

마이크로 가스센서를 위한 저전력 마이크로 히터의 제조

I. 유한요소법에 의한 열분포해석

정완영*, 임준우**, 이덕동**, 노보루 야마조에***

Fabrication of Low Power Micro-heater for Micro-Gas Sensor

I. The Thermal Distribution Analysis by The Finite Element Method

Wan-Young Chung*, Jun-Woo Lim**, Duk-Dong Lee** and Noboru Yamazoe***

요 약

마이크로 가스센서 제조를 위해 PSG/Si₃N₄를 다이어프램으로 하고 Pt 패턴을 히터로 하는 마이크로 히터를 설계하였다. 백금히터와 감지막을 위한 백금전극을 동일평면에 설계하여 하나의 노광공정으로 실현하도록 센서의 형태를 가정하였다. 마이크로 가스센서의 가열부의 열적거동을 유한요소법에 의해 수치해석하므로써 다이어프램 부분의 온도분포, 소비전력 및 감지막부분의 온도분포를 예측할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 히터와 감지막이 동일 평면에 이웃하는 구조의 센서와 일반적 마이크로센서구조인 감지막/절연막/히터의 구조를 갖는 센서의 열적거동을 비교 분석하였다.

Abstract

The micro heater with PSG/Si₃N₄ diaphragm and platinum heater pattern was designed for micro-gas sensor fabrication. The platinum heater and the platinum electrode for sensing layer were designed on the same plane and fabricated in the single photolithography process. The thermal analyses including temperature distribution over the diaphragm and power consumption of the heater were carried by finite element method. The thermal properties of the microsensor with both heater and sensing electrode on the same plane was compared with that of the typical microsensor which had the structure of sensing layer/insulator/heater on the diaphragm.

1. 서 론

금속산화물반도체인 SnO₂, ZnO, In₂O₃ 등의 소결체로써 공기중 가스의 유무 및 농도를 측정하는 반도체형가스센서는 약 30년전에 Seiyama^[1]와 Taguchi^[2]에 의해 발표되었다. 이러한 반도체가스센서는 1968년 일본의 Figaro사에 의해 상업화된 후 지금까지 기본적인 소자형태(소결체형)에는 큰 변화가 없이 가스누출경보, 가스의 농도측정에 주로 사용되어 왔다.

* 세명대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Semyung University)

** 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

*** 일본 규슈대학 재료개발공학전공(Dept. of Materials Science and Technology, Kyushu University, Japan)

※ 이 논문은 1995년도 학술진흥재단의 자유공모과제에 의해 수행되었습니다.

<접수일자 : 1996년 11월 4일>

그러나 최근 몇 가지 다른 종류의 감지막을 가진 센서어레이(array)로써 다양한 가스를 구별, 인식 및 정량화하고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[3-6]. 또한 반도체소자의 집적화기술을 이용한 센서(이하 마이크로센서라 칭한다)의 개발은 소형화, 저비용, 저전력소모, 신호처리회로와의 동일면에 집적 등의 장점을 가질 수 있다. 대부분의 금속산화물가스센서는 가연성 및 탄화수소계가스를 감지하기 위해서는 100~400℃ 정도로 동작온도를 높혀주어야한다^[4-6]. 따라서 마이크로 가스센서의 제조에 있어서 적당한 히터의 구현은 매우 중요한 기술이 되고 있다.

저전력동작과 실리콘칩상에서의 주변회로의 열전달을 막기 위해서는 센서의 마이크로히터를 실리콘칩과 열적으로 분리된 곳에 위치시킬 필요가 있다. 현재까지 이러한 목적으로 다이아프램구조^[4-6]와 공중부유구조(air bridge)^[3]가 널리 연구되고 있다. 이러한 구조에서 히터는 약 300℃정도까지 가열되면서도 주변의 실리콘칩부위로 열을 전달하지 않아야 한다. 마이크로센서의 히터로서는 NiFe합금^[6], SiC박막^[7], 확산저항^[8], 다결정실리콘^[9], Pt패턴^[10] 등이 사용될 수 있다.

본 연구에서는 감지막과 소자형태에 비해 상대적으로 연구가 적게 이루어지고 있는 마이크로센서의 발열특성에 대해 분석하였다. 마이크로 가스센서제조를 위하여 백금저항체를 이용한 히터를 설계하고 유한요소법에 의한 범용 소프트웨어인 ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc., U.S.A.)를 이용하여 이의 열분포도 및 열소비전력을 수치해석하였다. 컴퓨터를 사용하여 수치해석된 마이크로히터의 발열특성을 실제 제작된 결과와 비교함으로써 열효율성이 우수한 마이크로히터를 제작하고자 했다.

