

온도보상을 고려한 열선형 공기유량
측정시스템에 관한 실험적 연구
Experimental Study on Hot-Wire Type Air Flow Rate Measurement
System Considering Ambient Temperature Compensations

이 민 형*, 유 정 열**, 고 상 근**, 윤 준 원***, 김 사 량*, 김 동 성****
M. H. Lee, J. Y. Yoo, S. K. Kauh, J. W. Yun, S. R. Kim, D. S. Kim

ABSTRACT

The purpose of this study is to perform modelings and experiments to measure air flow rate using hot-wires and a CTA(Constant Temperature Anemometer). The flow rate can be obtained by measuring the heat loss of the hot-wire due to the variations of flow velocity when the hot-wire is maintained at uniform temperature. But the defect of this method is that the output signal changes not only by the flow rate but also by the ambient temperature. Thus, in the present study, a method which compensates the variations of the ambient temperature has been introduced to measure exact flow rate. To be more specific, the bridge circuit of the usual hot-wire anemometer system has been modified in such a way that a temperature resistance sensor and a variable resistance are placed in one of the legs to compensate the different temperature coefficients of both the hot-wire and the temperature compensating resistance for flow velocity or for flow mass up to the flow temperature of 50°C. Comparing the modeling and experimental results, it has been shown that the compensating point differs as the flow rate varies. Therefore, optimum compensation points are sought to construct the circuit. The present modeling and experimental results may be applied to the design of actual air flow meters for automobiles.

기 호 설 명

	R_{w1} : 보정조건에서의 열선저항(Ω)
	R_{w2} : 실험조건에서의 열선저항(Ω)
A, B, n : 열전달계수 $h(U)$ 에 사용되는 상수	R_{w0} : 0°C에서의 열선저항(Ω)
T_1 : 보정조건에서의 유체온도(°C)	R_{t0} : 온도보상저항의 0°C에서의 저항(Ω)
T_2 : 주위 유체온도(°C)	R_{t1} : 온도보상저항의 보정조건에서의 저항(Ω)
T_w : 열선온도(°C)	R_{t2} : 온도보상저항의 실험조건에서의 저항(Ω)
T_{w1} : 보정조건에서의 열선온도(°C)	
R_w : 열선저항(Ω)	

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

*** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

**** 정회원, 한국기계연구소 내연기관연구실

- R_3 : 고정저항 = 10Ω
- R_4 : 과열비를 보정하기 위한 저항(Ω)
- R_5 : 각 센서의 온도계수를 보정하기 위한 가변저항(Ω)
- R_L : 리이드저항 = 0.13Ω
- U : 유체속도(m/s)
- I : 열선에 흐르는 전류(A)
- ΔE : 저항 R_3 에 걸리는 전압(V)
- a : 과열비(R_w/R_{w2})
- C_d : 오리피스의 송출계수
- β : 오리피스의 직경비
- L : 열선과 오리피스 사이의 거리
- D : 덕트의 내경
- h : 열전달계수
- Nu : Nusselt 수
- Re : Reynolds 수
- α_w : 열선의 온도계수($^{\circ}\text{C}$)
- α_i : 온도보상저항의 온도계수($^{\circ}\text{C}$)

1. 서 론

자동차의 연료공급시스템에 있어서 자동차 배출물에 대한 규제가 강화됨에 따라 점차 전자화 추세가 강하게 대두되고 공연비 제어기술에 필요한 보다 신속 정확한 공기유량 측정방법의 개발이 요구되고 있으며, 이에대한 기술을 확보하여야만 국산자동차의 해외진출이 가능한 실정이다. 본 연구는 최근 선진국에서 많은 개발 노력이 이루어지고 있는 열선/열판을 이용한 공기유량 측정방법을 취급하였다.

공기유량계는 미국, 일본, 유럽의 경우에 대체로 3단계에 걸쳐서 발전되어 왔다. 제 1 단계에서는 플랩형 유량계를 장착하여 엔진으로 흡입되는 공기흐름으로부터 발생하는 힘에 의한 플랩의 각도 위치를 가변저항에 의하여 전압으로 변환시킴으로써 전기신호를 얻는 방법이 사용되었다. 제 2 단계는 Karman 와류를 초음파 송수신장치로 탐지함으로써 전기신호를 얻고자 하는 방법이며 현재 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 제 3 단계로 볼 수 있는 최근 10여년 간에는 열선 또는 열필름을 센서로 하는 공기유량계의 개발에 많은 관심이 기울여지고 있다.

정온도형 열선유속계(CTA, Constant Temperature Anemometer)는 가는 백금선을 일정한 온도로 유지시킬 때, 주위 유체의 속도 변화에 따른 열선의 열량손실을 측정함으로써 공기유량을 측정할 수 있는 장치이다. 이 열선은 난류유동에서의 속도측정에 많이 사용될 수 있는 장점이 있으나, 반응이 외부 유동속도 뿐만아니라 온도변화에도 대단히 민감한 결점을 가지고 있다. 이런 온도에 대한 민감성은 약간의 외부 온도변화에도 측정오차를 발생시킨다.

열선이 신속한 반응을 보이기 위해서는 굵기가 작아야 하지만 너무 작아지면 쉽게 끊어지는 내구성 문제가 있으므로 적정의 굵기로 하되, 길이를 늘려 저항을 크게 하여야 한다. 또한 굵기가 커지면 열선 이후에 와류 shedding(vortex shedding)이 많이 생기는 문제도 있다.

온도가 변화하는 유동장에서 CTA를 이용하여 두 개의 열선으로 속도와 온도를 측정하는 여러 방법들이 최근에 많이 알려져 왔다. Ali¹⁾는 통상적인 CTA에 온도측정 열선을 첨가한 복잡한 회로를 만들었으며, Sakao²⁾는 두 개의 CTA들을 사용하였다. Drubka 등³⁾은 최초로 열선브리지에 온도보상저항을 만들어 외부 유체의 온도변화에 대해 자동으로 보상하는 방법을 고안하였다. Takagi⁴⁾는 직접 열선의 전류를 측정함으로써 더욱 간단한 방법을 모색하였다. 이 시스템은 단순한 CTA에 온도보상저항만 부가시키면 된다. 고상근 등⁵⁾은 표준적인 회로를 채택하여 열선유속계의 동특성을 측정함으로써 성능향상에 필요한 자료를 제시하였다. 이택식 등⁶⁾은 외부 온도변화, 오프셋 전압(offset voltage)을 포함한 CTA에 관한 정적 반응방정식(static response equation)을 제시하였다. Sauer⁷⁾는 열선에 흐르는 전류와 유량과의 관계식에서 전류는 유량의 0.25 승에 비례한다고 제시하였다. 그는 작은 레이놀즈 수의 유동에서 중요한 자연대류항을 무시하고 열선의 온도의존성을 조사하였다. 그리고 열선의 기계적 성질과 전기적 저항의 변화를 고려하였다. Sumal⁸⁾은 열선의 기계적 성질의 변화가 보정곡선을 변화시킴을 보이고 열선 주위의 난류량을 조사하였다. 최

만수 등⁹⁾은 수직 열선 근처의 과도열전달에 관하여 실험적 연구를 하였다.

