

광학계의 위상 변조 조건에 따른 중심 강도 변화

이영철 · 정창섭

전남대학교 물리학과

박성종

순천청암대학 안경광학과

이윤우

한국표준과학연구원

(2000년 2월 21일 받음, 2000년 4월 6일 수정본 받음)

최근에 많은 연구들이 디지털 다기능 디스크(DVD) pick up head나 초정밀 주사 현미경과 같은 회절 한계 이상의 초분해능을 갖는 광학계를 개발하기 위해 annular mask나 pupil filter 등의 다양한 방법을 이용하고 있다. 본 연구진은 초분해능 광학계 개발에 이용되는 annular mask와 phase modulated filter를 동시에 갖는 환형대의 위상 변조 광학계를 개발하기 위한 연구를 수행해 왔다. 이러한 광학계의 결상 특성은 위상 변조 조건, 즉 환형 폭, 환형 위치, 그리고 변조량에 영향을 받게 되는데, 본 연구에서는 이러한 위상 변조 조건을 결정할 수 있는 최적화 프로그램을 개발하였다. 프로그램에 의해 결정된 환형 위상 변조 광학계의 위상 변조 조건에 따른 최적 상면에서의 중심 강도 변화를 조사하였다. 이러한 결과로부터 최대 중심 강도를 갖는 최적의 환형 위상 apodizer 조건을 결정할 수 있었고, 특히 광학계가 구면수차를 포함하는 경우 구면수차량이 증가할수록 수차 보정 능력이 우수함을 알 수 있었다.

I. 서 론

최근에 회절 한계 이상의 초분해능을 갖는 광학계를 개발하여 디지털 다기능 디스크(DVD)와 콤팩트디스크(CD) 그리고 초정밀 주사 현미경등에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구는 주로 annular mask, phase modulated filter, amplitude modulated filter 및 holographic optical element (HOE) 등의 다양한 방법을 응용하여 고밀도의 광정보 기록 및 재생 장치를 개발하기 위한 연구가 수행되고 있으며, 특히 optical pick-up 기술에 annular apodizer를 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구와 관련하여 일본의 도시바에서는 annular의 반경과 sidelobe 강도에 따른 최적의 annular 조건을 결정하였고,¹⁻³ 그리고 대만에서 비구면의 대물렌즈에 annular의 내부 반경에 따른 beam spotsize와 sidelobe의 강도 변화를 조사하여 DVD와 CD에 적합한 각각의 annular 조건을 결정하여⁴ DVD/CD의 호환성을 갖는 optical pick-up head에 적용하였다. 이외에도 annular형 phase-only pupil filter나 annular binary filter를 이용한 초분해능 광학계를 개발하여 광기록장치와 주사현미경등에 적용하기 위한 연구도 수행되었다.⁵⁻⁷ 국내에서는 쌍안경 등의 광학계에 임의의 위상 변조량을 적용한 위상 변조 광학계 개발에 대한 연구가 발표된 바 있으며,⁸⁻¹⁰ 본 연구실에서도 위상 변조를 적용하여 광학계의 결상 능력을 향상시키기 위한 연구, 즉 임의로 결정된 환형폭과 위상 변조량을 적용한 환형 위상 변조 광학계가 point spread function과 optical transfer function에 미치는 영향에 대한 연구를 발표한 바가 있다.^{11,12} 최근에는 삼

성전자에서 광학계에 발생하는 jitter를 사용하여 최적화된 annular mask를 갖는 optical pick-up head 개발 연구가 수행되었다.¹³⁻¹⁵

이와 같이 기존의 연구에서는 최적의 annular 폭과 위치가 중심 spot size나 sidelobe 강도, 또는 jitter 등의 변화에 따라서 결정되었다. 본 연구에서는 annular mask와 phase filter를 동시에 갖는 환형 위상 변조 광학계를 고려하여 환형 폭과 환형 위치에 따른 최적의 위상 변조량을 결정할 수 있는 최적화 프로그램을 개발하였고, 또한 최적화 프로그램에 의해 결정된 환형 위상 변조 광학계의 중심 강도를 진폭 변조된 광학계와 균일한 진폭을 갖는 광학계의 최적 상면에서의 중심 강도와 비교하여 중심 강도가 가장 높은 최적의 환형 위상 변조 광학계를 결정하였다. 이러한 연구는 초분해능을 요구하는 초정밀 주사현미경 개발에 적용될 수 있으며, 대용량의 정보를 기록하고 재생하기 위한 DVD의 optical pick-up head에 적용될 수 있다.

