

논문 97-6-5-01

## (111) 실리콘 웨이퍼를 이용한 6빔 가속도센서의 유한요소법 해석

심준환\*, 김동권\*, 서창택\*, 류인식\*\*, 이종현\*

Analysis of 6-Beam Accelerometer Using (111) Silicon Wafer by  
Finite Element MethodJun-Hwan Sim\*, Dong-Kwon Kim\*, Ch'ang-Taeg Seo\*, In-Sik Yu\*\*,  
and Jong-Hyun Lee\*

## 요 약

본 논문에서는 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 가속도센서의 미세기계구조부의 스트레스 분포와 주파수특성을 해석하였다. 해석된 결과로 부터 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양에 적합한 새로운 형태의 6빔 압저항형 가속도센서의 파라미터 값을 설정하였다. 이때, 설계된 가속도센서의 매스 패드의 반경 및 빔 길이, 빔 폭, 빔 두께의 각 파라미터 값은 500  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ 였으며, 그리고 같은 구조의 센서에서 진동질량은 0.4 mg과 0.8 mg인 두가지 종류로 정의하였다. 설계된 구조를 가지고 (111)면 n 실리콘 웨이퍼에 n' 영역이 선택적으로 확산된 n/n'/n 3층 구조를 사용하여 6빔 압저항형 실리콘 가속도센서를 제조하고, 그 특성을 조사하였다. 이때, 센서의 미세기계구조를 형성하기 위하여 다공질 실리콘 에칭법을 이용한 마이크로머시닝기술을 사용하였다.

## Abstract

In this paper, the analyses of the stress distribution and frequency characteristics of silicon microstructures for an accelerometer were performed using the general purpose finite element simulation program, ANSYS. From the analyses, we determined the parameter values of a new 6-beam piezoresistive accelerometer applicable to the accelerometer's specification in airbag system of automobile. Then, the mass paddle radius, beam length, beam width, and beam thickness of the designed accelerometer were 500  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , and 5  $\mu\text{m}$ , respectively and two different seismic masses with 0.4 mg and 0.8 mg were defined on the same sensor structure. The designed 6-beam accelerometers were fabricated on the selectively diffused (111)-oriented n/n'/n silicon substrates and the characteristics of the fabricated accelerometers were investigated. Then, we used a micromachining technique using porous silicon etching method for the formation of the micromechanical structure of the accelerometer.

## 1. 서 론

최근에 실리콘 마이크로머시닝 기술과 반도체 집적회로 공정기술을 이용하여 소형화, 경량화 및 고성능화가 가능한 실리콘 가속도센서에 관한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>1,2,3</sup>. 일반적으로 새로운 형태의 실리콘 가속도

\* 경북대학교 전자·전기공학부 (School of Electronic &amp; Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\* 경동전문대 전자계산과 (Dept. of Computer Science, Kyungdong College)

※ 이 논문은 1996년도 한국 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

&lt;접수일자 : 1997년 8월 1일&gt;

센서의 개발은 모델링을 포함한 소자의 설계, 제작공정, 그리고 소자의 특성화의 세가지 중요한 단계로 구성되며, 여기에서 주어진 소자에 대한 특성의 이론적 예측은 개발 단계에서 개발 연구에 수반하는 시행착오를 줄여 개발 시간과 개발 비용을 줄이므로 점점 더 중요성을 더해 가고 있다. 이러한 이론적 예측을 위하여 최근 많은 분야에서 유한요소법(Finite Element Method)<sup>[4, 6]</sup>, 유한차분법(Finite Difference Method)<sup>[7]</sup>, 유한상자법(Finite Box Method) 등이 이용되고 있다. 유한요소법은 해석적 접근으로는 불가능한 복잡한 구조물의 정적 응력해석, 고유 진동해석 및 동적 해석에 이용될 수 있어, 일반 기계 및 구조물의 설계에 이용되어 왔으며, 최근에는 미세 기계구조물의 해석과 설계에도 유용하게 사용되고 있다. 더욱이 각종 압저항소자에 이용되는 구조물의 경우에는 자세한 스트레스 분포 해석이 가능하기 때문에 저항의 크기와 위치도 최적화할 수 있다.

실리콘 가속도센서는 감지원리에 따라 압저항형<sup>[8]</sup>, 용량형<sup>[9]</sup>, 그리고 압전형<sup>[10]</sup>으로 크게 나눌수 있다. 그중 압저항형 실리콘 가속도센서는 주로 (100)면 웨이퍼상에 KOH 등과 같은 이방성 식각용액에서 벌크 마이크로머시닝(bulk micromachining) 기법<sup>[11]</sup>을 사용하여 2개 또는 4개의 빔과 진동질량(seismic mass)을 가지는 구조를 이루고 있다<sup>[12, 13]</sup>. 반면 본 논문에서는 (100)면 웨이퍼에 비하여 기계적 강도가 큰 (111)면 웨이퍼를 사용하여 기관의 결정면에 관계없이 임의 형상을 정확하고 쉽게 제조할 수 있는 다공질 실리콘 마이크로머시닝법<sup>[14]</sup>으로 센서의 미세기계구조를 제조하였으며, 또한 매스를 중심으로 대칭적인 6개의 빔을 갖는 구조로 설계하여 측면방향의 원하지 않는 타축감도(cross-axis sensitivity) 감소시켰으며, 또한 외부충격에 대한 빔의 저항력을 한층 더 증가시킴으로써 센서의 기계적인 특성을 크게 향상시켰다.

