

## 고응답 열식 질량공기유량센서의 제작 및 열거동 특성

박 병 규<sup>†</sup> · 이 준 식<sup>\*</sup>

(2008년 2월 21일 접수, 2008년 5월 10일 수정, 2008년 5월 21일 심사완료)

### Micro-Fabrication and Thermal Characteristics of a Thermal Mass Air Flow Sensor for Real-time Applications

Byung Kyu Park and Joon Sik Lee

**Key Words:** Thermal Mass Flow Sensor(열식 질량유량센서), Thermo-resistive Type(열저항식), MEMS Sensor Microfabrication(멤스 센서 제작)

#### Abstract

A thermal mass air flow sensor (MAFS), which consists of a micro-heater and thermo-resistive sensors on the silicon-nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) thin membrane structure, is micro-fabricated by MEMS processes. Two thermo-resistive temperature sensors are located at  $100\mu\text{m}$  upstream and downstream from the micro-heater respectively. The thermal characteristics are measured to find the best measurement indicator. The micro-heater is operated under constant power condition, and four flow indicators are investigated. The normalized temperature indicator shows good physical meaning and is easy to use in practice. It is found that the configurations and heating power of thermal-resistive elements are the dominant factors to determine the range of the flow measurement in the MAFS with higher sensitivity and accuracy.

---

#### 기호설명

$K_P, K_I, K_D$ : PID 제어 매개변수

$\text{Int}_{\text{prev}}$ : 오차-시간 그래프에서 누적오차

$P$ : 열유속 [mW]

$R$ : 온도 T에서의 저항 [Ohm]

$R_o$ : 기준온도 (=273.15 K)에서의 저항

$\text{Re}_x$ : Reynolds 수 (=  $ux/\nu$ )

$T$ : 온도 [K]

$T_0$ : 마이크로 히터 온도 [K]

$T_1$ : 상류 열저항센서 온도 [K]

$T_2$ : 하류 열저항센서 온도 [K]

$T_3$ : 실리콘기판 상류 열저항센서 온도 [K]

$T_4$ : 실리콘기판 하류 열저항센서 온도 [K]

$T_s$ : 샘플링 시간 [ms]

$u$ : 유속 [m/s]

$x_n$ : PID 제어기의 출력 [-]

#### 그리스문자

$\alpha$ : 저항온도계수 [K]

$\Delta T_{12}$ : 상·하류 간 온도차 (=  $T_1 - T_2$ )

$\nu$ : 동점성계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

---

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : bkpark@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1705 FAX : (02)887-2486

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

---

하첨자

- $h$  : 히터
- $i$  : 센서 입구
- $o$  : 센서 출구

### 1. 서론

유량측정은 많은 산업 및 연구분야에서 중요한 기반기술로서, 특히 자동차 엔진의 공연비 제어, 반도체 장비의 공정 제어, 의료 진단, 대기환경 측정 등 다양한 분야로 활용이 확대됨에 따라 최근에는 고정밀도를 갖는 초소형 유량센서 기술이 주목을 받고 있다. 반도체제조 공정기술이 발달함에 따라 이를 이용하여 훨씬 단순하고 미세한 구조를 가지면서 성능이 향상된 저가의 마이크로 센서를 제작하는 것이 가능하게 되었다.

멤스(MEMS) 공정을 이용한 열식 질량유량센서<sup>(1,2)</sup>는 기본적으로 단열이 양호한 박막구조 위에 열을 발생시키는 발열부와 유속의 변화에 따른 여러 지점에서의 온도변화를 측정하는 온도 감지부로 구성되어 있다. 일반적으로 단열 구조는 실리콘 기질로의 전도 열전달을 억제하고 유체로의 대류 열전달을 크게 함으로써 유속의 측정 감도를 높이기 위해 브리지 또는 멤브레인 형태의 지지구조가 광범위하게 채용되고 있다.<sup>(3)</sup> 이러한 구조는 유체의 열전도계수 측정기 및 벽면 전단 응력 측정기, 교류 특성을 측정하는 열전변환기, 적외선 감지기, 진공압력을 측정하는 Pirani 진공 게이지, 초소형 HDD에 채용되고 있는 열식 가속도계, 음향 계측기 등을 비롯한 다양한 종류의 센서에 응용되고 있다. 브리지 지지구조는 전도 열전달을 줄일 수 있어 측정정도를 높일 수 있기는 하지만, 강도가 너무 낮아 쉽게 부서지는 단점이 있어서 산업용으로는 멤브레인 지지구조가 보다 많이 채용되고 있다.

