

# 터널링 전류효과를 이용한 마이크로가속도 센서의 축전기부 해석

## Analysis in Capacitor of Microaccelerometer Sensor Using Tunnelling Current Effect

김 옥 삼

O. S. Kim

**Key Words** : Microaccelerometer Sensor(마이크로가속도 센서), Tunnelling Current Effect(터널링 전류효과), Coupled Thermo-electric Analysis(열-전기 연성해석), Capacitor(축전기), Finite Element Method(유한요소법), SOI Wafer(실리콘 절연 웨이퍼)

**Abstract** : The microaccelerometer using a tunnelling current effect concept has the potential of high performance, although it requires slightly complex signal-processing circuit for servo-system. The paddle of microaccelerometer is pulled to have the gap width of about 2nm which almost allows the flow tunnelling current. This paper demonstrates at capacitor of microaccelerometer the use of the coupled thermo-electric analysis for voltage, current, heat flux and Joule heating then tunnelling current flows. Two electrodes are applied to the microaccelerometer producing a uniform difference of temperature gradient and electric potential between the paddle and the substrate.

### 1. 서 론

마이크로가속도 센서는 자동차의 서스펜션(suspension), ABS, 에어백(air bag) 및 네비게이터(navigator) 등에서 가속도 변화를 검출하는 요소로서 많이 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 아울러 부피와 크기가 작고 민감도가 우수한 마이크로가속도 센서는 자동차 조향장치, 구동시 진동제어 장치 등을 위한 다양한 용도가 있다. 초소형이면서 브릿지회로에 전원전압을 공급하여 측정범위 200% 정도의 순간 가속도를 측정 가능한 마이크로가속도 센서는, 실리콘 절연웨이퍼(silicon on insulator, SOI wafer)를 소재로 종전의 기계적 가공법이 아닌 마이크로머시닝(micromachining)에 의해 제작 가능하다<sup>2)</sup>.

MEMS(microelectromechanical systems)나 마이크로센서(microsensor)들의 설계공정에서 컴퓨터로 모델링을 하거나 최적의 형상을 추구하는 선도설계(leading design)는 미국을 비롯한 일부국가들에서 이루어 졌다. SENSIM<sup>3)</sup> MEMCAD<sup>4)</sup> 및 CAEMEMS<sup>5)</sup> 등의 상업용 패키지 코드는 유한요소법(finite element method, FEM) 또는 경계요소

법(boundary element method, BEM) 등으로 각종 마이크로가속도 센서의 잔류응력 및 잔류변형량의 결과 도출이 가능하지만 축전기부의 전기적 성질에 대한 해석은 아직 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 그러나 SOI웨이퍼로 제작하는 승용차용 마이크로가속도 센서의 연구개발에는 구조체의 설계과정에서 적층막(depositing layer)과 열산화층(thermal oxide layer)의 기계적 성질변화 및 잔류응력의 해석<sup>6)</sup>과 축전기부의 전기적성능 예측이 최적설계에 중요한 요건으로 작용한다.

본 연구는 양자역학적 현상에서 나타나는 미소 에너지 갭(energy gap)을 극복하는 터널링전류(tunnelling current) 원리를 이용한 승용차 에어백의 검침부 역할을 하는 마이크로가속도 센서<sup>7)</sup>의 작동과정에서 정전기력(electrostatic force)이 유지될 때 축전기(capacitor)부를 해석한다. 이때 줄발열(Joule heating)은 열과 전기를 연성해석(coupled analysis)하여 축전기의 온도분포, 전압분포, 전류변화 양상, 열유속의 거동을 유한요소법의 범용 상용코드인 MARC K6.1로 해석하여 향후 터널링전류 원리에 기초한 마이크로가속도 센서의 패들 및 축전기부 최적형상설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

