

## 대칭 및 비대칭 binary filter가 수차를 포함한 광학계의 측상 GAIN에 미치는 영향

최기준 · 정창섭<sup>†</sup>

전남대학교 물리학과

④ 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300번지

심상현

정인대학 안경광학과

④ 580-712 전북 정읍시 시기동 산 9-28번지

(2001년 1월 18일 받음, 2001년 5월 10일 수정본 받음)

본 논문은 annular binary filter로 진폭 변조된 일반광학계와 공초점계에 구면 수차와 코마가 존재할 때 측상 PSF, GAIN을 계산하였다. 고려한 동의 형태는 진폭이 1인  $0 \sim r_1$ 의 안쪽 환형과  $r_2 \sim 1$ 의 바깥쪽 환형으로 구성되어 있고, 두 환형의 면적이 같을 때와 다를 때 두 가지 경우에 대해 고려하였다. 면적이 같을 때를 대칭(symmetry), 다를 때를 비대칭(asymmetry)이라 하여 asymmetry parameter  $\epsilon$ 를 도입하였다. 동의 반경을 1로 규격화한 개구면에서 obstruction parameter  $\mu$ 에 따라 변조폭을 고려하여, 일반광학계와 공초점계에 대한 측상 PSF를 계산하였고, 측상에서 superresolution을 살펴보기 위해서 GAIN을 정의하여  $\mu$ 에 따른 GAIN을 구하였다. 특히 일반광학계에 구면수차가 존재할 때, 측상 PSF를 수식적으로 전개하였다.

분류코드 : SM.010.

### I. 서 론

광학계의 사용범위가 넓어지고, 다양화됨에 따라 우수한 광학계를 설계, 제작하려는 노력이 지속되고 있다. 실질적으로 제작된 광학계가 사용목적에 맞게 제작되었는지를 정밀하게 측정하고 평가하는 것은 대단히 중요하며, 정확한 광학계의 평가와 결상능력을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구는 O'Neil<sup>[1]</sup>등에 의해서 연구된 annular aperture 유형과 M. Mino와 Y. Okano<sup>[2]</sup>등에 의해서 연구된 shaded aperture 유형의 동(pupil)의 진폭변조 방법이 있으며, 다른 방법으로는 위상 지연시키는 방법을 사용한 위상변조 방법이 있다.<sup>[3,4]</sup> 위상변조 방법은 강도가 높게 나타나는 장점이 있지만 제작하기 어렵다는 단점을 가지고 있는 반면 진폭변조 방법은 제작하기 쉬운 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 광학계의 결상능력을 향상시키기 위하여 기존에 본 연구실에서 연구 발표된 바 있는 불균일한 진폭을 갖는 shaded aperture와 central obstruction을 갖는 annular aperture인 경우가<sup>[5-9]</sup> 아닌 M. Martinez-Corral<sup>[10]</sup>이 사용한 annular binary filter<sup>[10,11]</sup>를 적용하였다. 그림 1과 같이 동의 반경을 1로 규격화한 개구면에서  $0 \sim r_1$ ,  $r_2 \sim 1$ 이 진폭 1을 갖는 annular binary filter 형태의 진폭 변조된 광학계가 수차를 포함할 경우 측상 PSF에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 연구를 위해  $r_1$ 과  $r_2$ 의 위치는 obstruction parameter  $\mu$ 를 변화시킴으로써 동의 중심으로부터 1까지 세분화하였다. 첫 번째

는 내부의 환형과 외부의 환형이 같은 면적일 경우, 두 번째는 면적이 다른 경우로 asymmetry parameter  $\epsilon$ 을 변화시키면서 측상 PSF를 계산하였다. 그리고 이러한 annular binary filter가 측상 PSF에 미치는 영향을 조사하기 위해 최대강도의  $1/2^{\circ}$  되는 폭의 비율을 GAIN이라 정의하고, 이를 이용하여 구면수차 또는 코마가 각각 0, 0.25λ, 0.50λ, 0.75λ, 1.00λ를 갖는 광학계에 대해 GAIN을 계산하였다. 구면수차를 포함한 일반 광학계의 경우는 PSF로부터 1-D Fourier transform으로 변환하고 전개하여 Fresnel 적분형태로 구하였다. 이러한 filter가 초분해능을 갖는 광학계로 응용될 수 있는 confocal

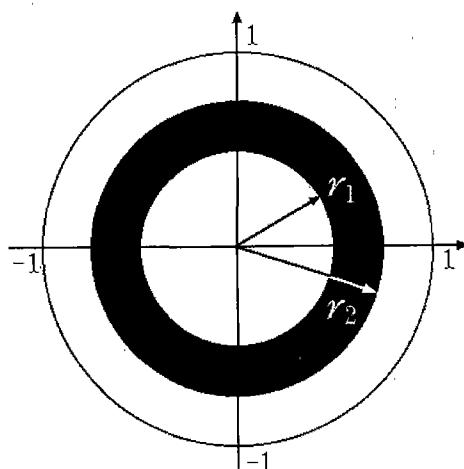


그림 1. Annular binary filter를 적용한 광학계의 동의 형태.

