

5공 프로브 실험실용 교정 시스템 개발

김창민* · 백승찬** · 지창은*** · 황원태†

Development of a Laboratory-based Calibration System for 5-Hole Probes

Changmin Kim*, Seungchan Baek**, Changeun Ji***, Wontae Hwang†

Abstract In the field of experimental fluid dynamics, the 5-hole probe is one of the most widely used tools to measure flow velocity and pressure. We hereby describe the development of an inexpensive laboratory-based flow calibration system for 5-hole probes. The system is applied to a custom L-shaped probe, and the probe performance is compared against a standard commercial probe in a custom wind tunnel. The setup allows rotation of the probe around the yaw and pitch axes. Static and total pressure values are calculated, and then calibration maps are constructed based on the yaw and pitch angles. Using these maps, errors of the custom probe are found to be $\pm 5\%$ for velocity magnitude and $\pm 3^\circ$ for direction, compared to the commercial probe, when both pitch and yaw angles are within 40° .

Key Words : 5-Hole probe (5공 프로브), Non-nulling method, Calibration (교정)

기호설명

φ : yaw 방향 회전 각도
 θ : pitch 방향 회전 각도
 P_{static} : 유동의 정압

P_{total} : 유동의 전압
 $C_{p,pitch}$: pitch 각도에 대한 calibration 무차원변수
 $C_{p,yaw}$: yaw 각도에 대한 calibration 무차원변수
 U_x : x 방향 유동 속도
 U_y : y 방향 유동 속도
 U_z : z 방향 유동 속도

† Corresponding author:
Dept. of Mechanical Engineering,
Institute of Advanced Machines and Design,
Institute of Engineering Research,
Seoul National University, Professor
E-mail: wthwang@snu.ac.kr

* Dept. of Mechanical Engineering,
Seoul National University, Undergraduate student

** Dept. of Mechanical Engineering,
Seoul National University, Ph.D. candidate

*** Dept. of Mechanical Engineering,
Seoul National University, M.S. candidate

1. 서론

공력 측정에 있어서 5공 프로브 (5-hole probe)는 많은 분야에 활용되어 왔는데, 이는 5공 프로브가 일반적인 피토관 (pitot tube)과 달리 유동의 3차원 속도 성분을 동시에 측정할 수 있기 때문이다. 또한 5공 프로브 뿐만 아니라 7공 프로브, 다공 프로브 등을 통해서도 유동의 속도와 압력을 더욱 정확히 측정하려는 노력이 있어왔다. Bryer 와 Pankhurst

는 기존에 존재하던 수많은 유속 측정 방법들을 책으로 정리하였다⁽¹⁾.

Treaster와 Yocum은 non-nulling 기법을 사용하면서 5공 프로브에 yaw와 pitch각도를 주며 교정을 하였고, 레이놀즈 수 (Reynolds number)에 따른 측정값들의 변화를 분석하였다⁽²⁾. Nulling기법은 대칭되는 프로브 구멍의 압력 값이 같게 되도록, 즉 yaw 축에 대한 각도가 0이 되도록 프로브를 움직이는 것을 말하는데, 실제 측정에서는 이러한 움직임을 적용하기 힘들다. 반면 non-nulling 기법은 보간이나 회귀를 사용하기 때문에 측정 시에 프로브를 회전시킬 필요가 없다.

Pisale와 Ahmed는 5공 프로브 교정에 필요한 무차원화된 변수들이 극한값을 갖지 않도록 하는 방법을 제시하였다⁽³⁾. Paul과 Upadhyay는 유동의 압력과 방향을 측정함에 있어 완성된 교정지도를 바탕으로 회귀 (regression) 방법과 보간 (interpolation) 방법을 비교하였다⁽⁴⁾. 또한 Georgiou와 Milidonis는 터보기계 (turbomachinery) 연구를 위한 5공 프로브를 L자에 가까운 S자 모양으로 제작하고, 이를 이용하여 교정지도를 구축하였으며, 실제 풍동 내의 유동 측정에 활용하였다⁽⁵⁾.