공기유량 측정에 영향을 미치는 습기, 온도, 맥동오차, 반응시간 등에 따른 문제들을 개선하기 위한 많은 연구¹⁰⁻¹³⁾가 시도되어 왔다. Drubka 등³⁾은 열선의 과열비를 일정하게 하여 열선브리지의 출력을 온도변화에 대해 보상시켰는데, 이는 다소 복잡한 구성이라 제법 오차를 보였다. 그러므로 본 연구에서는 열선에 흐르는 전류를 직접 측정하는 보다 간단한 방법을 채택하였다. 이 방법은 보통의 CTA 브리지에 온도보상저항과 가변저항만 첨가하면 된다. 이와 같은 방법으로 외부 유동의 온도가 40°C인 경우와 75°C인 경우에 대하여 제한된 속도범위에서 보상된 출력을 얻고자 하였다. 속도에 대한 보상 뿐만 아니라, 같은 방법으로 유량에 대하여도 보상된 출력을 얻고자 하였다.

2. 모델링 및 이론

귀환제어회로를 가지고 있는 동특성이 우수하고 안정한 CTA를 사용하여 공기유량을 측정할 때, 열선은 대류열전달 현상에 관련된 유체의 속도, 온도, 밀도 등에 의하여 영향을 받게 된다. 만약 열선을 일정한 과열비로 가열하면서 공기유량을 증가시키면 열선은 강제대류에 의하여 냉각되고 그 저항은 감소한다. 즉, 휘트스톤브리지의 평형이 깨어지므로 즉시 귀환제어회로에서 전류를 보내면 다시 평형이 이루어져 열선의 최초온도가 유지된다. 이 방법에서 보상전류와 공기량과의 사이에는 유일한 관계가 성립된다. 그러나 열선은 속도 뿐만 아니라 온도에도 민감하므로 온도보상시스템이 없으면 외부 유체의 온도변화에 따라 많은 오차가 발생하게 된다.

온도보상을 위한 CTA의 휘트스톤브리지는 Fig. 1과 같다. 과열비 조절은 R_4 를 변화시킴으로써 가능하다. 브리지의 한 저항이 되는 온도보상저항 R_t 는 유동내에 설치하여 유동온도를 감지하게 된다. 열선과 온도보상저항의 온도계수가 다르므로 가변저항 R_6 를 첨가하여

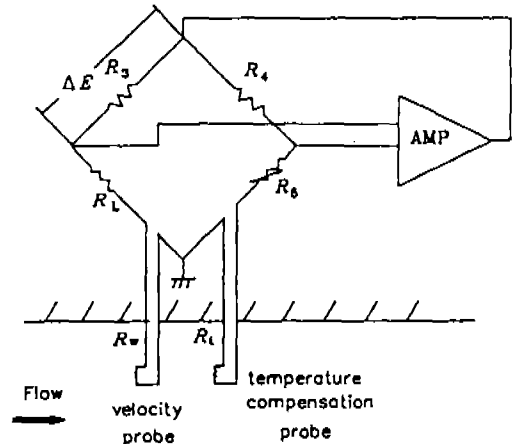


Fig. 1 Block diagram of the Hot-wire anemometer compensated for ambient temperature variations

두 센서의 온도계수를 보정시켰다. 통상적인 CTA의 경우 R_t 는 일정한 값이나, 여기서는 온도에 따라 저항이 변하여 보상을 하게 되는데, 작은 전류로 온도에 대한 감도를 크게 하기 위하여 R_t 로는 R_w 보다 비교적 큰 저항을 사용하였다.

만약 열선의 과열비가 일정하게 유지되고 열선과 온도보상저항의 온도계수가 같다면, 완전히 보상된 시스템이나 두 센서의 온도계수가 다르고 열전달계수의 온도의존성이 존재하므로 이 영향들에 대하여 가변저항 R_6 를 변화시키면서 보상을 하게 된다.

열선이 유동에 의해 냉각되면 귀환제어회로에 의해 전류 I 가 흐르는데, 이 경우에 자연대류와 복사열전달 효과를 무시하면 에너지 보존법칙에 의하여 다음의 관계가 성립한다.¹⁴⁾

$$I^2 R_w = (T_w - T_2) h \quad (1)$$

여기서 열전달계수는 중요한 온도변수가 된다. 열선저항을 온도에 따라 나타내면 다음과 같다.

$$R_{w1} = R_{w0}(1 + \alpha_w T_1) \quad (2)$$

$$R_{w2} = R_{w0}(1 + \alpha_w T_2) \quad (3)$$

$$R_w = R_{w0}(1 + \alpha_w T_w) \quad (4)$$

온도보상저항을 온도에 따라 나타내면,

$$R_{t1} = R_{t0}(1 + \alpha_t T_1) \quad (5)$$

$$R_{t2} = R_{t0}(1 + \alpha_t T_2) \quad (6)$$

이다. 여기서 R_{w0} 는 0°C 에서의 열선저항이고, R_{t0} 는 0°C 에서의 온도보상저항인데 각 저항의 온도계수 중 2차항 이상은 무시하였다. 상온에서의 과열비를 $\alpha = 1.5$ 로 하여 브리지평형을 이루었을 때,

$$R_4 = \frac{R_3(R_{t1} + R_5)}{(aR_{w1} + R_L)} \quad (7)$$

이다. 식(3), (4)로부터

$$(T_w - T_2) = \frac{1}{\alpha_w R_{w0}}(R_w - R_{w2}) \quad (8)$$

이다. 외부 유동 온도조건에서의 브리지평형으로부터 열선저항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_w &= \frac{R_3}{R_4}(R_{t2} + R_5) - R_L \\ &= \frac{R_3}{R_4}(R_{t0} + \alpha_t R_{t0} T_2 + R_5 - \frac{R_4}{R_3} R_L) \\ &= \frac{R_3 R_5}{R_4} (1 + \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t T_2) \end{aligned} \quad (9)$$

단, $R_6 = R_5 + R_{t0} - \frac{R_4 R_L}{R_3}$ 이다. 식(1)에서

$$I^2 = \frac{1}{R_w}(T_w - T_2)h \quad (10)$$

이다. 식(3), (8), (9)를 식(10)에 대입하면,

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{1}{\alpha_w R_{w0}} (1 - \frac{R_{w2}}{R_w}) h \\ &= \frac{1}{\alpha_w R_{w0}} \left\{ 1 - \frac{R_{w0} R_4 (1 + \alpha_w T_2)}{R_3 R_6 (1 + \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t T_2)} \right\} h \end{aligned} \quad (11)$$

이다. 그러므로 출력전압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\Delta E)^2 &= I^2 R_3^2 \\ &= \frac{R_3^2}{\alpha_w R_{w0}} \left\{ 1 - \frac{R_{w0} R_4 (1 + \alpha_w T_2)}{R_3 R_6 (1 + \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t T_2)} \right\} h \end{aligned} \quad (12)$$

2.1 열전달계수가 속도만의 함수인 경우

$$(\Delta E)^2 = \frac{R_3^2}{\alpha_w R_{w0}} \left\{ 1 - \frac{R_{w0} R_4 (1 + \alpha_w T_2)}{R_3 R_6 (1 + \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t T_2)} \right\} \cdot h(U) \quad (13)$$

식(13)에서 외부 온도의 변화에도 불구하고 유동속도만의 출력을 얻기 위해서는 대괄호안의 분수식에서 분자 분모의 온도계수가 같아야 한다. 즉, $\alpha_w = \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t$ 이다.

