

## MEMS 공정으로 제작한 NO<sub>2</sub> 마이크로 가스센서의 열전달 해석

주영철<sup>1)\*</sup> · 이창훈<sup>1)</sup> · 김창교<sup>2)</sup>

### Heat Transfer Analysis for NO<sub>2</sub> Micro Gas Sensor Fabricated by MEMS Technology

Youngcheol Joo<sup>1)\*</sup>, Changhoon Lee<sup>1)</sup>, and Changkyo Kim<sup>2)</sup>

**요 약** 대기중의 NO<sub>2</sub> 가스 농도를 측정하기 위한 마이크로 가스센서를 MEMS 공정을 이용하여 제작하였다. WO<sub>3</sub>와 같은 가스 감응물질을 목표 온도까지 가열하기 위해서 마이크로 핫플레이트를 가스센서에 장착하였다. 마이크로 가스센서의 열전달 현상을 상용 열유동 해석 전용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 해석하였다. 해석 결과 실리콘 웨이퍼 기판의 온도가 거의 상온에 가까워 핫플레이트에서 발생한 열이 가스 감응물질을 효과적으로 가열하여서 가스감응물질의 열적 고립상태를 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. 마이크로 핫플레이트의 형상을 변경함으로써 가스 감응물질의 온도 균일도를 높일 수 있다.

**Abstract** A flat type NO<sub>2</sub> micro gas sensor was fabricated by MEMS technology. In order to heat up gas sensing material such as WO<sub>3</sub> to a target temperature, a micro hotplate was built on the gas sensor. The temperature distribution of micro gas sensor was analyzed by a CFD program, FLUENT. The results showed that the temperature of silicon wafer base was almost similar to that of the room temperature, which indicates that the heat generated at the micro hotplate heated up effectively the sensing material and its thermal isolation was kept. The uniformity of temperature on the sensing material can be improved by modifying the shape of micro hotplate.

**Key Words** : gas sensor, heat transfer, MEMS, micro hotplate, NO<sub>2</sub>, numerical analysis

## 1. 서 론

질소 산화물 (NO<sub>x</sub>) 가스는 오존 가스의 주요 생성원으로서 대도시에서 차량 배기가스로 인한 스모그 현상을 일으키고 산성비를 내리서 환경을 파괴시키는 주 원인중의 하나이다[1]. 과거에는 공장이나 발전소, 가정의 보일러 배출가스가 NO<sub>x</sub> 가스의 주요 발생원이었으나 자동차의 수가 증가함에 따라 차량 내연기관의 배출가스가 NO<sub>x</sub> 가스의 주요 발생원이 되고 있다. 이렇게 유해한 NO<sub>x</sub> 가스를 측정하기 위해서 고체 전해질을 이용한 전기화학식 센서나[2] SnO<sub>2</sub>, ZnO, WO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 산화세라믹 혹은 박막을 이용한 반도체 방식의 센서[3-6]와 같이 여러 가지 NO<sub>x</sub> 가스센서가 개발되었다. 최근에는 산화물 반도체 박막 혹은 후막이 민감성과 신뢰성이 높아 NO<sub>2</sub> 가스센서의 감지 회로로 활용하는 방법이 활발히 연구되어 왔다. 이러한 센서는 NO<sub>2</sub> 가스가 산화물 반도체 박막 혹은 후막의 표면에 접촉하면 흡착되어 반

도체의 전기저항이 변화되는 성질을 이용한 것으로 가스 감도를 좋게 하기 위해 박막을 200°C~300°C의 일정한 온도로 균일하게 가열하여야 한다. 이를 위하여 마이크로 핫플레이트가 장착되는데, 소요되는 전력을 적게 하면서 감지 회로의 온도가 균일한 설정온도로 유지되도록 하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 대기중의 NO<sub>2</sub> 가스 농도를 측정하기 위해 MEMS 공정을 이용하여 WO<sub>3</sub>를 가스 감응물질로 하고 마이크로 핫플레이트가 감응물질을 가열해 주는 마이크로 가스센서를 제작하였다. 마이크로 핫플레이트에서 발생한 열이 감응물질을 효과적으로 가열하는지, 감응물질의 온도분포는 균일한지의 여부를 확인하기 위해 가스센서의 온도분포를 전산 프로그램을 이용하여 해석하였다.