5공 프로브의 교정지도는 기본적으로 측정하고자 하는 유동에 맞춰 제작되기 때문에 추후 지정된 조건을 벗어나는 다른 실험에서 교정지도를 사용할 경우 부적절할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 가스터빈의 연소기-터빈 통합 분석을 위하여 설계된 특수 풍동에 대하여 소개한 뒤, 해당 설비 중앙에서 나오는 균일한 유동장을 이용하여 5공 프로브를 교정하는 시스템에 대해 소개한다. 그리고 제작사에서 이미 교정된 상용 5공 프로브로 풍동 속도를 측정함으로써 새로운 시스템으로 교정된 커스텀 5공 프로브의 성능을 검증해 보고자 한다. 이 과정을 통하여 추후 다른 실험에서도 이러한 교정방법을 적용하여 다른 실험조건에 따라 교정지도를 구축할 수 있다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 풍동 설비

교정작업에 사용된 풍동을 아래 Fig. 1에 표기하였다. 해당 풍동은 연소기-터빈 통합 분석을 위하여 구축되었으며, 이를 위하여 3개의 토출구가 존재한다. 각 토출구에서 나오는 유동은 상류의 섹션 분할판 각도를 변경하여 유량 비율을 조절할 수 있다. 본 논문에서는 중앙부 주유동부를 사용해서 실험을 수행하였다. 본격적인 실험에 앞서, 정확한 교정작업을 위하여 풍동 토출구에서 균일한 유동이 나오는지를 파악하기 위해서 피토크를 이용하여 유동의 균일성을 확인하였다 (Fig. 2). 해당 실험은 분할판을 조정하여 주유동 부에 모든 유동이 쏠릴 수 있도록 설정을 하였다. 이때에 중앙부에서는 9.9 m/s 정도의 속도가 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

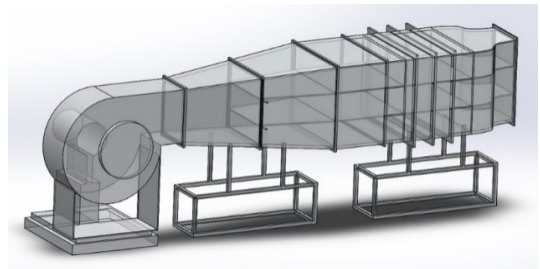


Fig. 1. Custom 3-stream open-loop wind tunnel

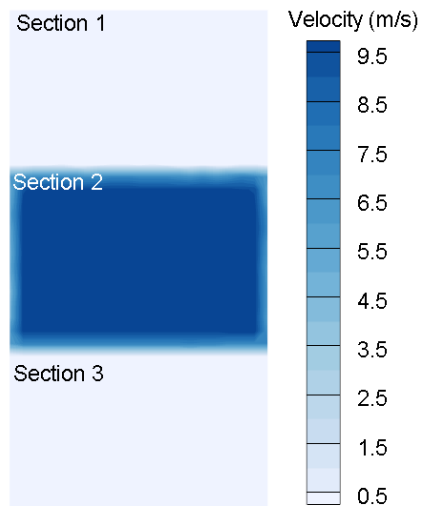


Fig. 2. Flow uniformity at wind tunnel main outlet

2.2 5공 프로브 및 교정 장비

이 논문에서는 국내 금속가공업체에서 제작된 5공 프로브 및 Scanivalve 사의 DSA3217 압력센서 들이 사용되었으며, 교정을 위해서는 알루미늄 프로파일로 제작된 회전 장비, 그리고 계산을 위한 LABVIEW등의 소프트웨어가 사용되었다.

Fig. 3은 L형 5공 프로브를 보여준다. 끝부분에 다섯 개의 샘플링 구멍으로 이루어져 있다 (Fig. 3a). 중앙의 구멍은 앞면이 통로와 수직하게 제작되어 있고, 나머지 4개의 구멍들은 앞면이 전부 비스듬하게 대칭적으로 나 있다 (Fig. 3b). 프로브 팁의 직경은 7 mm이다. 구멍들은 각각의 고유한 번호가 있는데, 프로브가 유선 방향으로 정렬될 경우 유동은 프로브의 대칭적인 형태를 따라 흘러가기 때문에 압력센서가 1 - 4 번 구멍에서 측정하는 값이 같게 나와야 한다.

교정을 위해서 프로브는 Fig. 4와 같이 풍동출구에 부착되어 있는 회전장치에 고정되며, 각도기를 이용하여 yaw 및 pitch 각도를 측정한다. 반복 실험을 10번 이상 수행하였을 때, 압력이 동일한 값을 나타낸 것으로 보아 충분히 정밀하게 각도를 맞출 수 있음을 확인하였다. 프로브가 유선 방향으로 정렬되어 있는지는 압력센서를 통해 알 수 있다.

