

<논 문>

## 5공프로우브의 보정에 영향을 주는 유동변수들에 대한 실험적 연구

이 상 우\* · 윤 태 진\*\*

(1996년 7월 8일 접수)

### Experimental Investigation of Flow Parameters Influencing the Calibration of Five-Hole Probes

Sang Woo Lee and Tae Jin Yoon

**Key Words :** Five-Hole Probe(5공프로우브), Calibration(보정), Cone Angle(원추각), Pressure-Hole Orientation(압력공방향), Reynolds Number(레이놀즈수)

#### Abstract

Effects of cone angle, pressure-hole orientation and Reynolds number on the five-hole probe calibration have been investigated for eight large-scale conical five-hole probes, which have either perpendicular pressure holes or forward-facing pressure holes for the cone angles of 45 deg, 60 deg, 75 deg and 90 deg. Pitch and yaw angles are changed from -40 deg to +40 deg with an interval of 5 deg, respectively, when the probe Reynolds numbers are  $1.77 \times 10^4$ ,  $3.53 \times 10^4$  and  $7.06 \times 10^4$ . The result shows that larger cone angle results in more sensitive changes in the calibration coefficients. In the case that the cone angle is 45 deg, the pitch-angle and yaw-angle coefficients of the five-hole probe with the perpendicular pressure holes show a very different trend compared with those of the five-hole probe with the forward-facing pressure holes. On the other hand, when the cone angle is more than 60 deg, each calibration coefficient is nearly independent of the pressure-hole orientation. Additionally, the effects of the Reynolds number on the calibration coefficients are also reported in detail.

#### 기 호 설 명

$C_{dp}$  : 동압계수, 식 (5)

$C_{pa}$  : 피치각계수, 식 (1)

$C_{sp}$  : 경압계수, 식 (3)

$C_{ip}$  : 전압계수, 식 (4)

$C_{ya}$  : 요각계수, 식 (2)

$D$  : 5공프로우브의 직경

$P_{av}$  : 5공프로우브 측면 압력공에서의 평균압력,  
식 (6)

$P_i$  : 5공프로우브의  $i$ -번째 압력공에서 측정된 압력

$P_s$  : 정압

$P_t$  : 전압

$Re_D$  : Reynolds 수 =  $U_\infty D / \nu$

$U_\infty$  : 자유유동속도

$x$  : 주유동방향 좌표, Fig. 2

$y$  : 높이방향 좌표

$z$  : 폭방향 좌표, Fig. 2

그리스문자

$\nu$  : 동점성계수

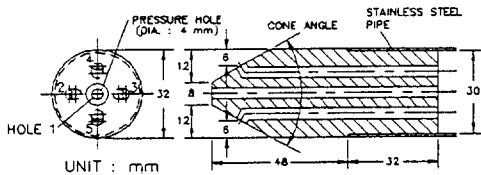
\*회원, 국립금오공과대학교 기계공학과

\*\*국립금오공과대학교 기계공학과 대학원

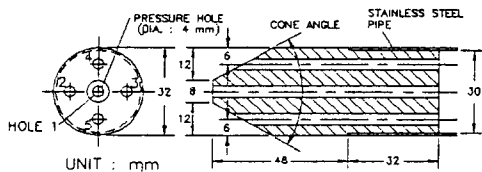
## 1. 서론

5공프로우브(five-hole probe)는 3차원 유동장에서 흐름각, 전압, 정압 등을 직접적으로 측정할 수 있는 유일한 수단으로 터보기계 및 복잡한 3차원 유동장의 연구에 널리 사용되고 있다.<sup>(1~4)</sup> 5공프로우브를 사용하여 3차원 유동장을 측정할 때, 그 측정에 영향을 줄 수 있는 파라미터로는 Reynolds 수, Mach 수, 난류성분, 속도구배, 벽면근접거리(wall proximity) 등이 있으며, 5공프로우브의 기하학적 형상과 관련하여 선단의 모양, 압력공의 방향, 원추각 등도 측정에 영향을 미친다. 실제 터보기계 등의 응용분야에서는 다양한 형상의 5공프로우브들이 사용되고 있지만, 본 연구에서는 주로 원추형 5공프로우브에 대하여 연구를 진행하고자 한다. Fig. 1은 이 원추형 5공프로우브의 선단 부분을 자세히 그린 것이다. 일반적으로 5공프로우브들은 프로우브의 측면에 위치하는 네 개의 압력공들이 그 표면에 대해 수직으로 뚫려 있는 수직압력공(perpendicular pressure hole) 5공프로우브(Fig. 1(a))와 5공프로우브의 중심선과 평행하게 뚫려 있는 평행압력공(forward-facing pressure hole) 5공프로우브(Fig. 1(b))로 구분될 수 있다.

Treaster와 Yocum<sup>(5)</sup>은 실제 유동측정에 사용하고 있는 상용 원추형 5공프로우브와 프리즘형 5공프로우브 등에 대하여 보정방법, 대표적인 보정곡선 및 보간과정 등을 자세히 기술하였다. 이와 함



(a) Five-hole probe with perpendicular pressure holes



(b) Five-hole probe with forward-facing pressure holes

Fig. 1 Present large-scale conical five-hole probes

계 그들은 이 상용 5공프로우브들에 대하여 Reynolds 수와 벽면근접거리가 속도측정에 미치는 영향에 대하여 간략하게 언급하였다. Smith와 Adcock<sup>(6)</sup>는 압력공이 5공프로우브 표면과 수직인 피라미드형 5공프로우브에 대하여 Reynolds 수, Mach 수 등의 영향을 연구하였다. Ligrani 등<sup>(7)</sup>은 5공프로우브의 선단 크기 때문에 실제 측정된 각 압력공의 압력들이 서로 다른 위치에서 측정됨에 유의하여 위치분해능(spatial resolution)를 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 이와 함께 그들은 속도구배에 비례하여 5공프로우브 근처에서 발생하는 다운워시(down wash) 속도를 고려한 측정방법을 제시하였다. Ligrani 등<sup>(8)</sup>은 선단 직경이 1.22 mm인 피라미드형의 초소형 5공프로우브에 대하여 이것의 보정방법, 제작방법 및 측정시 주의사항 등을 자세히 소개하였다. 최근 들어 Dominy와 Hodson<sup>(9)</sup>은 터보기계의 유동 측정에 널리 사용되는 원추형 및 피라미드형 5공프로우브에 대하여, Reynolds 수, Mach 수, 압력공의 방향, 난류강도 등의 영향을 연구하였다. 그들은 모든 실험을 피치각을 0도로 고정하고 요각을  $-20^\circ$ 에서  $+20^\circ$ 로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그 결과 요각이 서로 다른 두 영역에서 Reynolds 수가 보정결과에 큰 영향을 미침을 밝혔다. 또한 그들의 결과에 의하면 Mach 수가 다른 경우에도 Reynolds 수에 따른 보정계수의 변화가 거의 없었다. 1996년 이상우와 윤태진<sup>(10)</sup>은 벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그들은 요각뿐만 아니라 5공프로우브와 벽면 사이의 경사각도 벽면근접 효과에 큰 영향을 미침을 밝혔고, 벽면근접거리에 따른 유동각의 변화정도를 제시하였다.

