

7공 압력 프로브의 보정 및 개발

Development and Calibration of a Seven-Hole Pressure Probe

양재훈*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서론

풍동시험에서 시험모델 주변 흐름의 정량적인 데이터를 얻기 위해서는 흐름의 직접적인 측정이 요구된다. 이러한 경우 유체 흐름 속에 프로브를 직접 장착함으로써 측정이 가능한데, 일반적으로 3차원 유동 측정에 이용되는 것은 열선풍속계(hot-wire anemometer)나 5공 압력 프로브이다. 그러나 이들 프로브는 유동의 흐름 각이 30°를 넘는 경우에는 측정값의 정확성이 많이 낮아진다. 비록 5공 프로브의 경우, 프로브 주축의 중심을 흐름 방향과 일치시키는 Nulling 기법을 이용하여 30°가 넘는 높은 흐름의 측정이 가능하지만[1], 일반적으로 Nulling 기법의 적용은 어렵고 많은 데이터를 얻는 실험에는 적합하지 못하다.

이에 비해 Non-nulling 기법을 이용하는 7공 프로브는 5공 프로브와 비교해 다소 복잡하고 더 많은 실험 시간을 필요로 하는 단점이 있기는 하지만, 높은 흐름각을 지닌 3차원 유동의 시간 평균 속도벡터를 구하기에는 가장 적합하다[2]. 본 논문은 신뢰할 수 있는 수준의 오차를 지닌 7공 압력 프로브를 개발하고, 보정(calibration) 이론을 이용한 프로브의 보정과정 및 실험을 통해 제작된 프로브의 성능을 검증하는데 그 목적이 있다.

2. 본론

2.1 7공 프로브의 형상적 특징

5공 압력 프로브는 동일한 직경을 지닌 5개의 관(tube)으로 구성되는데, 중심 압력공(pressure hole)을 기준으로 주위의 4개의 압력공은 90°의 간격을 이루며 구성된다. 이러한 5공 프로브의 제작은 중심 압력공을 기준으로 주변 압력공을 정확하게 일렬로 정렬하는 상당히 어려운 작업이 요구된다. 반면, 7공 프로브는 직경이 동일한 7개의 관을 이용하여 중심 압력공을 기준으로 그 주위에 6개의 관을 둘러

싸면 자연적으로 정렬이 이루어지는 형상적 특징을 지닌다. 그러므로 5공 프로브 제작에서 요구되던 적절한 압력공간의 간격을 고려할 필요가 없어지게 된다[2].

일반적으로 7공 프로브 팁(probe tip)의 형상은 원추형(cone), 반구(hemisphere), 면(facet) 세 가지로 나눌 수 있다. Zeiger et al.[3]은 아음속 범위의 마하수(Mach number) 변화에서 7공 프로브의 형상이 프로브 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 그들에 의하면 실제 프로브를 이용한 측정실험을 할 경우, 보정과정과 동일한 마하수에서 측정한다면 프로브의 형상과 성능은 그다지 큰 상관관계가 없다고 하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 정확한 제작이 용이하고 가장 많이 쓰이는 원추형 프로브를 제작하기로 결정하였다.

2.2 7공 프로브의 설계 및 제작

7공 프로브의 성능은 프로브를 구성하는 7개 관의 직경과 원추각(cone angle)의 크기에 따라서 달라진다. 또 원추 형태를 만들기 위해 주어진 각도로 프로브 팁을 가공할 때, 얼마만큼 정밀하게 가공할 수 있는지 그 가공 정밀도에 따라서 프로브 성능은 크게 영향을 받게 된다.

Fig. 1은 설계된 7공 프로브의 압력공 및 형상을 나타낸 것이다. 7번 압력공을 기준으로 주변에 6(1~6번)개의 압력공이 위치한다. 제작된 7공 프로브는 직경이 1mm인 7개의 스테인리스 스틸(stainless steel) 관으로 구성되었고, 프로브 팁의 직경은 4mm로 유동 교란을 최소화하도록 하였다. 프로브의 원추각은 70°이며, 프로브 전체 길이는 180mm이다. 7공 프로브와 압력변환기(pressure transducer)의 연결이 용이하도록 하기 위해서 프로브의 후방에서 관들이 서로 일정한 간격을 가지도록 적정한 각도를 주었다.

