

다단계 온도 감지막을 가진 고영역 흐름측정용 마이크로 흐름센서

A Micro-Flow Sensor With Multiple Temperature Sensing Elements for Wide Range Flow Velocity Measurement

정완영*, 김태용, 서용수
(Wan-Young Chung, Tae-Yong Kim, and Yong-Su Seo)

Abstract : A new silicon micro flow sensor with multiple temperature sensing elements was proposed and fabricated in considering wide range flow velocity measuring device. Thermal mass flow sensor measures the asymmetry of temperature profile around the heater which is modulated by the fluid flow. A micro mass flow sensor was normally composed of a central heater and a pair of temperature sensing elements around it. A new 2-D wide range micro flow sensor structure with three pairs of temperature sensing elements and a central heater was proposed and numerically simulated by Finite Difference Formulation to confirm the feasibility of the wide flow range sensor structure. To confirm the simulation result, the new flow sensor was fabricated on silicon substrate and the basic flow sensing properties of the sensor were measured.

Keywords : micro flow sensor, silicon sensor, wide flow range, mass flow sensor, FDM simulation

I. 서론

가스/액체의 흐름측정을 위한 마이크로 흐름센서는 흐름의 내부에 완전히 칩을 삽입하는 경우와 집적화된 마이크로 채널을 통해 기체나 액체 흐름의 일부가 칩의 일부영역을 통과하도록 하는 형태가 있다. 가장 널리 사용되고 있는 마이크로 흐름센서는 보통 중앙에 히터를 설치하고 히터의 양쪽 끝에 일정한 거리를 두고 하나씩의 온도센서를 설치하여 유체흐름의 세기에 따라 중앙의 히터에 따르는 열전달의 변화에 의해 히터 양쪽의 온도 감지막에서의 온도 차이가 발생하는 현상을 이용하여 유체의 흐름의 세기를 측정하고 있다[1-4].

본 연구에서는 이러한 실리콘 마이크로 흐름센서에서 저속에서 고속에 이르는 보다 넓은 범위의 흐름의 세기에 대해 감지능력을 가지는 센서 제조를 위해 다단계의 온도감지막을 가지는 2D 마이크로 흐름센서의 구조를 설계하고 이를 자체 프로그램한 FDM(Finite Difference Formulation) 방식으로 시뮬레이션하여 마이크로 센서의 흐름감지 특성을 예측하였으며 이의 정당성을 증명하기 위해 실리콘 기판위에 센서를 제작하여 그 흐름 감도를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

II. 센서의 설계

현재 가장 널리 사용되고 있는 마이크로 흐름센서의 구조는 그림 1(a)와 같은 구조의 형태이고 이때 기판으로 사

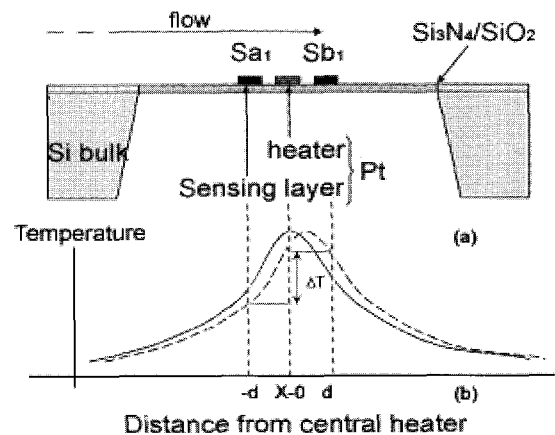


그림 1. 전형적인 마이크로 흐름센서의 구조. (a) 센서 단면도, (b) 흐름 감지 원리.

Fig. 1. Typical structure of a micro flow sensor. (a) cross-sectional view of the sensor, (b) principle of flow detection.

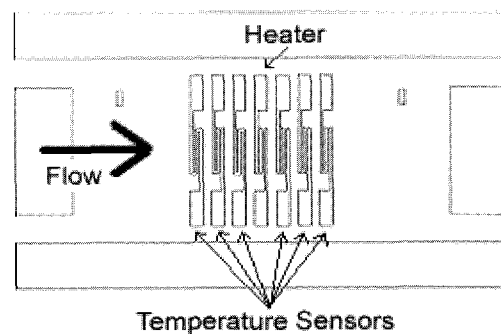


그림 2. 다단계 온도 감지막을 가진 흐름센서의 설계 레이아웃.
Fig. 2. The layout of the designed micro flow sensor with multi-step temperature sensing elements.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 5. 6., 채택확정 : 2005. 10. 25.

정완영, 김태용 : 동서대학교 인터넷공학부

(wychung@dongseo.ac.kr/tykimw2k@gdsu.dongseo.ac.kr)

서용수 : 동서대학교 전자공학과(seoyong@gdsu.dongseo.ac.kr)

※ 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-002-D00126).

용되는 실리콘은 이방성 에칭되어서 마이크로 브릿지 형태를 취하거나 얇은 다이아프램 위에 히터와 열감지소자를 배치하는 형태를 취하게 된다. 이렇게 히터와 온도 감지부 아래의 실리콘기판의 벌크부분을 이방성 에칭으로 제거하는 것은 실리콘의 열전도도가 매우 우수하기 때문에 히터에서 발생한 열이 기판의 실리콘으로 전도되는 것을 방지하기 위한 것이다[5-7].

