

# 초공진기를 이용한 노란색 레이저의 선폭 축소 및 초공진기의 예리도 측정

이원규<sup>1†</sup> · 박창용<sup>1</sup> · 박상언<sup>2</sup> · 유한영<sup>2</sup> · 유대혁<sup>1</sup> · 문종철<sup>1</sup> · 서호성<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 차세대표준연구원

<sup>2</sup>한국표준과학연구원 길이시간센터

☎ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2010년 4월 29일 받음, 2010년 5월 25일 수정본 받음, 2010년 5월 26일 게재 확정)

이터븀 광격자 시계의 검색 레이저로 쓰기 위하여, WG-PPLN를 사용하여 1319 nm 파장의 Nd:YAG 레이저와 1030 nm 파장의 Yb 도핑된 광섬유 레이저의 합주파수 (578.4 nm)를 발생시켰다. 이터븀 광격자에서 시계 전이선을 분광하기 위해서는 1 Hz 수준의 선폭을 가지는 검색 레이저가 필요하기 때문에, 합주파수로 발생된 노란색 레이저의 주파수를 초공진기에 안정화하여 선폭을 축소하였다. 초공진기는 선풍창 계수가 낮은 ULE로 제작되었고, 진동으로 인한 영향이 작은 받침점에서 능동형 제진대 위에 설치되었다. 공기 굴절률의 영향을 제거하기 위하여 이 초공진기를 진공 챔버 내부에 설치하고, 온도를 1 mK 수준에서 안정화하였다. 또한, 이 장치들을 방음 챔버 안에 설치하여, 소리로 인한 잡음을 막아 주었다. 실험에 사용된 초공진기의 광자 수명시간으로부터, 그 예리도가 380 000으로 측정되었다.

## Linewidth Reduction of a Yellow Laser by a Super-cavity and the Measurement of the Cavity Finesse

Won-Kyu Lee<sup>1†</sup>, Chang Yong Park<sup>1</sup>, Sang Eon Park<sup>2</sup>, Han Young Ryu<sup>2</sup>,

Dai-Hyuk Yu<sup>1</sup>, Jongchul Mun<sup>1</sup>, and Ho Suhng Suh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Emerging Measurement Standards, Korea Research Institute of Standards and Science

<sup>2</sup>Center for Length and Time, Korea Research Institute of Standards and Science

1 Doryong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received April 29, 2010; Revised manuscript May 25, 2010; Accepted May 26, 2010)

Sum frequency generation was utilized to obtain a yellow laser with the wavelength of 578.4 nm for a probe laser of an Yb lattice clock. The output of an Nd:YAG laser with wavelength of 1319 nm and that of an Yb-fiber laser with wavelength of 1030 nm were passed through a waveguided periodically-poled lithium niobate (WG-PPLN) for sum frequency generation. It is required that the probe laser has a linewidth of the order of 1 Hz to fully resolve the Yb lattice clock transition. Thus, the linewidth of the probe laser was reduced by stabilizing the frequency to a super-cavity. This was made of ULE with a low thermal expansion coefficient, and was mounted on an active vibration-isolation table at the optimal point for the reduced sensitivity to vibration. Also, this was installed in a vacuum chamber, and the temperature was stabilized to 1 mK level. This system was installed in an acoustic enclosure to block acoustic noise. The finesse of the super-cavity was measured to be 380 000 from the photon life time of the cavity.

Keywords: Sum frequency generation, Yb lattice clock, Yellow laser, Linewidth reduction, Super-cavity

OCIS codes: (300.3700) Linewidth; (140.3425) Laser stabilization; (140.4780) Optical resonators; (300.6210) Spectroscopy, atomic

### I. 서 론

현재 초의 정의로 사용되는 세슘 원자의 초미세 구조 바닥 준위 사이의 마이크로웨이브 전이(9.2 GHz)로는 원자간의

충돌, 복사장, 중력장 등의 영향으로 지상에서 구현할 수 있는 불확도가 10<sup>-16</sup> 수준의 한계에 도달해 있다. 이 한계를 극복할 수 있는 방법으로써 시계 전이선의 주파수가 수 백 THz 영역에 있는 광시계가 주목 받고 있다. 이러한 광시계

<sup>†</sup>E-mail: oneqlee@kriss.re.kr

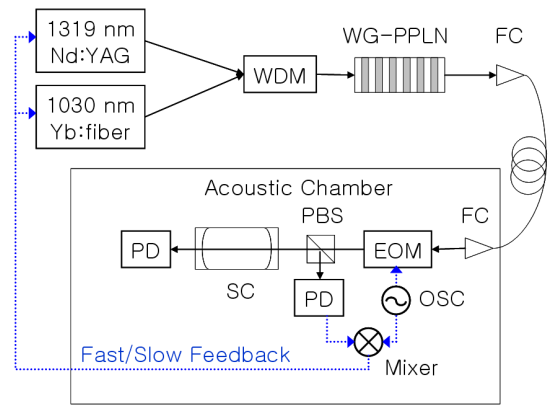
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

