

논문 99-8-5-6

미소 빔 구조를 가진 압저항형 유체센서의 제작 및 특성

박창현*, 강성규*, 류인식**, 심준환***, 이종현*

Fabrication and Characteristics of Piezoresistive Flow Sensor
with Microbeam StructuresChang-Hyun Park*, Sung-Gyu Kang*, In-Sik Yu**,
Jun-Hwan Sim***, Jong-Hyun Lee*

요약

(100), n/n'/n 3층 실리콘 웨이퍼를 이용하여 4가지 형태의 미소 빔 구조를 가지는 압저항형 유체센서를 제작하고, 그 특성을 조사하였다. Boron 확산을 통하여 압저항을 형성하였으며 형성된 압저항의 저항 값은 1 k Ω 정도였다. 다공질 실리콘 마이크로머시닝을 이용하여 3차원의 실리콘 미소 빔 구조체를 제작하였으며, 실리콘과 금속의 열팽창계수 차이를 이용하여 빔을 위로 휘게 하여 원하는 형상으로 제조하였다. 제조된 센서의 출력 특성은 half-bridge를 구성하여 조사하였다. 같은 유속에서는 빔의 길이에 비례하여 출력 전압이 증가함을 보였고, 반면에 빔의 길이가 짧을수록 측정 가능 구간이 넓게 나타났다. 제조된 센서의 출력전압은 유량의 3.2승에 비례하여 증가하였으며, 이는 유속에 따른 빔이 받는 응력이 비선형 특성을 나타내기 때문이다.

Abstract

Piezoresistive flow sensors with four different types of microbeam structures were fabricated using (100), n/n'/n three-layer silicon wafer and their characteristics were investigated. Piezoresistors were formed through boron diffusion and its values were about 1 k Ω . Three-dimensional silicon microbeams were constructed by porous silicon micromachining and curled microbeams were fabricated by the difference in the thermal expansion coefficient between silicon and metal. The output response of the fabricated sensor was evaluated through half-bridge. The output voltage increased with increasing length of microbeam at the same flow velocity, while the detectable measurement range extended with decreasing length of microbeam. The output voltage of the fabricated sensors were increased with quotient of 3.2 of the flow rate since the stress of the beam versus the gas flow showed non-linear characteristics.

1. 서론

* 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic & Electrical Eng., Kyungpook Nat'l University)

** 경동정보대학 전자계산과 (Dept. of Computer Science, Kyungdong College of Techno Information)

*** 한국해양대학교 전자통신공학과 (Dept. of Electronics & Communication Eng., Korea Maritime University)

<접수일자 : 1999년 8월 9일>

기체나 액체의 유량 또는 유속을 측정하는 유체센서는 기상관측, 의료진단, 환경분야 뿐만 아니라 자동차 엔진, 반도체 공정설비 등의 산업분야에 크게 활용되고 있으며, 측정 방법 및 응용분야에 따라 다양한 종류가 있다^[1].

반도체를 이용한 유체센서는 기존의 유체센서에 비해 소형 경량화가 가능하고, 기체나 액체의 흐름 속에 설치하

간편한 장점을 가지고 있기 때문에 최근 많은 연구가 되고 있다^[2-4]. 반도체형 유체센서는 주로 열선(hot wire) 유속계의 원리^[5], 즉 센서의 발열부에서 유체로의 열전달 원리가 이용된다^[6]. 따라서, 센서의 감도를 증가시키기 위해서는 발열부와 열감지부사이의 열적차단(thermal isolation)이 매우 중요하다. 발열부의 열적차단이 우수하지 못하여 낮은 센서의 감도 및 높은 소비전력의 문제가 있다. 또한, 긴 열시상수(thermal time constant), 센서 패키지로의 많은 열손실, 그리고 센서칩 전체가 가열되기 때문에, 유속에 대한 응답시간이 느리고, 유체 온도측정용 센서와 유체선서를 한 칩상에 결합하기 어려워 특별한 실장기술이 필요한 단점이 있다^[7-9].