본 연구에서는 터보기계의 연구개발 및 복잡한 3차원 유동장의 측정에 널리 사용되는 원추형 5공프로우브의 보정특성에 대하여 체계적인 연구를 수행하였다. 일반적으로 원추형 5공프로우브를 프로우브 고정법(non-nulling method)을 적용하여 사용할 경우, 피치각과 요각이 각각  $-40^\circ$ 에서  $40^\circ$  범위 내에서의 사용이 가능하다. 그러나 기존의 연구<sup>(9)</sup>에서는 피치각이 0도인 상태에서 요각만을 변화시켰고, 요각의 범위도  $-20^\circ$ 에서  $+20^\circ$  사이로 제한되어 있다. 본 연구에서는 피치각과 요각을 각각  $-40^\circ$ 에서  $+40^\circ$ 까지 변화시킴으로써, 실제 사용범위 전체에 걸쳐 보정계수의 변화를 제시하였

다. 앞에서 언급했듯이 5공프로우브의 보정에 영향을 주는 파라미터는 매우 다양하지만, 여기서는 원추각, 압력공의 방향 그리고 Reynolds 수 ( $= U_{\infty}D/\nu$ ) 등이 원추형 5공프로우브의 각 보정계수에 미치는 영향에 대해 주로 연구하고자 한다. 이를 위해 지지대가 코브라형으로 설계된 여러 종류의 large-scale 원추형 5공프로우브들을 제작하였다. 소형 5공프로우브가 아닌 large-scale 원추형 5공프로우브를 실험대상으로 채택한 이유는 5공프로우브를 정확하게 제작할 수 있고, 저속 풍동에서 실제 터보기계 내부에서의 프로우브 Reynolds 수를 구현할 수 있기 때문이다.

## 2. 실험

### 2.1 원추형 5공프로우브

본 연구에서 사용한 large-scale 원추형 5공프로우브의 개략도가 Fig. 1에 소개되어 있다. 원추각은 45도, 60도, 75도, 90도 등 네 종류로 변화시켰고, 이들 원추각에 대하여 Fig. 1에서와 같이 수직 압력공과 평행압력공을 가지는 2종류의 5공프로우브를 각각 제작하였다. 이들 5공프로우브들은 Fig. 2와 같이 프로우브지지대의 끝부분에 삽입되어 고정된다. 모든 5공프로우브 선단의 길이와 직경( $D$ )은 각각 80mm와 32mm로 일정하며, 지지대 끝단에서 5공프로우브 끝부분까지의 거리, 즉 5공프로우브 선단에서 지지대 안으로 삽입되지 않는 부분의 길이는 원추각이 바뀌더라도 48mm로 항상 일정하게 유지된다. 모든 5공프로우브에 대하여 압력공의 직경은 4mm로 동일하며, 압력공의 방향에 관계 없이 압력공 2, 3, 4, 5 등의 중심들은 원추경사면의 중심에 위치한다. 이 large-scale 5공프로우브들은 실제 측정에 사용되는 소형 5공프로우브에 비하여 상대적인 표면조도가 훨씬 작다. 이 표면조도도 실제 프로우브의 보정 특성에 영향을 줄 수 있지만 본 연구에서는 이 영향을 고려하지 않았다. 본 연구에서 사용한 5공프로우브의 지지대는 Fig. 2와 같이 코브라형이며, 외경이 32mm이고 두께는 1mm인 스테인리스 스틸 파이프로 정밀하게 제작되었다. 이 지지대는 그 끝단에 앞에서 언급한 원추형 5공프로우브들을 자유롭게 탈착할 수 있고, 부착된 5공프로우브의 압력공 1 입구가 프로우브지지대의 중심선과 일치하도록 설계되었다. 따라서 5공프로우브를 요각 방향으로 회전하여도 압력공 1

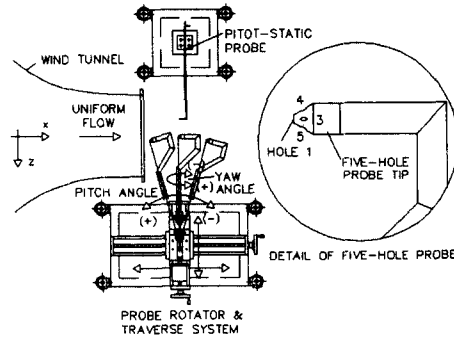


Fig. 2 Top view of experimental apparatus

의 위치는 변화하지 않게 된다. 이 5공프로우브의 5개의 구멍들은 각각 공압튜브로 연결되며, 이 튜브들은 지지대 파이프 내부를 통하여 압력스캐너와 연결된다.

### 2.2 실험장치

실험장치는 Fig. 2에서와 같이 크게 풍동과 5공프로우브 회전장치로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 풍동은 개방형으로, 시험단면의 크기는 600mm×400mm이며 면적축소비는 9.0이다. 그리고 풍동의 출구속도는 최대 40m/s까지 연속적인 조절이 가능하며, 유속의 균일도는 1% 이내이다. 5공프로우브의 회전은 피치각의 경우 각도분해능이 0.2도인 수동회전장치에 의해 이루어지고, 요각은 백래쉬가 매우 작은 하모닉 감속기어가 장착된 AC 서보모터에 의해 자동적으로 이루어졌다. 이 요각 자동회전장치의 각도분해능은 0.0072도이며, 이것은 피치각 회전장치에 탑재되어 있다. 5공프로우브가 요각 방향으로 회전할 경우에는 5공프로우브의 선단 위치가 변화하지 않으나, 피치각 방향으로 회전을 할 경우에는 5공프로우브의 위치가  $x$ -축과  $z$ -축 방향으로 크게 달라진다. 이와 같은 5공프로우브의 위치 변화를 보상하기 위하여 5공프로우브 회전시스템은 수평조절이 가능한 3축 이송장치 위에 탑재되어 있다.

본 연구에서의 압력측정은 IBM PC AT-386으로 전체 측정시스템을 온라인화하였으며, IBM PC에는 GPIB 및 다기능입출력보드(National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 내장되어 있다. 5공프로우브로부터의 압력신호는 압력변환기(MKS, type 120)에 의해 전압으로 변환된다. 본 연구에서 사용한 MKS 압력변환기는 내부에 히터가 내장되

어 있어서 주위 온도 변화에 관계 없이 센서의 온도를 일정하게 유지시켜 준다. 이 압력변환기의 DC 출력은 디지털전압계에 의해 모니터되고, 또한 이 전압은 다기능입출력보드의 12-bit A-D 변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 이 A-D 변환기의 데이터 취득속도(sampling rate)는 최대 100kHz이며 입력단의 이득을 소프트웨어상에서 1, 2, 4, 8 등으로 변화시킬 수 있다. 5공프로우브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-6)를 사용하였고, 이 압력스캐너는 다기능 입출력보드를 이용하여 제어하였다.

본 연구에서는 Reynolds 수의 영향에 대한 실험을 위해 자유유동속도를 7.5 m/s, 15 m/s, 30 m/s 등으로 변화시켰고, 모든 실험에서 난류강도를 0.5% 이내로 일정하게 유지하였다. 이들 자유유동속도( $U_\infty$ )와 5공프로우브의 선단 직경( $D$ )에 근거한 Reynolds 수는 각각  $1.77 \times 10^4$ ,  $3.53 \times 10^4$ ,  $7.06 \times 10^4$  등이다. 실험에 사용된 모든 5공프로우브에 대하여, 피치각과 요각이 각각  $-40^\circ$ 에서  $+40^\circ$  범위에서 5도 간격으로 보정실험을 수행하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 피치각은 주유동과 프로우브 지지대가 서로 직각일 때를 0도로 설정하였고, 이때 요각은 압력공 2와 압력공 3에서 측정된 압력이 서로 같을 때 0도로 하였다. 본 연구에서는 Reynolds 수가  $3.53 \times 10^4$ 일 때 95%의 신뢰도로 오차범위(uncertainty interval)를 계산하였다.<sup>(11)</sup> 그 결과 압력측정의 오차범위는 자유유동 동압의  $\pm 0.7\%$ 이고, 피치각계수, 요각계수, 정압계수, 전압계수 등의 오차범위는 각각  $\pm 0.120$ ,  $\pm 0.095$ ,  $\pm 0.023$ ,  $\pm 0.043$  등이었다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 5공프로우브의 대표적인 보정방법

