

## 개회로 FOG의 폐회로 신호처리기의 구현\*

김도의 · 예윤해

경희대학교 공과대학 전자공학과, 레이저 공학 연구소

(1997년 6월 18일 받음)

개회로 구성 광섬유 자이로스코프(FOG)를 위한 폐회로 신호처리의 가능성을 밝히기 위한 신호처리기를 제작하였다. 이 신호처리기는 종래의 위상추적 신호처리 방식을 전디지털로 구현한 것으로서 광검출기의 출력단에서 곧바로 디지털로 변환하여 신호처리함으로써 잡음에 강한 FOG용 신호처리기로 동작할 수 있다. 또 이 신호처리기는 위상편이량  $2\pi$ 범위에서 최대 36비트의 분해능력을 가져 가장 분해능이 높은 신호처리기가 될 가능성이 있으며, 크기가  $2\pi$ 이상인 위상편이량도 측정할 수 있다. 제작된 신호처리기를 전 광섬유 FOG에 적용한 결과 적분시간이 1초일 때 위상차 분해능은  $3 \mu\text{rad}$ (회전율  $0.74 \text{ deg/hr}$ 에 해당)로서 지구의 자전속도를 충분히 확인할 수 있는 정도였다.

### I. 서 론

Sagnac효과란 고리형태로 구성된 간섭계의 경로를 따라 서로 반대방향으로 진행하는 두 빛간의 경로차가 간섭계의 회전에 비례하여 나타나는 것을 말하며, Sagnac간섭계의 출력은 회전에 비례한 두 빛간 위상차의 정현 함수로 주어진다. 따라서 FOG의 출력은 회전에 대해 비선형적이며, Sagnac위상차의 최대값 또한  $\pi$ 로 제한된다. 이러한 문제를 해결하면서 고감도와 넓은 회전을 측정범위를 동시에 얻기 위해 다양한 종류의 신호처리방식이 연구되었다.<sup>[1]</sup>

FOG는 광학구성에 따라 크게 폐회로 구성과 개회로 구성 방식으로 나눌 수 있다. 폐회로 구성의 FOG를 위해서는 집적 광학변조기와 같은 고가의 광대역 위상변조기를 필요로 하나 개회로 구성에 비해 안정성과 감도가 높은 신호처리가 가능한 것으로 알려져 있으며, 대표적인 방식으로는 digital serrodyne방식을 들 수 있다.<sup>[2]</sup> 개회로 구성에서는 PZT 위상변조기(PM)와 같은 저가의 광섬유 부품을 사용할 수 있으나 출력이 광원의 세기에 의존적이고, Sagnac 위상차 또한  $\pi$ 로 제한됨과 동시에 선형적이지 못한 단점이 있다. 그러나 1991년 Toyama 등에 의해 발표된 디지털 위상추적 신호처리(DPT)<sup>[3]</sup>는 개회로 구성의 FOG를 위한 신호처리 방식이면서도 일반적인 개회로 구성이 갖는 단점을 해소할 수 있는 가능성을 가진 신호처리방식으로 이것이 완성될 경우 저가의 고성능 FOG가 가능할 것으로 예상된다.

DPT방식은 광검출기 출력에 가변사각파를 곱한 후 저역통과필터를 통과시켜 직류(DC)성분을 추출하고, 이 값을 이용하여 가변사각파의 펄스폭을 조절함으로써 DC성분이 0이 되게 하며, 이때 가변사각파의 펄스폭이 Sagnac위상차가 되는 원리에 기초한 전자적 폐회로 신호처리방식으로 개회로 구성의 FOG가 폐회로 구성의 FOG와 동일하게 동작할 수 있

도록 한다. 그러나 DPT 신호처리기를 실제로 구현하기 위해서는 이상적인 가변사각파와 위상변조기의 구동을 위한 정현파 신호, 그리고 이상적인 곱셈기와 같은 요건을 충족시켜야 한다. 그렇지 못한 경우 오프셋, 드리프트, 잡음 등으로 인해 심각한 문제가 발생할 수 있으며, 실제로 DPT신호처리기는 회전율이 수백 deg/hr이하일 때 올바른 출력값을 제공하지 못하고 있다. 본 논문에서는 DPT방식을 구현하는 과정에서 발생할 수 있는 문제점에 대한 분석 결과를 토대로 하여 제안된 개선된 DPT(ADPT: Advanced DPT)방식<sup>[4]</sup>을 구현함으로써 개회로 광학구성의 폐회로 FOG가 실현가능함을 밝히고자 하였으며, 이 신호처리 방식은 DPT방식에서의 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 광검출기의 출력을 곧바로 디지털로 변환한 후 처리하는 것을 기본으로 하고 있다.

