

비균일 진폭변조가 쌍안경 대물경의 MTF에 미치는 영향*

홍경희

육군사관학교 물리학과

(1999년 1월 19일 받음, 1999년 3월 29일 수정본 받음)

본 연구에서는 비균일 진폭변조가 렌즈계통의 결상성능에 미치는 영향에 대해서 국산 쌍안경 대물경을 시험렌즈로 하여 실험적으로 조사하였으며, 회절광학적으로 OTF를 측정하는 방법에 의해 결상 성능을 평가하였다. 이때 비균일 진폭 분포로 조명하기 위해서 균일하게 시준된 광속에 의해 조명되는 시험렌즈 앞에 진폭변조판을 두어 이를 투과하도록 하였다. 시험렌즈의 수차특성을 유한 광선 추적을 통하여 ray-fan을 계산하여 살펴보았다. 비균일한 강도분포, 특히 가운데는 밝고 외곽으로 갈수록 어두운 것으로서 연속적으로 변하는 강도분포 및 그와 반대의 연속적인 분포로 조명되었을 때 Gaussian 상평면 위에서 MTF를 측정하여 균일한 조명 하에서의 MTF와 비교 분석하였다.

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 개구 상에서 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 공동 연구로 annular형태로 개구상에서 위상변조하였을 경우 국산 쌍안경 대물경의 MTF에 미치는 영향을 연구한 바가 있다.^[5,8] 이상수는 이론적으로 개구상 진폭변조에 의해 광결상계의 초분해능을 얻을 수 있다고 발표하였다.^[9]

일본에서는 Osamu Nakamura 등이 annular pupil을 가진 광학계에 대하여 연구하였고,^[10] 스페인에서는 Yzuel 교수팀이 axial apodization에 의해 분해능을 높이는 연구를^[11] Ojeda-Castaneda 팀이 Zone Plate 방식으로 분해능을 높이는 방법을 연구 발표하였다.^[12] 미국에서는 Christopher A. Haniff 팀이 적외선 광학계에 대하여 적용하여 보았고^[13,14] Robert M. Lewitt 팀 등이 Bessel window를 이용하여 digital image representing의 향상을 모색하는 연구를 발표하였다.^[15]

본 연구팀도 균일한 개구변조에 관한 연구를 다년간 실시하였다. annular형태로 개구상 진폭변조가 광학계 MTF에 미

치는 영향을 조사 연구하여 발표한 바가 있다.^[16-18] 일차원적 비균일 개구변조가 광학계 MTF에 미치는 영향에 대하여도 연구하여 발표한 바 있다.^[19,20] 본 연구에서는 개구 상에서 이차원적으로 연속적으로 진폭이 변하는 진폭분포로 변조되었을 경우에 대하여 조사하였다. 특히 가운데는 밝고 외곽으로 갈수록 어두운 것으로서 급속히 밝기가 변하는 진폭변조 및 그와 반대의 진폭변조를 실시한 경우에 Gaussian 상평면 위에서 MTF를 측정하여 균일한 조명 하에서의 MTF와 비교 분석하였다.

II. 시험렌즈 및 진폭변조

2.1. 시험 렌즈의 수차특성

시험렌즈의 유효경은 37.5 mm, 초점거리 128.04 mm인 국산 이중렌즈이다. 본 연구에서 사용한 시험렌즈의 수차특성을 살펴보기 위해, 유한광선추적을 이용하여 축상 대칭적인 수차가 있는 경우와 비축수차가 있는 경우에 대한 ray-fan을 계산하여 그림으로 도시하였다. 그림 1에서 ray-fan은 Gaussian 초평면 상에서 광선수차를 계산하여 얻은 것으로 시계각 0 DEG에 대해서는 sagittal 평면과 tangential 평면이 대칭성으로 동일하기 때문에 하나만 계산하였고 시계각 1 DEG 및 2 DEG에 대해서는 두 가지 모두 계산하여 그림으로 제시하였다. 그림에서 수평축은 동(pupil)과 자오면 또는 구결면이 개구와 만나는 교직선 상에서 광축을 중심으로 대칭적인 좌표를 의미하며 수직축은 Gauss상 평면과 자오면 및 구결면이 만나는 교직선 상의 좌표를 의미한다. 그림에서 선이 3개가 나타나는 것은 ray-fan이나 spot diagram을 계산할 때 가시영역의 Fraunhofer C, d, 및 F line에 대하여 계산하였기 때문이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 시계각이 0 DEG일 때에는 최대 0.05 mm 정도의 광선수차를 보이고 있으며 중심으로부터 상대좌표가 0.9일 때에 변화가 크다. 시계각이 1 DEG일 때에는 sagittal ray-fan과 tangential ray-fan이 거의 유사하여

