

# 열선유속계의 신기술

고상근 · 이신표

## New Technologies on Hot Wire Anemometry

Sang-Ken Kauh · Shin-Pyo Lee



- 고상근(서울대 기계공학과)
- 1956년생.
- 열유체계측제어, 열전달을 전공하였으며, 메카트로닉스 분야에 관심을 가지고 있다.



- 이신표(서울대 기계공학과 열전달실 협실)
- 1963년생.
- 열선유속계의 성능향상, 열유동계측 및 센서 개발과 난류유동에 관심이 있다.

### 1. 머리말

열선유속계는 유속, 특히 난류를 측정하는 장치로서 정온도형 열선유속계(CTA : Constant Temperature Anemometer)와 정전류형 열선유속계(CCA : Constant Current Anemometer)가 있으나 현재는 정온도형 열선유속계가 정전류형 열선유속계보다 빠른 주파수 응답특성을 비롯한 많은 장점을 가지고 있어서 널리 사용되고 있다. 가는 열선의 온도를 주위 유체보다 높게 유지할 때, 그 열선으로부터 유체로의 열손실이 발생한다. 즉 유체의 속도가 빨라지면 열손실량이 커지며, 그 열손실량을 측정하면 속도를 계산해 낼 수 있다. 이와 같은 원리를 이용한 열선유속계가 지난 40년간 널리 사용되어 왔으며, 최근의 반도체 기술의 발달로 유속계의 정밀도 및 신뢰성 향상이 이루어졌다. 그러나 열선유속계는 제품의 성능보다 그 사용자의 기술 수준에 따라 이용가치가 달라질 수 있다고 여겨지며, 그 원리를 잘 이해하여야 정밀계측이 가능할 것이다.

열선유속계와 관련된 최근의 연구는 열선 주위의 열전달계수를 명확히 규명하는 것,<sup>(1)</sup> 열선의 과열비 및 주위 유체의 온도와 속도가 열선유속계의 정특성에 미치는 영향,<sup>(2)</sup> 두 개의 열선을 이용하여 유동장의 온도 및 속도의 섭동량을 동시에 측정하는 방법<sup>(3)</sup> 등이 있다.

이 글에서는 부 온도저항계수를 갖는 탄소 파이버를 열선으로 이용하고 이를 구동하는 증폭회로의 구성에 관한 연구, 3차원 속도측정용 열선프로브의 접지단자를 3개의 열선이 공통으로 사용하는 공통접지 삼축 열선프로브와 유속계의 특성에 대해 고찰한다. 또한 과열비가 다른 두 개의 정온도형 열선유속계를 이용하여 유동장의 온도와 속도를 동시에 측정하는 방법과 임의 형태의 유체온도정보를 이용한 열선유속계의 일반적인 온도보상 방법에 관하여 논의하여 열선유속계의 원리와 그 응용 등을 간단히 설명함으로써 관심 있는 분들의 이해를 돕고자 한다.

## 2. 부 온도저항계수 센서를 이용한 정온도형 열선유속계 설계

물질의 전기저항  $R$ 은 보통  $R=R_0(1+\alpha T)$ 로 표시되는데, 여기서  $R_0$ 는  $0^\circ\text{C}$ 에서 물질의 저항이고,  $\alpha$ 는 온도저항계수 (Temperature Resistance Coefficient)로서 대부분의 금속은  $\alpha$ 가 양(positive)이며 탄소나 반도체소재인 더미스터(Thermister)는 부(negative)의 온도저항계수를 갖는다.<sup>(6)</sup>

이절에서는 부의 온도저항계수를 갖는 탄소파이버를 이용한 열선 프로브의 제작 과정과, 이 센서를 이용하여 유체의 속도를 전압신호로 변환시켜 주는 부 온도저항계수 센서용 열선유속계의 설계에 대하여 설명한다.

현재 사용되고 있는 열선유속계의 측정용 센서는 텅스텐이나 백금선이며 시판되는 유속계는 양의 온도저항계수를 갖는 금속선에 적합하도록 제어계가 설계되어 있다. 이 경우 부의 저항온도계수를 갖는 물질을 센서로 사용하면 전혀 동작되지 않거나 센서가 불안정하게 과열되어 끊어지게 된다.

전기 전도성접착제(예, DOTITE)를 일반적인 열선프로브의 지지봉(Prong) 끝에 바르고 탄소파이버를 부착한다. 상온에서 접착제의 유기성분이 날아가도록 하루 정도 기다리거나  $120^\circ\text{C}$ 의 항온조에서 약 30분 정도 열처리하면 센서로서 사용할 수 있다. 완성된 열선의 저항은 2mm 길이의 경우 약 1.5 k $\Omega$  이었다.

