

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.11.863

# 직선형 5공 압력프로브의 새로운 교정 알고리즘 적용

김 장 권<sup>†</sup> · 오 석 형<sup>\*</sup>

(2008년 8월 4일 접수, 2008년 9월 9일 수정, 2008년 10월 17일 심사완료)

## Application of the New Calibration Algorithm of a Straight-Type Five-Hole Pressure Probe

Jang Kweon Kim and Seok Hyung Oh

**Key Words:** Binary Search(2진탐사), Calibration Map(교정지도), Data Reduction(데이터추출), Five-Hole Pressure Probe(5공압력프로브, FHPP), Geometry Transformation(형상변환), Look-Up(룩업), Non-Nulling(넢널링), Pitch Angle(피치각), Pitch Coefficient(피치계수), Yaw Angle(요각), Yaw Coefficient(요계수)

### Abstract

This paper investigated the new calibration algorithm of a straight-type five-hole pressure probe for measuring three-dimensional flow velocity components. This new calibration algorithm was used for velocity data reduction from the calibration map and based on the combination of a look-up, a binary search algorithm and a geometry transformation including the translation and reflection of nodes in a calibration map. The calibration map was expanded up to the application angle,  $\pm 55^\circ$  of a probe. This velocity data reduction method showed a perfect performance without any kind of interpolating errors in calculating yaw and pitch angles from the calibration map. Moreover, when it was applied to an actual flow field including a swirling flow, a good result came out on the whole.

### 1. 서 론

다공압력프로브는 레이저유속계, 입자영상유속계 및 열선풍속계에 비해 저가형으로 역유동이나 재순환 유동과 같은 유동장내에서도 3차원 평균 속도뿐만 아니라 정압 및 전압까지 동시에 쉽게 측정할 수 있어, 지금까지 다양한 유동장에 걸쳐 널리 사용되고 있다.

일반적으로 프로브를 고정하는 넢널링(non-nulling) 교정방법은 일정한 속도를 갖는 풍동의 균일 분류에서 피치각(pitch angle,  $\alpha$ )과 요각(yaw

angle,  $\beta$ )에 따라 얻어진 압력프로브의 교정지도(calibration map)를 가지고, 실제 유동장으로부터 산출된 요계수(yaw coefficient,  $C_{p_\alpha}$ )와 피치계수(pitch coefficient,  $C_{p_\beta}$ )를 만족하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 교정지도에서 역으로 찾아내는 과정이다.

지금까지 교정지도를 가지고 미지의 유동장에서 측정된 압력들로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하는 교정방법은 대부분이 다양한 형태의 보간법(interpolation method)에 의해 이루어졌다. 특히 Gallington<sup>(1)</sup>은 최초로 2차원 다항식 커브피팅(curve-fit)방법<sup>(2,3)</sup>을 제안하여 교정을 하였으며, Zilliac<sup>(4)</sup>은 직접 보간을 위해 IMSL 서브루틴인 Akima 보간기법을 이용한 룩업표(look-up table)를 사용하였고, Wenger 등<sup>(5)</sup>은 이들 두 방법들을 조합하였으며, Kim 등<sup>(6)</sup>과 Morrison 등<sup>(7)</sup>은 상용 3차원 커브피팅 프로그램인 TableCurve3D를 이용하였다. 또 Rediniotis 등<sup>(8)</sup>은 신경회로망을

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 군산대학교 동력기계시스템공학과  
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr  
TEL : (063)469-1848 FAX : (063)469-1841  
<sup>\*</sup> 군산대학교 기계공학부

이용하였으며, Kjelgaard<sup>(9)</sup>는 포텐셜유동 방정식을 이용하였다. 이 중에서도 프로브 팁(tip) 직경이 0.9 mm인 초소형 7공압력프로브에서 75°의 유동각으로 0.28°의  $\alpha$ ,  $\beta$ 오차와 0.35%의 속도 크기 오차를 예측한 Rediniotis 등<sup>(8)</sup>의 신경회로망 교정방법이 지금까지 발표된 가장 우수한 성능으로 평가된다.

본 연구에서는 직선형 FHPP를 가지고 교정지도로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 정확하게 얻기 위해 기존의 교정방법들과는 전혀 다른 룩업(look-up)기능과 형상변환(geometry transformation) 및 2진탐사 알고리즘(binary search algorithm)을 이용하는 새로운 교정방법을 개발하였다.

이에 따라 본 연구에서는 새로 개발된 교정방법을 간략히 소개하고, 그 성능을 평가하고자 하며, 이를 실제 유동장에 적용한 결과에 대해서도 검토하고자 한다.