에서는 매우 좁은 선폭을 가지는 전이선을 이용하기 때문에, 지난 십여 년간 레이저의 선폭을 초공진기(super-cavity)를 이용하여 1 Hz 수준으로 좁히려는 연구가 활발하게 진행되어<sup>[1-8]</sup>, 현재, 초공진기를 구성하는 거울의 코팅 물질의 열적 인 요동의 한계까지 다다랐다는 보고가 이루어지고 있다<sup>2, 6, 8]</sup>. 이터븀 (Yb) 원자는 스트론튬 (Sr) 원자와 함께  $10^{-18}$  수준의 불확도를 가진 광격자 주파수 표준기의<sup>[9]</sup> 구현에 가장 근접해 있는 원소의 하나로 여겨지고 있다<sup>[10-15]</sup>. 이터븀 광격자 시계 전이선( $^1S_0 - ^3P_0$ )의 파장이 578.4 nm이고, 선폭은 약 10 mHz라고 이론적으로 예측되므로<sup>[10]</sup>, 이 전이선을 완전히 분광하기 위해서는 가능한 한 좁은 선폭의 노란색 검색 레이저가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 이터븀 광격자 시계의 전이선의 분광을 위해 578.4 nm 파장의 검색 (probe) 레이저를 얻기 위하여 발진 파장이 1319 nm인 Nd:YAG 레이저와 발진 파장이 1030 nm인 Yb 도핑된 광섬유 레이저 (Yb-doped fiber laser)의 합주파수 발생 (SFG, sum frequency generation)을 이용하였다. SFG로 발생된 노란색 레이저의 선폭은 20 kHz 정도이므로, 선폭을 더욱 축소하기 위하여 초공진기에 Pound-Drever-Hall (PDH) 방법<sup>[16]</sup> 써서 주파수를 안정화하였다. 그 결과로 초공진기의 예리도(finesse)를 측정할 수 있었다. 1 Hz 수준의 선폭을 구현하기 위해서는 선폭창 계수가 작은 물질로 이루어진 초공진기를 사용해야 할 뿐만 아니라, 공진기에 미치는 음향 잡음, 진동 잡음, 온도 변화 등을 모두 최소화해야 한다. 본 연구에서는 이러한 환경 요인들을 제어하기 위해 방음 체임버와 능동형 제진대, 온도 안정화 장치, 진공 체임버 등의 장치를 완성하고 그 성능을 측정하였다.

## II. 실험 장치

그림 1에 SFG 방법을 이용하여 검색 레이저를 발생하는 실험 장치를 나타내었다. 1319 nm의 레이저로서는 Innolight사의 Nd:YAG 레이저 (Mephisto)를 사용하였다. 이 레이저는 선폭이 1 kHz 이하이고, 출력은 500 mW까지 가능하다. 1030 nm의 레이저로는 Koheras사의 광섬유 레이저를 사용하였다. 제조사의 설명서에 의하면 이 레이저의 선폭은 150  $\mu$ s에서 20 kHz이며 출력은 120 mW까지 가능하다. 이 두 레이저를 1319/1030 nm 용 WDM 광섬유 결합기로 합친 후, WG-PPLN (waveguided periodically-poled lithium niobate)에 입사시켜 합주파수를 발생시킴으로써 578.4 nm 파장의 빛을 얻었다. 위상정합 조건을 만족시키기 위해 PPLN의 온도는 63.5°C로 유지시켰다. 1319 nm 레이저의 입사 세기 250 mW, 1030 nm 레이저의 입사 세기 78 mW의 조건에서 약 10 mW의 578.4 nm 합주파수 레이저를 얻을 수 있었다. PPLN 출력에는 두 펌프 레이저도 섞여 있기 때문에 이를 제거하기 위해 578.4 nm만을 투과시키는 간섭 필터를 사용하였다. 발생된 노란색 레이저를 최종적인 주파수 기준인 초공진기에 안정화하기 위해 그림에서와 같이 Pound-Drever-Hall 방법을 이용하여 각각의 레이저에 피드백을 걸어 주었다. 초



**FIG. 1.** Setup for the probe laser using sum frequency generation. (WDM; fiber coupler for 1319 nm and 1030 nm, WG-PPLN; wave-guided periodically-poled lithium niobate, FC; fiber collimator, EOM; electro-optic modulator, PBS; polarizing beam splitter, SC; super-cavity, PD; photodiode, OSC; oscillator)

공진기는 환경 요인으로 인한 잡음 들을 최소화하기 위해 온도 안정화를 할 수 있는 진공 체임버 안에 진동에 대한 민감도가 최소가 되는 방법으로 설치되었고, 이 진공 체임버는 능동형 제진대 위에 설치되고 다시 이 제진대는 방음 체임버 안에 설치되었다. 노란색 레이저를 방음 체임버로 보내기 위해 단일모드 편광유지 광섬유를 사용하였다.

