

온도변화를 고려한 가변온도형 열선유속계의 교정식

이 신 표* · 고 상 근**

Calibration Equation for VTA Including the Effect of Ambient Temperature Drift

Shin-Pyo Lee, S. Ken Kauh

Key Words: Variable Temperature Anemometer(가변온도형 열선유속계), Constant Temperature Anemometer(정온도형 열선유속계), Calibration Equation/Curve(교정식/곡선)

Abstract

Calibration equation for Variable Temperature Anemometer(VTA) has been tested for measured velocity-output data and the calibration process has been compared with that of Constant Temperature Anemometer(CTA). VTA has greater sensitivity than that of any other conventional anemometers, but to be more popular technique in flow field measurement, simple, accurate and well established calibration process should be suggested. To meet this purpose, similar calibration method used for CTA has been adopted for VTA and finally calibration equation for VTA including the effect of temperature drift has been proposed.

1. 서 론

가변온도형 열선유속계(이하 VTA로 표시)는 현재 사용되고 있는 열선유속계 가운데 가장 감도가 우수한 유속계이다.⁽¹⁾ 감도가 크면 속도의 변화에 따라 출력전압의 변화가 크게 나타나 결과적으로 더욱 정밀한 유속의 측정이 가능하게 된다. VTA는 기존의 정온도형 열선유속계(이하 CTA로 표시) 회로에서 열선이 연결된 브릿지회로의 과열비 설정용저항을 입력전압에 따라 저항값이 변하는 능동전기소자로 대체하고 유속계 출력전압의 일부를 이 전기소자의 입력으로 되돌려 속도가 증가함에 따라 열선의 과열비가 일정하지 않고 더욱 증가하도록 회로를 구성한 것이다. 따

라서 CTA와 비교하여 작동 중 열선의 저항이 일정하지 않고 속도의 증가에 따라 증가하게 된다. 기존 열선유속계들의 가장 큰 단점은 고속에서 감도가 낮아지는 것인데 VTA에서는 열선의 온도를 증가시켜 이를 보상한다.

지금까지 VTA의 개발에 관하여 수행된 연구결과를 정리하면 능동저항소자로서 광도전성저항(photoconductive cell)과 트랜지스터를 이용한 유속계 회로의 개발, 광도전성저항 안정화회로의 개발⁽²⁾과 이를 이용한 유속계 출력의 안정화, 주위 유체의 온도변화(ambient temperature drift)에 대한 VTA와 CTA의 출력변동 비교해석, VTA에서 출력의 온도의존성과 보상방법⁽³⁾에 관한 연구 등으로 요약할 수 있다.

VTA는 CTA와 비교할 때, 출력의 일부가 입력측으로 정귀환(positive feedback)되므로 정귀환되는 비율을 증가시키면 유속계가 발진하여 안정된 신호를 얻을 수 없었다. 정귀환되는 비율을 낮게 유지하면 신호는 안정되지만 CTA와 비교하여 감도의 개선을 기대할 수 없었다. 또한 지름이 굵

* 회원, 경기대학교 기계공학과

shinpyo@kuic.kyonggi.ac.kr

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

은 대형열선을 사용하는 경우와 고속에서도 CTA 보다 쉽게 발전하여 안정된 신호를 얻는데 어려움이 있었다. 이것은 고속에서 그리고 열선의 표면적이 증가하면서 큰 전류를 취급하게 되고 이것이 회로의 불안정을 가져오기 때문이라고 생각된다. 최근에 본 연구자는 VTA의 회로에 대한 지속적인 개선을 수행하여 위에서 언급한 발전 및 신호의 불안정문제를 대부분 해결하여 VTA의 작동 속도범위에 대한 제한을 없애고 또한 출력의 귀환율도 이전보다 크게 증가시켜 CTA에 비하여 더욱 개선된 성능을 확인할 수 있었다.

