
다단계 온도 감지막을 가진 마이크로 흐름센서의 열전달 특성

김태용* · 정완영*

Thermal Flow Characteristics of a New Micro Flow Sensor with Multiple Temperature Sensing Elements

Tae Yong Kim* · Wan-Young Chung*

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

요 약

마이크로 흐름센서는 반도체 집적기술을 이용할 수 있어, 소형으로 제작이 가능하며 빠른 응답특성을 가져 다양한 분야에 응용되고 있다. 본 연구에서는 넓은 흐름의 세기 영역에서 정밀한 감도를 가지는 2차원의 마이크로 흐름센서를 실리콘 기판위에 적층시켜 제작하였다. 흐름센서의 중앙에 하나의 히터와 양측에 온도를 검출할 수 있는 3쌍의 감지막을 가진 새로운 센서 구조를 제안하고, 온도 검출에 대한 성능평가를 위하여 시간영역에서의 유한차분법을 이용하여 공기흐름의 세기 변화에 따른 온도분포를 계산하였다. 계산결과를 통하여 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, the small size of the elements these 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 Finite Difference formulation to confirm the feasibility of the flow sensor structure in time domain.

키워드

마이크로 흐름센서, 온도분포, 유한차분법, thermal mass flow sensor

1. 서 론

종래의 반도체 집적회로 공정기술에 마이크로머시닝 기술을 결합시킴으로써 센서소자의 소형화가 가능하다. 이러한 초소형 센서는 빠른 응답특성을 가지는 것 외에도 저전력, 다차원화, 다기능화, 지

능화 시스템화 등이 가능하다[1]~[4].

본 논문에서는 유전체 멤브레인의 중앙에 하나의 히터와 그 양측에 3쌍의 온도 감지막을 형성시켜 마이크로 흐름센서를 제작하였다. 히터에서 공급된 열원은 유전체 멤브레인을 따라 확산(또는 전도)되며 각 센서의 감지막에서는 서로 다른 온도차

를 가지게 된다. 제작된 마이크로 흐름센서의 온도 감지특성을 정량적으로 파악하기 위해서 2차원 열 운송 방정식(Heat Transfer Equation)에 대해 유한 차분법을 적용하여 공기 흐름의 세기 변화에 대한 각 센서 감지막 위치에서의 온도분포를 계산하였다[5],[6]. 공기의 흐름은 마이크로 흐름센서의 좌측에서 일정한 속도로 이동하는 것으로 가정하였다. 정식화를 통하여 얻어진 차분 알고리즘은 객체지향언어로서 잘 알려진 Java를 이용하여 코딩하였다[7].

II. 마이크로 흐름센서

가스/액체 등의 흐름측정이 가능한 마이크로 흐름센서는 중앙에 하나의 히터와 양쪽에 일정 거리를 두고 열전달에 따른 온도를 감지하기 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 열적 이동이 발생하게 된다. 히터 양쪽에 배치된 온도 감지막(sensing layer)은 이러한 열유동에 영향을 받아 검지되는 온도는 서로 편차를 가지게 되며, 이러한 특성을 이용하면 유체 흐름의 세기 등을 측정할 수 있다.

그러나 센서를 구성하는 기하학적 구조, 히터, 절연물 등의 배치에 따라 나타나는 온도의 분포는 서로 달라질 수 있어 감지 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 소자의 기하학적인 구조에 대한 온도 분포 특성을 파악할 필요가 있다. 이를 위하여 열 운송방정식에 대하여 유한차분법(finite difference method)을 적용하고, 소자의 온도 분포를 동정하기 위하여 수치적으로 계산을 수행하였다.

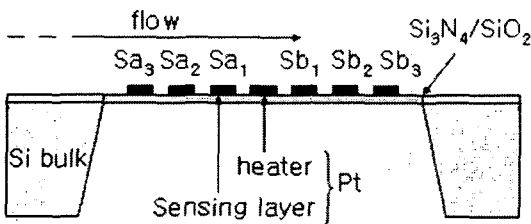


그림 1. 마이크로 흐름 센서의 단면 구조
Fig 1. Cross-section of micro flow sensor.

