FOG를 이용한 디지털 진북추종 방식

김성진*

Digital North Finding Method based on Fiber Optic Gyroscope

Sung-jin Kim*

요 약

FOG(fiber optic gyroscope :광섬유 자이로스코프)는 소형 경량화, 신속한 가동, 저 전력 소모 및 저렴한 가격으로 실현 가능하므로 자이로콤파스시스템에서의 선호도가 높아지고 있다. 본 논문에서는 FOG를 기반으로 하며, 자이로콤파스시스템에 적용할 수 있는 디지털 진북추종 방식을 제안한다. FOG의 earth signal의 해석모델을 분석하고, lock-in증폭기를 통과한 earth signal을 모델링 한다. 두 개의 lock-in증폭기 출력신호를 이용한 진북추종 알고리즘을 개발하고, 이 알고리즘에 의한 디지털 진북추종 방식을 제안한다. 제안한 방식의 성능을 증명하기 위해 컴퓨터시뮬레이션 결과를 포함한다.

ABSTRACT

In the gyrocompass system, the use of the fiber optic gyroscope(FOG) makes this traditional system considerably attractive because it has strong points in terms of weight, power, warming-up time, and cost. In this paper, a novel digital north-finding method based upon an FOG, which can be applied to the gyrocompass system, is proposed. The analytical model for the earth signal of the FOG is described, and the earth signals passed through lock-in amplifiers are modeled. Additionally, a north-finding algorithm using two lock-in amplifier outputs is developed, and the proposed method is organized by the developed algorithm. Simulation results are included to verify the performance of the proposed method.

키워드

FOG, Earth Signal 모델링, 자이로콤파스, 진북추종 알고리즘, 디지털 진북추종 방식

Ⅰ. 서 론

Sagnac효과를 이용한 FOG는 일종의 광회전센서로서 각속도 및 위치정보를 필요로 하는 여러 응용분야(car mapping, video stabilization, vehicle control, general diagnostic 및 navigation 등)에서 이용되고 있다[1]. 가장 유망한 응용분야중 하나는 자이로콤파스시스템(진북추종장치)으로, 여기서 FOG는 지구자전 각속도센서로 이용된다. 자이로콤파스시스템에 FOG를 활용할 때 몇 가지 중요한 장점(소형 경량화, 신속한 가동, 저 전력 소모 및 저렴한 가격 등)을 갖는다.

일반적으로 FOG는 회전각이나 상대방위는 탐지할 수 있으나 방위각(azimuth)은 찾아낼 수 없다. 그러므로 FOG를 자이로콤파스시스템에 적용하려면 지구회전축 방향(즉, 진북방향)을 식별할 수 있어야 한다. 따라서 자이로콤파스시스템에서는 FOG를 회전시키고, FOG의 감지축(sensing axis)이 지구자전각속도의 수평투사(horizontal projection)를 주사(scanning)하도록 한다.

* 동명정보대학교 정보통신공학과 교수

접수일자 : 2005. 7. 4

이렇게 하여 얻은 신호를 earth signal(FOG를 회전시킬 때 동, 서, 남, 북 각 방향에 따라 측정되는 지구자전각속도의 크기) 이라하며 이 신호의 정보를 이용하여 진북방향을 얻을 수 있다[2]. 본 논문에서는 earth signal의 수학적 모델을 해석하고, earth signal에 포함될 수 있는 각종 잡음의 영향을 감소하기 위해 lock-in 증폭기를 적용한다. Lock-in 증폭기를 통과한 earth signal의 데이터를 활용한 진북추종 알고리즘을 개발하고 이를 이용한 디지털 진북추종 방식을 제안한다.

