

〈論 文〉

유속에 따른 열선의 과열비 조정을 통한 열선유속계의 감도향상에 관한 연구

이신표* · 고상근**

(1995년 4월 3일 접수)

Sensitivity Enhancement of a Hot-wire Anemometer by Changing Overheat Ratio with Velocity

S. P. Lee and S. Kauh

Key Words : Sensitivity(감도), Constant Temperature Anemometer(CTA : 정온도형 열선유속계), Constant Voltage Anemometer(CVA : 정전압형 열선유속계), Photoconductive Cell(광도전성저항), Transistor(트랜지스터), Variable Temperature Anemometer(VTA : 가변온도형 열선유속계)

Abstract

In this study, a new hot-wire anemometer which has greater sensitivity than that of a constant temperature anemometer(CTA) was proposed. In contrast to CTA, the wire working resistance of the new anemometer increases with flow velocity, that is, the operating mode of the wire becomes variable temperature. The variable temperature anemometer(VTA) was made by substituting a voltage controlled variable resistor such as photoconductive cell or transistor for one of the resistors in the bridge. By positively feeding back the bridge top signal to the input side of these electronic components, the wire overheat ratio could be increased with velocity automatically. Static response analyses of the VTA, constant voltage anemometer(CVA) and CTA were made in detail and calibration experiments were performed to validate the proposed operating principle. The wire operating resistance of the CVA decreases with velocity and this leads to lower sensitivity than that of a CTA. But the sensitivity of the newly proposed VTA is superior to that of a CTA, since the wire overheat ratio increases with velocity. Consequently, it is found that the major factor that is responsible for large sensitivity of a VTA is not the working resistance itself but the change of the wire working resistance with velocity.

기 호 설 명

A, B : 열전달계수 $h(=A+B\sqrt{U})$ 의 상수들

A_s : 열선의 표면적

E_b : 브릿지상단의 전압

E_w : 열선양단의 전압

E_r : 정전압형 열선유속계에서 비반전 입력측에 가하는 전압

E_{tr} : 트랜지스터 콜렉터-에미터 사이 전압

F : 광도전성저항 가변온도형 유속계에서 출력귀환비율

h : 열선과 유체사이의 대류열전달계수

I : 열선을 흐르는 전류

*서울대학교 대학원

**정회원, 서울대학교 기계공학과

- I_b : 트랜지스터 베이스전류
- I_c : 트랜지스터 콜렉터전류
- K : 정온도형 열선유속계의 출력식에서의 비례계수
- R_A : 브릿지에서 열선과 직렬로 연결되는 저항
- R_B : 열선과 대칭으로 브릿지상단과 연결되는 저항
- R_{b1}, R_{b2} : 트랜지스터의 바이어스전압을 정하기 위한 저항들
- R_C : 브릿지에서 R_B 와 직렬로 연결되는 저항
- R_{Cas} : 광도전성저항
- R_F : 출력의 귀환비율을 정하는 가변저항
- R_{eq} : 트랜지스터 바이어스회로에서의 등가저항
- R_K, R_L : 가변온도형 열선유속계에서 귀환회로의 저항들
- R_T : 유체온도 T_T 에서의 열선의 저항
- R_w : 작동온도 T_w 에서의 열선의 저항
- R_0 : 0°C 에서의 열선의 저항
- S : 유속계의 감도
- T_T : 유체온도
- T_w : 열선의 작동온도
- U : 유체속도
- ΔV : 고정저항 R_A 양단의 전압
- V_{be} : 트랜지스터의 베이스-에미터사이 전압
- V_{eq} : 트랜지스터 바이어스회로에서의 등가전압
- V_{ref} : 기준전압
- V_{in} : 광도전성저항에 입력되는 전압

그리스문자

- α_w : 열선의 온도저항계수
- β : 트랜지스터의 전류증폭률

1. 서 론

열선유속계는 가장 널리 사용되고 있는 유속측정 기기로서 그 종류로는 정온도형(constant temperature)과 정전류형(constant current) 그리고 정전압형(constant voltage) 열선유속계가 있다. 열선유속계의 출력은 열선과 유체사이의 대류열전달관계를 이용하여 브릿지 상단에서의 전압으로 구해지며 이것을 유속계의 정특성관계식으로 부른다.⁽¹⁾ 이 출력관계식을 유속에 대하여 미분하면 감도가 얻어지며⁽²⁾ 감도(sensitivity)가 높을수록 정밀한 유속측정이 가능하다. 그러나 기존의 열선유속계들

의 공통적인 단점은 유속이 증가할수록 그 감도가 낮아지는 것이다.

열선에서 유체로의 대류열전달량은 대류열전달계수와 열선과 유체사이의 온도차의 곱으로 표시되는데 유속이 증가할수록 대류열전달계수의 증가율은 감소하고 열선의 작동온도도 일정하거나 감소하기 때문에 열선에서 유체로의 대류열전달량의 증가율은 감소한다. 열선의 가열전류는 대류열전달량에 의해 결정되고 유속계의 출력은 가열전류에 비례하므로 유속이 증가함에 따라 그 감도가 낮아지게 된다. 따라서 감도를 향상시키기 위하여 대류열전달량을 증가시키려면 대류열전달계수 또는 열선과 유체사이의 온도차를 증가시켜야 한다.

대류열전달계수는 열선이 특정하게 주어지면 유속에 의해서만 변화하며 유속계 사용자의 의도에 따라 변화시킬 수 없다. 그러나 열선의 온도는 열선의 가열전류를 조절하는 방식, 즉 유속계의 작동형식에 따라 변화시킬 수 있다. 예를 들면, 정온도형 열선유속계의 경우에는 가열전류가 자동으로 조정되어 유속에 관계없이 열선의 작동온도가 일정하게 유지되지만 정전류형 열선유속계는 유속에 관계없이 열선에 흐르는 전류를 일정하게 유지하므로 유속이 증가하면 열선이 냉각되어 그 온도가 떨어진다. 이것을 다르게 표현하면, 기준온도에서의 열선의 저항에 대한 작동중인 열선의 저항을 과열비라고 정의할 때, 정온도형 열선유속계의 과열비는 유속에 관계없이 초기에 설정된 값으로 일정하게 유지되지만 정전류형 열선유속계의 과열비는 유속이 증가함에 따라 감소한다고 말할 수 있다.

