

논문 2000-9-4-02

박막 히터형 유량센서의 온도보상

김 형 표

Temperature Compensation of Hot-film Flow Sensor

Hyungpyo Kim

요 약

본 논문은 박막 히터형 유량센서의 온도보상을 위해 초기 불평형 전압을 이용한 새로운 온도보상 방법을 사용하였다. 온도보상을 위해서 본 논문에서는 휘스톤 브릿지의 비를 다르게 하는 방법으로 오픈루프에서 초기 불평형 전압을 온도에 따라 나타낸 그래프를 이용하여 센서 회로의 저항값을 구하는 방법을 사용하였다. 공기 온도가 $-20^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ 범위에서 온도 보상을 실시한 결과 $\pm 1\%$ 이내의 온도 오차가 발생하여, 정밀한 박막 히터형 유량 센서를 제작할 수 있었다.

Abstract

This paper represents a hot-film flow sensor which is compensated by a noble temperature compensation method using the initial unbalanced voltage. The resistance value of the sensor is determined by using the graph of the initial unbalanced voltage of an open-loop circuit against the air temperature. The compensation is accomplished by applying the unbalanced ratio of the resistors in the Wheastone bridge circuit. In the range of air temperature of $-20^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$, the error is about $\pm 1\%$.

1. 서 론

유량센서에는 여러 가지 종류가 있지만 박막 히터형 유량센서는 간단한 구조로 정밀하게 측정할 수 있고 또 반도체 재료와 공정을 이용하여 가장 쉽게 제작할 수 있는 유량센서이다. 이러한 원인으로 박막 히터형 유량센서는 마이크로센서와 마이크로머시닝분야에서 제작되는 유량센서의 대부분을 차지하며 자동차와 의료 및 반도체 공정 등의 고부가가치 분야에 주로 응용된다^{1) 3)}. 그러나 박막 히터형 유량센서는 측정소자에서 소비되는 열손실로 유량을 측정하므로 유체의 온도변화에 영향을 받는다. 따라서 이를 보상하기 위한 온도

보상 연구는 수십년 동안 많은 연구자들이 이에 관한 논문을 보고하고 있다^{4) 8)}. 1988년 Yang은 브릿지 저항을 단계적으로 변화시키는 방법을 보고하였고, 1996년 Toda는 보상저항에 의한 방법을 각각 제안하였다^{9) 10)}. 대부분 유량센서의 측정회로는 휘스톤 브릿지의 원리를 이용하며 이 휘스톤 브릿지의 평형조건을 가정하여 온도보상을 수행하기 위해 여러 개의 온도 보상저항을 브릿지 회로에 추가하거나, 온도 센서로 유체온도를 측정하여 온도보상을 하므로 복잡하였다^{8) 10)}. 그러나 본 논문에서는 휘스톤 브릿지가 불평형 상태에서 온도영향을 수식으로 계산하여 유체 온도가 유량센서에 미치는 영향을 간단한 수식으로 표현하고, 이를 그래프로 나타내어 최소 오차가 되는 휘스톤 브릿지의 온도보상 저항값을 구하는 방법을 사용하여 온도보상을 하였다.

상주대학교 전자전기공학부 (School of Electronic and Electrical Eng., Sangju Nat' I Univ.)

<접수일자 : 2000년 2월 7일>

2. 센서의 동작 원리

박막 히터형 유량센서는 그림 1과 같이 유체의 흐름이 있는 부분에 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_t)를 유체 흐름과 평행하게 위치시키고 회로의 나머지는 외부에서 동작한다. 이 박막 히터형 유량센서의 동작 원리는 측정 소자(R_s)가 주위 온도보다 높게 가열되어 흐르는 유체 속에 놓여 있으면 측정 소자는 흐르는 유체로 열량을 빼앗겨 냉각된다. 이때 빼앗기는 열량을 전기회로를 이용하여 전력으로 측정하여 유체 유량과의 관계를 공식화한 것이 hot-wire anemometer의 원리로서 일반적으로 식(1)로 공식화된다^[11].

