

열선 유속계에 대한 유체 온도의 보정

김재기*, 심상학**

The Correction of Fluid Temperature for Hot-wire Anemometer

Jae-Gi Kim*, Sang-Hack Shim**

Abstract

This paper reports by simple method that is quickly corrected the effects of fluid temperature for the hot wire anemometer. We are concerned with a variable output of hot wire anemometer on arbitrary fluid temperature. Hot wire by measuring boundary layer of turbulent flow has been calibrated by arbitrary temperature lower than 100 °C, and velocity lower than 20m/s. As a result, we could pick up the temperature factor affected by output of hot wire anemometer from related in output of arbitrary temperature to output of room temperature. By using temperature factor on the output of hot wire anemometer, we also obtained that the relationship of velocity was of no effect by temperature of fluids. About results of calibrated hot wire, uncertainly of velocity is 2.15% at room temperature and 3.1% at arbitrary temperature.

Key Words : Fluid Temperature(유체온도), Hot-wire(열선유속계), ArbitraryTemperature(임의온도), Boundary layer(경계층), Turbulent Flow(난류), Correction(보정)

1. 서론

열선 유속계는 변동량을 측정하는 도구로서 많은 연구자들에게 지지 되어와 계기들의 발전과 함께 세련되어져, 지금은 완성된 계측기로서 인정받고 있다. 또한 시간적, 공간적으로도 우수한 분해 능력을 지녀 난류뿐만 아니라 변동 현상의 유속, 온도의 측정에는 빼놓을 수 없는 계기가 되었다. 뿐만 아니라, 측정원리는 매우 간단하고, 저렴

한 가격으로 손쉽게 만들 수 있는 것이 무엇보다도 커다란 장점이다.

그러나, 취급하는 데에 있어서는 의외로 어려움이 많아 사용하는데 있어서 익숙해지기까지는 여러가지 지식을 필요로 한다. 더군다나 유속과 출력과의 관계를 사용 전에 검토하지 않으면, 유속계로서 책임을 다하지 못한다. 또한, 과도의 가열, 기계적 진동, 고체 등과의 접촉 등으로 끊어 지기 쉽고, 측정 대상인 흐름의 측정 목적, 정밀

* 유한대학 산업일어과
** 고창기능대학 메카트로닉스과

도 등에 맞추어 Probe의 형상에 대하여도 고려하지 않으면 안된다.

이러한 것 이외에도 열선 유속계에 있어서의 영향 인자는 많고, 이러한 제반 사항에 관련된 측정 상에 있어서의 문제 해결에는 유체 역학, 열선 유속계의 측정 원리, 신호 처리 등의 지식, 가공 기술 등이 요구된다. 이러한 열선 유속계의 문제점 해결에 대해서는 지금까지 많은 논문과 해설이 발표되어져 있다.⁽¹⁻⁶⁾

그러나, 유체 온도가 흐름장에 있어서 일정하지 않은 경우, 열선 유속계가 유체 온도로부터 받는 영향에 대한 연구는 그다지 많지 않다. 또한 복잡한 회로를 만들거나 복잡한 방정식 등을 유도해 온도의 영향을 소거하는 등의 방법으로 인해서 열선 유속계의 장점인 손쉬움에 커다란 장애가 될 수도 있다.

그래서, 본 논문은 간단한 회로로 만들어져 시판되고 있는 열선 유속계와 자작의 검정 풍동, 난류 경계층의 측정에 적합한 형상의 열선 Probe를 만들어 유체의 온도가 열선의 출력에 끼치는 영향에 대하여 조사해, 손쉽게 유체 온도의 영향을 제거할 수 있는 열선 유속계에 대한 유체 온도의 보정 방법에 관하여 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 검정 풍동의 개략은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 비교적 단순한 구조로 되어 있다. 공기 유입구 앞에 설치된 공기 필터에서 청정된 공기는 가열부를 거치고 정류 격자를 지나, 직경이 40mm인 출구에서 대기 중으로

방출된다. 가열된 유체의 검정이 가능하도록 팬 입구에 히터를 설치한 가열부는 전압을 조정함으로써 임의의 온도로 설정할 수 있도록 했다. 풍동의 노즐 수축비는 7:1이며, 정압실에는 압력공을 설치해 정밀 미차 압력계로 정압을 측정하고, 압력공으로부터 회전 반경 90°의 위치에 직경 0.1mm의 Cu-constantan(T-type) 열전대 온도계를 삽입시켜 정압실에서의 중심 온도를 측정했다. 이 열전대는 본 실험범위 내에서 다른 종류의 열전대에 비해 정도가 높고, 온도 변화에 따른 기전 시간이 빨라, 순간 온도 변화에 대한 측정에 유력하다.

