

축방향 하중을 이용한 마이크로 자이로스코프의 고유진동수 조율

Tuning of Micromachined Gyroscope by the Axial Loads

조중현† · 박윤식* · 박영진**

Choonghyoun Cho, Younsik Park and Youngjin Park

Key Words : MEMS(미세 전자기계 시스템), Gyroscope(자이로스코프), Tuning(고유진동수 조율), Axial Loads(축방향 하중)

ABSTRACT

Although the MEMS element is made through a very precise manufacturing process, usually there is the difference between the modeling design and the actual product. So tuning is required. Through the frequency tuning(changing the characteristics of device), we can calibrate the fabrication error and uncertainty. I'll propose the method of changing the natural frequency through the imposing the axial force on the anchor part to separate the sensing part and the tuning part. When the shape of section is the form of rectangular, the degree of the natural frequencies' change under axial force appears to be different. Applying a tuning force of $30 \mu N$, the natural frequencies' difference can be reduced by 5 percent.

1. 서론

MEMS 기술에 의한 가속도계나 각속도계와 같은 센서의 발달은 지속적으로 이루어져 왔다. MEMS 구조물의 공진현상을 이용한 마이크로 자이로스코프의 경우 고유진동수의 설정이 매우 중요하므로 제조단계에서 매우 정교함을 요한다. 그러나 공정기술의 발달도 고유진동수 설정에 대한 요구조건을 충족시키지 못하기 때문에 조율(tuning)기법에 대한 연구는 계속되고 있다. 현재 마이크로 센서의 고유진동수 조율방법으로는 대표적으로 정전기력을 이용한 방법이 있다[2-3]. 정전기력은 반스프링(anti-spring) 효과를 보이기 때문에 고유진동수를 줄이는데 효과적이다. 그러나 측정부(sensing part)와 조율부(tuning part)가 근접해 있기 때문에 전기적 노이즈에 노출되는 문제를 가지고 있다. 이 논문에서는 축방향 하중을 이용하여 MEMS 구조물의 고유진동수 조율하는 방법을 제시하고, 가상실험을 통해 마이크로 자이로스코프에 적용 가능성을 알아보고자 한다.

2. 마이크로 자이로스코프

Figure 1은 마이크로 자이로스코프의 형상을 보여주고 있다. x축 방향의 진동을 가한 상태에서 y축 방향의 회전이 발생하면 코리올리의 힘(Coriolis' force)에 의해 z축 방향의 진동이 생기게 된다. 이때 z축 방향의 진동의 크기를 측정하면 각속도를 측정할 수 있다.

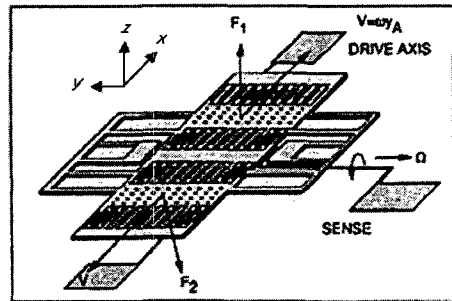


Fig. 1. Micromachined Gyroscope

각속도를 측정하는 센서의 설계에서 가장 중요한 것은 감도를 높이는 것이다. 위의 경우 x축 방향의 고유진동수와 y축 방향의 고유진동수를 일치시켰을 때 감도가 가장 좋다는 것은 일반적으로 알려져 있다. 그러나 두 방향의 고유진동수가 완전히 일치했을 경우 ZRO(zero rate output)이 발생하기 때문에 5%정도의 차이를 둔다. 이를 위해, 구조물의 고유진동수를 결정하는 빔 스프링(anchor부분에 연

† 책임저자 : 한국과학기술원 기계공학부

E-mail : string@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

* 한국과학기술원 기계공학부

** 한국과학기술원 기계공학부

결된 hook beam)의 단면을 결정하면 두 방향의 고유진동수를 설정할 수 있다. 그러나 공정과정에서 발생하는 오차로 인해 원하는 고유진동수를 얻을 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해 정전기력을 이용한 조율(tuning) 기법이 일반적으로 이용된다. 다음은 beam의 지배방정식과 정전기력을 이용하여 고유진동수의 변화를 해석적으로 구한 과정이다.

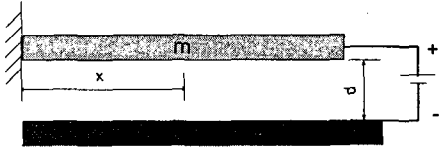


Fig. 2. Beam under Electrostatic force.

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = f \quad (\text{governing equation}) \quad (1)$$

$$f = \frac{w\epsilon_0}{2} \left(\frac{V}{d-v} \right)^2 \cong \frac{w\epsilon_0 V^2}{2} \left(\frac{1}{d^2} + \frac{2v}{d^3} \right) \quad (\text{electrostatic force}) \quad (2)$$

지배방정식과 선형화한 electrostatic force를 이용하여 다음과 같이 natural frequency를 구할 수 있다.

$$\int_0^L \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \phi_i dx + \int_0^L EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \phi_i dx = \int_0^L f \phi_i dx \quad (3)$$

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (4)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_i^4 EI}{\rho L^4} - \frac{w\epsilon_0 V^2}{\rho d^3}} \quad (\text{natural frequency}) \quad (5)$$

위의 결과로 전압 (V)를 증가하면 고유진동수가 낮아지는 것을 알 수 있다.

