

〈論 文〉

## 광도전성저항을 이용한 열선유속계의 온도보상

이신표\* · 고상근\*\*

(1995년 4월 3일 접수)

### Temperature Compensation of Hot-Wire Anemometer with Photoconductive Cell

S. P. Lee and S. Kauh

**Key Words** : Hot-Wire Anemometer(열선유속계), Temperature Compensation(온도보상), Photoconductive Cell(광도전성저항)

#### Abstract

A new temperature compensation technique for hot-wire anemometer is proposed in this article. In contrast to the available compensation techniques, a photoconductive cell is introduced here as a variable resistor in the bridge. The major advantage of adopting an active component such as photoconductive cell is that temperature compensation can be achieved by using any kind of temperature sensors, once the output of temperature sensor is given as a voltage. Thereby, the temperature compensation can be made automatically and intelligently by a computer software or a hardware device. Validation experiments using a photoconductive cell with a thermocouple-thermometer are conducted in the temperature range from 30 °C to 50 °C and the velocity ranges from 8 m/s to 18 m/s.

#### 기 호 설 명

$A_s$  : 열선의 표면적  
 $a, b$  : 함수 D의 계수들  
 $D$  : 온도보상의 정도를 나타내는 함수,  $(\Delta V)^2 / (\Delta \dot{V})^2$   
 $h$  : 열선과 유체 사이의 대류열전달계수  
 $E_b$  : 브리지 상단의 전압  
 $E_w$  : 열선 양단의 전압  
 $I$  : 열선을 흐르는 전류  
 $R_A$  : 브리지에서 열선과 직렬로 연결된 고정저항  
 $R_B$  : 브리지에서 열선의 과열비를 설정하는 가변 저항  
 $R_C$  : 브리지에서  $R_B$ 와 직렬로 연결된 보상저항,

$$1 / (R_p^{-1} + R_{cas}^{-1})$$

$R_{cas}$  : 광도전성저항  
 $R_p$  : 광도전성저항과 병렬연결된 저항  
 $R_{wf}$  : 유체온도  $T_f$ 에서의 열선의 저항  
 $R_{wa}$  : 특정한 주위온도에서의 열선의 저항  
 $R_{ww}$  : 작동온도  $T_w$ 에서의 열선의 저항  
 $R_{w0}$  : 0 °C에서의 열선의 저항  
 $T_f$  : 유체온도  
 $T_a$  : 특정한 주위온도  
 $T_w$  : 열선의 작동온도  
 $U$  : 유체속도  
 $V_c$  : 광도전성저항에 인가되는 보상전압

#### 그리스문자

$a_w$  : 열선의 온도저항계수  
 $\Delta V$  : 고정저항  $R_A$  양단의 전압

\*서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 서울대학교 기계공학과

$\sigma$  : 브리지내 저항들의 비,  $\frac{R_B R_{wa}}{R_A R_C}$

상첨자

\* : 기준

## 1. 서론

열선유속계는 열선과 유체 사이의 대류열전달관계를 이용하여 유속을 측정하는 기기이다. 그러나 열선유속계의 출력은 유속이 일정한 경우에도 유체의 온도가 변화함에 따라 변화한다. 이것은 열선과 유체 사이의 대류열전달량이 단순히 유속뿐만 아니라 유체의 온도변화에 의해 변하기 때문이다. 따라서 온도가 변화하는 유동장의 경우 온도보상을 고려하지 않은 유속측정은 많은 오차를 포함한다.

열선유속계의 온도변동에 대한 위의 단점을 극복하기 위하여 온도변화를 보상하는 다양한 방법이 제시되었다. Bearman<sup>(1)</sup>은 온도변화에 따른 보정계수를 도입하여 신호처리시에 유속계의 출력을 보정하는 방법을 제시하였다. Artt와 Brown<sup>(2)</sup>은 하나의 열선을 과열비가 다르게 동작시켜 각각의 과열비에 대한 유속계의 출력을 얻은 후 이를 처리하여 유동의 평균온도와 속도를 구하였다. 후에 Sakao<sup>(3)</sup>는 과열비가 다르게 동작하는 두 개의 정온도형 열선유속계와 신호처리회로를 구성하여 유속과 유체의 온도를 실시간적으로 동시에 측정하였다. Drubka 등<sup>(4)</sup>은 정온도형 열선유속계의 브리지에 온도보상용 금속저항(compensating resistance probe)을 도입하여 처음으로 하드웨어적인 온도보상을 수행하였다. 그러나 Drubka 등은 브리지상단에서의 출력을 보상하는 것을 목적으로 하였기 때문에 그 보상방법이 매우 복잡하였다. Takagi<sup>(5)</sup>는 Drubka 등의 방법을 개선하여 브리지에서 열선과 직렬로 연결되는 고정저항에서 유속계의 출력을 검출하는 방법으로 보상방법을 단순화하였다. Moffat과 Frota<sup>(6)</sup>은 온도변화에 따라 수동으로 유속계의 과열비 설정용 저항을 조정함으로써 브리지상단에서의 온도보상을 수행하였다.

위에서 언급한 여러가지 방법 중, 현재 가장 널리 사용되는 방법은 두 개의 저항센서로 구성된 프로우브를 유속계의 브리지에 연결하여 사용하는 방법이다. 이 경우 하나의 저항센서는 속도측정을 위

한 보통의 열선이며 다른 하나는 온도를 검출하는 보상저항센서로서 브리지에서 가변저항 즉, 그 저항값이 유체온도에 따라 변화하는 저항으로 작용한다. 이 두 개의 저항센서를 유속계의 브리지에서 서로 반대측에 놓이도록 연결함으로써 온도변동의 효과를 상쇄시키고 결과적으로 유속계의 출력에 온도변화의 효과가 나타나지 않도록 한다. 이와 같은 방법은 열선유속계뿐만 아니라 스트레인지이지나 자동차용 공기유량계의 온도보상 등에 널리 사용되고 있다.

