

## 근접장 기록을 위한 디스크의 광학적 특성

### Optical characteristics of discs for near-field recording

민철기\*, 박노철<sup>†</sup>, 박경수\*, 박영필\*

Cheol-Ki Min, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park and Young-Pil Park

(2009년 8월 24일 접수; 2009년 9월 7일 심사완료; 2009년 9월 21일 게재확정)

#### Abstract

In this paper, we investigate field distribution and interference pattern in the exit pupil and in the focal region. Also, we compare with metal and dielectric substrate for near-field recording. To obtain field distribution, we use modified vector diffraction theory and Zernike Polynomials. Finally, we design and optimize refractive index and thickness of disk for near-field surface recording and cover-layer incident recording.

**Key Words :** Solid Immersion Lens (SIL), optical disk, Near-field Recordings (NFRs).

#### 1. 서론

차세대 광 정보 저장 기술로 떠오르고 있는 NFR(near-field recording) 기술은 장치는 SIL (Solid Immersion Lens)의 사용으로 고밀도 정보저장을 달성하게 되었다. NFR 핵심 기술은 렌즈와 디스크를 20nm 로 유지할 수 있는 간극제어 기술, 외부 충격과 오염에 대응하는 기술, 수차를 최소로 하기 위한 광학계의 설계/가공 기술 등이 있다. 렌즈를 포함한 광학계뿐만 아니라 정보를 기록 또는 재생 시키는 광디스크도 NFR 시스템에서 중요한 핵심 기술중의 하나로 연구되고 있다.

광 디스크는 기록 방식에 따라서 다음과 같이 이 분류될 수 있다. 디스크의 종류는 상 변화 방식을 이용한 PC(Phase Change)방식과 광-자기 효과를 이용한 MO(magneto-optical) 디스크 등이 있다

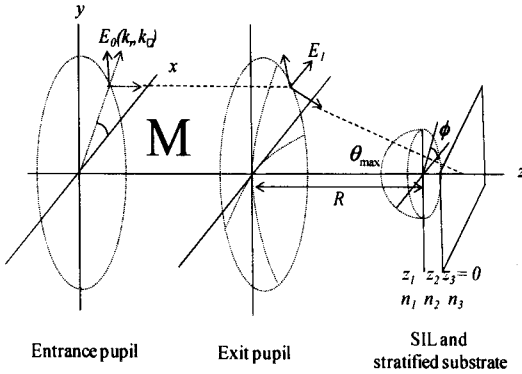
[1,2]. 광 디스크의 상부 층은 유전체, 반도체, 금속 등 다양한 물질로 구성되어 있다.

본 논문에서는 다양한 물질의 광학적 특성을 출사동에서 전반사된 이미징신호를 통하여 분석하고 수차 분석을 통하여 이상적인 광학계와 디스크에 관하여 연구한다. 또한, 표면 기록 방식과 보호층 근접장 방식을 위한 광 디스크의 특성에 관하여 연구하며 디스크의 굴절률에 따라 발생하는 구면수차를 최소로 하기 위한 위상보정 방법을 연구한다. 출사동과 초점영역에서 반사된 신호와 복사조도 분포를 획득하기 위하여 회절 적분 이론을 사용 하였으며, 수차를 해석하기 위한 Zernike 이론을 학습하였다.

#### 2. 이론

출사동에서 SIL 과 디스크 사이의 다양한 에어 간극에 따른 전반사된 복사조도 분포를 획득하기 위해서 무수차를 가지는 광학계를 그림 1 에 나타내었다.

