

광학설계제원으로부터의 OTF 수치계산 S/W 개발

이 종 응

청주대학교 광학공학과

홍 경 희

육군사관학교 교수부 물리학과

(1993년 11월 16일 받음)

광학설계제원으로부터 회절광학적인 방법으로 OTF를 계산하는 S/W를 개발하고 계산정밀도를 검증하였다. 개발된 S/W를 이용하여 OTF측정용 표준렌즈에 대한 MTF를 계산하여 본 결과 다른 S/W에서의 계산치 및 실험을 통한 측정치와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

I. 서 론

광학계의 결상성능의 평가에는 여러가지 방법이 사용될 수 있으나, 최종적인 광학계의 성능분석에는 광학계의 공간분해능을 나타내는 OTF(optical transfer function)를 측정하는 방법이 최근 많이 사용되고 있다. 이에 따라 국내에서도 그간 OTF의 측정에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며,^[1,2] 측정장비는 이미 국산화되어 산업체에 보급되고 있다. 또한, 광학계의 설계에 있어서도 설계자료로부터 OTF를 계산하여 설계를 평가하는 것이 거의 일반화 되었다. 그간 국내 학계에서도 OTF의 계산방법과^[3] 진폭변조, 개구변조를 이용한 OTF의 개선방법에^[4,5,6] 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 본 연구는 이를 바탕으로 국내의 산업계에서 활용가능하도록 신뢰성 있고 체계화된 software의 개발에 주목적을 두고 수행되었다.

광학계의 OTF를 이론적으로 계산하는 방법은^[7,8] 기하광학적 방법(geometrical OTF)과 회절광학적 방법(diffraction OTF)으로 나누어 볼 수 있다. 기하광학적인 방법은 광선의 추적을 통하여 점광원에 대한 상면의 강도분포를 얻고 이를 Fourier 변환하여 OTF를 구하는 방법으로 빛의 회절효과가 고려되지 않으므로 수차가 큰 광학계의 평가에만 사용될 수 있다. 회절광학적인 방법은 회절이론을 사용하여 상면의 강도분포를 얻고, 이를 Fourier 변환하여 OTF를 구하는 방법이다. 회절광학적인 OTF는 상면에서의 강도분포를 구할 필요가 없는 경우

에는 동함수(pupil function)의 auto-correlation으로부터 OTF를 바로 계산할 수도 있다.

본 연구에서는 유한광선추적을 통하여 파면수차를 얻어 동함수를 구하고 이를 auto-correlation시켜 OTF를 구하는 회절광학적인 방법을 사용하였다. Software의 정확도는 영국 SIRA사에서 제작된 OTF측정용 표준렌즈의 MTF(modulation transfer function)를 계산하여 이를 SIRA에서 제시된 계산치와 측정치,^[9] GENII(Genesee Optics Software, Inc.)^[10]에서의 계산치, 표준과학연구원에서의 측정치^[11,12]와 비교하여 검증하였다. 이를 통하여 본 연구에서 개발된 program에서의 계산치는 타 software에서의 계산치와 0.03 이내의 차이를 보였으며, 실험치와의 차이는 0.04 이내로 나타났다. 계산치에서 서로 차이가 큰 영역은 MTF의 값이 작은 고주파 영역으로 계산방법에 따른 작은 오차가 저주파대역에 비해 상대적으로 MTF값에 큰 영향을 주게 되기 때문으로 생각된다. 실험치와의 비교에서는 10 cycles/mm, 20 cycles/mm의 저주파영역에서 계산치와 실험치의 차이가 크게 나타났으며, 이것은 계산치 모두에서 공통적으로 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서 개발된 software에서의 계산된 MTF값은 타 software에서의 계산치와 서로 잘 일치하고 있다고 볼 수 있다.

II. 비가간섭성 광원에 대한 OTF 이론

1. Rayleigh 결상이론과 OTF^[7,8]

그림 1과 같이 비가간섭성 광원에 의하여 조명되는 광학계에서 x' - y' 평면상의 점 (x', y') 에서의 disturbance $U(x', y')$ 은 Huygens-Fresnel원리에 따라

$$U(x', y') = -\frac{i}{\lambda} \iint H(\xi, \eta) \frac{e^{\frac{2\pi i s}{\lambda}}}{s} d\xi d\eta \quad (1)$$

로 주어지며, s 는 반경 R 의 표준구면상의 점 $P(\xi, \eta, \delta)$ 에서 상면상의 점 $Q(x', y', 0)$ 까지의 거리이다. (1)식에서 $H(\xi, \eta)$ 는 동함수(pupil function)로 출사동의 최대반경을 ρ_{max} 라고 하면

$$H(\xi, \eta) = U_0(\xi, \eta) e^{\frac{2\pi i}{\lambda} W(\xi, \eta)} \begin{cases} \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \leq \rho_{max} \\ \sqrt{\xi^2 + \eta^2} > \rho_{max} \end{cases} = 0 \quad (2)$$

