

실시간 렌즈 성능평가장치 설계 및 제작

이윤우 · 조현모 · 이인원

한국표준과학연구원 광학그룹

홍 경 희

육군사관학교 화랑대연구소

이 환 규

부원광학주식회사

(1994년 11월 21일 받음)

복사기, 팩스 렌즈 등 대량생산되는 광학계를 실시간에 성능평가하기 위하여 5개의 십자형 슬릿 물체와 3개의 2차원 CCD를 상분석장치로 사용한 자동평가장치를 개발하였다. 시험렌즈의 사양에 따라 물체와 렌즈, 그리고 상분석장치를 이동시키는 자동정렬장치를 제작하였으며 슬릿의 수직 및 수평방향 선분포 함수를 CCD에 의하여 동시에 측정하였다. 그리고 렌즈의 축상 및 비축상 MTF와 배율, 편심, 그리고 회전위치에 따른 최적방향 등을 자동으로 실시간에 측정할 수 있었다.

I. 서 론

우수한 광학계를 생산하기 위해서는 렌즈의 설계, 제작, 그리고 평가기술이 함께 필요하며 서로 간에 조화를 이루어야 한다. 제작된 렌즈를 평가하는 방법은 매우 많지만 대량생산하는 경우에는 각각의 부품 제작과정 뿐만 아니라 최종 조립품을 실시간에 평가하는 기술들을 많이 요구하고 있다. 국내 광학회사에서는 카메라 렌즈 뿐만 아니라 복사기와 팩스 렌즈들을 대량생산하고 있다. 일부 팩스에는 CIS(Contact Image Sensor)와 같이 미세렌즈 배열을 사용하기도 하지만 아직도 대부분의 기기들은 광학유리로 만든 보통의 렌즈를 사용한다.^[1,2] 이들 렌즈들의 사양은 복사기 및 팩스에서 사용하는 용지가 규격화되었기 때문에 제조회사에 따라 약간의 차이가 있을 뿐 거의 비슷하다. 대부분의 광학회사에서 사용하는 렌즈 성능시험 방법은 몇개의 특정한 공간주파수를 갖는 격자형 분해능 타겟을 사용하여 투사된 상을 직접 눈으로 검사하며 그외 초점길이, 수차등도 직접 측정한다. 이러한 방법은 특히 시험렌즈의 수가 많은 경우 시험자의 신체특성과 컨디션이 측정결과에 영향을 많이 끼치므로 재현성 유지에 어려움이 있으며 또한 측정시간이 오래 걸리는 문제 등을 지니고 있다. 일부

에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 CCD(Charge Coupled Device)를 사용하여 렌즈의 투사된 분해능 타겟의 상을 디지털화 하는 직접 MTF(Modulation Transfer Function) 측정방법을 사용하기도 한다.^[3] 하지만 공간주파수가 서로 다른 여러개의 분해능 타겟을 구하기가 힘들고 시험렌즈의 종류에 따라 다르게 요구하는 변수들을 측정하기 위해서는 또 다른 측정장치가 필요하다.

본 연구에서는 복사기 및 팩스 렌즈를 함께 사용할 수 있는 실시간 성능평가장치를 개발하였다. 시험렌즈의 종류에 따라 간격이 서로 다른 여러개의 십자선 물체를 사용하였으며 미세이동장치 위에 부착된 세개의 2차원 CCD를 사용하여 디지털 주사함으로써 슬릿의 선분포 함수를 구하였다. 그리고 이것을 다시 푸리에 변환하는 간접 MTF 측정방법을 사용하여 Sagittal 및 tangential MTF를 축상과 비축상에서 동시에 측정하였다.^[4,5] 또한 배율, 편심, 회전각도에 따른 최적방향 등의 여러 변수들도 매우 신속하게 자동으로 측정할 수 있도록 하였다. 마이크로 컴퓨터를 사용하여 모타구동과 신호처리를 하였으며 측정과정 및 결과표시를 실시간에 하였다. 그리고 자세한 설계변수와 측정결과를 나타내었다.

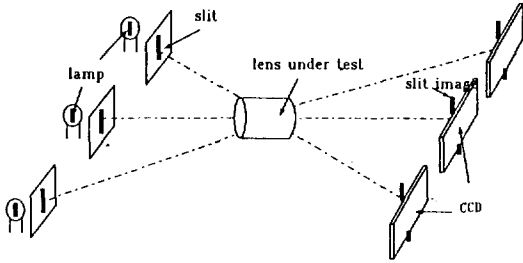


그림 1. 여러 개의 CCD를 이용한 실시간 MTF 측정원리.