광도전성저항은 주위의 온도변화에 따라 그 저항값이 크게 변하는 특성을 갖기 때문에 신뢰할 안정화회로를 갖지 않은 VTA는 정밀도 및 재현성 면에서 문제가 될 수 있다. 따라서 본 연구자는 아날로그 PI제어계를 구성하여 광도전성저항 소자의 저항값을 오차범위 약 0.1% (예를 들어 목표치 3000 ohm에서 3 ohm정도의 변동) 내로 안정하게 설정할 수 있는 회로를 개발하였으며 시험결과 적분회로를 이용한 방법⁽⁴⁾보다 더욱 신뢰성 있고 안정함을 확인할 수 있었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 VTA에 대하여 많은 개선이 이루어졌으며 이제는 실용적인 측면에서 유속계를 교정하여 사용하는 방법에 대하여 연구할 필요가 있다. 이 연구는 기존의 대표적인 유속계인 CTA 교정과과정과의 비교연구를 통하여 수행될 수 있을 것이다. 실제로 VTA를 사용하는 경우 CTA와 비교할 때 교정방법이 어렵고 오차가 많이 발생한다면 VTA의 실용화는 매우 어려울 것이다. 유속계 사용자의 입장에서는 VTA의 교정과과정이 CTA의 경우와 정확히 동일한 것이 가장 이상적이며 간편할 것이다.

본 연구에서는 실험결과를 이용하여 먼저 넓은 속도 범위에 대한 VTA의 유속-출력 데이터를 획득하고 이를 이용하여 이전의 연구에서 제시한 VTA의 정특성방정식⁽³⁾의 타당성을 확인한다. 이후 정특성방정식을 이용하여 여러 가지 다양한 속도 및 온도가 변화하는 상황을 가정하여 속도-온도-출력의 관계를 계산과정을 통하여 획득하고 이를 기본 데이터로 이용하여 VTA의 교정과과정을 검토하고 CTA의 경우와 비교한다. 최종적으로 유체의 온도변화가 포함된 일반적인 형태의 교정식을 제시한다.

2. 유속계 실험결과와 교정방법

2.1 노즐출구에서의 속도측정

VTA는 유속계의 출력을 브릿지 저항의 입력측으로 되돌리는 비율(출력의 귀환율)에 따라 그 특성이 변한다. 입력측으로 되돌리는 비율을 0으로 설정하면 출력전압 즉, 속도 증가의 정보가 입력측으로 전달되지 않고 유속계는 정온도형 방식으로 동작한다. 귀환비율을 증가시키면 유속계는 VTA로 동작하게 되고 유속계의 출력이 정온도형과 다르게 나타난다.

Fig. 1은 유속이 조절되는 균일 노즐의 출구에 열선센서와 피토투브를 설치하고 인버터를 이용하여 노즐 출구의 속도를 조절하면서 유속계의 출력을 기록한 것이다. 그림에서는 데이터가 일치하여 잘 구별할 수 없으나 실험은 속도를 증가시키면서 5회, 그리고 속도를 감소시키면서 5회 즉, 각각의 경우에 최소 10회 실시되었다. 열선은 실험실에서 구할 수 있는 25 μm 굵기의 열전대용 백금선을 사용하여 제작하였다. 본 연구자의 경험상 이 열선을 안정적으로 구동하는 것은 5 μm 열선을 구동하는 것보다 더 고도의 기술을 요하는 가혹한 조건이다. 유속의 측정은 약 35m/s의 고속까지 수행되었으나 안정적인 출력전압을 획득할 수 있었다.