Fig. 2는 이를 바탕으로 실제 제작된 7공 프로브를 나타내고 있다. 제작된 7공 프로브는 프

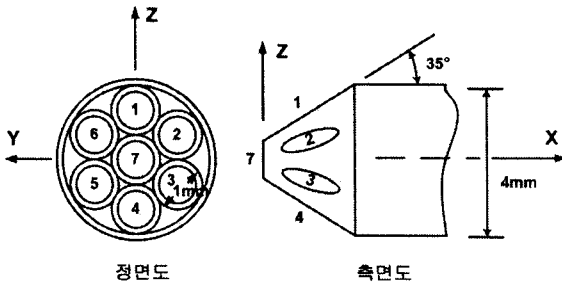


Fig.1 7공 프로브의 압력공 및 형상

로브 팁 직경이 매우 작기 때문에 유체 흐름을 측정할 때 흐름에 교란을 주지는 않지만, 상대적으로 그 작은 크기로 인해 프로브를 제작할 때 피할 수 없는 결점이 발생하기 마련이다. 따라서 7공 프로브는 종전의 프로브와 똑같은 모양으로 제작하였다 할지라도 제작 후에 반드시 보정과정을 거쳐야만 한다.

2.3 보정 이론 및 과정

7공 프로브는 속도와 흐름각도를 알고 있는 유동장에서 측정을 통해 보정상수 K를 구한 후, 이 보정상수 K를 이용하여 미지의 유동장을 측정하여 그 흐름성질을 결정하게 된다.

보정은 가장 높은 압력을 나타내는 압력공을 기준으로 총 7개의 영역으로 구분하여 각 영역에 따른 압력계수를 구한다. 7개의 영역은 중심 압력공을 기준으로 하는 1개의 낮은 흐름각 영역과 주변의 6개의 압력공을 기준으로 하는 6

$$C_{\alpha} = \frac{2(P_4 - P_1) + (P_3 - P_6) - (P_2 - P_5)}{3(P_7 - P_{aver})}$$

$$C_{\beta} = \frac{(P_3 - P_6) + (P_2 - P_5)}{\sqrt{3}(P_7 - P_{aver})}$$

$$C_t = \frac{P_7 - P_t}{P_7 - P_{aver}}, \quad C_q = \frac{P_7 - P_{aver}}{P_t - P_s}$$

높은 흐름각의 경우, 가장 높은 압력이 나타나는 n(n=1~6)번 압력공을 기준으로 다음과 같이 압력계수(C_θ, C_φ, C_t, C_q)를 구한다.

$$C_{\theta} = \frac{P_n - P_7}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}, \quad C_{\phi} = \frac{P_{n-1} - P_{n+1}}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}$$

$$C_t = \frac{P_n - P_t}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}, \quad C_q = \frac{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}{P_t - P_s}$$

이와 같이 구한 압력계수(C)와 흐름성질(A)을 이용하여 4차 다항식 최소 자승법으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & C_{\theta 1} & C_{\beta 1} & C_{\alpha 1}^2 & \cdots & C_{\beta 1}^4 \\ 1 & C_{\theta 2} & C_{\beta 2} & C_{\alpha 2}^2 & \cdots & C_{\beta 2}^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & C_{\theta n} & C_{\beta n} & C_{\alpha n}^2 & \cdots & C_{\beta n}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1^A \\ K_2^A \\ \vdots \\ K_m^A \end{bmatrix}$$

식(3)을 더 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$[A] = [C][K]$$

여기서 보정상수 K를 구하기 위해서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K] = [C^T C]^{-1} [C^T] [A]$$



Fig. 2 제작된 7공 프로브 사진
개의 높은 흐름각 영역으로 구분한다[2]. Fig. 3은 7공 프로브를 이용한 측정의 편의를 위해 흐름각을 정의한 그림이다.

7번 압력공을 기준으로 하는 낮은 흐름각의 압력계수(C_α, C_β, C_t, C_q)는 다음과 같이 구할 수 있다.

Sumner[4]의 연구결과에 의하면, 7공 프로브의 보정(calibration)은 그 간격이 10°를 넘을 경우 높은 흐름각 측정에서 더 큰 오차가 발생하므로 최대허용 보정간격은 10°가 적당하다고 하였다. 이에 본 실험의 보정간격은 측정의 편의와 소요시간을 고려해 10°로 하였으며, 이에 따라 측정지점은 총 253개가 된다.

