

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.8.573

실시간 제어를 이용한 마이크로 열식 질량공기 유량센서의 열특성 측정

박 병 규* · 이 준 식*

(2009년 2월 27일 접수, 2009년 6월 9일 수정, 2009년 6월 10일 심사완료)

Measurements of Thermal Characteristics for a Micro-Fabricated Thermal Mass Air Flow Sensor With Real-Time Controller

Byung Kyu Park and Joon Sik Lee

Key Words: Thermal Air Flow Sensor(열식 공기유량센서), Real-Time Controller(실시간 제어), Temperature Difference Control(온도차 제어), Microfabrication(마이크로 제조)

Abstract

A thermal mass air flow sensor, which consists of a micro-heater and thermal sensors on the silicon-nitride thin membrane structure, is micro-fabricated by MEMS processes. Three thermo-resistive sensors, one for the measurement of microheater temperature, the others for the measurement of membrane temperature upstream and downstream of the micro-heater respectively, are used. The micro-heater is operated under the constant temperature difference mode via a real time controller, based on inlet air temperature. Two design models for microfabricated flow sensor are compared with experimental results and confirmed their applicabilities and limitations. The thermal characteristics are measured to find the best flow indicator. It is found that two normalized temperature indicators can be adopted with some advantages in practice. The flow sensor with this control mode can be adopted for wide capability of high speed and sensitivity in the very low and medium velocity ranges.

기호설명

K_P, K_I, K_D : PID 제어 매개변수

l_H : 마이크로히터의 폭 [m]

l_s : 마이크로히터-측온센서간의 거리 [m]

P_H : 열유속 [mW]

R : 온도 T에서의 저항 [Ohm]

R_0 : 기준온도 (=273.15 K)에서의 저항

Re_x : Reynolds 수 (= ux/ν)

T : 온도 [K]

T_0 : 마이크로 히터 온도 [K]

T_1, T_2 : 상류 및 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]

* 책임저자, 회원, 서울대학교 SNU-IAMD

E-mail : bkpark@snu.ac.kr

TEL: (02)880-7545/1204 FAX: (02)887-2486

* 서울대학교 기계항공공학부

그리스문자

α : 저항온도계수 [K]

ΔT_{12} : 상·하류 간 온도차 ($=T_1 - T_2$)

γ : 특성방정식의 근

ν : 동점성계수 [m^2/s]

1. 서 론

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.

마이크로 열식 질량유량센서^(1,2)는 실리콘 웨이퍼를 사용하여 벌크 마이크로머시닝(bulk micro-machining) 또는 표면 마이크로머시닝(surface micro-machining)을 포함한 멤스(MEMS) 공정으로 제작하지만 기본적인 원리는 열전달 현상을 이용한다. 최근 선진국간의 차세대 성장동력 발굴을 위한 국가간의 경쟁으로 인하여 초소형 마이크로/나노 시스템, 바이오시스템이 개발되고 있으며, 초저유량 센서에 대한 연구⁽³⁾도 수행되고 있다.

마이크로 열식 질량유량센서는 유속에 따른 대류 열전달의 변화를 이용하여 유속을 측정하기 때문에 전자식에 비해 노이즈 특성이 우수하지만, 발열원에 의한 온도분포의 측정점, 즉 온도감지 위치가 측정 유속 범위와 감도에 매우 큰 영향을 미친다. 또한 전자회로를 이용한 가열부의 다양한 가열 제어모드의 영향도 크다. 일정전력 제어의 경우 복잡한 전류/전압 제어 대신 대부분 저항변화를 무시하고 정전류를 이용함으로써 회로 단순화를 통하여 일반 산업용으로 사용되고 있다. 또한 일정온도 제어의 경우 개념적인 이해가 용이하지만 정밀측정을 위해서는 추가적인 온도보상회로가 필요하다.⁽⁴⁾ 따라서 유입유체와의 온도차를 일정하게 유지하도록 제어함으로써 유입유체 온도의 변화에 대응할 수 있도록 실시간 제어시스템을 구성하여 가능성을 검토한다.