SFG 방법으로 얻을 수 있는 검색 레이저의 최대 세기는 PPNL의 광굴절 (photorefractive) 효과에 의한 손상 한계로 인해 10 mW 정도이다. 실제로 이터븀 광격자 시계 전이선의 주파수를 측정할 때에는 이렇게 큰 세기가 필요하지 않지만, 처음으로 시계 전이선을 찾는 것을 쉽게 하기 위해서 높은 레이저 세기로 전이선을 넓히는 것이 좋다. 이러한 면에서 SFG 방법으로 생성된 노란색 광원이 실험적으로 장점을 가지고 있다. 또한, SFG 방법에 쓰이는 두 고체 레이저의 원래 선폭이 각각 1 kHz, 20 kHz 정도로 작은 편이기 때문에, 2차적인 선폭 축소 없이 한 단계만으로 선폭 축소가 가능하다.

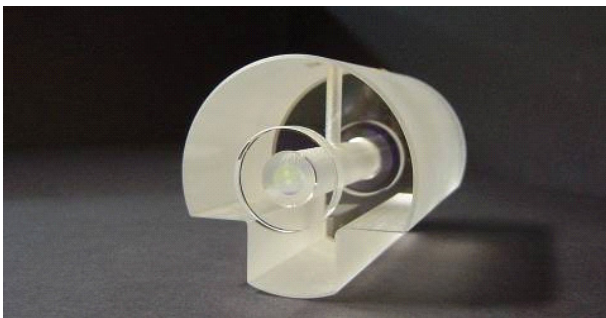
## III. 환경 요인으로 인한 잡음의 차단

현재 기술로 광주파수 영역에서 주파수 안정도를 가장 좋게 하는 방법은 주파수 안정화의 기준으로 초공진기를 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 온도 요동으로 인한 주파수 변화를 최소화하기 위해 초공진기의 거울과 간격 물질로서 선폭창계수가  $10^{-8}/K$ 인 ULE (Ultra Low Expansion Glass)를 사용하였다. 간격 물질 (spacer)의 길이가 10 cm이므로, 초공진기의 자유 스펙트럼 영역 (FSR; free spectral range)은 1.5 GHz이었다. 제조사의 설명서에서 추산한 예리도 (finesse)는 200 000이었다. 이를 다르게 표현하면, 이 초공진기의 선폭은 7.5 kHz이고 광자 수명시간은 21  $\mu$ s이며 Q 값은  $7 \times 10^{10}$ 이다. 초공진기의 한 쪽 거울은 평면 거울이고, 다른 쪽 거울은 곡률 반경 0.5 m의 오목 거울이며, 이로부터 계산된 초공

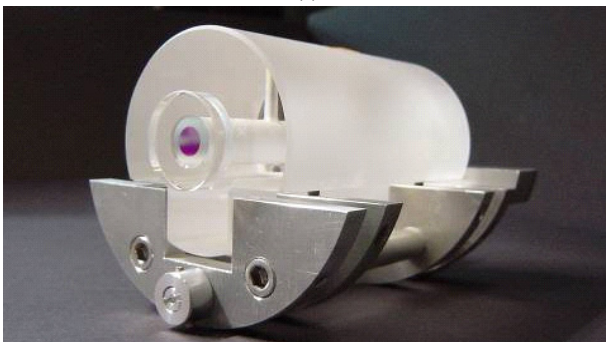
진기 공명 모드의 빔 크기 ( $1/e^2$  half width)는 평면 거울면에서 0.192 mm, 오목 거울면에서 0.215 mm이다. 그림 2(a)에 실험에 사용된 초공진기의 사진을 나타내었다.

외부의 진동 잡음이 초공진기에 미치는 영향을 막아주기 위해 제진대 (vibration isolation table)을 사용하지만, 진동의 영향을 더욱 줄여주기 위해서는 외부 진동에 둔감한 구조로 초공진기의 받침대를 설계해야 한다. 이러한 방법은 크게 수평 설치 방법<sup>[2-4]</sup>과 수직 설치 방법<sup>[5-7]</sup>으로 나뉜다. 수평 설치 방법은 수평으로 놓인 초공진기를 받치는 점을 적당히 조절하여 중심부가 변형되는 정도와 가장자리가 변형되는 정도를 맞추어 주는 방법이고, 수직 설치 방법은 수직으로 놓인 초공진기를 정확히 중간 지점에서 받쳐주어 윗부분과 아랫부분의 변형이 상쇄되게 하는 방법이다. 본 연구에서는 실험적으로 바꾸어 줄 수 있는 자유도가 많은 수평 설치 방법을 채택하였다. 그림 2(b)에 초공진기와 받침대의 설치 사진을 나타내었다.

