

액정 소자의 위치 민감도 및 수차 특성에 대한 연구 The Analysis of Position Sensitivity and Aberration characteristics of Liquid Crystal Elements

정수진[†], 허태연*, 유호식*, 유장훈**, 박수한*

Soo-Jin Jeong, Tae-Youn Heor, Ho-Sik Yoo, Jang-Hoon Yoo, and Soo Han Park

ABSTRACT

The Blu-ray disc as a next generation high density optical medium uses an objective lens of high numerical aperture(NA 0.85) and blue laser in order to increase the recording density. The double layer is also useful for doubling the density. The spherical aberration of Blu-ray disc is very sensitive to the thickness of the disk because of high numerical aperture. This paper suggests a method to compensate the spherical aberration caused by the change of disk thickness, by using the Liquid Crystal lens instead of the Liquid Crystal panel. It was possible to develop both the LC panel generating the optical phase difference and LC lens changing the optical power. In this paper, we analyzed the aberration performance and a position sensitivity of the two type LC elements when the samples deviate from the optical axis of the objective lens. The results of applying this analysis show that the LC lenses rather than the LC panels have a significant assembling tolerance. The theoretical characteristics of the two elements are calculated and compared with the measurement data.

Key Words : Blu-Ray Disc, Liquid Crystal Lens, Spherical Aberration

기호설명

GB : Giga-byte

BD : Blu-Ray Disc

DVD : Digital Versatile Disc

LCE : Liquid Crystal element

1. 서론

최근에 주목을 받고 있는 차세대 고밀도 광 기록 매체인 Blu-ray 는 고 개구수(NA 0.85)의 대물렌즈와 청색의 레이저를 사용하고 기록밀도를 높인 저장 장치를 이야기한다. [1-3] Blu-ray Disc 는 Blu-ray Disc Asso-

ciation (BDA)이라고 불리는 가전과 PC 의 선진업체 들에 의하여 개발된 차세대 광디스크 표준이다. 청색레이저를 사용하기 때문에 기존의 DVD 사용과장보다 짧고 기존의 기술이 제공하는 공간에 더욱 많은 정보를 저장할 수 있다. 기존의 적색 레이저 다이오드와 개구수 0.6 의 대물렌즈를 사용하는 Digital Versatile Disc(DVD)는 디스크 1매당 4.7GB 의 정보 저장이 가능한 반면 Blu-ray Disc(BD)는 1982 년 Compact Disc(CD), 1996 년 DVD 를 잇는 제 3 세대 규격이라고 할 수 있으며, HDTV 영상을 2시간 이상 녹화할 수 있다. BD 의 기록용량을 단층 매체에서 25GB, 이중 매체에서 50GB 을 기록한다. 최초의 BD 기록기기는 2003 년 3 월에 Sony 가 발표하였다. 2003 년 9 월에는 JVC, 삼성이 발표하였고 2004 년 12 월에 시장에 출시하였다. 현재, MGM 스튜디오, 20 세기 폭스사, 월트디즈니, Vivendi Universal Games, Electronic Arts 등이 BD 를 지지하고 있다. Blu-ray 는 고 개구수이기 때문에 디스크 두께변화에 대하여 구면수차의 변화가 매우

[†] 책임저자 : 삼성전기 중앙연구소

E-mail : janghoon@samsung.com

* 삼성전자 DVS 사업부 개발 1 그룹

**삼성전자 DM 연구소 Media Solution Team

(논문접수일 : 2005 년 4 월 1 일)

민감하고, 기록 밀도를 배가시키기 위하여 복층의 디스크를 사용한다. 최근에는 차세대 광기록 기기에서 용량을 증가시키기 위해서 복층 이상의 다층 기록막을 적용하려는 노력이 있다. 이러한 디스크 두께의 변화에 따라 발생하는 구면수차를 보정하기 위하여 액정렌즈(Liquid Crystal Lens) 또는 액정 보상소자(Liquid Crystal Panel)를 사용할 수 있다. 이때, 위상차를 발생시켜 수차를 보정하는 Doughnut-type 의 LC-Panel 과 Power 를 변화시켜 보정하는 Parabolic-type 의 LC Lens 가 적용 가능하다. 본 연구에서는 두 가지 형태의 LC 소자를 가지고 대물렌즈의 광축에서 벗어날 때 발생하는 수차 특성 및 위치 민감도를 분석하였다. 이론적인 해석값과 측정값을 비교하였고 광축과의 조립공차 측면에서 LC lens 가 LC-panel 보다 2 배 이상 유리한 것으로 판명되었다.

