

Erbium 첨가 광섬유 증폭기형 광원을 이용한 광섬유 gyroscope *

박 희 갑

전북대학교 물리학과

김 병 운

한국과학기술원 물리학과

(1994년 12월 5일 받음)

Erbium 첨가 광섬유를 광원겸 광증폭기로 사용하는 방식으로 개회로 형태의 광섬유 gyroscope를 구성하였다. Erbium 첨가 광섬유를 거쳐 5 mW 이상의 gyro 출력광 power와 7 nm의 파장선폰을 얻었다. Loop 광섬유로부터 광증폭기형 광원으로의 feedback으로 인하여 회전속도에 따라 scale factor가 변화함을 관찰할 수 있었다. 그러나 변조된 gyro 출력신호광의 평균 power가 회전속도에 무관하도록 위상차의 변조진폭을 $\phi_m = 2.405 \text{ rad}$ 으로 한 경우에 회전속도와 무관한 일정한 scale factor를 얻을 수 있었다.

I. 서 론

일반적으로 광섬유 gyroscope용 광원에 요구되는 특성으로서 큰 출력과 함께 파장선폰이 넓고 중심파장이 안정되어야 하는 점들을 들 수 있다.^[1] 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 neodymium이나 erbium 등의 희토류 원소가 첨가된 능동 광섬유를 이용하는 superfluorescent fiber source에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다.^[2-5] 이러한 희토류 첨가 광섬유 광원은 넓은 발광 파장대역을 가지며 반도체 광원과 비교하여 불 때 온도변화에 대하여 매우 안정된 파장 특성을 가지고 있다. 또한 광섬유 형태의 광원이므로 gyro용 광섬유와의 저손실 결합이 용이하다. 특히 1.55 μm 파장대인 erbium 계열의 광섬유 광원은 광통신에서의 기술발전에 힘입어 출력 5 mW 이상, 선폰 10 nm 이상의 매우 좋은 출력 특성을 나타내고 있으며,^[4] 다른 종류의 광원에 비해 장파장이므로 UV나 방사능에 대한 광섬유의 안정성이 높아 군사응용에서도 많은 관심을 모으고 있다.

한편 최근에 neodymium 첨가 광섬유를 광원겸 광증폭기로 사용하는 새로운 광원방식이 제안된 바 있다.^[5] 즉, neodymium 첨가 광섬유로부터의 superfluorescence를 광원으로 사용함과 동시에, 회전감지용 광섬유

loop로부터 돌아온 gyro 광신호가 다시 같은 neodymium 첨가 광섬유를 반대방향으로 지나는 동안 증폭이 이루어지도록 하는 방식이다.(그림 1 참조) 종래 방식에서 gyro의 광출력이 대개 수~수십 μW 수준으로 매우 작은 것을 감안하면 증폭된 큰 출력은 gyro 신호처리시에 큰 장점이 될 수 있다.

그러나 이와 같이 능동광섬유를 광증폭기형 광섬유광원 (FAS: Fiber Amplifier Source, 이하 본 논문에서 FAS라 함)으로 활용하는 방식에는 해결해야 할 문제점이 있다. 회전감지용 광섬유 loop로부터 FAS로 feedback되는 빛에 의해 FAS의 특성이 교란될 수 있다는 점이다. Feedback되는 빛은 loop내에서의 위상변조로 인하여 기본적으로 수십~수백 kHz 정도로 변조되어 있으며, gyro가 회전함에 따라 feedback 신호 파형이 변화한다.

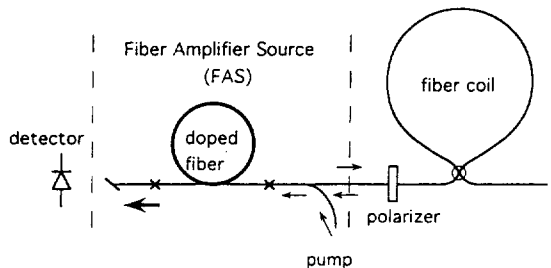


그림 1. 광섬유 증폭기형 광원(FAS: Fiber Amplifier Source) 방식의 광섬유 gyroscope 개념도.