실험에 사용한 열선 유속계의 Probe 형상을 Fig.2에 표시했다. 이 Probe 형상은 차널 난류의 경계층에 중점을 두고 측정하기 위하여 만든 자작품으로 벽면 근처의 속도 및 온도를 측정할 때 Prong에 의한 교란과 벽면 등의 영향을 받지 않도록 설계되었다.

검정 풍동의 교정은 차널 난류 실험의 측정 범위에 맞추어, 유속 20% 이하, 유체 온도는 실온으로부터 100℃ 이내에서 실시했다.

Fig. 3은 표준 피토판을 이용해 검정 풍동의 출구 유속을 측정하고, 정압실 압력을 유속으로 변환한 값과의 관계를 조사한 것으로, 실온에서의 유속과 임의의 온도에 대한 유속을 나타낸 것이다. 각각의 관계를 최소 자승법에 의해 선형화 시킨 결과, 직선적인 관계를 나타내었고, 그림 중에 나타낸 점선은 정압실과 출구의 이상적인 관계를 표시한 것이다. 여기서, U_{pitot} 는 출구에서의 속도이고, U_{ps} 는 정압실의 압력을 유속으로 환산한 값이다. 실온에서와 임의의 온도에서 두 관계에는 거의 차이가 없

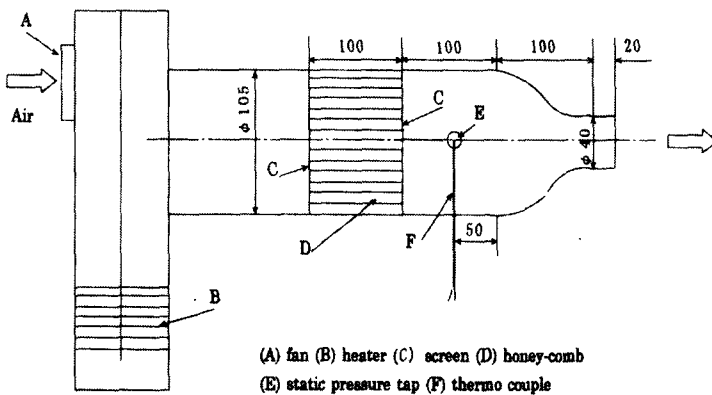


Fig. 1 Sketch of wind tunnel for calibrating Hot-wire and Cold-wire.

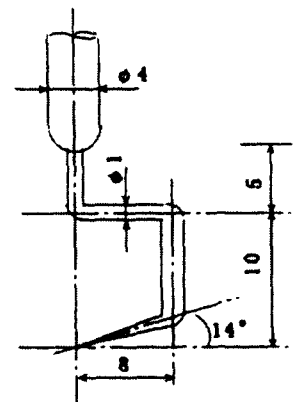


Fig. 2 Hot-wire probe.

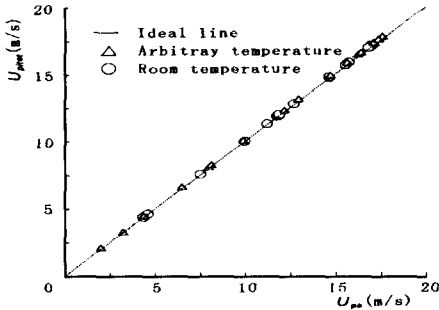


Fig. 3 Calibrated velocity for wind tunnel.

고, 출구에서의 유속과 정압에 의한 유속의 차이는 1% 이하이다.

또한, 정압실에서의 유체온도와 출구에서의 유체온도를 동일한 종류의 열전대를 사용하여 측정하였다. 그 결과, 정압실과 출구에서의 두 온도 사이에 4%이내의 차이를 보였으며, 온도 상승에 따른 두 온도의 차이는 선형적인 관계로 나타났다. 이에 두 온도간의 차이에 의한 값을 관계식을 이용하여 보정하였다.

3. 검정식과 고찰

열선에 의한 유속 측정에는 미리 검정되어진 열손실 특성을 기초로 하는 것이 무엇보다도 실제적이다. 즉, 일정한 비율로 열선을 가열하여, 그 곳으로부터 발생한 주열 열과 흐름에 의해 빼앗긴 열손실과의 관계를 가지고 관계식을 만들어, 유속 측정에 이용하는 방법이 "정온도법"이다. 그리고, 열선에서의 열평형식은 다음과 같고, "킹의 식"이라고 불린다.

$$I^2 R_w = (T_w - T_a)(bU^n + c) \quad (1)$$

여기서, T_w 는 열선의 가열온도로 일정하게 유지하며, T_a 는 유체의 온도, U 는 유속이다.

