

펨토초 레이저의 주파수 모드를 이용한

게이지 블록의 정밀 길이 측정

Precision Length Metrology of Gauge Blocks using the Optical Comb of a Femtosecond Pulse Laser

진종한, 김영진, 김윤석, 강주식*, 김승우

KAIST BUPE연구단, *한국표준과학연구원 기반표준부

jinjong@kaist.ac.kr

세계 여러 표준 기관들에서는 산업계에서 널리 사용되는 길이 표준 시편인 게이지 블록을 미터의 정밀도에 소급하여 광 간섭계를 사용하여 절대 교정을 수행해왔다. 초기에는 주파수 대역폭이 넓은 램프를 사용하여 회절 격자나 광학 필터를 사용하여 여러 파장을 선택해서 절대 길이 측정에 응용하는 다파장 간섭계의 원리가 널리 이용되었다. 그 뿐만 아니라 전통적인 호모다인 레이저 간섭계는 위상의 모호성 문제로 절대 거리 측정이 불가능하기 때문에 짧은 가간섭 거리를 특징으로 갖는 백색광 간섭계를 함께 사용하여 게이지 블록의 윗면과 아랫면에서 트리거(trigger) 신호를 생성하여 각 위치에서 호모다인 레이저의 간섭 신호를 검출하여 게이지 블록의 절대 길이 교정을 수행하였다. 그 외에도 헤테로다인 레이저 간섭계의 원리를 적용한 게이지 블록의 절대 길이 교정 방법이 제안되었고, 파장 쓸기(wavelength sweeping) 원리를 기본으로 하는 교정 방법이 제안되기도 하였다. 최근에 널리 사용되고 있는 방법은 과거에 광원으로 사용하던 램프를 안정도가 훨씬 좋은 여러 대의 안정화된 레이저로 대체하여 다파장 간섭계의 원리를 이용하여 게이지 블록의 절대 길이 교정을 수행하는 방법이다.

본 논문에서는 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔을 기본으로 하는 광 주파수 합성기의 개념을 사용하여 새로운 게이지 블록의 절대 길이 교정에 대한 방법을 제안하고자 한다^(1,3). 주파수 표준 중의 하나인 루비듐(Rb) 원자 시계에 펨토초 레이저의 주파수 모드간 간격(repetition frequency)과 오프셋 주파수(offset frequency)를 잠금하여 이를 수백 nm에 해당하는 광 대역의 파장 영역에서 표준 자(ruler)로서 사용한다. 길이 측정용 광원으로 사용된 파장 가변 외부 공진기 레이저 다이오드(external cavity laser diode)의 주파수는 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔으로 절대 파장을 측정할 뿐만 아니라 잠금하여, 안정화된 파장을 얼마든지 원하는 만큼 얻어낼 수 있다. 이를 통해 게이지 블록의 절대 길이 교정을 수행하면, 여러 대의 레이저 간섭계를 하나의 광 주파수 합성기로 대체할 수 있을 뿐만 아니라 주파수 표준 중에 하나인 루비듐 원자 시계에 소급하는 교정 불확도를 얻을 수 있다.

Fig.1 은 게이지 블록의 절대 길이 교정을 수행하기 위한 전체 구성도이다. 이는 크게 펨토초 레이저의 안정화 부분, 외부 공진기 레이저 다이오드와 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔을 통해 구현되는 광 주파수 합성기 부분, 게이지 블록 측정을 위한 간섭계 부분으로 나누어져 있다. 펨토초 레이저의 안정화는 광 빔을 정의하는 두 개의 독립 변수인 주파수 모드간 간격과 오프셋 주파수를 루비듐 원자 시계에 소급하여 얻어지는 기준 주파수와 함께 위상 잠금 회로(phase locked loop, PLL)에 넣음으로써 원하는 기준 주파수로 제어할 수 있다. 이 때 오프셋 주파수는 자기 상관 간섭인 $f-2f$ 간섭계를 이용하여 측정할 수 있고, 이를 위해 광결정 광섬유(photonic crystal fiber)를 통해 대역폭을 넓히게 된다⁽²⁾. 외부 공진기 레이저 다이오드는 파장 측정기를 통해 분해능이 8 MHz(0.016 fm)으로 대략적인 파장 제어가 이루어지고, 안정화된 펨토초 레이저의 광 빔을 통해 미세한 파장 제어와 측정 및 잠금이 이루어진

다. 이를 통해 원하는 파장을 안정하게 얻을 수 있는 광 주파수 합성기를 구현할 수 있다. 이렇게 파장 제어가 이루어진 빛은 게이지 블록 측정을 위한 광 간섭계 부분으로 입사하게 된다. 이는 일반적으로 Fig.1에서와 같이 트와이만 그린(Twyman-Green) 형태의 간섭계로 이루어져 있다. 얻어진 간섭 무늬로부터 푸리에 변환 (Fourier transform)방법을 통해 소수부(excess fraction part)를 계산할 수 있으며, 동시에 측정된 온도, 습도, 압력, CO₂ 농도 등의 환경 변수들로부터 공기 굴절률(refractive index of air)을 계산하여 공기 중에서의 파장을 얻어낸다. 이를 바탕으로 합치법(exact fraction method)을 적용하여⁽⁵⁾ 호칭 치수가 25 mm인 K급 게이지 블록을 측정할 결과 측정값이 24.999890 mm이고, 합성 표준 불확도는 17 nm(k=1)로 얻었다⁽⁴⁾. 이는 광 주파수 합성기를 통해 1.9×10^{-10} 의 안정도를 갖는 네 개의 파장(777 nm, 778 nm, 780 nm, 781 nm)을 사용하여 20번 반복 측정을 통해 얻은 측정값이며, 게이지 블록의 온도 및 공기 굴절률 등이 보정된 값이다.

