

삼직교 열선유속계의 간편한 측정법 개발

김진권* · 강신형**

(1999년 6월 26일 접수)

Development of Easy Measurement Method of Orthogonal Triple-Sensor Hot-Wire Anemometer

Jin-Kwon Kim and Shin-Hyoung Kang

Key Words: Orthogonal Triple-Sensor Hot-Wire Anemometer(삼직교 열선 유속계), Three-Dimensional Flow Measurement(유동측정), Calibration Network(검정그물망)

Abstract

Easy measurement method of orthogonal triple-sensor hot-wire anemometer is developed. Advantages of the new method is that it does not require either the exact orthogonality of the installed wires which cannot be kept during the probe manufacture and repair, nor the knowledge of the wire installation angles and the yaw and pitch coefficient of the wires. The new method introduced yaw and pitch calibration coefficients which are designed to increase monotonically with yaw and pitch angles. So the resulting calibration network is simple to recognize compared with that of the previously suggested calibration method. Verification experiments showed good accuracy and independency of the directional calibration on velocity.

기호설명

- e_i : 열선출력전압 ($i=1,2,3$)
- h_i, k_i : 열선의 요, 피치각 계수 (식 3)
- u, v, w : x, y, z 방향 속도성분
- V_e : 유효속도 (식 1)
- α, β, ϕ : 유동의 요, 피치각, 원추각
- α_i, γ_i : 열선의 설치 요각, 롤각 (Fig. 3)
- f_i, g_i, F, G : 검정계수

하첨자

- N, T, B : 법선, 접선, 이중법선 방향
- α, β : 요, 피치방향
- p, w : 프로브 좌표계, 열선 좌표계

1. 서론

실제 공학적 응용에서 발생하는 유동장은 대부분 복잡한 3차원 유동장이고, 3차원 유동장의 정확한 측정의 중요성은 증가하고 있다. 삼차원 유동장의 정량적인 측정을 위해서는 크게 5공 피토 프로브와 같이 압력측정을 이용하는 방법, 열선 유속계를 이용하는 방법, 레이저 도플러 유속계(LDV)나 입자상 유속계(PIV) 등 광학적 원리를 이용하는 방법 등이 있다. 이들 방법은 나름대로의 장단점을 가지고 있어서, 측정하고자 하는 유동장의 성격에 따라서 가장 적합한 방법을 선택하거나 상호 보완적으로 사용된다.

5공 피토 프로브는 3차원 공간에서의 평균 유동속도와 방향뿐만 아니라 정압까지 동시에 측정할 수 있는 유일한 방법이라는 장점과 한 번의 검정으로 장기간 사용할 수 있다는 편리함을 가지고 있지만, 시간적 변화가 심한 유동의 측정은 불가능하다. 근래에 각광을 받는 LDV나 PIV는 유동장에 프로브를 삽입하지 않아도 된다는 장점

* 회원, 서울대학교 터보동력기계연구센터
E-mail : jk@fluidmachin.com
TEL : (02)874-6852 FAX : (02)889-6205
** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

이 있으나, 산란입자를 충분히 그리고 균일하게 흐르게 하는 데 어려움이 있으므로, 연속적인 신호를 취하는데 약점이 있어, 주파수 분석에서 한계를 가진다. 이에 비해서 열선 유속계는 측정 때 마다 검정실험을 행해야 한다는 단점이 있으나, 응답속도가 빠르고 연속적인 신호를 발생시킨다는 장점이 있어, 5공 피토 프로브나 광학적 방법으로 측정하기 곤란한 많은 고유한 응용분야를 가지고 있다.

열선 유속계를 사용하여 3차원 유동장을 측정하는 방법에는 단일 열선 프로브나 X 형 열선 프로브를 회전시키면서 측정한 1차원 또는 2차원 속도성분들을 조합하여 3차원 유동장을 계산하는 방법과 3차원 열선유속계를 사용하여 한번에 구하는 방법 등이 있다. Mueller⁽¹⁾은 이 방법들을 비교한 결과, 3차원 유동장의 측정에는 삼차원 열선 유속계를 사용하는 방법이 오차가 작다는 것을 보였다. 또한, 빠르게 회전하는 임펠러 날개 등에 동기시켜서 위상평균 유동장을 구하기 위해서는, 3차원 순간속도성분을 동시에 측정할 수 있는 3차원 열선유속계를 사용한 방법이 바람직하다. 뿐만 아니라 3차원 열선유속계를 사용하는 방법은 단일 열선 프로브나 X 형 열선 프로브를 회전시켜서 측정하는 방법에 비해 실험시간을 몇 배 단축시킬 수 있는 장점이 있어 많이 사용되고 있다.

