

오목 거울 측정용 위상천이 회절격자 간섭계

황태준 · 김승우[†]

한국과학기술원 기계공학과 BUPE연구단

⊕ 306-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2003년 5월 2일 받음, 2003년 6월 19일 수정본 받음)

구면 거울을 정밀하고 정확하게 측정할 수 있는 위상천이 회절격자 간섭계를 제시한다. 간섭계는 하나의 회절격자를 이용하여 간섭계의 기준광과 측정광을 분할하고, 다시 결합시켜 간섭무늬를 생성시키고 위상천이 시키는 간단한 구조로 설계되었다. 광원으로부터의 광을 큰 수치구경인 고정도의 집속렌즈의 초점에 위치한 회절격자 위에 집속하여 반사회절된 파면을 기준파면과 측정파면으로 사용한다. 부가적인 기준면이 없이 회절격자 위의 매우 작은 영역이 기준면을 대신하므로 시스템 오차가 작다. 광섬유 형태의 공초점현미경 구조를 광원과 집속렌즈 사이에 설치하여 집속렌즈와 회절격자사이의 정렬오차를 최소화 하였다. 회절격자를 광축에 수직한 방향으로 이송함으로써 기준파면과 측정파면사이의 상대적인 위상천이를 일으켜서 일련의 위상천이된 간섭무늬를 쉽게 획득할 수 있다. 간섭계를 제작하고, 결상렌즈와 CCD를 이용해서 얻은 위상천이된 대상구면 거울의 간섭무늬들을 해석하여 전체적인 간섭계 시스템의 성능을 평가해 보았다.

주제어 : Interferometry, diffraction grating, phase-shifting, single mode fiber, confocal microscopy.

I. 서 론

렌즈와 거울의 형상을 정밀하게 측정하고 평가하는 광학시험에 많은 형태의 공간섭계가 개발되고 사용되어왔다. 그 중, 회절격자를 광선분할기로 사용하는 형태의 공간섭계들을 통칭하여 회절격자 간섭계라 부른다. 회절격자 간섭계는 별개의 광학표면을 사용하지 않고 회절격자에서 회절된 파면을 직접 기준파면으로 사용할 수 있으므로, 격자의 형태나 주기를 선정하여 회절된 기준파면과 측정파면을 원하는 방향으로 재생하여 다양한 형태의 간섭계를 만들 수 있다. 뿐만 아니라 광분할기로 사용한 같은 격자를 기준광과 측정광을 다시 결합하여 간섭무늬를 재생해 내는 용도로도 사용할 수도 있다. 한 개나 두 개의 회절격자를 이용해서 간단하고 다양한 용도로 사용된 예를 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 회절격자에서 회절된 두 개의 파면이 횡방향으로 총밀린 간섭무늬를 만들어내는 론키 시험^[1]은 대표적인 예이고, 경사조사간섭계,^[2,3] 반사회절격자 간섭계,^[4] 점회절간섭계,^[5] 그리고 다중채널 간섭계^[6]는 잘 알려진 예이다.

본 논문에서는 특히 오목 거울을 정확하게 측정하는 여러 가지 형태의 회절격자 간섭계를 제시한다. 거울을 측정하는 간섭계에 회절격자를 사용하는 것은 1969년에 제시되었다.^[7] 하나의 격자에서 회절된 한 회절파면을 기준파면으로 사용하고 다른 회절파면을 측정파면으로 사용한다. 회절격자는 광원에서 출발한 광을 기준광과 측정광으로 분할하고 재결합하여 간섭무늬를 재생하는 용도로 사용된다. 즉 회절격자는 광선분할기와 동시에 기준면으로 사용되고 기준파면을 재생하기 위하여 다른 부가적인 광학부품이 사용되지 않는다. 회절격자로 반

사형 격자를 사용할 경우 적외선 영역과 자외선 영역의 광원을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 광원에서 출발한 광을 집광렌즈로 집광하여 수렴하는 구면파를 만든 후 집광렌즈의 초점에 회절격자를 설치하고 광을 분할 하는 형태인 경우, 회절격자면 위에 광이 맺히는 영역이 매우 작아져서 상대적으로 넓은 영역에 양질의 회절격자를 생성해야 할 필요성이 없어진다.^[8] 즉, 기준면과 광선분할기의 영역이 매우 작아지므로, 그만큼 전체 시스템 오차가 작아지는 장점을 가지고 있다. 반사형 회절격자의 경우, 초점으로 맺히는 형태의 광선에 수차를 유발하지 않으므로, 오목 거울의 Autostigmatic 형태의 측정 간섭계^[9]에 사용될 수 있다.

II. 간섭계 설계

구면의 오목 거울을 측정할 때는 구면의 곡률중심에 점광원을 두고, 점광원에서 출발한 구면파가 측정대상물에서 반사하고, 다시 곡률중심으로 돌아오는 Autostigmatic 형태가 적합하다. 정밀한 간섭계를 구성하기 위해서는 점광원이 양질의 구면파를 재생할 수 있어야 하고, 대상물의 형상정보를 가지고 있는 측정광을 결상계쪽으로 반사할 수 있게 처리되어야 한다. 그림 1은 이와 같은 점을 고려해서 설계된 Autostigmatic 형태인 대표적인 두 가지 형태의 간섭계를 나타낸 것으로 하나는 단일모드 광섬유를 사용하고 다른 하나는 양질의 집속렌즈를 사용한 것이다. 기준광은 부가적인 기준면으로 만들어지는 것이 아니라 점광원에서 출발한 구면파 중 일부가 기준광으로 사용된다. 측정대상물에서 반사된 측정광이 기준광과 간섭하기 위하여 점광원의 위치이자 측정대상물의 곡률중심인 점 C에 반사면을 설치한다.

