

정밀 광학 부품의 복굴절 측정 방법에 관한 연구

민인기^{1,2} · 고영배^{1,2} · 권창오³ · 윤경환^{1,*}

¹단국대학교 기계공학과 대학원, ²한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구본부 금형·성형 연구부, ³동아정밀

A Study on The Birefringence Measurement in Precision Optical Product

In Ki Min^{1,2} · Young Bae Ko^{1,2} · Chang Oh Kwon³ · Kyung Hwan Yoon^{1,*}

Abstract : Recently, injection molding process became more popular than ever to produce large quantities of high precision products. Extensive studies have been conducted for reducing the residual stresses and birefringence in injection-molded optical products. Flow-induced and thermally-induced stresses and birefringence have been found as two main sources during injection molding process. Generally, quantitative value of birefringence can be measured with polarizing microscope using the compensator. However, it is difficult to measure low order retardation with microscope, so developing a measurement system for low order optical path difference is in need. In the present paper, a system using Photo Elastic Modulator (PEM) is demonstrated to measure low phase retardation in injection-molded products.

Key Words : Birefringence, Injection Molding, Retardation, Photoelasticity, Optical Products

1. 서 론

사출성형은 정밀 부품류나 광학 제품 등의 고부가가치 제품을 대량 생산하는 방향으로 많이 이용되고 있으며 특히, 제품의 경량화, 생산 자동화의 이점이 있어 여러 제품들에서 이전에 사용되던 금속이나 유리등의 고가의 재질들이 최근에는 플라스틱으로 대체되고 있다. 또한 정밀 광학 부품류, 즉, CD/DVD 미디어, 각종 렌즈류, 디스플레이, 광 측정용 부품등도 생산성 및 가격 경쟁력 면에서 사출 성형으로 많이 제작 되고 있다. 하지만 이런 이점에도 불구하고 성형 과정에서 발생하는 잔류 응력으로 인한 성형후의 변형 등은 고정밀 제품을 생산하는데 있어서 아직도 문제점으로 남아 있으며 광학 부품에 사용하는 경우에는 치명적인 약점으로 작용하고 있다. 광학제품 내에서 발생하는 이방성, 즉, 복굴절의 양이 렌즈나 광자기 디스크 등의 제품의 성

능에 영향을 미치므로 공학적 측면에서 사출 성형품의 성형과정에 대한 이해와 더불어 문제점 해결에 많은 연구가 필요한 실정이다.

플라스틱 부품은 성형 과정동안에 다양한 열적, 기계적 이력을 가지고 있으며 성형 조건에 따라서 각기 다른 양의 배향 특성과 잔류응력, 수축 등을 유발시키며 최종 제품의 형상 및 정밀도에 많은 영향을 미친다.

복굴절은 크게 유동에 의한 복굴절(Flow-induced birefringence)과 열에 의한 복굴절(Thermally-induced birefringence)로 나눌 수 있으며, 유동에 의한 부분은 충전과 보압 과정동안 배향된 고분자 체인이 평형상태로 돌아가지 못한 채로 사출품 내에 남아 발생되는 것이며, 열에 의한 부분은 제품에서 온도변화에 의해 발생하는 것으로 사출부터 제품 취출 후 까지 제품의 불균일한 냉각 속도에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.^{(1),(2)}

복굴절의 측정은 일반적으로 편광 현미경을 이용하여 보상기(Compensator)를 이용하여 측정할 수 있다. 하지만, 두께가 얇은 광학필름의 경우에는 복굴

1. 단국대학교 기계공학과 khyoon@dku.edu, 교신저자*

2. 한국생산기술연구원(KITECH)

3. 동아정밀

접수 : 2011. 12. 20. 채택 : 2012. 04. 27.

질의 크기 또한 매우 작아 현미경을 이용하여 육안으로 측정하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 성형품 내에 남아있는 복굴절의 양을 측정하기 위하여 편광현미경과 직접구민 polariscope를 사용하여 사출품에 남아있는 복굴절을 측정된 결과를 보이기로 한다.