프로우브고정법을 적용한 보정실험에서는 특정한 피치각, 요각에 대하여 5개의 압력, 정압, 전압 등이 얻어진다. 이 7개의 측정압력은 다음과 같이 정의된 보정계수로 표현된다.<sup>(5)</sup>

피치각계수(pitch-angle coefficient)

$$C_{pa} = (P_4 - P_5) / (P_1 - P_{av}) \quad (1)$$

요각계수(yaw-angle coefficient)

$$C_{ya} = (P_2 - P_3) / (P_1 - P_{av}) \quad (2)$$

정압계수(static-pressure coefficient)

$$C_{sp} = (P_{av} - P_{ss}) / (P_1 - P_{av}) \quad (3)$$

전압계수(total-pressure coefficient)

$$C_{tp} = (P_t - P_t) / (P_1 - P_{av}) \quad (4)$$

식 (3)으로 정의된 정압계수 대신에 다음과 같이 정의된 동압계수가 5공프로우브의 보정계수로 사용되기도 한다.<sup>(9)</sup>

동압계수(dynamic-pressure coefficient)

$$C_{dp} = (P_t - P_s) / (P_1 - P_{av}) \quad (5)$$

여기서  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  등은 각 압력공에서 측정된 압력이고,  $P_s$ 와  $P_t$ 는 피토정압프로우브(Pitot-static probe)를 이용하여 따로 측정된 정압과 전압을 의미한다.  $P_{av}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{av} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4 \quad (6)$$

프로우브고정법을 이용한 보정실험에서는 각각의 피치각과 요각에 대해서  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_s$ ,  $P_t$  등의 7개의 압력이 구해지고, 이 압력들로부터 식 (1), 식 (2), 식 (3), 식 (4) 등에서 정의된 피치각계수, 요각계수, 정압계수, 전압계수 등이 계산된다. 이 네 가지 계수들은 일반적으로 피치각과 요각의 변화에 따른 피치각계수 대 요각계수 관계(Fig. 3, Fig. 4), 피치각과 요각의 변화에 따른 정압계수의 분포(Fig. 5, Fig. 6) 및 전압계수의 분포(Fig. 7, Fig. 8) 등으로 표현된다. 미지의 유동장에서 5공프로우브로부터 얻어진  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  등의 5개의 압력을 이용하여 3차원속도를 얻기 위해서는 먼저 이 5개의 압력으로부터 피치각계수와 요각계수를 계산해야 한다. 만약 피치각계수-요각계수 평면이 피치각-요각 평면과 일대일로 대응이 된다면, 적절한 보간방법을 적용하여 이 피치각계수와 요각계수로부터 피치각과 요각을 바로 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 피치각과 요각을 피치각과 요각의 함수로 표현된 정압계수와 전압계수에 적용하여 보간하면, 측정위치에서의 정압계수  $C_{sp}$ 와 전압계수  $C_{tp}$ 가 구해진다. 식 (3)과 식 (4)에서  $C_{sp}$ ,  $C_{tp}$ ,  $P_1$ ,  $P_{av}$  등은 이미 알고 있는 값이 되므로, 이 두 식으로부터 정압  $P_s$ 와 전압  $P_t$ 를 바로 구할 수 있다. 두 흐름각 즉 피치각과 요각 및 정압과 전압이 모두 구해지면 각 좌표계 방향의 3차원 속도 성분들은 이들 사이의 관계식으로부터 쉽게 계산될 수 있다.<sup>(5)</sup> 프로우브고정법을 적용한 5공프로우브 보정프로그램의 개발에 있어서 가장 중요한 점은 앞에서 언급한 보정관계들로부터 피치각, 요각, 정압, 전압 등을 정확하고 신뢰성 있게

찾아내는 것이다.

### 3.2 원추각 및 압력공방향의 영향

여기서는 주로 자유유동속도가 15m/s인 경우 즉 Reynolds 수가  $3.53 \times 10^4$ 일 때의 결과를 주로 제시하고자 한다. Fig. 3은 수직압력공이 뚫려 있는 원추형 5공프로우브의 피치각계수와 요각계수를 피치각과 요각의 변화에 따라 나타낸 것이다. 본 연구의 보정실험은 피치각과 요각이  $-40$ 도와  $40$ 도 범위에서 5도 간격으로 이루어졌다. 그런데 피치각과 요각의 절대값이 40도일 때, 피치각계수와 요각계수의 값이 지나치게 커져서, 여기서는 피치각과 요각이 35도 이하의 데이터만 제시하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 수직압력공 5공프로우브의 경우, 원추각이 45도에서 90도로 변화해도 피치각계수-요각계수 평면이 원추각에 관계 없이 피치각-요각 평면과 모두 일대일로 대응이 되고 있다. 따라서 피치각계수와 요각계수가 주어졌을 때, 적절한 보간 방법을 적용하면, 이에 대응하는 피치각과 요각은 문제 없이 결정된다. 일반적으로 피치각이 일정한 곡선들과 요각이 일정한 곡선들이 서로 직각으로 만나고 이들로 구성되는 각 격자들의 간격이 균일하다면, 다시 말해 각 격자가 정사각형 꼴이라면 가장 이상적일 것이다. 실제로 Fig. 3에서 피치각과 요각이 0도 근처에서 이와같은 이상적인 관계가 근사적으로 실현된다. 그러나 피치각과 요각이 동시에 큰 값을 갖는 경우, 즉 피치각과 요각 모두 0도인 곳으로부터 대각선 방향으로 멀어지는 경우, 각 격자는 크게 변형되어 마름모 형태로 변화한다. 이와같은 격자의 변형은 원추각이 45도일 경우에는 비교적 작지만, 원추각이 90도로 증가되면 매우 심해진다. Fig. 3의 각 그림을 자세히 살펴 보면, 원추각이 큰 5공프로우브에서 피치각과 요각이 일정한 각도만큼 증가할 때 이에 대응되는 피치각계수와 요각계수의 변화는 원추각이 작은 경우에 비하여 매우 크다. 즉 원추각이 클수록, 각 격자를 구성하는 꼭지점들 사이의 간격이 크게 증가한다. 따라서 다른 보정 파라미터의 영향이 없다고 가정한다면, 이와 같은 각 격자 면적의 증가는 실제 보간 과정에서 피치각과 요각을 더 정확하게 결정할 수 있게 한다.

Fig. 4는 평행압력공이 뚫려 있는 원추형 5공프로우브의 피치각계수-요각계수의 관계를 나타낸다. 이 경우에도 원추각이 45도에서 90도로 증가하면

