

고출력 Erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하는 자이로스코프에서 광원 과잉잡음의 소거

진영준 · 박태용 · 박희갑

전북대학교 물리학과

(1999년 8월 3일 받음, 1999년 9월 30일 수정본 받음)

고출력 erbium 첨가 광섬유 광원을 이용하는 광섬유 자이로스코프에서 측정감도를 개선하기 위하여 신호처리를 통해 자이로 출력단에서 출력신호에 포함된 광원의 과잉잡음 성분을 소거하였다. 진폭 1.8 rad으로 변조된 자이로의 잡음 스펙트럼을 측정된 결과, 본 논문의 방식으로 과잉잡음을 소거한 경우가 소거하지 않은 경우에 비해서 잡음이 13.5 dB 감소하였다. 또한, 회전에 따른 자이로 출력을 측정된 결과, 불규칙잡음 계수가 1/4~1/5 정도로 감소하였다.

I. 서 론

광섬유 자이로스코프(이하 줄여서 자이로라 함)는 Sagnac 간섭계의 원리를 이용한 회전속도 센서로서, 미사일의 자세제어나 인공위성, 비행기, 선박, 잠수함과 자동차 등의 항법장치에 사용되고 있다.^[1] 자이로에서는 회전속도에 대한 측정감도가 가장 중요한 특성항목인데, 측정감도를 개선하려면 신호대 잡음비(SNR)를 향상시켜야 하며 이를 위해서는 고출력 광원을 사용하는 것이 바람직하다. 일반적으로 광섬유 자이로의 잡음에는 회로상의 전기적 잡음외에 광검출과정에서 발생하는 산탄잡음(shot noise)과 과잉 광자잡음(excess photon noise, 이하 줄여 과잉잡음이라 함)등이 있다.^[2] 그런데, 산탄잡음과 과잉잡음은 검출광 출력이 클수록 증가하는 잡음이므로, 고출력 광원을 사용하는 자이로의 경우에는 전기회로상의 잡음보다 이러한 산탄잡음과 과잉잡음이 더 큰 문제가 될 수 있다.^[2,3] 산탄잡음은 광검출 과정에서 불가피하게 생기는 양자잡음으로서 그 크기가 검출광 출력의 제곱근에 비례한다. 반면에, 광원에서 발생하는 과잉잡음은 주로 여러 스펙트럼 성분들간의 맥놀이로 기인하는 것으로서, 강도잡음 형태로 나타나며 그 크기가 검출광 출력에 직접 비례한다. 따라서 검출광 출력이 크면 클수록 자이로의 SNR은 과잉잡음에 의해서 제한되며, 이러한 경우에는 광원의 출력을 키우더라도 더 이상 SNR이 개선되지 않는다. 이러한 점에서, 고출력 광원을 사용하는 자이로의 SNR을 향상시키는데는 광원의 과잉잡음 효과를 줄이는 것이 매우 중요하다.

광원의 과잉잡음이 자이로 출력에 미치는 효과를 줄이기 위하여 여러 가지 방법이 제안되었다.^[4-6] 그중 한 방법은 자이로를 변조진폭 π 부근의 사각파로 위상변조함으로써 자이로 신호의 신호대 잡음비를 개선하는 방식이다.^[4] 그러나 이 방식은 사각파 변조가 가능하도록 위상변조기의 대역폭이 충분히 커야 하므로 집적광학 방식의 자이로 칩을 사용하는 경우에만 가능하다는 단점이 있다. 한편, 변조 진폭에 따라 신호 채널과 quadrature 채널간에 잡음분포가 달라지는 점에 착안하여 잡음

의 대부분이 quadrature 채널에 몰리도록 변조진폭을 취함으로써 신호 채널의 잡음을 최소화하여 자이로 신호의 신호대 잡음비를 키우는 방법도 제안되었다.^[5] 또한 1.06 μm 파장 대역의 Nd 첨가 광섬유 광원을 사용하는 자이로에서 적절한 신호처리를 통해 자이로 신호에 포함된 광원의 잡음을 상쇄시켜 자이로의 SNR을 14 dB 개선시킨 연구결과도 보고되었다.^[6]

