

1 칩 마이크로 프로세서를 이용한 He-Ne 레이저의 주파수 안정화

최현승*(광주과학기술원 대학원 기전공학과), 엄태봉(한국표준과학연구원),
이선규(광주과학기술원 기전공학과)

Frequency Stabilization of He-Ne laser using One Chip Micro-processor

H. S. Choi(Mechatronics. Dept., K-JIST), T. B. Eom(KRISS), S. K. Lee(Mechatronics. Dept., K-JIST)

ABSTRACT

A simple digital control system has been developed for the frequency stabilization of an internal mirror He-Ne laser. The system is based on one chip microprocessor with embedded Basic interpreter. To stabilize the laser output frequency, the signal such as power difference or beat frequency between two modes is supplied and processed by a microprocessor, and control signal is fed to the heating coil would round the laser tube for adjusting the spacing of the laser cavity mirror. Newly developed frequency stabilization system is totally digitized. The system and the frequency stability performance are briefly described.

Key Words : Frequency stabilization (주파수 안정화), He-Ne laser (He-Ne 레이저), Power balance(파워 밸런스), Beat frequency (맥놀이 주파수), One chip microprocessor (1 칩 마이크로 프로세서)

1. 서론

633nm에서 발진하는 내부 반사경형 주파수 안정화 He-Ne 레이저는 간섭을 이용한 정밀 길이 측정 분야에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히 높은 출력과 우수한 광학적인 특성 때문에 633nm He-Ne 레이저는 간섭계의 광원으로 널리 사용되고 있다. 지금까지 내부 반사경형 He-Ne 레이저의 주파수를 안정화시키기 위한 많은 방법들이 발표되었는데, 그들의 대부분은 아날로그적인 방법을 채택하고 있다. 일부에선 디지털적인 방법으로 제어를 하고 있으나 완벽한 디지털 제어는 아니다.^(1,2) 아날로그 회로는 디지털 회로에 비해 간단하긴 하지만 몇 가지 단점을 안고 있다. 하지만 디지털 회로는 비례이득과 적분이득과 같은 제어 파라미터 값을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있으며, 더군다나 본 연구에서 개발된 새로운 장치는 전자회로를 변경시키지 않고 간단하게 여러 다른 주파수 안정화 방식을 적용할 수 있으며 레이저 주파수 안정화를 위한 각종 파라미터를 모니터링 하거나 원격작동을 위해 퍼스널 컴퓨터와 쉽게 인터페이스 할 수 있도록 되어있다.

본 논문에서는 베이직 인터프리터가 내장된 1 칩 마이크로 프로세서를 사용하여 2 모드 발진에서 수직 수평 편광 성분의 출력이 동일하게 유지되도록 레이저 공진기의 길이를 조절해 주는 2 모드 파워 밸런스 방법을 이용한 주파수 안정화와 횡자장 하에서 Zeeman 분리된 수직 수평 편광성분의 맥놀이 주파수가 일정하게 유지되도록 레이저 공진기의 길이를 조절해주는 주파수 안정화 방식의 두 가지 방법을 제시하고 위 방식을 이용하여 주파수를 안정화 시킨 실험결과를 보인다.

2. He-Ne 레이저의 주파수 안정화

레이저 발진 주파수의 불안정성은 레이저 공진기 사이의 거리가 변함에 의해 주로 발생되어진다. 따라서 주파수 안정화된 레이저를 얻기 위해서는 이 공진기의 길이 변화를 측정하여 공진기의 길이가 일정하도록 제어하여야 한다.

내부 반사경형 633nm He-Ne 레이저에 대한 주파수 안정화 방식은 이미 많은 사람들에 의해 연구되었다.^(1,2) 정밀 길이 측정용 레이저 간섭계의 광원으로 사용되는 He-Ne 레이저의 주파수 안정도는 약