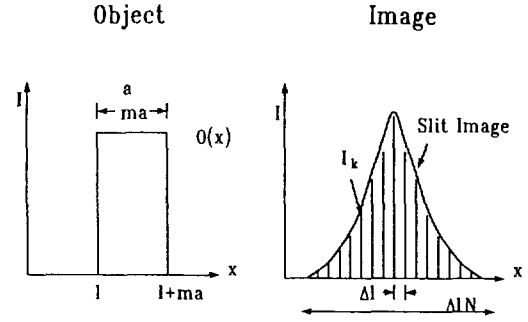


그림 2. 슬릿 상의 샘플링 출력.

II. CCD를 이용한 다중 광축 MTF 측정

그림 1은 렌즈의 축상 및 비축상 MTF를 실시간에 측정하기 위하여 구성된 측정장치의 개략도이다. 시험 렌즈의 규격에 의하여 정해진 간격으로 물체면에 놓여진 여러개의 슬릿은 렌즈에 의하여 각각 다른 방향으로 결상되며 또한 같은 수의 CCD에 의하여 그림 2와 같이 수치화 된다. 슬릿은 그 폭의 크기에 따라 결정되는 고유의 공간주파수 성분을 가지며 시험렌즈의 성능에 의하여 슬릿의 MTF를 저하시킨 상을 맺는다. 만약 슬릿의 폭을 a , 렌즈의 배율을 m , CCD의 화소간격을 Δl , 그리고 공간주파수를 u 로 나타내면 렌즈의 MTF $M(u)$ 는 상면에서 배율에 의한 슬릿의 이상적인 광세기분포 $O(x)$ 와 실제 상의 광세기 분포함수에 대한 푸리에 변환 값의 비로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$M(u) = \frac{mua}{\sin(mua)} \cdot \frac{\sqrt{\left(\sum_{k=0}^N I_k \cos \frac{2\pi u \Delta l k}{m}\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^N I_k \sin \frac{2\pi u \Delta l k}{m}\right)^2}}{\sum_{k=0}^N I_k} \quad (1)$$

여기서 I_k 는 CCD의 k 번째 화소에 대응하는 슬릿 상의 표준값이다. 위 식에서 첫번째 항은 슬릿의 MTF를 나타내며 렌즈의 배율에 관계없이 슬릿 폭의 크기에 의해서만 표현됨을 알 수 있다.

CCD는 화소크기와 간격이 일정하게 고정되어 있으므로 사용가능한 공간주파수 범위는 근본적으로 한정되어 있다. 그러므로 CCD를 사용할 경우에는 물체와 시험렌즈의 유효 공간주파수 영역을 고려하여 선택하여야 하며 또한 CCD의 MTF에 의한 영향을 보정하여야 한다. CCD의 MTF는 공간주파수가 서로 다른 여러개의 sinu-

soidal 물체를 사용하여 직접 측정하거나 혹은 이론적으로 계산하여 구할 수 있다. 만약 공간주파수가 일정한 sinusoidal 물체가 일정한 화소간격과 크기를 가진 CCD 위에 결상된 경우 화소중심에 대한 상 위치의 위상차에 따라 출력의 대비도(contrast)가 다르게 된다. 즉 상의 위치에 따라 CCD의 MTF가 다르게 되며 이것은 한개의 공간주파수에서 일정한 값을 가지는 것이 아니라 공간주파수에 비례하여 폭이 매우 크게되는 최대 및 최소값 사이의 임의의 MTF 값을 가진다. 보통 CCD의 MTF는 각각의 공간주파수에서 산술평균으로 생각하여 계산한다.^[4,5] 그러므로 렌즈의 MTF는 식 (1)을 CCD의 MTF로 다시 나누어서 보정한 값이다.

III. 측정장치 구성 및 제작

표 1은 국내 광학회사에서 생산하는 복사기 및 팩스 렌즈들의 종류 및 사양이다. 이들 렌즈들은 제조회사에 따라 약간의 규격 차이가 있을 뿐 거의 비슷하다. 복사기 렌즈의 경우 물체는 A4 혹은 A3 등의 용지이며 상면은 드럼 면이다. 그러나 팩스의 경우에는 상면에는 1차원 CCD array가 놓여 있다. 복사기 렌즈는 배율이 보통 1이지만 팩스 렌즈는 물체를 10배 이상 축소해야 하므로 높은 공간주파수에서 MTF 측정을 요구한다.

