

MEMS 가속도계의 성능분포 및 제조수율 예측

김 용 일* · 유 흥 희*†

* 한양대학교 기계공학과

Prediction of the Performance Distributions and Manufacturing Yields of a MEMS Accelerometer

Yong Il Kim* and Hong Hee Yoo*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received January 24, 2011 ; Revised April 27, 2011 ; Accepted April 27, 2011)

Key Words : MEMS Accelerometer(MEMS 가속도계), Uncertainty(불확실성), Sensitivity(민감도), Measurable Frequency Range(측정가능 주파수), Performance Distribution(성능분포), Manufacturing Yield(제조수율)

초록: 모든 기계 시스템의 변수는 불확실성을 가지고 이는 시스템 성능에 직접적인 영향을 미칠 뿐 아니라 생산성 감소를 야기한다. 특히 MEMS 시스템의 크기는 매우 작으므로 일반적인 기계 시스템에 비해 제조 공차는 상대적으로 커질 수 밖에 없다. 이 제조 공차에 의한 시스템 변수 불확실성은 MEMS 시스템의 성능과 제조 수율에 영향을 미친다. 본 연구에서는 두 가지의 불확실성 해석법을 이용하여 MEMS 가속도계의 시스템 변수 불확실성에 의한 성능의 불확실성 해석을 수행하고 성능분포 및 제조수율을 예측하였다.

Abstract: All mechanical-system parameters have uncertainty, and this uncertainty directly affects system performances and results in a decrease in the manufacturing outputs. In particular, since the size of a MEMS system is extremely small, the manufacturing tolerances of a MEMS system are relatively large when compared to the tolerances of a macro-scale system. High manufacturing tolerances result from an increase in the uncertainty of the system parameters, thereby affecting the performances and manufacturing yields. In this paper, the performance uncertainty of a MEMS accelerometer due to system parameter uncertainty is analyzed by using several uncertainty analysis methods. Finally, the performance distributions and manufacturing yields of the MEMS accelerometer are predicted.

1. 서 론

MEMS 기기의 크기는 일반적인 기계 시스템의 크기에 비해 매우 작기 때문에 일반 기계 시스템과 같은 공차 비율을 만족시키기 위해서는 많은 제조비용이 들어간다. 따라서 MEMS 기기의 공차는 일반 시스템의 공차보다 상대적으로 크게 주어진다. 그러나 상대적으로 큰 제조공차는 성능의 불확실성을 크게 만들고 이는 어쩔 수 없는 생산수율 감소를 야기한다. 그러므로 MEMS 기기의 제조공차 조절에 의한 수율 증가는 MEMS 제조

회사들이 풀어야 할 중요한 과제 중에 하나라고 할 수 있다.

많은 MEMS 기기 중에서 MEMS 가속도계는 MEMS 압력센서 다음으로 큰 시장을 형성하고 있으며 주로 자동차의 에어백 또는 현가장치에 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 최근에는 MEMS 가속도계가 작은 공간을 차지한다는 이점 때문에 mp3 플레이어나 휴대전화 같은 모바일 기기에 많이 적용되어 주로 모션 센싱에 사용되고 있다. 게다가 모바일 기기 생산이 점점 늘어감에 따라 MEMS 가속도계 이용량은 점점 더 늘어날 것으로 예상된다.

1970 년대에 최초의 마이크로 가속도계가 개발되었다.⁽²⁾ 그 이후 1990 년대까지 제조기술에 관한 연구가 계속되었고 특히 몇몇 연구자들에 의해 벌

† Corresponding Author, hhyoo@hanyang.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

크 마이크로머시닝 기술과 서피스 마이크로머시닝 기술을 적용한 MEMS 가속도계 제조 방법이 개발되었다.^(3,4) 그 이후 MEMS 가속도계의 빔 구조 변화와 관련된 정적 및 동적 해석에 관한 연구들이 이루어졌다.⁽⁵⁾ 또한 빔과 진동질량의 치수 변화에 따른 MEMS 가속도계의 민감도 변화에 관한 연구도 수행되었다.⁽⁶⁾ 뿐만 아니라 3 축 방향 가속도 및 3 축 방향 각가속도를 측정할 수 있는 MEMS 가속도계 개발이 연구됨으로써 구조적인 개선도 이루어졌다.^(7,8) 현재까지 MEMS 가속도계에 대한 많은 연구들이 이루어져왔지만 불확실성 해석에 관한 연구는 찾아보기 힘들다.

