

펨토초 레이저를 이용한 분산형 간섭계

Dispersive interferometry using femtosecond laser pulses

주기남, 김승우*

*한국과학기술원 기계공학과

pepsi@kaist.ac.kr

절대거리를 측정하기 위한 분산형 간섭계(dispersive interferometer)는 넓은 스펙트럼을 갖는 광원을 이용하여, 다음의 식과 같이 측정거리에 따른 주파수 상에서의 간섭 신호를 얻어낸다.

$$i(\nu) = a(\nu) + b(\nu)\cos\phi(\nu) \tag{1}$$

여기서, $i(\nu)$ 는 주파수 상에서의 간섭신호를 의미하며 $a(\nu)$, $b(\nu)$ 는 광원의 스펙트럼으로 결정되는 요소를, $\phi(\nu)$ 는 간섭신호의 위상을 나타낸다. 즉 $\phi(\nu)$ 는 측정 거리에 따른 위상을 나타내며 아래의 식과 같이 광원의 주파수인 ν 의 함수로 주어진다.

$$\phi(\nu) = \frac{2\pi}{\lambda}(2L) = \frac{4n\pi L}{c}\nu = 2\pi\alpha\nu, \quad \alpha = \frac{2nL}{c} \tag{2}$$

여기서 λ 는 광원의 파장을, c 는 진공중의 광원의 속도를 나타내며, L 은 측정 거리이다. 공기 굴절률 n 이 상수라고 가정하면 식 (2)에서 알 수 있듯이 $\phi(\nu)$ 는 ν 와 선형 관계를 가지며, 식 (1)을 푸리에 변환(Fourier transform)하여 구한 비례상수 α 를 통해 L 을 측정할 수 있다.

그동안 이러한 분산형 간섭계에 대하여 많은 연구가 진행되었으며, 이들 연구는 광원의 종류에 따라 백색광, LED와 같은 연속 스펙트럼(continuous spectrum)을 갖는 광원을 이용한 연구⁽¹⁾와 다중모드 레이저 다이오드(multi-mode laser diode)를 사용한 연구⁽²⁾로 구분된다. 연속 스펙트럼을 갖는 백색광의 경우, 간섭무늬를 얻기 위한 샘플링(sampling)은 주로 회절 격자(diffraction grating)과 CCD를 이용한 스펙트로미터(spectrometer)에 의해 수행되며, 스펙트로미터의 주파수 분해능은 내부 CCD의 화소(pixel) 크기로 결정된다. 백색광은 비교적 넓은 스펙트럼을 가지기 때문에 주파수에 따른 많은 정보를 얻을 수 있고, 이로 인해 최소 측정 영역이 1 μm 정도로 짧아지는 장점을 가지지만 스펙트로미터의 주파수 분해능으로 인하여 최대측정 영역이 수백 μm 로 제한 받으며, 그 이상의 측정거리에서는 간섭신호를 전혀 검출할 수 없다는 단점을 가진다. 한편 다중모드 레이저 다이오드는 스펙트럼이 불연속한(discrete) 특성을 가지기 때문에, 간섭 신호는 스펙트로미터로 검출하지만 샘플링 간격은 다중모드 레이저 다이오드의 모드간 간격(mode spacing)에 의해 결정되며, 샘플링 폭은 각 모드의 선폭(linewidth)에 의해 결정된다. 즉, 간섭신호가 각 모드들에만 실리게 되기 때문에 백색광에서 최대 측정 영역이 스펙트로미터의 주파수 분해능에 의해 제한되는 것과는 달리, 에일리어싱(aliasing)을 이용하여 최대 측정 영역을 어느 수준 확장시킬 수 있다. 그러나 다중모드 레이저 다이오드는 각 모드의 선폭이 연속발진(CW) 레이저 등의 선폭보다 비교적 넓기 때문에 가간섭성이 떨어지고, 이로 인하여 최대 측정 영역은 또다시 수십 mm로 제한을 받게 된다. 또한 광원의 스펙트럼이 백색광에 비해 매우 좁기 때문에 최소 측정 영역 50 μm 이상으로 커지는 문제가 있다.

