

회전에 의해 플라스틱 기판에 추가로 발생하는 복굴절의 측정에 관한 연구

김종선* · 윤경환**
(2003 년 9 월 5 일 접수)

A Study on the Rotation-Induced Birefringence in Plastic Disk Substrate

J. S. Kim and K. H. Yoon

Abstract

Extensive studies have been conducted for reducing the residual stresses and birefringence in injection-molded optical disk substrate. Flow-induced and thermally-induced stresses and birefringence have been found as two main sources during injection molding process. However, high speed rotation also induces extra stresses and birefringence in real operation of disk drives. In the present paper rotation-induced in-plane birefringence has been measured and presented for CD and DVD substrates at different radial position. About 10 - 15 nm of extra retardation in one pass has been measured up to 4,800 rpm. The distribution of extra rotation-induced birefringence will be valuable data for designing an optimal optical disk substrate. Finally, experimental results were compared with the extra stresses calculated from simple formulation.

Key Words : Birefringence, Residual Stresses, Rotation-Induced Birefringence, CD, DVD

1. 서 론

최근에 컴퓨터나 가전 산업의 발전에 기인하여 하드디스크, CD, DVD 등의 저장 용량이 크게 증가함과 동시에 그 회전속도(배속수) 또한 크게 증가하고 있는 추세이다. 특히, 광디스크의 크기에는 변화가 없이 더욱 많은 정보를 저장하고 빠른 속도로 읽어내기 위해서 그 저장밀도의 증가에 관한 노력과 함께 전기 적인 신호의 처리기술의 발전으로 디스크를 더욱 더 빠르게 회전시키는 기술 또한 비약적인 발전이 진행되고 있다. 초기의 CD-ROM 의 경우 200rpm ~ 500rpm 정도의 매우 낮은

회전수로 디스크를 회전시켜 데이터를 읽어냈다. 하지만, 요즘 사용되는 고배속의 CD-ROM 이나 DVD-ROM 의 경우 디스크의 회전수가 6,000 rpm 을 넘어서고 있다. 이러한 광학 디스크에서는 일반적으로 사출성형에 의해 폴리카보네이트로 만들어진 투명한 플라스틱 기판의 복굴절이 크면 기록 재생시에 레이저광이 영향을 받기 때문에 기판의 복굴절 크기는 광학 디스크의 품질에 직접적인 영향을 준다. 그러므로 성형시 잔류응력과 복굴절을 억제해야 하며 그 정밀한 평가, 관리가 필요하다. 일반적으로 반사광의 강도변화에 따라 정보를 읽어내는 CD, LD, DVD 의 경우에는 입사

* 단국대학교 대학원 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

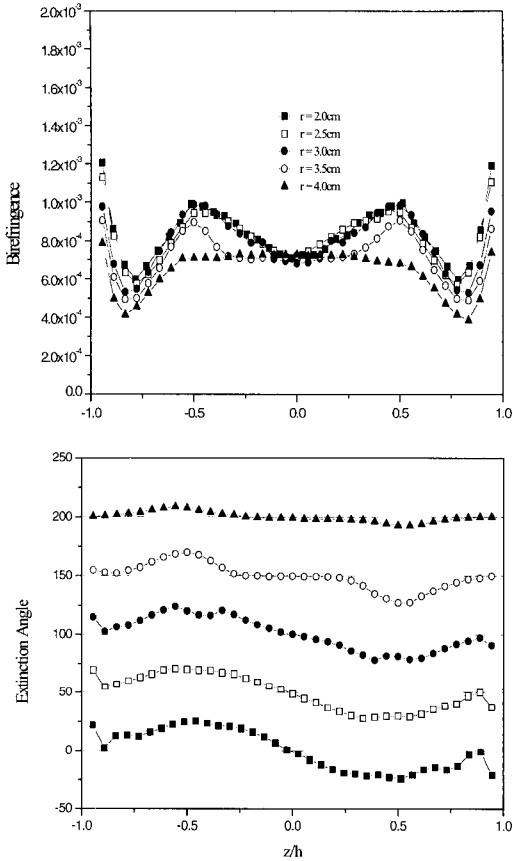


Fig. 1 Gapwise profiles of birefringence (a) and extinction angle (b) of optical disk made by injection molding(h is half gap thickness)