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

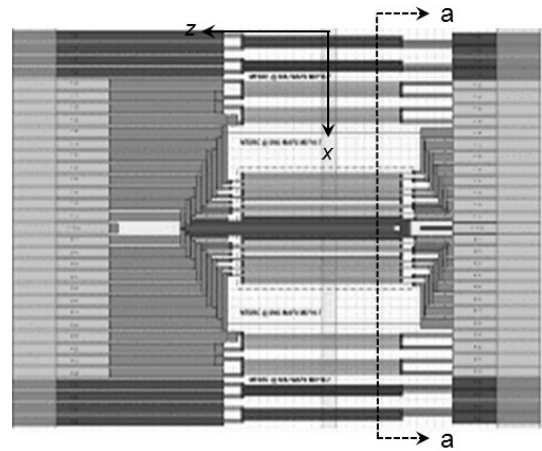


Fig. 1 Mask pattern of the MAFS

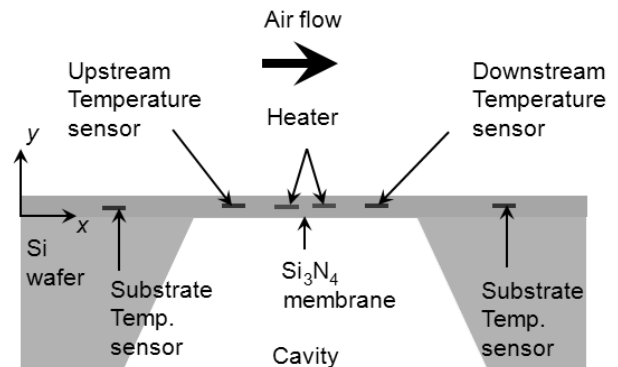


Fig. 2 Schematic of cross-section a-a in the flow sensor considered

서를 제작하고, 상대적으로 높은 유속에서 디지털 실시간 제어기를 사용하여 일정 온도로 제어되는 유량센서의 열거동 특성을 고찰하였다. 이를 통해 마이크로 히터가 일정 온도로 제어되는 경우 질량유량센서의 측정가능한 유속범위를 파악하고 향후 고정밀 열식 질량유량센서의 성능 개량을 도모하고자 한다.

2. 마이크로제조 공정

2.1 유량센서의 구조

멤스 공정을 이용한 소자 제조를 위해 설계한 마스크 패턴을 Fig. 1에 나타냈고, 마이크로제조 기술을 이용한 질량유량센서 단면 a-a의 구조를 Fig. 2에 나타냈다. 이 소자는 크기가 4 mm × 6

mm로서 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.⁽⁵⁾ 이 멤브레인 지지영역은 가로 1200 μm , 세로 2000 μm 이고, 내부 중앙에는 폭 40 μm , 두께 0.2 μm 의 마이크로 히터를 기준으로 상하 각각 1의 질화실리콘 지지막이 있다.

2.2 마이크로 제조 공정

반도체 제조 기술을 이용하여 유량센서 소자를 제작하는 과정은 Fig. 3에 나타냈다.

온도 신호 수집 및 히터 가열을 하기 위한 전기적인 연결선은 25 μm 의 금선(gold wire)이어서 매우 약하므로 제작된 센서 소자는 투명한 폴리머로 도포해서 외부로부터 연결부를 보호하였다.

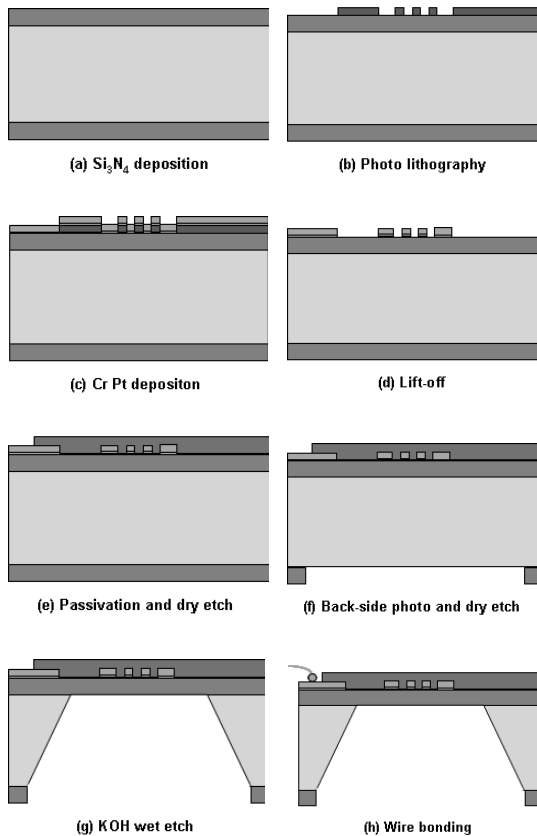


Fig. 3 Microfabrication process of thermal mass air flow sensor

멤스 공정으로 제작 중인 열식 질량유량센서의 웨이퍼 사진 및 3 nm 금 박막코팅한 후의 주사전자 현미경(SEM) 사진을 Fig. 4에 나타냈다. 각 유량센서 소자의 크기는 4 mm \times 6 mm이고, 한장의 웨이퍼에 160개의 소자를 제조한 것이다. 이 열식질량유량센서 소자를 레이저 또는 습식식각 등으로 다이싱한 다음, 두께 1mm인 PCB 기판에 자리 홈을 파고 패키징 한 유량센서를 Fig. 5에 나타냈다.