본 연구에서는 유한요소 해석을 위해 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS<sup>[15]</sup>를 이용하여 가속도센서의 미세기계구조부의 동적특성을 해석하고, 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양에 적합한 6빔 가속도센서의 파라미터 값을 설정하였다. 이를 토대로 하여 다공질 실리콘의 선택 형상이 뛰어나고 양극반응시 자체정지(self-stop)<sup>[16]</sup> 특성을 가지는 (111)면 n 실리콘 웨이퍼에 n' 영역이 선택적으로 확산된 n/n'/n 3층 구조를 사용하여 6빔 압저항형 실리콘 가속도센서를 제조하고, 그 특성을 조사하였다.

## II. 유한 요소 해석을 이용한 가속도센서의 설계

### 2.1. 유한요소법

유한요소법은 구조설계나 성분설계 등의 구조 산업 분야에서 광범위하게 사용되는 표준적인 수치 모델링 기술이다. 최근에는 센서와 미세기계구조의 설계에 대한 유한요소법의 응용은 센서 산업에서 개발시간의 단축으로 인한 생산 효율성과 구조물의 응력분포를 미리 예측함으로써 그 유용성을 인정받고 있기 때문에, 점차 표준적인 설계 공정으로 되어 가고 있다. 유한 요소 해석 도구로는 ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, FLUENT 등이 있다. 본 연구에서는 PC에서 2차원, 3차원 형상에 대한 구조, 전자기장, 열-유체의 유한요소 분석도구인 ANSYS (SASI-Swanson Analysis System, Inc.) 5.3을 이용하여 유한 요소 분석을 수행하였다. ANSYS는 preprocessor, solution, postprocessor의 과정을 거쳐 분석이 이루어진다. 그림 1은 일반적으로 유한요소 분석이 이루어지는 과정을 나타낸 것이다. 먼저 재료상수, 물질특성, 요소 형태등과 같은 입력 데이터를 넣은 후, CAD를 이용하여 구조물을 설계하고 유한요소 생성을 한다. 다음으로 경계조건 설정과 analysis type을 결정하여 solving한 후, 마지막으로 결과를 분석한다.

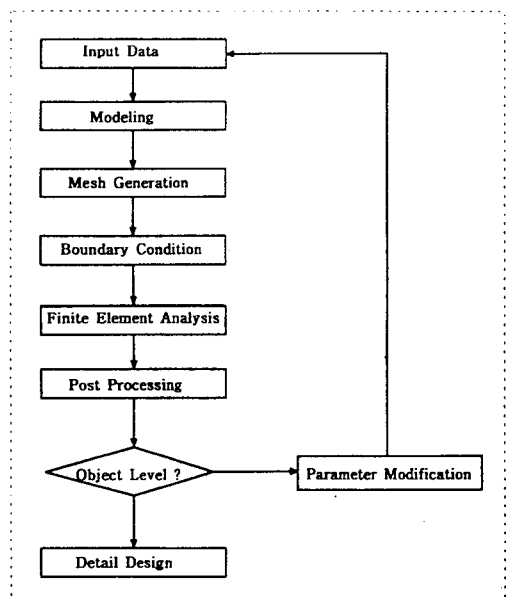


그림 1. 유한요소 해석을 위한 흐름도.

Fig. 1. Flow chart for finite element analysis.

그리고 나온 결과치가 설계기준에 만족하는지를 확인하여 설계기준에 부합하면 다시 parameter를 변경하여 처음으로 돌아가서 다시 유한요소 해석을 하게 된다.

## 2.2. 6빔 가속도센서의 설계

일반적으로 가속도센서의 구조는 빔에 질량을 부착하는 방법에 따라서 캔틸레버형과 브릿지형의 두가지 기본형태인 질량-빔 시스템으로 구분할 수 있다<sup>[5]</sup>. 또한 브릿지형 가속도센서는 지지하는 빔이 위치하는 방향에 따라 질량을 2 방향에서 지지하는 형태와 4 방향에서 지지하는 가속도 센서로 나눌 수 있다. 이것은 실리콘 기판의 방향이 (100)일 경우에 압저항이 위치할

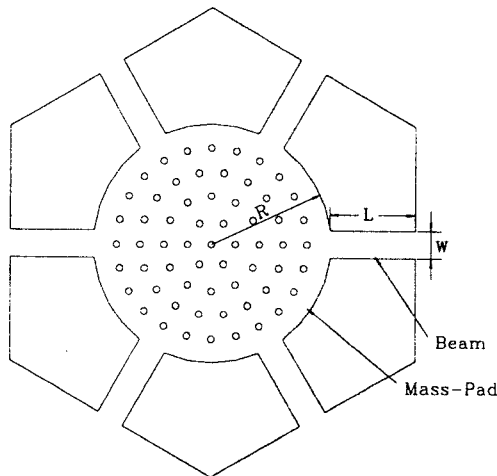
수 있는 방향이 (110)로 제한됨으로서 4 방향 이상에서는 빔을 형성할 수 없기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 압저항의 방향성 제한이 없는 (111) 실리콘 기판을 사용하여 질량을 중심으로 대칭적인 6개의 방향에서 지지하는 6빔 구조의 가속도센서를 제안하였으며, 구조의 형태는 그림 2와 같다. 이는 빔 개수의 증가로 인하여 측면방향의 원하지 않는 타측감도 감소되며, 또한 외부충격에 대한 빔의 저항력을 한층 더 증가시킴으로써 센서의 기계적인 특성을 크게 향상시킬 수 있다. 여기서 L은 빔의 길이, W는 빔의 폭, 그리고 R은 매스가 형성될 질량 pad의 반경을 나타낸 것이다.