최근에 열선 유속계의 원리를 사용한 유체센서의 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로서, 압저항형 캔틸레버 패들(paddle)을 이용한 유체센서가 제안되었다^[10]. 이의 구조는 한 개의 패들을 지지하는 두 개의 캔틸레버로 이루어져 있으며, 유체의 흐름을 감지하기 위한 네 개의 압저항이 캔틸레버의 끝에 형성되어 있다. 따라서 열선 유속계와 같이 발열부가 없기 때문에 열에 대한 문제점이 전혀 없으며, 또한 유체의 흐름에 따라 기계적인 캔틸레버 패들의 변형으로 인한 압저항값의 변화를 이용하기 때문에 신호처리 및 센서 패키지가 간단하게 된다는 장점이 있다. 그러나, 캔틸레버 패들 구조는 유체의 흐름을 측정하기 위하여 벌크 마이크로머시닝 공정을 이용하여 웨이퍼의 상하가 관통되도록 제조되어 있기 때문에 고온(60~120°C)에서 장시간의 식각, 양면 마스크 작업에 의한 정합오차, 미세구조의 방향 및 기판의 결정면의 제한으로 인한 미세구조의 소형화에 어려움이 있다^[11].

본 논문에서는 양극반응을 이용한 다공질 실리콘 마이크로머시닝 기술^[12] 이용하여 실리콘 캔틸레버를 형성한 후, 형성된 캔틸레버 위에 증착된 금속과 실리콘의 열팽창 계수의 차이^[13]를 이용하여 원하는 높이까지 휘게 하여 미소 빔 구조를 가진 압저항형 유체센서를 제안하였다. 제안된 센서의 제조공정에서 양극반응을 이용한 다공질 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하기 때문에 유체의 흐름에 의한 기계적 변이를 가져오는 미소 빔의 기하학적 형태를 자유롭게 바꿀 수가 있어 응용 분야에 적합한 감도를 갖는 유체센서를 제조할 수 있는 장점이 있다.

II. 실험 및 측정

1. 압저항형 유체센서의 설계

그림 1은 설계된 미소 빔 구조를 나타낸 것이다. 빔 구조에 따른 유속에 대한 센서의 출력 특성을 알아보기 위하여 4가지 형태로 빔을 설계하였다. 이때, 센서의 감지소자는 빔 끝에 압저항으로 형성하였다. 또한, 미소 빔 아래 부분은 감도를 크게 하기 위하여 잘록하게 설계하여 유속에 대한 스트레스가 집중되도록 하였다. 설계된 빔은 폭이 155 μm , 두께는 8 μm 로 모두 동일하다. 빔의 길이는 type 1의 경우 1,050 μm 으로 4개의 빔이 모두 같으며, type 2의 경우 전장이 1,255 μm 이고 날개 판(paddle)은 720 \times 285 μm^2 이다. Type 3의 경우는 빔의 길이는 왼쪽 가장 큰 것부터 차례로 1,555 μm , 1,400 μm , 1,250 μm , 1,050 μm 이다. Type 4의 경우 전장이 1,555 μm 이고 날개 판은 720 \times 285 μm^2 이다. 그리고 압저항이 형성된 잘록한 빔의 크기는 모두 폭이 95 μm , 길이는 145 μm 이다. 다공질 실리콘 마이크로머시닝 공정에서 양극반응을 원활하게 하기 위하여 Type 2와 type 4의 날개 판 부분에 직경 30 μm 의 홀을 각각 14개 씩 뚫었다.