<sup>†</sup>E-mail: cschung@chonnam.chonnam.ac.kr

scanning optical microscopy에 적용하여, 이에 대해 수치특성을 조사하였다.

## II. 수치를 포함한 일반광학계에 annular binary filter를 적용했을 때 축상 GAIN의 변화

**2.1. 진폭 변조 annular binary filter를 적용한 광학계**  
진폭변조를 고려한 광학계의 동함수  $f(r, \phi)$ 는

$$f(r, \phi) = T(r, \phi) \exp[2\pi i(W(r, \phi))] \quad (1)$$

로 표현되고, 축상 PSF는

$$I(0, W_{20}) = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} T(r) \exp[2\pi i(W_{20}(r, \phi) + W'(r, \phi))] r dr d\phi \right|^2 \quad (2)$$

이 된다.

여기서 진폭분포 함수  $T(r)$ 은

$$T(r) = \begin{cases} 1 & (0 \leq r \leq r_1) \\ 0 & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ 1 & (r_2 \leq r \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

과 같이 표현되고, 수치는  $W(r, \phi) = W_{40}r^4 + W_{31}r^3 \cos\phi$ 인 경우를 고려하였다.

본 논문에서 사용한  $r_1$ 과  $r_2$ 는 표 1과 같다.

여기서  $\mu$ 는 obstruction parameter로 값의 범위는 0에서 1이며, 0일 때는 clear aperture, 1에 가까워 질수록 많이 가린 경우이다.  $\varepsilon$ 는 asymmetry parameter로써  $\mu$ 에 의해 가려진 면적이 결정되면, 안쪽과 바깥쪽 환형 면적의 대칭 정도를 나타내는 변수로  $0.5 < \varepsilon \leq 1$ 의 값을 갖으며, 0.5일 때는 같은 면적을 갖게 되는 경우이며, 1에 가까워질수록 바깥쪽 환형의 면적이 더 넓게 되는 비대칭의 경우가 된다.

### 2.2. 수치계산

크게 대칭인 경우와 비대칭인 경우로 나누고 이러한 filter가 구면수차 또는 코마를 포함한 광학계에 대해 축상 PSF를 구하였다. 각 경우에 대해 PSF를 프로그램화하여 수치 계산을 하였고, 특히 축상에서 구면수차가 존재할 때는 수식적으로 유도하였으며 수치계산을 통해 얻은 결과와 동일함을 검증하였다.

다음은 수식적으로 유도한 경우인 대칭면적의 annular binary filter를 적용한 광학계에 구면수차가 있을 때 축상 PSF를 수식적으로 유도하는 과정을 나타내었다.

복소진폭함수는

표 1. 대칭 filter와 비대칭 filter를 적용한 광학계에서  $\mu, \varepsilon$ 에 따른  $r_1, r_2$ 의 위치

	$r_1$	$r_2$
대칭인 경우	$\sqrt{0.5(1-\mu)}$	$\sqrt{0.5(1+\mu)}$
비대칭인 경우	$\sqrt{0.5 - \varepsilon\mu}$	$\sqrt{0.5 + (1-\varepsilon)\mu}$

$$F(p', W_{20}) = \frac{1}{A} \int_0^1 \int_0^{2\pi} T(r) \exp[2\pi i(W_{40}r^4 + W_{20}r^2)] \times \exp(2\pi i p' r \cos\phi) r dr d\phi \quad (4)$$

이 되며, 이를  $\phi$ 에 대해 적분하면 Bessel함수 형태로 주어지고, 다시 규격화하여 얻어진 축상 복소진폭함수는

$$F(0, W_{20}) = 2 \left[ \int_0^{\sqrt{0.5(1-\mu)}} \exp[2\pi i(W_{40}r^4 + W_{20}r^2)] r dr + \int_{\sqrt{0.5(1+\mu)}}^1 \exp[2\pi i(W_{40}r^4 + W_{20}r^2)] r dr \right] \quad (5)$$

이 된다. 여기서 치환한 후, Fresnel 적분을 사용하여 얻어진 복소 진폭함수는

$$F(0, W_{20}) = \frac{e^{-i\frac{\pi W_{20}^2}{2W_{40}}}}{2\sqrt{W_{40}}} \left\{ C \left[ \frac{W_{40}(1-\mu) + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] + iS \left[ \frac{W_{40}(1-\mu) + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - iS \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] + C \left[ \frac{2W_{40} + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] + iS \left[ \frac{2W_{40} + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{40}(1+\mu) + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - iS \left[ \frac{W_{40}(1+\mu) + W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right\} \quad (6)$$

이 된다. 여기서  $C(z), S(z)$ 는 Fresnel 적분으로써 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

$$F(z) = C(z) + iS(z), \quad F(z) = \int_0^z \exp\left[i\left(\frac{\pi}{2}s^2\right)\right] ds$$

$$C(z) = \int_0^z \cos\left(\frac{\pi}{2}s^2\right) ds, \quad S(z) = \int_0^z \sin\left(\frac{\pi}{2}s^2\right) ds \quad (7)$$

따라서 구면수차를 포함한 광학계의 축상 PSF는

$$I(0, W_{20}) = |F(0, W_{20})F^*(0, W_{20})|$$

$$= \frac{1}{4W_{40}} \left\{ \left( C \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1-\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] + C \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1+\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right)^2 + \frac{1}{4W_{40}} \left\{ \left( S \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1-\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] + S \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1+\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right)^2 \right\} \right\} \quad (8)$$

으로 주어진다.

