

펨토초 레이저의 주파수 모드를 이용한 정밀 길이 측정

진종한*, 김영진, 김승우(KAIST 기계공학과)

Precision Length Metrology using the Optical Comb of Femtosecond Pulse Lasers

Jonghan Jin, Young-Jin Kim, Seung-Woo Kim (Dept. of Mecha. Eng., KAIST)

ABSTRACT

In precision length measurements using optical interferometry based on homodyne or heterodyne principles, it is crucial to have frequency-stabilized monochromatic light sources. To the end, we investigate the possibility of utilizing the optical comb constituted by ultrashort femtosecond pulse lasers generated from a gain medium of titanium-doped aluminium oxide (Ti:Al₂O₃). The optical comb is stabilized by locking to the caesium atomic clock, which allows all the modes of the comb to maintain an extremely high level of frequency stabilization to precision of one part in 10¹⁶. Then, high precision length measurements are realized by extracting a single or group of particularly wanted optical frequency components or by adopting a third-party light source locked to the comb. Required measurement system setup will be presented in detail along with experimental results.

Key Words : Frequency stabilization (주파수 안정화), Femtosecond laser(펨토초 레이저), Precision length metrology (정밀 길이 측정), Synthetic wavelength interferometer(합성파 간섭계), Gauge block measurement (게이지 블록 측정)

1. 서론

광학 간섭 원리를 바탕으로 하는 정밀 길이 측정에 있어서 주파수가 안정화된 단색(monochromatic) 광원은 필수적이다. Ti:Al₂O₃의 증폭 매질에 의해 발진되는 펨토초 레이저(femtosecond laser)의 주파수 모드(frequency mode)들을 사용하여 정밀 길이 측정에 적합한, 주파수 안정화된 광원을 구현하고자 한다. 펨토초 레이저의 주기적인 펄스(pulse)는 주파수 영역에서 보면 일정한 간격을 갖는 주파수 모드들로 구성된다. 이런 주파수 모드들은 주파수 모드간 간격, f_r 과 시간 영역에서 펄스의 군속도(group velocity)와 위상속도(phase velocity)의 차이에 의해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 의 두 독립적인 요소로 표현된다. 펨토초 레이저의 주파수 모드들을 주파수 표준인 세슘(cesium) 원자 시계에 잠금(lock)시키면, 주파수 모드간 간격과 오프셋 주파수로 표현되는 펨토초 레이저의 모든 주파수 모드들은 10⁻¹⁶ 수준으로 매우 정밀하게 주파수 안정화가 이루어진다. 이런 안정화된 주파수 모

드들을 주파수 영역에서의 ‘자’(ruler)로서 사용하여, 다른 유용한 광원들의 주파수를 측정 및 잠금(lock)함으로써 매우 정밀하게 주파수가 안정화된 단색 광원을 얻어낼 수 있다. 이는 안정화된 펨토초 레이저의 주파수 모드들이 존재하는 영역에서 원하는 주파수를 정확히 조절 및 제어하여 주파수가 안정화된 단색 광원으로 사용할 수 있으며, 이를 통해 ‘광주파수 합성기’(optical synthesizer)를 구현할 수 있다. 본 연구에서는 많은 단색 광원들 중에서 파장(wavelength) 및 진폭(amplitude)을 전자적으로 변화시킬 수 있고 광량(optical power)이 커서 긴 거리의 정밀 거리 측정 및 형상 측정에 유용한 다이오드 레이저(diode laser)를 사용하며, 그 중에서도 긴 가간섭길이(coherence length)를 얻기 위해 주파수 선평폭(line width)이 작은 외부 공진기 다이오드 레이저(external cavity diode laser)를 사용한다. 외부 공진기 다이오드 레이저는 파장 가변 범위가 대략 10 ~ 50 nm 수준으로 주파수 변조 및 진폭 변조를 통한 절대 거리 측정[1][2] 및 다파장 간섭계의 구현이 가능하며[3], 광량은 수십 mW 정도로 비선형 효과를

통한 거리 측정도 가능하다[4]. 선폭은 대략 300 kHz 이하 수준으로 가간섭길이 대략 1 km 정도로 긴 거리 측정에도 적용 가능하다[5]. 본 연구에서는 안정화된 펨토초 레이저에 잠금된 외부 공진기 다이오드 레이저를 사용하여 초정밀 길이 측정이 필요한 블록 게이지(block gauge)의 측정 및 보정을 수행한다[6][7][8].

