

< 논문 >

마이크로 가스센서의 열적 성능에 관한 연구

주영철* · 김창교*

(2005년 12월 20일 접수, 2006년 4월 26일 심사완료)

A Study of Thermal Performances for Micro Gas Sensor

Youngcheol Joo and Chang Kyo Kim

Key Words: Gas Sensor(가스센서), Heat Transfer(열전달), MEMS, Numerical Analysis(수치해석)

Abstract

A lever type NO₂ micro gas sensor was fabricated by MEMS technology. In order to heat up the gas sensing material to a target temperature, a micro heater was built on the gas sensor. The sensing material laid on the heater and electrodes and did not contact with the silicon base to minimize the heat loss to the silicon base. The electric power to heat up the gas sensor to a target temperature was measured. The temperature distribution of micro gas sensor was analyzed by a CFD program. The predicted electric power of micro heater to heat up the sensing material to the target temperature showed a good agreement with the measured data. The design of micro gas sensor could be modified to show more uniform temperature distribution and to consume less electric power by optimizing the layout of micro heater and electrodes.

기호설명

C : 자연대류상수

\dot{E}_g : 에너지 발생률(W)

g : 중력가속도(m/s²)

h : 대류열전달계수(W/m² · K)

k : 열전도율(W/m · K)

I : 전류(A)

L : 대표 길이(m)

n : 지수

Nu : Nusselt 수

\dot{q} : 단위체적당 에너지 발생률(W/m³)

Ra : Rayleigh 수

R_e : 전기 저항(Ω)

T : 온도(K)

T_s : 표면 온도(K)

T_∞ : 대기의 온도(K)

V : 부피(m³)

α : 열확산율(m²/s)

β : 체적 열팽창계수(K⁻¹)

ν : 동점성계수(m²/s)

1. 서론

질소 산화물 (NO_x) 가스는 오존 가스의 주요 생성원으로서 대도시에서 차량 배기가스로 인한 스모그 현상을 일으키고 산성비를 내려서 환경을 파괴시키는 주 원인중의 하나이다. 과거에는 공장이나 발전소, 가정의 보일러 배출가스가 NO_x 가스의 주요 발생원이었으나 자동차의 수가 증가함에 따라 차량 내연기관의 배출가스가 NO_x 가스의 주요 발생

† 책임저자, 회원, 순천향대학교 기계공학과
E-mail : ychjoo@sch.ac.kr
TEL : (041)530-1551 FAX : (041)530-1550

* 순천향대학교 정보기술공학부

원이 되고 있다. 이렇게 유해한 NO_x 가스를 측정하기 위해서 고체 전해질을 이용한 전기화학식 센서나⁽¹⁾ SnO_2 , ZnO , WO_3 , TiO_2 산화 세라믹 혹은 박막을 이용한 반도체 방식의 센서⁽²⁻⁴⁾와 같이 여러 가지 NO_x 가스센서가 개발되었다. 최근에는 산화물 반도체 박막 혹은 후막이 민감성과 신뢰성이 높아 NO_2 가스센서의 감지 회로로 활용하는 방법이 활발히 연구되어 왔다. 이러한 센서는 NO_2 가스가 산화물 반도체 박막 혹은 후막의 표면에 접촉하면 흡착되어 반도체의 전기저항이 변화되는 성질을 이용한 것으로 가스 감도를 좋게 하기 위해 박막을 470~530K의 일정한 온도로 균일하게 가열하여야 한다. 이를 위하여 마이크로 히터가 장착되는데, 소요되는 전력을 적게 하면서 감지 회로의 온도가 균일한 설정온도로 유지되도록 하는 것이 중요하다.

