

일차원적 비균일 개구변조시 광학계의 최적상면 MTF에 미치는 영향

홍경희

육군사관학교, 물리학과

(1998년 7월 9일 받음, 1998년 9월 5일 수정본 받음)

일차원적 비균일 진폭변조가 광학계의 최적 상평면 상에서의 MTF에 미치는 영향을 연구하였다. 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 위치함으로써 이루어진다. 진폭변조판은 계단식으로 투과도가 다른 것과 연속적으로 투과도가 변하는 것으로서 미국 Edmund사 제품을 사용하였다. 진폭변조하였을 때에 각각의 경우 60 line/mm의 공간주파수에서 최대 MTF 값을 가지는 상평면을 best of focus로 결정하였다. 진폭변조의 경우와 변조하지 않은 경우에 대하여 MTF를 측정해서 그 값을 서로 비교하였다. Gaussian 상평면 상에서 MTF를 측정하였을 때와는 상이한 결과가 나타났다. 축상에서는 변조할 경우에 MTF 값이 변조하지 않은 경우에 비해 고주파로 갈수록 증진되는 효과가 나타났으며 축외에서는 시계각 1°에서는 다양한 결과가 나타나서 현저하게 증진되는 경우가 있는가 하면 오히려 감소하는 경우도 있다. 시계각 2°에서는 변조할 경우에 MTF 값이 변조하지 않은 경우 보다 대체로 감소하여 역효과가 나타났고 고주파 부분에서 다소 증가하는 경우가 있으나 그 값 자체가 매우 작으므로 실용적인 가치가 적게 나타났다.

I. 서 론

균일한 조명하에서 Fraunhofer회절에 의한 광학렌즈계의 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 compact 하면서도 높은 성능을 얻을 수 있는 가능성을 탐색할 수가 있다. 또한 laser disk나 pick-up등 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.^[5-7] 이상수는 이론적으로 개구상 진폭변조에 의해 광결상계의 초분해능을 얻을 수 있다고 발표하였다.^[8]

일본에서는 Osamu Nakamura등이 annular pupil을 가진 광학계에 대하여 연구하였고,^[9] 스페인에서는 Yzuel 팀이 axial apodization에 의해 분해능을 높이는 연구를^[10] Ojeda-Castaneda 팀이 Zone Plate 방식으로 분해능을 높이는 방법을 연구 발표하였다.^[11] 미국에서는 Christopher A.Haniff 팀이 적외선 광학계에 대하여 적용하여 보았고^[12,13] Robert M.Lewitt 팀등이 Bessel window를 이용하여 digital image representing의 향상을 모색하는 연구를 발표하였다.^[14]

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

치는 영향을 조사 연구하여 발표한 바가 있다.^[15-17] 또한 개구상 위상변조가 광학계 MTF에 미치는 영향에 대해서도 연구한 결과를 발표한 바 있다.^[18,19] 본 연구에서는 개구 상에서 일차원적으로 일정한 기울기를 가지는 선형적인 진폭분포로 변조되었을 때와 계단 형태의 진폭분포로 변조되었을 경우에 대해서 Gaussian 상평면 상에서의 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사 연구하여 발표하였으나^[20] 실제로는 각각의 최적 상평면 상에서 사용하게 된다고 고려되어 본 연구에서는 각각의 최적 상평면 상에서의 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사 연구하였다.

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 것

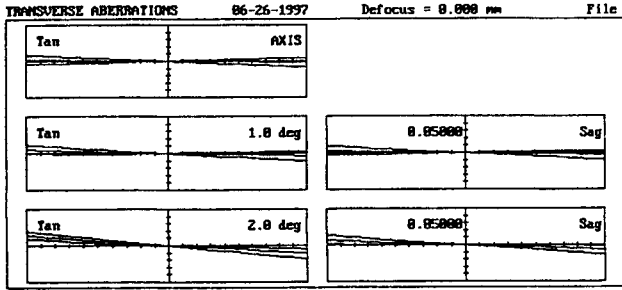


그림 1. 시험렌즈의 ray-fan.

으로 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 계산들은 영국의 Kidger가 만든 렌즈설계 프로그램 Sigma59를 이용하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 시계각이 0°일 때에는 0.015 mm 정도의 광선 수차를 보이고 있다. 시계각이 1°일 때에는 sagittal ray-fan과 tangential ray-fan이 거의 유사하여 약 0.025 mm 이내가 된다. 그러나 시계각이 2°일 때에는 sagittal ray-fan은 0.03 mm 이내가 되지만 tangential ray-fan은 0.04 mm 이내가 된다. spot diagram은 각 시계각에 대하여 defocussing effect까지 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.

