
열운송 방정식을 이용한 마이크로 흐름센서의 온도특성 해석

김태용^{*} · 정완영^{*}

^{*}동서대학교

Temperature Property Analysis of Micro Flow Sensor using Thermal Transfer Equation

Tae Yong Kim^{*} · Wan-Young Chung^{*}

^{*}Dongseo University

E-mail : tykimw2k@gdsu.dongseo.ac.kr

이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 연구비를 지원받았음(KRF-2002-D00126).

요 약

마이크로 흐름센서는 종래의 반도체 접적회로 공정기술을 이용하여 소형으로 제작이 가능하며, 빠른 응답특성으로 다양한 응용이 기대되고 있다. 본 연구에서는 넓은 흐름의 세기 영역에서 정밀한 감도를 가지는 2차원 마이크로 흐름센서를 실리콘 기판위에 설계하였다. 흐름센서 중앙에 하나의 히터와 양측에 3쌍의 온도 감지막을 가진 새로운 구조를 제안하고, 제안된 구조의 성능평가를 위해 유한차분법을 이용하여 열운송방정식을 시간영역에서 해석하였다. 성능평가는 제안된 흐름센서 모델에 대하여 공기흐름의 세기 변화에 따른 온도분포를 계산함으로써 실제 흐름센서의 동작을 정량적으로 분석하였다.

ABSTRACT

A micro flow sensor on silicon substrate allows the fabrication of small components where many different functions can be integrated so that the functionality of the sensors can be increased. Further more, due to the small size of the elements the sensors can be quite fast. A thermal mass flow sensor measures the asymmetry of temperature profile around the heater which is modulated by the fluid flow. In normal, a mass flow sensor is composed of a central heater and a pair of temperature sensing elements around the heater. A new 2-D wide range micro flow sensor structure with three pairs of temperature sensors and a central heater was proposed and numerically simulated by the Finite difference formulation to confirm the feasibility of the flow sensor structure.

키워드

마이크로 흐름센서, 온도분포특성, 유한차분법, 열운송방정식

I. 서 론

종래의 접적회로 공정기술에 마이크로 머시닝 기술을 결합시킴으로써 센서소자의 마이크로화가 가능하다. 이러한 초소형 센서는 저전력, 다차원화, 다기능화, 지능화, 시스템화 등 매우 빠른 응답특성을 가지고 있다[1-4].

본 논문에서는 산화물 반도체 감지막이 그 동작온도에 따라서 감응특성이 서로 달라지는 성질을 이용하여, 유전체 멤브레인 중앙에 하나의 히터와 그 양측에 3쌍의 온도 감지막을 형성시켜 마이크로 흐름센서를 제작하였다. 히터에서 공급된 열원은 멤브레인을 따라 확산(또는 전도)되며 각 센서의 감지막에서는 서로 다른 온도차를 가

지게 된다. 제작된 마이크로 흐름센서의 온도 검지 특성을 정량적으로 파악하기 위해서 2차원 열운송방정식(Heat Transfer Equation)에 대해 유한차분법(finite difference method)을 적용하여 다양한 공기 흐름에 대한 각 센서 위치에서의 온도분포를 계산하였다[5,6]. 공기 흐름은 마이크로 흐름센서의 좌측에서 일정한 속도로 이동하는 것으로 가정하였다. 정식화를 통하여 얻은 차분 알고리즘은 대표적 객체지향언어인 Java를 이용하여 프로그램을 작성하였다[7].

II. 마이크로 흐름센서

가스/액체 등의 흐름 측정이 가능한 마이크로 흐름센서는 중앙에 하나의 히터와 양쪽에 일정거리를 두고 열전달에 따른 온도변화를 검지하기 위한 감지막을 가지고 있다. 이러한 구조를 그림 1에 나타냈다. 센서 위쪽으로 임의의 흐름이 존재하면, 히터에서 공급된 열원은 흐름에 영향을 받아 임의의 방향으로 확산과 대류에 의해 열적인 이동이 발생하게 된다. 히터 양쪽에 배치된 온도감지막(sensing layer)은 이러한 열 유동에 영향을 받아 검지되는 온도는 서로 편차를 가지게 되며, 이러한 특성을 이용하면 유체 흐름의 세기를 측정할 수 있다.