## 2. 교정방법 소개

### 2.1 교정지도의 $C_{p\alpha}$ 와 $C_{p\beta}$ 의 정의

넢널링기법의 교정지도를 얻기 위해 사용한  $C_{p\alpha}$ 와  $C_{p\beta}$ 는 각각  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 함수를 만족하며, 각각 식 (1)과 식 (2)로 주어진다.

$$C_{p\alpha}(\alpha, \beta) = \frac{p_1 - p_2}{p_0 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i + p_\sigma} = \frac{C_{p_1} - C_{p_2}}{C_{p_0} - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_{p_i} + C_{p_\sigma}} \quad (1)$$

$$C_{p\beta}(\alpha, \beta) = \frac{p_3 - p_4}{p_0 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i + p_\sigma} = \frac{C_{p_3} - C_{p_4}}{C_{p_0} - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_{p_i} + C_{p_\sigma}} \quad (2)$$

여기서  $p_i$ ,  $C_{p_i}(i = 0 \sim 4)$ 는 FHPP에서 동시에 얻어지는 5개의 압력 및 압력계수들이다. 또, 압력 및 압력계수에 대한 표준편차인 RSS(root-sum-square)는 식 (3)과 식 (4)로 각각 주어진다.

$$p_\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^4 (p_i - \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 p_i)^2} \quad (3)$$

$$C_{p_\sigma} = \frac{p_\sigma}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^4 (C_{p_i} - \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 C_{p_i})^2} \quad (4)$$

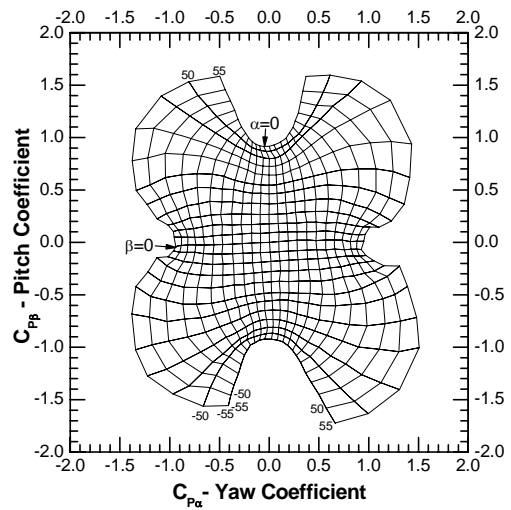


Fig. 1 Calibration map of FHPP

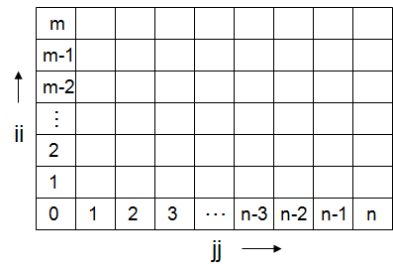


Fig. 2 (m×n) matrix for two-dimensional array

또 정압과 압력계수의 관계식은 식 (5)와 같다.

$$p_i = p_s + C_{p_i}(\alpha, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

참고로, Fig. 1은 유동속도 16.7 m/s에서 얻은 교정지도이다.

본 연구에서는 Treaster 등의 방법<sup>(10)</sup>을 따라 넢널링기법을 적용하였으나, 이 방법은 압력계수인  $C_{p\alpha}$ 와  $C_{p\beta}$ 들의 분모항에 발산을 유발하여 유효 유동각을  $\pm 30^\circ$ 로 한정하게 한다. 그러나 Judd<sup>(11)</sup>는 압력계수의 분모 항에 RSS를 더하여 압력계수의 발산을 방지함으로써 유효 유동각을  $\pm 80^\circ$ 까지 확대하였으나, 이 압력계수가 정압에 의존하게 되어 교정과정에서의 정압과 실제 측정시의 정압이 서로 다르면 사용할 수 없는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 Judd의 방법에서 문제 되는 정압항을 포함하지 않고, 동압에 비례하도록 개량된 RSS를 사용하여 분할영역기법을 적용하지 않고서도 유효 유동각을  $\pm 45^\circ$ 로 넓힌 Kim 등<sup>(12)</sup>의 교정방법을 사용하였다.

