

주기적인 선물체에 대한 Contrast Transfer Function의 수치계산

김형수 · 전영세 · 이종웅

청주대학교 광학공학과

김성호

한국원자력연구소 양자광학연구실

(1998년 8월 27일 받음, 1998년 10월 19일 수정본 받음)

광학계의 결상성능평가는 optical transfer function(OTF)을 측정하는 것이 표준적인 방법으로 사용되고 있다. 그러나, 대량 생산되는 광학계의 경우에는 측정의 편리함 때문에 test pattern을 투영하여 contrast를 검사하는 방법도 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 회절결상이론을 사용하여 주기적 line-space pattern에 대한 contrast transfer function(CTF)을 계산하는 프로그램을 개발하고, C-계수와 Zernike 다항식으로 표현되는 3차 파면수차에 의한 광학계의 modulation transfer function(MTF)과 CTF 변화를 비교, 분석하였다.

I. 서 론

광학계의 결상성능평가는 optical transfer function(OTF)^[1,2]을 측정하는 것이 표준적인 방법으로 사용되고 있으며, 국내에서도 광학설계제원으로부터의 OTF 계산방법^[3,4], 진폭변조와 개구변조를 이용한 OTF의 개선방법^[5,6], OTF의 정밀 측정 방법^[7,8,9]에 대한 많은 연구가 있었다. OTF는 광학계의 결상 특성을 정량적으로 나타내고는 있으나, 대량생산되는 광학계의 경우에는 OTF 측정에 많은 시간이 소요되기 때문에 test pattern^[10]을 투영하여 육안으로 contrast를 검사하는 방법도 많이 사용되고 있다.

공간주파수 영역에서 광학계의 투과율을 나타내는 OTF는 복소함수이며, 복소수 극형식 표현에서 OTF의 절댓값은 sinusoidal object의 modulation 변화를 나타내는 modulation transfer function(MTF)^[11]이며, 위상항은 주기적인 물체함수의 위상변화를 나타내는 phase transfer function(PTF)이 된다. OTF를 현상적으로 이해한다면 MTF는 contrast가 1인 sinusoidal object가 광학계에 의하여 결상되어질 때의 상의 contrast에 해당하며 PTF는 pattern의 최대, 최소강도의 이동으로 나타나게 된다. 따라서 sinusoidal pattern을 투영하여 contrast를 측정하면 특정공간주파수에서의 MTF를 쉽게 알 수 있지만 sinusoidal object는 제작이 어렵기 때문에 line-space type의 주기적 선물체 pattern이 투영검사에 사용되고 있다. 이때 측정되는 contrast는 contrast transfer function(CTF)^[12]으로 불리고 있으며, 여러 공간주파수 성분을 포함하고 있기 때문에 MTF와는 다른 값을 가지게 된다. 광학설계제원으로부터 CTF를 계산하는 방법에 대해 국내에서는 아직 연구된 바가 없으며, 국외에서는 1차원 three-bar pattern의 contrast에 대한 연구가 1995년 G. D. Boreman^[13]에 의하여 발표된 바가 있다.

본 연구에서는 주기적인 선물체의 CTF를 파면수차^[11,14,15]로부터 계산하는 프로그램을 개발하고, 각각의 수차항에 의한 CTF의 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 Rayleigh 결상 이론^[1,2]을 바탕으로 광학계의 OTF를 구한 후에 특정한 주기를 갖는 선물체에 대한 물체와 상의 스펙트럼과 강도분포를 계산하고, 상의 강도분포에서 최대, 최소치를 구하여 contrast를 계산하였다. 주기적인 선물체에 대한 MTF와 CTF를 비교하면, CTF가 같은 공간주파수의 MTF에 비하여 큰 값을 가진다. 이것은 CTF가 주기적인 선물체에 대한 intensity contrast이므로 단일 공간주파수의 sinusoidal object에 대한 intensity contrast인 MTF와는 달리 CTF는 전 공간주파수성분을 모두 포함하고 있고 저주파성분들에 의해 MTF보다 CTF가 큰 값을 갖는 것으로 이해된다.

II. 회절결상이론과 Contrast Transfer Function

2.1. 비가간섭성 광원에 의한 결상^[1,2]

비가간섭성 광원에 의하여 조명되는 물체는 비가간섭성 점 광원(point source)의 집합으로 볼 수 있으며, 물체면의 각 점 광원에서 출사한 광파가 출사동에서 회절하여 상면에 강도분포(point spread function)를 만들게 되고, 상은 각 물체점으로부터의 회절강도분포의 중첩으로 해석될 수 있다.

비가간섭성 광원에 의해 조명되는 광학계에서 상의 강도분포는

$$I'(x', y') = \iint K(x', y'; x_0, y_0) I(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (1)$$

의 형태로 표현되며, (1)식의 $K(x', y'; x_0, y_0)$ 는 물체점 (x_0, y_0) 에 존재하는 강도분포 $I(x_0, y_0)$ 가 상면상의 점 (x', y') 로 회절되는 양을 나타내는 광학계의 전달함수(transfer function)이다.

물체의 크기가 작아, 모든 물체점에 대한 전달함수가 같다^[16]고 볼 수 있는 경우(isoplanatic region)에

$$I'(x', y') = \iint K(x' - x_0, y' - y_0) I(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (2)$$

의 형태로 쓸 수 있고, $x_0 = x_0', y_0 = y_0'$ 인 점광원(point source)을 가정하는 경우에 상면에서의 강도분포 $I_p'(x, y)$ 는

$$I_p'(x', y') = \iint K(x', y'; x_0, y_0) \delta(x_0 - x_0') \delta(y_0 - y_0') dx_0 dy_0 = K(x' - x_0', y' - y_0') \quad (3)$$

와 같이 되어, 전달함수가 점광원에 의한 상의 강도분포인 point spread function $I_p'(x', y')$ 과 같음을 알 수 있다.