Ⅱ. 광섬유 자이로콤파스의 Earth Signal 해석모델

광섬유 자이로콤파스의 원리를 그림1에 나타내었다. FOG의 감지루프(sensing loop)는 수평선과 수직으로 놓여지고, 또한 각 방향에서의 지구자전각속도를 측정하기 위해 수직축 둘레를 회전한다(그림1a 참조). 이 때 측정된 값은 동, 서 방향에서 영이 되는 정현파 신호가 되며, 이 신호를 "earth signal" 이라고 한다(그림1b 참조). 이 신호의 크기는 국부적 수평선(local horizon)에서 지구자전각속도의 투사이며, 이 신호의 위상은 우리가 찾으려는 초기방향을 나타낸다.

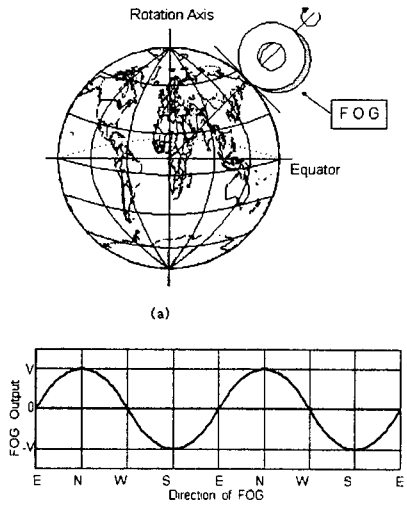

그림 1. 광섬유 자이로콤파스의 원리
Fig. 1 Principle of the fiber optic gyrocompass

이상적인 경우 earth signal은 정현파신호로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_e(t) = K_e \sin(\Omega t + \phi_e) \tag{1}$$

여기서, $\Omega = 2\pi f_0$, $K_e = k\cos(Q_e)$이며, f_0 는 회전주파수, ϕ_e는 진북방향과 임의의 방향사이의 위상차, k는 지구자전각속도를 고려한 FOG의 scale factor, Q_e는 지구의 위도를 나타낸다.

FOG에는 "random walk" 및 "drift" 현상이 존재한다[3]. 본 연구에서 언급할 디지털 방식에서는 drift가 무시될 수 있으므로 이것은 고려치 않는다. Random walk의 스펙트럼은 백색잡음과 유사하며, earth signal과 상관성이 없다. 따라서 random walk는 백색잡음으로 earth signal에 첨가되며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$U_{RW}(t) = RW(t) \tag{2}$$

자이로콤파스시스템에서 FOG가 회전할 때 안정한 회전이 보장되어야 하지만 회전각속도의 편차가 존재하게 된다. 이러한 편차는 FOG회전판의 질량의 비보정, 회전축의 편심, 베어링의 마찰 등에 기인한 것이다. 회전판이 불안정하게 회전할 때 회전판의 위치/시간변화는 다음 식으로 쓸 수 있다[4].

$$\Theta(t) = \omega_0 t - \delta + \Theta_0 \sin\alpha t \tag{3}$$

여기서, $\omega_0 (= \Omega)$는 회전각속도, δ 는 부하각, Θ_0는 진동크기, α 는 진동주파수이다. 정상상태로 회전할 때 부하각 δ 는 아주 작으며 무시될 수 있다. 따라서 각속도 편차를 고려할 때 earth signal은 위상변조에 의해 왜곡되며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_{em}(t) &= K_e \sin(\omega_0 t + \Theta_0 \sin\alpha t + \phi_e) \\ &= K_e [\sin(\omega_0 t + \phi_e)\cos(\Theta_0 \sin\alpha t) \\ &\quad + \cos(\omega_0 t + \phi_e)\sin(\Theta_0 \sin\alpha t)] \end{aligned} \tag{4}$$

제 1종 Bessel함수로 $\cos(\Theta_0 \sin \alpha t)$ 및 $\sin(\Theta_0 \sin \alpha t)$를 전개할 때, 식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$U_{em}(t) = K_e J_0 \sin(\omega_0 t + \phi_e) + K_e \sum_{m=1}^{\infty} J_m [\sin((\omega_0 + m\alpha)t + \phi_e) + (-1)^m \sin((\omega_0 - m\alpha)t + \phi_e)] \quad (5)$$