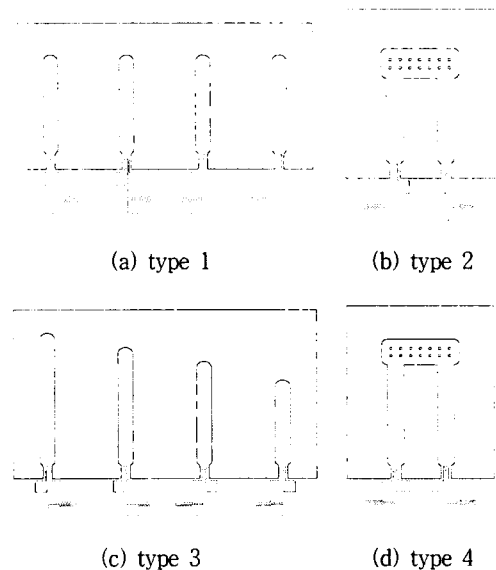


그림 1. 4가지 형태의 빔 구조

Fig. 1. Beam structures with four different types.

2. 압저항형 유체센서의 제조

압저항형 미소 빔 유체센서의 제조 공정은 크게 $n^+/n^-/n$ 시편 형성, 압저항 형성, 미세구조 형성, 금속화 및 열처리 공정으로 되어 있다. 먼저 5인치 (100), n 형

실리콘 웨이퍼를 가지고 그림 2(a)와 같이 n형 실리콘 에피층의 두께가 8 μm 이고 n' 층의 두께는 15 μm 인 n/n'/n의 3층 구조 위에 1,500 Å 두께의 Si_3N_4 를 성장시켰다. 그리고 양극 반응시 접촉저항을 줄이기 위하여 뒷면은 phosphorus를 확산 시켜 n'로 만들었다. 다음으로 압저항을 형성하기 위하여 사진식각법으로 압저항의 패턴을 정의 한 후, RIE(reactive ion etching)를 이용하여 Si_3N_4 를 식각하였다. 불순물 주입을 위하여 Boron 용액을 spin coating하여 120 $^{\circ}\text{C}$ 에서 pre-baking을 15분간 수행한 후, 1,050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 20분간 pre-deposition하였다(그림 2 (b)). 그림 2(c)와 같이 사진식각법으로 빔을 정의 한 후, RIE를 이용하여 Si_3N_4 와 에피층을 각각 식각하였다. 이때 사용된 RIE 공정 조건은 표 1과 같다. 다음으로 양극반응시 뒷면 전극을 형성하기 위하여 Al을 thermal evaporator를 사용하여 증착한 후, 그림 2(d)와 같이 20% HF용액에서 0.25 V, 20분간 양극반응하여 n' 층에 선택적으로 다공질 실리콘을 형성하였다. 그리고 다공질 실리콘은 5% NaOH 수용액에서 식각하여 그림 2(e)와 같이 빔을 형성하였다. 다음으로 에피층 위에 남아있는 Si_3N_4 를 고농도 48% HF용액에서 제거한 후, 1,100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 20분간 습식 산화과정을 수행하였다. 이 과정은 두 가지 목적을 가지는데, 첫째는 압저항부분을 전기적으로 절연시키고 둘째는 drive-in 과정으로 적절한 압저항 값을 얻기 위함이다. 제작된 압저항의 sheet resistance는 55 Ω/\square 이며, 저항값은 1 k Ω 정도였다. 다음으로 접촉창을 열고, Al을 evaporator를 이용하여 증착 시킨 후, 사진식각법과 Al 에칭공정으로 패턴을 형성하였다. 최종적으로 450 $^{\circ}\text{C}$, 30분간 열처리 공정을 통하여 빔을 bending 시켜 소자를 완성하였다(그림 2(f)).

표 1. RIE 식각 조건

Table 1. RIE etching condition.

종류 반응 조건	Si_3N_4	Si
초기 진공도	20 mTorr	20 mTorr
반응 가스	NH_4F 15 sccm	SF_6 15 sccm Ar 70 sccm
반응 시간	4분	12분
RF Power	100 W	50 W