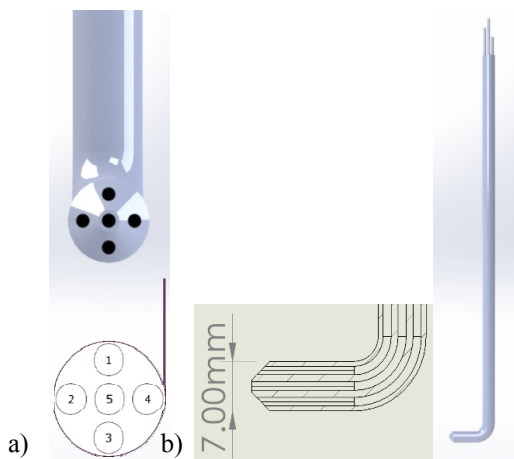


Fig. 3. Schematic of the 5-hole probe. a) Front view, b) side view

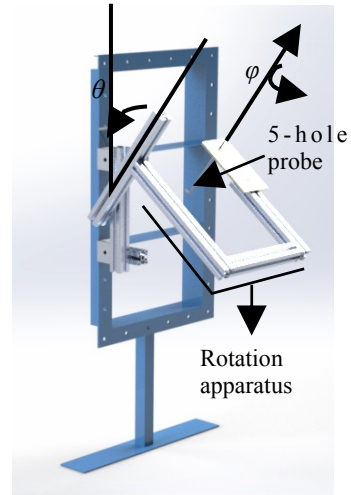


Fig. 4. Calibration hardware for the 5-hole probe, attached to the wind tunnel exit, showing rotation yaw angle ϕ and pitch angle θ .

3. 5 공 프로브 캘리브레이션

본 논문에서는 non-nulling 방식을 통해 5공 프로브를 교정하여 풍동에서의 유동을 측정하였다. 교정을 위해 먼저 알고 있는 유동장에 프로브를 삽입하고, yaw (ϕ) 및 pitch (θ) 방향으로 회전시킴으로써 다양한 각도에서 유동을 측정한다. 각각의 yaw와 pitch 각도마다 5개의 구멍에서 측정되는 압력을 모두 기록하고, 그것을 무차원화하여 교정지도 (calibration map)를 구축한다.

3.1 교정지도 구축

여러가지 non-nulling 방식의 교정은 각기 무차원화된 변수 설정이 조금씩 다르며, 이 논문에서는 그중 Treaster와 Yocum의 아래와 같은 무차원 변수들을 선택하였다⁽²⁾.

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4}$$

$$C_{P,yaw} = \frac{P_2 - P_4}{P_5 - \bar{P}}$$

$$C_{P,pitch} = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{P}}$$

$$C_{p,static} = \frac{P_{static} - \bar{P}}{P_5 - \bar{P}}$$

$$C_{P,total} = \frac{P_5 - P_{total}}{P_5 - \bar{P}} \quad (1)$$

이때 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 는 각각의 pitch와 yaw 각도에 따른 5공 프로브의 압력 값들이다. P_{static} 과 P_{total} 은 각각 유동의 정압과 전압인데, 교정지도가 이미 구축되어 있는 경우에 $C_{p,yaw}$ 와 $C_{p,pitch}$ 으로부터 간접적으로 구할 수 있다. 위 \bar{P} 를 제외한 무차원 변수들은 5공 프로브의 pitch와 yaw 각도가 30° 를 넘어가면 분모가 0에 가까워지고, 특이점 (singularity)에 도달하며 급격하게 커진다. 이는 곧 높은 pitch와 yaw 각도에서 유동이 제대로 측정되지 못함을 의미한다. 따라서 위의 변수들은 한정된 범위 내의 pitch와 yaw 각도에서만 측정할 수 있다. 이러한 현상의 이유는 다공 프로브 근처에서 유동 박리 (separation)가 일어나기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 아래와 같이 무차원화의 기준을 중앙 5번 구멍 뿐만 아니라 주변 1, 2, 3, 4번 구멍에 대해서도 적용하였다. 그리고 Gerner et al.이 제시한 높은 yaw와 pitch 각도에서도 사용될 수 있는 방법⁶⁾을 적용하여 1, 2, 3, 4번 구멍에 무차원화를 진행하였다.

