

적정주파수에서 동작하는 광섬유 자이로스코프의 광원잡음 소거

진영준* · 박태용 · 박희갑

전북대학교 물리학과

(1999년 12월 14일 받음, 2000년 3월 6일 수정본 받음)

본 논문에서는 광섬유 자이로스코프에서 자이로 출력으로부터 광원의 과잉잡음 성분을 소거할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 실험하였다. 이 방식은 기존의 방식과 달리 광원잡음 검출시에 별도의 지연 광섬유가 필요 없다는 장점이 있으며, 신호처리를 통해 자이로 출력에서 광원 과잉잡음의 적정주파수 성분만을 소거하는 방식으로서, 적정주파수에서 동작하는 광섬유 자이로에 단순하게 적용될 수 있다. 고출력 Erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하고 적정주파수로 변조된 광섬유 자이로스코프에 이 방식을 적용한 결과, 자이로 출력 스펙트럼상의 잡음이 12 dB 감소하였다. 또한, 회전 때론 자이로 출력을 측정 한 결과, 불규칙잡음 계수가 1/3.5 정도로 감소하였다.

I. 서 론

Sagnac 간섭계의 원리를 이용하는 광섬유 자이로스코프(이하 줄여서 자이로라 함)에서 회전속도의 측정감도는 매우 중요한 특성이다. 이러한 자이로의 측정감도를 높이기 위해서는 고출력의 광원을 사용하는 것이 유리하며 자이로 출력에 포함된 잡음을 최소화하여야 한다. 일반적으로 광섬유 자이로의 출력에 포함되는 잡음의 종류로는 전기 회로상의 잡음외에 광검출과정에서 발생하는 산탄잡음(shot noise)과 광원의 과잉잡음(excess noise) 등이 있다.^[1] 이 중에서 광원의 과잉잡음은 광원의 스펙트럼상의 여러 파장 성분들간의 맥놀이(beatting)에 기인하는 것으로서 강도잡음(intensity noise) 형태로 나타나며, 그 크기가 파장선폭에 반비례하고 광 power에 비례한다. 따라서 광원의 출력이 클수록 자이로의 잡음은 과잉잡음에 의해 주도되며, 광원의 출력이 어느 한도 이상으로 커지면 자이로의 SNR이 광원 과잉잡음에 의해 제한되어 광출력이 증가하더라도 SNR은 더 이상 개선되지 않는다.^[2] 그러므로 고출력 광원을 사용하여 자이로의 감도를 높이고자 하는 경우에 광원의 과잉잡음 효과를 줄이는 것이 중요하다.

고출력 광원을 사용하는 자이로에서 광원의 과잉잡음이 자이로 출력에 미치는 효과를 줄이기 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었다.^[3-6] 그 중에서 한 방법은 적절한 신호처리를 통해 자이로 출력신호에 포함된 광원의 과잉잡음을 소거함으로써 자이로 신호의 SNR을 개선시키는 방법이다.^[5,6] 이 방법은 자이로와 광원 사이의 광섬유 결합기에서 사용하지 않는 한 단말을 이용하여 자이로 코일과 같은 길이의 별도의 지연 광섬유를 거쳐 광검출기로 광원의 잡음성분을 검출하고, 이 검출된 광원잡음을 자이로 신호로 변조한 후, 이를 다시 자이로 신호로부터 빼줌으로써 자이로의 출력신호에 포함된 광원의 과잉잡음성분을 소거하는 방식이다. 본 논문의 연구에 앞서,

*한국과학기술원 전자광학특화연구센터에서 전북대 기초과학 연구소로 파견중

고출력 erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하는 자이로에서 이와 같은 신호처리를 통해서 광원잡음을 소거함으로써 자이로 출력의 SNR을 13.5 dB 개선시킨 바 있다.^[6] 그런데, 이 방식은 광원의 잡음을 검출하기 위하여 자이로 코일 광섬유와 같은 길이의 지연 광섬유를 별도로 필요로 한다. 따라서 구성이 복잡하고 자이로의 크기가 커진다는 단점이 있다.