그림 2(b)에서와 같이 6빔 가속도센서의 구조는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 먼저 실리콘 미세기체구조를 이루는 부분과 외부에서 부과하는 금속 질량로 이루어진다. 따라서 유한요소 해석을 위하여 초기 입력 조건을 설정할 때, 각각의 부분에 대하여 적합한 데이터를 주어야 한다. 이때, 주어지는 입력조건이 표 1에 나타나 있다.

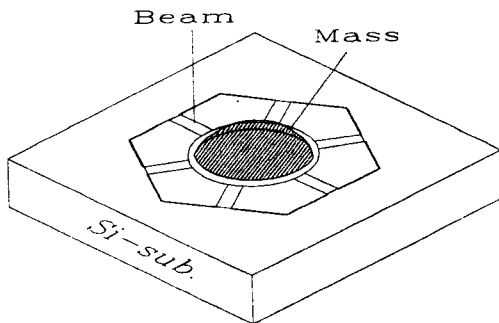
표 1. 초기 입력 조건

Table 1. Initial input condition.

Structure		Si Microstructure	Ni Mass
Material		Shell 63 (Elastic 4node 63)	Solid 92 (Tet 10node 92)
Material Properties	Young's Modulus (GPa)	18.75	16.1
	Poisson's Ratio	0.3	0.44
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	$2.328 \times 10^3$	$11.68 \times 10^3$



(a)

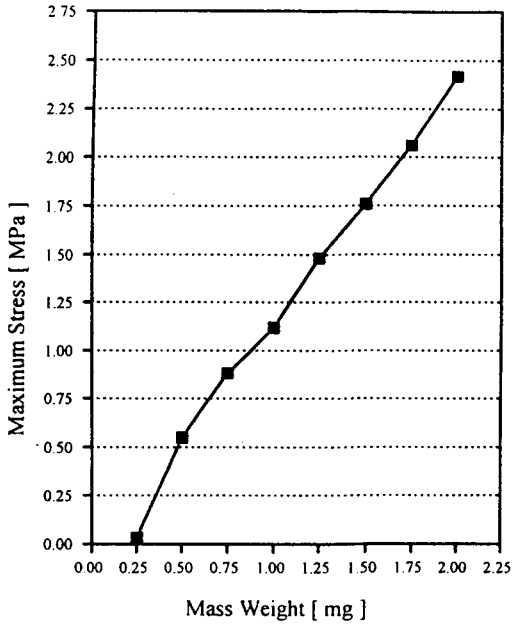


(b)

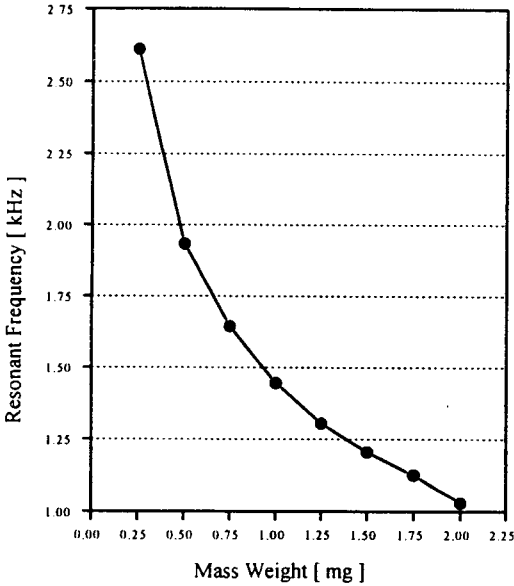
그림 2. 6빔 가속도센서의 평면구조(a) 및 입체구조(b)

Fig. 2. The structure of 6-beam accelerometer: (a) top view; (b) 3D view.

6빔 가속도센서에 대한 해석은 질량 패드의 반경을 500  $\mu\text{m}$ , 빔의 폭을 100  $\mu\text{m}$ 로 고정시키고, 1g의 일정한 가속도를 인가하여 시뮬레이션 하였을 때의 대표적인 응답특성이 그림 3 ~ 5에 나타나 있다. 그림 3은 빔의 길이를 500  $\mu\text{m}$ , 두께를 5  $\mu\text{m}$ 로 하였을 때, 질량의 무게에 따른 응답특성으로 질량의 무게가 증가함에 따라 최대 스트레스는 증가하고, 반면에 공진주파수는 감소하였다. 그림 4는 빔의 길이를 500  $\mu\text{m}$ 로 하였을 때, 질량 무게가 각각 1 mg, 2 mg일 경우에 빔의 두께에 따른 응답으로 빔의 두께가 증가할수록 최대 스트레스는 감소하고, 공진주파수는 증가한다. 그림 5는 질량의 무게

