

# GNSS 신호를 이용한 회전체의 롤 회전 속도 추정 기법

## A Roll Rate Estimation Method Using GNSS Signals for Spinning Vehicles

김정원, 조종철, 황동환\*, 이상정

(Jeong Won Kim, Jong Chul Cho, Dong-Hwan Hwang, and Sang Jeong Lee)

**Abstract :** This paper proposes a roll rate estimation method for spinning vehicles. The carrier phase and frequency variations caused by spinning of vehicles are observed and the roll rate estimator is designed on the observation. The roll rate estimator consists of phase detector and zero crossing counter. The phase detector computes phase variation using in-phase and quadrature value from the correlator. By using zero crossing counter, the roll rate can be estimated since the output of phase detector is changed in proportion to the roll rate. Experiment a results show that estimated roll rate error is smaller than 0.0578Hz.

**Keywords :** spinning vehicle, rotational doppler, roll rate estimation

### I. 서론

1950년경부터 발전된 항법 기술은 우주항공, 지상, 해상 및 수중에서 거의 모든 항체를 비롯하여 개인병사와 탄약까지 광범위하게 활용되고 있다. 많이 사용되는 항법 시스템으로는 관성 항법 시스템(INS, Inertial Navigation System)과 GPS(Global Positioning System)로 대표되는 위성 항법 시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System) 및 두 시스템을 결합한 통합 항법 시스템을 들 수 있다[1].

최근에는 재래식 무기에 유도, 항법 및 제어 기능을 추가하여 타격 정확도 및 사거리를 향상시키려는 시도를 하고 있으며 대표적인 것으로 자유 낙하 폭탄에 유도 키트(Kit)를 결합한 JDAM(Joint Direct Attack Munitions)이 있으며 이라크전 등 실전에 사용되어 성능을 입증한 바 있다[1-4]. 이와 유사한 개념으로 기존의 자주포, 함포 등에서 발사되는 재래식 포탄에 유도, 항법 기능을 추가하여 적은 비용으로 정확도를 10~20m로 향상시킨 예도 볼 수 있다[3-5]. 이 경우 포탄은 발사시 큰 충격을 받고 일반 센서로 측정 불가능한 고회전 운동을 하므로 고충격이 항법에 큰 영향을 줄 수 있으며, 고회전 때문에 일반적인 항법 시스템을 사용할 수 없다.

한편, 회전하는 항체의 롤각 또는 롤 회전 속도를 추정하는 기법으로 IMU(Inertial Measurement Unit)로부터의 강제조건이나 가속도계의 변조 신호를 이용한 것을 볼 수 있으며 센서의 오차가 매우 작은 고성능의 IMU가 필요한 단점이 있다 [6,7]. 지자기 센서(Magnetic Compass)를 이용하는 방법도 소개되었는데 자기장 외란의 영향을 받으므로 문제가 될 수 있다 [6]. 관성 센서나 지자기 센서를 이용한 추정 기법 외에도 항체가 롤 축을 기준으로 회전함에 따라 발생하는 GNSS 신호의 위상 변조와 크기 변조 현상을 이용하여 추정하는 기법도

볼 수 있다[8]. 이 방법은 회전에 따라 변하는 GNSS 신호의 크기를 측정하기 위하여 수신기에 상관기를 추가하여야 한다.

본 논문에서는 회전하는 항체의 새로운 회전 속도 추정기법을 제안하고자 한다. 제안하는 기법은 회전으로 인한 GNSS 신호의 위상 변화를 이용하는 방법이다. 먼저 회전체에서 GNSS 안테나 위상 중심의 주기적인 이동으로 인한 회전 도플러 현상이 발생하는 것을 관찰하고 이 신호가 수신기의 신호 추적 루프에 큰 영향을 미침을 보였다. 제안한 회전 속도 추정 기법은 회전 도플러 변화가 회전 속도와 같은 주파수의 정현파 형태로 나타나는 점을 이용하여 신호 추적 루프에서 출력되는 I, Q 상관값으로부터 위상 변화를 계산하고 저역 통과 필터와 영점 교차 계수기를 사용하여 회전 속도를 추정한다. 제안한 기법의 성능은 회전 실험 장치를 이용하여 검증하였고 실험 결과, 추정 오차가 0.06Hz 이내임을 확인하였다. 논문의 구성은 2절에서는 회전 운동이 GNSS 신호에 미치는 영향을 살펴보고 3절에서 회전 속도 추정기 설계 기법을 기술하였다. 4절에서는 제안한 기법의 유효성을 검증하기 위한 실험 구성 및 결과를 제시하였으며 마지막으로 5절에서 결론과 추후 연구 과제를 제시하였다.

### II. 회전 운동이 GNSS 신호에 미치는 영향

#### 1. GNSS 신호의 회전 도플러 현상

회전하는 항체에서 GNSS 안테나의 위상 중심은 그림 1과 같이 회전 속도에 따라 변한다.

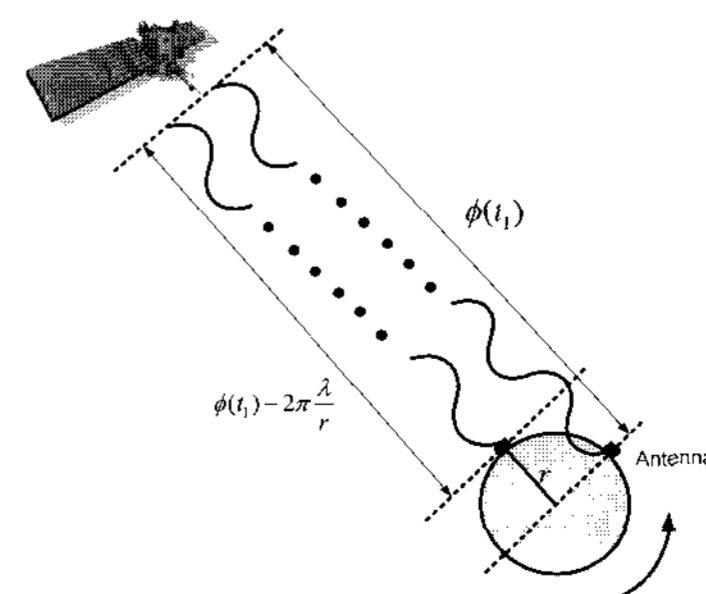


그림 1. 회전하는 항체의 안테나에 입력되는 GNSS 신호.  
Fig. 1. Received GNSS signal on the spinning vehicles.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 5. 11., 채택확정 : 2008. 4. 3.

김정원 : 한국항공우주연구원(jwkim76@kari.re.kr)

조종철 : ㈜한양네비콤(nix4102@hanyangnav.co.kr)

황동환, 이상정 : 충남대학교 전기정보통신공학부

(dhhwang@icnu.ac.kr/eesjl@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 국방과학연구소 기초연구과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다(계약번호 UD060034AD).

