

직선형 5공 압력프로브를 이용한 3차원 유동속도 계측시스템 개발 Measurement System Development for Three-Dimensional Flow Velocity Components Using Straight-Type Five-Hole Pressure Probe

김장권·오석형·정규조

J. K. Kim, S. H. Oh and K. J. Jeong

Key Words : Calibration Map(교정지도), Data Reduction(데이터추출), Five-Hole Pressure Probe(5공압력프로브), Non-Nulling Method(넢널링방법), Pitch Angle(피치각), Pitch Coefficient(피치계수), Yaw Angle(요각), Yaw Coefficient(요계수)

Abstract : This paper shows the development process of a straight-type five-hole pressure probe for measuring three-dimensional flow velocity components. The data reduction method using a bi-cubic curve-fitting program in a new calibration map was introduced in this study. This new calibration map can be applied up to the application angle, $\pm 55^\circ$ of a probe. As a result, for the application angle of $\pm 45^\circ$, an error for yaw and pitch angles appeared from -1.76° to 1.83° and from -1.91° to 1.75° , respectively. Moreover, an error for a vector magnitude and a static pressure compared with a dynamic one showed from -7.83% to 4.87% and from -0.73 to 0.77 , respectively. Even though this data reduction method showed unsatisfactory errors in a vector magnitude, it resulted in an easy and simple application method. Especially, when it was applied to an actual flow field including a swirling flow, a good result came out on the whole. However, in order to obtain a better result, it is thought that a more sophisticated interpolation method needs to be introduced.

1. 서 론

지금까지 스월링유동을 포함한 3차원 유동장을 측정하기 위해서는 레이저유속계(LDV), 입자영상유속계(PIV), 열선풍속계(HWA), 다공 압력프로브(MHPP) 등이 주로 계측기로서 사용되어져왔다. 일반적으로 덕트 내 스월유동은 재순환유동영역을 수반하므로 역유동을 동반하게 된다. 따라서 이 역유동에 대한 음속도 및 난류특성치들과 방향성을 가장 정확히 측정할 수 있는 장비는 LDV와 PIV가 있지만, 이것은 너무나 값비싼 측정 장비이며, 특히 역유동 및 재순환이 형성되는 가스유동장내에 산란 입자들을 공급할 때나 투입된 입자들을 환기할 때에도 많은 어려움이 있어 보편적으로 사용하기에는 그다지 쉽지 않다. 또한 HWA를 이용하는 경우에는

열선프로브가 높은 주파수를 갖는 속도에서도 좋은 감도를 가지고 난류특성치들을 측정 가능하지만 음속도를 감지하지 못하는 단점이 있으므로, 보통 MHPP를 이용하여 그 결점을 보완하고 있는 추세이다. 반면, MHPP는 LDV, PIV 및 HWA에 비해 저가형이면서 역유동이나 재순환 유동과 같은 유동장내에서도 3차원 평균속도뿐만 아니라 정압 및 전압까지를 동시에 용이하게 측정할 수 있기 때문에, 지금까지 다양한 유동장에 걸쳐 널리 사용되어져 왔으며, 또한 많은 계측발전을 이루어왔다.

일반적으로 MHPP를 이용하는 유동장의 계측방법에는 프로브 회전을 통한 널링(nulling)방법과 프로브 고정을 이용하는 넢널링(non-nulling)방법 등이 있다. 넢널링방법에 의한 유동장 계측 시 발생할 수 있는 오차는 크게 교정지도(calibration map)를 얻는 과정에서 발생하는 계측오차와 실제 유동장에서 측정된 다수의 압력데이터들을 가지고 교정지도로부터 피치(pitch)각과 요(yaw)각을 찾아내는 과정과 이후 3차원평균속도 및 정압 등을 연산하는 과정에서 발생하는 데이터추출(data reduction) 오차로 나누어볼

접수일 : 2006년 7월 20일, 채택확정 : 2006년 8월 20일
오석형(책임저자) : 군산대학교 기계공학부
김장권 : 군산대학교 동력기계시스템공학전공
E-mail : osh@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4721
정규조 : 군산대학교 동력기계시스템공학전공

수 있다. 여기서 계측오차는 사용하는 유동장의 질과 프로브의 크기 및 제작정도 그리고 압력을 측정하는 계측기의 성능뿐만 아니라 프로브를 정해진 피치각과 요각에 얼마나 정교하게 위치시키는가에 따라 개선될 수 있다. 물론 데이터추출오차도 교정지도를 피치각과 요각을 잘게 나누어 만들게 되면, 그 오차를 현저히 줄일 수도 있겠지만, 이것은 교정 시 매우 많은 시간이 소요되며, 정교한 각도조정기를 필요로 하게 된다. 한편, 피치각과 요각이 세분화된 교정지도를 확보한다 하더라도 교정지도로부터 피치각과 요각을 찾아내는 연산방법에 따라 그 오차는 달라진다. 지금까지 교정지도를 가지고 미지의 유동장으로부터 측정된 압력들을 바탕으로 피치각과 요각을 구하기 위해 개발되어왔던 교정방법에는 Gallington¹⁾이 최초로 제안했었던 다항식 커브피트(curve-fit)방법²⁻⁴⁾과 직접 보간을 위해 IMSL서브루틴인 Akima 보간기법을 이용한 Zilliac의 룩업표(look-up table)방법^{5,6)}, 이들 두 방법들을 조합한 Wenger 등⁷⁾의 방법, 상용 3차원 커브피팅 프로그램인 TableCurve3D⁸⁾를 이용한 Morrison 등의 방법⁹⁾, 신경회로망을 이용한 Rediniotis 등^{10,11)}의 방법, 포텐셜유동 방정식을 이용한 Kjeldgaard의 방법¹²⁾ 등이 있다.