3. 축방향 하중을 이용한 조율

3.1 축방향에 의한 외팔보의 고유진동수 변화

위에서 보인 정전기력을 이용한 방법은 구조물의 형상이나 질량의 변화 없이 조율이 가능하지만, 구동부와 측정부 그리고 조율부가 근접해 있기 때문에 전기적 노이즈에 노출되어 있는 것이 단점이다. 구조물의 고유진동수를 결정하는 스프링에 축방향 하중을 가하는 조율방법은 이와 같은 단점을 보완할 수 있다. 외팔보에 축방향 하중이 주어졌을 때, 고유진동수 변화를 알아보았다.



Fig. 3. Cantilever Beam under axial load.

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + P \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \quad (\text{governing equation}) \quad (6)$$

$$v(x,t) = F(t)W(x) \quad (7)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + \frac{P}{EI} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\rho A \omega^2}{EI} W = 0 \quad (8)$$

W(x)에 대한 4차 미분방정식의 일반해를 외팔보의 경계 조건에 적용하면 식(9)와 같은 특정방정식을 얻을 수 있다.

$$B^2 + (2A^2 + B^2) \cosh(-A + \sqrt{A^2 + B^2})^{1/2} \cos(A + \sqrt{A^2 + B^2})^{1/2} - AB \sinh(-A + \sqrt{A^2 + B^2})^{1/2} \sin(A + \sqrt{A^2 + B^2})^{1/2} = 0$$

$$\ast A = \frac{P}{2EI}, \quad B = \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \omega^2 \quad (9)$$

축방향 하중 P에 대한, 고유진동수 ω를 구하기 위해 위의 특정방정식을 수치적으로 계산하면 Figure 4와 같은 결과를 확인할 수 있다(Figure 4는 축방향 인장력에 대한 결과이다).

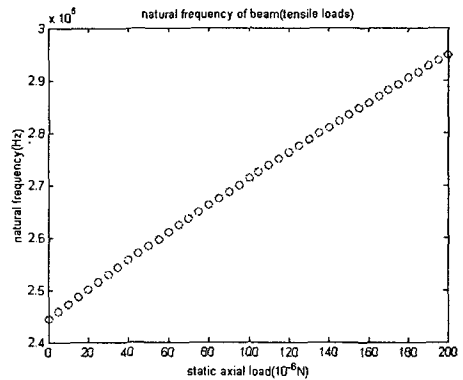


Fig. 4. Natural frequencies of cantilever Beam under tensile axial load.

축방향 하중에 의한 외팔보의 고유진동수 변화에서 자이로스코프에 적용 가능한 현상을 발견하였다. 구조물의 고유진동수를 결정하는 스프링의 단면이 직사각형인 경우 축방향 하중에 의해 각 방향의 고유진동수 변화가 다르게 나타났다. 압축력이 작용하는 경우 두방향의 고유진동수 차이가 증가하고, 인장력이 작용할 때에는 그 차이가 줄어드는 현상을 보였다.

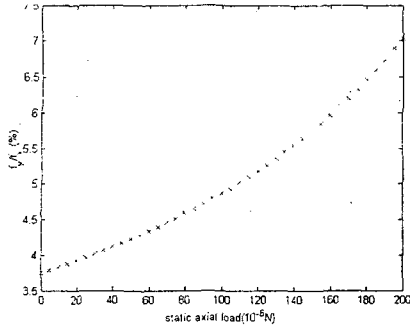


Fig. 5. The ratio of natural frequencies under compressive axial load.

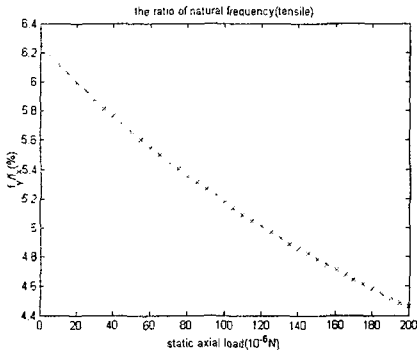


Fig. 6. The ratio of natural frequencies under tensile axial load.

압축력과 인장력을 모두 이용하여 고유진동수 조율이 가능하지만, 압축력의 경우 편심력이 발생할 우려가 있고 복잡한 공정이 예상된다. 따라서 공정이 간단한 인장력만을 적용해 보기로 하였다.