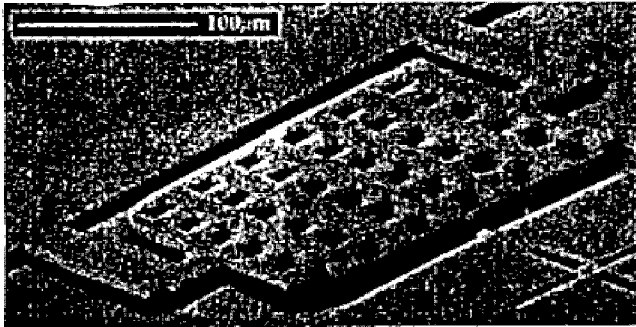
접수일 : 1999년 7월 28일

김옥삼 : 여수대학교 기계공학과

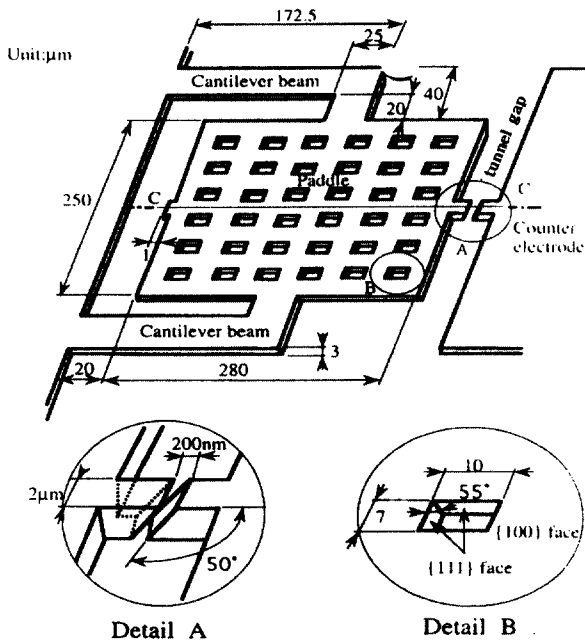
## 2. 터널링 전류효과를 이용한 마이크로가속도 센서의 작동원리

### 2.1 구조 및 제작방법

마이크로가속도 센서는 실리콘 단결정(single crystal silicon, SCS)의 패들(paddle)과 아래에 있는 기판(substrate)의 전극의 사이에 전하가 존재하는 축전기부가 있다. 정전용량의 차이가 가속도의 변화로 나타나는 터널링 전류효과를 기초로 한 마이크로가속도 센서이며 SEM (scanning electron microscope) 이미지와 대략적 형상 및 치수를 Fig. 1의 (a)와 (b)에 나타냈다<sup>7)</sup>. 패들의 재질은 밀러지수(miller index) {100}면의 SCS이고 두께는  $3\mu\text{m}$ , 기판과 패들의 극판거리 즉, 축전기의



(a) SEM image of microaccelerometer



(b) Rough configuration

Fig. 1 Schematic views of microaccelerometer

높이는  $4\mu\text{m}$ 이다. 센서의 패들에 36개의 작은 구멍을 제작한 이유는 무게를 감소시키면서 전극의 기능도 함께 하고자 함이다. 가공 및 제작에는 집속 이온 빔(focused ion beam, FIB) 가공기술<sup>8)</sup>, 박막 성형과 이방성(anisotropic) 및 등방성 에칭(isotropic etching)기술 등의 MEMS 제작을 위한 최첨단 마이크로머시닝 기술<sup>9)</sup>이 사용되어 졌다.

온도변화시 열팽창의 차이에 의하여 열응력과 점탄성적 변형이 발생하여 온도 히스테리시스(hysteresis)를 나타내지만 상하대칭 형상은 측정하지 않은 다른축의 감도 향상에 유리한 점이 있다. 기판축의 대향전극(counter electrode)과의 유효거리는 과대한 가속도에 대하여 스토퍼로서 역할을 하기 때문에 센서의 내충격성이 우수하도록 설계되었다. 아울러  $3\mu\text{m}$  두께의 두 개의 외팔보(cantilever beam)로 지지되어 외팔보의 잔류응력이 스프링계수 및 센서의 감도에 영향을 미친다.