그림 1(a)에서 나타나듯이 레이저에서 출발한 단색광은 단일

[†]E-mail: swk@kaist.ac.kr

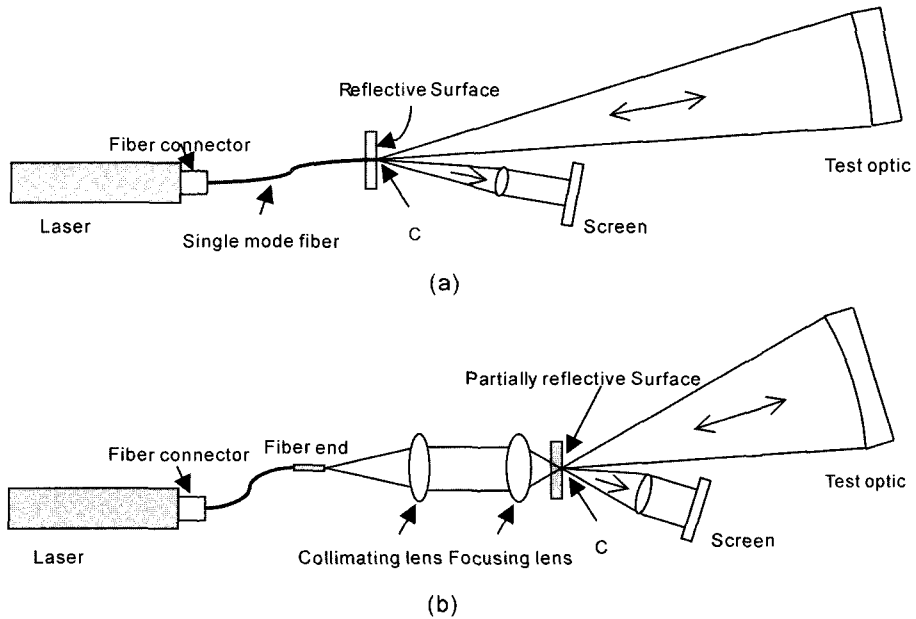


그림 1. 오목한 구면거울을 측정하기 위한 두 가지 Autostigmatic 형태의 간섭계; (a) 단일모드 광섬유의 끝단을 점광원으로 이용한 경우, (b) 고정도의 시준렌즈와 집속렌즈의 조합으로 점광원을 만드는 경우

모드 광섬유로 전파된 후, 광섬유의 다른 쪽 끝에서 점회절된다. 회절된 광은 구면파의 형태로 측정대상 거울면과 결상렌즈를 동시에 비춘다. 거울면의 곡률중심이 점 C에 위치하도록 설치된 거울면에서 반사한 광은 다시 점 C로 모이고, 광섬유의 끝단과 같은 평면 위에 설치된 반사면에서 반사한다. 반사한 광은 스크린으로 향하고 기준광과 간섭을 일으켜 간섭무늬가 관측된다. 실질적으로 단일모드 광섬유에서 회절된 파면의 수치구경은 0.1 정도의 상대적으로 작은 값이므로 그림 1(a)와 같은 시스템으로는 큰 F수의 오목거울만이 측정가능하다. 작은 F수의 거울을 측정하기 위해서는 그림 1(b)와 같이 단일모드 광섬유대신 큰 수치구경의 집속렌즈를 대신 사용할 수 있다. 고정도의 시준렌즈와 집속렌즈가 구면파를 재생하기 위해서 사용되었으며, 광원에서부터 오는 광을 투과하고, 측정물에서 오는 파면을 반사하기 위해 집속렌즈의 초점과 측정대상의 곡률중심인 점 C에 광축에 수직으로 부분반사면을 설치한다.

광섬유 끝이나 집속렌즈를 광축방향으로 이송하여서 간섭무늬에 위상천이를 일으킬수도 있지만, 구면파의 경우 광축방향으로 이송하였을 경우, 파면전체에 걸쳐서 위상천이량은 균일하지 못하고 측정오차를 유발한다. 이러한 문제는 그림 2와 같이 회절격자를 집속광의 초점에 설치하여 점광원으로 사용함으로써 해결할 수 있다. 회절격자를 광축과 격자방향에 수직인 방향으로 이송할 경우 회절된 파면의 위상천이량은 균일하다.^{[10],[11]} 즉, 회절격자는 회절광의 점광원역할과 동시에 위상천이기의 역할을 동시에 수행하게 된다.

