

마이크로 유속, 유량센서의 기술동향

박 세 광

(경북대 공대 전기공학과 조교수)

1. 개 요

고도의 시스템 기술이 요구되는 현대 산업사회에서 자동제어 기술의 핵이 되는 센서기술의 발전없는 균형잡힌 산업성장이 이루어질 수 없으며 기술선진국으로의 도약도 기대할 수 없다. 우리나라에서는 다른 분야에 비해 센서기술은 많이 낙후되어 있으며 특히 유속센서에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 그런데, 유속 및 유량 측정은 산업 계측중에서 중요한 분야 중의 하나이며 최근에는 에너지 절약 기술이나 각종 첨단 기술에서의 수요가 급격히 증가하고 있다. 그리고 유속 및 유량의 정확한 측정은 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.

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

종래의 대규모의 장치와 많은 주변장치로 구성된 유속 및 유량 측정목적의 기기들은 각각의 특성으로 말미암아 여러 곳에 쓰는데 제약을 받게 되며 비싼 편이다. 근년들어 반도체기술의 급속한 발달에 힘입어 기체와 액체 둘 다 사용할 수 있는 소형, 양질의 센서를 저가격으로 양산할 수 있게 되었다. 또한 그림 1과 같이 하나의 칩에 신호를 증폭 및 변환하는 신호 처리회로를 센서와 함께 집적시킨 스마트 센서(smart sensor)를 제작할 수 있다. 그러므로 범용성을 가지며 손쉽게 사용할 수 있는 반도체 기술을 이용한 유속센서의 개발이 진행되고 있다.

반도체기술을 이용한 유속센서를 제작하기 위한 연구가 많이 진행되고 있으며 그 중의 대부분은 열을 검출수단으로 하여 유속을 측정한다. 이것의 원

표 1 유속센서의 응용분야와 용도

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



(a) 센서와 신호 처리회로가 분리된 종래의 구조



(b) 센서와 신호 처리회로가 하나의 칩에 결합된 스마트 센서

그림 1. 일반 측정 시스템의 다이어그램

리는 1948년 Louis V.King이 소개한 열선 유속계(hot-wire anemometer)의 원리와 비슷하다. 열선 유속계는 가열된 금속의 세선(細線)을 유동분포(流動分布)에 놓고 유동에 의한 냉각작용으로 열선에서 일어나는 전기저항 또는 전류의 변화를 검출하여 유속을 구한다. 이것은 다른 종류의 센서에 비해 감도가 높은 반면 먼지 등에 의해 열선이 절단될 위험성이 높고 또 먼지가 부착함으로써 단시간에 특성이 변화하는 단점을 갖고 있다.

2. 기계식 유속측정 방법

유속 및 유량의 측정방법에는 여러가지가 있으나 여기서는 관로에서의 유속측정과 기상학에 응용되는 기본적인 유속 및 유량 측정기술에 관하여만 서술한다. 유속측정에 이용되는 방법은 유동에 의한 압력차, 힘, 회전수, 유체 중의 트레이서의 움직임이나 센서의 냉각효과를 이용한 것이 있다. 표 2는 이들 기계식 유속 측정기술의 종류를 대별한 것이다.

표 2 유속 측정기술의 종류

종 류		방법 또는 원리
1. 압력 측정	1) 피토포관	베르누이 식 $p + \frac{1}{2}\rho V_i^2 = p_t$
	2) 오리피스	
2. 힘 측정	로터미터	$F = \frac{C_d \rho V_i^2 A}{2}$
3. 회전 측정	1) 베인유속계	회전수 \propto 유속
	2) 컵 풍속계	
4. 트레이서 방법	1) 도플러	먼지나 초음파의 트레이서의 움직임
	2) 레이저 도플러	

2.1 압력 측정 방법

유동의 속도변화가 있으면 국부적으로 압력의 변화가 있다. 비압축성 이상유체에 대하여 그 관계는 베르누이의 식(Bernoulli equation)에 의해 주어진다.

$$p + \frac{1}{2}\rho V_i^2 = p_t$$

여기서 p 는 정압[Pa], ρ 는 유체 밀도[[kg/m³] 그리고 V_i 는 유속[m/s]이다. 상수 p_t 는 총압(total pressure)이며 유속이 정체점(stagnation point)에서의 압력을 나타낸다.