3차원 열선유속계는 측정하고자 하는 유동장의 특성에 따라, 열선의 개수, 열선의 배치 등에서 다양한 형태가 있고, 각 형태마다 고유한 측정법이 존재한다. 통상적으로 가장 많이 사용되는 것은 삼직교 열선(orthogonal triple-sensor hot-wire) 프로브이고, 이를 사용하여 3차원 유동을 측정하는 방법은 여러 가지가 제시되었다. Hyun⁽²⁾은 와이어의 설치 요각 α_i 와 설치 톨각 γ_i 를 이상적인 프로브의 기하학에서 구해지는 값을 공통적으로 사용하고, 요 및 피치각 계수 h_i , k_i 는 가장 널리 알려진 값을 하나로 고정시켜 사용하였다. 이 방법은 간단한 좌표변환에 의해서 3차원 속도 성분이 구해지므로 가장 간편한 방법이지만, 실제로는 프뮴과 열선의 설치 및 유지 상태에 따라 α_i 와 γ_i 가 이상적인 값에서 차이를 보일 수 있고, 열선의 상태에 따라 h_i 와 k_i 가 변하므로, 이상적으로 완벽한 프로브를 사용하지 않는다면 근

본적으로 오차를 예측하기 힘든 방법이다. Lekakis et. al.⁽³⁾은 복잡한 수식의 유도에 의해서 열선마다 다른 α_i , γ_i , h_i , k_i 를 가진 경우에 적용할 수 있는 방법을 개발하였는데, 실제 이들값을 측정하는 것이 간단한 문제가 아니다.⁽⁴⁾ Gieseke와 Guezennec⁽⁵⁾은 α_i , γ_i , h_i , k_i 값의 측정 없이 요, 피치각에 대한 검정실험을 하고, 이 검정데이터를 바탕으로 최소자승법을 사용하여 열선의 반응식을 구하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 넓은 각도범위에서 검정실험을 해야 한다는 단점이 있지만, α_i , γ_i , h_i , k_i 를 직접 측정하지 않고도 사용할 수 있기 때문에, 프로브가 이상적인 상태를 유지할 수 없는 실제 상황에게 가장 적합한 방법이다. 그러나, 최소자승법에 의해서 α_i , γ_i , h_i , k_i 를 임목적으로 내포하는 계수들을 구한 이후에, 구해진 검정그물망이 복잡한 형태를 띠어서 유동의 요각과 열선반응함수의 대응관계를 파악하기 힘들고 실제 측정가능한 각도 범위를 확인하기도 힘들다. 본 연구에서는 5공 피토 프로브에 대한 연구⁽⁶⁾에서 이루어진 경험을 바탕으로 Gieseke와 Guezennec의 연구를 발전시켜 간결하게 유동각과 속도성분을 찾아내는 방법을 개발하였다.

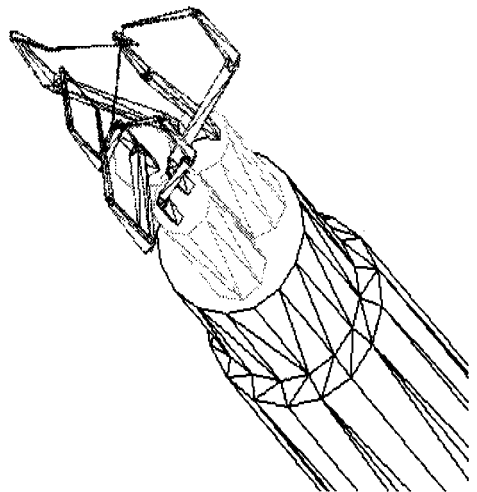


Fig. 1 Orthogonal triple-sensor hot-wire probe (55P912, Dantec)

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 서로 직교하는 세 개의 열선으로 구성된 DANTEC사의 55P912 프로브를 사용하였다. 직경 $5\ \mu\text{m}$, 길이 $3.2\ \text{mm}$ 인 텅스텐 와이어의 양단 $1\ \text{mm}$ 를 직경 $25\text{-}30\ \mu\text{m}$ 가 되도록 도금하여 만든 Wollaston 열선 세 개가 서로 직교하도록 설치되어 있다. Figure 2에서 열선과 나란한 방향을 열선좌표계 x_w, y_w, z_w 로 잡았고, 프로브 중심축을 x_p 축으로 하고 $x_w y_w$ 평면과 $x_p y_p$ 평면이 이면각 (dihedral angle) $\theta=45^\circ$ 를 이루도록 프로브 좌표계 x_p, y_p, z_p 를 잡았다. x_p 축과 각 열선이 $\phi\approx 54.7^\circ$ 의 큰각을 이루기 때문에, 프로브의 중심축에 대해서 약 35.3° 의 큰각 이내에서 유입되는 유동에 대해서 전압신호와 일대일의 대응이 성립하고 유동장 측정이 가능하다.

