

전자기력을 이용한 진동형 자이로의 가진루프제어

Oscillation Control for a Electro-Magnetic Vibratory Gyroscope

공형직, 이석천, 박성수, 홍성경*
(Hyeong-Jik Kong, Sug-Chon Lee, Sungsu Park, and Sung-Kyung Hong)

Abstract : This paper presents the design of the Automatic Gain Control (AGC) system for the drive axis of a electro-magnetic driven cylinder gyroscope. The simulation and experimental results show that the designed AGC excites the cylinder at its natural frequency and maintains a specified amplitude of oscillations, and also track the natural frequency shifts due to temperature variations. The sensing performance of the AGC driven gyroscope is shown to be greatly improved compared to that of the open-loop driven one.

Keywords : cylindrical vibratory gyroscope, electromagnetic force, automatic gain control

I. 서론

자이로스코프 (이하 자이로)는 회전량을 측정하는 관성센서로서 가속도계와 함께 안정화/자세제어, 관성 항법제어장치를 위해 필요한 핵심 센서이다[1,2]. 기존의 자이로는 광학적 성질을 이용하는 파이버 옵틱(fiber optic) 자이로와 링 레이저(ring laser) 자이로, 회전모터의 관성력을 이용하는 기계식 자이로 등이 있으며, 이들은 고정밀도가 요구되는 군사용 및 민간용 비행체의 관성항법 제어장치에 주로 사용되었다[1,2]. 한편 이들 기존의 자이로는 구조 및 구현의 복잡성 등으로 인하여 저가, 소형화 및 대량 생산보다는 고정밀도, 고해상도 등의 성능만을 중요한 요소로 생각하였으며 따라서 그 응용범위가 극히 제한적 이었다[2].

최근 전자 산업의 발전은 이러한 자이로의 응용범위를 자동차, 의료기기, 가전제품, 산업용 로봇제어 등으로 활용 영역을 확대시켰다. 이와 더불어 가격이 높고, 고정밀도를 요구하던 기존의 자이로에 비해 저가, 소형, 경량화를 요구하게 되었다[2]. 진동형 자이로는 기존의 기계식 자이로 및 광학식 자이로에 비해 구조가 간단하여 쉽게 제작할 수 있고, 소형, 저가이며 소비전력도 적게 드는 장점을 갖고 있다 [3-6]. 반면 성능은 상대적으로 떨어지는 단점을 갖고 있으나 이를 극복하기 위하여 최근에는 페루프 제어기법 및 소프트웨어적인 보상기법의 연구가 수행되고 있다[7,8]. 진동형 자이로의 진폭 및 공진주파수는 단기적으로 온도변화와 장기적으로는 노후에 따른 재질의 강성 변화에 민감하게 변화하며, 이로 인하여 개루프 가진 제어 적용시 성능저하 현상이 발생하게 된다[9]. 따라서 일정한 성능유지와 감도를 최대화하기 위해서는 변하는 공진주파수를 지속적으로 추종하면서, 동시에 일정한 진폭으로 가진하도록 하는 자동이득 제어 (Automatic Gain Control, AGC) 설계가 요구 된다[8].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 24., 채택확정 : 2004. 12. 6.
공형직, 이석천, 박성수, 홍성경 : 세종대학교 항공우주공학과
(kong629@empal.com/sugchon@hanmail.net/sungsu@sejong.ac.kr/skhong@sejong.ac.kr)

※ 본 연구는 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

본 논문에서는 기존의 가진/감지 방식 (압전/정전력)과 비교하여 성능이 우수한 전자기력 가진/감지 방식 [7,9,10,11]

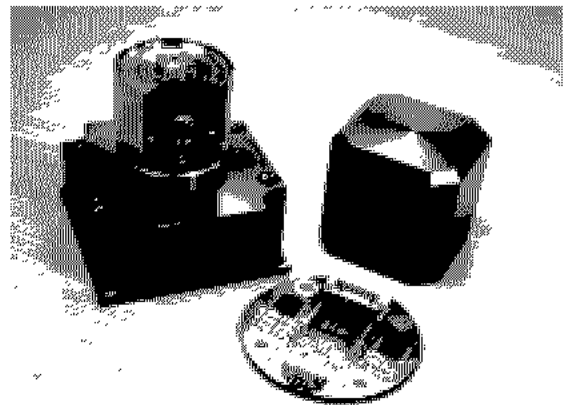


그림 1. 실린더형 진동 자이로
Fig. 1. Experimental CVG.

