

# 유동속도계측을 위한 5공압력프로브의 새로운 교정 알고리즘 A New Calibration Algorithm of a Five-Hole Pressure Probe for Flow Velocity Measurement

김장권 · 오석형

J. K. Kim and S. H. Oh

(접수일 : 2008년 6월 16일, 수정일 : 2008년 7월 24일, 채택확정 : 2008년 7월 24일)

**Key Words** : Calibration Map(교정지도), Data Reduction(데이터추출), Five-Hole Pressure Probe(5공압력프로브, FHPP), Geometry Transformation(형상변환), Non-Nulling Method(넢널링방법), 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 necessary for calculating three-dimensional flow velocity components. The new data reduction method includes a look-up, a geometry transformation such as the translation and reflection of nodes, and a binary search algorithm. This new calibration map was applied up to the application angle,  $\pm 55^\circ$  of a probe. As a result, this data reduction method showed a perfect performance without any kind of interpolation errors in calculating yaw and pitch angle from the calibration map.

## 1. 서 론

일반적으로 압력프로브는 레이저유속계, 입자영상 유속계 및 열선풍속계에 비해 저가형으로 역유동이나 재순환 유동과 같은 유동장내에서도 3차원 평균속도 뿐만 아니라 정압 및 전압까지를 동시에 용이하게 측정할 수 있어, 지금까지 다양한 유동장에 걸쳐 널리 사용되고 있다.

프로브고정법인 넢널링(non-nulling) 방법에 의한 유동장 계측 시 발생할 수 있는 오차는 크게 교정지도(calibration map)를 얻는 과정에서 발생하는 계측 오차와 실제 유동장에서 측정된 다수의 압력데이터들로부터 계산된 요계수(yaw coefficient,  $C_{p_\alpha}$ )와 피치계수(pitch coefficient,  $C_{p_\beta}$ )를 가지고 교정지도로부터 피치각(pitch angle,  $\alpha$ )과 요각(yaw angle,  $\beta$ )을 찾아내는 과정에서 발생하는 데이터추출(data reduction) 오차로 나누어볼 수 있다. 여기서 계측오차는 사용하는 유동장의 질과 프로브의 크기 및 제작 정도 그리고 압력을 측정하는 계측기의 성능뿐만 아니라 프로브를 정해진  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 얼마나 정교하게 위

치시키는데 따라 개선될 수 있다. 물론 데이터추출 오차도 교정지도에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 잘게 나누어 만들게 되면, 그 오차를 현저히 줄일 수도 있겠지만, 이것은 교정 시 매우 많은 시간이 소요되며, 정교한 각도조정이 필요하게 된다. 또  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 세분화시켜 교정 지도를 확보한다 하더라도, 교정지도로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 찾아내는 연산방법에 따라 그 데이터추출오차는 크게 달라진다.

지금까지 정해진 교정지도를 바탕으로 미지의 유동장으로부터 측정된 압력들을 가지고  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하는 교정방법에는 Gallington<sup>1)</sup>이 최초로 제안했던 2차원 다항식 커브피트(curve-fit)방법<sup>2,3)</sup>과 IMSL서브루틴인 Akima 보간기법을 이용한 Zilliac의 룩업표(look-up table)방법<sup>4)</sup>, 이들 두 방법들을 조합한 Wenger 등<sup>5)</sup>의 방법, 상용 3차원 커브피팅 프로그램인 TableCurve3D를 이용한 Morrison 등<sup>6)</sup>과 Kim 등의 방법<sup>7)</sup>, 신경회로망을 이용한 Rediniotis 등<sup>8)</sup>의 방법, 포텐셜(potential)유동 방정식을 이용한 Kjelgaard의 방법<sup>9)</sup> 등이 있다. 이 중에서도 프로브 팁(tip) 직경이 0.9 mm인 초소형 7공압력프로브에서 75°의 유동각에 대하여 0.28°의 유동각 오차와 0.35%의 속도 크기 오차를 예측한 Rediniotis 등<sup>8)</sup>의 신경회로망 교정기법이 지금까지 발표된 가장 우수한 성능으로 평

김장권(책임저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학전공  
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848  
오석형 : 군산대학교 기계공학부

가된다.

본 연구에서는 직선형 FHPP를 가지고 교정지도로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 정확하게 얻기 위해 기존의 교정기법들과는 전혀 다른 록업(look-up)기능과 형상변환(geometry transformation) 및 2진탐사(binary search) 알고리즘을 이용하는 새로운 교정기법을 적용하였다.