(2)식을 Fourier 변환하면 convolution theorem^[16]에 의하여 상면 강도분포의 Fourier 스펙트럼 $I_{\omega}'(f, g)$ 는

$$I_{\omega}'(f, g) = \iint I(x', y') e^{i2\pi(fx' + gy')} dx' dy' = K_{\omega}(f, g) I_{\omega}(f, g) \quad (4)$$

$$K_{\omega}(f, g) = \iint K(x', y') e^{i2\pi(fx' + gy')} dx' dy' \quad (5)$$

$$I_{\omega}(f, g) = \iint I(x_0, y_0) e^{i2\pi(fx_0 + gy_0)} dx_0 dy_0 \quad (6)$$

로 주어진다.

공간주파수 f, g 에 대한 광학계의 optical transfer function (OTF)는

$$OTF(f, g) = \frac{I_{p\omega}'(f, g)}{I_{p\omega}'(0, 0)} \quad (7)$$

로 정의된다. (7)식의 $I_{p\omega}'(f, g)$ 는 점광원에 의한 상면의 강도 분포인 point spread function의 Fourier 스펙트럼이다.

Fig. 1에서 상면상의 점 $O'(x', y')$ 에서의 광파분포는 Rayleigh 결상이론^[2]에 의해 출사동에서 회절된 평면파의 중첩으로 이해할 수 있으며, Fraunhofer 회절로 근사하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U(x', y') = -\frac{i}{\lambda} \iint H(\xi, \eta) \frac{e^{i\frac{2\pi}{\lambda}s}}{s} d\xi d\eta \approx -i \frac{e^{i\frac{2\pi}{\lambda}R}}{\lambda R} \iint H(\xi, \eta) e^{-i\frac{2\pi(\xi x' + \eta y')}{\lambda R}} d\xi d\eta \quad (8)$$

(8)식에서 λ 는 광원의 파장, R 은 표준구면의 반경, s 는 표준구면에서 상점까지의 거리이고, $H(\xi, \eta)$ 는 점광원의 입사구면

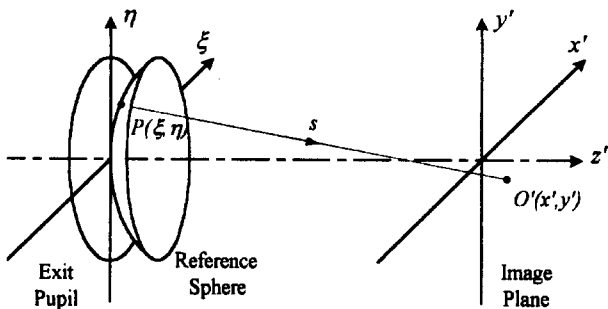


Fig. 1. Diffraction from the reference sphere.

파에 의해 표준구면에 존재하는 광파의 진폭분포를 나타내는 광학계의 동함수(pupil function)이다. (8)식으로부터 각 평면파의 공간주파수 (v_f, v_g)는

$$v_f = \frac{\xi}{\lambda R}, \quad v_g = \frac{\eta}{\lambda R} \quad (9)$$

로 주어지게 된다.

출사동의 최대반경이 ρ_{\max} 인 원형개구를 갖는 광학계에서 회절파의 최대공간주파수 v_{\max} 는

$$v_{\max} = \frac{\rho_{\max}}{\lambda R} = \frac{N_A}{\lambda} \quad (10)$$

가 된다. (10)식의 N_A 는 상측 수치구경이며, 상의 강도분포는 회절파의 간섭에 의하여 형성되기 때문에, 강도분포의 공간주파수한계(cut-off frequency) v_c 는

$$v_c = 2v_{\max} = \frac{2N_A}{\lambda} \quad (11)$$

로 주어진다.

(7)식의 공간주파수(f, g)를

$$f = \frac{v_f}{v_{\max}}, \quad g = \frac{v_g}{v_{\max}} \quad (12)$$

로 규격화하고, 상측좌표계 (x', y')를 Rayleigh 단위 R_u 로써

$$X' = \frac{x'}{R_u}, \quad Y' = \frac{y'}{R_u}, \quad R_u = \frac{\lambda}{N_A} \quad (13)$$

규격화하면, (8)식은

$$U(X', Y') = \iint H(f, g) e^{-2\pi i(fX' + gY')} df dg \quad (14)$$

가 된다. (14)식의 동함수 $H(f, g)$ 는

$$H(f, g) = U_0(f, g) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda} W(f, g)}, \quad \sqrt{f^2 + g^2} \leq 1 \\ = 0, \quad \sqrt{f^2 + g^2} > 1 \quad (15)$$

로 정의될 수 있다. (15)식의 $W(f, g)$ 는 광학계의 파면수차이고, $U_0(f, g)$ 는 출사동에서의 진폭분포이며, 상측 수치구경 N_A 가 작은 광학계의 경우에 출사동에서의 진폭분포는 균일하다고 가정할 수 있다(paraxial approximation).