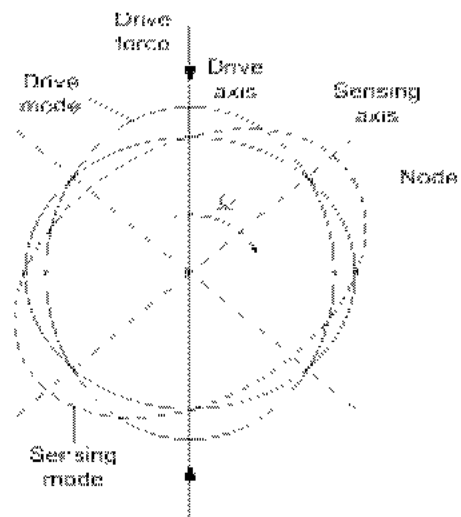


그림 2. 실린더의 모드형상.
Fig. 2. Mode shape of vibratory cylinder.

을 이용하는 실린더 진동형 자이로(그림 1)를 대상으로 AGC방식의 가진루프 제어를 설계하였다. 또한 본 연구 결과를 사전 연구 결과인 개루프 제어 방식 [9]과 실험적으로 비교 분석하였다. 본 연구결과인 가진 루프제어를 통하여 온도변화 등으로 인한 공진주파수변화를 지속적으로 추종하고 가진 진폭을 일정하게 유지 시킬 수 있음을 확인하였으며, 결과적으로 센서의 성능이 급격히 향상됨을 입증하였다.

II. 실린더 진동형 자이로 모델

1. 작동원리

진동부인 실린더가 이상적인 조건이라고 가정하면, 그림 2와 같이 가진력이 작용하는 가진축 방향으로 첫 번째 모드형상이 발생하고 45° 방향인 센싱축 상에 노드점이 생긴다. 이 첫 번째 모드형상을 가진모드라 한다. 가진모드 상태에서 가진축과 센싱축에 수직인 축을 중심으로 외부 각속도(Ω)가 인가되면 코리올리 힘이 작용하여 센싱축 방향으로 두 번째 모드형상이 발생하며 이로 인해 노드점에 변위가 발생된다. 이 두 번째 모드형상을 센싱모드라 한다. 센싱모드에서의 노드점 변위는 각속도(Ω)에 비례하며 그 변위로 부터 각속도를 측정할 수 있다[6,7,9,10].

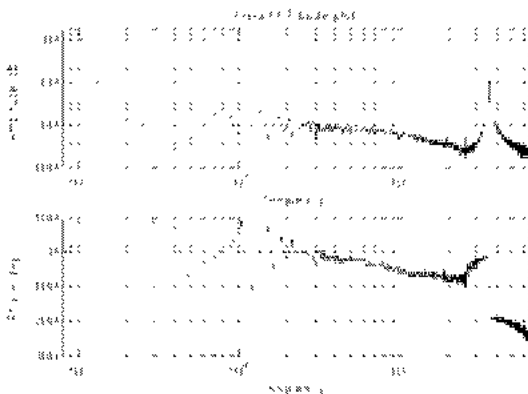


그림 3. 실린더의 주파수 응답해석.
Fig. 3. Bode plot of gyroscope.