<sup>†</sup> 연세대학교 기계공학과  
E-mail pnch@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-4677  
\* 연세대학교 기계공학과



**Fig.1** Schematic of electric field vectors in the entrance and exitpupils of the aplanatic system with a Solid Immersion Lens.

x 와 y 방향의 복사조도 분포의 이미지를 획득하기 위해서 F. Zipp *et al* 의 이론을 적용하였다 [3].

$$E_x^-(k_r^-, k_\phi^-) = (-r_p + (r_p + r_s) \sin^2 k_\phi^-) E_x^+(k_r^+, k_\phi^+) - \left( \frac{1}{2} (r_p + r_s) \sin 2k_\phi^- \right) E_y^+(k_r^+, k_\phi^+) \quad (1)$$

$$E_y^-(k_r^-, k_\phi^-) = -\left( \frac{1}{2} (r_p + r_s) \sin 2k_\phi^- \right) E_x^+(k_r^+, k_\phi^+) - (r_p + (r_p + r_s) \sin^2 k_\phi^-) E_y^+(k_r^+, k_\phi^+) \quad (2)$$

수치적분에 의해서 Zernike 계수를 계산하였다.

$$A_n^m = \frac{2(n+1)}{(1+\delta_{m0})\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(\rho, \theta) Z_n^m(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (3)$$

입사동과 출사동에서 좌표  $(k_r^\pm, k_\phi^\pm)$  는  $0 \leq k_r^\pm \leq n_1$  과  $k_\phi^\pm$  는 방위각을 나타낸다. 초점에서의 전기장의 분포를 확인하기 위해서 Van de Nes *et al* 의 회절적분을 사용하였다 [4].

$$E(r) = -\frac{i}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{a(k_x, k_y)}{k_z} e^{ikr} dk_x dk_y, \quad (4)$$

$a(k_r, k_\phi) = R_f (k_{z1} / k)^{1/2} M_L E_0(k_r, k_\phi)$  이고  $R_f$  는 초점 거리이며 전파와 투과행렬은 다음과 같다.

$$M_{L,i}^\pm(k_r, k_\phi) = \begin{pmatrix} g_i^{0\pm} - g_i^{2\pm} \cos 2k_\phi & -g_i^{2\pm} \sin 2k_\phi & 0 \\ -g_i^{2\pm} \sin 2k_\phi & g_i^{0\pm} + g_i^{2\pm} \cos 2k_\phi & 0 \\ -g_i^{1\pm} \cos k_\phi & -g_i^{1\pm} \sin k_\phi & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

적분변수  $\Omega$  는  $0 \leq k_\phi < 2\pi$ ,  $0 \leq k_r < NA$  이고  $k_0$  이고  $NA$  는 광학계의 개구수이고,  $g_i^{0\pm}$  와  $g_i^{n\pm}$  는 투과와 반사 계수를 나타내고 참조문헌 4에 유도되어 있다.

### 3. 출사동에서의 복사조도

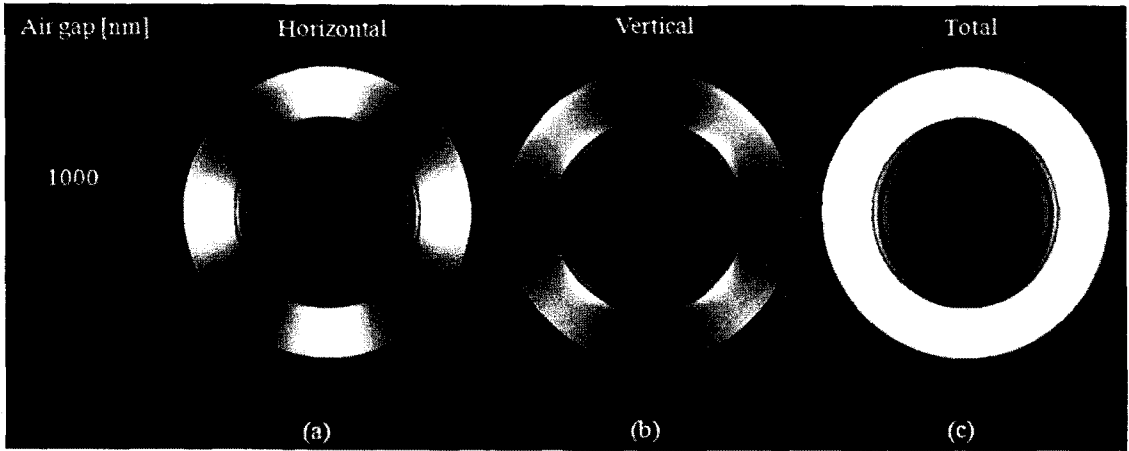
출사동에서 SIL 과 디스크 사이의 반사된 이미지를 획득하기 위한 광학 시스템은 Twyman-Green Interferometer 가 주로 사용되고 있다.