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

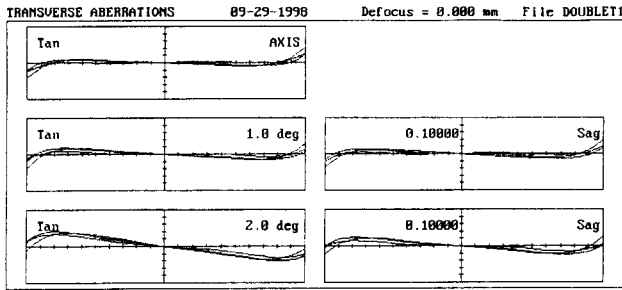


그림 1. 시험렌즈의 ray fan.

최대 광선수차가 약 0.04 mm 이내가 되고 중심으로부터 상대 좌표가 0.8에서부터 0.9 사이에서 변화가 크다. 그러나 시계

각이 2 DEG일 때에는 최대 광선수차가 sagittal ray-fan은 0.05 mm 이내가 되지만 tangential ray-fan은 0.08 mm 이내가 되고 중심으로부터 상대좌표가 0.9 근처에서 변화가 크게 일어난다.

2.2. 비균일 진폭변조

진폭변조판은 미국 Edmund사에서 유리판을 기판으로 한 홀로그래픽 필름판에 감광시켜, 가운데는 어둡고 외곽으로 갈수록 급격히 밝은 연속분포의 투과도를 갖도록 제조한 것이다.^[21] 이것을 부 연속분포 진폭변조판 이라고 하자. 그 반대는 본 연구실에서 앞에 언급한 진폭변조판을 사진필름과 접촉하여 노출, 감광 및 현상하여 제작하였다. 본 실험에 사용한 정 연속분포 진폭변조판을 투과한 광속의 강도분포를

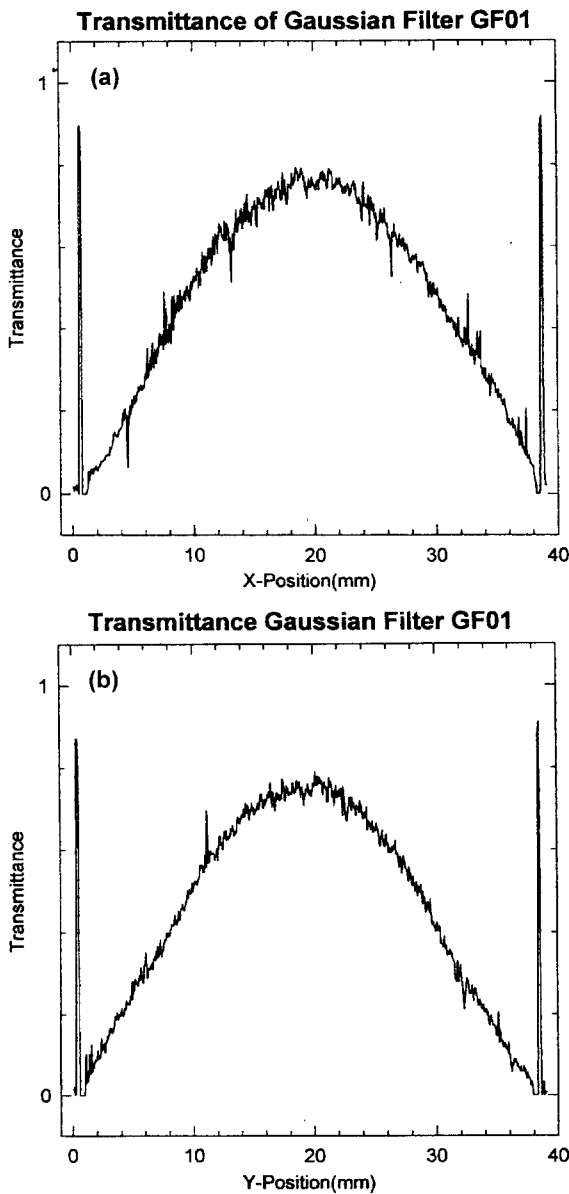


그림 2. 정 연속분포의 진폭변조판 투과도 (a) 수평방향, (b) 수직방향.

