

〈論 文〉

압전세라믹을 이용한 사각보형 진동자이로의 설계 및 성능분석

Design and Analysis of Square Beam Type Piezoelectric Vibrating Gyroscope

이 정 훈* · 박 규 연** · 이 종 원***

Jeong-Hoon Lee, Kyoo-Yeon Park and Chong-Won Lee

〈1995년 6월 19일 접수 ; 1995년 8월 31일 심사완료〉

Key Words : Vibrating Gyro(진동자이로), Angular Velocity(각속도), Piezoelectric Material(압전소자), Gyroscope(자이로스코프)

ABSTRACT

Square beam type piezoelectric vibrating gyro is developed for the measurement of angular velocity, which is compact, small in size and mass-producible. It features that three pieces of piezoelectric ceramics are bonded onto one face of equilateral square bar type gyro head. Two of them are used as sentuators which drive the gyro head and measure Coriolis force. The third piece is used for the feedback signal in order to resonate the gyro head with its fundamental natural frequency. Matching two fundamental natural frequencies in the gyro head with its driving frequency is found critical in the design of vibrating gyro. Calibration results show that the vibrating gyro developed has the dynamic characteristics of first-order system within the frequency range of interest, which can be easily compensated by a lead compensator.

1. 서 론

일반적으로 관성계 내의 물체에 대한 동특성 파악을 위해서는 속도, 가속도 및 각속도, 각각속도에 대한 정보를 필요로 하며 자이로는 이중에서 각속도를 측정하는 장치이다. 운동하는 질량에 회전각속도가 인가될 때 발생하는 코리올리힘을 측정하여 회전각속도를 검출하는 개념의 각속도 센서인 진동자이

로는 성능이 회전형 자이로에 비해 떨어지나 구조가 간단하고 소형이며 대량생산이 가능한 장점이 있다.

진동자이로의 효시로는 1950년 영국의 Sperry Gyroscope Company의 "Gyroton"⁽¹⁾이며, 전자기력을 이용한 가진과 측정이 그 특징으로서 실험실 조건에서 지구의 자전속도를 측정할 수 있었다. 그 후 1960년대에 General Electric에서 "VYRO"⁽²⁾라는 모델을 개발했는데 압전소자를 이용하여 가진과 측정을 하는 방법이 사용되었다. 1980년대에 Watson Ind.⁽³⁾, Söderkvist⁽⁴⁾ 등은 센서자체가 압전재료로 만들어진 자이로를 실험하였고, 1990년도에 들어서는 진동자이로의 원리를 마이크로 머시닝 기술과 연계시켜서 소형 경량화와 대량생산을 목표로 연구가 일

*한국과학기술원 기계공학과

**삼성전기주식회사

***정희원, 한국과학기술원 기계공학과

부 진행되고 있다. 현재 제품화되어 실제 응용되고 있는 예로는 무라다사의 삼각프리즘 형태의 자이로, 토킨사의 원통형 자이로 등이 있으며 이러한 자이로는 캠코더 화면 안정화 장치에 주로 사용되고 있다.

본 논문에서는 압전소자의 압전, 전왜 방정식을 이용하여 자이로헤드의 동적거동을 해석하였다. 진동자이로는 물체의 공진주파수에서의 진동현상을 이용하며, 두방향의 고유진동수를 일치시켜야 하는 등의 까다로운 설계조건이 있다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족하도록 사각보 구조를 기본으로 하여 새로운 형태의 자이로헤드를 고안하였다. 또한 자이로헤드의 구동회로를 설계, 해석하고 각속도를 측정할 수 있는 검출회로를 설계하여 개발된 진동자이로의 동특성을 확인하고 진상보상기를 이용하여 사용주파수 영역을 넓혔다.

2. 기본원리와 수치해석

2.1 압전 세라믹의 성질 및 기본 방정식

압전세라믹에 힘 또는 응력을 가했을 때 전하가 발생하는 현상을 압전효과라 하고, 반대로 외부에서 전계를 가했을 때 변위가 발생하는 현상을 전왜효과라고 한다. 이러한 압전, 전왜성을 부여하기 위해 압전 세라믹 표면에 원하는 방향으로 전극을 입힌후 강한 직류전계를 가해 결정축의 방향을 배열시키는 작업을 하게 된다. 이것을 분극(polarization)이라 하고, 분극전계의 방향을 분극축이라 한다. 분극된 압전소자는 Fig. 1에서와 같이 극성방향을 3축으로 정의하고, 3축을 기준으로 1, 2축을 정의한다. 이

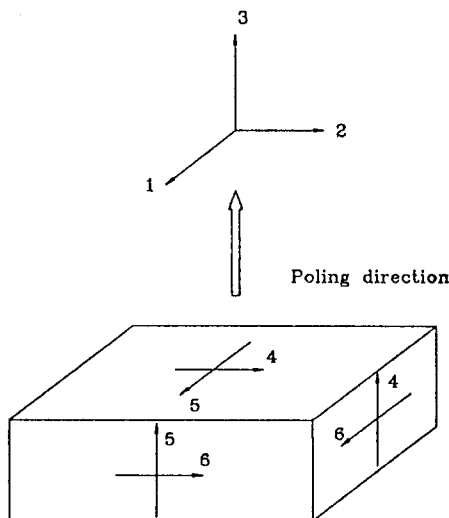


Fig. 1 Poling direction of piezoelectric material

좌표를 기준으로 압전, 전왜효과에 의해 결정에 발생하는 응력과 전계의 관계를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

$$S_p = S_{pq}^E T_q + d_{ip} E_i, \quad p, q = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (1)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \epsilon_{ik}^T E_k, \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서 S_p , T_q , D_i , E_i 는 각각 변형률(Strain), 응력(Stress), 전기변위(Electric displacement), 가해진 전계(Electric field intensity)를 나타낸다. S_{pq}^E 는 E_i 가 상수일 때 S_p , T_q 의 비례관계를 나타내며 탄성 컴플라이언스(elastic compliance matrix)라고 한다. d_{iq} 는 압전상수(piezo electric strain/charge matrix)를 나타내며, ϵ_{ik}^T 는 T_q 가 상수일 때, D_i , E_k 의 비례관계를 나타내는데 유전률(permittivity matrix) 행렬이라 한다.

