

일차원적 비균일 위상변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향

홍경희

육군사관학교 물리학과

(1998년 11월 9일 받음 1999년 1월 27일 수정본 받음)

일차원적 비균일 위상변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향을 연구하였다. 시험평가 렌즈는 국산 유효경 37.5 mm, 초점 거리 128.04 mm인 이중렌즈를 택하였다. 시험렌즈의 수차특성은 축상과 시계각 1°와 2°인 비축에 대해 각각 ray-fan과 파면수차를 계산하여 그림으로 도시하였다. 위상변조는 시험렌즈 앞에 근접하여 위상변조판을 위치함으로 이루어 진다. 위상변조판은 계단식으로 하나의 계단이 $\lambda/2$ 씩 위상 차이가 되도록 제작하였고 선형 위상변조판은 연속적으로 위상이 변하도록 제작하였다. 위상변조를 실시한 경우와 변조하지 않은 경우에 각각 축상과 시계각 1° 및 2°인 비축에 대해 MTF를 측정해서 그 값을 서로 비교하였다. 대체로 계단식으로 위상변조한 경우에는 전반적으로 MTF의 증진현상을 나타내었으며 선형으로 위상변조한 경우에 축상에서는 감소하고 축외에서는 tangential MTF의 증진효과가 크게 나타났다.

I. 서 론

균일한 조명하에서 회절에 의한 광학렌즈계의 결상능력을 향상시키는 데는 한계가 있다. 우리가 관심이 있는 공간주파수 영역에서 이러한 한계를 넘어 결상능력의 극대화를 이룩하려면 개구상의 변조가 필요하다. 일차원적 비균일 위상변조가 광학계의 MTF에 미치는 영향을 조사 연구함으로써 광응용기기에서 실용적인 공간주파수 영역에서의 광에너지 손실 없이 높은 결상성능을 얻을 수 있는지 가능성 여부를 알아보고자 한다.

본 연구와 관련하여 일차원적 비균일 개구변조가 광학계 MTF에 미치는 영향^[1]과 일차원적 비균일 개구변조가 광학계의 최적상면 MTF에 미치는 영향^[2]에 대하여 연구한 바를 발표한 바 있다. 앞에서 연구한 것은 개구 상에서 일차원적인 진폭변조를 실시하였을 경우에 대해 조사 연구하였으며 진폭변조는 입사광의 에너지를 차단하기 때문에 시야각에 변화를 주는 결과가 되기도 하며 광에너지의 손실이 많아서 결상계의 성능에 좋지 못한 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 이러한 단점을 보완하여 광에너지의 손실 없이 위상지연만 가하므로 결상계의 성능향상을 달성할 수 있는지를 조사 연구하였다.

개구 상에서 annular형태로 위상변조를 실시한 경우 무수차계의 광학계 MTF에 미치는 영향에 대해서 연구한 결과 진폭변조와 차이는 있지만 공간주파수 여과효과와 수차보정효과를 발견하였다.^[3,4] Seidel 3차 수차를 갖는 광학계 MTF에 미치는 영향을 연구하여 발표한 바도 있고^[5] 실제 수차가 큰 국산 쌍안경 대물경에 대해서도 개구 상에서 annular형태로 위상변조를 실시한 경우 광학계 MTF에 미치는 영향에 대해서 연구한 결과 공간주파수 여과효과는 크게 나타나지 않았지만 수차보정 효과는 잘 나타났다.^[6-8] annular형태의 위상변조판을 제작하는 데에는 다소 어려움이 있어서 보다 간편한 일차

원적 위상변조를 실시할 때 광학계 MTF에 미치는 영향을 연구하게 되었다.

II. 시험렌즈 및 진폭변조

일차원적 비균일 위상변조가 광학계 MTF에 미치는 영향을 조사하기 위해서 앞에 연구한 방법과 동일하게 주사형 OTF 측정장치를 이용하였다. 일차원적 위상변조를 위해서 위상변조판을 제작하여 사용하였다. 평가하려는 렌즈 앞에 거의 접촉할 만큼 밀접하여 일차원적 위상변조판을 위치 시켜서 MTF를 측정하였고, 변조하지 않은 경우의 MTF와 위상변조를 실시하였을 때의 MTF를 비교함으로써 위상변조의 영향을 조사하였다.