그러나 기존에 수행되었던 마이크로 가스센서의 열전달 현상에 대한 연구는 거의 대부분이 구조물의 응력해석을 할 때 주로 사용되는 유한요소법을 기본으로 하는 상용 프로그램[ANSYS,⁽⁵⁻⁸⁾ SOLIDIS⁽⁹⁾ 등]을 사용하였고, 열전달 현상을 해석할 때 주로 사용하는 유한체적법을 기본으로 한 열유체 해석 전용 프로그램을 이용한 경우는 거의 없다. 또한 기존의 연구는 실리콘 기판과 마이크로 히터, 전극의 고체 사이에 이루어지는 열전도만을 다루는 연구가 대부분이고,^(5,6,8,9) 여기에 고체 표면에서 일어나는 대류열전달에 의한 열손실을 고려한 연구가 몇몇 있을 뿐,⁽⁷⁾ 고체의 표면에서 일어나는 복사열전달에 의한 열손실을 고려한 연구는 드물다. 또한 대부분의 기존 연구는 열전달 해석을 통하여 마이크로 가스센서의 온도분포를 파악하는데만 관심이 있고 이를 이용하여 소비전력을 산출하려는 노력이 보이지 않는다. 따라서 가스센서 표면에서의 대류 및 복사를 통한 열방출을 포함한 정밀한 온도분포 해석과 이를 이용한 가스센서의 소비전력을 예측할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 대기중의 NO_2 가스 농도를 측정하기 위해 MEMS 공정을 이용하여 SnO_2 를 가스 감응물질로 하고 마이크로 히터가 감응물질을 가열해주는 마이크로 가스센서를 제작하였다. 마이크로 히터에서 발생한 열이 효율적으로 감응물질을 가열하는데 사용되고 실리콘 베이스로 누설되는 열방출을 줄이기 위하여 마이크로 히터와 전극을 공중에 다리 모양으로 뜨도록 제작하였다. 감응물질은 마이크로 히터와 전극위에 부착되어 실리콘 베이스와의

접촉을 완전히 차단하였다. 감응물질을 작동온도까지 가열하려면 마이크로 히터에 얼마만한 전류를 공급해 주어야 하는지, 마이크로 히터에서 발생한 열이 감응물질을 효과적으로 가열하는지의 여부를 확인하기 위해 가스센서의 온도분포를 유한체적법을 이용한 전산 프로그램 FLUENT를 이용하여 해석하고, 실험 결과와 비교하였다.

2. 가스센서 제작 및 측정

2.1 제작공정

가스센서는 일반적인 MEMS 공정을 이용하여 만들어진다. 베이스로는 (100) 방향의 4인치 n-type 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 이 웨이퍼의 양면에 $1\mu\text{m}$ 두께의 SiO_2 막을 열산화법으로 성장시킨 후, 전극과 마이크로 히터를 만들기 위한 금속층을 증착한 후 포터리소그라피법으로 감광제를 이용하여 패턴을 형성한다.

Au/NiCr 막을 입힌 후 에칭하여 전기도금을 위한 베이스를 만든 후, 니켈을 $6\mu\text{m}$ 의 두께로 전기도금하여 마이크로 히터와 전극을 만든다. 다리형의 가스센서를 제작하기 위해 실리콘 습식식각을 이용하여 V자 형태의 홈을 형성한다. 마지막막으로 감지물질을 마이크로 히터와 전극 위에 스크린 프린팅하여 형성한다. 제작한 여러 가지 형태의 마이크로 가스센서중 하나의 구조를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 마이크로 히터에서 발생하는 열을 감응물질에 효율적으로 전달하고 실리콘 베이스로 누설되는 열을 최소화하기 위해 실리콘 베이스에 V자 형태의 홈을 파서 마이크로 히터와 전극의 중앙부분이 실리콘 베이스에 닿지 않고 공중에 다리 형태로 떠 있도록 하였다. 감응물질은 마이크로 히터와 전극위에 올려져 있어서 실리콘 베이스와는 전혀 접촉하지 않는다. 마이크로 히터의 폭은 $20\mu\text{m}$, 길이는 $1510\mu\text{m}$ 이며, 전극은 폭 $20\mu\text{m}\sim 65\mu\text{m}$, 길이 $350\mu\text{m}$ 의 2개로 이루어져 있다. 네 귀퉁이의 네모난 부분은 마이크로 히터에 전류를 공급하고 전극의 저항을 측정하기 위한 전선을 연결할 접점들이다. 마이크로 가스센서의 전체 면적은 $1.3\times 1.3\text{mm}^2$ 이다. Fig. 1(b)는 제작된 마이크로 가스센서의 사진이다.