초공진기는 수평 방향으로 설치되기 위해 양쪽 아래 부분을 직각으로 깎아낸 구조를 가지고 있다 (cut-out cavity). 초공진기를 네 지점에서 받쳐주는데, 받침대와 접촉점은 수직 방향과 수평 방향의 잔여 진동을 줄여주기 위해 불소고무 (fluoro elastomers) 재질의 고무볼을 사용하였다. 이 검은색 고무볼의 직경은 3.18 mm이며 Goodfellow사에서 생산되는 FKM sphere라는 제품을 사용하였다. 이 고무볼의 재질은  $10^{-8}$  Torr의 진공 조건에서도 사용할 수 있다. 실험적으로 가장 진동에 둔감한 위치를 찾으려면 여러 위치로 받침점을 바꿔볼 필요가 있는데, 이 과정을 보다 편리하게 하기 위하여,



(a)



(b)

FIG. 2. (a) ULE super-cavity for the probe laser, (b) the super-cavity mounted at the vibration-insensitive point.

받침점 사이를 결정하는 축을 한 쪽은 오른나사로 다른 쪽은 왼나사로 처리하여 간단히 대칭적으로 움직이도록 설계하였다. 진공 중에서 사용해야 하므로 나사의 부드러운 움직임을 위한 윤활제로는 DuPont사의 고진공용 그리스 (제품명 Krytox LVP)를 사용하였다. 이 제품은 20°C에서 증기압이  $1 \times 10^{-13}$  Torr 정도이므로 고진공 조건에서 기계적인 윤활 용도로 적당하다.

공기 굴절률 변화로 인한 주파수의 변화를 막기 위해 그림 3과 같이 초공진기를 진공 챔버 안에 넣었다. 진공 챔버의 지름은 10 인치 플랜지를 사용하였고, 총 길이는 350.6 mm로 설계하였다. 펌핑 용량이 20 l/s인 이온펌프를 사용하여 진공을 뽑아 주어 약  $4 \times 10^{-7}$  Torr의 진공도를 유지할 수 있었다. 사용한 초공진기의 선폭창율이 최소가 되는 온도가 11°C 근처이므로, 두 단의 TEC (thermo-electric cooler)를 사용하여 온도를 낮추어 주었다. TEC는 진공 조건에서 쓸 수 있도록 Melcor사의 모델명 CP1.4-127-06L를 사용하였고, 가스 누출로 인한 진공도 저하가 우려되는 플라스틱 재질의 TEC의 기존 전원 연결선을 떼어내고 캡톤선 (Kapton wire)을 납땀하여 전원선으로 사용하였다. 이 TEC는 가로, 세로 각각 4 cm이고 두께는 3.8 mm, 최대 전류는 6.0 A이다. 두 TEC는 스테인레스 스틸 재질의 챔버와 두 층의 알루미늄 실린더 층 사이에 각각 설치되었고, 보다 균일한 온도 분포를 위하여 가장 내부에 한 층의 알루미늄 층을 추가하였다. 각 알루미늄 층의 두께는 5 mm이다. 열적 접촉성을 좋게 하기 위해 TEC와의 각 접촉면에는 인듐 포일을 넣었다. AD590 센서를 이용하여 온도를 측정하고, PID 조절을 통하여 1 mK 이하의 안정도로 온도를 안정화할 수 있었다. 진공 챔버의 레이저 빔 통로로는 578 nm에서 양면이 무반사 코팅된 윈도우를 wire-seal로 설치하였다. 이 때, wire로는 지름 1 mm의 인듐선을 사용하였다.

