

# 신호왜곡 현상을 고려한 MEMS 가속도 센서 모델링 및 성능특성 분석

## MEMS Accelerometer Modeling and Performance Analysis by Considering Signal Distortion

김 용 일\* · 유 흥 희†

Yong Il Kim and Hong Hee Yoo

(2010년 8월 30일 접수 ; 2011년 1월 18일 심사완료)

**Key Words** : MEMS(마이크로 기전 시스템), Accelerometer(가속도 센서), Sensitivity(민감도), Measurable Frequency Range(측정가능 주파수), Signal Distortion(신호왜곡)

### ABSTRACT

In this paper, assumed mode method on Euler beam theory is employed and signal distortion is considered to obtain the performances of a MEMS accelerometer which are a sensitivity and measurable frequency range(MFR). Not only the sensitivities and MFR but also the variations of dynamic responses and natural frequencies of the MEMS accelerometer are investigated for several sets of beam properties such as length, width, thickness and Young's modulus. It is stated that the variations of beam properties significantly influence the performances of the MEMS accelerometer and the relationship between sensitivities and MFR is inversely proportional to each other.

### 1. 서 론

MEMS 가속도 센서는 크게 피에조 타입, 커패시턴스 타입 가속도 센서로 나누어 질 수 있다. 특히 커패시턴스 타입 가속도 센서는 최근 반도체 집적 회로 공정기술의 발달로 저렴한 생산비용으로 소형화 대량 생산화가 가능해져 자동차, 바이오 메카닉, 모션 컨트롤 어플리케이션 등 다양한 분야에서 사용되고 있다<sup>(1,2)</sup>. MEMS 가속도 센서는 일반적으로 cantilever beam-mass 구조로 되어있으며 따라서 어떤 용도로 쓰이는가에 따라 빔의 형상이 달라질 수 있다. 예를 들어 자동차 에어백 제어와 같이 큰 가속도만을 감지해야 할 때와 휴대전화기 또는 mp3

플레이어와 같이 작은 가속도를 감지해야 할 때의 빔 구조가 달라진다. 빔 구조를 설정하고 용도에 맞는 가속도 센서 설계를 위해서는 가속도 센서의 성능특성 분석이 필요하다.

1970년대 후반 처음으로 실리콘 가속도 센서가 개발 되었다<sup>(3)</sup>. 1980년대 초부터 1990년대 초까지는 벌크 마이크로머시닝 제조기술과 서피스 마이크로머시닝 제조기술 같은 제조공정에 관한 연구가 주를 이루었다<sup>(4,5)</sup>. 1990년대 말부터 MEMS 가속도 센서의 빔과 진동질량의 구조에 따른 정적 및 동적 해석에 관한 연구가 이루어졌다<sup>(6)</sup>. 또한 2000년대 들어서 빔의 정전기력에 의한 처짐에 관한 연구와 빔의 치수 변화에 따른 민감도 변화 분석에 관한 연구도 이루어졌다<sup>(7,8)</sup>. 최근에는 한 개의 진동질량으로 3축 방향 가속도와 각가속도를 모두 측정할 수 있는 MEMS 가속도 센서 개발에 관한 연구가 이루어지고 있다<sup>(9)</sup>.

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr  
Tel : (02)2220-0446, Fax : (02)2293-5070  
\* 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

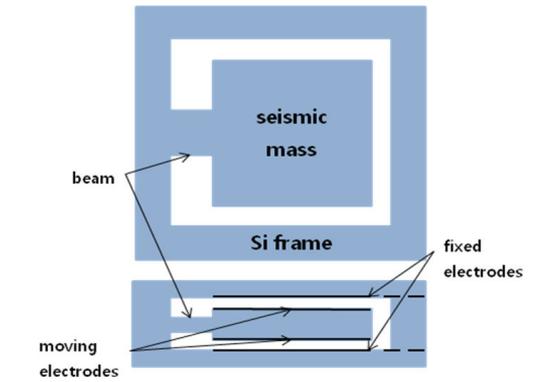


Fig. 1 The schematic view of a capacitive accelerometer

가속도 센서는 측정 대상이 내보내는 가속도 신호를 있는 그대로 출력해야 한다. 그러나 측정 대상은 여러 가지 크기의 주파수 성분이 서로 다른 위상차를 가지고 입력되고 이는 MEMS 가속도 센서 출력 신호의 왜곡 현상을 유발한다. 그러나 위의 대부분의 연구들에서는 측정 대상이 만드는 가속도의 주파수 성분에 대한 신호왜곡 현상이 고려되지 않았다. 반면 이 연구에서는 신호왜곡 현상을 고려하여 measurable frequency range(MFR)를 도출하였다. 이를 sensitivity와 함께 가속도 센서의 성능을 나타내는 지수로 정의하였고 성능특성 분석을 수행하였다.