### 2.2 작동원리

마이크로가속도 센서의 가속도 검출부는 Fig. 2 (b)그림의 우측상단에 있는 터널갭(tunnel gap)에서 높이방향의 가속도  $a_z$ 를 검출한다. 이 갭은 패들에 작용하는 정전인력에 의하여 터널링 전류가 흐르기 직전의 간격  $2\text{nm}$ 을 유지하고 있으며 나노미터 단위의 미소환경에서는 절연과괴가 일어나지는 않는다. 터널갭의 간격을  $200\text{nm}$ 에서  $2\text{nm}$ 로 축소시키는데 필요한 전압은  $15\text{V}$  정도이다.

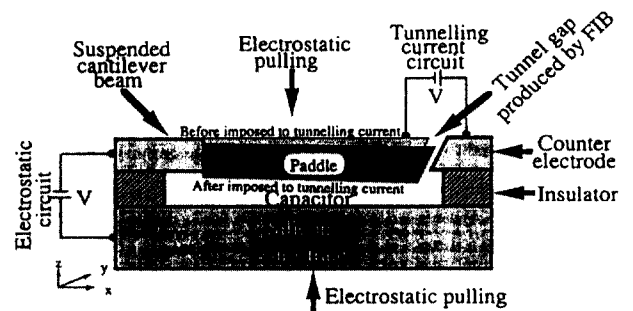


Fig. 2 Operating principles according to tunnelling current and electrostatic force

아울러 정전기력이 직접 패들에 작용하고 있기 때문에 패들 위치를 효과적으로 제어함으로써 축전기의 전계 형상을 합리적으로 설계할 수 있다.

패들과 기판이 평행한 위치에 있을 때 극판 사이에 전압  $V$ 를 인가하면 극판에 전하가 축적되고 전계를 형성한다. 이때 축전기의 정전기력  $F$ 는 식

(1)과 같다.

$$F = \frac{S\epsilon}{2} \left(\frac{V}{d}\right)^2 \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 은 극판사이 물질의 유전율,  $S$ 는 대향 전극의 극판면적,  $V$ 는 인가전압 및  $d$ 는 극판사이의 거리이다.

가속도의 변화는 패들과 기판의 간격을 축소시킴으로써 축전기의 전기 강도와 전하량이 변화하기 때문에 정전기회로(electrostatic force circuit)에 전류가 흐른다. 작동회로도는 Fig. 3과 같이 패들의 피드백 서보 루프(feedback servo loop)에서 터널링 전류를 가지는 가속도가  $a$ 이며 관성력은  $F_i$ ,  $y$ 는 패들의 변위이다. 외팔보에서 변위는 임계수준을 초과하였을 때 터널링 전류  $i$ 에 의해 측정된다. 터널링 전류  $i$ 가 피드백 전압  $V$ 로 변환한 작용력  $F_e$ 를 발생시킨다. 가속도  $a_z$ 를 받으면 패들 질량에 작용하는 관성력에 의해 외팔보가 움직이게 되고 터널링 전류의 간격이 변화한다. 이때 터널링 전류를 검지하고 축전기 전압  $V$ 를 제어하여 이 갭의 간격을 2nm이하로 일정하게 유지한다. 그 보상전압  $\Delta V$ 에서 환산하여  $a_z$ 를 구한다.

3. 모델과 연성해석 문제의 이산화(離散化)

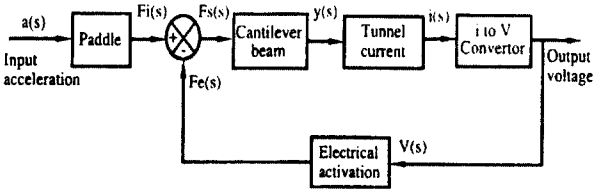


Fig. 3 Block diagram of microaccelerometer based on a tunnelling current effect concept

3.1 모델해석

터널링 전류효과를 이용한 마이크로가속도 센서에 대한 열과 전기의 연성해석은 전기에 의한 줄 열의 온도의존성을 고려해야 한다. 이 경우 전기저항은 온도의 함수, 내부발열은 전류의 함수로서 취급했다. Fig. 4와 같이 마이크로가속도 센서 패들부(a)는 요소수 143개, 절점수 615개로 분할하였고 축전기(b)는 4절점 사각형 요소 22개와 36개의 절점으로 구성하였다. 가로 290 $\mu$ m, 세로 250 $\mu$ m, 높이

4 $\mu$ m의 직사각형 형상의 축전기 공간을 요소 및 절점 분할하고 전류와 전압의 경계조건 및 온도의존성의 성질 변화를 고려하였다.

