

論文2003-40SD-12-3

안정성이 개선된 고집적 가스센서 어레이 열해석

(Thermal Analysis of Highly Integrated Gas Sensor Array with Advanced Thermal Stability Properties)

鄭完永*, 林俊佑**, 李德東***

(Wan-Young Chung, Jun-Woo Lim, and Duk-Dong Lee)

요약

서로 다른 동작온도를 가지는 12개의 감지막으로 구성된 고집적형 센서어레이(다이아프램의 크기가 $3 \times 5 \text{mm}^2$)가 설계되고 열동작의 관점에서 최적화되었다. 이 센서어레이는 에칭된 실리콘기판과 접합된 얇은 유리기판 위의 중앙에 하나의 히터가 위치하고 양쪽에 동작온도가 다른 감지막이 위치하도록 설계됨으로써 개별 마이크로센서 보다 동시에 훨씬 많은 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 제안된 마이크로센서 어레이는 다이아프램의 중앙에 하나의 히터만을 가지는 구조를 하고 있기 때문에 고집적 어레이구조를 실현하면서도, 히터를 중심으로 감지막의 동작온도에 따라 다양한 감지특성을 얻을 수 있고 또 히터 양쪽의 감지막의 종류를 다르게 함으로써 다이아프램위의 전 감지막이 모두 다른 감지특성을 가지게 되어 고집적 센서어레이를 구현하기 용이한 구조로 밝혀졌다.

Abstract

A sensor array ($3 \times 5 \text{mm}^2$ in diaphragm dimension) of 12 sensing elements with different operating temperatures was optimized with respect to thermal operation. This sensor array with single heater on a glass diaphragm over back-etched silicon bulk realizes a novel concept of a sensor array: an array of sensor elements operated at different temperatures can yield more information than single measurement. The proposed micro sensor array could provide well-integrated array structure because it had only single heater at the center of the diaphragm and used the various sensing properties of two kinds of metal oxide layers with various operating temperatures.

Keyword : Gas sensor, Micro gas sensor, Gas sensor array, SnO₂, Thermal analysis.

* 正會員, 東西大學校 인터넷工學部

(School of Internet Engineering, Dongseo University)

** 正會員, 大邱科學大學 인터넷情報系列

(Dept. of Electronic Engineering, Taegu Science College)

*** 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터工學部

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 연구의 일부는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01505-0)지원으로 수행되었음.

接受日字:2002年11月19日, 수정완료일:2003年11月27日

I. 서론

반도체형 가스센서의 가장 큰 단점 중의 하나는 특정한 가스의 감지를 위한 센서임에도 불구하고 여러 가지 가스에 대해 비교적 반응을 많이 한다는 사실이다. 이러한 반도체형 가스센서의 단점을 극복하기 위하여 지금까지는 단일소자의 선택성을 향상시키는 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 최근에는 다양한 특성을 가지는 센서어레이를 구성하고 이로부터 들어오는 다양한 입력신호를 처리하여 특정한 가스를 인식하려는 노력이 많이 이루어지고 있다^{1)~5)}. 이러한 최근의 연

구경향은 보다 더 진보되어 가스를 반정량적으로 인식하는 “전자코”의 개발에도 활발한 연구가 이루어지게 하고 있다.

본 연구에서는 이러한 전자코 등에 사용될 수 있는 입력 센서어레이로서 더욱 가능성이 높은 집적형 어레이 센서에 관해 연구한 내용이다. 실리콘을 이용한 가스 센서어레이에서 해결해야 할 중요한 기술적인 문제는 (1) 적당한 가스감지박막의 형성과 패터닝, (2) 실리콘 기판에 영향을 주지 않으면서도 원하는 동작온도를 유지할 수 있는 히터의 형성이다. 이 중에서 히터의 온도 제어문제는 중요한 문제임에도 불구하고 많은 가스센서어레이 연구자들이 거의 연구를 하지 않은 분야이다. 본 연구에서는 실리콘 기판위에서 서로 다른 온도에서 동작하는 센서어레이를 설계하고, 각각의 가스감지박막의 동작온도를 알기 위해 상업용 유한요소 시뮬레이터인 ANSYS⁽⁶⁾를 사용하여 센서어레이를 열해석해서 그 설계의 타당성을 보여주고자 하였다.

