

<논 문>

5공프로브의 전 각도 범위 압력계수 지도와 새로운 보정계수

김진권* · 강신형**

(1996년 11월 12일 접수)

Full Angle Range Pressure Coefficient Maps of Five-Hole Probe and New Calibration Coefficients

Jin-Kwon Kim and Shin-Hyoung Kang

Key Words : Five-Hole Probe(5공프로브), Calibration Coefficient(보정계수), Pressure Coefficient Map(압력계수지도), Calibration Network(보정 그물망), Zone Division Calibration Method(영역분할 보정법)

Abstract

Pressures of a five-hole probe were measured for a full range of yaw and pitch angles and complete pressure coefficient maps were obtained. Based on these maps, various features of five-hole probe pressures were revealed and new five-hole probe calibration coefficients were devised. The new calibration coefficients show non-diverging characteristics for any flow direction and one-to-one correspondence for a wide range of flow angles. These calibration coefficients expand the valid flow angle range of five-hole probe calibration by ± 10 degrees and complement a critical defect of five-hole probe zone-division calibration method which has not been known yet. Moreover new non-diverging calibration coefficients have advantages in nulling methods, too.

1. 서 론

유동장 측정을 위하여 열선 유속계, 레이저도플러 유속계, 그리고 입자상 유속계 등이 점점 더 많이 쓰이는 추세이지만, 3차원 속도성분과 정압을 동시에 측정할 수 있는 장치로는 5공프로브가 간단하면서도 거의 유일한 방법이다. 이 때문에 많은 연구자들이 5공프로브의 보정 및 측정방법에 관하여 연구했는데, 프로브의 형상,^(1,2) 레이놀즈수 효과,⁽³⁾ 벽면 효과⁽⁴⁾ 등에 대한 다양한 연구가 이루어졌으며, 본 논문에서와 같이 보정 각도범위의 확장에 주안점을 두고 이루어진 연구로는 다음과 같

은 것들이 있다.

Lee와 Ash⁽⁵⁾는 구형(spherical) 5공프로브의 포텐셜 유동 계산으로부터 이론적인 보정 그물망을 구했고, 이를 실험에서 구한 보정 그물망과 비교함으로써 5공프로브 보정의 이론적인 기초를 확립하였다. Wright⁽²⁾는 보정 그물망에서의 이중보간의 어려움을 피하기 위하여, 원추각(conical angle) 계수, 속도계수 및 압력계수를 도입하여 간단한 보정곡선을 고안하였으나, 이론적인 이면각(dihedral angle) 관계식을 사용했기 때문에, 프로브가 엄밀하게 축대칭이 아닌 경우에는 실제 측정에 있어서 이면각에 따라 큰 계측오차를 가진다. Judd⁽⁶⁾는 RSS(Root-Sum-Square) 형태의 항을 보정계수의 분모에 더하여, 보정계수의 발산을 방지함으로써, 보정 각도범위를 이전의 약 $\pm 40^\circ$ 에서 약 $\pm 80^\circ$ 까

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

지 확장하였다. 그러나 이 보정계수를 검토해 보면, 이는 정압에 의존하게 되어 있어서, 측정 유동장의 정압이 보정 상태의 정압과 다르면 사용할 수 없음을 알 수 있다. Everett 등⁽⁷⁾은 7공프로브를 제작하고, 유동박리 구역에 속한 압력구멍의 압력이 보정계수에 사용되는 것을 배제하기 위하여, 유동상태에 따라 서로 다른 보정계수를 사용하는 7공프로브 영역분할 보정법을 도입함으로써 보정 각도 영역을 확장하였다. 이들은 측정점이 일대일 대응 영역 내부에 있는지에 대한 확인 없이, 피팅(fitting)오차가 큰 점들을 제외하는 3차 다항식 보정곡선을 사용함으로써 오차의 여지를 남겼다. 그러나 영역분할의 개념은 혁신적인 것으로, Ostowari와 Wentz⁽⁸⁾는 이 개념을 5공프로브의 널링 보정에 적용하였고, Sitaram과 Govardhan⁽⁹⁾은 5공프로브의 널널링 보정에 적용하여 보정각도 범위를 넓혔다. 위의 각 연구들은 나름대로의 장점을 가지고 있으나, 이들을 검토, 종합하여 체계적으로 보정계수를 연구할 필요성이 있다.

본 논문에서는 5공프로브의 보정 및 측정이론을 검토하여, Judd⁽⁶⁾의 RSS 형태의 분모항이 가지는 오류를 발견하였고, 가능한 모든 범위의 요각(yaw angle)과 피치각(pitch angle)에 대한 5공프로브의 압력들을 측정하여 작성된, 전 각도 범위의 5공프로브 압력계수 지도를 제안하였다. 이 압력계수 지도를 바탕으로 다양한 보정계수들의 특징을 검토할 수 있었고, 넓은 각도범위에서 안정적으로 사용할 수 있는 새로운 보정계수를 개발하였다.

2. 5공프로브의 보정 및 측정이론과 보정계수의 검토

본 논문에서 사용되는 5공프로브 용어와 유동각의 정의를 Fig. 1에 나타내었다. 요각 α 와 피치각 β 는 직교좌표계에 적합하고, 원추각 ϕ 와 이면각 δ 는 구면좌표계에서 유리한데, 간단한 삼각함수 관계식에 의해서 상호변환이 가능하다.

유속 U , 정압 p_s 의 균일유동이 어떤 요각 α 와 피치각 β 를 가지고 5공프로브로 다가올 때, 5공프로브의 각 압력구멍은 다음의 압력을 받게 된다.

$$p_i = p_s + C_{p_i}(\alpha, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (i=0, 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

여기서 C_{p_i} 는 각 압력구멍 H_i 에서의 압력계수이며, 각 압력구멍의 원추각 ϕ_{H_i} , 유동의 요각 α ,

피치각 β 와 레이놀즈수 Re_D 의 함수이다. 주어진 5공프로브에서 ϕ_{H_i} 는 고정이며, 적당히 작은 원추각 내에서 C_{p_i} 는 Re_D 에 관계 없이 일정하고, 상당히 넓은 원추각 범위에서도 적당한 Re_D 범위에서 C_{p_i} 의 Re_D 에의 의존도는 작으므로, C_{p_i} 는 실질적으로 요각 α 와 피치각 β 만의 함수로 생각할 수 있다. (상은 공기중에서 직경 $D=3.18$ mm인 구형 프로브로 측정할 때 유속 $U=1\sim 100$ m/s의 범위에서 레이놀즈수 $Re_D \approx 2.1 \times 10^2 \sim 2.1 \times 10^4$ 로, 층류유동 범위에 있으므로 천이에 따른 유동박리점의 급격한 이동에 의한 C_{p_i} 의 변화를 겪지는 않는다. 그러나, 유동 입사방향으로부터 멀리 떨어져 있는 압력구멍의 C_{p_i} 는 층류유동 범위내에서도 Re_D 의 큰 변화에는 어느 정도 영향을 받으므로, 5공프로브의 보정은 측정하고자 하는 유동장의 주유동속도와 비슷한 Re_D 에서 이루어지는 것이 원칙이다.)