축상에서 FWHM을 알아보기 위해 최대강도를 구하면,  $W_{20} = -W_{40}$ 인 조건에서 최대강도를 가지므로,<sup>[12]</sup>

$$I(0, -W_{40}) = |F(0, -W_{40})F^*(0, -W_{40})|$$

$$= \frac{1}{W_{40}} (C[\sqrt{W_{40}}] - C[\mu\sqrt{W_{40}}])^2 + \frac{1}{W_{40}} (S[\sqrt{W_{40}}] - S[\mu\sqrt{W_{40}}])^2 \quad (9)$$

로 주어지고, half maximum인 곳의  $W_{20}$ 을 구하기 위해서는  $\frac{I(0, W_{20})}{I(0, -W_{40})} = \frac{1}{2}$  라 하여 정리하면,  $W_{40} \neq 0$ 인 조건에서 다음 식을 만족한  $W_{20}$ 이 된다.

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[ C \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - C \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1-\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] + C \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1+\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\} \\ & + \left\{ \left[ S \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - S \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1-\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] + S \left[ \frac{W_{20} + W_{40}(1+\mu)}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\}^2 \\ & - 2 \left\{ (C[\sqrt{W_{40}}] - C[\mu\sqrt{W_{40}}])^2 + (S[\sqrt{W_{40}}] - S[\mu\sqrt{W_{40}}])^2 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Filter를 적용하기 전과 후의 축상 PSF 폭을 비교하기 위해 GAIN을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{GAIN} = \frac{\text{Clear aperture일 때 축상에서 최대강도의 } 1/2\text{이 되는 폭}}{\text{Apodizer를 적용했을 때 축상에서 최대강도의 } 1/2\text{이 되는 폭}} \quad (11)$$

GAIN이 1보다 큰 경우는 축상에서의 폭이 clear aperture보다 좁은 경우이고, 1보다 작은 값을 가질 경우에는 clear aperture인 경우보다 폭이 넓은 경우이다. GAIN은 Fresnel 적분을 통해 근을 구하지 못하여 식을 프로그램화하여 결과를 얻었으며, 겹중은 축상 PSF를 수치적분하여 얻은 GAIN과 비교하였다.

비대칭면적의 filter를 적용한 광학계에서의 축상 PSF도 대칭 filter를 적용한 광학계에서 사용했던 방법을 적용하면

$$\begin{aligned} F(0, W_{20}) = & 2 \left[ \int_0^{\sqrt{0.5-\varepsilon\mu}} \exp [2\pi i(W_{40}r^4 + W_{20}r^2)] r dr \right. \\ & \left. + \int_{\sqrt{0.5+(1-\varepsilon)\mu}}^1 \exp [2\pi i(W_{40}r^4 + W_{20}r^2)] r dr \right] \end{aligned} \quad (12)$$

이 되고, 이에 대한 강도는

$$\begin{aligned} I(0, W_{20}) = & |F(0, W_{20})F^*(0, W_{20})| \\ = & \frac{1}{4W_{40}} \left\{ \left[ C \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - C \left[ \frac{W_{40}(1-2\varepsilon\mu)+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] + C \left[ \frac{W_{40}[1+2(1-\varepsilon)\mu]+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\} \\ & + \frac{1}{4W_{40}} \left\{ \left[ S \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - S \left[ \frac{W_{40}(1-2\varepsilon\mu)+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] + S \left[ \frac{W_{40}[1+2(1-\varepsilon)\mu]+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

이 되며,  $W_{20} = -W_{40}$ 일 때 최대강도를 갖기 때문에<sup>[12]</sup> 최대강도는

$$\begin{aligned} I(0, -W_{40}) = & |F(0, -W_{40})F^*(0, -W_{40})| \\ = & \frac{1}{4W_{40}} (-2C[\sqrt{W_{40}}] + C[2\sqrt{W_{40}}[1-\varepsilon]\mu] + C[2\sqrt{W_{40}}(\varepsilon\mu)])^2 \\ & + \frac{1}{4W_{40}} (-2S[\sqrt{W_{40}}] + S[2\sqrt{W_{40}}[1-\varepsilon]\mu] + S[2\sqrt{W_{40}}(\varepsilon\mu)])^2 \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다.