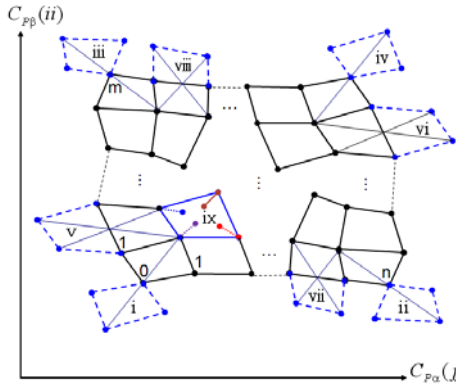


Fig. 3 Case studies of calibration map for determining  $\alpha$  and  $\beta$

2.2 교정지도로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 결정방법

원하는 유동장에서 FHPP로부터 측정된 5개의 압력데이터들은 우선 식 (1)과 식 (2)를 만족하는  $Cp_\alpha$ 와  $Cp_\beta$ 로 연산되는데, 이 값들은 속도와 압성분들을 구하기 위한 각도  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 Fig. 1로부터 구하는데 사용된다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하는 순서를 차례대로 나열해 보자. 먼저 Fig. 1의 교정지도상에서 각 교점(node)들은  $Cp_\alpha$ 와  $Cp_\beta$  및  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 동시에 만족하는 점들이므로, 교정지도상의 각 교점은 좌표( $Cp_\alpha, Cp_\beta$ )로 표현되며, 동시에 좌표( $\alpha, \beta$ )로도 표현될 수 있다. 따라서 교정지도상의 각 교점들의  $Cp_\alpha$ 와  $Cp_\beta$  및  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 정보 값들은 Fig. 2와 같은 두 개의 2차원 배열(array)로 각각 나타낼 수가 있다. 한편, 실험으로 주어진  $Cp_\alpha$ 와  $Cp_\beta$ 를 좌표로 하는 점  $P_{ij}$ 에서 교정지도상의 각 교점들에 순차적으로 그 벡터(vector)의 길이가 최소가 되는 교정지도상의 한 교점을 룩업으로 찾아 그 점을  $P_1(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 이라고 하자. 이때 점  $P_{ij}(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 와 최소길이관계를 갖는 교점  $P_1$ 을 포함한 주변의 교점들을 이용하여 점  $P_{ij}$ 에 근접하는 방법에는 Fig. 3에서와 같이 크게 9가지 경우로 생각해 볼 수 있다. 즉, 교점  $P_1$ 과  $P_{ij}$ 가 교정지도내에 있는 경우(조건 ix)와 교점  $P_1$ 이 교정지도의 바깥 경계선 중 꼭짓점에 있으면서 점  $P_{ij}$ 가 교정지도를 벗어나는 경우(조건 i, ii, iii, iv), 그리고 교점  $P_1$ 이 교정지도의 경계선상에 있으면서 점  $P_{ij}$ 가 교정지도를 벗어나는 경우(조건 v, vi, vii, viii)가 이에 해당된다. 참고로, 본 연구에서는 Fig. 3의 조건 i의 경우에 대해서만 기술하기로 한다. 따라서 Fig. 3의 조건 i를 Fig. 4와 같이 나타내면, 4각형을 구성하는 교점  $P_1$ 을 포함한 주변의 교점들, 즉  $P_2, P_3, P_4$ 를 이용하여 점  $P_{ij}$ 에 근접하기 위해서는 교점  $P_1$ 을 중심으로 형상변환(geometry transformation)시켜 교점  $P_1$

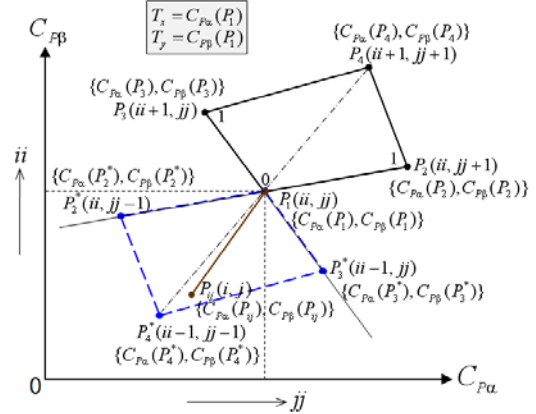


Fig. 4 Case study of the condition i

을 제외한 가상의 나머지 3개 교점들, 즉  $P_2^*, P_3^*, P_4^*$ 를 구해야 한다. 이때 이동(translation)과 반사(reflection)를 포함하는 형상변환을 위해 사용한 수식은 식 (6)과 같다.<sup>(13)</sup>

$$[P^*] = [P][T] = [P] \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2T_x & 2T_y & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{단, } [P^*] = [x^* \ y^* \ 1], [P] = [x \ y \ 1], \\ T_x = Cp_\alpha(P_1), T_y = Cp_\beta(P_1)$$

위와 같은 과정을 통하면, 점  $P_{ij}(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 가 교정지도상의 어느 곳에 있더라도, 이  $P_{ij}$ 를 둘러싸는 4각형의 교점들은 쉽게 결정된다. 따라서 Fig. 5(a)에서와 같이 점  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 가 4각형 내부에 있을 경우  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하는 방법에 대하여 생각해 보자. 본 연구에서는 점  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 가 4각형 내부에서도 어느 쪽 교점에 위치하는가를 먼저 찾기 위해 2진탐사 알고리즘을 사용하였다.

먼저 두 교점들에 의해 주어지는 벡터들, 즉  $\overrightarrow{P_1P_2}, \overrightarrow{P_1P_3}, \overrightarrow{P_2P_4}, \overrightarrow{P_3P_4}$ 의 선형방정식과 기울기들을 구하면 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\overrightarrow{P_iP_j} \Rightarrow y_{ij} = g_{ij}(x - x_i) + y_i, \quad g_{ij} = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (7)$$

단,  $(i, j) = (1, 2), (1, 3), (2, 4), (3, 4)$

$$g_{AB} = \frac{\overline{y_{AB}}}{\overline{x_{AB}}} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{(y_4 - y_3) + (y_2 - y_1)}{(x_4 - x_3) + (x_2 - x_1)}$$

$$g_{CD} = \frac{\overline{y_{CD}}}{\overline{x_{CD}}} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{(y_3 - y_1) + (y_4 - y_2)}{(x_3 - x_1) + (x_4 - x_2)} \quad (8)$$

$$\overrightarrow{P_A P_B} \Rightarrow y_{AB} = g_{AB} \left( x - \frac{x_1 + x_3}{2} \right) + \frac{y_1 + y_3}{2}$$

$$\overrightarrow{P_C P_D} \Rightarrow y_{CD} = g_{CD} \left( x - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2}$$