*본 연구는 국방과학연구소에서 지원하는 전자광학연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

이러한 feedback 신호의 변화에 따라 FAS의 출력과 증 심파장, 그리고 이득(gain)이 영향을 받아 결과적으로 gyro의 scale factor가 회전속도에 따라 변화하고 불안 정해지는 문제점이 있다. 따라서 FAS 방식은 회전속도에 따라 feedback 신호파형이 변화하는 개회로(open loop) 방식의 gyro^[6] 보다는 회전에 의한 위상차를 주파수 변환기와 같은 것으로 보상함으로써 feedback 신호가 언제나 같은 상태로 유지되도록 하는 폐회로(closed loop) 방식^[7]에 적합한 것으로 인식되어 왔다.

본 논문에서는 erbium 첨가 광섬유를 FAS로 사용하여 개회로 방식의 광섬유 gyroscope를 구성하고 기본적인 동작특성을 측정하였다. 또한 앞에서 기술된 바와 같은 개회로 방식에서의 feedback으로 인한 문제점을 해결하기 위하여 적정 위상변조 조건을 찾아보았다. 즉, erbium의 고유 특성상 이득이 feedback 신호의 빠른 변화에 대해서는 거의 반응하지 못하는 점^[8]에 착안하여, 회전속도가 변화하더라도 변조된 feedback 신호의 평균 power가 일정하게 유지되도록 위상변조진폭을 결정하였다. 이렇게 함으로써 gyro의 scale factor를 회전속도에 무관하게 일정한 값으로 유지시킬 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

II. 동작원리와 적정 위상변조 조건

FAS 광원을 이용한 광섬유 gyroscope의 개념도는 그림 1과 같다. 그림에서 doped fiber가 광원과 광증폭기의 2가지 역할을 함께 하는 것으로서, 본 논문에서는 erbium 첨가 광섬유(EDF: erbium-doped fiber, 이하 EDF라 함)가 사용된다. EDF에 광펌핑을 해주고 레이저 발진이 일어나지 않도록 해주면 EDF의 양쪽으로 superfluorescence가 나오는데 파장폭도 넓고 출력도 비교적 크므로 gyro의 광원으로 이용하기에 적합하다. 광섬유 coil 쪽으로 향한 빛이 광섬유 Sagnac loop를 거쳐 회전속도에 비례하는 위상차에 관한 정보를 신고 다시 EDF를 반대방향으로 통과하며 광검출기는 EDF에서 크게 증폭된 gyro 신호를 검출할 수 있다.

한편, 서론에서 기술한 바와 같이 광섬유 Sagnac loop로부터 feedback된 광신호가 FAS의 특성에 영향을 주어 결과적으로 gyro의 scale factor가 불안정해지는 문제점이 발생할 수 있다. 그런데 erbium의 에너지 준위 특성을 보면, erbium 이온이 여기되어 레이저 작용의 상위준위(4I_{13/2})에 머물 수 있는 평균시간(life time)이 10 ms 정도로 매우 긴 특징을 가지고 있다. 따라서 이 시간에 비해 충분히 짧은 시간 내에 변조된 feedback

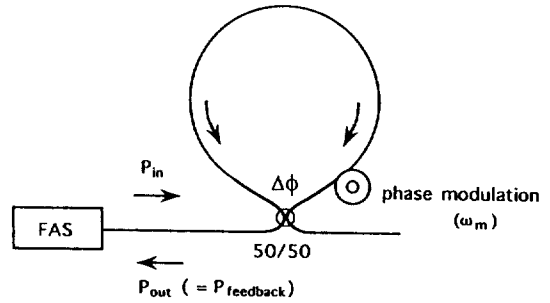


그림 2. 위상변조된 광섬유 Sagnac loop

신호에 대해서는 이득변화의 응답속도가 이를 따라가지 못하므로 EDF의 이득이 거의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 예로써 100 kHz로 변조된 feedback 신호에 대한 EDF 광원의 반응은 변조되지 않은 경우(dc)에 비하여 1% 이하인 것으로 보고된 바 있다.^[8]

일반적으로 실제의 광섬유 gyro에서는 gyro의 출력이 회전속도의 변화에 대해 가장 민감한 영역에서 동작시키기 위해 loop의 한쪽 끝에서 수십~수백 kHz 정도의 변조주파수로 위상변조를 가한다. 이에 따라 loop를 양 방향으로 도는 두 빛간의 위상차가 변조되며, Sagnac loop의 출력은 두 빛의 간섭에 의해 진폭변조된다. 그러므로 loop의 출력, 즉 feedback 신호는 dc 성분과 함께 변조주파수 성분, 그리고 그 고조파(higher-order harmonics) 성분들의 합으로 이루어지며, 결과적으로 EDF를 이용한 FAS 광원의 특성은 주로 feedback 신호의 dc 성분에 의해서만 영향받을 것임을 예측할 수 있다. 따라서 회전속도가 변화하더라도 feedback 신호의 평균 power 성분이 일정하도록 위상변조 진폭을 결정해 주면 scale factor를 회전속도에 무관하게 안정시킬 수 있다.