여기서 J_m은 Θ_0로 표시되는 위수 m의 제 1종 Bessel함수 계수이다. FOG를 위해 안정한 회전시스템이 준비되었다고 가정할 때, Θ_0는 아주 작으며 $J_0 = 1$, $J_1 = \Theta_0/2$ and $J_2 = J_3 = J_4 \cdots = 0$가 된다. 따라서 식(5)는 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$U_{em}(t) \simeq K_e [\sin(\omega_0 t + \phi_e) + \Theta_0 \cos(\omega_0 t + \phi_e) \cdot \sin \alpha t] \quad (6)$$

FOG의 회전판 평면이 회전축과 수직을 이루지 못하고 각 Θ_t 만큼 기울어졌다면, 이 경사효과가 earth signal에 추가적인 왜곡을 야기 시킨다. 이 효과를 고려할 때 식(6)의 earth signal은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U_{em}(t) = K_e(1 - \sin\Theta_t)[\sin(\omega_0 t + \phi_e) + \Theta_0 \cos(\omega_0 t + \phi_e) \cdot \sin \alpha t], \quad 0 \le \Theta_t < 90^\circ \quad (7)$$

여기서 Θ_t는 아주 작으며 기계적인 정확도에 달려있다. 전체시스템의 진동으로 인해 또 다른 왜곡이 야기되며, 이것은 random walk와 마찬가지로 earth signal과 상관성이 없다. 따라서 진동으로 인한 추가적인 왜곡이 earth signal에 잡음으로 첨가되고 이것을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$U_v(t) = V(t) \quad (8)$$

실제적인 경우 앞에서 검토한 random walk잡음, 각속도 편차, 경사효과 및 시스템의 진동잡음을 고려할 때, 전체적인 earth signal은 식(2), (7) 및 (8)의 합으로 되며 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$U_e(t) = RW(t) + K_e(1 - \sin\Theta_t)[\sin(\omega_0 t + \phi_e) + \Theta_0 \cos(\omega_0 t + \phi_e) \cdot \sin \alpha t] + V(t) \quad (9)$$

식(9)를 관찰할 때 첫째 및 셋째 항은 광섬유 자이로콤파스시스템의 최적설계에 달려있으며, 이들은 둘째 항보다는 상대적으로 작다.

Ⅲ. Lock-in증폭기를 통과한 Earth Signal의 모델링

Lock-in증폭기는 PSD(phase sensitive detection)회로와 저역통과필터로 구성되어 있다. PSD회로의 기능은 입력신호에 참조신호(reference signal)를 곱하는 것이고, 저역통과필터의 기능은 이들 두 신호의 곱을 적분하여 평균하는 것이다[5-7]. Lock-in증폭기의 동작원리가 그림2에 나타나있다. 그림2b의 참조신호 $R_s(t)$는 일정 주기를 갖는 구형펄스 파형으로서 다음과 같이 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$R_s(t) = \frac{4R}{\pi}(\sin\omega_0 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5}\sin 5\omega_0 t + \cdots) \quad (10)$$

또한 lock-in증폭기의 출력은

$$U_{LA}(\phi_e) = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} U_e(t) \cdot R_s(t)\, dt \quad (11)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서 τ는 회전판의 회전주기($= 2\pi/\omega_0$)의 정수배로 택한다. 식(9) 및 (10)을 식(11)에 대입하고 정리하면 $U_{LA}(\phi_e)$를 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$U_{LA}(\phi_e) = P_1\cos(\phi_e + P_2) + P_3 \qquad (12)$$

여기서 P_1 및 P_2는 K_e, ω_0, R, Θ_t, τ, Θ_0 및 α와 관계되는 파라미터들이며, $P_3 = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}[RW(t) + V(t)] \cdot R_s(t)\,dt$ 이다. 이들 파라미터를 위한 수식은 아주 복잡하므로, 여기서 이들을 위한 세부적인 표현 식은 생략하기로 한다.

