

반도체형 유속/유량센서의 온도특성

최 재건(崔 再建), 김 형표(金 亨杓), 박 세광(朴 世光)

Temperature Characteristics of Solid State Flow Velocity/Mass Sensor

Jaigun Choi, Hyungpyo Kim and Sekwang Park

요 약

정온도형 반도체 유속/유량센서를 제작하여 유속변화와 온도변화에 대한 특성을 측정하였다. 회로의 파라메타는 유한차분법을 이용한 시뮬레이션으로 구하였다. 유속 실험에서 유속이 0-45cm/sec의 범위에서 감도는 10mW/(cm/sec)이고 응답시간은 2초 이내였다. 유체온도 실험에서 온도 변화율이 0.1°C/min 이하에서는 센서출력은 자동 온도보상되었고, 온도 변화율이 0.2°C/min 일 때는 온도보상시간이 약 2분 소요되었다. 그러나 실제 온도 변화율이 0.2°C/min 이상이 되는 경우가 많지 않기 때문에 개발된 센서는 대부분의 미소유량 측정에 사용될 수 있다.

Abstract

A constant solid state flow velocity/mass sensor has been fabricated and its characteristics were measured according to flow velocity and fluid temperature. Parameters of the sensor circuit were obtained by simulation using finite difference method. Sensitivity was 10mW/(cm/sec) in the range of flow velocity 0-45cm/sec and response time was within two seconds. For the experiment of fluid temperature variation, the sensor output was compensated at the rate of temperature variation 0.1°C/min, however, with the rate of 0.2°C/min it took two minutes to be compensated. Since it is not quite often to have such a rate of temperature variation of 0.2°C/min or more, the developed sensor output can be used for most applications to detect small amount of flow-rate.

I. 서론

전자식 반도체 유속/유량센서는 미세가공 기술과 반도체 기술의 발달에 힘입어 1980년대 초부터 세계적

으로 많은 연구소에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 우수한 논문들을 발표하여 제품화의 가능성을 보여주고 있고 초보적인 제품(MFC류)을 이미 몇몇 선진국에서 시판하고 있는 실정이다. 이러한 전자식 반도체 유속/유량센서는 1982년, J. H. Huijsing 등이 유체가 가열된 칩상을 지날 때, 칩 양단 지점의 온도차를 이용하여 유속을 측정할 수 있는 센서를 개발하여 유속센서의 새로운 방향을 모색, 제시하였다^[1]. 또한 1987년, 중국의 Tong Qin-Yi 등이 CCT(Constant Chip Temperature)원리를 이용한 CMOS 유속측정센서를 소개하였다^[2]. 이것은 칩온도를 일정하게 하기 위해 필요

경북대학교 전기공학과
(Department of Electrical Engineering
Kyungpook National University)

<접수일자 : 1995년 4월 3일>

* 이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의거하여 연구되었음.

로 되는 가열 트랜지스터의 전력 소비 변화를 측정함으로써 가열된 칩상의 유속을 측정하는 것이다. 90년대에 들어와서 M. Esashi는 미세가공기술(micromachining technology)을 이용하여 제작한 유속센서를 연구 발표한 바 있다^[3]. 전자식 유량계로는 마그네틱 유량계와 초음파 유량계가 있다. 마그네틱 유량계(電磁流量計)는 유체의 성질에 영향을 받지 않고 측정 가능하며 고정도이나 고가이고 도전성 유체만 측정이 가능하다. 초음파 유량계는 배관 외부에 부착이 가능해서 취부가 용이하나 저정도이고 소구경(50mm이하)은 측정이 불가능하다. 반면에 반도체를 이용한 전자식 반도체 유속/유량센서는 소형이고, 측정관의 구경에 제약을 받지 않고, 미소유량이 감지 가능하며, 저가이며, 쉽게 전기신호로 변환이 가능하나, 유체의 온도가 변화할 경우 온도보상이 어려운 단점이 있다^[4-6].

