

금속산화물을 감지막으로 하는 마이크로 가스센서의 열해석

논문
12-10-6

Thermal Analysis of Micro-Gas Sensor with Metal Oxide Sensing Layer

정완영*

(Wan-Young Chung*)

Abstract

Thermal properties for typical stack-type and newly proposed planar-type micro-gas sensors were studied. The thermal analyses for the proposed planar structure including temperature distribution over the sensing layer and power consumption of the heater were carried using finite element method by computer simulation and well compared with those of typical stack-type micro-gas sensor. The thermal properties of the microsensor from thermal simulation were compared with those of a actual device to investigate the acceptability of the computer simulation for micro gas sensor.

Key Words(중요용어) : Gas Sensor(가스센서), Metal Oxide Sensor(금속산화물 센서), Thermal Analysis(열해석), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Silicon Sensor(실리콘 센서)

1. 서 론

금속산화물을 감지막으로 하는 반도체형 가스센서는 대부분 특정가스에 대한 적당한 감도와 적당한 응답특성을 얻기 위하여 약 100℃에서 500℃사이의 온도에서 동작하고있다¹⁾. 센서의 이러한 고온에서의 동작은 마이크로 가스센서의 제조에 있어서 사용될 수 있는 가능한 실리콘 공정을 크게 제한시킨다. 즉, 가스감지막과 마이크로히터는 동일한 실리콘기판 위에 있는 주변회로의 보호와 저전력소모를 위해 열적으로 고립된 형태를 취하여야한다. 열고립을 위해서는 크게 두가지형태의 에칭된 다이아프램형태의 실리콘구조 즉, 뒷면으로부터 이방성 에칭된 실리콘다이아프램²⁾이나 앞면으로부터 에칭된 마이크로브릿지형 구조³⁾를 가지게 된다. 뒷면에서 에칭된 구조는 공정의 편이성과 높은 기계적인 강도 때문에 자주 이용되어오고 있다. 이상적인 열고립은 가스감지막이 최적의 온도로 가열되면서 소자의 열손실이나 주변회로

의 열피해의 방지를 위해 그 외의 부분 즉, 실리콘 벌크나 패키지 부분은 실온을 유지하게 하는 것이다. 그러나 실제소자에서는 그런 이상적인 열전달은 기대하기 힘들다. 열적으로 소자구조의 최적화는 실제 제작된 소자의 열분포와 전력소모를 평가하기 위하여 매우 중요한 요소이다. 이러한 것을 실험적으로 이룩하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 소자를 실제 제조하기 이전에 컴퓨터를 이용하여 마이크로센서의 열특성을 최적화 하는 연구가 필요하게된다.

열분석의 중요성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 감지막의 온도는 가스감지특성 즉, 감도, 선택성 및 응답속도에 크게 영향을 주기 때문에 감지막의 온도와 그 분포특성은 센서의 동작예측을 위해 정확히 평가되어야만 한다. 마이크로센서의 열특성은 히터와 절연층의 물질의 종류뿐만 아니라 기하학적구조와 크기에 큰 영향을 받는다. 컴퓨터시뮬레이션은 최적 소자의 구조와 물질의 선택에 도움을 줄 것이다.

(2) 열적 절연을 위해 사용된 얇은 절연 박막 텀브레인은 마이크로센서의 수명에 결정적인 영향을 줄 수 있는 거대한 열적스트레스에 노출되어 있다. 따라서 정확한 열해석에 의해 스트레스가 없는 다이아프램을 제조하는 것이 매우 중요하다.

마이크로가스센서의 열해석은 그 중요성에 비해 지

* : 동서대학교 정보통신공학부

(부산광역시 사상구 주례2동 산69-1, Fax : 051-320-1468 E-mail : wychung@dongseo.ac.kr)