반사를 포함해서 경로차를 100nm 이하, 편광 성질을 이용한 광자기 디스크에서는 30nm~40nm 이하로 관리가 필요하다.⁽¹⁾

최근에는 광학 디스크등에서 복굴절이 커지면 수신호 영역 주위의 잡음신호가 커지며 SNR(Signal to Noise Ratio) 또는 CNR(Carrier to Noise Ratio) 값이 작아지는 경향이 있다. 또한 기판의 두께가 일반 디스크의 반인 0.6mm의 DVD 계열의 광디스크에서는 N. A.(Numerical Aperture) 값이 커지며 픽업 신호에 미치는 영향을 줄여야 한다는 사실이 알려지면서 기판의 품질을 평가하는 하나의 필수 조건으로 복굴절의 값이 쓰이게 됨에 따라 광학 제품에 형성되는 복굴절의 연구 자체도 중요한 의미를 지니게 되었다.⁽²⁻³⁾

현재까지 광학 디스크에 관한 연구는 주로 광학 디스크 기판을 만드는 과정인 사출성형 프로세

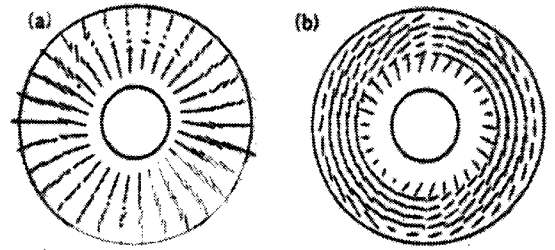


Fig. 2 Birefringence distribution is changed by rotation⁽⁶⁾; (a) 0 rpm, (b) 3,000 rpm

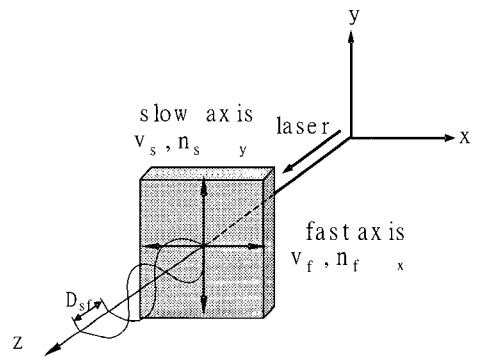


Fig. 3 A linear polarized light and path difference passing an anisotropic substance

스에 있어 피하기 어려운 현상인 기판에 발생하는 복굴절의 형성에 관한 연구가 주로 이루어졌다. 이러한 연구에 의해 성형중에 기판에 발생하는 유동에 의한 복굴절은 Fig. 1과 같이 디스크에 두께 방향으로의 분포를 가지는 것과 추후 차등 냉각에 의해 발생하는 복굴절의 발생 메카니즘이나 저감법에 관한 연구⁽⁴⁻⁵⁾는 상당한 진척을 보이고 있지만 성형후 광학 디스크가 고속으로 회전하며 기록 및 재생을 할 때 추가로 발생하는 복굴절의 연구⁽⁶⁻⁷⁾는 미미한 실정이다.(Fig. 2)

이러한 이유로 본 논문에서는 정적인 상태에서의 복굴절의 측정에서 벗어나 회전수를 변화시키며 회전시 야기되는 복굴절의 측정 결과를 보겠다. 또한 이 결과를 간단한 모사결과와 비교함으로써 광디스크를 제작하기에 앞서 그 설계자들에게 회전을 고려했을 때 필요한 초기 복굴절 분포의 최적 조건을 찾을 수 있는 유용한 데이터를 제공하는 것을 목표로 한다.

