

Reynolds 수가 2단 원추형 5공프로브를 이용한 3차원 유동 측정에 미치는 영향

- 저속 유동장에서의 보정 결과 -

이 상 우[†] · 전 상 배^{*}

(2000년 12월 1일 접수, 2001년 10월 19일 심사완료)

The Effect of Reynolds Number on the Three-Dimensional Flow Measurements with a Two-Stage Cone-Type Five-Hole Probe in a Non-Nulling Mode

- Calibration Data in Low-Speed Flowfields -

Sang Woo Lee and Sang Bae Jun

Key Words: Five-Hole Probe(5공프로브), Calibration(보정), Non-Nulling Method(프로브고정법), Reynolds Number(레이놀즈 수), Three-Dimensional Flow(3차원 유동)

Abstract

The effects of Reynolds number on the non-nulling calibrations of a cone-type five-hole probe in low-speed flows have been investigated at Reynolds numbers of 2.04×10^3 , 4.09×10^3 and 6.13×10^3 . The calibration is conducted at the pitch and yaw angles in ranges between -35 degrees and 35 degrees with an angle interval of 5 degrees. In addition to the calibration coefficients, reduced pitch and yaw angles, static and total pressures, and velocity magnitude are obtained through a typical non-nulling reduction procedure. The result shows that each calibration coefficient, in general, is a function of both the pitch and yaw angles, so that the pre-existing calibration data in a nulling mode are not enough in accounting for the full non-nulling calibration characteristics. Due to interference of the probe stem, the calibration coefficients are more sensitive to Reynolds number at positive pitch angles than at negative ones. The calibration data reduced in this study may serve as a guide line in the estimation of uncertainty intervals resulted from the Reynolds number effects at low Reynolds numbers.

<p style="text-align: center;">기호설명</p> <p>C_{pa} : 피치각계수, 식 (1)</p> <p>C_{sp} : 정압계수, 식 (3)</p> <p>C_{tp} : 전압계수, 식 (4)</p> <p>C_{ya} : 요각계수, 식 (2)</p> <p>D : 5공프로브의 직경</p> <p>P_{av} : 5공프로브 측면 압력공에서의 평균</p>	<p style="text-align: center;">압력, 식 (5)</p> <p>P_i : 5공프로브의 i-번째 압력공에서 측정 한 압력</p> <p>P_s : 정압</p> <p>P_t : 전압</p> <p>Q : 유속의 크기</p> <p>Re_D : 프로브 Reynolds 수 = $U_\infty D / \nu$</p> <p>U_∞ : 자유유동속도</p>
--	---

* 회원, 국립금오공과대학교 기계공학부

Email : swlee@knut.kumoh.ac.kr

TEL : (054)467-4209 FAX : (054)467-4050

** 회원, 국립금오공과대학교 대학원 기계공학과

그리스문자

α : 피치각, Fig. 1

β : 요각, Fig. 1

ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 하첨자
 reduced : 보정프로그램으로부터 얻어진 값

1. 서론

5공프로브(five-hole probe)는 3차원 흐름에서 피치각(pitch angle)과 요각(yaw angle) 뿐만 아니라, 전압(total pressure)과 정압(static pressure)을 직접적으로 측정할 수 있는 유일한 수단으로 터보기계 및 복잡한 3차원 유동장의 연구에 널리 사용되고 있다.^(1~5) 5공프로브를 사용하여 3차원 유동장을 측정할 때, 그 측정에 영향을 줄 수 있는 파라미터로는 Reynolds 수, Mach 수, 난류강도 및 스케일, 속도 구배, 벽면근접거리(wall proximity) 등이 있다.⁽⁶⁾

Treaster와 Yocum⁽⁷⁾은 원추형 5공프로브와 프리즘형 5공프로브 등에 대하여 보정방법, 대표적인 보정 곡선 및 보간과정 등을 자세히 기술하였다. 이와 함께 그들은 이 상용 5공프로브들에 대하여 Reynolds 수와 벽면근접거리가 유속 측정에 미치는 영향에 대하여 간략하게 언급하였다. Smith와 Adcock⁽⁸⁾은 압력공이 5공프로브 표면과 수직인 피라미드형 5공프로브에 대하여 Reynolds 수, Mach 수 등의 영향을 연구하였다. Ligrani 등⁽⁹⁾은 5공프로브의 선단 크기 때문에 실제 측정된 각 압력공의 압력들이 서로 다른 위치에서 측정됨에 유의하여 위치분해능(spatial resolution)을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 이와함께 그들은 속도구배에 비례하여 5공프로브 근처에서 발생하는 다운워시(down wash) 속도를 고려한 측정방법을 제시하였다.

Ligrani 등⁽¹⁰⁾은 선단 직경이 1.22mm인 피라미드형의 초소형 5공프로브에 대하여 이것의 보정방법, 제작방법 및 측정시 주의사항 등을 자세히 소개하였다. Dominy와 Hodson⁽¹¹⁾은 터보기계의 유동 측정에 널리 사용되는 원추형 및 피라미드형 5공프로브에 대하여, Reynolds 수, Mach 수, 압력공의 방향, 난류강도 등의 영향을 연구하였다. 그들은 모든 실험에서 피치각을 0도로 고정하고 요각을 -20도에서 +20도로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그 결과 요각이 다른 두 영역에서 Reynold 수가 보정결과에 큰 영향을 미침을 밝혔다. 그들의 결과에 의하면 Mach 수가 다를 경우에도 Reynolds 수에 따른 보정계수의 변화가 거의 없었다. 최근 Lee와 Yun⁽⁶⁾은

벽면근접거리가 원추형 5공프로브의 보정에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그들은 요각 뿐만 아니라 5공프로브와 벽면 사이의 경사각도도 벽면 근접 효과에 큰 영향을 미침을 밝혔고, 벽면근접거리가 다른 흐름각의 변화 정도를 제시하였다.

본 연구에서는 Reynolds 수의 변화가 5공프로브를 이용한 3차원 유동 측정에 미치는 영향을 연구하고자 한다. 일반적으로 원추형 5공프로브를 프로브 고정법(non-nulling method)을 적용하여 사용할 경우, 피치각과 요각이 각각 -35도에서 +35도 범위 내에서 사용이 가능하다. 그러나 기존의 연구⁽¹¹⁾에서는 피치각이 0도인 상태에서 요각만을 변화시켰고, 요각의 범위도 -20도에서 +20도 사이로 제한되어 있다. 이때 기존의 연구에서는 Reynolds 수에 따른 보정계수들의 변화만을 언급했을 뿐, 그 결과 나타나는 실제 피치각, 요각, 정압, 전압, 속도의 크기 등의 변화량을 제시하지 못하였다. 본 연구에서는 피치각과 요각을 각각 -35도에서 +35도까지 변화시켜, 실제 사용범위 전체에 걸친 보정계수의 변화 및 이에 따른 흐름각, 압력, 유속의 크기 등의 변화량을 제시하고자 한다.

