
 論 文

大韓造船學會論文集
 第34卷第2號 1997年5月
 Journal of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 34, No. 2, May 1997

반류 계측용 5공 피토관의 캘리브레이션 방법에 관한 연구

김우전*, 김도현*, 윤현세*, 문덕용*, 반석호*

Study on the calibration of a five-hole Pitot-tube for the wake measurement

by

W. J. Kim*, D. H. Kim*, H. S. Yoon*, D. Y. Moon* and S. H. Van*

요 약

선미 반류분포를 계측하기위해 수조에서 흔히 사용하는 5공 피토관의 새로운 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 기존의 한 각도(수평 또는 수직)만을 고려하는 1차원 캘리브레이션 방법과는 달리, 본 논문에서 제안한 2차원 차트 캘리브레이션 방법은 수평각과 수직각을 동시에 변화시켜 얻어진 2차원 차트를 이용하여 종전에 큰 각도에서 발생하던 오차를 줄임으로써 계측 정도를 크게 향상시켰다. 또한 종래의 1차원 방법에 맞추어 구성된 계측 시스템을 수정 없이 사용할 수 있도록 상관계수를 정의함으로써 사용의 편의를 도모하였다.

Abstract

The new definition of calibration coefficients is proposed for a five-hole Pitot tube. Two-angle chart calibration other than one-angle variation is considered to improve the accuracy in the measurement of the three-dimensional velocity fields. Several sets of correlation coefficients are introduced for different shapes of the probe tip. The calibration method with one-angle variation is compared with the new two-angle chart calibration method and the improvement of the present method is clearly shown.

접수일자 : 1996. 12. 31. 재접수일자 : 1997. 3. 26.

* 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

1. 서론

선체 주위의 유동을 비롯한 많은 복잡한 형태의 유체장을 연구하기 위해서는 3차원 유동의 속도 측정이 필수적이다. 이 때 흔히 쓰이는 장비로는, 유속과 각도에 따른 각 구멍의 압력 변화를 이용하여 각 방향의 속도 성분을 구하는 5공 압력 유속계 (five-hole pressure probe [Pitot tube]), 유체 유동에 의해 식혀지는 열선의 온도를 일정하게 유지하기 위해 공급되는 전류를 측정하여 속도를 추정하는 열선 유속계(thermal anemometer [hot-wire, hot-film]), 그리고 작은 입자에 의해 산란되는 빛의 Doppler효과를 이용한 광학 유속계 (Laser-Doppler Velocimetry [LDV])등을 들 수 있다[1]. 이 중 hot-wire는 난류 성분의 측정에 아주 탁월한 장비이나, 매시간 캘리브레이션을 해야하고 장비의 열선이 매우 약하기 때문에 취급에 주의해야 하는 약점이 있다. 한편 LDV는 캘리브레이션이 필요 없을 뿐 아니라 측정 영역에 장비가 들어가지 않아도 되는 장점이 있으나, 값이 비싸고 유체가 움직이는 수동(water tunnel)이 아닌 물체가 움직이는 수조(towing tank)에서는 사용하기가 불편하고, 특히 공기 중에서는 산란 입자를 측정 부위에 제공(seeding) 해주는 기술이 매우 어렵다는 약점을 가지고 있다. 5공 피토관의 경우에는 평균 유속만을 측정할 수 있지만, 위의 두 장비에 비해 값이 싸고 사용이 간편할 뿐 아니라, 한 번 캘리브레이션 하여 얻어진 계수들은 반영구적으로 사용할 수 있는 강점이 있다. 그리고 5공 피토관에 의해 측정된 평균 속도는 다른 측정 장비로 측정한 값보다 정확하고 안정적인 것으로 알려져 있기 때문에 현재 대부분의 수조에서 선미 반류등을 측정하는데 널리 사용되고 있다.

