

## 이진 컴퓨터 형성 홀로그램을 이용한 비구면 형상 측정용 위상편이 회절격자 간섭계

황태준 · 김승우<sup>†</sup>

한국과학기술원 기계공학과 BUPE연구단  
④ 306-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2003년 10월 17일 받음, 2004년 5월 27일 수정본 받음)

위상편이 회절격자 간섭계와 이진 컴퓨터 형성 홀로그램을 제작하여 널 시스템을 구성하고 비구면형상 측정 시스템을 구축하였다. 제안하는 시스템은 비구면형상에 맞게 제작된 이진 컴퓨터 형상 홀로그램과 가시도가 조정된 위상편이 회절격자간섭계로 이루어져 있다. 위상편이 회절격자간섭계는 회절격자의 흠 형상이나 간섭을 일으킬 측정광과 기준광을 바꿈으로써 가시도를 쉽게 조절할 수 있고, 높은 수준의 측정 정확도를 가지는 장점을 가지고 있다. 이진 컴퓨터 형성 홀로그램은 비구면의 정보를 통하여 컴퓨터로 수치모사한 후 전자-빔 리토그래피 장비로 제작할 수 있고, 위상편이 회절격자 간섭계, 비구면과 함께 자동곡률측정 방식으로 설치된다. 간섭계와 홀로그램을 제작한 후 비구면을 측정, 실험을 수행하고 시스템을 평가하였다.

주제어 : Phase-shifting diffraction grating interferometer, Computer generated hologram, Aspherics.

### I. 서 론

비구면은 접광원에서 출발한 광이 측정면에서 반사한 후 다시 한 점으로 모이지 않아 일반적인 간섭계로 측정하는데 어려움이 있으나, 비구면이 만들어내는 파면과 반대되는 파면을 생성하는 보조적인 널 보정기(null compensator)를 설치하면 널 테스트를 수행할 수 있다.<sup>[1]</sup> 널 보정기는 구면렌즈를 여러 장 사용하여 만들 수 있으나, 고정밀 구면으로 구성되는 널 보정기의 조립이 어려워 정확하게 제작하는 것이 쉽지 않고, 간섭계에서의 정렬이 어렵다. 그래서, 렌즈와 같은 역할을 할 수 있는 홀로그램<sup>[2,3]</sup>을 사용하는 방식이 연구되었고, 의도한 임의의 파면을 재생할 수 있는 컴퓨터형성홀로그램(computer generated hologram, CGH)를 적용한 방식이 많은 논문에서 소개되어 왔다.<sup>[4-8]</sup> 컴퓨터형성홀로그램은 렌즈나 거울과 같은 기계적인 가공을 하지 않고 이론상 수식적으로 표현이 가능한 모든 파면을 만들 수 있으며 최근 급성장한 반도체 제조 기술을 컴퓨터형성홀로그램 제작에 도입함으로써 제작 기술과 성능이 획기적으로 발달하여 저렴한 가격에 정밀한 제작이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 전자-빔 리토그래피(e-beam lithography) 장비를 이용하여 이진 진폭변조형 컴퓨터형성홀로그램을 제작하고 높은 가시도를 얻을 수 있게 조정이 가능하고 높은 측정정밀도의 위상편이 회절격자 간섭계를 이용하여 비구면을 측정하는 방식을 제시한다.

### II. 컴퓨터형성홀로그램을 설치한 위상편이 회절격자 간섭계

간섭계와 측정대상물의 성질에 따라 다양한 형태의 컴퓨터형성홀로그램을 이용한 비구면 형상측정 간섭계를 설계할 수 있다. 여기서는 간섭계의 측정광에 고품질의 컴퓨터형성홀로그램을 설치하여 넓은 비구면의 형상측정을 수행한다.<sup>[9]</sup> 그림 1은 위상편이 회절격자 간섭계의 측정광에 컴퓨터형성홀로그램을 설치하여, 자동곡률측정(autostigmatic) 방식으로 측정하는 경우를 나타낸다. 위상편이 간섭계는 수렴광을 사용하는 경우 측정

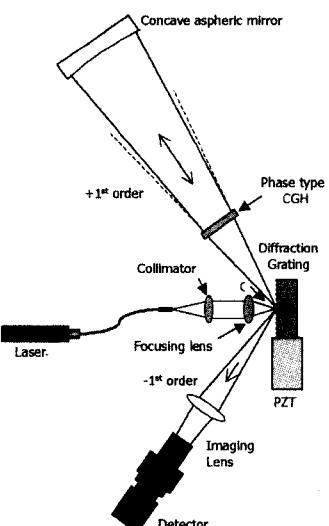


그림 1. 위상편이 회절격자 간섭계와 위상회절격자 형태의 컴퓨터 형성 홀로그램으로 이루어진 비구면 널 측정 시스템.