그러나 기존의 온도보상방법은 가변저항으로서 오직 금속보상저항만을 사용하도록 제안되었기 때문에 현재 사용가능하며 기능적으로 잘 개발된 여러가지 종류의 온도센서(예를 들면, 열전대, 더미스터, 저항온도검출기 등)를 사용하지 못하며, 또한 유속을 측정하는 경우 다음에 언급할 여러가지 기술적인 어려움이 생기게 된다.

두 개의 저항센서로 구성된 프로우브를 이용하여 온도보상을 수행하는 경우, 두 개의 저항센서는 보통 그 재질이 다르므로 온도변화에 대한 저항변화 즉, 온도저항계수가 서로 다르고 이에 따라 센서 사이에 정합문제(matching)가 생기며 이것은 온도변화에 대한 유속계의 조정을 복잡하게 한다. 또한 다차원 유속측정을 위하여 두 개 이상의 열선을 사용하는 경우, 하나의 열선을 보상하기 위해서는 또 다른 하나의 보상저항이 필요하게 되어 전체 프로우브의 크기가 매우 커지게 된다.<sup>(6,7)</sup> 이와 같은 단점 즉, 프로우브의 정합문제와 프로우브의 측정체적이 커지는 문제를 해결하기 위해서는 온도보상의 새로운 방법이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 기존의 열선유속계의 온도보상방법에서 사용되던 수동전기소자인 금속보상저항을 능동소자 즉, 입력전압에 따라 저항값을 바꿀 수 있는 소자인 광도전성저항으로 대체하여 임의 형식의 온도검출수단을 유속계의 온도보상에 적용할 수 있는 새로운 온도보상방법을 제시하였다. 본 연구에서는 유체온도의 검출수단으로 열전대를 사용하고 열전대 증폭기의 출력을 이용하여 광도전성저항의 저항을 바꿈으로써 열선유속계의 온도보상을 수행한다.

## 2. 해석 및 온도보상조건의 유도

광도전성저항을 도입한 열선유속계의 회로를

Fig. 1에 나타내었다.<sup>(6)</sup> 회로는 부귀환 직류증폭기와 열선을 포함하는 브리지로 구성되어 있다. 부귀환 직류증폭기는 열선을 제외한 세 개의 저항에 의해 설정되는 과열비에 따라 열선저항을 유동변화에 관계 없이 항상 일정하게 유지하기 위한 전력을 공급한다. 여기서,  $R_{ww}$ 는 작동중인 열선의 저항이며,  $R_B$ 는 열선의 과열비를 설정하기 위한 가변저항이고,  $R_A$ 는 브리지내의 고정저항이다. 기존의 정온도형 열선유속계와 비교하면, 저항  $R_C$ 가 병렬 연결된  $R_P$ 와  $R_{Cas}$ 로 구성되어 있는데  $R_P$ 는 고정저항이고  $R_{Cas}$ 가 광도전성저항으로 입력전압에 따라 그 저항이 변화하는 반도체소자이다.

열선이 전류  $I$ 에 의하여 가열되고 유체의 흐름에 의하여 냉각될 때, 열선과 유체 사이의 대류열 전달관계는 다음과 같이 표시된다.

$$I^2 R_{ww} = A_s (T_w - T_f) h \quad (1)$$

여기서, 대류열전달계수  $h$ 는 유체온도의 변화가 작은 경우(교정이 수행된 기준온도에 대하여 약 20 °C의 변화) 속도에 의해서만 변화한다고 가정한다.<sup>(4-6)</sup> 열선의 저항온도관계에 의해 동작중인 열선의 온도(가열된 열선)와 유체온도(가열되지 않은 열선)에서의 저항은 다음의 식으로 표시된다.

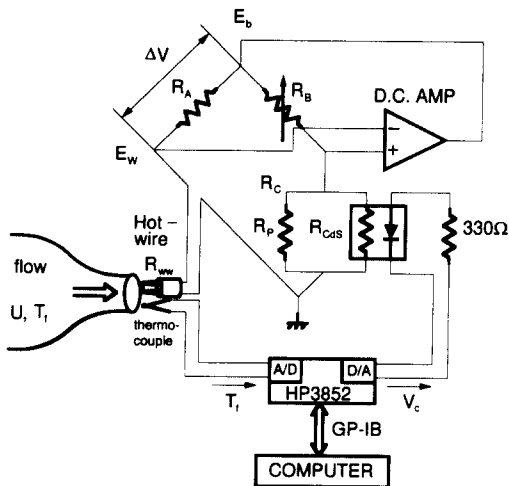


Fig. 1 Temperature compensating circuit adopting photoconductive cell. Here  $R_{ww}$  is a hot-wire and  $R_B$  is a variable resistor for overheat-ratio setting and  $R_A$  is a fixed resistor. One arm of the bridge is replaced with the resistor  $R_C$  that is made of two resistors in parallel ( $R_P$  and  $R_{Cas}$ ).

$$R_{ww} = R_{w0}(1 + \alpha_w T_w) \quad (2)$$

$$R_{wf} = R_{w0}(1 + \alpha_w T_f) \quad (3)$$

고정저항  $R_A$  양단의 전압은 식 (1)에 식 (2)와 (3)을 대입함으로써 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$(\Delta V)^2 = I^2 R_A^2 = \frac{A_s R_A^2}{R_{w0} \alpha_w} \left[ 1 - \frac{R_{wf}}{R_{ww}} \right] h \quad (4)$$

