

정온도형 유속 및 유량 측정센서

朴世光*, 金亨杓**

Flow Velocity and Mass Measurement Sensor of Constant Temperature Type

Se Kwang Park and Hyoung Pyo Kim

요 약

기체와 액체의 유속을 측정하기 위한 반도체 기술을 이용한 소형의 정온도형 유속센서가 제작되었다. 유속 센서는 유속에 영향을 받는 대류 열전달만을 검출하도록 설계되었고, 다른 종류의 열전달과 간섭효과는 기준 센서의 사용으로 상쇄되도록 하였다. 원리는 유동에 의한 센서 양단전류의 변화로 유속을 측정하는 것이다. 이 유속센서의 실험은 수돗물로 가는 관(지름 8mm)을 사용하여 수행되었다. 그 결과 센서의 소비전력과 유속의 제곱근 사이의 관계는 유속이 0-200 cm/sec 범위에서 거의 선형으로 나타났다.

Abstract

A constant temperature type of flow sensor using a solid state micromachining technology was developed for measuring the velocity of gas or liquid. It was designed to detect only the heat convection related to flow velocity. Other heat transfer terms and common mode interferences are canceled by differentiating both reference and exposed flow sensor. It employs the principle that the change of current through the sensing element can be used to measure the flow velocity. An experimental study of the behavior on this flow sensor was performed in a narrow tube(diameter : 8mm) for city water. The relation between power consumption of the flow sensor and square-root of flow velocity is almost linear in the low velocity range(0-200 cm/sec).

I. 서 론

유속 및 유량 측정은 산업 계측 중에서 중요한 분야 중의 하나이며, 최근에는 에너지 절약의 측면에서도 중요하다. 예를 들면, 자동차 산업에서 유체량의 정확한 계측은 연료의 낭비와 공해를 줄이는 효과를 가져온다. 환경보호적인 면에서 살펴보면 강과 호수로 방출되는 폐수의 조절과 처리는 산업사회에서 큰 문제 중의 하나이다.

표 1. 유속센서의 응용분야와 용도

Table 1. Application and uses of flow sensor

응용분야	용도
공업계측용	송수, 송유관의 유량계측 연료 주입량 측정
일반산업용	상하수도 유량계측 강물의 유량측정
기상관측용	풍속과 풍량
항공산업용	공기속도 측정
자동차용	흡입 공기량 센서 연료 유량계
토목공사용	빌딩이나 건축물에 작용하는 풍력 측정
생체의학용	호흡, 혈류속도 측정
가전기기용	진공청소기 흡입유속

* 正會員 : 慶北大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

** 慶北大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)
<접수일자 : 1992년 6월 10일>

* 본 연구는 센서기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

그러므로 유속 및 유량을 측정하는 기술 개발이 절실히 요구된다. 표 1은 유속센서의 응용분야와 용도를 나타낸다.

그리고 종래의 대규모의 장치와 많은 주변장치로 구성된 유속 및 유량 측정목적의 기기들은 각각의 특성으로 말미암아 여러 곳에 쓰는데 제약을 받게 되며 또한 비싼 편이다. 근년들어 반도체기술의 급속한 발달에 힘입어 기체와 액체 둘 다 사용할 수 있는 소형의 양질의 센서를 저가적으로 양산할 수 있게 되었다.

반도체기술을 이용한 유속센서를 제작하기 위한 연구가 외국에서는 많이 진행되고 있으며 그 중의 대부분은 열을 검출수단으로 하여 유속을 측정한다.^[4-5] 이것의 원리는 1948년 Louis V. King이 소개한 열선 유속계(hot-wire anemometer)의 원리와 흡사하다.^[5] 열선 유속계는 가열된 금속의 세선(細線)을 유동분포(流動分佈)에 놓고 유동에 의한 냉각작용으로 열선에서 일어나는 전기저항 또는 전류의 변화를 검출하여 유속을 구한다.^[6-7] 이것은 다른 종류의 센서에 비해 감도가 높은 반면 먼지 등에 의해 열선이 절단될 위험성이 높고 또 먼지가 부착함으로써 단시간에 특성이 변화하는 단점을 갖고 있다.