(7)식과 (14)식으로부터 광학계의 OTF는

$$OTF(f, g) = \frac{\iint H(f', g') H^*(f' + f, g' + g) df' dg'}{\iint H(f', g') H^*(f', g') df' dg'} \quad (16)$$

와 같이 동함수의 auto-correlation으로 주어진다. (16)식의 OTF는 복소함수이며, 광학계의 modulation 변화를 나타내는 MTF와 위상변화를 나타내는 PTF로 구성된다.

2.2. 선물체의 Contrast Transfer Function

Fig. 2에서와 같이 개구부의 폭이 a 이고 반복주기가 $2a$ 인 주기적인 선물체를 정의하면, Rayleigh 단위로 규격화된 물체

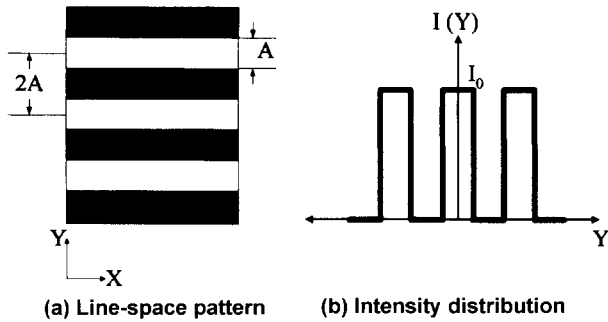


Fig. 2. Intensity profile of the periodic line-space pattern.

의 폭 A 는

$$A = \frac{a}{R_u} = \frac{N_A a}{\lambda} \tag{17}$$

로 주어지며, 이 선물체의 규격화된 공간주파수 ω 는

$$\omega = \frac{1}{2A} \tag{18}$$

가 된다. Fig. 2에서 선물체의 강도분포함수 $I(Y)$ 는

$$I(Y) = I_0, \quad 2mA - \frac{A}{2} \leq Y \leq 2mA + \frac{A}{2} \\ = 0, \quad \text{otherwise} \tag{19}$$

로 쓸 수 있고, (19)식의 m 은 정수이다.

선물체의 Fourier 스펙트럼 $I_\omega(g)$ 는

$$I_\omega(g) = \int_{-\infty}^{\infty} I(Y) e^{-2\pi i g Y} dY = AI_0 \text{sinc}(\pi g A) \tag{20}$$

가 되며, (20)식의 공간주파수 g 는

$$g = n \cdot \Delta g, \quad \Delta g = \frac{1}{2A} \tag{21}$$

로써 n 은 정수, Δg 는 frequency sampling distance이다.

상의 Fourier 스펙트럼 $I'_\omega(g)$ 은 (4)식에 의해

$$I'_\omega(g) = OTF(0, g) \times I_\omega(g) \tag{22}$$

로 주어진다.

상의 강도분포는 (22)식의 역 Fourier 변환으로 주어지고, 선물체의 주기성에 의해 frequency sampling distance Δg 에 대한 함으로 표현 된다.

$$I(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} I'_\omega(g) e^{2\pi i g Y} dg = \sum_{n=-n_{\max}}^{+n_{\max}} I'_\omega(n \Delta g) e^{2\pi i n \Delta g Y} \cdot \Delta g \tag{23}$$

(23)식의 n_{\max} 는 $2/\Delta g$ 보다 작거나 같은 정수이다.

광학계의 OTF는 $OTF^*(f, g) = OTF(-f, -g)$ 의 관계가 항상 성립하므로, (23)식은

$$I(Y) = \{I'_\omega(0) + 2 \sum_{n=1}^{n_{\max}} \text{Re}[I'_\omega(n \Delta g) e^{2\pi i n \Delta g Y}]\} \cdot \Delta g \tag{24}$$

로 바꾸어 쓸 수 있다.

공간주파수 ω 로 반복되는 선물체의 intensity contrast인 contrast transfer function(CTF)는

$$CTF(\omega) = \frac{I_{\max}'(Y) - I_{\min}'(Y)}{I_{\max}'(Y) + I_{\min}'(Y)} \tag{25}$$

로 정의되며, (25)식에서 $I_{\max}'(Y)$ 는 상면에서의 최대강도를, $I_{\min}'(Y)$ 는 최소강도를 나타낸다.

III. 주기적 선물체에 대한 CTF의 계산 및 분석

3.1. OTF의 수치계산

광학계의 OTF를 계산하는 방법^[1,18]은 기하광학적 방법과 회절광학적 방법으로 나누어 볼 수 있다. 기하광학적 방법은 광선추적을 통해 점광원에 대한 상면의 강도분포를 얻고 이를 Fourier 변환하여 OTF를 구하는 방법으로 빛의 회절효과가 고려되지 않으므로 수차가 큰 광학계의 평가에만 사용될 수 있다. 회절광학적 방법은 회절이론을 이용하여 상면의 강도분포를 얻고, 이를 Fourier 변환하여 OTF를 구하는 방법이다. 회절광학적 OTF는 (16)식의 동함수의 auto-correlation으로부터 계산될 수 있다. 본 연구에서는 동함수의 auto-correlation으로 OTF를 구하는 회절광학적 방법을 사용하였다.

