

광주파수발생기를 도입한 절대거리측정 solute distance measurement based on optical frequency generator

*현상원, 진종한, 김영진, 김윤석, #김승우

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

KAIST BUPE 연구단

Key words : absolute distance measurement, optical frequency generator, multi-wavelength interferometer

1. 서론

절대거리측정(absolute distance metrology)은 측정면의 움직임 없이도 원하는 거리를 한번에 측정하는 방법이다. 현재 널리 사용되고 있는 간섭원리를 이용한 길이 측정기는 측정면의 움직임으로 생겨나는 간섭 무늬의 위상변화를 적분하여 측정면의 처음 위치와 최종 위치 사이의 상대 변위(relative displacement)를 측정한다. 이 방법은 광원의 파장을 기준자(ruler)로 이용하므로 높은 측정 불확도를 갖고 길이 표준에 직접적으로 소급하는 측정법이며, 위상의 변화가 곧 측정면의 변위를 의미하므로 복잡한 계산이나 측정 과정이 필요 없이 빠른 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 위상모호성(phase ambiguity) 문제로 인해 거리를 측정하고자 할 때 반드시 측정면을 원하는 만큼 이동시키는 과정이 필요하며 위상변화를 적분하므로 신호에 실려있는 여러 오차성분 또한 누적되는 단점을 갖고 있다. 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 간섭계(multi-wavelength interferometer)¹와 광 주파수를 일정한 넓이 및 주기로 주사하여 길이를 측정하는 주파수 주사 간섭계(frequency scanning interferometer)²를 비롯한 여러 방법이 존재한다. 이 중 다파장 간섭계는 측정 불확도의 신뢰할 수 있는 분석이 가능하며 빛의 짧은 파장을 사용하는 광 간섭계의 장점을 잘 살릴 수 있는 절대거리측정법 중 하나이지만 측정하고자 하는 거리를 일정한 범위 내로 추정할 수 있어야 하는 단점이 존재하여 게이지블록 측정 등의 특정한 분야에서만 사용되고 있다.

최근 펄드초 레이저의 안정화 기술을 바탕으로 광 주파수의 정밀 측정 기술이 발전하면서 광 주파수 대역에서 원하는 주파수를 주파수 표준에 소급하여 얻을 수 있는 ‘광주파수발생기’(optical frequency generator)의 개념이 제안되었다. 이러한 광주파수발생기는 파장 가변 범위 내에서 원하는 주파수를 높은 안정도로 발생시킬 수 있을 뿐 아니라 특정 주파수에서 다른 주파수로 연속적으로 주파수 쓸기가 가능한 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 광주파수발생기가 가진 장점을 다파장 간섭계에 적용하여 기존의 제한된 측정영역을 확장하면서 광 간섭계의 높은 측정 불확도 특성을 갖고 절대거리를 수행할 수 있는 방법을 제안하고 검증하고자 한다

2. 절대거리측정

2.1 다파장 간섭계

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 파장으로 측정했을 때를 표현한 것이다.

$$= \frac{\lambda_1}{2}(m_1 + \epsilon_1) = \frac{\lambda_2}{2}(m_2 + \epsilon_2) = \dots = \frac{\lambda_N}{2}(m_N + \epsilon_N) \quad (1)$$

λ_i 는 i ($i=1, 2, \dots, N$) 번째 공기 증에서의 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 과 각 파장에서의 정수부, m_i ($i=1, 2, \dots, N$) 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 을 충분히 작은 범위 내에서 추정할 수 있다면 합치법(exact fraction method)을 통해 분석적으로 절대거리를 구할 수 있다.

절대거리, L 을 구하기 위해 먼저 측정하고자 하는 절대거리의 초기 추정값(initial guessing) 을 구하여 해의 범위를 한정한다. 초기 추정을 통해 얻은 예측 범위 내에서 각각의 파장에서 측정된 소수부, ϵ_i 와 이론적으로 갖는 소수부의 차이가 특정한 허용오차 d 보다 작은 거리의 해, L_c 를 구하면 절대거리를 측정할 수 있다. 이는 식 (2)과 같이 나타난다.

$$\left| E\left(\frac{L_c}{\lambda_i}\right) - \epsilon_i \right| < d \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