열식 마이크로 질량유량센서는 유속에 따른 대류 열전달의 변화를 이용하여 유속을 측정하기 때문에 발열원에 의한 온도분포의 측정점, 즉 온도감지 위치가 측정 유속 범위와 감도에 매우 큰 영향을 미친다. 또한 전자회로를 이용한 가열부의 다양한 가열 제어모드의 영향도 크다.

따라서 본 연구에서는 박막 구조 위에서 마이크로 히터 및 온도센서로 구성된 열식 질량 공기

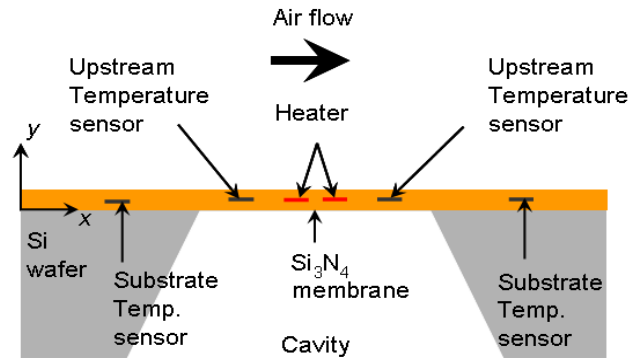


Fig. 1 Schematic cross-section of the flow sensor

유량센서를 제작하고, 일정 열유속 발열 모드로 동작하는 유량센서의 열거동 특성을 고찰하였다. 이를 통해 마이크로 히터가 일정 열유속으로 제어되는 경우 질량유량센서의 측정가능한 유속범위를 파악하고 향후 고정밀 열식 질량유량센서의 성능 개량을 도모하고자 한다.

### 2. 마이크로제조 공정

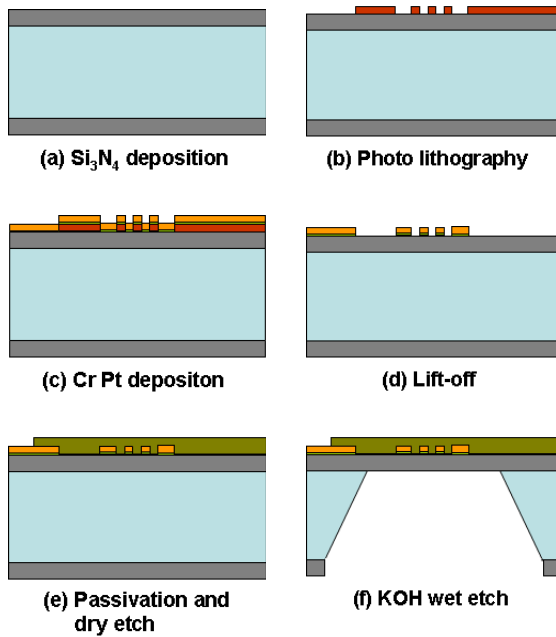
#### 2.1 유량센서의 구조

마이크로제조 기술을 이용한 멤스공정으로 제작되는 마이크로 질량유량센서 소자의 구조를 Fig. 1에 나타냈다. 이 소자는 크기가 4 mm x 6mm로서 마이크로 히터로 구성된 가열부 및 상하류의 온도를 측정하는 감지부는 질화실리콘 박막으로 지지되어 있고, 멤브레인 상부 및 하부 공동으로 측정공기가 흐르며, 실리콘 기질부에서는 유입되는 공기의 온도를 측정해서 보정할 수 있도록 백금 박막 온도센서가 구성되어 있다. 이 멤브레인 지지영역은 가로 1200  $\mu\text{m}$ , 세로 2000  $\mu\text{m}$ 이고, 내부 중앙에는 폭 40  $\mu\text{m}$  두께 0.2  $\mu\text{m}$ 의 마이크로 히터를 기준으로 상하 각각 1  $\mu\text{m}$ 의 질화실리콘 지지막이 있다.