본 논문에서는 백금 박막 저항체를 사용하여 열을 발생하고 유체의 흐름으로 인해 소모되는 발열량이 유속의 자승과 비례한다는 원리를 이용한 정온도형 반도체식 유속/유량센서를 연구하였다. 기존의 정온도형 반도체식 유속/유량센서는 유체의 온도가 변화할 경우 저항에서 소모되는 발열량이 변화하여 센서를 오동작시키는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 반도체식 유속/유량센서의 이러한 문제점을 개선하기 위해서 유한차분법을 이용한 시뮬레이션으로 이론적 분석과 회로 개발 및 실험 장비를 설계 제작하였다.

II. 정저항 유속/유량센서의 동작원리

본 논문의 유속/유량센서는 박막 저항이 휘스톤 브릿지의 두 다리에 해당되고 이것이 일정한 저항으로 유지되는 케환회로를 가지는 정저항형(또는 정온도형)이다. 센서의 표면은 유체의 흐름에 노출되어 있고, 센서의 표면과 센서의 나머지 부분 사이에는 열절연 물질로 절연되어 있으며, 센서는 주위의 온도보다 더 높은 온도로 유지하여 일정한 온도 차이를 갖게 가열된다.

유속/유량센서의 시스템은 그림 1과 같이 다섯 개 저항으로 구성된 브릿지 형태이다. 브릿지 상단 전압과 브릿지 중간에서의 전압을 감지하여 박막에서 소모되고 있는 전력을 계산하고, 소모되는 전력을 브릿지 상단으로 피드백하는 신호처리 회로로 크게 구분되어지며, 시스템의 구동회로가 중간에 디지털화되어 있지만

결국은 페루프를 형성하게 되어 있다. 특히 본 논문에서 사용된 구동회로가 디지털화됨으로 인하여 전체적으로 더욱 안정되고 빠른 특성을 보이고 있다.

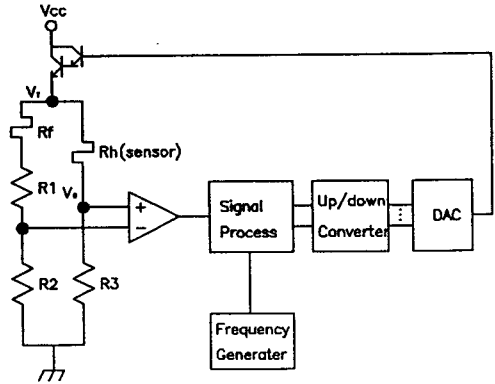


그림 1. 유속/유량센서 개략도

Fig 1. Schematic diagram of flow velocity/mass sensor

여기서 브릿지는 유체의 온도에 따라 저항값이 변화하는 온도보상용 박막저항 R_f 히터로 사용되는 박막저항 R_h 와 온도가 변화하더라도 일정한 저항을 갖는 R_1 , R_2 와 R_3 로 구성된다. R_h 와 R_f 는 각각 히터의 온도 측정 센서와 유체의 온도를 측정하는 센서, R_1 은 유체와 히터와의 온도차이를 원하는 온도로 발생시키기 위한 조정 저항이 된다. R_3 에는 정밀저항을 사용하며, 박막에 흐르는 전류를 전압으로 바꾸어 준다.

신호처리 회로는 브릿지가 항상 평형을 이루도록 브릿지의 중간 부분인 R_2 의 상단과 R_3 의 상단전압의 차가 항상 영이 되도록 브릿지 상단으로 피드백을 걸어준다. 회로가 동작하는 메카니즘을 살펴보면, 전원이 켜진 상태에서 유속이 없는 유동장에 R_h 와 R_f 가 설치되어 있다면, 유체온도와 두 저항이 열평형을 이루기 때문에 R_h 와 R_f 는 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$R_h = R_{h0} (1 + \alpha_h T_h) \quad (1)$$

$$R_f = R_{f0} (1 + \alpha_f T_f) \quad (2)$$

여기서 T_f 는 유체의 온도, T_h 는 가열된 히터의 온도, α_h 와 α_f 는 각각 저항온도계수를 의미하고 R_f 를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 만약 브릿지가 평형이라면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$R_h R_2 = R_3 (R_1 + R_f) \quad (3)$$

