

투과광 스펙트럼 측정법을 이용한 링레이저 공진기의 광학적 정렬

전형욱 · 최용진 · 이기홍* · 신상훈 · 이혁수 · 손정영

한국과학기술연구원 3차원영상그룹

*한양대학교 물리학과

(1997년 8월 20일 받음)

링 레이저 공진기를 광학적으로 정렬하는 방법은 여러 가지가 있지만, 투과광 스펙트럼 측정법(cavity transmission spectrum control)은 측정이 매우 간단하고 공진기의 손실을 측정하면서 동시에 정렬을 할 수 있는 장점이 있다. 투과광 스펙트럼 측정법을 이용한 공진기의 광학적 정렬 장치를 구성하여, 레이저 자이로스코프에 사용할 링형 공진기에 모두 네 개의 반사경을 정렬 부착시켰으며, 동시에 정렬한 공진기의 내부 손실 값을 측정했다. 그 결과 최소 내부 손실은 0.98%였으며, 네 개의 반사경에 대한 총 반사 계수는 99.02%로 계산된다.

I. 서 론

링 레이저의 공진기를 이루는 중요한 요소가 반사경이며, 특히 반사경의 정렬 상태에 따라 공진기 내부 손실의 대부분이 결정되므로, 레이저 공진기의 성능은 반사경의 정렬에 따라 좌우된다고 할 수 있다. 하지만 공진기의 손실이 매우 작으므로 측정하기도 어렵고 공진기의 손실 측정과 광학적 정렬이 이원화되어 있는 경우에는 손실 측정 후에 다시 일체형 공진기에 부착된 반사경을 떼어서 광학적 정렬을 하여야 하는 어려움이 있다.

공진기 정렬을 위한 손실 측정 방법에는 위상 측정법(phase shift method)^[1], 감쇄 시간 측정법(decay time method)^[2], 투과광 스펙트럼 측정법(cavity transmission spectrum control method)^[3] 등이 있다. 이 방법들은 각각 장단점을 갖고 있으며, 측정할 수 있는 정밀도도 서로 다르다. 위상 측정법^[1]은 광원으로부터 나온 빔을 기준 광선과 정렬할 공진기를 통과한 후의 광선으로 나누어 두 빔의 위상차(phase difference)를 측정하여, 공진기의 손실 σ 를 계산한다. 내부손실 측정의 범위는 0.01~3%이며, 여러 모드에서 손실측정이 가능하지만, 입사빔을 정렬할 공진기의 모드로 맞추기 위한 자동 정합 시스템(autotuning system)의 제작이 필요하다. 감쇄 시간 측정법^[2]은 공진기에 광을 입사시켜 공진기 내의 빛이 사라질 때까지의 공진기가 갖는 감쇄 시간을 측정하는 방법이다. 따라서 일반적으로 50ns 이상이 되지 않게 외부 광원의 차단을 매우 빠르게 하여야 한다. 감쇄 시간과 공진기의 손실은 반비례의 관계를 갖고 있으며 이 방법에 의한 공진기의 손실 측정 해상도는 0.0005%이다. 외부 광원으로 연속파를 사용하는 경우는 공진기의 축모드와 일치하는 외부 광원의 주파수를 맞추기 위한 모드 정합 장치가 필요하며, 펄스 레이저를 사용할 경우에는 광원 레이저의 출력빔에는 많은 축모드가 있으므로 모드의 정합은 필요하지 않다. 일반적으로 저손실 공진기의 감쇄 시간은 0.1~50 μ s 정도이므로 측정장비의 전자적 처리 속도가 이 측정의 정밀도를 좌우하게 된다.

위상 측정법은 반사경의 정렬에 따른 공진기 길이의 변화가 생길 때 다시 자동 정합 되어야 하며, 감쇄 시간 측정법도 공진기에 광을 입사시킨 다음 그 광이 소멸될 때까지의 시간을 측정하는 것이므로 그 사이에 공진기의 정렬 상태를 바꿀 수는 없다. 하지만 투과광 스펙트럼 측정법^[3]은 외부 광원으로 사용하고 있는 레이저의 공진기 길이를 변화시켜 연속적으로 발진 파장을 바꾸어 줌으로서 반사경의 정렬에 따른 공진기 길이의 변화에 관계없이 입사광을 정렬할 공진기에 공진시킬 수가 있어 정렬과 동시에 측정을 할 수가 있다. 내부 손실 측정의 범위는 0.01~5%이다.