#### 2.2 마이크로 제조 공정

반도체 제조 기술을 이용하여 유량센서 소자를 제작하는 과정은 다음과 같다 (Fig. 2 참조).

(1) 제작에 사용된 기판은 양면이 연마된 (100) 방향의 4인치 두께 500  $\mu\text{m}$ 의 실리콘 웨이퍼를 세척 건조한 후, 질화실리콘 박막을 저응력 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)

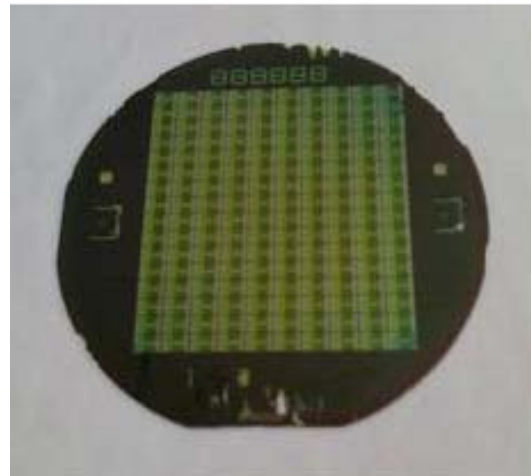


**Fig. 2** Microfabrication process of thermal mass air flow sensor

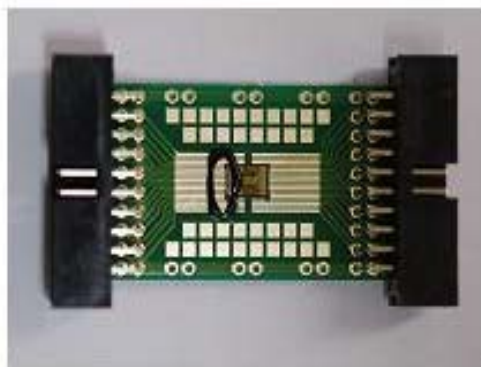
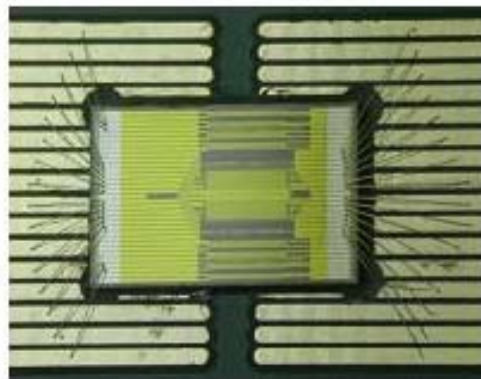
법으로 두께 1  $\mu\text{m}$  박막을 증착함 (Fig. 2 (a)).  
 (2) 감광제(PR, Photo Resist)를 스핀 코팅하고, 마스크로 패터닝함 [Fig. 2 (b)].  
 (3) 금속 스퍼터(metal sputter)를 이용하여 접착층으로 크롬 금속 박막두께는 20 nm, 백금 박막 200 nm을 증착함 [Fig. 2 (c)].  
 (4) 금속 박막을 리프트오프(lift-off) 법으로 제거하여 금속패턴을 완성함 [Fig. 2 (d)].  
 (5) 금속의 산화 및 이물질 부착을 막기 위해 전면에 질화실리콘 보호막을 PECVD법으로 1  $\mu\text{m}$  두께로 증착, 패터닝 후 건식식각으로 접촉패드를 만듦 [Fig. 2 (e)].  
 (6) 웨이퍼 후면을 감광제 코팅하고 마스크로 패터닝한 다음, LPCVD로 증착된 질화실리콘 박막을 건식식각으로 제거하고, 질화지지막 하부에 공동을 형성하기 위하여 80 $^{\circ}\text{C}$  30% KOH 수용액에서 비등방성 식각을 수행함 [Fig. 2 (f)].

