

## 음차자이로의 동적특성 연구

### Dynamic Analysis of Tuning-fork Gyroscope

곽 문 규<sup>†</sup> · 송 명 호<sup>\*</sup>

Moon K. Kwak and Myung H. Song

(2002년 5월 27일 접수 : 2003년 1월 20일 심사완료)

**Key Words** : Gyroscope(자이로스코프), Dynamic Analysis(동적해석)

#### ABSTRACT

A rate gyroscope has been used popularly to measure the angular motion of a given vehicle using a symmetric rotor spinning rapidly about its symmetry axis. Since the rapid rotation is required in this type of gyroscope, the motor has been used to make the rotor spin, so that it results in a heavy configuration. The tuning-fork gyroscope has been developed to avoid this problem, which utilizes a Coriolis coupling term and vibration about one axis. Due to the Coriolis effect, the vibration of one axis is transferred to other axis when the angular motion along the vibrating axis is given to the system. The concept of a tuning-fork gyroscope was recently realized using MEMS techniques. However, the dynamic characteristics of the tuning-fork gyroscope has not been discussed in detail. In this study, we derived the equations of motion for the tuning-fork type gyroscope using the energy approach and investigated the dynamic characteristics by means of numerical analysis.

#### 1. 서 론

항로 및 방향을 계측하는데 사용되어온 주 장비는 진공상태에서 전기로 가동되는 레이트 자이로스코프(rate gyroscope)이다. 이 기술은 18세기에 처음 개발되었으며 진공 자이로는 1930년대에 확산되어 사용되기 시작했다.<sup>(1)</sup> 이 장비는 고속 회전하고 있는 축에 대하여 수직인 축에 짐발(Gymbal)과 비틀 스프링을 설치하여 각속도에 따라 일정 회전각이 나오도록 만든 계측 장비이다. 자이로의 동적특성에 대해서는 참고문헌 (2)에서 자세히 다루고 있다. 레이트 자이로는 기계-전기가 결합된 시스템으로 이루어지며 고속 회전을 필요로 하기 때문에 마모와 파손이 발생할 수 있고 기계적 진동에 약하다. 따라서 정기적인 유지

보수가 필요하다.

최근에 정밀기계 제작 및 전자제어 기술의 발달에 힘입어 초소형 정밀 전기기기(電機機器 : MEMS)의 개발과 응용에 대한 관심이 높아지고 있다. Barbour 등,<sup>(3)</sup> Buffin,<sup>(4)</sup> Schoess 등<sup>(5)</sup>은 관성항법장치의 MEMS 기술추이에 대해 자세히 다루고 있다. MEMS 기술을 이용해 제작된 초소형 정밀 자이로 센서는 제어 위한 정밀성을 보장하면서도 부착이 용이하여 그 실용성이 매우 높다고 말할 수 있다. 현재 기계식 자이로스코프 센서외에 링레이저자이로, 광섬유 자이로, 실리콘 진동구조 자이로, 압전형 자이로가 주로 사용되고 있다.

압전형 자이로는 압전작동기를 이용하여 전기적으로 진동을 발생시키고 코리올리스 효과를 이용하여 회전각속도를 압전 감지기로 검출한다. 압전소자를 이용하고 있어 진동을 가하면 잡음이 발생하여 정밀도를 저하시킨다. 안정도와 정밀도는 다른 자이로스코프 센서에 비해 다소 떨어지며 구조적으로 취약하지만, 소형, 경량으로 기계적 마모가 없어 수명이 길고 저

<sup>†</sup> 책임저자, 정희원, 동국대학교 기계공학과

E-mail : kwakm@dgu.ac.k

Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379

<sup>\*</sup> 동국대학교 기계공학과

가로 대량 제작할 수 있다는 장점으로 인해 압전 음차 자이로센서의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 현재까지 개발된 압전형 음차 자이로에는 음차(tuning-fork),<sup>(6)</sup> 보(beam),<sup>(7)</sup> 삼지 음차(trident-type tuning fork),<sup>(8-10)</sup> H,<sup>(11)</sup> 평행보(parallel-beam),<sup>(12)</sup> 판(Plate),<sup>(13)</sup> 링(ring)<sup>(14)</sup> 형태 등이 있으며 진동자이로의 기능을 향상시킨 두축자이로(two-axis gyro)<sup>(15)</sup>도 있다.

