

단일모드 헬륨네온레이저를 사용한 초공진기(Super-Cavity)의 주파수 변조 분광연구

서호성 · 윤태현 · 조재홍 · 정명세

한국표준과학연구원 레이저연구실

류갑열 · 김영덕

서강대학교 물리학과

최옥식

영남대학교 물리학과

(1991년 10월 1일 받음)

주파수 변조 분광학(frequency modulation spectroscopy)을 이용하여 레이저 주파수의 안정화를 위한 초공진기의 주파수 변조 신호를 검출하였다. 단일모드 헬륨네온 레이저와 1.5 MHz로 구동하는 전기광학 변조기를 이용하여 $150 \text{ kHz}(3 \times 10^{-10})$ 의 고분해능을 갖는 초공진기의 주파수 변조 신호를 검출하였다. 또 위상민감검출기에 의한 기준신호의 위상이 각각 0° (동위상, in-phase), 90° (직각위상, quadrature phase)인 두개의 주파수 변조 신호 성분을 X축 및 Y축으로 하는 위상공간에서 주파수 변조 신호의 벡터궤적을 측정하고 주파수 변조 분광 신호를 해석하였다. 측정된 벡터궤적은 잠김증폭기(lock-in amplifier)의 기준 신호의 위상과 같은 각도로 회전함을 알았고 Bjorklund 등이 제시한 계수(modulus) 측정 대신에 이 벡터 궤적을 이용할 경우 쉽게 주파수변조 분광 신호의 크기 뿐만아니라 기준 신호의 위상 정보도 얻을 수 있음을 보였다. 측정된 주파수 변조 신호는 공진기 투과 중심 주파수 근방 $\pm 1.5 \text{ MHz}$ 이내에서 헬륨 네온 레이저 주파수가 존재할 때 이 주파수를 공진기의 투과 곡선의 중심에 안정화할 수 있는 주파수 분별곡선으로 사용할 수 있음을 보였다.

I. 서 론

주파수 변조 분광학(FM Spectroscopy)을 측대파법(side band technique)이라고 하여 NMR(Nuclear Magnetic Resonance)을 연구하던 R.V. Pound에 의해서 1946년 마이크로파 안정화에 처음으로 사용되었다.^[1] 광 주파수 영역에 사용되기는 1981년 G. C. Bjorklund와 M.D. Levenson에 의해, 고감도 분광법으로 사용한 것이 처음이었다.^[2] 이와 동시에 R.W.P. Drever 등에 의해 주파수 가변 레이저를 고 피네스(high finesse) 파브리-페롯 에탈론(Fabry-Perot etalon)을 기준으로 하여 레이저 주파수를 안정화하는 기술이 개발 되었다.^[3] 이 기술은 레이저 주파수의 단기 변동을 검출기의 산탄잡음(shot noise) 수준까지 작게 할 수 있는 유력한 방법이다. 주파수 변조 측대파법은 연속발전 색소레이저를 이용한

초고감도분광^[4], 광주파수와 마이크로파 주파수의 직접적인 결합^[5], 차세대 광주파수 표준기 개발을 위한 연구^[6], 중력파 검출을 위한 아르곤 이온 레이저 주파수 안정화^[7] 등 많은 연구에 사용되어 왔다. 특히, 1986년 제 14회 양자전자 국제학회(CPEM)에서 J.L. Hall은 "Phase stable laser"라는 제목의 초청강연에서, 2대의 헬륨 네온 레이저를 이용하여 맥놀이 선폭 100 mHz 이하, 게이트(gate) 시간 1~300 s에서의 알랜(Allan) 분산 제공근은 3×10^{-16} , 위상안정도는 1 rad drift/10 s로 주파수를 안정화 할 수 있었다고 밝혔다.^[8] 이후 많은 주파수 변조 분광연구가 수행되어 왔으며^[9-12] 차세대 광 주파수 안정화기술 등에는 필수적인 것이 되었다.^[13] 최근 고반사율 반사경의 제조기술이 상용화 되고 피네스가 40,000인 초공진기 광학 스펙트럼 분석기(super cavity optical spectrum analyzer)가 시판되어^[14] 기존의 파브리-페롯

광학 스펙트럼 분석기의 분해능보다 100배 이상을 향상시켰다.^[15] 본 논문에서는 주파수 변조분광법의 원리와 특징을 살펴보고 단일 종모드 헬륨 네온 레이저를 이용하여 상용의 초공진기의 주파수 변조 분광신호 검출과 그 특성에 대하여 연구하였다.

II. 주파수 변조 분광학을 레이저 안정화법의 원리와 특징

그림 1은 주파수 변조 분광학을 위한 대표적인 실험 장치를 나타낸 개략도이다. 단일 주파수로 발진하는 레이저의 전기들(electric field) $E_1(t)$ 을 위상변조기로 위상 변조하면 전기들 $E_2(t)$ 를 얻는다. 위상변조된 전기들 $E_2(t)$ 는 시료를 통과하여 시료의 흡수 및 위상특성에 따라 $E_3(t)$ 로 바뀐다. 이 전기들 $E_3(t)$ 를 고속응답 광검출기로 전류신호 $S(t)$ 로 변환한 후 위상민감검출기(phase sensitive detector)로 측정하게 된다. 위상민감검출을 위해서는 위상조절기(phase adjuster)와 라디오 주파수 혼합기(RF-mixer)로 구성하고 혼합기의 기준신호로서는 위상 변조를 위한 라디오주파수 진동자(oscillator)의 신호를 그대로 사용한다. 주파수 변조 분광법을 이론적으로 살펴보면 다음과 같이 된다. 위상변조시에 변조지수 $M < 1$ 이 되도록하여 위상변조된 전기들 $E_2(t)$ 를 베셀(Bessel) 함수로 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 위상변조된 $E_2(t)$ 의 2차 이상의 고차 최대파를 무시한다.