Fig. 1과 같은 MEMS 커패시티브 가속도 센서의 빔과 진동질량을 끝단 질량을 가진 외팔 보 구조로 이상화하여 동역학적 모델링을 수행하였다. 또한 유도된 운동방정식을 바탕으로 이 센서의 모드해석 및 신호왜곡 현상분석을 수행하였다. 그리고 가속도 센서의 성능지수로 정의된 sensitivity와 MFR 사이의 영향을 비교함으로써 MEMS 가속도 센서의 성능특성을 분석하였다.

## 2. MEMS 가속도 센서

Fig. 1과 같이 MEMS 가속도 센서는 일반적으로 진동 질량이 달린 외팔 보가 두 pyrex 유리 기판 사이에 매달려있는 구조이다. 진동 질량의 윗면과 아랫면 그리고 진동 질량과 마주하는 위, 아래 두 유리 기판에 전극이 붙어 있고 이들은 서로 커패시터로 작용하게 된다. 따라서 가속도 센서 본체에 진동

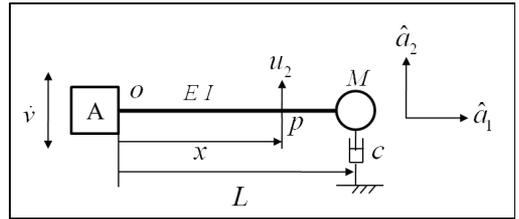


Fig. 2 Configuration of a cantilever beam with a tip mass

질량에 수직 방향으로 가속도가 가해지면 이로 인해 진동질량이 가속도의 반대방향으로 움직이고 유리기판과 진동 질량에 붙어있는 전극간의 거리가 변하게 된다. 결국 두 커패시터 사이의 정전 용량의 변화로 가속도 크기가 측정된다.

MEMS 가속도 센서는 진공패키징 또는 실압패키징으로 제작 될 수 있다. 진공패키징은 진공도(Q factor)가 높아 성능이 우수하지만 잔류진동현상(ringing)이 발생하기 쉬운 단점이 있다. 반면에 실압패키징된 가속도 센서는 성능은 떨어지지만 제조 단가가 낮은 장점이 있어서 최근 휴대기기에 많이 적용되고 있다. 이 연구에서는 스퀴즈 필름 감쇠 효과를 적용하였고 감쇠비가 0일 때와 0.707일 때 입력 가속도 신호와 빔 처짐의 변화를 비교하였다.

MEMS 가속도 센서의 성능을 해석하기 위해 굽힘방향 운동방정식을 유도하였다. 연속계에서 오일러 보 이론에 근거하였으며 끝 단 질량의 관성 모멘트는 무시하고 집중 질량으로 가정하였다. Fig. 2에서 보의 임의의 질점 P의 탄성변위는 굽힘 방향 변형변수 w로 나타낼 수 있다.

$$w = \sum_{i=1}^{\mu^*} \phi_i(t) q_i(t) \quad (1)$$

여기서  $\phi_i(x)$ 는 굽힘 방향 모드함수를 나타낸다.  $q_i(t)$ 는 일반좌표이며  $\mu^*$ 는 일반좌표 수를 나타낸다.

임의의 질점 P의 속도  $\dot{v}^P$ 와 가속도  $\ddot{a}^P$ 는 다음과 같다.

$$\dot{v}^P = (\dot{v} + \dot{w}) \hat{a}_2 \quad (2)$$

$$\ddot{a}^P = (\ddot{v} + \ddot{w}) \hat{a}_2 \quad (3)$$

케인 방법에 의한 운동방정식은 다음과 같다<sup>(10)</sup>.