이러한 형태의 마이크로 센서구조에서는 좌측으로부터 우측으로 유량의 흐름이 발생하는 경우에, 유체의 온도가 상온이라고 본다면, 그림 1(b)와 같이 히터 좌측의 온도센서에는 실온에 가까운 온도를 나타내고 히터 우측의 온도센서에는 히터의 온도보다 조금 낮은 온도가 감지될 것이다. 또한 유체의 흐름속도가 매우 빠른 경우에는 히터 우측의 온도센서에는 보다 히터온도와 가까운 온도가 감지될 것이다. 통상 흐름센서는 흐름의 세기의 측정영역에 따라, 약한 흐름을 정밀하게 측정하는 경우에는 중앙의 히터에 보다 가깝게 온도측정센서를 설치하며 강한 흐름을 측정하는 경우에는 중앙의 히터에서 멀리 떨어져서 온도 측정센서를 배치하게 된다. 그러나 이렇게 되는 경우에는 한 센서를 이용해서 측정하는 측정범위가 제한될 수밖에 없다[8-10].

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 중앙 히터를 중심으로 그 양쪽에 여러 개의 온도 감지막을 적당한 간격으로 순차적으로 배치하여 저속의 흐름에서부터 고속의 흐름까지 넓은 영역의 흐름세기에 대해 흐름의 속도를 측정이 가능하도록 하는 새로운 형태의 고정밀 흐름센서를 설계하고 제작하였다[4]. 그림 2는 본 연구에서 설계한 센서의 설계 레이아웃을 보여주고 있다.

III. 센서의 열해석

마이크로 흐름센서에서의 온도 감지막에 의한 온도 감지 특성을 정량적으로 파악하기 위해서 2차원 열운송 방정식(heat transfer equation)에 대해 유한차분법(finite difference method)을 적용하여 다양한 공기의 흐름에 대한 각 센서 위치에서의 온도 분포를 계산하였다[11,12]. 공기의 흐름은 마이크로 흐름 센서의 좌측에서 일정한 속도로 이동하는 것으로 가정하였다. 정식화를 통하여 얻은 차분 알고리즘은 객체지향 언어인 Java를 이용하여 프로그램으로 작성되었다[13].

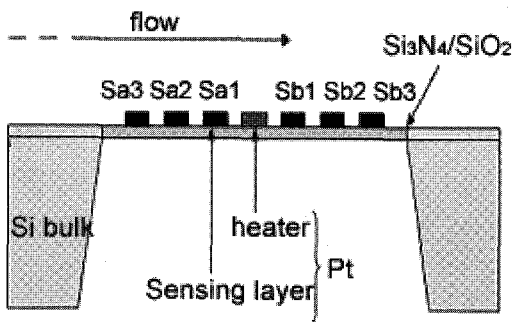


그림 3. 설계된 2차원 마이크로 흐름센서의 단면도.
Fig. 3. Cross-sectional view of the designed 2D micro flow sensor.

1. 열 운송 방정식의 수치 모형

1.1 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 온도 T와 속도성분 (u, v)에 의해서 특정 지위 질 수 있다. 열전도 및 열대류 문제를 수치적으로 해석하기 위해서 다음의 비선형 열 운송 방정식(nonlinear heat transfer equation)을 이용하였다[11,12].

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

위 식에서 속도 (u, v)를 포함하는 1차 편미분 항들은 열대류를 나타내고, 2차 편미분 항들은 열확산을 나타낸다. 여기서 α_x 와 α_y 는 각 방향으로의 확산 정도를 나타내는 확산계수이다. (1)에서 속도 (u, v)를 이미 알고 있다고 가정하면, 다음과 같이 선형 열 운송 방정식으로 취급할 수 있다.

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

1.2 유한차분법을 이용한 이산화

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

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

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

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

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

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

(3)-(5)에서 p는 시간중분 Δt를 증가시켰을 때의 각 시간 단계를 나타낸다. 각 편미분 항들에 대한 차분 결과를 정리하면, 아래와 같은 차분 알고리즘을 얻을 수 있다.

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

여기에서 변수 S_x, S_y, C_x, C_y 는 각각 아래와 같다.

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

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

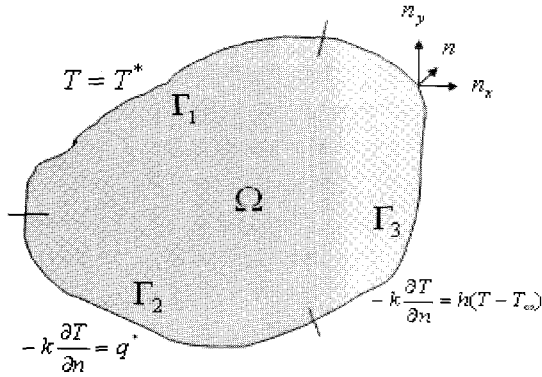


그림 4. 영역 Ω 에 대한 각종 경계 조건.

Fig. 4. Area Ω and its boundary Γ .

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

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.

