

## Computer Generated Hologram을 이용한 포물면경 형상측정

김성하 · 곽종훈 · 최옥식

영남대학교 이과대학 물리학과

송재봉 · 이윤우 · 이인원

한국표준과학연구원 양자표준부

(2000년 2월 22일 받음, 2000년 4월 11일 수정본 받음)

Diamond turning machine으로 알루미늄을 가공하여  $f/1.5$ , 구경 50 mm인 포물면경을 제작하였다. 이진위상(binary phase) 홀로그램으로 포물면경 형상측정을 위한 computer generated hologram(CGH)을 encoding하였으며 staircase encoding 방법으로 간섭무늬 곡선의 직선근사를 하였다. 간섭무늬 데이터를 포스트스크립트(PostScript) 파일로 변환한 후 CGH 원도를 레이저 프린터로 확대 출력하고 축소 촬영하여 CGH를 제작하였다. 측정부(viewing arm)에 CGH가 위치하는 Twyman-Green 간섭계를 구성하여 포물면경의 표면형상을 측정하였다. 측정결과를 직접표면형상측정법 및 간섭계를 이용한 자동시준법의 측정 결과와 비교하고 오차를 분석하였다.

### I. 서 론

비구면 광학소자는 구면 광학소자로는 해결하기 어려운 구면수차, 상의 왜곡, 비점수차 등 상의 질을 저하시키는 여러 수차요인을 제거하거나 극소화할 수 있어 비구면 1면으로 구면 3-4면 또는 그 이상의 성능을 낼 수 있다. 그 결과 다수의 구면 광학소자를 소수의 비구면 광학소자로 대체함으로써 광학기기를 작고 가볍게 만들 수 있는 장점이 있다.<sup>[1]</sup>

가공기술의 발달로 비구면의 사용이 증가되고 있지만 가공과 함께 이루어지는 비구면의 형상측정은 구면의 형상측정에 비하여 어려운 문제이다. 비구면의 형상측정 방법은 일반적으로 직접형상측정법과 간섭법으로 나눌 수 있으며 간섭법은 다시 non-null test와 null test로 나눌 수 있다.<sup>[2]</sup>

직접형상측정법은 사용이 간편하여 생산현장에서 많이 쓰이나 정확도가 간섭법보다 떨어지는 단점이 있다. 간섭법 중에서 non-null test는 파면의 기울기를 측정하는 층밀리기(shearing) 간섭계가 많이 사용되는데 null test에서 사용되는 부가적인 광학소자가 필요없는 것이 장점이지만 광학면의 직접적인 정보가 아닌 파면의 기울기 정보를 얻는 것이 특징이다. 한편 null test는 정확도가 뛰어나지만 비구면 파면을 기준 파면과 비교하기 위하여 비구면 파면을 기준파면과 같은 구면 파면이나 평면파면으로 만들어주기 위해 null compensator를 사용해야하는데 이것은 제작이 어렵고 비용이 많이 들고 평가하는 비구면 광학소자가 바뀔 때마다 다시 제작해야 하는 단점이 있다.

Null optics대신 computer generated hologram(CGH)을 이용하면 간편하게 비구면의 형상을 측정할 수 있다. CGH는 광학가공이 필요없고 일반적인 null optics가 여러 개의 구면으로 구성되는 것에 비하여 하나의 CGH로 이러한 null optics를 대체하므로 간섭계의 정렬이 쉬워진다. 그리고 CGH의 설

계는 비구면과 구면이 동일한 과정에 의해 수치적으로 행해지므로 CGH 제작에서 비구면은 구면과 비교하여 다른 것이 없다.

본 연구에서는 이러한 장점을 지닌 CGH를 사용한 비구면 형상 측정법을 연구하였다. 이를 위하여 다른 측정법으로도 형상측정이 가능한 포물면경을 시험용 광학소자로 사용하였고 이진위상 홀로그램을 설계, 제작하였으며 CGH를 사용한 측정 결과를 직접표면형상측정법 및 간섭계를 이용한 자동시준법의 측정 결과와 비교 분석하였다.