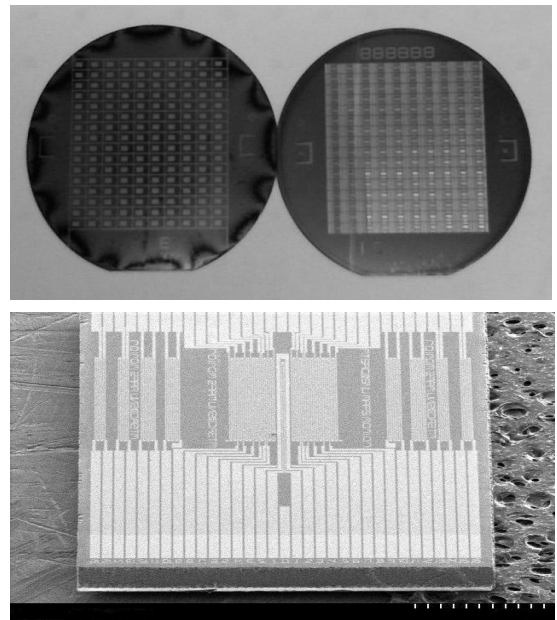


Fig. 4 Photograph of the wafer in process (f) and the SEM image of microfabricated sensor

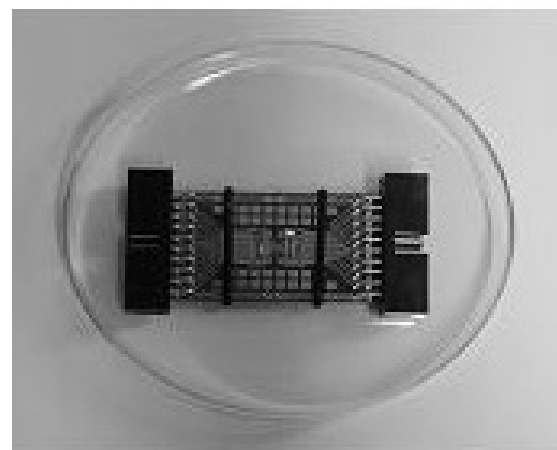
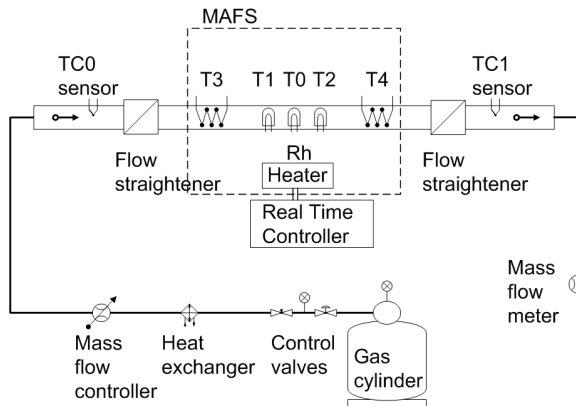


Fig. 5 Packaged mass air flow sensor



(a) Schematic



(b) Test section

Fig. 6 Experimental apparatus

2.3 실험장치

본 연구에서는 멤스 공정으로 제작한 질량유량 센서로 유량을 교정하기 위해 고압 질소가스, 압력조절기, 질량유량제어기, 필터, 유동단면이 10 mm × 10 mm인 미니 채널, 정밀유량계 등으로 유동 교정 및 측정시스템[Fig. 6(a)]을 구성하였다. 패키징한 질량유량센서는 시험부 유로의 중앙에 설치하였고, 상하류에 다공성 금속 필터 및 균일 유동을 위한 정류기를 설치하였다[Fig. 6(b)].