1944년 Neumann 과 Ulam 에 의해 몬테카를로라고 명명된 방법 (Monte-Carlo method)이 소개되었는데 이것은 핵확산에 대한 불확실성 문제를 해결하기 위함이었다.⁽⁹⁾ 이 방법은 모든 불확실성 문제에 적용될 수 있지만 시간적으로 매우 비효율적이다. 이후에 First order reliability method 라는 통계기법이 소개되었다.⁽¹⁰⁾ 이 방법은 많은 동역학 관련 불확실성 문제에 적용될 수 있다.⁽¹¹⁾ 최근 FORM 을 이용하여 MEMS 자이로스코프의 설계변수 불확실성을 해석하는 연구가 수행되었다.⁽¹²⁾ 시스템 변수에 대한 성능이 심한 비선형성을 가지지 않는다면 FORM 은 불확실성 문제에 가장 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 또한 최근에는 비선형 시스템의 불확실성 문제를 해결할 수 있는 Univariate dimension reduction method 또는 Eigenvector dimension reduction method 같은 통계기법이 연구되었다.^(13,14) 그러나 불확실성에 관한 연구 중에서 MEMS 가속도계에 대한 연구는 거의 발견되지 않았다.

기존 연구의 문제점은 MEMS 가속도계 시스템 변수 불확실성이 성능과 수율에 어떤 영향을 미치는지 파악할 수 없다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 시스템 변수 불확실성이 MEMS 가속도계 성능에 미치는 영향의 정도를 분석하였다. 그리고 성능지수의 분포 및 제조 수율을 예측하였다. MEMS 가속도계의 성능지수로 민감도와 측정가능 주파수를 정의하였고 불확실성 분석 방법으로 FORM 과 uDR 을 사용하였다.

2. MEMS 가속도계 모델링

Fig. 1 과 같은 한 개의 진동질량과 한 개의 빔으로 이루어진 MEMS 가속도계가 사용되었다. 제시된 MEMS 가속도계는 외팔보 끝 단의 진동질량이 두 유리기판 사이에 매달려 있는 구조이다. 그

리고 두 쌍의 전극이 유리기판 및 진동질량의 윗면과 아랫면에 붙어 두 개의 커패시터 역할을 하고 있다. 가속도가 진동질량 넓은 면의 수직 방향으로 주어졌을 때 진동질량은 가속도 반대 방향으로 움직이게 되고 진동질량과 유리기판에 붙어있는 두 커패시터의 커패시턴스 차로 가속도가 측정된다.

본 연구에서는 Fig. 1 의 MEMS 가속도계를 Fig. 2 와 같이 이상화 하여 모델링 하였다. 오일러 베르누이 빔으로 가정하였고 입력 가속도는 빔의 굽힘 방향으로만 가해진다고 가정하였다. 따라서 MEMS 가속도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n m_j \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n k_j q_j + \dot{v} P_j = 0 \tag{1}$$