5공 피토관을 이용해 속도를 측정하는 방법에는 Nulling mode와 Non-nulling mode가 있는데, Nulling mode의 경우에는 대칭점의 압력이 같아지는 각도만큼 회전시키는 방법인데, 비효율적이고 공간의 제약을 받는 불편 때문에 현재는 대부분 캘리브레이션 차트(calibration chart)를 이용하는 Non-nulling mode가 쓰이고 있다. 이 때 속도를

산출하는 방식은 캘리브레이션 방법에 따라 달라지는데, 본 논문에서는 Non-nulling mode의 여러 캘리브레이션 방법을 소개하고 장단점과 주의점을 지적하고자 하였다. 그리고 5공 피토관의 끝단 모양에 따라 캘리브레이션 차트의 모양이 달라지기 때문에 반구형 끝단과 사각뿔대형 끝단을 가지는 피토관의 유입각과 압력 계수의 적절한 상관 관계를 찾아내었으며, 지금까지 수조등에서 사용되고 있는 1차원적인 방법을 개선한 새로운 2차원 차트 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 이 방법은 1차원 방법에 사용되어 왔던 압력 변환기등 측정 시스템을 바꾸지 않고도 적용 할 수 있는 방법으로 유동의 입사각과 세 끝단 압력차의 상관 관계(correlation)에 기초하고 있다. 이로부터 얻어진 속도 성분과 1차원 캘리브레이션 방법으로부터 구해진 속도 성분을 비교하여 1차원 캘리브레이션 방법을 사용함으로써 생길 수 있는 오차를 살펴보았다.

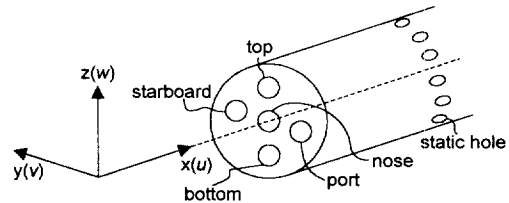


그림 1 5공 피토관의 모양 및 구멍 위치

2. 1차원 캘리브레이션 방법

보통 수조에서 사용하고 있는 반류 측정 시스템은 다섯 구멍이 관 끝에 있고 정압(static pressure)을 재는 구멍이 하류에 위치한 5공 피토관과 세 개의 압력 변환기로 이루어져 있다. 그림 1에 정의된 바와 같이 수직면에 위치한 두 구멍(bottom, top)의 압력차, 수평면에 위치한 두 구멍(port, starboard)의 압력차, 그리고 끝단(nose)의 압력과 정압의 차이를 각각 측정한다. 본 논문에서 지칭하는 1차원 캘리브레이션 방법이라 함은 측정된 피토관의 세 개의 압력차이로부터 세 방향의 속도

성분을 산출할 때, 수직 방향으로 놓인 두 구멍의 압력차와 수직각 $[\beta_V]$ 의 상관계수에 수평각 $[\beta_H]$ 의 영향이 없다고 가정하여 각각의 각도를 수직 방향 혹은 수평 방향의 구멍들의 압력 차이만으로 상관 짓는 방법이다[2]. 이 방법을 사용하여 캘리브레이션 하는 경우에는 피토크를 수평이나 수직으로 놓고 그 평면상에서의 각도 변화에 따른 압력-각도 상관계수(correlation coefficient)만을 구하면 된다. 이 때 속도의 크기에 대한 상관 계수가 수평 및 수직각에 대해 각각 하나씩 두 개가 생기고, 이를 모두 이용하는 경우는 유속값의 유일성이 보장되지 않기 때문에 대표되는 상관 관계를 택하여 사용한다. 그리고 각 캘리브레이션 점을 연결하는 곡선을 다항식으로 근사(approximation)하는 방법과 삼간(interpolation) 하는 방법이 있을 수 있는데, 캘리브레이션 점들의 분포가 부드러운 정상적인 경우에는 거의 차이를 보이지 않는 것으로 알려져 있다. 흔히 사용되던 수직각과 수평각에 대한 각도-압력상관계수는 다음과 같다.

$$C_{pitch}^1(\beta_V) = (P_{bottom} - P_{top}) / \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1)$$

$$C_{yaw}^1(\beta_H) = (P_{port} - P_{starboard}) / \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (2)$$

이 때, u 를 구하기 위한 상관계수는

$$C_q^1(\beta) = (P_{nose} - P_{static}) / \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (3)$$

로써 대표각 β 는

$$\beta = \tan^{-1}[\sqrt{(\tan \beta_V)^2 + (\tan \beta_H)^2}] \quad (4)$$

로 얻어진다.

