

< 논문 >

백색광의 삼파장 분해에 의한 2차원 복굴절측정 장치의 개발에 관한 연구

김종선[†] · 윤경환^{*}
(2004년 11월 9일 접수, 2005년 4월 4일 심사완료)

A Study on the Birefringence Measurement in Injection Molded Parts Using R-G-B Separation of White Light

Jongsun Kim and Kyunghwan Yoon

Key Words : Injection Molding(사출성형), Birefringence(복굴절), Plastic Lens(플라스틱 렌즈), Retardation length(경로차)

Abstract

Recently, injection molded plastic optical products are widely used in many fields, 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 to measure the 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.

기호설명

- C : 광탄성계수 (Pa^{-1})
- d : 매질의 두께 (mm)
- D_{sf} : 경로차 (nm)
- I : 신호 강도 (V)
- n : 굴절률
- t : 매질 통과시간 (sec)
- λ : 광의 파장 (nm)

- ϕ_{sf} : 위상차 (rad)
- τ_i : 주응력 (Pa)

1. 서론

최근 들어 광 저장 장치와 카메라 폰등의 급속한 확산에 따라 광학용 렌즈를 플라스틱으로 대체하여 생산성을 높이고 생산비를 낮추는 작업이 활발히 진행되어 왔다. 하지만 사출성형 공정과 고분자 물질의 특성상 최종 제품에 남는 광학적 이방성, 즉, 잔류 복굴절의 분포는 피할 수 없다. 이러한 광학 렌즈 내부에 남는 복굴절의 분포는 광학 설계 단계에서는 예측하지 못하는 결과들을 초래하게 된다. 그래서 품질이 우수한 광학용 렌즈를 생산하기 위해서 렌즈 내부의 잔류응력(residual stress)과 복굴절(birefringence)의 양을 줄이려는 시도는 많은 연구가 활발히 진행 중이다.^(1,2)

[†] 책임저자, 회원, 단국대학교 대학원 기계공학과

^{*} 회원, 단국대학교 기계공학과

E-mail : khyoon@dankook.ac.kr

TEL : (02)709-2825 FAX : (02)796-9529

렌즈 전체에 분포하는 복굴절의 양을 줄이는 방법은 수지가 정해져 있는 경우 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 냉각수의 유로 조절 등의 금형 구조 개선을 통한 방법이고 다른 하나는 성형조건을 개선하여 광로 상의 복굴절의 양을 줄이는 것으로 사출 속도의 분포나 금형의 온도 조절 또는 압축과정을 포함시키는 등의 방법이다.

금형 구조의 개선은 잔류 응력이나 복굴절이 크게 남지 않도록 냉각수로의 설계를 CAE를 이용하여 확인할 수 있고 성형법의 개선은 단순 사출법 대신 압축 공정을 가미한 사출/압축 공정의 적용 등이다. CAE를 사용한 해석 시 렌즈의 측면에 온도차가 크게 발생하지 않게 냉각 수로를 조절하는 것이 필수적이다.

성형 조건의 조절도 CAE를 사용한 해석이 크게 도움이 될 수 있으며, 특히 주의해야 할 사항은 잔류 응력이나 복굴절이 금형 내에서의 비등온 냉각에 의한 효과와 유동에 의한 효과가 복합적으로 남게되므로 렌즈의 유효 단면에서의 유동 방향을 주의해서 해석해야 한다. 실험적으로는 short shot test가 상당히 유용한 자료로 사용될 수 있으며, 특히, 단면적이 증가하는 부분에서의 유동 형태의 조절에 주의를 요한다.