Rediniotis 등¹¹⁾은 신경회로망 교정기법을 적용하여 프로브 팁(tip) 직경이 0.9 mm인 초소형 7공압력프로브(SHPP)에서 75°의 유동각에 대하여 0.28°의 유동각 오차와 0.35%의 속도 크기 오차를 예측 정확도로 발표하였다. 이것은 지금까지 발표된 가장 우수한 성능으로 평가된다. 또한 Johansen 등¹³⁾은 교정자료의 데이터베이스와 국부적인 최소자승보간기법을 SHPP에 적용하여 팁 직경이 1.65 mm에서 99%의 신뢰도로 각도예측은 0.6°이하로, 속도예측은 1% 이내로 각각 발표하였다.

한편, Gallington의 방법^{1,7)}은 각각의 함수들을 최소자승방법에 의해 2차원 다항식으로 피팅하므로, 교정함수가 매우 부드러워야 한다고 가정하고 있다. 따라서 다항식 형태를 벗어날 때는 매우 정확하지 않으며, 전형적인 성능은 유동각에 대해서는 ±1°로, 속도크기에 대해서는 ±2%의 정확도를 나타낸다. 또 Zilliac의 방법⁵⁻⁷⁾은 유동각에 대해서는 ±0.5°로, 속도크기에 대해서는 ±1%의 정확도를 나타낸다고 알려져 있다. 또 Venkateswara Babu 등¹⁴⁾은 SHPP를 이용하는 년널링 교정기법에서 영역분할방법을 사용하여 ±54°의 피치각과 요각의 범위에서 유동각의 보간 오차를 ±1° 이내로, 전압과 정압의 오차는 각각 동압의 0.5%와 1% 이내에 있는 것으로 발표하

였다. Lee 등¹⁵⁾은 5공압력프로브(FHPP)의 년널링 교정기법에 의해 ±40°의 피치각과 요각의 범위에서 피치각의 오차는 ±0.92°, 요각의 오차는 ±0.76°, 속도크기의 오차는 ±2.32%를 제시하였다.

본 연구에서는 직선형 FHPP를 사용하였으며, 교정지도로부터 유용한 유동각을 쉽게 얻기 위한 데이터추출방법으로서, Morrison 등⁹⁾이 사용한 Table-Curve3D⁸⁾를 이용하였다.

본 연구의 목적은 기존의 열선풍속계에서 행해지던 유속측정 과정을 보완하는데 있으며, 일차적으로 직선형 FHPP의 검정지도를 확보하고, 기존의 자동이송장치에 FHPP를 장착하여 원하는 위치로 제어하면서 유동장의 압력들을 A/D보드를 통해 컴퓨터로 자동 측정하는 유동계측용 프로그램과 측정된 압력으로부터 3차원속도성분을 유도해 내는 변환프로그램 등을 개발하는데 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 직선형 FHPP(United Sensor Corp., USNH-F-172 0346)는 Fig. 1과 같다. 실제유동과 맞닿는 선단부의 관은 직경이 3.06 mm, 길이가 49 mm이며, 유동에 의한 흔들림을 방지하기 위해 보강용 관은 직경 6.13 mm, 길이가 539 mm를 갖는다. 따라서 압력프로브의 총 길이는 총 588 mm로 되어 있다. 그리고 피토판 선단부에는 5개의 압력측정용 구멍이 형성되어 있는데, 중앙부의 관 직경은 0.508 mm이며, 나머지 4개의 관 직경은 모두 0.4064 mm이다. 정압이나 전압을 측정하기 위해서는 매우 낮은 차압에서도 정밀측정이 가능한 정밀도 ±0.25%를 갖는 압력계(Furness, FC510)를 사용하였으며, FHPP의 압력을 동시에 연속적으로 측정하기 위해서는 최대용량이 ±200 mmAq로 정밀도가 ±0.5%인 압력계(Furness, FCO332)를 5개 사용하였다. 검정지도 데이터를 얻기 위한 실험장치는 KSB6311과 AMCA STANDARD 210-85를 참고로 하여 만들어진 송풍식 소형 팬테스터와 프로브의 3축방향 이송을 자유롭게 수동으로 조절할 수 있도록 요각과 피치각을 조정하는 지그(jig)가 부착된 기존의 제도판 및 유동측방향 이송을 위해 레일위에 놓여진 이송 받침대로 구성되어 있다. 그 외 실제 유동 측정에 사용된 실험장치는 Fig. 2와 같이 인버터 방식으로 구동되는 5마력 원심형 송풍기와 확산부,

정류실, 수축부, 시험부로 구성되어 있는 아음속풍동¹⁶⁾과 3차원 자동이송장치(Dantec 41T50 & 41T75) 그리고 컴퓨터(P4, Win-XP)로 구성되어 있다. 이 컴퓨터에는 FHPP로부터 압력측정을 위해 A/D변환카드(Keithley, KPCI- 3101)가 내장되어 있으며, 자동이송장치의 제어는 RS-232C를 사용하였다. 계측과정 및 데이터 연산 등의 모든 과정은 Testpoint(Keithley, V.4.5) 소프트웨어를 이용하여 Fig. 3과 같은 전용 계측프로그램을 만들어 사용하였다.