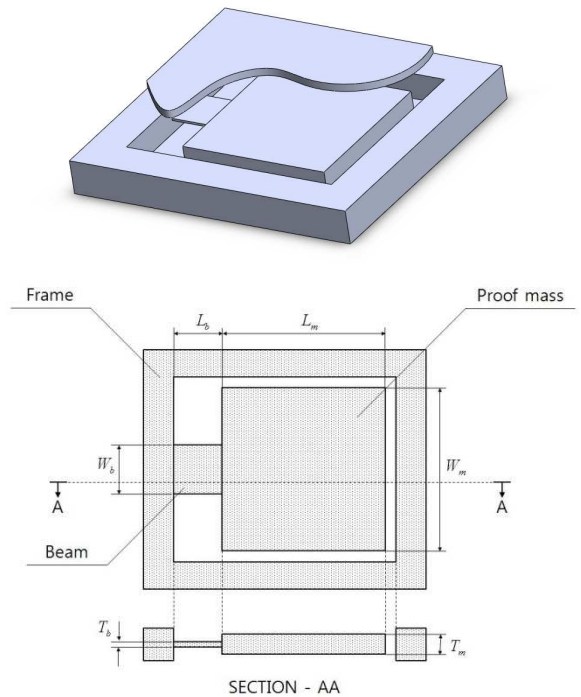


Fig. 1 Configuration of a MEMS accelerometer

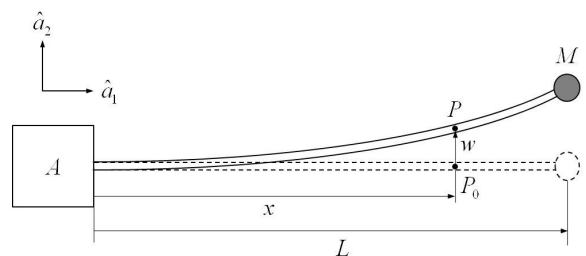
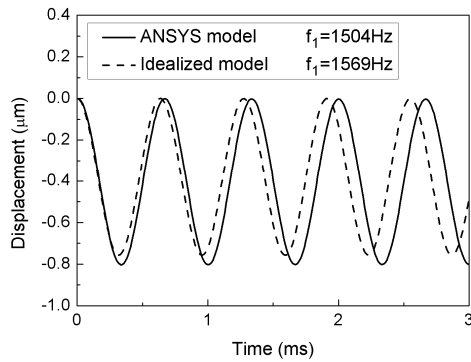


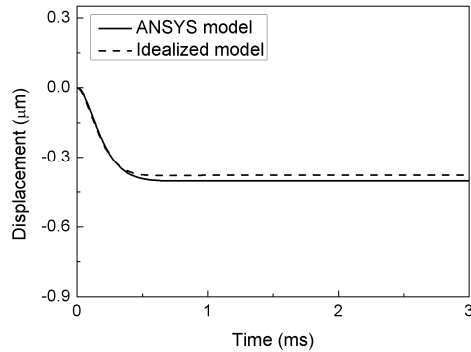
Fig. 2 Idealized model of the MEMS accelerometer

Table 1 Material and geometric data of the MEMS accelerometer

Notation	Description	Data
ρ	Density	2330 kg/m ³
E	Young's modulus	190 GPa
L_b	Beam length	600 μm
W_b	Beam width	600 μm
T_b	Beam thickness	30 μm
L_m	Mass length	2000 μm
W_m	Mass width	2000 μm
T_m	Mass thickness	250 μm



(a) Result with no damping



(b) Result with damping ratio 0.707

Fig. 4 Transient responses of ANSYS and idealized models undergoing a step input force

여기서

$$m_{ij} = \int_0^L \rho \phi_i(x) \phi_j(x) dx + M \phi_i(L) \phi_j(L) \quad (2)$$

$$k_{ij} = \int_0^L EI \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx \quad (3)$$

$$P_i = \int_0^L \rho \phi_i(x) dx \quad (4)$$

ANSYS 모델과 이상화 모델의 모드해석 결과를 비교함으로써 식 (1)의 타당성을 검증하였다. 식 (2)와 (3)의 집중질량 M 과 면적관성모멘트 I 는

Table 1⁽¹⁵⁾에 주어진 물성치로 계산될 수 있다. 이상화된 빔의 길이 L 은 $L_b + 0.45L_m$ 로부터 얻어질 수 있다. ANSYS 모델의 첫 번째 고유진동수는 1504Hz 이고 이상화 모델은 1569Hz 이며 두 고유진동수 결과의 상대오차는 약 4.1%이다. Fig. 4(a)는 ANSYS 모델과 이상화 모델의 집중질량 중심에 $10^{-4}N$ 의 스텝 입력이 작용할 때 과도해석 결과이다. 이때 두 응답의 평균 값의 상대오차는 약 5.7%이다. 응답의 평균 값을 구하기 위해 감쇠비 0.707 을 모델에 적용하였고 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(b)와 같이 정적 평형 응답은 1ms 이내에 얻어질 수 있고 이상화 모델이 수치해석에 있어서 간단하고 편리하기 때문에 이하에서는 이상화 모델을 사용한다.