본 연구는 투과광 스펙트럼 측정법을 이용한 방법으로 본 연구실에서 제작한 링 레이저 자이로스코프용 링 공진기의 손실을 측정하면서 공진기의 반사경을 정렬하는 기술에 대해 논의한 것이다.

II. 공진기 내부의 손실 계산

본 논문에서 사용한 공진기의 구성은 그림 1과 같다. 공진기의 주변 길이가 16 cm인 이방성 링 공진기(circular anisotropic resonator)로서, 공진축과 거울면 접선의 사이각은 22.5°로써, 고반사율을 가진 4개의 거울을 지나온 광선은 90°의 분극회전이 일어나게 설계된 것이다. 그림 2는 비평면형 공진기의 입력 주파수와 출력 주파수와와의 관계로 정렬할 공진기의 공진 모드가 모드간격과 반사율에 대한 출력 주파수의 에어리 함수(Airy's function)를 나타내고 있다. 거울의 반사율이 높을수록 출력은 뾰족해지며, 반사도가 낮아지거나 광학적 정렬이 되어 있지 않았을 경우에 출력 펄스폭이 넓어진다.^[4]

공진기 내에서 일어나는 손실은 흡수, 산란, 회절 등 다양한 요소들에 의해 발생하지만, 상당 부분이 반사경에 의한 것이므로 반사경의 반사도와 정렬상태가 상당히 중요하다. 공진기 내에 출력을 증가시킬 이득 매질이 없는 경우에 공진기의 특성 계수(Finesse) F 는 공진기 내에서의 손실 σ 과 다음과 같은 관계를 갖는다.^[4]

III. 실험 및 결과 분석

3.1. 실험 장치

실험장치는 그림 3과 같이 빔을 공진기에 입사시키기 위한 부분과 공진기로부터 나온 빔을 검출해서 측정하는 두 부분으로 구성하였다. 외부 광원의 빔을 비평면형 공진기로 최대한 입사시키기 위해서 빔의 경로 및 편광 방향을 조절할 수 있는 미세 조정이 가능한 모드 정합 장치(mode matching system)가 있다. 그리고 공진기를 통과하고 나온 투과광의 펄스폭과 자유대역폭(free spectral range)을 측정하는 손실 측정 장치(loss measurement part)가 있다. 그림 4는 공진기 본체와 공진기에 부착 정렬시킬 4개의 반사경이다. 중요한 구성 요소들의 구비 조건과 역할 및 특성은 다음과 같다.

3.1.1 광원

사용한 광원은 15 Oersted의 영구자석으로 선형 편광을 발진하는 선형 헬륨-네온(He-Ne, 파장 6,328 Å) 레이저이며, 출력이 약 200 μW이다. 광원의 공진 길이가 측정하려는 공진기의 길이와 비슷하여야 하므로 공진기 길이(평면경과 구면경 사이)는 100 mm인 레이저였으며 이로 인하여 레이저의 이득 곡선 안에는 2개 정도의 종모드가 있다. 측정에 필요한 범위의 주파수를 얻기 위해서 전반사 구형 반사경에는 피에조 변환기(PZT)를 부착하여, 공진기의 길이를 약 1 μm 정도 변화시킬 수 있게 하였다. 이때 피에조 변환기의 진동 주파수는 약 10~18 Hz가 되게 하였다. 광원으로부터 나오는 빔은 피에조 변환기에 의해 일정한 파장영역을 일정한 시간 간격동안 연속적으로 발진되어 나온다. 따라서 공진기 길이 변화에 따른 주파수의 변화폭은 정렬할 공진기의 이웃한 두 개의 모드에서 공진이 된다. 그림 5(a)는 광원의 시간에 따른 출력 주파수의 변화이며 주파수 ν_1 와 ν_2 는 정렬할 공진기의 공진 모드에