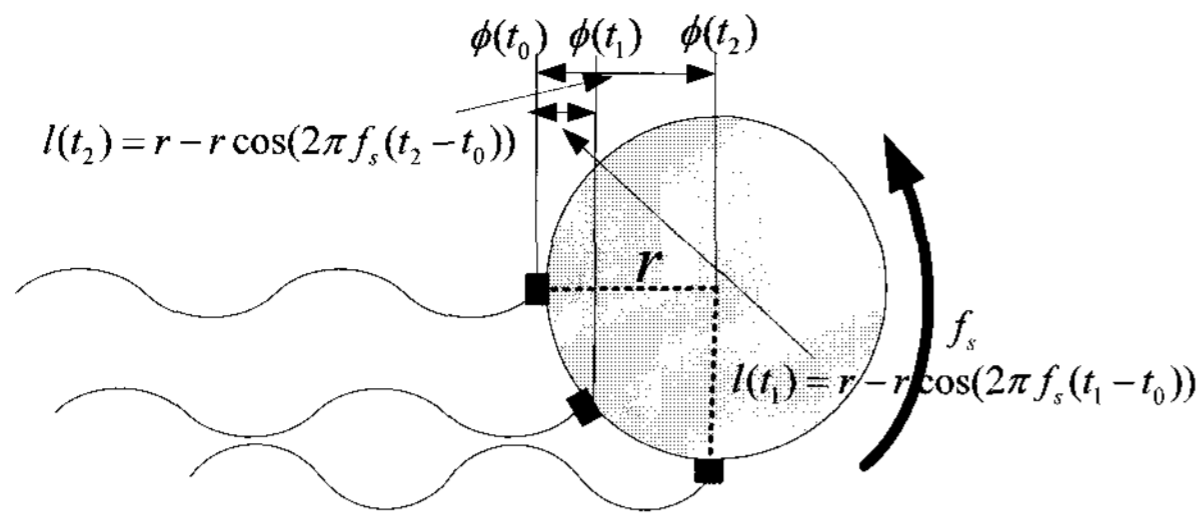


그림 2. 회전 항체에서 안테나 위치의 변화.  
Fig. 2. Variation of the antenna position on the spinning vehicles.

따라서 회전하는 항체에 부착된 안테나에 입력되는 GNSS 신호는 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = AC(t)D(t)\cos[2\pi(f_c + f_d)t + \phi(t)] + n(t) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 신호의 크기,  $C(t)$ 는 코드,  $D(t)$ 는 항법 데이터,  $f_c$ 는 반송파 주파수,  $f_d$ 는 항체와 위성의 운동으로 인한 도플러 주파수,  $\phi(t)$ 는 회전으로 인한 반송파의 위상 변화,  $n(t)$ 는 잡음을 나타낸다. 항체가 일정 속도로 회전하면 그림 2와 같이 안테나의 위치가 변하며 수신된 반송파 위상은 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(t) = 2\pi \frac{l(t)}{\lambda} \text{ [rad]} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 L1 반송파의 파장이며,  $l(t)$ 는 시간에 따른 선각(line of sight) 방향상에서의 안테나 중심 위치를 나타낸다. GPS C/A 코드의 경우 1 칩(chip)의 길이가 약 300m이고 항체의 지름에 비하여 매우 크므로 회전에 의한 코드 위상의 변화는 무시할 수 있다.

$f_s$ 의 속도로 회전하는 항체의 경우 시간에 따른 안테나의 위치는 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$l(t) = r - r \cos(2\pi f_s t) \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 안테나와 회전체 중심간의 거리이고  $f_s$ 는 항체의 회전 주파수이다. (2)와 (3)으로부터 회전에 의하여 반송파의 위상은  $+2\pi r/\lambda$ 에서  $-2\pi r/\lambda$ 까지  $f_s$ 의 주파수를 가지고 변하는 것을 알 수 있고 반송파 주파수도 (4)와 같이 변한다.

$$f(t) = \frac{d}{dt}[\phi(t)] = \frac{4\pi^2 f_s r}{\lambda} \sin(2\pi f_s t) \quad (4)$$

따라서, 회전체에서 GNSS 입력 신호의 반송파 위상과 주파수는 주기적으로 변하게 된다. 즉, 위상 변조 또는 주파수 변조된 신호의 형태를 가지게 된다.

2. 회전 도플러 현상이 신호 추적 루프에 미치는 영향

회전으로 인하여 위상 및 주파수 변조된 신호가 신호 추적 루프에 인가되면 동적 스트레스 오차(dynamic stress error)가 발생하며 PLL(Phase Locked Loop)을 사용하는 수신기에서는 (5)를 이용하여 이를 계산할 수 있다[9,10].

$$\Delta\phi_{ss}(t) = \frac{1}{\omega_0^n} \frac{d^n}{dt^n} \phi(t) = \frac{1}{\omega_0^n} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} r \cos(2\pi f_s t) \right] \quad (5)$$

여기서,  $\omega_0$ 는 루프의 비감쇄 고유 주파수(undamped natural frequency)이고  $n$ 은 루프 차수를 나타낸다. 반송파 추적 오차는 (5)에서 보는 바와 같이 회전 속도가 증가 할수록 크기가 증가하고 주파수  $f_s$ 를 가지는 정현파 형태로 나타난다. 일반적으로 비회전 항체에서는 가속도나 저크(jerk) 형태의 입력이 인가되면 PLL의 차수를 높여 동적 스트레스 오차를 제거할 수 있지만 회전 항체에서는 차수를 높여도 오차가 존재하며, 이것으로 인하여 항법 오차가 증가되거나 lock을 잃게 되어 항법이 불가능하게 된다.

III. 회전 속도 추정 기법

전술한 바와 같이 회전하는 항체에 수신된 GNSS 신호는 위상 변조된 신호이므로 위상 변화를 측정하면 회전 속도를 추정 할 수 있다. 그림 3은 회전 속도를 추정하기 위한 GNSS 수신기의 신호 추적 루프이고, 그림 4는 회전 속도 추정기를 나타낸다.

회전 속도 추정기는 GPS 반송파 추적루프의 상관기 출력인 I, Q 값을 이용하여 위상 변화를 검출하는 위상검출기, 위상 변화에 포함된 잡음을 제거하는 저역 통과 필터(LPF, Low Pass Filter), 위상 변화의 주파수를 측정하여 회전 주파수를 계산하는 영점 교차 계수기(zero crossing counter)부로 구성된다.