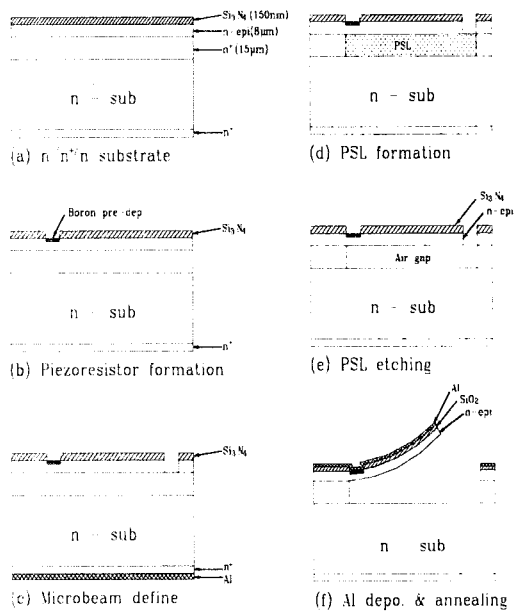


그림 2. 압저항형 유체센서의 제조 공정

Fig. 2. The fabrication process of the piezo-resistive flow sensor.



그림 3. 특성측정을 위한 유체센서의 장착도

Fig. 3. Experimental set-up for characterizing the flow sensor.

3. 압저항형 유체센서의 특성측정

그림 3은 특성측정을 위한 센서 장착도이다. 제조된 센서는 자체 제작된 예폭시 보오드 위에 장착되어 와이어 본딩으로 신호선을 연결하였다. 이 보오드는 유체의 통로인 내경 5 mm인 관에 그림 3과 같이 홈을 내어 장착된다. 이때 측정에 사용된 유체는 질소 가스였다. 센서가 위치한 부분의 실제 유로 단면적은 0.13 cm^2 이다. 그림 3과 같이 유체가 관을 통하여 흐를 때 마이크로빔이 응력을 받아서 빔 끝에 형성된 압저항의 변화가 일어난다. 이 변화를 그림 4와 같이 2개의 빔을

한 조로 하여 2개의 압저항과 2개의 고정저항으로 이루어진 half-bridge를 구성하여 센서의 출력전압을 얻는다. 이때, 그림 5와 같이 센서의 브리지 출력을 차동 증폭기를 이용하여 1,000배 증폭하였고, 2쌍의 브리지를 합산 회로를 통하여 센서의 최종 출력을 얻었다.

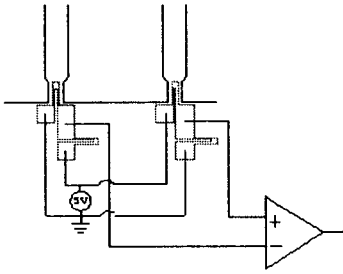


그림 4. 브리지 회로 구성도
Fig. 4. Bridge circuit configuration.

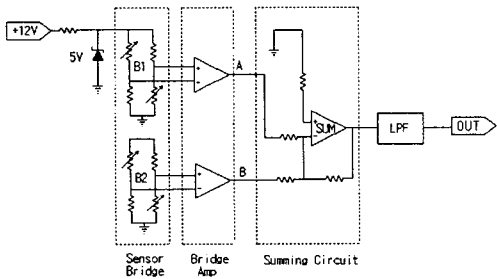


그림 5. 출력 측정회로
Fig. 5. Output measuring circuit.

III. 결과 및 특성

1. 제조된 소자

그림 6은 양극 반응을 이용한 다공질 실리콘 마이크로머시닝 공정으로 제작된 빔 위에 증착된 Al과 실리콘의 열팽창 계수 차이를 이용하여 빔을 원하는 모양으로 굽혀 제작한 완성된 센서의 SEM 사진이다. 두께가 8 μm 인 에피층은 그대로 남아 빔을 이루고 있으며, 15 μm 두께의 n⁺층만이 선택적으로 양극반응 된 후 식각되어 미세구조가 정확히 형성되었음을 알 수 있다. 또한, 제조된 마이크로 빔을 450 $^{\circ}\text{C}$, 30분간 열처리 공정을 했을 때, 빔 길이 1,050 μm 인 type 1의 경우, bending된 높이는 350 μm 였고, 참고문헌 [14]로부터 계산된 곡률반경은 800 μm 로 나타났다. 여기서 빔의 길이와 열처리조건(온도, 시간)에 따라 bending된 빔의

높이를 조절할 수 있기 때문에^[14] 유체센서의 측정범위와 출력전압을 원하는 정도로 조정할 수 있다.

