

고속 카메라를 이용한 기상측정용 광섬유 점회절 간섭계

Fiber-optic Point-diffraction Interferometer using High-speed Camera for on-machine measurement

박정재, 김승우
한국과학기술원 기계공학과
jeremy@kaist.ac.kr

최근, 우주광학산업 관련 광학계 평가 및 반도체 웨이퍼 검사 시장에서 대영역 형상 측정에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다⁽¹⁾. 이를 위해 고정밀, 고분해능, 고속 측정의 특성을 갖는 광간섭계 방식이 기존의 측정 방법들을 대체해가고 있는 추세에 있지만, 가공기 상에서 발생하는 다양한 형태의 환경 왜란, 즉 예를 들어 시스템의 기계적 진동이나 공기 유동과 같은 성분들에 의해 측정 정밀도가 저하되는 특성을 극복하는 것이 광간섭계를 이용한 기상 측정에 있어서 가장 중요한 문제로 대두되고 있다. 지금까지 이와 같은 광간섭계 방식이 가지고 있는 환경 왜란에 대한 민감도를 최소화하기 위해 간섭무늬 상에 나타나는 phase fluctuation 양을 측정하여 광원에 되먹임함으로써 간섭무늬를 안정화시키는 방법, 공간위상천이 장치나 spatial heterodyning method를 이용하여 one-shot measurement를 수행하는 방법, 공통경로 구조를 적용하여 진동성분을 상쇄시키는 방법 등 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 이와 같은 기존의 방법들은 진동 영향을 검출하기 위한 별도의 장치 또는 복잡한 구조의 위상천이 장치를 필요로 하며, 대응할 수 있는 진동 성분의 스펙트럼에 있어서 매우 제한적이라는 단점을 가진다. 본 논문은 기상 측정에 적용될 수 있는 진동에 둔감한 광간섭 측정 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 Figure 1(a)에서 보는 바와 같이 간섭계와 측정 물체 사이의 경로에 해당하는 optical cavity에 공통경로 구조를 적용하여 진동 상쇄효과를 얻고자 하였으며, 진동 성분으로 인해 발생하는 위상 fluctuation에 영향을 받지 않는 측정을 수행하기 위해 고속 카메라를 이용한 실시간 간섭무늬 획득을 통해 주파수 영역에서의 진동 성분 주파수 필터링 알고리즘을 적용하여 다양한 형태의 진동 환경에서 우수한 위상 측정 정밀도 및 반복능을 획득하고자 한다.

Figure 1(a)는 본 논문에서 제안하는 간섭계 시스템의 optical layout을 나타낸다. 635 nm LD 광원으로부터 전파하는 광은 PBS에서 반사되어 측정 대상의 표면으로 진행하며, 반사된 광은 다시 동일한 경로를 거쳐 BS를 통해 기준 경로와 측정 경로로 분할된다. 기준 경로로 전파한 광은 집광 렌즈와 SMF를 통해 완벽한 구면파로 점회절되어 나타나며, 측정 경로로 전파한 파면과 PBS에서 만나게 된다. 최종적으로 LP와 imaging lens를 거쳐 고속 카메라 촬상면에 간섭무늬가 결상되면서 실시간 간섭무늬 획득이 이루어지게 된다. 여기서 SMF에 의한 mode filtering 및 점회절 현상으로부터 나타나는 완벽한 구면파 생성에 대한 수식적 검증 과정을 통해 집광 효율과 single mode operation이 가능한 최소 전파 길이간의 관계를 알 수 있었고⁽²⁾, SMF N.A.를 고려한 sphericity로부터의 phase deviation 양이 대략 7.3×10^{-4} 으로 나타남을 이론적으로 계산하였다.

또한, 본 논문에서는 진동 성분에 의한 영향을 제거하기 위해 높은 시간 분해능을 갖는 고속 카메라를 통해 획득한 광강도 신호에 대한 주파수 영역 분석 결과를 이용하여 phase-scanning frequency에 대한 filtering 과정으로부터 peak 위치에서의 위상값만을 추출하는 알고리즘을 적용하였다. 이와 같은 측정 알고리즘은 PSI를 phase-scanning에 의해 나타나는 특정 heterodyne frequency에 해당하는 위상값을 복원하기 위해 고안된,

