

전자기력을 이용한 진동형 자이로스코프의 가진 및 검출 기법 연구

A Driving and Pick-Off Method of Vibratory Gyroscopes Using Electromagnetic Force

이 정 영, 홍 성 경
(Jung-Young Lee and Sung Kyung Hong)

Abstract : Driving and pick-off using electromagnetic force for a cylindrical vibratory gyroscope is considered. A gyroscope consisting of thin cylindrical vibrating element and electromagnetic drive and pick-off element is designed, fabricated and tested. The results of the proposed pick-off method were compared with the results of the highly precise laser interferometer and eddy current sensor as it was used as the reference standard. Through the experiment, it is verified that the proposed electromagnetic driving and pick-off method can be an effective alternative to conventional electrostatic or piezo-electric methods.

Keywords : cylindrical vibratory gyroscope, electromagnetic force

I. 서론

자이로스코프(이하 자이로)는 회전량을 측정하는 관성센서로서 가속도계와 함께 안정화/자세제어를 위해 반드시 필요한 센서이다[1]. 기존의 자이로는 고정밀도가 요구되는 군사용 및 민간용 비행체의 관성항법 제어장치에 주로 사용되었다. 저가, 소형화 및 대량 생산보다는 고정밀도, 고해상도 등의 성능만을 중요한 요소로 생각하였으며, 따라서 그 응용범위가 제한적이었다.

최근의 전자 산업의 발전은 이러한 자이로의 응용범위를 자동차, 의료 기기, 가전제품, 산업용 로봇제어 등으로 확대시켰다. 가격이 높고, 고정밀도를 요구하던 기존의 자이로에 비해 저가이고, 소형화, 경량화를 요구하게 되었다.

기존의 자이로는 크게 광학적인 성질을 이용하는 것과 기계적인 성질을 이용하는 것으로 나누어진다[1,2]. 광학적 성질을 이용하는 자이로는 파이버 옵틱(Fiber Optic) 자이로와 링 레이저(Ring Laser)자이로 등이 있으며, 기계적인 성질을 이용하는 자이로는 회전 운동량 보존법칙을 이용한 회전방식의 자이로와 선형운동량 보존방식을 이용한 진동형 자이로가 있다.

빛의 관성적인 성질(새그넥 효과(Sagnac effect))을 이용하는 파이버 옵틱 자이로는 기본적으로 여러 개의 거울로 이루어진 새그넥 간섭계이다. 이는 광파이버를 신호 경로로 쓰게 되고 각종 회로를 부착하여 감도를 높일 수 있다. 그러나 높은 감도를 위해 부수적인 회로가 요구되고, 페루프르로 작동시켜야 한다. 또한 사용되는 파이버는 반드시 극성을 유지시켜야 하며, 좋은 광원이 있어야 하는 등 복잡한 회로와 값비싼 요소를 포함하고 있다 [3].

링 레이저 자이로는 광학적 진동자인 레이저와 여러 개의 거울을 사용하여 빛을 회전시켜 빛이 정상파의 형태를

지니게 한다. 입력각속도가 들어올 때 새그넥 효과를 이용하여 그 값을 알 수 있게 된다. 이것은 "Lock-in" 현상 등의 문제점이 있고, 파이버 옵틱 자이로와 같이 비싸다는 단점이 있다[3].

기계적 자이로 중 회전 모터의 관성력을 이용하는 회전방식의 자이로는 그 구조가 복잡하고 각종 기계적 부품(Spinning Wheel, 베어링 등)을 포함하므로 부피가 크며 가격이 비싸고 고속으로 회전하기 위하여 전력소모가 크며 동작의 안정성도 시간에 따라 나빠질 수 있다[2]. 한편 진동형 자이로는 회전이 아닌 진동을 이용하므로 구동부와 고정부와의 마찰이 없고 가공이 용이하며 수명이 길다는 장점이 있다. 또한 구조가 간단하고 쉽게 제작할 수 있으며, 소형화, 저가, 저 소비전력의 특성을 갖고 있어서 기존의 기계식 자이로 단점을 개선할 수 있다. 성능은 회전방식의 기계적 자이로 및 광학적 자이로보다는 떨어지지만, 정밀한 성능을 요구하지 않는 많은 분야에 응용이 가능하며, 소프트웨어적인 보상기법의 발달로 성능향상이 가능하다[4]. 표 1은 종류별 자이로의 성능과 가격을 비교한 표이다[5].