표 1에 SIL 광학헤드의 설계명세서를 나타내었다. 405nm 단색광원을 파장에 1.887의 굴절률을 가지는 Hemisphere SIL 을 사용하였다. 설계된 SIL 광학헤드의  $NA_{eff}$  유효초점거리 그리고 Clear Aperture 는 각각 1.50, 1.33mm, 2.44mm 이다. 입사되는 레이저 광원은 x-편광이고 대물렌즈의 입사각은  $53^\circ$  이다. 다양한 공기 간극에서 glass 기판의 전반사된 이미지를 통하여 출사동에서의 광학적 성능에 관하여 연구한다.

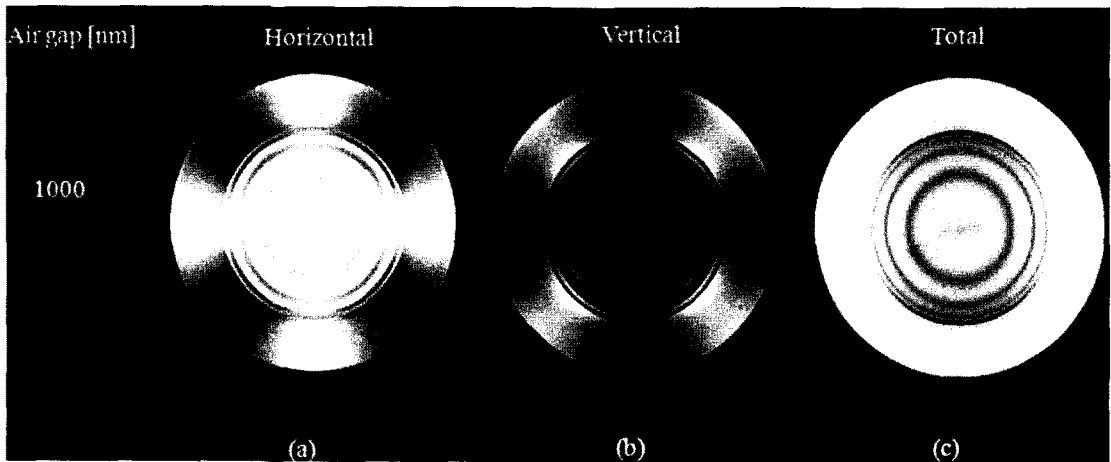
출사동에서 반사된 이미지를 획득하기 위하여 사용된 디스크의 굴절률은  $n_{BK7} = 1.53$  이며 그림 2에 1000nm의 공기 간극에 대한 이미지 신호를 나타내었다.

**Table1** Specifications of the SIL optical head designed for near-field recording

Effective NA		1.50
Material		LaSFN-9
SIL	Diameter (mm)	1.0
	Index	1.887
NA0		0.8 (=in air)
Wavelength (nm)		405
Polarization		x-Linear
Disk		Bk7 ( $n_{BK7} = 1.53$ )
Hemisphere SIL for near-field recording		



**Fig. 2** The calculated reflected irradiance of an  $NA=1.5$  solid immersion lens that is separated by a 1000nm air gap from a flat sample of  $BK7$ . (a) horizontally polarized irradiance, (b) vertically polarized irradiance, and (c) total irradiance.



**Fig.3** The calculated reflected irradiance of an  $NA=1.5$  solid immersion lens that is separated by a 1000nm air gap from a flat sample of  $Al$  ( $n_{Al} = 0.629 + 5.002i$  at 405nm). (a) horizontally polarized irradiance, (b) vertically polarized irradiance, and (c) total irradiance.