유속계에 따라 가열전류를 조절하는 방식이 다르기 때문에 열선이 동일하여도 유속계에 따라 교정곡선(calibration curve)의 형태는 매우 달라지게 된다. 그러므로 현재 사용되고 있는 유속계들의 출력을 정특성해석과 실험을 통하여 체계적으로 비교하면 감도에 가장 큰 영향을 미치는 인자의 도출이 가능하다. 그리고 이 인자의 효과가 최대한 나타나도록 열선유속계의 작동형식을 개선한다면 제안된 유속계는 기존의 유속계보다 감도가 우수할 것이다.

본 연구의 목적은 유속계의 작동형식을 변화시켜 기존의 유속계보다 더욱 감도가 우수한 유속계를 개발하는 것으로서 최근에 개발된 정전압형 열선유속계⁽³⁻⁵⁾와 정온도형 열선유속계 사이의 출력 및 감도의 비교가 연구의 직접적인 계기가 되었다. 본

연구에서는 열선유속계의 감도에 지배적인 영향을 미치는 인자를 도출하기 위하여 기존의 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 출력특성을 해석한다. 도출한 인자의 효과가 열선유속계에서 최대한 나타날 수 있도록 새로운 형식의 열선유속계를 제안하며 정온도형 열선유속계와의 출력비교 실험을 통하여 향상된 감도를 확인한다.

Fig. 1은 기본적인 정온도형 열선유속계의 회로로서 브릿지(bridge)와 직류증폭기(amplifier)로 구성된다. 브릿지는 열선을 포함한 네개의 저항으로 구성되는데 R_w 는 작동중인 열선이며 R_A 와 R_B 는 고정저항, 그리고 R_C 는 열선의 과열비 설정용 가변저항이다. 직류증폭기는 브릿지에서 검출된 전압차이를 증폭하여 열선의 온도를 일정하게 유지시키는 전력을 공급한다. 브릿지와 직류증폭기는 부귀환적(negative feedback)으로 연결되어 열선의 온도, 즉 작동저항이 유동조건에 관계없이 다음의 관계로 항상 일정하게 유지되도록 동작한다.

$$R_w = \frac{R_A \cdot R_C}{R_B} \tag{1}$$

열선이 전류 I 에 의하여 가열될 때, 열선과 유체사이의 대류열전달관계는 다음의 식으로 표시된다.

$$I^2 R_w = h A_s (T_w - T_f) \tag{2}$$

여기서, h 는 열선과 유체사이의 대류열전달계수로서 유속에 따라 지배적으로 변화한다. 열선의 온도와 유체온도의 변화가 큰 경우에는 유체의 물성치 변화때문에 부분적으로 변화한다고 알려져 있다. 이들의 효과를 엄밀하게 고려한 다양한 형태의 대류열전달계수의 표현이 초기의 많은 유속계 연구자들에 의하여 제시되었다.^(6,7) 그러나 유체의 온도가 일정한 등온유동장(isothermal flow field) 내의 열선을 생각하면 열선과 유체사이의 대류열전달계

수를 근사적으로 다음의 식과 같이 유속에 의해서만 변화한다고 가정할 수 있다.⁽⁸⁾

$$h = A + B\sqrt{U} \tag{3}$$

열선은 금속 저항센서로서 자신의 온도와 저항사이 에 유일한 관계를 가지며 이를 온도저항관계(resistance temperature relation)라고 부른다. 이 관계를 이용하면 작동중인 열선의 저항(가열된 경우)과 유체온도에서의 저항(가열되지 않은 경우)은 다음과 같이 표시된다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha_w T_w) \tag{4}$$

$$R_f = R_0(1 + \alpha_w T_f) \tag{5}$$

직류증폭기의 입력저항이 무한대라면 고정저항 R_A 를 흐른 전류 I 는 모두 열선을 흐르게 되고 오옴의 법칙과 위에서 제시한 식 (1), (2), (3) 그리고 (4)와 (5)에 의해 브릿지 상단에서의 정온도형 열선유속계 출력은 다음과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$E_b^2 = K \cdot h$$

$$K = \frac{A_s}{\alpha_w R_0} \left[1 - \frac{R_f R_B}{R_A R_C} \right] \left[R_A + \frac{R_A R_C}{R_B} \right]^2 \tag{6}$$

정온도형 열선유속계의 경우 열선의 온도가 일정하게 유지되는 유속계의 특성때문에 식 (6)의 계수 K 는 유속에 무관하게 일정하게 유지된다.

2. 정전압형 열선유속계의 정특성해석

최근에 유속에 관계없이 열선양단의 전압을 일정하게 유지하는 형식의 정전압형 열선유속계가 개발되었다. Sarma⁽⁹⁾와 Kuppa 등⁽⁴⁾은 한개의 연산증폭기를 이용하여 증폭기의 부귀환루프에 열선을 연결한 정전압형 열선유속계를 제안하였다. 이신표⁽⁵⁾는 열선유속계의 온도보상에 관한 연구를 수행하는 과정에서 기존의 정온도형 열선유속계의 회로를 변형한 정전압형 열선유속계를 제안하였다.

Fig. 2는 이신표⁽⁵⁾에 의하여 제안된 정전압형 열선유속계의 개략도이다. Fig. 1의 정온도형 열선유속계회로와 비교할 때, 열선과 반대측의 저항이 직류전압으로 대치되어 증폭기에 연결되어 있다. Fig. 2에서 R_w 는 열선이며 R_A 는 열선과 직류연결된 고정저항이고 E_T 는 열선양단의 전압을 정하는 직류전압이다.

