

# 광섬유 링 레이저 팽창계와 측정 불확도 평가

## Fiber ring laser dilatometer and evaluation of measurement uncertainty

유한영, 이성현\*, 서호성

한국표준과학연구원, 기반표준부, 길이/시간 그룹, \*경희대학교 전자공학과  
hyryu@kriss.re.kr, hssuh@kriss.re.kr

매질의 선형 열팽창계수 (coefficient of thermal expansion: CTE)를 측정하기 위해서는 매질에 열적 사이클이 진행 될 때 두 가지 물리량 즉, 온도와 변위를 측정해야 한다. CTE를 측정하기위해서 일반적으로 dilatometry, interferometry, thermo-mechanical 분석과 같은 3 가지 주요 기술이 주로 사용되고 있다. 극히 낮은 열팽창 매질의 CTE를 매우 낮은 불확도로 측정을 하는 것은 쉬운 일이 아니다<sup>(1)</sup>. 광학소자로서 일반 간섭계로는 측정이 어려운 열팽창계수가 거의 0에 가까운 초저팽창물질인 ULE(ultra low expansion material)의 열팽창 계수를 그림 1과 같은 광섬유 링 레이저를 이용하여 측정할 수 있는 응용방법을 제시한다. 이 ULE의 열팽창계수의 측정<sup>(2)</sup>을 위해 광섬유 링 레이저 구성소자로 사용된 에어 갭 에탈론 필터의 투과파크에 레이저 파장을 안정화하고, 에탈론 필터의 spacer (ULE)의 온도변화에 따른 주파수 변화를 모니터링하여 CTE 측정조건의 실험방법을 만족하고 ULE의 열팽창 계수를 측정 하였다. 일반적으로 레이저를 단일모드로 동작시키기 위해 Fabry-Perot 에탈론 필터가 레이저 공진기 내에 설치되어 사용된다. 만약 이 에탈론 필터에 온도변화가 생기면 에탈론 필터의 spacer의 열팽창 때문에 레이저의 광주파수 또한 바뀔 것이다. 이 ULE 매질의 CTE는 에탈론 필터 spacer의 온도의 함수로써 광주파수 변화량을 측정함으로써 얻을 수 있다. 최근 저자는 ITU-T grid 25 GHz 채널 간격으로 동작하는 광섬유 링 레이저<sup>(3)</sup>를 제작한 바 있다. 에탈론 필터의 특성에 따라 등간격 채널간격으로 동작하는 레이저에서 에탈론 필터 spacer의 온도가 변할 때 식(1)과 같이 광주파수 변화량을 측정하면 그때 ULE 매질의 spacer의 CTE를 계산할 수 있다.

$$\frac{\Delta\nu_0}{\nu_0} = -\Delta T \cdot \left( \frac{1}{n} \frac{\Delta n}{\Delta T} + \alpha \right) \tag{1}$$

여기서  $\nu_0$ 와  $\Delta\nu_0$ 는 중심주파수와 그 주파수 변위이며,  $\Delta n/\Delta T$ 는 굴절률의 온도 의존성,  $\alpha$ 는 매질의 열적 팽창 효율을 나타낸다. 온도변화에 따른 레이저 주파수 변위는 6개 채널의 ITU-T grid 주파수에서 측정하고 측정된 각각의 주파수들로부터 그림 2와 같이 CTE를 계산하고 합성표준 불확도를 평가할 수 있었다. 합성표준 불확도는 식(1)로 부터 불확도 전파방정식<sup>(4)</sup>을 이용하여 구할 수 있으며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{1}{L\Delta T}\right)^2 u^2(\Delta L) + \left(\frac{\alpha}{\Delta T}\right)^2 u^2(\Delta T) + \left(\frac{\alpha}{L}\right)^2 u^2(L)} \tag{2}$$

여기서  $u(\Delta L), u(\Delta T), u(L)$ 는 길이변화, 온도변화, 샘플길이와 관계된 불확도 항목이다.

