

論文

7공 압력프로브의 교정 및 개발

양재훈*, 장조원**

Development and Calibration of a Seven-Hole Pressure Probe

Jae Hun Yang*, Jo Won Chang**

ABSTRACT

The present study was carried out in order to develop a seven-hole pressure probe which is able to measure high flow angles. The seven-hole pressure probe is a non-nulling, directional velocity probe used for measuring three dimensional flow that having high flow angles. A 4 mm diameter seven-hole conical pressure probe was manufactured with a cone angle of 70°. The probe was comprised of seven 1 mm diameter stainless steel tubes packed close together and fitted into an outer stainless steel sleeve. The calibration procedure is based on the use of the Gallington's polynomial curve-fit method. The validity of the seven-hole conical pressure probe is demonstrated by comparisons with hot-wire data.

Key Words : Seven-Hole Pressure Probe(7공 압력프로브), Pressure Hole(압력공), Conical Type(원추형태), Probe Tip(프로브 팁), Cone Angle(원추각)

1. 서 론

아음속 풍동시험에서 시험모델 주변 흐름의 정량적인 데이터를 얻기 위해서 유체 흐름 속에 프로브를 직접 삽입하여 측정하는 방법이 있다. 일반적으로 3차원 흐름측정에 이용되는 센서는 열선프로브(hot-wire probe)나 5공 압력 프로브 등이다. 그러나 이러한 프로브 들은 흐름각이 30°를 넘는 경우에는 측정값의 정확성이 저하된다. 비록 5공 압력프로브(성봉주, 장병희, 1988)의 경우, 프로브 주축의 중심을 흐름 방향과 일치시키는 Nulling 기법을 이용하여 30°가 넘는 높은 흐름각 측정이 가능하지만, 일반적으로 Nulling 기법의 적용은 시간이 많이 소요되므로 많은 데이터를 얻는 실험에는 적합하지 않다. 이에 비해 Non-nulling 기법을 이용하는 7공 압력프로브는 Non-nulling 기법의 5공 압력프로브와 비교해 다

소 복잡하고 더 많은 실험 시간을 필요로 하는 단점이 있기는 하지만, 약 80°까지의 높은 흐름각을 지닌 3차원 흐름의 시간평균 속도벡터를 구하기에는 가장 적합하다(Gallington, 1980).

7공 압력프로브와 관련된 연구는 Gallington (1980)을 비롯해 다수의 연구자(Everett et al., 1983, Sumner, 2000)들에 의해 수행되었으며, 7공 압력프로브의 개발과 더불어 보다 더 정확하고 쉬운 교정방법(Gerner et al., 1981, 1984, Zilliac, 1993, Wenger et al., 1998)을 연구하는데 그 초점이 맞추어졌다. 이에 비해 국내에서는 아직 7공 압력프로브 및 데이터 획득 및 처리 소프트웨어가 개발된 사례가 없다. 7공 압력프로브는 비용이나 사용 측면에 있어서 국내 수요자의 요구 사항에 맞지 않는 단점이 있으므로 검증된 성능을 가진 7공 압력프로브의 개발은 시급한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 신뢰할 수 있는 수준의 오차를 지닌 7공 압력 프로브를 개발하고, 교정(calibration)이론을 이용한 프로브의 교정절차 및 실험을 통해 개발된 프로브의 성능을 검증하고자 한다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 정희원, 한국항공대학교 항공운항학과
연락처, E-mail : jwchang@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