그림 2(a)와 같이 구면파가 구면파의 초점에 놓여있는 투과형 회절격자 위에 수직으로 입사하였을 경우 발생하는 회절현상은 잘 알려진 회절격자방정식으로 쉽게 설명할 수 있다. 만약 회절격자가 Δx 만큼 수직으로 이송되었을 경우, 발생하는 회절파면의 위상천이량은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

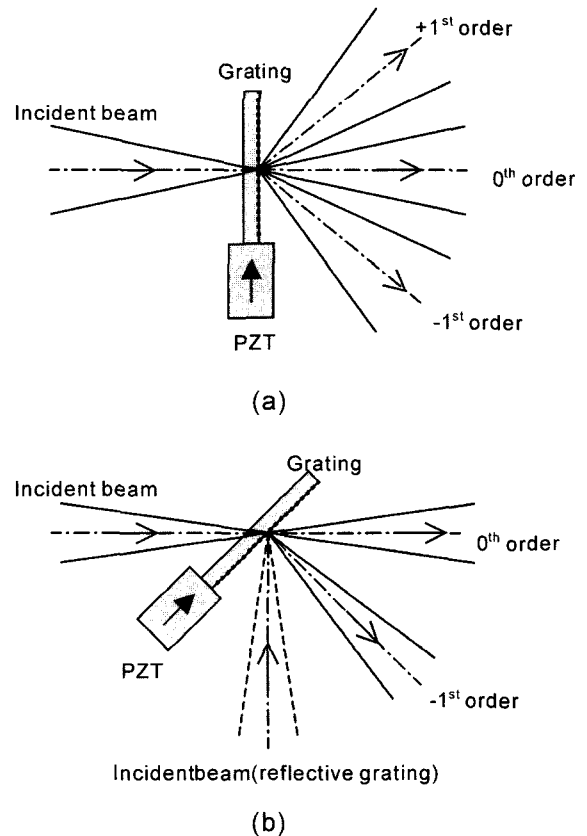


그림 2. 회절격자의 한 점으로 구면파가 집속되는 형태에서 회절격자를 이송하여 회절파면에 위상천이를 일으키는 방식; (a) 회절격자에 수직으로 입사, (b) 회절격자에 경사지게 입사.

$$\Delta\Omega_m = m \frac{2\pi\Delta x}{d} \tag{1}$$

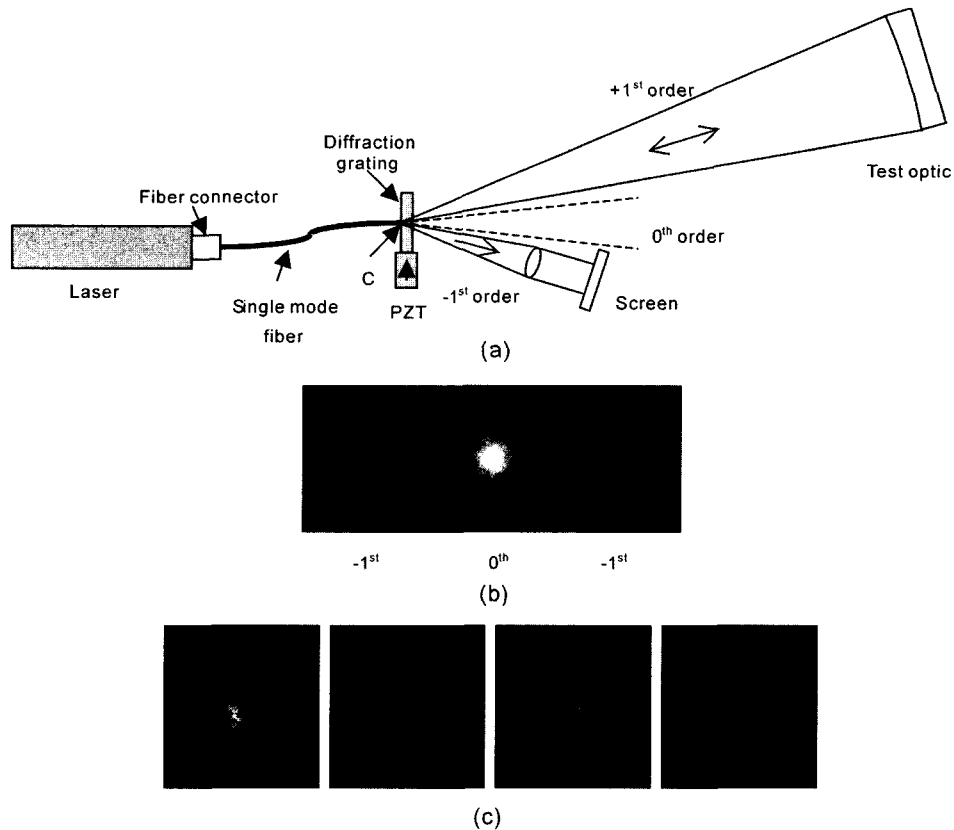


그림 3. 간단한 위상천이 회절격자 간섭계; (a)시스템, (b) 회절된 표면의 강도 영상, (c) 네 개의 위상천이된 간섭무늬.