### II. 개회로 FOG의 전자적 폐회로 신호처리

개회로 구성의 FOG에서는 Sagnac 루프내에 위치한 위상변조기를 정현파로 구동하여 위상변조하며, 이때 광검출기 출력은 다음과 같다.<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned}
 I_D(t) &= \frac{I_o}{2} [1 + \cos(\phi_m \cos \omega_m t + \phi_R)] \\
 &= \frac{I_o}{2} [1 + [J_0(\phi_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_m) \cos 2n \omega_m t] \cos \phi_R \\
 &\quad - [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\phi_m) \sin(2n-1) \omega_m t] \sin \phi_R] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\phi_m$ 은 위상변조의 진폭,  $\phi_R$ 은 Sagnac위상차이다. 식(1)을 보면 변조주파수의 홀수 고조파의 진폭은  $\sin \phi_R$ 에 비례하고, 짝수 고조파의 진폭은  $\cos \phi_R$ 에 비례하므로 홀수 고조파 성분을 이용하여 신호처리를 행하면 회전이 작을 때에도 높은 감도로 신호처리 할 수 있음을 알 수 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 출력특성이 비선형적이고, 측정범위가  $\pi$ 이내로 제한되며, 광출력의 세기에 의존적이어서 안정성이 떨어지는 단점이 있

\*본 연구는 국방부 위촉 전자광학 특화연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

다. 이러한 개회로 FOG의 문제를 해결하기 위하여 시도되었던 신호처리 방식으로는 synthetic heterodyne(SH)방식<sup>15)</sup>과 DPT방식을 들 수 있다. SH 방식에서는 식 (1)의 출력을  $\omega_m$ 으로 진폭 변조할 때 각 주파수성분의 sideband성분 중 진폭이  $\sin \phi_R$ 과  $\cos \phi_R$ 에 비례하고, 주파수가 동일하면서 위상차가  $90^\circ$ 인 두 신호를 합하여 식 (2)의 신호를 얻고, 이로부터  $\cos n\omega_m t$ 에 대한 위상차  $\phi_R$ 를 추출한다.

$$\cos \phi_R \cos n \omega_m t + \sin \phi_R \sin n \omega_m t = \cos (n \omega_m t - \phi_R) \quad (2)$$

SH 방식은 아날로그 신호처리에 기초한 방식으로 회로구성이 복잡하고, 아날로그 신호처리가 갖는 모든 문제점을 그대로 안고 있기 때문에 FOG용 신호처리 방식으로 적합하다고 할 수 없다. 그러나 DPT방식에서는 광검출기의 신호에서 홀수 고조파의 성분을 추출하기 위해 광검출기 출력을 정현파 변조하는 대신 그림 1과 같은 펄스간격이 조절 가능한 가변사각파를 사용한다. 가변사각파  $A(t, \delta)$ 와 광검출기의 출력에서 직류성분을 제거한 출력,  $I_D(t)$ 를 곱한 후 저역통과필터를 통과시키면 저역통과필터의 출력  $S(\delta, \phi_R)$ 는

$$S(\delta, \phi_R) = \frac{I_D}{\pi} [C_1(\delta) \cos \phi_R - C_2(\delta) \sin \phi_R] \quad (3)$$

가 되며, 여기서

$$C_1(\delta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_{2(2n-1)}(\phi_m)}{2n-1} \sin(2n-1)\delta \quad (4)$$

$$C_2(\delta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_{2n-1}(\phi_m)}{2n-1} [sgn(\cos \frac{\delta}{2}) \cos(2n - \frac{1}{2})\delta + (-1)^n sgn(\sin \frac{\delta}{2}) \sin(\frac{2n-1}{2})\delta] \quad (5)$$

