

三軸 熱線 프로브에 의한 流動計測法

김 경 훈

Flow Measurement of a Triple Hot-Wire Probe

Kyung-Hoon Kim



- 김경훈 (경희대학교 기계공학과)
- 1954년생
- 유체역학을 전공하였으며, 유체기계
의 내부유동 및 난류유동 계측과 해
석에 관심이 있다.

1. 머리말

현 재, 과학기술 및 산업일반에 계측의 기술이 광범위하게 이용되고 있다. 3차원적으로 유동장을 계측하는 방법으로서 레이저도플러유동계(L. D. V.), 열선 유속계(hot-wire anemometer) 및 다공 피토크미터(yaw meter) 등을 이용하는 방법 등이 있다. 이 중에서 유동이 비정상적인 것을 문제시하는 경우에 사용할 수 있는 것은 L. D. V.와 열선유속계이다.

L. D. V.는 “고형의 프로브를 유동중에 집어넣지 않고 측정점으로부터 떨어진 위치에서 측정하는 비접촉 측정법으로 유동을 흐트리지 않는다.” “응답성이 빨라서 시간 분해능이 높다.”라고 하는 이점이 있는 반면 “불투명한 유체는 측정할 수 없다.” “용기의 창이 오염됨으로써 측정이 불가능하다.”라고 하는 결점이 있고 또한 3차원적으로 측정하려고 하면 시스템이 극히 고가라는 점에서 사용상의 제약도 있다. 한편 열선유속계는 “유동중에 센서를 직접 집어 넣는 접촉성이다.” “기계적인 강도가 약하다.”라는 결

점이 있지만 “비교적 싼 가격으로 시스템을 구성할 수 있다.” “고정도로 구할 수 있다.” “레이저에 비해 사용범위가 넓다.” “직접적으로 유동의 변동을 알 수가 있다.”는 이점이 있다.

이 열선유속계의 열선프로브는 전류에 의해 가열되어 주위의 온도보다 높게 보존된 금속의 세선(일반적으로 텅스텐선이나 백금선이 이용된다)이 기류에 의해 냉각되며, 그 결과로 세선의 온도변화에 따르는 전기저항의 장치이며 정전류법과 정온도법의 두 가지가 있다. 정전류법은 열선에 흐르는 전류를 일정하게 유지시켜 열선저항의 변화를 이용한 방법으로서, 이 방법은 전기저항의 속도에 대한 감도가 다르다는 것을 이용하여 유속과 온도를 동시에 계측하는 경우에 이용되고 있다. 한편 정온도법은 열선의 저항을 일정하게 유지하도록 열선에 전류를 흘려서, 이 때의 출력전압의 변화로부터 유속을 구하는 방법으로서 정전류법에 비해서 시정수가 작기 때문에 유속변동의 측정에는 이것이 사용되고 있다.

유속백터가 변화하는 유동인 3차원 유동을 열선유속계로서 측정할 때, 열선프로브를 이

용하는 방법으로는 1) 1축의 경사형 열선 프로브를 회전시키는 방법, 2) 2축의 열선 프로브를 유동방향에 놓는 방법, 3) 다축 열선 프로브를 사용하는 방법 등이 있지만 1), 2)의 방법은 6개의 난류응력성분 및 각각의 속도성분을 구하기 위해 많은 양의 정보가 필요하며, 프로브 자체를 어느 한 고정점에 대하여 회전시켜야 하므로 동시성의 결여가 발생하게 되어 부정확한 자료를 얻게 되는 단점이 있다. 따라서 유동특성을 규명하기 위해서는 3방향의 성분을 동시에 측정할 수 있는 다축 열선 프로브가 사용되며, 이 중에서도 가장 신뢰성이 있는 자료를 잡을 수 있는 삼축 열선 프로브(triple hot wire: T. H. W.)이다.

삼축 열선 프로브는 평균 유속에 대하여 비교적 큰 변동성분을 갖는 3차원 비정상류를 실시간적으로 측정할 때에 가장 뛰어난 점을 지니고 있다. 이제까지 많은 프로브형상들⁽¹⁻⁷⁾이 제안되어 왔지만, 지금까지 이들의 객관적인 평가는 행하여지지 않았다. 그 이유의 하나로서는 각각의 프로브형태에 따른 데이터의 처리법과 검정방법이 이용되어온 점이며, 어떠한 형태의 프로브에도 적용될 수 있는 일반적인 방법이 없다는 사실이다.

