

펨토초 레이저의 합성파를 이용한 절대거리 측정

김윤석*, 진종한, 주기남, 김승우(KAIST)

Absolute Distance Measurement using Synthetic Wavelength of Femto-second Laser

Yun Seok Kim*, Jonghan Jin, Ki-Nam Joo, Seung-Woo Kim (KAIST)

ABSTRACT

Technological feasibility of using recently-available femtosecond ultra short pulse lasers for advanced precision length metrology is investigated with emphasis on absolute distance measurements with 10 μm resolution over extensive ranges. The idea of using femtosecond lasers for the measurement of absolute distances is based on the fact that a short pulse train is a mode-locked combination of discrete monochromatic light components spanning a wide spectral bandwidth. The synthetic wavelength is created from the repetition frequency, f_r of the femtosecond laser and for more precise resolution, higher-order harmonics of the repetition frequency may be selected as the synthetic wavelength by using appropriate electronic filters.

Key Words : Femto-second Laser(펨토초 레이저), Synthetic wavelength (합성파), Absolute distance measurement (절대거리 측정)

1. 서론

일반적으로, 절대거리 간섭계는 고정된 두 물체 간의 거리를 측정하는 역할을 수행한다. 이러한 절대거리 간섭계는 기존의 변위 간섭계인 호모다인 간섭계(Homodyne interferometer)나 헤테로다인 간섭계(Heterodyne interferometer)와는 달리 고정된 거리를 바로 측정하기 때문에, 변위 간섭계에서 긴 거리 측정시 발생하는 오차의 누적이나 광경로 차단에 의한 측정 정보 손실과 같은 문제점을 해결할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 짧은 시간동안 측정이 이루어지기 때문에 환경 변화에 의한 오차도 작다. 따라서 절대거리 간섭계는 현재 산업계에 널리 이용되고 있는 변위용 간섭계를 대체할 수 있으며, 그보다 성능을 개선시킬 수 있는 가능성을 가진다. 이러한 이유로 절대거리 간섭계에 대한 연구는 오랫동안 여러 방법들을 통해서 수행되어 왔다. 이를 크게 구분하면, 다파장 간섭계(Multiple wavelength interferometer)[1]와 백색광 간섭계(White light scanning interferometer), 합성파 간섭계(Synthetic wavelength interferometer)[2]등으로 나누어진다. 다파장 간섭계는 측정 시 광원의 여러 파장 성분을 이용하여 그 위

상들을 측정함으로써 절대거리를 측정한다. 그래서 비교적 높은 분해능을 얻을 수 있으나 측정시간이 길어지게 되며, 각 파장의 불안정성으로 인하여 고정밀도가 나쁘다. 그리고 백색광 간섭계는 높은 분해능과 정밀도를 가지고 있고 원리적으로도 측정 범위가 넓지만, 실제로 형상이 아닌 거리를 측정하는 상황에는 적합하지 않다. 합성파 간섭계는 측정 거리가 수 m에 이르지만 분해능이 나쁘다는 단점이 있다. 이런 이유들로 인하여 기존의 방법들은 긴 거리의 절대거리 측정에 있어서 제한적이다.

본 연구에서는 긴 거리를 높은 분해능으로 측정하기 위한 합성파 간섭계를 제안한다. 그리고 이를 가능하게 하기 위해 광원으로는 펨토초 레이저(Femto-second laser)를 사용하였다. 제안하는 간섭계는 2 m의 측정거리를 가지며 신호 처리를 통해 수십 μm 정도의 분해능을 얻을 수 있다.

2. 합성파 간섭계

2.1 펨토초 레이저

펨토초 레이저는 기존의 단색광 레이저와는 달리 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째, 펄스 형태로 레이

저가 발전하며 첨두 파워(Peak power)가 크기 때문에 광의 비선형 현상을 이용한 연구에 유용하다. 둘째, 펨토초 레이저는 Fig. 1과 같이 비교적 넓은 주파수 대역을 가지며 많은 주파수 성분들로 구성되어 있으므로 다파장을 이용하는 간섭계의 광원으로 사용

