

간섭계용 헬륨-네온 레이저의 주파수 안정화

주기남*(한국과학기술원 기계공학과 박사과정), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)
Frequency stabilization of HeNe laser for interferometry

K. N. Joo(Mecha. Eng. Dept. KAIST), S. W. Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

Lasers are used as the source of the interferometers in the industrial field. These lasers need 2 requirements. The first is the narrow linewidth of laser for the long coherence length. The second is the stabilized frequency of laser for the precision measurement. Now HeNe lasers are mostly used and the frequency stability is about 10^{-9} . In this paper, we construct the HeNe laser systems of frequency stabilization using typical 2 method, the beat frequency stabilization method and the intensity difference method. So, we get the frequency stabilities of 2.01×10^{-9} (0.1s), 3.4×10^{-9} (0.1s).

Key Words : 헬륨-네온 laser (헬륨네온 레이저), frequency stabilization (주파수 안정화), interferometry (간섭계)

1. 서론

1960 년대에 레이저가 발명된 이후로 레이저는 여러 분야에서 사용되고 있다. 특히 길이 측정 분야에 있어서는, 간섭계 (interferometer)의 광원으로 레이저를 널리 사용하고 있다. 그러한 이유는 다른 빛들에 비해 레이저가 직진성이 우수하고 단색성 (monochromaticity)을 가지고 있기 때문이다. 그래서 레이저는 다른 빛들에 비해 가간섭 (coherence) 거리가 길고, 간섭계의 광원으로서 널리 사용된다. 그러나 실제로 레이저는 완벽하게 단일 주파수의 빛이 아니다. 레이저의 스펙트럼을 분석해 보면, 레이저는 주파수 영역에서 어느 일정 주파수를 중심으로 선폭 (linewidth)을 가지고 있다. 이러한 선폭의 존재로 인해, 레이저를 이용한 간섭계는 가간섭 거리에 제한을 두게 되고 간섭계의 성능을 저하시키게 되는 것이다. 헬륨-네온 레이저의 경우, 선폭이 좁기 때문에 가간섭 거리는 충분히 길다. 그러나 레이저의 선폭이 작아서 가간섭 거리가 길어지더라도, 그 중심 주파수가 시간에 따라 흔들리게 되면, 레이저의 파장을 기준으로 하는 간섭계는 정밀도가 나빠지는 문제가 발생한다. 예를 들어, 상대 불확도가 1×10^{-6} 정도의 레이저를 광원으로 한 간섭계로 100 mm 를 측정하면, 오차는 $0.1 \mu\text{m}$ 가 된다. 그렇기 때문에 간섭계의 정밀도를

높이기 위해서는 광원의 주파수가 안정되어 있어야 한다.

주파수 안정화 방법으로 국가 표준에서는 요오드 이온을 이용한 안정화 방법을 이용하고 있다. 안정도는 매우 우수하나 이러한 방법은 복잡하고 광량도 작아서 산업계에 쓰이기에 어려움이 있다. 현재 산업계에서는 이득곡선에 안정화하는 방법을 사용하고 있으며, 이러한 방법으로 맥놀이 주파수 안정화 방법과 광량 비교법이 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 현재 산업계에서 쓰이는 이러한 주파수 안정화 방법을 이용하여 헬륨-네온 레이저의 주파수 안정화를 수행하였다. 마이크로 컴퓨터를 이용하여 비교적 간단하고 성능이 우수하며 비교적 작은 시스템을 구성하였다.

2. 지만 효과를 통한 맥놀이 주파수의 안정화를 이용한 주파수 안정화

2.1 지만 효과를 이용한 주파수 분리¹⁾

1896 년, 피터 지만 (Peter Zeeman)은 가열된 Na 증기에서 방출된 빛 띠의 선폭이 Na 증기에 자장을 가하자 넓어지는 것을 발견하였다. 지만은 로렌츠 (Lorentz)의 고전적 모형으로 빛의 각주파수 ω 가 빛의 진행방향과 같은 방향으로 가한 자장 B 에 의해

$$\omega + \Delta\omega = \omega \pm Be/2mc \quad (1)$$

으로 변하는 것을 보였다. 이러한 현상을 지만 효과라 한다. 헬륨-네온 레이저 튜브에 자장을 가하게 되면, 지만 효과에 의하여 여기 상태의 에너지 준위가 나누어 지면서 바닥 상태로 떨어질 때 서로 주파수가 다른 두 레이저가 발진하게 된다.

