

<技術論文>

자동차용 정온도 열선식 공기유량계의 개발에 관한 연구

조성권* · 유정열** · 고상근** · 김동성***

(1992년 5월 28일 접수)

A Study on the Development of Constant Temperature Hot Wire Type Air Flow Meter for Automobiles

Sung Kwon Cho, Jung Yul Yoo, Sangken Kauh and Dong-Sung Kim

Key Words : Constant Temperature Hot Wire Type Air Flow Meter(정온도 열선식 공기유량계), DC-Amplifier(직류증폭기), Heat Transfer Coefficient(열전달 계수), Temperature Compensation(온도 보상)

Abstract

Constant temperature hot wire air flow meter for automobiles requires temperature compensation system because hot wire output signal is sensitive to ambient temperature variations as well as fluid velocity. The objectives of the present study are to design an air flow meter circuit which is capable of compensating the hot wire output signal for ambient temperature variations and to investigate the mechanism of such temperature compensation. This circuit is composed of platinum hot wire, platinum resistor, two variable resistors, a constant resistor and a DC-amplifier. In particular, by simply replacing a constant resistor in one of the bridge arms of the conventional circuit with platinum resistor and a variable resistor for the purpose of temperature compensation, the deviation of output signal with respect to ambient temperature variations between 27°C and 70°C could be reduced to less than 2.5% for mass flow rate and to less than 5% for velocity respectively. The mechanism of temperature compensation against ambient temperature variations was explained by means of measuring the heat transfer coefficient with hot wire temperature variations and analyzing conventional empirical equations qualitatively.

———— 기 호 설 명 ————

A, B, a', b'	: 열선의 열전달계수 실험식에서의 계수	E	: 브릿지상단에서의 전압(V)
A_m, B_m, B_u	: Curve-fitting식의 계수	E_1	: 가변저항 R_4 상단에서의 전압(V)
A_r	: 열선의 열전달 면적(m^2)	E_2	: 고정저항 R_3 상단에서의 전압(V)
α	: 과열비 (R_w/R_{wf})	E_0	: 출력전압(V)
D	: 덕트의 내경(m)	G	: 직류증폭기의 이득
d	: 열선의 직경(m)	h	: 열선의 열전달계수($W/(m^2K)$)
		I	: 열선에 흐르는 전류(A)
		k	: 공기의 열전도율($W/(mK)$)
		k_r	: 기준온도에서 공기의 열전도율($W/(mK)$)
		l	: 히터와 열선사이의 덕트 길이(m)

*정회원, 서울대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 서울대학교 기계공학과

***한국기계연구소

- l_2 : 열선과 오리피스사이의 덕트 길이 (m)
- M : 유량 (kg/s)
- Nu : Nusselt수 (hd/k)
- n : 열선의 열전달계수 실험식에서의 지수
- Re : Reynolds수 ($\rho ud/\mu$)
- R_3 : 출력용 고정저항 (Ω)
- R_4 : 과열비 조정용 가변저항 (Ω)
- R_5 : 온도 보상용 가변저항 (Ω)
- R_t : 유동 온도에서의 온도보상용 백금저항 (Ω)
- R_{t0} : 0°C에서의 온도보상용 백금저항 (Ω)
- R_w : 열선의 저항 (Ω)
- R_{w0} : 0°C에서의 열선저항 (Ω)
- R_{wf} : 유동온도와 열선온도가 같을 때 열선저항 (Ω)
- T, T_f : 유동온도 (°C)
- T_m : 막온도 ($(T_w + T_f) / 2$) (°C)
- T_r : 물성치 산출을 위한 기준온도
- T_w : 열선의 온도 (°C)
- U, u : 유동속도 (m/s)
- α_t : 온도보상용 백금저항의 온도계수 (/°C)
- α_w : 열선의 온도계수 (/°C)
- ρ : 공기의 밀도 (kg/m^3)
- μ : 공기의 점성계수 ($kg/(ms)$)
- μ_r : 기준온도에서 공기의 점성계수 ($kg/(ms)$)

1. 서론

선진국에서는 이미 전자적인 방법을 통한 정확한 공기연료 혼합비의 제어방식과 연료분사장치를 개발하여 자동차에 탑재하는 수준에 이르고 있다. 이러한 장치는 여러 가지 요소로 구성되나, 정확한 공연비 제어를 위해서는 엔진으로 흡입되는 공기량을 정밀하게 측정할 수 있는 공기유량계가 절대적으로 필요하다. 공기유량계로서는 플랩형, Karman와류형들이 많이 사용되었으나, 최근에는 정확한 유량 측정, 빠른 응답속도를 위해 점차적으로 정온도 열선식 공기유량계로 대체해가고 있는 실정이고⁽¹⁾⁽²⁾ 국내에서도⁽³⁾ 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 유량계는 응답속도가 빠르고 정