진동형 자이로에서 입력각속도를 측정하기 위한 힘은 코리올리 힘(Coriolis force)을 이용한다. 이러한 진동형 자이로는 기본적으로 진동 줄(Vibrating String)과 소리굽쇠(Tuning Fork)[6]의 원리를 기초로 하여 만든다.

일반적으로 진동을 가진하고 입력된 각속도를 검출하기 위한 방법으로는 정전력(electrostatic)방식 또는 압전(piezo-electric)방식을 주로 사용하고 있다[7]. 정전력 검출 방식은 입력된 각속도에 대해 검출되는 정전용량의 변화가 약 10^{-18} [F]정도로 작아서 그 신호를 직접처리하기가 어렵고, 신호 대 잡음비(Signal to Noise ratio)가 낮아서 그 신호를 신뢰하기가 어렵다[7,8].

한편 압전 검출방식은 앞선 재료의 높은 온도 의존성 때문에 검출회로에 온도 보상회로를 따로 부착해야 하는 등 회로의 부담이 큰 단점이 있다. 따라서 위와 같은 기존의 가진/검출 방식의 단점을 보완 할 수 있는 대체 방법으로서

논문접수 : 2002. 10. 18., 채택확정 : 2002. 12. 30.

이정영 : 세종대학교 항공우주공학과(jeep9993@hanmail.net)

홍성경 : 세종대학교 항공우주공학과(skhong@sejong.ac.kr)

※ 본 논문은 산업자원부에서 지원하여 연구하였습니다.

표 1. 종류별 자이로의 성능과 가격 비교.

Table 1. Cost and performance comparisons of gyro technologies.

Gyro type	Cost per axis (normalized)	Scale factor error(%)	Zero offset(°/sec)	Operating life(h)
Vibratory	1	4	2	>100000
Spinning Wheel	2.5	2	1	<2000
Fiber-optic	3.8	1	0.1	>100000
Ring-laser	6.2	10 ⁻⁴	2×10 ⁻¹⁶	>100000

전자기력 방식을 제안하고자 한다[3,8,9]. 제안하는 전자기력 방식은 코일의 권선수에 따라 가진과 검출 감도를 선형적으로 증가시킬 수 있으며, 온도에 대한 의존도가 적은 장점을 갖고 있다.

본 논문에서는 진동부가 실린더 형인 진동형 자이로 [10,11,12]를 설계/제작하여 전자기력을 이용한 가진 및 검출 기법을 연구하였으며, 그 실험 결과를 고정밀 변위측정계인 레이저 인터페로미터와 와전류 센서를 이용한 검출결과와 비교하여 그 효율성을 입증하였다.

II. 실린더 진동형 자이로의 작동원리

진동형 자이로의 기본원리는 공진주파수로 진동하는 물체는 일정한 모드형상이 발생하고 이 모드 상태에서 외부 각속도(Ω)가 인가되면 물리적인 변화가 발생하는 사실에서 출발한다. 물리적인 변화량은 인가된 각속도에 비례하며, 변화된 물리량을 측정함으로써 각속도를 측정할 수 있는 것이다.

본 논문에서 제안한 자이로는 진동부가 실린더 형상을 갖는 진동형 자이로로서 가진과 검출은 마그네틱 코일을 이용한 전자기력(electromagnetic force)을 이용하였다. 실린더가 완벽하게 균일하고 대칭인 이상적인 상태로 가정하고 실린더의 고유진동수로 가진을 한다면, 그림 1과 같이 가진 힘이 가해지는 중심축으로 첫 번째 모드형상이 발생하고 중심축의 45°방향의 원주에 노드(node)점이 발생한다. 이때의 첫 번째 모드를 가진 모드(excitation mode)라 하며 중심축을 가진축(q_e)이라 한다. 이 진동상태에서 자이로에 외부 각속도가 가해지면 가진 모드에 코리올리 힘이 발생하며 이 코리올리 힘에 의해 그림 1과 같이 45°방향에 두 번째 모드형상이 발생하며 노드 점의 변이가 발생한다. 이러한 노드 점의 변이는 각속도에 비례하게 되며 그 변이량을 측정함으로써 각속도를 측정할 수 있게 된다. 이때의 두 번째 모드형상을 센싱 모드(sensing mode)라 하고 이 축을 센싱축(q_s)이라 한다.