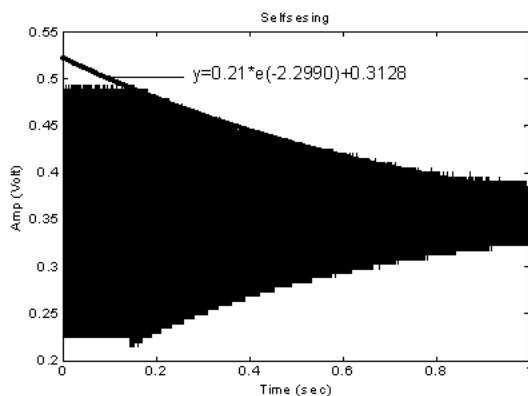


그림 4. 실린더 진폭의 대수감소.
Fig. 4. Logarithmic decrement of cylinder's amplitude.

2. 파라미터 인식

가진축의 운동방정식은 이차 미분방정식 형태로 가정하여 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x - f \tag{1}$$

여기서 감쇄비(ζ)와 고유진동수(ω_n)의 추출은 주파수 응답 실험을 통하여 수행하였다. 그림 3은 주파수 응답선도이다. 한편 실린더의 감쇄비(ζ)는 공진주파수로 가진한 상태에서 가진력을 제거한 후 진폭의 감쇄되는 현상의 시간 응답을 통하여 측정하였다. 그림 4는 그 시간응답이며, (2)의 대수감소식을 이용하여 감쇄비를 추출하였다.

$$\delta = \frac{x_1}{x_2} = \zeta\omega_n\tau_d \tag{2}$$

이상과 같은 방법으로 추출한 매개변수들의 값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \omega_n &= 3588 \text{ (Hz)} \\ \zeta &= 0.00005099 \end{aligned}$$

III. 가진루프 제어기

1. AGC 루프의 설계

센서의 견실한 거동을 위해서는 실린더의 진폭을 일정하게 유지하면서 정확히 공진주파수로 가진을 하도록 하는 가진루프 제어기가 요구된다. 이때 외부 환경의 변화 등으로 실린더의 고유진동수 및 감쇄비는 시변 특성을 지니므로 균일한 진동특성을 유지하기 위해서 가진루프는 자동이득제어(Automatic Gain Control, AGC) 형태를 취하여야 하며 그 블록선도는 그림 5와 같다[9]. AGC는 절대값, 저대역 필터(LPF), 비교기등의 구성요소로 간단하게 구현되며, AGC를 포함한 가진축의 운동방정식은 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} + c\dot{x} + \omega^2x - K(r-z)\bar{x} \\ \ddot{z} - \lambda(|\dot{x}| - z) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 K 는 이득 값, c 는 $2\zeta\omega_n$, r 은 기준 진폭, z 는 실린더 진동 속도의 절대값을 취한 후 저대역 필터를 통과한 후의 신호, 그리고 λ 는 저대역 필터의 차단 주파수이다.

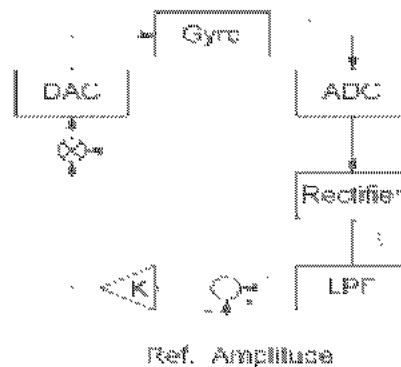


그림 5. AGC의 구성도.
Fig. 5. Construct figure of AGC.

즉, AGC는 가진축의 속도 \dot{x} 의 진폭을 일정하게 유지하기 위해서 측정된 속도의 진폭과 기준 진폭과의 차를 이득값으로 증가 또는 감소시킨 후 다시 가진축의 속도와 곱한 값으로 가진 시킨다. 이때 실린더는 속도 피드백을 통하여 감쇄 항을 상쇄시키는 기능 때문에 항상 고유진동수로 자유 진동하게 된다. 설계변수인 이득값 K , 저대역필터의 λ 값에 따른 가진축의 운동방정식을 해석하기 위해서 평균법(averaging method)을 도입한다.