주기적인 선물체는 Nyquist sampling theorem^[17]에 의하여 등간격의 스펙트럼만을 가지므로, (22)식에 의하여 상의 Fourier 스펙트럼을 계산하기 위해서는 등간격의 OTF만을 필요로 한다. 본 연구에서는 출사동을 ($\delta f, \delta g$) 크기의 등간격 grid로 분할하여

$$OTF(f, g) = \frac{\sum_i \sum_j H(f_i', g_j') H^*(f_i' + f, g_j' + g) \delta f \delta g}{\sum_i \sum_j H(f_i', g_j') H^*(f_i', g_j') \delta f \delta g} \tag{26}$$

Table 1. Calculated MTFs and their numeric errors ($\delta f = \delta g = 0.025$)

normalized spatial frequency	theoretical MTF ^[18]	calculated MTF	error
0.1	0.93639	0.93672	-0.00033
0.2	0.87289	0.87383	-0.00094
0.3	0.80973	0.81095	-0.00122
0.4	0.74706	0.74806	-0.00100
0.5	0.68504	0.68637	-0.00133
0.6	0.62384	0.62507	-0.00123
0.7	0.56364	0.56498	-0.00134
0.8	0.50463	0.50567	-0.00104
0.9	0.44701	0.44796	-0.00095
1.0	0.39100	0.39184	-0.00084
1.1	0.33683	0.33731	-0.00048
1.2	0.28476	0.28517	-0.00041
1.3	0.23508	0.23502	0.00006
1.4	0.18812	0.18806	0.00006
1.5	0.14429	0.14428	0.00001
1.6	0.10409	0.10368	0.00041
1.7	0.06815	0.06746	0.00069
1.8	0.03739	0.03642	0.00097
1.9	0.01332	0.01214	0.00118
2.0	0.00000	0.00000	0.00000

Table 2. Wavefront aberrations expressed by the C-coefficients

C _{ij}	order	polynomial	remark
C ₀₀	0	1	constant shift
C ₁₁	1	y	tilt
C ₂₀	1	$(x^2 + y^2)$	defocus
C ₂₂	3	y^2	astigmatism
C ₃₁	3	$(x^2 + y^2)y$	coma
C ₄₀	3	$(x^2 + y^2)^2$	spherical aberration

로 근사하여 OTF를 계산하였다. Table 1은 원형개구를 가지는 무수차광학계에서 (16)식의 적분에 의해 계산된 MTF^[18]와 $\delta f = \delta g = 0.025$ 인 경우에 (26)식에 의하여 계산된 MTF를 나타내고 있다. Table 1에서 계산된 MTF는 무수차 광학계의 경우에 ± 0.0015 이내의 오차를 갖고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 파면수차에 따른 광학계의 MTF와 CTF 변화를 비교하기 위해 파면수차를 정의하는데 있어서 C-계수 다항식과 Zernike 다항식의 두 가지 표현방법을 사용하였다.

C-계수 다항식에 의한 파면수차는,

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^i C_{ij} x^j y^{i-j} \quad (27)$$

와 같이 정의되며 C-계수 다항식에서의 3차 수차는 Table 2와 같다.

파면수차를 Zernike 다항식으로 표현하면

$$W(r, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n Z_{nm} r^n |e^{im\phi} \quad (28)$$

로써 정의되고 Zernike 다항식에서의 3차 수차는 Table 3과 같다.

3.2. 무수차광학계의 OTF와 CTF

Fig. 3에는 주기적인 선물체에 대한 상의 스펙트럼이 나타나 있다. Fig. 3에서 선물체의 공간주파수 g 는 회절파의 최대공간주파수 v_{max} 를 기준으로 규격화된 주파수이며, 파장 $0.5461 \mu\text{m}$, F/8의 광학계에서 $g = 0.1$ 은 5.71 cycles/mm, $g = 1.0$ 은 57.11 cycles/mm, $g = 1.9$ 는 108.51 cycles/mm에 해당한다.

Table 3. Wavefront aberrations expressed by the Zernike polynomials

Z _{nm}	order	polynomial	remark
Z ₁	0	1	constant shift
Z ₂	1	$r \cos(\phi)$	tilt about x axis
Z ₃	1	$r \sin(\phi)$	tilt about y axis
Z ₄	1	$2r^2 - 1$	defocus
Z ₅	3	$r^2 \cos(2\phi)$	astigmatism (0°, 90°)
Z ₆	3	$r^2 \sin(2\phi)$	astigmatism (±45°)
Z ₇	3	$(3r^2 - 2r) \cos(\phi)$	coma along y axis
Z ₈	3	$(3r^2 - 2r) \sin(\phi)$	coma along x axis
Z ₉	3	$6r^4 - 6r^2 + 1$	spherical aberration

Fig. 3에서 상의 스펙트럼은 물체의 공간주파수가 공간주파수한계에 가까워질수록 폭이 넓어지며, 스펙트럼의 세기는 줄어들게 된다. Fig. 4에는 F/8의 무수차 광학계에서, 주어진 공간주파수에 대한 상의 강도분포가 나타나 있다. Fig. 4의 강도분포에서 물체의 규격화된 공간주파수가 큰 경우 intensity contrast가 감소되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4(a)는 물체의 규격화된 공간주파수가 0.1인 경우이며, 이 주파수에 대한 MTF와 CTF는 각각 0.9367, 0.9598의 값을 갖는다. Fig. 4(b)는 공간주파수가 1.0인 경우이며, 이 주파수에 대한 MTF는 0.392이고 CTF는 0.499로써, CTF가 MTF보다 큰 값을 가지고 있다. Fig. 4(c)는 물체의 공간주파수가 1.9인 경우이며 상의 intensity contrast가 매우 나쁨을 알 수 있다. 공간주파수 1.9에서의 MTF와 CTF는 각각 0.012와 0.015이다.

