

論文

단일영역 오차보간 모델을 이용한 5-Hole Pressure Probe의 교정

오세윤*, 안승기*, 조철영*

Calibration of a Five-Hole Pressure Probe using a Single Sector Error Interpolation Model

Se-Yoon Oh*, Seung-Ki Ahn* and Cheol-Young Cho*

ABSTRACT

A new calibration method for five-hole pressure probe is presented. This method provides accuracies better than those based on the traditional regression method. The calibration algorithm uses a single sector interpolation response surface calculated by comparing the regression curve fits with the actual calibration data. A five-hole pressure probe with hemispherical tip was fabricated and calibrated at Reynolds number of $4.11 \times 10^6/m$ and flow angle of ± 48 degrees. Two data prediction models, the least-square regression and a single sector error interpolation, were evaluated. The comparison of these two calibration methods to a five-hole probe is described and discussed. An evaluation of the calibration accuracy is also given.

초 록

기존의 전통적인 회귀분석 기반 교정방법에 비해 높은 교정정밀도를 얻을 수 있는 5-hole pressure probe의 교정방안을 연구하였다. 이 새로운 교정기법은 교정시험으로부터 획득한 데이터와 곡선적합 결과간의 차이를 이용하여 산정한 단일 영역에 대한 오차보간 반응곡면을 사용한다. 끝단의 직경이 4.0 mm인 5-hole probe를 자체 제작하고, 레이놀즈 수 $4.11 \times 10^6/m$ 와 흐름각 $\pm 48^\circ$ 에서 교정시험을 수행하였다. 최소자승 회귀분석모델과 단일영역 오차보간 모델을 적용하여 자료처리를 수행하고 이들 두 교정방안에 대한 비교평가와 분석을 수행하였으며, 아울러 교정 정밀도에 대한 평가도 수행하였다.

Key Words : Calibration Test(교정시험), Error Interpolation(오차보간), Regression Analysis(회귀분석), Sectoring Scheme(영역분할), Pressure Port(압력공)

1. 서 론

관심 유동장(flow field)의 유동특성을 알기 위한 방법으로는 먼저 여러 가지 흐름가시화 방법을 들 수 있으나, 대부분의 경우 정량적인 정보를 얻는 데에는 한계가 있으며 이러한 정보를 얻

기 위해서는 유동장에 관한 직접적인 측정이 필요하다. 유동장에 probe를 직접 투입하여 측정하는 방법 중에 가장 고전적인 유동장 측정방안으로는 5-hole pressure probe와 triaxial-hot wire probe의 두 가지 유형을 들 수 있으며, 이들 모두 약 40° 이내 받음각 영역에서의 측정이 가능하다. 이중 다양한 끝단 형상을 갖는 소형 5-hole probe는 다른 여러 가지 흐름측정 장치에 비해 그 적용법이 간단하고 경제적이어서 많은 유동장 측정분야에서 사용되고 있다[3,6,7,9]. Bryer와 Pankhurst[6]는 5개소의 압력측정용 probe를 사

† 2006년 2월 16일 접수 ~ 2006년 4월 17일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

연락처, E-mail : syoh@add.re.kr

대전광역시 유성우체국 사서함 35-3호

용한 교정시험(calibration test)을 통해 전압력(total pressure)과 정압력(static pressure) 및 모든 속도성분을 구할 수 있음을 보였다.

대표적인 5-hole probe의 교정방법의 하나인 다항식 회귀분석법(polynomial regression)을 이용하는 Gallington[1] 방법의 경우에는 흐름각(flow angle) $\pm 2.5^\circ$ 가량 속도는 $\pm 5\%$ 가량의 오차를, 아키마 보간법(AKIMA interpolation)을 이용한 Zilliac[2] 방법의 경우에는 흐름각의 오차가 $\pm 0.5^\circ$ 정도이고 속도오차는 $\pm 1\%$ 까지 측정이 가능하다고 알려져 있다. 그러나 사용이 비교적 간편하고 인과관계가 직관적이어서 주로 사용되고 있는 Gallington 방법은 곡선적합(curve fitting) 오차가 상대적으로 크게 발생하기도 하며, Zilliac 방법의 경우에는 이러한 오차를 감소시키기 위해 복잡한 보간기법을 도입하였으나 특정상용코드(IMSLS[®] subroutine)가 필요하고 측정자료의 실시간 처리가 어렵다는 단점이 있다[9].

본 연구에서는 기존의 Gallington 방법을 근간으로 교정을 수행하고, 회귀분석에서 발생하는 곡선적합 오차에 일반적으로 쉽게 이용할 수 있는 보간법[8]을 다시 적용하도록 하여 교정정밀도를 향상시킬 수 있도록 하였다. 특히 다중영역 분할기법(multi-sectoring scheme)을 이용하는 기존 교정모델에 새로이 단일영역(single-sector) 오차보간모델(error interpolation model)의 적용을 시도하여, 대상 교정영역의 분할시 교정모델의 영역경계(boundary)에서 불가피하게 발생하는 불연속 오차(discontinuity error)를 줄이도록 하였다[10].