탄소파이버는 복합재료 성형과정에 사용되는 소재로서 대량 공급되어 가격이 싸고 그 직경은 약 7 $\mu\text{m}$ 로 유속 측정용 센서 소재로서 적합하고 전기전도성이 있으며 음의 온도저항계수를 갖는다. 단위 길이당 비저항이 다른 재료에 비하여 상당히 크기 때문에(약 1,000배) 정전류형 유속계를 구성하여 유체의 온도 변동을 측정하는 경우 좋은 특성이 기대된다. 또한 점용접(Spot Welding) 방법

이 아닌 전기 전도성접착제로서 금속지지봉과 탄소파이버를 부착시키므로 그 제작과정이 간편하다.

전체 시스템은 그림 1과 같이 4개의 저항으로 구성된 브리지와 이득이 매우 큰 직류 증폭기로 구성되어 있다.  $R$ 은 센서이며 탄소파이버 센서의 경우 부의 온도저항계수를 갖는다. 텅스텐이나 백금을 열선으로 사용하는 유속계와 비교해 보면 브리지를 구성하는 저항값이나 열선의 과열비를 정하는 포텐시오미터의 위치 그리고 열선의 위치가 다르다. 또한 열선을 흐르는 전류도 금속열선에 비해 매우 작기 때문에(수 mA 정도) 증폭기에 전력을 증가시킬 부스터장치(Current Booster)가 필요치 않다.

저항  $R_1$ 은  $R$ 과 서로 비슷한 저항값이며,  $R_2$ 와  $R_3$ 도 서로 비슷한 정도이다.  $R_2$ ,  $R_3$ 는  $R$ 이나  $R_1$ 에 비해 가능하면 크게 설계하고 브리지 저항중 센서  $R$ 은 외부유체의 온도나 속도변동에 민감하지만 나머지 저항  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 는 동작 중 저항값에 변동이 생기지 않도록 정밀급저항을 사용한다. 저항  $R_3$ 는 센서  $R$ 의 과열정도를 정하는 포텐시오미터 저항이다.

증폭기는 연산증폭기(Operational Amplifier)를 이용하여 구성한 차동증폭형이며, 이득은 조정가능하고 실제작동시의 이득은 약 5,000이다.

개루프(Open Loop) 상태에서 브리지 저항이 서로 평형이 되도록 저항  $R_3$ 의 값을 설정한다. 증폭기의 출력을 브리지에 연결하여 폐

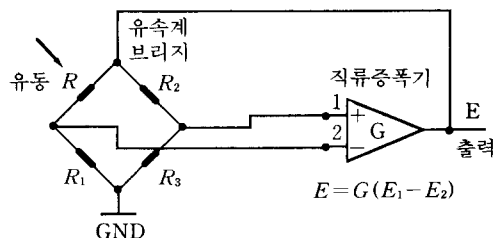


그림 1 부온도저항계수 센서용 유속계 회로

루프 피드백시스템 (Closed Loop Feedback System)을 만든다.

저항  $R_3$ 를 돌려서 초기 설정값보다 증가시키면 순간적으로 증폭기 입력단에 전압차가 발생하고 증폭기출력전압  $E$ 가 브리지에 가해지고 저항  $R$ 이 과열되면 온도가 상승하므로, 이에 따라 저항  $R$ 이 감소하여  $R_1$ 에 걸리는 전압이 증가하게 되고 브리지 저항은 다시 평형을 이루면서 증폭기 입력단의 전압차도 0에 이르게 된다.

이 상태에서 센서에 유동의 증가분이 있게 되면 순간적으로 센서가 냉각되어 저항이 증가하고 점 2의 전압이 감소하여 출력전압  $E$ 는 증가하게 되고, 이에 따라 센서에 흐르는 전류도 증가하여 온도가 상승하므로 저항이 다시 감소하게 되어 외부유동의 교란에 관계없이 센서의 저항 즉, 온도는 일정하게 유지되고 속도의 증가에 대응하는 전압의 출력이 얻어지게 된다.

그림 2는 탄소파이버의 저항이 온도의 증가에 따라 감소하는 것을 보여주고 있으며 실험이 수행된 온도영역에서 비선형적인 특성을 보여주고 있다.

그림 3은 속도에 따른 유속계의 출력, 즉 브리지 상단의 전압을 나타내고 있다. 속도의 제곱근 형태이며 일반적인 열선유속계의 보정곡선과 같다.

### 3. 공통접지 삼축열선에 관한 연구

현재 3차원 속도측정을 위해 사용되고 있는 삼축열선(Triple Wire)은 지지봉이 6개이다. 이 절에서는 기존의 삼축 열선프로브에서 접지부분을 공통으로 하여 지지봉을 4개로 만든 공통접지 삼축열선 프로브와 이를 구동하는 유속계의 특성에 대하여 논의한다.

그림 4에 공통 접지 삼축 열선의 형상을 나타내었다. 가운데 지지봉이 공통접지부분으로 각 열선에 흐른 전류는 접지부분을 통하여 브리지로 흘러들어 간다.