### II. 이진위상 홀로그램

1966년 Lohmann<sup>[3]</sup>이 synthetic binary 홀로그램으로 임의의 파면을 만들 수 있음을 보여준 이후에 많은 종류의 encoding 방법이 연구되었다. Lohmann 형의 aperture 함수는 통상적인 홀로그램의 간섭무늬(fringe)와 같으며 Lee<sup>[4]</sup>에 의해 이러한 특성을 이용한 이진위상 홀로그램이 제안되었다. 이것은 재생할 때 이론적으로는 파면오차가 없어 비구면 평가용으로 적당하다.<sup>[1]</sup>

위상만 변하는 물체파  $\exp[i\phi(x,y)]$ 와 비축 기준파  $\exp(i2\pi\alpha x)$ 로 홀로그램을 만들 경우 출력함수는

$$h(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(m\pi q)}{m\pi} \exp[im(2\pi\alpha x - \phi(x,y))] \quad (1)$$

이다. 식 (1)에 비축 기준파  $\exp(i2\pi\alpha x)$ 를 곱해주면 -1차 항에서 원하는 파면  $\exp[i\phi(x,y)]$ 를 얻을 수 있다. 그리고 반송 주파수  $\alpha$ 를  $x$  방향 대역폭의 1.5배 보다 크거나 같게 선택하면 불필요한 다른 차수의 회절빔이 제거된다.

홀로그램의 회절효율은 변수  $q$ 에 의해 결정되는데  $q$ 가 0.5 이면 0차를 제외한 모든 짝수차 항이 사라지고 1차 회절빔의

회절효율이 최고 10%인 진폭형 홀로그램이 된다.

### III. CGH의 설계 및 제작

#### 3.1. 간섭계 구성

비구면 형상측정을 위한 CGH를 설계하기 위하여 그림 1과 같이 측정부에 CGH를 두는 Twyman-Green 간섭계<sup>[1,5]</sup>를 선택하였다. CGH를 이용한 간섭계 구성은 크게 Twyman-Green 간섭계와 Fizeau 간섭계로 나눌 수 있으며 CGH가 놓이는 위치도 사용목적에 따라 다르게 할 수 있다. 본 연구에 사용된 Twyman-Green 간섭계에서는 측정하고자하는 비구면의 상이 맺히는 측정부의 결상면에 CGH를 둠으로써 비구면의 파면과 CGH의 파면을 비교한다. CGH에 기록된 간섭무늬는 이상적인 비구면 파면과 기준파면에 의해 결상면에 생기는 간섭무늬이다. 비구면 파면과 CGH의 재생파면이 같은 조건에서 CGH를 통과하므로 CGH substrate의 수차가 간섭무늬에 영향을 미치지 않는 것이 특징이고 비구면이 diverger lens에 의하여 CGH면에 결상하므로 간섭계의 정렬이 쉬워진다. 공간필터(spatial filter)로 원하지 않는 나머지 회절빔들을 제거한다.

#### 3.2. CGH 설계와 제작

간섭측정방법으로 형상을 측정하고자하는 비구면을 간섭계에 위치시켜서 비구면에 의해 생긴 파면이 CGH면에 도달했을 때의 위상함수를 구하는 것이 CGH 설계이다. 본 연구에서는 위상함수를 구하기 위하여 그림 1과 같이 측정부에 CGH를 사용하는 Twyman-Green 간섭계 구성에 맞게 광선추적<sup>[6]</sup>을 하여 CGH면까지의 광로정차(optical path difference)를 구하였다. 여러 방법으로 측정할 경우에 나타나는 간섭무늬의 공간주파수와 제작하여야 할 CGH의 공간주파수를 고려하여 정점을 지나는 구면에서 최대 sag가 50  $\lambda$ 가 되는 포물면경을 측정 비구면으로 정하였다. 포물면경은 구경이 50 mm, f/1.5이고 알루미늄을 재료로하여 MOORE사의 diamond turning machine(M18AG152)으로 가공한 한 것이다. 광원은 He-Ne 레이저(632.8 nm)를 사용하였으며 가능한한 단순한 diverger lens를 사용하기 위해 f/1.95, 구경이 30 mm이고 재

질이 BK7인 단일렌즈를 사용하였다.