2. 액정 소자의 소개

Blu-ray Disc 는 0.1mm, 0.075mm 2 층 Disc 에 정보를 저장하여 대용량을 확보한다. 광디스크의 두께오차에 의해 발생하는 3 차 및 5 차 구면수차(W_{40} , W_{60})는 식(1)과 같은 관계가 있다.

$$W_{40} = \frac{n^2 - 1}{8n^3} (NA)^4 \Delta d \quad (1)$$

$$W_{60} = -\frac{(n^2 - 1)(n^2 - 9)}{144n^3} (NA)^6 \Delta d$$

여기서, Δd 는 두께오차, n 은 기관의 굴절율, NA 는 대물렌즈의 개구수를 나타낸다. 개구수가 0.6 인 DVD 에 비해 개구수가 0.85 인 BD 에서의 구면수차가 4 배 이상 민감하게 된다. 따라서, BD 의 경우 기관두께 오차의 허용량이 1/4 이 되어야 하고 Dual Layer 의 경우 층간 간섭을 배제하기 위한 Spacer Layer 의 두께를 고려하면 구면수차의 보정이 필수적이다. 반면에 개구수가 커진데 반해 기관두께를 0.6mm 에서 0.1mm 로 줄여 코마수차의 발생량은 DVD 와 거의 동일한 수준이다.

Disc 두께의 변화로 인해 발생하는 구면수차를 상쇄시키는 방법으로 렌즈 구동 방식, Liquid Crystal Element(이하 LCE)를 이용하는

방식 등이 가능하다. 렌즈 구동 방식은 광학적인 배율을 가변시켜서 구면수차를 보정하는 방식으로 별도의 구동 모터를 사용해야 하고 공간적으로 많은 부분을 차지하게 된다. 한편 LCE 는 투명 전극에 전압을 인가하고 광학적인 초점거리를 변화시키거나, 광학적인 위상을 변화시켜서 구면수차를 보정한다. 그 원리는 투명전극이 설치된 두 글래스 기관에 액정을 봉입하고 전압을 인가하면, 전압에 비례하여 액정분자가 회전하고 굴절율이 변화되는 현상을 이용하는 것이다. 이 원리를 이용하여 구면수차 보정에 필요한 위상분포를 능동적으로 보정한다. LCE 는 공간적으로 작은 영역만을 차지하여 유리하지만 광학적인 수차를 억제하기 어렵고 저온에서의 느린 응답속도와 신뢰성에 약점을 가지고 있다. 이 때 LCE 를 설계하는 방식에 따라 유효경에 따른 위상의 변화를 줄 수도 있으며, 혹은 유효경 내의 전체적인 광학적인 Power 의 변화를 줄 수도 있다.

$$\Phi_{\text{phase}} = 2\pi/\lambda(C_1R^2 + C_2R^4 + C_3R^6 + \dots) \quad (2)$$

식(2)은 LCE 설계 시 적용하는 계수에 따른 위상 변화 함수이다.

$$\Phi_{\text{phase}} = 2\pi/\lambda \cdot \Delta n \cdot d \quad (3)$$

$$n_{\text{eff}}(U) = \lambda \cdot \Phi_{\text{phase}} / (2\pi \cdot d) + n_0 \quad (4)$$

LCE 의 굴절율 변화에 따른 위상 변화는 식(3)으로 표현되며, 위상과 굴절율 변화 사이의 관계는 식(4)으로 표현될 수 있다. Cover glass 두께에 의한 구면수차를 보정하는 액정사용 방식에 따라 위상차를 발생시키는 Doughnut type 의 LCE 와 Power 를 발생시키고 구면수차를 보정하는 Parabolic-type 의 LCE 를 제조 하여 사용할 수 있다. Doughnut-type 은 LCE 에서 발생하는 위상과 보정하려는 위상의 광축이 일치해야 위상의 상쇄가 이루어질 수 있으므로 De-center 에 대해 민감한 특징을 보인다. [4] 하지만 Parabolic-type 의 LCE 는 광의 Power 변화로 보정하므로 광축의 De-center 에 의한 수차의 변화가 Doughnut-type 에 비해 상대적으로 크지 않다. 대물렌즈 광축과 LCE 소자의 광

축간에 발생하는 위치 오차는 부가적인 광학수차를 발생시키고 광픽업의 성능을 열화시키게 된다. 또한 위치 공차가 엄격하면 대물렌즈를 가동하는 액츄에이터에 렌즈와 함께 조립되어야 하기 때문에 액츄에이터의 감도를 저감시키게 된다. 따라서, 상대적으로 위치 민감도가 적은 Parabolic-type의 LCE의 성능을 검증하여 액츄에이터에 탑재하지 않고도 구면수차를 보정하는 것이 가능한지 검증할 필요가 있다. [5]