이 방법을 이용한 대표적인 것으로 피토포관(pitot tube)이 많이 사용된다. 피토포관은 두 종류의 관으로 구성되어 안쪽 관은 총압을 측정하는데 쓰이는 반면에 바깥쪽의 다른 관은 정압을 측정하는데 사용된다.

압력차를 이용한 또 하나의 방법은 차폐물을 삽입하여 유체가 흐르는 관의 단면적을 변화시키는 것이다. 관의 단면적이 감소하면 유속은 증가하고, 그 결과로 생긴 차폐물 양쪽의 압력차를 이용하여 유속을 측정할 수 있다. 이러한 방법을 사용한 장치로는 오리피스(orifice), 노즐(nozzle), 그리고 벤츄리(venturi tube) 등이 있다.

2.2 힘 측정 방법

유동 중에 물체를 두어 유동을 막으면 저항력 F 가

생긴다. 이 힘은 다음 식과 같이 유속의 제곱에 비례한다.

$$F = \frac{C_d \rho V_f^2 A}{2}$$

여기서 A는 물체의 면적이다. C_d 는 드랙계수 또는 저항계수(drag or resistance coefficient)이며 물체의 모양에 따라 결정된다.

유체의 힘을 이용한 기계적 장치는 로터미터(rotameter)가 있으며 투명한 수직 테이퍼 관(tapered tube)과 부자(float)로 구성되었다.

2.3 회전 측정 방법

회전에 의한 측정 방법에는 크게 베인 또는 프로펠러 유속계(vane 또는 propeller anemometer)와 컵 풍속계(cup anemometer)로 나눌 수 있다. 두 종류 모두 회전자(rotor)를 갖고 있으며, 기계적 마찰을 무시하면 회전수는 유속에 정비례한다.

2.4 트레이서(tracer) 방법

트레이서 방법은 유동에 의해 운반되는 먼지입자, 오염물질, 색소나 초음파와 같은 트레이서의 움직임을 검출함으로써 유속을 구하는 방법이다. 그 가운데 초음파 방법으로서 도플러 효과(Doppler effect)를 이용한 레이저 도플러 유속계(Laser Doppler Velocimeter)가 있다.

3. 열식 유속계의 측정원리

열식 유속계는 가열된 센서의 냉각효과를 이용한 것이다. 측정원리에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 유동의 영향으로 센서표면의 온도분포가 바뀌어서 생긴 온도차를 측정하는 방법과 센서에서의 열손실을 측정하는 방법이다. 이것은 반도체 기술을 이용한 열식 유속센서에 많이 응용되어지고 있다. 다음은 열식 방법의 두 가지 원리이다.

3.1 온도차 측정 방법

유속측정에 쓰이는 이 방법은 가열된 센서의 표면

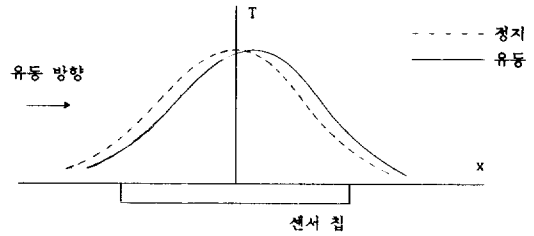


그림 2. 온도분포에 대한 유동의 영향을 보여주는 단면도

에서 유동으로 인한 온도변화를 검출하는 것이다. 가열된 센서로부터 유체로의 열전달은 센서표면의 위쪽으로 균일하게 분포되지 않는다. 그 이유는 유체의 흐름 방향으로 갈수록 열경계층의 두께가 두꺼워져서 바람맞이 쪽에서의 냉각이 그 반대쪽보다 더 심하게 일어나기 때문이다.

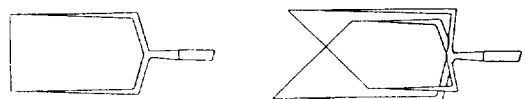
그림 2는 온도분포에 대한 유동의 영향을 나타내며 평판에 삽입한 센서 칩의 단면을 보여준다. 유동이 없을 때는 온도분포가 대칭이지만 유체로의 대류 열전달이 있을 경우는 비대칭이 된다. 센서의 열차단이 완전치 않으면 센서 주위의 벽도 어느 정도 가열된다.