각 열선은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 프로브 좌표계에 대해서 롤각 γ 와 요각 α 를 가지고 설치된다. 세 열선이 서로 직교하기 위해서는 요각 α_i 는 35.3° 이고, 롤각 γ_i 는 120° 의 간격을 유지해야 한다. 그러나, 프로브의 제작과정이나, 보관, 실험 과정에서 변형의 가능성이 있으며, 열선의 수선과정에서 몇도 정도의 오차가 발생할 수 있다. 삼차원 열선 프로브는 중력에 의한 자연대류의 영향으로 프로브의 물상태에 따라서 영향을 받으므로, 이를 고려해서 측정이 이루어진다. 본 연구에서는 측방향에서 본 형태가 Fig. 4와 같이 되도록하여 모든 측정이 이루어졌다.

삼직교 열선 프로브에서 나온 신호는 세 채널의 Dantec 90C10 정온도유속계 브릿지를 가진 90N10 정온도 열선유속계 시스템에서 증폭, 처리된다. 열선유속계 시스템의 출력전압은 컴퓨터의 DT2838 데이터 처리 보드를 통해서 읽어들이며, 연속모드를 통해서 파일로 저장하거나, 일괄모드를 통해서 메모리에서 데이터 연산과정을 거친다. 삼직교 열선유속계의 검정에 사용된 장치는 김진권과 강신형⁶⁾에서 5공 피토 프로브의 검정에 사용된 풍동과 3차원 유동 검정장치이다. 프로브를 유동방향으로 일치시킨 상태에서 $0\text{-}12\ \text{m/s}$ 로 유속을 변화시키면서 속도검정을 실시하

고, 유속을 $10\ \text{m/s}$ 와 $5\ \text{m/s}$ 로 고정시킨 상태에서 요각과 피치각을 -35° 에서 35° 까지 약 5° 간격으로 변화시키면서 각도검정실험을 실시한 후, 다시 속도검정을 실시하여 재현성을 확인하였다.

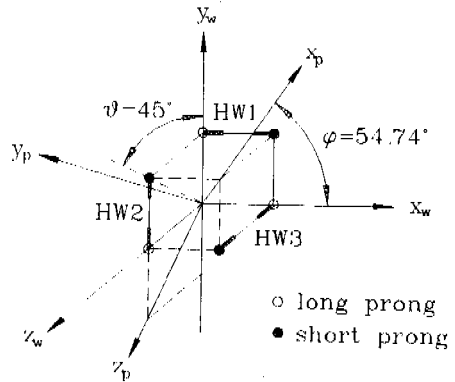


Fig. 2 Configuration of the orthogonal triple-sensor hot-wire probe and coordinate systems

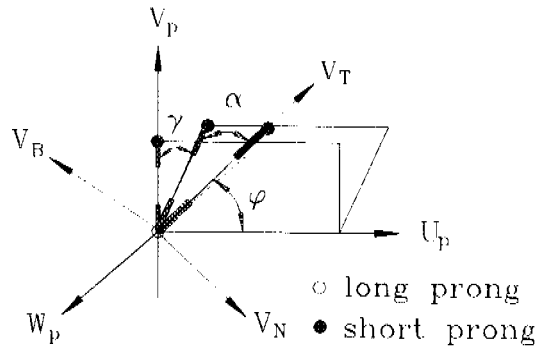


Fig. 3 Definition of wire installation angles and velocity components

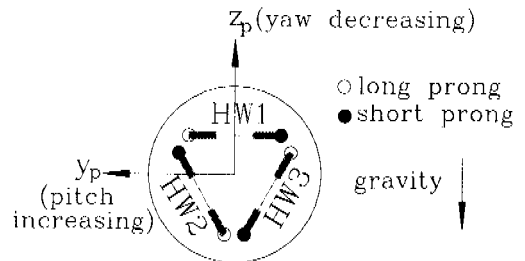


Fig. 4 Relative position of the probe to the gravity

3. 열선설치각 및 열선특성에 무관한 삼직교 열선유속계 측정법 개발

정온도형 열선유속계(CTA)의 기본원리는 열선 유속계의 브리지 출력 e 가 열선의 유효냉각속도 V_e 에 대해서

$$e^2 = A + B \cdot V_e^n \quad (n \approx 0.5) \quad (1)$$

로 알려진 King의 냉각법칙을 만족시킨다는 것이다. 각 열선의 유효냉각속도 $V_{e,i}$ 를 열선유속계의 전압신호 e_i 의 4차 다항식으로

$$V_{e,i} = a_{0,i} + a_{1,i} \cdot e_i + a_{2,i} \cdot e_i^2 + a_{3,i} \cdot e_i^3 + a_{4,i} \cdot e_i^4 \quad (2)$$