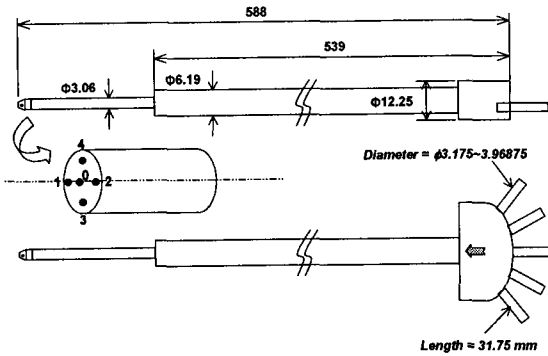


Fig. 1 Straight-type yaw-head probe geometry

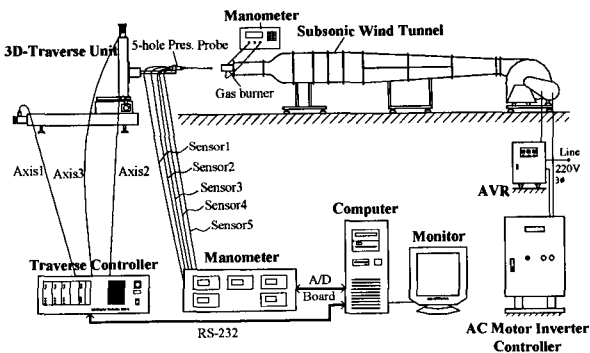


Fig. 2 Data acquisition system using 5-hole pressure probe

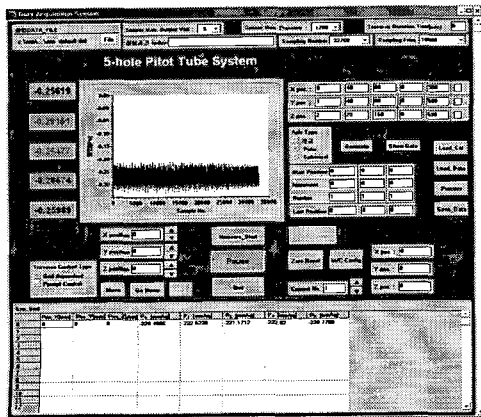


Fig. 3 Data measurement program using 5-hole

pressure probe

2.2 실험방법

본 연구에서 직선형 FHPP의 검정을 위해 사용한 유동속도는 각각 16.7 m/s와 20.6 m/s를 사용하였으며, 각각의 유동속도에서 요각도와 피치각도에 대해 정압과 전압 및 5개의 프로브 압력들을 각각 측정하였다. 유동속도에 대한 속도의 검정과정을 위해서는 실험실 바닥에 대해 수직성을 맞출 수 있는 제도판의 손잡이 부분을 개조하여 요각과 피치각을 자유롭게 수동으로 조작할 수 있는 각도조정용 지그를 제작하여 부착한 후, 이 제도판을 바닥에 레일이 깔린 기존의 이송장치 받침대 위에 올려놓고, 각도가 변하여도 소형 휠테스터의 출구에 부착한 직경 100 mm인 원형노즐의 퍼텐셜코아 중심부 내에 압력프로브가 항상 위치하도록 3축방향을 조정하였다.

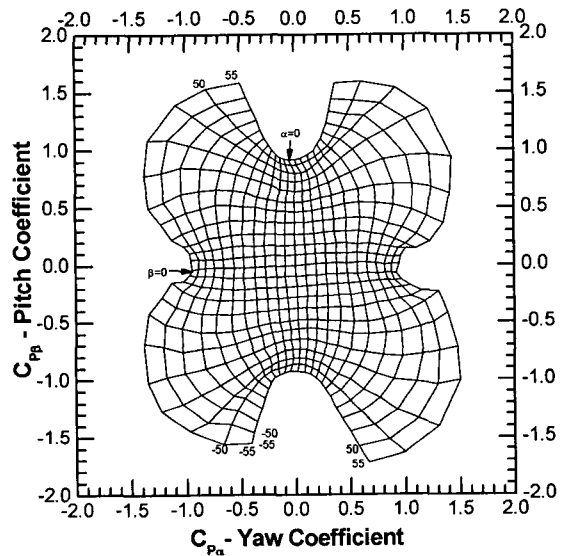


Fig. 4 Calibration map of 5-hole pressure probe

본 연구에서 사용한 직선형 FHPP의 검정 작업에는 년널링기법을 적용하였으며, 기본적으로는 Treaster 등의 방법¹⁷⁾을 따랐다. 그러나 이 방법은 보정계수인 요계수와 피치계수들의 분모항에 발산을 유발하여 유효 유동각을 $\pm 30^\circ$ 로 한정하게 한다. 그러나 Judd¹⁸⁾는 보정계수의 분모항에 RSS (root-sum-square)를 더하여 보정계수의 발산을 방지함으로써 유효 유동각을 $\pm 80^\circ$ 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 포함

하지 않고, 동압에 비례하도록 개량된 RSS를 사용하여 분할영역기법을 적용하지 않고서도 유효 유동각을 $\pm 45^\circ$ 로 넓힌 Kim 등¹⁹⁾의 검정방법을 사용하였다. 그 결과 Fig. 4는 16.7 m/s에서 요각과 피치각에 따라 얻어진 교정지도이다. 본 연구에서는 이 교정지도를 사용하여 3차원 속도를 연산하였다. 여기서 요각과 피치각은 각각 $\pm 55^\circ$ 까지 5° 간격으로 변화를 주었으며, 압력들을 읽기 위해 사용한 A/D 변환기의 샘플링 주파수는 채널당 10 kHz, 샘플링수는 채널당 32,768개로 각각 설정하여 사용하였다.