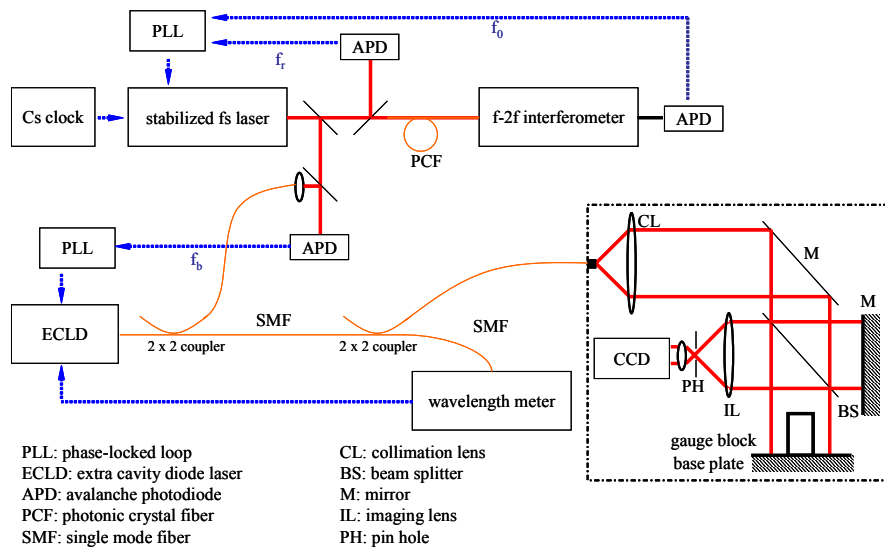


Fig. 1 Overall hardware configuration for absolute length calibration of gauge blocks using the optical comb of a femtosecond pulse laser

Table 1. Uncertainty evaluation

Sources of uncertainty errors contributions component	Value	Value (nm) for L ₀ =25 mm
Uncertainty of the gauge block interferometer	$[(7.8 \text{ nm})^2 + (1.9 \times 10^{-10} \cdot L_0)^2]^{1/2}$ nm	7.8
Uncertainty of excess fraction	0.02	
Uncertainty of wavelengths in use	1.9×10^{-10}	
Uncertainty of repetition rate	1.3×10^{-12}	
Uncertainty of carrier offset frequency	8.1×10^{-13}	
Uncertainty of the beat frequency	1.9×10^{-10}	
Uncertainty related to the refractive index of air	$1.4 \times 10^{-8} \cdot L_0$ nm	0.4
Uncertainty of air temperature	5.2 mK	
Uncertainty of air pressure	3.0 Pa	
Uncertainty of relative humidity	0.1 %RH	
Uncertainty of CO ₂ composition in air	10.0 ppm	
Uncertainty of updated Edlen's formula	10^{-8}	
Uncertainty related to thermal expansion of gauge block	$1.3 \times 10^{-7} \cdot L_0$ nm	3.3
Uncertainty of the thermal expansion coefficient	$5.8 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$	
Uncertainty of the surface temperature of gauge block	15 mK	
Uncertainty of the wave-front error of the optical components of the gauge block interferometer	12 nm	12
Uncertainty of wringing of gauge block	6.9 nm	6.9
Uncertainty of surface roughness of gauge block	5.0 nm	5.0
Uncertainty of flatness and parallelism of gauge block	0.6 nm	0.6
Combined standard uncertainty (k=1)	$[(17 \text{ nm})^2 + (1.3 \times 10^{-7} \cdot L_0)^2]^{1/2}$	17

참고문헌

- 진중환, 김영진, 김승우, "펨토초 레이저의 주파수 모드를 이용한 정밀 길이 측정", 한국정밀공학회 추계학술대회, 63-66, 2005
- 김영진, 진중환, 김승우, "거리 및 형상 측정을 위한 펨토초 레이저의 주파수 안정화", 한국정밀공학회 추계학술대회, 57-60, 2005
- 진중환, 김영진, 김윤석, 김승우, 강주식, "펨토초 레이저의 주파수 모드를 이용한 정밀 길이 측정", 한국광학회 동계학술대회, 2006
- "Guide to the expression of uncertainty in measurement", ISO, 1993
- 강주식, 김재완, 서호성, 이원규, "3 대의 주파수 안정화 레이저를 이용한 게이지 블록 길이의 절대 측정," 한국광학회 하계학술대회, 2006