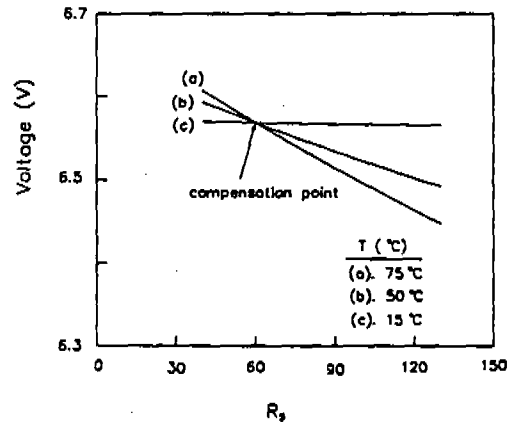


Fig. 2 Prediction of the compensation point with flow temperature variations, for the case when $h = h(U)$

실험에 사용한 열선의 온도계수 α_w 는 0.0035 ($^\circ\text{C}$)이며, 온도저항센서의 온도계수 α_t 는 0.00385 ($^\circ\text{C}$)인데, 이 경우 R_6 가 60Ω 이면 열선의 출력전압은 완전히 속도만의 함수가 되어 온도영향이 없어진다. Fig.2에서는 열선의 열전달계수가 속도만의 함수로 모델링하여 레이놀즈수 22에서 가변저항에 따라 온도 15°C , 50°C 와 75°C 에서의 계산결과를 나타내었다.

2.2 열전달계수가 속도와 온도의 함수인 경우

$$h(U, T) = (A(T) + B(T)U^n) \quad (14)$$

열전달계수를 식(14)로 즉, 온도와 속도의 함수로 모델링하여 실험데이터로 고정된 n 값에

서 계수 A, B 를 최소자승법으로 구하였다. 이 경우 출력전압은 다음과 같다.

$$(\Delta E)^2 = \frac{R_3^2}{\alpha_w R_{w0}} \left[1 - \frac{R_{w0} R_4 (1 + \alpha_w T_2)}{R_3 R_6 (1 + \frac{R_{t0}}{R_6} \alpha_t T_2)} \right] \cdot h(U, T) \quad (15)$$

식(15)에서 만약 열전달계수가 온도에 따라 증가하는 경향을 보인다면, 저항 R_6 에 속해 있는 R_5 를 증가시켜 각 센서의 온도계수를 보정하여 열전달계수가 증가한 만큼 줄여 주도록 하여야 한다. 그와 반대로 열전달계수가 온도에 따라 감소한다면 R_5 를 감소시켜야 한다.

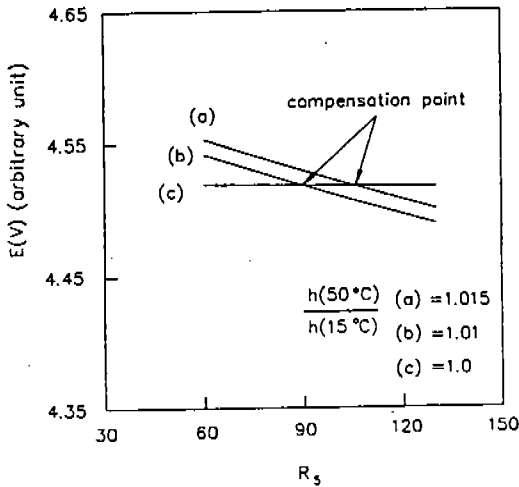


Fig. 3 Prediction of the compensation point with flow temperature variations, for the case when $h = h(U, T)$

Fig. 3은 열전달계수를 속도와 온도의 함수로 모델링한 경우, 온도의 의존성에 따른 상온조건과 가열조건에서의 모델링 계산결과를 나타내었다. 만약 가열조건에서의 열전달계수가 상온조건에서의 열전달계수보다 1%이상 더 커진다면 일치점은 더욱 큰 값에서 이루어지며, 더 작아진다면 60 Ω보다 작은 값에서 일치점이 생길 것이다.

3. 실험적 연구

3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 4와 같이 송풍기, 히터, 공

기유량계, 덕트, 계측기기 그리고 자료처리장치 등으로 구성되어 있다. 덕트의 내경은 실린더의 흡입구 내경과 같게 하였다. 컴퓨터의 입출력포트를 이용하여 송풍기의 모터를 제어함으로써 각각의 모터속도에서 유동의 온도, 유량, 열선의 출력전압을 측정하였다. 공기유동은 송풍기에서 히터와 유량계를 지나 오리피스를 거쳐 흐르도록 되어 있다. 히터는 단자를 5개로 만들어 여러 온도범위에서 실험이 가능하다.

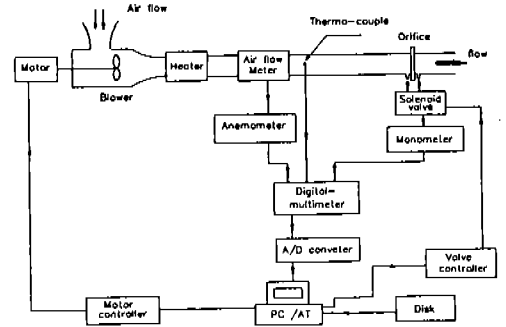


Fig. 4 Schematic layout of experimental apparatus and data acquisition process

유동의 온도측정은 동-콘스탄탄 열전대를 사용하여 0.1 °C의 정확도로 측정하였다. 이 열전대는 반응시간이 충분히 짧아 정확한 온도측정이 가능하였다.

공기유량 측정용으로는 오리피스, 노즐, 벤츨리형 노즐 등이 많이 사용되는데, 여기서는 ASME 규격의 코너-탭 오리피스를 사용하였으며 각 유동변수는 실험시의 온도로 보정하여 계산하였다. 솔레노이드 밸브를 이용하여 오리피스 양단의 압력차를 디지털 마노메타로 측정하였다. 오리피스의 유량계수는 다음과 같다.¹⁵⁾

$$C_d = f(\beta) + 91.7 \beta^{2.5} Re_d^{-0.75}$$

$$f(\beta) = 0.5959 + 0.1312 \beta^{2.1} - 0.184 \beta^8 \quad (16)$$

계측기기로는 디지털 압력계(YEW 2654), 디지털 멀티메타(Hewlett Packard 3457 A), 정온도형 열선유속계(KANOMAX 1010) 등이 사용되었다. Fig. 5와 같이 컴퓨터로 제어되

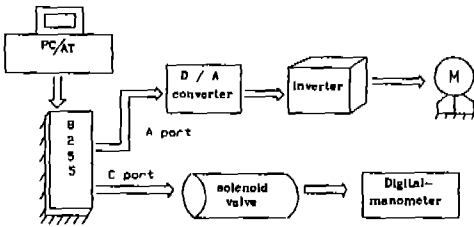


Fig. 5 Interfacing circuit controller

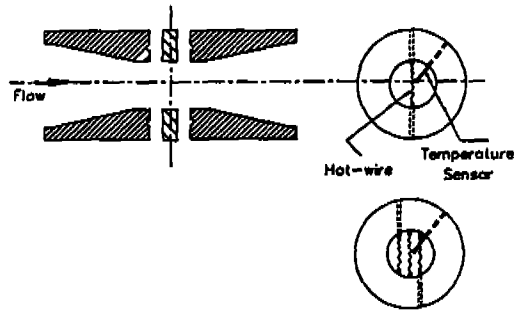


Fig. 7 Configuration of air flow meter

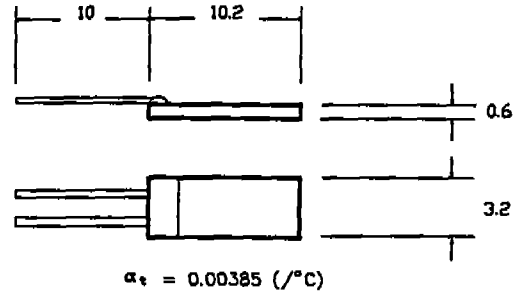
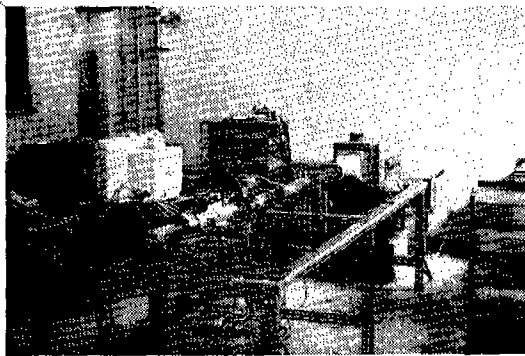


