熱線風速計에 의한 測定方法

盧 秉 俊
<全北大學校 機械工學科>

1. 서 론

유체공학의 발전과 함께 기간산업인 항공산업과 정밀산업의 급진적이고 획기적인 발전이 거듭되어 왔다.

유체공학에서 무엇보다 중요한 것은 정밀계측과 해석이나 일정한 유동형태를 갖는 층류유동이나, 공학적인 측면에서 일차원으로 간주하여 응용하고 있는 관로 유동 보다는 자유분사나 복잡한 機關內의 混合가스의 유동현상 또는 소용돌이 유동등은 과거의 간단한 측정기구로서는 측정과 해석이 불가능하다.

유속의 최초 측정방법은 Torricelli(1608~1647)가 Bernoulli 방정식을 오리피스에 적용하여 유속 계산식 $v=k\sqrt{2gh}$ 를 유도하였고, 그 이후 역시 Bernoulli 방정식을 이용하여 Henri Pitot (1695~1771)는 停滯點에 대한 이론을 고려하여 停滯壓을 측정하는 방법으로 가는관을 이용하여 Seine 江의 유속을 측정하는데 성공하므로서 유체 유동의 측정이 활발히 이루어진 것이다. 이론적인 유속계산식 $v=k\sqrt{2gh}$ 는 가장 원시적인 피토우관(Pito-tube)이나 오리피스에 의한 유속 계산식이지만, 현재에 아무리 전기적인 정밀측정 방법과 레이저에 의한 측정방법이 개발되어도 결국 피토우관에 의한 측정값이나 압력측정치와의 교정(Calibration)이 선행되지 않으면 안되기 때문에, 피토우관에 의한 측정방법은 가장 원시적이면서 가장 정확한 측정방법의 하나이다. 다만 피토우관에 의한 측정은 速度場內의 平均速度를 측정하게 되고 亂流成分의 해석이 불가능하며, 그 측정이 일차원 유동에 국한된다는 것이 단점으로 되어 있다. 이러한 점들을 보완할 수 있는 측정장치들이 많이 개발되고 있으나 본 해설에서는 공기유동의 경우 우리가 가장 많이 사용하고 있는 열선풍속계에 대하여 그 용법을 논하기로 한다.

2. 열선풍속계의 이론

열선풍속계에 의한 측정은 1次元, 2次元, 3次元 유동을 각기 측정과 해석이 가능토록 되어 있으며, 그 측정 프로브(probe)는 1次元用 I 型과 2次元用 X型이 가장 많이 사용되고 있다.

2차원 측정이나 3차원 측정은 결국 1차원 측정용 열선풍속계를 2셋트 또는 3셋트 사용할뿐 그 측정원리는 동일하므로 1차원 열선풍속계의 기본원리를 살펴 보기로 한다.

열선풍속계의 기본원리는 Wheaston Bridge의 원리를 그대로 적용한 것이다. 그림 1과 같이 최초 AB에 흐르는 전류가 균형을 이루어 증폭기에 전류가 흐르지 않다가 저항(유속에 의한 저항)이 프로브에 작용하게 되면 전류 유동의 불균형을 가져와 Wheaston Bridge가 불균형 상태에 놓이게 된다. 이렇게 되면 서어보 증폭기에서 필요한 전류를 공급시켜 Wheaston Bridge전

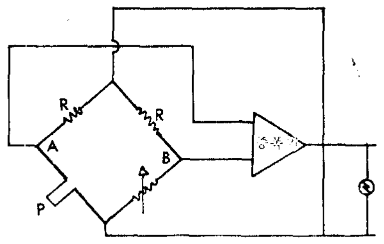

그림 1 Wheaston Bridge

체에 균형을 이루도록 한다. 그리하여, 이 때에 흐르는 전류는 프로브 P에서 공기저항에 의해 받는 저항치에 기인됨을 알 수 있다. 이 때에 저항치로 나타나는 값은 방향에는 관계없이 프로브 P에 수직으로 작용하는 값의 합으로 나타나게 된다.