II. 센서어레이의 설계와 제조

급속산화물 감지막을 가지는 반도체형 가스센서는 보통 가스와 감지박막이 반응하여 가스감응특성을 보이기 위해 가스감지박막이 100~500°C로 가열되어야 한다. 이러한 사실은 실리콘을 기판으로 하는 가스센서의 마이크로화에 큰 장애요인으로 작용하고 있다. 실리콘 마이크로센서에서는 저전력화와 실리콘 기판위에 위치하는 다른 회로들을 보호하기 위해 센서의 감지박막이 있는 활성부분을 열절연막 위에 올리게 된다. 전형적인 마이크로 가스센서의 경우에는 이방성 에칭에 의해 가스센서가 위치하는 부분의 뒷면이 에칭되고 그 위에 SiO₂, Si₃N₄ 또는 이들로 구성되는 다층 절연층인 실리콘절연층(다이아프램)이 형성되고 그 위 중앙부분에 감지박막을 가열하기 위한 마이크로 히터가 위치하게 된다. 또한 대부분의 센서는 분리된 절연 멤브레인 위에 각각 떨어져있는 단위 센서로 구성되어 전체적인 센서어레이 구조를 이루고 있다^{1) 5) 7)}.

본 연구에서는 각기 다른 감지특성을 가지는 센서로 이루어지는 센서어레이의 집적도를 높이면서도 그 각기 다른 가스 감지특성을 잘 제어할 수 있는 형태의 소자를 구상하게 되었다. 감지특성이 다른 센서를 만들기 위해서는 감지박막을 각기 다른 물질로 만드는 방법과 동일한 감지박막을 사용하되 동작온도를 다르게

하는 방법이 있을 수 있다. 이 논문에서는 위의 두가지 방법을 사용하는 고집적도 마이크로 가스센서 어레이를 제작하는 방법을 개발하였다. 또한 전형적인 실리콘산화물을 사용한 멤브레인이 열적인 안정성이 떨어져서 온도가 동작온도까지 오르내리면서 열스트레스에 의해 쉽게 파손되는 단점을 보완하기 위해서 상용의 유리기판을 사용하는 방법을 처음으로 시도하였다⁸⁾.

먼저 본 실험에서는 두께가 125 μm인 코닝 7740 유리판을 기판으로 사용하여 마이크로가스센서를 제작해서 그 특성을 조사했다. 그리고 물리적인 충격이나 장기간의 사용에 의한 소자특성의 열화가 일어나지 않도록 하였다. 열적으로 고립된 멤브레인상의 중앙에 하나의 히터를 배치하고 그 양측면에 여러개의 감지막을 동일기판면상에 형성함으로써 소자 제조를 단순화하였고, 하나의 히터가 발생시키는 열로써 여러개의 감지박막이 서로 다른 온도에서 각각 동작하도록 하였다.

<그림 1>에 마이크로가스센서의 제작 공정 순서도를 나타내었다. 제작 공정은 다음과 같다.

(a) 센서 제작을 위한 기판으로 두께가 125 μm인 코닝 7740 유리판을 사용하였다. 이 유리기판은 열팽창 계수가 실리콘 지지대와 비슷하여 양극 집합에 용이한 장점이 있다.

(b) 유리기판을 초기 세척한 후 전면에 r.f. 마그네트론 스퍼터를 이용하여 in-situ로 Ti를 0.03 μm, Pt를 0.23 μm 두께로 연속하여 증착하였다. 여기서 Ti층은 Pt와 절연물층간의 접착성을 좋게 하기 위한 것이다.

(c) 마스크 #1을 이용하여 Pt를 습식식각(식각액 = 70HCl : 10HNO₃ : 80H₂O, 85°C)해서 Pt 히터와 감지전극을 형성하였다.

(d) 마스크 #2를 이용하여 열증착기로 증착된 1,500 Å Sn을 lift-off법으로 감지막 패터를 형성하였다.

(e) 증착된 Sn을 650°C에서 3시간 동안 산소분위기에서 열산화시켜서 SnO₂로 변화시켜서 가스 감지박막이 되게 하였다.