일반적으로 초공진기는 수십~수천 Hz의 음향 잡음에 민감하게 반응하여 잡음이 발생하므로 1 Hz 급의 좁은 선폭의 레이저를 만들기 위해서는 반드시 음향 잡음을 막아 주어야 한다. 이를 위하여 초공진기가 설치된 진공 챔버를 그림 3

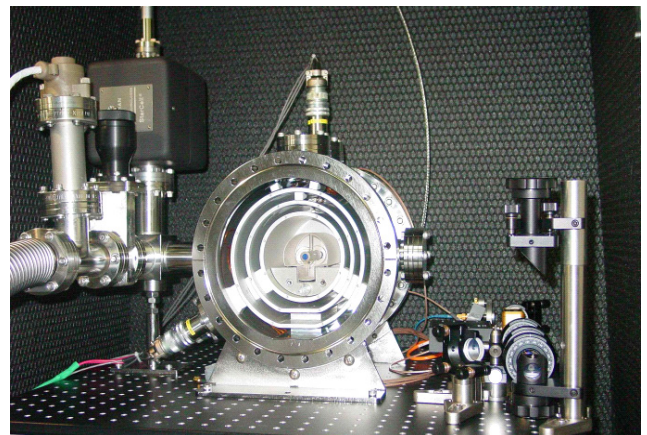


FIG. 3. Super-cavity mounted in a vacuum chamber.



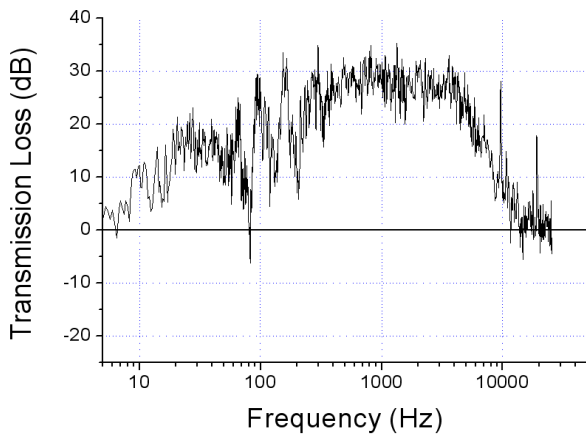


FIG. 4. Soundproof capability of the acoustic enclosure.

에서와 같이 방음 체임버 (Halcyonics, Acoustic Enclosure 780) 안에 설치하였다. 방음 체임버의 방음 성능을 측정하기 위해서 방음 체임버 내부에 마이크로폰을 둔 뒤에 체임버 문을 열었을 때와 닫았을 때 마이크로폰으로 검출된 소리세기의 차이를 측정하였다. 마이크로폰으로는 G.R.A.S. Sound & Vibration 사의 Type 46AE를 사용하였는데 민감도는 45.77 mV/Pa이고, 측정 영역은 14 ~ 135 dBA이다. 마이크로폰의 출력을 저잡음 전류증폭기를 통과시킨 뒤, FFT 스펙트럼 분석기로 소리세기의 스펙트럼을 측정하였다.

성능 측정 결과는 그림 4에 나타내었다. 그림에서 세로축에 나타난 통과 손실(Transmission Loss)은 체임버 문을 열었을 때와 닫았을 때 마이크로폰으로 측정된 소리 스펙트럼 세기의 비이다. 그림에서 볼 수 있듯이 대부분의 음향 주파수 영역에서 20 ~ 30 dB 정도의 방음 성능을 가짐을 확인하였다. 몇몇의 특정 주파수에서는 방음 성능이 좋지 않은 부분이 있는데, 이는 방음 체임버 자체의 구조에 의존하는 공명 주파수와 관계가 있다고 판단된다.

실험실 바닥을 통하여 초공진기로 전달되는 진동에 의한 잡음을 차단하기 위하여 방음 체임버 내부에 그림 3에서와 같이 능동형 제진대 (Halcyonics, Micro60)를 설치하였다. 이 능동형 제진대의 제진 성능을 측정하기 위해서 가속도계를 제진대 위에 설치하고 제진대를 켜고 끄는 때의 가속도 스펙트럼을 FFT 스펙트럼 분석기로 측정하였고, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 사용한 가속도계의 민감도는 1.02 V/(m/s<sup>2</sup>)이고, 측정범위는 4.9 m/s<sup>2</sup> p.k., 주파수 범위는 0.07 ~ 300 Hz이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 능동형 제진대를 작동시켰을 때 10 ~ 20 dB의 제진 효과가 확인되었다. 제진대의 능동 제어가 작동될 때 10 ~ 100 Hz의 주파수 영역에서 절대 가속도의 수준은 0.3 ~ 0.5  $\mu\text{g}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$  이었다. 이러한 제진 수준은 외국의 유사한 연구실의 예와 비교할 때 약간 크지만 같은 오더의 성능을 보인 것이다. 본 실험실이 2층에 위치하고 있다는 점을 고려한다면 만족할 만한 제진 시스템이 설치된 것으로 판단된다.