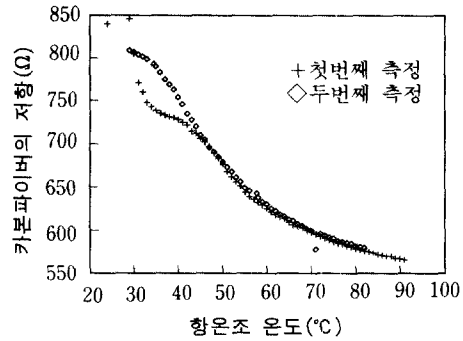


그림 2 탄소파이버의 온도 저항 관계

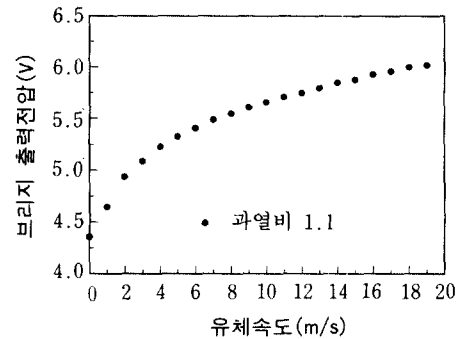


그림 3 카본유속계의 보정곡선

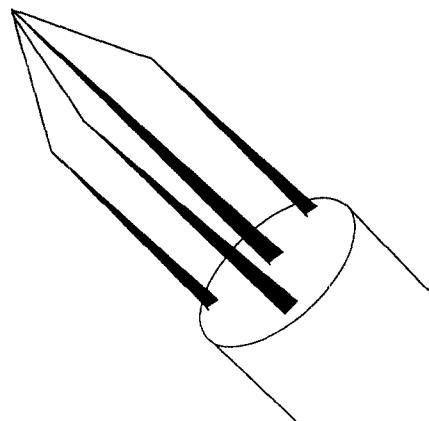


그림 4 삼축 열선

공통접지 삼축열선은 기존의 프로브에 비해서 검사체적이 작고 제작이 간편하다는 장점이 있으나 공통부분으로 인한 전기적인 문제가 발생할 수 있다. 이 문제는 공통부분의

저항을 되도록 작게 하고 각 열선유속계의 접지를 띄워서(float) 해결한다. 각 유속계에 공급되는 전원은 개별적으로 존재하여야 한다.<sup>(7)</sup>

그림 5는 공통접지 삼축열선 유속계의 해석을 위한 개념도이다. 그림에 한 개의 열선에 대한 회로만 나타내었으나 3축 열선의 경우 같은 회로가 두 개 더 있다.

전류  $i_3$ 는 나머지 유속계에 의해 공통접지 단자로 흘러드는 전류인데 이 전류에 의해 공통접지 삼축열선의 경우 발생하는 회로간의 전기적인 간섭현상은 유속계의 정특성해석을 통하여 이해할 수 있으며 공통접지 부분의 저항과 흘러드는 전류에 의해 미세한 전압이 발생하게 된다. 결론적으로 회로간의 간섭을 줄이려면 공통접지에 사용되는 지지봉의 저항을 줄여야 한다. 상세한 해석과정 및 결과는 참고문헌 (8)에 나타나 있다.

대표적인 보정방법은 직교 대칭 프로브인 DANTEC 55R91 프로브에 적용되는 방법인데 프로브 제작시 정확한 대칭 직교성이 유지되지 않을 경우 오차가 발생할 수 있다는 것이 문제점이다. 또 다른 문제점은 속도와 열선으로부터 빼앗기는 열량을 관련시키는 식이다.

자료처리 방법은 King의 법칙과 Jorgensen의 식을 사용하는데 그림 6에 열선의 좌표계를 나타내었다.  $x, y, z$ 은 각각의 열선에 해당하는 좌표계이고 1, 2, 3은 프로브에 고정된 좌표계이다.

$$\text{King의 법칙 : } E^2 = A + BU_{eff}^n \quad (1)$$

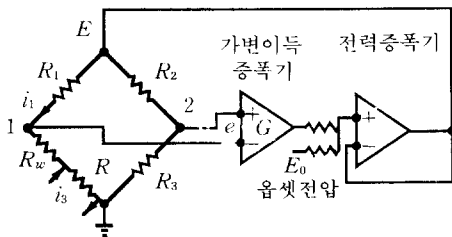


그림 5 삼축 열선유속계의 해석을 위한 개념도

Jorgensen의 식 :  $U_{eff}^2 = U_x^2 + k^2 U_y^2 + h^2 U_z^2$   
좌표계 사이의 관계를 이용하여 속도성분을 표시하면 식 (2)와 같으며, 식 (1)을 이용하여 정리하면 열선유속계의 선형화된 출력은 식 (3)으로 표시된다.

$$U_x = (\text{const}) U_1 + (\text{const}) U_2 + (\text{const}) U_3 \quad (2)$$

$$(E^2 - A)^{\frac{2}{n}} = C_1 U_1^2 + C_2 U_2^2 + C_3 U_3^2 + C_4 U_1 U_2 + C_5 U_2 U_3 + C_6 U_3 U_1 \quad (3)$$

각각의 열선에 대해서 식 (3)이 성립하며, 삼축열선의 보정이란 이 계수들을 결정하는 것이다.