1999년 6월 28일 접수, 1999년 9월 3일 심사완료

금까지 그다지 주목을 받지 못하였다. 1990년대 들어 시작된 대부분의 열해석은 상업용의 소프트웨어 제품에 의해 수행되어오고 있다¹⁴⁾. 컴퓨터에 의해 수행되어진 대부분의 열해석은 유한요소법(FEM : Finite Element Method)이나 차분법(FDM : Finite Differential Method)을 이용한 소프트웨어에 의해 이루어지고 있다. 본 연구에서는 실리콘 기판의 뒷면으로부터 이방성에칭된 마이크로센서구조에서 히터, 절연층과 감지막이 순서적으로 쌓여진 구조인 '적층형구조'의 센서¹⁵⁾와 히터와 감지막이 동일면위에 존재하는 '평면형구조'의 센서¹⁶⁾의 열해석을 시도하고 두 센서구조의 열특성의 차이점을 조사, 비교하여서 본 연구그룹에 의해 제안된 평면형구조 마이크로 가스센서의 열분포특성을 조사하고자 하였다.

2. 열해석을 위한 이론 및 물질정수

본 연구에서 소자에서의 열분포와 열소비전력 등의 열특성을 시뮬레이션하기 위해서 유한요소법을 이용하는 상업용 범용소프트웨어인 ANSYS (Swanson Analysis Systems, Inc., U.S.A.)를 이용하였다. 정확한 열분석을 위해서는 센서구조에서 사용되는 각각의 물질의 열에 대한 물질의 특성을 정확히 알아야 한다. 표 1에 센서물질의 열전도도와 복사율을 요약하였다. SnO₂와 Ti에 대해서는 이러한 데이터를 찾을 수 없어서 각각 SiO₂(PSG)와 Pt의 데이터를 준용하였다. 본 시뮬레이션에서 열전도도는 3차원 8노드 열고체 요소로 구성되게 하였고 물질의 열전도도는 등방성으로 가정하였다. SiO₂(PSG)/Si₃N₄다이아프램의 복사율은 금속산화물 표면의 복사율이 0.5 이상이라는 일반적인 결과와 실리카유리의 복사율이 0.7이라는 사실을 고려하여 0.7로 가정하였다. 센서의 전 대류영역(공기와 접촉하는 전 면적)의 대류열 전달계수는 0.004(W/cm²·K)로 가정하였다¹⁷⁾. 이 시뮬레이션에서 마이크로센서소자의 가열전력은 히터 부하(열생성율, 즉 히터의 단위체적에 일정한 전력을 부과하는 방식)에 의해 히터에 부과되었다. 이러한 전력부과방식은 히터패턴의 코너효과, 즉 히터 요소의 코너에서 히터의 저항이 직선형태에서의 부분에서와 차이가 나는 효과를 무시한 것이다. 또한 이 시뮬레이션에서는 마이크로센서소자가 주위의 어떤 고체와도 접촉하지 않은 상태의 완전히 독립적으로 27℃ 주변의 공기로만 둘러 쌓여있다고 가정한다. 즉, 소자의 패키지에 의한 열적 손실을 고려에 넣지 않았다.

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 열 계수들
Table 1. Thermal coefficients used for simulation

Property	Si	SiO ₂ (PSG)	Si ₃ N ₄	Pt
Thermal conductivity [W/cm·K]	1.5	0.0109~0.0145 (293~573K)	0.2092	0.734~0.719 (273~600K)
Emissivity	0.3	0.7		0.1

3. 실험

3.1 소자 모델의 설계

본 시뮬레이션에서 연구된 소자는 전형적인 마이크로센서구조인 두 가지 형태의 적층형구조와 새롭게 제안되고 있는 평면형구조이다. 적층형구조 I의 경우, 히터 최외곽의 크기(즉, 감지막의 크기)가 다이아프램의 크기의 1/3으로 고정되었고 이 히터의 크기는 평면형히터외곽의 크기와 같다. 이러한 히터의 크기는 실리콘 벌크로의 열전도를 줄이기 위한 이상적인 크기로 알려져 있다. 그러나 적층형구조 II의 경우에는 히터와 감지막의 크기가 평면형구조의 감지막과 같은 크기로 설계되었다. PC용 소프트웨어의 요소수의 제한(500개 이하) 때문에 본 연구에서는 소자의 완전한 대칭구조를 가정하여 소자의 1/4만을 시뮬레이션 하였고 전체의 소비전력을 계산할 때는 그 일부에서 소비되는 전력의 4배로 계산하였다. 그림1에 각각 246, 295 및 281개의 3차원 8-노드 요소(6면체, Solid 70)로 메쉬된 평면형구조, 적층형구조 I, 적층형구조 II의 1/4조각 FEM 모델을 보였다.

