

## Fishtail Edge를 이용한 OTF 측정장치의 자동화

김태희 · 최옥식

영남대학교 물리학과

조현모 · 이윤우 · 이인원

한국표준과학연구원, 영상그룹

(1996년 7월 11일 받음)

기존에 제작된 칼날주사형 OTF 측정장치의 물체부와 상분석부를 개선하여 측정을 자동화함으로써 MTF 측정 정확도를 향상시켰다. 여러 가지 크기를 갖는 핀홀과 슬릿들을 물체로 사용하였고 fishtail edge를 상분석부의 수평방향에 45°로 부착시킴으로써 radial과 tangential 방향의 MTF를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 또한 상분석부의 스텝핑 모터 구동장치와 측정 컴퓨터 프로그램을 개선하였고 SIRA 그룹의 50 mm 표준렌즈를 사용하여 OTF 측정장치의 측정 정확도를 평가하였다.

### I. 서 론

광학계의 결상성능 평가에는 여러 방법이 사용될 수 있으나, 최종적인 광학계의 성능 분석에는 광학계의 공간 분해능을 나타내는 OTF(optical transfer function)를 측정하는 방법이 최근 세계적으로 많이 사용되고 있다. OTF를 실험적으로 측정하는 방법은 간섭계를 이용하는 방법<sup>[1,2]</sup>과 광학계에 의해 맺혀진 상을 주사 해석하는 방법<sup>[3,4]</sup>으로 나눌 수 있다.

주사(scan)에 의해 OTF를 측정하는 방법은 1963년 Shanon과 Neuman에 의해 집, 슬릿 또는 칼날의 상을 electric filter로 주사 해석하는 전기적 푸리에 해석 방법<sup>[5]</sup>이 제시된 이래 각국에서 계속 발전하여 왔다.<sup>[6-8]</sup>

표준과학연구원 영상그룹에서는 핀홀을 점물체로 사용하거나 슬릿을 선물체로 사용하고 스텝핑 모터에 부착된 칼날로 상의 강도 분포를 주사한 뒤 이를 컴퓨터로 푸리에 변환하여 OTF를 계산하는 측정장치를 1986년에 개발하였으며, 현재 측정 능력과 측정 정확도를 향상시키기 위한 연구를 계속하고 있다.<sup>[9,12]</sup>

그런데 기존의 렌즈형 시준장치와 카메라형 광학대를 이용한 OTF 장치에서 radial과 tangential 방향의 MTF를 측정하기 위해서는 선물체로 사용하는 슬릿과 scanning edge로 사용하는 칼날을 모두 radial이나 tangential 방향으로 회전시킨 후 광축을 재정렬하여야 했다. 이 경우 물체와 칼날을 수동으로 90°만큼 회전시켜야 하므로 물체와 칼날이 각 측정 방향에 대하여 정확하게 90°로 회전되었는지 확인할 수 없었을 뿐만 아니라 광축 재정렬에 많은 시간이 소비되었다. 이러한 사항들은 MTF 측정 오차의 원인이 되었으므로 본 연구에서는 이와 같은 문제점들을 다음과 같이 해결하였다.

다양한 직경의 핀홀과 슬릿을 부착한 turret을 제작하여 물체로 사용하고 이를 스텝핑 모터가 부착된 회전장치에 부착시켰으며, radial과 tangential 방향의 동시적인 주사가 가능한 fishtail을 scanning edge로 사용<sup>[13]</sup>하고 이를 스텝핑 모터가 부착된 직선이동장치에 부착시켰다. 또한 칼날을 scanning edge로 사용할 경우를 위하여 scanning edge가 부착된 직선이동장치를 스텝핑 모터가 부착된 회전장치에 부착시켰다. 추가적으로 사용된 스텝핑 모터들의 조정을 자동화하기 위하여 모터 제어장치를 제작하였으며, fishtail을 이용한 MTF 측정, 계산 과정과 결과 표시를 위하여 컴퓨터 프로그램을 개선하였다. 개선된 OTF 측정장치의 측정 정확도는 SIRA 연구팀이 개발한 50 mm OTF 표준렌즈<sup>[14]</sup>의 MTF를 측정하여 평가하였으며, 국산 팩스렌즈의 MTF를 측정하였다.

### II. Optical Transfer Function

선물체에 대한 OTF 이론은 참고문헌<sup>[9]</sup>에 잘 알려져 있으므로 본 논문에서는 점물체에 대한 OTF 이론을 살펴보겠다.