2.1. 시험렌즈의 수차특성

시험평가 하려는 렌즈로는 국산 렌즈로서 진폭변조판의 크기에 맞추어 직경 37.5 mm, 초점거리 128.04 mm인 접합된 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 계산할 때 가시영역의 Fraunhofer C, d, 및 F line에 대하여 계산하였기 때문이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 시계각이 0°일 때에는 0.05 mm 정도의 광선수차를 보이고 있다. 시계각이 1°일 때에는 sagittal ray-fan과 tangential ray-fan이 거의 유사하여 약 0.04 mm 이내가 된다. 그러나 시계각이 2°일 때에는 sagittal ray-

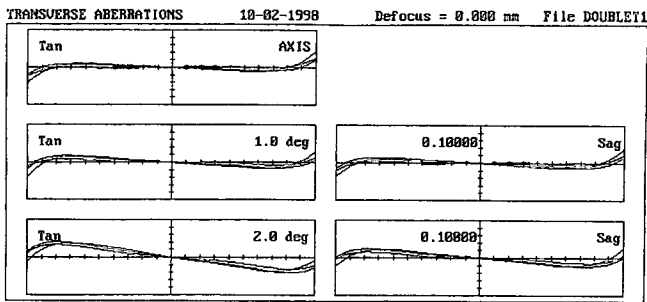


그림 1. 시험렌즈의 ray-fan.

fan은 0.05 mm 이내가 되지만 tangential ray-fan은 0.08 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 0.08 mm 미만이었다. 축상 물체에 대하여는 시계각 0°일 때이며 Gaussian 초평면 상에서 가장 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 위상변조판 제작

위상변조판은 광학유리 BK-7을 기판으로 하였다. 직경 38.15 mm이며 두께는 5.0 mm의 광학평면을 제작하였으며 평면도는 546.1 nm의 파장을 기준으로 $\lambda/4$ 이내가 되도록 연마하였다. 계단식 위상변조판은 광학 평행평면판 위에 한 쪽은 5.0 mm간격으로 $\lambda/2$ 의 위상지연 차이가 되도록 계단식으로 유전체 박막을 입혔으며 반대 쪽은 무반사 박막을 입혔다. 유전체로서는 MgF_2 를 사용하였다. 선형 위상변조판은 선형으로 박막두께를 조절하기 어려워서 광학 평면에서 한쪽은 0.012° ($7.2''$)의 기울기를 가지도록 매우 약한 wedge를 제작하였다. 그리하여 양면에 무반사 박막을 입혀서 광학 유리의 두께 차이에 의하여 선형적으로 위상 차이가 발생하도록 제작하였다. 계단식 위상판을 광축을 회전축으로 하여 180° 회전한 것을 역계단식 위상변조라 하고 선형 변조판을 광축을 회전축으로 하여 180° 회전한 것을 역선형 위상변조라 한다.

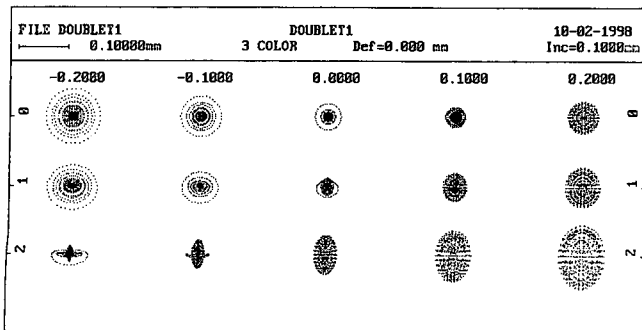
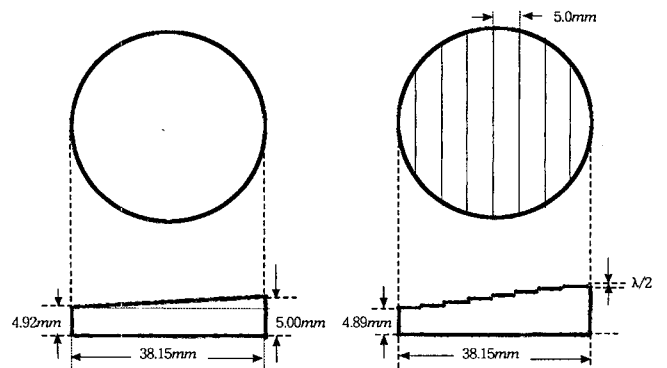