실제 속도를 측정하면 각각의 열선에 대해 출력이 얻어지는데 식 (3)을 이용하여 세 개의 연립방정식을 풀면 각 성분의 속도가 얻

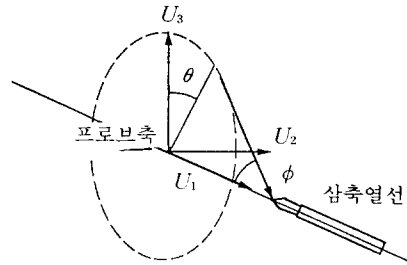


그림 6 삼축 열선의 좌표계

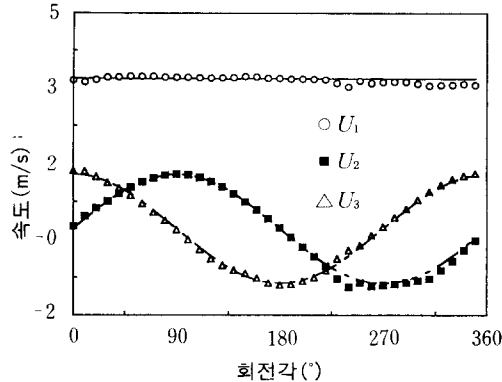


그림 7 피토관과 삼축 열선에 의한 속도 비교

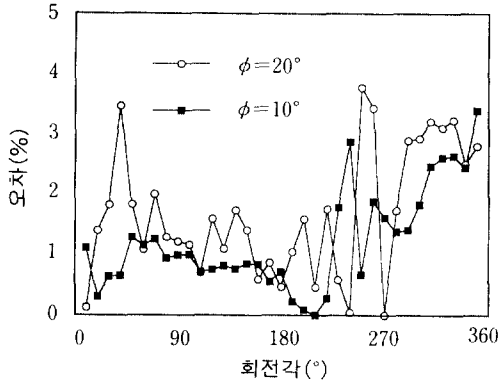


그림 8 공통접지 삼축 열선의 보정오차

어진다.

그림 7은 피토판에 의해서 측정된 속도와 보정된 공통접지 삼축열선에 의한 속도 성분을 비교하고 있으며, 그림 8은 공통접지 삼축열선 프로브의 보정오차를 나타내고 있다.

#### 4. 과열비가 다른 두 개의 정온도형 열선유속계를 이용한 온도, 속도의 동시 측정

과열비가 다른 두 개의 정온도형 열선유속계의 출력을 적절히 조합, 처리하여 유동장의 온도와 속도를 동시에 측정하는 방법에 대하여 논의한다. 즉, 유속계의 속도 보정곡선과 온도 보정곡선을 구한 후 실제 유동장에 적용하면 두 열선유속계의 출력전압으로부터 유동장의 온도와 속도를 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

자료는 열선유속계의 각각의 출력을 곱셈기, 분할기, 가산기, 감산기 등을 하드웨어적으로 구성하고 이들의 이득을 조정하여 속도신호와 온도신호를 분리, 처리하는 방법과 유속계 각각의 신호를 저장하여 최적의 이득을 정하는 방법이 있다. 평행한 두 개의 정온도형 열선유속계에서 각각의 열선을 1과 2로 나타낼 때 열선 주위의 대류열전달을 나타내는 기본 관계식은 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$E_1^2 = R_{w1}(a + bU^n)A(T_{w1} - T_a) \quad (4)$$

$$E_2^2 = R_{w2}(a + bU^n)A(T_{w2} - T_a) \quad (5)$$

여기서,  $E$ ,  $R$ ,  $A$ ,  $T_w$ ,  $T_a$ 는 각각 열선의 전압, 저항, 표면적, 온도, 유체의 온도이며,  $a + bU^n$ 은 열선과 유체 사이의 열전달계수이다. 식 (5)에 적절한 저항비를 곱하여 식 (4)에서 빼주면 식 (6)을 얻게 되는데, 식 (6)은 유체의 온도와 무관한 속도와 출력전압과의 관계식이 된다.

$$\begin{aligned} E_1^2 - (R_{w1}/R_{w2}) \times E_2^2 \\ = R_{w1}(a + bU^n)A(T_{w1} - T_{w2}) \end{aligned} \quad (6)$$

그러나 열선의 정확한 작동 저항  $R_{w1}$ 과  $R_{w2}$ 를 알 수 없기 때문에 그 비를  $\alpha$ 로 놓고 실험적으로 구한다.