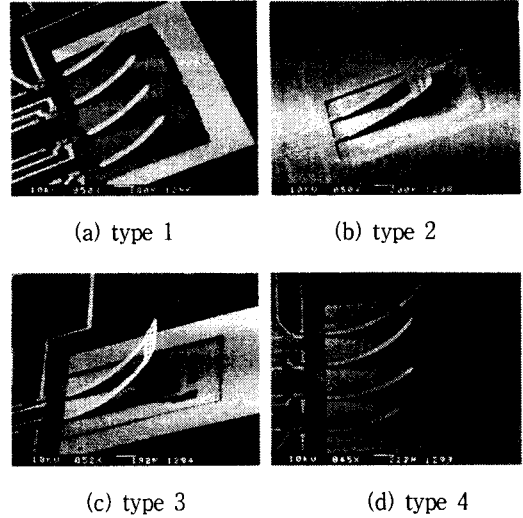


그림 6. 제작된 유체센서의 SEM 사진
Fig. 6. SEM photographs of the fabricated flow sensors.

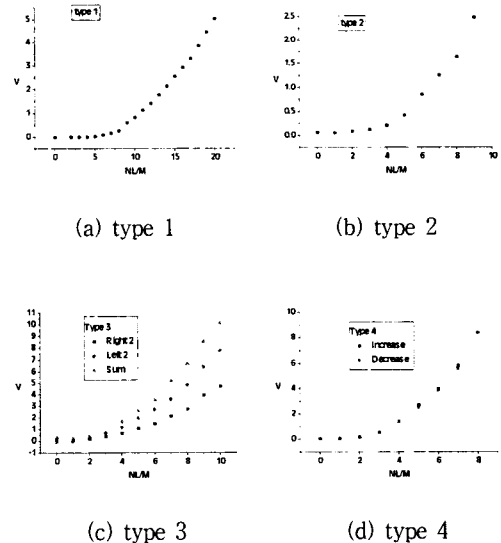


그림 7. 제조된 센서의 유량에 따른 출력 특성
Fig. 7. Output characteristics of the fabricated sensors according to the flow rate.

2. 출력 특성

그림 7은 각각 4가지 형태의 센서에 대한 출력 특성을 나타낸 것이다. Type 1의 경우 측정 가능 구간은 4

~ 20 NL/M(normal litter per minute)이었다. 이는 유량을 유속으로 환산했을 경우 5.1 ~ 25.6 cm/sec에 해당한다. Type 1을 제외한 다른 형태의 센서, 즉 type 2 ~ type 4는 측정 가능 구간이 2 ~ 10 NL/M으로 나타났다. 측정 구간 이상의 유속에 대해서는 빔의 떨림 현상이 나타났다. 여기서 측정 가능 구간의 길이는 type 1과 type 2를 비교해 보면 빔의 길이가 짧을수록 넓게 나타남을 알 수 있다. 또한, Type 2와 type 4의 출력을 비교했을 경우 빔의 길이가 길수록 출력이 증가함을 알 수 있었다. 그림 7(c)는 type 3의 출력 특성을 나타낸 것이다. Right 2는 4개의 빔 중 길이가 짧은 길이가 1,250 μm 및 1,050 μm 인 두 빔을 이용하여 half-bridge를 구성하여 얻은 출력 값이고, Left 2는 길이가 1,555 μm 및 1,400 μm 인 두 빔을 이용하여 얻은 출력 값이며, Sum은 두 출력 값을 합산회로를 이용하여 합산하여 얻은 출력 값이다. 여기서도 빔의 길이가 길수록 출력전압이 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 7(d)는 Type 4의 출력 특성을 나타낸 것으로서, increase에 대한 측정값은 유량을 증가시키면서 측정 한 값이다. 두 값을 비교해 보면 이력이 거의 없이 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서, type 4와 같은 패들이 있는 구조에서는 양방향으로 유체의 흐름을 모두 측정할 수 있음을 알 수 있다. 그림과 같이 4가지 형태의 센서에 대한 출력특성은 모두 비선형 특성을 나타냄을 알 수 있다. 이 출력곡선을 polynomial fitting으로 관계식을 구해보면 모두 $V = a \cdot X^{3.2}$ 식을 따른다. 여기서 V는 출력전압, a는 상수, 그리고 X는 유량을 나타낸다. 따라서 지수관계의 출력을 선형출력으로 만들어주는 IC칩을 사용하여 출력회로를 구성하면 유체센서로 쉽게 적용될 것으로 기대된다.