본 연구를 위해 국내에서 직접 제작한 반구형 두부(hemispherical-tipped)의 5-hole pressure probe를 사용하여 속도 60 m/s 영역에서 교정시험을 수행하였다. 획득된 시험자료는 기존의 최소자승 회귀분석방법과 곡선적합 잔여오차(residual error)에 대한 추가적인 보간법을 적용하였으며, 이들 두 교정방안에 대한 비교평가와 교정결과에 대한 분석을 수행하였다.

II. 시험장치 및 방법

2.1 시험장치

교정시험에 사용된 국방과학연구소 파일럿 풍동(ADD-PWT)은 측정부의 제원이 폭 0.75 m, 높이 0.563 m, 길이 2.188 m이며, 수축비 9.0인 단일 폐회로식으로서, 유속을 최저속도 10 m/s에서 최고속도 120 m/s까지 변화시킬 수 있다.

교정시험을 위한 흐름각의 범위는 풍동 기계장치의 제약으로 인해 $\pm 48^\circ$ 까지로 제한되었으며 이때의 레이놀즈수는 $4.11 \times 10^6/m$ 였다. 본 연구에서는 probe 끝단 압력공(pressure port)에서 탐지되는 압력을 측정하기 위해 압력범위 ± 1.0 psid ($\pm 0.05\%$ full scale error)인 5개의 Barocel[®]을 사용하였으며, 파일럿 풍동의 자료획득장치에 연결하여 시스템 교정(on-line calibration)을 수행하였다. 교정시험에서 측정된 각도와 속도의 합성표준불확도[12] (u_c)는 각각 $\pm 0.05^\circ$ 와 0.04 m/s였다.

2.2 5-Hole Probe 형상

풍동시험부내 유동특성의 측정을 위해 5-hole pressure probe와 같은 장치를 개발하는 경우에는 소형화가 매우 중요하다. 설계초기에는 흐름 간섭을 최소화하기 위해 probe의 직경을 2.5 mm로 선정하였으나 국내제작여건으로 인해 직경이 4.0 mm로 증가되었다. 제작된 각각의 probe들은 제작과정에서 발생하는 여러 공차로 인해 유동장 측정 사용 전에 반드시 별도의 교정과정을 거쳐야만 한다.

교정시험에 사용된 5-hole probe는 스테인레스강 재질로 제작되었으며 5개의 압력공이 있는 끝단은 직경 4.0 mm의 반구형 형상으로 전체길이는 160 mm에 이른다. 이러한 반구형 형상의 probe는 저속영역에서 속도 및 레이놀즈수에 따른 특성변동이 작아서 교정속도 이외의 미지의 저속유동조건에서도 사용이 가능하다[11]. Fig. 1 에는 본 연구를 위해 자체 개발된 5-hole probe 의 상세제원이 나타나 있다.

2.3 교정시험조건

압력자료를 획득할 흐름각 조합의 선정은 가능한 한 압력표본자료들이 각각의 5개 분할영역에

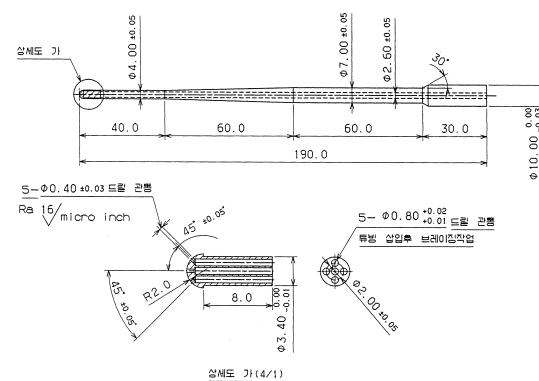


Fig. 1. Details of a five-hole probe (mm)

서 균일하게 획득될 수 있도록 하였다. 따라서 선정된 표본들이 원하는 영역 안에 확실히 배치될 수 있도록 영역간의 경계선 영역에는 배당하지 않았다[7]. 파일럿 풍동 시험부의 중앙에 장착된 probe는 높은 흐름각을 위한 원주방향 영역간의 경계가 45°, 135°, 225°, 315°로 예상됨에 따라, 롤각(roll angle, ϕ)의 경우에는 교정시험을 5°에서부터 시작해서 15° 간격으로 175°까지 회전시켜 교정시험을 수행하였다. 또한, 시험부내의 회전반(turn table)을 이용하여 $\pm 48^\circ$ (θ_{max})까지 4° 간격으로 원추각(cone angle, θ)을 변화시켰다. 흐름각에 대한 probe의 자세제어는 초승달형 지지부 시스템(crescent support system)과 회전반으로 사용된 로터리 테이블(rotary-table)을 이용하여 변경하였다.