이다.  $S(\delta, \phi_R)$ 가 '0'이 되게 펄스의 간격을 조정하면  $\phi_R$ 는 다음

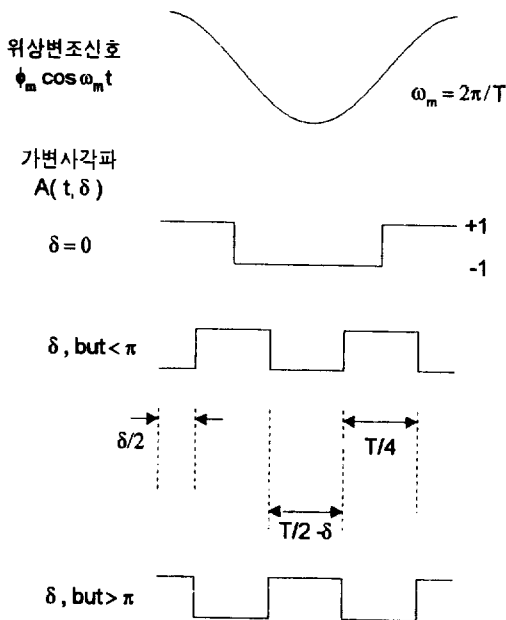


그림 1. 가변사각파와 위상변조신호.

식으로 계산된다.

$$\phi_R = \tan^{-1} \left[ \frac{C_1(\delta)}{C_2(\delta)} \right] \quad (6)$$

위상변조진폭,  $\phi_m$ 이 2.77 rad 일 때 7 mrad의 오차범위내에서 Sagnac위상차  $\phi_R$ 은 펄스간격  $\delta$ 와 같은 값을 가지며, 따라서 회전율의 측정은 S가 '0'이 되게 유지시키면서 가변사각파의 펄스폭  $\delta$ 를 측정함으로써 이루어질 수 있다. 그러나 식 (3)~식 (6)의 결과를 얻기 위해서는 광검출기 신호채널의 대역폭이 제한되지 않고, 곱셈기의 대역폭 또한 제한되지 않아야 하며<sup>14)</sup>,  $\phi_R$ 과  $\delta$ 간의 위상차 또한 정확히 일치되어야 하며, 위상변조기의 구동신호 또한 이상적이어야 한다.

### III. 전디지털 폐회로 신호처리기

앞에서 제시된 이상적인 DPT방식 신호처리를 위해서는 FOG의 출력을 디지털로 변환한 후 신호처리에 필요한 모든 연산을 디지털 상태에서 수행하고, 위상변조신호의 파형과 위상관계를 최대한 이상적인 상태에 근접시키는 것이 필요하다. 이러한 신호처리기의 요건을 갖춘 신호처리 방식은 ADPT 방식<sup>14)</sup>으로 알려졌으며, 이 방식은 앞에서 제시된 요건을 최대한 만족할 수 있도록 구현되었다. 그림 2에 ADPT방식을 실현하기 위한 전디지털 폐회로 신호처리기의 블록 구성도를 보였으며, DPT방식을 위한 회로구성<sup>13)</sup>에서와 같이 광섬유 위상변조기(PM)에 주파수  $f_m$ 의 정현파를 인가하여 위상 변조하고, 광검출기의 출력은 DC전압을 차단한 후 곱셈기로 입력시키는 것을 알 수 있다. 그러나 ADPT방식에서는 광검출기의 출력  $I_D(t)$ 와 가변사각파를 아날로그 방식으로 곱하는 대신 완전히 디지털화된 곱셈을 통하여 아날로그 방식에서의 대역폭 제한효과를 피하며, 가변사각파와 동기된 정현파를 얻기 위해 디지털 정현파 발생기를 이용함으로써 낮은 차수의 고조파를 배제하면서 THD(total harmonic distortion)를 -65 dB이하로 유지하였다.

$I_D(t)$ 와 가변사각파의 디지털 곱셈과 곱한 신호의 저역 통과 필터링은 A/D변환기(analog-to digital converter)의 출력을

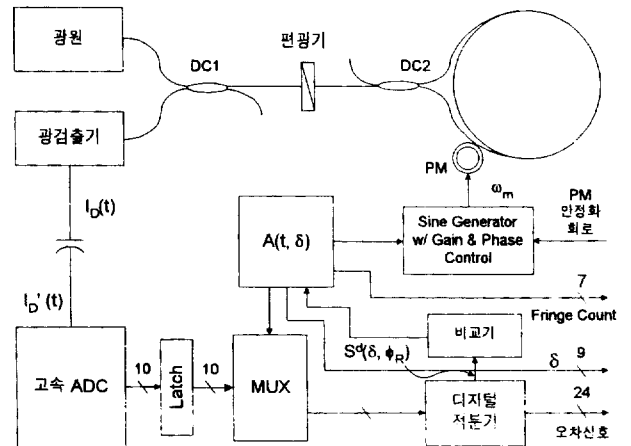


그림 2. 전디지털 폐회로 신호처리기의 블록도.