이 논문에서는 위와 같은 문제점을 고려하여 별도의 지연 광섬유 없이도 자이로 출력으로부터 광원의 과잉잡음 성분을 소거할 수 있는 방법을 제안하고 실험하였다. 이 방식에서는 지연 광섬유 없이 광원잡음을 직접 검출하고, 이 검출된 잡음을 자이로 신호로 변조하여 적절히 감쇄시킨 후, 이를 다시 자이로 신호에 더해줌으로써 자이로의 출력신호에 포함된 광원의 과잉잡음의 적정주파수(proper frequency) 성분을 소거할 수 있다. 따라서 자이로를 적정주파수에서 동작시키는 경우에 비교적 간단히 광원잡음이 소거된 출력을 얻을 수 있다. 이 방법은 반드시 자이로를 적정주파수에서 동작시켜야 된다는 제약이 있는데, 일반적으로 적정주파수에서 자이로의 감도나 안정성 등 여러 가지 특성이 가장 우수하여 이 주파수에서의 동작이 가장 바람직한 것으로 되어 있으므로^[7] 문제되지 않을 것으로 여겨진다. 이러한 방법을 통해서 자이로 출력의 SNR이 12 dB 개선되고, 불규칙 잡음 계수(random walk coefficient)는 잡음소거를 하지 않은 경우에 비해 1/3.5 수준까지 감소시킬 수 있었다.

II. 잡음소거를 위한 신호처리

광원잡음의 적정주파수 성분을 소거하는 원리를 그림 1에 나타내었다. 광원의 출력이 시간에 대해 일정한 dc 성분 P_0 와 잡음성분 $n(t)$ 의 합으로 구성되어 있는 것으로 생각하자. 광원으로부터의 빛은 광섬유 결합기를 통해 자이로 루프에서 변조되어 자이로 신호로서 되돌아와 다시 광섬유 결합기를 거쳐 광검출기(PDI)에서 검출된다. 규격화된 자이로의 신호 파형을 $g(t)$ 라 하면, 자이로 광검출기 출력 전압 신호 $S_d(t)$ 는 다음과

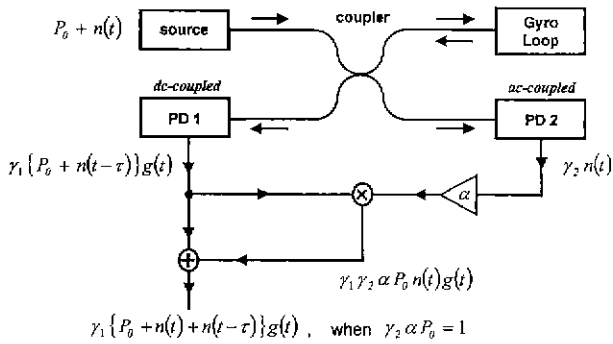


그림 1. 광원잡음소거를 위한 신호처리.

같이 표현된다.

$$S_d(t) = \gamma_1 \{P_0 + n(t - \tau)\} g(t) \tag{1}$$

위의 (1)식에서 τ 는 자이로 코일 광섬유를 빛이 한바퀴 도는데 걸리는 시간(transit time)이며, γ_1 은 자이로에서의 광손실과 광검출기의 감도 등을 포함한 상수이다.

한편, 그림 1에서 광섬유 결합기의 다른 한 단말로부터 ac 결합된 광검출기(PD2)로 광원 출력의 ac 성분, 즉, 광원의 잡음성분만을 검출한다. 검출된 잡음성분의 전압 출력을 $N_d(t)$ 라 하면

$$N_d(t) = \gamma_2 n(t) \tag{2}$$

가 되는데, 여기서 γ_2 는 광원에서 PD2 사이의 광손실과 광검출기의 감도등을 포함한 상수이다. 검출된 잡음을 자이로 신호로 변조하기 위하여 PD2에서 검출된 잡음을 적절히 증폭(또는 감쇄)시켜 PD1의 자이로 신호 출력과 곱하면, 변조된 잡음신호는

$$\begin{aligned} S_d(t) \cdot \alpha \cdot N_d(t) &= \gamma_1 \gamma_2 \alpha P_0 n(t) g(t) \\ &+ \gamma_1 \gamma_2 \alpha n(t) n(t - \tau) g(t) \\ &\approx \gamma_1 \gamma_2 \alpha P_0 n(t) g(t) \end{aligned} \tag{3}$$