2.2 사각보형 진동자이로의 기본원리

Fig. 2는 사각보형 진동자이로의 기본원리를 나타낸다. y 방향의 압전소자를 통해 보의 일차공진주파수의 교류신호를 가하면 보는 y 방향 일차공진모드로 움직인다. 이때 보가 x 방향 각속도로 회전하면, y 방향에 직각이 되는 z 방향으로 코리올리힘이 작용한다. 이 힘은 보를 z 방향으로 가진하여 일차모드의 운동을 발생시키고, z 방향 압전소자에게 이를 측정하면 가해진 각속도에 비례하는 신호를 얻을 수 있다. 발생하는 신호의 크기를 극대화하기 위해서는 가진주파수가 y 방향, z 방향 각각의 일차공진점이 되어야 하고 두 개의 공진주파수는 일치되어야 한다. 압전소자에 의한 가진, 측정의 원리를 이해하고 자이로의 감도(Sensitivity)를 예측하기 위해서 Fig.

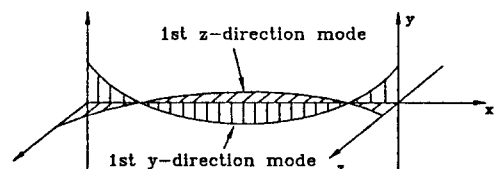
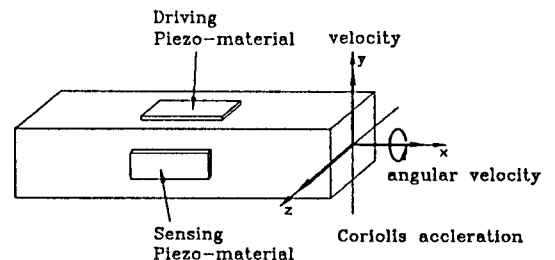


Fig. 2 Basic principle of piezoelectric vibration gyro

3의 간략화된 모델을 기본으로 운동방정식을 유도한다.

(1) 운동방정식의 유도(6)

압전소자가 보의 표면에 부착되었을때 가해진 전압 $V(x, t)$ 에 의한 압전소자의 변형은 보에 굽힘모멘트 $T(x, t)$ 를 발생시키며 압전방정식을 통해 식 (3)의 결과를 얻는다.

$$T(x, t) = cV(x, t),$$

$$c = -d_{31} \left(\frac{h_s + h_p}{2} \right) \left(\frac{E_s h_s E_p b_s}{E_s h_s + E_p h_p} \right) \quad (3)$$

여기서 E_p, E_s 는 압전소자 및 보의 영계수이다. 조화입력전압의 경우 식 (3)을 Fig. 3의 자유-자유경계조건의 Euler-Bernoulli보에 적용하여 힘평형의 조건으로부터 지배방정식을 유도하면

지배방정식 :

$$\rho_s A_s \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + (E_s I_s)_y \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4}$$

$$= \frac{\partial^2 (cV(x, t))}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$\rho_s A_s \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + (E_s I_s)_z \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4}$$

$$= 2\dot{v}(x, t)\Omega(t)\rho_s A_s$$

$$V(x, t) = \begin{cases} 0 & 0 < x < L_1 \\ V_o \sin(\omega t) & L_1 < x < L_2 \\ 0 & L_2 < x < L \end{cases}$$

$x=0, L$ 에서

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0 \quad (5)$$

가 된다. 여기서 $v(x, t), w(x, t)$ 는 보의 y, z 방향의 변위, ρ_s, A_s 는 보의 밀도, 단면적이며 Ω 는 x 축 방향 회전각속도, ω 는 조화입력전압 주파수, 하첨자 y, z 는 y, z 방향 특성을 나타낸다.

모드 해석을 하기위해 $v(x, t), w(x, t)$ 를 공간과 시간의 함수로 나타내면(7)

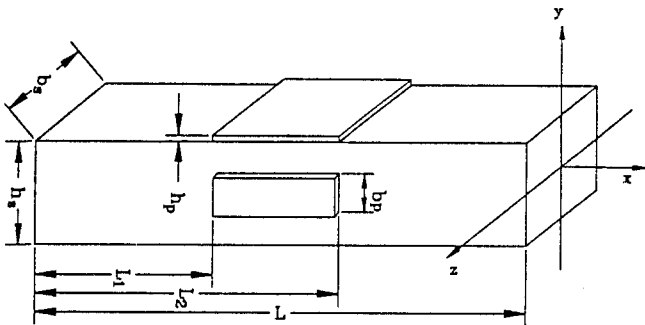


Fig. 3 Analysis model

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) \zeta_n(t),$$

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) \eta_n(t) \quad (6)$$

여기서 $\phi_n(x) = (\cos h(\lambda_n x/L) + \cos(\lambda_n x/L) - \sigma_n (\sin h(\lambda_n x/L) + \sin(\lambda_n x/L)))$ 이며, $n=1$ 일 때, $\sigma_1=0.982, \lambda_1=4.73$ 이다.