한편, 유동장내의 실내온도는 온도변화에 따른 속도오차를 최대한 억제하기 위해 약 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였으며, 전압변동에 따른 풍동속도의 변화를 막기 위해서는 자동전압조정기(AVR)를 설치하여 사용하였다.

2.3 속도 및 정압연산방법

검정지도를 얻기 위해 사용한 요각계수와 피치각계수는 각각 요각(α)와 피치각(β)의 함수를 만족하며, 각각 식(1)과 식(2)로 주어진다.

$$Cp_\alpha(\alpha, \beta) = \frac{p_1 - p_2}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + p_\sigma} \quad (1)$$

$$= \frac{Cp_1 - Cp_2}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4) + Cp_\sigma}$$

$$Cp_\beta(\alpha, \beta) = \frac{p_3 - p_4}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + p_\sigma} \quad (2)$$

$$= \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4) + Cp_\sigma}$$

여기서 p_i 와 Cp_i 는 FHPP에서 동시에 얻어지는 5개의 압력 및 압력계수들이다. 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.

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

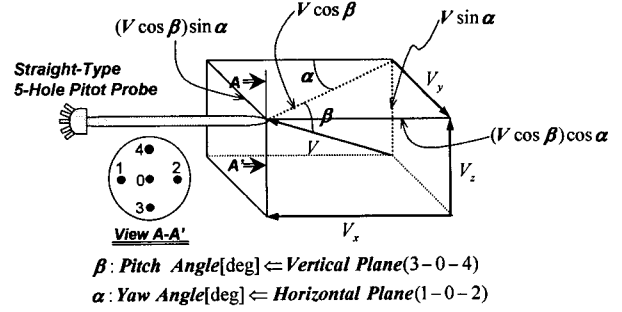


Fig. 5 Velocity decomposition of 5-hole pressure probe

한편 검정지도를 통해 실제 유동장에서 측정된 5개의 압력측정값들을 가지고 얻을 수 있는 속도벡터와 압력 및 3차원 속도성분들은 각각 식(6), 식(7), 식(8)로 주어진다. 여기서 Fig. 5는 FHPP에 대한 속도벡터를 요각과 피치각에 따라 분해한 3차원 속도성분들을 나타내고 있다.

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{(p_{i,max} - p_{i,min})}{(Cp_{i,max} - Cp_{i,min})}} \quad (6)$$

$$p_s = p_{i,max} - Cp_{i,max} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

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

$$V_y = V \cos \beta \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

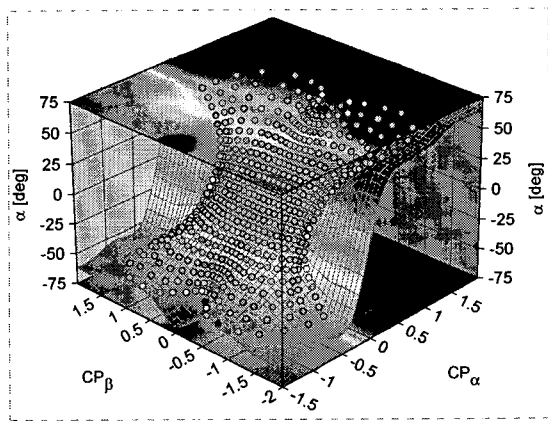
$$V_z = V \sin \beta$$

따라서 속도벡터를 계산하기 위한 순서는 다음과 같다. 먼저 각 측정점에서 얻어진 5개의 압력측정값들로부터 요각계수와 피치각계수를 계산한 다음 검정지도를 만족하는 요각과 피치각을 구한다. 그 다음, 요각과 피치각을 만족하는 5개의 Cp_i 를 구하고, 측정치 p_i 와 함께 해당하는 값들을 식(6)에 대입하면 쉽게 속도벡터를 얻을 수 있다. 또한 정압과 각 방향의 속도성분들도 차례로 구해지게 된다.

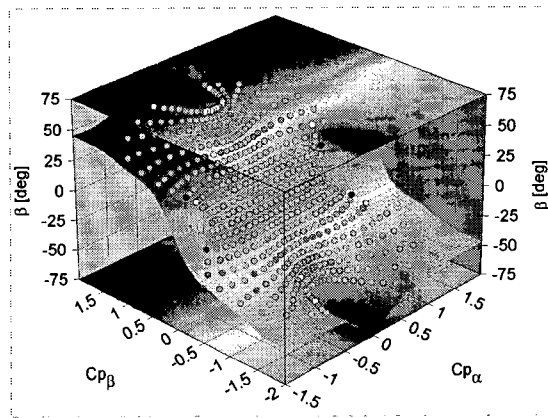
3. 실험결과 및 고찰

3.1 검정지도로부터 자료추출 시 오차 평가

Fig. 6은 TableCurve3D⁸⁾라는 소프트웨어를 이용하여 요각계수 및 피치각계수에 따른 요각과 피치각을 검정지도로부터 얻고자 3차원 보간 방법에 의해 나타낸 커브피트 그림들이다. 여기서 요각과 피치각은 분산분석에서 피팅 통계치의 우수성(goodness)을 나타내는 r^2 이 각각 0.9992와 0.9994인 제 539번째 수식에 해당하는 제 10차의 Cosine Series Bivariate 다항식⁸⁾(부록참조)에 의해 모두 나타내었다.



