

비축상 OTF의 정밀측정

조현모 · 이윤우 · 이회윤 · 이인원

한국표준연구소 광학연구실

(1991년 7월 12일 접수)

칼날주사형 OTF 측정장치를 개선하여 비축상 OTF 측정 정확도를 향상시켰으며 SIRA 연구팀이 개발한 50 mm 평면-볼록형 표준렌즈를 사용하여 OTF 측정장치의 성능을 평가하였다. 공간 주파수 0~100 cm/mm 영역에서 표준렌즈의 MTF 측정값은 극소수의 공간 주파수를 제외하고 축상에서 ± 0.02 , 비축상에서 ± 0.03 이내에서 SIRA 측정값과 일치하였으며 PTF 측정값은 SIRA 측정값과 $\pm 5^\circ$ 이내에서 일치하였다.

I. 서 론

OTF(Optical Transfer Function) 측정 방법은 간섭계를 이용하는 측정방법과^[1,2] 광학계에 의해 맺혀진 상을 주사 해석하는 방법으로^[3,4] 대별될 수 있으며 주사방법중에서 주기적인 격자를 사용하는 광학적 Fourier 해석방법과 점, 슬릿 또는 칼날의 상을 전기적으로 주사해석하는 전기적 Fourier 해석방법이 각국에서 계속하여 발전하여 왔다. 현재 세계 각국은 다양한 형태의 OTF 측정장치를 보유하고 있으며, OTF의 정확도를 비교 검토하는 연구가 활발하여져서 OTF의 국가표준을 확립하고^[5,6] OTF의 국제적 표준안이 마련되고 있다.

본 연구소 광학연구실에서는 주사방법중 점, 슬릿 등을 물체로 사용하고 상의 강도분포를 스텝핑모타에 부착된 칼날로 주사한 다음 컴퓨터로 Fourier 변화하여 OTF를 구하는 측정장치를 개발하였으며 측정능력과 정밀정확도 향상을 위한 연구를 계속하고 있다. 처음 개발된 OTF 측정장치는^[8,9] 반사형 시준장치와 nodal solide 광학대를 이용하였고 데이터 처리를 위해 Apple 컴퓨터를 사용하였다. 고분해능 스텝핑모타에 부착된 칼날을 주사장치로 사용하여 한 위치에서 여러번 측정값을 읽어 평균함으로써 매우 높은 측정정밀도를 얻을 수 있었으나 비축상 OTF 측정이 어려웠고 컴퓨터의 데이터 처리속도가 느려서 측정과정이나 결과제시에 어려움이 많았다. 그후 이러한 문제점을 해결하기 위하여 1989년 렌즈형 시준장치와 카메라형 광학대를 이용한 OTF 측정장치를^[10] 개발하였으며 데이터 처리장치도 IBM-AT 컴퓨터를

사용하여 짧은 시간에 측정이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 이미 개발된 렌즈형 시준장치와 카메라형 광학대를 이용한 OTF 측정장치의 비축상 측정 정확도 향상을 위해 일부 측정장치를 개선하고 측정자동화를 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며 표준렌즈를 사용하여 측정장치의 종합적인 성능을 평가하였다. OTF 측정장치의 성능평가에 사용된 표준렌즈는^[11] 영국 SIRA 연구팀이 개발한 초점길이 50 mm 평면-볼록형 렌즈이며 영국을 비롯한 여러 연구기관에서 OTF 값이 측정되었고 OTF 측정장치의 성능평가를 위해 세계적으로 사용되고 있다. OTF 측정장치의 정확한 성능평가를 위하여 광학대, 광원 등의 측정장치에 의한 오차와 진동이나 외부 잡음에 의한 각종 오차요인을 배제하였으며 축상 및 비축상에서 MTF(Modulation Transfer Function)와 PTF(Phase Transfer Function)의 측정정확도를 분석하였다.

