

개루프 제어의 실린더 진동형 자이로 구현 및 실험

The Implementation and Experiments of Open-Loop Cylindrical Vibratory Gyroscope

공형직, 홍성경*, 김정엽
(Hyeong-Jik Kong, Sung-Kyung Hong, and Jung Yub Kim)

Abstract : This paper considers the implementation and experiments of an open-loop Cylindrical Vibratory Gyroscope(CGV). An open-loop CGV composed of thin cylindrical vibrating element, electromagnetic drive and pick-off element with open-loop control was designed and fabricated. The experimental performance tests of the open-loop CGV were done using a temperature chambered rate table. Also, the limitations of open-loop CGV were analyzed and the solution for the limitations was proposed.

Keywords : cylindrical vibratory gyroscope, electromagnetic force, open-loop control, rate test

I. 서론

자이로스코프(이하 자이로)는 회전량을 측정하는 관성센서로서 가속도계와 함께 안정화/자세제어, 관성 항법제어장치를 위해 필요한 핵심 센서이다[1]. 기존의 자이로는 광학적 성질을 이용하는 파이버 옵틱(Fiber Optic) 자이로와 링 레이저(Ring Laser) 자이로, 회전모터의 관성력을 이용하는 기계적 자이로 등이 있으며, 이들은 고정밀도가 요구되는 군사용 및 민간용 비행체의 관성항법 제어장치에 주로 사용되었다[1]. 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 제한적이었다.

최근 전자 산업의 발전은 이러한 자이로의 응용범위를 자동차, 의료기기, 가전제품, 산업용 로봇제어 등으로 활용영역을 확대시켰다. 이와 더불어 가격이 높고, 고정밀도를 요구하던 기존의 자이로에 비해 저가, 소형, 경량화를 요구하게 되었다.

한편 진동형 자이로는 회전이 아닌 진동을 이용하므로 구동부와 고정부와의 마찰이 없고 가공이 용이하며 수명이 길다는 장점을 갖고 있다. 또한 그 구조가 간단하여 대량 생산이 용이하고 소형화, 저가, 저 소비전력의 장점을 갖고 있다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이 최근 점차적으로 증가하고 있는 자이로 적용체계의 수요와 더불어 기존 자이로의 대안으로서 주목 받으며 많은 연구가 이루어지고 있다 [2-8].

본 논문에서는 진동부가 실린더 형태의 진동형 자이로를 대상으로, 개루프(open-loop) 제어의 가진 및 검출 방식을 적용하여 이를 구현하였다.

이 때 가진/검출 방식은 이전 연구 결과인 비접촉식 전자

기력을 이용하여 기존의 압전(piezo-electric)방식 등의 접촉식 가진/검출 방식의 단점을 극복하였다[8]. 한편 성능 입증 을 위하여 Rate Table을 이용한 기본적인 각속도 검출 실험 과 온도 등의 환경 변화에 대한 강건성 실험을 수행하였으며, 그 제어방식의 단점을 분석하고 대책을 제안하였다.

II. 실린더 진동형 자이로

1. 작동원리

본 논문에서 대상으로 하는 자이로는 진동부가 실린더 형태를 갖는 진동형 자이로이며, 그 실린더가 완벽하게 균 일하고 대칭인 이상적인 상태로 가정한다. 이 때 실린더의 고유진동수로 가진을 한다면, 그림 1과 같이 가진 힘이 가 해지는 중심축으로 첫 번째 모드형상이 발생하고 중심축의 45° 방향의 원주에 노드점이 발생한다. 이때의 첫 번째 모 드를 가진 모드(excitation mode)라 하고, 그 중심축을 가진 축(q_e)이라 한다. 이 진동상태에서 자이로에 외부 각속도 (Ω)가 가해지면 코리올리스 힘(Coriolis force)에 의해 45° 방향에 두 번째 모드형상이 발생하며 노드 점에 변이가 발 생한다.

이러한 노드 점의 변이는 각속도에 비례하게 되며 그 변 이 량을 측정함으로써 각속도를 측정할 수 있게 된다. 이때 의 두 번째 모드형상을 센싱 모드(sensing mode)라 하고

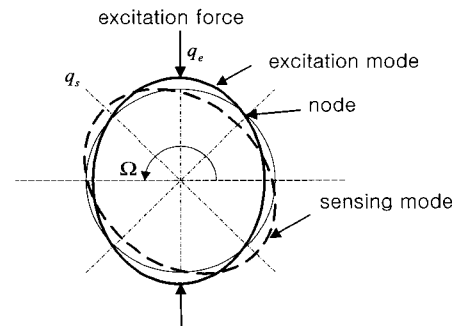


그림 1. 실린더의 모드형상.