확한 유량을 감지할 수 있는 반면에 열선주변의 유동 온도에 따라 오차를 유발한다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 정온도 열선식 공기유량계의 전체적인 회로를 구성한 다음, 여기에 간단한 온도보상시스템을 첨가함으로써 유동온도의 변화에 관계없이 일정한 출력이 나오도록 하고, 이에 관련된 온도보상시스템의 메카니즘을 규명하고자 한다. 온도보상시스템은 여러 가지가 알려져 있으나, Drubka(1977)⁽⁴⁾가 열선브릿지에 단지 온도센서(thermistor)를 삽입하고, 과열비(overheat ratio), 열선의 냉저항과 작동 중의 저항차, 열선의 브릿지상단에서의 출력 중 한 가지를 일정하게 유지시켜 온도보상을 수행하는 방법을 제안하였다. Takagi(1985)⁽⁵⁾는 위의 방법 중 과열비를 일정하게 유지시키는 방법을 택하고, 출력으로 브릿지상단의 전압이 아닌 열선에 흐르는 전류를 감지함으로써 더욱 더 간단한 온도보상시스템을 제안하였다. 본 연구는 바로 이 방법을 채용하여 온도보상을 수행한다.

2. 공기유량계의 원리 및 이론

Fig. 1에 나타난 바와 같이, 온도보상시스템이 첨가된 열선식 공기유량계의 전체적인 구성은 다섯 개의 저항으로 구성된 브릿지부와 브릿지 중간단에서의 전압차를 증폭하여 다시 브릿지상단으로 피드백(Feedback)을 걸어 주는 직류 증폭기로 나눌 수

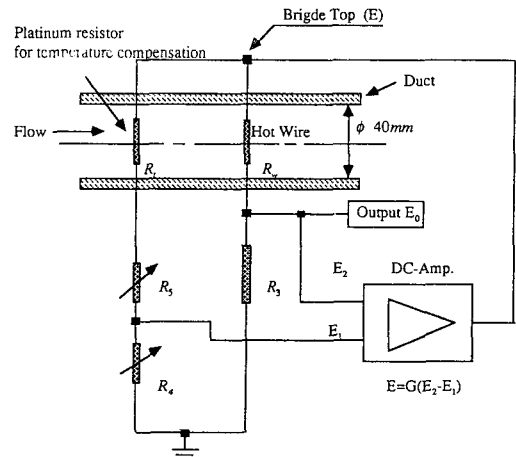


Fig. 1 Constant temperature hot wire type air flow meter with compensation system for fluid temperature variations

있다.

브릿지부는 유동장의 온도에 따라 저항이 민감하게 변하는 백금열선 R_w , 온도보상용 백금저항 R_t , 온도가 변하더라도 일정한 저항을 유지하는 R_3 , R_4 , R_5 로 구성된다. R_3 는 고정저항이므로 전압=전류×저항의 관계에 따라 열선에 흐르는 전류를 전압으로 변환시켜 주는 출력단자로서 이용된다. R_4 와 R_5 는 가변저항으로 각각 열선의 과열비 조정과 온도보상용이다. 열선의 온도에 따른 저항변화는 2차항을 무시하면 다음과 같다.

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

여기서 α_w 는 온도보상시스템에서 R_5 를 결정하는데 중요하다. 직류증폭기는 브릿지의 중간 부분인 R_3 의 상단전압 E_2 와 R_4 의 상단전압 E_1 의 전압차이를 G (Gain=1000~5000)배 정도 증폭하여 다시 브릿지상단으로 피드백을 걸어 주어, 브릿지가 항상 평형을 이루도록 한다.

전원이 공급되지 않은 상태에서 유속이 없는 유동장에 R_w 와 R_t 가 설치되어 있다면, 공기와 두 저항이 각각 열평형을 이루기 때문에 저항은 다음과 같을 것이다.

$$R_w = R_{w0} (1 + \alpha_w T_f) \quad (2)$$

$$R_t = R_{t0} (1 + \alpha_t T_f) \quad (3)$$

회로가 작동할 때 열선으로부터 복사열전달량과 전도열전달량은 비교적 작으므로 이들을 무시한 상태에서 열선의 발열량과 대류열전달량이 평형⁽⁶⁾을 이뤘다면,

$$I^2 R_w = h A_r (T_w - T_f) \quad (4)$$

이고 식(1), (2)로부터

$$I^2 = \frac{h A_r}{\alpha_w R_{w0}} \left(1 - \frac{R_{wf}}{R_w}\right) \quad (5)$$

$$= \frac{h A_r}{\alpha_w R_{w0}} \left(1 - \frac{1}{a}\right), \quad a = \frac{R_w}{R_{wf}} \quad (6)$$

