

위상변조가 회전대칭적 수차를 갖는 쌍안경 결상력에 미치는 효과

홍경희 · 오병완 · 정창섭*

육군사관학교, *전남대학교

(1992년 5월 18일 받음)

개구상에서 위상변조를 실시하였을 때에 line spread function과 MTF에 미치는 효과를 실험적 측정에 의한 고찰을 실시하였다. 국산 쌍안경 대물렌즈를 시험렌즈로 하였다. 위상변조를 위한 위상판을 제작하고 렌즈앞에 밀착하여 MTF를 측정하였다. 위상변조는 개구상에서 일정한 범위를 π 만큼 지연시켰다. 실험결과 수차가 큰 쌍안경 대물경계에 위상변조 효과는 공간주파수 여과특성은 매우 약하고 수차보정효과가 크게 나타났다. 결과적으로 적절하게 위상변조를 실시하면, 광에너지 손실이 거의 없이 광학계의 결상능력을 향상시킬 수가 있음을 확증하였다.

I. 서 론

광학계의 결상능력을 향상시키기 위해 각 분야에서 수많은 연구가 수행되어 오고 있는데 이들 중 개구 변조가 OTF에 미치는 영향은 O'Neil^[1]과 Steel 등에 의하여 수차가 없는 annular aperture에 대하여 이론적으로 연구된 바 있으며, Mino^[2] 등에 의해서는 shaded aperture에 대하여 연구된 바 있고, 국내에서도 과학기술원^[3]과 육군사관학교^[4,6]에서 이 중 annular aperture에 대하여 이론적으로 및 실험적으로 연구된 바가 있다. 그러나 이러한 연구들은 실제 광학기구를 통과하는 빛의 차단 때문에 많은 광에너지를 요하는 광학적 이용상의 어려움이 많다. 그런데 비해 위상변조는 이러한 제한에서 벗어나 어떠한 광학기구에도 응용할 수 있을 것으로 판단된다. 입사동(入射瞳)에서 개구상에 annular형으로 위상을 일정량만큼 지연(遲延)시켜 결상능력을 증진시키도록 시도하였다. 위상지연의 정도는 π 만큼이며 annular의 위치를 변화시켜 가며 결상계(結像系)의 LSF 및 MTF에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 주사방법에 의한 OTF측정

OTF측정 방법에는 간접계에 의한 측정과 주사방법이 있으며 주사방법에도 칼날이나 슬릿에 의해 상을 주사하는 간접 주사방법과 주기적인 격자를 이용하여 slit의

상을 주사하거나 격자의 상을 slit으로 주사하는 직접 주사방법이 있다. 간접 주사방법 중에서도 칼날에 의한 방법은 측정시간이 늦은 단점이 있으나 측정장치의 제작이 간편하고 MTF 및 PTF를 동시에 측정할 수 있으며 측정 정밀도가 높아서 세계적으로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 칼날주사방법으로 OTF를 측정하였다.

1. 실험장치

그림 1은 실험장치에 대한 schematic diagram을 나타내고 있다. 광원은 텅스텐 램프를 사용하였으며 단색광을 얻기 위해 546.1 nm의 파장을 선택적으로 투과시키는 간섭필터를 이용하였다. 물체는 좁은 slit을 이용하였고 OTF를 측정하고자 하는 렌즈로 결상하여 이를 일정한 속도로 진행하는 stepping motor에 의해 칼날로 주사한다. 칼날 뒤에는 현미경 대물경이 있어서 상평면을 지나 발산하는 광속을 집속시켜 광검출기로 보내준다. 칼날과 검출기 사이에는 flip mirror가 있어서 광신호를 검출하지

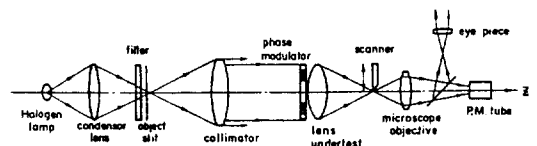


그림 1. Schematic diagram of the optical system for measuring the OTF.