1번 구멍

$$\bar{P} = \frac{P_2 + P_4}{2}$$

$$C_{P,yaw} = \frac{P_2 - P_4}{P_1 - \bar{P}}$$

$$C_{P,pitch} = \frac{P_1 - P_5}{P_1 - \bar{P}} \quad (2)$$

2번 구멍

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_3}{2}$$

$$C_{P,yaw} = \frac{P_2 - P_5}{P_2 - \bar{P}}$$

$$C_{P,pitch} = \frac{P_1 - P_3}{P_2 - \bar{P}} \quad (3)$$

3번 구멍

$$\bar{P} = \frac{P_2 + P_4}{2}$$

$$C_{P,yaw} = \frac{P_2 - P_4}{P_3 - \bar{P}}$$

$$C_{P,pitch} = \frac{P_5 - P_3}{P_3 - \bar{P}} \quad (4)$$

4번 구멍

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_3}{2}$$

$$C_{P,yaw} = \frac{P_5 - P_4}{P_4 - \bar{P}}$$

$$C_{P,pitch} = \frac{P_1 - P_3}{P_4 - \bar{P}} \quad (5)$$

n 번 구멍 ($n = 1, 2, 3, 4, 5$)

$$C_{p,static} = \frac{P_{static} - \bar{P}}{P_n - \bar{P}}$$

$$C_{P,total} = \frac{P_n - P_{total}}{P_n - \bar{P}} \quad (6)$$

먼저 압력 센서가 계측한 5개의 압력 중 어느 값이 가장 높은지 파악하고, 그 구멍을 기준으로 무차원 변수들을 산정한다. 예를 들어 프로브를 오른쪽으로 시계방향으로 회전시켜서 2번 구멍에서 압력이 제일 크게 계측되었다면, 그 구멍을 기준으로 식(3)의 무차원 변수들을 계산한다.

교정지도를 구축하는 법은 아래와 같다. 위에서 주어진 무차원 변수들 중 $C_{p,pitch}$ 을 한 축으로 설정하고 $C_{p,yaw}$ 을 다른 축으로 설정해서, 각각 pitch 각도와 yaw 각도를 회전장치에서 측정하여 두 개의 교정지도를 생성한다. 그리고 반대로 pitch 각도와 yaw 각도를 두 축으로 지정하고, 무차원 변수인 $C_{p,total}$ 과 $C_{p,static}$ 을 추가적으로 계산해서 두 개의 교정지도를 생성한다. 이러한 방식으로 5개의 구멍에 대해 모두 4개씩 교정지도를 구축한다. Fig. 5는 이러한 방법을 사용한 5번

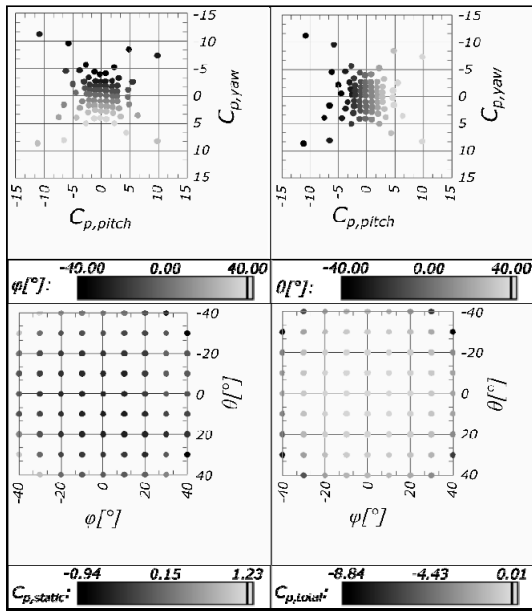


Fig. 5. Scatter plot of the calibration maps for the 5th hole.