Fig. 8 Configuration of Pt resistance sensor

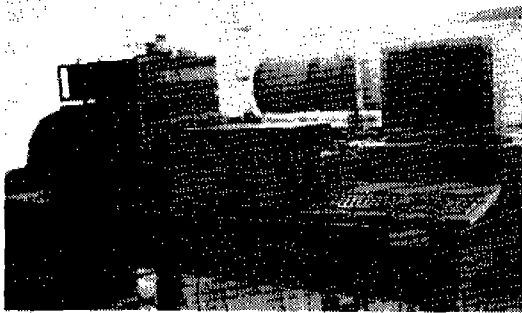


Fig. 6 Photograph of the experimental apparatus and data acquisition system

는 가변모타와 전자밸브가 사용되었으며 컴퓨터와 계측기기의 연결은 GPIB(General Purpose Interface Bus)를 사용하였다. Fig.6은 자료처리장치를 포함한 실험장치의 사진이다.

3. 2 공기유량계

본 연구를 위하여 제작된 공기유량계는 Fig. 7과 같다. 그림에서와 같이 지름 $50 \mu\text{m}$ 인 열선을 내부에 한가닥만 설치한 유량계와 세가닥을 직렬로 연결한 유량계를 만들었는데, 세가닥의 열선은 냉저항값이 커서 한가닥 열선

보다 안정된 신호를 보였다. 유동이 안정성을 갖도록 8° 정도의 구배를 갖는 벤츨리형으로 만들었다. 이런 경우 열선 주위의 속도구배가 편평해져 열선이 실제 유량에 보다 근접한 신호를 낼 수 있다. 먼지 제거와 열선의 안전을 위해 열선 앞과 뒤에 절망을 부착하였으나, 장시간 사용하면 열선에 먼지 등이 앉아 전기적 성질을 변화시키므로 오차발생의 원인이 된다. 열선의 바로 앞쪽에 온도보상저항을 삽입하였다.

온도보상저항은 DIN 43760 Pt 500Ω 으로써 α_t 가 $0.00385 (/^\circ\text{C})$ 이며 그 모양을 Fig.8에 스케치하였다. 한 가닥의 열선은 길이가 32 mm 이고 냉저항은 1.82Ω 이다. 세 가닥의 열선은 길이가 87.1 mm 이고, 냉저항은 4.95Ω 이다. 백금선의 온도계수는 $0.0035 (/^\circ\text{C})$ 으로 하였으며, 굵기는 $50 \mu\text{m}$ 이다. 열선케이블의 저항은 0.15Ω 인데 무시할 수 없는 값이므로 이를 고려하여 계산을 수행하였다.

3. 3 실험방법

온도보상저항과 열선의 온도계수를 보정하

기 위한 가변저항을 정온도형 열선 유속계의 브리지에 삽입한 회로를 구성하여, 열선 양단의 전압과 열선유속계의 출력전압을 측정하여 열선유속계의 전압에서 열선 양단의 전압을 뺀 값이 온도에 무관한 출력이 된다. 공기유량계는 오리피스 앞부분 약 $L/D=10$ 인 지점에 설치하여 되도록 오리피스의 영향을 줄이도록 하였다. 컴퓨터에서 제어되는 송풍기의 풍량을 12 단계로 나누어 각 유량의 정상상태에서 디지털 멀티미터로 12회 평균하여 열선의 출력전압, 유동온도, 오리피스압력을 측정하였다. 그러나 히터 작동시 히터의 열용량이 크므로 유량이 적은 부분에서 정확한 온도측정이 힘들었다. 즉, 공기온도 50°C 의 실험시에는 $45^\circ\text{C}\sim 52^\circ\text{C}$ 의 온도범위를 보이고 있다. 이는 중요한 오차를 차지하고 있다. 유량은 20 kg/h 에서 190 kg/h 범위로 측정하였는데 실제 소형자동차의 4000 rpm 에서의 공기량범위이다. 자료는 바로 컴퓨터에 입력이 되며 처리는 별도 프로그램으로 이루어졌다.

4. 결과 및 검토

각 유량에서 외부 온도가 열선전압에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 외부온도를 $15^\circ\text{C}\sim 75^\circ\text{C}$ 로 변화시키며 실험을 수행하여 모델링 계산결과와 비교하였다. 모델링 계산식에서 단일 열전달계수가 온도에 무관하다면 $R_5 = 60\ \Omega$ 에서 출력전압은 온도에 무관한 신호로 나올 것이다. 그러나 열전달계수가 온도에 따라 증가한다면 R_5 를 열전달계수가 증가한 만큼 증가시켜야 할 것이다. 그 반대의 경우 즉, 열전달계수가 온도증가에 따라 감소하는 경향을 보인다면 가변저항이 $60\ \Omega$ 보다 작은 값에서 일치점을 찾을 것이다. 그러므로 열전달계수의 온도의존성은 중요한 변수이다.

4.1 온도에 대한 속도보상

가변저항을 변화시키면서 상온조건과 가열조건에서의 열선의 출력을 측정하여 Fig. 9에 나타내었는데 R_5 를 $0\ \Omega$ 으로 실험한 결과는 상온조건에서보다 가열조건에서 훨씬 큰 출력

이 나온다. 이는 온도보상저항의 온도계수가 열선의 온도계수보다 커서 과보상된 결과이다. R_5 를 증가시키면 온도보상저항의 온도계수가 작아지므로 이 영향을 차츰 줄여나갈 수 있다. Fig. 9에서와 같이 $R_5 = 75\ \Omega$ 에서 온도에 관계없이 두 경우의 출력곡선이 거의 일치한다. 그러나 속도가 큰 지역에서는 상온조건에서의 출력이 조금 작게 나오고 있다. 여기서 상온조건과 가열조건에서의 출력곡선의 기울기를 보면 가열조건에서의 기울기가 조금 작게 나온다. 이 원인은 열전달계수의 변동 때문이다. 이런 경우에는 유동속도 전범위에 걸쳐 하나의 고정 가변저항으로 보상을 할 수 없다. 왜냐하면, 가변저항의 역할은 상온조건에서의 출력을 단순히 아래 위로 평행 이동시킬 따름이기 때문이다. 그림에서와 같이 온도보상이 안된 보통의 열선은 온도 50°C 에서 훨씬 작은 출력을 보여 속도측정에 많은 오차를 보이고 있다. 그림에서 실선은 유동온도 50°C 에서의 이론 모델링 계산결과인데, 실험결과와 비교하면 거의 일치하므로 이 모델링으로 정확한 예측을 할 수 있음을 나타낸다. 실험시의 약간의 오차는 유동온도 측정에서 오차가 생겨 속도계산이 틀리기 때문이다.

