

펨토초 펄스 레이저를 이용한 대면적 형상측정 간섭계 Interferometry for precision large-surface profile measurement using femtosecond pulse laser

*주우덕, 김영진, 김윤석, 박지용, 장윤수, #김승우

*W.-D. Joo, Y.-J. Kim, Y. Kim, J.-Y. Park, Y.-S. Jang and #S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)

KAIST 극초단광학 초정밀기술연구단

Key words : Surface profile measurement, Interferometry, Femtosecond laser

1. 서론

간섭법은 광학 부품 및 각종 산업 시편의 표면을 측정하는 방법 가운데 널리 사용되는 비접촉식 형상 측정 방식의 하나이다. 간섭법은 광학 구성에 따라 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer), 마하 쯔렌더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer) 등으로 분류할 수 있으나, 적용 광원에 따라 서로 다양한 종류로 나누어 볼 수 있다. 단색광원(monochromatic light source)은 간섭계에 적용하는 대표적인 광원 중 하나로, 시간 가간섭성(temporal coherence)과 공간 가간섭성이 좋아 비대칭(non-symmetric) 광학계 및 비동일 광경로(unequal-path) 구성이 가능하기 때문에 위상천이방법(phase shifting method)과 함께 대구경 형상 측정에 널리 적용된다. 다만 위상 모호성이 존재하므로 파장의 절반보다 큰 단차에 대해서 단일 측정값을 결정지을 수 없다. 또한 높은 시간 가간섭성에 의해 원치않는 광학면에서 생성되는 반사광에 의해서 기생간섭무늬가 형성되어 획득된 간섭무늬의 신호 대 잡음비(S/N ratio)가 저하되는 단점이 있다. 이에 비하여 단색광원의 선폭에 비해 넓은 파장폭을 지니고 있는 저결맞음 광원(low-coherence light source) 또는 광대역 광원(broadband light source)은 위상 모호성이 없는 저결맞음 간섭계의 구성에 사용되며, 이는 단차형상의 측정에 유용하게 쓰이고 있다. 그러나 저결맞음 광원의 경우 시간 가간섭성이 매우 낮기 때문에 광분할기로부터 기준면과 측정면까지의 거리 차이가 광원의 가간섭거리 범위 내로 일치해야

하므로 하드웨어 구성 상의 자유도가 제한되며, 동일 시스템에 대해 측정면의 구경 변화가 쉽지 않다.

모드 동기 된 극초단 펄스 레이저는 일반적으로 주파수 영역에서 광 빔(optical comb) 특성을 나타내어, 고 정밀 분광이나 광 주파수 측정, 광주파수 발생기 제작, 고차 조화파 생성 등에 적용되는 광원이지만, 공간상에서 짧은 펄스폭을 지니는 결맞은 극초단 펄스열을 발진하는 광원으로 거리 및 형상 측정에도 널리 사용된다 [1]. 주기적으로 형성되는 낮은 시간 가간섭성 특성을 절대거리 측정에 적용함으로써 긴 거리를 높은 정확도로 측정할 수 있다 [2-3]. 또한 낮은 시간 가간섭성을 높은 공간 가간섭성과 함께 이용하여 펨토초 레이저를 이용한 저결맞음 간섭계를 구현함으로써 대영역 형상 측정에 적용할 수도 있다 [4]. 높은 시간 공간 가간섭성은 단색광원을 사용한 간섭계와 같이 비대칭 광학계 구성이 가능하기 때문에 대구경 광학계의 검사에 있어서 기준면을 측정 시편과 동일하게 제작하지 않더라도 측정이 가능하다. 이와 동시에, 잘 정의된 반복률에 따라 발진하는 펄스에 의해 생성되는 주기적인 시간 저결맞음 특성으로부터 위상 모호성의 극복이 가능하고, 기생간섭무늬가 없어 간섭무늬의 신호 대 잡음비가 좋아진다는 기존의 저결맞음 간섭계의 장점을 포함하면서도 동시에 펄스의 주기의 절반의 배수에 해당하는 만큼 광경로 차를 임의로 부여할 수 있기 때문에 비동일 광경로 구성이 가능하다는 장점을 가진다.

본 논문에서는 상기 장점을 지니는 펨토초

레이저를 이용하여 대면적 형상측정용 비동일 및 비대칭 구조의 간섭계를 구성하고, 이로부터 획득한 간섭무늬를 분석하여 형상을 복원하는 과정에 대하여 제안한다.