(4)에서 진폭의 시간에 따른 변화는 가진축의 진동운동에 비해서 극히 느리므로 시간축을 $\tau = \omega t$ 으로 변환시키고 위치와 속도 x, \dot{x} 를 진폭과 위상변화량 a, ϕ 로 좌표변환한 후, 평균법을 적용하면 다음과 같은 선형 평균 동특성(averaged dynamics)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{a}' &= \frac{1}{2\omega} [K(r - \omega \bar{z}) - c] \bar{a} \\ \bar{\phi}' &= 0 \\ \bar{z}' &= \frac{\lambda}{\omega} \left(\frac{2}{\pi} \bar{a} - \bar{z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\bar{\bullet}$ 는 변수의 평균을 의미하며, 프라임 (')은 변환된 무차원 시간 τ 에 대한 미분 값을 나타낸다. 이때 위의 과정으로 구한 설계변수 값은 (5)를 만족해야 한다.

$$\frac{K}{\omega} \propto \frac{\lambda}{\omega} \propto \frac{c}{\omega} \ll 1 \quad (5)$$

(4)의 평형점은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{a}_0 &= 0, & \bar{a}_1 &= \frac{\pi}{2\omega} \left(r - \frac{c}{K} \right) \\ \bar{z}_0 &= 0, & \bar{z}_1 &= \frac{1}{\omega} \left(r - \frac{c}{K} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이때, $r > c/K$ 로 가정하고 평형점에서의 Jacobian 선형화를 거치면 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} D_x f(a_0, z_0) &= \begin{pmatrix} \frac{1}{2\omega}(Kr - c) & 0 \\ \frac{2\lambda}{\pi\omega} & -\frac{\lambda}{\omega} \end{pmatrix} \\ D_x f(a_1, z_1) &= \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\pi}{4\omega}(Kr - c) \\ \frac{2\lambda}{\pi\omega} & -\frac{\lambda}{\omega} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

(\bar{a}_0, \bar{z}_0) 에서의 평형점은 불안정한 고유값과 안정한 고유값을 하나씩 갖는다. 그러나 $\bar{a}(0) \neq 0$ 이면 AGC Loop는 가진된다. (\bar{a}_1, \bar{z}_1) 의 평형점은 고유값은 $r > c/K$ 을 만족하면 두 개의 고유값이 모두 안정하다. $D_x f(a_1, z_1)$ 의 고유값은 (8)과 같다[8].

$$\frac{1}{2\omega} (-\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 2\lambda(Kr - c)}) \quad (8)$$

AGC의 성능은 진폭의 시간에 따른 변화를 나타내는 \bar{a} 의 반응에 달려있으며, 설계변수인 K 와 λ 값을 조정해서 바꿀 수 있다.

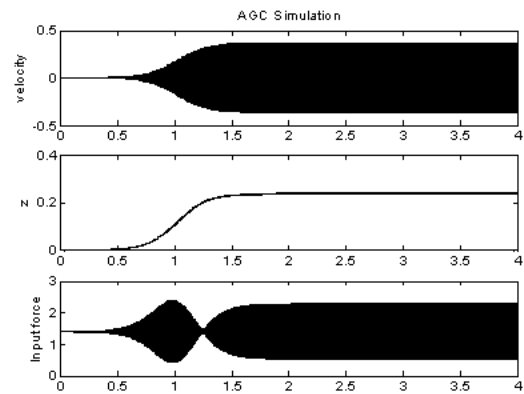


그림 6. AGC 시뮬레이션결과.
Fig. 6. Simulation of AGC.

2. AGC 시뮬레이션

시뮬레이션을 통하여 본 시스템에 적절한 AGC의 매개변수들을 아래와 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} K &= 63 (m) \\ \lambda &= 395.84 (rad) \\ r &= 0.2 (m/s) \end{aligned}$$

그림 6은 이 때의 AGC를 포함한 가진축의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6의 첫 번째 그래프는 가진축의 속도로 시간이 지나면 진폭이 일정하게 유지되는 것을 보여준다. 두 번째 그래프는 z값을, 마지막 그래프는 가진축으로 입력되는 가진력을 나타낸다.