자이로헤드에 사용되는 보의 작은 감쇠를 고려하고 일차탄성모드($n=1$)일때를 고려하면 식 (4)로부터 식 (7)의 결과를 얻는다.

$$\ddot{\zeta}_1(t) + 2\zeta_{y1}\omega_{y1}\dot{\zeta}_1(t) + \omega_{y1}^2\zeta_1(t)$$

$$= \frac{cV_o \left[\frac{\partial \phi_1(x)}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2}}{\rho_s A_s L} \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$\ddot{\eta}_1(t) + 2\zeta_{z1}\omega_{z1}\dot{\eta}_1(t) + \omega_{z1}^2\eta_1(t) = 2\dot{\zeta}_1(t)\Omega(t)$$

$$\omega_{y1}^2 = \frac{(E_s I_s)_y \lambda_1^4}{\rho_s A_s L}, \quad \omega_{z1}^2 = \frac{(E_s I_s)_z \lambda_1^4}{\rho_s A_s L}$$

이때 Ω_o 의 크기와 $\omega_a (\ll \omega_1)$ 의 주파수를 갖는 가속도 $\Omega(t) = \Omega_o \cos(\omega_a t)$ 가 작용하고 발진주파수를 $\omega = \omega_{y1}$ 으로 할 때 식 (7)에서 z 방향의 보의 운동은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\eta}_1(t) + 2\zeta_{z1}\omega_{z1}\dot{\eta}_1(t) = F_z \cos(\omega_a t) \sin(\omega_{y1} t) \quad (8)$$

$$F_z = \frac{cV_o \Omega_o \left[\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2}}{\rho_s A_s L \omega_{y1}}$$

(2) 측정식의 원리

압전소자가 변형시 압전효과에 의해 변형량에 비례하는 전하가 발생한다. 이때 압전소자의 면적 S 에 모이는 전하는 가우스의 법칙에 의해(5)

$$Q(t) = \int_S D d\sigma \quad (9)$$

D : 전기변위벡터, $d\sigma$: 면적 S 에 수직인 벡터

로 계산된다. 식 (8)은 입력각속도에 따른 z 방향의 운동을 나타내는데, Fig. 3의 측정부 압전소자에는 $\eta_1(t)$ 에 비례하는 변형에 의해 전하가 발생한다. 압전소자에 발생하는 전하량 $Q_3(t)$ 는 식 (9)와 압전식에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$Q_3(t) = \frac{d_{31} E_p}{1-\nu} (h_s/2) \int_0^L \left(\frac{\partial^2 \phi_1 \eta_1}{\partial x^2} \right) dx dy$$

$$= -\frac{d_{31} E_p}{1-\nu} (h_s/2) \left[\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2} b_p \eta_1(t) \quad (10)$$

2.3 진동자이로의 동적 특성

모든 센서는 센서자체의 동적 응답특성이 있는데

진동자이로도 각속도의 측정원리상 동적 응답특성이 나타난다. 식 (10)에서 입력된 각속도에 비례하여 발생하는 전하량은 z 방향의 진동 $\eta_1(t)$ 에 비례하는데, $\eta_1(t)$ 의 운동방정식은 식 (8)이며 해를 구하기 위해 식 (11)로 변형한다.

$$\ddot{\eta}_1(t) + 2\zeta_{z1}\omega_{z1}\dot{\eta}_1(t) + \omega_{z1}^2\eta_1(t)$$

$$= \frac{F_z}{2} [\sin((\omega_{y1} - \omega_a)t) + \sin((\omega_{y1} + \omega_a)t)] \quad (11)$$

동기조건인 $\omega_{z1} = \omega_{y1} = \omega_1$ 이 만족되는 경우 다음과 같이 해를 구할 수 있다.

$$\eta_1(t) = X_1 \sin((\omega_1 - \omega_a)t - \beta_1)$$

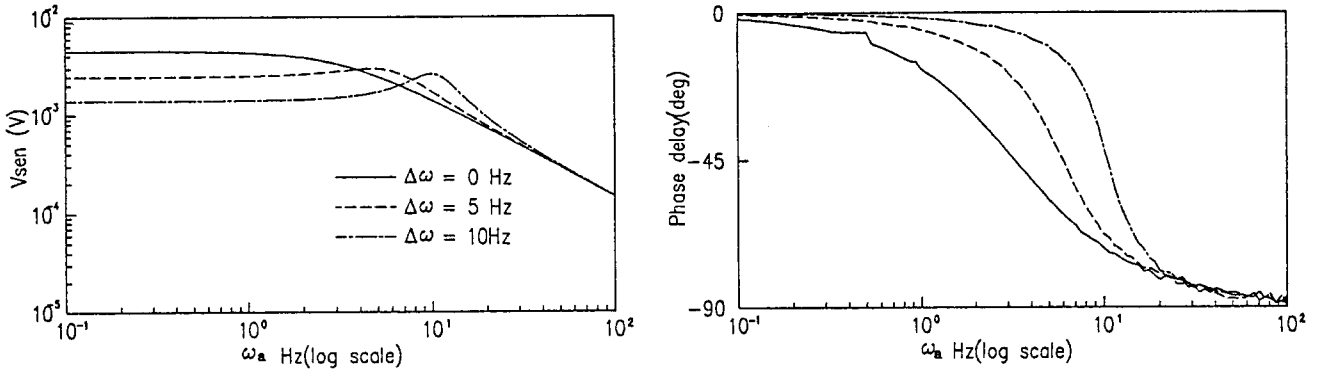


Fig. 4 Dynamic characteristics of vibrating gyro

Table 1 Material properties kfor simulation of vibrating gyro's dynamic characteristics