II. 장치개선 및 실험

OTF 측정장치는 유한 및 무한거리 물체를 이루는 물체부, 측정되어지는 광학계에 의해 결상된 상을 주사 해석하는 상분석 장치, 각종 측정부품들을 지지하고 측정조건에 맞도록 광축정렬을 하기 위한 광학대로 구성된다. 본 연구실에서 이미 제작사용하고 있는 카메라형 광학대를 이용한 OTF 측정장치는 짧은 시간에 측정을 할 수 있고 비축상 OTF 측정이 가능하나 표준렌즈를 사용한 OTF 측정장치 성능평가 결과 비축상 OTF 측

정값에서 비교적 큰 오차와 측정 재현성에 문제를 나타내었다. 그러나 측상에서 측정된 MTF 측정값은 대부분 $\pm 2\%$ 이내의 오차로 정확한 측정결과를 보였다. 본 연구에서는 이러한 비측상 OTF 측정오차의 주된 요인이 광학대를 이루는 각종 translator와 rotator 등의 이동 정확도와 광축정렬의 오차에서 비롯된다고 판단하고 광학대의 기계적 오차요인과 광축정렬 오차 요인을 개선하였으며 또한 보조광학계와 광신호 처리시 발생하는 오차요인 등을 개선하였다. OTF 측정시 상분석장치는 광학계의 광축에 수직한 평면에서 이동해야 한다. 광학대의 기계적 오차는 비측각도에 따라 상분석 장치를 이동했을 때 이 수직한 평면으로 부터 상분석 장치를 벗어나게 하며 조리개의 f 수가 작을수록 또한 공간주파수가 커질수록 광학대에서 발생하는 defocus 오차의 영향을 크게 받는다.^[7] $10 \mu\text{m}$ 이내의 미소한 defocus 오차에 의해서도 MTF 값에 큰 변화를 줄 수 있기 때문에 비측으로 이동하는 translator의 이동정확도를 향상시키기 위하여 기존의 수동 translator 대신 분해능이 $\pm 1 \mu\text{m}$ 이고 유효 이동거리가 125 mm인 스테핑모타가 부착된 translator (Micro Control UT 100 125 pp)를 사용하였다. 비측상 OTF 측정시 발생하는 또하나의 광학대 오차는 시준장치를 회전시키는 rotator에 의해 나타났으며 기존의 장치에 사용된 rotator의 크기가 작기 때문에 시준장치의 회전 관성에 의해 정확한 비측각도로 회전하는데 어려움이 있었으며 여러번 측정할 경우 재현성에 문제가 나타났다. 이러한 rotator에서 나타나는 오차를 개선하기 위하여 Micro Control사의 Rt 200을 사용하여 각도측정 정밀도를 0.001° 로 향상하고 회전시 시준장치의 무게를 충분히 지탱할 수 있도록 하였다. 보조 광학계로 사용된 시준렌즈의 성능을 개선하기 위하여 초점길이 1274 cm, 직경 100 mm인 air spaced triplet를 사용하였고 이 렌즈의 파면수차는 $\gamma 5$ 이하($\gamma=546 \text{ nm}$)이다. Fig. 1은 개선된 OTF 측정장치를 보여준다. Line spread function의 모양을 정확히 측정할 수 있도록 광검출 장치의 선형성과 반응속도, 증폭률 등을 고려하여 광검출기를 선택하였고 낮은 빛의 세기에서 충분히 선형성을 나타낼 수 있도록 광신호 증폭기의 gain을 조절하였으며 신호대 잡음비가 최소한 10 : 1 이상이 되도록 함으로써 광신호 처리시 발생하는 오차를 최소화 하였다. 광축정렬 후 상높이에 따라 다른 비측 각도에서 OTF를 측정할 때 기존의 장치에서는 수동으로 translator를 움직이고 다시 현미경으로 상의 위치를 확인하는 과정에서 진동이나 측정자에 의해 광축정렬에 영향을 줌으로써 측정값이 다르게 나타나는 경우가 있었다. 이러한 문제를

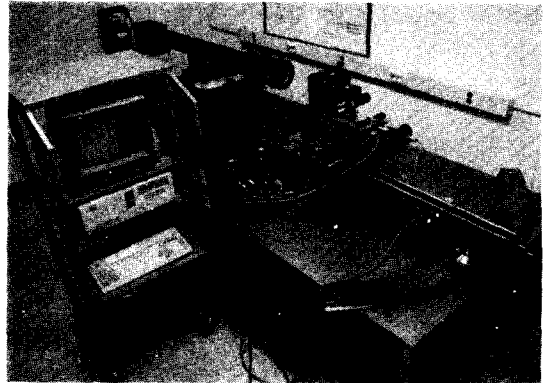


Fig. 1. Developed camera bench type OTF measuring equipment.