$$P_s = (A + B Q_i^{1/2}) \Delta T \quad (1)$$

식(1)에서 소자에 공급되는 전력(P_s)은 유체 유량(Q_i)의 제곱근에 비례하는 것을 알 수 있다. 여기서 A와 B는 소자 재료에 의해서 정해지는 상수이고, ΔT 는 측정 소자의 온도와 유체 온도와의 차이이다. 이때 A와 B는 유체 온도에 무관하다고 가정한다. 가열된 측정 소자가 유체 흐름으로 인해 냉각되어 손실되는 열량을 다시 공급하기 위해, 그림 1과 같이 피이드백 회로를 이용하여 전력을 증가시키면 측정 소자는 다시 가열되어 냉각되기 전의 온도로 상승하게 된다. 이때 다시 유체 유량이 증가하면 측정 소자에 피이드백 회로가 공급해야 할 전력은 다시 증가한다. 이렇게 유체 유량에 따라 변화되는 전력을 측정함으로써 유량을 측정하는 원리를 정온도형이라 한다. 열식 유량계의 측정원리에는 정전류형과 정온도형이 있는데 정온도형이 정전류형보다 회로적으로 복잡하지만 감도와 응답속도 등에서 특성이 우수하므로 대부분 정온도형 측정원리를 적용한다.

박막 히터형 유량 센서는 그림 1과 같이 측정 소자인 R_s , 온도보상 소자인 R_t , 피이드백 브릿지의 평형 저항인 R_a , R_b 와 피이드백 신호를 증폭하여 브릿지에 전력을 공급하는 연산증폭기로 구성된다. 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_t)는 저항온도계수를 크게 하여 온도 변화에 따라 저항값이 크게 변화하도록 하고 R_a 와 R_b 는 온도계수를 작게 하여 온도가 변화하더라도 저항값의 변화가 없게 한다. 또 R_s 는 저항값을 작게 하고 R_t 는 저항값을 크게 하여 두 저항의 저항비를 크게 하면 연산증폭기의 출력전압이 브릿지 상단에 인가될 때

R_s 에 전류가 많이 흐르게 되고 R_t 에는 전류가 작게 흐르게 된다. 전류가 많이 흐르는 R_s 는 열이 발생하여 가열되고, 전류가 작게 흐르는 R_t 는 열이 발생하지 않으므로 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_t)는 ΔT 의 온도 차이가 생긴다. 가열된 측정 소자는 온도계수가 크기 때문에 유체 흐름에 따라 열손실이 생기면서 유체온도에 따라 저항값이 변화하게 되고, 온도보상 소자는 가열되지 않았기 때문에 유체 흐름에 따라 열손실이 없고 유체 온도에 따라서만 저항값이 변화된다. 이런 온도에 따른 동작을 이용하여 유체온도 변화에 대한 유량센서의 출력을 보상할 수 있다.

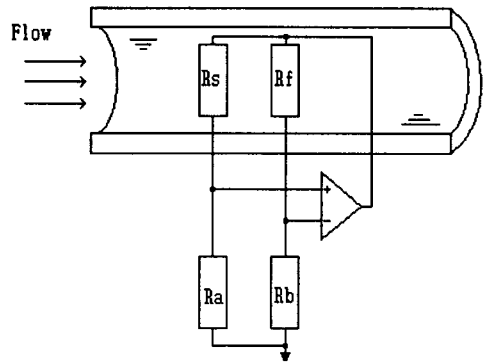


그림 1. 박막 히터형 유량 센서의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the hot-film flow sensor.

3. 온도 보상

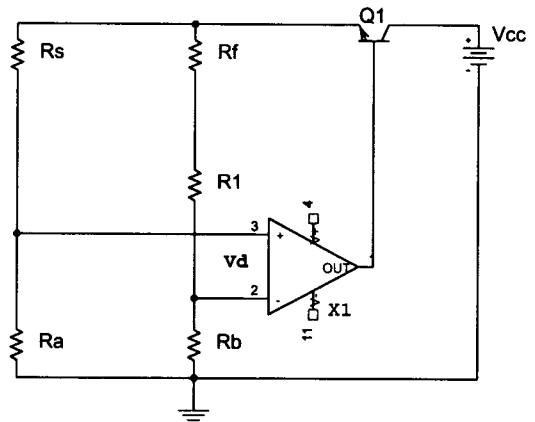


그림 2. 온도 보상을 위한 피이드백 회로
Fig. 2. Feedback circuit for temperature compensation.