광르정을 구한 후 최소제곱법을 사용하여 CGH면에서의 위상함수를 구하였으며 위상함수로부터 프린터로 출력하기 위한 간섭무늬 데이터를 구하였다. 프린터로는 일반적인 곡선을 그릴 수 없으므로 CGH에 그려지는 비구면의 간섭무늬 곡선을 오차범위내에서 직선으로 근사하여야 한다. 간섭무늬 곡선을 직선으로 근사시키는 방법은 등위상면의 모든 간섭무늬 데이터를 계산하는 것보다 계산속도가 빠르고 허용오차범위내의 정확도를 가진 staircase encoding 방법<sup>[7]</sup>을 사용하였다. 그림 2에 개략적인 방법을 나타내었다. 간섭무늬간격이  $\Delta\phi$ 이고 각 간섭무늬 곡선의 허용오차가  $\delta\phi$ 이다. 등위상면의 한 시작점에서 접선을 구한 후 등위상면에 대해 허용오차만큼 떨어져 있는 곡선과 접선의 교점을 구한다. 이 교점을 수평 이동하여 처음의 등위상면과의 교점을 구한다. 처음 시작점과 이 교점을 연결하는 선분은 반드시 곡선의 허용오차 범위 안에 존재하게 된다. 이 교점을 출발점으로 하여 똑같은 방법으로 새 교점을 구하면 허용오차 범위 내에서 곡선을 직선으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 허용오차  $\delta\phi$ 를  $\lambda/40$ 로 계산하였다.

간섭무늬 데이터를 사용하여 CGH를 제작하는 방법은 프린터나 플로터로 CGH 원도를 확대 출력하여 설계시의 크기로 축소 촬영하거나 e-beam 리소그라피(lithography)나 레이저 리소그라피를 이용하여 chrome-on-glass에 등배율로 제작하는 방법이 있다.<sup>[1,7,8]</sup> 리소그라피 방법은 축소촬영에 비해 매우 정밀한 CGH를 만들 수 있지만 제작비용이 많이 든다.

본 연구에서는 간섭무늬 데이터를 포스트스크립트 파일로 변환한 다음 분해능이 600 dpi인 레이저 프린터로 CGH 원도를 확대 출력하였다. 포스트스크립트 파일을 이용하면 프린터의 interpreter에 의해 프린터의 분해능에 맞게 원하는 위치와 크기로 그림을 출력할 수 있다. CGH 원도의 직경은 194 mm이다. 이렇게 출력된 것을 50 mm 슈나이더 렌즈를 장착한 삼성 GX-1 카메라로 Kodak사의 TMX-100 필름을 사용하여 1/10 배로 축소 촬영하여 CGH를 완성하였다. CGH의 반송주파수는 11.03  $\text{mm}^{-1}$ 이고 기준빔의 재생각도는 0.4도이다. 간섭무늬 폭을 나타내는 q factor는 0.5이다. 그림 3은 임의의 크기로 나타낸 CGH 원도이다.

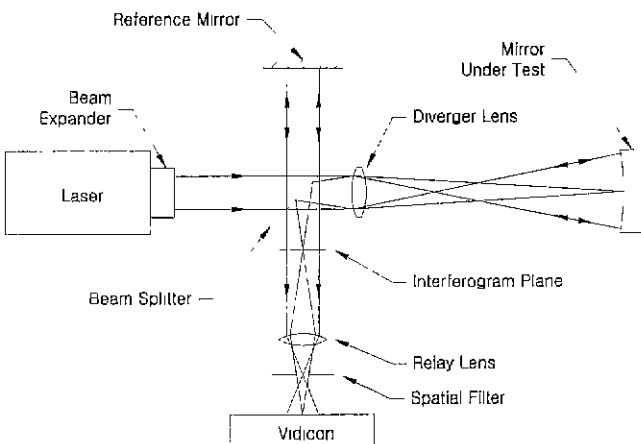


그림 1. 측정부에 CGH를 사용한 포물면경 측정용 Twyman-Green 간섭계 구성.

