

렌즈형 시준장치를 이용한 간편한 벤치형 OTF 측정장치 제작 및 측정자동화

글 : 홍경희교수(육군사관학교 화랑대연구소)/이윤우, 조현모, 이인원(한국표준연구소)

한국표준연구원 광학실과 육군사관학교 홍경희 교수팀이 개발한 OTF(Optical Transfer Function) 측정장치는 표준편차가 Tropel이나 Ealing사 제품 표준편차의 1/10에 지나지 않는 매우 우수한 품질 특성을 지닌 제품이다.

본 자료는 육군사관학교 홍경희 교수가 기고한 것으로, 광학계 성능평가를 위한 카메라 벤치형 OTF 측정장치에 관심있는 독자제현의 업무에 많은 참고가 되리라 본다

-편집자 주-

I. 서 론

표준연구소 광학실험실에서는 4년 전부터 렌즈들이나 결상계의 성능평가를 위한 주사형 OTF(Optical Transfer Function) 측정장치를 개발하여 대외적인 시험검사 업무에 사용하고 있다.^[1,2] 그동안 우리의 측정장치를 사용하면서 몇 가지 불편한 점들을 발견하였는데 이를 개선함으로써 본 실험실 뿐만 아니라 국내 광학산업체에서도 사용할 수 있는 간편한 OTF 측정장치를 제작하였다.

처음 개발된 OTF 측정장치는 고분해능의 주사장치를 사용함으로써 매우 높은 측정 정밀도를 얻을 수 있었으나 크기가 4×5m인 T자형 광학대 위에 설치되어 규모가 너무 크고, 비축상 무한거리 물체를 반사형 시준장치를 이용한 nodal slide를 사용하여 형성하였으므로 초점 길이가 긴 광학계를 시험할 경우 정확한 nodal point를 찾기가 힘들었을 뿐만 아니라

많은 시간이 소비되었다. 그리고 Apple 컴퓨터를 사용한 데이터 처리장치와 OTF 계산프로그램은 컴퓨터성능에 전적으로 제한되므로 처리속도가 느렸고 측정과정이나 결과제시에도 불편한 점들이 많이 있었다. 그러므로 이와 같은 문제들을 다음과 같이 해결함으로써 사용이 매우 간편한 OTF 측정장치를 제작할 수 있었다. 즉 전체 장치의 크기를 1×1.5m 정도로 줄여 광학데이블 위에 설치할 수 있도록 하였다. 그리고 비축상 무한거리 물체는 초점길이가 1m이고 F수가 12.5인 렌즈형 시준장치를 스테핑 모타가 부착된 한 개의 회전장치와 직선이동 장치로 구성된 비축형성 장치에 부착시킨 카메라 벤치형 측정장치를^[3] 구성함으로써 매우 짧은 시간내에 정확히 형성될 수 있도록 하였다. 사용된 스테핑 모타들의 조정과 광감지기 신호처리는 국산 IBM-AT 컴퓨터를 사용하여 자동화하였으며 OTF 계산과 측정과정 및 결과표시를 위한 컴퓨터 프로그램을 새로

개발하였다.

본 연구에서는 새로 제작한 카메라 벤치형 OTF 측정장치의 자세한 설계 및 제작, 성능평가에 대하여 논하였다.

II. 장치제작

1. 광학장치

제작된 OTF 측정장치의 광학부분은 축상과 비축상에서 무한 및 유한거리 선물체를 형성하는 광원부, 시험되는 광학계의 고정장치부, 그리고 결상된 상을 여러 초점면에서 주사하여 전기신호로 변환시키는 상분석장치부 등으로 구성된다. 그림 1은 제작된 OTF 측정장치의 전체 장치도이며, 각 부분에 대한 명칭을 나타내었다. 폭이 $25\mu\text{m}$ 이고 길이가 3mm인 슬릿, 텅스텐 램프, 집광렌즈, 단색필터, 확산판 등으로 구성된 물체를 시준하기 위하여 초점길이가 1m, F수가 12.5인 렌즈형 시준장치를 제작하였다. 사용한 렌즈는 Spindler Hoyer의 achromatic 렌즈(SH032594)이며 국내에서 많이 생산되는 광학계의 규격과 국제표준화기구(International Standards Organization)의 권고안⁽⁶⁾(시준렌즈의 F 수는 10 이상, 유효구