그리고 다른 속도성분들은 각각

$$\begin{aligned} v &= u \tan(\beta_H) \\ w &= u \tan(\beta_V) \end{aligned} \quad (5)$$

로 표현된다.

그러나 이 방법은 하나의 각도(수평각 혹은 수직

각)가 작은 경우에는 정도(Accuracy)를 유지할 수 있으나 두 개의 각도가 동시에 20° 이상이면 계측 정도를 보장할 수 없는 단점이 있다.

3. 2차원 차트 캘리브레이션 방법

위와 같은 1차원 캘리브레이션 방법의 한계를 극복하기 위해서는 두 개의 각도가 동시에 변화하는 상태에서의 압력-각도 상관 계수를 이용하는 2차원 캘리브레이션 방법이 필요하다. 이 때, 각도의 중첩은 선형적(linear)이지 못하기 때문에 수직각(이하 Pitch[ϕ])과 수평각(이하 Yaw[θ])의 적용 순서에 따라 Pitch-Yaw mode 와 Yaw-Pitch mode로 구분되는데, Pitch-Yaw mode라 함은 캘리브레이션 할 때 Pitch각을 먼저 회전하고 그 후에 Pitch각이 회전된 상태에서 Yaw각을 회전하는 방식이고, Yaw-Pitch mode의 경우에는 그 순서가 반대인 경우이다. 각각의 경우에서의 세 방향의 속도 성분 산출 공식은 각각 다음과 같다.

Pitch-Yaw mode

$$\begin{aligned} u &= q \cos(\phi) \cos(\theta) \\ v &= q \cos(\phi) \sin(\theta) \\ w &= q \sin(\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

Yaw-Pitch mode

$$\begin{aligned} u &= q \cos(\theta) \cos(\phi) \\ v &= q \sin(\theta) \\ w &= q \cos(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (7)$$

본 논문의 목적은 현재 수조에서 1차원 캘리브레이션 방법에 맞추어 사용되고 있는 압력 계측 시스템을 바꾸지 않고도 사용 할 수 있는 효과적인 2차원 캘리브레이션 방법을 찾아내는데 있다고 할 수 있다.

3.1 Treaster & Yocum(TY)의 방법

대표적인 2차원적인 캘리브레이션 방법으로는 Applied Research Laboratory(ARL)에서 Treaster와 Yocum(이하 TY)에 의해 개발된 방법을 들

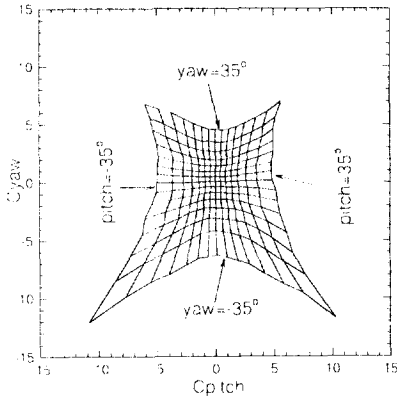


그림 2-1 TY의 방법에 따른 $(C_{pitch}^{TY}, C_{yaw}^{TY})$ 도표

수 있다[3]. 이 방법은 피토관의 각 구멍 사이의 압력 차이가 아닌 각 구멍의 압력 값들의 상호상관 계수에 기초하고 있다. 이 계수에는 속도가 포함되어있지 않고 압력 계측치들로만 이루어진 조합을 이용한다. 그리고 정압을 따로 재는 구멍이 없는 피토관을 대상으로 하였다. 그들에 의해 제안된 상관 계수는 다음과 같다.