**Table 1** Initial data for simulation

	Description	Numerical data
$\rho$	Mass per unit length	$4.194 \times 10^{-11}$ kg/ $\mu$ m
$E$	Young's modulus	190 GPa
$L$	Beam length	600 $\mu$ m
$I$	Area moment of inertia	$1.35 \times 10^6$ $\mu$ m <sup>4</sup>
$M$	Tip mass	$2.33 \times 10^{-6}$ kg

**Table 2** Comparison of the natural frequencies

	ANSYS(Hz)	Present(Hz)	Error(%)
1st	1424.30	1424.28	0.00
2nd	75082.00	75174.62	0.12
3rd	242920.00	243152.97	0.10
4th	506310.00	507072.67	0.15
5th	864910.00	866963.56	0.24

$$F_i + F_i^* = 0 \tag{4}$$

여기서 일반작용력  $F_i$  과 일반관성력  $F_i^*$  은 각 각 다음과 같다.

$$F_i = -\frac{\partial U}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} \tag{5}$$

$$F_i^* = -\int_0^L \rho \ddot{a}^p \cdot \vec{v}_i^p dx \tag{6}$$

$U$ 는 보의 굽힘방향 탄성 에너지이고,  $R$ 은 에너지 소산 함수이다.  $\vec{v}_i^p$ 는 편속도이다.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left( \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \tag{7}$$

$$R = \frac{1}{2} c [\dot{w}(L, t)]^2 \tag{8}$$

$$\vec{v}_i^p = \frac{\partial \vec{v}^p}{\partial \dot{q}_i} = \phi_i \hat{a}_2 \tag{9}$$

감쇠계수  $c$ 는 진동질량과 기판 사이의 스퀴즈 필름 감쇠 효과에 의해 결정될 수 있고 다음과 같다<sup>(8)</sup>.

$$c = \frac{\mu L_m W_m^3 \beta}{d^3} \tag{10}$$

여기서  $\mu$ 는 점성계수,  $L_m$ 과  $W_m$ 은 각각 진동질량의 길이와 폭이다.  $d$ 는 기판과 진동질량 사이의 거리이다. 그리고  $\beta$ 는 다음과 같다.

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{192}{\pi^5} \left( \frac{W_m}{L_m} \right) \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left( \frac{n\pi L_m}{2W_m} \right) \right\} \tag{11}$$

보 끝 단의 집중질량을 모델링하기 위해 보의 단위 길이 당 질량을 나타내는  $\rho$ 가  $x=L$ 에서 큰 값이 되는 충격함수(Dirac's delta function)로 가정하면 식 (4)~(11)로부터 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\sum_{j=1}^{\dot{u}} m_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{\dot{u}} c_{ij} \dot{q}_j + \sum_{j=1}^{\dot{u}} k_{ij} q_j + \dot{v} P_i = 0 \tag{12}$$

여기서

$$m_{ij} = \int_0^L \rho \phi_i(x) \phi_j(x) dx + M \phi_i(L) \phi_j(L) \tag{13}$$

$$c_{ij} = c \phi_i(L) \phi_j(L) \tag{14}$$

$$k_{ij} = \int_0^L EI \phi_{i,xx}(x) \phi_{j,xx}(x) dx \tag{15}$$

$$P_i = \int_0^L \rho \phi_i(x) dx \tag{16}$$

여기서  $M$ 은 진동질량의 질량이다.

현재 모델링 방법을 검증하기 위해 주어진 초기 물성치로 모드 해석한 결과를 ANSYS 모드해석결과와 비교하였다. 수치해석에 사용된 빔의 초기 물성치들은 Table 1에 나타내었고<sup>(2)</sup> 총 5개의 모드로 5차 고유진동수까지 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. 도출된 결과에서 알 수 있듯이 ANSYS로 얻은 결과와 최고 0.24%의 오차를 보이고 있으므로 이 연구에서 제시된 모델링에 대한 신뢰성과 정확성을 보여준다고 판단된다.

### 3. 신호왜곡

신호왜곡 현상은 측정 대상이 두 개의 주파수 성분 이상을 가진 신호를 생성할 때 MEMS 가속도 센서에서 측정되는 주파수 신호가 감쇠에 의한 위상차로 인하여 서로 일치하지 않는 현상을 말한다.