가변사각과  $A(t, \delta)$ 와 곱한 후 위상변조신호의 일정 주기동안 적분함으로써 수행하며, 적분값  $S(\delta, \phi_R)$ 를 기준값과 비교함으로써 DPT 방식에서  $S(\delta, \phi_R)$ 의 부호를 판별하고 이에 따라 가변사각과의 펄스폭을 조절한다. 따라서 ADPT방식을 실현하기 위한 전디지털 폐회로 신호처리기에서는 FOG의 광검출기에서의 전기적인 신호를 디지털로 변환한 후 디지털 신호 처리함으로써 아날로그 회로에서 발생할 수 있는 오프셋이나 드리프트, 잡음의 유입 등에 의한 영향을 피할 수 있다.

그림 2에 보인 FOG에 접속된 전디지털 폐회로 신호처리기의 블록 구성도에서 A/D변환기는 10비트로서 샘플링 주파수는 30 Msps이고, PM 구동신호의 주파수  $f_m$ 은 30 kHz이다. MUX회로는  $A(t, \delta)$ 와 A/D변환된 광검출기 출력의 디지털 곱셈을 수행하며, MUX의 출력은 디지털 적분기에 인가되어 일정 주기동안 적분된다. 현 구성에서 샘플링 주파수가 위상 변조신호 주파수  $f_m$ 의 1024배이고, 디지털 적분기는 위상 변조신호의 16주기 동안 적분하므로 디지털 적분기의 출력은 24비트가 된다.

디지털 비교기는 디지털 적분기의 출력을  $S(\delta, \phi_R)=0$ 에 해당하는 값과 비교하여 가변사각과,  $A(t, \delta)$ 의 펄스폭을 제어하기 위한 것으로 DPT방식에서의 아날로그 비교기와 같은 역할을 한다.

가변사각과는 위상이 추적된 상태에서 FOG의 회전율이 일정한 경우에도 펄스폭이 1 LSB씩 늘었다 줄었다를 반복하며, 이에 따라 디지털 적분값, 즉  $S(\delta, \phi_R)$ 도 그림 3과 같이 가변사각과의 변화에 따라 두 값 사이를 반복한다. 이것은 가변사각과의 펄스폭( $\delta$ ) 변화의 최소값이 유한하여(가변사각과 발생기가 10비트로 구성된 경우  $\delta$ 의 최소 변화량은  $2\pi 2^{(10-1)}$  rad으로 제한됨) 적분값이 정확히 '0'가 될 수 없기 때문이며,  $\delta$ 가  $\phi_R$ 보다 조금 큰 값( $\delta_+$ )과 조금 작은 값( $\delta_-$ )을 반복할 때의 적분값,  $S_+$ 와  $S_-$ 는 미세한 회전율의 변화에도 그 값이 변하므로  $\delta$ 의 1 LSB이하에 해당하는 회전율에 정보를 갖고 있는 셈이다.

$S_+$ 와  $S_-$ 의 차이값은  $\delta$ 의 1 LSB, 즉 12.272 mrad의 위상차에 해당하며,  $S_+$ 와  $S_-$ 의 평균값에서 오프셋을 뺀 후  $(S_+ - S_-)$ 로 나누어 표준화된 오차(normalized error)신호를 얻고, 이 값에  $\delta$ 의 1 LSB에 해당하는 위상차를 곱함으로써  $\delta$ 만으로는 고려될 수 없었던 미세한 회전율의 변화에 의한 위상차까지 계산해 낼 수 있으며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{표준화된 오차 신호} = \frac{\frac{S_+ + S_-}{2} - \text{오프셋}}{S_+ - S_-} \quad (7)$$

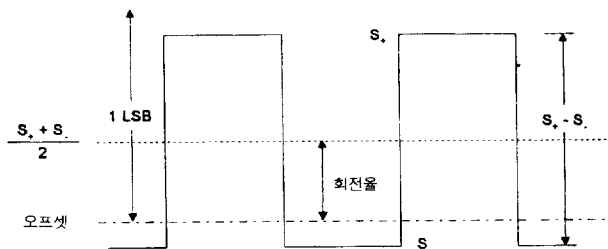


그림 3. 정지상태에서 적분기의 출력파형과 LSB이하의 회전율 정보.

