

저산란 반사경을 이용한 링레이저 자이로의 주파수 잠김 개선

조민식[†] · 심규민 · 권용을 · 정태호 · 오문수

국방과학연구소 기술연구본부

☎ 305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 35-5호

이수상 · 조현주 · 손승현 · 문 건 · 이재철

고등기술연구원 포토닉스 및 통신기술센터

☎ 449-800 경기도 용인우체국 사서함 25호

(2002년 4월 1일 받음, 2002년 6월 10일 수정본 받음)

링레이저 자이로의 주파수 잠김을 개선하기 위하여, 링레이저 공진기에 저산란 반사경을 적용하는 연구가 수행되었다. 초정밀 연마기술을 통해 표면 거칠기 1 Å rms 이하의 반사경 기판을 가공하였으며, 가공된 기판에 이온빔 스퍼터링 코팅방식을 이용하여 산란율 30 ppm 이하의 반사경을 제작하였다. 제작된 저산란 반사경을 링레이저 자이로에 적용한 결과, 자이로의 잠김 주파수를 약 0.1 deg/sec 이하로 개선할 수 있었다.

주제어 : ring laser gyroscope, low scattering mirror, lock-in-frequency

I. 서 론

링레이저 자이로의 회전 각속도 감지 성능은 링레이저 공진기에 적용되는 반사경의 산란 성능에 의해 우선적으로 결정된다.^[1] 즉, 링레이저 자이로가 감지할 수 있는 최소의 회전 각속도에 해당하는 잠김 주파수(lock-in frequency)는 반사경의 산란에 비례하여 증가한다. 따라서 고분해능의 링레이저 자이로를 개발하기 위해서는 산란이 적은 반사경의 확보가 무엇보다도 중요하다. 반사경의 산란율 성능은 반사경 제작에 사용될 반사경 기판의 표면 거칠기와 반사경 코팅 공정에 크게 의존한다. 링레이저 자이로 개발 선진국에서는 고성능 링레이저 자이로용 반사경 기판의 표면 거칠기를 0.5 Å rms 이내로 낮추고 있으며, 기판 위에 유전체 박막을 반복적으로 증착하여 만든 반사경의 산란율도 약 10 ppm 이내로 개선시킨 상황이다.

링레이저 자이로는 레이저 공진기 안에서 시계 방향과 반시계 방향으로 진행되는 두 레이저 광선의 주파수 차이가 외부에서 인가되는 회전 각속도에 비례하는 원리를 이용하여, 외부입력 회전각을 측정하는 광학식 회전센서이다.^[1,2] 이러한 링레이저의 구성에서 반사경은 필수 부품이며, 반사경에 의한 레이저 광선의 반사가 일어날 때, 반사경 표면으로부터 광선의 산란 역시 부분적으로 발생하게 된다. 시계 방향으로 진행되는 레이저 광선이 반사경 표면에서 산란을 일으키면 원래 광선과 반대 방향으로 진행되는 후방산란 광선이 발생한다. 이 후방산란 광선은 반시계 방향으로 진행되는 레이저 광선의 주파수를 동조화 시켜서 양 방향으로 진행되는 광선의 주파수 사이의 차이를 없애 버리는 주파수 잠김(frequency lock-in)을

유발시킨다.^[1,3,4] 즉, 주파수 잠김 현상은 적은 양의 회전 입력 관측을 불가능하게 하는 자이로 성능의 한계 상황이다. 이러한 링레이저 자이로의 회전각 감지 능력은 몸체 진동기와 같은 장치를 적용하여 개선할 수도 있으나, 근본적인 자이로 성능 개선방안은 되지 못한다. 결국, 링레이저 자이로에 사용되는 반사경의 산란성능을 향상시킴으로써만, 자이로의 회전각 감지능력을 보다 미소한 회전각 영역에까지 확장할 수 있는 것이다.

본 논문에서는, 저산란 반사경 제작을 위한 반사경 기판의 초정밀 가공과 반사경 코팅에 대해 기술하고, 제작된 저산란 반사경을 적용한 링레이저 자이로의 주파수 잠김 개선 결과를 소개한다.