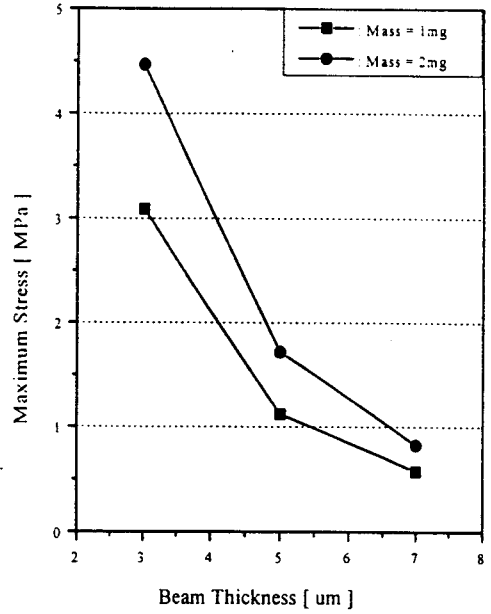


(a)

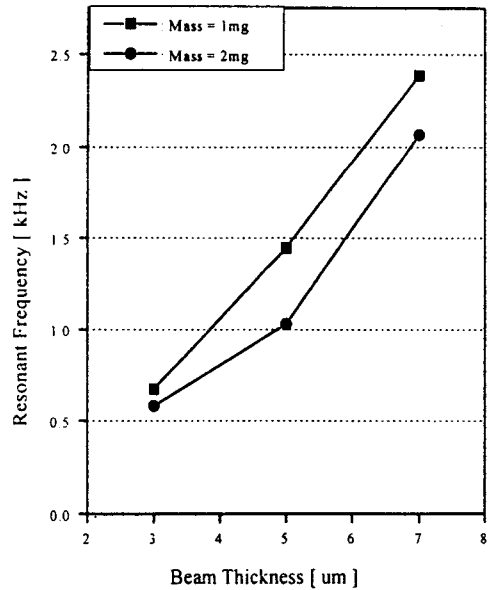


(b)

그림 3. 질량의 무게에 따른 가속도센서의 시뮬레이션된 최대 스트레스(a) 및 공진주파수(b)  
 Fig. 3. The simulated results of the accelerometer according to mass weight: (a) maximum stress; (b) resonance frequency.



(a)



(b)

그림 4. 빔의 두께에 따른 가속도센서의 시뮬레이션된 최대 스트레스(a) 및 공진주파수(b)  
 Fig. 4. The simulated results of the accelerometer according to beam thickness: (a) maximum stress; (b) resonance frequency.

를 1mg로 하였을 때, 3가지의 빔의 두께에 대하여 빔의

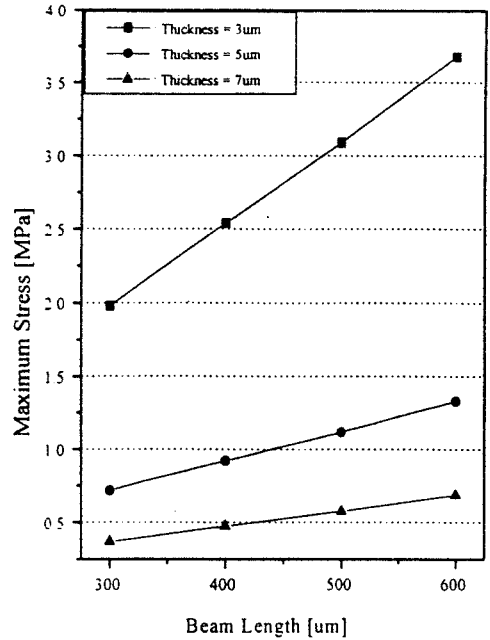
길이에 따른 최대 스트레스와 공진주파수를 나타낸 것

이다. 여기서도 빔의 증가에 따라 최대 스트레스는 증가하고, 공진주파수는 감소하였다. 이상의 결과로부터 최대 스트레스와 공진주파수는 상호 보완적인 관계로서 응용분야에 적절한 공진주파수를 가지면서 가속도센서의 감도에 영향을 주지 않는 조건을 설정하여야 한다. 특히, 최대 스트레스는 질량을 지지하고 있는 빔의 가장 자리에 나타내기 때문에 빔에 걸쳐 나타나는 스트레스의 분포를 이용하여 가속도센서의 압저항의 위치와 길이를 설정하면 센서의 감도를 최적화 할 수 있다.

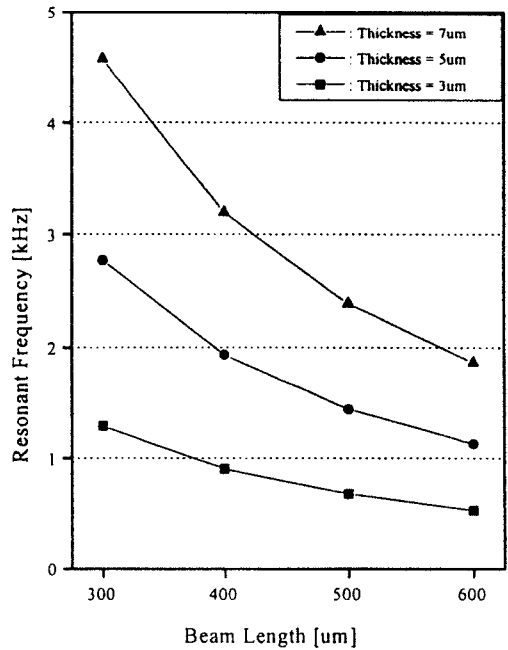
표 2는 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양에 들어가는 6빔 가속도센서의 파라미터 값을 나타낸 것이다. 이때, 에어백 센서의 사양은 감도가 1 mV/g이상, 공진주파수는 3 kHz이상이다. 본 논문에서 제시한 가속도센서의 최대 장점중의 하나는 센서를 제조한 후, 마지막 단계에서 질량을 외부에서 부과하여 적절한 양을 얻을수 있기 때문에 같은 구조의 센서에서 응용에 따라 원하는 가속도와 주파수범위를 갖는 semi-specific 센서를 만들 수 있다는 것이다. 그림 6은 표 2에서 0.8 mg의 질량을 갖는 가속도센서에 대하여 센서의 평면에 수직인 방향으로 1g 가속도를 인가했을 때, 구조물의 변형된 모양과 6개의 빔이 받는 응력분포를 나타낸 그림이다. 여기에 나타난 응력분포를 보면, 빔의 중간 부분에서는 응력이 거의 발생하지 않고, 빔과 기관이 연결되는 부분이 가장 큰 응력을 나타내며, 그 다음으로는 빔과 질량간 연결되는 부분이다. 따라서 6빔 가속도센서의 압저항은 빔의 길이에 대하여 최대 응력의 80%가 되는 빔의 가장자리에서 50 μm되는 영역에 형성하여 최적의 감도를 얻을 수 있도록 하였다.