FAS를 이용하는 gyro의 적정위상변조 조건을 찾기 위하여 광섬유 Sagnac loop의 입출력 특성을 조사해 보자. 그림 2에서 loop내 한쪽 끝에서의 위상변조에 의해 loop를 반대방향으로 돈 두 빛 간의 위상차가 변조되는데 그 진폭과 주파수를 각각 ϕ_m , ω_m 이라 하자. 그리고 회전으로 인한 위상차를 $\Delta\phi_R$ 이라 하면 loop를 서로 반대 방향으로 돈 두 빛간의 위상차 $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_R + \phi_m \sin\omega_m t \tag{1}$$

한편 P_m 의 광 power가 loop 내에 입사하였을 때 loop로부터 되돌아오는 광출력 P_{out} 은 곧 feedback 신호의 power이며, loop에서의 손실을 무시하는 경우에

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} (1 + \cos \Delta \phi) \quad (2)$$

이 된다. (1)식을 (2)식에 넣어 전개하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} [1 + [J_0(\phi_m) + 2\sum_n J_{2n}(\phi_m) \cos 2n\omega_m t] \cos \Delta \phi_R - [2\sum_n J_{2n-1}(\phi_m) \sin(2n-1)\omega_m t] \sin \Delta \phi_R] \quad (3)$$

위의 식에서 J_n 은 차수 n 의 1종 Bessel 함수이다.

(3)식으로 부터 출력광신호의 변조주파수(ω_m) 성분은 $J_1(\phi_m) \sin \Delta \phi_R$ 에 비례하므로 출력광신호의 변조주파수 성분만을 lock-in amplifier와 같은 것으로 측정함으로써 회전에 의한 위상차를 측정할 수 있다.

한편 (3)식으로부터 변조된 출력광신호의 dc 성분, 즉, 평균 power 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_{in} [1 + J_0(\phi_m) \cos \Delta \phi_R] \quad (4)$$

(4)식에서 변조된 광출력의 평균 power가 회전에 무관하게 일정하려면 $J_0(\phi_m) = 0$ 이 되어야 한다. 즉, 위상차 변조의 진폭을 $\phi_m = 2.405$ rad으로 하여 동작시키면 회전속도가 변화하더라도 feedback 광신호의 평균 power가 일정하게 유지된다. 따라서 FAS의 출력과 스펙트럼, 그리고 이득이 안정되고 이에 따라 gyro의 scale factor는 회전속도에 무관하게 일정한 값을 가지게 된다.

III. 실험 및 결과

실험장치의 구성은 그림 3과 같다. 회전감지용 광섬유

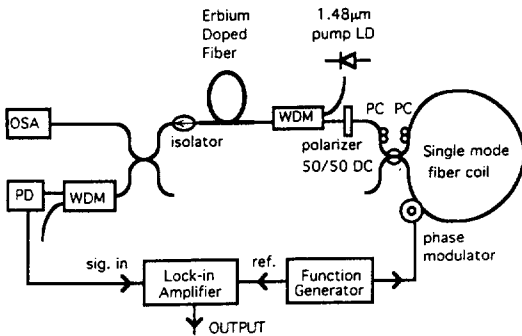


그림 3. 실험장치 구성도(WDM: Wavelength division multiplexer, PC: polarization controller, DC: directional coupler, OSA : optical spectrum analyzer).

loop는 직경 15 cm의 spool에 감긴 길이 3.4 km의 통신용 단일모드 광섬유로 구성되었다. Loop의 내외에 각각 편광조절기를 설치하여 loop내의 빛의 편광상태를 조절하였으며, loop의 입력단에 편광판을 두어 loop에 입사한 편광상태와 같은 편광상태의 출력만이 통과하도록 하였다. 또한 loop내의 한쪽 끝에는 원통형 PZT에 광섬유를 감은 형태의 위상변조기를 두었다. 이 광섬유 loop 길이에 대한 적정 변조주파수(proper modulation frequency)는 29.4 kHz이나, 본 실험에서는 이 PZT를 작은 전압으로도 크게 변조시킬 수 있는 공진주파수인 25 kHz로 변조하였다. 이 변조속도는 feedback의 영향을 완전히 무시할 수 있을 만큼 충분한 속도는 아니나 본 논문에서 적정 변조조건을 보이는데는 문제가 없을 것으로 생각된다.