1982년 Johan H. Huijsing 등이 유체가 가열된 칩상을 지날 때 칩의 양단 지점의 온도차를 기초로 하여 BJT(bipolar junction transistor)를 이용한 검출회로를 사용해서 유속을 측정할 수 있는 센서를 발표했다.^[8] 상기한 유속 및 유량 측정기술에는 offset 출력전압 존재, 낮은 감도, 응답의 불안정성, 늦은 응답시간 등의 문제점이 있다. 또한 유속 및 유량 측정센서에서 계속적으로 개선할 점으로, 유체의 온도가 변할 때 그것을 보상할 수 없어서 정확한 측정이 힘들다. 둘째, 유체의 온도가 칩의 온도보다 더 높을 때는 측정할 수 없다. 이는 실용화에 큰 문제점이다. 왜냐하면 공장이나 가정에서 사용되는 유체의 온도는 칩의 온도보다 높은 경우가 많기 때문이다. 셋째, 제조 공정이 복잡하다.

유속센서를 실용화하는데 해결되어야 할 문제점으로는 패키징(packaging) 방법, 액체가 흐르는 배관에서 센서의 리드선 처리와 부식성 유체에 대한 보호막 형성 등이 있다.

본 논문은 반도체 기술을 이용하여 위에서 언급한 문제점들을 보완하여 간단하고 널리 사용 가능한 정

저항형(constant resistance type) 유속센서의 제작과 접속 인터페이스(interface) 회로를 설계하고 판내 유동에서 유속센서의 동작 특성을 실험을 통하여 알아 본다.

II. 정온도형 유속센서의 이론

1. 정온도형 유속센서의 동작 원리

열식 유속센서는 센서에 공급된 전력을 조절 및 측정하는 방법에 따라 정전류형 동작과 정온도형 또는 정저항형 동작으로 구분된다.

정전류형 동작은 유속의 변화에 따라 열선 센서의 저항값이 변하게 되는데 정전류원은 센서에 일정한 직류전류만을 공급하기 때문에 센서의 저항이나 온도의 변화에 비례하는 센서의 양단 전압을 측정함으로써 유속을 구할 수 있다. 정온도형 또는 정저항형 동작은 유속의 변화에 관계없이 센서의 온도가 항상 일정하게 유지된다. 이것은 일반적으로 센서의 가열을 조절하는 회로에서 피이드백 증폭루프를 적용함으로써 구현할 수 있다. 센서의 온도를 일정하게 유지시키는데 필요로 하는 피이드백 전류를 측정함으로써 유속을 구할 수 있다.

그리고 유체의 온도를 측정하기 위하여 기준센서를 사용한다. 센서와 유체 사이의 온도차를 측정함으로써 정확한 유속 측정이 가능하기 때문이다. 여기에는 온도기준 방법(temperature reference method)과 제로 흐름기준 방법(zero-flow reference method)이 있다. 온도기준 방법은 자체 가열을 무시할 수 있는 전력 소모가 매우 작은 기준센서를 사용하므로 유체의 온도를 측정할 수 있다. 측정된 유체온도는 센서와 유체 사이의 온도차를 계산하는데 사용한다. 두번째는 제로 흐름기준 방법으로 측정 및 기준센서가 같은 전력 또는 같은 온도의 동일한 조건에서 동작한다. 그러나 측정센서는 유동에 노출되어 있고, 기준센서는 유속에 의한 센서의 온도변화 영향을 받지 않게 설계되어 있다. 유동이 없을 때에 두 센서는 동일한 출력을 나타내기 때문에 유동이 있을 때에는 이들 센서 조합의 차동출력은 유속의 직접적인 측정 기준이 된다.