## 2. 가스센서 제작공정

가스센서는 일반적인 MEMS(micro electro- mechanical system) 공정을 이용하여 만들어진다. 기판으로는 (100) 방향의 단면 폴리싱된 두께 500 μm의 p형 실리콘 웨이

<sup>1)</sup> 순천향대학교 기계공학과

<sup>2)</sup> 순천향대학교 정보기술공학부

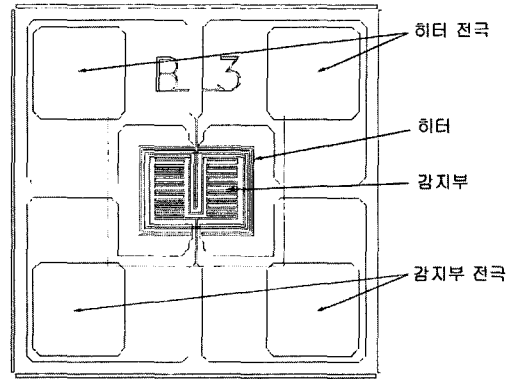
퍼를 사용한다. 이 웨이퍼의 양면에 낮은 응력을 갖는 질화규소막(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)을 2 μm 두께로 증착시켰다. 전면의 막은 멤브레인으로 이용되고 후면은 웨이퍼 식각시 보호막으로 사용된다. 웨이퍼를 세척한 후에 스퍼터를 이용하여 400 Å 두께의 Ta과 2000 Å 두께의 Pt를 순차적으로 증착시켰다. 마스크1을 이용하여 마이크로 핫플레이트의 히터부와 가스 감지부의 전극 패턴을 식각으로 형성하였다. 패턴형성 이후에 SiO<sub>2</sub>를 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)로 5000 Å 증착시킨 후, 마스크 2로 보호용 패턴을 형성하였다. 다음에 shadow 마스크를 이용하여 감지막인 WO<sub>3</sub>를 스퍼터를 사용하여 증착하여 박막을 형성하였다. 이후에 500°C~700°C에서 4시간 동안 공기중에서 어니얼링하였다. 다이어프램을 얻기 위하여 후면을 습식 식각하였다. 최종적으로 완성된 마이크로 센서는 500°C, 600°C, 700°C에서 1시간동안 열처리를 하였다. 이와 같은 공정을 수행하여 마이크로 가스센서를 제작하였다[7].

마이크로 가스센서의 구조를 Figure 1 (a)에 나타내었다. 중앙부에 2 μm 두께의 감지 회로가 0.5×0.5mm<sup>2</sup> 면적 내에서 지그재그 모양으로 배치되어 있으며, 그 주변에 2 μm 두께의 핫플레이트 히터 회로가 사각형 도넛 모양으로 둘러싸고 있다. 네 귀퉁이의 하안 부분은 센서와 히터 전극에 전류를 공급하기 위한 전선을 연결할 접점들이다. 마이크로 가스센서의 전체 면적은 5×5mm<sup>2</sup>이다. Figure 1 (b)는 제작된 마이크로 가스센서의 중앙부 사진이다.

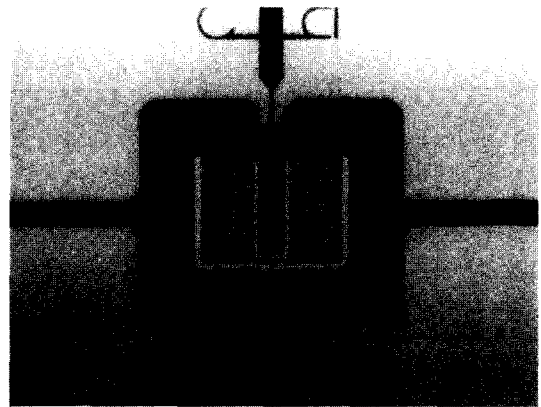
### 3. 가스센서의 열전달 해석

마이크로 가스센서는 감응물질의 온도가 200°C~300°C에 이르렀을 때 가장 좋은 가스 감도를 보인다. 마이크로 핫플레이트는 감지물질의 온도를 일정한 설정온도로 올려주는 역할을 하는 것으로 감지 회로의 온도를 균일하게 해 줄수록 좋은 가스 감도를 나타낸다. 또한 감응물질을 가열하는데 필요한 소요전력이 적게 들수록 저전력의 가스센서가 된다. 이와 같이 가스센서를 개발할 때 가장 중요한 점은 전력 소모량이 적어야 하며 감응물질의 온도가 균일해야 한다는 점이다. 이를 위하여 상용 열유동해석 프로그램을 이용하여 발열부와 감지부, 실리콘 기판의 온도분포를 해석하였다.