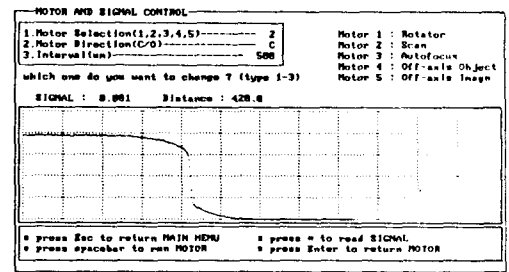


Fig. 2. Developed computer program for controlling motors and signal.

해결하기 위하여 광축정렬 뿐만 아니라 대략적인 주사함수의 모양과 주사구간, 주사간격 등을 정하고 상분석 장치를 비측상으로 이동할 수 있도록 OTF 측정을 자동화 하였다. 각종 모터의 구동과 그때의 광신호를 컴퓨터 화면상에 각종 translator, rotator의 위치에 따른 광신호의 변화로 나타낼 수 있도록 하였다. Fig. 2는 칼날주사함수 측정시 슬릿상의 중심이 칼날주사함수의 중심이 되도록 상면에서 칼날을 정렬하기 위하여 칼날이 부착된 스텝핑모타의 이동과 광신호의 변화를 컴퓨터 화면상에 나타낸 것이다. 그림에서 횡축방향은 칼날의 좌표를 나타내며 $50 \mu\text{m}$ 마다 표시를 하였고 종축은 0~5 V 사이의 광신호의 변화를 나타낸다. OTF 측정시 물체는 폭이 $50 \mu\text{m}$ 이고 길이가 3 mm인 슬릿을 사용하였고 물체에 의해 결상된 슬릿상의 모양을 분해능이 $0.1 \mu\text{m}$ 인 스텝핑모타에 부착된 칼날로 주사 해석하였다. 물체를 조명하기 위한 광원은 3000 K 이상의 색온도에서 텅스텐 필라멘트 램프와 간섭필터를 조합하여 사용하였고 광검

출기는 Hamamatsu R446 광증배관을 사용하였다. OTF 측정장치의 성능평가에 사용된 표준렌즈는 영국의 SIRA 연구팀이 개발한 촛점길이 50 mm인 평면-볼록형 렌즈이고 설계변수를 살펴보면 546 nm에서 굴절률 1.50957 ± 0.0010 , 구면반경 25.48 ± 0.06 mm, 중심두께 10.0 ± 0.05 mm, 반경 28 mm인 Zinc Crown Glass이다. 이 표준렌즈는 f/4, f/5.6, f/8, f/11의 구경조리개와 PTF 측정을 위한 f/8 phase stop을 부착할 수 있도록 제작되었으며 표준렌즈의 OTF 측정값은 무한거리 물체에 대해 보고되고 있다. 본 연구에서는 무한거리 물체에 대해 축상과 비축상에서 MTF를 측정하였고 f/8 phase stop을 사용하여 비축상에서 PTF를 측정하였다. 사용된 간섭필터는 544.9 nm에서 최대투과율을 나타내며 최대투과율의 50% 이상 투과율을 나타내는 파장영역이 12 nm 이하이다. 다른 측정장치 사이에 측정장치의 상호비교를 위하여 측정조건을 정확히 명시해야 하며 특히 측정되어지는 광학계의 촛점평면을 정확히 정의해야 한다. 일반적으로 최적상평면(maximum MTF plane)과 측정상평면(datum focal plane)을 정의하여 OTF가 측정되어지는 상평면의 위치를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 표준렌즈의 측정상평면은 축상 물체에 대하여 f/8, 50 cm/mm 공간주파수에 측정된 MTF 값이 최대가 되는 최적상평면에서의 MTF 값의 50% 되는 상평면 중 렌즈에 가까운 평면으로 정의하고 있다. 최적상평면은 자동촛점 측정을 위한 컴퓨터 프로그램과 광축방향으로 1 μ m 분해능은 가진 스텝핑모타를 사용하여 최적상평면 근방에서 defocus에 의한 MTF 값의 변화를 정해진 공간주파수에서 측정함으로써 구할 수 있으며 대략 5~9개의 위치에서 MTF 값을 측정한 다음 spline 보간법을 사용하여 구하였고 비슷한 방법으로 측정상평면의 위치를 구하였다. 최적상평면 근방에서 defocus에 의한 MTF 값의 변화는 완만한 곡선을 나타내며 defocus 오차가 발생하더라도 MTF 값에서 큰 변화가 없다. 그러나 같은 평면에서 비축상 MTF는 defocus에 의해 값이 크게 변할 수 있기 때문에 측정상평면을 최적상평면 근방에 정하면 비축상에서 측정오차가 크게 발생한다. 본 연구에 사용된 표준렌즈는 최적상평면에서 측정된 MTF 값의 50%가 되는 상평면 중 렌즈에 가까운 평면을 측정상평면으로 정함으로써 이 측정상평면 근방에서 MTF 값이 변화가 기울기가 큰 직선에 가까게 나타나기 때문에 defocus에 의한 OTF 측정값의 비교오차를 줄일 수 있다. OTF 측정시 주사구간과 주사간격은 sampling 이론과 line spread function의 모양에 따라 조절하였다. 칼날이 스텝핑모타에 부착되어 주사함수를 측정함으로써 한 위치에

