f)c = (\frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_f})c = (n_s - n_f)d$$
(1)

여기에서 t 는 매질 통과 시간, v 는 매질 통과 속도, c 는 진공 또는 공기 중의 광속, n_s, n_f 는 각 각 slow axis 와 fast axis 의 굴절률이며 그 차이를 통상 복굴절의 값(Δn)이라 부른다[5, 6].

복굴절값은 소멸각(extinction angle)과 함께 2 축 결정의 광학타원체를 이용하여 나타낼 수 있으며 타원체의 식을 세 주축 방향의 굴절률 n_l, n_{ll}, n_{ll} 를 사용하여 나타내면 다음의 식 (2)와 같다.

$$\frac{X^2}{n_{\rm I}^2} + \frac{Y^2}{n_{\rm II}^2} + \frac{Z^2}{n_{\rm III}^3} = 1$$
(2)

이 타원체는 Fig. 2(a)와 같이 XY, XZ 와 YZ 평 면상에서 세 개의 대칭적인 타원면을 형성하고 있다. 만약 2 축 결정의 두 주축 XY 와 임의의 xy 축과의 각도를 χ라 하고 Z 와 z를 일치시킬 때 z 또는 Z 축을 따라 진행하는 광의 최대 굴절률의 차이를 복굴절 값이라 하며, 양이나 음의 값을 모 두 가질 수 있으며 *n_l* - *n_{ll}* 가 된다. 굴절률의 분포 를 XY 면상에 투영된 타원을 이용하여 진동방향 에 따라 Fig. 2(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 장 축에 평행하게 진동하는 빛이 단축보다 굴절률이 큰 상태로 장축의 길이를 a, 단축의 길이를 b 라 할 때 a - b 의 차이 값을 이용하여 복굴절의 값을 나타낼 수 있으나, 실제 굴절률의 차이가 작아 육 안으로는 항상 원으로 보이기 때문에 다음의 식 (3)와 같이 α 라는 상수를 곱해 타원의 찌그러진 정도를 복굴절의 값에 비례하도록 과장하여 표시 하였다.

$$\mathbf{a} - \mathbf{b} = \alpha (\mathbf{n}_{\mathrm{I}} - \mathbf{n}_{\mathrm{II}}) \tag{3}$$

본 논문에서는 α 값을 -80,000 으로 설정하여 두 께 방향의 복굴절 분포를 표현하는 방법으로 사 용하였다[5, 6]. 복굴절의 측정은 편광현미경 하에 서 Berek compensator 를 사용하여 샘플 두께방향 각 위치에서의 위상차 및 경로차를 구하였으며, 최종적인 복굴절의 값은 이 경로차를 샘플의 두 께로 나누어 구하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 LS-Mtron 의 LGE-110D 사출 성 형기와 Mitsubishi Rayon 의 PMMA (grade: TF8)를 사용하였다. 성형 조건으로는 사출유량을 약 68 cc/s(사출속도 140mm/s), 수지온도는 260℃로 설정 하여 Table 1 과 같이 실험하였다. 제품의 형상은 Fig. 3 에 보는 바와 같으며 공칭 두께 1.12mm 의 7 인치(180mm×90mm) 크기이다. 복굴절의 측정은 게이트로부터 5, 25, 45, 65, 85mm 위치에서 두께방 향으로 측정하였으며 두께 방향의 각 위치를 반 두께(half-gap thickness) h로 나누어 무차원화 된 값 으로 표현하였다. 또한, Fig. 2 에서 정의한 소멸각 은 한 그래프에 모두 나타내기 위하여 각 위치마 다 50°씩 이동시켜 나타내었다.