$$E_2(t) \cong E_0 \left\{ -\frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + \exp(i\omega_c t) + \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (1)$$

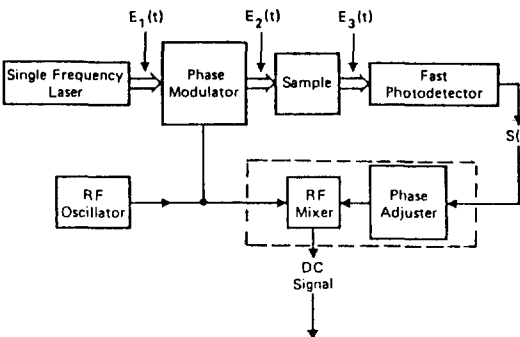


그림 1. A typical experimental arrangement for FM-spectroscopy

여기서, ω_c 는 레이저 광의 각주파수, ω_m 은 변조 각주파수를 나타낸다. 또 E_0 는 변조가 되기전의 전기들의 세기를 나타낸다. 한편, 이 광이 그림 2와 같은 투과 특성을 갖는 시료를 통과하면 투과된 전기들 $E_3(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_3(t) \cong E_0 \left\{ -T_{-1} \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + T_0 \exp(i\omega_c t) + T_{+1} \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (2)$$

여기서 시료의 투과특성을 T_j 라 하였고, 다음과 같이 표현된다.

$$T_j = \exp(-\delta_j - i\phi_j), \quad (j=0, \pm 1) \quad (3)$$

j 는 0, ± 1 로 나타낼 수 있고, 이것은 각각 ω_c , $\omega_c \pm \omega_m$ 에 대한 기호를 나타낸다. 식 (3)에서 δ_j 는 시료의 흡수 함수를 나타내고, ϕ_j 는 분산함수를 나타낸다. 이 투과된 전기들이 광검출기에 검출될때의 광 강도 $I_3(t)$ 는

$$I_3 = c |E_3(t)|^2 / 8\pi \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 c 는 빛의 속도이고, M^2 , $|\delta_0 - \delta_{\pm 1}|$, $|\delta_0 - \delta_{\pm 1}|$, $|\phi_0 - \phi_{\pm 1}|$, 및 $|\phi_0 - \phi_{\pm 1}|$ 은 모두 < 1 이라고 가정해서 I_3 를 계산하면

$$I_3(t) \cong \frac{cE_0^2}{8\pi} \exp(-2\delta_0) [1 + (\delta_{-1} - \delta_1)M \cos \omega_m t + (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0)M \sin \omega_m t] \quad (5)$$

가 된다. 만일, $(\delta_{-1} - \delta_1) \neq 0$, $(\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0) \neq 0$ 이면, (5) 식의 $I_3(t)$ 는 변조 각주파수 ω_m 의 라디오 주파수 신호와의 맥놀이 신호를 갖는다. 즉, 그림 1과 같이 위상 민감 검출법에 의하여 진폭 $(\delta_{-1} - \delta_1)M$ 과 $\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0$ 을 측정할 수 있다.

이때, $\omega_m < \delta \Omega / 2$ 일때에는 (여기서, $\delta \Omega$ 를 시료의 흡수곡선의 반치전폭(FWHM)) 동위상 신호진폭은 흡수곡선의 미분에 비례하고 직각위상 신호 진폭은 $\{(\phi_1 - \phi_0) - (\phi_0 - \phi_{-1})\}$ 로 표현되므로 분산곡선의 2차 미분에 비례하게 된다. 그러나, 그림 2에 나타낸 바와 같이 $\omega_m > \delta \Omega / 2$ 경우에는 동위상 신호는 +1차 최대파에 의한 흡수곡선과 -1차 최대파에 의한 흡수곡선의 차이가 된다. 즉, 레이저 주파수를 주사해 보면 동위상 신호와 직각위상 신호는 각각 흡수곡선의 차이 $(\delta_{-1} - \delta_1)$ 와 분산 곡선들의 차이 $(\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0)$ 로 식별해 됨을 알 수 있다. 주파수 변조 분광신호의 모양을 살펴 보기

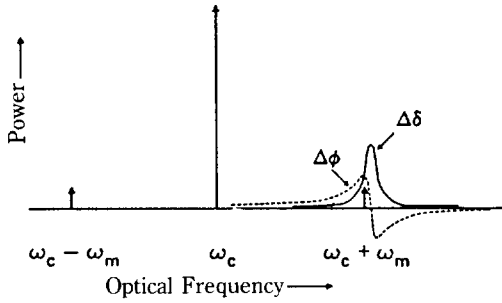


그림 2. Frequency domain illustration of FM spectroscopy

위해서 시료의 흡수곡선이 로렌츠안(Lorentzian)이라고 가정하면 흡수곡선 $\delta(\omega)$ 와 분산 곡선 $\varphi(\omega)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