서 여러번의 측정값을 읽어 평균을 취할 수 있으며 진동이나 순간적으로 광신호에 영향을 끼치는 오차요인들을 최소화 하였다. f/8, 광간주파수 50 c/mm, 축상의 최적상평면에서 측정된 MTF 값은 0.66이며 이 값이 50%인 0.33의 MTF 값을 갖는 평면중 렌즈에 가까운 평면인 측정상평면에서 표준렌즈의 OTF를 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

표준렌즈의 OTF는 무한거리 물체에 대하여 f/4, f/5.6, f/8, f/11의 축상과 f/5.6의 3°, f/8의 3°, 6° 비축상에서 MTF를 측정하였고 f/8 phase stop을 사용하여 3°, 4° 비축상에서 PTF를 측정하였다.

Table 1은 f/8, 축상의 최적상평면과 측정상평면에서 측정된 MTF값과 f/4, f/5.6, f/11 축상의 측정상평면에서 측정된 결과를 SIRA 연구팀에서 측정한 측정값과 비교하여 수치로 나타낸 것이며 극소수의 공간주파수 영역에서 0.03의 차이를 제외하고 ± 0.02 이하고 SIRA 측정값과 일치하는 결과를 보여준다. Table 1에서 괄호안에 표시한 수치는 SIRA 연구팀에서 측정한 결과이다. Fig.

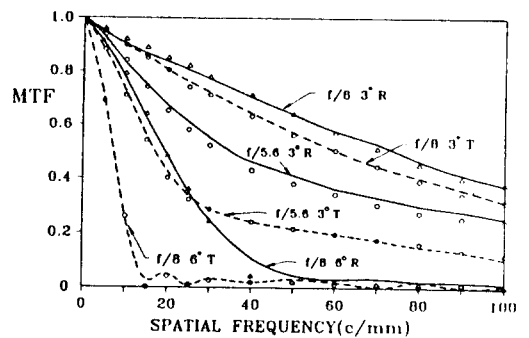


Fig. 3. f/8 3°, 6° and f/5.6 3° off-axis MTF curves.

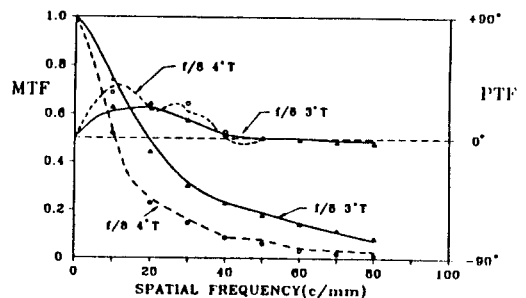


Fig. 4. Measured MTF and PTF curves using the special f/8 stop.