여기서 열선의 작동저항  $R_{ww}$ 는 브리지내의 세 개의 다른 저항에 의해서 설정되며 다음과 같이 표시된다.

$$R_{ww} = R_A R_C / R_B \quad (5)$$

유속계의 출력을 브리지 상단이 아닌 고정저항  $R_A$ 의 양단에서 얻은 이유는 본 절에서 유도할 온도보상의 조건이 유체온도의 변화에 대하여 선형적인 형태로서 간단하게 얻어지기 때문이다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 최종적인 유속계의 출력은 다음의 식으로 얻어진다.

$$(\Delta V)^2 = \frac{A_s R_A^2}{R_{w0} \alpha_w} \left[ 1 - \frac{R_B R_{w0} (1 + \alpha_w T_f)}{R_A R_C} \right] h \quad (6)$$

식 (6)은  $(1 + \alpha_w T_f)$ 의 항을 포함하고 있기 때문에, 출력은  $T_f$ 의 변화에 따라 변화하게 되는데, 만약 식 (6)의 분모에 있는 저항  $R_C$ 를 온도  $T_f$ 의 변화에 따라 의도적으로 적절히 변화시키면, 출력은 속도  $U$ 에만 의존하게 되고 유속계의 온도보상이 이루어지게 된다.

저항  $R_C$ 의 보상조건 즉, 온도  $T_f$ 에 따른 변화 형태를 구하기 위하여 식 (6)을 다시 고찰한다. 기준 유체온도  $T_f^*$ 와 이 경우의 보상저항  $R_C^*$ 에서의 출력을  $\Delta V^*$ 로 나타내면, 이 때 유속에 따른 출력은 식 (6)에 의해 다음의 식으로 표시된다.

$$(\Delta V^*)^2 = \frac{A_s R_A^2}{R_{w0} \alpha_w} \left[ 1 - \frac{R_B R_{w0} (1 + \alpha_w T_f^*)}{R_A R_C^*} \right] h \quad (7)$$

식 (6)은 임의 온도변화에 대한 유속계의 출력을 나타내는 식으로써 기준 유체온도에서의 출력식 (7)과 비교할 때, 동일한 속도에서 출력이 동일하여 온도보상이 이루어지려면,  $(\Delta V^*)^2$ 와  $(\Delta V)^2$ 의 비는 1이 되어야 한다. 이와 같은 온도보상의 조건으로부터  $R_C$ 의 조건을 다음의 식으로 얻는다.

$$R_C = R_C^* \frac{1 + \alpha_w T_f}{1 + \alpha_w T_f^*} \quad (8)$$

보상조건 식 (8)은 단순하지만 매우 중요한 의미

를 갖는다. 온도  $T_f$ 에서의 보상저항  $R_c$ 가  $R_c^*$ 에 대하여 식 (8)과 같이 변화하면 기준온도  $T_f^*$ 와 저항  $R_c^*$ 에서 수행된 보정곡선과 일치하게 되는 것이다. 보상저항을 이용하는 Takagi<sup>(5)</sup>의 방법에서는 보상을 수행하기 전에 알아야 할 물성치들(예를 들면, 열선의 온도저항계수, 보상저항의 온도저항계수, 0°C에서의 열선저항, 0°C에서의 보상저항, 브리지를 구성하는 저항들의 저항값 등)이 매우 많으며, 이들 물성치를 이용하여 열선과 보상저항간의 온도저항 계수차이를 조종하는 가변저항값을 설정한다. 이와 같은 조정과정은 복잡하며 저자의 경험에 의하면 이들 물성치의 값은 높은 uncertainty를 갖기 때문에 온도보상의 정도를 신뢰할 수도 없다. 따라서 다른 온도에 대한 검증이 반드시 필요하다. 그러나 본 연구에서 제안된 온도보상방법에서는 식 (8)에 사용되는 온도저항계수만 적절히 알려진다면 극단적인 경우, 다른 온도에 대한 확인은 필요하지 않다.

### 3. 광도전성저항의 특성과 유속계에 적용시의 장점

광도전성저항은 입력측이 발광성 다이오드(light emitting diode)로 그리고 출력측은 황화카드뮴(CdS) 포토커플러로 구성되어 있다. 광도전성저항은 적외선의 검출, 광통신, 온도측정 등 공업분야에서 널리 사용되고 있다. 광도전성저항은 일정한 입력전압에 대해서는 고정저항으로 동작한다. 출력측의 저항은 입력측에 가해지는 전압이 다이오드의 빛 강도(intensity)를 바꿈에 따라 변화하게 되는데, 이와 같은 특성을 이용하여 입력전압을 적절히 조종하면 가변저항으로서 온도보상에 사용할 수 있다.

광도전성저항을 유속계의 온도보상에 채택한 가장 중요한 이유는, 온도에 따라 전압을 출력하는 모든 온도측정수단을 온도보상에 모두 적용할 수 있다는 점이다. 지금까지 사용되었던 보상저항에 의한 온도보상방법에서는 오직 백금선과 같은 저항만을 사용했지만 이와 같이 광도전성저항을 이용하여 온도보상을 수행하게 되면 온도보상을 위한 측정기구를 다양화할 수 있음을 의미한다.