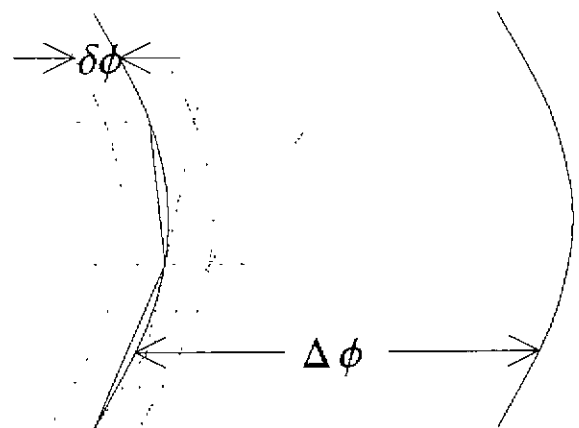


그림 2 Staircase encoding 방법을 이용한 곡선의 직선 근사.

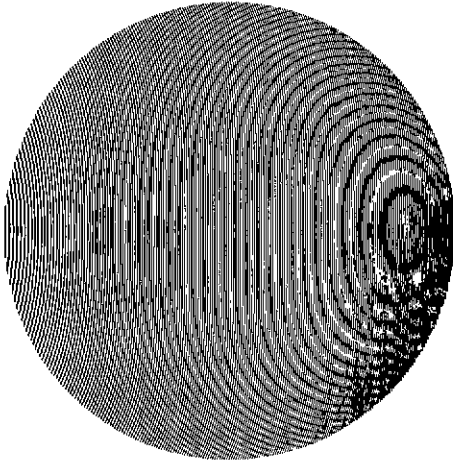


그림 3. 포물면경 형상측정을 위한 CGH 원도.

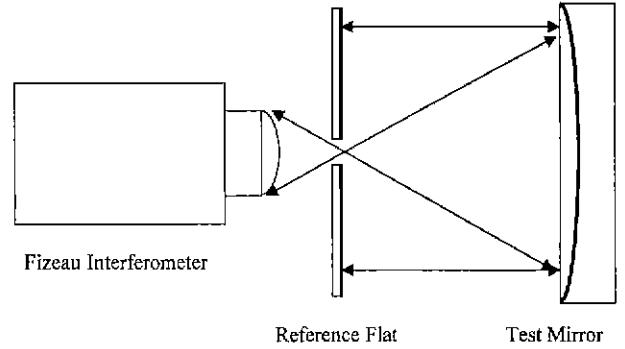


그림 5. Fizeau 간섭계를 이용한 포물면경의 자동시준법.

IV. 실험 및 결과

4.1. 직접표면형상측정

직접표면형상측정방법<sup>[2]</sup>은 촉침을 사용하여 촉침이 측정대상물의 표면을 따라 움직일 때 기준 좌표계로부터 촉침의 높이를 측정하여 대상물의 형상을 측정하는 방법이다. 그림 4는 일차원적인 형상측정만 가능한 HOBSON사의 직접표면형상측정기(RANK TAYLOR Form-Talysurf Series)로 포물면경을 측정하여 포물면경의 직경에 따라 이론적인 포물면경의 높이와 실제 측정된 높이의 차이를 나타낸 결과이다.

본 실험에서는 PV(peak to valley)값으로 측정 결과를 나타내었다. 그림 4에서 먼지나 이물질에 의해 높이 솟은 중앙의 잘못된 데이터를 제외하면 PV 2.1  $\lambda$ (1.3  $\mu\text{m}$ )의 형상오차를 볼 수 있다. 그래프의 굴곡은 포물면의 각 지점에서의 형상을 나타내고 실제로 제작된 포물면경에서는 희미하지만 육안으로 tool mark를 볼 수 있었다.