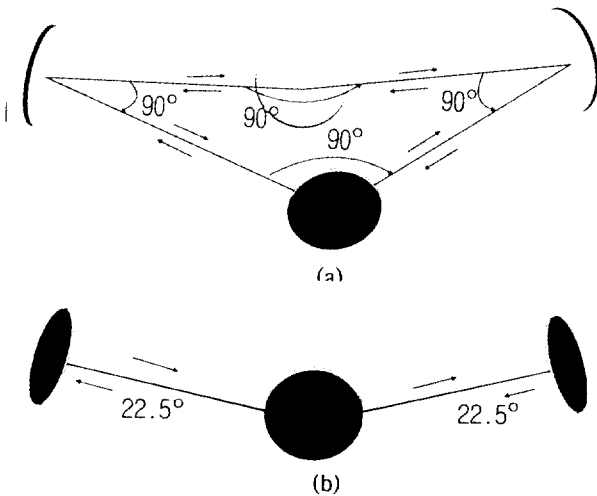


그림 1. 비평면형 공진기의 구성. (a) 공진기의 비스듬한 모습과 (b) 공진기의 옆모습.

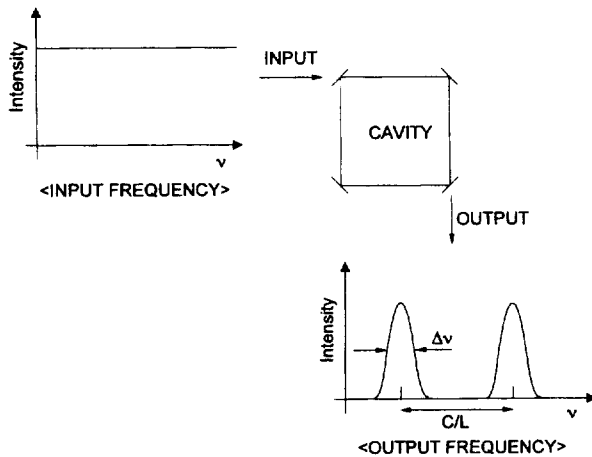


그림 2. 투과광 스펙트럼 측정법.

$$F = \frac{2\pi}{\sigma} \quad (1)$$

이 경우에 공진기 내의 손실은 반사경의 정렬 상태에 따른 회절 손실이 가장 큰 부분을 차지한다. 입력하는 외부 광원의 파장을 시간에 대해 일정하게 연속적으로 변화시키면 공진 주파수는 다음과 같은 특성 계수의 관계를 갖는다.

$$F = \frac{T}{\Delta\tau} \quad (2)$$

여기서 T 는 그림 2와 같이 이웃하고 있는 공진 모드의 시간 간격이며, $\Delta\tau$ 는 두 공진 펄스의 평균 시간 폭이 된다.

따라서 공진기 내의 손실은

$$\sigma = 2\pi \frac{\Delta\tau}{T} \quad (3)$$

로 주어진다. 공진기 내부 손실은 투과 펄스폭에 비례하기 때문에 투과 펄스폭 측정값이 최소가 되도록 공진기의 반사경을 정렬하면 공진기의 성능을 향상시킬 수 있다.

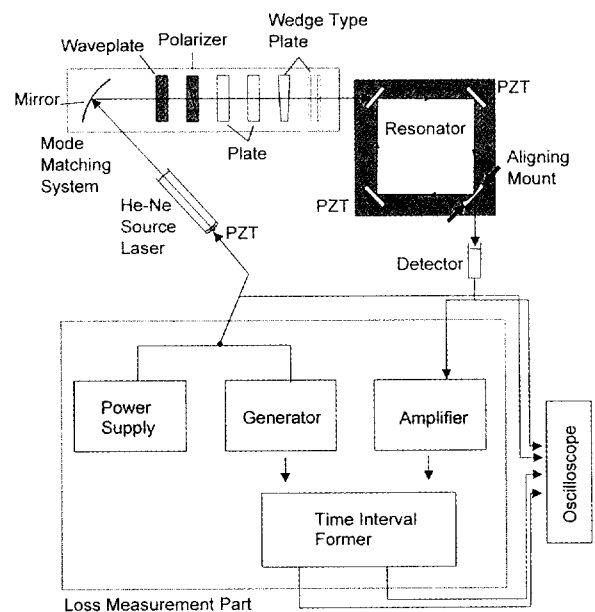
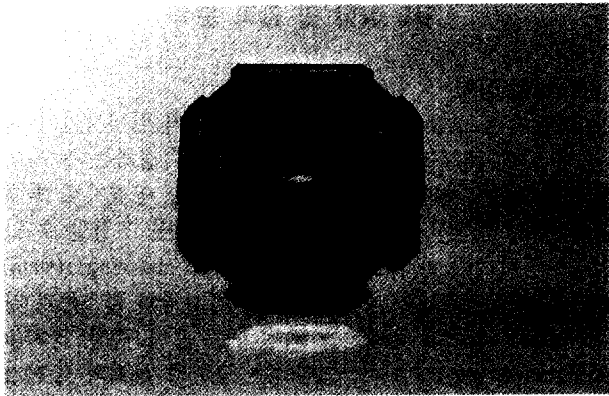
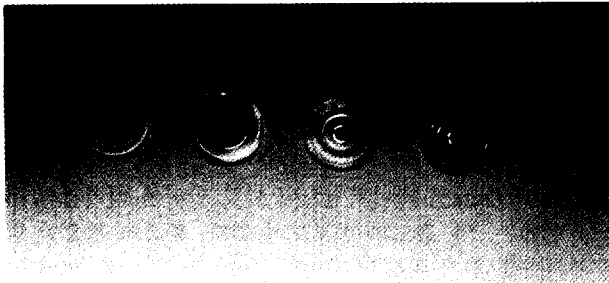