Fig. 1. Mode Shape of Vibratory Cylinder.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 3. 23., 채택확정 : 2004. 7. 12.

공형직, 홍성경, 김정엽 : 세종대학교 항공우주공학과

(kong629@empal.com/skhong@sejong.ac.kr/joykim@sejong.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부 항공우주기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었음.

그 축을 센싱축(q_s)이라 한다.

이상적인 진동 자이로의 운동 방정식은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_e + 2\zeta_e\omega\dot{q}_e + \omega^2q_e - 2G\Omega\dot{q}_s &= 2F\sin(pt) \\ \ddot{q}_s + 2\zeta_s\omega\dot{q}_s + \omega^2q_s + 2G\Omega\dot{q}_e &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $p = \omega$ 즉, 실린더의 고유진동수(natural frequency)이며, ζ_e 와 ζ_s 는 두 모드 q_e 와 q_s 의 감쇠비(damping ratio)이다. G 는 코리올리스 힘에 의해 두 모드에 영향을 주는 유효질량이며, Ω 는 인가된 각속도이고 F 는 가진 힘이다.

2. 고유진동수 및 감쇠비 측정 실험

자이로 진동부인 실린더의 고유진동수와 감쇠비를 구하기 위하여 유한요소법을 통한 해석과 실험적인 방법을 수행하였다. 그림 2는 유한요소법을 통한 해석 결과이며, 이때 고유 진동수는 약 3.6 KHz 이다. 한편 그림 3은 동적 주파수 분석기(Dynamic Signal Analyzer)를 이용한 주파수 응답 실험 결과로서 고유진동수가 3.58 KHz임을 확인하였다. 이를 통하여 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

한편 실린더의 감쇠비는 가진상태에서 가진력을 급히 제거한 후의 시간응답을 바탕으로 대수감소법(logarithmic decrement)을 적용하여 측정하였다. 그림 4는 그 때의 시간 응답 결과이며 감쇠비는 약 0.00005임을 확인하였다.

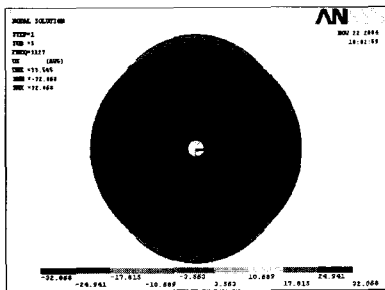


그림 2. 유한요소 해석 결과.

Fig. 2. FEM analysis.

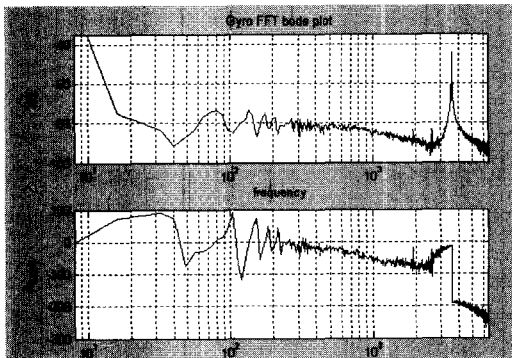


그림 3. 실린더의 주파수 응답 실험.

Fig. 3. Frequency analysis.

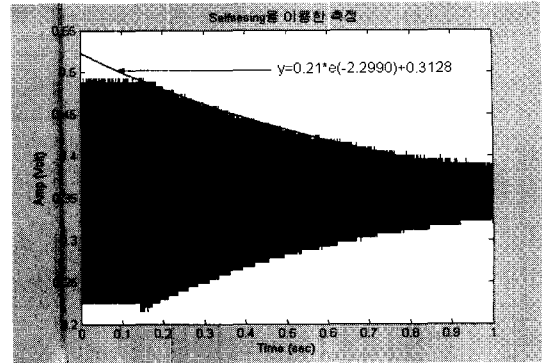


그림 4. 감쇠비 측정.

Fig. 4. Measurement of damping ratio.

