

적외선 광학계통 성능평가를 위한 간섭계 개발

홍경희 · 고재준 · 이성태 · 장세안* · 오명호*

육군사관학교 물리과, *수학과

(1991년 9월 18일 받음)

적외선 광원으로 CO₂ 레이저를 사용하였고 광속을 2.5 cm의 직경으로 확대하여 Twyman-Green 간섭계를 구성하였다. 각종 렌즈는 Ge렌즈로, 광속분리기는 ZnSe평행판으로 택하였다. pyro-electric vidicon camera에 의해 CRT monitor에 간섭무늬를 제시하며 image card에 의해 digitize되고 PC로 강도분포가 입력되어 data처리된다. 여기서, 적외선 간섭무늬는 thermal paper 상에 기록하였다. 가시영역에서는 He-Ne레이저를 광원으로 하고 CCD 카메라로 검출하여 CRT monitor에 제시하였다. 파면수차함수, PSF, OTF가 계산되어 3차원 그래프로 제시되며 프린트 된다.

I. 서 론

적외선 광학계를 개발하려면 성능을 검사하는 품질관리가 필수적이며 이를 위해서 필요불가결한 것이 적외선용 간섭계이다. 적외선 관측장비의 필요성은 군사광학장비 외에도 화재경보, 의학에서 암진단, 또는 도난방지용 각종 정보장치등의 수요가 있으며, 선진국에서도 많은 관심과 자본을 투자하여 연구 개발하고 있다. 이에 뒤 떨어지지 않도록 우리나라에서도 적외선 광학장비의 개발에 관심을 가지고 연구되어야 할 것이다.

간섭계의 구성은 Ge렌즈와 ZnSe로 된 beam splitter로 구성하여 Twyman-Green 간섭계로 사용된다. 검출기는 pyro-electric vidicon camera로, 간섭무늬를 포착하여 image card에 의해 data를 읽어 computer로 입력하여 수치해석하였다.

II. 적외선 간섭계 구성

1. 광계통의 구성

Oscillator에서부터 나오는 적외선 광속은 반사경에 의해 광학 table에 위치한 광학계통의 높이에 맞추어 조정하였고 초점거리 5 cm의 Ge렌즈에 의해 집속, 발산되어 초점거리 50 cm인 Ge렌즈에 의해 평행광속으로 확대한다. ZnSe광속분리기에 의해 서로 수직하게 광속이 분리되어 하나는 PZT mirror에 의해 반사되어 참고광속이 되고, 다른 하나는 성능을 평가하고자 하는 평면 반사경에 의해 반사되어 광속분리기를 통과한 후 참고

광속과 간섭을 일으킨다.^[1] 선정렬을 위해 액정판을 이용하여 광속의 진행방향을 검출하며 평행광을 감지하기 위해서 인광판에 자외선으로 조명을 하며 적외선의 감광상태를 살펴보았다. Twyman-Green간섭계의 개략도가 Fig. 1에 도시되어 있으며 본 연구에서 구성한 적외선 간섭계의 광학계통이 Fig. 2에 사진으로 나타낸 바와 같다. 결상렌즈의 성능평가를 위해서는 Fig. 1(b)와 같이 구성되며^[2], 본 연구에서는 결상렌즈의 경우에만 가시광 HeNe 레이저 광속을 이용하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 구성하였다. 간섭무늬의 강도분포는 pyro-electric vidicon camera를 이용하여 image card에 의해 PC에 입력하였다. 가시광의 경우에는 CCD camera를 이용하여 간섭무늬의 강도분포를 검출하고 적외선의 경우와 마찬가지로 image card에 의해 PC에 입력하여 동일한 방법으로 data처리를 한다.