3.2 열손실 측정방법

유속이 증가하게 되면 가열된 센서에서의 열손실은 증가하게 된다. 이 원리를 이용한 것이 그림 3의 열선 유속계이다. 열선은 가는 금속선으로 제작되며 그것에 흐르는 전류에 의해 가열된다. 열선의 온도는 그것의 저항으로 알 수 있다. 열손실과 유속과의 관계는 킹의 방정식(King's equation)으로 주어진다.

$$P/\Delta T = a_1 + a_2 V_f^{1/2} \quad (1)$$

여기서 P는 열선에서의 소비전력[W]이고 ΔT 는



(a) I형 프로브

(b) X형 프로브

그림 3. 열선 유속계

열선과 유체와의 온도차이다. 계수 a_1 과 a_2 는 프로브의 모양과 열선과 유체의 물리적 특성에 따라 결정된다.

열선유속계의 강도상의 결점을 개선하기 위한 열막 유속계(hot-film anemometer)는 유리나 도자기 등의 절연재료를 만들어진 막대 끝에 얇은 금속막을 붙인 것이다.

4. 정온도형(열손실 측정) 유속센서의 동작 원리

4.1 동작 방식의 종류

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

그림 4(a)의 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. 그림 4(b)는 정전류형으로 동작할 때 유속에 따른 출력을 나타낸 것이다. 초기의 열선 유속계는 정전류형이 주로 사용되었다. 정전류형은 구성이 간단하지만 센서온도의 변동때문에 센서 온도감도와 유체의 특성을 고려

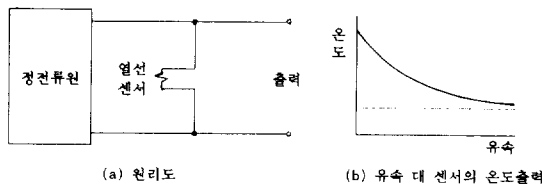


그림 4. 정전류형 유속센서

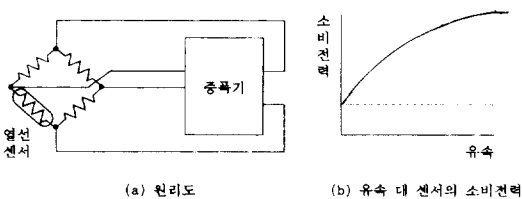


그림 5. 정온도형 유속센서

해야만 하는 단점이 있다. 또한 센서의 응답 속도는 센서의 열용량에 의하여 제한된다.

그림 5(a)의 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. 그림 5(b)는 정온도형으로 동작할 때 유속의 변화에 따른 피이드백 전류에 의한 열선 센서에서의 소비전력이다. 정온도형 동작 원리는 반도체 열식 유속센서에 적용되어 요즘 많이 연구되어지고 있다.

그리고 유체의 온도를 측정하기 위하여 그림 6에서와 같이 기준센서를 사용한다. 센서와 유체 사이의 온도차를 측정함으로써 정확한 유속 측정이 가능하기 때문이다. 여기에는 그림 6(a)와 (b)의 온도기준 방법(temperature reference method)과 제로 흐름 기준 방법(zero-flow reference method)이 있다.

온도기준 방법은 자체 가열을 무시할 수 있는 전력소모가 매우 작은 기준센서를 사용함으로써 유체의 온도를 측정할 수 있다. 측정된 유체온도는 센서와 유체사이의 온도차를 계산하는 데 사용한다. 정확한 측정을 위해서 측정 센서의 열에 의해 영향받지 않는 곳에 설치한다. 즉, 측정 센서의 상류나 충분히 먼 거리에 설치한다.

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 때 두 센서는 동일한 출력을 나타내기 때문에 유동이 있을 때에는 이들 센서 조합의 차동출력은 유속의 직접적인 측정 기준이 된다.

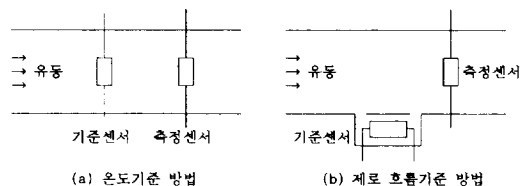


그림 6. 열식 유속센서

4.2 정온도형 유속센서의 피이드백 원리 (Resistor-bridge)

측정센서 R_s 는 주위의 유체 온도보다 높은 일정한 온도, 즉 정온도 동작을 하도록 전기적으로 가열된다. 이것은 그림 7의 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 (2)식과 같다.

$$R_s - R_0 = \alpha(T_s - T_f) \quad (2)$$

여기서 R_0 는 기준온도 T_f 에서 측정센서의 저항이고, α 는 고유저항 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 $5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 까지이다. NTC(Negative Temperature Coefficient) 서어미스터는 높은 온도계수($-30 \times 10^{-3} \sim -50 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) 때문에 열선유속계로서 널리 이용된다. 집적 실리콘 저항은 거의 $2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 의 값을 갖으며 알루미늄의 경우는 $4.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 이다.