이 글에서는 Kim⁽⁸⁻¹⁰⁾이 제안한 임의 형상의 삼축 열선 프로브로부터 추출되는 세 개의 직교화 전압출력치를 이용하여 속도벡터를 평가하는 데이터 처리법을 정리하고 있다. 이 방법은 센서의 직교성이나 대칭성을 가정하지 않기 때문에 프로브형상이 정확하게 주어질 수 없는 자작 프로브인 경우에도 특히 유용하다.

2. 삼축열선

2.1 좌표계

삼축 열선을 실제로 사용할 때에는 실험실

좌표계 'x, y, z', 프로브 좌표계 'X, Y, Z' 및 센서 좌표계 'X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi}' 인 세 종류의 좌표계가 일반적으로 정의될 필요가 있다.

실험실 좌표계 'x, y, z' 는 실험실에 고정된 직교좌표계로서 프로브의 설치상태, 센서의 배열 등에 관계없는 절대좌표계이다. 예를 들면 실험장치의 기준축, 수평방향 및 연직방향 등이 택하여진다. 따라서 'x, y, z' 방향의 유속성분을 'u, v, w' 라고 하면, 삼축 열선 프로브의 목적은 이 'u, v, w' 를 구하는 것이다. 프로브 좌표계 'X, Y, Z' 는 프로브에 고정시킨 직교좌표계로, 예를 들면 프로브 스템의 방향, 이것과 수직인 2방향 등이 택하여진다. X의 'x, y, z' 에 대한 방향여현을 'l_x, m_x, n_x', Y와 Z에 대해서도 같은 형태로 'l_y, m_y, n_y', 'l_z, m_z, n_z' 라고 하면 'x, y, z' 로부터 'X, Y, Z' 로의 변환 매트릭스 A 는 식 (1)로 표현되고, 실험실 좌표계 'x, y, z' 는 식 (1)에 의해서 프로브 좌표계 'X, Y, Z' 로 변환된다.

$$A = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x \\ l_y & m_y & n_y \\ l_z & m_z & n_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

A의 역행렬을 A⁻¹라고 쓰면 'X, Y, Z' 로부터 'x, y, z' 로의 변환은 식(3)에 의하여 이행된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

또한 'X, Y, Z' 방향의 유속성분을 'U, V, W' 라고 하면 식 (2), 식 (3)과 같은 형태로 식 (4)와 식 (5)의 관계가 된다.

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (5)$$

변환 매트릭스 A 는 프로브를 실험장치에 설치한 시점에서 결정되는 값이다.

다음으로 그림 1의 센서 좌표계로써 센서 'i'에 고정시킨 직교좌표계 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} ', ' $i=1, 2, 3$ ' 를 정의한다.

이 때, 한 조의 프링은 공간적으로 비틀려져 있는 위치에 있지 않고, 즉 하나의 평면을 구성하는 것으로 하여 이 면을 프링면이라고 부른다. X_{Ti} 를 센서의 축방향, X_{Ni} 를 프링면내에서 센서에 직각방향 그리고 X_{Bi} 를 프링과 센서 양쪽에 직각방향, 결국 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} ' 가 오른나사손 법칙에 따른 좌표계를 구성하는 형태로 택한다. X_{Ti} 의 ' X, Y, Z ' 에 대한 방향여현을 ' $\lambda_{Ti}, \mu_{Ti}, \nu_{Ti}$ ' 그리고 X_{Ni}, X_{Bi} 에 대해서도 같은 형태로 ' $\lambda_{Ni}, \mu_{Ni}, \nu_{Ni}$ ', ' $\lambda_{Bi}, \mu_{Bi}, \nu_{Bi}$ ' 라고 하면 ' X, Y, Z '로부터 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} '로의 변환 매트릭스 B_i 는 식 (6)으로 표현되며, 프로브

$$\begin{bmatrix} \lambda_{Ti} & \mu_{Ti} & \nu_{Ti} \\ \lambda_{Ni} & \mu_{Ni} & \nu_{Ni} \\ \lambda_{Bi} & \mu_{Bi} & \nu_{Bi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

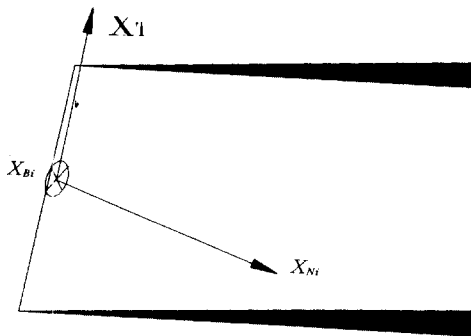


그림 1 센서 좌표계

좌표계 ' X, Y, Z '는 식 (7)에 의해서 센서에 대한 좌표계 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} '로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} X_{Ti} \\ X_{Ni} \\ X_{Bi} \end{bmatrix} = B_i \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