2. 이론적 배경

2.1 복굴절과 광탄성

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 1에서 보는 바와 같이 횡과인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이 때 가장 빠르게 진행되는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행되는 축을 slow axis라 부르며 두 축 사이의 각도는 90°를 이룬다. Fast axis와 slow axis를 각각 굴절률에 관한 주축이라 하며 직선 편광된 빛이 광학적 이방성인 물체를 통과할 때 fast axis와 slow axis로 성분이 분리되면 두 파형 사이에는 경로차 또는 위상차가 생긴다. 따라서 편광된 빛이 두께가 d인 매질을 통과할 때 속도차에 의해 발생하는 경로차 D_{sf} 는 다음과 같은 식 (1)로 계산할 수 있다.

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

여기에서 t는 매질 통과 시간, v는 매질 통과 속도, c는 진공 또는 공기 중의 광속, n_s , n_f 는 각각 slow axis와 fast axis의 굴절률이며, 그 차이를 복굴절의 값이라 부른다.

한편, 각도로 나타낼 수 있는 위상차 ϕ_{sf} 는 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{sf} = \frac{2\pi}{\lambda}d(n_s - n_f) \quad (2)$$

여기서 λ 는 진공 중의 파장이다.

일반적으로 성형품 내에 존재하는 굴절률은 수지의 유동방향, 유동에 수직인 방향, 그리고 두께방향으로 각기 다른 값을 가지며, 이를 디스크 기관 내

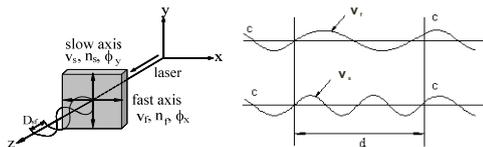


Fig. 1. Optical path distance and phase difference

에 적용하면 굴절률이 반지름 방향, 원주방향, 기관에 수직인 방향으로 분류 할 수 있다. 본 논문에서는 디스크 기관의 경우에는 수직으로 레이저광이 한번 통과할 때 반지름 방향 굴절률(n_r)에서 원주방향 굴절률(n_e)을 뺀 값, 즉, in-plane 복굴절 값과 경로차에 대한 측정 결과들을 예로 보이며 이를 광학 필름과 같이 복굴절 값이 작은 제품에도 적용할 수 있음을 보이고자 한다.

2.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster는 “Treatise on the kaleidoscope”에서 정상적으로 투과성이 있는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성(photoelasticity)이라 하며 광학적으로 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의한 복굴절은 주응력 차에 비례한다.

선형 광탄성(Linear Photoelasticity) 이론에서는 등방성 물질이 응력을 받으면 편광된 광학 주축 방향의 굴절률의 차이가 주응력의 차이에 비례하며 다음 식 (3)과 같다.

$$n_i - n_j = C(\tau_i - \tau_j) \quad (3)$$

여기에서 i, j, k = I, II, III 주축의 방향이며, τ_i , τ_j , τ_k 는 세 주축 방향의 주응력이다. 또한, n_i 는 주축 i 방향으로 편광된 횡과가 물질을 통과할 때의 굴절률이며 C는 광탄성계수(stress-optical coefficient)이다. 이 선형 광탄성 관계식은 여러 고분자들에 대하여 상당히 넓은 범위에서 증명되어 있다. 대부분의 광학 디스크의 재료로 사용되는 폴리카보네이트(PC)의 광탄성계수는 유리전이온도(T_g) 이상에서 약 3,600 Br (1 Br = 10^{-12} Pa⁻¹)이고, 유리전이온도 이하에서는 60~70 Br로 알려져 있다.⁽³⁾

3. 복굴절 측정 장치의 구성

3.1 편광현미경을 이용한 복굴절의 측정

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. 이러한 측정

원리는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.⁽⁴⁾

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

위의 식에서 I''는 검광자(detector)의 intensity, I₀는 빛의 세기, θ는 샘플의 빠른축과 편광기의 편광축 사이의 각도이며 φ는 위상차이다. I''를 0으로 만들 수 있는 조건은 Isoclinic (sin²2θ=0)과 Isochromatic (sin(φ/2)=0)의 두 가지 경우이며, 이러한 상태를 일반적으로 extinction이라 부른다.