$10^{-7} \sim 10^{-9}$ 수준으로 공진기 길이 변화에 따른 레이저의 출력 변화나 주파수 변화 특성을 이용하여 주파수를 안정화 시킨다. 주파수 안정화에 사용되는 비편광 내부 반사형 He-Ne 레이저에서는 보통 서로 직교하는 선형 편광을 갖는 2개의 종모드(Longitudinal mode)가 발진한다.⁽¹⁻⁵⁾ 이 레이저에서 공진기의 길이가 변하게 되면 모드가 이득 곡선(Gain curve) 위를 따라 움직이게 되면서 각 모드의 주파수나 출력이 변하게 된다. 이 때 발생하는 두 모드 사이의 출력과 주파수 차이가 공진기 길이를 조절하기 위한 제어신호로 사용된다. 이 제어신호를 사용해서 두 모드의 출력이 서로 같도록, 즉 출력의 차이가 "0"이 되도록 레이저 공진기의 길이를 조절하여 주파수를 안정화하는 파워 발란스 방법이 He-Ne 레이저의 주파수를 쉽게 안정화 시킬 수 있기 때문에 가장 널리 사용된다. 그리고 두 모드 사이의 주파수 차이, 즉 맥놀이 주파수(Beat frequency)가 일정하도록 공진기의 길이를 조절하여 주파수를 안정화 시키는 방법이 있는데, 이 방법에서는 공진기 길이의 변화에 따른 맥놀이 주파수 변화가 분명하지 않고 맥놀이 주파수가 500MHz 이상이기 때문에 고주파수 처리를 위한 복잡한 회로가 요구되어지는 등 주파수 안정화가 약간 어렵다. 다른 방식으로는 Zeeman 안정화 방법이 있는데, 이 방식에서는 He-Ne 레이저에 자장을 형성시켜 Zeeman 분리에 의한 두 개의 다른 편광된 성분을 얻는다. He-Ne 레이저의 종방향으로 자기장을 걸어 주면 이득곡선이 중심 부근에서 단일 모드로 발진이 되며 Zeeman 효과에 의해 서로 반대 방향으로 회전하는 두 원형 편광성분으로 분리된다. 이득곡선 중심 부근에서 두 원형 편광성분의 맥놀이 주파수는 최소 값을 갖게 되고 출력은 서로 같게 되기 때문에 이 신호를 이용하여 공진기의 반사경을 조절할 수 있다. 한편 횡방향으로 자장을 형성하여 주면 서로 반대 방향을 갖는 두개의 선형 편광성분으로 분리되는데 이득곡선의 중심 부근에서 맥놀이 신호가 선형적으로 변하기 때문에 이 맥놀이 신호가 일정한 값을 갖도록 공진기의 반사경을 조절하여 주파수를 안정화 시킬 수 있다. 이들 Zeeman 안정화 레이저는 맥놀이 주파수가 보통 수십 KHz에서 수 MHz 정도로 헤타로다인 간섭계의 광원으로 널리 사용되어진다.⁽²⁻⁵⁾

위에서 설명했듯이, 레이저 공진기의 길이 변화를 알려주는 신호로 출력 레이저의 파워나 주파수가 이용되어지고 주파수 안정화를 위해서 이 신호가 일정하여 지도록 공진기의 길이를 조절하여야 하는데, 이에 여러 가지 방법이 사용되어지고 있다. 먼저 가장 보편적으로 사용되는 방식으로 레이저 플라즈마 튜브에 열선을 감아 열선에 공급되는 전

류를 제어함으로써 공진기 길이를 조절하는 방법이 있는데, 이 방법은 응답 속도가 느린 단점이 있으나 장치가 간단하기 때문에 가장 널리 사용된다. 한편, 플라즈마 튜브에 PZT를 부착시켜 플라즈마 튜브를 강제적으로 팽창시켜 공진기의 길이를 조절하는 방법이 있는데, 이 방식에서는 응답속도가 빠른 장점이 있으나 조절 범위가 작고 튜브에 손상을 줄 수 있다는 단점이 있기 때문에 일반적으로 열선과 병행해서 사용되며 원기급 레이저 등에 많이 사용된다. 이 밖에 팬이나 열전소자(Peltier cooler)를 사용하여 플라즈마 튜브를 냉각시켜주거나 레이저의 방전전류를 조절하여 공진기 길이를 조절하는 방식 등이 있다.

3. 실험장치 구성 및 방법

본 연구에서는 레이저 주파수 안정화를 위해서 두 가지 방법, 즉 2모드 파워 발란스 방법과 Zeeman 분리에 의한 맥놀이 주파수(Beat frequency)를 안정화 시키는 방법을 사용하였는데, 이 때에 사용된 레이저를 Fig. 1에 나타낸다.