기존의 복굴절 측정방법으로는 목적과 용도에 따라 여러가지로 구성할 수 있다. 하지만 일반적인 방법은 기판에 입사된 광이 투과 또는 반사시 일어나는 편광 상태의 변화를 측정하는 것으로 표면과 박막물질의 연구 수단인 엘립소미터와 원리적으로는 같은 것이다. 이런 복굴절의 측정 방법으로는 보상판에 의한 간섭 측정법, 직선 편광 입사에 의한 회전 검광자법, 원편광 입사에 의한 회전 검광자법, 위상 변조법등이 있다.^(3,4)

2차원 복굴절 측정 장비로는 주로 위상이동법(phase shifting(steping) method)이 많이 사용되고 있는데 이 방법은 분석기(analyzer)나 1/4 파장판을 회전시키며 회전에 따른 이미지의 차이를 분석함으로써 복굴절의 분포를 측정하고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 하지만 기계적인 작동부와 이미지처리를 위한 시스템 사이의 타이밍을 맞추는 장치가 별도로 들어가기 때문에 고가의 장비가 필요하고 장시간의 측정시간이 필요한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 위의 사항들을 고려하여 고속으로 복굴절 분포를 측정하는 장치를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다.

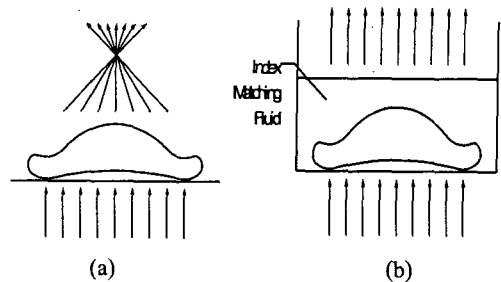


Fig. 1 A course of lay placed in the air (a) and immersed in the index matching fluid(b)

2. 복굴절 측정 시스템

2.1 복굴절

광학적 이방성을 가지는 물질은 빛이 통과할 때 빛의 진행 속도가 가장 빠르게 진행하는 고속축(fast axis), 가장 느리게 진행하는 축을 저속축(slow axis)라 부르고, 두 파형 사이의 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_s , t_f 는 각각 저속축과 고속축으로 광이 매질을 통과 시간, v_s , v_f 는 각각 저속축과 고속축으로 광이 매질을 통과 속도, c 는 진공 또는 공기중의 광속, n_s , n_f 는 각각 저속축(slow axis)과 고속축(fast axis)의 굴절률이며 그 차이를 통상 복굴절의 값이라 부른다.

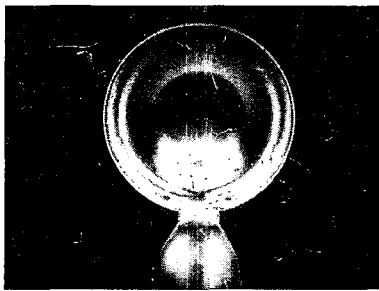
2.2 침액법

렌즈와 같은 복잡한 구조를 가지는 성형품을 평행광 상태에서 복굴절의 분포를 측정하는 경우 Fig. 1(a)와 같이 빛이 굴절되어 필요한 데이터를 관찰할 수 없다.

이러한 경우에 사용할 수 있는 방법이 바로 침액법으로 Fig. 1(b)와 같이 굴절률이 같은 액체 속에 렌즈와 같은 측정품을 넣어서 평행광 상태로 광로를 만든 후 Fig. 2(b)와 같이 복굴절 이미지를 촬영할 수 있다. 이와 같은 방법으로 측정물의 구조에 따른 영향을 배제하고 가공중에 형성된 복굴절의 구조만을 측정할 수 있다. 침액법에 사용되는 동 굴절률 용액(index matching fluid)



(a)



(b)

Fig. 2 A lens's birefringence pattern in the air (a) and immersed in the index matching fluid (b)