상관기 출력 I와 Q는 (6)과 (7)로 나타낼 수 있다.

$$S_I(t) = \sqrt{2PT} \frac{\sin(\pi\Delta f T)}{\pi\Delta f T} R_c(\Delta\tau) \cos[a \cos(2\pi f_s t)] + n_I \quad (6)$$

$$S_Q(t) = \sqrt{2PT} \frac{\sin(\pi\Delta f T)}{\pi\Delta f T} R_c(\Delta\tau) \sin[a \cos(2\pi f_s t)] + n_Q \quad (7)$$

여기서,  $P$ 는 신호전력,  $T$ 는 선적분 시간,  $R_c(\bullet)$ 는 C/A 코드의 상관함수,  $\Delta f$ 와  $\Delta\tau$ 는 각각 반송파 주파수와 코드 위상추적 오차이고,  $n_I$ 와  $n_Q$ 는 각각 상관기 출력 I, Q의 잡음

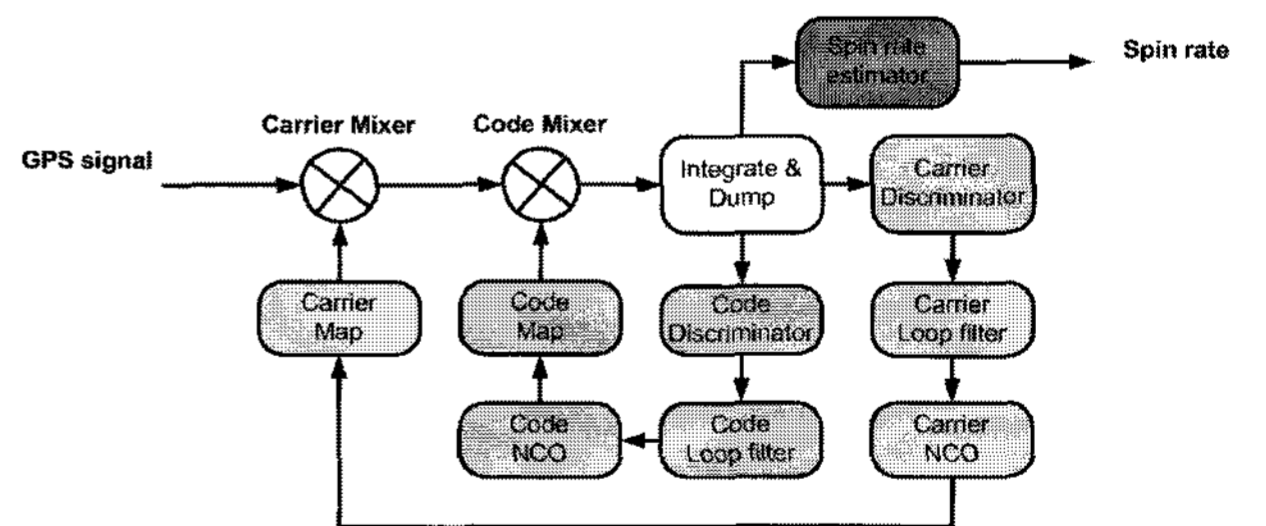


그림 3. 회전 속도 추정을 위한 GNSS 수신기의 추적 루프.  
Fig. 3. The tracking loop of GNSS receiver for spin rate estimation.

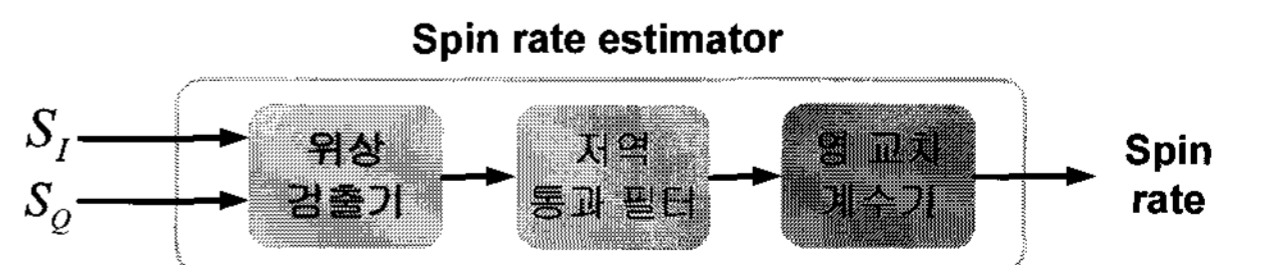


그림 4. 회전 속도 추정기.  
Fig. 4. Spin rate estimator.

을 나타낸다.  $a$ 는 항체의 지름과 반송파 추적 루프의 차수 및 대역폭에 따라 결정되는 값임을 (5)에서 알 수 있다. Arctangent 함수를 이용하면 I, Q 상관값으로부터 (8)과 같이 위상 변화를 계산할 수 있다.

$$S_A(t) = ATAN(S_Q, S_I) = a \cos(2\pi f_s t) + n_a \quad (8)$$

(8)의 위상 변화는 회전 추정기의 LPF로 입력되고, 이곳에서 고주파 성분의 잡음은 제거된다. LPF의 차단 주파수는 항체의 최대 회전 속도를 이용하여 결정한다. LPF의 출력은 정현파 형태의 신호이며 이 신호의 주파수를 검출하여 회전 속도를 추정한다. 일반적으로 위상 변조된 신호를 복조하는 방법은 포락선(envelope)을 검출하지만[11] 회전에 의한 위상 변화의 크기는 항체의 지름, 신호 추적 루프의 차수와 대역폭에 따라 다르기 때문에 본 논문에서는 영점 교차 계수법을 사용하여 검출하였다. 잡음의 영향을 고려하여 그림 5와 같이 히스테리시스(hysteresis)를 사용하였다.

그림 5에서  $\pm\Delta$ 는 히스테리시스 크기를 나타내며 PIT (Predetection Integration Time)와 반송파 추적 루프의 대역폭으로부터 결정한다. 영 교차를 통하여 얻은 값은 그림 6에서 보인 바와 같이 (9)에 나타난 상관기의 적분 시간과 샘플 수를 이용하여 회전 주파수로 변환한다.

$$\hat{f}_s = \frac{1}{\text{Num of Sample} \times \text{PIT}} \quad (9)$$

(9)에서 PIT는 상관기의 적분 시간이다. 추정된 회전 주파수  $\hat{f}_s$ 에 포함된 잔여 잡음을 제거하기 위하여 이동 평균 필터(Moving averaging filter)를 아래 (10)과 같이 이용하였다.

$$\bar{f}_s(i) = \frac{1}{N+1} [\hat{f}_s(i-N) + \hat{f}_s(i+1-N) \dots + \hat{f}_s(i)] \quad (10)$$