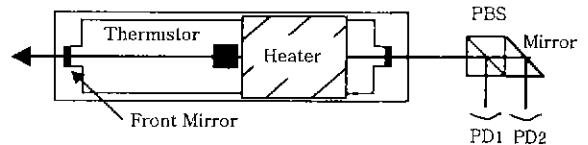


Fig. 1(a) Schematic diagram of laser for power balance stabilization method

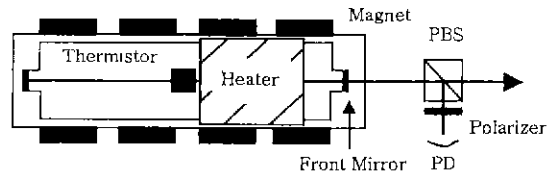


Fig. 1(b) Schematic diagram of laser for beat frequency locking method

Fig. 1(a)는 2모드 파워 발란스 방법에 사용된 He-Ne 레이저로서 플라즈마 튜브 양단에 직경 8mm의 반사경이 장착되어 있으며 레이저 튜브 직경 30mm, 공진기 길이 200mm를 가지고 있으며, 공진 조건이 이루어져 레이저 발진시에 반사율이 작은 전면의 반사경을 통해서 레이저 빔이 나오게 되는데 종모드 사이의 간격이 약 700MHz 정도로 보통 서로 직교하는 편광을 갖는 2모드 발진이 이루어진다. 안정화를 위한 제어 신호는 후방 거울에서 나오는 레이저 광속을 이용하였는데 레이저의 편광축을 편광광속 분리기(PBS)와 일치하도록 하여 광검출기(PD₁)에서는 수직의 편광성분, PD₂에서

는 수평의 편광 성분이 얻어진다. 그리고 공진기의 길이를 제어하기 위해 레이저 튜브 주위에 열선을 감아 플라즈마 튜브의 길이를 조절한다. 그리고 튜브에 부착한 두 개의 온도센서를 이용하여 튜브의 평균온도를 측정함으로써 예열 후 안정화를 시키는 시작점이 항상 일정한 온도에서 이루어지도록 하였다. Fig. 1(b)에는 Zeeman 방식의 맥놀이 주파수 안정화에 사용된 레이저를 나타내었는데, 전체적인 사양은 Fig. 1(a)와 같지만 이 때에는 공진기의 횡방향으로 상하 방향에 자석을 붙여서 자장(약 300Gauss 정도의 특성자장)을 형성하도록 하여 Zeeman 효과에 의해 싱글 모드(Single mode)로 발진이 되며 이 싱글모드가 약간의 주파수 차이를 갖는 수직 수평 두 선형 편광 성분으로 분리된다.

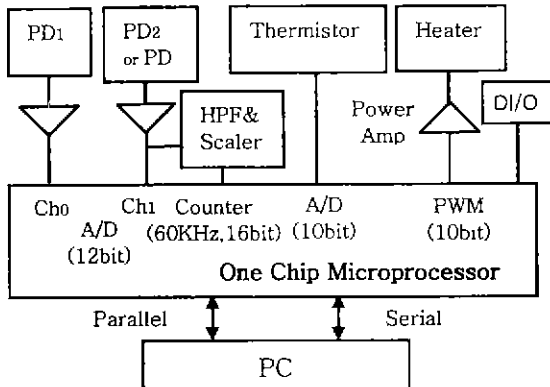


Fig. 2 Block diagram of digital control system for the stabilization of inter-mirror He-Ne laser

Fig. 2에는 내부 반사경형 He-Ne 레이저의 주파수 안정화 실험에 사용된 디지털 제어 시스템의 개략도를 나타내었다. 제어기로는 베이직 인터프리터가 내장된 1 칩 마이크로 프로세서를 사용하였다. 2 모드 파워 발란스 방법의 경우, 광 경로에 편광 광속분할기를 설치하고 2 개의 광검출기를 사용하여 수직 수평 방향의 성분을 검출한다. 이 신호는 적당하게 증폭된 후 마이크로 프로세서의 A/D 변환기에서 디지털화 된 후 소프트웨어적으로 검출신호의 세기 차이를 비교한다. 이 때 광검출기 및 전자 장치의 불안정에 따른 이득 및 오프셋을 소프트웨어적으로 조절하게 된다. 한편 맥놀이 주파수 안정화의 경우는 1 개의 광검출기를 사용해서 맥놀이 주파수를 검출하도록 하였다. 후자의 경우에 얻어진 신호는 고주파 통과 필터를 거쳐 정현파 신호를 사각파로 변환시킨 후 계수기를 이용하여 마이크로 프로세서가 허용하는 주파수 수준까지 낮은 주파수를 계수한다. 이 주파수는 록킹을 위한 기준 주파수(소프트웨어적으로 설정한 안정화 하고자 하는 주파수)와 비교된다. 파워 발란스의 경우 두 편

