

## Defocus에 따른 Bessel Beam의 회절 특성

박성종 · 최기준 · 박민경 · 김재범 · 심상현 · 정창섭

전남대학교 자연과학대학 물리학과

(1995년 4월 22일 받음)

본 연구에서는 CFAP(Combined Filter of Amplitude and Phase) 형태의 진폭과 위상이 변조된 Bessel beam의 회절 특성을 조사하기 위해 무수차 광학계와 구면수차가 포함된 광학계 각각에 대한 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화, 그리고 Optical Transfer Function(OTF) 변화를 Bessel beam의 마디 수를 증가시키면서 계산하였다. Bessel beam은 구면수차를 포함한 광학계에서의 최대 강도 값과 최대 강도 점에서의 OTF 값이 무수차 광학계의 경우보다 크게 나타나는 구면수차 보정효과를 보였으며, 특히 구면수차가 3λ 포함된 광학계에서의 OTF 값은 Clear aperture의 경우보다 높은 OTF 값을 보였다. 또한 defocus에 따른 중심 스폿의 반경은 Airy disk의 반경보다 훨씬 작게 나타나는 영역이 있음을 알 수 있었으며, 이러한 결과들은 고집적 반도체 소자 제작을 비롯한 고밀도 광 기록 장치에 이용 가능할 것이다.

### I. 서 론

각 연구소 및 산업 현장에서는 다양한 광학계가 폭넓게 사용되고 있으며, 보다 우수한 결상 능력을 갖는 광학계를 필요로 하고 있다. 최근에는 고집적 반도체 소자 제작을 비롯한 고밀도 광 기록 장치등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 이러한 분야의 연구로 한계분해능 이상의 고분해능을 갖는 광학계에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구실에서는 이러한 연구로 point spread function(PSF)와 encircled energy를 이용하여 CFAP 형태의 진폭과 위상이 변조된 Bessel beam의 결상 특성을 연구 보고한 바 있다.<sup>[1]</sup>

이러한 Bessel beam은 회절 효과를 최소화하는 diffraction free beam의 개념으로 Durnin<sup>[2,3]</sup> 등에 의해서 소개되었으며, 이론적, 실험적인 많은 연구가 수행되고 있다.<sup>[4-8]</sup>

본 연구에서는 진폭과 위상이 변조된 Bessel beam들을 광학계의 성능 평가 방법인 PSF와 OTF를 사용하여 무수차 광학계, 구면수차가 1λ 포함된 광학계, 구면수차가 3λ 포함된 광학계 각각에 대한 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화, 그리고 OTF 변화를 Bessel beam의 마디 수를 증가시키면서 계산하여, diffraction free beam의 개념을 갖는 Bessel beam의 defocus에 따른 회절 특성을 조사하였다.

### II. 이론적 고찰

#### 1. 동함수

본 연구에서는 진폭과 위상이 변조된 Bessel beam의 마디 수에 따른 회절 특성을 조사하기 위해 다음과 같이 실수 진폭 함수를 고려했다.

$$\begin{aligned} T_0(r, \phi) &= J_0(\alpha_0 r) & \alpha_0 &= 0 \text{ (Clear aperture)} \\ T_1(r, \phi) &= J_0(\alpha_1 r) & \alpha_1 &= 5.520 \\ T_2(r, \phi) &= J_0(\alpha_2 r) & \alpha_2 &= 8.650 \\ T_3(r, \phi) &= J_0(\alpha_3 r) & \alpha_3 &= 11.790 \end{aligned} \quad (1)$$

이러한 Bessel beam들의 실수 진폭은 그림 1과 같다.

#### 2. 광학계 평가 함수(PSF와 OTF)

본 연구에서는 상 평가뿐만 아니라 몇 가지 다른 광학계산도 비교적 용이하게 만드는 Hopkins canonical 좌표계<sup>[9]</sup>와 극좌표를 사용하여 광학계 평가 함수중 하나인 PSF를 계산하였으며, 상면과 축상 강도는 PSF의 제곱으로 각각 다음과 같이 표현된다.