II. 링레이저 자이로 개요

링레이저 자이로의 동작원리는 Sagnac 효과에 있다.^[2] 동일한 폐 경로를 시계 방향과 반시계 방향의 빛이 진행할 때, 외부에서 인가되는 회전각속도의 영향에 의해 양 방향으로 진행되는 두 광선의 공진기 형성거리(L)는 입력 회전각속도에 비례하여 각각 길어지거나 짧아진다. 식(1)은 회전 각속도(Ω)에 의해 유도된 두 광선 사이의 공진기 길이 차이(ΔL)을 표현한 것이다.

$$\Delta L = \frac{4A\Omega}{c}, \quad A = \text{area} \quad (1)$$

여기서, A는 폐 경로의 면적, c는 광속이다.

이렇게 발생한 두 광선간의 공진기 길이 차이(ΔL)는 식 (2)에서와 같이 레이저 발진 주파수의 차이($\Delta\nu$)로 표현된다. 이

[†]E-mail: minsjo@add.re.kr

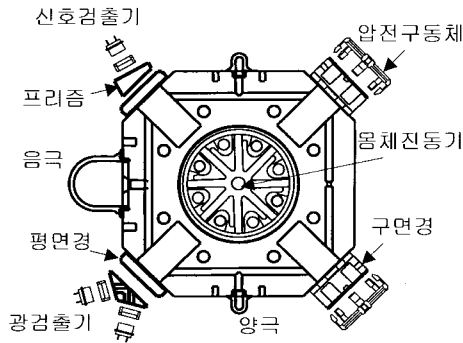


그림 1. 링레이저 자이로의 구조.

때, 두 광선 사이의 간섭에 의해 만들어진 간섭무늬 개수(N)를 일정 시간 간격 동안 세게 되면, 관계식(3)으로부터 외부인가된 회전각(Θ)을 얻어낼 수 있다.^[2]

$$\Delta v(= v_{cw} - v_{ccw}) = \frac{\Delta L}{L} v = \frac{4A}{L\lambda} \Omega \quad (2)$$

여기서, v 와 λ 는 각각 레이저 광선의 주파수와 파장이다.

$$N = \frac{4A}{L\lambda} \Theta \quad (3)$$

본 연구에서 활용한 링레이저 자이로는 사각형 형태의 자이로로서, 광 경로 한 번의 길이가 7 cm, 전체 광경로가 28 cm이다. 사각형 모서리에 각각 네 개의 반사경이 부착되었으며, 레이저 매질로는 He-Ne 가스가 사용되었다. 레이저 발진파장은 633 nm이다. 레이저 공진기 몸체의 재질은 열팽창 계수가 우수한 Zerodur가 사용되었다. 그림 1은 본 연구에 사용된 링레이저 자이로 구조를 보여준다.

III. 실험 및 분석

3.1. 저산란 반사경 제작

반사경 기관의 재질은 용융 실리카(fused silica)를 사용하였다. 반사경 기관의 직경은 22 mm, 두께는 4 mm이었다. 반사경 기관 연마의 첫 단계는 Fresh-Feed 연마기법으로 불리는 전통적인 기관 연마기술로서, 물과 연마제를 섞은 연마용액(slurry)을 연마반(lap)에 조금씩 첨가하면서 기관 표면을 연마하는 가공방법이다. Fresh-Feed 가공기법은 근본적인 원리상 1 Å rms 이하의 표면 거칠기를 얻는 데는 한계를 가지는 반면, 반사경 기관의 평면도(flatness)를 $\lambda/10$ 이하로 개선시킬 수 있다. Fresh-Feed 연마공정을 완료한 반사경 기관은 1 Å rms 이하의 표면 거칠기를 얻기 위한 다음 단계로 Bowl-Feed식 초정밀 연마공정에 투입되었다.^[5]

Bowl-Feed식 연마 기법에서는, 연마용액의 농도를 항상 일정하게 유지시키는 수단으로, bowl 형태의 용기를 만들어 연마용액을 채우고 연마용액 내부의 연마제 입자가 용기의 바닥으로 침전되지 않도록 섞어주는 stirrer를 장착하였다. Bowl 안에서 연마용액의 수위는 연마반이 충분히 용액에 잠길 수 있도록 연마반 위로 약 10 mm 정도 높게 하였다. 연마용액은

