

전자기력을 이용한 실린더형 진동 자이로스코프의 모델링

권혁성, 이학성
세종대학교 대학원 전자공학과

A Modeling of Cylindrical Vibration Gyroscope using Electromagnetic Force

Hyuk-Sung Kwon, Hak-Sung Lee
Dept. of Electronics Engineering, Sejong Univ.
E-mail: bonono@chol.net

Abstract

본 논문은 소형화, 저가, 저 소비 전력의 특성을 가지는 전자기력을 이용한 실린더형 진동 자이로의 기존의 기계적 모델링이 실제 자이로스코프의 특성과 부합하지 않음을 개선하기 위해 전자기적 해석을 포함하여 기존의 기계적 모델링보다 성능을 향상시켰다. 전자기적 해석은 실린더의 진동 운동에 의해 실린더 내부에 발생된 기전력 성분 측정과 자이로스코프의 전기적 해석이다. 기전력 성분은 자이로 센싱 저항이 실린더 유무에 따른 전압 값 변화로 확인하였다. 전자기적 해석을 포함한 제안된 모델링을 통해 이론적인 자이로스코프의 특성이 실제 자이로스코프 특성에 부합되고 기존 모델링 특성보다 우수함을 비교를 통해 입증하였다.

1. 서론

자이로스코프(이하 자이로)는 회전량을 측정하는 관성 센서로서 가속도계와 함께 안정화/자세제어, 관성 항법 제어장치를 위해 반드시 필요한 센서이다[1]. 기존의 자이로는 고정밀도가 요구되는 군사용 및 민간용 비행체의 관성 항법 제어 장치에 주로 사용되었다. 저가, 소형화 및 대량 생산보다는 고정밀도, 고해상도 등의 성능만을 중요한 요소로 생각하였으며, 그 응용범위가 제한적이었다. 최근의 전자 산업의 발

전은 이러한 자이로의 응용범위를 자동차, 의료 기기, 가전 제품, 산업용 로봇제어 등으로 활용 영역을 확대시켰다. 가격이 높고 고정밀도를 요구하던 기존의 자이로에 비해 저가, 소형, 경량화를 요구하게 되었다.

기존의 자이로는 크게 광학적인 성질을 이용하는 것과 기계적 성질을 이용하는 자이로로 나누어진다[1][2]. 광학적 성질을 이용하는 자이로는 파이버 옵틱(Fiber Optic) 자이로와 링 레이저(Ring Laser) 자이로 등이 있다. 광학 자이로는 고성능이지만 복잡함과 비싸다는 단점을 지닌다[3]. 기계적 성질을 이용하는 자이로는 회전 운동량 보존법칙을 이용한 회전방식의 자이로와 선형운동량 보존법칙을 이용한 진동 자이로가 있다. 회전 방식 자이로는 구조가 복잡하고 부피가 크며 가격이 비싸고 과도한 전력 소모 등의 단점을 지닌다[2]. 한편 진동형 자이로는 회전이 아닌 진동을 이용하므로 구동부와 고정부 사이의 마찰이 없고 가공이 용이하며 수명이 길다는 장점을 있다. 또한 구조가 간단하고 쉽게 제작할 수 있으며, 소형화, 저가, 저 소비전력의 특성을 가지고 있어서 기존의 기계식 자이로의 단점을 개선할 수 있다. 성능은 회전 방식의 기계식 자이로 및 광학 자이로보다 떨어지지만, 정밀한 성능을 요구하지 않는 분야에 응용이 가능하며, 소프트웨어적인 보상기법의 발달로 성능 형상이 가능하다[4].

본 논문은 소형화, 저가, 저 소비 전력의 특성을 가지는 전자기력을 이용한 실린더형 진동 자이로의 기존의 기계적 모

델팅이 실제 자이로의 특성과 부합하지 않음을 개선하기 위해 전자기적 해석을 포함하여 기존의 기계적 모델링보다 성능을 향상시켰다[8]. 전자기적 해석은 실린더의 진동 운동에 의해 실린더 내부에 발생된 기전력 성분 측정과 자이로의 전기적 해석이다. 기전력 성분은 자이로 센싱 저항이 실린더 유무에 따른 전압 값 변화로 확인하였다. 전자기적 해석을 포함한 제안된 모델링을 통해 이론적인 자이로의 특성이 실제 자이로 특성에 부합되고 기존 모델링 특성보다 우수함을 비교를 통해 입증하였다.

2. 실린더형 진동 자이로스코프의 기본 원리

진동 자이로의 기본 원리는 공진주파수로 진동하는 물체는 일정한 모드 형상이 발생하고 이 모드 상태에서 외부 각속도 (Ω)가 인가되면 물리적인 변화가 발생한다는 것이다. 이때, 이러한 물리적인 변화량은 인가된 각속도에 비례하며, 따라서, 그 변화된 물리량을 측정함으로써 각속도를 측정 할 수 있다는 것이다.