그리하여, 공기속도에 따라 프로브에 미치는 저항치가 변하게 되므로 유속의 변화에 대한 전류의 변화를 상호 함수관계로 놓고 이를 측정하기에 간편하게 사용가능한 함수식을 얻기 위하여는 하기와 같은 과정을 거쳐야 한다. 다만 프로브의 저항치는 온도의 변화에 영향을 받으므로 측정실내의 온도는 등온을 유지하여야 한다.

2.1. King의 법칙

—기호 설명—

- $A.B$: 열선의 특성에 따라 정해지는 상수
- a : 열선의 가열계수, $a=(R_1-R_0)/R_0$
- d : 열선의 직경
- E : 열선풍속계의 출력(volt)
- E_1 : 프로브(1)에 의한 열선풍속계의 출력
- E_2 : 프로브(2)에 의한 열선풍속계의 출력
- E_{lin} : 선형계(linearizer)를 거쳐 나오는 출력
- e'^2_1 : 열선풍속계의 파동출력
- e'^2_2 : 열선풍속계의 파동출력
- g : 중력가속도
- h : 압력수두
- I : 전류
- K' : 측정조건에 따라 정해지는 상수
- k : $(A+B)^2\cdot a/(a+1)$. 열선의 계수
- l : 열선의 길이
- m : 지수
- n : 지수 $n=\frac{1}{m}$
- R : 온도 T에서의 유체유동에 대한 저항
- R_1 : Wheaston Bridge에서의 열선의 저항
- R_0 : 온도 T_0에서의 열선의 저항
- S_1, S_2 : 열선의 계수
- $\bar{U}$: 피토우관에 의한 측정 유속
- $\bar{U}_1$: 프로브(1)에 수직한 유속(그림 5 참조)
- $\bar{U}_2$: 프로브(2)에 수직한 유속(그림 5 참조)
- U_a : 열선에 평행한 속도벡터 성분
- U_n : 열선에 수직한 속도벡터
- U_{eff} : 열선의 순간 유효 냉각속도 성분
- $\bar{U}_{eff}$: 열선에 의한 평균 냉각속도 성분
- $\bar{U}_{eff}*$: $\bar{U}_{eff}$의 측정치
- u : 유동방향의 속도성분
- $\bar{u}'^2$: 유동방향의 베리언스(variance)
- $u*$: u의 측정치
- w : 유동방향에 수직한 속도성분
- $w*$: w의 측정치
- w'^2 : 유동방향에 수직한 베리언스
- $u'w'$: 코베리언스(covariance)

가열된 열선의 주위 유체에 대한 열전달은 유체의 유동속도 함수로 되어 있다. 이 관계를 식으로 나타내면;

$$RI^2=(A_1+B_1\bar{U}^n)(T-T_0) \qquad (1)$$

식 (1)을 좀더 간편하게 나타내면;

$$E^2=k(A_1+B_1\bar{U}^n) \qquad (2)$$

A_1과 B_1을 상수로 놓고 식 (2)를 King은 다음과 같이 간편하게 표기 하였으며 이 이론을 King의 법칙이라고 한다.

$$E^2=A+B^n \qquad (3)$$

King은 멱(冪)법칙으로 되어 있는 식 (3)을 보다 사용하기에 간편하게 하기 위하여 다음과 같은 간단한 식으로 표시하였다.

$$E=k\bar{U} \qquad (4)$$

2.2. 직선화 (Linearization)이론

식 (3)에 표기된대로 열선풍속계에서 나오는 출력과 피토우관으로 측정한 유속 $\bar{U}$의 관계를 도시하면 이는 그림 2와 같이 되어 사용하는 데에 불편하다.