이 된다. (3)식에서의 근사는 잡음성분 $n(t)$ 와 $n(t-\tau)$ 가 P_0 에 비해 매우 작은 것으로 가정하여 잡음신호의 곱 $n(t) \cdot n(t-\tau)$ 항을 무시한 결과이며, α 는 증폭률(또는 감쇄율)을 나타낸다. α 의 값을 적절히 조절하여 $\gamma_2 \alpha P_0 = 1$ 이 되도록 맞추어 준 후, 변조된 잡음신호를 자이로 출력신호 $S_d(t)$ 에 더해지면 최종 출력 $S_{out}(t)$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$S_{out}(t) = \gamma_1 \{P_0 + n(t) + n(t - \tau)\} g(t) \tag{4}$$

(1)식과 비교하여 (4)식의 결과를 보면 이상적인 광원출력 P_0 에 잡음성분 $n(t) + n(t-\tau)$ 이 더해진 형태로 나타남을 볼 수 있다. (4)식에서 나타난 잡음성분 $n(t) + n(t-\tau)$ 를 주파수 영역으로 Fourier 변환하면,

$$\begin{aligned} G(f) &= \mathcal{F}\{n(t) + n(t - \tau)\} \\ &= N(f) + N(f) e^{-j2\pi f \tau} \\ &= 2e^{-j2\pi f \tau} N(f) \cos(\pi f \tau) \end{aligned} \tag{5}$$

와 같이 표현된다. 이식에서 f 는 주파수이며 $N(f)$ 는 $n(t)$ 의 주파수 영역에서의 Fourier 변환값이다. 그러면 신호처리된 잡음의 power spectrum은

$$|G(f)|^2 = 4|N(f)|^2 \cos^2(\pi f \tau) \tag{6}$$

이 된다. 위의 (6)식으로부터 신호처리된 잡음의 power 밀도는 주파수에 따라 변화하고 $\cos^2(\pi f \tau)$ 에 비례하며, $f_p = 1/2\tau$ 로 주어지는 자이로의 적정주파수에서 잡음 power 밀도가 최소가 됨을 알 수 있다. 즉, 자이로를 적정주파수로 변조하고 적정주파수 성분의 출력만을 취할 경우, 이상과 같은 신호처리를 통하여 광원의 과잉잡음이 소거된 자이로의 출력을 얻을 수 있다.

III. 실험 및 결과

광원잡음 소거를 위한 실험 구성도를 그림 2에 나타내었다. 자이로의 광원으로 평균 파장이 1553.5 nm인 erbium 첨가 광섬유 광원¹⁶⁾을 사용하였으며, 광원 출력 power는 39 mW이고 파장선폭은 24.5 nm였다. Sagnac 루프는 편광상태를 일정하게 유지시키기 위해서 220 m 길이의 편광유지 광섬유로 구성하였고 루프의 직경은 15.5 cm였다. 2개의 광섬유 결합기 모두 결합비율이 50:50의 편광유지 광섬유 결합기를 사용하였다. Sagnac 루프내에서 PZT 위상 변조기를 사용하여 자이로를 적정주파수인 455 kHz로 변조해주었고, 위상차 변조진폭은 1.8 rad였다. 광검출기(PD1, PD2)는 InGaAs PIN photodiode를 사용하였으며 PD1으로 검출된 자이로 신호의 평균 검출광 power는 466 μ W였다. 한편, 자이로를 변조하지 않은 경우에 검출광 power는 696 μ W였다.

