

비영위법에 의한 5공 프로브의 교정에 관한 연구

정양범* · 신영호* · 박호동*

A Study on the Five - hole Probe Calibration with Non - nulling Method

Y. B. Jung · Y. H. Shin · H. D. Park

Key words : Five - hole probe(5공 프로브), Non - nulling method(비영위법), Pressure coefficient(압력계수), Dynamic pressure(동압)

Abstract

This paper is concerned with a method for calibrating five - hole probes of both angle - tube and prismatic geometries to measure local total and static pressures and the magnitude and direction of the mean velocity vector. Descriptions of the calibration technique, the typical calibration data, and an accompanying discussion of the interpolation procedure are included. The flow properties are determined explicitly from measured probe pressures using calibration data. Flow angles are obtained within the deviation angle of 1.0 degree and dynamic pressures within 0.03 with 95% certainty.

The variations in the calibration data due to Reynolds number are also discussed. For the range of Reynolds number employed, no effect was detected on the pitch, yaw and total pressure coefficients. However, the static pressure coefficient showed change to cause minor variations in the magnitude of the calculated velocity vector. To account for these variations, average correction factors need to be incorporated into the static pressure coefficient.

기호설명

A_j, B_j, C_j, D_j : cubic spline 보간식의 계수	C_{py} : 요계수(yaw coefficient)
C_{pp} : 피치계수(pitch coefficient)	P_i : 5공 프로브 각 압력공의 압력($i=1\sim5$)
C_{ps} : 정압계수(static pressure coefficient)	P_s : 정압(static pressure)
C_{pt} : 전압계수(total pressure coefficient)	P_t : 전압(total pressure)
	Re_p : 프로브 직경을 기준으로한 레이놀즈수
	U_o : 교정속도

* 정회원, 한국중공업 기술연구소

V_x, V_y, V_z	: x, y, z 방향의 속도성분
x, y, z	: 3차원 좌표계
α	: 피치각(pitch angle)
β	: 요각(yaw angle)
φ	: 콘각(cone angle)
θ	: 롤각(roll angle)
η, ω	: cubic spline 보간식의 콘각 또는 롤각
ρ	: 공기밀도

1. 서 론

각종 터보기계에서 발생하는 유동은 3차원 구조를 이루고 있으며, 특히 터빈 케이스케이드 통로 내에는 손실의 중요한 인자인 여러가지 와류(Vortex)가 발생하여 상당히 복잡한 유동구조를 나타낸다. 항공기의 경우에는 비행 성능을 향상시키기 위하여 인위적으로 강한 와류를 생성시켜주는 예도 있으며, 실제 저속비행 중에는 이러한 와류에 의해 발생하는 양력(Lift force)에 상당히 의존한다. 따라서 이러한 와류의 작용에 대한 메카니즘을 정확하게 규명하는 것은 효율 향상을 위한 최적설계를 위하여 필요하다. 또한 터빈 케이스케이드 내부의 3차원 유동특성과 손실 등을 연구하기 위하여 속도장 뿐만 아니라 압력분포도 측정되어야 한다. 3차원 유동장내의 동일 지점에서 속도와 압력에 대한 정량적인 정보를 얻기 위하여 속도와 압력을 동시에 측정할 수 있는 기능의 센서를 사용해야 한다. 5공 프로브는 시간평균값만을 측정할 수 있는 한계가 있지만 압력과 3차원 속도성분을 동시에 측정할 수 있기 때문에 터보기계 등에서 발생하는 압력 변화가 큰 3차원 유동장의 연구에 유용하게 사용되어질 수 있다.

5공 프로브로 3차원 유동장을 측정하기 위하여는 프로브의 교정(Calibration)이 필요하며 가장 일반적으로 사용되는 교정방법은 영위법(Nulling method)이다. 이 방법은 유동장 내에 위치한 프로브 축이 유동방향과 일치하도록 피치(Pitch) 및 요(Yaw)각이 영도(0°)가 되도록 조절하여 유동방향을 결정하고 이때의 측정 값으로 압력과 속도를 구하거나 또는 유동방향과 프로브 축이 한 평면상에

위치하도록 요각을 영도로 조절한 후 측정치를 2차원 교정관계식에 대입하여 압력과 속도를 구하는 것이다. 이러한 방법에 의하여 유동장의 압력과 속도를 측정할 경우 유입각이 큰 경우에도 비교적 정확한 속도를 측정할 수 있는 잇점이 있다. 그러나 각 측정점마다 프로브 축을 유동방향에 따라 조절해야하는 어려움이 있으며, 특히 터빈 케이스케이드 내부와 같이 공간적으로 제약을 받을 경우 측정이 어려운 단점도 있다. 따라서 이러한 어려움을 해결하기 위하여 5공 프로브를 유동의 방향에 따라 프로브 축을 조절하지 않고 일정하게 고정시킨 후 압력과 속도를 측정할 수 있도록 3차원적으로 교정을 해야하며, 이러한 방법을 비영위법(Non-nulling method)이라 한다. 비영위법으로 교정을 할 경우 유동방향을 구하는 방법은 피치각과 요각을 이용하거나 콘(Cone)각과 롤(Roll)각을 이용하는 방법이 있다(Fig. 1 참고).