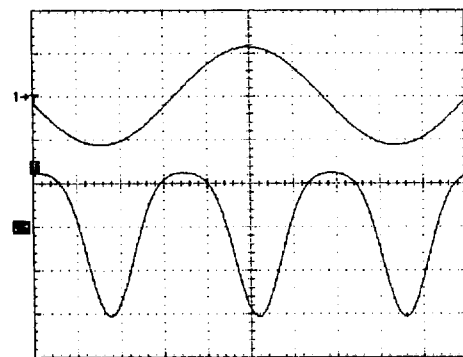
#### IV. 실험결과

ADPT방식을 실증하기 위한 실험에 사용된 FOG는 (주)도남시스템에서 제작한 K-FOG3로서 구성에 사용된 중요부품은 다음과 같다. 발진파장 823 nm인 SLD(Laser Diode사 제작, 모델 SRD-8301-PF-001), 공진 주파수가 40 kHz인 PZT에 일정길이의 광섬유를 감은 PZT 위상변조기, 연마형 tunable PM coupler, 그리고 광검출기로는 Fujitsu사의 PIN 다이오드(모델 FID08T13TX)를 사용하였으며, 회전감지부인 Sagnac 루프는 직경 80  $\mu\text{m}$ 인 Panda형 편광유지광섬유 210 m를 직경 16cm의 스펀에 감아 제작한 것으로서 1 deg/hr의 회전율에 대한 Sagnac 위상차는 4.145  $\mu\text{rad}$ 이다. 광검출기에서 측정된 FOG의 광출력은 1  $\mu\text{W}$ 정도로 이를 A/D변환기에 적합한 크기의 전압신호로 변환하기 위해 FET입력형 고속 연산증폭기를 이용하여 transimpedance 증폭기를 제작하였다. 구성된 신호처리기를 K-FOG3에 연결하여  $\phi_m$ 이 2.77이 되도록 조정된 다음 일련의 시험을 행하였다.

그림 4는 정지상태에서 위상변조 신호의 파형과 광검출기의 출력 파형을 동시에 관측한 것이다. 광검출기의 출력 파형은 식 (1)과 같이 위상변조신호의 주파수  $\omega_m$ 과 고조파 성분들의 선형조합으로 나타나며, 정지상태에서는  $\omega_m$ 의 홀수 고조파 성분이 없어지기 때문에 짝수 고조파 성분만 나타난다. 이 사실을 실험대 위에 정지해 있는 FOG(이 상태에서 FOG가 경험하는 회전율은 지구의 자전속도의 수평성분이며, 중부지방에서 지구의 자전에 의한 회전속도는 약 9 deg/hr임)에 대한 출력파형인 그림 4의 CH<sub>2</sub> 파형에서 인지할 수 있다.

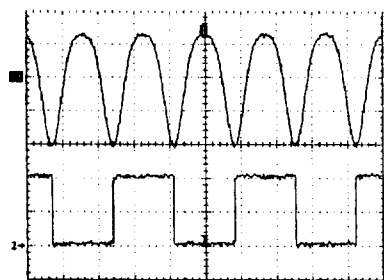
그림 5는 회전율이 비교적 클 때 가변사각과와 광검출기 출력의 변화를 관측한 것으로서 회전시 광검출기의 출력에 홀수고조파 성분이 발생함을 알 수 있으며, 반대방향으로 회전할 때에는 광검출기 출력에서 홀수고조파 성분이 반전되어 나타남을 볼 수 있다. 또한 가변사각과의 펄스폭  $\delta$ 가 FOG의 회전율에 비례하여 변하는 것도 확인할 수 있다.