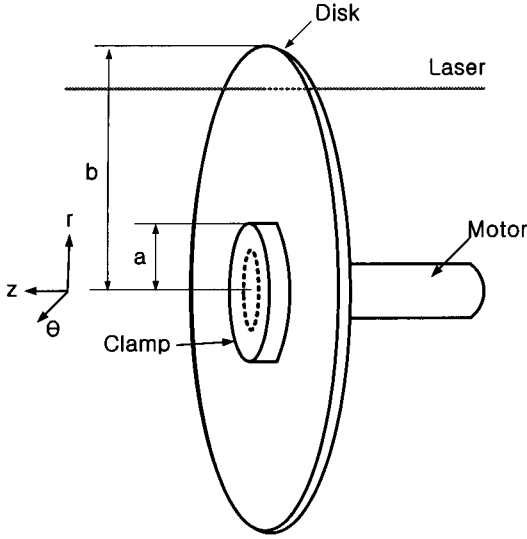


Fig. 4 Configuration and coordinate system of a rotating disk

2. 복굴절과 광탄성

2.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 횡파인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이때 가장 빠르게 진행되는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행되는 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 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 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.

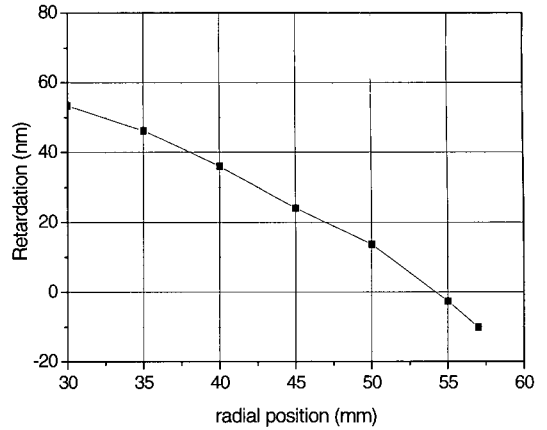


Fig. 5 The distribution of retardation in $r-\theta$ plane, $D_{r\theta}$, of a sample CD at rest

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.

일반적으로 디스크 기관 내에서는 굴절률이 반지름 방향, 원주방향, 기관에 수직한 방향에 따라 다른 값을 가지며 두께방향으로도 분포를 가지고 있다. 본 논문에서는 실제 현장에서 가장 중요한 데이터로 여기고 있는 정지 상태가 아닌 Fig. 4 와 같이 회전하는 기관에 수직으로 레이저광이 한번 통과할 때 반지름 방향 굴절률(n_r)에서 원주방향 굴절률(n_θ)을 뺀 값, 즉, in-plane 복굴절 값과 경로차에 대한 측정 결과들을 보이고자 한다. 실제 측정은 Fig. 4 에서 보는 것과 같이 디스크의 안쪽지름부터가 아니라 디스크를 고정시키는 클램프의 바깥지름에서부터 측정하였다.

Fig. 5 는 초기 상태에서 회전을 하고 있지 않을 때 CD 기관의 in-plane 경로차를 반지름 방향의 거리의 함수로 측정된 예를 보이고 있다.

2.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster 는 “treatise on the kaleidoscope”에서 정상적으로 투과성이 있는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띠게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성(photoelasticity)이라 하며 광학적으로 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의한 복굴절은

주응력차에 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 빛이 물질을 통과할 때의 굴절률이며 C 는 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 $3,600 \text{ Br}$ ($1 \text{ Br} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$)이고, 유리전이온도 이하에서는 $60 \sim 70 \text{ Br}$ 로 알려져 있다.⁽⁸⁾