비가간섭광에 의해 조명되는 유한한 크기의 점물체가 광학계에 의해 상을 형성할 경우에 상의 강도분포함수와 물체의 강도분포함수는 선형적인 관계를 이루므로

$$I_i(x_i, y_i) = K \iint_{-\infty}^{+\infty} |h(x_i - x_o, y_i - y_o)|^2 I_g(x_o, y_o) dx_o dy_o \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 위 식에서  $I_i(x_o, y_o)$ 는 유한한 크기를 갖는 점물체가 측정상면에 이루는 회절상의 강도분포함수,  $I_g(x_o, y_o)$ 는 점물체의 기하광학적으로 이상적인 상에 대한 강도분포,  $K$ 는 복소수 비례상수 그리고  $|h(x_o, y_o)|^2$ 는 PSF(point spread function)이다. 이들의 규격화된 푸리에 변환은

$$G_i(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) \frac{e^{-2\pi i(f_x x_i + f_y y_i)} dx_i dy_i}{\iint_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) dx_i dy_i} \quad (2)$$

\*본 연구를 수행함에 있어 광학 및 기계 부품 제작에 도움을 주신 표준과학연구원의 이희윤님과 이재협님께 감사를 드립니다.

$$G_g(f_x, f_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} I_o(x_o, y_o) \frac{e^{-2\pi i(f_x x_o + f_y y_o)} dx_o dy_o}{\iint_{-\infty}^{+\infty} I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o}}{\quad} \quad (3)$$

$$H(f_x, f_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} |h(x_o, y_o)|^2 \frac{e^{-2\pi i(f_x x_i + f_y y_i)} dx_i dy_i}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |h(x_i, y_i)| dx_i dy_i}}{\quad} \quad (4)$$

로 주어진다. Convolution 이론에 의해 식 (1)은

$$H(f_x, f_y) = \frac{G_i(f_x, f_y)}{G_g(f_x, f_y)} \quad (5)$$

로 표현되며  $H(f_x, f_y)$ 를 OTF로 정의한다. Radial(x-축) 방향의 OTF를 측정하는 경우를 고려해 보면 식 (5)는

$$H(f_x, 0) = \frac{G_i(f_x, 0)}{G_g(f_x, 0)} \quad (6)$$

이 된다. 식 (6)에서  $G_i(f_x, 0)$ 는 측정상면에서 측정 한 유한 크기의 점물체에 대한 radial 방향의 상분포를 푸리에 변환한 것이며  $G_g(f_x, 0)$ 는 기하광학적으로 이상적인 점물체의 상에 대한 radial 방향의 크기를 계산한 뒤 이를 푸리에 변환한 것이다. 그러므로 상의 강도분포함수  $G_i(f_x, 0)$ 를 측정하면 OTF를 계산할 수 있다.

$G_i(f_x, 0)$ 는 식 (2)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$G_i(f_x, 0) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) e^{-2\pi i f_x x_i} dx_i dy_i}{\iint_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) dx_i dy_i} \quad (7)$$

측정상면에 형성된 점물체의 상에 대한 radial 방향의 주사 함수  $E(x)$

$$E(x) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) dx_i dy_i \quad (8)$$

로 주어진다. 점물체의 회절강도분포를 tangential(y-축) 방향으로 적분한  $L(x_i)$ 를

$$L(x_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_i(x_i, y_i) dy_i \quad (9)$$

로 정의한 후 식 (7)에 대입하면  $G_i(f_x, 0)$ 는

$$G_i(f_x, 0) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} L(x_i) e^{-2\pi i f_x x_i} dx_i}{\int_{-\infty}^{+\infty} L(x_i) dx_i} \quad (10)$$

이 된다.  $L(x_i)$ 와  $E(x)$ 는 식 (8)과 식 (9)에 의해

$$L(x_i) = \frac{dE(x)}{dx_i} \quad (11)$$

인 관계가 성립하므로 식 (10)과 식 (11)을 식 (6)에 대입하면 실험에서 측정되는 주사함수  $E(x)$ 를 사용한 OTF 계산식 (12)가 얻어진다.

$$H(f_x, 0) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dE(x_i)}{dx_i} e^{-2\pi i f_x x_i} dx_i}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dE(x_i)}{dx_i} dx_i} \times \frac{1}{G_g(f_x, 0)} \quad (12)$$

식 (12)의 OTF는 복소함수이므로

$$H(f_x, 0) = MTF(f_x, 0) e^{i PTF(f_x, 0)} \quad (13)$$

로 쓸 수 있는데, 여기서 MTF(modulation transfer function)는 OTF의 modulus를 나타내고 PTF는 OTF의 복소수 편각을 나타낸다.

### III. 측정장치의 개선

#### 3.1. 측정장치의 개선

Fig. 1은 표준연구원의 영상그룹에서 제작하여 사용하고 있는 OTF 측정장치로써 유한 및 무한거리의 물체로 이루어진 물체부(그림의 좌측 부분), 시험렌즈에 의해 결상된 상을 주사 해석하는 상분석부(그림의 우측 부분) 그리고 각종 측정 부품들을 지지하고 측정 조건에 맞도록 광축 정렬을 하기 위한 광학대로 구성된다.

이러한 기존의 OTF 장치는 다음과 같은 불편한 점이 존재하였다.