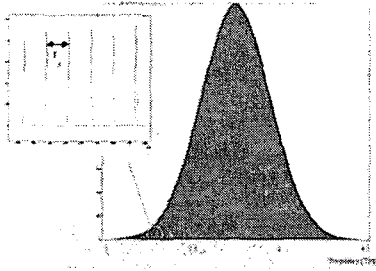


Fig. 1 Frequency comb of femtosecond laser in the frequency domain

될 수 있다. 셋째, 주파수 상에서 펨토초 레이저는 모드락(Mode-locked) 되어 있기 때문에 모드간 간격(Mode spacing, f_r)이 일정하며, 안정적이다.[3] 펨토초 레이저의 이러한 특징들은 많은 조화파가 형성되는 것을 가능하게 한다. 즉 이웃한 주파수를 이용하면 모드간 간격에 해당하는 주파수의 신호가 형성되며 마찬가지로 주파수가 모드간 간격의 배수에 해당하는 빛을 이용하면 그에 해당하는 합성파장(Synthetic wavelength)을 얻을 수 있다. 이러한 모드간 간격의 조화파들을 이용하여 여러 합성파 생성이 가능하기 때문에 펨토초 레이저를 이용하면 수 m 의 측정거리에서 수십 μm 의 분해능을 가지는 간섭계의 구현이 가능해진다.[4]

2.2 합성파 간섭계의 기본 구조와 원리

합성파 간섭계의 실험 구성은 크게 광학부분과 전자부분으로 구분할 수 있다. 광학부분은 광원인 펨토초 레이저와 기준 광 검출기(Reference photo detector), 측정 광 검출기(Measurement photo detector), 광을 기준 광 검출기와 측정 광 검출기로 나누어 주는 광속 분할기(Beam splitter)로 구성되어 있다.

광원에서 나온 빛은 광속 분할기를 지나 일부는 기준 광 검출기로 입사되며, 일부는 코너큐브(retroreflector)에서 반사 후 측정 광 검출기로 입사된다. 펨토초 레이저의 전기장 $E(x)$ 를 수학적으로 모델링하면 다음과 같다.

$$E(x) = \sum_{n=1}^N E_n e^{i(2\pi n f_r t + k_n x)} \quad (1)$$

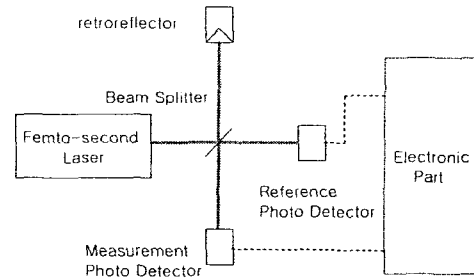


Fig. 2 Optical part of the synthetic interferometry

여기서 f_n 은 펨토초 레이저의 n 번째 모드, λ_n 은 n 번째 모드의 파장, k_n 은 $2\pi/\lambda_n$, E_n 은 주파수가 f_n 인 전기장의 진폭을 나타낸다. 식 (1)을 통해 기준 광 검출기로 입사되는 빛, E_1 과 측정 광 검출기로 입사되는 빛, E_2 는 각각 $E(l_1)$, $E(l_2)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 l_1 은 펨토초 레이저와 기준 광 검출기 사이의 광경로, l_2 은 펨토초 레이저와 측정 광 검출기 사이의 광경로를 뜻한다. E_1 , E_2 가 각각 기준 광 검출기와 측정 광 검출기에 입사되면 기준 광 검출기에서 측정되는 신호, I_R 과 측정 광 검출기에서 측정되는 신호, I_M 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_R = I_0 + \sum_{n=1}^N I_n \cos((n2\pi f_r)t + \frac{2\pi}{\Lambda_n} l_1) \quad (2)$$

$$I_M = I_0 + \sum_{n=1}^N I_n \cos((n2\pi f_r)t + \frac{2\pi}{\Lambda_n} l_2) \quad (3)$$

$$\Lambda_n = \frac{c}{n f_r} \quad (4)$$

여기서 f_r 은 주파수의 모드간 간격 이고, Λ_n 은 합성파장, I_0 은 DC 성분의 광강도(Intensity), I_n 은 $n f_r$ 주파수 성분의 광강도이다. 식 (2)와 (3)을 살펴보면 두 신호의 위상 차이는 $2\pi(l_2 - l_1)/\Lambda_n$ 임을 알 수 있으며 두 신호의 위상 차이를 측정하면 이를 통해 거리를 측정할 수 있다.

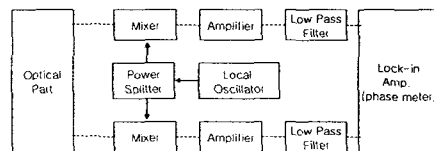


Fig. 3 Electronic part of the synthetic interferometry

두 신호 I_R , I_M 사이의 위상을 측정하기 위해서는 일반적으로 위상 측정기를 사용하는데, 위상 측

정기는 입력되는 신호의 주파수가 높으면 위상 차이를 정밀하게 추출해내지 못하는 한계를 가진다. 그래서 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 슈퍼헤테로다인(Superheterodyne)기법[5]을 적용하였다. 슈퍼헤테로다인 기법은 신호의 주파수를 낮추는(Frequency down conversion) 역할을 하지만, 그에 비해 위상정보는 유지시킨다. 그러므로 이렇게 낮추어진 신호를 위상 측정기에서 측정하면 높은 분해능으로 측정이 가능해진다. Fig. 3은 위상을 측정하기 위한 전자부분을 나타낸다. 전자부분은 슈퍼헤테로다인 기법에 필요한 안정된 신호를 생성해주는 주파수원(Local oscillator), 주파수원의 신호를 같은 위상의 두 신호로 분할해주는 파워 분할기(Power splitter), 광 검출기에서 전달되는 신호와 파워 분할기에서 전달되는 신호를 곱해주는 믹서(Mixer)와, 증폭기(Amplifier), 저주파 대역 필터(Low pass filter), 위상 측정기(Phase meter)로 구성되어 있다.