광원에 포함된 잡음성분을 ac 결합된 광검출기(PD2)로 검출하였고, 광검출기 앞단에 별도의 광섬유 편광기를 두어 광원의 과잉잡음 성분중 자이로 루프에 입사하는 성분과 동일한 편광성분만을 검출하였다. 앞의 이론에서 설명한 바와 같이, 광원의 잡음신호를 광감쇄기와 전기적 증폭기를 거쳐 자이로 출력 신호와 곱한 후, 이 곱한 신호를 다시 자이로 출력 신호에 더해 주었으며, 광원 과잉잡음의 적정주파수 성분이 소거 되도록 증폭기의 증폭레벨을 조절하였다. 스펙트럼 분석기(RF spectrum analyzer)로 자이로 출력의 잡음 스펙트럼을 측정하고, lock-in amplifier로 자이로 출력 신호의 변조 주파수(적정

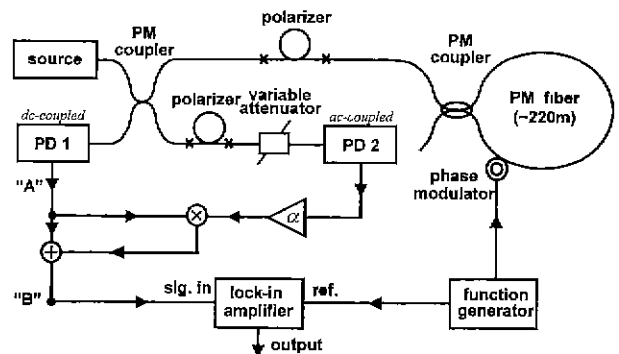


그림 2. 실험구성도.

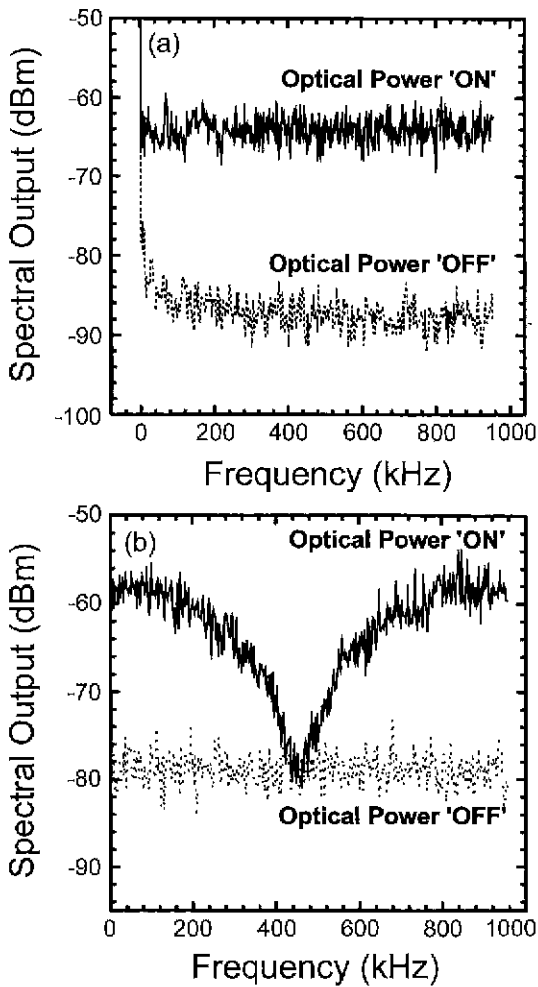


그림 3. 자이로를 위상변조하지 않은 경우의 자이로 출력의 잡음 스펙트럼. (a) 잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 잡음 소거 방식을 적용한 경우.