이 된다. 여기서 a 는 과열비를 나타낸다. 직류증폭기의 이득이 커서 브릿지가 평형을 이룬다면,

$$R_w R_4 = R_3 (R_t + R_5) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R_w &= \frac{R_3}{R_4} (R_t + R_5) = \frac{R_3}{R_4} (R_{t0} + R_{t0} \alpha_t T_f + R_5) \\ &= \frac{R_3 (R_{t0} + R_5)}{R_4} \left(1 + \frac{\alpha_t R_{t0} T_f}{R_{t0} + R_5}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

을 만족하고, 이를 식(2)와 함께 식(5)에 대입하

면,

$$I^2 = \frac{h A_r}{\alpha_w R_{w0}} \left(1 - \frac{R_4 R_{w0} (1 + \alpha_w T_f)}{R_3 (R_{t0} + R_5) (1 + \alpha_t R_{t0} T_f / (R_{t0} + R_5))}\right) \quad (9)$$

이 된다. 이때 출력전압은

$$E_0 = \left[\frac{h A_r R_3^2}{\alpha_w R_{w0}} \left(1 - \frac{R_4 R_{w0} (1 + \alpha_w T_f)}{R_3 (R_{t0} + R_5) (1 + \alpha_t R_{t0} T_f / (R_{t0} + R_5))}\right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

된다. 열전달계수가 유동속도만의 함수라는 가정에 유동온도 T_f 에 관계없이 일정한 출력전압을 얻기 위해서는, 식(10)에서 R_5 가 다음 식(11)을 만족하도록 설정해주면 된다.

$$\alpha_w = \frac{\alpha_t R_{t0}}{R_{t0} + R_5} \quad (11)$$

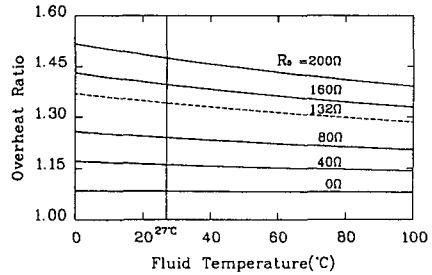


Fig. 2 Overheat ratio vs. fluid temperature

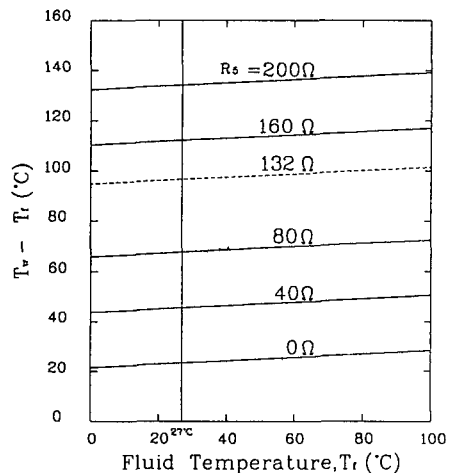


Fig. 3 Temperature difference between hot wire and fluid vs. fluid temperature

그러나, 열전달계수 h 의 유동온도에 대한 변화는 유동속도에 대한 변화 보다는 작지만, 그래도 무시할 수 없을 만큼 큰 편이다. 결국, 최종적으로 R_0 를 결정하기 위해서는 열전달계수 h 의 유동온도와 유동속도에 따른 경향을 정확히 파악해야 한다. 열선의 열전달계수를 측정하는 일은 간단하지 않으며, 열선의 형태, 유동조건 변화, 물성치 산출방법 등에 따라 항상 일관성 있는 경향을 보이는 것은 아니다. 그러므로, 우선은 실험을 통해 시행오차적으로 같은 유량에 대해 T_f 가 변하더라도 일정한 출력전압이 얻어질 때의 R_0 를 구한다. 구한 결과

$$\alpha_w > \frac{\alpha_t R_{t0}}{R_{t0} + R_0} \quad (12)$$

을 만족한다면 식 (8), (9), (10)에서 알 수 있듯이, 이러한 온도보상시스템을 채용한 공기유량계에서는 일정한 출력전압에 대해 유동온도 T_f 가 올라갈수록 열선의 온도 상승과 함께 열전달계수 h 는 증가함을 간접적으로 예측할 수 있다. Fig. 2는 직류증폭기의 이득이 충분히 커서 브릿지가 평형을 이루었다는 가정하에 R_0 의 변화에 따른 과열비의 변화를 나타내고 있다. R_0 가 커질수록 유동온도 상승에 대해 과열비의 감소폭은 더욱 커지고 있음을 알 수 있다. 더구나 실제의 직류증폭기 이득은 유한이기 때문에 과열비의 전체적인 값은 이보다 조금 더 떨어질 것이다. Fig. 3은 같은 가정하에 열선의 온도와 유동온도의 차를 계산한 것을 나타낸 것으로서 모든 R_0 에 대하여 유동온도가 상승함에 따라 온도차는 더욱 커지고 있음을 보여주고 있다.