물체부는 하나의 선물체나 점물체만을 설치할 수 있으므로 시험렌즈의 특성에 따라 물체를 외부에서 수동으로 교환해야 했고, 선물체를 사용하여 radial이나 tangential 방향의 MTF를 측정하는 경우 측정방향에 따라 선물체를 외부에서 수동으로 90°회전시켜야 했다. 상분석부에서는 칼날을 스텝핑 모터에 부착하여 점물체나 선물체의 결상된 상을 주사하므로 radial 방향의 주사와 tangential 방향의 주사중 한 방향으로의 주사만 가능하였다. 그러므로 radial이나 tangential 방향의 주사를 위해서는 각각 칼날을 외부에서 수동으로 90°회전을 시킨 다음 현미경으로 상에 대한 칼날의 상대적 평행도를 확인한 후 주사를 실시하였다.

이러한 점들을 해결하여 광축의 재정렬, 측정 편리성 그리

OTF Measurement system

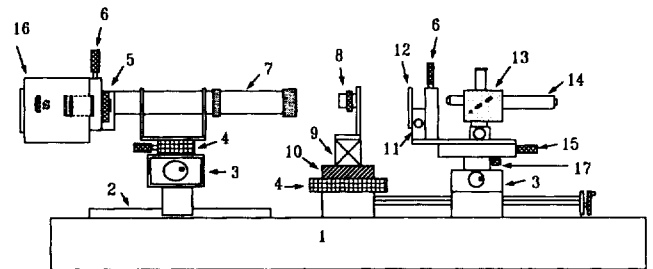


Fig. 1. Side diagram of the developed camera bench type OTF measuring equipment.

- |                  |                           |
|------------------|---------------------------|
| 1. optical table | 10. tilter                |
| 2. rail          | 11. scanner translator    |
| 3. translator    | 12. fishtail scanner      |
| 4. rotator       | 13. alignment system      |
| 5. object turret | 14. PM tube               |
| 6. rotator       | 15. defocusing translator |
| 7. collimator    | 16. object generator      |
| 8. lens mount    | 17. micro X-Y translator  |

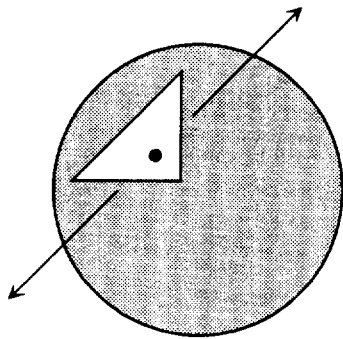


Fig. 2. Fishtail to image orientation.

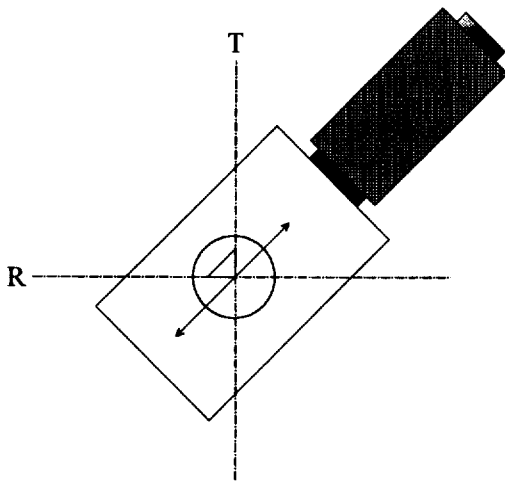


Fig. 3. Image scanner mounting position for fishtail.

고 측정 재현성을 향상시키기 위하여 물체부와 상분석부를 다음과 같이 개선하였다.

첫째 시험렌즈의 특성에 맞게 점물체와 선물체를 자동적으로 교환할 수 있도록 하기 위하여 폭이 5, 25, 50  $\mu\text{m}$  인 슬릿과 직경이 50, 75, 100, 150, 200  $\mu\text{m}$  인 핀홀을 부착한 turret을 제작하여 분해능 및 정확도가 0.01°인 회전장치(Micro Control사의 UR 100 PP)에 부착시켰다.

둘째 선물체를 사용하여 radial, tangential 방향의 MTF 측정할 경우 각 방향에 따른 선물체의 90°회전을 편리하게 하기 위하여 슬릿들을 각각 수평과 수직으로 turret에 부착시켰다.

셋째 칼날을 scanning edge로 사용하여 점물체나 선물체의 상에 대한 radial, tangential 방향의 주사함수 측정시 칼날의 90°회전을 자동화하기 위하여 칼날이 부착된 직선이동장치를 분해능 및 정확도가 0.01°인 회전장치(Micro Control UR 100 PP)에 부착시켰다.