$$C_{pitch}^{TY}(\phi, \theta) = (P_{bottom} - P_{top}) / (P_{nose} - \bar{P}) \quad (8)$$

$$C_{yaw}^{TY}(\phi, \theta) = (P_{port} - P_{starboard}) / (P_{nose} - \bar{P}) \quad (9)$$

$$C_{total}^{TY}(\phi, \theta) = (P_{nose} - P_{total}) / (P_{nose} - \bar{P}) \quad (10)$$

$$C_{static}^{TY}(\phi, \theta) = (\bar{P} - P_{static}) / (P_{nose} - \bar{P}) \quad (11)$$

$$\bar{P} = (P_{port} + P_{starboard} + P_{bottom} + P_{top}) / 4 \quad (12)$$

위와 같은 정의를 이용하면 하나의 $(C_{pitch}^{TY}, C_{yaw}^{TY})$ 의 조합에 1:1 대응하는 (ϕ, θ) 을 구할 수 있고, 각각 해당되는 pitch각[ϕ]과 yaw각[θ]을 알면 그 각도에 해당되는 C_{total}^{TY} 과 C_{static}^{TY} 를 찾을 수 있다. (10), (11)의 정의에 따라 그로부터 P_{total} 과 P_{static} 을 구하면 다음과 같이 속도의 크기를 찾아낼 수 있다.

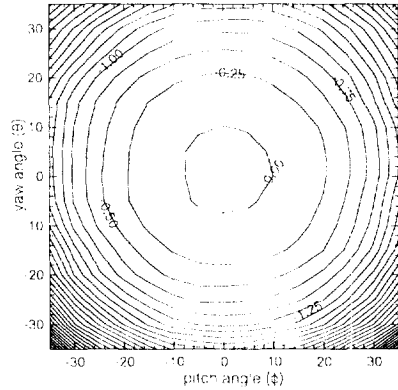


그림 2-2 TY의 방법에 따른 C_{total}^{TY} 분포도

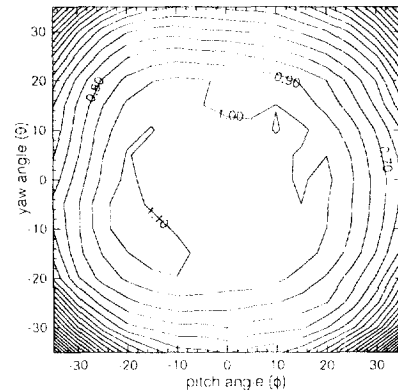


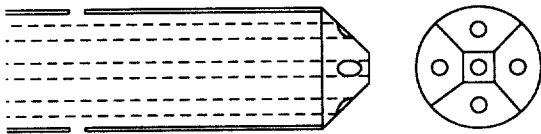
그림 2-3 TY의 방법에 따른 C_{static}^{TY} 의 분포도

$$q = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{total} - P_{static})} \quad (13)$$

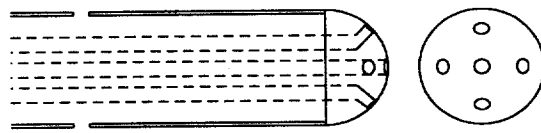
그림 2-1부터 2-3에서는 사각뿔대형의 끝단을 가진 5공 피토관[4]을 Yaw-Pitch mode에 따라 $\pm 35^\circ$ 까지 5° 간격으로 캘리브레이션 하여 얻은 압력 값을 바탕으로 (8)에서 (11)의 정의에 따른 압력-각도 상관계수들을 보이고 있다. 그림 2-1로부터 두 각도 (ϕ, θ) 를 찾는 방법은 $(C_{pitch}^{TY}, C_{yaw}^{TY})$

평면에서 2차원 삼각법을 이용하거나 또는 1차원 삼각법을 교대로 반복해서 사용하면 구할 수 있다. 하지만 위의 방법은 다섯 구멍의 압력값이 모두 필요하기 때문에 압력 변환기를 다섯 개 사용하거나 아니면 각 구멍의 압력 신호를 변환기에 돌아가며 연결해주는 스캐니 밸브(Scani-valve)시스템을 사용해야하는 불편이 있다.

