

실리콘 미세 가공을 이용한 열전형 미소유량센서 제작 및 특성

이영화 · 노성철* · 나필선 · 김국진** · 이광철** · 최용문*** · 박세일*** · 임영언

Fabrication and characteristics of micro-machined thermoelectric flow sensor

Young Hwa Lee, Sung Cheoul Roh*, Pil Sun Na, Kook Jin Kim**, Kwang Chul Lee**,
Yong Moon Choi***, Se Il Park**†, and Young Eon Ihm

Abstract

A thermoelectric flow sensor for small quantity of gas flow rate was fabricated using silicon wafer semiconductor process and bulk micromachining technology. Evanohm R alloy heater and chromel-constantan thermocouples were used as a generation heat unit and sensing parts, respectively. The heater and thermocouples are thermally isolated on the Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ laminated membrane. The characteristics of this sensor were observed in the flow rate range from 0.2 slm to 1.0 slm and the heater power from 0.72 mW to 5.63 mW. The results showed that the sensitivities ($(\partial(\Delta V)/\partial(\dot{q}))$; ΔV : voltage difference, \dot{q} : flow rate) were increased in accordance with heater power rise and decreasing of flow rate.

Key Words : thermoelectric flow sensor, sensitivity, flow rate, KOH anisotropic etching

1. 서 론

유량센서는 유체의 압력, 힘, 위치, 열 및 주파수 등의 변화를 이용하여 유량 및 유속을 측정하는 센서로서 자동차 엔진, 반도체 공정설비, 의료, 기상관측, 환경 등의 여러 분야에서 널리 활용되고 있다^[1]. 유량센서는 방식에 따라 비열형(non-thermal) 유량센서와 열형 유량센서로 나뉘는데, 열형 유량센서는 다시 열저항 센서, 열전 센서, 열전자 센서, 초전(pyroelectric) 센서 등으로 세분화된다. 특히 박막 히터형 유량센서는 센서의 발열부에서 유체로 인해 전달되는 열전달 효과를 이용하는데, 구조가 간단하여 히터역할의 발열부와 주위의 열 감지부, 그리고 신호처리 및 온도보상

을 위한 주변회로로 구성된다. 또한 기존 반도체 공정의 호환성으로 현재 여러 연구기관에서 다양한 센서를 개발하고 있다^[2-7]. 열전형 유량 센서로는 백금박막 히터와 크로멜-알루멜 단일접합 열전대를 사용한 열전형 유량센서가 선행 연구되었고^[3], 본 연구에서는 어레이 형태의 열전대를 배치하여 미소유량에서의 감도를 증대시켰다.

제작된 센서의 발열부로서는 Evanohm R type(Ni₇₅-Cr₂₀-Al_{2.5}-Cu_{2.5}) 합금 박막을 히터로 하고, 열 감지부로서 크로멜(Ni₉₀-Cr₁₀)과 콘스탄탄(Cu₅₅-Ni₄₅) 박막 열전대를 증착하였다. 히터부와 열전대 고온 접합부는 열전대 저온접합부와 열적 격리시켜 유체에 의한 온도 변화만 감지되도록 후면의 Si를 KOH 이방성 식각하였다^[3,4,8].

열 유량 센서의 측정감도는 열 감지부의 출력 전압의 변화로 표현되며, 이것은 유체의 열전도도, 열확산 계수의 함수 등으로 해석될 수 있다. 따라서 다양한 주요 변수에 따른 측정된 정량적 변화는 미세 유량 센서의 중요한 성능 지표가 된다^[9-11]. 본 논문에서는 제작된 유량 센서의 발열 히터 전력 변화 및 측정 유량에 따른 측정 감도 등의 특성에 대해 논의하였다.