전산해석에서 가장 먼저 해야 할 일은 해석할 대상을 모델링하고 격자를 생성하는 것이다. 본 연구에서는 GAMBIT을 이용하여 모델링과 격자를 생성하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 마이크로 가스센서는 좌우 대칭이므로 계산시간과 메모리를 절약하기 위해 Figure 2 (a)와 같이 오른쪽 반만 해석하였다. 마이크로



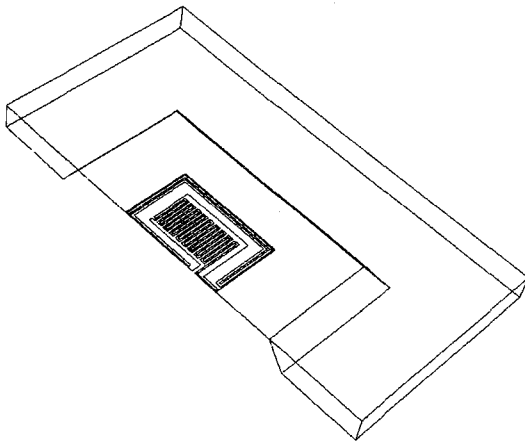
(a) Structure of micro gas sensor



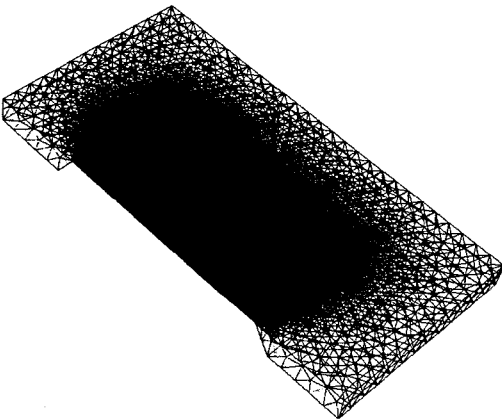
(b) View of micro gas sensor center area

Fig. 1. Micro gas sensor fabricated by MEMS technology

핫플레이트와 감지 전극 주변부가 해석의 가장 중요한 대상이고 온도구배도 클 것으로 예상되므로 그 부분에 격자를 촘촘히 배치하였고 핫플레이트에서 멀어질수록 격자의 크기가 점점 커지게 하여 격자밀도를 낮추었다. 격자 생성시 가장 어려웠던 점은 열전달 해석을 위하여 한 개의 물질 혹은 막 안에는 적어도 세 층 이상의 격자가 배열되어야 하는데 질화규소막의 두께가 너무 얇아서 격자의 크기가 작아진다는 점이었다. 핫플레이트와 감지 전극을 지지하고 있는 질화규소막은 중요한 열전달 통로이므로 아무리 메모리가 많이 소요된다고 하여도 격자밀도를 높여서 격자를 배치하여야 하지만, 실리콘 베이스 위의 질화규소막은 전체 열전달에 큰 영향을 미치지 않는 데도 많은 메모리를 차지하여야 하는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 실리콘 베이스 위의 질화규소막을 무시하고 모두 실리콘 웨이퍼로 구성되어 있다고 가정하였다. Figure 2 (b)에 완성된 격자



(a) Modeling



(b) Mesh structure

Fig. 2. Mesh structure of micro gas sensor

구조를 나타내었고 Table 1에 각 부분의 격자 개수를 나타내었다. 마이크로 핫플레이트와 감지 전극이 있는 주요부에는 격자가 조밀하게 배치된 반면 실리콘 베이스의 끝으로 갈수록 격자 밀도가 떨어지는 것을 볼 수 있다.