DVD의 경우와 달리 BD에서의 대물렌즈 개구수는 매우 크기 때문에 BD용 대물렌즈가 허용하는 디스크두께의 허용오차는 $\pm 3\mu\text{m}$ 이내가 되어야 한다. 그러나 BD디스크의 제조오차가 $\pm 5\mu\text{m}$ 정도이기 때문에, BD의 경우 디스크간의 제조오차도 커버하지 못하므로 이의 보상을 별도의 기능이 필수적이다. 또한 복층의 디스크를 사용하기 때문에 디스크 두께 차이($25\mu\text{m}$)에서 발생하는 구면수차의 보정도 가능해야 한다. 두께 차이 $25\mu\text{m}$ 는 RMS 수차로 약 $\pm 125\text{m}\lambda_{\text{rms}}$ 의 구면수차를 발생시킨다. 조립된 픽업의 각 부품에서 발생하는 구면수차, 광원의 파장변화에 기인하는 구면수차 등을 고려하여 보상 범위를 결정해야 하지만, 본 연구에서 사용한 Doughnut Type의 액정소자는 $\pm 105\text{m}\lambda_{\text{RMS}}$ 의 보상범위를 가지고 있다. Fig.1은 Doughnut-type과 Parabolic-type의 위상 보정 형태를 보여주고 있다. [6]

Doughnut-type의 경우 초기에는 Fig.2(a)와 같이 Segment형의 소자로 반대의 위상을 발생하여 보정하였으나, 잔존 수차가 크다는

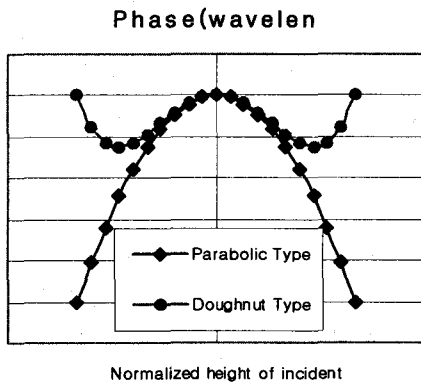


Fig. 1 Phase compensation of liquid crystal elements(LCE)

문제가 있었기 때문에 Fig.2(b)와 같은 Gradation형의 개발이 가능하게 되었다. Fig.3은 Gradation 형태의 액정소자 적용에 따라 잔존 수차가 제거된 결과를 보여준다. 그러나 Doughnut Type의 LCE는 대물렌즈와의 동심도 공차가 엄격하다. 편심량에 따른 재생 지터의 특성이 매우 나빠지기 때문에 $20\sim 30\mu\text{m}$ 이내로 동심도가 유지되어야 한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 액정소자의 광학적인 Power를 조절하여 Parabolic Type를 개발하였다. Parabolic형 구조는 원리적으로 대물렌즈의 동심도에 영향을 받지 않으므로 액츄에이터로부터 분리할 수 있어 조립문제, 액츄에이터 가동부 무게 감소에 의한 배속증가 등에 있어 유리하다. 그러나 액정의 경우 편광에 의존하기 때문에 디스크로 입사와 출사하는 광에 각각 대응하는 소자를 사용해야 하는데 이 경우 투과율 감소가 발생한다.

본 연구에서는 Doughnut-type LC Panel과 Parabolic Type LC Lens의 광축과의 De-center에 따른 수차 발생량을 해석하고 실험을 통하여 위치민감도를 측정하였다.