또한 광도전성저항을 이용하여 온도보상을 수행하면 프로우브의 전체 측정체적의 크기를 줄일 수 있다. 이것은 광도전성저항이 직접 측정하려는 유

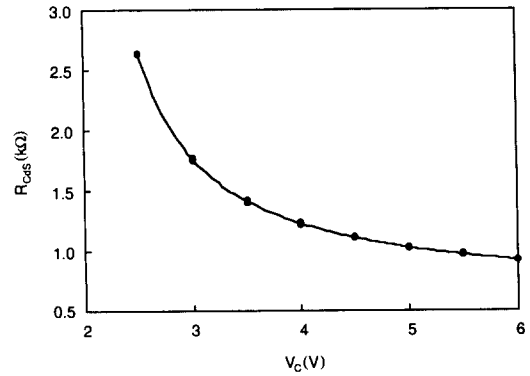


Fig. 2 Resistance variation of the photoconductive cell with input voltage. A 330Ω resistor is connected in series with the input side of the cell to limit the current (see Fig. 1)

체와 접촉할 필요가 없고 대신에 측정점에서 유체와 접촉하고 있는 온도센서로부터의 신호가 광도전성저항의 저항을 조정하기 때문이다. 기존의 온도보상방법에서는 보상저항이 반드시 측정점에 위치하여 온도변화를 경험해야 하므로 열선의 개수가 두 개 이상이 되면 전체 프로우브의 크기가 매우 커지게 된다. 그러나 광도전성저항을 채택한 유속계의 경우에는 하나의 온도센서로 여러 개의 광도전성저항을 구동시킬 수 있으므로 다차원 측정을 위한 프로우브의 온도보상에 본 방법이 적합하게 된다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 일본 Moririca사<sup>(9)</sup>의 모델 MCD-725E 광도전성저항의 저항변화곡선으로서 입력에 대하여 비선형적인 저항변화 특성을 보여준다. 광도전성저항의 입력측에 가해지는 전류를 제한하기 위하여 Fig. 1과 같이 입력측에 330Ω의 저항을 연결한다.  $R_c$ 의 전체적인 저항수준을 500Ω 정도로 낮추기 위해 680Ω의 부가적인 저항  $R_p$ 를 광도전성저항과 병렬로 연결하였다.

### 4. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치는 원형노즐, 열선 유속계, 열전대와 증폭기, A-D 변환기(analog to digital), D-A 변환기(digital to analog) 그리고 개인용 컴퓨터를 포함한 자료획득장치이다. 원형노즐의 출구에 피토크, 열전대 그리고 열선을 설치하였다. 노즐의 단면수출물(노즐의 입구면적 대 출구

면적)은 42.25 : 1이며 출구직경은 3 cm이고 출구의 퍼텐셜 코어(potential core)영역에서 속도 20 m/s일 때, 난류강도는 약 0.4%였다. 출구에서의 속도는 상용 인버터에 의해 송풍기에 입력을 조정함으로써 이루어진다. 출구의 온도는 2 kW 히터의 전원을 SSR(solid state relay)로 조정하여 약 0.1 °C 의 범위에서 조정된다.

DANTEC 텅스텐 열선(직경 5 μm)을 상용 Kanomax 프로우브에 점접하여 사용하였으며, 이 때 열선의 길이는 약 2 mm였다. 실험실에서 제작한 열선유속계의 직류증폭기의 이득은 약 800이었으며 연산증폭기를 이용하여 차동증폭형으로 제작하였다.

온도를 검출하고 온도보상을 위한 신호를 광도전성저항에 가하기 위하여 T형 열전대(copper-constantan)와 데이터 획득장치(HP3852A)를 사용하였다. Fig. 1은 전체실험장치의 개략도를 나타내고 있으며 개인용 컴퓨터는 GP-IB(general purpose interface bus)를 통하여 자료획득장치와 통신한다. Fig. 3은 열전대에서 검출되고 증폭된 신호를 이용하여 광도전성저항이 온도보상을 수행하도록 입력측에 가하는 보상전압  $V_c$ 를 컴퓨터내에서 계산하기 위한 과정을 나타낸다.

유체의 온도가 측정되면 필요한 보상저항  $R_c$ 는 식 (8)에 의해 계산되고 Fig. 2를 참조하여 Secant method(근 구하는 프로그램)로 해당 전압을 계산하게 된다. 구해진 보상전압은 데이터 획득장치내의 D-A 변환기를 이용하여 광도전성저항의 입력측에 가해진다. 이와 같이 입력측에 가하는 전압을 프로그램을 이용하여 자유롭게 바꿔서 보상저항을 변화시킬 수 있기 때문에 어떠한 온도저항계수를

갖는 열선에도 적용할 수 있는 장점이 있다.

### 5. 온도저항계수의 결정

본 연구에서 제안된 보상방법에서는 유속계에 적절한  $\alpha_w$ 를 선정하는 것이 온도보상의 정확도를 결정한다.  $\alpha_w$ 는 열선의 온도저항계수로서 금속의 물성치표로부터 그 공칭값(nominal value)을 대략 알 수 있다. 그러나 열선의 성질은 그 순도 및 제작 공정에 따라 달라지기 때문에 실험적인 보정과정을 거치지 않고 온도저항계수를 사용하게 되면 온도보상에 많은 오차를 가져온다. 그러나 열선의 공칭 온도저항계수를 구하려 해도 온도에 따른 열선의 저항변화가 매우 작아서 정밀한 측정장비들이 필요하며 이렇게 구해진  $\alpha_w$ 가 특정한 열선 및 유속계에 적합한지는 확신할 수 없다.

본 연구에서는  $\alpha_w$ 를 실제 유속계의 상황에 가까운 동작시켜 공칭 온도저항계수가 아닌 실제 유속계의 동작상황에 적합한 온도저항계수를 구하는 두 가지 방법을 제안한다. 통상적인 열선유속계의 작동방식에는 정온도형 열선유속계(CTA) 방식과 정전류형 열선유속계(CCA) 방식이 있으며 열선의 온도저항계수  $\alpha_w$ 는 CTA와 CCA의 정특성관계식에 포함되어 있기 때문에 앞으로 설명할 방법에 따르면 실제 유속계의 특성을 모두 고려한  $\alpha_w$ 를 구할 수 있다.