복사기와 팩스 렌즈의 실제 사용조건은 매우 다르지만 두 렌즈를 함께 사용할 수 있도록 장치를 구성하였다. 그림 3은 물체, 시험렌즈, 그리고 CCD를 이동시키기 위하여 구성된 이동장치들을 나타낸 것이다. 모든 이동장치들은 스테핑 모터로 구동되며 분해능은 $10 \mu\text{m}$ 이고 초기 위치를 확인하기 위하여 photo interrupter를 사용하였다. 그리고 각각의 모터 조종은 컴퓨터로 하지만 수동으로도 작동가능케 하였다. 이 경우에는 스테핑 모터에 부착된 rotary encoder에 의하여 이동거리를 읽으며

표 1. 복사기 및 팩스 렌즈의 종류와 규격

종 류	초점길이 (mm)	F-Number	용지크기 (mm)	상크기 (mm)	물체-상간거리 (mm)	배율	MTF(min, %)		
							c/mm	S	T
복사기 렌즈	180-190	6-10	180-297	180-297	720-760	1-2	5	40-60	
팩스 렌즈	20-28	4.5-6	210-257	19-29	270-305	0.1-0.09	35-45	44-67	45-66

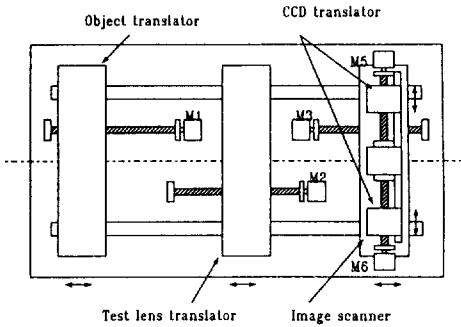


그림 3. MTF 측정장치의 자동 미세이동장치.

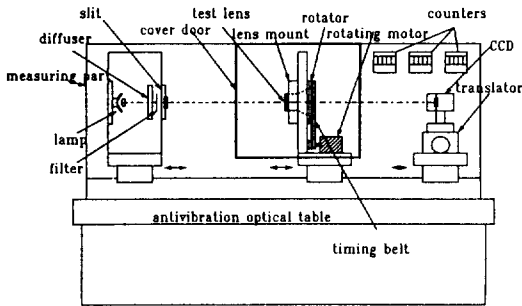


그림 4. 제작된 복사기 및 팩스 렌즈의 실시간 MTF 측정장치 단면도.

측정장치에 부착된 계수기로 표시할 수 있도록 하였다. 그림 4는 제작한 MTF 측정장치의 단면도이다. 전체 장치는 외부 빛을 차단 시키기 위하여 덮개 문이 부착된 상자속에 있으며 무진동 테이블 위에 놓여 있다.

다음은 측정장치를 기능에 따라 광원부, 렌즈 고정부, 상 분석부, 그리고 마이크로 컴퓨터를 이용한 전자조종 및 상처리장치로 나누어 설명하겠다.

1. 광원부

복사기 렌즈의 경우 물체는 사용하는 용지의 중심과 한변의 0.75, 그리고 끝 부분에 놓여있다. 즉 축상 및 비축상 다섯 위치에서 MTF를 측정한다. 또한 렌즈의

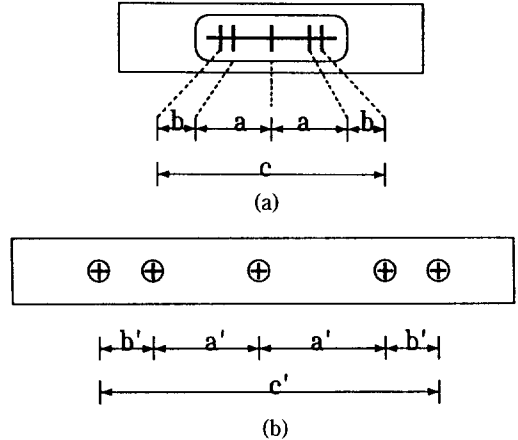


그림 5. MTF 측정장치의 팩스(a) 및 복사기(b) 측정용 물체(a:b=3:7, c=19~24 mm, a':b'=2.5:7.5, c'=216~297 mm).

수직 및 수평방향에서 MTF를 측정할 수 있도록 그림 5와 같이 십자선 모양의 물체를 사용하였다. 이것은 광학유리 위에 리소그래픽 방법으로 제작하였으며 복사기 렌즈의 경우 슬릿 폭은 20 μm이고 팩스인 경우는 렌즈의 배율을 고려하여 10 μm이다. Diffuser를 사용하여 슬릿 전체에 균일하게 빛을 조명하도록 하였으며 복사기의 경우에는 실제 사용하는 광대역 투과 필터를 함께 사용하였다. 그리고 렌즈의 종류와 사용하는 용지의 크기가 다른 경우를 고려하여 슬릿 사이의 간격이 서로 다른 여러 종류의 물체를 교환하여 사용할 수 있게하였다. 실제로는 팩스 렌즈의 경우에 물체를 축소하지만 본 측정장치에서는 물체와 상의 위치를 역으로 하여 슬릿 물체를 확대하도록 구성하였다. 그리고 축상과 비축상 물체의 간격이 매우 좁으므로 한개의 유리판 위에 다섯개의 십자선 슬릿을 근접시켜 함께 제작하였다.