로 표현되고, $U_0(\xi, \eta)$ 는 입사파면에서의 disturbance, $W(\xi, \eta)$ 는 파면수차이다. (1)식에서 s 는

$$s = \sqrt{(x' - \xi)^2 + (y' - \eta)^2 + (R - \delta)^2} \quad (3)$$

이며, P 는 표준구면상에 있으므로

$$\xi^2 + \eta^2 + (\delta - R)^2 = R^2$$

의 관계식이 성립하고, $x' \ll R, y' \ll R$ 이므로 이를 (3)식에 대입하여 근사하면

$$s = \sqrt{R^2 - 2\xi x' - 2\eta y' + x'^2 + y'^2} \approx R - \frac{\xi x' + \eta y'}{R}$$

이 얻어지고, (1)식의 분모 s 는 R 로 근사하면

$$U(x', y') \approx -i \frac{e^{\frac{2\pi i R}{\lambda}}}{\lambda R} \iint H(\xi, \eta) e^{-\frac{2\pi i}{\lambda R}(\xi x' + \eta y')} d\xi d\eta \quad (4)$$

로 표현된다.

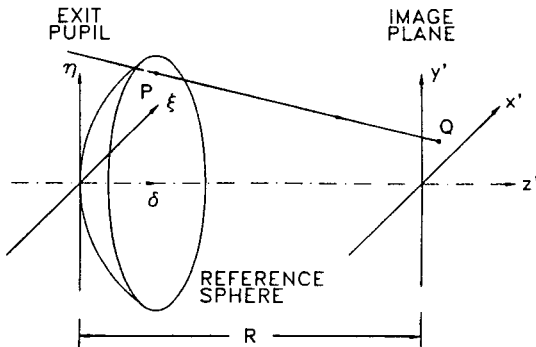


그림 1. Coordinate system for on-axis imaging.

광학계의 공간분해능을 나타내는 OTF는

$$OTF(f, g) = \frac{I_\omega(f, g)}{I_\omega(0, 0)} \quad (5)$$

로 정의되고 있고, $I_\omega(f, g)$ 는 상면의 강도분포를 나타내는 PSF(point spread function) $I(x', y')$ 의 power spectrum이다. (4)식에서 $I(x', y')$ 은

$$I(x', y') = U(x', y') U^*(x', y') = \left\{ \iint H(\xi, \eta) e^{-\frac{2\pi i}{\lambda R}(\xi x' + \eta y')} d\xi d\eta \right\} \times \left\{ \iint H^*(\xi', \eta') e^{\frac{2\pi i}{\lambda R}(\xi' x' + \eta' y')} d\xi' d\eta' \right\} \quad (6)$$

이므로 power spectrum $I_\omega(f, g)$ 는

$$I_\omega(f, g) = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x', y') e^{-2\pi i(fx' + gy')} dx' dy' = \iint H(\xi, \eta) \times \left\{ \iint H^*(\xi', \eta') \delta\left(\frac{\xi - \xi'}{\lambda R} + f\right) \delta\left(\frac{\eta - \eta'}{\lambda R} + g\right) d\xi' d\eta' \right\} d\xi d\eta = \iint H(\xi, \eta) H^*(\xi + \lambda Rf, \eta + \lambda Rg) d\xi d\eta \quad (7)$$

로 주어지고, OTF는 동함수의 auto-correlation으로 주어지게 된다.

$$OTF(f, g) = \frac{\iint H(\xi, \eta) H^*(\xi + \lambda Rf, \eta + \lambda Rg) d\xi d\eta}{\iint H(\xi, \eta) H^*(\xi, \eta) d\xi d\eta} \quad (8)$$

(8)식에서 OTF는 복소함수이며, OTF는 광학계에 의한 modulation의 변조를 나타내는 MTF(modulation transfer function)와 위상변화를 나타내는 PTF(phase transfer function)의 곱으로 표현된다. (7)식에서 $I_\omega(f, g)$ 의 실수부를 $Re[I_\omega(f, g)]$ 허수부를 $Im[I_\omega(f, g)]$ 라 하면 OTF, MTF, PTF는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$OTF(f, g) = MTF(f, g) \times \cos(PTF(f, g)) \quad (9)$$

$$MTF(f, g) = \frac{\sqrt{Re[I_\omega(f, g)]^2 + Im[I_\omega(f, g)]^2}}{I_\omega(0, 0)} \quad (10)$$

$$PTF(f, g) = \tan^{-1} \left(\frac{Im[I_\omega(f, g)]}{Re[I_\omega(f, g)]} \right) \quad (11)$$