4. 실험결과

Fig. 4(a)는 단순 사출 후 보압이나 압축을 가하 지 않은 Exp. #1 의 결과로 벽면 근처에서 보이는 복굴절 값은 충전 시 유동에 의해 발생하는 것이 며, 제품 내부에서는 약 -2.2×10⁻⁵으로 거의 평탄 한 분포를 보이고 있다. Fig. 4(b)는 각 위치에서의 두께방향의 소멸각(extinction angle)을 나타낸 것으

Table 1110ccss conditions for 7men Lor				
	Mold temp. (°C)	Packing (kgf/cm ²)	Compression Force (ton)	Remarks
Exp. #1	80	-	-	Inj. only
Exp. #2		500 (1.0s)	-	CIM
Exp. #3		-	110	ICM
Exp. #4	110	500 (1.0s)	-	RHCM
Exp. #5		-	110	RICM

Table 1 Process conditions for 7inch I CP









로 거의 모든 위치에서 0 에 가깝게 분포함을 보 이고 있다. 이 결과는 사출이 완료된 후 보압을 걸 지 않아 벽면 근처를 제외하고는 응력이 거의 완화



Fig. 5 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of CIM process at various distance from gate





되었음을 보여주는 대표적인 패턴이다[6].

Fig. 5는 일반 사출 성형(CIM)을 적용한 Exp. #2 의 결과로 두께 방향의 복굴절 분포와 소멸각 (extinction angle)을 보이고 있다. Fig. 5(a) 에서 보 면 두께([y/h])가 0.5~0.8 인 위치에서 복굴절 정점 을 보이고 있는데 이는 보압의 영향으로 사출 후 낮은 온도에서 수지의 유동에 의해 발생한 것임 을 알 수 있으며 게이트에서 멀어질수록 보압의



Fig. 7 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of RHCM process at various distance from gate



Fig. 8 Gapwise profiles of birefringence Δn (a) and extinction angle (b) of RICM process at various distance from gate

영향도 작아져 복굴절 값이 작게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 또한 두께가 0 의 위치인 중심부위 에서는 전체적으로 약 -2.75x10⁻⁵ 이하의 값을 보 이고 있는데 이는 Fig. 4 에서와 같이 수지가 유동 후에 천천히 냉각되면서 열에 의해 발생하는 잔 류 복굴절의 결과이다[6].

Fig. 6 에서는 Exp. #3 의 사출/압축(ICM) 성형공정 의 결과를 보이고 있다. 벽면근처를 제외하고는 -2.50x10⁻⁵ 의 값으로 정점이 없는 거의 균일한 분포 를 나타내고 있다. 복굴절 분포로만 본다면 Fig. 4 와 민인기 · 조성우 · 윤경환



Fig. 9 The optical indicatrix representation of birefringence and extinction angle distribution of injection-only (a), CIM (b), ICM (c), RHCM (d) and RICM (e) corresponding to Figs. 4-8

거의 유사한 값과 분포를 나타내지만 게이트로부 터 가장 가까운 위치에서 소멸각(extinction angle) 은 부호가 바뀌는 부분을 볼 수 있는데 이는 역 유동(back flow)에 의해 발생하는 결과이며 압축과 정에서 팬게이트가 완전히 고화되지 않아서 나타 나는 현상으로 볼 수 있다.

Fig. 7 은 Exp. #4 의 결과로 금형 표면을 110℃까 지 급속가열 하였다가 냉각시키며 성형한 RHCM 의 복굴절 분포를 보이고 있다. 벽면 근처에서의 복굴절 값은 Fig. 5 의 일반사출성형과 비교하여 볼 때 유사한 패턴을 보이고 있으나 |y/h|가 0.5~0.8 인 부근에서의 복굴절 값은 일반사출 성형 에 비해 작아지는데 이는 급속가열로 인한 금형 표면온도의 상승으로 서냉효과가 발생하여 보압 과정 시 작용된 응력이 이완되어 더 낮은 복굴절 분포를 나타내는 것이다.