그러나, 이상의 연구들은 단순히 코리올리스 효과를 이용할 수 있는 특정 형태의 센서에 대한 제작과 실험 결과에 주력하였다. 반면, 압전형 자이로의 동적 특성을 이론적으로 해석한 논문은 많지 않은데 Ulitko<sup>(16)</sup>가 포크 형태의 자이로 센서에 대한 수학적 인 모델을 유도하였고, Kudo등,<sup>(17)</sup> Kagawa등<sup>(18)</sup>은 유한요소법을 이용한 모델링 방법을 토의하였다.

회전 거동을 하는 보에 대한 대표적인 연구 결과로는 Kane등,<sup>(19)</sup> Yoo,<sup>(20)</sup> 박문규 등<sup>(21)</sup>의 연구가 있었으나 그 연구 결과들은 압전형 자이로에 적용할 수 없다. 이는 회전축이 기준축에 대해 직교하는 경우를 다루고 있지만, 압전형 자이로는 기준축에 대하여 회전이 이루어지는 경우이기 때문이다.

본 연구에서는 음차자이로의 동적 모델을 허용함수와 라그랑지방정식을 이용해 유도하고 수치실험을 통해 코리올리스 효과가 보구조물의 진동에 미치는 영향과 다른 동적 효과가 주는 영향을 조사하였다. 또한 음차 자이로를 이용한 각속도 계측 방법을 수치계산 결과를 바탕으로 논하였다. 본 연구에서 제시한 모델을 살펴보면 압전형 음차 자이로의 물리적 원리를 쉽게 이해할 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 운동방정식의 유도

압전형 자이로는 회전을 이용하는 기계적인 자이로와는 달리 압전체에 의한 진동을 이용하고 있다. 기본적인 형태는 Fig. 1(a)의 음차형 자이로의 일종인 왓슨형 자이로센서와 Fig. 1(b)의 주상형 자이로의 일종인 GE형 자이로로 구분할 수 있다.

본 연구를 위해 음차는 직사각형 균일보로서 등방성 재료로 이루어져 있다고 가정하였다. Fig. 2는  $x$ 축에 대해  $\theta$ 의 각속도로 회전하고 있는 강체의 중심축으로부터  $r$ 만큼 떨어진 지점에 고정되어 있는 균일보를 보여주고 있다. 균일보의  $y, z$ 축 방향의 변

위를  $u_y, u_z$ 라고 할 경우 보의 임의의 위치에서의 변위벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{R}_p = x\vec{i} + [u_y \cos \theta - (r + u_z) \sin \theta]\vec{j} + [u_y \cos \theta + (r + u_z) \cos \theta]\vec{k} \quad (1)$$

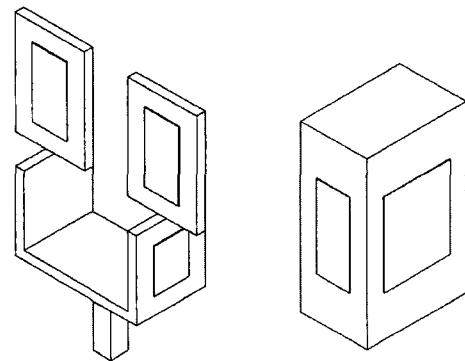
여기서  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 는 각방향 단위벡터이며  $\theta$ 는  $x$ 축 방향 회전각이다.

따라서, 운동에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$T_b = \frac{1}{2} m \int_0^L \vec{R}_p \cdot \vec{R}_p dx \quad (2)$$

따라서 식 (1)을 시간에 대해 미분하여 식 (2)에 대입하면 운동에너지를 구할 수 있으며, 변분을 통하여 운동방정식은 상미분방정식과 편미분방정식이 혼합된 형태로 나타난다.<sup>(22)</sup>

본 연구에서는 각각의 변위를 허용함수(admissible function)와 일반 변위의 곱으로 표현하는 가정모드 방법(assumed mode method)를 이용하였다.<sup>(22)</sup> 따라서 다음과 같이 가정한다.