III. 열운송방정식의 수치모형

1. 열 운송 방정식

대부분의 유체해석에 관한 문제의 경우, 유체의 운동은 흐름 전체의 메커니즘을 결정하는 중요한 인자이다. 유체역학을 지배하는 방정식은 유체의 운동이 (x, y) 방향에 대한 속도성분 (u, v) 에 의해서 특징지워질 수 있다. 열전도 및 열대류 문제를 수치적으로 해석하기 위해서 다음의 비선형 열 운송 방정식(nonlinear heat transfer equation)을 이용하였다[4],[5].

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

위 식에서 속도 (u, v) 를 포함하는 1차 편미분 항은 열대류(heat convection)에 기여하고, 2차 편미분 항들은 확산(thermal diffusion)에 기여한다. 여기서 α_x 와 α_y 는 각 방향으로의 확산 정도를 나타내는 확산계수(thermal diffusivity)이다. 식 (1)에서 속도 (u, v) 를 이미 알고 있다고 가정하면, 다음과 같이 선형 열 운송 방정식으로 취급할 수 있다.

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

2. 유한차분법을 이용한 이산화

식 (2)를 대상으로 수치적인 해를 구하기 위해서 다음과 같이 시간과 공간에 대하여 적절한 차분을 도입할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,k}^{p+1} - T_{i,k}^p}{\Delta t} \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = u \frac{T_{j+1,k}^p - T_{j-1,k}^p}{2\Delta x}$$

$$v \frac{\partial T}{\partial y} = v \frac{T_{i,k+1}^p - T_{i,k-1}^p}{2\Delta y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{j-1,k}^p - 2T_{j,k}^p + T_{j+1,k}^p}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,k-1}^p - 2T_{i,k}^p + T_{i,k+1}^p}{\Delta y^2} \quad (5)$$

식 (3)~(5)에서 p 는 시간증분 Δt 를 증가시켰을

때의 각 시간 단계를 나타낸다. 각 편미분 항들에 대한 차분 결과를 정리하면, 아래와 같은 차분 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T^{p+1} &= (S_x + 0.5C_x)T_{j-1,k}^p \\
 &+ (S_x - 0.5C_x)T_{j+1,k}^p \\
 &+ (1 - 2S_x - 2S_y)T_{j,k}^p \\
 &+ (S_y + 0.5C_y)T_{j,k-1}^p \\
 &+ (S_y - 0.5C_y)T_{j,k+1}^p
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 S_x &= \frac{\alpha_x \Delta t}{\Delta x^2}, \quad S_y = \frac{\alpha_y \Delta t}{\Delta y^2} \\
 C_x &= \frac{u \Delta t}{\Delta x}, \quad C_y = \frac{v \Delta t}{\Delta y}
 \end{aligned}$$

위에서 얻은 계산 알고리즘은 von Neumann의 안정성 해석조건으로서 다음을 만족하여야 한다.

$$(S_x + S_y) \leq 0.5, \quad \frac{C_x^2}{S_x} + \frac{C_y^2}{S_y} \leq 2 \tag{7}$$

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

3. 경계조건과 초기조건

온도 분포 $T(x, y, t)$ 와 시간변화에 따른 비정상상태(unsteady state) 응답을 계산하기 위해서는 적절한 경계조건(BC: boundary condition)과 시간 $t=0$ 에 대한 상태, 즉 초기조건(initial condition)이 필요하다.