2. 비축상점의 OTF

비축상점에 대한 OTF의 계산에서는 파면수차를 정의할 때 사용되는 좌표계(그림 2의 $x_e-y_e-z_e$ 좌표계)^[13]와 동함수를 정의하는 Hopkins 좌표계^[14]가 다르기 때문에 auto-correlation의 수치계산시 상당한 주의가 필요하다. 그림 2에서 출사동좌표계 $x_e-y_e-z_e$ 는 출사동의 정점을 원점으로 하고 주광선의 진행방향을 z_e 축으로 하는 좌표계이며, 파면수차는 출사동좌표계를 규격화한 환산좌표계(reduced coordinate)에서 정의된다. 환산좌표계 (r, ϕ) 는

$$\rho^2 = x_e^2 + y_e^2$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{x_e}{y_e}\right), \quad (0 \leq \phi < 2\pi)$$

$$r = \frac{\rho}{\rho_{max}}, \quad (0 \leq r \leq 1)$$

로 정의되고 있으며, Hopkins 좌표계 $\xi-\eta-\delta$ 와는 ω' 만큼 기울어져 있다. 상면의 좌표계 $x'-y'-z'$ 은 광축을 z' 축으로 하는 좌표계이며, 주광선이 상면에 입사한 높이는 y_{pr}' 이고 Q 는 주광선의 입사점을 기준으로 $(\Delta x', \Delta y')$ 만큼 떨어져 있다.

$$\Delta x' = x'$$

$$\Delta y' = y' - y_{pr}'$$

따라서 비축상점에 대한 표준구면의 반지름을 R' 이라고 하면, 그림 2에서 주광선의 입사고는

$$y_{pr}' = R' \sin \omega'$$

로 주어지며, 표준구면상의 점 P 에서 상면의 Q 까지의 거리는

$$s \approx R' - \frac{\xi \Delta x' + (\eta - y_{pr}') \Delta y'}{R'} \quad (12)$$

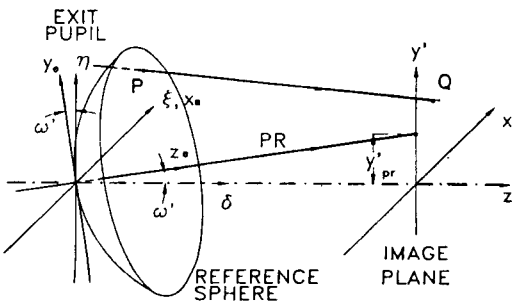


그림 2. Coordinate system for off-axis imaging.

로 근사된다. 좌표계의 회전변환관계에서 ξ, η 는

$$\xi = x_e$$

$$\eta = y_e \cos \omega' + z_e \sin \omega'$$

로 주어지나 F-수가 크고 ω' 이 작은 경우에는

$$\eta \approx y_e \cos \omega'$$

으로 근사할 수 있다. 따라서 그림 3과 같이 파면의 중심이 출사동좌표계에서 $(\Delta x_e, \Delta y_e)$ 만큼 이동하여 중첩된 경우 비축상점에 대한 공간주파수 (f, g) 는

$$f = \frac{\Delta x_e}{\lambda R'}$$

$$g = \frac{\Delta y_e}{\lambda R'} \cos \omega' \quad (13)$$

로 주어진다. (13)식에서 출사동의 직경이 ρ_{max} 인 이상적 광학계의 비축상점에 대한 y' 축 방향의 분해능 한계를 계산하여 보면 $\Delta y_{e-max} = \rho_{max} \cos \omega'$ 이고, $R' = R / \cos \omega'$ 이므로

$$g_{max} = \frac{\rho_{max}}{\lambda R} \cos^3 \omega'$$

$$= v_{max} \cos^3 \omega' \quad (14)$$

로 주어지고 v_{max} 는 축상 상점에 대한 공간분해능한계이다. x' 축 방향의 분해능한계는

$$f_{max} = \frac{\rho_{max}}{\lambda R'}$$

$$= v_{max} \cos \omega' \quad (15)$$

가 된다.^[7,15]

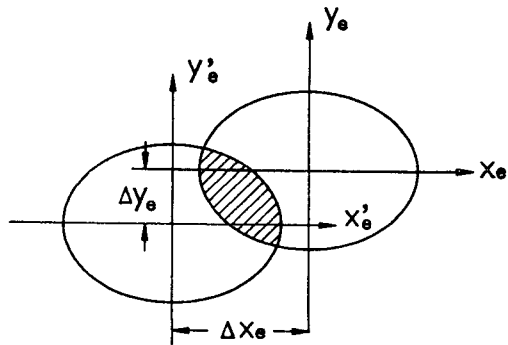


그림 3. Auto-correlation of exit pupil.

III. OTF의 수치계산

1. Auto-Correlation의 수치적분

(8)식의 auto-correlation의 적분 영역은 출사동의 중심을 $(\lambda Rf, \lambda Rg)$ 만큼 옮겼을 때의 중첩되는 부분과 같다. 따라서 출사동을 그림 4와 같이 가로와 세로가 각각 2ϵ 인 사각형의 cell로 나누어 각 cell의 중심을 (ξ_i, η_j) 라 하면

$$I_w(f, g) = \sum_{i,j} I_w^{(i,j)}$$

$$I_w^{(i,j)} = \int_{\xi_i - \epsilon}^{\xi_i + \epsilon} \int_{\eta_j - \epsilon}^{\eta_j + \epsilon} H(\xi, \eta) H^*(\xi', \eta') d\xi d\eta$$

$$\xi' = \xi + \Delta\xi, \quad \Delta\xi = \lambda Rf$$

$$\eta' = \eta + \Delta\eta, \quad \Delta\eta = \lambda Rg \quad (16)$$

로 바꾸어 쓸 수 있고, cell의 크기만 작게 잡으면 적분 오차도 충분히 줄여줄 수 있다.