이상적인 진동형 자이로의 운동 방정식은 (1)과 같다.

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

여기서, $p = \omega$ 즉, 실린더의 고유진동수(natural frequency)이며, ζ_e 와 ζ_s 는 두 개의 모드 q_e 와 q_s 의 감쇄비(damping ratio)이다. G 는 코리올리스 힘에 의해 두 모드에 영향을 주는 유효질량(effective mass)이며, Ω 는 인가된 각속도이고, F 는 가진 힘이다[8,9,10].

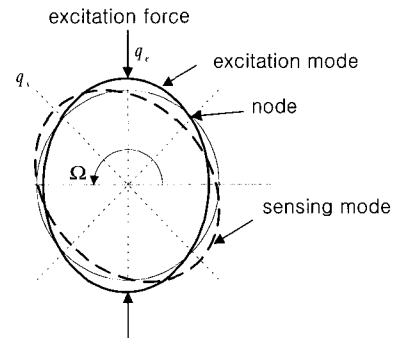


그림 1. 실린더의 모드형상.

Fig. 1. Mode shapes of the cylinder.

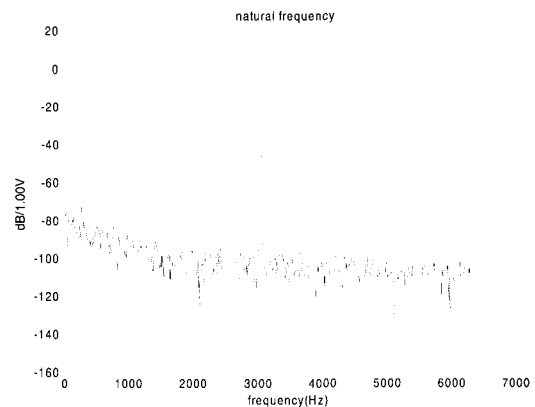


그림 2. 고유진동수 측정 3060Hz.

Fig. 2. Measured natural frequency :3060Hz.

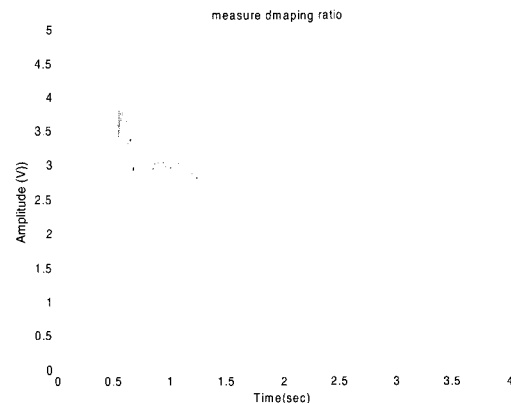


그림 3. 감쇄비 측정 0.0477.

Fig. 3. Measured damping ratio: 0.0477.

III. 고유진동수 및 감쇄비 측정 실험

자이로의 진동부인 실린더의 고유진동수와 감쇄비를 실험적으로 구하기 위하여 Sound & Vibration을 측정하는 B&K사의 Portable Pulse Front End 2827을 이용하여 실험을 하였다. 그림 2는 고유진동수 측정을 위한 주파수 응답 결과이며 그림 3은 대수감소법(logarithmic decrement)을 이용하여 감쇄비 측정을 하기 위한 시간응답 결과이다. 실험 결과 실린더의 고유진동수는 3060Hz, 감쇄비는 0.0477임을 확인하였다.

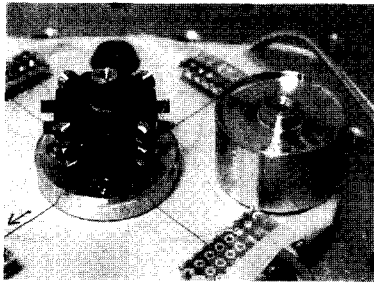


그림 4. 제작된 실린더 진동형 자이로.
Fig. 4. Fabricated cylindrical vibratory gyro.