2.2 소비전력 측정

가스센서 감응물질이 470~530K의 일정한 온도

로 가열되었을 때 가스센서가 NO₂ 가스를 가장 효율적으로 감지한다. 감응물질은 이 작동온도로 가열하기 위하여 마이크로 히터에 전류를 가해야 하는데, 이때 작동온도에 도달하기 위한 전류의 크기를 아는 것이 매우 중요하다.

마이크로 가스센서 전체의 크기가 매우 작고 특히 감응물질의 면적은 190×170 μm²에 불과하므로 감응물질의 온도를 직접 정확하게 측정하기는 매우 어렵다. 따라서 마이크로 가스센서 전체를 핫플레이트 위에 올려놓고 온도를 일정하게 유지시킨 후에 감지전극의 저항을 측정하였다. 마이크로 가스센서를 상온으로 식힌 후에 마이크로 히터에 전압을 변화시키면서 전류를 가하여 감지

전극의 저항값이 마이크로 핫플레이트에서 측정 한 저항값과 동일한 값을 나타낼 때의 전압을 측정하여 히터의 소비전력을 산출하였다.

3. 가스센서의 열전달 해석

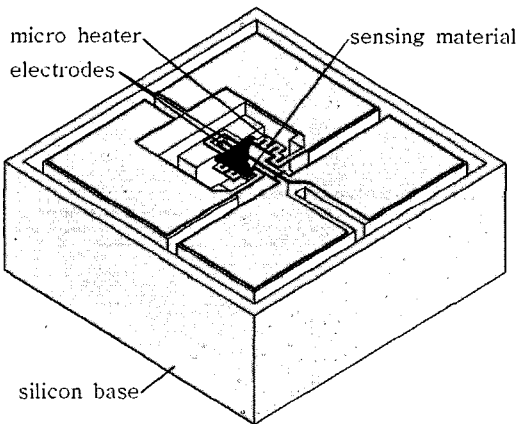
3.1 가스센서의 열전달 해석

마이크로 히터는 감응물질의 온도를 작동온도로 올려주는 역할을 하는 것으로 감응물질을 가열하는데 필요한 소모전력이 적게 들수록 저전력 가스센서가 된다. 또한 감응물질을 작동온도까지 가열하기 위하여 마이크로 히터에 공급하여야 하는 전류를 예측할 필요가 있다. 이를 위하여 상용 열유동해석 프로그램을 이용하여 마이크로 히터와 전극, 감응물질, 실리콘 베이스의 온도분포를 해석하였다.

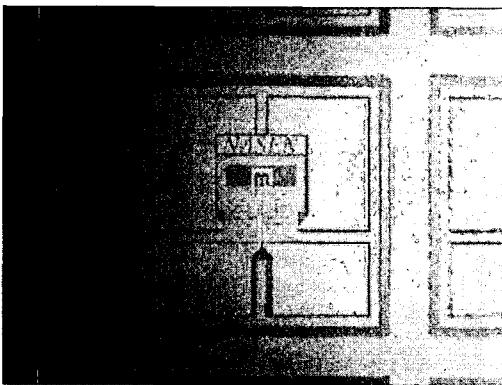
전산해석에서 가장 먼저 해야 할 일은 해석할 대상을 모델링하고 격자를 생성하는 것이다. 본 연구에서는 GAMBIT 프로그램을 이용하여 모델링과 격자를 생성하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 마이크로 가스센서는 좌우 대칭이므로 계산 시간과 메모리를 절약하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 오른쪽 반만 해석하였다. 마이크로 히터와 전극, 감응물질은 육면체의 각진 형태이므로 육면체 격자를 촘촘히 배치하였다. 실리콘 베이스는 마이크로 히터와 전극이 접촉하는 부분에서 온도구배도 클 것으로 예상되므로 그 부분에 격자를 촘촘히 배치하였고 이 부분에서 멀어질수록 격자의 크기가 점점 커지게 하여 격자밀도를 낮추었다.

Fig. 2(b)에 완성된 격자구조를 나타내었고, Table 1에 각 부분의 격자 형태와 개수를 나타내었다. 마이크로 히터와 전극이 있는 주요부에는 격자가 조밀하게 배치된 반면 실리콘 베이스의 끝으로 갈수록 격자 밀도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 격자의 개수를 Table 1에 나타낸 것 보다 10배를 늘려도 가스센서의 온도는 0.5K의 차이밖에 보이지 않아 Table 1의 격자밀도를 본 논문의 계산에 사용하였다.