부귀환증폭기의 작용에 의해 열선양단의 전압은

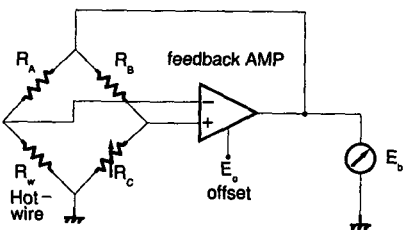


Fig. 1 Circuit diagram of a constant temperature anemometer (CTA)

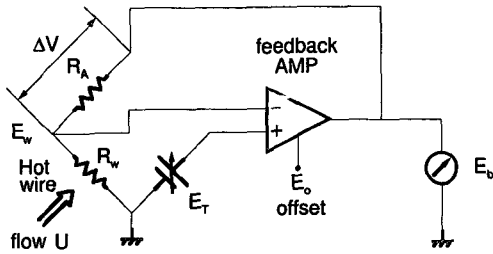


Fig. 2 Circuit diagram of a constant voltage anemometer(CVA)

다음과 같이 인가되는 전압 E_T 로 일정하게 유지된다.

$$E_w = E_T \quad (7)$$

직류증폭기의 입력저항이 무한대라고 가정하면 고정저항과 열선을 흐르는 전류관계는 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{R_A} = \frac{E_w}{R_w} = \frac{E_T}{R_w} \quad (8)$$

열선에서 유체로의 대류열전달관계식 (2)와 열선의 온도저항관계식 (4), (5) 그리고 브릿지에서의 전류관계식 (8)을 이용하면 정전압형 열선유속계의 출력을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_o = \Delta V + E_T \quad (9)$$

$$\Delta V^2 = \frac{A_s R_A^2}{\alpha_w R_0} \left[1 - \frac{R_f \Delta V}{R_A E_T} \right] \cdot h \quad (10)$$

Sarma⁽³⁾와 이신표⁽⁶⁾에 의해 제안된 정전압형 열선유속계의 회로는 열선양단의 전압을 일정하게 유지시키기 위한 회로가 다르다. 그러나 결과적으로 열선양단의 전압을 일정하게 유지한다는 작동형식이 동일하기 때문에 유속에 따라 열선에 필요한 가열전류의 양은 같으며 이 가열전류의 변화를 식 (10)과 같이 고정저항 양단의 전압변화로써 취하는 것이 동일하다.

3. 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 감도비교

정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 정특성해석을 통하여 브릿지 상단에서의 속도에 대한 출력을 식 (6)과 (9)로 구할 수 있었다. 대류열 전달계수의 관계식 (3)이 알려지고 브릿지를 구성하는 저항들과 입력전압이 주어지면 정온도형 열선

유속계와 정전압형 열선유속계의 출력과 감도를 구할 수 있다. 그런데 동일한 열선을 작동형식이 같은 유속계에 연결하여 사용하는 경우에도 출력과 감도가 여러 요인들에 의하여 변화함을 알 수 있다. 예를 들면, 유속계의 출력을 단순히 증폭하는 경우에도 증폭된 신호는 원래의 신호에 비해 우수한 감도를 갖게 된다. 또한 식 (1)과 식 (7)에서 알 수 있듯이 정온도형 열선유속계의 경우에는 열선의 작동저항, 즉 과열비가 높을수록 비례계수 K 가 증가하여 감도가 향상된다. 그리고 식 (1)을 보면 저항 R_A 와 R_C 의 조합에 따라 열선의 과열비를 동일하게 설정할 수 있는데 식 (7)에서 R_A 에 따라 K 가 달라지므로 유속계의 감도가 변하는 것을 알 수 있다.

따라서 두 유속계의 감도를 비교하기 위해서는 위에서 언급한 여러가지 요인들의 효과를 배제한 타당한 비교의 기준이 제시되어야 하는데, 위에 기술한 예를 통하여 감도비교의 기준을 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 대류열전달계수가 동일하기 위해서는 동일한 열선을 사용해야 한다. 둘째, 브릿지에서 열선과 직렬로 연결되는 저항으로 동일한 값의 저항을 사용해야 한다. 셋째, 위의 두가지 조건을 만족한 상태에서 두 유속계가 교정곡선상의 한 속도에서 동일한 출력을 갖도록 유속계를 조정한다. 이 과정은 정온도형 열선유속계의 경우 과열비 설정용 가변저항 R_C 를 조정하고 정전압형 열선유속계의 경우에는 인가전압 E_T 를 조정하여 이루어진다. 비교의 전제조건으로서 열선과 직렬로 연결되는 고정저항을 동일한 값으로 사용했기 때문에 교정곡선상의 한 속도에서 두 유속계의 출력이 일치하는 것은 열선의 작동저항 즉, 과열비가 동일함을 의미한다. 이 점을 기준으로 하여 유속을 증가시키거나 감소시키면서 두 유속계가 어떠한 거동을 보이는가를 관찰하면 어느 작동형식의 유속계 감도가 우수한가를 판단할 수 있다.

Fig. 1과 Fig. 2의 회로에서 열선과 직렬로 연결되는 고정저항 R_A 는 47Ω (공칭 50Ω)을 사용한다. 본 연구에서는 직경 $5\mu\text{m}$, 길이 2mm 의 텅스텐 열선을 사용하여 속도 0에서 25m/s 의 범위에서 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 정특성관계식을 이용하여 속도에 따른 출력과 감도를 비교한다. 이 경우 열선의 대류열전달계수의 식으로 다음의 관계가 Kauh 등⁽⁹⁾에 의해 제안되었다. 이 식은 비교하려는 두 유속계의 출력계산에 공통

적으로 사용되므로 식의 정확도는 정성적인 비교에 영향을 미치지 않는다.

$$h = 2000 + 1400\sqrt{U} \quad (11)$$

속도 0 m/s에서 동일한 출력을 갖도록 정온도형과 정전압형 열선유속계를 조정하고 속도를 증가시키면서 계산한 교정곡선이 Fig. 3이다. 속도가 증가함에 따라 정온도형 열선유속계의 출력이 정전압형 열선유속계의 출력보다 증가하는 것을 알 수 있다. 유속계의 감도를 다음과 같이

$$S = \frac{dE_b}{dU} \quad (12)$$

로 정의할 때 Fig. 3의 결과를 감도로서 표시한 것이 Fig. 4이다. Fig. 3에서 속도가 0 m/s일 때 동일한 출력이 되도록 유속계의 출력을 조정하였기 때문에 속도증가에 따른 출력의 변화는 감도의 차이를 의미한다. Fig. 3과 Fig. 4로부터 정온도형 열선

유속계의 감도가 정전압형 열선유속계의 감도보다 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 3의 계산결과를 이용하여 속도에 따른 열선의 작동저항을 표시한 것이다. 정온도형 열선유속계의 경우에는 열선의 저항이 속도에 무관하게 설정된 값으로 일정하게 유지되지만 정전압형 열선유속계의 경우에는 속도가 증가할수록 작동저항이 감소하는 것을 알 수 있다. 작동저항이 감소하는 것은 유속에 따라 열선이 냉각되는 것을 의미하며 이와 같은 동작특성은 정전압형 열선유속계의 정특성관계식을 통하여 설명된다.