경은 시험렌즈보다 10mm 이상, 초점길이는 시험렌즈보다 최소한 2배 이상)을 고려하여 선택하였다. 본 연구소가 보유하고 있는 Zygo Mark III 디지털 간섭계를 사용하여 측정된 시준렌즈의 파면수차는 유효구경 80mm로 제한하였을 경우 peak to valley 는 $\lambda/4$ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) 이하로써 현재 외국회사에서 매우 고가로 판매하는 OTF용 시준렌즈와 비교해도 손색이 없다. 슬릿으로 사용한 선물체는, sagittal과 tangential 방향으로 회전할 수 있도록 광축에 수직방향인 회전장치에 부착되어 있으며 시준장치 외부에서 수동으로 조정할 수 있다. 물체를 비축상으로 이동하기 위하여 길이가 1m, 분해능이 $\pm 10.4\mu\text{m}$ 인 직선이동장치 위에, 분해능 및 정확도가 0.01° 인 회전장치(Micro Controle UR 100 PP)를 부착시켰다. 그리고 전체의 물체형성장치는 길이가 1m 이고 분해능이 0.05mm 인 두개의 rail 위에 부착되어 시험하는 렌즈와 물체 사이의 거리를 1m 이내에서 조정할 수 있도록 하였다. 그러므로 무한거리 혹은 유한거리(물체부에서 시준장치를 분리하면) 물체는 시험하는 렌즈로부터 임의의 거리에서 광축에 수직된 방향으로 이동하면서 비축상 물체를 형성한다. 이와 같은 광학장치는 카메라 렌

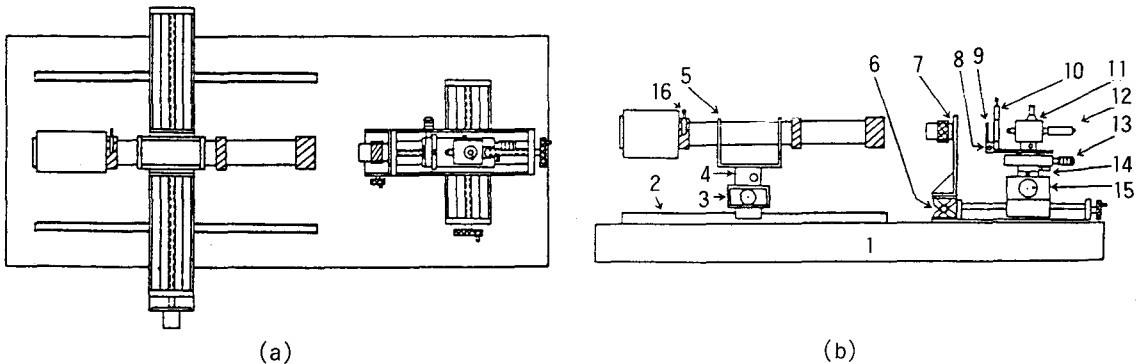


Fig. 1. (a) Schematic plane and (b) side diagram of the camera bench type OTE measuring system.

(1. optical table 2. rail 3. translator 4. rotator 5. collimator 6. lab. zack 7. lens holder 8. scanning translator 9. scanner 10. rotator 11. alignment system 12. optical detector 13. defocusing translator 14. micro X-Y translator 15. X-Y translator 16. S/T rotator).

즈를 실제로 사용할 경우, 대상물체와의 기하학적 구조가 같으므로 카메라 벤치형 광학장치라 부른다. 제작된 장치의 최대 field angle 은 $\pm 45^\circ$ 이며 각도의 정확도는 $\pm 0.01^\circ$ 이다. 시험하는 렌즈 고정장치는 수직으로 미세이동이 가능한 labjack 위에 여러 종류의 카메라 렌즈 mount 와 centering holder를 교환하여 부착 가능하도록 제작하였다.