그림 2에서 해석영역 Ω 의 경계를 Γ 라고 가정하면, 경계조건으로서 온도에 대한 값과 법선 방향으로의 온도 구배의 값(thermal flux)을 지정할 수 있다. 일반적으로 다음 3 종류의 경계조건을 이용할 수 있다.

$$T = T^* \text{ on } \Gamma_1 \text{ (Dirichlet condition)} \tag{8}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q^* \text{ on } \Gamma_2 \text{ (Neumann condition)} \tag{9}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_\infty) \text{ on } \Gamma_3 \tag{10}$$

(제3종 경계조건)

여기서 n 은 경계면 바깥 방향으로 작용하는 법

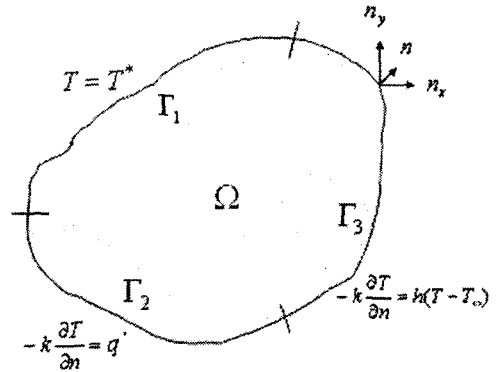


그림 2. 영역 Ω 와 각 경계 조건
Fig 2. Area Ω and its boundary Γ .

선 벡터(normal vector)를 의미하며, k 는 열전도도(thermal conductivity), h 는 열전달율(heat transfer coefficient), T_∞ 는 매질 주변의 온도, T_w 는 경계면에서의 온도를 나타낸다. 특히 Neumann 조건의 경우는 제 2종 경계조건으로서 자연경계 조건(Natural Boundary Condition)이라고도 불린다.

한편, 초기조건으로서 영역 Ω 에 대한 온도 값을 이미 알고 있는 경우라면

$$T(x, y, t=0) = T_0(x, y) \text{ in } \Omega \tag{11}$$

로 둘 수 있으며, $T_0(x, y)$ 는 시간 $t=0$ 에서의 초기 온도 분포를 의미한다.

4. 변수의 무차원화

해석하고자 하는 디바이스의 크기가 마이크로 단위로 주어질 경우, 위에서 얻은 차분 알고리즘을 그대로 이용하면 시간 변화에 따른 축차 계산 중 오차가 누적되어 수치 해의 정밀도에 영향을 미칠 수 있다. 이를 피하기 위하여 다음과 같이 적절한 변수 변환을 식 (2)에 대하여 적용하였다.

우선 계산 영역을 $x_{\max} \times y_{\max}$ 로 주어진다고 가정하자. 이 경우, 계산영역의 최대 길이를 대표 길이 L 로 두고, 속도 항에 대해서도 최대 속도를 취하여 U 로 두면

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{u} = \frac{u}{U}, \quad \bar{v} = \frac{v}{U} \tag{12}$$

와 같이 각 변수를 무차원화 시킬 수 있다. 이 관

계를 이용하면 시간 t 는 다음과 같이 변환된다.

$$\tau = \left(\frac{U}{L}\right)t \quad (13)$$

마찬가지로, 온도 T 의 경우에는 최대 및 최소 온도를 고려하여 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (14)$$

이와 같은 무차원화 변환 결과를 이용하여 식 (2)에 적용하면 다음과 같은 무차원 방정식(non-dimensional equation)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{1}{P_{e,x}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{P_{e,y}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (15)$$

여기서 페클레(Péclet) 수로 알려진 $P_{e,*}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{e,x} = \frac{LU}{\alpha_x}, \quad P_{e,y} = \frac{LU}{\alpha_y}$$

식 (2)와 (15)를 비교하였을 때, 방정식의 원형은 그대로 유지되고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (6)에서 얻은 차분 알고리즘에 대해서 추가 변형을 하지 않고 그대로 사용할 수 있다.

IV. 수치해석 결과

1. 해석 조건 및 계산 모델

그림 1에 나타난 바와 같이, 마이크로 흐름 센서의 열전달 특성을 해석하기 위하여 열적으로 고립된 $2.2 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 의 유전체 멤브레인(SiO_2) 위에 히터를 배치하고, 양 옆으로 각 3쌍의 센서 어레이를 배치한 구조를 대상으로 하였다. 센서의 구조는 3차원 구조를 하고 있으나, 센서 표면에서의 흐름에 대한 열적인 이동을 파악하는 것이 목적이므로, 그림 3과 같이 2차원적인 센서 표면에서의 각 영역을 차분 격자로 이산화하고 계산을 수행하였다.