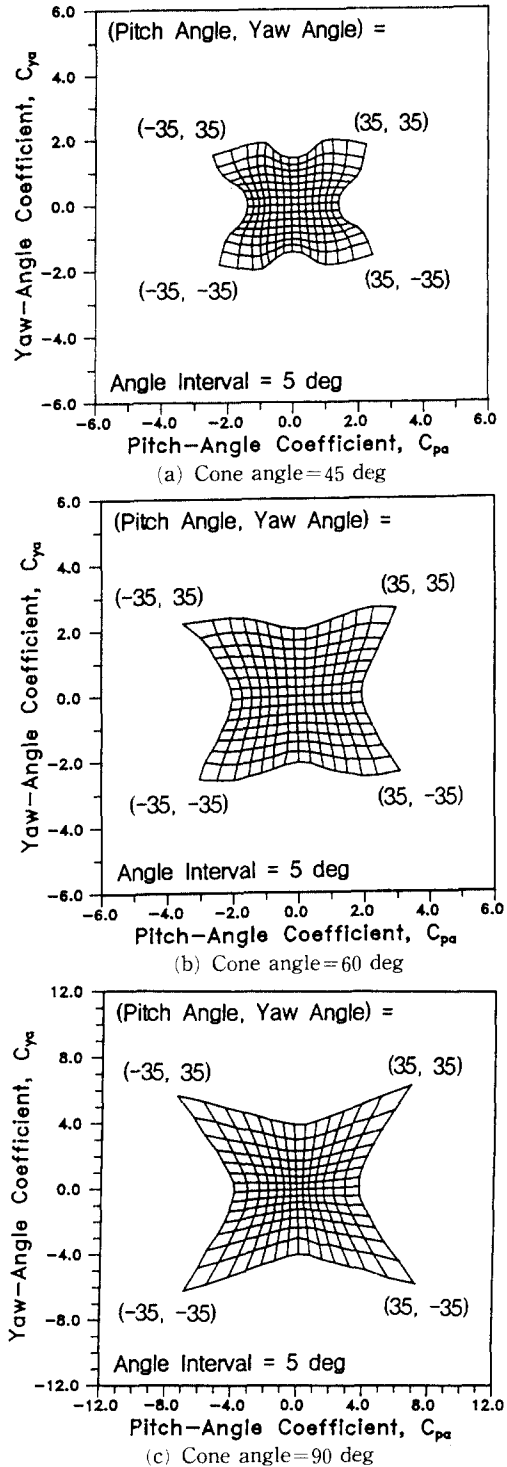
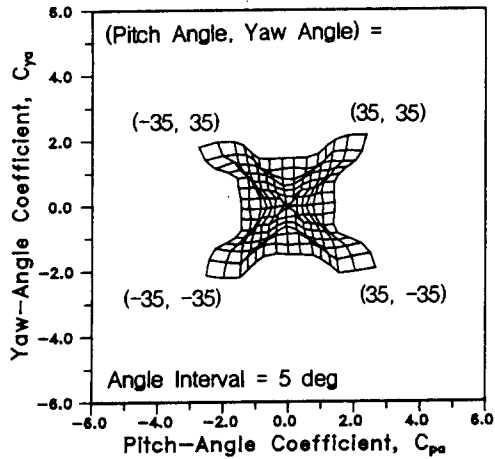
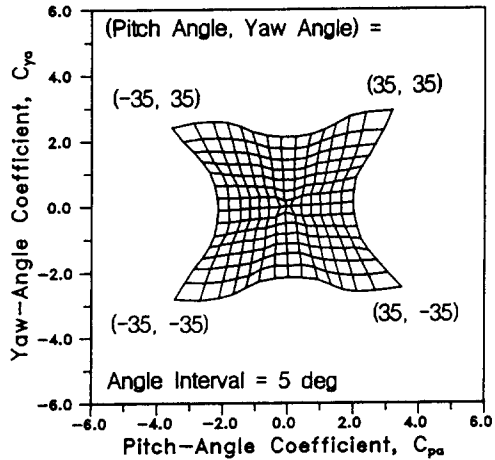


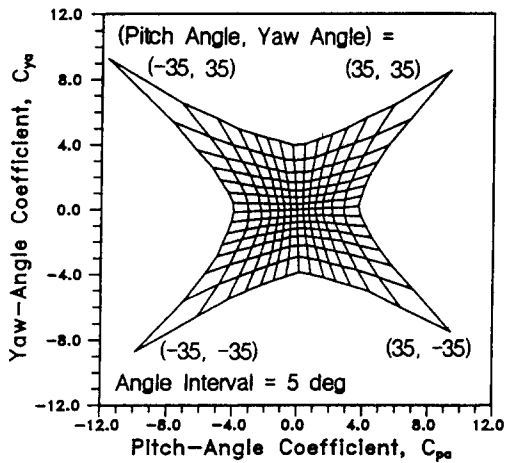
Fig. 3 Pitch-angle coefficient versus yaw-angle coefficient for conical 5-hole probe with perpendicular pressure holes for  $Re = 3.53 \times 10^4$



(a) Cone angle=45 deg



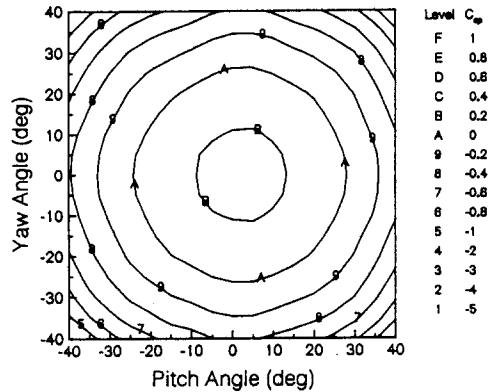
(b) Cone angle=60 deg



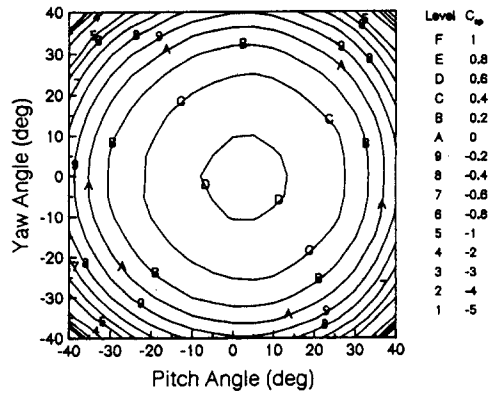
(c) Cone angle=90 deg

Fig. 4 Pitch-angle coefficient versus yaw-angle coefficient for conical 5-hole probe with forward-facing pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$

각 격자 사이의 간격이 크게 증가하고, 대각선 방향으로 격자의 변형이 심화된다. 전반적으로 원추각이 서로 같은 수직압력공 5공프로우브와 평행압력공 5공프로우브의 보정계수들의 변화 범위는 대체로 서로 비슷하다. 그러나 원추각이 90도일 때 평행압력공 5공프로우브의 보정곡선이 Fig. 3(c)에 비하여 대각선 방향으로 격자의 변형이 더 심하지만, 이 대각선 방향의 격자점들을 제외하면 보정계수의 범위가 서로 비슷함을 알 수 있다. 그런데 평행압력공 5공프로우브의 경우 원추각이 60도 이하일 때, 피치각과 요각의 절대값이 모두 5도 이하에서 격자의 불균일이 매우 크게 나타났다. 특히 원추각이 45도인 평행압력공 5공프로우브의 경우에는 피치각계수-요각계수 평면과 피치각-요각 평면 사이의 관계가 일대일로 대응이 되지 않고, 각 격자들이 특히 대각선 방향으로 심하게 뒤틀려 있다.



