

전자력을 이용한 평면 진동형 각속도계의 자속간섭의 영향

홍승완*, 이상훈, 임형택, 김용권, 이승기*

서울대학교 전기공학과

*단국대학교 전기공학과

The effect of magnetic flux interference on the planar vibratory gyroscope driven by electromagnetic force

Seung-Wan Hong*, Sang-Hun Lee, Hyung-Taek Lim, Young-Kweon Kim, Seung-Ki Lee*

Dept. of Electrical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

*Dept. of Electrical Engineering, Dankook Univ.

Abstract

The effect of the magnetic flux interference between the driving and detecting unit of the gyroscope by the electromagnetic force has been investigated quantitatively. The key parameter dictating the output characteristics of the gyroscope which is driven and detected using electromagnetic force is the mutual interference between the driving and detecting unit.

Using the specially designed apparatus for positioning of the detecting unit, it is found that the vertical positioning of the detecting unit plays a significant role in minimizing the interference effect as evidenced by our experimental results.

I. 서론

군사용 및 민간용 항공기의 관성 항법 제어장치에 쓰이는 각속도계와 각속도계는 소형화, 경량화에 의해 자동차 항법장치, 로보트 제어 등과 같은 산업분야에서의 다양한 응용이 기대되는 분야이다. 기존의 각속도계는 회전형이며 1만 RPM 이상의 고속 회전모터를 필요로 하므로 전력 소모가 크고, 수명이 짧으며 매우 비싼 기기이다. 그러나 최근에 개발되는 진동형 각속도계는 소형화에 의해 기존의 회전형 각속도계의 단점을 극복할 수 있다. 평면 진동형 각속도계의 감도는 회전형에 비해 다소 떨어진다는 단점이 있으나 회전이 아닌 진동을 이용하므로 구동부와 고정부와의 마찰이 없고 가공이 용이하며 수명이 길다는 장점이 있다[1].

평면 진동형 각속도계는 여러 가지 원리로 구동시킬 수 있다. 정전력 구동과 정전력 검출 방식은 초소형화에 적합하나 검출하는 정전용량의 값이 $10^{-16}F$ 정도로 아주 작은 단점이 있고[2], 전자력 구동과 전자력 검출 방식은 검출값이 상대적으로 크나 구동부와 검출부와의 자속간섭 영향을 받는다는 단점이 있다[3].

본 논문의 목적은 두개의 김벌을 갖는 평면 진동형 각속도계 [3]에서 전자력을 발생시키는 구동부와, 인덕턴스의 변화값을 측정하는 검출부간의 자속간섭의 영향을 조사하고 측정하며 검토하는 것이다.

II. 전자력을 이용한 평면 진동형 각속도계의 구조 및 원리

그림 1과 같이 전자력으로 구동되며 전자력을 이용하여 각속도를 검출하는 평면 진동형 각속도계를 제작하였다. 이 각속도계의 관성 구조물은 비틀림 플렉서에 의해 지지되는 2개의 김벌로 구성된다. 선형 운동량을 가지는 관성요소는 내부 김벌 위에 놓여져 있다. 이 평면 진동형 각속도계를 회전형 각속도계와 비교하면 외부 김벌은 회전형 각속도계의 회전자에 해당하고, 내부

김벌은 센서 구조물에 해당한다. 비틀림 플렉서는 비틀리는 방향에는 유연하고 다른 방향으로는 잘 움직이지 않는다. 또한 구동부와 검출부의 독립적인 자기회로 형성을 위해 외부 김벌과 내부 김벌의 아래에는 각 김벌의 크기와 동일한 크기의 자성체를 부착하였다.

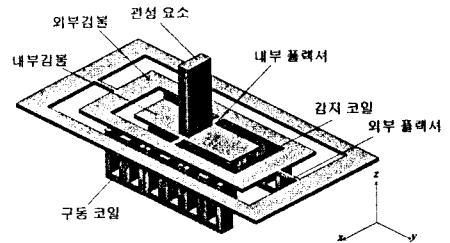


그림 1. 평면 진동형 각속도계

관성 구조물의 구동과 변위의 검출을 위해 구조물 아래에 놓여진 코일에 코일을 장착하였다. 그림 2는 구조물 아래에 부착된 코일의 배치와 위에서 본 관성구조물을 나타낸다. 구동용 코일로는 왼쪽과 오른쪽에 각각 세 개씩의 코어를 부착($E_{1,1}$, $E_{1,2}$, $E_{1,3}$, $E_{2,1}$, $E_{2,2}$, $E_{2,3}$)하였고, 변위의 검출을 위한 검출용 코일로는 가운데에 각각 두 개(S_a , S_b)의 코어를 부착하였다.