(1)식에서의 지수와 계수 n , b , c 의 정수 값을 정하는 것을 Probe의 검정이라고 해도 과언이 아니다. 유체의 온도 T_a 가 일정한 경우에, 열선 유속계 개개의 특성은 있지만, Probe의 b , c 를 정수로 취급할 수 있는 것은 유속의 검출을 쉽게 할 수 있도록 하고, 유속계로서 매우 다행한 일이다.

즉, Probe의 정수 b , c 는 유체의 물성치에 대한 함수이므로 유체 온도 T_a 가 일정하면, 정수로서 취급이 가능하다.

Bruun⁽³⁾은 지수 n 의 유속 의존성에 대하여 연구하여, n 은 1~20%의 범위에서 약 0.5이고, 유속30%이상에서 급격히 감소하는 것에 대하여 보고하였다.

Collis & Williams⁽⁴⁾는 공기를 대상으로 Probe계수의 온도 의존성에 대하여 조사해, 유체의 물성치와 온도의 함수로 나타내었다. 이 결과는 유체 온도의 변화가 없는 경우, Probe 계수 b , c 에 대해서 정수 취급이 가능하지만, 유체의 온도 T_a 가 일정하지 않을 경우, Probe의 정수 b , c 는 유체의 물성치와 온도의 함수이기 때문에 유체 온도에 의존할 것이다. 즉, 유체의 온도 변화가 있는 경우에 Probe의 계수 b , c 를 정수 취급하는 것은 적지 않은 무리가 있다.

Vasanta^(5, 6)는 열선에 있어서의 Nusselt 수와 Reynolds 수의 관계에 대하여, 다음과 같이 정의하고 실험적으로 조사했다.

$$Nu = A + B(Re)^n \quad (2)$$

여기서 A , B , n 은 계수이다. 실험은 4종류의 열선 직경과 길이의 비, 유체 온도 20~60℃, 유속1~25%의 측정 범위에서 관계식 (2)의 계수 A , B , n 에 대하여 조사하였다. 그 결과로부터 Nu 수와 Re 수의 관계가 온도에 대하여 선형적임을 나타냈다.

그러나, 이러한 검정 설비를 준비하기에는 매우 어려울 뿐 만 아니라, 또한 검정하는 데에 있어서도 상당한 시간을 소요하기 때문에, 열선의 수명 등을 고려하면 실제로 응용하기에는 곤란한 점이 매우 많다.

그래서, 본 연구에서는 간단한 설비를 이용하고, 또한 열선의 수명을 고려하여 비교적 짧은 시간에 유체 온도의 보정이 가능하도록 검정 방법을 개선하였다.

$$R_w = R_r \cdot \{1 + \alpha(T_w - T_r)\} \quad (3)$$

여기서, α 는 열선의 온도계수, T_r 은 기준온도이고, 본 연구에서는 실온을 사용한다. R_r 은 T_r 에서의 저항 값이다. 임의의 온도, 유속에서 열선 유속계의 출력은 다음의 전기식으로 표현된다.

$$E_a = I(R_w + R_a) \quad (4)$$

관계식 (1)을 식(3)과 (4)를 이용해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I^2 R_w = (R_w - R_a) / \alpha R_r \cdot (bU^n + c)$$

그러나, 열선 유속계의 출력 E_θ 를 이용하는 것이 실제적인 것과 전기 저항은 모두 온도의 함수로서 표현할 수 있기에 열선 유속계의 출력과 유체 온도, 유속의 관계식으로 바꾸어 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a^2 = f_1(\theta) \cdot (1 + a_1 U^{1/2}) \quad (5)$$

여기서, E_a 는 임의의 유체 온도 T_a 에서의 열선 유속계의 출력이고, 온도차 θ 는 $T_a - T_r$ 를 나타내며, f_1 은 온도의 함수, a_1 은 계수이다.

4. 검정 결과 및 고찰

4.1 실온에서의 검정

실온을 기준 온도로 채용하여 유체 온도가 실온인 경우에 대하여 관계식 (5)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_r^2 = f_1(0) \cdot (1 + a_1 U^{1/2}) \quad (6)$$

여기서, E_r 은 유체온도 T_r 에 대한 열선 유속계의 출력이고, $\theta=0$ 이 된다.