(a) Watson type (b) GE type  
Fig. 1 Typical piezoelectric gyro sensors

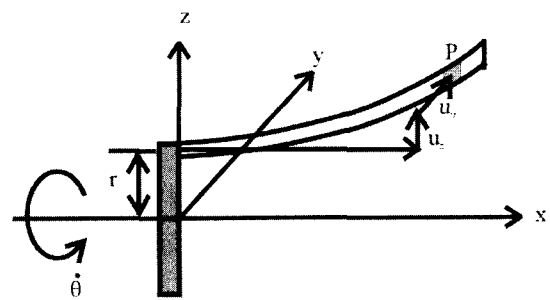


Fig. 2 Schematic of tuning-fork gyro

$$u_y = \Phi_y q_y, \quad u_z = \Phi_z q_z \quad (3a,b)$$

여기서  $\Phi_y = [\Phi_{y1} \ \Phi_{y2} \ \dots \ \Phi_{ym}]$ 의  $1 \times n$  행렬이며,  $\Phi_z = [\Phi_{z1} \ \Phi_{z2} \ \dots \ \Phi_{zm}]$ 의  $1 \times m$  행렬이다. 각 벡터 요소는  $q_y = [q_{y1} \ q_{y2} \ \dots \ q_{ym}]^T$ ,  $q_z = [q_{z1} \ q_{z2} \ \dots \ q_{zm}]^T$ 의  $n \times 1$ ,  $m \times 1$  벡터이다.

이를 이용하면 운동에너지는 다음과 같은 형태로 유도된다.

$$\begin{aligned} T_b = & \frac{1}{2} q_y^T M_y \dot{q}_y + \frac{1}{2} q_z^T M_z \dot{q}_z + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 q_y^T M_y q_y \\ & + \frac{1}{2} J_b \dot{\theta}^2 + r \dot{\theta}^2 \bar{\Phi}_z q_z + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 q_z^T M_z q_z \\ & + \dot{\theta} q_y^T M_{yz} q_z - r \dot{\theta} \bar{\Phi}_y q_y - \dot{\theta} q_z^T M_{yz}^T q_y \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} M_y = & \bar{m} \int_0^L \Phi_y^T \Phi_y dx, \quad M_z = \bar{m} \int_0^L \Phi_z^T \Phi_z dx \\ \bar{\Phi}_y = & \bar{m} \int_0^L \Phi_y dx, \quad \bar{\Phi}_z = \bar{m} \int_0^L \Phi_z dx \\ J_b = & \frac{1}{2} m r^2, \quad M_{yz} = \bar{m} \int_0^L \Phi_y^T \Phi_z dx \end{aligned}$$

이며  $\bar{m}$ 과  $L$ 은 보의 단위길이당 질량과 길이를 나타낸다.

한편, 탄성에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$V_b = \frac{1}{2} \int_0^L \left[ EI_y \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \right) + EI_z \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} \right) \right] dx \quad (5)$$

여기서  $EI_y$ ,  $EI_z$ 는 각각  $y$ 축,  $z$ 축에 대한 굽힘강성을 나타낸다.

식 (5)에 식 (3)을 대입하면 탄성에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$V_b = \frac{1}{2} q_y^T K_y q_y + \frac{1}{2} q_z^T K_z q_z \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} K_y = & EI_y \int_0^L \left( \frac{d^2 \Phi_y}{dx^2} \right)^T \left( \frac{d^2 \Phi_y}{dx^2} \right) dx \\ K_z = & EI_z \int_0^L \left( \frac{d^2 \Phi_z}{dx^2} \right)^T \left( \frac{d^2 \Phi_z}{dx^2} \right) dx \end{aligned}$$

기진력,  $F_y(t)$ 가  $\xi$ 지점에  $y$ 방향으로 작용하는 경우에 가상일은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta W = \delta q_y^T \Phi_y(\xi)^T F_y(t) \quad (7)$$

운동에너지, 탄성에너지와 가상일 표현식을 라그랑지 방정식에 대입하면 다음과 같은 운동방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_y & 0 \\ 0 & M_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_y \\ \ddot{q}_z \end{Bmatrix} + 2\dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 & -M_{yz} \\ M_{yz}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} K_y - \dot{\theta}^2 M_y & -\dot{\theta} M_{yz} \\ \dot{\theta} M_{yz}^T & K_z - \dot{\theta}^2 M_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_y \\ q_z \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} r \dot{\theta} \bar{\Phi}_y^T \\ r \dot{\theta}^2 \bar{\Phi}_z^T \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Phi_y^T(\xi) \\ 0 \end{Bmatrix} F_y(t) \end{aligned} \quad (8)$$

