

정밀측정을 위한 안정된 광원에 관한 연구

김지대*, 서호성**, 이동주***

A Study on the Stabilization Scheme of Optical Source for Precision Measurement

Ji-Dea Kim*, Ho-Suhng Suh**, Dong-Ju Lee***

Abstract

This study is for the stable optical source in order to get the precision measurement, which contributes to help the laser frequency and the output to be settled. The laser optical frequency is changed by the length of resonance cavity. The length variation of the laser resonance amplitude is affected by the thermal expansion of that system. So, we try not only to adjust the temperature of the laser tube using the heater for fine length of resonance cavity, but also to maintain the fixed temperature of the resonance cavity for outputting the safe laser optical frequency.

Therefore, we must take materials with the thermal expansion of the supporting system, which is closer to it of the laser resonance cavity. Using the materials, we can promote to stabilize the temperature of it. In advance, we also plan to get the settlement of the laser frequency and the output in the long term, optimizing and stabilizing the system.

Key Words : Stabilization(안정화), Optical Source(광원), Precision Measurement(정밀측정), Resonant cavity(공진기)

1. 서론

근대의 산업기술이 고도로 발전함에 따라 기계 및 전자 제어등 기술에 초정밀도 기술이 요구되고 이에 대한 측정 기술의 중요성이 대두되었다. 산업 현장에서도 측정정도 요구가 수십 μ m~ 수 μ m, nm정도의 정밀정확도로 바뀌어 에 따라 기존의 기계식, 전기 전자식 측정기를 광응용 정기로 바꾸고 있는 실정이다.

기존의 기계식인 마이크로미터, 버니어캘리퍼스, 다이얼게이지, LVDT등에서부터 광학식의 리니어엔코더, 레이저 간섭을 이용한 길이측정기 등으로 바뀌어 가고 있다. 이렇게 광을 기초로 한 측정에서는 무엇보다도 아주 안정된 광원이 필요하게 되는데 이런 안정된 광원을 얻기 위해서는 광의 주파수와 출력을 안정화시켜야 보다 안정된 원으로 사용할 수 있을 것이다. 그 중에서 레이저는 일광원 보다 단색성, 가간섭성, 지향성, 휘도등이 상당히

* 충남대학교 대학원 기계공학과
(kjd999@m-tech.co.kr)

** 한국표준연구원

*** 충남대학교 기계공학과

우수하여 여러 분야에 광범위하게 이를 이용하고 있는 실정이다. 특히 레이저는 길이측정, 유속측정, 온도측정, 진동측정, 질량 및 진직도 측정, 표면 조도측정, 가속도 및 각 가속도 측정 등 여러 물리량들을 정확하게 측정 할 수 있는 기술을 가져 왔다. 그러므로 초정밀 길이측정 등에 안정된 광원으로 사용할 주파수 안정화 레이저의 개발이 필요하게 되었다. 이러한 레이저의 개발은 1960년 미국의 벨(Bell) 연구소의 자반(A. Javan) 등에 의해 근적외선 He-Ne 레이저 $\lambda=1.153 \mu\text{m}(2.6 \times 10^{14}\text{Hz})$ 의 연속발진을 성공한 이래 가히 폭발적이라고 할 만큼 레이저에 대한 연구가 활발히 일어났다. 이 기체 레이저는 단일 모드 발진이 가능하고 지향성이 뛰어나 수 mrad 정도이므로 계측용 광원으로써 아주 적합한 것이었다. 그러나 레이저의 공진기를 지지하는 매질도 열팽창을 하므로 Ne의 도플러 이득폭 900 MHz 이내에서 레이저가 흔들리는 것이 문제가 됐다. 이러한 현상에 의해 영국의 물리학 연구소(NPL)의 Rowley와 Wilson은 이득곡선의 최대값에서 공진기 길이를 300Hz로 변조하여 1차 하모닉신호를 이용한 레이저 주파수 안정화를 처음으로 실현하였다.³ 그 진공 파장이 $\lambda=632.911418 \text{ nm}$ 임을 측정하였고, 그 재현성이 10^{-8} 정도 갖고 있음을 보였고 rm 이후 세계 각국에서 많은 연구가^{4,5,6,7,8} 진행되었다. 최근의 광주파수 절대측정의 연구는^{9,10} 파장 633 nm의 red line의 안정화 He-Ne 레이저 복사선은 1983년에 추천된 값에 비해 40배정도 불확도가 개선되어 가시영역에서 최고로 정확한 표준 복사선이 되었으며 2.5×10^{-11} 의 불확도를 갖기 위해서는 동작조건도 훨씬 정밀하게 규정지어졌다.