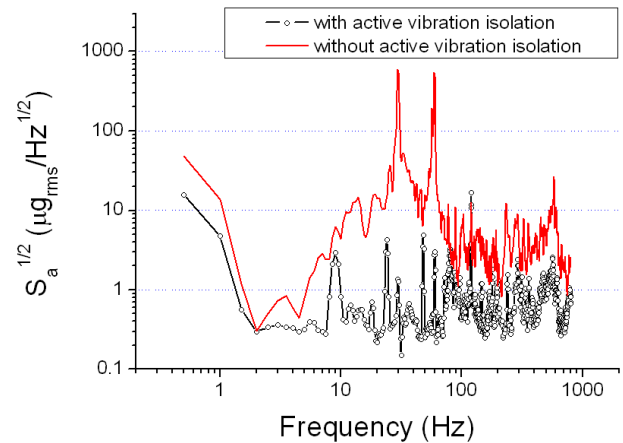


FIG. 5. Active vibration isolation capability.

#### IV. 실험결과

앞에서 살펴본 바와 같이, 검색 레이저의 주파수 기준인 초공진기의 환경 영향으로 인한 잡음을 최소화한 후, PDH 방법을 통해 SFG 방법으로 생성된 578.4 nm의 검색 레이저의 주파수를 그림 1과 같은 실험장치로 초공진기에 안정화하였다. 편광유지 단일모드 광섬유를 이용하여 초공진기가 설치된 방음 체임버로 검색 레이저를 보내었다. 또한 이 광섬유는 공간 주파수 필터링을 통해 레이저 빔을 깨끗한 가우시안으로 만드는 역할도 한다. PDH 방법에 사용된 전기광학 변조기 (EOM, electro-optic modulator)의 공진 주파수는 21 MHz이었다. 변조 주파수의 공급을 위해 두 채널의 함수 발생기 (function generator)를 사용하였는데 두 번째 채널의 위상 조절 기능을 사용하여, 복조된 (demodulation) PDH 오차 신호를 쉽게 얻을 수 있었다. 편광 빔분할기 (PBS, polarizing beam splitter)와  $\lambda/4$  파장판을 통과한 레이저 빔을 초공진기에 입사시켰다. 이 공진기에서 반사된 레이저 빔은  $\lambda/4$  파장판을 한번 더 통과하면서 편광 방향이 90° 바뀌므로 편광 빔분할기에서 반사된다. 공진기에서 투과된 빛과 반사된 빛의 세기를 각각의 광다이오드 (PD, photodiode)를 통해 측정하고, PDH 오차 신호의 빠른 피드백과 느린 피드백을 통해 SFG 검색 레이저의 주파수를 안정화하였다. 주파수 피드백은 수 MHz의 밴드폭을 가지는 상용 PID조절기 (Toptica, FALC 110)를 사용하였다. 빠른 피드백은 1319 nm Nd:YAG 레이저의 PZT (밴드폭 100 kHz)에 가해주었고, 느린 피드백은 1030 nm fiber 레이저의 PZT에 걸어 주어 수 시간 동안 주파수 잡음이 유지될 수 있었다.

초공진기에 주파수를 안정화한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 이 때 사용된 PDH 오차 신호를 나타낸다. 그림 6(b)에는 1030 nm 레이저에 부착된 PZT를 이용하여 합주파수를 스캔하면서 얻은 초공진기의 투과 스펙트럼을 나타내었다. 초공진기에 입사하는 레이저의 세기는 약 50  $\mu\text{W}$  이었으며, 렌즈 조합을 이용하여 초공진기의 공명 모드에 맞추어 주었다. EOM의 sideband주파수값을 사용하여 주파수