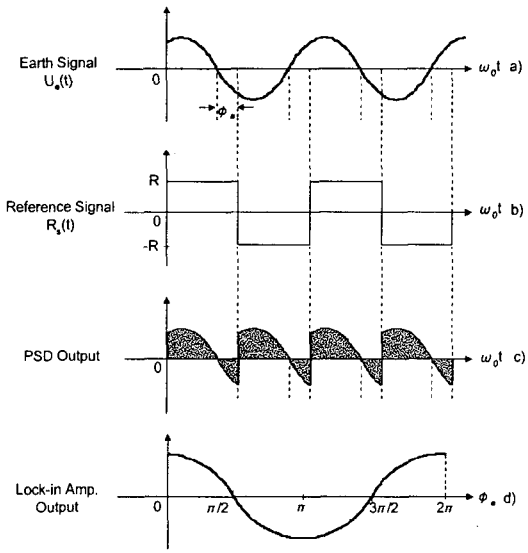

그림 2. Lock-in증폭기의 동작원리
Fig. 2 Operational principle of the lock-in amplifier

Ⅳ. 디지털 진북추종 방식

진북방향에 대한 각 정보를 얻기 위해서 두 개의 lock-in증폭기가 사용된다. 첫 번째 lock-in증폭기의 참조신호는 식(10)의 참조신호보다 위상이 90° 앞선다. 그러므로 earth signal에 대한 첫 번째 lock-in증폭기의 출력은 3장에서와 같은 절차를 통하여 정현파 함수가 된다. 또한 두 번째 lock-in증폭기의 참조신호는 식(10)과 같고, earth signal에 대한 두 번째 lock-in증폭기의 출력은 3장에서와 같이 여현파 함수가 된다. 따라서 이 들 두 개의 lock-in증폭기의 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_{LA1} = f_1\sin(\phi_e + f_2) + f_3 \qquad (13)$$

$$U_{LA2} = f_4\cos(\phi_e + f_5) + f_6 \qquad (14)$$

여기서, f_i, $i=1, 2, \cdots, 6$은 P_j, $j=1, 2, 3$와 유사한 파라미터들이며, 또한 earth signal과 관계가 있다. 편의상, 지금부터 식(13) 및 (14)와 같이 lock-in증폭기의 출력 식에서 독립변수 ϕ_e를 생략하기로 한다.

1. 진북추종 알고리즘 개발

진북방향을 찾기 위해 컴퓨터에서 처리할 데이터를 수집해야 한다. 첫 번째 lock-in 증폭기 출력으로부터 다음과 같이 네 개의 데이터를 체계적으로 측정한다.

$$U_{11} = f_1\sin(\phi_e + f_2) + f_3 \qquad (13a)$$

$$U_{12} = f_1\sin(\phi_e + f_2 + \pi/2) + f_3 \qquad (13b)$$

$$U_{13} = f_1\sin(\phi_e + f_2 + \pi) + f_3 \qquad (13c)$$

$$U_{14} = f_1\sin(\phi_e + f_2 + 3\pi/2) + f_3 \qquad (13d)$$

이들 데이터는 회전판에서 90° 간격으로 표본을 취함으로서 얻을 수 있다. 같은 방법으로 두 번째 lock-in증폭기로부터 다음과 같이 또 다른 네 개의 데이터를 얻는다.

$$U_{21} = f_4\cos(\phi_e + f_5) + f_6 \qquad (14a)$$

$$U_{22} = f_4\cos(\phi_e + f_5 + \pi/2) + f_6 \qquad (14b)$$

$$U_{23} = f_4\cos(\phi_e + f_5 + \pi) + f_6 \qquad (14c)$$

$$U_{24} = f_4\cos(\phi_e + f_5 + 3\pi/2) + f_6 \qquad (14d)$$

앞에서 수집한 여덟 개의 데이터를 이용할 때, 파라미터 f_i, $i=1, 2, \cdots, 6$의 값들은 아래의 식들과 같이 유도된다.