#### 5.1 CTA방식

CTA 방식에서는  $R_c$ 를 일정하게 두고 유체온도를 변화시키면서 실험을 수행한다. 등온으로 유지되는 여러 온도에 대하여 통상적인 방법으로 교정곡선을 구할 수 있는데, 동일한 속도에서  $T_f^*$ 의 출력으로 각각의 온도  $T_f$ 에 대한 출력력을 나누면 식 (9)를 따르는 출력비  $D$ 와 온도  $T_f$ 에 따른 데이터의 집합이 얻어진다. 여기서  $T_f^*$ 는  $\alpha_w$ 를 구하기 위한 기준온도로서 온도변화범위에서 중간값으로 채택한다.

$$D = \left[ \frac{\Delta V}{\Delta V^*} \right]^2 = \frac{\left\{ 1 - \frac{R_{w0}R_B(1 + \alpha_w T_f)}{R_A R_c} \right\}}{\left\{ 1 - \frac{R_{w0}R_B(1 + \alpha_w T_f^*)}{R_A R_c} \right\}} \quad (9)$$

식 (9)는 유체온도의 변화  $T_f$ 에 대하여 선형적임을 알 수 있으며 정리하면 다음의 식으로 표시된다.

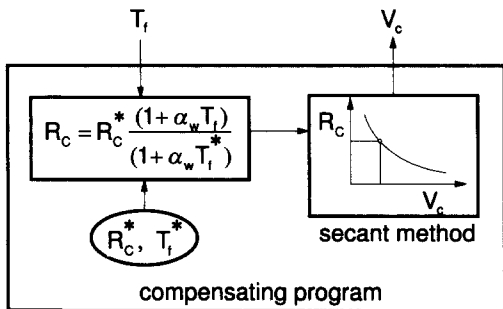


Fig. 3 Calculating procedure to generate the voltage applied to the photoconductive cell with the measured ambient temperature

$$D = f(T_f) = a + b \cdot T_f \quad (10)$$

교정실험을 통하여 얻어진 데이터를 curve-fitting 하면 식 (10)의  $a$ 와  $b$ 가 구해지고 식 (9)를 참조 하면 계수  $a$ 와  $b$ 는 다음의 식들로 표시된다.

$$a = \frac{\left[1 - \frac{\sigma}{(1 + \alpha_w T_a)}\right]}{\left\{1 - \sigma \frac{(1 + \alpha_w T_f^*)}{(1 + \alpha_w T_a)}\right\}} \quad (11)$$

$$b = \frac{\frac{\sigma}{(1 + \alpha_w T_a)}}{\left\{1 - \sigma \frac{(1 + \alpha_w T_f^*)}{(1 + \alpha_w T_a)}\right\}} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{R_B R_{wa}}{R_A R_C} \quad (13)$$

식 (11)과 (12)에 의하여  $\alpha_w$ 를 얻기 위해서는 0 °C에서의 열선의 저항  $R_{w0}$ 를 알아야 한다. 그러나 직접  $R_{w0}$ 를 측정하기보다는 열선의 온도저항 관계식 (14)를 이용하여 특정한 온도에서 열선의 저항을 측정하여  $R_{w0}$  대신 사용한다. 식 (11) 또는 (12)와 식 (14)를 사용하면 식 (8)에 사용되는 최적의 온도저항계수  $\alpha_w$ 의 최종적인 값을 구할 수 있으며, 정리하면 식 (15)와 (16)으로 표시된다.

$$R_{wa} = R_{w0}(1 + \alpha_w T_a) \quad (14)$$

$$\alpha_w = \frac{\sigma - 1}{T_a + \frac{a\sigma}{1 - a} T_f^*} \quad (15)$$

또는

$$\alpha_w = \frac{\sigma - 1}{T_a - \sigma T_f^* + \frac{\sigma}{b}} \quad (16)$$

### 5.2 CCA방식

CCA 방식에서는 열선저항이 유체온도에 따라 변하는 경우, 브리지가 저항의 균형을 이루어 직류 증폭기의 출력이 0이 되도록 하는  $R_c$ 의 값을 온도에 따라 검출하여 온도저항계수를 결정한다. CCA 방식(엄밀하게는 기존의 정온도형 열선유속계에서 열선의 냉저항을 측정하는 방식)에서 열선에 흐르는 전류는 1mA 이하로서 열선을 자체 발열시키지 않으므로 열선의 온도는 유체의 온도변화를 따른다. 이 과정에서 증폭기와 브리지는 연결되어 있지 않다.

브리지가 저항의 균형을 이루었는지는 직류증폭기 출력에서의 전압의 변동으로 알 수 있다. 유체 온도가  $T_f$ 인 경우 Fig. 1에서 직류증폭기 출력이 0

이 되려면  $R_c$ 는 다음과 같이 조정되어야 하며 이 경우 브리지내의 네 개의 저항은 균형을 이룬다.

$$R_c = \frac{R_B}{R_A} R_{w0}(1 + \alpha_w T_f) \quad (17)$$

$T_f$ 에 따라  $R_c$ 의 값을 측정하고 curve-fitting 하면 그 기울기가 열선의 온도저항계수의 정보를 가지며 식 (17)로 정리하였을 때, 온도저항계수가 얻어진다.