3. 공기유량계 제작 및 실험적 고찰

3.1 공기유량계 제작

열선은 Fig. 4에서와 같이 가능하면 냉저항을 크게 하고 공기유량 측정에 적합하도록 길이를 길게 해서 단면 A-A에 Z자형으로 설치하였다. 직경이 작은 철심지지대를 사용하여 Z자형의 양끝점에서는 납을 녹여 접합하였고 중간단 두점에서는 충분한 장력을 유지하도록 지지하였다. 유동은 직경이 52 mm인 관을 지나 열선이 설치되어 있는 직경 40 mm의 Venturi의 목부분을 통과하여 다시 직경 52 mm인 관을 지나도록 하였다. 유동을 균일하게 하

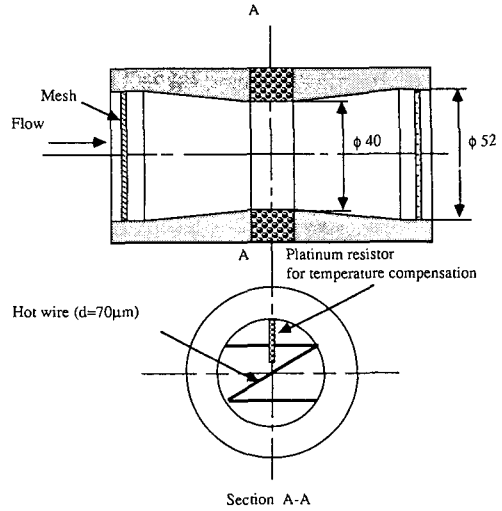


Fig. 4 Configuration of hot wire and platinum resistor for temperature compensation placed in the duct

기 위하여 직경 52 mm인 관 양쪽에 Mesh(격자간격 : 2.5 mm, 와이어의 직경 : 0.4 mm인 정사각형격자)를 설치하였으며, Venturi의 수축, 확대부분에 14%의 구배를 주었다. 열선으로는 내구성을 고려해서 직경 70 µm이고, 길이 약 10 cm인 백금선을 사용하였다. 통상적으로 유속을 측정하기 위한 열선은 열용량이 적고 유동에 교란을 주지 않도록 직경 5 µm인 것을 사용하나 본 연구에서는 평균적인 유량만을 측정하고 내구성이 커야 하므로 훨씬 굵은 열선을 사용하였다. 열선의 저항은 25°C에서 2.407Ω이었다. 열선의 온도계수는 직접 측정을 하지 않고 Bentley⁽⁷⁾의 실험결과인 $\alpha_w = 3.9092 \text{ E-3}/^\circ\text{C}$ 를 인용하였다. 이 결과를 가지고 R_{w0} 를 역환산하면 2.177 Ω이었다. 온도보상용 백금저항은 DIN43760 Pt500 Ω으로서, $\alpha_t = 3.85 \text{ E-3}/^\circ\text{C}$ 인 써미스터이다. 가능하면 유동을 방해하지 않도록 열선을 설치한 곳보다 상류에 설치하고 단면적이 작은 면을 유동방향과 수직이 되게 하였다.

직류증폭기는 OP앰프(operational amplifier)와 트랜지스터(transistor)를 사용하여 자체 제작하였다. 이 직류증폭기를 구성하는 기본적인 회로는 오직 두 입력전압차만이 증폭되는 차동증폭기⁽⁸⁾회로이다. 전체적인 회로는 이러한 차동증폭기를 두번 사용하여 이득을 높이고, 두번째 차동증폭기에서는 가변저항을 사용하여 이득을 조절할 수 있도록 하