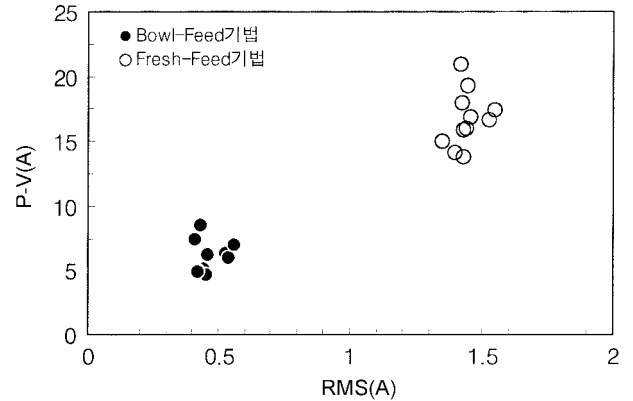


그림 2. Fresh-Feed식 연마(1차)와 Bowl-Feed식 연마(2차)에 의한 기관의 표면 거칠기 개선.

표 1. 국내 제작된 초정밀 반사경 기관의 표면 거칠기

샘플번호	RMS(Å)	P-V(Å)
1	0.54	4.74
2	0.46	6.80
3	0.58	8.14
4	0.54	5.56
5	0.50	10.44

물 1 liter에 연마제 20 g을 혼합하여 준비하였다. Bowl안의 연마용액은 연마반과 함께 회전하면서 연마반과 샘플의 표면 사이에 연마제를 공급한다. Bowl과 연마반의 회전속도는 40 rpm이었다. 기관의 실질적인 초연마 공정은 stirrer의 사용 시점으로부터 시작된다. Stirrer는 bowl안의 가장자리 근처에 장착되었으며, 회전하는 bowl에 대해 정지상태의 장애물을 형성함으로써, 연마용액의 침전을 강제적으로 억제하여 bowl안의 연마용액 농도를 균일하게 유지시키는 역할을 한다. Stirrer를 장착한 상태에서 반사경 기관의 초연마 공정이 약 30분간 수행되었으며, stirrer를 제거하고 약 15분 후에 반사경 기관의 연마를 완료하였다. 반사경 기관의 표면 거칠기 평가에는 위상측정 간섭계의 일종인 모델명 Maxim GP Surface Profiler(미국 Zygo사)가 사용되었다.^[6] 그림 2는 Fresh-Feed 기법과 Bowl-Feed 기법을 적용한 기관의 표면 거칠기 개선 결과를 잘 보여준다. 표 1은 초정밀 연마가 완료된 반사경 기관의 표면 거칠기 p-v(peak-to-valley)와 rms(root-mean-square)값을 정리한 것이다.

반사경 코팅은 이온빔 스퍼터링 방식의 반사경 제작장비(영국 Oxford Instrument Plasma Technology사의 모델명 Ionfab 500+)을 이용하였다. 코팅에 사용된 유전체 박막 재질은 고굴절 물질로 $Ta_2O_5(n=2.05)$ 와 저굴절 물질로 $SiO_2(n=1.48)$ 이 선택되었다. 이온빔 스퍼터링에 의한 반사경 코팅은 전통적인 전자빔 가열에 의한 반사경 코팅에 비해 박막층의 기동구조가 보다 밀집된 분포를 가지고 있어서 반사경의 산란율을 개선하는데 유리한 환경을 제공해 준다. 반사경의 산란율 평가에는 45도 산란측정이 가능한 총적분 산란측정(TIS; Total Integrated Scattering) 장비가 활용되었다. 표 2는 이온빔 스퍼터링 방식에 의해 제작된 반사경의 산란율 성능을 보여준다. 이온빔 스

표 2. 이온빔 스퍼터링 방식에 의해 제작된 저산란 반사경의 산란율

샘플번호	산란율(ppm)	비고
1	11.7	평면경
2	12.5	평면경
3	17.9	구면경
4	15.3	구면경
5	10.9	평면경

퍼터링 방식에 의해 코팅된 반사경 제품은 대체로 산란율이 10 ppm 주변의 값을 가지고 있으며, 그 이상의 산란율 향상도 기대할 수 있었다. 이는 기존의 전자빔 가열방식에 의한 반사경 코팅공정에서 얻어진 산란율 약 60 ppm 이상의 값에 비교할 때 상당히 우수한 수치이다.