2. 기본 원리

2.1 펨토초 레이저의 안정화

펨토초 레이저의 주파수 모드들은 주파수 모드간 간격, f_r 과 시간 영역에서 펄스의 군속도(group velocity)와 위상속도(phase velocity)의 차이에 의해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 의 두 독립적인 요소로 표현되며, 이를 주파수 표준인 세슘 원자 시계를 통해 안정화 시키면 펨토초 레이저의 n 번째 주파수 모드는 주파수 모드간 간격과 오프셋 주파수로 식(1)과 같이 표현할 수 있으며, 이는 10^{-16} 의 안정도를 갖는다[9].

$$f_n = n \cdot f_r + f_o \quad (1)$$

주파수 모드간 간격, f_r 을 안정화 시키기 위해 Fig. 1 과 같이 펨토초 레이저의 펄스를 대역폭이 큰 광검출기(photo-detector)를 통해 단순히 측정하면, 그 측정 신호는 주파수 모드간 간격인 80 MHz 뿐만 아니라 그 조화파(harmonics) 성분도 함께 검출된다. 이를 주파수 표준인 세슘 원자 시계에 잠금된 고정밀 주파수 합성기(high-stabilized radio frequency synthesizer)의 출력 신호와 전자적으로 비교하여 이를 위상 잠금 회로(Phase locked loop, PLL)를 통해 공진기의 미러(mirror)의 위치를 PZT 를 통해 제어함으로써 주파수 모드간 간격을 일정하게 유지한다[9].

펄스의 군속도(group velocity)와 위상속도(phase velocity)의 차이에 의해 발생하는 오프셋 주파수(offset frequency), f_o 를 안정화 시키기 위해서 흔히 많이 사용하는 방법이 f-2f 간섭계이다. 이 방법은 펨토초 레이저의 광 빛(optical comb)에서 주파수가 낮은 쪽의 광주파수, f_{comb} 를 BBO(β -BaB₂O₄) 결정체에 입사시켜 비선형 효과(non-linear effect)를 이용한 이차 조화파 생성(second harmonic generation)을 한다. 이렇게 생성된 주파수 성분, $2 \times f_{comb}$ 과 기존의 광 빛 중에서 비선형 효과로 생성된 이차 조화파에 대응되는 주파수, $2f_{comb}$ 의 차를 통해 식(2)와 같이 오프셋 주파수를 얻을 수 있다. 이를 위해서는 펨토초 레이저의 주파수 대역이 f_{comb} 과 $2f_{comb}$ 성분을 모두 포함하여야 f-2f 간섭계의 원리를 적용하여

오프셋 주파수, f_o 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 2f_{SHG} - 2f_{comb} &= 2 \times f_{comb} - 2f_{comb} \\ &= 2 \cdot (n \cdot f_r + f_o) - (2 \cdot n \cdot f_r + f_o) = f_o \quad (2) \end{aligned}$$

하지만 펨토초 레이저의 증폭매질(Ti:Al₂O₃)은 주파수 대역폭의 한계가 있으며, 그 자체에서 f-2f 의 주파수 성분을 얻기 힘들다. 따라서 오프셋 주파수를 f-2f 간섭계를 통해 얻어내기 위해서는 펨토초 레이저의 주파수 대역폭을 넓혀주는(broadening) 단계가 필요하며, 이를 위해 photonic crystal 광섬유를 사용한다. 이는 광강도(optical intensity)에 따라 매질의 굴절율(refractive index)이 변하는 원리를 바탕으로 하며, 특히 펨토초 레이저 같이 짧은 펄스의 빛이 입사될 경우 시간에 따라 광강도의 변화가 생기므로 이는 시간에 따른 굴절율 변화를 야기한다. 이를 통해 자기-위상 변조(self-phase modulation)가 가능하며, 제한된 펨토초 레이저의 대역폭은 f-2f 간섭계 구현이 가능할 만큼 넓어지게 된다.