교정시험의 수행을 위해서는 먼저 4개의 압력계수들을 적당한 기준 좌표계 시스템(reference coordinate system)에 따라 정의해야한다. 일반적으로 풍동시험에는 받음각(angle of attack, α)과 요우각(yaw angle, ψ)과 같은 직각좌표계가 사용되지만, 높은 받음각과 큰 요우각에 대한 교정시험을 용이하도록 하기 위해서는 구형 좌표계(spherical coordinates)와 같은 기준 시스템을 사용하는 것이 편리하다. 흐름에 대한 원추각 θ 는 Fig. 2와 같이 속도벡터와 probe 축 사이의 각으로

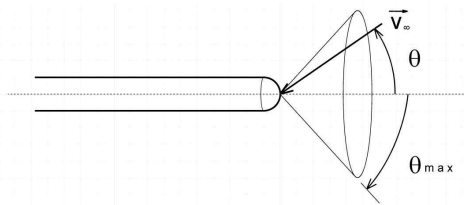


Fig. 2. Cone angle definition

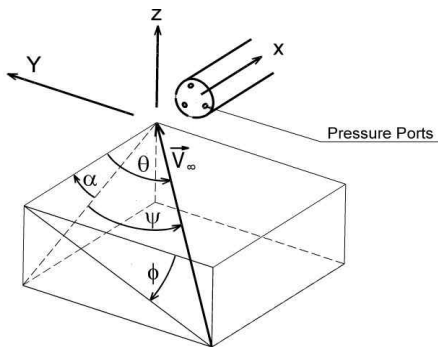


Fig. 3. Five-hole probe coordinate systems

로 정의하고, 롤각 ϕ 는 Y축과 Y-Z 면에 투영한 속도벡터 사이의 각으로 정의한다. 롤각은 속도벡터가 probe의 끝단으로 접근할 때에 흐름의 상류방향을 기준으로 하여 음의 Y축으로부터 시계방향으로 측정된 것을 양의 값으로 설정한다 [1,4,9]. Fig. 3은 이러한 흐름각과 기준좌표계 시스템에 대한 정의를 나타내고 있으며 이러한 흐름각에 대한 시험자료들은 간단한 좌표계 변환 과정을 거쳐서 고정된 풍동 좌표계로부터 probe 기준 좌표계로 변환되었다.

III. 교정이론

3.1 교정기법 고찰

본 연구에서 제시된 교정방안은 기존의 회귀분석방법에 곡선적합 오차에 대한 보간법이 결합된 형태이며, 직관적이고 단순한 장점을 갖고 있는 기존의 회귀분석 기반 교정법을 유지하면서도 관련 오차를 경감시킬 수 있도록 하여 앞서 언급한 특정상용코드를 사용하지 않고도 보다 정확한 교정이 가능하도록 하고자 하였다. 따라서 오차보간 교정방안의 이면에 내포되어있는 교정원리의 설명을 위해선 먼저 Gallington[1]과 Zilliack[2]의 교정기법에 대한 고찰이 필요하다. 이들 두 교정기법들은 모두 probe에 작용압력을 기준한 영역분할 기법을 사용하고 있다(Fig. 4).

낮은 흐름각 영역에서의 유체의 흐름은 5-hole probe의 5개 모든 압력공에서 이탈하지 않은 상태를 가정하므로, 5개의 모든 압력공의 압력자료가 유효하다. 각도변화에 따른 압력계수들은 각각의 기준축에 따라 선형적으로 변하는 정의를 갖는다. 낮은 흐름각 영역에 대한 각도변화에 따른 압력계수의 정의는 다음의 식(1)과 같다.

식(1)에서 분자는 서로 반대방향 압력공간의 압력차이(pressure difference)에 따른 받음각과 요우각의 변화량을 나타내며, 분모는 probe 근사

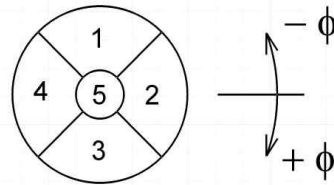


Fig. 4. Pressure port/calibration sector numbering convention

동압을 사용하여 이러한 압력차이를 무차원화 시키는 역할을 한다.

$$C_{\alpha} = \frac{(P_3 - P_1)}{(P_5 - P_{1-4,avg})} \tag{1}$$

$$C_{\psi} = \frac{(P_2 - P_4)}{(P_5 - P_{1-4,avg})}$$

$$C_0 = \frac{(P_5 - P_{T,local})}{(P_5 - P_{1-4,avg})}$$

$$C_q = \frac{(P_5 - P_{1-4,avg})}{(P_{T,local} - P_{S,local})} \tag{2}$$

국부 전압력과 정압력은 미지의 흐름측정시에 압력계수로부터 식(2)와 같이 산출된다. 여기서 C_0 는 probe가 추정한 전압력(P_5)과 실제 전압력간의 차이를 보정(correction)하는 역할을 하며 C_q 는 probe 근사동압과 실제 동압간의 차이를 보정하는 역할을 한다.

$$C_{\theta_n} = \frac{(P_n - P_5)}{(P_n - \frac{P_{n-} + P_{n+}}{2})} \tag{3}$$

$$C_{\phi_n} = \frac{(P_{n-} - P_{n+})}{(P_n - \frac{P_{n-} + P_{n+}}{2})}$$

$$C_{0_n} = \frac{(P_n - P_{T,local})}{(P_n - \frac{P_{n-} + P_{n+}}{2})} \tag{4}$$

$$C_{q_n} = \frac{(P_n - \frac{P_{n-} + P_{n+}}{2})}{(P_{T,local} - P_{S,local})}$$

5-hole probe의 경우 높은 흐름각을 갖는 흐름을 효과적으로 취급하기 위해서는 중앙 압력공과 그 원주방향 주위의 약 90°의 4개 영역에 대한 부가적인 압력계수군이 정의되어야한다. 높은 흐름각에 대한 4개 영역에 대한 모든 압력계수는 식(3)과 식(4)와 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다. 여기서, P_n 은 n번째 영역에서 탐지된 가장 큰 압력을 말하며, P_{n+} 과 P_{n-} 는 각각 n번째 압력공의 시계방향과 반시계방향에 원주방향으로 인접한 압력공의 압력을 말한다.