이 논문에서는 고출력 erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하는 자이로에서 자이로 출력 신호로부터 광원의 과잉잡음 성분을 소거하는 실험을 수행하였다. Erbium 첨가 광섬유(EDF: erbium-doped fiber)를 이용한 광원은 1.55 μm 대역의 중심 파장이 온도 변화에 대해 비교적 안정되고 파장선폭이 넓어서 고성능 고안정도의 자이로용 광원으로 매우 적합하다.^[7,8] 따라서 EDF를 자이로에 응용하는 방식에 관한 연구가 다양하게 이루어져 왔다.^[9-13] EDF 광원의 출력은 수십 mW에 이르므로 이를 자이로에 사용하는 경우에 SNR은 광원의 과잉잡음에 의해 제한된다. 이 논문의 실험에서는 자이로 코일과 같은 길이의 별도의 지연 광섬유를 거쳐 광원의 과잉잡음을 검출하고, 검출된 잡음을 자이로 신호로 변조한 후, 이를 자이로 신호로부터 빼줌으로써 자이로의 출력신호에 포함된 광원의 과잉잡음성분을 소거하였다. 이로써 자이로 출력의 SNR이 13.5 dB 개선되고 불규칙잡음 계수(random walk coefficient)는 종전의 1/4~1/5 수준까지 감소시킬 수 있었다.

II. 고출력 광원을 사용하는 자이로의 신호대 잡음비

고출력 광원을 사용하는 자이로에서 광신호 검출과정에서 발생하는 산탄잡음이나 과잉잡음이 회로의 전기적 잡음에 비해 충분히 크다고 가정하는 경우, 검출된 신호의 신호대 잡음비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[3]

$$\text{SNR} = \frac{\langle I_s \rangle^2}{\langle (\Delta I_s)^2 \rangle} = \frac{\langle I_s \rangle}{2eB + \langle I_s \rangle B / \Delta\nu} \quad (1)$$

여기서, I_s 는 광검출기에 흐르는 광전류로서 검출광 power에

비례하는 값이고, e 는 전하량을 나타내며, $\langle \rangle$ 는 시간평균을 의미한다. 또한, B 는 검출 시스템의 전기적 대역폭이고, $\Delta\nu$ 는 광원의 주파수선평폭을 나타내는데 주파수선평폭을 파장선평폭으로 표현하면, 크기만을 고려할 때, $\Delta\nu = c\Delta\lambda / \lambda^2$ 이고 이때 파장선평폭 $\Delta\lambda$ 는

$$\Delta\lambda = \left[\int P(\lambda) d\lambda \right]^2 / \int P^2(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

으로 정의되는 양이다.^[3] (1)식의 분모에서 첫째항은 산탄 잡음에 해당하는 양이며, 둘째항은 과잉잡음에 해당하는 양이다. 산탄잡음과 과잉잡음의 SNR 기여가 대등한 상태의 광검출기 전류는 $\langle I_s \rangle = 2ec\Delta\lambda / \lambda^2$ 인데, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 25 \text{ nm}$ 인 경우를 대입하면 $\langle I_s \rangle = 1.0 \mu\text{A}$ 이다. 광검출기로서 InGaAs PIN photodiode를 사용하는 것을 감안하여 광검출기의 감도를 0.9 A/W로 취하면 이는 1.1 μA 의 검출광 출력에 해당한다. 검출광 출력이 이보다 충분히 큰 경우, (1)식에서 $2eB \ll \langle I_s \rangle B / \Delta\nu$ 이 되고, SNR은 과잉잡음에 의해 제한되어 검출광 출력이 증가하더라도 SNR은 더 이상 개선되지 않는다. 따라서, 고출력의 광원을 갖는 자이로의 경우, SNR을 향상시키기 위해서는 광원의 선평폭을 늘리거나 전기적 대역폭을 줄여야 하며, 또는 광원의 과잉잡음을 어떤 방법으로든지 소거시켜 주어야 함을 알 수 있다.