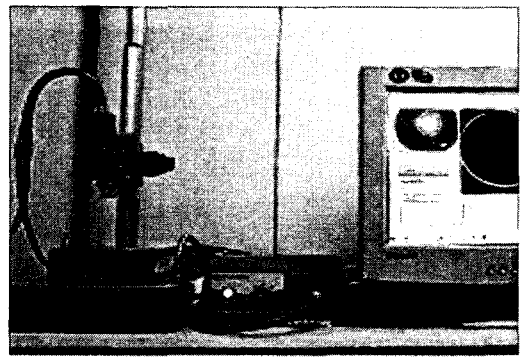
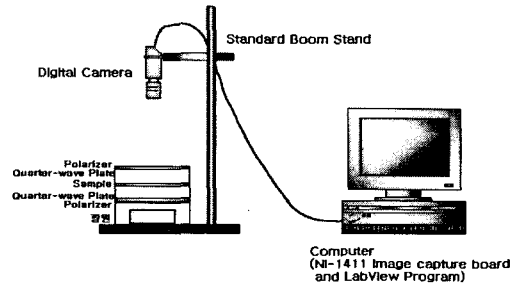


Fig. 4 2-D measurement system by ccd camera

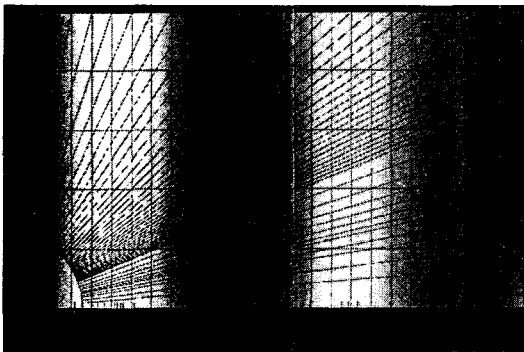


Fig. 3 Levy's interference chart⁽¹⁰⁾

은 굴절률 0.002 간격으로 구할 수 있다. Fig. 2(b)는 Zeonex로 만든 렌즈로 굴절률 1.530인 동굴절률 용액(index matching fluid)에서 찍은 사진이다.

이와 같이 광학용 렌즈를 통과하여 보이는 컬러를 간섭색(interference color)라 하며, Fig. 3에서

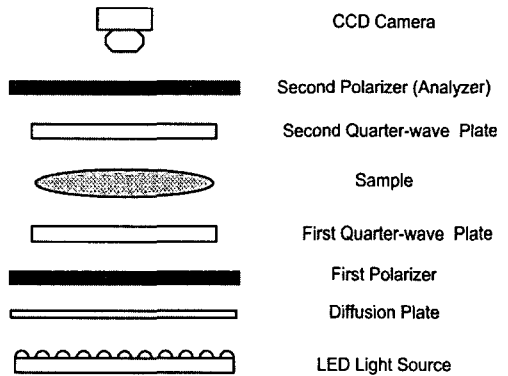


Fig. 5 Optical setup

하단의 숫자로 표시된 것과 같이 경로차가 증가할 때 이에 비례하여 간섭색(interference color)이 변화하게 된다.

2.3 시스템 구성도

측정에 사용된 시스템은 Fig. 4의 사진에 나타난 바와 같으며, 광학 시스템의 구성은 Fig. 5과

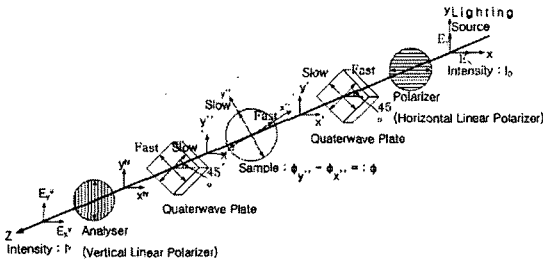


Fig. 6 Optical train used

같이 Edmund Industrial Optic사의 편광 필름 2장, 1/4 파장판 2장, 그리고 LED 평면 광원으로 구성된 광학계를 가지고 있으며, 또한 복굴절 이미지의 촬영을 위하여 썸텍의 비디오 현미경 시스템인 iCamscope-305를 사용하였다. 마지막으로 촬영한 복굴절 이미지 해석을 위해서 National Instruments사의 NI-1411 이미지 캡처보드와 LabView 프로그램을 사용하였다.