p_i 가 측정되었을 때 7개의 미지수 p_s , U , C_{p_i} 와 5개의 방정식이 있으므로 연립방정식 (1)은 부정이다. 그러나, C_{p_i} 가 α 와 β 만의 함수이므로 그 관계를 유도하거나 측정하고, 식 (1)로부터 p_s 와 U 에 의존하지 않고 (α , β)에 일대일 대응이 되는 C_{p_i} 들의 함수인 보정계수를 찾을 수 있으면, 이 연립방정식은 4개의 미지수 α , β , p_s , U 와 5개의 방정식으로 이루어져 있으므로 풀린다. 간단한 예로써 Lee와 Ash⁽⁶⁾의 방법과 유사하게 보정계수 C_{p_α} 와 C_{p_β} 를

$$C_{p_\alpha}(\alpha, \beta) = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} = \frac{C_{p_1} - C_{p_2}}{C_{p_1} - C_{p_3}} \quad (2)$$

$$C_{p_\beta}(\alpha, \beta) = \frac{p_3 - p_4}{p_1 - p_3} = \frac{C_{p_3} - C_{p_4}}{C_{p_1} - C_{p_3}} \quad (3)$$

와 같이 정의하면, 이 보정계수들은 p 와 U 에 의

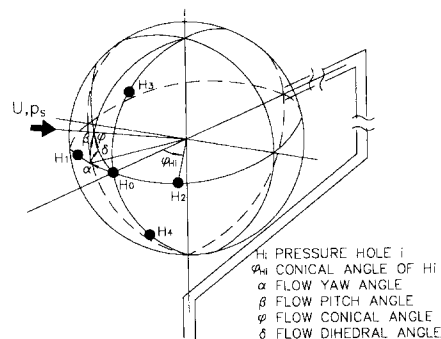


Fig. 1 Configuration of 5-hole probe and definition of angles

존하지 않으며, α 와 β 만의 함수이고, 적당한 원추 각내에서 (α, β) 와 일대일 대응이 된다. 보정실험에 의해 압력계수 $Cp_i(\alpha, \beta)$ 와 보정계수 $Cp_a(\alpha, \beta)$, $Cp_b(\alpha, \beta)$ 가 구해졌다면, 측정하고자 하는 유동장에서 측정된 p_i 로부터 $Cp_i(\alpha, \beta)$ 와 $Cp_b(\alpha, \beta)$ 가 계산되고, 일대일 대응 관계식에서 α 와 β 가 구해진 다음, 모든 $Cp_a(\alpha, \beta)$ 가 계산되어 결국 p_s 와 U 가 구해진다.

위와 같은 이유에서 연구자들은 p_s 와 U 에 독립적이고, 넓은 각도범위에서 일대일 대응이 되는 보정계수 Cp_a 와 Cp_b 를 찾기 위해서 노력하였다. 보정계수가 p_s 와 U 에 무관하기 위해서는 식 (2)와 (3)에서와 같이 p_s 는 뺄셈에 의해서, $1/2 \cdot \rho U^2$ 은 나눗셈에 의해서 제거되어야 하며, 분자는 단조함수이어야 하고, 분모는 넓은 각도 범위에서 0이 되지 말아야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 보정계수로

$$Cp_a = \frac{p_1 - p_2}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)}$$

$$= \frac{Cp_1 - Cp_2}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)} \quad (4)$$

$$Cp_b = \frac{p_3 - p_4}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)}$$

$$= \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)} \quad (5)$$

가 오랫동안 사용되어 왔으며, 현재도 가장 널리 사용되고 있다.

그러나, 식 (4)와 (5)의 분모 $p_0 - (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$ 는 원추각 $\phi \approx 60^\circ$ 부근에서 0을 거치며 부호가 바뀌기 때문에, 보정계수가 발산하거나 유동각과 일대일 대응이 되지 못하는 원인이 된다. 따라서, Judd⁽⁶⁾는 항상 양의 값을 가지는 새로운 값

$p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^4 p_i\right)^2 - \sum_{i=1}^4 p_i^2}$ 을 분모로 도입하여, 널링 보정각도를 $\pm 80^\circ$ 까지 확장하였다. 하지만 식 (1)로부터 Judd⁽⁶⁾의 분모를 계산하면, 이 식에 p_s 항이 포함되어 있으므로, 보정은 p_s 에 무관하지 못함을 알 수 있다.

보정계수의 분자로는 요 방향으로는 $p_1 - p_2$, 피치 방향으로는 $p_3 - p_4$ 가 주로 사용되어 왔다. 7공프로브에서 처음 도입된 Everett 등⁽⁷⁾의 영역분할

보정법은 유동방향에 따라서 서로 다른 분자와 분모의 조합을 사용한다는 점에서 혁신적이다. 영역분할 보정법의 개념을 5공프로브에 적용하면 다음과 같다. 유동각이 작아서 측정된 5개의 압력 p_i 중에서 p_0 가 가장 크다면, 그 영역은 영역 0으로 정의되고, 영역 0에서는 식 (4), (5)와 같은 통상적인 보정계수가 사용된다. 유동각이 커서, 예를 들어 p_1 이 5개의 p_i 중에서 최대일 때, 이 영역은 영역 1로 정의되고, 이때 유동의 반대 방향인 2번 압력구멍은 유동박리내에 있어서, 그 압력 p_2 는 유동각의 변화에 민감하지 않음을 추정할 수 있다. 따라서, 영역 1에서는 p_2 를 제외하고

$$Cp_a = \frac{p_1 - p_0}{p_1 - \frac{1}{2}(p_3 + p_4)}$$

$$= \frac{Cp_1 - Cp_0}{Cp_1 - \frac{1}{2}(Cp_3 + Cp_4)} \quad (6)$$

$$Cp_b = \frac{p_3 - p_4}{p_1 - \frac{1}{2}(p_3 + p_4)} = \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_1 - \frac{1}{2}(Cp_3 + Cp_4)} \quad (7)$$

와 같은 보정계수가 사용된다. 영역분할의 개념은 Ostowari와 Wentz⁽⁸⁾에 의해서 5공프로브의 널링 보정법에, Sitaram과 Govardhan⁽⁹⁾에 의해서 널링 보정법에 적용되어 보정영역을 각각 피치각 $\pm 80^\circ$ 와 요 및 피치각 54° 이내로 넓혔다.