3. 실험결과

3.1 적절한 합성파의 선정

실험에서 사용한 펄스 레이저는 Femtolasers사의 Scientific sPRO 모델로, 중심파장이 800 nm, 대역폭이 100 nm 이상, 모드간 간격이 75 MHz, 펄스 폭이 12 fs 이내이다. 그리고 사용한 위상측정기는 100 kHz 이하의 신호에서 분해능은 0.01°이며 정밀도는 0.1°이다. 또 광 검출기가 검출가능한 주파수 대역은 1 GHz 이하이다. 표 1은 이러한 조건을 고려하여 위상측정기에서 모드간 간격의 고차 조화파에 따른 측정거리, 정확도, 분해능을 보여준다.

Table 1 Harmonics, frequency measurement range, error and resolution of phase meter of the phase meter for high harmonics

harmonics	frequency (MHz)	measurement range(m)	error (μm)	resolution (μm)
1	75	2	555.6	55.6
3	225	0.667	185.3	18.5
8	600	0.25	69.4	6.9
13	975	0.154	42.8	4.28

표 1을 살펴보면 현재 실험 구성에서의 가장 긴 측정범위는 첫 번째 조화파의 2 m이고, 가장 정밀도가 좋은 조화파는 13 번째 조화파라는 것을 알 수 있다. n번째 조화파에 의해 측정된 위상을 ϕ_n 라 하면, 2π 모호성(2π ambiguity)이 발생하지 않는 범위 안에서 계산된 거리 L_n 과 실제 거리 L_{real} 은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$L_n - \Delta L_n < L_{real} < L_n + \Delta L_n \quad (5)$$

여기서 ΔL_n 은 측정시 오차에 발생하는 값이다. 따라서 n번째 조화파로 위상을 측정하여 거리를 계산한 다음, 좀 더 파장이 짧은 조화파를 이용하여 분해능을 향상시키려면 이 때 조화파의 파장은 적어도 $2\Delta L_n$ 보다는 커야 한다는 것을 알 수 있다. ΔL_n 은 측정시 불확도에 의해 발생하며, 환경오차와 정렬오차를 제외하면, 펄스 레이저의 안정도, 파워 분할기와 위상측정기에서 발생하는 위상오차가 가장 크게 영향을 미친다. 안정화된 펄스 레이저의 경우 모드간 간격의 안정도는 1 Hz이다. Fig. 2에서 코너 큐브가 $x/2$ 만큼 이동하면 측정되는 위상변화 $\Delta\phi$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = 360^\circ \times \frac{x}{c/f_{rep}} = \frac{360^\circ f_{rep}}{c} \times x \quad (6)$$

여기서 c 는 빛의 속도를 나타낸다. $x = 1$ m일 경우, 모드간 간격의 안정도 1 Hz에 의해 발생하는 위상의 불확도 U_ϕ 는 다음과 같다.

$$U_\phi = \frac{\partial\phi}{\partial f_{rep}} \times \Delta f_{rep} \approx 2.4 \times 10^{-6} \quad (7)$$

한편 파워 분할기를 사용하면 분할된 두 신호 간 위상의 불일치가 발생하여 불확도를 유발한다. 현재 사용 중인 파워 분할기의 경우 100 MHz 이하에서는 2°, 500 MHz 이상에서는 6° 정도로 각 믹서로 들어가는 신호들 간의 위상차를 유발한다. 이 위상차는 최종 결과 값에 직접적으로 영향을 미친다. 마지막으로 위상 측정기에서 발생하는 불확도 U_m 를 고려해야 한다. 현재 사용 중인 위상 측정기의 불확도는 100 kHz 이하에서 0.1°이다.