<sup>†</sup>E-mail: swk@kaist.ac.kr

광과 기준광 사이에 파면반전이 발생하나, 공초점 현미경의 원리를 이용해서 접속광을 회절격자 면 위에 정확히 접속하는 정밀 정렬방식을 사용하여 높은 측정 정밀도를 얻을 수 있다.<sup>[10,11]</sup>

회절격자의 기준점 C에서 출발한 구면파는 컴퓨터형성홀로그램에 입사하여, 측정대상물에 해당하는 비구면파로 변하고, 측정대상물에 수직으로 입사하게 된다. 측정대상물에 수직으로 입사하고, 다시 반사한 파는 같은 경로로 기준점 C로 향하게 된다. 측정광만 컴퓨터형성홀로그램을 두 번 통과하므로, 측정광의 광세기가 기준광에 비하여 작아질 수 있고 간섭무늬의 가시도가 나빠지게 된다. 컴퓨터형성홀로그램을 위상변조형태로 제작하여 사용하면, 특정 회절성분의 크기를 높게 키울 수 있어서 컴퓨터형성홀로그램으로 인하여 측정의 광량이 작아지는 것을 막을 수 있다. 그러나, 위상변조형태의 컴퓨터형성홀로그램은 진폭변조 형태의 컴퓨터형성홀로그램에 비해 제작이 어렵고 제작가격이 비싸다는 단점이 있다. 그에 비해 진폭회절격자형태의 컴퓨터형성홀로그램은 쉽게 제작할 수 있으나, 측정광의 광량이 기준광에 비해 작아지므로 간섭무늬의 가시도가 나빠져 측정이 어려워질 수 있다.

그림 2는 측정광의 광량을 기준광의 광량보다 상대적으로 비대하게 키워서 컴퓨터형성홀로그램으로 인하여 발생할 수 있는 광량손실을 보상하기 위하여 설계된 위상편이 회절격자간섭계의 한 실례이다. 회절격자는 광원의 방향에 대하여 r 차 회절성분이 광원으로 다시 돌아가게 리트로우 설치(Littrow mount)되어 있다. 광원에서 나온 광은 단일모드 광섬유, 시준렌즈 접속렌즈를 통하여 리트로우 설치되어 있는 회절격자 위에 접속된다. 회절격자 위에서 회절되는 성분들 중 0차 회절성분은 그대로 반사하여 컴퓨터형성홀로그램과 측정대상물을 향하고, r 차 회절성분은 기준광으로 다시 접속렌즈로 향한다. 측정대상물에서 반사한 광은 다시 컴퓨터형성홀로그램을 지나 회절격자로 접속되어 회절되고, 그 중 0차 회절

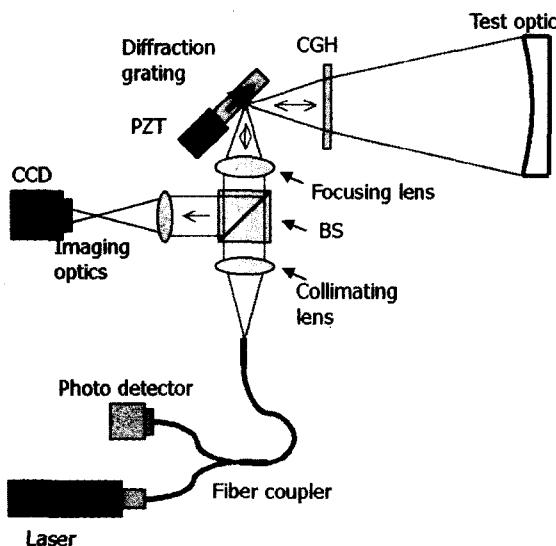


그림 2. 측정광이 기준광보다 높은 효율의 위상편이 회절격자간섭계.

성분은 기준광과 간섭하여 간섭무늬를 생성한다. 시준렌즈와 접속렌즈 사이에 광선분할기를 설치하고, 결상렌즈를 통하여 간섭무늬를 전하결합소자에서 획득한다. 측정광은 회절격자에서 두 번 0 차 회절한 것이고, 기준광은 한 번 r 차 회절한 것이므로, 특수한 형태의 회절격자를 제외하고 측정광의 광량이 기준광에 비해 상대적으로 큰 값을 얻을 수 있다. 간섭무늬의 위상편이는 회절격자를 격자평면방향으로 이송해서 기준광의 위상을 편이함으로써 얻을 수 있다. 회절파면의 위상은 회절격자의 주기에 대한 이송량의 비가 회절격자에 입사하는 파면의 위상에 더해져서 편이된다. 회절격자를  $\Delta x$ 만큼 이송하면, 측정광의 위상편이는 없고 기준광은 회절격자에서 r 차 회절성분임으로 회절격자의 이송량에 비례하는 위상편이가 발생한다.

$$\Delta\Omega = r \frac{2\pi\Delta x}{d} \quad (1)$$

그림 3은 간섭계에 적용할 수 있는 대표적인 두 가지 형태의 반사회절 회절격자의 흄 형상을 나타낸다. 직사각형 흄의 경우 흄의 형상(h 및 w)을 조절함으로써 각 회절광의 상대적인 크기를 조절할 수 있고, 경사회절격자의 경우 경사각( $\theta_B$ )을 조절함으로써 회절광의 상대적인 크기를 조절할 수 있다.