Table 1. Measured MTE values of 50 mm standard test lens (f/8, f/5.6, f/4 and f/11 on axis for the infinite conjugate tests)

frequency (c/mm)	KSRI (SIRA)				
	maximum MTF	datum focal plane			
		f/8	f/8	f/5.6	f/4
1	0.94(0.96)	0.93(0.94)	0.95(0.96)	0.76(0.73)	0.93(0.93)
10	0.90(0.92)	0.88(0.90)	0.90(0.90)	0.48(0.46)	0.88(0.88)
15	0.87(0.88)	0.82(0.84)	0.84(0.84)	0.41(0.39)	0.80(0.80)
20	0.83(0.84)	0.75(0.76)	0.79(0.78)	0.39(0.36)	0.74(0.72)
25	0.81(0.81)	0.69(0.69)	0.73(0.72)	0.35(0.32)	0.66(0.66)
30	0.77(0.78)	0.62(0.61)	0.68(0.66)	0.30(0.30)	0.60(0.58)
40	0.72(0.71)	0.46(0.46)	0.56(0.54)	0.26(0.24)	0.46(0.44)
50	0.66(0.65)	0.33(0.32)	0.46(0.44)	0.20(0.19)	0.35(0.35)
60	0.60(0.59)	0.23(0.22)	0.37(0.35)	0.15(0.14)	0.28(0.27)
70	0.55(0.54)	0.15(0.15)	0.29(0.28)	0.12(0.11)	0.23(0.22)
80	0.51(0.48)	0.11(0.10)	0.24(0.23)	0.10(0.09)	0.19(0.29)
90	0.46(0.44)	0.08(0.08)	0.19(0.19)	0.07(0.08)	0.16(0.18)
100	0.40(0.40)	0.05(0.06)	0.16(0.16)	0.06(0.06)	0.14(0.15)

Table 2. Measured MTE values of 50 mm standard test lens (f/8, f/5.6, off-axis for the infinite conjugate tests)

frequency (c/mm)	KSRI(SIRA)					
	f/8 3°		f/8 6°		f/5.6 3°	
	Radial	Tangential	Radial	Tangential	Radial	Tangential
8	0.94(0.97)	0.95(0.95)	0.91(0.92)	0.70(0.69)	0.93(0.94)	0.89(0.88)
10	0.90(0.92)	0.90(0.90)	0.78(0.79)	0.25(0.26)	0.83(0.84)	0.73(0.71)
13	0.86(0.89)	0.86(0.85)	0.62(0.64)	0.03(0.00)	0.75(0.74)	0.55(0.54)
20	0.84(0.85)	0.80(0.80)	0.49(0.48)	0.05(0.04)	0.67(0.65)	0.42(0.40)
25	0.80(0.82)	0.76(0.74)	0.34(0.36)	0.01(0.01)	0.61(0.58)	0.33(0.32)
30	0.77(0.78)	0.72(0.71)	0.24(0.24)	0.03(0.03)	0.55(0.52)	0.28(0.28)
40	0.70(0.71)	0.64(0.63)	0.09(0.04)	0.02(0.02)	0.46(0.43)	0.24(0.24)
50	0.64(0.64)	0.57(0.56)	0.04(0.02)	0.03(0.02)	0.41(0.38)	0.22(0.22)
60	0.57(0.57)	0.50(0.50)	0.03(0.02)	0.02(0.01)	0.36(0.34)	0.20(0.20)
70	0.53(0.51)	0.44(0.44)	0.04(0.01)	0.00(0.01)	0.33(0.30)	0.18(0.18)
80	0.46(0.45)	0.40(0.39)	0.02(0.01)	0.02(0.00)	0.30(0.27)	0.14(0.16)
90	0.41(0.40)	0.36(0.34)	0.03(0.01)	0.00(0.01)	0.28(0.25)	0.14(0.14)
100	0.37(0.38)	0.31(0.31)	0.01(0.00)	0.01(0.00)	0.25(0.24)	0.11(0.12)

3은 f/8 3°, 6°와 f/5.6 3° 비축상 측정상평면에서 측정된 표준렌즈의 MTF 값을 보여주며 그림에서 실선 및 점선은 본 연구에서 측정된 결과이고 작은원 혹은 삼각형으로 표시한 결과는 SIRA 연구팀의 측정결과이다. Table 2는 비축상 MTF 측정값을 SIRA 측정값과 비교하여 나타낸 결과이며 f/8, 공간주파수 40 c/mm를 제외하고