4.2. 간섭계를 이용한 자동시준측정법(auto-collimation test)

그림 5는 간섭계를 이용한 자동시준측정법<sup>[2]</sup>을 나타낸 것이다. 간섭계의 렌즈와 포물면경의 초점을 일치시키고 기준평면

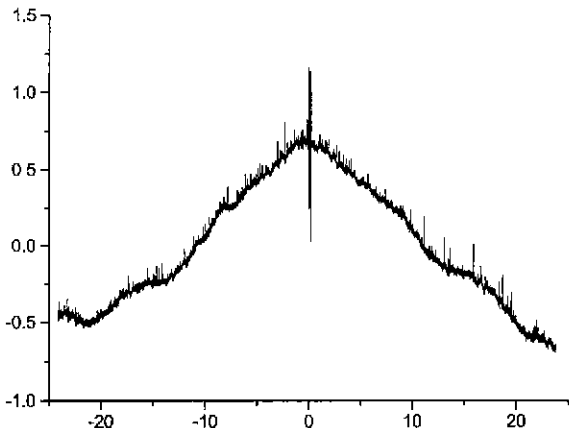


그림 4. 직접형상측정법으로 측정한 결과(포물면경의 직경(mm)에 따른 설계값과 측정값의 차이( $\mu\text{m}$ )).

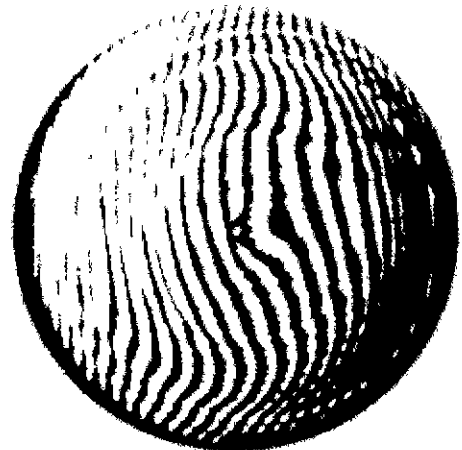


그림 6. 자동시준법에 의한 포물면경의 표면형상 측정 결과.

거울(reference flat)을 초평면에 두면 평행광이 거울에서 반사되어 왔던 경로를 따라 간섭계로 되돌아간다. 이 방법은 포물면경의 기하학적 특성을 이용한 형상측정 방법으로 Fizeau 간섭계의 기준렌즈에 의한 기준구면파면과 포물면경에서 되돌아오는 구면파면이 만드는 간섭무늬로부터 포물면경의 형상을 측정한다. 여기서 빛이 같은 경로를 두 번 지나므로 오차가 네 번 계산되고 간섭무늬 하나의 간격은  $\lambda/4$ 가 된다. Zygo사의 Fizeau 간섭계(Mark III)를 이용하였고 기준평면거울은 PV 값이 0.3  $\lambda$ 이었다. 그림 6은 포물면경을 자동시준법으로 측정한 결과로 1.0  $\lambda$ 의 PV 값을 보여주며 직접형상측정 결과와 같은 형상을 보여준다.

4.3. CGH를 이용한 형상측정결과 및 오차분석

4.3.1. 형상측정결과

제작한 CGH의 파면 재생상을 보기 위하여 그림 7과 같이 간섭계를 구성하였다. CGH에서 재생되는 파면과 평면 기준파면의 간섭무늬를 그림 8에 나타내었다.

최종적으로 포물면경과 CGH를 직접 비교하는 null test를 하였다. 이때 그림 1의 Twyman-Green 간섭계를 사용하여 interferogram plane에 CGH를 두고 간섭무늬를 측정하였다. 그림 9에 최종 측정결과를 나타내었으며 PV 1.3  $\lambda$  값을 보여준다. 자동시준법으로 측정한 그림 6의 결과와 비슷한 간섭무늬 패턴을 볼 수 있다.