III. 과잉잡음 소거 원리

광원 과잉잡음 소거의 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 되돌아와 다시 광섬유 결합기를 거쳐 광검출기(PD1)에서 전기신호로 변환된다. 단위 광원출력에 대해 변조되어 돌아오는 자이로의 출력 파형을 $g(t)$ 라 하면 자이로 광검출기에서 검출된 전압 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$S_d(t) = \gamma_1 \{ P_0 + n(t - \tau) \} g(t) \quad (3)$$

위의 (3)식에서 τ 는 자이로 루프에서의 지연시간이며, γ_1 는 자이로에서의 광손실과 광검출기의 감도를 포함한 상수이다.

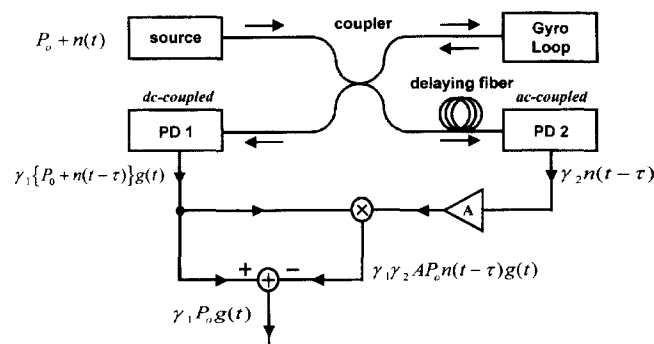


그림 1. 광원의 과잉잡음의 소거원리.

한편, 그림 1의 광섬유 결합기의 한 단말을 이용하여 광원의 잡음을 검출한다. 자이로 루프와 같은 길이의 별도의 지연 광섬유를 거치도록 하여 τ 의 시간 지연을 겪게 한 후, ac 결합된 광검출기(PD2)로 광원 출력의 ac 성분, 즉, 잡음 성분을 검출한다. 검출기의 잡음신호 출력을 $N_d(t)$ 라 하면

$$N_d(t) = \gamma_2 n(t - \tau) \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} S_d(t) \cdot A \cdot N_d(t) &= \gamma_1 \gamma_2 A P_0 n(t - \tau) g(t) \\ &\quad + \gamma_1 \gamma_2 A \{ n(t - \tau) \}^2 g(t) \\ &\approx \gamma_1 \gamma_2 A P_0 n(t - \tau) g(t) \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. (5)식에서의 근사는 잡음성분 $n(t - \tau)$ 가 P_0 에 비해 매우 작은 것으로 가정하여 $n(t - \tau)$ 의 제곱항을 무시한 결과이며, A는 증폭률(또는 감쇄율)을 나타낸다. 마지막으로 자이로 출력신호 $S_d(t)$ 로부터 위의 (5)식으로 표현된 변조된 잡음신호를 빼주면 최종 출력 $S_{out}(t)$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$S_{out}(t) = \gamma_1 P_0 g(t) + \gamma_1 (1 - \gamma_2 A P_0) n(t - \tau) g(t) \quad (6)$$

위의 (6)식에서 증폭률(또는 감쇄율) A의 값을 적절히 조절하여 $\gamma_2 A P_0 = 1$ 이 되도록 맞추어 주면 둘째항이 0이 되어 잡음이 소거된 자이로 출력신호 $\gamma_1 P_0 g(t)$ 를 얻을 수 있다.

IV. 실험 및 결과

광원잡음 소거를 위한 실험구성도는 그림 2와 같다. 큰 출력을 얻기 위하여 EDF 광원에 또 다른 EDF 증폭기를 직렬 연결하여 자이로용 광원을 구성하였다. 직렬 연결된 광원의 출력은 39 mW였다. 광원 출력광 스펙트럼은 그림 3과 같으며 측정된 스펙트럼으로부터 (2)식에 의해 구한 파장선평폭은 24.5 nm였다. 광원으로부터 빛이 광섬유 편광기를 거쳐 길이 220

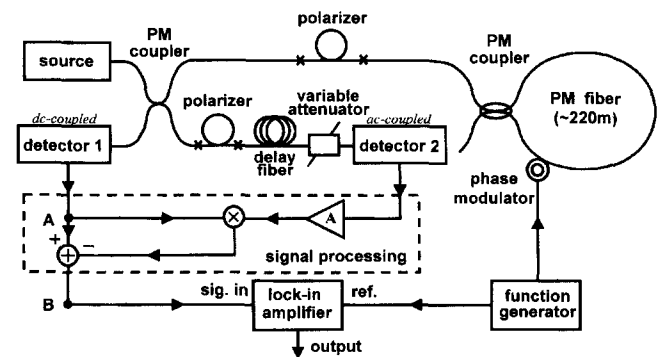


그림 2. 실험구성도.