2.2 광주파수 합성기

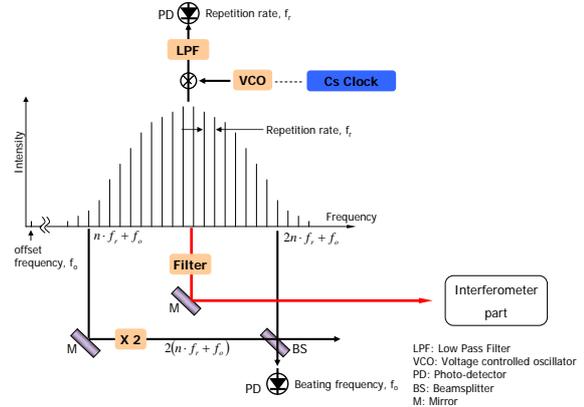


Fig. 1 Concept of the optical synthesizer

Fig. 1 은 광주파수 합성기의 개념을 보여준다. 펨토초 레이저의 광 빛의 주파수 성분들을 안정화하기 위해 주파수 모드간 간격과 오프셋 주파수를 측정 및 제어한다. 주파수 모드간 간격의 경우는 광 빛 자체를 광검출기를 통해 받아 공진기의 미러를 평행이동(translation)하도록 제어함으로써 이루어지고, 오프셋 주파수의 경우에는 f-2f 간섭계의 원리를 사용하여 공진기의 미러의 기울임(tilting)을 제어함으로써 이루어진다. 이렇게 안정화된 광 빛의 모든 주파수 성분들은 식(1)과 같이 절대 주파수를 갖고, 이를 주파수 영역에서의 '자'(ruler)로서 사용하여, 다른 유용한 광원들의 주파수를 측정 및 잠금(lock)함으로써 매우 정밀하게 주파수가 안정화된 단색

광원을 얻어낼 수 있다. 즉, 안정화된 펄스 레이저의 주파수 모드들이 존재하는 영역에서 원하는 주파수를 정확히 조절 및 제어하여 고정밀도의 주파수가 안정화된 단색 광원을 얻을 수 있으며, 이를 통해 ‘광주파수 합성기’(optical synthesizer)를 구현할 수 있다[11].

2.3 파장 천이 간섭계(Wavelength scanning interferometer)

다파장 간섭계를 기본으로 하는 파장 천이 간섭계는 파장 가변 광원을 사용하여 두 개 혹은 그 이상의 다른 파장을 통해 절대 거리 측정을 하는 방법이다. 측정하고자 하는 기하학적 길이(geometrical path length), L 은 식(3)과 같이 두 파장, λ_1 과 λ_2 의 정수부(integer part), N 와 소수부(excess fraction part), ε 로 표현할 수 있다.

$$L = \frac{\lambda_1}{2}(N_1 + \varepsilon_1) = \frac{\lambda_2}{2}(N_2 + \varepsilon_2) \quad (3)$$

여기서, 소수부는 푸리에 방법(Fourier method) 등의 여러 해석 방법을 통해 간섭 무늬에서 바로 알아낼 수 있지만, 파장의 정수부, N 은 알 수 없다. 따라서 측정하고자 하는 길이, L 을 구하기 위해서는 정수부, N 을 구해야 한다. 이를 위해 파장 천이를 수행하면서 간섭무늬에서의 정수부 변화량, ΔN 과 소수부 변화량, $\Delta \varepsilon$ 을 구해내면, 식(4)와 같이 기하학적 길이, L_s 을 합성파, λ_s 에 의해 구해낼 수 있다. 이렇게 구한 기하학적 길이로부터 각 파장의 정수부, N 을 구할 있다. 합성파로 구한 길이, L_s 의 불확도가 낮으므로 이를 통해 정수부, N 만을 구해내고 식(3)에 의해 최종적으로 기하학적 길이, L 을 구한다.