2. 정온도형 유속센서의 피이드백 원리

측정센서 R_s 는 주위의 유체 온도보다 높은 일정한

온도, 곧 정온도 동작을 하도록 전기적으로 가열된다. 이것은 그림 1의 피이드백 루프에 의하여 이루어진다. 여기서 센서는 거의 평형상태인 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge)의 한 부분이며 피이드백 증폭기(feedback amplifier)의 출력 전류로부터 가열된다. 센서가 거의 일정한 온도를 갖도록 하는 방법은 다음과 같다. 센서는 유체속도의 증가로 인해 냉각된다. 온도에 따른 측정센서 R_s 의 저항값의 변화는 다음 (1)식과 같다.

$$R_s - R_0 = \alpha(T_s - T_0) \quad (1)$$

여기서 R_0 는 기준온도 T_0 에서 측정센서의 저항이고, α 는 고유저항이 R_0 와 이의 온도계수 β 의 곱이고, T_s 는 측정센서의 온도이다. 일반적으로, 백금과 텅스텐과 같은 유속 센서에 쓰이는 금속에 대한 대표적인 온도계수 β 의 값은 3×10^{-3} 부터 $5 \times 10^{-3} K^{-1}$ 까지이다. NTC(negative temperature coefficient) 서미스터는 높은 온도계수($-30 \times 10^{-3} \sim -50 \times 10^{-3} K^{-1}$) 때문에 열선유속계로서 널리 이용된다. 집적 실리콘 저항은 거의 $2 \times 10^{-3} K^{-1}$ 의 값을 갖으며 알루미늄의 경우는 $4.3 \times 10^{-3} K^{-1}$ 이다.

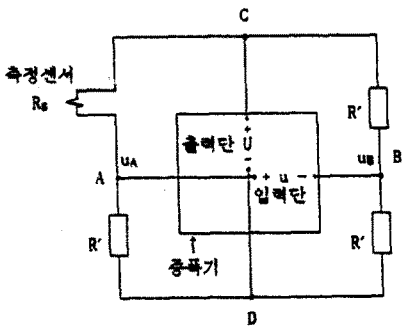


그림 1. 정온도형 열식 유속센서의 피이드백 루프
Fig. 1. Feedback loop of constant temperature type of thermal flow sensor.

측정센서 R_s 의 저항값 변화는 증폭기 입력으로 들어가는 A-B 양단 전압 u 를 변화시킨다. 그러나 브리지는 브리지의 공급전압 C-D 양단 전압 U 를 조정하는 증폭기에 의하여 평형을 되찾아 측정센서 R_s 의 온도를 일정하게 한다. 이 때 출력 끝, C-D 양단 전압의 제곱값 U^2 은 센서 R_s 에서의 소비전력에 정비례한다. 그러므로 C-D 양단의 가열전압 U 를 측정함으로써 유체의 속도를 얻을 수 있다.

그리고 피이드백 루프는 세 부분으로 구성된다.

: (1) 감지소자인 측정센서 R_s , (2) 센서 저항변화에 민감한 휘스톤 브리지 저항 R' , (3) 측정센서 R_s 에 가열 전력을 공급하는 피이드백 증폭기

III. 설계 및 제작

1. 센서 제작

센서의 기판으로는 실리콘 웨이퍼와 glass를 사용하였다. 박막저항으로 사용되는 알루미늄을 실리콘 웨이퍼와의 접착을 좋게 하기 위하여 먼저 산화막(SiO_2)을 성장시켰다. 산화막의 두께는 약 4600\AA 이다. 각각의 기판에 알루미늄 박막을 증착하기 위하여 필라멘트 열증착 방법을 이용한 Thermal Evaporator (Varian 3117)를 사용하였다. Pattern 작업후에 α -step을 사용하여 두께를 측정할 결과 실리콘 웨이퍼의 경우는 약 300\AA 이고 glass의 경우는 약 500\AA 이었다. 그리고 이 증착된 알루미늄 박막을 $480^\circ C$ 질소분위기에서 30분간 annealing 하였다. 센서의 pattern을 만들기 위하여 실리콘 웨이퍼와 glass에 대하여 사진식각 공정을 행하였다.