측정센서 R_s 의 저항값 변화는 증폭기 입력으로 들어가는 A-B양단 전압 U 를 변화시킨다. 그러나 브리지는 브리지의 공급전압 C-D양단 전압 U 를 조정하는 증폭기에 의하여 평형을 되찾아 측정센서 R_s 의 온도를 일정하게 한다. 이때 출력 즉, C-D양단 전압

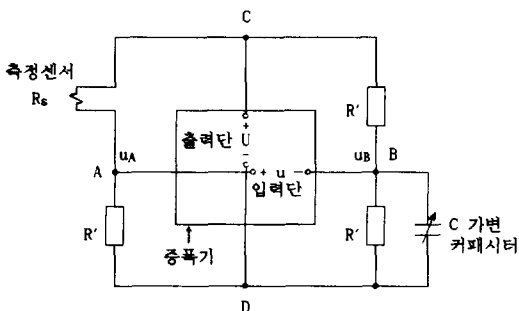


그림 7. 정온도형 열식 유속센서의 피이드백 루프

의 제공값 U^2 은 센서 R_s 에서의 소비전력에 정비례한다. 그러므로 C-D양단의 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

5. 마이크로 유속센서의 종류

마이크로 유속센서는 BJT, CMOS, Thin-film 등으로 heater, 온도 센서와 op-Amp를 제작하여 유속을 측정한다.

5.1 CMOS로 제작한 유속센서[1]

1987년 중국의 Tong Qin-Yi 등이 CCT(constant chip temperature) 원리를 이용한 CMOS 유속센서를 소개하였다. 유체가 칩위를 흐를때 대류에 의해서 칩의 온도가 내려가면 온도센서는 온도변화량을 검출한다. 이 양을 op-Amp가 증폭하여 heater에 입력하면 heater가 가열되어 칩의 온도를 일정하게 유지하게 한다. 이때 heater의 전력소비를 검출하여 유속을 측정하는 원리이다. 칩에는 heater, 온도센서와 op-Amp가 CMOS 공정에 의해서 모두 제조되었

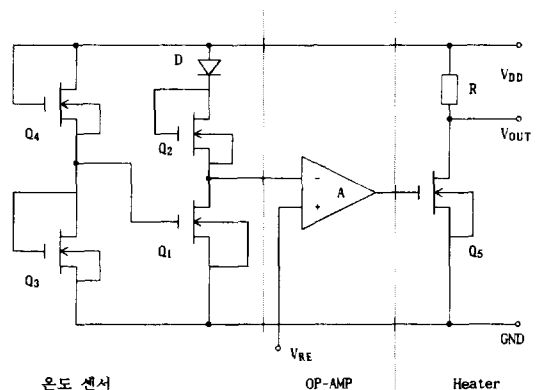


그림 8. CMOS로 제작한 유속센서의 회로

다. 그림 8은 CMOS를 이용하고 CCT원리를 적용하여 유속센서를 설계한 것이다.

칩의 온도는 diode D에 의해서 측정되고 NMOS transistor Q_1 에 의해서 diode D에 일정한 전류가 공급된다. MOS transistor Q_3 와 Q_4 는 거의 온도에 무관하게 Q_1 의 게이트에 일정한 전압을 공급한다. Q_2 는 op-Amp가 적절히 동작하게 전압을 변경한다. Q_5 는 heater로 동작하고 R는 확산 저항으로 전압 V_{OUT} 을 출력하게 한다. 전압 V_{RE} 는 센서의 온도를 정하고 전압 V_{OUT} 은 유속의 제곱근에 비례한다.