여기서 0°C에서의 히터 저항 R_{h0} 와 R_3 , 0°C에서의 유체 온도 측정용 저항 R_0 와 R_2 를 각각 같은 값을 갖게 하면, α_h 와 α_f 는 같으므로 식(4)를 얻을 수 있다.

$$T_h - T_f = \frac{R_1}{R_2 \alpha_f} = \text{const.} \quad (4)$$

즉 전원을 처음 공급하면, 브릿지가 평형을 이루지 않기 때문에 R_2 상단과 R_3 상단 사이에 전압차이가 나게 되고 이 전압차는 센서의 구동회로를 통하여 브릿지 상단에 더 많은 전압을 가하게 된다. 또한, 같은 브릿지 상단 전압에서도 브릿지에서 R_h 박막 쪽의 저항이 다른 쪽보다 약 10배가량 작게 설치되어 있기 때문에 R_h 박막 쪽으로 더 많은 전류가 흐르게 된다. 따라서 R_h 박막에 흐르는 전류는 떨어진 박막의 온도를 올려주고, 박막의 저항은 식(1)과 같이 상승하여 브릿지는 평형을 이룰 것이다. 결국, 박막의 저항은 실온에서의 저항보다 $R_1/R_2 \alpha_f$ 배 높은 저항을 갖게 된다. 이 상태에서 유체가 흐르게 된다면, 주위 유체온도보다 높은 온도의 박막은 많은 대류 열전달로 인하여 저항이 떨어지고 브릿지의 전압차이가 발생하게 된다. 이때 페루프를 구성하고 있는 센서 구동회로에서 이를 감지하여 더 많은 전압을 걸어주게 되어 다시 브릿지 평형을 되찾게 되어 브릿지의 전압차이가 영이 되게 한다. 이때 유속의 제곱근에 비례하는 R_h 박막의 전력을 측정하여 속도와 유량을 측정할 수 있다.

하지만, R_h 박막에 공급되는 전력은 주위 유체온도 (T_f)가 변화하면, 박막으로부터 주위 유체로의 대류 열전달량이 달라지기 때문에 같은 유량에 대해서 출력은 달라지게 된다. 유체온도(T_f) 변화에 따른 출력 변화가 없도록 하기 위해서 유체 온도를 측정하는 R_f 과 고정 저항 R_1 을 이용하여, 박막의 온도(T_h)를 유체온도에 따라 변화시켜 $\Delta T = (T_h - T_f)$ 가 항상 일정하게 한다.

이때, 박막으로부터 전달되는 전체 열전달량에 비해 박막을 통한 전도와 자연 대류 열전달은 비교적 적으므로 무시할 수 있으며, 이 상태에서 열박막(R_h)의 발열량과 대류열전달량이 평형을 이루었다면 식(5)를 얻을 수 있다.

$$P = I^2 R_h = Ah (T_h - T_f) \quad (5)$$

여기서 R_h 박막의 소비전력 P 는 히터와 유체의 온도차이, 박막의 단면적(A) 및 열전달계수(h)에 의해 정해진다. 하지만 히터와 유체의 온도차이, 센서의 단면적 A 가 일정하므로 식(5)에서 R_h 박막의 소비전력 P 는 열전달계수(h)에 의해서만 정해지게 된다. 이때 전류 I 는 브릿지의 정밀저항에 걸리는 전압으로서 식(6)과 같이 주어진다. 또한 히터의 저항값(R_h)은 브릿지 상단의 전압(V_i)과 정저항 상단의 전압(V_o)의 차이 즉, 히터의 양단에 걸리는 전압을 전류 I 로 나누어 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$I = \frac{V_o}{R_3} \quad (6)$$

$$R_h = \frac{(V_i - V_o)}{I} \quad (7)$$

식(5)에서 유체온도 변화에 대한 열전달계수(h)의 변화는 유체속도 변화와 비교하면 작지만 정밀한 측정에서는 무시할 수 없다. 따라서, 식(4)에 의해서만 R_1 의 값을 정하지 않고 유한차분법을 이용한 시뮬레이션에 의해서 출력특성이 좋은 R_1 을 구한다.