오옴의 법칙과 식 (8)에 의하여 열선을 흐르는 전류와 작동저항 사이의 관계는 다음과 같다.

$$E_T^2 = I^2 \cdot R_w^2 \quad (13)$$

대류열전달관계식 (2)를 식 (13)에 대입하면 대류열전달계수와 작동저항사이의 관계는 다음과 같다.

$$E_T^2 = \frac{hA_s}{\alpha_w R_0} (R_w - R_f) R_w \quad (14)$$

열선양단의 전압은 정전압형 열선유속계의 특성에 의해 인가되는 전압 E_T 로 일정하게 주어지게 되어 식 (14)는 유속에 관계없이 일정한 값을 갖는다. 그런데 식 (11)에서 대류열전달계수는 유속에 따라 증가하므로 결과적으로 열선의 작동저항은 유속이 증가하면 감소하게 된다. 유속에 따른 열선의 작동저항감소가 정전압형 열선유속계의 출력과 감도를 정온도형 열선유속계보다 낮아지도록 만든 인자라고 생각할 수 있다. 계산한 속도범위 뿐만 아니라 그 이상의 속도에서도 정온도형 열선유속계의

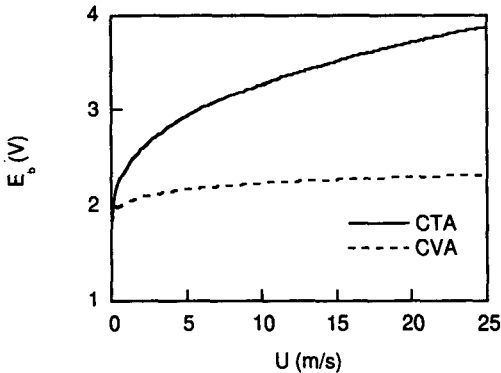


Fig. 3 Calculated bridge top outputs of CTA and CVA (condition of same outputs at 0 m/s)

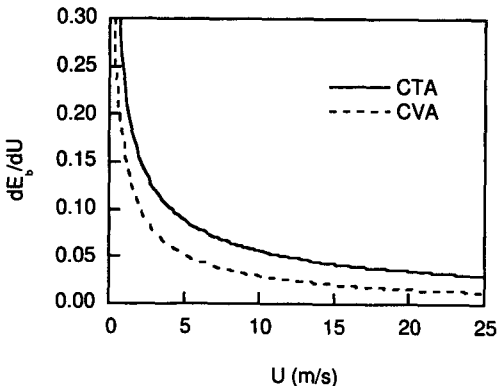


Fig. 4 Calculated sensitivities of CTA and CVA (condition of same outputs at 0 m/s)

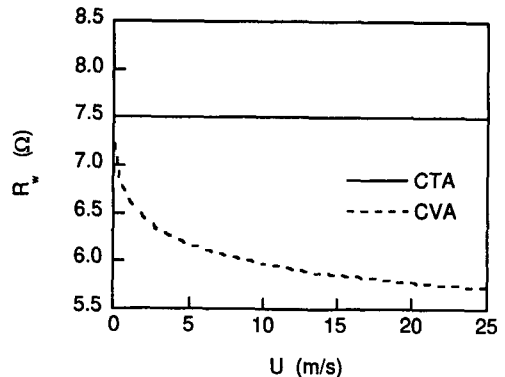


Fig. 5 Calculated wire working resistances of CTA and CVA (condition of same outputs at 0 m/s)

감도는 정전압형 열선유속계의 감도보다 우수할 것이다.

그러나 Fig. 3의 결과는 속도 0 m/s에서 동일한 작동저항을 갖도록 두 유속계를 조정하였기 때문에 유속이 증가함에 따라 정온도형 열선유속계의 작동저항은 정전압형 열선유속계보다 항상 높아진다. 따라서 열선의 작동저항이 유속에 따라 다르기 때문에 엄밀한 감도의 비교가 될 수 없다는 질문이 제기될 수 있다. 왜냐하면 정온도형 열선유속계는 열선의 작동저항을 크게 할수록 감도가 향상되기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 따라서 0 m/s보다 큰 속도에서 동일한 출력을 갖도록 두 유속계를 조정하고 속도를 감소시키면서 출력 및 감도의 변화를 고찰하는 것이 필요하다.

유속 25 m/s에서 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계가 동일한 출력을 갖도록 설정한 경우가 Fig. 6이다. 이 경우에도 정온도형 열선유속

계의 출력변화폭이 정전압형 열선유속계에 비하여 큰 것을 알 수 있으며 이것은 Fig. 7에서 유속계의 감도로 표시하였을 때 명확해진다. 열선의 작동저항변화를 Fig. 8에 나타내었는데 Fig. 5와 형태가 유사하지만 저속에서 작동저항이 매우 높아지게 됨을 알 수 있다. 이것은 유속 25 m/s에서 정온도형 열선유속계와 동일한 출력이 되도록 인가전압을 높게 설정하였기 때문이다. 열선의 작동저항은 온도저항관계에 의해 열선의 작동온도와 관계되므로 인

