대면적 미세형상 가공시스템 - 초정밀 레이저 길이측정 기술 개발

Large aperture – Development of high precision laser based length measurement technology

*현상원, 김영진, 천병재, 김윤석, #김승우
*S. Hyun, Y.-J. Kim, B. J. Chun, Y. Kim, #S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)
한국과학기술원 기계공학과

Key words : length measurement, absolute distance, interferometry, multi-wavelength interferometer

1. 서론

대면적 미세형상 가공에 있어서 주요한 측정 요소는 가공된 형상 자체의 측정, 검사를 수행하는 대면적 3 차원 측정과 가공 시 공구와 시편의 위치를 측정, 교정하는 길이 측정의 두 가지로 볼 수 있다. 특히 길이 측정 기술의 경우 가공의 신뢰성 확보와 소요시간 감소, 쓰루풋의 증대 등을 위해서 반드시 확보해야 할 기술로 볼 수 있다. 그러나 대면적에서 미세형상을 가공하는 만큼 큰 동적 영역(dynamic range) 를 지닌 측정기술을 필요로 하게 되며 사용하는 측정기의 교정 또한 중요한 이슈로 볼 수 있다.

빛의 간섭원리를 이용한 광간섭계는 안정화된 레이저 광원의 파장을 기준자(ruler)로 삼아 길이를 측정한다. 이러한 간섭법은 현재의 상대성 원리의 빛의 속도에 근거한 길이 표준에 직접적으로 소급되는 측정이 가능하며 높은 분해능과 정확도를 갖는 측정법으로서 초정밀 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 호모다인 혹은 헤테로다인 위상검출법을 사용하는 일반적인 레이저 간섭계는 하나의 단색광 레이저를 사용하며 측정면의 움직임으로 생겨나는 간섭무늬의 위상변화를 적분하여 측정면의 처음 위치와 최종 위치 사이의 상대 변위(relative displacement)를 측정한다.[1] 그러나 단색광을 사용할 때 나타나는 위상모호성(ambiguity) 문제로 인해 거리를 측정하고자 할 때 반드시 측정면을 원하는 만큼 이동시키는 과정이 필요하고, 위상변화를 적분하므로 신호에 실려있는 여러 오차성분 또한 누적되는 단점이 있으며 특히 이러한 문제는 동적 영역(dynamic range)가 매우 커지는 대면적 미세형상의 측정 시에 두드러진다. 이로 인해 기존 간섭계의 여러 장점을 살리면서 절대거리를 측정할 수 있는 측정기의 필요성이 제기되고 있으며 연구 개발도 활발히 수행되고 있다.

간섭 원리를 이용한 절대거리측정은 같은 거리를 둘 이상의 여러 광 파장을 사용하여 측정하는 다파장 간섭계와 광 주파수를 일정한 넓이 및 주기로 주사하여 길이를 측정하는 주파수 주사 간섭계를 비롯한 여러 방법이 존재한다. 최근 펨토초 레이저의 안정화 기술을 바탕으로 광 주파수의 정밀 측정 기술이 발전하면서 광 주파수 대역에서 원하는 주파수를 주파수 표준에 소급하여 얻을 수 있는 다양한 방법이 개발되었다. 펨토초 레이저의 광 빗을 이용하면 넓은 파장 범위 내에서 원하는 광 주파수를 기존의 길이표준인 안정화된 He-Ne 레이저보다도 높은 안정도로 발생시킬 수 있어 길이 측정, 주파수 측정, 분광 등의 다양한 분야에서 응용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 펨토초 레이저의 광 빗을 다파장 간섭계를 이용한 절대거리측정과 결합하여 광 간섭계의 좋은 측정 불확도 특성을 갖고 절대거리를 수행할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 광 주파수 빗과 안정화된 주파수의 생성

절대거리 측정을 위한 안정화된 레이저를 구성하기 위하여 안정화된 펨토초 레이저의 광 빗을 이용한다. Fig. 1(a)와 같이 펨토초 레이저는 주파수 영역에서 10^5-10^6 개 가량의 매우 좁은 선폭의 주파수 모드의 합으로 나타낼 수 있으며 모든 주파수 모드는 두 가지 성분인 반복률(f_r)과 옵셋 주파수(f_o)를 통해 그 주파수를 나타낼 수 있다. 따라서 f_r 과 f_o 를 주파수 표준에 대해 안정화하면 넓은 광주파수 영역에 걸쳐서 높은 안정도로 안정화된 빛을 생성할 수 있다.