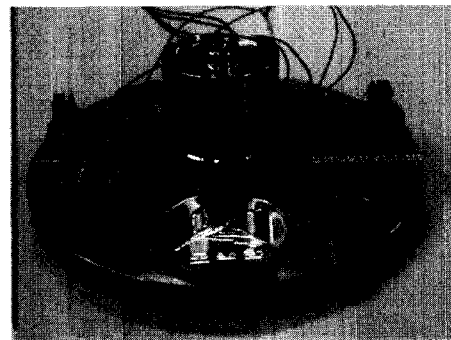


그림 5. 실린더형 진동 자이로.

Fig. 5. Experimental CVG.

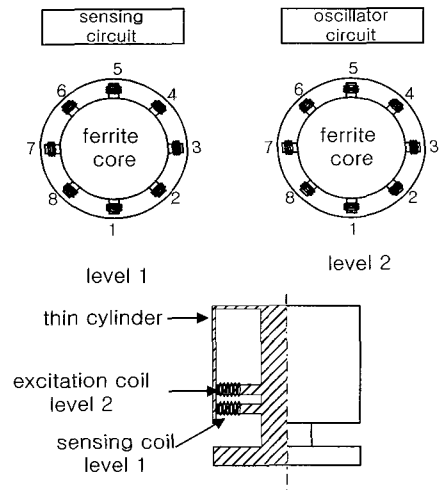


그림 6. 실린더형 진동 자이로의 구조.

Fig. 6. The structure of cylindrical vibratory gyro(CVG).

3. 설계/제작

전자기력에 의해 쉽게 가진이 되고, 외부충격, 온도 변화 등에 민감하게 반응하는 재료를 배제하고 조립/가공의 용이성 등을 고려하여 Ni79(permalloy)를 실린더 재질로 선택하고 내경 24mm, 높이 14.9mm, 두께 0.6mm의 실린더를 설계/제작하였다. 또한 작은 전류에도 쉽게 자화되는 연자성체인 페라이트를 가진/검출을 위한 작동기와 센서로 이용하며, 지

름 23.6mm의 페라이트 코어(ferrite core) 형태로 제작하였다. 가진부의 코일은 지름 0.08mm, 250회 권선수로 하였으며, 검출부의 코일은 지름 0.08mm, 300회의 권선수로 하였다. 비접촉식 전자기력의 가진/검출 방식은 이전 연구 결과에서 그 타당성을 입증하였다[8]. 그림 5는 실린더 진동형 자이로의 설계 구조를 간략하게 나타낸 것이며, 그림 6은 제작/조립된 실린더 진동형 자이로의 형상이다.

III. 각속도 검출 실험

1. 실험방법

본 절에서는 실린더 진동형 자이로의 개루프 가진 및 검출 방식의 성능을 검증하기 위하여 Rate Table을 이용한 기본적인 각속도 검출 실험과 온도 등의 환경 변화에 대한 강건성 실험을 수행하였다.

개루프 가진 및 검출 기능을 구현하기 위한 실험 구성은 그림 7과 같다. 실린더의 가진을 위해서는 신호발생기(function generator, HP33120A)를 개루프 상태로 이용하였으며, 이 때 신호는 1V의 offset 전압으로 하는 진폭 1V, 20mA의 정현파를 실린더의 고유진동수(3.58KHz)로 일정하게 발생시켰다. 각속도 검출을 위한 센싱축의 검출 코일에서는 인접 가진 축과의 자속간섭을 최소화하고 동시에 센싱의 민감도를 향상시키기 위하여 기본 자속의 유지가 요구되며, 이를 위하여 전원공급기를 이용하여 사전 전압(bias) 3.3V를 인가하였다.

또한 검출 신호를 증폭하고 일정 대역의 필터링을 위하여 프리앰프(SR560)를 이용하였으며, 이 신호를 오실로스코프로 측정하였다. 위와 같은 실험장치에서 자이로는 그림 8의 온도 챔버가 있는 Rate Table에 장착되고 상온과 고온 각각에서의 가해진 각속도 검출 성능을 실험하였다.

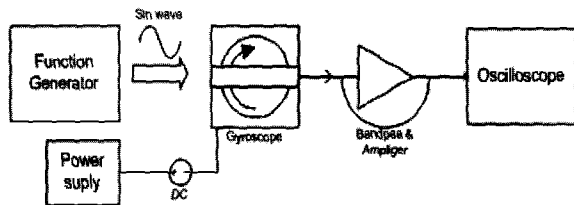


그림 7. 실험 구성.
Fig. 7. Experimental Set Up.