3. 압력계수지도와 새로운 보정계수

널링법에서도 사용할 수 있도록 발산하지 않으며,⁽¹⁰⁾ 넓은 각도범위에서 일대일 대응이 되는 보정계수를 고안하기 위하여, 가능한 모든 요각과 피치각 범위에서 5공프로브의 압력을 측정하여 전 각도범위의 압력계수지도를 구하였다. 사용된 5공프로브는 흔히 사용되는 United Sensor 사의 원추형 프로브 DC-125-18-CD이며 세부사항은 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 풍동의 단면은 200×1200 mm이며, 유동의 불균일도는 0.5% 이하이고, 난류강도는 10 m/s에서 0.4%, 20 m/s에서 0.3%, 30 m/s에서 0.2% 이하이다. 실험은 10 m/s의 속도에서 행해졌는데, 5공프로브 직경에 기준한 레이놀즈수 $Re_D \approx 2.12 \times 10^5$ 이다. 피치각 β 는 각도기가 부착되어 0.5°의 분해능을 갖는 회전테이블에 의해 -70° 부터 $+90^\circ$ 까지 5.0°의 간격으로 수동조정되

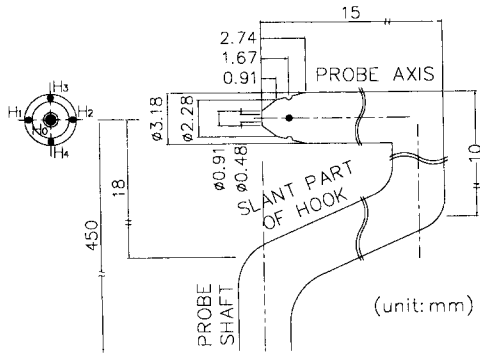


Fig. 2 Dimension of the used 5-hole probe (United Sensors, DC-125-18-CD)

며, 요각 α 는 스텝모터, 타이밍벨트 및 타이밍플리에 의해서 0.47° 단위로 회전시킬 수 있는 회전장치에 의해서 -180° 에서 $+180^\circ$ 까지 4.7° 의 간격으로 자동조정된다. (Fig. 3)

$\beta=0^\circ$ 일 때 α 에 따른 압력계수의 거동을 Fig. 4(a)에 나타내었다. Cp_1 는 $-70^\circ < \alpha < 60^\circ$ 에서 단조증가하고, Cp_2 는 $-60^\circ < \alpha < 70^\circ$ 에서 단조감소하므로, $Cp_1 - Cp_2$ 는 최소한 $-60^\circ < \alpha < 60^\circ$ 에서 단조증가하여 이 영역에서 Cp_a 의 분자로 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. $70^\circ < |\alpha| < 150^\circ$ 일 때에는 최대압력을 나타내는 압력구멍을 제외하고 나머지 4개의 압력구멍은 박리영역에 위치하여 압력값이 거의 같기 때문에, 서로 다른 두 개의 보정계수, 즉 일대일 대응이 되는 압력계수 차의 비를 두 개 찾는 것은 불가능하다. $|\alpha| > 150^\circ$ 일 때 모든 압력구멍은 박리영역에 있으며 5개의 압력값들은 거의 같게 되어, 보정계수 즉, 압력계수 차의 비는 작은 압력변동에 의해서 임의의 값을 가질 수 있게 된다.

β 가 증가할 때 압력계수들의 거동은 Fig. 4(b)(c)(d)에 나타낸 $\beta=15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 압력계수들로 부터 알 수 있다. β 가 증가하면 p_3 은 증가하며, $\beta > 30^\circ$ 에서는 p_3 이 p_0 을 능가하여 최대압력이 되고, $\beta > 60^\circ$ 인 영역에서는 최대압력 p_3 을 제외한 모든 압력은 비슷한 값을 가진다. $\beta=15^\circ$ 와 -45° 인 경우를 Fig. 4(e)(f)에 나타내어 Fig. 4(b)(c)와 비교할 수 있도록 하였는데, 5공프로브는 원칙적으로 축대칭이므로 음수의 β 에서는 양수의 β 와 대칭적인 특성을 보여야 한다. 전반적으로 대칭적인 특성을 보이지만 박리가 일어나는 α 의 값과 박리 이후의 압력계수의 거동이 β 가 양수일 때와 음수일 때

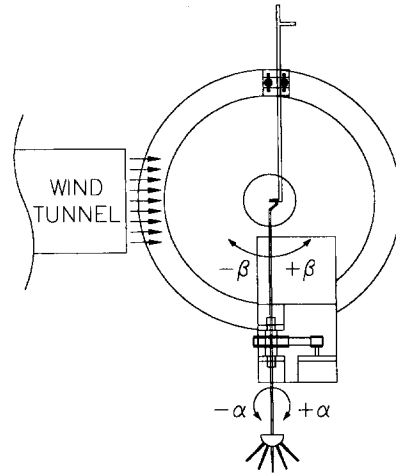


Fig. 3 Top view of 5-hole probe calibration facility

약간의 차이를 보였다. 눈에 띄이는 차이점은 β 가 양수인 Fig. 4(b)(c)에서는 $\alpha \approx \pm 70^\circ$ 에서 박리로 추정되는 급격한 압력계수의 변화가 관찰되는 것과 달리, $\beta=-15^\circ, -45^\circ$ 인 Fig. 4(e)(f)에서는 $\alpha \approx \pm 60^\circ, \pm 45^\circ$ 에서 각각 불연속점이 관찰되어 박리의 영향을 받는다고 생각되는 점들이 전반적으로 앞당겨진다.

5공프로브는 지지축을 제외하고는 원칙적으로 축대칭이므로, 압력계수분포에서의 피치 방향의 비대칭은 Fig. 5와 같이 지지축의 영향으로 설명이 가능하다. β 가 음수인 경우에는 5공프로브의 지지축이 측정부위 앞으로 나오게 되는데, Fig. 5(a)에서와 같이 α 가 작을 때에는 측정부 앞에서 후류를 만드는 부분은 지지축 뿐이고, 지지축과 갈고리 모양이 부드럽게 연결되어 있으며, 측정부에 영향을 주지 않을 만큼 가늘고 멀리 있다. 그러나 α 가 커짐에 따라 Fig. 5(b)에서처럼 측정부와 지지축을 연결하는 갈고리 모양의 경사진 부분이 측정부 앞으로 나와서 넓은 후류를 만들뿐만 아니라, 측정부와와의 거리도 가까워져서 측정부가 이 넓은 후류에 묻히게 된다. 따라서 Fig. 4에서 보듯이 β 가 음수인 경우에는 β 가 양수인 경우에 유동박리 영역으로 들어가는 α 보다 더 빨리 후류영역에 들어가게 되고, 또 후류 내부에서의 압력계수의 거동도 조금 차이가 생긴다.

피치각과 요각의 변화에 대한 압력계수들의 변화를 보다 명확히 검토하기 위하여 Fig. 6과 같은 압력계수지도를 작성하였다. Fig. 6의 압력계수지도에서 등 압력계수값을 나타내는 수의 좌측중앙에