(a) Yaw angle



(b) Pitch angle

Fig. 6 Surface curve-fitting curves α , β with the

function of Cp_α and Cp_β

이 교정기법은 나쁜 교정점들의 영향을 줄이는데 도움을 주며, 프로브가 완벽하게 대칭성을 유지하지 않아도 성능을 보완해 주는 역할을 해 준다⁹⁾.

한편, 측정점으로부터 얻어진 5개의 압력값들로부터 얻어진 요각계수와 피치각계수를 가지고 Fig. 4의 교정곡선으로부터 요각과 피치각을 얻는 방법은 실험 자료가 적을 때에는 직접 선형 보간기법으로도 추정이 가능하지만, 실험 자료가 많아질 때에는 복잡한 2차원 보간기법을 사용하지 않고서는 도저히 얻을 수 없게 된다. 그러나 이 기법은 교정곡선을 만족하는 요각과 피치각이 $\alpha = f(Cp_\alpha, Cp_\beta)$, $\beta = f(Cp_\alpha, Cp_\beta)$ 로 Fig. 6과 같이 각각 수학적함수식으로 주어지므로 쉽게 연산 작업을 할 수 있는 장점이 있다.

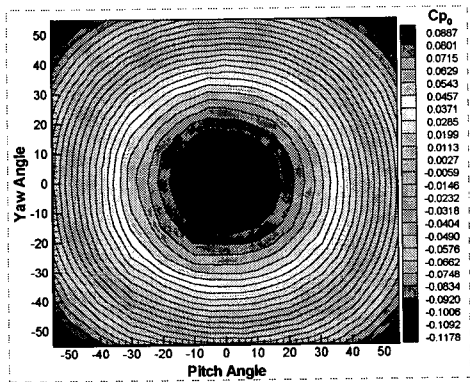
Fig. 7은 교정지도로부터 구해진 요각과 피치각을 만족하는 압력계수들의 그림들이다. 여기서 압력계수들은 역시 TableCurve3D⁸⁾라는 소프트웨어를 이용하여 커브피트를 거쳐 수식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 압력계수들 모두 분산분석에서 피팅 통계치의 우수성을 나타내는 r^2 이 각각 0.9997, 0.9998, 0.9998, 0.9997, 0.9998인 제 524번째 수식에 해당하는 2×5 차의 Fourier Series Bivariate 다항식⁸⁾(부록참조)에 의해서 모두 나타내었다. 교정작업에서 이루어진 프로브의 대칭성은 이 압력계수 분포들을 통해서도 잘 이루어졌음을 알 수가 있다.

한편, Fig. 4의 교정자료들을 TableCurve3D에 적용한 결과, 본 연구에서 사용한 FHPP의 오차 결과는 Table 1과 같다. 즉, FHPP의 요각과 피치각의 적용각도범위가 $\pm 45^\circ$ 일 경우가 $\pm 55^\circ$ 보다 훨씬 양호한 오차해석 결과를 보여준다. 특히 적용각도 범위 $\pm 45^\circ$ 에서 요각의 오차는 최소 -1.76° , 최대 1.83° 를 보여주며, 피치각의 오차는 최소 -1.91° , 최대 1.75° 를 나타내고 있다. 그러나 속도벡터의 오차는 적용

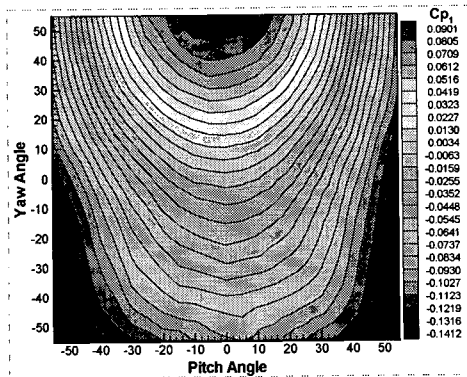
Table 1 The error analysis results of 5-hole pressure probe when TableCurve3D was used in the calibration map

α, β		Error analysis			
		Yaw angle, α	Pitch angle, β	Vector, V (%)	Static pressure, Ps (%)
$\pm 55^\circ$	Min.	-3.67°	-4.12°	-7.83	-0.73
	Max.	4.50°	3.32°	6.12	0.77
$\pm 45^\circ$	Min.	-1.76°	-1.91°	-7.83	-0.73
	Max.	1.83°	1.75°	4.87	0.77