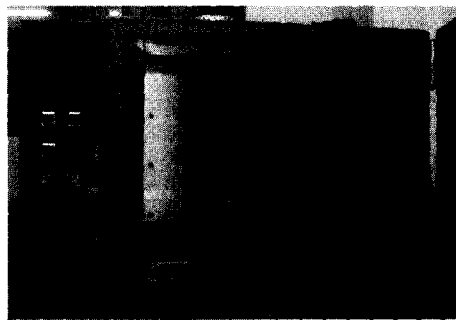


그림 8. Rate Table.
Fig. 8. Rate Table.

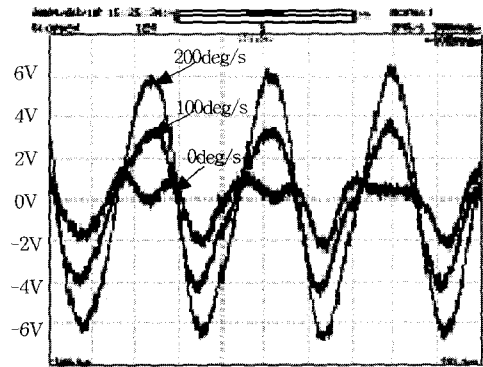


그림 9. 상온(25°C)에서의 각속도 검출.
Fig. 9. Rate Pick-off at 25°C.

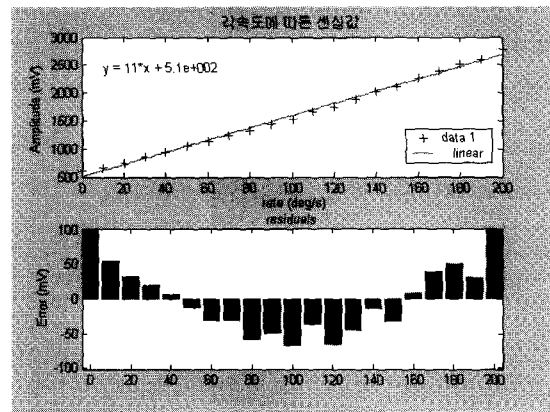


그림 10. 각속도 센싱값의 선형화와 오차.
Fig. 10. Scale Linearization and its Errors.

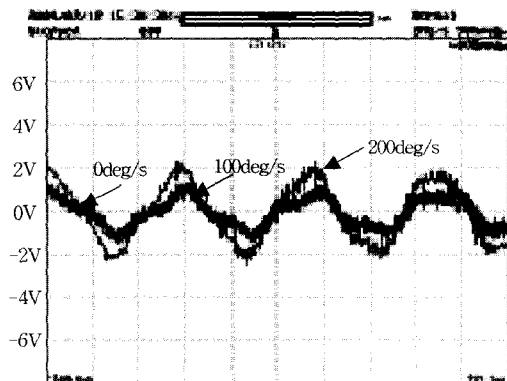


그림 11. 35°C에서 각속도 검출.
Fig. 11. Rate Pick-off at 35°C.

한편 위의 가진/검출 작동 기능을 단일 보드에서 효과적으로 수행하기 위하여 초소형 DSP를 이용한 제어기 구현 연구를 병행 중에 있으며, 향후 위 실험 장치를 대체할 예정이다[9].

2. 실험결과

그림 9는 상온(25°C)에서 Rate Table에 인가된 각속도가 0 deg/s, 100 deg/s, 200 deg/s 일 때의 센싱축 코일에 유기된

검출 전압을 나타낸 것이다. 센싱축의 전압은 매우 미세하기 때문에 프리앰프로 500배 증폭시키고 밴드패스 필터 (1 KHz ~ 10 KHz)를 이용하여 노이즈를 감소 시켜 결과 값을 추출하였다. 결과에서도 보듯이 각속도가 증가함에 따라 센싱축의 검출 전압이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그림 10의 상단은 검출 전압을 0 deg/s부터 200 deg/s 까지 10 deg/s 간격으로 측정된 결과를 나타낸 것이고, 하단은 측정 결과를 $y = 11x + 510$ 으로 선형화한 후 이에 대한 오차를 나타낸 그래프이다. 결과에서 보듯이 상온에서는 비교적 선형적으로 각속도가 양호하게 검출됨을 알 수 있다.