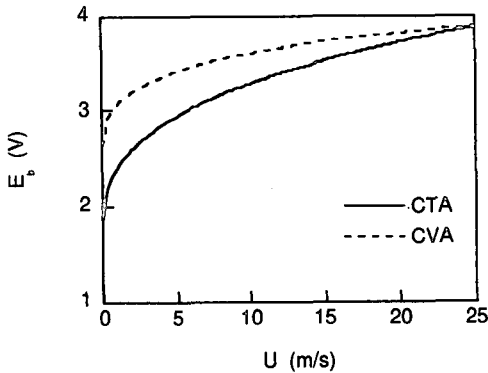


Fig. 6 Calculated bridge top outputs of CTA and CVA (condition of same outputs at 25 m/s)

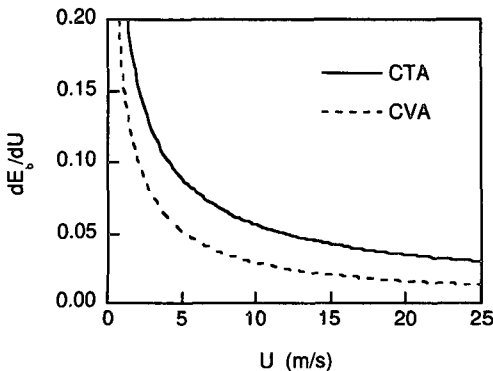


Fig. 7 Calculated sensitivities of CTA and CVA (condition of same outputs at 25 m/s)

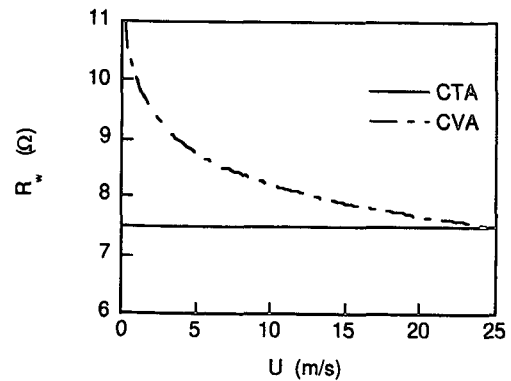
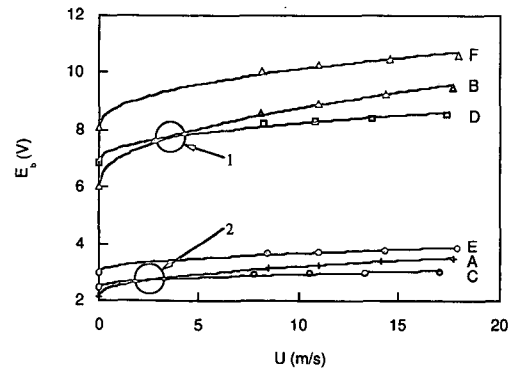


Fig. 8 Calculated wire working resistances of CTA and CVA (condition of same outputs at 25 m/s)



Experimental conditions

Cases	Mode	E_T (V)	R_A (Ω)
A	CTA	—	47
B	CTA	—	150
C	CVA	0.4	47
D	CVA	0.4	150
E	CVA	0.6	47
F	CVA	0.6	150

Fig. 9 Calibration experiments of CTA and CVA at the bridge top

가전압을 너무 높게 설정하면 저속에서 열선이 녹아 끊어질 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7 그리고 Fig. 8을 비교하여 알 수 있는 중요한 사실은 Fig. 6에서 정전압형 열선유속계의 출력이 정온도형 열선유속계의 출력보다 크고 열선의 작동저항도 계산한 속도범위에서 정전압형 열선유속계가 크지만 Fig. 8에 나타난 감도는 정온도형 열선유속계가 크다는 것이다.

실험을 통하여 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 출력을 비교한 것이 Fig. 9이며 Fig. 10은 이 경우의 작동저항이다. Fig. 9에서 A, B로 표시된 교정곡선은 정온도형 열선유속계의 경우로서 열선의 과열비는 두 경우에 동일하지만 열선과 직렬연결된 고정저항이 다른 경우이다. 고정저항 R_A 가 각각 47 Ω 과 150 Ω 인 경우, 상온에서 브릿지가 균형을 이루도록 가변저항 R_C 를 조정한다. 이 값에 일정한 과열비를 곱하여 R_C 를 설정하고 브릿지와 증폭기를 연결하면 고정저항 R_A 는 다르지만 열선의 작동저항은 동일하게 설정할 수 있다. 교정곡선 A, B를 보면, 열선의 작동저항이 동일하여도 고정저항 R_A 가 클수록 유속계의 감도가 커짐을 알 수 있다.

정전압형 열선유속계의 경우에는 인가전압 E_T 가 0.4V인 경우 고정저항 R_A 를 각각 47 Ω 과 150 Ω 으로 바꾸면서 교정곡선 C와 D를 얻었으며, 마찬가지로 인가전압 E_T 가 0.6V의 경우에는 교정곡선 E와 F를 얻었다. Fig. 10에서 인가전압 E_T 가 같으면 동일한 유속에서 브릿지상단의 출력이 달라도 과열비가 고정저항 R_A 에 관계없이 같음을 확인할 수 있다. 정전압형 열선유속계의 경우 R_A 가 동일하면 E_T 가 클수록 출력과 감도가 크며 E_T 가 같은

경우에는 R_A 가 클수록 출력과 감도가 커진다.

Fig. 9에서 고정저항 R_A 가 같은 경우, 정온도형 열선유속계의 출력과 정전압형 열선유속계의 출력이 일치하는 점들(점 1과 2)이 있으며 이점에서 열선의 작동저항은 같다. 그러나 이점보다 속도가 높아지면 정온도형 열선유속계의 출력이 정전압형 열선유속계의 출력보다 높아지며 속도가 낮아지면 정온도형 열선유속계의 출력이 더욱 낮아진다. 이것은 바로 유속계의 감도차이를 의미하며 모든 속도 영역에서 정온도형 열선유속계의 출력이 정전압형 열선유속계의 출력보다 우수함을 실험을 통하여 확인할 수 있다.