결상된 상을 주사하는 장치는 참고문헌 1-4에서 사용한 것과 구조가 같다. 즉 날카로운 칼날을 분해능이 $0.1\mu\text{m}$ 인 마이크로 이동장치 (Micro Control UT 50.20PP)에 부착시킨 것이며 이를 sagittal 과 tangential 방향으로 측정가능하도록 새로운 수동식 회전장치에 부착 시켰다. 칼날을 통과한 산란광은 현미경 구조로 구성된 정렬장치의 대물렌즈에 의하여 광감지기에 집광된다, 사용하는 광감지기의 분광감응 형태는 S-20 이며 감지면적이 비교적 넓은 head-on형 광증배관이다. 그리고 낮은 신호에 따른 noise를 최대한 제거하기 위하여 전단증폭기가 내장된 소켓 (Hamamatsu C1556)을 사용하였다. 주사장치와 정렬장치 등은 유효이동가능 거리가 $\pm 250\text{mm}$ 인 수동 X-Y 이동장치 위에 부착시켰다.

전체 광학장치에서 시준장치와 주사장치의 높이는 같은 높이로 고정시켰으며, 결상면을 찾기 위하여 X-Y 방향으로만 이동가능하게 하고 시험렌즈 고정장치는 수직방향으로만 미세이동 가능하게 함으로써 정렬시간을 최대한 단축할 수 있게 하였다.

2. 광신호 처리 및 모터 조종장치

그림 2는 국산 IBM-AT 형 마이크로 컴퓨터를 사용한 광신호 처리 및 모터 조종장치의 개략도이다. 전류신호로 변환된 광신호는 광증배관 소켓에 내장된 전단증폭기에 의하여 전압신호로 변환증폭되며 다시 후단증폭기에 의하여 재증폭되어 A/D 변환기 (ADC1211, 12bit)

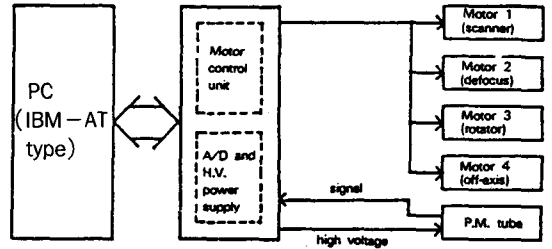


Fig. 2. Block diagram of data acquisition and motor control system.

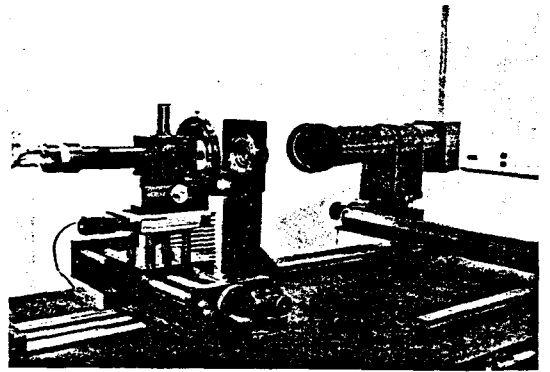


Fig. 3. Developed camera bench type OTF measuring system.(for infinite off-axis object)

에 입력된다. 광증배관에 걸어주는 역바이어스 전압은 RCA PF 1041N 증폭기를 사용하여 -1.5KW 이하에서 가변되는 고전압 전원을 제작하여 사용하였다. 세 개의 4상 스테핑 모터와 한 개의 5상 스테핑 모터는 interface card로부터 발생하는 5V 펄스신호를 각각의 모터 조종 board에서 24V 로 증폭함으로써 조종한다. 각 모터의 선택과 속도조절은 소프트웨어에 의하여 자동조종되며 정렬시 편리하도록 수동조종도 할 수 있다.

그림 3은 제작된 OTF 측정장치의 광학장치 사진이다. 비축상 무한거리 물체를 형성한 시준장치를 볼 수 있다.