이와 같이 안정화된 광 빗은 그 자체로는 모드 하나하나의 광량이 10-100 nW 수준으로 매우 작고 광대역 광원을 특성을 가지므로 실제 길이측정 간섭계의 광원으로 사용하기에는 부적합하다. 따라서 이 중의 원하는 하나의 모드를 추출한 뒤 증폭하여 충분한 광량을 가진 단색광으로 만드는 과정이 필요하다. 주파수 모드의 추출은 패브리-페로 필터와 광섬유 브라그 그레이팅(FBG) 필터의 조합으로 이루어지며 추출된 하나의 주파수 모드를 증폭하는 방법으로는 주입잠금기법(optical injection locking)이라는 광학적 증폭방법이 사용된다. 주입잠금기법이란 두 개의 레이저를 주종관계로 짝을 맺어 사용하는 것으로 주파수가 안정적인 주 레이저(Master laser)의 빛을 높은 광량을 가진 종레이저(Slave laser)로 입사시키면 종 레이저에서 발진되는 빛의 주파수가 주 레이저 빛의 주파수로 고정되는 현상을 말한다. 이 때, 종 레이저에서 발진하는 빛은 주파수 이외에 선폭과 주파수 안정도와 같은 특성 또한 주 레이저와 같아지게 된다. 이러한 주입잠금기법의 특성에 의해 주파수 표준의 우수한 주파수 성능을 완벽히 이용할 수 있다.

3. 절대거리 측정

다파장 간섭계(multi-wavelength interferometer, MWI)는 둘 혹은 그 이상의 잘 정의되고 안정화된 다수의 파장을 사용하여 위상 모호성의 문제를 극복한다. 식 (1)은 다파장 간섭계의 원리를 이용하여 절대 거리, L 을 서로 다른 N 개의

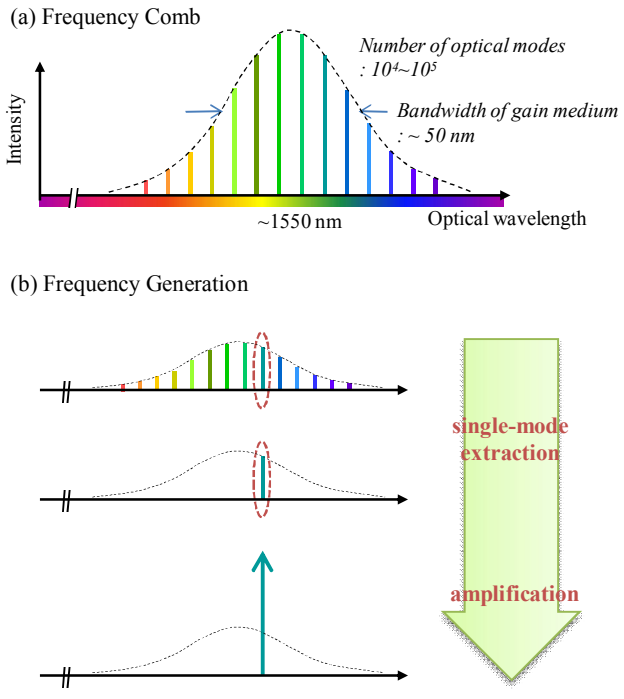

Fig. 1 (a) Frequency comb of a femtosecond laser
(b) Frequency generation by injection locking

파장으로 측정했을 때를 표현한 것이다.

$$L=\frac{\lambda_1}{2}(m_1+\varepsilon_1)=\frac{\lambda_2}{2}(m_2+\varepsilon_2)=\cdots=\frac{\lambda_N}{2}(m_N+\varepsilon_N) \quad (1)$$