그림 3. 투과광 스펙트럼 측정법을 이용한 공진기 정렬 장치의 개략도.



(a)



(b)

그림 4. (a) 정렬할 비평면형 공진기 본체와 (b) 공진기에 부착할 반사경들.

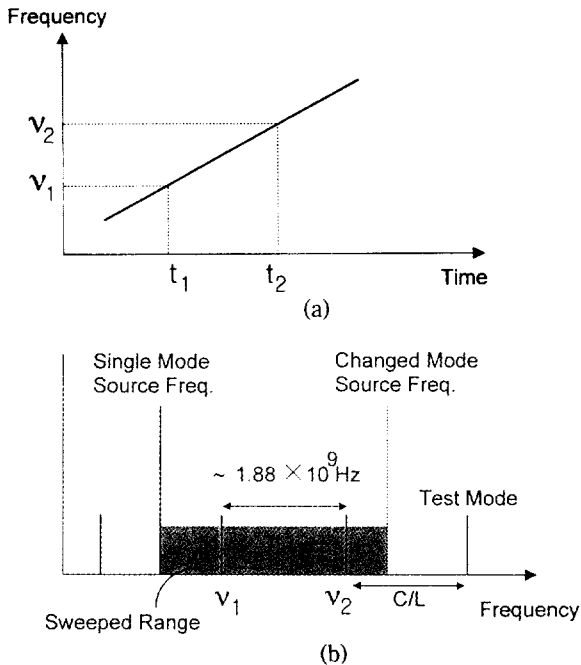


그림 5. (a) 입력 광원의 시간에 따른 공진 주파수의 변화와 (b) 입력 광원의 출력 주파수 범위와 공진기 내의 공진 주파수와의 관계.

해당한다. 그림 5(b)는 광원의 공진기의 길이 변화에 따른 발진 주파수의 변화 영역과 정렬할 공진기의 공진 모드의 관계

를 나타낸 것이다. 이와 같이 투과광 스펙트럼 측정법에 사용될 광원은 출력 주파수가 쏠고 가는 영역 내에 두 개의 정렬할 공진기의 공진 모드가 포함되어 있어야 한다.

3.1.2. 모드 정합 장치

그림 3에서 보는 것과 같이 모드 정합 장치는 필요한 편광을 만들며 거의 연속적으로 빔의 방향을 조절할 수 있는데, 수직 및 수평으로 1분(angular minute)까지 조절이 가능하고, 곡률 반경이 1.5 m이며, 반사율이 95% 이상인 구면경과 원편광을 만들기 위한 $\lambda/4$ 파장판, 편광판 그리고 미세한 빔의 조절을 위한 5 mm 두께의 무반사 코팅된 한 쌍의 판과 쇄기 형태의 판으로 구성되어 있다. 입사하는 빔의 편광을 $\lambda/4$ 파장판과 편광판으로 원하는 방향의 선편광을 만들고, 두 쌍의 평행판을 써서 미세하게 방향을 조절하여 정렬할 공진기 채널로 일치시킨다.