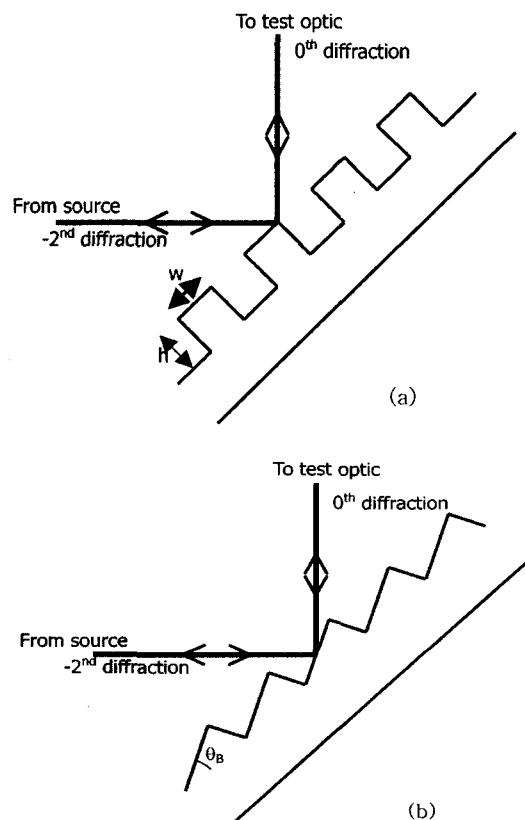
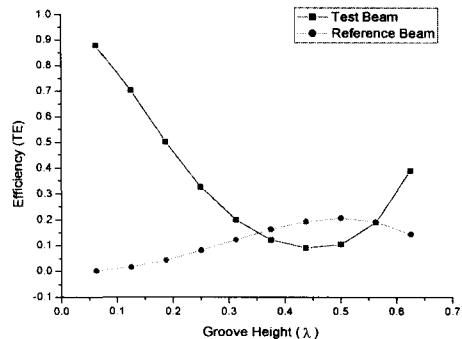
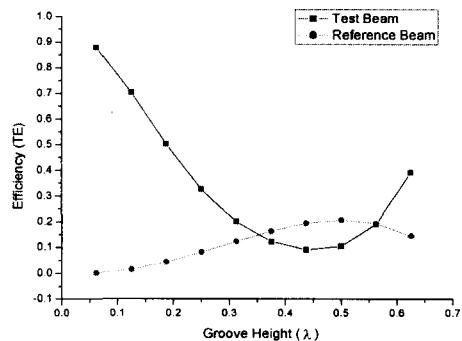


그림 3. 측정광이 기준광보다 큰 위상편이 회절격자 시스템의 회절격자.



(a) Efficiency curve of P-plane polarized diffraction wavefronts

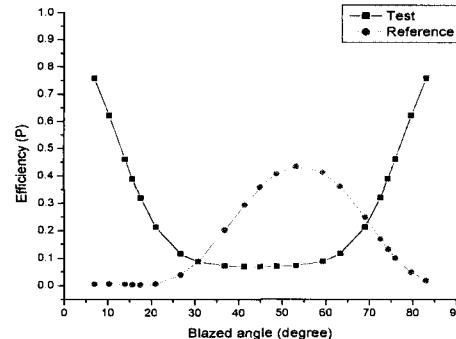


(b) Efficiency curve of S-plane polarized diffraction wavefronts

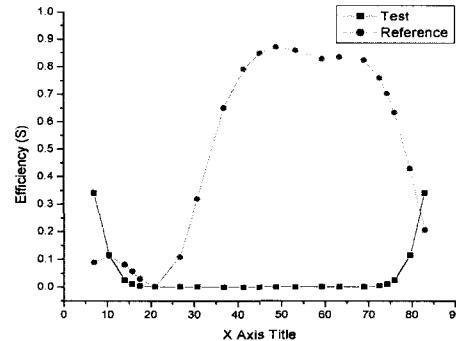
그림 4. 사각 격자를 이용한 회절격자 간섭계에서 측정광과 기준광의 효율곡선.

기준광의 효율을 측정광에 비해 상대적으로 낮추기 위하여 회절격자를 2차 회절성분에 대하여 리트로우 설치되게 한 후, 여러가지 형태의 회절격자에 대하여 측정광과 기준광의 상대적인 효율을 산출해 보았다.<sup>[12,13]</sup> 수치모사에 사용한 모든 회절격자는 알루미늄 코팅 되어있고, 주기는 1200 흄/mm, 광원의 파장은 632.8 nm이다. 그림 4은 직사각형 흄의 높이에 해당하는  $h$ 값을 바꿔가면서 얻은 효율곡선이다. 광원에서 출발한 광이 회절격자에서 회절한 성분들 중 2차 회절성분이 기준광에 해당하고, 0차 회절성분이 측정광에 해당한다. 측정대상물에서 반사한 광은 다시 회절격자로 다시 입사하여 0차로 회절하고 기준광과 간섭하므로, 측정대상물의 반사도를 100%라 가정한다면, 컴퓨터형성홀로그램으로 인한 광량감소율을 생각하지 않은 상태에서 측정광의 광량은 0차 회절성분의 효율의 제곱이 된다. P 편광, S 편광 모두 다 격자흡의 높낮이가 작은 값에서 기준광보다 상대적으로 큰 효율의 측정광을 얻을 수 있다.

그림 5는 그림 3 (b)와 같이 설치된 경사회절격자를 이용한 경우, 컴퓨터형성홀로그램으로 인한 광량의 감소율을 고려하지 않은 상태에서 측정광과 기준광의 상대적인 효율을 계산한 그래프이다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 P 편광, S 편광 모두 다 격자의 경사각이 낮은 값에서 상대적으로 큰 효율의 측정광을 얻을 수 있다. 특히 회절격자에 대해 P 편광의 광원을 사용하였을 경우, 높은 효율의 측정광을 얻을 수 있다.



(a) Efficiency curve of P-plane polarized diffraction wavefronts



(b) Efficiency curve of S-plane polarized diffraction wavefronts

그림 5. 경사 격자를 이용한 회절격자 간섭계에서 측정광과 기준광의 효율곡선.