이러한 어려움을 해소하고, 2절의 1차원 캘리브레이션 방법에 사용했던 계측 시스템을 그대로 사용하면서도 계측 정도를 크게 향상할 수 있는 새로운 2차원 캘리브레이션 방법을 제안 하고자 한다. 이때, 사용하고자 하는 피토관의 끝단 모양에 따라 두개의 각도 (ϕ, θ)와 1:1 대응을 이루는 두개의 각도-압력 상관계수 ($C_{pitch}^{2A}, C_{yaw}^{2A}$)의 정의가 달라야한다. 다음에는 우선 끝단이 잘린 피라미드형(사각뿔대 모양)의 끝을 가진 피토관을 위한 상관 계수에 대해 살펴본 후, 반구형의 끝단을 가진 피토관의 상관계수를 구하고, 1차원 캘리브레이션 방법을 사용할 때 발생할 수 있는 오차에 대하여 알아본다.



(a) 사각뿔대형 끝단을 가진 피토관



(b) 반구형 끝단을 가진 피토관

그림 3 5공 피토관의 생김새

3.2 사각뿔대모양(Frustum of pyramid)의 피토관을 위한 방법

초기의 피토관의 경우에는 포오텐시얼 이론을

이용한 상관관계를 사용하거나 또는 Nulling mode를 이용하였기 때문에 피토관의 끝단이 대칭성을 고려한 구형이나 반구형의 모양을 가졌으나, 제작이 어렵고 큰 입사각을 가지는 경우에는 포오텐시얼 이론으로는 더 이상 각도-압력 상관 관계를 규정할 수 없기 때문에 캘리브레이션 차트의 작성이 필수적이게 되었다. 캘리브레이션이 전제된 경우에는 피토관의 끝단의 모양의 좋고 나쁨은 각도 변화에 대한 압력 변화의 민감도(sensitivity)에 따른다고 할 수 있고, 이런 배경으로 그림 3-(a)에서 보인 바와 같이 제작이 용이 할뿐 아니라 큰 입사각에서도 좋은 민감도를 보이는 끝단이 잘린 피라미드형(사각뿔대형)의 끝(probe tip)을 가진 피토관이 흔히 사용되어왔다. 이 때, 2절의 (1),(2)와 비슷한 형태의 수평(yaw), 수직(pitch)각에 대한 압력 차이의 상관계수를 (14),(15)와 같이 정의 할 수 있다.

$$C_{pitch}^{2A}(\phi, \theta) = (P_{bottom} - P_{top}) / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (14)$$

$$C_{yaw}^{2A}(\phi, \theta) = (P_{port} - P_{starboard}) / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (15)$$

그리고 위 식의 분모에는 한 방향의 속도 성분 (u) 대신 속도의 전체 크기(q)를 사용하였다. 한편, (3)과 같은 속도 크기에 대한 상관 계수 정의를 사용하면 두 각도가 모두 큰 경우에는 계수의 부호가 바뀌거나, 아주 작은 값을 가질 수 있기 때문에 수학적 문제를 피하기 위해 C_q^{2A} 가 항상 양(+)의 값을 가지면서 각도에 대해 부드러운 변화를 가지도록 다음과 같이 선택하였다.

$$C_q^{2A}(\phi, \theta) = \{ (P_{nose} - P_{static}) + K_q (|P_{bottom} - P_{top}| + |P_{port} - P_{starboard}|) \} / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (16)$$

이때, K_q 의 값은 C_q^{2A} 가 항상 양(+)의 값을 가지도록 정하면 된다. 그러나 위의 정의에 들어 있는 속도의 크기 q 를 미리 알 수 없고, 그 값

이 구하고자하는 대상이므로 우선, q 를 가정하고 (14), (15)의 정의에 따라 구해진 상관 계수를 캘리브레이션 값과 비교하여 두 각도를 구하고, 그 각도를 이용하여 C_q^{2A} 의 값을 얻고 그로부터 새로운 q 를 구한다. 이를 두 각도와 속도 크기가 수렴된 값을 가질 때까지 반복하면 되는데, 보통 20번 이내에서 수렴하는 것을 확인하였다.