Fig. 5에는 무수차광학계의 MTF와 CTF가 나타나 있으며, 실선은 MTF를 점선은 CTF를 나타내고, CTF가 MTF보다 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 MTF가 하나의 공간주파수성분만을 가지는 sinusoidal object에 대한 intensity contrast인데 반해, CTF는 주기적인 선물체에 대한 intensity contrast이므로, Fig. 3의 예에서와 같이 CTF에는 공간주파수 대역에서 저주파 성분들이 포함되어 있기 때문인 것으로 이해된다.

3.3. 수차가 있는 광학계의 OTF와 CTF

수차가 있는 광학계의 경우에 수차가 커지면, 결상성능은

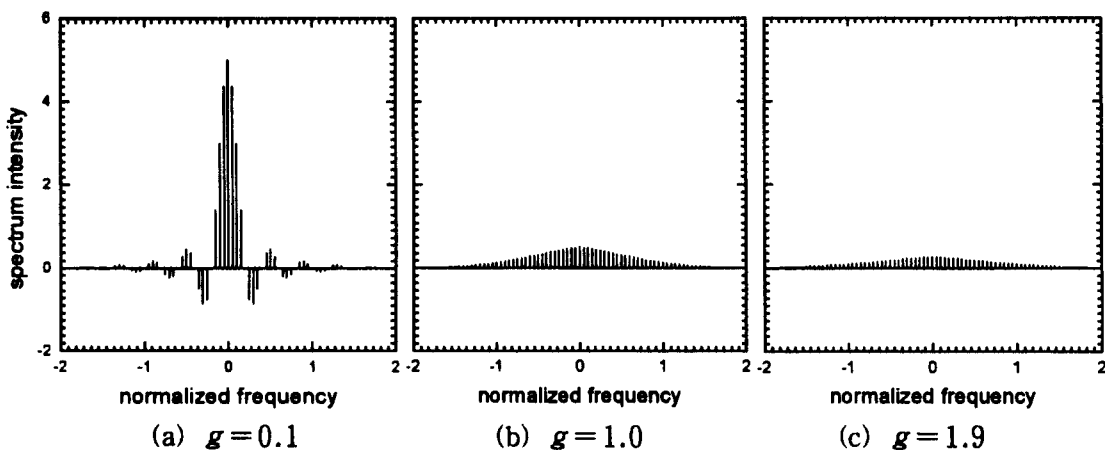


Fig. 3. Image spectrum of the periodic line-space patterns.

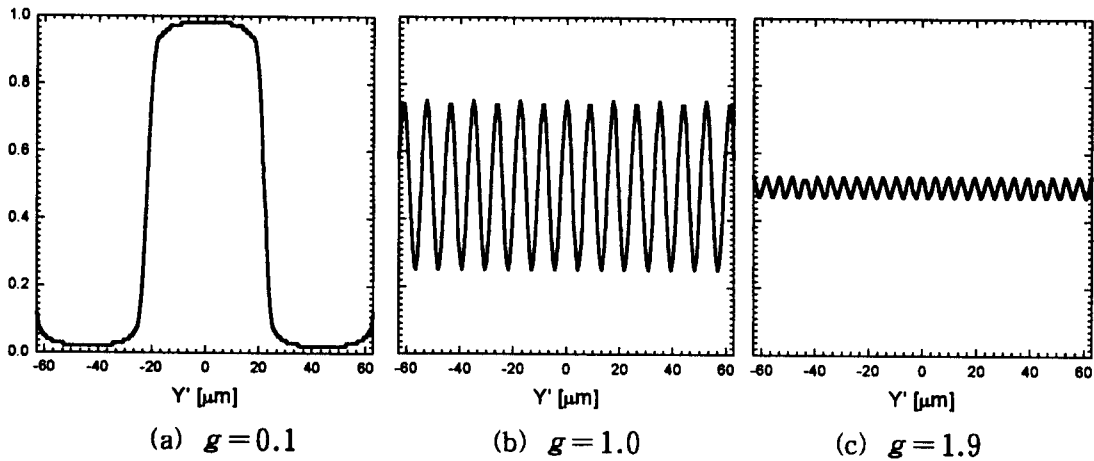


Fig. 4. Image intensity of the periodic line-space patterns ($\lambda=0.5461 \mu\text{m}$, $F/8$).

저하되고 MTF와 CTF는 무수차광학계의 경우에 비해 감소하게 된다. Fig. 6에는 파장 $0.5461 \mu\text{m}$, $F/8$ 의 광학계에서 $g=0.1$ 의 선물체에 대한 각각의 파면수차에 따른 상의 강도 분포가 나타나 있다.

Fig. 6(a)는 $g=0.1$ 인 선물체의 강도분포이며, Fig. 6(b)는 $g=0.1$ 인 선물체가 무수차 광학계에 의해 결상되어 질 경우의 상의 강도분포이다. Fig. 6(c)의 defocus와 (d)의 3차 구면수차는 회전대칭성 수차이므로 1차원 선물체에 대하여 상이 좌우 대칭적으로 퍼지고 있으며, 같은 1λ 의 파면수차를 가지는 경우, 3차 구면수차에 의한 결상성능 저하가 defocus보다 크게 나타남을 보여주고 있다. Fig. 6(e)에는 1λ 의 3차 비점수차에 의한 상의 강도분포가 나타나 있다. 본 연구에서는 y 축 방향의 1차원 line-space pattern을 가정하였기 때문에, x 축 방향의 3차 비점수차에 의한 효과는 나타나지 않으며, Fig. 6(e)는 y 축 방향의 defocus와 같은 형태의 강도분포를 나타내고

있다. Fig. 6(f)는 1λ 의 3차 코마에 의한 상의 강도분포로써, 강도분포가 비대칭적으로 변화하여 극대와 극소의 위치가 이동하였음을 알 수 있다.