2. PZT mirror의 구동

Piezo-electric transducer(PZT)에 의해 전압에 따른 길이의 선형팽창하는 성질을 이용하여 참고반사경을 일정한 위상차를 나타내는 거리만큼씩 이동한다. 즉, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ 의 위상간격으로 이동하여 각 위치에서 간섭무늬의 강도분포를 입력한다^[3]. PZT mirror의 구동은 PC에 의해 step motor를 구동하여 PZT의 전원공급기의 전압 조절스위치를 구동하며 한 지점을 택하여 강도가 최소, 최대, 최소가 되는 곳에서 step motor가 멈추도록 프로그램 하였다. PZT mirror와 computer의 구성은 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

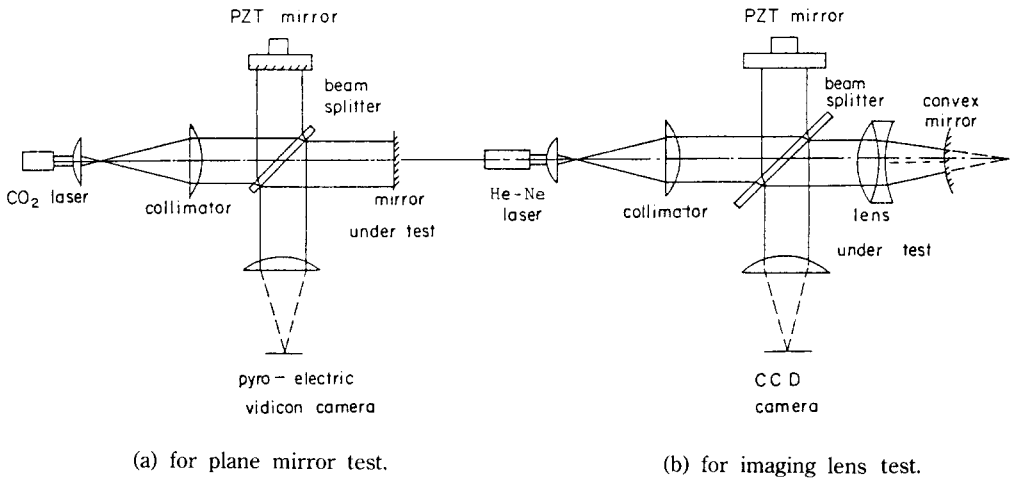


Fig. 1. Schematic diagram of Twyman-Green interferometer



Fig. 2. Photograph of the IR Twyman-Green interferometer for plane mirror test.

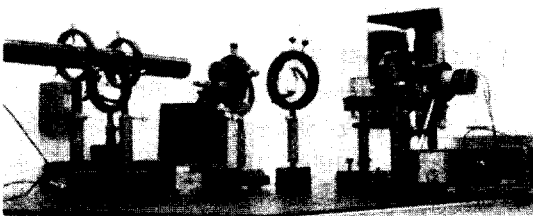


Fig. 3. Photograph of Twyman-Green interferometer for visible imaging lens test.

본 연구에서는 이 PZT mirror의 구동을 하는데 있어서 computer 와 Interfacing 방법을 채택하여 반자동식으로

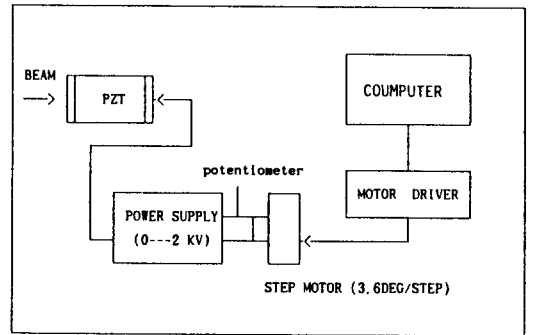


Fig. 4. PZT mirror interfacing circuit.

개량, 더욱 정밀도를 높이고 시간을 절약할 수 있도록 설계하였다. 즉 시중에서 흔히 구할수 있는 potentiometer (10 turn) 로 조절하는 직류 가변 고전압장치에 step motor (3.6 deg/step)를 부착하고 이 step motor 의 driver를 computer 와 interfacing 하여 PZT mirror 의 power supply 를 computer 조작으로 정밀 조절할 수 있게 하였다.

위와 같은 설계방식의 장점은 어떤 특정한 양의 phase 변화가 요구될 때 수동식으로 power supply 를 조작하여 눈으로 비교,판단하는것에 비하여 computer 상의 한 화면에서 반자동으로 수행됨으로 훨씬 빠르고도 정밀하게 실험을 수행할수 있다는 것이다.