온도 신호 수집 및 히터 가열을 위한 전기적인 연결이 필요하므로 제작된 센서 소자는 PCB 기판의 연결라인과 센서 소자의 접촉패드를 25  $\mu\text{m}$ 의 금선으로 와이어 볼 본딩을 해야 하고, 유속을 측정하기 위해서 이를 패키징을 하였다.

MEMS 공정으로 제작된 열식 질량유량센서의 웨이퍼 사진을 Fig. 3 에 나타냈다. 각 유량센서



**Fig. 3** Micro-fabricated MAFS in processed wafer

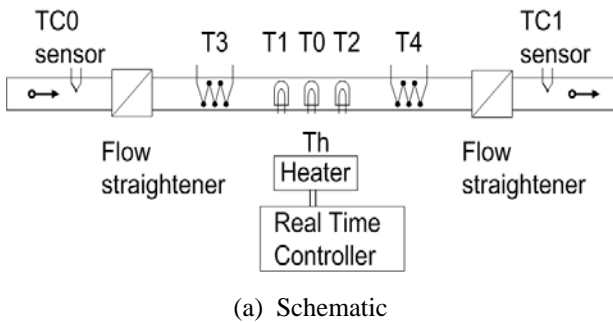


**Fig. 4** Gold wire bonding and packaged mass air flow sensor

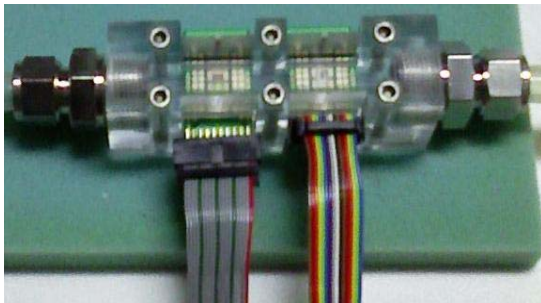
소자의 크기는 4 mm x 6 mm 이고, 한 장의 웨이퍼에 160개의 소자를 제조한 것이다. 이 열식 질량유량센서 소자를 레이저 또는 습식식각 등으로 다이싱한 다음, 패키징 한 유량센서를 Fig. 4 에 나타냈다.

2.3 실험장치

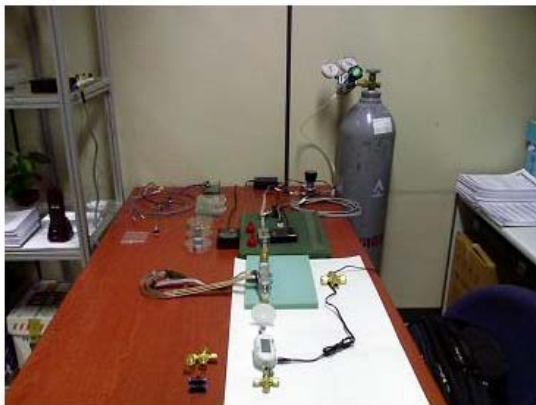
본 연구에서는 MEMS 공정으로 제작한 질량유량센서로 유량을 측정하기 위해 고압 질소가스, 압력조절기, 질량유량제어기, 필터, 유동단면이 10 mm x 10 mm인 미니 채널, 정밀유량계 등으로 유동 측정시스템 및 실험장치(Fig. 5)를 구성하였다. 질량유량센서는 Fig. 4와 같이 두께 1mm인 PCB 기판에 자리 홈을 파고 패키징하여 시험부 유로의 중앙에 설치하였고, 상하류에 필터 및 균일유동을 위한 정류기를 설치하였다.