그림 6은 적분시간을 1초로 하여 정지상태에서 신호처리기 출력을 약 10분간 측정된 것으로 약 0.74 deg/hr의 random walk가 있음을 볼 수 있다. 그림 7은 정지상태에서 약 6시간

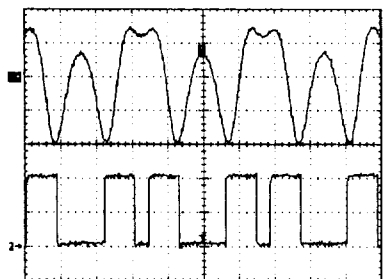


CH1: 위상변조신호 (1V/DIV, 5  $\mu\text{s}$ /DIV)  
CH2: 광검출기 출력 (1V/DIV, 5  $\mu\text{s}$ /DIV)

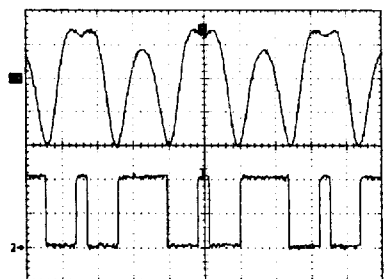
그림 4. 위상변조기 구동 신호와 광검출기의 출력 신호.



(a) 정지시



(b) 시계방향으로 회전할 때



(c) 반시계방향으로 회전할 때

CH1 (위) : 광검출기 출력  
(1 V/DIV, 5  $\mu$ s/DIV)  
CH2 (아래) : 가변사각파  
(2 V/DIV, 5  $\mu$ s/DIV)

그림 5. 회전상태에 따른 가변사각파와 광검출기 출력의 변화.

동안 드리프트를 측정된 결과로서 2 deg/hr이내의 드리프트가 관측되는 것을 확인할 수 있으며, 5시간 가량 경과된 시점에서 실내의 히터가 작동하여 주위온도가 변화했을 때 전디지털 폐회로 신호처리기의 출력이 크게 변화하는 것으로 보아 위상 변조기의 온도 드리프트에 의한 것으로 추측할 수 있으며, 따라서 실제 응용이 가능한 FOG를 위해서는 위상변조기에 대한 안정화 회로가 필요함을 알 수 있다.

그림 8은 규준화된 오차값을 신호처리함으로써 폐회로 신호처리기의 분해능이 향상된 결과를 보이기 위해 FOG를 회전테이블에서 저속으로 회전시켰을 때 신호처리기의 출력을 보인 것으로 20초 간격으로 정지, 18 deg/hr, 정지, -18 deg/hr, 정지, 10.8 deg/hr, 정지, -10.8 deg/hr, 정지, 3.6 deg/hr, 정지, -3.6 deg/hr, 정지의 순서로 FOG를 회전시켰다. 약 5 deg/hr의 오프셋이 존재하지만 ADPT 신호처리기의 분해능은 지구의 자전속도를 확인하기에 충분할 뿐만 아니라 1 deg/hr정도의

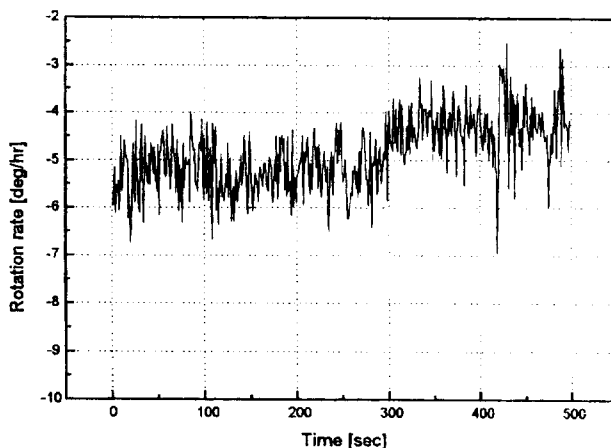


그림 6. 전디지털 폐회로 신호처리기의 잡음.

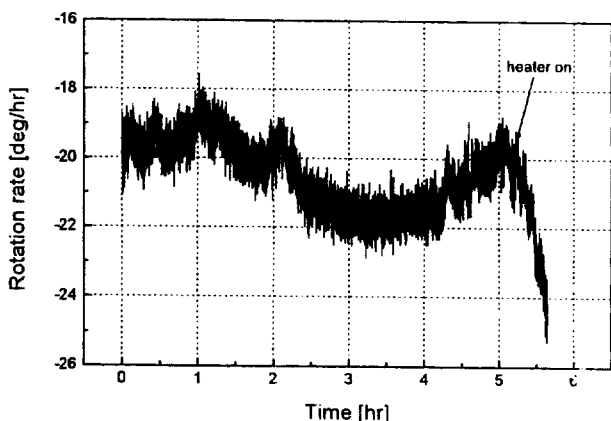


그림 7. 전디지털 폐회로 신호처리기의 드리프트 특성 측정결과.