3.1.3. 광검지기(Photodetector)

광검지기는 정렬할 공진기에서 나오는 펄스를 전압 펄스로 변환시켜 주기 위해서 사용하였다. 이 전압 펄스에서 시간 주기의 정보를 구하기 위해서 시간 주기 측정기(Time Interval Former)로 입력시켰다. 광검지기는 저잡음 밴드 증폭기가 있는 광다이오드로 구성되어 있다.

3.1.4. 손실 측정 장치

손실 측정 장치는 입력 광원의 전반사경에 부착된 피에조 변환기를 구동하기 위한 톱니 파형의 전압을 공급하며, 광검지기로부터의 신호를 받아 공진기의 투과 펄스폭과 시간주기를 측정한다. 따라서 레이저와 측정장치에 가해 주는 전원 공급 장치와 레이저 광원에 부착되어있는 피에조 변환기에 인가될 톱니파 전압 발생 장치가 있다. 그리고 정렬할 공진기로부터 나온 출력빔을 검출하는 광검지기와 이를 증폭시키는 증폭기가 있다. 기준 신호와 출력된 신호가 동기된 후, 투과광의 펄스폭(Δt)과 펄스간 시간 간격(T)을 보여주는 시간 주기 형성 장치를 거쳐 오실로스코프 상에서 측정하게 하였다. 이들의 신호 동작 상태는 그림 6과 같다.

3.2. 실험

정렬할 공진기를 고정시킨 후, 질소(N_2) 가스를 주입시켜 내부의 미세한 먼지를 제거한 후에 반사경을 공진기에 광학적 접촉으로 부착시켰다. 처음에는 살짝 부착시켜, 반사경을 천천히 돌려가며 무지개 색의 간섭 무늬가 한가지 색(노란색)이 되는지를 확인 후 강하게 밀착시켰다. 주의할 것은 부착시키는 과정에서 반사경의 코팅면이 공진기의 표면에 닿아 흠이 생기지 않도록 해야 한다. 이렇게 세 개의 평면경을 부착한 후에 같은 방법으로 구면경을 반접착시킨 다음 투과광 스펙트럼 측정을 하였다.

공진기의 채널로 채널과 평행하게 광원의 빔을 입사시켜, 검출기로 구면경에서 나오는 펄스의 신호를 잡아낸 후, 각각 두 장의 쇄기형 프리즘판과 평면판으로 오실로스코프 상에서 펄스의 폭이 최소가 되면서, 두 개의 펄스가 검출될 수 있도록 미세 조정을 한다. 미세 조정 후 공진기에 입사되는 빔의 편광 방향을 바꾸어 주면서 두 펄스를 제외한 신호 잡음(Noise)을 최소화시켰다. 공진기에 부착되어 있는 구면 반사

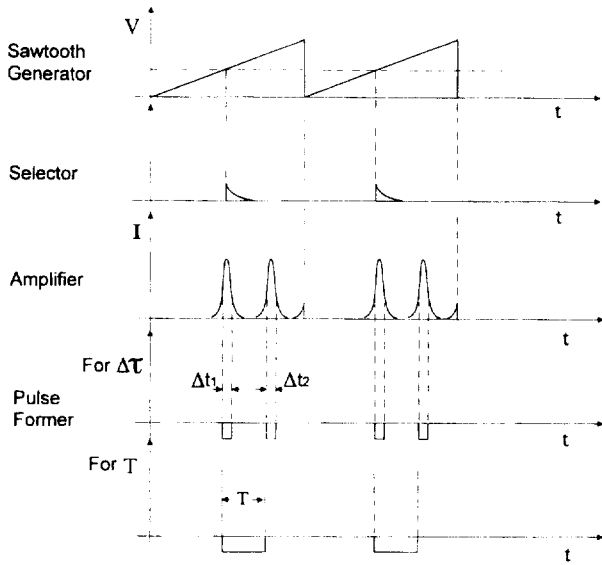


그림 6. 주요 장치들의 출력 또는 입력 신호의 상태.

경을 마이크로미터로 밀어주면서 펄스폭을 최소화시킨다. 두 펄스의 간격 T와 각 펄스의 폭 Δt_1 과 Δt_2 를 측정한다.

3.3. 실험 결과

그림 7은 오실로스코프 상에서의 피에조 변환기에 인가되는 전압과 정렬할 공진기로부터 나오는 출력 펄스를 나타낸

것이다. 광원인 레이저의 공진길이가 측정할 공진기의 길이보다 크므로 실제 측정에서는 공진기 길이에 대한 보상을 해주어야 한다. 따라서 식 (3)은 다음과 같이 수정이 된다.