그리고 computer 에 의한 조절방식의 전원장치는 매우 고가임에 비하여 위 장치는 매우 저렴한 가격으로 구성할 수 있으며 또한 step motor unit 는 PZT mirror 구동

뿐만아니라 여러 다른 시스템의 조작 (마이크로미터 조작등) 에도 이용될수 있는 응용성이 있다.

III. Data 처리

간섭무늬로부터 파면함수를 읽어들이면 파면함수를 Zernike polynomial로 fitting시킨다. Gram Schmidt orthogonalization에 의해 행렬식 계산에 있어서 ill-condition이 나타나지 않도록 하였고, 필요에 따라 tilt나 선 정렬에서 오는 비점수차를 제거하기가 용이하게 되어 있다⁴. 파면함수로부터 수차함수를 결정하고 동함수를 알게 되며 동함수의 autocorrelation을통하여 OTF를 계산하고 동함수를 Fourier 변환하여 PSF(point spread function)을 얻는다. OTF중에서 위상을 나타내는 것이 PTF(phase transfer function)이며 진폭을 나타내는 것이 MTF(modulation transfer function) 이다⁵. 본 연구에서 작성한 프로그램에서는 파면수차함수, MTF 및 PSF를 3차원 graph로 제시할 수 있도록 되어 있다.

1. 입력 장치

본 간섭계의 입력장치 구성은 Fig. 5 와 같다.

광계통에서 얻어진 간섭무늬 상을 CCD-camera (512 × 492 pixels)로 입력하여 computer 에 장착되어 있는 frame grabber(PC VISION PLUS) 로 보내고 frame grabber 는 computer 와의 연계 명령을 통하여 image processing 작업을 수행하도록 되어있다. 여기서는 두개의 monitor 를 사용하는데 CCTV monitor 는 256 gray level 로 fringe data를 display 하는 전용 monitor 이다.

CCD-camera 로 입력되는 data 는 fringe 의 2차원 평면상의 intensity 분포 이므로 이것을 phase data 로 변환할 필요가 있다. 따라서 앞장에서 설명한 PZT mirror 를 구동하여 90Å 간격으로 phase shifting 을 한 3

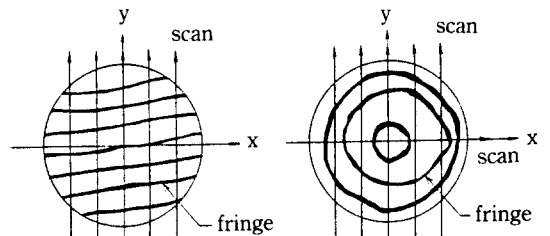
개의 fringe data A, B, C 를 얻은후 식 (1)을 이용하여 phase data, $\phi(x, y)$ 를 얻도록 한다¹³.

$$\phi(x, y) = \text{arcTAN} \left[\frac{C(x, y) - B(x, y)}{A(x, y) - B(x, y)} \right] \quad (1)$$

그러나 위에서 얻어진 $\phi(x, y)$ 는 각 fringe 내의 order 가 고려되지 않은 것이므로 $\phi(x, y)$ 의 각 edge 를 검색하여 order 가 같은 영역끼리 구분한후 그 영역들 별로 order 를 재 고려해두면 fitting 에 사용될 data 가 완성된다. 즉 phase data 는 $\phi(x, y, m)$, $m=0,1,2,3 \dots$ (order) 로 된다. 이때 edge 검색용으로 사용된 software 는 검색 시간의 절약과 고 성능을 위하여 줄무늬형태와 원형무늬 형태의 두가지 case 로 구분하였다. Fig. 6 에는 각 무늬형태에 따른 data 입력시에 scan 방향을 도시하였다. 참고로 fringe data 는 전체 pixel 의 수, 512 × 492 중에서 200 × 200 을 사용하였으며 $\phi(x, y)$ 를 구한후 fitting 을 위한 입력 data 추출은 20 × 20 으로 시행하였다.