3. 복굴절의 측정장치 및 결과

3.1 실험 장치

복굴절의 측정방법은 목적과 용도에 따라 여러 가지로 구성할 수 있다. 하지만 일반적인 방법은 기판에 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 수집장치의 분해능과 비례하며 위상차로 약 0.1nm 이다. Fig. 6 은 본 논문에서 복굴절을 측정하기 위하여 사용한 광학계를 보이고 있으며 Fig. 7 은 복굴절 측정을 위한 시스템의 구성도이다. 본 논문 실험에 사용한 광학계에는 Newport 사의 편광판 2 개와 위상 변조를 위해서 Hinds 사의 PEM-90 Photo-Elastic Modulator 를 사용

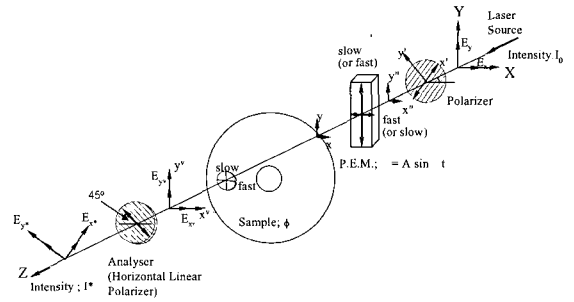


Fig. 6 Optical train used

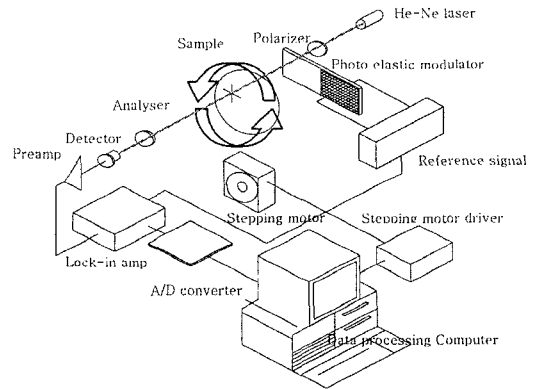


Fig. 7 A diagram of optical setup using modulation

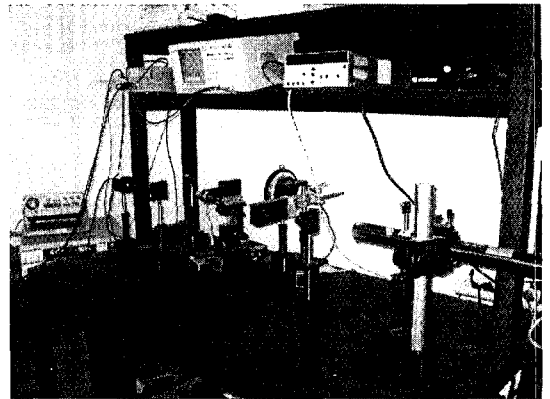


Fig. 8 A photo of optical setup

하였고, 변조된 신호를 측정하기 위해서 Stanford Research System 사의 SR830 Lock-in Amplifier 를 사용하였다.

또한, 디스크를 회전시키기 위한 모터와 제어장치를 LG 전자로부터 제공 받았으며, 레이저 강도를 측정하기 위해서 Hinds 사의 DET-90 검출기, Lock-in Amp.에서의 나오는 신호를 수집하기 위해서 National Instruments 사의 AT-MIO-16X 와 Lab-View 프로그램을 사용하였다.

Fig. 8 은 복굴절 측정에 사용한 시스템의 사진이다.

본 논문에 사용된 시스템에서 검출기에 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 떼어 내서 복소 꼴 형태로 만든 것이다.

