

# Excel을 이용한 마이크로 흐름센서의 열전달 해석

김태용\* · 정완영\*

\*동서대학교

## Thermal Transfer Analysis of Micro Flow Sensor Based on Excel

Tae Yong Kim · Wan-Young Chung\*\*

Dongseo University

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

### 요 약

마이크로 흐름센서는 종래의 반도체 집적회로 공정기술을 이용하여 소형으로 제작이 가능하며, 빠른 응답특성을 가지는 장점이 있어 다양한 응용이 기대되고 있다. 본 연구에서는 넓은 흐름의 세기 영역에서 정밀한 감도를 가지는 2차원 마이크로 흐름센서를 실리콘 기판위에 설계하여 왔다. 이러한 흐름센서의 정확한 온도특성을 분석하고 이 결과로부터 최적의 온도 감지막 위치를 결정할 필요가 있다. 설계방법으로서 표계산 소프트웨어 Excel을 이용하여 열운송방정식의 차분 방정식을 매크로 기능을 이용하여 적용하고 워크시트 내에서 셀 참조방식을 활용하여 자동 계산을 수행하도록 구현하였다. 본 연구에서는 Excel을 활용한 효율적인 설계방법을 제시하고 하나의 히터와 양측에 한 쌍의 온도 감지막을 가진 마이크로 흐름센서에 대해서 열전달 특성을 계산하고 이로부터 최적의 온도 감지막 위치를 결정할 수 있었다.

### 키워드

마이크로 흐름센서, 온도분포특성, 유한차분법, 열운송방정식, Excel

## 1. 서 론

가스/액체의 흐름측정을 위한 마이크로 흐름센서는 내부에 완전히 칩을 삽입하는 경우와 집적화된 마이크로 채널을 통해 기체나 액체 흐름의 일부가 칩의 표면 영역을 통과하도록 하는 구조가 일반적이다. 폭넓게 사용되는 마이크로 흐름센서는 보통 중앙에 히터를 두고 히터의 양쪽에 유체 흐름의 세기에 따라 나타나는 열전달의 변화를 픽업할 수 있는 온도 감지막을 설치하여 흐름의 세기를 측정하고 있다[1-6].

그러나 이와 같은 구조를 가진 흐름센서의 경우, 히터 양쪽에 설치하는 온도 감지막의 위치에 따라 센서의 감도에 영향을 받는 문제점이 있다 [2,3]. 따라서 설치하고자 하는 온도 감지막의 적절한 배치를 위하여 몇 가지 경우를 고려하여 수치해석을 하고 최적의 온도 감지막 위치를 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 이제까지의 수치해석 방법을 벗어나 폭넓게 이용되고 있는 표계산 소프트웨어인 Excel 사용환경에서 도출된 계산 알고리즘을 연계

시켜 보다 효율적인 수치해석을 시도하였다. TOMIMURA 등은 Excel 환경에서 차분 알고리즘과 표계산 기능을 이용하여 다양한 열역학적인 문제들을 다룰 수 있음을 보고하고 있다[7]. 이를 통하여 표계산 기능 및 데이터 가시화를 위한 [차트] 기능 등을 보다 간편하게 이용할 수 있으며, 계산 알고리즘의 디버깅도 용이하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 따라서 2차원 열운송 방정식으로부터 정상상태 해석을 위한 차분 알고리즘을 먼저 도출하고 Excel 환경에서 지원하는 매크로 기능을 이용하여 계산 알고리즘을 적용하여 작업 중인 워크 시트내의 각 셀과 관련을 부여함으로써 간단하게 수치해석을 수행할 수 있음을 보인다. 또한 계산 결과로부터 최적의 온도 감지막 위치를 검토하여 하드웨어 구현시에 유용한 수단으로서 활용이 기대된다.