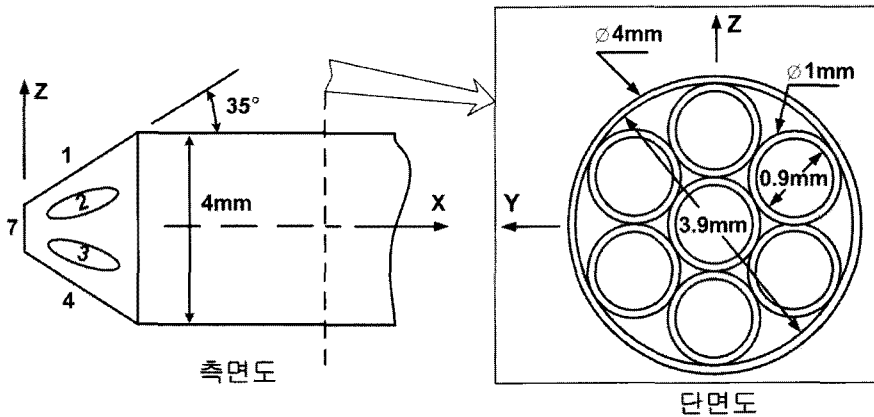


fig. 1 설계된 7공 압력프로브의 형상 및 압력공

II. 본 론

2.1 7공 압력프로브의 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 압력프로브의 제작은 중심 압력공을 기준으로 주변 압력공을 정확하게 일렬로 정렬하는 상당히 어려운 작업이 요구된다. 그러나, 7공 압력프로브는 직경이 동일한 7개의 관을 이용하여 중심 압력공을 기준으로 그 주위에 6개의 관을 둘러싸면 자연스럽게 정렬이 이루어지는 형상적 특징을 지닌다. 그러므로 5공 압력프로브 제작에서 요구되던 적절한 압력공간의 간격을 고려할 필요가 없어지게 된다(Gallington, 1980).

일반적으로 7공 압력프로브 팁(probe tip)의 형상은 면(facet), 원추(cone), 반구(hemisphere)형 등으로 구분할 수 있다. Zeiger et al.은 압력프로브 팁 형상이 프로브 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 아음속 범위의 속도영역에서 연구를 수행하였다. 그들에 의하면 실제 프로브를 이용하여 실험을 수행할 경우, 교정(calibration)과정과 동일한 속도영역에서 측정한다면 프로브의 형상과 성능은 그다지 큰 상관관계가 없다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 정확한 제작이 용이하고 가장 많이 사용되는 원추형 7공 압력프로브를 제작하기로 결정하였다.

2.2 7공 압력프로브의 설계 및 제작

7공 압력프로브의 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 압력프로브의 형상 및 압력공을 나타낸 것이다. 7번 압력공을 기준으로 주변에 6(1~6번)개의 압력공이 위치한다. 제작된 7공 압력프로브는 직경이 1 mm인 7개의 스테인리스 스틸(stainless steel) 관으로 구성되었고, 프로브 팁의 전체직경은 4 mm로 흐름 교란을 최소화 되도록 하였다. 프로브의 원추각은 70°이며, 프로브 전체 길이는 180 mm이다. 7공 압력프로브와 압력변환기(pressure transducer)의 연결이 용이하도록 하기 위해서 프로브의 후방에서 관들이 서로 일정한 간격을 가지도록 구부렸다.

fig. 2는 본 연구를 통하여 제작된 7공 압력프로브의 최종형태를 나타내고 있다. 개발된 7공 압력프로브는 프로브 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 압력프로브는 종전의 프로브와 똑같은 모양으로 제작하였다 할지라도 제작 후에 반드시 교정(calibration)과정을 거쳐야만 한다.