그림 2. 시험렌즈의 spot diagram.



(a) 선형 위상변조판(wedge) (b) 계단형 위상 변조판
그림 3. 일차원적 비균일 위상변조판.

III. MTF 측정결과 및 분석

3.1. MTF 측정결과

MTF 측정 방법은 전에 발표한 바와 같이 주사형 OTF 측정 장치를 이용하였다.^[5] 위상변조를 실시하지 않은 경우를 기준으로 시계각이 0°일 때 Gaussian 상평면에서 MTF를 측정하였다. 계단식으로 위상 차이가 있는 계단식 위상변조의 경우와 일차원적으로 기울기가 일정하게 위상 차이가 있는 선형 위상변조의 경우 그리고 위상판을 좌우로 바꾸어 역계단식 위상변조 및 역선형 위상변조한 경우 그리고 위상변조하지 않은 경우에 대해 각각 시험렌즈의 MTF를 측정하여 그 값들을 서로 비교 분석하였다. 공간주파수 범위는 100 line/mm까지로 정하였다. 그림 4에서부터 그림 6까지에서 실선은 위상변조하지 않은 경우(A)이고 점선의 길이가 큰 순서로부터 계단식 위상변조(B), 계단식 위상변조의 좌우를 바꾼 역계단식 위상변조(C), 선형식 위상변조(D), 이 것의 좌우를 바꾼 역선형 위상변조(E)의 경우이다.

시계각 0°일 때의 위상변조한 경우와 변조하지 않은 경우

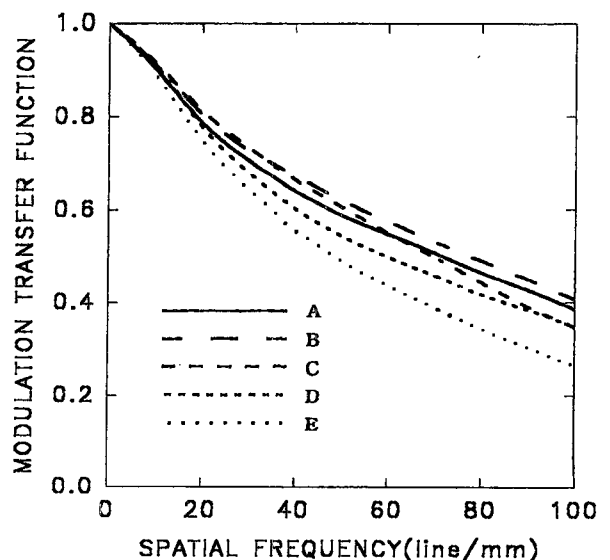


그림 4. 시계각 0°에서의 MTFs.