3.2. 저산란 반사경을 이용한 링레이저 자이로의 잠김 주파수 개선 실험

링레이저 자이로 고유의 잠김 주파수(lock-in frequency)는 자이로에 적용되는 반사경의 산란율에 의해 결정되는 성능변수로서, 아래와 같이 표현된다.^[1]

$$\Omega_L = \frac{c\lambda^2 r_s}{32\pi Ad} \text{ (rad/sec)} \quad (4)$$

여기서, c 는 광속도, λ 는 레이저 파장, r_s 는 반사경의 산란계수, A 는 링레이저 자이로의 광경로 면적, d 는 레이저 빔의 크기를 나타낸다. 따라서, 링레이저 자이로의 구조가 결정된 상황을 고려할 때, 반사경의 산란율을 제외한 나머지 변수들은 고정된 값이기 때문에, 잠김 주파수의 개선은 반사경의 산란율을 감소시켜서 접근할 수 있다.

링레이저 자이로의 잠김 주파수 측정을 위하여 자이로를 Rate Table위에 장착한 후, 5 deg/sec 이상의 초기 회전에서 출발하여 서서히 회전을 감소시키면서 자이로의 출력 변화를 조사하였다. 링레이저 자이로의 레이저가 발진을 지속하고 있는 동안, 자이로에 입력되는 회전 각속도가 없을 경우에는 자이로 내부에 위치한 반사경 표면이 반사경 격자(mirror grating) 현상에 의해 손상될 수 있으므로 주의해야 한다. 실험에 사용된 Rate Table은 CARCO Electronic사(미국)의 Direct Drive Rate Table 시리즈의 모델 811이다. 811 모델은 최대 각속도(maximum speed) 1000 deg/sec, 각속도 분해능(rate resolution range) 0.00001 deg/sec, 위치 분해능(position resolution) 0.0001 deg의 성능을 가지는 초정밀 Rate Table로서, 자이로의 잠김 주파수 측정에 전혀 손색이 없는 장비이다. 그림 3은 회전 각속도 입력에 따른 링레이저 자이로 출력특성을 보여주고 있다. 입력 회전 각속도가 점차적으로 감소함에 따라 링레이저 자이로의 출력 펄스 개수가 서서히 감소하다가, 특정 각속도(잠김 주파수) 이하에서는 자이로가 출력을 내보내지 않는 무감지 영역(dead zone)이 관측되고 있음을 알 수 있다. 식 (1)에서도 언급하였듯이, 자이로에 적용되는 반사경의 성능이 개선될수록 잠김 주파수의 크기가 감소하여 보다 좁은 무감지 영역을 구현할 수 있다.

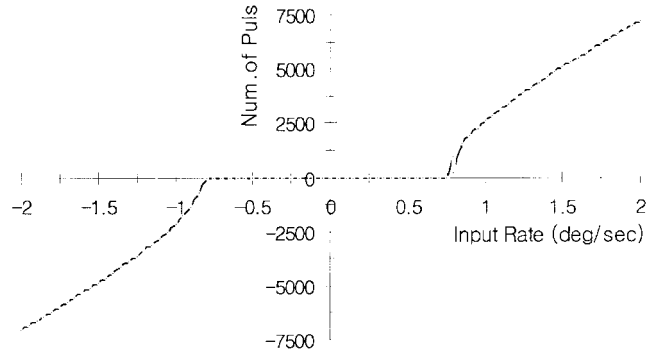


그림 3. 링레이저 자이로의 출력 특성.