않을 때에는 검출기로 들어가는 빛을 차단하여 보호할 수 있으며 선정렬시에는 상부에 있는 접안경과 더불어 현미경으로 사용할 수 있어서 정확한 상평면상에 칼날이 위치하는가를 확인할 수가 있다.

2. 실험방법 및 측정

실험에 사용된 물체로 매우 좁은 slit을 이용할 경우 상의 강도분포는 OTF를 측정하는 파장에 비해 매우 좁게 되어 1차원적인 선물체로 근사할 수 있게 된다. 칼날로 주사하여 얻은 함수 $E(x_i)$ 는 상의 강도분포함수의 적분이 된다.^[7,8] 이를 미분하면 단일슬릿상의 강도분포인 LSF를 얻을 수 있고 그 결과를 Fourier 변환하여 OTF를 구할 수 있다.^[9] 실제 실험에서는 주사하는 강도분포의 구간이 유한하여 연속적인 Fourier변환이 불가능하므로 표본을 결정해야 한다. 표본이론에 의하면 OTF값을 알고자 하는 공간주파수 간격을 Δf_i 라 할 때 필요한 주사구간이 $-x$ 로부터 $+x$ 까지라고 하면

$$|x| = 1/\Delta f_i \tag{1}$$

의 관계가 있다.^[10] 이 때 측정해야 하는 표본간격 Δx_i 는 측정되어지는 광학계의 분해한계 f_{max} 에 관계 된다. 즉,

$$\Delta x_i = 1/(2f_{max}) \tag{2}$$

이 때 주사구간은 주사함수의 변화가 거의 없는 정도까지 충분히 넓게 잡아야 한다.^[10] data처리 할 때 FFT의 사용시 편의를 고려하여 주사간격을 0.01 mm, 주사범위를 1.28 mm 또는 2.56 mm로 하였다. 렌즈의 표면반사나 mount에서의 반사 및 산란된 광은 상을 흐리게 만든다. 렌즈의 표면이 상하거나 연마가 거칠게 되어도 산란광이 상을 흐리게 하여 OTF값이 낮아진다. 대체로 이러한 back ground에 의한 noise는 칼날주사함수에서 선형적인 증가추세로 가정할 수 있고, 이를 미분한 line spread function $L(x)$ 에서는 일정한 값을 가진다고 판단한다. 그림 2는 칼날주사함수와 back ground에 의한 효과를 그림 3은 칼날주사함수를 일차미분한 LSF를 보여 준다. 그림 3에 나타난 바와 같이 LSF에서 최소가 0이 되려면 back ground에 기인한 효과를 제거해야 한다.^[11]

광검출기는 분광감응 특성을 고려하여 선택하여야 하며 광검출기에서 검출되는 전기신호를 컴퓨터에 입력하여 기억시키고 OTF측정 전산프로그램에 의해 data 처리를 한다. 위상판과 동일한 두께를 가지며 변조되지 않은 광학평면판을 위상판의 위치에 놓고 50 lps/mm에서 가장 MTF값이 높은 상평면을 best of focus로 결정하였다. 이와 같이 best of focus 상평면상에서, 뒤에서

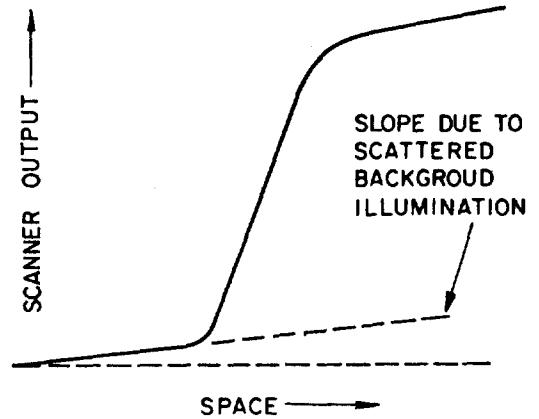


그림 2. Output of a knife edge scanner when scattered light is present.