측정 소자(R_s)의 온도와 유체 온도의 차이를 일정한 온도 ΔT 만큼 유지하기 위해서 그림 2의 피이드백 회로의 브릿지 전압 V_d 는 초기에 불평형이다. 이 초기 불평형 전압 V_d 는 ΔT 를 결정하는 요소이다. 피이드백 회로의 V_d 전압은 그림 2 회로의 각 저항값에 따라 결정된다. 그림 2 회로에서 R_s 는 측정 소자, R_f 는 온도보상 소자, R_a, R_b 는 브릿지 저항이고, R_1 은 유량 측정범위를 결정하고 온도 보상을 하기 위한 저항이다. 유량 측정범위는 R_1 를 조정하여 V_d 전압이 크면 유량 측정범위가 작아지고 감도가 향상되며, R_1 를 조정하여 V_d 전압이 작으면 유량 측정범위가 커지며 감도가 줄어든다. 이는 V_d 전압이 크면 ΔT 가 커져 측정 소자(R_s)의 온도가 높아 작은 유량에서도 많은 열량을 빼앗기기 때문이다. 초기 불평형 전압 V_d 의 계산은 그림 2의 피이드백 회로에서 피이드백 증폭기(X_1)과 트랜지스터(Q_1)을 제거하고 그림 3과 같이 오픈 루프에서 계산할 수 있다. 그림 3의 오픈 루프 회로에서 임의의 일정한 유체온도에서 R_s, R_f 를 정의하고, R_1 은 임의의 값일 때 V_d 전압을 온도에 대한 수식으로 전개하면 식(2)와 같다. 여기서 입력 전압 V_{cc} 는 계산을 편리하게 하기 위해 1V로 가정하였다.

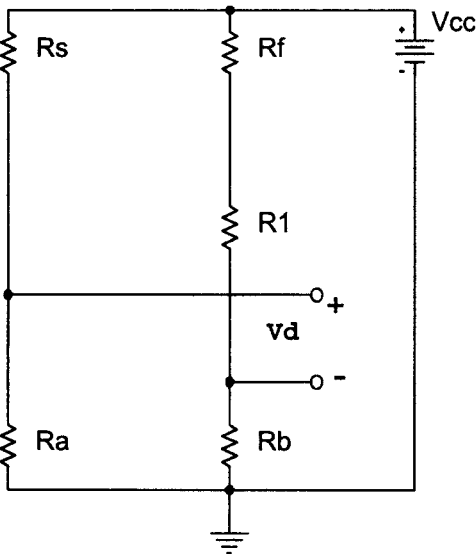


그림 3. 오픈 루프 회로

Fig. 3. Open loop circuit.

$$V_d = \frac{R_a}{R_s + R_a} - \frac{R_b}{R_f + R_1 + R_b} \quad (2)$$

측정 소자 R_s 의 저항값과 온도보상 소자 R_f 의 저항값은 유체온도 T , 일정온도 T_0 일 때의 각 소자의 저항값을 R_{s0}, R_{f0} 라 할 때 식(3)과 같이 된다.

$$R_s = R_{s0}(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3)$$

$$R_f = R_{f0}(1 + \alpha(T - T_0))$$

만약 브릿지의 저항비가 $R_{s0}/R_a = R_{f0}/R_b$ 인 경우 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(4)와 같이 된다. 식 (3)의 T 는 오픈루프에서 유체 온도이며 식(4)에서와 같이 T 에 따라 V_d 가 변하는 것을 나타내기 위한 것으로 식(4)의 V_d 가 바뀔 때 따라 식(1)의 ΔT 가 변하는 관계가 있다.

$$V_d = \frac{d}{aT^2 + bT + c} \quad (4)$$

여기서 a, b, c, d 는 온도와 무관한 저항(R_a, R_b, R_1)을 포함하는 상수이다. 식(4)에서 분자는 상수이고, 분모가 온도에 대한 2차식이므로 V_d 전압은 온도 T 에 따라 변하게 된다.

그러나, 식(4)의 분자를 상수 단일 항에서 온도 T 에 따라 변화하는 항이 포함되면 식(4)는 분자 항과 분모 항이 모두 온도에 따라 변화하게 되어, 전압 V_d 가 온도 T 에 따라 계속 변화되는 것을 최소화할 수 있다. 만약 브릿지의 저항비가 $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 인 경우 식 (3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(5)와 같이 된다.

$$V_d = \frac{d'T + e'}{a'T^2 + b'T + c'} \quad (5)$$

여기서 a', b', c', d', e' 는 온도와 무관한 저항을 포함하는 상수이다. 식(5)의 분자는 식(4)와 달리 온도 T 에 대한 1차식이므로 상수 d' 값에 따라 V_d 전압이 온도 T 의 변화에 식(4)의 경우보다 작게 변화될 수 있다는 것을 알 수 있다.