(f) 또한 히터의 한쪽의 감지막으로는 순수한 SnO₂ 박막을 그대로 사용하고 다른 쪽의 감지막으로는 SnO₂(+Pt) 박막을 형성하여서 코닝 7740 유리판에 마이크로 가스센서어레이의 주요 구성요소들을 형성하였다. 이때 SnO₂(+Pt) 박막을 위해서는 SnO₂ 박막위에 이온증착기로 Pt를 30 Å 초박막으로 증착한 후, 600°C에서 30분간 질소분위기에서 열처리함으로써 귀금속촉

배 Pt가 표면위위에 고립된 미세 섬형식으로 분포된 SnO₂(+Pt) 감지박막을 형성할 수 있었다.

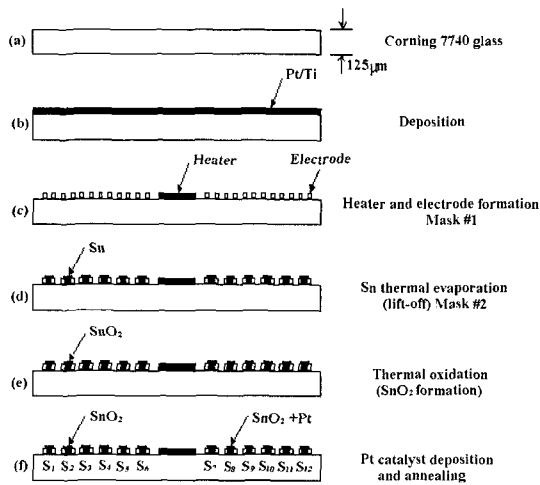


그림 1. 마이크로 가스센서 어레이의 공정순서도
Fig. 1. Processing steps for the micro gas sensor array.

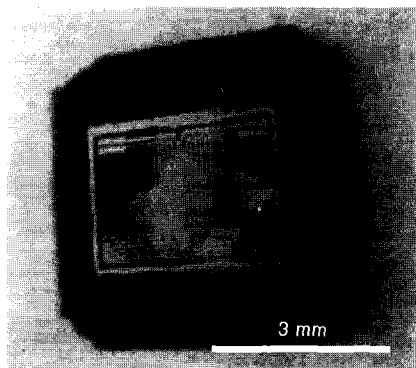
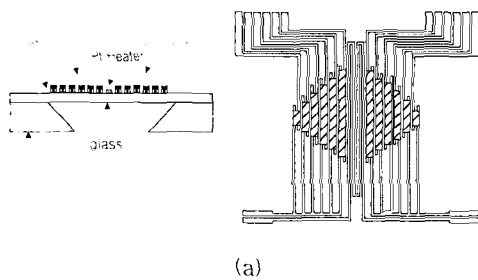


그림 2. 제안된 구조의 센서어레이(a)와 제조된 센서어레이 구조(b)
Fig. 2. The proposed structure of the sensor array(a) and a fabricated sensor array(b).

코닝 7740 유리판에서 히터, 전극, 감지박막이 형성된 면적은 3×5mm²이다. 감지막의 크기는 히터와 가까운 쪽에서부터 살펴보면 가로 폭은 100μm로 동일하지만, 세로 길이는 1600, 1300, 1000, 700, 400, 100μm로 다르게 설계하였다. 이는 전체적으로 중앙에 위치한 히터에 의해 감지박막에서 균일한 온도가 유지되는 영역이 중앙히터로부터 떨어질수록 좁아지기 때문에 가급적 감지영역을 넓히면서도 감지박막의 동작온도를 균일하게 유지하기 위한 설계에서 비롯되었다. 마이크로머시닝된 실리콘 지지대에 양극접합이 될 소자의 전체 크기는 9×7mm²이다.

<그림 2>는 본 연구에서 제안된 고집적형 센서어레이의 구조(a)와 실제 제조된 센서어레이 소자의 사진(b)을 보여주고 있다.

III. 센서의 열해석

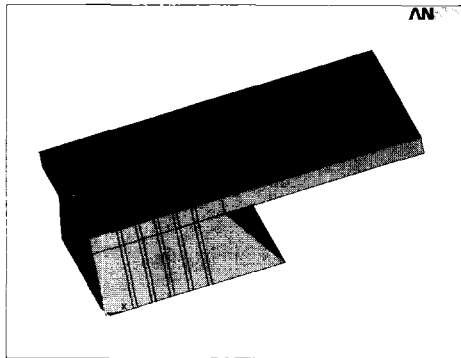
본 연구에서의 열해석은 널리 사용되고 있는 상용 FEM(Finite Element Method: 유한요소법) 열해석 소프트웨어 패키지인 ANSYS를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 각 센서구성 물질의 열전도계수, 복사능(emissivity)이 <표 1>에 요약되어 있다^[7]. SnO₂와 같이 파라미터의 참고가 불가능한 경우에는 SiO₂와 같다고 가정하여서 시뮬레이션했다. 열해석에 있어서 열전도, 대류, 복사가 고려되어야하지만 본 연구에서는 히터와 센서감지막의 동작온도가 500℃ 이하이기 때문에 복사의 효과를 배제한 가운데 열해석을 수행하였다^[9].