표 2. 6빔 가속도센서의 파라미터 값  
Table 2. Parameter values of the 6-beam accelerometer.

Parameter	Type 1	Type 2
Mass Pad Radius	500 μm	500 μm
Beam Length	350 μm	350 μm
Beam Width	100 μm	100 μm
Beam Thickness	5 μm	5 μm
Mass Weight	0.4 mg	0.8 mg



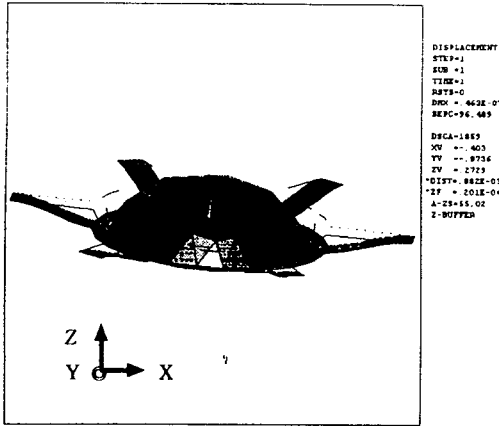
(a)



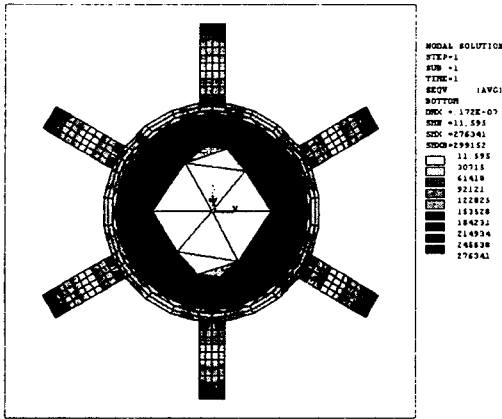
(b)

그림 5. 빔의 길이에 따른 가속도센서의 시뮬레이션된 최대 스트레스(a) 및 공진주파수(b)

Fig. 5. The simulated results of the accelerometer according to beam length: (a) maximum stress; (b) resonance frequency.



(a) deformed shape



(b) stress distribution

그림 6. Z축방향으로 1g 가속도를 인가했을 때의 가속도센서의 변형모양과 스트레스분포

Fig. 6. Deformed shape and stress distribution of the accelerometer under an acceleration of 1g in the direction of Z-axis.

센서의 주파수에 따른 응답을 해석하기 위하여 harmonic analysis를 통하여 표 2의 두가지 type에 대하여 해석하였다. 그림 7은 damping factor를 0.1로 하고 1g 사인가속도로 인가하여 시뮬레이션 하였을 때, 0.1 ~ 5 kHz까지의 주파수에 대한 최대 스트레스를 나타낸 것이다. 표 3은 1g 가속도하에서 static 및 modal 해석을 통하여 얻은 6빔 가속도센서의 시뮬레이션 결과이다. 이때, type 1과 type 2의 공진주파수는 각각 4.341 kHz, 3.083 kHz로서 그림 7에서 얻은 값과 일치하고 있다.

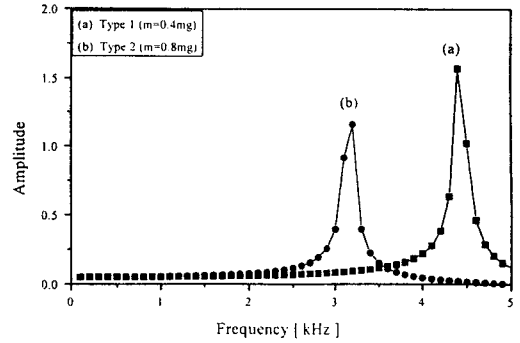


그림 7. FEM 시뮬레이션을 이용한 가속도센서의 주파수 응답

Fig. 7. Frequency response of the accelerometer using FEM simulation.

표 3. 6빔 가속도센서의 시뮬레이션 결과

Table 3. The simulated results of the 6-beam accelerometer.