II. 이론 및 물질정수

열전달해석을 통한 온도관리 및 제어를 위하여 컴퓨터를 이용한 수치해석방법이 개발·응용되고 있으며, 이들 중에서 가장 대표적인 것으로 차분법(finite difference method), 유한요소법(finite element method) 및 경계요소법(boundary element method)이 있다^[11].

이 중 유한요소법은 구조공학의 분야로부터 발전하여 과학기술 전반에 적용되는 수치해석법으로 알려져 있다. 현재 유한요소법에 의한 선형해석은 그 수학적기

초가 완성되어, 많은 범용 프로그램이 개발되어 있으며, 구조공학의 분야에 널리 응용되고 있다. 또한 비선형문제의 해석에도 증분법(Incremental procedure)이 널리 사용되므로써, 원리적으로는 모든 구조문제의 해석이 가능하게 되었다. 이와 더불어 가중잔류(weighted residual)법이 개발되어, 구조공학이외의 분야인 유체역학, 열전달, 물질이동 및 전자기학 등의 여러 분야에서 응용이 널리 이루어지고 있다.

열전달방식에는 전도(conduction), 대류(convection) 및 복사(radiation)의 세가지가 있다. 열전달방식의 기본인 물리적인 기구를 이해하고 전달된 에너지의 양을 결정하는 열전달방정식(rate equation)을 적용하는 일은 매우 중요하다. 다음은 일반적인 열전달에서의 원리 및 방정식과 본 수치해석에서 사용된 방정식을 요약한 것이다.

2.1 전 도

전도는 물체와 다른 물체 또는 동일 물체의 다른 부분의 접촉에서 온도차이 때문에 생기는 내부에너지 전달로 생각할 수 있다. 열전도에 관한 열전달방정식은 Fourier법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서 \vec{q} 는 전달방향에 수직이 되는 단위면적당 x 방향으로의 열유속(heat flux)이고 k 는 열전도도이다. 등방성열전도에 대한 3차원식은

$$\vec{q} = -k \left(\hat{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 본 수치해석에서는 3차원 열고체모델(3-D thermal solid model)을 채택했다.

2.2 대 류

서로 다른 온도를 가진 운동중의 유체와 경계표면사이에 발생하는 대류는 유체의 성질에 따라 강제대류와 자연대류로 분류된다. 자연대류는 유체의 밀도의 변화 즉, 유체의 온도변화에 따른 부력에 의해 생기는 것이다. 대류효과는 뉴턴의 냉각법칙(Newton's law of cooling)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{q} = h(T_s - T_B) \quad (3)$$

I. 유한요소법에 의한 열분포해석

여기서 T_S 는 물체의 표면온도이고 T_B 는 유체의 온도를 나타낸다. h 는 대류열전달계수이며 이것은 표면의 기하학적 형상, 유동의 성질, 유체의 열역학적물성치와 전달물성치들에 의하여 영향을 받는 경계층내부의 조건에 의존한다.

대류열전달계수는 여러 가지 변수에 의해 수학적으로 매우 복잡하게 계산된다. 대기압 아래서 수평판으로부터의 Laminar flow에 의한 자유대류의 경우 대류열전달계수는 위로 향한 평행판의 경우

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (4)$$

이고 아래로 향한 가열된 평행판의 경우는

$$h = 0.59 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (5)$$

로 나타내어지며 가열된 수직판의 경우는

$$h = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (6)$$

로 간략화 된 등식으로 표현될 수 있다^[12]. 여기서 ΔT 는 발열부분의 온도와 분위기온도의 차이이고 본 수치해석에서는 대류효과에서 유체의 온도(T_B , 벌크 온도)를 27°C(300K)로 고정하였다. 또한 $L = \frac{A}{P}$ 이고 A 는 면적, P 는 면적을 감싸고 있는 표면둘레이다.

2.3 복 사

열복사는 유한한 온도의 물질로부터 방사되는 전자기에너지를 말한다. 전도나 대류에 의한 에너지전달은 매질이 필요한 반면, 사실상 복사열전달은 진공중에서 가장 잘 이루어진다.