3.2 축방향 하중에 의한 자이로스코프의 고유진동수 변화

외팔보의 경우 5% 정도의 고유진동수 조율 능력을 가지려면 약 $600\mu N$ 의 하중이 필요하였다. 실제 자이로스코프의 경우 5% 정도의 조율을 위한 하중을 알아본 결과, 스프링의 단면이 $2.4\mu m \times 4\mu m$ 인 자이로스코프에 $30\mu N$ 의 하중으로 5.36%의 고유진동수 차이의 변화를 얻을 수 있었다.

3.3 축방향 하중의 구현

고유진동수 조율에 필요한 축방향 하중을 얻기 위해서 정전기력을 이용하였다. 조율에 필요한 하중을 얻을 수 있었고, 구동부의 진동에 의해서 하중의 변화가 적은 장점을 가지고 있다.

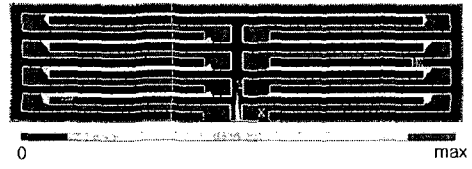


Fig. 7. Axial load using electrostatic force

ANSYS를 이용한 가상실험을 통해 $1.5\mu m$ 의 간극과 50V의 전압으로 $30\mu N$ 의 하중을 얻을 수 있었다.

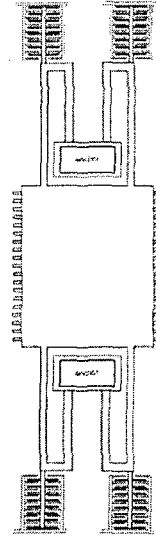


Fig. 8. Overall shape of micromachined gyroscope

3.4 축방향 하중에 의한 구조물의 변형

축방향 하중이 가해졌을 때 구조물의 변형 상태를 분석하여 자이로스코프의 구동에 있어서 발생할 수 있는 문제점을 점검해 보았다. Figure 9를 보면 변형이 가장 많은 부분(C)의 변위가 $0.11\mu m$ 였고, D에서의 변형각도가 1도 미만의 결과를 보였다. 따라서, 자이로스코프의 구동에는 문제가 없는 것으로 생각된다.

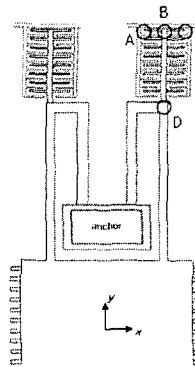


Fig. 9. The deformation by the axial loads

Table 1. The deformation by the axial loads

Position	displacement	
	x	y
A	- 80 nm	100 nm
B	- 80 nm	50 nm
C	- 80 nm	110 nm

3.5 자이로스코프의 설계

자이로스코프의 설계에 있어서 공정오차의 영향, 고유진동수 조율에 필요한 하중, 하중에 의한 변형 등을 고려해야 한다. 폴리실리콘의 두께나 스프링의 치수가 커질수록 공정 오차에 둔감한 경향을 보이지만, 고유진동수 조율에 필요한 하중은 커진다. 따라서 이와 같은 현상을 고려한 최적 설계가 요구된다. 현재 최적화 과정을 수행 중에 있다.

4. 결론

이 논문에서는 축방향 하중을 이용한 자이로스코프의 고유진동수 조율 방법을 제시하였다. 축방향 하중을 받는 외팔보의 고유진동수 해석을 통해 자이로스코프에 적용 가능한 현상을 발견하였고, 이를 실제 자이로스코프에 적용하기 위해 ANSYS를 이용한 가상실험을 통해 그 가능성을 점검하였다. 30 μ N의 힘으로 5% 고유진동수 조율을 확인하였으며, 정전기력을 이용하여 축방향 하중을 얻는 방법을 제안하였다. 현재 조율에 필요한 힘, 공정오차의 영향 등을 고려한 최적 설계를 수행중에 있다.

후 기

이 연구는 한국과학재단지정 한국과학기술원 가상입체음향연구소(NRL)과 두뇌한국사업(BK21)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Jan Soderkvist, 1991, 'Piezoelectric Beams and Vibrating Angular Rate Sensors', IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control.
- (2) Y.S. Oh, B.L Lee, S.S. Baek, H.S. Kim, J.G. Kim, S.J. Kang and C.M. Song, 1998, 'A tunable vibratory microgyroscope', Sensors and actuators.
- (3) Kyu-Yeon Park, Chong-won Lee, Hyun-Suk Jang, Yongsoo Oh and Byeoungju Ha, 1999, 'Capacitive type surface-micromachined silicon accelerometer with stiffness tuning capability', Sensors and actuators.
- (4) Kang-Sik Jung, Seung-Jae Moon and Hong-Hee Yoo, 2004, 'Dynamic Analysis of Micro Cantilever Beams Undertaking Electrostatic Forces', Journal of Korean Society for Noise and Vibration Engineering.
- (5) A. Bokaian, 1988, 'Natural frequencies of beams under compressive axial loads', Journal of Sound and Vibration.
- (6) A. Bokaian, 1990, 'Natural frequencies of beams under tensile axial loads', Journal of Sound and Vibration.