와 같이 표현하면, 열선유속계의 전압신호로부터 유효냉각속도를 직접 구할 수 있어 편리하므로, 식 (2)가 많이 사용된다. 이때 열선의 유효냉각속도 V_e 는 Jorgensen⁽⁷⁾ 열선 반응식으로 알려져

$$V_e^2 = V_N^2 + k^2 \cdot V_T^2 + h^2 \cdot V_B^2 \quad (3)$$

의해서 유속의 열선에 대한 수직 (normal) 성분 V_N , 접선 (tangential) 성분 V_T , 이중법선 (bi-normal) 성분 V_B 의 기여를 가장 잘 나타낸다. 여기서 요각계수 $k \approx 0.15$, 피치각계수 $h \approx 1.02$ 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 삼직교 열선 프로브의 i 번째 ($i=1-3$) 열선의 유효냉각속도 $V_{e,i}$ 는 Jorgensen의 열선 반응식에 따라

$$V_{e,i}^2 = V_{N,i}^2 + k_i^2 \cdot V_{T,i}^2 + h_i^2 \cdot V_{B,i}^2 \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

삼직교 열선 프로브에서 열선 설치상황을 나타낸 Fig. 3에서 프로브 좌표계 (x_p, y_p, z_p)에서의 속도성분 (u_p, v_p, w_p)와 i 번째 열선의 수직, 접선, 이중법선방향 속도성분 ($V_{N,i}, V_{T,i}, V_{B,i}$) 사이에는

$$\begin{pmatrix} V_{N,i} \\ V_{T,i} \\ V_{B,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_i & \sin \gamma_i \\ 0 & -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{pmatrix} \quad (5)$$

의 좌표변환 관계가 성립한다. 식 (2)와 식 (5)를 식 (4)의 좌변과 우변에 각각 대입하면, 세 열선에 대해서

$$\begin{aligned} & a_{0,i} + a_{1,i}e_i + a_{2,i}e_i^2 + \dots + a_{8,i}e_i^8 \\ & = u_p^2 + A_{1,i}v_p^2 + A_{2,i}w_p^2 \\ & + A_{3,i}u_pv_p + A_{4,i}v_pw_p + A_{5,i}w_pu_p \end{aligned} \quad (6)$$

와 같은 형태의 식을 얻는데, 여기에서 $\alpha_i, \gamma_i, h_i, k_i$ 등은 각 계수 $a_{n,i}$ 와 $A_{n,i}$ 에 암묵적으로 포함되어 있다. 삼직교 열선프로브의 속도 및 각도 검정실험을 행한 모든 검정 데이터로부터 최소자승법에 의해서 계수 $a_{n,i}$ 와 $A_{n,i}$ 를 구하게 되면, 이 식이 삼차원 열선유속계의 반응식이 된다. 식 (6)의 좌변은 i 번째 열선의 출력전압 e_i 로만 구성되어 있으므로, 이를 유효냉각속도함수 $f_i(e_i)$ 로 정의할 수 있다. 식 (6)의 우변은 프로브 좌표계에서의 속도성분의 이차항으로 이루어져 있으므로, 속도크기 V 의 제곱과 유동방향함수 $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ 로 분리할 수 있다. 따라서 식 (6)은

$$f_i(e_i) = g_i(V, \alpha, \beta) = V^2 \cdot g_{i,n}(\alpha, \beta) \quad (7)$$

와 같은 형태의 식으로 이해할 수 있다.