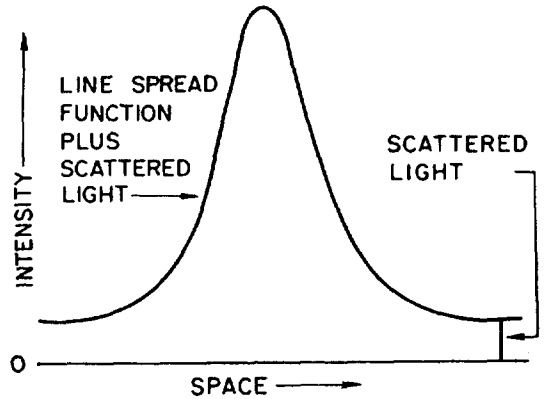


그림 3. Image of a slit light source in which the lens has introduced scattered light.

설명할 위상변조 형태의 위상판들을 교체해 가며 OTF를 측정하였다.

III. 위상변조

1. 위상변조 형태

본 연구에서 다루게 되는 위상변조는 위상차가 π 만큼 있는 경우에 $\tau(x,y)$ 가

$$\left. \begin{aligned} \tau(x,y) &= 1 & : r \leq r_2 \\ \tau(x,y) &= \exp[i\pi] & : r_2 \leq r \leq r_1 \\ \tau(x,y) &= 1 & : r_1 \leq r \leq 1 \\ \tau(x,y) &= 0 & : r > 1 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

단, $r^2 = x^2 + y^2$,

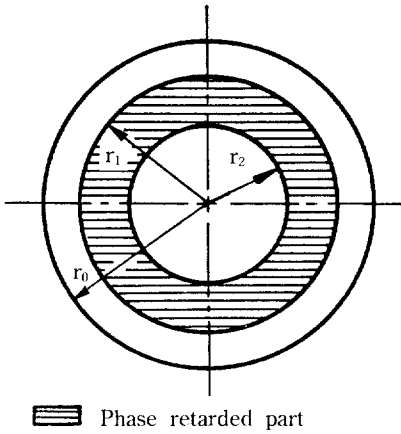


그림 4. 위상변조 aperture.

Table 1. Phase modulation types

	r_2	r_1	R_1
(A)	0	0	0
(B)	0.4	0.7	0.55
(C)	0.5	0.8	0.65
(D)	0.6	0.9	0.75

과 같이 주어지며, 이 경우를 PMA(phase modulated aperture)이라 부른다.

본 연구에서 고려한 위상변조 aperture의 형태를 그림 4에 보였다. 여기에서 위상변조된 부분의 내측 및 외측 반경을 식 (3)에서와 같이 각각 r_2, r_1 로 두 반경의 평균을 R_1 으로 표현하였다. 위상변조의 형태는 Table 1과 같다.

2. 실험측정을 위한 위상판의 제작

위상판의 모양은 Fig. 4와 같으며 r_1 및 r_2 를 다르게 함으로써 위상변조 범위를 다르게 하여 Table 1과 같은 형태로 제작하였다. 그림에서 빗금친 부분만 π 만큼 지연하도록 두면한 유전체로 박막을 입혔다. 유전체의 굴절률을 n 이라 하고 박막의 두께를 t 라 하면 위상지연 ϕ 는 $\phi = (n - 1)t \times 2\pi/\lambda = \pi$ 가 된다.

따라서 두께 $t = \lambda/2(n - 1)$ 로 되어야 한다. 위상판 제작시 substrate는 BK-7인 광학초자로서 직경이 52 mm이고 두께는 5 mm인 평면판이다. 유전물체는 Ti을 사용하였다. 540 nm에서 $\lambda/2$ 위상이 되도록 제작되었다. Table 1에서의 (A) 형태는 박막을 입히지 않은 광학평행판이며 (B), (C) 및 (D) 형태는 내열테이프를 마스크를 제작하여 광학평행판상에 집착시키고 박막을 입혔다.