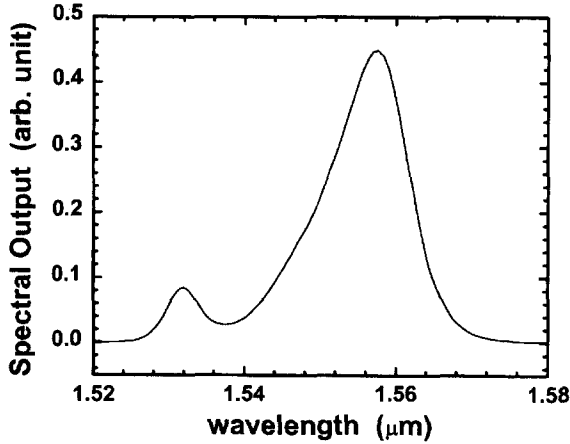


그림 3. Erbium 첨가 광섬유 광원의 출력광 스펙트럼.

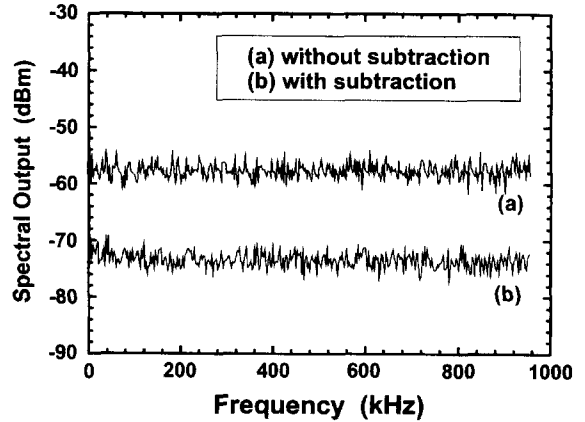


그림 4. 자이로를 위상변조하지 않은 경우의 자이로 출력의 잡음 스펙트럼. (a) 과잉잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 과잉잡음을 소거한 경우.

m의 Sagnac 루프로 입사하는데, 루프 광섬유를 감은 spool의 직경은 15.5 cm였다. Sagnac 루프를 편광유지 광섬유로 구성하여 별도의 편광조절기 없이 편광이 일정하게 유지되도록 하였으며, 광섬유 결합기를 50:50의 편광유지 광섬유 결합기를 사용함으로써, 광섬유 결합기를 지날 때 위상이 일정하게 유지되도록 하였다. 자이로를 PZT(Lead Zirconate Titanate) 위상 변조기를 사용하여 적정주파수인 455 kHz로 위상변조해 주었고, 위상차 변조진폭은 1.8 rad였다. 자이로 출력 신호광을 dc 결합된 광검출기로 검출하였으며, 이때 평균 검출광 power는 530 μ W였다. 한편, 자이로를 변조하지 않은 경우에 검출광 출력 790 μ W였다.

자이로 루프에서의 지연시간과 같은 시간만큼 지연된 잡음광을 검출하기 위하여 자이로 루프와 같은 길이의 일반 단일 모드 광섬유를 거치게 한 후, ac 결합된 광검출기로 잡음 성분을 검출하였다. 한편, EDF 광원의 출력광은 비편광되어 있으므로 상호 독립적인 두 편광성분의 합으로 생각할 수 있다. 그런데 두 직교 편광 성분 중 한 성분만이 편광기를 지나 자이로의 동작에 기여하므로 광원의 과잉잡음 성분중 자이로 루프로 입사하는 성분과 동일한 편광성분의 잡음만을 검출해야만 신호처리에 의해서 자이로 신호에 포함된 광원의 과잉잡음을 상쇄시킬 수 있다. 따라서, 지연 광섬유 앞단에 별도의 편광기를 두어 자이로 루프로 입사하는 성분과 동일한 편광성분만을 검출하였다.