본 논문에 사용된 시스템의 Jones Matrix 는 다음의 식 (4)와 같다. 또한, 식 (4)의 Jones Matrix 를 이용하여 검출기의 신호를 계산하면 식 (5)와 같이 각각 D.C.값, Ω 값, 2Ω 값 등의 항을 구할 수 있다. 여기서 Ω 는 PEM 의 변조 주기이다.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & 1 & 0 & e^{i\phi} & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{I^*}{I_0} &= \frac{1}{2}(1 - J_0(1)) && \text{D.C} \\ &+ \sin \phi J_1(A) \sin \Omega t && \Omega \text{ term} \\ &- \cos \phi J_2(A) \sin 2\Omega t && 2\Omega \text{ term} \\ &+ \dots \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 기판 회전시 복굴절의 측정 결과

Fig. 9 는 0.6mm 두께의 DVD 기판을 장착하고 회전수를 증가시킬 때 나타나는 실제 Lock-in Amp.에서 나오는 출력의 변화를 데이터 획득 장치에 의해 받는 과정을 시간의 함수로 보여주고 있다. 중심으로부터 떨어진 거리가 각각 30mm, 40mm, 50mm 에서의 Lock-in Amp.의 신호를 직류 성분으

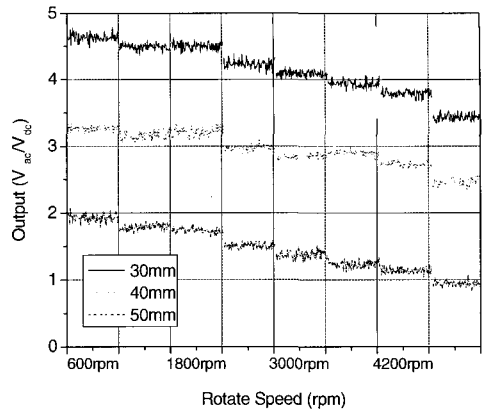


Fig. 9 Raw data of V_{ac}/V_{dc} for different radial positions (0.6mm sample)

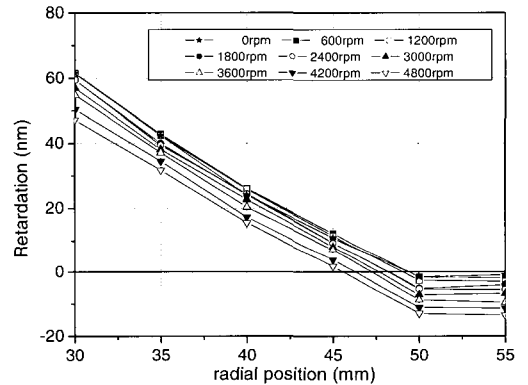


Fig. 10 Retardation distribution at different radial positions (1.2mm sample)

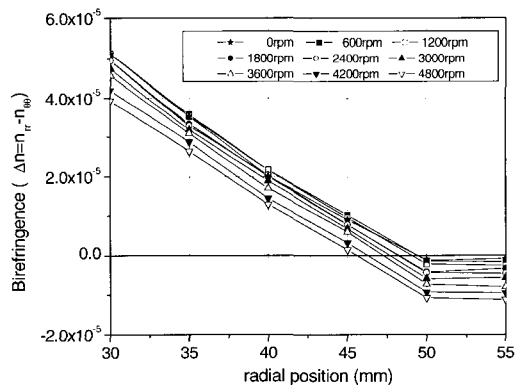


Fig. 11 Birefringence distribution at different radial positions (1.2mm sample)

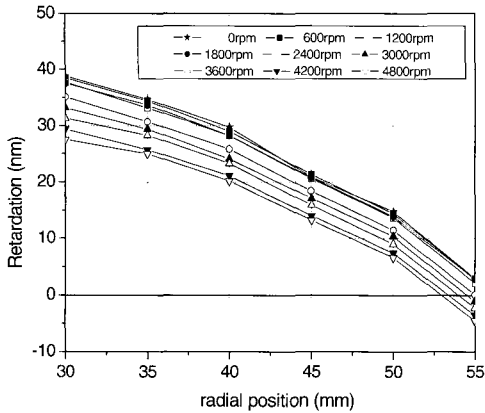


Fig. 12 Retardation distribution at different radial positions(0.6mm sample)