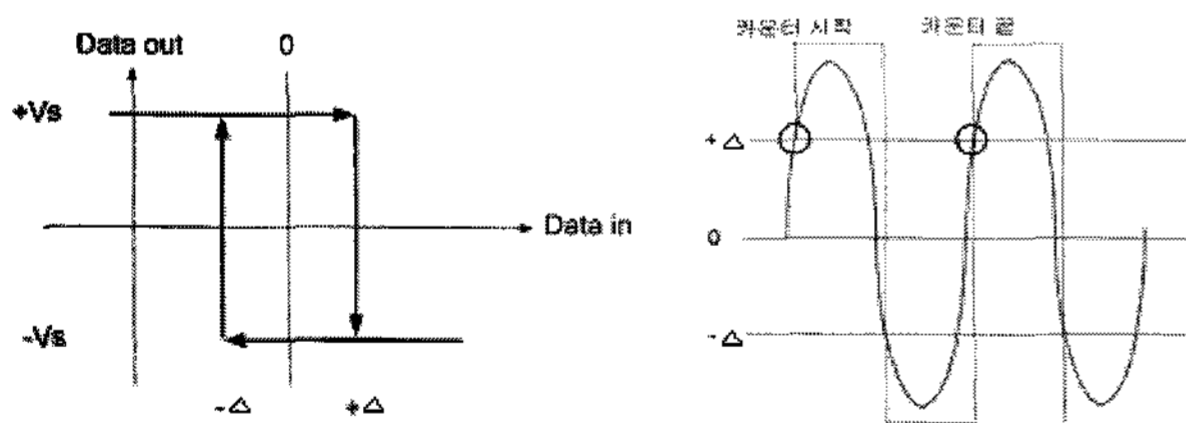


그림 5. 히스테리시스 갖는 영점 교차 계수법.  
Fig. 5. Zero crossing counter with hysteresis.

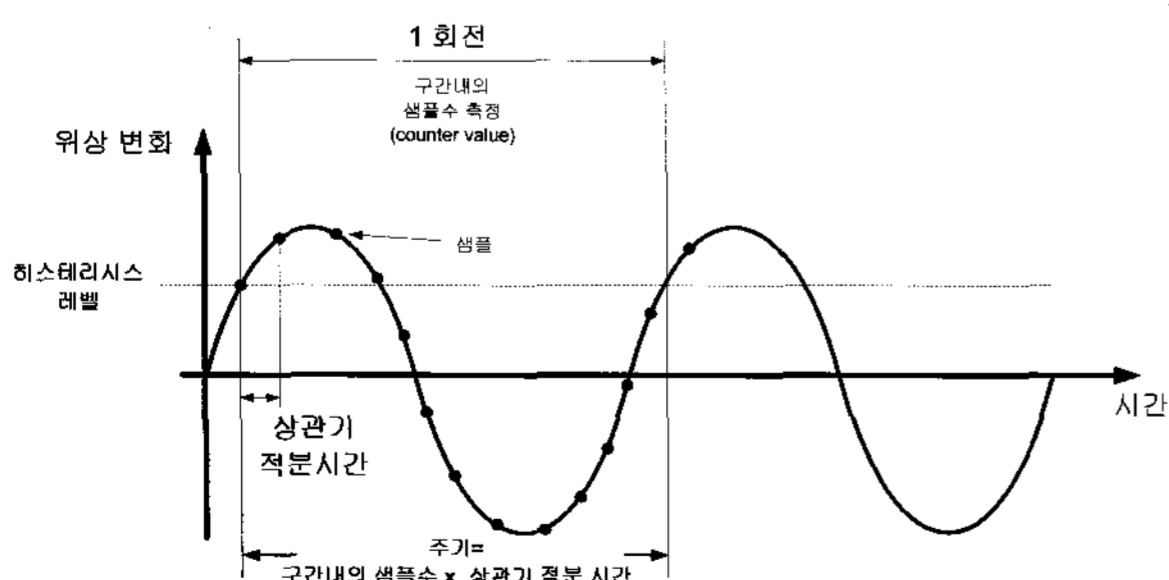


그림 6. 회전 주파수 계산.  
Fig. 6. Computation of spin frequency.

여기서,  $N$ 은 이동 평균 필터의 차수를 나타내며,  $\hat{f}_s(i)$ 는 현재 추정된 회전 주파수,  $\bar{f}_s$ 는 필터의 회전 주파수 출력을 나타낸다. 그림 7과 8은 이동 평균 필터의 계단 응답 특성과 주파수 응답 특성을 나타낸 것이다.

계단 응답 특성과 주파수 응답 특성으로부터 보듯이 응답 시간과 통과 주파수 대역은 이동 평균 필터 차수에 영향을 받음을 알 수 있다. 차수를 높이면 고주파 성분을 갖는 잡음의 영향은 감소하지만, 응답 시간이 느려지고 추정할 수 있는 회전 속도의 범위가 감소한다. 차수를 낮추면 응답 속도가 빨라지고 추정 범위가 증가하지만 잡음의 영향이 커진다. 이동 평균 필터의 차수는 응답 시간이 주어진 응답 시간보다 짧고, 이동 평균 필터의 차단 주파수가 항체의 최대 회전 주파수보다 크도록 (11)과 같이 정한다.

$$N < \frac{t_{resp}}{PIT} \quad (11-a)$$

$$N < \frac{0.293}{f_{max} \times PIT} \quad (11-b)$$

여기서,  $t_{resp}$ 는 주어진 응답 시간,  $f_{max}$ 는 항체의 최대 회전 주파수이고, (11-a)와 (11-b)를 만족하는 차수  $N$  중 최대값을 사용하여 잡음의 영향을 최소화하도록 한다.