마이크로 히터에서 전기 저항에 의해 발생한 열은 접촉해 있는 감응물질과 실리콘 베이스에 열전도 메카니즘으로 전달된다. 마이크로 히터와 감응물질, 전극, 실리콘 웨이퍼 베이스를 포함한



(a) Structure of micro gas sensor



(b) View of micro gas sensor

Fig. 1 Micro gas sensor fabricated by MEMS technology

마이크로 가스센서의 모든 표면에서 대기중으로 대류열전달과 복사열전달로 열이 방출된다. 실리콘 베이스의 밑면은 가스센서 지지구조물과 접촉되어 있으므로 온도가 300K로 고정되었다고 가정하였다. 히터의 발열량이 가스센서 표면에서 대기중으로 방출되는 열량과 실리콘 베이스 밑면을 통하여 지지구조물로 방출되는 열량과 균형을 이룰 때 가스센서의 온도 분포는 정상상태가 된다.

마이크로 가스센서 내부는 다음과 같은 3차원 정상상태 열전달 방정식에 의해 지배를 받는다.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

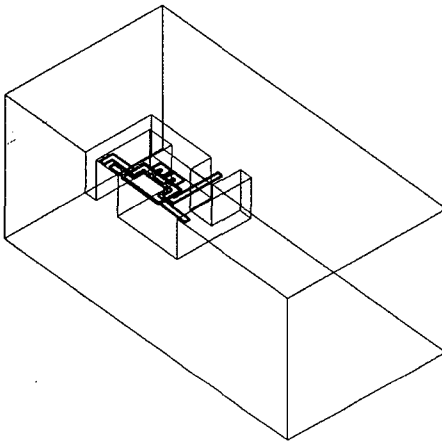
가스센서에 사용된 여러 재료의 열물성을 Table 2에 나타내었다. 비열과 열전도율은 온도에 따라 물성치가 크게 변하므로 각 부분의 평균 온도에서의 물성치를 계산에 이용하였다.

\dot{q} 은 단위체적당 에너지 발생률로 마이크로 히터를 제외한 부분에서는 0이다. 마이크로 히터에서는 전기저항에 의해 열이 발생하는데

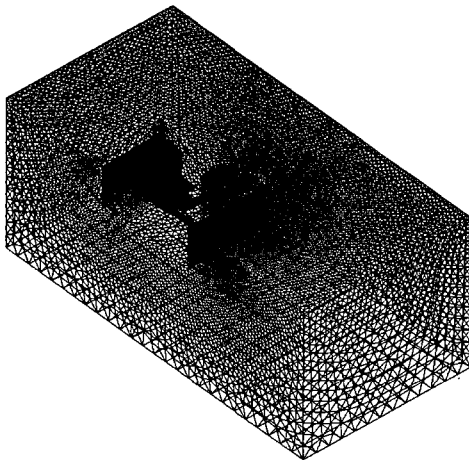
$$\dot{q} = \frac{\dot{E}_q}{V} = \frac{I^2 R_e}{V} \quad (2)$$

에 의해서 발열량을 구할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 히터에서는 열이 균일하게 발생한다고 가정하였다.

가스센서 표면에서는 주변의 대기에 자연대류



(a) Modeling



(b) Mesh structure

Fig. 2 Mesh structure of micro gas sensor

Table 1 Mesh type and number of each parts

| Parts | Mesh type | Number | Material |
|------------------|-------------|--------|------------------|
| Micro heater | hexahedral | 2790 | Ni |
| Sensor electrode | hexahedral | 2049 | Ni |
| Sensing material | hexahedral | 2064 | SnO ₂ |
| Silicon base | tetrahedral | 120233 | Si |
| Total | | 127136 | |

Table 2 Material properties

| Material | Density kg/m ³ | Specific heat J/kg · K | Thermal conductivity W/m · K | Emissivity |
|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------|
| SnO ₂ | 7310 | 227 | 4.5 | 0.5 |
| Ni | 8900 | 538 | 72.9 | 0.11 |
| Si | 2330 | 712 | 148 | 0.3 |