또한 식 (4)를 식 (6)으로 나누면 식 (7)과 같으며, 식 (7)은 유체의 속도에 무관한 온도와 유속계 출력과의 관계식이 된다.

$$\begin{aligned} E_1^2 / [E_1^2 - (R_{w1}/R_{w2}) E_2^2] \\ = T_{w2} / (T_{w1} - T_{w2}) - T_a / (T_{w1} - T_{w2}) \end{aligned} \quad (7)$$

그림 9와 그림 10은 과열비를 1.1 및 1.5로 유지한 각각의 정온도형 열선유속계의 출력이다. 이와 같이 두 유속계의 과열비를 크게 차이나도록 유지하고 실험한 것은 과열비에 따라 열선의 속도 응답성(Sensitivity)과 온도 응답성이 다르기 때문이다.

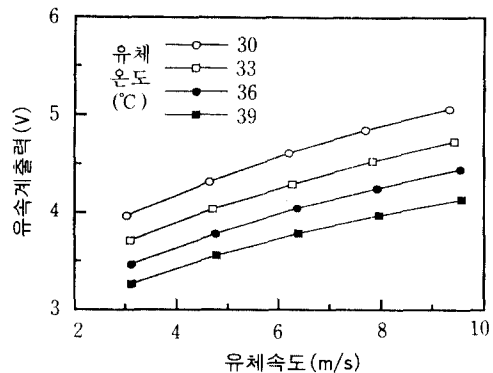


그림 9 과열비 1.5에서의 유속계출력

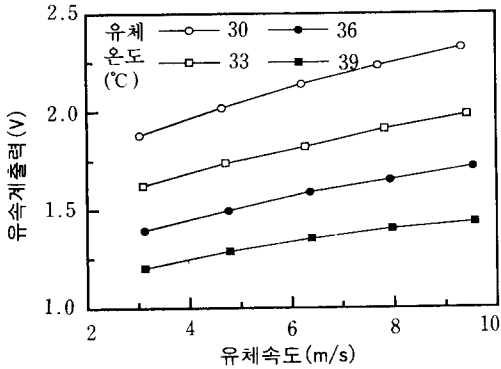


그림 10 과열비 1.1에서의 유속계출력

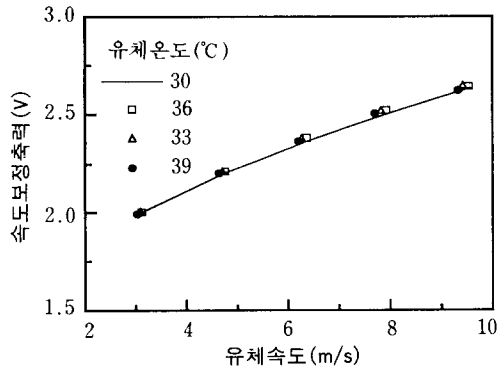


그림 11 속도 보정곡선

$E_1^2 - \alpha E_2^2$ 를 온도에 무관하고 속도에만 관계하는 출력으로 만들기 위해 먼저 그림 9와 그림 10의 각각의 데이터를 최소오차자승법으로 보정 (curve fit) 한다.

임의의 두 온도 (예를 들면 30, 36°C)에서 같은 속도에서의 전압을 읽어서 (예를 들면 5 m/s) 식 (8)로 놓는다.

$$\begin{aligned} & E_1^2(30^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) - \alpha E_2^2(30^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) \\ &= E_1^2(36^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) \\ & \quad - \alpha E_2^2(36^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서  $\alpha$ 는 식 (9)와 같이 되는데 여러 온도와 여러 속도에 대해  $\alpha$ 를 구하면  $\alpha$ 는 1.1이 된다. 그림 11은  $\alpha$ 를 1.1로 하였을 때의 속도보정 곡선이다.

$$\alpha = \frac{E_1^2(30^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) - E_1^2(36^\circ\text{C}, 5\text{ m/s})}{E_2^2(30^\circ\text{C}, 5\text{ m/s}) - E_2^2(36^\circ\text{C}, 5\text{ m/s})} \quad (9)$$

또한 이 결과를 이용하여  $E_1^2/[E_1^2 - (R_{w1}/R_{w2})E_2^2]$ 과 온도와 관계 즉, 온도보정 곡선을 그린 것이 그림 12이다.

이상적인 열선유속계에서는  $E_1^2/[E_1^2 - (R_{w1}/R_{w2})E_2^2] = (T_{w2} - T_a)/(T_{w1} - T_{w2})$ 이므로 속도에 무관한 보정곡선이 얻어지겠지만 실제로는 그림 12와 같이 속도에 따라 온도보정 곡선이 일치하지 않았다. 이는 유속계의 이득이 유한하기 때문에 속도의 변화에

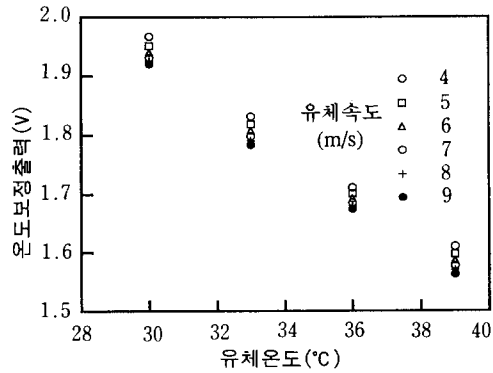


그림 12 온도 보정곡선

따라 열선의 온도가 일정하게 유지되지 않은 결과로 생각되며 더욱 연구가 필요하다.