히터 회로에서 전기 저항에 의해 발생한 열은 접촉해

Table 1. Mesh type and number of each part

부분	격자 형태	격자 개수	재질
히터 회로	육면체	3876	Pt
감지 전극	육면체	7910	WO <sub>3</sub>
질화규소막	육면체, 사면체	165842	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
실리콘 베이스	사면체	29377	Si
합계		207005	

있는 질화규소막을 통하여 안쪽의 감지 전극과 바깥쪽의 실리콘 기판에 열전도(conduction) 메카니즘으로 전달된다. 마이크로 핫플레이트와 감지 전극, 실리콘 웨이퍼 기판을 포함한 마이크로 가스센서의 모든 표면에서 대기중으로 대류열전달(convection)과 복사열전달(radiation)로 열이 방출된다. 히터의 발열량과 가스센서 표면에서 대기중으로 방출되는 열량이 균형을 이룰 때 가스센서의 온도 분포는 정상상태가 된다.

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

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

여기서  $T$ 는 온도이고,  $k$ 는 각 재료의 열전도도로 Table 2에 그 값을 나타내었다. 감지전극의 WO<sub>3</sub> 재질에 대한 자료는 찾을 수 없어서 그와 비슷한 산화물인 SnO<sub>2</sub>의 물성치를 해석에 이용하였다.

Table 2. Material properties

물성치 재질	밀도 kg/m <sup>3</sup>	비열 J/kg·K	열전도도 W/m·K	방사율
Pt	21440	132.51	73	0.1
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3184	170	33	0.7
Si	2330	712	148	0.3
SnO <sub>2</sub>	7310	227	4.5	0.5

$\dot{q}$ 은 단위 부피당 발열량으로 히터를 제외한 부분에서는 0이다. 히터에서는 전기저항에 의해 열이 발생하는데

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

에 의해서 발열량을 구할 수 있다[8]. 여기서

$I$ : 전류

$R_e$ : 발열체의 전기저항

$V$ : 발열체의 체적

이다. 히터에서는 열이 균일하게 발생한다고 가정하였다. 가스센서 표면에서는 주변의 대기에 자연대류에 의한 열전달로 열이 방출되는데, 이때의 열전달 계수는 다음과 같은 실험식으로 구할 수 있다[8].

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

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu\alpha} \quad (4)$$

여기서

$T_s$  : surface temperature

$T_\infty$  : environment temperature

$Nu$  : Nusselt number

$Ra$  : Rayleigh number

$Gr$  : Grashof number

$Pr$  : Prandtl number

$C$  : Natural convection factor

$L$  : Characteristic length

$g$  : gravitational acceleration

$h$  : convective heat transfer coefficient

$n$  : exponent

$\beta$  : volumetric thermal expansion coefficient

$\nu$  : kinematic viscosity

$\alpha$  : thermal diffusivity

$n$ 과  $C$ 는 실험적으로 구해지는데 층류흐름일 때  $n = 0.25$ 가 적용되며  $C$ 의 값은 Table 3의 값을 사용하였다[9].

Table 3. C value of each surface

대류가 발생하는 부분	C
수직판	0.56
수평판의 윗면	0.52
수평판의 아래면	0.26

Figure 3에 마이크로 핫플레이트와 감지 전극의 온도 분포를 나타내었고, Figure 4에 마이크로 가스센서 전체의 온도분포를 나타내었다. 열이 발생하는 마이크로 핫플레이트의 온도가 가장 높게 나타났다. 마이크로 핫플레이트는 감지부 전극을 사각의 도넛 모양으로 둘러싸고 있는데 핫플레이트에서 안쪽과 바깥쪽으로 갈수록 온도가 감소한다. 그런데 안쪽에는 온도가 완만하게 감소하여 감응물질의 온도가 높은 온도를 유지하고 있는 반면에 바깥쪽에서는 급격하게 감소하여 실리콘 기판에서는 거의 상온에 가까워 온도가 감소되었다. 이는 마이크로 히터선의 배치가 효율적으로 되어 있어서 적은 소비전력으로 감응물질을 가열할 수 있음을 말한다. 감응물질의 온도도 거의 균일한 온도분포를 보이나 히터선이 많이 모여 있는 왼쪽 윗부분의 온도가 높고 도넛의 열려있는 부분인 아래쪽의 온도가 상대적으로 낮은 분포를 보였다. 히터선과 감지 전극의 형상 배치를 변경함으로써 좀 더 균일한 온도분포를 갖는 마이크로 가스센서를 개발할 수 있었다.