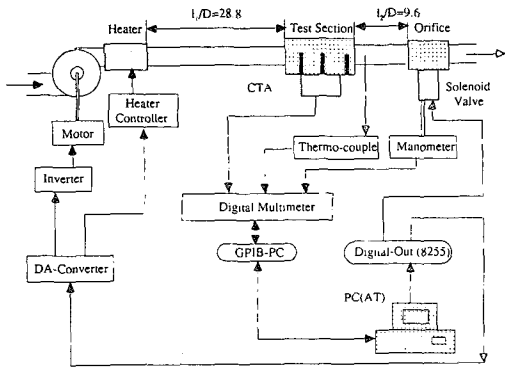


Fig. 5 Schematic layout of data acquisition apparatus

였다. 여기에 전류증폭율이 매우 큰 달링턴 트랜지스터를 사용하여 열선에 전류를 충분히 흘릴 수 있도록 하였다. 또한, 자동차에 바로 탑재할 수 있도록 전원 전압은 자동차의 전원 전압과 같은 +12V로 하고, 열선과 온도보상용 저항들을 브릿지 상단 부분에 설치함으로써 출력전압이 자동차 전원과 같은 그라운드를 갖게하여 ECU로의 연결선을 줄일 수 있었다. 보다 상세한 회로도 및 설명을 위해서는 조성권⁽⁹⁾을 참조하기 바란다.

3.2 실험장치 및 방법

유동온도에 변화에 따른 최적의 온도보상시스템을 고찰하기 위한 실험장치는 Fig. 5에 나타나 있듯이 송풍기, 히터, 계측기기, 제어기, 공기유량계, 관, 오리피스, PC로 구성된다. 모든 장치들은 PC에 의해서 중앙통제가 되도록 구성하였다. 유량범위를 최고 244.9 kg/h까지 25단계로 나누어 매번 유동장의 온도가 프로그램 상에 설정되어 있는 조건을 만족하도록 제어하면서 측정하였다. 온도제어 범위는 1°C 이내로 충분히 할 수 있었으며, 유동의 속도와 유량은 매 단계마다 환산하여 PC의 스크린 상에 모든 상황이 나타나도록 프로그래밍하였다. 유동온도의 제어방법, 오리피스를 이용한 유량측정 방법 등 상세한 계측방법에 대하여는 조성권⁽⁹⁾을 참조하기 바란다.

4. 실험결과

본 연구에서 제작한 공기유량계의 출력은 상당히 안정된 파형을 나타내었고, 유량과 속도에 대해 각각 온도보상을 수행하였다. 또한, 열전달계수에 대

한 부분적인 경향을 고찰하기 위하여 열선의 온도를 변화시키면서 열전달계수를 측정하였다.

4.1 유량에 대한 온도보상

유량에 대한 최적의 온도보상시스템을 구성하는 R_s 의 값을 찾기 위해 유체의 온도를 27~70°C까지 변화 시키면서 시행오차적으로 실험을 수행한 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 $R_s=132\Omega$ 일때 전체적인 유량범위에서 유동온도 변화에 관계없이 거의 일정한 출력을 나타내고 있다. 또한, 실온 27°C에서의 출력을 기준으로 비교해 보았을 때 오차는 최고 2.5%⁽⁹⁾정도였고 유량이 작은 영역에서는 과보상, 큰 영역에서는 미보상을 나타내고 있다. Fig. 7, 8은 브릿지상에 온도보상용 백금저항과 온도보상용 가변저항을 설치하였기 때문에 나타나

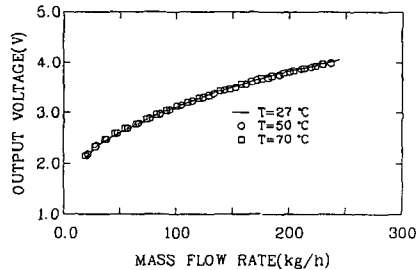


Fig. 6 Output voltage vs. mass flow rate compensated for fluid temperature variations with $R_s=132\Omega$

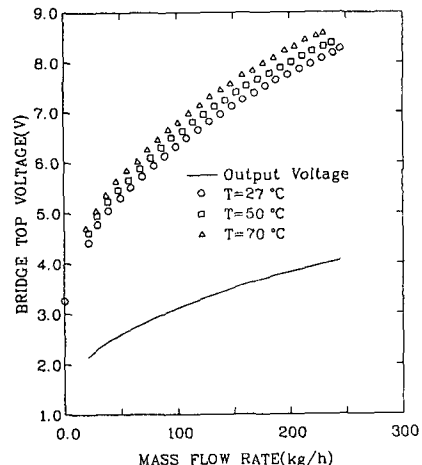


Fig. 7 Bridge top voltage vs. mass flow rate compensated for fluid temperature variations with $R_s=132\Omega$

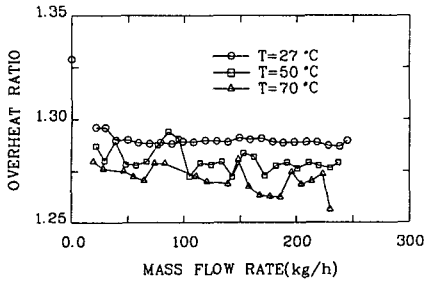


Fig. 8 Overheat ratio vs. mass flow rate compensated for fluid temperature variations with $R_s = 132 \Omega$