본 논문에서는, 소형 5공프로브를 사용하여 평균유속이 30 m/s 이하인 저속 유동장에서 3차원 유동을 측정할 때 발생하는 Reynolds 수의 영향을 연구하였다. 일반적으로 터보기계 large-scale 모델에서의 3차원 유동측정이나 실험실에서 이루어지는 대부분의 통상적인 3차원 유동측정이 이 경우에 해당된다.

2. 실험

2.1 5공프로브

본 연구에서 사용한 실험장치 및 소형 원추형 5공프로브의 개략도가 Fig. 1과 Fig. 2에 소개되어 있다. Fig. 1과 Fig. 2 모두 위에서 내려다 본 형상을 그린 것이다. 이 5공프로브는 미국 United Electronic Controls사에서 제작된 2단 원추형 5공프로브(DC-125-24-F-22-CD)이다. 이 5공프로브의 선단 직경은 3.18 mm (0.125 inch)이며, 상류 원추면의 원추각은 94도이고, 하류 원추면의 원추각은 30도이다. 압력을 측정하는 5개의 압력공의 직경은 0.48 mm이며, 이 중 압력공 #1은 5공프로브 끝 부분에 프로브 중심선과 평행하게 뚫려 있고, 압력공 #2에서 압력공 #5는 90도 간격으로 하류 원추면에 대해 수직으로 뚫려 있다. 이와같은

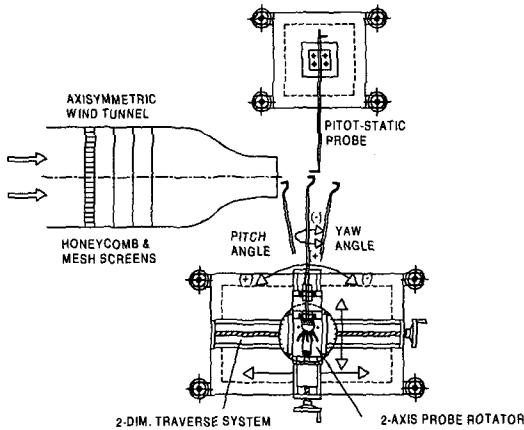


Fig. 1 Top view of experimental apparatus

치수들은 본 연구에서 사용한 5공프로브를 현미경으로 확대하여 측정한 수치들이다. 5공프로브의 지지대는 Fig. 1에서와 같이 코브라 형상이며, 이 코브라 형상 부분을 제외한 나머지 지지대는 직경이 6.35 mm(0.25 inch)로 보강되어 있다.

이 5공프로브는 요각 방향으로 회전할 때 압력공 #1의 위치가 변화하지 않도록, 압력공 #1의 입구가 5공프로브 보강 지지대의 중심선과 일치하도록 설계되었다. 피치각은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 5공프로브를 반시계 방향으로 회전시킨 각도이며, 이 피치각은 압력공 #4의 압력이 압력공 #5의 압력보다 더 클 때 0보다 크다. 따라서 피치각은 5공프로브가 Fig. 1의 세 위치 중 가장 왼쪽에 위치할 때 양의 값을 갖게 된다. 요각은 5공프로브가 그 지지대 축을 중심으로 시계방향으로 회전한 각도이며, 이 요각은 압력공 #2에서 측정한 압력이 압력공 #3에서 측정한 압력보다 더 클 때 양의 값이 된다.

2.2 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서와 같이 크게 소형 풍동과 5공프로브 회전장치로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 풍동은 개방형으로, 시험단면은 직경이 50 mm인 원형 풍동이다. 이 풍동의 유속은 인버터에 의해 조절이 가능하며, 풍동의 출구 속도는 최대 40 m/s까지 연속적인 조절이 가능하다. 이 풍동의 유속 균일도는 1% 이내이며, 난류 강도는 1%이다. 5공프로브의 회전은, 피치각의

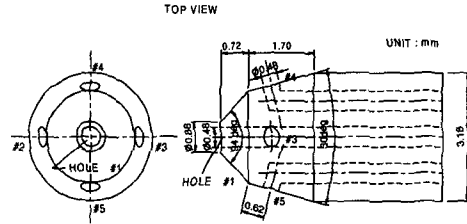
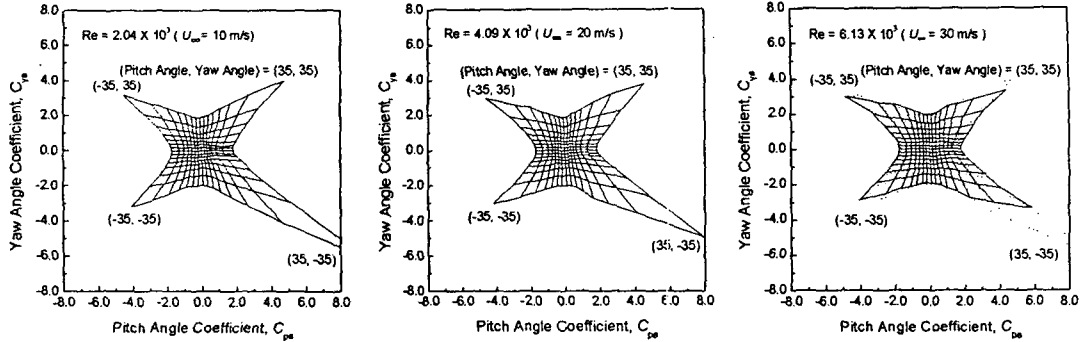


Fig. 2 Tested miniature cone-type five-hole probe

경우 각도분해능이 0.1도인 정밀 수동회전장치에 의해 이루어지고, 요각은 백래쉬가 없는 하모닉 감속기어(Oriental Motor, UHG50-2C)가 장착된 AC 서보모터(Oriental Motor, KXSM240HG1-BL)에 의해 자동적으로 이루어졌다. 이 요각 자동회전 장치의 각도 분해능은 0.0072도이며, 이것은 피치각 회전장치에 탑재되어 있다. 본 연구에서 사용된 5공프로브는 요각 방향으로 회전할 경우에는 5공프로브의 선단 위치가 변화하지 않으나, 피치각 방향으로 회전을 할 경우에는 그 위치가 크게 달라진다. 이와같은 5공프로브의 위치 변화를 보상하기 위하여 5공프로브 회전시스템은 수평조절이 가능한 2축 이송장치 위에 탑재되어 있다. 이 2축 이송장치의 각 축은 THK 사의 볼스크루와 선형운동 가이드로 구성되어 있으며, 직진도가 매우 우수하여 이동시 각도 변화는 무시할 정도로 작았다.