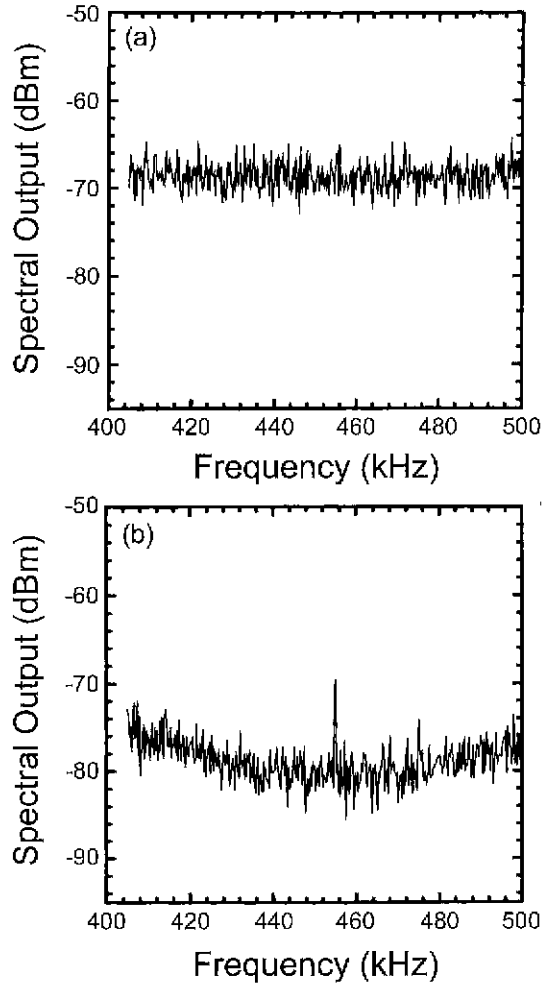


그림 4. 자이로를 위상변조한 경우의 자이로 출력 스펙트럼 (위상차 변조진폭 : 1.8 rad). (a) 잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 잡음 소거 방식을 적용한 경우.

주파수) 성분을 측정하였다.

그림 3은 자이로를 위상변조 하지 않은 경우에 대해서 광원을 켜(ON) 경우와 광원을 끈(OFF) 경우, 즉, 전기적 잡음만이 존재하는 경우에 대한 잡음 스펙트럼(noise floor spectrum)을 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이다. 그림 3(a)는 잡음을 소거하기 전의 잡음 스펙트럼을 그림 2의 “A”의 위치에서 측정된 결과이고, 그림 3(b)는 이 논문에서 설명한 신호처리를 통해 잡음을 소거한 자이로 출력의 잡음 스펙트럼을 그림 2의 “B”의 위치에서 측정된 것이다. 우선 광원을 켜 경우에 신호처리 전후의 잡음 스펙트럼을 보면, 신호처리를 통해 잡음을 소거함으로써 자이로 출력의 잡음이 소거되지 않은 경우에 비해서 적정주파수(455 kHz)에서 16 dB가 감소한 것을 볼 수 있다. 적정주파수외의 다른 주파수에서는 오히려 잡음이 증가한 주파수 영역이 있음도 볼 수 있다. 그런데 그림 3(b)의 신호처리 후의 잡음 스펙트럼에서 광원을 켜 상태와 끈 상태를 비교해보면 광원과 관련된 잡음은 실질적으로 거의 다 소거되었음을 알 수 있다. 그러나, 광원을 끈 경우에 신호처리 전후의 잡음 스펙트럼을 비교해보면, 신호처리 과정에서 8 dB 가량의 전기적 잡음이 추가된 것을 볼 수 있다. 그림 3의 실험결과를

종합하면, 자이로 출력에 포함된 잡음 중 광원에 의한 잡음 성분은 신호처리에 의해 대부분 소거되었으나 SNR의 개선은 신호처리 회로잡음에 의해 제한되고 있음을 알 수 있다.

한편, 자이로를 정상적으로 위상변조(위상차 변조진폭 1.8 rad)하는 경우에 대해서 자이로 출력의 잡음 스펙트럼을 스펙트럼 분석기로 측정하고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 3에서와 마찬가지로 그림 4(a)는 잡음을 소거하기 전인 “A”의 위치에서 측정된 결과이고, 그림 4(b)는 잡음을 소거한 후인 “B”의 위치에서 측정된 결과이다. 잡음소거 후의 결과인 그림 4(b)에서 위상변조 주파수인 455 kHz 성분의 작은 peak는 지구 자전속도에 대한 자이로 신호인데, 잡음소거 전인 그림 4(a)에서는 잡음레벨이 자이로 신호의 크기와 비슷하기 때문에 잡음에 묻혀 자이로 신호의 peak가 나타나지 않았다. 신호처리를 통해 잡음을 소거한 경우에 잡음 power 레벨이 잡음소거 전에 비해서 12 dB가 낮아졌다. 신호처리 전후에 자이로 신호레벨은 같게 유지되도록 회로가 구성되었으므로 잡음레벨의 감소는 SNR이 향상된 정도를 의미한다. 위상변조하지 않은 경우에 비하여 잡음감소 정도가 떨어지는 이유는 변조로