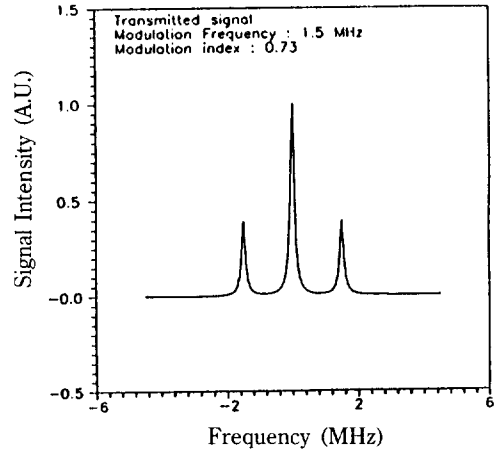
$$\delta(\omega) = \delta_{peak} \frac{1}{R^2(\omega) + 1} \quad (6)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_{peak} \frac{R(\omega)}{R^2(\omega) + 1} \quad (7)$$

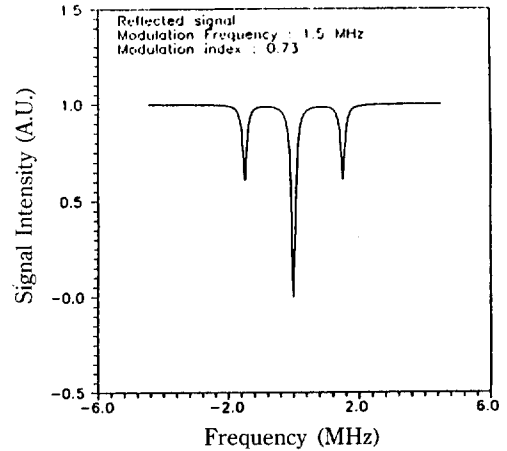
여기서 $R(\omega)$ 는 규격화된 주파수를 나타낸 것인데

$$R(\omega) = \frac{\omega - \Omega}{(\Delta \Omega / 2)} \quad (8)$$

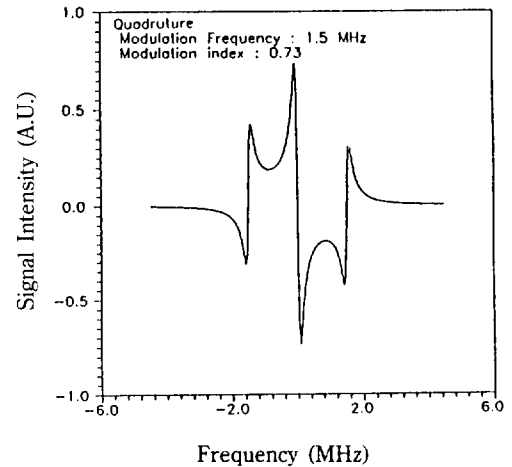
이다. 시료를 피네스가 40,000, $\Delta \Omega = 150$ kHz, FSR=6 GHz인 초공진기로 가정하여 공진기에 반사된 광을 이용한 주파수 변조 신호를 계산하였다. $\omega_m / \Delta \Omega = 10$ 으로 가정하고 (6), (7) 및 (8) 식을 이용하여 두 주파수 변조 분광신호인 $\cos \omega_m t$ 와 $\sin \omega_m t$ 의 진폭을 계산한다. 여기서 $\omega_m = 1.5$ MHz, $\Delta \Omega = 150$ kHz, $M = 0.73$ 으로 하여 이들을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 a)는 변조지수(modulation index) $M = 0.73$, 변조주파수 1.5 MHz로 레이저 광을 위상변조하여 $\Delta \Omega = 150$ kHz인 초공진기를 투과하였을 때의 공진기의 투과 스펙트럼을 나타내었다. 그림 3 b)는 초공진기의 반사 스펙트럼을 나타내었다. 그림 3 c)는 동위상 주파수 변조 분광신호를 나타내었고 그림 3 d)는 $\sin \omega_m t$ 의 진폭인 직각위상 주파수 변조 분광신호를 나타내었다. 동위상신호 선폭은 공진기 투과 및 반사 스펙트럼 선폭과 같은 150 kHz가 되고, ± 1 차 측대파에 의한 흡수곡선의 최고값은 변조 주파수의 2배(3 MHz)로 분리되어 있다. 또는 직각위상 분광신호는 각각 주파수가 $\omega_c - \omega_m$ 에서 ω_c 까지는 + 값을, ω_c 에서 $\omega_c + \omega_m$ 까지는 - 값을 갖는 분산형 신호가 됨을 알 수



a) Transmitted Signal

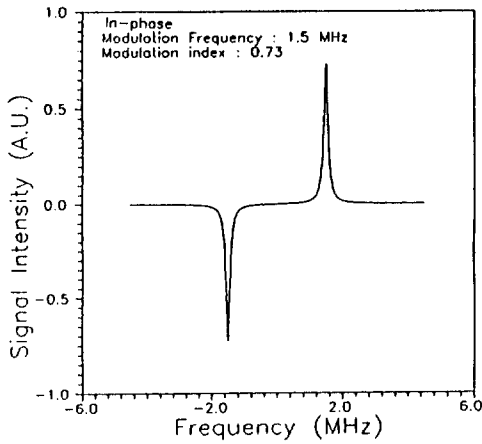


b) Reflected signal

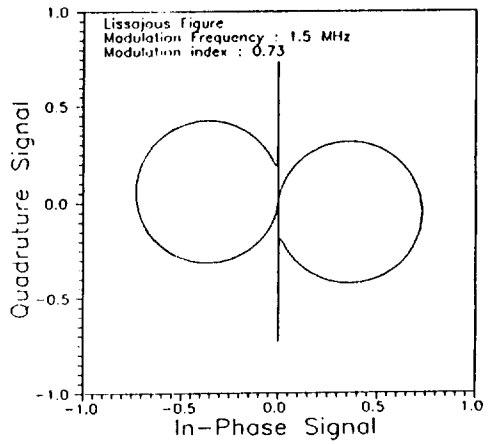


Frequency (MHz)