### III. 컴퓨터형성홀로그램의 설계

컴퓨터형성홀로그램이 측정광에 위치하고 자동곡률측정 방식으로 측정하는 경우, 점 C에서 임의의 각도로 출발한 광선은 컴퓨터형성홀로그램을 지나 측정대상물에 수직으로 입사하고, 같은 각도로 반사하여 컴퓨터형성홀로그램을 지나, 점 C에 출발한 각과 같은 각도로 입사한다. 이와 같은 경로로 광선추적을 하여, 컴퓨터형성홀로그램에 입사하는 광의 각도와 회절되는 광의 각도를 구하여 컴퓨터형성홀로그램을 설계한다. 광선추적은 회절격자 면 위의 한 점 C에서 시작해도 되나, 간섭계에서 출발한 광과 돌아오는 광의 경로가 일치하므로, 편의상 측정대상물의 한 점에서 수직으로 나아가는 광의 경로를 추적하여 설계한다.

그림 6은 측정대상물의 임의의 한 점 P에서 측정대상물의 수직인 방향으로 출발한 광의 광경로를 추적한 그림이다. 측정대상물의 광축이 정확히 간섭계의 광축과 일치하는 경우, 측정대상물은 z축을 중심으로 좌우 대칭의 구조이다. 점 P(x, z)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$z(x) = \frac{cx^2}{1 + [1 - (K+1)c^2 x^2]} + A_4 x^4 + A_6 x^6 + A_8 x^8 + A_{10} x^{10} \quad (2)$$

식 2와 같이 비구면의 식이 주어져 있을 경우, 비구면에서

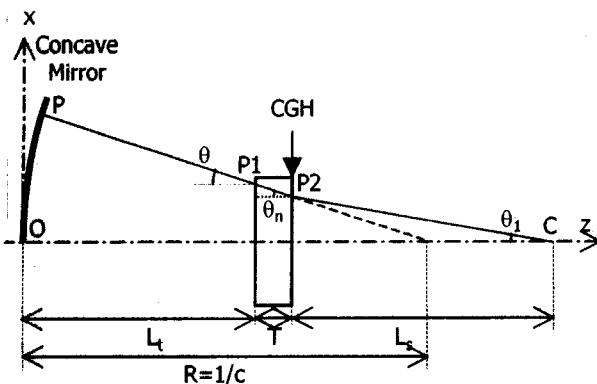


그림 6. 비구면과 컴퓨터형성 홀로그램, 간접계 사이의 광선추적.

수직으로 나아가는 광이 광축과 이루는 각도를  $\theta$  라 한다면,  $\theta$ 는 식 3로 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}(z'(x)) \quad (3)$$

비구면에서 수직으로 나아가는 광은 컴퓨터형성홀로그램이 새겨져 있는 평판에 각  $\theta$ 로 입사하게 된다. 컴퓨터형성홀로그램은 광원쪽의 면에 새기는 것이 광경로추적에 유리하고, 컴퓨터형성홀로그램정렬에도 유리하다. 비구면에서 수직으로 나아가는 광은 측정대상물에서  $L_T$ 만큼 떨어진 곳에 위치한 평판의 점  $P_1(x_1, z_1)$ 에 입사한다. 거리  $L_T$ 은 광원에서 나오는 파면의 수치구경과 측정대상의 수치구경을 고려하여 정할 수 있다.

$$x_1 = x - (L - z) \times \tan \theta(x) \quad (4)$$

평판의 굴절률에 따라, 비구면에서 수직으로 나아가는 광의 각도는 식 5와 같이 변한다.

$$\sin \theta_n(x) = \frac{\sin \theta(x)}{n} \quad (5)$$

평판을 지나 평판의 반대쪽인 컴퓨터형성홀로그램의 한 점  $P_2(x_2, z_2)$ 에 각  $\theta_n$ 으로 입사하게 된다.

$$x_2 = x - (L - z(x)) \times \tan \theta(x) - T \times \tan \theta_n(x) \quad (6)$$

컴퓨터형성홀로그램은 그 주기가 광축을 중심으로 천천히 변하는 원형 회절격자라고 볼 수 있다. 컴퓨터형성홀로그램의 설계는 컴퓨터형성홀로그램 위의 점  $P_2$ 에서의 원형 회절격자의 주기  $d$ 를 구하는 문제로 국한되고, 광축과의 광경로를 비교하는 방식으로 쉽게 해결할 수 있다. 광축의 광경로와 회절된 광경로를 비교하여 원형 회절격자의 주기를 구한다. 광축의 광경로는 식 7과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$OPD_0 = L_1 + n \times T + L_2 \quad (7)$$

점 P에서 광원의 위치인 점 C까지의 광경로는 식 8과 같이 표현할 수 있다.

$$OPD(x) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (L_1 - z)^2} + n \times \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + T^2} + \sqrt{x_2^2 + L_2^2} \quad (8)$$

두 광경로의 차를 회절차수와 파장의 곱으로 나누면 점 P에 대응하는 컴퓨터형성홀로그램 위의 점  $P_2$ 에서의 위상을 구할 수 있다.

$$\Phi(x_2) = \frac{2\pi}{m\lambda} \{OPD_0 - OPD(x_2)\} \quad (9)$$

식 6에서 구한  $x_2$ 값은 점 P에 대응하는 컴퓨터형성홀로그램 위의 점  $P_2$ 의  $x_2$ 값이므로 동일한 위상차를 갖는다. 제작을 쉽게 하기 위하여 이산 진폭변조형태의 컴퓨터형성홀로그램을 구성할 경우, 식 8의 투과함수를 이산진폭변조인 경우 식 10과 같이 구분하여 표현할 수 있다.

$$t(x_2) = \begin{cases} 1, & 2\pi \leq \Phi(x_2) < 2\pi + \pi \\ 0, & 2\pi - \pi \leq \Phi(x_2) < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

$\Phi(x_2) = m\pi$  인  $x_2$ 를 구하여 이산진폭변조형태의 컴퓨터 형성홀로그램을 구성한다.