Table 2. Actual diameter

D_1	D_2
34.8 mm	20.3 mm
39.7 mm	25.6 mm
44.5 mm	30.8 mm

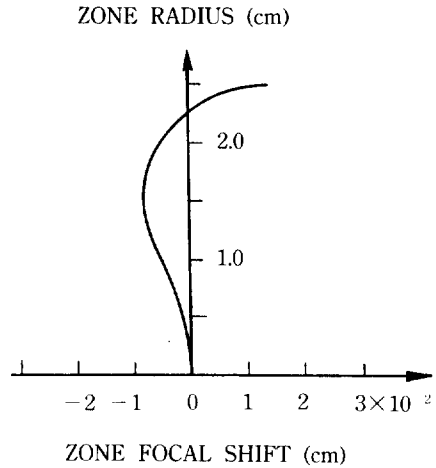


그림 5. Longitudinal spherical aberrations of the binocular objective lens.

Table 1에서는 위상판의 반경비율을 나타낸 것이므로 피검렌즈의 유효경이 50 mm를 감하여야 제작하고자 하는 위상판의 위상변조 부분의 외경 D_1 및 내경 D_2 가 된다. 그러나 마스크 제작시 크기의 오차와 내열테이프의 두께로 인한 edge 부분의 박막 두께의 층이 오차가 발생하였다. 실제로 제작한 위상판에 대하여 위상변조 부분의 외경 D_1 및 내경 D_2 를 측정된 결과 Table 2와 같다.

IV. 위상변조 효과

1. 시험렌즈의 수차특성

그림 5에는 위상변조 효과를 조사하고자 하는 시험렌즈인 국산 쌍안경 대물렌즈의 회전대칭적인 구면수차특성을 보여주고 있다. 시험렌즈의 초점거리는 19.2 cm이며 유효경은 5 cm이다. 여기서 나타내는 값은 종구면 광선 수차를 의미한다. 매우 전형적인 수차특성을 가지고 있다.

2. MTF측정에 의한 고찰

준비된 MTF측정 장비로 시험렌즈의 LSF값을 측정된

결과를 그림 6에 제시하였고 MTF값을 그림 7에 제시하였다. 그림 6에는 위상변조한 개구와 변조하지 않은 개구의 LSF값과 비교하여 제시하였다. 곡선 (A)는 변조하지 않은 개구의 LSF를 실선으로 나타내고 있다. 곡선 (B)는 이중으로 갈라져서 강도분포가 넓게 퍼진것을 볼 수 있고 곡선 (C)는 전반적으로 약간 넓게 퍼지고 있다. 곡선 (D)에서는 왼편은 약간 변조되지 않은 곡선위로 나타났지만 오른편에는 오히려 더 중앙에 밀집되어 좋은 특성을 보여주고 있다.

그림 7에는 위상변조한 개구와 변조되지 않은 개구의 MTF값을 비교하여 제시하였다. 곡선 (A)는 변조되지 않은 개구의 MTF를 실선으로 나타내고 있다. 곡선 (B)의 경우는 60 lps/mm까지는 (A) 보다 낮은 MTF값을 갖지만 그 이상의 고주파 영역에서는 높아지고 있다. 곡선 (C)는 약 15 lps/mm보다 낮은 주파수 영역에서는 (A)보다 높은 MTF값을 가지나 그 이상의 고주파수 영역에서는 더 낮은 MTF값을 가지며, 곡선 (D)의 경우에는 약 12 lps/mm부터 38 lps/mm까지의 중간영역에서는 더 낮은

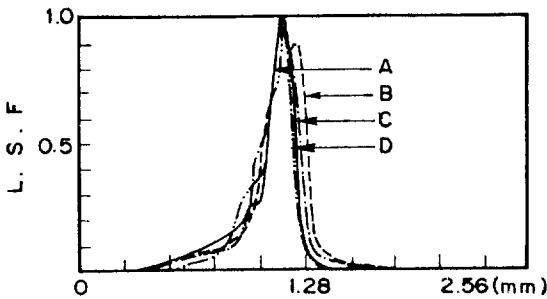


그림 6. Effects of phase modulation on the LSFs.