(a) Cone angle=45 deg



(b) Cone angle=75 deg

Fig. 5 Contours of static-pressure coefficient for conical 5-hole probe with perpendicular pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$

따라서 평행압력공이 뚫려 있는 45도 5공프로우브는 피치각과 요각의 정확한 결정이 불가능하므로 5공프로우브로서의 기능을 수행할 수 없게 된다. 그러나 원추각이 60도일 때에는 피치각과 요각 모두 5도 이내를 제외하면 수직압력공 5공프로우브와 전체적으로 비슷한 경향을 보여 준다. 원추각이 90도가 되면 피치각과 요각의 절대치가 30도보다 작은 경우로 한정하면, 압력공의 방향이 피치각계수와 요각계수 평면에 거의 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 정압계수를 피치각과 요각의 함수로 표현한 그림들이다. 먼저 수직압력공 5공프로우브의 정압계수 분포를 살펴 보면(Fig. 5), 등정압계수선들은 피치각과 요각이 0도인 곳을 중심으로 거의 동심원 형태로 존재하고, 정압계수의 구배는 피치각과 요각의 절대값이 증가할수록 커진

다. 이때 원추각이 증가하면(Fig. 5(b)), 정압계수의 구배는 매우 심해지고 그 최대값도 증가하는 경향을 보인다. 특히 피치각과 요각 모두 40도일 경우에는 정압계수의 절대값이 크게 증가함을 확인할 수 있다. 평행압력공 5공프로우브의 정압계수 분포(Fig. 6)는 수직압력공 5공프로우브의 동심원 형태와 매우 다르게 나타났다. 원추각이 45도일 때 등정압계수선들의 분포는 십자가 형태를 나타내며, 원추각이 증가하여 75도로 되면 등정압계수선들은 8각형 형태로 변화된다. 이와 같은 분포의 변화 이외에는 평행압력공 5공프로우브의 정압계수는 앞에서 언급한 수직압력공 5공프로우브의 정압계수 분포와 대체로 비슷한 경향을 보여준다. 즉 원추각이 일정할 때 피치각과 요각이 증가하면 정압계수의 구배는 커지고, 원추각이 증가할수록 정압계수의 최대값이 증가한다. 본 연구의 전체 실험결과를 토

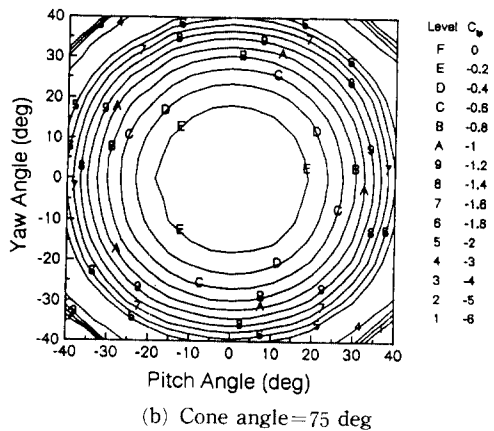
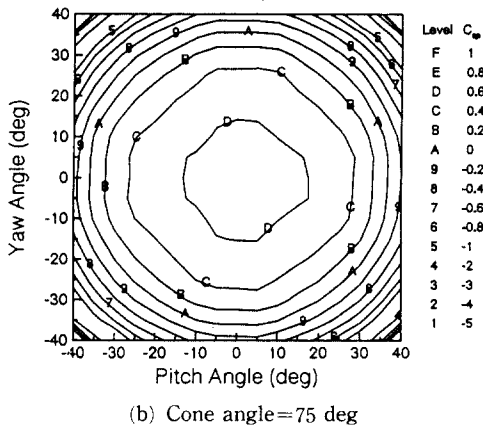
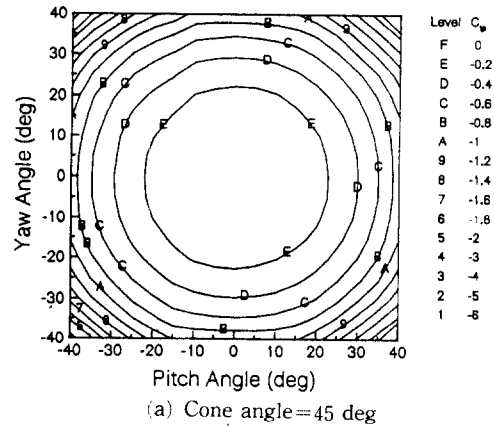
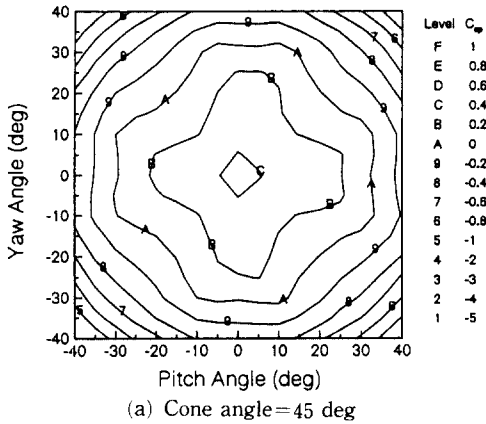


Fig. 6 Contours of static-pressure coefficient for conical 5-hole probe with forward-facing pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$

Fig. 7 Contours of total-pressure coefficient for conical 5-hole probe with perpendicular pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$

대로 정압계수의 변화경향을 종합해 보면, 일반적으로 피치각과 요각이 작을 경우 정압계수의 변화는 비교적 작지만, 피치각과 요각이 커지면 그 변화량이 크게 증가한다. 그리고 압력공의 방향에 관계없이 원추각이 증가하면 전체적으로 정압계수의 구배가 커지는 경향이 나타나며, 정압계수의 최대값도 증가한다. 수직압력공 5공프로우브의 경우 등정압계수선들은 피치각과 요각이 모두 0도인 점을 중심으로 거의 동심원의 형태로 존재한다. 이것은 요각이 0도일 때의 실험결과 즉 프로우브회전법(nulling method)의 실험결과만 알아도 다른 흐름각에서의 정압계수의 경향을 그대로 파악할 수 있음을 의미한다. 그러나 평행압력공의 경우에는 등정압계수선들이 동심원 형태와 비교하여 크게 달라지는데, 이와 같은 현상은 원추각이 작고, 피치각

과 요각이 작을수록 심화되는 경향을 보여 주었다. Fig. 7과 Fig. 8은 전압계수를 피치각과 요각의 함수로 표현한 그림들이다. 전압계수의 전체적인 변화 경향은 정압계수의 경우와 흡사한 점이 많이 발견된다. 수직압력공 5공프로우브의 경우(Fig. 7), 등전압계수선들은 피치각과 요각이 대략 0도 근처를 중심으로 동심원을 형성하고 있으며, 피치각과 요각이 비교적 작을 경우 전압계수의 구배는 매우 작지만, 피치각과 요각이 증가하면 그 구배가 급격히 증가한다. 그러나 평행압력공이 뿔려 있는 5공프로우브에서는(Fig. 8), 원추각이 작을 때 등전압계수선들이 동심원 형태로부터 다소 변형되는 경향을 보여 주었지만, 그 변화가 정압계수의 경우처럼 심하지는 않았다. 정압계수와는 달리 원추각이 변화하거나 압력공방향이 달라져도, 피치각과 요각이 0도 근처에서 나타나는 전압계수의 최대값은 그다지 크게 변화하지 않았지만, 흐름각이 큰 영역에서는 원추각에 따라 전압계수가 큰 폭으로 변화하였다.

Fig. 9는 수직압력공 5공프로우브에 대하여, 피치각과 요각이 모두 20도일 때 각 압력공에서 측정된 5개의 압력들과  $P_{av}$ 를 원추각의 함수로 표시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 원추각이 증가하면  $P_1$ 은 감소하는 반면에,  $P_2, P_3, P_4, P_5, P_{av}$  등은 증가하는 경향을 보인다. 따라서 원추각이 커

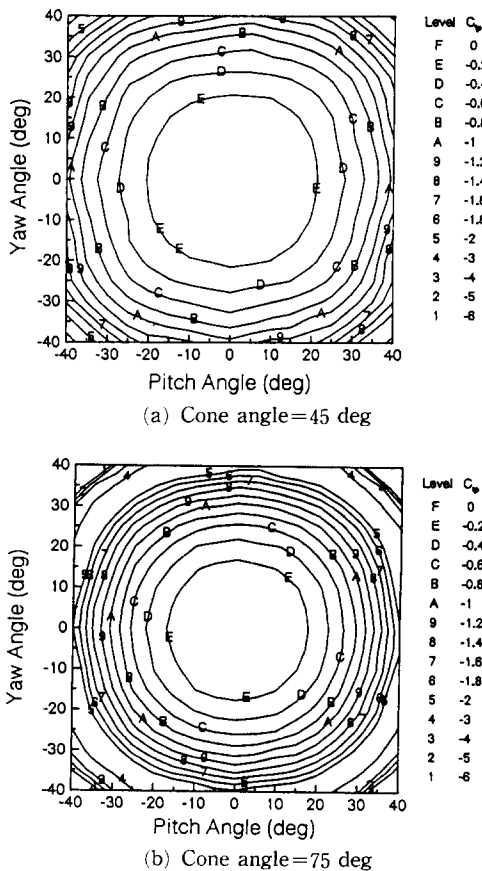


Fig. 8 Contours of total-pressure coefficient for conical 5-hole probe with forward-facing pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$