II. 이론적 고찰

2.1. 환형 위상 변조된 광학계

결상 광학계의 성능 평가에 대한 계산을 용이하게 하는 Hopkins canonical 좌표계¹⁶를 사용하여 상면에서의 강도 분포를 표현하면

$$I(p', \psi') = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(r, \phi) \exp[2\pi i p' r \cos(\phi - \psi')] r dr d\phi \right|^2 \quad (1)$$

이며, 초점 이동에 따른 광축상의 강도 분포는 다음과 같이 표현된다.^[7]

$$I(W_{20}) = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} T(r, \phi) \exp[2\pi i(W(r, \phi) + W_{20}(r, \phi))] r dr d\phi \right|^2 \quad (2)$$

여기서 (r, ϕ) 와 (ρ', ψ') 는 각각 출사등과 상면에서 환산 극좌표를 나타내며, W_{20} 은 초점 이동량, 그리고 I_0 는 무수차 광학계의 초평면상($\rho' = \psi' = 0$)에서의 강도 분포를 나타낸다. 또한 $f(r, \phi)$ 는 동함수이며, 본 연구에서 고려한 위상 변조 광학계의 동함수는

$$f(r, \phi, \theta) = T(r, \phi) \exp[2\pi i(W(r, \phi) + \theta)] \\ = T(r, \phi) \exp[2\pi i\theta] \exp[2\pi iW(r, \phi)] \quad (3)$$

으로 표현된다. 여기서 $T(r, \phi)$ 는 실수 진폭 분포 함수, $2\pi\theta$ 는 위상 변조량, $W(r, \phi)$ 는 파면 수차 함수를 나타낸다. 본 연구에서는 광학계가 위상만 변조된 경우를 고려하였기 때문에 $T(r, \phi)$ 는 진폭 분포 함수가 1로 규격화 되어 동함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(r, \phi, \theta) = P(r, \phi, \theta) \exp[2\pi iW(r, \phi)] \quad (4)$$

여기서 $P(r, \phi, \theta)$ 는 위상 변조 함수를 나타내며, 환형 위상 변조 광학계의 위상 변조 함수는

$$P(r, \phi, \theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq r < r_1 \\ \exp[2\pi i\theta] & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 1 & r_2 < r \leq 1 \\ 0 & r > 1 \end{cases} \quad (5)$$

로 표현된다. 이 때 환형 위상 변조된 광학계의 등의 형태는 그림 1과 같다. 또한 고려된 광학계의 파면 수차 함수는 광축에 대하여 회전 대칭 수차를 갖는 경우로

$$W(r, \phi) = W_{40}r^4 + W_{20}r^2 \quad (6)$$

과 같이 표현된다.

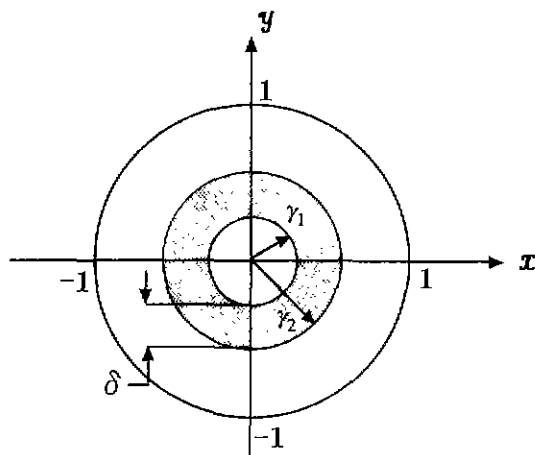


그림 1. 환형 위상 변조된 광학계의 등의 형태.