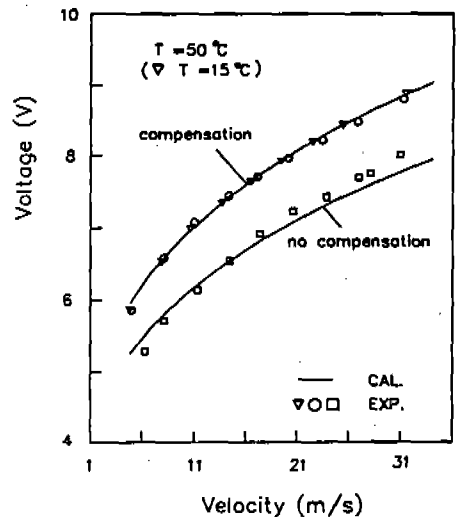


Fig. 9 Compensated output voltage of modeling and experimental results for velocity compensation, $R_5 = 75\ \Omega$

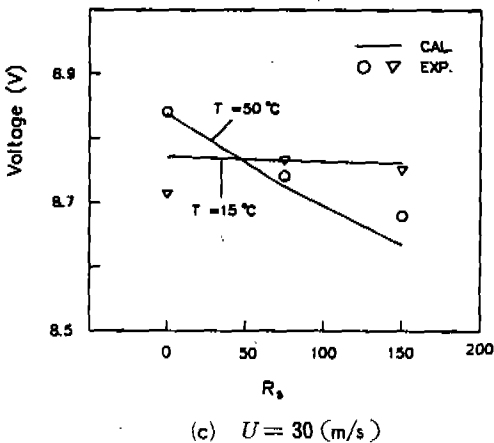
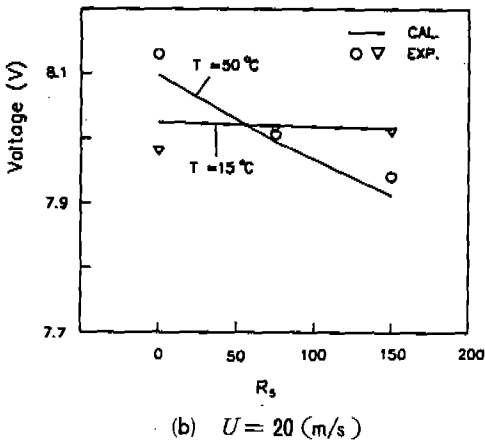
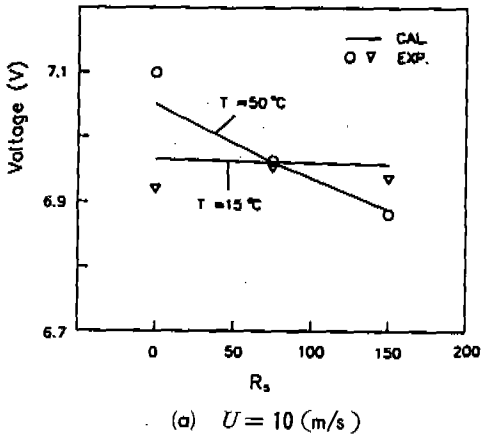


Fig. 10 Modeling and experimental results with R_5 variations for velocity compensation

Fig. 10은 가변저항에 따른 상온조건과 가열 조건에서의 출력의 변화에 대한 실험결과와 모델링 계산결과를 나타내었는데, R_6 를 증가시키에 따라 일치하여 가는 경향을 보이고 있다. Fig. 10에서 (a), (b), (c)를 비교하여 보면 유동속도에 따라 일치점이 조금씩 다르게 나타나는데 유속이 큰 영역에서는 작은 영역에서 보다 가변저항이 작은 값에서 보상이 됨을 보이고 있다. 이는 계산모델링에서 모든 속도에 대하여 열전달계수를 속도의 0.554승으로 하였기 때문인데, 이 지수값을 레이놀즈 수에 따라 다르게 하면¹⁴⁾ 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 더욱 큰 원인은 열전달계수의 온도의존성이 속도에 따라 다른 경향을 보이기 때문이다. 이 결과는 Fig. 9에서 작은 속도에서는 거의 일치하나 큰 속도에서는 가열 조건에서의 출력이 조금씩 작게 나오는 경향을 설명해 준다. R_6 를 변화시키면서 가열조건과 상온조건에서의 출력의 차이를 Fig. 11에 나타내었는데, 그림에서와 같이 속도범위에 따라 과보상된 지역과 미보상된 지역이 발생하고 있다. 이런 경향을 보이는 이유는 열전달계수의 온도의존성이 속도에도 의존하고 있기 때문이며, 또는 열선의 형상비 때문이다. 그러므로 원하는 속도영역에서 보상된 시스템을 만들 수 있는 가변저항을 정하여야 한다.

Fig. 12는 열전달계수를 속도의 0.554 승으로 모델링한 것인데, 정확히 선형적인 관계를 보여주고 있다. 이 지수값 0.554는 Collis

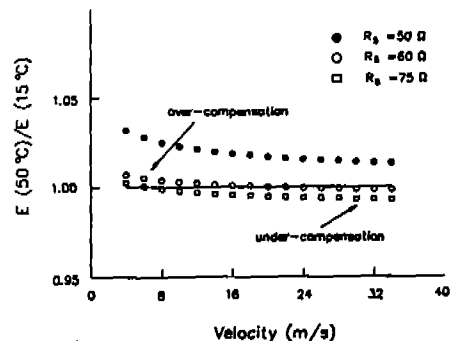


Fig. 11 Deviations of heating voltage from room temperature voltage with R_5 variations for velocity compensation

and Williams¹⁴⁾의 지수값 0.45($0 < Re < 44$), 0.51($44 < Re$) 보다 큰 값이다.

한 가닥의 경우 냉저항이 1.82Ω 인데 비교적 작은 값이라 과열비를 높이기 힘들며 출력신호가 불안정하였다. 그러나 저항은 길이에 비례하므로 모델링식에서 알 수 있듯이 출력은 한 가닥의 열선이나 세 가닥의 열선이나 정량적으로 같은 값을 보인다. Fig. 13에 한 가닥 열선과 세 가닥 열선의 실험결과를 정량적으로 비교하여 나타내었다.

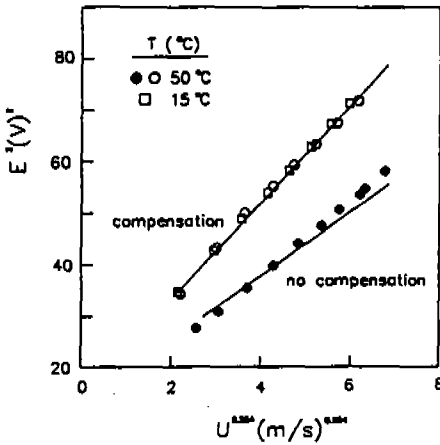


Fig. 12 Compensated data $E^2 (V)^2$ of the voltage across R_3 in the flow with ambient temperature variations for velocity compensation

4.2 열전달계수

실험데이터를 이용하여 식(14)에서의 계수 A , B 를 최소자승법으로 구한 값을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서와 같이 A 값은 온도증가에 따라 증가하고, B 값은 온도증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이 결과는 Takagi⁴⁾의 결과와 일치하고 있다. 이런 경향은 작은 레이놀즈 수에서는 A 항이 지배적이기 때문에 온도증가에 따라 열전달계수를 증가시키고, 큰 레이놀즈 수에서는 B 항에 의해 온도증가에 따