Lee 등¹⁾은 구형(Spherical type) 5공 프로브에서 프로브 주위의 유동을 포텐셜 유동이라 가정하고 롤각과 콘각을 이용하여 교정곡선을 구하였으며, Pien²⁾은 구형 프로브일 경우 한 평면상의 속도 성분은 같은 평면에서 3개의 압력신호를 획득하여 구할 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 그러나 Pien은 이러한 포텐셜 유동해석의 결과는 비점성 유동에서 완전한 구형 프로브일 경우 타당성이 있지만, 일반적으로 실험에 의해 교정 데이터를 구해야 한다고 하였다. Treaster 와 Yocum³⁾은 피치각과 요각을 이용해 교정식을 구하여 속도장과 압력을 측정하였다. Dominy 등⁴⁾은 레이놀즈수, 마하수 및 난류가 5공 프로브의 교정 데이터에 미치는 영향을 연구한 바 있다. Everett와 Gerner 등⁵⁾은 seven-hole cone probe에 대한 이론을 정립하고 유입각이 적은 경우와 큰 경우를 분리하여 교정하는 방법을 제시하였다. 즉 유입각이 적을 경우에는 요각과 피치각을 이용하고 유입각이 큰 경우에는 롤각과 콘각을 이용하여 속도와 압력을 계산하는 교정식을 구하였다.

본 연구에서는 선회각이 큰 터빈 케이스케이드 내부의 3차원 유동특성을 연구하기 위한 전 단계로서 angle-tube probe와 prism probe에 대하여 피치각과 요각을 이용한 비영위법으로 교정하여

교정결과를 비교하였다. 또한 레이놀즈수의 변화가 교정 데이터에 미치는 영향을 연구하였으며, 교정을 위한 전 과정은 컴퓨터 프로그램으로 실행되도록 하였다.

2. 5공 프로브의 교정

2.1 프로브 형상

5공 프로브는 두개의 직교 평면에 5개의 압력공을 배치하여 각각의 압력공으로부터 독립적으로 압력을 측정할 수 있도록 만들어진 센서이다. 두 평면은 중앙의 압력공 위치에서 교차되도록 구성되어 있으며 각각 요평면, 피치평면으로 나타낸다. 즉 중앙의 압력공을 중심으로 4개의 압력공이 90° 간격으로 원주방향으로 배치되어 있으며, 중앙의 압력공과 각각의 압력공은 45°의 각을 이루도

록 되어있다. 현재 상용화 되어있는 프로브로는 프로브 선단의 모양에 따라 구형(Spherical type), 원추형(Conical type) 및 프리즘형(Prismatic type) 등이 있으며, Fig. 1은 압력공의 구성과 유동각(Flow angle)의 개념 및 좌표계를 나타내고 있다.

압력공의 구별은 Fig. 1에 표현된 바와 같이 중앙의 압력공을 1번 압력공, 요평면의 두 압력공을 각각 2번, 3번 압력공, 피치평면의 두 압력공을 각각 4번, 5번 압력공으로 한다. 유동각에 따른 3차원 속도성분은 피치각(α)과 요각(β) 혹은 롤각(φ)과 콘각(θ)으로 표현될 수 있으며, 본 연구에서는 전자의 방법으로 교정하였다. 유동각이 결정된 후 x, y, z 방향의 각 속도성분은 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$V_x = U_o \times \cos(\alpha) \times \cos(\beta) \tag{1}$$

$$V_y = U_o \times \cos(\alpha) \times \sin(\beta) \tag{2}$$

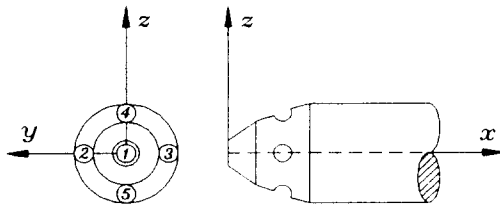
$$V_z = U_o \times \sin(\alpha) \tag{3}$$

Prism probe는 전체 형상이 일직선으로 되어 있기 때문에 측정공간이 좁은 각종 터보기계의 내부 유동 및 압력측정에 유용하게 사용될 수 있다. 구형 및 원추형 등의 angle-tube probe는 전체 형상이 기억자이며 따라서 공간의 제약을 받지않는 유동의 연구에 주로 사용된다.