Half maximum이 되는  $W_{20}$ 을 구하기 위하여 대칭인 경우와 같이  $\frac{I(0, W_{20})}{I(0, -W_{40})} = \frac{1}{2}$  라 놓고 정리하면,  $W_{40} \neq 0$ 인 조건에서 다음을 만족한  $W_{20}$ 이 된다.

$$\begin{aligned} & 2 \left\{ \left[ \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - C \left[ \frac{W_{40}(1-2\varepsilon\mu)+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + C \left[ \frac{W_{40}[1+2(1-\varepsilon)\mu]+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\} \\ & + 2 \left\{ \left[ S \left[ \frac{W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{20} + 2W_{40}}{\sqrt{W_{40}}} \right] - S \left[ \frac{W_{40}(1-2\varepsilon\mu)+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + S \left[ \frac{W_{40}[1+2(1-\varepsilon)\mu]+W_{20}}{\sqrt{W_{40}}} \right] \right]^2 \right\} \\ & - (-2C[\sqrt{W_{40}}] + C[2\sqrt{W_{40}}[(1-\varepsilon)\mu]] + C[2\sqrt{W_{40}}(\varepsilon\mu)])^2 \\ & - (-2S[\sqrt{W_{40}}] + S[2\sqrt{W_{40}}[(1-\varepsilon)\mu]] + S[2\sqrt{W_{40}}(\varepsilon\mu)])^2 \end{aligned} \quad (15)$$

대칭의 binary filter의 경우와 같이 (11)식을 이용하여 GAIN을 구하였다.

코마를 포함한 경우는 직접적인 적분이 불가능하여 수치적분을 통해 결과를 얻었으며 축상 PSF는

$$I(0, W_{20}) = \frac{1}{I_0} \int_0^1 \int_0^{2\pi} T(r) \exp [2\pi i(W_{20}r^2 + W_{31}r^3 \cos \phi)] r dr d\phi \quad (16)$$

이 된다.

이 식을 이용하여 PSF의 최대강도를 찾은 다음, 최대강도의  $1/2$ 이 되는  $W_{20}$ 의 폭을 구하고, GAIN의 정의를 이용하여 결과를 나타내는 프로그램을 작성하였다.

본 연구에서는 구면수차 또는 코마가 각각 0, 0.25  $\lambda$ , 0.50  $\lambda$ , 0.75  $\lambda$ , 1.00  $\lambda$ 를 포함한 광학계가 대칭 filter( $\varepsilon = 0.5$ )와 비대칭 filter( $\varepsilon = 0.55, 0.60, 0.70, 0.80, 1.00$ )를 적용했을 때 축상 PSF, GAIN을 계산하였다.

### 2.3. 결과 및 분석

수차를 포함하지 않은 광학계에 대칭 filter를 적용했을 때 축상 GAIN은 그림 2의 (a)와 (c)에 나타나 있고, 비대칭 filter를 적용했을 때는 (e)의 그림과 유사한 결과를 얻을 수