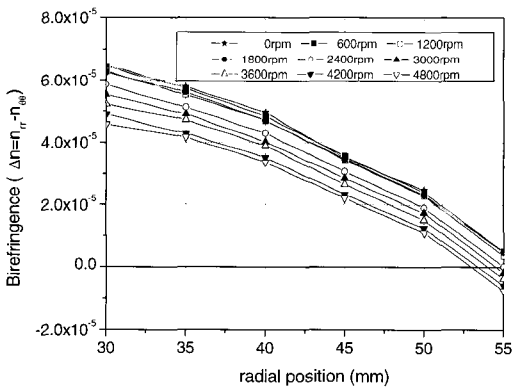


Fig. 13 Birefringence distribution at different radial positions(0.6mm sample)

로 나눈 것을 보여주며 회전수가 증가하면 세 위치 모두 감소하는 현상을 명확히 보여주고 있다.

Fig. 10 은 1.2mm 두께의 CD 기판에 회전수를 0 ~ 4,800rpm 까지 증가시킬 때 중심으로부터 떨어진 거리가 30mm~55mm 에서 측정되어진 경로차의 분포를 보여준다. 0 ~ 4,800rpm 사이에서 약 15nm의 경로차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 11에서는 이 경로차를 복굴절의 값으로 환산해서 표시하고 있다. 0 ~ 4,800rpm 에서 약 1.2×10^{-5} 의 복굴절이 감소하는 현상을 보였다.

같은 실험을 0.6mm 두께의 DVD 기판을 장착하고 실시한 결과를 Fig. 12 에 보여준다. 0 ~ 4,800 rpm 사

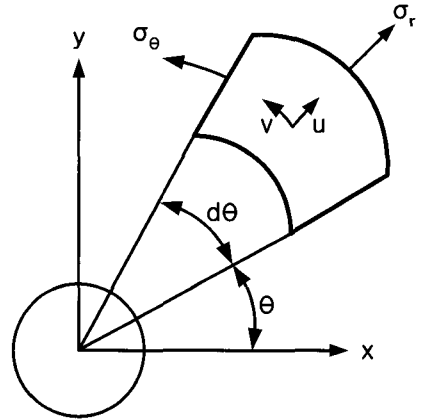


Fig. 14 Large thin plate with a small circular hole

이에서 1.2mm 두께의 CD 기판 보다 작은 약 10nm의 경로차가 발생하였고, 이 경로차를 복굴절로 환산할 경우 Fig. 13 과 같이 약 1.8×10^{-5} 의 차이를 보이고 있다.

4. 회전하는 얇은 회전체에 발생하는 추가 응력의 모사

회전에 의해서 발생하는 경로차 또는 복굴절의 실험결과를 간단한 모사 결과와 비교하기 위해서는 회전하는 디스크를 Fig. 14 와 같이 중심부에 원형 홀을 가지는 얇은 판으로 가정하였다.⁽⁹⁻¹⁰⁾

따라서 z 축 방향의 하중과 응력은 없으며, r 과 θ 방향의 응력은 z 축에 대칭이다. 또한 전단응력 $\tau_{r\theta}$ 는 무시하며 이와 같은 조건을 이용하여 원통형 좌표계의 힘의 평형 방정식을 쓰면 다음의 식 (6)과 같다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r = 0 \quad (6)$$

여기서 σ_r 과 σ_θ 는 r 과 θ 방향의 수직응력이고 F_r 은 r 방향의 체적력이다.