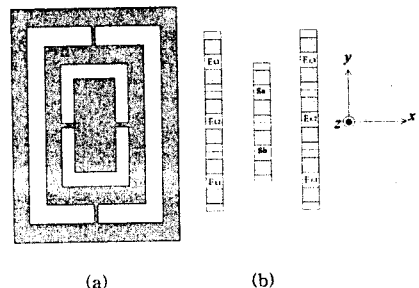


그림 2. (a) 위에서 본 관성 구조물의 모양, (b) 구동용 코일과 검출용 코일의 배치도

각속도계는 외부 김벌 아래의 구동용 페라이트 코일에 있는 코일에 offset을 가진 2상 구형파를 인가하여, 일정한 주파수의 전자력을 발생시켜 이 힘으로 외부 플렉서를 진동시킴으로써 구동된다. 진동의 주파수는 출력 감도를 최대로 높이기 위해 내부 김벌의 공진 주파수로 한다. 이 때 진동의 중심 축은 외부 플

래서이다. 진동은 내부 플렉서를 통하여 내부 김블에 전달되어 관성 요소가 진동하는 선형 운동량을 지니게 된다. 이 때 평면에 수직인 방향으로 각속도가 입력되면 식 (1)과 같이 주어지는 코리올리 힘에 의해 내부 김블은 구동 주파수로 진동(진동의 중심축은 내부 플렉서)하게 되며, 이 때 감지부의 코일에 유기되는 전압으로 각속도를 검출하게 된다. 여기서 진동하는 내부 김블의 변위각 θ 는 식 (2)와 같이 주어진다 [2,4].

$$\vec{F} = 2m \vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (1)$$

여기서,

m : 물체의 질량, $\vec{\Omega}$: 입력각속도,
 \vec{v} : 회전좌표계에 대한 물체의 속도

이다. 또한,

$$\theta = \frac{I \phi_0 Q}{\omega_n} \Omega \quad (2)$$

여기서,

I : 관성비, ϕ_0 : 구동변위각,
 Q : 선택도(Q-factor), ω_n : 구동주파수,
 Ω : 입력각속도

이다.

III. 구동부와 검출부간의 자속간섭

구동부와 검출부가 독립적으로 자기회로를 구성한다면 구동부에 의한 검출부의 자속간섭은 이상적으로 없다. 이와 같은 이상적인 경우를 해석하기 위해서 검출부의 전기회로와 자기회로를 모델링하여 수치해석을 하였다. 그림 3은 검출부의 전기회로를 나타낸 것이다. 이 때의 전기회로 방정식은 식 (3)과 같이 주어지게 된다.

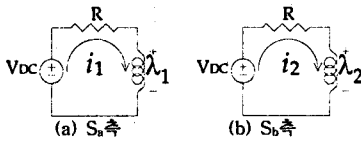


그림 3. 검출부의 전기회로

$$\begin{aligned} Ri_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} &= V_{DC} \\ Ri_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} &= V_{DC} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 λ_1 과 λ_2 는 그림 4와 같이, 독립적으로 구성되는 검출부의 자기회로의 모델링에서 구해진다. 이 때의 λ_1 과 λ_2 를 식 (4)에 나타내었다.

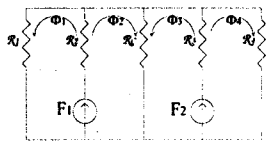


그림 4. 검출부의 자기회로 모델 (κ : 자기저항)

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= L_1 i_1 - L_2 i_2 \\ \lambda_2 &= -L_2 i_1 + L_2 i_2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= N_{turn}(\phi_1 + \phi_2), \lambda_2 = N_{turn}(\phi_3 + \phi_4), F_i = N_{turn} i_i, \\ L_1 &= (\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_4 + \kappa_1 \kappa_3 \kappa_4 + \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4) * N_{turn}^2 / D \end{aligned}$$

$$L_2 = (\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_4 + \kappa_1 \kappa_3 \kappa_4 + \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4) * N_{turn}^2 / D$$

$$L_c = (\kappa_1 \kappa_2 \kappa_3) * N_{turn}^2 / D$$

$$D = \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4 + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \kappa_5 + \kappa_1 \kappa_2 \kappa_4 \kappa_5 + \kappa_1 \kappa_3 \kappa_4 \kappa_5 + \kappa_2 \kappa_3 \kappa_4 \kappa_5$$

이다.