±0.03 이하에서 두 결과가 일치함을 볼 수 있다. Fig. 4는 렌즈 앞에 f/8 phase stop을 부착하고 3°, 4° 비축상에서 MTF와 PTF를 측정된 결과를 SIRA 측정값과 비교하여 보여준다. PTF 측정시 f/8 phase stop은 직경이 6.230±0.025 mm이고 표준렌즈의 곡면으로부터 12.5±0.2 mm 앞쪽에 설치한 조리개이다. PTF는 공간주파수에

Table 3. Measured MTF and PTF values using the special f/8 phase stop.

frequency (c/mm)	KSRI(SIRA)			
	f/8 3° tangential		f/8 4° tangential	
	MTF	PTF	MTF	PTF
10	0.76(0.74)	18°(23°)	0.53(0.52)	38°(34°)
20	0.47(0.44)	23°(26°)	0.25(0.23)	23°(22°)
30	0.30(0.30)	14°(13°)	0.16(0.15)	21°(26°)
40	0.22(0.22)	3°(2.5°)	0.08(0.08)	1°(5°)
50	0.19(0.18)	0°(0°)	0.08(0.06)	0°(0°)
60	0.15(0.14)	0(-1.5°)	0.03(0.04)	
70	0.11(0.11)	-2°(-2°)	0.03(0.02)	
80	0.09(0.08)	-2°(-4°)	0.03(0.01)	

따라 선형적으로 변하는 함수 포함하고 있으며 이 함수 상면에서 좌표원점의 선택에 관련된다. SIRA 표준렌즈는 측정값의 비교를 위해서 공간주파수 0 c/mm와 50 c/mm에서 PTF 값이 0°가 되도록 좌표원점을 선택하였다. Table 3은 PTF 측정결과를 SIRA 측정값과 비교하여 수치로 나타낸 것이며 ±5° 이내에서 두 결과가 일치함을 볼 수 있다. PTF에서 ±5°의 차이는 계산상 MTF 값의 ±0.02에 상당한다.

결 론

렌즈형 시준장치와 카메라형 광학대를 이용한 OTE 측정장치를 개선하여 비축상에서 OTF 측정 정확도를 향상시켰다. 카메라형 광학대에서 렌즈형 시준장치의 비축각도 회전장치와 비축상으로 image analyzer의 이동 정밀도를 향상하였으며 측정자동화를 위해 컴퓨터 프로그램을 개선하였다. OTF 측정시 발생하는 각종 오차요인을 제거하였으며 SIRA 표준렌즈를 사용하여 OTF 측정장치 성능을 평가하였다. f/4, f/5.6, f/8, f/11 축상과 f/5.6 3°, f/8.3°, 6° 비축상에서 측정된 MTF 값은 축상에서 ±0.02, 비축상에서 ±0.03 이내에서 SIRA 측정

값과 대부분 일치하였으며 f/8 phase stop을 렌즈 앞에 장치하고 3°, 4° 비축상에서 측정했을때 PTF 값이 ±5° 이하고 SIRA 측정값과 일치하였다.

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] British standard 4779 (1971).
- [6] ANSI PH 3.57-1978.
- [7] ISO/DIS 9334, 9335 (1987).
- [8] 이윤우, 조현모, 이인원, *홍경희, 새물리*, **27**, 95 (1987).
- [9] K. H. Hong, I. W. Lee, H. M. Cho and Y. W. Lee, *Appl. Opt.*, **26**, 4423 (1987).
- [10] 이윤우, 조현모, 이인원, *홍경희, 응용물리*, **3**, 153 (1990).
- [11] T. L. Williams and A. Ashton, *Applied Optics*, **8**, 2007 (1969).

Precision Measurement of Off-AXIS OTF

Hyun Mo Cho, Yun Woo Lee, Hoe Yun Lee and In Won Lee
Korea Standards Research Institute, Optics Laboratory

(Received: July 12, 1991)

The knife-edge scanning type OTF measuring equipment is improved to enhance the accuracy in off-axis OTF measurement and the accuracy of this equipment is evaluated by measuring the OTF of 50 mm plano-convex standard lens developed by SIRA group. Measured MTF values of the standard lens are in good agreement with SIRA results within ± 0.02 on axis and ± 0.03 off-axis in 0~100 c/mm frequency range except only a few spatial frequencies. Measured PTF values are in good agreement with SIRA results within $\pm 5^\circ$