

일차원적 비균일 개구변조가 광학계 MTF에 미치는 영향*

홍 경 희

육군사관학교, 물리학과

(1998년 2월 5일 받음, 1998년 3월 16일 수정본 받음)

일차원적 비균일 진폭변조가 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사하였다. 시험평가 렌즈는 국산 유효경 10 mm, 초점거리 87.8 mm인 이중렌즈를 택하였다. 시험렌즈의 수차특성은 축상과 시계각 1°와 2°인 비축에 대해 각각 ray-fan과 파면수차를 계산하여 그림으로 도시하였다. 진폭변조는 시험렌즈 앞에 근접하여 진폭변조판을 위치함으로 이루어진다. 진폭변조판은 계단식으로 투과도가 다른 것과 선형적으로 투과도가 변하는 것을 사용하였다. 진폭변조하지 않았을 때 60 cycles/millimeter(c/mm)의 공간주파수에서 최대 MTF 값을 가지는 상평면을 최적 상평면으로 결정하였다. 진폭변조의 경우와 변조하지 않은 경우에 대하여 MTF를 측정해서 그 값을 서로 비교하였다. 축상에서는 변조할 경우에 MTF 값이 변조하지 않은 경우에 비해 약간 저조하나 축외에서 변조할 경우에는 MTF 값이 시계각이 클수록 많이 증진 되었다.

I. 서 론

균일한 조명하에서 Fraunhofer회절에 의한 광학렌즈계에 의한 결상능력을 향상시키는 데는 한계가 있다. 우리가 관심이 있는 공간주파수 영역에서 이러한 한계를 넘어 결상능력의 극대화를 이룩하려면 개구상의 apodization이 필요하다. 실제적인 비균일 개구변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향을 조사 연구함으로써 광학기기에서 보다 compact하면서도 보다 높은 성능을 얻을 수 있는 가능성을 탐색할 수가 있다. 또한 laser disk 나 pick up 등 각종 레이저 응용기기 및 광정보와 광통신에 적용하여 집광능력을 향상시켜 보고자 한다.

본 연구와 관련하여 국내에서는 정창섭이 이론적으로 접근하여 개구상에서 진폭변조를 실시하였을 경우에 대해 무수차 광계통 및 3rd order 파면수차가 있는 광학계 몇 가지 경우에 대하여 연구 발표한 바가 있다.^[1-4] 또한 본 연구팀과 공동연구로 annular형태로 개구상에서 위상변조하였을 경우 국산 쌍안경 대물경의 MTF에 미치는 영향을 연구한 바가 있다.^[5-6] 이상수는 이론적으로 개구상 진폭변조에 의해 광결상계의 초분해능을 얻을 수 있다고 발표하였다.^[9]

일본에서는 O.Nakamura 등이 annular pupil을 가진 광학계에 대하여 연구하였고,^[10]스페인에서는 Yzuel이 axial apodization에 의해 분해능을 높이는 연구를^[11] Ojeda-Castantda가 Zone Plate 방식으로 분해능을 높이는 방법을 연구 발표하였다.^[12] 미국에서는 C. A. Haniff가 적외선 광학계에 대하여 적용하여 보았고^[13,14] R. M. Lewitt가 Bessel window를 이용하여 digital image representing의 향상을 모색하는 연구를 발표하였다.^[15]

본 연구팀은 개구상에서 annular형태로 진폭을 변조하였을 때에 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사 연구하여 발표한 바

가 있으며^[16-18] 개구상에서 annular형태로 위상을 변조하였을 때에 광학계 MTF에 미치는 영향에 대해서도 연구하여 그 결과를 발표한 바 있다.^[19,20] 본 연구에서는 개구 상에서 일차원적으로 일정한 기울기를 가지는 선형적인 진폭분포로 변조되었을 때와 계단 형태의 진폭분포로 변조되었을 경우에 대해서, 비균일 개구변조가 광학계 MTF에 미치는 영향이 조사 연구되었다.