(a) Schematic



(b) Test section



(c) Overall view

Fig. 5 Experimental apparatus

3. 결과 및 고찰

3.1 박막 선 저항

금속의 경우 저항-온도 관계식은 다음과 같다.

$$R = R_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\} \tag{1}$$

여기서  $\alpha$ 는 저항온도계수(TCR)로서 벌크 플라티늄의 경우  $3.85 \times 10^{-3} /K$  이지만, 제작 센서의 저항온도계수는  $2.04 \times 10^{-3} /K$  이다.

MEMS 공정으로 제작한 열식 질량유량센서의 확인을 위하여 센서의 박막 저항선별로 측정된 저항치를 Fig. 6에 나타내었다. 마이크로 히터의 저항은 약 200  $\Omega$  이고, 상류 및 하류의 온도를 측정하는 열저항식 온도 센서의 저항은 약 200 - 1500  $\Omega$  임을 알 수 있으며, 필요에 따라 임의의 조합이 가능하도록 설계 제작하였고 실험에 사용한 것은 히터에서 100  $\mu m$  상하류에 위치한 것으로 약 540  $\Omega$  이다. 또한 이 그림에서는 서로 다른 9개의 다이(die)에서 측운소자에 대한 저항치를 함께 나타낸 것으로서, 금선 본딩(gold wire bonding) 및 패키징을 완료한 후 각 단자별로 측정된 저항치는 웨이퍼상 다이의 위치 및 와이어 본딩 접점 위치에 따른 차이로서 아주 높은 정밀도를 얻기 위해서는 신호처리 회로 구성시 정밀 저항 트리밍 기술을 사용하여 저항을 조정할 수 있어야 함을 알 수 있다.

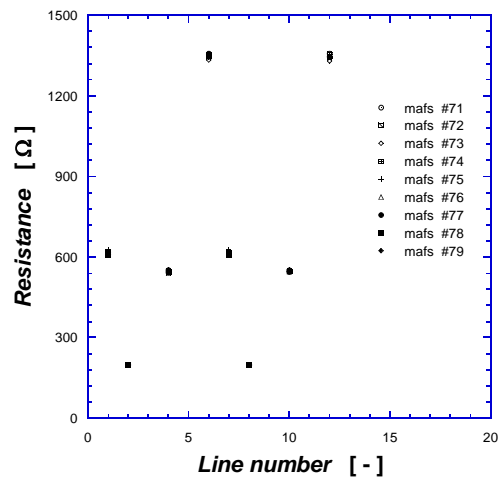


Fig. 6 Measured terminal resistances of packaged mass air flow sensor

3.2 제어변수의 영향

마이크로 히터를 일정 열유속 또는 일정 온도로 유지하기 위해서는 응답성이 뛰어난 피드백 제어가 필요하다. 따라서 고속 측정 제어 시스템에서 제어기가 가장 좋은 상태로 유지되도록  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ 를 설정해야 하고, 그 방법에는 공정응답법, 극한사이클법, 시행착오법<sup>(4)</sup> 등이 있다. 만약 샘플링 간격이 면적에 포함된 시간에 대해 상대적으로 짧다면, 특정한 순간의 PID 제어기의 출력값  $x_n$ 은 다음과 같다.

$$x_n = K_p e_n + K_I \left( \frac{e_n + e_{n-1}}{2} + \text{Int}_{\text{prev}} \right) + K_D \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \quad (2)$$