Fig. 8은 Exp. #5의 결과로 금형 표면을 110℃ 까지 급속가열한 상태에서 압축공정을 적용한 RICM 의 경우로 게이트와 가까운 5mm 위치를 제 외하고는 복굴절 값이 ICM 에 가까운 낮은 값을 보이고 있다. 앞선 결과들과 비교하여 볼 때 RICM 에서는 사출 후 압축효과가 작용하였음에도 불구하고 게이트에서 가까운 부분은 복굴절 분포 가 사출/압축에서와 같이 relaxation 되지 못하고 |y/h|가 0.5~0.8 인 부분에서 일부 유동에 의한 값이 나타나고 있다는 것이다. 이는 높은 금형표면 온 도에 의한 서냉의 효과로 성형품 내부의 유통성 상승이 게이트의 고화를 늦추어 압축 과정 중에 역유동(back flow) 현상을 발생시키는 것으로 판단 되며 이는 게이트에서 비교적 먼 25mm 까지도 나타나고 있으며 소멸각(extinction angle)의 부호가 반대로 되는 결과에서 알 수 있다[6].

마지막으로 Fig. 9 에서는 광학타원을 이용하여 앞의 실험결과에 대해 최종 복굴절의 크기와 소 멸각(extinction angle)의 분포를 indicatrix 를 이용하 여 나타내었다. 사출만 한 실험인 Exp. #1 의 경우 에는 중심부위에서 타원의 크기가 가장 작은 형 태로 열에 의한 복굴절이 주를 이루는 것을 보여 주고 있으며, Exp. #2 와 Exp. #4 의 경우에는 사출 후 보압의 영향으로 2 개의 추가적인 정점을 볼 수 있고, 사출 후 압축을 적용한 Exp. #3 과 Exp. #5 의 사출 후 압축의 적용된 실험에서는 중심부 위의 소멸각(extinction angle)이 거의 0으로 분포하 며 균일한 복굴절 분포를 보인다. 또한, 게이트 근처에서 소멸각(extinction angle)의 부호가 반대로 변하는 것을 뚜렷하게 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 각 성형 메커니즘의 종류에 따 른 7인치용 도광판의 두께방향의 복굴절을 측정 하여 사출품 내부에서 발생하는 유동특성을 확인 할 수 있었다. 보압 및 압축이 적용되지 않은 단 순 사출의 경우에는 벽면 근처를 제외하고는 거 의 균일한 복굴절 분포를 보이고 있으며, 사출 후 보압이 적용된 일반 사출 성형과 RHCM의 경우에 는 크기는 다르지만 충전 후 낮은 온도에서 보압 에 의한 유동으로 중심부위에서 복굴절 정점을 보이고 있다. 사출/압축성형 및 RICM의 경우에는 단순 사출과 유사하게 전체적으로 균일한 복굴절 분포를 보이지만 게이트 부근에서 소멸각의 부호 변화를 통해 압축과정 중에 역유동이 발생함을 확인할 수 있었으며, 특히, RICM 공정의 경우에는 25 mm 부근까지도 역유동이 발생하는 결과를 나 타냈다. 마지막으로 광학타원을 이용한 표현법을 이용하여 복굴절 구조 변화와 유동특성을 보였다.

후 기

본 논문은 지식경제 기술혁신사업(Project No. 10033710, 10033493)의 지원으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- T. H. Lin, 2009, Ph. D, Thesis, University of Akron, Ohio.
- [2] Y. B. Lee, T. H. Kwon, K. H. Yoon, 2002, Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk. Part II, Polym. Eng. Sci, Vol. 42, No. 11, pp. 2273~ 2292.
- [3] S. Matsuda, A. Ito, M. Katsuaki, M. Yoshinobu, T. Tooru, 1984, Heat Cycle Injection Compression Molding Method, US. Patent 4442061.
- [4] M. C. Jeng, S. C. Chen, P. S. Minh, J. A. Chang, C. S. Chung, 2010, Rapid Mold Temperature Control in Injection Molding by using Steam Heating, Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 9, pp. 1295~1304.
- [5] E. Hecht, 2002, Optics, 4th ed., Addison-Wesley, Massachusetts. pp. 395~468.
- [6] I. K. Min, K. H. Yoon, 2011, An Experimental Study on the Effects of Injection-molding Types for the Birefringence Distribution in Polycarbonate Discs, Kr-Au. Rheo. J., Vol. 23, No. 3, pp. 155~162.