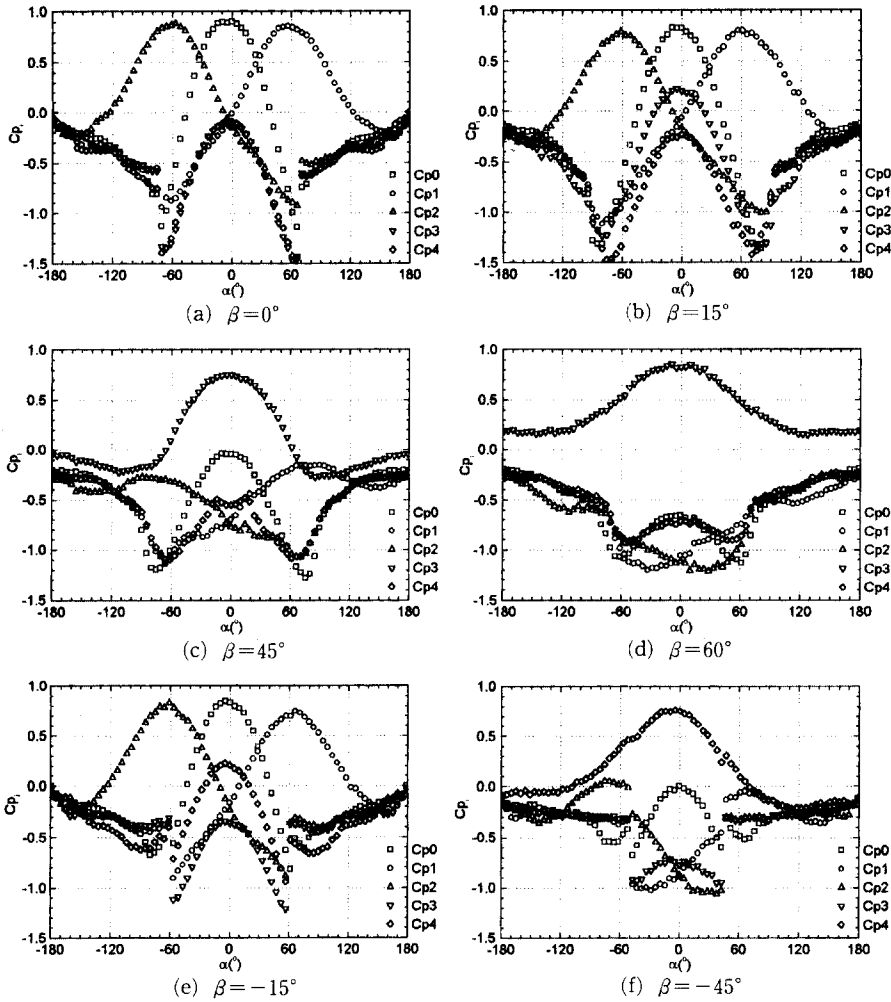


Fig. 4 Variation of C_{p_i} with yaw and pitch angles

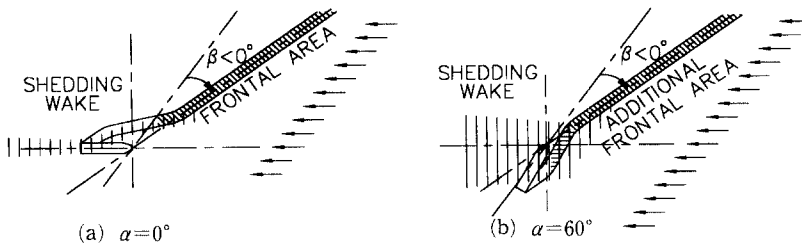


Fig. 5 Blocking effect of hook part on the tip of the probe

그 수가 나타내는 등 압력선이 위치하도록 하여, 등 압력계수선의 등 압력계수값을 쉽게 인식할 수 있도록 하였다. Fig. 6(a)의 C_{p0} 선도는 전 (α , β) 범위에서의 C_{p0} 압력계수의 값을 보여 주므로,

이 선도는 식 (1)에서 정의된 α 와 β 만의 함수인 $C_{p0}(\alpha, \beta)$ 에 해당한다. 마찬가지로 식 (1)에서 정의된 다른 $C_{p_i}(\alpha, \beta)$ 함수들, 보정계수의 분자와 분모의 후보들 및 보정계수 $C_{p\alpha}(\alpha, \beta)$, $C_{p\beta}(\alpha, \beta)$

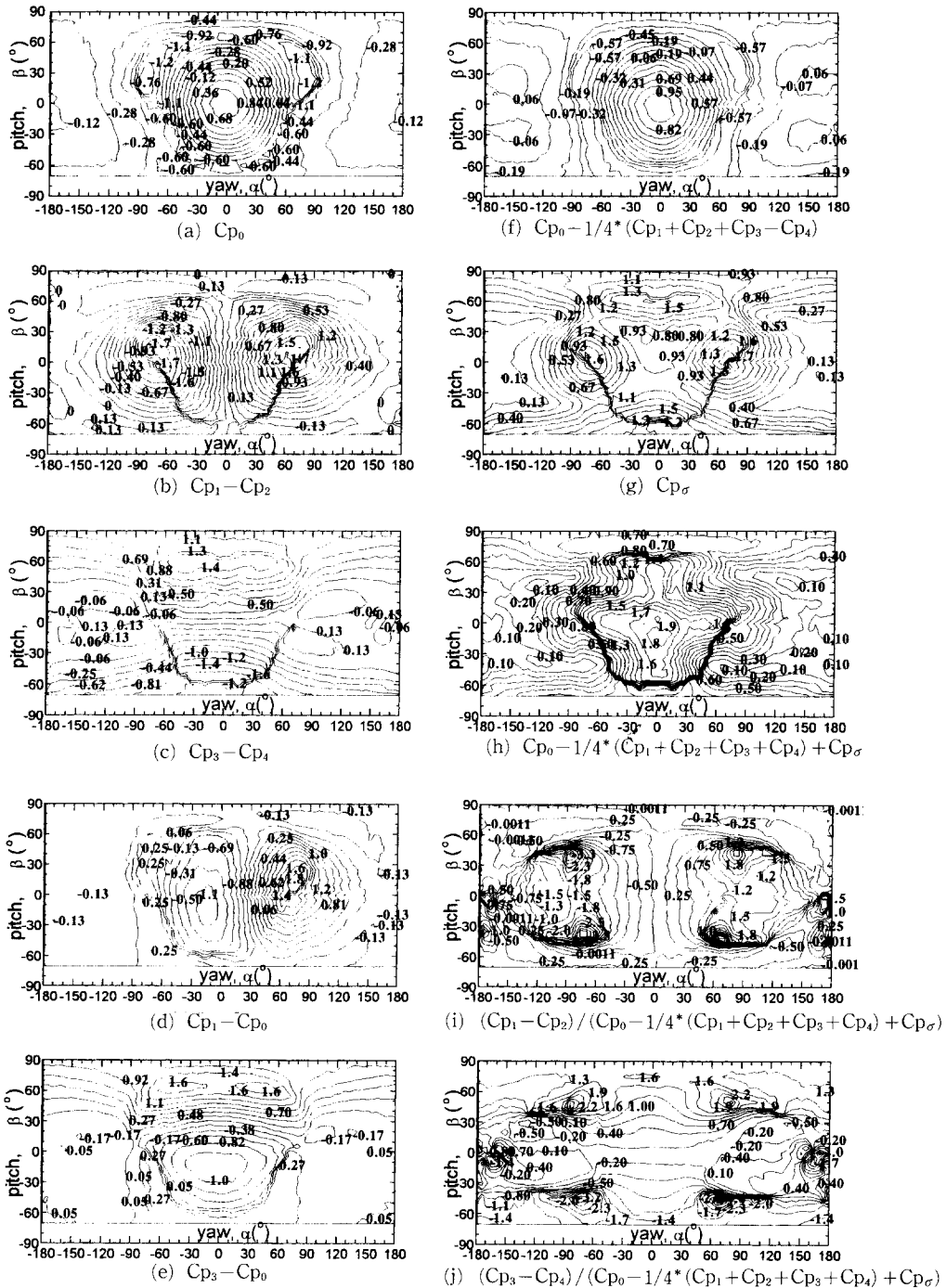


Fig. 6 Full range pressure coefficient maps of 5-hole probe

의 후보들의 입력계수지도가 작성되었고, 보정계수 연구에 사용되었다. Fig. 6(a) (b) (c)의 입력계수들은 Fig. 4, Fig. 5에서 이미 피치 방향의 비대칭성

이 설명된 $30^\circ < |\alpha| < 100^\circ$ 의 범위를 제외하고는 요 및 피치 방향으로의 대칭성을 잘 보여준다. Fig. 6(a)의 $30^\circ < |\alpha| < 100^\circ$ 에서는 유동이 5공프로브 주

위로 가속됨에 따라 β 가 양수일 때처럼 압력계수는 절대값이 큰 음수가 되어야 하나, β 가 음수인 경우에는 후류의 영향으로 절대값이 그다지 크지 않게 된다. Fig. 6(b) (c) (g) (h)의 $30^\circ < |\alpha| < 100^\circ$ 중 음수의 피치영역에 나타난 밀집한 등압력계수선들은 Fig. 4(e) (f)에 보여진 후류의 영향에 의한 불연속점들을 나타낸다.