2. 검출회로

그림 2는 두 개의 센서를 포함한 시스템으로서 측정센서 R_s 는 유동이 존재하는 파이프안에 설치되었으며 기준센서 R_r 은 유체의 유동이 없는 파이프의 기준 챔버(reference chamber)에 위치한다. 그래서 측정센서 R_s 는 유체의 속도에 영향을 받아 유체로의 대류 열손실과 기판으로 전도열손실이 있으며 기준센서 R_r 은 단순히 열전도에 의한 열손실만이 생긴다.

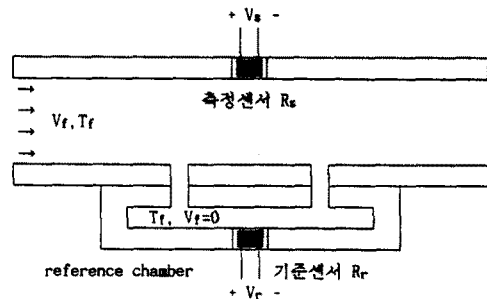


그림 2. 두 센서를 포함한 관의 구조
Fig. 2. Structure of mounted sensors.

그림 3은 유속센서의 검출회로의 구조이다. A 부분은 센서 R_s 를 포함한 부분으로서 앞의 II-2에서 언급된 피이드백 원리가 적용되어 측정센서 R_s 는 항상 거의 일정한 저항값을 유지한다. 반면에 기준센서 R_r 을 포함한 B 부분은 유체의 속도에 상관없이 동작하므로 기준센서 R_r 은 항상 초기치를 갖는다.

측정센서 R_s 와 기준센서 R_r 에서의 에너지 평형방정식은 각각 다음 식(2)와 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} P_s &= V_s^2/R_s = (\alpha + \beta V_f^{1/2})(T_s - T_f) \\ &= \alpha(T_s - T_f) + \beta V_f^{1/2}(T_s - T_f) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 α 와 β 는 상수이며 오른쪽의 첫번째 항은 전도에 의한 열손실을 나타내고 두번째 항은 대류에 의한 열손실을 나타낸다.

$$P_r = V_r^2/R_r = \alpha(T_s - T_f) \quad (3)$$

유속 V_f 가 변화하더라도 센서 R_s 는 기준센서 R_r 과 거의 같은 저항값을 유지하므로 식(2)에서 식(3)를 빼면 식(4)와 같이 된다.

$$(V_s^2 - V_r^2)/R_s = \beta V_f^{1/2}(T_s - T_f) \quad (4)$$

그리고 전압 V_a 와 출력전압 V_o 는 각각 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} V_a &= (V_s^2 - V_r^2)/10 \\ V_o &= V_a^2/10 \end{aligned}$$

결국 유속 V_f 와 출력전압 V_o 와의 관계식은 다음과 같다.

$$V_f = 1000 V_o / [R_s \beta (T_s - T_f)]^2 \quad (5)$$

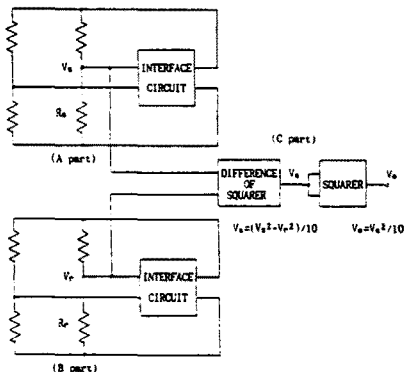


그림 3. 유속센서의 검출회로 구성

Fig. 3. Detecting circuit of the flow sensor.

그리고 센서에서는 열전도와 열대류에 의한 열손실 뿐만 아니라 자연대류, 복사, 그리고 열잡음(thermal noise) 등으로 인한 열손실도 있다. 그러나 그림 3과 같이 회로 구성을 하게 되면 유체의 속도와 관계되는 대류열전달만이 고려되며 기준센서와 차동증폭기를 사용하면 자연대류나 복사 등에 의한 열손실은 서로 상쇄된다.