#### IV. 컴퓨터형성홀로그램 제작

곡률상수 K값이 -1.040이고, 곡률반경이 1800 mm인 크기 600 mm인 대구경의 거울을 측정대상물로 삼았다. 이 사양은 인공위성용 카메라에 사용되는 있는 대구경 비구면 거울의 설계값을 참조하였다. 컴퓨터형성홀로그램은 먼저 사용하는 파장, 구면파의 광원의 수치구경과 컴퓨터형성홀로그램과의 거리를 먼저 정하고, 컴퓨터형성홀로그램이 새겨지는 판의 두께와 굴절률, 그리고 정렬 컴퓨터형성홀로그램의 크기를 정한다. 그림 7은 최종적으로 그려진 컴퓨터형성홀로그램의 형상을 보여준다. 가운데에 컴퓨터형성홀로그램이 있고, 바깥쪽으로 두 개의 정렬 컴퓨터형성홀로그램<sup>[14]</sup>이 가운데를 중심으로 점대칭으로 위치하고 있다.

컴퓨터형성홀로그램의 제작에서 중요한 것 중 하나는 컴퓨터형성홀로그램이 새겨질 판의 선정이다. 굴절률과 같은 광학적 물성이 컴퓨터형성홀로그램 전 영역에 걸쳐 동일해야 하고, 그 평탄도가 광학적 성질 검사에 적합할 정도로 높은 정도여야 한다. 장시간 광에 노출되므로 열팽창계수와 같은 열적 물성도 높은 정도여야 하며, 고정시키는 구조물에 의한 비틀림 등에 강하도록 기계적 성질도 좋아야 한다. 수정(quartz)은 열팽창 계수나 기계적인 성질에서 좋은 성능을 나타내고, 전자빔 리토그래피 장비의 반도체 마스크로 사용될 수 있으므로 컴퓨터형성 홀로그램의 판의 재료로 선정하였다.

전자빔 리토그래피 장비를 이용하여 컴퓨터형성홀로그램을 제작하기 위해서는 gds 데이터 포맷의 파일을 제작하여

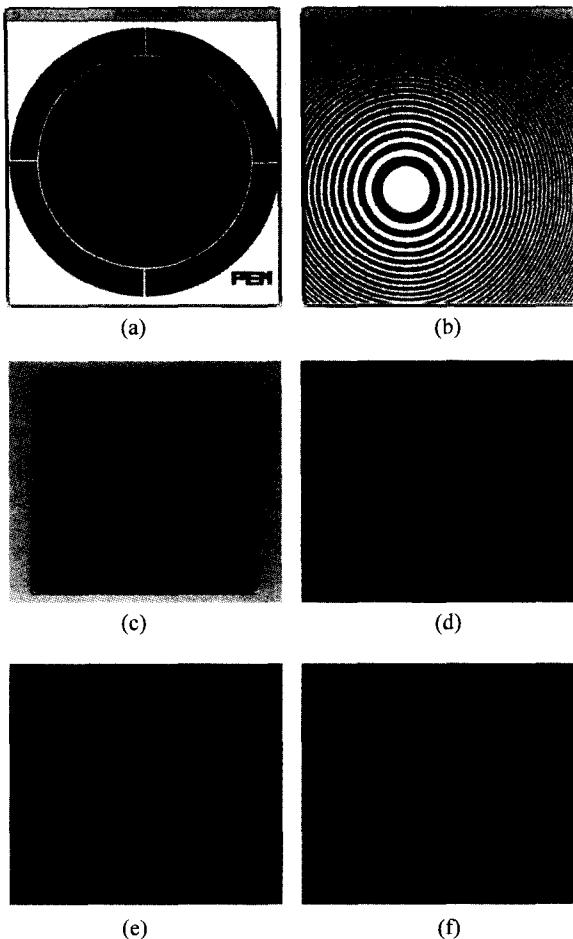


그림 7. 설계 및 제작된 컴퓨터형성홀로그램; (a~b) 설계된 컴퓨터형성홀로그램, (c~f) 제작된 컴퓨터형성홀로그램.

야 한다. 제작된 설계 소프트웨어에서 Autocad<sup>TM</sup> script 형식의 파일을 생성한 후, 상용으로 사용하는 gds변환기를 이용하여 Autocad<sup>TM</sup> 파일을 gds파일로 변환한다. 이 gds파일을 전자-빔 리토그래피 장비의 제어 컴퓨터에 전송하여 컴퓨터형성홀로그램제작 작업을 수행한다.