2. 출력장치

이 절에서는 FAS(Fringe Analysis System)의 운용에 있어서 출력장치에 관하여 살펴 보겠다. FAS를 운영하기 위한 하드웨어로는 IBM XT급 이상 PC 및 허큐리스 graphic 카드(720 × 348), 80칼럼의 프린터, 20M 이상의 하드 디스크가 필요하며 소프트웨어로 DOS 3.2 이상이 요구된다. FAS의 각종 출력은 대화식과 일괄식 두가지 방식으로 이루어진다. 대화식은 작업항목을 입력하면 작업을 실행하고 그 결과를 화면에 보여준다. 구체적으로



(a) for line type fringe (b) for circular type fringe
Fig. 6. Scanning direction of data input.

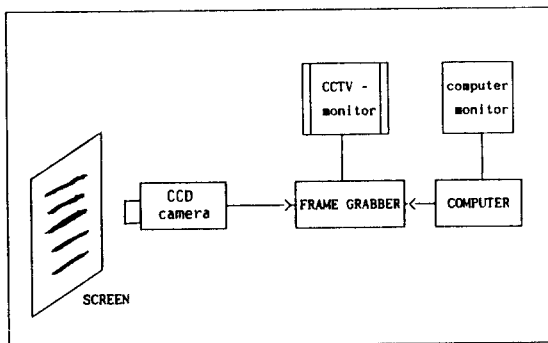


Fig. 5. Input system for fringe analysis.

표 1. 간섭무늬해석 주메뉴

```
FAS has 2 operating methods.
1. interactive
2. batch
select no=1
STOP-Program terminated
```

표 2. 간섭무늬해석 세부메뉴

Fringe Analysis System least-squares method	
· default	
11. set default	
input data	
21. assign file name	
22. access data & nomalize	
23. view data	
· fitting	
31. least-squares method	
33. view error	
· Zernike	
41. display coefficient	
42. filter coefficient	
43. save coefficient	
44. load coefficient	
45. calculated zernike contour	
46. view zernike contour	
47. make any coefficient	
· analysis	
51. calculate OTF	
52. view magnitude of OTF	
53. view phase of OTF	
54. calculate PSF	
55. view PSF	
· end	
99. end	

살펴보면 다음과 같다. sfas를 입력하면 "c:\FAS\FAS-WORK>sfas" 화면에 표 1 과 같은 주메뉴가 나타나며 1을 선택하면 대화식이 된다.

계속해서 표 2의 세부메뉴가 나타난다. 여기서부터 실제적인 작업이 시작된다. 원하는 작업번호를 입력하면 FAS가 그 작업을 수행한 다음 결과를 화면에 나타내어 준다. 따라서 작업 결과를 따로 기록해 두지 않는다. 현재의 작업이 끝나야 다음 작업을 지정할 수 있으며 작업항목 99(end)를 선택할 때까지 반복된다.

일괄식은 여러 개의 작업항목을 한꺼번에 입력하는 것으로 대화식처럼 다음의 작업항목을 지정해 주기 위하여 현재의 작업이 끝날 때까지 기다릴 필요가 없다. 그 결과는 fas.lis에 기록되므로 필요하다면 나중에 화면으로 확인 하거나 종이에 인쇄하여 볼 수 있다.

IV. 실험결과 및 결과분석

1. 간섭무늬

적외선으로 Twyman-Green 간섭계에 의해 평면 반사경을 시험한 결과로 얻은 간섭무늬가 Fig. 7에 나타나

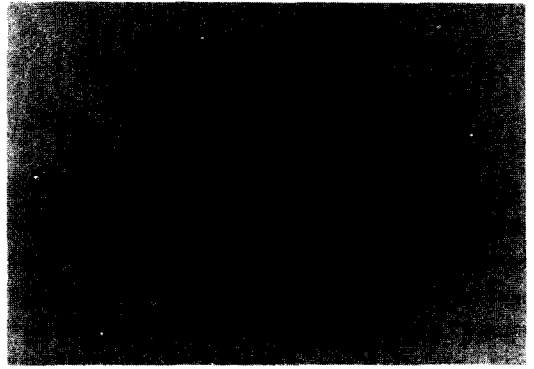


Fig. 7. IR interferogram of plane mirror test.