Structure Characteristics		Type 1	Type 2
Maximum Stress (MPa)		0.361	0.676
Maximum Deflection ( $\mu\text{m}$ )		0.025	0.042
Resonance Frequency (kHz)	1 Mode	4.341	3.083
	2 Mode	9.396	6.03
	3 Mode	9.4	6.033

### III. 센서제조 및 특성측정

그림 8은 다공질 실리콘 에칭법을 이용하여 제조한 6빔 미세구조의 SEM 사진이고, 그림 9는 진동질량이 올라간 압저항형 실리콘 가속도센서의 SEM 사진이다. 제조된 센서는 중심에 하나의 진동질량, 이것을 지지하는 6개의 빔, 그리고 각 빔 위에 하나의 압저항과 빔 바깥에 하나의 고정저항으로 구성되어 있다. 따라서 마주보는 브릿지에서 각 빔 위의 두 개의 압저항과 바깥의 두 개의 고정저항을 하나의 half-bridge로 구성하여 총 3개의 브릿지 출력신호가 나오도록 설계하였다. 제조된 가속도센서의 매스 패드(mass pad)의 반경 및 빔

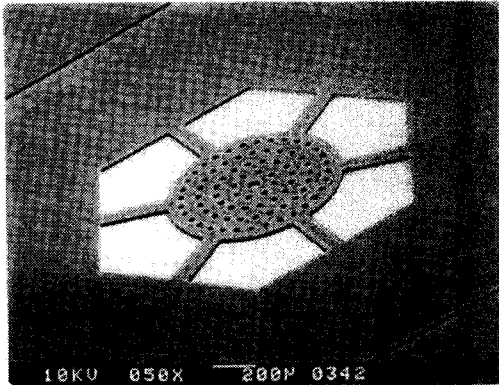


그림 8. 6빔 미세구조의 SEM 사진  
Fig. 8. SEM photograph of the 6-beam microstructure.

길이, 빔 폭, 빔 두께의 각 파라미터 값은  $500\ \mu\text{m}$ ,  $350\ \mu\text{m}$ ,  $100\ \mu\text{m}$ ,  $5\ \mu\text{m}$ 로서 표 2와 같다. 또한 미세구조와 기판 사이의 공극은  $20\ \mu\text{m}$ 이며, 칩의 면적은  $3.7\ \text{mm} \times 3.7\ \text{mm}$ 이다. 그리고 센서의 진동질량을 추가하는 방법은 현재 IC(Integrated Circuit)의 패키징(packaging) 분야에 넓게 이용되고 있는 Pb/Sn/Ag 솔더 페이스트를 매스 패드에 디스펜싱(dispensing)<sup>117)</sup>하여 3-zone reflow 장치를 사용하여 열처리하는 것이다. 따라서 같은 구조의 센서를 가지고 단순히 진동질량은 양을 다르게 함으로써 감도 및 공진주파수가 다른 가속도센서를 제조할 수 있다는 것이다. 본 실험에서 사용된 센서의 진동질량은 0.4, 0.8 mg으로 제조하였다.

압저항형 가속도센서의 제조 공정은 크게  $n/n^+/n$  3층 구조의 시편 형성, 압저항 형성, 미세구조 형성, 금속화 및 관성질량 제조 공정으로 되어있다. 이때 사용한 웨이퍼는 4", 결정면이 (111)이고 저항율이  $5\sim 10\ \Omega \cdot \text{cm}$ 인 n형 실리콘 기판을 사용하였다. 미세구조 제조를 위한 마이크로머시닝은 그림 8의 결과에서 보는 것처럼 정확한 미세구조의 형성이 용이한 다공질 실리콘 에칭법을 이용하였으며, 가속도센서의 세부적인 공정조건은 참고문헌 [18]에 잘 나타나 있고, 전체적인 공정은 그림 10과 같다.

그림 11은 진동질량이 0.4 mg와 0.8 mg인 두가지 종류의 가속도센서에 대하여 센서의 평면에 수직인 방향으로 0 ~ 6g의 사인파형 가속도를 인가하였을 때, 200배의 증폭회로를 거친 3개의 브릿지 출력전압을 unity gain을 가지는 가산회로를 통하여 합산하여 얻은

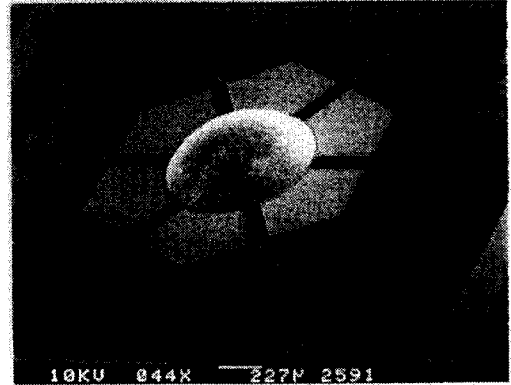


그림 9. 관성질량이 올라간 소자의 SEM 사진  
Fig. 9. SEM photograph of the accelerometer with a loaded mass.

표 4. 제조된 6빔 가속도센서의 측정 결과  
Table 4. The measured results of the fabricated 6-beam accelerometer.