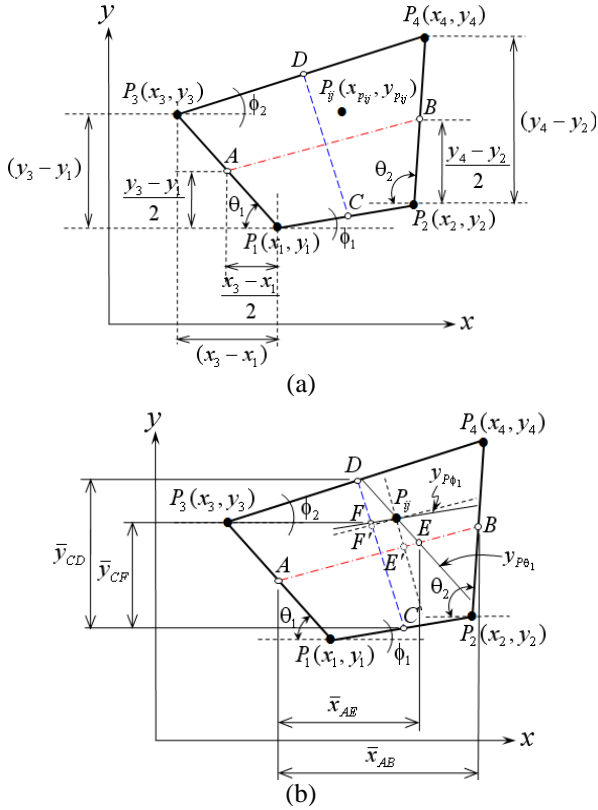


Fig. 5 Relation between  $P_{ij}$  and  $P_i$  forming a quadrangle on the calibration map

여기서 벡터  $\overrightarrow{P_i P_j}$ 를 이용하여 점  $P_{ij}$ 에 근접하기 위해서 마주보는 각 직선의 중점을 연결하는 중심선 벡터  $\overrightarrow{P_A P_B}$ 와  $\overrightarrow{P_C P_D}$ 의 기울기와 선형방정식들은 식 (8)로 주어진다. 또 Fig. 5(b)에서 점  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 를 통과하며, 기준축인 벡터  $\overrightarrow{P_1 P_3}$ 와  $\overrightarrow{P_1 P_2}$ 에 평행한 선형방정식은 식 (9)로 주어진다.

$$\begin{aligned} y_{P\theta_1} &= g_{13}(x - x_{P_{ij}}) + y_{P_{ij}}, & g_{13} &= \tan(\pi - \theta_1) \\ y_{P\alpha_1} &= g_{12}(x - x_{P_{ij}}) + y_{P_{ij}}, & g_{12} &= \tan\alpha_1 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 벡터  $\overrightarrow{P_A P_B}$ 와 직선  $y_{P\theta_1}$ 이 만나는 점  $E$ 에 해당하는 좌표값  $x_E$ 와  $y_E$ 는 식 (8)과 식 (9)로부터  $y_{AB} = y_{P\theta_1}$ 의 관계를 이용하면, 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_E &= \frac{g_{13}x_{P_{ij}} - \frac{g_{AB}(x_1 + x_3)}{2} + \frac{y_1 + y_3}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{13} - g_{AB}} \\ y_E &= g_{13} \left\{ \frac{g_{AB} \left( x_{P_{ij}} - \frac{x_1 + x_3}{2} \right) + \frac{y_1 + y_3}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{13} - g_{AB}} \right\} + y_{P_{ij}} \end{aligned} \quad (10)$$

또 벡터  $\overrightarrow{P_C P_D}$ 와 직선  $y_{P\phi_1}$ 이 만나는 점  $F$ 에 해당하는 좌표값  $x_F$ 와  $y_F$ 는 같은 방법으로  $y_{CD} = y_{P\phi_1}$ 로부터 식 (11)로 주어진다.

$$\begin{aligned} x_F &= \frac{g_{12}x_{P_{ij}} - \frac{g_{CD}(x_1 + x_2)}{2} + \frac{y_1 + y_2}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{12} - g_{CD}} \\ y_F &= g_{12} \left\{ \frac{g_{CD} \left( x_{P_{ij}} - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) + \frac{y_1 + y_2}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{12} - g_{CD}} \right\} + y_{P_{ij}} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 직선  $y_{P\theta_1}$ 와  $y_{P\phi_1}$ 을 점  $P_{ij}$ 를 기준으로 중심선 벡터의 길이에 대응하는 기울기만큼 각각 회전할 경우, 직선  $y_{P\theta_1}$ 이 직선  $\overline{AB}$ 와 만나는 교점을  $E'$ 라고 하고, 직선  $y_{P\phi_1}$ 이 직선  $\overline{CD}$ 와 만나는 교점을  $F'$ 라고 하면, 회전각들은 식 (12)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \angle EP_{ij}E' &= \theta = (\theta_2 - \theta_1) \times \frac{\overline{x_{AE'}}}{\overline{x_{AB}}} \\ \angle FP_{ij}F' &= \phi = (\phi_2 - \phi_1) \times \frac{\overline{y_{CF'}}}{\overline{y_{CD}}} \end{aligned} \quad (12)$$

