

위상천이 회절격자 간섭계

Phase-shifting Diffraction-grating Interferometer

황태준*, 김승우

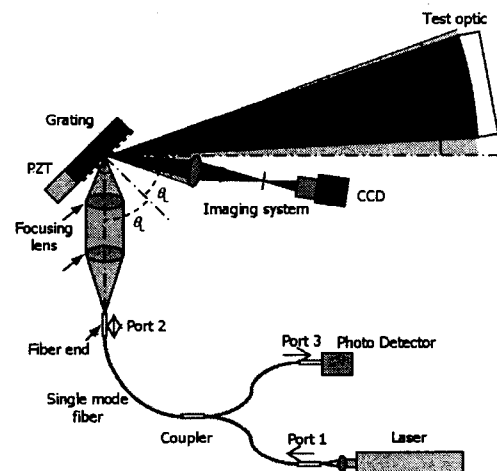
한국과학기술원 기계공학과

joon@pem.kaist.ac.kr*

렌즈와 거울의 형상을 정밀하게 측정하고 평가하는 광학시험에 많은 형태의 공간섭계가 개발되고 사용되어왔다. 그 중, 회절격자를 광선분할기로 사용하는 공간섭계들을 통칭하여 회절격자 간섭계라 부른다. 회절격자 간섭계는 별개의 광학표면을 사용하지 않고 회절격자에서 회절된 파면을 직접 기준파면으로 사용할 수 있으므로, 격자의 형태, 주기를 선정하여 기준파면과 측정파면을 원하는 방향으로 재생하여 다양한 형태의 간섭계를 만들 수 있다.

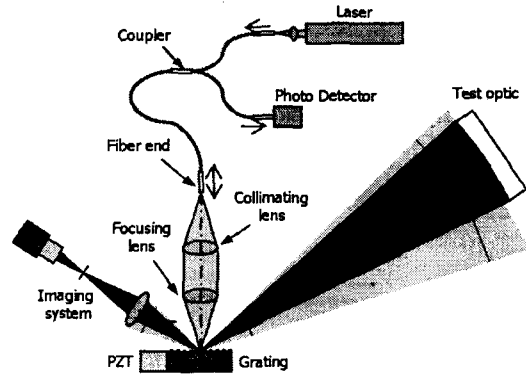
본 논문에서는 특히 오목 거울을 정확하게 측정하는 여러 가지 형태의 회절격자 간섭계를 제시한다. 거울을 측정하는 간섭계에 회절격자를 사용하는 것은 1969년에 제시되었다⁽¹⁾. 하나의 격자에서 회절된 한 회절파면을 기준파면으로 사용하고 다른 회절파면을 측정파면으로 사용한다. 회절격자는 광원에서 출발한 광을 기준광과 측정광으로 분할하고 재결합하여 간섭무늬를 재생하는 용도로 사용된다. 즉 회절격자는 광선분할기와 동시에 기준면으로 사용되고 기준파면을 재생하기 위하여 다른 부파적인 광학부품이 사용되지 않는다. 회절격자로 반사형 격자를 사용할 경우 적외선 영역과 자외선영역의 광원을 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 광원에서 출발한 광을 집광렌즈로 집광하여 수렴하는 구면파를 만든 후 집광렌즈의 초점에 회절격자를 설치하고 광을 분할하는 형태인 경우, 회절격자면 위에 광이 맺히는 영역이 매우 작아져서 상대적으로 넓은 영역에 양질의 회절격자를 생성해야 할 필요성이 없어져 그만큼 전체 시스템 오차가 작아지는 장점을 가지고 있다.⁽²⁾

그림 1은 회절격자가 입사광에 대하여 Littrow설치된 형태이다. 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 만큼 이동하면, 단순히 0차로 반사한 기준광의 위상은 회절격자 이동으로 인해 천이되지 않고, 1차 회절된 측정광의 위상은 파면전체에 걸쳐서 일정하게 천이되어 전체 간섭무늬에 일정한 위상천이를 일으킨다.



< 그림 1 >

그림 2에 나타나있는 간섭계에서는 반사형 회절격자가 광선분할기의 역할로 사용된다. 구면파를 재생하기 위해 그림 1에서 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 측정 대상물에서 반사하여 다시 회절격자에서 0차 반사 회절된다. 측정광과 기준광은 간섭하여 그 간섭무늬는 결상렌즈를 통해서 CCD에서 획득된다. PZT스테이지로 회절격자를 x만큼 이송하면, 기준광과 측정광에 서로 반대방향으로 위상천이가 일어나서 간섭무늬에 일정한 위상천이를 일으킨다.



< 그림 2 >

그림 1과 2에서 제시한 간섭계의 위상천이현상을 간단한 일반식으로 표시할 수 있다. 기준광이 회절격자에서 r차로 회절되어 광감지기로 향하고, 측정광이 m₁차로 회절되어 측정대상물에서 반사하여 다시 m₂차로 회절되어 광감지기로 향한다면 기준광과 측정광의 상대적인 위상천이량은 식 1과 같다.

$$\Delta\Omega = \Delta\Omega_o - \Delta\Omega_r = 2\pi(m_1 + m_2 - r) \quad (1)$$

간섭계의 측정 정밀도를 반복능 시험을 통해서 구해보았다. 동일한 오목거울을 60회에 걸쳐 반복 측정한 후, 45개의 Zernike 항에 대한 표준편차를 구한 결과 모든 Zernike 계수의 표준편차 값은 0.0011λ 이하였다. 측정대상 영역 전체에 걸친 측정한 제곱평균제곱근 결과의 랜덤한 변화량은 λ/500보다 작았다. 간섭계 시스템의 정확도를 평가하기 위해서 0.25λ peak-to-valley 크기인 안장 형태의 오차를 가지고 있는 측정거울을 광축을 중심으로 돌려서 측정을 수행하였다. 네 번 측정한 형상의 제곱평균제곱근 결과의 가장 큰 차이는 0.0053λ였고, 이를 통해서 간섭계 시스템이 나노미터 레벨의 정확도를 가지고 있음을 알 수 있다.

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 여러가지 형태의 광학 부품의 측정에 적용할 수 있다. 하나의 회절격자를 사용하여서 정밀 간섭계에 필요한 광선분할과 재결합, 위상천이를 동시에 수행할 수 있게 간단하게 설계되었다. 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 이송함으로써 구면파에 균일한 위상천이를 일으켜 위상천이 간섭계를 구현하여 나노미터 수준의 형상측정을 수행할 수 있다.

1. C. R. Munneryn, "A simple laser interferometer," Appl. Opt. 8(4) 827-829 (1969).
2. G. Molesini, G. Pedrini, and F. Quercioli, "Laser unequal path interferometer configurations by grating splitting at the Fourier plane," Opt. Eng. 23(5) 646-649 (1984).