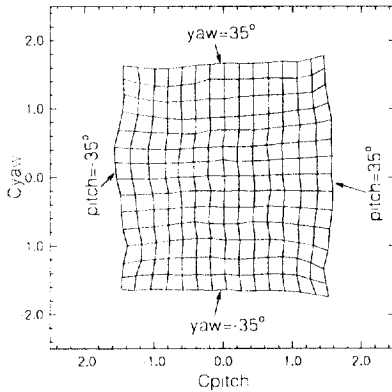


그림 4-1 사각뿔대형 피토관의 $(C_{pitch}^{2A}, C_{yaw}^{2A})$ 도표

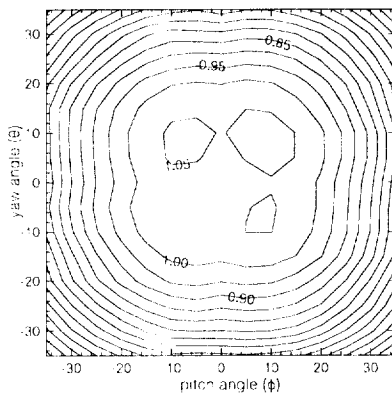


그림 4-2 사각뿔대형 피토관의 C_q^{2A} 분포도

이 때 (14),(15)의 정의는 $(C_{pitch}^{2A}, C_{yaw}^{2A})$ 과 (ϕ, θ) 가 그림 4-1에서 보인바와 같이 매우 깨끗한 1:1대응을 이루고 있음을 상기해준다. 속도의 크

기와 두 각도를 알면 (6)이나 (7)로부터 세 방향의 속도 성분을 구할 수 있다. 그림 4-1과 4-2에는 3.1절에서 사용한 사각뿔대모양의 끝단을 가진 5공 피토관[4]의 데이터를 다시 이용하였는데, 본래의 데이터에는 정압을 재는 구멍이 따로 있지 않았으므로 정압을 영(zero)로 생각하였다. 그리고 (16)식의 상수 K_q 는 각 피토관의 캘리브레이션 특성치로서 이 경우에는 0.1을 택하였다.

3.3 반구모양(Hemi-sphere)의 피토관을 위한 방법

현재 여러 수조에서 사용하고 있는 구형이나 반구형 끝단을 가진 피토관의 경우에는, (14),(15)의 정의로는 $(C_{pitch}^{2A}, C_{yaw}^{2A})$ 과 (ϕ, θ) 가 1:1대응함을 보장 할 수 없다.

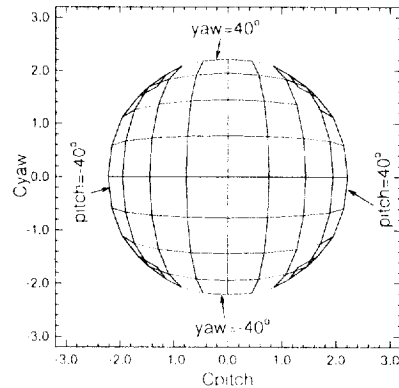


그림 5-1 구형 피토관의 포텐셜이론에 의한 $(C_{pitch}^{2A}, C_{yaw}^{2A})$ 도표

이러한현상은 간단한포텐셜이론을 구(sphere)에 적용하여 얻어진 압력 분포를 이용하면 알 수 있는데, 3.2절의 정의에 따라 구성하면 그림 5-1에 보인바와 같이 두 각도가 모두 큰 경우에 1:1 대응이 깨어짐을 볼 수 있다. 5공 피토관의 압력 계측 값으로부터 유동의 입사각을 찾기 위해서는 각도-압력 계수와 각도의 1:1 대응이 필수적이므로, 이를 위해서 (14)와 (15)식을 약간수정하여

큰 입사각에서도 1:1대응이 보장될 수 있도록 다음과 같이 각도-압력차 상관 계수를 정의하였다.