4. 가변온도형 열선유속계의 설계

3절의 고찰을 통하여 유속에 따른 열선의 작동저항의 변화는 정온도형 열선유속계의 경우 0이고 정전압형 열선유속계의 경우는 음(-)임을 알 수 있었으며 유속계의 감도를 결정하는 가장 중요한 인자는 열선의 작동저항이 아니라 유속에 따른 열선의 작동저항변화임을 알 수 있었다. 만약 유속에 따른 열선의 작동저항변화가 양(+)이 되도록 유속계를 구성한다면 열선의 과열비가 낮아도 정온도형 열선유속계보다 감도가 우수한 유속계가 될 것이다.

유속에 따른 열선의 작동저항 증가는 Fig. 1의 정온도형 열선유속계의 회로에서 유속계의 사용자가 속도에 따라 가변저항 R_C 를 연속적으로 증가시켜 구현할 수 있다. 이 경우 과열비를 변화시킨 새로운 유속계의 감도가 정온도형 열선유속계의 감도보다 우수할 것이다. 그러나 Fig. 1의 회로에서 수동으로 가변저항 R_C 를 조정하는 것은 실용적인 측면과 신호의 재현면에서 사실상 불가능하다. 따라서 속도에 따라 브릿지의 가변저항을 자동적으로 변화시키는 회로가 정온도형 열선유속계의 회로에 부가되어야 한다.

유속에 따라 저항 R_C 를 변화시키기 위해서는 입력전압에 따라 그 저항이 변하는 전기소자(예를 들면, 광도전성 저항과 트랜지스터)가 필요하다. 정온도형 열선유속계의 출력은 유속의 증감에 관한 정보를 가지고 있기 때문에 이 출력전압의 일부를 이들 소자들의 입력측에 가한다면 유속에 따라 이들 소자들의 저항을 변화시킬 수 있다. 이 경우 열선의 저항은 유속에 따라 연속적으로 변화하므로

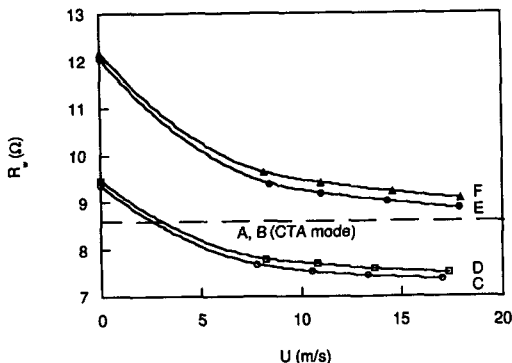


Fig. 10 Wire working resistances of CTA and CVA with same condition with Fig. 9

유속계의 경우와 동일한 형태로 주어지지만 식 (7)에 포함된 저항 R_C 가 광도전성저항의 출력특성을 표시하는 식 (16)과 (17)에 의해 바뀌어 다음과 같이 표시된다.

$$E_b^2 = \frac{hA_s}{\alpha_w R_0} \left\{ 1 - \frac{R_f \cdot R_B}{R_A \cdot f(V_{ref} - F \cdot E_b)} \right\} \left[R_A + \frac{R_A \cdot f(V_{ref} - F \cdot E_b)}{R_B} \right]^2 \quad (18)$$

4.2 트랜지스터를 채택한 가변온도형 열선유속계

광도전성저항과 마찬가지로 트랜지스터도 입력전압에 따라 그 저항값이 변화하는 가변저항이다. 그러나 트랜지스터를 동작시키기 위해서는 바이어스 회로를 구성하여 트랜지스터의 동작점을 설정해야 한다. Fig. 13은 NPN형 트랜지스터의 기본적인 바이어스 회로로서 R_{b1} 과 R_{b2} 는 바이어스 전압을 설정하는 가변저항이며 R_B 는 부하저항 그리고 E_b 는 전원전압인데, 실제 가변온도형 열선유속계에서는 E_b 가 브릿지상단의 전압을 표시하고 저항 R_B 와 트랜지스터가 브릿지에서 열선의 반대측 저항으로 동작하며 콜렉터전압이 직류증폭기에 입력된다.

Fig. 13의 회로가 브릿지내에서 가변저항으로 동작하는가를 판단하기 위해서는 전압 E_b 에 따라 전압비 E_{tr}/E_b 가 어떻게 변화하는가를 고찰해야 한다. Fig. 1의 정온도형 열선유속계회로의 경우, 전압 E_b 와 증폭기에 입력되는 전압사이에 다음의 관계가 있다.

$$\frac{E_w}{E_b} = \frac{R_w}{R_A + R_w} = \frac{R_C}{R_B + R_C} \quad (19)$$

그런데 정온도형 열선유속계의 경우 R_w 와 R_A 그리고 R_B 와 R_C 가 유속계의 특성상 일정하게 유지되므로 유속의 증가에 따라 출력전압 E_b 가 증가하여도 전압비 E_w/E_b 는 일정하다. 그러므로 식 (19)로 표시되는 전압비가 일정하다면 열선의 작동

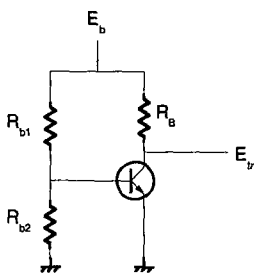


Fig. 13 Bias circuit for NPN transistor

저항이 일정함을 간접적으로 의미한다. Fig. 13의 회로가 가변온도형 열선유속계에서 성공적으로 사용되려면 전압 E_b 에 따라 전압비 E_{tr}/E_b 가 변화해야 한다.

이를 판단하기 위해 Fig. 13의 회로를 Brophy⁽¹¹⁾의 교과서를 참조하여 해석한다. 트랜지스터의 전류증폭특성을 선형으로 가정하면 베이스전류와 콜렉터전류 사이에는

$$I_c = \beta \cdot I_b \quad (20)$$

의 관계가 있으며, 여기서 β 는 전류증폭율로서 제작회사에 의해 알려지거나 실험을 통하여 측정한다. 바이어스회로는 입력측과 출력측에 키르히호프 법칙을 적용하여 해석하며 그 결과 바이어스선 (식 (21))과 부하선 (식 (22))방정식을 얻는다.

$$E_{tr} = E_b - I_c R_B \quad (21)$$

$$I_b = \frac{V_{eq} - V_{be}}{R_{eq}} \quad (22)$$

여기서, R_{eq} 와 V_{eq} 는 각각 바이어스회로의 등가 저항과 등가전압이며 테브닝의정리를 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$R_{eq} = \frac{R_{b1} \cdot R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}, \quad V_{eq} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} E_b \quad (23)$$

식 (22)에서 트랜지스터의 베이스-에미터간 전압을 실리콘 트랜지스터의 경우 약 0.6V로서 일정하다고 가정하면 주어진 R_{b1} 과 R_{b2} 에 대하여 E_b 에 따른 콜렉터전류 I_c 와 E_{tr} 을 구할 수 있고 이로부터 트랜지스터의 콜렉터와 에미터 양단의 저항을 구할 수 있다.