충남대학교 재료공학과(Department of Material Engineering, Chungnam National University)

*한국기계연구원 열유체공정기술연구부(Thermo-Fluid System Department, Korea Institute of Machinery and Materials)

**한국표준과학연구원 전자기표준부(Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

***한국표준과학연구원 물리표준부(Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

†Corresponding author: seilpark@kriss.re.kr

(Received : December 22, 2004, Accepted : January 10, 2005)

2. 유량센서의 제작

본 연구에서 제작된 유량센서의 개략도는 그림 1과 같다.

제작에 사용된 기판은 직경 6인치 양면 연마된 두께 500 μm 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 먼저 초기 세척된 기판위에 잔류 응력을 줄이기 위한 샌드위치구조의 200 nm-Si₃N₄/1000 nm-SiO₂/200 nm-Si₃N₄ 3층 박막을 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)법으로 각각 형성하였다^[12]. 증착된 박막의 잔류 응력값은 Si₃N₄(200 nm)의 경우 약 1087 MPa, SiO₂(1000 nm) 박막의 경우 약 -93 MPa이었다^[13].

그 다음 감광액 노광법으로 패턴을 형성하고 Evahom R type 타겟을 사용한 DC 마그네트론 스퍼터를 사용하여 두께 500 nm 의 박막을 증착 후, lift-off 방식으로 발열부 박막 히터를 형성하였다. 제작된 히터는 3400 \times 50 μm^2 크기의 직선형으로, 계산된 저항값은 약 180 Ω 이었다.

감지부인 열전대는 역시 감광액 노광법으로 패턴 형성 후, DC 마그네트론 스퍼터링법으로 크로멜 및 콘스탄탄 타겟을 사용해 두께 500 nm의 박막을 각각 증착하고 lift-off 방법으로 제작하였다. 열전대와 히터와의 거리는 20 μm 로 하고, 한쪽 열전대의 총 수는 45쌍, 각 열전대는 770 \times 15 μm^2 크기를 갖는다.

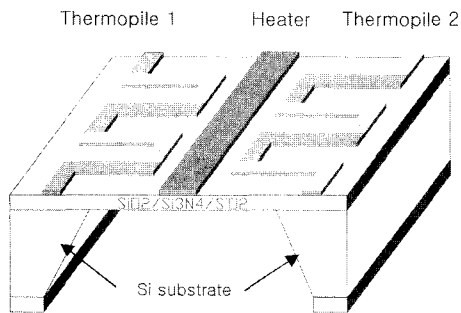


그림 1. 개략도; 히터와 열전대의 고온접합부가 Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 멤브레인 위에 위치

Fig. 1. Schematic diagram; the heater and thermocouple hot junctions on Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ membrane.

다음은 와이어 본딩 전극 형성을 위하여 30 nm-Ti/200 nm-Au 박막을 전자선 진공 증착하고 lift-off 패턴 하였다. 표 1은 제작된 센서 발열부 및 감지부 박막의 특성 및 설계 규격이다.

마지막으로 히터 및 열전대의 고온 접합부는 열적 격리를 위하여 Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 멤브레인에 놓이도록 기판 후면을 이방성 식각 하였다. 후면의 노광은 전용의 후면 마스크 정렬기를 사용하였고, Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 박막을 반응성 이온 식각 식각 후, 80 $^{\circ}\text{C}$ 30 % KOH 수용액에서 1.2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각 속도로 비등방성 식각 시켰다. 제조된 유량센서의 Evahom R 히터 및 상·하류 열전대의 측정된 저항은 약 160 Ω 및 약 8.6 k Ω 이었다. 그림 2는 제작된 센서의 현미경 사진을 나타낸다.