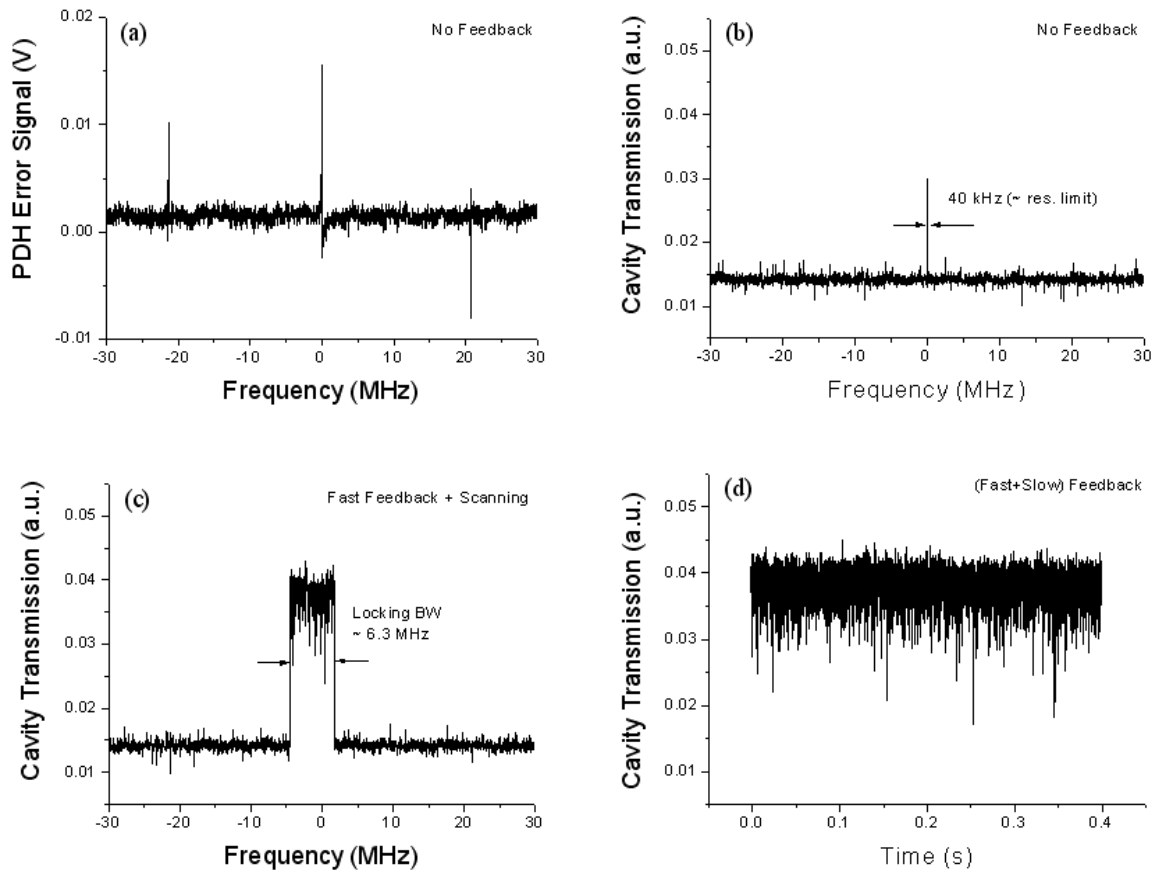


FIG. 6. (a) PDH error signal, (b) super-cavity transmission signal with no feedback, (c) cavity transmission with fast feedback and frequency scan, (d) cavity transmission with fast and slow feedback.

축 (그림의 가로축)을 보정함으로써 측정한 초공진기 투과 스펙트럼의 폭은 약 40 kHz이었는데, 이는 실제 초공진기의 선폭, 또는 SFG 레이저의 선폭이 아니고 스캔 속도와 오실로스코프 샘플링율로 인한 한계이다. 이 상태에서 빠른 되먹임 (약 100 kHz bandwidth)을 1319 nm 레이저에 부착된 PZT에 걸어 주었을 때, 그림 6(c)와 같이 약 6.3 MHz의 범위에서 주파수 잠금이 일어났다. 이 때 스캔 폭을 점차 줄여 주는 동시에, 레이저 주파수의 흐름 (drift)을 보상하기 위해 느린 되먹임을 1030 nm 레이저의 PZT에 걸어주어 그림 6(d)와 같이 초공진기의 투과 피크에 합주파수를 안정화할 수 있었다. 초공진기 내부로 결합되는 입사 레이저의 비율을 초공진기의 반사 신호로부터 계산한 결과 약 15% 이었다.

그림 7에 합주파수로 발생된 578.4 nm의 레이저 빔의 주파수를 초공진기에 안정화한 상태에서 음향-광 변조기 (AOM, acousto-optic modulator)를 사용하여 초공진기에 입사하는 빛을 스위칭한 후 ring-down 신호를 관측한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 이 초공진기의 광자 수명시간은 40  $\mu$ s 이었고, 이로부터 계산된 예리도는 380 000이고, 초공진기의 선폭은 약 4 kHz이었다.

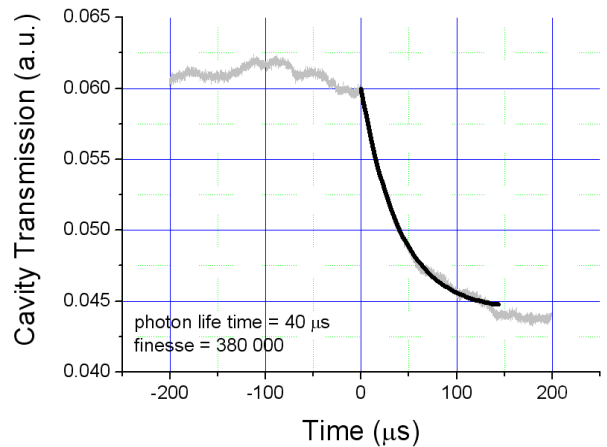


FIG. 7. Finesse measurement using cavity ring-down.