3.2 연성문제의 이산화

전기전도의 문제에서 사용하고 있는 열의 단위 변환을 위해 프로그램에서는 전류에 의해 발생된 열량에 파라미터 계수를 곱하여 열유속을 계산하였다. 열전도와 전기전도의 연성해석에서 양자역학적 연성은 무시하여 전압과 온도분포를 시간증분의 사이에 독립적으로 처리하였다. 전기전도 문제는 각 시간 증분에서 정상상태로 해석하고 이때 전류에 의한 발생열은 새로운 입력으로 하였다. 아울러 해석으로 얻은 온도분포로 전기저항의 값을 수정하고 바로 다음 시간증분에서 전기전도 문제에 대입하였다. 열과 전기의 연성문제에 있어서 전기전도방정식과 열전도방정식은 아래와 같이 식(2) 및 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\rho(T)V = I \quad (2)$$

$$C(T)\dot{T} + K(T)T = Q + Q^E \quad (3)$$

여기서  $\rho(T)$ 는 온도의존성을 고려한 전기전도 매트릭스,  $V$ 는 절점의 전압벡터,  $I$ 는 절점의 전류

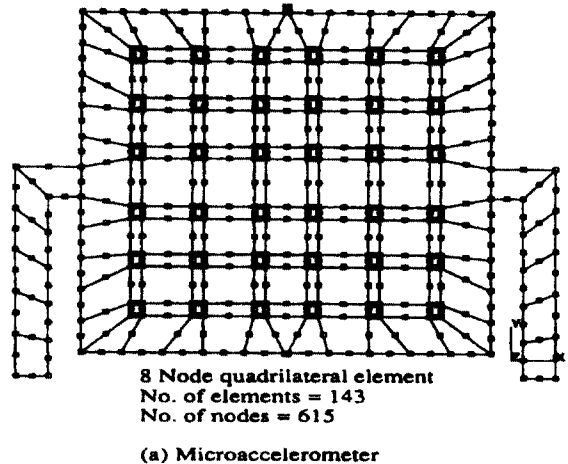


Fig. 4 Finite element meshes for capacitor and microaccelerometer

벡터이다. 그리고 식(3)의  $C(T)$ 는 온도의존성을 고려한 열용량 매트릭스,  $\dot{T}$ 는 절점 온도벡터의 시간에 대한 미분계수이다.  $K(T)$ 는 온도의존성을 고려한 열전도 매트릭스,  $T$ 는 절점 온도벡터,  $Q$ 는 열유속 벡터 및  $Q^E$ 는 전류에 의해 발생하는 열유속을 의미한다.

전기와 열의 연성에 관한 항은 식(2)의  $\rho(T)$ 와 식(3)서의  $Q^E$ 로서 표현되고 식(3)을 미소 시간스텝에 대하여 풀기 위해 후방차분법을 사용하였다.

$$\frac{1}{\Delta t} [C(T) + K(T)] T_n = Q_n + Q_n^E + \frac{1}{\Delta t} C(T) T_{n-1} \quad (4)$$

$n-1$ 시간 스텝에서 식(4)을 이용해 축전기의 임의의 요소와 절점의 열유속 흐름에 따른 온도분포, 온도구배를 구하고 전압분포와 전류의 거동 등의 전기적 성질도 해석하였다.

Fig. 5의 흐름도와 같이 해석한 전기와 열전도의 연성방정식에서 비정상항인  $\{\dot{T}\}$ 를 이산화하여 얻은 최종 강성방정식에 시간증분에 따른 초기조건 및 경계조건을 미소 시간증분  $\Delta t$  를 적분하여 근사해를 구하였다.