식 (1)에서 m 은 회절차수, d 는 격자 주기를 의미한다. 식 (1)에서도 알 수 있듯이 0차 회절성분은 위상천이량은 없는 반면, 높은 차수의 회절성분은 회절차수와 회절격자의 이송량에 비례하여 위상천이가 발생한다. 그림 2(b)의 경우는 구면파가 특정한 각을 가지고 경사지게 입사할 경우를 나타낸다. 입사하는 구면파의 경사각이 격자의 이송에 의해서 발생하는 위상천이량에 미치는 영향은 없으므로, 입사각과 회절격자의 주기를 바꿈으로써 회절표면의 방향을 손쉽게 바꿀 수 있다. 점선으로 표시된 것은 반사회절격자의 경우 입사광의 방향을 나타낸 것이다. 투과형 회절격자가 새겨진 유리판의 굴절률과 두께가 투과한 회절표면에 수차를 유발할 수 있으나 반사회절격자를 사용한 경우 유리판을 투과하지 않으므로 유리판으로 인한 수차가 없는 구면파를 얻을 수 있다.

그림 3은 광섬유 끝에 투과형 회절격자를 설치하여 autostigmatic 형태의 간섭계를 꾸민 실례를 나타낸다. 간단한 시스템을 꾸미기 위해서 광섬유의 끝단을 점광원으로 이용한 그림 1(a)와 유사한 형태에 투과형 회절격자를 설치하여서 제작하였다. 투과형 회절격자 자체가 반사형 회절격자 역할을 동시에 수행할 수 있으므로, 대상물에서 반사한 광이 회절격자 면에서 반사회절하여 스크린으로 향할 수 있다. 점광원이 위치한 평면에 정확히 회절격자가 위치하여야 하지만, 실질적으로 회절격자를 이송하였을 경우 발생할 수 있는 회절격자와 광섬유 끝의 물리적인 충돌을 막기 위해 그 사이에 매우 작은 간격이 필요하다. 작은 수치구경의 구면거울을 측정해서 간섭

계를 검증해 보았다. 대상 거울은 회절격자에서 회절하는 회절성분들 중 +1차 회절성분의 광축상에 놓여지고 대상거울의 곡률중심은 점광원 즉, 광섬유 끝단과 동일 위치인 점 C의 위치와 같게 조정한다. -1차 회절성분은 기준표면으로 사용되며 스크린을 비춘다. 대상거울에서 반사된 측정광은 다시 회절격자를 향하고 점 C에서 반사회절하고 그 중 0차 회절성분은 기준광과 간섭하여 스크린에 간섭무늬를 생성한다. PZT구동 스테이지로 회절격자를 Δx 만큼 이송하면, 기준광과 측정광은 각각 ± 1 차 회절광이므로 그 위상은 식 (1)에 따라서 표면전체에 균일하게 천이된다. 기준광과 측정광의 위상차는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Delta\Omega - \Delta\Omega_o - \Delta\Omega_r = +2\pi\frac{\Delta x}{d} - (-2\pi\frac{\Delta x}{d}) = +4\pi\frac{\Delta x}{d} \quad (2)$$

여기서 $\Delta\Omega_o$ 는 측정광의 위상천이량이고, $\Delta\Omega_r$ 은 기준광의 위상천이량이다. 측정광이 회절격자에서 두 번 회절하지만, 두 번째는 측정거울에서 스크린쪽으로 반사하는 0차 회절이므로 그로 인해 발생하는 위상의 변화는 없다. 그림 3(b)는 실험에 사용된 투과형 회절격자에서 회절된 0차와 ± 1 차 회절성분을 스크린에 비추어 얻은 영상을 나타낸다. 실험에서 사용한 격자는 2.29 mm의 두께인 quartz위에 새겨져 있고, 2 μ m의 주기를 가지고 있는 binary amplitude 형태이므로 두 1차 회절성분은 강도가 같다. 안정적으로 회절격자를 이송하기 위해 광섬유 끝과 회절격자의 사이에 10 μ m의 간격을 주고 실험하였

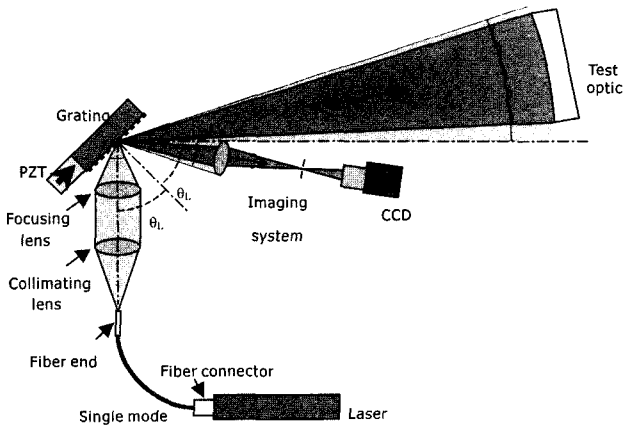


그림 4. Littrow설치된 위상천이 회절격자 간섭계.

다. 그림 3(c)는 632.8 nm의 단색광을 사용하여 구면 거울을 측정하고, 회절격자를 안전하게 이송하여서 얻은 네 개의 위상천이된 간섭무늬를 나타낸다.

앞서 설명한 것과 같이, 회절격자가 새겨져 있는 일정한 두께와 굴절률을 가지는 유리판은 투과된 회절성분인 기준광과 측정광에 수차를 유발할 수 있다. 그림 3의 간섭계에서 볼 수 있듯이 기준광은 격자를 한 번 투과하는데 반해 측정광은 두 번 투과하므로 간섭무늬에 그 영향이 나타나게 되고 시스템 오차로 남게 된다. 이러한 수차성분은 유리판의 두께와 굴절률을 고려하여 소프트웨어로 보정할 수 있지만, 정밀한 측정이 요구되는 경우에는 부적절하다.