$$f_3 = \frac{1}{4}(U_{11} + U_{12} + U_{13} + U_{14}) \qquad (15)$$

$$f_6 = \frac{1}{4}(U_{21} + U_{22} + U_{23} + U_{24}) \quad (16)$$

$$f_2 + \phi_e = \frac{1}{4}[\tan^{-1}(\frac{U_{11} - f_3}{U_{12} - f_3}) - \tan^{-1}(\frac{U_{11} - f_3}{U_{14} - f_3}) + \tan^{-1}(\frac{U_{13} - f_3}{U_{14} - f_3}) - \tan^{-1}(\frac{U_{13} - f_3}{U_{12} - f_3})] \quad (17)$$

$$f_5 + \phi_e = \frac{1}{4}[\tan^{-1}(\frac{U_{24} - f_6}{U_{21} - f_6}) - \tan^{-1}(\frac{U_{22} - f_6}{U_{21} - f_6}) + \tan^{-1}(\frac{U_{22} - f_6}{U_{23} - f_6}) - \tan^{-1}(\frac{U_{24} - f_6}{U_{23} - f_6})] \quad (18)$$

$$f_1 = \frac{1}{4}[\frac{(U_{11} - U_{13})}{\sin(\phi_e + f_2)} + \frac{(U_{12} - U_{14})}{\cos(\phi_e + f_2)}] \quad (19)$$

$$f_4 = \frac{1}{4}[\frac{(U_{21} - U_{23})}{\cos(\phi_e + f_5)} - \frac{(U_{22} - U_{24})}{\sin(\phi_e + f_5)}] \quad (20)$$

또한 진북방향의 값 ϕ_e는 다음 식으로 유도될 수 있으며,

$$\phi_e = \tan^{-1}[\frac{(U_1/U_2) - \sin(f_2 - f_5)}{\cos(f_2 - f_5)}] - f_5 \quad (21)$$

여기서, $U_1 = (U_{LA1} - f_3)f_4$ 이고 $U_2 = (U_{LA2} - f_6)f_1$ 이다. 수집된 데이터 $U_{ij}, i = 1,2,\ j = 1,2,3,4$와 식(15)~(20)에 의해 계산된 파라미터를 이용하면, 식(21)로부터 진북방향 ϕ_e를 구할 수 있다. 본 절에서 개발한 진북추종 알고리즘의 흐름도가 그림3에 나타나 있다.

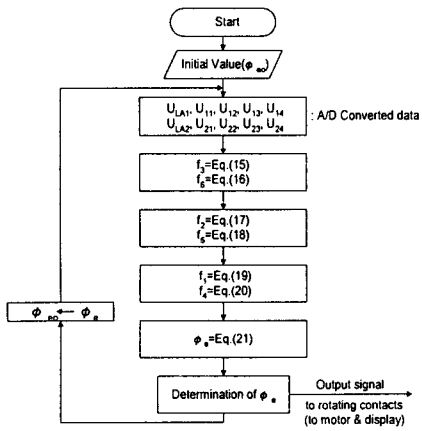

그림 3. 개발한 진북추종 알고리즘의 흐름도
Fig. 3 Flowchart for the developed north-finding algorithm

2. 디지털 진북추종 방식

본 절에서는 디지털 진북추종 방식을 제안한다. 제안한 방식은 앞 절에서 개발한 진북추종 알고리즘을 기반으로 구성된다. 이 방식은 그림4에서와 같이 네 개의 주요성분인 대역통과필터(bandpass filter), lock-in 증폭기, 위상천이장치(phase shifter), 신호처리장치(signal processor)로 구성되며, 각 성분들의 역할은 다음과 같다.

대역통과필터: 이 필터는 중심주파수가 FOG 회전판의 회전주파수와 같아야하며, 10Hz 이하의 저주파수 범위에서 현저하게 나타나는 잡음성분을 제거하기 위한 사전처리장치(preprocessor)로서의 기능을 한다. 이들 잡음은 전자회로에 의한 $1/f$ 잡음, random walk잡음 및 진동잡음 등으로 이루어져 있다.