II. 시험렌즈 및 진폭변조

일차원적 비균일 진폭변조가 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사하기 위해서 앞에 연구한 방법과 동일하게 주사형 OTF 측정장치를 이용하였다. 일차원적 진폭변조를 위해서 유리판 위에 진폭이 일차원적으로 분포되는 진폭변조판을 사용하였다. 평가하려는 렌즈 앞에 거의 접촉할 만큼 밀접하여 일차원적 진폭변조판을 위치 시켜서 MTF를 측정하였고, 변조하지 않은 경우의 MTF와 진폭변조를 실시하였을 때의 MTF를 비교함으로써 진폭변조의 영향을 조사하였다.

2.1. 시험렌즈의 수차특성

시험평가 하려는 렌즈로는 국산렌즈로서 진폭변조판의 크기에 맞추어 직경 10 mm, 초점거리 87.8 mm인 이중렌즈를 사용하였다. 수차특성은 광선추적을 이용하여 축상 대칭적인 수차가 있는 경우와 비축수차가 있는 경우에 대하여 각각 ray-fan과 파면수차를 계산하여 그림으로 도시하였다. ray-fan은 Gaussian 초평면 상에서 광선수차를 계산하여 얻은 것으로 시계각 0°에 대해서는 sagittal 평면과 tangential 평면이 대칭성으로 동일하기 때문에 하나만 계산하였고 시계각 1° 및 2°에 대해서는 두 가지 모두 계산하여 그림 1에 제시하였다. 그림에서 선이 3개가 나타나는 것은 ray-fan이나 spot diagram을 계산 할 때 가시영역의 Fraunhofer C, d, 및 F line에 대하여 계산하였기 때문이다. 이 계산들을 위해서 렌즈설계

*본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행된 핵심문제연구 과제 번호 971-0206-023-2의 일부입니다.

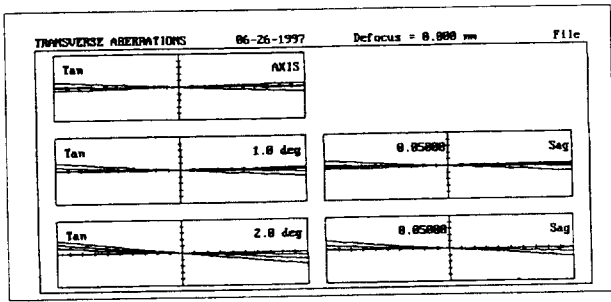


그림 1. 시험렌즈의 ray-fan.

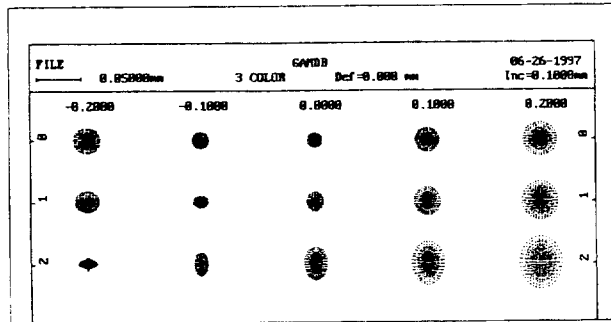


그림 2. 시험렌즈의 spot diagram.