## II. 마이크로 흐름센서

그림 1에 보인 바와 같이, 가스/액체 등의 흐름 측정이 가능한 마이크로 흐름센서는 중앙에

하나의 히터와 양쪽에 일정거리를 두고 열전달에 따른 온도변화를 검지하기 위한 온도 감지막을 가지고 있다. 센서 표면 바로 위로 임의의 흐름이 존재하면, 히터에서 공급된 열원은 열전도 및 확산 과정을 통하여 열적인 이동이 발생하게 된다. 히터 양쪽에 배치된 온도 감지막(sensing layer)은 이러한 열 유동에 의해 나타나는 온도 차이를 측정하여 유체 흐름의 세기를 알 수 있다[1-3].

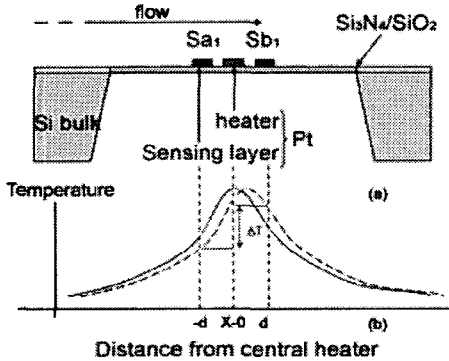


그림 4 전형적인 마이크로 흐름센서의 구조 (a) 센서 단면도 (b) 흐름 감지 원리

III. 차분 알고리즘

유체의 메커니즘을 지배하는 방정식은 유체의 운동이 (x, y) 방향에 대한 속도 성분 (u, v)에 의해서 다음과 같이 열전도 및 열대류 항을 포함하는 비선형 열운송방정식 (nonlinear thermal transfer equation)을 이용할 수 있다[4,5,8,9].

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

(1)식에서 속도 (u, v)를 포함하는 1차 편미분 항은 열대류(thermal convection)에 기여하고, 2차 편미분 항들은 확산(thermal diffusion)에 기여한다. 여기서  $\alpha_x$ 와  $\alpha_y$ 는 각 방향으로의 확산정도를 나타내는 확산계수(thermal diffusivity)를 의미한다. 그리고 Q는 기관에서의 발열밀도를 나타내며, 이를 이용하여 중앙의 히터에 전력을 공급할 수 있다. 문제를 단순화시키기 위해서 식 (1)의 속도 (u, v=0)를 이미 알고 있고 정상상태 해석을 고려하면, 시간 미분항은 무시되고 다음과 같은 선형 정상상태 열운송방정식을 얻을 수 있다.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{Q}{\rho c} \quad (2)$$

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

$$T_{i,j} = [(S_x + 0.5 C_x) T_{j-1,k} + (S_x - 0.5 C_x) T_{j+1,k} + S_y (T_{j,k-1} + T_{j,k+1}) + \frac{Q}{\rho c}] / [2\alpha_x (1/\Delta_x^2 + 1/\Delta_y^2)]$$

$$S_x = \frac{\alpha_{i,j}}{\Delta x^2}, \quad S_y = \frac{\alpha_{i,j}}{\Delta y^2}, \quad C_x = \frac{u}{\Delta x}$$

여기서 (3)식의 차분 알고리즘에 대하여 적절한 수치 해를 얻기 위해서, 센서 중앙에 위치한 히터에서는 다음과 같이 초기조건 등을 설정하였다(그림 2 참조). 여기에서 입력된 계산 파라미터는 워크시트 내에서 이름 참조가 가능하도록 사전에 설정을 하였다.