2.2 출력의 교정과 감도

Fig. 2는 Fig.1에 나타난 실험결과를 기존의 정온도형 열선유속계의 교정방법으로 보통 사용되는 King의 법칙에 근거하여 결과들을 곡선맞춤한

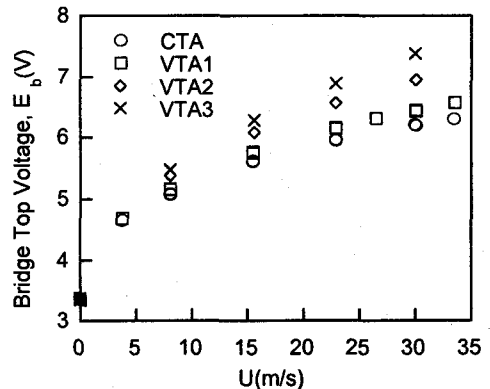


Fig. 1 Calibration Experiments of VTA

것이다.⁽⁵⁾ 주의할 점은 Fig. 1과 달리 세로축이 출력전압의 제곱으로 표현된 것이다. 곡선맞춤의 정확도를 표시하기 위하여 다음과 같이 정의되는 Chi Square⁽⁶⁾를 사용한다.

$$\chi^2 = \sum_i \left[\frac{y_i - f(x_i)}{\sigma_i} \right]^2 \quad (1)$$

식에서 y_i 는 실험에서 측정된 데이터 값이며 $f(x_i)$ 는 곡선맞춤된 함수로부터 계산된 값이다. 분모의 σ_i 는 측정된 실험데이터의 오차를 표시한다. σ_i 를 사용하는 이유는 곡선맞춤식을 잘못 선정하여 아주 정밀하게 측정된 데이터가 곡선맞춤식에서 멀리 떨어진 경우 χ^2 의 값을 크게 증가시켜서 새로운 맞춤식을 사용할 것을 암시하기 위함이다. 본 연구에서는 측정된 각각의 데이터에 대하여 오차를 평가하지 않고 동일하게 1을 갖는다고 생각하고 χ^2 를 계산한다. 따라서 χ^2 는 곡선맞춤식의 오차로 생각할 수 있으며 여러 가지 제안된 함수형식에 대하여 χ^2 가 가장 작아지는 함수가 유속계의 교정용 함수로 선정된다.

CTA에서는 χ^2 이 작게 나타나지만 VTA에서 출력의 귀환율이 증가할수록 오차가 커지는 것을 알 수 있다. (본 결과에서는 우연히 VTA1이 CTA의 결과보다 χ^2 이 작게 계산되었다.) CTA의 정특성방정식은 출력전압의 제곱이 대류열전달계수에 비례하는 형식으로 나타나기 때문에 속도의

$$E_b^2 = k \cdot h = k \cdot (a + bU^{0.5}) \\ = A + B \cdot U^{0.5} \quad (2)$$

제곱근에 비례하는 형식을 사용하는 경우 오차가 적게 된다. 위에서 비례상수 k 는 유속계를 구성하는 브릿지의 저항들로 이루어지는 수인데 CTA의 특성상 일정한 값이 되고 대류열전달계수 h 는 열선의 크기에 따라 a , b 값은 달라져도 속도의 제곱근에 비례하는 형식은 변하지 않는다. 따라서 CTA의 경우에는 식 (2)가 유속계 교정식으로 널리 사용된다.

Fig. 3은 속도에 대한 지수변화를 일정한 값으로 고정하지 않고 곡선맞춤식을 구한 것이다. Fig. 2와 비교하여 오차가 매우 줄어든 것을 알 수 있으며 Table 1에 정리된 Fig. 2와 Fig. 3의 Chi square 계산결과를 통하여 확인할 수 있다. 속도의 제곱근으로 함수를 선정하면 VTA의 출력 귀환율이 증가할수록 오차가 급격히 커진다. 속도의 지수 n 을 고정하지 않은 경우에는 제곱근의 형식을 취한 경우와 비교하여 오차가 매우 작아진다.

Table. 2는 Fig. 3의 곡선맞춤결과를 요약한 것이다. VTA의 경우 출력의 귀환율이 증가할수록 속도의 지수 n 이 커지며 일정하지 않다. 얻어진 교정식의 활용으로서 유속계의 감도를 구할 수 있다. 속도에 대하여 교정식을 미분하면 유속계의 감도가 얻어지는데 Fig. 4에 그 계산결과를 나타내었으며 Table 2의 결과와 비교할 때 속도의 지수 n 이 감도와 직접 관계됨을 알 수 있다.