5.2 BJT로 제작한 유속센서[2, 3]

1982년에 Johan H. Huijsing 등이 그림 9와 같이 유체가 가열된 칩상을 지날 때, 칩의 양단 지점의 온도차를 기초로 하고 그림 10의 BJT를 이용한 검출회로를 사용하여 유속을 측정하였다. 이것의 기본 원리는 두 지점의 온도차 ΔT_{12} 는 식(3)에서와 같이 유속(u)의 제곱근과 칩 온도와 유체 온도와의 차 ΔT_{∞} 에 비례한다.

$$\Delta T_{12} = C \Delta T_{\infty} u^{1/2} \quad (C\text{는 상수}) \quad (3)$$

여기서 ΔT_{∞} 를 일정하게 유지시킴으로 유속 u에 대한 온도차 ΔT_{12} 를 얻을 수 있다. 검출회로의 출력 전압은 다음 (4)식과 같이 ΔT_{12} 의 함수로 나타내어 짐으로 유속 u_0 를 측정할 수 있다.

$$V_o = 0.08 \Delta T_{12} I_c R_c \quad (4)$$

이 원리를 계속 연구하여 최근에는 유동의 방향을

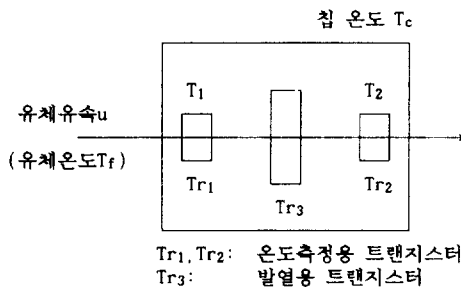


그림 9. Huijsing 등이 개발한 Si 유속센서의 기본 구성

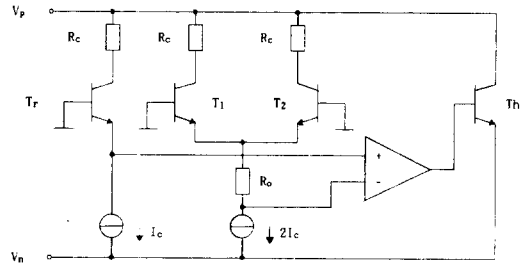


그림 10. Huijsing 등이 개발한 Si 유속센서의 검출 회로

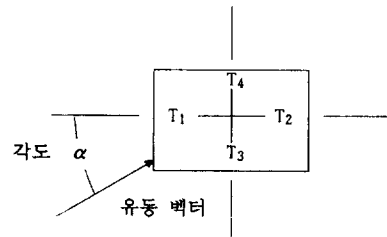


그림 11. 유체의 방향 센서

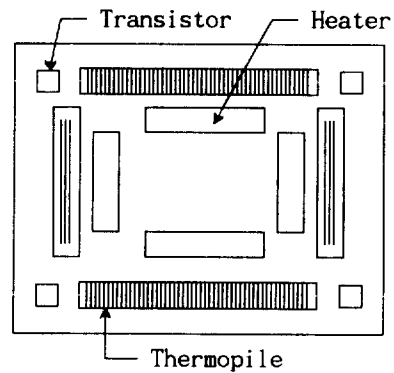


그림 12. 칩의 레이아웃

측정하는 마이크로 유속 센서를 소개하였다.

그림 11에서 칩위의 온도센서 T_1 과 T_2 의 온도차 ΔT_{12} 와 T_3 과 T_4 의 온도차 ΔT_{34} 에 기반해서 유체의 방향을 식(5)와 같이 유도할 수 있다.

그림 12는 센서의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 센서를 가열하는 4개의 확산 저항 heater와 센서의 평균온도를 측정하는 4개의 bipolar transistor와 칩의 온도차이를 측정하는 4개의 thermopile을 칩위에 구성한 대략적인 chip lay-out이다.

$$\alpha = \arctan(\Delta T_{12}/\Delta T_{34}) \quad (5)$$

5.3 박막으로 제작한 유속센서[4, 5, 6]

국내에서는 1990년 제1회 센서기술학술대회에서 저자가 Thin Film을 이용한 유속센서를 발표하였다. 측정원리는 그림 13에서 두 개의 센서를 포함한 시스템으로서 측정센서 R_s 는 유동(流動)이 존재하는 파이프안에 설치되었으며 기준센서 R_r 은 유체의 유동이 없는 파이프의 기준챔버(reference chamber)에 위치한다. 그래서 측정센서 R_s 는 유체의 속도에 영향을 받아 유체로의 대류열손실과 기판으로 전도열손실이 있으며 기준센서 R_r 은 단순히 열전도에 의한 열손실만이 생긴다.

