

광주파수 합성기를 이용한 파장 쓸기 간섭계 Frequency sweeping interferometer based on the optical frequency synthesizer

*현상원, 진종한, 김영진, 김윤석, #김승우

*S. Hyun, J. Jin, Y.-J. Kim, Y. Kim and #S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)

KAIST BUPE 연구단

Key words : Absolute distance metrology, Optical frequency synthesizer, Frequency sweeping interferometer

1. 서론

절대 거리 측정(absolute distance metrology)은 측정면의 이동이 필요 없이 기준팔과 측정팔 간의 절대 거리를 측정할 수 있는 방법이다. 현재 널리 사용되고 있는 호모다인(homodyne) 또는 헤테로다인(heterodyne) 간섭계는 측정면의 움직임으로 생겨나는 간섭 무늬의 위상변화를 적분하여 측정면의 처음 위치와 최종 위치 사이의 상대 변위(relative displacement)를 측정하는 방법이다. 이 방법은 광원의 파장을 기준자(ruler)로 이용하므로 nm 이하의 높은 측정 분해능을 가지고 위상의 변화가 곧 변위의 변화를 의미하므로 복잡한 계산이나 측정 과정이 필요 없어 빠른 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 거리 측정 시 발생하는 위상 모호성(phase ambiguity) 문제로 인해 측정면을 측정하고자 하는 거리 만큼 움직이는 과정이 필요하다. 이로 인해 측정 도중 공기 유동이나 장애물 등의 외부요인에 의해 간섭 신호가 끊기게 되면 다시 처음부터 측정해야 하며, 우주 공간 등의 측정면의 정확한 이송을 기대할 수 없는 곳에서의 적용이 어렵다는 한계를 갖고 있다. 이러한 이유로 특히 수십 m에서 수 km 이상의 긴 거리를 정밀하게 측정해야 하는 항공/우주 분야나 건축, 조선, 군수 산업에서의 절대 거리 측정에 관한 필요성이 꾸준히 제기되고 있으며 연구 개발도 활발히 수행되고 있다.

현재 전세계적으로 연구되고 있는 대표적인 절대 거리 측정 방법으로는 펄스가 측정면을 맞고 돌아오는 시간을 측정하는 비행시간법(time-of-flight method)과 가간섭 광원의 파장을 바꿔가면서 측정하는 방법인 다파장 간섭계(multi-wavelength interferometer)와 파장 쓸기 간섭계(frequency sweeping interferometer), 비슷한 주파수를 갖는 두 개 혹은 여러 주파수의 간섭으로 생성된 긴 파장의 합성파를 이용하여 위상 모호성을 극복하는 합성파 간섭계(synthetic-wavelength interferometer) 등이 있다. 그 중 파장 쓸기 간섭계는 비행시간법이나 합성파 간섭계에 비해 높은 분해능을 얻을 수 있고 다파장 간섭계와 같이 측정하고자 하는 거리에 대한 선형적인 지식을 필요로 하지 않는다는 장점을 갖고 있다. 그러나 광원의 안정도(stability)와 파장 가변 범위(tunable range)의 제한으로 인해 긴 거리 측정에서 널리 사용되지 못하였다.

본 연구에서는 높은 주파수 안정도를 갖는 펨토초 레이저 광 빛의 주파수 모드를 바탕으로 구현된 광주파수 합성기를 광원으로 적용하여, 수 km 이상의 측정 영역에서도 μm 수준의 측정 불확도를 얻을 수 있는 파장 쓸기 간섭계를 제안한다.

2. 파장 쓸기 간섭계의 기본 이론 및 실험 장치

파장 쓸기 간섭계는 특정한 파장 λ_1 에서 λ_2 로 연속적으로 파장을 쓸면서 간섭무늬의 흐름을 계수하여 위상 모호성의 문제 없이 절대 거리를 측정하는 방법이다. 간섭계의 기준면과 측정면 사이 거리, L 는 파장 쓸기를 수행하면서 획득되는 위상차, $\Delta\phi$ 를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{\lambda_s \Delta\phi}{2 \cdot 2\pi} = \frac{\lambda_s}{2} (\Delta N + \Delta f) \quad (1)$$

여기서, 위상차, $\Delta\phi$ 의 정수부, ΔN 는 파장 쓸기를 수행하는 동안 흘러가는 간섭 무늬를 계수하여 얻을 수 있으며 소수부, Δf 는 처음 파장, λ_1 과 끝 파장, λ_2 에서의 간섭 무늬를 해석하여 얻어진 각각의 소수부인 f_1 과 f_2 의 차를 통해 구할 수 있다. 이 때의 합성파 λ_s 는 처음 파장, λ_1 과 끝 파장, λ_2 에 의해 결정되며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2)$$