획득된 1000nm 이미지 신호로부터 큰 공기 간극으로 인하여 SIL의 전반사의 의하여 밝은 원형 고리패턴이 생성됨을 확인 하였다. 밝은 영역 안의 중앙영역은 4개의 작은 원형고리가 나타나는데 입사되는 광원의 파장보다 공기 간극이 큰 경우 이런 현상들이 나타나고 evanescent coupling이 발생하지 않는다. 그림 3에 1000nm의 SIL과 디스크 사이에서 Al에 의하여 반사된 복사조도 이미지를 나타내었다. 3. (a)에서 중앙 영역의 이미지는 SP (Surface plasmon) 효과에 의하여 Bk7보다 더욱 더 복잡한 형상을 나타낸다. 표면 플라즈몬 현상은 유전체(SIL)와 금속(Al)의 경계면에서 광-

전자 효과로서 특정파장의 빛이 (특정 각도의 입사각으로) 금속에 조사되면 대부분의 광에너지가 자유전자로 전이되는 공명 현상이다. 그 결과로서 표면파가 생길 때 나타나는 현상을 SPR (Surface Plasmon Resonance)라고 부르며, 이 때 입사광이 반사광으로 변하지 않고 표면을 따라 전달된다. 광학계의 성능을 검증하기 위하여 SIL과 디스크를 포함한 광학계의 수차 분석을 수행하였다. 근접장 효과가 극대화되기 위한 공기간극은 20nm로 고정하였으며, BK7과 Al의 기판에서 간섭무늬와 Zernike 계수를 계산하였다.

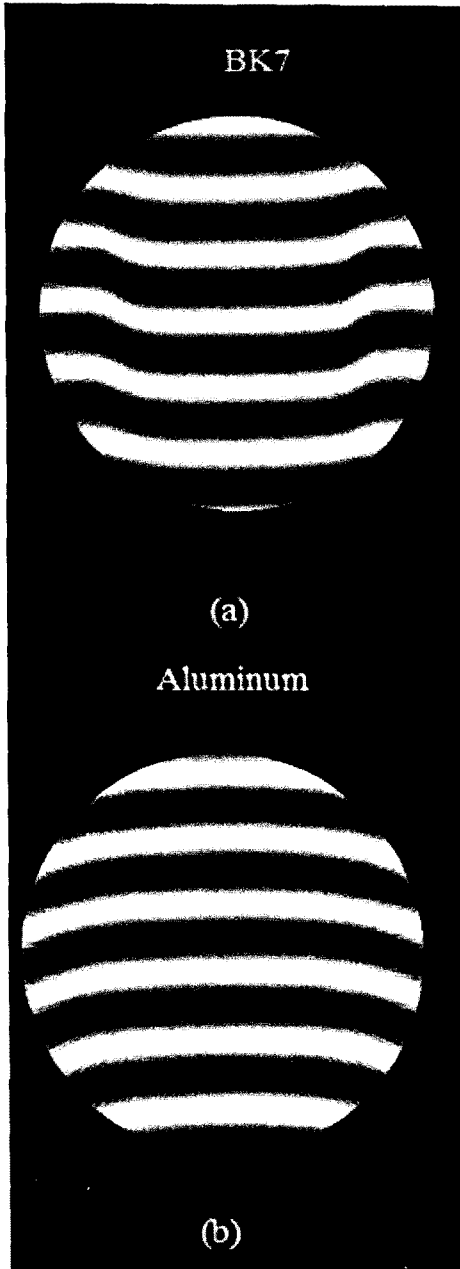


Fig.4 The calculated interference pattern of an  $NA=1.5$  solid immersion lens that is separated by a 20nm air gap (a) BK7, and (b) Aluminum substrates.