신호왜곡 현상을 분석하기 위해 먼저 가속도 측정 조건을 도출하였다. 이를 위해 앞 절에서 얻은 운동 방정식 (12)를 정규화하였고 다음과 같다.

$$[J]\{\ddot{\eta}\} + [\Gamma]\{\dot{\eta}\} + [\alpha^2]\{\eta\} = \{R\} \quad (17)$$

여기서

$$[J] = [V]^T [M] [V] \quad (18)$$

$$[\Gamma] = [V]^T [C] [V] \quad (19)$$

$$[\alpha^2] = [V]^T [K] [V] \quad (20)$$

$$\{R\} = -\dot{v} [V]^T \{P\} \quad (21)$$

식 (17)에서  $i$ 번째 운동방정식의 응답  $\eta_i$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_i = \frac{r_i}{\omega_i^2} \frac{1}{\sqrt{(1-u_i^2)^2 + (2\zeta_i u_i)^2}} e^{j(\omega_i t - \theta_i)} \quad (22)$$

여기서

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{2\zeta_i u_i}{1-u_i^2} \quad (23)$$

$$u_i = \frac{\omega_{input1}}{\omega_i} \quad (24)$$

식 (24)의  $\omega_{input1}$ 은 한 개의 주파수 성분을 가진 입력 가속도의 주파수이고  $\omega_i$ 은 MEMS 가속도 센서의  $i$ 번째 고유진동수이다. 식 (22)에서  $u_i$ 에 관한 식은 식 (23)과 다음의 증폭도이다.

$$f(u_i) = \frac{1}{\sqrt{(1-u_i^2)^2 + (2\zeta_i u_i)^2}} \quad (25)$$

식 (25)로부터  $\zeta_i$ 와  $u_i$ 가  $\dot{v}$ 와  $\eta_i$ 에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 식 (22)에서  $r_i$ 는 입력 가속도  $\dot{v}$ 에 비례하고  $\omega_i$ 는 일정하다. 그러므로  $f(u_i)=1$ 일 때  $\eta_i$ 는  $\dot{v}$ 에 선형적으로 비례하기 때문에 측정되는 가속도를 빔의 처짐으로부터 구할 수 있다. 따라서  $u_i \ll 1$ 인 구간을 가속도 측정조건으로 정할 수 있다.

두 개의 주파수 성분을 가진 임의의 가속도 신호를 입력으로 정하였다. 이 연구에서는  $\zeta$ 를 0과

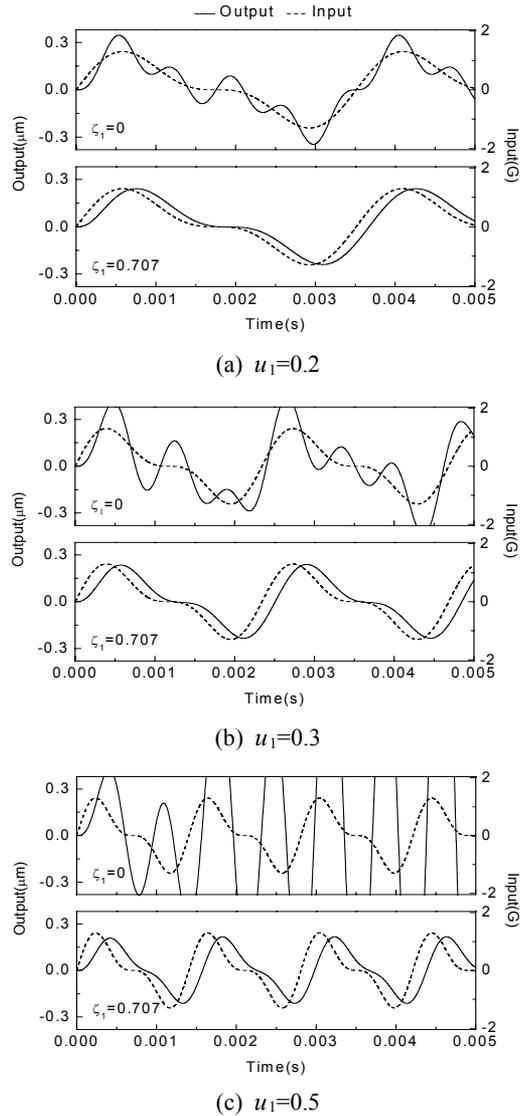


Fig. 3 Output and input signals in terms of the damping ratio variation

0.707의 두 가지 경우에 그리고  $u_1$ 을 기준으로 0.2, 0.3, 0.5의 세 경우에 대하여 다음과 같은 가속도 입력 신호가 주어질 때 응답을 도출하였다.

$$\dot{v} = A_1 \sin(\omega_{input1}t) + A_2 \sin(\omega_{input2}t) \quad (26)$$

여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 은 입력 가속도 신호의 진폭이고  $\omega_{input1}$ 과  $\omega_{input2}$ 은 주파수이다. 이때  $\omega_{input2}$ 는  $\omega_{input1}$ 의 두 배 값을 사용하였다.