7공 프로브를 이용하여 측정된 압력 데이터는 처리를 위해 전기적인 신호로의 변환이 필

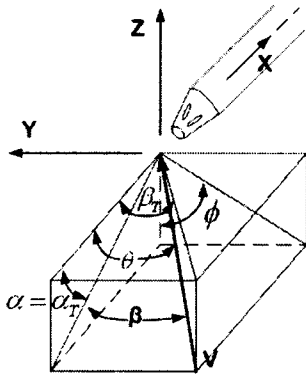


Fig. 3 흐름각 정의

요하다. 본 연구에서는 프로브 압력을 PDCR-23(1 psi range, $\pm 0.12\%$ F.S.) 압력 변환기 (pressure transducer)를 통하여 전기적 신호로 변환시켰으며, 변환된 전기적 신호는 매우 미약하므로 시그널 컨디셔너(signal conditioner)를 거쳐 증폭하고 필터링 하였다. 이러한 신호는 아날로그 신호로서 컴퓨터를 이용한 데이터 획득을 위해서는 디지털로의 변환이 필요하다. 이것은 컴퓨터에 내장되는 DAQ board(Data Acquisition board, PCI-MIO-16E-4)를 통해 이루어지며, 이러한 디지털 신호는 NI(National Instruments)사의 LabVIEW를 사용하여 100Hz로 10초 동안 기록하였다. LabVIEW를 이용하여 얻은 압력 데이터는 컴퓨터 프로그래밍 언어인 C++을 이용하여 압력계수를 계산해 내고 각 영역별로 정렬되도록 하였다.

Fig. 4는 보정과정에서 측정된 낮은 흐름각에서 α_T, β_T 의 변화에 따른 C_{α}, C_{β} 를 보여준다. 고른 간격으로 잘 분포된 수직·수평선은 이들 압력계수가 관련있는 흐름각에 대해서는 의존성을 띄고, 다른 흐름각에 대해서는 독립적임을 잘 보여주고 있다.

Table 1은 4차 다항식 최소 자승법 보정과 실제 흐름사이의 표준편차(standard deviation)를 나타낸다. 기존의 연구결과[2][5][6]와 비교하였을 때, 보정곡선이 실제 값과 잘 일치함을 알 수 있다.

2.4 7공 프로브의 실험 및 결과

개발된 7공 프로브가 측정 장비로서 적합한지를 판단하기 위해서 열선풍속계와 7공 프로브를 이용하여 시위길이가 0.18m인 NACA 0012 에

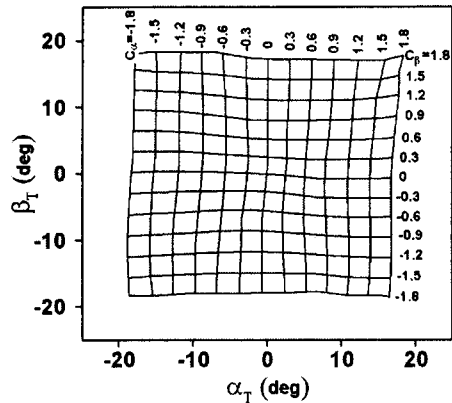


Fig. 4 낮은 흐름각에서의 C_{α}, C_{β}

어포일의 앞전부근에서 유동을 측정하였다. 열선풍속계로도 측정 가능한 흐름각을 만들기 위해서 에어포일의 받음각을 10° 로 하고, 2 m/sec ($Re = 22,700$)의 속도로 실험을 하였다.

Table 1 보정곡선의 표준편차

낮은 흐름각 영역		높은 흐름각 영역	
변수	표준편차	변수	표준편차
α_T	0.17°	θ	0.75°
β_T	0.13°	ϕ	0.4°
C_i	0.6%	C_i	1.7%
C_q	0.3%	C_q	1.6%
$\frac{\sigma_{(P_t)}}{P_t - P_s}$	0.3%	$\frac{\sigma_{(P_t)}}{P_t - P_s}$	1.4%
$\frac{\sigma_q}{P_t - P_s}$	0.5%	$\frac{\sigma_q}{P_t - P_s}$	2.1%
velocity	3.10%	velocity	3.53%