2.2. 일차원적 비균일 진폭변조

진폭변조판을 제작하기 위해서는 광학유리가 기판이 되며 알루미늄이나 탄소를 박막으로 입혀 투과도를 조절함으로써 진폭변조판을 제작할 수 있다. 진공증착기 내에서 광학평면판을 기판으로 하여 진공증착을 실시하여 보았으나 결과가

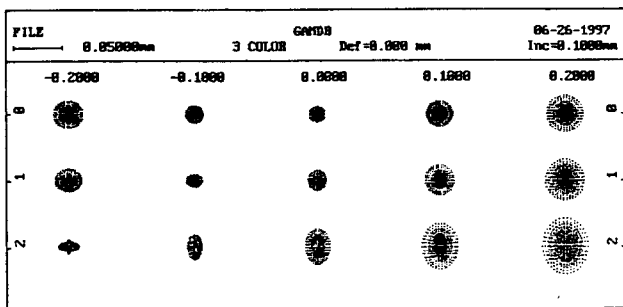


그림 2. 시험렌즈의 spot diagram.

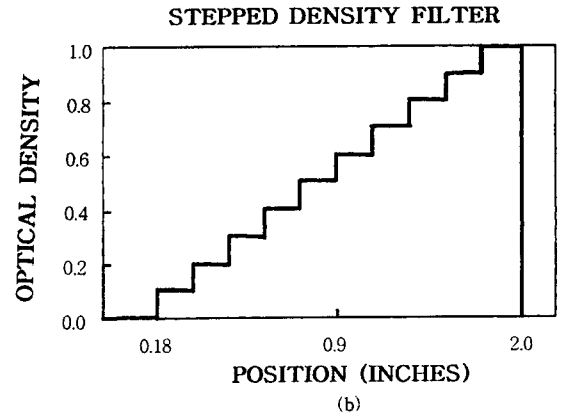
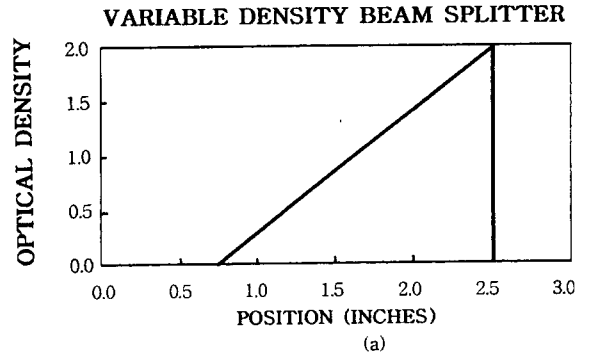


그림 3. 비균일 진폭변조판의 강도분포 (a) 선형 진폭변조, (b) 계단형 진폭변조.

좋지 못하여 미국 Edmund사에서 제작한 것을 구입하였다. 계단식으로 투과도가 다른 것과 연속적으로 일정한 기울기를 가지고 투과도가 변하는 것을 구입하였다. 이 것들은 모두 홀로그래픽 glass plate 필름을 감광시킨 것으로 일차원적인 진폭분포를 가지고 있다. 그림 3(a)는 연속적으로 진폭이 변하는 선형 진폭변조판 이고 그림 3(b)는 계단식 진폭변조판 이며 두 가지 모두 가시영역 400 nm부터 700 nm까지의 파장대에서 사용할 수 있도록 설계하여 제작한 것이다. 선형 진폭변조판은 크기가 가로 3인치, 세로 1인치, 두께 0.062인치 이고, 가로 0.75인치에서 2.75인치 사이에서 투과도가 96%부터 1.0%까지 일정한 기울기를 가지고 감소하도록 제작된 미국 Edmund사 카다로그 번호 C41,960이다. 계단식 진폭변조판은 크기가 가로 2인치, 세로 1인치, 두께 0.062인치 이고, 가로 0.18인치에서 2인치 사이에서 투과도가 100%부터 10%까지 계단식으로 감소하도록 제작된 미국 Edmund사 카다로그 번호 C32,599이다.^[21]

일차원적 진폭변조는 개구 상 조명이 한 쪽으로 치우치는 것과 같으므로 시계각의 변화를 가져오는 효과를 나타낸다고 볼 수가 있다. 따라서 수차특성에서는 개구 상의 진폭변조에 따라 수차에 기여하는 정도가 강도 변화에 비례하는 가중치의 변화를 주는 것으로 생각할 수가 있다.