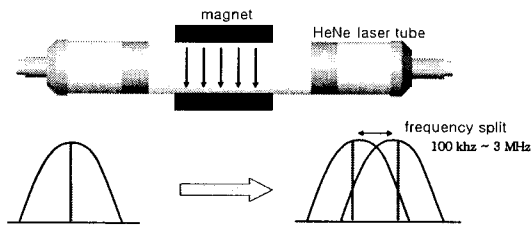


Figure 1. Frequency split of zeeman laser at transverse magnetic field

Figure 1 과 같이 단일 모드로 발진하는 레이저 튜브에 자석을 통해 자장을 가하게 되면 단일 모드가 분리되어 두 개의 모드로 발진한다. 이때 자장을 레이저가 발진하는 방향, 즉 종 방향으로 작용시키면 발진하는 각 모드의 레이저가 서로 반대 방향의 원편광을 가지게 되며, 횡 방향으로 작용시키면 서로 수직한 방향으로 편광되어 레이저가 발진하게 된다. 대개의 경우 두 레이저간의 주파수 폭은 100 kHz ~ 3 MHz 정도이며, 자장의 세기나 가하는 방향에 따라 달라지게 된다. 발진하는 레이저를 광검출기로 보게 되면, 두 레이저간의 맥놀이 주파수를 확인할 수 있으며, 시간이 지남에 따라 주위 환경변화로 인하여 맥놀이 주파수가 변화함을 알 수 있다. 특히, 온도변화에 가장 큰 영향을 받는다. 튜브의 온도가 변하면, 튜브의 길이가 변하게 되고, 이에 따라 공명 조건이 변화하면서 발진하는 레이저의 주파수가 변하게 된다. 결국은 두 레이저 간의 맥놀이 주파수도 변하게 되며, 반대로 말하면, 맥놀이 주파수를 안정화시키는 것으로 발진하는 레이저의 주파수를 안정화시킬 수 있다.

2.2 실험장치

2.1 절에서 살펴본 대로 맥놀이 주파수는 레이저 튜브의 길이변화에 따라 민감하게 변화한다. 따라서 안정화 시스템은 레이저 튜브의 길이를 안정화하는 작업이 필요하다. 길이를 안정화하는 방법으로 열선이나 램프를 이용하여 튜브의 온도를 제어하는 방법을 사용했다. 헬륨-네온 레이저는 효율이 매우 낮아서 (0.1%), 자체적으로 열이 발생하고, 온도가 대략 80°C 정도 된다. 그래서

주위 환경의 온도변화에 따라 튜브의 온도가 변화하게 되는데, 이를 열적 제어를 통해 안정화하는 것이다. 이 방법은 비교적 간단하고 튜브의 수명에 영향을 거의 미치지 않는다는 장점을 가지고 있으나, 제어가 느리고 냉각장치가 없어서 한 방향의 제어밖에 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 열을 가하는 장치로는 10W 소비전력을 가지는 할로겐 램프를 사용하였다. 레이저 튜브는 uniphase 사의 모델 1007 로써, 파장은 632.8 nm, 출력은 0.5 mW, 튜브 길이는 148.6 mm 이고 공진기 모드간의 주파수 간격은 1090 MHz 여서 단일 모드로 발진한다. 튜브는 알루미늄 케이스로 둘러싸고 아래, 위로 자석을 두어서 자장을 횡 방향으로 가하였다. 램프는 알루미늄 케이스에 구멍을 내어 복사 에너지가 튜브에 전달되도록 구성되었다. 레이저가 발진하는 쪽에는 시준기를 두어서, 빛의 발산을 막았으며, 광 분할기를 두어, 수직방향에는 광검출기를 통해 맥놀이 주파수를 검출하였다. Figure 2 는 전체적인 구성도를 나타내고 있다.