IV. 실험결과

가진 제어루프 자체의 성능과 가진 제어루프가 센서 성능에 미치는 영향을 검증하기 위하여 아래와 같은 실험을 수행하였다.

1. 상온에서의 가진 성능비교

상온(25°C)에서 개루프 상태의 가진(function generator 사용)과 AGC 루프를 이용한 폐루프 가진의 성능을 비교하였다.

그림 7에서 보는 바와 같이 개루프 가진은 상온(25°C)일 경우에도 시간이 지남에 따라 가진축의 변위가 일정하지 않은 경향을 보이는 반면, AGC 폐루프 가진의 경우에는 가진축의 변위가 항상 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

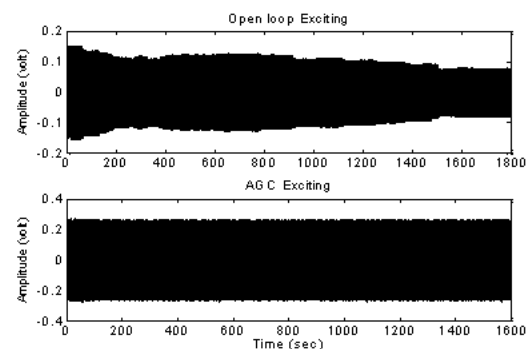


그림 7. 상온에서의 가진 성능비교.
Fig. 7. Compare with exciting at constant temperature.

2. 온도변화에 따른 가진 성능비교

온도가 변화함에 따라 필연적으로 실린더의 동특성이 변화하게 된다. 그림 8은 실린더의 온도에 따른 공진 주파수의 변화이다. 가진 시 이러한 실린더의 특성 변화에 적응하지 못하면 전체적인 센서의 성능저하가 초래된다. 이러한 환경변화(온도)에 따른 AGC 가진의 성능을 테스트하였다.

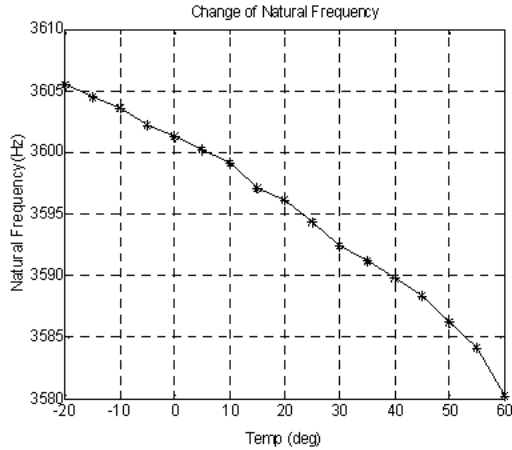


그림 8. 온도에 따른 공진주파수의 변화.

Fig. 8. Change of natural frequency on temperature.

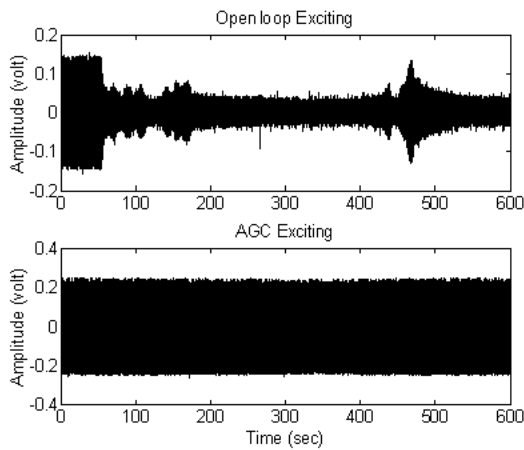


그림 9. 온도변화에 따른 가진 성능비교.