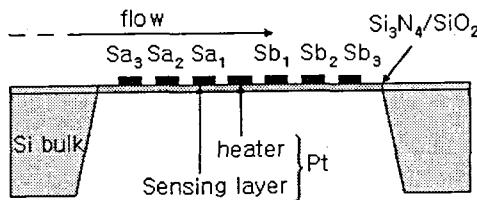


그림 1 마이크로 흐름 센서의 단면 구조

Fig. 1 Cross-section of micro flow sensor

그러나 센서를 구성하는 기하학적 구조, 히터의 모양, 절연물 등의 배치에 따라 나타나는 온도분포는 서로 달라질 수 있어 감지특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 소자의 기하학적인 구조에 대한 온도분포 특성을 적절히 파악할 필요가 있다. 이를 위하여 열운송방정식에 대하여 유한차분법을 적용하고, 소자의 온도분포를 동정하기 위하여 넓은 흐름대역에서 수치적으로 계산을 수행하였다.

III. 열운송방정식의 수치 모형

대부분의 유체해석의 경우, 유체의 운동은 흐름 전체의 메커니즘을 결정하는 중요한 인자이다. 유체역학을 지배하는 방정식은 유체의 운동이

(x, y) 방향에 대한 속도 성분 (u, v)에 의해서 특징 지워질 수 있다. 열전도 및 열대류 문제를 수치적으로 해석하기 위해서 다음의 비선형 열운송방정식(nonlinear thermal transfer equation)을 이용하였다[4,5].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} - a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

위 식에서 속도 (u, v)를 포함하는 1차 편미분 항은 열대류(thermal convection)에 기여하고, 2차 편미분 항들은 확산(thermal diffusion)에 기여한다. 여기서 a_x 와 a_y 는 각 방향으로의 확산정도를 나타내는 확산계수(thermal diffusivity)를 의미한다. 식 (1)에서 속도 (u, v)를 이미 알고 있다고 가정하면, 다음과 같은 선형 열운송방정식을 이용할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

식 (2)에 대하여 수치적으로 해를 구하기 위해서, 시간과 공간에 대한 적절한 차분을 도입하여 다음 식과 같은 차분 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T^{j+1} &= (S_x + 0.5C_x)T_{j-1,k}^p \\ &+ (S_x - 0.5C_x)T_{j+1,k}^p \\ &+ (1 - 2S_x - 2S_y)T_{j,k}^p \\ &+ (S_y + 0.5C_y)T_{j,k-1}^p \\ &+ (S_y - 0.5C_y)T_{j,k+1}^p \\ S_x &= \frac{a_x \Delta t}{\Delta x^2}, \quad S_y = \frac{a_y \Delta t}{\Delta y^2} \\ C_x &= \frac{u \Delta t}{\Delta x}, \quad C_y = \frac{v \Delta t}{\Delta y} \end{aligned} \quad (3)$$

위에서 얻은 차분 알고리즘을 이용할 경우, von Neumann의 안정성 해석조건으로서 다음 식을 만족할 필요가 있다.

$$(S_x + S_y) \leq 0.5, \quad \frac{C_x^2}{S_x} + \frac{C_y^2}{S_y} \leq 2 \quad (4)$$

여기서 $S_x = S_y = s$ 로 가정할 경우, 안정성을 확보하기 위해서는 $s \leq 0.25$ 를 만족하는 시간 증분 Δt 를 이용하여야 한다.

다음으로 식 (3)에 대하여 적절한 수치 해를 얻기 위해서, 센서 중앙에 위치한 히터에서는 다음과 같이 초기조건을 설정하였다.

$$T(x, y, t) = T_0(x, y) = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

그리고 센서 가장자리에 위치한 실리콘 벌크 영역에 대해서는 히터에서 공급된 열이 충분히 냉각된다고 가정하여 다음과 같이 Dirichlet 경계 조건으로 설정하였다.

$$T = T^* = 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ for silicon bulk area}$$

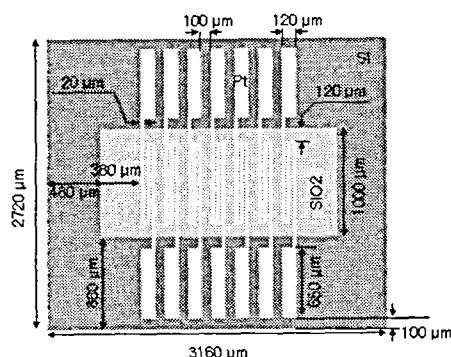


그림 2 마이크로센서의 수치 모델

Fig. 2 Numerical model for micro flow sensor

표 1. 해석 조건

Table 1. Conditions for simulation

해석 영역	317×273 (uniform grid)
격자 크기	$\Delta x = \Delta y = \Delta l = 10 \mu\text{m}$
경계 조건	Dirichlet 조건 (Si영역: 0°C로 고정)
히터 온도	500°C
흐름 속도	$u, v = 0$