II. 최적의 환형 조건 결정

본 연구에서는 광학계가 갖는 파면 수차 함수의 분산을 사용하여 위상 변조 위치와 폭에 따른 최적의 위상 변조량을 결정하였으며, 이 때 광학계의 파면 수차 함수에 대한 분산은

$$\sigma^2 = \langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 \quad (7)$$

으로 표현된다. 여기서 $\langle W \rangle$ 는

$$\langle W \rangle = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(r, \phi) r dr d\phi \quad (8)$$

로 주어지므로 분산에 대한 (7)식은

$$\sigma^2 = \left[\frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2(r, \phi) r dr d\phi \right] - \left[\frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W(r, \phi) r dr d\phi \right]^2 \quad (9)$$

와 같이 표현된다.

내경(r_1)과 외경(r_2)으로 이루어진 환형 부분이 $2\pi\theta$ 만큼 위상 변조된 임의의 광학계에 대한 분산은

$$\sigma_{ph}^2 = \begin{cases} \langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 & 0 \leq r \leq r_1 \\ \langle (W + \theta)^2 \rangle - \langle (W + \theta) \rangle^2 & r_1 \leq r \leq r_2 \\ \langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2 & r_2 \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

으로 표현되며, 그림 2는 회전 대칭 수차를 갖는 광학계의 파면과 환형 위상 변조된 광학계의 파면을 나타낸다.

식 (9)와 (10)을 사용하여 환형 위상 변조된 파면 수차 함수의 분산이

$$\sigma_{ph}^2 = \left[\frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} W^2(r, \phi) r dr d\phi + \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (W(r, \phi) + \theta)^2 r dr d\phi + \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^1 W^2(r, \phi) r dr d\phi \right\} \right] \\ - \left[\frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} W(r, \phi) r dr d\phi + \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (W(r, \phi) + \theta) r dr d\phi + \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^1 W(r, \phi) r dr d\phi \right\} \right]^2 \quad (11)$$

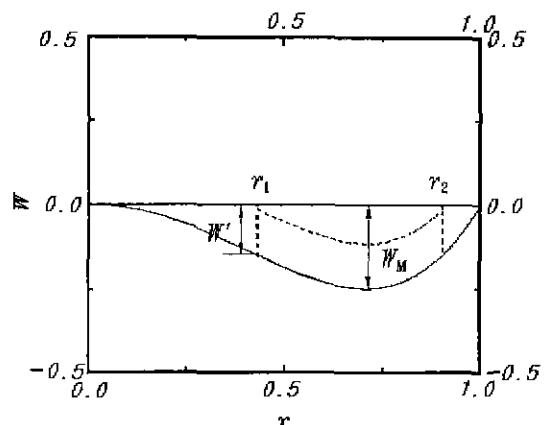


그림 2. 회전 대칭 수차를 갖는 광학계의 파면.

과 같이 표현되며, 이를 정리하여 간단하게 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{ph}^2 = \langle W^2 \rangle + \frac{2\theta}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} W(r, \phi) r dr d\phi + \theta^2 (r_2^2 - r_1^2) - \langle W \rangle^2 - 2\langle W \rangle \theta (r_2^2 - r_1^2) - \theta^2 (r_2^2 - r_1^2)^2 \quad (12)$$

여기서 광학계의 결상 능력을 향상 시키기 위해서는 광학계에 포함된 수차량을 최소화 해야하기 때문에 광학계에 포함된 파면 수차 함수의 분산이 최소가 되는 조건

$$\frac{\partial \sigma_{ph}^2}{\partial \theta} = 0 \quad (13)$$

을 사용하여 변조 폭에 따른 최적 위상 변조량을 결정할 수 있다. 따라서 환형 위상 변조된 광학계의 변조 폭에 따른 최적 위상 변조량을 결정하기 위하여 식 (12)와 식 (13)을 사용하면

$$\frac{\partial \sigma_{ph}^2}{\partial \theta} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} W(r, \phi) r dr d\phi + 2\theta (r_2^2 - r_1^2) - 2\langle W \rangle (r_2^2 - r_1^2) - 2\theta (r_2^2 - r_1^2)^2 = 0 \quad (14)$$

과 같이 표현되며, 이를 θ 에 대해 다시 정리하면

$$\theta = \frac{-\int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} W(r, \phi) r dr d\phi + (r_2^2 - r_1^2) \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} W(r, \phi) r dr d\phi}{\pi (r_2^2 - r_1^2) (1 - r_2^2 + r_1^2)} \quad (15)$$

으로 표현된다. 식 (15)를 변조 위치에 따라 계산하면 위상 변조량을 결정할 수 있다.