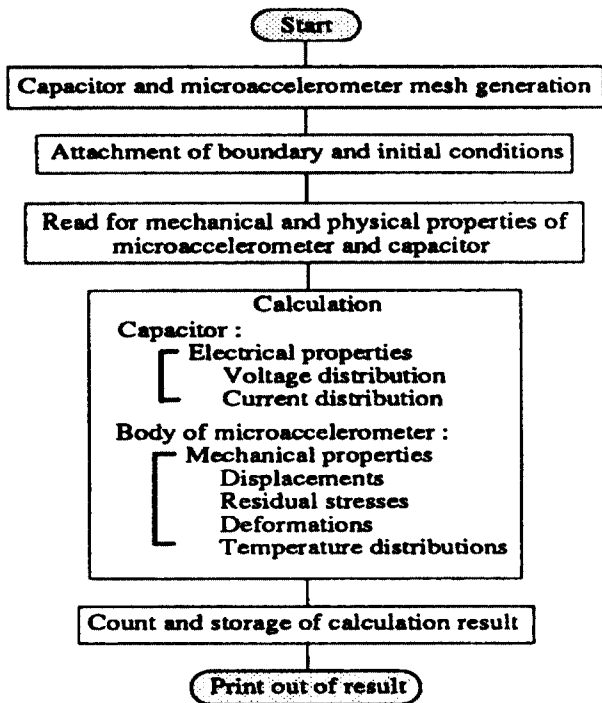


Fig. 5 Flow chart for analyses in micro-accelerometer and capacitor

#### 4. 해석결과 및 고찰

Fig. 6은 가속도의 변화량을 검지하는 터널갭과 대향전극 사이의 검출부에서 전압의 분포양상을 나타낸 것이다. 이 그림은 갭을 중심으로 좌우대칭의 형상을 나타내고 터널갭의 상단부(표면으로부터  $1\mu\text{m}$ 정도)에는  $-1.72 \sim -3.58 \text{ V}$ 의 전압을 나타내고 있다. 대향전극은 상단부에서 전압인  $15 \text{ V}$ 가량이 인가되어 있고  $2\mu\text{m}$ 에 이르는 중심부에는  $9.4 \sim 13.1 \text{ V}$ 의 비교적 균일한 전압분포를 보여주고 있다.

Fig. 7은 마이크로가속도 센서의 전극에  $15 \text{ V}$ 의 전압이 부과된 경우 검출부에서의 전압구배를 나타낸 것이다. z축이  $4\mu\text{m}$ 에 이르는 기판부근에서는