본 연구에서의 압력측정은 IBM PC AT-486으로 전체 측정시스템을 온라인화하였으며, IBM PC에는 다기능 입출력보드(National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 내장되어 있다. 5공프로브로부터의 압력신호는 압력변환기(Furness Controls, FC012)에 의해 전압으로 변환된다. 이 압력변환기의 DC 출력은 디지털전압계(Keithley, 2001)에 의해 모니터되고, 또한 이 전압은 다기능 입출력 보드의 12-bit A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 이 A-D변환기의 데이터 취득속도(sampling rate)는 최대 100 kHz이며 입력단의 증폭비를 소프트웨어 상에서 1, 2, 4, 8 등으로 변화시킬 수 있다. 5공프로브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-6)를 사용하였고, 이 압력스캐너는 다기능 입출력보드의 디지털 I/O를 이용하여 제어하였다.



(a) $Re = 2.04 \times 10^3$ ($U_\infty = 10$ m/s) (b) $Re = 4.09 \times 10^3$ ($U_\infty = 20$ m/s) (c) $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

Fig. 3 Pitch-angle coefficient versus yaw-angle coefficient

2.3 실험조건 및 실험과정

본 연구에서는 Reynolds 수를 변화시키기 위해 자유유동속도(U_∞)를 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s 등으로 변화시켰고, 모든 실험에서 난류강도는 1% 이내로 일정하게 유지하였다. 이들 자유유동속도와 5공프로브의 선단 직경(D)에 근거한 Reynolds 수는 각각 2.04×10^3 , 4.09×10^3 , 6.13×10^3 이다. 실제 보정실험은 피치각을 -35° 로 고정하고, 요각을 -35° 에서 $+35^\circ$ 로 변화시키면서 시작된다. 그 뒤 피치각을 5도씩 증가시키면서 피치각이 $+35^\circ$ 가 될 때까지 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 따라서 각 피치각에 대해 요각이 반복적으로 변화하지만, 본 연구에서 사용한 자동회전장치는 백래쉬가 없고 각도 분해능이 매우 우수하므로 오차를 최소화할 수 있었다. 본 연구에서는 Reynolds 수가 4.09×10^3 일 때 95%의 신뢰도로 불확도(uncertainty interval)를 계산하였다.⁽¹²⁾ 그 결과 압력측정의 불확도는 자유유동 동압의 $\pm 0.70\%$ 이고, 피치각계수, 요각계수, 정압계수, 전압계수 등의 불확도는 각각 ± 0.120 , ± 0.095 , ± 0.023 , ± 0.043 등이었다.

3. 결과 및 검토

3.1 프로브 고정법

프로브 고정법을 적용한 보정실험에서는 특정한 피치각과 요각에 대하여 각 압력공에서의 5개의 측정 압력, 정압, 전압 등이 얻어진다. 이 7개의 측정 압력은 다음과 같이 피치각계수, 요각계

수, 정압계수, 전압계수 등으로 표현된다.^(7,11)

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

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

$$C_{sp} = (P_{av} - P_5)/(P_1 - P_{av}) \quad (3)$$

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

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

$$P_{av} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5)/4 \quad (5)$$

프로브고정법을 이용한 보정실험에서는 각각의 피치각과 요각에 대해서 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_s, P_t$ 등의 7개의 압력 값이 구해지고, 이 압력들로부터 피치각계수, 요각계수, 정압계수, 전압계수 등이 계산된다. 이 네 가지 보정계수들은 일반적으로 피치각계수 대 요각계수 관계(Fig. 3), 정압계수의 분포(Fig. 6) 및 전압계수의 분포(Fig. 7) 등으로 표현된다. 미지의 유동장에서 5공프로브로부터 얻어진 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 등의 5개의 압력을 이용하여 3차원 유속를 얻기 위해서는 먼저 이 5개의 압력으로부터 피치각계수와 요각계수를 계산해야 한다. 만약 Fig. 3과 같이 피치각계수-요각계수 평면이 피치각-요각 평면과 일대일로 대응이 된다면, 적절한 보간방법을 적용하여 이 피치각계수 대 요각계수 관계로부터 피치각과 요각

을 바로 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 피치각 및 요각을 피치각과 요각의 함수로 표현된 정압계수 (Fig. 6)와 전압계수(Fig. 7) 관계에 적용하여 보간하면, 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. 이 정압과 전압으로부터 유속의 크기 Q 는 다음과 같이 구해진다.

$$Q = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (6)$$

특정 좌표계에 대한 3차원 속도 성분들은 피치각, 요각, 유속의 크기 사이의 일반적인 관계식으로부터 쉽게 계산될 수 있다.⁽⁷⁾ 프로브고정법을 적용한 5공프로브 보정프로그램의 개발에 있어서 가장 중요한 점은 앞에서 언급한 보정관계(Fig. 3, Fig. 6, Fig. 7)로부터 피치각, 요각, 정압, 전압 등을 정확하게 구하는 것이다.

3.2 보정계수

피치각계수, 요각계수, 정압계수, 전압계수 등의 보정계수들의 Reynolds 수에 따른 변화가 Fig. 3에서 Fig. 7에 소개되어 있다. 이들 각 그림의 (c)에서 점선으로 표시된 곡선들은 $Re=2.04 \times 10^3$ 의 결과를 나타낸다.

Fig. 3은 피치각계수(C_{pa}) 대 요각계수(C_{ya})의 관계를 피치각과 요각의 변화(5도 간격)에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 각 곡선의 교점은 측정된 (피치각, 요각) 쌍에서의 피치각계수와 요각계수를 나타낸다. 일반적으로 피치각계수는 요각

이 일정한 곡선을 따라 크게 변화하고, 요각계수는 피치각이 일정한 곡선을 따라 크게 변화한다. 이와같은 현상은 피치각이나 요각이 작을수록 두드러져, 피치각이 0도인 곡선과 요각이 0도인 곡선은 각각 종축(요각계수 축) 및 횡축(피치각 축)과 거의 평행하다. 피치각과 요각이 모두 0도에 가까운 영역에서는 각 곡선의 교점으로 구성된 격자의 형상이 정사각형에 근접하는 경향을 보이지만, 피치각과 요각이 클수록 격자의 형상이 마름모꼴로 크게 변형되는데, 이것은 대각선 방향에서 두드러진다. 일반적으로 각 격자의 형상이 정사각형에 근접할수록 보간 측면에서는 유리하다.