2.4 해석이론

본 논문에 사용한 광학 시스템의 구조는 Fig. 6과 같다. 기본적으로 원편광 시스템을 사용하고 있으며 CCD 카메라에 들어오는 신호를 해석하기 위해서 Jones (or Muller) 행렬을 이용했고 이는 Maxwell방정식을 만족하는 x-y 평면내에서 진동하며 z 축 방향으로 진행하는 횡파의 전기장의 크기만을 따로 떼어 내서 복소표 형태로 만든 것이다.

본 논문에 사용된 시스템의 Jones 행렬은 다음의 식 (2)와 같다. 또한, 식 (2)의 Jones 행렬을 이용하여 검출기의 신호를 계산하면 결국 식 (3)과 같이 $\sin \phi/2$ 의 제곱항으로 나타나게 된다.

$$\begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I^V = \frac{C_0}{2} |E_{y'}|^2 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{C_0}{2} E_{0x}^2 \quad (4)$$

여기서 θ 는 측정 샘플이 주축과 이루는 각, ϕ 는 측정 샘플에 의해 발생하는 위상차, E는 x,y

방향의 전기장의 크기이다.

또한 최종 신호강도, I^V 의 I_0 에 대한 비는 다음의 식 (5)로 요약될 수 있다.

$$\frac{I^V}{I_0} = \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (5)$$

원편광 시스템은 등경사(isoclinic)의 상태가 나타나지 않게 되어 주축에 관계없이 경로차 D_{sf} 만의 함수로 나타난다는 점이 크게 다르며 백색광을 쓰면 간섭색 무늬(interference color pattern)로 샘플의 2차원적인 경로차 D_{sf} 의 분포를 알 수 있게 된다. 식 (1)을 이용하여 ϕ 대신 D_{sf} 를 주어진 파장 λ 의 함수로 표시하면 식 (6)과 같은 최종식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{I'}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda} \right) \quad (6)$$

이 간단한 식은 우리가 편광판 사이에 샘플을 두고 백색광 하에서 실험을 수행할 경우 발생하는 간섭색 무늬(interference color pattern)를 이해할 수 있는 기본이 된다.

이와 같은 식 (6)을 이용하여 우선 백색광을 R(red, λ_R), G(green, λ_G), B(blue, λ_B)로 분리하여 샘플의 x-y 평면상의 한 점에 의해 발생하는 경로차 D_{sf} 를 고정하면 각각의 신호의 강도는 다음의 세 식 (7), (8), (9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I'_{R}}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_R} \right) \quad (7)$$

$$\frac{I'_{G}}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_G} \right) \quad (8)$$

$$\frac{I'_{B}}{I_0} = \sin^2 \left(\frac{\pi D_{sf}}{\lambda_B} \right) \quad (9)$$

이와 같이 같은 경로차를 가져도 빛의 파장에 따라 검출기에 들어오는 신호의 강도가 달라지며 본 논문에서는 이를 이용하여 각각의 R, G, B 성분의 비율에 따라 비교적 큰 경로차도 측정할 수 있는 시스템을 구성한 것이 특징이다.