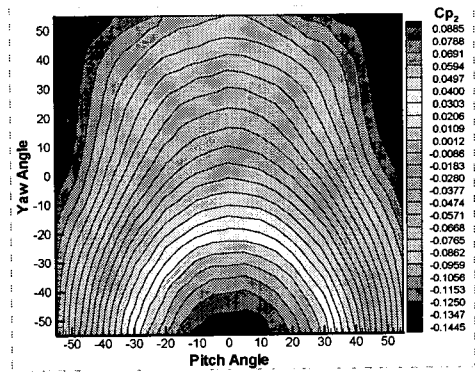
각도범위가 줄어든 $\pm 45^\circ$ 에서조차도 균일한 교정속도 대비 최소값은 여전히 -7.83% 를 보여줘 여전히 개선의 여지가 많으며, 최대값은 4.87% 를 보여줘 약간 나은 결과를 나타낸다. 또 정압의 오차는 적용각도범위가 $\pm 55^\circ$ 에서조차도 동압대비 최소 -0.73% , 최대 0.77% 를 보여주고 있다. 이 같은 오차 결과는 기 발표된 연구들^{1,5,7,11,13-15)}보다도 성능이 훨씬 떨어지지만, FHPP치고는 쉽게 적용할 수 있는 방법을 제공하며, p_0 가 가장 큰 단일영역의 교정지도를 가지고서도 요각 및 피치각의 적용범위가 상대적으로 넓다는 장점들이 있다. 따라서 본 연구의 교정방법 및 데이터 추출과정은 회전유동을 포함하는 실제유동장의 속도크기의 경향분석을 위해서는 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 한편 Morrison 등⁹⁾은 프로브의 적용각도 범위를 $\pm 25^\circ$ 로 한정시켜 TableCurve3D를 사용한 바가 있다.



(a) C_{p0}

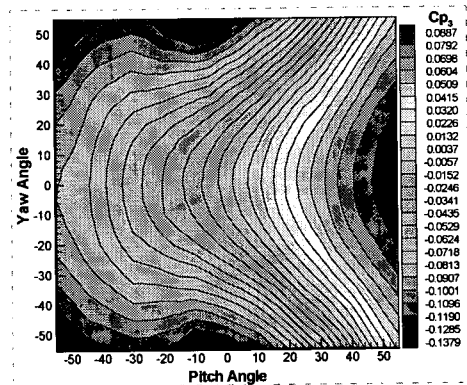


(b) C_{p1}

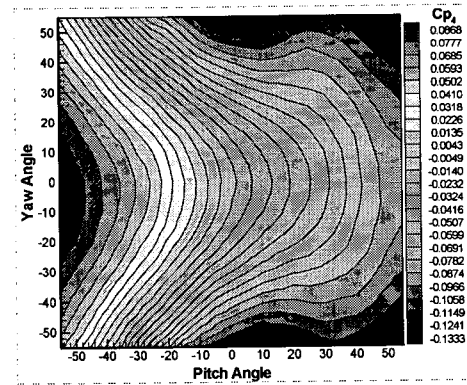


(c) C_{p2}

Fig. 7 Pressure coefficient contours C_{p_i} with the function of α and β



(d) C_{p3}



(e) C_{p4}

Fig. 7 Pressure coefficient contours C_{p_i} with the function of α and β

3.2 실제 유동장에 적용한 결과 분석

Fig. 8은 Gun식 가스버너¹⁶⁾에서 버너출구로부터 거리가 $X/R=0.3846$ 만큼 떨어진 유동장을 FHPP와 X형 열선프로브를 가지고 측정한 유동축방향성분, 반경방향성분 및 회전방향성분의 평균속도들을 버너의 출구속도(U_e)로 무차원화하여 비교한 그림이

다. 약 $Y/R=\pm 1.0$ 부근의 슬릿부를 전·후로 하는 영역에서는 두 프로브에 의한 평균속도가 가장 큰 크기로서 거의 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 버너 중앙부가 막혀있는 $Y/R < \pm 0.34$ 의 영역에서는 FHPP에 의한 값이 열선프로브의 경우보다 아주 미소하나마 더 크게 나타나는데, 이것은 내부 유동의 재순환운동에 의해 가속현상이 작용한 결과로 본다. 또 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 크기 차이가 현저히 나타나는데, 이것은 이 위치에서 스월베인의 회전유동에 의한 원심효과가 가장 크게 작용되기 때문에, 그로 인해 유동의 방향성에 영향을 더 많이 받은 결과로 생각할 수 있다. 그 밖의 슬릿부를 벗어난 외측영역에서는 외부공기가 주 분류로 유입하려는 Entrainment 효과에 의해서 FHPP의 측정값이 열선프로브의 경우보다 약간 더 큰 크기분포를 보여주고 있다.