2.3 교정 이론 및 과정

7공 압력프로브는 속도와 흐름각도를 알고 있

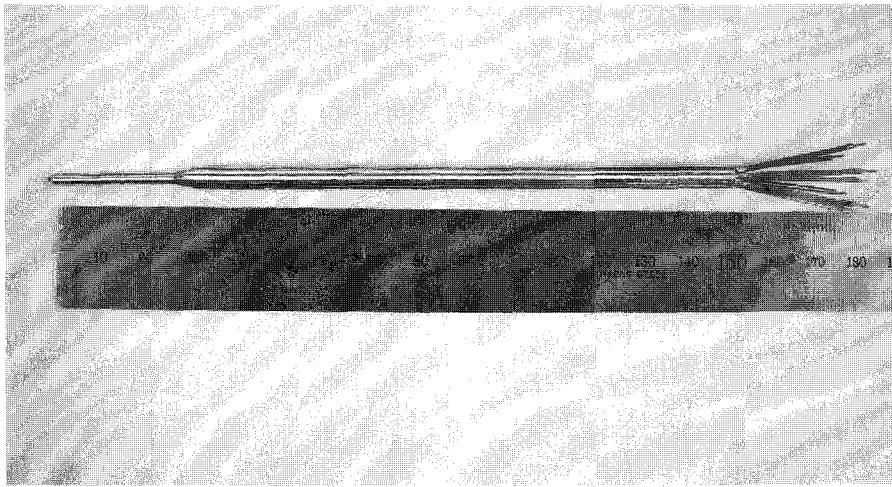


fig. 2 개발된 7공 압력프로브

는 유동장에서 측정을 통해 교정상수 K를 구한 후, 이 교정상수 K를 이용하여 미지의 유동장을 측정하여 그 흐름성질을 결정하게 된다.

교정은 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 6개의 높은 흐름각 영역으로 구별한다(Gallington, 1980).

공을 기준으로 하는 낮은 흐름각의 압력계수 (C_a, C_b, C_c, C_d)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C_a &= \frac{2(P_1 - P_1) + (P_3 - P_6) - (P_2 - P_5)}{3(P_7 - P_{avr})} \\
 C_b &= \frac{(P_3 - P_6) + (P_2 - P_5)}{\sqrt{3}(P_7 - P_{avr})} \\
 C_c &= \frac{P_7 - P_1}{P_7 - P_{avr}}, \quad C_d = \frac{P_7 - P_{avr}}{P_1 - P_s}
 \end{aligned} \tag{1}$$

높은 흐름각의 경우, 가장 높은 압력이 나타나는 $n(n=1\sim6)$ 번 압력공을 기준으로 다음과 같이 압력계수 (C_θ, C_o, C_t, C_q)를 구한다.

$$\begin{aligned}
 C_\theta &= \frac{P_n - P_7}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}, \quad C_o = \frac{P_{n-1} - P_{n+1}}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}} \\
 C_t &= \frac{P_n - P_t}{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}, \quad C_q = \frac{P_n - \frac{P_{n+1} + P_{n-1}}{2}}{P_t - P_s}
 \end{aligned} \tag{2}$$

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

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & C_{a1} & C_{b1} & C_{c1}^2 & \cdots & C_{d1}^4 \\ 1 & C_{a2} & C_{b2} & C_{c2}^2 & \cdots & C_{d2}^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & C_{an} & C_{bn} & C_{cn}^2 & \cdots & C_{dn}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1^{-1} \\ K_2^{-1} \\ \vdots \\ K_m^{-1} \end{bmatrix} \tag{3}$$

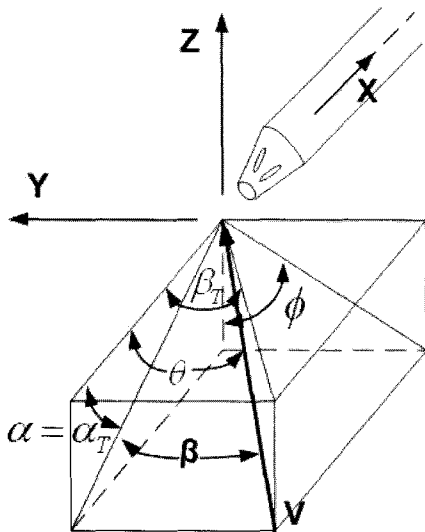


fig. 3 흐름각 정의

fig. 3은 7공 압력프로브를 이용한 측정의 편의를 위해 흐름각 정의를 나타낸 것이다. 7번 압력

식(3)을 더 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$[A] = [C][K] \tag{4}$$

여기서 교정상수 K를 구하기 위해서는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K] = [C^T C]^{-1} [C^T] [A] \tag{5}$$

7공 압력프로브 교정(calibration)에서 적합한 교정간격에 대한 연구(Sumner, 2000)에 의하면, 프로브 교정간격이 10°를 넘을 경우 높은 흐름각 측정에서 더 큰 오차가 발생하므로 최대허용 교정간격은 10°가 적당하다고 하였다. 이에 본 실험의 교정간격은 측정의 신뢰성과 편의성을 고려하여 피치각을 최대 70°까지 10°간격으로 교정실험을 수행하였다. 따라서 7개의 영역으로 구분된 7공 압력프로브의 측정위치는 각 영역별로 36개가 되므로 원점을 포함하여 총 253개가 된다.