B_i^{-1} 라고 쓰면 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} '로부터 ' X, Y, Z '로의 변환과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = B_i^{-1} \begin{bmatrix} X_{Ti} \\ X_{Ni} \\ X_{Bi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한 ' X_{Ti}, X_{Ni}, X_{Bi} ' 방향의 유속성분을 ' U_{Ti}, U_{Ni}, U_{Bi} '라고 하면 식 (7), 식 (8)과 같은 형태로 식 (9)의 관계가 된다.

$$\begin{bmatrix} U_{Ti} \\ U_{Ni} \\ U_{Bi} \end{bmatrix} = B_i \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = B_i^{-1} \begin{bmatrix} U_{Ti} \\ U_{Ni} \\ U_{Bi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

변환 매트릭스 B_i 는 프로브 본체에 대한 프링, 센서의 설치 상태에 의하여 결정되며 프로브 고유의 정수이다.

2.2 King의 법칙

스텝이나 프링에 의한 간섭효과를 전혀 받지 않는 무한히 긴 가열세선이 유속벡터 IV 의 유동중에 놓여져 있다고 할 때, 이 이상적인 열선으로부터의 발열량 Q 는 열선에 직각인 면내의 속도성분 q 에 의하여 결정되며 식 (11)의 관계가 성립한다. 이것을 King의 법칙이라고 한다.

$$q^n \propto Q \quad (11)$$

q 를 열선의 냉각속도(cooling velocity)라고 하며 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$q^2 = U_N^2 + U_B^2 \quad (12)$$

2.3 Jorgensen의 특성방정식

실제 프로브에서는 그림 2에 보인 바와 같이 프링의 영향 때문에 q 에 대한 U_N , U_B 의 감도가 동일하지 않고 또한 센서의 단말효과 때문에 U_T 도 열선의 냉각에 관여한다. 따라서 식 (12) 대신에 유효냉각속도(effective cooling velocity) q_e 를 식 (13)의 형태로 정의한다.

$$q_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (13)$$

k 와 h 는 U_T 와 U_B 에 대한 감도계수이며 센서직경 d 에 대한 길이 l 이 꽤 큰 경우에는 $k=0$, 프링의 영향을 무시할 수 있을 때에는 $h=1$ 이 된다. 일반적으로는 $k>0$, $h>1$ 이며 l/d (Champagne et al.,⁽¹¹⁾ $|IV|$ (Brunn and Tropea⁽¹²⁾) 및 요각 ϕ 와 피치각 θ (Andreopoulos⁽¹³⁾)의 함수가 된다. 식 (13)을 Jorgensen의 특성방정식이라고 부르며 열선유속계의 기본식이 되고 있다.⁽¹⁴⁾

3축 열선 프로브의 경우에는 각 센서마다 식 (14)가 성립된다.

$$q_{ei}^2 = U_{Ni}^2 + k_i^2 U_{Ti}^2 + h_i^2 U_{Bi}^2 \quad (i=1, 2, 3) \quad (14)$$

식 (14)에 식 (9)를 대입하면 식 (15)가 된다.

$$q_{ei}^2 = (\lambda_{Ni}^2 + k_i^2 \lambda_{Ti}^2 + h_i^2 \lambda_{Bi}^2) U^2 + (\mu_{Ni}^2 + k_i^2 \mu_{Ti}^2 + h_i^2 \mu_{Bi}^2) V^2$$

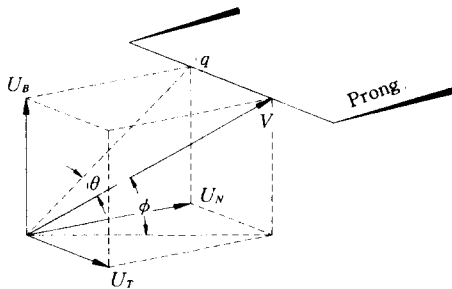


그림 2 프로브 프링과 유속 IV 의 관계

$$\begin{aligned} &+ (\nu_{Ni}^2 + k_i^2 \nu_{Ti}^2 + h_i^2 \nu_{Bi}^2) W^2 \\ &+ 2(\lambda_{Ni} \mu_{Ni} + k_i^2 \lambda_{Ti} \mu_{Ti} + h_i^2 \lambda_{Bi} \mu_{Bi}) UV \\ &+ 2(\mu_{Ni} \nu_{Ni} + k_i^2 \mu_{Ti} \nu_{Ti} + h_i^2 \mu_{Bi} \nu_{Bi}) UV \\ &+ 2(\nu_{Ni} \lambda_{Ni} + k_i^2 \nu_{Ti} \lambda_{Ti} + h_i^2 \nu_{Bi} \lambda_{Bi}) UV \end{aligned} \quad (15)$$