$$L_s = \frac{1}{2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (\Delta N + \Delta \varepsilon) = \frac{\lambda_s}{2} (\Delta N + \Delta \varepsilon) \quad (4)$$

식(4)와 같이 합성파, λ_s 로 기하학적 길이, L_s 를 구해 각 파장으로 측정된 길이의 정수부, N 를 정확히 구해내려면, 합성파를 통해 측정된 길이 측정 불확도, $u(L_s)$ 가 측정 파장 중 가장 작은 파장의 불확도, $u(\lambda_2)$ 의 1/4 보다 작아야 한다. 이런 이유로 합성파에 대한 불확도, $u(\lambda_s)$ 가 좋지 않다면, 게이지 블록의 측정 영역이 제한된다.

3. 실험 구성

Fig. 2은 게이지 블록을 측정하기 위한 광학 구성도이다. 외부 공진기 다이오드 레이저(ECLD)에서

나온 빛은 렌즈(CL)에 의해 평면파가 되며, 광속분할기(BS)에 의해 하나는 기준미터(M1)으로 다른 하나는 측정하고자 하는 게이지 블록과 잘 연마된 베이스(M2)로 입사한다. 이는 가장 간단한 트와이만그린(Twyman-Green) 간섭계 형태이며, 간섭 무늬는 CCD 카메라에 의해 얻어진다. 그리고, 외부 공진기 다이오드 레이저의 파장을 천이하면서 게이지 블록의 윗면과 베이스의 간섭무늬 변화량을 각각 광검출기 1(PD1)과 광검출기 2(PD2)를 통해 얻어낸다. 광검출기에서 얻어진 정수부 변화량, ΔN 과 소수부 변화량, $\Delta \varepsilon$ 그리고 파장 천이에 의한 합성파를 식(4)에 적용하면, 합성파를 통한 게이지 블록의 절대 길이, L_s 를 구할 수 있으며, 이를 통해 각 파장에 대한 정수부, N 를 계산할 수 있다. 소수부, ε 는 Fig. 2의 게이지 블록의 윗면과 베이스 면(M2)이 기준면과 생기는 간섭 무늬들 간의 위상차(phase difference)로 정의되며, Fig. 3와 같이 보여진다. 위상은 식(5)로 표현되어지는 간섭 무늬, $I(x)$ 를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 식(6)과 같이 얻어지는 주파수 영역에서의 정보, $F(w)$ 중에서 가장 주요한 공간 주파수(dominant spatial frequency) 성분, w_i 에서 식(7)에 의해 위상을 구하는 푸리에 방법(Fourier method)으로 얻어진다.

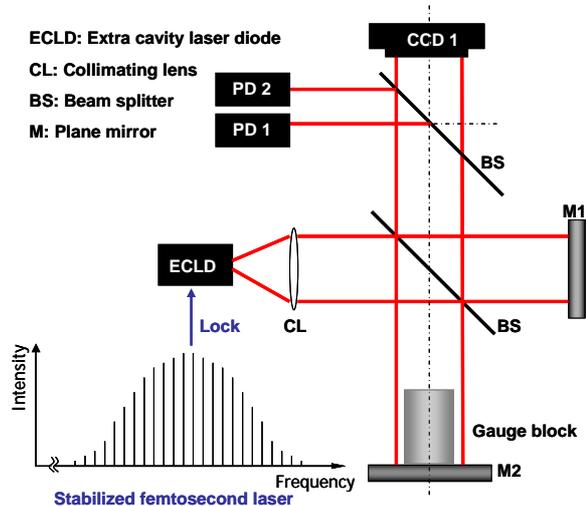


Fig. 2 Optical layout for measurement of the gauge block

$$I(x) = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos(w_i x + \phi)\} \quad (5)$$

여기서, x 는 간섭무늬가 형성된 수직 방향이며, w_i 는 시편의 기울어짐에 의해 생기는 간섭무늬의 공간주파수이다.