King의 법칙은

$$E^2=A+B\bar{U}^n=A+B^{\frac{1}{m}} \qquad (5)$$

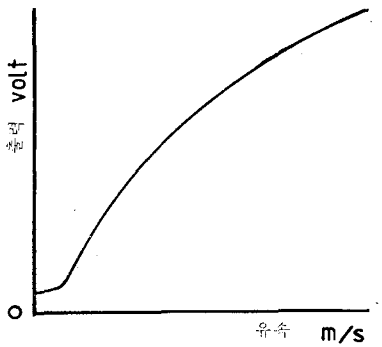

그림 2 열선풍속계의 출력과 유속의 관계

여기서 선형계를 사용하여 다음과 같은 함수식을 얻을 수 있도록 택하면(그림 3 참조)

$$E_{lin}=K'(E^2-A)^m \qquad (6)$$

이는 다시

$$E_{lin}=K'(E+\sqrt{A})^m(E-\sqrt{A})^m \qquad (7)$$

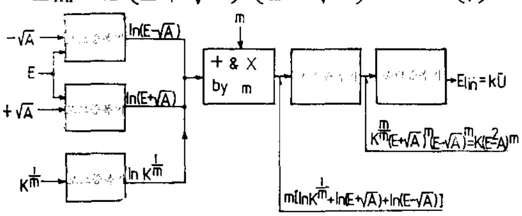

그림 3 선형화 설명도

그림 3에서 보는 바와 같이 2개의 로그증폭기는 입력으로서 $(E+\sqrt{A})$와 $(E-\sqrt{A})$의 신호를 각각 받고 또 다른 로그증폭기 하나는 $K'^{\frac{1}{m}}$의 신호를 받는다. 이 세 로그증폭기에서 나오는 세출력들은 다른 증폭기에 의하여 그 값들이 합하여 지고 지수 m이 곱해 지게 된다. 이렇게 하여 나오는 신호는 지수증폭기에 보내져 식 (6)과 같은 결과를 얻을 수가 있다.

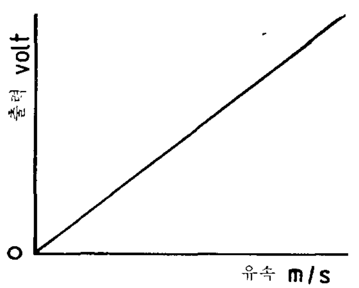

그림 4 선형계의 출력과 유속의 관계

열선풍속계의 출력을 식 (6)에 대입시키면,

$$E_{lin}=K'(A+B\bar{U}^{\frac{1}{n}}-A)^m \qquad (8)$$

곧 $$E_{lin}=K'B\bar{U}=K\bar{U} \qquad (9)$$

결국 식 (9)와 같이 선형계의 출력이 유속에 정비례 하고 있음을 알 수 있다. (그림 4 참조)

3. X型 프로브의 용법

2절에서 설명한 열선풍속계의 이론직선화 방정식의 원리는 유체유동에서 1차원 유동 측정 즉 I型 프로브의 용법의 제반 이론과 마찬가지이다.

다만 열선풍속계의 선형계의 출력 E와 피토우관에 의해 측정한 유속 $\bar{U}$는 동시에 측정되어야 하고 완전히 발달된 난류 유동역에서는 정확한 속도 교정식 (9)를 구하기가 어렵다. 왜냐하면 동일한 속도영역에 열선프로브와 피토우관을 위치시켜야 되기 때문이며 이 영역 역시 파동속도가 거의 존재하지 않는 포텐셜(potential) 유동역이어야 한다.

결국 X型 프로브 역시 동일한 방법으로 직선의 식을 구하게 되며 이 때에는 열선풍속계가 2셋트가 필요할 뿐이다.