7공 압력프로브의 교정은 광범위한 유속범위에서 우수한 유질성능을 갖는 교정 제트 시스템(calibration jet system)을 이용하여 수행하였다. 교정 풍속은 2 m/sec로 프로브 성능 검증에 위한 측정 실험과 동일한 범위의 유속에서 수행하였다.

7공 압력프로브를 이용하여 측정된 압력 데이터는 처리를 위해 전기적인 신호로의 변환이 필요하다. 본 연구에서는 프로브 압력을 PDCR-23(1 psi range, ±0.12%) 압력 변환기(pressure transducer)를 통하여 전기적 신호로 변환시켰다. 압력 변환기의 교정은 교정 제트 시스템을 이용하여 압력 변화(Micromanometer Furness社, FCO12)와 출력 전압의 관계를 조사하여 교정 데이터를 획득하였고, 이를 선형화한 교정식은 다음과 같이 표현된다.

$$y = Ax + B = 0.5974x - 0.5377 \tag{6}$$

여기서 A에 대한 오차는 0.12%, B는 3.95%이고, 표준편차(standard deviation)는 0.0921이며 상관관계 계수(correlation coefficient)는 0.99997이다.

변환된 전기적 신호는 매우 미약하므로 압력 변환기와 일체형으로 이루어진 Scanivalve社의 시그널 컨디셔너(signal conditioner, SCSG2)를 거쳐 증폭하고 고역통과필터(High pass filter)는 bypass로 설정하였다. 시그널 컨디셔너를 통과한 신호는 아날로그 신호로 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)社의 LabVIEW를 사용하여 100 Hz로 10초 동안 기록하였다. LabVIEW를 이용하여 얻은 압력 데이터는 컴퓨터 프로그래밍 언어인 C++을 이용하여 압력계수를 계산해 내고 각 영역별로 정렬되도록 하였다.

fig. 4는 교정실험에서 측정된 약 20°정도까지의 낮은 흐름각에서 α_T, β_T 의 변화에 따른

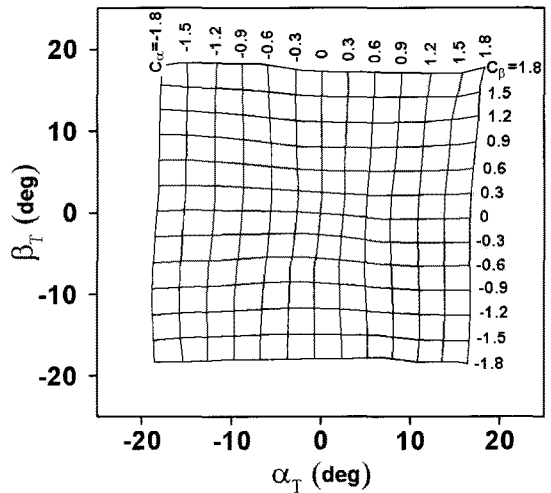


fig. 4 낮은 흐름각에서의 C_a, C_s

C_a, C_s 를 보여준다. 비교적 일정한 간격으로 잘 분포된 수직·수평선은 압력계수 C_a, C_s 에 따라 흐름각 α_T, β_T 가 결정된다는 것을 알 수 있다.

<표 1> 교정곡선의 표준편차

| 낮은 흐름각 영역 | | 높은 흐름각 영역 | |
|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| 변 수 | 표준편차 | 변 수 | 표준편차 |
| α_T | 0.17° | θ | 0.75° |
| β_T | 0.13° | ϕ | 0.4° |
| C_t | 0.6% | C_t | 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% |

<표 1>은 본 연구에 따른 4차 다항식 최소 상승법 교정과 실제 흐름사이의 표준편차를 나타낸 것이다. 본 연구를 통하여 얻은 교정곡선은 기존의 7공 압력프로브 연구(Gallington, 1980, Gerner and Maurer, 1981, Gerner et al., 1984)에서의 성능결과와 비교하였을 때 손색이 없을 정도로 실제 기준값과 잘 일치함을 알 수 있다.