| R16C9 |                         | f6      |                |     |
|-------|-------------------------|---------|----------------|-----|
| 1     | 2                       | 3       | 4              | 5   |
| 1     | 마이크로 흐름 센서의 열전달 해석(2차원) |         |                |     |
| 5     |                         |         |                |     |
| 6     | 기관 길이 [μm]              | 1320    | 0.00132        | [m] |
| 7     | 기관 폭 [μm]               | 1000    | 0.001          |     |
| 8     | 분할수 Nx                  | 66      |                |     |
| 9     | 분할수 Ny                  | 50      |                |     |
| 10    | 요소 사이즈 Dx               | 0.00002 |                |     |
| 11    | 요소 사이즈 Dy               | 0.00002 |                |     |
| 12    | 기관 두께 [m]               | 0.002   |                |     |
| 13    | 히터 전력 q [W]             | 1       |                |     |
| 14    | 대류 속도 u [m/s]           | 0       |                |     |
| 15    |                         |         |                |     |
| 16    | 히터 등 기본 설정              |         | Run 셀 수식 대입 계산 |     |
| 17    |                         |         |                |     |
| 18    |                         |         |                |     |

그림 5 Excel 워크 시트내에 계산에 필요한 기본 파라미터 설정 예

|                | 히터(Pt)   | 그외(SiO2) |
|----------------|----------|----------|
| 열전도도 k [W/mk]  | 71       | 20       |
| 비중 ρ [Kg/m3]   | 21400    | 2650     |
| 비열 c [J/Kg.K]  | 130      | 753.1    |
| ρc             | 2782000  | 1995715  |
| 열확산계수 α [m2/s] | 2.55E-05 | 1.00E-05 |

그림 6 계산에 이용된 물질 정수

다음에는 그림 3과 같이 기관 영역 및 히터에 대한 물질정수 설정은 필요에 따라 임의로 변경 가능하도록 워크시트내에 추가하였다. 마지막으로 그림 2의 하단에 보이는 각 [설정] 버튼을 누르면

비주얼 베이직으로 작성된 매크로로 이동하여 작업 시트의 셀 값들을 자동으로 갱신하고 최종적으로 수치해를 얻을 수 있다. 여기서 주의할 것은 Excel의 주 메뉴중 [도구]→[옵션]→[계산] 부분의 설정은 다음과 같이 반복계산의 부분을 체크해 두어야만 한다. 이 기능을 이용하여 수치해가 수렴할 때까지 자동으로 계산이 반복적으로 수행된다(그림 4 참조).

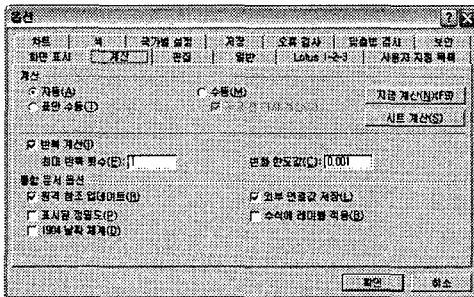


그림 7 정상상태 해를 얻기 위해서는 필요한 환경 설정

고립된  $2.2 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 의 유전체 멤브레인( $\text{SiO}_2$ ) 위에 히터를 배치하고 히터 양측에 여러 쌍의 센서 어레이를 배치할 수 있다(그림 6 참조). 본 연구에서는 편의상 한 쌍의 온도 감지막을 설정하고 x-방향으로의 공기 흐름에 따른 열전달 특성을 계산하였다. 계산을 위한 물질정수의 값은 그림 3에 나타내었다.

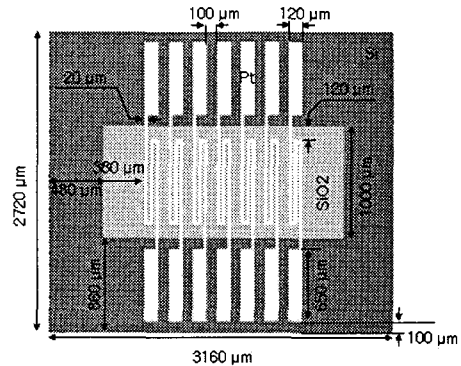


그림 6 마이크로 흐름센서의 수치 모델

$$T = \frac{(R[100]C/R[100]C^2 + R[140]C/(2 \cdot R[100]C)) \cdot RC - 1}{R[100]C/R[100]C^2 + R[140]C/(2 \cdot R[100]C) + R[110]C + R[200]C} \cdot (2 \cdot R[100]C) + 1$$