이에 따라 본 연구의 목적은 새로 개발된 교정기법을 간략히 소개하고, 그 성능을 평가하고자 하며, 이를 적용한 유동계측용 프로그램을 개발하는데 있다.

## 2. 교정방법에 대한 이론적 접근

### 2.1 교정지도의 $C_{p\alpha}$ , $C_{p\beta}$ 및 압력계수의 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  $p_i (i=0 \sim 4)$ 와  $C_{p_i} (i=0 \sim 4)$ 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.

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

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

또 정압과 압력계수의 관계식은 식(5)로 주어진다.

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

참고로, Fig. 1은 각각 16.7 m/s와 20.6 m/s에서 얻은 교정지도이다.

본 연구에서는 Treaster 등의 방법<sup>10)</sup>을 따라 넢널링기법을 적용하였으나, 이 방법은 보정계수인  $C_{p\alpha}$ 와  $C_{p\beta}$ 들의 분모항에 발산을 유발하여 유효 윗동각을  $\pm 30^\circ$ 로 한정하게 한다. 그러나 Judd<sup>11)</sup>는 보정계수의 분모항에 RSS를 더하여 보정계수의 발산을 방지함으로써 윗동각을  $\pm 80^\circ$ 까지 확대하였으나, 이 보정계수가 정압에 의존하게 되어 교정과정에서의 정압과 실제 측정시의 정압이 서로 다르면 사용할 수 없는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 Judd의 방법에서 문제되는 정압항을 포함하지 않고, 동압에 비례하도록 개량된 RSS를 사용

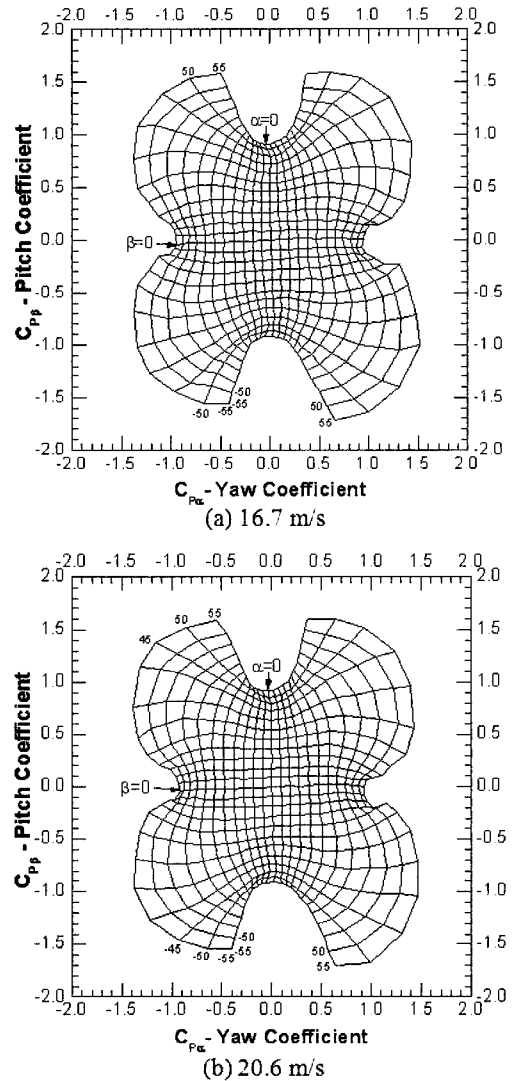


Fig. 1 Calibration map of FHPP



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

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

또 Fig. 3의 조건  $v$ 의 경우에는 Fig. 5에서와 같이 교점  $P_1$ 을 포함한 4각형 주변의 교점들, 즉  $P_2, P_3, P_4$ 를 점  $P_0$ 를 중심으로 형상변환하면, 가상의 교점들인  $P_2^*, P_4^*$ 가 구해진다. 이때 식 (6)을 만족하는 점  $P_0$ 의 좌표는 식 (7)과 같다.