5-hole probe 교정시험 과정에서는 예상되는 모든 흐름영역에 대한 대표적인 표본 압력자료들을 측정한다. 각각의 압력시험자료들을 적절한 영역에 따라 분류하고 이로부터 관련 압력계수들

을 산출한 후 원하는 흐름특성을 얻기 위해 이들 압력계수들을 식(5)와 같은 형태의 4차 다항방정식을 사용해 근사시킨다[1,4,7].

$$A_i = K_1^A + K_2^A C_{\alpha i} + K_3^A C_{\psi i} + K_4^A C_{\alpha i}^2 + K_5^A C_{\alpha i} C_{\psi i} + K_6^A C_{\alpha i}^3 + K_7^A C_{\alpha i}^3 + K_8^A C_{\alpha i}^2 C_{\psi i} + K_9^A C_{\alpha i} C_{\psi i}^2 + K_{10}^A C_{\alpha i}^3 + K_{11}^A C_{\alpha i}^4 + K_{12}^A C_{\alpha i}^3 C_{\psi i} + K_{13}^A C_{\alpha i}^2 C_{\psi i}^2 + K_{14}^A C_{\alpha i} C_{\psi i}^3 + K_{15}^A C_{\psi i}^4 \tag{5}$$

여기서 A는 흐름특성량 중의 하나로서 낮은 흐름각 영역에서는 α, ψ, C_0, C_q 에, 높은 흐름각 영역에서는 θ, ϕ, C_0, C_q 에 해당하며, 아래첨자 i는 i번째 특성량 임을 나타낸다. 또한, 상수 K는 교정계수들로서 위첨자는 K가 속한 특정한 흐름특성을 나타내며, 아래첨자는 다항방정식 전개에 있어서 n번째 항임을 표시한다. 물론 높은 흐름각 영역에서는 C_{α}, C_{ψ} 가 C_{θ}, C_{ϕ} 로 각각 바뀌어야 한다. 이들 수식을 총 N개의 시험자료에 대한 행렬 형태로 표현하게 되면 식(6)과 같다.

$$[A] = [C][K] \tag{6}$$

식(6)에서 [K]는 15×1로 구성된 특정영역에 대한 교정계수 벡터이며, [C]는 흐름각 변화에 따른 1, $C_{\alpha}, C_{\psi}, C_{\alpha}^2, \dots, C_{\psi}^4$ 와 같은 압력계수군을 포함하는 N×15 요소로 구성된 행렬이다. 또한, [A]는 N×1로 구성된 α, ψ, C_0, C_q 와 같은 흐름특성들에 대한 벡터이다.

교정계수 행렬 [K]는 식(6)에 대해 최소자승 회귀분석(least square regression analysis)을 수행함으로써, 알고 있는 [A]와 [C]를 사용하여 구할 수 있다.

3.2 오차보간모델

Gallington[1]은 회귀근사모델을 교정에 이용할 경우 흐름각의 오차는 ±2.5°, 속도 크기의 오차는 ±5% 가량인 것으로 평가하였다. 이러한 불확도(uncertainty) 원인은 흐름각 압력계수에 따른 흐름특성량 변화를 식(5)의 다항식 교정곡선이 완벽하게 맞춰주지 못해 발생하는 곡선적합도의 저하 때문이다.

Zilliac[2]은 이러한 불확도 원인을 제거하기 위해 회귀근사모델을 사용하는 대신 교정점의 데이터를 교정모델에 직접 사용하였다. 따라서 흐름각 압력계수에 따른 흐름특성량의 변화를 높은 정밀도를 갖고 구하기 위해 상당히 복잡한 고도의 보간 알고리즘을 사용하게 되었다. Zilliac은 그의 연구에서 5차 다항식과 1차 도함수가 연속

인 조건을 사용하는 아키마 보간법을 사용하였다. 따라서 교정데이터에 대한 보간을 수행할 경우 IMSL[®]과 같은 복잡한 상용코드를 사용해야하며 자료측정 실험 중에 흐름특성의 실시간 계산이 어렵다[3,9].