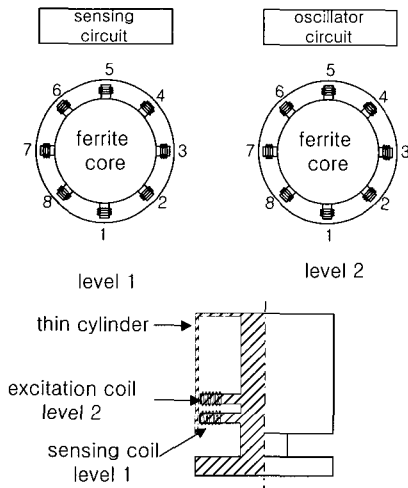


그림 5. 실린더 진동형 자이로의 구조.
Fig. 5. Cylindrical vibratory gyro structure.

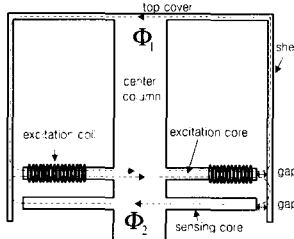


그림 6. 가진부의 자속 모델링.
Fig. 6. Drive element modelling of magnetic flux.

IV. 전자기력을 이용한 가진 및 검출 원리

본 논문의 연구대상인 진동부가 실린더인 진동형 자이로를 그림 4와 같이 내경 24mm, 높이 10mm, 두께 0.5mm의 실린더와 지름 23.6mm의 페라이트 코어(ferrite core)를 직접 제작하였으며 그림 5는 제작한 자이로의 구조를 실린더, 페라이트 코어, 가진부, 검출부로 나누어 간략하게 나타낸 것이다. 그림 6은 가진부의 자속 (magnetic flux, Φ)을 도시한 것이며 그림 7은 그림 6을 등가회로로 나타낸 것이다.

위의 모델링을 통하여 아래와 같이 정의된 (2)를 바탕으로 가진부의 전자기력을 유도하면 (3)과 같다.

$$F = -\nabla W_m = -\frac{\Phi^2}{\mu S} \quad (2)$$

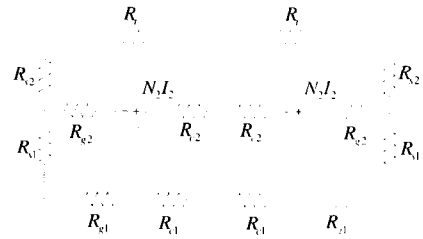


그림 7. 가진부의 등가회로.
Fig. 7. Drive element modelling of equivalent circuit.

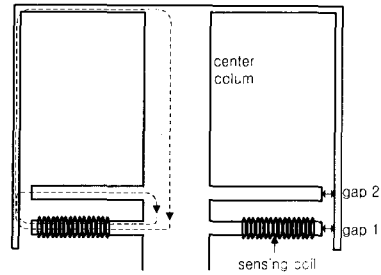


그림 8. 검출부의 자속 모델링.
Fig. 8. Pick-off element modelling of magnetic flux.

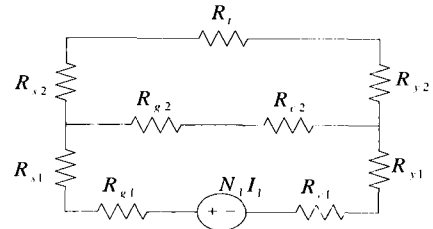


그림 9. 검출부의 등가회로.
Fig. 9. Pick-off element modelling of equivalent circuit.

$$F = -\frac{\mu_0 S_{g2} N_2^2 I_2^2}{l_{g2}} \quad (3)$$

여기서, N_2 는 코일의 권선수, I_2 는 코일의 전류, μ_0 는 투자율(permeability), S_{g2} 는 실린더와 마주보는 코어의 면적, l_{g2} 는 실린더와 코어의 거리이다(2는 가진부를 의미함).

투자율 μ_0 가 실린더와 페라이트 코어보다 상대적으로 매우 작으므로 실린더와 페라이트 코어의 릴럭턴스(reluctance)는 무시할 수 있다.