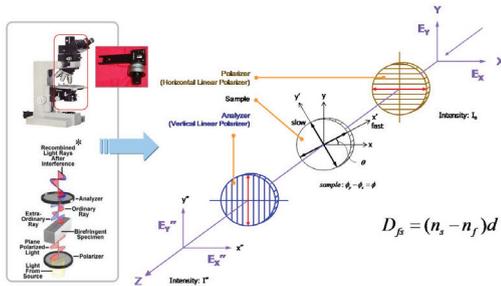


Fig. 2. Polariscope setup in microscope



Fig. 3. Polarizing microscope

Isoclinic 은 샘플의 광학주축이 편광기나 분석기의 편광축 중 하나와 만날 때마다 발생하며, θ가 sin²2θ=0의 조건을 만족시키기 위해서는 다음과 같이 θ=mπ/2 (여기서 m은 정수)가 된다. Rotation stage를 사용하여 샘플을 360° 회전시킬 경우 90° 간격을 두고 4번의 extinction을 관찰할 수 있다. 이때, 일단 주축을 발견한 후 I''가 최대가 되는 상태로 고정하고 빠른 축과 느린 축을 미리 알고 있는 quarter-wave plate등을 사용하며 위상차 φ가 감소되는 현상을 통해 샘플 내의 빠른 축과 느린 축을 쉽

게 발견할 수 있다. 주축을 발견한 후 I''이 최대가 되는 상태로 rotation stage를 사용하여 extinction상태로부터 샘플을 45° 회전시키면 sin²2θ=1이 되어 I''은 위상차 φ만의 함수가 된다. 그 후 보상판(Berek compensator)을 사용해서 원하는 위치의 색이 검게 바뀔 때까지 기관에서 야기되는 위상차를 보상하여 총 위상차를 0으로 만들어 주면 샘플내의 위상차를 구할 수 있게 된다⁽⁵⁾. 본 논문에서는 blow 성형 시 사용되는 pre-form 사출품을 측정하였으며 게이트로부터 제품의 높이에 따른 in-plane birefringence를 측정 한 결과를 보였으며, Fig. 3에 보이는 독일 Leitz社의 편광현미경을 이용하였다.

3.2 PEM을 이용한 polariscope의 구성

복굴절의 측정방법은 목적과 용도에 따라 Fig. 2의 setup에 다른 장치들을 추가하여 여러 가지로 구성할 수 있다. 하지만 일반적인 방법은 기관에 입사된 광이 투과 또는 반사된 후에 일어나는 편광 상태의 변화를 측정하는 것으로 표면과 박막물성의 연구 수단인 엘립소미터와 원리적으로는 같은 것이다. 이와 같은 복굴절의 측정 방법으로는 위상 보상판에 의한 간섭 측정법, 직선 편광입사에 의한 회전 검광자법, 원편광 입사에 의한 회전 검광자법, 위상 변조법등이 있다.

본 실험에서 사용한 위상 변조법은 통과광의 변조된 주파수 성분만을 기본으로 측정하기 때문에 부품의 정밀도에 따른 오차 등의 영향을 받지 않고 다른 방법들에 비해 작은 양의 위상차 또는 경로차를 아주 정밀하게 측정할 수 있다. 본 장치의 분해능은 데이터 수집 장치의 분해능과 비례하며 위상차로 약 0.1 nm이다. Fig. 4는 PEM을 이용하여 복굴절을 측정하기 위한 광학계를 보이고 있으며 Fig. 5는 복굴절 측정을 위한 시스템의 구성도이다.