표 1. 열시뮬레이션에 사용된 각종 파라미터들
Table 1. Parameters for thermal simulation.

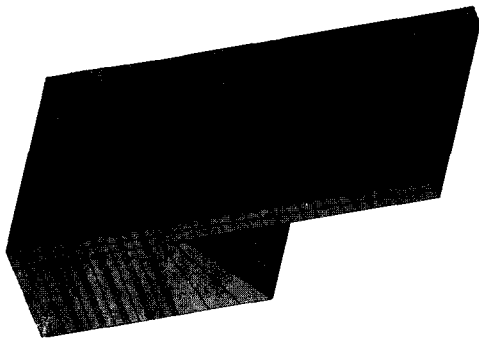
Properties	Si	Glass	SnO ₂	Pt
Thermal conductivity [W/cmK]	1.5	0.0078	0.045	0.734~0.719 (273~600K)
Emissivity	0.3	0.7	0.5	0.1

열해석은 전체소자의 형태가 완전대칭인 것을 가정하여서 전체 어레이 소자의 1/4만에 대해 수행되었다. 이는 전체적인 해석을 위한 복잡성을 방지하기 위함이다. <그림 3>은 본 연구에서의 전형적인 FEM 모델을 보여주고 있다. <그림 3(a)>는 모델 형성을 위한 요소

들을 보여주고 있으며 <그림 3(b)>는 열해석을 위해 메쉬가 형성된 모델을 보여주고 있다. 본 연구에서는 열해석의 정밀성 향상을 위해 해석 단위가 되는 셀을 나누는 메쉬간격을 다양화하였다. 즉, 가스감지박막이나 히터가 있는 부분은 세밀하게 메쉬형태가 되게 하였고 그에 반하여 실리콘 벌크 등의 부분은 메쉬의 형태가 커지도록 하였다. 히터부분에는 열해석의 단위가 되는 메쉬를 최대 5 μ m를 넘지 않게 하였다.



(a)



(b)

그림 3. 센서어레이 1/4부분에 대한 FEM 모델(a)과 메쉬된 FEM 모델(b)

Fig. 3. Typical FEM model (a) and meshed FEM model (b) of a quarter of sensor array.

IV. 결과 및 고찰

마이크로 센서의 감지막 어레이를 위한 히터의 위치를 실리콘벌크에로의 열차단과 그에 따르는 저전력의 필요성에 의해 열절연막(유리기판) 중앙에 두도록 설계하였다. 즉, 센서어레이가 위치하는 부분의 열고립을 위해 실리콘 위쪽으로부터 이방성 에칭에 의해 실리콘 벌크 부분이 에칭되었다. 에칭 후에 얇은 유리기판

이 놓이고 그 이전에 이 유리기판에는 히터의 양쪽에 각각 6개의 완전 대칭형 감지박막 어레이가 형성되어 있게 된다. 센서어레이(감지박막 어레이)의 열분포를 확인하기 위해 중앙의 히터를 500 $^{\circ}$ C 까지 가열한 다음에 각 감지박막의 온도를 조사한 결과를 <그림 4>에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 중앙의 히터를 최고 온도로 하여 히터로부터 멀어질수록 동작온도가 감소하여 비교적 균일하게 각각의 감지박막의 동작온도가 분포하는 것을 확인할 수 있다.