Fig. 7은 식 (7), (8), (9)에 의한 파장에 따른 신

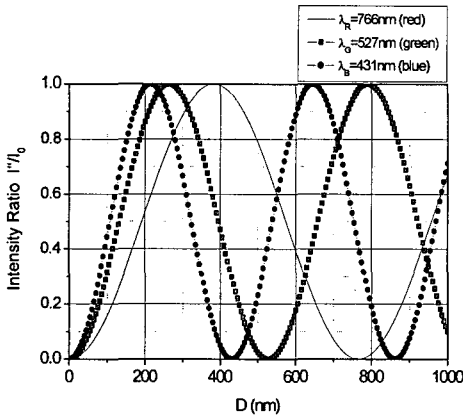


Fig. 7 Intensity distribution by wavelength

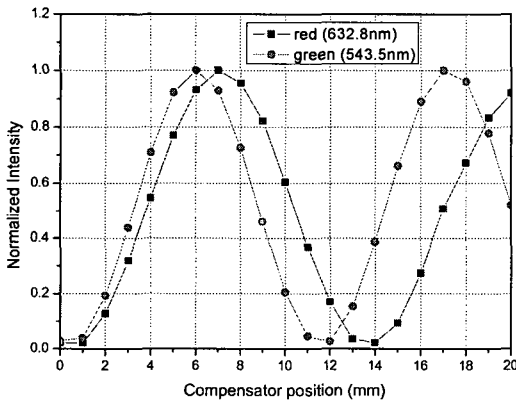


Fig. 8 Intensity distribution by difference laser wavelength

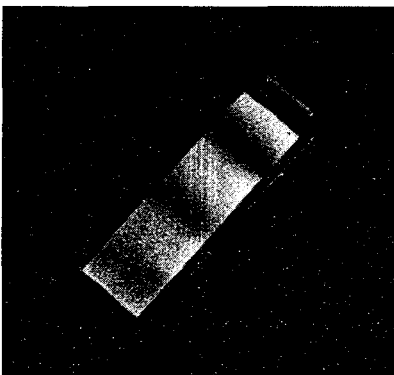


Fig. 9 Interference color pattern of quartz wedge

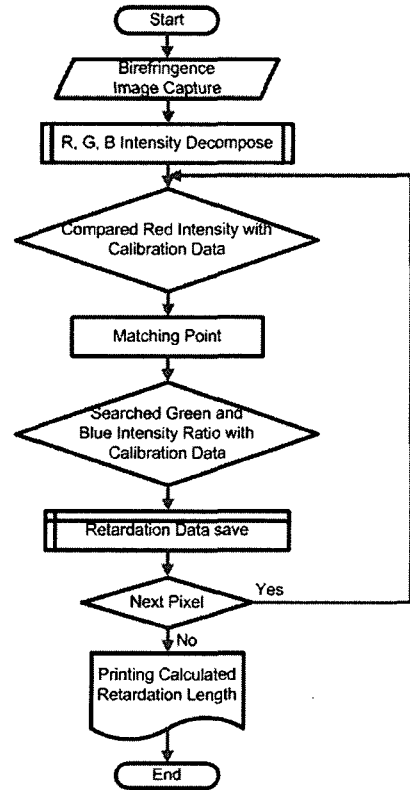


Fig. 10 Measurement flow-chart

호 강도의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 8는 JDS Uniphase사의 레이저 파장이 543.5nm의 1675MP, green He-Ne laser와 Uniphase사의 레이저 파장이 632.8nm인 1135, red He-Ne laser, Newport사의 편광판을 이용해서 복굴절 측정에 있어 사용되는 파장에 상관없이 동일한 경로차를 측정할 수 있다는 것을 Fig. 8에서 보이고 있다.

하지만 경로차가 신호의 강도로만 표현되며, sin 제곱의 함수로 표현되기 때문에 측정 파장의 절반, 즉 632.8nm의 레이저를 이용한 경우 316.4nm 이상의 경로차가 발생할 경우 파장의 주기에 따라 신호의 강도가 동일한 지점이 나타나 경로차를 구별할 수 없는 경우가 발생한다. 또한 신호의 강도가 sin 제곱의 함수이기 때문에 매우 작은 경로차가 발생하는 경우나 측정 파장의 절반의 경로차가 발생하는 경우, 마지막으로 측정 파장과 같은 경로차가 발생하는 경우 등에 신호의 정확성이 떨어지는 문제점을 가지고 있기 때문에 2색법이나 3색법을 이용하게 되었다.