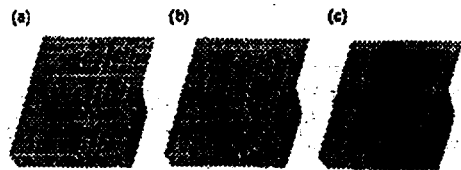


그림 1. 각종 소자의 유한요소모델.
(a) 평면형구조 (b) 적층형구조 I (c) 적층형구조 II
Fig. 1. Finite element models of the devices.
(a) planar structure (b) stacked structure I (c) stacked structure II

시뮬레이션의 정확도를 높이기 위해 메쉬간격을 소자의 위치에 따라 적당히 변화시켰다. 즉, 히터와 가스감지막부분과 그 주위는 세밀하게 메쉬를 취하고 그 외의 부분에는 메쉬의 간격을 크게 하였다. 복사 열전도 시뮬레이션을 위해서는 평면형구조, 적층형구조 I, 적층형구조 II의 다이아프램(위쪽과 아래쪽으로 향한 면 모두)이 각각 135, 168과 122개의 표면효과 요소(SURF 22)로 메쉬되었고 이러한 요소(표피 요소)는 이미 메쉬된 열전도와 대류열전도에 대한 요소의 표면에 추가로 부과되었다.

3.2 소자의 제조

평면형 소자의 제조된 모습을 그림 2에 보였다. 폭 $3.7 \times 3.7 \text{ mm}^2$, 두께 $320 \mu\text{m}$ 의 실리콘 칩이 뒷면으로부터 에칭되어 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 폭과 $950 \mu\text{m}$ 두께의 사각형 다이아프램을 형성하였다. 그 위에 Pt 히터와 감지막을 위한 전극쌍과 $260 \times 260 \mu\text{m}^2$ 의 SnO_2 감지막이 형성되어 있다. 절연층 다이아프램은 APCVD (atmosphere pressure chemical vapor deposition)에 의한 PSG(phosphorous silica glass) 800 nm , LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)에 의한 150 nm 두께의 Si_3N_4 막이 사용되었다. 제조공정은 간단히 다음의 3개의 마스크공정으로 이루어져 있다.

(1) Mask 1은 저항체히터와 감지막을 위한 전극쌍의 형성을 위해, (2) Mask 2는 실리콘칩의 후면에칭을 위해, (3) Mask 3은 감지막막의 패터닝을 위한 것이다.

센서의 제조공정의 상세한 설명은 다른 논문에 다루어져 있다¹⁶⁾. 적층형구조의 마이크로센서는 평면형센서와 같은 다이아프램으로 구성되었고 이 센서 제조를 위한 자세한 제조공정은 다른 논문에 상세히 설명되어있다¹⁷⁾.

4. 결과 및 고찰

4.1 마이크로 가스센서의 열특성

전형적인 적층형구조에서는 감지막은 그것의 바로 아래에 있는 히터에 의해 가열되어지지만 평면형의 경우 감지막은 감지막 바깥에 위치하는 백금히터에 의해 가열되어진다. 그림 3은 각각 56.6 mW , 47.7 mW 및 25.1 mW 의 전력으로 가열된 평면형구조, 적층형구조 I과 적층형구조 II소자의 열 흐름도이다. 평면형 마이크로히터의 경우 히터의 대부분의 히팅에너지