3.1. X型 프로브의 직선의 식

그림 5 (a)에서 보는 바와 같이 X型프로브의 경우 유동방향에 각각 ±45°의 각을 이루는 (1),(2)프로브가 각기 다른 열선풍속계에 연결되어 측정되는 경우이다. (b)에서와 같이 프로브 (1)에 수직한 유속을 평균유속 $\bar{U}_1$, (2)에 수직한 유속을 평균유속 $\bar{U}_2$로 표시하였을 때 식 (9)를 적용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

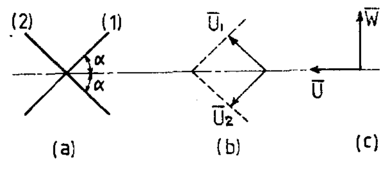

그림 5 X형 프로브와 유동방향의 관계

$$\left.\begin{array}{l} F_1=k\overline{U}_1 \\ E_2=k\overline{U}_2 \end{array}\right\} \qquad (10)$$

열선의 특성에 따라 E 와 $\overline{U}$ 의 관계식에서 E 축의 절편을 갖는 $E=k\overline{U}+C$ 와 같은 식으로 구해지기도 하나 $C=0$ 가 되도록 열선풍속계의 조정이 필요하다.

식 (10)은 다시

$$\left.\begin{array}{l} \overline{U}_1=u+w=E_1/k \\ \overline{U}_2=u-w=E_2/k \end{array}\right\} \qquad (11)$$

E_1 과 E_2 를 제하고 표시하면

$$\left.\begin{array}{l} e'_1=k(u'+w') \\ e'_2=k(u'-w') \end{array}\right\} \qquad (12)$$

여기에서

$$\begin{array}{l} \overline{(e'_1+e'_2)^2}=4k^2\overline{v'^2} \\ \overline{(e'_1+e'_2)}=4k^2\overline{w'^2} \\ \overline{e'^2_1}-\overline{e'^2_2}=4k^2\overline{u'w'} \end{array} \qquad (13)$$

3.2. 측정치 교정

강한 난류성분들을 갖는 유동역에서의 레이놀즈 응력성분들($\overline{u'^2}$, $\overline{w'^2}$, $\overline{u'w'}$)을 정확하게 측정하기에는 극히 어려운 점이 많아 때때로 측정오차를 가져오는 수가 많다.

$\overline{U}_{eff}$ 를 열선의 순간냉각속도라 하고 U_n 및 U_a 를 열선에 수직 및 축방향의 순간속도 벡터성분이라 하면 $\overline{U}_{eff}$ 값은 항상 陽(+)의 값을 가지므로,

$$\overline{U}_{eff}=1\sqrt{V_n^2+k_a^2V_a^2} \qquad (14)$$

가 되고, 속도성분들은

$$\left.\begin{array}{l} u=\overline{U}+u' \\ v=\overline{V}+v' \\ w=\overline{W}+w' \end{array}\right\} \qquad (15)$$

이므로, 여기서 $v=w=0$ 으로 놓고 열선이 u 의 방향에 수직하다면 일반적으로

$$\begin{array}{l} U_{eff}=\sqrt{(\overline{U}+u')^2}=|\overline{U}+u'|\neq\overline{U}+u' \\ \overline{U}_{eff}=\overline{U+u'}\neq\overline{U} \\ \overline{(U_{eff}-\overline{U}_{eff})^2}=\overline{(|\overline{U}+u'|-\overline{|\overline{U}+u'|})^2}\neq\overline{u'^2} \end{array} \qquad (16)$$

가 되어, 오차를 가져오기 쉬우며 $\overline{u'w'}$ 의 경우도 마찬가지이다. 그리하여 1975년 TUTU와 CHEVRAY는 교정방법을 다음과 같이 제시하였다. 열선이 u, w 의 유동평면에 있고 α 를 u의 유동방향과 열선에 수직한 방향이 이루는 각이라고 하면 열선의 냉각유효속도는