Fig. 9은 썩기 형태의 수정의 두께가 증가함에 따라 복굴절이 증가하는 상태를 나타내고 있으며 이 신호를 본 장치의 보정(calibration)에 사용하였다.

Fig. 10과 같이 촬영된 이미지는 일차적으로 LabView를 이용하여 $R(\text{red}, \lambda_R)$ 의 성분을 분리해 낸 후 식 (7)과 Fig. 8의 썩기 형태 수정을 이용한 보정값을 이용하여 $R(\lambda_R)$ 의 신호 강도의 위치를 찾는다. 신호의 강도가 \sin 의 제곱에 항으로 변하기 때문에 주기에 따라서 $R(\lambda_R)$ 의 신호의 강도가 일치하는 경로차가 다수 발생한다. 이와 같이 다수의 신호의 강도가 일치하는 부분 중에 실제의 경로차를 찾기 위하여 식 (8), 식 (9)를 이용한다.

각각 분리된 $G(\text{green}, \lambda_G)$, $B(\text{blue}, \lambda_B)$ 의 신호 강도의 비가 가장 유사한 지점을 찾아 실제 경로차의 오더를 결정하게 된다. 이와같은 방법을 각각 pixel에 적용하여 전체 이미지를 처리하여 촬영한 광학용 렌즈의 경로차를 결정한다.

3. 결과

Fig. 11는 레이저 프린터에 사용되는 F-theta 렌즈의 복굴절을 촬영한 이미지이다. 이미지를 각각의 R, G, B의 삼색광의 성분으로 분해하면 Fig. 12과 같이 나타나며 각각의 이미지를 식 (7), (8), (9)를 이용하면 Fig. 13와 같이 F-theta 렌즈의 경로차를 정량화할 수 있었다. 측정 결과 렌즈의 측면 부분의 경우 최고 600 nm의 경로차를 가지는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 일반적인 복굴절 측정 시스템으로는 측정을 하기 힘든 결과로 사출 성형과정에서 남는 상당히 큰 경로차의 값을 측정 할 수 있다는 것을 보인 예이다.