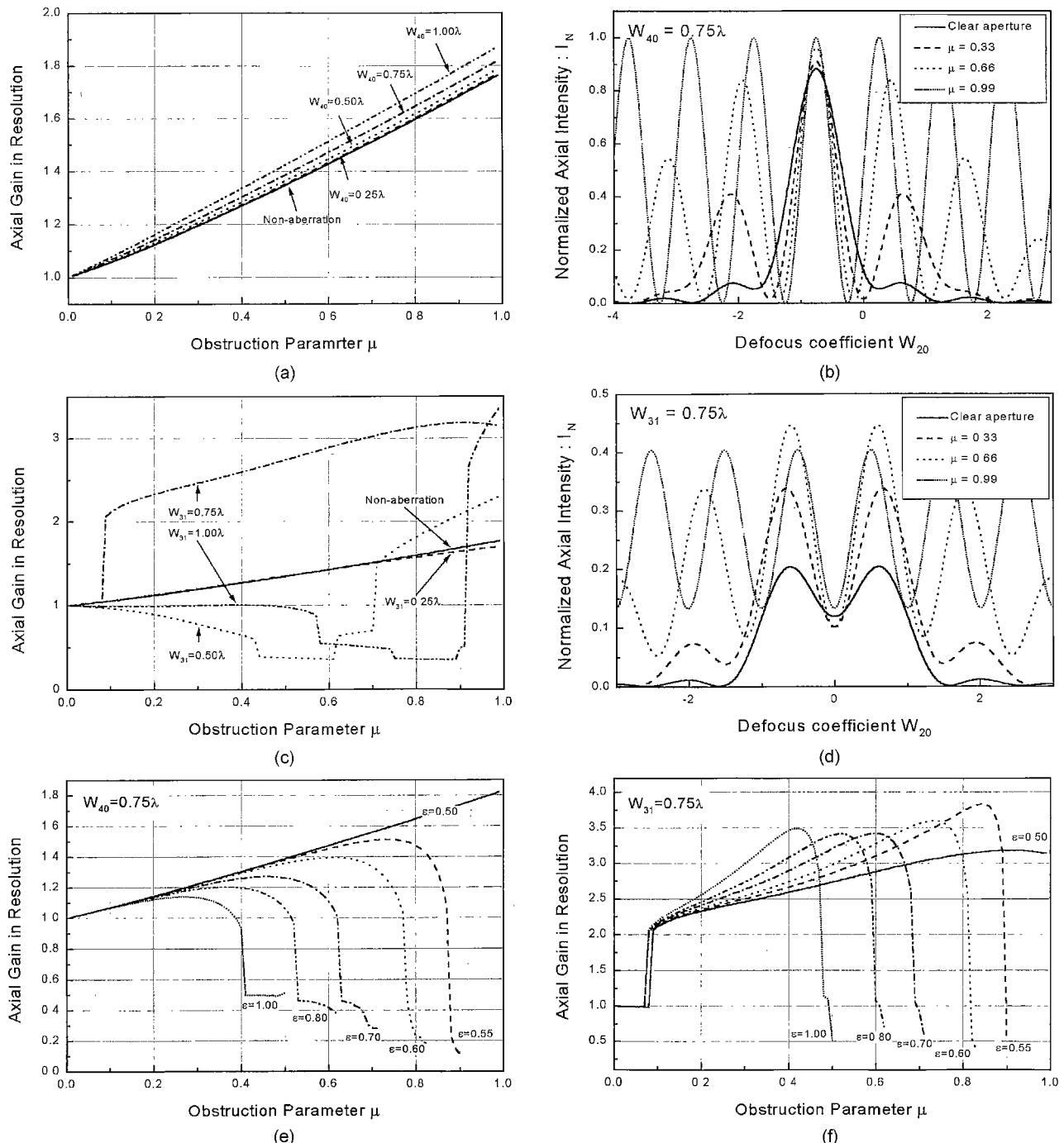


그림 2. 대칭 filter와 비대칭 filter를 적용한 일반광학계에서 수차에 따른 GAIN (a) 대칭 filter, 무수차, 구면수차가 있을 때 축상 GAIN, (b) 대칭 filter,  $W_{40}=0.75\lambda$ 일 때 축상 PSF, (c) 대칭 filter, 무수차, 코마가 있을 때 축상 GAIN, (d) 대칭 filter,  $W_{31}=0.75\lambda$ 일 때 축상 PSF, (e) 비대칭 filter,  $W_{40}=0.75\lambda$ 일 때 축상 GAIN, (f) 비대칭 filter,  $W_{31}=0.75\lambda$ 일 때 축상 GAIN.

있었다. (e)는 구면수차  $0.75\lambda$ 를 포함한 광학계를 나타내고 있지만,  $0, 0.25\lambda, 0.50\lambda, 1.00\lambda$  모두 유사한 그래프 형태를 보이고 있어 대표로  $0.75\lambda$ 를 나타내었다. 수차를 포함하지 않은 광학계에 대칭인 filter를 적용한 경우의 GAIN은  $\mu$ 가 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 반면, 비대칭인 경우는 대칭인 경우보다 낮은 값을 나타내었다.

구면수차를 포함한 광학계의 경우 수차가 존재함에도 불구

하고 대칭인 filter를 적용하면 FWHM은 계속 줄어듦을 알 수 있었다. 따라서 구면수차가  $1.00\lambda$ 까지는 이 filter를 적용하면 이점을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 수차가 없는 경우와 마찬가지로 구면수차를 포함하고 있을 때도 대칭인 경우의 GAIN이 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 수차가 증가함에 따라 최대강도를 갖는  $W_{20}$ 이  $-W_{40}$ 이었으며, 이는 식을 전개해 나갈 때 사용했던 Ojeda-Castaneda의 결과<sup>[12]</sup>

와 일치함을 알 수 있었다.

코마가 존재할 때는 비대칭 filter를 적용한 광학계가 대칭 filter를 적용한 광학계보다 GAIN이 더 증가함을 알 수 있었으며, 대칭인 filter를 적용하였을 때 그림 2의 (d)에 나타난 것처럼 코마가  $0.75\lambda$ 의 PSF에서  $\mu$  값에 따른 그래프의 형태로 미루어 GAIN이 증가함을 설명할 수 있었다. 코마의 경우는 수차량에 따라 GAIN의 변화가 심함을 알 수 있었으며, 비대칭인 경우는 그림 2의 (f)에  $0.75\lambda$ 인 경우만 나타내었다.

이러한 filter를 일반광학계에 적용하여 얻은 결과는 GAIN이 증가하는 장점을 얻었지만 그림 2의 (b)와 (d)를 보면 알 수 있듯이 PSF의 side-lobe가 커지는 단점이 있었다.

### III. 수차를 포함한 공초점계에 Annular binary filter를 적용했을 때 축상 GAIN의 변화

#### 3.1. 공초점계에 대한 기초이론

일반적인 광학현미경에서 최근에 더욱 발전하여 confocal scanning optical microscopy가 등장하였다. 기존의 광학현미경에 비해 confocal scanning optical microscopy의 이점을 살펴보면, 첫째 3D 물체의 면을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 살아있는 표본까지도 절단하지 않고 비접촉식으로 단면을 나타낼 수 있는 기능을 가지고 있다. 둘째, 기존의 광학현미경은 물체의 전 영역에 대해 조사하여(full-field illumination) 상을 맷으로 정확한 초점을 제외하고는 초점의 위쪽과 아래쪽에서 오는 빛에 의해 어느 정도의 흐려짐이 발생할 수 있어, 상의 선명도를 감소시킨다. 그러나 공초점 광학 현미경은 물체에 단일 점으로 조사(point scanning illumination)하여 상을 맷기 때문에 초점에서 오는 빛으로만 상을 형성시키므로, 공초점 현미경은 축상에서의 강도분포가 중요하게 되고, 이를 이용하여 물체에 손상이 가지 않고도 절단면을 나타낼 수 있는 기능을 갖게 할 수 있다.<sup>[13,14]</sup>