회전에 의해서 야기되는 복굴절을 모사하기 위해서 위의 식 (6)에서 원심력에 의한 체적력 $\rho\omega^2 r$ 을 대입하고, 경계 조건은 식 (7), 식 (8)과 같다. 이 식들을 이용하여 정리를 하면 다음 식 (9), 식 (10)과 같이 σ_r 과 σ_θ 가 표현된다.

$$(\sigma_r)_{r=a} = \sigma_{radd} \cdot \frac{1-\nu}{E} \quad (7)$$

$$(\sigma_r)_{r=b} = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \times \left[\frac{-(3+\nu)(1-\nu^2)\rho\omega^2 r^2}{8E} + (1+\nu)c_1 - (1-\nu)\frac{c_2}{r^2} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \times \left[\frac{-(3+\nu)(1-\nu^2)\rho\omega^2 r^2}{8E} + (1+\nu)c_1 + (1-\nu)\frac{c_2}{r^2} \right] \quad (10)$$

여기서 ρ 는 디스크의 밀도, ω 는 디스크의 각속도이다.

식 (9), (10)에 Fig. 4 에 보인 바와 같이 디스크 안쪽부분의 클램프에 의해서 추가되는 r 방향의 응력을 σ_{radd} 라 하고, 디스크 바깥쪽($r = b$)에서는 자유단 상태라는 경계조건을 적용하여 보면 식 (11), (12)의 C_1, C_2 는 다음과 같이 정리된다.

$$C_1 = \frac{(1-\nu)a^2\sigma_{radd}}{(a^2-b^2)E} + \rho\omega^2 \frac{(1-\nu)(3+\nu)}{8E} (a^2+b^2) \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{(1+\nu)a^2b^2\sigma_{radd}}{(a^2-b^2)E} + \rho\omega^2 \frac{(1+\nu)(3+\nu)}{8E} a^2b^2 \quad (12)$$

여기서 a 는 디스크의 내경에 위치한 클램프의 외경, b 는 디스크의 외경, ν 는 포아송의 비이다.

Fig. 15 는 $r=18\text{mm}$ 에서를 0 으로 했을 때와 일정한 값이 작용하고 있을 때의 r 방향, θ 방향, r 방향 응력에서 θ 방향의 응력을 뺀 값을 $\rho\omega^2 b^2$ 으로 나누어 normalize 시킨 값들의 분포를 나타낸 것이다. σ_{radd} 를 0 으로 했을 때와 일정한 값이 작용하고 있을 때 r 방향의 응력과 θ 방향의 응력 모두 중심에서 외부로 나갈수록 작아지는 경

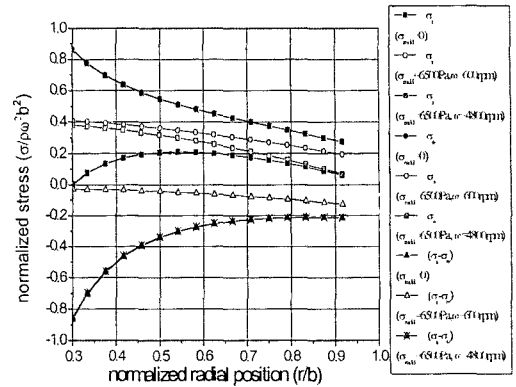


Fig. 15 The computed normalized stresses for two cases ($\sigma_{radd} = 0$ and $\sigma_{radd} = \text{constant at } r=a$)

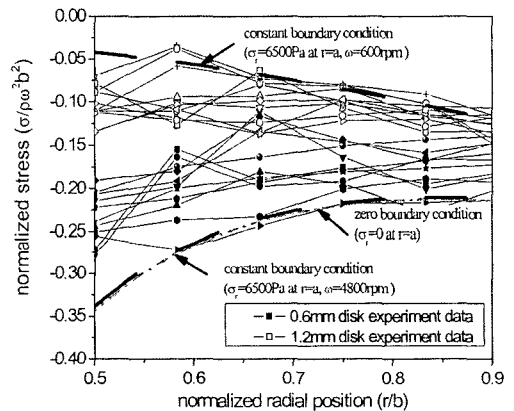


Fig. 16 Comparison between experimentally measured and computed normalized stresses