1.3 경계조건과 초기조건

온도분포 $T(x, y, t)$ 와 시간변화에 따른 비정상상태 온도분포 즉, 흐름센서의 응답을 계산하기 위해서는 적절한 경계조건과 시간 $t=0$ 에서의 상태, 즉 초기조건이 필요하다. 그림 4에서 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.

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

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

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_\infty) \text{ on } \Gamma_3 \text{ (제3종 경계조건)} \quad (10)$$

여기서 n 은 경계면 바깥 방향으로 작용하는 법선벡터를 의미하며, k 는 열전도도, h 는 열전달율, T_∞ 는 매질 주변의 온도, T_w 는 경계면에서의 온도를 나타낸다. 특히 Neumann 조건의 경우는 제 2종 경계조건으로서 자연경계조건(natural boundary condition)이라고도 불린다.

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

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

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

1.4 변수의 무차원화

해석하고자 하는 디바이스의 크기가 마이크로 단위로 주어질 경우, 위에서 얻은 차분 알고리즘을 그대로 이용하면

시간 변화에 따른 축차 계산중 오차가 누적되어 수치 해의 정밀도에 영향을 미칠 수 있다. 이를 피하기 위하여 다음과 같이 적절한 변수 변환을 (2)에 대하여 적용하였다.

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

$$\tilde{x} = \frac{x}{L}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{L}, \quad \tilde{u} = \frac{u}{U}, \quad \tilde{v} = \frac{v}{U} \quad (12)$$

와 같이 각 변수를 무차원화 시킬 수 있다. 이 관계를 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 (2)에 적용하면 다음과 같은 무차원 방정식을 얻을 수 있다.

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

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

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

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

2. 수치해석 결과

2.1 해석 조건 및 계산 모델

본 연구에서 설계된 흐름센서의 흐름 감지특성을 알아보기 위해 먼저 설계된 마이크로센서를 열 해석 하였다. 마이크로 흐름 센서의 열전달 특성을 해석하기 위하여 그림 3과 같이, 열적으로 고립된 $2.2 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 의 유전체 멤브레인(SiO₂) 위에 히터를 배치하고, 그 양옆으로 각 3쌍의 온도 감지막 어레이를 배치한 구조를 대상으로 하였다. 센서의 구조는 3차원 구조를 하고 있으나, 센서 표면에서의 흐름에 대한 열적인 이동을 파악하는 것이 목적이므로, 그림 5와 같이 2차원적인 센서 표면에서의 각 영역을 차분 격자로 이산화하여 계산을 수행하였다. 즉, 수치해석을 단순화하기 위하여 센서의 구조를 2차원구조로 단순화하고 다만 그 경계조건에 3차원 구조의 특성을 반영하기로 하였다.

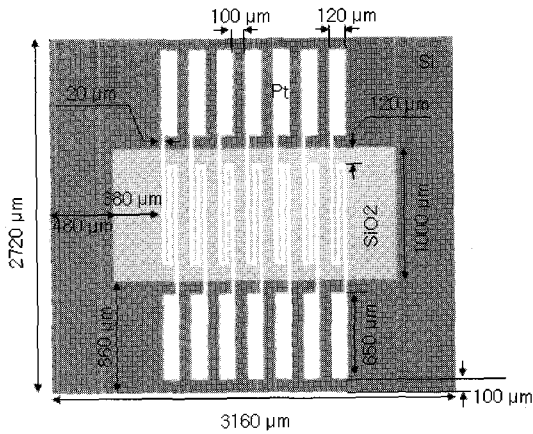


그림 5. 마이크로센서의 2차원 수치 모델.
Fig. 5. Two dimensional numerical model for a micro flow sensor.

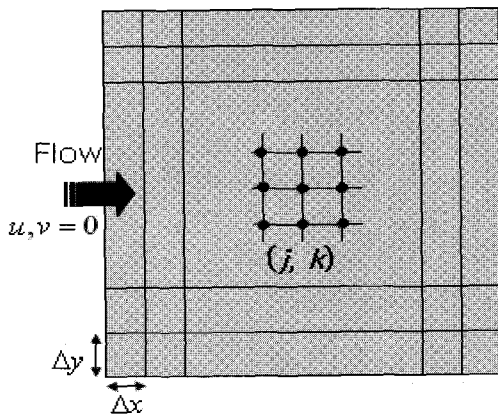


그림 6. 계산공간의 이산화 및 흐름속도 u, v 방향 설정.
Fig. 6. Discretization of 2D device model and flow velocity u and v.

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 (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.

	Si (m=0)	SiO ₂ (m=1)	Pt (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

그림 5에서 실리콘으로 구성된 센서의 지지 부분(실리콘 벌크 영역)은 실제 구조에서 3차원적으로 벌크 구조를 하고 있어, 전달된 열은 대부분 외부로 유출되어 충분히 냉각 되는 구조를 하고 있다. 따라서 이 영역에 대해서 적용하는 경계조건은 0°C로 고정하여 Dirichlet 조건(제 1종 경계조건)으로 설정하였다.

제안된 마이크로 흐름 센서를 해석하기 위하여 그림 5의 해석 영역을 그림 6과 같이 등간격의 차분 셀로 나누어서 이용하였다. 해석 조건을 표 1에 나타내었다. 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.