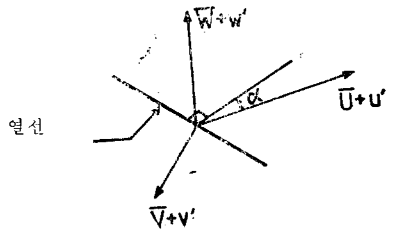

그림 6 열선과 유동방향의 관계

$$\overline{U}^2_{eff}=[(\overline{U}+u')\cos\alpha+(\overline{W}+w')\sin\alpha]^2+v^2 +k^2[(\overline{U}+u')\sin\alpha-(\overline{W}+w')\cos\alpha]^2 \quad (17)$$

고로 유동축에 ±450를 이루고 있는 X型 열선의 경우는

$$\begin{array}{l} \overline{U}_{eff}(\alpha=45°)=\overline{U}_{eff}^{(1)} \\ \quad =2^{-1/2}[(u+w)^2+2v^2+k_a^2(u-w)^2]^{\frac{1}{2}} \\ \overline{U}_{eff}(\alpha=-45°)=\overline{U}_{eff}^{(2)} \\ \quad =2^{-1/2}[(u-w)^2+2v^2+k_a^2(u+w)^2]^{\frac{1}{2}} \end{array} \qquad (18)$$

또 E_1, E_2 와의 관계식으로 나타내면

$$\begin{array}{l} E_1=S_1[(u+w)^2+2v^2+k_a^2(u-w)^2]^{\frac{1}{2}} \\ E_2=S_2[(u-w)^2+2v^2+k_a^2(u+w)^2]^{\frac{1}{2}} \end{array} \qquad (19)$$

만약 프로브의 교정이 층류유동역에서 이루어졌다면 $(u'=v'=w'=0)$ u 의 유동축상에서는 $(U=u,\ v=w=0)$

$$E_i=S_iU\sqrt{1+k_a^2} \qquad (20)$$
$$(i=1,2)$$

여기서 기울기는 $S_i\sqrt{1+k_a^2}$ 이므로

$$\overline{U}_{eff}^{(i)}=\frac{E_i}{S_i\sqrt{1+k_a^2}} \qquad (21)$$

고로

$$\begin{array}{l} \sqrt{2}\,\overline{U}_{eff}^{*(1)}=[(u+w)^2 \\ \quad +2v^2+k_a^2(u-w)^2]^{\frac{1}{2}}/\sqrt{1+k_a^2} \\ \sqrt{2}\,\overline{U}_{eff}^{*(2)}=[(u-w)^2 \\ \quad +2v^2+k_a^2(u+w)^2]^{\frac{1}{2}}/\sqrt{1+k_a^2} \end{array} \qquad (22)$$

가 되며, k_a 와 v 를 무시하면

$$\left.\begin{array}{l} \sqrt{2}\,\overline{U}_{eff}^{*(1)}=u^*+w^* \\ \sqrt{2}\,\overline{U}_{eff}^{*(2)}=u^*-w^* \end{array}\right\} \qquad (23)$$

상기 두식들은

$$u^*+w^*=[(u+w)^2+2v^2+k_a{}^2(u-w)^2]^{\frac{1}{2}}/\sqrt{1+k_a{}^2} \qquad (24)$$

$$u^*-w^*=[(u-w)^2+2v^2+k_a{}^2(u+w)^2]^{\frac{1}{2}}/\sqrt{1+k_a{}^2}$$

식 (24)를 자승하여 뺀다음 u^*를 $\overline{U}^*+u'^*$로, w^*를 $\overline{W}^*+w'^*$로 대치하면

$$(\overline{U}^*+u'^*)(\overline{W}^*+w'^*)(1+k_a{}^2)=(\overline{U}+u')(\overline{W}+w')(1-k_a{}^2) \qquad (25)$$

평균치를 취하면

$$\overline{u'w'}=\overline{U^*W^*}\frac{1+k_a{}^2}{1-k_a{}^2}-\overline{VW}+\overline{u'^*w'^*}\frac{1+k_a{}^2}{1-k_a{}^2} \qquad (26)$$