$E(X)$ 는 X 의 소수부를 취하는 함수이다. 이 때 특정한 범위 내에서 일치하는 해를 찾는 방식이므로 여러 개의 해가 동시에 조건을 만족할 수 있어, 유일한 해를 얻을 수 있도록 초기 추정을 충분히 작은 불확도로 수행하여야 한다. 합치법을 통해 얻을 수 있는 해들 간의 간격은 측정에 사용한 파장과 소수부의 허용오차에 따라 결정된다. 원하는 광주파수를 정확히 생성할 수 있는 광주파수발생기를 다파장 간섭계에 도입하면 해들 간의 간격을 최대로 하는 파장을 적절히 선정하고 생성할 수 있으므로 다파장 간섭계의 측정 영역을 확장할 수 있다. 또한 연속적인 파장의 주사가 가능해지므로 다음에 설명할 주파수 주사 간섭계의 원리를 이용하여 절대거리를 측정하기에 충분히 작은 불확도로 측정 거리의 초기 추정치를 동시에 획득할 수 있다.

2.2 주파수 주사 간섭계

주파수 주사 간섭계는 특정한 파장 λ_1 에서 λ_2 로 연속적으로 파장을 주사(scan)하면서 간섭무늬의 흐름을 계수하여 위상 모호성의 문제 없이 절대거리를 측정하는 방법이다. 간섭계의 기준면과 측정면 사이 거리, L 는 파장 주사를 수행하면서 획득되는 위상차, $\Delta\phi$ 를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$= \frac{\lambda_s \Delta\phi}{2 \cdot 2\pi} = \frac{\lambda_s}{2} (\Delta N + \Delta\epsilon) \quad (3)$$

여기서, 위상차, $\Delta\phi$ 의 정수부, ΔN 는 파장 쓸기를 수행하는 동안 흘러가는 간섭 무늬를 계수하여 얻을 수 있으며 소수

부, $\Delta\epsilon$ 는 처음 파장, λ_1 과 끝 파장, λ_2 에서의 간섭 무늬를 해석하여 얻어진 각각의 소수부인 ϵ_1 과 ϵ_2 의 차를 통해 구할 수 있다. 이 때의 합성과 λ_s 는 처음 파장, λ_1 과 끝 파장, λ_2 에 의해 결정되며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\lambda_s = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (4)$$

3. 실험장치 및 결과

절대거리측정을 위해 구성한 간섭계의 광학구성도는 Figure 1 과 같다. 광원은 안정화된 펨토초 레이저와 외부 공진기 다이오드 레이저로 구성된 광주파수 발생기를 사용하였다. 이 때 외부공진기 레이저 다이오드(external cavity laser diode, ECLD)의 파장 가변 범위는 765-781 nm 이며, 안정화된 펨토초 레이저의 주파수 모드와의 간섭을 통해 얻어진 맥놀이 주파수(beat frequency)를 위상잠금회로(phase locked loop, PLL)를 통해 잠금하여 높은 주파수 안정도로 원하는 파장을 생성할 수 있다.

광 주파수 발생기에서 생성된 잘 정의되고 높은 안정도를 가진 빛은 광섬유를 통해 간섭계를 전달되며 시준 렌즈(collimator)를 지나 시준된 후 PBS1 에서 편광에 따라 투과하는 성분과 반사하는 성분의 두 방향으로 갈라진다. PBS1 에서 반사한 성분은 AOM 의 라디오주파수 대역의 변조 주파수인 f_b 만큼 주파수 천이되어 원래의 주파수 성분을 갖는 빛과 BS 에서 합쳐져 두 방향으로 진행하며 한 성분은 P1 을 거쳐 APD1 에서 간섭하여 AOM 의 변조 주파수 성분을 갖는 간섭신호를 생성하고 다른 성분은 PBS2 로 입사한다. PBS2 에 입사된 빛은 편광에 따라 반사하는 성분과 투과하는 성분으로 나누어지는데 이 때 앞서 PBS1 에서 나누어졌던 것과 같이 반사하는 성분은 f_b 로 주파수 천이가 일어난 빛이며 투과하는 성분은 본래의 주파수를 갖는 빛이다. 두 빛은 각각 retro-reflector 와 target mirror 를 맞고 다시 PBS2 로 돌아오는데 중간에 거치는 QWP1,2 에 의해 편광이 90° 회전하여 입사될 때의 경로와는 다른 경로로 출사하여 P2 를 거쳐 APD2 에서 간섭신호를 생성한다. APD1, 2 에서 위에서 설명한 바와 같이 두 개의 간섭신호를 얻고 이 두 신호 간의 위상차를 위상측정기로 측정하면 각 파장에 대한 소수부를 구할 수 있다.