균일 외팔보의 고유함수를 허용함수로 사용하면  $\Phi_y$ ,  $\Phi_z$ 를 구성하고 있는 각각의 고유함수 벡터는 다음과 같다.

$$\phi_{zi} = \phi_{zi} = [\cosh \lambda_i x/L - \cos \lambda_i x/L - \sigma_i (\sinh \lambda_i x/L - \sin \lambda_i x/L)] / \sqrt{m} \quad (9)$$

여기서  $\lambda_i = 1.875, 4.694, 7.855, 10.996, 14.137, \dots$ 이고  $\sigma_i = 0.734, 1.018, 0.999, 1.000, 1.000, \dots$ 이다. 이를 이용하면 식 (8)의 계수행렬들이 좀더 간단하게 다음과 같이 표현된다.

$$M_y = M_z = M_{yz} = I \quad (10)$$

$$K_y = \Lambda_y = \text{diag}(\omega_y^2), \quad K_z = \Lambda_z = \text{diag}(\omega_z^2) \quad (11)$$

$$(\bar{\Phi}_y)_i = (\bar{\Phi}_z)_i = 2\sqrt{m} \sigma_i / \lambda_i \quad (12)$$

여기서  $I$ 는 identity 행렬이며

$$(\omega_y)_i = EI \lambda_i^4 / mL^3, \quad (\omega_z)_i = EI \lambda_i^4 / mL^3$$

식 (10)과 (11)을 이용하면, 운동방정식 (8)이 다음과 같이 간략하게 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_y \\ \ddot{q}_z \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\xi \Omega_y & -2\theta I \\ 2\theta I & 2\xi \Omega_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \Lambda_y - \dot{\theta}^2 I & -\dot{\theta} I \\ \dot{\theta} I & \Lambda_z - \dot{\theta}^2 I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_y \\ q_z \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} r \dot{\theta} \bar{\Phi}_y^T \\ r \dot{\theta}^2 \bar{\Phi}_z^T \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Phi_y^T(\xi) \\ 0 \end{Bmatrix} F_y(t) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $\xi$ 는 점성감쇠계수인데 본 연구에서는 0.01로 가정하였다. 공진시의 진폭을 제한하고 자유진동시 진동의 소멸을 가져오게 된다. 또한,  $\Omega_y = \text{diag}(\omega_y)$ ,

$\Omega_z = \text{diag}(\omega_z)$ 이다. 이 식을 살펴보면 두 번째 계수 행렬이 코리올리스 영향과 감쇠영향을 반영하고 있으며 세 번째 계수 행렬에는 각속도에 의한 강성저하 효과와 각가속도에 의한 circulatory 효과가 포함되어 있음을 알 수 있다. 항등부호 오른쪽을 살펴보면 음차가 붙어있는 강체의 각가속도와 각속도에 의해 기진력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 만일  $r$ 이 0이라면 강체의 기진력으로 작용할 수 있는 항은 없어진다. 앞에서 언급한 연구 결과들에는 이와 같은 동적 영향이 시스템의 응답에 어떻게 기여하는지에 대한 논의가 전혀 없이 단지 두 번째 계수행렬인 코리올리스 효과만 음차 자이로 설계 인자로 고려되었다. 실제의 음차자이로에 있어  $A_y, A_z$ , 즉,  $y, z$ 축 방향 고유진동수가 강체의 각속도보다 훨씬 높기 때문에 다른 요소들이 세 번째 계수 행렬의 특성을 크게 변화시킬 수는 없다. 또한 회전 중심으로부터 벗어난 정도를 나타내는  $r$  값 또한 크지 않기 때문에 회전운동으로 발생하는 기진력 또한 크지 않을 것으로 예상된다. 코리올리스 영향은  $y$ 축과  $z$ 축간의 진동 연성으로 간주할 수 있다. 따라서  $y$ 축 방향으로 가진하고 회전운동이 있을 경우 두 번째 코리올리스 영향 행렬에 의해  $z$ 축 방향으로 진동이 발생하게 된다. 그리고 이 진동 응답은 각속도에 비례한 형태로 나타나게 된다. 이 것이 음차자이로의 구동 원리이다. 다음 수치 계산을 통해 그 영향을 좀더 자세하게 살펴보자.