지금까지 연구되고 있는 실리콘을 기판으로 하는 마이크로가스센서에서, 히터로부터 실리콘 기판으로 열전달을 방지하기 위한 구조로 사용된 것은 주로 실리콘 질화막, 실리콘산화막, 질화막과 산화막의 샌드위치구조, PSG막 등이 히터와 감지박막의 지지막으로 사용되고 그 아래부분의 실리콘 벌크는 이방성 에칭되는 구조를 취하였다. 이러한 구조에서 가장 문제가 되는 것은 가스감지막의 동작을 위해서는 감지막의 온도가 약 300~500 $^{\circ}$ C로 올려져야 한다는 것이다. 이렇게 동작온도를 올렸다가 내렸다가 되풀이되거나 고온에서 장시간 동작할 경우에 히터와 감지박막을 지지하는 산화 또는 질화박막은 열스트레스에 의해 그 수명이 비교적 짧은 것으로 보고되고 있다. 이러한 열스트레스에 대한 저항력을 증대시키는 것이 이 마이크로센서의 상용화에 중요한 요인이 되고 있다. 본 연구에서는 실리콘기

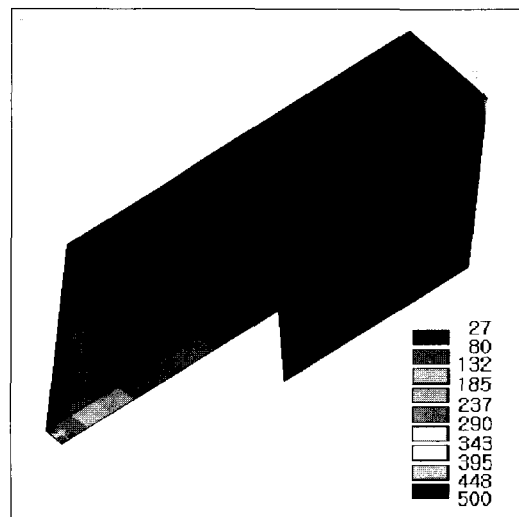
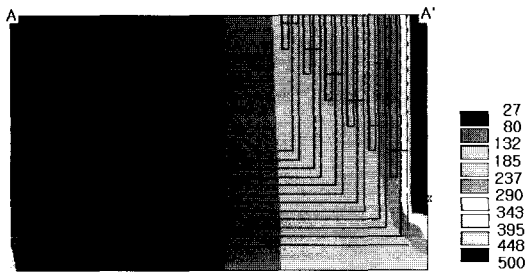


그림 4. 히터의 온도가 500 $^{\circ}$ C일 때의 센서어레이의 전형적인 온도분포

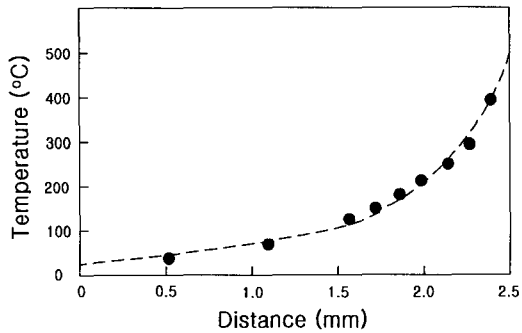
Fig. 4. Typical temperature distribution of a quarter of sensor array.

판의 벌크에로의 열전달 방지와 가스감지박막의 가열을 위한 두가지 목적외에 열스트레스로 부터의 안정성 향상을 위해 얇은 유리기판위에 히터와 감지막을 형성하고 그 유리기판을 실리콘 기판에 붙여서 사용하는 방법을 사용하였다. 이와같이 센서어레이 구조에서 실리콘질화막이나 실리콘 산화막을 센서감지박막의 지지막으로 사용하지 않고 기판의 실리콘과는 별도의 유리기판을 사용하는 방법은 지금까지 시도된 바 없으며, 본 연구에서 처음 시도되는 방법이다.

또한 히터의 온도가 동일한 상태에서 각 센서감지박막 어레이의 온도분포를 조사하여 <그림 5>에 요약하였다. <그림 5>에서 대부분의 온도기울기가 얇은 유리기판에서 이루어지며 실리콘 기판 자체의 온도는 열해석에서 대입한 실온인 27°C를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 센서어레이의 구조에서 가장 중앙에 위치한 히터를 중심으로 대칭 형태로 위치한 가스감지박



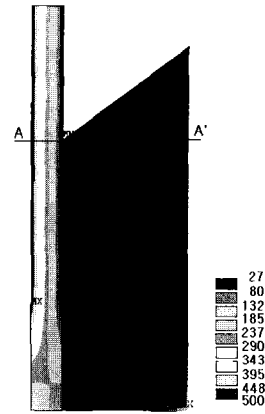
(a)