Fig. 9. Compare with exciting on temperature.

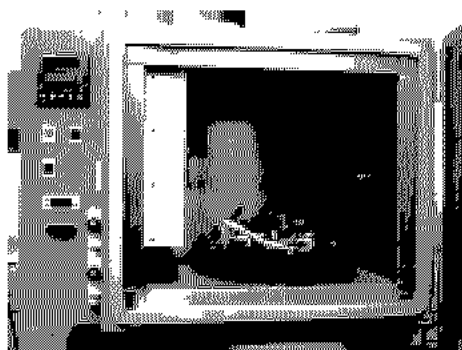


그림 10. 레이트 테이블.

Fig. 10. Rate table.

온도변화에 대한 실험은 챔버 내부 온도를 -20°C에서 65°C까지 변화 시켜가며 실린더의 고유진동수를 측정하였다. 그림 9에서 보듯이 개루프 가진은 25°C일 경우에만 가진축의 변위가 일정하게 나타나고 온도가 변화에 따라 변위가 확연히 줄어든다. 반면에 AGC 가진은 온도변화에도 불구하고 진폭이 항상 일정하게 유지된다. 이는 실린더의 공진 주파수가 온도에 따라 변화할 때 개루프 제어는 변화된 공진 주파수를 추종하지 못하는 반면 AGC 가진 제어기는 온도 센서의 보상 없이 실린더의 변화하는 공진주파수로 추종을 하고 있음을 보여준다.

3. 각속도 검출 성능 비교(정온)

개루프와 AGC 루프를 각각 적용할 때, 각각의 기능이 각속도 검출 성능에 미치는 영향을 실험을 통해 확인 하였다.

그림 11와 그림 12은 그림 10에서 보는 rate table을 이용하여 일정한 온도에서 10deg/s 씩 증가 시키면서 센싱값을 측정 한 것이다. 결과에서 보듯이 개루프 가진에서는 각속도에 따른 센싱 값이 선형적이지 않지만 AGC 가진루프를 이용한 자이로의 경우 각속도 센싱 결과는 전 영역에서 개루프 가진의 센싱값보다 선형적인 것을 알 수 있다.

4. 각속도 검출 성능 비교(변온)

4.3과 같은 실험을 상온과 상온에서 10°C 증가시킨 상태에서 실험을 하였다.

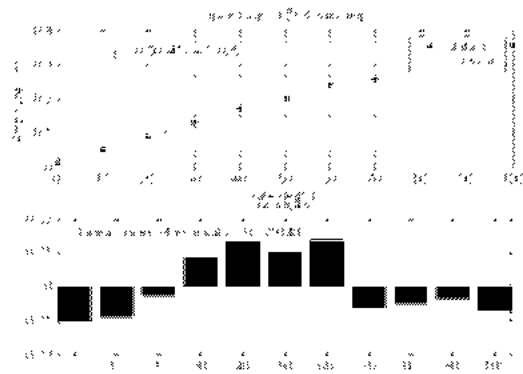


그림 11. 개루프 가진의 각속도센싱.

Fig. 11. Rate sensing of open loop excitation.