그림 3에서 실리콘(Si)으로 구성된 센서의 지지 부분(실리콘 벌크 영역)은 실제 구조에서 3차원적

으로 벌크 구조를 하고 있어, 전달된 열은 대부분 외부로 유출되어 충분히 냉각되는 구조를 하고 있다. 따라서 이 영역에 대해서 적용하는 경계조건은 0°C 로 고정하여 Dirichlet 조건(제 1종 경계조건)으로 설정하였다.

제안된 마이크로 흐름 센서를 해석하기 위하여 그림 3의 해석 영역을 그림 4와 같이 등간격의 차분 셀을 이용하였다. 해석 조건은 표 1에 주어져 있다. 센서내의 각 매질에 대한 기본 물질 정수는 표 2의 값을 사용하였다.

여기서 열 확산계수 α_x, α_y 는 매질 내에서 균질이므로 다음과 같이 가정하였다.

$$\alpha_x = \alpha_y = \alpha_m = \frac{k_m}{\rho_m c_m} \quad (m=0, 1, 2) \text{ [m}^2/\text{s]}$$

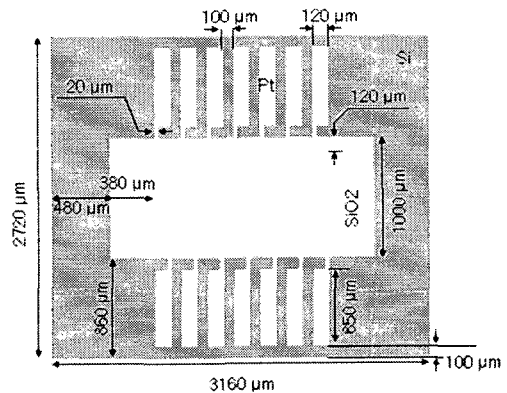


그림 3. 마이크로센서의 수치 모델
Fig 3. Numerical model for micro flow sensor.

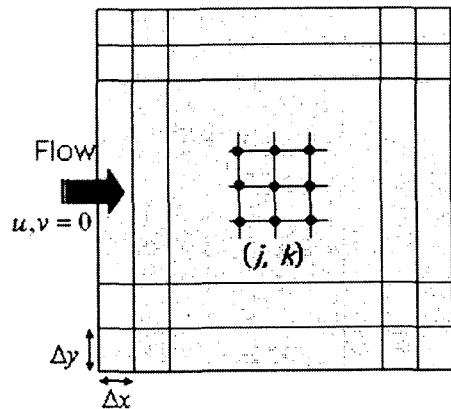


그림 4. 계산공간의 이산화 및 흐름 속도
 u, v 향 설정
Fig 4. Discretization and flow velocity.

표 1. 해석 조건
Table 1. Conditions for simulation

해석 영역	317×273 (uniform grid)
격자 크기	$\Delta x = \Delta y = \Delta l = 10 \mu m$
경계 조건	Dirichlet 조건 (Si 영역: 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_iO_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

센서 중앙부의 히터에서는 지속적으로 500°C의 열을 공급하고, 적정 시간 후에 열 분포가 정상상태(steady state)에 도달할 때까지 계산을 수행하였다.

2. 계산 결과

열 운송 방정식에 대한 차분 알고리즘을 이용하여 마이크로 흐름 센서의 열전달(운송) 특성을 해석하였다. 이송에 영향을 미치는 흐름 속도의 경우, y-방향으로의 흐름은 무시하고 센서의 좌측에서 일정한 속도로 공기의 흐름이 있다고 가정하였다.

