

회전에 의한 플라스틱 기판에 야기되는 복굴절의 측정에 관한 연구

김종선*, 윤경환**

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 has been measured up to 4,800 rpm.

Key Words : Birefringence, Residual Stresses, Rotation-induced Birefringence, Compact Disk, DVD, Anisotropy, Optical Disk

1. 서 론

최근에 컴퓨터나 가전 산업의 발전에 기인하여 하드 디스크, 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 전기적인 신호의 처리기술의 발전으로 디스크를 더욱 더 빠르게 회전시키는 기술 또한 비약적인 발전이 진행되고 있다. 초기의 CD-ROM의 경우 200 rpm~500 rpm 정도의 매우 낮은 회전수로 디스크를 회전시켜 데이터를 읽어냈다. 하지만 요즘 사용되는 고배속의 CD-ROM이나 DVD-ROM의

경우 디스크의 회전수가 6,000 rpm을 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 억제해야하며 그 정밀한 평가, 관리가 필요하다. 일반적으로 반사광의 강도변화에 따라 정보를 읽어내는 CD, LD, DVD의 경우에는 입사와 반사를 포함해서 경로차를 100 nm 이하, 편광 성질을 이용한 광자기 디스크에서는 30 nm -40 nm 이하로 관리가 필요하다.

* 단국대학교 대학원 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

최근에는 광학 디스크등에서 복굴절의 양 자체가 기판의 S/N비 또는 CNR에 미치는 영향이 상당히 크다는 사실과 두께가 일반 디스크의 반인 0.6mm의 DVD계열의 광 디스크에서는 Numerical Aperture의 값이 커지며 픽업 신호에 미치는 영향을 줄여야 한다는 사실이 알려지면서 기판의 품질을 평가하는 하나의 필수조건으로 복굴절의 분포가 쓰이게 됨에 따라 광학 제품에 형성되는 복굴절의 연구 자체도 중요한 의미를 지니게 되었다.

현재까지 광학 디스크에 관한 연구는 주로 광학 디스크 기판을 만드는 과정인 사출성형 프로세스에 있어 피하기 어려운 현상인 기판에 발생하는 복굴절에 관한 연구가 주로 이루어졌다. 이러한 연구에 의해 성형중에 기판에 발생하는 유동에 의한 복굴절과 추후 차등 냉각에 의해 발생하는 복굴절의 발생 메커니즘이나 저감법에 관한 연구⁽¹⁾는 상당한 진척을 보이고 있지만 성형후 광학 디스크가 고속으로 회전하며 기록 및 재생을 할 때 추가로 발생하는 복굴절의 연구^(2,3)는 미미한 실정이다.(Fig. 1) 이러한 이유로 본 논문에서는 지금까지 정적인 상태에서의 복굴절의 측정에서 벗어나 회전시 야기되는 복굴절의 측정 결과를 보이기로 한다.

2. 복굴절과 광탄성

2.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 횡파인 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 성분을 분리되면 두 파형 사이에는 위상차가 생긴다. 이러한 속도차에 의해 발생하는 두께 d를 통과하는 사이의 거리 경로차, D_s 는 다음과 같은 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$D_s = (t_s - t_f)c = (n_s - n_f)d \quad (1)$$

여기에서 t는 매질 통과 시간, v는 매질 통과 속도, c는

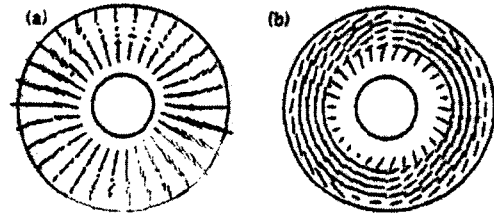


Fig. 1 Birefringence distribution is changed by rotation speed⁽²⁾; (a) 0 rpm, (b) 3,000 rpm

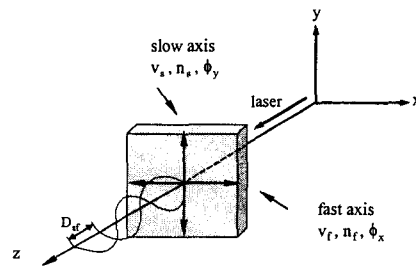


Fig. 2 A linear polarized light passed an anisotropic substance along z axis

진공 또는 공기중의 광속, n_s , n_f 은 각각 slow axis와 fast axis의 굴절률이며 그 차이를 복굴절의 값이라 부른다.

디스크 기판 내에서는 다음과 같이 굴절률이 반지름 방향, 원주방향, 기판에 수직인 방향에 따라 다른 값을 가지며 두께방향으로 분포를 하고 있다. 이 논문에서는 회전하는 기판에 수직으로 레이저 광이 한번 통과할 때 반지름 방향 굴절률에서 원주방향 굴절률을 뺀 값인 $\Delta n = n_r - n_\theta$ 에 대한 측정 결과들을 보이고자 한다.