λ_i 는 i (i=1, 2, ···, N) 번째 공기 중에서의 빛의 파장을 가리키고 또한 m_i, ε_i 는 i 번째 파장, λ_i 을 사용한 측정 시의 정수부(integer part)와 소수부(excess fraction part)를 의미한다. 각각의 식에서 소수부, ε_i 는 간섭계에서의 간섭 신호를 해석하여 직접적으로 측정이 가능하지만 정수부, m_i 의 경우 위상모호성의 문제로 인해 직접적으로 획득하는 것이 불가능하다. 따라서 식 (2.1)에서는 절대거리, L 와 각 파장에서의 정수부, m_i (i=1, 2, ···, N) 까지의 N+1 개의 미지수가 존재한다. 미지수의 개수가 식의 개수보다 하나가 많으므로 전 영역에 대해 유일한 해를 구할 수는 없지만, 초기에 측정하고자 하는 절대거리, L 를 충분히 작은 범위 내에서 추정할 수 있다면 합치법(exact fraction method)을 통해 분석적으로 절대거리를 구할 수 있다.[2]

4. 절대거리 측정 간섭계의 구성

Fig. 2(a) 는 절대거리 측정 간섭계의 광원부를 나타낸다. 광원부는 모두 광섬유 기반의 광학계를 사용하여 환경 및 진동에 대해 둔감하도록 구성하였다. 펨토초 레이저 또한 1550 nm 의 중심파장을 갖는 광섬유 펨토초 레이저를 사용하였고 반복률과 옵셋 주파수는 주파수 표준인 Rb 원자시계에 대해 안정화되었다. 주파수 모드의 추출은 패브리-페로 필터와 AWG(Array Wavelength Grating) 의 조합으로 수행하였으며 추출된 모드는 주입잠금법을 이용하여 증폭하기 위해 종레이저로 사용되는 다이오드 레이저에 입사된다. 패브리-페로 필터의 선폭은 200 MHz 이하로 펨토초 레이저의 반복률인 100 MHz 를 고려하면 하나의 모드를 추출하는데 있어 충분한 수준이며 이렇게 추출된 모드들은 패브리-페로의 FSR 만큼의 간격을 두고 AWG 로 입사된다. AWG 는 원하는 파장대의 모드를 각 채널로 필터링하며 이렇게 추출된 주파수모드가 다이오드 레이저에 주입되면 주입잠금법에 의해 낮은 배경 잡음을 갖고 증폭되며 최종적으로 다이오드 레이저의 출력은 커플러를 통해 하나의 광섬유를 통해 간섭계로 전달된다. Fig. 3 은 광원의 주파수 안정도, 선폭 등의 특성을 보여주는 결과이다. 광 빗의 주파수 불확도는 Rb 원자시계의 10^{-12} 에 거의 근접한 것으로 나타났으며 주입잠금법에 의한 다이오드 레이저의 주파수 불확도도 10^{-14} 이하로 광 빗의 주파수를 거의 완벽히 따라