먼저 Fig. 3의 (a)는  $u_1$ 이 0.2일 때, (b)와 (c)는

$u_1$ 이 각각 0.3과 0.5일 때의 감쇠비 0과 0.707에 대 그래프이다. 감쇠비가 0일 때 (a), (b), (c)에서 모든 출력이 입력 신호를 따라 진동하는 현상이 나타났다. 감쇠비가 0.707일 때 (a)에서 입력 신호와 출력 신호의 형상이 일치하는 것을 볼 수 있다. (b)도 마찬가지로 입력 신호와 출력 신호의 형상이 거의 일치하고 있다. 그러나 (c)에서 비록 감쇠비가 0.707 이더라도 출력 신호의 형상은 입력 신호와 전혀 일치하지 않는다. 이것으로 두 개 이상의 주파수 성분을 가진 입력 신호가 들어올 때  $u_1$ 이 증가 할 수록 출력 신호의 왜곡현상이 심해지는 것을 알 수 있다. (a)의 출력 신호에 대한 그래프 (b)와 (c)에서 출력 신호의 오차를 계산해보면 각각 2.78%와 13.9%의 오차가 발생한다. 따라서  $u_1$ 이 0.2와 0.3일 때 오차가 작다고 판단할 수 있고 이때 신호 왜곡 현상을 방지한다고 말할 수 있다. 반면에  $u_1$ 이 0.5일 때는 신호왜곡 현상을 막을 수 없다. 따라서  $\zeta_1 = 0.707$  이고 입력 신호의 주파수가  $u_1 = 0.3$ 의  $\omega_{input}$  보다 크지 않다면 출력 신호의 왜곡 현상이 현저히 줄어든다.

#### 4. 성능지수

MEMS 가속도 센서의 대표적인 성능지수는 sensitivity이다. sensitivity는 입력 가속도에 대한 진동질량을 지지하고 있는 빔의 변위의 크기로 나타낼 수 있고 식은 다음과 같다.

$$S = \frac{w}{v} \tag{27}$$

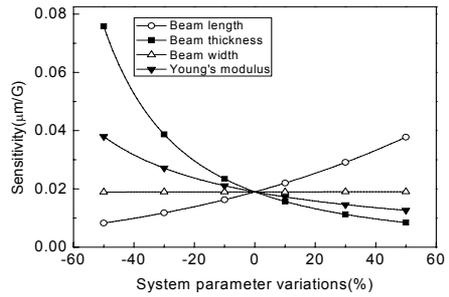
여기서  $S$ 는 sensitivity를 나타낸다.

또 다른 성능지수로 measurable frequency range(MFR)를 정하였다. 이것은 측정 대상의 가속도를 측정하기 위한 측정 대상의 허용 주파수 범위를 말한다.  $u_1$  범위는 앞 절에서 설명된 것처럼 다음과 같다.

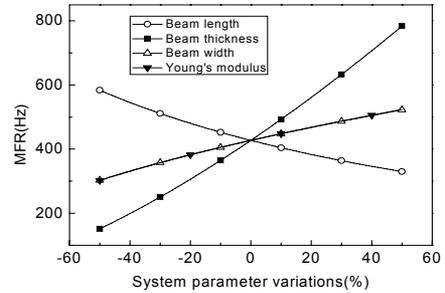
$$0 < u_1 < 0.3 \tag{28}$$

이때  $u_1$ 은  $\omega_{input} / \omega_1$ 이므로 MFR은 다음과 같다.

$$0 < \omega_{input} < 0.3\omega_1 \tag{29}$$



(a)



(b)

Fig. 4 Variations of sensitivity and MFR of the MEMS accelerometer vs. system parameter variations

이들은 MEMS 가속도 센서의 성능을 결정짓는 요소로 사용될 수 있으며 설계자가 원하는 성능을 발휘하는 MEMS 가속도 센서 설계를 위해 고려될 수 있다.

#### 5. 성능특성 분석

MEMS 가속도 센서의 성능특성을 분석하기 위해 4절에서 정의된 MEMS 가속도 센서의 성능지수인 sensitivity와 MFR을 시스템 변수를 변화시켜가면서 구하였다. 여기서 시스템 변수는 MEMS 가속도 센서 빔의 길이 폭 두께 그리고 재료의 탄성계수이고 Table 1의 물성치를 기준으로  $\pm 50\%$ 로 변화시켰다.