광 성분의 파워 차이가, 맥놀이 주파수의 경우 기준주파수와 비교한 주파수 차이가 오차 신호가 된다. 이 값은 소프트웨어적으로 증폭되고 누적되어 미분 되어서(PID 회로) PWM(Pulse Width Modulation)을 거쳐 출력된다. PWM 출력은 전류가 증폭된 후 열선에 공급되어 플라즈마 튜브의 길이를 조절하게 된다. 열선을 사용한 온도 제어의 경우 초기에 열선에 전류를 공급하여서 플라즈마 튜브를 상온보다 조금 높은 온도로 가열(Preheating)시킨다. 에너지는 안정화 하려는 방향으로 전달되기 때문에 가열된 레이저 튜브는 시간이 지남에 따라 서서히 식어가는데 즉, 공진기의 길이가 줄어드는데 반대로 열선에 전류를 증가시켜 공진기의 길이를 늘려줌으로써 공진기의 길이를 일정하게 유지시킬 수 있다. 앞에서 설명했듯이 안정화를 이루기 위해서는 플라즈마 튜브는 정상작동 온도보다 높게 유지되어야 되기 때문에 레이저를 "On"한 후 적당한 온도에 도달할 때까지 열선에 전류를 공급하게 된다. 온도검출기의 신호가 설정온도에 도달하게 되면 예열을 중단하고 서보회로를 작동시켜 주파수 안정화를 이룬다. 그리고 앞서 제시한 두 가지의 안정화 방법을 위해서 제어보드에 설치된 스위치의 간단한 조작만으로 각각의 방법을 바로 적용할 수 있게 하였다. 실험에 사용된 제어 알고리즘은 베이직 프로그램으로 작성이 되었으며 컴퓨터의 병렬 포트를 사용해서 제어 프로그램을 로딩하였고 직렬포트를 통해서 각 출력 데이터 들을 입력을 받아 Labview를 사용하여 컴퓨터 화면상에 나타내어 지도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3(a)에 파워 발란스 법을 사용한 주파수 안정화 결과를 나타낸다. 그림에서는 광검출기를 통해서 얻어진 레이저의 2 모드 발진에서 시간에 따른 선형 편광된 수직 수평 방향 성분의 파워 차이의 변화를 보여주고 있다. 초기의 주기적인 결과들은 안정화가 되기 전(Preheating)의 두 성분들의 파워 차이를 나타낸다. 공진기의 길이가 변함에 따라서 각 성분들의 출력 파워도 변하기 때문에 그림과 같은 결과를 보인다. 하지만 플라즈마 튜브가 적당한 온도에 도달하여 서보회로가 작동하게 되면 수직 수평 두 성분의 파워가 같아서 파워 차이가 "0"이 되었음을 확인할 수 있다. 즉, 레이저의 주파수가 안정화 되었음을 알 수 있다. Fig. 3(b)에는 횡자장(Transverse magnetic field) 하에서 Zeeman 분리된 수직 수평 편광 성분의 맥놀이 주파수를 고정시키는 방법을 사용한 실험 결과를 나타내는데, 이 경우에도 마찬가지로 제어가 이루어지기 이전에는 공진기의 길이 변화에 따른 발진 레이저의 수직 수평

방향 두 성분의 맥놀이 주파수가 주기적으로 변하다가 서보회로가 작동하게 되면 일정한 값을 갖게 됨을 알 수가 있다. 이 때 주파수 고정 값은 실험을 통해서 임의의 값을 설정하였으며, 맥놀이 주파수가 설정 치에 고정되도록 하여 주파수 안정화된 결과를 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 주파수 안정화 되기 이전의 결과 그래프에서 불규칙적으로 생기는 신호는 싱글모드(Single mode) 발진에서 2모드(Two mode) 발진으로 바뀐 부분으로 이 부분에서는 안정화를 시킬 수 없다.