Fig. 3(a)~3(c)를 서로 비교해 보면, 전체적인 격자 형상은 정성적인 측면에서 서로 비슷하지만, Reynolds 수가 작을수록 피치각계수와 요각계수의 변화 범위가 더 크고 격자의 변형이 더 심함을 알 수 있다. Reynolds 수가 2.04×10^3 에서 (Fig. 3(a)) 요각의 절대값이 15도 이하일 경우, 격자 분포가 피치각이 0도인 곡선을 중심으로 좌우 대칭이 되지 않았다. 그러나 Reynolds 수가 증가할수록 이와 같은 비대칭성은 크게 완화되는 경향을 보여 준다. Fig. 3(c)에서 점선($Re=2.04 \times 10^3$)과 실선($Re=6.13 \times 10^3$)으로 이루어진 곡선들을 서로 비교하면, Reynolds 수에 따른 피치각계수와 요각계수의 변화를 바로 확인할 수 있다. 이 비교 그림으로부터 피치각 또는 요각이 25도 이상인 경우와 피치각이 0도보다 클 때 요각이 15도보다 작은 영역에서 Reynolds 수의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 요각이 15도보다 작은 영역에서, 피치각이 10도로 일정한 곡선으로부터 25도로 일정한 곡선 사이 공간에서 Reynolds 수의 영향이 두드러졌다. 이와같은

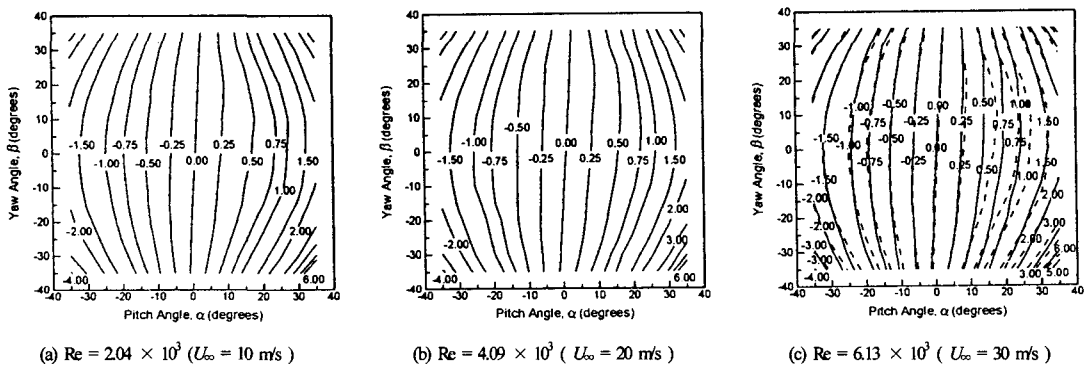


Fig. 4 Contours of pitch-angle coefficient, C_{pa}

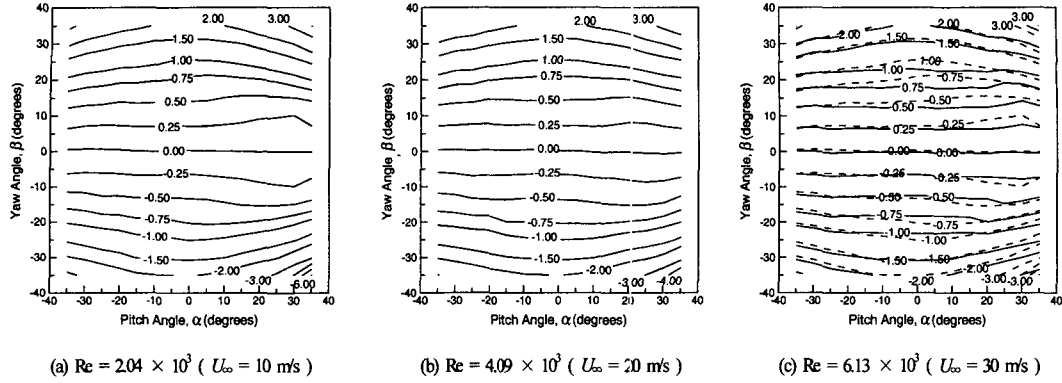


Fig. 5 Contours of yaw-angle coefficient, C_{ya}

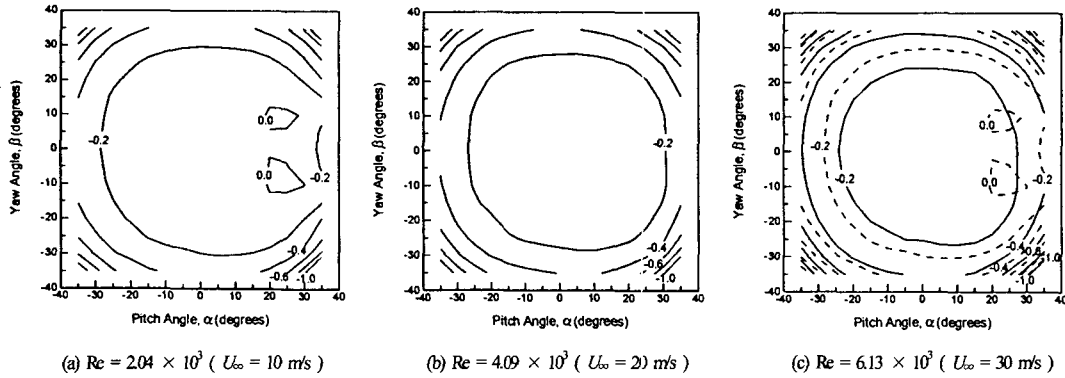


Fig. 6 Contours of static-pressure coefficient, C_{sp}

Reynolds 수의 영향은 Fig. 4(c)를 살펴 보면 더 확연히 드러난다.

