

영역분할과 2차원 커브피팅 함수들을 이용하는 직선형 5공 압력프로브의 성능 평가

The Performance Assessment of a Straight-Type Five-Hole Pressure Probe Using a Zone Partition and Two-Dimensional Curve-Fitting Functions

김장권*† · 오석형**

Jang-Kweon Kim*† and Seok-Hyung Oh**

(접수일 : 2013년 06월 07일, 수정일 : 2013년 11월 11일, 채택확정 : 2013년 11월 12일)

Abstract: This paper introduced the new calibration algorithm of a straight-type five-hole pressure probe necessary for calculating three-dimensional flow velocity components. The new velocity data reduction method using both a commercial two-dimensional curve-fitting program and the zone partition method of a calibration map was firstly introduced in this study. This new calibration method can be applied up to the wide flow angle of $\pm 80^\circ$ despite of using a five-hole pressure probe because this data reduction method showed a comparatively good performance in calculating yaw and pitch angles from the calibration map.

Key Words : Calibration Map, Five-Hole Pressure Probe(FHPP), None-Nulling Method, Pitch Angle, Pitch Coefficient, Two-Dimensional Curve-Fitting, Velocity Data Reduction, Yaw Angle, Yaw Coefficient, Zone Partition Method

1. 서 론

5공 압력프로브(이하 FHPP라고 함)는 비교적 낮은 가격으로 구입할 수 있는 대표적인 다공피토 관으로서 역유동이나 재순환유동 및 스월(swirl)이 동반된 유동장내에서도 3차원 평균속도뿐만 아니라 정압까지 동시에 측정할 수 있어, 지금까지 다양한 유동장에 널리 사용되고 있다.

일반적으로 미지의 유동장을 다공 압력프로브로 측정한 압력들을 요계수(yaw coefficient, C_{p_α})와 피치계수(pitch coefficient, C_{p_β})로 환산한 다음

다공 압력프로브의 교정지도(calibration map)를 이용하여 요각(α)과 피치각(β)을 구하는 교정방법에는 Gallington¹⁾이 최초로 제안했던 2차원 다항식 커브피팅(curve-fitting)방법^{2,3)}과 IMSL서브루틴인 Akima 보간기법을 이용한 Zilliac의 룩업표(look-up table)방법⁴⁾, 이들 두 방법들을 조합한 Wenger 등⁵⁾의 방법, TableCurve3D를 이용한 Morrison 등^{6,7)}과 Kim 등^{7,8)}의 방법, 신경회로망을 이용한 Rediniotis 등⁹⁾의 방법, 포텐셜(potential)유동 방정식을 이용한 Kjelgaard의 방법¹⁰⁾ 등이 있다.

대체적으로 FHPP는 안정적인 속도를 확보하기

*† 김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** 오석형 : 군산대학교 기계공학부

*† Jang-Kweon Kim(corresponding author) : Department of Power System Engineering, Kunsan National University.
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848