두 물체 사이 또는 표면에서의 복사는 Stefan-Boltzmann 법칙에 의해 주어진다.

$$\dot{q} = \epsilon \sigma F_{12} (T_S^4 - T_2^4) \quad (7)$$

여기서 ϵ 는 복사율로 이것은 그 표면이 이상적인 복사체에 비하여 얼마나 효과적으로 복사하는가를 나타낸다. σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-12} \text{W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$), F_{12} 는 표면1로부터 표면2로의 form factor, T_S 는 표면1의 절대온도, T_2 는 표면2의 절대온도이다.

본 수치해석에서의 $T_2 = T_{SUR}$ 즉, 주위의 온도이고, $F_{12} = 1$ 이다. 따라서 복사에 의한 열전달은 온도의존성이 매우 크고 온도에 대해 비선형적인 것을 알 수 있다.

2.4 물질정수

본 수치해석에서 사용된 물질정수는 다음과 같다^[13~15].

물질 물질정수	Si	SiO ₂	Pt
열전도도 (W/cm · K)	1.5	0.0109~0.0145 (293~573K)	0.734~0.719 (273~600K)
복 사 율	0.3	0.8	0.1

다이아프램의 경우 SiO₂(PSG)/Si₃N₄ 층으로 이때 복사율은 0.7로 가정하였다. 일반적으로 산화된 표면을 가지는 경우 복사율이 0.5이상이고^[13] 석영유리의 경우 0.7 정도로 알려져 있다^[16].

대류열전달계수 h 는 자연대류만을 가정하였고 본 수치해석에서의 각각의 요소의 표면적에 대하여 식(4), (5) 및 (6)에 의해서 0.0005~0.46(W/cm² · K)로 계산되었고 이 값들을 적용한 경우와 전체표면적에 0.004의 값을 적용한 경우, 그 해석이 매우 유사하게 나타났다.

본 수치해석에서는 우선 해석의 단순화를 위해 소자 모델을 단순화하여 소자의 모형의 1/4에 대하여 열분석을 한 후 그것을 4배하므로써 전체전력을 계산하였다. 히터나 감지막전극의 리드선과 패드는 고려하지 않았다. 또한 히터에 단위체적당의 일정한 전력을 가하므로써 소자의 동작온도를 올리는 방식(heat generation rate)을 취했다.

III. 소자모델 설계

본 연구에서의 소자는 다이아프램구조로 설계하였다. 본 연구에서는 다음 2가지 사항을 고려하여 소자를 설계했다. 첫째, 소자 제작시의 복잡한 공정을 피하기 위해 히터와 감지막의 전극으로 사용되는 Pt공정을 일회의 노광(photolithography)으로 한정하기 위해 금속공정을 하나의 마스크공정으로 처리하였다. 둘째, 감지막부위에서의 온도의 균일한 분포를 얻기 위한(가스감