그러나 식 (15)에서 최적 위상 변조량을 결정하기 위해서는 먼저 환형의 폭 r_1 과 r_2 가 결정되어야 하기 때문에 본 연구에서는 r_1 과 r_2 를 결정하기 위해

$$W_R = \frac{W'}{W_M}, \quad W_R \leq 1 \quad (16)$$

로 정의되는 W_R 을 도입하였다. 여기서 W' 은 그림 2에 표현된 것과 같이 임의의 위치에서 파면 수차량이고, W_M 은 파면 수차 함수의 최대 극값을 나타낸다. 식 (16)에서 W_R 이 0과 1 사이의 임의 값으로 주어지면 W' 이 결정되고, 결정된 W' 을 갖는 환형 위치 r_1 과 r_2 그리고 환형의 폭이 결정된다. 이렇게 결정된 환형의 위치 r_1 과 r_2 를 위상 변조량을 결정하는 식 (15)에 적용하면 최적 위상 변조량이 결정된다.

또한 본 연구에서는 최적의 환형 위상 변조 광학계를 결정하기 위해서 W_R 의 변화에 따른 환형 위상 변조된 광학계(T_P)의 중심 강도를 이미 발표된 균일한 진폭을 갖는 광학계(T_A)의 중심 강도, 단조 증가 형태의 진폭 변조된 광학계(T_B)의 중심 강도, 그리고 단조 감소 형태의 진폭 변조된 광학계(T_C)의 중심 강도와 각각 비교하였다. 이 때 중심 강도(Center Peak Intensity)의 변화율 η 를

$$\eta_A = \frac{T_P \text{의 중심 강도}}{T_A \text{의 중심 강도}}$$

$$\eta_B = \frac{T_P \text{의 중심 강도}}{T_B \text{의 중심 강도}}$$

$$\eta_C = \frac{T_P \text{의 중심 강도}}{T_C \text{의 중심 강도}} \quad (17)$$

와 같이 정의하였다. 여기서 중심 강도 변화율 η 가 1.0 보다 큰 경우에는 T_P 의 중심 강도가 비교된 경우의 중심 강도보다 크게 된다.

III. 결과 및 분석

그림 3은 식 (1)과 (17)을 사용하여 광학계에 포함된 구면수차가 0.25λ , 0.5λ , 0.75λ , 그리고 1.0λ 인 경우 W_R 값에 따른 중심 강도 변화율을 나타내고 있다. 그림 3(a), (b), (c), (d)의 모든 경우에서 W_R 에 관계없이 중심 강도 변화율이 1보다 높게 나타났으며, 광학계에 포함된 구면수차가 1λ 이하인 경우에는 균일한 진폭을 갖는 광학계, 단조 증가와 단조 감소 형태로 진폭 변조된 광학계보다 위상 변조된 광학계가 위상 변조 폭에 관계없이 중심 강도값이 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 η_A 가 가장 높은 값을 나타내고, 그림 3(a)에서 η_B 와 η_C 의 값이 약간의 차이가 있지만 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 3으로부터 환형 위상 변조를 적용한 광학계가 T_A , T_B , 그리고 T_C 광학계보다 구면수차에 대한 보정 효과가 크게 나타나는 위상 변조폭이 있음을 알 수 있으며, 특히 구면수차량이 0.25λ , 0.5λ , 0.75λ 인 경우에는 $W_R=0.6$, 그리고 1.0λ 인 경우에는 $W_R=0.4$ 에서 η 값이 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 광학계에 포함된 구면수차의 영향을 최소화 줄일 수 있는 최적의 위상 변조 조건을 갖는 환형 위상 변조 광학계를 결정할 수 있다.