광원의 자유 대역폭 $\Delta\nu_s^{[4]}$ 는

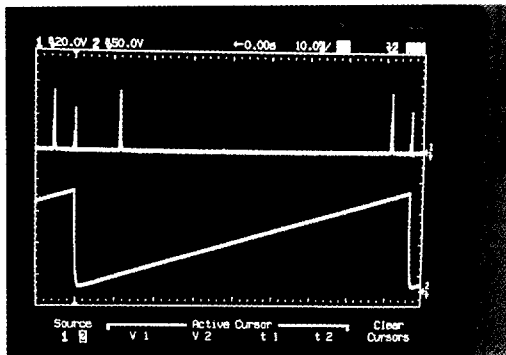
$$\Delta\nu_s = \frac{c}{2L_s} \quad (4)$$

여기서 L_s 광원의 공진기 길이, c 광속이다. 이에 반하여 정렬할 링 공진기의 자유 대역폭 $\Delta\nu_c^{[5]}$ 는

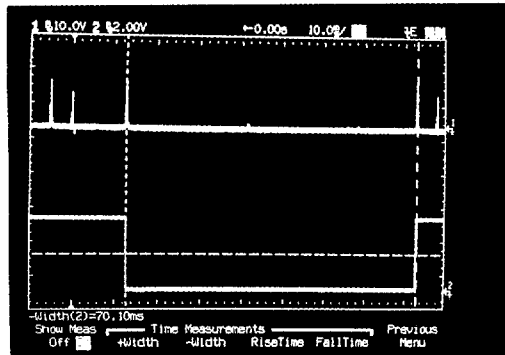
$$\Delta\nu_c = \frac{c}{L_c} \quad (5)$$

여기서 L_c 정렬할 링 공진기의 주변 길이이다. 따라서 본 측정에서 사용한 광원의 자유 대역폭^[6]은 이득 곡선 안에 2개의 종모드가 있는 것에 비하여 링 공진기의 자유 대역폭은 He-Ne 레이저의 이득 곡선 안에 1개의 종모드를 가질 정도로 다소 크므로, 링 공진기의 공진 펄스가 링 공진기 자체의 펄스로 나타나기 전에 연속되는 광원의 다음 종모드에 의한 공진 펄스가 먼저 나타난다. 따라서 실질적인 이웃하는 펄스의 시간 간격은 측정할 링 공진기의 길이에 대해 광원의 공진길이 비를 보상하여 주어야 한다. 이에 따라 정렬할 공진기의 손실 σ 는

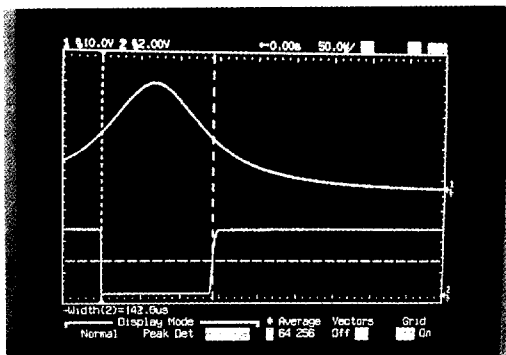
$$\sigma = 2\pi k \frac{\Delta\tau}{T} \quad (6)$$



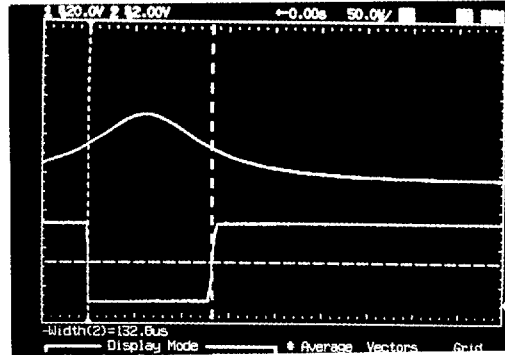
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 공진기 손실 및 정렬을 위한 측정 데이터(오실로스코프 상에 나타난 파형들). (a) 피에조 변환기에 인가된 전압과 공진 펄스, (b) 발생된 펄스의 간격 측정, (c) 및 (d) 공진된 두 펄스의 펄스폭 측정.

