

백색광의 R-G-B 성분 분해에 의한 사출품내의 복굴절 측정법 개발

김종선* · 윤경환**

A study on the Birefringence Measurement in Injection Molded Parts using R-G-B separation of White Light

J. S. Kim and K. H. Yoon

Abstract

Recently, injection molded plastic optical products are widely used, because injection molding process has advantages of low cost and high productivity. However, there remains residual birefringence and residual stresses originated from flow history and differential cooling. The present study focused on developing a technique measuring birefringence in optical plastic parts using R-G-B separation of white light. The main idea of an analysis comes from the fact that more information can be obtained from the distribution of retardation caused by different wavelengths. A complete system to give the quantitative values of retardation covering high order 2-D birefringence will be demonstrated. Further investigation is under way to improve the accuracy of the system using diodes as light sources.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Birefringence(복굴절), Retardation Length(경로차)

1. 서 론

최근에 들어 광저장 장치들의 급속한 확산에 따라 광학용 유리렌즈들을 플라스틱으로 대체하여 생산성을 높이고 생산비를 낮추는 작업이 활발히 진행되어 왔다. 하지만, 사출성형 공정과 고분자 물질의 특성상 최종 제품에 남는 광학적 이방성, 즉, 복굴절의 분포는 피할 수 없다. 이러한 광학 렌즈 내부에 남는 복굴절의 분포는 광학 설계 단계에서 예측하지 못하는 결과들을 초래하게 되므로 품질이 우수한 광학용 렌즈를 생산하기 위해서 렌즈 내부의 잔류응력(residual stress)과 복굴절(birefringence)의 양을 줄이려는 연구가 활발히 진행되어왔다.^(1,2)

일반적인 복굴절의 측정법은 측정하고자 하는

시편에 입사된 광이 투과 또는 반사된 후에 일어나는 편광 상태의 변화를 측정하는 것으로 표면과 박막물성의 연구 수단인 엘립소미터의 원리를 응용한 것이다. 이런 복굴절의 측정 방법으로는 위상 보상판에 의한 간섭 측정법, 직선 편광입사에 의한 회전 검광자법, 원편광 입사에 의한 회전 검광자법, 위상 변조법등이 있다.^(3,4)

또한, 현재 2 차원 복굴절 측정 장비로는 주로 위상 변조법등이 많이 사용되고 있는데 이 방법은 검광자나 1/4 파장판을 회전시키며 회전에 따른 이미지의 차이를 분석함으로써 복굴절의 분포를 측정하고 있다.^(5,6,7,8,9) 하지만, 기계적인 작동부와 이미지처리를 위한 시스템 사이의 타이밍을 맞추는 장치가 별도로 들어가기 때문에 고가의 장비가 필요하고 장시간의 측정시간이 필요한 단

* 단국대학교 대학원 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

점을 가지고 있다.

그래서, 본 논문에서는 위의 사항들을 고려하

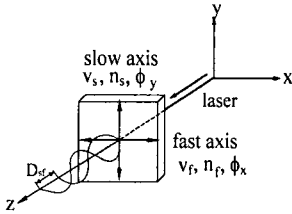


Fig. 1 A linear polarized light and path difference passing an anisotropic substance.

여 저가의 고속 복굴절 분포를 측정하는 장치를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 복굴절 측정

2.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 횡파인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이때, 가장 빠르게 진행하는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행하는 축을 slow axis 라 부르며 두 축 사이의 각도는 90° 를 이룬다. Fast axis 와 slow axis 를 각각 굴절률에 관한 주축이라 하며 직선 편광된 빛이 광학적 이방성인 물체를 통과할 때 fast axis 와 slow axis 로 성분이 분리되면 두 파형 사이에는 경로차 또는 위상차가 생긴다. 이러한 속도차에 의해 발생하는 두께 d 를 통과하는 사이의 거리 경로차, D_{sf} 는 다음의 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 t 는 매질 통과 시간, v 는 매질 통과 속도, c 는 진공 또는 공기중의 광속, n_s , n_f 는 각각 slow axis 와 fast axis 의 굴절률이며 그 차이를 복굴절의 값이라 부른다.

한편, 각도로 나타낼 수 있는 위상차는 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.