3. 컴퓨터 프로그램 개발

그림 4는 OTF 측정프로그램의 플로우 차트이다. 전체 프로그램은 BFP(Best Focal Pla-

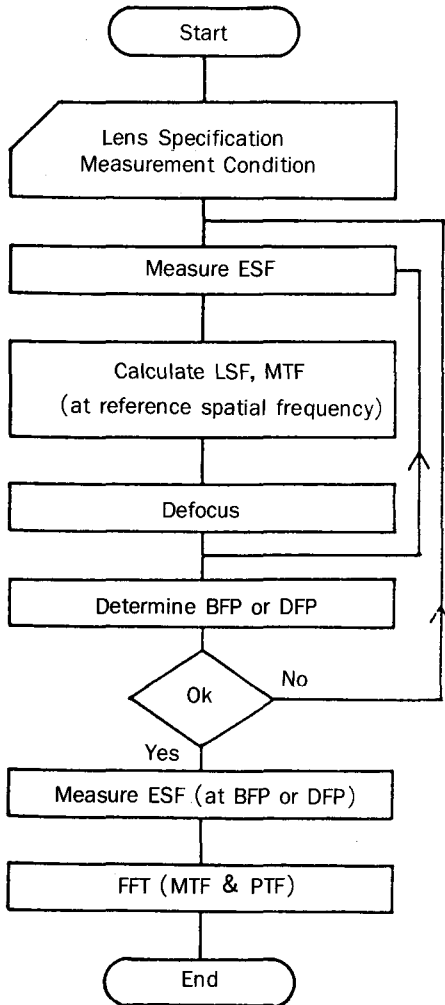


fig. 4. Flow chart of the OTF measuring procedure.

ne) 혹은 DFP(Datum Focal Plane)을 결정하는 자동초점조정 프로그램과 결정된 임의의 상평면에서 OTF를 측정 및 계산하는 프로그램 등 두 부분으로 구성된다. 자동초점조정 프로그램은 임의의 특정한 공간주파수에서 초점근방을 광축방향으로 이동하면서 MTF(Modulation Transfer Function)를 측정함으로써 최대값을 나타내는 BFP 혹은(측정결과에 비교나 인용을 위해 선택된 상평면인) DFP를 결정한다. DFP가 결정되면 상분석장치는 자동이동되며 전 공간주파수 영역에 대한

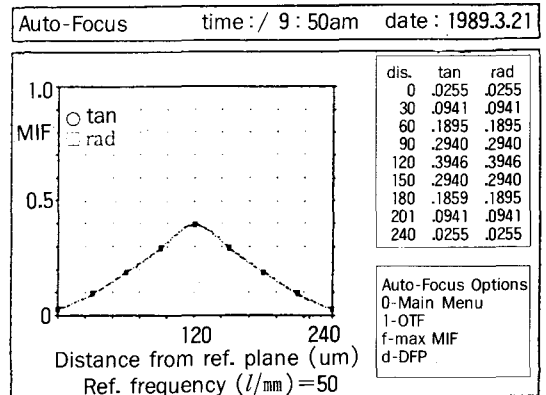


Fig. 5. MTF curve of auto-focus program.

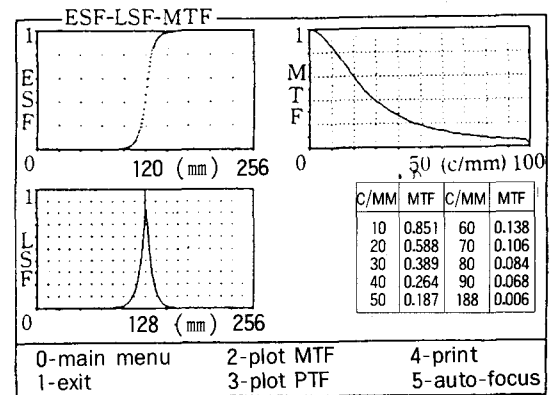


fig. 6. Measured result of developed OTE measuring program.

OTF(MTF & PTF)를 FFT(Fast Fourier Transform) 프로그램을 사용하여 계산한다.