** Seok-Hyung Oh : School of Mechanical Engineering, Kunsan National University.

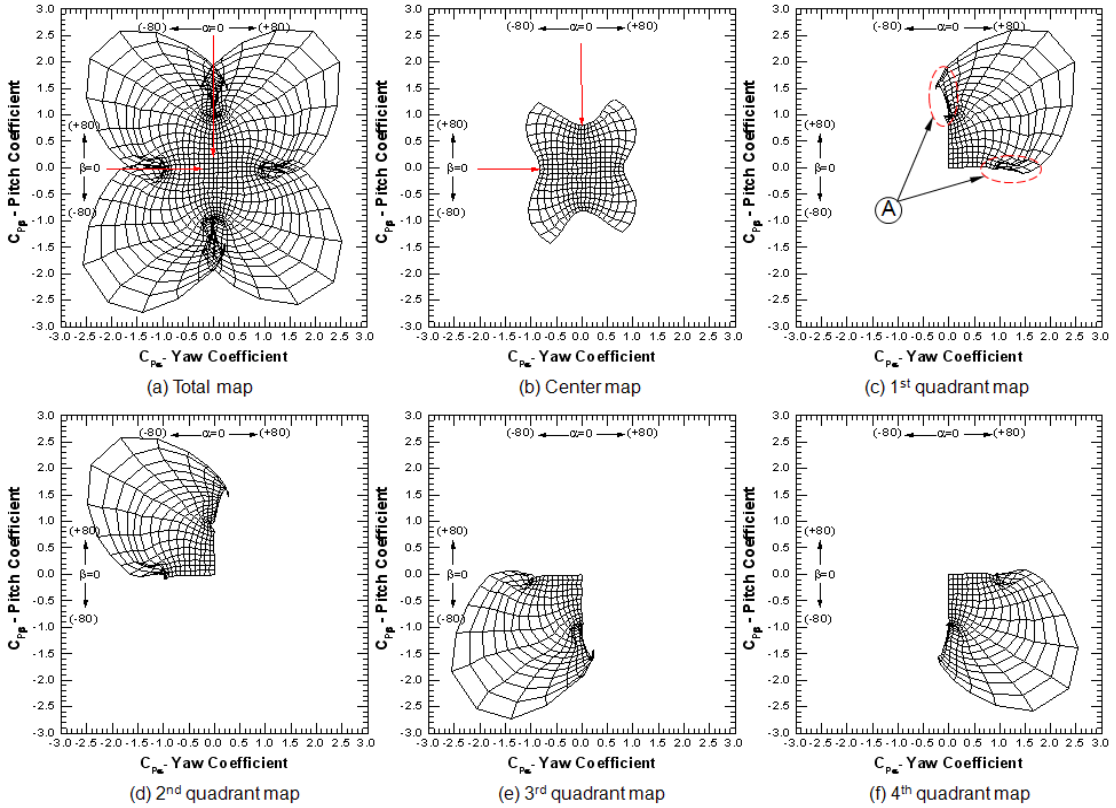


Fig. 1 Calibration maps of a FHPP

위한 유효유동각이 $\pm 45^\circ$ 로 잘 알려져 있다. 따라서 FHPP를 유효유동각이 $\pm 45^\circ$ 보다 크게 나타나는 강한 스월이 동반된 실제 유동장에 적용하기에는 다소 한계가 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 본 저자들은 상용 2차원 키프피팅 프로그램인 TableCurve3D⁷⁾를 이용한 연구결과⁸⁾와 룩업 및 형상변환(geometry transformation)을 사용하는 새로운 교정기법을 연구한 결과¹¹⁾들에 의해 유효유동각을 $\pm 55^\circ$ 까지 확대시킨바가 있다. 그러나 이 각도도 강한 스월이 동반된 실제 유동장에 적용하기에는 여전히 작다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 직선형 FHPP를 사용하면서도 유효유동각을 $\pm 80^\circ$ 까지 확장시킬 수 있는 새로운 교정방법을 제안하고자 한다. 이를 통해 강한 스월이 동반된 유동장에서 측정된 압력으로도 3차원속도성분 등을 정확히 유도해 내는 속도변환 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 교정방법에 대한 이론적 접근

2.1 교정지도의 C_{p_α} , C_{p_β} 및 압력계수의 정의

넢널링(non-nulling)기법을 위한 교정지도를 얻기 위해 사용한 C_{p_α} 와 C_{p_β} 는 각각 α 와 β 의 함수를 만족하며, 측정된 압력들로부터 각각 식 (1)과 식 (2)로 계산된다. 이 식들은 기본적으로 Treaster 등의 방법¹²⁾을 바탕으로 분모항의 발산을 방지하고자 RSS (root-sum-square)항을 추가한 Judd¹³⁾와 Kim 등¹⁴⁾의 교정기법을 적용하였다. 여기서 p_i ($i=0 \sim 4$)와 C_{p_i} ($i=0 \sim 4$)는 FHPP에서 동시에 얻어지는 5개의 압력 및 압력계수들이다.

Table 1 Approximating function lists of each calibration map region⁷⁾

Map region	Angle	r^2	Approximating functions
Center	α	0.99987	Equation 539 ; cosine series bivariate order 10
	β	0.99993	Equation 539 ; cosine series bivariate order 10
1 st quadrant	α	0.99227	Equation 409 ; Chebyshev X, Y bivariate polynomial order 10
	β	0.99713	Equation 524 ; Fourier series bivariate order 2×5
2 nd quadrant	α	0.99159	Equation 409
	β	0.99753	Equation 524
3 rd quadrant	α	0.99591	Equation 409
	β	0.99633	Equation 409
4 th quadrant	α	0.99758	Equation 409
	β	0.99713	Equation 409

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

$$= \frac{Cp_1 - Cp_2}{Cp_0 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Cp_i + Cp_{\sigma}}$$

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

$$= \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_0 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Cp_i + Cp_{\sigma}}$$

또 압력 및 압력계수에 대한 표준편차인 RSS는 식 (3)과 식 (4)로 각각 주어진다.

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

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

또 정압과 압력계수의 관계식은 식 (5)로 주어진다.

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

2.2 교정지도의 확보 및 근사화

Fig. 1(a)는 5°간격으로 ±80°까지 α 와 β 에 따라 식 (1)과 식 (2)로부터 계산된 Cp_{α} 와 Cp_{β} 로 이루어진 교정지도이다. 본 연구에서 제안한 새로운 교정방법은 Fig. 1(a)와 같이 중첩된 영역에서 α 와 β 를 정확히 읽지 못하는 문제점을 해결하고자, 그동안 Babu 등¹²⁾과 Kim 등¹³⁾이 사용한 기존의 영역 분할방법과는 전혀 다른 Fig. 1(b~f)와 같이 α 와 β 가 ±45°이내의 중심부지도영역과 이를 벗어난 1상한, 2상한, 3상한, 4상한으로 지도영역을 각각 분할하였다. 이렇게 되면, 실제 측정된 압력들로부터 얻은 Cp_{α} 와 Cp_{β} 를 가지고 5개 영역의 교정지도들로부터 ±80°까지의 α 와 β 를 모두 읽을 수 있다. 그러나 중심부를 제외한 1상한에서 4상한의 일부에서는 여전히 격자가 겹쳐져 있어 현재와 같은 2차원 교정지도로서는 지금까지 개발된 어떠한 교정 알고리즘으로도 완벽하게 α 와 β 를 모두 읽어낼 수는 없다.

