

압전세라믹을 이용한 사각보형 진동자이로의 설계, 제작 및 평가

이정훈, 박규연**, 이종원***

(Design and Analysis of Square Beam Type Piezo-electric Vibrating Gyroscope)

(Jeong-Hoon Lee, Kyoo-Yeon Park, Chong-Won Lee)

1.1 서론

일반적으로 관성계 내의 물체에 대한 동적특성의 파악을 위해서는 속도, 가속도 및 각속도, 각가속도에 대한 정보를 필요로 하며 자이로는 이 중에서 각속도를 측정하는 장치이다. 운동하는 질량에 회전각속도가 인가될 때 발생하는 코리올리힘을 측정하여 회전각속도를 검출하는 개념의 가속도 센서인 진동자이로는 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 압전물질로 만들어진 자이로를 실험하였고 1990년도에 들어서는 진동자이로의 원리를 마이크로 머시닝 기술과 연계시켜서 소형 경량화와 대량생산을 목표로 연구가 일부 진행되고 있다. 현재 제품화되어 실제 응용되고 있는 예로는 무라다사의 삼각프리즘 형태의 자이로, 토킨사의 원통형 자이로 등이 있으며 이러한 자이로는 컴퓨터 화면 안정화 장치에 주로 사용되고 있다.

본 논문에서는 압전소자의 압전, 전왜 방정식으로 출발하여 자이로헤드의 동적 거동을 해석하였다. 진동자이로는 물체의 공진주파수에서의 진동현상을 이용하며, 두방향의 고유진동수를 일치시켜야 하는 등의 설계조건이 있다. 이러한 조건을 만족하도록 사각보 구조를 기본으로 하여 새로운 형태의 자이로헤드를 고안하였다. 자이로헤드의 구동회로를 설계, 해석하고 각속도를 측정할 수 있는 검출회로를 설계하여 설계된 진동자이로의 동적 특성을 확인하고 보정회로를 이용하여 사용 주파수 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. 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 탄성 컴플라이언스(elastic compliance matrix), d_{iq} 는 압전상수(piezo-electric strain/charge matrix), ϵ_{ik}^T 는 유전율(permittivity matrix)행렬을 나타낸다.

2.2 사각보형 진동자이로의 기본원리

Fig.1은 사각보형 진동자이로의 기본원리를 나타낸다. y방향의 압전소자를 통해 보의 일차공진주파수의 교류신호를 가하면 보는 y방향으로 일차공진모드로 움직인다. 이때 보가 x방향 각속도로 회전하면, y방향에 직각이 되는 z방향으로 코리올리힘이 작용한다. 이 힘은 보를 z방향으로 가진하여 일차모드의 운동을 발생시키고 z방향 압전소자에서 이를 측정하면 가해진 각속도에 비례하는 신호를 얻을 수 있다. 발생하는 신호의 크기를 극대화하기 위해서는 가진주파수가 y방향, z방향 각각의 일차공진점이 되어야 하고 두개의 공진주파수는 일치되어야 한다.

압전소자에 의한 가진, 측정의 원리를 이해하고 자이로의 감도(Sensitivity)를 예측하기 위해서 Fig.2의 간략화된 모델을 기본으로 운동방정식을 유도한다.

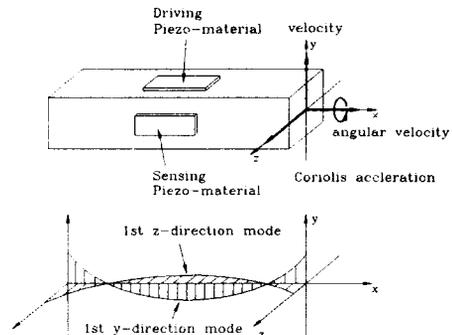


Fig 1 Basic principle of piezoelectric vibration gyro

* 삼성전자주식회사
 ** 삼성전기주식회사
 *** 한국과학기술원 기계공학과, 소음 및 진동제어 연구센터 (NOVIC)

2.2.1 운동방정식의 유도^[6]

압전소자가 보의 표면에 부착되었을 때 가해진 전압에 의한 압전소자의 변형은 보에 굽힘모멘트 T 를 발생시키며 압전방정식을 통해 식(3)의 결과를 얻는다.