는 영향을 보여주고 있다. 보통 온도보상시스템이 없는 정온도식 열선유속계에서는 브릿지상에서 열선 이외의 저항들은 주위 유동온도 변화에 관계없이 저항이 일정하기 때문에 브릿지 평형식으로부터 열선의 저항도 일정한 값을 유지한다. 반면에 온도보상시스템이 첨가된 이 공기유량계는 유동온도가 상승하면 온도보상용 백금저항 R_t 가 상승하고 식(8)에서의 브릿지 평형조건으로부터 열선의 저항도 상승한다. Fig. 7은 유동온도가 상승함에 따라 열선의 저항이 상승하기 때문에 브릿지상단의 전압이 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 열선의 열전달 계수가 속도만의 함수라는 가정하에서는 이론적인 고찰에서의 식(11)로부터 온도보상용 가변저항 $R_s = -7.57\Omega$ (저항이 음수인 것은 열선과 온도보상용 가변저항을 직렬로 연결해야 함을 의미)일때 과열비가 일정하고 이에 따라 출력도 일정하지만, 실제로는 열전달계수의 유동온도에 대한 변화를 고려하여 이보다 큰 $R_s = 132\Omega$ 를 택하여 보상을 하였기 때문에 Fig. 8에 나타나 있듯이 유동온도가 상승함에 따라 과열비는 전반적으로 감소하고 있다. 여기서, $T = 50^\circ\text{C}$, 70°C 일때 유량에 따라 과열비의 등락폭이 큰 이유는 공기온도 상승시 유동이 불안해지는 것을 충분히 감쇠시키지 못했기 때문이다. 만약에 과열비를 유동온도에 관계없이 항상 일정하게 유지시켜 준다면, 유동온도 T_f 가 상승하더라도 열선과 공기의 온도차($T_w - T_f$)는 R_w 의 상승으로 인하여 커지게 되고 이것은 열전달 계수 h 의 상승을 초래하여 출력은 실온보다 크게 나올 것이다. 결국, 전체적인 온도보상시스템의 메카니즘은 흐르는 유체온도 상승에 따라 식(4)에서 $(T_w - T_f)/R_w$ 는 감소하고, 이때 열전달 계수 h 는 $(T_w - T_f)/R_w$ 의 감소분만큼 상승하여 이 두 값의

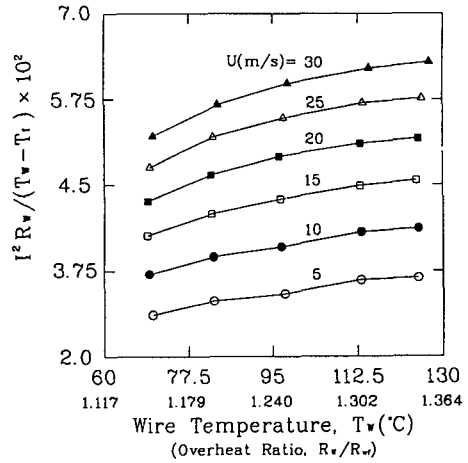


Fig. 9 Heat transfer coefficient with hot wire temperature variations

값으로 이루어진 출력전류 I 는 일정한 값을 유지하는 것이다. 그러나, 이 두값의 감소량과 증가량이 유량범위에 따라 다르기 때문에 과보상영역과 미보상영역이 나타나는 것이다. 따라서, 공기유량계 설계시 열전달계수가 정확히 알려 져야만 충실한 온도보상을 수행할 수 있는 것이다.

열선의 열전달계수에 관한 많은 실험적 연구결과들은(10),(11),(12),(13),(14) 다음과 같은 실험식으로 주로 표현된다.

$$Nu = a' + b' Re^n \quad (13)$$

$$h = A(T_w, T_f) + B(T_w T_f) \left(\frac{\rho u d}{\mu} \right)^n \quad (14)$$

이때 온도에 따른 물성치는,

$$\frac{k}{k_r} = \left[\frac{T}{T_r} \right]^{0.86}, \quad \frac{\mu}{\mu_r} = \left[\frac{T}{T_r} \right]^{0.9} \quad (15)$$