또는

$$x_n = A e_n + B e_{n-1} + C (\text{Int}_{\text{prev}}) \quad (3)$$

여기서

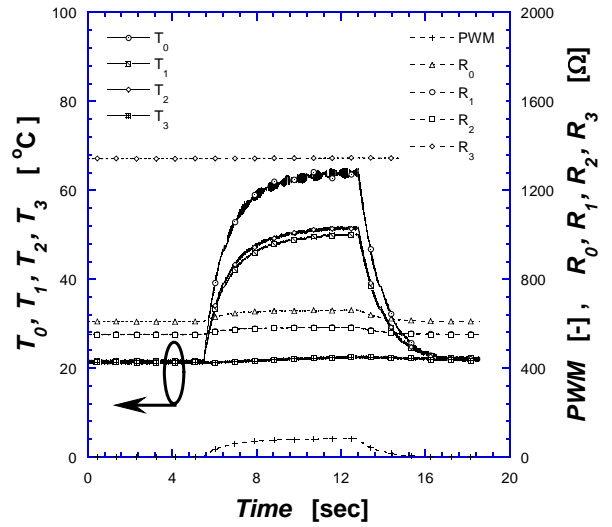
$$A = K_p + 0.5K_I T_s + K_D / T_s, \quad B = 0.5K_I T_s - K_D / T_s,$$

$C = K_I$ ,  $\text{Int}_{\text{prev}}$ 는 오차-시간 그래프에서 누적오차이다.

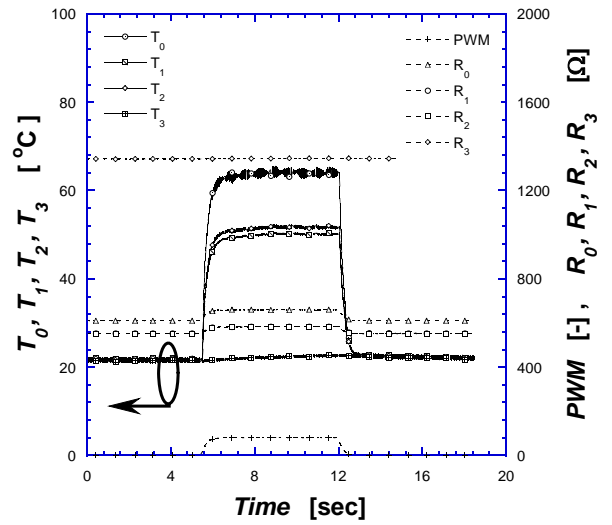
Fig. 7은 구형 입력시 PID 제어 매개변수에 따른 시스템의 거동을 나타낸 것으로 정해진  $K_I$ 에서  $K_p$ 의 증가에 따라 구형 입력에 대한 응답성이 증가함을 알 수 있다. 이러한 PID 제어기의 거동을 통해 본 시스템에 적합한  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ 를 각각 1.50, 0.0005, 0.0으로 설정하였다. 이러한 신속한 열적 거동은 유동 변화가 심하고 빠른 응답성을 필요로 하는 자동차용 유량센서가 갖추어야 할 중요한 특성 중의 하나이다. 또한 이 PID 제어 매개변수는 시스템의 구성,  $T_s$ 에 따라 크게 변하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 모든 저항 및 온도를 자동차 적용을 고려하여  $T_s$ 가 약 4ms 간격의 고속으로 측정하였다.

3.3 일정 열유속

본 연구에서 수행한 실험의  $\text{Re}_x$  범위는 640~8200이고, 모든 측정은  $T_s$ 가 4ms의 실시간 루프(time-critical loop)로 고속 측정 및 펄스폭 변조



(a)  $K_p = 0.05$ ,  $K_I = 0.0005$ ,  $K_D = 0.0$



(b)  $K_p = 0.25$ ,  $K_I = 0.0005$ ,  $K_D = 0.0$

Fig. 7 Dynamic behavior of flow sensor system with a square input for various control parameters

(pulse width modulation)로 일정 열유속을 유지하였다. 열유속은 84 mW로 일정하게 유지하였고, 각 순간의 제어신호, 열저항센서의 온도를 측정 평균하여 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. Fig. 8(a)에서 알 수 있는 바와 같이 실리콘 기질의 온도가 거의 일정하게 유지되지만, 유속이 증가함에