그러나 이 보간방안은 흐름각 오차가 ±0.5° 정도이고 속도오차가 ±1%인 장점이 있으므로, 본 연구에서는 이런 장점을 유지하면서도 직관적인 회귀근사모델의 특징을 살리기 위한 보다 간단한 교정방안에 관한 고찰을 수행하였다. 이를 위해 먼저 앞서 정의한 압력계수와 동일한 압력계수를 사용하여 Gallington 방법에서와 같은 일련의 교정을 통해 식(5)를 구하였다. 이러한 상관관계를 구한 후에 곡선적합도에 따라 발생하는 개개의 곡선적합 오차 $\Delta error_A = f(C_{\alpha_i}, C_{\psi_i})$ 를 식(5)의 교정곡선에 추가하면 식(7)과 같이 표현할 수 있다[3]. 여기서 오차량 $\Delta error_A$ 는 식(5)의 곡선적합결과와 실제로 측정된 교정데이터간의 차이를 말하며, 이러한 오차량은 4개의 흐름변화량과 흐름각에 따른 분할영역에 대해 각각 산출된다.

$$\begin{aligned}
 A_i = & K_1^A \\
 & + K_2^A C_{\alpha_i} + K_3^A C_{\psi_i} \\
 & + K_4^A C_{\alpha_i}^2 + K_5^A C_{\alpha_i} C_{\psi_i} + K_6^A C_{\psi_i}^2 \\
 & + K_7^A C_{\alpha_i}^3 + K_8^A C_{\alpha_i}^2 C_{\psi_i} + K_9^A C_{\alpha_i} C_{\psi_i}^2 + K_{10}^A C_{\psi_i}^3 \\
 & + K_{11}^A C_{\alpha_i}^4 + K_{12}^A C_{\alpha_i}^3 C_{\psi_i} + K_{13}^A C_{\alpha_i}^2 C_{\psi_i}^2 + K_{14}^A C_{\alpha_i} C_{\psi_i}^3 + K_{15}^A C_{\psi_i}^4 \\
 & + \Delta error_A(C_{\alpha_i}, C_{\psi_i})
 \end{aligned} \tag{7}$$

회귀근사모델을 통해 교정계수 K^A 를 구한 후에 교정곡선과 실제 교정데이터와의 비교를 통해 각각의 교정각도조합(α, ψ)에 따른 4가지 흐름변수량 대한 식(7)의 오차보상항 $\Delta error_A$ 를 산출하였다. 이러한 오차보상항은 다음단계의 오차보간 처리를 위해 식(1)~식(4)와 같은 흐름각 압력계수의 함수형태로 5개 분할영역의 4개 흐름특성량에 대한 20개의 오차량 데이터베이스(residual error interpolation response surfaces)로 구성된다. 따라서 미지의 흐름을 측정하면 먼저 식(5)의 다항방정식을 이용하여 근사 흐름특성량을 구하고 이 근사 흐름특성량에 오차량 데이터베이스를 보간하여 구한 오차량 $\Delta error_A$ 를 통해 보다 정확한 예측값으로 보상시킬 수 있게 된다.

이러한 교정기법은 흐름각 압력계수와 흐름특성량과의 관계를 실제 측정된 교정데이터를 직접적으로 이용하여 정의한 Zilliac 방법과 유사하다. Zilliac 방법에서는 흐름각 압력계수의 변화범위에 걸쳐 크게 변동하는 알고 있는 측정된 교정점 자체를 보간시켰다. 그러나 본 연구에서는 단지

식(5)의 곡선적합에서 발생하는 잔여오차만을 보간시켜서 보간대상 데이터의 크기가 상대적으로 작아지고 보간기법의 중요성이 크게 감소될 수 있게 되어 보다 간단하고 사용이 손쉬운 보간법의 적용이 가능하며, 따라서 측정정밀도의 큰 손실 없이 자료의 실시간 처리가 가능하다[3].

IV. 시험결과 및 검토

4.1 교정시험결과

기존 회귀근사모델을 이용하여 교정데이터를 영역별로 처리한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 각 기호들은 최대압력이 탐지되는 압력공의 번호에 따라 분류된 분할영역을 나타낸다. 대략 흐름각 16° ~ 24° 부근에서 최대압력 탐지공의

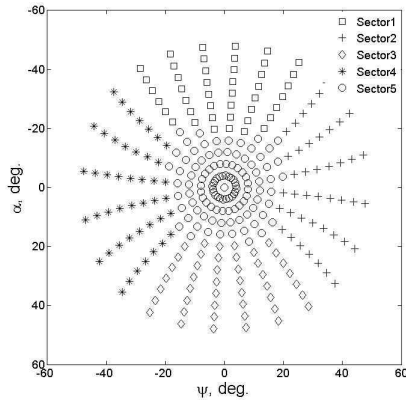


Fig. 5. Distribution of calibration points/sectors

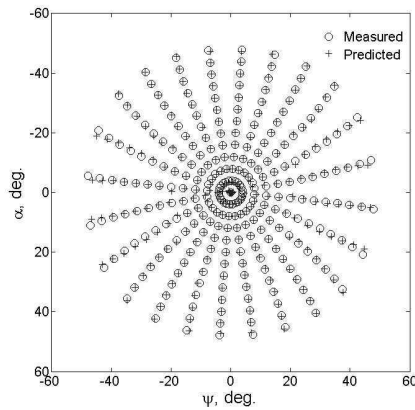
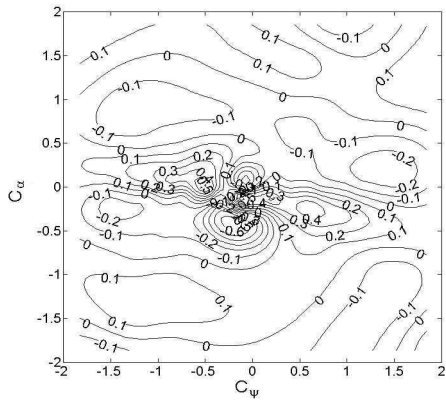