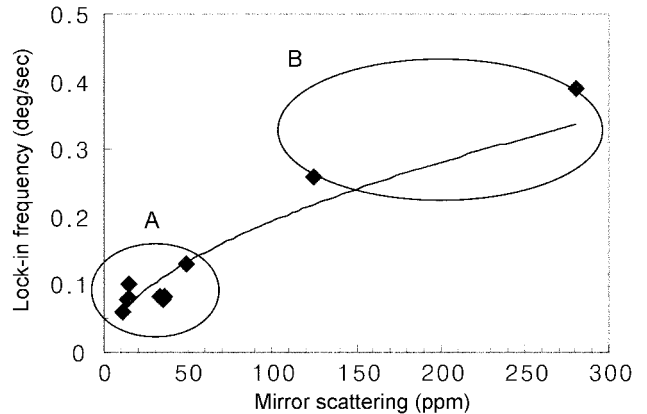


그림 4. 반사경 산란 개선에 따른 잠김 주파수 변화. A: 저산란 반사경, B: 고산란 반사경.

반사경의 산란율 변화에 따른 링레이저 자이로의 잠김 주파수 측정실험이 이루어졌다. 그림 4에 나타난 A 그룹은 링레이저 자이로에 이온빔 스퍼터링 방식으로 제작된 저산란 반사경을 적용한 경우이고, B 그룹은 기존의 전자빔 가열방식으로 제작된 반사경을 적용한 경우이다. 30 ppm 이하의 저산란 반사경을 적용하였을 때, 링레이저 자이로의 잠김 주파수 값이 약 0.1 deg/sec 주변으로 현저히 개선되었음을 확인할 수 있다. 전자빔 가열방식으로 제작된 고산란율 반사경의 경우는 보유한 시험 샘플이 적어서 데이터 개수는 많지 않으나, 링레이저 자이로 잠김 주파수에 대한 반사경 산란율의 영향을 보는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

링레이저 자이로의 주파수 잠김을 개선시키는 방안으로, 저산란율의 반사경을 레이저 공진기에 적용하는 연구가 수행되었다. 초정밀 연마기법을 도입하여 표면 거칠기 1 Å rms 이하의 반사경 기판을 제작하였으며, 제작된 반사경 기판을 이온빔 스퍼터링 방식 반사경 코팅장비에 투입하여 30 ppm 이하의 저산란 반사경을 확보하였다. 저산란 반사경을 링레이저 공진기에 적용한 결과, 링레이저 자이로의 잠김 주파수를 약 0.1 deg/sec까지 개선시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] Aronowitz, F, *The Laser Gyro (in Laser Applications, Vol. I, M. Ross ed.)* (New York, Academic Press, 1971).
- [2] Fowels, G. R., *Introduction to Modern Optics (2nd ed.)* (New York, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975).
- [3] George M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems: A Modern Synthesis*, (New York, Academic Press, 1993).
- [4] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*, (New York, Springer-Verlag, 1993).
- [5] R. W. Dietz and J. M. Bennett, "Bowl-Feed Technique for Producing Supersmooth Optical Surfaces," *Applied Optics*, vol. 5, pp. 881-882, 1966.
- [6] J. F. Biegen and R. A. Smythe, *Fourth International Conference, Metrology and Properties of Engineering Surfaces National Bureau of Standards*, Gaithersburg, MD, April 13-15, 1988.

Lock-in frequency improvement of ring laser gyro using a low-scattering mirror

Min-Sik Jo[†], Kyu-Min Shim, Yong-Yool Kwon, Tae-Ho Chung, and Moon-Su Oh

Technology Research Center, Agency for Defense Development, Yusong P.O. Box 35-5, Taejeon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: minsjo@add.re.kr*

Soo Sang Lee, Hyun Ju Cho, Seong Hyun Son, Gun Moon, and Jae Chul Lee

Center for photonics & Communications, Institute for Advanced Engineering, Kyoungki-do 449-020, KOREA

(Received April 1, 2002 ; revised manuscript received June 10, 2002)

For the improvement of the lock-in frequency of a ring laser gyro, a low-scattering mirror was employed in the laser resonator. A super-polishing technique produced fine mirror substrates of less than 1-Å-rms-roughness. The mirror coating using an ion-beam sputtering technique reduced the scattering loss to less than 30 ppm. As a result of the mirror scattering enhancement of the ring laser, the lock-in frequency of the gyro was improved up to about 0.1 deg/sec.

Classification Codes : LO.060, SM.020, SM030.