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

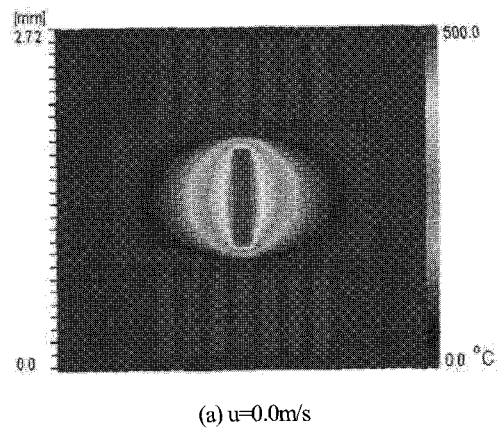
센서 중앙부의 히터에서는 지속적으로 500°C의 열을 공급하고, 적정 시간 후에 열 분포가 정상상태(steady state)에 도달할 때까지 계산을 수행하였다. 또한 유체의 흐름이 있는 경우에도 히터의 온도는 500°C를 유지하는 것으로 가정하였다.

2.2 해석 결과

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

y축방향의 흐름속도 u의 변화가 없고 x방향의 흐름 v만 있는 전형적인 확산 문제로 가정하여 계산된 온도 분포 결과를 유체의 흐름세기에 따라 그림 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 있게 되었다.



(a) u=0.0m/s

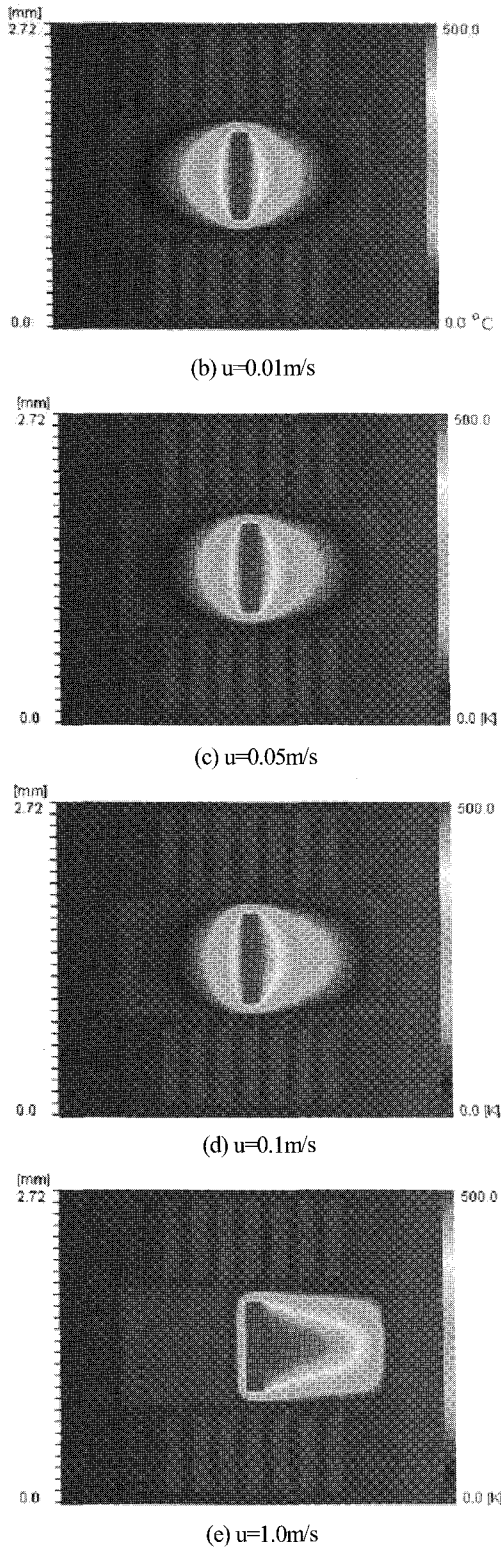


그림 7. 흐름의 세기에 따른 흐름 센서에서의 온도분포.
Fig. 7. Temperature distribution over a micro flow sensor by several flow velocities.

다음으로 흐름 속도에 따른 열 운송과 확산에 의한 온도차 특성을 파악하기 위하여 센서의 중심축상($y=y_{max}/2$)에서 인 중앙히터를 중심으로 한 센서 윗면에서의 2차원 온도분포 변화를 그림 8에 나타냈다.

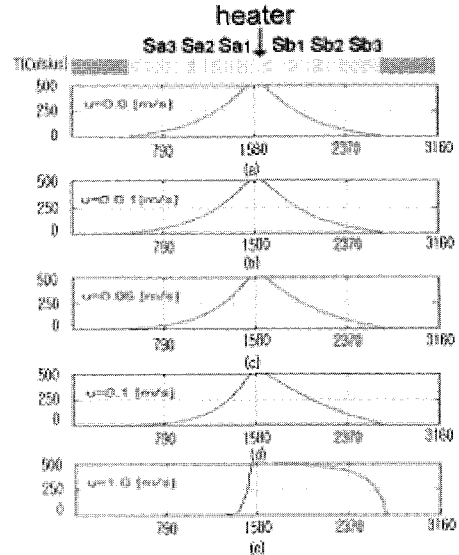


그림 8. 센서의 중심축상에서의 흐름속도에 따른 온도 분포 변화.
Fig. 8. Temperature distribution for variable flow velocity on axial line of the sensor.