Fig. 7에는 광학계의 파면수차를 Table 2의 C-계수 다항식으로 표현할 경우에 대한 MTF와 CTF를 실선과 점선으로 나타내었다. Fig. 7 (a), (b), (c), (d)는 각각 defocus, 3차 비점수차, 3차 코마, 3차 구면수차가 1λ 있는 광학계의 MTF와 CTF를 계산한 결과로써, 무수차 광학계와 비교하여 MTF와 CTF가 크게 저하되었다. 수차가 있는 경우에도 CTF가 MTF보다 큰 값을 갖으며, 다른 수차에 비하여 3차 코마에 의한 MTF와 CTF의 저하가 적게 나타난다. Fig. 6(f)의 강도분포에 의하면, 3차 코마는 상의 강도분포를 비대칭적으로 만들고, 최대, 최소강도의 위치를 이동시키기는 하지만 최대, 최소강도의 크기는 무수차계의 경우와 거의 같기 때문에 contrast의 저하는 작다. 이 때문에 3차 코마에 의한 MTF와 CTF의 저하가 다른 수차의 경우에 비하여 적게 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

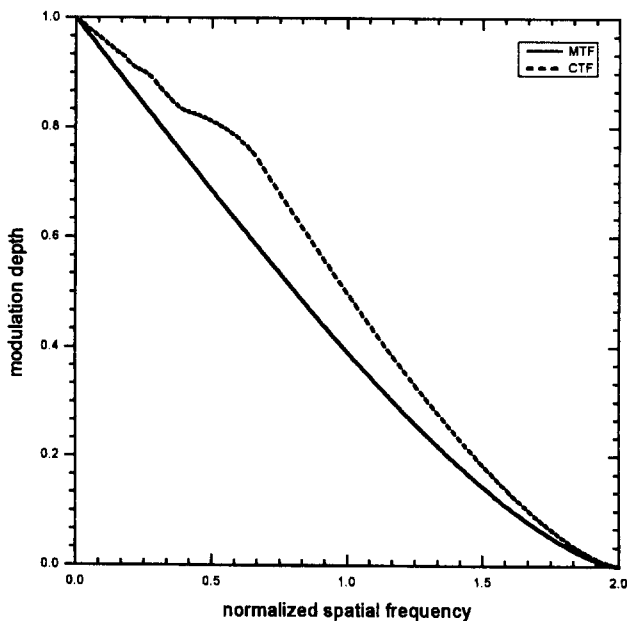


Fig. 5. The MTF and CTF of an aberration free system.

Fig. 8은 광학계의 파면수차를 Table 3의 Zernike 다항식으로 표현할 경우에 대한 MTF와 CTF 변화이다. Fig. 7과 마찬가지로 (a), (b), (c), (d)는 각각 defocus, 3차 비점수차, 3차 코마, 3차 구면수차가 1λ 있는 광학계의 MTF와 CTF로써, 실선은 MTF를 점선은 CTF를 나타낸다. Fig. 7과 Fig. 8에서 같은 1λ 의 파면수차에 대하여, C-계수 다항식에 의하여 표현된 경우와 Zernike 다항식에 의하여 표현된 경우의 MTF와 CTF의 계산치가 서로 다르다. 이것은 파면수차를 정의하는데 있어서, C-계수 다항식과 Zernike 다항식이 서로 다르기 때문이다. 예로써 defocus의 경우, Zernike 다항식의 $+1\lambda$ defocus는 C-계수 다항식에서 $+2\lambda$ 의 defocus와 -1λ 의 constant shift가 있는 경우에 해당하므로, Zernike 다항식의 $+1\lambda$ defocus는 C-계수 다항식에서 $+2\lambda$ 의 defocus에 해당하게 된다. 3차 비점수차의 경우, C-계수 다항식의 $+1\lambda$ 는 Zernike 다항식에서도 $+1\lambda$ 로 같기 때문에, Fig. 7(b)는 Fig. 8(b)와 같다. 3차 코마의 경우, Zernike 다항식의 $+1\lambda$ 3차 코마는 C-계수 다항식에서 $+3\lambda$ 의 3차 코마와 -2λ 의 tilt가 있는 경우에 해당되며, 3차 코마에 의한 MTF와 CTF의 저하가 defocus나 3차 비점수차에