Fig. 5는 7공 프로브와 열선풍속계를 이용한 측정결과의 벡터성분을 나타낸다. 열선풍속계의 측정값을 기준으로 7공 프로브의 표준편차는 속도 3.17%, 흐름각 1.59° 로 나타났다. 속도의 크기는 전체적으로 7공 프로브로 측정된 경우보다 열선풍속계로 측정된 경우가 더 컸으며, 특히 x방향 속도성분 u가 더 컸으나 흐름각에서 편차가 줄어들면서 속도의 크기에서 그 편차가 많이 줄어들었다. 이러한 7공 프로브 오차는 프로브 성능에 가장 큰 영향을 미치는 프로브 팁을 좀 더 정밀하게 가공한다면 줄일 수 있을 것이다.

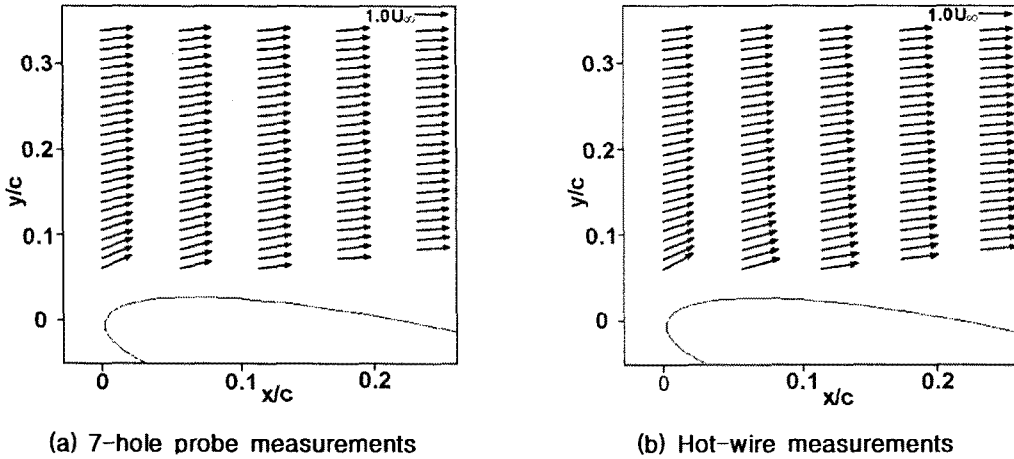


Fig. 5 NACA 0012 앞전부근의 유동 ($\alpha=10^\circ$, $Re=22,700$)

3. 결론

본 연구에서 팁 직경이 4mm이고, 70° 의 원추각을 가지는 7공 압력 프로브와 측정 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 7공 프로브는 약 70° 까지의 흐름각 측정이 가능하고, 4차 다항식 최소 자승법을 이용한 보정식을 통해 실제 유동의 속도벡터와의 비교에서 그 오차가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 또 열선풍속계를 이용한 측정 데이터 값과 비교를 통해 속도크기는 3.17%, 흐름각은 1.59° 의 표준편차로 측정 장비로서 적합함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업(과제번호: S0405110-E0810876-35004022)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 성봉주, 장병희, “최소 자승법을 이용한 5-Hole Yawhead Probe의 간략한 보정법”, 한국항공우주학회, 제16권, 제2호, 1988, pp. 20~28.
- 2) Gallington, R. W., “Measurement of Very Large Flow Angles with Non-nulling Seven-Hole Probe”, USAFA-TR-80-17, 1980, pp. 60~88.

- 3) Zeiger, M. D., Chalmers, L. P., and Telionis, D. P., “Tip Geometry Effects on Calibration and Performance of Seven-Hole Probes”, AIAA 98-2810, 1998.

- 4) Sumner, D., “Calibration Methods for a Seven-Hole Pressure Probe”, Proc. Fluid Control, Measurement and Visualization, 2000.

- 5) Gerner, A. A., Maurer, C. L., and Gallington, R. W., “Non-nulling Seven-Hole Probes for High Angle Flow Measurement”, Experiments in Fluids, Vol. 2, No. 2, 1984, pp. 95~103.

- 6) Gerner, A. A. and Maurer, C. L., “Calibration of Seven-Hole Probes Suitable for High Angles in Subsonic Compressible Flows”, USAFA-TR-81-4, 1981, pp. 57~92.