III. 열전달 해석 및 시뮬레이션

본 논문에서는 백금 박막 저항체가 일정한 온도를 유지하면서 유체 속에 놓여 있는 모델을 그림 2와 같이 선정했다. 센서는 일정한 온도를 유지하기 위해서 유속의 변화에 대하여 열 발생량을 변화시킨다. 유속에 대한 열 발생량 변화를 전압으로 측정하여 유속을 구하게 된다. 센서의 형상은 사각형의 평면형이다. 선정된 모델에 대하여 유도된 비정상 상태 2차원 직교좌표에 대한 방정식은 열 확산항과 열 생성항을 갖는 일반적인 전달 방정식으로 식(8)로 표현된다^[7].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (8)$$

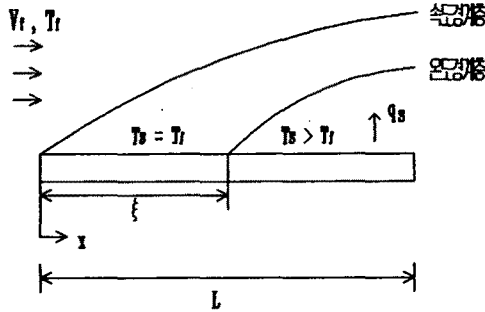
여기서, T : 센서부 온도 (x, y, t 의 함수)

ρ : 센서부 밀도

c : 센서부 비열

k : 센서부 열전도도

S : 단위 체적당 열 발생률이다.



L : 센서부의 전체 길이 T_f : 유체 온도,
 V_f : 유체 속도, T_s : 기관 온도,
 q_s : 열 발생량 ξ : 비가열 부분의 길이

그림 2. 비가열된 부분으로 시작하는 평행 흐름에서의 평판

Fig 2. Flat plate in parallel flow with unheated starting length.

열 생성항 S에는 센서의 열 발생량과 센서의 열 손실인 유체로의 손실량을 포함한다. 유체로의 손실량인 열대류(heat convection)에는 자연대류와 강제대류 두가지가 있다. 자연대류에 의한 대류 열전달 계수(h_n)는 식(9)로 표현된다.

$$h_n = (k/L) \left(0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{[1 + 0.492/Pr^{9/16}]^{4/9}} \right) \quad (9)$$

여기서, $Ra = \frac{g\beta(T_s - T_f)L^3}{\nu\alpha}$: Rayleigh number

Pr : Prandtl number

g : 중력 가속도

β : 체적 열 팽창 계수

ν : 동점성 계수

α : 열확산 계수이다.

강제대류에 의한 대류 열전달 계수(h_f)는 식(10), (11)로 표현되는데 식(10)은 일반적인 경우이며, 식(11)은 특별한 경우로서 그림 2과 같이 가열되는 부분의 앞 부분에 열 절연체가 아니면서 가열되지 않은 부분이 존재할 경우에 적용되는 것으로 유속 센서의 가열 부분과 비가열 부분을 구분할 때 적용된다.

$$h_f = (k/x) 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (10)$$

$$h_f = \frac{(k/x) 0.332 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 - (\xi/x)^{3/4}]^{1/3}} \quad (11)$$

여기서, Re : Reynolds number 이다.

열 발생량은 정온도를 유지하기 위해서 센서로 유입되는 전기적인 전력으로 공급된다. 따라서, 유체의 유동에 의해서 열 손실이 변할 경우 회로에서 공급되는 전력이 변하게 된다. 즉, 이 때의 전력(P)과 센서 저항체(R_h)에 흐르는 전류(I)와의 관계식은 식(12)로 표현된다.

$$P = I^2 R_h \quad (12)$$

시뮬레이션은 식(8)의 2차원 열전달 방정식을 유한 차분법으로 해석하여 전기적인 연속 방정식과 합병하여 동시에 수행한다. 유한차분법중 직접 방법인 3대각-행렬 방법과 반복 계산법인 Gauss-Seidel 방법을 조합한 선순법(Line-by-Line Method, Alternating-Direction Implicit)을 적용한다. 이 방법은 수렴이 빠르고, 간단하며 오차가 작다^[8].