기 호	특 성	값	단 위
b_s	Width	4.300×10^{-3}	m
h_s	Height	4.300×10^{-3}	m
L_s	Length	27.00×10^{-3}	m
L_1	Nodal point 1	6.051×10^{-3}	m
L_2	Nodal point 2	20.95×10^{-3}	m
I_s	Moment of inertia	2.849×10^{-11}	m^4
ζ_{y1}	Damping coeff. of y direction	1.750×10^{-4}	
ζ_{z1}	Damping coeff. of z direction	3.501×10^{-4}	
ω_1	Resonance frequency	$2\pi \times 19186$	rad/s
E_s	Modulus of elasticity of brass	103×10^9	N/m^2
ρ_s	Density of brass	8500	kg/m^3
b_p	Width o sensing piezo	2.15×10^{-3}	m
h_p	Thickness of piezo	0.120×10^{-3}	m
E_p	Modulus of elasticity of piezo	6.50×10^{10}	N/m^2
ν	Poisson's ratio of piezo	0.3	
d_{31}	Piezoelectric strain constants	48×10^{-12}	C/Newton
C_p	Capacitance of piezo	0.9×10^{-9}	Farad
V_o	Magnitude of actuating vantage	1	Volt
Ω_o	Magnitude of angular velocity	1	deg/s

$$+ X_2 \sin((\omega_1 + \omega_a)t - \beta_2) \quad (12)$$

$$X_1 = \frac{F_z}{2\sqrt{[\omega_1^2 - (\omega_1 - \omega_a)^2]^2 + [2\zeta_{z1}\omega_1(\omega_1 - \omega_a)]^2}} \quad (13)$$

$$X_2 = \frac{F_z}{2\sqrt{[\omega_1^2 - (\omega_1 + \omega_a)^2]^2 + [2\zeta_{z1}\omega_1(\omega_1 + \omega_a)]^2}} \quad (14)$$

$$\beta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega_1^2 - (\omega_1 - \omega_a)^2}{2\zeta_{z1}\omega_1(\omega_1 - \omega_a)}\right) + 90^\circ \quad (15)$$

$$\beta_2 = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega_1^2 - (\omega_1 + \omega_a)^2}{2\zeta_{z1}\omega_1(\omega_1 + \omega_a)}\right) + 90^\circ \quad (16)$$

식 (12)를 $\omega_1 \gg \omega_a$ 의 조건을 이용하여 간략화하면 식 (17)로 정리되는데 고유진동수 ω_1 으로 진폭변조된 각속도 신호가 시상수 $1/(\zeta_{z1}\omega_1)$ 을 가지는 일차시스템의 응답특성을 나타낸다.

$$\eta_1(t) = \frac{F_z}{2\omega_1\sqrt{\omega_a^2 + (\partial_{z1}\omega_1)^2}} \cos\left(\omega_a t - \tan^{-1}\left(\frac{\omega_a}{\zeta_{z1}\omega_1}\right)\right) \sin(\omega_1 t - 90^\circ) \quad (17)$$

Fig. 4는 식 (10) 및 (11)를 Table 1의 제원을 기준으로 각속도의 주파수 ω_a 가 변함에 따른 자이로의 응답특성을 모의실험한 결과이다. 동기조건인 $\omega_{z1} = \omega_{y1} = \omega_1$ 이 만족되는 경우는 입력되는 각속도의 주파수에 따라서 일차시스템의 성격을 나타내며 절점 주파수(cutoff frequency) f_c 는 $\zeta_{z1}\omega_1/(2\pi) = 3.3\text{Hz}$ 로 계산된다.

식 (11)에서 동기조건이 만족되지 않아 ω_{y1} 과 ω_{z1} 이 일치하지 않으면 자이로의 응답특성은 일차특성에서 벗어난다. 두 주파수의 차이인 $\Delta\omega = (\omega_{y1} - \omega_{z1})$ 가 5Hz, 10Hz일 때 응답특성은 Fig. 4에 나타나 있다.

3. 진동자이로의 측정원리 및 설계

본 연구에서는 2장에서 설명한 각속도 측정의 원리를 기본으로 압전소자를 이용하여 동시에 가진과 측정을 하는 새로운 형태의 자이로를 실험하고 이를 이용 각속도를 측정할 수 있음을 보였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 보의 y 방향에 3개의 압전소자를 부착하여 양쪽의 두개 a, c는 가진과 측정용으로 이용하고, 가운데의 압전소자 b는 보의 가진과 동기걸음을 위한 기준신호로써 이용한다. 보의 y 방향진동에 의해 압전소자 b에 발생하는 신호는 위상이 조절되고 연산증폭기에 의해서 증폭되어 양쪽 a, b 압전소자를 가진하게 된다. 이렇게 하여 별도의 가진

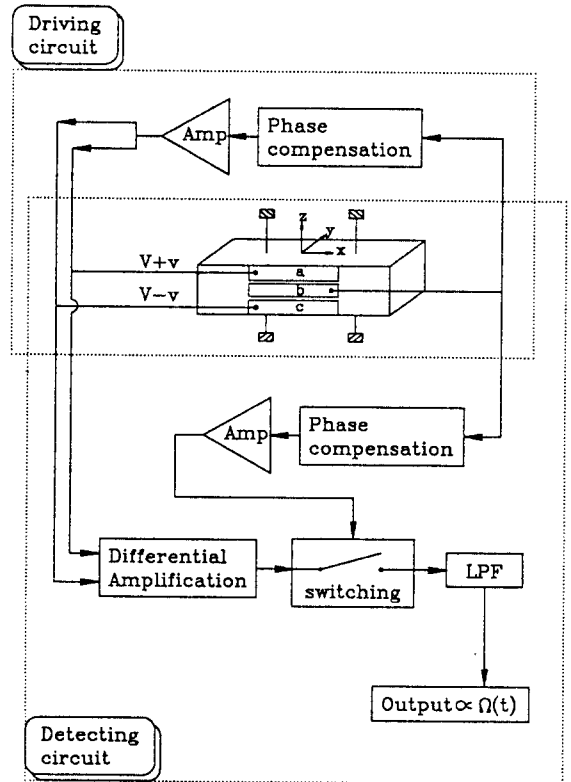


Fig. 5 Block diagram of vibration gyro

장치 없이 보를 y 방향의 일차모드로 가진할 수 있다.