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

이다. 식(3)을 Fig.2의 자유-자유상태의 Euler-Bernoulli보에 적용하여 힘평형의 조건으로부터 지배방정식을 유도하면

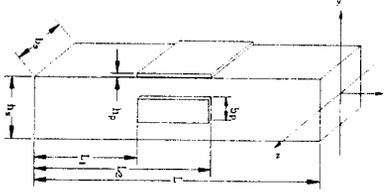


Fig 2 Analysis model

$$\begin{aligned} \text{지배방정식: } \rho_s A_s \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + E_s I_s \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} &= \frac{\partial^2 (cV(x,t))}{\partial x^2} \quad (4) \\ \rho_s A_s \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + E_s I_s \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} &= 2 \dot{v}(x,t) \Omega(x,t) \rho_s A_s \end{aligned}$$

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

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

가 된다. 이때 $v(x,t), w(x,t)$ 는 y 방향, z 방향으로의 변위를 나타낸다.

모드 해석을 하기위해 $v(x,t), w(x,t)$ 공간과 시간의 함수로써 나타내면^[7]

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

$$\phi_n(x) = (\cosh(\lambda_n x/L) + \cos(\lambda_n x/L)) - \sigma_n (\sinh(\lambda_n x/L) + \sin(\lambda_n x/L))$$

여기서 $n=1$ 일때 $\sigma_1=0.982, \lambda_1=4.73$ 이다.

자이로헤드에 사용되는 보의 작은 감쇠를 고려하여 식(4)에서 식(7)의 결과를 얻는다.

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \frac{cV_o \left[\frac{\partial \phi_n(x)}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2}}{\rho_s A_s L} \sin(\omega_n t) \quad (7)$$

$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{\eta}_n(t) + \omega_n^2 \eta_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L \phi_n \dot{v} dx \dot{q}_1(t) \Omega(x,t)$$

$$\omega_n^2 = \frac{E_s I_s \lambda_n^4}{\rho_s A_s L}$$

관심대상인 보의 일차모드만을 고려하고 $\Omega(t) = \Omega_o \cos(\omega_o t)$ 라하면 식(7)에서 z 방향의 운동은 다음과 같이 된다.

$$\ddot{\eta}_1(t) + 2\zeta_{s1} \omega_1 \dot{\eta}_1(t) + \omega_1^2 \eta_1(t) = F_z \cos(\omega_o t) \sin(\omega_1 t) \quad (8)$$

$$F_z = \frac{cV_o \Omega_o \left[\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2} \int_0^L \phi_1^2 dx}{\rho_s A_s L^2 \zeta_{s1} \omega_1}$$

2.2.2 측정식의 원리

압전소자가 변형시 압전효과에 의해 변형량에 비례하는 전하가 발생한다. 이때 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 벡터로 계산된다. 압전식과 식(8)를 이용하면 압전소자에 발생하는 전하량 Q_3 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_3(t) &= -\frac{d_{31} E_p}{1-\nu} (h_s/2) \int_0^L \left(\frac{\partial^2 \phi_1 \eta_1}{\partial x^2} \right) dx dy \\ &= -\frac{d_{31} E_p}{1-\nu} (h_s/2) \left[\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right]_{L_1}^{L_2} b_p \eta_1(t) \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 진동자이로의 동적 특성

모든 센서는 센서자체의 동적 응답특성이 있는데 진동자이로도 각속도의 측정원리상 동적 응답특성이 나타난다. 식(10)에서 입력된 각속도는 z 방향의 진동 $\eta_1(t)$ 에 비례하는 데 $\eta_1(t)$ 의 운동방정식은 식(8)이며 이의 해를 구하기 위해 가진력부분을 식(11)으로 변형하여 정상상태 해를 구하면

$$\ddot{\eta}_1(t) + 2\zeta_{s1} \omega_1 \dot{\eta}_1(t) + \omega_1^2 \eta_1(t) = \frac{F_z}{2} \left[\sin(\omega_1 - \omega_o)t + \sin(\omega_1 + \omega_o)t \right] \quad (11)$$