$\overline{U}$와 $\overline{W}$는 이론적인 평균유속을 나타내는 미지의 값이며 $\overline{U}^*$와 $\overline{W}^*$는 정확한 측정치이므로 코베리언스의 교정식을 식(26)으로 부터 얻을 수 있다.

$$\overline{u'w'_c}=\overline{U^*W^*}\frac{2k_a{}^2}{1-k_a{}^2}+\overline{u'^*w'^*}\frac{1+k_a{}^2}{1-k_a{}^2} \qquad (27)$$

이 식에서 측정치 $\overline{W}^*$는 거의 무시할 수 있으며, CHAMPAGNE, SLEICHER, WEHRMANN은 열선의 계수 k_a는 l/d에 비례하는 것으로 사용하는 $l/d=250$의 열선의 경우 $k_a=0.18$로 놓았을 때 식 (27)은 다음과 같은 간단한 교정식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{u'w'_c}=1.067\overline{u'^*w'^*} \qquad (28)$$

그림 7은 2차원 유동 측정의 열선풍속계 시스템의 설치도이다.

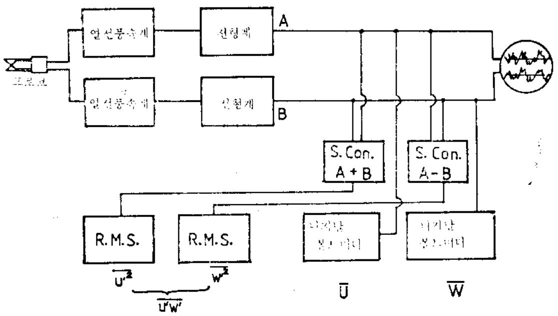

그림 7 2차원 유동측정 열선풍속계의 장치도

4. 맺는말

유체유동의 대부분은 2차원유동이나 공학적인 설계에서는 대개 일차원유동으로 간주하고 점성의 영향마저도 무시해 버리는 수가 많다.

소용돌이 유동이나 유동방향이 일정하지 않은 유동에서는 열선풍속계에 의한 측정이 불가능하다. 왜냐하면 앞에서 설명한 바와 같이 열선에 의해 나타나는 저항치는 열선에 작용하는 유체유동의 방향에는 관계없이 열선이 받고 있는 총저항치가 나타나기 때문에 어느 방향에 대한 정확한 유속을 측정하기가 어렵기 때문이다.

또한 피토우관에 의한 측정 역시 직경의 크기에 따라 한 위치의 측정치에 대한 速度場의 크기가 다르고 정확한 유동방향이 알려지지 않는 한 측정치가 실제 유동방향에 대한 유속과 동일하다고 말할 수 있다. 나아가서 유속측정시 때때로 피토우관에 의한 측정의 경우 陰壓이 나타나는 경우가 있으나 이 경우에도 유속의 크기와 방향 등을 정확히 판별하기가 어려우며, 아직까지 피토우관에 의한 陰速 측정과 해석방법은 구명되지 않고 있다.

그러므로, 이상에서 설명한 피토우관 열선풍속계에 의한 측정에서는 유동 방향이 분명하거나 可視化(visualization)에 의한 유동방향을 점검한 후에 사용하여야 될 것이다. 따라서 열선풍속계 사용시에는 등온을 유지하여야 되기 때문에 교정당시의 실내온도나 실험 당시의 실내온도는 동일하여야 하며, 습도의 조절이 필요하고 시험부(test section)를 흐르는 공기는 최대로 먼지를 제거하여 열선 주위에 부착되어 열선의 감도의 감소를 가져와 점차적인 저항치의 감소 현상을 막아야 한다.

참 고 문 헌

1. B.J. Rho; Contribution à l'étude d'un écoulement de jet turbulent en forme de nappe conique, 1979.

(343페이지에 계속)