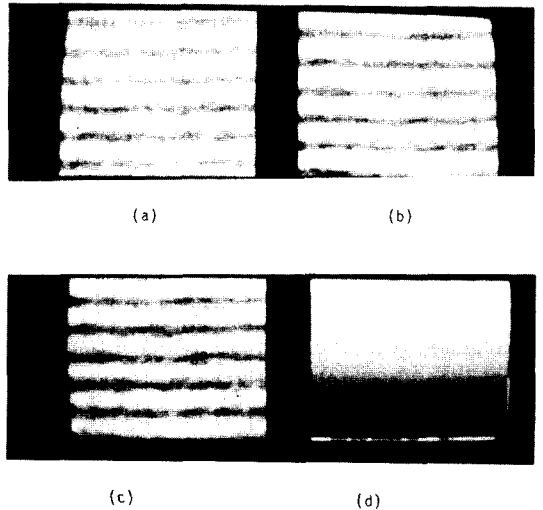


Fig. 8. Line type fringe of visible imaging lens test.

있다. 파장이 긴 탕으로 Fizeau무늬는 매우 직선에 가까운 형태를 보여주고 있다. 정성적으로 보아서 시험하고자 하는 평면 반사경의 평면도는 파장의 1/8이내의 정확도를 충분히 보여주고 있다. 위의 간섭무늬는 thermal paper 에 감광시켜 얻은 것이다. 따라서 실시간으로 자동 data처리가 불가능 하게 되었다. 그러나 그 기술 면에서나 원리면에서는 가시영역의 CCD camera나 vidi-con camera에 의해 얻은 간섭무늬를 해석하는 것과 동일하므로, 그 이후에는 632.8nm의 파장을 갖는 HeNe 레이저 광원을 사용하여 결상렌즈를 시험하였다. Fig. 8은 줄무늬의 형태로 얻은 것이며 PZT mirror에 의해 위상 차이를 0, $\pi/2$, π , 되도록 하여 각각의 경우 줄무늬를 (a), (b), (c)에 나타내었고 (d)에는 soft ware 에 의해 noise를

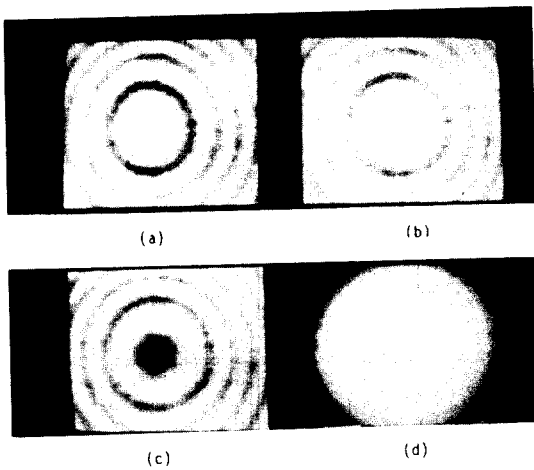


Fig. 9. Circular type fringe of visible imaging lens test

제거하고 실제 파면의 위상을 나타내 주고 있다. Fig. 9에는 원형간섭무늬의 형태로 얻은 것이며 줄무늬와 같이 각각 위상차이에 대한 간섭무늬와 soft ware에 의해 noise를 제거한 실제적 파면의 위상을 나타낸 것이다.