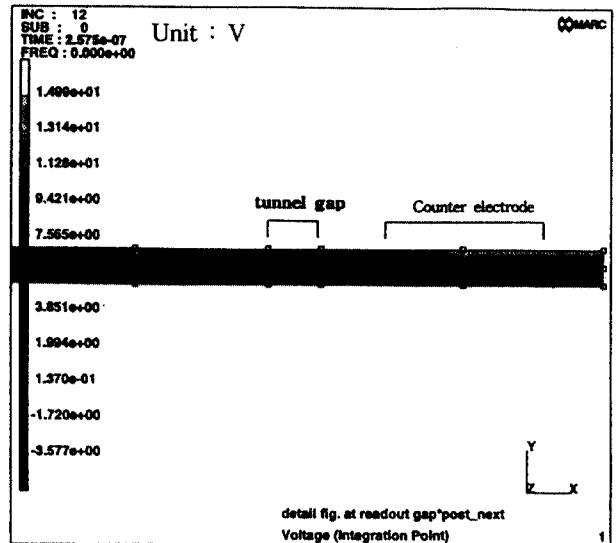


Fig. 6 Detail figure of voltage at readout gap

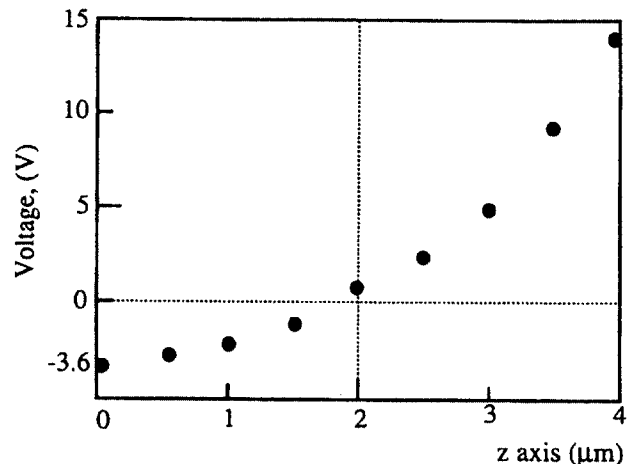


Fig. 7 Voltage of distribution vs. z-axis in case of 15V

14.9 V를 나타내며 중심부(z-방향 2 $\mu\text{m}$ )에서는 0.7 V, 패들 부근에서는 -3.57 V의 마이너스 전압을 보여준다. 이 그림에서 알 수 있듯이 터널링 전류 효과를 이용한 마이크로가속도 센서의 축전기 내에서 전압의 기울기는 1 $\mu\text{m}$  당 4.68 V에 이르며 이 수치는 향후 정전기력을 작용력으로 이용하는 여러가지 형태의 마이크로가속도 센서의 설계를 위한 기초자료가 될 것이다.

Fig. 8은 축전기의 전류분포를 나타내며 터널갭에서 수직방향의 축으로 비교적 정확한 대칭성을 보여준다. 전류구배를 나타내는 그림의 중심축 부근은 진한색으로 표현되는  $1.15 \times 10^{-4} \text{ A}$ 로 부터  $1.24 \times 10^{-5} \text{ A}$  정도의 전류분포 거동을 나타냈다. 아울러 센서 본체인 패들과 대향전극 방향으로 진행하면서 전류가 증가하여  $1.04 \times 10^{-3} \text{ A}$  정도에 도달한다. 이와 같은 경우 전류구배는 1 $\mu\text{m}$  당  $1 \times 10^{-4} \text{ A}$  정도의 급격한 기울기를 의미한다.