속도 u 의 변화가 없는 전형적인 확산 문제로 가정하여 계산된 온도 분포 결과를 그림 5에, 유체의 흐름이 있는 경우에 대한 결과를 그림 6-7에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이, 히터에서 공급된 열원이 흐름이 없는 경우는 일반적인 열 확산이 일어나고, 흐름이 주어진 경우에는 센서의 우측으로 열이동과 확산이 동시에 일어나는 것을 알 수 있다. 그 결과 히터 양쪽에 배치된 온도 검지막에서 검출되는 온도는 서로 편차를 가지게 되며, 이를 통하여 흐름의 정도를 파악할 수 있다.

다음으로 흐름 속도에 따른 열 운송과 확산에

의한 온도차 특성을 파악하기 위하여 센서의 중심 축상($y=y_{max}/2$)에서의 온도분포 변화를 그림 8에 나타냈다.

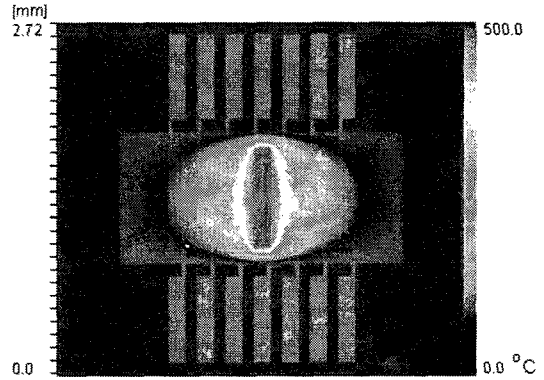


그림 5. 공기의 흐름이 없는 일반 확산만을 고려한 경우의 온도분포 ($u=0.0$ m/s)
Fig 5. Temperature distribution for non air flow ($u=0.0$ m/s).

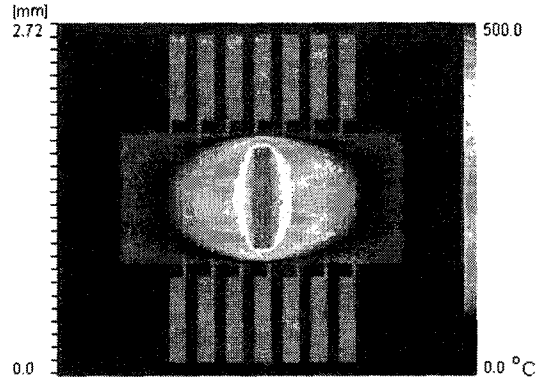


그림 6. 흐름을 고려한 경우의 온도 분포($u=0.01$ m/s)
Fig 6. Temperature distribution for a flow ($u=0.01$ m/s).

이 경우, 중심에 배치된 히터에서 공급된 열이 흐름의 세기에 따라 우측으로 이동되는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 각 검지막에서 측정된 온도차 특성을 그림 9에 나타냈다. 각 검지막에서의 온도차는, 그림 1에 나타낸 바와 같이, 그림 8의 결과로부터 다음과 같이 계산하였다.

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

흐름 속도가 느린 경우에는 온도차 변화가 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 또한 흐름 속도가

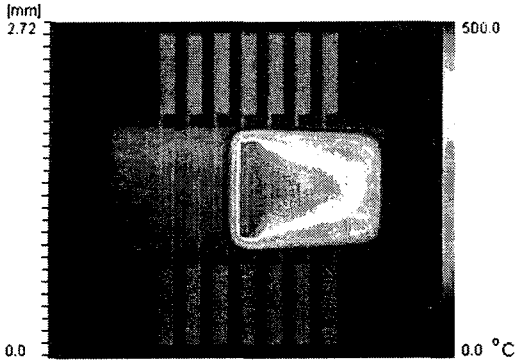


그림 7. 흐름을 고려한 경우의 온도 분포($u=1.0$ m/s)
Fig 7. Temperature distribution for a flow ($u=1.0$ m/s).