넷째 점물체를 사용하는 경우 radial과 tangential 방향의 주사함수를 동시에 측정할 수 있도록 하기 위하여 Fig. 2와 같은 fishtail을 scanner로 사용하였다. 직각 이등변 삼각형 형태의 fishtail은 서로 수직인 2개의 scanning edge를 가지고 있는데 밑변은 radial 방향의 주사, 높이는 tangential 방향의 주사에 사용한다. Fig. 2에서 화살표는 결상된 점물체의 상에 대한 fishtail의 이동 방향을 나타내므로 fishtail이 1 사분면으로

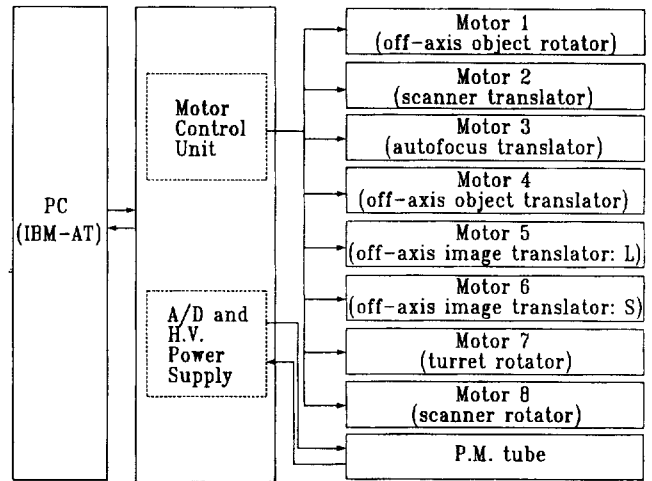


Fig. 4. Block diagram of data acquisition and motor control system.

이동하는 경우에는 radial 방향의 주사함수가 측정되고 3 사분면으로 이동하는 경우에는 tangential 방향의 주사함수가 측정된다. 이러한 방식의 주사를 위하여 fishtail을 Fig. 3과 같이 광축에 대하여 45°로 정렬된 분해능이 0.1  $\mu\text{m}$  인 직선이동장치(Micro Control사의 UT 50.20 PP)에 부착시켰다.

### 3.2. 모터 제어장치의 제작

모터 제어장치는 interface card로부터 발생하는 5 V의 펄스 신호를 각각의 모터 제어 board에서 24 V로 증폭함으로써 각각의 스텝핑 모터에 대한 모터 선택과 속도 조절을 자동으로 조절한다. 그런데 기존의 모터 제어장치에서는 6개의 스텝핑 모터에 대하여 5개의 모터 제어 board를 사용하므로 분해능이  $\pm 1 \mu\text{m}$  로 동일한 scanner용 비축상 직선이동장치와 defocus용 직선이동장치를 하나의 모터 제어 board에서 조정하였다. 이로 인해 모터 제어용 소켓을 잘못 선택하는 경우가 발생하여 광축 정렬의 오차를 야기시켰다. 이러한 모터 제어에서 나타나는 오차를 개선하고 추가로 설치한 turret을 부착시킨 회전장치, fishtail의 직선이동장치를 부착시킨 회전장치에 대한 스텝핑 모터들을 제어하기 위하여 모터 제어 board를 추가하여 모터 제어장치를 제작하였다.

Fig. 4는 국산 IBM-AT형 마이크로 컴퓨터를 사용한 모터 제어장치의 개략도이다.

### 3.3. 프로그램의 개선

앞에서 논한 OTF 측정장치의 개선을 바탕으로 하여 OTF 측정 프로그램을 개선하였다.

먼저 fishtail을 scanning edge로 사용하는 경우에 radial과 tangential 방향의 실제 주사 거리와 간격은 fishtail을 부착한 모터의 주사 거리와 주사 간격에  $\cos 45^\circ$ 를 곱하여 계산하도록 하였다. 즉, fishtail이 부착된 스텝핑 모터의 이동 거리에 대한 광신호의 변화를 컴퓨터 화면상에 나타낸 Fig. 5의 종축 방향은 fishtail의 빗변이 이동한 거리를 나타내고 있으므로 radial과 tangential 방향의 실제 주사 거리는 표시된 거리에

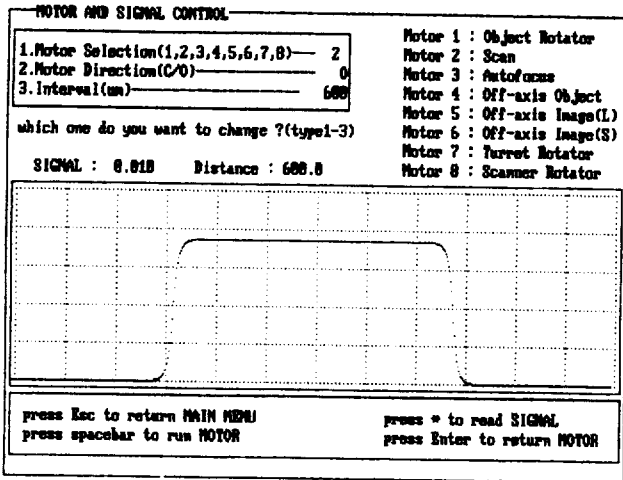


Fig. 5. Measured result of program for controlling motors and signal in the developed OTF measuring system.