Structure Characteristics	Type 1	Type 2
Sensitivity (mV/g)	0.68	1.56
① Measured Resonance Frequency (kHz)	4.236	3.21
② Simulated Resonance Frequency (kHz)	4.341	3.083
Error between ① and ② (%)	- 2.48	+ 3.95

출력특성을 나타낸 것이다. 이때, 측정된 감도는 type 1(질량=0.4mg)이 0.68 mV/g, type 2(질량=0.8mg)가 1.56 mV/g이며, 비선형특성은 full scale 출력에서 모두 2% 이하로 나타났다. 그림 12는 type 1의 센서에 대하여 1g의 일정한 진동으로 40 Hz ~ 8 kHz 범위의 주파수를 인가하여 센서의 주파수 특성을 측정된 그림이다. 이때 측정된 공진주파수는 4.236 kHz이었다. 표 4는 제조된 가속도센서의 감도 및 측정된 공진주파수와 시뮬레이션으로 얻은 공진주파수를 비교한 것이다. 이때, 두가지 종류의 센서에 대한 측정결과를 보면, 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양인 감도 1 mV/g, 공진주파수 3 kHz를 만족시키기 위해서는 진동질량의 양을 0.6 mg으로 설정하면 가능하다는 것을 알 수

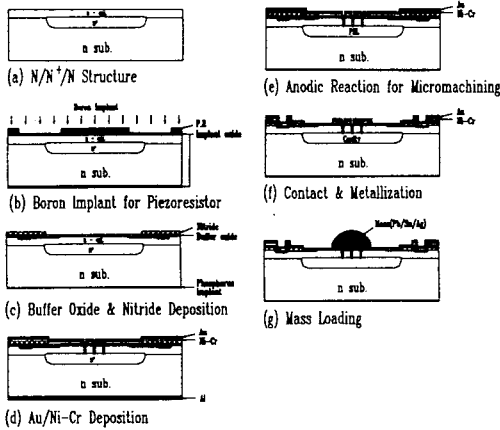


그림 10. 가속도센서의 제조 공정도  
Fig. 10. Fabrication process of the accelerometer.

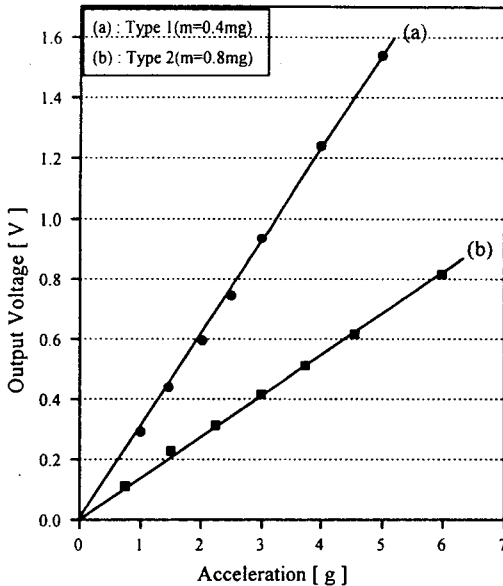


그림 11. 가속도에 따른 센서의 출력특성  
Fig. 11. Output characteristic of the accelerometer as a function of acceleration.

있다. 여기서 측정 공진주파수의 결과와 시뮬레이션 결과를 비교했을 때, 시뮬레이션 결과가 측정치와 비교적 잘 들어 맞고 있음을 알 수 있다. 따라서 FEM 시뮬레이션을 통한 센서의 특성분석을 통하여 센서의 응용범위에 적합한 구조물을 최적화할 수 있을 것으로 생각한다.

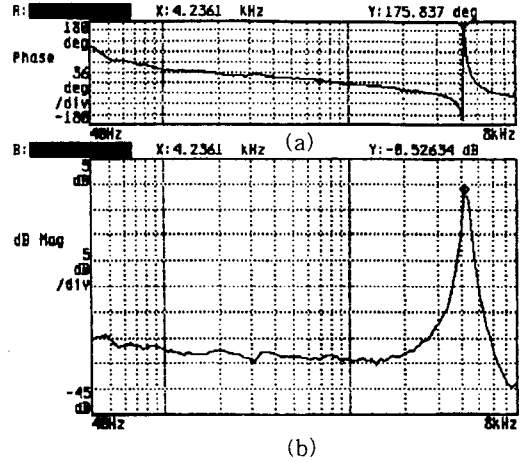


그림 12. 1g 가속도하에서 인가 주파수에 따른 센서의 위상 (a) 및 진폭응답 (b)  
Fig. 12. Frequency-dependent shift (a) and amplitude response(b) as a function of the excitation frequency as measured at a constant excitation of 1g.

#### IV. 결론

본 논문에서는 유한요소 해석을 위해 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 가속도센서의 미세기계구조부의 스트레스 분포와 주파수특성을 해석하여, 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양에 적합한 6빔 가속도센서의 파라미터 값을 설정하였다. 이때, 설정된 가속도센서의 매스 패드의 반경 및 빔 길이, 빔 폭, 빔 두께의 각 파라미터 값은 500  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ 였다. 여기서 설계된 센서를 가지고 다공질 실리콘의 선택 형성이 뛰어나고 양극반응시 자체정지 특성을 가지는 (111)면 n 실리콘 웨이퍼에 n' 영역이 선택적으로 확산된 n/n'/n 3층 구조를 사용하여 6빔 압저항형 실리콘 가속도센서를 제조하고, 그 특성을 조사하였다.

진동질량이 0.4 mg와 0.8 mg인 두가지 종류의 가속도센서에 대하여 센서의 평면에 수직인 방향인 Z축방향으로 0 ~ 6g의 사인파형 가속도를 인가하였을 때, 200배의 증폭회로를 거친 3개의 브릿지 출력전압을 unity gain을 가지는 가산회로를 통하여 합산하여 출력특성을 얻었다. 이때, 측정된 감도는 type 1(질량=0.4mg)이 0.68 mV/g, type 2(질량=0.8mg)가 1.56 mV/g이며, 비선형 특성은 full scale 출력에서 모두 2% 이하로 나타났다.