Lock-in증폭기: 디지털 진북추종 방식은 두 개의 lock-in증폭기를 필요로 하며, 첫 번째 lock-in증폭기의 참조신호 $R_{s1}(t)$는 두 번째 lock-in증폭기의 참조신호보다 위상이 90° 앞선다. 즉, $R_{s1}(t) = R_s(t + \frac{\pi}{2\omega_0})$이고 $R_{s2}(t) = R_s(t)$이다. 근본적으로 lock-in증폭기는 SNR(signal-to-noise ratio)을 향상시키기 위해 이용된다.

위상천이장치: 이 성분의 역할은 #1 lock-in증폭기의 참조신호를 #2 lock-in 증폭기 참조신호보다 위상이 90° 앞서도록 위상천이를 시키는 것이다. 이것은 회전판의 원호 상에서 #2 lock-in증폭기를 위한 LED(light emitting diode)/PD(photodetector)쌍이 장치된 위치로부터 90° 에 해당하는 거리만큼 떨어진 장소에 #1 lock-in증폭기를 위한 LED/PD쌍을 추가적으로 장치함으로서 실현할 수 있다. 이들 LED/PD쌍은 lock-in증폭기들의 참조신호인 구형펄스를 적시에 "트리거" 시켜주기 위해 사용된다.

신호처리장치: 이 성분은 진북방향을 구하기 위해서 두 개의 lock-in증폭기로부터 수집된 데이터를 처리하는 역할을 하며, 일종의 컴퓨터이다.

FOG를 이용한 동적 진북추종 방식에서, 아날로그 방식은 한 개의 lock-in증폭기에 LPF를 적용하여 아날로그적으로 진북을 가리키는데 반하여, 본 논문에서 제안한 디지털 방식은 90° 위상차를 갖는 두 개의 lock-in증폭기를 통과한 FOG 출력신호에 본 논문에서 개발한 진북추종 알고리즘을 적용하여 A/D 컨버터와

컴퓨터에 의해 연산처리 하므로 기계적인 구조가 간단하고 다양성이 있으며 컴퓨터에 의한 조절이 쉬운 장점이 있다.

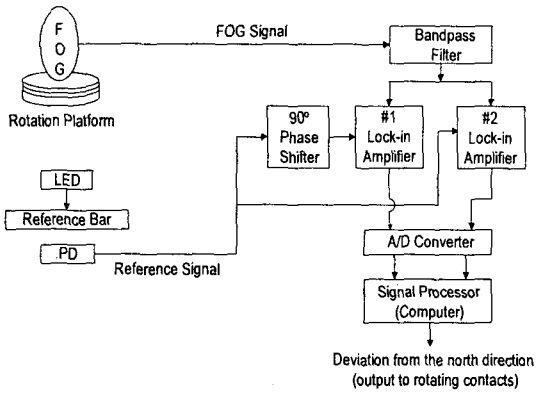

그림 4. 제안한 디지털 진북추종 방식의 블록선도
Fig. 4 Block diagram of the proposed digital north-finding method

V. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 진북추종 방식의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 목적으로 다음 식을 이용하여 FOG의 earth signal을 발생시켰다(식 (4) 및 (9) 참조).

$$U_e(t) = K_e \sin(2\pi f_0 t + \Theta_0 \sin \alpha t) + n_{RW}(t) + n_V(t) \qquad (22)$$

여기서, $K_e = 1.0$, $f_0 = 1$ (Hz), $\Theta_0 = 0.05^\circ$ 그리고 $\alpha = 2\pi \times 60$ (rad/sec)이다. 이 들 파라미터 값은 정상상태 운전 하에서의 대표값 이다[4]. 식(22)에서, $n_{RW}(t)$ 및 $n_V(t)$는 평균이 0이고 분산이 1/4인 가우스분포를 갖는 랜덤프로세서 들이며, 이들은 각각 random walk잡음과 진동잡음을 표시한다. 또한 lock-in 증폭기의 적분기간 τ 는 회전주기의 5배로 택하였다. 즉, $\tau = 5(1/f_0)$ 이다.