앞의 이론에서 설명한 바와 같이, 광감쇄기와 전기적 증폭기로서 검출된 잡음신호의 전압레벨을 조절하여 자이로 출력 신호와 곱한 후, 이 곱한 신호를 다시 자이로 출력 신호광에서 빼 줌으로써, 광원의 과잉잡음성분을 소거하였다. 자이로 출력의 잡음 스펙트럼을 스펙트럼 분석기(RF-spectrum analyzer)로 측정하고, 자이로 출력 신호의 변조 주파수 성분을 lock-in amplifier로 측정하였다.

우선, 자이로를 위상변조 하지 않은 경우에 대해서 자이로 출력단에서의 잡음 스펙트럼(noise floor spectrum)을 스펙트럼 분석기로 측정하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)는 과잉 잡음을 소거하기 전의 결과로서 그림 2의 A의 위치에서 측정된 결과이고, 그림 4(b)는 이 논문에서 설명한 신호

처리를 통해 잡음을 소거한 결과로서 그림 2의 B의 위치에서 측정된 것이다. 신호처리를 통해 잡음을 소거함으로써 자이로 출력의 잡음 스펙트럼이 과잉잡음을 소거하지 않은 경우에 비해서 16 dB가 감소하였다. 이 논문의 신호처리에서 신호 출력의 크기는 변하지 않으므로 이는 SNR 향상의 정도를 의미한다. 16 dB의 잡음감소는 과잉잡음의 약 84%가 소거되었음을 의미한다. 만일 과잉잡음이 완전히 소거되어 SNR이 산탄잡음에 의해서만 제한되는 것을 가정하는 경우, (1)식에 본 실험의 조건을 대입하면 SNR의 개선은 29 dB에 이르는 것으로 계산된다. 물론, 회로내 전기적 잡음과 자이로의 다른 잡음요인들이 무시된 결과이므로 실제로는 이에 미치지 못할 것이나 과잉잡음을 보다 정교하게 상쇄시킴으로써 SNR을 크게 개선시킬 수 있음을 보여준다.

한편, 그림 5는 자이로를 정상적으로 위상변조하는 경우에 대해서 자이로 출력단에서의 잡음 스펙트럼을 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이다. 변조 주파수는 자이로의 적정주파수인 455 kHz였으며, 위상차 변조 진폭은 신호의 크기가 가장 큰 1.8 rad이었다. 그림 5(a)는 광원의 과잉 잡음을 소거하기 전에 자이로 출력 스펙트럼을 측정된 결과이고, 그림 5(b)는 과잉잡음을 소거한 자이로 출력을 측정된 결과이다. 신호처리를 통해 과잉잡음을 소거한 경우에 잡음 스펙트럼이 과잉잡음을 소거하지 않은 경우에 비해서 14 dB가 감소하였다. 위상변조하지 않은 경우에 비하여 잡음감소 정도가 다소 떨어지는데, 이는 변조로 인하여 평균 검출광 power가 감소했기 때문으로 해석된다. 그림 5에서 위상변조 주파수인 455 kHz 성분의 작은 peak는 지구 자전속도에 대한 자이로 신호를 의미한다. 자이로 신호 양 옆의 큰 peak(431 kHz, 479 kHz)들이 존재하는데, 이 peak들은 자이로를 위상변조하는 PZT가 자체 공진 주파수(24 kHz)에서 잡음 전압에 의해 구동되기 때문에 나타난 것으로 해석된다. 매우 작은 회전속도인 지구자전속도에 대해 측정했기 때문에 이러한 peak들이 자이로 회전신호에 비해서 상대적으로 매우 크게 나타났으나, 최종적으로 lock-in amplifier로 변조주파수 성분만을 측정하므로 이 peak들은 자이로 출력에 큰 영향을 주지는 않는다. 다만 이