본 연구에서는 기계 기구학적인 측면에서 Laser Tube의 안정된 지지와 공진기의 열팽창 그리고 그 공진기를 지지하는 매질의 열팽창과 외부로부터 전달되는 진동을 안정화함으로써, 외부 오작동을 최대한 줄여 안정된 레이저 주파수 출력을 유도하고 이러한 레이저 광 주파수를 미세 조절함으로써 안정된 광원을 얻는데 그 목적이 있다

그러므로 레이저 중에서도 선 스펙트럼이 극히 좁은 He-Ne 레이저주파수를 안정화함으로써 오차의 범위를 한 차원 줄이고 신뢰도를 향상시키려 한다.

2. 이 론

He-Ne 레이저의 이득매질을 갖고 있는 방전관은 2개의 고반사율의 거울 가운데 공진기가 설치되어 있다. 방전관의 양 끝은 Brewster 창이라 부르는 유리창을 부착하여 선

형편광(P편광)된 레이저 광에 대해서 반사 손실을 작게 하였다. 2개의 반사거울 간격 L 을 공진기의 길이라 한다. 이때 공진기 안에는 전자기장이 형성되고 형태에 따라 TEM_{mnq} 라고 쓰는 모드들이 존재하게 되는데¹¹ m 과 n 은 공진기 내부의 공간적인 전자기장의 분포와 관련되며 횡모드 양자수라 부른다.

또, q 는 주로 레이저 공진기 내부의 축방향 전자기장의 분포와 관련되므로 종모드 양자수라고 부른다. 보통의 레이저에서는 단순한 횡방향 전자기장 공간 분포를 갖는 것이 유리하기 때문에 기본 횡모드($m=0, n=0$) 즉, TEM_{00} 모드만 발진하도록 하는데, 이 모드의 공간 분포는 가우스 분포를 하고 다른 모드에 비해 면적이 작기 때문에 바늘구멍과 같은 공간 필터를 이용하여 선택적으로 발진하도록 할 수 있다. He-Ne 레이저에서는 (2-1)식을 만족하는 모세관을 방전관 안에 삽입하는데 이 모세관이 공간필터 작용을 하여 일반적으로 TEM_{00} 모드만 발진하게 한다.

이득매질이 없는 수동공진기의 각 모드 공진 주파수는 ν_{mnq} 로 쓰는데

$$\nu_{mnq} = \Delta \nu_c \left\{ (q+1) + \frac{1}{\pi} (2m+n+1) \cos^{-1} \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right\} \quad (2-1)$$

로 주어지며 $\Delta \nu_c$ 는 TEM_{00} 모드간의 간격이며 자유스펙트럼 영역(Free Spectral Range, FSR) 이라고도 하는데

$$\Delta \nu_c = \frac{c}{2L} \quad (2-2)$$

이다. 여기서 c 는 광속도이다.