2. 펨토초 펄스 레이저를 이용한 대면적 형상측정 간섭계

펨토초 펄스 레이저를 이용한 간섭계의 구성은 그림 1 과 같다. 광원은 펨토초 레이저 공진기(femtosecond laser oscillator)와 공진기 내의 모드 잠금 및 오프셋 주파수와 반복률 등을 제어하기 위한 제어부(control part), 그리고 이들 주파수에 대한 시간표준에 해당하는 원자시계(atomic clock) 등으로 이루어져 있다. 공진기에서 발진한 레이저는 시준렌즈와 광분할기를 거쳐 각각 측정 시편과 기준 시편으로 나뉘어지며, 측정 시편의 종류에 따라 대응하는 시준렌즈를 거칠 수 있다. 반사되어 돌아온 펄스들은 이미징 렌즈를 통해 CCD 와 같은 광검출기에 간섭무늬를 형성한다. 이 때 광분할기에서 측정시편까지의 거리와 기준면까지의 거리 간의 차 ΔL 이 식 1 을 만족할 경우에만 간섭무늬를 획득할 수 있다.

$$\left| \frac{n}{f_r} - \Delta L \right| < L_c \quad (\text{식 1})$$

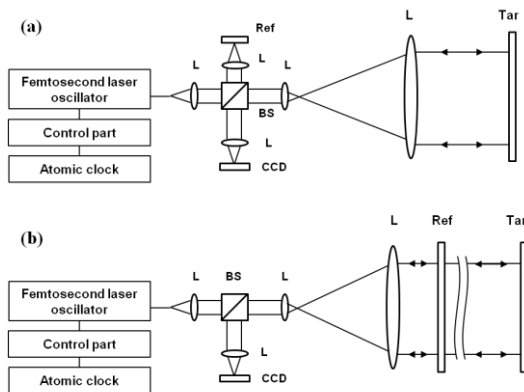


Fig. 1 Optical configurations of interferometer for large-surface profile measurement using femtosecond laser (a) Twyman-Green interferometer (b) Fizeau interferometer, L: lens, BS: beam splitter, Ref: reference surface, Tar: target surface

단, f_r 은 펄스의 반복률, n 은 임의의 정수, L_c 는 광원의 가간섭 길이에 해당한다.

간섭계는 측정 시편 및 측정 환경에 따라 다양한 종류로 구성할 수 있는데, 대표적인 방식으로 그림 1(a)의 트와이만-그린(Twyman-Green) 간섭계를 들 수 있으며 대구경 광학계 검사에 널리 사용되는 방식 중 하나인 피조(Fizeau) 간섭계 역시 그림 1(b)에서와 같이 구성이 가능하다.

간섭법으로부터 획득한 정보는 기본적인 저절맞음 간섭계의 간섭무늬 처리 방법인 가시도 정점 검출법, 주파수 영역 분석법 및 위상 정점 검출법 등을 사용하여 분석하여 형상 정보를 복원할 수 있다. 완만한 곡면을 가진 측정면을 대상으로 하는 경우, 위상천이 원리를 적용할 수도 있으며 이 경우 일반적인 버킷 알고리즘(bucket algorithm)을 적용하여 위상 복원 및 언래핑 과정 등을 통해 형상 정보의 복원이 가능하다.

3. 결론

본 연구에서는 기존 광원에 비하여 여러 장점을 지닌 펨토초 펄스 레이저를 광원으로 이용하여 다양한 형태의 간섭계를 제안하고 이로부터 획득한 간섭무늬에 대한 분석 과정에 대하여 소개하였다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 도약사업과 우주원천기초기술개발사업의 지원을 받아 KAIST 극초단광학 초정밀기술연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, S.-W., Nat. Photonics, Vol. 3, pp.313-314 (2009)
2. Ye, J., Opt. Lett., Vol. 29, No.10, pp.1153-1155 (2004)
3. Lee, J., Kim, Y.-J., Lee, K., Lee, S., and Kim, S.-W., Nat Photonics, Vol. 4, pp.716-720 (2010)
4. Oh, J.S., and Kim, S.-W., Opt. Lett., Vol. 30, No. 19, pp. 2650-2652 (2005)