이때 교점  $E'(x'_1, y'_1)$ 과 교점  $F'(x'_2, y'_2)$ 의 좌표값들은 교점  $E(x_E, y_E)$ 와  $F(x_F, y_F)$ 를 점  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 를 기준으로 위의 회전각들만큼 좌표변환을 하면 각각 식 (13)과 식 (14)로 주어진다.

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_{p_{ij}} + (x_E - x_{p_{ij}})\cos\theta - (y_E - y_{p_{ij}})\sin\theta \\ y'_1 &= y_{p_{ij}} + (x_E - x_{p_{ij}})\sin\theta + (y_E - y_{p_{ij}})\cos\theta \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x'_2 &= x_{p_{ij}} + (x_F - x_{p_{ij}})\cos\phi - (y_F - y_{p_{ij}})\sin\phi \\ y'_2 &= y_{p_{ij}} + (x_F - x_{p_{ij}})\sin\phi + (y_F - y_{p_{ij}})\cos\phi \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 요각  $\alpha$ 는 두 점인  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 와  $E'(x'_1, y'_1)$ 으로 이루는 방정식이 벡터  $\overrightarrow{P_1 P_2}$ 와 만나는 교점의 길이에 비례하는 각으로부터 구해지고, 피치각  $\beta$ 는 두 점  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 와  $F'(x'_2, y'_2)$ 으로 이루는 방정식이 벡터  $\overrightarrow{P_1 P_3}$ 와 만나는 교점의 길이에 비례하는 각으로부터 구해진다.

### 2.3 데이터추출 연산방법

교정지도를 통해 실제 유동장을 만족하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 가지고 얻을 수 있는 속도벡터와 압력 및 3차원 속도성분들은 각각 식 (15), 식 (16), 식 (17)로 주어진다.

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{(p_{i,\max} - p_{i,\min})}{(Cp_{i,\max} - Cp_{i,\min})}} \quad (15)$$

$$p_s = p_{i,max} - C_{p,i,max} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_x &= V \cos \beta \cdot \cos \alpha \\ V_y &= V \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ V_z &= V \sin \beta \end{aligned} \quad (17)$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 직선형 FHPP는 United Sensor사의 USNH-F-172 0346 모델로 그 제원은 Fig. 6과 같다.<sup>(6)</sup> 정압이나 전압을 측정하기 위해서는 정밀도  $\pm 0.25\%$ 를 갖는 압력계(Furness, FC 510)를 사용하였다. 또 FHPP의 압력을 동시에 연속적으로 측정하기 위해서는 최대용량이  $\pm 200 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로 정밀도가  $\pm 0.5\%$ 인 압력계(Furness, FCO332)를 5개 사용하였다. 한편, 교정지도 데이터를 얻기 위해 유속발생장치인 실험장치로는 KSB6311과 AMCA STANDARD 210-85에 의해 만들어진 송풍식 소형 웬테스터(fan tester)와 프로브의 3축방향 이송을 자유롭게 수동으로 조정할 수 있도록  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 조정하는 지그(jig)가 있다. 여기서 Fig. 7은 FHPP로부터 압력프로브를 원하는 위치로 자유롭게 이동시키기 위해 3차원 자동 이송장치(Dantec 41T50 & 41T75)를 RS-232C로 제어하여 압력계측과 속도데이터 연산을 동시에 수행하도록 개발된 전용 계측프로그램으로, Keithley사의 A/D변환카드(KPCI-3101)와 Testpoint (V.4.5) 소프트웨어를 사용하여 개발하였다.

#### 3.2 실험방법

직선형 FHPP의 교정을 위해 사용한 유동속도는  $16.7 \text{ m/s}$ 였다. 참고로, 이 속도는 프로브 팁의 직경을 기준으로 하였을 때, 레이놀즈수로는  $Re \approx 3.384 \times 10^3$ 에 해당한다. 이 유동속도에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 따라 정압과 전압 및 5개의 프로브 압력

들을 측정하였다. 이때 압력프로브의 위치는 소형 웬테스터의 출구에 부착한 직경  $100 \text{ mm}$ 인 원형노즐의 퍼텐셜코어(potential core) 내에 항상 위치하도록 지그를 조정하였다. 교정지도를 얻기 위해 사용한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각  $0^\circ$ 에서  $\pm 55^\circ$ 까지  $5^\circ$  간격으로 변화를 주었으며, 압력들을 읽기 위해 사용한 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 채널당  $10 \text{ kHz}$ , 샘플링 수는 채널당 32,768개였다. 한편, 유동장내의 실내온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약  $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

