

펨토초 펄스 레이저를 이용한 절대 거리 측정

Absolute Distance Measurement using Femtosecond Pulse Lasers

진중환, 주기남, 김승우
 KAIST 기계공학과
 jinjong@kaist.ac.kr

절대 거리 측정은 한 번의 측정으로 두 물체 사이의 거리를 측정하는데 목표를 두고 있다⁽¹⁾. 일반적으로 광학식 간섭계(optical interferometer)는 광원의 파장을 기준으로 사용하여 거리를 측정하며, 기존의 호모다인(homodyne) 간섭계나 헤테로다인(heterodyne) 간섭계에서는 측정면을 움직이면서 초기 위치부터 원하는 측정 위치까지 간섭 신호의 위상을 세어나감으로써 거리를 구해낼 수 있다. 이런 방법들은 절대 거리 측정에 바로 응용하기에는 한계를 가지며, 지난 수년간 빛의 전파 시간(time-of-flight) 이나 광강도 변조(intensity modulation) 방법 같은 다른 원리를 사용한 절대 거리 측정에 대한 연구가 진행되어왔으나 낮은 정밀도로 인해 응용 범위가 제한되었다. 또 두 파장 간섭계나 다중 파장 간섭계도 절대 거리 측정의 또 다른 원리로 응용되어졌고⁽²⁾, 대역폭이 넓은 가변 다이오드 레이저로 연속적인 주파수 변조를 통한 절대 거리 측정도 수행되어지고 있다⁽³⁾.

절대 거리 측정에 사용되는 광학식 간섭계의 다양한 방법들의 공통적인 특징은 순차적으로 또는 동시에 넓은 대역폭에서 많은 단색광 요소를 사용하는 방법이다. 각 개별적인 단색광 요소들의 간섭들이 합쳐지고, 합쳐진 간섭 신호의 위상정보를 각 측정 방법에 적절한 해석 방법을 통해 분석하면 절대 거리를 얻을 수 있다. 이런 관점에서 넓은 대역폭의 주파수 성분을 커 효과(Kerr-effect)를 이용하여 모드록(mode-locking)시킴으로써 아주 짧은 펄스 형태로 발진하는 펨토초 펄스 레이저의 특징을 사용한 새로운 절대 거리 측정법을 제안하고자 한다.

그림 1은 펨토초 레이저를 이용한 절대 거리 측정을 위한 구성도이다. 전체 구조는 마이켈슨 간섭계 형태이며, 편광 성분이 다른 빛이 기준면과 측정면으로 나뉘어 입사하게 된다. 전체 구성은 크게 레이저 안정화 부분과 간섭계 부분으로 나뉘게 되며, 본 논문에서는 간섭계 부분, 즉 헤테로다인 간섭계부분, 콤 스펙트럼 간섭계(comb spectrum interferometer) 부분, 합성파 간섭계(synthetic wavelength interferometer) 부분의 세 부분만으로 제한한다.

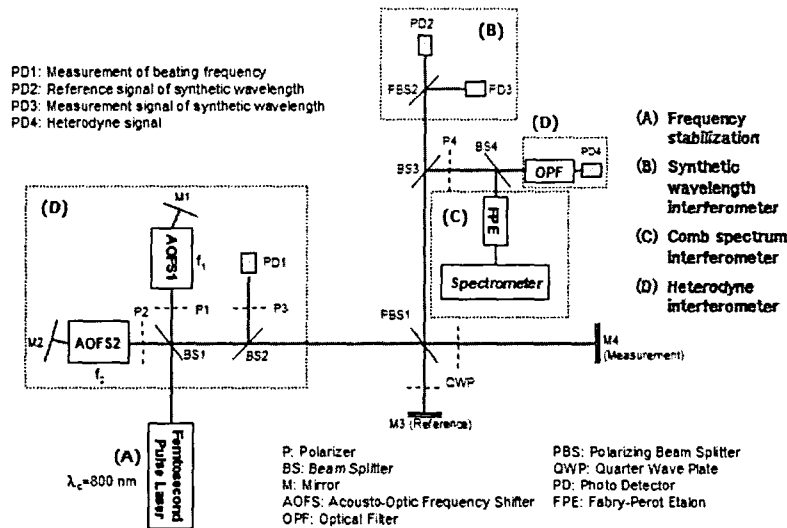


그림 1. 펨토초 레이저를 이용한 절대거리 측정을 위한 광학 구성도

본 연구에서 사용되어지는 펨토초 레이저는 중심파장이 800 nm, 대역폭이 100 nm(FWHM), 모드간 간격 75 MHz, 펄스폭이 12 fs이하이다. 그림 2와 같이 절대 거리 측정을 위해 사용되는 세 가지 간섭계의 측정 결과 및 측정 영역과 분해능은 서로 보완적이며, 이를 통해 1 m 이상의 측정영역에서 나노미터 이하의 분해능으로 측정이 가능하다. 헤테로다인 간섭계의 경우, 맥놀이 주파수가 50 kHz이며, 이는 두 개의 AOFS(Acousto-Optic Frequency Shifter)에 의해 만들어진다. M1, M2는 PD1에서 기준 맥놀이 신호를 최대로 얻기 위해 조절되어 지고, 그림 3과 같이 간섭계의 광경로차에 의해 위상이 지연된 맥놀이 주파수는 PD4에서 검출된다. 측정 영역은 광원의 중심 파장의 반에 해당하는 400 nm이며, 측정 분해능은 0.1도의 분해능을 갖는 위상측정기로 약 0.1 nm 이다.

