

펄초 레이저의 합성파를 이용한 절대 거리 측정

*진종한¹, 김영진, 김윤석, 김승우
¹ KAIST BUPE 연구단

Absolute length metrology using synthetic wavelength of a femtosecond pulse laser

*J. Jin¹, Y.-J. Kim, Y. Kim, S.-W. Kim

¹ Billionth Uncertainty Precision Engineering(BUPE) group, KAIST,

Key words : absolute length metrology, femtosecond pulse laser, synthetic wavelength interferometer

1. 서론

절대 거리 측정은 한번의 측정 과정을 통해 기준면과 측정면 사이의 거리를 얻어내는 방법이다. 기존의 거리 및 각도 측정에서 널리 사용되고 있는 이중 모드 HeNe 레이저(heterodyne HeNe laser)는 측정면을 움직이면서 간섭 무늬를 계수하여, 측정면의 초기 위치와 최종 위치 사이의 상대 변위(relative displacement)를 측정하는 대표적인 방법이다. 이는 측정 분해능을 nm 이하로 얻을 수 있고 빠른 속도로 측정할 수 있기 때문에 초정밀 위치 결정 및 제어용으로 널리 사용되고 있다. 하지만 수 m 이상의 긴 거리를 측정할 때 측정면을 초기 위치에서 측정하고자 하는 위치까지 연속적으로 움직이면서 간섭 무늬를 계수하여야만 하기 때문에 공기의 유동, 진동 등의 외부 요인에 의해 측정하는 동안 간섭 신호를 잃어버리게 되면 처음부터 다시 측정해야만 하는 단점이 있다. 이런 단점들은 높은 분해능으로 긴 영역의 길이 측정을 필요로 하는 항공/우주 산업에서의 궤도 추적 및 결정, 초대형 건축물의 건설 작업, 초대형 선박의 조립 및 건조 등의 중공업, 첩보 위성에 적용될 고해상도 카메라의 제작 및 검사나 유도 미사일 궤도 추적 등의 국방 기술에 적용하기에는 실질적으로 한계가 있다. 향후 우리나라의 첨단 및 국방 기술 경쟁력 확보를 위해서는 이러한 산업들에 대한 기초 기술들이 활발히 연구 및 개발되어야 하며, 그 중에서도 초정밀 측정을 위한 절대 거리 측정 기술이 필수적으로 확보되어야 한다.

절대 거리 측정 기술은 크게 여러 개의 과정을 통해 절대 거리를 얻을 수 있는 다파장 간섭계(multi-wavelength interferometer)의 원리[1], 빛의 주파수 혹은 파장을 천이시키거나 끌기를 바탕으로 하는 파장 천이 및 끌기 간섭계(wavelength scanning/sweeping interferometer), 비슷한 주파수를 갖는 두 개 혹은 그 이상의 주파수 성분들의 간섭을 통하여 위상의 모호성을 피하기 위해 주기가 긴 여러 합성파를 생성함으로써 절대 거리를 측정하는 합성파 간섭계(synthetic wavelength interferometer)로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 펄초 레이저의 광 빔(optical comb)의 주파수 모드들 간 간섭을 통해 최대 수 m 에서 최소 수백 mm 에 해당하는 여러 합성파를 생성하여 절대 거리 측정에 이용하는 합성파 간섭계의 원리를 기본으로 하여 절대 거리 측정을 수행하고자 한다. 현재까지 연구가 진행된 펄초 레이저의 광 빔을 기본으로 하는 합성파 간섭계의 경우에는 수 m 의 측정영역에서 수 μm 정도의 분해능으로 측정 가능하다. 이 때, 측정영역은 펄초 레이저 광 빔의 주파수 모드 간 간격(repetition rate)과 전자 회로의 대역폭(bandwidth)에 의해 제한되며 측정 분해능은 기준 파(reference wave)와 측정 파(measurement wave) 사이의 위상 차(phase difference)를 검출하는 위상 검출기(phase-meter)의 성능에 의해 좌우된다. 75 MHz 의 주파수간 모드를 갖는 펄초 레이저를 사용한 선행연구에서는 최대 측정 영역이 4 m 이고, 측정 분해능은 8.55 μm 이었다[2].

본 연구에서는 펄초 레이저의 주파수 간 모드를 변화 시킴으로써 더 넓은 측정 영역을 갖고, 동시에 위상 검출

기를 통한 위상 측정 분해능보다 훨씬 높은 성능을 갖는 위상 잠금(phase locking) 개념을 도입함으로써 최대 60 m 의 측정 영역에서 nm 이하의 측정 분해능을 갖는 절대 거리 측정 방법을 제안하고자 한다.