향을 가지고 있다. 하지만 σ_{radd} 에 일정한 힘이 가해지면 회전 속도가 느릴 때는 σ_{radd} 에 의해 r 방향의 응력은 커지고 θ 방향의 응력은 작아진다. 그러나 회전 속도가 빨라지면 σ_{radd} 에 의해서 추가로 생기는 r 방향의 응력보다 체적력에 의해서 생기는 응력이 점점 커져 σ_{radd} 의 영향이 줄어들어 σ_{radd} 를 0 으로 하는 결과와 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 16 은 0.6mm 디스크와 1.2mm 디스크 기판의 회전에 의해 발생하는 복굴절 측정값을 식 (3) 을 이용하여 응력으로 환산한 후 normalize 시킨 결과와 Fig. 15 에 보인 계산 결과를 비교한 것이다. Fig. 16 에서 보는 바와 같이 중심부를 잡아주는

응력, σ_{radd} 를 0 으로 가정하는 자유단의 경계조건을 사용하는 것보다는 일정한 크기의 값이 작용한다는 조건이 적용되어야 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 자유단을 가정하는 경우에는 모든 실험 결과를 normalize 시킨 경우 응력이 하나의 곡선 위에 떨어지지만, 실험 결과는 자유단을 가정한 경우와 order 는 일치하지만 어느 정도의 분포를 보이고 있다. 이와 같은 분포의 이유는 디스크 자체의 회전중에 생기는 진동과 중심부에서 잡아주는 응력의 영향으로 생각된다. 본 실험에서는 중심을 잡아주는 응력을 $\sigma_{radd} = 6,500$ Pa 로 넣은 경우 거의 모든 실험 결과를 커버할 수 있었다.

5. 결론

광디스크 기판을 회전시킬 때 발생하는 복굴절 또는 경로차의 분포를 위상변조법을 사용하여 측정된 결과를 보였다. 1.2mm 두께의 CD 기판의 경우 회전수 600~4,800rpm 사이에서 거의 일정한 크기인 약 15nm 의 경로차가 추가로 발생하는 것을 볼 수 있으며 0.6mm 두께의 DVD 기판의 경우도 약 10nm 의 경로차가 발생하였다.

이 실험 결과는 광디스크의 최적 설계를 원하는 연구자들에게 유용한 정보가 될 것이다. 한편, 위의 실험 결과를 얇은 판의 회전에 의한 간단한 모사결과와 비교한 결과 광디스크의 내경을 잡아주는 효과가 크게 영향을 줄 수 있었다. 디스크를 잡아주는 응력의 직접적인 측정과 광학계를 수직으로 하고 디스크를 수평으로 회전시키는 장치의 보완 등을 차후에 계획하고 있다.

후 기

이 연구는 2003 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Philips Technical Review, 1985, "A review of technology for the Laser-Vision videodiscs and the Compacy Disc", Royal Philips Electronics.
- (2) 윤경환, 1996, "광디스크 기판의 성형에 관하여", 고분자 과학과 기술, Vol. 7, No. 3, pp. 284~290.
- (3) Mansuripur, M., "The Physical Principles of Magneto-optical Recording", Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Otani H., 1998, "2-D Birefringence measurement using Phase Shift", J. J. of Optics., Vol. 27, No. 12, pp. 698~703.
- (7) DeGroot. P. J., Dergevorkian A and Erickson T., 1998, "Interferometric analysis of stress induced birefringence in a rotating disk", Proc. SPIE, pp. 227~233.
- (8) Janeschitz-Kriegl, 1983, Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence., Springer-Verlag, Berlin.
- (9) Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 1995, Advanced Strength and Applied Elasticity, Prentice Hall PTR, New Jersey, pp. 327~350.
- (10) Baddour, N. and Zu, Z. W., 2001, "A revisit of spinning disk models. Part I: derivation of equations of motion", Appl. Mathematical Modelling, Vol 25, pp. 541~559.