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

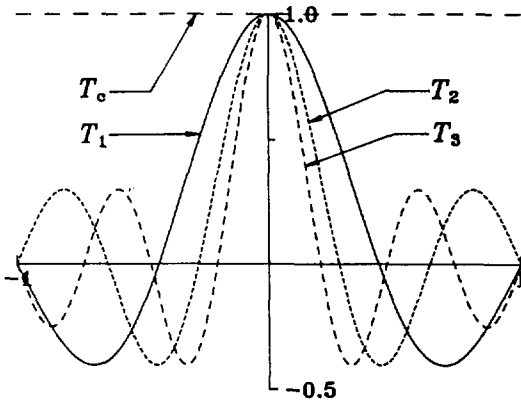


그림 1. Clear aperture와 Bessel beam들의 실수 진폭.

$$I(W_{20}) = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} T(r, \phi) \exp[2\pi i(W'(r, \phi) + W_{20}(r, \phi))] r dr d\phi \right|^2 \quad (3)$$

여기서  $(r, \phi)$ 과  $(\rho', \psi')$ 은 각각 동과 상면의 좌표를 나타내며, 동함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f(r, \phi) = T(r, \phi) \exp[2\pi i W(r, \phi)] \\ = T(r, \phi) \exp[2\pi i (W'(r, \phi) + W_{20}(r, \phi))] \quad (4)$$

본 연구에서 사용한 상면의 좌표  $\rho'$ 은 실제 좌표  $\rho$ 를  $N.A./\lambda$ 로 규격화하여 사용하였으며, Bessel beam의 defocus에 따른 중심 스폿의 반경과 강도 변화를 계산하기 위해 Bessel beam의 실수 진폭을 식 (2), (3)에 대입하여 상면 강도와 축상 강도를 표현하면 다음과 같다.

$$I(\rho', \Psi') = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} J_0(\alpha r) \exp[2\pi i (W(r, \phi) + \rho' r \cos(\phi - \psi'))] r dr d\phi \right|^2 \quad (5)$$

$$I(W_{20}) = \frac{1}{I_0} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} J_0(\alpha r) \exp[2\pi i (W'(r, \phi) + W_{20}(r, \phi))] r dr d\phi \right|^2 \quad (6)$$

2차원 공간 주파수  $(s, t)$ 에 대한 OTF는

$$D(s, t) = \frac{1}{A} \iint_s f(x + s/2, y + t/2) \times f^*(x - s/2, y - t/2) dx dy \quad (7)$$

와 같이 동함수의 auto-correlation으로 계산되어질 수

있으며, 여기서  $S$ 는 점  $(x \pm s/2, y \pm t/2)$  위에 있는 동의 중첩 부분에 대한 적분 면적을 나타내며,  $A$ 는  $D(0, 0) = 1$ 로 만들기 위한 규격화 상수 값으로 아래와 같다.

$$A = \iint f(x, y) \cdot f^*(x, y) dx dy \quad (8)$$

최대 강도 점에서의 OTF를 계산하기 위해서 Bessel beam의 실수 진폭을 식 (7)에 대입하면 구결면상의 OTF와 자오면상의 OTF는

$$D(s) = \frac{1}{A} \iint_s J_0(\alpha x + s/2, \alpha y) \times J_0^*(\alpha x - s/2, \alpha y) \cdot \exp[ik(W(x + s/2, y) - W(x - s/2, y))] dx dy \quad (9)$$

$$D(t) = \frac{1}{A} \iint_s J_0(\alpha x, \alpha y + t/2) \times J_0^*(\alpha x, \alpha y - t/2) \cdot \exp[ik(W(x, y + t/2) - W(x, y - t/2))] dx dy \quad (10)$$

으로 표현된다.

본 연구에서는 defocus에 따른 PSF와 OTF를 계산하기 위해서 식 (5), (6), (9), (10)을 FORTRAN을 사용한 가우스 구적법으로 컴퓨터 프로그램을 작성하였으며, 작성된 프로그램의 정확도를 확인하기 위해 무수차 광학계에 대한 해석적 PSF 값<sup>[1]</sup>과 OTF 값<sup>[10]</sup>들과 비교해 본 결과  $10^{-6}$ 까지 일치하는 좋은 정확도를 보였다.

### III. 결과 및 분석

본 연구에서는 무수차 광학계, 구면수차가  $1\lambda$  포함된 광학계, 구면수차가  $3\lambda$  포함된 광학계 각각에 대한 강도와 중심 스폿의 반경 변화, 그리고 최대 강도 점에서의 OTF 변화를 Bessel beam의 마디 수를 증가시키면서 계산하였다. 이 때의 강도 값은 Gaussian 상점을 1로 규격화하여 나타냈으며, 중심 스폿의 반경은 광축상의 강도 값으로부터 비축상 강도 값을 계산하여 처음으로 0에 수렴하는 점을 택하였다.