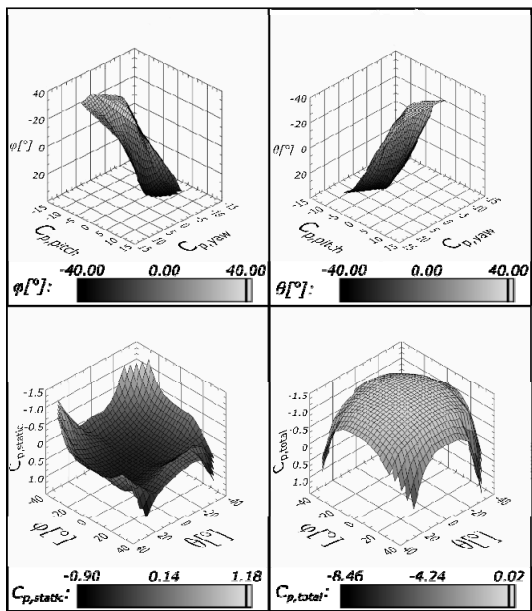


Fig. 6. Linearly interpolated calibration maps for the 5th hole.

변 구멍의 교정지도 산포도를 나타낸다. Fig. 6는 산포도를 선형보간 (linear interpolation)한 교정지도를 보여준다.

교정지도를 구축하는 과정에서 기록하고자 하는 yaw와 pitch각도의 간격, 유동의 속도 U 등이 고려되어야 한다. U 가 증가할수록 유동에 대한 5공프로브 끝부분에서의 간섭 정도가 심해짐에 따라 교정지도 결과가 달라진다⁷⁾. 따라서 이러한 차이를 최대한 줄이기 위해, U 값은 실제 측정하고자 하는 유동의 속력과 최대한 같게 하여야 한다. 추후 연소기-터빈 통합 분석에서 측정되어야 할 유동의 속력은 8 - 9 m/s 로 예측이 된다. 따라서 이번 논문에서 5공 프로브의 교정에 사용한 풍동의 유속은 $U = 8.3$ m/s로 고정하고 그에 따른 압력 데이터를 사용하여 교정지도를 제작하였다.

그 다음으로 교정지도 제작에 필요한 $\Delta\theta$ 또는 $\Delta\phi$ 값을 선정하였다. 본 논문에서 사용된 압력 센서는 Scanivalve DSA3217으로서, 주어진 데이터시트에 의하면 정확도는 $\pm 0.05\%$ 이고, 분해능은 약 0.2Pa 이었다. 또한 Sumner는 회귀와 보간을 이용한 교정지도 제작을 각각 비교하며, $\Delta\phi$ 와 $\Delta\theta$ 값이 10° 이하일 경우 $\Delta\theta$ 에 의한 교정지도의 오차는 매우 작음을 발견하였다⁸⁾. 따라서 $\Delta\theta$ 값을 더 작게 하여 교정지도를 만드는 데 드는 시간과의 trade-off를 고려하여, 이 논문에서는 $\Delta\theta = 10^\circ$ 로 정하고 교정지도를 만들었다. Fig. 5, 6은 이렇게 제작된 교정지도를 보여준다. $C_{p,pitch}$ 값이 증가함에 따라 pitch 각도가 증가하고, $C_{p,yaw}$ 값이 증가함에 따라 yaw 각도가 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 교정지도의 특징은 Treaster와 Yocum이 소개한 교정지도의 특징과도 같으므로, 교정지도가 잘 작성되었음을 알 수 있다.

3.2 유속과 방향 계산

실제로 유동을 계측할 때에는 5개의 압력 값들 중 가장 큰 값에 대응되는 구멍의 교정지도를 이용하여 보간법을 통해서 유속과 방향을 계산한다. 먼저 $P_1 \sim P_5$ 으로부터 $C_{p,yaw}$ 와 $C_{p,pitch}$ 를 계산하고, 교정지도를 이용하여 yaw와 pitch 각도를 구한다. 그리고 이로부터 $C_{p,total}$ 및 $C_{p,static}$ 를 교정지도를 이용하여 구하고, equation 6 을

통해 P_{total} 및 P_{static} 을 구한다. 그리고 아래 equation 7를 이용해서 속력 U 는 비압축성 유체를 가정하고 베르누이 공식으로 계산한다. 속도벡터 성분 U_x, U_y, U_z 는 yaw각도와 pitch각도를 고려하여 equation 7를 이용해서 계산한다. Fig. 7은 실제 속도를 구하는 방법을 정리하였다.