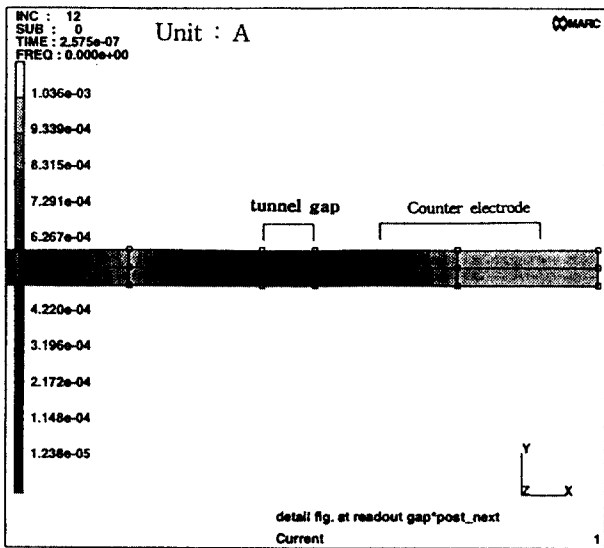


Fig. 8 Detail figure of current at readout gap

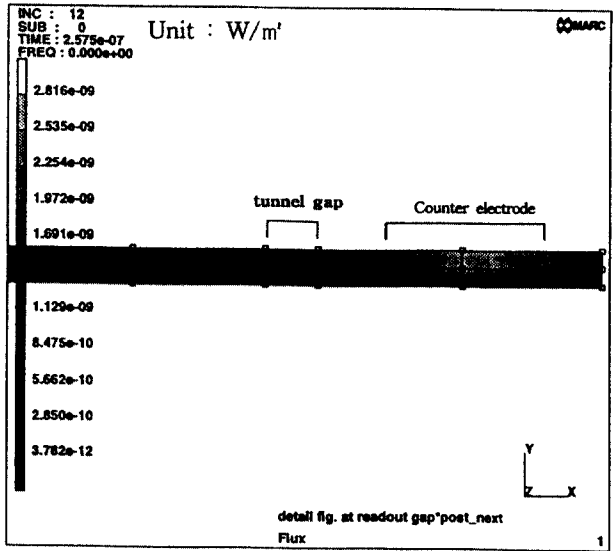


Fig. 9 Detail figure of heat flux at tunnel gap

Fig. 9는 열유속이 축전기의 터널갭에서 어떠한 양상으로 나타나고 있는가를 보여주는 것이다. 15 V의 부과전압의 경우 터널갭에서  $5.7 \times 10^{-10} \sim 3.8 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  가량의 미미한 가열공정을 나타내므로 터널링전류를 이용한 마이크로가속도 센서의 설계 시 열유속의 거동은 무시할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 10은 마이크로가속도 센서의 축전기에 15 V 정도의 전압을 인가한 후 축전기의 위치에 따른 출발열에 의한 온도분포를 나타낸 것이다. 그림의 우측상단에 표시한 것과 같이 세 지점 ( $z=4, x=0$

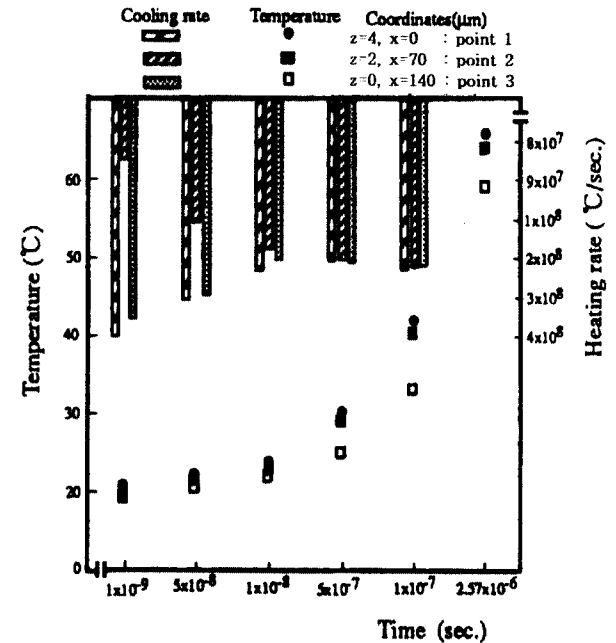


Fig. 10 Comparison the temperature with to heating rate according to Joule heating at capacitor

과  $z=2, x=70$  및  $z=0, x=140 \mu\text{m}$ )에서 계산하였다. 가열 개시 이후  $1 \times 10^{-8} \text{ sec}$ 까지는 21~24°C 정도까지 가열되어 부분별 온도편차가 3~4°C 정도에 이르렀지만  $5 \times 10^{-7} \text{ sec}$  후에는 7~8°C의 차이가 발생하였다. 가열개시  $2.6 \times 10^{-6} \text{ sec}$  후에서는  $x=140 z=0 \mu\text{m}$  위치에서 57°C,  $x=70, z=2 \mu\text{m}$ 에서 63°C 및  $x=0, z=4 \mu\text{m}$ 에서 65°C 정도의 온도분포를 나타내고 있었다. 이때 가열속도는 우측의 좌표에서 알 수 있듯이  $7.5 \times 10^7 \sim 9.2 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C/sec}$  정도의 빠른 속도로

진행되고 있었다. 터널링 전류효과 이용한 마이크로가속도 센서의 축전기의 온도는 출발열로 인하여 57~65°C까지 도달할 것으로 예측된다.

Fig. 11은 인가전압을 0.1 V에서 200 V까지 다양하게 변화시켰을 때 축전기의 출발열 온도를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 15 V를 기준으로 0.1 V~15 V까지 가열속도(heating rate)는 1.44°C/V이며, 이후부터 200 V 구간에서는 1.14°C/V를 나타내는데 양측은 모두 로그좌표(log coordinate)이다. 그러나 온도의 절대값은 전체영역에서 68°C에서 176°C까지 비교적 고온상태로 유지되고 있으므로 15 V이상의 전압을 부과하는 경우는 출발열에 대한 문제를 고려해야 할 것으로 사료된다.