### 6. 온도보상방법의 검증 및 토의

이 절에서는 CTA 방식과 CCA 방식에서 온도저항계수  $\alpha_w$ 를 결정하는 구체적인 예를 소개하고, 실험을 통하여 제안된 보상방법의 타당성을 검증한다. Fig. 4는 CTA 방식에서 실험된 유속계의 출력으로 고정저항  $R_A$  양단의 전압을 제공한 것이다. 온도를 30 °C에서 50 °C까지 5 °C씩 증가하면서 얻어진 데이터들이 각각의 기호로 나타나 있다. 측정된 데이터를  $U^{0.5}$ 으로 curve-fit하여 각각의 측정점을 지나는 선으로 나타내었다.

실험에서 사용한 교정장치는 주어진 송풍기의 회전수에 대하여 유체의 온도를 조절하는 방식으로, 온도와 속도를 완전히 독립적으로 제어하지 못한다. 따라서 등온과정에서 얻어진 데이터들의 속도가 다르게 되고 동일한 속도에서의 출력을 구하기 위해서는 curve-fit 과정이 필요하다.  $U^{0.5}$ 으로 curve-fit한 것은 식 (1)에서의 대류열전달계수가  $U^{0.5}$ 으로 변화한다고 가정한 것이며 측정데이터를

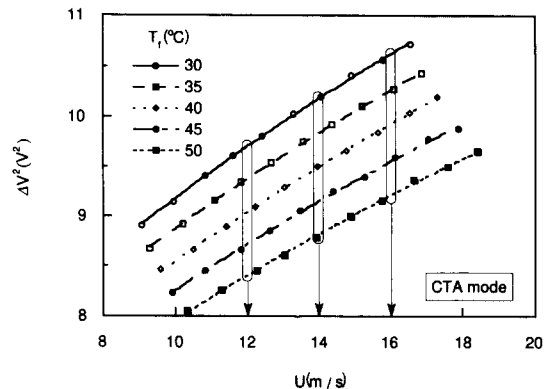


Fig. 4 Squared output curve to generate the data set determining the  $\alpha_w$  in the CTA mode (conditions:  $R_A=46.6\Omega$ ,  $R_B=2208\Omega$ ,  $R_C=445\Omega$ ,  $R_{wa}=6.135\Omega$  at  $T_a=28.5^\circ\text{C}$ )

가장 잘 모사하는 다른 방법을 사용해도 무방하다.

curve-fit된 선으로부터 속도 12, 14 그리고 16 m/s에 해당되는 온도의 변화에 대한 출력데이터가 얻어진다. 이들 데이터로부터 식 (10)으로 표시되는  $D$ 와  $T_f$ 의 관계를 구한다. 식 (10)으로부터 예상된 결과이지만 Fig. 5는  $D$ 와  $T_f$ 의 관계가 선형적임을 보여주며 직선으로 보정하면  $a$ 는 1.2846, 그리고  $b$ 는  $-0.0071248$ 이다. 구해진  $a$ 와  $b$ 를 식 (15)에 대입하면  $\alpha_w$ 로서 0.003877이 얻어지며 식 (16)에 대입하면 0.003883을 얻는다. 각각의 방법에 대하여 얻어진 온도저항계수가 서로 잘 일치하는 것이 흥미롭다. 이후의 보상실험에서는  $\alpha_w$ 의 값으로 0.00388을 사용하고 식 (8)과 함께 온도보상에 사용한다.

CCA 방식에서는 열선의 자체 발열에 의한 저항 변화가 없도록 브리지에 흐르는 전류를 약 1mA 이하로 제한하여 실험한다.<sup>(6,9)</sup> Fig. 6은 온도변화에 대하여 열선저항이 변화할 때, 브리지가 균형을 이루기 위해 조정된  $R_c$ 의 저항변화를 나타내고 있다. 여기서, 유속계의 직류증폭기출력을 검사하여 0이 될 때,  $R_c$ 의 값은 저항측정기를 이용하여 측정한다. 구해진 온도저항계수의 값은 0.00375이다.

각각의 방식에서 정해진 온도저항계수를 이용하여, 실제 유속계의 온도보상에 적용하여 본 연구에서 제안된 방법의 타당성 실험을 수행한다. Fig. 7은 열선유속계의 출력에 미치는 온도보상의 효과를 잘 나타내 준다. 온도보상을 하지 않은 경우에 저항  $R_c$ 는 445Ω으로 고정되어 있다. 온도가 30℃에서 50℃로 변화할 때, 출력이 감소하며 온도보상을 하지 않으면 실제 속도를 낮게 산출한다. 그러나 CTA나 CCA 방식에서 구한 온도저항계수와 식 (8)을 이용하여 온도보상을 수행하면 온도보상을 수행하지 않은 30℃의 원래의 유속계 보정곡선에 잘 일치함을 관찰할 수 있다.

작동원리를 비교해 볼 때, 브리지에 보상저항을 사용하는 기존의 방법은 하드웨어적인 방법이며 본 연구에서 제시한 방법은 소프트웨어적인 방법이라고 할 수 있다. 따라서 의미상 동일한 온도저항계수가 두 가지 경우의 보상법에 적용된다면 발생하는 오차와 온도보상의 효과는 정확히 동일하다. 그러므로 본 연구에서 오차의 해석을 통하여 의미를 갖는 것은 온도보상된 최종적인 결과보다는 온도저항계수를 결정하는 과정으로 생각된다. 오차해석의 일례로서 온도저항계수로서 얻어진 0.003877에 대