실험에 사용된 EDF는 erbium의 첨가밀도가 약 300 ppm, 길이가 37.7 m이며, 펌핑용 광원으로는 1.48 µm 파장의 InGaAsP laser diode를 사용하여 WDM(wavelength division multiplexer) coupler를 통해 EDF에 입사시켰다. EDF의 한쪽 끝에는 광 isolator를 두어 단면 반사나 산란으로 인한 레이저 발진을 막도록 하였다. 광 isolator를 통과한 출력광은 WDM을 거쳐 펌프광을 걸러낸 후 gyro 신호광만이 InGaAs PIN photodiode에 의해 검출되며 lock-in amplifier로 변조주파수 성분이 측정된다. 한편 빛이 EDF를 출발하여 loop 광섬유를 거쳐 다시 EDF로 돌아오기까지의 광손실은 약 14 dB였다.

그림 4는 EDF로의 펌프 power를 변화시키며 gyro의 출력광 power를 측정한 결과인데, 위상변조하지 않고 ($\phi_m = 0$) gyro를 회전시키지 않는 상태($\Omega = 0$)에서 광 iso-

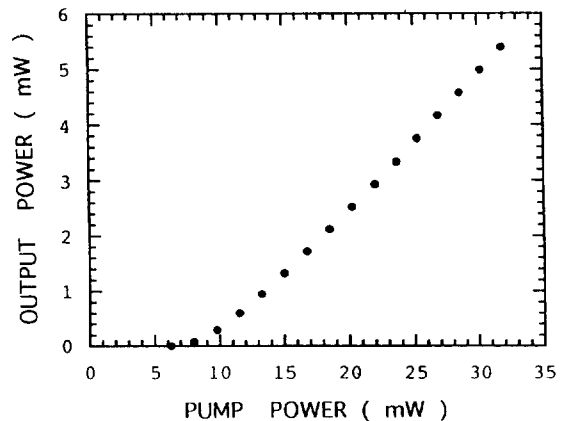


그림 4. 펌프 power에 대한 gyroscope 광출력 특성($\phi_m = 0, \Omega = 0$).

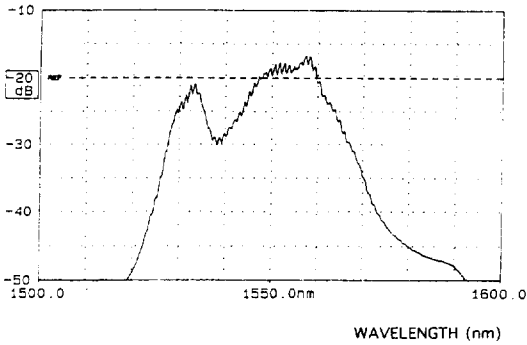


그림 5. Gyroscope 출력광 스펙트럼($\phi_m=0$, $\Omega=0$, $P_{pump}=20$ mW).

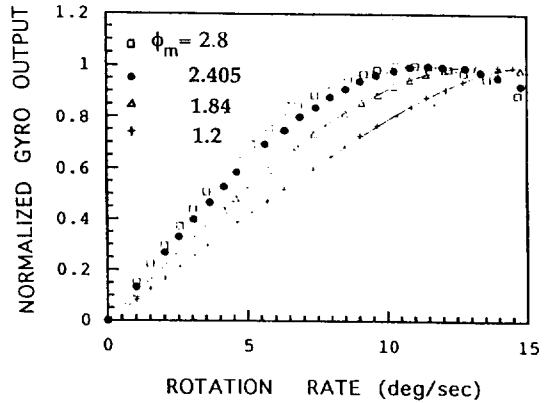


그림 7. 여러 위상변조진폭에 대한 gyroscope 출력특성 (Lock-in amplifier 출력)

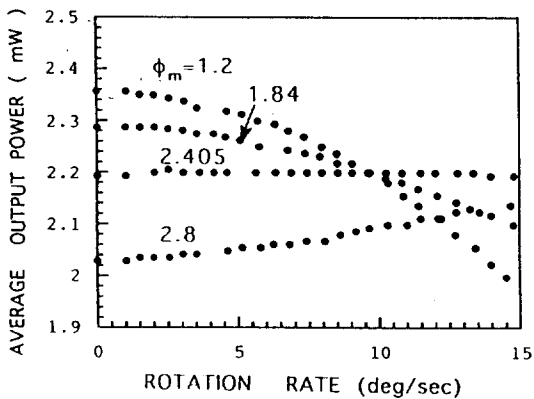


그림 6. 회전속도와 위상변조진폭의 변화에 따른 gyroscope 출력광 신호의 average power($P_{pump}=20$ mW).