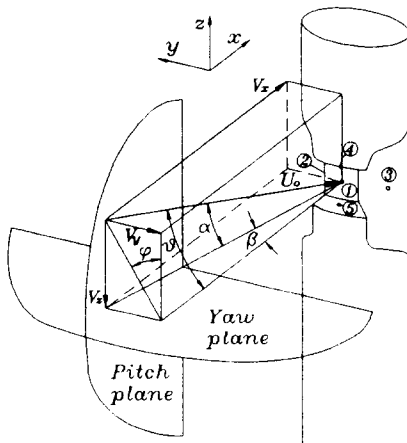
2.2 프로브 교정

5공 프로브의 응답특성은 프로브의 형상으로 인하여 프로브 선단에서 유동의 박리가 발생하고 점성의 영향을 받기 때문에 이론적 해석으로는 구할 수 없다. 따라서 기지의 유동장에 대하여 프로브의 응답특성을 나타낼 수 있는 수식을 결정하는 교정을 해야한다. 이러한 교정 관계식은 유동각의 변화에 따른 무차원 압력계수의 항들로 표현되어지며, 이때 무차원 압력계수의 값은 속력의 변화에는 무관해야하고 단지 유동각의 함수로만 되도록 결정해야 한다.

본 연구에서는 비영위법으로 프로브를 교정하였으며, 측정된 5개의 압력으로부터 정압, 전압 및 속도를 구할 수 있는 관계식은 피치각과 요각을 이용하여 결정하였다. 교정을 위한 압력계수로는 아래의 식으로 정의되어지는 피치계수(C_{pp}), 요계수



(a) Angle-tube probe



(b) Prism probe

Fig. 1 Geometry and coordinate system of the five-hole probes.

(C_{py}), 전압계수(C_{pt}) 및 정압계수(C_{ps})의 4개가 이용된다.

$$C_{pp} = (P_4 - P_5) / (P_1 - \bar{P}) \quad (4)$$

$$C_{py} = (P_2 - P_3) / (P_1 - \bar{P}) \quad (5)$$

$$C_{pt} = (P_1 - P_t) / (P_1 - \bar{P}) \quad (6)$$

$$C_{ps} = (\bar{P} - P_s) / (P_1 - \bar{P}) \quad (7)$$

$$\bar{P} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4 \quad (8)$$

5공 프로브의 응답특성을 피치각과 요각의 변화에 대한 압력계수의 관계식으로 교정을 하기 위하여 피치각과 요각을 각각 $-35^\circ \sim 35^\circ$ 의 범위에서 5° 간격으로 측정하였으며 총 측정점의 수는 289개이다.

5공 프로브의 각 압력공에 대한 압력신호는 electronic pressure scanner에 의해 전기적인 신호로 변환된 후 다채널 압력측정 장비인 PSI 8400 pressure acquisition system을 통하여 컴퓨터 하드디스크에 저장된다. 이때 System 8400의 control, Calibrator의 각도 조절 및 데이터 획득 과정은 프로그램에 의한 컴퓨터 온라인으로 처리되도록 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 교정장치와 데이터 획득과정을 나타내고 있다.

5공 프로브의 피치각과 요각을 변화하면서 측정된 결과에 대한 교정은 아래식으로 표현되어지는 cubic spline 보간식으로 하였다.

$$S(\omega) \mid_{\eta} = S_j(\omega) \mid_{\eta} = A_j + B_j(\omega - \omega_j) + C_j(\omega - \omega_j)^2 + D_j(\omega - \omega_j)^3 \quad (9)$$

$$\omega_j \leq \omega < \omega_{j+1} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N)$$

여기서 A_j, B_j, C_j, D_j 는 교정상수이다. η 는 상수로서의 피치각 또는 요각을 나타내고 ω 는 변수로서의 피치각 또는 요각을 의미한다. 이때 η 가 피치각이면 ω 는 요각, η 가 요각이면 ω 는 피치각이 된다.