따라서 본 연구에서는 위의 문제점을 해결하고자 TableCurve3D⁷⁾ 프로그램을 사용하여 각 지도영역별로 Cp_{α} 와 Cp_{β} 를 독립변수로 하는 α , β 에 대한 최적의 2차원 교정지도영역들을 나타내는 근사함수들(approximate functions)을 만들었으며, 그 결과들은 Table 1과 같다. 그 외에도 실제압력들에 대한 압력계수인 Cp_0 에서부터 Cp_4 까지의 근사함수들도 중복되는 계산오차들을 줄이고자 Cp_{α} 와

Cp_β 에 대하여 확보하였다. 한편, Table 1에서 r^2 은 커브피팅 통계치의 분산분석⁷⁾에서 우수성 (goodness)을 나타내며, 식 (6)으로 정의한다.

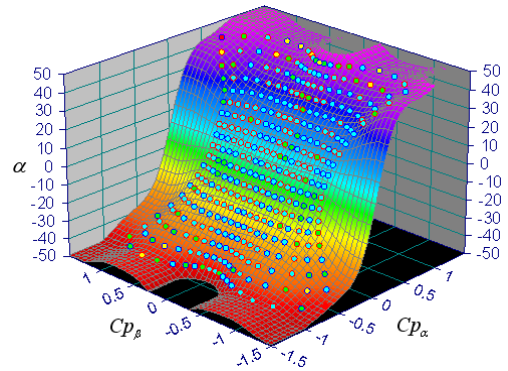
$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

여기서 w_i 는 가중치, y_i 는 y 자료값, \hat{y}_i 는 예측된 y 값, \bar{y} 는 y 값들의 평균, n 은 자료점들의 수를 의미한다. 또한 $r^2 = 1$ 은 오차가 전혀 없는 완벽함을 의미한다.

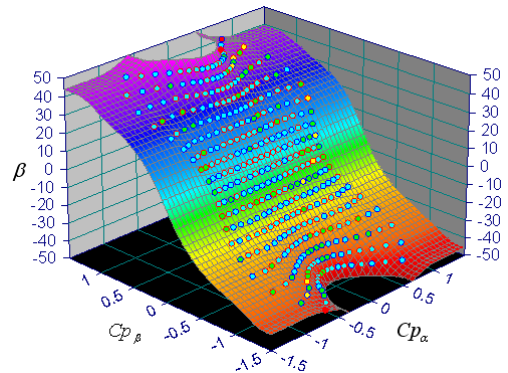
2.3 교정지도의 영역결정방법

Fig. 1의 교정지도로부터 속도와 정압성분들을 구하기 위한 각도 α 와 β 를 찾는 과정은 사람 눈으로 추적할 때는 격자가 겹치지 않는 곳까지는 비교적 쉽게 이루어지나, 이 과정을 컴퓨터를 사용하여 연산을 자동 처리하고자 할 때에는 Fig. 1의 교정지도가 정형화되지 않은 곡선으로 이루어져 있어 단순한 방법으로 Cp_α 와 Cp_β 를 가지고 각도 α 와 β 를 찾기란 결코 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 위의 문제점을 해결하기 위해서 실험으로 주어진 Cp_α 와 Cp_β 가 이미 만들어진 Fig. 1(b)에서 Fig. 1(f)까지 5개의 교정지도영역중 어느 영역에 속하는지를 결정하기 위해서는 룩업기능 및 형상변환을 이용하여 요각과 피치각을 구하는 기 발표된 저자들의 연구결과¹¹⁾의 알고리즘을 사용하였다. 즉, 가장 먼저 수행해야 할 과정은 실험으로 주어진 Cp_α 와 Cp_β 가 만나는 교점이 α 와 β 가 $\pm 45^\circ$ 이내로 경계되는 Fig. 1(b)의 중심부영역내의 교정지도에 존재하는지 또는 벗어나는지를 결정하는 것이다. 이를 위해서는 교정지도상의 각 교점들을 만족하는 Cp_α 와 Cp_β 및 α 와 β 의 정보 값들을 두 개의 2차원 배열(array)로 각각 만든 다음, 실험으로 주어진 Cp_α 와 Cp_β 를 좌표로 하는 교점 $P_{ij}(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 에서 교정지도상의 각 교점들에 순차적으로 그 벡터(vector)의 길이가 최소가 되는 교정지도상의 한 교점을 룩업으로 찾아



(a) Yaw angle(α)



(b) Pitch angle(β)

Fig. 2 Surface curve-fitting curves α and β with the function of Cp_α and Cp_β in the center map (Eqn. 539)⁷⁾

그 점을 $P_1(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 이라고 하고, 점 $P_{ij}(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 와 최소길이의 관계를 갖는 교점 P_1 을 포함한 주변의 3개 교점들을 이용하면 점 $P_{ij}(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 에 일치하는 α 와 β 를 형상변환을 이용하는 알고리즘¹¹⁾에 의해 구할 수 있다. 만약 이 α 와 β 가 $\pm 45^\circ$ 이내에 있으면, Table 1에서 나타낸바와 같이 중심부지도영역에 존재하는 것으로 간주하여 TableCurve3D의 프로그램에 의해 커브피팅한 Fig. 2를 이용하여 다시 α 와 β 를 각각 구할 수도 있다. 여기서 Fig. 2는 각각 $\alpha = f(Cp_\alpha, Cp_\beta)$, $\beta = g(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 로 수식화되며, 그 결과는 C언어 로도 출력이 가능하다.