그림 8은 type 3에서 빔 길이가 각각 1,555 μm , 1,400 μm 및 1050 μm 인 3개의 빔을 독립적인 브리지로 만들어서 출력 특성을 나타낸 것이다. 측정시 유체의 흐름을 양방향으로 모두 흘려서 출력응답을 얻었다. 그림 8에서 a, b 및 c는 각각 빔 길이 1,555 μm , 1,400 μm 및 1050 μm 을 나타낸다. 그림 7의 결과와 마찬가지로 빔의 길이가 길수록 출력전압은 크게 나타났다. 유체를 역방향으로 흘려주었을 경우, 그림 7(d)와 다르게 3개의 빔 모두에서 출력이 감소함을 볼 수 있다. 이는 빔이 유선형으로 굽어 있어 역 방향으로 유체가 흐름 경우 빔이 유체로부터 응력(stress)을 적게 받기 때문이다. 그러나

그림 7(d)는 구조상 날개 판에서 유체로부터의 응력을 거의 다 받아들이기 때문에 유체의 흐름 방향에 관계 없이 거의 같은 출력값이 나타난 것으로 생각된다.

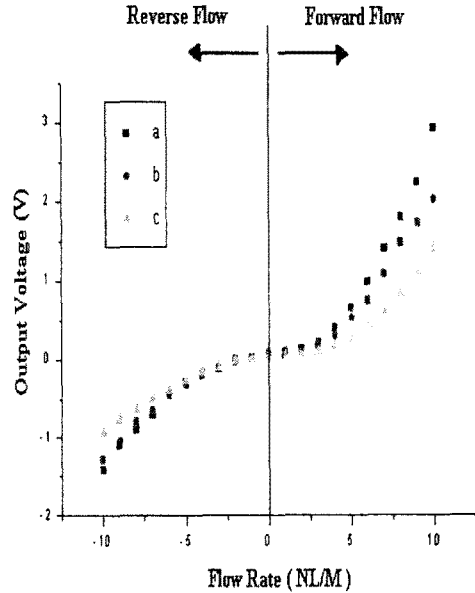


그림 8. 빔 길이에 따른 출력 특성

(a=1,555 μm , b=1,400 μm , c=1,050 μm)

Fig. 8. Output characteristics according to the beam lengths.

(a=1,555 μm , b=1,400 μm , c=1,050 μm)

IV. 결 론

(100), n/n'/n 3층 구조 웨이퍼를 이용하여 미소 빔 구조를 가지는 압저항형 유체센서를 제작하고, 그 특성을 조사하였다. Boron 확산을 통하여 압저항을 형성하였으며, 형성된 압저항의 저항 값은 1 k Ω 정도였다. 양극 반응을 이용한 다공질 실리콘 마이크로머시닝 공정으로 3차원 미소 빔 구조체를 형성하였으며, 이때 실리콘 빔의 두께는 8 μm , 공극(airgap)은 15 μm 로서 n형 에피층 및 n'층의 두께와 정확하게 일치했다. 또한, 제조된 마이크로 빔을 450 $^{\circ}\text{C}$, 30분간 열처리 공정을 통하여 빔을 bending된 모양으로 만들 수 있었다. 제조된 센서의 출력 특성은 두 개의 빔을 하나의 half-bridge로 구성하여 차동 증폭기를 통하여 1,000배 증폭하여 얻었다. 측정된 출력특성은 같은 유속에서 빔의 길이에