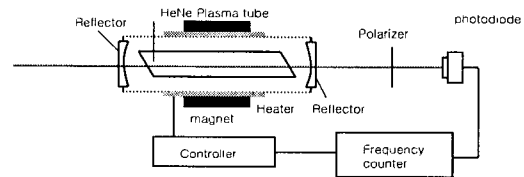


Figure 2. Schematic design of zeeman laser system

광검출기에 검출된 신호는 사인 곡선을 가지며, 크기가 비교적 작다. 그래서 증폭기를 사용해서 신호를 증폭하고, 트리거를 통해 구형파로 신호처리를 하여 TTL 신호로 바꾸었다. 주파수 측정기와 제어기로는 80C196KC 를 사용하였다. 기준 클럭으로는 20 MHz 크리스탈 오실레이터를 사용하였다. 80C196KC 는 10 MHz 의 내부 타이머를 통해 입력된 주파수를 세어서, 입력 주파수를 측정하게 된다. 그래서 입력 주파수의 변화를 타이머의 값의 변화로 확인하여, 원하고자 하는 타이머의 값을 정하고, 오차를 PID 제어를 하였다. 출력은 80C196KC 내부의 핀스톡 변조(PWM) 방법을 이용하였으며, 저대역 필터를 두고 모터 구동용 파워 증폭기인 PA21 에서 신호를 증폭하여 할로겐 램프에 가하였다. 제어를 하기 위해서는 보통 10 분 정도의 예열시간이 필요하며 그 이후에 제어를 시작하였다.

2.3 실험 및 측정결과

Figure 3 는 안정화 회로가 동작하기 전과 후의

맥놀이 주파수 변화를 나타낸 것이다. 제어회로가 동작한지 몇초 후에 맥놀이 주파수가 안정화 됨을 알 수 있다. 맥놀이 주파수의 변동폭은 5 kHz 였다.

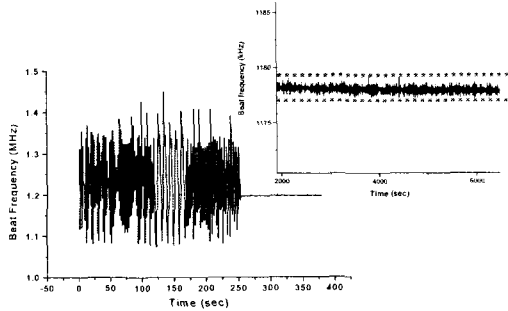


Figure 3. Beat frequency stabilization

레이저 주파수의 안정도를 정확히 평가하기 위해서는 다른 안정화된 레이저의 주파수와 직접 비교하여 알란 분산을 구해야 한다. 알란 분산은 시간 영역에서 주파수의 안정도를 나타내는 척도로 사용되며, 레이저의 명목 주파수를 ν_0 , 실제 발진 주파수를 $\nu(t)$ 라 할 때, 알란 분산은 식 (2)와 같이 정의 된다^[2].

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\bar{y}_{k+\tau} - \bar{y}_k)^2 \right\rangle \quad \bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt \quad (2)$$

여기서 $y(t) = [\nu(t) - \nu_0] / \nu_0$ 이다. 물리적으로 τ 와 $\sigma(\tau)$ 는 각각 레이저 선폭 확대의 요인이 되는 주파수 잡음의 크기와 이로 인해 확대된 레이저 선폭으로 해석할 수 있다. 측정에 사용된 안정화 레이저는 HP사의 5518A로 주파수 안정도가 약 10^{-9} 이며, 명목 주파수는 473.612234 THz 이다. 출력으로 이중 모드의 레이저가 나오기 때문에, 두 레이저를 편광 광분할기를 이용하여 하나의 모드만을 통과시켜, 간섭을 일으켜서 간섭광을 고속 광검출기(APD, Hamamatsu C5658)로 받아서 주파수 카운터 (Universal Counter, Agilent 53131A)로 그 값을 읽었다.