3. 결과 및 고찰

3.1 일정 온도차 제어

멤스 공정으로 제작한 열식 질량유량센서의 확인을 위하여 센서의 박막 저항선별로 측정된 저항치를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림은 서로 다른 11개의 다이(die)에 대해서, 한 개의 다이당 배열된 측온소자 15개에 대한 저항을 함께 나타낸 것이다. 금선 본딩(gold wire bonding) 및 패키징을 완료한 후 각 단자별로 측정된 저항치는 웨이

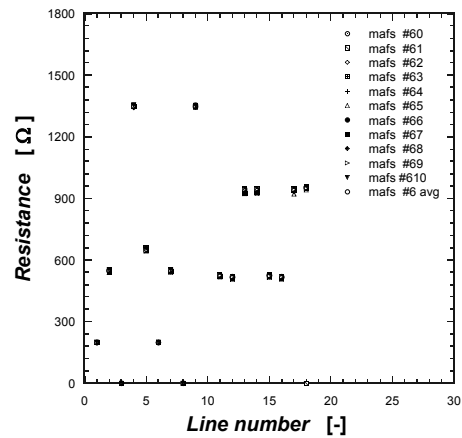


Fig. 7 Measured terminal resistances of packaged mass air flow sensor

퍼상 다이의 위치 및 와이어 본딩 접점 위치에 따라 매우 미소한 차이가 있기 때문에 중첩되어 나타난 것이다. 백금저항선의 경우 저항-온도 관계식은 다음과 같다.

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

여기서 α 는 저항온도계수(TCR)로서 벌크 플라티늄의 경우 $3.85 \times 10^{-3} / K$ 이지만, 제작 센서의 저항온도계수는 $2.04 \times 10^{-3} / K$ 이다. 일반적으로 사용되는 후막 물성과는 차이가 있지만 백금 박막 경우 온도에 대한 선형성은 매우 우수하다.

마이크로 히터를 일정 열유속 또는 일정 온도로 유지하기 위해서는 응답성이 뛰어난 피드백 제어가 필요하다. 따라서 실시간 제어기(real time controller)에서 마이크로 히터의 온도가 설정상태로 잘 유지되도록 K_p , K_i , K_D 를 설정해야 한다. 이를 위해 본 시스템에서는 계단입력시 PID 제어 매개변수에 따른 시스템의 열적 거동을 파악하여 시행착오법으로 결정하였다.⁽⁵⁾ 본 연구에서 수행한 실험 유속범위는 약 0 ~ 10 m/s ($Re_x = 0 \sim 8200$)로서 일반적인 마이크로 유량센서보다 훨씬 크다. 실시간 루프(time-critical loop)로 고속 측정 및 펄스폭 변조(pulse width modulation) 신호로 히터를 일정온도차로 제어하였고, 모든 측정은 샘플링 시간 T_s 가 4ms이다.

3.2 마이크로 유량센서 모델

열식 질량유량센서의 열적 거동을 확인하기 위해서는 3가지 보존방정식들을 수치해석하는 것이 바람직하다. 그러나 특성길이가 마이크로스케일인 경우 3차원 해석은 계산격자가 급증하고 많은 시간이 필요하다. 따라서 여기서는 기존의 해석 모델을 사용하여 정성적인 거동을 예측하고 특성을 고찰한다. 먼저 초저속의 마이크로 유량센서에 널리 이용되는 Lammerink 등이 제시한 모델⁽⁶⁾의 해는 다음과 같다.

$$\frac{\Delta T_{21}}{\Delta T_{03}} = C \exp\left\{\gamma_2\left(l_s - \frac{l_H}{2}\right)\right\} - \exp\left\{\gamma_1\left(-l_s + \frac{l_H}{2}\right)\right\} \quad (2)$$

여기서 l_s 는 마이크로미터 중심에서 마이크로센서까지의 거리, l_H 는 마이크로미터의 폭이고, γ_1, γ_2 는 특성방정식의 근으로서 유속, 열확산계수, l_s 의 함수이며, C 는 상수이다. 이 Lammerink 모델은 마이크로센서의 초저유속 거동을 잘 예측한다. 그러나 본 유량센서조건인 경우 Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 유속이 증가하는 경우 유속에 따른 온도차가 포화되어 부적합한 것으로 나타났다. 이것은 모델의 지배방정식이 강성이어서 특성을 나타내는 매개인자들의 영향이 매우 크게 작용하기 때문이다.