이에 비해서 제안하는 펨토초 레이저(femtosecond laser pulses)를 광원으로 한 분산형 간섭계는 기존의 연구들에서 제시되었던 측정거리 제한에 관한 문제점들을 해결할 수 있다. 펨토초 레이저는 펄스 레이저로서 모드 락(mode-lock)된 다중모드 레이저의 특성을 가진다. 1×10^{14} Hz 이상의 비교적 넓은 주파수 대역을 가지기 때문에, 분산형 간섭계의 광원으로 이용할 경우 다중모드 레이저 다이오드에 비해 많은 측정 데이터를 얻어 정확도를 높일 수 있으며 최소 측정 영역이 5 μm 정도로 매우 작게 된다. 또한 각 모드들이 1 MHz 이하의 매우 좁은 선폭을 가지기 때문에, 이로 인한 가간섭 거리(coherence length)만큼 측정 영역을 확장할 수 있다. 하지만 펨토초 레이저의 각 모드들은 수십 MHz의 모드간 간격만큼 주파수 차이를 가지고 분포하기 때문에, 각각의 모드들

을 분리하기 위해서는 고정도의 분광기술을 필요로 하며, 현재는 어려운 상황이다. 그래서 본 연구에서는 펨토초 레이저의 모드간 간격을 패브리-페로 에탈론(Fabry-Perot etalon, FPE)을 이용하여 주파수 필터링함으로써 모드간 간격을 넓히는 방법을 제안한다. 아래의 그림은 제안하는 간섭계의 광학 구성(optical layout)을 나타낸다.

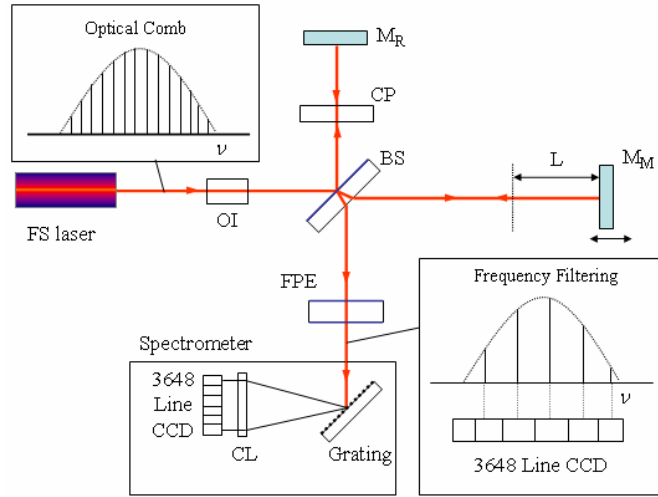


Fig. 1. Dispersive interferometer using femtosecond laser pulses. FS laser, femtosecond laser; OI, optical isolator; BS, beam splitter; CP, compensation plate; FPE, Fabry-Perot etalon; MR, reference mirror; MM, measurement mirror; CL, collimating lens

간섭계는 기본적인 마이켈슨 간섭계로 구성하였으며 광원에서 나온 빛은 양쪽 미러에서 반사되어 FPE를 통과하고 스펙트로미터에서 검출된다. 사용한 펨토초 레이저는 Ti:sapphire 레이저로 중심 파장이 800 nm인 모드 록 레이저를 사용하였다. FPE를 통과하는 빛은 다중 간섭에 의해 보강 간섭을 일으키는 빛만이 통과하기 때문에 입사하는 빛의 주파수가 FPE의 투과 주파수 첨두(peak)와 일치할 때만 모두 투과하게 되며, 그렇지 않은 경우에는 차단된다. 그래서 펨토초 레이저가 FPE를 통과하게 되면, FPE의 자유 스펙트럼 영역(free spectral range, F.S.R.)에 따라 펨토초 모드들이 필터링 되어 모드간 간격이 FPE의 F.S.R.로 넓어지는 효과를 얻을 수 있다. 결국 펨토초 레이저의 모드들은 단색성(monochromatic)의 특징을 가진 채, 모드간 간격만 넓어지는 효과를 가지게 된다. 이러한 효과는 측정하는 스펙트로미터의 CCD 한 픽셀 안에 하나의 모드를 정합(matching)시킬 수 있는 결과를 주게 되며 긴 측정 거리에서도 간섭신호를 얻을 수 있다. 물론 FPE의 F.S.R.에 의해서 모호성 없이 측정 가능한 거리(non-ambiguity range, NAR)가 정의되기 때문에, 그 이상의 측정 거리에서는 모호성(ambiguity) 문제가 발생하지만, 이는 주기적으로 나타나는 NAR의 수를 결정해 주는 간섭계와 복합적으로 구성하여 해결할 수 있다. 펨토초 레이저를 이용하면 광학 구성의 변화 없이 모드간 간격을 이용한 등가파장 간섭계(Synthetic wavelength interferometer)의 구현이 가능하기 때문에 이러한 문제를 해결할 수 있다.⁽³⁾ 펨토초 레이저를 이용한 분산형 간섭계의 성능을 평가한 결과, 6 nm의 분해능으로, 최소 측정거리 5 μm에서 최대거리 200 mm까지 측정이 가능한 것을 확인하였다. 그리고 FPE를 통한 주파수 필터링이 더욱 개선되면 수 m까지 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) U. Schnell, E. Zimmermann, and R. Dändliker, "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channeled spectrum interferometry," Pure Appl. Opt. 4, 643-651 (1995)
- (2) 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, 850-852 (1997)
- (3) 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, 5512-5517 (2000)