그림 4와 5는 투과회절성분이 유발할 수 있는 수차를 제거하기 위해 반사형 회절격자를 사용하고, 큰 수차구경의 거울을 측정할 수 있게 광섬유대신 집속렌즈를 사용한 두 가지 다른 형태의 위상천이 회절격자 간섭계를 나타낸다.

그림 4는 그림 1(b)와 비슷한 형태로 회절격자가 입사광에 대하여 Littrow설치된 형태이다. 이 경우, 회절격자는 마치 광축에 수직으로 설치된 반사거울과 비슷한 역할을 한다. 광섬유 끝에서 나오는 구면파를 회절격자 위에 초점을 맞추어 입사시키기 위하여 고정도의 시준렌즈와 집속렌즈가 사용된다. 입사된 광은 0차와 -1차 회절성분으로 나뉘고, -1차 회절성분은 반사회절하여 집속렌즈로 향한다. 회절격자에서 반사된 0차 회절성분은 측정거울과 간섭무늬를 획득하는 결상렌즈를 동시에 비춘다. 측정거울에서 반사한 광은 회절격자로 향하고 회절격자에서 다시 회절된 성분 중 1차 회절성분은 기준광과 간섭하여 CCD에서 간섭무늬가 결상된다.

PZT스테이지로 회절격자를 Δx 만큼 이송하면, 단순히 0차로 반사한 기준광의 위상은 회절격자 이송으로 인해 천이되지 않고, 1차 회절된 측정광의 위상은 파면전체에 걸쳐서 일정하게 천이된다. 즉, 두 파면의 위상차는 식 (3)으로 표시할 수 있다.

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_o - \Delta\Omega_r = +2\pi \frac{\Delta x}{d} \quad (3)$$

여기서 격자는 한 격자주기에 걸쳐 연속적으로 이송되고, 그로 인해 얻어지는 광위상은 위상천이 알고리즘¹⁶⁾을 통하여 정

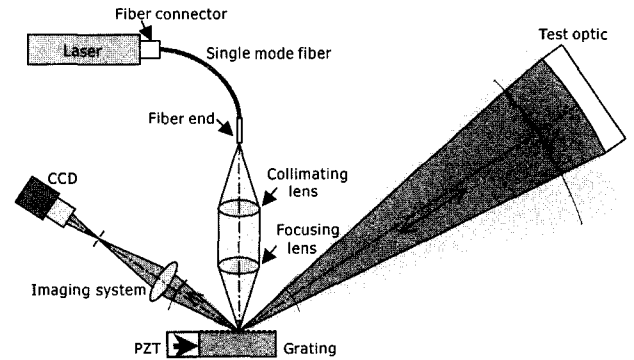


그림 5. 입사광이 수직으로 입사하는 위상천이 회절격자 간섭계.

확히 구해낼 수 있다.

그림 5에 나타나있는 간섭계에서는 그림 3과 같이 반사형 회절격자가 광선분할기의 역할로 사용된다. 구면파를 재생하기 위해 그림 4에서 소개한 간섭계와 동일하게 단일모드 광섬유, 시준렌즈, 그리고 집속렌즈가 사용되고, 집속렌즈의 초점에 회절격자가 광축에 수직으로 설치된다. 구면파는 회절격자 위에 수직으로 입사하고 회절된다. -1차 회절성분은 기준파면으로 사용되고, +1차 회절성분은 측정파면으로 사용되며 측정대상물에서 반사하여 다시 회절격자에서 0차 반사회절된다. 측정광과 기준광은 간섭하여 그 간섭무늬는 결상렌즈를 통해서 CCD에서 획득된다. 기준광과 측정광 사이의 위상차는 앞선 식 (2)와 동일하게 표시할 수 있다.

III. 광집속 렌즈와 공초점 현미경

그림 4와 5의 간섭계에는 반사형 회절격자가 사용되어서 특정한 굴절률과 두께의 회절격자의 유리판으로 인한 수차의 영향은 발생하지 않는다. 그리고, 수차구경이 작은 단일모드 광섬유에 비하여 큰 수차구경의 집속렌즈를 사용할 수 있어서 작은 F수의 구면 거울을 손쉽게 측정할 수 있다. 그러나, 수렴하는 구면파를 회절격자의 한 점에 집속하는 형태인 경우, 집속렌즈와 회절격자 사이에 실제적인 정렬문제가 발생한다. 만약 회절격자가 집속렌즈의 초점에 정확하게 놓여지지 않을 경우, 회절성분인 기준파면과 측정파면에 수차가 유발되고 결론적으로 측정 오차가 발생한다. 이러한 문제를 제거하기 위하여 공초점 현미경에 이용된 방식을 적용한다. 공초점 현미경 방식^{12,13)}은 회절격자를 정확히 집속렌즈의 정확한 초점에 정렬하기 위하여 사용된다. 공초점 현미경은 회절한계 주사점의 현미경으로써 광원과 광검출기쪽이 마이크로미터 수준의 편홀이 사용된 것이다. 편홀을 단일모드 광섬유의 끝으로 대체함으로써 동초점현미경 구조를 매우 간단히 할 수 있고, 제시한 간섭계에 쉽게 적용할 수 있다.