실온에서 유속 $U=0$ 의 경우, 열선 유속계의 출력을 E_0 라고 하면, 식(6)은 다음과 같은 관계가 된다.

$$E_0^2 = f_1(0) \quad (7)$$

관계식(7)을 식(6)에 대입하면, 열선 유속계의 출력과 유속의 관계는 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$E_r^2 / E_0^2 = 1 + a_1 U^{1/2} \quad (8)$$

따라서, 열선 유속계의 출력과 유속의 관계식을 가지고 실제로 응용한다.

관계식(8)과 같이 실온에서의 열선 유속계의 출력 E_r 를

E_0 으로 무차원화 시켜서 유속과의 관계를 조사한 것이 Fig.4이다. 그림 중에 사용한 기호는 문헌⁽⁸⁾에서의 검정 결과를 인용하였다.

각 기호에 대한 결과를 최소 자승법으로 선형화 시켜 계수를 구할 수 있고, (8)식에 대입하면 열선 유속계의 출력만으로 마지의 흐름장에 대한 유속을 구할 수 있다. 본 실험의 검정 결과에 의한 유속의 불확실성은 $U_{RSS}/U=2.15\%$ (약95%포괄도)이다.⁽¹⁰⁾

4.2 임의의 온도에서의 검정

임의의 온도에 대한 열선 유속계의 출력 E_θ 와 유속과의 관계를 조사하기 위하여 출력 E_θ 를 실온, $U=0$ 에서의 출력 E_0 으로 무차원화 시켜 유속과의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 그림 중에 사용한 기호는 문헌⁽⁸⁾에서의 검정 결과를 인용하였다.

그림의 결과처럼 임의의 유체 온도에서의 결과는 각각의 데이터에 유체의 온도에 의한 영향이 포함되었기 때문에, 일정한 유체 온도에서 만의 결과와는 다른 양상을 보인다.

유체의 온도가 임의의 온도 T_θ 에서 유속 $U=0$ 의 경우, 열선 유속계의 출력을 E_θ 로 정의하면 관계식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_\theta^2 = f_1(\theta) \quad (9)$$

Fig. 5의 결과에서 온도의 영향을 배제하기 위해서는 E_θ 가 필요하다.

그러나, 임의의 온도에 대한 E_θ 를 측정하려면 온도를 일정하게 유지하기 위한 장치를 필요로 한다. 또한 상당수의 일정한 온도에 대한 검정을 하기 위해서는 많은 시간을 필요로 한다.

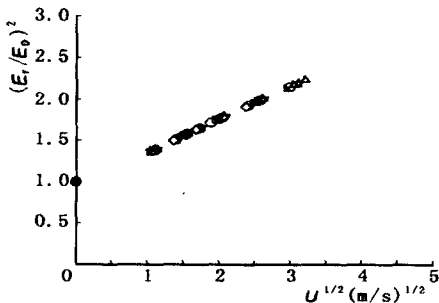


Fig. 4 Calibrations of Hot-wire at room temperature.

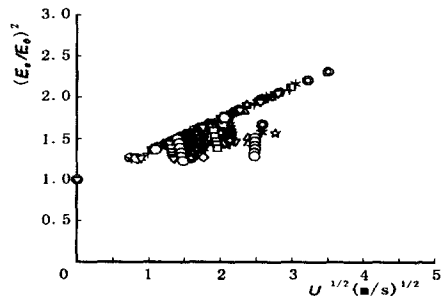


Fig. 5 Relations of Hot-wire output normalized by E_0 at arbitrary temperature.

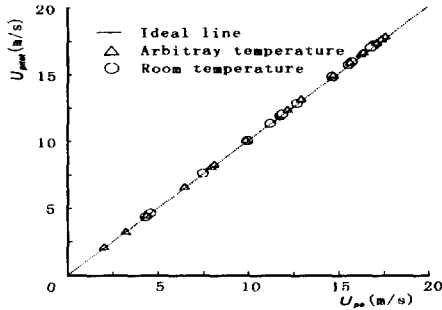


Fig. 6 Calibrations of Hot-wire at arbitrary temperature.

본 연구에서는 임의의 온도를 가진 유속에 대한 열선 유속계의 출력 E_a 와 동일한 속도를 가진 실내 온도에서의 출력 E_r 의 비례 관계를 이용하여, 온도와와의 관계를 조사했다. 그 결과 출력의 비 $(E_a/E_r)^2$ 는 온도차 θ 에 대하여 직선적인 변화를 나타내었으며, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$E_a^2 / E_r^2 = A \cdot \theta + B \quad (10)$$

여기서, A와 B는 계수이고, 검정 결과를 최소 자승법으로 선형화 시켜 구할 수 있다.