한편, Ne의 원자는 방전관 내부 온도에 따라 열운동을 하고 속도 분포는 Maxwell 분포를 갖는다. 운동하는 원자가 어떤 주파수의 빛을 발광 할 때에는 도플러 효과에 의해서 정지 좌표계에 있는 관측자는 그 주파수가 이동한 것처럼 인식하게 되는데 이것을 도플러편이(Doppler Shift)라 한다. 정지하고 있는 Ne 원자의 발광 주파수는 ν_0 라고 하면 ν 라는 속도로 운동하는 원자로부터 발광된 광 주파수 ν 는 식(2-3)과 같이 되고 +부호는 관측자가 가까워지는 방향으로 운동하는 원자의 주파수 이동을 나타낸다.

$$\nu \cong \nu_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (2-3)$$

이와 같은 원인 때문에 본래의 ν_0 주파수로 발광하는 Ne 원자 천이선들이 그 원자의 운동속도 분포에 비례해서 $f(\nu)$ 와 같은 형의 선모양을 갖는다.

$$f(\nu) \propto \exp \left[- \ln 2 \frac{(v - v_0)^2}{\Delta \nu_D} \right] \quad (2-4)$$

여기서 $\Delta \nu_D$ 는 도플러 폭으로써 그 반치반폭(HWHM)을 나타내며

$$\Delta \nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{2 \ln 2 \frac{kT}{M}} \quad (2-5)$$

으로 주어진다.

여기서 k 는 볼쯔만 상수로 $1.380,658 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ 이며 T 는 절대온도, M 은 Ne 원자 질량이며 c 는 광속도로써 299,792,458 m/s이다. 파장 633 nm(474 THz) He-Ne 레이저의 경우 $T = 400 \text{ K}$ 로 계산하면 $\Delta \nu_D = 760 \text{ MHz}$ 가 되고 반치폭 $2\Delta \nu_D$ 는 약 1.5 GHz 가 됨을 알 수 있다.

레이저에서 광이 레이저 매질을 통과할 때 광의 증폭이 되는 비율을 이득이라 한다. 기체 레이저의 이득 $g(\nu)$ 도 (2-6)식과 같이 가우스 형의 분포를 나타내며 g_0 를 천이 주파수 ν_0 에서의 이득이라 하면 $g(\nu)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$g(\nu) = g_0 \cdot \exp \left[- \ln 2 \frac{(v - v_0)^2}{\Delta \nu_D} \right] \quad (2-6)$$

레이저 공진기내에서 전파하는 광은 이와 같은 이득이 생길 뿐만 아니라 공진기 내에 여러 원인에 의해 손실이 존재한다. 총 손실을 a 라 하면 레이저 발전은 이득이 손실보다 큰 주파수 범위 안에 존재하는 공진모드에 상당하는 부분만이 레이저로 발전하게 된다.

파장 633nm 발전선에 대한 He-Ne 레이저 이득은 보통 실험식에서 다음과 같은 실험식으로 주어진다.¹²

$$g_0 = 3 \times 10^{-4} l/d \quad (2-7)$$

공진기 내부의 광은 여러번 왕복하는 동안 증폭이 반복되어 증폭이 무한히 커질 것 같지만 여기된 Ne 원자수가 유한하기 때문에 무한히 증폭되지 않고 유한한 포화 출력을 갖게 된다. 즉 두 반사거울을 통해 나오는 출력을 t 라 하고, 기타손실을 a 라 하면 레이저 출력 P 는

$$P \propto t \left\{ \left(\frac{g(\nu_0)l}{a+t} \right)^2 - 1 \right\} \quad (2-8)$$

로 주어지고¹³출력의 최대값 t 는

$$\left\{ (a+t)^3 / (a-t) \right\} = \left\{ g(\nu_c) \cdot l \right\}^2 \quad (2-9)$$

를 만족하는 값이다.

일반적인 공진기 내부의 압력 변화나 온도변화에 의한 공진기의 장기간 길이 변화가 생기고, l/L (L : 공진기의 길이, l : 방전관의 길이를 뺀 대기 노출된 길이)에서의 대기 압력에 의한 레이저 주파수 변동이나 온도 변화에 의한 변동은 다음 식으로 주어진다.¹⁴

$$|\Delta \nu| = \nu_0 (a \Delta T + 3.63 \times 10^{-7} \Delta P \cdot l/L) \quad (2-10)$$

여기서 a 는 공진기의 지지봉의 열팽창 계수를 나타내며, ΔP 는 torr로 나타낸 압력 변화를 나타낸다. 위 공식에서 보는 바와 같이 공진기의 길이변화가 레이저 주파수에 상당히 큰 영향을 끼친다.