2. 간섭무늬의 해석

Fig. 8(d) 및 Fig. 9(d)에 나타난 간섭무늬에서는 각각 줄무늬와 원형무늬에서 piston, tilt 및 defocus 등의 실험 장치 및 간섭계 계통의 error가 포함되어 있는 것이다. 따라서 시험하고자 하는 결상렌즈 그 자체의 성능을 나타내지 못하고 있다. 따라서 간섭계 계통의 error를 고려하여 tilt, piston error 및 defocuss에 의한 수차를 제거하여야 한다. Fig. 10은 결상렌즈 그 자체의, (a) 파면수차함수, (b) MTF, (c) PTF 및 (d) PSF를 줄무늬 형태의 간섭무늬를 해석하여 얻은 결과이며, Fig. 11에는 원형무늬를 해석하여 얻은 결과이다. 줄무늬 형태이거나 원형무늬 형태이거나 동일한 결상렌즈를 시험한 결과이므로 간섭무늬의 해석결과는 동일해야 하겠으나 그림에서 보는 바와 같이 파면수차함수에서 약간의 차이를 보여주고 있다. 그 이유는 줄무늬형태를 얻으려면 결상렌즈나 참고평면반사경을 약간 기울여야 하므로 비축수차를 가지게 되며 원형무늬 형태를 얻을 때에는 대체로 회전대칭적인 수차만 포함되기 때문이다. 그러나 기울어진 각도가 매우 작기 때문에 그다지 큰 영향을 미치지 않았으며 따라서 MTF, PTF 및 PSF는 거의 같게 나타난 것이다.

본 연구에서 시험한 가시광선 영역의 결상렌즈는 독

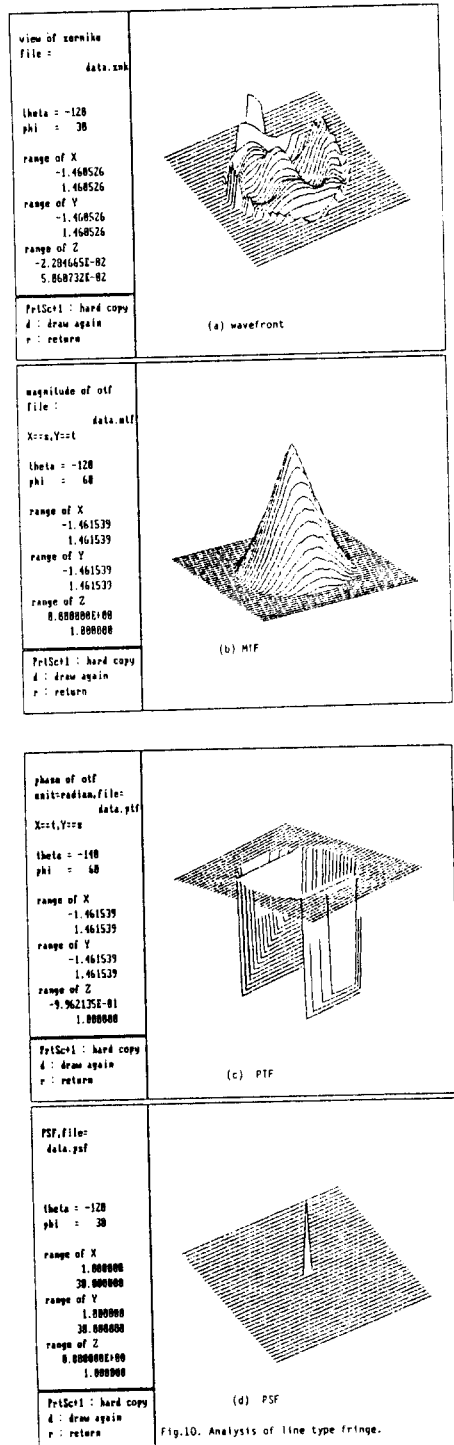


Fig.10. Analysis of line type fringe.