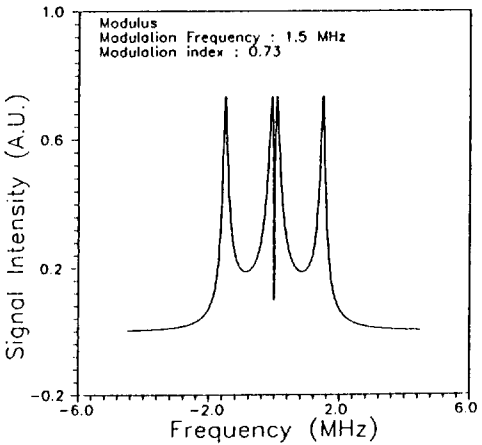
c) Quadrature



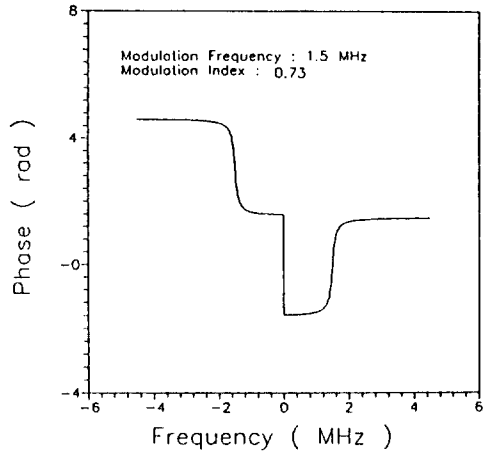
d) In-phase



f) Lissajous



e) Modulus



g) phase

그림 3. Theoretically calculated FM signals

있다. 공진기의 투과 선폭 $\Delta\Omega$ 의 20배 정도 폭을 갖는 분산형 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 주파수 변조 분광 신호의 진폭크기로 나타나는 계수를 그림 3 e)에 나타내었다. 직각위상 주파수 변조 분광신호 진폭을 $Y(\omega)$ 라고 하면 원통 좌표로 나타낸 주파수변조 신호 크기 R 을 벡터로 나타내면

$$R(\theta) = R(\theta) \hat{r} \tag{9}$$

이 되고 $R(\theta)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(\theta) = (X^2 + Y^2)^{1/2} \tag{10}$$

으로 주어지고 위상 θ 는

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \tag{11}$$

로 표현된다. 이들 식 (9)와 식 (11)로 나타낸 곡선을 그림 3 f)와 g)에 나타내었다. g)에서는 $0 \sim 2\pi$ 에 모든 부분에 θ 가 존재하므로 주파수 변조 신호의 벡터궤적 $R(\theta)$ 은 1, 2, 3, 4상한 모든 존재함을 뜻한다. 이상에서와 같이 우리는 주파수 변조 신호의 형태에 대하여 살펴보았다. 본 논문에서는 헬륨 네온 레이저를 사용하여 상용 초공진기 에탈론의 주파수 변조 분광신호를 검출하여 그 신호의 특성에 대하여 기술하였다.

III. 실험 및 해석

그림 4에는 본실험에 사용한 Pound-Drever 법^[3]이라 불리는 장치도를 나타낸 것이다.

헬륨 네온 레이저는 단일모드 발진하는 내부 반사경형(Melles Griot #660)을 사용하였다. 레이저 방전용 전원으로 처음에는 스위칭 전원 공급기(switching power supplier)를 사용하였는데 스위칭 주파수 잡음 때문에 초공진기의 고분해 분광신호를 검출할 수 없었으므로 정전류 원(HP 6516A)에 바꾸어 사용하였다. 레이저광은 패러데이 회전기(Faraday rotator, FR)를 이용한 광차단기(Isolator)를 통과하고 전기광학 위상변조(Electrooptic Phase Modulator, Gsanger社 LM-0202)를 통과하면, 위상 변조가 된다. 이때, 라디오주파수 신호발생기(HP 8656 B, 1.5 MHz)로부터 나온 라디오주파수신호는 라디오주파수 증폭기(RF-amplifier社, #110A)를 통하여 임피던스 맞춤(impedance matching)용 공진변압기(resonance transformer, IMT, TDK社의 고속 Ferrite core-K-6A를 이용하여 자체 제작)을 통하여 위상변조에 공급하였는데 이때 사용된 라디오주파수 출력은 0.2 watt 정도로써 이는 변조지수를 0.73에 해당하는 값이었다. 위상변조기를 통과한 수평편광된 레이저광은 편광 빔살가르계(polarizing beamsplitter, PBS)를 통과하고 또, 패러데이 회전기를 통과하면 원편광이 되고 다시, 조리개 ID를 통과하고 결맞춤(mode matching) 렌즈 L을 통하여 피네스가 약 40,000, 자유분광범비(free spectral range, FSR)가 6