이때 보에 각속도가 존재하면 z 방향의 진동에 의해 압전소자 a에는 +v, 압전소자 c에는 -v의 전압이 가진전압 V에 더하여져 발생된다. +v, -v의 신호는 각속도 크기에 비례하며 이를 차동증폭하면 각속도의 신호가 보의 발진주파수로 변조된 신호를 얻는다. 이렇게 해서 얻어진 신호를, b 압전소자에서 발생하는 신호를 이용하여 동기검파시키고 저대역 통과필터를 거치게 하면 입력된 각속도에 비례하는 신호를 얻는다.

3.1 센서헤드 및 지지부의 설계

진동자이로의 헤드 부분은 자이로의 가장 중요한 부분으로 전기적인 구동력을 기계적인 진동으로 변환시키고 외부 회전 각속도에 의해 발생된 코리올리 힘을 전기적 신호로 변환시키는 역할을 한다. 자이로헤드의 재질은 황동을 선택하였으며 헤드의 구동 주파수는 소음문제를 없애기 위해서 가청영역의 주파수보다 높게 하며 각속도의 측정효율을 높이기 위해 Fig. 6에서와 같이 헤드의 두방향 일차공진점을 일치시켜야 한다⁽⁶⁾.

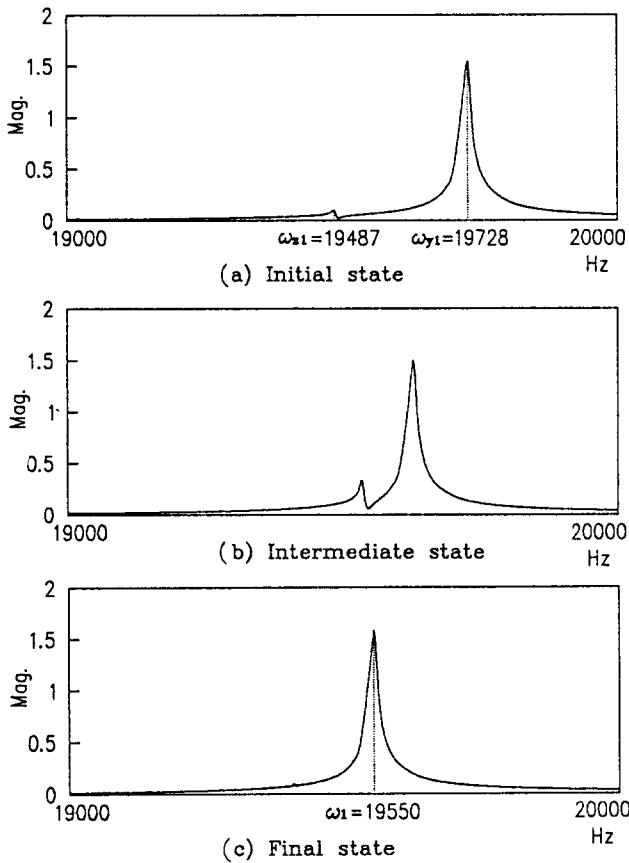


Fig. 6 Transfer function of gyro head and matching of resonance frequency

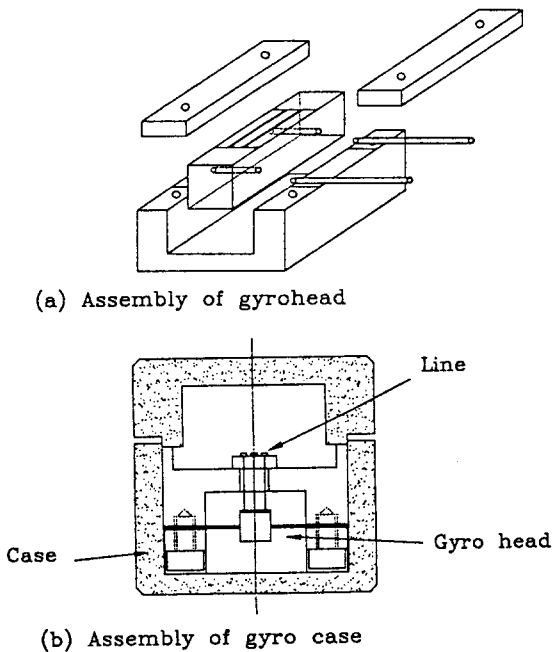


Fig. 7 Configuration of vibrating gyro

헤드를 지지시킬 때는 헤드의 일차모드진동에 영향이 작아야하며 또한 각속도를 측정하는 방향으로 는 헤드를 강건하게 지지하여야 한다. 실험에서는 Fig. 7에서처럼 사각보모양 헤드의 일차진동모드절점에 가는 구멍을 뚫어 철선으로 지지하였다.

