

상수온도형열선풍속계의 한가지 온습도보정방법에 주는 제곱지수 n 의 영향에 대한 연구

김 정 필

본문에서는 열선풍속계의 공기흐름속도측정에 주는 흐름마당의 온습도변화의 영향과 온습도보정에 미치는 제곱지수 n 의 변화영향에 대한 문제를 연구하였다.

선행연구[1-5]들에서는 란류특성량들이나 온도보정관계를 실험적으로 결정함에 있어서 제곱지수 n 을 관찰하는 흐름속도변화에 따라 일정한 상수($n=0.5$)로 가정하였다.

또한 $n=n(U)$ 의 의존성을 연구하는 경우에도 제곱지수 n 에 대한 상수 B 의 의존성을 고려하지 못하였으며 함수 $\phi(U)$ 의 형태도 선형관계로 설정하고 문제의 연구를 진행하였다.

여기서는 $B=B(n)$ 의 의존성을 고려하여 제곱지수 n 의 결정방정식을 구성하였으며 실험자료에 기초하여 함수 $\phi(U)$ 를 고차다항식의 형태로 주고 $n=n(U)$ 의 관계를 결정하여 온습도보정오차를 줄이였다.

1. 흐름매질의 온습도영향의 보정방법

전류에 의하여 온도 T_w 로 가열된 길이가 l , 직경이 d 인 가는 금속선(열선)이 온도 T_g 인 공기흐름속에 놓여있다고 하자. 그리고 열선과 주위흐름매질과의 열교환은 강제대류에 의해서만 진행된다고 가정한다. 이때 열선에서 크라머스의 열전달관계식[1-3]을 리용하면 흐름속도변화에 따르는 열선풍속계의 출구전압은 다음과 같이 표시된다.[1, 5]

$$E^2 = A_0(1 - \alpha_1 \varepsilon) \left(1 + \alpha_e \frac{\phi p_s}{p} \right) + B_0(1 - \beta_1 \varepsilon) \left(1 + \beta_e \frac{\phi p_s}{p} \right) \left(\frac{p}{p_0} \right)^n \left(\frac{U}{U_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서 A_0 과 B_0 은 각각 측정전기다리의 전기저항들과 열선의 동작온도 T_w 그리고 T_w 에서의 공기의 물성에 관계되는 상수, α_1 과 α_w 그리고 β 와 β_w 는 각각 T_w 에서의 공기의 물성에 관계되는 상수, p 와 p_0 은 흐름의 정압력과 특성압력, U 와 U_0 은 공기의 흐름속도와 특성흐름속도, ϕ 와 p_s 는 공기의 상대습도와 포화수증기압, $\varepsilon = (T_g - T_0)/(T_w - T_0)$ 은 흐름온도와 열선가열온도와의 비를 표시한다.

이제 U_c 를 열선교정실험에서 얻어진 흐름속도라고 하고 ΔU_a 를 흐름마당의 온습도변화의 영향에 의하여 생기는 속도편차라고 하면 온습도변화를 고려한 흐름속도는 다음과 같이 표시된다.

$$U = U_c + \Delta U_a \quad (2)$$

속도-전압관계식 (1)을 리용하여 온도변화량 $\Delta \varepsilon$ 과 습도변화량 $\Delta \phi$ 의 1차항까지 고려하면 보정속도 ΔU_a 는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\Delta U_a = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varphi=\text{const}} \Delta \varepsilon + \frac{\partial U}{\partial \varphi} \Big|_{\varepsilon=\text{const}} \Delta \varphi = K_\varepsilon \Delta \varepsilon + K_\varphi \Delta \varphi \quad (3)$$

여기서 K_ε 과 K_φ 는 각각 온도 및 습도보정계수이며 속도-전압관계식 (1)을 리용하면 다음과 같이 표시된다.

$$K_\varepsilon = -\frac{U_0}{n} \left\{ \frac{\left[E^2 - A_0(1 + \alpha \varepsilon_c) \left(1 + \alpha_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) \right]^{1-n}}{B_0 \left[(1 + \beta \varepsilon_c) \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) \right]^{n+1}} \right\}^{\frac{1}{n}} \left(\frac{p_0}{p_c} \right) \times$$

$$\left\{ A_0(\alpha - \beta) \left[1 + (\alpha_w + \beta_w) \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} + \alpha_w \beta_w \left(\frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right)^2 \right] + \right. \quad (4)$$

$$\left. + \frac{\varphi_c p_{sc}}{p_c} A_0(\alpha_w - \beta_w) [1 + (\alpha + \beta) \varepsilon_c + \alpha \beta \varepsilon_c^2] + \right.$$

$$\left. + \left(\beta + \beta \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} + \beta \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \varepsilon_c \right) E^2 \right\}$$