Table 2 Classification conditions for determinating each calibration map region

Regions	No.	Conditions	Effective angle interval
Center			$-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ $-45^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$
1 st quadrant	1	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta > 0; p_1(-) < p_2(-), p_3(+) > p_4(-)$	$45^\circ < \alpha < 80^\circ$ $45^\circ < \beta < 80^\circ$
	2	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta > 0$	
	3	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta < 0; p_1(+) > p_2(-) > p_4(-) > p_3(-)$	
2 nd quadrant	1	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta > 0; p_3(+) > p_4(-) > p_1(-) > p_2(-)$	$-80^\circ < \alpha < -45^\circ$ $45^\circ < \beta < 80^\circ$
	2	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta > 0$	
	3	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta < 0; p_1(-) < p_2(+), p_3(-) < p_4(-)$	
3 rd quadrant	1	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta < 0; p_4(+) > p_3(-) > p_1(-) > p_2(-)$	$-80^\circ < \alpha < -45^\circ$ $-80^\circ < \beta < -45^\circ$
	2	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta < 0$	
	3	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta > 0; p_2(+) > p_1(-) > p_3(-) > p_4(-)$	
4 th quadrant	1	$Cp_\alpha < 0, Cp_\beta < 0; p_4(+) > p_3(-) > p_2(-) > p_1(-)$	$45^\circ < \alpha < 80^\circ$ $-80^\circ < \beta < -45^\circ$
	2	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta < 0$	
	3	$Cp_\alpha > 0, Cp_\beta > 0; p_1(+) > p_2(-), p_3(-) > p_4(-)$	

한편, 실험으로 주어진 Cp_α 와 Cp_β 가 만나는 교점이 α 와 β 가 $\pm 45^\circ$ 를 벗어나 Fig. 1(c)의 1상한 지도영역에 존재할 경우에는 TableCurve3D의 프로그램에 의해 커브피팅한 Fig. 3을 이용하여 α 와 β 를 쉽게 구하게 된다. 위와 같은 방법으로 하면, α 와 β 가 $\pm 45^\circ$ 를 벗어난 다른 2, 3, 4상한의 지도영역에서도 쉽게 α 와 β 를 구할 수가 있다. 이와 같이 Cp_α 와 Cp_β 가 만나는 교점이 명확하게 교정지도내에 존재한다면, α 와 β 는 두 가지 방법에 의해서 모두 얻을 수가 있다.

그러나 Fig. 1(a)에서 보느냐와 같이 각 상한별 영역이 일부 겹치는 부분에서는 즉, Fig. 1(c)에서 점선 내에 포함된 "A" 영역에서는 룩업과 형상변환에 의한 알고리즘¹¹⁾으로서는 α 와 β 를 정확히 구할 수가 없다. 하지만 이 경우에도 실험으로 주어진 Cp_α 와 Cp_β 가 만나는 교점이 교정지도에서 몇 상한에 속하는지를 정확하게 알 수만 있다면, 각 상한에 만족하는 커브피팅한 함수식들인 $\alpha = f(Cp_\alpha, Cp_\beta)$, $\beta = g(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 로부터 쉽게 구할 수가 있다. 한편, 본 연구에서 교정지도의 영역 결정에 사용한 방법의 조건들은 Table 2로 요약할 수 있었다.

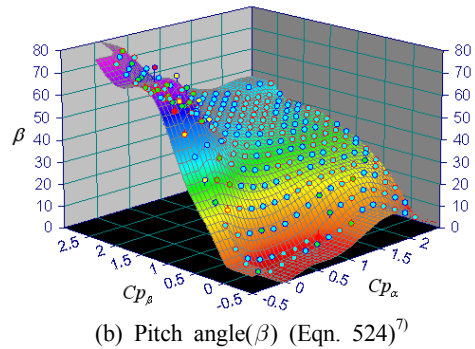
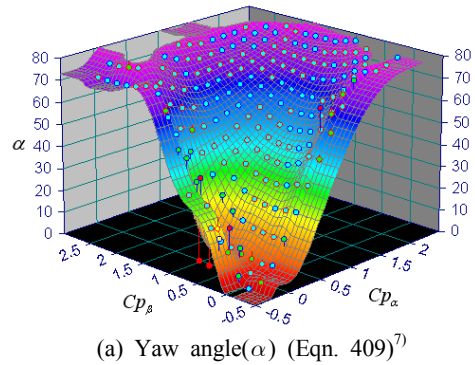


Fig. 3 Surface curve-fitting curves α and β with the function of Cp_α and Cp_β in the 1st quadrant map

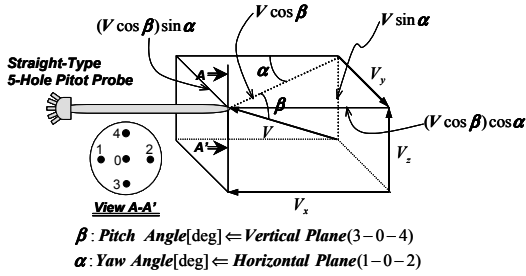


Fig. 4 Velocity decomposition of FHPP

2.4 데이터추출 연산방법

Fig. 1의 교정지도를 통해 실제 유동장을 만족하는 α 와 β 를 가지고 얻을 수 있는 속도벡터와 압력 및 3차원 속도성분들은 각각 식 (7), 식 (8), 식 (9)로 주어진다. 여기서 Fig. 4는 FHPP에 대한 속도벡터를 α 와 β 에 따라 분해한 3차원속도성분들을 나타내고 있다.