식(4)와 식(5)를 임의의 브릿지 저항값으로 온도에 대한 V_d 전압 관계를 그래프로 나타낸 것이 그림 4이다. 그림 4는 $R_{s0}/R_a = R_{f0}/R_b$, $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 경우에 대해서 전체적인 상태를 알 수 있는 $-200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 까지의 온도 범위와 $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 까지 일상생활에 응용되는 범위에서 온도에 대한 V_d 전압의 변화를

나타낸 것이다. 그림 4에서 $R_{s0}/R_a = R_{f0}/R_b$ 인 경우 전압 V_d 는 온도 T 에 따라 계속 변화되는 것을 알 수 있다. 이는 V_d 전압에 의해 결정되는 ΔT 에 변화를 유도하여 유체 온도에 의해 박막 히터형 유량센서의 출력이 온도오차가 생기게 되는 원인이 된다. 다시 말해서 식(1)의 전력 P 는 유체 온도에 따라 바뀌게 된다. 식(1)은 측정 소자와 유체 온도와의 온도차 ΔT 는 일정하다는 가정에서 유량을 측정하는 원리이므로 온도차 ΔT 의 변화는 온도오차의 원인이 된다.

그림 4에서 $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 인 경우 전압 V_d 는 -200°C 에서 급격하게 상승하여 0°C 근처에서는 거의 변화가 없다가 온도가 상승함에 따라 서서히 하강하는 형태를 가진다. 0°C 근처에서 변화가 없는 것은 일상 생활에서 응용하기 위해서 $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 온도범위에서 변화가 최소화되도록 브릿지 저항값을 조정했기 때문이다. 그림 4에서 $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 온도범위에서 $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 인 경우 온도에 대한 전압 V_d 의 변화량이 $R_{s0}/R_a = R_{f0}/R_b$ 인 경우와 비교하여 아주 적음을 알 수 있다.

따라서 브릿지의 저항비가 $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 인 조건으로 브릿지의 저항값을 결정하여 초기 불평형 전압 V_d 를 유체온도에 따라 최소화하는 방법은 식(1)의 우변 항에서 온도차 ΔT 가 유체온도에 따른 변화 폭이 최소가 되어, 유체온도에 대한 출력 오차를 최소화하는 온도보상 방법이 될 것이다.

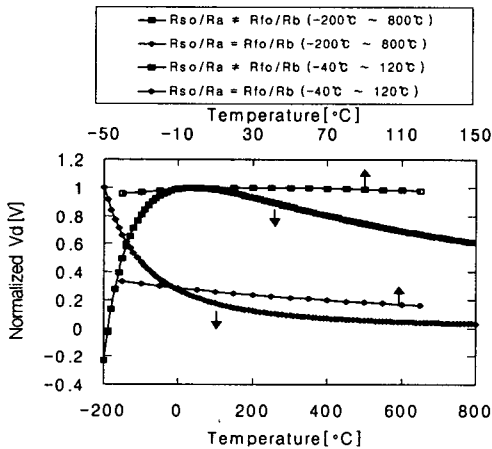


그림 4. 온도에 대한 V_d 전압 계산 결과
Fig. 4. Calculation results of V_d voltage with temperature.

4. 실험 및 결과

백금박막으로 제작한 측정 소자(R_s)와 온도보상 소자(R_t)의 온도계수는 3500ppm 이고 그림 5는 제작한 유량센서의 사진이다. 이 온도계수 값은 백금의 벌크 온도계수인 3850ppm 보다 낮지만 박막 히터형 센서 소자로는 사용이 가능하다. 실제로 백금이 벌크 온도계수를 가지면 백금 측은 저항체로 사용할 수 있어 온도센서로도 제작이 가능하다. 백금박막의 온도계수에 영향을 주는 인자로는 주로 증착시의 불순물, 박막 두께와 열처리 조건에 의해 결정된다. 실험 유체로는 공기를 사용하고, 공기 유량 변화는 송풍기의 전압을 가변하여 조절하고 공기 온도 변화는 히터가 내장된 순환식 챔버를 사용하였다. 실험 범위는 자동차 엔진 흡입 공기를 측정할 수 있는 $0 \sim 300\text{kg/h}$, $-40^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 범위에서 수행하였다.