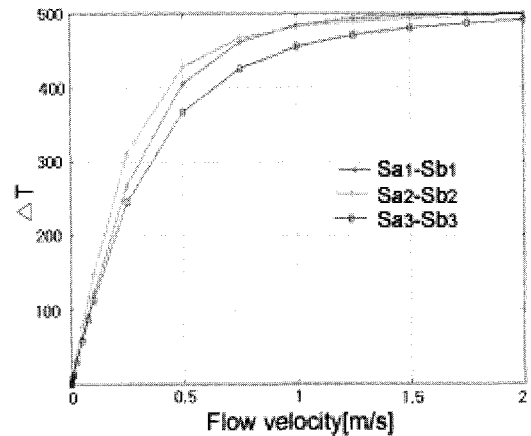


그림 9. 공기흐름의 속도에 따른 각 온도 감지막 쌍에서 검출된 온도차.
Fig. 9. Flow sensing results from each sensing element pairs of the micro flow sensor.

이 경우, 중심에 배치된 히터에서 공급된 열이 흐름의 세기에 따라 우측으로 이동되는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 중앙히터를 중심으로 한 대칭되는 양쪽 온도감지막에서 측정된 온도차 특성을 그림 9에 나타냈다. 각 감지막에서의 온도차는, 그림 3에서의 표기에 따라 그림 8에 표시된 결과로부터 다음과 같이 계산하였다.

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

중심 히터로부터 가장 가까운 온도 감지막쌍 사이의 거리는 중심히터로부터 220 μ m, 그 다음 거리의 온도 감지막쌍은 440 μ m, 가장 멀리 위치하는 온도 감지막은 중심히터로부터 660 μ m 떨어져 있다.

흐름 속도가 느린 경우인 0~0.5m/sec의 흐름속도범위에

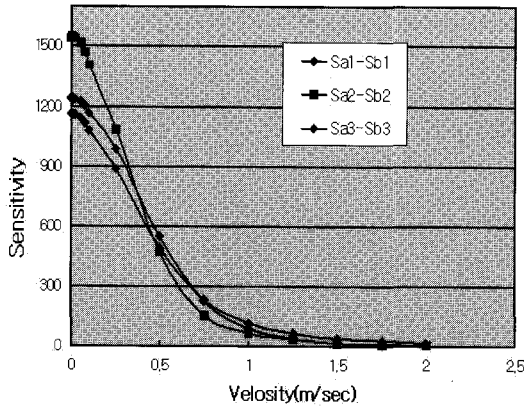


그림 10. 온도감지막쌍의 흐름속도에 따른 흐름감도 변화.
Fig. 10. Flow sensitivity variation for each temperature sensing element pairs.

서는 온도감지막사이의 흐름에 따른 온도차가 3가지 온도 감지쌍 모두에서 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 흐름 속도가 빨라질 경우에는 측정된 온도차가 지수 함수적으로 변하고, 결국은 온도변화가 없어지는 포화상태에 이르는 것을 알 수 있다.

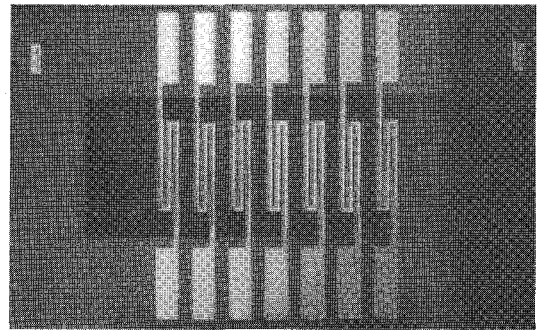
그림 10에 흐름속도의 변화에 대한 온도차의 변화를 흐름감도로 정의하고 각 흐름속도에 대한 감도를 표시하였다. 여기에서 히터를 중심으로 한 온도 감지막의 간격에 따라 흐름에 대한 온도차의 변화(흐름감도)가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 0~0.25m/sec 범위의 흐름에 대해서는 두번째의 온도감지막쌍이 가장 큰 흐름감도를 나타내는 반면에 0.25~0.75m/sec 영역에서는 중심히터에 가장 가까이 위치한 온도 감지막쌍이 가장 큰 흐름감도를 나타내고, 0.75m/sec 이상의 고속 흐름 영역에서는 중심히터에서 가장 멀리 떨어진 온도 감지막쌍이 가장 큰 흐름감도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이 수치해석 결과에서는 중심히터로부터 떨어진 거리의 정도에 따라 흐름감도가 각 흐름영역별로 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 만약 이러한 온도 감지막의 중앙히터로부터 떨어진 거리에 따른 최적 감도를 알 수 있다면 넓은 흐름영역 범위에서 최적의 흐름감도를 가지는 흐름센서를 제작할 수 있게 될 것이다.