IV. 센서의 설치구조와 회로도

유속/유량센서는 박막 저항체를 포함한 브리지형태로 주어진다. 이때 사용되는 박막 저항체는 저항재료층에서 온도에 대한 선형성 및 온도 계수가 큰 재료로 제작되어야 한다. 또한, 자동차와 같은 열악한 환경에서도 견딜 수 있도록 내구성이 있어야 하며, 빠른 응답속도를 위해 열전도도가 큰 것일수록 좋다. 하지만 열전도도가 큰 재료일수록 저항체의 소비전력이 커지므로 응답속도와 소비전력을 고려하여 적절한 재료를 선택하는 것이 좋다.

이렇게 적절하게 선택된 박막 저항체를 그림 3과 같은 센서 구조로 설치된다. 본 논문에서 히터로 사용된 백금 박막 저항체는 유체의 흐름에서 대류만의 영향을 받도록 유체 흐름에 노출되었고, 가능하면 유동을 방해하지 않게 하기 위하여 단면적이 작은 면을 유동 방향과 수직이 되게 하였다. 온도보상을 위해 사용된 유체 온도 측정용 박막 저항체는 유체의 흐름에 영향

을 받지 않도록 윗 부분을 덮고, 히터의 하부에 설치하였다.

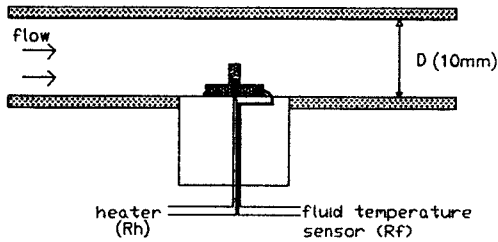


그림 3. 센서의 설치 구조

Fig. 3 Sensor structure

그림 1과 같이 측정 소자는 평형 브릿지에 설치한다. 측정 소자의 소비전력 P 는 King의 방정식에 의하면 유속 V_f 에 대해서 지수 n 에 비례하고 센서의 기하학적인 구조에 따라 n 는 0.5 ~ 0.9의 값을 가진다.

$$P = \frac{V^2}{R_h} = I^2 R_h = (\alpha + \beta(V_f)^n) \Delta T \quad (13)$$

또한 측정소자의 소비전력 P 는 유체와 측정소자의 온도차인 ΔT 에 비례한다. R_h 는 센서의 저항값이며 α , β 는 상수이다.

센서의 출력은 정확한 값을 알고 있고 온도변화에 큰 변화를 보이지 않는 정밀저항(R_3)을 사용하여 그 양단의 전압에 의해 전류를 계산하여 히터의 전력을 계산한다. 본 연구에서는 식(13)에서 $\Delta T = (T_h - T_f)$ 를 카운터 등을 이용하여 디지털화하고 기존의 아날로그 센서 구동회로와는 달리 특정 게인없이 자동으로 필요한 센서 전력을 공급하여 항상 그 값을 일정하게 유지시켜 온도에 무관한 특성을 나타내게 한다. 즉 열 전달계수(h)를 일정하게 유지하여 히터에서 밖으로 전달되는 열을 일정하게 놓으므로써 온도보상을 수행한다. 그림 4는 PCB로 제작한 센서회로이다.

V. 실험 결과

유속에 대한 전압변화는 인터페이스를 통하여 직접 컴퓨터로 입력되게 하였다. II장에서 언급한 것과 같이 R_1 에 따라 센서의 특성을 결정하기 때문에 식(4)와 시뮬레이션 결과에 의해서 R_1 은 20 Ω , 유체는 물을 사용하여 실험하였다.