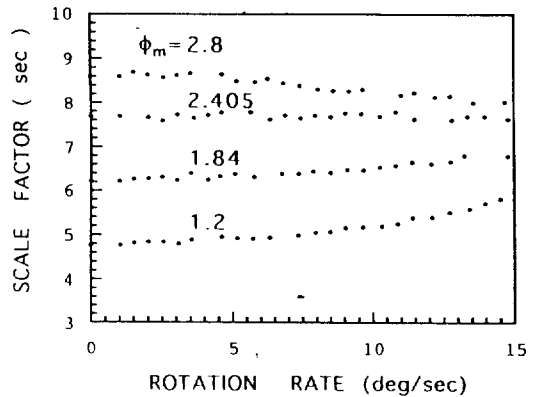


그림 8. 회전속도와 위상변조진폭의 변화에 대한 scale factor 변화.

lator를 통과한 직후의 신호광 출력을 측정하는 것이다. 펌프 power 30 mW에서 5 mW 이상의 power를 얻었으며 그 이상의 펌프 power에 대해서는 레이저 발진이 일어남을 관찰할 수 있었다.

그림 5는 그림 4와 같은 상태에서 20 mW의 펌프 power에 대하여 gyro의 출력광 spectrum을 측정하는 결과이다. 두개의 peak가 있으나 주 peak는 중심파장 1555 nm에 약 7 nm 정도의 대역폭(3 dB)을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이 결과는 광섬유 증폭기를 거친 후의 결과이므로 광섬유 loop에 입사하는 빛의 선폭은 이보다 더 넓은 것으로 생각된다.

그림 6은 gyro를 정상동작시키며, (위상변조를 가하며) 광 isolator 통과후의 변조신호광의 평균 power를 반응속도가 느린 광 power meter로 측정하는 결과이다. 이때 펌프 power는 20 mW였으며 위상차의 변조진폭을 달리하며 측정하였다. 앞의 이론에서 예측한 바와 같이 $\phi_m =$

2405 rad의 변조진폭에서 출력신호광의 평균 power는 회전속도에 관계없이 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 그러나 다른 변조진폭의 경우에는 회전속도가 변함에 따라 출력신호광의 평균 power도 변화하였다.

그림 7은 lock-in amplifier로 측정된 gyro의 최종출력으로서 위상변조진폭과 회전속도를 달리하며 측정하여 최대치가 1이 되도록 규격화 한 것이다. 이상적인 경우에 회전속도에 대한 출력곡선의 형태는 정확한 $\sin K\Omega$ (K : scale factor, Ω : 회전속도)의 꼴로 나타나야 하며 그래야 이로부터 적절한 신호처리가 가능하다. 그러나 그림 7에서 보면 여러 변조진폭의 경우에 대하여 각기 출력이 최대가 되는 회전속도에 차이가 있음을 볼 수 있다. 변조진폭 $\phi_m = 2.405$ rad인 경우에는 $\Omega = 11.7^\circ/\text{s}$ 의 회전속도에서 최대가 되나, 변조진폭이 이를 초과하는 경우 ($\phi_m = 2.8$ rad)에는 최대가 되는 회전속도가 감소하고, 미

달하는 경우($\phi_m = 1.2, 1.84$ rad)에는 최대가 되는 회전속도가 증가하는 경향이 있음을 볼 수 있다. 이는 feedback이 영향을 미치는 경우에 정상적인 출력인 $\sin K\Omega$ 외에 $\sin 2K\Omega$ 성분의 distortion이 발생한다는 연구결과^[1]와 관련있는 것으로 생각된다.

그림 7에서의 출력곡선의 모양을 좀더 상세히 관찰하기 위하여 scale factor K 를 그림 7상의 개개 측정치로부터 환산하여 그림 8에 나타내었다. 변조진폭이 $\phi_m = 2.405$ rad인 경우에는 scale factor가 회전속도의 변화에 대하여 거의 일정한 값을 유지함을 볼 수 있다. (그림 8에서 data상의 약간의 fluctuation은 실험에 사용된 회전테이블의 속도 불균일과 속도측정 오차에 기인한 것임) 따라서 그림 7에서 $\phi_m = 2.405$ rad인 경우의 출력곡선은 찌그러짐이 거의 없는 $\sin K\Omega$ (K 는 상수) 꼴임을 알 수 있다. 그러나 다른 변조진폭의 경우에는 scale factor에 차이가 있으며 또한 회전속도에 따라 변화함을 볼 수 있는데, 이는 그림 7에서의 해당곡선들이 sine 곡선으로부터 이그러짐이 있음을 말해 주는 것이다.