프로그램 Sigma59(Kidger Optics, UK)가 이용되었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 시계각이 0° 일 때에는 0.015 mm 정도의 광선수차를 보이고 있다. 시계각이 1° 일 때에는 sagittal ray-fan과 tangential ray-fan이 거의 유사하여 약 0.025 mm 이 내가 된다. 그러나 시계각이 2° 일 때에는 sagittal ray-fan은 0.03 mm 이내 가 되지만 tangential ray-fan은 0.04 mm 이내 가 된다. spot diagram은 각 시계각에 대하여 defocussing effect 까지 고려하여 계산하였고 그 결과를 그림 2에 제시하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 Gaussian 광학적 초평면 상에서 모든 시계각에 대하여 spot의 직경이 0.04 mm 미만이 되었다. 축상 물체에 대하여는 시계각 0° 일 때이며 Gaussian 초평면 상에서 가장 spot 크기가 작고 초점이 잘 맞지만 비축상 물체의 경우, 시계각 1° 에서는 초점을 렌즈 쪽으로 0.1 mm 옮겼을 때가 가장 초점이 잘 맞으며 시계각이 2° 일 때에는 초점을 렌즈 쪽으로 0.2 mm 옮겼을 때가 가장 초점이 잘 맞는다는 것을 알 수가 있다.

4.2. 일차원적 비균일 진폭변조

진폭변조판을 제작하기 위해서는 광학유리가 기관이 되며 알루미늄이나 탄소를 박막으로 입혀 투과도를 조절함으로써 진폭변조판을 제작할 수 있다. 진공증착기 내에서 광학평면판을 기관으로 하여 진공증착을 실시하여 보았으나 결과가 좋지 못하여, 계단식으로 투과도가 다르게 만든 제품과 연속적으로 일정한 기울기를 가지고 투과도가 변하도록 만든 제품을 구입하였다. 이 것들은 모두 홀로그래픽 glass plate 필름을 감광시킨 것으로 일차원적인 진폭분포를 가지고 있다. 그림 3(a)는 연속적으로 진폭이 변하는 선형진폭변조판의 강도 분포를 나타낸 것이고 그림 3(b)는 계단식 진폭변조판의 강도

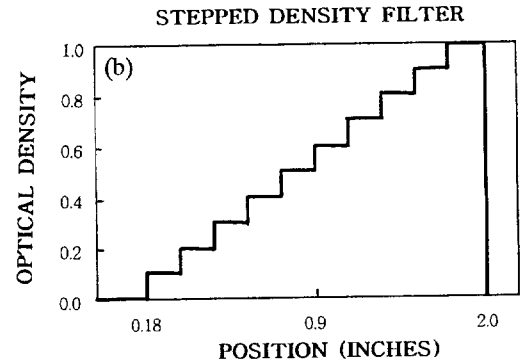
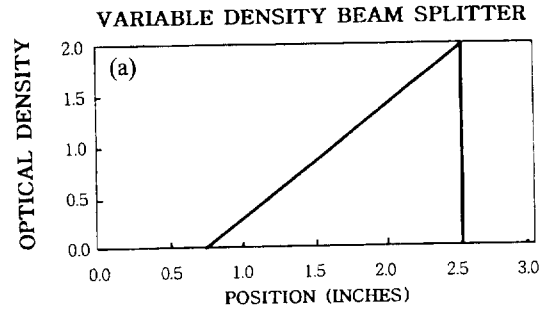


그림 3. 비균일 진폭변조판의 강도분포. (a) 선형 진폭변조, (b) 계단식 진폭변조

분포를 나타낸 것이다. 두 가지 모두 가시영역 400 nm부터 700 nm까지의 파장대에서 사용할 수 있도록 설계하여 제작된 것이다. 선형 진폭변조판은 크기가 가로 3인치, 세로 1인치, 두께 0.062인치 이고, 투과도가 96%부터 1.0%까지 일정한 기울기를 가지고 있다(Edmund Scientific '96 C41960).^[21] 계단식 진폭변조판은 크기가 가로 2인치, 세로 1인치, 두께 0.062인치 이고, 투과도가 100%부터 10%까지 계단식으로 감소한다(Edmund Scientific '96 C32,599).^[21]