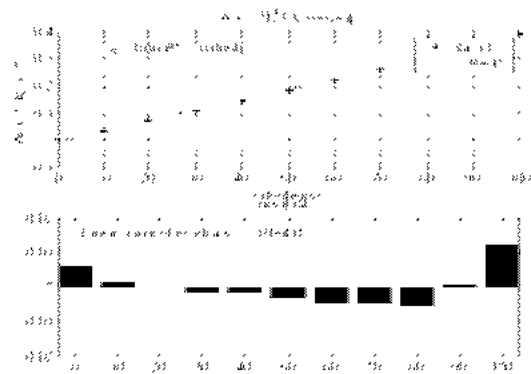
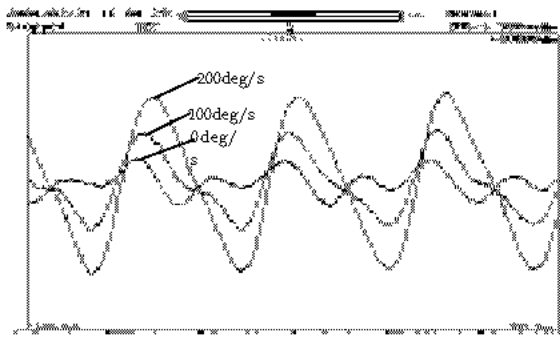
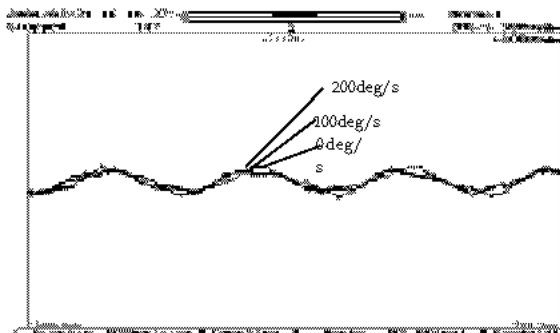


그림 12. AGC 가진의 각속도 센싱.

Fig. 12. Rate sensing of AGC loop excitation.



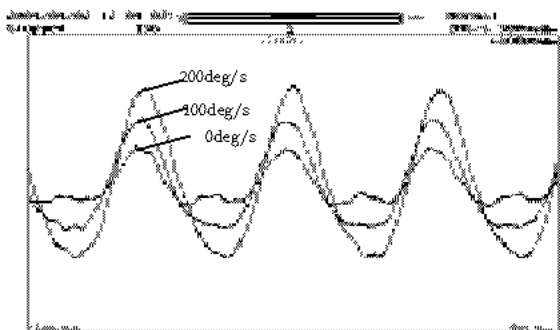
(A) Rate sensing of open loop excitation(25°C).



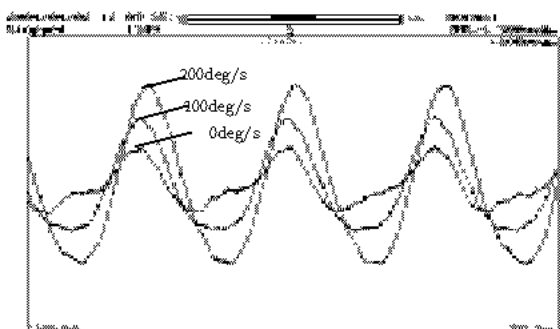
(B) Rate sensing of open loop excitation(35°C).

그림 13. Openloop 가진의 각속도 센싱.

Fig. 13. Rate sensing of open loop excitation.



(A) Rate sensing of AGC excitation loop(25°C).



(B) Rate sensing of AGC loop excitation(35°C).

그림 14. AGC 가진의 각속도 센싱.

Fig. 14. Rate sensing of AGC loop excitation.

그림 13(A),(B)는 개루프 가진의 경우로써 그림 13(A)는 상온(25°C)에서, 그림 13(B)는 상온에서 10°C 증가 시킨 상태(35°C)에서 각각 0deg/s, 100deg/s, 200deg/s씩 각속도를 증가하고, 입력된 각속도를 센서에서 측정된 센싱값이다. 결과에서 보듯이 상온일 경우 각속도 변화에 따라 센싱값이 증가하지만 온도가 변하면 센싱값은 변화를 보이지 않았다.

그림 14(A),(B)는 AGC가진 루프를 사용한 자이로의 각속도 센싱값으로, 각각 상온(25°C)과 상온에서 10°C 증가 시킨 상태(35°C)에서 0deg/s, 100deg/s, 200deg/s씩 각속도를 증가하고, 증가된 각속도에 대한 센서 측정값을 나타낸 그래프이다. 결과에서 보듯이 AGC 가진 루프에서는 온도변화가 생겨 실린더의 고유 진동수가 변화 하더라도 변화한 공진주파수를 추종하므로 각속도 측정에는 영향주지 않았다.