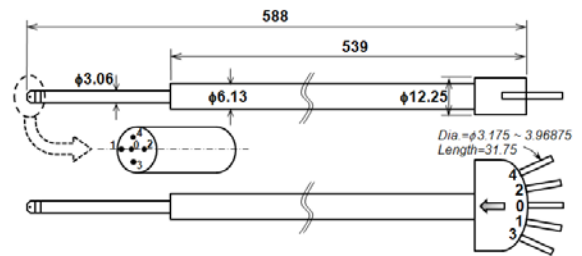


Fig. 6 Straight-type FHPP's geometry

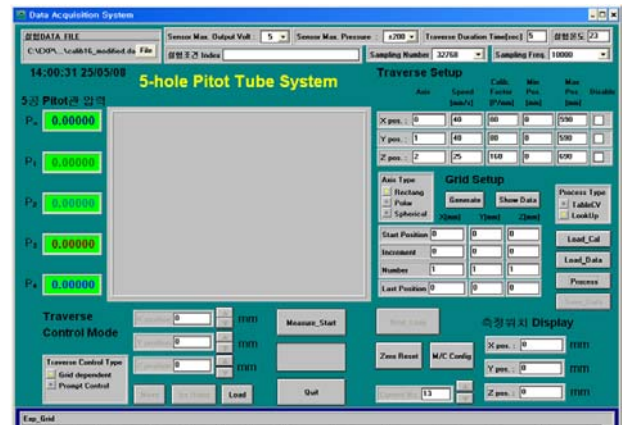


Fig. 7 Data measurement and reduction program using FHPP

Exp.	Specified Angles					Calculation Angles									
	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	CP $\alpha$	CP $\beta$	Yaw	Pitch	CP $\alpha$	CP $\beta$				
0	-55	-55	0.101	-20.3178	-23.9182	-15.7845	-22.2318	8.735	-0.409086352	-1.557482480	-55	-55	-1.204780075	-1.417206102	-0.5
1	-55	-50	0.101	-19.1271	-24.3968	-16	-21.4	10.1815	-0.387568196	-1.457696382	-50	-55	-1.134527973	-1.445443825	-0.5
2	-55	-45	0.101	-17.7557	-24.68	-16.4	-20.37	11.5023	-0.353341242	-1.360120543	-45	-55	-1.053614448	-1.462152816	-0.5
3	-55	-40	0.101	-15.7075	-24.68	-16.8	-19.49	12.534	-0.307895078	-1.251273096	-40	-55	-0.932769268	-1.462152816	-0.5
4	-55	-35	0.101	-14.0436	-24.7541	-17.0914	-18.41	13.2908	-0.281212356	-1.163383230	-35	-55	-0.834598046	-1.466524766	-1.1
5	-55	-30	0.101	-12.0604	-24.68	-17.42	-17.4	14.19	-0.247517232	-1.077006799	-30	-55	-0.717587910	-1.462152816	-1.1
6	-55	-25	0.101	-11.06	-24.68	-17.9	-16.6	14.8637	-0.221589267	-1.028321272	-25	-55	-0.658563635	-1.462152816	-1.1
7	-55	-20	0.101	-9.89	-24.5415	-18.4779	-16.0119	15.29	-0.189656068	-0.979054572	-20	-55	-0.589532847	-1.453981222	-1.1
8	-55	-15	0.101	-9.417	-24.1	-19.4	-15.6	15.66	-0.143824285	-0.956584505	-15	-55	-0.561625528	-1.427932425	-1.1
9	-55	-10	0.101	-8.8625	-23.53	-20.1806	-15.15	15.945	-0.100632520	-0.934247392	-10	-55	-0.528909654	-1.394302041	-1.1
10	-55	-5	0.101	-8.6221	-22.7341	-21.1	-14.8685	15.96	-0.048865795	-0.921889217	-5	-55	-0.514725892	-1.347343404	-1.1
11	-55	0	0.101	-8.2994	-21.3052	-21.9698	-14.9297	15.88	0.0199017443	-0.922610249	0	-55	-0.495686375	-1.263037341	-1.1

Fig. 8 Data reduction results in the program



4. 연산 및 실험결과 고찰

4.1 교정지도로부터 자료추출 시 오차 평가

Fig. 8은 새로운 교정기법의 성능을 평가하기 위해 유동속도 16.7 m/s에서 얻어진 교정지도를 표준 교정지도로 삼아 본 연구의 속도연산프로그램에 반영한 결과이다. 여기서 Fig. 8의 좌편 2, 3번째 칸에 나열된 값들은 각각 FHPP의 교정지도를 얻고자 미리 정해놓은 피치각과 요각을 나타내며, 12, 13번째 칸에 나타난 요각과 피치각은 프로그램을 통해 계산된 결과들이다. 한편, Fig. 8의 좌측으로부터 5번째 칸부터 주어지는 5개의 FHPP의 압력값들을 본 프로그램에 입력하였을 때, 계산결과인  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 교정지도상의 미리 정해진  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 상호 비교한 결과, 오차가 전혀 없는 완벽한 일치율을 보여, 지금까지 개발된 교정기법들 중에서 가장 우수한 성능으로 알려진 0.28°의  $\alpha$ ,  $\beta$  오차를 예측한 Rediniotis 등<sup>(8)</sup>의 신경회로망 교정방법보다도 더 우수함을 확인할 수 있었다.