3. 실험장치

Fig. 1 은 본 연구를 위한 실험장치의 전체 구성도를 간략히 나타낸 것으로 레이저 Head와 Controller로 나누어져 있다. 레이저 주파수는 광 공진기의 미세 길이변위에 따라 변하고, 이 공진기의 미세 길이변화에 가장 큰 영향을 주는 요인은 레이저 Tube의 온도에 관계됨이 증명되었다. 그러므로 He-Ne Laser Plasma Tube에 Heater를 감아서 Laser Plasma Tube에 온도를 조절해 줌으로써 레이저 공진기의 길이를 조절하고, 이때 발생하는 광 출력을 PD(Photo Diode)로 검출하여, 이 값을 He-Ne Laser

Controller에서 분석하여 Heater-Driver로 피드백 함으로 레이저 Tube에 감겨있는 Heater에 전원을 공급하거나 중단함으로써 레이저 Tube의 온도를 일정하게 유지하여 미세 길이변화를 제어하므로 레이저주파수와 출력을 안정되게 유지하는 것이다.

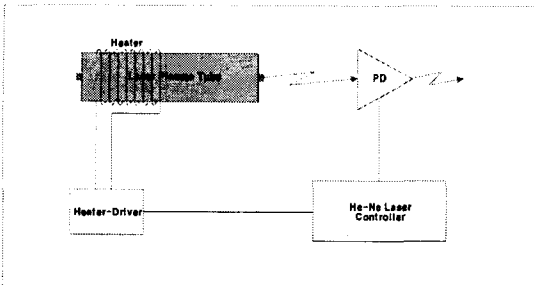


Fig. 1 Experimentation a device Diagram

3.1 Laser head System

본 실험에 사용한 He-Ne 레이저 튜브는 기존에 출시되어 있는 생산품으로 632.8nm 의 파장을 방출하는 Red 레이저 사용하였다. 이 레이저는 Melles Griot사의 레이저 방전관 : 05-LHR-150모델로 계측용으로 많이 사용되는 것으로서 Table. 1 에 제원을 나타내었다. 그리고 레이저의 DC 방전을 할 수 있는 전원장치로 동일사의 : 05LPL902-065 (115/230VAC)모델을 사용하였으며, 이 전원장치는 릴레이 구동회로와 함께 Controller에 구성하여 구현하였다. Fig. 2 Block diagram of He-Ne laser Tube head system의 구현을 도식적으로 나타낸 것이다.

Table. 1 Specifications of the He-Ne Laser Plasma Tubes(05-LHR-150)

Min. Output power	5.0mW
Beam Diameter	0.80mm
Beam Divergence	1.00mrad
Max Mode Sweep	2%
Mode Spacing	438MHz
Operating Voltage(Tube only)	1850V
Rec. Ballast Resistor	68Kohm
Operating Voltage W/Ballast	2290V
Current	6.5mA
Tube Length	350.5mm
Tube Diameter	36.8mm