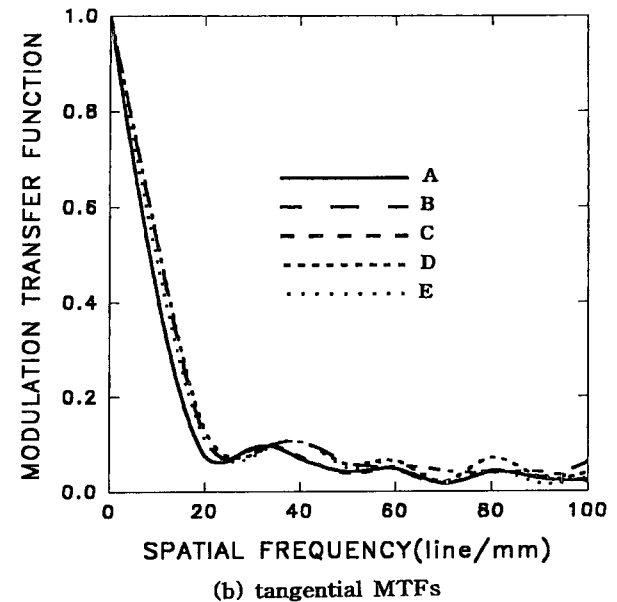
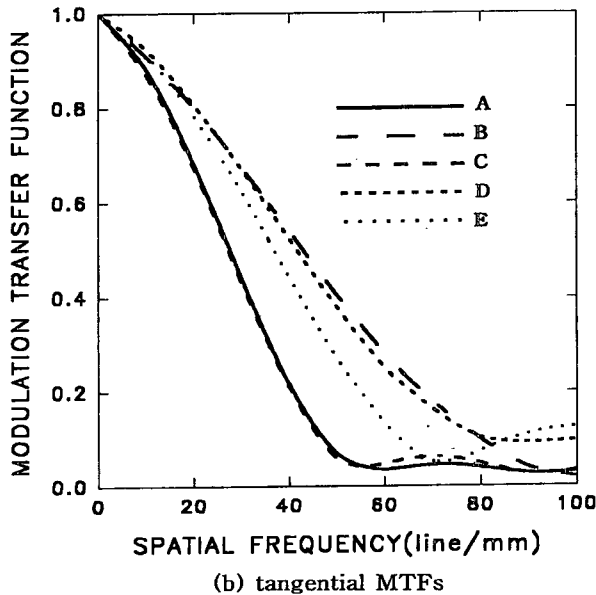
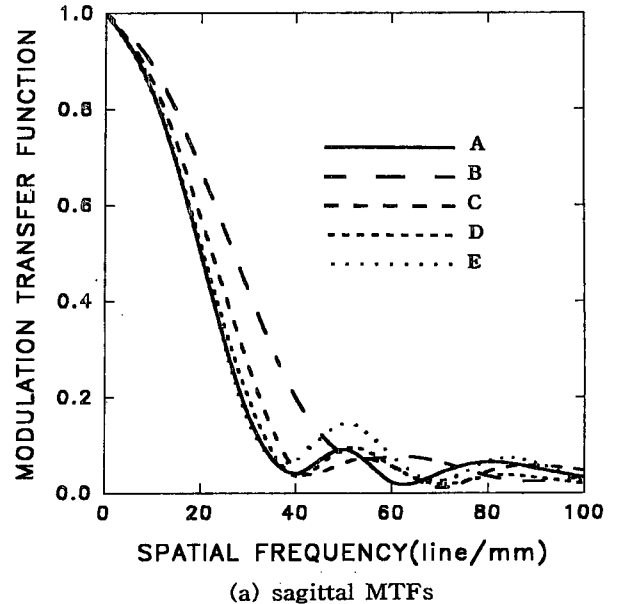
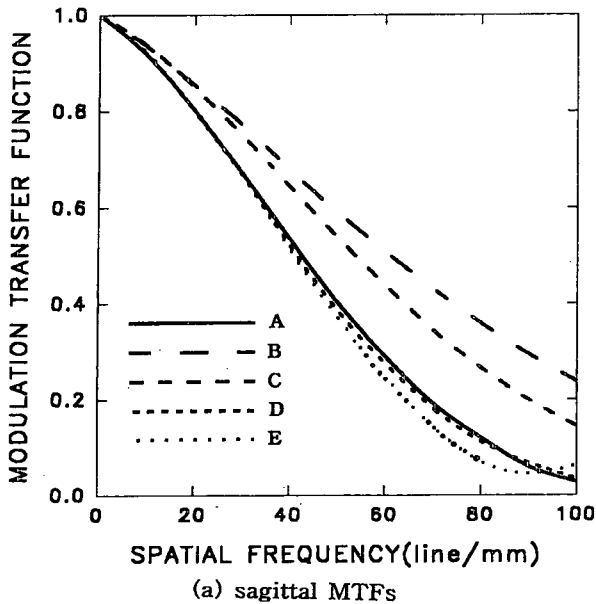


그림 5. 시계각 1°에서의 MTFs.