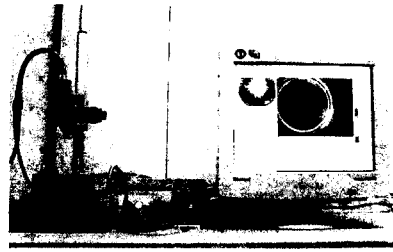


Fig. 2 2-D measurement system using CCD camera



Fig. 3 Optical train used in the system

2.2 시스템 구성도

본 논문에서 사용된 측정 시스템 구성은 Fig. 2, 3 과 같이 Edmund Scientific 사의 편광판 2 장, 1/4 파장판 2 장, 그리고, 백색 LED 평면 광원으로 구성된 광학계를 가지고 있으며, 복굴절 이미지의 촬영을 위하여 섹텍의 비디오 현미경 시스템인 iCamscope-305 를 사용하였다. 또한 촬영한 복굴절 이미지 해석을 위해서 National Instruments 사의 NI-1411 이미지 캡처보드와 LabView 프로그램 사용하였다.

2.3 해석이론

본 논문에서 사용한 광학 시스템의 구조는 Fig. 3 과 같으며 기본적으로 원편광 시스템을 사용하고 있다. 본 시스템에서 CCD 카메라에 들어오는 신호를 해석하기 위해서 Jones (or Muller) Matrix 를 이용했으며 이는 Maxwell 방정식을 만족하는 x-y 평면내에서 진동하며 z 축 방향으로 진행하는 횡파의 전기장의 크기만을 따로 떼어내서 복소표 형태로 만든 것이다.

본 논문에서 사용된 시스템의 Jones Matrix 는 다음의 식 (3)과 같다. 또한, 식(3)의 Jones Matrix 를 이용하여 검출기의 신호를 계산하면 식(4)와 같이 sin 의 제곱항으로 나타나게 된다.

$$\begin{bmatrix} E_x^v \\ E_y^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$I^v = \frac{C_0}{2} |E_y^v|^2 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (4)$$

$$I_0 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \quad (5)$$

또한 최종 Intensity I^v 의 I_0 에 대한 비는 다음의 식 (6)으로 요약될 수 있다.

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

원평광 시스템은 isoclinic 의 상태가 나타나지 않게 되어 주축에 관계없이 경로차 만의 함수로 나타난다는 점이 크게 다르며 백색광을 쓰면 interference color pattern 으로 샘플의 2 차원적인 경로차의 분포를 알 수 있게 된다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 ϕ 대신 D_{sf} 를 주어진 파장 λ 의 함수로 표시하면 식 (7)와 같은 최종식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{I^v}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda} \right) \quad (7)$$

이 간단한 식은 우리가 편광판 사이에 샘플을 두고 백색광하에서 볼 경우 발생하는 interference color pattern 을 이해할 수 있는 기본이 된다.

우선 백색광을 R, G, B 의 삼색광이라 가정하여 샘플의 x-y plane 상의 한 점에 의해 발생하는 경로차를 고정하면 각각의 intensity 를 식 (7)을 이용하여 나타낼 수 있다.

이와 같이 같은 경로차를 가져도 빛의 파장에 따라 검출기에 들어오는 신호의 강도가 달라지는데 이것은 빛이 파장에 따라 굴절률이 달라지는 색수차 현상 때문이다. 이와 같은 파장에 따른 신호 강도의 변화는 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 광학 시스템에서 촬영된 이미지를 R, G, B 의 성분으로 분리하고 식 (7)을 이용하여 분리된 R, G, B 의 신호강도의 비가 가장 유사한 지점을 찾아 실제 경로차의 오더와 값을 결정하게 된다. 이와같은 방법을 각각 pixel 에 적용하여 광학용 렌즈의 경로차를 결정한다.

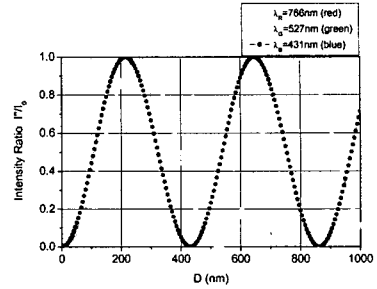


Fig. 4 Intensity distribution with different wavelength as a function of retardation length

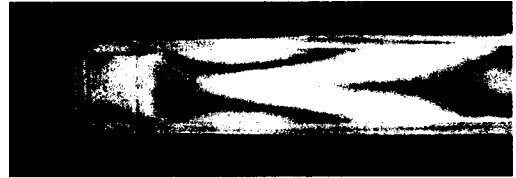


Fig. 5 An interference color pattern of birefringence distribution in f-theta lens