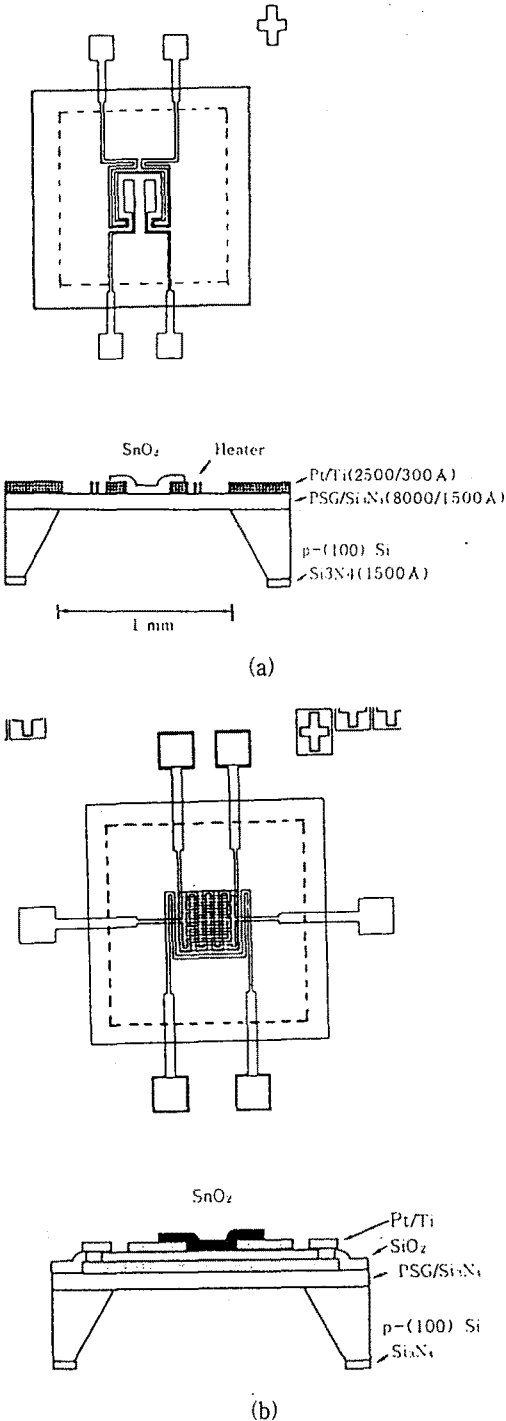


그림 1. 마이크로히터의 구조
 (a) 평면형 구조 (b) 적층형 구조
 Fig. 1. The device structures of micro-heater.
 (a) The planar structure (b) The stack structure

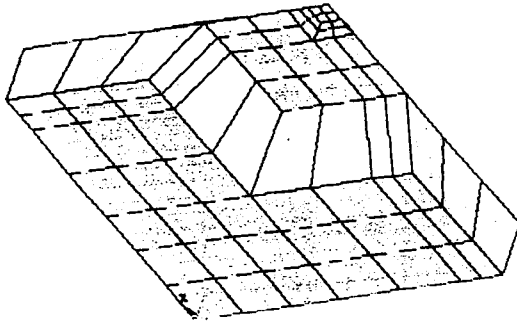
지막은 그 동작온도에 따라 크게 가스에 대한 감도와 선택성에 영향을 받는다) 소자형태를 고려하였다. 두께 320 μm 의 p-(100)실리콘을 기판으로 사용하여 전 후면에 각각 Si_3N_4 1500Å과 PSG(phosphorous silica glass) 0.8 μm 을 형성하고 후면을 KOH로 식각하는 소자형태를 가정하였다.

그림1은 본 연구에서의 소자의 모형과 일반적인 형태의 다이아프램구조의 소자를 비교한 것이다. 일반적으로 다이아프램 가스센서의 경우 다이아프램 물질로서 O-N-O-N(silicon oxide-nitride-oxide-nitride)^[17], PSG- Si_3N_4 구조^[18], oxinitride^[3], 고농도 붕소가 도핑된 실리콘층^[19] 등이 주로 쓰이고 있다. 본 연구에서는 비교적 열 사이클에 의한 스트레스가 적다고 알려진 PSG- Si_3N_4 층을 채택했다. 한편 일반적인 다이아프램구조 소자의 형태는 그림 1-(b)과 같이 다이아프램위에 절연막이 형성된 후 그 상단에 감지막과 그것을 위한 전극이 형성되는 구조(적층형 구조)였다. 이 경우는 히터의 열은 절연층을 통하여 감지막부위에 전달된다. 반면 본 연구에서의 평면형구조는 히터와 감지막이 동일면에 이웃하고 측면의 열전달로서 감지막을 가열하는 것을 가정하였다. 이러한 소자형태는 제작공정시 3종류의 마스크(Pt 히터+감지막을 위한 Pt 전극, 후면 식각, 감지막)의 단순공정으로 센서를 제조할 수 있다는 장점이 있다.

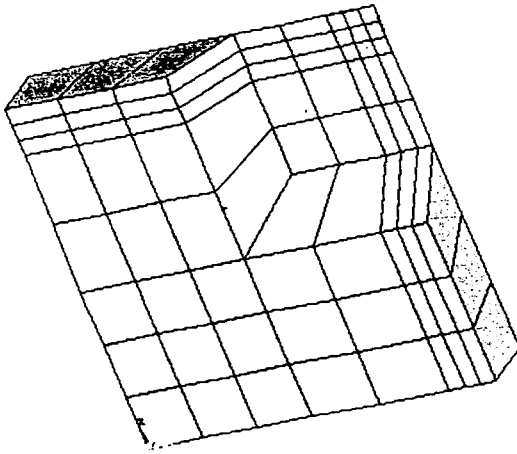
IV. 수치해석 및 분석

그림2는 본 수치해석에서 사용된 소자의 위와 아래에서 바라본 3차원유한요소모델이다. 소자를 설계함에 있어서 우선 본 연구에 앞서 이루어진 소자의 열적거동에 대한 수치해석^[17]을 기본으로 하여, 다이아프램에 대한 히터의 크기를 1/3로 고정시켰다. 이러한 크기는 히터가 실리콘벌크에 열피해를 거의 주지않는 것으로 해석이 되었다. 또한 본 연구에서 제안된 평면형구조에서도 히터의 외곽부분의 크기가 다이아프램의 1/3이 되게하여 수치해석을 하므로써 기존의 센서구조와 열적거동을 비교 분석하였다. 이 FEM모델은 약 100개의 요소로 이루어져있고 PC용 소프트웨어를 사용하므로써 생기는 메모리 부족현상을 고려하여 감지막과 히터가 있는 주위는 작은 요소(element)를 만들어서 보다 정밀한 수치해석을 하였고 실리콘 벌크주위에는 큰 요소를 형성하였다. 즉, 평면형소자의 모델의 경우(그림2(a)), 두꺼