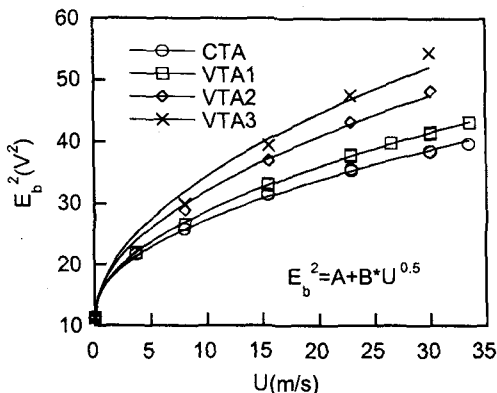


Fig. 2 Calibration equation with $U^{0.5}$

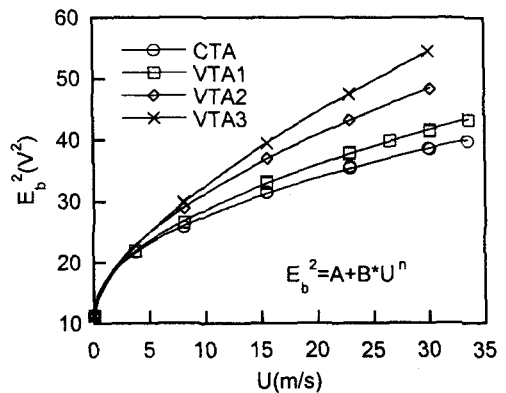


Fig. 3 Calibration equation with U^n

Table 1 Chi square for each calibration equation

cases	χ^2	
	$A+B \cdot U^{0.5}$	$A+B \cdot U^n$
CTA	1.0	0.39
VTA1	0.5	0.38
VTA2	3.1	0.03
VTA3	19.47	0.06

Table 2 Curve fitting equations in Fig. 3

cases	A	B	n
CTA	11.374	5.447	0.47
VTA1	11.308	5.323	0.51
VTA2	11.283	5.449	0.56
VTA3	11.266	4.800	0.64

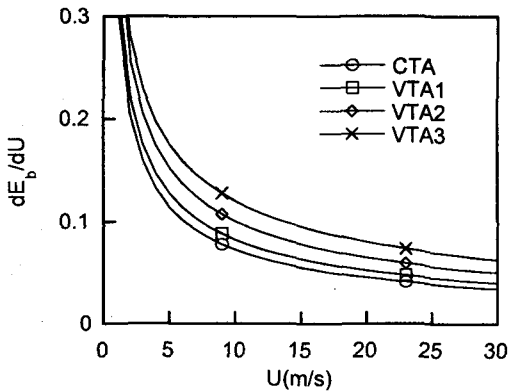


Fig. 4 Sensitivity of VTA

저속에서는 모든 유속계의 감도가 우수하지만 속도가 증가함에 따라 VTA와 CTA 모두 감도가 감소하게 된다. 약 15m/s 이상의 속도에서 VTA의 감도는 CTA의 약 2배 이다.

3. VTA 정특성방정식의 타당성 확인

정특성방정식은 유속계의 회로⁽⁷⁾(직류증폭기와 브릿지 저항값)와 열선주위의 대류열전달계수 등을 이용하여 주어진 유속에 대해 출력을 예측하는 관계식이다. CTA의 경우에는 위의 식 (2)로 정특성방정식이 나타나며 매우 쉽게 유속이 주어지면 출력이 바로 계산된다. 그러나 VTA의 경우는 주어진 속도에 대하여 출력전압을 구하는 것