$$\times \frac{B_0^2 (1 + \beta \varepsilon_c)^2 \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right)^2}{B_0^2 (1 + \beta \varepsilon_c)^2 \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right)^2}$$

$$K_\varphi = -\frac{U_0}{n} \left\{ \frac{\left[E^2 - A_0(1 + \alpha \varepsilon_c) \left(1 + \alpha_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) \right]^{1-n}}{B_0 \left[(1 + \beta \varepsilon_c) \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) \right]^{n+1}} \right\}^{\frac{1}{n}} \left(\frac{p_0 p'_{sc}}{p_c^2} \right) \times$$

$$\left\{ A_0 \alpha_w (1 + \alpha \varepsilon_c) \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) + \beta_w \left[E^2 - A_0(1 + \alpha \varepsilon_c) \left(1 + \alpha_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right) \right] \right\}$$

$$\times \frac{B_0 (1 + \beta \varepsilon_c) \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right)^2}{B_0 (1 + \beta \varepsilon_c) \left(1 + \beta_w \frac{\varphi_c p'_{sc}}{p_c} \right)^2} \quad (5)$$

여기서 $p'_{sc} = \frac{\partial p_s}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_c}$, 첨자 c 는 교정실험조건에 해당하는 량을 표시한다.

2. 제곱지수 n 의 변화특성결정방정식

여기서는 흐름속도변화에 관한 제곱지수 n 의 양적 및 음적변화특성을 연구하였다.

제곱지수 n 이 흐름속도에 양적으로 관계된다고 보면 $n = n(U)$ 의 관계는 속도-전압 관계식 (1)로부터 다음과 같은 대수방정식으로 표시할수 있다.

$$\ln(\alpha_1 n^2 - \alpha_2 n + \alpha_3) + \alpha_4 n = \alpha_5 \quad (6)$$

한편 제곱지수 n 이 흐름속도에 음적으로 관계된다고 보면 $n=n(U)$ 관계는 속도-전압관계식 (1)을 리용하여 다음과 같은 미분방정식으로 표시할수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_6^n U^n [2\alpha_1 n - \alpha_2 + (\alpha_1 n^2 - \alpha_2 n + \alpha_3) \ln U] \frac{\partial n}{\partial U} + \\ + \alpha_6^n U^n (\alpha_1 n^2 - \alpha_2 n + \alpha_3) \left(\ln \alpha_6 + \frac{n}{U} \right) = \frac{2E}{B_0} \frac{\partial E}{\partial U} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\alpha_i (i=1, \dots, 6)$ 는 흐름마당의 온습도조건과 열선의 동작조건 그리고 흐름매질의 물리적성질에 관계되는 량이다. 미분방정식 (7)의 오른변을

$$\phi(U) = \frac{2E}{B_0} \frac{\partial E}{\partial U} \quad (8)$$

로 표시하면 $\phi(U)$ 는 교정실험자료에 기초한 $E=f(U)$ 관계를 고차다항식의 형태로 얻어 결정할수 있다. 또한 미분방정식 (7)의 경계조건은 $n=0.5$ 인 경우 온습도보정후 상대오차가 최소인 흐름속도로 규정해줄수 있다. 즉

$$n|_{U=8.91} = 0.5 \quad (9)$$

3. 실험적검증

실험적검증은 직경 $d=12.85 \times 10^{-6} \text{m}$ 이고 길이 $l=4.5 \times 10^{-6} \text{m}$ 인 월프람열선을 가진 상수온도형열선풍속계를 리용하여 진행하였다.

실험은 다음과 같은 조건들에서 진행되었다.

흐름조건 1; 공기온도 $T_{g1}=14.72^\circ \text{C}$, 공기습도 $\varphi_1=0.771(77.1\%)$

흐름조건 2; 공기온도 $T_{g2}=9.86^\circ \text{C}$, 공기습도 $\varphi_2=0.531(53.1\%)$

위의 두 경우 열선의 동작온도와 열선가열저항은 각각 $T_w=180^\circ \text{C}$, $R_w=3.33\Omega$ 이였다.

그림 1에서는 방정식 (6)으로 결정된 $n=n(U)$ 의 양적특성을 보여주었다. 그림 1에서 제곱지수 n 은 흐름속도가 증가함에 따라 0.65로부터 0.53까지 작아지고 주어진 온습도변화($\Delta \varepsilon = -0.030$, $\Delta \varphi = -0.24$)에서 제곱지수 n 도 $\Delta n = 0.005$ 정도의 변화를 보여주었다.