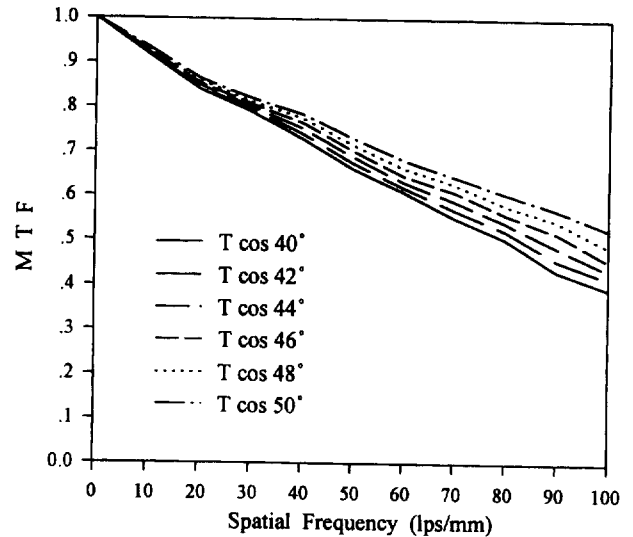


Fig. 7. Simulated MTF curves depend on the aligned angle between the translator and the tangential scanner.

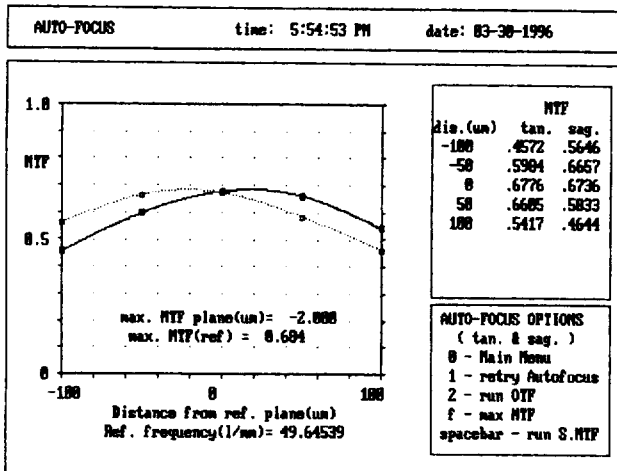


Fig. 6. Measured through-focus MTF curves of the developed auto-focus program.

cos 45°를 곱하도록 하였다. 또한 fishtail이 일정한 방향으로 이동함에 따라 radial과 tangential 방향의 주사함수가 순차적으로 측정되는데 이를 Fig. 5에서 알 수 있다.

다음으로 임의의 특정한 공간 주파수에서 상면을 광축 방향으로 이동하면서 auto-focus 수행할 경우 radial과 tangential 방향의 MTF를 동시에 측정하여 최적 상면을 결정할 수 있게 하였다. 이러한 초점중이동에 따른 표준렌즈의 축상 MTF 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

#### IV. MTF 측정 및 검토

##### 4.1. Fishtail의 정렬

Fishtail을 사용하여 MTF를 측정할 경우 MTF 측정 오차는 직선이동장치에 대한 fishtail scanner의 정렬 오차에 의해 주로 발생한다. 직각이동면 삼각형 형태인 fishtail은 밑변과 높이가 radial scanner와 tangential scanner로 사용되므로 fishtail의 빔변이 광축과 45°의 각을 이루도록 정확하게 정렬되어

야 이러한 정렬 오차를 최소화 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 광축에 대하여 45°로 회전시킨 직선이동장치의 종축면에 fishtail의 빔변을 평행하게 부착시킨 뒤 fishtail의 빔변이 직선이동장치의 종축면과 완전한 평행을 이루도록 미세조정을 실시하였다. 이때 fishtail의 빔변이 직선이동장치의 종축면에 대하여 완전하게 평행하도록 정렬되면 광축상에서 측정된 radial MTF와 tangential MTF가 일치하므로 공간 주파수 50 lps/mm 에서 tangential 방향과 radial 방향의 MTF가 일치하게끔 fishtail의 빔변을 미세 조정을 하였다.

MTF 계산시 사용하는 주사 거리는 사용자가 입력한 모터 이동 거리에 cos 45°를 곱하여 계산하도록 프로그램 되어 있으므로 만약 fishtail의 tangential scanner와 이동장치의 종축면이 50°의 각으로 정렬되어 있다면 계산상의 주사 거리는 실제 주사 거리의 (cos 50°/cos 45°)배로 줄어든다. 이로 인해 LSF의 선폭이 줄어들어 계산된 MTF는 실제값보다 상당히 좋아지게 된다. Fishtail의 tangential scanner와 이동장치의 종축면 사이의 정렬각에 따른 MTF 값의 변화를 컴퓨터 모의실험을 통해 계산해 보았으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. 계산치들을 서로 비교하여 보면 50 lps/mm 에서 각도가 10°차이가 남에 따라 MTF 값은 약 0.08의 차이가 남을 알 수 있다.