그림 6의 오픈루프 실험 결과는 초기 불평형 전압 V_d 을 이용한 온도보상 방법에서 초기 불평형 전압이 온도에 따라 변화는 결과를 얻기 위한 것이다. 오픈 루프 회로에 165mV 의 전압을 인가하여 측정 소자와 온도보상 소자의 자체 가열에 의한 저항값 변화를 최대한 방지하였다. 온도가 0°C 근처에서 최고전압을 나타내고 0°C 근처에서 멀어지면서 전압이 서서히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 3장의 온도보상 방법에 의해서 온도가 0°C 근처에서 최고점이 되고 이점에서 멀어질수록 감소하는 형태가 되도록 저항 R_a , R_b , R_t 의 값을 조정된 회로를 사용한 경우이다.

그림 6의 폐 루프 실험 결과는 피이드백이 되도록 구동 회로를 구성하여 유량이 없는(0kg/h) 상태에서 온도에 따라 변화는 출력전압을 나타낸 것이다. 그림 6의 오픈 루프에서의 실험결과와 같이 0°C 근처에서 상승점이 있고 0°C 근처에서 멀어질수록 감소하는 형태이나 50°C 이상에서 다시 전압이 증가하고 있다. 50°C 이상에서 전압이 오픈 루프의 결과와 다르게 증가하는 것은 공기의 자연대류에 의해서 생기는 공기흐름이 증가하기 때문이다. 측정 소자의 온도는 직접 측정할 수는 없지만 그림 1의 회로에서 측정 소자에 연결된 저항의 전압과 전류를 측정하여 계산할 수 있으므로 ΔT 는 계산으로 알 수 있다. ΔT 를 유량이 없을 경우 계산하면 그림 6의 폐 루프 실험결과와 같은 형태가 될 것이다.

그림 7은 여러 가지 공기유량에 대해서 상온에서 60°C

까지 온도를 상승시키면서 수행한 온도 실험 결과이다. 이 실험에서는 그림 6의 폐 루프 결과와 같은 50℃ 이상에서 출력전압이 상승하는 현상이 일어나지 않는다는 유체가 흐르고 있어 강제대류에 의한 흐름만 있기 때문이다. 온도가 올라갈수록 출력전압이 내려가는 것은 그림 6의 오픈 루프 회로 실험 결과에서 0℃ 이상에 불평형 전압이 하강하도록 하였기 때문이고, 또 온도가 올라갈수록 공기의 밀도가 낮아지기 때문이다. 공기의 밀도가 낮아지면 공기의 유속은 일정할지라도 공기 질량 유량은 적어진다. 그림 6의 폐 루프 실험 결과는 전체 온도 범위에 대해서 ±1%의 온도 오차가 생겼다. 그림 8은 각 온도에서 유량을 변화시키면서 출력전압을 측정된 결과이다. 각 온도와 전체 유량변화 범위에서 출력전압은 최대 ±0.7%의 오차가 생겼다. 이와 같은 결과에서 3장의 온도 보상 방법으로 온도 보상을 실시한 결과 ±1%이내의 온도 오차가 발생하여, 정밀한 유량 센서를 제작할 수 있을 것이다.

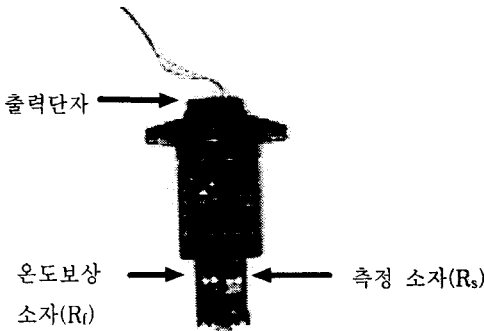


그림 5. 제작한 유량센서의 사진
Fig. 5. Photograph of fabricated flow sensor.

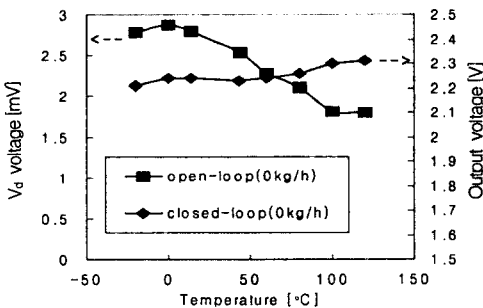


그림 6. 온도에 대한 Va 전압 실험 결과
Fig. 6. Experimental results of Va voltage with temperature.