그림 5는 EGA(Enhanced Graphic Adapter)를 사용한 칼라 모니터를 통해서 보여준 자동초점조정 프로그램의 측정결과이다. 공간주파수 50c/mm 에서 초점심도에 따른 MTF값들의 분포를 실시간에 나타내므로 측정자는 DFP를 바로 알 수 있다.

그림 6은 DFP에서 측정 및 계산한 ESF(Edge Scan Function), LSF(Line Spread Function), MTF 등을 나타낸 것이다. 한 화면에 측정결과들은 실시간에 나타냄으로써 바로 결과를 알 수 있을 뿐만 아니라 짧은 시간내에 잘못된 측정과정을 찾을 수 있다. DFP를 결정

Table 1. Measured MTF values of a standard lens for the infinite conjugate tests.

(SIRA)

Frequency (c/m)	Max. MTF plane (50 c/mm) F/8	Datum Focal Plane		
		F/8	F/ 5.6	F/ 11
5	0.96 (0.96)	0.95 (0.94)	0.96 (0.96)	0.94 (0.93)
10	0.92 (0.92)	0.90 (0.90)	0.90 (0.90)	0.88 (0.88)
15	0.89 (0.88)	0.83 (0.84)	0.85 (0.85)	0.81 (0.80)
20	0.86 (0.84)	0.76 (0.76)	0.78 (0.78)	0.74 (0.72)
25	0.83 (0.81)	0.72 (0.69)	0.73 (0.72)	0.67 (0.66)
30	0.79 (0.78)	0.61 (0.61)	0.67 (0.66)	0.60 (0.58)
40	0.72 (0.71)	0.47 (0.46)	0.55 (0.54)	0.47 (0.44)
50	0.66 (0.65)	0.33 (0.32)	0.45 (0.44)	0.36 (0.35)
60	0.60 (0.59)	0.22 (0.22)	0.37 (0.35)	0.28 (0.27)
70	0.54 (0.54)	0.15 (0.15)	0.30 (0.28)	0.23 (0.22)
80	0.49 (0.48)	0.10 (0.10)	0.24 (0.23)	0.19 (0.20)
90	0.44 (0.44)	0.07 (0.08)	0.19 (0.19)	0.17 (0.18)
100	0.39 (0.40)	0.06 (0.06)	0.16 (0.16)	0.14 (0.15)

하는데 소요되는 시간은 시험렌즈의 F 수에 따라 초점심도가 변화하므로 칼날의 초점이동시간에 의존하며, DFP에서의 OTF 측정은 외부 노이즈를 극소화시키기 위하여 주사간격마다 읽는 데이터 수와 읽는 간격에 의존하므로 사용자는 가장 좋은 측정변수를 선택하여 입력시켜야 한다.

Ⅲ. 성능평가 및 검토

제작된 OTF 측정장치의 측정정확도를 시험하기 위하여 국제적으로 인정되는 SIRA 그룹의 표준렌즈⁷⁾를 사용하여 측정하였다. 표 1은 광축상의 무한거리 물체에 대하여 공간주파수 50c/mm일 경우 최대 MTF 상면과 DFP에서 F 수에 따라 측정된 MTF 값들이며 괄호내의 값은 SIRA 그룹에서 발표한 측정치이다. SIRA 그룹의 50mm 평면-볼록형 표준렌즈의 경우 DFP를 측정물체에 대하여 f/8, 50c/mm 공간주파수에서 측정된 MTF 값이 최대 MTF 값의 50%되는 상평면 중 렌즈에 가까운 평면으로 정의하고 있다. SIRA 그룹에서 측정된 값들과

비교하면 두 군데를 제외하고 전체적으로 ±2 MTF 단위내에서 일치함을 알 수 있었다. 제작된 장치에서 상분석장치에 사용된 광학부품들은 처음 개발한 것과 똑같으므로 측정정밀도는 참고문헌 1, 2에서 발표한 0.8%이다. 임의의 렌즈를 사용하여 OTF를 측정할 경우 기본적인 정렬외에 소요되는 측정시간은 DFP를 결정하는데 소요되는 시간을 포함하여 1분 이내이었다.