3. 해석결과

Fig. 5 는 레이저 프린터에 사용되는 F-theta 렌즈의 복굴절을 촬영한 이미지이다. 이미지를 각각의 R, G, B 의 삼색광의 성분으로 분해하면 Fig. 6 과 같이 나타나며 각각의 이미지를 식 (7)을 이용하여 Fig. 7 과 같이 F-theta 렌즈의 경로차를 정량화할 수 있었다. 측정 결과 렌즈의 측면 부분의 경우 최고 600 nm 의 경로차이를 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 일반적인 복굴절측정 시스템으로는 측정을 하기 힘든 결과로 사출성형 과정에서 발생하는 높은 복굴절의 측정을 가능하게 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 높은 오더의 복굴절을 가지는 플라스틱 제품의 복굴절을 정량적으로 평가하기 위하여 색수차를 이용하는 방법을 제시하였다. Fig. 7 에서 보는 것과 같이 짧은 시간에 300 nm 이상의 높은 오더의 경로차를 결정할 수 있었다. 이론상으로는 이보다 높은 양의 경로차를 측정할 수 있지만 아직 광원의 스펙트럼 분포와 광학 시스템

의 S/N 비, 신호의 분해능 향상 등의 문제를 해결하여 좀더 정확한 결과를 얻어 내는 연구를 진행 중에 있으며 광원으로 단색 다이오드를 조합한 2 색 또는 3 색법에 의한 복굴절을 측정법을 대안으로 구상 중에 있다.

이 연구는 2003 학년도 2010 생산기반 혁신기술 개발사업 지원으로 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

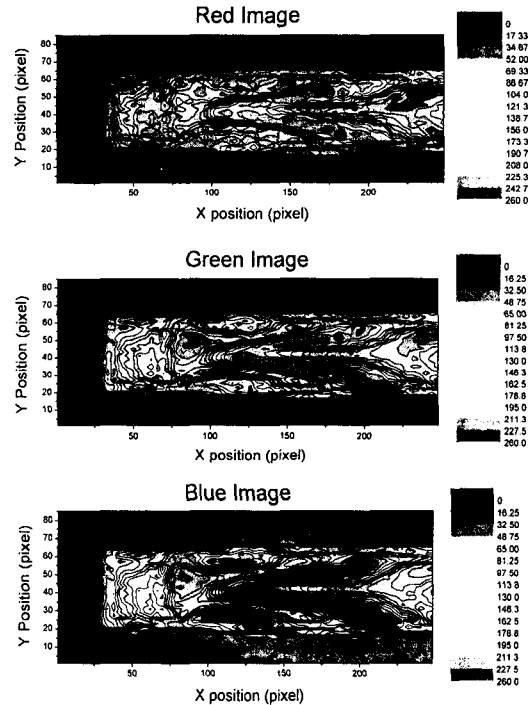


Fig. 6 RGB intensity image

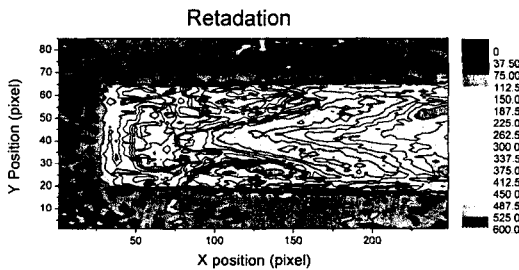


Fig. 7 The distribution of calculated retardation length

후 기

- (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) Hecht, E. 1987. Optics. Berlin, Massachusetts, Addison-Wesley Janeschitz-Kriegl, 1983, Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence., Springer-Verlag, Berlin
- (4) Zhu, Y. C., Koyama, T., Takada, T., Murooka, Y., and Otsuka, T., 1999, "Two-dimensional measurement technique for birefringence vector distributions: data processing and experimental verification", Applied Optic, Vol. 38, No. 11, pp. 2216 ~ 2224
- (5) Zhu, Y. C., Koyama, T., Takada, T., Murooka, Y., and Otsuka, T., 1999, "Two-dimensional measurement technique for birefringence vector distributions: measurement principle", Applied Optic, Vol. 38, No. 11, pp. 2225 ~ 2231
- (6) E. A. Patterson, W. Ji and Z.F. Wang, 1997, "On Image Analysis for Birefringence Measurement in Photoelasticity", Optics and Lasers in Engineering, Vol 28, pp. 17 ~ 36
- (7) Otani H., 1998, "2-D Birefringence measurement using Phase Shift", J. J. of Optics., Vol. 27, No. 12, pp. 698 ~ 703.
- (8) S. Yoneyama, Y. Morimoto, R. Matsui, 2003, "Photoelastic fringe pattern analysis by real-time phase-shifting method", Optics and Lasers in Engineering, Vol 39, pp. 1 ~ 13