3. MEMS 가속도계 성능

본 연구에서는 두 가지의 가속도계 성능지수가 이용되었다. 첫 번째 성능지수는 민감도 S 이고 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{w}{a_m} \quad (5)$$

여기서 w 는 집중질량의 처짐이고 a_m 는 입력 가속도이다.

입력 가속도가 $a_m \sin 2\pi f_m t$ 로 주어진다면 빔의 처짐은 $w \sin 2\pi f_m t$ 이 된다. 민감도는 식 (5)와 같으므로 입력 가속도의 주파수 변화에 따라 민감도가 변하게 된다. 따라서 민감도는 물성에 관한 함수인 동시에 입력 주파수에 관한 함수이다. 만약 MEMS 가속도계의 기하적 및 재료적 물성들이 결정된다면 민감도는 입력 주파수에 관한 함수로써 구해질 수 있다. 반면에 물성치들이 임의의 값을 가진다면 민감도는 구해질 수 없다. 그러므로 임의의 물성치를 가진 MEMS 가속도계 분석을 위해서는 민감도가 입력 주파수와 독립이어야 한다. 이를 위해 두 번째 성능지수인 측정가능 주파수 범위가 정의될 수 있고 식은 다음과 같다.

$$\left| \frac{S(0) - S(f_{mfr})}{S(0)} \right| = e_{mfr} \quad (6)$$

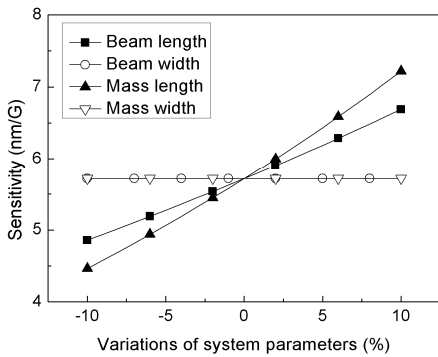
여기서 f_{mfr} 은 측정가능 주파수 범위이고 e_{mfr} 은 민감도의 허용오차이다.

Fig. 5 는 8 개 변수 각각의 변화에 따른 민감도 변화를 나타낸다. 각각의 시스템 변수들은 -10%부터 +10%까지 변하고 기준값은 Table 1 의 값을 사

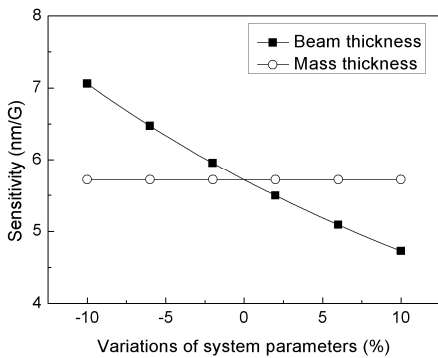
용하였다. Fig. 5(a)에서 진동질량과 빔의 길이 변화는 민감도에 상대적으로 큰 영향을 미치고 있는 반면 진동질량과 빔의 폭 변화는 민감도에 전혀 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)에서 빔 두께 변화는 민감도 변화에 상대적으로 큰 영향을 미치고 있으나 진동질량의 두께 변화는 Fig. 5(a)의 진동질량 및 빔의 폭 변화와 마찬가지로 민감도 변화에 전혀 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)에서 탄성계수와 밀도 변화 역시 민감도 변화에 영향을 미치고 있다. 그러나 그 영향은 Fig. 5(a)와 (b)에서 빔 및 진동질량의 길이

그리고 빔 두께보다 작은 것을 알 수 있다. 앞의 결과들로부터 진동질량의 길이와 빔의 두께 변화가 민감도 변화에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

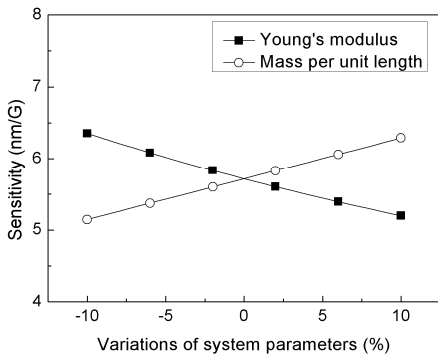
Fig. 6은 시스템 변수 각각의 변화에 따른 측정 가능 주파수 변화를 나타낸 그래프이다. 민감도 관련 결과와 마찬가지로 각 시스템 변수들은 기준값에서 -10% 부터 +10%까지 변한다. 허용오차 e_{mfr} 는 5%을 적용하였다. Fig. 5의 결과와 유사하게 진동질량의 길이와 빔의 두께 변화가 측정가능 주파수 범위 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것