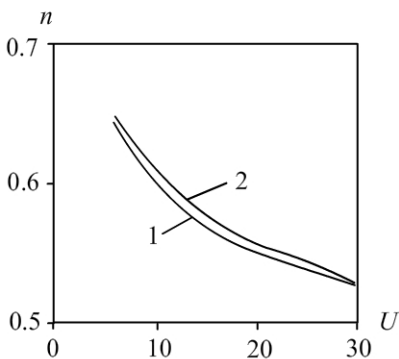


그림 1. $n=n(U)$ 의 양적변화
1-흐름조건 1, 2-흐름조건 2

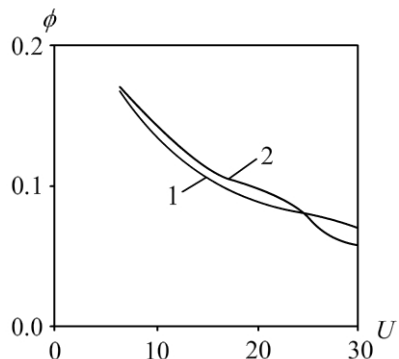


그림 2. $\phi=\phi(U)$ 의 변화
1-흐름조건 1, 2-흐름조건 2

그림 2에서는 $\phi = \phi(U)$ 의 변화곡선을 제시하였고 그림 3에서는 방정식 (7)에 기초하여 $n = n(U)$ 의 음적인 변화곡선을 보여주었다. $n = n(U)$ 의 관계를 음적으로 보는 경우에는 주어진 범위에서 흐름속도가 증가함에 따라 제곱지수 n 이 0.52부터 0.42까지 감소하였다.

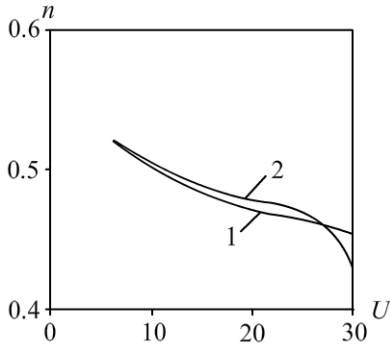


그림 3. $n = n(U)$ 의 음적변화

1—흐름조건 1, 2—흐름조건 2

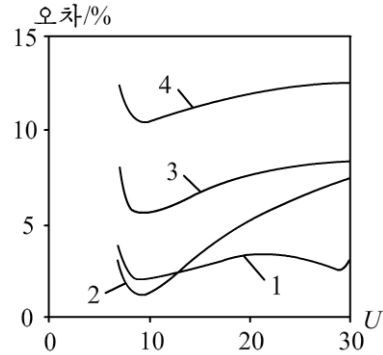


그림 4. 속도측정에 대한 n 의 변화영향

그림 4에서는 보정관계식 (2)–(5)에 의한 온습도보정후의 측정오차곡선(곡선 1, 2, 3)들과 온습도보정을 하지 않은 경우에 나타나는 측정오차곡선(곡선 4)을 보여주었다. 여기서는 흐름조건 1인 경우 얻은 실험자료를 교정실험자료로 설정하고 연구를 진행하였다.

양적인 $n = n(U)$ 의 관계를 리용하여 온습도보정을 하는 경우에는 6.18%의 평균측정오차(곡선 3), 음적인 $n = n(U)$ 를 리용하면 3.44%의 평균측정오차(곡선 1)가 나타나며 일반적으로 리용되는 $n = 0.5$ 를 리용하면 3.99%의 측정오차(곡선 2)가 생긴다.

그리고 온습도변화영향을 보정하지 않는 경우에는 11.75%의 평균측정오차가 생긴다.

이로부터 음적인 $n = n(U)$ 의 관계를 리용하여 흐름마당의 온습도변화영향을 보정하는 경우 측정오차가 제일 작으며 일반적인 $n = 0.5$ 의 고정된 n 의 값을 리용하는것보다 흐름속도변화에 따르는 측정오차변화를 크게 줄일수 있다는것을 알수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김정필; 실험항공역학, 김일성종합대학출판사, 171~180, 주체102(2013).
- [2] Cameron; Spinger-handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer, 229~287, 2007.
- [3] J. G. Webster; Measurement, Instrument and Sensors Handbooks, CRC, 964~981, 2014.
- [4] J. O. Hinze; Turbulence, McGraw-Hill, 85~96, 1975.
- [5] S. E. Larsen et al.; DISA Information, 16, 15, 1974.

주체107(2018)년 3월 10일 원고접수

The Study on the Influence of a Square Exponent n on the Method for a Temperature and Humidity Compensation in a CTA

Kim Jong Phil

In this paper, we composed the determinating equation of a square exponent n , considering its dependence on $B=B(n)$ in a velocity-voltage relation of a hot-wire anemometer, made the function $\varphi(U)$ in the form of a polynomial of higher degree on the base of experimental data and considered the method by which was reduced the temperature and humidity compensation errors.

Key words: hot-wire, anemometer