이 간단하지 않으며 반복적인 방법을 사용해야 한다.⁽³⁾ 그 이유는 브릿지의 능동저항소자의 저항이 출력전압의 영향을 받아 결정되기 때문이다. 다음의 식 (3)에 VTA의 출력식을 나타내었는데 여기서 이 식의 사용방법이나 유도과정을 설명하기 위한 것은 아니고 단순히 복잡하고 주어진 유속에 대하여 출력을 얻기가 쉽지 않음을 보이기 위해서이다. CTA 및 VTA의 출력방정식의 유도는 참고문헌 (1), (3), (4) 등을 참고하기 바란다.

$$E_b^2 - \frac{h A_s}{a_w R_0} \left(1 - \frac{R_f \cdot R_B}{R_A \cdot R_{cas}(E_b)} \right) \cdot \left(R_A + \frac{R_A \cdot R_{cas}(E_b)}{R_B} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

Fig. 5는 식 (3)을 이용하여 CTA와 VTA의 출력을 계산한 것이다. CTA에서 출발하여 출력의 귀환율을 높이면 실험에서 관찰한 바와 같이 VTA의 특성이 더욱 강하게 나타난다. 이 경우에도 열선의 대류열전달계수는 속도의 제곱근에 비례하는 King의 식을 사용하여 계산하였다. Fig. 5에서 기호로 표시된 것은 주어진 유속에 대하여 정특성방정식을 이용하여 계산된 출력을 나타내며 이 점들을 지나는 실선은 $A+B \cdot U^n$ 으로 곡선 맞춤된 결과를 나타낸다. 대류열전달계수로 속도의 제곱근에 비례하는 식을 사용하였지만 곡선 맞춤식에서 n값은 귀환율이 증가할수록 커진다. Fig. 5에서 n의 범위는 CTA의 경우 정확히 0.5

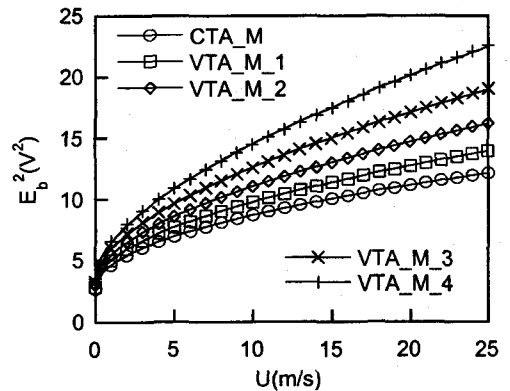


Fig. 5 Calculated outputs by using static response equation

에서부터 VTA_M_4의 경우 0.6으로 증가한다. CTA의 경우 n이 0.5가 된 것은 앞에서 설명한 바와 같이 CTA의 출력식이 정확히 대류열전달계수의 형태와 같기 때문이다. 그러나 VTA의 경우에는 n값이 변하는데 이 결과는 Fig. 3에서 살펴본 실험결과와 그 경향이 정확히 일치하며 본 연구자에 의하여 제시된 정특성방정식이 매우 정확함을 보여준다.

실용적 측면에서 유속계를 사용하는 경우 CTA의 경우에는 식 (2)를 속도에 대하여 전개하여 얻은 출력신호의 4차식으로 다음의 식을 사용한다. 온도가 일정한 유동에 대하여 유속계의 전압을 측정하면 교정곡선에 의하여 속도가 계산된다.⁽⁸⁾

$$U = a_0 + a_1 E_b + a_2 E_b^2 + a_3 E_b^3 + a_4 E_b^4 \quad (4)$$

Fig. 6은 Fig. 5에 나타낸 결과를 출력전압의 4차식으로 곡선맞춤한 결과를 나타내며 Fig. 7은 2차, 3차 및 4차 다항식으로 곡선맞춤한 경우 계산된 오차를 표시하고 있다. 맞춤식의 차수가 증가하면서 오차가 급격히 감소한다. 가로축의 숫자 0, 1, 2, 3, 4는 Fig. 6에서 CTA_M, VTA_M_1, VTA_M_2 등에 해당한다. CTA의 경우와 마찬가지로 VTA의 경우에도 4차의 다항식을 사용하는 것이 타당할 것으로 예상된다.