frequency-domain에서의 filtering process의 한 특별한 형태로 생각할 수 있다는 개념에서 출발한다. 이와 같은 관점에서 위상 측정 정밀도를 높이기 위해서는 고속 카메라의 sampling frequency, PZT에 의한 phase-scanning frequency, 환경왜란에 의한 vibration frequency 등 세 주파수 사이의 적절한 관계 설정을 통해 phase-scanning frequency에 나타나는 측정하고자 하는 위상 정보에 다른 주파수 성분에 의한 frequency overlap이 발생하지 않도록 하는 것이 매우 중요하다⁽³⁾. 이와 같은 측정 알고리즘을 통해 실제 1인치 spherical concave mirror에 대한 표면 형상 측정 실험을 수행한 결과는 Figure 1(b)와 같고, 이를 통해 측정 과정 중에 나타나는 60 Hz 정도의 진동 환경에서 위상 복원이 잘 수행되었음을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제안하는 측정 알고리즘의 위상 복원 반복능을 평가하기 위해 주파수 필터링에 의한 위상 추출 기법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 총 30회에 걸쳐 반복 측정을 수행하였고, 그 결과는 Figure 1(c)와 같다. 측정된 파면의 RMS값을 기준으로 각각 122 ± 1 nm, 120 ± 3 nm의 값을 가지는데, 결과적으로 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 통해 위상 복원 반복능이 3배 이상 향상될 수 있음을 입증하였다.

본 논문에서는 고속 카메라와 위상 주사 주파수 필터링을 통한 위상 추출 방법을 사용하여 기상 측정에 적용 가능한 진동에 둔감한 광섬유 점회절 간섭계를 제안하였다. 또한 단일 모드 광섬유에 대한 이론적 검증을 통해 기준 파면 사용의 정당성을 확보하였고, 제안하는 측정 알고리즘에 대한 simulation을 통해 위상 복원 성능 향상을 입증하였다. 마지막으로 1" mirror에 대한 형상 측정을 통해 위상 복원 반복능이 크게 향상될 수 있음을 보였다.

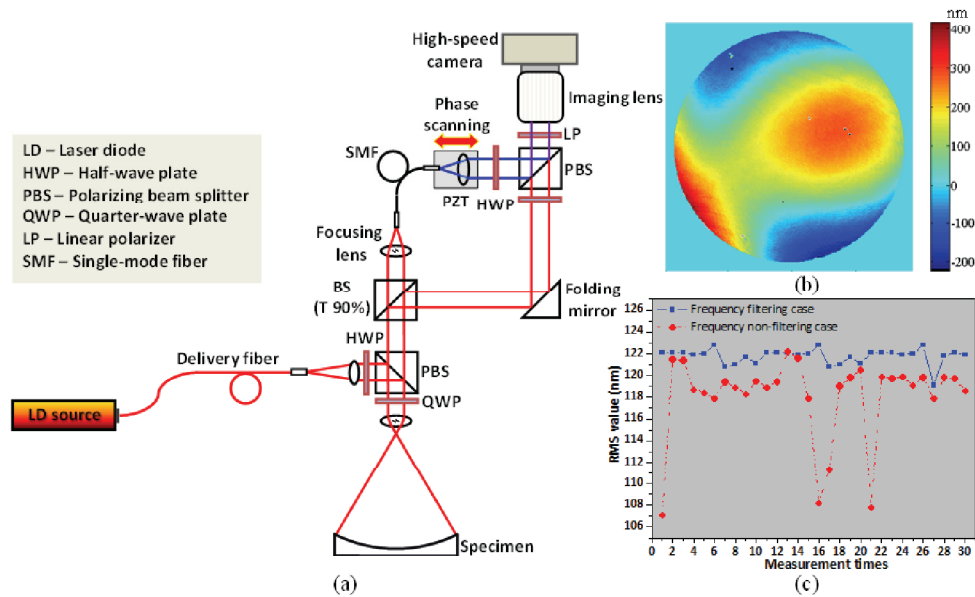


Figure 1.(a)Optical layout of vibration-desensitized interferometer (b)Experimental result for 1" spherical concave mirror surface measurement (c)Repeatability test results(RMS value)

1. K. Freischlad, S. Tang, and J. Grenfell, "Interferometry for wafer dimensional metrology," Proc. SPIE **6672** (2007).
2. O. Wallner, W. R. Leeb, and P. J. Winzer, "Minimum length of a single-mode fiber spatial filter," J. Opt. Soc. Am. A **19**(12), 2445-2448 (2002).
3. J. M. Huntley, "Suppression of phase errors from vibration in phase-shifting interferometry," J. Opt. Soc. Am. A **15**(8), 2233-2241 (1998).