금속기판에서 비점수차가 더 크게 계산되었는데

Table 2 Calculated wavefront aberrations

Substrate	Aberrations (Zernike Coefficient)	Numerical Value (mλ)
BK7	Astigmatism ( $A_{22}$ )	249.1
	Coma ( $A_{31}$ )	0
	Spherical( $A_{40}$ )	13
Aluminum	Astigmatism ( $A_{22}$ )	259.7
	Coma ( $A_{31}$ )	0
	Spherical ( $A_{40}$ )	188.8

이것은 표면플라즈몬 효과로 인한 x 방향 성분이 그림 4 로부터 획득한 결과로부터 Zernike 계수를 계산하였다. 근접장 광학계 시스템에서는 구면, 코마, 비점수차가 가장 중요하기 때문에 다른 수차량은 계산하지 않았다.

더 강화됐기 때문에 초점에서의 빔 스팟은 더욱 더 타원형상을 가진다.

근접장 광학계 시스템에서 수차에 영향을 주는 성분은 렌즈의 형상에 의한 구면수차/ 광학계 정렬에 의한 코마 수차/ 그리고 레이저 광원에 따라 발생하는 비점수차 등으로 나타낼 수 있다.

구면수차는 대물렌즈의 기하학적 형상에 의하여 해결이 가능하고 코마수차는 정확한 광학계 정렬로 해결할 수 있다. 하지만, 비점수차는 편광의 상태를 원형 편광으로 변경했을 때 제거가 가능하다. 표면 플라즈마 효과는 원형편광에서 생성되지 않기 때문에 근접장 시스템에서 금속물질은 디스크의 상부층에 적합하지 않고 표 2의 구면수차를 제거시키기 위해서는 SIL 과 디스크가 컨택 상태에서 제거할 수 있다.

#### 4. 초점에서의 광학적 특성

##### 4.1 표면기록을 위한 초점에서의 광학적 특성

이전 단원에서 선형편광은 비점수차를 유발시킨다고 언급하였다. 그리하여 이번 단원부터는 원형편광을 사용하여 초점 영역에서 전기장의 분포를 계산하였다. 해석모델은 1.90의 개구수를 가지는 렌즈 2.086의 굴절률을 가지는 SIL 과 근접장 효과를 최대로 하기 위한 SIL 과 디스크 사이의 공기 간극은 20nm 설계하였다. 광 디스크는 표면기록을 위한 상 변화층 디스크를 사용하였다.

SiN(15nm)	$n=2.10+0.001i$
ZnS-SiO <sub>2</sub> (50nm)	$n=2.38+0.001i$
GeSbTe(15nm)	$n=3.05+1.9i$
ZnS-SiO <sub>2</sub> (10nm)	$n=2.38+0.001i$
SiN(10nm)	$n=2.1+0.001i$
Ag alloy(70nm)	$n=0.174+2.0i$
Substrate(1.1mm)	$n=1.6224$

Fig. 5 Optical configuration with the SIL, air-gap, and the rewriteable first-surface GeSbTe phase change stack on a polycarbonate (PC) optical disk substrate.

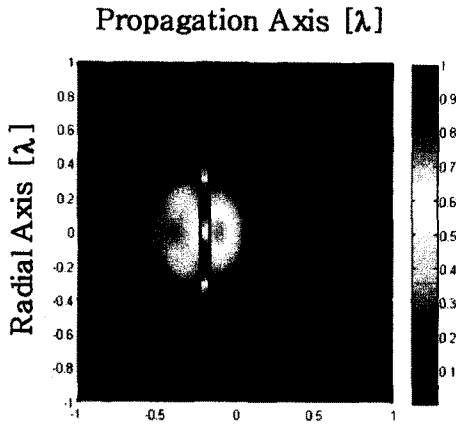


Fig. 6 The total intensity distribution for Fig. 5

SIL로부터 투과된 광원은 상변화층의 중간에 전파되었으며, 다른 기판들보다 더 많은 광량이 전달된다.

#### 4.2 보호층 근접장 기록을 위한 디스크의 특성

본 연구의 마지막 단원에서는 다층기록을 위한 미디어의 특성을 연구한다. 보호층의 굴절률은 SIL의 굴절률보다 작고 개구수 보다는 커야 한다. 본 논문에서는 1.58의 굴절률을 가지는 폴리머 계열의 물질을 사용하여 해석을 수행하였다.