Annular binary filter를 공초점계에 적용하면 side-lobe를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, GAIN이 증가하여 초분해능을 갖는 광학계가 된다는 것은 M. Martinez-Corral에 의해 밝혀졌으며, 이러한 superresolving filter는 optical data storage, lithography, microscopy등의 분야에 응용 가능하게 된다.<sup>[15]</sup>

이러한 광학계에 대칭 annular binary filter와 비대칭 annular binary filter를 적용하고, 구면수차 또는 코마가 포함되어 있을 때 GAIN을 조사하였다.

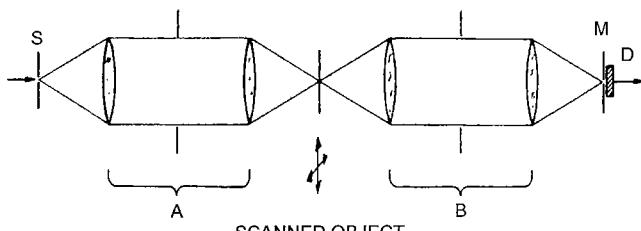


그림 3. 공초점계의 원리 : S-point source, M-pinhole mask, D-detector A-illumination system, B-collecting system.

#### 3.2. 수치계산

이러한 공초점계에서 PSF는

$$I(p', W_{20}) = |F_{il}(p', W_{20}) \times F_{col}(p', W_{20})|^2 \quad (17)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 축상의 복소진폭함수는 각각

$$\begin{aligned} F_{il}(0, W_{20}) &= \frac{1}{A} \int_0^1 \int_0^{2\pi} T_{il}(r) \exp[2\pi i(W_{20}r^2 + W')] r dr d\phi \\ F_{col}(0, W_{20}) &= \frac{1}{A} \int_0^1 \int_0^{2\pi} T_{col}(r) \exp[2\pi i(W_{20}r^2 + W')] r dr d\phi \end{aligned} \quad (18)$$

이 된다. 여기서  $W'$ 는 구면수차, 코마를 나타내는 수차이고, 통합수  $T_{il}(r)$ 은 clear aperture를,  $T_{col}(r)$ 은 annular binary filter를 적용한 광학계를 사용하였다. 수차가 포함되어 있을 때는 조명계와 집광계에 동등한 수차가 있다고 가정하였으며 일반광학계에서 사용하였던 동일한 수차량과 동일한  $\epsilon$ 을 적용하여, 공초점계에서 축상 PSF, GAIN을 계산하였다.

#### 3.3. 결과 및 분석

그림 4의 (a)와 (c)는 공초점계가 수차를 포함하고 있지 않은 경우의 축상 GAIN을 나타내고, 그림 4의 (b)인 PSF를 보면 알 수 있듯이 일반광학계에 적용하여 얻은 결과와 유사하게 FWHM은  $\mu$ 의 증가에 따라 계속 줄어들어 GAIN이 증가함을 알 수 있었다. 그림 4의 (b)와 (d)를 통해 일반광학계에서 단점으로 작용하던 side-lobe는 급격히 감소하였음을 알 수 있었다. 수차가 포함되어 있지 않을 때는 일반 광학계의 경우와 마찬가지로 대칭인 경우가 비대칭인 경우보다 높은 값의 GAIN을 나타내었다.

구면수차를 포함한 경우는  $\mu$ 의 증가에 따라 FWHM은 계속 줄어들어 GAIN의 증가를 나타내었고, 대칭 filter를 적용한 경우가 비대칭을 적용한 경우보다 더 양호한 결과를 나타내었다. 0, 0.25  $\lambda$ , 0.50  $\lambda$ , 0.75  $\lambda$ , 1.00  $\lambda$  모두 유사한 결과를 얻어 대표로 구면수차가  $0.75\lambda$ 인 경우만 나타내었다(그림 4(e)).

코마를 포함한 경우도 일반광학계와 마찬가지로 비대칭 filter를 적용한 광학계가 대칭 filter를 적용한 광학계보다 GAIN이 더 증가함을 알 수 있었다.

공초점계에 annular binary filter를 적용하였을 때는 일반광학계에 적용하여 얻은 결과와 동일하게 구면수차가 존재할 때는 대칭 binary filter가, 코마가 존재할 때는 비대칭 binary filter가 더 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 일반광학계와 공초점계에 적용하여 얻은 결과의 큰 차이는 공초점계에서 side-lobe가 많이 감소함을 알 수 있었으며, 이는 조명계와 집광계 모두 동등한 수차를 가지고 있을 때 공초점계의 PSF는 clear aperture인 조명계와 binary filter를 적용한 집광계의 PSF 곱이기 때문에 side-lobe가 감소함을 설명할 수 있다.