### 3. 수치해석

유도된 운동방정식을 이용하여 음차자이로의 동적 특성을 수치 해석을 통해 조사하였다. 다음 값들은 기타의 조율에 사용되고 있는 음차로부터 추출되었다.

$$\begin{aligned} \rho &= 7850 \text{ kg/m}^3, \quad r = 6.3 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad E = 200 \text{ GPa}, \\ L &= 81.6 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad A = 1.728 \times 10^{-5} \text{ m}^2, \\ I_y &= 3.31776 \times 10^{-11} \text{ m}^4, \quad I_z = 1.88624 \times 10^{-11} \text{ m}^4 \\ \xi &= L \end{aligned}$$

그리고 음차의 끝단에  $y$ 축 방향의 첫 번째 고유진동수와 동일한 주파수로 가진 시키는 것으로 다음과 같이 가정하였다.

$$F_y(t) = 1000 \sin(2769.89t) \quad (14)$$

이렇게 될 경우  $y$ 축 방향으로 공진이 된다. 실제로 음차자이로는  $y$ 축 방향의 압전작동기를 구동시켜  $y$ 축 방향을 공진시킨 상태에서 코리올리스 영향으로 나타나는  $z$ 축 방향의 응답으로부터 각속도를 추출한다. 공진을 시키는 이유는 그렇게 해야 연성 효과를 극대화할 수 있기 때문이다. 실제로는 공진상태에서 구동해야 하기 때문에 이 점이 음차자이로의 단점이기도 하다. 다른 영향을 배제하고 코리올리스 영향만을 고려한다면 회전이 없는 경우 당연히  $y$ 축과  $z$ 축간에 연성이 없기 때문에  $z$ 축 방향에는 진동이 나타나지 않는다. 식 (14)와 같은 기진력으로 공진 시킨 다음 음차 기저부, 즉 강체를 Fig. 3과 같은 각속도로 회전한다고 가정해보자.

Fig. 3으로부터 알 수 있듯이 이 회전운동은 강체가 한 방향으로 회전하다가 멈춘 다음 역회전하는 것으로 간주할 수 있다.

수치모델에 대해서 먼저  $y$ 축 방향으로 식 (14)와 같은 기진력을 가해 얼마동안 공진 시킨 후 강체를 Fig. 3과 같이 회전시킬 경우의 응답을 계산하였다. Figs. 4와 5는 각각  $y$ 방향과  $z$ 방향 끝단의 시간 변위를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이  $y$ 축 방향 변위는 시간이 지나가면서 공진상태로 접어드는 것을 알 수 있으며,  $z$ 축 방향 변위는 0.3초에 진동이 시작되어 0.4초가 약간 지나서 종료되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 보이는  $z$ 축 방향 응답을 Fig. 3과 비교해 보면 Fig. 3의 각속도가 Fig. 4의 주파수로 변조되어 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 5는 음차자이로의  $y$ 방향 고유진동수를 가지는 조화함수와