Fig. 4는 피치각계수 C_{pa} 를 피치각과 요각의 함수로 표시한 것이다. 일반적으로 이상적으로 설계, 제작된 5공프로브의 경우 피치각계수 곡선들은 종축과 평행한 수직선이 되어야 할 것이다. 피치각이 0도일 경우에는 피치각계수 곡선이 거의 수직선에 근접하지만, 피치각의 절대값이 0도보다 커질수록 그 차이는 크게 나타나고 있다. 이와같은 현상은 Reynolds 수가 2.04×10^3 에서 6.13×10^3 으로 증가하여도 그대로 유지된다. Fig. 4(c)에서 점선으로 표시된 $Re=2.04 \times 10^3$ 의 결과와 실선으로 표시된 $Re=6.13 \times 10^3$ 의 결과를 비교해 보면, 대체로 피치각이 0도보다 작을 경우에는 그 차이가 비교적 작은 반면 피치각이 0도보다 크면 그 차이가 더 심해짐을 알 수 있다. 그런데 이 변화는 요각의 절대값이 클 경우보다는 요각의 절대값이 20도보다 작을 때 두드러졌다.

Fig. 5는 요각계수 C_{ya} 를 피치각과 요각의 함수

로 표시한 것이다. 피치각계수의 경우와 마찬가지로 이상적인 5공프로브의 경우 요각계수 곡선들은 횡축과 평행한 수평선이 되어야 할 것이다. 요각이 0도일 경우에는 요각계수 곡선이 거의 수평선에 근접하지만, 요각의 절대값이 0도보다 커질수록 수평선으로부터의 변형이 심해지고 있다. 이것은 Reynolds 수가 2.04×10^3 에서 6.13×10^3 으로 증가하여도 그대로 유지된다. Fig. 5(c)에서 점선으로 표시된 $Re=2.04 \times 10^3$ 의 결과와 실선으로 표시된 $Re=6.13 \times 10^3$ 의 결과를 비교해 보면, 피치각계수의 경우와 마찬가지로 대체로 피치각이 0도보다 작을 경우에는 두 경우의 차이가 비교적 작은 반면, 피치각이 0도보다 크면 그 차이가 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5의 결과를 종합해 보면, 일반적으로 요각이 0도인 경우를 기준으로 요각이 0보다 큰 경우와 작은 경우를 비교해 보면, Reynolds 수에 의한 피치각계수와 요각계수의 변화는 서로 거의 대칭적으로 나타났다. 그러나 피

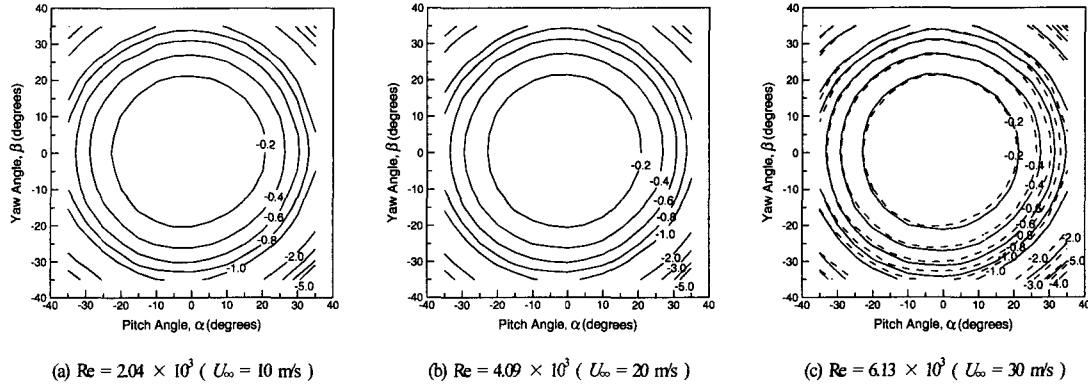


Fig. 7 Contours of total-pressure coefficient, C_{tp}

치각이 0도에 대해서는 이 Reynolds 수에 의한 변화가 서로 대칭적으로 나타나지 않았다. 이와 같이 피치각이 0도보다 작은 영역과 비교하여 0도보다 큰 영역에서 Reynolds 수의 효과가 더 크게 나타나는 이유는 5공프로브의 지지대의 영향과 밀접한 관련이 있으리라 추정된다. 즉 Reynolds 수가 작을수록 점성력의 영향이 관성력에 비해 증대되므로, 이에 따라 5공프로브 지지대에 의한 영향이 강화될 것이다.

Fig. 6은 피치각과 요각의 변화에 따른 정압계수 C_{sp} 의 분포를 보여 준다. Fig. 6은 Fig. 3에서 결정된 피치각과 요각으로부터 정압계수를 구하는데 이용되며, 식 (3)을 통해 정압이 계산될 수 있다. Fig. 6(a)를 보면, 일반적으로 정압계수는 피치각과 요각이 증가할수록 그 절대값이 증가하는 경향을 보이지만, 그 분포가 그림 중심 즉 피치각과 요각이 모두 0도인 점에 대하여 점대칭이 되지 못하고 있다. 대체로 요각이 0도인 선에 대해서는 정압계수의 분포가 서로 대칭적이지만, 피치각이 0도인 선에 대해서는 결코 대칭이 되지 않았다. Reynolds 수가 4.09×10^3 으로 증가하면, 이 비대칭성은 완화되는 경향을 보인다. 이와같은 사실은 Reynolds 수가 증가할수록 5공프로브 지지대에 의한 유동의 변화가 감소함을 의미한다. 실선($Re=6.13 \times 10^3$)과 점선($Re=2.04 \times 10^3$)을 비교해 보면, Reynolds 수에 따라 정압계수가 비교적 크게 변화함을 알 수 있다. 특히 Reynolds 수의 영향은 피치각이 0도보다 클 때 두드러졌다.

Fig. 7은 피치각과 요각의 변화에 따른 전압계수 C_{tp} 의 분포를 보여 준다. Fig. 7은 Fig. 3에서 결정된 피치각과 요각으로부터 전압계수를 구하는데 이용되며, 식 (4)를 통해 전압이 계산된다.

전압계수는 정압계수와는 달리 그 분포가 그림 중심 즉 피치각과 요각이 모두 0도인 점에 대하여 거의 완전한 동심원 형태이며, 전압계수의 변화 범위는 대략 -5에서 0 정도로 정압계수의 변화범위 0에서 -1보다 훨씬 심하게 나타났다. 이것은 피치각이나 요각이 일정하게 변화할 때, 정압계수보다 전압계수의 변화가 훨씬 클 수 있음을 의미한다. Fig. 3(c)에서 점선($Re=2.04 \times 10^3$)과 실선을 비교해 보면, 전압계수는 정압계수(Fig. 6(c))에 비해 Reynolds 수에 따른 변화가 비교적 작음을 확인할 수 있다.