일반 결상광학계에서는 입사파면의 disturbance U_0 는 균일하다고 볼 수 있으므로, 각 cell의 적분은 (2)식에

$$I_w^{(i,j)} = C_{\xi_i, \eta_j} C_{\xi_i', \eta_j'} \int_{\xi_j - \epsilon}^{\xi_j + \epsilon} \int_{\eta_j - \epsilon}^{\eta_j + \epsilon} e^{-\frac{2\pi i j}{\lambda} [W(\xi, \eta) - W(\xi', \eta')]} d\xi d\eta$$

$$C_{\xi_i, \eta_j} = U_0 U_0^*, \quad \sqrt{\xi_i^2 + \eta_j^2} \leq \rho_{max}$$

$$= 0, \quad \text{otherwise}$$

가 되며, C_{ξ_i, η_j} 는 각 cell의 vignetting 여부를 나타내는 parameter이다. Cell 내에서 파면수차는 완전히 변한다고 볼 수 있으므로

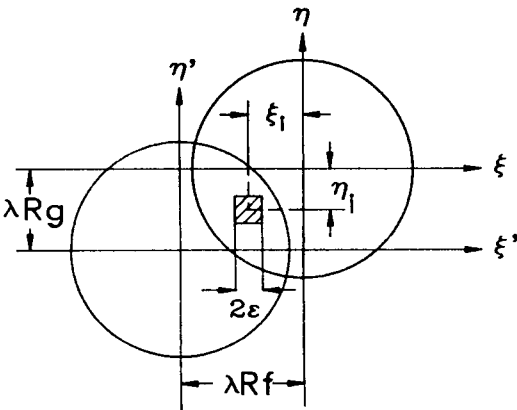


그림 4. Numerical calculation of the auto-correlation.

$$W(\xi, \eta) - W(\xi', \eta') \approx W(\xi_i, \eta_j) - W(\xi_i', \eta_j')$$

$$+ \left\{ \frac{\partial W}{\partial \xi} \Big|_{\xi_i, \eta_j} - \frac{\partial W}{\partial \xi} \Big|_{\xi_i', \eta_j'} \right\} (\xi - \xi_i)$$

$$+ \left\{ \frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\xi_i, \eta_j} - \frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\xi_i', \eta_j'} \right\} (\eta - \eta_j)$$

로 근사할 수 있고, B, B_ξ, B_η 를

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} [W(\xi_i, \eta_j) - W(\xi_i', \eta_j')]$$

$$B_\xi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial W}{\partial \xi} \Big|_{\xi_i, \eta_j} - \frac{\partial W}{\partial \xi} \Big|_{\xi_i', \eta_j'} \right]$$

$$B_\eta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\xi_i, \eta_j} - \frac{\partial W}{\partial \eta} \Big|_{\xi_i', \eta_j'} \right] \quad (17)$$

라 두면 각 cell의 적분은

$$I_w^{(i,j)} = C_{\xi_i, \eta_j} C_{\xi_i', \eta_j'} \iint_{-\epsilon}^{\epsilon} e^{i(B + B_\xi \xi + B_\eta \eta)} d\xi d\eta$$

$$= 4C_{\xi_i, \eta_j} C_{\xi_i', \eta_j'} \epsilon^2 e^{iB} \text{sinc}(\epsilon B_\xi) \text{sinc}(\epsilon B_\eta) \quad (18)$$

로 주어진다.

2. OTF의 수치계산 과정

본 연구에서는 유한광선을 추적하여 광선의 광로정에 서 파면수차를 계산하는 방법을 사용하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

제 1 단계

주광선을 추적하여 입사동의 위치를 구하고, 입사동을 등간격의 cell로 나누어 각 cell의 중심을 통과하는 유한광선을 추적하여 Gauss 상면에 입사한 위치, 방향여현, 광로정을 구하여 둔다. 이 과정에서 광선이 통과하는 cell과 통과하지 않는 cell 사이의 vignetting edge를 지나는 광선은 이분법(bi-section method)으로 구하여 별도로 저장하여 둔다.

제 2 단계

유한광선의 추적자료에서 표준구면과의 교점과 파면수차를 구하고, vignetting edge를 지나는 광선을 이용하여 출사동의 크기를 결정한다. Defocus가 필요한 경우는 파면수차를 구하기전에 defocus를 시켜준다. 따라서 defocus된 OTF를 구하는 경우 새로운 광선의 추적은 필요없게 된다.