GHz(이때 공진기의 분해능 $\Delta\Omega = 150$ kHz 이다)인 초공진기로 입사되어 PD1에서 검출된다. 오실로스코프 1을 이용하여 그 투과된 스펙트럼을 관찰한다. 한편, 공진기에서 반사된 원편광된 레이저광은 다시 FR를 통과하면 수직선편광이 되어 편광 빔살가르계에서 반사되어 고속 광검출기 PD2(실리콘 avalanche photodiode, HAMAMATSU #S2382 사용)에 입사된다. 입사된 광신호는 검출기 PD2에서 전류신호로 바뀌어져서 콘덴서를 통과할때 직류(dc)신호는 차단 되고 교류(ac) 신호만 고속 잠김증폭기(Eg&G 5202)의 입력단과 오실로스코프 2에 입력된다. 또, 잠김증폭기의 기준신호는 위상변조기에 사용된 라디오주파수 신호를 사용한다. 잠김증폭기 출력단에서는 기준 신호의 위상에 따라 동위상(0°) 출력 신호와 직각위상 출력 신호(90°)로 분리되며 오실로스코프 3,4를 이용하여 검출한다. 또 이들 두 신호들 간의 리자쥬 그림(Lissajous figure, 주파수 변조 신호의 벡터 궤적)를 확인하기 위해서 또 다른 1대의 오실로스코프 5를 이용하였다. 한편 25 Hz 경사(ramp) 신호발생기로 초공진기의 길이를 주사하고, 이 경사 신호는 오실로스코프 1, 2, 3, 4의 X축 신호로 입력한다. X축에 공진기의 길이에 비례하는 경사 신호 입력을 하였으므로 X축은 주파수 축이 되어 오실로스코프로 스펙트럼을 관찰할 수 있게 된다. 이렇게 하여 측정된 각 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다.

그림 5의 a)는 위상변조된 레이저 광이 초공진기를 투과한 스펙트럼인데, 나르케 신호(carrier signal)의 크기(Bessel 1종 함수의 $J_0(M)$)와 1차 측대과 신호의 크기($J_1(M)$)의 비로 부터 변조지수 $M=0.73$ 인 것을 안다. 또 변조주파수(1.5 MHz)와 스펙트럼폭으로부터 초공진기의 분해능은 이론에서와 같이 약 150 kHz 정도임을 알 수 있었다. 또, 그림 5의 b)는 초공진기에서 반사된 레이저 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 5의 a) 신호와 마찬가지로 같은 변조지수를 갖는 신호크기를 나타내나 극성이 반대이다. 그림 5의 c)신호는 동위상 주파수 변조 신호로서 각 최고(peak)선은 공진기 투과곡선과 같이 150 kHz의 선폭을 나타내었고 두 선간의 간격은 변조 주파수의 2배인 $2f_m$ (3 MHz)이다. 그림 5의 d)는 직각위상 신호로써 레이저 주파수 안정화를 위한 분별곡선으로 사용할 수 있는 것으로써 레이저 주파수가 초공진기의 투과곡선의 최대값과 일치할 때 이 곡선의 가운데 부분인 영교차(zero-crossing) 점이 되고 이 점을 중심으로 하여 양쪽 $\pm f_m$ (± 1.5 MHz) 위치에서 다시 영교차 하는 점이 존재하게 된다. 레이저의 주파수가 $f_c \pm f_m$ 이내에 존재하게 되면 이 신호를 이용한 피드백회로(feed-back cir-

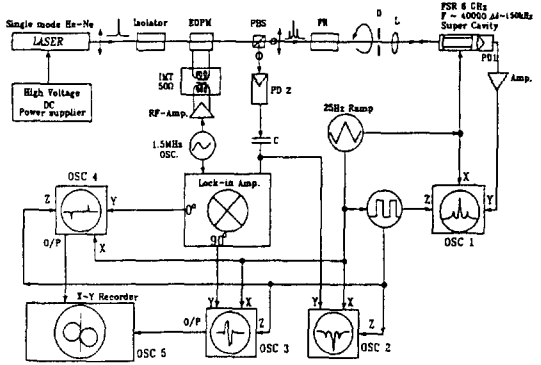
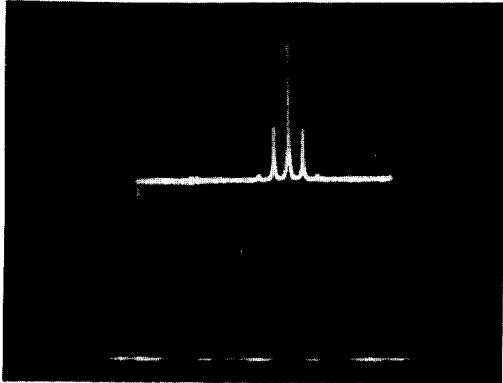
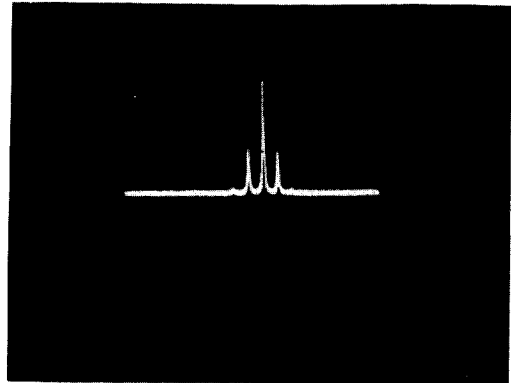