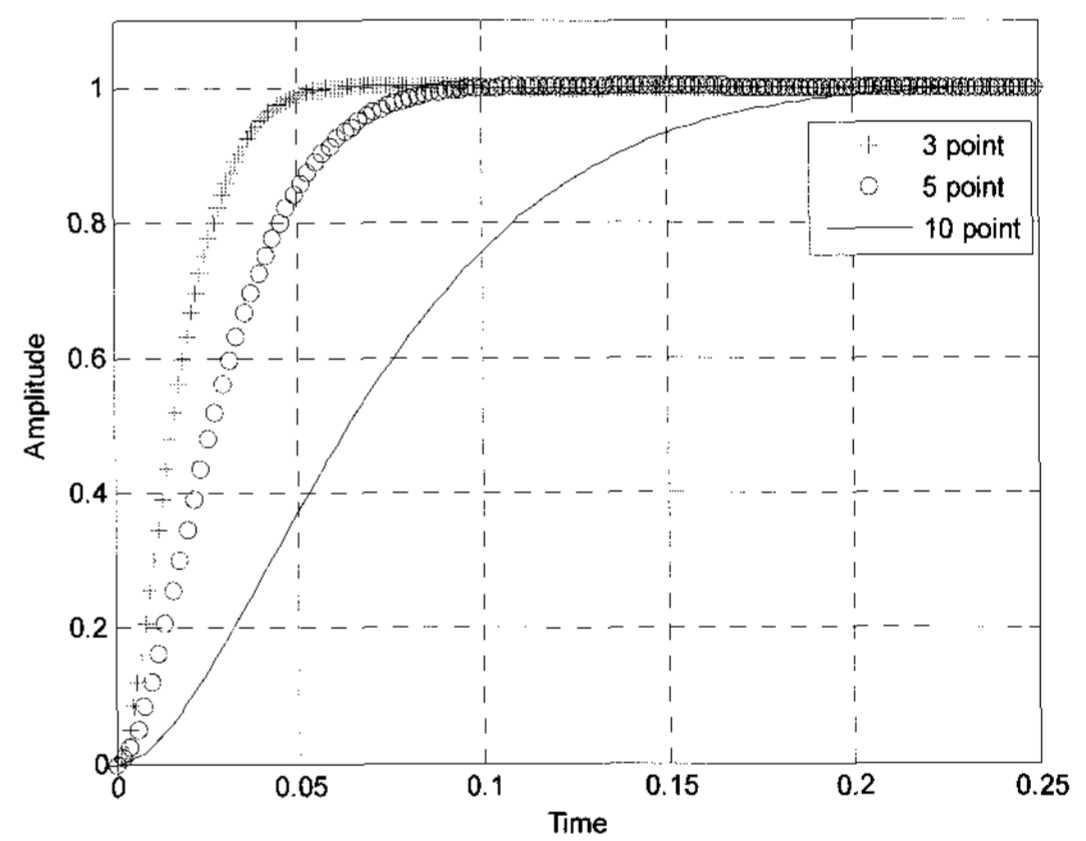


그림 7. 계단 응답 특성.  
Fig. 7. Step response.

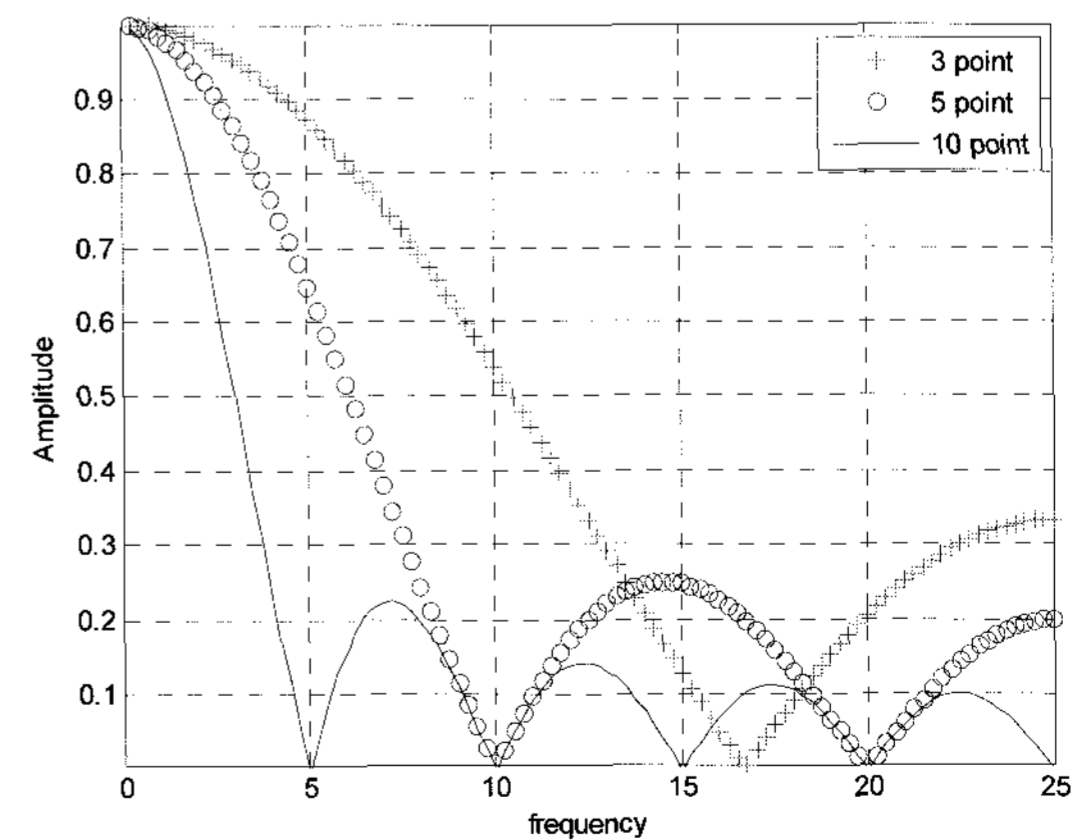


그림 8. 주파수 응답 특성.  
Fig. 8. Frequency response.

IV. 성능 평가

1. 실험 시스템 구성

제안한 회전 속도 추정 기법의 성능 검증을 위하여 그림 9 와 같은 시스템을 이용하였다. 회전 실험 장치는 회전 항체를 모사하는 것으로 내부에 GPS 수신기를 장착할 수 있고 회전축에 엔코더(encoder)를 부착하여 회전 속도를 측정할 수 있다. 성능 평가를 위한 데이터는 USB(Universal Serial Bus)와 UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)를 통하여 수집할 수 있다. 그림 10은 제작한 회전 실험 장치를 보여주고 있다. 회전 실험 장치에는 2곳의 안테나 장착 부분이 있으며 안테나 장착 부분 1의 직경은 50mm이며 안테나 장착 부분 2의 직경은 300mm이다. 본 논문의 실험 결과는 안테나 장착 부분 1에 안테나 4개를 90도 간격으로 설치하여 수행한 것이다.

실험에 사용한 엔코더는 1회전에 1000개의 펄스(Pulse)를 출력하며 이를 이용하여 측정된 회전 속도를 기준으로 제안한 기법의 성능 평가를 수행하였다. 엔코더로부터 출력되는 펄스 신호로부터 회전 속도를 측정하기 위하여 8비트 마이크로 컨트롤러인 ATmega128을 이용하였다. 그림 11은 엔코더 및 카운터의 구성도를 나타낸다.