일반적으로 Reynolds 수가 증가할수록 피치각계수 대 요각계수 분포(Fig. 3)에서 보정곡선 격자의 형상이 소폭이나마 정사각형에 근접하였고, 피치각계수와 요각계수의 변화 범위가 축소되는 경향을 보여 주었다. 특히 피치각이 0보다 클 때 Reynolds 수의 영향이 두드러졌다. 전압계수는 정압계수와는 달리 그 분포가 피치각과 요각이 모두 0도인 점에 대하여 완전한 동심원 형태이며, 전압계수의 변화 범위는 정압계수의 변화 범위보다 훨씬 크게 나타났다. 그러나 전압계수는 정압계수에 비해 Reynolds 수에 따른 변화가 비교적 작았다. 모든 보정계수에 대하여, Reynolds 수의 영향은 피치각이 0보다 작을 경우보다 0보다 클 때 두드러졌다. 이것은 본 연구와 같이 Reynolds 수가 비교적 작은 저속 유동장에서 나타나는 특징이며, 관성력에 대한 점성력의 상대적인 크기 증가로 5공프로브 지지대의 영향이 크게 나타나기 때문이다.

3.3 흐름각, 압력, 유속의 크기

Reynolds 수에 따른 보정계수들의 변화 경향을

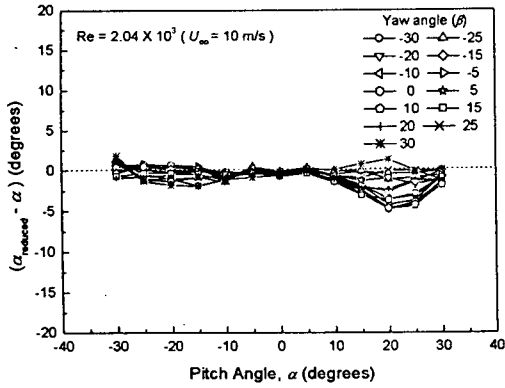


Fig. 8 $(\alpha_{reduced} - \alpha)$ at $Re = 2.04 \times 10^3$ obtained with calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

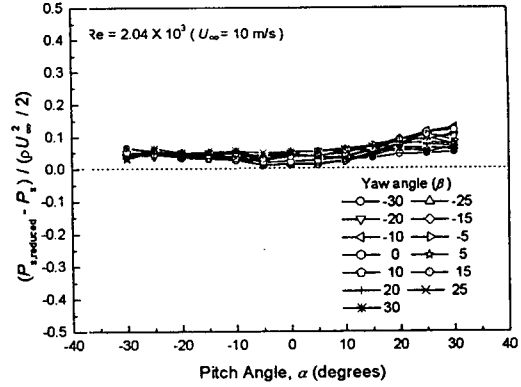


Fig. 10 $(P_{s, reduced} - P_s) / (\rho U_\infty^2 / 2)$ at $Re = 2.04 \times 10^3$ obtained with calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

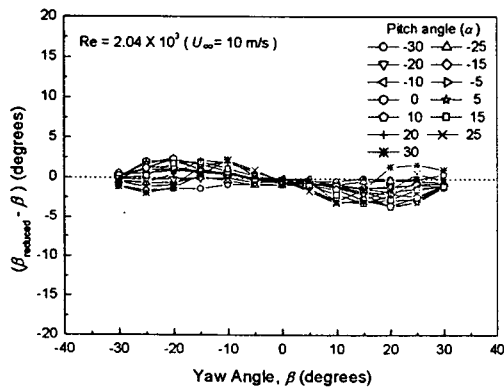


Fig. 9 $(\beta_{reduced} - \beta)$ at $Re = 2.04 \times 10^3$ obtained with calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

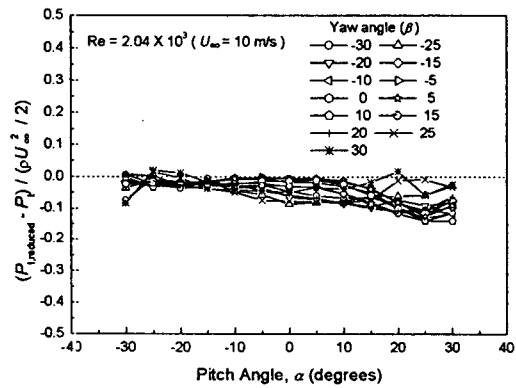


Fig. 11 $(P_{t, reduced} - P_t) / (\rho U_\infty^2 / 2)$ at $Re = 2.04 \times 10^3$ obtained with calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

이해하는 것도 큰 의미가 있지만, 실용적인 측면에서는 Reynolds 수에 따라 피치각, 요각, 정압, 전압, 유속의 크기 등이 어느 정도 변화하는지를 정량적으로 파악하는 것도 매우 중요하다. 이 점에 유의하여 본 연구에서는 대표적인 보정방법^(7,11)을 도입한 보정프로그램을 개발하였다. Reynolds 수가 6.13×10^3 인 경우의 데이터를 보정계수를 구하기 위한 기본 데이터로 하여, Reynolds 수가 2.04×10^3 과 4.09×10^3 인 두 경우에 측정된 5개의 측정압력 즉 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 등의 데이터를 이 프로그램에 입력하였다. 그 결과 피치각, 요각, 정압, 전압, 유속의 크기 등의 계산 결과를 얻었다.

이때 피치각과 요각이 ± 35 도의 경우는 보간이 불가능하므로, -30 도에서 $+30$ 도까지의 총 169 (13×13) 세트의 데이터가 입력되었다. 이렇게 얻어진 각 경우의 계산치(reduced value)와 이에 해당하는 측정치의 차이들 즉 각도 차이에 해당하는 $(\alpha_{reduced} - \alpha)$ 와 $(\beta_{reduced} - \beta)$, 정압과 전압의 차이인 $(P_{s, reduced} - P_s) / (\rho U_\infty^2 / 2)$ 와 $(P_{t, reduced} - P_t) / (\rho U_\infty^2 / 2)$, 유속 크기의 차이인 $(Q_{reduced} / U_\infty)$ 등은 순수하게 Reynolds 수의 영향에 의한 변화량을 나타낸다. 물론 이들 값들에는 보정프로그램 자체의 보간 오차가 포함되어 있음을 유의해야 한다.