보다 실제적인 상황을 시뮬레이션하기 위해, 시불변 파라미터(time-invariant parameters : TIPs)를 위한 stationary 경우와 시변 파라미터(time-varying parameters : TVPs)를 위한 nonstationary 경우를 동시에 고려하였으며[8-11], 결과적인 earth signal과 lock-in증폭기 출력들이 그림5에 나타나 있다. 여기서 TIPs는 파라미터 K_e, Θ_0, 및 α 의 값들이 시불변(즉, 일정상수) 임을 의미하고, 반면에 TVPs는 이들 파라미터 값들이 ±20% 내에서 시변(즉, $K_e(t), \Theta_0(t), \alpha(t)$) 임을 암시한다. 그림5에서 첫째 열은 TIPs를 위한 시뮬레이션 결과를 나타내고, 둘째 열은 TVPs를 위한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림5의 각 열에서, 맨 위는 시뮬레이션에 사용된 FOG의 earth signal을 나타내고, 중간은 #1 lock-in증폭기 출력을 나타내며, 아래는 #2 lock-in증폭기 출력을 나타낸다.

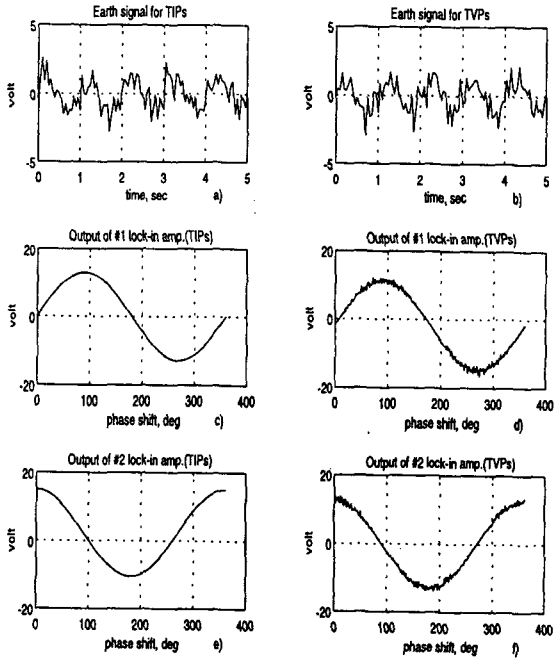

그림 5. Earth signal 및 lock-in 증폭기 출력
Fig. 5 Earth signals and outputs from lock-in amplifiers

Worst case 시뮬레이션을 위해 그림5a 와 5b에서와 같이 아주 잡음이 큰 earth signal을 사용하였다. 그림5를 관찰할 때, 잡음이 매우 큰 earth signal을 사용하였

을지라도 #1 및 #2 lock-in증폭기 출력들은 아주 깨끗한 정현파 및 여현파 임을 알 수 있으며, 이것은 아주 정상적인 결과이다. 왜냐하면 제안한 방식에서는 earth signal의 SNR을 향상시키기 위해 lock-in증폭기를 사용했기 때문이다.

그림5에 보인 earth signal 및 lock-in증폭기 출력들을 사용할 때, 제안한 진북추종 방식의 시뮬레이션 결과가 그림6에 나타나있다. 이들 결과로부터 아주 잡음이 큰 earth signal을 사용했음에도 불구하고 TIPs에 의한 진북추종오차는 거의 0에 가깝고, TVPs에 의한 진북추종오차도 아주 작음을 관찰할 수 있다. 이러므로 제안한 방식은 stationary 경우뿐 만 아니라 nonstationary 경우에도 잘 동작함을 알 수 있다.