### 5. 임의 형태의 유체온도정보를 이용한 열선유속계의 온도보상에 관한 연구

열선유속계의 출력에 영향을 주는 대표적인 인자로는 유체의 속도와 온도가 있다. 유속계를 이용하여 속도에 관계된 여러 자료를 얻으려는 경우 대기의 온도가 상승하거나 풍동 내의 온도가 변화되면 유속계를 새로운 온도에 대하여 보정하거나 여러 온도 범위에 대하여 수행된 보정곡선을 이용해야 한다. 또한 자동차용 공기유량계의 경우 대단히 넓

은 온도 범위에서 동작하기 때문에 속도신호의 온도보정은 반드시 필요하다.

이 절에서는 기준 온도에 대하여 열선유속계를 보정하고 이후에 유체의 온도가 변동하면 변화에 대응하는 적절한 보상 전압을 회로에 가감하여 유속계의 출력이 오직 속도에 의해서만 변화하도록 하는 회로 구성에 대하여 논의한다.

열선 주위의 유체속도와 대류열전달과의 관계는 식 (10)로 표시된다.

$$E_w^2 = hA_s(T_w - T_a)R_w \quad (10)$$

식 (10)에서 주위 유체의 온도가 일정하게 유지될 때 대류열전달 계수  $h$ 는 속도만의 함수이고  $A_s(T_w - T_a)R_w$ 는 유속계의 특성상 일정한 값이 되어 유속계 출력전압  $E_w$ 와 유체 속도간에 관계가 얻어진다.

그러나 주위 유체의 속도뿐만 아니라 온도가 변화한 경우  $h$ 값 즉, 속도 영향 이외에도  $(T_w - T_a)$ 가 변화하게 된다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 동일한 속도 조건에서도 주위 유체 온도의 변화에 따라 유속계의 출력이 변하여 오차를 발생시킨다.

그림 13에 온도보상 회로를 첨가하지 않은 경우 유체 온도가 30, 40, 50°C로 변화하였을 때의 유속계의 출력을 나타낸다. 속도가 같은 경우 주위 유체의 온도가 높아지면 유속계의 출력이 낮아지는 것을 알 수 있다.

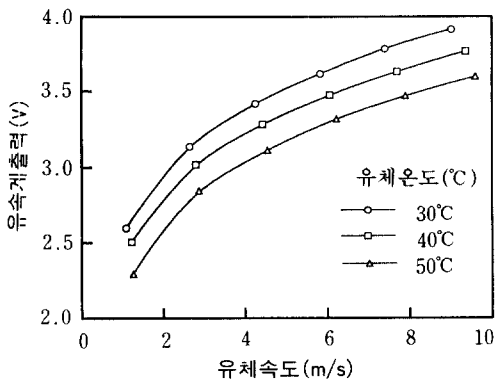


그림 13 온도보상회로가 없는 열선유속계의 출력

그림 14는 열선유속계를 변형하여 브리지의 한쪽에 임의의 전압을 가하는 경우이다. 기존의 열선유속계는  $E_T$ 가 0이고 유속계의 출력은 브리지상단(Bridge Top)에서 얻는다.

직류증폭기는  $E_1$ 과  $E_2$ 의 차이가 0이 되는 방향으로 작용하고 전압분할의 원리에 의해 식 (11)이 된다.

$$\frac{R_4}{R_1+R_4}E = \frac{(E-E_T)}{(R_2+R_3)}R_3 + E_T \quad (11)$$

식 (12)를 정리하면 식 (12)가 된다.

$$R_4 = \frac{R_1R_3 + \frac{E_T}{E}R_1R_2}{R_2 - \frac{E_T}{E}R_2} \quad (12)$$

식 (12)를 보면  $E_T$ 를 증가시키는 경우 분모는 감소하고 분자는 증가하게 되어  $R_4$ 가 식 (13)과 같이 되어  $E_T=0$ 의 경우보다 과열됨을 알 수 있다.

$$R_4 \geq \frac{R_1R_3}{R_2} \quad (13)$$

$R_4$ 가 과열된다는 것은  $E_T$ 를 가감하여 열선에 흐르는 전류를 조절할 수 있음을 의미한다.