III. MTF 특성 분석

진폭변조를 실시하지 않은 경우를 기준으로 시계각이 0°일

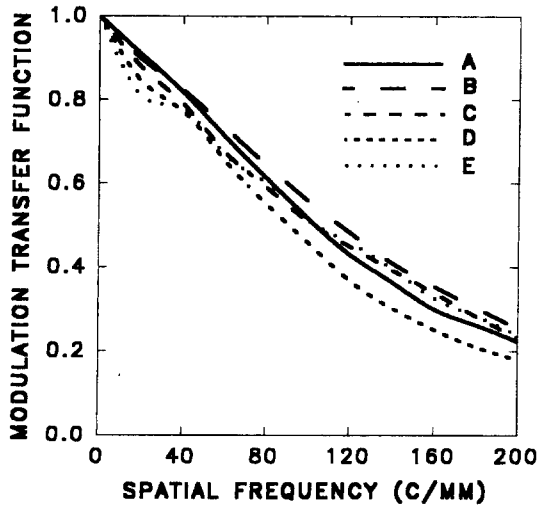


그림 4. 시계각 0°에서의 MTFs.

때 공간주파수 60 line/mm에서 최대 MTF 값을 가지는 위치를 best of focus로 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 line/mm까지로 정하였다. 그림 4에서부터 그림 6까지에서 실선은 진폭변조하지 않은 경우(A)이고 점선의 길이가 큰 순서로부터 계단식 진폭변조(B), 계단식 진폭변조를 좌우를 바꾼 역계단식 진폭변조(C), 선형식 진폭변조(E), 이를 좌우로 뒤바꾼 역선형 진폭변조(D)의 경우이다.

시계각 0°일 때에 진폭변조한 경우와 변조하지 않은 경우의 MTF 측정 결과는 그림 4와 같다. 약 20 line/mm까지는 진폭변조하지 않은 경우가 가장 높은 MTF 값을 보이고 있으나 그 이상에서는 계단식 진폭변조한 경우가 가장 높은 MTF 값을 보이고 있다. 역계단식 진폭변조의 경우에는 전반적으로 계단식 진폭변조를 실시한 경우보다 낮은 MTF 값을 가지며 진폭변조하지 않은 경우와 비교하면 약 100 line/mm까지는 낮은 값을 가지다가 그 이상의 고주파에서는 더 높은 MTF 값을 보이고 있다. 선형진폭변조시에는 80 line/mm까지는 진폭변조하지 않은 경우보다 낮은 MTF 값을 가지다가 그 이상의 주파수 영역에서는 더 높은 MTF 값을 보여 주고 있다. 역선형진폭변조를 실시한 경우에는 전 주파수 영역에서 진폭변조하지 않은 경우보다 낮은 MTF 값을 나타내고 있다. 시계각

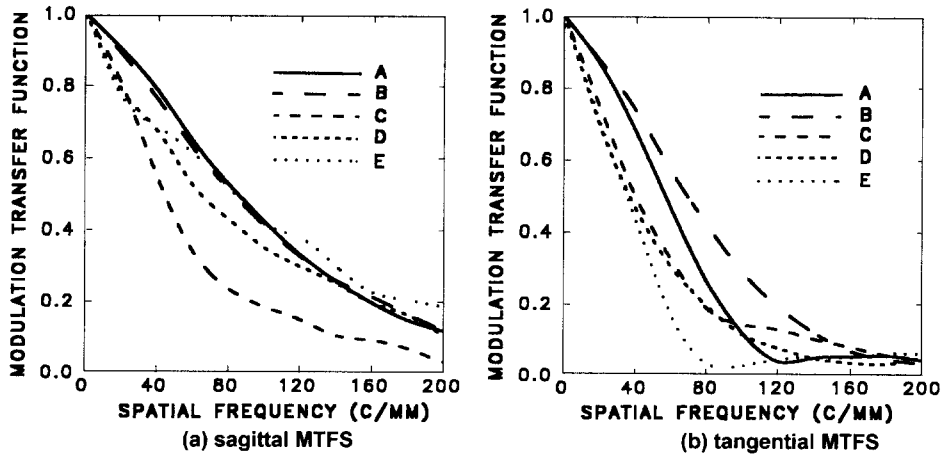


그림 5. 시계각 1°에서의 MTFs ($\beta=1^\circ$).