2.4 7공 압력프로브의 검증실험 및 결과

본 연구에서는 개발된 7공 압력프로브가 측정 장비로서 적합한지를 검증하기 위해서 시위길이가 0.18 m인 NACA 0012 에어포일의 앞전부근에서 흐름을 열선풍속계로 측정한 결과와 비교하였다. 열선풍속계로도 측정 가능한 흐름각을 만들기 위해서 에어포일의 받음각을 10°로 하였고, 자유류의 속도는 2 m/sec($Re=22,700$)로 설정하여 검증실험을 수행하였다. 프로브가 에어포일 표면과의 거리가 가까울 때 발생할 수 있는 벽면간섭 효과를 우려하여 검증실험에 앞서 벽면간섭의 영향이 미치는 범위를 조사하였으며, 검증실험은 에어포일 표면과 가까운 거리에서의 측정은 제외하고 수행하였다.

열선풍속계를 이용한 실험은 DANTEC社의 X형 열선프로브(55R51)를 사용하였고, 정보획득율과 저역 통과 필터는 각각 6 kHz, 3 kHz로 약 11초간 신호를 획득하였다. 열선풍속계의 교정은 7공 압력프로브의 교정과 마찬가지로 교정 세트

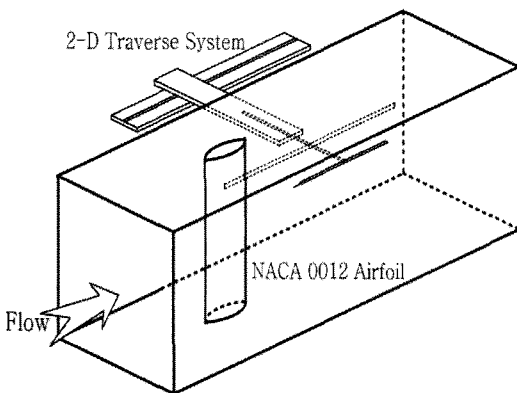


fig. 5 시험부 개략도

시스템을 이용하여 2 m/sec에서 수행하였고, 3 kHz로 16,384개의 정보를 얻어 시간평균 하였다. 속도와 전압사이의 관계는 4차 다항식(polynomial)

으로 표현하였으며, 본 연구에서 교정한 속도범위에서 오차는 0.4% 미만이다.

fig. 5는 본 연구를 위해 풍동 시험부에 장착한 에어포일 및 이송장치를 나타낸 개략도이다. 측정 장비인 7공 압력프로브와 2축 열선프로브는 시험부 옆면의 슬롯(slot)을 통하여 에어포일 표면에 수직하게 이송이 가능하도록 자동이송장치에 장착되었고, 본 연구에서 사용된 자동이송장치의 정확도는 0.01 mm이다.

fig. 6은 7공 압력프로브와 X형 열선프로브를 이용하여 측정한 속도벡터를 나타낸 것이다. 검증실험이 진행되는 동안 온도변화는 ± 1.0 °C 미만이며, 평균속도에 대해 2축 열선프로브의 불확실성은 5%정도였다. 이미 검증된 열선풍속계의 측정값을 기준으로 7공 압력프로브의 속도크기 및 흐름각 오차는 각각 $\pm 1.59\%$, $\pm 0.80^\circ$ 이다. 이러한 불확실성에는 프로브의 위치 오차, 받음각의 정렬, 풍동 시험부의 유속 변화, 온도 변화가 포함되어 있다. 속도크기는 전체적으로 7공 압력프로브로 측정한 결과보다 열선풍속계로 측정한 결과가 더 크게 나타났으며, 특히 x방향 속도성분 u와 y방향 속도성분 v 모두 크게 나타났지만 흐름각에서 거의 차이가 없었다. 이러한 7공 압력프로브 오차는 프로브 성능에 가장 큰 영향을 미치는 프로브 팁을 설계도면과 일치하도록 아주 정밀하게 가공한다면 줄일 수 있을 것이다.