3.2 보 구동부의 회로설계

각속도에 비례하는 코리올리힘을 발생시키기 위해서는 y 방향의 진동을 발생시켜야 한다. 이를 위해 보에 부착된 압전소자에 보의 공진주파수의 교류신호를 가해 발생하는 일차모드의 진동을 이용한다. 이때 필요한 교류신호를 얻기 위해서는 신호발생기와 같은 외부 장치가 필요하나 이것은 주변장치가 복잡해질뿐만 아니라 정밀하게 주파수를 조정하기 어렵다는 단점이 있다.

다른 방법으로는 피드백에 의한 공진방식이 있는데 이것은 연산증폭기의 발진조건인 “Barkhausen criteria”⁽⁹⁾를 이용한 것이다.

Fig. 8에서 피드백 된 신호를 연산증폭기에서 증폭시켜 출력하고 이 신호가 다시 피드백 되어 증폭되는 순환과정을 거쳐 연산증폭기의 출력전압을 포화되고 리미트 사이클(limit cycle)을 형성하게 된다⁽¹⁰⁾.

포화에 의한 묘사함수(describing function) $A(a)$ 를 수학적으로 표현하면

$$A(a) = \begin{cases} 1 & \text{for } a < b \\ \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \frac{b}{a} + \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} & \text{for } a \geq b \end{cases} \quad (18)$$

이다. 여기서 a 는 연산증폭기의 입력전압의 크기이다. 이 묘사함수를 이용하여 리미트 사이클을 예상할 수 있다. Fig. 8에서

$$\begin{aligned} E(j\omega) &= A(a) K(j\omega) V_y(j\omega) \\ V_y(j\omega) &= H_e(j\omega) E(j\omega) \end{aligned} \quad (19)$$

이므로

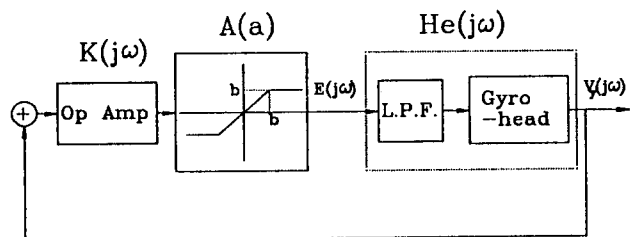


Fig. 8 Block diagram of self-oscillation circuit with Op. Amp. saturation

$$(1 - He(j\omega)A(a)K(j\omega))V_y = 0 \quad (20)$$

이다. 식 (20)에서 리미트 사이클이 존재한다면 $V_y \neq 0$ 이므로

$$He(j\omega)K(j\omega) = \frac{1}{A(a)} \quad (21)$$

을 만족시키는 해가 존재하여야 한다. 본 계가 포화가 일어나기 전까지의 묘사함수, $A(a)$ 의 기울기는 1이므로 포화가 일어났을 때 $A(a)$ 범위는 식 (18)로부터

$$0 < A(a) \leq 1 \quad (22)$$

이며, Fig. 9(a)와 같다. 따라서 본계에서 리미트 사이클이 발생한다면

$$Re(KHe) \geq 1, Im(KHe) = 0 \quad (23)$$

을 만족하는 해가 존재해야 한다. 계의 Nyquist선도인 Fig. 9(b)가 Fig. 9(a)의 그래프와 공진주파수 ω_1 에서 만나는 것으로 보아 해가 존재함을 확인할 수 있다. 이상에서의 리미트 사이클 발생조건을 이용한 구동회로를 설계함으로써 별도의 외부 가진장치 없이 고유진동수에서 자이로헤드를 발진시킬 수 있는

장점이 있다.

4. 성능 실험

3장에서 고려된 센서헤드, 지지방법을 기본으로 개발된 자이로를 제작하고 Fig. 10의 실험장치에서 보정한다. 고정축을 중심으로 회전하는 외팔보형 진자로 각 변위를 발생시키고, 각 변위계 (Potentiometer)의 신호와 진자에 설치된 진동자이로의 신호를 비교한다.

4.1 진동자이로의 동적 특성 실험

Fig. 11은 진동자이로의 주파수 응답선도이며, 자이로의 동적 특성인 일차시스템의 특성을 확인할 수 있다. 이를 곡선근사화하고 절점주파수를 구하면

$$G(s) = \frac{112.9 \times 10^{-3}}{s + 19.23}, f_c = 3.06\text{Hz} \quad (24)$$

이다. Fig. 12는 발진주파수가 19181Hz 일 때 진동자이로의 응답특성이며 Fig. 11의 발진주파수 19186Hz와 5Hz 차이가 있다. 2.3절의 모의실험을 통해서 얻은 결과와 같은 방향을 보임을 알 수 있다.