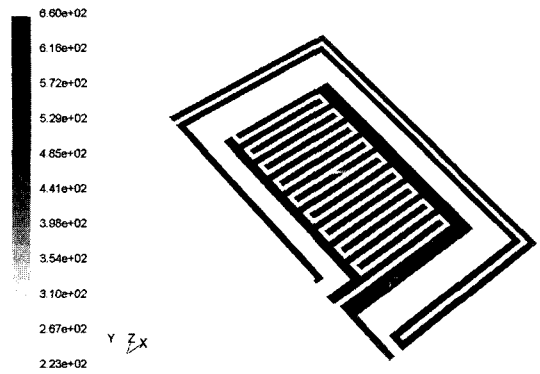


Fig. 3. Temperature distribution of micro hotplate and sensor electrode (unit : K)

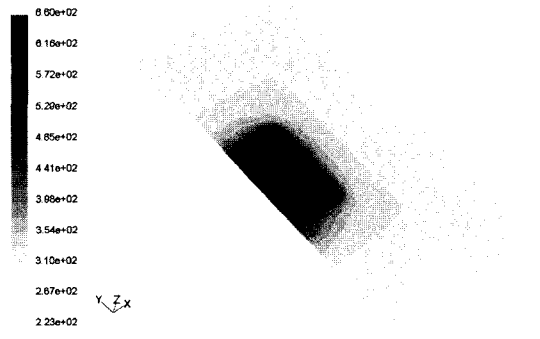


Fig. 4. Temperature distribution of micro gas sensor (unit : K)

### 3. 결 론

MEMS 공정을 이용하여 감응물질을 균일한 온도로 유지해주는 마이크로 핫플레이트가 장착되어 있는 NO<sub>2</sub> 마이크로 가스센서를 제작하였다. 마이크로 가스센서의 열전달 현상을 상용 열유동 해석 전용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 마이크로 가스센서의 열전달 해석을 하였다. 해석 결과 실리콘 웨이퍼 기판의 온도가 거의 상온에 가까워 핫플레이트에서 발생한 열이 감응물질을 효과적으로 가열하여서 핫플레이트의 감응물질 부분의 열적고립상태가 유지됨을 알 수 있었다. 감응물질의 온도 균일도를 높이기 위하여 핫플레이트의 형상 변경을 제안할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 순천향대학교 차세대 BIT무선부품연구센터(과제번호:R-12-2002-052-04003-0)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] H. Meixner, J. Gerblinger, U. Lampe and Feischer, "Thin-film gas sensors based on semiconducting metal oxides," *Sensors and Actuators B*, Vol. 23, pp.119-125, 1995.
- [2] N. Miura, H. Honishi, T. Matsumoto and M. Ippomatsu, "Development of high-performance solid-electrolyte sensors for NO and NO<sub>2</sub>," *Sensors and Actuators B*, Vol. 13-14, pp.387-390, 1993.
- [3] I. Sayago, J. Gutierrez, L. Ares, J. I. Robla, M. C. Horrillo, J. Getino, J. Rino and J. A. Agapito, "The effect of additive in tin oxide on the sensitivity and selectivity to NO<sub>x</sub> and CO," *Sensors and Actuators B*, Vol. 26-27, pp.19-23, 1995.
- [4] E. Traversa, S. Matsusima, G. Okada, Y. Sadaoka, Y. Dakai and K. Watanabe, "NO<sub>2</sub> sensitive LaFeO<sub>3</sub> thin films prepared by r.f. sputtering," *Sensors and Actuators B*, Vol. 24-25, pp.661-664, 1995.
- [5] J. Wollenstein, J. A. Plaza, C. Cane, Y. Min, H. Bottner and H. L. Tuller, "A novel single chip thin film metal oxide array," *Sensors and Actuators B*, Vol. 93, pp.350-355, 2003.
- [6] C. Cantalini, L. Valentini, L. Lozzi, I. Armentano, J. M. Kenny and S. Santucci, "NO<sub>2</sub> gas sensitivity of carbon nanotubes obtained by plasma enhanced chemical vapor deposition," *Sensors and Actuators B*, Vol. 93, pp.333-337, 2003.
- [7] 김창교, 이영환, 노일호, 유홍진, 유광수, 기창진, "스퍼터링법으로 제작한 WO<sub>3</sub> 박막을 이용한 NO<sub>2</sub> 마이크로 가스센서에 관한 연구," *한국산화기술학회논문지*, Vol. 4, No. 3, pp.139-144, 2003.
- [8] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed., John Wiley and Sons, 2002.
- [9] K. D. Hagen, *Heat Transfer with Applications*, Prentice Hall, pp.337-371, 1999.