2. 시험렌즈 고정부

복사기 및 팩스 렌즈의 고정은 착탈이 쉽도록 하였으며 나사를 사용하여 기울기를 미세조종 가능하도록 하였다.

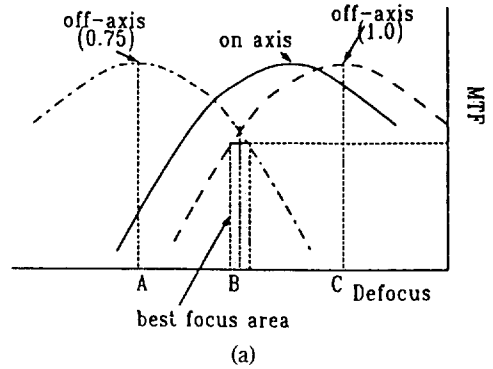
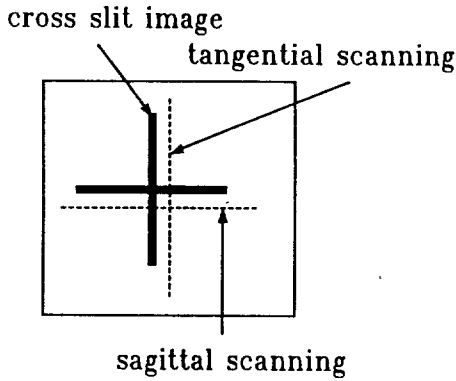


그림 6. CCD에서 슬릿 이미지의 수직 및 수평 주사.

그리고 렌즈의 편심등을 측정하기 위하여 고정장치를 회전기어 위에 부착하였으며 스테핑 모터와 타이밍 벨트를 사용하여 구동시켰다.

3. 상 분석부

슬릿의 광도분포함수를 축상과 비축상에서 측정하기 위하여 3개의 2차원 CCD(삼성항공, BW-360ED)를 사용하였다. 한개의 CCD는 광축 위에 고정되어 있으며 두개는 각각 광축에 수직방향으로 움직이는 미세이동장치 위에 고정되어 시험렌즈의 측정조건에 따라 이동할 수 있도록 하였다. 그리고 전체 CCD는 광축방향으로 이동할 수 있게 하였다. 사용한 CCD의 화소 수는 682×492 이며 화소간격은 $9.6 \times 9.9 \mu\text{m}$ 이다.

그림 6은 CCD에서 십자선 슬릿 상의 광도분포를 디지털화하기 위하여 신호를 읽는 위치를 나타낸 것이다. Sagittal 및 Tangential 방향의 광도분포함수를 CCD의 중심에 가까운 두 행렬을 사용하여 동시에 측정함으로써 매우 짧은 시간에 구할 수 있다. 이 방법은 바늘구멍을 사용하는 경우에 상중심을 결정하기 위하여 계산시간이 오래 걸리는 문제와 한개의 슬릿을 직각으로 회전시키기 위하여 회전장치가 필요한 문제를 해결한 매우 편리한 방법이다. 그러나 신호를 읽는 두 행렬이 CCD의 중심으로부터 떨어져 있으므로 측정하는 비축각의 유효 오차범위를 고려하여 가능한 중심에 가까운 곳에서 주사하도록 해야 한다.

4. 전자제어 및 상처리 장치

전체 이동장치들에 사용된 6개의 스테핑 모터(Oriental Motor, PH566)는 컴퓨터 프로그램에 의하여 만든 펄스를 증폭시켜서 구동하였다. 모터의 이동거리, 방향, 속도는 프로그램으로 조종한다. 이동장치의 이동거리를 확인하