전자-빔 리토그래피 장비로 제작한 컴퓨터형성홀로그램은 투과형 회절격자로 투과하는 부분과 투과하지 않는 부분이 1:1인 이진 진폭변조형 회절격자이다. 투과형 회절격자는 기본적으로 반사하는 회절성분도 존재하고, 회절격자가 새겨진 유리판의 뒷면 반사 역시 존재할 수 있으므로, 절대적인 효율을 정확히 구할 수는 없다. 그래서 간단한 실험으로 효율을 직접 구해보았다. 컴퓨터형성홀로그램의 주기는 광원의 주기보다 상대적으로 크므로 광원의 편광은 크게 고려하지 않고, 마구잡이 편광의 광원을 컴퓨터형성홀로그램의 표면에 조사한 후, 각 회절성분의 효율을 구해 보았다. 1.0의 광이 홀로그램에 입사하였을 경우, 0차 회절성분은 0.325, 1차 회절성분은 0.0834, 2차 회절성분은 0.0192, 그리고, 3차 회절성분의 경우 0.0049의 효율을 보였다. 주로 사용되는 1차 회절성분의 경우 대략 입사하는 광보다 12배 작다. 이러한 검

퓨터형성홀로그램을 간섭계에 설치할 경우, 100%의 반사율의 대상물을 측정한다고 가정하면 컴퓨터형성홀로그램을 두 번 투과회절하므로 광량은 145배 정도로 감소하게 된다.

## V. 실험결과 및 보정

비구면 거울은 알루미늄을 다이아몬드 터닝 머신으로 제작하였다. 곡률상수 K값이 -1.040이고, 곡률반경이 1800 mm인 크기 600 mm의 망원경용 거울이다. 컴퓨터형성홀로그램으로 인한 측정광의 광량손실을 보상하기 위하여 17.5°의 경사회절격자를 사용한 위상편이 회절격자 간섭계를 구성하여 실험을 수행하였다. 간섭계와 하나의 평판 위에 설치되어 있는 컴퓨터형성홀로그램은 간섭계와 먼저 5자유도 스테이지를 이용해 정렬되고, 전체적으로 다시 5자유도 스테이지로 측정 비구면거울과 정렬된다. 컴퓨터형성홀로그램을 설계시 얻어진 값과 같이 간섭계와 컴퓨터형성홀로그램의 상대적인 거리( $L_s$ )는 200 mm, 컴퓨터형성홀로그램이 새겨진 수정판의 두께( $T$ )는 1.46 mm, 수정판과 측정대상물의 중심까지의 거리( $L_T$ )는 1703.8 mm로 정렬하였다.

그림 8은 얻어진 간섭무늬를 보여준다. 제 2 사분면과 4 사분면에 나타나는 간섭무늬는 간섭계와 컴퓨터형성홀로그램사이의 정렬정도를 나타내는 정렬 컴퓨터형성홀로그램 1에서의 간섭무늬이다. 정렬 컴퓨터형성홀로그램 1은 3차 반사회절성분으로 설계되었다. 제 1 사분면과 3 사분면에 나타나는 간섭무늬는 간섭계, 컴퓨터형성홀로그램, 측정물체의 광축상의 위치정도를 나타내는 정렬 컴퓨터형성홀로그램 2에서의 간섭무늬이다. 그러나, 3차 투과회절을 두 번 거치기 때문에 간섭무늬의 가시도가 크게 떨어짐을 알 수 있다. 가운데 보이는 간섭무늬가 측정대상물의 정보를 담고 있는 간섭무늬이다. 컴퓨터 형성 홀로그램은 측정대상물의 정보뿐 아니라 다른 회절성분들 역시 존재하여 간섭무늬에 영향을 미칠 수 있다. 이는 결상광학계의 편향을 조절하여 제거할 수 있다. 그러나, 본 실험에선 완전히 제거하진 못하여 간섭무늬의 가운데에 잡음신호가 결상되어, 소프트웨어적으로 잡

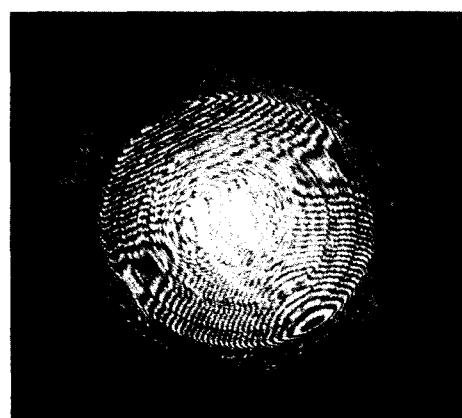


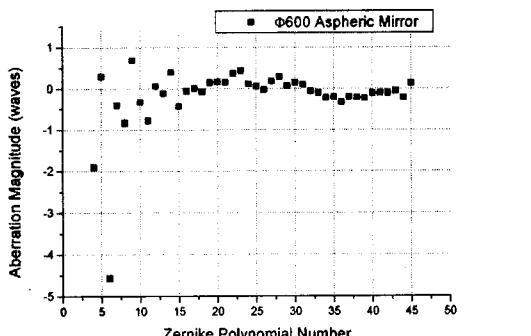
그림 8. 지름 600 mm 비구면의 측정결과 얻은 간섭무늬.

음을 처리하였다. 그림 9 (a)는 측정된 결과를 제니케 다항식 맞춤을 이용하여 수차량을 산출한 결과이고 그림 9 (b)는 파면을 다시 복원하여 이차원, 삼차원으로 도식화한 것이다. 비점수차가 가장 크게 작용하여 전체적으로  $11.50\lambda$ (peak-to-valley)크기의 말안장 형태의 모양이 나타남을 알 수 있다.