그림 6. 시계각 2°에서의 MTFs.

의 MTF 측정 결과는 그림 4와 같다. 시계각이 0°일 때는 sagittal MTF와 tangential MTF가 같으므로 tangential MTF만 측정하였다. 시계각이 1°일 때에 MTF 측정 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)에는 sagittal MTF들이 나타나 있고 그림 5(b)는 tangential MTF가 나타나 있다. 대체로 tangential MTF가 sagittal MTF보다 작은 값을 가지는 이유는 시험렌즈의 수차특성에서 tangential 수차가 sagittal 수차보다 더 크기 때문이다. 시계각이 2°일 때에 MTF 측정 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)에는 sagittal MTF들이 나타나 있고 그림 6(b)는 tangential MTF가 나타나 있다.

상변조를 실시한 경우에는 전체 공간주파수 영역에서 변조하지 않은 경우보다 높은 MTF 값을 보여 주고 있다. 역계단식 위상변조를 실시한 경우에는 저주파 영역에서는 더 높은 MTF 값을 나타내다가 60 line/mm를 전후하여 고주파수로 갈수록 낮아지는 것을 볼 수 있다. 선형 위상변조를 실시한 경우에는 전반적으로 위상변조하지 않은 경우보다 낮은 MTF 값을 나타내며 저주파에서는 별 차이가 없다가 고주파로 갈수록 점점 더 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 역선형 위상변조를 실시한 경우에는 선형 위상변조를 실시한 경우와 유사한 특성을 보이고 있으며 그 정도가 더 심하게 나타난다.

3.2. 결과 분석

그림 4에서 보는 바와 같이 축상 MTF 특성에서, 계단식 위

그림 5에서 보는 바와 같이 비축 MTF 특성에서도 시계각 1°에서는 sagittal MTF 특성과 tangential MTF 특성이 다르게 나타난다. 그림 5(a)에서 보면 sagittal MTF에서는 계단식 위

상변조를 실시한 경우가 가장 MTF 증진효과가 높게 나타났다. 변조하지 않은 경우에 비해 고주파로 갈수록 더욱 높은 MTF 값을 가지게 되어 MTF 증진효과가 크게 나타난다. 그 다음은 역계단식 위상변조를 실시한 경우가 계단식 위상변조를 실시한 경우 다음으로 계단식과 유사한 MTF 증진효과를 보여주고 있다. 선형 위상변조를 실시한 경우에는 위상변조하지 않은 경우에 비해 저주파 영역인 약 20 line/mm 이내에서 조금 높은 MTF 값을 가지며 그 이후로는 감소하여 더 낮은 값을 가지다가 약 85 line/mm 이후부터 약간 높은 값을 가지고 있다. 역선형 위상변조를 실시한 경우에는 약 95 line/mm까지 낮은 MTF 값을 가지다가 그 이후에는 변조하지 않은 경우보다 더 높은 값을 가지고 있다. 그림 5(b)에서 보면 역계단식 위상변조를 제외하고는 전반적으로 현저한 MTF 증진현상을 볼 수 있다. 계단식 위상변조의 경우에는 약 95 line/mm의 공간주파수 영역까지는 변조하지 않은 경우에 비해 현저한 MTF 증진을 볼 수 있으며 그 이후로는 오히려 약간 낮아지고 있다. 역계단식 위상변조의 경우에는 약 55 line/mm부터 85 line/mm까지의 공간주파수 영역에서 약간 높은 MTF 값을 가지며 그 외에는 약간 낮은 값을 가지는 것이 기대 밖으로 나타났다. 선형 위상변조와 역선형 변조의 경우에는 전반적으로 높은 MTF 값을 보여주고 있으며 특히 고주파로 갈수록 다른 위상변조의 경우보다 훨씬 높은 MTF 증진 효과가 나타났다. 역선형 위상변조시에는 약 70 line/mm 부근에서 MTF 값이 낮아진 것이 특징이라 하겠다.