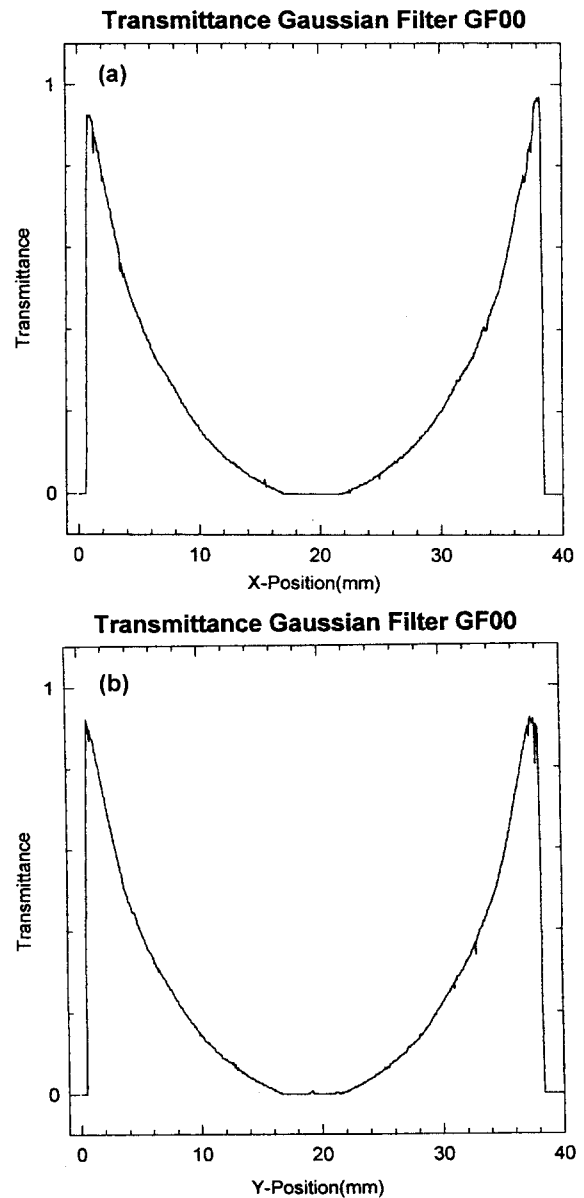


그림 3. 부 연속분포의 진폭변조판 투과도 (a) 수평방향, (b) 수직방향.

densitometer에 의해 주사(scanning)한 결과가 그림 2에 나타나 있다. 그림 2(a)는 x-축 방향의 지름을 따라 주사한 것으로 신호의 잡음(noise) 때문에 이상적인 곡선은 아니지만 그 모양은 포물선의 분포곡선을 보여주고 있다. 양쪽 끝의 peak는 사용하지 않는 가장자리 부분으로서 실제 실험에는 영향을 주지 않는다. 그림 2(b)는 y-축 방향의 지름을 따라 주사한 것으로 x-축 방향의 주사 결과와 대동 소이하다. 즉, 신호잡음(noise)로 인한 이상적인 포물선 분포곡선은 아니지만, 전반적으로 지름 방향으로 포물선의 분포곡선을 보여주었으며, 양쪽 끝의 peak부분도 x-축과 마찬가지로 보이니 이도 가장자리 부분으로써 실제 실험에 영향을 주지 않는 부분이다.

그림 3은 부 연속분포 진폭변조판을 투과한 광속의 강도분포를 위에서와 마찬가지로 densitometer에 의해 주사한 결과이다. 그림 3(a)는 x-축 방향의 지름을 따라 주사한 것으로 양쪽 끝의 가장자리 부분의 낮은 강도분포는 실제 사용되지 않는 부분으로 실험에 영향을 주지 않으며, 양쪽 끝은 높은 강도분포를 보이니 중심부분으로 갈수록 낮은 강도분포를 보인다. 신호 잡음(noise)은 사진 필름으로 감광시켜 제작한 정 연속분포 진폭변조판에 비하면 훨씬 적은 편이다. 투과도의 그림도 비교적 좋은 포물선 모양을 보이고 있다. 그림 3(b)는 y-축 방향의 지름을 따라 주사한 결과이다. 대체로 포물선을 나타내고 있는 것이 x-축을 따라 주사한 결과와 유사하다. 구입한 부 연속분포 진폭변조판에 비해 일반 사진 필름에 감광시켜 본 연구실에서 제작한 정 연속분포 진폭변조판의 투과도가 noise가 많은 것은 필름의 입자 크기가 홀로그래픽용 필름보다 더 크기 때문이다.