Table 3 C value of each surface

| Surfaces | C |
|-----------------------------------|------|
| Vertical surface | 0.56 |
| Upper surface of horizontal plate | 0.52 |
| Lower surface of horizontal plate | 0.26 |

에 의한 열전달로 열이 방출되는데, 이때의 열전달계수는 다음과 같은 실험식으로 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$Nu = \frac{hL}{k} = CRa^n \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (4)$$

n 과 C 는 실험적으로 구해지는데 층류흐름일 때 $n=0.25$ 가 적용되며 C 의 값은 Table 3의 값을 사용하였다.⁽¹¹⁾

Fig. 3에 마이크로 히터와 전극, 감응물질의 온도분포를 나타내었고, Fig. 4에 마이크로 가스센서 전체의 온도분포를 나타내었다. 열이 발생되는 마이크로 히터의 온도가 가장 높게 나타났다. 이 열은 바로 위에 접촉되어 있는 감응물질에 전달되어, 전극 주변의 감응물질 온도가 작동 온도인 470K~530K를 보이고 있다. 이 열은 다시 감지전극으로 전달되어 감지전극의 온도도 상승시킨다. 마이크로 히터와 감지전극은 지지를 위하여 실리콘 베이스에 아주 일부분이 접촉되어 있다. 이 접촉부분을 통하여 열이 빠져나가는데 접촉부위를 줄임으로서 열의 방출을 줄이도록 노력하였다. 가스감응물질은 오른쪽 아래 부분에서 제일 높은 온도를 보이고 위쪽 중앙부는 비교적 낮은 온도분포를 보인다. 이는 오른쪽 아래 부분은 실리콘 베이스에서 멀리 떨어져서 열손실이 적은 반면, 위쪽의 중앙부분은 실리콘 기둥과의 거리가 15 μm 에 불과하여 마이크로 히터에서 발생한 열이 감응물질로 전달되기 보다는 실리콘 기둥으로 누출되는 부분이 많기 때문이다. 이를 개선하기 위해서 가스감응물질과 실리콘 기둥과의 거리가 좀 더 멀어지도록 마이크로 히터의 회로를 변경하였으며 온도분포 해석 결과 감응물질

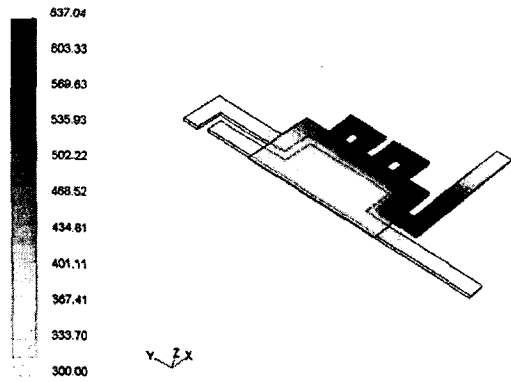


Fig. 3 Temperature distribution of micro heater and sensor electrode (unit: K)

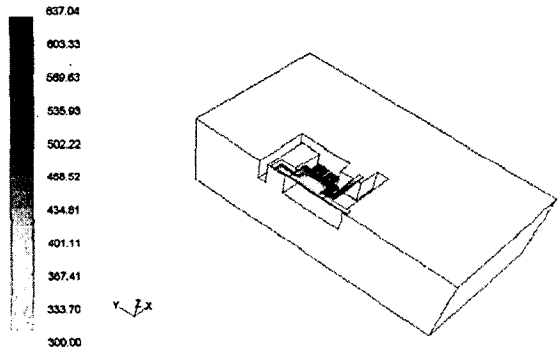


Fig. 4 Temperature distribution of micro gas sensor (unit: K)

의 온도 균일도가 많이 향상되었다.

본 연구에서는 SiO₂ 막을 무시하고 온도분포를 계산하였는데, 실제로는 SiO₂가 실리콘 베이스로 전달되는 열을 차단하여 더욱 작은 열손실이 일어남을 알 수 있다.