제 3 단계

파면수차를 최소사승법을 사용하여 표 1의 다항식으로

표 1. Polynomials for wavefront aberration.

number	order	polynomial	number	order	polynomial
1	1	y	19	7	y^7
2	2	x^2	20	8	x^8
3	2	y^2	21	8	x^6y^2
4	3	x^2y	22	8	x^4y^4
5	3	y^3	23	8	x^2y^6
6	4	x^4	24	8	y^8
7	4	x^2y^2	25	9	x^8y
8	4	y^4	26	9	x^6y^3
9	5	x^4y	27	9	x^4y^5
10	5	x^2y^3	28	9	x^2y^7
11	5	y^5	29	9	y^9
12	6	x^6	30	10	x^{10}
13	6	x^4y^2	31	10	x^8y^2
14	6	x^2y^4	32	10	x^6y^4
15	6	y^6	33	10	x^4y^6
16	7	x^6y	34	10	x^2y^8
17	7	x^4y^3	35	10	y^{10}
18	7	x^2y^5			

fitting한다. 일반적으로 파면수차는 Zernike 다항식으로 전개되는 경우가 많으나 본 연구에서 개발된 program에서는 (17), (18)식을 효율적으로 계산하기 위하여 binomial을 사용하였으며, x 의 짝수차항만 사용하고 있으므로 회전대칭성이 있는 광학계의 분석만이 가능하다.

제 4 단계

출사동을 등간격으로 cell로 나누어 각 cell의 파면수차, 1차 편미분의 값을 구하여 저장하고, 광선이 통과하는 cell은 C_{ξ_i, η_j} 를 1로, vignetting이 된 cell은 0으로 지정하여 둔다. 이와 함께 $I_w(0, 0)$ 의 값을 구하여 둔다.

제 5 단계

주어진 공간주파수(f, g)에 대한 auto-correlation을 구한다. 실제계산에서는 출사동이 등간격의 cell로 나누어져 있어 auto-correlation은 일정한 간격의 공간주파수에 대하여서만 가능하므로 중간값은 spline보간법을 사용하여 얻게된다. Auto-correlation의 계산에서 비축상점의 경우는 출사동좌표계가 Hopkins좌표계에 대하여 회전되어 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 비축상점에 대한 (16)식의 auto-corelation은 그림 3에서와 같이 출사동좌표계에서 계산하였으며, 공간주파수는 (13)식에서 주어지게 된다. 출사동좌표계에서의 auto-correlation의 계산은 (16)~(18)식에서 ξ 를 x_c 로, η 를 y_c 로 바꾸어 주면 된다.

IV. MTF의 계산결과 및 토의

본 연구에서 개발된 program은 OSA로 명명하였으며 OTF 계산의 정확도를 검증하기 위하여 표 2에 제시된 표준렌즈의 MTF를 계산하여 GENII^[10]에서 계산된 값, SIRA에서 계산된 값^[9]과 표준과학연구원에서의 측정치, ^[11,12] SIRA에서의 측정치^[9]와 비교하였다. 표 2의 표준렌즈는 영국 SIRA사에서 제작된 OTF 측정용 표준렌즈로 plano-convex형의 단렌즈이다. 이 렌즈의 촛점거리는 546.1 nm에서 50 mm이고 렌즈 뒤에 위치한 조리개를 교환하여 F-수를 바꾸어 줄 수 있다.

OTF의 계산에서 파면수차는 입사동을 32×32개의 cell 나누고 각 cell의 중심을 통과하는 광선을 추적하여 광로정차를 구하고, 출사동좌표계에서 표 1의 다항식으로 fitting하여 파면수차를 얻었다. 동함수의 auto-correlation은 출사동을 51×51개의 cell로 나누어 적분하였다. GENII를 이용한 계산에서도 입사광선의 수는 OSA와 같게 하였다. 실험적으로 OTF를 측정할 때에는 먼저 측상에서 기준주파수에 대하여 최대의 MTF를 가지는 상면을 찾고, 다시 defocus시켜 기준주파수의 MTF가 최대치의 1/2되는 상면을 찾아 이 상면을 OTF값의 비교를 위한 기준상면으로 사용하고 있다. 이 기준상면은 정의에 따르면 defocus 방향에 따라 2개가 있으나, 렌즈쪽의 상면이 기준상면으로 사용되고 이를 datum focal plane이라 부른다. 본 연구에서는 표준과학연구원의 논문에 제시된 것과 동일한 조건을 사용하여 MTF값을 계산하였으며, 표 2의 표준렌즈의 경우 물체가 무한점에 있을 때의 기준상면은 546.1 nm, F/8의 측상에서 50 cycles/mm에 대한 datum focal plane이다.