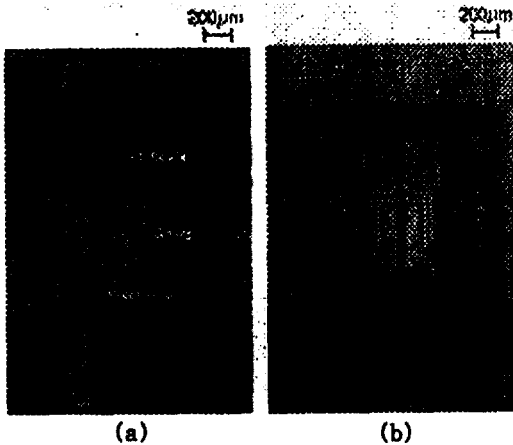
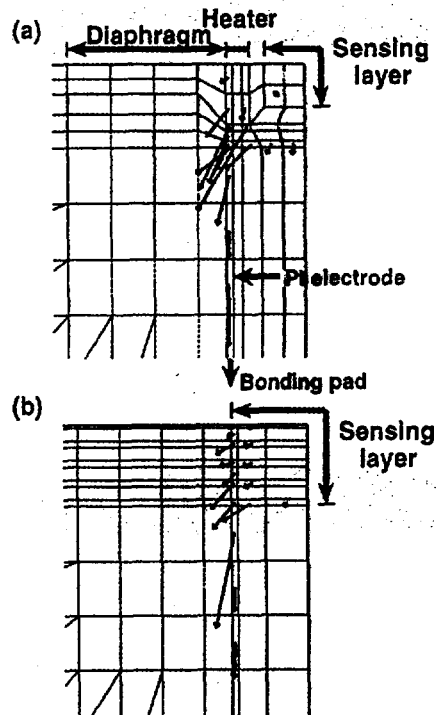


그림 2. 평면형 마이크로센서의 구조.
(a) 윗면 (b) 뒷면
Fig. 2. The structure of a planar-type microsensor.
(a) Top view (b) Back view



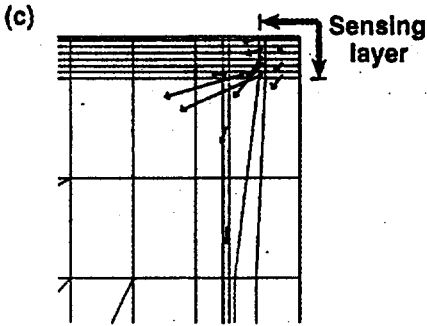


그림 3. 각각 56.5, 47.7 및 25.1 mW의 가열 전력에 대한 열흐름도.

(a) 평면형구조 (b) 적층형구조 I (c) 적층형구조 II

Fig. 3. Thermal flux diagram of the devices at 56.6, 47.7 and 25.1 mW for the planar structure (a), the stacked structure I (b) and the stacked structure II (c).

지는 열전도에너지의 형태로 감지막의 측면에 있는 히터로부터 다이아프램을 거쳐 가스감지막에 전달되기 때문에 히터와 감지막사이의 다이아프램에서의 대류와 복사에 의한 열 전력의 소모가 비교적 클 것으로 예측된다. 전체의 열전력에 대한 3가지 열전달기구의 기여에 대한 시뮬레이션 결과를 감지막의 평균온도의 함수로서 그림 4에 나타내었다. 여기에서 감지막의 평균온도는 감지막의 중앙부위와 가장자리부분의 1/2이되는 위치에서의 온도로 정의하였다. 소자가 다른 어떤 부양부분과도 접촉하지 않은 완전히 27℃온도의 주변공기로 고립되어있다고 가정하므로써 패키지 부분으로의 전도에너지에 의한 부분은 고려되지 않았다. 감지막의 온도를 150℃에서 400℃로 증가시킴으로써 복사에너지의 부분이 평면형구조의 경우 5.6%에서 10.0%로, 적층형 I의 경우는 7.5%에서 13.7%로 적층형구조 II의 경우는 7.8%에서 12.4%로 선형적으로 증가되었음을 볼 수 있다.

그림 5는 평면형구조, 적층형구조 I과 적층형구조 II에 대해 각각 56.6 mW, 47.7 mW 및 25.1 mW의 가열전력이 가해졌을 때 소자에 대한 온도분포를 보였다. 이들 각각의 가열전력에 대하여 감지막의 평균온도는 약 350℃이었다. 가열되는 부분은 전체의 소자영역에서 다이아프램 위의 중앙부분에만 제한적으로 되어지는 것을 볼 수 있고 실리콘 벌크의 온도는 각각 29.3℃, 28.5℃, 28.4℃로 분위기온도 27℃와 거의

같음을 알 수 있다. 평면형구조에서는 최대온도(약 396.3℃)가 발열 저항체의 위치에서 나타나고 그 안쪽의 감지막에는 조금 낮은 온도인 347.2℃가 나타남을 알 수 있다. 반면에 두 종류의 적층형구조의 경우는 소자에서의 최고온도가 각각 약 357.4℃와 364.8℃의 온도가 감지막 즉 히터의 중앙부분에서 보이는 것을 알 수 있다.