Angle-tube probe와 prism probe에 대한 교정 데이터는 Fig. 3~Fig. 5에 도시하였다. 각각의 곡선은 식 (9)로 보간되어 실제 유동장에서 측정된 5개의 압력 신호로부터 유동각, 속도 및 압력을 구할때 사용된다. Fig. 3은 피치계수와 요계수에 대한 격자형태로 되어 있으며, 수평방향으로 향한 곡선은 요각이 일정한 경우이고 수직방향으로 향한

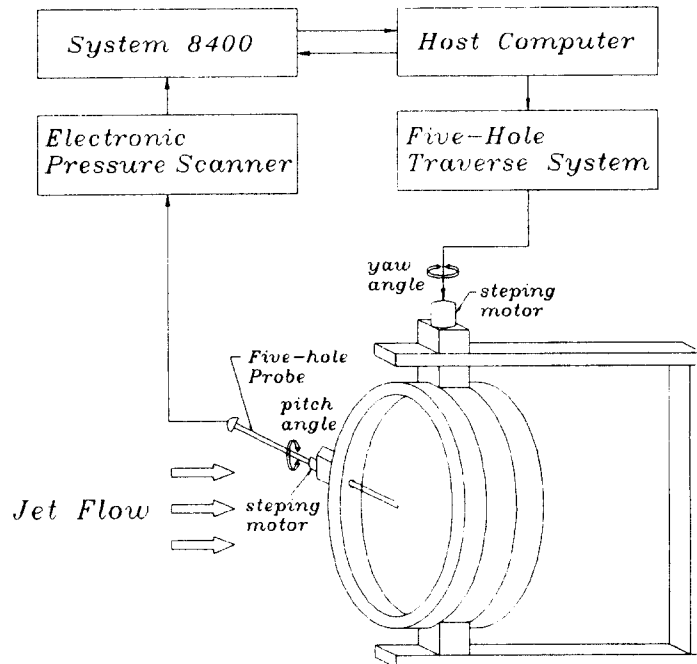


Fig. 2 Five hole probe calibration system.

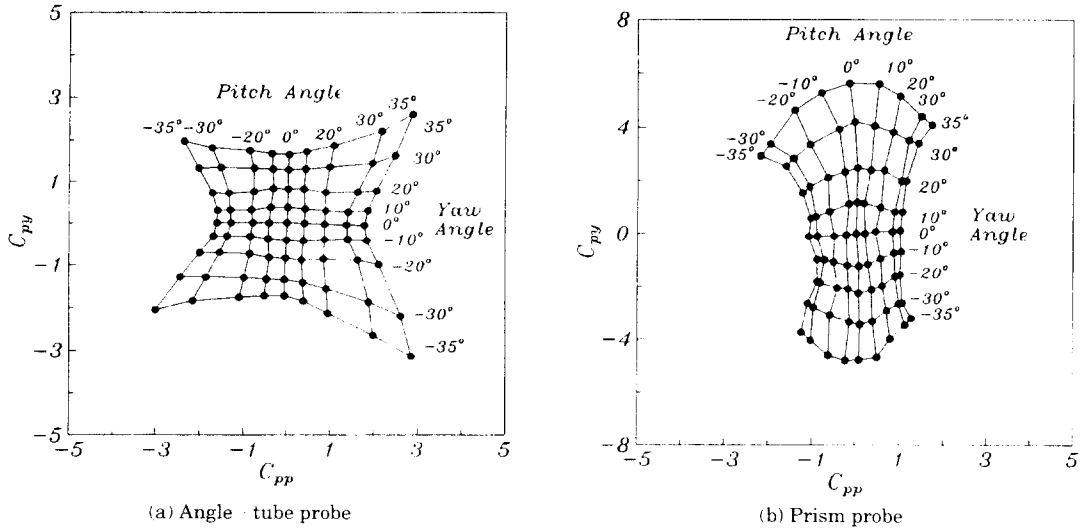


Fig. 3 Typical calibration data C_{pp} vs C_{py} .

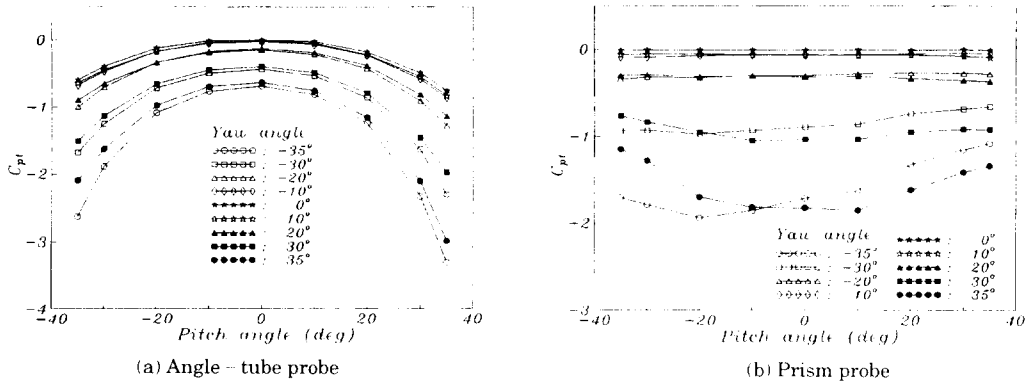


Fig. 4 Typical calibration data C_{pt} vs α .