3.2 소비전력 비교

감응물질의 온도가 작동온도에 이르도록 하는 마이크로 히터의 단위체적당 에너지 발생률 \dot{q} 을 시행착오법으로 구한 후, 식 (2)에 의해서 마이크로 히터에 가하여야 할 전력을 산출하였다. Fig. 5에 2.2절에 나타낸 소비전력 측정법으로 측정된 전력값과 전산해석으로 예측한 값을 비교하였다. 예측치와 측정치는 약 20~30% 정도의 차이를 보인다. 이는 측정치가 마이크로 히터에 직접 전류

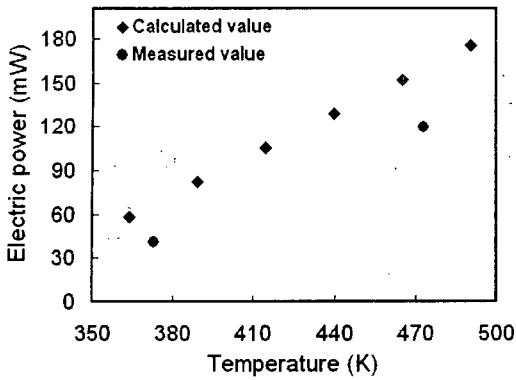
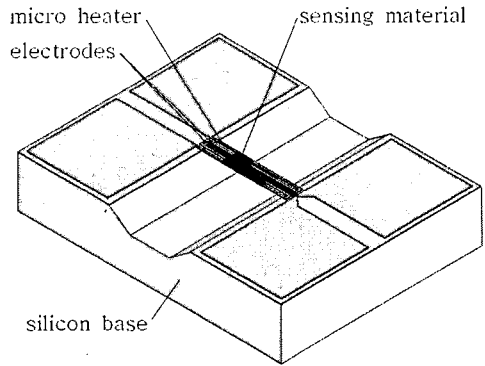


Fig. 5 Electric power and temperature of sensing material

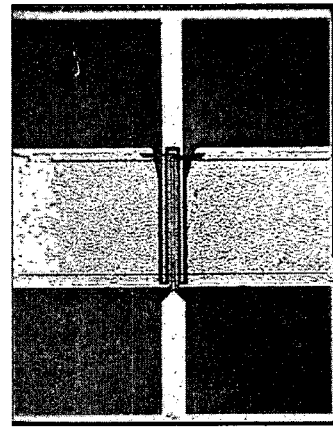
를 가하면서 감응물질의 온도를 측정하는 것이 아니라 핫플레이트에서 가열하는 간접적인 측정법으로 소비전력을 산정한 것이기 때문에 정확한 소비전력을 측정하지 못하였기 때문에 사료된다. 또한 마이크로 가스센서 제작시 히터나 감지전극 두께가 불균일하게 도금되거나 감지물질을 프린팅할 때 두께가 균일하게 되지 못하였기 때문에 사료된다. 이 비교로 전산해석을 통한 예측치가 감응물질을 가열하는데 소요되는 소비전력을 20~30%의 오차로 예측할 수 있다는 것을 알았으므로, 가스센서의 구조가 바뀌어도 가스센서의 소비전력을 해석을 통하여 어느 정도 예측할 수 있었으며, 실제 NO₂ 가스를 이용하여 가스민감도 실험을 할 때 마이크로 히터에 가할 전력의 실험 범위를 정할 수 있었다.

3.3 가스센서 설계개선

3.2절의 모델에 대한 해석결과 감응물질이 실리콘 기둥에 가까워서 열을 빼앗기는 것을 알 수 있었다. 그래서 실리콘 기둥을 없애고 감지물질과 실리콘 지지대 사이의 거리를 넓히며 히터의 모양을 좀 더 단순화하여 열을 효과적으로 전달하도록 설계개선을 제안하였다. Fig. 6은 이 설계개선안으로 제작한 마이크로 가스센서이다. 이에 대해 소비전력을 측정하고 해석하여 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 개선된 모델에서도 역시 측정값과 해석치가 약 20%의 오차를 보였다. 초기 모델과 비교할 경우 개선된 모델은 약 30% 정도 소비전력이 저감됨을 알 수 있었다.