IV. 마이크로센서 제작

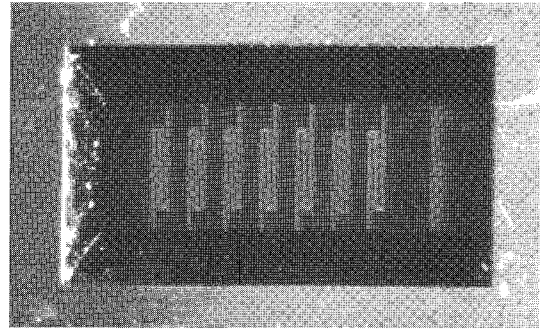
설계되고 수치 해석된 마이크로 흐름센서의 실제 동작특성을 확인하기 위해 실리콘공정에 의해 설계된 마이크로 흐름센서를 제작했다. 마이크로 흐름센서의 제작을 위한 공정을 순서에 따라 요약하면 다음과 같다.

1) 기판으로는 저항율이 10~20 Ω·cm인 (100) 방향의 경면 처리된 두께 500 μm의 n형 실리콘 웨이퍼를 사용하였고, 스트레스가 보상된 유전체 멤브레인을 형성하기 위하여 샌드위치 구조의 Si₃N₄(1,500 Å)/SiO₂(3,000 Å)/Si₃N₄(1,500 Å) 다층유전체 절연막을 실리콘 웨이퍼 앞, 뒷면에 동시 증착하였다. 여기서, Si₃N₄는 LPCVD로 증착하였고, SiO₂는 APCVD로 증착하였다.

2) 기판의 앞, 뒷면에 r.f. magnetron sputter를 이용하여 in-



(a) Overview



(b) Back view

그림 11. 제작된 마이크로 흐름센서의 윗면 사진.
Fig. 11. The photographs of the fabricated flow sensor.

situ로 Ti를 300 Å, Pt를 2,000 Å 증착하였다. 여기서 Ti는 Pt와 절연물층(N/O/N)간의 접착성을 좋게 하기 위한 목적으로 증착되었다.

3) 마스크 #1과 #2를 양면 정렬기를 사용하여 정렬함으로써 앞면에는 Pt히터 및 온도센서의 패턴을 형성하였고, 뒷면에는 실리콘 이방성 식각을 위한 창의 패턴을 형성하였다. Pt 식각용액(HNO₃:HCl:H₂O=1:7:8, 85°C)을 이용하여 Pt를 식각함으로써 전면에 Pt히터, 감지전극 및 온도센서를 형성하였고, 뒷면에 식각창을 형성하였다.

4) 뒷면에 있는 6,000 Å의 N/O/N층은 40분 동안 RIE를 이용하여 제거 하였다.

5) Pt 히터패턴 및 온도센서의 안정성을 위해 600 °C에서 1시간동안 열처리하였다.

6) 마지막으로, 실리콘 기판 뒷면을 KOH 용액을 이용하여 습식 식각함으로써 열적으로 고립된 형태를 갖는 소자를 제작하였다.

7) 결과적으로, 히터는 열적으로 고립된 1×2.2 mm²인 유전체 멤브레인 가운데 위치하고 있으며, 히터중심으로 부터 220 μm 떨어진 곳마다에 좌우 각각 세개의 온도센서를 가지는 초정밀 마이크로 흐름센서가 제작되었다.

제작된 마이크로 흐름센서의 사진을 그림 11에 나타내었다.

V. 결과 및 고찰

멤브레인의 아래에 있는 실리콘을 식각하지 않은 소자의 경우 히터에서 발생한 열량의 대부분이 실리콘으로 전도되

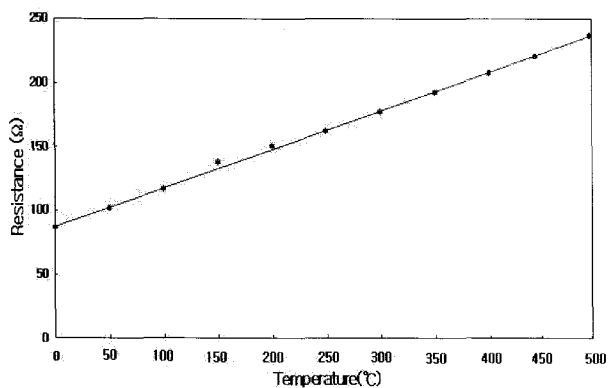


그림 12. 백금 히터의 온도에 따른 저항변화특성.
Fig. 12. Resistance variation of fabricated Pt heater for various temperatures.

어, 히터에서 발생한 열량이 유지되지 않아 백금히터의 온도가 거의 상승되지 않는다. 그러나 실리콘 식각 후의 소자는 멤브레인 위에 히터가 위치하게 되어서 멤브레인 하부의 실리콘으로 전도되는 열량을 차단할 수 있어, 아래의 (16)으로부터 백금 히터의 저항이 히터에서 발생한 온도에 따라 저항온도계수 α 의 함수로써 변화함을 알 수 있다. 즉, 실리콘 식각시 다이아프램의 히터에서 발생한 열량은 백금 히터, N/O/N 다이아프램에 의해서만 적은 양이 전도되고, 열량의 대부분은 히터 내에 유지되어 소자로부터 외부로의 열량손실을 줄일 수 있다.