#### 1. 무수차 광학계

그림 2는 무수차 광학계에 대한 강도(Intensity)와 중심 스폿의 반경(S. R.) 변화를 각각 나타내고 있다. 그림 2-(a)는 Clear aperture인 경우 Gaussian 상점에서 최대 강도 값을 가지며 중심 스폿의 반경은 0.61로 defocus에 따라 일정하게 나타나고 있다. 또한 OTF 값은 Gaussian 상점에서 가장 높은 값을 가지며 Gaussian 상점에서 멀어질수록 떨어짐을 그림 3으로부터 알 수 있다. 이러한 결과는 무수차 광학계에서 Clear aperture의 경우 Gaussian 상점에서 최적 초점이 있음을 보여주고 있다.

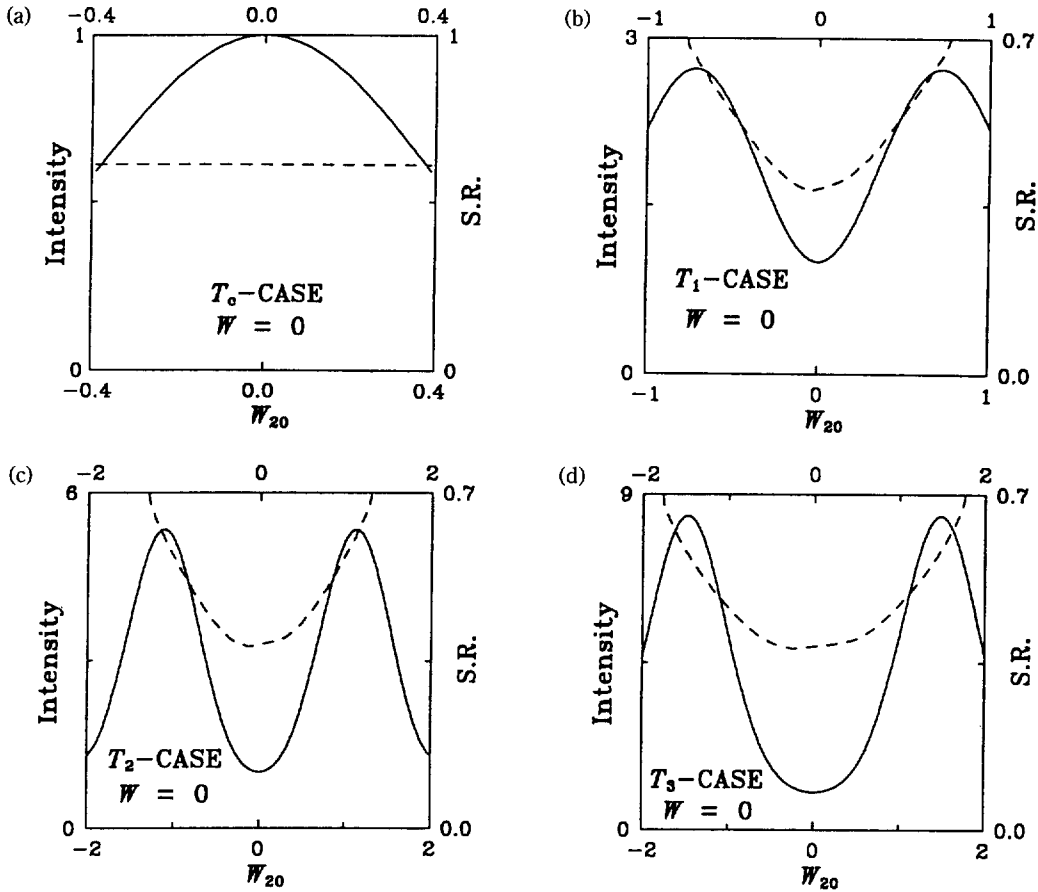


그림 2. 무수차 광학계 대한 Clear aperture와 Bessel beam들의 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화(강도(Intensity): —, 중심 스폿의 반경(S. R.): ----).