실험결과와의 비교를 통하여 제안된 VTA 정특성방정식의 타당성이 충분히 검토되었으므로 이제부터는 계산을 통하여 필요한 VTA의 출력데이터를 획득한다. 계산의 목적은 실험으로 획득할 수 없는 비등온(non isothermal) 유동에 대한 데이터를 얻기 위해서이다. 본 연구자에 의하여 개발된 정특성방정식은 유체의 온도변화 효과를 포함하고 있기 때문에 등온 및 비등온 유동에 대하여 모두 출력의 예측이 가능하다. VTA의 출력은 CTA의 경우와 마찬가지로 주위유체의 온도변동에 따라 변한다.⁽⁹⁾

Figure 8은 주위 유체온도를 제외한 모든 조건이 동일한 유속계가 유체온도 20, 40, 60°C에서 동작하는 경우에 출력을 정특성방정식을 통하여 예측하고 이를 출력전압의 4차식으로 곡선맞춤한 결과이다. 3개의 온도에 대하여 식 (4)형태의 3개의 식이 얻어진다. 이때 출력전압의 계수들을 정리하여 표시하면 Fig. 9와 같으며 온도의 함수임

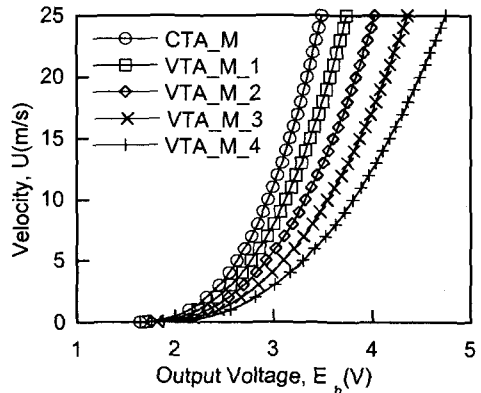


Fig. 6 Curve fitted data with 4th order polynomial of E_b

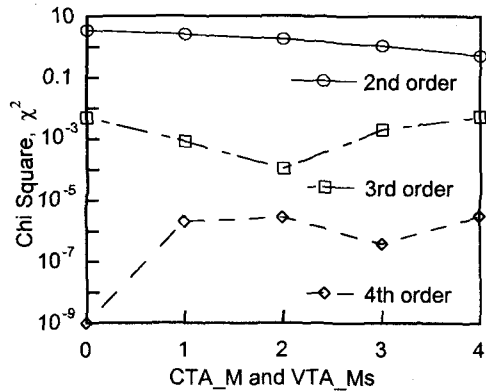


Fig. 7 Chi square in curvefitting

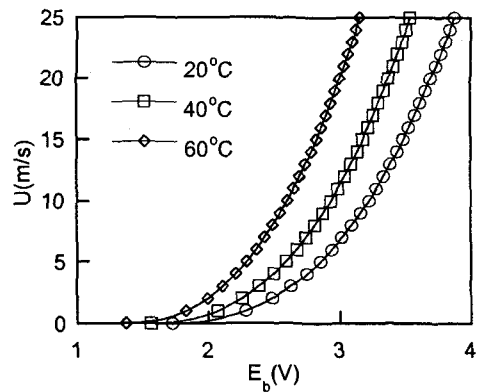


Fig. 8 Outputs of VTA in non-isothermal flow

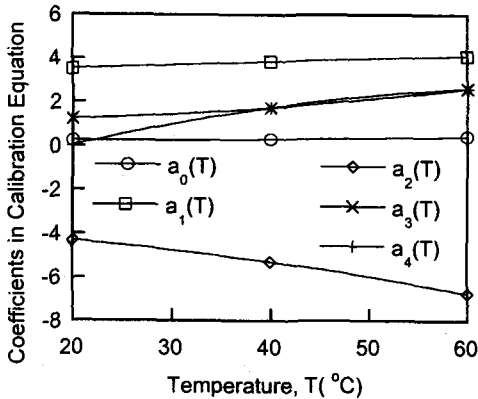


Fig. 9 Temperature dependency of the coefficients in equation (4)