$$\eta_1(t) = X_1 \sin((\omega_1 - \omega_o)t - \beta_1) + X_2 \sin((\omega_1 + \omega_o)t - \beta_2) \quad (12)$$

$$X_1 = \frac{F_z}{2\sqrt{[\omega_1^2 - (\omega_1 - \omega_o)^2]^2 + [2\zeta_{s1} \omega_1 (\omega_1 - \omega_o)]^2}} \quad (13)$$

$$X_2 = \frac{F_z}{2\sqrt{[\omega_1^2 - (\omega_1 + \omega_o)^2]^2 + [2\zeta_{s1} \omega_1 (\omega_1 + \omega_o)]^2}} \quad (14)$$

$$\beta_1 = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega_1^2 - (\omega_1 - \omega_o)^2}{2\zeta_{s1} \omega_1 (\omega_1 - \omega_o)} \right) + 90^\circ \quad (15)$$

$$\beta_2 = -\tan^{-1} \left(\frac{\omega_1^2 - (\omega_1 + \omega_o)^2}{2\zeta_{s1} \omega_1 (\omega_1 + \omega_o)} \right) + 90^\circ \quad (16)$$

이다. 식(12)를 $\omega_1 \gg \omega_o$ 의 조건을 이용하여 간략화하면 식(17)로 정리되는 데 고유진동수 ω_1 으로 진폭변조된 각속도 신호가 시상수

$1/(\zeta_{s1} \omega_1)$ 을 가지는 일차시스템의 응답특성을 나타낸다.

$$\eta_1(t) = \frac{F_z}{2\omega_1 \sqrt{\omega_1^2 + (\zeta_{s1} \omega_1)^2}} \cos(\omega_o t - \tan^{-1} \left(\frac{\omega_o}{\zeta_{s1} \omega_1} \right)) \sin(\omega_1 t - 90^\circ) \quad (17)$$

Fig.3는 식(10), 식(11)를 표1을 기준으로 각속도의 주파수 ω_o 가 변함에 따른 자이로의 응답특성을 모의실험한 결과이다. 입력되는 각속도의 주파수에 따라서 일차시스템의 성격을 나타내며 절점주파수(Cutoff Frequency) f_c 는 $\zeta_{s1} \omega_1 / (2\pi) = 3.3$ Hz로 계산된다.

식(11)에서 가진력의 주파수가 ω_1 과 일치하지 않으면 자이로의 응답특성은 일차특성에서 벗어난다. 가진력의 주파수와 ω_1 의 차이가 5 Hz, 10 Hz 일때 Fig.3에 그 응답특성이 나타나 있다.

Table.1 Material properties for simulation of vibratin gyro's dynamic characteristics

기호	특성	값	단위
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 of sensing piezo	2.15×10^{-3}	m
h_p	Thickness of piezo	0.120×10^{-3}	m
ν	Poisson's ratio of piezo	0.3	
d_{11}	Piezoelectric strain constants	48×10^{-12}	C/Newton
C_p	Capacitance of piezo	0.9×10^{-9}	Farad
V_a	Magnitude of actuating voltage	1	Volt
Ω	Magnitude of angular velocity	1	deg/s

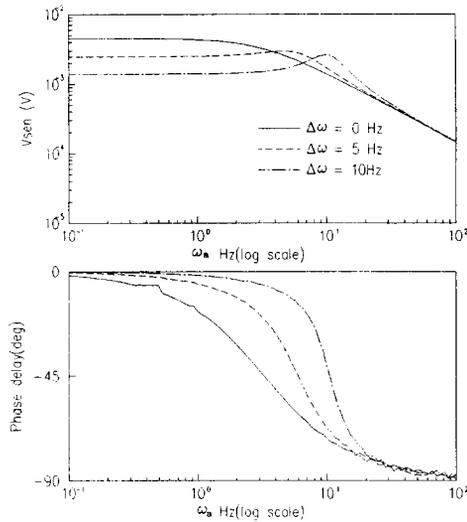


Fig.3 Dynamic characteristics of vibrating gyro

3. 진동자이로의 설계조건, 구성 및 측정원리

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.4에서 볼 수 있듯이 보의 y방향에 3개의 압전소자를 부착하여 양쪽의 두개 a, c는 가진과 측정용으로 사용하고, 가운데의 압전소자 b는 보의 가진과 동기검파를 위한 기준신호로써 이용한다. 보의 y방향진동에 의해 압전소자 b에 발생하는 신호는 위상이 조절되고 연산증폭기에 의해서 증폭되어 양쪽 a, c압전소자를 가진하게 된다. 이렇게 하여 별도의 가진장치 없이 보를 y방향의 일차모드로 가진할 수 있다.