I. 유한요소법에 의한 열분포해석



(a)



(b)

그림 2. 소자의 유한요소 모델

(a) 평면형 소자 (b) 적층형 소자

Fig. 2. The finite element model of the device.

(a) The planar structure (b) The stack structure

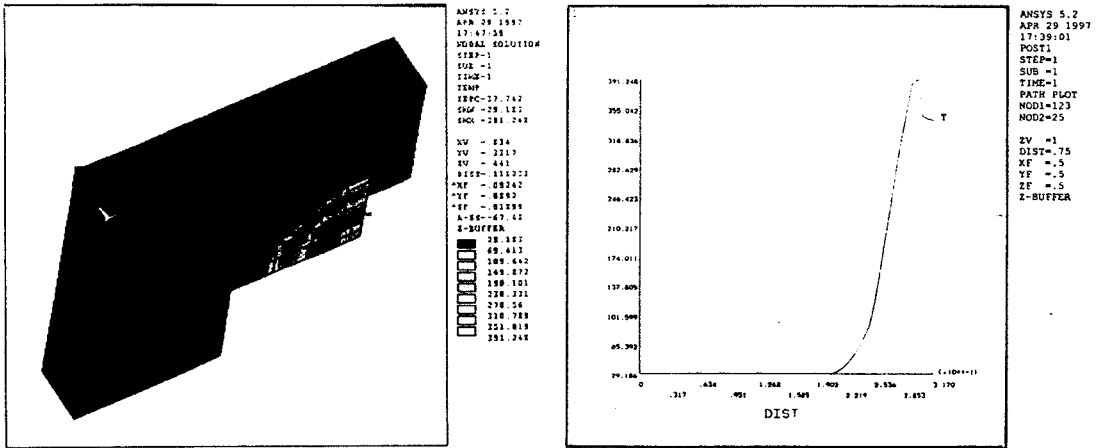
은 실리콘벨크영역은 27개요소, 다이아프램은 44개요소, 히터는 4개요소, 감지막은 4개의 요소로 구성되었다. 이때 유한요소는 3차원 8-노드 요소, Solid 70,으로 구성되었고 각부분에서의 요소의 최대크기를 한정한다음 소프트웨어의 자동메쉬기능에 의해 그리드를 형성하였다. 소자의 전체 크기는 3.7mm × 3.7mm로 하였고 다이아프램의 크기는 1.5mm × 1.5mm, 감지막은 260 μ m × 260 μ m의 정방형구조로 설계하였다. 수치해석의 간략화를 위해 설계된 전체소자의 1/4만큼만 모델링하였고 리드선과 본딩패드는 고려하지 않았다.

그림3은 32.5mW의 전력을 설계된 평면형 Pt히터에 가했을 때 소자에서의 온도분포도를 30.0mW의 전력이 가해진 일반적인 형태(감지막/절연막/히터구조의 적층형)의 마이크로가스센서와 비교한 것이다. 실리콘벨크의 온도가 각각 약 29 $^{\circ}$ C정도로서 대기온도인 27 $^{\circ}$ C와 거의 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다. 절연층을 통하여 수직으로 열에너지가 전달되는 보통의 마이크로 가스센서에 비해 히터와 감지막이 동일 평면에 존재하므로 측면으로부터 열이 전달되는 구조임에도 불구하고 감지막위에서의 온도는 본 연구에서 제안된 평면형의 구조가 훨씬 균일함을 볼 수 있다.