이 된다. 여기서 k 는 공진기 길이의 보상 계수로 다음과 같이 정의된다.

$$k \equiv \frac{L_c}{2L_r} \quad (7)$$

또한 광원에서 사용되고 있는 피에조 변환기를 그림 5(a)와 같이 이상적으로 선형적 구동이 어려우므로 2개의 공진 펄스가 같은 폭을 갖고 있지 않다. 따라서 시간 폭 $\Delta\tau$ 는 두 펄스의 시간 폭을 평균하여 정하여 하므로 다음과 같다.

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \quad (8)$$

본 실험에 사용된 공진기의 경우(그림 7의 결과),

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} = \frac{142 + 132}{2} = 137 \mu s,$$

$$k = \frac{160}{200} = 0.8,$$

$$T = 70 ms$$

이므로 링 공진기의 내부 손실 σ 는 약 0.98%로 측정되었으며, 정렬한 공진기의 총 반사 계수를 R 이라고 할 때, 공진기의 손실 σ 와는 $R=1-\sigma$ 의 관계가 있으므로 총 반사 계수 R 은 99.02%가 된다.

상용으로 사용중인 0.05도급 레이저 자이로의 공진기(ZLK-16, Polyus사)에 대해 공진기 내부의 손실을 측정한 결과 각 펄스의 폭 Δt_1 과 Δt_2 는 각각 약 82와 72 μs 가 되었다. 이 결과로부터 공진기의 손실 σ 는 약 0.55%였으며 총 반사 계수 R 은 99.45%가 되었다. 따라서 본 실험에서 정렬한 공진기의 손실 값은 실제 고정밀도의 링 레이저 자이로에 이용되기에는 손실이 다소 큰 편임을 알 수 있었다.

IV. 결 론

링 레이저 자이로스코프에 사용될 비평면-일체형 링 공진기에 네 개의 반사경을 부착 정렬시키기 위해 투과광 스펙트럼 측정 장치를 구성하였다. 이 장치를 통해 공진기 내의 손실이 최소가 되도록 반사경을 실시간으로 정렬하는 것이 가능하며, 동시에 공진기의 손실을 측정할 수 있다. 본 측정 장치로 세 개의 평면경과 한 개의 구면경을 링형 공진기에 부착 정렬시켰고 측정된 공진기의 내부 손실은 약 0.98%였으며 이는 고정밀도의 링레이저 자이로에 이용되기에는 손실이 다소 큰 편이었다. 이 손실을 줄이려면 고반사율의 반사경을 제작하여 공진기 정렬에 사용하여야 한다.

참고문헌

- [1] J. M. Herbelin, J. A. McKay, M. A. Kwok, R. H. Ueunten, D. S. Urevig, D. J. Spencer and D. J. Benard, "Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method," *Appl. Opt.* **19**(1), 144 (1980).
- [2] Dana Z. Anderson, Josef C. Frisch and Carl S. Masser, "Mirror reflectometer based on optical cavity time," *Appl. Opt.* **23**(8), 1238 (1984).
- [3] Valentina V. Azarova, Evgeniy L. Giruts, S. M. Kopylov, Michail M. Nazarenko, "Laser measurers of high quality optical cavities and mirrors parameters," *Proc. SPIE* 2097, 163 (1994).
- [4] Max Born and Emil Wolf, *Principle of optics* (Pergamon Press, Oxford, 1983), p328.
- [5] W. W. Chow, J. Gea-Banacloche and L. M. Pedrotti, *Review of Modern Physics* **57**(1), 61 (1985).
- [6] Peter W. Milonni and Joseph H. Eberly, *Lasers* (John Wiley & Sons, New York, 1991), p105.

Alignment of a ring laser cavity by using the cavity transmission spectrum control method

Hyung-Wook Jeon, Yong-Jin Choi, Ki-Hong Lee*, Sanghun Shin,

Hyuk-Soo Lee and Jung-Young Son

3-D Imaging Media Research Group, Korea Institute of Science and Technology

*Department of Physics, Hanyang University

(Received : August 20, 1997)

Several methods of aligning ring type cavities have been investigated for long time. The measurement of cavity transmission spectrum control is somewhat effective due to aligning cavity with measuring cavity loss at the same time. In this research, four mirrors are aligned and attached by the measurement of pulse width of the transmitted light. The intracavity loss is optimized to about 0.98%, giving the calculated total reflection coefficient of about 99.02%.