그림 6은 그림 4와 5에서 제시한 간섭계의 회절격자 정렬에 이용되는 공초점 현미경방식의 원리를 나타내고 있다. 기본적으로 단일모드 광섬유의 2x1 광섬유결합기로 이루어져있으며, 앞서 제시한 간섭계의 광섬유를 간단히 광섬유결합기구조로 대체하여 변경할 수 있다. 레이저에서 나온 광은 렌즈를 통해

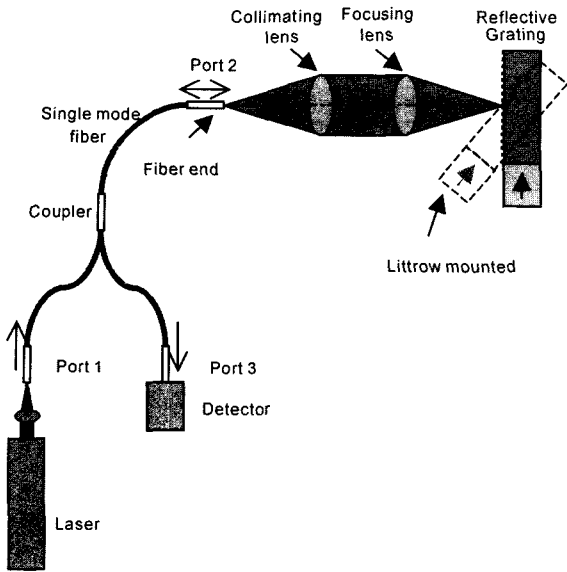


그림 6. 공초점 현미경 원리를 이용한 정렬.

광섬유결합기의 포트 1로 집광되고, 포트 2에서 구면파로 전파한다. 시준렌즈와 집적렌즈를 통해서 회절격자의 한 점에 집광되는 광은 회절격자에서 반사회절하여 집적렌즈와 시준렌즈를 다시 거쳐 광섬유결합기의 포트 2로 다시 집광된다. 이 광의 일부는 광섬유결합기의 포트 3으로 향하고, 광검출기로 광강도가 측정된다. 회절격자를 집적렌즈와 정렬하면서, 광검출기의 출력 전압 신호를 통하여 집적렌즈의 정확한 초점을 찾을 수 있다. 회절격자가 Littrow설치되어 있다면, 시준렌즈와 집적렌즈를 통해서 회절격자 위에 경사각으로 입사하는 광의 회절광 중 1차 회절 성분이 다시 집적렌즈를 향하고, 포트 2로 집적되므로 동일한 방식으로 회절격자의 정렬을 수행할 수 있다.

IV. 측정 결과

실험실에서 위상천이 회절격자 간섭계를 구성하여 실험을 수행하였다. 파장 632.8 nm의 헬륨네온 레이저를 간섭계의 광원으로 채택하고, 1 mm에 1200개 사인패턴의 격자무늬가 있는 반사형 홀로그래픽 회절격자를 광선분할기로 사용하였다. PZT 마이크로 스테이지를 회절격자에 장착하여 회절격자를 격자방향과 광축방향에 수직하게 이동하는 위상천이기로 사용하였다. 광섬유 내에서 632.8 nm 대역의 단일모드 도파를 위해 core의 지름 크기가 3.3 μm 인 2x1 광섬유결합기가 사용되었다. 광섬유 끝에서 나오는 구면파의 수치구경은 0.16이다. 수치구경 0.14인 고정도의 대물렌즈가 광섬유결합기에서 나오는 구면파를 평면파로 바꾸는 시준렌즈로 사용되었고 수치구경 0.28의 고정도의 대물렌즈가 회절격자에 광을 집속하는 집속렌즈로 사용되었다. 집속렌즈의 초점에 회절격자를 정확히 정렬하기 위해 PZT 마이크로 스테이지가 장착된 회절격자는 광축이송과 더불어 광축에 수직하고 서로 수직한 방향으로의 두 기울기 θ_x, θ_y 를 조절할 수 있는 짐발설치대가 붙어있는 3축 스테이지 위에 설치하였다.

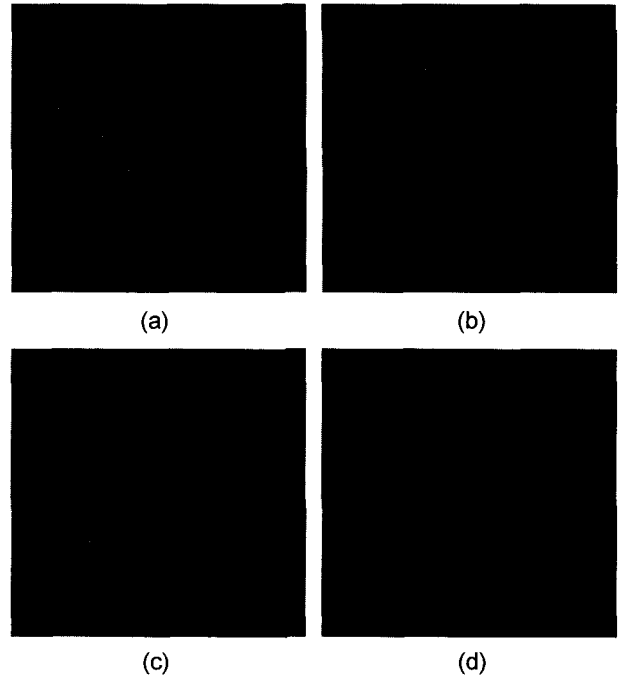


그림 7. 632.8 nm의 광원으로 측정된 오목거울의 위상천이된 간섭무늬.