Table 2 Uncertainty induced by stability of mode spacing (U_ϕ), power splitter (U_s), phase meter (U_m)

	U_ϕ	U_s	U_m
degree	2.4×10^{-6}	2 ~ 6	0.1

이 불확도들을 모두 고려하여 전체 불확도를 구해보면 다음과 같다.

$$U_{min} = \sqrt{(2.4 \times 10^{-6})^2 + 2^2 + 0.1^2} \approx 2.0 \quad (8)$$

$$U_{\max} = \sqrt{(2.4 \times 10^{-6})^2 + 6^2 + 0.1^2} \approx 6.0 \quad (9)$$

식 (8)을 통해 첫 번째 조화파에서의 오차 ΔL_1 을 구해보면

$$\Delta L_1 = 2 m \times \frac{2.002}{360} \approx 11.12 \text{ mm} \quad (10)$$

이다. 13번째 조화파의 경우 측정거리는 Table 1에 의해 154 mm이므로

$$2\Delta L_1 < \frac{\lambda_{13}}{2} \quad (11)$$

가 만족된다. 따라서 첫 번째 조화파와 13 번째 조화파의 위상 값을 알면 측정범위내의 모든 지점의 절대거리를 10 μm 이하의 분해능으로 측정할 수 있다.

3.2 실험결과

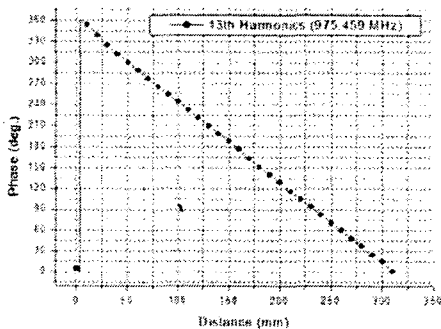


Fig. 4 Measurement result using 13th harmonics

Fig. 4는 13 번째 조화파를 사용했을 때의 이동거리와 위상과의 관계를 나타낸 그래프이다. 10 mm 간격으로 거리를 증가시켜 가며 실험을 수행하였다. 각 점들은 40 번의 측정값을 얻어 평균을 취한 값이다. 거리가 310 mm 증가하였을 때 위상은 360° 만큼 변화하였다. 측정값들의 표준편차는 1.388° 이고 이를 거리로 환산했을 경우 1.18 mm가 된다. 식 (9)를 보면 위상의 불확도는 약 6° 이고 이를 길이로 환산하면 약 2.57 mm이다. 불확도의 범위안에서 결과값이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 2,4,8,13 번째 조화파를 이용하여 총 행정이 500 mm이고 0부터 50 mm단위로 거리를 늘려 가며 위상을 측정한 결과이다. 거리의 변화에 따른 여러 조화파들의 위상 변화 모습을 한눈에 알아볼 수 있다.

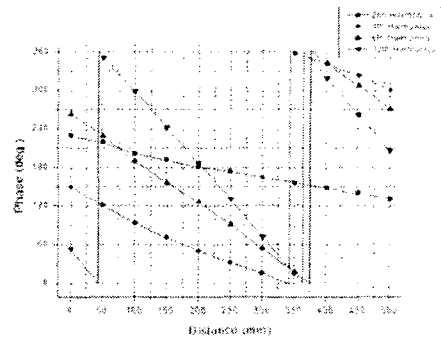


Fig. 5 Measurement result using 2nd, 4th, 8th and 13th harmonics

4. 결론

펄스 레이저를 광원으로 하여 수 m 의 측정영역에서 10 μm 이하의 분해능을 가지는 절대거리를 측정하는 방법을 제안하였고, 합성파 간섭계를 이용하여, 절대거리를 측정하였다. 정해진 주파수 영역 안에서 적당한 주파수의 조화파를 자유롭게 선택할 수 있었고, 여러 조화파들의 측정거리를 비교하였으며 13 번째 고차 조화파를 이용하여 측정분해능을 높이는 작업을 수행하였다. 현재 측정 정확도에 영향을 미치는 오차를 분석하고 가장 큰 영향을 미치는 요소를 제거하여 불확도를 낮추는 연구가 진행 중이다. 앞으로는 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 파워 분할기에서의 위상차 불일치 현상을 제거하여 전체 실험 구성의 불확도를 낮추는 실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. G. L. Bourdet, A. G. Orszag, "Absolute distance measurements by CO2 laser multiwavelength interferometry," *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 2, pp. 225, 1979.
2. K. Seta, T. O'ishi "Distance meter utilizing the intermode beat of a He-Ne laser," *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 3, pp. 354, 1990.
3. C. Rulliere, "Femtosecond Laser Pulses principles and Experiments," Springer, pp.25-30,1998.
4. K. Minoshima, H. Matsumoto, "High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser," *Appl. Opt.*, Vol. 39, No. 30, pp. 5512-5517, 2000.
5. M. S. Kim, S. W. Kim, "Two-Longitudinal-Mode He-Ne Laser for Heterodyne Interferometers to Measure Displacement," *Appl. Opt.*, Vol. 41, No. 28, pp. 5938-5942.