이때 보에 각속도가 존재하면 z방향의 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 b압전소자에서 발생하는 신호를 이용하여 동기검파시키고 저대역 통과필터를 거치게 하면 입력된 각속도에 비례하는 신호를 얻는다.

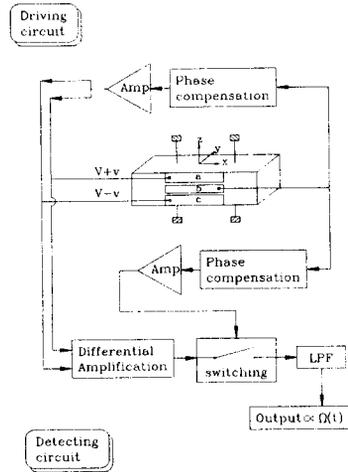


Fig.4 Block diagram of vibration gyro

3.1 센서헤드와 지지부의 설계

압전자이로의 헤드 부분은 자이로의 가장 중요한 부분으로 전기적인 구동력을 기계적인 진동으로 변환시키고 외부 회전 각속도에 의해 발생된 코리올리힘을 전기적 신호로 변환시키는 역할을 한다. 자이로헤드의 재질은 황동을 선택하였으며 측정효율을 높이기위해 두방향의 공진점을 일치시켜야한다. 자이로헤드의 구동주파수는 소음문제를 없애기 위해서 가청영역의 주파수보다 높아야한다.

헤드의 진동에 영향을 주지않고 헤드를 고정할 수 있는 방법은 신호의 안정성 측면에서 무척 중요한 역할을 하게 된다. 실험에서는 Fig.7에서처럼 사각보모양 헤드의 일차진동모드절점에 가는 구멍을 뚫어 철선으로 지지하였다.

3.2 보 구동부의 회로설계

각속도에 비례하는 코리올리힘을 발생시키기 위해서는 y방향의 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"^[8]를 이용한 것이다. Fig.5에서 피드백 된 신호를 연산증폭기에서 증폭시켜 출력하고 이 신호가 다시 피드백 되어 증폭되는 순환과정을 거쳐 연산증폭기의 출력전압은 포화되고 리미트 사이클(Limit cycle)을 형성하게 된다.^[9]

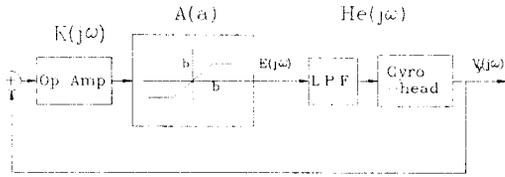


Fig 5 Block diagram of self-oscillation circuit with Op. Amp. saturation

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 싸이클을 예상할 수 있다. Fig 5에서

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

이므로

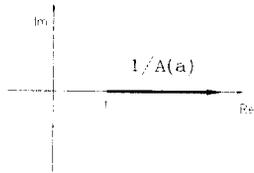
$$(1 - He(j\omega)A(a)K(j\omega))V_y = 0 \quad (20)$$

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

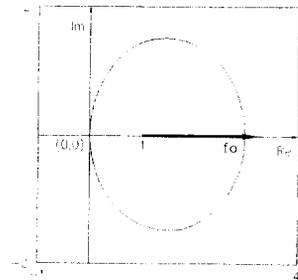
$$He(j\omega)K(j\omega) = \frac{1}{A(a)} \quad (21)$$