보정계수의 분자로 쓰이는 $Cp_1 - Cp_2$ 와 $Cp_3 - Cp_4$ 를 Fig. 6(b) (c)에 나타내었는데, 이들은 원추각 ϕ 가 작을 때에는 거의 수직 또는 수평인 직선으로 나타난다. 이것은 이 영역 내부에서는 $Cp_1 - Cp_2$ 는 α 만의, $Cp_3 - Cp_4$ 는 β 만의 단조증가함수임을 의미하므로, 이들은 보정계수 Cp_α 와 Cp_β 의 분자로 이상적이다. 유동각이 증가함에 따라 이들은 α 와 β 양쪽에 의존하기 시작하지만, $\phi < 50^\circ$ 까지는 여전히 (α, β)에 일대일 대응관계를 나타내므로 이 영역에서 보정계수의 분자로 쓰일 수 있다. $\phi > 60^\circ$ 일 때 $Cp_1 - Cp_2$, $Cp_3 - Cp_4$ 는 더 이상 (α, β)와 일대일 대응이 아니므로 보정계수의 분자로 쓰일 수 없다. 5공프로브의 영역분할 보정법에 사용되는 $Cp_1 - Cp_0$ 과 $Cp_3 - Cp_0$ 의 등압력계수선도를 Fig. 6(d) (e)에 나타내었는데, 일대일 대응을 나타내는 영역이 각각 최대 $-15^\circ < \alpha < 70^\circ$, $-15^\circ < \beta < 70^\circ$ 로, 영역분할법의 영역 1 및 3에서 보정계수의 분자로 사용될 때, 측정 가능한 각도의 범위를 조금 확장할 수 있다. 이러한 거동은 영역 2 및 4의 분자 $Cp_2 - Cp_0$ 과 $Cp_4 - Cp_0$ 에 대해서도 마찬가지이다.

식 (4)와 (5)에 사용되는 보정계수의 분모 $Cp_0 - (Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)/4$ 의 등압력계수선도를 Fig. 6(f)에 나타내었는데, 원추각 $\phi = 50 \sim 60^\circ$ 부근에서 0을 거쳐 음수로 바뀐다. 이 때문에 식 (4)와 (5)의 보정계수는 $\phi = 50 \sim 60^\circ$ 에서 발산하고, 측정 가능한 유동각 범위를 보정계수 분자의 일대일 대응 영역보다 제한하는 원인이 된다. 식 (4)와 (5)를 보정계수로 사용한 보정 그물망을 Fig. 7(a)에 나타내었는데, 본 논문의 모든 보정 그물망은 요각이나 피치각을 한 단계(약 5°) 더 증가시켰을 때 발산하거나 겹쳐지는 점이 하나라도 있으면, 이를 제외하고 완전한 보정 그물망을 가지는 최대 각도범위까지 보정 그물망을 그렸으므로, 그려진 보정 그물망은 해당되는 보정계수를 이용하여 완전한 보정 그물망을 그릴 수 있는 최대영역을 나타낸다. Fig. 7(a)에서 보정 그물망의 변보다 모서리 부분

의 원추각이 크기 때문에, $Cp_0 - (Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)/4$ 가 모서리에서 제일 먼저 0에 접근하므로, 보정 그물망은 모서리 부분이 한계 원추각에 도달하여 늘어지며 발산하게 되는데, 발산하는 점을 포함한 요, 피치각 범위를 제외하면, 측정 가능한 요, 피치각의 한계는 약 $\pm 35^\circ$ 정도로 생각할 수 있다.

분모가 0이 되어 보정계수가 발산하는 것을 막기 위하여, 다음과 같은 Root-Sum-Square (RSS) 형태의 분모를 고안하였다.

$$p_\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^4 (p_i - \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 p_i)^2} \quad (8)$$

$$Cp_\sigma = \frac{p_\sigma}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^4 (Cp_i - \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 Cp_i)^2} \quad (9)$$

p_σ 는 Judd⁽⁶⁾의 분모에서 힌트를 얻었지만 Judd⁽⁶⁾의 분모와 달리, 식 (1)로부터 p_σ 항을 포함하지 않고, $\rho U^2/2$ 에 비례하도록 유도되었기 때문에, 이를 분모로 사용한 보정계수는 p_σ 및 U 에 독립이다. Cp_σ 의 등 압력계수선도를 Fig. 6(g)에 나타내었는데, 모든 영역에서 일정한 크기 이상의 양수이므로 보정계수를 발산시키지 않는다. 그러나, 이를 사용한 보정계수

$$Cp_\alpha = \frac{p_1 - p_2}{p_\sigma} = \frac{Cp_1 - Cp_2}{Cp_\sigma} \quad (10)$$

$$Cp_\beta = \frac{p_3 - p_4}{p_\sigma} = \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_\sigma} \quad (11)$$

의 보정 그물망을 구성한 것이 Fig. 7(b)인데, 유동각을 한 단계 더 넓히면 Fig. 7(a)와 반대로 보정그물망의 변부분이 겹쳐지게 된다. 이는 Fig. 6(b) (c) (g)에서 알 수 있듯이 $\alpha \approx \pm 45^\circ$, $\beta \approx 0^\circ$ 또는 $\alpha \approx 0^\circ$, $\beta \approx 45^\circ$ 부근에서 α , β 의 증가에 대한 분모 Cp_σ 의 증가율과 분자 $Cp_1 - Cp_2$, $Cp_3 - Cp_4$ 의 증가율이 비슷하여 그 비가 일정하기 때문이다.