2.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster는 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 주응력차에 비례한다.

선형 광탄성(Linear Photoelasticity) 이론에서는 등방성 물질이 응력을 받으면 편광된 광학 주축 방향의 굴절률

의 차이가 주응력의 차이에 비례하며 다음과 같다.

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

여기에서 $i, j, k = I, II, III$ 축이며, $\tau_I, \tau_{II}, \tau_{III}$ 는 세 주축 방향의 주응력이다. 또한 n_i 는 주축 i 방향으로 편광된 빛이 물질을 통과하는 굴절률이며 C 는 광탄성계수(stress-optical coefficient)이다.

3. 복굴절의 측정장치 및 결과

3.1 실험 장치

복굴절의 측정방법은 목적과 용도에 따라 여러가지로 구성할 수 있으며, 표면과 박막물성의 연구 수단인 엘립소미터와 원리적으로는 같은 것이다.

본 실험에서 사용한 위상변조법은 통과광의 변조된 주파수 성분을 기본으로 계산하기 때문에 부품의 정밀도에 따른 오차 등의 영향을 받지 않고 작은 양의 위상차를 아주 정밀하게 측정할 수 있으며 Fig. 3에는 위상 변조법을 이용하여 복굴절을 측정하기 위하여 사용한 광학계를 보이고 있다.

3.2 기판 회전시 복굴절의 측정 결과

다음의 Fig. 4는 0.6 mm 두께의 DVD 기판을 장착하

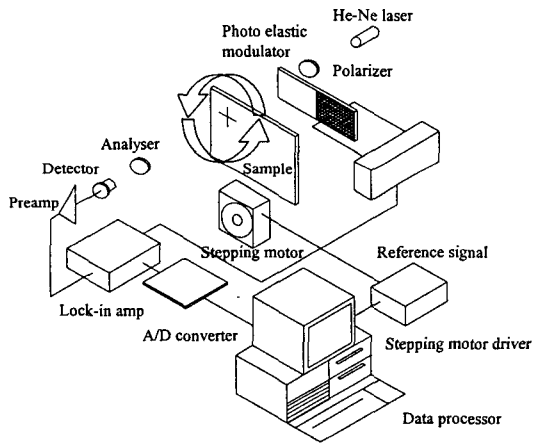


Fig. 3 A diagram of optical setup using modulation

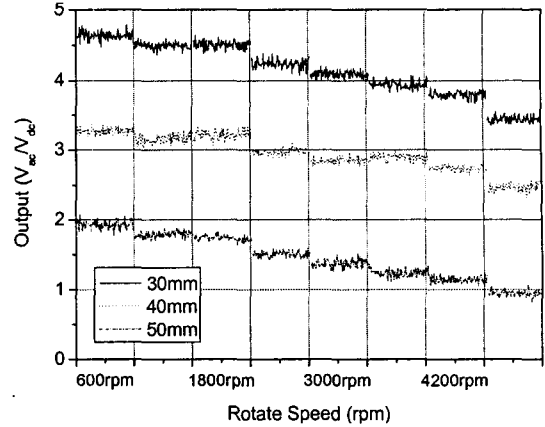


Fig. 4 Raw data of Vac/Vdc for different radial positions. (0.6 mm sample)

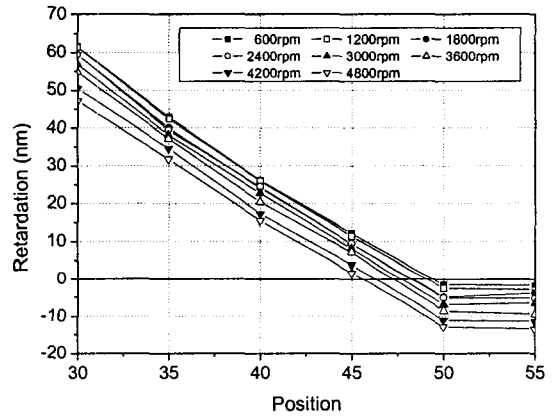


Fig. 5 Retardation distribution at different test positions. (1.2 mm sample)

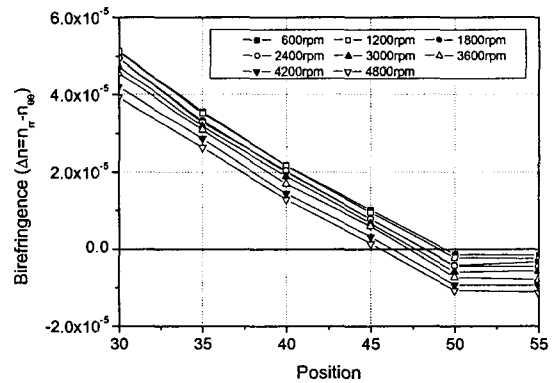


Fig. 6 Birefringence distribution at different test positions. (1.2 mm sample)