| 기판 온도분포 (K) | 10        | 30       | 50       | 70       | 90       |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 300.14      | 300.14    | 300.14   | 300.14   | 300.14   | 300.14   |
| 300.14      | 3.00E+02  | 300.5766 | 300.7973 | 301.0209 | 301.2484 |
| 300.14      | 300.57475 | 301.0114 | 301.4518 | 301.898  | 302.3518 |
| 300.14      | 300.78977 | 301.4423 | 302.1006 | 302.7673 | 303.4455 |
| 300.14      | 301.00197 | 301.8732 | 302.7408 | 303.6252 | 304.5247 |
| 300.14      | 301.21046 | 302.2855 | 303.3697 | 304.4679 | 305.5947 |
| 300.14      | 301.41437 | 302.6942 | 303.9848 | 305.2919 | 306.621  |
| 300.14      | 301.61287 | 303.0919 | 304.5835 | 306.0938 | 307.6294 |
| 300.14      | 301.80516 | 303.4773 | 305.1633 | 306.8704 | 308.6059 |
| 300.14      | 301.99505 | 303.8486 | 305.7221 | 307.6188 | 309.5465 |
| 300.14      | 302.16819 | 304.2047 | 306.2578 | 308.336  | 310.4479 |

그림 8 워크 시트내에서 각 셀에 대해 작성된 매크로를 이용한 차분 알고리즘 대입과 검증

Excel내에서 매크로로부터 셀 참조 수식이 입력된 각 셀의 경우는 그림 5와 같이 차분 알고리즘과 관련하여 현재 참조하고 있는 셀들의 값들을 추적 또는 모니터링 할 수 있으며 매크로의 디버깅에도 효과적으로 이용할 수 있음을 알 수 있다. 재미있는 것은 식 (3)의 차분 알고리즘과 셀 참조가 서로 대응하고 있고, 수식 입력창의 입력된 수식을 마우스로 클릭하면 매크로 등의 디버깅 등에 유용하게 활용할 수 있다.

#### IV. 수치해석 결과

그림 1에 나타난 마이크로 흐름센서에 대하여, 센서의 열전달 특성을 해석하기 위해 열적으로

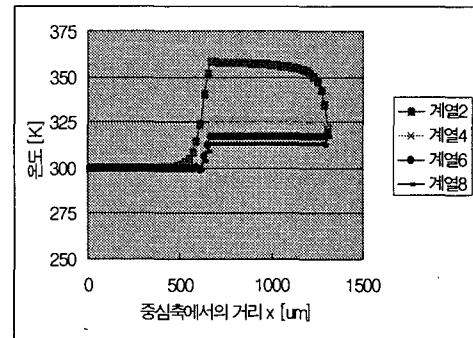


그림 10 센서의 중심축상에서의 열전달 해석 결과( $u=0.25, 0.75, 1.25, 1.75$ )

그림 6에서 센서 중앙부의 히터에서는 발열밀도  $Q=1[\text{W}/\text{m}^2]$ 으로 가열하는 것을 가정하였다. 따라서 히터에 공급된 전력은 열에너지로 변환시켜 히터를 가열하게 되며 열 이송에 영향을 미치는 공기 흐름은 x-방향으로만 주어지는 것으로 가정하였다(y-방향으로의 흐름은 무시).

속도  $u$ 를 0.25, 0.75, 1.25, 1.75로 두었을 때의 센서 중심축상에서의 계산된 온도 분포 결과를 그림 7에 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 온도차를 픽업하여 흐름의 정도를 파악할

수 있다. 그러나 지배방정식에 대하여 양해법과 풍상 차분을 이용하여 차분 알고리즘을 도출한 관계로 공기 흐름 속도가 2.25를 넘어선 경우에는 수치해가 발산하였다.