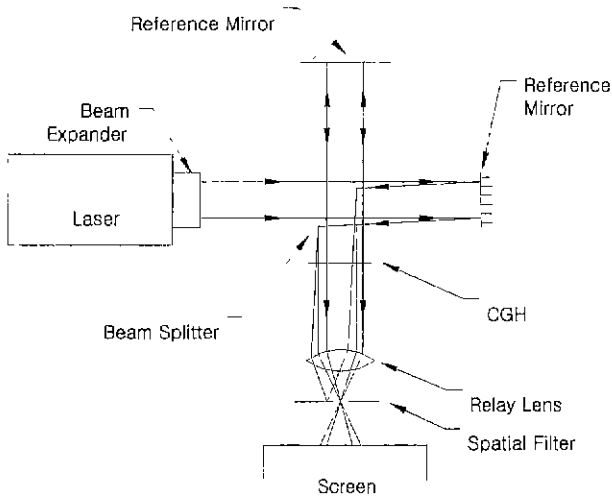


그림 7. CGH 재생을 위한 간섭계 구성.

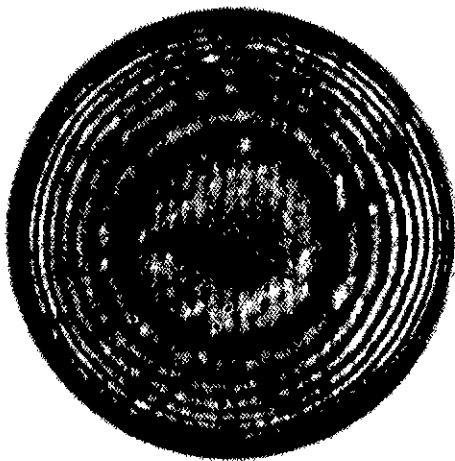


그림 8. CGH 재생상.



그림 9. CGH를 이용한 형상측정결과(CGH와 포물면경의 간섭무늬).

4.3.2. 오차분석

정확도가 0.1 λ인 Zygo 간섭계를 사용한 자동시준방법을 기준으로 결과와 오차를 분석하였다. 먼저 직접표면형상측정방법과 자동시준법의 측정결과가 1.1 λ의 차이를 보이는데 이것

은 직접표면형상측정방법이 포물면경의 어느 한 단면에 대해서만 측정된 결과이므로 PV 측정값이 자동시준법보다 높게 나올 가능성이 충분하고 또한 자동시준법에서 사용한 기준거울의 정밀도가 다소 낮은데(PV 0.3 λ)에 원인이 있다고 보여진다. CGH를 이용한 측정결과와 자동시준법의 측정결과도 또한 0.3 λ의 차이를 보인다. 이러한 차이는 CGH의 제작오차와 정렬오차 그리고 Zygo 간섭계에 사용된 광학소자에 비해서 상대적으로 정밀도가 떨어지는 간섭계를 구성하는 광학소자들에 의한 오차에 기인한 것으로 판단된다.<sup>[9-11]</sup>

유한한 분해능을 가진 프린터로 CGH를 출력하고 사진렌즈를 사용하여 축소촬영을 하였기 때문에 발생한 제작오차에는 위상의 양자화오차, 상의 왜곡오차 그리고 크기오차가 있다.

레이저 프린터의 유한한 분해능 때문에 필연적으로 위상을 양자화 하는 과정에서 발생하는 오차가 위상의 양자화오차이다. 제작한 홀로그램의 직경 내에 N개의 분해 가능한 점들이 있고 CGH의 대역 주파수를  $B_x$ 라고 하면 파면오차는 식 (2)와 같다.<sup>[11]</sup>

$$\Delta W = 1.5 B_x / N \tag{2}$$

제작한 CGH의 경우 N은 4583,  $B_x$ 는  $3.68 \text{ mm}^{-1}$ 이다. 이 경우 CGH의 파면오차는  $0.002 \lambda$ 이다. 파면오차를 2로 나눈 것이 포물면의 형상오차에 해당하므로 양자화오차에 의한 형상오차는  $0.001 \lambda$ 로 측정결과에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다.