(a) Structure of micro gas sensor



(b) View of micro gas sensor

Fig. 6 Micro gas sensor of low power consumption

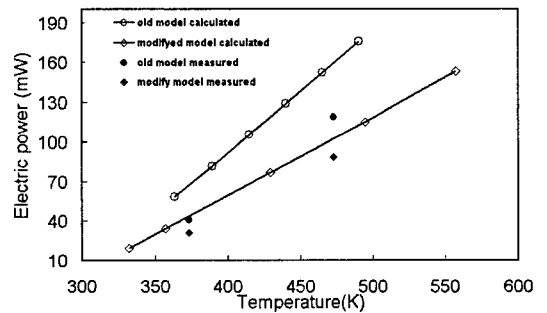


Fig. 7 Electric power of old and modified models

4. 결론

MEMS 공정을 이용하여 감응물질을 균일한 온도로 유지해주는 마이크로 히터가 장착되어 있는

NO₂ 마이크로 가스센서를 제작하였다. 마이크로 가스센서의 열전달 현상을 상용 열유동 해석 프로그램을 이용하여 해석하였다. 해석 결과 실리콘 웨이퍼 베이스의 온도가 거의 상온에 가까워 마이크로 히터에서 발생한 열이 감응물질을 효과적으로 가열하였음을 알 수 있었다. 또한 감응물질의 온도를 작동온도로 가열하기 위해 마이크로 히터에 가하여야 하는 전류의 양을 예측할 수 있었다. 마이크로 히터와 전극의 배열을 바꿈으로써 감응물질의 온도분포를 균일하게 하고 소비전력을 적게 하도록 가스센서의 설계변경을 할 수 있었다.

참고문헌

(1) Miura, N., Honishi, H., Matsumoto, T. and Ippomatsu, M., 1993, "Development of High-performance Solid-electrolyte Sensors for NO and NO₂," *Sensors and Actuators B*, Vol. 13~14, pp. 387~390.

(2) Sayago, I., Gutierrez, J., Ares, L., Robla, J. I., Horrillo, M. C., Getino, J., Rino, J. and Agapito, J. A., 1995, "The Effect of Additive in Tin Oxide on the Sensitivity and Selectivity to NO_x and CO," *Sensors and Actuators B*, Vol. 26~27, pp. 19~23.

(3) Wollenstein, J., Plaza, J. A., Cane, C., Min, Y., Bottner, H. and Tuller, H. L., 2003, "A Novel Single Chip Thin Film Metal Oxide Array," *Sensors and Actuators B*, Vol. 93, pp. 350~355.

(4) Cantalini, C., Valentini, L., Lozzi, L., Armentano, I., Kenny, J. M. and Santucci, S., 2003, "NO₂ Gas Sensitivity of Carbon Nanotubes Obtained by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition," *Sensors and Actuators B*, Vol. 93, pp. 333~337.

(5) Bechtold, T., Hildenbrand, J., Wollenstein, J., and Korvink, J.G., 2004, "Model Order Reduction of 3D Electro-thermal Model for a Novel Micromachined Hotplate Gas Sensor," 5th Int. Conf. on Thermal and Mechanical Simulation and Experiments in Micro-electronics and Micro-Systems, EuroSimE2004, Brussels, Belgium, 10~12 May, pp. 263~267.

(6) Ali, S.Z., Gonzalez, W., Gardner, J.W. and Udrea, F., 2004, "Analysis of High Temperature SOI Microhotplates," CAS 2004 Proceedings International Semiconductor Conference, Vol. 2, Sinai, Romania, 4~6, October, pp. 351~354.

(7) Demirci, T., Guney, D., Bozkurt, A. and Gurbuz, Y., 2001, "Electro-thermal Simulations and Modeling of Micromachined Gas Sensor," Microelectromechanical System Conference 2001, Berkeley, California, U.S.A., 24~26 August, pp. 99~102.

(8) Low, H.M., Tse, M.S. and Chiu, M.M., 1998, "Thermal Induced Stress on the Membrane in Integrated Gas Sensor with Micro-heater," Electron Devices Meeting 1998, Hong Kong, 29 August, pp. 140~143.

(9) Cardinali, G.C., Dori, L., Fiorini, M., Maccagnani, P. and Liberali, V., 1997, "An Integrated Microstructure with Temperature Control for Gas Sensors," 21st International Conference on Microelectronics, Vol. 2, Nis, Yugoslavia, 14~17, September, pp. 515~518.

(10) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed., John Wiley and Sons.

(11) Hagen, K. D., 1999, *Heat Transfer with Applications*, Prentice Hall, pp. 337~371.