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{(p_{i,max} - p_{i,min})}{(Cp_{i,max} - Cp_{i,min})}} \quad (7)$$

$$p_s = p_{i,max} - Cp_{i,max} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_x &= V \cos \beta \cdot \cos \alpha \\ V_y &= V \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ V_z &= V \sin \beta \end{aligned} \quad (9)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 직선형 FHPP(United Sensor Corp., USNH-F-172 0346)의 제원은 Fig. 5와 같다. 정압이나 전압을 측정하기 위해 사용한 압력계(Furness, FC510)는 매우 낮은 차압에서도 정밀측정이 가능한 정밀도 $\pm 0.25\%$ 를 갖는다. 또 5공 압력프로브의 압력을 동시에 연속적으로 측정하기 위해서는 최대용량이 $\pm 199.99 \text{ mmH}_2\text{O}$ 인 압력계(Furness, FCO012)를 5개 사용하였다. 또 송풍을 위한 실험장치로는 KSB 6311과 AMCA STANDARD 210-85에 의해 만들어진 송풍식 소형 팬테스터를 이용하였으며, 압력프로브를 3축 방향

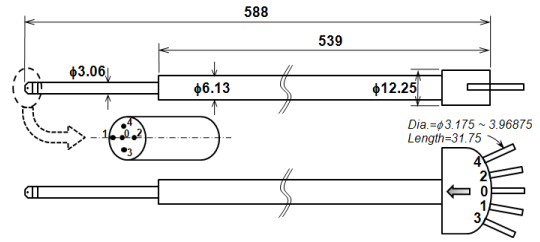


Fig. 5 Geometry of a straight-type FHPP

으로 자유롭게 이동하기 위해서는 α 와 β 를 수동으로 조정할 수 있는 제도판을 응용한 지그(jig)를 사용하였다. FHPP로부터 압력측정을 위해서는 A/D 변환카드(Keithley, KPCI-3101)가 내장된 컴퓨터(P4, Win-XP)를 사용하였으며, 계측과정 및 데이터 연산을 수행하도록 개발된 전용 계측프로그램을 사용하였다.^{8,11)}

3.2 실험방법

직선형 FHPP의 교정을 위해 본 연구에서 사용한 소형 팬테스터의 출구 유동속도는 16.44 m/s 였으며, 이 유동속도에서 α 와 β 에 따라 정압과 전압 및 5개의 프로브 압력들을 측정하였다. 이때 압력프로브의 위치는 소형 팬테스터의 출구에 부착한 직경 100 mm 인 원형노즐의 퍼텐셜코어(potential core) 내에 항상 위치하도록 압력프로브가 장착된 지그를 조정하였다. 교정지도를 얻기 위해 사용한 요각과 피치각은 각각 0° 에서 $\pm 80^\circ$ 까지 5° 간격으로 변화를 주었으며, 압력들을 읽기 위해 사용한 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 채널당 10 kHz , 샘플링 수는 채널당 $32,768$ 개였다.

4. 연산결과 및 고찰

4.1 각 영역별 요각과 피치각의 오차분석

Fig. 6은 α 와 β 가 $\pm 45^\circ$ 이내인 중심부 교정지도 영역에서 Fig. 1(b)의 각도들과 Fig. 2에서와 같이 TableCurve3D로 커브피팅하여 구한 각도들을 서로 뺀 각도오차들을 나타낸 그림이다. 요각인 α 의 경우, -45° 와 45° 에서만 각각 약 -1.5° 와 1.5° 미만의 오차를 보여주며, 또 피치각인 β 역시 -45° 와 45°

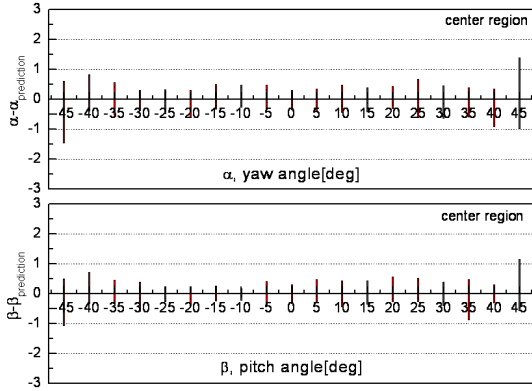


Fig. 6 Error angles in the center map region

에서만 각각 약 -1.0° 와 1.0° 근방의 오차를 보여주고 있다. 그러나 $\pm 45^\circ$ 를 제외한 다른 각도에서는

모두 $\pm 1^\circ$ 보다 더 작은 각도를 보여주고 있어, 근사화된 함수식의 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 그러나 이것은 룩업과 형상변환에 의한 알고리즘으로 얻어진 성능¹⁾보다는 다소 떨어지지만, 유동장 압력들을 측정하고자 하는 각 지점에서 순간적으로 변하는 압력들에 대하여 연산결과와 산포를 줄이는 데는 오히려 효과가 있다고 판단된다.