(a) In-plane geometric parameter variations

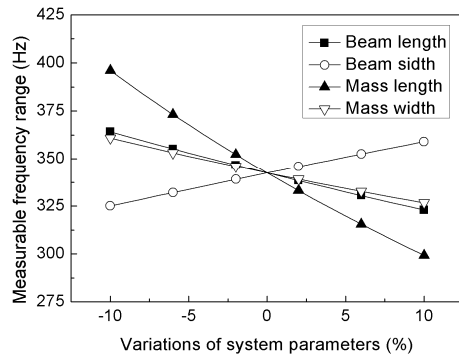


(b) Out-of-plane geometric parameter variations

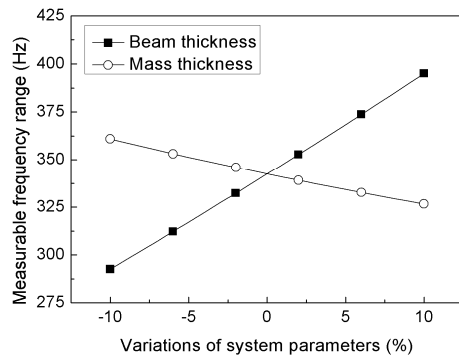


(c) Material parameter variations

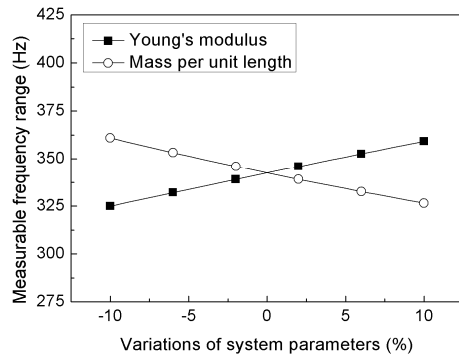
Fig. 5 Sensitivity variations versus system parameter variations



(a) In-plane geometric parameter variations



(b) Out-of-plane geometric parameter variations



(c) Material parameter variations

Fig. 6 Measurable frequency range variations versus system parameter variations

Table 2 Standard deviations of material and geometric data of the MEMS accelerometer

Notation	Description	Data
σ_ρ	Density standard deviation	100 kg/m ³
σ_E	Young's modulus standard deviation	10 GPa
σ_{L_b}	Beam length standard deviation	1 μ m
σ_{W_b}	Beam width standard deviation	1 μ m
σ_{T_b}	Beam thickness standard deviation	2 μ m
σ_{L_m}	Mass length standard deviation	1 μ m
σ_{W_m}	Mass width standard deviation	1 μ m
σ_{T_m}	Mass thickness standard deviation	2 μ m

으로 나타났다. 그러나 Fig. 5(a)와 달리 Fig. 6(a)에서 빔과 진동질량의 폭이 측정가능 주파수 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 Fig. 6(b)에서 진동질량의 두께도 측정가능 주파수 변화에 영향을 미치고 있다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 비교했을 때 민감도가 증가하면 측정가능 주파수 범위는 대체로 감소 하므로 이들 두 성능지수들은 서로 반대되는 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 성능분포 및 제조수율 예측

4.1 불확실성 해석 방법

성능분포와 제조수율 예측에 앞서 불확실성 해석 방법에 대하여 간단히 알아보려고 한다. 성능지수 Y 를 시스템 변수의 함수라고 한다면 성능함수는 다음과 같다.

$$Y = g(b_1, b_2, \dots, b_i) \quad (7)$$

성능지수의 평균과 분산은 시스템 변수의 평균과 분산을 이용하여 구할 수 있고 다음 식과 같다

$$\mu_Y = g(\mu_{b_1}, \mu_{b_2}, \dots, \mu_{b_i}) \quad (8)$$

$$Var(Y) = \sum_{j=1}^i \left(\frac{\partial g}{\partial b_j} \right)^2 Var(b_j) \quad (9)$$