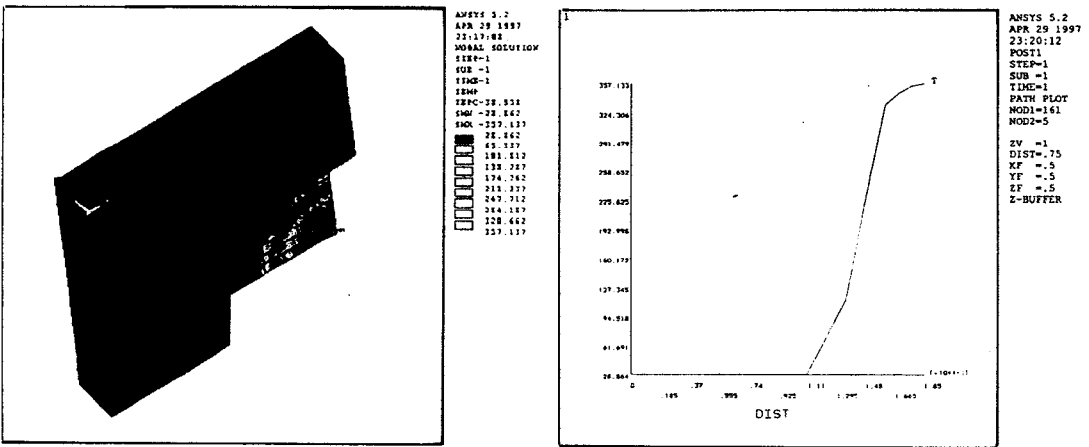
그림4는 그림3에서와 같은 전력이 가해진 평면형히터와 적층형히터의 감지막부분에서의 온도분포도를 보인 것이다. 평면형소자의 경우 적층형구조에 비해 기본적으로 감지막의 크기가 작을 수밖에 없으나 그림에서 알 수 있는 바와 같이 감지막전체에 대한 온도분포가 평면형소자에서 상대적으로 훨씬 평탄함을 알 수 있다. 감지막의 폭에 대한 중심부위와 끝부분의 온도편차를 계산해보면 적층형의 경우에는 0.046 $^{\circ}$ C/ μ m이나 평면형의 경우에는 0.019 $^{\circ}$ C/ μ m이고 복사효과를 포함한 평면형의 경우는 0.02 $^{\circ}$ C/ μ m였다. 이렇게 감지막부분에서의 균일한 온도분포를 실현하므로써 동작온도에 따라 감지특성이 달라지는 감지막의 보다 정확한 감지효과를 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

그림5는 본 수치해석에서의, 전체표면적에 자연대류만을 가정하고 대류열전달계수 h 는 0.004를 적용한 소자의 대류효과분석을 위한 모델이다. 대류가 일어나는 표면의 메쉬는 소프트웨어의 기능에 의해 자동으로 메쉬되었다.

소자에 가해진 전력에 대한 Pt히터부분과 감지막부분의 온도를 조사하였다. 복사효과를 고찰하기 위해서 본 연구에서는 3차원 표면효과 요소, SURF 22,를 적용하여 센서표면전체에서의 복사효과를 시뮬레이션하였다. 또한 각각의 경우 복사효과에 의한 전력소모를 고찰하였다. 본 수치해석에서 알 수 있듯이 400 $^{\circ}$ C이하에서 동작하는 Si마이크로센서에서의 복사효과에 의한 전력소모는 전체 전력에 대해 전력소모의 비율이 약 2% 이하로 거의 무시할 수 있을 정도의 수치를 나타내었다. 이를 가한 전력에 대한 감지막의 동작온도로 환산해보면 32.5mW의 전력이 가해진 경우 복사효과를 무시하면 동작온도가 343 $^{\circ}$ C이나 복사효과를 계산에 넣으면 316 $^{\circ}$ C의 동작온도를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 3. 소자의 온도분포도 (a) 평면형 소자 (b) 적층형 소자

Fig. 3. Temperature distribution of the device (a) The planar structure (b) The stack structure

표 1. 가해진 전력에 따른 Pt히터의 온도, 감지막부위의 온도 및 복사효과에 의한 전력(평면형소자)

Table 1. The temperatures of Pt heater, sensing layer and the radiation effect for the loading power

loading power (mW)	Temp. of heater (°C)	Temp. of sensing layer (°C)	Radiation energy (mW)
10.8	147	135	0.12(1.1%)
18.1	228	203	0.24(1.3%)
25.3	306	278	0.40(1.6%)
32.5	391	343	0.61(1.9%)
39.7	468	412	0.88(2.2%)