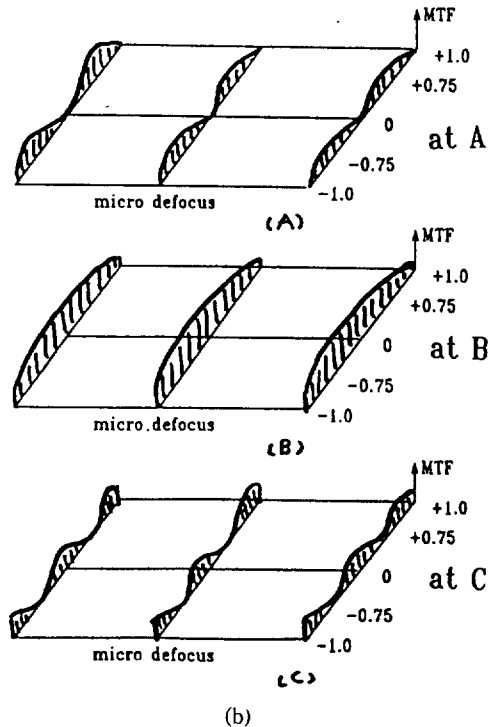


그림 7. 상높이와 초점심도에 따른 렌즈의 MTF 변화.

기 위하여 모터에 직접 rotary encoder(500 pulse/rotation)를 부착하였으며 계수기를 부착시켜 외부에 직접 표시할 수 있도록 하였다. 그리고 이동장치의 초기위치를 결정하기 위하여 photo interrupter를 사용하였다. 3개의 CCD 카메라의 출력은 multiplexer(Data Translation, DT 2859)에 의하여 한개씩 선택되며 다시 image grabber(Data Translation, DT2851)에 의하여 디지털로 변환된다.^[7] 변환된 신호는 1/256의 분해능을 가지며 데이터 파일로 저장된다. 측정과정은 실시간으로 칼라 모니터에 나타나며 측정결과는 프린터 할 수 있다. 모든 신호와

모타구동은 국산 80486DX급 마이크로컴퓨터를 사용하여 처리하였다.

IV. 렌즈의 MTF 및 변수측정

1. 렌즈의 최적상면 결정

복사기 및 팩스 렌즈의 실제 상면은 평면이 아니고 수차에 의하여 휘어져 있으므로 상의 높이와 초점심도에 따라 그림 7(a)와 같이 기준 공간주파수(여기서는 5c/mm)의 MTF 값이 달라진다. 즉 임의의 위치 A, B, C에서 MTF는 그림 7(b)와 같이 나타난다. A와 C의 위치에서는 상 높이에 따라 MTF 값이 균일하지 않지만 B에서는 모든 상높이에서 초점 심도변화에 거의 관계없이 MTF 값이 일정함을 알 수 있다. 그러므로 렌즈의 최적상면은 모든 축상 및 비축상 MTF 값이 함께 가장 크게 되는 위치로서 정의 할 수 있다. 렌즈의 실제 사용조건에서 최적 상평면은 복사기의 드럼, 혹은 팩스의 일차원 CCD의 위치이며 이것을 기준으로 초점심도(depth of focus)를 측정한다. 초점심도는 상면에서 모든 MTF 값이 일정한 값보다 크게되는 광축방향의 유효길이를 말하며 렌즈를 설계할 때 조립공차를 고려하여 미리 정해진다.

2. 편심측정

측정장치의 광축에 대하여 시험렌즈의 광축이 그림 8(a)와 같이 일치하지 않고 어긋나 있는 경우 렌즈를 회전시키면 슬릿 이미지는 CCD 화소의 수평방향으로 이동한다. 측정장치에서 렌즈를 1회전 시킨 경우 슬릿 이미지의 최대 변위를 편심량이라고 한다. 그림 8(b)는 편심량이 최대인 경우의 슬릿 이미지 변위를 나타내었다. 렌즈를 일정한 각도만큼 회전시키면서 슬릿 이미지의 피크 위치를 기록한 후 피크 간격이 최대가 되는 경우를 찾아낸다. 그림에서 슬릿 이미지의 초기 피크 위치를 기준으로 최소 및 최대 변위량을 K_{min} , K_{max} 라 하면 편심량은

$$\text{편심량} = (K_{max} - K_{min})\Delta l \quad (2)$$

이다. 여기서 Δl 는 CCD의 화소간격이며 렌즈와 상간거리를 알면 편심량을 각도단위로 표시할 수 있다.