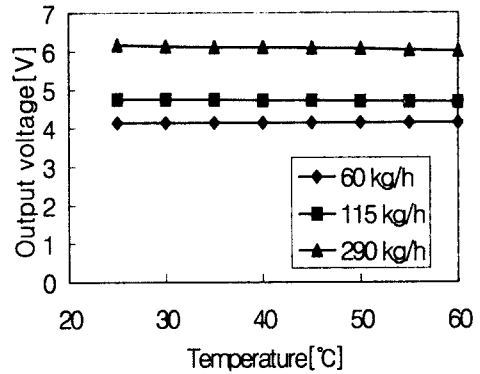


그림 7. 여러 가지 공기유량에서 온도에 대한 출력전압
Fig. 7. Output voltage versus temperature in varied mass flow.

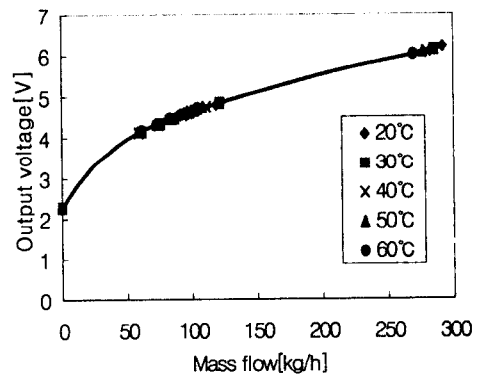


그림 8. 온도와 유량변화에 대한 출력전압
Fig. 8. Output voltage versus mass flow in varied temperature.

5. 결론

박막 히터형 유량센서의 온도보상을 위해 오픈 루프 회로의 초기 불평형 전압을 이용하였다. 이를 위해 오픈 루프 회로에서 $R_{s0}/R_a = R_{f0}/R_b$ 일 경우는 온도 변화에 따라 출력 전압이 지속적으로 변하였고, $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 일 경우는 온도 변화에 따른 출력 전압이 변화되지 않는 부분이 나타났다. 따라서, $R_{s0}/R_a \neq R_{f0}/R_b$ 인 조건을 피드백 회로에 적용하여 온도 보상을 실시한 결과 ±1%이내의 온도 오차가 발생하여, 정밀한 박막 히터형 유량 센서를 제작할 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. J. Biao and T. Q. Yi, "Integrated multi-unction sensor for flow velocity, temperature and vacuum measurements," *Sensors and Actuators*, vol. 19, pp. 3-11, 1989.
- [2] Huibert-Jan Verhoeven and Johan H. Huijsing, "Design of integrated thermal flow sensors using thermal sigma-delta modulation," *Sensors and Actuators A*, vol. 52, pp. 198-202, 1996.
- [3] 김형표, 박세광, "발열 저항체 박막유량계의 응답 특성", *대한전기학회논문지*, 제46권, 2호, pp. 290-293, 1997. 2.
- [4] 박광순, 강정호, 김형표, 박세광, "초기불평형 전압을 이용한 열박막형 유량센서의 온도보상", *대한전기학회 MEMS 학술대회 논문집*, pp. 249-254, 1999. 4.
- [5] O. Tabata, "Fast-response silicon flow sensor with an one-chip fluid temperature sensing element", *IEEE Electron Devices*, vol. 33, no. 3, pp. 361-365, 1986.
- [6] Charles R. Cook, etc., "Thin-film air flow sensor using temperature-biasing resistive element," US Patent 5237867, 1993.
- [7] B. W. van Oudheusden, "The determination of the effective ambient temperature for thermal flow sensors in a non-isothermal environment", *Sensors and Actuators*, vol. A 72, pp. 38-45, 1999.
- [8] 고상근, 이신표, "열선유속계의 신기술", *대한기계학회지*, 제33권, 9호, pp. 793-802, 1993.
- [9] Cangian Yang, M. Kümmel and H. Søeberg, "A self-heated thermistor flowmeter for small liquid flow in microchannels", *Sensors and Actuators*, vol. 15, pp. 51-62, 1988.
- [10] Kei Toda, Isao Sanemasa and Koichi Ishikawa, "Simple temperature compensation of thermal air-flow sensor", *Sensors and Actuators*, vol. A 19, pp. 197-201, 1996.
- [11] W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel, "Sensors," VCH, vol. 4, 1990.

 著 者 紹 介

김형표

「센서학회지 제8권 제5호」 논문99-8-5-5, p.41 참조
 현재 상주대학교 전자전기공학부 전임강사