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{-jwx} dx \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}\{F(w_i)\}}{\text{Re}\{F(w_i)\}} \right] \quad (7)$$

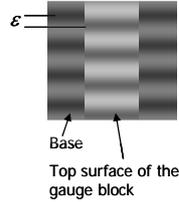


Fig. 3 The interference fringe of the top surface of the gauge block and base

파장 천이 간섭계를 바탕으로 하는 게이지 블록 측정에서 측정 영역을 확장하기 위해서는 측정 파장 및 합성파의 안정도에 대한 개선이 필요하며, 이를 위해 주파수 안정화된 펄스 레이저와 광원인 외부 공진기 다이오드 레이저를 간섭시켜 얻은 맥놀이 주파수(beat frequency)를 사용한다. 즉, 외부 공진기 다이오드 레이저의 발진 주파수를 안정화된 펄스 레이저의 주파수 수준으로 안정화하여, 광원의 주파수를 매우 정밀하게 측정 및 제어가 가능하게 된다.

4. 결론

고정밀 주파수 안정화된 광원을 얻기 위해, 주파수 표준인 세슘 원자 시계를 통해 주파수 모드간 간격을 잠금하고 옙셋 주파수를 제어하여 10^{-16} 수준의 주파수 안정화된 펄스 레이저를 구현하였다. 주파수 안정화된 펄스 레이저의 주파수 모드들을 주파수 영역에서의 ‘자’(ruler)로서 사용하여, 외부 공진기 다이오드 레이저의 주파수를 측정 및 잠금(lock)함으로써 원하는 주파수를 매우 정밀하게 주파수가 안정화된 단색 광원을 얻을 수 있는 광주파수 합성기 구현을 위한 기초 실험을 수행하였다. 이를 통해 산업 현장이나 실험실 단위에서 정밀하게 길이를 측정하기 위해 사용되는 게이지 블록 측정을 위한 광학 구성을 제안하였고, 불확도 평가 및 기초 실험을 수행하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Toshihiro Kubota, Makoto Nara and Tohshihiko Yoshino, "Interferometer for measuring displacement and distance," *Optics letter*, Vol. 12, No. 5, pp. 310-312, 1987.
2. K.Ikezawa, K.Isozaki, E.Ogita and T.Ueda, "Measurement of absolute distance employing a tunable CW dye laser," *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No.1, pp. 36-39, 1992.
3. F.Bien, M.Camac, H.J. Caulfield and S.Ezekiel, "Absolute distance measurements by variable wavelength interferometry," *Applied optics*, Vol. 20, No.3, pp. 400-403, 1981.
4. Akira Ishida, "Two-wavelength displacement-measuring interferometer using second-harmonic light to eliminate air-turbulence-induced errors," *Japanese journal of applied physics*, Vol. 28, No. 3, pp. 473-475, 1989.
5. Newfocus, "TLB-6300 Tunable laser manual"
6. Youichi Bitou, Akiko Hirai, Hideaki Yoshimori, Feng-Lei Hong, Yun Zhang, Atsushi Onae and Katuo Seta, "Gauge block interferometer using three frequency-stabilized lasers," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4401, pp. 288-297, 2001
7. 강주식, 김재완, 서호성, 이원규, "3 대의 주파수 안정화 레이저를 이용한 게이지 블록 길이의 절대 측정," *한국광학회 하계 학술대회지*, pp. 254-255, 2005.
8. Youichi Bitou, Akiko Hirai, Hideaki Yoshimori, Feng-Lei Hong, Yun Zhang, Atsushi Onae and Katuo Seta, "Gauge block interferometer using three frequency-stabilized lasers," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4401, pp. 288- 297, 2001.
9. R.Holzwarth, M.Zimmermann, Thomas Udem, and T.W.Hansch, "Optical Clockworks and the measurement of laser frequencies with a mode-locked frequency comb," *IEEE journal of quantum electronics*, Vol. 37, No.12, pp. 1493-1501, 2001.
10. David J. Jones, Scott A. Diddams, Jinendra K. Ranka, Andrew Stentz, Robert S. Windeler, John L. Hall, Steven T. Cundiff, "Carrier- envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis", *Science*, Vol. 288, pp. 635-639, 2000.
11. John D. Jost, John L. Hall, and Jun Ye, "Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator," *Optics express*, Vol.10, No.12, pp. 515-520, 2002.