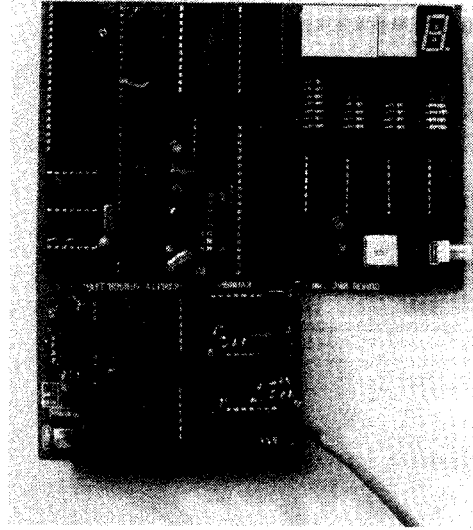


그림 4. 전체 센서회로의 사진

Fig. 4 Photograph of overall sensor circuit

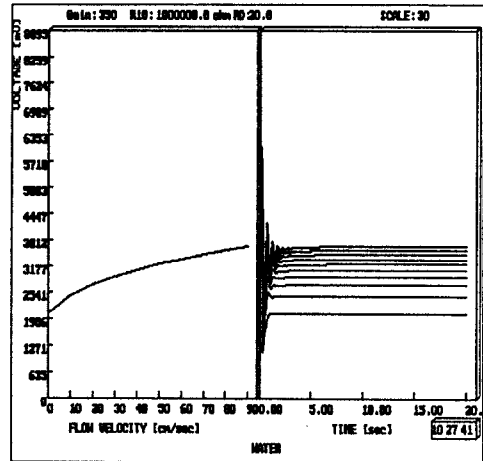


그림 5. 물에 대한 시뮬레이션 결과

(회로정수: 게인 350, $R_1 = 20\Omega$)

Fig. 5 Simulation result for water

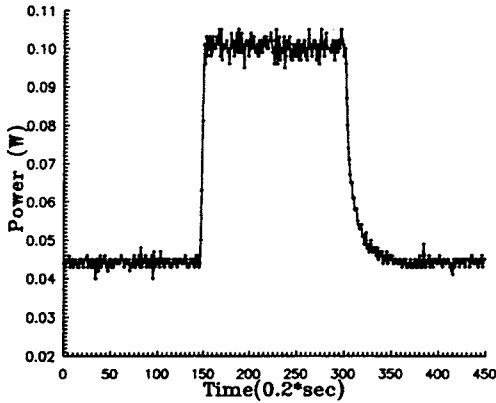
(Gain is 350 and R_1 is 20 Ω .)

1) 시뮬레이션 결과

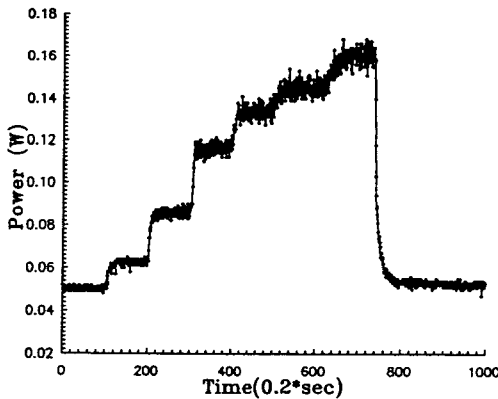
그림 5는 물에 대한 시뮬레이션 결과로서 게인 350, R_1 저항값이 20 Ω 에 대한 결과가 최적인 것으로 나타났다.

2) 응답시간 특성

그림 6은 유체온도가 18.6°C로 일정할 때 유속의 변화에 대한 센서의 소비전력을 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 유속이 10cm/sec의 큰 변화에 대하여 응답속도가 2초임을 보여주고 있으며, 그림 6(b)는 유속이 5cm/sec의 작은 변화에 대해 0.5초 이내의 빠른 응답 특성을 보이고 있다.



(a) 유속의 증감



(b) 유속의 단계변화

그림 6. 유속의 변화에 대한 특성
Fig. 6 Characteristics for flow velocity variation

3) 센서의 감도 및 히스테리시스 특성

그림 7은 유속의 변화에 대한 소비전력과 관계 나타낸 것으로 소비전력이 유속의 제곱근에 비례함을 보이고 있으며, 이때의 감도는 10mW/(cm/sec)이다.

그림 8은 히스테리시스 특성을 보이고 있으며, 유속이 0-45cm/sec인 범위에서 전체출력의 4.5%의 특성을 보여준다.