3. 센서 성능시험 장치

미소 유량 센서의 측정 감도와 히터의 발열량 증가

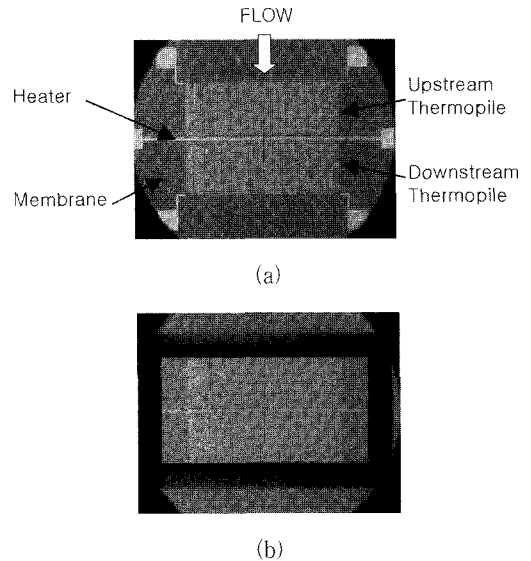


그림 2. 유량 센서의 현미경 사진; (a) 전면부, (b) 후면부
Fig. 2. Microscopic image of a flow sensor; (a) front side and (b) back side.

표 1. 박막금속의 특성 및 설계규격

Table 1. Properties and design specification of thin film metals

	Material	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Thermal Conductivity (W/m \cdot K)	Remarks
Heater	Evahom R	134	14.6	3400 \times 50 μm^2
TC 1	Chromel	70.6	19	770 \times 15 μm^2
TC 2	Constantan	52	19.5	45 pairs \times 2

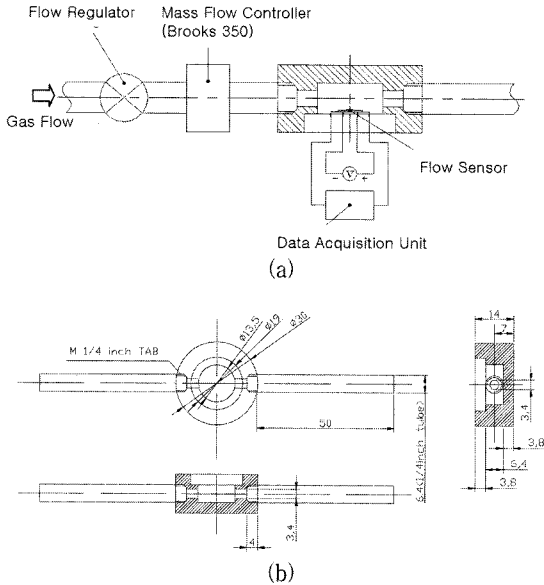


그림 3. 유량센서 측정 장치; (a) 전체 시스템의 개략도, (b) 센서부의 세부 치수

Fig. 3. Measurement package of flow sensor; (a) schematics of entire system and (b) detailed diagram of sensing unit with dimensions.

및 유량 변동과의 관계를 확인하기 위하여 그림 3(a)와 같이 실험장치를 구성하였다. 그림 3(b)는 센서 부착부의 실제 크기를 나타내는 설계도이다.

실험장치는 압축공기 저장탱크, 공기 필터, 건조기, 압력조절 밸브, 압력계, 온도계, 유량조절계, 그리고 미소유량 센서부로 구성되어 있다. 유동관로의 유동률을 안정적으로 제어하기 위하여 설치된 압력 조절기를 통해 0.25 MPa의 압력으로 일정하게 공급된 공기는 유량 조절계(Brooks 350)에 의해 유동률이 조절되어 미소 유량 센서가 장착된 유동관을 지나게 된다. 유량조절계 상류측 온도는 실험시 $21.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 하였고, 백금 저항센서로 그 값을 측정하였다. 실험장치 주의의 압력은 대기압계(Ruska, 19 psia)를 이용해 측정하였다.

미소 유량 센서의 히터는 전원을 연결하여 발열량을 0.03 mW에서 5.63 mW, 유량은 0.2 slm에서 1.0 slm의 범위로 변화시키면서 히터 양측의 열전대로부터 얻어지는 각각의 기전력 변화를 다중 데이터 측정기(HP 34970A)를 사용해 동시 반복 측정하였다.