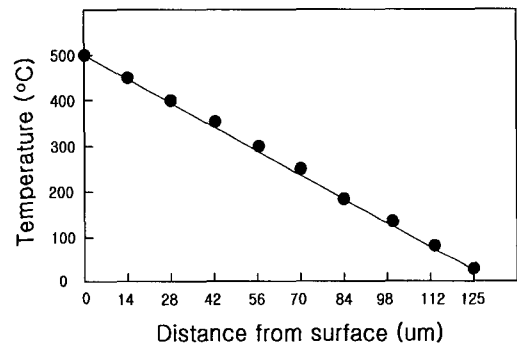
(b)

그림 5. 히터의 온도가 500°C일 때의 센서어레이에서의 온도분포도: 등고선형태 분포도(a)와 A-A' 단면에서의 온도분포도(b)

Fig. 5. Temperature distribution over the sensor array at the heater temperature of 500°C: Contour style (a), path plot (A-A') (b).



(a)



(b)

그림 6. 히터의 온도가 500°C일 때의 센서어레이 단면의 온도분포도

Fig. 6. Cross-sectional temperature profile of the glass diaphragm at the heater temperature of 500°C: Contour style (a), path plot (b).

막의 온도는 히터로부터 떨어질수록 온도가 낮아지지만 유리기판을 지지하는 실리콘벌크의 온도는 실온이라는 사실을 확인할 수 있었다. 제조된 센서어레이는 히터에 공급하는 전력(전압)의 크기에 따라 히터의 온도가 결정된다. 중앙히터의 온도가 500°C가 되도록 공급전력이 조절되었을 때의 12개의 감지막 중에서 한쪽 편에 있는 6개 감지박막의 온도는 395에서 160°C로 비교적 선형적인 온도분포를 가지고 있는 것으로 나타났다. 즉, 중앙히터에 가장 근접된 감지박막의 온도가 395°C이고 센서어레이의 가장 바깥쪽의 감지박막의 온도가 160°C로 나타났다.

<그림 6>에는 125 μ m 두께의 얇은 유리기판의 온도 단면 분포도를 보이고 있다. 기판의 단면에서 500~27°C의 분포로 중앙 히터와 가장 가까운 감지박막에서

부터 가장 멀리 있는 감지박막 까지 선형적으로 동작 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 실리콘 기판의 벌크로의 열전달이 전혀 없으므로 해서 센서어레이소자 자체의 전력소모를 감소시킬 수 있게 된다. 얇은 유리지기판의 온도분포 열해석은 추후 센서 감지막의 지지 다이아프램 설계에 귀중한 자료가 될 것으로 예상된다.

<그림 7>에는 3가지 다른 전력이 히터에 공급되어서 히터의 온도가 다를 때의 한쪽 편에 위치한 감지막의 온도분포도를 보인 것이다. <그림 7>에서 x축의 "센터로부터의 거리"는 중앙히터로부터의 센서감지막의 위치를 나타내고 있다. 각 센서감지막이 비교적 선형적으로 변화하는 온도에서 동작하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 만약 중앙 히터에 <그림 7>과 같은 3가지의 전력을 연속적으로 변화시킨다면 한편의 6개의 감지박막으로부터 18개의 동작온도가 다른 가스감지특성을 얻을 수 있게 될 것이다. 또 히터를 중심으로 반대편에 동일한 온도에서 동작하는 다른 감지박막($\text{SnO}_2(+\text{Pt})$)이 위치한다는 것을 고려한다면 중앙 히터를 중심으로 12개의 센서감지막을 가지는 한 개의 센서어레이로 히터를 3개의 전력에서 동작시킨다면 최고 36개의 다른 감지특성을 얻을 수 있게 된다.

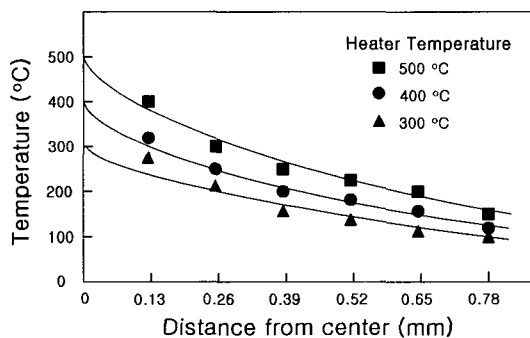


그림 7. 중앙 히터의 온도에 따른 각 어레이 감지막의 온도분포: (a) 500°C, (b) 400°C, (c) 300°C.