2. 기본 이론 및 구성

펄초 레이저는 발진 대역폭 내에 10⁵ ~ 10⁶ 개의 독립적인 주파수 모드(repetition rate, f_r)들을 갖는다. 이 주파수 모드들은 각 주파수 모드들 간의 간섭을 통해 식(1)과 같은 합성파, Δ를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 합성파를 사용하여 기준 신호와 측정 신호의 위상 차, Δφ를 검출하게 되면 식(2)와 같이 절대 거리, L을 선정할 수 있다.

$$\Lambda = \frac{c}{f_r} \tag{1}$$

$$L = \frac{c}{2\pi f_r} \cdot \Delta\phi \tag{2}$$

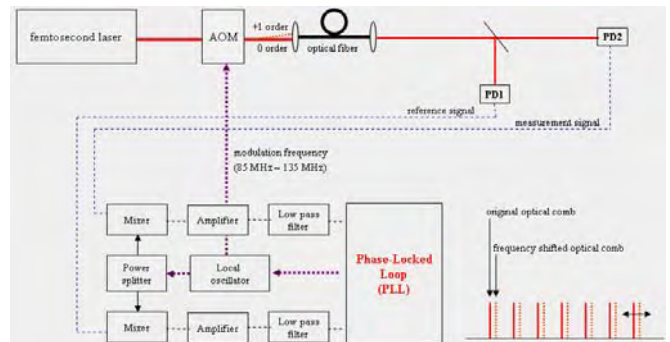


Fig. 1 Schematics of synthetic wavelength interferometer based on the concept of phase locking for absolute length metrology

그림 1 은 위상 잠금 개념을 이용하여 수십 m 의 측정 영역에서 nm 이하의 분해능으로 절대 거리 측정이 가능한 광학 구성도이다. 80 MHz 의 주파수 모드간 간격을 갖는 펄초 레이저에서 나온 빛은 주파수 천이(frequency shift)를 위해 AOM(Acousto-Optic Modulation)에 입사된다. AOM 에 입사된 빛은 원래의 입사된 빛과 5 MHz ~ 75 MHz 만큼 주파수 천이된 1 차 회절 빛을 생성하며, 이 두 빛을 광섬유에 집광시켜 간섭시킨다. 이를 통하면 원래의 주파수 모드 간 간격인 80 MHz 에 해당하는 합성파와 그 조화파 성분 및 주파수 천이된 빛과 원래의 빛이 간섭되어 나타나는 5 MHz ~ 75 MHz 사이에 해당하는 합성파를 얻을 수 있다. AOM 을 통한 주파수 천이 방법은 펄초 레이저의 공진기의 끝 미러(end mirror)를 PZT 로 구동하여 구현할 수 있는 주파수 천이량보다 월등히 크며, 이는 더 넓은 측정 영역에서 절대 거리 측정이 가능하도록 해준다. PD1 에서는 기준 신호를 얻고, PD2 에서 측정 신호를 얻어 그 두 신호의

위상 차가 일정하도록 위상 잠금 회로(Phase-locked loop, PLL)를 통해 제어하게 된다. 이 때 여러 합성파에 의한 거리 정보들이 PD 를 통해 한꺼번에 얻어지게 되므로 슈퍼 헤테로다인(super heterodyne) 방법을 적용하여 원하는 주파수 성분, 즉 원하는 합성파를 통해 얻은 거리 정보를 얻어 낸다.

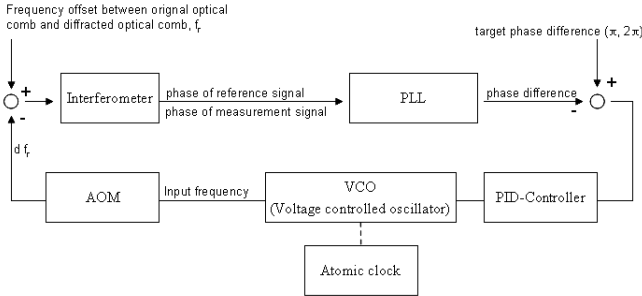


Fig. 2 Block diagram of phase-locking technique for absolute length metrology

그림 2 는 측정하고자 하는 절대 거리에 상응하는 AOM 의 주파수 변조량을 제어하여 위상 차를 유지시키면서 그에 맞는 합성파를 생성하기 위한 제어 개념도이다. 초기 AOM 의 변조 주파수로 정해진 합성파로 간섭계 부분을 통해 기준 파의 위상 성분과 측정 파의 위상 성분을 PD1 과 PD2 를 통해 각각 얻어낸다. PLL 회로를 통해 이 두 신호의 위상 차에 상응하는 DC 전압 값을 얻어내며, 이를 원하는 목표 위상 차(target phase difference)와의 차를 오차 신호로 정의하게 된다. 이 오차신호는 PID 제어기를 통해 매우 높은 주파수 안정도를 얻기 위해 Rb 원자 시계에 잠금된 전압 제어 오실레이터(voltage controlled oscillator, VCO) 의 입력으로 들어가게 된다. 이 전압 오실레이터는 AOM 을 구동하는 변조 주파수 신호를 생성하며, 동시에 PD 를 통해 얻어진 많은 합성파 중에서 관심 있는 합성파 신호를 걸러내기 위해 사용되는 슈퍼 헤테로다인(super-heterodyne) 의 기준 주파수로도 사용된다. 이 제어신호를 통해 AOM 의 변조 주파수는 바뀌게 되고, 원래의 광 빛과 1 차 회절된 광 빛 사이의 간섭에서 얻어지는 합성파 역시 바뀌게 된다. 간섭계를 통해 얻어지는 두 신호의 위상 차가 목표 위상 차로 수렴할 때까지 제어가 계속 수행되어지고, 측정하고자 하는 절대 거리에 해당하는 AOM 의 변조 주파수가 수렴하면 이를 주파수 계수기로 읽어 내어 식(2)를 통해 절대 거리, L 을 구해낼 수 있다. 일반적으로 위상 측정기의 분해능보다 주파수 계수기의 분해능이 훨씬 높기 때문에 nm 이하의 분해능을 얻어낼 수 있다.