3. 배율측정

렌즈를 조립할 때 물체와 렌즈간격 그리고 상간거리의 공차는 보통 0.1~0.5% 정도를 요구하므로 제작된 렌즈의 배율을 조립공차보다 더욱 정확하게 측정하여 확인하여야 한다. 그림 9(a)는 배율 측정원리를 나타낸 것이

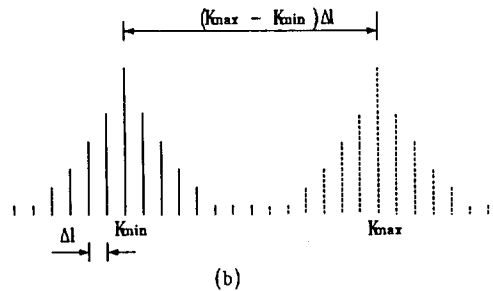
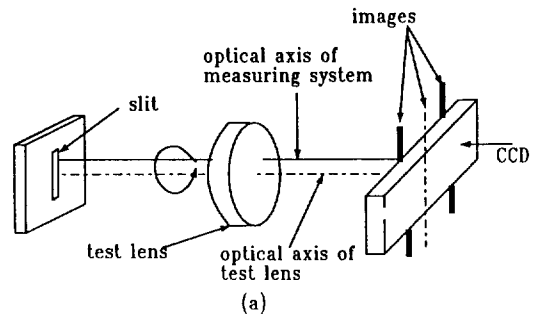


그림 8. 렌즈의 편심측정 원리.

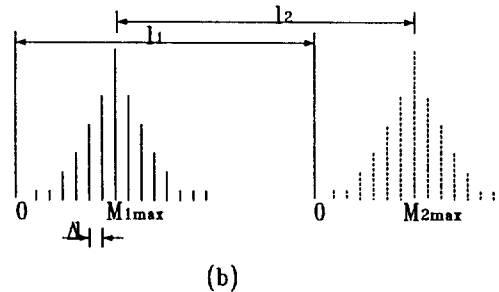
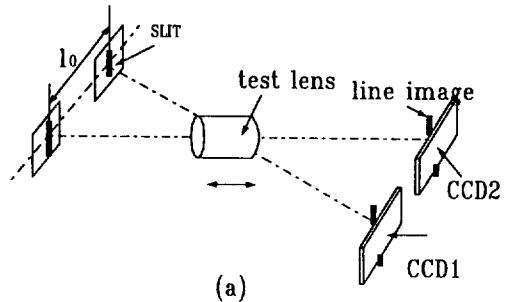


그림 9. 렌즈의 배율측정 원리.

다. 렌즈를 광축방향으로 미세이동 시키면서 최적상면을 결정된 후 이때의 물체와 상의 크기로 부터 구한다. 슬릿 간격을 알고 있을때 렌즈에 의하여 맺은 슬릿 이미지의 피크 간격을 CCD로 측정하면 배율은 두 간격의 비로

결정된다. 그림 9(b)는 슬릿 이미지의 피크간격 측정원리를 나타낸 것이다. 슬릿 간격을 l_0 , CCD의 간격을 l_1 , 화소 간격을 Δl , 슬릿 이미지의 피크간격을 l_2 이라 하면 렌즈의 배율은

$$\text{배율} = l_2/l_0 = (l_1 + (M_{2max} - M_{1max})\Delta l)/l_0 \quad (3)$$

이다. 여기서 M_{2max} 는 CCD2에서의 피크 위치, M_{1max} 는 CCD1에서의 피크 위치를 나타낸다.

4. 렌즈의 회전위치에 따른 MTF 측정

그림 10(a)와 같이 렌즈가 광축에 대하여 기울어져 있거나 렌즈를 구성하는 단일 렌즈 면이 기울어져 있는 불량품 혹은 비대칭렌즈인 경우 렌즈를 회전시키면 그림 10(b)와 같이 모든 공간주파수에서 각도에 따라 MTF 값이 변한다. 즉 렌즈의 분해능이 광축에 대하여 비대칭이므로 회전각도에 따른 MTF를 측정하여 값이 가장 높은 최적방향을 정한다. 그림에서 렌즈를 단위각도 $\Delta\theta$ 씩 1회전시켜 기준 공간주파수의 MTF 값을 기록한 후 각각의 방향에 대하여 최소 MTF 값이 최대가 되는 방향을 최적방향으로 정한다. 렌즈를 1회전시켜 최적방향이 정해지면 다시 렌즈를 최적방향으로 회전시켜

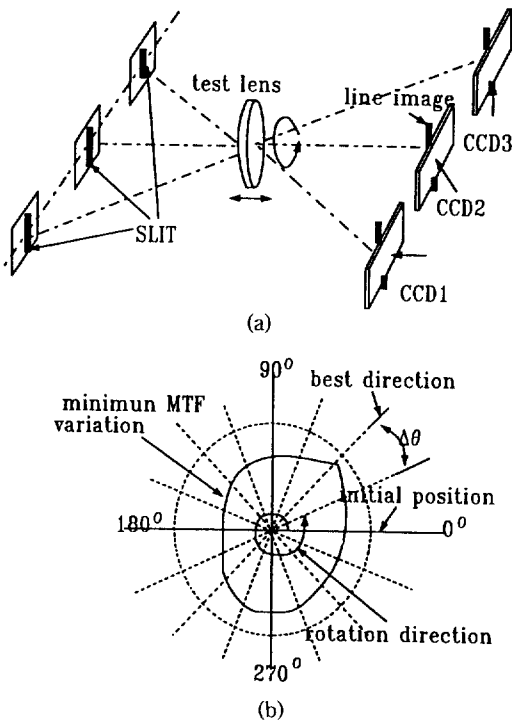


그림 10. 렌즈의 회전위치에 따른 MTF 변화.