비례하여 출력전압이 증가함을 보였고, 반면에 빔의 길이가 짧을수록 측정 가능 구간이 넓어짐을 알 수 있었다. 그리고 패들이 있는 빔 구조에서는 정방향의 유체의 흐름과 역방향의 흐름에서 출력특성이 대칭을 이루기 때문에 양방향으로 측정 가능함을 알 수 있었다. 또한 이 출력곡선을 polynomial fitting으로 관계식을 구해보면 모두 $V = a \cdot X^{3.2}$ 식을 따른다. 따라서 지수 관계의 출력을 선형출력으로 만들어주는 IC칩을 사용하여 출력회로를 구성하면 유체센서로 쉽게 적용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] R. C. Baker, "An introductory guide to flow measurement", Anderson Press, Oxford, 1988.
- [2] H. J. Biao and T. Q. Yi, "Integrated multi-function sensor for flow velocity, temperature and vacuum measurements", *Sensors and Actuators*, vol. 19, pp. 3-11, 1989.
- [3] E. S. Yoon and K. D. Wise, "An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 39, no. 6, pp. 1376-1386, 1992.
- [4] A. K. Henning et al., "Microfluidic MEMS for semiconductor processing", *IEEE Trans. Comp. Package., Manuf. Technol. Part B*, vol. 21, no. 4, pp. 329-337, 1998.
- [5] A. E. Perry, "Hot-wire anemometry", Clarendon Press Oxford, Oxford, 1982.
- [6] A. J. van der Wiel et al., "A liquid velocity sensor based on the hot-wire principle", *Sensors and Actuators A*, vol. 37-38, pp. 693-697, 1993.
- [7] B. W. van Oudheusden, "Silicon thermal flow sensors", *Sensors and Actuators A*, vol. 30, pp. 5-26, 1992.
- [8] N. T. Nguyen and R. Kiehnscherf, "Low-cost silicon sensors for mass flow measurement of liquids and gases", *Sensors and Actuators A*, vol. 49, pp. 17-20, 1995.
- [9] A. F. P. van Putten, M. J. A. M. van Putten and M. H. P. M. van Putten, "Silicon thermal anemometry: developments and applications", *Meas. Sci. Technol.* vol. 7, pp. 1360-1377, 1996.
- [10] Y. Su, A. G. R. Evans and A. Brunnschweiler, "Micromachined silicon cantilever paddles with piezoresistive readout for flow sensing", *J. Micromech. Microeng.* vol. 6, pp. 69-72, 1996.
- [11] K. E. Bean, "Anisotropic etching of silicon," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1185-1193, 1978.
- [12] 초찬섭, 심준환, 이종현, "다공질 실리콘 식각법을 이용한 실리콘 미세가공기술," 전자공학회 논문지, 제 31권, A편, 제 11호, pp. 116-123, 1994.
- [13] Y. D. Kim, J. H. Sim, J. W. Nam and J. H. Lee, "Fabrication of a silicon micro-probe for vertical probe card application", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 7070-7073, 1998.
- [14] 김용대, "수직형 프로브카드 응용을 위한 실리콘 마이크로 프로브의 제조", 경북대학교 석사학위논문, 1997.

著 者 紹 介

박 창 현

『센서학회지 제8권 1호』 논문 99-8-1-06, p.43 참조.
현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

강 성 규

1997년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1999년 경북대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 현재 서울대 반도체 공동연구소 연구원. 주관심 분야 : 반도체공정기술, 반도체 센서

류 인 식

『센서학회지 제4권 1호』 논문 95-4-1-09, p.71 참조.
현재 경동정보대학 전자계산과 조교수.
현재 한국해양대학교 전자통신공학과 전임강사.

심 준 환

『센서학회지 제8권 1호』 논문 99-8-1-06, p.44 참조.

이 종 현

『센서학회지 제1권 1호』 논문 92-21, p.194 참조.
현재 경북대학교전자전기공학부 교수