4.2 보상기의 설계

설계된 진동자이로는 시스템의 특성상 일차시스템

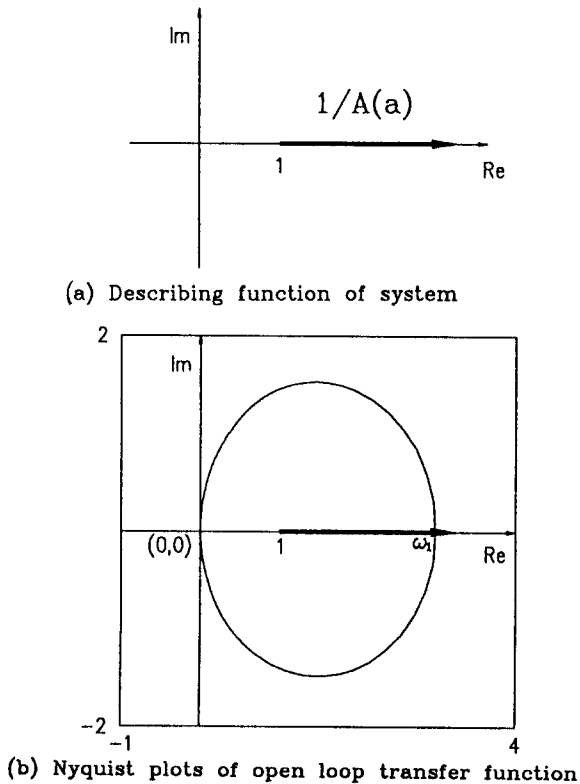


Fig. 9 Existence of limit cycle

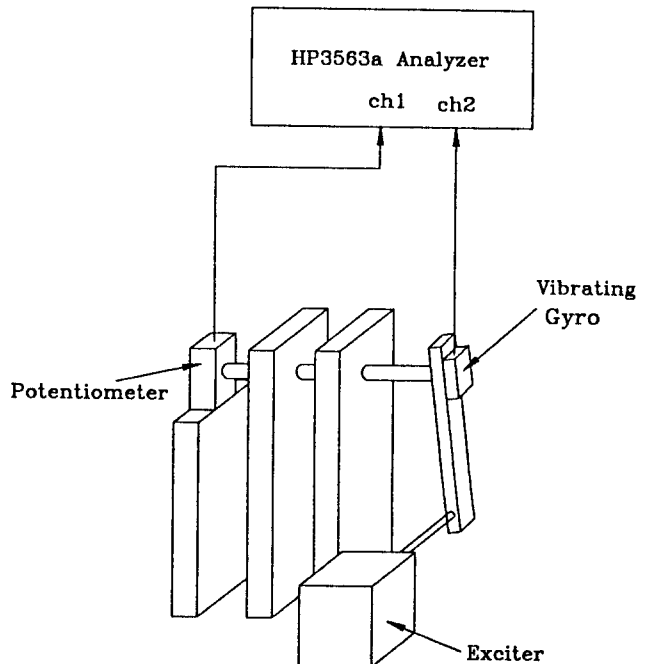
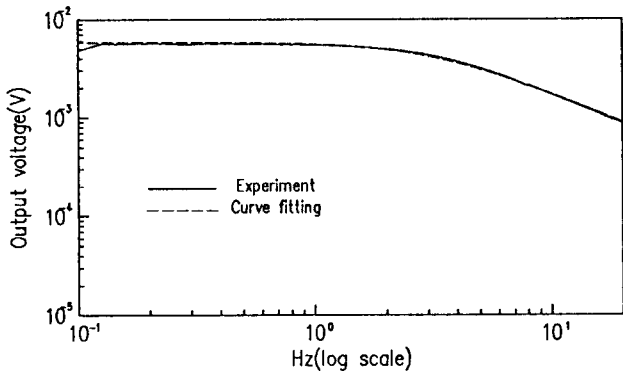


Fig. 10 Experimental setup for calibration



의 성격을 가진다. 이를 보상하고 사용주파수 영역을 증가시키기 위해 진상보상기를 식 (25)와 같이 설계하였다.

$$V_{out}(s) = \frac{\alpha_1 s + 1}{\alpha_2 s + 1} V_{in}(s) \quad (25)$$

여기서 $V_{in}(s)$, $V_{out}(s)$ 는 각각 보상기의 입력전압, 출력전압이고 상수 α_1 , α_2 는 진동자이로의 동적특성과 사용주파수영역에 의해서 결정되는 값이다. 진상보상기를 포함한 진동자이로의 전체 전달함수는 식 (26)이다.

$$G'(s) = \left(\frac{112.9 \times 10^{-3}}{s + 19.23} \right) \left(\frac{-440(s + 20.67)}{s + 9092} \right) \approx \frac{-49.72}{s + 9092}$$

$$f_c = 1447\text{Hz} \quad (26)$$

전체전달함수의 절점주파수가 2.06Hz에서 1447Hz로 바뀌었음을 알 수 있다. 보상기를 거친 자이로의 응답의 결과는 Fig. 13이며 주파수에 따라 크기가 일정하고 위상지연이 없어 동적특성이 보상되었고 그 감도는 5.5mV/(deg/s)이다. 0.1Hz 미만의 저주파수와 20Hz 이상의 고주파수 영역에서는 가진기의 성

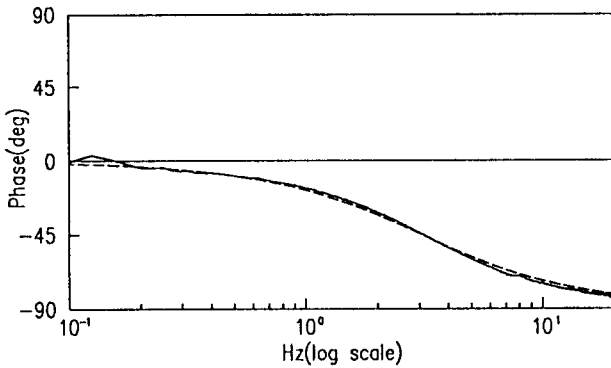


Fig. 11 Vibrating gyro output voltage per 1deg/sec
Oscillation frequency : 19186Hz