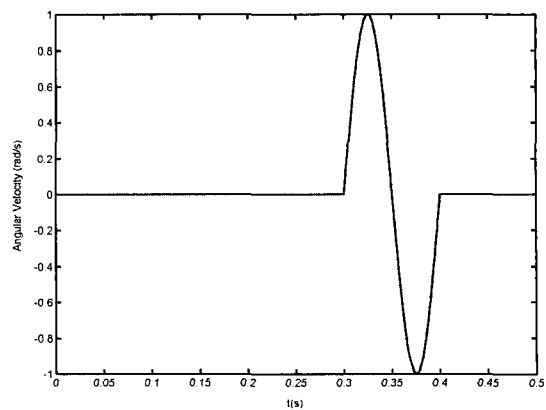


Fig. 3 Time history of angular velocity

음차에 가해진 각속도 신호가 서로 곱해진 형태, 즉 변조된 형태로 나타난다. 이런 경우를 진폭변조

(amplitude modulation)라고 부르는데, 라디오 AM 송신이 이에 해당한다. 라디오 진폭변조의 경우 고주파의 반송신호(carrier signal)의 진폭을 음성신호의 강약에 따라 변화시킨다. 수신기에서는 변조 반송파를 수신한다음, 반송파 성분을 제어해가며 음성신호를 얻게 되는데 이를 복조(demodulation)라고 부른다. 라디오 신호의 변조와 복조는 전자 회로를 이용해 이루어진다. 음차 자이로의 원리도 이와 동일하다고 말할 수 있다. 한 방향으로 가진된 고주파의 진동신호가 코리올리스 영향에 의해 다른 방향에 진동이 발생한다. 이 진동 신호는 음차에 가해진 각속도 신호에 의해 변조된 신호이며 이를 복조하면 원래의 각속도 신호를 얻을 수 있다.

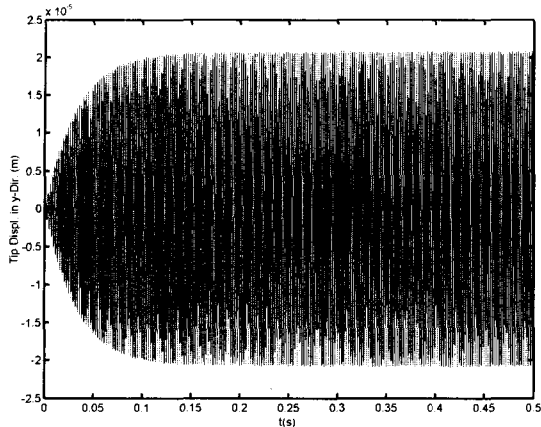


Fig. 4 Time history of tip displacement in y-direction

본 연구에서는 matlab 프로그램에서 제공하는 복조 함수인 demod를 사용하여 Fig. 5의 신호를 복조하였다. 그 결과가 Fig. 6과 같다. 보조된 응답에 다시 2차의 저주파 통과 필터(코너 주파수 50 Hz, 필터감쇠 계수 30%)를 적용한 결과가 Fig. 7이다.

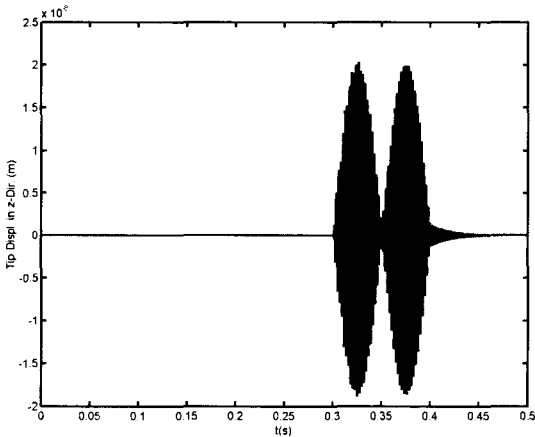


Fig. 5 Time history of tip displacement in z-direction

계측된 신호를 복조하고 필터링한 각속도 응답과 원래 음차에 가해진 Fig. 3의 각속도를 비교해보기 위해 다음과 같은 RMS 오차 식을 적용하였다.

$$error = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega}_i)^2} \quad (15)$$

여기서  $\omega_i$ 와  $\bar{\omega}_i$ 는 각각 계측된 각속도 값과 원래의 각속도 값을 나타낸다. 그리고  $N$ 은 계측된 전체 데이터 개수를 나타낸다. Fig. 7의 응답을 Fig. 3의 응답과 비교해본 결과, RMS 오차가  $6.1514 \times 10^{-4}$  rad/s로 나타났다.