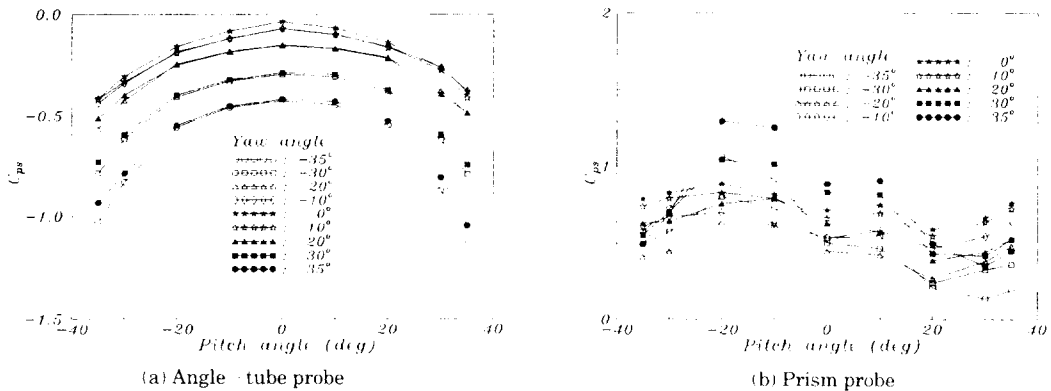


Fig. 5 Typical calibration data C_{ps} vs α .

곡선은 피치각이 일정한 경우이다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 일정한 요각에 대하여 피치각의 변화에 대한 정압 및 전압계수의 관계를 나타낸다.

전체적으로 두 센서에 대한 교정 결과는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기하학적 형상의 차이로 인하여 서로 다른 특성을 보이며, 특히 피치각의 변화에 대한 격자의 형태와 정압계수의 분포형태는 상당한 차이를 보인다. 피치계수와 요계수에 대한 격자형태를 보면 prism probe의 경우 피치계수의 변화범위가 아주 좁으며, 이러한 특성 때문에 prism probe는 피치면에 대한 유동의 변화에 민감하게 응답하게 된다. 정압계수의 분포에서도 prism probe의 응답은 angle-tube probe의 응답에 비해 강한 비대칭을 이루고 있다. 이러한 결과는 후자의 경우 지지대가 센서의 측정부와 떨어져 있기 때문에 비교적 대칭에 가까운 분포를 보이지만 전자의 경우에는 피치각의 변화에 따라 프로브 지지대에 의한 end-flow의 영향을 많이 받기 때문에 비대칭을 형성하게 된다.

3. 측정신호에 대한 속도와 압력의 결정

5공 프로브를 이용하여 비영위법으로 유동장을 측정할 경우 기지의 유동장에서 교정한 결과를 이용하여 미지의 유동장에 대한 응답으로부터 실제 속도와 압력을 구하게된다. 즉 측정된 5개의 압력 신호를 이용하여 Fig. 3에 나타난 피치계수와 요계수의 격자로부터 유입각 α 와 β 를 결정하고 이 각에 대한 전압 및 정압계수를 구하여 속도와 전압 및 정압을 계산한다. 이때 교정 데이터로부터 결정되어야 하는 유입각 α 또는 β 는 두개의 독립변수를 갖게되며, 따라서 α 또는 β 를 구하기 위하여 각각 2번의 보간이 필요하다.

측정 신호에 대하여 속도와 압력을 결정하는 방법은 아래와 같다.

(1) 5공 프로브의 5개의 압력으로부터 식 (4), (5)로 피치계수와 요계수를 구하여 C'_{pt} , C'_{ps} 라 한다.

(2) 각각의 요각에 대하여 피치계수와 요계수의 교정 데이터를 식 (9)로 보간하여 측정에 의해 구해진 피치계수 C'_{py} 에 대응하는 요계수를 구한다.

(3) 요각과 (2)에서 구한 요계수를 식 (9)로 보간

하여 측정에 의해 구해진 요계수 C'_{py} 에 대응하는 국소 요각 β' 를 구한다.

(4) (2)와 (3)의 과정에서 요와 피치를 서로 바꾸어 차례로 실행하여 국소 피치각 α' 를 구한다.

(5) 각각의 요각에 대하여 피치각과 전압계수의 교정 데이터를 식 (9)로 보간하여 (4)에서 구한 피치각 α' 에서의 피치계수를 구한다.