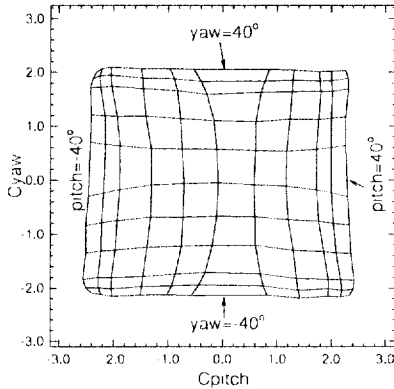


그림 5-2 반구형 피토관의 $(C_{pitch}^{2B}, C_{yaw}^{2B})$ 도표

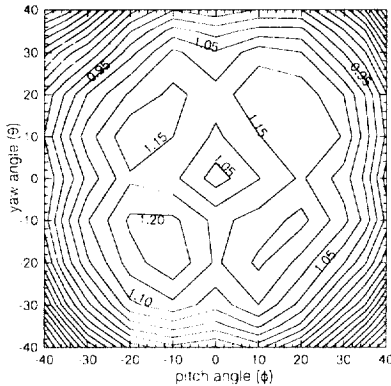


그림 5-3 반구형 피토관의 C_q^{2B} 분포도

$$C_{pitch}^{2B}(\phi, \theta) = \{ (P_{bottom} - P_{top}) + K_{\phi} \text{sign}[|\frac{1}{2} \rho q^2 - (P_{nose} - P_{static})|, (P_{bottom} - P_{top})] \} / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (17)$$

$$C_{yaw}^{2B}(\phi, \theta) = \{ (P_{port} - P_{starboard}) + K_{\theta} \text{sign}[|\frac{1}{2} \rho q^2 - (P_{nose} - P_{static})|, (P_{port} - P_{starboard})] \} / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (18)$$

여기서 $\text{sign}[a, b]$ 는 a 의 절대값에 b 의 부호를 붙이는 기호이다. 이때, K_{ϕ} , K_{θ} 는 각 피토관의 고유상수로서 $(C_{pitch}^{2B}, C_{yaw}^{2B})$ 과 (ϕ, θ) 가 1:1대응이 되도록 캘리브레이션때의 계측값을 바탕으로 여러 조합을 시도하여 $(C_{pitch}^{2B}, C_{yaw}^{2B})$ 차트가 가장 바둑판에 가까운 값들을 정하면 된다.

그리고 속도의 크기에 관한 상관계수는 3.2절의 (16)과 마찬가지로 선택하였는데, 여기서도 K_q 는 C_q^{2B} 의 값이 항상 양(+)의 값을 가지면서 각도에 따라 부드러운 변화를 하도록 정한다.

$$C_q^{2B}(\phi, \theta) = \{ (P_{nose} - P_{static}) + K_q (|P_{bottom} - P_{top}| + |P_{port} - P_{starboard}|) \} / \frac{1}{2} \rho q^2 \quad (19)$$

계측된 압력 차이로부터 (17),(18) 그리고 (19) 식을 이용하여 각 속도 성분을 산출해내는 방법은 3.2절에 기술한 방법과 같다. 본 절에서 예로 사용한 5공 피토관은 그림 3-(b)에 보인 바와 같이 KRISO수조에서 사용할 목적으로 최근 제작한 것으로 수조에서 Pitch-Yaw mode로 -40° 에서 $+40^\circ$ 까지 10° 간격으로 1.5m/sec의 속도에서 캘리브레이션 하였다. 단지 큰 각도에서는 급격한 변화가 예상되므로 $\pm 35^\circ$ 를 캘리브레이션에 추가하였다. 이때, K_{ϕ} , K_{θ} , K_q 는 피토관의 고유 상수로서 이번 경우에는 각각 0.9, 0.4, 0.2를 택하여 사용하였다.

4. 1차원 캘리브레이션 방법의 오차

이 절에서는 2차원 방법과의 직접 비교를 통해, 1차원 방법을 사용할 때 발생할 수 있는 오차를 살펴보기로 한다.