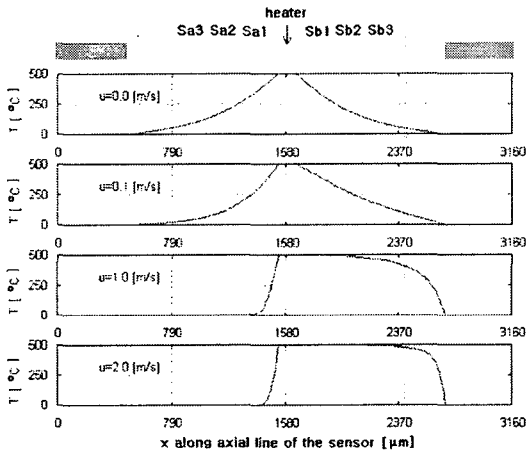


그림 8. 센서의 중심축상에서의 흐름 속도에 따른 온도분포 변화

Fig 8. Temperature distribution for variable flow velocity on axial line of the sensor.

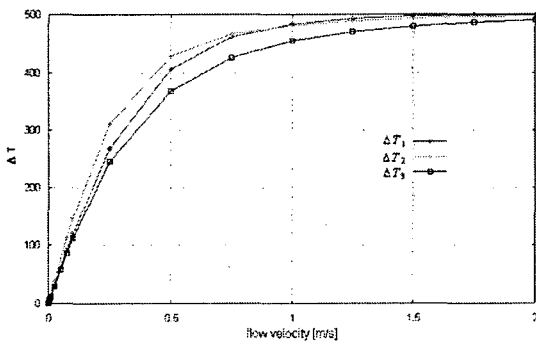


그림 9. 센서의 각 온도감지막에서 검출된 온도차
Fig 9. Flow Sensing results from each temperature sensing element pairs.

빨라질 경우에는 측정된 온도차 변화가 지수 함수적으로 변하고, 결국은 온도가 포화상태에 이르는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

넓은 흐름영역에서 높은 흐름감도를 가지는 흐름센서구조로 응용이 기대되는 새로운 마이크로 흐름 센서의 구조를 제안하고, 성능 평가를 위하여 유한차분법을 이용하여 수치 계산을 수행하였다.

히터를 기점으로 양측에 배치된 3쌍의 검지막에서 온도 분포를 검출한 결과, 다양한 공기의 흐름에 적절히 대응하는 센서를 구성할 수 있는 것을 알았다. 공기의 흐름이 느린 경우에는 각 검지막이 가지는 센서 검출능력이 동일한 특성을 지니게 된다는 것을 알았다. 그러나 공기의 흐름이 빨라질 경우에는 각 검지막에서 검출된 온도차 특성에 편차가 나타나는 것을 알았다. 이것은 빠른 공기의 흐름으로 인하여 히터 중앙을 기점으로 좌측의 온도 에너지가 우측으로 이동하게 되어 나타나는 것으로 생각된다. 이러한 각 검지막에서의 검출 능력의 차이를 적절히 활용하면 다양한 공기의 흐름에 대응할 수 있는 센서를 제작할 수 있는 것을 확인하였다.

앞으로 흐름 속도의 변화에 대하여 히터의 온도를 다양하게 변화시켰을 경우, 열이동에 따른 센서 내 감응특성을 해석할 필요가 있다. 또한 흐름 센서의 실리콘 벌크 영역을 포함한 실제 모델에 적합한 3차원 해석을 수행할 예정이다.

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 Sensor," 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 Actuators

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, 자바 애플릿 프로그래밍, (도서출판)에이포미디어, 2004.

저자소개



김태용(Tae Yong Kim)

1993년 부산수산대학교 전자공학과 졸업

1994년 동대학 전기공학과 조교

1997년 일본 오까야마대학 공학석사

2001년 일본 오까야마대학 공학박사

2002년-현재 동서대학교 인터넷공학부 교수

※관심분야 : 위성통신, 마이크로파 해석 및 설계, 마이크로센서, 시뮬레이션응용기술



정완영(Wan-Young Chung)

1987년 경북대 전자공학과 졸업

1989년 동대학원 공학석사

1998년 일본 큐슈대학 공학박사

1993-1999 세명대학교 전자공학과 교수

1999년-현재 동서대학교 인터넷공학부 교수

※관심분야 : 유비쿼터스 센서네트워크, 마이크로센서, 유비쿼터스 헬스케어