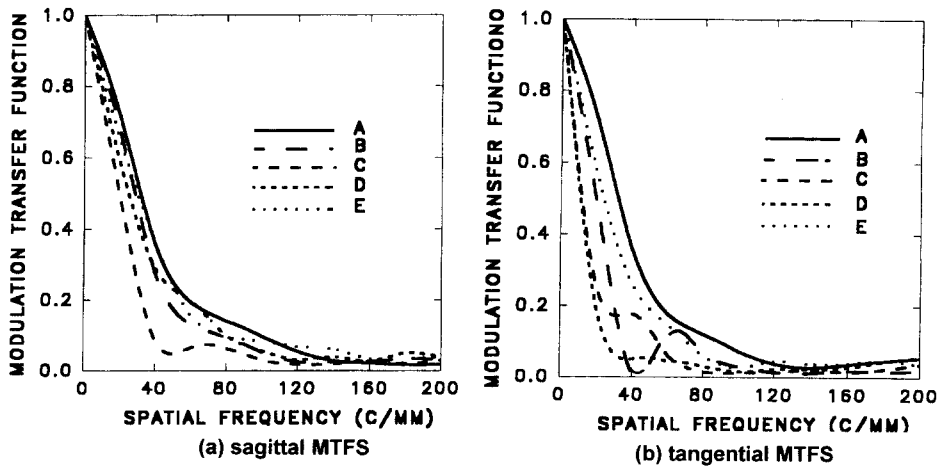


그림 6. 시계각 2°에서의 MTFs ($\beta=2^\circ$).

0°일 때에는 전반적으로보아 계단식 진폭변조를 실시하는 경우에 MTF가 증진하는 것으로 볼수가 있다.

시계각 1°에 대한 MTF 특성은 그림 5에 제시한 바와 같다. 그림 5(a)의 sagittal field의 MTFs를 비교하여 보면 계단식 진폭변조시에는 약 120 line/mm까지는 진폭변조하지 않은 경우보다 약간 낮은 MTF 값을 가지나 그 이상의 고주파 영역에서는 약간 높은 MTF 값을 보여주고 있고, 역계단식 진폭변조를 실시한 경우에는 전체 공간주파수 영역에서 매우 낮은 MTF 값을 나타내고 있다. 선형진폭변조를 실시한 경우에는 약 90 line/mm의 주파수 이하에서는 더 낮은 MTF 값을 가지고 그 이상에서는 더 높은 MTF 값을 가진다. 저주파로 갈수록 더 낮고 고주파로 갈수록 더 높은 값을 가지는 현상이 나타났다. 그러나 역선형 진폭변조를 실시한 경우에는 160 line/mm 까지의 주파수 영역에서 낮은 MTF 값을 보여주고 있고 그 이상에서는 약간 높아지고 있을 뿐이다. 그림 5(b)에는 tangential field의 MTFs를 보여 주고 있다. 계단식 진폭 변조를 실시한 경우에는 거의 전 주파수 영역에서 MTF 증진효과가 나타났지만 선형진폭변조를 실시한 경우에는 그와 반대로 진폭변조하지 않은 경우에 비해 120 line/mm 까지는 매우 낮은 MTF 값을 보여준다가 그 이상에서는 거의 비슷한 MTF 값을 보여주고 있을 뿐이다. 역계단식 진폭변조를 실시한 경우에는 약 90 line/mm까지는 낮아지고 그 이상에서는 높고 안정된 값을 보여주고 있다. 그러나 역선형 진폭변조를 실시한 경우에는 약 100 line/mm까지 낮은 MTF 값을 보여주고 있으며 그 이상의 영역에서는 서서히 감소하여 변조하지 않은 경우보다 부분적으로는 다소 높고 부분적으로는 다소 낮은 값을 보여주고 있다. 시계각 1°에서는 전반적으로 보아 계단식 진폭변조하는 경우가 MTF의 증진효과가 있다고 볼수가 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 6(A)에서 보는 바와 같이 sagittal field의 MTF 특성은 역계단식 진폭변조를 실시한 경우가 전 공간주파수 영역에서 가장 낮은 MTF 값을 보여 주고 있으며 고주파 공간주파수 영역의 일부를 제외하고는 대체로 진폭변조를 실시하지 않은 경우에 비해 낮은 MTF 값을 나타내고 있다. 고주파 영역에서도 전체적으로 낮은 값을 가져서 주목할 만한 MTF 증진효과로는 판단되지 않는다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 tangential field의 MTF 특성에서도 마찬가지로, 진폭변조하지 않은 경우에 비해 모든 진폭변조를 실시한 경우에 거의 모든 공간주파수 영역에서 낮은 MTF 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 결상력이 나빠진다고 볼 수 있다. 일부 고주파 영역에서 선형진폭변조를 실시한 경우에 매우 미약한 증진 현상이 나타나지만 고주파 영역에서의 MTF 값이 모두가 매우 낮아서 결상력에 별로 기여하지 못하며 전반적으로 보아 실용적인 측면에서 볼 때 일차원적 진폭변조를 하는 것이 MTF 값을 감소시키므로 결상력의 역효과를 나타낸다고 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구를 통하여 일차원적 비균일 진폭변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 축상 물체의 경우에는 일차원적 진폭변조를 실시할 때에 고주파 영역으로 갈수록 MTF 값이 증진되는 것을 볼 수 있었다. 비축상의 물체에 대하여 시계각이 1°일 때에는 sagittal MTF 값은 역선형진폭변조시에 고주파 영역에서 MTF 값의 증진을 보여 주는 것을 제외하고는 이렇다할 효과를 발견할 수 없었고 tangential MTF 값은 계단식 진폭변조를 실시한 경우에 MTF 값이 현저하게 증가하였으며 역계단식 진폭변조의 경우도 120 line/mm 부근에서 tangential MTF 값의 증진이 눈에 띠 만큼 나타났다. 그러나 시계각이 2°에서는 선형 및 역선형 진폭변조시에 고주파 부분에서 미약한 MTF 값의 증진효과가 나타나기는 하였지만 대체로 낮은 MTF 값을 가지고 있어서 실용적인 결상력 증진에는 효과를 미치지 못한다. 따라서 넓은 시계각에 대해서는 결상력의 증진에 도움을 주지 못한다고 볼 수가 있다. 실용적인 면에서 고찰하여 볼 때 일차원적 진폭변조는 시계각이 작을 경우에는 MTF 값의 증진효과를 얻을 수가 있어서 광학계 결상력의 성능증진을 기대할 수가 있으나 시계각이 큰 경우에는 오히려 MTF 값이 감소하여 결상력의 성능 증진에 역효과가 나타나기 때문에 시계각의 제한을 받는다.