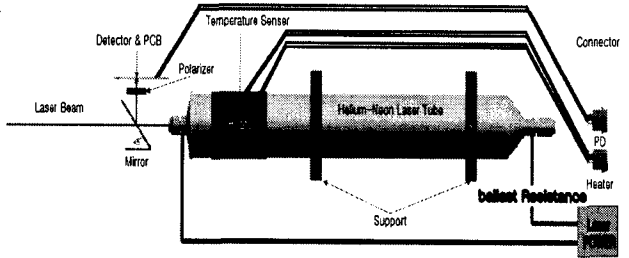


Fig. 2 Block diagram of He-Ne laser Tube head System

포토다이오드는 공진기 미세 길이변화량에 따른 레이저 주파수 출력 변화를 Detector함으로서 레이저 출력 안정성을 알아보기 위해 사용하였다. Detector 경로를 살펴보면 레이저 Tube에서 발진한 레이저 Beam이 45° Mirror를 거쳐 레이저 Beam을 분할하고 Polarizer를 거쳐 출력되는 변화율을 Controller에 전해준다. 본 실험에 사용한 포토다이오드는 Thorlabs사의 FDS100 모델로 실리콘 포토다이오드로서 분광감도 영역이 350nm~1100nm 이고 특히 900nm 의 파장 영역에서 감도가 최대 이며 입사광량에 대한 출력전류의 직진성과 매우 빠른 응답성을 가지고 있으며 PIN 구조로 20V 의 바이어스로 구동하는 포토다이오드로 Table. 2 에 제원을 나타내었다.

Table 2 Specifications of the Photo-diode (FDS100)

Spectral Response	350-1100nm
Active Area	13mm ²
Rise Time	10ns(50 ohms @20V bias)
Fall Time	Same as Rise Time
NEP	1.2(10 ⁻¹⁴)w/√Hz(@20V bias)
Dark Current	20nA(@20V bias)
Package	T05
Damage Threshold CW	100mW
Damage 10ns Pulse	0.5J/cm ²
Bias Voltage	20V

Fig. 3 는 레이저 Tube의 고정치구인 Support와 Fixture 부분으로 사용재질은 테프론을 가공 제작하였다. 테프론은 불소수지로서 난연성이 있고 우수한 내열성을 가지고 있으며, 전기절연성이 양호하고, 고주파특성도 우수하다. 특히 모든 고체에 비해 가장 낮은 마찰 계수를 가지고 자기윤활성을 가진다.

Support는 레이저 Tube를 고정 지지하여도 다른 재질의 재료에 비해 soft하므로 Tube에 그다지 큰 무리가 없을 것으로 보였고, 레이저 Tube를 Support에 고정 할 때 Tube 보호링도 테프론으로 제작하여 레이저 Tube를 먼저 감싸고 Support의 고정나사로부터 Tube를 보호하여 외부의 영향을 최소로 줄이도록 설계 제작 하였다.

Fixture는 polarizer을 고정시킬 수 있는 Polarizer Mounting을 제작하여 결합시켰고, 편광선택의 좋은 곳을 선택하기 위해 회전을 할 수 있도록 설계 되어, 편광상태가 가장 좋을 때 Fixture에 고정할 수 있도록 설계하였다. 그리고 45° Mirror를 고정할 수 있도록 하여, 반사광을 받도록 하였다. 또 Detector 부분을 하나의 System으로 구성하여 외부의 영향을 최대한 적게 받도록 설계하였다.

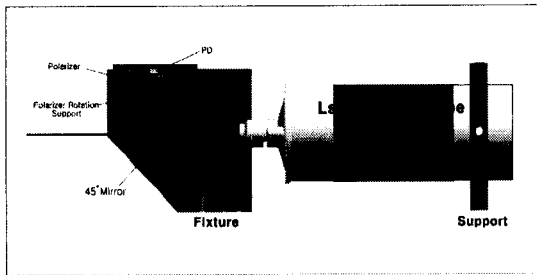


Fig. 11 Fixture Part

3.2 Laser Controller System

Stabilized He-Ne Laser Controller는 He-Ne Laser Plasma Tube를 구동하는 전원장치와, He-Ne 레이저 Tube의 출력 주파수 신호를 검출 제어함으로, 출력을 안정화하는 회로장치이다.