CGH 원도를 프린터로 출력할 때 직경이 d인 홀로그램에서 최대변형 e로 잘못 출력된 상의 왜곡에 의해 발생하는 왜곡수차는 식 (3)과 같다.

$$\Delta W = 3 B_x e / d \tag{3}$$

제작한 CGH의 경우 240 mm인 직선이 241 mm로 1 mm 잘못 출력되므로 변형 e는 1/240이고 d는 CGH의 직경으로 194 mm이다. 파면오차는 CGH에서  $0.002 \lambda$ 이다. 이것은  $0.001 \lambda$ 의 표면형상오차에 해당하며 무시할 수 있는 양이다.

CGH 원도를 사진렌즈로 축소 촬영할 때 잘못된 배율에 의해 크기오차가 발생한다. 원하는 홀로그램의 파면을  $W(r, \theta)$ 라 하면 잘못된 배율 M으로 만들어진 홀로그램의 파면은  $W(r/M, \theta)$ 가 된다. 이 경우 다음 식과 같이 지름 총밀리기(radial shear)를 발생시킨다.

$$\Delta W \approx \left( \frac{1}{M} - 1 \right) r \frac{\partial W}{\partial r} \tag{4}$$

0.1 mm의 크기오차에 의해 CGH는  $0.2 \lambda$ 의 파면오차가 발생하였다. 이것은  $0.1 \lambda$ 의 형상오차에 해당한다. 이상에서 CGH 제작시 발생하는 오차는 사진렌즈의 축소촬영에 의한 크기오차가 제일 큼을 알 수 있다.

간섭계를 구성할 때 CGH의 정렬상태에 의해 큰 오차가 발생한다. 홀로그램이 정위치에서  $\Delta x$ 만큼 옆으로 이동하였을 때 다음과 같은 파면 오차를 가진다.

$$\Delta W \approx \Delta x \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \tag{5}$$

간섭계 구성시 정렬오차는 0.1 mm 정도였으며 이것으로 인한 파면오차는 CGH에서 0.4  $\lambda$ 이며 0.2  $\lambda$ 인 표면형상오차에 대응된다.

홀로그램이 정위치에서  $\Delta\theta$ 만큼 회전한 경우에는 식 (6)과 같은 파면오차를 가진다.

$$\Delta W \approx \Delta\theta \frac{\partial W(r, \theta)}{\partial \theta} \quad (6)$$

간섭계 구성시  $\Delta\theta$ 는 0.1도였다. 0.1도의 홀로그램 회전으로 인한 오차는 CGH에서 0.2  $\lambda$ 이며 0.1  $\lambda$ 의 표면형상오차에 해당한다. 정렬에 의한 오차가 제작에 의한 오차보다 영향이 크기 때문에 가능한 정밀하게 정렬하여야 한다.

CGH의 제작오차와 정렬오차를 합치면 0.4  $\lambda$ 가 됨을 알 수 있다. 이 값을 고려하면 CGH를 사용하여 측정된 결과와 자동시준법의 측정된 결과가 0.1  $\lambda$ 의 차이가 난다. 다른 광학소자들(기준 거울, beamsplitter, diverger lens)의 표면 형상에 의한 오차요인 및 간섭무늬 측정의 정밀도를 고려할 때 이러한 측정결과는 차이가 없음을 나타낸다.