(6) 요각과 (5)에서 구한 피치계수의 관계를 식 (9)로 보간하여 (3)에서 구한 요각 β' 에 해당하는 전압계수 C'_{pt} 을 구한다.

(7) (5)와 (6)의 과정에서 전압계수와 정압계수를 바꾸어 차례로 실행하여 정압계수 C'_{ps} 를 구한다.

위의 과정이 끝나면 측정점에 대한 전압, 정압 및 유입속도는 아래의 식으로 구하게 되며, 각각의 속도성분은 위에서 결정된 피치각과 요각 및 식 (12)에서 구해지는 유입속도를 식 (1)~(3)에 대입하여 구한다.

$$P_t = P_1 - C'_{pt} \times (P_1 - \bar{P}) \quad (10)$$

$$P_s = \bar{P} - C'_{ps} \times (P_1 - \bar{P}) \quad (11)$$

$$U_o = \sqrt{\frac{2 \times (P_t - P_s)}{\rho}} \quad (12)$$

4. 레이놀즈수의 영향

5공 프로브로 유동장을 측정하는 기본 목적은 측정점에 대한 3차원 속도성분을 구하는 것이다. 이때 프로브의 교정시 속도를 고정한 후 피치각과 요각의 변화에 대한 교정 데이터를 구하여 변화하는 유동장에서 속도성분을 측정하게 되며, 따라서 교정 데이터에 대한 레이놀즈수의 영향을 평가할 필요가 있다. 즉 교정 데이터가 레이놀즈수의 함수로 변화된다면 실제의 속도를 계산할 경우 오차의 범위가 커지게 된다. 본 연구에서는 교정속도를 10m/s~35m/s의 범위에서 변화시키면서 레이놀즈수 Re_p 의 영향을 평가하였다. 이때 Re_p 는 프로브의 직경을 기준으로 계산한 레이놀즈수이다.

Fig. 6~Fig. 8은 요각이 20도인 경우 피치각과 Re_p 의 변화에 따른 교정 데이터를 나타내고 있다. 두 경우 모두 피치계수와 요계수 및 전압계수는 Re_p 의 영향을 거의 받지 않지만 정압계수의 경우

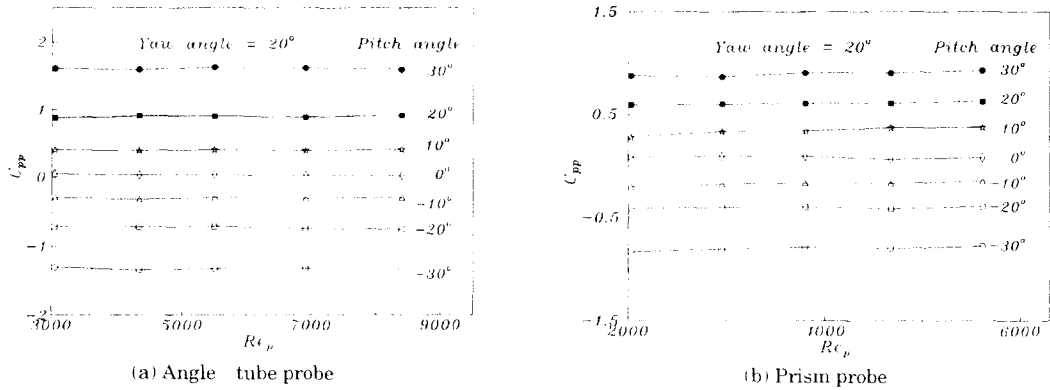


Fig. 6. Typical Reynolds number effect on the calibration data C_{pp} .

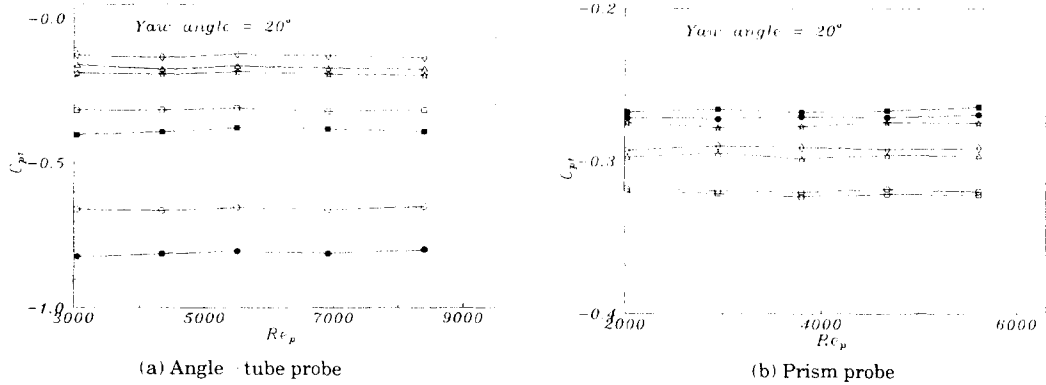


Fig. 7. Typical Reynolds number effect on the calibration data C_{pt} . (marks are the same as those of Fig. 6)