##### 4.2. 표준렌즈의 MTF 측정

본 연구에서 개선한 OTF 측정장치의 정확도를 평가하기 위하여 영국 SIRA 그룹에서 제작한 OTF 측정용 표준렌즈의 MTF를 측정하여 SIRA에서의 측정치와 비교하였다. 표준렌즈의 MTF는 무한거리에 있는 직경이 50 μm 인 핀홀을 물체로 사용하여 f/8, f/5.6, f/4, f/11의 축상과 f/8, 3°, 6°, f/5.6, 3°의 비축상에서 측정하였다.

Table 1은 f/8 축상의 최적 상면에서 측정된 값을 SIRA에서의 측정값과 비교하여 수치로 나타낸 것이다. 측정치를 서로 비교하여 보면 극소수의 공간 주파수 영역에서 0.03의 차이가

Table 1. Comparison of the accuracy of measured MTF values of a standard lens. (f/8, f/5.6, f/4 and f/11 on-axis for the infinite conjugate tests)

frequency (lps/mm)	KRISS(SIRA)				
	maximum MTF f/8	datum focal plane			
		f/8	f/5.6	f/4	f/11
5	0.97(0.96)	0.96(0.94)	0.95(0.96)	0.72(0.73)	0.93(0.93)
10	0.94(0.92)	0.90(0.90)	0.89(0.90)	0.47(0.46)	0.86(0.88)
15	0.91(0.88)	0.84(0.84)	0.84(0.84)	0.40(0.39)	0.81(0.80)
20	0.86(0.84)	0.77(0.76)	0.78(0.78)	0.38(0.36)	0.73(0.72)
25	0.82(0.81)	0.70(0.69)	0.73(0.72)	0.34(0.32)	0.65(0.66)
30	0.77(0.78)	0.61(0.61)	0.67(0.66)	0.30(0.30)	0.59(0.58)
40	0.71(0.71)	0.46(0.46)	0.55(0.54)	0.25(0.24)	0.46(0.44)
50	0.65(0.65)	0.33(0.32)	0.45(0.44)	0.20(0.19)	0.35(0.35)
60	0.61(0.59)	0.22(0.22)	0.36(0.35)	0.14(0.14)	0.27(0.27)
70	0.65(0.54)	0.14(0.15)	0.29(0.28)	0.11(0.11)	0.23(0.22)
80	0.49(0.48)	0.09(0.10)	0.22(0.23)	0.09(0.09)	0.19(0.19)
90	0.43(0.44)	0.06(0.08)	0.17(0.19)	0.07(0.08)	0.18(0.18)
100	0.39(0.40)	0.05(0.06)	0.14(0.16)	0.06(0.06)	0.15(0.15)

Table 2. Comparison of the accuracy of measured MTF values of a standard lens. (f/8 and f/5.6 off-axis for the infinite conjugate tests)

frequency (lps/mm)	KRISS(SIRA)					
	f/8, 3°		f/8, 6°		f/5.6, 3°	
	radial	tangential	radial	tangential	radial	tangential
5	0.97(0.97)	0.96(0.95)	0.92(0.92)	0.71(0.69)	0.91(0.94)	0.89(0.88)
10	0.92(0.92)	0.91(0.90)	0.79(0.79)	0.25(0.26)	0.83(0.84)	0.71(0.71)
15	0.89(0.89)	0.87(0.85)	0.63(0.64)	0.02(0.00)	0.74(0.74)	0.54(0.54)
20	0.85(0.85)	0.82(0.80)	0.48(0.48)	0.04(0.04)	0.65(0.65)	0.40(0.40)
25	0.82(0.82)	0.77(0.74)	0.35(0.36)	0.01(0.01)	0.59(0.58)	0.31(0.32)
30	0.78(0.78)	0.72(0.71)	0.24(0.24)	0.04(0.03)	0.53(0.52)	0.26(0.28)
40	0.71(0.71)	0.64(0.63)	0.10(0.04)	0.01(0.02)	0.44(0.43)	0.23(0.24)
50	0.64(0.64)	0.57(0.56)	0.02(0.02)	0.01(0.02)	0.40(0.38)	0.20(0.22)
60	0.56(0.57)	0.51(0.50)	0.02(0.02)	0.02(0.01)	0.35(0.34)	0.18(0.20)
70	0.50(0.51)	0.45(0.44)	0.01(0.01)	0.02(0.01)	0.32(0.30)	0.16(0.18)
80	0.44(0.45)	0.40(0.39)	0.02(0.01)	0.01(0.00)	0.29(0.27)	0.14(0.16)
90	0.40(0.40)	0.35(0.34)	0.00(0.01)	0.01(0.01)	0.27(0.25)	0.10(0.14)
100	0.36(0.38)	0.30(0.31)	0.01(0.00)	0.01(0.00)	0.26(0.24)	0.09(0.12)