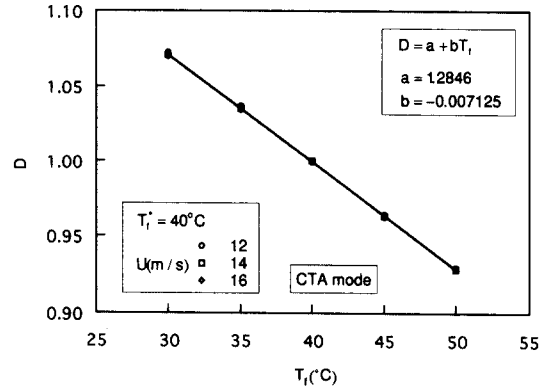


Fig. 5 Linearly curve-fitted relation between compensation ratio  $D$  and temperature with step increase of 5 °C in the CTA mode (same condition with Fig. 4)

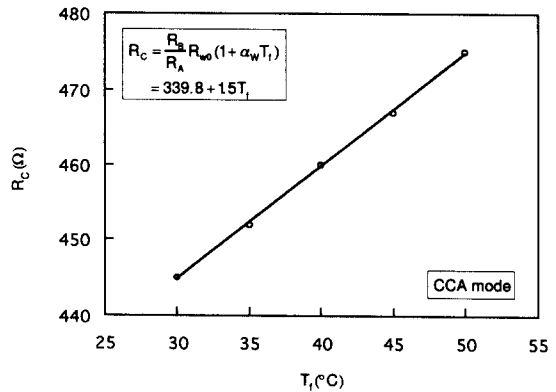


Fig. 6 Variation of  $R_c$  with temperature for determination of  $\alpha_w$  in the CCA mode (conditions :  $R_A=46.6\Omega$ ,  $R_B=3284\Omega$ )

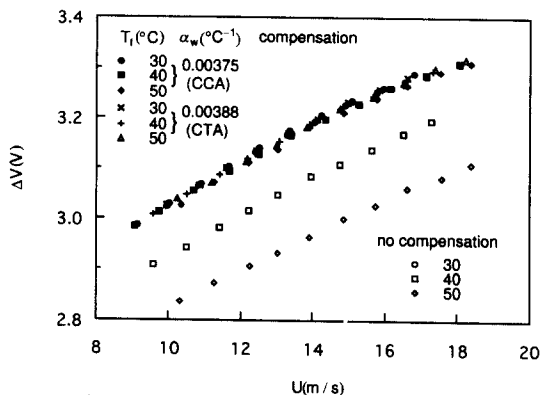


Fig. 7 Compensated and uncompensated output for temperature increase with 10 °C step from 30 °C

**Table 1** Uncertainty analysis of temperature resistance coefficient

$x_i$	Unit	Value	$\delta x_i$	$\frac{\delta x_i}{\alpha_w} \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} \times 100 (\%)$
$T_a$	°C	28.5	0.5	0.56
$T_f^*$	°C	40	1	3.30
a		1.2846	0.007	2.52
$R_A$	Ω	46.6	0.055	0.38
$R_B$	Ω	2208	2.1	0.30
$R_C$	Ω	445	0.54	0.39
$R_{wa}$	Ω	6.135	0.0058	0.30

$$\text{Total uncertainty } \frac{\delta \alpha_w}{\alpha_w} = \left[ \left( \frac{\delta x_i}{\alpha_w} \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} \times 100 \right)^2 \right]^{1/2} 4.25$$

$$\alpha_w = f(T_a, T_f^*, a, R_A, R_B, R_C, R_{wa})$$

한 uncertainty의 해석결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

계산에 사용된 저항들은 FLUKE model 2620A를 사용하여 측정하였으며 저항들의 uncertainty는 계기 오차(precision error)와 바이어스 오차(bias error)를 root sum square 방식으로 합하여 산출하였다.  $T_f^*$ 와 Fig. 5에서 산출된 계수 a에 의한 uncertainty가 다른 항들에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 보다 정확한 온도저항계수를 산출하기 위해서는  $T_f^*$ , 즉 유속계 교정장치의 온도제어 방식과 계수 a, 즉 온도저항계수를 결정하기 위한 linear curve-fit 과정에 대한 주의가 필요하다.

이제 브리지상단의 출력  $E_b$ 를 온도변화에 대해 보상하는 방법과 그 조건에 대하여 고찰한다. 브리지 상단에서의 출력전압은 다음의 식으로 표시된다.

$$E_b^2 = \frac{hA_s}{R_{w0}\alpha_w} \left[ 1 - \frac{R_{wf}}{R_{ww}} \right] (R_A + R_{ww})^2 \quad (18)$$

온도보상된 브리지 출력을 얻기 위해서는, 두 온도  $T_f^*$ 와  $T_f$ 에서 얻어진 출력이 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} & \left[ 1 - \frac{R_B R_{w0} (1 + \alpha_w T_f^*)}{R_A R_C^*} \right] \left[ R_A + \frac{R_A R_C^*}{R_B} \right]^2 \\ &= \left[ 1 - \frac{R_B R_{w0} (1 + \alpha_w T_f)}{R_A R_C^*} \right] \left[ R_A + \frac{R_A R_C}{R_B} \right]^2 \quad (19) \end{aligned}$$

그러나 식 (19)로부터 얻어지는 보상조건은 기준온

도에 대하여 정리할 때, 유체온도의 변화에 대하여 다음과 같은 비선형적인 형태가 되는 것을 알 수 있다.

$$\frac{R_C}{R_C^*} = f\left(\frac{T_f}{T_f^*}\right) \quad (20)$$

백금저항과 같이 저항값이 온도에 따라 선형적으로 변하는 수동소자를 브리지에 도입하여 브리지상단의 출력을 보상하면 Drubka 등<sup>(4)</sup>의 경우와 같이 보상방법이 매우 복잡하게 되며 실제 적용이 매우 불편하다. 비선형적인 특성을 선형으로 보고 온도보상을 수행하면, 유체의 온도가 기준온도  $T_f$ 로부터 벗어남에 따라 그 오차는 매우 커지게 될 것이다. 그러나 광도전성 소자를 채택하여  $R_C$ 의 변화를 적절한 보정과정을 통하여 식 (20)에 맞출 수 있다면 브리지 상단에서의 온도보상도 가능할 것이다.