IV. 실험 및 결과 고찰

1. 실험 방법

열증착 방법에 의하여 알루미늄 박막으로 제작된 센서의 하나의 칩 크기는 $1.3 \times 3 \text{mm}^2$ 이다. 이것을 그림 4와 같이 TO 패키지의 윗 부분을 잘라낸 면을 에폭시로 접착시킨 후 와이어 본딩(wire bonding)하였다. 내경 8mm 유리관내의 유동을 혼란시키지 않도록 하기 위하여 센서의 윗면이 벽면과 평행이 되도록 설치하였다. 또 센서면을 흐르는 유체를 균일한 층류로 간주하기 위하여 센서위치는 배관의 유체 주입구에서 관 반지름의 16배인 64mm보다 훨씬 크게 하였다.^[9]

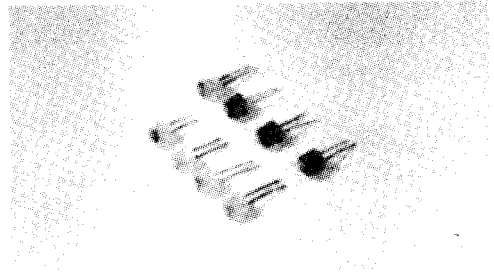


그림 4. 제작된 유속센서의 사진

Fig. 4. Photograph of the flow sensor.

그림 5는 유체가 흐르는 관의 벽에 센서를 설치한 구조의 단면도이다. 그리고 부식성 유체로부터 보호하기 위하여 칩의 윗면에 막을 입혔다. 그림 6은 유속 측정 실험에 사용된 장치를 보여주고 있다. 유속을 얻기 위하여 사진의 왼편에 있는 저울을 사용하여 시간당 흐른 유체의 양을 측정하였다. 실험에서는 유체로 11°C 의 물을 사용하였다.

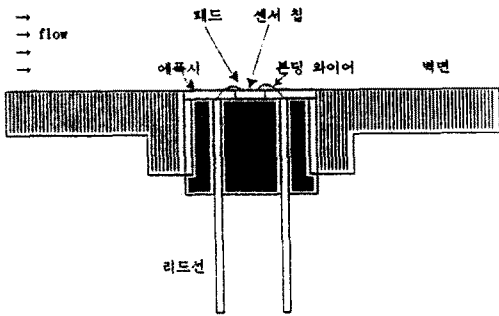
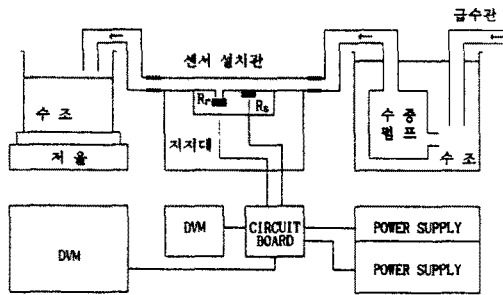
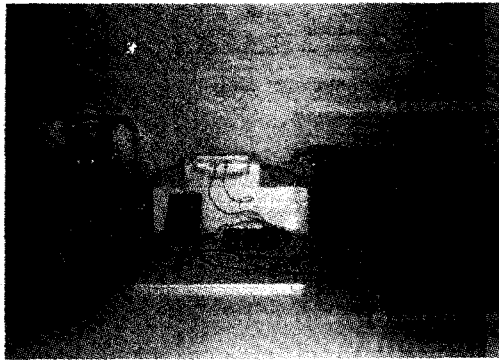


그림 5. 관의 벽에 센서를 설치한 단면도
 Fig. 5. Cross section of the flow sensor mounted on the pipe wall.



(a) 블럭 다이어그램
 (a) Block diagram.



(b) 사진
 (b) Photograph.

그림 6. 유속 측정장치
 Fig. 6. Equipment for flow measurement.