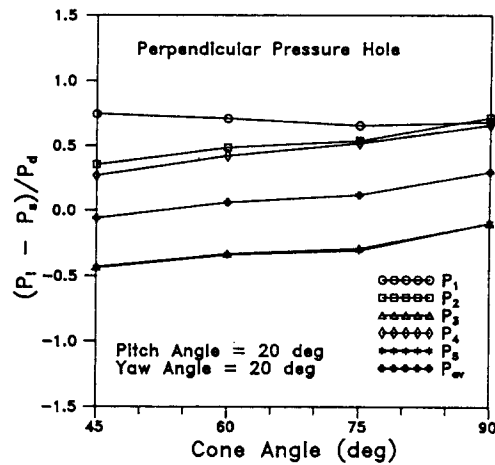


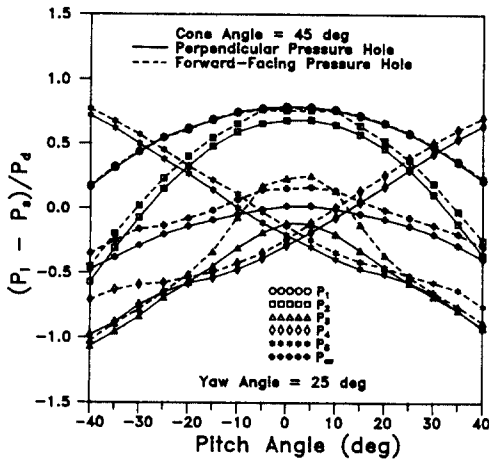
Fig. 9 Pressures measured at each pressure holes of conical five-hole probe with perpendicular pressure holes for  $Re=3.53 \times 10^4$  as a function of cone angle when pitch angle=20 deg and yaw angle=20 deg



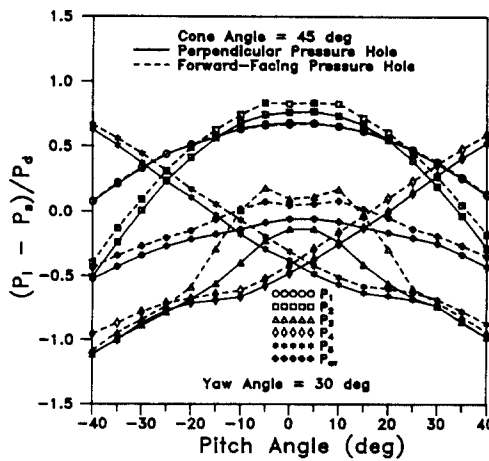
지면 ( $P_1 - P_{av}$ )는 감소하게 된다. 그런데 식 (1)부터 식 (5)에서 정의된 보정계수들의 분모가 모두 ( $P_1 - P_{av}$ )이므로, 원추각이 커지면 이들 보정계수들은 증가할 수 밖에 없다. 이와 같은 이유에서 원추각이 증가할수록 각 보정계수의 단위 흐름각당 변화가 심화된다.

Fig. 10은 원추각이 45도인 5공프로우브에 대하여 요각이 25도와 30도일 때, 각 압력공에서 측정된 압력들이 압력공의 방향에 따라 어떻게 변화하는지를 보여준다. 요각이 25도 (Fig. 10(a))와 30도일 (Fig. 10(b)) 경우 모두 압력공방향이 달라져도

$P_1$ 는 거의 변화하지 않는다. 이것은 원추면에 위치한 압력공의 방향을 제외하면 두 5공프로우브의 형상이 동일하므로 당연한 결과라고 할 수 있다. 그러나 원추면에 뚫린 압력공에서 측정된 압력들 중  $P_2$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  등은 요각에 관계 없이 평행압력공에서의 측정 결과가 수직압력공에서 측정된 결과보다 조금 더 크게 나타나고, 이 압력차는 피치각에 따라 그다지 심하게 변화하지 않는다. 이와는 달리 압력공방향을 변화가  $P_3$ 에는 큰 영향을 주었다. 요각이 25도일 경우,  $P_3$ 에 대한 압력공방향을의 영향은 피치각이 -15도에서 +15도 사이에서 그 영향이 두드러졌다. 그러나 피치각의 절대값이 15도보다 큰 곳에서는 압력공방향을의 영향이 급격히 감소하였다. 이와 같은 경향은 요각이 30도일 경우에도 그대로 나타나지만, 압력공방향을의 영향이 심한 범위가 -20도에서 +20도 사이로 더 확대된다. 이렇게 압력공방향을의 영향이 크게 나타나는 곳에서는 평행압력공 5공프로우브에서 측정된 ( $P_2 - P_3$ )가 크게 감소하므로, 수직압력공 5공프로우브와 비교하여 평행압력공의 요각계수는 급격히 감소하게 된다. 본 연구의 압력공 번호매김에서는 요각이 0보다 크면 압력공 2가 상류에 위치하고, 압력공 3이 주유동이 흘러가는 쪽에 놓이게 된다 (Fig. 2). 따라서 요각이 충분히 크면, 압력공 3 근처에서는 반드시 박리가 일어난다. 이때 박리가 일어나는 영역은 요각뿐만 아니라 피치각의 영향도 받을 것이다. Fig. 10에서  $P_3$ 가 압력공방향을에 따라 크게 달라지는 근본 원인은 압력공의 방향이 달라지면 압력공 입구의 면적이 달라지기 때문이다. 수직압력공의 경우 그 입구는 원형인 반면에, 평행압력공의 입구는 그 범위가 상류 및 하류방향으로 동시에 길어진 타원형이다. (Fig. 1) 원추각이 같으면 5공프로우브 표면에서의 박리영역은 일정할 것이다. 그런데 이때 압력공 입구의 범위가 서로 다를 경우 이들 압력공에서 측정된 압력은 서로 달라질 수 있다. 앞에서 언급했듯이, 평행압력공 45도 5공프로우브의 피치각계수-요각계수 평면은 피치각-요각 평면과 일대일로 대응이 되지 않았다. Fig. 4(a)를 자세히 살펴보면, 요각이 30도인 곡선이 피치각이 15도일 때 요각이 25도인 곡선과 서로 만나고 있다. 이것은 피치각이 20도에서 15도로 5도 감소할 때, 요각이 30도일 경우의 요각계수 감소량이 요각이 25도일 경우보다 훨씬 더 크기 때문인데 이와 같은 현상은 Fig. 10의 결과로부터 설명이 가능하다.