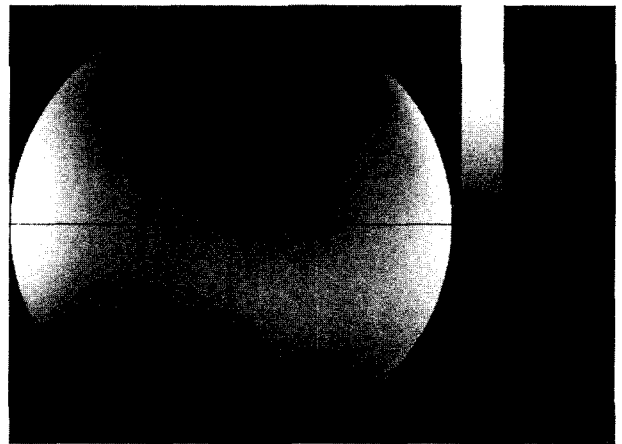


그림 8. Zernike 다항식을 이용해서 복원한 오목거울의 측정결과.

측정대상은 지름이 25.4 mm이고, 초점거리가 25.4 mm인 알루미늄으로 표면처리되어 있는 오목거울을 사용하였다. 측정대상물을 직접 결상하고 있는 640x480 CCD 카메라를 이용하여 위상이 $\pi/2$ 씩 천이된 간섭무늬를 획득하였다. 그림 7은 측정대상물을 측정함으로써 얻은 네 개의 간섭무늬를 보여준다. 그림에서도 나타나듯이 회절격자를 이동함으로써 전 측정 영역에 걸쳐서 위상천이된 간섭무늬를 얻을 수 있음을 알 수 있다. PZT의 길이방향으로의 비선형성으로 인하여 정확하게 등간격으로 위상천이가 일어나지 않을 수 있으므로, 임의 위상 반복 알고리즘^[4]을 도입하여 측정결과를 산출해 내었다. 그림 8은 최종적으로 얻은 거울면의 형태를 구한 것으로 45개의 Zernike 다항식을 사용하여서 측정된 위상을 복원한 결과를 나타낸다.

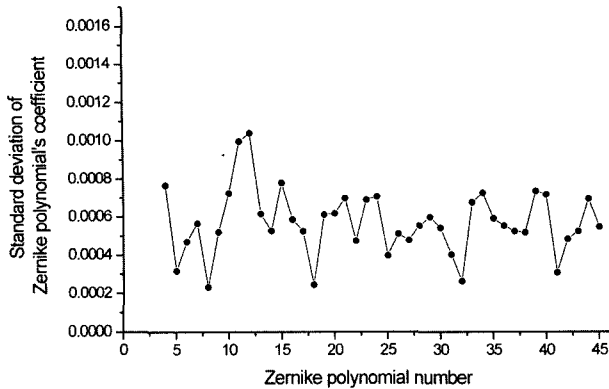


그림 9. 오목 거울을 60회 반복 측정해서 얻은 Zernike계수의 표준 편차값.

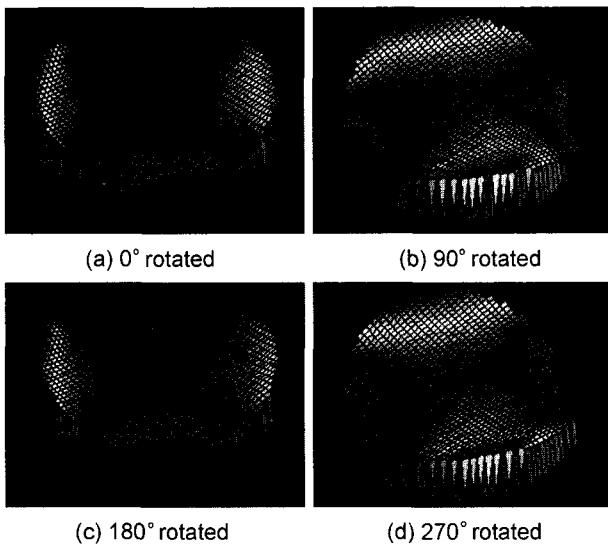


그림 10. 동일한 오목거울을 광축을 중심으로 90°씩 네 번 회전해서 얻은 측정결과.

간섭계의 측정 정밀도는 반복능 시험을 통해서 구할 수 있다. 그림 9는 동일한 오목 거울을 60회에 걸쳐 반복 측정된 결과를 보여준다. 측정결과에서 상수항과 기울기항을 제외한 앞선 45개의 Zernike 다항식을 얻어 각 항에 대한 표준 편차를 도식화하였다. 그래프를 통해서도 알 수 있듯이 모든 Zernike 계수의 표준 편차 값은 0.0011λ 이하이다. 측정대상 영역 전체에 걸쳐서 반복적으로 측정한 제곱평균제곱근 결과의 랜덤한 변화량은 λ/500보다 작았다.