Fig. 6. Comparison between measured and predicted values using regression method

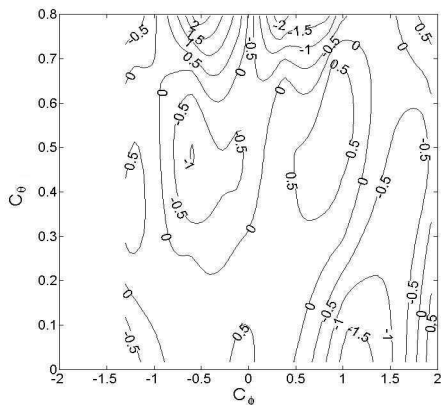
변화가 일어났는데 이는 높은 흐름각 영역으로의 영역변화가 일어났음을 의미하며, 그림에서 반경 방향으로의 영역변화가 불규칙한 것은 교정대상 probe 압력공의 제작공차에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 교정시험결과에는 풍동 흐름각 (flow angularity) 등의 여러 편의오차(bias error) 영향이 포함되어 있으므로 자료처리에는 이러한 흐름각 영향을 보상시키는 과정이 필요하다[1,7].

4.2 교정모델과 오차

Fig. 6은 식(5)의 회귀근사모델을 사용하여 교정곡선을 구한 경우로 교정시험으로부터 얻은 교정점과 이 교정점 데이터들을 다항방정식으로부터 다시 역산(back-calculation)한 결과를 함께 나타내었다. 만약 식(5)의 회귀근사모델이 반응표면의 형상을 충분히 곡선적합 시키지 못한다면 교정데이터와 식(5)의 수학적 모델간의 차이가 발생하게 되고 이는 회귀근사에서 발생하는 잔여오



(a) α_{error} on sector 5 (deg.)



(b) α_{error} on sector 2 (deg.)

Fig. 7. The error in the calibration curve fit of the angle of attack for sectors

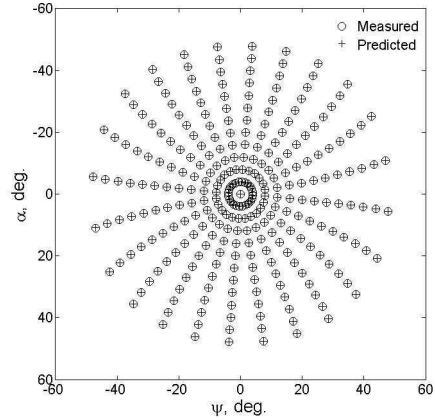


Fig. 8. Comparison between measured and predicted values using error interpolation

차 즉 곡선적합오차를 유발한다. Fig. 6에서도 이러한 곡선적합오차를 확인할 수 있는데 높은 흐름영역으로 갈수록 곡선적합성이 떨어지고 오차가 증가하여 측정의 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

이러한 오차를 제거하기 위해서는 식(5)의 다항식 차수를 증가시키거나 곡선적합성을 높일 수 있도록 별도의 변수를 추가시키는 등의 노력이 필요하다. 그러나 이런 방안은 과도한 교정점의 증가를 초래하고 차수를 증가시키기도 곡선적합성이 크게 향상되지 않는 등의 결과를 초래한다. Fig. 7은 이러한 회귀근사모델의 곡선적합 오차를 흐름각 압력계수에 따라 나타낸 것으로 오차의 비교가 용이하도록 각각의 흐름각 압력계수군에 대한 반응각 오차(α_{error})로 환산하여 도시하였다. 그림으로부터 상대적으로 높은 흐름각 영역에서의 오차가 크고 변동추이가 복잡하여 단순한 다항식모델로는 설명이 어렵다는 것을 알 수 있다. Fig. 8에는 식(5)의 회귀근사모델이 적합시키지 못한 Fig. 7의 영역별 잔여오차를 식(7)의 오차보간모델을 이용하여 보상시킨 결과가 나와있다. Fig. 6의 결과와 비교할 때 모델링에 사용된 모든 실험점을 통과하는 보간법의 특징 때문에 모든 교정점에서 측정값과 예측값이 일치한다는 것을 알 수 있으며, 이러한 교정모델의 적합성확인을 위해서는 교정점 외의 별도의 추가 탈교정(off-calibration)점에 대한 검증이 필요하다.