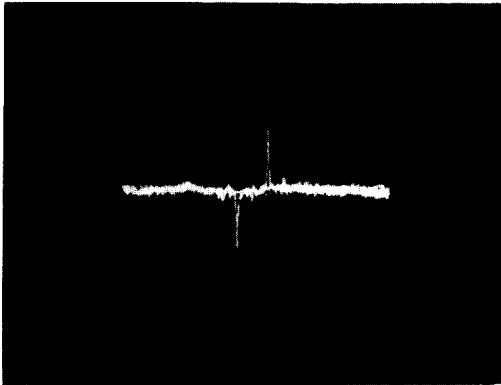
그림 4. Experimental set-up for FM spectroscopy of super-cavity.
 PD: photodetector, OSC: oscilloscope, C: capacitor, IMT: impedance matching transformer, EOPM: electro-optic phase modulator, PBS: polarizing beamsplitter, FR: Faraday rotator, ID: Iris diaphragm, L: lens



a) transmitted



b) reflected



c) in-phase



d) quadrature



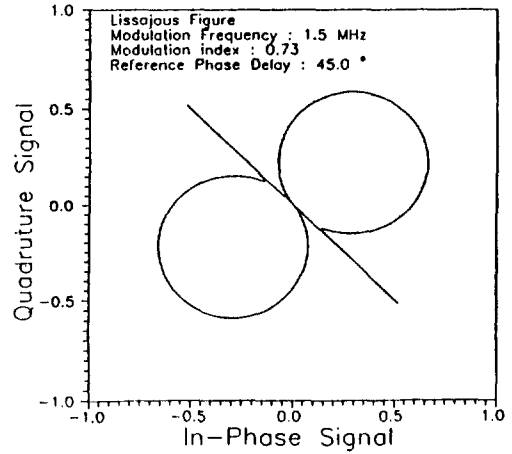
e) vector locus

그림 5. Measured FM signals

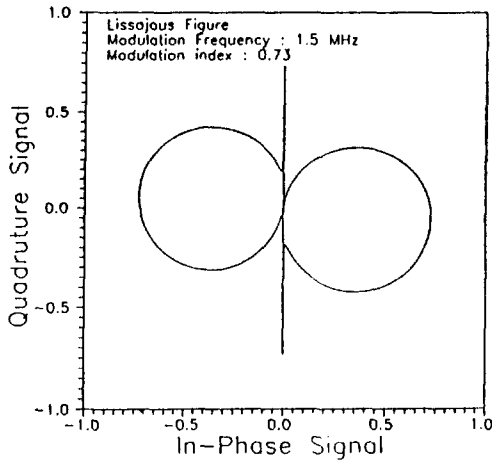
cuit)에 의한 레이저 주파수 자동제어가 가능함을 말해 준다. 한편, 동위상과 직각위상의 두 주파수 변조 신호로부터 주파수 변조 신호의 크기인 계수(ref. 16의 그림 3(e)) 측정법에 대해서 Bjorklund¹⁶⁾ 등은 기술하고 있다. 그와 같은 계수 측정은 라디오주파수 스펙트럼 분석기의 신호 추적 방식(signal tracking mode)으로 측정하거나, 아날로그 신호연산기를 이용한 측정이 가능하다. 추적 속도에 제한을 받는 것이나 또 아날로그 신호연산기를 제작해야 하는 불편이 있다. 본 연구에서는 두 주파수 변조신호를 이용한 리싸쥬 그림을 측정함으로써 Bjorklund 등이 제시한 계수의 정보를 포함하는 주파수 변조 신호의 벡터궤적을 그대로 얻을 수 있었다. 또 기준신호의 위상정보까지 포함하고 있어서 정확한 동위상이나 직각위상 주파수 변조신호 검출을 할 수 있게 할 뿐 아니라, 주파수 변조신호의 진폭이나 위상을 오실로스코

코프 상에서 쉽게 알 수 있다. 잠김증폭기에 입력되는 기준신호의 위상에 따른 (9)식과 같은 벡터궤적 $R(\theta)$ 의 변화를 살펴보기 위하여, 잠김증폭기 내부 위상지연기를 이용하여 위상지연 $\Delta\theta$ 에 따른 $R(\theta)$ 의 변화를 조사하였다. 그 결과 오실로스코프에 나타난 벡터궤적 $R(\theta)$ 는 그림 6과 같이 기준신호의 위상 지연 $\Delta\theta$ 에 따라 같은 각도로 회전함을 관측하였다. 그림 6의 a) b) c) d) e)는 각각 기준신호의 위상지연 0° , 22.5° , 45° , 67.5° , 90° 일때의 벡터궤적이다. 그림 7에서는 측정된 벡터궤적의 회전을 보여주고 있는 그림을 나타내었다.

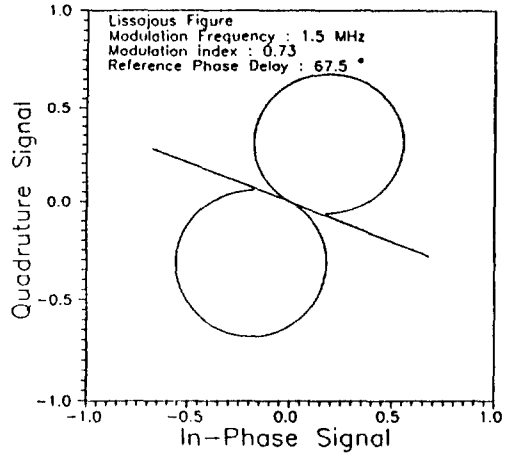
그림 6이나 7에서 한글 “응”자 모양 벡터궤적의 그림 중 “-”획의 직선의 기울기는 레이저 주파수가 초공진기 투과곡선의 최대값 근방에서 동위상 신호와 직각