표 3에는 datum focal plane을 결정하기 위하여 F/8에서 무한대에 있는 측상물체에 대한 50 cycles/mm의

표 2. Design specifications of the standard lens system.

material
Zinc-crown(508612)
refractive index: 1.5096 ± 0.0010 at 546.1 nm
dimensions(plano-convex singlet)
curvature radius of front surface: 25.48 ± 0.06 mm
rear surface: plane
axial thickness: 10.00 ± 0.05 mm
clear aperture: greater than 28mm in diameter stop position
1.0 ± 0.1 mm from the rear plane surface

표 3. Calculated MTF values of the standard lens system for 50 cycles/mm with defocusing(F/8, on-axial infinite object, 546.1 nm).

defocus (mm)	OSA	GENII	remarks
-0.30	0.138	0.139	
-0.28	0.215	0.217	
-0.26	0.296	0.298	
-0.247	0.348	0.351	datum focal plane
-0.24	0.377	0.379	
-0.22	0.454	0.456	
-0.20	0.525	0.528	
-0.18	0.587	0.590	
-0.16	0.637	0.640	
-0.14	0.672	0.675	
-0.12	0.692	0.695	
-0.105	0.697	0.700	best focal plane
-0.10	0.696	0.699	
-0.08	0.684	0.687	
-0.06	0.658	0.660	
-0.04	0.618	0.619	
-0.02	0.567	0.568	
0.00	0.508	0.507	Gaussian image plane

MTF값이 계산되어 있다. 표 3에서 50 cycles/mm에 대한 최적상면은 Gauss상면에서 -0.105 mm만큼 defocus 되어 있으며, 이 때의 MTF값은 0.70이었다. 따라서 datum focal plane은 MTF값이 0.35인 -0.247 mm defocus된 상면이 된다. OSA와 GENII에서 계산된 결과는 거의 같고, 최적상면에서 datum focal plane까지의 거리는 0.142 mm이며 이는 표준과학연구원서 측정된 값 150±5 μm과 잘 일치하고 있다.^[1]

표 4에는 무한대에 있는 축상물체에 대하여 F/8, F/5.6, F/4, F/11인 경우의 MTF가 계산되어 있다. 계산치들을 서로 비교하여 보면 F-수가 상대적으로 작은 경우(F/4, F/5.6)에서 공간주파수가 높을 때 계산치간의 차이가 크게 나타나고 있으나 그 차이는 0.03 이내이므로 서로 잘 일치한다고 볼 수 있다. 측정치와의 비교에서는 공통적으로 10 cycles/mm, 20 cycles/mm의 저주파에서 계산치와 측정치의 차이가 크게 나타나고 있고, 그 차이는 0.04 정도이다.

표 5에는 무한대에 있는 비축물체에 대하여 F/8 3°, F/8 6°, F/5.6 3°인 경우의 MTF가 계산되어 있으며 기준상면은 표 3에 제시된 datum focal plane을 사용하였다. 계산치를 서로 비교하여 보면, 그 차이는 0.03 이내로서 축상의 경우와 마찬가지로 잘 일치하고 있다.

표 4. MTF values of the standard lens system for on-axial infinite object point(e-line, 546.1 nm). (a) on the best focal plane of 50 c/mm at F/8

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.940	0.940	0.94	0.90	0.92
20	0.876	0.877	0.88	0.83	0.84
30	0.814	0.816	0.81	0.77	0.78
40	0.755	0.758	0.76	0.72	0.71
50	0.697	0.700	0.70	0.66	0.65
60	0.643	0.644	0.64	0.60	0.59
70	0.590	0.594	0.59	0.55	0.54
80	0.540	0.544	0.54	0.51	0.48
90	0.491	0.496	0.49	0.46	0.44
100	0.444	0.448	0.44	0.40	0.40

(b) on the datum focal plane at F/8

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.919	0.920	0.92	0.88	0.90
20	0.795	0.795	0.79	0.75	0.76
30	0.644	0.645	0.65	0.62	0.61
40	0.489	0.490	0.49	0.46	0.46
50	0.348	0.351	0.35	0.33	0.32
60	0.237	0.239	0.24	0.23	0.22
70	0.156	0.159	0.16	0.15	0.15
80	0.104	0.107	0.11	0.11	0.10
90	0.074	0.076	0.08	0.08	0.08
100	0.059	0.060	0.06	0.05	0.06

(c) on the datum focal plane at F/5.6

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.922	0.924	0.93	0.90	0.90
20	0.806	0.813	0.81	0.79	0.78
30	0.686	0.699	0.70	0.68	0.66
40	0.573	0.590	0.59	0.56	0.54
50	0.469	0.491	0.49	0.46	0.44
60	0.377	0.403	0.40	0.37	0.35
70	0.299	0.328	0.33	0.29	0.28
80	0.236	0.264	0.27	0.24	0.23
90	0.187	0.214	0.21	0.19	0.19
100	0.149	0.175	0.18	0.16	0.16