간섭계 시스템의 정확도를 평가하기 위해서 이번에는 0.25λ peak-to-valley 크기인 안장 형태의 오차를 가지고 있는 측정거울을 광축을 중심으로 돌려서 측정을 수행하였다. 그림 10은 측정거울을 광축을 중심으로 완전히 한 바퀴 회전할 때까지 90°씩 네 번 돌려서 각각 측정된 결과를 3차원으로 나타낸 것이다. 그림을 통하여 안장형태의 오차가 거울이 회전함에 따라서 회전함을 알 수 있다. 네 번 측정한 형상의 제곱평균제곱근 결과의 가장 큰 차이는 0.0053λ였고, 이를 통해서 간섭계 시스템이 높은 정확도를 가지고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 간단한 구조와 쉽게 조절할 수 있는 장점과 함께 높은 정밀도를 가지는 위상천이 회절격자 간섭계를 제안하였다. 주로 구면 거울의 형상 오차나 수차를 정확하게 측정할 수 있고, 다른 여러 가지 형태의 광학 부품의 측정에 적용할 수 있다. 하나의 회절격자를 사용하여서 정밀 간섭계에 필요한 광선분할과 재결합, 위상천이를 동시에 수행할 수 있게 간단하게 설계되었다. 광섬유 형태의 공초점 현미경구조를 채택하여 광선을 집속하는 렌즈와 회절격자 사이의 정렬문제도 해결하였다. 제시한 간섭계는 간섭무늬를 생성하는 기준파면과 측정파면이 회절격자의 매우 작은 영역을 제외하고는 다른 광학 부품으로 인해 위상의 변화가 없으므로, 시스템 오차가 매우 작은 장점을 가지고 있다. 간단히 회절격자를 광축에 수직방향으로 이동함으로써 구면파에 균일한 위상천이를 일으켜 위상천이 간섭계를 구현하여 높은 정확도의 형상측정을 수행할 수 있다.

참고문헌

- [1] V. Ronchi, Appl. "Forty years of history of a grating interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 3, no. 4, pp. 437-451, 1964.
- [2] K. G. Birch, "Oblique incidence interferometry applied to non-optical surfaces," *J. Phys. E.*, vol. 6, pp. 1045-1048, 1973.
- [3] P. de Groot, "Grating interferometer for flatness testing," *Opt. Lett.* vol. 21, no. 3, pp. 228-230, 1996.
- [4] S. de Nicola, P. Ferraro, A. Finizio, G. Pesce, and G. Pierattini, "Reflective grating interferometer for measuring the refractive index of transparent materials," *Opt. Comm.* vol. 118, no. 5, pp. 491-494, 1995.
- [5] H. Meddecki, J. Tejnjl, K.A. Goldberg, and J. Boker, *Opt. Lett.* "Phase-shifting point diffraction interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 19, pp. 1526-1528, 1996.
- [6] O. Y. Kwon, "Multichannel phase-shifted interferometer," *Opt. Lett.* vol. 9, no. 2, pp. 59-61, 1984.
- [7] C. R. Munnerylyn, "A simple laser interferometer," *Appl. Opt.* vol. 8, no. 4, pp. 827-829, 1969.
- [8] G. Molesini, G. Pedrini, and F. Quercioli, "Laser unequal path interferometer configurations by grating splitting at the Fourier plane," *Opt. Eng.*, vol 23, no. 5, pp. 646-649, 1984.
- [9] D. Malacara, *Optical shop testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992).
- [10] T. Suzuki and R. Hioki, J., "Translation of light frequency by a moving grating," *Opt. Soc. Am.*, vol. 57, pp. 1551, 1967.
- [11] W. H. Stevenson, "Optical frequency shifting by means of a rotating diffraction grating," *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 3, pp. 649-652, 1970.
- [12] T. Wilson and C. J. R. Sheppard, *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic, London, 1984).
- [13] T. Dabbs and M. Glass, "Fiber-optic confocal microscopes: FOCON," *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 16, pp. 3030-3035, 1992.
- [14] I.-B. Kong and S.-W. Kim, "General Algorithm of Phase-Shifting Interferometry by Iterative Least-Squares Fitting," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 183-188, 1995.

Phase-shifting diffraction grating interferometer for testing concave mirrors

Tae-Joon Hwang and Seung-Woo Kim[†]

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

[†]*E-mail: swk@kaist.ac.kr*

(Received May 2, 2003, Revised manuscript June 19, 2003)

We present a novel concept of a phase-shifting diffraction-grating interferometer, which is intended for the optical testing of concave mirrors with high precision. The interferometer is configured with a single reflective diffraction grating, which performs multiple functions of beam splitting, beam recombination, and phase shifting. The reference and test wave fronts are generated by means of reflective diffraction at the focal plane of a microscope objective with large numerical aperture, which allows testing fast mirrors with low f-numbers. The fiber-optic confocal design is adopted for the microscope objective to focus a converging beam on the diffractive grating, which greatly reduces the alignment error between the focusing optics and the diffraction grating. Translating the grating provides phase shifting, which allows measurement of the figure errors of the test mirror to nanometer accuracy. Interferometry, diffraction grating, phase-shifting, single mode fiber, confocal microscopy.

OCIS Codes : 120.3180, 050.1950, 050.5080, 060.2430, 180.1790.