를 대부분 이용한다.(15) 여기서 계수 A, B 는 $(T_w - T_f)$ 의 일차함수 혹은, (T_w/T_f) 의 멱함수로 표현되지만, 각각 함수에 대한 계수는 여러 실험결과에서 많은 차이를 보이고 있다. Fig. 9는 유동온도가 고정되어 있는 상태에서 열선의 온도를 변화시킬때 본 공기유량계 열선의 열전달계수의 변화를 보여주고 있다. Fig. 9에서 계수 A 는 유동속도가 0인 자연대류상태에서의 값이기 때문에 알 수 없고, 계수 B 는 유동속도가 클수록 열전달계수의 상승폭이 큰것으로 보아 선형적이기 보다는 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 유량에 대한 보상을 수행한다면, 식(6), (14)로부터 출력전압은

$$E_0^2 = [A + B(\frac{d}{\mu})^n (\rho u)^n] A_r (1 - 1/a) \frac{R_s^2}{\alpha_w R_{w0}}$$

$$= A_m + B_m M^n \tag{16}$$

$$A_m = A A_r (1 - 1/a) \frac{R_s^2}{\alpha_w R_{w0}},$$

$$B_m = B (\frac{d}{\mu})^n A_r (1 - 1/a) \frac{R_s^2}{\alpha_w R_{w0}}, \quad M = \rho u$$

이고, 속도에 대한 보상이라면

$$E_0^2 = A_m + B_m \rho^n u^n = A_m + B_u u^n, \quad B_u = B_m \rho^n \tag{17}$$

라고 할 수 있다. 출력값을 가지고 유량에 대해 식 (16)의 우변 항과 같은 식으로 curve-fitting을 수행한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 통상 제측용 열선유속계의 출력에서의 n은 0.45~0.5정도이며 유동온도변화에도 거의 일정한 값을 나타낸다고 알려져 있다. 본 연구에서 제작한 공기유량계는 n=0.708로서 이 범위에서 상당히 벗어난 경향을 보이고 있다. 그 이유는 다음 두 가지 원인 때문인 것으로 추측된다. 첫째, 통상 사용되는 제측용 열선의 길이는 2 mm 정도이지만 본 연구의 열선의 길이는 10 cm 정도로 관내에 상당히 폭 넓게 설치되어 있으므로 속도가 작을 때 열선에서의 유량감지 차이가 발생하기 때문인 것으로 추측된다. 둘째, 유동속도가 없을 때와 있을 때의 과열비가 서로 다르게 나타나는 전기회로상의 문제이다. Fig. 8에서 공기 온도 27°C 일 때 과열비의 변화를 살펴보면, 유량이 0일 때는 약 1.326인 것에 반해 유동이 있을 때는 약 1.290으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 유량이 0일 때 더 큰 출력력을 나타낼 수 있고 출력곡선의 모양을 변화 시킬 수 있다. 하지만, 이미 얻은 검정곡선을 이용하여 자동차용 공기유량계로 사용한다면 큰 문제는 없을 것이다. Fig. 11은 같은 결과를 식 (17)의 우변 항과 같은 식으로 유동속도에 관해 curve-fitting을 수행한 것으로서 유동온도의 증가에 따라 기울기가 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이것은 공기를 이상기체로 가정한다면 밀도는 유동온도에 대해 반비례하는 반면에 계수 B_m은 Fig. 10에서와 같이 거의 일정하기 때문에, 결과적으로 유동온도 상승에 따라 계수 B_u는 감소한다는 것으로 설명될 수 있다. 따라서 속도에 관한 보상은 공기의 밀도가 변하는 만큼 계수 B_m을 보정하여 계수 B_u가 일정한 값을 유지하도록 다른 R_s를 선택해야 만이 가능할 것이다.

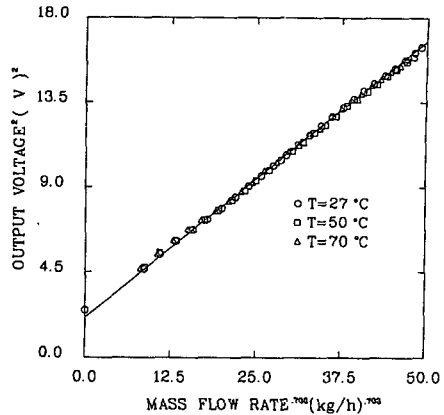


Fig. 10 Curve-fitting of output voltage vs. mass flow rate compensated for fluid temperature variations with R_s=132 Ω

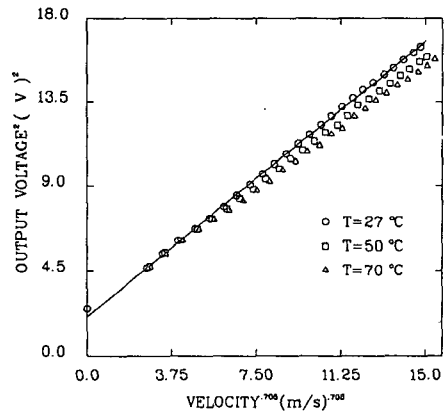


Fig. 11 Curve-fitting of output voltage vs. velocity compensated for fluid temperature variations with R_s=132 Ω