본 연구에서 제시한 온도보상회로에서 전체유속계의 응답시간은 광도전성저항의 반응시간과 온도 측정센서의 시간상수 및 A-D와 D-A변환과정에 의해 지연된다. Moririca사<sup>(9)</sup>의 기술자료를 참고하면 MCD-725E는 응답에 약 20 ms의 시간이 소요되므로, 본 연구에서 제시한 온도보상방법은 평균온도장이 천천히 변화하는 경우(예를 들면, 대기온도의 보상, 자동차용 공기유량계 등)에 한하여 적용할 수 있으며 온도변화가 심한 난류유동장의 경우에는 매우 심각한 오차가 발생할 것이다. 이 경우에는 응답이 빠른 온도측정수단과 광도전성저항을 사용해야 하며 또한 이들 사이를 연결하는 온도-전압변환의 수단으로 하드웨어적인 회로를 사용해야 하는데 이를 위한 보완적 연구가 필요하다.

Moffat과 Frota<sup>(6)</sup>는 유체온도의 변화 약 15 °C에 대하여 열선의 과열비 설정용 가변저항을 온도의 변화에 따라 수동으로 조정하여 브리지 상단의 출력을 보상하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 보상방법은 열선과 직렬로 연결되는 저항  $R_A$ 에서의 전압을 출력으로 채택하였으므로 식 (4)와 보상조건식 (8)이 유체온도의 변화에 대하여 선형적인 것으로 나타났다. 선형적인 형태의 온도보상 조건은 취급하기 쉬우며 실험적으로 구현하기도 쉽고 발생하는 오차도 비선형적인 조건보다 작아진다.

새로 제안된 보상방법은 브리지내의 저항만을 조정하여 온도보상된 출력을 고정저항 양단의 전압으로 얻는 것이다. 이와 비교하여 또 다른 방법으로는 브리지 상단에서 출력된 신호를 아날로그 회로



를 구성하여 보상을 수행하고 속도신호와 온도신호를 실시간적으로 구하는 방법이다.<sup>(3,6,10)</sup> 이들의 방법에서는 보상된 신호를 얻기 위하여 매우 복잡한 아날로그회로를 구성하여야 한다. 아날로그 회로의 주요기능은 나누기와 제곱, 제곱근 기능과 곱하기 등으로 구성되는데 이는 모두 비선형적인 함수들로서 처리에 따른 오차와 각 회로들 사이의 위상지연(phase shift)으로 인한 오차의 발생은 불가피하다. 이와 같은 신호분리에서의 어려움은 부분적으로 브리지 상단에서 검출된 신호가 비선형적이기 때문이다. 브리지내에서 수행되는 온도보상방법은 위에서 설명한 바와 같이, 보상조건이나 그 출력형태가 모두 온도변화에 대하여 선형적이기 때문에 브리지 상단 전압을 이용하여 보상하는 방법보다 우수함을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 광도전성저항을 가변저항으로서 열선유속계의 브리지에 도입하여 온도보상을 수행하는 새로운 방법을 제안하였다. 광도전성저항을 유속계에 도입한 가장 중요한 이유는, 온도에 따라 전압을 출력하는 모든 온도측정수단을 유속계의 온도보상에 적용할 수 있고 이에 따라 온도보상을 위한 측정수단을 다양화할 수 있기 때문이다. 또한 부가적으로 측정체적을 줄일 수 있으며 보상 프로그램을 이용하여 열선의 재질에 관계 없이 온도보상을 수행할 수 있다. 본 연구에서 제시한 온도보상방법을 사용하려는 사용자를 위하여 정온도방식과 정전류방식에서 열선의 온도저항계수를 결정하는 과정을 자세히 제시하였다. 텅스텐 열선의 경우, 본 연구의 결과와 저자의 경험으로는 실제 사용시에 온도저항계수로서 0.0039를 추천한다. 이 경우 다른 온도에서의 검증과정이 생략될 수 있으므로 온도보상을 위한 유속계의 조정과정이 매우 간단해진다.

## 참고문헌

(1) 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.

(2) Artt, D. W. and Brown, A., 1971, "The Simultaneous Measurements of Velocity and Temperature," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, Vol. 4, pp. 72~74.

(3) Sakao, F., 1973, "Constant Temperature Hot-Wires for Determining Velocity Fluctuations in an Air Flow Accompanied by Temperature Fluctuations," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, Vol. 6, pp. 913~916.

(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*, No. 22, pp. 5~14.

(5) Takagi, S., 1986, "A Hot-Wire Anemometer Compensated for Ambient Temperature Variations," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, Vol. 19, pp. 739~743.

(6) Moffat, R. J., and Frota, M. N., 1981, "Effects of Combined Roll and Pitch Angles on Triple Hot-Wire Measurements of Mean and Turbulence Structure," *DISA Information*, No. 28, pp. 16~23.

(7) Blair, M. F. and Bennett, J. C., 1987, "Hot-Wire Measurements of Velocity and Temperature Fluctuations in a Heated Turbulent Boundary Layer," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, Vol. 20, pp. 209~216.

(8) Kauh, S. and Lee, S. P., 1994, Korea patent No. 94-14605 (pending)

(9) Moririca databook, 1993.

(10) Ali, S. F., 1975, "Hot-Wire Anemometry in Moderately Heated Flow," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 46, No. 2, pp. 185~191.