Fig. 4은 실험에 사용한 He-Ne Laser Controller의 Block Diagram으로 레이저를 ON시킨 다음, 레이저의 출력은 Mirror와 선형편광판을 통해 PD(photo Diode)로 레이저 Beam을 받는다. 이렇게 받은 레이저 Beam의 신호는 매우 미약하기 때문에 PD-Amp (Photo Diode Amplifier)를 통해 증폭하였고, 이 신호 값을 HPF(High pass Filter) 즉 고역통과 필터를 통하여 출력이 통과주파수대역의 70.7%(차단주파수)보다 낮은 신호는 감쇠시키거나 저지하고 높은 주파수의 신호는 모두 통과시켰다. 이렇게 증폭시킨 주파수 신호를 다시 Amp(Amplifier)를 통해 다시 증폭시키고 이 신호를 F/V (Frequency to Voltage Converter)를 통해 전압값으로 변환시키고 Diff-Amp

(Differential Amp)로 차동증폭기에서 이 전압값과 Reference(BIAS)값을 비교하여 오차신호를 검출하였고, 이 오차신호가 PI(Proportional & Integrator)회로를 통하여 출력신호는 입력신호가 적분된 형태로 출력된다. 이 신호를 다시 PC(Polarity Converter)회로를 통과하고 H-Driver(Heater Driver)를 구동하거나 중단하므로 레이저 공진기의 온도를 조절하고, 온도 센서를 레이저 Tube에 부착하여 레이저 Tube의 온도를 Display상에서 관측하였다. 이와 같은 실험절차를 바탕으로 하여 레이저 공진기의 온도를 제어하여 레이저 공진기 길이 L을 조절하였다. 이러한 원리를 이용하여, 레이저 주파수를 안정화 할 수 있는 Controller를 제작하였다.

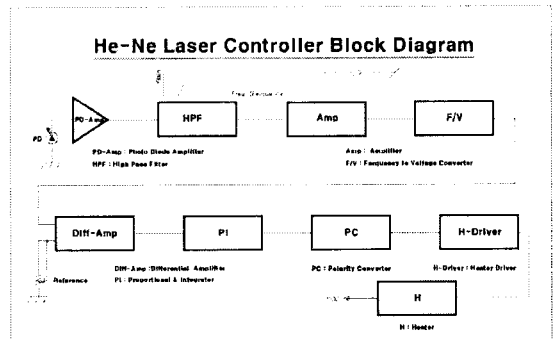


Fig. 4 He-Ne Laser Controller Block Diagram

본 연구에서 사용한 F/V Converter(Frequency to Voltage Converter)는 ANALOG DEVICES사에서 생산되는 AD650을 사용하였다. 실험에 사용한 장비는 HP사의 Synthesizer/Function Generator(3325A)로 주파수를 입력하였고, Agilent 6½ Digit Multimeter로 전압을 반복 측정하여 통계를 내었다. 그 결과 60kHz ~ 300kHz 사이의 주파수와, 전압이 선형적으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

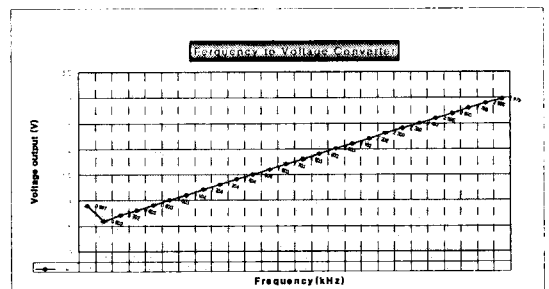


Fig. 5 F/V Converter output

4. 결론

본 실험에서는 외부진동을 최대한 줄이기 위하여 광학 테이블을 이용하여 측정 하였으므로 외부의 진동은 우선 안정된 상태로 보고 실험하였다.

단일모드로 발진하는 He-Ne 레이저의 경우 레이저 출력 요동 진폭은 100% 에 가까운 값을 갖는다. 그러므로 보통의 상용 He-Ne 레이저는 이와 같은 출력요동을 줄이고 레이저의 출력도 어느정도 안정화하기 위해 3 ~ 4개의 중모드로 발진하게 만들어 놓았다. 이와 같은 레이저의 출력요동은 일반적으로 5% 이하이다.