Fig. 7은 각 상한별로 얻어진 교정지도의 α 와 β 를 커브피팅한 근사함수들로부터 얻어진 α 와 β 를 각각 $\pm 45^\circ$ 각도오차를 각 상한별 유효각도범위에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 나타난 가장 큰 특징은 각 지도영역별로 특정 각도들에서 각도오차가 약 $\pm 2.5^\circ$ 보다 더 큰 피크치가 소수개 존재한다는 것이다. 이것은 두 가지 요인으로 볼 수 있는데, 첫 번째는 교정지도가 해당된 특정 α 와 β 에서 이

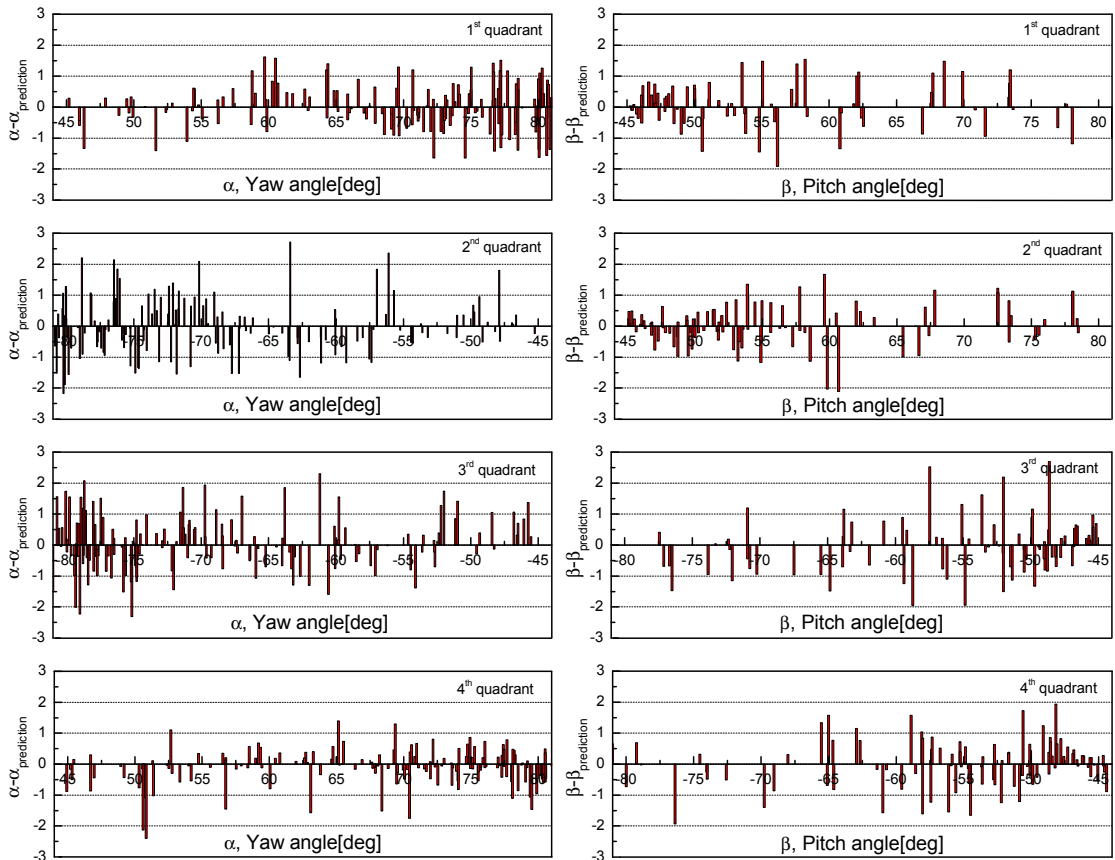


Fig. 7 Error angles in each quadrant map region

TEMP : 20 °C p : 1.20412645461239 Result : Edk3

Buttons: Load, Table_C, LookUp, SAVE, END

X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	CP_α	CP_β	ZONE	Pitch Ang	Yaw Ang	CP_0	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	V	P[mmAq]	V_X[m/s]	V_Y[m/s]	V_Z[m/s]	
-40	-25	0	-1.8809	-17.4186	-7.8533	-14.7434	10.9055																
-35	-25	0	1.1243	-15.6788	-4.5889	-13.6105	8.7492																
-30	-25	0	3.9348	-13.7880	-1.1852	-12.4795	6.4854																
-25	-25	0	6.1987	-12.0998	1.4232	-11.6259	4.3220																
-20	-25	0	8.1687	-10.7724	3.9056	-11.0394	1.8805																
-15	-25	0	9.7103	-9.6650	5.4975	-10.3052	-0.1769																
-10	-25	0	10.9756	-8.6132	6.8202	-9.1722	-2.3201																
-5	-25	0	11.7980	-8.2038	7.7905	-8.1084	-4.1643																
0	-25	0	12.1575	-8.1858	8.2097	-7.0443	-6.1564																
5	-25	0	11.9127	-8.2971	8.1397	-5.4257	-7.7949																
10	-25	0	11.2911	-8.4876	7.4835	-3.4686	-8.9579																
15	-25	0	10.3682	-9.2219	6.5178	-1.6272	-10.1518																
20	-25	0	8.7907	-10.0643	4.8256	0.6385	-10.8460																
25	-25	0	7.0750	-11.4998	2.6754	2.8685	-11.8104																
30	-25	0	4.8828	-12.9427	0.2054	5.1148	-12.5550																
35	-25	0	2.1376	-14.7276	-2.9368	7.3574	-13.3418																
40	-25	0	-0.6726	-16.7618	-5.9685	9.4725	-14.0468																