그림 6에서 보는 바와 같이 시계각 2°에서도 sagittal MTF 특성과 tangential MTF 특성이 약간 다르게 나타난다. 그림 6(a)에서 보면 sagittal MTF에서는 계단식 위상변조를 실시한 경우가 저주파 영역에서 가장 MTF 증진효과가 높게 나타났으며 그다음은 역계단식 위상변조, 선형 위상변조 순으로 MTF 증진효과가 나타나고 있다. 고주파 영역에서는 높고 낮은 값들이 서로 엇갈린다. 역계단식, 선형 그리고 역선형 순으로 bump의 위치가 고주파 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그러나 역선형 위상변조의 경우에는 낮은 공간주파수 영역에서는 다소 위상변조하지 않은 경우보다 낮은 MTF 값을 보이지만 약 35 line/mm부터 65 line/mm 사이에는 현저하게 높은 bump를 나타내어 특정한 공간주파수 영역에서의 결상증진

효과를 눈에 띄게 보여 주고 있다. 그림 6(b)에서 보면 전반적으로 위상변조한 경우가 변조하지 않은 경우보다 높은 MTF 값을 보여 주고 있으며 첫 번째 골짜기의 위치도 고주파 쪽으로 이동하였으며 첫 번째 bump의 위치도 고주파 쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다. 고주파 영역에서도 더 높은 극 값을 보여 주고 있어서 전반적으로 MTF 증진효과를 나타내고 있다.

IV. 결 론

일차원적인 비균일 위상변조는 비교적 용이한 방법으로 이루어지면서도 실제적인 광학계의 MTF에 많은 증진을 보여 주고 있다. 특히 계단식 위상변조의 경우에는 모든 시야에서 거의 모든 공간주파수 범위에서 현저한 MTF 증진 효과를 나타내었다. 선형 위상변조의 경우는 약간의 wedge를 이루고 있어서 광속을 약하게 편향시키는 효과가 있기 때문에 축상에서는 역효과를 나타낸 것으로 판단되며 축외에 tangential MTF 에는 상당한 증진 효과가 나타났다. 본 연구를 통하여 일차원적으로 계단식 위상변조를 실시하면 매우 유의한 결상 증진 효과를 얻을 수 있다는 사실이 입증되었다.

감사의 글

본 논문은 육군사관학교 부설 화랑대 연구소 1998년도 국고연구비 지원을 받았음.

참고문헌

- [1] 홍경희, 한국광학회지, 9, 59 (1998).
- [2] 홍경희, 한국광학회지, 9, 277 (1998).
- [3] 홍경희, 정창섭, 한순희, 새물리, 30, 646 (1990).
- [4] 홍경희, 오병완, 정창섭, 육사논문집, 41, 313-321 (1991).
- [5] 홍경희, 오병완, 정창섭, 한국광학회지, 3, 143 (1992).
- [6] 한순희, 정창섭, 임기건, 심상현, 김현정, 이종진, 홍경희, 새물리, 32, 312(1992).
- [7] 홍경희, 오병완, 육사논문집, 44, 363-379 (1993).
- [8] Kyung Hee Hong, JKPS, 28, 746 (1995)

One dimensional inhomogeneous phase modulation effects on the MTF of an optical system

Kyung Hee Hong

Korea Military Academy, Dept. of Physics

(Received November 9, 1998, Revised manuscript received January 27, 1999)

One dimensional inhomogeneous phase modulation effects on the MTF of optical system was investigated. The lens under test was a doublet made in Korea. It was 36 mm effective diameter, 128.04 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°). Phase modulation was carried out by positioning a phase modulator close contacted with the lens under test. One was linear type that had linearly increasing phase retardation and the other was stepped type which had phase difference π for each step. The MTFs were measured on the Gaussian image plane and were compared with one another. The MTFs of linear type phase modulated apertures had a little lower values than the MTF of unmodulated aperture for on-axis but most of all the MTFs of one dimensional phase modulated aperture are improved than the MTF of unmodulated aperture.