$$T_x = \frac{Cp_\alpha(P_1) + Cp_\alpha(P_3)}{2}$$

$$T_y = \frac{Cp_\beta(P_1) + Cp_\beta(P_3)}{2} \quad (7)$$

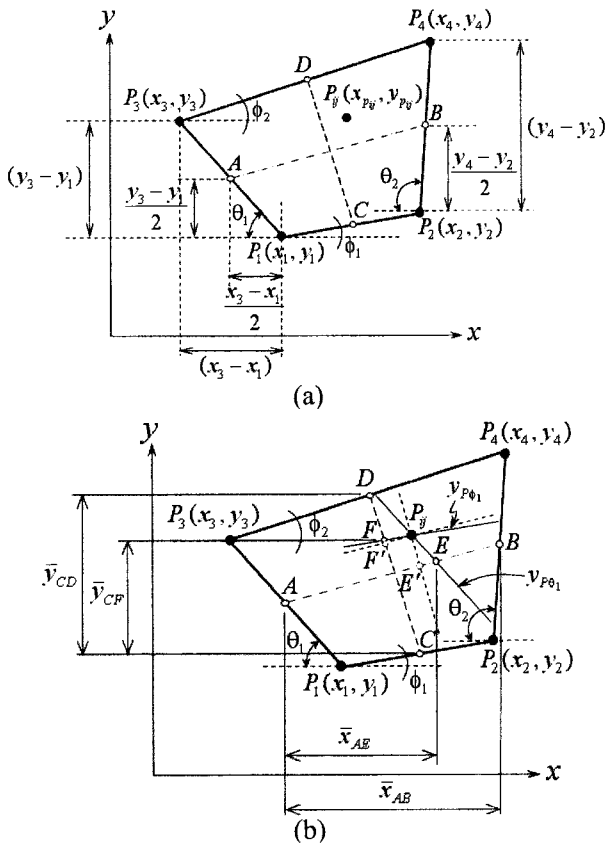


Fig. 6 Relation between  $P_{ij}$  and  $P_i$  forming a quadrangle on the calibration map

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. 6a에서와 같이 점  $P_{ij}(x_{pij}, y_{pij})$ 가 4각형 내부에 있을 경우  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구하는 방법에 대하여 생각해 보자. 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 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\overrightarrow{P_iP_j} \Rightarrow y_{ij} = g_{ij}(x - x_i) + y_i, \quad g_{ij} = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (8)$$

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

여기서는 벡터  $\overrightarrow{P_iP_j}$ 를 이용하여 점  $P_{ij}(x_{pij}, y_{pij})$ 에 근접하기 위해서 2진탐색(binary search)알고리즘을 적용하였다. 즉, 마주보는 각 직선의 중점을 연결하는 중심선 벡터  $\overrightarrow{P_AP_B}$ 와  $\overrightarrow{P_CP_D}$ 의 기울기와 선형방정식들은 식 (9)로 주어진다. 이때 점  $P_{ij}(x_{pij}, y_{pij})$ 는 중심선 벡터  $\overrightarrow{P_AP_B}$ 와  $\overrightarrow{P_CP_D}$ 를 기준으로 볼 때 4각형 내 어느 위치에 속해 있는지를 쉽게 알 수 있다.

한편, Fig. 6b에서와 같이 점  $P_{ij}(x_{pij}, y_{pij})$ 를 통과하며, 기준축인 벡터  $\overrightarrow{P_1P_3}$ 와  $\overrightarrow{P_1P_2}$ 에 평행한 선형방정식은 식 (10)으로 주어진다. 여기서 벡터  $\overrightarrow{P_AP_B}$ 와 직선  $y_{P\theta_1}$ 이 만나는 점  $E$ 에 해당하는 좌표값  $x_E$ 와  $y_E$ 는 식 (9)와 식 (10)으로부터  $y_{AB} = y_{P\theta_1}$ 의 관계를 이용하면, 식 (11)로 나타낼 수 있다.

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

$$g_{CD} = \frac{\overline{y_{CD}}}{\overline{x_{CD}}} = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \frac{(y_3 - y_1) + (y_4 - y_2)}{(x_3 - x_1) + (x_4 - x_2)} \quad (9)$$