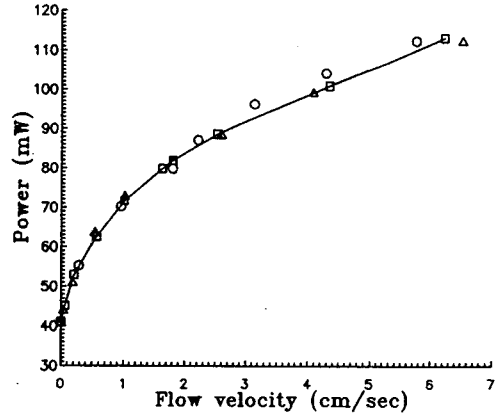


그림 7. 유속에 대한 소비전력
Fig. 7 Flow velocity versus power

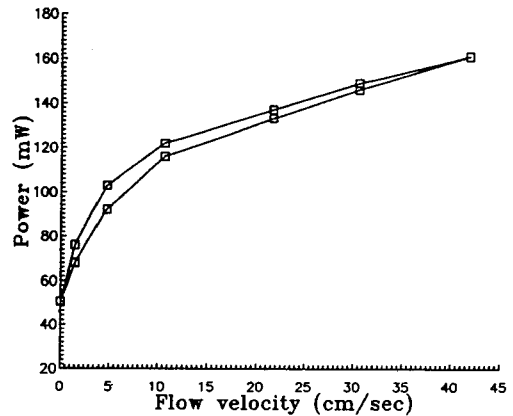


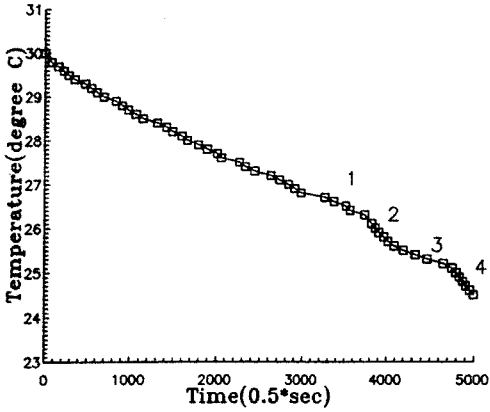
그림 8. 히스테리시스 특성
Fig. 8. Characteristics of hysteresis

4) 온도보상 특성

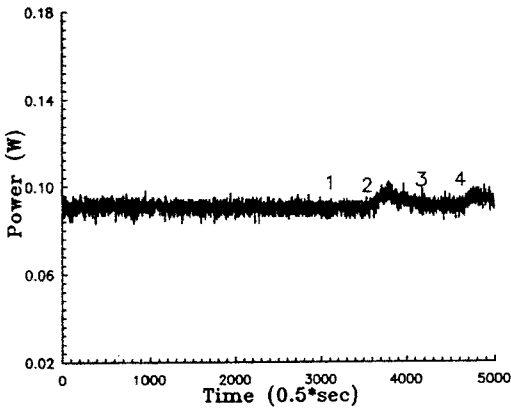
실내온도가 19°C에서 유체의 온도변화에 따른 시스템의 온도보상 특성을 조사하였다. 그림 9는 10cm/sec의 일정한 유속에서 유체의 온도가 30°C에서 24.5°C까지 냉각되는 경우로서 이 때의 소비전력의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 온도변화율이 0.1°C/min로 자연냉각인 1, 3구간에서는 온도보상이 이루어지는 반면에, 온도변화율이 0.2°C/min로 강제냉각인 2, 4구간에서는 2분 이내로 온도보상이 이루어지는 것을 볼 수 있다.

그림 10은 유체의 온도가 19.9 ~ 21.7°C의 범위에서 온도변화율이 0.1°C/min 일때 출력은 거의 일정한 값을 갖고 있으므로, 유속센서는 온도 변화에 따른

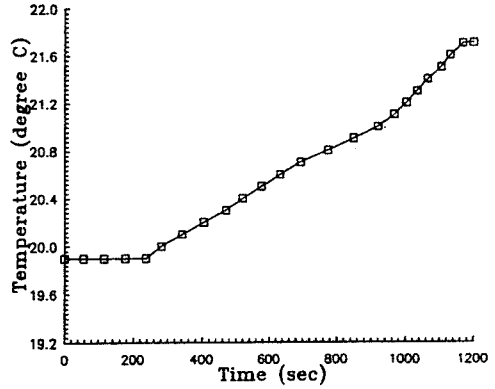
온도보상을 하여 센서와 유체와의 온도차(ΔT)를 일정하게 유지하고 있음을 알 수 있다.