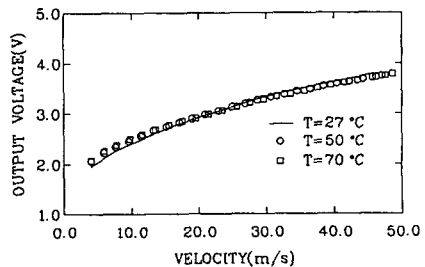


Fig. 12 Output voltage vs. velocity compensated for fluid temperature variations with R_s=80 Ω

4.2 속도에 관한 온도보상

속도에 관한 온도보상은 계수 B_m 이 아니라 밀도까지 포함된 계수 B_d 를 일정하게 유지함으로써 실현될 수 있다. 이것은 유량에 대한 보상시의 $R_s=132\Omega$ 에 비해 낮은 값인 $R_s=80\Omega$ 을 선택하여 과열비의 감소폭을 줄임으로써 가능하였으며, Fig. 12는 그결과를 나타내고 있다. Fig. 6에 나타난 유량에 대한 보상과는 달리 오차도 최고 5%⁽⁹⁾정도이고, 속도가 작은 영역과 큰 영역에서 각각 과보상과 미보상량이 커지고 있다. 결국, 이 열선식 공기유량계는 속도센서보다는 유량센서로서 더 적합하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

간단한 온도보상시스템을 채용하여 회로를 구성하고 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 열선형 공기유량계의 컴팩트한 회로를 구성하여 안정된 출력을 얻어냄으로써 회로설계의 기반을 조성하였다.
- (2) 유동온도 27~70°C 변화 범위에서 온도보상을 수행하여 오차를 유량에 대해서는 2.5%, 속도에 대해서는 5%이내로 줄일 수 있었다.
- (3) 열전달계수의 경향을 정성적으로 파악하여 온도보상메카니즘을 설명할 수 있었다.

후 기

이 연구는 주식회사 적고 및 한국기계연구원의 지원으로 이루어 졌으므로 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Sauer, R., 1980, "Hot Wire Air Mass Meter-A New Air Flow for Gasoline Fuel Injection Systems," SAE 800468.
- (2) Sumal, J. S. and Sauer, R., 1984, "Bosch Mass Air Flow Meter: Status and Further Aspects," SAE 840137.
- (3) 이민형, 유정열, 고상근, 윤준원, 김사량, 김동성, 1991, "온도보상을 고려한 열선형 공기유

량 측정시스템에 관한 실험적 연구," 한국자동차 공학회지 제13권 제4호, pp. 62~75.

- (4) Drubka, R. E., Tan-atichat, J. and Nagib, H. M., 1977, "Analysis of temperature compensating circuits for hot-wires and hot-films," DISA information, Vol. 22, pp. 5~14.
- (5) Takagi, S., 1985, "A hot-wire anemometer compensated for ambient temperature variations," J. Phys. E., Vol. 19, pp. 729~743.
- (6) Gurtcheff, G. A. and Hazelton, L. D., 1986, "Mass Airflow Sensor: Ambient Temperature Compensation Design Considerations," SAE 860406.
- (7) Bentley, J. P., 1984, "Temperature sensor characteristics and measurement system design," J. Phys. Instrum., Vol. 17., pp 430~439.
- (8) Robert, F. C. and Frederic, F. D., 1987, "Operational Amplifiers Linear and Integrated Circuits," 3rd edition.
- (9) 조성권, 1992, "자동차용 정온도 열선식 공기유량계의 개발에 관한 실험적 연구," 서울대학교 공학석사학위논문.
- (10) Collis, D. C. and Williams M. J., 1959, "Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers," J. Fluid Mechanics, Vol. 6, pp. 357~384.
- (11) Bruun, H. H., 1975, "On the temperature dependence of constant temperature hotwire probes with small wire aspect ratio," J. Phys. E., Vol. 8, pp. 942~951.
- (12) Abdel-Rahman, A., Tropea C., Slawson P., Strong A., 1987, "On temperature compensation in hot-wire anemometry," J. Phys. E., Vol. 20, pp. 315~319.
- (13) Ali, S. F., 1975, "Hot-wire anemometry in moderately heated flow," Rev. Sci. Instrum., Vol. 46, pp. 185~191.
- (14) 송계영, 1991, "온도가 실린더 주위의 열전달 계수에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," 서울대학교 공학석사학위논문.
- (15) Morrison G. L., 1974, "Effects of fluid property variations on the response of hot-wire anemometers," J. Phys. E., Vol. 7, pp. 434~436.