(a) Yaw angle=25 deg



(b) Yaw angle=30 deg

Fig. 10 Pressures measured at each pressure hole of five-hole probe with cone angle of 45 deg for  $Re=3.53 \times 10^4$

## 3.3 Reynolds 수의 영향

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 등은 원추각이 45인 수직압력공 5공프로브 보정계수들의 Reynolds 수에 따른 변화를 보여준다. Fig. 11(a), Fig. 3(a), Fig. 11(b) 등을 차례로 비교하면, Reynolds 수가 피치각계수와 요각계수에 미치는 영향을 이해할 수 있다. 피치각계수와 요각계수의 전체적인 분포는 Reynolds 수에 따라 정성적으로 그다지 크게 변화하지 않는다. 그러나 Reynolds 수가  $1.77 \times 10^4$ 에서  $3.53 \times 10^4$ 을 거쳐  $7.06 \times 10^4$ 으로 증가할수록, 각격자 사이의 간격이 감소하는 경향을 나타내는데,

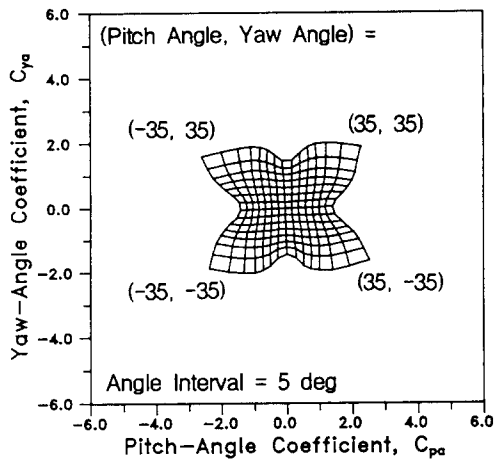
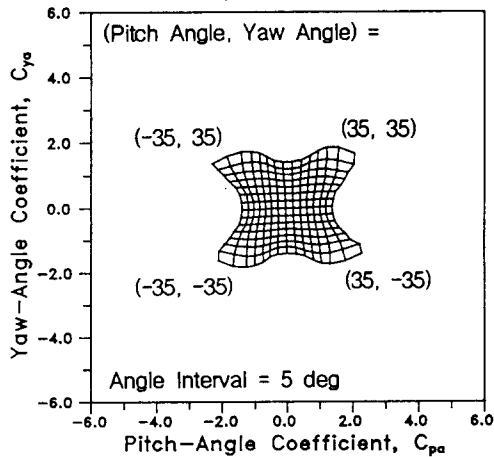
(a)  $Re = 1.77 \times 10^4$ (b)  $Re = 7.06 \times 10^4$ 

Fig. 11 Effect of Reynolds number on pitch-angle and yaw-angle coefficients of five-hole probe with perpendicular pressure holes when cone angle = 45 deg

이와 같은 현상은 특히 피치각과 요각의 절대치가 30도보다 클 때 두드러진다. Fig. 12(a), Fig. 5(a), Fig. 12(b) 등을 비교하면 정압계수에 대한 Reynolds 수의 영향을 이해할 수 있다. Reynolds 수가  $1.77 \times 10^4$ 에서  $3.53 \times 10^4$ 으로 증가할 경우, 피치각과 요각의 전 범위에 걸쳐서 정압계수는 증가하고, 그 구배도 다소 심화되었다. 특히 피치각과 요각이 모두 0도 근처에서도 이와 같은 현상이 뚜렷이 관찰되었다. 그러나 Reynolds 수가  $3.53 \times 10^4$ 에서  $7.06 \times 10^4$ 으로 증가하면 정압계수의 변화는 거의 없었다. 전압계수의 경우(Fig. 13(a), Fig. 7(a), Fig. 13(b)) 피치각과 요각이 대략 30도보다 작은 경우에는 Reynolds 수의 영향이 거의 없었고, 이들 흐름각이 30도보다 클 경우에도 그 변화 폭이 그다지 심하지 않았다. 전체적으로 볼

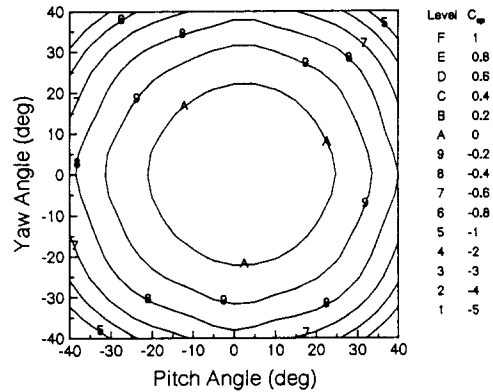
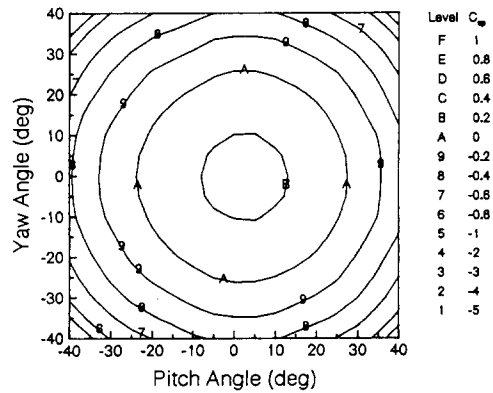
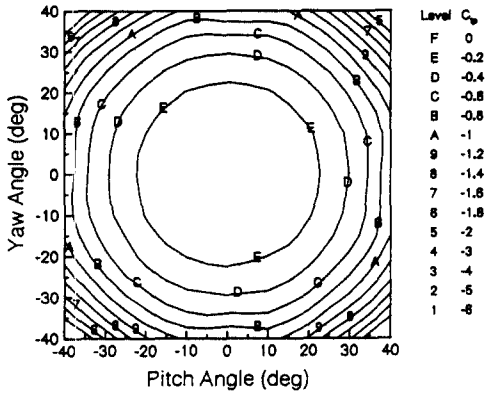
(a)  $Re = 1.77 \times 10^4$ (b)  $Re = 7.06 \times 10^4$ 

Fig. 12 Effect of Reynolds number on static-pressure coefficient of five-hole probe with perpendicular pressure holes when cone angle = 45 deg

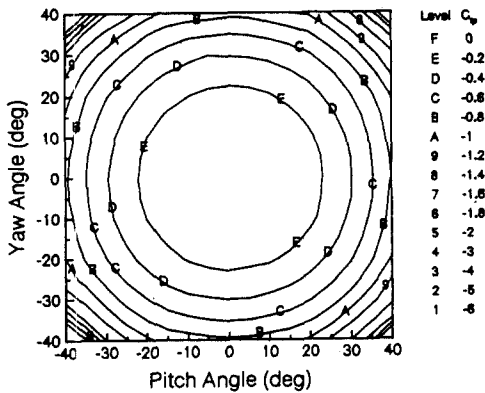
때 전압계수에 대한 Reynolds 수의 영향은 정압계수의 경우와 비교하여 더 작게 나타났다.

Fig. 14는 평행압력공 45도 5공프로우브의 실험 결과이다. 이 결과들을 Fig. 4(a)와 비교해 보면, Reynolds 수가 피치각계수와 요각계수에 지대한 영향을 줌을 확인할 수 있다. Reynolds 수가 충분히 작은 Fig. 14(a)에서는 격자들의 변형이 비교적 심한 편이지만, 그래도 피치각계수-요각계수 평면이 피치각-요각 평면과 거의 일대일로 대응이 되고 있다. 그러나 Reynolds 수가 증가함에 따라 특히 대각선 방향으로 격자의 변형이 매우 커져서, Reynolds 수가  $3.53 \times 10^4$ 으로 되면(Fig. 4(a)) 앞에서도 언급했듯이 두 평면의 일대일 대응이 파괴된다. 여기서 Reynolds 수가 더 증가하면 일대일 대응이 되지 않는 피치각과 요각의 범위가 더욱 확