표 1은 광학계에 포함된 구면수차의 증가에 따른 최적 환형 위상 변조 조건과 중심 강도를 나타내고 있다. 표 1에서 광학계에 포함된 구면 수차량의 증가에 따른 최대 중심 강도를 갖는 위상 변조 광학계의 최적 위상 변조 위치와 폭의 변화가 없고, 단지 위상 변조량만 수차량의 증가에 따라서 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 최적의 환형 위상 변조 광학계에서도 구면수차량이 증가할수록 중심 강도 값은 감소하였지만 광학계에 포함된 구면수차가 1λ 인 경우에도 중심 강도 값이 0.95이상으로 높은 강도 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 식 (1)을 사용하여 계산한 최적 상면에서 최적화된 위상 변조 광학계와 T_A , T_B , 그리고 T_C 광학계의 강도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 최적화된 환형

표 1. 광학계에 포함된 구면수차의 증가에 따른 최적 환형 위상 변조 조건과 중심 강도

W_{40}	중심 강도	변조폭 (δ)	변조량 ($2\pi\theta$)	변조위치 (r_1, r_2)
0.25 λ	0.9969106	0.474	0.0340	0.43, 0.904
0.5 λ	0.9876907	0.474	0.4273	0.43, 0.904
0.75 λ	0.9724882	0.474	0.6408	0.43, 0.904
1.0 λ	0.9515450	0.474	0.8545	0.43, 0.904

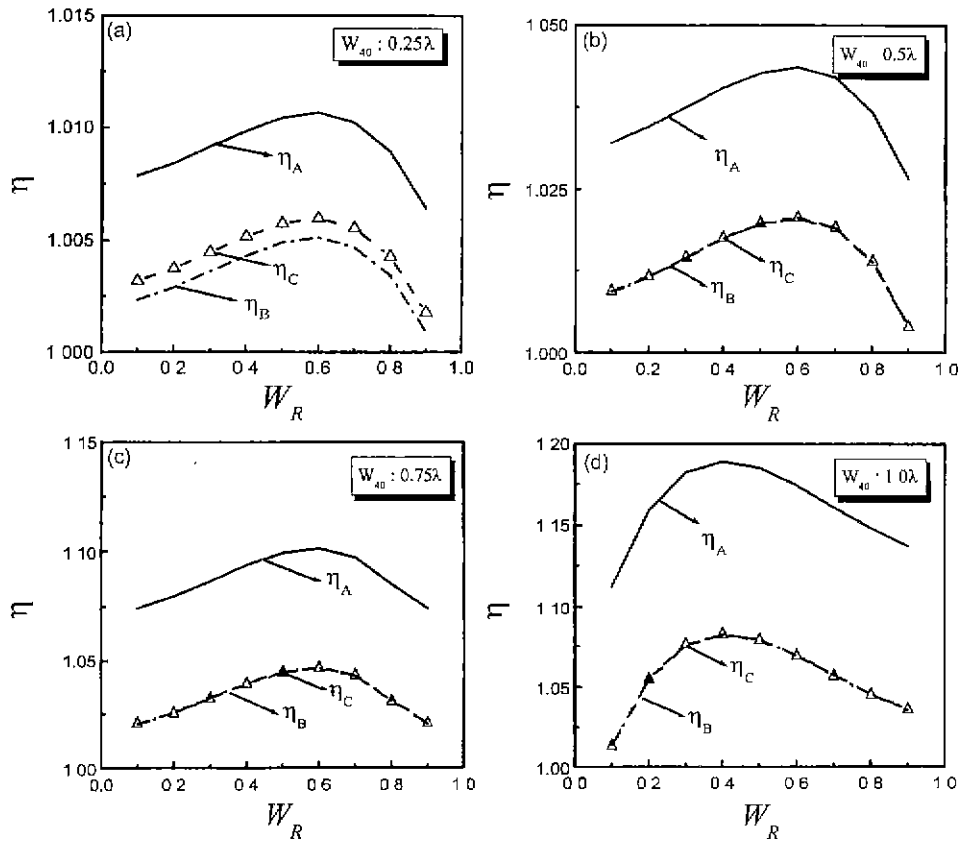


그림 3. 광학계가 구면수차 0.25λ , 0.5λ , 0.75λ , 1.0λ 를 갖는 경우 W_R 값에 따른 중심 강도 변화율.