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

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

$$y_{P\theta_1} = g_{13}(x - x_{P_{ij}}) + y_{P_{ij}}, \quad g_{13} = \tan(\pi - \theta_1)$$

$$y_{P\alpha_1} = g_{12}(x - x_{P_{ij}}) + y_{P_{ij}}, \quad g_{12} = \tan\alpha_1 \quad (10)$$

$$x_E = \frac{g_{13}x_{P_{ij}} - \frac{g_{AB}(x_1 + x_3)}{2} + \frac{y_1 + y_3}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{13} - g_{AB}}$$

$$y_E = g_{13} \left\{ \frac{g_{AB} \left( x_{P_{ij}} - \frac{x_1 + x_3}{2} \right) + \frac{y_1 + y_3}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{13} - g_{AB}} \right\} + y_{P_{ij}} \quad (11)$$

또 벡터  $\overrightarrow{P_CP_D}$ 와 직선  $y_{P\phi_1}$ 이 만나는 점  $F$ 에 해

당하는 좌표값  $x_F$ 와  $y_F$ 는 같은 방법으로  $y_{CD} = y_{P\phi_1}$ 로부터 식 (12)로 주어진다.

$$x_F = \frac{g_{12}x_{P_{ij}} - \frac{g_{CD}(x_1 + x_2)}{2} + \frac{y_1 + y_2}{2} - y_{P_{ij}}}{g_{12} - g_{CD}}$$

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

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 (13)으로 주어진다.

$$\angle EP_{ij}E' = \theta = (\theta_2 - \theta_1) \times \frac{\overline{x_{AE'}}}{\overline{x_{AB}}}$$

$$\angle FP_{ij}F' = \phi = (\phi_2 - \phi_1) \times \frac{\overline{y_{CF'}}}{\overline{y_{CD}}} \quad (13)$$

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 회전각들을 이용하여 좌표변환을 하면 각각 식 (14)와 식 (15)로 주어진다.

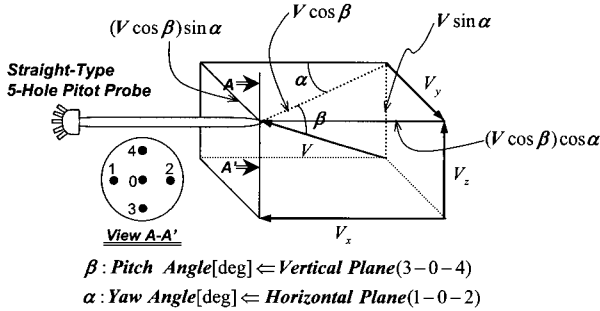


Fig. 7 Velocity decomposition of FHPP

$$x'_1 = x_{p_{ij}} + (x_E - x_{p_{ij}})\cos\theta - (y_E - y_{p_{ij}})\sin\theta$$

$$y'_1 = y_{p_{ij}} + (x_E - x_{p_{ij}})\sin\theta + (y_E - y_{p_{ij}})\cos\theta \quad (14)$$

$$x'_2 = x_{p_{ij}} + (x_F - x_{p_{ij}})\cos\phi - (y_F - y_{p_{ij}})\sin\phi$$

$$y'_2 = y_{p_{ij}} + (x_F - x_{p_{ij}})\sin\phi + (y_F - y_{p_{ij}})\cos\phi \quad (15)$$

따라서 요각  $\alpha$ 는 두 점인  $P_{ij}(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}})$ 와  $E'(x'_1, y'_1)$ 으로 이루는 방정식이 벡터  $\overline{P_1P_2}$ 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 이루

는 방정식이 벡터  $\overline{P_1P_3}$ 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(16), 식(17), 식(18)로 주어진다. 여기서 Fig. 7은 FHPP에 대한 속도벡터를  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 따라 분해한 3차원속도성분들을 나타내고 있다.

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{(p_{i,max} - p_{i,min})}{(Cp_{i,max} - Cp_{i,min})}} \quad (16)$$

$$p_s = p_{i,max} - Cp_{i,max} \cdot \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (17)$$

$$V_x = V \cos\beta \cdot \cos\alpha$$

$$V_y = V \cos\beta \cdot \sin\alpha$$

$$V_z = V \sin\beta \quad (18)$$

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 직선형 FHPP(United Sensor Corp., USNH-F-172 0346)의 제원은 Fig. 8과 같다.<sup>7)</sup> 정압이나 전압을 측정하기 위해 사용한 압력계(Furness, FC510)는 매우 낮은 차압에서도 정밀측정이 가능한 정밀도  $\pm 0.25\%$ 를 갖는다. 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. 교정지도 데이터를 얻기 위한 실험장치로는 KSB6311과 AMCA STANDARD 210-85에 의해 만들어진 송풍식 소형 팬테스터와 프로브의 3축 방향 이송을 자유롭게 수동으로 조절할 수 있도록  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 조정하는 지그(jig)가 있다. FHPP로부터 압력측정을 위해서는 A/D