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

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



a) Describing function of system



b) Nyquist plots of open loop transfer function

Fig 6 Existence of limit cycle

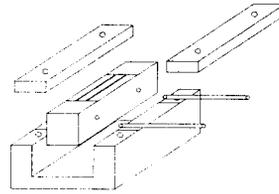
이며, Fig 6(a)와 같다. 따라서 본계에서 리미트 싸이클이 발생한다면

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

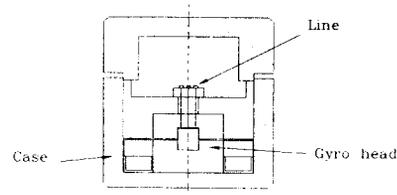
을 만족하는 해가 존재해야 한다. 계의 Nyquist선도인 Fig 6(b)가 Fig 6(a)의 그래프와 공진주파수 ω_1 에서 만나는 것으로 보아 해가 존재함을 확인할 수 있다. 이상에서의 리미트 싸이클 발생조건을 이용한 구동회로를 설계함으로써 별도의 외부 가진장치 없이 고유진동수에서 자이로헤드를 발진시킬 수 있는 장점이 있다.

4. 성능 실험

3장에서 고려된 센서헤드, 지지방법을 기본으로 자이로를 설계하고 Fig 7에서와 같이 조립 케이스에 넣는다. 고정축을 중심으로 회전하는 외팔보형의 진자의 각변위를 각변위계(Potentiometer)로 측정하고 진자에 진동자이로를 설치하여 성능을 평가한다.



(a) Assembly of gyrohead



(b) Assembly of gyro case

Fig 7 Configuration of vibrating gyro

4.1 진동자이로의 동적 특성 실험

Fig 8은 진동자이로의 주파수 응답선도이며, 자이로의 동적 특성인 일차시스템의 성격을 확인할 수 있다. 이를 곡선근사화하고 절점주파수를 구하면

$$\frac{17.97 \times 10^{-3}}{s + 3.06}, \quad f_c = 3.06 \text{ Hz} \quad (24)$$

이다. Fig 9는 발진주파수가 19181 Hz 일때 진동자이로의 응답특성이며 Fig 8의 발진주파수 19186 Hz 와 5 Hz 차이가 있다. 2.3절의 모의실험을 통해서 얻은 결과와 같은 경향을 보임을 알 수 있다.

4.2 보상기의 설계

설계된 진동자이로는 시스템의 특성상 일차시스템의 성격을 가진다. 이를 보상하고 사용주파수 영역을 증가시키기 위해 회로적인 보상방법을 이용하였다. 전상보상기를 포함한 진동자이로의 전체 전달함수는 식(25)이다.

$$\left(\frac{17.97 \times 10^{-3}}{s + 3.06} \right) \left(\frac{-440(s + 3.29)}{s + 1447} \right) \cong \frac{-7.9064}{s + 1447}, \quad f_c = 1447 \text{ Hz} \quad (25)$$