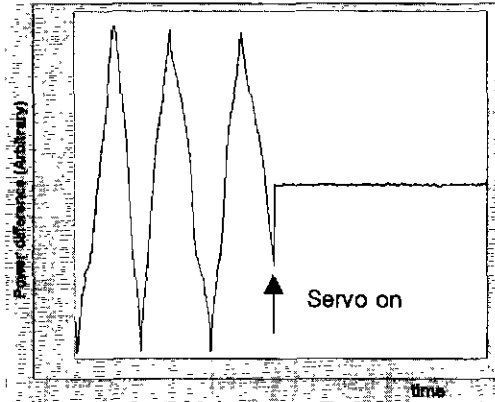


Fig. 3(a) Frequency stabilization result of internal-mirror He-Ne laser by Power balance method

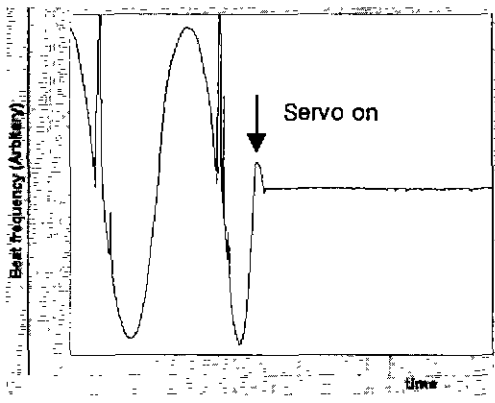


Fig. 3(b) Frequency stabilization result of internal-mirror He-Ne laser by beat frequency locking

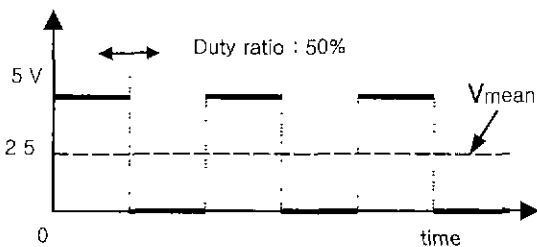


Fig. 4 PWM signal to the heater for the frequency stabilization

그리고 Fig. 4 에는 주파수 안정화를 위해서 제어기로부터 열선에 입력이 되는 PWM 신호를 나타내었다. 열선에 공급할 전류가 클 경우 PWM의 듀티(duty)비를 크게 하고, 작을 경우에는 듀티비를 작게 하여 평균 전류를 조절할 수 있다. 이 방법은 전류증폭기의 부하를 감소시키고 낮은 전압에서 노이즈가 작은 장점이 있다

5. 결론 및 향후 과제

A/D 변환기 등 다양한 입출력 기능이 내장된 윈 칩 마이크로 프로세서를 사용하여 633nm He-Ne 레이저의 주파수를 파워 발란스 방법과 맥놀이 주파수 록킹 방법을 적용하여 각각 안정화 시켰다. 디지털 안정화법을 사용하면 안정화에 필요한 여러 파라미터들을 쉽게 조절할 수 있으며 그 효과를 실시간으로 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한 베이직 언어를 사용하여 프로그램을 작성하기 때문에 디버깅이 쉽고 고가의 마이크로 프로세서 개발장비(MDS)가 없이도 쉽게 프로그램 및 작동상태를 검사할 수 있다. 베이직의 경우 수행속도가 느리나 본 실험에서는 열선으로 제어하기 때문에 충분한 속도를 가지고 있다. 한편, 안정화에 필요한 회로를 간편하게 할 수 있으며 여러 가지 안정화 방식을 하나의 회로에서 구현 시킬 수 있다. 추후에는 원기급 레이저와의 비교를 통한 주파수 안정도와 중심 주파수를 보다 정확하게 확인하여야 할 것이다.

참고문헌

1. A Sasaki, S. Ushimaru, T. Hayashi, "Simultaneous Output- and Frequency-Stabilization and Single-Frequency Operation of an Internal-Mirror He-Ne Laser by Controlling the Discharge Current", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 23, No.5, pp.593-599, May, 1984
2. T. Baer, F.V. Kowalski, and J. L. Hall, "Frequency stabilization of a 0.633 μ m He-Ne longitudinal Zeeman laser", Applied Optics, Vol. 19, No.18 pp. 3173-3177, Sep. 1980.
3. W R C Rowley, "The performance of a longitudinal Zeeman-stabilized He-Ne laser(633nm) with thermal modulation and control, Meas. Sci. Technol., Vol. 1, pp.348-351, 1990
4. N.Umeda, M. Tsukiji, and H Takasaki, "Stabilized He-Ne transverse Zeeman laser", Applied Optics, Vol. 19, No. 3, pp. 442-450, Feb 1980.
5. Mark A. Zumberge, "Frequency stability of a Zeeman-stabilized laser", Applied Optics, Vol. 24, No. 13, pp. 1902-1904, July 1985