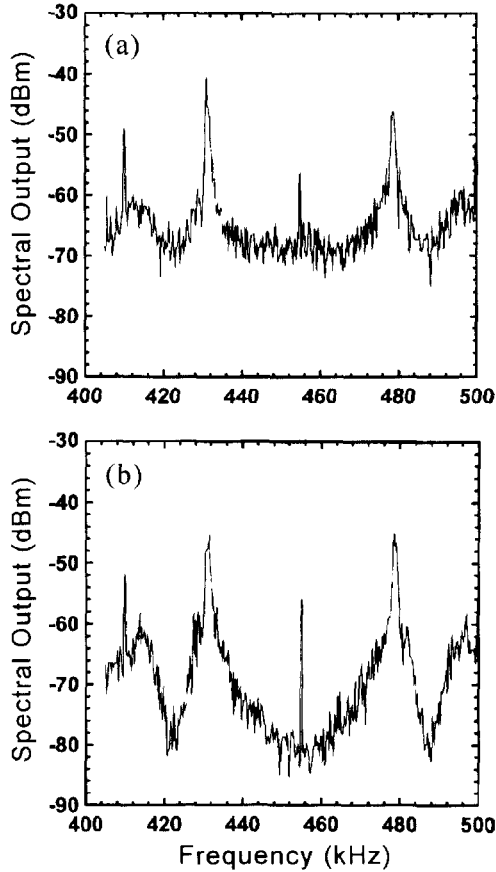


그림 5. 자이로를 위상변조하는 경우에 자이로 출력 스펙트럼 (위상차 변조진폭 : 1.8 rad). (a) 과잉잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 과잉잡음을 소거한 경우.

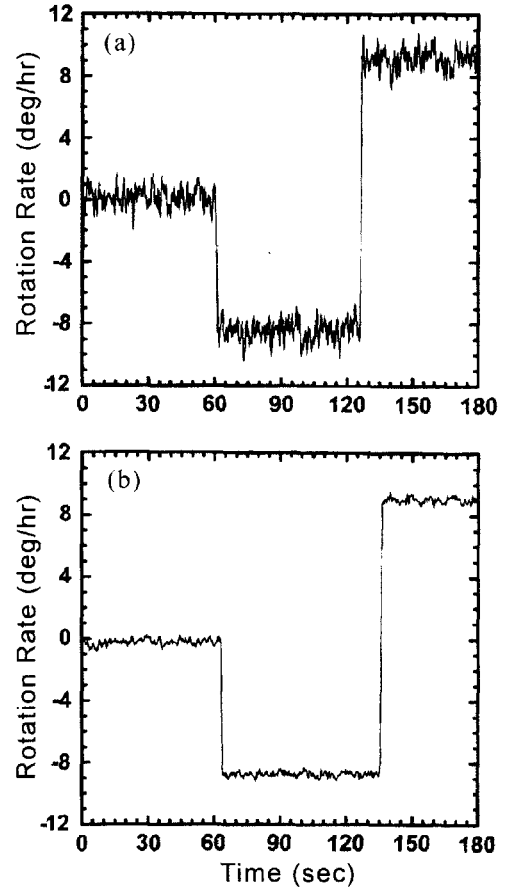


그림 6. 회전에 따른 자이로 출력. (a) 과잉잡음을 소거하지 않은 경우, (b) 과잉잡음을 소거한 경우.

peak들의 기승부분에 의해 변조주파수 성분의 잡음이 약간 증가하므로 잡음 축소를 위해서는 PZT 구동시에 공진 주파수 성분을 제거하는 필터를 사용하면 효과가 있을 것으로 생각된다.

그림 5에서와 동일한 실험 조건하에서 몇가지 회전속도에 대해 자이로 출력신호의 변조 주파수 성분을 lock-in amplifier로 측정하여 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 과잉잡음을 소거하기 전의 자이로 출력이고 그림 6(b)는 과잉잡음을 소거한 경우의 자이로 출력으로서, 이 때 lock-in amplifier의 시간상수는 0.2초였다. 과잉잡음을 소거하기 전에는 불규칙 잡음 계수가 $2.6 \times 10^{-2} \text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 였는데, 과잉잡음을 소거한 후에는 $5.7 \times 10^{-3} \text{deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 로 대략 1/4.5 정도로 감소하였다. 한편, 참고문헌 6의 경우와 비교해 볼 때, 이 논문의 방식이 같은 위상차 변조진폭에 대해서 불규칙 잡음 계수가 더욱 큰 폭으로 감소하였는데, 이는 이 논문의 방식이 참고문헌 6의 경우에 비해서 자이로의 SNR을 더욱 크게 개선시킬 수 있음을 의미한다. 그리고, 그림 6의 결과는 그림 5의 결과와 일치되는 것으로, 만일 자이로 신호 검출채널과 잡음 검출채널간의 주파수 응답특성이 일치하고 회로의 전기적 잡음이 작다면 광원 과잉잡음의 소거에 의해서 불규칙 잡음 계수는 더욱 큰 폭으로 감소할 것으로 여겨진다.