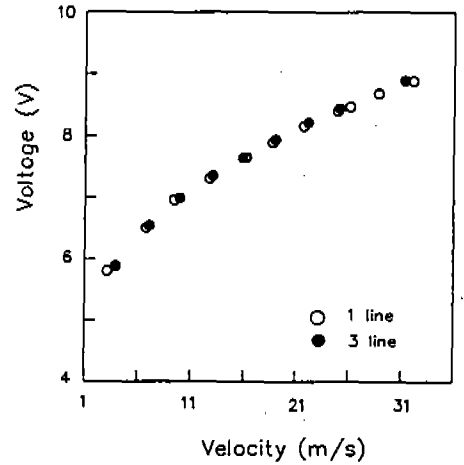
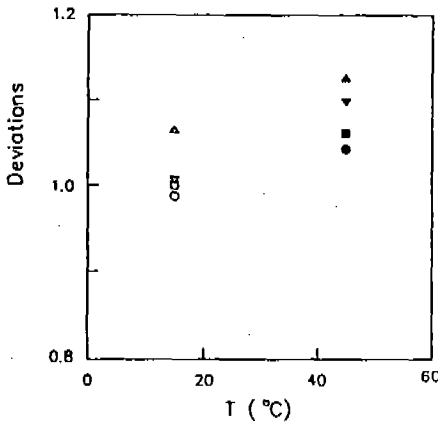
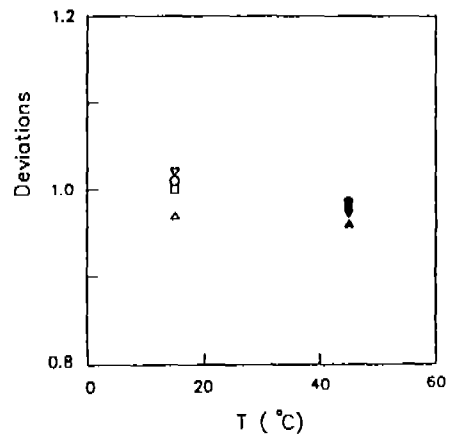


Fig. 13 Quantitative comparison with the voltages of 1 line and 3 lines for velocity compensation, $R_3 = 75 \Omega$



(a). $A(45^\circ C)/A(15^\circ C)$



(b). $B(45^\circ C)/B(15^\circ C)$

Fig. 14 Dependence of constants A and B in the heat transfer function on the flow temperature

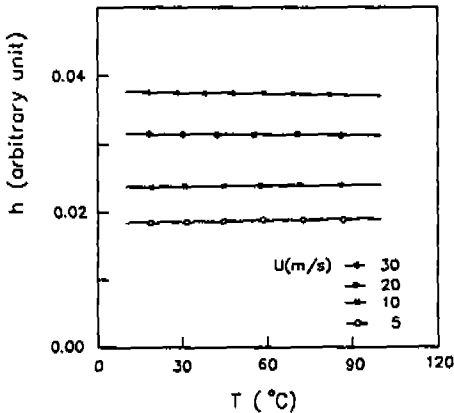


Fig. 15 Variations of heat transfer coefficient with temperature at each velocity

라 열전달계수가 감소된다. 이 열전달계수의 온도변화에 대한 의존성을 여러 유속에 대하여 Fig. 15에 나타내었는데 작은 속도에서는 온도증가에 대해 양의 기울기를 가지고 큰 유속에서는 음의 기울기를 가진다. 그러므로 열전달계수의 온도의존성은 유속의 영향을 크게 받는다. 이 결과는 Collis and Williams¹⁴⁾ 및 Bruun¹⁶⁾의 결과와 일치한다. 이 열선을 이용한 유량측정은 열전달계수의 온도의존성 때문에 오차를 면할 수가 없다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 작은 유속에서는 열전달계수가 증가하므로 그만큼 R_b 를 크게 하여 R_b 가 약 75 Ω 에서 보상이 되는 결과와 일치하는데 이는 Fig. 3에서와 같이 35 $^{\circ}\text{C}$ 증가에 대해 열전달계수가 증가함을 나타낸다. 큰 유속에서는 R_b 가 약 50 Ω 에서 보상되었는데 이는 열전달계수가 감소함을 나타낸다. Gurtcheff¹⁰⁾는 열전달계수가 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서보다 약 8% 증가한다고 하였는데, 만약 열전달계수가 이런 경향을 보인다면 본 실험에서 가변저항이 더욱 큰 값에서 보상된 결과를 얻을 것이다.

4.3 온도에 대한 유량보상

같은 공기의 속도에서도 온도가 달라지면 유량이 변하므로 유량에 대해 보상하기 위해서는 밀도변화를 고려하여 Fig. 9의 가열조건에서의 곡선을 더욱 아래로 내려야 하는데 이

를 위해서는 가변저항을 더욱 크게 하여야 한다. Fig. 16은 가변저항을 220 Ω 으로 하여 실험한 결과인데, 가열조건에서도 상온조건에서와 같은 출력이 나옴을 보여주지만 유량범위에 따라 두 출력이 조금씩 차이를 보이고 있다. 만약, 열선이 온도보상되지 않았다면 훨씬 작은 출력을 보여 정확한 유량측정을 할 수가 없다.

Fig. 16은 상온조건과 가열조건에서의 실험 결과와 이론 모델링 계산결과를 보여주는데, 두 결과가 거의 일치하므로 이 이론모델링으로도 유량예측이 가능함을 알 수 있다. 즉 유량을 측정하고자 할 때 이 모델링 식을 사용 하여도 되고 이를 다시 여러 단계로 나눈 테이블로 만들어 사용 하여도 될 것이다. 그러나 비선형 특성을 고려하여 테이블로 사용함이 좋다. Fig. 17은 각각의 온도에서 가변저항의 변화에 따른 출력의 변화를 보여 주는데, R_b 가 150 Ω 이면 가열조건에서의 출력이 상온조건에서의 값보다 크게 나오므로 여기서는 정확한 유량측정이 불가능하며 저항값을 더욱 크게 하여 약 220 Ω 이면 일치하는 결과가 됨을 보이고 있다. 작은 유량에서는 R_b 가 220 Ω 에서 잘 일치하고 있으나 큰 유속에서는 200

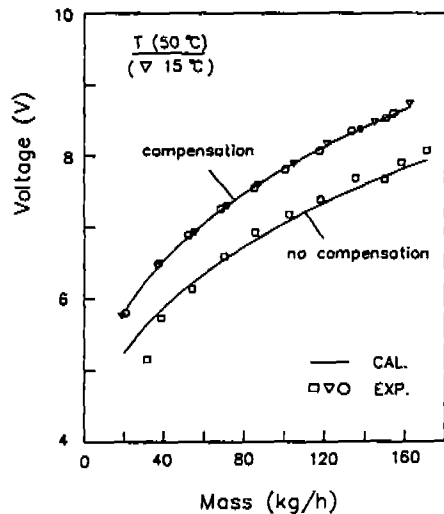
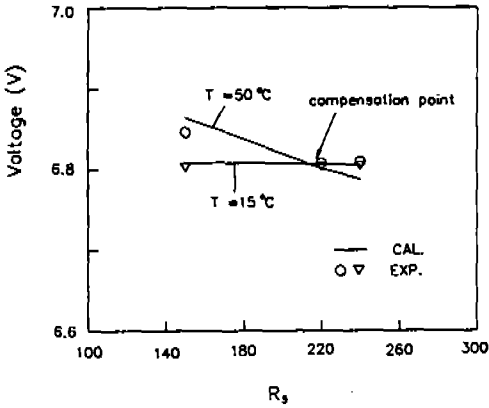
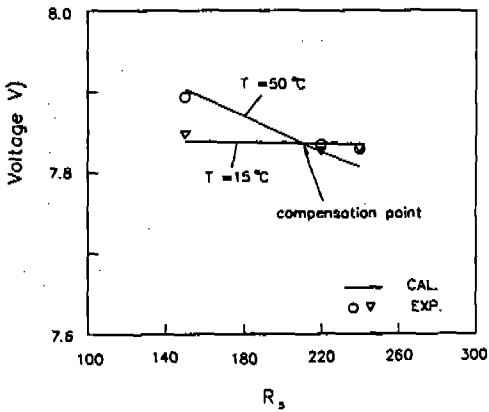