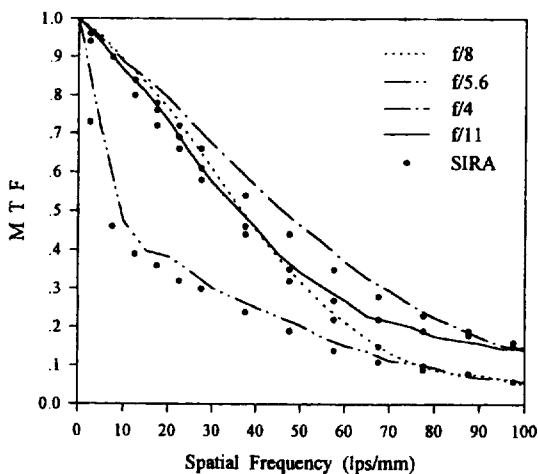


Fig. 8. Comparison of the accuracy of measured MTF curves of a standard lens. (f/8, f/5.6, f/4 and f/11 on-axis for the infinite conjugate tests)

나타나고 있는 것을 제외하고 0.02 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2는 f/5.6, 3°와 f/8, 3°, 6°인 비축상의 측정 상평면에서 측정된 MTF 값과 SIRA에서의 측정값을 비교하여 수치로 나타낸 것이다. 측정치를 서로 비교하여 보면 그 차이는 0.03 이내로서 축상의 경우와 마찬가지로 SIRA에서의 측정치와 잘 일치하고 있다.

측정된 이들 MTF 값을 Fig. 8과 Fig. 9에 정리하였는데 실선과 점선은 본 연구에서 측정된 결과이고 작은 점은 SIRA에서의 측정치이다.

### 4.3. 팩스렌즈의 MTF 측정

표준렌즈를 사용한 평가를 통해 측정 정확도가 확인된 개선된 OTF 장치를 사용하여 팩스렌즈의 MTF를 측정하였다.

시험렌즈 규격에 제시된 물체거리에 직경이 50 μm 인 핀홀을 고정시키고 팩스렌즈에 의하여 맺혀진 상을 fishtail을 사

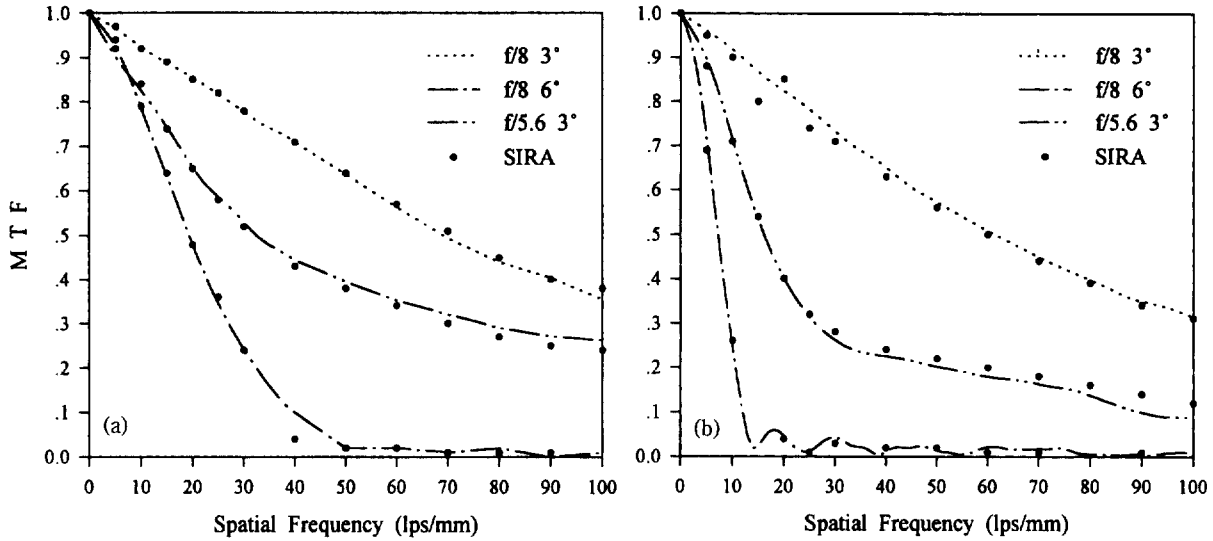


Fig. 9. Comparison of the accuracy of measured MTF curves of a standard lens. (f/8 and f/5.6 off-axis for the infinite conjugate tests) (a) radial MTF (b) tangential MTF