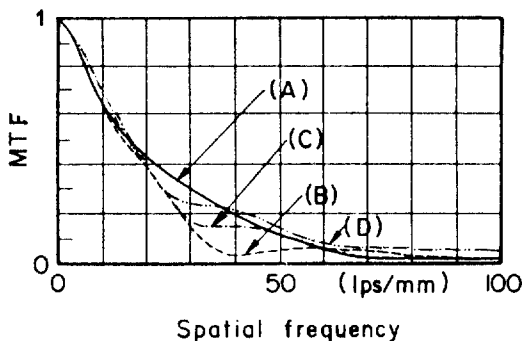


그림 7. Effects of phase modulation on the MTFs.

MTF값을 지나 그 외의 영역에서는 더 높은 MTF값을 가진다. MTF값이 증진한다는 것은 결상계의 해상력이 높아짐을 의미하므로 결상력이 증진한다고 설명할 수 있다. 따라서 본 연구결과 아래와 같이 결론지을 수 있다.

V. 결 론

개구상에서 위상을 π 만큼 위상을 지연시켰을 경우 개구상에서 진폭변조한 경우와 유사한 결과를 얻었다. 수차가 큰 광학계이므로 공간주파수여과효과는 그다지 나타나지 않고 수차보정효과(收差補正効果)만 크게 나타났다. 위상변조(位相變調)는 광에너지 손실이 없으므로 개구상에서 적절하게 위상지연을 가하는 위상변조를 실시함으로써 사용목적에 부합되는 공간주파수 영역에서 광학계의 결상력(結像力)이 극대가 되도록 할 수 있음이 본 연구를 통하여 입증(立證)되었다.

감사의 글

이 연구는 1990년 4월부터 1991년 6월까지 한국과학재단 지원으로 수행된 연구결과이며 이에 감사를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

- [1] E. L. O'Neil, J. Opt. Soc. Am. **46** (1956).
- [2] M. Mino and Y. Okano, Appl. Opt. **10** (1971).
- [3] 홍경희, 박사학위논문 (한국과학기술원, 1980).
- [4] K. H. Hong and J. U. Lee, Appl. Opt. **26** (1987).
- [5] 홍경희, 이중웅, 새물리, **27** (1987).
- [6] H. B. Chung, K. H. Hong and S. S. Lee, Appl. Opt. **22** (1983).
- [7] Leo Levi, *Applied Optics*, John Wiley and Sons, Inc., New York (1968).
- [8] Max Born and Emil Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, New York (1975).
- [9] K. R. Barnes, *The Optical Transfer Functions*, American Elsevier Publishing Company, Inc. New York (1971).
- [10] J. C. Darity and R. Shaw, *Image Science*, Academic Press, San Francisco, (1974).
- [11] E. Marchant and R. Phillips, Appl. Opt. **2**, 359 (1963).

Phase Modulation Effects on the Imaging Performance of the Binocular Objective Having Rotationally Symmetrical Aberrations

Kyung-Hee Hong, Byung-Owan Oh and Chang-Sup Chung*

Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

**Chun Nam University, Kwangju 500-070, Korea*

(Received: May 18, 1992)

Discussed in this paper are the effects of phase modulation on the line spread functions (LSF) and MTFs of a binocular objective system. The binocular objective lens is made in Korea. It has rotationally symmetric aberrations. The LSFs and MTFs are measured experimentally. The phase modulation is carried out by applying phase retardation π on the aperture. The area where the phase is not retarded presents a double annular type. The OTF curves of phase modulated aperture are compared with that of unmodulated aperture. The comparison shows that there is the aberration compensation effect in aberration loaded system. Therefore the performance of many optical system can be improved without any loss of light energy by properly modulating the phase on the aperture.