식 (7)로 표현되는 삼직교 열선유속계 반응식의 다당성을 검토하기 위하여 DANTEC 55P912 삼직교 열선 프로브에 대하여 속도 및 각도 검정 실험을 실시하였다. 요각, 피치각을 0° 에 고정하고 유속을 0에서 12 m/s까지 변화시키면서 속도 검정을 실시하고, 속도를 5 m/s와 10 m/s로 각각 고정시킨 상태에서 요각과 피치각을 측정가능한 원추각 (conical angle) 범위인 $\pm 35^\circ$ 까지 변화시키면서 각도검정 실험을 수행한 후, 다시 속도검정실험을 통해 열선 반응의 재현성을 확인하였다. 속도 및 각도 검정실험 결과로부터 식 (6)의

$a_{k,i}$ 및 $A_{k,i}$ 계수를 최소자승법에 의해서 구하고, 세 열선에 대한 $f_i(e_i)$ 와 $g_i(V, \alpha, \beta)$ 를 Fig. 5에서 비교하였다. 세 열선 모두에 대해서, 전압 신호만으로 계산된 $f_i(e_i)$ 가 유동속도와 유동각만으로부터 계산된 $g_i(V, \alpha, \beta)$ 와 정확히 일치한다. 속도 및 각도 검정실험의 모든 유동상태에 대한 열선의 반응을 식 (6)이 잘 표현하므로,

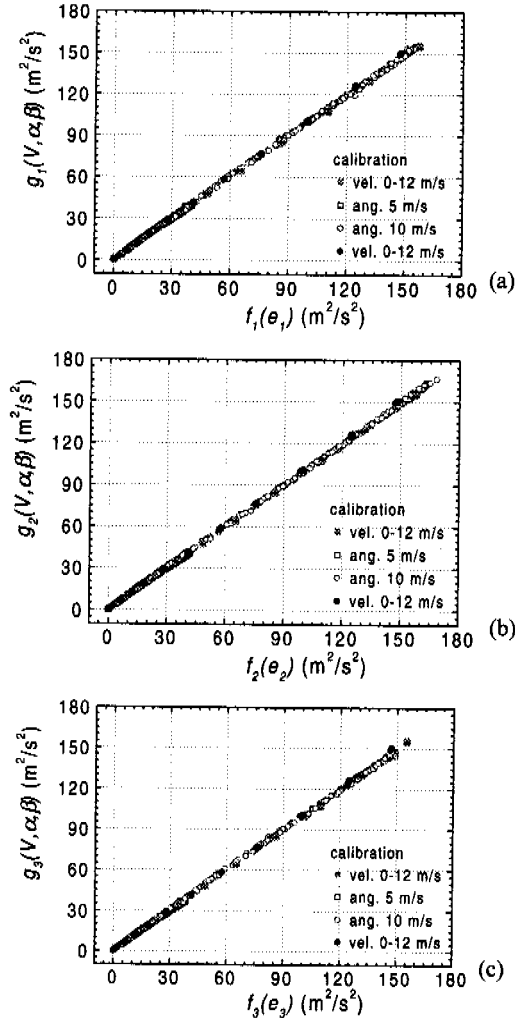


Fig. 5 Verification of equation (6), the response equation for the orthogonal triple-sensor hot-wire probe : comparison of the $f_i(e_i)$, function of wire output and $g_i(V, \alpha, \beta)$, function of flow condition

이 식이 3차원 열선유속계의 반응식으로 적합함을 확인할 수 있다. 식 (6)으로부터

$$u_{p, FIT, i}^2 = a_{0,i} + a_{1,i}e_i + a_{2,i}e_i^2 + \dots + a_{8,i}e_i^8 - (A_{1,i}v_p^2 + A_{2,i}w_p^2 + A_{3,i}u_p v_p + A_{4,i}v_p w_p + A_{5,i}w_p u_p) \quad (8)$$

와 같이 계산되는 피팅식으로 계산되는 $u_{p, FIT, i}$ 와 검정실험에서 설정된 $u_{p, SET}$ 을 Fig. 6에서 비교하였다. 각도검정실험 전후의 두 차례의 속도