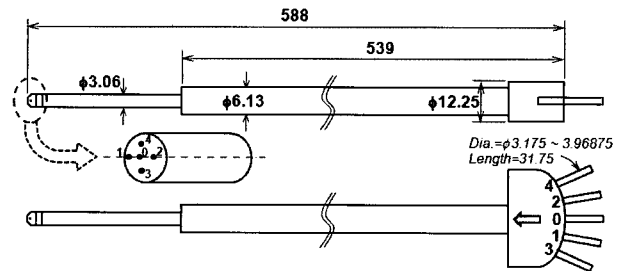


Fig. 8 Straight-type FHPP

변환카드(Keithley, KPCI-3101)가 내장된 컴퓨터(P4, Windows XP)를 사용하였으며, 계측과정 및 데이터 연산을 수행하도록 개발된 전용 계측프로그램인 Fig. 9는 Testpoint(Keithley, V.4.5)를 사용하여 개발하였다.

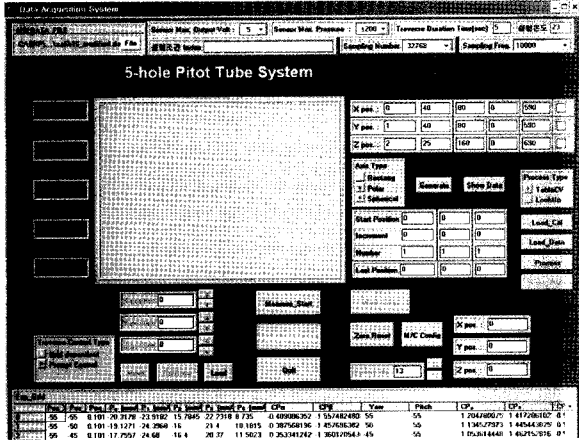


Fig. 9 Data measurement and reduction program using FHPP

3.2 실험방법

직선형 FHPP의 교정을 위해 본 연구에서 사용한 유동속도는  $16.7 \text{ m/s}$  ( $Re \approx 3.384 \times 10^3$ )와  $20.6 \text{ m/s}$

( $Re \approx 4.175 \times 10^3$ )였으며, 각각의 유동속도에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 에 따라 정압과 전압 및 5개의 프로브 압력들을 측정하였다. 이때 압력프로브의 위치는 소형 환테스터의 출구에 부착한 직경  $100 \text{ mm}$ 인 원형노즐의 퍼텐셜코어(potential core) 내에 항상 위치하도록 지그를 조정하였다. 교정지도를 얻기 위해 사용한 요각과 피치각은 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.

4. 연산결과 및 고찰

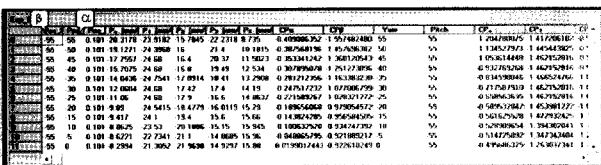
본 연구에서 개발한 새로운 교정기법의 성능을 평가하기 위해 교정지도로부터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 추출 시 오차 평가에 사용한 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 유동속도  $16.7 \text{ m/s}$ 와  $20.6 \text{ m/s}$ 에서 얻어진 Fig. 1과 같은 각각의 교정지도에 동일한 교정지도를 만족하는 5개의 압력값들을 각각 입력하였을 때, 새로운 교정기법으로부터 얻어진  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 교정지도상의  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 상호 비교하는 과정에서 발생하는 성능오차를 평가하는 방법이며[Fig. 10(a)와 (b)참조], 두 번째는 각 유동속도에서 얻어진 교정지도에서 서로 다른 교정지도를 만족하는 5개의 압력값들을 각각 입력하였을 때,  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 상호 비교하여 오차를 평가하는 방법[Fig. 10(c)와 (d)참조]이다. 여기서 전자는 새로운 교정기법에 대한 정확성을 판단할 수 있으며, 후자는 레이놀즈수( $Re$ )에 따른 압력프로브의 성능 영향을 보여준다.