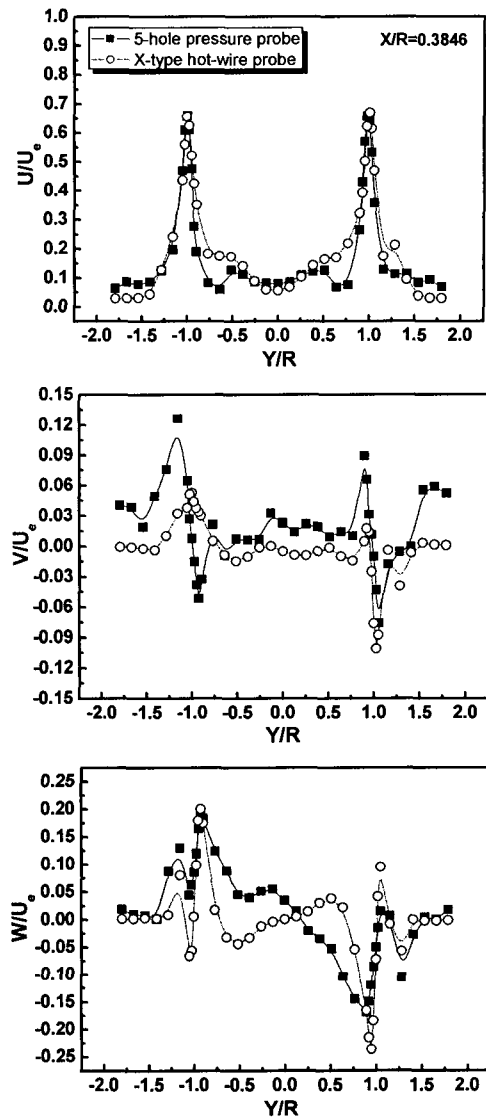


Fig. 8 Comparison result between 5-hole pressure probe and X-type hot-wire probe in the flow field of a gun-type gas burner

한편 FHPP는 유동장의 방향성을 감지하면서 속도를 얻을 수 있지만, 열선프로브는 유동장의 방향성을 감지하지 못하고 단지 속도만을 측정하기 때문에, 본 연구에서는 반경방향과 회전방향 성분의 평균속도 크기들을 단순히 비교하는 것은 별 의미가 없다고 판단된다. 그러나 X형 열선프로브만의 정보로는 정확히 알 수 없는 유동의 방향성을 고려한 실제 반경방향 및 회전방향성분의 속도분포를 제공한다는 점은 별도의 의미가 있을 것으로 본다.

따라서 Fig. 8에서 나타낸 반경방향 성분의 평균속도는 크기값 자체는 FHPP가 열선프로브보다 더 크게 감지되며, 그 분포 역시 FHPP의 결과가 더 뚜렷한 좌우 대칭성을 보여주고 있다. 또 회전방향 성

본의 평균속도는 슬릿부 안쪽에 있는 스월베인부에 해당하는 버너 중심부에서 크기 분포가 특히 큰 차이를 보여주고 있다. 이것 역시 스월베인의 회전유동에 의한 방향성이 감지된 영향인 것 같다.

전체적으로 볼 때, 본 연구에서 적용한 FHPP는 현재의 결과만으로도 유용한 유동장 정보를 파악하는데, 충분한 측정기구가 될 수 있다고 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 FHPP의 새로운 검정지도를 통해 "TableCurve3D"라는 소프트웨어를 이용하여 3차원 속도성분들을 추출하기 위한 과정들을 제시하였으며, 그 과정 중에서 발생하는 오차들을 분석하였다. 또 실제 회전유동이 포함된 유동장에 적용한 결과에 대해서도 X형 열선프로브에 의한 측정치와 함께 비교 검토하였다.

FHPP의 요각과 피치각의 오차는 적용각도범위가 $\pm 45^\circ$ 일 경우가 $\pm 55^\circ$ 보다 요각의 경우 최소 -1.76° , 최대 1.83° 를 보여주며, 피치각의 경우 최소 -1.91° , 최대 1.75° 로 훨씬 양호한 결과를 보여준다. 그러나 속도벡터의 오차는 적용각도범위가 줄어든 $\pm 45^\circ$ 에서 조차도 교정속도 대비 최소값은 -7.83% , 최대값은 4.87% 를 보여줘 여전히 개선의 여지가 많다고 본다. 또 정압의 오차는 적용각도범위가 $\pm 55^\circ$ 에서 조차도 동압대비 최소 -0.73% , 최대 0.77% 를 보여주고 있다.

한편, 이들 결과들을 실제 유동장에 적용해 본 결과, FHPP는 현재의 결과만으로도 유용한 유동장 정보를 파악하는데, 충분한 측정기구가 될 수 있다고 판단한다. 그러나 보다 정밀한 측정기구가 되기 위해서는 다중영역을 고려한 정밀도가 높은 새로운 자료추출을 위한 2차원 보간방법의 개발이 더 필요하다고 본다.

후 기

이 논문은 2005년도 군산대학교 교수장기해외연수경비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

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 and C. L. Maurer, 1982, "Calibration of Seven-Hole Probes suitable for High Angles in Subsonic Compressible Flows", AIAA Paper No. 82-0410.
4. 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.
5. G. G. Ziliac, 1989, "Calibration of Seven-Hole Pressure Probes for Use in Fluid Flows with Large Angularity", NASA TM 102200.
6. G. G. Ziliac, 1993, "Modelling, Calibration, and Error Analysis of Seven-Hole Pressure Probes", Exp. in Fluids, Vol. 14, pp. 104 ~ 120.
7. 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.
8. SYSTAT Software Inc., 2002, Table Curve 3D v4 for Windows User's Manual.
9. 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.
10. O. K. Rediniotis and G. Chrysanthakopoulos, 1998, "Application of Neural Networks and Fuzzy Logic to the Calibration of the Seven-Hole Probe", Trans. of the ASME, Vol. 120, pp. 95 ~ 101.
11. 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.
12. S. O. Kjelgaard, 1988, "Theoretical Derivation and Calibration Technique of a Hemispherical-Tipped Five-Hole Probe", NASA Technical Memorandum 4047.
13. E. S. Johansen, O. K. Rediniotis and G. Jones, 2001, "The Compressible Calibration of Miniature

Multi-Hole Probes", Trans. of the ASME, Vol. 123, pp. 128 ~ 138.

14. 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.