온도 보상회로를 첨가한 경우, 출력은 열선과 직렬로 연결된 저항으로부터 얻게 되는데 이는 보상 방식이 브리지를 흐르는 전류를 일정하게 하는 것이기 때문이다.

$$E^* = IR_1 \quad (14)$$

출력을 식 (14)로 정의하면  $E_T$ 를 가하는

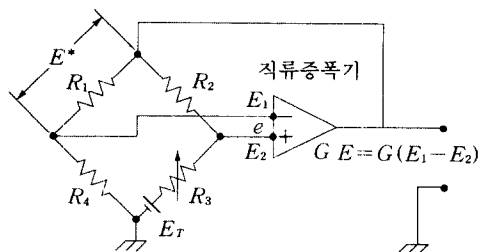


그림 14  $E_T$ 를 첨가한 정온도형 열선유속계

경우에도  $E_1 = E_2$ 가 되도록 전체회로가 작동하여, 식 (15)와 같이 되며 열선 주위의 열 전달 관계식은 식 (16)과 같이 된다.

$$E_1 = E_2 = \frac{(E - E_T)}{(R_2 + R_3)} R_3 + E_T = IR_4 \quad (15)$$

$$\frac{(E - E_T)}{(R_2 + R_3)} R_3 + E_T = \sqrt{hA_s(T_w - T_a)R_w} \quad (16)$$

$E^{*2}$ 에 대한 출력방정식을 위의 식들을 조합하여 구성하면 최종적으로 식 (17)이 된다.

$$kE^{*2} = \left\{ 1 - \frac{C(1 + \alpha T_2)E^*}{AE_T + BE^*} \right\} \quad (17)$$

여기서,  $k$ 는 속도가 일정할 때 상수이고,  $A, B, C$ 는 브리지의 저항들로 구성된 상수들이다. 남은 문제는  $E^*$ 를 일정하게 하는 보상전압  $E_T$ 의 값과 조건을 구하는 것이다. 가장 단순한 온도보상전압의 형태로  $E_T$ 를 식 (18)로 가정하고 출력방정식에 대입하면 식 (19)와 같이 되는데  $T_2$ , 즉 외부유체온도에 무관한  $E^*$ 을 얻으려면  $T_2$ 에 대하여 정리된 항이 0이 되어야 한다.

$$E_T = \gamma(T_2 - T_1) \quad (18)$$

$$T_2(kE^{*2}A\gamma - A\gamma + c\alpha E^*) - kE^{*2}A\gamma T_1 + kB E^{*3} + A\gamma T_1 - BE^* + CE^* = 0 \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{c\alpha E^*}{(A + kE^{*2}A)} \quad (20)$$

위의 해석과정은 온도변화에 따라 선형적인 출력을 내는 온도 센서를 이용하여 센서 출력전압의 증폭비를 식 (20)으로 주어지는 적절한 값으로 설정하고 브리지의 한 쪽에 첨가하면 외부유동에 무관하게 유체의 속도에 대해서만 변화하는 유속계의 출력이 얻어지는 것을 의미한다. 상세한 해석과정은 참고문헌 (10)에 나타나 있다.

온도변화에 대응하는 보상전압은 열전대, 전기저항체, 정전류형유속계, 반도체 온도계 소자 등으로부터 얻을 수 있으며 이 이외에도 다른 형태의 온도정보도 사용될 수 있다.

실험에서 유체의 온도는 IC 온도 센서의 하나인 AD590을 통하여 얻었다. 이 센서는 ANALOG DEVICE사 제품으로<sup>(11)</sup> 0°C에서 0V, 100°C에 10V가 되도록 조정한다.

식 (18)의 개념도는 그림 15로 나타낼 수 있다. 온도보상회로를 열선유속계에 첨가하면 실험에 사용된 전체 회로도도 그림 16과 같다. Shift는 보정온도에서 브리지에 가해지는 출력이 0V가 되도록 조정하는 기능이며 gain은 외부유체온도의 변화에 비례하는 전압을 일정비율로 증폭하는 역할을 한다.

유동온도와 유동속도를 조절할 수 있는 노즐의 출구에 열선프로브와 온도센서를 설치하고 온도보상회로를 첨가하지 않은 상태에서, 즉 회로상의 1을 단락시키고 유체의 온도를 30°C로 설정한 상태에서 속도를 변화시키면서 출력을 얻는다. 즉 30°C 기준온도에서의 열선유속계 보정 곡선을 구하는 것이다.

이제 온도보상회로를 첨가한 상태로 30°C

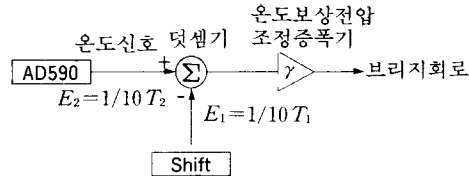


그림 15 온도보상회로의 개념도

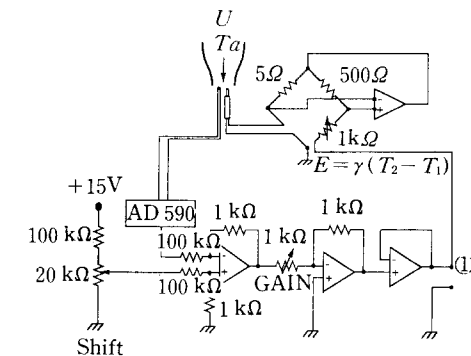
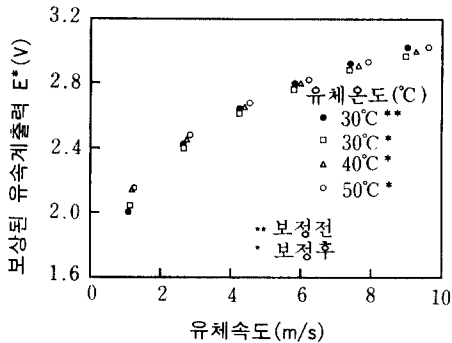