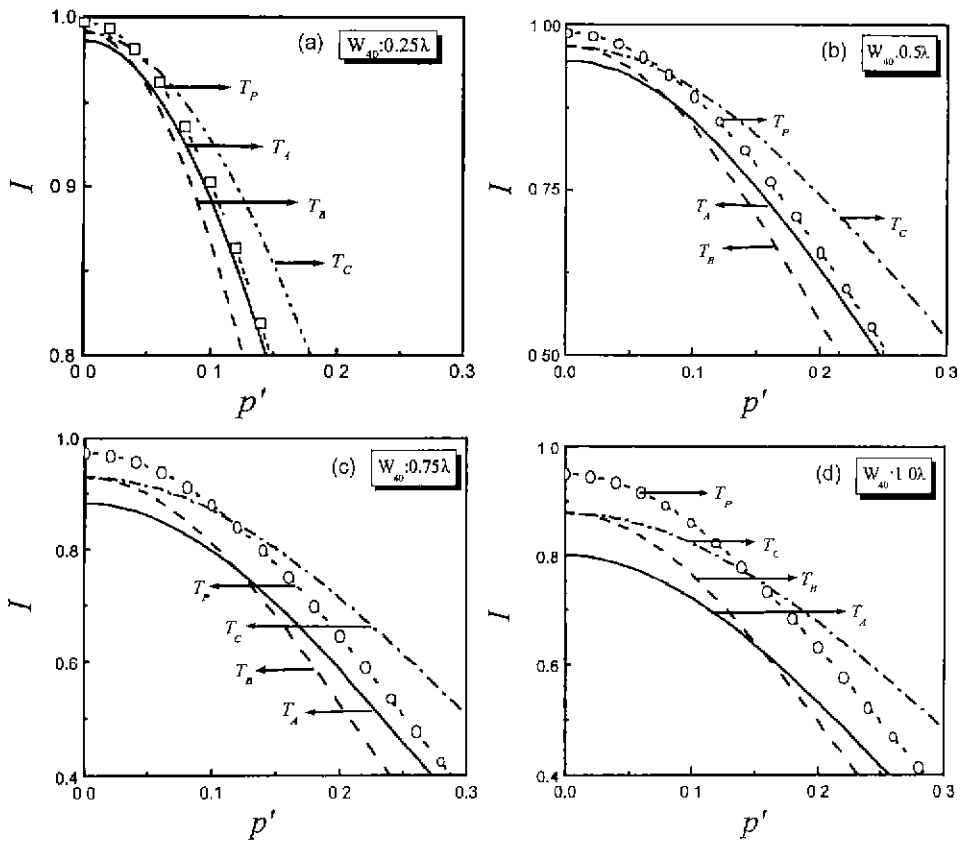


그림 4. 최적 상면에서 최적화된 위상 변조 광학계, T_A , T_B , 그리고 T_C 광학계의 강도 분포.

위상 변조 광학계의 중심 강도가 광학계에 포함된 구면 수차량에 관계없이 T_A , T_B , 그리고 T_C 의 중심 강도보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 수차량이 증가할수록 T_A , T_B , 그리고 T_C 의 중심 강도값이 최적화된 위상 변조 광학계의 중심 강도 보다 크게 낮아짐을 알 수 있다. 이는 환형 위상 변조된 광학계가 구면수차량이 증가할수록 수차 보정 효과가 우수함을 나타낸다.

IV. 결 론

본 연구에서는 환형 위상 변조 광학계를 고려하였고, 환형 부분의 변조 폭과 위치에 따른 위상 변조량을 결정하는 최적화 프로그램을 개발하였다. 프로그램에 의해 결정된 위상 변조 조건을 적용한 환형 위상 변조 광학계의 결상 특성을 분석하기 위해 중심 강도를 조사하였으며, 조사된 중심 강도를 단조 증가 형태와 단조 감소 형태로 진폭 변조된 광학계, 그리고 균일한 진폭을 갖는 광학계의 중심 강도에 비교하여 중심 강도 변화율을 조사하였다.