GNSS 신호의 측정을 위하여 NordNav사의 소프트웨어 수신기 RF/IF 하드웨어를 이용하였는데 크기가 작아서 실험 장치 내부에 쉽게 장착을 할 수 있으며 신호 추적 루프부 소프트웨어의 수정이 가능하고 데이터 처리가 용이한 장점을 가진다. 제안한 회전 속도 추정 기법을 신호 추적 루프부 소프트웨어에

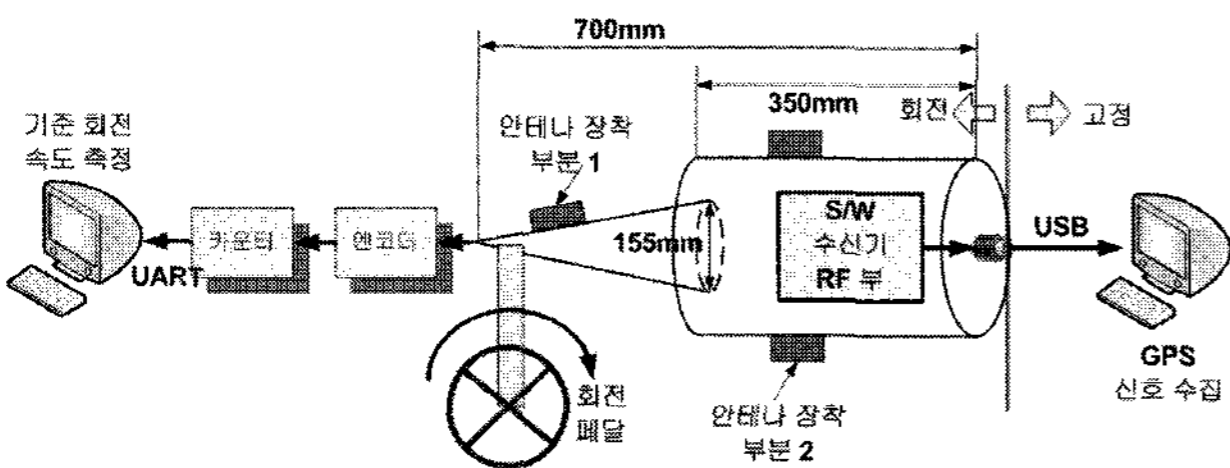


그림 9. 실험 시스템 구성.  
Fig. 9. Experimental system.

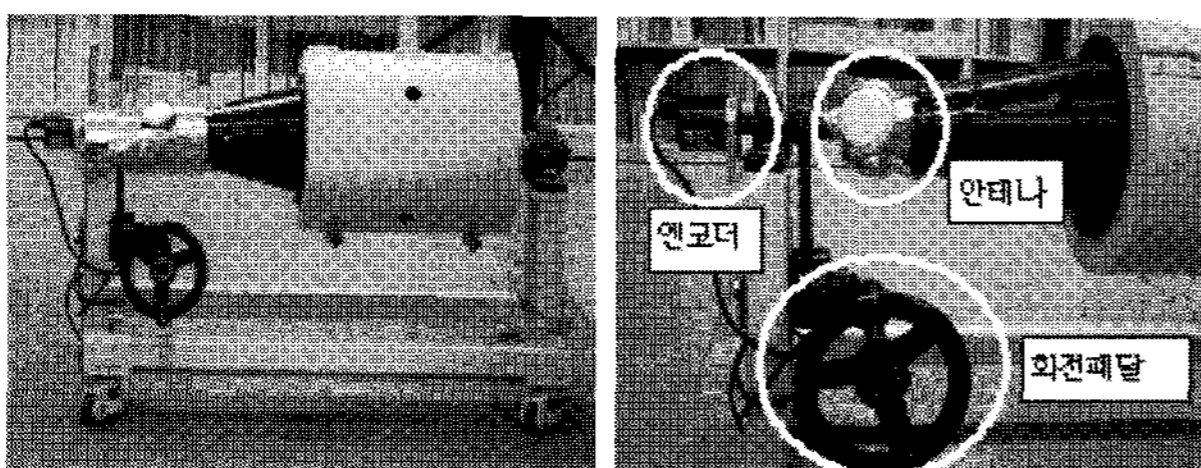


그림 10. 회전 실험 장치 사진.  
Fig. 10. Photograph of experimental setup.

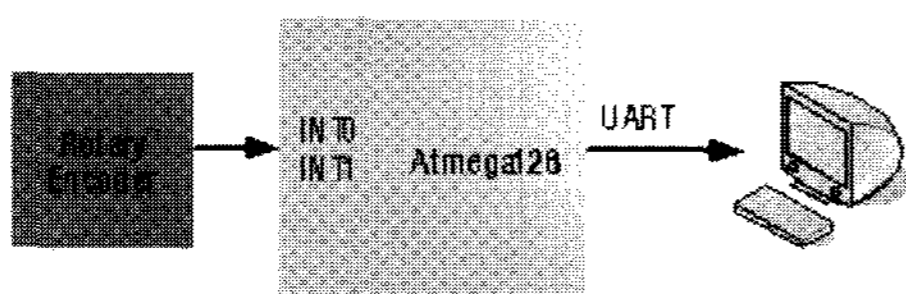


그림 11. 엔코더 카운터.  
Fig. 11. Counter for the encoder.

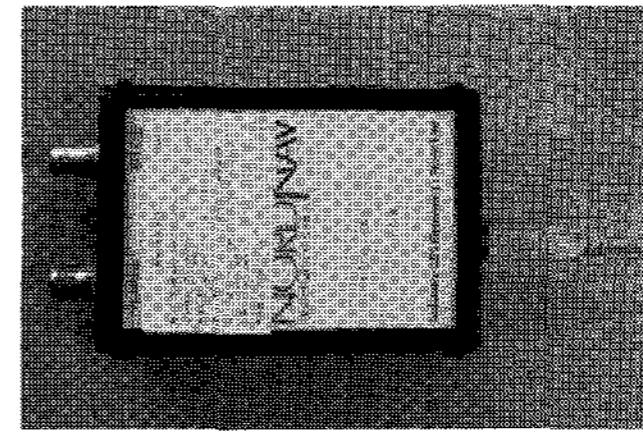


그림 12. 소프트웨어기반 GPS 수신기 하드웨어.  
Fig. 12. Hardware of SDR GPS receiver.