15. S. W. Lee and T. J. Yoon, 1996, "Effect of Wall Proximity on the Calibration of a Miniature Cone-Type Five-Hole Probe", Trans. of the KSME (Part B), Vol. 20, No. 8, pp. 2693 ~ 2706.

16. J. K. Kim, 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.

17. 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.

18. A. M. Judd, 1975, "Calibration of a Five Tube probe for Measuring Wind Speed and Direction", Journal of Physics E : Sci. Inst., Vol. 8, pp. 115 ~ 116.

19. 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.

부 록

539 : 10th Order Cosine Series Bivariate Polynomial

$$z=a+b\cos(x)+c\cos(y)+d\cos(2x)+e\cos(x)\cos(y)+f\cos(2y)+g\cos(3x)+h\cos(2x)\cos(y)+i\cos(x)\cos(2y)+j\cos(3y)+k\cos(4x)+l\cos(3x)\cos(y)+m\cos(2x)\cos(2y)+n\cos(x)\cos(3y)+o\cos(4y)+p\cos(5x)+q\cos(4x)\cos(y)+r\cos(3x)\cos(2y)+s\cos(2x)\cos(3y)+t\cos(x)\cos(4y)+u\cos(5y)+v\cos(6x)+aa\cos(5x)\cos(y)+ab\cos(4x)\cos(2y)+ac\cos(3x)\cos(3y)+ad\cos(2x)\cos(4y)+ae\cos(x)\cos(5y)+af\cos(6y)+ag\cos(7x)+ah\cos(6x)\cos(y)+ai\cos(5x)\cos(2y)+aj\cos(4x)\cos(3y)+ak\cos(3x)\cos(4y)+al\cos(2x)$$

$$\cos(5y)+am\cos(x)\cos(6y)+an\cos(7y)+ao\cos(8x)+ap\cos(7x)\cos(y)+aq\cos(6x)\cos(2y)+ar\cos(5x)\cos(3y)+as\cos(4x)\cos(4y)+at\cos(3x)\cos(5y)+au\cos(2x)\cos(6y)+av\cos(x)\cos(7y)+ba\cos(8y)+bb\cos(9x)+bc\cos(8x)\cos(y)+bd\cos(7x)\cos(2y)+be\cos(6x)\cos(3y)+bf\cos(5x)\cos(4y)+bg\cos(4x)\cos(5y)+bh\cos(3x)\cos(6y)+bi\cos(2x)\cos(7y)+bj\cos(x)\cos(8y)+bk\cos(9y)+bl\cos(10x)+bm\cos(9x)\cos(y)+bn\cos(8x)\cos(2y)+bo\cos(7x)\cos(3y)+bp\cos(6)\cos(4y)+bq\cos(5x)\cos(5y)+br\cos(4x)\cos(6y)+bs\cos(3x)\cos(7y)+bt\cos(2x)\cos(8y)+bu\cos(x)\cos(9y)+bv\cos(10y)$$

단, $x=\pi(Cp_a+1.3799)/2.8875$, $y=\pi(Cp_\beta+1.7232)/3.3195$ 이며, 모든 계수들은 프로그램에 의해서 자동으로 결정된다.

524 : 2x5 Order Fourier Series Bivariate Polynomial

$$z=a+b\cos(x)+c\cos(y)+d\sin(x)+e\sin(y)+f\cos(2x)+g\cos(2y)+h\sin(2x)+i\sin(2y)+j\cos(3x)+k\cos(3y)+l\sin(3x)+m\sin(3y)+n\cos(4x)+o\cos(4y)+p\sin(4x)+q\sin(4y)+r\cos(5x)+s\cos(5y)+t\sin(5x)+u\sin(5y)+v\cos(x)\cos(y)+aa\cos(x)\sin(y)+ab\sin(x)\cos(y)+ac\cos(x)\cos(2y)+ad\cos(2x)\cos(y)+ae\cos(x)\sin(2y)+af\sin(3x)\cos(y)+ag\cos(x)\cos(3y)+ah\cos(3x)\cos(y)+ai\cos(x)\sin(3y)+aj\sin(3x)\cos(y)+ak\cos(x)\cos(4y)+al\cos(4x)\cos(y)+am\cos(x)\sin(4y)+an\sin(4x)\cos(y)+ao\sin(x)\sin(y)+ap\sin(x)\cos(2y)+aq\cos(2x)\sin(y)+ar\sin(x)\sin(2y)+as\sin(2x)\sin(y)+at\sin(x)\cos(3y)+au\cos(3x)\sin(y)+av\sin(x)\sin(3y)+ba\sin(3x)\sin(y)+bb\sin(x)\cos(4y)+bc\cos(4x)\sin(y)+bd\sin(x)\sin(4y)+be\sin(4x)\sin(y)+bf\cos(2x)\cos(2y)+bg\cos(2x)\sin(2y)+bh\sin(2x)\cos(2y)+bi\cos(2x)\cos(3y)+bj\cos(3x)\cos(2y)+bk\cos(2x)\sin(3y)+bl\sin(3x)\cos(2y)+bm\sin(2x)\sin(2y)+bn\sin(2x)\cos(3y)+bo\cos(3x)\sin(2y)+bp\sin(2x)\sin(3y)+bq\sin(3x)\sin(2y)$$

단, $x=\pi(\alpha+55)/110$, $y=\pi(\beta+55)/110$ 이다.