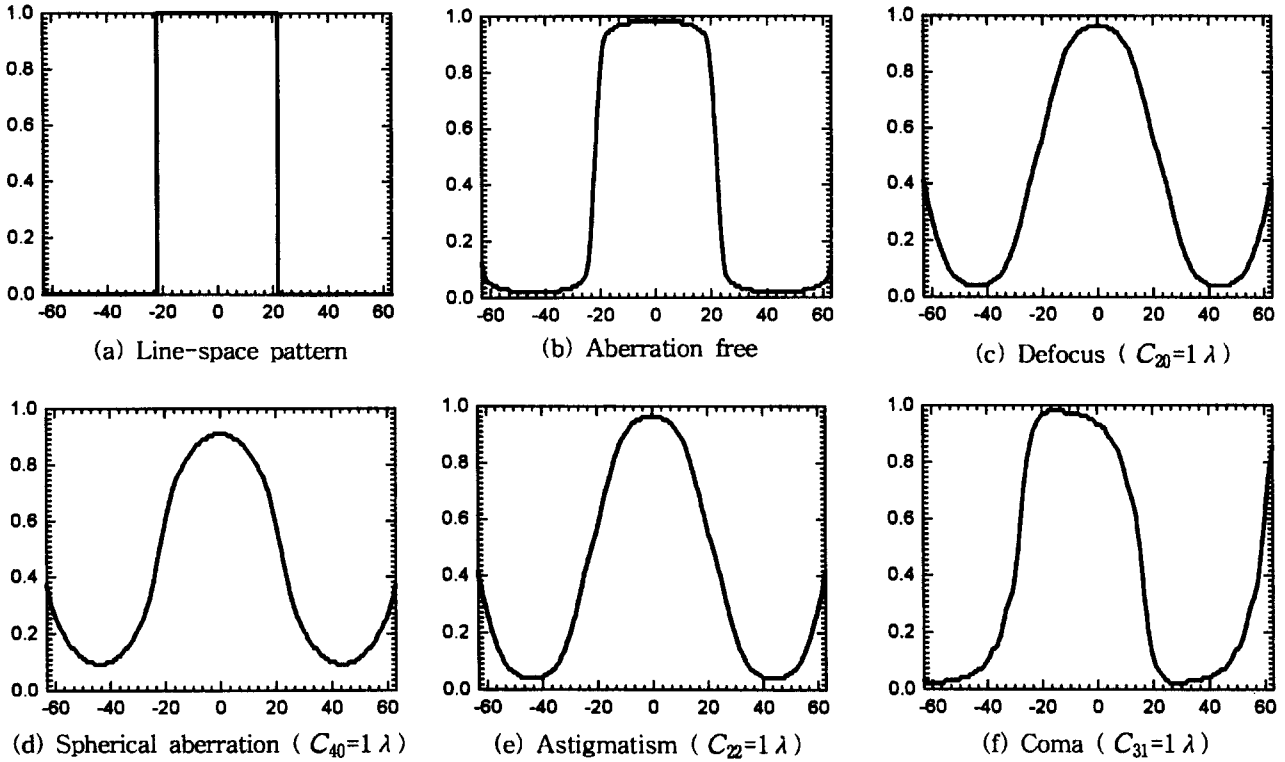


Fig. 6. Image intensity in the presence of the third order aberrations expressed by the C-coefficients ($\lambda=0.5461 \mu\text{m}$, $F/8$, $g=0.1$).

비교하여 더 적음을 알 수 있다. 3차 구면수차의 경우, Zernike 다항식에서 $+1\lambda$ 의 3차 구면수차는 C-계수 표현에서는 $+6\lambda$ 의 3차 구면수차와 -6λ 의 defocus, $+1\lambda$ 의 constant

shift가 있는 경우에 해당하여, 직접적인 비교는 불가능하지만, 3차 구면수차가 defocus보다 MTF와 CTF의 저하에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

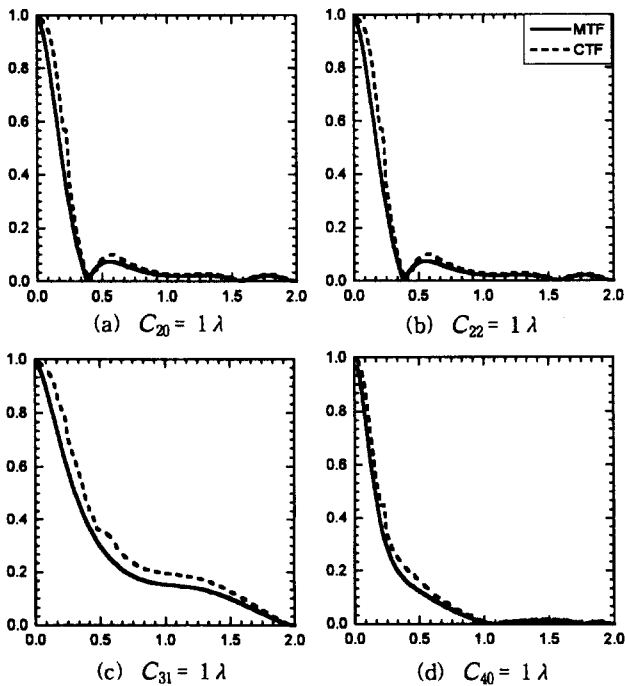


Fig. 7. The MTF and CTF for the third order aberrations expressed by the C-coefficients.

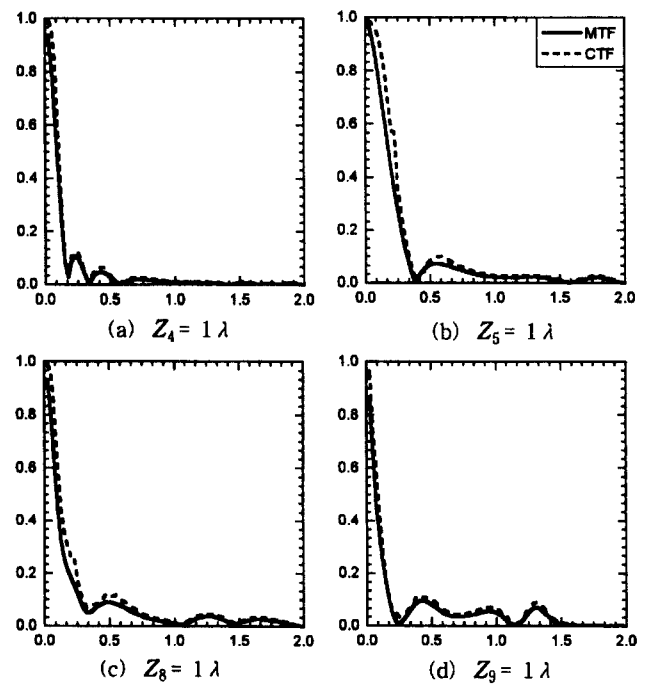


Fig. 8. The MTF and CTF for the third order aberrations expressed by the Zernike polynomials.