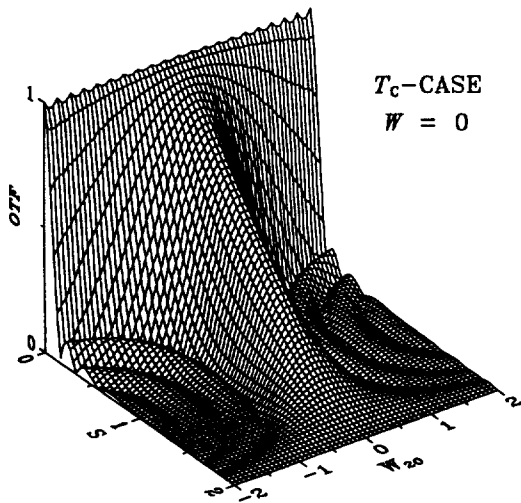


그림 3. 무수차 광학계 대한 Clear aperture의 defocus에 따른 OTF 변화.

그림 2-(b)는 Bessel beam의 마디 수가 1인 경우, 그림 2-(c)는 Bessel beam의 마디 수가 2인 경우, 그림 2-(d)는 Bessel beam의 마디 수가 3인 경우로서 Bessel beam 들은 Gaussian 상점을 중심으로 앞, 뒤에서 두개의 최대 강도 점을 갖는 다초점 형태를 보였으며, 중심 스폿의 반경은 Gaussian 상점을 중심으로 최대 강도 점으로 갈수록 중심 스폿의 반경이 커짐을 알 수 있다. 또한 Bessel beam의 마디 수가 증가함에 따라 최대 강도 점의 위치가 Gaussian 상점으로 더욱 멀어지고, 중심 스폿의 반경의 변화는 더욱 완만해지고 있다. 특히 표 1로부터 최대 강도 점에서 중심 스폿의 반경은 Bessel beam의 마디 수가 증가함에 따라 점점 작아져,  $T_3$ 인 경우 Airy disk의 반경 0.61보다 작아짐을 알 수 있다.

그림 4-(a)에서는 Bessel beam들의 OTF 값들은 Clear aperture의 OTF 값보다 현저하게 떨어지지만 매우 낮은 주파수 영역에서는 Clear aperture의 OTF 값보다 높게

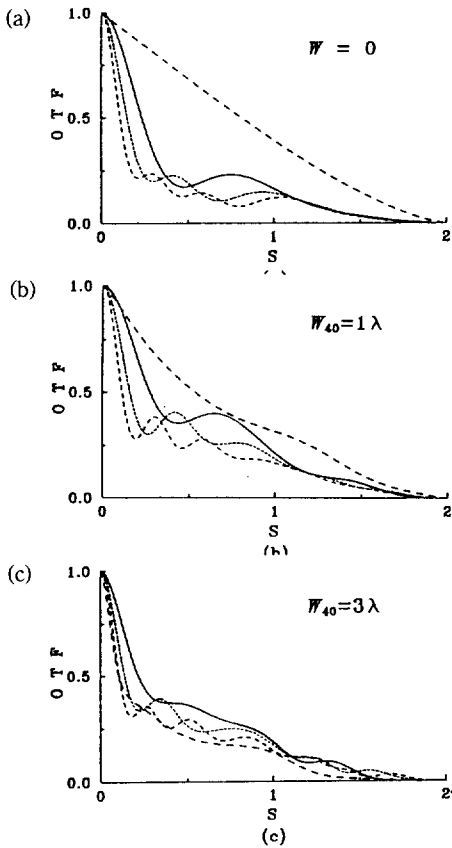


그림 4. 무수차 광학계, 구면수차가 1λ 포함된 광학계, 구면수차가 3λ 포함된 광학계 각각에 대한 Clear aperture( $T_c$ )와 Bessel beam( $T_1, T_2, T_3$ )의 최대 강도 점에서의 OTF( $T_c$ : ---,  $T_1$ : —,  $T_2$ : ·····,  $T_3$ : -·-·-).

나타나고 있다. 또한 Bessel beam의 마디 수가 증가할수록 OTF 값이 떨어지고 있음을 알 수 있다.

2. 구면수차가 1λ 포함된 광학계의 경우

그림 5는 구면수차가 1λ인 광학계에 대한 Clear aperture와 Bessel beam들의 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경과 강도 변화를 각각 나타내고 있으며, 그림 5-(a)는 Clear aperture인 경우, 그림 5-(b)는 Bessel beam의 마디 수가 1인 경우, 그림 5-(c)는 Bessel beam의 마디 수가 2인 경우, 그림 5-(d)는 Bessel beam의 마디 수가 3인 경우이다.