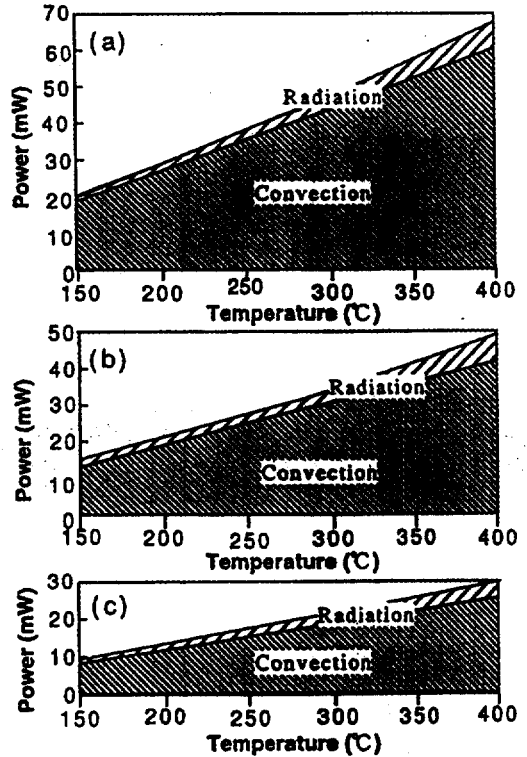


그림 4. 가열전력과 감지막의 평균온도와의 시뮬레이션 결과.

(a) 평면형구조 (b) 적층형구조 I (c) 적층형구조 II

Fig. 4. Simulated heating power vs. the average temperature across the sensing layer for the planar structure (a), the stacked structure I (b) and the stacked structure II (c).

그림 6은 평면형구조, 적층형구조 I과 적층형구조 II의 시뮬레이션된 가열특성을 보인 것이다. 평면형구조에서 감지막은 감지막의 외각을 둘러싼 백금히터에 의해 가열된다. 따라서 가열에너지는 그림 3에서

와 같이 열전도에 의해 주로 전달된다. 따라서 평면형구조에서 히터로부터 감지막으로의 열전도동안에 약간의 대류에너지가 소비되어질 것이다. 그러나 적층형구조에서는 가스감지막이 감지막 바로 아래에 있는 히터에 의해 가열되기 때문에 히터로부터 감지막으로의 열전도동안 대류에너지의 손실은 전혀 없는 것으로 생각되어진다. 이러한 대류에너지에서의 소비에너지의 차이가 감지막의 동작온도를 증가시키는데 필요한 전력이 크게 효과를 미치는 것으로 생각된다.

그림 7에 다양한 가열전력에 대한 감지막(평면형구조와 적층형구조Ⅱ : $260 \times 260 \mu\text{m}^2$, 적층형구조Ⅰ :

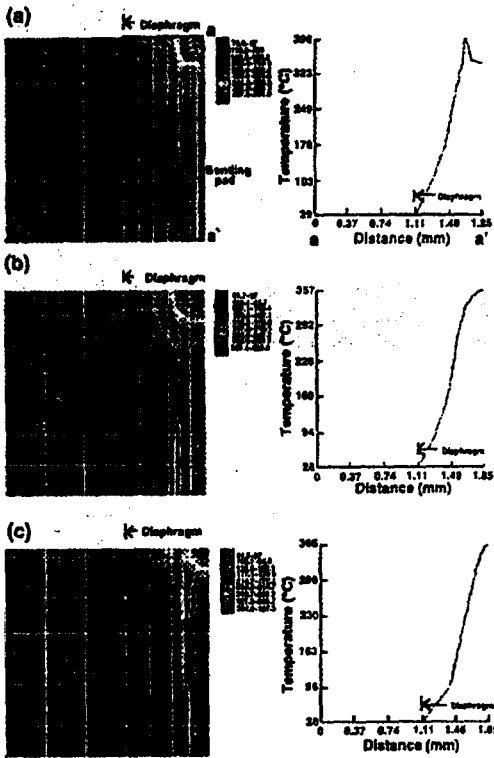


그림 5. 각각 56.6, 47.7 및 25.1 mW의 가열전력에 대한 시뮬레이션된 소자의 온도 분포결과. (a) 평면형구조 (b) 적층형구조Ⅰ (c) 적층형구조Ⅱ

Fig. 5. Simulated temperature distributions of the devices at 56.6, 47.7 and 25.1 mW for the planar structure (a), the stacked structure I (b) and the stacked structure II (c).