### IV. 결 론

본 연구에서는 동의 반경을 1로 규격화한 개구면에서  $0 \sim r_1$ 과  $r_2 \sim 1$ 에서 진폭 1을 갖는 annular binary filter가 수차를 포함한 광학계의 축상 PSF에 미치는 영향을 조사하였고, 이러

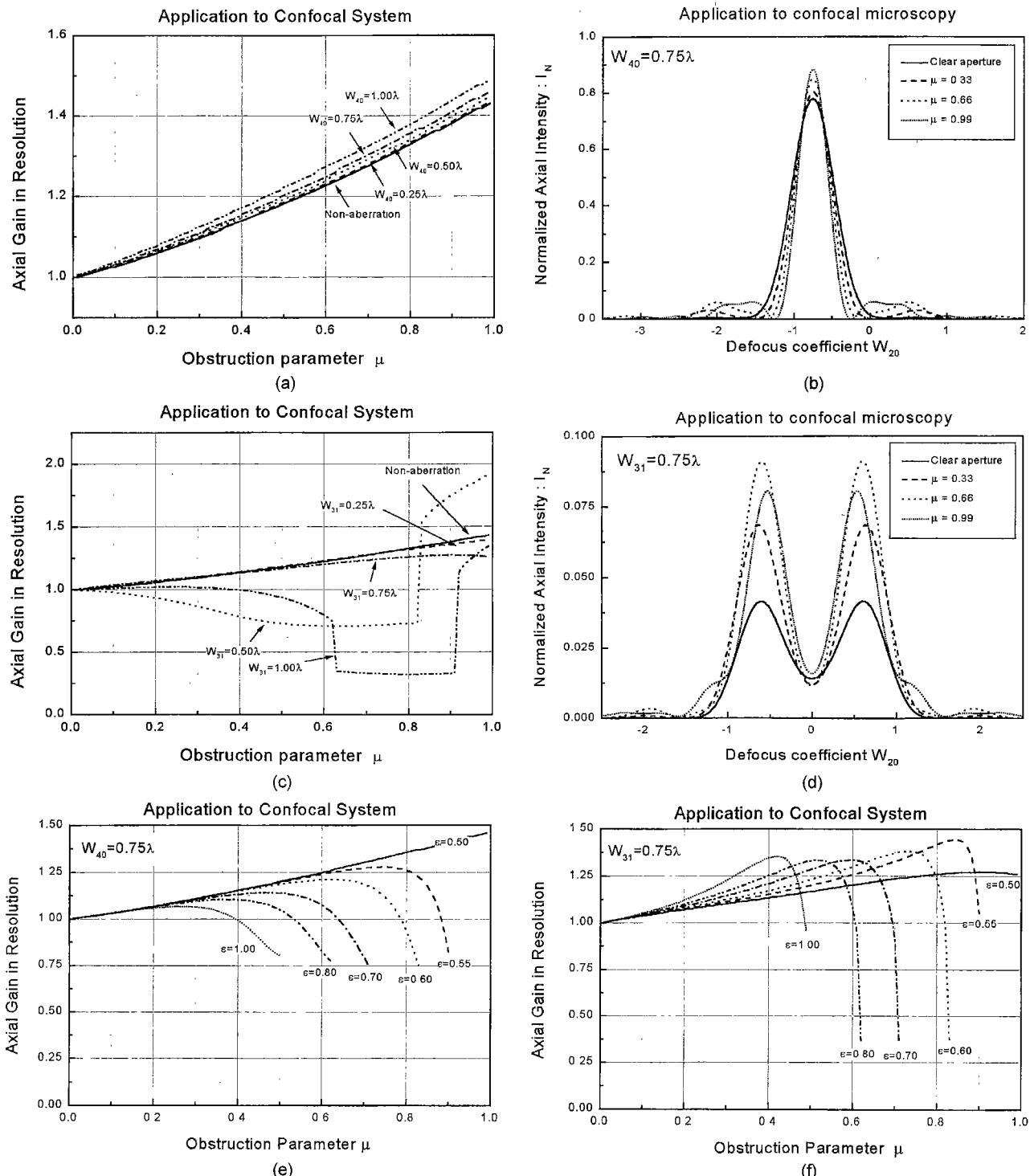


그림 4. 대칭 filter와 비대칭 filter를 적용한 공초점계에서 수차에 따른 GAIN. (a) 대칭 filter, 무수차, 구면수차가 있을 때 축상 GAIN, (b) 대칭 filter,  $W_{40} = 0.75 \lambda$ 일 때 축상 PSF, (c) 대칭 filter, 무수차, 코마가 있을 때 축상 GAIN, (d) 대칭 filter,  $W_{31} = 0.75 \lambda$ 일 때 축상 PSF, (e) 비대칭 filter,  $W_{40} = 0.75 \lambda$ 일 때 축상 GAIN, (f) 비대칭 filter,  $W_{31} = 0.75 \lambda$ 일 때 축상 GAIN.