따라 마이크로 히터의 온도뿐만 아니라 상하류에 위치한 열저항 센서의 온도도 대류열전달의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 유속이 1.4 m/s 이상에서는 히터의 발열량이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 유량측정 대표적인 표시자로서 여러 무차원 인자  $\Delta T_{01}/\Delta T_{03}$ ,  $\Delta T_{12}/\Delta T_{03}$ ,  $\Delta T_{01}/T_3$ ,  $\Delta T_{13}/T_3$  등을 도입하여 검토한 결과,  $\Delta T_{13}/T_3$ 가 감도는 가장 우수하지만 유속의 증가에 따라 감소하고 유동이 없는 경우에 유한한 값을 나타내는 단점이 있는 것으로 나타났다. 이들 중  $\Delta T_{01}/T_3$ 을 제외한 다른 표시자들은 우회 측정유로에 유입되는 공기의 온도가 변함에 따라 실리콘 기질의 온도가 변하게 되어도 유량 측정 표시자로서 사용할 수 있고, 특히  $\Delta T_{12}/\Delta T_{03}$ 이 유동이 없는 극한조건에서 물리적으로 가장 적합한 표시자인 것으로 나타났다. 유속이 1.4 m/s 이하 인 경우에도, 마이크로 히터의 발열량을 줄이면 일정 열유속 조건으로 유량의 측정이 가능하다. 그러나 발열량이 낮으면 높은 유속에서의 감도가 떨어지게 되어 측정 가능한 최고 유속 한계가 낮아진다. 이러한 제약을 극복하기 위해서 실제 응용에서는 많은 경우 히터의 발열량 및 우회 측정유로의 유동저항 조정으로 해결하기 때문에 열식 질량공기유량센서의 개발 시에는 이러한 사항들도 매우 세심하게 고려해야 한다.

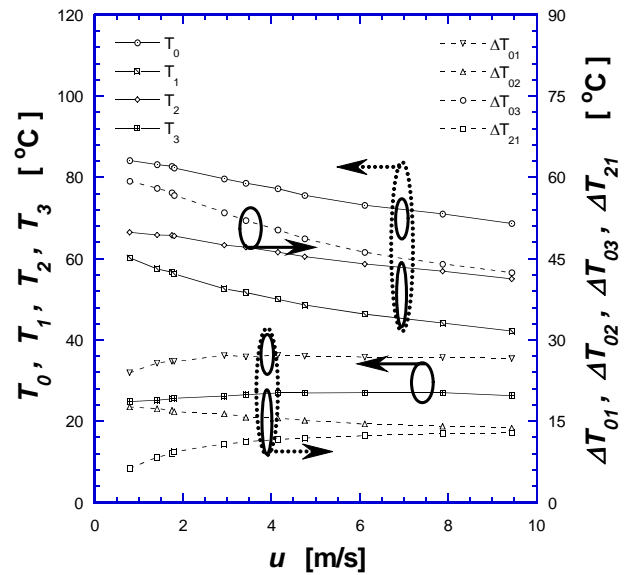
4. 결론

본 연구에서는 멤스공정으로 열식 마이크로 질량유량센서를 제작하고, 열저항 감지센서의 위치가 상하류 각각 약 100  $\mu\text{m}$  일 때, 정해진 가열모드로 마이크로 히터를 제어한 경우에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

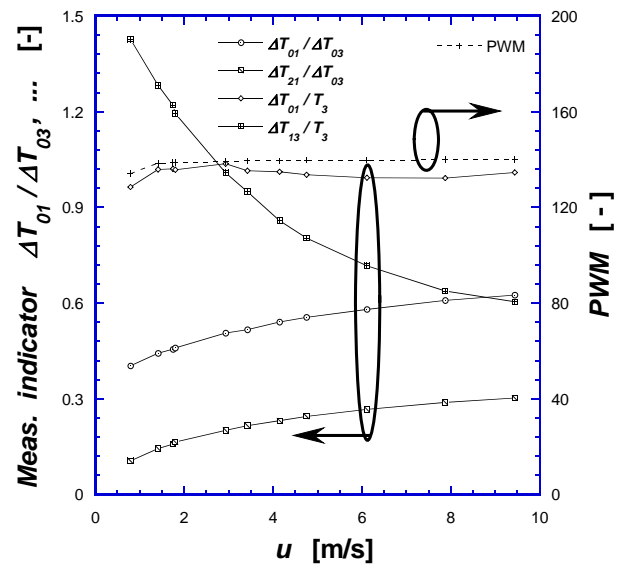
(1) 열식 질량유량센서의 경우, 유속 측정범위는 온도감지센서의 위치 및 제어모드가 감도 및 정밀도에 큰 영향을 미친다.