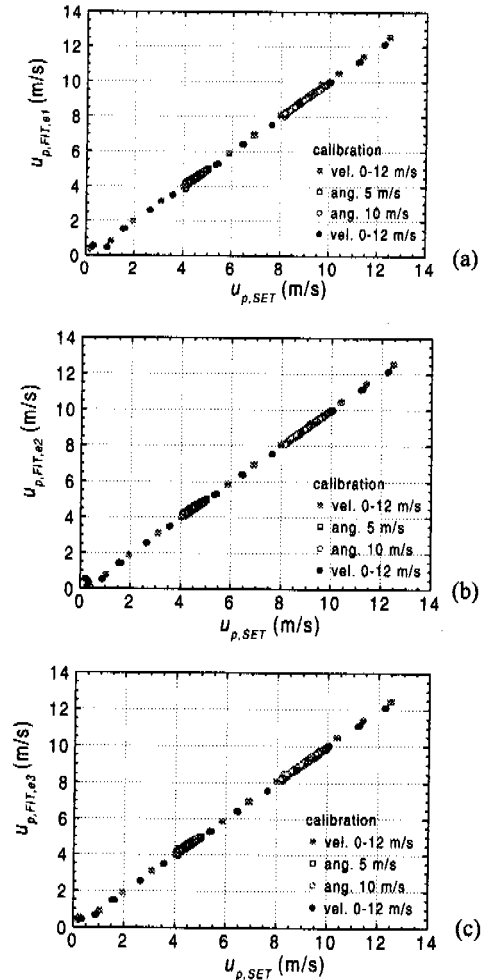


Fig. 6 Verification of equation (8), the orthogonal triple-sensor hot-wire response equation in velocity unit

검정실험 데이터와 속도를 5 m/s, 10 m/s로 고정시킨 상태의 각도 검정실험 데이터가 모두 식 (6)의 열선반응식을 만족시킴을 속도의 크기단위에서 확인할 수 있다. Figure 6에서 두 번의 속도검정과 두 속도에서의 각도 검정 결과들은 95%의 신뢰도로 $\pm 1.8\%$ 이내의 오차로 일치한다.

5공 피토 프로브 측정법⁽⁶⁾에서와 마찬가지로 방법으로 식 (7)의 세 식에서 속도 크기 V 가 소거되고, 좌변의 (e_1, e_2, e_3) 만의 함수와 우변의 (α, β) 만의 함수가 일대일 대응이 되는 함수 관계식을 구할 수 있으면, 이 함수 관계식은 속도에 무관한 삼차원 열선유속계의 검정계수로 사용

할 수 있다. 이와 같이 열선유속계 출력 (e_1, e_2, e_3) 와 유동각 (α, β) 사이를 일대일 대응이 되게 만드는 검정계수를 구하기 위해서는 식 (7)의 $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ 의 거동을 조사할 필요가 있다. 열선 1, 2, 3에 대한 정규화된 방향함수 $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ 의 거동을 Fig. 7에 각각 나타내었다. Figure 7(a)를 보면 Fig. 4에서와 같이 수평으로 설치되어 있는 열선 1의 반응 $g_{1,n}(\alpha, \beta)$ 은 수직으로 변하는 요각 α 의 변화에는 거의 변화가 없고, 수평으로 변화하는 피치각 β 가 감소하여 열선의 수직방향에 가까워 질에 따라 증가함을 알 수 있다. 열선 2는 Fig. 4에서와 같이 요각이 감소하고 피치각이 증가할수록 열선의 수직방향에 가까워지기 때문에, Fig. 7(b)에서 이 방향으로 $g_{2,n}(\alpha, \beta)$ 값은 증가한다. Fig. 7(c)에서 열선 3은 요각과 피치각이 증가함에 따라 $g_{3,n}(\alpha, \beta)$ 이 증가하는 특성을 보인다. 이러한 각 열선의 반응 특성을 이용하고, 시행착오법으로 몇가지 후보를 검토한 끝에 요각계수 $G_a(\alpha, \beta)$ 와 피치각계수

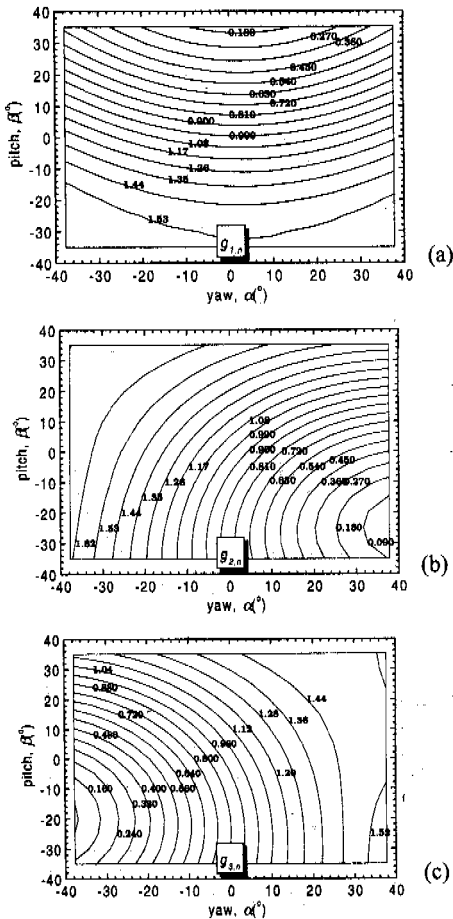


Fig. 7 Variations of the normalized directional functions, $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ with the flow angles at 5 m/s