그림 16 온도보상회로가 있는 정온도형 열선유속계



그림 17 온도보상된 유속계의 출력  $E^*$ 

에서 이전의 결과와 동일한 출력이 얻어지도록 shift를 조절한다. 그 이유는 30°C에서도 AD590 센서는 약 3V의 전압을 출력하므로 기준온도를 30°C로 설정한 경우 브리지에 가해지는 전압을 0V로 하려면 -3V의 전압을 더해줘야 브리지에 영향이 없어지기 때문이다. Shift를 조정한 상태에서 유체온도는 30°C로 유지시키고 속도를 변화시켜 출력을 얻는다. 이제 외부 유체온도를 50°C로 설정하고 유체속도가 30°C의 한 점과 같을 때 동일한 출력이 얻어지도록 gain을 조정한다. Shift와 gain을 모두 저장하면 온도 보상회로의 조정이 끝나게 된다.

그림 17은  $E^*$ 가 외부유체의 온도가 변화하여도 속도가 같으면 출력이 동일함을 보여주고 있다.

## 6. 맺음말

정온도형 열선유속계의 출력은 유체의 속도와 온도에 의해 변화하는데 이와 같은 유속계의 특성을 이해하고 회로를 변경하거나 얻어진 출력을 적절히 처리하면 유체의 속도와 온도를 구할 수 있고, 또한 속도신호에서 온도의 영향을 보정할 수도 있으며 여러가지 응용을 할 수 있다. 열선유속계의 특성을 이해하기 위해서는 기본적인 부귀환회로와 열선주위의 대류열전달과 센서로서의 재료특성

을 파악해야 한다.

이 글에서는 부의 온도저항계수를 갖는 탄소파이버를 이용한 속도측정용 센서의 제작과 이를 구동하는 유속계의 제작에 대하여 논의하고 유동장 측정에의 적용가능성을 살펴보았으며 공통접지 삼축 열선 프로브를 제작하고 유속계의 전기적인 문제점을 살펴보았다. 과열비가 다른 두 개의 열선유속계를 이용하여 유동장의 온도와 속도를 동시에 측정하는 방법과 열선유속계에 온도 보상회로를 첨가하여 유체의 온도가 변화하여도 속도가 같은 경우 동일한 출력이 얻어지는 일반적인 보상방법을 논의하였다.

## 참고문헌

- (1) Bremhorst, K., 1985, "Effect of Fluid Temperature on Hot-Wire Anemometers and an Improved Method of Temperature Compensation and Linearization without Use of Small Signal Sensitivities," J. Phys. E : Sci. Instrum., Vol. 18, pp. 44~48.
- (2) Kauh, S., Lee, T. and Moffat, R. J., 1989, "Static Response of the Constant Temperature Anemometer Including the Effect of Both the Finite Amplifier Gain and the Fluid Temperature," Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 131~135.
- (3) Kim, K. H., 1988, "Development of Three Dimensional Flow Measuring Method by Triple Hot-Wire Probe," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space, Vol. 6, No. 2, pp. 1~9.
- (4) Taslim, M. E., Kline, S. J. and Moffat, R.J., 1978, "Calibration of Hot-Wires and Hot-Films for Velocity Fluctuations," Thermoscience Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.

- (5) Lienhard, J. H., Helland, K. N., 1989, "An Experimental Analysis of Fluctuating Temperature Measurements Using Hot-Wire at Different Overheats," Experiments in Fluids, Vol. 7, pp. 265~270.
- (6) Brophy, J. J., 1983, Basic Electronics for Scientists, McGraw-Hill, pp. 2~3.
- (7) Kauh, S., 1989, Microscale System User's Manual for Modules HWM-100 and Power Module
- (8) Myung, H., Lee, S., Kauh, S., 1993, "An Application Example of Common Ground Hot Wire Probe for CTA," Proceedings of the 6th Int. Sym. on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Vol. 3, pp. 191~196.
- (9) Sakao, F., 1973, "Constant Temperature Hot Wires for Determining Velocity Fluctuations in an Air Flow Accompanied by Temperature Fluctuations," J. Phys E : Sci. Instrum. 6, 913~916.
- (10) Lee, S., Cho, J., Kauh, S., 1993, "A Study on Temperature Compensation of Hot Wire Anemometer Using IC Temperature Sensor," Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 119~122.
- (11) ANALOG DEVICES, Linear Products Databook, 1990. 