그림 8은 검출부의 자속을 도시한 것이며 그림 9는 그림 8을 등가회로로 나타낸 것이다. (4)의 패러데이(Faraday) 유도기전력 법칙에 의해 릴럭턴스의 합과 자속의 합을 이용하여 검출부의 유도기전력을 구하면 (5)와 같다.

$$V = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

$$V = \frac{\mu_0 N_1^2 I_1 S_{g1}}{l_{g1}} \frac{dl_{g1}}{dt} \quad (5)$$

여기서, N_1 는 코일의 권선수, I_1 는 코일의 전류, S_{g1} 는 실린더와 마주보는 코어의 면적, l_{g1} 는 실린더와 코어의 거리

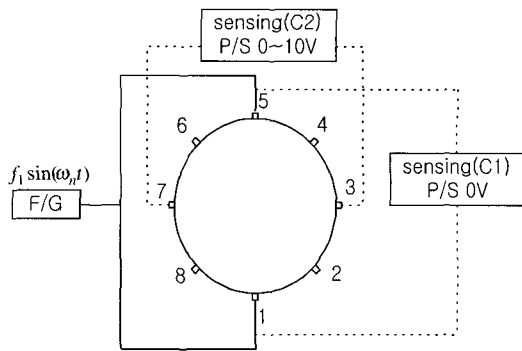


그림 10. 자이로 실험구성.
Fig. 10. Gyro experimental setup.

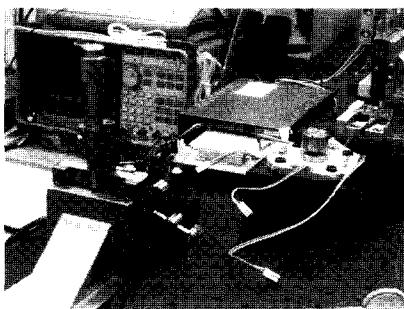


그림 11. 레이저 인터페로미터 실험.
Fig. 11. Experiments with laser-interferometer.

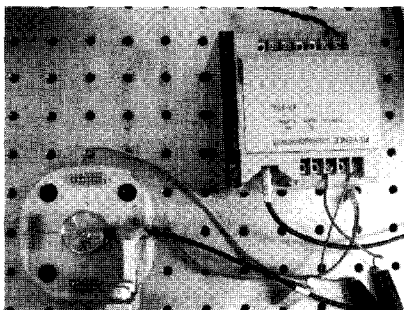
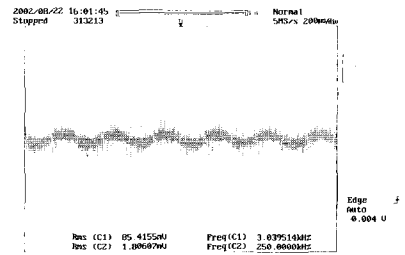


그림 12. 와전류 변위계 실험.
Fig. 12. Experiments with digital displacement inductive sensor.

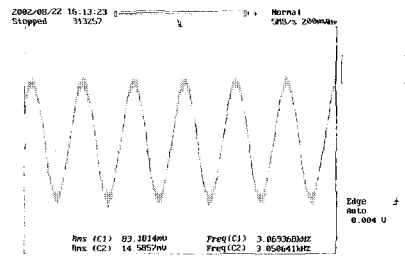
이다(1은 검출부를 의미함).

가진부와 유사하게 공기의 투자율이 매우 작으므로 실린더와 페라이트 코어의 릴럭턴스를 무시할 수 있다. 즉, 가진부의 전자기력은 코일의 감은수와 전류의 제곱에 비례하며 간극의 제곱에 반비례함을 알 수 있고 검출부의 기전력의 변화는 간극의 거리에 제곱에 반비례하고 간극의 시간 변화율에 비례함을 알 수 있다.

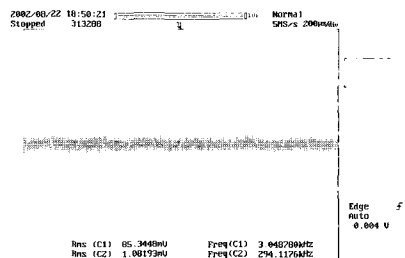
본 논문에서는 위와 같은 원리를 바탕으로 신호발생기(function generator : Agilent 33120A)를 이용하여 페라이트 코어에 감겨진 지름 0.08mm, 권선수 200의 열분당 코일에 1.4V(0.7V 오프셋(offset)의 정현파를 고유진동수로 실린더가 공진하도록 가진을 하였으며 그 때의 전자기력은 (3)에 의하여 약 0.007의 힘이 됨을 알 수 있다. 이 때 실린더에 가진 모드형상이 발생하여 실린더와 페라이트 코어 사이의



(a) $\omega_n = 3050\text{Hz}$



(b) $\omega_n = 3059\text{Hz}$



(c) $\omega_n = 3070\text{Hz}$

그림 13. C1 전압 0V C2 전압 10V일때의 주파수 변화시의 C1, C2의 측정값.