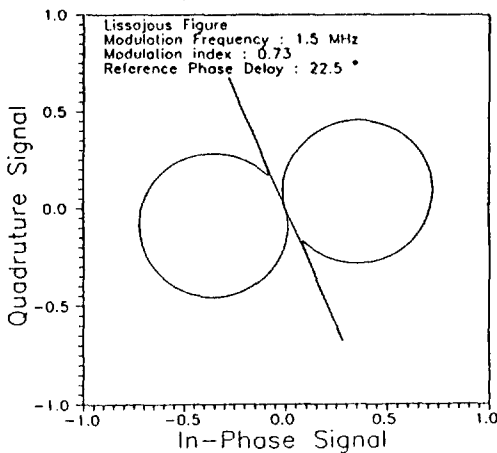
c) $\Delta\theta = 45^\circ$



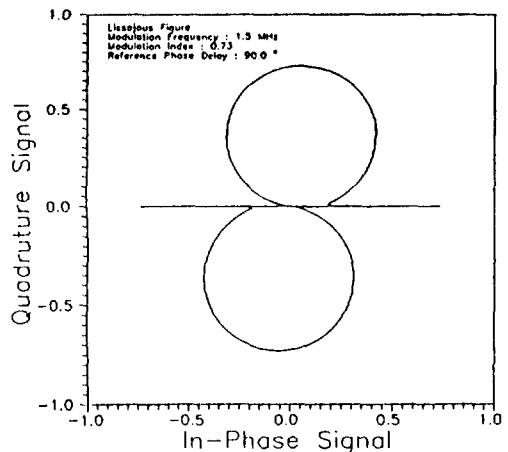
a) $\Delta\theta = 0^\circ$



d) $\Delta\theta = 67.5^\circ$

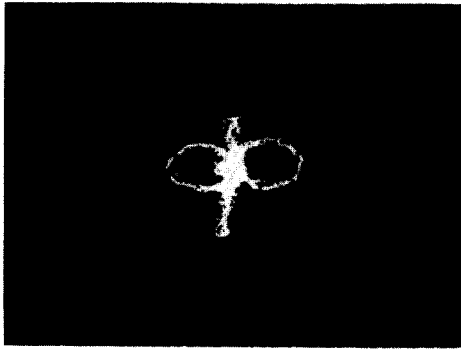


b) $\Delta\theta = 22.5^\circ$



e) $\Delta\theta = 90^\circ$

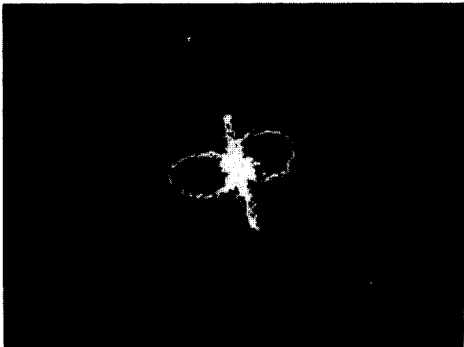
그림 6. Measured vector locus of FM signals



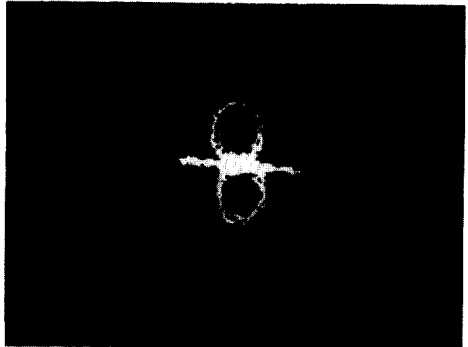
a) $\Delta \theta = 0^\circ$



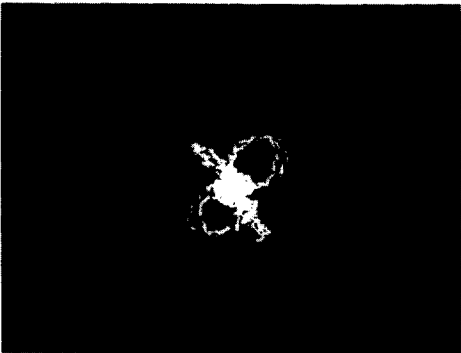
d) $\Delta \theta = 67.5^\circ$



b) $\Delta \theta = 22.5^\circ$



e) $\Delta \theta = 90^\circ$



c) $\Delta \theta = 45^\circ$

그림 7. Rotation of vector locus of FM signals

위상 신호에 의해 만들어 지는데 기준신호의 위상지연이 "0" 때, "-" 획의 직선기울기가 유한한 값(∞ 가 아니고)을 갖는다는 것은 실제 동위상 신호가 $\omega=0$ 근방에서 0이 아닌 기울기를 갖거나 잠김증폭기의 위상민감 검출시 측정 전자회로 상에서 위상지연에 의한 것으로 해석될 수 있다. 이와같은 벡터궤적의 회전을 이용하면 주파수

변조 신호검출시에 기준신호의 위상을 정확히 맞추어 줄 수 있으므로 주파수 변조분광신호를 정확한 위상으로 검출할 수 있게한다.