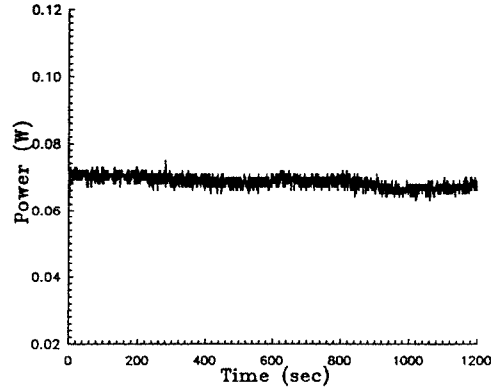
(a) 유체온도



(b) 소모전력



(a) 유체온도



(b) 소모전력

그림 10. 유체 가열에 따른 온도보상 특성

Fig. 10 Characteristics of temperature compensation by heating

그림 9. 유체 냉각에 따른 온도 보상 특성

Fig. 9 Characteristics of temperature compensation by cooling

VI. 결론

유한차분법 시뮬레이션을 통하여 최적의 출력 특성을 갖는 저항 $R_1(20\Omega)$ 에 대해서 온도보상된 정온도형 반도체 유속센서를 제작하여 유속변화와 온도변화에 대한 실험을 하였다. 유속의 변화에 대한 실험에서 유속이 0-45cm/sec까지 변화할 때 감도는 10mW/(cm/sec)으로 나타났으며, 10cm/sec의 유속변화에 대하여 2초 이내의 응답시간을 갖는 것으로 나타났다.

히스테리시스 특성은 4.5% 이내의 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

유체온도의 변화에 대한 특성 실험에서 일정 유속일 때, 자연냉각 및 가열의 경우에는 유속센서의 온도보상이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 반면에, 강제냉각의 경우 온도변화율이 0.2°C/min일 때는 온도보상시간이 약 2분이 소요되었다. 그러나 실제 유체의 온도가 0.2°C/min이상의 큰 폭으로 변화하는 경우가 많지 않기 때문에 큰 영향은 없으리라 본다.

그리고 센서의 구조 및 설치에 대한 연구보완으로 온도변화에 대한 응답시간을 줄이는 것이 앞으로의 과제이다.

VII. 참고문헌

- [1] J. H. Huijsing, J. P. Schuddent and W. Verhoef, "Monolithic Integrated Direction-Sensitive Flow Sensor", *IEEE. Electron Devices*, vol. 29, no. 1, 133-136, 1982.
- [2] H. J. Biao and T. Q. Yi, "Integrated Multi-Function Sensor for Flow Velocity, Temperature and Vacuum Measurements", *Sensors and Actuators*, vol. 19, 3-11, 1989.
- [3] M. Esashi, "Micro Flow Sensor and Integrated Magnetic Oxygen Sensor Using It", *Transducers' 91*, 34-37, 1991.
- [4] 崔再建, 半導體 技術을 利用한 流速센서의 研究, 경북대학교 전기공학과 석사학위 논문, 1992.
- [5] 金亨杓, 有限差分法을 이용한 半導體 流速/流量센서에 대한 解析 및 實驗, 경북대학교 전기공학과 석사학위 논문, 1993.
- [6] Sekwang Park, Hyungpyo Kim and Yunseok Kang, "Study of Flow Sensor Using Finite Difference Method", *Sensors and Materials*, vol. 7, no. 1, 1995.
- [7] F. P. Incropera and D. P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 3rd, 311-585, 1990.
- [8] Suhas V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing, 1980.

著 者 紹 介



최 재 건

1967년 4월 8일생. 1989년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 졸업(석사). 1995년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 주관 심분야 : 반도체 유속/유량 센서 및 마이크로머시닝.



김 형 표

1967년 2월 5일생. 1992년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 졸업(석사). 1994년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 주관 심분야 : 반도체 유속/유량 센서 및 온도센서

박 세 광

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-04, p.41 참조.

현재 경북대학교 전기공학과 부교수