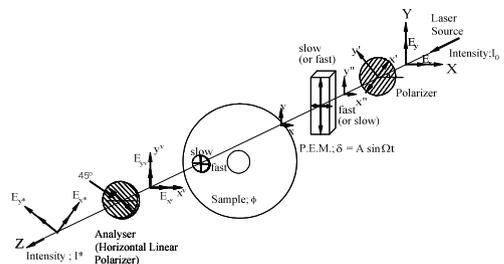


Fig. 4 Configuration of Optical train

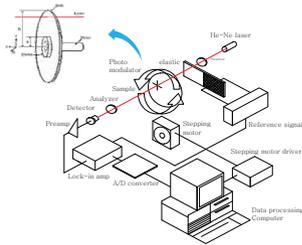


Fig. 5 A diagram of optical setup using modulation

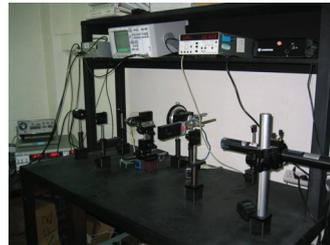


Fig. 6 An optical bench setup for birefringence measurement

본 논문에서 미소 복굴절 측정 실험에서 사용한 광학계는 Newport사의 편광판 2개와 위상 변조를 위해서 Hinds사의 PEM-90 Photo-Elastic Modulator와, 변조된 신호를 측정하기 위해서 Stanford Research System사의 SR830 Lock-in Amplifier이다.

또한, 레이저 강도를 측정하기 위해서 Hinds사의 DET-90 검출기, Lock-in Amp.에서의 나오는 신호를 수집하기 위해서 National Instruments사의 AT-MIO-16X와 Lab-View 프로그램을 사용하였다.

본 논문에 사용된 시스템에서 검출기에 들어오는 신호를 해석하기 위해서 Jones (or Muller) Matrix를 이용했으며, 이는 Maxwell방정식을 만족하는 x-y 평면 내에서 진동하며 z 축 방향으로 진행되는 횡파의 전기장의 크기만을 따로 떼어 내서 복소꼴 형태로 만든 것이다.

Jones Matrix는 다음의 식 (5)와 같고, 검출기의 신호를 계산하면 식 (6)와 같이 각각 D.C.값, Ω 값, 2Ω 값 등의 항을 구할 수 있다. 여기서 Ω 는 PEM의 변조 주기이다. 최종 결과 식 (6)에서 보이듯이 경로차를 나타내는 I^*/I_0 값이 식(4)에서 보인 바와 같은 sine의 제곱에 비례하는 함수가 아닌 sine에 비례하는 함수로 경로차가 0 근처에서도 sensitivity가 커서, 특히, 작은 양의 복굴절에 의한 경로차를 측정하는데 용이하며 optical film등의 측정에 커다란 도움이 될 것으로 보인다. 본 구성을 통해서 제작된 polariscope의 setup과 Calibration Data를 Fig. 6 및 Fig. 7에 보인다.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 00 \\ 01 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad \text{----- (5)}$$

$$\frac{I^*}{I_0} = \frac{1}{2}(1 - J_0(A)) \quad ; DC \quad \text{----- (6)}$$

$$+ \sin\phi J_1(A)\sin\Omega t \quad ; \Omega \text{ term}$$

$$- \cos\phi J_2(A)\sin 2\Omega t \quad ; 2\Omega \text{ term}$$

$$+ \dots \dots \dots$$

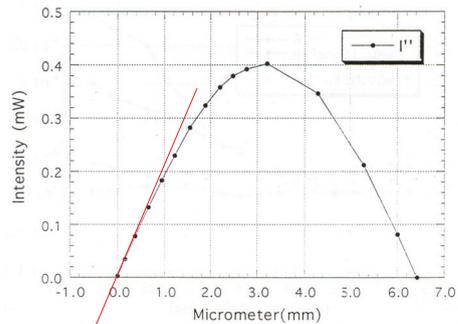


Fig. 7 The Calibration data for P.E.M with polariscope setup

4. 결과

4.1 편광 현미경을 이용한 복굴절의 측정

복굴절의 측정은 편광필름 두장과 1/4 파장필름 두 장으로 구성된 circular polariscope setup을 이용하여 개략적인 복굴절의 양을 확인한 후 편광 현미경을 이용하여 측정하였다. 먼저 pre-form 성형품이 현미경의 rotating stage에 올라가도록 샘플을 자른 후 측정하였다. 측정결과를 Fig. 8에 보이며 정성적인 값을 알 수 있도록 두 개의 편광필름 사이에서 촬영한 이미지 사진을 동시에 비교하였으며 샘플의 경로차가 약 1500 nm 까지 측정되는 것을 볼 수 있다.