이상의 실험결과를 종합할 때, EDF를 사용하는 FAS 방식의 광섬유 gyroscope는 특정 위상변조진폭($\phi_m = 2.405$ rad)에 대해서는 feedback 효과로 인한 불안정성이 제거되어 회전속도변화에 무관한 안정된 scale factor를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

Erbium 첨가 광섬유 증폭기를 광원겸 광증폭기로서 사용하는 방식으로 개회로 형태의 광섬유 gyroscope를 구성하였다. Erbium 첨가 광섬유를 거쳐 5 mW 이상의 gyro 출력 power를 얻을 수 있었다. 비교적 단순한 구성방식으로서, 종래 방식의 광섬유 gyro에서 검출되는 광신호 출력의 최소한 100배 이상에 해당하는 큰 출력을 얻을 수 있으므로 gyro의 각종 신호처리시에 매우 유리할 것으로 생각된다. 또한 7 nm 이상의 파장선평을 얻었는데 이는 광증폭 후에 측정된 선평이므로 loop 광섬유에 입사하는 빛의 선평은 이보다 더 넓을 것으로 생각된다. 아직 최적화되지 않은 상태이므로 erbium 첨가 광섬유

변수를 최적화하면 출력특성은 더욱 개선할 수 있을 것이다.

한편, gyro용 loop 광섬유로부터 광섬유 증폭기형 광원(FAS)으로의 feedback에 의해 광원의 특성이 교란되어 회전속도에 따라 gyro의 scale factor가 변화함을 관찰할 수 있었다. 그러나 위상변조의 진폭을 적절히 선택해 줌으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있었다. 즉, 회전속도가 변화하더라도 변조된 feedback 신호의 평균 power가 일정하게 유지되도록 위상변조진폭을 $\phi_m = 2.405$ rad으로 결정해 줌으로써 회전속도에 무관한 일정한 scale factor를 얻을 수 있었다.

감사의 글

Er 광섬유를 제공해 주신 충남대 이동한 교수, 광섬유 접속에 도움을 주신 한국전자통신연구소 광통신연구실과 주무정 박사, 그리고 단일모드 광섬유를 제공해 주신 삼성전자에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Ezekiel, S. P. Smith, and F. Zarinetchi, in *Optical Fiber Rotation Sensing*, edited by W. K. Burns, Academic Press, San Diego(1994).
- [2] I. N. Duling III, W. K. Burns, L. Goldberg, *Opt. Lett.* **15**, 33(1990).
- [3] K. Liu, M. Dignonnet, H. J. Shaw, B. J. Ainslie, and S. P. Craig, *Electron. Lett.* **23**, 1320(1987).
- [4] P. F. Wysocki, M. J. F. Dignonnet, and B. Y. Kim, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2**, 178(1990).
- [5] K. A. Fesler, M. J. F. Dignonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, *Opt. Lett.* **15**, 1321(1990).
- [6] H. C. Lefevre, R. A. Bergh, and H. J. Shaw, *Opt. Lett.* **7**, 454(1982).
- [7] J. L. Davis and S. Ezekiel, *Opt. Lett.* **6**, 505(1982).
- [8] P. F. Wysocki, Ph. D. thesis, Stanford University (1992).
- [9] M. P. Moeller, W. K. Burns, and N. J. Frigo, *IEEE J. Lightwave Technol.* **7**, 262(1989).

Fiber-Optic Gyroscope Using Erbium-Doped Fiber Amplifier Source

Hee Gap Park

Department of Physics, Chonbuk National University, Jeonju, 560-756, Korea

Byoung Yoon Kim

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Taejon 305-701, Korea*

(Received: December 5, 1994)

Fiber-optic gyroscope with open loop configuration is constructed by using an erbium-doped fiber as a source and also as an optical amplifier. Gyro output power of more than 5 mW and 7 nm spectral width are obtained. Owing to the effects of feedback from the sensing loop to the fiber amplifier source, scale factor is found to vary depending on the rotation rate. However, constant scale factor is obtained in case that the phase difference is modulated with the amplitude $\phi_m = 2.405$ rad, in which the average power of the modulated gyro output is independent of rotation rate.