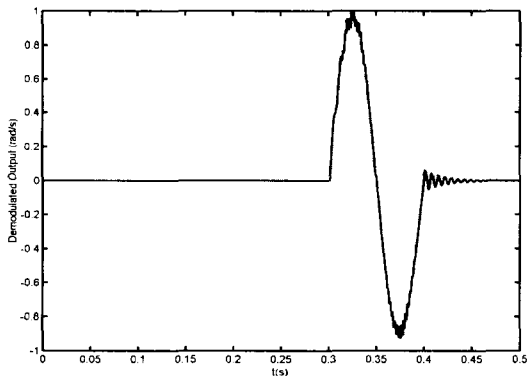


Fig. 6 Demodulated output

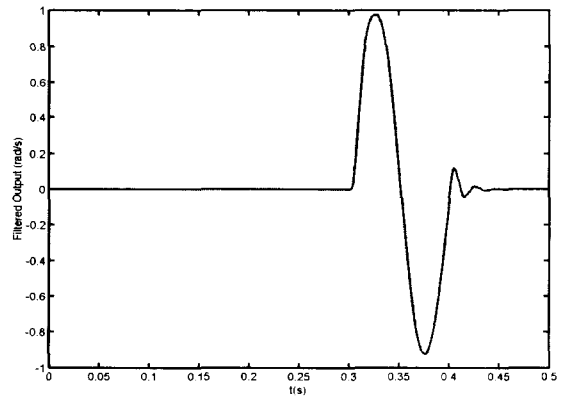


Fig. 7 Filtered output

앞에서 언급한 것처럼 대부분의 음차 자이로에 관한 연구들은 식 (13)의 두 번째 계수 행렬의 코리올리스 영향만을 고려하였다. 두 번째 계수 행렬만을 고려하고 동일한 수치계산을 수행한 결과 Fig. 7의 결과와 거의 동일한 결과를 얻었는데 RMS 오차는  $6.2101 \times 10^{-4}$  rad/s로 오히려 모든 항을 고려한 경우보다 오차가 약간 커지는 것을 알 수 있다. 이로부터 운동방정식에 포함된 각가속도항, 편심위치가 진동 응답에 크게 영향을 주지 않으며 코리올리스 영향이 지배적임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

압전형 음차 자이로는 한 방향으로 진동하는 구조물에 길이 방향으로 회전이 가해지는 경우 코리올리스 효과에 의해 다른 방향에 진동이 유발되는 성질을 이용한다. 현재까지 발표된 연구 결과는 대부분 코리올리스 효과를 극대화할 수 있는 다양한 형태의 자이로 개발에 치중되어 있으며 동적 모델링에 대한 연구는 거의 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 음차 자이로의 동적 특성 해석을 위해 동적 모델을 유도하였다. 운동방정식을 분석해 본 결과 음차 자이로의 동특성은 음차 자이로에 가해지는 각속도, 각가속도, 그리고 중심축으로부터의 거리에 의해 결정되며, 그 중 각속도에 의한 연성 영향, 즉 코리올리스 연성 행렬의 영향이 동적 응답을 지배하게 됨을 확인할 수 있었다. 음차 자이로에 관한 연구에서는 이 영향만을 다루었지만 본 연구에서는 그 외에도 다른 요소들이 동적 응답에 영향을 주고 있음을 유도된 운동방정식을 통해 규명하였다.

동적 특성을 조사하기 위해 수치 모델을 이용하여 동적 응답을 계산하였다. 수치계산에서 음차의  $y$  방향을 가진하여 공진시키고 음차 자이로를 회전하는 경우의  $z$  방향 응답을 계산하였다.  $z$  방향 응답은 각속도 진폭의 외곽 신호가 증폭되어 나타나는 형태를 보이며 고주파의 가진 신호와 저주파의 입력 각속도 신호가 변조된 형태의 신호로 구성됨을 알 수 있다. 이 신호를 복조하면 음차 자이로에 가해진 회전각속도를 역추출할 수 있다. 이 것이 음차 자이로의 기본 작동 원리이다.