Fig. 10(a) 및 10(b)에서와 같이 본 교정기법에 대한  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 연산결과는 각 유동속도에서 주어진  $\alpha, \beta$ 와 모두 완벽하게 일치하여 지금까지 개발된 교정기법들 중에서 가장 우수한 성능임을 알 수 있다.

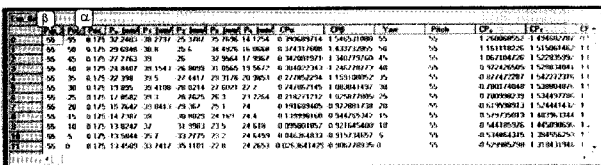
Table 1 The error analysis results of FHPP

$(P_{i(16.7)} \Rightarrow Calmap_{(20.6)})$

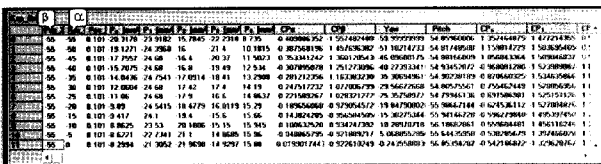
$\alpha, \beta$	요각 $\alpha(^{\circ})$	피치각 $\beta(^{\circ})$	속도 $V(\%)$	정압(%)	
				$p_s / \frac{1}{2} \rho V^2$	
$\pm 55^\circ$	Min	-5	-5	-15.4	-3.4
	Max	8.4	5	10.5	1.72
$\pm 45^\circ$	Min	-1.84	-3.66	-6.4	-0.64
	Max	5.55	4.48	6.36	0.62



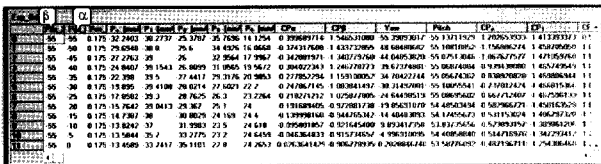
(a)  $p_{i(16.7)} \Rightarrow Calmap_{(16.7)}$



(b)  $p_{i(20.6)} \Rightarrow Calmap_{(20.6)}$



(c)  $p_{i(16.7)} \Rightarrow Calmap_{(20.6)}$



(d)  $p_{i(20.6)} \Rightarrow Calmap_{(16.7)}$

Fig. 10 Data reduction results in the program

Table 2 The error analysis results of FHPP

$$(p_{i(20.6)} \Rightarrow Calmap_{(16.7)})$$

$\alpha, \beta$		요각 $\alpha(^{\circ})$	피치각 $\beta(^{\circ})$	속도 $V(\%)$	정압(%) $p_s / \frac{1}{2} \rho V^2$
$\pm 55^{\circ}$	Min	-5	-4.58	-11.2	-1.3
	Max	5	6.73	5.33	0.41
$\pm 45^{\circ}$	Min	-3.94	-3.4	-11.2	-0.41
	Max	4.27	6.73	1.5	0.3

한편, Fig. 10(c) 및 10(d)에서는 서로 다른 유동속도에서 연산된 결과들로서, 그 오차 값들은 Table 1 및 2와 같다. 여기서 FHPP의  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 적용각도범위가  $\pm 45^{\circ}$ 일 경우가  $\pm 55^{\circ}$ 보다 다소 양호한 오차해석 결과를 보여준다. 그러나 적용각도 범위가  $\pm 45^{\circ}$ 로 낮아지더라도  $\alpha$ 와  $\beta$  및 속도의 오차는 상당히 큰 값들을 나타내고 있다. 이것은 유동속도가 서로 다른 상태에서 얻어진 프로브의 압력값들이므로, 속도차이로 인해 발생하는 프로브의 흔들림 등이 서로 반영된 결과로 해석된다. 이 결과는 두 속도의 교정지도를 서로 중첩시켜 나타낸 Fig. 11에서도 서로 완벽히 일치하지 않는다는 것을 알 수 있는데, 실제로 본 압력프로브는 긴 길이로 인해 교정시 유동속도  $16.7 \text{ m/s}$ 에서 보다는  $20.6 \text{ m/s}$ 에서 상대적으로 더 흔들림이 컸었다. 따라서 실제 유동장을 측정 시에는 측정하고자 하는 유동속도와 유사한 속도에서 얻은 압력프로브의 교정지도를 사용하고, 흔들림을 최대한 방지해서 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