식(1)과 같이 합성파의 파장을 이용하여 구한 절대 거리, L 의 측정 불확도가 빛의 파장을 분해해 낼 수 있을 정도로 충분히 좋다면, 위상의 모호성 문제로 바로 결정할 수 없는 식(3)의 N_1 과 N_2 를 식(4)를 통해 결정하여 높은 분해능으로 절대 거리를 측정할 수 있게 된다. 일반적으로 이런 분해능 향상을 위한 조건은 식(5)와 같이 표현된다.²

$$L = \frac{\lambda_1}{2} (N_1 + f_1) = \frac{\lambda_2}{2} (N_2 + f_2) \quad (3)$$

$$N_{1,2} = \text{int} \left(\frac{2L}{\lambda_{1,2}} \right), \quad L = \frac{\lambda_{1,2}}{2} (N_{1,2} + f_{1,2}) \quad (4)$$

$$u(L) < \lambda_{1,2} / 4 \quad (5)$$

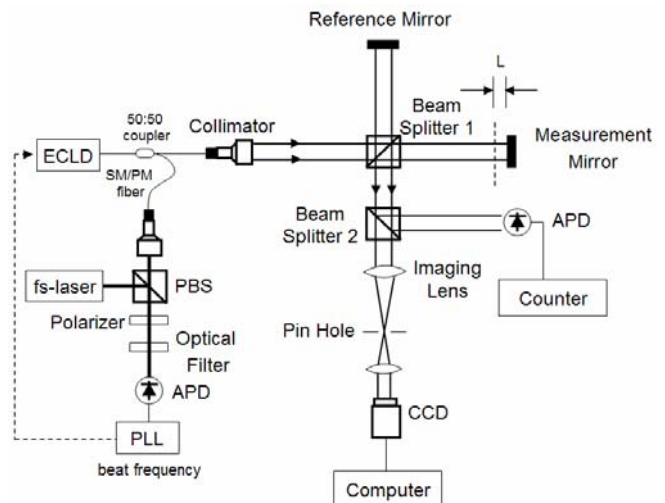


Fig. 1 Schematic diagram of the frequency sweeping interferometer

Fig. 1은 본 연구단에서 제안한 파장 쓸기 간섭계의 광학 구성도이다. 광원은 안정화된 펨토초 레이저와 외부 공진기 다이오드 레이저로 구성된 광주파수 합성기를 사용하였다. 이 때 외부공진기 레이저 다이오드(external cavity laser diode, ECLD)의 파장 가변 범위는 765-781 nm이며, 파장

측정기(wavelength meter)를 통해 대략적인 파장이 30 MHz분해능으로 측정되며, 안정화된 펄스 레이저의 주파수 모드와의 간섭을 통해 얻어진 맥놀이 주파수(beat frequency)를 위상잠금회로(phase locked loop, PLL)를 통해 잠금하여 10⁻¹⁰ 수준의 주파수 안정도를 얻을 수 있다.

광주파수 합성기에서 나온 빛은 광섬유를 통해 광원에서 간섭계로 전달되며, 기준면과 측정면에서 각각 반사되어 CCD 카메라를 통해 간섭 무늬를 획득할 수 있다. 측정 시간을 줄이기 위해 파장 쏠기가 진행되는 동안 광검출기(PD)를 통해 간섭 무늬의 흐름, ΔN 을 계수한다. 간섭 무늬를 해석하여 소수부, f 를 구하기 위해 기준면에 약간의 기울기를 주어 간섭무늬가 일정한 공간주파수를 갖도록 하며, 푸리에 변환 방법을 이용하여 측정점에서의 위상을 구한다.

3. 실험 결과 및 불확도 분석

제안된 파장 쏠기 간섭계의 성능 검증을 위해 일정한 변위로 움직이면서 각 위치에서의 절대거리를 측정하였다. 미세한 변위 구동을 위해 PZT 미세 구동 스테이지를 사용하였고, 본 실험에서는 17.75 μm 의 변위로 Fig. 2 와 같이 최대 네 단계로 구동하였다. 각 변위에서는 네 번의 절대거리를 측정하였고, 각각의 측정에서는 진동 및 기타 외란의 영향을 줄이기 위해 30 번 반복 측정을 통한 평균값을 취하였다. 이 때 측정면과 기준면 사이의 절대 거리는 약 4.4 mm 이다.

측정 반복능을 평가하기 위해 30 번의 반복 측정을 수행하였고, 식(1)을 통한 합성과 파장에 기준한 절대 거리의 측정 반복능은 36.6 nm(S.D.)이다. 본 실험에서 예측되는 합성과 파장을 기준으로 한 절대 거리의 측정 불확도는 최대 100 nm 이하로 식(5)의 조건을 만족하므로, 식(4)을 통한 빛의 파장에 기준한 절대거리를 구할 수 있다. 이때 얻어진 측정 반복능은 0.64 nm (S.D.)이다.