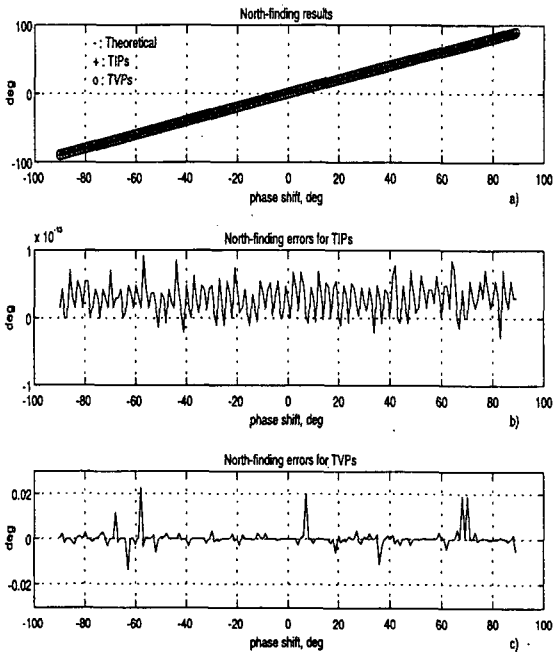

그림 6. 제안한 진북추종 방식의 성능
Fig. 6 Performance of the proposed north-finding scheme

VI. 결 론

FOG를 사용함에 따른 여러 가지 장점 때문에 광섬유 자이로콤파스시스템은 전통적인 기계식 자이로콤파스보다 선호도가 높아가고 있다. 본 논문에서는 광섬유 자이로콤파스시스템에 적용할 수 있는 디지털 진북추종 방식을 제안하였다. 이 방식은 본 논문에서 새로이 개발한 진북추종 알고리즘을 기반으로 구성된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 진북추종 방식이 stationary earth signal 경우뿐 만 아니라 nonstationary earth signal 경우에도 그 성능이 우수함을 입증하였다.

참고문헌

[1] S. Ezekiel and H. J. Arditty, "Fiber-optic rotation sensors", Selected Papers on Fiber Optic Gyroscopes, R. B. Smith, SPIE Milestone Series Vol. MS 8, pp. 3-27, SPIE Optical Eng. Press, 1989.

[2] B. Culshaw and I. P. Giles, "Fiber optic gyroscopes", Selected Papers on Fiber Optic Gyroscopes, R. B. Smith, SPIE Milestone Series Vol. MS 8, pp. 28-38, SPIE Optical Eng. Press, 1989.

[3] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscopes", Selected Papers on Fiber Optic Gyroscopes, R. B. Smith, SPIE Milestone Series Vol. MS 8, pp. 39-55, SPIE Optical Eng. Press, 1989.

[4] Y. S. Kwon, "A study of the dynamic instability characteristics and stabilisation of ariable-reluctance stepping motors", Ph.D. Thesis, Univ. of Manchester, Manchester, England, 1993.

[5] D. Malchow, "Lock-in applications anthology", Technical publication edited by D. Malchow and issued by EG&G Princeton Applied Research Corporation, Princeton, NJ, 1986.

[6] S. M. Kay, "Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory", Prentice-Hall, NJ, 2003.

[7] F. R. Bach and M. I. Jordan, "Learning Graphical Models for Stationary Time Series", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 52, pp. 2189-2199, Aug. 2004.

[8] S. D. Stearns and R. A. David, "Signal processing algorithm", chapter 9, Prentice-Hall, NJ, 1988.

[9] B. Widrow and S. D. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall NJ, 1985.

[10] J. Benesty and Y. Huang, "Adaptive Signal Processing", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.

[11] Y. Jin and B. Friedlander, "A CFAR Adaptive Subspace Detector for Second-Order Gaussian Signals", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 53, pp. 871-884, Mar. 2005.

저자약력

김성진(Sung-jin Kim)

1974년 3월 해군사관학교(이학사)
1977년 2월 서울대학교 전자공학과(공학사)
1980년 2월 고려대학교 전자공학과(공학석사)
1988년 12월 미국 University of New Mexico 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사)
1980년 3월 ~ 2001년 2월 해군사관학교 전자공학과 교수
2001년 3월 ~ 현재 동명정보대학교 정보통신공학과 교수
※ 관심분야 : 디지털신호처리, 적응신호처리, 레이더/위성 신호처리, EW분야 및 시스템 모델링