4.3 탈교정점 적합성

오차보간모델을 사용하여 탈교정점의 특성을 예측한 결과가 Fig. 9와 Fig. 10에 나타나 있다. 먼저 Fig. 9는 원주방향 영역내부의 탈교정점에

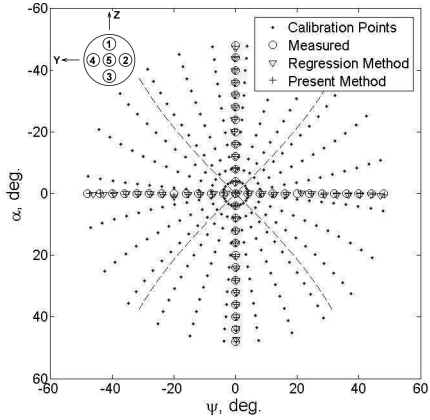


Fig. 9. Off-calibration points within the sector boundaries

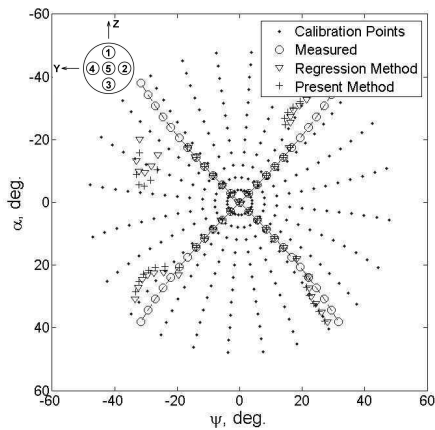


Fig. 10. Off-calibration points on the sector boundaries

대한 분석결과로 오차보간방법이나 기존방법이 모두 별다른 차이 없이 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10의 원주방향 영역경계면 ($45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$)에 대해서는 두 방법 모두 큰 오차를 유발하였다. 이러한 오차는 높은 흐름각 영역의 수학적 모델이 회귀근사를 통해 구한 반응표면의 영역경계를 벗어남으로 인해 발생하는 외삽(extrapolation) 오차로, 원주방향 영역경계면상의 압력공들 사이의 압력차이가 매우 작아서 식(3)과 식(4)의 무차원 압력계수가 특이점(singularity)을 갖기 때문에 발생한다. 결국 원주방향의 각 영역마다 각기 다른 무차원계수를 정의하게 되면 수학적 정의에 따른 불연속 특성으로 인해 각 무차원계수가 교차하는 경계면에서의 관련 계산결과가 모호해지는 것을 피할 수 없게 된다.

4.4 단일영역 오차보간모델

영역분할기법을 사용할 때 발생하는 영역경계면에서의 불연속 특성을 피하고 모든 교정영역에서 일관성 있는 교정모델을 얻기 위해 식(1)과 식(2)의 정의를 모든 흐름각 영역에 동일하게 적용하여 낮은 흐름각에서부터 높은 흐름각에 이르는 전체영역을 단일영역에 대한 다항방정식으로 모두 표현하고 이에 따라 발생하는 근사화 오차를 오차보간의 적용을 통해 처리하고자 하였다.

Fig. 11은 단일영역 오차보간모델을 이용하여 모든 탈교정들에 대한 흐름특성의 예측결과를 나타낸 것으로, Fig. 10의 결과와 비교하여 측정의 정확도가 현격히 향상된 것을 알 수 있다. 이는 단일 압력계수군을 교정모델에 적용함으로써 기존의 영역분할시 생기는 불연속 특성이 제거되어

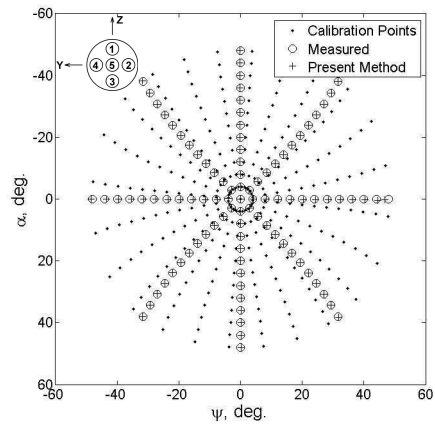


Fig. 11. Off-calibration points using a single sector error interpolation

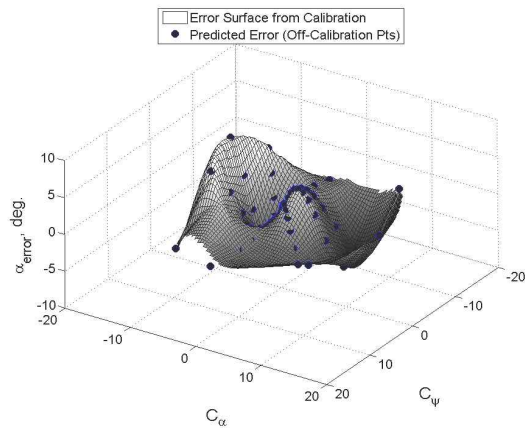


Fig. 12. Calibrated error interpolation surface and off-calibration error

생긴 현상이며, 이러한 시도를 통해 기존 교정모델의 정밀도를 높이고 교정모델의 구성에 필요한 압력계수군과 회귀근사모델을 단일화 할 수 있는 장점을 얻을 수 있었다.