표 2. 계산에 이용된 물질 정수

Table. 2 Material constants for simulation

	$S_i; m=0$	$S_i O_2; m=1$	$P_i; m=2$
열전도도, k [W/(m · K)]	150	20	71
비중, ρ [kg/m ³]	2330	2650	21400
비열, c [J/(kg · K)]	702.9	753.1	130

IV. 수치해석 결과

그림 1의 마이크로 흐름센서에 대하여, 센서의 열전달 특성을 해석하기 위해 열적으로 고립된

$2.2 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 의 유전체 멤브レン인(SiO_2) 위에 히터를 배치하고 히터 양측에 3쌍의 센서 어레이를 배치한 구조를 대상으로 하였다. 실제 센서는 3차원 구조를 하고 있으나, 그림 2에 나타낸 바와 같이 센서 표면에서의 흐름에 대한 열적인 이동을 파악하는 것으로 충분하다. 그림 2에 나타낸 2차원 모델을 해석하기 위한 조건 및 물질정수 값을 표 1과 2에 나타내었다.

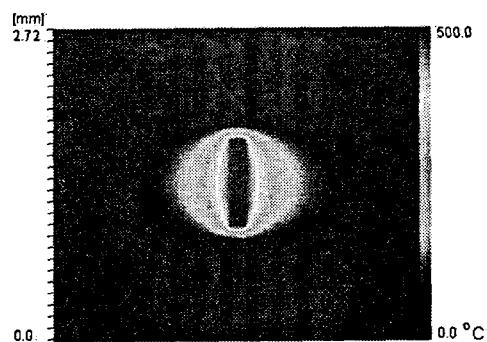


그림 3 흐름을 고려한 경우 ($u=0.01 \text{ m/s}$)

Fig. 3 Temperature distribution for a flow ($u=0.01 \text{ m/s}$)

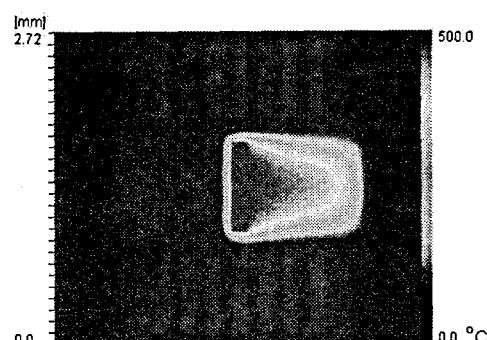


그림 4 흐름을 고려한 경우 ($u=1.0 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Temperature distribution for a flow ($u=1.0 \text{ m/s}$)

여기서 열확산계수 a_x, a_y 는 매질 내에서 균질로 볼 수 있으므로 다음과 같이 가정하였다.

$$a_x = a_y = a_m = \frac{k_m}{\rho_m c_m}, \quad (m=0, 1, 2) [\text{m}^2/\text{s}]$$

센서 중앙부의 히터에서는 지속적으로 500°C의 열을 공급하고, 적정 시간 후에 정상상태(열적 평형)에 도달할 때까지 계산을 수행하였다. 여기서 열 이송에 영향을 미치는 공기 흐름은 y -방향으로의 흐름은 무시하고, 센서의 좌측에서 일정한 속도를 가지고 있다고 가정하였다.

속도 u 를 0.01, 1.0로 두고 계산된 온도 분포 결과를 그림 3, 4에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 흐름이 주어진 경우에는 센서의 우측으로 열 이동과 확산이 동시에 일어나는 것을 알 수 있다. 그 결과 히터 양쪽에 배치된 온도 감지막에서 검출되는 온도는 서로 편차를 가지게 되며, 이를 통하여 흐름의 정도를 파악할 수 있다.