다음으로 흐름 속도에 따른 온도 감지막 사이의 온도차 특성을 파악하고 적절한 배치 간격을 파악하기 위하여 표계산을 수행하였다. 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 계산결과로부터 알 수 있듯이, 중앙 히터에서 온도 감지막과의 거리가 140 $\mu$ m 이후부터는 온도 편차가 전반적으로 55 $^{\circ}$ C 부근에 어는 정도 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 하나의 히터와 한 쌍의 온도 감지막을 이용하는 경우에 최적의 온도 감지막 배치를 위한 지침으로 활용할 수 있을 것으로 보인다. 반대로 흐름속도가 느린 경우에는 각 온도 감지막 사이에서의 온도차가 불규칙적인 양상을 보이고 있다. 여기서 각 감지막 사이의 온도차 계산은 그림 1에 나타난 것과 같이 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta T = |S_{b_i} - S_{a_i}| \quad \text{for } (i=1,2,3)$$

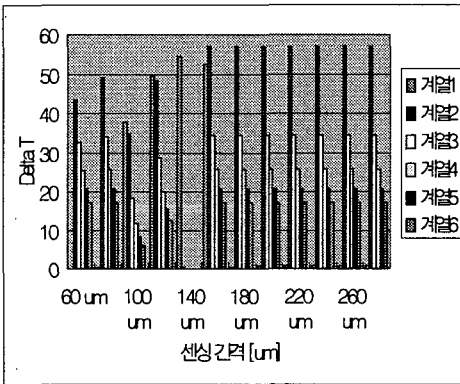


그림 11 중앙 히터를 기준으로 온도 감지막의 위치에 따른 온도차 계산

### V. 결 론

중앙의 히터를 기점으로 양쪽에 한 쌍의 온도 감지막을 가진 마이크로 흐름센서에 대해서 Excel과 매크로 기능을 이용하여 주어진 공기 흐름영역에서 열전달 해석을 수행하였다. Excel을 이용할 경우, 편리한 표계산 기능과 데이터를 비주얼하게 표현할 수 있는 차트 및 워크 시트내에서의 셀 참조 등을 수치해석을 위하여 충분히 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

히터를 기점으로 양측에 배치된 한 쌍의 온도 감지막에서 온도분포를 동정한 결과, 온도 감지막의 위치를 적절히 결정할 수 있음을 확인하였다. 이를 통하여 하드웨어 제작시 유용한 설계 파라미터로 활용이 기대된다. 앞으로 개발된 Excel 기

반 시뮬레이션 툴을 활용하여 여러 쌍의 온도 감지막을 가진 경우를 고려하여 보다 구체적인 계산을 수행하고 최적의 온도 감지막 배치를 위한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 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] 김태용, 정완영, "다단계 온도 감지막을 가진 마이크로 흐름센서의 열전달 특성", 한국해양정보통신학회 논문지 제9권 제 3호, pp. 595-601, June, 2005.
- [3] 정완영, 김태용, 서용수, "다단계 온도 감지막을 가진 고정영 흐름측정용 마이크로 흐름센서", 제어자동화시스템공학회 논문지 제12권 제1호, pp. 85-92, January, 2006.
- [4] M. Elwenspoek, "Thermal Flow Micro Sensors," in Proc. of IEEE Semiconductor Conference, vol.2, pp.423-435, October 1999.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Toshio TOMIMURA et al., "Thermo-Fluid Dynamics Simulation and Visualization using Spreadsheet of Excel", 일본항공우주학회지 Vol.53, No.621, pp.299-305, 2005.
- [8] J.P. Holman, Heat Transfer in SI Units 7th ed., McGRAW-HILL, 1992.
- [9] C.A.J. Flecher, Computational for Fluid Dynamics, I-Fundamental and General Techniques 2nd ed., Springer-Verlag, 1993.