그림 14는 유속센서의 검출회로의 구조이다. A부분은 센서 R_s 를 포함한 부분으로서 앞의 2.2에서 언급된 피드백 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 (6), (7)와 같다.

$$P_s = V_s^2/R_s = (\alpha + \beta V_f^{1/2})(T_s - T_f) \quad (6)$$

$$= \alpha(T_s - T_f) + \beta V_f^{1/2}(T_s - T_f)$$

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

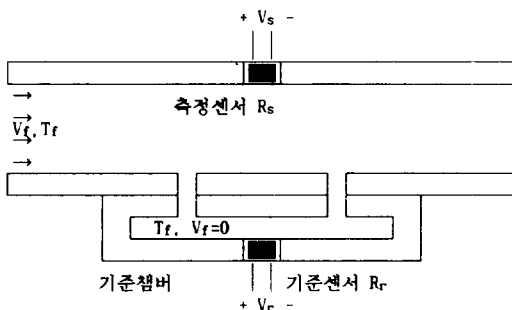


그림 13. 두 센서를 포함한 관 구조

$$P_r = V_r^2/R_r = \alpha(T_s - T_f) \quad (7)$$

유속 V_f 가 변화하더라도 센서 R_s 는 기준센서 R_r 과 거의 같은 저항값을 유지하므로 식 (6)에서 식 (7)를 빼면 식 (8)와 같이 된다.

$$(V_s^2 - V_r^2)/R_s = \beta V_f^{1/2}(T_s - T_f) \quad (8)$$

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

$$V_a = (V_s^2 - V_r^2)/10$$

$$V_o = V_a^2/10$$

결국 유속 V_f 와 출력전압 V_o 와의 관계식은 다음과 같다.

$$V_f = 1000 V_o / [R_s \beta (T_s - T_f)]^2 \quad (9)$$

그리고 센서에서는 열전도와 열대류에 의한 열손실 뿐만 아니라 자연대류, 복사, 그리고 열잡음(thermal noise) 등으로 인한 열손실도 있다. 그러나, 그림 14와 같이 회로 구성을 하게되면 유체의 속도와 관계되는 대류열전달만이 고려되며 기준센서와 차동 증폭기를 사용하면 자연대류나 복사 등에 의한 열손실은 서로 상쇄된다.

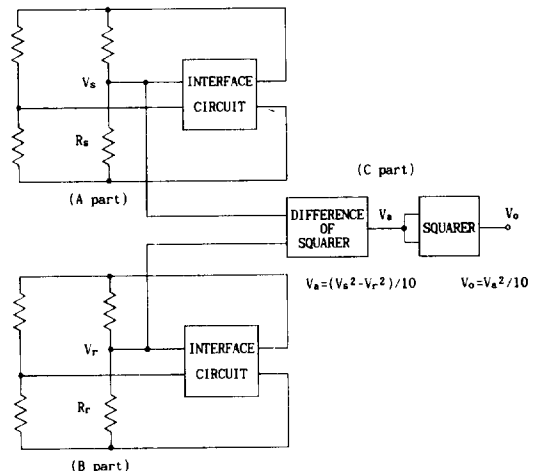


그림 14. 유속센서의 검출회로 구성

6. 마이크로 유속센서의 전망

반도체 기술을 이용한 유속센서가 다른 종류의 유속센서에 비하여 장점으로 들 수 있는 것은 다음과 같다.

- 1) 반도체기술을 이용함으로 양산성이 우수하다.
- 2) 저가격으로 제작가능하다.
- 3) 양질의 센서를 얻을 수 있다.
- 4) 소형이어서 흐름에 영향을 거의 미치지 않는다.
- 5) 어떤 환경에도 설치가 가능하다.
- 6) 기체와 액체 모두 측정할 수 있다.

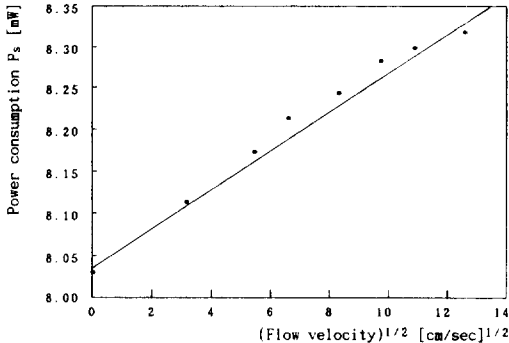
그리고, 기계식과 비교해서 마이크로 유속센서의 주된 문제점은

- 1) 유체의 온도가 변할 때 그것을 보상해야 한다.
- 2) 유속의 측정범위가 좁은 것 등이다.