또한 1g의 일정한 진동으로 40 Hz ~ 8 kHz 범위의 주파수를 인가하여 센서의 주파수 특성을 측정 한 결과, 측정된 공진주파수는 type 1에서 4.236 kHz, type 2에서 3.21 kHz이었다. 이때, 측정된 공진주파수와 시뮬레이션으로 얻은 공진주파수를 비교하였을 때, type 1과 2에서 각각 -2.48%, +3.95%로 나타났다. 따라서 FEM 시뮬레이션을 통한 센서의 특성분석을 통하여 센서의 응용범위에 적합한 구조물을 최적화할 수 있을 것으로 생각한다. 이상의 측정결과로 부터 자동차의 에어백 시스템에 들어가는 가속도센서의 사양인 감도 1 mV/g, 공진주파수 3 kHz를 만족시키기 위해서는 진동질량의 양을 type 1과 2의 중간영역인 0.6 mg으로 설정하면 가능하다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. E. Petersen, A. Shartel, and N. F. Raley, "Micromechanical accelerometer integrated with MOS detection circuitry," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, pp. 23-26, 1982.
- [2] F. Rudolf, A. Jornod, and P. Bencze, "Silicon microaccelerometer," *Transducers '87, Dig. of Tech. Papers*, pp. 395-398, 1987.
- [3] S. Terry, "A miniature silicon accelerometer with built-in damping," *Tech. Dig. of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 114-116, 1988.
- [4] F. Pourahmadi, P. Barth, and K. Petersen, "Modeling of thermal and mechanical stresses in silicon microstructures," *Sensors and Actuators*, vol. A21-A23, pp. 850-855, 1990.
- [5] T. Tschan, N. de Rooij, A. Bezing, S. Ansermet, and J. Berthoud, "Characterization and modeling of silicon piezoresistive accelerometers fabricated by a bipolar-compatible process," *Sensors and Actuators*, vol. A25-A27, pp. 605-609, 1991.
- [6] T. Tschan, N. de Rooij, and A. Bezing, "Analytical and FEM modeling of piezoresistive silicon accelerometers: predictions and limitations compared to experiments," *Sensors and Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 189-203, 1992.
- [7] Ki Won Lee, "Modeling and simulation of solid-state pressure sensors, U.M.I. A Bell & Howell Information Co., 1987.
- [8] J. T. Suminto, "A simple, high performance piezoresistive accelerometer," *Transducers '91, Dig. of Tech. Papers*, pp. 104-107, 1991.
- [9] H. Seidel, H. Riedel, et al., "Capacitive silicon accelerometer with highly symmetrical design," *Sensors and Actuators*, vol. A21-A23, pp. 308-311, 1990.
- [10] M. E. Motamedi, "Acoustic accelerometers," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, vol. UFFC-34, no. 2, pp. 237-242, 1987.
- [11] E. Bassous, "Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1178-1185, 1978.
- [12] H. Crazzolara, G. Flach, and W. von Munch, "Piezoresistive accelerometer with overload protection and low cross-sensitivity," *Sensors and Actuators*, vol. A39, pp. 201-207, 1993.
- [13] V. M. McNeil, M. J. Novack, and M. A. Schmidt, "Design and fabrication of thin-film microaccelerometers using wafer bonding," *Transducers '93, Dig. of Tech. Papers*, pp. 822-825, 1993.
- [14] 조찬섭, 심준환, 이종현, "다공질 실리콘 식각법을 이용한 실리콘 미세가공기술", *대한전자공학회 논문지*, 제 31권, A편, 11호, pp. 116-123, 1994.
- [15] "ANSYS engineering analysis system user's manual for ANSYS revision 5.3," Swanson Analysis System Inc., Houston, PA., 1996.
- [16] R. P. Holmstrom and J. Y. Chi, "Complete dielectric isolation by highly selective and self-stopping formation of oxidized porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 42, no. 2, pp. 386-388, 1983.
- [17] N. Peteron, "A solder paste dispenser for SMD Assembly," *Proceedings of NEPCON/West '86*, pp. 619-621, Feb. 1986.

- [18] Jun-Hwan Sim, Sung-Ho Hahm, Jung-Hee Lee, Jong-Hyun Lee, In-Sik Yu, and Jin-Sup Kim, "Eight-beam piezoresistive accelerometer fabricated by using a selective porous silicon etching method," Transducers '97, Dig. of Tech. Papers, pp. 1193-1196, 1997.

---

 著 者 紹 介
 

---

## 심 준 환

『센서학회지 제4권 제1호』 논문 95-4-1-09, p.71 참조.  
현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정



## 김 동 권

1974년 7월 22일생. 1996년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정. 주관심 분야 : 반도체 센서, 회로설계.

## 류 인 식

『센서학회지 제4권 제1호』 논문 95-4-1-09, p.71 참조.  
현재 경동전문대학 전자계산과 조교수.

## 이 종 현

『센서학회지 제4권 제1호』 논문 95-4-1-09, p.71 참조.  
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수



## 서 창 택

1975년 2월 09일생. 1997년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정. 주관심 분야 : 반도체 센서, FEM해석