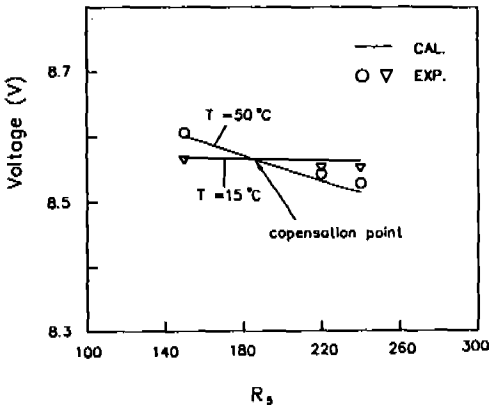
Fig. 16 Compensated output voltage of modeling and experimental results with mass compensation with $R_b = 220 \Omega$ (3 lines)



(a) mass = 50 (kg/h), Re = 21



(b) mass = 100 (kg/h), Re = 42



(c) mass = 150 (kg/h), Re = 63

Fig. 17 Modeling and experimental results with R_5 variations for mass compensation

Ω 정도에서 잘 일치하고 있다. 이 결과는 Fig. 16에서도 알 수 있듯이 작은 유량에서는 잘 일치하고 있으나, 큰 유량에서는 가열조건시의 출력이 조금 작게 나오는 경향을 설명해준다. Fig. 18은 R_5 가 200 Ω 과 220 Ω 에 대하여 상온조건과 가열조건에서의 출력을 비교하였는데 유량에 따라 과보상 지역과 미보상 지역이 발생한다. 앞으로 이 오차를 줄이는 연구가 필요하다.

유량 60 kg/h에서의 온도변화가 출력에 미치는 영향을 예측한 결과를 Fig. 19에 표시하였는데 유동온도가 50 $^{\circ}\text{C}$ 까지는 R_5 가 180 Ω 에서 일치하지만 유동온도가 75 $^{\circ}\text{C}$ 가 되면 R_5

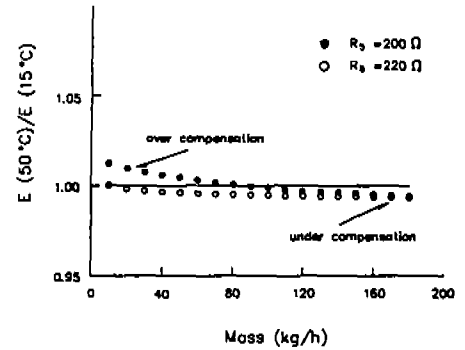


Fig. 18 Deviations of heating voltage from room temperature voltage with R_5 variations for mass compensation

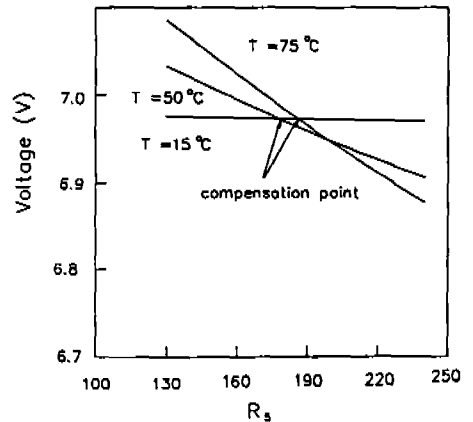


Fig. 19 Prediction of compensation point for varying temperature at 60 (kg/h)

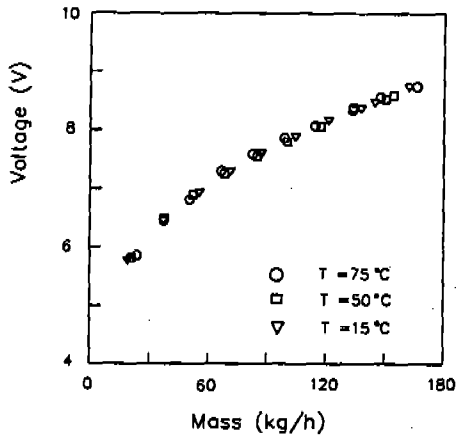


Fig. 20 Experimental results at each temperature

가 190 Ω에서 일치함을 보여준다. 이 예측은 Fig. 20의 실험결과에서도 알 수 있듯이 75°C에서의 출력은 상온조건시의 값보다는 조금 큰 값을 보여주는 결과와 일치한다. 그러므로 필요한 온도범위에서 최적의 보상을 얻기 위해서는 가변저항을 변화시켜 주어야 한다.

4. 4 결 토

본 연구에서 제작한 공기유량계의 정확성 및 신뢰성을 검토하기 위하여 독일의 Bosch사 제품의 공기유량계를 실험장치에 장착하여 실험하였다. 사실상 본 연구에서 사용된 공기유량계의 걸보기 치수는 Bosch사 제품의 공기유량계와 일치하므로 실험장치의 덕트 부분도 이들의 교환이 가능하도록 설계 제작되었다.

Fig. 21은 실험데이터를 최소자승법으로 처리함으로써 구하여진 상수 A, B를 나타내었다. 이 결과는 본 실험결과와 일치하는 경향을 보이나 상온조건에서의 값과 더 큰 차이를 보인다. 이것은 가열조건에서의 온도가 더욱 높기 때문이다. 실험결과를 Fig. 22에 나타내었으며, 가열조건에서의 출력을 상온조건에서의 출력으로 나눈 값을 Fig. 23에 나타내었다. 이 결과는 본 실험과 일치하고 있다. 상온조건에서의 출력에 많은 보상이 되었으나 역시 유량범위에 따라 과보상 지역과 미보상 지역이 생겨 유량측정 오차를 발생시킨다. 그러므로 이 공기유량계도 개선의 여지가 남아 있다. 이 분

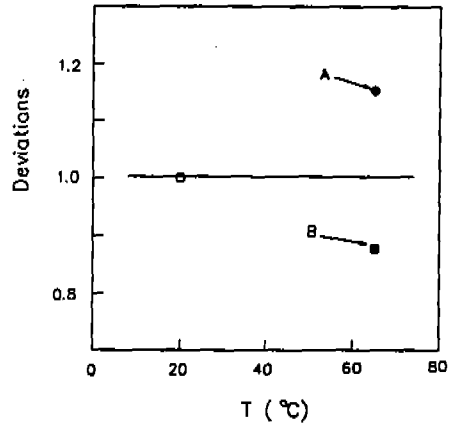


Fig. 21 Dependence of constants A and B in the heat transfer function on the flow temperature for Bosch air flow meter