검출부 위에 있는 구조물이 외부 플렉서를 중심으로 정현적으로 움직이면 내부 김블과 검출부 코어 사이의 공극은 정현적으로 변화하게 되는데, 이는 자기저항의 변화로 나타나 식 (3) 및 식 (4)에서의 i_1 과 i_2 가 변화하게 된다. i_1 과 i_2 의 변화로부터 검출 코일 S_a 및 S_b 에 유기되는 검출전압 V_{sa} 및 V_{sb} 를 구할 수 있다. 각각의 전압은 DC offset을 가지며 그 값에 180°의 위상차를 가지는 같은 크기의 정현파가 더해져서 나타난다. 측정하는 각속도의 양은 양쪽의 코일에 유기되는 전압의 차($V_{sa} - V_{sb}$)로써 나타나므로 각속도가 입력되지 않을 때 전압의 차는 0이 나오게 된다. 하지만 실제로는 구동부 코일로부터 넘어오는 자속간섭의 영향으로 그림 5와 같은 전압이 코일 양단의 차로 유기된다. 따라서 이 전압은 순전히 자속간섭의 영향이라고 볼 수 있다.

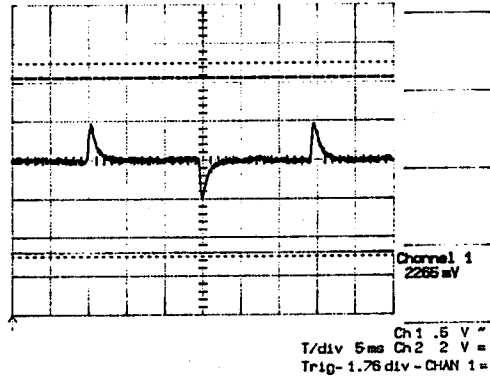


그림 5. 검출부에 유기되는 자속간섭의 실험 파형

이러한 자속간섭의 영향을 최소화하기 위해서는 코어를 부착할 때 구동부 코어와 검출부 코어의 정렬오차를 줄이고, 각 코어에 삽입하는 코일들도 가능한 한 동일한 것을 사용해야 한다. 표 1과 표 2는 본 각속도계에 사용된 구동부와 검출부의 코일 쌍의 인덕턴스값과 저항값을 보여주고 있다.

표 1. 구동부 코일쌍의 저항값과 인덕턴스값

구동부 코일	E_{11}	E_{12}	E_{13}	E_{21}	E_{22}	E_{23}
R[Ω]	13.22	13.20	13.21	13.21	13.20	13.21
L[mH]	2.02	2.02	2.03	2.03	2.01	2.02

표 2. 검출부 코일 쌍의 저항값과 인덕턴스값

검출부 코일	S_a	S_b
R[Ω]	57.8	57.8
L[mH]	8.06	8.06

IV. 자속간섭의 측정 및 검토

자속간섭의 영향을 조사하기 위하여 본 각속도계의 치구는 검출부 코일을 XYZ-마이크로미터를 사용하여 각 방향으로 움직일 수 있게 제작되었다. 우선 X 방향으로의 영향을 조사하기 위해서 검출부 코일을 Y 방향으로는 중앙에($Y=0$), Z 방향으로는 지정한 높이($Z=0.8, 0, -1$ mm)에 고정시킨 후 코일을 X 방향으로 움직이면서 자속간섭 파형의 peak-to-peak값을 350배로 증폭하여 측정하였다. 여기서 $Z=0$ 위치는 구동부 코일과 검출부 코일이 같은 높이에 있을 때를 말한다. Y 방향으로의 영향을 조사하기 위해서는 검출부 코일을 X 방향으로는 중앙에($X=0$), Z 방향으로는 지정한 높이($Z=0.8, 0, -1$ mm)에 고정시킨 후 코일을 Y

방향으로 움직이면서 출력값을 측정하였다. 또한 Z 방향으로의 간섭영향을 조사하기 위해서는 검출부 코일을 X=Y=0 위치에 두고 이를 Z 방향으로 움직이면서 자속간섭의 영향을 조사하였다.

그림 6-8은 측정된 자속간섭의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 6에서는 검출부 코일을 X의 양의 방향으로 움직일수록 자속간섭의 양이 커지고, X의 음의 방향으로 움직일수록 자속간섭의 양이 상대적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7에서는 코일을 Y의 음의 방향으로 움직일수록 자속간섭의 양이 커지고 양의 방향으로 움직일수록 자속간섭의 양이 적어지는 것을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7의 결과는 제작된 구동부 코일과 검출부 코일이 각각 비대칭성을 지니고 있음을 알 수 있게 해 준다. 즉, 구동부 코일의 양쪽이 서로 비대칭($E_{n,3}$ 과 $E_{r,1}$ 의 자속이 크고 $E_{n,1}$ 과 $E_{r,3}$ 의 자속이 상대적으로 적음)이면서 검출부 코일(S_b 자속이 S_d 자속보다 큼)도 서로 비대칭임을 알 수 있다.