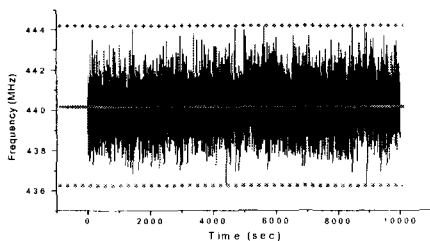


Figure 4. Beat frequency between zeeman laser and a HP stabilized laser

Figure 4 는 주파수 변화를 약 3 시간동안 2Hz 의 샘플링 주파수로 측정된 것이며, 주파수 변동폭은 8MHz 로 표준 편차는 1.06 MHz 였다. 주파수 변동폭으로 계산한 레이저 주파수 안정도는 1.7×10^{-8} 이다. 알란 분산은 $\sigma(0.1s) = 2.01 \times 10^{-8}$ 이다.

3. 이중 모드로 발진하는 헬륨-네온 레이저 튜브의 광량을 통한 주파수 안정화

3.1 이중 모드로 발진하는 헬륨-네온 레이저 튜브^[3]

레이저 튜브의 길이가 짧으면 단일 모드로 발진하지만, 길이가 점점 길어져서 공진기의 모드간 주파수 폭이 작아지게 되면, 이득곡선 내에 이중 모드가 발진하게 된다.

$$\Delta \nu_{cavity} = \frac{c}{2L} \quad (3)$$

헬륨-네온 레이저의 경우 이득곡선은 불균일 도플러 확대 현상에 의해 넓어지게 되며, 그 폭은 일반적으로 $\Delta \nu = 1 \text{ GHz} \sim 1.5 \text{ GHz}$ 정도이다. 그래서 식 (3)에서 길이 L 이 길어지게 되면, $\Delta \nu_{cavity}$ 가 작아져서 $\Delta \nu_{cavity} < \Delta \nu$ 가 되며, 이중모드가 발진하게 되는 것이다. 발진하는 이중모드는 서로 편광상태가 수직상태이고, 두 모드간의 맥놀이 주파수는 대략 650 MHz 정도가 된다. 레이저 주파수를 안정시키기 위해 앞의 방법과 같이 맥놀이 주파수를 검출하여, 그 맥놀이 주파수를 안정화시키는 방법도 가능하나, 그럴 경우 650 MHz 의 높은 주파수의 광을 검출하기 위한 고속 광다이오드가 필요하게 되며, 차후에 그 신호를 안정화시키기 위한 전자회로들이 복잡하게 구성되어야 하는 문제점이 있다. 그래서 이중모드가 서로 수직 편광되어 있다는 사실로부터 두 편광상태의 빛의 광량을 각각 검출하여, 그 두 광량간의 차이가 일정하게 제어하는 것으로 레이저의 주파수를 안정화하였다. 헬륨-네온 레이저의 이득곡선 내에 이중모드가 존재하여, 주위환경 변화로 인하여 주파수가 변하게 되면, 그에 따라 광량도 변화한다. 그래서 그 광량변화를 없애면, 반대로 광주파수가 일정하게 고정되는 것이다.

3.2 실험장치

실험에서 쓰인 레이저 튜브는 Melles griot 사의 05 LHR 219 모델로써, 파장은 632.8 nm, 출력은 최소 2 mW, 길이는 226.1 mm 이다. 그럴 경우, 모드간 간격이 687 MHz 이고 그래서 이중모드가 발진하게 된다. 두 모드는 서로 수직

편광되어 있기 때문에 편광 광분할기를 이용하면, 두 모드를 분리해낼 수 있다. 레이저 튜브는 O-ring 을 통해 알루미늄 하우징에 고정시켜 중심을 맞추었으며, 뒤에 편광 광분할기를 두어 광다이오드로 각 모드의 광량을 검출하였다. 앞에도 편광 광분할기를 두어 이중모드 레이저나 단일모드 레이저로 사용이 가능하도록 하였다.

각 모드의 광량을 검출기로 받아서 이를 증폭한 후, 차동 증폭기를 통해 두 모드간의 광량차이를 받아 보았다. 이때 두 모드에 공통적인 잡음이 존재하기 때문에, 이를 제거하기 위해 두 광량의 합으로 나누는 표준화 작업을 수행하였다.

