

## 펨토초 레이저의 주파수 모드를 이용한 정밀 길이 측정

### Precision Length Metrology using the Optical Comb of Femtosecond Pulse Lasers

진중환, 김영진, 김윤석, 김승우, 강주식\*  
 KAIST 기계공학과, \*한국표준과학연구원 광기술표준부  
 jinjong@kaist.ac.kr

광학 간섭 원리를 바탕으로 하는 정밀 길이 측정에 있어서 주파수가 안정화된 단색(monochromatic) 광원은 필수적이다. 본 연구에서는  $Ti:Al_2O_3$ 의 증폭매질에 의해 발진되는 펨토초 레이저(femtosecond laser)의 주파수 모드(frequency mode)들을 사용하여 정밀 길이 측정에 적합한, 주파수 안정화된 광원을 구현하고, 정밀 길이 측정에 적용하고자 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  $10^{-14}$  수준으로 매우 정밀하게 주파수 안정화가 이루어진다. 이런 안정화된 주파수 모드들을 주파수 영역에서의 '자'(ruler)로서 사용하여, 다른 유용한 광원들의 주파수를 측정 및 잠금(lock)함으로써 매우 정밀하게 주파수가 안정화된 단색 광원을 얻어낼 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 선 폭(line width)이 작은 외부 공진기 다이오드 레이저(external cavity diode laser)를 사용한다. 외부 공진기 다이오드 레이저는 파장 가변 범위가 대략 10 nm ~ 50 nm 수준으로 주파수 변조 및 진폭 변조를 통한 절대 거리 측정 및 다파장 간섭계의 구현이 가능하며, 광량은 수십 mW 정도로 비선형 효과를 통한 거리 측정도 가능하다. 선폭은 대략 300 kHz 이하 수준으로 가간섭길이가 대략 1 km 정도로 긴 거리 측정에도 적용 가능하다. 본 연구에서는 안정화된 펨토초 레이저에 잠금된 외부 공진기 다이오드 레이저를 사용하여 초정밀 길이 측정이 필요한 게이지 블록(gauge block)의 측정 및 보정을 수행한다.

Fig. 1은 광주파수 합성기와 게이지 블록의 길이 측정을 위한 트와이만 그린 간섭계(Twyman-Green interferometer)가 통합된 전체 측정 구성도이다. 게이지 블록 측정을 위한 간섭계 부분에서는 광주파수 합성기를 통해 측정되고 잠금되어 잘 정의된 빛이 광섬유를 통해 전해지고, 이는 시준 렌즈(collimation lens)를 통해 지름이 2인치인 평면파(plane wave)로 시준된다. 이는 빛을 꺾기 위한 거울(turning mirror)을 통해 광속 분할기(beam splitter)로 들어간다. 이는 기준 거울(reference mirror)과 게이지 블록(gauge block) 및 베이스(base)쪽으로 나뉘고 다시 모여 결상 렌즈(imaging lens)를 통해 CCD 카메라에 결상된다. 공기 굴절률 보상을 위해 온도계, 습도계,  $CO_2$ 계, 압력계를 통해 환경 변수를 측정한다. 그리고, 환경 변수들을 일정하게 유지하기 위해 전체 광학계의 외부에 챔버(chamber)를 구성하였다. Fig. 2는 광주파수 합성기를 구성하기 위해 펨토초 레이저를 루비듐(Rb) 원자 시계(atomic clock)를 통해 주파수 안정화한 결과이다. 점선은 본 연구에 사용된 루비듐 원자시계의 알란 편차(allan deviation)를 나타내며, 실험적으로 안정도가 루비듐 원자시계를  $10^{-14}$ (1000 s)정도로 잘

따라감을 알 수 있다. Fig. 3은 트와이만 그린 형태의 간섭계를 통해 얻은 게이지 블록의 간섭무늬이다. Fig. 4는 파장 측정기를 통한 외부 공진기 다이오드 레이저(external cavity diode laser, ECLD)의 외부 공진기의 끝 미러 각도를 조절하여 얻은 파장 제어 결과이다. Fig. 4(a)는 외부 공진기의 끝 미러 각도를 DC-모터를 통해 제어한 결과이며, Fig. 4(b)는 끝 미러 각도를 PZT를 통해 얻은 결과이다. 이를 통해 얻어지는 주파수 안정도는 파장 측정기의 최소 분해능과 일치하는 약 10 MHz(P.V.)이다. 본 연구를 통해 안정화된 펨토초 레이저를 바탕으로 구현된 광주파수 합성기의 정밀 길이 측정의 응용 가능성을 보이며, 이를 검증하기 위해 길이 표준 중의 하나인 게이지 블록을 측정한다. 100 mm의 길이를 갖는 게이지 블록을 측정했을 경우 합성 불확도는 20 nm ( $k=1$ )이하로 예측된다.