본 논문에서 사용된 자이로는 진동부가 실린더 형상을 가지는 진동 자이로로서 가진과 검출은 마그네틱 코일을 이용한 전자기력(electromagnetic force)을 이용하였다. 구조는 그림. (1)과 같다. 실린더가 완벽하게 균일하고 대칭인 이상적인 상태로 가정하고 실린더의 고유진동수로 자이로를 가진 한다면, 그림. (2)와 같이 가진 힘이 가해지는 중심축으로 첫 번째 모드 형상이 발생하고 중심축의 45° 방향의 원주에 노드 점이 발생한다.

이 때의 첫 번째 모드를 가진 모드(excitation mode)라 하며 중심축을 가진축(q_e)이라 한다. 이 진동 상태에서 자이로에 외부 각속도가 가해지면 가진 모드에 코리올리스 힘(Coriolis force)이 발생하며 이 코리올리스 힘에 의해 그림. (2)과 같이 45° 방향에 두 번째 모드 형상이 발생하며 노드 점의 변이가 발생한다. 이러한 노드 점의 변이는 자이로에 인가되는 각속도에 비례하게 되며 그 변이량을 측정함으로써 인가되는 각속도를 측정할 수 있다. 이 때의 두 번째 모드 형상을 센싱 모드(sensing mode)라 하고 이 축을 센싱축(q_s)이라 한다.

이상적인 진동 자이로의 운동 방정식은 식. (1)과 같다.

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

여기서, $p = \omega$ 즉, 실린더의 고유진동수(natural frequency)이며, ζ_e 와 ζ_s 는 두 개의 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[5,6,7,8].

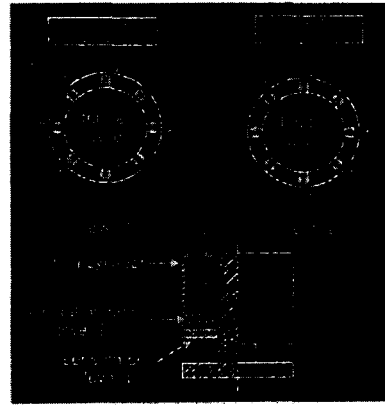


그림. (1) 실린더형 진동 자이로의 구조

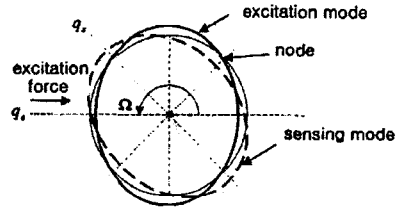


그림. (2) 자이로의 작동 원리

3. 실린더형 진동 자이로스코프의 전자기적 모델링

3.1 실린더형 진동 자이로스코프의 전기적 해석

실린더형 진동 자이로는 내부에서 전자기장을 발생하는 특성에 의해 전기 회로의 소자들로 변환할 수 있다[9]. 즉 저항

과 인덕터(Inductor)로 구성할 수 있다. 구성된 회로에 전압 값 센싱을 위한 Peak-detector 회로를 포함하여 그림. (3)과 같은 전기 회로로 구현할 수 있다.

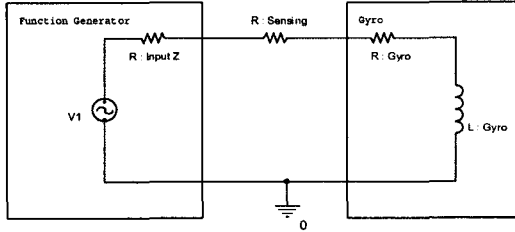


그림. (3) 자이로의 전기 회로

그림. (3)의 회로를 수식적으로 모델링 하면 식. (2)와 같다.

$$e(t) = Ri + Li \dot{i} \quad (2)$$

($R = R : \text{Input} + R : \text{Sensing} + R : \text{Gyro}, L = L : \text{Gyro}$)

자이로에 진동을 유발하는 가진 힘 F 는 전자기적 해석에 의해 회로에 인가되는 전류 i 에 비례한다. 따라서 식. (3)과 같다. 여기서 k 는 비례상수이다.

$$F = ki \quad (3)$$

3.2 기전력적 요소

진동 자이로의 기본 원리를 토대로 제작된 실린더형 진동 자이로는 고유진동수와 동일한 주파수를 가지는 교류전압을 가진부에 인가하여 실린더 내부에 전자기장을 생성한다[8,9]. 생성된 전자기장에 의해 센싱부에는 전류가 인가되고 저항을 연결하여 센싱부에서는 발생된 전압 값의 변화를 이용하여 각속도를 측정한다. 실린더 캡의 진동 운동 또한 기전력 작용을 하여 센싱부에 전자기장에 의해 유도된 전류와 다른 또 하나의 전류를 인가시킨다. 이것은 실린더 캡의 유무에 따른 그림. (3)의 R:Sensing에서 측정되는 전압 값 변화에 의해 증명되었다. 결과는 표. (1)에 정리하였다.

표. (1)의 결과는 자이로의 고유진동수와 동일한 3058Hz의 교류전원을 인가하였을 때의 결과이고 실린더가 존재할 경우 실린더가 존재하지 않았을 경우보다 2.33mV의 전압 상승이 발생한다.