III. Gaussian 상평면 상의 MTF

진폭변조시 광학계의 MTF를 조사하기 위해 주사형 OTF 측정장치를 이용하여 시준광으로 조명되는 시험렌즈 앞에 거의 접촉될 만큼의 위치에 진폭변조판을 위치시켜 MTF를 측정하였다. 그림 4부터 그림 6까지는 Gaussian 상평면 상에서

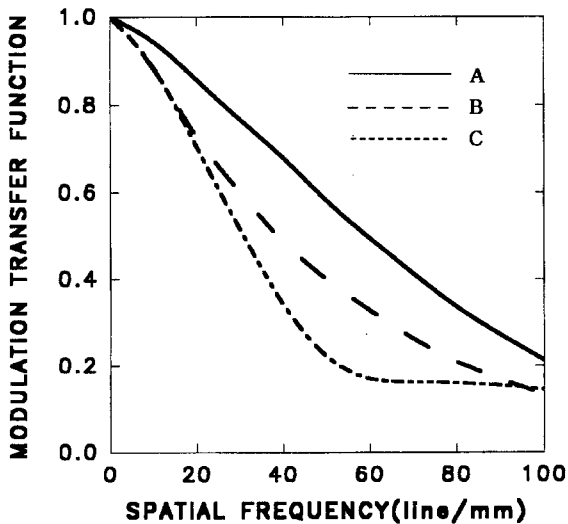


그림 4. 축상 MTF 특성.

비균일 진폭변조를 실시 하였을 경우와 변조를 실시하지 않은 경우에 대하여 MTF 특성들을 비교하여 제시하였다.

그림 4는 축상 물체에 대하여 tangential MTF를 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 축상 MTF의 특성은 변조되지 않은 경우(A)가 가장 높은 값을 가지며 정 연속분포의 진폭변조시(B)가 중간 정도 그리고 부 연속분포의 진폭변조시(C)가 가장 낮은 MTF값을 보여주었다

그림 5에서 시계각이 1°일 때 MTF 특성을 보여주고 있다. 그림 5(a)에서 sagittal MTF특성을 보면 70 line/mm까지는 변조하지 않은 경우가 가장 높은 값을 가지나 그 이후부터는 정 연속분포로 진폭변조한 경우가 더 높은 MTF 값을 가진다. 부 연속분포로 진폭변조한 경우는 전체적으로 낮은 MTF 값을 가지며 약 35 line/mm, 60 line/mm 및 85 line/mm 근처에서 bump를 나타내고 있다. 공간주파수여과 효과가 가장 잘 나타난다. 그러나 그림 5(b)에서 시계각이 1 DEG일 때 tangential MTF의 특성은 저주파 영역에서는 정 연속분포로 진폭변조하는 경우가 가장 높은 MTF 값을 가지며 다음은 진폭변조하지