Fig. 12에는 단일영역 오차보간 교정모델에 사용된 오차반응표면이 나타나 있으며, 교정시험으로부터 얻어진 오차보간모델이 탈교정점에서의 오차를 잘 설명하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 오차반응표면은 probe 끝단 전체에서 박리가 생겨 측정의 유효성을 잃거나 함수관계상의 중복값(double valued)이 발생하지 않는다면 교정모델의 적용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 1에는 흐름각에 대한 교정점과 탈교정점에 대한 교정모델별 표준오차(standard error)의 분석결과가 나와 있다. 앞서 언급한바와 같이 영역경계에서 발생한 특이점으로 인한 불연속 오차가 단일영역 오차보간모델의 적용시에 크게 개선된다는 것을 알 수 있으며, 이는 Zilliac이 제시한 오차수준에 근접한 것으로 판단할 수 있다. Table 2는 속도에 대한 표준오차 분석결과로 흐름각에 대한 오차와 유사한 경향을 보임을 알 수 있으며 교정속도 60 m/s에 대해 최대 약 2% 내외의 오차를 보였다.

V. 결 론

미지의 흐름에 대한 흐름특성을 측정하기 위한 반구형 소형 5-hole probe를 제작하여 흐름각 ±48° 영역에 대한 교정시험을 수행하였으며 본 연구의 단일영역 오차보간모델을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 먼저 기존 회귀근사모델 방법을 근간으로 회귀분석에서 발생하는 곡선적합 오차에 일반적으로 쉽게 이용할 수 있는 보간법을 다시 적용하여 교정정밀도를 향상시킬 수 있었다. 또한 기존 회귀분석 기반 교정방안의 직관적이고 단순한 장점을 유지하면서도 관련 오차를 경감시킬 수 있도록 하여, 특정상용코드를 사용하지 않고도 보다 정확한 교정이 가능하도록 하였다. 아울러 교정영역의 분할시 교정모델의 영역경계에서 불가피하게 발생하는 불연속 오차의 영향을 제거할 수 있었으며, 단일영역 오차보간모델을 적용할 경우 흐름각 표준오차는 ±0.5°, 속도오차는 약 ±2.5% 가량의 정밀도를 얻을 수 있었다. 본 연구에 적용된 교정방안은 7-hole probe 교정과 밸런스 교정 등의 기타 유사 교정모델 분야에도 응용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Standard errors for the flow angles

영역분할		회귀근사(α/ψ)		오차보간(α/ψ)	
		다중(5)	단일	다중(5)	단일
교정점		0.42° 0.37°	2.5° 2.9°	0° 0°	0° 0°
탈교정점	영역 내부	0.32° 0.52°	2.4° 2.9°	0.18° 0.36°	0.11° 0.37°
	영역 경계	12.7°* 6.2°*	2.5° 2.9°	15.6°* 6.1°*	0.05° 0.04°
비 고		[1] Gallington Method : ±2.5° [2] Zilliac Method : ±0.5°			

* Sector 4 data

Table 2. Standard errors for the velocity

영역분할		회귀근사(속도)		오차보간(속도)	
		다중(5)	단일	다중(5)	단일
교정점		0.45%	13.2%	0.30%	0.50%
탈교정점	영역 내부	2.15%	9.83%	1.87%	2.58%
	영역 경계	12.3%*	17.5%	12.2%*	2.17%
비 고		[1] Gallington Method : ±5% [2] Zilliac Method : ±1%			

* Sector 4 data

참고문헌

- Gallington, G. G., "Measurement of Very Large Flow Angles with Non-Nulling Seven-Hole Probes", USAFA-TR-80-17, 1980.
- Zilliac, G. G., "Calibration of Seven-Hole Pressure Probes for Use in Fluid Flows with Large Angularity", NASA-TM-102200, Dec. 1989.
- Wenger, C. W. and Devenport, W. J., "A Seven-Hole Pressure Probe Measurement System and Calibration Method Utilizing Error Tables", AIAA-98-0202, 1998.
- Sung, Bongzoo, "Analysis of the Vortical Flow around a 60 Degree Delta Wing with Vortex Flap", Ph.D. Thesis, Dec. 1985.
- 성봉주, 장병희, "최소 자승법을 이용한 5-Hole Yawhead Probe의 간략한 보정법", 한국항공우주학회지, 제 16권, 제 2호, June 1988.
- Bryer, D. W. and Pankhurst, R. C., "Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction", HMSO, 1971.
- Everett, K. N., Gerner, A. A. and Durston, D. A., "Theory and Calibration of Non-Nulling Seven-Hole Cone Probes Suitable

for Use in Complex Flow Measurement", AIAA-82-0232, Jan. 1982.

8) Using MATLAB, Version 6.1, The Math Works, Inc., Natick, 2002.

9) Vijayagopal, R., Pathanl, M. M., and Rediniotis, O. K., "Miniature Multi-Hole Pressure Probe - Neural Network Calibration and Frequency Response Enhancement", AIAA-98-0204, 1998.

10) 오세윤, 안승기, 최장섭, "회귀분석과 보간법을 이용한 5-Hole Probe의 교정", 2004 풍동 워크샵, 세미나 II, 2004. 5. 14.

11) 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.

12) 정낙삼 외, "측정불확도 표현 지침", 한국표준과학연구원, 1998.