## V. 결 론

이더븀 광격자 시계전이선의 검색 레이저를 개발하기 위해 합주파수 발생 (SFG) 방법을 사용하여 출력 10 mW의 578.4 nm 레이저를 얻었다. 검색 레이저의 선폭을 축소하기 위하

여 초공진기에 주파수를 안정화하였다. 주파수 안정도를 높이기 위하여 선펡창 계수가 작은 ULE 공진기를 사용하였고, 공진기에 미치는 음향 잡음, 진동 잡음, 온도 변화로 인한 잡음을 최소화할 수 있는 시스템을 완성하였다. 현재 진행 중인 독립적인 추가의 검색레이저의 제작이 완료되면, 두 레이저 사이의 맥놀이 신호로부터, 선펡 축소된 검색 레이저의 정확한 선펡과 주파수 안정도, 장기간에 걸친 주파수 흐름 등을 측정할 수 있을 것으로 기대된다. 초공진기의 ring-down 신호로부터 측정된 초공진기의 예리도는 380 000 이었다.

## References

1. B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano, and J. C. Bergquist, "Visible lasers with subhertz linewidths," *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3799-3802 (1999).
2. S. A. Webster, M. Oxborrow, S. Pugla, J. Millo, and P. Gill, "Thermal-noise-limited optical cavity," *Phys. Rev. A* **77**, 033847 (2008).
3. S. A. Webster, M. Oxborrow, and P. Gill, "Vibration insensitive optical cavity," *Phys. Rev. A* **75**, 011801(R) (2007).
4. T. Nazarova, F. Riehle, and U. Sterr, "Vibration-insensitive reference cavity for an ultra-narrow-linewidth laser," *Appl. Phys. B* **83**, 531-536 (2006).
5. J. Alnis, A. Matveev, N. Kolachevsky, Th. Udem, and T. W. Hänsch, "Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities," *Phys. Rev. A* **77**, 053809 (2008).
6. A. D. Ludlow, X. Huang, M. Notcutt, T. Zanon-Willette, S. M. Foreman, M. M. Boyd, S. Blatt, and J. Ye, "Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at  $1 \times 10^{-15}$ ," *Opt. Lett.* **32**, 641-643 (2007).
7. M. Notcutt, L.-S. Ma, J. Ye, and J. L. Hall, "Simple and compact 1 Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity," *Opt. Lett.* **30**, 1815-1817 (2005).
8. K. Numata, A. Kemery, and J. Camp, "Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 250602 (2004).
9. H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, "Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap," *Phys. Rev. Lett.* **91**, 173005 (2003).
10. S. G. Porsev, A. Derevianko, and E. N. Fortson, "Possibility of an optical clock using the  $6\ 1S_0 \rightarrow 6\ ^3P_0$  transition in  $^{171,173}\text{Yb}$  atoms held in an optical lattice," *Phys. Rev. A* **69**, 021403(R) (2004).
11. T. Kohno, M. Yasuda, K. Hosaka, H. Inaba, Y. Nakajima, and F.-L. Hong, "One-dimensional optical lattice clock with a fermionic  $^{171}\text{Yb}$  isotope," *Appl. Phys. Express* **2**, 072501 (2009).
12. Z. W. Barber, J. E. Stalnaker, N. D. Lemke, N. Poli, C. W. Oates, T. M. Fortier, S. A. Diddams, L. Hollberg, and C. W. Hoyt, "Optical lattice induced light shifts in an Yb atomic clock," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 103002 (2008).
13. N. Poli, Z. W. Barber, N. D. Lemke, C. W. Oates, L. S. Ma, J. E. Stalnaker, T. M. Fortier, and S. A. Diddams, "Frequency evaluation of the doubly forbidden  $^1S_0\text{-}^3P_0$  transition in bosonic  $^{174}\text{Yb}$ ," *Phys. Rev. A* **77**, 050501(R) (2008).
14. L. Hollberg, J. C. Bergquist, A. Brusch, S. Jefferts, T. Heavner, and T. Parker, Z. W. Barber, C. W. Hoyt, C. W. Oates, and L. Hollberg, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin, "Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral  $^{174}\text{Yb}$  atoms confined to an optical lattice," *Phys. Rev. Lett.* **96**, 083002 (2006).
15. C. W. Hoyt, Z. W. Barber, C. W. Oates, T. M. Fortier, S. A. Diddams, and L. Hollberg, "Observation and absolute frequency measurements of the  $^1S_0\text{-}^3P_0$  optical clock transition in neutral ytterbium," *Phys. Rev. Lett.* **95**, 083003 (2005).
16. R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B* **31**, 97-105 (1983).