4.2 실제 유동장에 적용한 결과 분석

Fig. 9는 Gun식 가스버너<sup>(14,15)</sup>에서 버너출구로부터 거리가 X/R=0.641만큼 떨어진 유동장을 FHPP와 X형 열선프로브를 가지고 측정된 X, Y, Z축 방향의 평균속도성분 U, V, W를 버너의 출구속도( $U_e$ )로 각각 무차원화하여 비교한 그림이다. 특히 FHPP로 측정된 결과는 기 발표된<sup>(6)</sup> 3차원커브피팅 프로그램인 "TableCurve3D"의 결과와 본 연구의 새로운 교정 알고리즘을 각각 적용하여 나타내었다. 그 결과 전체적으로는 교정방법에 관계없이 FHPP의 측정결과는 비교적 유사한 분포경향을 보이고 있다.

먼저,  $U/U_e$ 는 약  $Y/R=\pm 1.0$  부근의 슬릿부를 전후로 하는 영역에서는 두 프로브에 의한 평균속도가 가장 큰 크기로서 거의 비슷하게 나타나있다. 그러나 버너 중앙부가 막혀있는  $-0.34 < Y/R < 0.34$ 의 영역에서는 두 프로브에 의한 값들이 비슷한 크기를 나타내며, 스월베인부가 존재하는  $-0.74 < Y/R < -0.32$ 와  $0.32 < Y/R < 0.74$  사이에서는 FHPP의 측정값이 열선프로브의 경우보다 훨씬 더 작은 크기를 보이고 있다. 특히 스월베인의 외주반경에 해당하는 위치에서 그 크기가 현저히 차이 나는데, 이것은 이 위치에서 스월베인의 회전유동에 의한 원심효과가 가장 크게 작용되기 때문에, 그로 인해 열선프로브가 유동의 방향성에 관계없이 그 속도 자체에 영향을 더 많이 받는 결과로 생각할 수 있다. 그 밖의 슬릿부를 벗

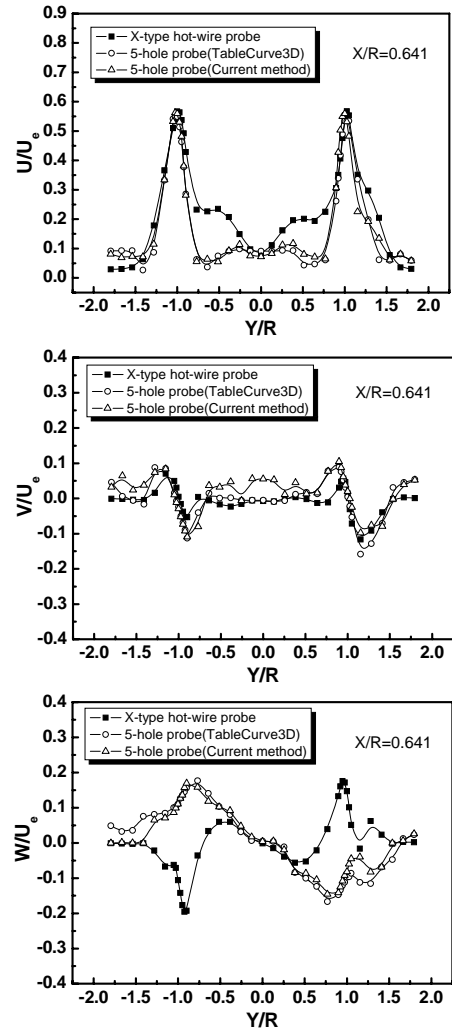


Fig. 9 Comparison results between FHPP and X-type hot-wire probe in a gun-type gas burner

어난 외측영역에서는 외부공기가 주 분류로 유입하려는 Entrainment 효과에 의해서 FHPP의 측정값이 열선프로브의 경우보다 약간 더 큰 크기분포를 보여주고 있다.

한편,  $V/U_e$ 의 경우, 각 프로브에 의한 분포경향은 거의 유사하나, 버너 중심부에서는 본 연구의 교정방법에 의한 값이 그 크기 차이가 매우 작지만 "TableCurve3D"의 결과보다도 약간 더 산만한 분포를 보여주고 있다. 이것은 본 연구의 연산알고리즘이 교정지도를 구성하는 Fig. 5(a)에서의  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 를 만족하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 국부적으로 빠르게 정확히 예측하는 완벽한 분해능을 가졌다지만,  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 를 둘러싸고 있는 국부적인 주변 자료들만을 바탕으로 직접 보간하므로, 순

간적으로 변하는 압력값들에 대응하여 연산결과의 산포를 줄이는 데는 다소 한계가 있음을 보여준다. 반면 "TableCurve3D"의 결과는 교정지도를 2차원 커브피팅으로 보간을 하기 때문에, 순간적으로 변하는 압력값들도 어느 정도 보정하므로 산포가 줄어든 모습을 보여주고 있다. 따라서 본 연구의 기법을 임의의 유동장에 효과적으로 적용하기 위해서는 보다 정확한 교정지도의 추가확보가 가장 중요하다고 본다. 또  $W/U_e$ 는 FHPP의 분포와 Peak크기는 유사하나, 열선프로브의 결과와는 방향성이 서로 일치하지 않음을 보여주고 있어 추가적인 비교 연구가 필요하다고 본다.