한편, 유속이 증가하여 일반적인 중고속영역에서 본 센서의 열전달특성은 직관적으로 열막 또는 열선 유속계와 유사한 거동⁽⁴⁾을 나타낼 것으로 생각되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = P_H / (A + B\sqrt{u}) \quad (3)$$

여기서 A, B는 전도 및 대류에 의한 열전달의 영향을 나타내는 상수로서 측은 센서소자에서의 열경계층 두께의 차이를 나타내며,⁽⁷⁾ 보통 교정에 의해 구한다. 일반적으로 열선 유속계의 경우 전도열손실에 의한 영향은 총열전달량의 약 15% 정도를 차지하며, 길이가 무한히 긴 2차원 열선의 경우 A/B의 비는 0.772이다.⁽⁴⁾ 여기서는 이를

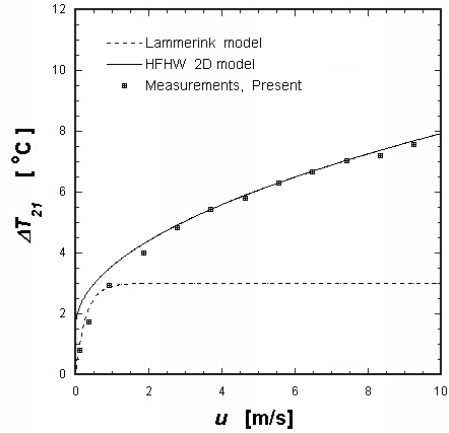
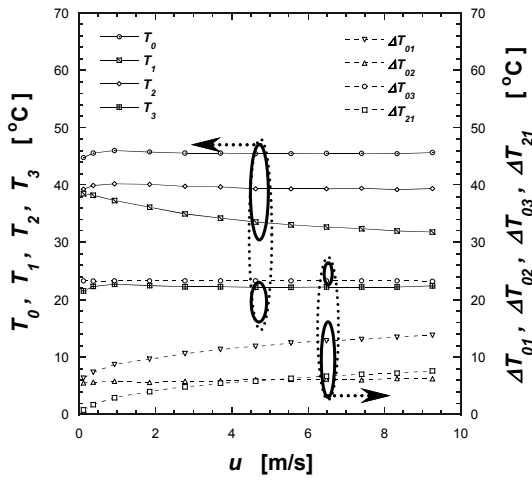


Fig. 8 Comparison of temperature differences between models and measurements

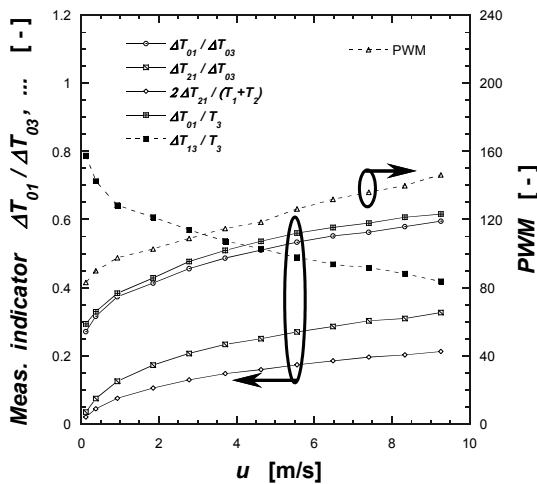
HFHW (hot film / hot wire) 2D 모델이라고 한다. 이 두 모델의 정성적인 거동을 살펴보면, Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이, 초저속영역에서는 Lammerink 모델이 중속영역에서는 HFHW 2D 모델이 거동을 상당히 잘 예측함을 알 수 있다. 본 온도차제어 센서의 경우 유속이 약 1.0 m/s 부근을 기준으로 설계 평가 모델의 설정에 주의를 기울여야 하고, 필요시 적절한 매칭기법을 적용해야 함을 알 수 있다.

3.3 마이크로 유량센서의 열특성

열식 질량유량센서의 열특성을 파악하기 위해서 마이크로 히터와 유입공기의 온도차 ΔT_{03} 는 23.3K로 일정하게 설정하였으며, 각 순간의 제어 신호, 열저항센서의 온도를 측정 평균하여 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9(a)에서 알 수 있는 바와 같이 유입공기(실리콘 기질 상류)의 온도 T_3 가 변할지라도 ΔT_{03} 은 일정하게 제어되고, 유속이 증가함에 따라 마이크로 히터의 온도뿐만 아니라 상하류에 위치한 열저항 센서의 온도가 열전달에 의해 미소하게 변화함을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)에서는 전체 유속범위에서 마이크로 히터의 발열량이 잘 제어되어 온도차가 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 유량측정 대표적인 표시자로서 무차원 인자 $\Delta T_{01}/\Delta T_{03}$, $\Delta T_{12}/\Delta T_{03}$, $2 \cdot \Delta T_{21}/(T_1 + T_2)$, $\Delta T_{01}/T_3$, $\Delta T_{13}/T_3$ 등을 도입하여