또한, 관계식 (7)과 (9)를 식(10)에 대입하면, $U = 0$ 에서의 온도 변화에 의한 열선 유속계의 출력 관계식이 된다.

$$E_\theta^2 / E_0^2 = A \cdot \theta + B \quad (11)$$

이 열선 유속계의 온도 특성에 관한 관계식을 이용하면, 임의의 온도에 대한 E_θ 를 측정하지 않고도 간단히 구할 수 있다.

Fig. 5의 검정결과를 관계식 (11)의 E_θ 를 이용하여 재정리한 것이 그림 6이다.

이 결과로부터 관계식 (5)와 (6)의 유속계수 a_1 은 온도의 영향을 받지 않고 일정함을 알 수 있다. 또한 이러한 경향은 Vasanta^(5, 6)등의 결과와도 일치함을 알 수 있다. 즉, 관계식 (9)를 관계식 (5)에 대입하여 열선 유속계의 출력과 유속의 관계를 나타내면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_a^2 / E_\theta^2 = 1 + a_1 U^{1/2} \quad (12)$$

여기서, 유속 계수 a_1 은 온도의 영향을 받지 않으므로 우변은 온도 영향이 없는 유속만의 항이 된다.

이상의 결과로부터, 임의의 온도에 대한 열선 유속계의

출력과 유속의 관계를 식(12)처럼 간단한 형태로 표현할 수 있고, 열선 유속계에 대한 온도의 영향을 사전에 조사해 줌으로서, 임의의 온도에 대한 흐름장에서의 유속측정에 대응할 수 있다.

본 검정 결과에 대한 유체 온도의 불확실성은 $U_{RSS}/Ta = 0.6\%$ (약95%포괄도)이고, 임의의 온도에 있어서 유속의 불확실성은 $U_{RSS}/U = 3.1\%$ (약95%포괄도)이다.

5. 결론

열선 유속계는 간명한 측정 원리 그리고 저렴한 가격으로 간단히 만들 수 있으며, 시간적 공간적으로도 우수한 분해 능력 등의 장점을 지니고 있다. 그러나, 측정 유체의 온도에 의해 출력에 대한 영향이 상당히 크고, 특히 유속과 유체의 온도가 함께 변화하는 흐름장에 있어서는 대응이 매우 어렵다.

그래서, 본 연구에서는 이러한 유체의 온도에 의한 영향을 손쉽게 보정할 수 있는 검정 방법에 대해서 제안한다.

검정방법의 순서는 실온에서의 열선 유속계 출력 E_0 와 E_r 그리고 임의의 온도에서의 출력 E_θ 를 사용하여, 열선 유속계의 온도 특성에 관한 관계식을 추출하고 임의의 온도에 대한 E_θ 를 구해, 다음과 같은 온도 영향을 받지 않는 유속의 관계식을 얻을 수 있다.

$$E_a^2 / E_\theta^2 = 1 + a_1 U^{1/2}$$

그러나, 이 식을 사용하는 데에 있어서 주의해야 할 점은 임의의 온도에 대한 변화를 알고 있거나 또는 온도도 함께 측정하여야 된다.

참 고 문 헌

- (1) 西岡通南, "熱線流速計(1) - (9)", 流れの計測 (連載) (1983-1988), Vol. 1-6.
- (2) J. O. Hinze, "Turbulence", 2nd ed., (1975), McGraw-Hill.
- (3) H. H. Bruun, "A note on static and dynamic calibration of constant-temperature hot-wire probes", J. Fluid Mech. (1976), Vol. 76, pp. 145 ~ 155.
- (4) D. C. Collis & M. J. Williams, "Two-dimensional convection from heated wires at the low Reynolds numbers", J. Fluid Mech. (1959),

Vol. 6, p. 357.

- (5) M. Kostka & R. V. Vasanta, "On the effects of fluid temperature on hot wire characteristics (Part 1: Results of experiments)", Experiments in Fluids (1992), Vol. 13, pp. 155~162.
- (6) R. V. Vasanta, "On the effects of fluid temperature on hot wire characteristics (Part 2: Foundation of a rational theory)", Experiments in Fluids (1992), Vol. 13, pp. 267~278.
- (7) 金宰基·吉識晴夫, "發達チャンネル亂流の亂れ 特性に及ぼすレイノルズ數の効果", 日本機械學會論文集 (B編), Vol. 64-620, pp. 986-991, 1998.
- (8) 金宰基·吉識晴夫, "發達チャンネルにおける 壁面加熱の影響", 日本機械學會論文集 (B編), Vol. 64-627, pp. 3652~3659, 1998.
- (9) 日本機械學會譯, "ASME 性能試驗規約「計測」の不確かさ", 1987, 丸善.