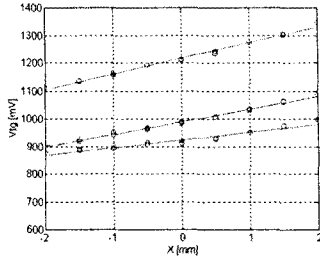


그림 6. 검출부 코일의 X 방향 변화에 따른 자속간섭

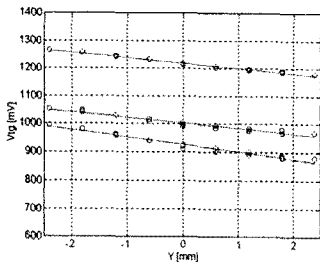


그림 7. 검출부 코일의 Y 방향 변화에 따른 자속간섭

그림 8은 검출부 코일이 관성 구조물과 가까워질수록 간섭의 양은 커지고, 멀어질수록 간섭의 양이 적어지는 것을 나타낸다. 또한, 검출부 코일이 관성 구조물로부터 매우 멀어지면 다시 간섭의 양이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 검출부 코일의 구동부 코일에 대한 상대적인 위치에 따라 자속간섭의 양상이 다름을 나타내 준다. 즉, 검출부 코일이 관성 구조물과 구동부 코일에 대해서 멀리 있지 않을 경우에 자속간섭이 일어나는 자기회로는 관성 구조물의 밑에 부착되어 있는 자성체와 구동부 코일, 검출부 코일에 의해서 형성되며, 상대적으로 멀리 있을 경우에는 자기회로가 구동부 코일과 검출부 코일에 의해서 주로 형성된다.

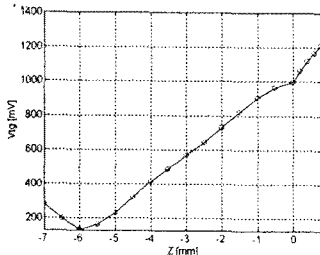


그림 8. 검출부 코일의 Z 방향 변화에 따른 자속 간섭

또한, X 방향이나 Y 방향으로의 자속간섭의 영향은 Z 방향으로의 자속간섭의 영향보다 작다. 그 이유는, 관성 구조물에 부착되어 있는 검출부 쪽의 자성체의 크기가 코일의 크기보다 크기 때문에 X 방향이나 Y 방향의 자기회로의 변화는 상대적으로 크지 않기 때문이다.

따라서 설계시에 자성체를 구동부나 검출부의 코어의 크기보다 크게 제작하여 제작상의 오차에 의한 X 방향이나 Y 방향으로의 자속간섭의 영향을 최소화하고, Z 방향으로로는 자속간섭의 영향을 가장 줄일 수 있는 높이에 검출부의 코어가 위치하도록 하는 것이 중요하다.

V. 결 론

전자력으로 구동되고 전자력을 이용하여 검출하는 각속도계의 가장 큰 문제점인 자속간섭 영향을 최소화하기 위해서는 설계시에 자성체의 크기를 코어의 크기보다 크게 설계하는 것이 중요하다. 또한, 자속간섭의 영향을 최소화할 수 있는 위치에 구동부의 코어와 검출부의 코어를 위치시켜야 하며, 각 코일들의 상수를 적절히 조절하고 자성체간의 거리를 충분히 확보해야 한다. 그러나, 자속간섭의 영향을 완전히 제거할 수는 없으므로 보상회로를 추가하는 것이 필요하리라 생각된다.

또한 각속도계의 자속간섭의 제거와 소형화를 고려할 때 정전력 구동과 전자력 검출로 구동부와 검출부의 원리를 달리하고, 소형화와 정밀제작을 위해 마이크로머시닝 기술로 정밀한 관성 구조물을 제작하는 것이 향후의 연구과제로 필요할 것으로 보인다.

본 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.(과제번호 94-043)

참고 문헌

- [1] Anthony Lawrence, "Modern Inertial Technology : Navigation, Guidance, and Control", Springer-Verlag, New York, 1993
- [2] B.Boxenhorn, P.Greiff, "A Vibratory Micromechanical Gyroscope", paper 88-4177, AIAA Guidance and Controls Conference, Minneapolis, Minnesota, August 15-17, 1988
- [3] 이상훈, 김용권, "전자력을 이용한 평면 진동형 자이로스코프의 제작", 대한전기학회 추계학술대회, 1993.11., pp.195-197
- [4] Ferdinand P.Beer and E.Russell Johnston, Jr., "Vector - Dynamics", McGraw-Hill, 1988
- [5] P.Greiff, B.Boxenhorn, T.King and L.Niles, "Silicon monolithic micromechanical gyroscope", Tech. Digest. 6th International Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (1991), pp.966-968.