Fig. 10. Analysis of line type fringe

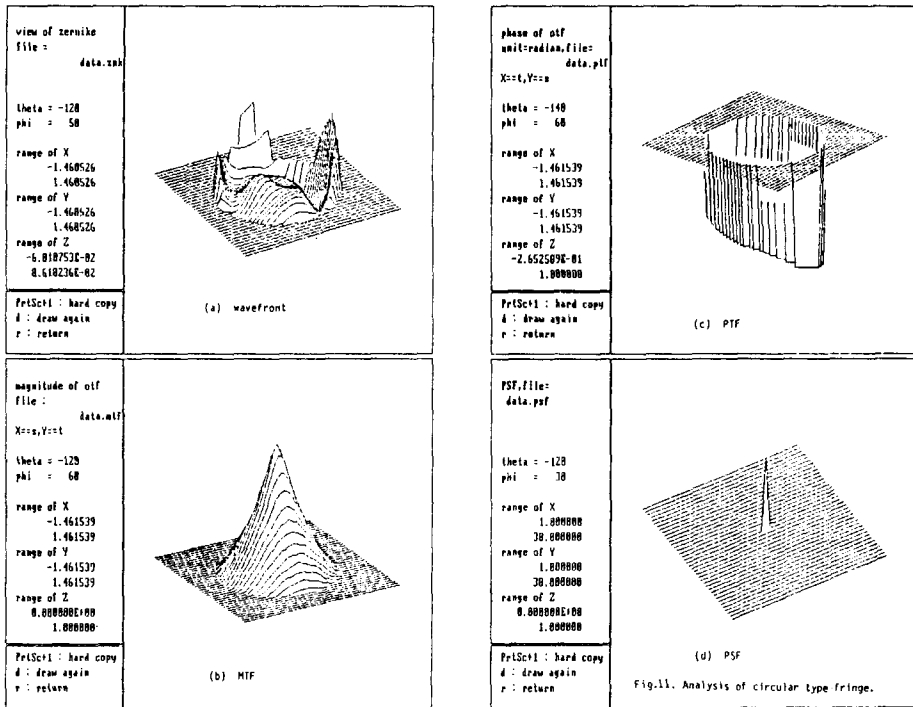


Fig. 11. Analysis of circular type fringe.

일산 카메라 렌즈로서 시험결과 성능이 매우 우수한 것으로 나타났다. Fig. 10 및 Fig. 11에서 wavefront, MTF 및 PTF의 좌표는 환산좌표로 나타내었다.

V. 결 론

본 연구 결과 적외선과 가시광선에 사용될 수 있는 간섭계를 개발하였다. Twyman-Green 간섭계를 구성하여 평면반사경이나 결상렌즈의 성능을 평가할 수 있었으며 자동으로 간섭무늬를 해석하여 3차원 그래프로 평가결과를 도시할 수 있게 되었다. 국산 평면반사경과 독일산 결상렌즈의 성능을 평가한 결과 매우 우수한 성능임을 확인할 수 있었다. 이러한 기술을 기반으로 하여 비파괴검사, 온도나 압력에 의한 광계통의 미세한 변화를 검사하는 장비를 개발할 수 있을 것으로 확신한다. 본 연구결과를 잘 활용하면 광학계통의 품질관리는 물론이거니와 다른 기계나 전기공학등의 학문 발전에 크게 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 1989-1990년도 자유공모 과제지원으로 수행되었으며 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Osuk Kwon, J. C. Wyant and C. R. Hayslett, Appl. Opt., **19**, 1862-1869(1980).
- [2] Eugene Hecht and Alfred Zajac, Optics, Addison-Wesley Publishing Co., Tokyo, 1987, p. 385-386.
- [3] J. C. Wyant, Lecture Note of Optical Testing and Testing Instrumentation, Optical Sciences Center, U. of Arizona, 1984. p. 58-64.
- [4] I. Y. Wang and D. E. Silva, Appl. Opt., **19**, 1510-1518 (1980).
- [5] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallger, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio, Appl. Opt., **13**, 2693-2703 (1974).

Development of Interferometer for Performance Assessment of IR Optical System

Kyung Hee Hong, Jae Jun Ko, Sung Tae Lee, Se An Jang* and Moungh Ho Oh*

*Korea Military Academy Department of Physics, *Mathematics*

(Received: September 18, 1991)

Twyman-Green interferometer is developed for assessment of IR optical system performance. Light source is CO₂ gas laser which has 10.6 μm wavelength. The light beam is expanded to 2.5 cm dia by Ge lens and splitted by ZnSe parallel plane plate. One of the beams is reflected by refernce mirror which is operated PZT. The fringe will be detected by a pyro-electric vidicon camera and displayed by a CRT monitor. Here, the IR fringe is recorded on the thermal paper. In visible region, the light source is He-Ne laser. The fringe is detected by a CCD camera and displayed by the CRT monitor. The intensity of the fringe is digitized by a image card and processed by a PC. The wavefront aberration function, PSF and OTF are calculated. The results are displayed in 3-D graphs on the monitor or printed out by a line printer.