(a) Temperatures and their differences



(b) Measurement indicators

Fig. 9 Variations of parameters in thermo-resistive sensors for velocity measurement($\Delta T_{03} = 23.3$ K)

검토한 결과, $\Delta T_{13}/T_3$ 가 감도는 가장 우수하지만 유속의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내기 때문에 주의깊은 반전 회로를 이용하는 것이 필요한 것으로 나타났다. 특히 이들 중 $\Delta T_{12}/\Delta T_{03}$ 이 유동이 없는 극한조건 및 유동방향의 감지가 필요한 역류조건에서도 물리적 의미를 갖는 가장 적합한 표시자인 것으로 나타났다. 이 자료는 신호처리회로의 증폭비 결정에 유용하다. 유속이 1.0 m/s 이하인 저속의 경우 감도가 우수하고 2.0 m/s 이상에서는 모든 측정유량 표시자가 거의 선형함수로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, Fig. 9

(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 저속영역에서는 상하류 온도차를 이용하여 고감도 측정이 가능하고, 고속영역에서는 열선(또는 열막) 유속계와 유사하게 일정온도차 유지를 위해 필요한 발열량의 증가에 따른 온도차를 감지하는 특성을 나타냄을 알 수 있다.

따라서 극소유량을 다루는 마이크로열유체시스템에서는 고감도의 저속영역을 이용하고 중대유량을 다루는 산업용 시스템에서는 고속영역을 이용하여 측정이 가능함을 알 수 있다. 실제 응용에서는 신호 증폭회로와 더불어 히터의 발열량, 우회 측정유로의 유동저항 조정으로 해결할 수 있기 때문에 열식 질량공기유량센서의 개발 시에는 상당한 유연성을 발휘할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 멤스 공정으로 마이크로 열식 질량유량센서를 제작하고, 디지털 실시간 제어를 사용하여 센서소자 상의 마이크로 히터를 일정온도차 모드로 제어한 경우에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마이크로 열식 질량유량센서의 경우 실제 온도를 측정함으로써 온도센서의 위치, 히터 발열량, 제어변수의 조정을 통한 고정밀도, 넓은 범위의 유속측정이 가능하다.
- (2) 일정 온도차 제어모드의 경우, 본 연구에서 사용한 센서는 유량측정 표시자로서 $\Delta T_{21}/\Delta T_{03}$ 및 $2 \cdot \Delta T_{21}/(T_1 + T_2)$ 가 유동방향의 감지 및 물리적으로 가장 적절하고, 이는 신호처리회로의 증폭비 결정에 유용하다.

(3) 온도차가 일정한 경우, 저유속에서는 감도가 우수하고 2.0 m/s 이상에서는 유량측정 표시자가 거의 선형 증가함수의 거동을 나타낸다.

(4) 디지털 실시간 제어를 사용하는 일정 온도차 제어 모드의 경우, 급격한 온도변화에서도 높은 추종성을 유지하기 위해서는 센서소자 보호를 위한 공급전력 제한기능이 필요하다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-J03002)을

받아 수행된 연구입니다. 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 Lang, W., 2006, "A High-Temperature Thermopile Fabrication Process for Thermal Flow Sensors," *Sensors and Actuators, A* 130, pp. 262~266.
- (4) Brunn, H. H., 1995, *Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press.
- (5) Park, B. K. and Lee, J. S., 2008, "Microfabrication and Thermal Characteristics of a Thermal Mass Air Flow Sensor for Real-Time Applications," *Transactions of the KSME B*, Vol. 32, No. 7, pp. 542~548.
- (6) 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.
- (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., 2007, "Flow Sensing Devices and Micro Mass Flowmeter with Configurations of Cooling Air Channels," *KR Pat.*, 10-0692072, G01F 1/69.
- (10) Bolton, W., 2004, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*, Third edition, Prentice Hall.
- (11) Dijkstra, M., et al., 2008, "Miniaturized Thermal Flow Sensor with Laminar Integrated Sensor Structures on Semicircular Surface Channels," *Sensors and Actuators, A* 148, pp. 1~6.
- (12) Abbaspour-Sani, E., and Javan, D., 2007, "Analytical Study of Resistive MEM Gas Flow Meters" *Microsystem Technologies*, 14, pp. 89~94.