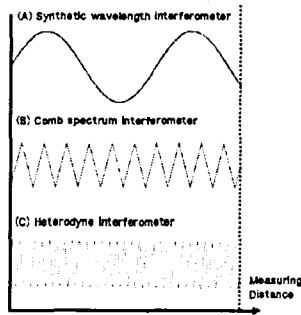


그림 2. 세 가지 간섭계를 이용한 절대 거리 측정

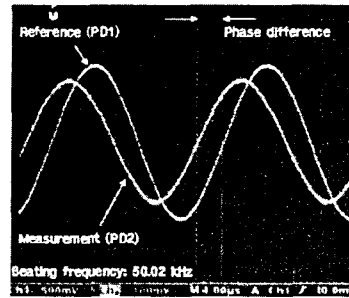


그림 3. 헤테로다인 간섭계 기준 및 측정 신호

펨토초 레이저의 일정한 모드간 간격을 이용한 합성과 간섭계를 사용하면⁽⁴⁾, 모드간 간격인 75 MHz에 해당하는 등가파장이 4 m가 되며, 최대 측정 영역은 최대 등가파장의 반에 해당하는 2 m이다, 기준신호와 측정신호는 각각 그림 1의 PD2와 PD3에 의해 얻어지며, 더 높은 모드간 간격을 이용한 합성파를 사용하면 측정 영역은 줄어들지만 높은 측정 분해능을 얻을 수 있다. 그림 4는 모드간 간격의 1번째(75 MHz), 4번째(300 MHz), 8번째(600 MHz), 13번째(975 MHz) 합성파를 이용하여 500 mm의 측정 영역을 측정한 결과이다.

측정 영역은 넓지만 상대적으로 측정 분해능이 낮은 합성파를 이용한 측정과 측정 영역이 좁지만 높은 측정 분해능을 얻을 수 있는 헤테로다인 간섭계의 측정 결과를 위상의 모호성없이 연결시켜 절대 거리 측정에 응용하기 위해 콤 스펙트럼 간섭계를 사용한다. 콤 스펙트럼 간섭계에서는 간섭 신호의 위상이 측정 거리에 비례하는 원리를 사용하며⁽⁵⁾, 스펙트럼 분석기의 각 픽셀(pixel)에 그에 맞는 간섭 신호의 주파수 성분들을 검출하기 위해 패브리페로 에탈론(Fabry-parot etalon)을 통해 필터링(filtering)을 한다. 측정 결과는 그림 5와 같으며, 위상의 모호성 없이 측정 가능한 거리(Non-ambiguity range, NAR)는 2.921 mm이며 분해능은 10 nm이다.

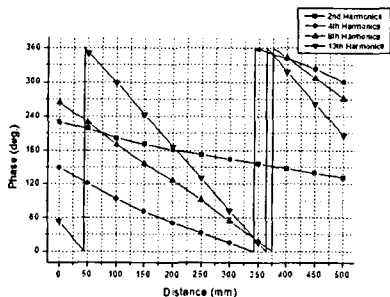


그림 4. 합성파 간섭계의 측정결과

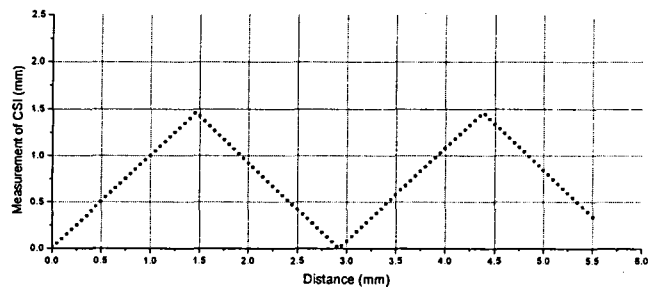


그림 5. 콤 스펙트럼 간섭계의 측정 결과

1. J. Ye, S.T. Cundiff, "Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Applications", Springer, 2005
2. U. Schnell, R. Dandliker, S. Gray, "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target", Opt. Lett. 21, 528, 1996
3. O. Sasaki, T. Kuwahara, R. Hara, T. Suzuki, "Sinusoidal wavelength-scanning interferometric reflectometry", Appl. Opt. 39, 3847, 2000
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. 39, 5512, 2000
5. L. Rovati, U. Minoni, F. Docchio, "Dispersive white light combined with a frequency-modulated continuous-wave interferometer for high-resolution absolute measurements of distance", Opt. Lett. 22, 850, 1997