을 알 수 있다. 이 계수들을 온도의 2차식으로 표시하고 식 (4)에 대입하면 온도변화를 포함한 VTA의 일반화된 교정식이 얻어지며 유속계의 출력전압과 유체의 온도를 측정하면 속도를 계산할 수 있다.

향후 연구과제로서 Fig. 9에서 제시된 계수들의 온도의존성에 관하여 연구할 가치가 있다. 계수들의 온도의존성이 열선의 크기, VTA의 경우 동작조건 등에 따라 어떻게 변하는지를 파악할 수 있다면 1개의 온도에서 교정된 유속계의 식을 이용하여 온도가 변한 경우에 유속을 예측할 수 있는 방법을 개발할 수 있을 것이다. 물론 이 경우 유속계의 정밀도는 떨어지게 된다.

5. 결론

가변온도형 열선유속계 VTA의 교정과정에서 대하여 살펴보았으며 최종적으로 온도변화를 포함하는 교정식을 제시하였다. CTA의 경우와 동일한 방법으로 VTA의 교정과정을 수행할 수 있었다. 단지 CTA의 경우에는 유속계 출력의 제곱이 속도의 제곱근에 비례하는 형식의 교정곡선이 맞춤형으로 적합하였으나 VTA의 경우에는 동일한 열선의 출력계산에서 속도의 제곱근에 비례하는 동일한 대류열전달계수를 사용하는 경우에도 유속계 출력의 제곱은 속도에 제곱근에 비례하지 않고 0.5보다 높은 지수를 가지면서 곡선맞춤 되었다. 실용적으로 사용될 수 있는 유속계 교정곡

선은 출력전압의 4차에 비례하는 형식이었으며 이것도 CTA의 경우와 유사하다. 이것은 기존의 유속계 사용자들에게 새로운 기계를 다루는 두려움 없이 가까운 장래에 VTA를 사용할 수 있는 근거가 된다. 왜냐하면 CTA에 비하여 교정과정은 비슷하지만 VTA의 경우 유속측정의 정밀도는 훨씬 우수하며 온도변화에 따른 출력의 변동도 또한 작기 때문이다.

참고문헌

- (1) Lee, S. P. and Kauh, S., 1997, "A New Approach to Enhance the Sensitivity of a Hot-wire Anemometer and Static Response Analysis of a Variable Temperature Anemometer," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 212-219.
- (2) Takagi, S., 1994, "The Status and Future of Hot wire Anemometer," *Research of Machinery*, Vol. 46, No. 6, pp. 679-685.
- (3) 이신표, 고상근, 1999, "가변온도형 열선유속계에서 출력의 온도의존성과 보상방법," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 659-663.
- (4) 이신표, 고상근, 1996, "광도전성저항을 이용한 열선유속계의 하드웨어적 온도보상에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 제 20 권, 제 11 호, pp. 3666-3675
- (5) King, L. V., 1914, "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid," *Proc. R. Soc. London*, Vol. 90, pp. 563-570.
- (6) <http://www.physics.hmc.edu>, The meaning of Fit Parameters,
- (7) Brunn, H. H., 1995, *Hot-wire Anemometry*, Oxford University Press.
- (8) 김진권, 강신형, 2000, "삼직교 열선유속계의 간편한 측정법 개발," 대한기계학회논문집 B 권, 제 24 권, 제 1 호, pp. 85-92.
- (9) Lee, S. P., Kim, J. I. and Kauh, S., 1995, "Temperature Compensation of Hot wire Anemometer with Photoconductive Cell," *Experiments in Fluids*, Vol. 19, pp. 362-365.