(d) on the datum focal plane at F/4

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.521	0.491	0.51	0.48	0.46
20	0.396	0.397	0.38	0.39	0.36
30	0.323	0.318	0.32	0.30	0.30
40	0.261	0.270	0.26	0.26	0.24
50	0.205	0.212	0.21	0.20	0.19
60	0.156	0.170	0.17	0.15	0.14
70	0.117	0.137	0.14	0.12	0.11
80	0.086	0.111	0.10	0.10	0.09
90	0.063	0.086	0.08	0.07	0.08
100	0.047	0.071	0.06	0.06	0.06

(e) on the datum focal plane at F/11

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.897	0.897	0.90	0.88	0.88
20	0.759	0.759	0.75	0.74	0.72
30	0.613	0.613	0.61	0.60	0.58
40	0.480	0.480	0.48	0.46	0.44
50	0.373	0.374	0.37	0.35	0.35
60	0.293	0.295	0.30	0.28	0.27
70	0.236	0.236	0.22	0.23	0.22
80	0.197	0.198	0.20	0.19	0.19
90	0.173	0.172	0.16	0.16	0.18
100	0.154	0.152	0.16	0.14	0.15

표 5. MTF values of the standard lens system for off-axial infinite object point(Hg e-line, 546.1 nm)

(a) Radial MTF of F/8 for 3° off-axial object point

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.940	0.940	0.95	0.90	0.92
20	0.876	0.874	0.88	0.84	0.85
30	0.807	0.805	0.81	0.77	0.78
40	0.738	0.732	0.74	0.70	0.71
50	0.668	0.660	0.68	0.64	0.64
60	0.602	0.591	0.61	0.57	0.57
70	0.539	0.529	0.55	0.53	0.51
80	0.483	0.473	0.49	0.46	0.45
90	0.434	0.423	0.44	0.41	0.40
100	0.391	0.380	0.40	0.37	0.38

(b) Tangential MTF of F/8 for 3° off-axial object point

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.921	0.924	0.92	0.90	0.90
20	0.825	0.836	0.82	0.80	0.80
30	0.732	0.753	0.73	0.72	0.71
40	0.651	0.674	0.64	0.64	0.63
50	0.582	0.611	0.57	0.57	0.56
60	0.522	0.548	0.51	0.50	0.50
70	0.467	0.494	0.45	0.44	0.44
80	0.417	0.438	0.40	0.40	0.39
90	0.370	0.392	0.36	0.36	0.34
100	0.325	0.341	0.31	0.31	0.31

(c) Radial MTF of F/8 for 6° off-axial object point

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.797	0.793	0.80	0.78	0.79
20	0.490	0.482	0.49	0.49	0.48
30	0.248	0.236	0.25	0.24	0.24
40	0.104	0.092	0.10	0.09	0.04
50	0.031	0.022	0.02	0.04	0.02
60	0.002	0.006	0.01	0.03	0.02
70	0.015	0.018	0.02	0.04	0.01
80	0.018	0.016	0.02	0.02	0.01
90	0.018	0.020	0.02	0.03	0.01
100	0.017	0.016	0.00	0.01	0.00

(d) Tangential MTF of F/8 for 6° off-axial object point.

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.251	0.245	0.23	0.25	0.26
20	0.048	0.043	0.04	0.05	0.04
30	0.033	0.037	0.04	0.03	0.03
40	0.003	0.008	0.01	0.02	0.02
50	0.015	0.016	0.01	0.03	0.02
60	0.002	0.007	0.01	0.02	0.01
70	0.010	0.017	0.01	0.00	0.01
80	0.007	0.008	0.01	0.02	0.00
90	0.003	0.005	0.00	0.00	0.01
100	0.000	0.004	0.00	0.01	0.00

(e) Radial MTF of F/5.6 for 3° off-axial object point.

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.870	0.867	0.87	0.83	0.84
20	0.689	0.682	0.68	0.67	0.65
30	0.557	0.543	0.54	0.55	0.52
40	0.473	0.454	0.45	0.46	0.43
50	0.417	0.394	0.39	0.41	0.38
60	0.376	0.351	0.35	0.36	0.34
70	0.343	0.316	0.31	0.33	0.30
80	0.316	0.286	0.29	0.30	0.27
90	0.292	0.263	0.26	0.28	0.25
100	0.272	0.244	0.24	0.25	0.24

(f) Tangential MTF of F/5.6 for 3° off-axial object point.

spatial frequency (c/mm)	calculated MTF			measured MTF	
	OSA	GENII	SIRA	KRISS	SIRA
10	0.741	0.733	0.73	0.73	0.71
20	0.433	0.417	0.41	0.42	0.40
30	0.298	0.281	0.27	0.28	0.28
40	0.252	0.244	0.24	0.24	0.24
50	0.225	0.227	0.22	0.22	0.22
60	0.200	0.208	0.21	0.20	0.20
70	0.177	0.186	0.18	0.18	0.18
80	0.154	0.161	0.16	0.14	0.16
90	0.132	0.140	0.14	0.14	0.14
100	0.111	0.120	0.11	0.11	0.12