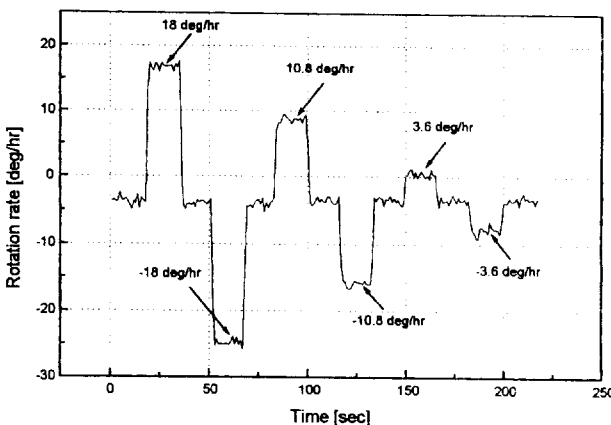


그림 8. 회전에 따른 신호처리기의 출력.

미세한 회전율도 측정이 가능함을 알 수 있다.

그림 2의 ADPT 신호처리기는 현재의 구성에서 0.5 ms당 24비트의 데이터를 출력하며, 이중 16비트의 데이터가 1 LSB의 (1 LSB = 12.272 mrad) 위상차에 해당한다. 따라서 전디지털 폐회로신호처리기가 갖는 시스템의 분해능은 적분시간이 1초인 경우 36비트에 달하며, 이는 digital serrodyne 처리기를 훨씬 능가하는 수준으로 향후 신호처리기의 개선정도에 따라 초고분해능의 신호처리기가 가능할 것으로 예견된다. 그러나 이를 위해

서는 그림 6~그림 8에서 보는 바와 같이 10 deg/hr 정도의 불규칙 오프셋과 위상변조기의 온도의존성을 극복해야만 한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 폐회로 방식 FOG의 장점인 안정성과 고분해능의 장점을 취할 수 있는 개회로 구성의 FOG를 위한 전 디지털 폐회로 신호처리를 개발하였다. 이상적인 조건하에서 신호처리의 분해능은 36비트이상이나 1차 완성한 신호처리에서 적분시간을 1초로 하여 측정 한 결과 random walk가 3  $\mu$ rad로서 직경 16 cm이고 광섬유의 길이가 210m인 K-FOG3에 적용하였을 때 0.74 deg/hr에 해당하였다. 위상변조신호와 광검출기 출력에 대한 증폭기를 제외한 전 회로가 디지털 회로로 구성되어 잡음에 강하고 인터페이스가 간단한 장점이 있으나 현재의 신호처리는 온도 의존성과 불규칙적

인 오프셋을 갖고 있으며, 이를 해결하기 위해 신호처리를 보완해나가야 한다. 또한 아날로그 회로부에서의 잡음과 왜곡을 최소화하는 연구를 통해서 이 신호처리의 성능은 지속적으로 개선이 가능할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Herve Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, Boston, 1993) pp.32-36
- [2] W. K. Burns, *Optical Fiber Rotation Sensing* (Academic Press, 1993)
- [3] K. Toyama, K. A. Fesler, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, *Opt. Lett.* **16**, 1207(1991)
- [4] 예윤해, 조성묵, 김종호, *센서학회지* **6**, 95 (1997).
- [5] J. H. Cole, B. A. Danver, and J. A. Bucaro, *J. Quantum Electron.* **18**, 694 (1982).

## Implementation of a closed-loop signal processor for the open-loop FOG

Do Ik Kim and Yunhae Yeh

*Dept. of Electronic Engineering and Institute for Laser Engineering  
Kyung Hee University, YongIn 449-701, Korea*

(Received : June 18, 1997)

A signal processor is implemented to verify the possibility of a closed-loop signal processing for the open-loop fiber-optic gyroscope (FOG). As an all-digital implementation of phase tracking scheme, it does analog-to-digital conversion of the detector output and signal processing all-digitally thereafter for a noise-immune FOG signal processor. It has a potential of 36-bits resolution in the  $2\pi$  range which is best in the number and sets no limit in the magnitude of the phase shift. The new signal processor was tested on an all-fiber gyroscope and turned out to have a resolution of 3  $\mu$ rad (corresponds to 0.74 deg/hr), which is good enough to measure the Earth's rotation rate.