이와 같은 3 ~ 4 개의 중모드를 같은 레이저도 편광판으로 어떤 한 방향의 편광선택을 할 경우에는 출력요동은 더 큰 값을 갖게 된다. 그러므로, 광검출기의 검출감도 측정과 같은 안정된 레이저 출력이 필요한 정밀 실험에서는 레이저의 출력을 안정화한 레이저가 필요하다. 일반적으로 레이저주파수를 안정화하면 어느 정도 레이저 출력도 안정화된다. 이것은 발진주파수가 안정되어 레이저 이득곡선의 일정한 지점에 레이저 발진주파수가 고정되기 때문이다. 즉 이득이 안정화 되어 있다면 레이저 주파수 출력도 안정화 되는 것이다.

그러므로 Fig. 6 에서 보는 것과 같이 3개의 중모드로 발진하는 레이저의 2차 맥놀이 신호를 검출해 주파수 안정화를 실현하였고, 레이저 Tube System 에 있는 편광판을 이용하여 3개의 중모드 중 가운데 모드만을 선택하여 주파수 안정화를 시키기 전후의 출력 요동비를 나타내었다.

안정화 하기전 $\pm 3.5\%$ 의 출력요동이 있고, 안정화후 10분 동안 $\pm 0.1\%$ 이내로 안정화됨을 관측하였다.

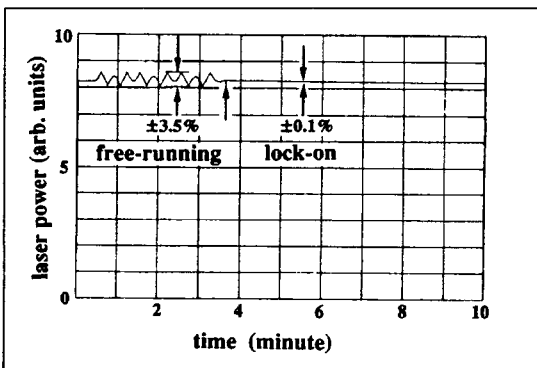


Fig. 6 Secondary beat signal

진공과장에서 632.8 nm 로 발진하는 He-Ne 레이저의 주파수는 473 MHz 의 값을 갖기 때문에 이렇게 큰 전자기파의 주파수를 직접 측정할 수 있는 장비가 존재하지 않으므로 MHz 의 값을 측정할 수가 없다. 그러므로 He-Ne 레이저의 2차 맥놀이 신호를 검출하여 레이저출력 주파수를 안정화하였고, 안정화된 2차 맥놀이 신호는 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 80 kHz 의 안정된 값을 갖고 있으며(A), free running 상태에서는 60kHz~ 100 kHz 사이에서 흔들리는 것을 같이 나타내고 있다(B).

제작된 레이저주파수 안정도를 평가는 제어 오차 신호를 사용하여 각각 주파수 요동을 측정하였다. 제어 오차신호를 이용하는 방법은 주파수 기준인 주파수 분별곡선 자체가 절대적 기준이 아니므로 절대 안정도 측정이라 보기는 어렵다. 보통의 경우, 이 방법으로 계산된 주파수 요동폭은 헤테로다인법에 의해 측정된 요동폭보다 10배 이상 작게 나타난다. Fig. 8은 실제 제작된 Controller와 Laser Head이다.

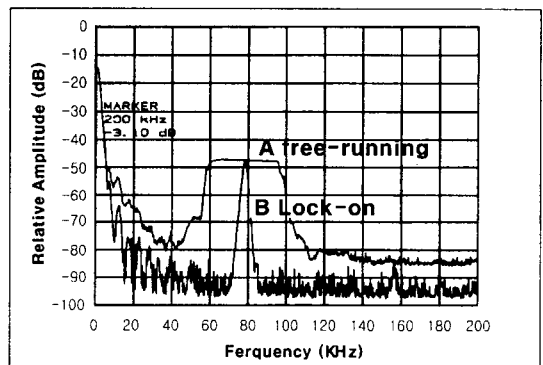


Fig. 7 Secondary beat signal
(A : free-running, B : Stabilized state)