기전력은 자이로의 고유진동수와 인가되는 각속도, 작동 온도 등에 영향을 받을 수 있다. 이 점들은 차후 연구하겠다.

	Voltage (R: Input)	Voltage (R:Gyro)	Voltage (R:Sensing)
with	840mVpp	840mVpp	9.91mVpp

cylinder			
without	600mVpp	600mVpp	7.58mVpp
cylinder			

표. (1) 저항에서 측정되는 전압 값

실린더 캡의 진동 운동에 의한 기전력으로 회로에는 전압 상승이 발생한다. 따라서 기존의 회로 방정식 식. (2)는 식. (4)와 같이 수정하였다.

$$e(t) = Ri + Li \dot{i} + V_{EMF} \quad (4)$$

3.3 실린더형 진동 자이로스코프의 전자기적 모델링

전기 회로적 해석인 식. (2)와 식. (3)을 앞서 해석한 기전력적 요소인 식.(4)와 함께 기계적 진동형 자이로의 운동 방정식에 포함하고 이를 상태 방정식(state equation)으로 정리하면 식. (5)와 같다.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2k & -\omega^2 & -2\zeta_s\omega & 0 & 2G\Omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2G\Omega & -\omega^2 & -2\zeta_s\omega \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_{EMF} \quad (6)$$

$$y = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]X$$

여기서 state, $X = [i \ q_e \ \dot{q}_e \ q_s \ \dot{q}_s]$ 이다.

4, 실험 결과 비교 및 분석

앞서 제시한 전자기적 실린더형 진동 자이로를 Simulink를 통해 구현하여 측정하고 실제 자이로 측정 결과와 비교 분석하였다.

먼저, 입력 주파수 변화에 따른 출력 전압 값의 변화, 즉 자이로의 주파수 응답을 통해 고유진동수 확인이다.

그림. (4)는 Simulink의 결과를 그림. (5)는 실제 결과이다. 두 결과 모두 자이로의 고유 주파수(3419Hz)에서 센싱부 출력 전압 값이 최대임을 확인하였다.

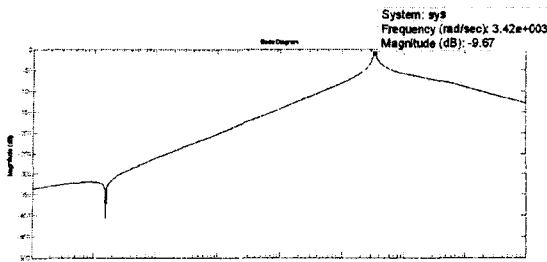


그림. (4) 이론적 주파수 응답(bode.m)

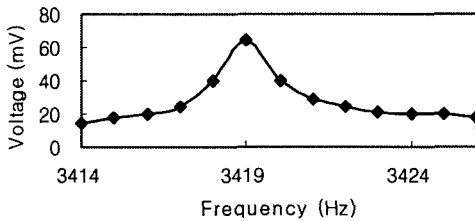


그림. (5) 실제 자이로의 주파수 응답

자이로에 구형파를 인가하여 센싱부 출력 전압의 파형과 크기를 비교해보고 자이로에 인가되는 각속도 변화에 의한 센싱부 출력 전압 값의 변화는 현재 측정 중 이다.

5, 결론

본 논문에서는 실린더형 진동 자이로스코프가 실린더의 진동 운동으로 인해 실린더 내부에 발생된 기전력이 자이로 출력 전압 값에 영향을 준다는 것을 센싱부 출력 전압 값의 증가를 통해 확인하였고, 이와 함께 전기적 모델링 요소들을 포함하여 새롭게 실린더형 진동 자이로의 모델링 과정을 수행하였다. 또한 모델링을 통한 자이로의 특성과 실제 실험 결과가 동일함을 확인하여 기존 기계적 실린더형 진동 자이로 모델링 보다 정밀한 모델링인 것을 확인하였다.

참고문헌

[1] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*, Springer-Verlag, New York, 1993[]

[2] P.H. Savet, *Gyroscopes: Theory and Design*, McGraw-Hill, 1961

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

[4] S.K. Hong, "Compensation of nonlinear thermal bias drift of resonant rate sensor(RRS) using fuzzy logic", *Sensors and Actuator*, 78, pp. 143-148, 1999

[5] B.Boxenhom and P. Greiff, "A vibratory micromechanical gyroscope", *ALAA Guidance and Controls Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 1033-1040, 15-17, Aug, 1998

[6] C.H.J. Fox, "The dynamics of a vibratin cylinder gyro with imperfection", *Proc. Inst. Mech. Eng*, pp. 453-464, 1996

[7] C.H.J. Fox, "Vibrating cylinder rate gyro : Theory of operation and error analysis", *Symposium Gyro Technology*, 1998

[8] 홍성경, 이정영, "전자기력을 이용한 진동형 자이로 스코프의 가진 및 검출 기법 연구", *제어·자동화 학회지*, 2003

[9] 김모세, 이학성, "DSP를 이용한 실린더형 진동 자이로스코프 제어기 설계", *전자공학회 학회지*, 2003