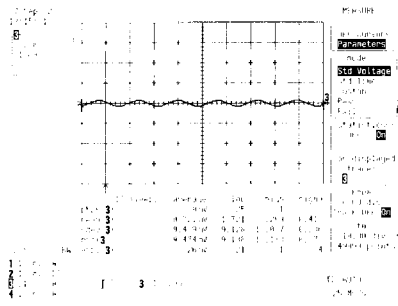
Fig. 13. Results with varying frequency (C1=0V, C2=10V).

간극에 변이가 발생하게 되며 간극의 시간변화율이 발생하면서 (5)와 같이 기전력의 변화가 생기게 된다. 따라서 위에서 언급한 원리에 의하여 전자기력이 진동형 자이로의 가진 및 검출 방법으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.

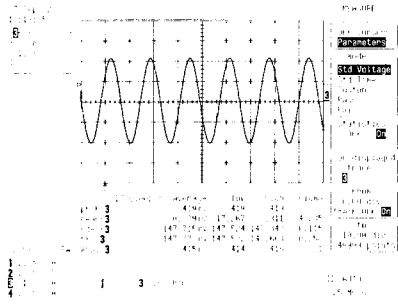
V. 전자기력을 이용한 가진 및 검출 실험

본 논문에서 제안한 전자기력을 이용한 진동형 자이로의 가진 및 검출이 가능함을 보이기 위해 측정된 실린더의 공진주파수 영역에서 주파수를 변화시키면서 가진부로 가진하고 진동현상을 검출부를 이용하여 측정하였다. 또한 그 결과의 타당성을 입증하기 위하여 고정밀 변위 측정용 레이저 인터페로미터(Polytec DFV3001)와 와전류 변위계(KEYENC EX502, 008)를 이용하여 비교 실험 하였다.

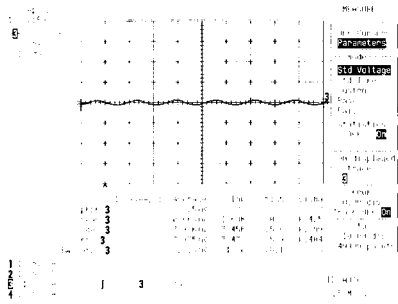
실험 장치의 구성은 그림 10과 같이 신호발생기(function generator, F/G)를 가진부 1, 5에 연결하고 실험을 통해 구한 실린더의 고유진동수 근방(3050~3070Hz)에서 주파수를 변화시켰다. 검출부는 기본 자속을 발생시키기 위하여 전원공급기(power supply, P/S)를 이용하여 사전 전압(bias)을 가해 주었으며 C1은 가진부의 자속간섭현상을 최소화하기 위하여 0V의 사전 전압을 가해주었다. 한편 사전 전압량에 따른



(a) $\omega_n = 3050\text{Hz}$



(b) $\omega_n = 3059\text{Hz}$



(c) $\omega_n = 3070\text{Hz}$

그림 14. 레이저 인터페로미터 실험결과.
Fig. 14. Experiment results using laser interferometer.

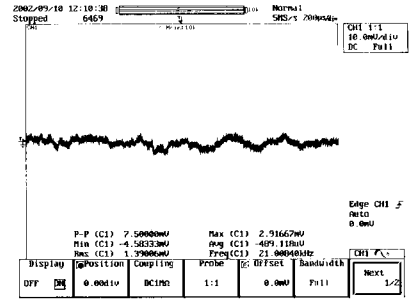
검출부의 측정 감도 현상을 분석하기 위하여 C2의 사전 전압을 0~10V에서 1V씩 변화를 가하였다. 레이저 인터페로미터와 와전류 변위계를 이용한 실험도 같은 조건의 가진 상태에서 진동 변이를 측정하였다. 그림 11과 그림 12는 각각 레이저 인터페로미터와 와전류 변위계를 이용한 실험 구성을 보여준다.