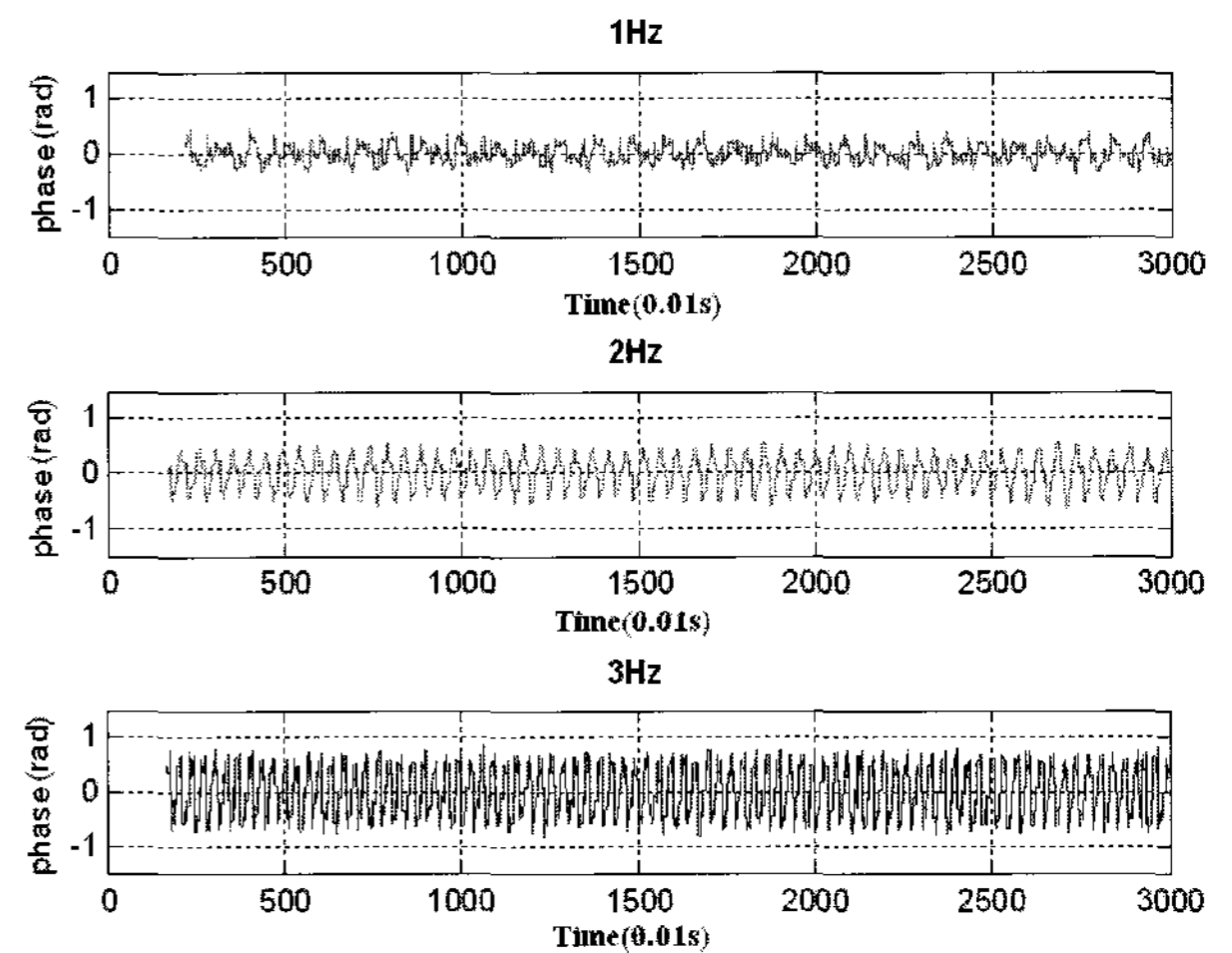


그림 13. 위상 검출기의 위상 출력.  
Fig. 13. Phase output of phase detector.

트웨어에 추가하여 실험을 수행 하였으며, 상관기의 적분 시간은 10msec, 반송파 추적 루프의 대역폭은 18Hz로 설정하였다. 위상 변화에 포함된 잡음의 분산은 약 0.0835rad이고 히스테리시스 크기는 잡음 분산보다 큰 0.1rad으로 설정하였고 응답 시간이 0.1sec보다 짧고, 차단 주파수가 5Hz가 되도록 5차 이동 평균 필터를 이용하였다. 그림 12는 실험에 사용한 소프트웨어 수신기의 RF/IF 하드웨어부를 보여준다.

2. 회전 속도 추정 실험

제안한 회전 속도 추정 기법은 C언어와 MATLAB으로 구현하였다. 회전 실험 장치를 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz, 5Hz의 속도로 회전시키며 소프트웨어 수신기의 RF/IF 하드웨어를 이용하여 IF(Intermediate Frequency)대역의 GPS 신호 데이터를 수집하였다. 그림 13은 1Hz, 2Hz, 3Hz의 속도로 회전할 때 위상 검출기 출력을 나타낸 것이다.

그림 13에서 GPS 반송파 위상이 항체의 회전에 따라 주기적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 14와 표 1은 엔코더로 측정된 회전 속도와 제안한 기법을 이용하여 측정된 회전 속도를 모두 나타낸 것이다. 결과에서 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz, 5Hz의 회전시 모두 0.05Hz-0.01Hz정도의 추정 오차를 가지는 것을 알 수 있다.

V. 결론 및 추후 연구 과제

본 논문에서는 GNSS 신호를 이용한 새로운 회전 속도 추정 방법을 제안하였다. 회전하는 항체에서는 안테나의 위상 중심의 주기적인 변화로 인하여 회전 도플러 현상이 발생하므로 수신 신호의 위상 및 주파수가 변조되어 나타난다. 회