$\alpha \approx \pm 45^\circ$, $\beta \approx 0^\circ$ 또는 $\alpha \approx 0^\circ$, $\beta \approx 45^\circ$ 부근에서 분자는 아직도 단조증가하지만, 분모 Cp_σ 의 증가율이 분자의 증가율과 비슷하여 식 (10)와 (11)의 보정계수가 일대일 대응이 되지 못하는 문제는, Fig. 6(f)에서 알 수 있듯이 이 영역에서 음수이고 감소하는 $Cp_0 - (Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)/4$ 를 분모에 더하여, 분모의 증가율을 줄여줌으로써 해결할 수 있다. 이것은 p_σ 와 $p_0 - (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$ 가 각각 p_σ 를 포함하지 않고 $\rho U^2/2$ 에 비례하므로, 이들의 선형합을 분모로 사용한 보정계수가 p_σ 와 U 에 무

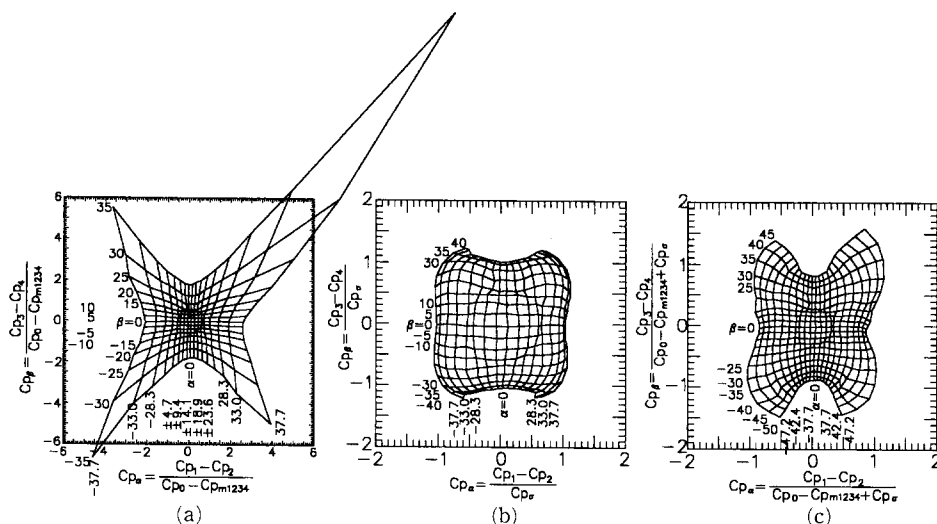


Fig. 7 Comparison of calibration coefficients

관하고 Cp_i 에만 의존하기 때문에 가능하다. Cp_σ 와 $Cp_0 - (Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)/4$ 를 더한 값의 등압력계수선도를 Fig. 6(h)에 나타내었는데, 모든 각도범위에서 일정 크기 이상의 양수이며, 유동각이 작을 때 최대값을 가지고, 유동각이 커짐에 따라 단조감소하므로, 단조증가하는 분자를 가진 보정계수의 분모로 사용하면 보정계수는 모든 각도에서 발산하지 않고, 넓은 유동각 범위에서 일대일 대응이 된다.

이를 이용한 보정계수

$$Cp_\alpha = \frac{p_1 - p_2}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + p_\sigma} = \frac{Cp_1 - Cp_2}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4) + Cp_\sigma} \quad (12)$$

$$Cp_\beta = \frac{p_3 - p_4}{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) + p_\sigma} = \frac{Cp_3 - Cp_4}{Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4) + Cp_\sigma} \quad (13)$$

의 거동을 Fig. 6(i), (j)에 나타내었는데, 모든 (α, β) 에서 발산하지 않고, 대체로 원주각 60° 이내의 영역에서 일대일 대응이 됨을 알 수 있다. Fig. 7(a)가 요, 피치각 각각 $\pm 35^\circ$ 이내, Fig. 7(b)

가 요, 피치각 각각 $\pm 40^\circ$ 이내에서 사용 가능한데 비해, 새로운 보정계수를 사용하여 보정그물망을 구성하면 Fig. 7(c)가 되는데, 요, 피치각 각각 $\pm 45^\circ$ 이내에서 사용이 가능하다. 5공프로브의 형식에 따라서 Cp_σ 와 $Cp_0 - (Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4)/4$ 를 단순히 더한 값보다 이들의 적절한 선형합이 더 좋은 결과를 나타낼 수도 있다.

4. 새로운 보정계수와 영역분할 기법

Everett 등⁽⁷⁾의 영역분할개념을 5공프로우브에 적용할 때, Sitaram과 Govardhan⁽⁹⁾에서와 같이 선형 분모를 사용하는 경우와, 본 논문에서 제안한 선형-RSS형 분모를 사용하는 경우에 대한 보정그물망을 Fig. 8(a)(b)에 각각 나타내었다. Fig. 8(a)는 현재까지 알려진 최신의 5공프로우브 년널링 보정방법이며, 년널링상태로는 가장 넓은 측정각을 갖는다. Fig. 8(a)의 영역 0과 영역 1, 2, 3, 4에는 중복되는 부분이 있고, Sitaram과 Govardhan⁽⁹⁾은 같은 점이 내부영역인 영역 0과 외부영역인 영역 1 등에서 계산될 때의 상대적인 오차에 대해서 논의한 바 있다.

그러나, Fig. 8(a)를 검토하면 내부영역의 보정그물망은 바깥쪽 경계에서 발산하고, 외부영역의 보정그물망은 안쪽 경계에서 발산하는데, 어느 영역의 그물망에서 보간해야 하는지를 결정하는 경계가 외부영역에 포함되어 있지 않기 때문에, 영역분