그림 5로부터 Clear aperture인 경우 최대 강도 점을 중심으로 -쪽으로 이동할수록 중심 스폿의 반경은 작아지며, +쪽으로 이동할수록 중심 스폿의 반경이 커지나, Bessel beam의 경우에는 최대 강도 점을 중심으로 +쪽으로 이동할수록 중심 스폿의 반경은 작아짐을 알 수 있다. 또한 Clear aperture인 경우 최대 강도 점을 포함해서 -쪽에서는 Airy disk의 반경 0.61보다 작으나, OTF 값은 무수차 광학계보다 떨어짐을 그림 4, 5와 표 1로부터 알 수 있다.

그림 5-(b), (c), (d)에서는 Bessel beam의 경우 무수차 광학계와는 달리 한 개의 최대 강도 점을 갖는 단초점 형태를 보였으며, 무수차 광학계보다 최대 강도 값과 중심 스폿의 반경은 커지고 있다. 또한 무수차 광학계와 마찬가지로 Bessel beam의 마디 수가 증가할수록 중심 스폿의 반경은 점점 작아짐을 알 수 있다.

그림 4-(b)에서는 Bessel beam들의 OTF 값들은 Clear aperture의 OTF 값보다 떨어지지만 저주파수 영역에서

표 1. 무수차 광학계, 구면수차가 1λ 포함된 광학계, 구면수차가 3λ 포함된 광학계 각각에 대한 Clear aperture( $T_c$ )와 Bessel beam( $T_1, T_2, T_3$ )의 최대 강도 점, 최대 강도 값, 중심 스폿의 반경(S. R.).

동의 형태	수차(W)	최대 강도 점	최대 강도 값	중심 스폿의 반경
Clear aperture( $T_c$ )	$W=0$	0.00	1.00	0.61
	$W_{40}=1\lambda$	-1.00	0.80	0.59
	$W_{40}=3\lambda$	-2.00	0.26	0.74
Bessel beam( $T_1$ )	$W=0$	$\pm 0.72$	2.72	0.66
	$W_{40}=1\lambda$	-1.50	4.19	0.70
	$W_{40}=3\lambda$	-3.03	3.33	0.72
Bessel beam( $T_2$ )	$W=0$	$\pm 1.10$	5.34	0.61
	$W_{40}=1\lambda$	-2.02	8.53	0.66
	$W_{40}=3\lambda$	-3.76	7.62	0.67
Bessel beam( $T_3$ )	$W=0$	$\pm 1.50$	8.43	0.58
	$W_{40}=1\lambda$	-2.46	13.61	0.63
	$W_{40}=3\lambda$	-4.31	12.70	0.67