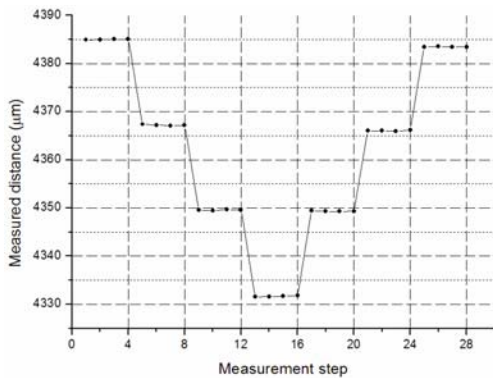


Fig. 2 Measured distance on the PZT stage

광주파수 합성기를 통해 구현된 파장 쏠기 간섭계의 측정 불확도, u(L)는 합성파의 파장 불확도, u(λ_s)와 간섭 무늬의 해석을 통한 소수부 불확도, u(Δf)를 통해 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$u(L) = \sqrt{\left\{L \frac{u(\lambda_s)}{\lambda_s}\right\}^2 + \left\{\frac{\lambda_s}{2} u(\Delta f)\right\}^2} \quad (6)$$

여기서, 소수부 불확도, u(Δf)만을 고려하는 이유는 (ΔN+Δf)에 대한 불확도 중에서 간섭 무늬의 개수, ΔN가 정수로 명확히 계수하는 것이 가능하기 때문이다. u(Δf)는 측정 거리, L에 관계없이 푸리에 방법을 적용하여 소수부를 구할 때 생기는 불확도이며, 본 연구에서는 소수부를 30 번 반복 측정하여 표준 편차인 0.003 으로 평가하였다. 합성파의 파장

불확도, u(λ_s)는 광주파수 합성기의 주파수 안정도에 의해 좌우되며, 이는 1.3 x 10⁻⁸ λ_s 로 평가된다. 특히 절대 거리 측정 불확도에 미치는 u(λ_s)의 영향은 소수부의 불확도, u(Δf)와는 달리 측정하고자 하는 거리 L에 비례하기 때문에 긴 거리의 측정에 있어서 중요하다. Fig. 3 은 합성파의 파장 불확도와 간섭 무늬 해석에 따른 불확도 만을 고려하여, 측정하고자 하는 절대 거리, L에 따른 측정 불확도를 도시하였다. 이 때 온도, 습도, 압력의 환경 변화, 공기 유동, 진동 등의 다른 영향은 고려되어있지 않다.

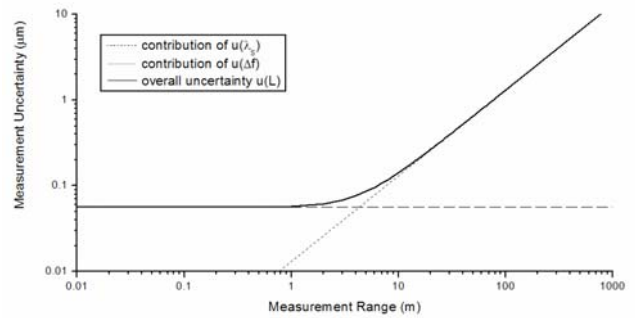


Fig. 3 Overall measurement uncertainty

측정하고자 하는 거리가 1 m 이내 정도로 짧은 경우에는 간섭 무늬의 해석을 통한 소수부 불확도, u(Δf)에 의한 항이 대부분을 차지하며, 전체 측정 불확도는 50 nm 가량의 일정한 값을 갖는다. 하지만 측정거리가 1 m 이상으로 커질수록 측정 불확도 또한 측정 거리에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 765 - 781 nm의 파장 가변 범위에서 10⁻¹⁰ 수준의 높은 주파수 안정도로 원하는 파장을 만들어 낼 수 있는 광주파수 합성기를 파장 쏠기 간섭계의 광원으로 적용하여 절대 거리 측정을 수행하였다. 기초 실험은 초기 절대거리인 약 4.4 mm 근처에서 17.75 μm의 단계 구동을 수행하였으며, 30 번 반복 측정을 통한 측정 반복능은 0.64 nm (S.D.)이다. 측정 불확도는 합성파의 파장 불확도와 간섭 무늬 해석에 따른 불확도 만을 고려하였고, 56 nm(k=1)이다. 추후 다른 환경 영향을 추가로 고려하여 볼 때 1 m 이내의 짧은 거리에서는 100 nm이하의 측정 불확도가 예측된다. 따라서 광주파수 합성기를 기반으로 하는 파장 쏠기 간섭계는 짧은 거리는 물론 수 km이상의 긴 측정 영역에서도 μm 수준의 측정 불확도로 측정할 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering) 연구단에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. 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.
2. Bitou Y., Seta K., "Gauge Block Measurement Using a Wavelength Scanning Interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 6084-6088, 2000