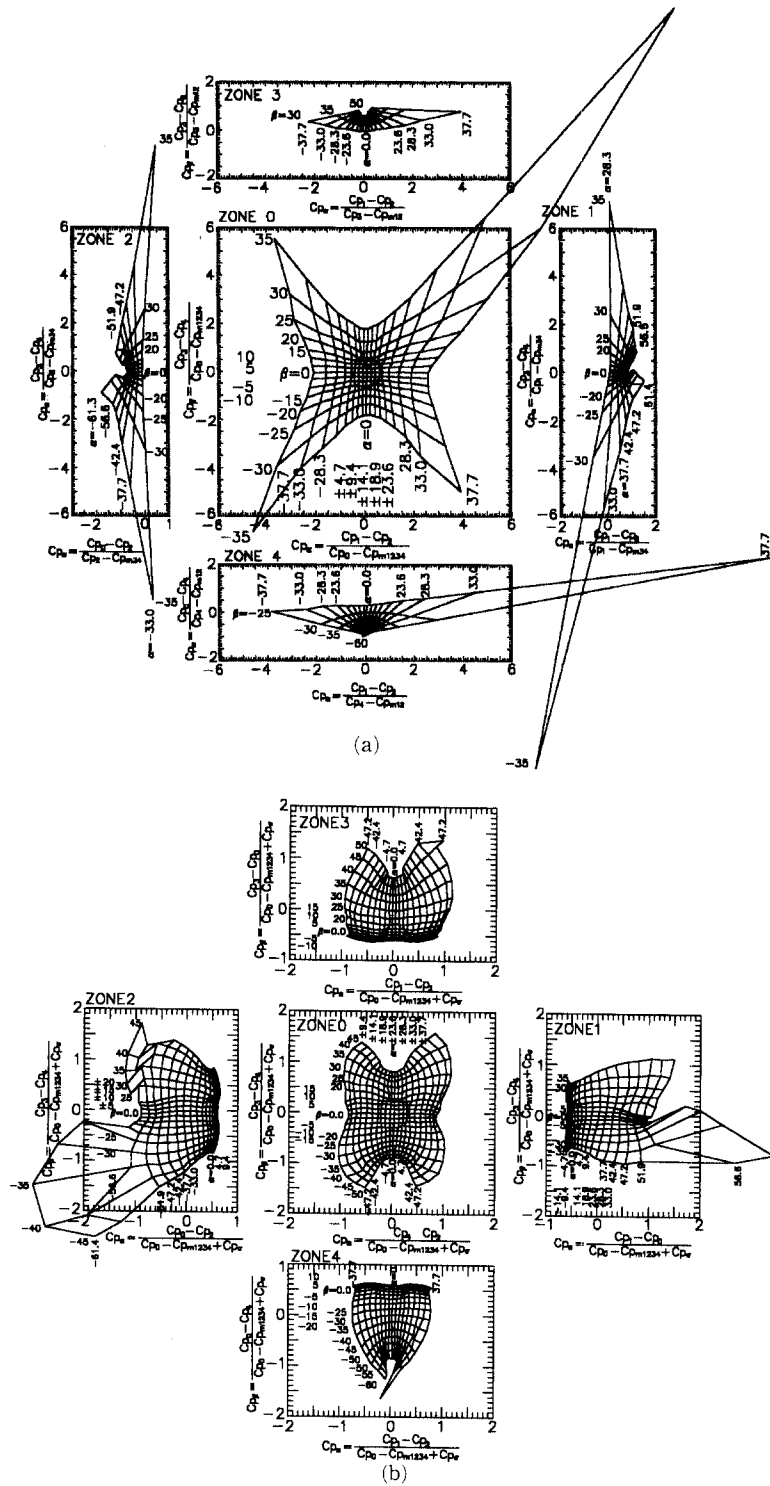


Fig. 8 Calibration network for zone-division method using (a) traditional calibration parameters and (b) new calibration parameters

할의 실질적인 면을 충족시키지 못한다는 결점이 있다. 즉, 유동장의 측정 시에 어느 영역에서 보간이 이루어져야 하는가는 측정된 5개의 p_i 중에서 어느 것이 최대인가에 의해서 결정되는데, $p_i (i=1, 2, 3, 4)$ 가 p_0 보다 커져서 최대압력이 되기 시작하는 각도는 Fig. 4(a)나, 김진권과 강신형⁽¹⁰⁾의 Fig. 4에서 알 수 있듯이, 위치에 따라 요각 및 피치각으로 약 $\pm 25^\circ$ 에서 $\pm 30^\circ$ 사이이다. 그런데, Fig. 8(a)에 나타난 기존의 보정계수를 사용한 영역분할기법에서는, 외부영역의 내부경계 부근에서 분모가 0에 접근함에 따라 보정계수가 발산하여, 외부영역의 내부경계값이 영역 1, 2, 3, 4에서 각각 28.3° , 33° , 30° , 25° 이므로, 어느 영역의 그물망에서 보간해야 하는지를 결정하는 경계인 $\pm 25^\circ \sim 30^\circ$ 를 포함하지 않는 경우도 존재하는데, 이것은 5공프로우브 영역분할 보정법의 치명적인 결함이다.

예를 들면, Fig. 4(a)에서 $\beta=0^\circ$ 일 때, $Cp_2 > Cp_0$ 이 되기 시작하는 점은 $\alpha=30^\circ$ 정도이다. 그러므로, 유동이 $\beta=0^\circ$, $\alpha=-31^\circ$ 에서 입사되는 경우, 측정된 압력은 $p_2 > p_0$ 의 관계가 있으므로 영역분할법에 의해 영역 2의 보정그물망에서 이중보간되어야 하는데, 영역 2는 $\alpha=-33^\circ$ 에서 -61.3° 까지를 포함하고 $\alpha=-31^\circ$ 를 포함하지 않으므로, 영역 2의 보정그물망에서 이중보간이 이루어 지지 못할 뿐만 아니라, 측정된 압력으로부터 영역 2의 보정계수를 계산하면 보정계수가 발산할 수도 있다.

이것은 영역 2의 보정계수의 분모가 내부경계 부근에서 부호를 바꾸기 때문으로, 이 문제를 해결하기 위해서는 항상 일정 크기 이상의 양수인 분모가 필요하다. 식 (12)과 (13)의 분모는 항상 양의 값을 가지므로, 이를 영역 1, 2, 3, 4의 보정계수의 분모로 사용하면 보정계수가 내부경계에서도 발산하지 않는다. 이 분모를 이용한 각 영역에서의 보정계수와 그 때의 보정그물망들을 Fig. 8(b)에 나타내었는데, 외부영역들의 내부경계면을 0° 정도까지 넓혀서 Fig. 8(a)에서 제기되었던 영역분할법의 결함을 제거하였을 뿐만 아니라, 외부영역의 부방향(영역 1과 2에서는 β 방향, 영역 3과 4에서는 α 방향)으로의 각도 범위도 넓혀서 영역분할 보정법의 측정 가능 범위를 넓힐 수 있었다.

5. 이중보간법과 정밀도 제고를 위한 속도, 정압 계산법

Everett 등⁽⁷⁾은 보정그물망에서의 이중보간을 하지 않고, 각 영역에서 요각계수, 피치각계수 및 속도계수를 포함하는 7개의 3차 다항식을 제시하였다. 그러나, 일정한 각도범위를 넘어서면 보정곡선은 발산하거나 일대일 대응이 되지 않으므로, 각각의 보정점을 보정그물망으로 확인해야 하며, 외삽은 발산영역을 포함할 수도 있으므로, 보정그물망에서 이중내삽을 하는 것이 바람직하다.

Fig. 8(b)의 보정그물망을 이용하여 유동장을 측정하는 절차와 계산법을 아래에서 검토한다. p_i 를 측정된 후에 최대압력이 어느 것인가에 따라 보간할 영역이 결정되고, 측정 압력값들을 대입하여 해당 영역의 보정계수 Cp_a 와 Cp_b 를 계산한다. 이중보간 해야 할 그물망이 불규칙적인 모양이므로 이중보간법의 적용이 간단하지 않다. 본 연구에서는 측정된 압력으로 부터 계산된 (Cp_a, Cp_b) 와 가장 가까운 해당 영역의 보정그물망의 교차점 좌표 (Cp_a^*, Cp_b^*) 를 찾고, (Cp_a^*, Cp_b^*) 와 (Cp_a, Cp_b) 를 연결한 벡터와 (Cp_a^*, Cp_b^*) 와 보정그물망에서 (Cp_a^*, Cp_b^*) 주위의 네 점을 연결한 네 벡터의 각각의 외적의 부호를 판별함으로써 (Cp_a, Cp_b) 가 교차점 (Cp_a^*, Cp_b^*) 로부터 어느 사분면에 있는지를 확인한다. 계산된 (Cp_a, Cp_b) 를 포함하는 보정그물망 상의 세 점으로부터 2차원 보간을 하여 (α, β) 를 결정한다.

유동방향 (α, β) 가 결정된 다음 p_s 와 U 를 구하기 위하여, 다음과 같은 속도계수, 정압계수를 미리 보정해 두는 방법이 흔히 사용된다.

$$C_{VP}(\alpha, \beta) = \frac{p_0 - \frac{1}{4}(p_1 + p_2 + p_3 + p_4)}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

$$\left(\because Cp_0 - \frac{1}{4}(Cp_1 + Cp_2 + Cp_3 + Cp_4) \right) \quad (14)$$

$$C_{SP}(\alpha, \beta) = \frac{p_0 - p_s}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (\because Cp_0) \quad (15)$$

이 방법에서 유동 원추각이 커져서 $p_0 - (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$ 가 0에 가까워지는 부분에서는 속도계수 $C_{VP}(\alpha, \beta)$ 도 0에 가까운 값으로 보정되어 있기 때문에, 속도 U 는 0/0의 형태로 풀리는데, 측정된

압력의 미세한 변동으로 큰 오차를 보일 수 있다.