한편 온도 변화에 대한 검출 성능의 영향을 알아보기 위하여 상온에서 10℃를 증가시킨 35℃에서 같은 실험을 반복 하였다. 그림 11에서 보듯이 인가된 각속도가 0 deg/s, 100 deg/s 에서는 변화가 거의 없고, 200deg/s에서야 작은 변화가 발생됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 온도 변화에 따라서 실린더의 고유진동수가 변함으로서 공진 가진이 이루어지고 있지 않기 때문에 발생된다. 즉, 전 절 그림 3의 주파수 해석결과에서 보듯이 공진 가진이 이루어지지 않을 경우 그 진폭이 급격히 감소하게 되어 민감도가 급격하게 저하됨을 관찰 할 수 있다. 이러한 현상은 개루프 가진제어의 한계로 파악되며 공진주파수를 자동으로 추종하는 페루프 가진제어의 구현이 요구됨을 알 수 있다.

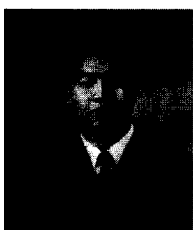
IV. 결론

본 논문에서는 진동부가 실린더 형태의 진동형 자이로를 대상으로, 개루프(open-loop) 제어의 가진 및 검출 방식을 적용하여 이를 구현하였다. 가진/검출 방식은 비접촉식 전자기력을 이용하여 기존의 압전(piezo-electric)방식 등의 접촉식 가진/검출 방식의 단점을 극복하였다. 한편 Rate Table을 이용한 상온/고온에서의 각속도 검출 실험을 수행하였다. 상온에서는 양호한 검출 성능을 보이나 고온에서는 검출 민감도가 급격히 저하됨을 실험을 통하여 입증하고 그 원인을 분석하였다. 추후 이러한 개루프 가진제어의 한계를 극복하기 위하여 공진주파수 변화를 자동으로 추종하도록 하는 페루프 가진제어의 구현이 요구됨을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlag,

New York, 1993.
 [2] S. H. Lee, S. W. Hong, Y. K. Kim and S. K. Lee, "A planar vibratory gyroscope using electromagnetic force", *Sensors and Actuator*, 65, pp. 101-108, 1998.
 [3] S. K. Hong, "Compensation of nonlinear thermal bias drift of resonant rate sensor(RRS) using fuzzy logic", *Sensors and Actuators*, 78, pp. 143-148, 1999.
 [4] J. T. Anders and R. Pearson, "Appication of the 'START' vibratory gyroscope", *GEC Review*, vol. 9, no. 3, 1994.
 [5] J. Söderkvist, "Piezoelectric beams and vibrating angular rate sensors", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 38, no. 3, pp. 271-280, 1991.
 [6] B. Boxenhorn and P. Greiff, "A vibratory micro-mechanical gyroscope", *AIAA Guidance and Controls Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 1033-1040, 15-17 August, 1988.
 [7] C. H. J. Fox, "The dynamics of a vibrating cylinder gyro with imperfection", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, pp. 453-464, 1996.
 [8] 홍성경, 이정영. "전자기력을 이용한 진동형 자이로스코프의 가진 및 검출 기법 연구", *제어 · 자동화 학회지* 9(1), pp. 30-36, 2003.
 [9] 김모세, 이학성, 홍성경, "DSP를 이용한 실린더형 진동 자이로스코프 제어기 설계", *대한전자공학회 하계종합학술대회*, 26(1), 2003.



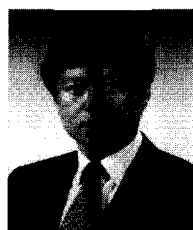
공형직

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



홍성경

1964년생 1978년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1989년 동대학원(석사). 1998년 Texas A&M Univ. 기계공학(박사). 1989년~2000년 국방과학 연구소 선임 연구원. 현재 세종대학교 기계항공우주공학부 조교수. 관심분야는 지능제어, 강건제어 및 센서응용.



김정엽

1950년생. 1973년 서울대 항공공학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1982). 한국과학기술원 박사(1991). 1974년~1995년 국방과학연구소 책임연구원. 한국항공우주산업(주) 상무이사. 2001년 3월~현재 세종대학교 기계항공우주공학부 부 교수. 관심분야는 전산구조해석 및 무인항공기 시스템설계.