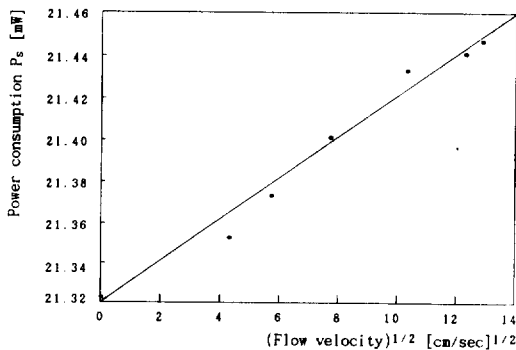
이러한 문제점들은 미세가공기술의 발달과 반도체 기술의 꾸준한 발전으로 국외에서는 실용화를 위한 연구가 진행중이며 국내에서도 자체기술로 기초 연구 및 실험이 완료되어 상용화 단계에 있다. 마이크로 유속센서의 실용화로 유량, 유속이 관계되는 각종 장치의 최적제어가 간단한 방법으로 가능해지기 때문에 큰 파급효과를 기대할 수 있다. 최근 마이크로 유속센서는 미소량의 유속을 측정할 수 있고 반도체 기술로 제작하기 때문에 소형, 대량 생산이 가능하여 유속, 유량 측정 목적의 대규모 장치를 소형의 값싼 칩이 대신할 수 있다. 특히 센서의 크기나 가격, 정밀도에 있어서 공업 계측용 뿐만 아니라 일반 사업용, 가전용으로도 알맞다. 이것을 응용하여 항공산업에서의 공기속도와 방향 측정, 의학용으로 혈액 속도측정, 또한 수도물 사용량에 대한 원격검침 서비스에 사용이 가능하다. 향후 그 사용범위가 보다 넓으리라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Biao, T. Q. Yi, "Integrated Multi-Function Sensor for Flow Velocity, Temperature and Vacuum Measurements", *Sensors and Actuators*, 19, (1989), pp. 3-11.
- [2] J. H. Huijsing, J. P. Schuddent, W. Verhoef, "Monolithic Integrated Direction-Sensitive Flow



(a) 유리 기판을 사용한 유속센서의 경우



(b) 실리콘 기판을 사용한 경우

그림 15. 소비전력 대 유속의 제곱근

그림 15는 유리와 실리콘을 기판으로 사용한 경우, 센서의 소비전력과 유속의 제곱근 사이의 관계를 나타낸 것이다. 유속 측정범위는 0-200cm/sec이며 전 범위에 걸쳐서 거의 직선적인 관계를 갖는다. 유리를 기판으로 제작한 센서의 저항값은 31.74Ω이며 실리콘으로 만든 센서는 21.85Ω이다. 각각의 경우, 회로의 공급전압은 5V, 10V이고 op-Amp 이득은 200이다. 센서 양단전압의 감도는 각각 0.038 mV/[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 미소영역에서의 측정이 곤란하지만 이와 같은 반도체 유속센서는 1cm/sec 정도의 초미소영역에 대해서도 측정이 가능하다. 그리고 칩과 유체의 온도차를 크게 하면 10m/sec의 고속에서도 측정할 수 있으며 감도도 향상된다.

Sensor”, IEEE. Electron Devices, Vol. 29, No. 1, Jan. (1982), pp. 133-136.

[3] B. W. Van Oudeusden, J. H. Huijsing, “Integrated Silicon Flow Sensor”, Sensors and Actuators, 16, (1989), pp. 109-119.

[4] 박 세광, 최 재건, “반도체 기술을 이용한 유속/유량 센서의 개발”, 제1회 센서기술학술대회 논문

집 Vol. 1, No. 1, Nov.(1990), pp. 69-74.

[5] 박 세광, 최재건, “정저항형 마이크로-칩 유속센서”, 제2회 센서기술학술대회 논문집 Vol. 2, No. 1, Nov.(1991), pp. 61-65.

[6] 최 재건, “반도체 기술을 이용한 유속센서의 연구”, 경북대학교 전기공학과 석사학위 논문, (1992)



박세광(朴世光)

1954년 10월 25일생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 Case Western Reserve대 전기전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(공학박). 1988~89년 미국 L.VAD Technology 사 Project Leader. 현재 경북대 공대 전기공학과 조교수.