여기서 μ_{b_i} 와 $Var(b_j)$ 는 각각 시스템 변수 b_j 의 평균과 분산이다. 그리고 $\partial g / \partial b_j$ 는 b_j 에 대한 성

능지수의 민감도이다. 따라서 시스템 변수의 불확실성이 주어진다면 식 (9)를 통해 성능지수의 불확실성이 구해질 수 있다. FORM 이라고 불리는 이 방법은 시간적으로 매우 효율적이어서 많은 공학문제에 쓰이고 있다. 성능곡선이 강한 비선형성을 띄지만 얇는다면 FORM 은 매우 효율적으로 사용될 수 있다. 그러나 비선형 시스템이라면 FORM 의 결과가 정확하지 않으므로 비선형 시스템의 불확실성을 해석 할 수 있는 방법을 이용해야 한다.

uDR 은 비선형 시스템의 불확실성을 해석 할 수 있는 방법 중 하나이다. 어떤 시스템의 함수 $y(\mathbf{b})$ 의 k 번째 모멘트 m_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_k = \int_{R_1} \dots \int_{R_n} y^k(\mathbf{b}) p(\mathbf{b}) d\mathbf{b} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{b} 는 b_i 로 이루어진 시스템 변수 벡터이다. R_i 는 b_i 의 영역을, $p(\mathbf{b})$ 는 \mathbf{b} 의 확률밀도함수를 나타낸다. $y(\mathbf{b})$ 의 k 번째 센트럴 모멘트 \bar{m}_k 는 다음과 같다.

$$\bar{m}_k = \int_{R_1} \dots \int_{R_n} [y(\mathbf{b}) - m_1]^k p(\mathbf{b}) d\mathbf{b} \quad (11)$$

적분계산이 용이하도록 $y(\mathbf{b})$ 를 근사화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^n y(\mu_{b_1}, \dots, b_i, \dots, \mu_{b_n}) - (n-1)y(\mu_{b_1}, \mu_{b_2}, \dots, \mu_{b_n}) \quad (12)$$

식 (12)를 식 (10)과 식 (11)에 대입하여 각 모멘트들을 구할 수 있다. 이어서 각각의 모멘트들로부터 평균, 분산, 왜도, 첨도를 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mu_Y = m_1 \quad (13)$$

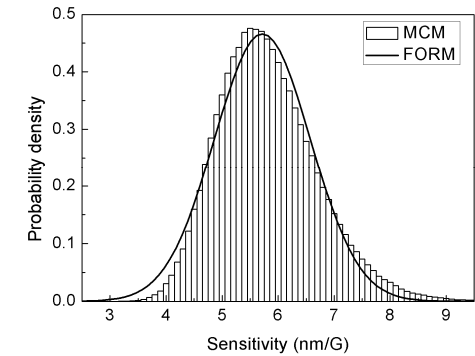
$$\sigma_Y^2 = \bar{m}_2 \quad (14)$$

$$\sqrt{\beta_Y} = \frac{\bar{m}_3}{\sigma_Y^3} \quad (15)$$

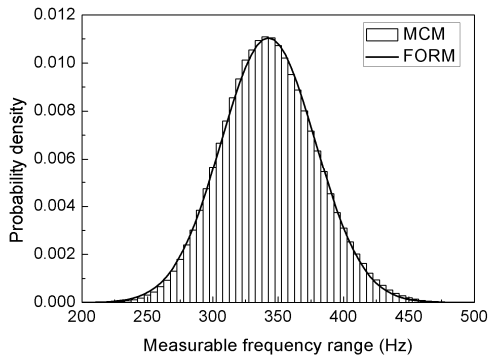
$$\beta_{1Y} = \frac{\bar{m}_4}{\sigma_Y^4} - 3 \quad (16)$$

식 (13)~(16)으로부터 함수 y 의 통계량이 도출되면 피어슨 시스템을 이용하여 확률분포를 구할 수 있다.