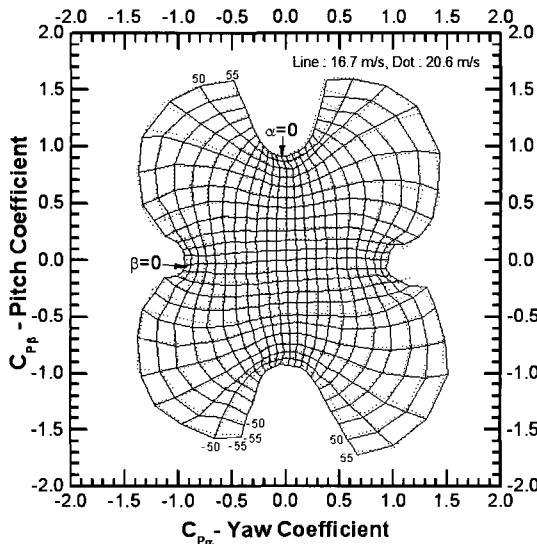


Fig. 11 Comparison of two calibration maps

## 5. 결론

본 연구에서는 FHPP의 교정지도를 통해 3차원속도 성분들을 추출하기 위해 록업기능과 형상변환 및 2진탐사기법을 이용하는 새로운 교정기법의 과정들을 제시하였으며, 이 교정 알고리즘(algorithm)을 실제 프로그램에 반영하여  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 오차들을 분석한 결과, 교정지도를 구하기 위해 사용한 유동속도  $16.7 \text{ m/s}$ 와  $20.6 \text{ m/s}$ 에서 각각 오차가 전혀 없는 완벽한 성능을 보였다. FHPP는 현재의 결과만으로도 유용한 유동장 정보를 파악하는데, 충분한 측정기구가 될 수 있다고 판단한다. 그러나 보다 정밀한 측정기구가 되기 위해서는 프로브의 흔들림이 완전히 배제된 환경조건하에서 그리고 현재보다도 더 정밀도가 높은 압력계를 사용하여 다양한 유동속도에서 교정지도를 확보하는 것이 더 필요하다고 본다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부지원에 의하여 수행되었음.

## 참고 문헌

1. R. W. Gallington, 1980, "Measurement of Very large Flow Angles with Non-Nulling Seven Hole Probe", Aeronautics Digest, USAFA- TR-80-17, pp. 60~88.
2. K. N. Everett, A. A. Gerner and D. A. Durston, 1983, "Seven-Hole Cone Probes for High Angle Flow Measurement : Theory and Calibration", AIAA J., Vol. 21, No. 7, pp. 992~998.
3. A. A. Gerner, C. L. Maurer and R. W. Gallington, 1984, "Non-Nulling Seven-Hole Probes for High-Angle Flow Measurement", Exp. in Fluids, Vol. 2, pp. 95~103.
4. G. G. Ziliac, 1993, "Modelling, Calibration, and Error Analysis of Seven-Hole Pressure Probes", Exp. in Fluids, Vol. 14, pp. 104~120.
5. C. W. Wenger and W. J. Devenport, 1999, "Seven-Hole Pressure Probe Calibration Method Utilizing Look-Up Error Tables", AIAA J., Vol. 37, No. 6, pp. 675~679.
6. G. L. Morrison, M. T. Schobeiri and K. R.

- Pappu, 1998, "Five-Hole Pressure Probe Analysis Technique", Flow Meas. and Inst., Vol. 9, pp. 153~158.
7. J. K. Kim, S. H. Oh and K. J. Jeong, 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.
  8. O. K. Rediniotis and R. Vijayagopal, 1999, "Miniature Multihole Pressure Probes and Their Neural-Network-Based Calibration", AIAA J., Vol. 37, No. 6, pp. 666~674.
  9. S. O. Kjelgaard, 1988, "Theoretical Derivation and Calibration Technique of a Hemispherical-Tipped Five-Hole Probe", NASA Technical Memorandum 4047.
  10. A. L. Treaster and A. M. Yocum, 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes", ISA Trans., Vol. 18, No. 18, pp. 23~34.
  11. A. M. Judd, 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. J. K. Kim and S. H. Kang, 1997, "Full Angle Range Pressure Coefficient Maps of Five-Hole Probe and New Calibration Coefficients", Trans. of the KSME, Vol. 21, pp. 1437~448.
  13. Vera B. Anand, 1996, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers", Wiley Press.