백금 히터의 온도에 따른 저항값 변화를 그림 12에 나타내었다. 이때 저항은

$$R = R_0 (1 + \alpha T) \tag{16}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 R_0 는 0 °C에서의 저항, α 는 온도계수이며 T는 온도이다. 그림 12에서 백금히터의 저항값은 온도에 따라 거의 직선적으로 변하고 있으며 그 기울기 값으로부터 백금히터의 저항온도계수가 0.0033/°C임을 알았다. 그러나 온도측정용 저항체로 사용되는 표준 백금의 저항온도계수는 0.00393/°C로 실험에서 측정된 값이 작은 값을 나타내었는데, 이것은 백금 증착시 백금 박막과 유전체 멤브레인 사이에 접착력을 증가시키기 위하여 백금 박막 아래층에 Ti막을 증착하였기 때문에 결과적으로 백금 박막의 순도가 저하되어 백금 히터의 저항온도계수가 표준 저항으로 사용되는 백금의 것보다 작게 나타나는 것으로 본다. 또한, 2,000Å의 얇은 박막으로 증착된 것도 하나의 이유로 생각된다. 일반적으로 백금 박막의 저항온도계수는 막의 순도(purity)에 크게 의존하며 그 값은 순도가 높을수록 커진다[14].

온도에 따른 센서의 소모전력을 그림 13에 나타내었다. 백금 히터의 저항온도계수를 이용하여 히터에 인가되는 전압과 그때 흐르는 전류값으로부터 그 저항을 계산함으로써, 인가전력에 따른 히터 표면의 온도변화를 알 수 있다. 히터에 인가되는 전력변화에 대한 히터와 온도변화 비($\Delta T / \Delta P$)는 약 10 °C/mW 정도였다. 최대동작온도 500°C에서 전

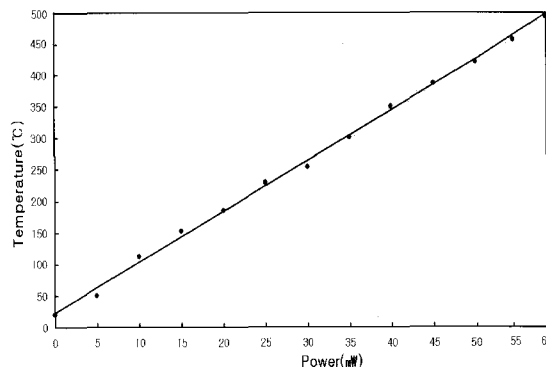


그림 13. 히터의 온도에 따른 소모전력.
Fig. 13. Power consumption of the fabricated Pt heater for heating temperature.

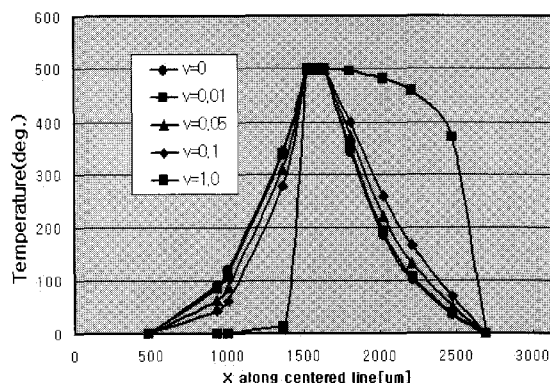


그림 14. 백금 히터로부터 거리에 따른 온도감지막의 온도 분포.
Fig. 14. Temperature profile vs. distance from Pt heater to temperature elements.

력소모는 약 59 mW 정도였다.

열적으로 고립된 멤브레인상의 히터전력을 59 mW로 변화시켜서 중앙히터의 온도를 500°C로 하였을 때, 멤브레인 내의 온도분포를 그림 14에 나타내었다.

공기의 흐름 속도가 빨라지면 자동적으로 공급전력을 조절하여 히터의 최고 온도가 500°C가 되도록 하였으며, 그림의 히터에서 발생하는 열량은 히터의 가장자리로부터 멀어질수록 그 온도가 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 그림 14의 결과는 저항-온도 변화곡선으로부터 역으로 온도를 계산한 것으로서 실제치와 일정부분 에러가 발생할 수 있다.

그림 14의 결과는 유한차분법에 의한 소자모델 열해석 결과인 그림8의 결과와 온도 감지막에서 약 최고 10~15%의 온도 차이를 나타내는 결과로서, 본 실험의 결과에서 나타나듯이 본 연구에서 수행된 2차원적인 유한차분법 열해석이 큰 오류가 없음을 보여주고 있다. 이러한 온도분포를 그림 10과 같은 흐름감도로 나타낼 경우에는 거의 차이를 구분할수 없을 정도로 유사한 감도특성을 나타냄을 확인하였다. 그림에서 중앙히터 양쪽의 마지막 온도표시는 센서의 벌크실리콘의 온도를 나타내고, 그 안쪽은 다이아프램 경계점에서의 온도를 나타낸다.