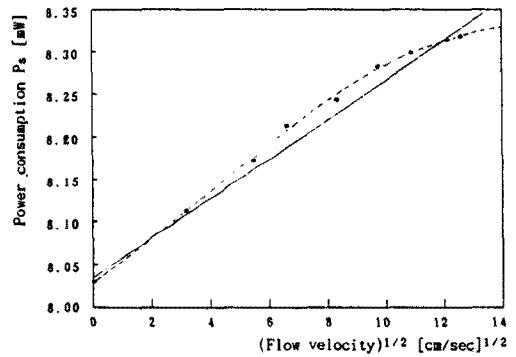
2. 실험 결과

2. 1 감도 측정

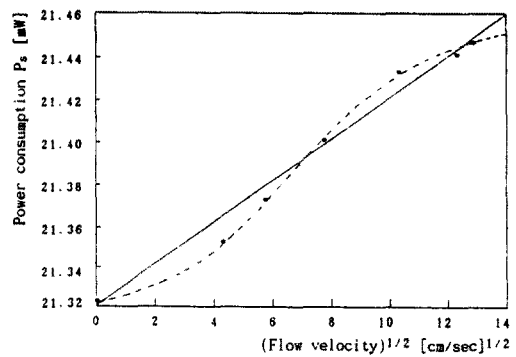
그림 7은 유리와 실리콘을 기판으로 사용한 경우, 센서의 소비전력과 유속의 제곱근 사이의 관계를 나타낸 것이다. 유속 측정범위는 0-200 cm/sec이며 II

장과 III장에서 언급한 것과 같이 전 범위에 걸쳐서 거의 직선적인 관계를 갖는다. 유리를 기판으로 제작한 센서의 저항값은 31.74Ω 이며 실리콘으로 만든 센서는 21.85Ω 이다. 각각의 경우, 회로의 공급전압은 5V, 10V이고 op-Amp 이득은 모두 200이다. 센서 양단전압의 감도는 각각 $0.038mV/[cm/sec]$, $0.011mV/[cm/sec]$ 이다. 유리를 사용한 센서의 감도가 실리콘을 사용한 경우보다 큰 것은 패키지로의 전도 열전달이 적고 유체로의 대류 열전달이 크게 일어나기 때문이다.

종래의 유속계나 유량계로는 미소역에서의 측정이 곤란하지만 이와 같은 반도체 유속센서는 1cm/sec 정도의 초미소역에 대해서도 측정이 가능하다. 그리고 칩과 유체의 온도차를 크게 하면 10 m/sec의 고속에서도 측정할 수 있으며 감도도 향상된다.



(a) 유리 기판을 사용한 유속센서의 경우
 (a) In case of glass as a substrate.



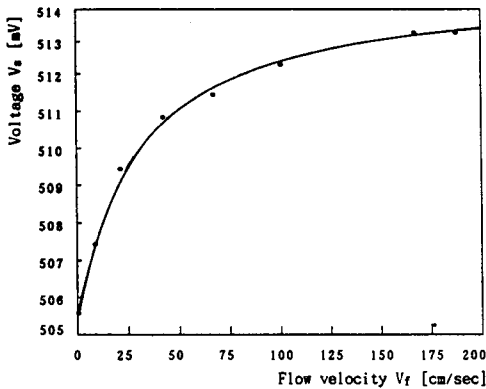
(b) 실리콘 기판을 사용한 경우
 (b) In case of silicon as a substrate.

그림 7. 소비전력 대 유속의 제곱근

Fig. 7. Power consumption versus square root of flow velocity.

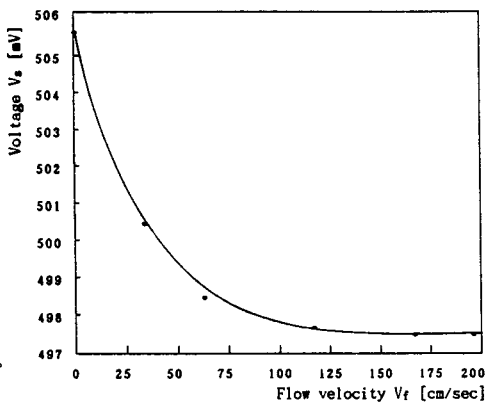
2. 2 op-Amp의 이득에 따른 영향

피이드백 전류를 조절하는 op-Amp의 이득을 200과 50으로 했을 때, 유속의 변화에 대한 센서 양단전압을 비교하였다. 여기에 사용된 센서는 유리를 기판으로 만든 것이다. 그림 8(a)에서는 피이드백 전류가 충분히 공급되어 유속의 증가로 손실된 열을 보상함으로써 센서 양단전압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 그림 8(b)에서는 피이드백 전류가 적어 유체로의 열 손실을 보상하지 못하기 때문에 유속이 증가할수록 센서 양단전압은 지수함수적으로 감소한다.