Fig. 7. Temperature distribution of sensing elements from central heater to the edge of the array when temperature of central heater is : 500°C(a), 400°C(b) and 300°C(c), respectively.

V. 결 론

중앙에 히터를 두고 양쪽에 서로 다른 성분을 가지는 감지박막을 가지는 고집적형 가스센서 어레이를 설

계, 제작하고 센서어레이의 열적인 안정성을 위해 얇은 유리기판을 센서어레이 지지기판으로 사용하는 새로운 형태의 센서어레이를 제작하였다. 감지박막 어레이의 동작온도 분포를 FEM 시뮬레이션으로 확인한 결과 센서어레이의 동작온도특성이 서로 선형적으로 차이나는 센서어레이 구조가 증명되었으며 추후 중앙히터에 다양한 전력을 공급하도록 센서어레이를 동작시킨다면 마이크로센서 어레이로 부터 많은 입력정보를 얻을 수 있게 될 것이 예상된다. 즉, 본 연구에서 3가지 전력에 의해 히터온도가 3가지 동작온도를 가진다면 최대 36개의 센서에 의한 가스감지 정보를 얻을 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] W.P. Carey, K.R. Beebe, E. Sanchez, P. Geladi and B.R. Kowalski, "Chemometric analysis of multisensor arrays", *Sensors and Actuators*, vol.9, pp. 223-234, 1986.
- [2] V.Demame and A. Grisel, "Domestic gas detection system using two integrated sensors", *Sensors and Actuators B*, vol.19, no.1-3, pp. 658-660, 1994.
- [3] D. Bednarczyk, S.P. DeWeerth, "Smart chemical sensing arrays using tin oxide sensors and analog winner-take all signal processing", *Sensors and Actuators B*, vol.26-27, pp. 271-274, 1995.
- [4] X. Wang, W. Patyrick Carey, Sinclair S. Yee, "Monolithic thin-film metal-oxide gas-sensor arrays with application to monitoring of organic vapors", *Sensors and Actuators B*, vol.28, pp. 63-70, 1995.
- [5] S. Semancik, R. E. Cavicchi, K. G. Kreider, J. S. Suehle, P. Chaparala, "Selected-area deposition of multiple active films for conductometric microsensor arrays", *Sensors and Actuators B*, vol.34, pp.209-212, 1996.
- [6] Introduction to ANSYS-Revision 5.51, Ansys Inc., U.S.A., 2000.
- [7] W.-Y. Chung, J.-W. Lim, D.-D. Lee, N. Miura and N. Yamazoe, "Thermal and gas-sensing

properties of planar-type micro gas sensor”, Sensors and Actuators B, vol.64, pp.118-123, 2000.

[8] 임준우, 온도 구배를 갖는 마이크로 가스센서 어레이의 제조 및 특성, 경북대학교 박사학위논문, 2000. 12

[9] W.-Y. Chung, J.-W. Lim, D.-D. Lee and N. Yamazoe, “Fabrication of low power micro-heater for micro-sensor I.The thermal distribution analysis by the finite element method”, J. Korean Sensors Society, vol.6(4), pp.337-344, 1997.

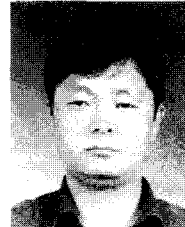
저 자 소 개



鄭完永(正會員)

1980년 3월~1987년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업. 1987년 3월~1989년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 1995년 4월~1998년 5월 : 일본 규슈대학 공학박사. 1993년 3월~1999년 2

월 : 세명대학교 전자공학과 전임강사, 조교수. 1999년 3월~현재 : 동서대학교 정보네트워크공학전공 부교수, 학부장. 2003년 9월~현재 : 동서대 유비쿼터스 TIC 소장



林俊佑(正會員)

1988년 3월~1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업. 1995년 3월~1997년 2월 : 경북대 전자공학과 반도체공학전공 석사졸업 공학석사. 1997년 3월~2000년 2월 : 경북대 전자공학과 반도체공학전공 박사졸업 공학박사. 2000년 3월~현재 : 대구과학대학 인터넷정보계열 전임강사

사졸업 공학박사. 2000년 3월~현재 : 대구과학대학 인터넷정보계열 전임강사

李德東(正會員)

1984년 : 연세대학교 전자공학과 공학박사. 현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수, 한국센서학회 회장