대되고, 피치각계수와 요각계수의 분포가 영문 "X"자 형태로 심하게 변형된다. 그런데 특이하게 요각이 0도일 때 피치각계수의 최대 변화범위는 Reynolds 수와 거의 무관하였다. 전체적으로 볼 때, 평행압력공 5공프로우브에서도 수직압력공 5공프로우브와 마찬가지로 Reynolds 수가 증가하면 일정한 흐름각에 대한 피치각계수와 요각계수의 변화 폭이 더 작게 나타났다. 이와 같이 원추각이 45도인 평행압력공 5공프로우브가 원추각이 45도인 수직압력공 5공프로우브나 원추각이 비교적 큰 5공프로우브들에 비하여 Reynolds 수의 영향을 크게

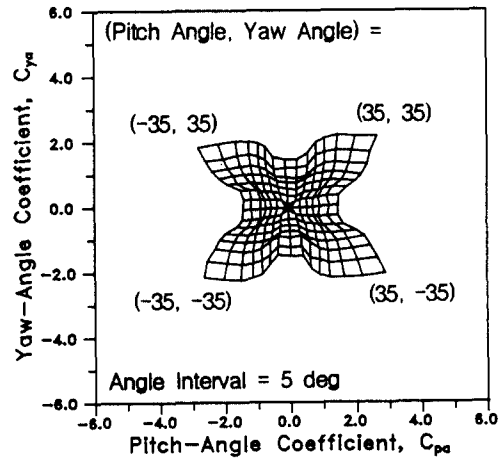


(a)  $Re = 1.77 \times 10^4$

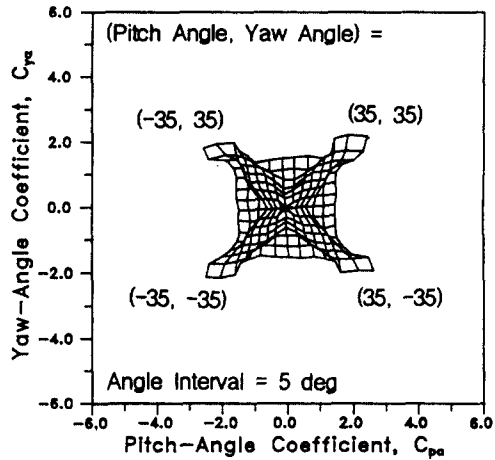


(b)  $Re = 7.06 \times 10^4$

Fig. 13 Effect of Reynolds number on total-pressure coefficient of five-hole probe with perpendicular pressure holes when cone angle=45 deg



(a)  $Re = 1.77 \times 10^4$



(b)  $Re = 7.06 \times 10^4$

Fig. 14 Effect of Reynolds number on pitch-angle and yaw-angle coefficients of five-hole probe with forward-facing pressure holes when cone angle=45 deg

받는 이유는 압력공 출구가 상류 및 하류 방향으로 긴 타원형이 되기 때문일 것이다.

본 연구의 실험결과를 모두 종합하여 Reynolds 수가 보정계수에 미치는 영향에 대하여 정리해 보자. 먼저 흐름각의 측정에 큰 영향을 주는 피치각 계수와 요각계수는 평행압력공 45도 5공프로우브에서 피치각과 요각의 전 영역에 걸쳐서 Reynolds 수의 영향을 가장 심하게 받았다. 그러나 이것을 제외한 다른 5공프로우브들의 피치각계수와 요각계수는 피치각과 요각이 모두 30도 이상일 때에만 Reynolds 수의 영향을 비교적 크게 받았다. 정압계수는 다른 보정계수들에 비하여 Reynolds 수에 따른 변화 폭이 비교적 크게 나타났고, 이러한 정압계수의 변화 경향은 정성적으로 5공프로우브의 종류에 거의 무관하였다. 이에 비해 전압계수의 경우에는 피치각과 요각이 모두 30도 이상일 때에만 Reynolds 수의 영향이 조금 나타났을 뿐, 그 이외의 영역에서는 Reynolds 수에 거의 무관하였다. 이러한 전압계수의 변화경향은 모든 5공프로우브에서 공통적으로 발견되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원추각, 압력공방향, Reynolds 수 등이 large-scale 원추형 5공프로우브의 보정계수에 미치는 영향에 대하여 체계적인 연구를 수행하였다. 이때 원추각은 45도, 60도, 75도, 90도 등으로 변화시켰고, 각 원추각에 대해 수직압력공과 평행압력공을 갖는 2종류의 5공프로우브를 제작하였다. Reynolds 수가  $1.77 \times 10^4$ ,  $3.53 \times 10^4$ ,  $7.06 \times 10^4$  등인 경우에 대하여, 실제 보정실험은 피치각과 요각이 각각 -40도에서 +40도 범위에서 5도 간격으로 이루어졌다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 원추각이 클수록 일정한 피치각과 요각의 변화에 대한 각 보정계수의 변화가 더 크게 나타났다. 이것은 원추각이 클 때, 보정계수 관계들로부터 피치각, 요각, 정압, 전압 등을 더 정확하게 구할 수 있음을 의미한다.
- (2) 원추각이 클수록 압력공의 방향이 보정계수의 분포에 거의 영향을 주지 않지만, 원추각이 45도일 경우에는 평행압력공과 수직압력공에 의한 보정계수의 차이가 크게 나타났다.
- (3) 대체로 평행압력공 5공프로우브에 비하여 수

직압력공 5공프로우브의 보정특성이 더 우수하였다. 특히 원추각이 45도일 때 평행압력공이 뿜려 있는 5공프로우브에서는 3차원 유동측정에 부적절하였다.

(4) 원추각이 45도인 평행압력공 5공프로우브의 피치각계수와 요각계수는 Reynolds 수에 따라 매우 심하게 변화하였다. 그러나 이것을 제외한 다른 5공프로우브에 있어서, 피치각과 요각이 30도보다 클 경우를 제외하면, 피치각계수와 요각계수에 대한 Reynolds 수의 영향은 대체로 미미하였다. 정압계수는 5공프로우브의 종류에 관계 없이 전 흐름각 영역에 걸쳐서 Reynolds 수의 영향을 비교적 크게 받았다. 반면에 전압계수는 피치각과 요각이 30도보다 큰 경우를 제외하면 Reynolds 수의 영향이 거의 없었다.

#### 후 기

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 (과제번호 : 01E0101) 연구 결과의 일부입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 차봉준, 이상우, 현용익, 이대성, 1993, "선형 터빈 케스케이드 통로에서의 3차원 유동 특성," 대한기계학회 논문집, Vol. 17, pp. 3146~3165.
- (2) Lee, S. W., Lee, J. S. and Ro, S. T., 1994, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Jets in Crossflow on Flat Plate," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 97~105.
- (3) Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., 1995, "Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film-Cooling Jets with Compound Angle Orientations," to appear in the *ASME Journal of Turbomachinery*, ASME paper 95-GT-38.
- (4) 이상우, 김용범, 1996, "폭방향으로 분사되는 막냉각 제트의 3차원 유동특성 및 압력손실," 대한기계학회논문집(B), Vol. 20, pp. 1363~1375.
- (5) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (6) Smith, A. L. and Adcock, J. B., 1986, "Effect of

- Reynolds Number and Mach Number on Flow Angularity Probe Sensitivity," *NASA TM* -87750.
- (7) Ligrani, P. M., Singer, B. A. and Baun, L. R., 1989, "Spatial Resolution and Downwash Velocity Corrections for Multiple-Hole Pressure Probe in Complex Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 7, pp. 424~426.
- (8) Ligrani, P. M., Singer, B. A. and Baun, L. R., 1989, "Miniature Five-Hole Pressure Probe for Measurement of Three Mean Velocity Components in Low-Speed Flows," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 22, pp. 868~876.
- (9) Dominy, R. G. and Hodson, H. P., 1993, "An Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-Hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurement," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 513~519.
- (10) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(B), Vol. 20, pp. 2693~2706.
- (11) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dordell, R. B., "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.