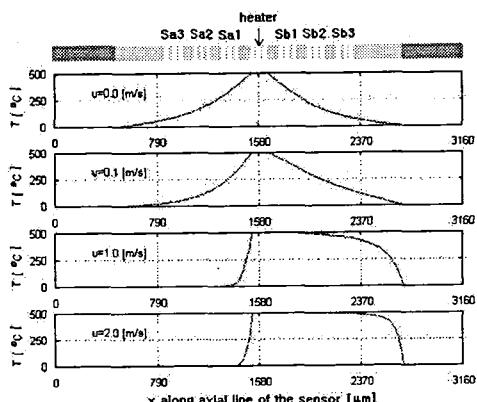


그림 5 센서의 중심축상에서의 흐름 속도에 따른 온도분포 변화

Fig. 5 Temperature distribution for variable flow velocity on axial line of the sensor

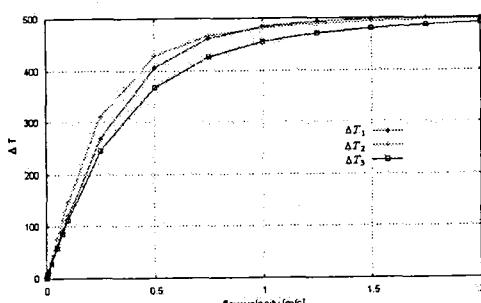


그림 6 센서의 각 온도감지막에서 검출된 온도차
Fig. 6 Flow Sensing results from each temperature sensing element pairs

다음으로 흐름 속도에 따른 열 운송과 확산에 의한 온도차 특성을 파악하기 위하여 센서의 중심축상($y = y_{\max}/2$)에서의 온도분포 변화를 그림 5에 나타냈다. 이 경우, 중심에 배치된 히터에서 공급된 열이 흐름의 세기에 따라 우측으로 이동되는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 각 감지막에서 측정된 온도차 특성을 그림 6에 나타냈다. 각 감지막에서의 온도차는, 그림 1을 참고하여 그

림 5의 결과로부터 다음과 같이 계산하였다.

$$\Delta T = |Sb_i - Sa_i| \text{ for } (i=1,2,3)$$

흐름 속도가 느린 경우에는 온도차 변화가 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 또한 흐름 속도가 빨라질 경우에는 측정된 온도차 변화가 지수 함수적으로 변하고, 결국은 온도가 포화상태에 이르는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

넓은 흐름영역에서 높은 감도를 가지는 흐름센서 구조로 응용이 기대되는 새로운 마이크로 흐름센서의 구조를 제안하고, 성능평가를 위하여 유한차분법을 이용하여 수치계산을 수행하였다.

히터를 기점으로 양측에 배치된 3쌍의 감지막에서 온도분포를 동정한 결과, 공기 흐름이 느린 경우에는 각 감지막이 가지는 센서 검출능력이 동일한 특성을 지니게 되는 것을 알았다.

그러나 공기 흐름이 빨라질 경우에는 각 감지막에서 검출된 온도차 특성에 편차가 나타나고, 빠른 공기 흐름으로 인하여 히터 좌측의 온도에너지가 우측으로 이동하게 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 각 감지막에서의 검출 능력의 차이를 적절히 활용하면 다양한 공기 흐름에 대응할 수 있는 마이크로 흐름센서를 제작할 수 있는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Wan-Yong Chung, "Design and Fabrication of Micro Gas Sensors with a Metal Oxide Sensing Layer," Ph.D thesis in Kyushu Univ., Japan, 1998.
- [2] M. Elwenspoek, "Thermal Flow Micro Sensors," in Proc. of IEEE Semiconductor Conference, vol.2, pp.423-435, October 1999.
- [3] Wan-Young Chung, et al., "Thermal and Gas-sensing Properties of Planar-type Micro Gas Sensors," Sensors and Actuators B, 64(1-3), pp.118-123, June 2000.
- [4] Wan-Yong Chung, Jun-Woo Lim, and Duk-Dong Lee, "Studies on Thermal Properties of a Micro Gas Sensing Element Array with Central Single Heater," Sensors and Acuators B, 83, pp.281-284, March 2002.
- [5] J.P. Holman, Heat Transfer in SI Units 7th ed., McGRAW-HILL, 1992.
- [6] C.A.J. Fletcher, Computational for Fluid Dynamics, I-Fundamental and General Techniques 2nd ed., Springer-Verlag, 1993.
- [7] 김태용, 지바 애플릿 프로그래밍, (도서출판)에이포미디어, 2004.