광학계에 포함된 구면수차량이 0.25λ , 0.5λ , 0.75λ , 1.0λ 인 경우에 환형 위상 변조된 광학계의 최대 강도 값은 진폭 변조된 광학계와 균일한 진폭을 갖는 광학계의 최대 중심 강도 값보다 높게 나타났다. 특히 최적의 환형 위상 변조 광학계는 구면 수차량이 증가할수록 수차 보정 효과가 우수함을 확인할 수가 있었다.

최적의 위상 변조 광학계의 환형 폭은 47%정도 차지하였고, 위상 변조량은 수차가 클수록 증가하였다. 환형의 위치는 0.43과 0.904로 수차량의 변화에 따른 변화가 없었다. 이 결과로부터 광학계가 수차의 영향을 가장 크게 받는 영역을 확인할 수가 있었고, 이 영역에 고려된 수차량에 따라 결정된 위상 변조량을 적용한 경우 광학계의 결상 성능을 크게 향상시킬 수 있었다.

이러한 결과들은 초분해능을 갖는 초정밀 광학계 개발에 적용할 수 있으리라 기대되며, 특히 구면수차의 영향을 크게 받는 DVD pick up head에 적용할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국표준과학연구원에서 시행한 기관고유사업의 연·학 협동연구과제의 지원에 의해서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. Ando, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 557 (1992).
- [2] H. Ando, T. Yokota, K. Tanoue., Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 5269 (1993).
- [3] H. Ando, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, Pt. 1(2A), 757 (1999).
- [4] P. Y. Liu *et al.*, IEEE Transactions on Magnetics **34**, 462 (1998).
- [5] T. R. M. Sales, G. M. Morris, Opt. Comm. **156**, 227 (1998).
- [6] M. M. Corral *et al.*, Opt. Comm. **119**, 491 (1995).
- [7] M. M. Corral *et al.*, Opt. Comm. **165**, 267 (1999).
- [8] 홍경희, 오병완, 정창섭, 한국광학회지 **3**, 143 (1992).
- [9] 홍경희, 한국광학회지 **4**, 22 (1993).
- [10] 홍경희, 한국광학회지 **10**, 10 (1999).
- [11] 한순희, 정창섭외 6인, 새물리 **32**, 312 (1992).
- [12] 정명렬, 박성중, 심상현, 홍경희, 정창섭, 한국물리학회 논문 초록집 **12** (1994).
- [13] C. W. Lee *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, Pt. 1(1B), 486 (1997).
- [14] J. H. Yoo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, Pt. 1(4B), 2184 (1998).
- [15] C. W. Lee *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, Pt. 1(4B), 2197 (1998).
- [16] H. H. Hopkins, Jap. J. Appl. Phys. **4**, suppl. 1 (1965).
- [17] H. H. Hopkins and M. J. Yzuzl, Opt. Act. **17**, 157 (1969).

The effect of phase modulation on the central peak intensity in an optical system

Young Chol Lee and Chang Sub Chung

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Seong Jong Park

Department of Ophthalmic Optics, Suncheon Chongam College, Suncheon 540-743, Korea

Yun Woo Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received February 24, 2000, Revised manuscript received April 6, 2000)

A lot of various studies are taking advantage of annular masks or various pupil filters to design optical systems such as a digital versatile disc (DVD) pick up head and precise scanning microscopy that have the superresolution beyond the diffraction limit. We considered both annular mask and pupil filter for the superresolution system. Since image quality is a function of annular width, position and modulation amount, we computerized the optimized condition for the phase modulation and investigated the variation of the center peak intensity for the phase modulated system. From this result, we were able to determine the best conditions for the annular apodizer, which give the maximum value of the center peak intensity. We made especially sure that the phase modulated system have an excellent compensation for spherical aberration as it increases.