IV. 결 론

본 연구에서는 회절결상이론을 바탕으로 주기적인 1차원 선물체에 대한 contrast transfer function(CTF)을 계산하는 프로그램을 개발하고, 파면수차에 따른 CTF의 변화를 분석하였다. CTF의 계산은 비가간섭성 광원에 의하여 물체가 조명되는 것을 가정하였으며, 광학계의 OTF와 물체의 스펙트럼으로부터 상의 스펙트럼을 얻고, 이를 역 Fourier 변환하여 상의 최대 강도와 최소 강도를 구해 계산하였다.

주기적인 선물체에 대한 CTF는 전 공간주파수 영역에 걸쳐서 MTF보다 큰 값을 가지고 있었으며, 이것은 MTF가 하나의 공간주파수에 대한 상의 intensity contrast를 나타내는 것에 비하여, CTF는 주기적으로 반복되는 line-space pattern의 contrast이기 때문에 공간주파수 영역에서 저주파수들을 포함하고 있기 때문에 MTF보다는 큰 값을 가지는 것으로 이해된다.

광학계의 파면수차에 따른 MTF와 CTF의 비교에서는 같은 1λ 크기의 3차 파면수차항들에 의한 MTF와 CTF를 비교하여 보았으며, 3차 수차중에서는 구면수차가 contrast에 가장 큰 영향을 주고 있었다. Defocus와 비점수차도 contrast에 상당한 영향을 주고 있으며, 코마의 경우에는 다른 수차에 비해 contrast의 저하가 적었다. 이것은 코마가 상의 강도분포를 비대칭적으로 변화시키기는 하지만, 강도분포의 최대강도와 최소강도 자체에 대한 변화는 적기 때문에 다른 수차에 비하여 contrast의 저하가 적게 나타나는 것으로 이해된다.

본 연구를 통하여 test pattern의 투영검사에서 예상되는 contrast를 광학설계제원으로부터 이론적으로 계산할 수 있게 되었으며, 투영검사를 통한 광학계의 성능 평가에 많은 도움을 줄 수 있는 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] M. Born, E. Wolf, Principle of Optics (Cambridge Univ. Press, New York, 1980), pp. 480-490, 464-468.

[2] 이상수, 파동광학 (교학연구소, 서울, 1984), pp. 225-235, 169-172.
 [3] 홍경희, 이상수, "렌즈설계 data로부터 OTF의 수치계산", 새물리, **19**, 72 (1979).
 [4] 이종웅, 홍경희, "광학설계제원으로부터의 OTF 수치계산 S/W 개발", 한국광학회지, **4**, 381 (1993).
 [5] 홍경희, 이종웅, "개구변조에 의한 수차계 MTF의 증진", 새물리, **27**, 24 (1987).
 [6] 한순희, 정창섭외, "개구면에서 위상변조가 OTF에 미치는 영향", 새물리, **32**, 312 (1992).
 [7] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, "주사형 OTF 측정장치 개발", 새물리, **27**, 95 (1987).
 [8] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, "렌즈형 시준장치를 이용한 간편한 벤치형 OTF 측정장치 제작 및 측정자동화", 응용물리, **3**, 153 (1990).
 [9] 조현모, 이윤우, 이희윤, 이인원, "비축상 OTF의 정밀측정", 한국광학회지, **2**, 121 (1991).
 [10] H. Osterberg, Military Standardization Handbook Optical Design (Defense Supply Agency, Washington, D.C., 1962), Chap. 26, pp. 1-8.
 [11] K. R. Barnes, The Optical Transfer Function (American Elsevier Pub. Co., New York, 1971), pp. 6-15.
 [12] J. W. Coltman, J. Opt. Soc. Am., **44**, 468 (1954).
 [13] G. D. Boreman, Sidney Yang, Appl. Opt., **34**, 8050 (1995).
 [14] D. Malacara, Optical Shop Testing (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976), pp. 455-472.
 [15] Code V Reference Manual Vol. II, (Optical Research Associates, Pasadena, 1997), pp. 2A. 593-606.
 [16] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (McGraw-Hill Inc., New York, 1996), pp. 19-22, 8-12.
 [17] E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transform and its Applications (Prentice-Hall Inc., London, 1988), pp. 83-87, 79-83.
 [18] 홍경희, "Effect of aperture modulation on optical transfer function", 박사학위청구 논문(한국과학원, 1980), pp. 15.

Numerical calculation of contrast transfer function for periodic line-space patterns

Hyung Su Kim, Young Se Chun and Jong Ung Lee
 Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

Sung Ho Kim
 Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600, Korea

(Received August 27, 1998, Revised manuscript received October 19, 1998)

The measurement of OTF(optical transfer function) is used for evaluation of imaging performance of optical system as a standard method. In the mass-production, the contrast measurement of projected patterns is also popular because of its simplicity. In this study, a computer program which evaluates the CTF(contrast transfer function) of optical system for periodic line-space patterns is developed by using the diffraction imaging theory. The MTF(modulation transfer function) and CTF of an aberrated system are evaluated and analyzed for the third order aberrations expressed by the C-coefficients and the Zernike polynomials.