4. 특성 평가

히터전력이 2.89 mW일 때, 공기 유량변화에 따른

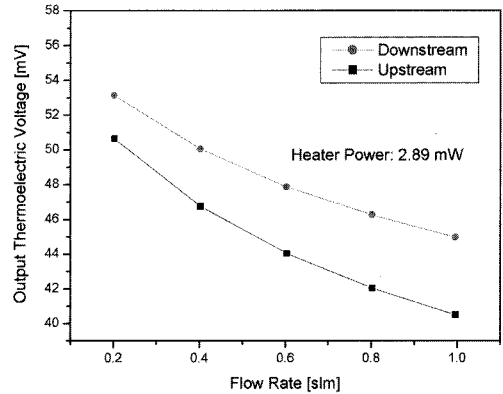


그림 4. 유량 변화에 따른 열전대의 출력 특성
Fig. 4. Thermocouples output characteristics as a function of flow rates.

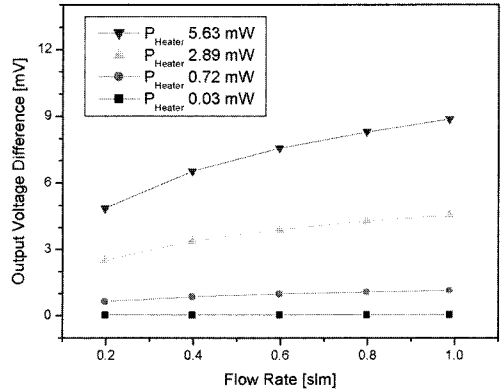


그림 5. 유량 변화에 따른 열전대쌍 사이의 전압차
Fig. 5. Voltage difference as a function of flow rate at various heater power.

열전대쌍의 전압변화를 기체 유입부 방향의 상류측 열전대와 유출부 방향의 하류측 열전대로 나누어 각각 그림 4에 나타내었다. 유량이 증가할수록 열전대의 출력전압은 점차로 감소하게 되는데, 이는 증가하는 유량에 의하여 손실되는 열량이 히터에서 공급되지 못하기 때문이다. 또한 유체의 방향에 따라서 상류측보다 하류측이 높은 출력전압을 보인다^[14].

또한 상류측과 하류측 열전대쌍 사이의 전압차를 유량변화에 따라 그림 5에 나타내었다. 히터의 입력 전력은 0.03 mW, 0.72 mW, 2.89 mW 및 5.63 mW로 하였으며, 유량은 0.2 slm에서 1.0 slm 범위로 변화시켰다. 동일한 히터전력일 때 상·하류 측 열전대쌍 전압차는 유량을 증가에 따라서 커지며, 히터 전력이 높을수록 전압차는 크게 나타난다. 이는 하류측 열전대에 유입되

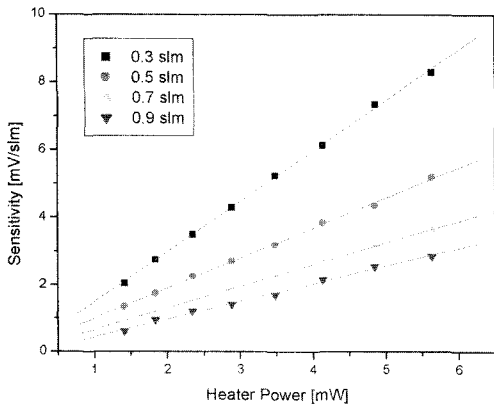


그림 6. 히터전력 변화에 대한 측정감도
 Fig. 6. Sensitivity as a function of heater power at different flow rates.

는 열량이 히터 전력 상승과 함께 증가하기 때문이다. 히터의 전력 증가에 따른 그래프 기울기의 증가는 열전대 쌍을 지나는 유체의 온도차에 따른 열전쌍 전압차 변동폭이 커지는 것을 의미하며, 이것은 히터 전력 증가에 따른 유량률의 증가에 대한 열전대 쌍의 전압차 변화로 정의되는 측정감도가 증가함을 나타낸다.