유동 측정의 정확도를 평가하기 위해서는 기존의 검증된 유동 측정 장치와의 비교가 필요하다. VectoFlow사의 5공 프로브 (모델명: L_5HP_csprkx_4)를 이용하여 직접 제작한 5공 프로브의 정확도를 평가하였다. 같은 pitch와 yaw각도에 대해 속력과 각도를 비교한 결과, VectoFlow의 프로브 대비 직접 제작한 프로브의 측정값은 yaw값과 pitch값이 모두 40° 이내일 경우 속력은 최대 ±5%, 각도는 최대 ±3°의 오차를 보였다. 또한 yaw와 pitch 중 하나가 40° 이상이면 속력의 오차율은 최대 ±8%, 각도는 최대 ±5°의 오차율을 보였다. 오차의 원인은 상용 프로브의 3 mm 팁 직경보다 커스텀 프로브의 7 mm 직경이 더 많은 유동 간섭을 야기하기 때문이다.

$$U = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{static})}{\rho}}$$

$$U_x = -U \cos\theta \sin\phi$$

$$U_y = -U \sin\theta$$

$$U_z = U \cos\theta \cos\phi \tag{7}$$

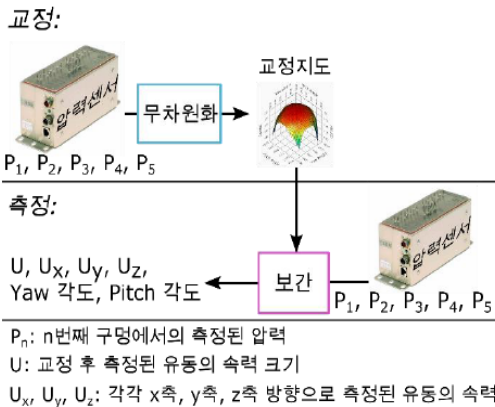


Fig. 7. Procedure for calculating flow velocity

4. 결론

본 논문은 실험실용 5공 프로브 교정 시스템 개발에 대하여 소개하였다. 개방형 풍동 출구의 균일 유동 영역에 프로브를 yaw와 pitch 각도에 따라 회전할 수 있는 장치를 제작하고 고정시켰다. 압력 센서를 사용하여 커스텀 프로브 5개 구멍에서의 압력을 각각 측정하였고, 이를 무차원화된 변수로 변환하여 non-nulling 방식을 사용해서 교정지도들을 구축하였다. 이 교정지도들을 보간하여 유동의 속력과 방향을 최종 계산하였다. 오차는 정확도가 높은 상용 프로브와 비교하여 pitch와 yaw 각도 둘다 40° 이하일 때, 유동의 속력은 최대 ±5%, 각도는 최대 ±3° 이었다.

후 기

This work has been supported by the UAV High Efficiency Turbine Research Center program of Defense Acquisition Program Administration and Agency for Defense Development.

REFERENCE

- 1) Bryer, D. W., and Pankhurst, R. C., 1971, "Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction," HMSO.
- 2) Treaster, A. L., and Yocum, A. M., 1979., "The calibration and application of five-hole probes," ISA Trans. Vol. 18(3), pp. 23~34
- 3) Pisasale, A. J., and Ahmed, N. A., 2002, "A novel method for extending the calibration range of five-hole probe for highly three-dimensional flows," Flow Meas. Instrum., Vol. 13(1-2), pp. 23~30.
- 4) Paul, A. R., Upadhyay, R. R., and Jain, A., 2011, "A novel calibration algorithm for five-hole pressure probe," Int. J. Eng. Sci. Technol., Vol. 3(2).
- 5) Georgiou, D. P., and Milidonis, K. F., 2014, "Fabrication and calibration of a sub-miniature

- 5-hole probe with embedded pressure sensors for use in extremely confined and complex flow areas in turbomachinery research facilities,” *Flow Meas. Instrum.*, Vol 39, pp. 54-63.
- 6) Gerner, A. A., Maurer, C. L., and Gallington, R. W., 1984, “Non-nulling seven-hole probes for high angle flow measurement. *Exp. Fluids*,” Vol. 2(2), pp. 95~103.
 - 7) Lee, S. W., and Jun, S. B., 2005, “Reynolds number effects on the non-nulling calibration of a cone-type five-hole probe for turbomachinery applications,” *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 19(8), pp. 1632~1648.
 - 8) Sumner, D., 2002, “A comparison of data-reduction methods for a seven-hole probe,” *J. Fluids Eng.*, Vol. 124(2), pp. 523~527.