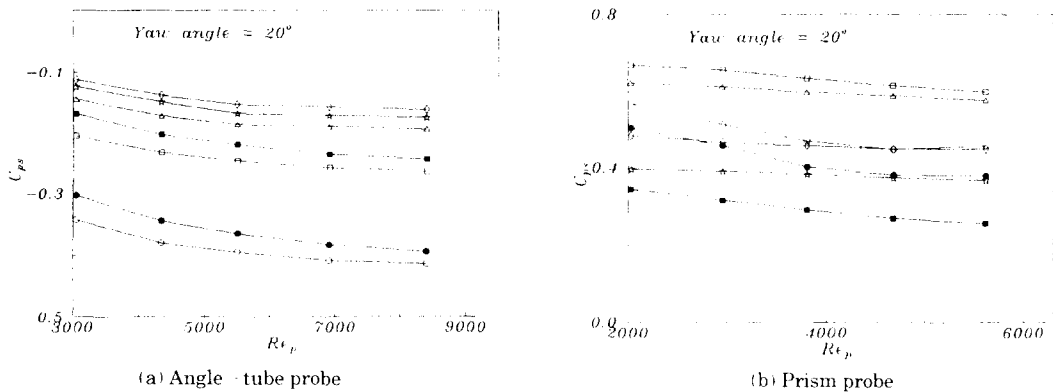


Fig. 8. Typical Reynolds number effect on the calibration data C_{ps} . (marks are the same as those of Fig. 6)

피치각이 증가 할수록 Re_p 의 변화에 대한 영향을 받게된다. 26m/s에서 프로브를 교정한 데이터를

이용하여 측정할 경우 본 연구의 레이놀즈수 범위에서 동압에 대한 정압의 최대오차는 약 5% 정도

였으며, 이에 대한 속도의 오차는 약 2.54% 정도이다. 이러한 오차를 보정하기 위하여 정압계수를 유입각 α 와 β 뿐만 아니라 레이놀즈수의 변화를 고려하여 교정을 해야 할 필요가 있으며, 이럴 경우 교정이 상당히 복잡해진다. 이에 대한 해결 방법으로 실험모델의 지배적인 레이놀즈수에서 교정된 데이터를 사용하는 방법과 레이놀즈수의 범위를 여러단계로 분할하여 각 구간의 교정 데이터로부터 수정계수를 구하여 사용하는 방법이 있다. 실제 레이놀즈수에 대한 정압계수의 의존도가 크지 않기 때문에 후자의 방법을 사용하면 레이놀즈수의 변화로 인한 오차는 1% 이하로 줄일 수 있다.

5. 교정결과에 대한 검토

5공 프로브의 교정결과를 이용하여 미지의 유동장에 대한 속도와 압력을 측정하기 위하여 프로브의 교정 결과에 대한 검증이 필요하며, 본 연구에서는 Fig. 2의 교정장치를 이용하여 유입각과 속도를 변화시키면서 측정한 결과에 대한 예측치와 실측치를 비교하였다.

Fig. 9는 prism probe에 대하여 피치각 및 요각을 변화시키면서 측정한 후, 교정 데이터를 이용하여 계산한 피치각과 요각의 예측치를 측정시의 피치각 및 요각과 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 피치각 및 요각이 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서는 예측치

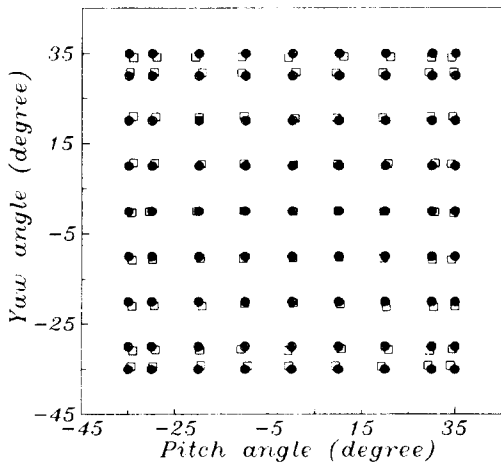


Fig. 9. Experimental and predicted values for flow angle.
 (● : experiment, □ : predict)