본 연구에서는 이러한 오차를 피하기 위하여 (α, β) 가 구해졌을 때, Fig. 6(a)와 유사한 Cp_i (α, β)로부터 5개의 Cp_i 를 계산하는 방법을 택했다. Cp_i 가 계산된 후에는 p_s 와 U 가 식 (1)의 5개의 식에서 유일한 2개의 미지수이고, 필연적으로 식 (1)의 5개 식 중에서 두 개만이 선형독립이다. 예를 들면, Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이, $\beta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$ 일 때에는 식 (1)의 $i=1, 2, 3, 4$ 는 압력구멍이 같은 유동상태에 있으므로 같은 식이고, $i=0$ 만 다른 식을 나타내고, $\beta=0^\circ$, $\alpha \approx 25 \sim 30^\circ$ 일 때에는 식 (1)의 $i=0$ 과 1의 두 압력구멍은 거의 같은 압력을 받으므로 같은 식을 나타내고, 나머지 세 식은 또 다른 거의 동일한 식을 나타낸다. 식 (1)의 5개의 p_i 중에서 p_i 값이 최대인 압력구멍과 p_i 값이 최소인 압력구멍은 전혀 다른 압력을 받으므로, p_i 값이 최대와 최소인 두 식은 항상 선형독립이 되고, 이 두 식을 이용하여 연립방정식을 풀면,

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{p_{i,\max} - p_{i,\min}}{Cp_{i,\max} - Cp_{i,\min}}} \quad (16)$$

$$p_s = p_{i,\max} - Cp_{i,\max} \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (17)$$

와 같이 유속과 정압을 구할 수 있다.

여기서 p_i 의 최대값과 최소값을 포함하는 2개의 연립방정식을 풀지 않고, 선형 종속이 되는 두 식을 택해서 풀게 되면, 식 (16)의 분자 및 분모가 0에 가까운 값이 되어 0/0의 형태가 되므로, 보정 및 측정 때의 미세한 압력측정 오차에 의해서 실제와 다른 임의의 유속 및 정압값을 산출할 우려가 있다. 참고로 식 (1)에서 $i=0$ 인 식과 $i \neq 0$ 인 식을 평균한 식도 항상 선형독립이 되는데, 이 두 식에서 유속과 정압을 구하는 과정을 계수화한 것이 식 (14)과 (15)이다.

본 논문에서 제안된 보정 및 측정방법의 타당성을 확인하기 위하여, 유속 10 m/s, 피치각 0° , $\pm 22.5^\circ$, $\pm 45^\circ$ 도에서 요각을 -45° 에서 45° 까지 2.36° 단위로 변화시키면서 200개의 각도에서, 피토포와 5공프로브의 측정결과 비교실험을 수행하였다. 측정오차는 대체로 0을 기준으로 한 종 모양의 분포로 정규분포에 가깝고, 자유도 199인 t-분포는 정규분포와 1% 이내의 차이를 보이므로, 정규분포에 의해서 95%의 신뢰도로 각 측정값의 오차의 범위를 정하면, 요각은 $\pm 2.12^\circ$, 피치각은 $\pm 1.34^\circ$, 유속은 ± 0.25 m/s로 자유유속의 $\pm 2.5\%$, 정압

은 ± 0.16 mmAq로 동압의 $\pm 2.64\%$, 전압은 ± 0.27 mmAq로 동압의 $\pm 4.5\%$ 가 된다.

이러한 종합적인 오차는 약 5° 간격으로 이루어진 보정 그물망으로부터 이중보간할 때 생기는 이중보간오차와 보정 및 측정 실험 당시의 각도, 압력 측정에서 발생하는 측정오차가 포함되어 있다. 즉, 보정각도 간격을 줄이고, 각도 및 압력 측정의 정밀도를 높이면 오차의 크기는 줄어들 것이다. 또, 유동각이 커질수록 5공프로브의 측정오차가 커지는 것은 잘 알려진 사실인데, 본 논문에서는 기존의 보정계수를 사용한 경우보다 유동각을 10° 정도 확장했으므로, 유동각이 큰 확장된 영역에서의 큰 오차가 전체 오차에 크게 기여했다.

6. 결 론

가능한 모든 요각 및 피치각 범위에서 5공프로브 압력을 측정하여 작성된 전 각도 범위 압력계수 지도를 제안하였다. 이 압력계수 지도를 검토함으로써 5공프로브의 여러 가지 압력 특성들을 파악하였으며, 통상적인 선형항과 Root-Sum-Square 형태의 항의 선형합을 분모로 사용하는 새로운 보정계수를 고안하였다. 이 보정계수는 넓은 유동각도 범위에서 유동각과 일대일 대응이 성립하여 년널링 보정 구간을 확장했을 뿐만 아니라, 5공프로브 영역분할 보정법의 알려지지 않았던 결점을 보완했으며, 모든 유동각 범위에서 발산하지 않는 특징 때문에 널링법에도 적합하다. 또한 정밀도를 제고할 수 있는 보정그물망 상의 이중보간법과 속도 및 정압 계산법을 제시하였다. 여기에 도입된 압력계수 지도의 개념은 다른 종류의 5공프로브의 보정에도 효과적으로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 삼성전자(주)의 산학협동연구구제와 터보동력기계연구센터의 지원으로 수행되었다. 이에 관계자 여러분에게 깊이 감사한다.

참고문헌

- (1) 윤태진, 이상우, 1996, "원추각과 압력공방향이 원추형 5공프로브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), pp.

- 359~364.
- (2) Wright, M. A., 1970, "The Evaluation of a Simplified form of Presentation for Five-Hole Spherical and Hemispherical Pitometer Calibration Data," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 3, pp. 356~362.
- (3) 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.
- (4) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제8호, pp. 2693~2706.
- (5) Lee, J. C. and Ash, J. E., 1956, "A Three-Dimensional Spherical Pitot Probe," *Transactions of the ASME*, pp. 603~608.
- (6) Judd, A. M., 1975, "Calibration of a Five Tube Probe for Measuring Wind Speed and direction," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 8, pp. 115~116.
- (7) Everett, K. N., Gerner, A. A. and Durston, D. A., 1983, "Seven-Hole Cone Probes for High Angle Flow Measurement: Theory and Calibration," *AIAA Journal*, pp. 992~998.
- (8) Ostowari, C. and Wentz, Jr., W. H., 1983, "Modified Calibration Technique of a Five-Hole Probe for High Flow Angles," *Experiments in Fluids*, Vol. 1, pp. 166~168.
- (9) Sitaram, N. and Govardhan, M., 1994, "Large Angle Calibration of Five Hole Probes," *Proc. The 4th Asian International Conference on Fluid Machinery*, pp. 193~197.
- (10) 김진권, 강신형, 1996, "복잡한 유동장에서 신뢰성있는 새로운 5공프로우브 널링기법," 대한기계학회 추계학술대회논문집(B), pp. 543~548.