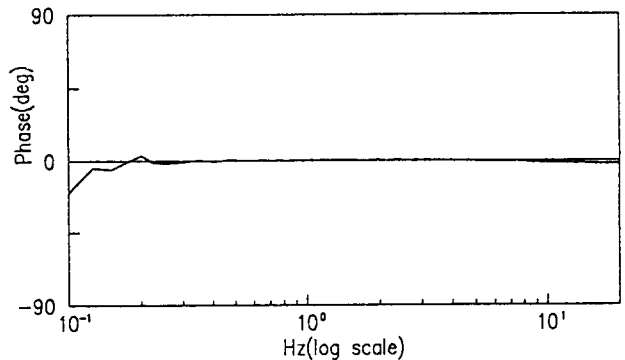
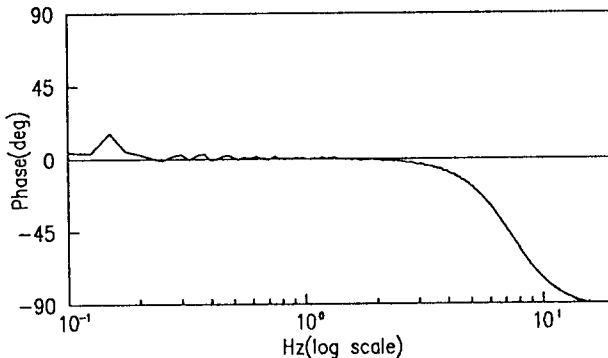
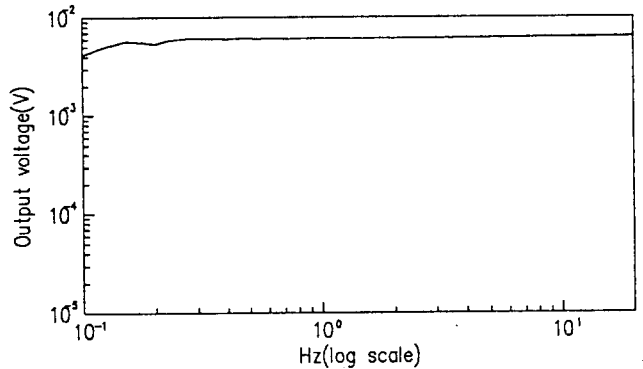
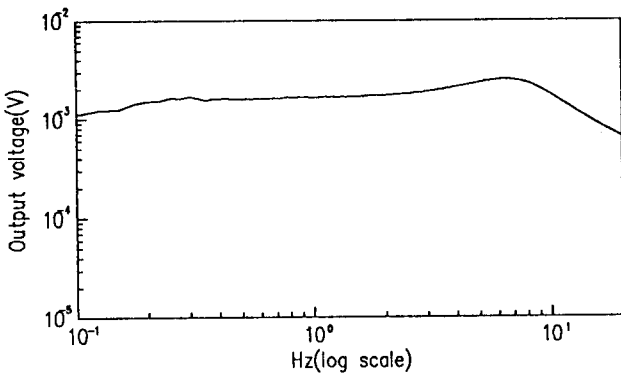


Fig. 12 Vibrating gyro output voltage per 1deg/sec
Oscillation frequency : 19181Hz

Fig. 13 Vibrating gyro output voltage per 1deg/sec with compensation

능의 한계로 파워가 충분하지 못하여 성능을 실험하지는 못하였지만 실험된 영역만큼의 응답성이 기대된다.

5. 결 론

각속도를 측정할 수 있는 사각보형 진동자이로의 기본원리를 압전식과 모드해석을 통해 해석하고 사각보형태의 새로운 진동자이로를 제작하여 각속도를 측정할 수 있음을 보였다. 제안된 진동자이로는 사각보의 한쪽면에만 압전소자가 부착되며, 하나의 압전소자를 이용하여 가진과 측정을 동시에 수행한다. 압전소자를 이용하여 자이로헤드를 사각보의 일차공진주파수로 자력구동 시키고 이를 해석했다. 진동자이로는 두개의 직교되는 공진모드를 이용하므로 헤드의 진동은 외부환경에 민감하여 자이로헤드의 제작시 두방향의 고유진동수를 일치시키는 문제와 자이로헤드의 지지문제는 자이로의 감도, 응답특성과 관련하여 중요한 문제이다. 설계된 진동자이로의 성능을 확인하기 위해 보정장치를 만들고 이를 이용하여 운동방정식을 풀어 해석된 자이로의 동적특성을 실험적으로 확인하였다. 그리고 이를 보상하는 회로를 설계하여 진동자이로의 동적 특성을 보상하고, 최종적으로 0~20Hz 에서 5.5mV/(deg/s)의 감도를 보임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Barnaby, J.B., Chatterton and F.H. Gerring, 1953, "General Teory and Operational Characteristics of the Gyrotron Angular Rate Tachometer," *Aeronaut, Eng. Rev.*, 12 (11), pp. 31~36.
- (2) Gates, 1968, "Vibrating Angular Rate Sensor may Threaten the Gyroscope," *Electronics*, 41 (10), pp. 130~134.
- (3) Watson, "Angular Rate Sensor Apparatus," *Eur. Patent Applic. No 0 084 704*.
- (4) Jan Söderkvist, "A Sensor Element Intended for a Gyro," *Swed. Patent No. SE 8 900 666*(July 30, 1992).
- (5) C.K. Lee, 1990, "Theory of Laminated Piezoelectric Plates for the Design of Distributed Sensor/Actuators. Part1: Governing Equations and Reciprocal Relationships," *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(3), pp. 1144~1158.
- (6) Bailey and J.E. Hubbard, 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *J. Guid. Control*, 8(5), pp. 605~611.
- (7) Robert D. Blevins, 1979, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," *Van Nostrand Reinhold Company*.
- (8) 이정훈, 1993, "압전세라믹을 이용한 사각보형 진동자이로의 설계, 제작 및 평가", *한국과학기술원 석사논문*, pp. 1~50.
- (9) David A. Bell, 1990, "Operational Amplifiers," *Prentice-Hall*.
- (10) 김미경, 지원호, 이종원, 1993, "한쌍의 압전형 구동기를 이용한 구조물의 능동 미소 진동 제어", *한국소음진동공학회지* 제 3 권 제 4 호, pp. 373~382.