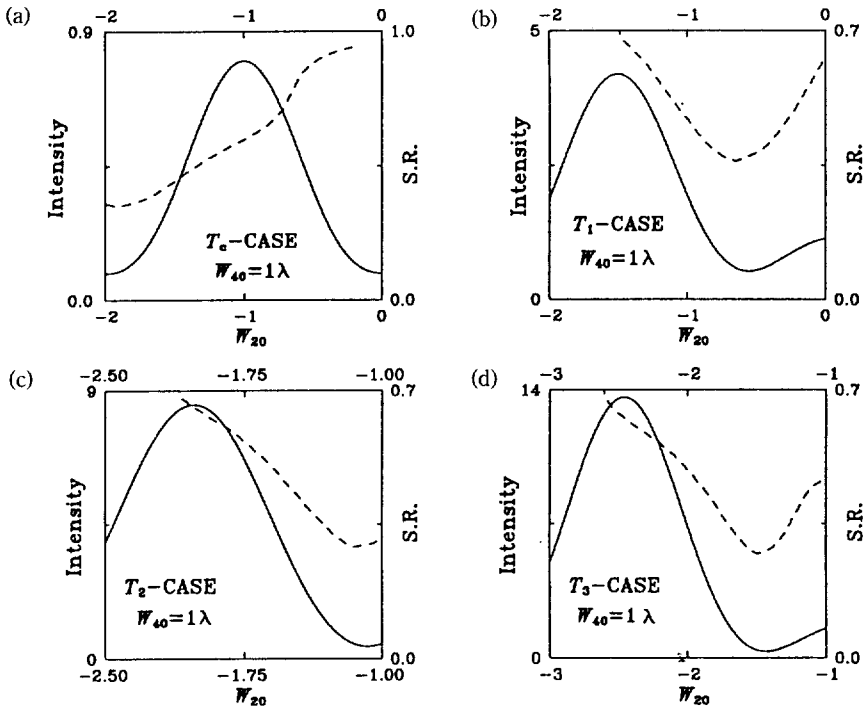


그림 5. 구면수차가 1λ인 광학계에 대한 Clear aperture와 Bessel beam들의 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화(강도(Intensity): —, 중심 스폿의 반경(S. R.): ----).

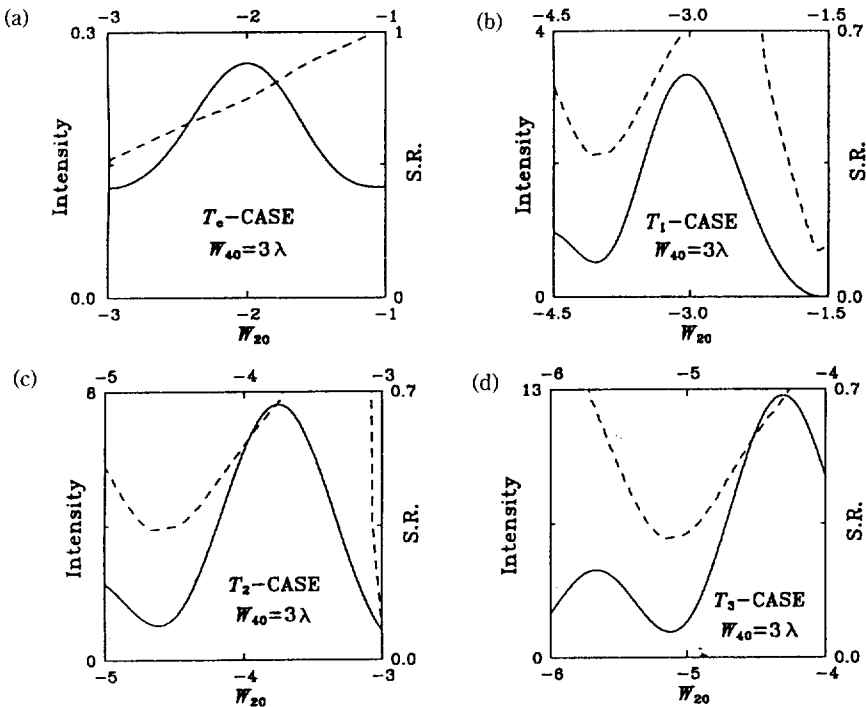


그림 6. 구면수차가 3λ인 광학계에 대한 Clear aperture와 Bessel beam들의 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화(강도(Intensity): —, 중심 스폿의 반경(S. R.): ----).

는 Clear aperture의 OTF 값보다 높게 나타나고 있으며, 무수차 광학계보다 구면수차가 1 $\lambda$ 인 광학계에서 OTF 값이 높게 나타나고 있다. 또한 무수차 광학계와 마찬가지로 Bessel beam의 마디 수가 증가할수록 OTF 값이 떨어지고 있음을 알 수 있다.

### 3. 구면수차가 3 $\lambda$ 포함된 광학계의 경우

그림 6은 구면수차가 3 $\lambda$ 인 광학계에 대한 Clear aperture와 Bessel beam들의 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화를 각각 나타내고 있다.

그림 4와 6(a)로부터 Clear aperture인 경우 구면수차가 3 $\lambda$  포함된 광학계에서는 최대 강도 값이 급속히 떨어지고 중심 스폿의 반경도 커지며, OTF 값도 크게 떨어짐에 따라 Clear aperture는 구면수차가 커질수록 상질이 크게 저하됨을 알 수 있다. 그림 6(b), (c), (d)로부터 Bessel beam의 경우 무수차 광학계나 구면수차가 1 $\lambda$  포함된 광학계와는 달리 최대 강도 점을 중심으로 -방향으로 갈수록 중심 스폿의 반경이 작아짐을 알 수 있으며, Bessel beam의 마디 수가 증가할수록 무수차 광학계나 구면수차가 1 $\lambda$  포함된 광학계와 마찬가지로 중심 스폿의 반경이 작아짐을 표 1로부터 알 수 있다.