λ , μ , ν 는 정수이므로 k_i , h_i 가 U , V , W 에 의존하지 않는다면 식 (15)는 U , V , W 의 3계 비선형 연립방정식이 되며 q_{ei} ($i=1, 2, 3$)를 측정하면 식 (15)를 풀므로써 U , V , W 가 구해진다. 이것이 삼축 열선 프로브의 기본원리이다.

2.4 정온도형 열선유속계

센서를 브리지의 한 변으로 비평형 전압을 피드백시킴으로써 센서저항, 즉 센서의 온도를 일정하게 유지시킬 때 센서가 소비하는 전력이 열선에서의 방열량 Q 와 같게 된다. 다시 말해서 그림 3과 같이 센서 양단의 전압 (bridge top 전압)을 E , 흐르는 전류를 I , 그리고 센서의 저항을 R 이라고 하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = EI = E^2/R \propto E^2 \quad (16)$$

식 (11)과 식 (16)으로 부터 식 (17)과 식 (18)로 쓸 수 있다.

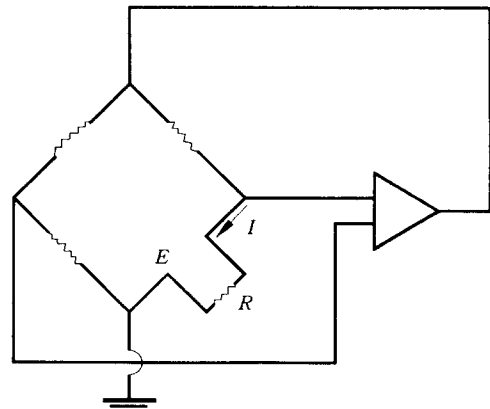


그림 3 정온도형 열선 유속계

$$q^n = AE^2 + B \quad (17)$$

$$E = f(q) \quad (18)$$

따라서 유속의 크기 q 와 방향을 알고, 유동중에 센서를 유동에 대하여 직각으로 놓고 브리지 최대전압 E 를 측정하면 식 (18)의 함수가 구해진다. 이것을 속도검정이라고 한다.

식 (18)은 일반적으로 그림 4에서 보는 바와 같이 곡선관계이지만 적당한 아날로그 회로(linearizer)를 통과시켜 E 를 변환하면 식 (19)가 된다.

$$E_i = 10 q / q_{max} = S q \quad (19)$$

여기서, E_i 은 그림 5와 같이 선형화장치의

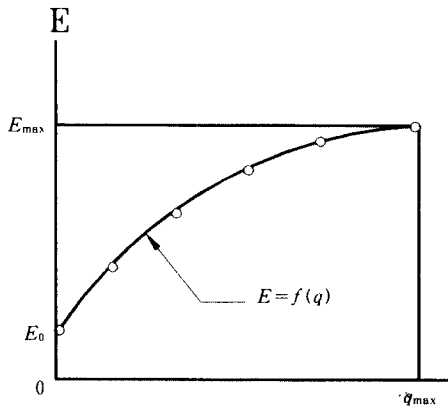


그림 4 정온열선유속계의 출력

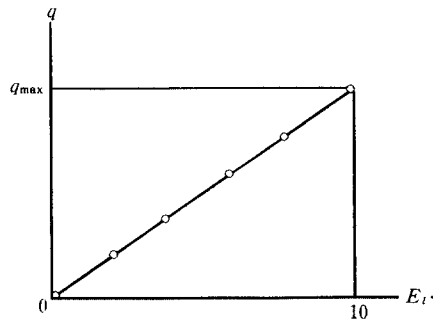


그림 5 선형화장치의 출력

출력이며 q 에 비례한다. q_{max} 는 측정범위내에서의 최대유속이며, $S=10/q_{max}$ 를 이득계수라고 한다. 실제의 측정시에는 센서가 유속방향과 일반적으로 직교하고 있지 않기 때문에 식 (19)의 q 는 식 (13), 식 (14) 또는 식 (15)으로 정의되는 유효냉각속도 q_{ei} 로 치환할 수 있으며 식 (20)이 된다.