(a) Raw data before calculation

TEMP : 20 °C p : 1.20412645461239 Result : Edk3

Buttons: Load, Table_C, LookUp, SAVE, END

X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	CP_α	CP_β	ZONE	Pitch Ang	Yaw Ang	CP_0	CP_1	CP_2	CP_3	CP_4	V	P[mmAq]	V_X[m/s]	V_Y[m/s]	V_Z[m/s]
-40	-25	0	-1.8809	-17.4186	-7.8533	-14.7434	10.9055	-0.3411	-0.9146	0	-40.0000	-25.0000	-0.0116	-0.1072	-0.0483	-0.0912	0.0659	16.4857	0.1224	11.4456	-5.3372	-6.9672
-35	-25	0	1.1243	-15.6788	-4.5889	-13.6105	8.7492	-0.3993	-0.8052	0	-35.0000	-25.0000	0.0077	-0.0966	-0.0285	-0.0829	0.0546	16.3812	-0.0720	12.1615	-5.6710	-6.9230
-30	-25	0	3.9348	-13.7880	-1.1852	-12.4795	6.4854	-0.4534	-0.6822	0	-30.0000	-25.0000	0.0230	-0.0860	-0.0083	-0.0776	0.0392	16.3999	0.1378	12.8720	-6.0023	-6.9309
-25	-25	0	6.1987	-12.0998	1.4232	-11.6259	4.3220	-0.4764	-0.5619	0	-25.0000	-25.0000	0.0362	-0.0759	0.0079	-0.0732	0.0250	16.4658	0.2896	13.5249	-6.3068	-6.9588
-20	-25	0	8.1687	-10.7724	3.9056	-11.0394	1.8805	-0.4923	-0.4334	0	-20.0000	-25.0000	0.0487	-0.0667	0.0233	-0.0684	0.0104	16.5060	0.1804	14.0574	-6.5551	-6.9758
-15	-25	0	9.7103	-9.6650	5.4975	-10.3052	-0.1769	-0.4853	-0.3242	0	-15.0000	-25.0000	0.0594	-0.0596	0.0331	-0.0629	-0.0008	16.4873	-0.0110	14.4334	-6.7304	-6.9678
-10	-25	0	10.9756	-8.6132	6.8202	-9.1722	-2.3201	-0.4756	-0.2111	0	-10.0000	-25.0000	0.0683	-0.0537	0.0415	-0.0564	-0.0138	16.3817	-0.0596	14.6213	-6.8180	-6.9232
-5	-25	0	11.7980	-8.2038	7.7905	-8.1084	-4.1643	-0.4749	-0.1171	0	-5.0000	-25.0000	0.0724	-0.0510	0.0474	-0.0507	-0.0263	16.4080	0.0627	14.8141	-6.9079	-6.9343
0	-25	0	12.1575	-8.1858	8.2097	-7.0443	-6.1564	-0.4728	-0.0256	0	0.0000	-25.0000	0.0743	-0.0499	0.0500	-0.0430	-0.0377	16.4941	-0.0124	14.9487	-6.9707	-6.9707
5	-25	0	11.9127	-8.2971	8.1397	-5.4257	-7.7949	-0.4777	0.0689	0	5.0000	-25.0000	0.0727	-0.0511	0.0499	-0.0337	-0.0485	16.4664	0.0447	14.8669	-6.9325	-6.9590
10	-25	0	11.2911	-8.4876	7.4835	-3.4686	-8.9579	-0.4810	0.1623	0	10.0000	-25.0000	0.0690	-0.0535	0.0459	-0.0227	-0.0562	16.3495	0.1866	14.5925	-6.8046	-6.9096
15	-25	0	10.3682	-9.2219	6.5178	-1.6272	-10.1518	-0.4865	0.2635	0	15.0000	-25.0000	0.0625	-0.0573	0.0388	-0.0104	-0.0625	16.5125	0.1082	14.4555	-6.7407	-6.9785
20	-25	0	8.7907	-10.0643	4.8256	0.6385	-10.8460	-0.4916	0.3792	0	20.0000	-25.0000	0.0529	-0.0631	0.0287	0.0027	-0.0681	16.4180	0.2057	13.9824	-6.5201	-6.9386
25	-25	0	7.0750	-11.4998	2.6754	2.8685	-11.8104	-0.4847	0.5019	0	25.0000	-25.0000	0.0419	-0.0705	0.0159	0.0163	-0.0729	16.5299	0.1822	13.5776	-6.3313	-6.9859
30	-25	0	4.8828	-12.9427	0.2054	5.1148	-12.5550	-0.4688	0.6300	0	30.0000	-25.0000	0.0289	-0.0802	0.0006	0.0303	-0.0776	16.4750	0.1633	12.9310	-6.0298	-6.9627
35	-25	0	2.1376	-14.7276	-2.9368	7.3574	-13.3418	-0.4323	0.7589	0	35.0000	-25.0000	0.0131	-0.0917	-0.0191	0.0456	-0.0819	16.3453	0.0225	12.1348	-5.6586	-6.9078
40	-25	0	-0.6726	-16.7618	-5.9685	9.4725	-14.0468	-0.3952	0.8612	0	40.0000	-25.0000	-0.0046	-0.1031	-0.0376	0.0572	-0.0884	16.4872	0.1113	11.4466	-5.3376	-6.9678

(b) Velocity reduction data after calculation

Fig. 8 Calibration map data calculated by velocity reduction program

미 실험적 오차를 포함한 상태에 있거나, 두 번째는 확보된 교정지도를 구성하는 사각형모양의 격자가 Fig. 1(c)의 "A"지점과 같이 명확하지 못하고 찌그러져 나타나 TableCurve3D의 성능한계로 Fig. 1(c~f)의 교정지도를 커브피팅한다 하더라도 얻어진 근사함수식들로는 충분히 나타낼 수 없는 결과로 볼 수 있다. 따라서 각 교정지도영역에서 각도 오차가 큰 소수개의 일부분을 무시하면, FHPP를 가지고도 Table 3에서와 같이 약 ±2.8°의 각도오차

범위의 성능으로 ±80°를 망라하는 α와 β를 구할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 요각과 피치각을 ±80°까지 추적하는 것은 지금까지의 FHPP로는 불가능하였으며, 값비싼 7공 압력프로브⁹⁾로나 가능한 각도이다.