V. 결론

공진주파수로 가진을 하게 되면 적은 에너지로 실린더의 형상을 많이 변화 시킬 수 있기 때문에, 적은 소비전력으로 센서의 분해능을 향상시킬 수 있다. 그러나 공진주파수가 환경에 의해 변화하기 때문에 이를 추종시킬 필요가 있다. 변화하는 공진주파수를 추종하게 되면 센서의 분해능은 향상은 물론이고 동적범위가 커지는 장점이 있다.

본 연구에서는 마그네틱을 이용한 자이로에 AGC 루프를 이용하여 진동형 자이로의 실린더가 공진주파수가 변화하는 상황에서도 항상 공진주파수로 가진되도록 능동적인 제어를 하였으며, 이 방법을 통하여 센서의 성능을 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다. 현재 각속도의 추출 방법은 자이로의 센싱축의 진폭 변화로 측정하였지만 향후 각속도를 추출하기 위한 알고리즘을 연구하고, 가진축 뿐만 아니라 센싱축에 대해서도 페루프 제어기법을 적용하여 센싱 성능을 한층 더 향상시킬 계획이다.

참고문헌

- [1] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- [2] N. Barbour, and G. Schmidt, "Inertial sensor technology", *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, Dec., 2001.
- [3] J. T. Anders and R. Pearson, "Application of the 'START' vibratory gyroscope", *GEC Review*, vol. 9, no. 3, 1994.
- [4] J. Söderkvist, "Piezoelectric beams and vibrating angular rate sensors", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 38, no. 3., pp. 271-280, 1991.
- [5] B. Boxenhom and P. Greiff, "A vibratory micromechanical gyroscope", *AIAA Guidance and Controls Conference*, pp. 1033-1040, 1988.
- [6] C. H. J. Fox, "The dynamics of a vibrating cylinder gyro with imperfection", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, pp. 453-464, 1996.
- [7] S. K. Hong, "Compensation of nonlinear thermal bias drift of resonant rate sensor (RRS) using fuzzy logic", *Sensors and Actuators*, vol. 78, pp. 143-148, 1999.
- [8] R. T. McCloskey, A. Vakakis, "Analysis of a microsensor

automatic gain control loop", *Proceeding of the American Control Conference*, pp. 3307-3311, 1999.

- [9] 공형직, 홍성경, 김정엽 “개루프 제어의 실린더 진동형 자이로 구현 및 실험”, 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권, 제8호, pp. 669-672, 2004.
- [10] 이정영, 홍성경, “전자기력을 이용한 진동형 자이로스

코프의 가진 및 검출기법 연구”, 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제9권, 제1호, pp. 30-36, 2003.

- [11] S. H. Lee, S. W. Hong, Y. K. Kim and S. K. Lee, "A planar vibratory gyroscope using electromagnetic force", *Sensors and Actuator*, vol. 65, pp. 101-108, 1998.



공형직

1978년생. 2004년 세종대학교 졸업. 현재 동대학원 재학중. 관심분야는 지능 제어, 강건제어 및 센서응용.



이석천

1974년생. 2003년 세종대학교 졸업. 현재 동대학원 재학중. 관심분야는 무인 항공기 지능제어 및 센서응용.



박성수

1988년 서울대학교 항공공학과(학사). 동대학원 석사(1990). UC Berkeley 기계공학과 박사(2000). 2001년~2002년 UC Berkeley ITS 연구소 연구원. 2003년~현재 세종대학교 항공우주공학과 조교수. 관심분야는 MEMS 및 유도항법제어.



홍성경

1983년 연세대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1989). Texas A&M Univ. 기계공학과 박사(1998). 1989년~2000년 국방과학연구소 선임연구원. 2000년~현재 세종대학교 항공우주공학과 부교수. 관심분야는 항법유도제어, 퍼지제어, 메카트

로닉스 및 센서응용.