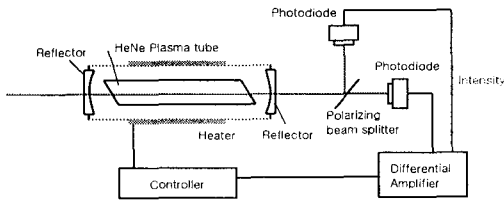


Figure 5. Schematic design of laser system

Figure 5 는 전체 시스템을 나타내고 있다. 증폭하고 두 전압의 차이를 구하는 소자로는 잡음이 적고 열적 흐름이 적은 LF357 과 AD712 를 사용하였고, 표준화 작업을 하기 위한 소자로는 AD734 를 사용하였다. 제어기로는 80C196KC 를 사용하였다. 먼저 아날로그 입력에 대해 TTL 신호로 신호처리를 한 후에, 80C196KC 의 내부의 10 비트 AD 변환기를 이용하여 검출한 후, 원하는 지점에서 고정시키는 PID 제어를 통해 광량차이를 안정화하였다. Figure 6 은 레이저 발진 이후의 두 모드간의 광량차이가 시간이 지남에 따라 온도 변화로 인하여 변화하는 것을 AD 변환값으로 나타낸 것이다.

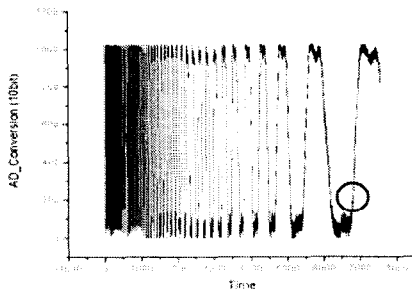


Figure 6. AD conversion of intensity difference

안정화 지점은 이중 모드 중 한 모드의 출력이 최대가 되는 곳을 결정하였고, AD 변환값으로 200 에 해당하는 값이었다. 이 값을 기준으로 PID

제어를 통해 안정화를 수행하였다.

3.3 실험 및 측정결과

Figure 7 은 안정화한 결과를 나타낸다. 실험 방법은 2 장에서 실험한 방법과 동일하며, 약 2 시간 동안 2Hz 의 샘플링 주기로 실험을 수행하였다. 주파수 변동폭은 8 MHz 였고 표준편차는 1.7 MHz 였다. 주파수 변동폭으로 계산한 주파수 안정도는 1.7×10^{-8} 이다. 알란 분산은 $\sigma(0.1s)=3.4 \times 10^{-8}$ 이다.

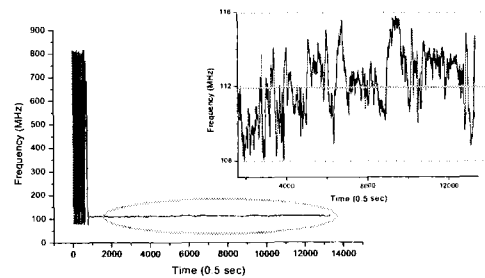


Figure 7. Beat frequency between 2 mode laser and a HP stabilized laser

4. 결론

본 논문에서는 헬륨-네온 레이저의 주파수 안정화를 수행하였다. 안정도는 기존의 안정화 레이저 정도의 결과를 얻었으며 마이크로 컴퓨터를 이용하여 비교적 간단하고 작은 크기의 시스템을 구성하였다. 안정화 방법은 맥놀이 주파수 안정화 방법과 광량비교법을 이요하였으며, 각각 안정도, $2.01 \times 10^{-9}(0.1 s)$, $3.4 \times 10^{-9}(0.1 s)$ 의 결과를 얻었다. 주파수 안정도에 영향을 미치는 요인들은 기준 레이저의 안정도, 온도 변화, 진동, 전자 회로 잡음 등을 들 수 있다.

참고문헌

1. M.A. Zumberge, "Frequency stability of a zeeman-stabilized laser," Appl. Opt. 24,1902 (1985)
2. J. Koning, P.H.J. Schellekens and P.A. McKeown, "Wavelength stability of HeNe lasers used in interferometry-limitations and traceability," Ann. CIRP 28, 307 (1979)
3. 김민석, " 이중모드 레이저를 이용한 헤테로다인 레이저 간섭계", 박사학위 논문, 한국과학기술원 (2002)