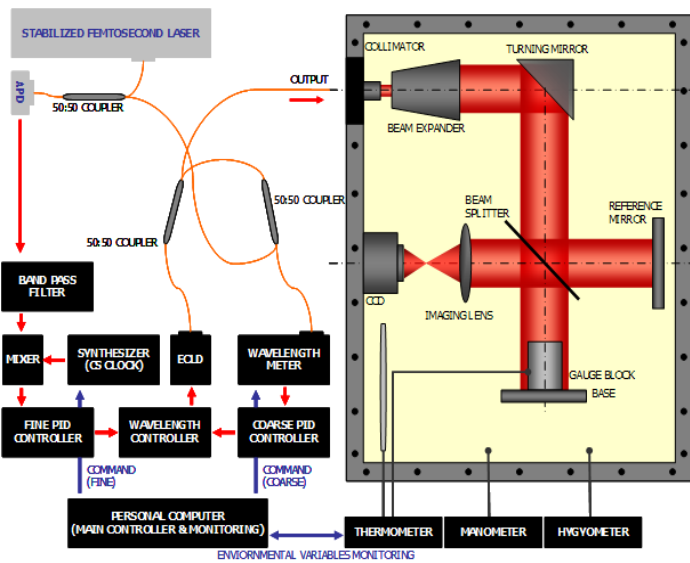


Fig. 1 Schematic of the length measurement of the gauge block

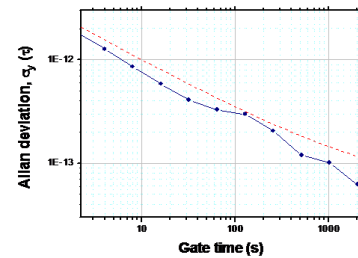


Fig. 2 Allan deviation of the fs-laser

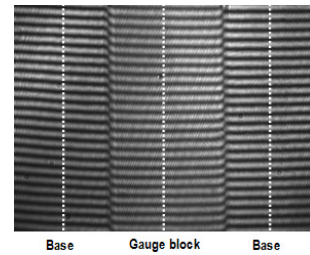
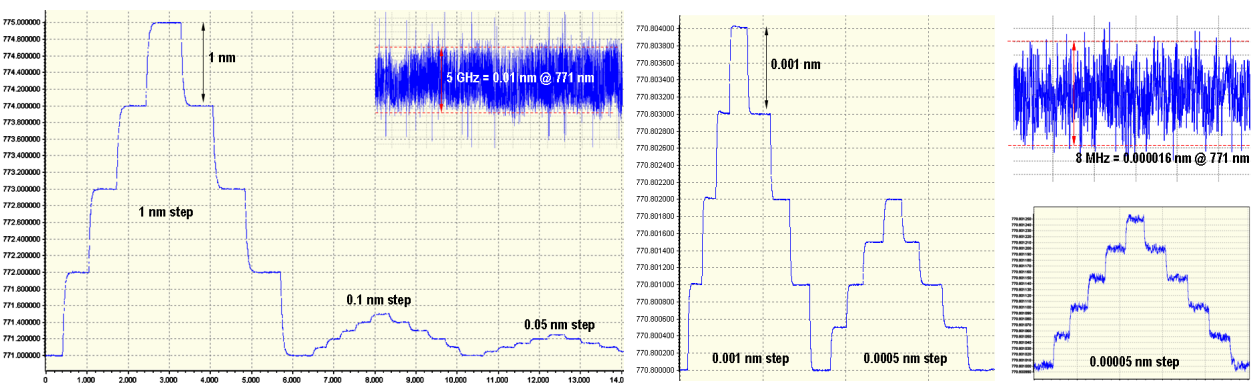


Fig. 3 Interferogram of the gauge block



(a) Coarse control by DC motor

(b) Fine control by PZT

Fig. 4 Wavelength control of the external cavity diode laser