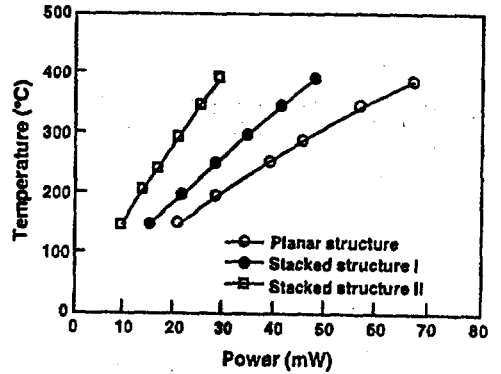


그림 6. 마이크로센서의 시뮬레이션된 열 특성. Fig. 6. Simulated heating characteristics of the microsensors.

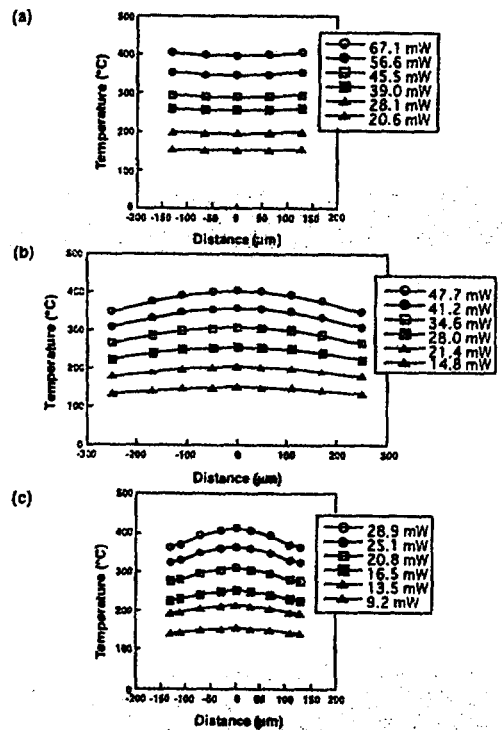


그림 7. 각 구조에서의 감지막에서의 온도분포. (a) 평면형구조 (b) 적층형구조Ⅰ (c) 적층형구조Ⅱ

Fig. 7. Temperature uniformity over the sensing layer for the planar structure (a), the stacked structure I (b) and the stacked structure II (c).

500×500 μm²위에서의 온도분포를 보였다. 56.6 mW에서의 평면형구조의 감지막의 온도분포는 감지막의 중앙부분에서부터 가장자리부분으로 가면서 345.5℃에서 352.6℃로 변화되었으며 감지막에서의 최고온도와 최저온도의 차이는 7℃이내를 유지하였다. 한편 적층형구조의 경우는 각각 47.7 mW와 25.1 mW의 전력에 대해 감지막의 중앙부분에서 가장자리부분으로 가면서 적층형구조I의 경우는 357.4℃에서 308.3℃로, 적층형구조II의 경우는 364.8℃에서 323.9℃로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 적층형구조의 감지막에서의 온도분포는 거의 같은 감

지막온도의 평면형구조에서의 온도분포와 비교하여 그 온도변화폭이 각각 6.9배와 5.8배 크다는 것을 알 수 있다. 평면형구조의 마이크로센서에서는 비록 감지막에서의 온도변화가 히터전력(또는 온도)을 증가 시킴에 따라 증가하는 경향이 있으나(그림 8) 본 연구에서 시뮬레이션된 최대의 히터전력(약 397.1℃에 대한 67.1 mW)에서조차도 매우 작은 8.6℃의 온도 편차를 보였다. 그러한 감지막에서의 온도의 균일성이 동일 다이아프램위에서 가열히터에 의해 둘러싸인 감지막을 가지는 제안된 평면형구조의 특성을 잘 표현해주고 있다.