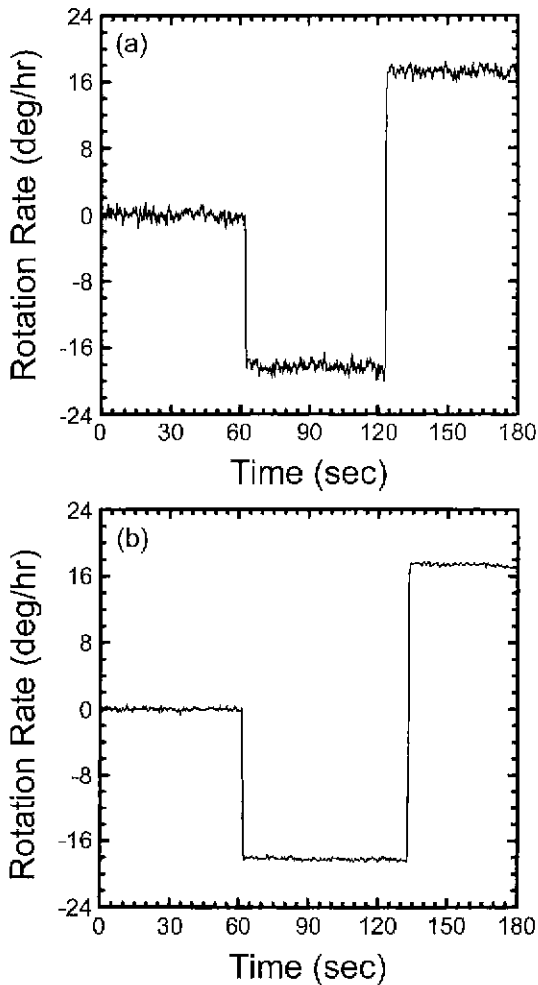


그림 5. 회전에 따른 자이로 출력. (a) 잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 잡음 소거방식을 적용한 경우.

인해 평균 검출광 power가 감소했기 때문으로 해석된다. 또한, 그림 3의 경우와 마찬가지로, 자이로 출력의 SNR 개선이 신호처리 회로의 전기적 잡음에 의해서 제한되었다.

그림 4에서와 동일한 실험 조건하에서 0 deg/hr와 ±17 deg/hr의 회전속도에 대해 자이로 출력신호의 변조 주파수 성분을 lock-in amplifier로 측정하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 잡음소거 전의 자이로 출력이고 그림 5(b)는 잡음소거 후의 자이로 출력으로서, 이 때 lock-in amplifier의 시간상수는 0.2초였다. 잡음소거 전에는 불규칙잡음 계수(random walk coefficient)가 $6.4 \times 10^{-3} \text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 였는데, 잡음소거 후에는 $1.8 \times 10^{-3} \text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 로 대략 1/3.5 정도로 감소하였다. 자이로 출력의 SNR이 신호처리 회로의 전기적 잡음에 제한되기 때문에, 만일 이러한 전기적 잡음이 작다면 광원 과잉잡음의 소거에 의한 불규칙잡음 계수의 감소폭은 더욱 커질 것으로 여겨진다.

그림 5와 동일한 실험 조건하에서 PD1의 평균 검출광 power를 변화시키면서 잡음을 소거하기 전과 소거한 후의 자이로 출력을 lock-in amplifier로 측정하고, 이로부터 불규칙잡음 계수를 계산한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서

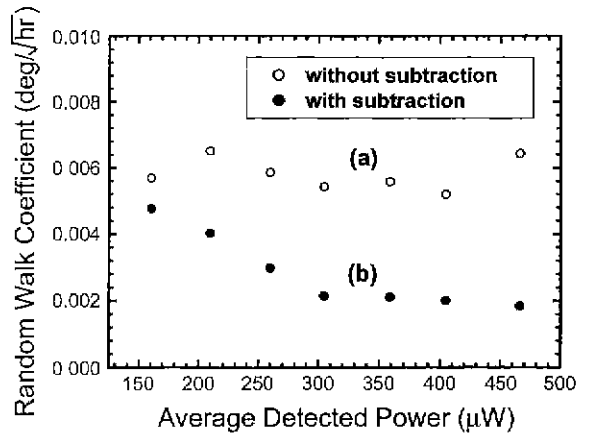


그림 6. 평균 검출광 power에 따른 불규칙 잡음 계수. (a) 잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 잡음 소거방식을 적용한 경우.