VI. 가진 및 검출 실험결과

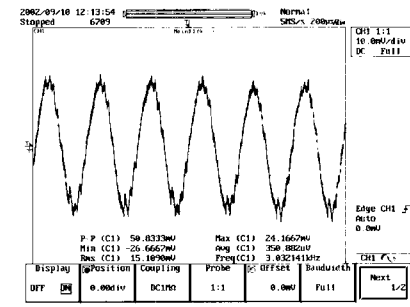
레이저 인터페로미터를 이용한 실험결과(그림 14)와 와전류 센서를 이용한 실험결과(그림 15)를 보면 예상한공진주파수 ($\omega_n = 3059\text{Hz}$)에서 진폭을 나타내는 전압이 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 이와 마찬가지로 자이로 자체의 전자기력을 이용한 측정결과(그림 13)도 동일하게 공진주파수에서 급격하게 전압이 변함을 알 수 있다.

실험 결과를 통하여 전자기력을 이용한 진동형 자이로의 가진 및 검출 기법이 정상적인 물리적인 변이량과 관계없이 고정밀 변이 측정기인 레이저 인터페로미터와 와전류 센서의 실험결과와 동일하게 공진현상은 물론 그 진동의 상대적인 진폭을 검출할 수 있음을 알 수 있다.

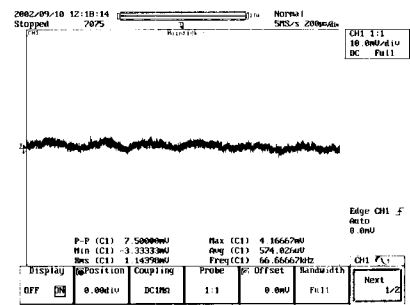
그림 16과 17은 실험결과 신뢰성을 높이기 위하여 같



(a) $\omega_n = 3050\text{Hz}$



(b) $\omega_n = 3059\text{Hz}$



(c) $\omega_n = 3070\text{Hz}$

그림 15. 와전류 변위계 실험결과.
Fig. 15. Experiment results using digital displacement inductive sensor.

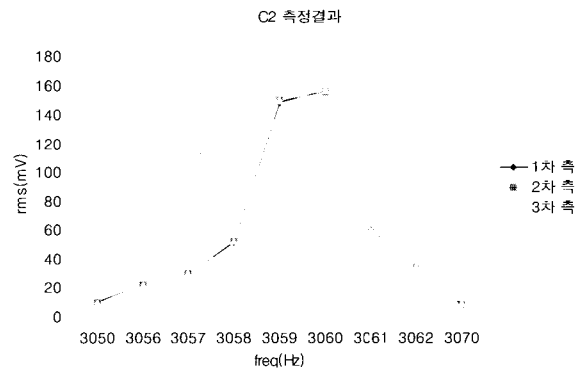


그림 16. 레이저 인터페로미터.

Fig. 16. Laser interferometer.

은 조건에서 레이저 인터페로미터와 와전류 변위계의 실험을 여러번 실험하여 종합한 결과이다. 그림 18과 19는 검출부 C2의 자화전압을 0~10V로 변화시키고 자속 간섭을

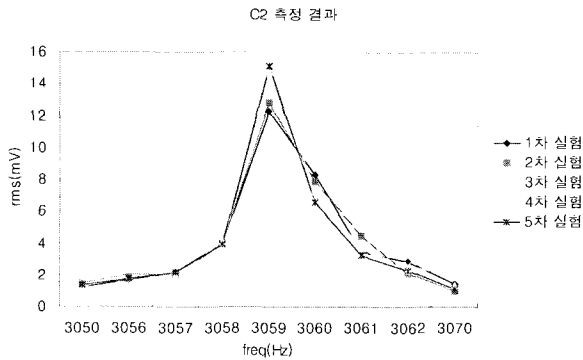


그림 17. 와전류 변위계.

Fig 17. Digital displacement inductive sensor.

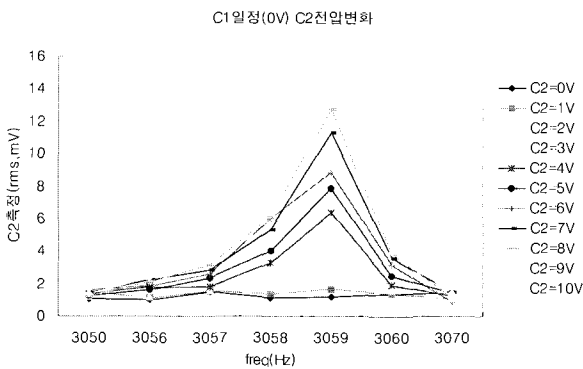


그림 18. 전자기력 센싱(C2).