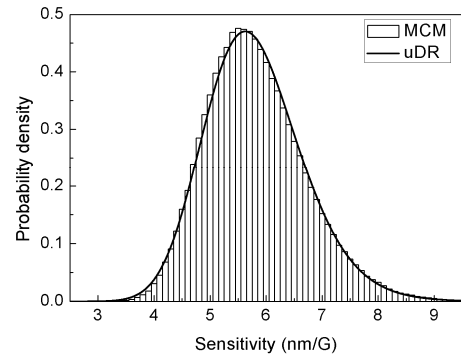
$$\frac{p'(y)}{p(y)} = \frac{y-b}{a+by+cy^2} \quad (17)$$



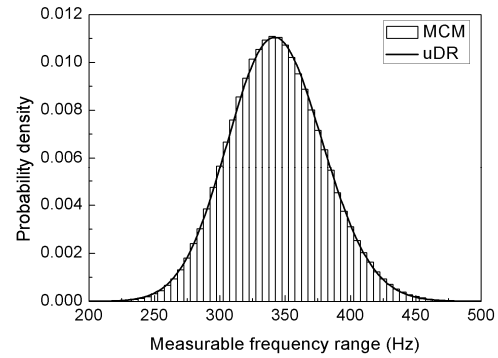
(a) Sensitivity distribution



(b) Measurable frequency range distribution

Fig. 8 Probability density distributions of two performance indices by FORM and MCM

(a) Sensitivity distribution



(b) Measurable frequency range distribution

Fig. 9 Probability density distributions of two performance indices by uDR and MCM

여기서 a , b , c 는 다음과 같다.

$$a = -\frac{\bar{m}_2(4\bar{m}_2\bar{m}_4 - 3\bar{m}_3^2)}{10\bar{m}_2\bar{m}_4 - 18\bar{m}_2^3 - 12\bar{m}_3^2} \quad (18)$$

$$b = -\frac{\bar{m}_3(\bar{m}_4 - 3\bar{m}_2^2)}{10\bar{m}_2\bar{m}_4 - 18\bar{m}_2^3 - 12\bar{m}_3^2} \quad (19)$$

$$c = -\frac{2\bar{m}_2\bar{m}_4 - 3\bar{m}_3^2 - 6\bar{m}_2^3}{10\bar{m}_2\bar{m}_4 - 18\bar{m}_2^3 - 12\bar{m}_3^2} \quad (20)$$

4.2 성능분포 및 제조수율 예측

최근 반도체 공정 기술로 MEMS 가속도계 치수들은 수 μm 이내로 조절될 수 있다. 그렇지만 두께 같은 면외 방향 치수들은 면내 방향 치수들에 비해 크기가 매우 작으므로 면외 방향 치수들의 불확실성은 면내 방향 치수들의 불확실성보다 상대적으로 크다. 게다가 MEMS 제조 회사들은 주로 실리콘 자체를 생산하지 않기 때문에 탄성계수나 밀도 같은 재료에 대한 불확실성은 조절될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 재료 관련 불확실성은 주어진 값으로 간주한다. 그 외의 기하적 물성

치들은 통상적인 값들을 사용하였고 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 제시된 시스템 변수들의 불확실성으로부터 FORM을 이용하여 두 성능지수의 불확실성이 도출되면 이를 이용하여 두 성능지수의 확률분포를 구할 수 있다. Fig. 8은 FORM 결과와 MCM 결과를 나타내고 있다. 총 500,000개의 시스템 변수 샘플을 생성하여 MCM 해석을 수행하였다. Fig. 8(b)에서 FORM과 MCM에 의한 측정가능 주파수 범위 분포는 거의 일치하고 있다. 그러나 Fig. 8(a)의 민감도 분포는 약간의 오차가 존재한다. 따라서 해당 시스템은 민감도에 대하여 비선형성을 가진다는 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 9에서 uDR을 이용한 해석 결과는 MCM 결과와 거의 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.

한편 FORM의 해석 시간은 약 0.5초 미만이고 uDR은 약 5초 미만이다. 반면 MCM의 해석 시간은 FORM 해석 시간의 100,000배 이상이다.

제조수율 예측을 하기 위해 MEMS 가속도계의 성능요구조건을 다음과 같이 설정하였다.