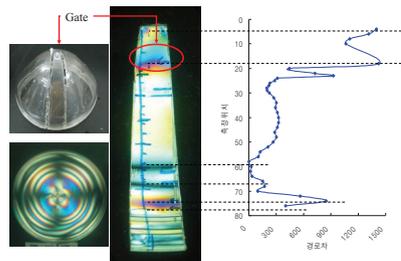


Fig. 8 Birefringence distribution of pre-form sample in polariscope setup and measurement result

4.2 위상 변조법을 이용한 복굴절 측정

본 실험에서는 3.2절에서 보인 polariscope 및 PEM을 이용하여 경로차가 작은 디스크를 측정하였다. 실제 측정은 Fig. 9에서 보는 것과 같이 디스크의 안쪽지름부터가 아니라 디스크를 고정시키는 클램프의 바깥지름에서부터 측정하였으며 in-plane 경로차를 반지름 방향의 거리의 함수로 측정한 예를 Fig. 10에 보이고 있다. 이렇게 측정하여 얻은 데이터는 식 1을 이용하여 각 부분에서의 두께로 나누어 복굴절 값을 얻을 수 있다. 경로차가 100 nm 이하인 구간에서도 충분한 분해능을 보인다는 사실에 주목할 필요가 있다.

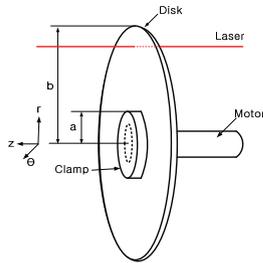


Fig. 9 Configuration and coordinate system of a disk (CD)

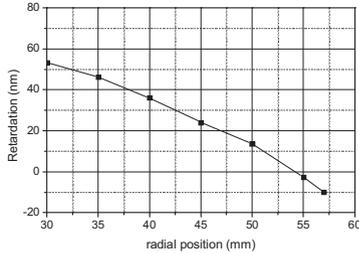


Fig. 10 The distribution of retardation in r - θ plane, $D_{r\theta}$ of a sample CD at rest.

5. 결론

본 연구를 통하여 광학용 성형품의 복굴절을 측정하기 위한 현미경과 polariscope를 이용하여 복굴절을 측정하기 위한 방법을 알아보았다.

다양한 복굴절의 측정방법이 있겠지만 편광 현미경을 통하여 간단히 복굴절을 측정하는 방법과 육안으로 측정하기 어려운 낮은 경로차를 가지는 샘플에 대해 복굴절을 측정할 수 있음을 보였다. 본 결과를 통하여 광학 측정법을 이용한 다양한 필름들의 성형 특성 분석에 많은 도움이 되리라 본다.

후 기

본 연구는 지식경제부 재원과 한국산업기술평가관리위원회의 산업원천기술개발사업 (과제번호: 10033710, 10033493)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K. H., 2002, "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/ Compression molded Center-Gated Disk. Part I and Part II", Polym. Eng.Sci., Vol.42, No.11, pp.2246~2272 & 2273~2292.
- 2) Kim, J. S. and Yoon, K. H., 2003, "A Study on the Prediction of Thermally-Induced Residual Stress and Birefringence in Quenched Polystyrene Plate Including Free Volume Theory", KSME (A), Vol. 27, No. 1, pp.77~87
- 3) Janeschitz-Kriegl, 1983, Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence, Springer-Verlag, Berlin
- 4) Fuller, G.G., 1995, Optical Rheometry of complex Fluids, Oxford University Press, New York
- 5) Hecht, E., 1987, Optics, Addison-Wesley Publishing Company.