Fig. 8은 $Re = 2.04 \times 10^3$ 경우 Reynolds 수에 의

한 피치각의 변화량 즉 $(\alpha_{reduced} - \alpha)$ 의 경향을 보여 준다. 일반적으로 피치각의 절대치가 10도보다 작을 경우 $|\alpha_{reduced} - \alpha|$ 이 매우 작으며, 피치각이 10도보다 클 경우 $|\alpha_{reduced} - \alpha|$ 은 최대 4.7도 정도로 비교적 크게 나타났다. 특히 $|\alpha_{reduced} - \alpha|$ 이 가장 큰 곳은 피치각이 20도 근처이며, 이때 $(\alpha_{reduced} - \alpha)$ 의 요각에 따른 변화도 가장 심하게 나타났다. 이것은 Fig. 4(c)에서 실선과 점선의 차이가 가장 큰 영역과 비교적 잘 일치한다.

Fig. 9는 $Re = 2.04 \times 10^3$ 경우 Reynolds 수에 의한 요각의 변화량 즉 $(\beta_{reduced} - \beta)$ 의 변화 경향을 보여 준다. 요각의 절대값이 5도 이하일 경우 $(\beta_{reduced} - \beta)$ 가 매우 작으며, 피치각의 절대값이

10도보다 클 때 $(\beta_{reduced} - \beta)$ 가 비교적 크게 나타났다. 특히 요각이 0도에 대해 $(\beta_{reduced} - \beta)$ 는 근사적으로 점대칭의 변화 경향을 보여 주었다. 이것은 요각의 부호에 관계없이 $|\beta_{reduced} - \beta|$ 의 변화 경향이 거의 같음을 의미한다.

Fig. 10은 $Re=2.04 \times 10^3$ 경우 Reynolds 수에 따른 무차원화된 정압의 변화량 즉 $(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 의 분포를 보여 준다.

$(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 는 $(\alpha_{reduced} - \alpha)$ 와 $(\beta_{reduced} - \beta)$ 와는 달리 Reynolds 수에 관계없이 항상 0보다 큰 값을 갖는다. 이 무차원 정압의 변화는 Fig. 6의 결과뿐만 아니라, Fig. 8과 Fig. 9에서 제시한 피치각과 요각의 변화량에 의해서도 영향을 받는다. 일반적으로 피치각이 0도보다 작으면 $(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 는 0.05 정도로 비교적 일정하게 유지되는 반면, 피치각이 0도보다 커지면 이 값은 단조 증가하는 경향을 보인다. 따라서 $(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 는 피치각이 30도에서 최대로 되며, 그 최대치는 대략 0.13에 육박하고 있다. 이와 함께 피치각이 증가할수록 요각에 따른 $(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 의 변화는 점점 커지는 경향을 보인다.

Fig. 11은 $Re = 2.04 \times 10^3$ 경우 Reynolds 수의 변화에 따른 무차원 전압의 변화량 즉 $(P_{t, reduced} - P_t)/(\rho U_\infty^2/2)$ 의 변화 경향을 보여 준다.

$(P_{t, reduced} - P_t)/(\rho U_\infty^2/2)$ 는 $(P_{s, reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 와는 달리 Reynolds 수에 관계없이 대부분 음의 값을 갖는다. 피치각이 -30도에서 30도로 증가함

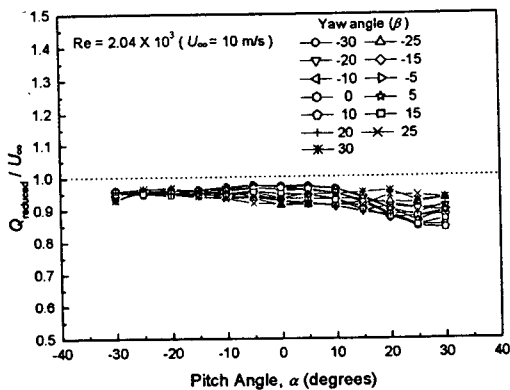


Fig. 12 $Q_{reduced}/U_\infty$ at $Re = 2.04 \times 10^3$ obtained with calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$ ($U_\infty = 30$ m/s)

Table 1 Minimum and maximum data of the difference between the reduced and measured values obtained with the calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$

	$(\alpha_{reduced} - \alpha)$		$(\beta_{reduced} - \beta)$		$(P_{s, reduced} - P_s)$		$(P_{t, reduced} - P_t)$		$(Q_{reduced} - U_\infty)$	
	(degrees)		(degrees)		$\rho U_\infty^2/2$		$\rho U_\infty^2/2$		U_∞	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
$Re=2.04 \times 10^3$ ($U_\infty=10$ m/s)	-4.74	1.84	-3.63	2.39	0.0113	0.1284	-0.1412	0.0195	-0.157	-0.024
$Re=4.09 \times 10^3$ ($U_\infty=20$ m/s)	-3.13	1.90	-3.10	2.33	-0.0037	0.0556	-0.1486	0.0400	-0.079	0.009
Reduction Error	-1.37	1.50	-1.36	0.77	-0.024	0.008	-0.046	0.026	-0.015	0.016

Table 2 Root-mean-square data of the difference between the reduced and measured values obtained with the calibration data at $Re = 6.13 \times 10^3$

	$(\alpha_{reduced} - \alpha)$ (degrees)	$(\beta_{reduced} - \beta)$ (degrees)	$(P_{s,reduced} - P_s)$	$(P_{t,reduced} - P_t)$	$(Q_{reduced} - U_\infty)$
			$\rho U_\infty^2/2$	$\rho U_\infty^2/2$	U_∞
$Re=2.04 \times 10^4$ ($U_\infty=10\text{m/s}$)	1.22	1.26	0.022	0.037	0.030
$Re=4.09 \times 10^4$ ($U_\infty=20\text{m/s}$)	1.01	1.21	0.012	0.033	0.020
Reduction Error	0.54	0.36	0.010	0.006	0.005

에 따라 $(P_{t,reduced} - P_t)/(\rho U_\infty^2/2)$ 는 대체로 단조 감소하는 경향을 보이며, 그 최소값은 대략 0.14 정도이다. 일반적으로 프로브고정법에 의한 보정 방법에 있어서, 먼저 결정된 피치각과 요각이 정압과 전압의 결정과정에 큰 영향을 미친다. Fig. 6과 Fig. 7에서 Reynolds 수에 따른 정압계수의 변화가 전압계수의 변화보다 더 큼에도 불구하고 $(P_{t,reduced} - P_t)/(\rho U_\infty^2/2)$ 의 변화가 $(P_{s,reduced} - P_s)/(\rho U_\infty^2/2)$ 보다 조금 더 크게 나타난 이유는 일정한 피치각과 요각의 변화에 대한 전압계수의 변화가 정압계수의 변화에 비해 더 크기 때문이다.