Table 3 Comparison of manufacturing yields by uDR and MCM

	Manufacturing yield by uDR (%)	Manufacturing yield by MCM (%)	Error (%)
P_{mfr}	99.6	99.7	0.10
P_{sen}	99.1	99.4	0.35
P_{yield}	98.7	99.1	0.45

$$\begin{aligned} S &= 4nm / G \\ f_{mfr} &= 250Hz \end{aligned} \quad (21)$$

MCM 결과를 통해 성능요구조건을 만족할 확률을 직접적으로 구할 수 있지만 시간상 매우 비효율적이다. 그러나 간단히 두 성능요구조건을 각각 만족할 확률을 Fig. 9의 분포곡선의 넓이를 계산함으로써 구할 수 있고 이것으로 수율을 예측할 수 있다. 두 성능지수가 서로 반비례하는 경향이 있으므로 두 조건을 모두 만족할 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{yield} = P_{sen} \cdot P_{mfr} \quad (22)$$

여기서 P_{sen} 과 P_{mfr} 은 각 성능요구조건을 만족하는 확률이고 P_{yield} 는 두 조건을 모두 만족하는 확률이다. Table 3 과 같이 식 (22)로부터 두 조건을 모두 만족하는 확률은 약 98.7%이고 MCM 으로부터 얻은 결과는 약 99.1%이다. 약 0.45%의 오차를 보이고 있으므로 두 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 MEMS 가속도계 성능의 불확실성 해석을 수행하고 수율을 예측하였다. 먼저 MEMS 가속도계의 성능을 정의하고 매개변수 연구를 수행하여 시스템 성능곡선의 선형적인 경향을 파악하였다. 두 가지의 불확실성 해석 방법을 적용하여 시스템 성능의 불확실성을 해석하고 MCM 결과와 비교하였다. 마지막으로 MEMS 가속도계의 성능요구조건을 설정하고 이를 만족할 확률을 구함으로써 수율 예측을 하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업 임 (No. 2010-0016395)

참고문헌

- (1) Yazdi, N., Ayazi, F. and Najafi, K., 1998, "Micromachined Inertial Sensors," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1640~1659.
- (2) Roylance, L. M. and Angell, J. B., 1979, "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 12, pp. 1895~1905.
- (3) Rodulf F., 1983, "A Micromechanical Capacitive Accelerometer with a Two-point Inertial-Mass Suspension," *Sensors and Actuators*, Vol. 4, pp. 191~198.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Wang, Q. M., Yang, Z., Li, F. and Smolinski, P., 2004, "Analysis of Thin Film Piezoelectric Micro-accelerometer using Analytical and Finite Element Modeling," *Sensors and Actuators A*, Vol. 113, pp. 1~11.
- (7) Puers, R. and Reyntjens, S., 1998, "Design and Processing Experiments of a New Miniaturized Capacitive Triaxial Accelerometer," *Sensors and Actuators A*, Vol. 68, pp. 324~328.
- (8) Amarasinghe, 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.
- (9) Eckhardt, R., 1987, *Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo method*, Los Alamos Science Special Issue.
- (10) Hasofer, A. M. and N. C. Lind, 1974, "Exact and Invariant Second Moment Code Format," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, pp. 111~121
- (11) Kim, B. S., Eom, S. M., Yoo, H. H., 2009, "Design Variable Tolerance on the Natural Frequency Variance of Constrained Multi-Body Systems in Dynamic Equilibrium," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 320, pp. 545~558.
- (12) Kim, Y. W. and Yoo, H. H., 2010, "Design of a Vibrating MEMS Gyroscope Considering Design

- Variable Uncertainties,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 11, pp.2175~2180.
- (13) Rahman, S., Xu, H., 2004, “A Univariate Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics,” *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19, pp. 393~408.
- (14) Youn, B. D., Xi, Z., Wang, P., 2008, “Eigenvector Dimension Reduction (EDR) Method for Sensitivity-Free Probability Analysis,” *Struct Multidisc Optim* Vol. 37, pp. 13~28.
- (15) Bao, M., 2000, *Handbook of Sensors and Actuators Volume 8 Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes*. Elsevier.