다파장 간섭계의 원리를 이용하여 절대거리를 측정하기 위해 서로 다른 네 개의 파장을 광주파수 합성기로 생성하였다. 이 네 파장은 780.2070 nm, 780.2037 nm, 779.9535 nm, 770.2043 nm 이며 여기에 온도, 습도, 압력, CO₂ 농도 등의 환경 변수를 측정하여 공기굴절률을 계산하는 방법을 통해 공기 중의 파장으로 보정하였다.

다파장 간섭계의 원리로 절대거리를 측정하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 측정하고자 하는 거리에 대한 초기 추정치(initial guessing)를 획득하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 주파수 주사 간섭계의 원리를 이용하여 네 개의 파장에서 소수부를 얻는 것과 동시에 초기 추정치를 얻었으며, 이는 첫 번째 파장에서 소수부를 측정된 후 두 번째 파장까지 연속적으로 주파수를 주사하여 두 번째 파장의 소수부를 측정함과 동시에 두 파장 사이의 위상 변화량을 측정하는 방식으로 수행되었다. 얻어낸 두 파장 사이의 위상 변화량을 통해 식 (3)과 같이 절대거리의 초기 추정치를 계산할 수 있다.

주파수 주사로 생성되는 합성파의 파장은 184.461 mm 이며 이를 통해 얻은 절대거리의 초기 추정치는 1195.206 mm 였다. 100 m 이하의 거리를 이러한 조건에서 측정 시 초기 추정치의 불확도는 175 μ m 이하이다.

네 개의 파장에서 각각의 경우에 해당하는 소수부를 측정하고 이에 다파장 간섭계의 원리를 적용하여 절대거리를 측정하였다. 앞서 살펴본 다파장 간섭계의 원리와 같이 절대거리의 초기 추정치를 통해서 절대거리의 해가 존재할 범위를 산정하였다. 이 때 네 파장의 관계에 의해서 유일한 해가 존재하는 범위는 이론적으로 소수부 허용 오차, ϵ 이 0.013 이하일 때 100 mm 이내로 나타나므로 이를 적용하여 초기추정치에서 ± 50 mm 내의 범위 내에서 거리를 계산하였다. 위의 과정을 통해 약 1.2 m 의 거리를 측정된 결과 유일한 절대거리의 해를 얻을 수 있었으며 측정 불확도는 20 nm 이하로 나타났다. 또한 이 결과가 주파수 주사 간섭계로 얻은 초기 추정치의 불확도 범위 이내에 존재하여 다파장 간섭계의 원리로 수 미터 수준의 넓은 영역에서 절대거리측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 원하는 파장을 정확하고 안정하게 생성할 수 있는 광 주파수 발생기의 특징을 다파장 간섭계에 적용하여 기존의 제한된 측정 영역을 확장한 절대거리측정법을 제안하고 검증하였다. 이를 위해 약 1.2 m 의 고정된 광경로를 구성하고 이의 절대거리를 측정하였다. 실험을 통해 다파장 간섭계의 높은 측정 불확도를 갖고 미터 수준의 넓은 영역의 절대거리측정이 가능함을 검증하였다.

후기

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

참고문헌

- 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.
- Kikuta, H., Iwata, K., Nagata, R., "Distance measurement by wavelength shift of laser diode," *Appl. Opt.*, **2** 1 , 2976-2980, 1986

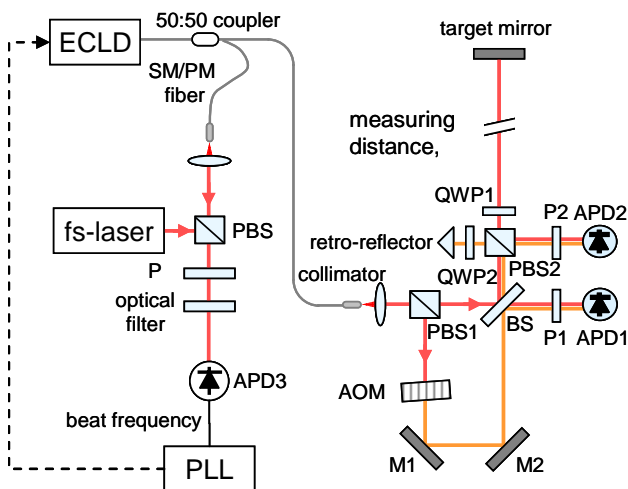


Figure 1 Optical layout for absolute distance measurement (BS: beam splitter, APD: avalanche photodiode, AOM: acousto-optic modulator, QWP: quarter-wave plate, M: mirror, P: polarizer, PBS: polarization beam splitter)