III. 결 론

본 연구에서는 프로브 팁 직경이 4 mm이고, 원추각이 70°인 7공 압력프로브와 데이터 획득 및 처리 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 7공 압력프로브의 교정곡선은 기존의 7공 압력프로브 연구(Gallington, 1980, Gerner et al., 1981, Gerner et al., 1984)결과와 성능을 비교하였을 때 손색이 없을 정도로 실제 기준값과 잘 일치하였다. 또한 7공 압력프로브로 측정된 속도벡터는 열선풍속계로 측정된 데이터 값과 비교·검증한 결과 속도크기 및 흐름각의 오차는 각각 $\pm 1.59\%$, $\pm 0.80^\circ$ 이었다. 따라서 본 연구에서 개발된 7공 압력프로브는 신뢰할 수 있는 작은 오차를 지닌 유동측정 센서로 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업

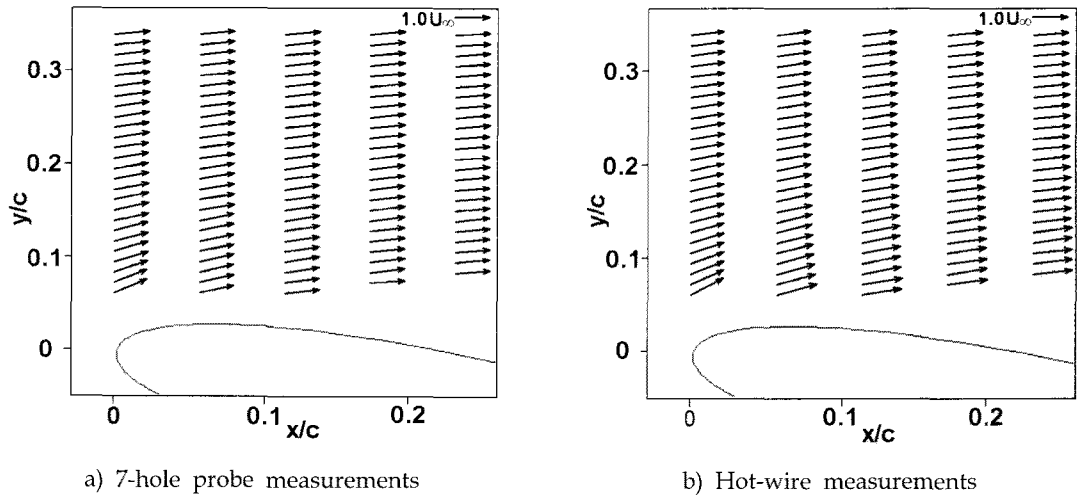


fig. 6 NACA 0012 앞전부근의 속도벡터 ($\alpha=10^\circ$, $Re=22,700$)

(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) Everett, K. N., Gerner, A. A., and Durston, D. A., "Seven-Hole Cone Probes for High Angle Flow Measurement: Theory and Calibration," AIAA Journal, Vol. 21, No. 7, 1983, pp.992~998.
- 4) Sumner, D., "Calibration Methods for a Seven-Hole Pressure Probe," Proc. Fluid Control, Measurement and Visualization, 2000.

- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Zilliac, G. G., "Modeling, Calibration, and Error Analysis of Seven-Hole Pressure Probes," Experiments in Fluids, Vol. 14, 1993, pp.104~120.
- 8) Wenger, C. W., and Devenport, W. J., "A Seven Hole Pressure Probe Measurement System and Calibration Method Utilizing Error Tables," AIAA 98-0202, 1998.
- 9) Zeiger, M. D., Chalmeta, L. P., and Telionis, D. P., "Tip Geometry Effects on Calibration and Performance of Seven-Hole Probes," AIAA 98-2810, 1998.