히터전력 변화에 따른 센서의 측정감도($\partial(\Delta V)/\partial(\dot{q})$; ΔV : voltage difference, \dot{q} : flow rate) 변화는 그림 6과 같이 나타난다.

측정 감도는 히터전력에 따라 선형적인 증가를 보이며, 이는 Lammerink *et al.*^[11]의 수학적 해와 일치된 결과를 보인다. 특히 미소유량의 경우 히터전력에 따른 측정감도는 급격히 증가된다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 유량이 0.3 slm인 경우, 0.9 slm의 유량을 흘려보냈을 때와 비교해 약 2.5배의 감도가 증가했음을 확인할 수 있다. 위의 결과는 히터에서 발생하는 열량이 크고, 유량이 적을수록 그 발생열을 효과적으로 하류 열전대로 전달하는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 반도체 공정 및 마이크로머시닝 기술을 사용하여 미소 유량 센서를 제작하였다. 발열부 히터 및 열전대의 고온 접합부는 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 멤브레인 위에 위치시켰고, 열전대의 저온접합부는 실리콘 프레임 위에 놓이도록 하여 열적 격리가 이루어지도록 하였다.

제작된 유량 센서는 발열 히터의 전력 변화 및 측정 유량에 따른 측정 감도와 응답 속도 등의 정량적 분석

이 수행되었다. 미소유량 센서 발열부 히터의 열량이 증가함에 따라 열전대 쌍 사이의 전압차가 크게 나타나며, 유량의 증가에 대해서도 전압차의 증가를 보였다.

센서의 측정감도는 히터전력의 증가에 따라 선형적인 증가 거동을 보여, 히터의 용량 조절이 미소 유량 센서의 측정감도에 중요한 요소가 됨을 확인하였다. 또한 측정유량의 변화에 따라 센서의 측정감도가 2배 이상 달라짐을 확인하였는데, 특히 유량이 작을수록 감도의 증대를 보였다.

따라서 본 연구에서 제작한 미소유량센서는 0.3 slm 이하의 미소유량측정에 적합할 것으로 판단되며, 차후 보다 세밀한 유량측정을 통해 센서의 최적감도범위를 규정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] J. van Kuijk, T. S. J. Lammerink, H.-E. de Bree, M. Elwenspoek and J. H. J. Fluitman, "Multi-parameter detection in fluid flows", *Sensors and Actuators A*, vol. 46-47, pp. 369-372, 1995.
- [2] M. A. Gajda and H. Ahmed, "Applications of thermal silicon sensors on membranes", *Sensors and Actuators A*, vol. 49, pp. 1-9, 1995.
- [3] 이형주, 김진섭, 김여환, 이정희, 최용문, 박세일, "유전체($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) 멤브레인 위에 제작된 크로멜-알루멜 열전 유량센서", *한국센서학회지*, 제12권, 제3호, pp. 1-9, 2003.
- [4] 정귀상, 김미목, 남태철, "SOI 멤브레인과 트랜치 구조상에 제작된 발열저항체형 마이크로 유량센서의 특성", *한국전기전자재료학회지*, 제14권, 제8호, pp. 658-662, 2001.
- [5] E. Yoon and K. D. Wise, "An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39, no. 6, Jun. 1992.
- [6] A. Glaninger, A. Jachimovicz, F. Kohl, R. Chabircovsky, and G. Urban, "Wide range semiconductor flow sensors", *Sensors and Actuators A*, vol. 85, pp. 139-146, 2000.
- [7] N. T. Nguyen, "Micromachined flow sensors-a review", *Flow Meas. Instrum.*, vol. 8, no. 1, pp. 7-16, 1997.
- [8] 최우창, 최혁환, 권태하, 이명교, "가스센서용 마이크로 히터의 발열특성", *한국센서학회지*, 제7권, 제5호, pp. 356-363, 1998.
- [9] G. Kaltsas and A. G. Nassiopoulou, "Novel C-MOS compatible monolithic silicon gas flow sensor with porous silicon thermal isolation", *Sensors and Actu-*

ators A, vol. 76, pp. 133-138, 1999.