MTF를 측정한다. 그리고 최적방향이 조립면에 수직인 방향으로 렌즈를 조립하도록 렌즈면에 표시를 한다.

5. 복사기 및 팩스 렌즈용 OTF 측정 컴퓨터 프로그램 개발

앞에서 논한 측정방법들을 바탕으로하여 CCD를 이용한 복사기 및 팩스 렌즈의 MTF 측정 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 전체 프로그램은 크게 나누어 세부분으로 구성된다. 첫번째 부분은 램프의 밝기 및 CCD 신호 크기의 조절, 그리고 시험렌즈 종류 및 사양과 측정항목의 입력자료에 의하여 물체, 렌즈, 그리고 CCD의 위치를 자동으로 이동시킨 다음 정렬상태를 확인하는 초기화 프로그램이다. 두번째 부분은 autofocus에 의한 최적상면의 결정과 MTF 측정, 그리고 편심, 배율 등의 변수들을 측정하는 부분이다. 여기서는 CCD로 측정된 측상 및 비측상 슬릿의 line spread function을 discrete Fourier transform 하여 변환된 복소함수의 amplitude인 MTF를 구하였으며 물체로 사용된 슬릿폭과 배율, 그리고 CCD의 화소크기와 간격 등에 의한 MTF 값의 영향을 보정하였다. 그리고 각각의 CCD에서 tangential, sagittal 측정을 동시에 하며 최적상면을 먼저 결정한 후 다시 측정한다. 세번째 부분은 측정값들을 실시간에 화면에 표시하거나 프린터로 출력하는 프로그램이며 저장한 데이터 파일로 부터 그래프를 그릴 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램에서 주프로그램 부분은 Quick Basic 언어를, 그리고 CCD에서 측정값을 읽어들이는 부분은 C언어를 사용하였다.

V. 측정 및 검토

그림 11은 제작된 측정장치의 autofocus 프로그램을

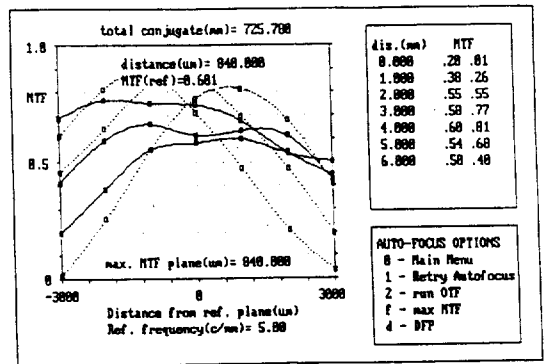


그림 11. Autofocus 프로그램에 의한 복사기 렌즈의 초점심도에 따른 MTF 측정.

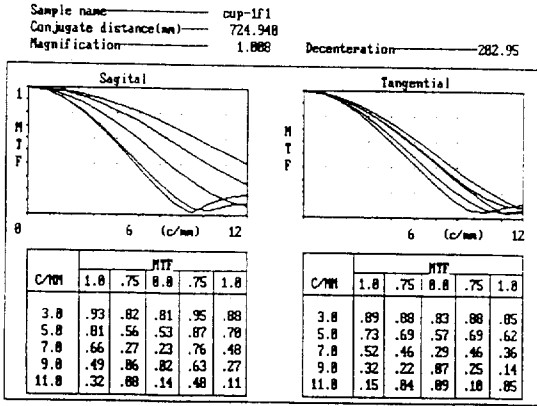


그림 12. 축상 및 비축상에서 복사기 렌즈의 MTF.

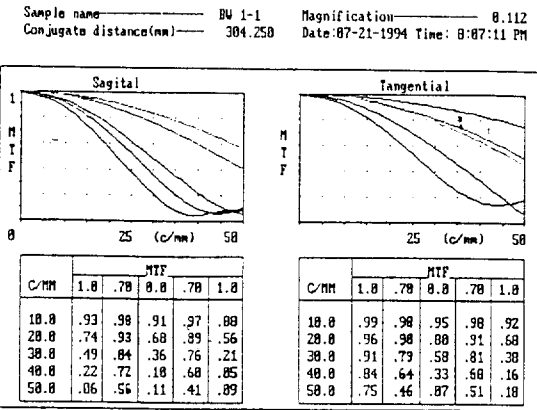


그림 13. 축상 및 비축상에서 팩스 렌즈의 MTF.