한 특성을 살펴보기 위해 GAIN을 정의하여 사용하였다.  $r_1$ 과  $r_2$ 의 위치는  $\mu$ 를 변화시키면서 동의 중심인  $r=0$ 부터 1까지 세분화하였으며, 대칭면적인 경우와 비대칭면적인 경우에 대해  $\varepsilon$ 을 변화시키면서 수차가 포함된 일반광학계와 공초점계의

축상 PSF를 계산하여 GAIN을 구하였다. 수식 전개는 구면수차를 포함한 일반광학계에서 PSF를 1-D Fourier transform으로 변환하고 전개하여 Fresnel 적분형태로 구하였다.

대칭인 경우는 무수차 광학계와 구면수차를 포함한 광학계

에서, 그리고 비대칭인 경우는 코마를 포함한 광학계에 적용하였을 때 양호한 GAIN을 얻을 수 있었다. 일반광학계에 annular binary filter를 적용하였을 때 축상에서 GAIN이 증가하는 장점이 있지만 side-lobe가 커지는 단점이 있었으며, 공초점계에 filter를 적용하였을 때는 GAIN이 증가, side-lobe를 줄이는 장점을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 수차가 포함된 광학계에 대해  $\mu$ 와  $\varepsilon$ 을 조절하면 원하는 축상 PSF, GAIN을 얻을 수 있으리라 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- [1] E. L. O'Neill, "Transfer function for an annular aperture," *J. Opt. Soc. Am.*, 4, p. 285, 1956.
- [2] M. Mino and Y. Okano, "Improvement in the OTF of a defocused Optical System Through the Use of Shaded Apertures," *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 1, pp. 2219-2225, 1971.
- [3] 정명렬, 박성종, 심상현, 홍경희, 정창섭, "Annular 형태로 위상변조된 Aperture가 광학계의 PSF에 미치는 영향," 제69회 한국물리학회논문 초록집 12(2), 1994. p. 332
- [4] 박성종, 이종진, 정창섭, "Amplitude filter와 Phase filter가 결합된 광학계의 결상특성," 한국광학회지, 제4권 1호, pp. 9-14, 1993.
- [5] C. S. Chung and H. H. Hopkins, "Influence of non-uniform amplitude on PSF," *J. Modern Opt.*, vol. 35, no. 9, pp. 1485-1511, 1988.
- [6] Chang S. Chung and Harold H. Hopkins, "Influence of non-uniform amplitude on the optical transfer function," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 6, pp. 1244-1250, 1989.
- [7] 이종진, 심상현, 정창섭, "Shaded aperture가 여러 가지 수차를 복합적으로 포함하는 광학계의 MTF에 미치는 영향," 새물리, vol. 32, no. 5, pp. 667-673, 1992.
- [8] 심상현, 정창섭, "OTF 계산값을 이용한 ERF 계산," 한국광학회지, 제4권 2호, pp. 140-144, 1993.
- [9] 심상현, 정창섭, "Shaded aperture가 ERF에 미치는 영향," 새물리, vol. 33, no. 4, pp. 464-468, 1993.
- [10] Manuel Martinez-Corral, Pedro Andres, Jorge Ojeda-Castañeda and Genaro Saavedra, "Tunable axial superresolution by annular binary filters," *Opt. Comm.*, 119, pp. 491-498, 1995.
- [11] Manuel Martinez-Corral, Pedro Andres, Carlos J. Zapata-Rodriguez and Marek Kowalczyk, "Three-dimensional superresolution by annular binary filters," *Opt. Comm.*, 165, pp. 267-278, 1999.
- [12] J. Ojeda-Castañeda, P. Andres and A. Diaz, "Strehl ratio with low sensitivity to spherical aberration," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 5, no. 8, pp. 1233-1236, 1988.
- [13] C. J. R. Sheppard and D. M. Shotton, "Confocal Laser Scanning Microscopy, Microscopy" (Springer-Verlag Singapore Pte Ltd. 1997)
- [14] 신은성, 남기봉, "회전원판식 공초점 현미경의 구성과 광학특성," 한국광학회지, 제8권 4호, pp. 255-259, 1997.
- [15] Z. S. Hegedus and V. Sarafis, "Superresolving filters in confocally scanned imaging systems," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 3, no. 11, pp. 1892-1896, 1986.

### Influence of symmetrical and asymmetrical binary filter on the axial GAIN of optical systems with aberrations

Ki Jun Choi and Chang Sub Chung<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>E-mail: cschung@chonnam.chonnam.ac.kr

Sang Hyun Sim

Department of Optometry, Chongin College, Jeungup 580-712, KOREA

(Received January 18, 2001 ; Received manuscript received May 10, 2001)

We discuss the influence of annular binary filters on the axial PSF of imaging systems which are apodized by a radially-symmetric filter and have spherical aberration and coma. In this paper we consider a whole family of annular binary filters in two cases. First, the binary filters are composed of two transparent annuli of the same area. Second, the binary filters are composed of a central clear circle and a concentric annular aperture with area bigger than that of the inner circle. In order to investigate the influence of the proposed filters on the axial PSF, we may use the axial resolution gains, which evaluate in terms of the FWHM of the intensity in the focal region of an apodized imaging system in comparison with that corresponding to a nonapodized one. We evaluate the PSF for the conventional and confocal systems having an aberration.

Classification code : SM.010.