III. MTF 특성 분석

MTF 측정은 국내에서 개발한 주사형 MTF 측정장치를 이용하였다.^[22,23] 폭이 5 μm인 슬릿을 물체로 하고 슬릿을 통과한 빛은 시준렌즈에 의하여 시준광으로 되며 시험렌즈에 의해 결상되고 그 상의 강도분포는 칼날에 의해 주사된다.^[22,23] 진폭변조를 실시하지 않은 경우를 기준으로 시계각이 0° 일 때 공간주파수 60 c/mm에서 최대 MTF 값을 가지는 위치를 최적 상평면으로 결정하고 그 위에서 MTF를 측정하였다. 계단식으로 투과도가 다른 진폭변조의 경우와 일차원적으로 기울기가 일정하게 투과도가 다른 진폭변조의 경우 그리고 변조하지 않은 경우에 대해 각각 시험렌즈의 MTF를 측정하여 그 값들을 서로 비교 분석하였다. 공간주파수 범위는 200 c/mm까지로 정하였다. 시계각 0° 일 때의 진폭변조한 경우와 변조하지 않은 경우의 MTF 측정 결과는 그림 4와 같다. 진폭변조하지 않았을 경우가 전체 공간주파수 범위에서 가장 높은 MTF 값을 보이고 있고 계단식 진폭변조의 경우는 전체 공간주파수 영역에 걸쳐 약간 낮으며 선형 진폭변조는 전체 공간

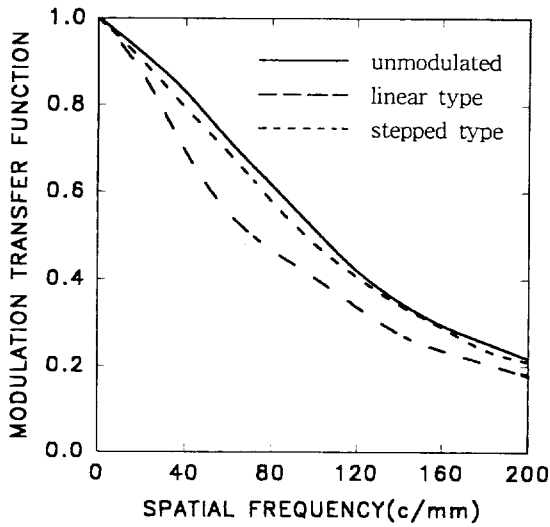


그림 4. 시계각 0°에서의 MTF.

주파수 범위에서 제일 낮게 나타났다. 특히 40 c/mm 근처에서는 그 차이가 현저하게 나타났다. 축 상에서는 진폭변조를 함으로써 MTF 특성이 나빠지는 것을 알 수 있으며 그 이유는 진폭변조를 실시하는 경우에는 최적 상평면의 위치가 변하는 것으로 판단된다.

시계각 1°에 대한 MTF 특성은 그림 5에 제시한 바와 같다.

그림 5(a)에는 sagittal field의 MTFs를 그림 5(b)에는 tangential field의 MTFs를 보여 주고 있다. 계단식 진폭 변조를 실시한 경우가 sagittal field에 대해서나 tangential field에 대해서 공히 전체 공간주파수 영역에서 가장 높은 MTF 값을 나타내고 있다. 다음은 sagittal field에 대해서 선형진폭변조의 경우가 전체 공간주파수 범위에 걸쳐서 변조하지 않은 경우보다 약간 높은 MTF값을 보여주고 있다. 그러나 tangential field에 대해서 살펴보면 약 90 c/mm까지는 선형 진폭변조의 경우가 변조하지 않은 경우보다 높은 MTF 값을 가지고 있으나 그 이후부터는 더 낮은 MTF 값을 가지는 것으로 나타났다. 특히 130-140 c/mm 사이에서 많이 낮게 나타났다. 시계각 1°에서는 계단식 진폭변조를 하는 것이 결상력 향상에 가장 도움이 되는 것을 알 수가 있다.