Fig. 12는 무차원 유속 크기 즉 $Q_{reduced}/U_\infty$ 의 변화 경향을 보여 준다. $Q_{reduced}$ 는 식 (6)의 P_s 와 P_t 대신 $P_{s,reduced}$ 와 $P_{t,reduced}$ 를 각각 대입하여 얻는다. 따라서 $Q_{reduced}/U_\infty$ 는 $(P_{s,reduced} - P_s)$ 와 $(P_{t,reduced} - P_t)$ 의 변화와 밀접한 관련이 있다. $Q_{reduced}$ 는 U_∞ 보다 작은 값

을 가지며, $Q_{reduced}/U_\infty$ 는 피치각이 -30도에서 30도로 변화할 때 단조 감소하는 경향으로 보여 주고 있다. 피치각이 30도일 때 $Q_{reduced}$ 는 U_∞ 에 비해 최대 16% 정도 감소한다.

Table 1에 피치각, 요각, 정압, 전압, 유속의 크기 등의 변화량 중 그 최소치와 최대치가 제시되어 있다. 이들 값들에는 보정프로그램의 보간 오차도 함께 포함되어 있으므로, 이 보간오차(reduction error)도 Table 1에 함께 제시하였다. 이 보간오차는 보정계수 계산용 기본 데이터와 동일한 Reynolds 수에서 예비실험을 통해 측정된 5개의 압력 값들을 보정프로그램에 입력하여 얻었

다. 이 예비 실험에서는 Fig. 3의 각 그리드 내부에 해당하는 피치각과 요각을 임의로 선택하는 방법으로, 피치각과 요각이 -30도와 30도 사이 영역에서 총 144개의 측정이 이루어졌다. 따라서 Table 1에 나타낸 각 Reynolds 수에서의 결과와 보정시 발생한 보간 오차를 비교하면 순수하게 Reynolds 수에 의한 변화량을 알 수 있게 된다. Table 1에 제시된 데이터는 특정 흐름각에서 얻어진 최대치와 최소치를 의미하므로 전체 보정 영역에서의 대표 값으로 보기는 어렵다. 이와같은 점에 유의하여, 각 피치각 및 요각 쌍에서 구한 피치각, 요각, 정압, 전압, 유속의 크기 등의 변화량을 보정영역 전체에 걸쳐 근제곱평균(root-mean-square)한 값을 계산하고, 그 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 1과 Table 2에서 제시된 데이터는 저속 유동장에서 5공프로브에 프로브고정법을 적용하여 3차원 유동장을 측정할 때 발생하는 오차의 범위를 추정하는데 유용한 자료로 사용되어질 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 프로브고정법을 적용하여 상용 2단 원추형 5공프로브로 저속 3차원 유동을 측정할 때 발생하는 Reynolds 수의 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험결과 프로브고정법에서 사용되는 보정계수들에 대한 Reynolds 수의 영향은 요각 뿐만 아니라, 동시에 피치각의 함수임이 밝혀졌다. 따

라서 피치각이 0도인 상태에서 요각만을 변화시켜 얻은 기존 연구의 데이터로는 모든 피치각과 요각 범위에서의 전체 보정계수 특성을 이해하는데 한계가 있다.

(2) 피치각계수와 요각계수에 대한 Reynolds 수의 영향은 주로 피치각이 0도보다 클 때 두드러지게 나타났다. 이것은 본 연구에서 다른 Reynolds 수 범위에서 5공프로브의 지지대의 영향이 크게 나타남을 의미한다.

(3) Reynolds 수에 관계없이, 피치각과 요각 전 영역에 걸친 전압계수의 변화 범위는 정압계수의 변화량에 비해 훨씬 크게 나타났다. 일반적으로 정압계수는 Reynolds 수에 따라 비교적 크게 변화하였지만, Reynolds 수에 따른 전압계수의 변화는 이에 비해 작았다.

(4) 본 연구에서는 대표적인 보정방법을 통하여 Reynolds 수에 의한 피치각, 요각, 정압, 전압, 유속의 크기 등의 변화량을 구하였고, 이를 체계적으로 제시하였다. 일반적으로 이들 값들 또한 피치각과 요각에 따라 크게 변화하였다. 이 데이터들은 터보기계 large-scale 모델에서의 유동 측정이나 실험실에서 이루어지는 대부분의 저속유동 측정시 Reynolds 수에 의한 오차를 추정하는데 유용할 것이다.

(5) Reynolds 수의 변화에 따른 정압계수의 변화가 전압계수의 변화에 비해 더 큼에도 불구하고, Reynolds 수에 따른 전압의 변화량이 정압의 변화보다 더 크게 나타났다. 이것은 먼저 결정된 피치각과 요각으로부터 정압과 전압을 구하는 과정에서, 일정한 피치각과 요각의 변화에 대한 전압계수의 변화가 정압계수의 변화에 비해 더 크기 때문이다.

후 기

본 연구는 세원기연의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 차봉준, 이상우, 현용익, 이대성, 1993, "선형 터빈 케이스케이드 통로에서의 3차원 유동 특성," 대한기계학회논문집, 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., 1997, "Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film-Cooling Jets with Compound Angle Orientations," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 310~319.
- (4) Lee, S. W., Park, S. W. and Lee, J. S., 2000, "Flow Characteristics Inside Circular Injection Holes Normally Oriented to a Crossflow: Part I - Flow Visualizations and Flow Data in the Symmetry Plane," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 266~273.
- (5) Lee, S. W., Joo, S. K. and Lee, J. S., 2000, "Flow Characteristics Inside Circular Injection Holes Normally Oriented to a Crossflow: Part II - Three-Dimensional Flow Data and Aerodynamic Loss," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 123, pp. 274~280.
- (6) Lee, S. W. and Yun, T. J., 1999, "An Investigation of Wall-Proximity Effect Using a Typical Large-Scale Five-Hole Probe," *KSME International Journal*, Vol. 13, pp. 273~285.
- (7) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (8) Smith, A. L. and Adcock, J. B., 1986, "Effect of Reynolds Number and Mach Number on Flow Angularity Probe Sensitivity," NASA TM-87750.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.

(12) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and

Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement
Uncertainty," *ASME Journal of Fluids
Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.