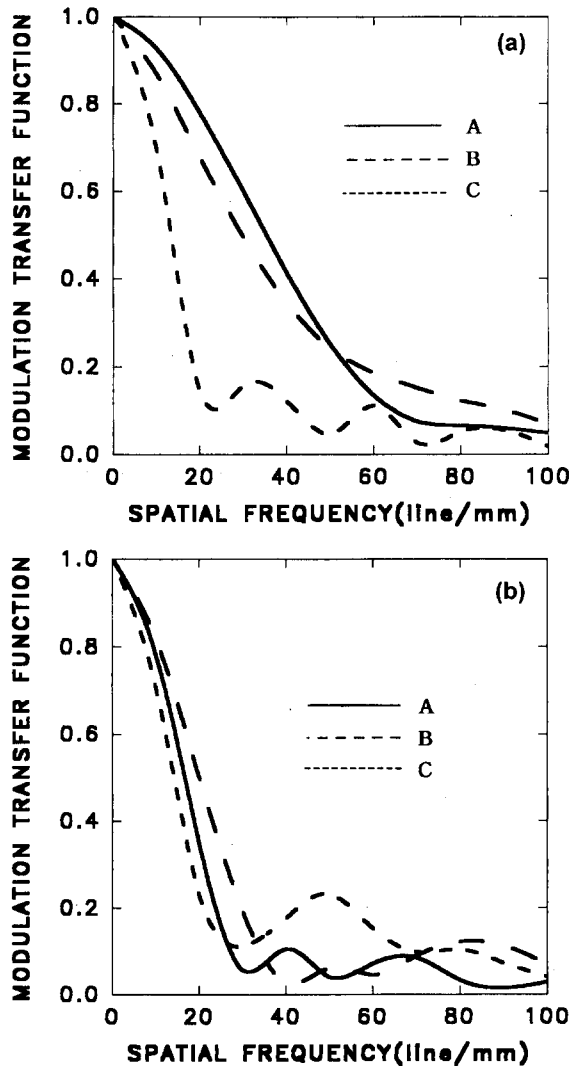


그림 5. 시계각 1° 일 때 MTF 특성 (a) sagittal MTF, (b) tangential MTF.

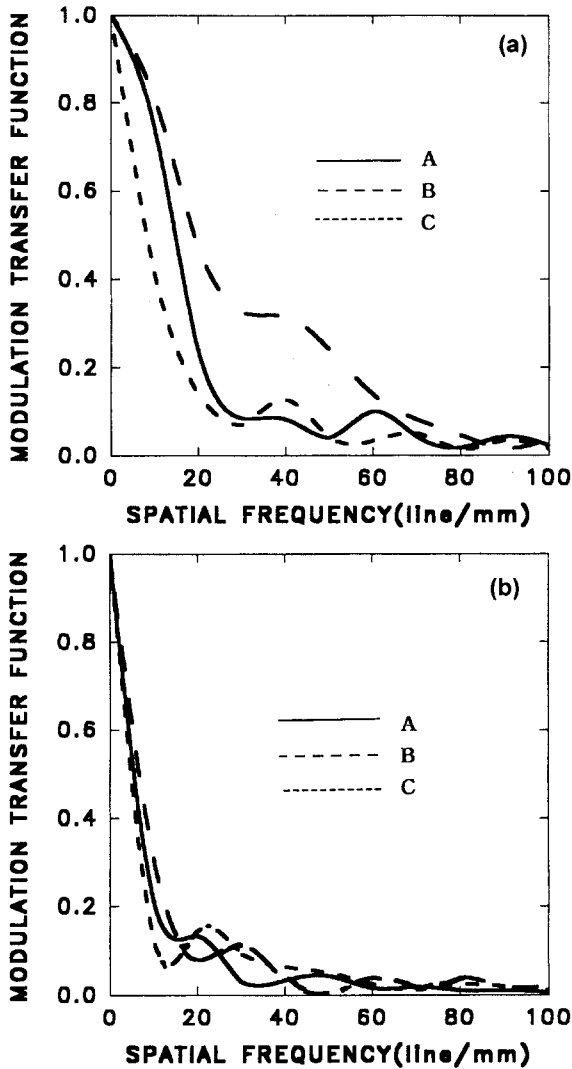


그림 6. 시계각 2°일 때 MTF 특성 (a) sagittal MTF, (b) tangential MTF.

않은 경우이고 부 연속분포로 진폭변조한 경우가 가장 낮은 MTF 값을 보이고 있다. 그러나 약 50 line/mm 근처에서는 부 연속분포의 진폭변조시 bump로 나타나며 현격하게 높은 MTF 값을 나타내고 있다. 약 70 line/mm 이상의 고주파 영역에서는 정 연속분포의 진폭변조를 실시한 경우가 가장 높은 MTF 값을 보여주고 있으며 그 다음은 부 연속분포의 진폭변조한 경우가 되고 변조하지 않은 경우가 가장 낮은 값을 가지고 있다.