그림 6에는 시계각 2°에 대한 MTF 특성을 제시하였다. 그림 6(a)에는 sagittal field에 대한 MTF 특성을 그림 6(b)에는 tangential field에 대한 MTF 특성을 각각 보여 주고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 sagittal field의 MTF 특성은 역시 계단식 진폭변조를 실시한 경우가 전 공간주파수 영역에서 가장 높은 MTF 값을 보여 주고 있으며 다음은 선형 진폭변조가 고주파 영역, 약 150 c/mm 이후를 제외하고는 전체적으로 변조하지 않은 경우보다 높은 MTF 값을 보여 주고 있다. 그러나 tangential field의 MTF 특성은 선형 진폭변조하는 경우가 약 160 c/mm 이상의 고주파 영역을 제외하고는 매우 현격하

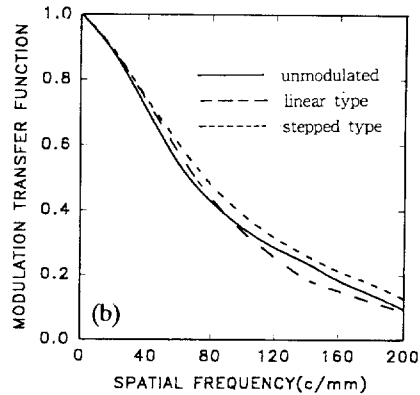
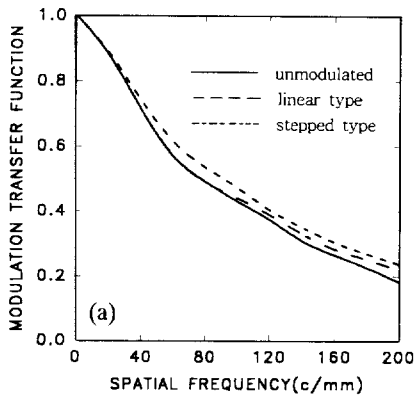


그림 5. 시계각 1°에서의 MTF. (a) sagittal MTF, (b) tangential MTF

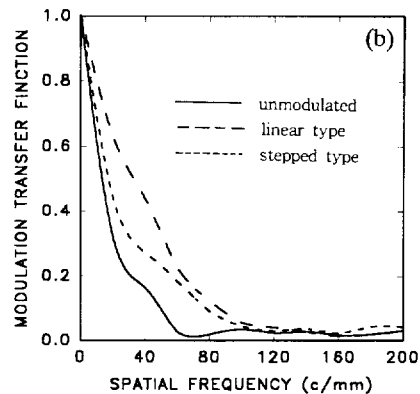
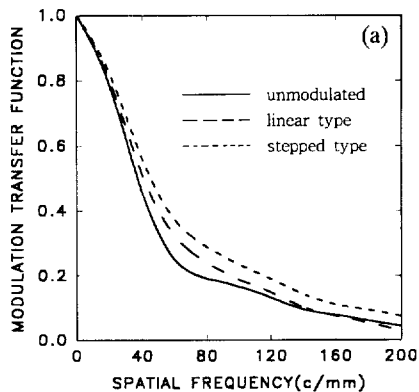


그림 6. 시계각 2°에서의 MTF. (a) sagittal MTF, (b) tangential MTF

계 높은 MTF 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그 다음으로 100 c/mm 이하의 공간주파수 영역에서 계단식 진폭변조를 할 경우가 역시 진폭변조를 실시하지 않은 경우에 비해 매우 높은 MTF 값을 가지고 있다. 따라서 선형 진폭변조를 실시한 경우가 시계각이 클 경우에도 좋은 MTF 값을 가지므로 고르게 좋은 것으로 생각할 수가 있다.

IV. 결 론

본 연구를 통하여 일차원적 비균일 진폭변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 축상 물체의 경우에는 약간 성능이 떨어지는 현상이 나타났지만 비축상의 물체에 대하여는 시계각이 클수록 일차원적 비균일 진폭변조를 함으로써 광학계의 MTF에 현저한 영향이 나타나서 많은 MTF 값의 증진을 보여 주었다. 따라서 적절히 일차원적 진폭변조를 실시하면 광학계의 결상능력 및 광의 집속력을 극대화할 수 있음이 증명되었다. 따라서 사용 목적에 따라서 적절한 진폭변조를 채택하면 성능이 우수한 광학장비의 개발이 가능해지며, 광의 집속능력을 극대화 하면 laser disk나 pick up 등 가전제품이나 광정보, 광통신 장비의 성능을 크게 향상시킬 수도 있으리라 믿는다.