## 5. 결론

본 연구에서는 FHPP의 교정지도를 통해 3차원 속도성분들을 추출하기 위해 룩업기능과 형상변환 및 2진탐사 알고리즘을 이용한 새로운 교정기법의 과정을 제시하였으며, 그 알고리즘을 실제 프로그램에 반영하여  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 계산오차들을 분석한 결과,  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 찾아내는 계산속도가 빠르고, 연산오차가 전혀 없는 완벽한 성능을 확인하였다. 그러나 실제 회전유동장에 적용한 결과, 일부영역에서는 각 프로브의 속도감지성능의 차이로 인해 X형 열선프로브에 의한 측정치와는 약간의 차이점과 유사성을 동시에 보여주고 있다. 그러나 본 연산방법은 "TableCurve3D"의 결과와는 매우 유사한 경향을 보이고 있어, 본 교정방법을 적용한 FHPP만으로도 각종 유동장 정보를 파악하는데 충분한 측정기구가 될 수 있다고 판단하지만, 보다 성능을 높이기 위해서는 더 정밀한 교정지도의 추가확보가 필요하다고 본다.

## 후 기

본 논문은 2008년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Gallington, R. W., 1980, "Measurement of Very large Flow Angles with Non-Nulling Seven Hole Probe," *Aeronautics Digest*, USAFA-TR-80-17, pp. 60~88.
- (2) Everett, K. N., Gerner, A. A. and Durston, D. A., 1983, "Seven-Hole Cone Probes for High Angle Flow Measurement : Theory and Calibration," *AIAA J.*, Vol. 21, No. 7, pp. 992~998.
- (3) Gerner, A. A., Maurer, C. L. and Gallington, R. W., 1984, "Non-Nulling Seven-Hole Probes for High-Angle Flow Measurement," *Exp. in Fluids*, Vol. 2, pp. 95~103.
- (4) Zilliac, G. G., 1993, "Modelling, Calibration, and Error Analysis of Seven-Hole Pressure Probes," *Exp. in Fluids*, Vol. 14, pp. 104~120.
- (5) Wenger, C. W. and Devenport, W. J., 1999, "Seven-Hole Pressure Probe Calibration Method Utilizing Look-Up Error Tables," *AIAA J.*, Vol. 37, No. 6, pp. 675~679.
- (6) Kim, J. K., Oh, S. H. and Jeong, K. J., 2006, "Measurement System Development for Three-Dimensional Flow Velocity Components Using Straight-Type Five-Hole Pressure Probe," *J. of the KSPSE*, Vol. 10, No. 4, pp. 56~64.
- (7) Morrison, G. L., Schobeiri, M. T. and Pappu, K. R., 1998, "Five-Hole Pressure Probe Analysis Technique," *Flow Meas. and Inst.*, Vol. 9, pp. 153~158.
- (8) Rediniotis, O. K. and Vijayagopal, R., 1999, "Miniature Multihole Pressure Probes and Their Neural-Network-Based Calibration," *AIAA J.*, Vol. 37, No. 6, pp. 666~674.
- (9) Kjelgaard, S. O., 1988, "Theoretical Derivation and Calibration Technique of a Hemispherical-Tipped Five-Hole Probe," *NASA Technical Memorandum 4047*.
- (10) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Trans.*, Vol. 18, No. 18, pp. 23~34.
- (11) Judd, A. M., 1975, "Calibration of a Five Tube probe for Measuring Wind Speed and Direction," *J. of Physics E : Sci. Inst.*, Vol. 8, pp. 115~116.
- (12) Kim, J. K. and Kang, S. H., 1997, "Full Angle Range Pressure Coefficient Maps of Five-Hole Probe and New Calibration Coefficients," *Trans. of the KSME*, Vol. 21, pp. 1437~1448.
- (13) Anand, V. B., 1996, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers," Wiley Press
- (14) Kim, J. K., 2004, "Experimental Investigation on the Turbulence Augmentation of a Gun-type Gas Burner by Slits and Swirl Vanes," *KSME Int. J.*, Vol. 18, No. 10, pp. 1819~1828.
- (15) Kim, J. K., 2008, "Investigation of the Turbulence Characteristics in the Swirling Flow of a Gun-Type Gas Burner with Two Different Hot-Wire Probes," *J. of Mechanical Sci. and Tech.*, Vol. 22, No. 1, pp. 180~189.