$$E_{ei}^2 = S^2 q_{ei}^2 \quad (20)$$

이 때 식 (15)는 식 (21)로 쓸 수 있다.

$$E_{ei}^2 / S^2 = f(B_i, k_i, h_i, U, V, W) \quad (21)$$

2.5 직접법과 간접법

세 개의 센서, 각각에 대하여 B_i, k_i, h_i 를 미리 알아놓고, 측정된 E_{ei}^2 을 식 (21) 또는 식 (15)에 대입하여 U, V, W 에 대해서 풀이하는 방법을 간접법이라 한다. 이것은 몇 가지 레벨이 고려되어진다.

- (1) $k_i=0, h_i=1$ 로 놓는 방법
- (2) k_i, h_i 를 세 개의 센서에 공통인 정수로 하는 방법
- (3) k_i, h_i 를 세 개의 센서마다 다른 정수로 하는 방법
- (4) k_i 를 요각, h_i 를 피치각의 함수로 하는 방법

시판되고 있는 프로브에 대해서는 (2)의 방법이 가장 일반적이지만 측정하려는 각도 범위의 확대나 정밀도의 향상에는 (3), (4)의 방법이 필요하다. (4)의 방법은 k_i, h_i 가 U, V, W 의 함수가 되기 때문에 식 (15)의 해를 구하기 위해서는 반복계산을 요한다.

한편 직접법은 세 개의 센서특성을 각각으로는 인지할 수 없고, 출력 E_i 에서 세 개의 인자(예를 들면 두 개의 각도계수와 하나의 속도계수)를 산출하고 프로브에 대한 유동의 요각과 피치각의 함수로 하여 구한다.

3. 맺음말

열·유체유동 중 난류에 대한 유동현상은 매우 광범위한 영역에서 나타나기 때문에 그 응용성이 매우 크게 작용되어 상업용 설비, 항공기, 자동차, 연소기 및 각종 스포츠 등에 이르기까지 넓게 적용되고 있다. 본 계측법은 특히 기하학적 형상에 좌우되지 않는 범용데이터 처리와 결부시켜 이용하는 것으로서 최근 컴퓨터의 보급이 활발히 정착됨에 따라 보다 정확한 방법으로 난류의 정량적인 자료와 정성적인 난류구조를 계측하기 위하여 컴퓨터와 온라인으로 연결한 열선유속계의 출력을 통계해석에 의해 분석하는 방법이 시도되고 있는 것이다. 끝으로 이 글에서 언급한 삼축 열선 프로브는 프로브의 제작에 대한 고도의 기술과 프로브의 검사체적을 되도록 작게 해야 하는 과제를 안고 있으며, 이러한 문제들은 제작기술의 발달로 점차 해결되고 있으며 적용대상이 크기 때문에 앞으로 많이 이용 될 것으로 기대되는 바이다.

참고문헌

- (1) Laskshimarayana, B., 1982, *TSI Quarterly*, Vol. VIII, Issue 1. pp. 3~13.
- (2) Moffat, R. J., Yavukurt, S. and Crawford, M. E., 1978, *Proc. Dynamic Flow Conf*, Marseille, France, pp. 1013~1035.
- (3) Skinner, G. T. and Raed., W. J., 1984, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 55, No. 6, pp. 578~581.
- (4) Mathiodakis, K. and Breugelmanns, 1985, F. A. E., *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, Vol. 18, pp. 414~419.
- (5) Bulter, T. L. and Wagner, J. W., 1983, *AIAA J.* Vol. 21, No. 5, pp. 726~732.
- (6) Muller, U. R. and Schon, Th., 1987, *Proc. 6th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Toulouse, France, pp. 6-4-1.
- (7) Gracio Fabris, 1978, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 49, No. 5, pp. 645~664.
- (8) Kim, K. H., 1988, 한국항공우주학회지, Vol. 6, No. 2, pp. 1~9.
- (9) Kim, K. H., 1988, 한국정밀공학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 48~62.
- (10) Kim K. H., 외 2인, 1989, 대한기계학회 추계학술대회, pp. 484~487.
- (11) Champagne, F. H., et al, 1967, *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, No. 153.
- (12) Brunn, H. H. and Tropea, C., 1980, Report No. SFB80/M/170, Karlsruhe Univ.
- (13) Andreopoulos, J., 1983, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 54, No. 6, p. 733.
- (14) Jorgensen, F. E., 1971, *DISA Information Report No. 11.* 