감사의 글

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

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, 오병완, 정창섭, 한국광학회지, **3**, 143 (1992).
- [7] 한순희, 정창섭, 임기진, 심상현, 김현정, 이종진, 홍경희, 새물리, **32**, 312 (1992).
- [8] 조영민, 김종태, 이상수, 한국광학회지, **5**, 349 (1994).
- [9] Osamu Nakamura and Kouji Toyoda, Appl. Opt., **30**, 3242 (1991).
- [10] Maria J. Yzuel, Juan C. Escalera and Juan Campos, Appl. Opt., **29**, 1631 (1990).
- [11] Jorge Ojeda-Castaneda, Pedro Andres and Manuel Martintz-Corral, Appl. Opt., **29**, 1299 (1990).
- [12] Christopher A. Haniff and David F. Buscher, JOSA A, **9**, 203 (1992).
- [13] Christopher A. Haniff and David F. Buscher, JOSA A, **10**, 1882 (1993).
- [14] Robert.M.Lewitt, JOSA A, **7**, 1834 (1990).
- [15] Haibin Chung, Kyung Hee Hong and Sang Soo Lee,

- Appl. Opt., **22**, 1812(1983).
[16] Kyung Hee Hong and Jong Ung Lee, Appl. Opt., **26**, 4425(1987).
[17] Kyung Hee Hong and Seung Yu Rah, JKPS, **22**, 108(1989).
[18] 홍경희, 한국광학회지, **4**, 22 (1993).
[19] Kyung Hee Hong, JKPS, **28**, 746 (1995).
[20] 홍경희, 한국광학회지, **9**, 59 (1998).
[21] Edmund Scientific Company, 1996 Optics & Optical Components Catalog, p62, 1996.

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

Kyung Hee Hong

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

(Received July 9 1998, Revised manuscript received September 5, 1998)

One dimensional inhomogeneous aperture modulation effects on the MTF of optical system was investigated. The lens under test was a doublet made in Korea. It has 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 under test. 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 each modulated aperture where the MTF has the highest value for 60 line/mm and were compared with one another. For on-axis, the MTFs of some modulated apertures had higher values than the MTF of unmodulated aperture in the high frequency region. In the case of off-axis, at the field of view 1°, the MTF values of some modulated aperture are improved prominently and some other one are disimproved. At the field of view 2° most of the MTFs of modulated apertures had lower values than the MTF of unmodulated aperture except the MTFs of linear and inverse linear type aperture in the high frequency area. But the values of MTFs in high frequency region were too low for actual use.