ULE의 열팽창계수는 그림2와 같이 12.5 °C에서 최대 불확도 ± 36 ppb/°C 값을 가지며 최종 계산된 합성표준 불확도는  $3.66 \times 10^{-8}$  이며, ULE 매질의 열팽창 계수측정과 관련된 불확도를 정리하면 표 1과 같다. 측정결과 및 표준 불확도 평가로부터 이 측정 장치는 ULE의 CTE 측정뿐만 아니라 다른 매질의 CTE 측정 위한 새로운 측정방법 중의 하나가 될 수 있을 것이다

표 1. ULE 매질의 열팽창계수 측정표준 불확도

불확도 인자	불확도 값	최대 기여도	측정 유형
길이 변화	1.60 nm	$3.55 \times 10^{-8}$	A
온도 변화	0.12 °C	$8.65 \times 10^{-9}$	B
샘플 길이	1.40 nm	$1.36 \times 10^{-13}$	A
합성 표준 불확도	$3.66 \times 10^{-8}$		

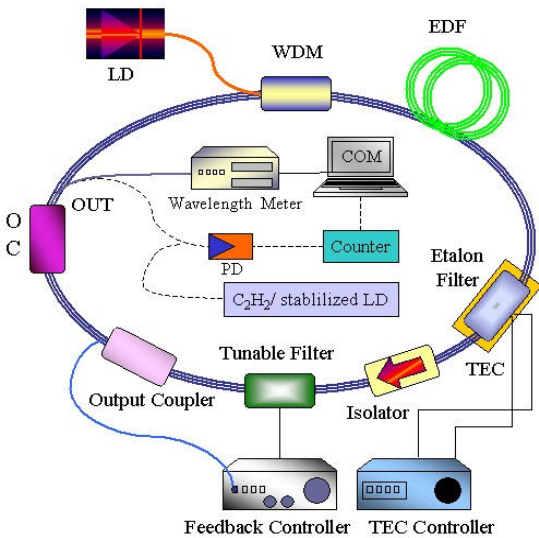


그림 1. 광섬유 링 레이저 팽창계

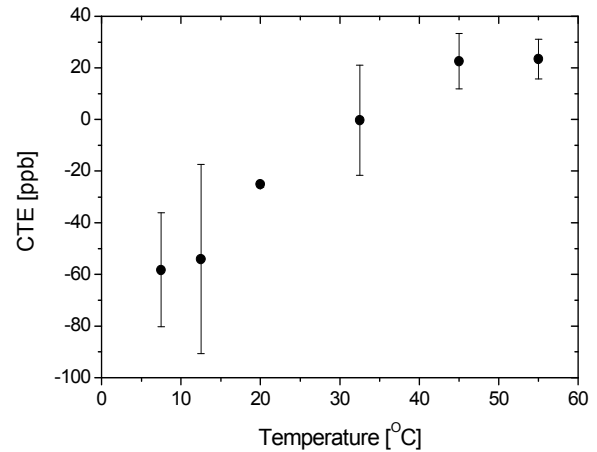


그림 2. 측정된 열팽창 계수와 표준 불확도

참고문헌

1. S. F. Jacobs, J. N. Bradford and J. W. Berthold III, "Ultraprecise measurement of thermal coefficients of expansion", Appl. Opt, Vol. 9, pp.2477-2480, 1970.
2. B. L. Harper, K. E. Hrdina and W. D. Navan, "Measuring thermal expansion variations in ULE glass with interferometry", proceedings of SPIE Vol. 5374, pp. 847 853, 2004.
3. H. Y. Ryu, W. K Lee, H. S Moon, S. K. Kim, H. S. Suh, D.H. Lee, "Stable single-frequency fiber ring laser for 25 GHz ITU-T grids utilizing staurable absorber filter", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.17, pp.1824 -1826, 2005.
4. KRIS-99-070-SP, 한국표준과학연구원, "측정불확도 표현 지침"