(2) 본 연구에서 사용한 센서는, 유량측정 표시자로서  $\Delta T_{12}/\Delta T_{03}$ 가 가장 적절하고, 일정 열유속 제어모드의 경우, 1.4m/s 이상의 유속범위에서 측정이 가능하다.

(3) 우회 측정유로의 적용 가능 유량범위를 확대하기 위해서는 일정온도, 일정 열유속, 정전류



(a) Temperatures and their differences



(b) Measurement indicators

Fig. 8 Variations of parameters in thermo-resistive sensors for velocity measurement (P = 84 mW)

제어 등, 적절한 가열 제어 모드의 조합을 고려하는 것이 바람직하다.

(4) 실제 응용에서 많은 경우 유량범위의 조정은 히터의 발열량 및 우회 측정유로 저항의 조정으로

가능하기 때문에 이러한 사항들도 매우 중요하다.

### 후 기

이 논문은 2007년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Nguyen, N. T., 1997, "Micromachined Flow Sensors - A review," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 1, pp. 7~16.
- (2) Ashauer, M., Glosch, H., Hedrich, F., Hey, N., Sandmaier, H. and Lang, W., 1999, "Thermal Flow Sensor for Liquids and Gases Based on Combinations of Two Principles," *Sensors and Actuators, A* 73, pp. 7~13.
- (3) Buchner, R., Sosna, C., Maiwald, M., Benecke W. and LangW., 2006, "A High-temperature Thermopile Fabrication Process for Thermal Flow Sensors," *Sensors and Actuators, A* 130, pp. 262~266.
- (4) Bolton, W., 2004, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Third edition, Prentice Hall.
- (5) Sabate, N., Santander, J., Fonseca, L., Gracia, I. and Cane, C., 2004, "Multi-range Silicon Micromachined Flow Sensor," *Sensors and Actuators, A* 110, pp. 282~288.
- (6) Pal, P., Sato, K. and Chandra, S., 2007, "Fabrication Techniques of Convex Corners in a (100)-Silicon Wafer using Bulk Micromachining : a Review," *J. Micromech. Microeng.*, 17, pp. 111~133.
- (7) Elwenspoek, M., 1999, "Thermal Flow Micro Sensors," *Proceeding of IEEE Semiconductor Conference*, pp. 423~435.
- (8) Madou, M. J., 2002, *Fundamentals of micro-fabrication*, Second Edition, CRC Press.
- (9) Park, B. K., Lee, J. S. and Oh, D. W., 2006, "Flow Sensing Devices and Micro Mass Flowmeter with Configurations of Cooling Air Channels," *KR Pat.*, 10-0692072, G01F 1/69.
- (10) Qiu, L., Hein, S., Obermeier, E., Schubert, A., 1996, "Micro Gas-flow Sensor with Intergated Heat Sink and Flow Guide," *Sensors and Actuators, A* 54, pp. 547~551.
- (11) Brunn, H. H., 1995, *Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press.
- (12) Lammerink, T. S. J., Tas, N. R., Elwenspoek, M. and Fluitman, J. H. J., 1993, "Micro-Liquid Flow Sensor," *Sensors and Actuators, A* 37, pp. 45~50.
- (13) Jeon, H. K., Lee, J. S. and Park, B. K., 2007, "Numerical Analysis on the Design of a Thermal Mass Air Flow Sensor with Various Heating Modes," *Transactions of the KSME B*, Vol. 31, No. 10, pp. 876~883.