Fig. 4의 (a)는 빔의 파라미터 변화에 따른 sensitivity의 변화를 나타낸 그래프이다. 빔의 두께 변화는 MEMS 가속도 센서의 sensitivity에 가장 민감하게 영향을 미치고 있다. 반면 빔의 폭 변화는 sensitivity 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 빔의 두께와 탄성계수 값이 커질 수록 MEMS 가속도 센서의 sensitivity는 감소하는

반면 빔의 길이 변화는 sensitivity와 비례 관계를 가진다. 한편 Fig. 4의 (b)는 빔의 파라미터 변화에 따른 MEMS 가속도 센서의 MFR의 변화를 나타낸 그래프이다. (a)와 마찬가지로 빔의 두께 변화가 MFR 변화에 가장 큰 영향을 미치고 있다. (a)에서 빔의 폭 변화는 sensitivity에 어떠한 영향도 미치지 않는 반면에 (b)에서는 탄성계수의 변화와 함께 MFR 변화에 비슷한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 (a)와 (b)에서 빔의 길이, 두께 그리고 탄성계수 변화에 따른 sensitivity와 MFR 변화는 서로 반비례 관계에 있는 것을 알 수 있다. 또한 (a)와 (b)에서 빔의 길이, 두께 그리고 영률 변화에 대한 Sensitivity와 MFR의 변화는 서로 반비례하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 MEMS 가속도 센서의 성능특성을 분석하기 위해 운동방정식을 유도하였고 ANSYS의 모드해석 결과와 비교해 봄으로써 운동방정식을 검증하였다. 유도된 운동방정식으로부터 신호왜곡 현상을 방지 할 수 있는 조건을 도출하였다. 또한 이 조건으로부터 MFR를 설정할 수 있으며 이것을 MEMS 가속도 센서 sensitivity와 함께 성능지수로 정의하였다. 빔의 길이, 두께, 폭 그리고 탄성계수의 parametric study를 통해 sensitivity와 MFR의 변화를 도출함으로써 MEMS 가속도 센서의 성능특성을 분석하였다. 전체적으로 sensitivity와 MFR의 변화는 서로 반비례하는 경향을 보였다. 빔의 두께 변화가 다른 파라미터 변화에 비해 상대적으로 sensitivity와 MFR에 큰 영향을 미치고 MFR에 대한 빔의 탄성계수와 폭 변화의 영향력은 서로 비슷하다는 것을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

(1) Amarsinghe, R., Dao, D. V. and Toriyama, T.,

Sugiyama, S., 2005, Design and Fabrication of Miniaturized Six-degree of Freedom Piezoresistive Accelerometer, MEMS2005 Conference, pp. 351~354.

(2) Bao, M. H., 2000, Micro Mechanical Transducers, Handbook of Sensors and Actuators, Vol. 8 - Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes, edited by Middelhoek, S.(Elsevier, Amsterdam).

(3) Roylance, L. M. and Angell, J. B., 1979, A Batch-fabricated Silicon Accelerometer, IEEE Trans. on Electron Devices. Vol. ED-26, pp. 1911~1917.

(4) Rodulf, F., 1983, A Micromechanical Capacitive Accelerometer with a Two-point Inertial-mass Suspension, Sensors and Actuators, Vol. 4, pp. 191~198.

(5) Kuehnel, W. and Sherman, S., 1994, A Surface Micromachined Silicon Accelerometer with On-chip Detection Circuitry, Sensors and Actuators A, Vol. 45, pp. 7~16.

(6) van Kampen, R. P. and Wolffenbuttel, R. F., 1998, Modeling the Mechanical Behavior of Bulk-micromachined Silicon Accelerometers, Sensors and Actuators A, Vol. 64, pp. 137~150.

(7) Huang, S., Li, X., Song, Z., Wang, Y., Yang, H., Che, L. and Jiao, J., 2005, A High-performance Micromachined Piezoresistive Accelerometer with Axially Stressed Tiny Beams, Journal of Micromechanics And Microengineering, Vol. 15, pp. 993~1000.

(8) Jung, K. S., Moon, S. J. and Yoo, H. H., 2005, Responses and Modal Analysis of Micro Double Cantilever Beams Interaced by Electronic Forces, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 199~205.

(9) Amarsinghe, R., Dao, D. V., Toriyama, T. and Sugiyama, S., 2007, Development of Miniaturized 6-Axis Accelerometer Utilizing Piezoresistive Sensing Elements, Sensors and Actuators A, Vol. 134, pp. 310~320.

(10) Kane, T. and Levinson, D., 1985, Dynamics, Theory and Applications, McGraw-Hill Book.