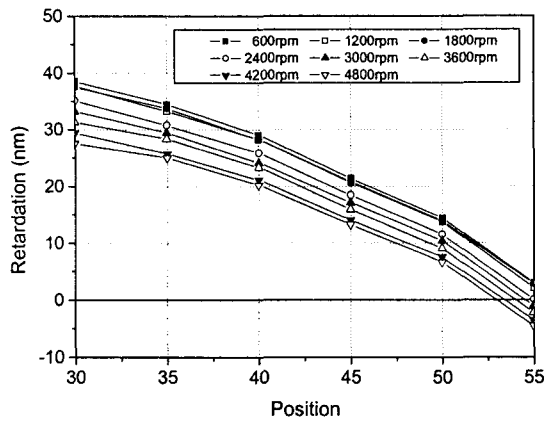


Fig. 7 Retardation distribution at different test positions. (0.6 mm sample)

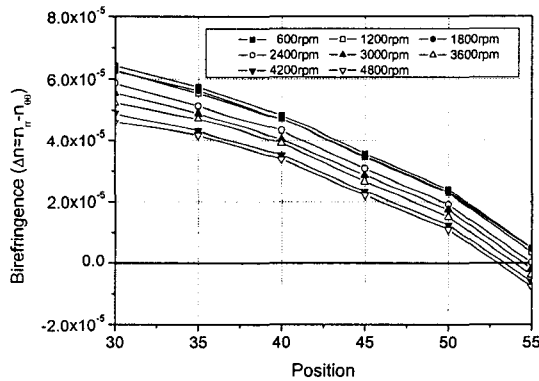


Fig. 8 Birefringence distribution at different test positions. (0.6 mm sample)

고 회전수를 증가시킬 때 나타나는 실제 output의 변화를 데이터 획득 장치에 의해 받는 과정을 시간의 함수로 보여주고 있다.

중심으로부터 떨어진 거리가 각각 30 mm, 40 mm, 50 mm에서의 Lock-in Amp.의 신호를 직류 성분으로 나눈 것을 보여주며 회전수가 증가하면 세 위치 모두 감소하는 현상을 명확히 보여주고 있다.

Fig. 5는 1.2 mm 두께의 CD 기판에 회전수를 600 - 4,800 rpm까지 증가시킬 때 중심으로부터 떨어진 거리가 30 mm - 55 mm에서 측정되어진 경로차의 분포를 보여준다. 600 - 4,800 rpm 사이에서 약 15 nm의 경로차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 6에서는 이 경로차를 복굴절의 값으로 환산해서 표시하고 있다. 600 -

4,800 rpm에서 약 1.2×10^{-5} 의 복굴절이 감소하는 현상을 보였다.

같은 실험을 0.6 mm 두께의 DVD 기판을 장착하고 실시한 결과를 Fig. 7에 보여준다. 600 - 4,800 rpm 사이에서 약 10nm의 경로차가 발생하고 복굴절로 환산할 경우 Fig. 8과 같이 약 1.8×10^{-5} 의 차이를 보이고 있다.

4. 결론

광디스크 기판을 회전시킬 때 발생하는 복굴절 또는 경로차의 분포를 위상변조법을 사용하여 측정된 결과를 보였다. 1.2 mm 두께의 CD 기판의 경우 회전수 600 - 4,800 rpm 사이에서 거의 일정한 크기인 약 15 nm의 경로차가 추가로 발생하는 것을 볼 수 있으며 0.6 mm 두께의 DVD 기판의 경우도 약 10 nm의 경로차가 발생하였다. 지면 관계상 이론적인 응력의 분포^(4, 5, 6)와 추가적인 실험 결과들은 학회 발표시 포함하기로 한다.

참고 문헌

- (1) Lee, Y. B. et al., 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) Otani H. et al., 1998, "2-D Birefringence Measurement using Phase Shift", J. J. of Optics., Vol. 27, No. 12, pp. 698~703.
- (3) DeGroot. P. J., Dergevorkian A and Erickson T., 1998, "Interferometric analysis of stress-induced birefringence in a rotating disk", Proc. SPIE, pp. 227~233.
- (4) Bassani, J. L., 1977, "Yield characterization of metals with transversely isotropic plastic properties", Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 651~156.
- (5) Gotoh, M., 1977, "A theory of plasticity anisotropy based on a yield function of fourth order(plane stress state)-I", Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, p. 505.
- (6) Hill, R., 1979, "Theoretical plasticity of textured aggregates", Math. Proc. Camb. Phil. Soc., Vol. 85, p. 179.