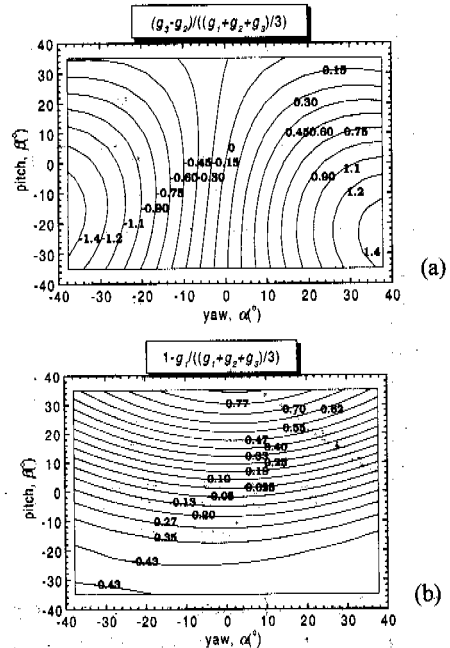


Fig. 8 Variations of the developed (a) yaw and (b) pitch calibration parameters with flow angles at 5 m/s

$G_\beta(\alpha, \beta)$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} G_\alpha(\alpha, \beta) &\equiv \frac{g_3 - g_2}{(g_1 + g_2 + g_3)/3} \\ &= \frac{f_{e,3} - f_{e,2}}{(f_{e1} + f_{e2} + f_{e3})/3} \\ &\equiv F_\alpha(e_i) \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} G_\beta(\alpha, \beta) &\equiv 1 - \frac{g_1}{(g_1 + g_2 + g_3)/3} \\ &= 1 - \frac{f_{e,1}}{(f_{e1} + f_{e2} + f_{e3})/3} \\ &\equiv F_\beta(e_i) \end{aligned} \quad (9b)$$

이들은 속도 V 를 포함하지 않아 속도에 무관하고, Fig. 8(a), (b)에서와 같이 측정가능 콘각 35.2° 이내에서 (α, β) 에 일대일 대응이 되며, 요각계수 $G_\alpha(\alpha, \beta)$ 는 요각 α 의 증가에 따라 단조증가하고, 피치각계수 $G_\beta(\alpha, \beta)$ 는 피치각 β 의 증가에 따라 감소하므로, 이상적인 검정계수가 된다. 이들 무차원화된 방향함수 $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ 와 검정계수 $G_\alpha(\alpha, \beta)$, $G_\beta(\alpha, \beta)$ 는 속도가 달라져도 거의 변화하지 않음을 김진권⁽⁸⁾에서 확인할 수 있다.

이들 검정계수들로부터 작성된 검정그물망을 Fig. 9에 나타내었다. 측정 가능 콘각 35.2° 까지 요, 피치각과 요, 피치계수의 순서쌍이 일대일 대응이 되고, 5 m/s 와 10 m/s 에 대해서 작성된 검정그물망은 차이가 없이 잘 일치한다.⁽⁸⁾ 이 검정그물망은 요각과 피치각이 요계수와 피치계수에 단조증가하므로, 요각과 피치각이 요계수 및 피치계수에 단조증가하지 않아서 복잡한 형태를 띠기 때문에 대응점을 알 수 없는 Gieseke와 Guezennec⁽⁵⁾의 검정법보다 간결하게 검정상태를 확인할 수 있다. 또 이는 검정그물망이 일대일 대응이 되지 않는 부분을 제거하고 내삽할 수 있게 함으로써, 열선유속계의 출력전압의 다항식으로부터 검정영역인지의 확인 없이 단순히 유속과 유동각을 계산함으로써 검정영역 바깥부분을 검정영역내부로 잘못 인식하는 범위를 줄일 수 있게 한다.

실제 측정에서의 속도계산법은 다음과 같다. (e_1, e_2, e_3) 가 측정되면 식 (9)의 우변을 계산할 수 있고, 이 값이 $G_\alpha(\alpha, \beta)$, $G_\beta(\alpha, \beta)$ 를 나타내

므로, 미리 검정된 해든 Fig. 9의 요, 피치각 계수 함수 $G_\alpha(\alpha, \beta)$, $G_\beta(\alpha, \beta)$ 로부터 유동의 요각과 피치각 (α, β) 를 이중보간하여 구한다. 유동각 (α, β) 가 구해지면 식 (7)의 $f_i(e_i)$, $g_{i,n}(\alpha, \beta)$ 를 알 수 있으므로

$$V = \sqrt{\frac{f_i(e_i)}{g_{i,n}(\alpha, \beta)}} \quad (10)$$

의 형태로 유동속도를 계산할 수 있다.