I. 유한요소법에 의한 열분포해석

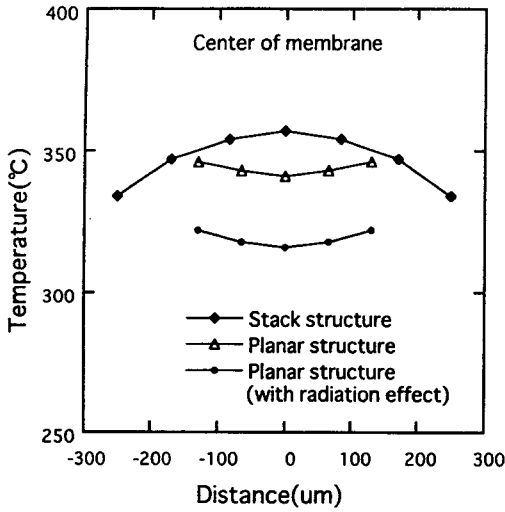


그림 4. 감지막 부위에서의 온도의 균일성 비교
Fig. 4. Comparison of temperature uniformity over the sensing layer.

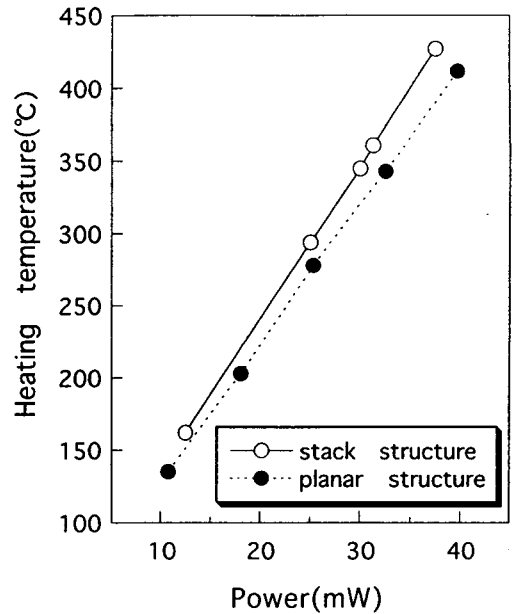
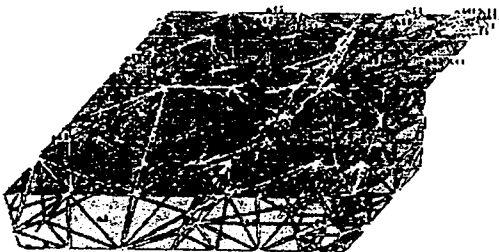
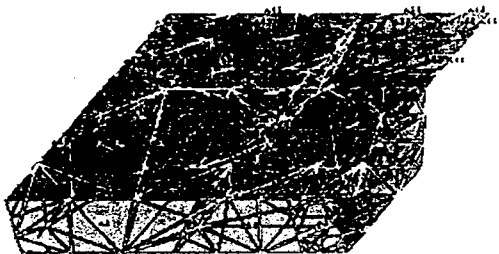


그림 6. 가열전력에 대한 히팅온도
Fig. 6. The relationship between heating power and temperature.



(a)



(b)

그림 5. 평면형소자에서의 대류효과 모델
(a) 평면형 소자 (b) 적층형 소자
Fig. 5. The convection model of the planar type device.
(a) The planar structure (b) The stack structure

그림6은 본 연구에서 설계된 평면형히터와 적층형히터의 가열전력에 대한 히팅온도를 비교한 것이다. 그림 5와 6에서 알 수 있는 바와 같이 히터의 크기를 기준으로 한 소자의 모형에서 평면형히터는 적층형히터에 비하여 10% 정도의 전력을 더 많이 소모하는 것을 알 수 있다. 그러나 평면형구조의 경우 감지막부위에서의 온도가 적층형에 비해 상대적으로 매우 균일한 것을 알 수 있다. 이와 같은 감지막에서의 온도의 균일성은 가스센서가 정확히 동작하기 위해서는 감지막전역이 일정한온도로 가열되어야 한다는 점에서 마이크로센서에서의 동작조건을 정하는데 있어서 유리할 것으로 생각된다.