## V. 결 론

다른 측정법으로도 광학면의 형상을 측정할 수 있는 포물면경을 제작하여 CGH를 이용한 간섭측정법으로 평가하였다. 제작한 비구면은 f/1.5, 구경 50 mm인 포물면경이며 알루미늄을 재료로 하여 diamond turning machine으로 제작하였다. CGH를 이용한 형상측정 결과를 직접표면형상측정 및 간섭계를 이용한 자동시준법의 측정결과와 비교하여 오차를 분석하였다. CGH는 파면 재생시 이론적으로는 오차가 없는 이진위상 홀로그램으로 encoding 하였으며 간섭무늬 곡선의 직선근사는 staircase encoding 방법으로 하였다. 이렇게 얻은 간섭무늬 데이터를 포스트스크립트 파일로 만들어 분해능 600 dpi의 레이저 프린터로 확대 출력한 후 사진필름으로 축소 촬영하여 CGH를 제작하였다. 포물면경을 평가하기 위해 Twyman-

Green 간섭계를 사용하였으며 상대적으로 광학소자의 정렬이 쉽고 CGH substrate에 의한 영향을 고려할 필요가 없도록 측정부에 CGH를 두도록 구성하였다.

CGH를 이용한 형상 측정결과는 PV 1.3  $\lambda$ 이며 간섭계를 이용한 자동시준법의 결과는 PV 1.0  $\lambda$ 로 다소 차이가 있었다. 이러한 측정결과와의 차이는 CGH의 제작 오차인 양자화 오차, 왜곡 오차, 크기오차 및 CGH의 위치오차 그리고 다른 광학소자의 영향으로 판단된다.

한편 e-beam 리쏘그래피나 레이저 리쏘그래피를 이용하여 등배율로 CGH를 제작하면 축소촬영시 발생하는 크기오차가 없고 또한 분해능을 수십 nm까지 높일 수 있으므로 위상의 양자화오차, 왜곡오차 등 제작시 발생하는 오차를 무시할 수 있다. 따라서  $\lambda/100$  이상의 고정도 비구면도 평가가 가능할 것이다. 고분해능을 가진 프린터와 리쏘그래피용 장비의 발달로 CGH를 이용한 비구면 형상측정의 정확도가 개선될 것이므로 CGH를 이용한 비구면 형상측정은 보편화 될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] 송재봉, 이운우, 이인원, 제9회 광기술위크잡논문집(한국광학회, 대전, 1999) 120.
- [2] J. S. Taylor, M. Piscotty, A. Lindquist, ed., Fabrication and testing of aspheres (OSA, Washington, 1999), p. 86.
- [3] A. W. Lohmann and D. P. Paris, Appl. Opt. **6**, 1739 (1967).
- [4] W. H. Lee, Appl. Opt. **13**, 1677 (1974).
- [5] S. M. Arnold, Proc. SPIE **1052**, 191 (1989).
- [6] A. Nussbaum, Optical system design, (Prentice Hall PTR, 1998), chapter 1, 2, 3.
- [7] S. M. Arnold, Opt. Eng. **24**, 803 (1985).
- [8] 한국표준과학연구원, Optical Pick-Up용 Holographic Optical Elements 개발연구, KRIS-97-095-IR (1997).
- [9] J. C. Wyant and V. P. Bennett, Appl. Opt. **12**, 2833 (1972).
- [10] A. J. MacGovern and J. C. Wyant, Appl. Opt. **10**, 619 (1971).
- [11] J. C. Wyant and P. K. O'Neill, Appl. Opt. **13**, 2762 (1974).

## Parabolic mirror test using computer generated hologram

Sung-Ha Kim, Chong Hoon Kwak and Ok Shik Choe

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

Jae Bong Song, Yun Woo Lee and In Won Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received February 22, 2000. Revised manuscript received April 11, 2000)

Parabolic aluminium mirror of f/1.5( $\phi$  50 mm) was fabricated by a diamond turning machine. Computer generated hologram (CGH) for the test of parabolic mirror was encoded by binary phase hologram. Approximation of curved fringe to line was made by staircase encoding. After fringe data transformed into a Post Script file, magnified master CGH was printed by a laser printer, and then it reduced to the photographic film. Parabolic mirror was tested by Twyman-Green interferometer with CGH at viewing arm. Its experimental result was compared with those of surface profile and auto-collimation test, and then the errors were analyzed.