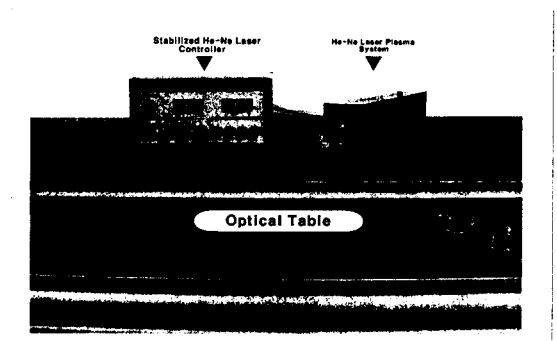


Fig. 8 Photos of Stabilization Laser

4. 결론

본 논문에서는 3개의 종모드를 발진하게 하는 내부 반사형의 He-Ne 레이저의 주파수와 출력을 안정화 시켰다. 레이저 분별곡선으로는 3개의 종모드 사이의 2차 맥놀이 주파수를 검출하여, 측정하여 보면, 이 주파수는 공진기 길이 변화에 따라 ± 40 kHz의 폭을 갖고 주기적으로 변화하고 있는 것을 관측할 수 있다.

그러므로 공진기 길이에 따른 주파수 특성과, 온도에 따른 공진기의 길이 변화, 따라서 공진기 온도에 따른 레이저 출력의 안정화 된 것을 알 수 있었다.

앞으로도 정밀 기술 산업이 더욱 발전함에 따라 광주파수 출력의 안정화가 더욱 요구될 것이며, 연구 과제로는 광학 실험실(무진동실 & Optic Table) 이외의 여러 산업 현장에서 누구나 손쉽게 접목시키고 사용할 수 있도록 하기 위해 레이저 System 자체에 Damper기능을 구현과, 더욱 안정화된 레이저 치구물을 구현함으로써 1차적인 외부의 영향을 최소화 하고, 레이저 공진기의 열팽창계수에 근접한 재료를 사용해 보다 정밀하게 안정화된 레이저 출력을 얻는 연구가 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Ho-Suhng Suh "Frequency Stabilization of He-Ne Lasers for Optical Frequency Standard" Yeungnam University , Department of Physics Graduate School (1993)
- [2] 장수, 조재홍 외 "광 학" 도서출판 대응 , pp.842-849
- [3] W. R. C. Rowley and D. C. Wilson, "Wavelength stabilization of an optical maser" Nature 200, 745-747(1963).
- [4] K. Shimoda and A. Javan, "Stabilization of the He-Ne Maser on the atomic line center", J. of Appl. phys., 36,718-726(1965).
- [5] D. C. Wilson and W.R.C. Rowley, " A method of producing an unmodulated laser output at a controlled frequency", J. Sc. Instrum. 43, 314-316(1966).
- [6] A. D. White et. al., Appl. Phys. Lett., 15,97(1964).

- [7] K. D. Mielenz et. al., "Measurement of absolute wavelength stability of lasers", J. of Opt. Soc. of Am, 56,156-162(1966).
- [8] A. D. White, "Frequency stabilization of gas lasers", IEEE, QE-1, 349-357 (1965).
- [9] BIPM, Dr. T. J. Quinn, 8차 CCDM 참가기관에 보낸 서신(19,May, 1993)중 "Mise en pratique of the definition of the metre"
- [10] Proceeding of Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM'92, Paris, 9-12 June, (1992) page 25.
- [11] H. Kogelnick and T. Li, Appl. Opt. 5, 1550(1966).
- [12] P. W. Smith, IEEE QE-2, 77(1966).
- [13] J. P. Gordon. et. al., Phys. Rev. 99, 1264(1955).
- [14] A. D. White et. al., Appl. Phys. Lett., 15,97(1964).
- [15] 김병태, "레이저 공학"도서출판 상학당, 2001년
- [16] 오라치오 스텔토, "레이저의 원리" 대한 교과서(주), 1994