참고문헌

[1] 박성중, 최기준, 박민경, 김재범, 심상현, 정창섭, 한국광학회지, **6**, 101 (1995).

[2] 박성중, 이종진, 정창섭, 한국광학회지, **4**, 9 (1993).
 [3] 심상현, 정창섭, 한국광학회지, **4**, 140 (1993).
 [4] 정창섭, H.H.Hopkins, 한국광학회지, **4**, 404 (1993).
 [5] 홍경희, 정창섭, 한순희, 새물리, **30**, 646 (1990).
 [6] 홍경희, 정창섭, 한순희, 새물리, **30**, 646(1990).
 [7] 홍경희, 오병완, 정창섭, 한국광학회지, **3**, 143(1992).
 [8] 한순희, 정창섭, 임기건, 심상현, 김현정, 이종진, 홍경희, 새물리, **32,3**, 12 (1992).
 [9] 조영민, 김종태, 이상수, 한국광학회지, **5**, 349 (1994).
 [10] O. Nakamura and K. Toyoda, Appl. Opt., **30**, 3242 (1991).
 [11] M. J. Yzuel, Juan C. E. and J. Campos, Appl. Opt., **29**, 1631 (1990).
 [12] J. Ojeda-Castantda, P. Andres and M. Martintz-Corral, Appl. Opt., **29**, 1299 (1990).
 [13] C. A. Haniff and D. F. Buscher, JOSA A, **9**, 203 (1992).
 [14] C. A. Haniff and D. F. Buscher, JOSA A, **10**, 1882 (1993).
 [15] R. M. Lewitt, JOSA A, **7**, 1834 (1990).
 [16] H. Chung, K. H. Hong and S. S. Lee, Appl. Opt., **22**, 1812 (1983).
 [17] K. H. Hong and J. U. Lee, Appl. Opt., **26**, 4425 (1987).
 [18] K. H. Hong and S. Y. Rah, JKPS, **22**, 108 (1989).
 [19] 홍경희, 한국광학회지, **4**, 22 (1993).
 [20] K. H. Hong, JKPS, **28**, 746 (1995).
 [21] Edmund Scientific Company, 1996 Optics & Optical Components Catalog, p62,(1996).
 [22] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, "주사형 OTF 측정장치 개발," 새물리, **27**, 95-99 (1987).
 [23] 조현모, 이윤우, 이인원, 홍경희, "표준렌즈에 의한 주사형 OTF 측정장치 성능평가," 새물리, **27**, 423-429 (1987).

One dimensional inhomogeneous aperture modulation effects on the MTF of optical system

Kyung Hee Hong
 Korea Military Academy, Dept. of Physics

(Received February 5, 1996, Revised manuscript received March 16, 1998)

One dimensional inhomogeneous aperture modulation effects on the MTF of optical system was investigated. The lens undertest was a doublet made in Korea. It was 10 mm effective diameter, 87.8 mm effective focal length. The ray-fans and spot diagrams were calculated and presented on the picture for on-axis and off-axis (field of view, 1° and 2°). Aperture modulation was carried out by positioning a aperture modulator close contacted with the lens undertest. We bought two modulators from Edmud Company in U.S.A. One was linear type and the other was stepped type. The MTFs were measured on the best of focus for unmodulated aperture where the MTF has the largest value for 60 c/mm and were compared with one another. The MTFs of modulated apertures had a little lower values than the MTF of unmodulated aperture for on-axis but in the case of off-axis, the values are highly improved as much as the wider field of view by modulating on the aperture.