본 연구에서는 matlab의 복조함수와 저주파수 통과

필터를 이용해 회전각속도를 재구성해 보았다. 원래의 회전각속도와 비교해본 결과 재구성한 회전각속도가 원래의 회전각속도에 상당히 부합됨을 알 수 있었다. 또한 코리올리스 영향만을 고려한 운동방정식을 이용해 얻은 신호를 같은 과정을 거쳐 복조하였는데 그 응답이 원래의 운동방정식을 사용해 얻은 결과와 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 고려한 음차 자이로의 경우에는 운동방정식에 포함된 각가속도항, 편심위치가 진동 응답에 크게 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 동국대학교 논문게재연구비 지원사업으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Greene, M., 1996, "A Solid State Attitude Heading Reference System for General Aviation," Proceedings of IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 413~417.
- (2) Meirovitch, L., 1970, Methods of Analytical Dynamics, McGraw-Hill.
- (3) Barbour, N. and Schmidt, G., 2001, "Inertial Sensor Technology Trends," IEEE Sensors Journal, Vol. 1, No.4, pp. 332~339.
- (4) Ruffin, P. B., 2000, "Progress in the Development of Gyroscopes for Use in Tactical Weapon Systems," Proc. of SPIE Vol. 3990, Smart Electronics and MEMS, pp. 2~12.
- (5) Schoess, J. N., Arch, D., Yang, W., Cabuz, C., Hocker, B., Johnson, B. and Wilson, M., 2000, "MEMS Sensing and Control: An Aerospace Perspective," Proc. of SPIE Vol. 3990, Smart Electronics and MEMS, pp. 22~27.
- (6) Momosaki, E., Kaneko, T. and Shimoda, T., 1995, "A Study of Quartz Tuning Fork Resonators in the Second Flexural Mode," IEEE Transaction on ultrasonics ferroelectrics and frequency control, Vol. 42, No. 3, pp. 443~450.
- (7) Fang, H. Y. and Yang, J. S., 2001,

"Vibration Analysis of a Rotating Elastic Beam with Piezoelectric Films as an Angular Rate Sensor." IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, pp. 507~513.

(8) Abe, M., Shinohara, E., Hasegawa, K., Murata, S. and Esashi, E., 2000, "Trident-type Tuning Fork Silicon Gyroscope by The Phase Difference Detection," IEEE, pp. 508~513.

(9) Ishida, N. and Tomikawa, Y., 1999, "Basic Consideration of Trident-type Tuning Fork Accelerometers Using Coriolis Force Phenomenon," Japan J. of Appl. Phys. Vol. 38, pp. 3228~3232.

(10) Satoh, A., Ohnjshi, K. and Tomikawa, Y., 1998, "Characteristics of the Piezoelectric Vibratory Gyrosensor Constructed Using a Trident Tuning-fork Resonator," IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 555~558.

(11) Fujimura, S., Yano, K., Kumasaka, T., Ariyoshi, H. and Ono, O., 1989, "A Vibration Gyros and Their Applications," IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics, pp. 116~117.

(12) Sato, H., Arai, F., Itoigawa, K. and Tsukahara, Y., 2000, "Parallel-beam Sensor/Actuator Unit and Its Application to the Gyroscope," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 3, pp. 266~272.

(13) He, G. H., Nguyen, C. T., Hui, J., Wong, M. S., Ng, A. F. L., Luong, H. C. and Ling, C., 1997, "A Piezoelectric-plate Mucrogyroscope," Int. Conf. on Solid-state Sensors and Actuators, pp. 895~898.

(14) Yang, J., Fang, H. and Jiang, Q., 2001, "One-dimensional Equations for a Piezoelectric

Ring and Applications in a Gyroscope," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 48, No. 5, pp. 1275~1282.

(15) Craig, R. J. G., 1990, "Theory of Operation of a Two-Axis-rate Gyro," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 5, pp. 722~731.

(16) Ulitko, I. A., 1995, "Mathematical Theory of the Fork-type Wave Gyroscope," IEEE Int. Frequency Control Symposium, pp. 786~793.

(17) Kudo, S., Sugawara, S. and Wakatuki, N., 1996, "Finite Element Analysis of Single Crystal Tuning Forks for Gyroscopes," IEEE Int. Frequency Control Symposium, pp. 640~647.

(18) Kagawa, Y., Tsuchiya, T. and Kawashima, T., 1996, "Finite Element Simulation of Piezoelectric Vibrator Gyroscopes," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 43, No. 4, pp. 509~518.

(19) Kane, T. R., Ryan, R. R. and Banerjee, A. K., 1987, "Dynamics of a Cantilever Beam Attached to a Moving Base," J. of Guidance, Vol. 10, No. 2, pp. 139~151.

(20) Yoo, H. H., Ryan, R. R. and Scott, R. A., 1995, "Dynamics of Flexible Beams Undergoing Overall Motions," J. of Sound and Vibration, Vol. 181, No. 5, pp. 261~278.

(21) 곽문규, 남상현, 2001 "보의 회전 및 진동제어를 위한 동적 모델 타당성 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권 제 2 호, pp. 292~300.

(22) Meirovitch, L., 1980, Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff & Noordhoff.