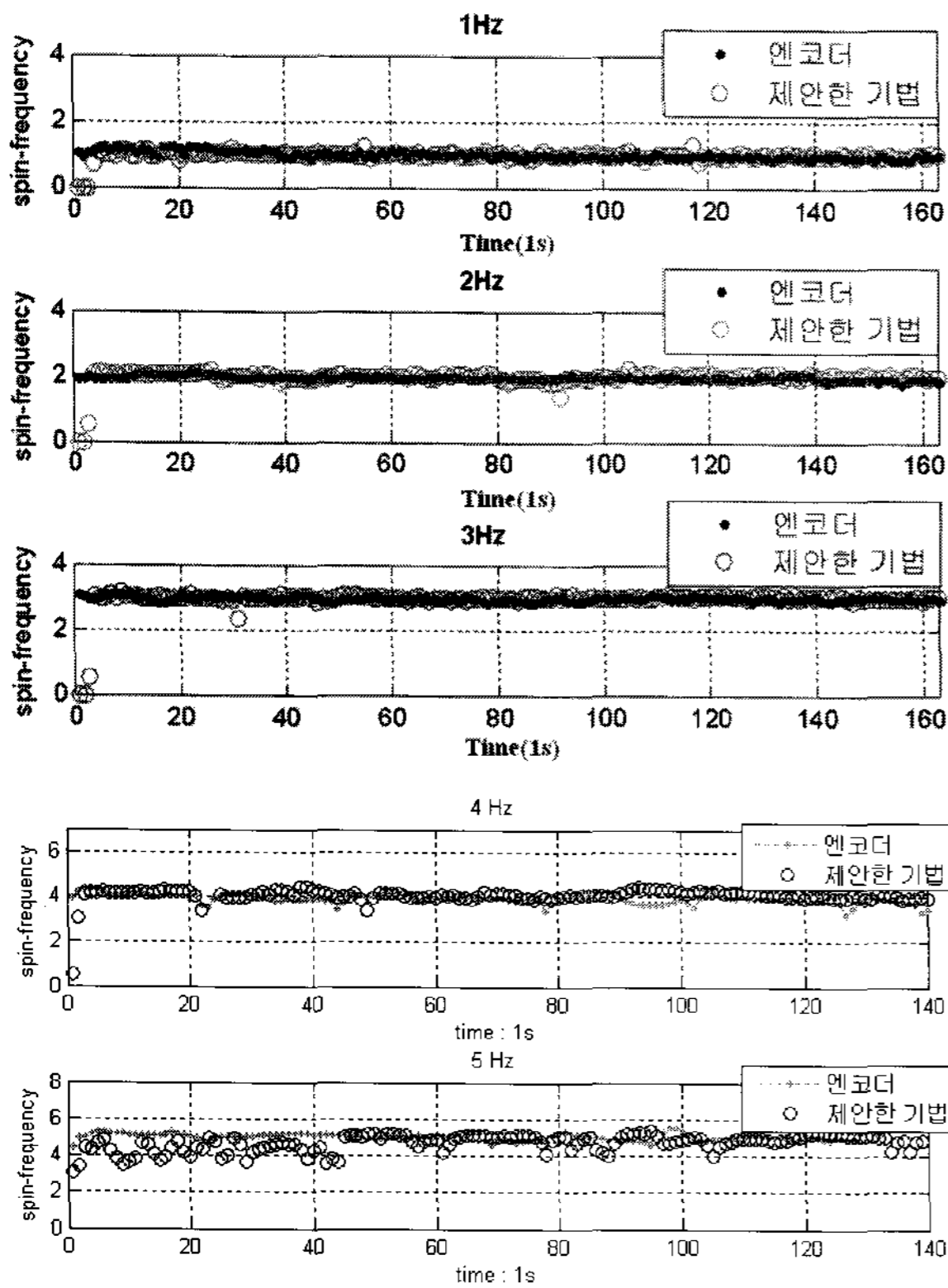


그림 14. 엔코더와 제안한 기법으로 추정된 결과 비교.  
 Fig. 14. Comparison between results of encoder and proposed method.

표 1. 추정된 회전 속도 오차.

Table 1. Error of estimated roll rate.

	엔코더로 측정한 회전 속도 (Hz)	추정된 회전 속도 (Hz)	차이(Hz)	
			평균	표준 편차
1	1.0518	0.999804	0.0519	0.876365
2	1.9345	1.992359	-0.0578	0.987665
3	2.9674	2.981072	-0.0143	0.7356573
4	4.0134	4.01378	0.00038	1.2485
5	5.112578	4.984632	0.1279	1.7782

전 도플러의 크기는 항체의 반지름과 회전 속도에 따라 달라지며 회전 속도와 같은 주파수의 정현파 형태로 나타난다.

신호 추적 루프에서 출력되는 I, Q 상관값으로부터 위상 변화를 계산하고 저역 통과 필터와 영점 교차 계수기를 사용하여 회전 속도를 추정한다. 제안한 기법을 검증하기 위하여 회전 실험 장치를 제작하고 실험을 수행하였으며, 실험 결과 최대 0.0578Hz의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

앞으로 실험을 통하여 크기 변조 현상을 이용하여 회전 속도를 측정하는 방법과의 성능 비교를 수행할 것이며, 회전으로 인하여 발생하는 GPS 수신기 신호 추적 루프의 동적 스트레스 오차를 보상할 수 있는 회전 주파수 추적 루프 설계에 대한 연구를 계속할 것이다.

참고문헌

- [1] G. T. Schmidt, "INS/GPS technology trends for military systems," *The Draper Technology Digest*, vol. 3, pp. 5-13, Draper Laboratory, 1999.
- [2] Hasik J. M., "GPS at War: A ten-year retrospective," *Proceedings of the ION GPS 2001*, pp. 2406-2417, 2001.
- [3] J. R. Dowdle and K. W. Flueckiger, "A GPS/INS guidance system for navy 5" projectile," *Proceedings of 52nd ION AM*, pp. 312-325, 1996.
- [4] 함왕식, "155mm 지능 포탄 개발 동향," 국방 기술 정보, 제 11 권 제 4 호, pp. 83-86, 2005.
- [5] E. J. Ohlmeyer, T. R. Pepitone, B. L. Miller, D. S. Malyevac, J. E. Bibel, and A. G. Evans, "System modeling and analysis of GPS/INS for extended range guided munitions," *TR 96/159, Dahlgren Division, Naval Surface Warfare Center, Dahlgren, VA*, 1996.
- [6] R. Kreichauf and Erik Lindquist, "Estimation of the roll angle in a spinning guided munition shell," *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006*, pp. 442-451, 2006.
- [7] B. S. Davis, "Using low-cost MEMS accelerometers and gyroscopes as strapdown IMUs on rolling projectiles," *Proceedings of IEEE PLANS 1998*, pp. 594-601, 1998.
- [8] J. H. Doty, D. A. Anderson, and T. D. Bybee, "A demonstration of advanced spinning vehicle navigation," *Proceedings of ION NTM 2004*, pp. 573-584, 2004.
- [9] E. D. Kaplan, *Understanding GPS - Principles and Applications*, Artech House, 1996.
- [10] P. Misra and Per Enge, *Global Positioning System Signals, Measurement, and Performance: Second Editions*, Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [11] R. E. Ziemer and W. H. Tranter, *Principles of communications*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.



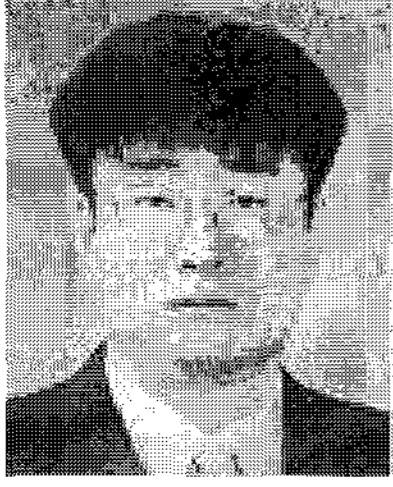
김정원

2002년 충남대학교 전자공학과 공학사. 2004년 동 대학원 공학석사. 2008년 동 대학원 공학박사. 2008년~현재 한국항공우주연구원. 관심분야는 임베디드 시스템, GNSS 수신기, GPS/INS 통합 항법 시스템.



조종철

2005년 한밭대학교 전자공학과 공학사. 2007년 충남대학교 전자공학과 대학원 공학 석사. 2007년~현재 (주) 한양네비콤 주임연구원, 관심분야는 HDL, GNSS 수신기.



### 황 동 환

1985년 서울대학교 전기공학과 공학사.  
1987년 KIAST 전기 및 전자공학과 공학석사. 1991년 동 대학원 공학박사.  
1996년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수. 관심분야는 INS, GPS, 추정론.



### 이 상 정

1979년 서울대학교 전자공학과 공학사.  
1981년 동 대학원 공학석사. 1987년 동 대학원 공학박사. 1988년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수. 관심분야는 강인 제어, GNSS.