측정치와의 비교에서는 축상 물체와 마찬가지로 저주파 영역에서 차이가 크게 나타나며 이는 세가지 계산치 모두에 공통적으로 나타나고 있다. 또한, 비축물체에 대한 MTF는 높은 공간주파수영역에서 극대 극소가 나타나고 있으며(예: F/8, 6° tangential MTF), 이 극대 극소의 존재는 실험치에서도 나타나고 있다. 이 때의 MTF값은 작기 때문에 그 차이는 적으나 극대 극소의 위치는 계산치와 실험치가 서로 다르게 나타난다. 이것은 실험 data 처리에 사용되는 Fourier 변환의 계산오차가 MTF값이 작은 주파수대역에서는 측정결과에 상대적으로 큰 영향을 주기 때문으로 이해된다. 비축물체에 대한 MTF 계산에서도 측정치와의 차이는 축상물체와 마찬가지로 0.04 이내로 나타나고 있다.

V. 결 론

광학설계제원으로부터 OTF값을 계산하는 software를 개발하고, MTF의 계산결과를 타 software에서의 계산된 값, 실험에서 측정된 값과 비교하여 그 정확성을 검증하였다. OTF의 계산에는 유한광선추적을 통하여 파면 수차를 구하고, 동함수의 auto-correlation을 계산하는 방법을 사용하였다. 계산결과를 비교하기위한 광학계는 영국 SIRA의 plano-convex형 표준렌즈를 사용하였으며, 546.1 nm의 단색 비가간섭성 광원에 의하여 조명되는 무한물체에 대한 MTF를 계산하였다.

계산 결과의 비교에는 국내에서 많이 사용되고 있는 GENII에서의 계산치와 SIRA의 계산치가 사용되었고, 측정치로는 표준과학연구원에서의 측정치와 SIRA에서의 측정치가 사용되었다. 계산치간의 비교에서는 세가지 모두 거의 같은 값을 가지고 있음이 확인되었으며, 그 차이는 축상 비축상 모두 0.03 이내로 잘 일치하고 있었다. 측정치와의 비교에서는 상대적으로 낮은 주파수(10 cycles/mm, 20 cycles/mm)에서 차이가 비교적 크게 나타났다. 이것은 계산치 모두의 공통적인 경향이었으며, 계산치와 실험치와의 차이는 0.04 이내였다. 비축물체에서 극대, 극소가 있는 경우에서는 MTF은 작은 값을 가지므로 MTF 자체는 측정치와 계산치의 차이가 작게 나타나나 극대극소점의 위치는 서로 다르게 나타나고 있었으며, 이는 MTF 값이 작은 경우 계산치의 data point의 sampling 방법과 측정시 data의 Fourier 변환 과정에서 고주파영역의 계산오차에 의한 것으로 이해된다.

본 연구를 통하여 국내에서 개발된 software의 정확성을 검증할 수 있었으며, 이를 계기로 앞으로는 국내의 연구결과가 산업계에서 널리 이용될 수 있기를 바란다.

감사의 글

본 연구의 수행과 program의 검증에 많은 도움을 주신 삼성전자(주)의 장요셉 과장님, 금성사 영상미디어연구소의 박성찬 박사님과 한국표준과학연구원의 이윤우, 조현모님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, 새물리, 27, 95 (1987).
 [2] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, 응용물리, 3, 153 (1990).
 [3] 홍경희, 이상수, 새물리, 19, 94(1979).

- [4] 한순희, 정창섭외, 새물리, **32**, 312(1992).
- [5] 홍경희, 이상수, 새물리, **21**, 124(1981).
- [6] 홍경희, 이종웅, 새물리, **27**, 24(1987).
- [7] 草川徹, 렌즈設計のための波面光學, 東海大學出版會, 東京(1976).
- [8] K. R. Barnes, *The Optical Transfer Function*, American Elsevier Pub. Co., New York(1971).
- [9] T. L. Williams, A. Ashton and M. J. Worrall, *Dimensions, Tolerance, and OTF Characteristics of the SIRA Group 50 mm Plano-Convex Test Lens*, 1970.
- [10] GENII Reference Manual, Genesee Optics Software Inc., Rochester(1989).
- [11] 조현모, 이윤우, 이인원, 홍경희, 새물리, **27**, 423 (1987).
- [12] 조현모, 이윤우, 이희운, 이인원, 한국광학회지, **2**, 121(1991).
- [13] 이상수, 기하광학, 교학연구소, 서울(1985).
- [14] 정창섭, 새물리, **28**, 92(1988).
- [15] Code V Reference Manual Vol. II, Optical Research Associates, Pasadena(1992).

Development of Numerical Calculation Software for OTF from Lens Design Data

Jong Ung Lee

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-384, Korea

Kyung Hee Hong

Department of Physics, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

(Received: November 16, 1993)

A software to calculate diffraction OTF from lens design data was developed and its accuracy was verified. To verify the accuracy, MTF of a standard lens system for OTF measurement were calculated. The results were compared with calculated values by another commercial software and measured values. We found that they have good agreements with one another.