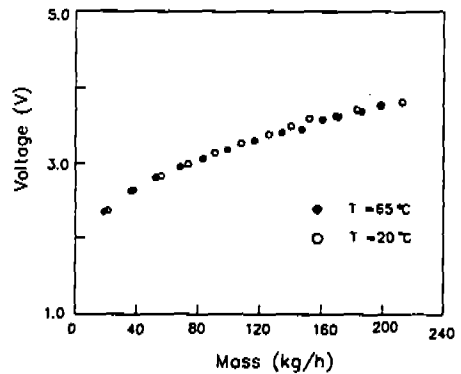


Fig. 22 Compensated voltage of Bosch air flow meter

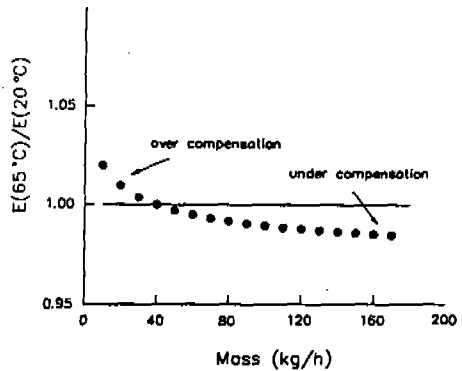


Fig. 23 Deviations of heating voltage from room temperature voltage for Bosch air flow meter

제를 해결하는 연구가 필요하다.

이상의 결과에서와 같이 열선은 온도에 상당히 민감하므로 온도변화에 대해 보상이 되어야 정확한 측정이 가능함을 알 수 있다. 이 열선은 속도에 대한 보상이 이루어지면 온도변화에 따른 속도측정에도 사용 가능하며, 유량에 대한 보상이 이루어지면 온도변화에 따른 유량측정에도 사용이 가능함을 알 수 있다. 그러나 각 속도에서 또는 유량에서 일치점이 달라 최적의 보상을 위해서는 각각에 따라 가변저항을 바꾸어 주어야만 한다. 그러므로 열선을 이용한 유량측정은 항상 오차를 발생시킨다. 낮은 속도에서는 복사량이 약 10% 정도이므로 중요한 오차의 하나이기는 하나, 가장 큰 오차발생 원인은 열선의 열전달계수의 온도의존성이 속도에 의존하는 것이다. 가변저항에 대한 실험결과에서 과보상 지역이 발생하는 것은 열전달계수가 이 지역에서 감소함을 나타낸다. 본 실험에서는 열선의 온도계수를 $0.0035 (/^{\circ}\text{C})$ 로 하였지만 만약 더 큰 값이라면 열전달계수는 온도증가에 따라 증가한다고 볼 수 있다. 그러므로 정확히 열선의 온도계수를 측정하여야 한다. 그리고 열선의 성질이 바뀌면 출력이 달라지므로 열선의 보존 문제를 고려하여 항상 보정곡선이 일치하도록 하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 열선을 이용한 유량측정을 하기 위하여 외부 온도변화에 보상된 시스템을 만들어 실험결과와 이론 모델링 계산결과를 비교 검토하였다. 열선을 이용한 정온도형 열선 유속계(CTA)는 유동의 속도측정에 많이 사용되는데, 이 열선은 속도 뿐만아니라 온도에도 민감하므로 약간의 유동온도 변화에도 측정오차를 발생시킨다.

(1) 보통의 CTA의 브리지에 단순히 온도보상저항, 열선 그리고 각 센서의 온도계수를 보정하기 위한 가변저항을 삽입함으로써 외부 온도변화에 보상된 시스템을 구성하였으며, 이 시스템으로 외부 유동온도 50°C 까지 제한된

속도범위에서 약 1%의 정확도로 보상된 결과를 얻었다.

(2) 두 센서의 온도계수 보정용 R_b 를 75Ω 으로 하여 열선의 출력을 유동속도에 관하여 보상할 수 있었고, 220Ω 으로 하여 유량에 관하여서도 보상할 수 있었다. 실험과 모델링계산결과는 잘 일치하므로 이 모델링은 실제시 적용이 가능하다. 그러나 각 보정시 유동속도에 따라 일치하는 가변저항이 조금씩 다르므로 원하는 범위에서 최적의 설계를 하여야 한다.

(3) 외부 온도보상시스템의 안정성 문제와 정확성 문제에 관하여는 세 가닥 열선의 경우가 한 가닥 열선보다 저항이 커 출력신호의 안정성을 보였다고 할 수 있다. 또한, 콤팩트한 회로를 구성하기 위하여는 두 센서의 온도계수가 다른 경우에 대해서와 온도보상저항의 0°C 때의 저항값이 다른 경우에 대해서도 실험이 필요하다.

후 기

이 연구는 주식회사 적고와 한국기계연구소의 지원으로 이루어졌으므로 이에 심심한 감사의 뜻을 표하며, 특히 유량계 및 각종 자료들을 제공하여 주신 김응서 교수님에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Ali, "Hot wire anemometer in moderately heated flow," Rev. Sci. Instrum. 46 185-91, 1975.
2. F. Sakao, "Constant temperature hot wire for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations," J. Phys. E: Sci. Instrum. 6 913-6, 1973.
3. R.E. Drubka, J. Tan-atichat and H.M. Nagib, "Analysis of temperature compensating circuits for hot-wires and hot-films," DISA information, 22, pp. 5-14, 1977.

4. S. Takagi, "A hot-wire anemometer compensated for ambient temperature variations," *J. Phys. E.* 19, pp. 729-743, 1986.
5. 고상근, 이택식, R. J. Moffat, "Static Response of the Constant Temperature Anemometer Including the Effect of Both the Finite Amplifier Gain and the Fluid Temperature," 대한기계학회 춘계 학술대회, 전북대학교, pp. 389-400, 1989.
6. 이택식, 고상근, "열선유속계의 시작 및 성능 향상에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 10권, 제 4호, pp. 541~557, 1986.
7. R. Sauer, "Hot Wire Air Mass Meter-A New Air Flow for Gasoline Fuel Injection Systems," SAE 800468, 1980.
8. J. S. Sumal and R. Sauer, "Bosch Mass Air Flow Meter-Status and Further Aspects," SAE 840137, 1984.
9. 최만수, 유정열, 노승탁, "수직 열선 근처의 과도 열전달에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 7권, 제 4호, pp. 461~468, 1983.
10. G. A. Gurtcheff and L. D. Hazelton, "Mass Airflow Sensor: Ambient Temperature Compensation Design Consideration," SAE 860410, 1986.
11. S. Mizutani and T. Ohtake, "Recent Sensor Technology in Japan", SAE 860410, 1986.
12. Y. Nishimura, Y. Ohyama and T. Sasa-yama, "Hot Wire Air Flow Meter for Engine Control System", SAE 830615, 1983.
13. R. J. Bremer, "Applications of a Mass Air Flow Sensor to the Automotive Environment," SAE 830930, 1983.
14. D. C. Collis and M. J. Williams, "Two-Dimensional Convection from Heated Wires at Low Reynolds numbers," *J. Fluid Mechanics*, 6, pp. 357-384, 1959.
15. *Fluid Meters—Their Theory and Applications*, 6th Ed. ASME, New York, 1971.
16. H. H. Bruun, "On the temperature dependence of constant temperature hot wire probes with small wire aspect ratio," *J. Physics, E*, 8, pp. 942-951, 1975.
17. J. O. Hinze, "Turbulence," pp. 83-174, 1975.