VI. 결론

넓은 흐름세기 영역에서 높은 흐름 감도를 가지는 새로운 마이크로 흐름 센서의 구조를 제안하고, 성능 평가를 위하여 유한 차분법을 이용하여 수치 계산을 수행하였다. 히터를 기점으로 양측에 배치된 3쌍의 검지막에서 온도 분포를 검출한 결과, 다양한 공기의 흐름속도에 적절히 대응하는 센서를 구성할 수 있는 것을 알았다. 온도 감지막쌍의 중앙히터로부터의 거리에 따라 흐름세기에 대한 감도가 다른 것을 알 수 있었고 다단계의 온도 감지막쌍을 실리콘의 다이아프램위에 설치하므로써 한쌍의 온도 감지막쌍을 가진 마이크로 흐름센서 보다 더 넓은 흐름세기의 영역에서 우수한 흐름감도를 가지는 마이크로 흐름센서를 제조가능한 것을 확인하였다. 또한 2차원 유한차분법 열해석의 정확성을 점검하기 위해 제조된 실리콘 흐름센서의 열흐름에 대한 특성을 측정하여 2차원 열해석의 정확성을 점검하였다.

이러한 각 온도 검지막의 중앙 히터에서의 거리에 따른 흐름감도의 변화, 즉 검출 능력의 차이를 적절히 활용하면 다양한 공기의 흐름에 대응할 수 있는 고영역 흐름센서를 제작할 수 있는 것을 가능성을 확인하였다. 현재 제작된 센서의 기체 흐름 특성 및 기체 분류가능성(즉, 기체에 따라 열전도가 달라짐에 따라 기체의 흐름속도 뿐만 아니라 기체의 종류까지도 알 수 있는)도 조사 중에 있다.

참고문헌

[1] E. Yoon, K. D. Wise, "An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39(6), pp. 1376-1386, 1992.

[2] L. Castaner, V. Jimenez, M. Dominguez, F. Masana, "Using microsystems technology for flow sensing in home appliances," *IEEE Circuits and Devices*, January 1997, pp. 14-18.

[3] M. Elwenspoek, "Thermal flow micro sensors," *Proc. of IEEE Semiconductor Conference*, vol. 2, pp. 423-435,

October 1999.

[4] 정완영, "유체흐름 감지 디바이스 및 그 제조방법," 특허출원 10-2003-44639(출원일 2003.7.2).

[5] W.-Y. Chung, "Design and fabrication of micro gas sensors with a metal oxide sensing layer," *Ph.D thesis in Kyushu Univ., Japan*, 1998.

[6] W.-Y. Chung, et al., "Thermal and gas-sensing properties of planar-type micro gas sensor," *Sensors and Actuators B*, vol. 64(1-3), pp. 118-123, June 2000.

[7] W.-Y. Chung, J.-W. Lim, and D.-D. Lee, "Studies on thermal properties of a micro gas sensing element array with central single heater," *Sensors and Actuators B*, vol. 83, pp. 281-284, March 2002.

[8] R. Kersjes, W. Mokwa, "A fast liquid flow sensor with thermal by oxide-filled trenches," *Sensors and Actuators A*, vol. 46/47, pp. 373-379, 1995.

[9] M. Richter, A. Park, J. Naundorf, M. Eberl, H. Leeuwis, P. Woias, A. Steckenborn, "A chemical microanalysis system as a microfluid system demonstrator," *Transducer'97*, Cicago, 16-19 June 1997, pp. 303-306.

[10] F. Mayer, A. Haberli, H. Jacobs, G. Ofner, O. Paul, H. Baltes, "Single-chip CMOS anemometer," *Proceedings of the IEDM*, 7-10 December 1997.

[11] J. P. Holman, *Heat Transfer in SI Units* (7th ed), McGRAW-HILL, 1992.

[12] C. A. J. Fletcher, *Computational for Fluid Dynamics, I Fundamental and General Techniques* (2nd. ed), Springer-Verlag, 1993.

[13] 김태용, 자바 애플릿 프로그래밍, (도서출판)에이포미디어, 2004.

[14] W. J. Tomkins et al., *Interfacing sensors to the IBM PC*, Prentice-Hall, Inc., chap. 7, pp. 183-224, 1998.



정 완 영

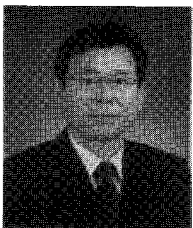
1987년 경북대 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1992년 동 대학원 박사. 1998년 일본 규슈대학 박사. 1999년~현재 동서대학교 인터넷공학부 부교수. 관심분야는 유비쿼터스 센서 네트워크, 마이크로센서, 유비쿼터스

헬스케어.



김 태 용

1993년 부산수산대학교 전자공학과 졸업. 1997년 오카야마대학 전기전자공학과 석사. 2001년 동대학 대학원 박사. 2005년~현재 동서대학교 인터넷공학부, 전임강사. 관심분야는 안테나 및 초고주파 소자, 임베디드 시스템.



서 용 수

1975년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동아대 석사. 1992년 경북대 대학원 전자공학과 박사. 1990년 3월~1991년 2월 일본 군마 대학 전자공학과(외국인 연구자). 1994년 3월~현재 동서대학교 정보시스템공학부 부교수.

관심분야는 영상처리, 패턴인식, Remote Sensing.