V. 결 론

동일면상에 형성된 Pt히터와 감지막을 갖는 마이크로센서를 설계하고 그 다이아프램에서의 온도분포와 히터의 소비전력을 유한요소법으로 분석하였다. 이를 감지막/절연막/히터의 적층구조로 된 마이크로센서와 비교하였다. 그 결과 평면형구조의 마이크로센서가 감지

막을 동일온도로 상승시키기 위해서는 적층형구조보다 약 10%이내의 전력을 더 소모함을 알 수 있었다. 그러나 평면형구조의 경우 감지막부분에서의 온도분포가 적층형구조에서 보다 균일해서 감지막의 동작온도조절에 매우 유리한 것을 알 수 있었다. 또한 평면형소자는 최소한 5개의 마스크가 필요한 적층형소자에 비해 3개의 마스크공정으로 소자를 만들 수 있다는 공정의 단순화에 장점이 있다. 또한 본 연구에서 이루어진 수치해석 방법은 마이크로 가스센서에서는 물론 가열부분을 가지는 여러 화학센서나 흐름센서 등에 널리 응용 가능할 것으로 생각된다.

VI. 참고문헌

- [1] T.Seiyama, A.Kato, K.Fujishi and M.Nagatanui, A new detector for gaseous components using semiconductive thin films, *Anal. Chem.*, vol.34, pp.502-1503, 1962.
- [2] N.Taguchi, *Jap.Patent* 45-38200, 1962.
- [3] M.Parameswaran, A.M.Robinson, Micromachined Thermal Radiation Emitter from a commercial CMOS process, *IEEE Electron Device Letters*, vol.13, no.2, pp.57-59, 1991.
- [4] E.Yoon, An integrated Mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol.39, no.6, pp.1376-1386, 1992.
- [5] J.W.Gardner et al., Integrated array sensor for detection organic solvents, *Sensors and Actuators B*, vol.26-27, pp.135-139, 1995.
- [6] U.Dibbern, A substrate for thin-film gas sensors in microelectronic technology, *Sensors and Actuators B*, vol.2, pp.63-70, 1990.
- [7] Y.Homma, K.Kamimura, H.Yi Cai and Y.Onuma, Preparation of polycrystalline SiC films for sensors used at high temperature, *Sensors and Actuators A*, vol.40, pp.93-96, 1994.
- [8] K.Murakami, D.-B.Ye and T.Yamamoto, Integrated hydrogen leak detector with a tunnel MIS structure, *Sensors and Actuators*, vol.13, pp. 315-321, 1988.
- [9] J.S.Suehle, R.E.Cavicchi, M.Gaitan and Semancik, Tin oxide gas sensor fabricated using CMOS micro-hotplates and in-situ processing, *IEEE Electron Devices Lett.*, vol.14, pp.118-120, 1993.
- [10] W.-Y.Chung, C.-H. Shim, S.-D. Choi and D.-D.Lee, Tin oxide microsensor for LPG monitoring, *Sensors and Actuators B*, vol.20, pp.139-143, 1994.
- [11] 홍준표, 열전도. 확산의 수치해석-FDM, FEM 및 BEM에 의한-, 반도체출판사, 1991.
- [12] J.P.Holman, *Heater Transfer*, 7th ed., Metric Editions., London, pp.353-354, 1992.
- [13] J.R.Welty, R.E.Wilson, C.E.Wicks, *Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., John Wiley and Sons, 1994.
- [14] S.Möller, J.Lin, E.Obermeier, Material and design considerations for low-power micro heater modules for gas-sensor applications, *Sensors and Actuators B*, vol.24-25, pp.343-346, 1995.
- [15] *Handbook of Chemistry and Physics*, 68th ed., CRC press, 1988.
- [16] C.Scheibe, E.Obermeier, W.Maunz, C.Plog, Development of a high-temperature basic device for chemical sensors based on an IDC with on-chip heating, *Sensors and Actuators B*, vol.24-25, pp.584-587, 1995.
- [17] Duk-Dong Lee, Wan-Young Chung, Man-Sik Choi, Jong-Mu Baek, Low power micro gas sensor, *Sensors and Actuators B*, vol.33, pp.147-150, 1996.
- [18] Hyeon-Soo Park et al., Tin oxide micro gas sensor for detecting CH₃SH, *Sensors and Actuators B*, vol.24-25, pp.478-481, 1995.
- [19] Selden B. Crary, Thermal management of integrated microsensors, *Sensors and Actuators*, vol.12, pp.303-312, 1987.

 著 者 紹 介

정완영

『센서학회지 제6권 제3호』 논문 97-6-3-10, p. 244 참조
 현재 세명대학교 조교수.



임준우

1969년생. 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1997년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1997년 ~ 현재 동대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야 : 실리콘 마이크로센서, 센서재료개발 등

이덕동

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-13, p. 116 참조
 현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수.

노보루 야마조에

『센서학회지 제6권 제3호』 논문 97-6-3-10, p. 244 참조
 현재 일본 규슈대학 총합이공학연구과 교수.