IV. 결론 및 토의

본 논문에서는 최근에 개발되어 고분해 분광학 연구에 많이 사용되고 있는 주파수 변조분광법과 단일모드 헬륨 네온 레이저를 사용하여 피네스가 40,000인 고분해능 초공진기(분해능 150 kHz)의 반사광에 의한 주파수 변조분광신호 검출에 대하여 연구하였다. 1.5 MHz의 라디오주파수 위상변조(변조지수 $M=0.73$)를 위해, KDP 전기광학(electro-optic) 위상변조기에 0.2 watt의 라디오주파수 신호를 인가하는데 1.5 MHz의 공진변압기를 고속 페라이트코아에 에나멜선을 감아서 임피던스 맞춤이 되도록하여 사용하였다. 주파수 변조 신호검출을 위해서는 Pount-Drever법이라 불리는 실험장치를 설치하여 고속 애버랜치 광검출기(avalanche photodiode)를 이용하여 고분해능 초공진기로 부터의 레이저 반사광을 검출하여 고속 잠김증폭기 사용하여 위상민감검출을 하였다. 잠

김증폭기의 출력 단자 1과 단자 2로 부터, 150 kHz의 선폭을 갖는 고분해능 초공진기의 흡수형 주파수 변조 분광 신호와 레이저 주파수 분별 곡선에 사용하기 적합한 3 MHz폭의 분산형 주파수 변조 분광 신호를 각각 얻었다. 이 3 MHz폭의 분산형 분광 신호는 그 공진기의 공진주파수를 중심으로한 점대칭 함수이고 중심에서 영교차를 함으로 레이저 주파수 자동제어를 위한 주파수 분별 곡선으로 사용할 수 있다. 이 분별 곡선의 주파수 제어 대역은 공진기의 투과 대역폭(150 kHz)의 20배가 되므로 고속 주파수 제어에 사용할 수 있어서 차후 이 분별 신호를 이용할 경우에 레이저의 주파수 안정화 뿐 아니라 위상 안정화를 가능케 해줄 수 있다. 또, 주파수 변조신호의 진폭을 측정하기 위하여 Bjorklund가 제시한 계수측정법 보다 쉬운 두 주파수 변조 신호의 리싸쥬 그림을 측정하므로써 주파수 변조분광신호의 벡터궤적을 측정할 수 있었다. 이 벡터 궤적은 주파수 변조 분광 신호의 크기인 계수에 대한 정보 뿐만아니라 기준신호의 위상에 대한 정보도 오실로스코프 화면에 직접 나타내 주므로, 이것을 이용하면 정확한 동위상의 흡수형 분광 신호나 정확한 분산형 분광신호 검출이 가능하다. 이것을 확인하기 위하여 잠김증폭기 기준신호의 위상지연에 따른 리싸쥬 벡터궤적 회전 현상을 확인하였다. 즉, 벡터 궤적은 잠김증폭기 기준신호의 위상지연 각과 똑같은 각도로 회전함을 알 수 있었다. 그러므로, 차후에 초공진기의 주파수 변조 신호와 그 리싸쥬 신호는 각각 헬륨 네온 레이저의 위상 안정화 및 시료의 주파수 변조 신호

확인이나 정확한 기준 신호의 위상에서의 분산형 또는 흡수형 분광신호 검출에 사용할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. V. Pound, Rev. Sci. Instrum. **17**, 490 (1946).
- [2] G. C. Bjorklund and M. D. Levenson, Phys. Rev. **A24**, 166 (1981).
- [3] R. W. P. Drever, et. al., Appl. Phys. **B31**, 97 (1983).
- [4] G. C. Bjorklund, Opt. Lett. **5**, 15 (1980).
- [5] R. G. DeVoe and R. G. Brewer, Phys. Rev. **A30**, 2827 (1984).
- [6] J. Helmcke, et. al., Appl. Phys. **B43**, 85 (1987).
- [7] G. A. Kerr, et. al., Appl. Phys. **B37**, 11 (1985).
- [8] J. L. Hall, J. Opt. Soc. Am. **B3**, 80 (1986).
- [9] I. Steiner, et. al., Appl. Phys. **B49**, 251 (1989).
- [10] M. D. Rayman, et. al., J. Opt. Soc. Am. **6**, 539 (1989).
- [11] K. Sugiyama, et. al., Opt. Lett. **13**, 556 (1988).
- [12] R. Kallenbach, et. al., Opt. Com. **70**, 56 (1989).
- [13] A. Morinaga, et. al., Jan. Jour. Appl. Phys. **29**, L1727 (1990).
- [14] NRC catalog, page L-2 (1989).
- [15] Burleigh Catalog, *Fabry-Perot Interferometers and Etalons*, FPIE 302, 583.
- [16] G. C. Bjorklund and M. D. Levenson, Appl. Phys. **B32**, 145-152 (1983).

Frequency Modulation Spectroscopy of a Super-Cavity using a Single Mode He-Ne Laser

Ho Suhng Suh, Tai Hyun Yoon, Jae Heung Jo and Myung Sai Chung

KRISS, Laser Lab.

Gap Youl Lyu and Yongduk Kim

Sogang University, Dept. of Physics

Ok Shik Choe

Youngnam University, Dept. of Physics

(Received: October 1, 1991)

Frequency modulation spectroscopy of the super-cavity, of which finesse is app. 40,000 has been demonstrated by using a single mode He-Ne laser. In-phase and quadrature components of frequency modulation signals (FM signal) were obtained by using the 1.5 MHz-driven-electrooptic phase modulator. The vector locus of the FM signal in the phase space, which is consisted of in-phase and quadrature components of the FM signal, was observed and analyzed for the dependence of FM signal upon the phase of the reference signal of a phase-sensitive-detector. According to rotating the phase of the reference signal, the vector locus was observed to rotate with the same phase angle as the reference signal. The in-phase component of the FM signals will be used to stabilize the frequency of the He-Ne laser to the resonant frequency of the super-cavity.