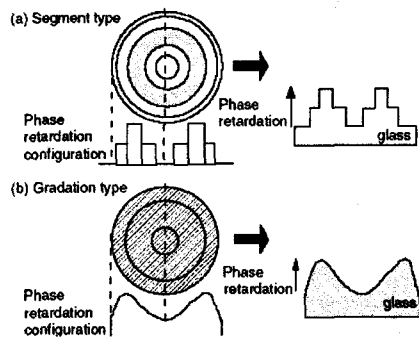


Fig. 2 Two types of liquid crystal elements

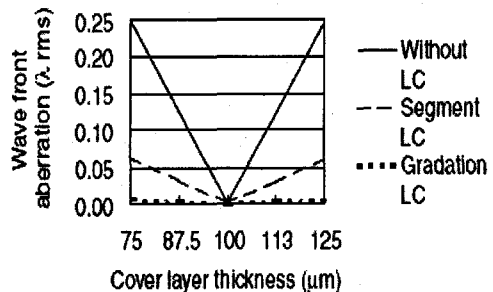


Fig. 3 Spherical aberration of doughnut-type LCE

구면수차를 인위적으로 크게 발생시킨 후 실제 사용 조건 보다 민감한 실험조건에서 상대적인 민감도를 비교 측정하였다. BD 디스크의 Dual layer 간 간격은 $25\mu\text{m}$ 이나 대물렌즈의 특성에 따라 $12.5\mu\text{m}$ 만을 보정하도록 하였다. 이는 전체 RMS 수차로 $\pm 120\text{m}\lambda\text{rms}$ 정도만 수차를 발생시키면 가능한 보정 범위가 된다. 개발한 Doughnut-type의 LC Panel 은 약 210mRMS 의 수차를 보정하도록 하였다. 측정시 BD 용 대물렌즈는 매우 민감하고 측정오류가 발생하기 쉽기 때문에 개구수를 0.6 정도로 제한하여 실험하였다. 디스크에서 발생하는 구면수차를 보정하기 위하여 설계된 액정렌즈의 특성은 Parabolic-type의 LC Lens 가 Doughnut-type의 LC Panel 과 비교하여 민감하지 않음을 알 수 있다. Fig.4 에서와 같이 Doughnut-type의 LC Panel 은 대물렌즈 0.2mm 위치이동에 대하여 $60\text{m}\lambda\text{rms}$ 의 수차값을 보여주는데 주로 코마(COMA) 와 비점수차(AS)가 발생한다. 한편, Parabolic-type의 LC lens 는 OL-Shift 에 대하여 수차값의 변화가 이론적으로 전혀 없었다.

3. 실험

액정소자의 편심에 따른 민감도를 측정하기 위하여 Blue 용 마하젠더 간섭계를 이용하여 수차를 측정하였다. Fig.5 와 같이 청색의 레이저를 사용하고 액정소자를 투과시킨 후에 대물렌즈와 Cover-glass, 개구수 0.85 의 시준렌즈를 투과시킨 후 간섭계로 수차 분석을 하였다. 이때, 구면수차가 없는 경우에는 액정소자에도 위상의 변화가 발생되지 않기 때문에 편심도의 영향이 나타나지 않고 민감도를 판단하기 어렵다. 또한 커버글래스 0.125mm 의 두께를 제어하고 제작하는데 어려움이 있기 때문에 인위적으로 구면수차를 발생시킨 후 액정소자의 이동에 따른 수차값을 분석하였다. BD 의 경우 인위적으로 조정하기는 쉽지 않기 때문에 커버글래스와 개구수를 조절하여 측정값이 비교하기 쉽도록 실험 조건을 설정하였다. Fig. 5 는 수차 측정을 위한 간섭계의 개념도를 보여주고 Fig. 6 은 간섭계를 이용한 측정장치를 구성한 사진을 보여준다.

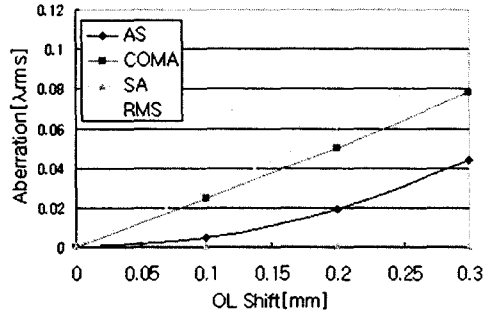


Fig. 4 The aberration of doughnut-type LCE with respect to the movement of objective lens)

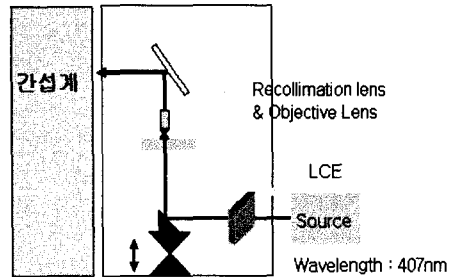


Fig. 5 The setup of interferometer measuring aberration of LCE

디스크에서 발생하는 구면수차를 보정하기 위하여 설계된 Parabolic-type의 액정렌즈의 사양은 $1.7\lambda\text{pv}$ 를 보정하도록 하였고, 실제 값은 약 $2.3\lambda\text{pv}$ 정도의 위상 값이 측정되었다. Fig. 7 은 Blue 용 간섭계를 이용하여 측정한 결과를 보여준다.