[10] B. W. van Oudheusden, "Silicon thermal flow sensors", *Sensors and Actuators A*, vol. 30, pp. 5-26, 1992.

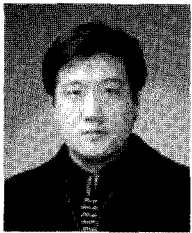
[11] T. S. J. Lammerink, N. R. Tas, M. Elwenspoek, and J. H. J. Fluitman, "Micro-liquid flow sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 37-38, pp. 45-50, 1993.

[12] 김명규, 박동수, 김창원, 김진섭, 이정희, 이종현, 손병기, "스트레스균형이 이루어진 $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ 유전체 멤베레인의 제작", *한국센서학회지*, 제4권,

제3호, pp. 51-59, 1995.

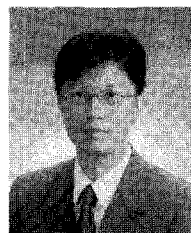
[13] 이영화, 권성원, 김국진, 박세일, 임영언, "Evanohm R 합금 히터를 사용한 크로멜-콘스탄탄 다중접합 열전변환기의 제작 및 특성", *한국센서학회지*, 제13권, 제1호, pp. 35-40, 2004.

[14] 안영배, 김진섭, 김명규, 이종현, 이정희, "스트레스균형이 이루어진 멤베레인 및 박막 열전대를 응용한 유체센서", *한국센서학회지*, 제5권, 제6호, pp. 51-59, 1996.



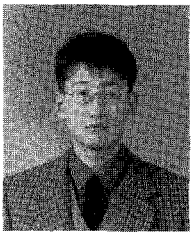
이영화

- 1971년 1월 6일생
- 1997년 2월 충남대학교 재료공학과 졸업(공학사)
- 1999년 2월 충남대학교 대학원 재료공학과 졸업(공학석사)
- 2000년 3월 ~ 현재 동 대학원 박사과정 재학중
- 주관심분야 : MEMS, 열전변환기, 유량센서 등



노성철

- 1964년 2월 12일생
- 1991년 2월 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사)
- 1993년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사)
- 현재 한국기계연구원 열유체 공정 연구부 근무
- 주관심분야 : 미소유량 측정/가시화, 가시화를 통한 열전달 및 유동구조 파악 등



나필선

- 1971년 5월 5일생
- 1997년 8월 조선대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사)
- 1999년 8월 조선대학교 대학원 정밀기계공학과 졸업(공학석사)
- 2001년 2월 ~ 현재 충남대학교 대학원 재료공학과 박사과정 재학중
- 주관심분야 : NEMS/MEMS 등

김국진

- 『센서학회지 제11권 제3호』 논문 2002-11-3-16, p.169 참조
- 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무

이광철

- 1968년 1월 30일생
- 1990년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학사)
- 1992년 8월 포항공과대학교 물리학과 졸업(이학석사)
- 2003년 8월 포항공과대학교 기계공학과 졸업(이학박사)
- 2004년 ~ 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무
- 주관심분야 : MEMS, HAR-MEMS 등

최용문

- 『센서학회지 제12권 제3호』 논문 2003-12-3-01, p.9 참조
- 현재 한국표준과학연구원 물리표준부 근무

박 세 일

- 『센서학회지 제7권 제3호』 논문 98-7-3-01, p.162 참조
- 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 근무

임 영 언

- 1954년 4월 2일생
- 1977년 2월 울산대학교 재료공학과 졸업(공학사)
- 1979년 2월 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사)
- 1988년 12월 Purdue University(Indiana, USA) 대학원 재료공학과 졸업(공학박사)
- 현재 충남대학교 신소재공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체재료, 자성반도체 등