Fig 18. Sensing of electromagnetic force(C2).

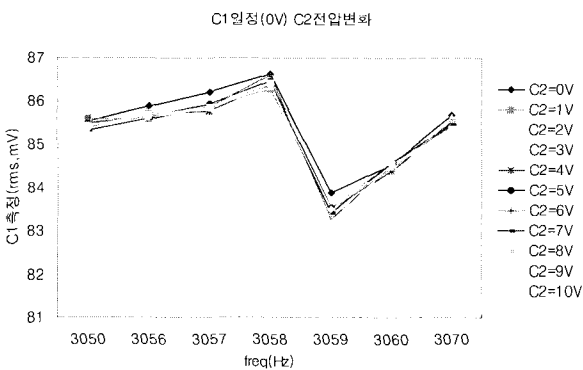


그림 19. 전자기력 센싱(C1).

Fig 19. Sensing of electromagnetic force(C1).

최소화하기 위하여 C1의 자화전압을 0V로 고정하고 전자기력을 이용하여 측정한 실험결과이다. C2의 사전 자화 전압이 커짐에 따라 검출 감도가 높아짐을 알 수 있으며, C1을 이용한 검출은 가진 전자기력의 간섭으로 인하여 감도가 높지 않음을 알 수 있었다. 따라서 실제 진동형 자이로의 구현에 있어서 가진부와와의 간섭을 최소화하기 위하여 C2를 검출부로 설정하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

VII. 결론

본 논문에서는 진동형 자이로의 기존의 정전력, 압전 방식의 가진/검출 방식의 단점을 보완 할 수 있는 대체 방법으로서 전자기력 방식을 제안하였다. 진동부가 실린더 형인 진동형 자이로를 설계/제작하여 전자기력을 이용한 가진 및 검출 기법을 구현하였으며, 그 실험 결과를 고정밀 변위측정기인 레이저 인터페로미터와 와전류 센서를 이용한 검출 결과와 비교하였다. 실험 결과를 통하여 전자기력을 이용한 진동형 자이로의 가진 및 검출 기법이 레이저 인터페로미터와 와전류 센서의 실험결과와 동일하게 공진현상은 물론 그 진동의 상대적인 진폭을 검출할 수 있음을 입증하였다.

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 vibratory 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 Actuators*, 78, pp. 143-148, 1999.
- [5] J. T. Anders and R. Pearson, "Appication of the 'START' vibratory gyroscope", *GEC Review*, Vol. 9, No.3, 1994.
- [6] R. A. Buser and N. F. de Rooij, "Tuning forks in silicon", *MEMS Proceedings*, pp. 94-95, 1989.
- [7] J. Söderkvist, "Piezoelectric beams and vibrating angular rate sensors", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 38, No.3, pp. 271-280, 1991.
- [8] M. Hashimoto, C. Cabuz, K. Minami and M. Esashi, "Silicon resonant angular rate sensor using electromagnetic excitation and capacitive detection", *Tech. Digest, 12th SensorSymp.*, Japan. pp 163-166, 1994.
- [9] F. Paoletti, M. A. Greillat and N. F. de Rooji, "A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation". *MEMS Proc.*, San Diego, CA, USA, pp 162-167, 11-15, Feb., 1996.
- [10] B. Boxenhom and P. Greiff, "A vibratory micromechanical gyroscope", *AIAA Guidance and Controls Conference*, Minneapolis, Minnesota, pp. 1033-1040, 15-17 August, 1988.
- [11] C. H. J. Fox, "The dynamics of a vibrating cylinder gyro with imperfection", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, pp. 453-464, 1996.
- [12] C. H. J. Fox, "Vibrating cylinder rate gyro : Theory of operation and error Analysis", *Symposium Gyro Technology*, 1988.



이 정 영

2001년 한남대학교 기계공학과 졸업.
2001년~현재 세종대학교 항공우주공
학과 (석사과정). 관심분야는 지능제어,
강건제어 및 센서응용.



홍 성 경

1987년 연세대학교 기계공학과 졸업.
1989년 동대학원 (석사). 1998년 Texas
A&M Univ. 기계공학 (박사). 1989년~
2000년 국방과학 연구소 선임연구원.
현재 세종대학교 기계항공우주공학부
조교수. 관심분야는 지능제어, 강건제

어 및 센서 응용.