4.2 실제소자에서의 온도평가

평면형구조 마이크로센서에서의 시뮬레이션된 온도특성의 결과와 제조된 소자에서의 실제온도특성이 얼마나 근접해 있는가를 조사하였다. 이러한 목적으로 먼저 소자에서 Pt히터(Pt 저항체)의 저항이 온도의 함수로서 조사되었다. 이 캘리브레이션은 열판 위에 소자를 놓고서 시행되었다. 이렇게 해서 얻어진 저항체의 양온도계수(PTC)는 약 3500 ppm/℃로서 비록 형태와 두께 등에서 큰 차이가 있지만 표준 Pt 저항체 온도계¹⁰⁾의 0℃에서의 3850 ppm/℃에 근접하는 특성을 보였다. 실험적 온도평가는 다음과 같이 수행되었다. 고정된 공급전압 아래에서 히터에 전원이 공급되고 전압과 전류의 값으로부터 저항체(히터)의 저항이 계산되고 캘리브레이션 커브에 기초하여 히터온도를 유추한다. 컴퓨터시뮬레이션에서는 중앙으로부터 65μm 떨어진 점(감지막의 중앙과 가장자리 사이의 중심위치)에서의 감지막의 온도는 섭씨의 히터온도보다 평균14%정도 낮았다. 따라서 실제 소자에서도 감지막의 온도가 히터의 온도보다 14% 낮은 것으로 가정되었다.

그림 9는 히터전력에 대한 시뮬레이션된 감지막이 온도값(T_s)과 실제소자의 감지막의 온도값(T_D)을 비교한 것이다. 히터전력이 20mW까지는 T_D 값과 T_s 값이 매우 일치하지만 가열전력이 증가하면서 그 차이가 조금씩 커지는 것을 알 수 있다. 예를 들면 347.2℃의 동작온도를 위해서는 T_s 의 관점에서는 56.6 mW의 전력이 필요하지만 T_D 의 관점에서는 36%가 큰 76.9 mW의 전력이 필요하다. 이러한 차이는 주로 단순화된 시뮬레이션조건 즉, 본딩와이어의 무시, 소자와 패키지 부분과의 접촉의 무시 등으로부터 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 이러한 시뮬레이션의 단순화를 고려한다면 T_D 와 T_s 는 비교적 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 마이크로센서소

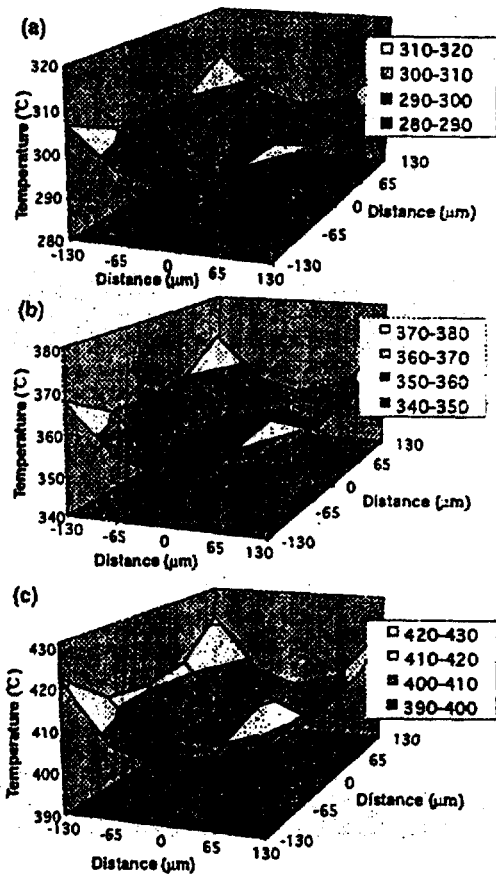


그림 8. 자기 다른 가열전력에 의한 평면형구조에서의 감지막 위에서의 3차원 온도분포.
(a) 45.5 mW (b) 56.6 mW (c) 67.1 mW

Fig. 8. 3D temperature distributions over the sensing layer of planar structure at the following powers : 45.5 mW (a), 56.6 mW (b) and 67.1 mW (c).