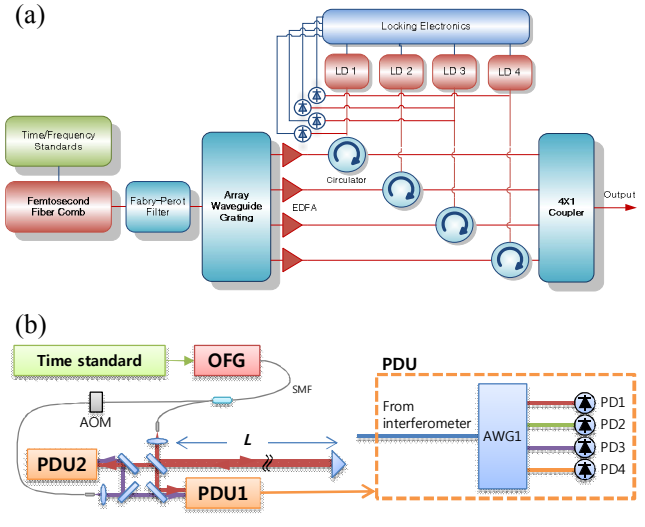

Fig. 2 (a) multi-channel light source
(b) absolute distance interferometer

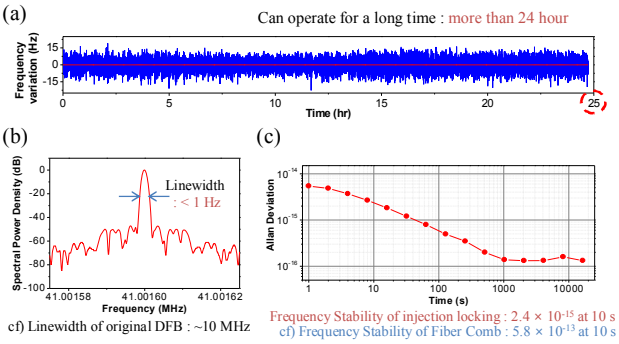

Fig. 3 (a) Frequency variation after stabilization
(b) Linewidth (c) Stability (Allan deviation)

가는 것을 확인할 수 있었다.

절대거리 측정을 위해서는 AOM(acousto-optic modulator)을 사용한 헤테로다인 간섭계가 구성되었다. 광원에서 광섬유를 통해 간섭계로 전달된 빛은 커플러를 통해 서로 다른 경로로 진행하며 그 중 하나는 AOM 에 의해 주파수가 변조된다. 주파수가 변조되지 않는 쪽은 타겟이 되는 재귀반사체(retro-reflector)로 진행한 뒤 위상 검출부(PDU, phase detection units) 로 입사되는 쪽과 기준이 되도록 PDU 로 바로 입사되는 두 가지 경로를 가진다. 구성된 간섭계는 편광 광학계를 사용하지 않으므로 주파수 섞임, 편광 섞임 등의 비선형 오차를 일으킬 수 있는 현상에서 자유로운 특징이 있으며 두 개의 PDU 서로간의 위상차를 통해 타겟까지의 거리만을 측정할 수 있다. PDU 는 FBG 필터를 이용하여 각각의 채널 별로 간섭신호를 동시에 얻을 수 있도록 구성되었다. 이를 이용하면 실시간으로 각 파장의 위상정보를 획득하여 절대거리를 계산할 수 있다.

이와 같이 구성된 간섭계를 이용하여 절대거리 측정을 수행하였다. 측정환경의 변화를 보상할 수 있도록 온도계, 습도계, 압력계, CO_2 농도계 등의 측정기가 동시에 사용되었으며 1 m 가량의 거리를 20 nm 이하의 불확도를 갖고 측정할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 원하는 파장을 정확하고 안정하게 생성할 수 있는 광 주파수 발생기의 특징을 다파장 간섭계에 적용하여 기존의 제한된 측정 영역을 확장한 절대거리측정법을 제안하였다. 특히 광 빗의 특성을 이용하여 원하는 여러 파장을 한번에 생성하여 실시간으로 절대거리를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였으며 실험을 통해 다파장 간섭계의 높은 측정 불확도를 갖고 미터 수준의 넓은 영역의 절대거리측정이 가능함을 검증하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업의 지원을 받아 한국과학기술원 정밀측정연구실에서 수행하였습니다.

참고문헌

1. Bobroff N., “Recent advances in displacement measuring interferometry,” Meas. Sci. and Technol., **4**, 907-926, 1993.
2. Tilford C. R., “Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes,” Appl. Opt., **16(**7), 1857-1860, 1977.
3. Jin, J., Kim, Y.-J., Kim, Y., Kang, C.-S., Kim, S.-W., “Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of a femtosecond pulse laser,” Opt. Exp., **14(13)**, 5968-5974, 2006.
4. Hyun, S., Kim, Y.-J., Kim, Y., Jin, J., Kim, S.-W., “Absolute length measurement with the frequency comb of a femtosecond laser,” Meas. Sci. and Technol., **20**, 095302, 2009.