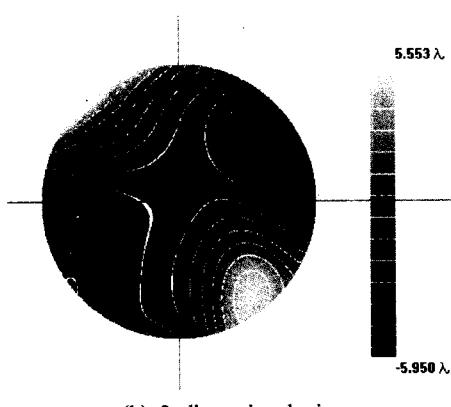
측정대상물의 측정결과에 컴퓨터형성홀로그램으로 인한 시스템 오차가 실릴 수 있으므로 따로 보정과정을 거쳐서 컴퓨터형성홀로그램 오차성분을 제거해 주어야 한다. 본 논문에서는 자가보정법을 적용하여서 컴퓨터형성홀로그램오차를 제거하였다.<sup>[15]</sup> 컴퓨터형성홀로그램은 하나의 렌즈로 취급될 수 있으므로 광축을 중심으로 등간격으로 회전하여서 오차성분을 제거할 수 있다. 전체적인 파면의 측정 결과는 다음과 같이 컴퓨터형성홀로그램오차성분을 뺀어서 표시할 수 있다.

$$W(r, \theta) = T(r, \theta) + H(r, \theta) + S(r, \theta) \quad (11)$$

여기서  $T$ 는 비구면의 형상오차,  $S$ 는 간섭계의 오차,  $H$ 는 컴퓨터형성홀로그램으로 인한 오차성분을 의미한다. 여기서 간섭계의 오차는 미리 측정해 놓을 수도 있고, 다른 성분에 의해 그 값이 매우 작은 편이므로 무시해도 된다. 컴퓨터형성홀로그램을 광축방향으로 회전한 측정결과들을 모두 더할 경우 컴퓨터형성홀로그램오차는 결과에서 사라지게 된다.



(a) 45 term Zernike representation of the measured wavefront



(b) 2 dimensional view

그림 9. 측정결과.

$$T + S = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} W_i \quad (12)$$

모두 더한 결과를 측정결과에서 뺄 경우 회전대칭인 부분을 제외하고 컴퓨터형성홀로그램오차성분을 역으로 구할 수 있다. 회전대칭인 부분은 전체적으로 작은 편이므로 간단하게 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.<sup>[16]</sup>

$$H = W - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} W_i \quad (13)$$

그림 10은 컴퓨터형성홀로그램을  $90^\circ$ 씩 네 번 회전하여 얻은 간섭무늬를 보여준다. 컴퓨터형성홀로그램의 회전과 무관하게 유사한 형태의 간섭무늬가 얻어짐을 알 수 있다. 그림 11은 제니케 다항식 맞춤을 이용하여 보정결과를 보여준다. 그림 11 (a)는 보정된 비구면의 수차를 보여주는 결과이다. 그림 11 (b)는 식 13으로부터 얻어진 컴퓨터형성홀로그램을 두 번 통과함으로써 발생하는 오차를 나타낸다. 수차함을 복원하여 분석한 결과 컴퓨터형성홀로그램의 전체적인 오차는 제곱평균제곱근(root-mean-square)값으로  $0.61\lambda$ 였다. 컴퓨터형성홀로그램을 두 번 통과하므로 오차는 이 결과의 반인 제곱평균제곱근  $0.30\lambda$ 의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 이 역시 회전시 발생하는 정렬오차성분으로 인한 영향이 남아있으므로 실제적인 오차는 이 값보다 작을 것이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 비구면의 형상오차를 정확하게 측정하기 위하여 이진컴퓨터형성 홀로그램과 위상면이 회절격자 간섭계를 이용한 측정방식을 제안하였다. 제안한 시스템은 회절격자 간섭계의 정확도를 그대로 가져올 수 있고, 간단하게 설

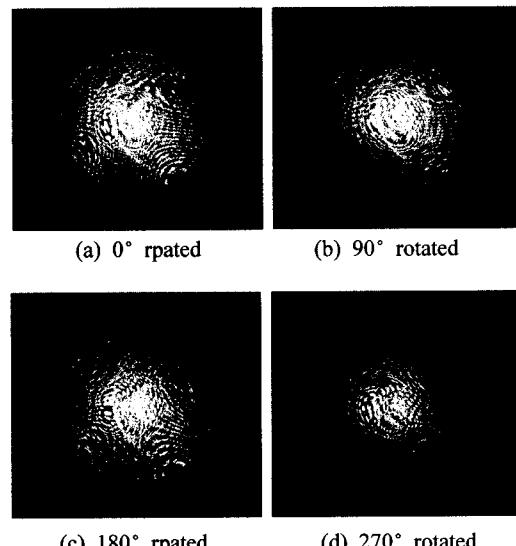


그림 10. 홀로그램을 4번 회전하여 얻은 간섭무늬.

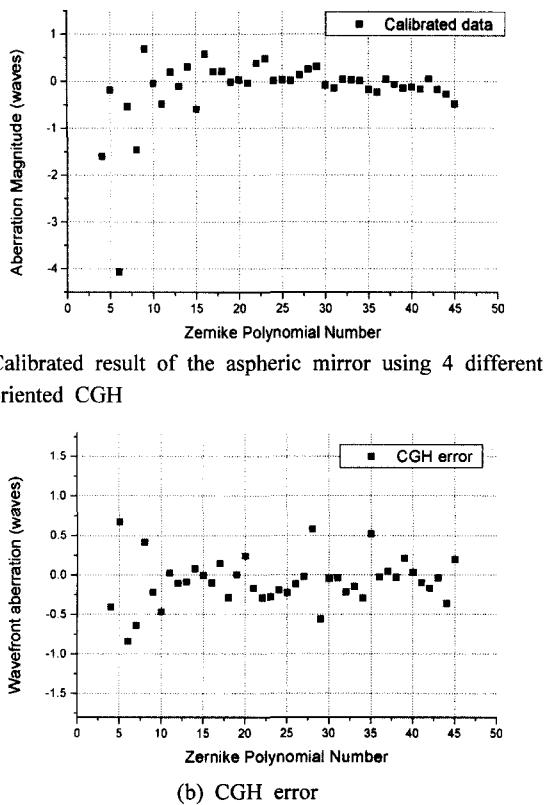


그림 11. 컴퓨터 형성 홀로그램의 오차를 제거하는 자가 보정결과.