Fig. 14는 실험과 모델링결과로서 전압 E_b 에 따

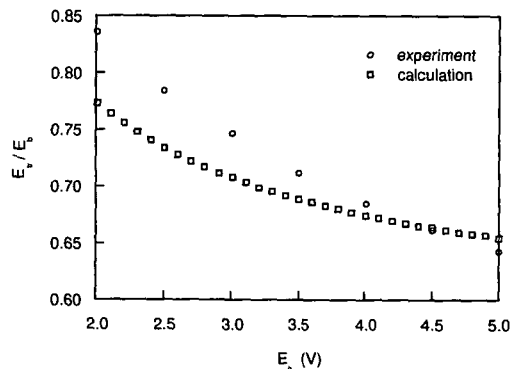


Fig. 14 Variation of E_{tr}/E_b with E_b in the bias circuit of Fig. 13

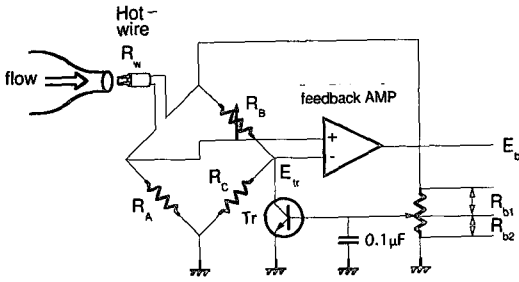


Fig. 15 Circuit diagram of a variable temperature anemometer (VTA) adopting transistor

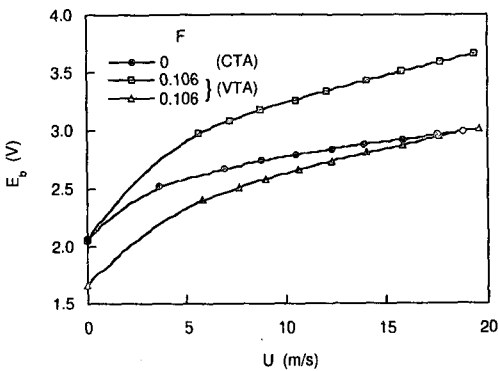


Fig. 16 Calibration experiments of CTA and VTA adopting photoconductive cell

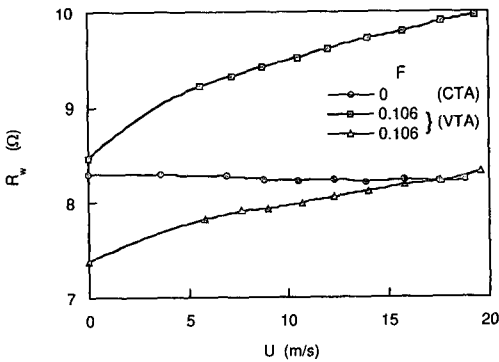


Fig. 17 Variations of wire working resistance of CTA and VTA adopting photoconductive cell

라 전압비 E_{tr}/E_b 가 변하는 것을 보여준다. 이것은 트랜지스터의 에미터-콜렉터 양단의 저항이 감소함을 의미하고 가변온도형 열선유속계의 회로를 구성하는데 Fig. 13의 바이어스회로가 사용될 수 있음을 보여준다. E_b 가 증가함에 따라 트랜지스터의 저항이 감소하므로 유속에 따라 열선의 저항을 증가시키려면 열선과 트랜지스터회로가 브릿지에서

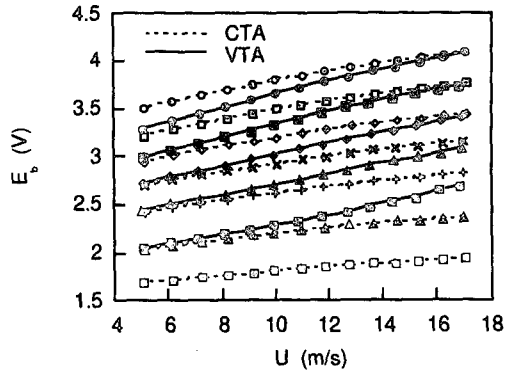


Fig. 18 Calibration experiments of CTA and VTA adopting transistor

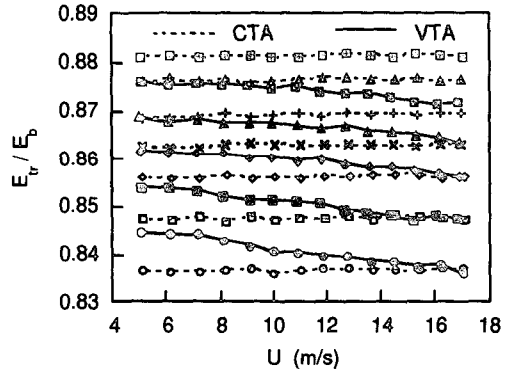


Fig. 19 Variations of wire working resistance of CTA and VTA adopting transistor

Experimental conditions

Cases	R_{b1} (kΩ)	R_{b2} (kΩ)	R_B (Ω)	mode
---○---	984	0	908	CTA
---□---	984	0	836	CTA
---◇---	984	0	778	CTA
---×---	984	0	734	CTA
---+---	984	0	692	CTA
---△---	984	0	644	CTA
---▢---	984	0	608	CTA
—○—	811.2	172.8	836	VTA
—□—	800.2	183.8	778	VTA
—◇—	792.3	191.7	734	VTA
—△—	771.8	205.9	692	VTA
—▢—	746.8	237.2	664	VTA

서로 마주보도록 배치해야 한다. Fig. 15는 Fig. 13의 바이어스회로를 채택한 가변온도형 열선유속계이다.