3. 시뮬레이션

위상 잠금 기법을 적용하여 절대 거리 측정이 가능한지를 검증해보기 위해, 기준 거리가 0.1 m 이고 측정 거리가 10.1 m 라고 가정하고 본 연구에서 제안한 위상 잠금 개념을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 초기 AOM 의 변조 주파수는 30 MHz 로 두었고, 그림 2 의 증폭기(amplifier) 중 하나를 반전 증폭기를 사용하여 목표 위상차가 π 인 경우를 고려하였다. 위상 차 오차, 즉 목표 위상 차와 실제 간섭계에서 얻어지는 위상 차의 차이가 10^{-10} 이하가 되면 위상 잠금을 통한 제어가 완료되었다고 가정하였다. 시뮬레이션 수행 결과는 그림 3 과 같으며 위상 차 오차는 $0(10^{-10}$ 이하)으로 수렴함을 알 수 있고, AOM 의 변조 주파수 역시 15.0 MHz 로 수렴함을 알 수 있다. 이 때 수렴된 AOM 의 변조 주파수를 사용하여 식(2)를 통해 절대 거리를 구해보

면 10 m 로 수렴함을 알 수 있다. 다양한 절대 거리에 따라 본 개념을 적용하는 경우 AOM 의 초기 변조 주파수에 따라 수렴의 속도나 수렴 정도가 정해지게 된다. 특히, 측정하고자 하는 거리, L 가 합성파의 한 파장, Λ 내에 있어야 위상의 모호성 없이 측정 가능하다. 이런 초기 위치를 선정하기 위해서 선형 연구로 진행된 펄스 레이저 광 빛의 주파수 모드를 통한 절대 거리 측정 방법을 적용하면, 최대 측정 거리인 60 m 이상의 거리도 측정 가능할 것이다. Table 1 은 주파수 모드간 간격에 따른 합성파의 파장이며, 최소 파장은 기본적인 펄스 레이저의 주파수 모드인 80 MHz 에 해당하는 3.75 m 이고, 최대 파장은 5 MHz 에 해당하는 60 m 이다.

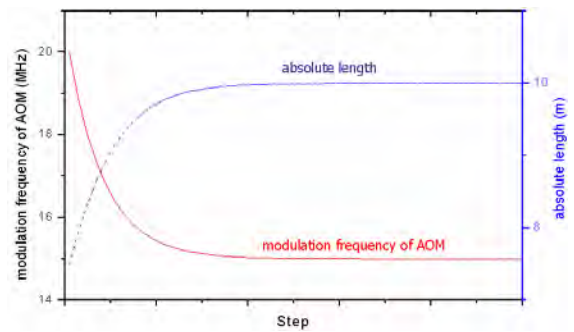


Fig. 3 Simulation result for absolute length of 10 m

Table 1 Synthetic wavelengths for each modulation frequency

Modulation Frequency of AOM (MHz)	Frequency shift between original and diffracted optical comb (MHz)	Synthetic wavelength
85 MHz	5 MHz	60 m
	75 MHz	4 m
100 MHz	20 MHz	15 m
	60 MHz	5 m
110 MHz	30 MHz	10 m
	50 MHz	6 m
120 MHz	40 MHz	7.5 m
Fundamental repetition rate, 80 MHz		3.75 m

4. 결론

본 논문에서는 최대 60 m 의 측정 거리에서 nm 이하의 분해능으로 측정할 수 있는 합성파 간섭계의 개념을 제안하고, 시뮬레이션으로 이를 검증하였다. 기존의 분해능이 낮은 위상 검출 방식을 위상 잠금 방식을 통해 AOM 의 변조 주파수를 측정함으로써 훨씬 높은 측정 분해능으로 절대 거리를 측정할 수 있었다. 동시에 펄스 레이저의 높은 침투 광량과 많은 주파수 모드들은 현재의 60 m 의 측정 거리를 확장시켜줌과 동시에 비선형 광학 원리를 기초로 하여 공기 굴절을 보상등의 가능성도 갖고 있다.

참고문헌

- J. Jin, Y.-J. Kim, Y. Kim, C.-S. Kang, S.-W. Kim, "Absolute length calibration of gauge blocks using optical comb of femtosecond pulse laser," *Opt. Exp.*, **14**(13), 5968-5974, 2006.
- 김윤석, 진종환, 주기남, 김승우, "펄스 레이저의 합성파를 이용한 절대거리 측정," 한국정밀공학회 추계학술대회, 2005.