실험장치 Setup 를 위하여 대물렌즈와 시준렌즈를 통과한 광의 수차를 측정하기 위하여 0.1mm 두께의 커버글래스를 삽입하여 수차를 측정한 후에 액정소자를 삽입하고 전압을 인가하여 구면수차를 $70\text{m}\lambda\text{RMS}$ 정도 발생시켰다. 액정소자와 대물렌즈 사이의 편심에 따른 위치 민감도를 측정하기 위하여 액정소자를 이동시키면서 전체 수차와 COMA 수차를 측정하였다. 액정소자의 형태에 따라 위치 민감도의 차이를 확인할 수 있었고, Doughnut-type(A)와 Parabolic-type(B)의 차이를 Fig. 7 과 같이 측정하였다. 유사한 조건에서 광학적인 해석을 통하여 실험값과 해석값의 경향이 잘 일치하고 있다. Fig. 8 은 Type 별 해석과 실험값을 비교하여 액정소자의 편심에 따른 COMA 수차의 발생량을 확인하였다.



Fig. 6. The photograph of interferometer



Fig. 7 The phase deformation compensating spherical aberration

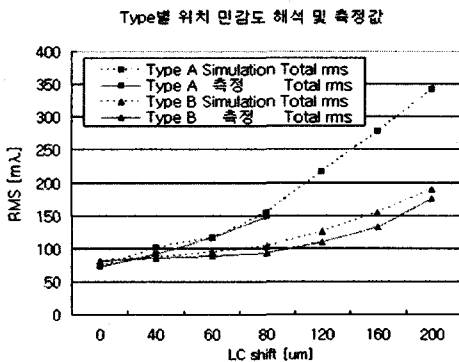


Fig. 8 The position sensitivity of two type of LCE

4. 결론

본 논문에서는 BD 용 대물렌즈와 평판을 이용하고 구면수차를 발생시킨 조건에서 액정소자를 이용하여 구면수차가 보정됨을 확인하였고, 액정소자의 형태에 따른 편심 공차를 측정 및 해석하였다.

액정소자는 Doughnut Type 과 Parabolic Type 를 상호 비교하고 대물렌즈와의 편심도에

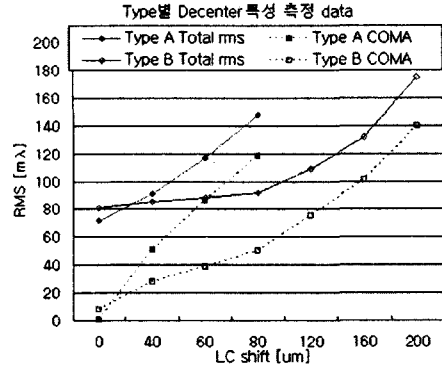


Fig. 9 Aberration of two-type LCE with respect to the de-center of LCE

따른 수차 발생량을 측정하였다. Parabolic Type 의 액정렌즈가 Doughnut Type 의 액정소자와 비교하여 2 배 이상 편심도에서 유리함을 확인하였다. 특히 Doughnut Type 의 액정소자는 80μm 이상 이동시에 측정이 곤란한 수준이며, COMA 수차가 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 한편 Parabolic Type 의 액정렌즈를 구면수차 보정에 사용하는 경우에는 위치 편심에 따른 수차가 크게 발생하지 않기 때문에 액추에이터에 탑재하지 않고 픽업 Base 에 장착하여 사용가능한 특징을 보였다. 따라서, 양산 적용시 수율을 증가시키는 요인이 됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Isao Ichimura et al., 2001, "In-Groove phase-change optical recording for a capacity of over 24GB", Technical Digest of ODS'01, pp.139-141
- [2] Tae Kyung Kim et al., 2001, "NA 0.85 3-element objective lens", Technical Digest of ISOM'01, pp.262-263
- [3] Hiriyuki Shindo, Ichiro Morishita, Noriyoshi Takeya, Hoseop Jeong, Yonghan Yoon et al., 2003, "BD/DVD Recording and Reproducing Compatible Use Technology in the 2nd generation Pick Up for Blu-ray Disc", Technical Digest of ISOM'03, pp.224-225
- [4] H. Tanase, G. Hashimoto, K. Yamamoto, T. Tanaka, T. Nakao et al., 2002, "Dual-layer-compatible optical head: Integration with a liquid-crystal panel", Tech. Dig. ISOM/ODS(2002), pp. 392-394

- [5] Seok Jung Kim, Tae Youn Heor, Tae Kyung Kim, Young Man Ahn, and Chong Sam Chung, 2004, "High Response Twin-Objective Actuator with Radial Tilt Function for Blu-ray Disc Recorder", Technical Digest of ISOM'04, pp.149-150
- [6] Yoshimasa Suzuki, Nobuyoshi Iwasaki, Shohei Kobayashi, Hiroko Sasaki, Masatoshi Nishino, et al., 2003, "Numerical Simulation Method for a Liquid-Crystal Aberration Compensation Device", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, pp, 869-872