그림 6에는 시계각이 2 DEG일 때 MTF 특성을 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 시계각이 2 DEG일 때 sagittal MTF의 특성을 살펴보면, 정연속분포의 진폭변조를 하는 경우에 약 85 line/mm 까지의 공간주파수 영역에서 현저하게 MTF 값이 증진하는 것을 볼 수 있다. 특히 20 line/mm에서부터 50 line/mm에 이르는 공간주파수 영역에서는 월등하게 높은 MTF 값을 보여주고 있다. 부 연속분포로 진폭변조한 경우에는 전반적으로 진폭변조하지 않은 경우에 비해 MTF 값이 저조하며 bump의 위치도 변조하지 않은 경우와 비교할 때 약 20 line/mm

의 공간주파수가 저주파 쪽으로 이동하여 발생하였다. 그림 6(b)는 시계각이 2 DEG일 때 tangential MTF의 특성을 보여주고 있다. 전체적으로 보아서는 정 연속분포로 진폭변조한 경우가 가장 좋은 MTF 특성을 보여준다고 생각된다. 부 연속분포로 진폭변조한 경우는 약 20 line/mm 부근에서 가장 높은 MTF 값을 가지고 있으나 그 외에는 전반적으로 가장 저조한 MTF 특성을 보이고 있다.

IV. 결 론

비균일하게 진폭변조를 하는 경우 정 연속분포로 진폭변조를 실시하는 경우가 변조하지 않은 경우에 비해 축상에서는 낮은 MTF 값을 가지므로 결상력이 낮아진다고 생각되지만 비축상에서는 시계각 1 DEG에서의 sagittal MTF를 제외하고는 변조하지 않은 경우에 비해 전반적으로 MTF 값이 증진되어 결상력이 좋아진다고 볼 수 있다. 부 연속분포로 진폭변조한 경우에는 전반적으로 변조하지 않은 경우에 비해 저조한 MTF 값을 가지며 결상력이 떨어지는 것을 알 수 있으나 특정한 영역에서 공간주파수 여과 효과와 더불어 MTF 값이 증진된 것을 발견하였다. 비축상에서는 다른 경우에 비해 bump가 뚜렷하게 나타나고 있어서 공간주파수 여과 특성을 잘 보여주는 것을 알 수 있다. 광학계의 사용 목적에 따라서 정 연속분포의 진폭변조를 실시하여 비축상 물체에 대한 결상력을 증진할 수 있다고 판단되며 특정한 공간주파수에 대한 공간주파수 여과특성을 살리려면 부 연속적인 분포의 진폭변조를 실시하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 박성종, 최기준, 박민경, 김재범, 심상현, 정창섭, 한국광학회지, 6, 101 (1995).
- [2] 박성종, 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] Osamu Nakamura and Kouji Toyoda, Appl. Opt., 30, 3242 (1991).
- [11] Maria J. Yzuel, Juan C. Escalera and Juan Campos, Appl. Opt., 29, 1631 (1990).
- [12] Jorge Ojeda-Castantda, Pedro Andres and Manuel Martintz-Corral, Appl. Opt., 29, 1299 (1990).
- [13] Christopher A. Haniff and David F. Buscher, JOSA A, 9, 203 (1992).
- [14] Christopher A. Haniff and David F. Buscher, JOSA A, 10, 1882 (1993).
- [15] Robert. M. Lewitt, JOSA A, 7, 1834 (1990).
- [16] Haibin Chung, Kyung Hee Hong and Sang Soo Lee, Appl. Opt., 22, 1812 (1983).

- [17] Kyung Hee Hong and Jong Ung Lee, *Appl. Opt.*, **26**, 4425 (1987).
[18] Kyung Hee Hong and Seung Yu Rah, *JKPS*, **22**, 108 (1989).
[19] 홍경희, *한국광학회지*, **9**, 59 (1998).
[20] 홍경희, *한국광학회지*, **9**, 277 (1998).
[21] Edmund Scientific Company, 1996 *Optics & Optical Components Catalog*, p. 62, 1996.

Inhomogeneous amplitude modulation effects on the MTF of binocular objective

Kyung Hee Hong

Dept. of Physics, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

(Received January 19, 1999, Revised manuscript received March 29, 1999)

In this study, inhomogeneous amplitude modulation effects on the imaging performance a lens system are experimentally investigated by measuring the diffraction OTF. The lens under the test is a binocular objective made in Korea. Inhomogeneous amplitude modulation is carried out by positioning the modulator cross contacted to the lens under test which is illuminated by collimated light beam. The aberration characteristics of the lens under test are examined by calculating the ray-fan through finite ray tracing. The MTFs of the lens illuminated by the homogeneous and inhomogeneous light beam are measured on the Gaussian image plane and compared with one another.