계, 제작된 컴퓨터형성 홀로그램을 이용하여 비구면을 정확하게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 측정대상물인 비구면으로부터의 광선추적과 수치해석, 투과함수의 이진화 방식을 통하여 이진컴퓨터 형성 홀로그램을 간단히 설계하는 알고리즘을 제안하였고, 실제로 전자-빔 리토그래피를 이용하여 이진 컴퓨터 형성 홀로그램을 제작하였다. 위상편이 회절격자 간섭계를 수정하여 측정광이 기준광보다 상대적으로 큰 간섭계로 재설계하고, 회절격자의 격자형상에 따른 가시도를 수치해석으로 산출해 내어서 이진컴퓨터 형성 홀로그램을 이용한 널 시스템에 적합한 회절격자 간섭계를 고안하고 제작하였다. 지름 600 mm의 알루미늄재질인 비구면을 디아몬드 터닝 머신으로 제작하여서 위상편이 회절격자 간섭계로 평가해보았다.

### 참고문헌

- [1] Daniel Malacara, *Optical Shop Testing*, 2<sup>nd</sup> ed. (John Wiley & Sons, Inc. 1992).
- [2] William C. Sweatt, "Describing holographic optical elements as lenses," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 67, no. 6, pp. 803-808, 1977.
- [3] Wai-Hon Lee, "Binary synthetic holograms," *Appl. Opt.* vol. 13, no. 7, 1677-1682, 1974.
- [4] A. W. Lohmann, D. P. Paris, "Binary Frounhofer hologram, generated by computer," *Appl. Opt.*, vol. 6, no. 10, pp. 1739-1748, 1967.
- [5] A. J. MacGovern and J. C. Wyant, "Computer generated hologram for testing optical element," *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 3, pp. 619-614, 1971.
- [6] S. M. Arnold, "Electron beam fabrication of computer generated holograms," *Opt. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 803-807, 1985.
- [7] J. H. Burge and D. S. Anderson, "Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates," *Proc. SPIE*, vol. 2199, pp. 181-198, 1994.
- [8] Steven M. Arnold and Anil K. Jain, "An interferometer for testing of general aspherics using computer generated holograms," *Proc. SPIE*, vol. 1396, 1990.
- [9] Steven M. Arnold, "Figure metrology of deep general aspherics using a conventional interferometer with CGH null," *Proc. SPIE*, vol. 2536, pp. 106-226, 1995.
- [10] Tae-Joon Hwang and Seung-Woo Kim, "Phase-shifting diffraction-grating interferometer for concave mirror testing," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 12, pp. 3532-3536, 2003.
- [11] 황태준, 김승우, "오목 거울 측정용 위상편이 회절격자 간섭계," *한국광학회지*, 제 14권 4호, pp. 392-398, 2003.
- [12] E. G. Loewen, *Diffraction gratings and applications*, (Marcel Dekker, Inc., 1997).
- [13] L. I. Goray and J. F. Seely, "Efficiencies of master, replica, and multilayer gratings for the soft x-ray - EUV range: modeling based on the modified integral method and comparisons to measurements," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 7, pp. 1434-1445, 2002.
- [14] Taehee Kim, James H. Burge, and Yunwoo Lee, "Measurement of highly parabolic mirror using computer generated hologram," *Proc. SPIE*, vol. 4778, 2002.
- [15] Chris J. Evans and Robert N. Kestner, "Test optics error removal," *Appl. Opt.* vol. 35, no. 7, pp. 1015-1020, 1996.
- [16] K. Freishlad, M. Kuchel, K. H. Schuster, U. Wegmann, and W. Kaiser, "Real time wavefront measurement with lambda/10 fringe spacing for the optical shop," *Proc. SPIE*, vol. 1332, pp. 18-24, 1990.

## Diffracton grating interferometer for null testing of aspheric surface with binary amplitude CGH

Tae-Joon Hwang and Seung-Woo Kim<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Science Town, Daejeon, 305-701, South Korea*

<sup>†</sup>E-mail: swk@kaist.ac.kr

(Received October 17, 2003, Revised manuscript May 27, 2004)

We present a null testing method for aspheric surfaces, utilizing a phase-shifting diffraction grating interferometer along with a binary amplitude computer generated hologram (CGH). The binary amplitude CGH is designed to compensate for the wavefront between a point source and the aspheric surface under test. The fringe visibility of the grating interferometer is controlled easily by selecting suitable grating diffraction orders for the measurement and reference wavefronts or by optimizing the groove shape of the grating used. The binary amplitude CGH is designed by numerical analysis of ray tracing and fabricated using e-beam lithography for autostigmatic testing. Experimental results of a large-scale aspheric mirror surface are discussed to verify the measurement performance of the proposed diffraction grating interferometer.

OCIS Codes : 120.3180, 050.1950, 090.1760, 220.1250.