원추각 35° 이내에서 속도와 요각, 피치각을 변동시키면서 340 여 유동조건에서 오차 확인 실험을 수행하였다. 설정된 속도 및 유동각과 측정된 열선유속계 출력전압 (e_1, e_2, e_3) 으로부터 계산된 유속과 유동각은 콘각 35° 내부의 유동에 대해서 95 %의 신뢰도로 속도 1.2%, 요각 3.8°, 피치각 3.7°의 오차범위를 나타내었다. 각도 측정의 오차가 커진 것은 측정한계 원추각인 원추각 35° 에 가까운 부분에서 발생한 큰 오차들의 기여가 크기 때문이다. 측정가능한계를 원추각 30° 이내로 좁히면 95 %의 신뢰도로 속도는 0.98 %, 요각은 1.4°, 피치각은 1.5°의 오차범위를 갖는다.

4. 결론

기존의 삼직교 열선 유속계의 측정법은 방법에 따라, 열선의 엄밀한 직교성과 이상적인 방향 반

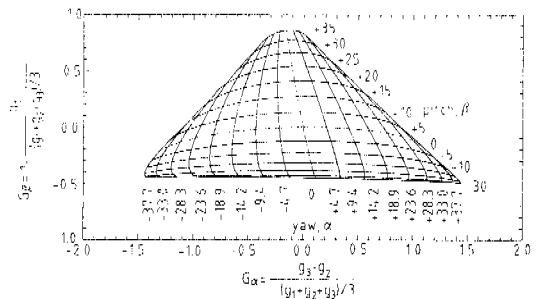


Fig. 9 Calibration network for the orthogonal triple-sensor hot-wire probe, 55P912 at 5 m/s using the developed calibration parameters

응성을 요구 또는 무리하게 가정하는 경우, 열선의 측정각도 및 방향 반응계수의 값을 정확히 측정해야 하는 경우, 아니면 검정그물망이 복잡한 형태를 띠는 등의 문제점이 있었다. 이를 극복하기 위해서 삼직교 열선 유속계의 측정법을 연구하여, 열선이 정확히 직교하지 않는 상황에서도 열선 설치각도, 열선의 요 및 피치방향 반응계수를 측정할 필요가 없는 편리한 측정법을 개발하였다. 개발된 측정법에서는 요, 피치각에 대해서 단조증가하는 요, 피치각 계수를 고안, 도입함으로써, 검정결과로 생기는 검정그물망에서의 각도와 검정계수의 대응관계를 명확히 알 수 있는 장점도 있다. 이 측정법에 대한 확인 실험결과, 검정결과가 유속에 대해서 독립적이고, 우수한 오차범위를 가짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 부분적으로 한국과학재단 및 서울대학교 터보동력기계연구센터의 지원을 받았고 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Mueller, U.R., 1992, "Comparison of Turbulence Measurements with Single, X and Triple Hot-Wire Probes," *Experiments in Fluids* 13, pp. 208~216.
- (2) Hyun, Beom-Soo, 1990, "Measurements in the Flow around a Marine Propeller at the Stern of an Axisymmetric Body," Ph.D. thesis, The University of Iowa.
- (3) Lekakis, I.C., Adrian, R.J. and Jones, B.G., 1989, "Measurement of Velocity Vectors with Orthogonal and Non-orthogonal Triple-Sensor Probes," *Experiments in Fluids*, 7, pp. 228 ~ 240.
- (4) Bruun, H.H., 1995, *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press.
- (5) Gieseke, T.J. and Guezennec, Y.G., 1993, "An Experimental Approach to the Calibration and Use of Triple Hot-Wire Probes," *Experiments in Fluids* 14, pp. 305~315.
- (6) 김진권, 강신형, 1997, "5공프로브의 전 각도 범위 압력계수 지도와 새로운 보정계수," 대한기계학회논문집 (B), 제21권, 제11호, pp. 1437~1448.
- (7) Jorgensen, F.E., 1971, "Directional Sensitivity of Wire and Fibre-film Probes," *DISA information*, No.11, May, 1971, pp. 31~37.
- (8) 김진권, 1998, 전향 스윙 프로펠러 팬의 성능 및 유동 특성, 서울대학교 박사학위 논문, pp. 151~178.
- (1) Mueller, U.R., 1992, "Comparison of Turbulence Measurements with Single, X and Triple Hot-Wire