4.3 가변온도형 열선유속계의 출력특성과 정온도형 열선유속계와의 감도비교

Fig. 16은 광도전성저항을 채택한 가변온도형 열선유속계와 정온도형 열선유속계의 교정곡선이다. 가변온도형 열선유속계와 정온도형 열선유속계의 출력을 비교하기 위하여 정온도형 열선유속계의 교정곡선에서 두개의 작동점(0 m/s, 2.1V ; 19.5 m/s, 3.1V)을 기준으로 설정한다. 가변저항 R_F 를 조정하여 출력의 귀환비율 F 를 결정한 후, Fig. 12의 R_B 를 바꾸면서 가변온도형 열선유속계의 출력과 정온도형 열선유속계의 출력이 기준점에서 같아지도록 조정한다.

Fig. 17은 Fig. 16의 결과를 이용하여 열선의 작동저항을 나타낸 것이다. 가변온도형 열선유속계의 경우 유속이 증가함에 따라 작동저항이 증가하고 정온도형 열선유속계보다 감도가 우수하다. 작동저항이 실험을 수행한 속도범위에서 정온도형 열선유속계보다 작은 경우에도 가변온도형 열선유속계의 감도가 더 우수함을 알 수 있다.

Fig. 18은 트랜지스터를 채용한 가변온도형 열선유속계의 출력을 정온도형 열선유속계의 출력과 비교한 것이다. 가변온도형 열선유속계의 교정곡선은 정온도형 열선유속계의 출력과 속도 약 17 m/s에서 일치하도록 가변저항 R_{b2} 와 R_B 를 조정한 후 얻은 것이다. 이 경우에도 가변온도형 열선유속계의 감도가 정온도형 열선유속계보다 우수함을 알 수 있다. Fig. 19는 Fig. 18의 실험결과를 이용하여 산출한 유속에 따른 전압비 E_{tr}/E_b 이다. 정온도형 열선유속계의 경우에 이 전압비는 일정한데 가변온도형 열선유속계의 경우에는 전압비가 유속에 따라 감소한다. 가변온도형 유속계의 브릿지에서 열선과 바이어스 회로가 마주보도록 배치되어 있기 때문에 유속에 따라 열선의 작동저항이 증가하게 된다. Fig. 18에서 유속에 따른 열선의 작동저항변화가 유속계의 감도를 향상시킨 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유속의 증가에 따라 열선의 작동저항이 증가하는 새로운 형식의 열선유속계를 개발하였으며 정온도형 열선유속계보다 그 감도가 우수함을 확인하였다. 정온도형 열선유속계와 정전압형 열선유속계의 정특성해석과 실험을 통하여 열선의 작동저항 그 자체보다는 유속에 따른 작동저항 변

화가 열선유속계의 감도에 영향을 주는 지배적인 인자임을 알 수 있었다. 정온도형 열선유속계의 경우에는 유속에 관계없이 열선의 작동저항이 일정하고 정전압형 열선유속계의 경우는 유속에 따라 열선의 작동저항이 감소하는데 이와 같은 작동형식의 차이가 감도의 차이를 가져온다. 이것은 열선의 작동저항을 유속에 따라 증가시킬 수 있다면 정온도형 열선유속계보다 감도가 우수한 새로운 형식의 열선유속계의 설계가 가능함을 의미한다. 유속에 따라 열선의 작동저항을 변화시키려면 브릿지내의 하나의 저항값을 유속에 따라 변화시켜야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 입력되는 전압에 따라 그 저항이 변화하는 전기소자를 도입하여 정온도형 열선유속계의 출력전압의 일부 즉, 유속의 변화정보를 이들 전기소자의 입력으로 정거환시킴으로써 열선의 작동저항을 유속에 따라 변화시킬 수 있었다. 전기소자로서 광도전성저항과 트랜지스터를 사용하는 가변온도형 열선유속계의 설계에 관하여 상세히 고찰하였으며 실험을 통하여 정온도형 열선유속계보다 가변온도형 열선유속계의 감도가 우수함을 보였다. 이 경우 유속계의 감도향상은 유속에 따른 열선의 작동저항변화가 주된 인자임을 보였다.

참고문헌

- (1) Perry, A. E., 1982, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press.
- (2) Champagne, F. H., 1978, "The Temperature Sensitivity of Hot Wires," *Proc. Dynamic Flow Conference*, Denmark.
- (3) Sarma, G. R., 1991, *US Patent No. 9074147*.
- (4) Kuppa, S., Sarma, G. R., and Mangalam, S. M., 1993, "Effect of Thermal Inertia on the Frequency Response of Constant Voltage Anemometer and its Compensation," *ASME-1993, Fluid Measurement and Instrum.*, pp. 67~73.
- (5) Lee, S., 1995, "A Study on the Temperature Compensation and Sensitivity Enhancement of the Hot-Wire Anemometer," Ph. D. thesis, Dept. of Mech. Eng., Seoul National Univ., Korea.
- (6) King, L. V., 1914, "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid," *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, Vol. 214A, pp. 373~432.

- (7) Collis, D. C. and Williams, M. J., 1959, "Two-Dimensional Convection from Heated Wires at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 357~384.
- (8) Bearman, P. W., 1971, "Corrections for the Effect of Ambient Temperature Drift on Hot-Wire Measurements in Incompressible Flow," *DISA Information*, No. 11, pp. 25~30.
- (9) Kauh, S., Myung, H., and Lee, S., 1993, "An Application Example of Common Ground Hot-wire Probe for CTA," *The 6th International Symposium on Transport Phenomena*, Vol. 2, pp. 1353~1358, Seoul.
- (10) Kock, F. A. and Gartshore, I. S., 1972, "Temperature Effects on Hot Wire Anemometer Calibration," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, Vol. 5, pp. 58~61.
- (11) Brophy, J. J., 1983, *Basic Electronics for Scientists*, 4th Ed., McGraw-Hill Book Company.