Ⅳ. 결 론

이미 높은 측정정밀도가 확인된 주사형 OTF 측정장치의 많은 부분을 개선함으로써 국내 광학산업체에서 편리하게 사용할 수 있는 카메라 벤치형 OTF 측정장치를 제작하였다. 표준렌즈를 사용한 성능평가 시험에서 ±2 MTF 단위내의 측정정확도를 확인할 수 있었다. 아직 이 장치는 완전한 측정자동화가 이루어지지 않았지만 Sagittal과 tagential 측정을 위한 물체와 스캔너의 회전장치, 여러 종류의 단색필터와 물체의 교환장치 등을 자동화하면

사용이 보다 편리한 장치가 될 것이다. 앞으로 이 장치는 국내의 여러 광학회사들이 사용하게 될 것이므로 본 연구소와 측정결과들을 상호비교함으로써 많은 평가자료를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, 새물리, 27, 95(1987).
 [2] K.H.Hong, I.W.Lee, H.M.Cho and

Y.W.Lee, Applied Optics, 26,4423(1987).
 [3] 조현모, 이윤우, 이인원, 홍경희, 새물리, 27, 423(1987).
 [4] H.M.Cho, Y.W.Lee and I.W.Lee, The Second ROC-ROK Metrology Symposium, VII-4-1(1988).
 [5] British Standards 4779, London(1971).
 [6] ISO/TC 172/SC 1, "Optics and optical instrumrnts OTF"(1988).
 [7] T. L. Williams and A. Ashton, Applied Optics, 8, 2007(1969).

알아봅시다

한 낮

한낮의 햇빛의 색은 다른 어느 때보다도 백색성(白色性)이 강하다. 대기가 맑고, 아지랭이가 없으며, 물체의 표면반사에 의한 색 손실이 없으면, 한낮에는 어느 색상도 가장 밝게 보이며, 색상 사이의 컨트라스트도 제일 강하다. 명암의 컨트라스트도 빛나는 명부와 짙고 짙은 그림자 때문에 아주 뚜렷하다. 빛의 각도와 성질은 계절의 변화에 따라 정확하게 변한다. 예컨대 추운 겨울의 한낮 광선은 다른 계절의 아침·저녁의 부드러운 핑크색과 비슷하다. 태양이 머리 위에 있는 여름날의 빛의 각도는 물체의 형태를 알아볼 수 없게 하고, 패턴을 강조한다. 특히 인물 찍기가 어렵다. 표정은 모자에 가리워지고, 눈은 깊은 그늘속에 묻힌다.

그런 결과, 한낮의 사진은 미묘한 맛이 없는 딱딱한 것이 되고 만다. 그림자는 화면 구성을 위한 근본 요소이므로, 화면의 분위기를 정하기 위해 적극 활용할 필요가 있다. 그들이 만드는 패턴은 언제나 딱딱한 인상을 주지는 않는다(나무밑의 여성 사진을 보면 그 밑자가 부드럽다). 이맘때쯤 그늘에서 쉬는 사람을 볼 기회가 많다. 그늘에 노광을 맞춰 명부를 희게 날려버리면, 실내의 서늘함과 밖의 더위가 동시에 전달된다.

빛이 너무 강하여 피사체를 그늘로 옮기든가 역광으로 찍든가 해도 아직 빛이 셀 때엔, 저감도 필름으로 노광을 다스려야 한다. UV 필터, ND 필터, 편광 필터는 안개, 지나친 빛, 눈부신 반사 등을 감소 시키고, 엄버(umber) 계열의 필터는 청공으로부터의 간접광이 화면에 푸른기를 주려 할 때, 정확한 색 재현에 도움이 된다. 명암의 대비가 강한 사진은 극적인 인상을 주므로, 여름날 한낮의 강렬한 빛으로 드러매틱한 효과를 거두어보는 것도 나쁘지 않다.

※ 자료제공 : 사진과평론사 「칼라사진술」