다층기록 광학계는 표면기록용 광학계보다 단일층에서는 정보의 저장을 적게 하지만, 기록층을 증가시켜 많은 정보를 기록/재생한다. 다층의 기록층으로 인하여 디스크간의 간섭 및 구면수차가 발생하게 된다.

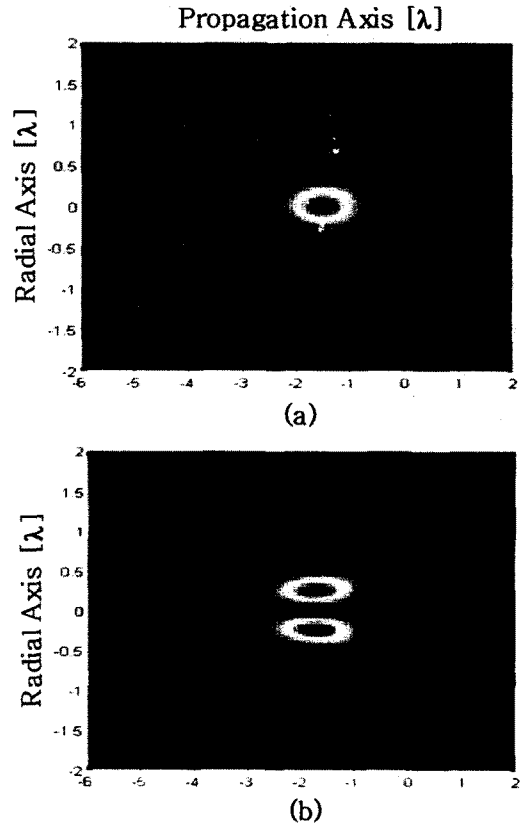
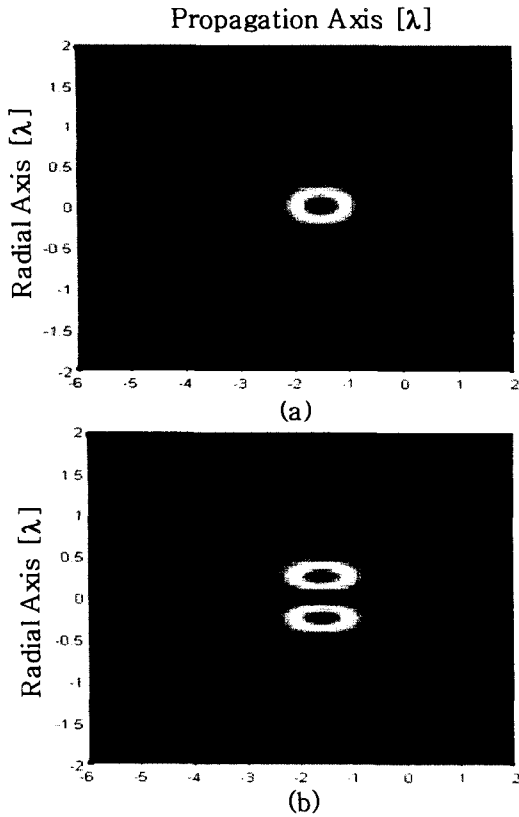


Fig. 7. The intensity distributions of a)  $|E_x|^2 + |E_y|^2$  and b)  $|E_z|^2$  in the focal region of an  $NA=1.45$  focusing system that consists of a SIL with  $n_{SIL} = 2.086$ , an air gap with  $n_{air} = 1.0$  of height  $\lambda_0/10$  and a cover-layer with  $n_{cover} = 1.58$ .

이러한 문제를 해결하기 위해서는 보호층의 두께가 최적화 되어야 하며 보호층으로 인한 초점거리 변화 때문에 생성되는 초점영역에서의 비대칭의 빔 스폿을 균일하게 만들기 위하여 위상보정 소자가 필요하게 된다.