잡음을 소거하기 전에는 불규칙잡음 계수가 검출광 power의 변화에 거의 무관하게 나타났다. 이는 본 실험과 같이 검출광 power가 큰 경우에는 불규칙 잡음 계수가 광원의 과잉잡음에 의해서 제한되어 검출광 power가 커지더라도 더 이상 줄어들지 않는 것으로 해석된다. 그러나, 광원의 과잉잡음을 소거한 경우에는 검출광 power가 증가할수록 불규칙잡음 계수가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서와 같은 광원 과잉잡음의 소거방식은 고효율 광원을 사용하는 자이로에서 자이로의 SNR 개선에 매우 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

적정주파수에서 동작하는 광섬유 자이로스코프에서 기존의 방식과 달리 별도의 지연 광섬유 없이 직접 검출한 광원잡음을 이용하여 신호처리를 통해 광원 과잉잡음을 소거하는 방식을 실험하였다. 즉, 직접 검출한 광원잡음을 자이로 신호로 변조하여 잡음 섞인 자이로 신호에 더해줌으로써 자이로 출력단에서 광원의 과잉잡음의 적정주파수 성분을 소거할 수 있었다. 고효율(39mW) erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하고 적정주파수(455 kHz)로 변조(위상차 변조진폭 1.8 rad)된 자이로에 이 방식을 적용하여 자이로 출력 스펙트럼상의 잡음레벨을 12 dB 감소시킬 수 있었다. 또한, 같은 조건에서 회전에 따른 자이로 출력을 측정할 결과, 불규칙 잡음 계수가 1/3.5 정도로 감소하였다. 또한, 검출광 power를 변화시키면서 불규칙잡음 계수를 측정할 결과, 검출광 power가 클수록 불규칙 잡음 계수의 감소폭도 더욱 커지는 것으로 나타났다. 본 논문의 실험에서 자이로의 SNR 개선이 신호처리 회로 잡음에 의해서 제한되었으므로, 실험에서 사용한 회로의 전기적 잡음을 줄인다면 불규칙잡음 계수를 더욱 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구의 실험에 많은 도움을 주신 KAIST의 김병윤 교수,

홍중범씨, 여영배씨께 감사를 드립니다. 본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

[1] W. K. Burns, R. P. Moeller, and A. Dandridge, IEEE Photon. Tech. Lett. **2**, 606 (1990).
 [2] P. R. Morkel, R. I. Laming, and D. N. Payne, Elec. Lett. **26**,

97 (1989).
 [3] H. C. Lefevre, S. Vatoux, M. Papuchon, and C. Puech, Proc. of Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **719**, 101 (1986).
 [4] J. Blake and I. S. Kim, Opt. Lett. **19**, 1648 (1994).
 [5] R. P. Moeller and W. K. Burns, Opt. Lett. **16**, 1902 (1991).
 [6] 진영준, 박태용, 박희갑, 한국광학회지, **10**, 396 (1999).
 [7] H. C. Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, Boston, 1992).

Subtraction of source noise in a fiber-optic gyroscope operating at the proper frequency

Young-Jun Chin, Tae Yong Park and Hee Gap Park

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(Received December 14, 1999, Revised manuscript received March 6, 2000)

We proposed and demonstrated a new scheme for subtracting the source excess noise from the output of the fiber-optic gyroscope. Unlike the previous methods, this scheme has an advantage of not requiring a delaying fiber for source noise detection and can be simply applied to fiber gyroscope operating at the proper frequency. By using this scheme, the proper frequency component of the source excess noise was subtracted from the gyroscope output. As a result, we obtained the reduction of noise by 12 dB (electrical) which was measured from the noise floor spectrum in the fiber gyroscope modulated at the proper frequency. We also obtained the random walk coefficient of the gyro output reduced by a factor of 3.5.