와 실측치가 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 $\pm 30^\circ$ 를 넘으면 예측치와 실측치 사이에 편차가 발생하며 최대 편차는 $\pm 1^\circ$ 정도이다. 피치각 및 요각의 증가는 프로브로 유입되는 유입각의 증가를 의미한다. 즉 유입각이 커지면 angle - tube probe의 경우 선단에서 유동의 박리가 발생하여 유입방향의 반대편에 위치한 압력공은 박리영역에 위치하게 되며, prism probe의 경우 프로브의 선단과 지지대의 영향을 받게 된다. 따라서 유입각이 클 경우에는 압력계수의 값이 유입각의 변화에 따라 민감하게 변화하지 못하며 이로 인하여 예측치와 실측치 사이에 오차가 발생하게 된다.

Fig. 10은 요각을 20도로 고정된 후 여러경우의 유입속도에 대하여 피치각을 변화시키면서 측정한 결과를 나타내고 있으며, 그림에서 점선은 측정시의 실제 속도이고 각각의 마크는 예측된 속도이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정결과는 실제속도를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 측정결과에 대한 압력과 속도의 계산은 피치각 및 요각을 결정한 후 수행하기 때문에 유입각의 편차는 압력의 예측치에 오차를 유발시키게 된다. 따라서 압력의 예측치도 유동각의 경우와 비슷한 결과를 보이게 되며, 예측치와 실측치에 대한 동압의 최대 오차는 3% 정도이다.

본 연구에서 사용한 교정 시스템으로 5공 프로브를 반복 교정할 경우 교정 데이터는 동압의 1.5% 이내에서 교정되어지며, 교정 데이터에 대한 불확실성(uncertainty)은 95%(20 to 1 odds)의 신

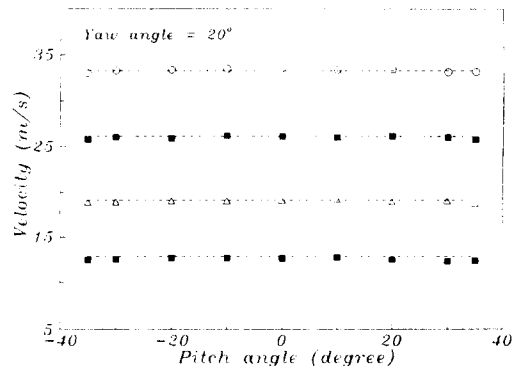


Fig. 10. Experimental and predicted values for velocity.

뢰도에서 피치각 및 요각의 최대값이 0.8° 정도였다.

7. 결 론

본 연구에서는 3차원 유동장에서 속도성분과 압력분포를 측정하기 위하여 사용되어지는 5공 프로브를 피치각과 요각의 변화에 대한 비영위법으로 교정하였다. 교정식은 프로브의 5개 압력신호에 대한 요계수, 피치계수, 전압계수 및 정압계수를 피치각과 요각의 함수로 하여 cubic spline 보간식으로 구하였다. 교정 데이터에 대한 불확실성은 피치각과 요각의 경우 0.8° 이내로 비교적 정확하게 교정되었다. 유입각과 동압에 대한 실측치와 예측치는 유입각이 작을 경우 거의 일치하며 유입각이 $\pm 30^\circ$ 를 넘으면 약간의 오차를 보이게 된다. 이때 동압의 최대 오차는 약 3% 정도이다. 교정 데이터에 대한 레이놀즈수의 영향은 정압계수의 변화가 지배하게 되며, 따라서 교정시 정압계수의 영향을 고려하기 위하여는 속도범위를 소구간으로 분할하여 각 영역에서 정압계수의 평균값을 이용하면 보다 정확한 값을 예측할 수 있다.

본 연구에 의한 교정결과를 이용하면 3차원 유

동장에 대한 평균속도와 전압손실분포 및 정압분포 등을 5공 프로브로 비교적 정확하게 측정할 수가 있다.

참고문헌

- 1) Lee, J. C. and Ash, J. E., "A three dimensional spherical pitot tube", Trans. ASME, Vol. 58, pp. 603 - 608, 1956.
- 2) Pien, P. C., "Five - hole spherical pitot tube", David Tylor Model Basin Report 1299, 1958.
- 3) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., "The calibration and application of five hole probes", ISA Transactions, Vol. 18, pp. 23 - 34, 1979.
- 4) Dominy, R. G. and Hodson, H. P., "An investigation of factors influencing the calibration of five hole probes for three dimensional flow measurements", Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 513 - 519, 1993.
- 5) Everett, K. N. and Durston, D. A., "Seven hole cone probes for high angle flow measurement : Theory and calibration", AIAA Journal, Vol. 21, pp. 992 - 998, 1983.