4.2 각 영역별 속도크기 및 정압의 오차분석

본 연구에서 사용한 FHPP의 각 영역별 속도벡터의 크기 및 동압으로 정압을 무차원화한 오

Table 3 The error analysis results of a FHPP

Map region		$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$V(\%)$	$2p_s/\rho V^2$ (%)
Center	Min	-1.47	-1.08	-1.57	-1.97
	Max	1.38	1.14	1.69	1.88
1 st	Min	-1.65	-1.92	-3.93	-8.97
	Max	1.62	1.55	2.63	8.01
2 nd	Min	-2.18	-2.11	-4.63	-8.81
	Max	2.72	1.67	2.85	5.69
3 rd	Min	-2.31	-1.95	-4.30	-7.68
	Max	2.31	2.69	3.42	6.03
4 th	Min	-2.77	-2.35	-4.27	-7.09
	Max	2.28	2.66	2.84	4.47

차들은 Table 3에서 각각 볼 수 있다. 중심지도영역에서 속도벡터 및 정압의 오차율들은 각각 $\pm 1.7\%$ 미만, $\pm 2.0\%$ 미만으로 나타나 매우 우수한 성능을 보여주고 있다. 그러나 중심부의 지도영역을 벗어난 경우, 속도벡터의 크기 및 정압의 오차율들은 각각 $\pm 4.7\%$ 미만과 $\pm 9\%$ 미만을 나타내, 다소 성능이 떨어진 결과를 보이고 있다. 이런 현상은 역시 TableCurve3D의 성능한계로 인해 Fig. 1(c~f)에서 교정지도의 가장자리에 해당하는 영역을 충분히 커브피팅하지 못한 결과로 볼 수 있지만, 이런 결과조차도 스윙이 강한 실제 유동장에서 $\pm 80^{\circ}$ 까지 요각과 피치각을 측정할 수 있다는 점에 비하면 크게 나쁘진 않다고 판단된다. Fig. 8은 직선형 FHPP의 교정압력들을 TableCurve3D로 근사한 교정지도의 성능을 자체 제작한 프로그램으로 예측한 하나의 결과를 보여주고 있다. 이 연산프로그램은 FHPP로부터 얻어진 압력들을 속도벡터와 3차원속도성분 및 정압 등으로 변환해 주므로 많은 유동장 측정에 있어 매우 유용한 수단을 제공할 것으로 기대된다.

5. 결 론

직선형 FHPP를 사용하면서도 유효유동각을 $\pm 80^{\circ}$ 까지 확장시킬 수 있도록 교정지도를 5단계 영역분할과 “TableCurve3D” 프로그램을 사용하는

새로운 개념을 도입한 결과 다음과 같은 FHPP의 분해 성능을 얻을 수 있었다.

(1) 요각과 피치각이 $\pm 45^{\circ}$ 이내인 중심부 지도영역에서 α 와 β 의 오차는 $\pm 1.5\%$ 미만을 보이며, 속도벡터 및 정압의 오차율은 각각 $\pm 1.7\%$ 미만, $\pm 2.0\%$ 미만을 나타낸다.

(2) 요각과 피치각이 $\pm 45^{\circ}$ 를 벗어난 영역에서 α 와 β 의 오차는 $\pm 2.8\%$ 미만을 보이며, 속도벡터 및 정압의 오차율은 각각 $\pm 4.7\%$ 미만과 $\pm 9\%$ 미만을 나타낸다.

(3) 직선형 FHPP는 교정지도의 영역분할법과 2차원 커브피팅 프로그램을 활용하면, 요각과 피치각의 유효유동각을 $\pm 80^{\circ}$ 까지 확장시킬 수 있다.

(4) 현재의 결과만으로도 FHPP는 다양한 3차원 유동장 정보를 파악하는데 매우 유용한 측정기구가 될 수 있다고 판단된다.

References

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. Zilliac, 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. SYSTAT Software Inc., 2002, *TableCurve 3D User's Manual, Ver.4 for Windows*.
 8. 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.
 9. 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.
 10. S. O. Kjelgaard, 1988, "Theoretical Derivation and Calibration Technique of a Hemispherical-Tipped Five-Hole Probe", *NASA Technical Memorandum 4047*.
 11. J. K. Kim and S. H. Oh, 2008, "A New Calibration Algorithm of a Five-Hole Pressure Probe for Flow Velocity Measurement", *J. of the KSPSE*, Vol. 12, No. 4, pp. 18-25.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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. 1437-1448.
 15. C. Venkateswara Babu, M. Govardhan and N. Sitaram, 1998, "A method of Calibration of a Seven-Hole Pressure Probe for Measuring Highly Three-Dimensional Flows", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 468-476.