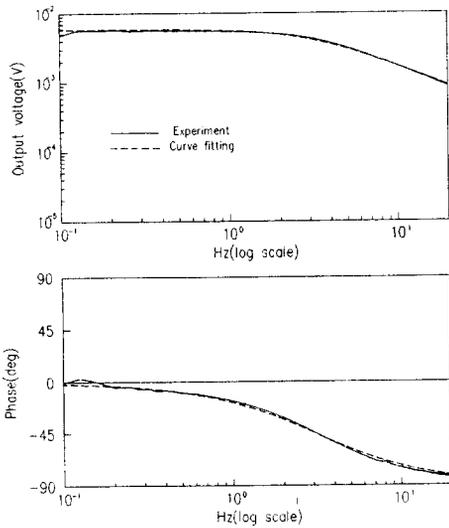


Fig.8 Vibrating gyro output voltage per 1deg/sec
Oscillation frequency : 19186Hz

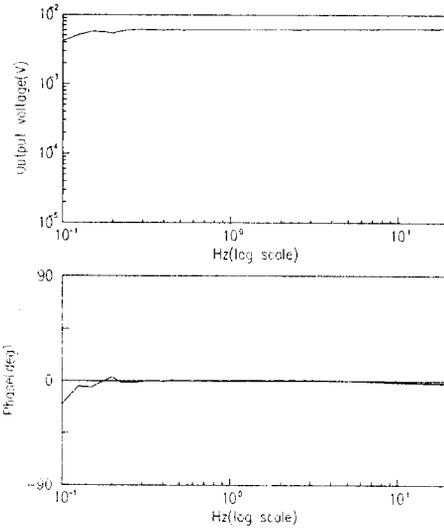


Fig.10 Vibrating gyro output voltage per 1 deg/sec
with compensation

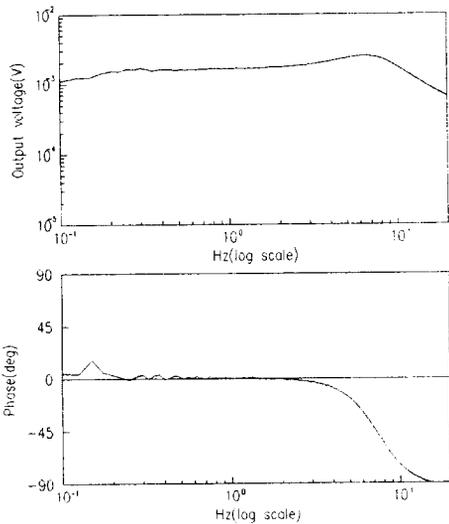


Fig.9 Vibrating gyro output voltage per 1deg/sec
Oscillation frequency : 19181Hz

전체전달함수의 절점주파수가 3.06 Hz 에서 1447 Hz 로 바뀌었음을 알 수 있다. 보상회로를 거친 자이로의 응답의 결과는 Fig.10이며 주파수에 따라 크기가 일정하고 위상 지연이 없어 동적특성이 보상되었고 그 감도는 6.09 mV/(deg/s) 이다. 0.1 Hz 미만의 저주파수와 20 Hz 이상의 고주파수 영역에서는 가진기의 성능의 한계로 파워가 충분하지 못하여 성능을 실험하지는 못하였지만 실험된 영역만큼의 응답성이 기대된다.

5. 결론

각속도를 측정할 수 있는 사각보형 진동자이로의 기본원리를 압전식과 모드해석을 통해 해석하고 제작시 각 설계요구조건을 제시했다. 진동자이로는 두개의 직교되는 공진모드를 이용하므로 자이로헤드의 제작시 두방향의 고유진동수를 일치시키는 문제와

자이로헤드의 지지문제는 자이로의 감도, 응답특성과 관련하여 중요한 문제이다. 하나의 압전소자를 이용하여 가진과 측정을 동시에 하는 새로운 형태의 사각보형 진동자이로를 제안하고 제작된 자이로헤드에 대해 압전소자를 이용, 보의 일차공진주파수로 자러구동 시키고 이를 해석했다. 동기검파를 통하여 각속도의 크기와 방향을 측정할 수 있는 회로를 제작, 구성된 자이로헤드에 연결하여 각속도를 측정할 수 있었다. 설계된 진동자이로의 성능을 확인하기 위해 보정장치를 만들고 이를 이용하여 운동방정식을 풀어 해석된 자이로의 동적특성을 실험적으로 확인하였다. 그리고 이를 보상하는 회로를 설계하여 진동자이로의 동적 특성을 보상하였다.

참고문헌

1. R.E. Barnaby, J.B. Chatterton and F.H. Gerring, "General Theory and Operational Characteristics of the Gyrotron Angular Rate Tachometer," Aeronaut. Eng. Rev., 12 (11), pp. 31-36, 1953
2. W.D. Gates, "Vibrating Angular Rate Sensor may Threaten the Gyroscope," Electronics, 41 (10), pp. 130-134, 1968.
3. W.S. 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, "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 , 1990.
6. T. Bailey and J. E. Hubbard, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," J. Guid. Control, 8 (5), pp. 605-611, 1985.
7. Robert D. Blevins, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
8. David A. Bell, "Operational Amplifiers," Prentice-Hall, 1990.
9. 김미경, 지원호, 이종원, "한쌍의 압전형 구동기를 이용한 구조물의 능동 미소 진동 제어," 한국소음진동공학회지 제3권 제4호, pp. 373-382, 1993.