사용하여 초점 종이동에 따른 복사기 렌즈의 축상 및 비축상(상높이 +1.0, -0.75) MTF 변화를 측정하였다. 공간주파수 5 c/mm 에서 세곳의 sagittal(점선) 및 tangential(실선) MTF 값을 측정하였으며 모든 상높이에서 가장 큰 값을 나타내는 최적상면은 중심에서 840 μm 떨어져 있음을 알 수 있다. 그리고 오른쪽 위쪽의 측정값은 축상 MTF 값을 나타낸 것이며 아래쪽의 것은 메뉴판을 나타낸다.

그림 12는 앞에서 구한 최적상면에서 측정된 복사기 렌즈의 MTF 값이다. Sagittal 방향이 tangential 방향보다 상높이에 따라 MTF 값의 변화가 크고 비축상 MTF가 축상보다 높은 것을 알 수 있다. 그리고 렌즈의 편심 측정결과를 나타낸다. 한개의 렌즈에 대하여 모든 상높이에서 MTF 측정시간은 1분정도이었으며 CCD를 이동시키지 않은 경우, 즉 autofocus 프로그램에서와 같이 세곳(상높이 +1.0, 0.0, -0.7)에서 측정하는 경우는 10초 정도 이었다.

그림 13은 팩스 렌즈의 최적상면에서의 측정결과이며 배율이 0.1 정도의 축소광학계이므로 공간주파수 영역이 복사기 보다 매우 크다. 그리고 각각의 상높이(± 1.0, ± 0.7, ± 0.0)에서 측정된 값을 비교하면 tangential 방향인 경우가 상대적으로 높은 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

최근에 영상입력장치로 많이 사용되는 이차원 CCD를 사용하여 복사기와 팩스 렌즈의 실시간 MTF 및 변수 측정장치를 개발하였다. 한개의 렌즈에 대하여 1분 이내의 매우 짧은 시간에 축상 및 비축상 MTF를 측정할 수 있도록 자동화하였으며 편심, 배율, 그리고 최적방향도 측정할 수 있게 하였다. 개발된 측정장치는 광학회사에서 최종조립된 렌즈의 성능평가장치로 사용될 것이다.

앞으로는 본 연구에서 개발된 기술을 이용하여 렌즈 등의 광학부품 생산공정에서 사용할 수 있는 실시간 변수측정장치와 CRT 등의 실시간 성능평가장치 등에 사용하려고 한다.

감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 광학 및 기계부품 제작에 도움을 준 본 연구원의 이회윤, 이재협씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] N. F. Borrelli, R. H. Bellman, J. A. Durbin and W. Lama, "Imaging and radiometric properties of microlens arrays", *Applied Optics*, **30**, 3633(1991).
- [2] 서형원, 조규성, 윤성균, 박태호, "감광성 유리를 이용한 마이크로 렌즈의 제조", 한국 광기술의 현황과 전망(제 3회 광기술 워크샵 논문집), 29-34(1994, 3월).
- [3] 砂金 光記, "CCD를 사용한 카메라 렌즈의 MTF 검사기", *O plus E*, 8월호, 67(1982).
- [4] 이윤우 외 5인, "CCD를 이용한 미세렌즈의 MTF 측정", *광학회지*, 5(1994) 인쇄중.
- [5] 이윤우, 조현모, 이인원, "CCD를 이용한 실시간 광학계 성능평가 기술", 한국 광기술의 현황과 전망(제 4회 광기술 워크샵 논문집), 11-22(1994, 9월).
- [6] J. C. Dainty and R. Shaw, *Image Science*(Academic Press, London, 1974), Ch. 2.
- [7] Data translation, "Product handbook" (1993).

Design and Fabrication of Real-time Lens Testing System

Yun-Woo Lee, Hyun-Mo Cho and In-Won Lee

Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, 305-606, Korea

Kyung-Hee Hong

Wharang-Dae Research Institute, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

Hwan-Kew Lee

Boowon Optical Co. Ltd., Buchon, 422-040, Korea

(Received: November 21, 1994)

This paper describes the design and fabrication of the testing system for copier and fax lenses in mass production. With the crossed line objects and 2-dim CCD arrays, we could measure the sagittal and tangential MTF in the on and off-axis at the same time. The automatic measuring methods for distortion, magnification, and best marginal direction of test lens in real time are presented.