이러한 비대칭의 빔 전기장 분포는 SIL과 보호층의 굴절률과 공기 간극에 의하여 생성되었다. 초점영역에서 균일한 전기장 분포를 획득하기 위하여 위의 시스템의 수차 분석을 실시한 후 수차가 반대 값을 가지는 위상 보정 소자를 설계하여 광학계에 추가시키면 초점영역에서 균일한 전기장 분포를 획득할 수 있다.

그림 7에서 초점영역은  $-1.605 \lambda_0$ 의 위치에서 형성되었는데 보호층의 굴절률로 인하여 기하학적 위치인 "0"으로 전파되지 않고 초점보다 뒤에 전파되어 생기는 위치이다.



**Fig.8** The intensity distributions of **a)**  $|E_x|^2 + |E_y|^2$  and **b)**  $|E_z|^2$  in the focal region of an  $NA=1.45$  focusing system that consists of a SIL with  $n_{SIL} = 2.086$ , an air gap with  $n_{air} = 1.0$  of height  $\lambda_0/10$  and a cover-layer with  $n_{cover} = 1.58$ . A comparison with the uncorrected field structure of fig. 7 shows a considerable improvement of the field structure by the phase-only correction.

위상 보정 소자를 사용하여 계산된 전기장의 분포는 그림 8 에 나타내었다. 설계된 위상 보정 소자는 수차를 감소시키는 역할을 하여 초점영역에서 균일한 전기장을 획득하였다.

그림 8 에 보호층 근접장 기록을 위한 단일 기록층에서의 전기장 분포를 확인 하였는데 2 층 기록을 위해서는 2 중 서보 및 보호층에 의한 구면수차를 고려하여야 한다. 또한, 고밀도 정보 저장을 위하여 기록층이 증가한다면 반사율을 높이기 위하여 기록층의 재료가 상변화 방식이 아니라 금속 재료의 silver 와 같은 재료를 사용하여야 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다양한 물질의 광학적 특성을 출사동에서 전반사 된 이미지신호를 통하여 분석하고 수차 분석을 통하여 이상적인 광학계와 디스크에 관하여 연구하였다. 또한, 표면 기록 방식과 보호층 근접장 방식을 위한 광 디스크의 특성에 관하여 연구하며 디스크의 굴절률에 따라 발생하는 구면수차를 최소화 하기 위한 위상보정 방법을 연구한다. 출사동과 초점영역에서 반사된 신호와 복사조도 분포를 획득하기 위하여 회절 적분 이론을 사용 하였으며, 수차를 해석하기 위한 Zernike 이론을 학습하였다. 획득한 결과로부터 근접장 광 기록을 위한 광학계의 설계/해석 및 최적화된 디스크의 구조 및 광학적 특성을 제시하였다.

## 후 기

" 이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R17-2008-040-01001-0)."

## 참고문헌

- [1] M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furki, M. Takeda, Y. Akiyama, T. Shimouma, and M. Yamamoto *Optical Data Storage 2004*, "High Density Near Field Optical Disc Recording using Phase Change Media and Polycarbonate Substrate." *Proceeding of SPIE* Vol. 5380:224-232.
- [2] A. Chekanov, M. Birukawa, Y. Itoh, and T. Suzuki, 1999, "Contact" solid immersion lens near-field optical recording in magneto-optical TbFeCo media," *J. Appl. Phys.*, 85:5324-5326.
- [3] F. Zijp, Jack M. A., V. A. Eerenbeemd, P. Urbach, and C. A. Verschuren, 2006, "Effects of Polarization on Wave Front Measurements and Manufacturing of Solid Immersion Lenses for Near-Field Optical Recording," *J. Appl. Phys.*, 45:1341-1347.
- [4] A. S. van de Nes, L. Billy, S. F. Periera, and J. J. Braat, 2004, "Calculation of the vectorial field distribution in a stratified focal region of a high numerical aperture imaging system," *Opt. Express*, 12:1281-1293.