(a) 이득=200인 경우

(a) Gain=200



(b) 이득=50인 경우

(b) Gain=50

그림 8. 센서의 양단전압 대 유속

Fig. 8. Voltage versus flow velocity.

유속 170 cm/sec일때 센서의 응답시간을 측정한 결과 상승시간(rising time)은 약 20초이고, 여기에 쓰인 센서는 유리를 기판으로 한 것이다.

V. 결 론

반도체 기술을 이용한 정저항형 유속센서를 설계 및 제작하였다. 이 센서의 동작은 가열된 센서의 유동에 의한 냉각작용에 기초한다. 피이드백 회로는 유체와 가열된 센서의 온도차를 일정계 함으로 센서의 저항값을 일정계 한다. 온도차를 일정계 하기 위해 필요한 센서에서의 전력의 변화를 측정하므로 유속을 검출할 수 있다.

검출회로는 열대류에 의한 영향만 고려하여 열전도와 잡음에 의한 영향은 상쇄되도록 설계되었다. 측정실험은 11°C의 물을 사용하여 유속 0-200 cm/sec의 범위에서 행하였으며 센서의 소비전력과 유속의 제곱근의 관계는 선형적이다. 유리와 실리콘을 기판으로 한 센서 양단전압의 감도는 각각 0.038mV/[cm/sec], 0.011mV/[cm/sec]이고, 유리의 경우 응답 상승시간은 약 20초이다. 이 유속센서는 의학적 응용으로 동맥이나 정맥의 혈류(0-50 cm/sec) 측정 등으로 응용될 수 있는 범위가 넓다.

VI. 참고문헌

- [1] B.W. van Oudheusden, et. al., "Integrated Sensor for Non-Invasive Monitoring of Flow in Pipes," *Sensors and Actuators*, vol. 18, pp.259-267, 1989.
- [2] T.Q. Yi and H.J. Biao, "Integrated Multi-Function Sensor for Flow Velocity, Temperature and Vacuum Measurements," *Sensors and Actuators*, vol.19, pp.3-11, 1989.
- [3] A.F.P. van Putten, "A Constant Voltage Constant Current Wheastone Bridge Configuration," *Sensors and Actuators*, vol.13, pp.103-115, 1988.
- [4] B.W. van Oudheusden and J.H. Huijsing, "Integrated Silicon Flow Sensor," *Sensors and Actuators*, vol.16, pp.109-119, 1989.
- [5] L.V. King, "On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid; Determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry," *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, A 214, pp.

373-432, 1914.
 [6] A.E. Perry, *Hot-Wire Anemometry*, Clarendon Press Oxford, Oxford, 1982.
 [7] P. Freymuth, "Feedback Control Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers," *The Review of Scientific Instruments*, vol. 38, no. 5, pp. 677-681, 1967.

[8] J.H. Huijsing and W. Verhoef, "Monolithic Integrated Direction Sensitive Flow Sensor," *IEEE. Electron Devices*, vol. 29, no. 1, pp. 133-136, 1982.
 [9] 황규섭, *센서활용기술*, 기전연구소, 1985.

著 者 紹 介



朴世光

1954년 10월 25일생. 1976년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 미국 Case Western Reserve대 전기전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1988년 동 대학원 졸업(공학박사). 1988~89년 미

국 L.VAD Technology사 Project Leader. 1989년~현재 경북대 공대 전기공학과 조교수. 주관심분야: 반도체 센서와 액츄에이터(압력, 유속/유량, 온도 센서 등) 및 반도체 제조공정.



金亨杓

1967년 2월 5일생. 1992년 경북대 전기공학과 졸업(학사). 1992년~현재 동 대학원 석사과정 재학중. 주관심분야: 반도체 유속/유량 및 온도센서.