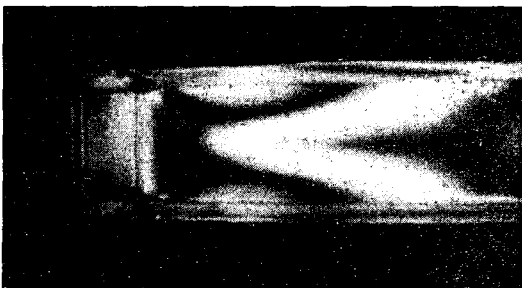


Fig. 11 A birefringence photo of F-theta lens

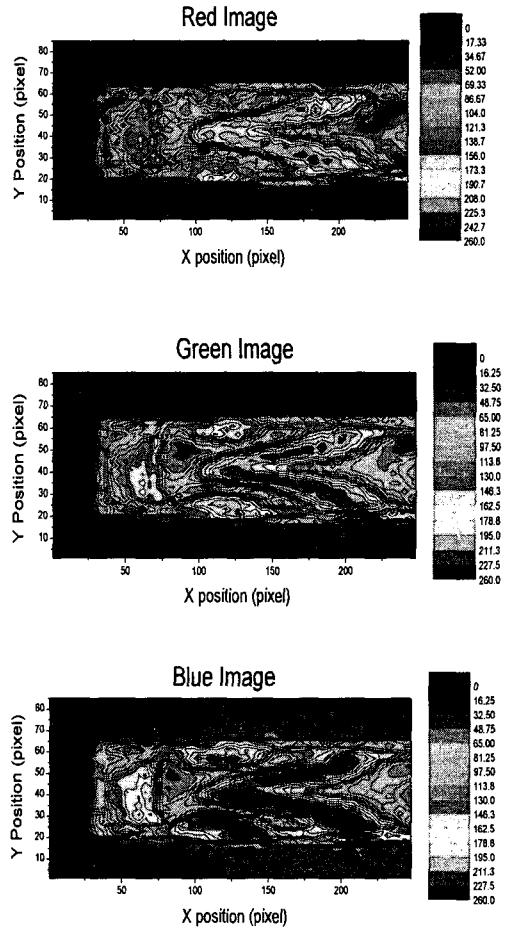


Fig. 12 RGB intensity image

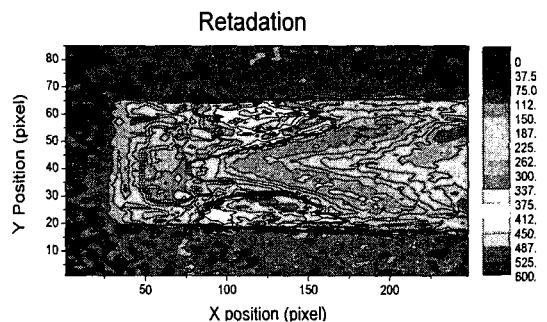


Fig. 13 The distribution of calculated retardation length

4. 결 론

본 논문에서는, 상당히 큰 잔류 경로차를 가지는 플라스틱 제품의 복굴절 값을 정량적으로 평가하기 위하여 백색광의 R, G, B 성분 분해를 이용하는 방법을 제시하였다. Fig. 13에서 보는 것과 같이 짧은 시간에 600 nm까지의 큰 경로차의 값을 2차원 형상에서 결정할 수 있는 결과를 얻어냈다. 하지만 아직 광원의 스펙트럼 분포와 광학 시스템의 S/N비, 신호의 분해능 한계 등의 문제를 가지고 있다. 또한 R, G, B의 성분 분해를 단순히 LabView를 이용한 이미지처리 방법을 이용하고 있으나 측정의 정확도를 높이기 위해 각각 452.56nm, 545.07nm, 632.8nm의 밴드패스 필터의 이용과 보정을 위하여 사용하고 있는 썬기 형태의 수정을 솔라일 바비넷 보상기 (Soleil Babinet compensator)로 교체하여 보정 데이터의 정확도도 높일 예정이며, 최종적으로는 정확한 경로차 값을 빠르게 측정하기 위해 광원으로 단색 다이오드 레이저를 조합한 2색 또는 3색법의 개발이 진행되고 있다.

후 기

이 연구는 2004년도 2010 생산기반 혁신기술 개발사업 지원으로 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K. H., 2002, "Numerical Analysis of Residual Stresses and Birefringence in Injection / Compression molded Center-Gated Disk. Part I and Part II," *KSME (A)*, Vol. 26, No. 11, pp. 2342~2354 & 2355~2363.
- (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*, Addison-Wesley, Berlin, Massachusetts.
- (4) Janeschitz-Kriegl, 1983, *Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence.*, Springer-Verlag, Berlin.
- (5) Zhu, Y. C., et al., 1999, "Two-dimensional measurement technique for birefringence vector distributions: data processing and experimental verification," *Applied Optic*, Vol. 38, No. 11, pp. 2216~2224.
- (6) Zhu, Y. C., et al., 1999, "Two-dimensional measurement technique for birefringence vector distributions: measurement principle," *Applied Optic*, Vol. 38, No. 11, pp. 2225~2231.
- (7) Patterson, E. A., Ji, W. and Wang, Z. F., 1997, "On Image Analysis for Birefringence Measurement in Photoelasticity," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 28, pp. 17~36.
- (8) Otani H., 1998, "2-D Birefringence measurement using Phase Shift," *J. J. of Optics.*, Vol. 27, No. 12, pp. 698~703.
- (9) Yoneyama, S., Morimoto, Y., Matsui, R., 2003, "Photoelastic fringe pattern analysis by real-time phase-shifting method," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 39, pp. 1~13.
- (10) Revell Phillips, Wm., 1971, *Mineral Optics, principles and techniques*, Freeman and Company, New York.