V. 결 론

Erbium 첨가 광섬유 광원을 사용하는 자이로스코프에서 직접 검출한 광원잡음을 자이로 신호로 변조하여 잡음섞인 자이로 신호로부터 빼줌으로써 자이로 출력단에서 광원의 과잉잡음을 소거할 수 있었다. 자이로의 위상차 변조진폭이 1.8 rad인 경우에 대해서 자이로 출력의 잡음 스펙트럼을 측정할 결과, 광원의 과잉잡음을 소거한 경우가 소거하지 않은 경우에 비해서 잡음이 13.5 dB 감소하였다. 또한, 같은 조건에서 회전에 따른 자이로 출력을 측정할 결과, 불규칙 잡음 계수가 1/4.5 정도로 감소하였다. 이 방식에서 과잉잡음을 효과적으로 상쇄시키기 위해서는 자이로 신호 검출채널과 광원잡음 검출채널에 사용된 두 광검출기 및 이에 따른 전기회로의 주파수 응답특성이 서로 일치해야 한다. 따라서 가능한 한 주파수 특성이 같은 광검출기를 선택하여 검출회로를 구성하고 전기적 잡음이 작도록 잘 설계된 회로를 사용하면 자이로의 불규칙 잡음 계수를 더욱 감소시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구의 실험에 많은 도움을 주신 KAIST의 김병윤 교수,

홍중범씨, 여영배씨께 감사를 드립니다. 본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터와 광전자연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] H. C. Lefevre, "The Fiber-Optic Gyroscope" Artech House, Boston (1992).
- [2] W. K. Burns, R. P. Moeller, and A. Dandridge, IEEE Photon. Technol. Lett. **2**, 606 (1990).
- [3] P. R. Morkel, R. I. Laming, and D. N. Payne, Electron. Lett. **26**, 97 (1989).
- [4] H. C. Lefevre, S. Vatoux, M. Papuchon, and C. Puech, Proc. SPIE **719**, 101 (1986).
- [5] J. Blake and I. S. Kim, Opt. Lett. **19**, 1648 (1994).
- [6] R. P. Moeller and W. K. Burns, Opt. Lett. **16**, 1902 (1991).
- [7] D. C. Hall, W. K. Burns, and R. P. Moeller, IEEE J. Lightwave Technol. **13**, 1452 (1995).
- [8] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim and H. J. Shaw, IEEE J. Lightwave Technol. **12**, 550 (1994).
- [9] L. A. Wang, and C. D. Chen, Electron. Lett. **32**, 1815 (1996).
- [10] H. G. Park, K. A. Lim, Y. J. Chin, and B. Y. Kim, IEEE J. Lightwave Technol. **15**, 1587 (1997).
- [11] Jefferson L. Wagener, Michel J. F. Digonnet, and Herbert J. Shaw, IEEE J. Lightwave Technol. **15**, 1689 (1997).
- [12] H. G. Park, Y. J. Chin, and B. Y. Kim, Electron. Lett. **35**, 167 (1999).
- [13] H. G. Park, Y. J. Chin, and B. Y. Kim, Electron. Lett. **35**, 1100 (1999).

Subtraction of excess noise in a gyroscope employing a high-power erbium-doped fiber source

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

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

(Received August 3, 1999, Revised manuscript received September 30, 1999)

In the fiber-optic gyroscope employing a high-power erbium-doped fiber source, the source excess noise was subtracted from the gyro output through a signal processing to improve the gyroscope sensitivity. As the result, we obtained the reduction of noise by 13.5 dB (electrical) which was measured from the noise floor spectrum when the gyro was modulated with the depth of 1.8 rad. In addition, the random walk coefficient of the gyro output was reduced by a factor of 4~5.