자에서의 온도분포나 열소모전력의 평가에 대해 FEM를 기반으로 하는 시뮬레이션의 효용성을 증명하는 자료가 될 것이다.

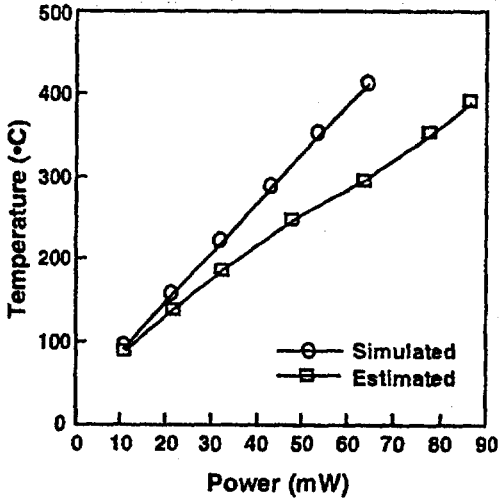


그림 9. 가열전력에 대한 가스감지박막의 온도.
Fig. 9. Temperature of gas sensing layer as a function of heater power.

5. 결 론

마이크로가스센서의 열특성을 FEM법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 분석하였다. 이러한 히터의 소모전력과 다이어램위의 온도분포를 포함하는 열해석에 의해 전형적인 센서구조인 적층형구조와 새롭게 제안된 평면형구조에 대한 열특성을 비교할 수 있었다. 시뮬레이션결과 평면형구조는 적층형구조보다 동일한 감지막의 온도를 위해 보다 많은 전력을 필요로 함을 알았다. 그러나 동일 평면위에 백금 히터와 감지막을 가지는 평면형구조는 전형적인 적층형구조가 5~6개의 마스크를 필요로 하는 공정에 의해 제작되는데 비해 3개의 마스크를 이용하는 단순공정에 의해 이루어진다는 장점을 가지고 있다. 또한 감지막의 온도균일성이 적층형보다 훨씬 균일하다는 장점을 가지고 있다. 더욱 중요한 것은 제안된 평면형구조의 센서는 스피닝코팅과 같은 습식법에 의한 감지

박막의 제조공정과와 공정호환성을 가질 수 있는 것이 확인되므로서, 본 실험에서의 평면형 가스센서가 반도체형 가스센서에서 감지막의 장기안정성부족을 해결하면서 마이크로화 할 수 있는 새로운 가스센서의 모델이 될 수 있는 가능성을 확인했다는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] N. Yamazoe, Y. Kurokawa and T. Seiyama, "Effects of additives on semiconductor gas sensors", *Sensors and Actuators*, Vol. 4, pp. 283-289, 1983.
- [2] 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.
- [3] 임준우, 김현호, 강봉휘, 정완영, 이덕동, "Suspended-type micro gas sensor", 제5회 한국반도체학술대회 논문집, pp. 187-188, 1998년 2월, 서울대학교.
- [4] N. R. Swart and A. Nathan, "Coupled electrothermal modelling of microheaters using SPICE", *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 41, No. 6, pp. 920-925, 1994.
- [5] W. Kriegl, P. Steiner, B. Fokmer, W. Lang, "Microtherm : a program for thermal modelling of microstructures", *Sensors and Actuators A*, Vol. 46-47, pp. 637-639, 1995.
- [6] W. -Y. Chung, D. -D. Lee, N. Miura, N. Yamazoe, "Fabrication of new planar-type microsensor attached with spin-coted thin film of tin dioxide and its thermal and CO sensing characteristics", *Trans. IEE of Japan*, Vol. 118-E, No. 92, pp. 147-153, 1998.
- [7] 정완영, 임준우, 이덕동, 노보루 야마조에, "마이크로 가스센서를 위한 저전력 마이크로 히터의 제조 : I. 유한요소법에 의한 열분포 해석", *한국센서학회지*, Vol. 6, No. 4, pp. 86-93, 1997.
- [8] DIN IEC 751 (Deutsche Industrienorm).