반면에 그림 4(c)에서는 구면수차가 3 $\lambda$  포함된 광학계인 경우 Bessel beam의 OTF 값은 Clear aperture의 OTF 값이 대부분의 주파수 영역에서 크게 나타나고 있다. 또한 무수차 광학계나 구면수차가 1 $\lambda$  포함된 광학계와 마찬가지로 Bessel beam의 마디 수가 증가할수록 OTF 값이 떨어짐을 알 수 있다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 diffraction free beam의 개념을 갖는 Bessel beam의 defocus에 따른 회절 특성을 조사하기 위해서 무수차 광학계, 구면수차가 1 $\lambda$  포함된 광학계, 구면수차가 3 $\lambda$  구면수차가 포함된 광학계 각각에 대한 defocus에 따른 강도와 중심 스폿의 반경 변화, 그리고 최대 강도 점에서의 OTF 변화를 Bessel beam의 마디 수를 증가시키면서 계산하였다.

Clear aperture의 경우 무수차 광학계에서는 Gaussian 상점에서 최대 강도 값을 가졌으며, OTF 값도 가장 크게 나타나 이 점을 최적 초점으로 사용할 수 있었으나, 광학계에 포함된 구면수차가 증가할수록 최대 강도 값과 OTF 값이 급속히 떨어지며, 중심 스폿의 반경이 커짐에 따라 광학계에 포함된 구면수차가 증가할수록 상질을 크게 저하시킴을 알 수 있었다.

Bessel beam의 경우 무수차 광학계와 구면수차가 1 $\lambda$  포함된 광학계에서의 OTF 값들은 매우 낮은 주파수 영역에서 Clear aperture의 OTF 값보다 크게 나타났으며, 특히 구면수차가 3 $\lambda$  포함된 광학계에서는 대부분의 주파수 영역에서 Clear aperture의 OTF 값보다는 높게 나타났다. 또한 구면수차를 포함한 광학계의 경우 무수차 광학계의 경우보다 최대 강도 값과 OTF 값이 크게 나타나는 구면수차 보정 효과를 보였으며, Airy disk의 반경보다 훨씬 작은 중심 스폿 반경을 가지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과들은 고집적 반도체 소자 제작을 비롯한 고밀도 광 기록 장치에 이용 가능할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박성종, 이종진, 정창섭, 한국광학회지, **4**, 9(1993).
- [2] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., J. H. Eberly, Phys. Rev. Lett., **58**, 1499(1987).
- [3] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., J. H. Eberly, Opt. Lett., **13**, 79(1988).
- [4] P. L. Overfelt and C. S. Kenney, J. Opt. Soc. Am. A, **8**, 732(1991).
- [5] Jari. Turunen, Antti. Vasara, and Ari T. Friberg, Appl. Opt., **27**, 3959(1988).
- [6] A. J. Cox and Dean C. Dibble, Appl. Opt., **30**, 1330(1991).
- [7] Graeme Scott and Neil McArdle, Opt. Eng., **31**, 2640(1992).
- [8] A. J. Cox and Dean C. Dibble, J. Opt. Soc. Am. A, **9**, 282(1992).
- [9] C. S. Chung and H. H. Hopkins, J. Mod. Opt., **35**, 1485(1988).
- [10] Edward L. O'Neill, J. Opt. Soc. Am., **46**, 285(1955).

## The Diffraction Property of the Bessel Beam for Defocus

S. J. Park, K. J. Choi, M. K. Park, J. B. Kim, S. H. Sim and C. S. Chung  
*Department of physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea*

(Received: April 22, 1995)

To investigate the diffraction property of the Bessel beam for defocus which acts CFAP (Combined Filter of Amplitude and Phase), we calculated numerically the intensity, the radius of central spot, and the optical transfer function for the number of node of the Bessel beam when an optical system has an aberration-free or a spherical aberration. The Bessel beam has larger the maximum intensity and the OTF value for an optical system with a spherical aberration than that with an aberration-free. Particularly, the OTF value at the point of maximum intensity for  $W_{40}=3\lambda$  is higher for the Bessel beam than for the Clear aperture. From these results, we know that the Bessel beam has the compensating effect. The Bessel beam also has the radius of central spot having a superresolution. We will be useful for the fabrication of semiconductor device and the optical recording system using these effects.