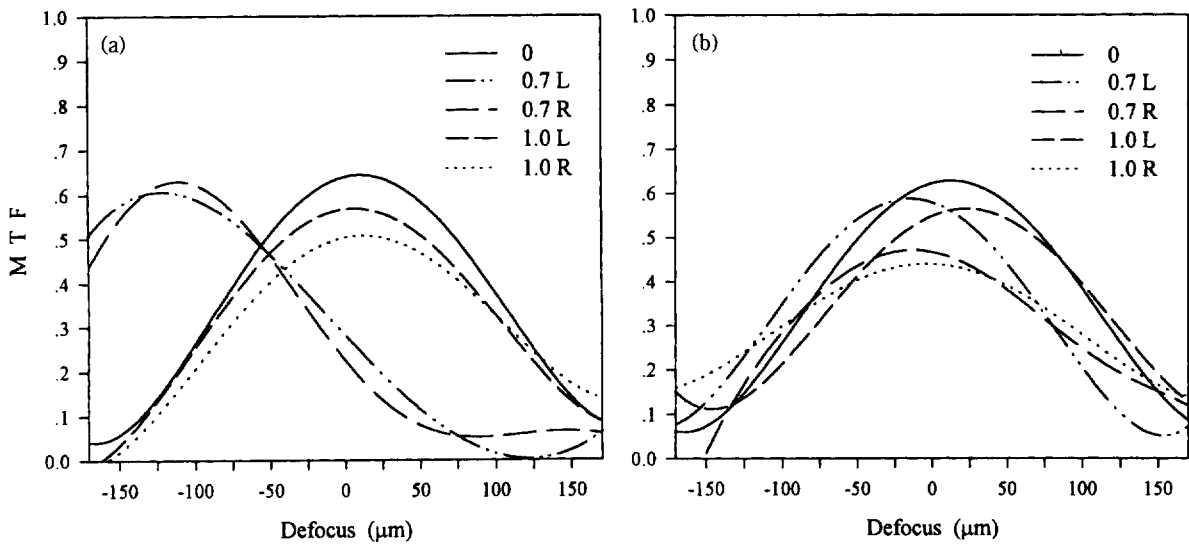


Fig. 10. Measured through-focus MTF curves of a fax lens. (a) radial MTF (b) tangential MTF

용하여 축상 및 비축상( $\pm 0.7 \times$  최대 상높이,  $\pm$  최대 상높이)에서 측정하였다. 초점중이동에 따른 팩스렌즈의 축상 및 비축상 MTF 변화를 Fig. 10에 나타내었는데 팩스렌즈는 물체를 10 배 이상 축소하므로 비교적 높은 공간 주파수인 46 lps/mm에서 측정을 실시하였다.

### V. 결 론

기존의 OTF 측정장치의 물체부를 개선하여 시험렌즈의 특성에 맞게 자동적으로 물체를 선택할 수 있도록 하였고 상분석부를 개선하여 radial과 tangential 방향의 MTF를 동시에 측정할 수 있도록 하여 MTF 값의 측정 정확도와 측정 능력을 향상시켰다. 또한 모터 조절장치와 컴퓨터 프로그램도 개선하여 MTF 측정, 계산 과정과 결과 제시를 편리하게 하였다.

개선된 OTF 측정장치의 측정 능력과 측정 정확도를 평가하기 위하여 표준렌즈를 사용한 성능 평가 실험을 한 결과 MTF 측정값이 축상에서는  $\pm 0.02$ , 비축상에서는  $\pm 0.03$  이내에서 SIRA의 측정값과 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 국산 팩스렌즈의 초점중이동에 따른 MTF 값의 변화도 측정하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] E. Ingelstam, E. Djurle and B. Sjogren, J. Opt. Soc. Am., **46**, 707(1956).
- [2] L. R. Baker, Proc. Phys. Soc. B., **68**, 871(1955).
- [3] G. Kuwabara, J. Opt. Soc. Am., **45**, 309(1955).
- [4] L. R. Baker, J. Appl. Phys. Japan, **4**, Supplement **1**, 146(1965).

- [5] E. Ingelstam and P. J. Lindberg, NBS Circular, **526**, 183(1951).  
[6] British Standard 4779(1971).  
[7] ANSI PH 3.57-1978.  
[8] ISO/DIS 9334, 9335(1987).  
[9] 이윤우, 조현모, 이인원, *홍경희, 새물리*, **27**, 95(1987).  
[10] 조현모, 이윤우, 이인원, *홍경희, 새물리*, **27**, 423(1987).  
[11] 이윤우, 조현모, 이인원, *홍경희, 응용물리*, **3**, 153(1990).  
[12] 조현모, 이윤우, 이회윤, 이인원, *한국광학회지*, **2**, 121(1991).  
[13] EROS 200 MK3 Instruction Manual, Ealing Electro-Optics, England(1986)  
[14] T. L. Williams and A. Ashton, *Appl. Opt.*, **8**, 2007(1969).

## Automation of an OTF Measurement System using a Fishtail Edge

Tae Hee Kim and Ok Shik Choe

*Department of Physics, Younghan University, Kyungsan 712-749, Korea*

Hyun Mo Cho, Yun Woo Lee and In Won Lee

*Image Technology Group, Korea Research Institute of Standards and Science  
P. O. Box 102, Yusong, Taejon 305-600, Korea*

(Received: July 11, 1996)

This paper describes the automation of an object generator and an image analyser in a knife scan OTF equipment to enhance the accuracy of OTF measurement. Pinholes and slits of various size in the object generator are used as an objects. A fishtail edge is mounted to the image analyzer and is translated to the direction of 45 degree angle with the horizontal to measure MTF simultaneously in the radial and tangential azimuths. The stepping motor control unit and software for the image analyzer are modified and the accuracy of this equipment is evaluated by measuring the OTF of SIRA group 50 mm standard lens.