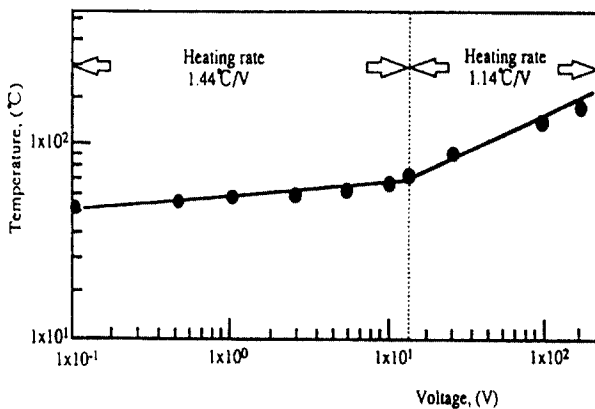


Fig. 11 Maximum temperature vs. applied voltage

### 5. 결론

터널링 전류효과를 이용한 마이크로가속도 센서의 작동과정에서 축전기의 전기적 성질을 해석한 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 마이크로가속도 센서의 축전기에서 터널갭 상단부인 표면 1 $\mu$ m는 -1.72~3.58 V, 중심부에서는 9.4~13.1 V의 비교적 균일한 전압분포를 나타냈으며, 전반적으로 전압의 기울기는 1 $\mu$ m 당 4.68 V정도를 나타냈다.
- 2) 축전기에서 전류분포는 터널갭 부근에서 수직축으로 대칭성을 보여주며, 구배는  $1 \times 10^{-4}$  A/ $\mu$ m 정도였다. 중심축 부근의 전류분포는  $1.15 \times 10^{-4}$  A 부터  $1.24 \times 10^{-5}$  A 정도 양상을 나타내며, 센서 패들과 대향전극 방향으로 진행하면서 증가하여  $1.04 \times 10^{-3}$  A에 도달했다.
- 3) 열유속은 축전기의 터널갭 부근과 대부분의

영역에서  $5.7 \times 10^{-10} \sim 3.8 \times 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> 와  $1 \times 10^{-9}$  W/m<sup>2</sup>의 미미한 정도를 나타내므로 터널링 전류효과를 이용한 마이크로가속도 센서의 열유속 거동을 무시할 수 있을 것으로 사료된다.

- 4) 축전기부 전체영역의 온도는 출발열로 인하여 57~65°C까지 도달할 것이다.

### 참고문헌

1. Bryzek J., "Impact of MEMS Technology on Society", Sensors and Actuators, A56, pp. 1~9, 1996
2. 金鉢三, 吉村 忍, 矢川 元基, "トンネル電流原理に基づくマイクロ加速度 センサーのジュール發熱および應力解析", 日本機械學會計算力學部門, 第 10 回計算力學 講演會, No. 97-7, O.S. 7-3, pp. 59~60, 1997
3. Cray S., Juma O. and Zhang Y., "Software Tools for Designers of Sensor and Actuator CAE Systems", IEEE Solid-state Sensors and Actuators (Transducers' 91), San Francisco, CA, USA, pp. 498~501, 1991
4. Gilbert J. R. et al, "Implementation of a MEM CAD System for Electrostatic and Mechanical Analysis of Complex Structures from Mask Descriptions, Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, pp. 207~212, 1993
5. Lee K. W. and Wise K. D., "SINSIM : A Simulation Program for Solid - State Pressure Sensors", IEEE., Transactions on Electron Devices, ED-29, pp. 34~41, 1982
6. Kim O. S., Yoshimura S. and Yagawa G., "Finite Element Analyses of Residual Stress Causing Popping up of Microaccelerometer Based on Tunneling Current Concept", International Conference on Materials and Mechanics'97, D-5A, International Conference on Forum, Tokyo, Japan. pp. 125~130, 1997
7. Moore D. F., Burgess S. C., Chiang H., Klaubert H., Shibaie N. and Kiriya T., "Micromachining and Focused Ion Beam Etching of Si for Accelerometer Symposium on Micromachining and Microfabrication", SPIE, Vol. 2639, pp. 253~258, 1995
8. Young R. J., "Micro-machining using a Focused Ion Beam", Vacuum, Vol. 44, 3/4, pp. 353~358, 1993
9. Petersen Kurt E., "Silicon as a Mechanical Materials", Proc. of IEEE., Vol. 70, No. 5, pp. 420~452, 1982