대상의 5공 피토관은 3.3절에서 언급한 반구형 피토관을 사용하였다. 이때, 1차원 캘리브레이션 계수들은 두 각도를 동시에 변화시키면서 얻어진 2차원 캘리브레이션 데이터중 한 각도가 0° 인 데

이터를 1차원 방법으로 다시 계산하여 1차원 상관 계수를 구하였고, 2차원 캘리브레이션 데이터를 임의 속도에서 계측된 압력 값으로 삼아서 각도와 속도를 산출하였다. 대상은 반구형 피토포니므로 각각 2절과 3.3절의 상관 계수를 이용하였다. 가상적인 압력 값으로 2차원 캘리브레이션 때 계측된 값을 이용했으므로 3.3절의 방법을 이용한 경우는 얻어진 속도와 각도가 캘리브레이션 때의 값을 오차 없이 재생함을 확인하였고, 한편 2절의 1차원 방법의 경우에는 pitch각이나 yaw각이 모두 큰 경우에는 큰 오차가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

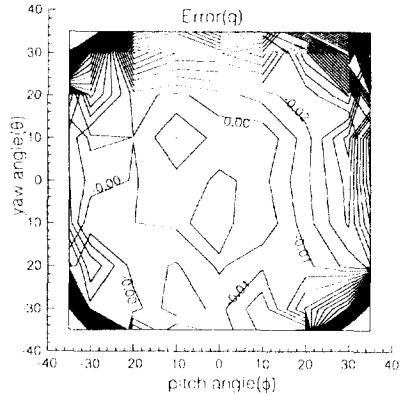


그림 6-3 1차원 방법에 따른 속도크기(q)의 오차

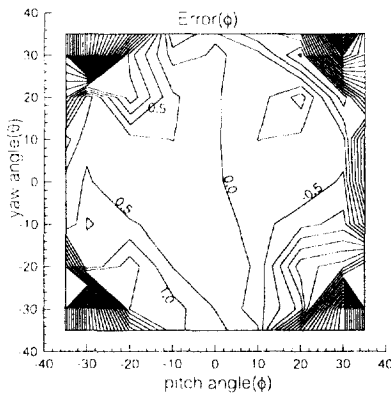


그림 6-1 1차원방법에 따른 수직각(pitch)의 오차(°)

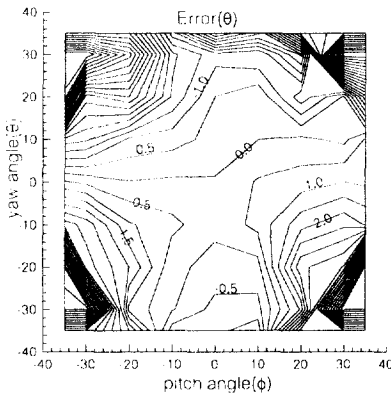


그림 6-2 1차원방법에 따른 수평각(yaw)의 오차(°)

그림 6-1 ~ 6-3에는 수평각, 수직각에 대한 오차가 각도(°)로, 유속에 대한 오차가 유속에 대한 비율(유속이 1.0)로 도시되고 있는데, 구석점들, 즉 수평각과 수직각이 모두 큰 경우에는 오차가 매우 큰 것을 알 수 있다.

1차원 캘리브레이션 방법을 이용하는 경우, 수평각과 수직각이 동시에 10° 보다 작은 경우에는 최대 오차가 각도로는 0.5°, 속도(q)는 0.5%정도로서 매우 정확함을 알 수 있었고, 두각도가 20° 보다 작은 경우에는 최대 오차가 각도로는 2°, 속도(크기)는 1.5%정도로서 충분한 정도를 유지하고 있다고 할 수 있다. 그러나 두 각도가 동시에 30° 이상인 경우에는 오차가 각도로는 5°이상, 유속(q)으로는 10%이상 발생 할 수 있음을 확인하였다. 이러한 1차원 방법의 한계는 오래 전에 알려져 있었으며, 계측 시스템을 바꾸지 않고서도 적용이 가능한 2차원 방법은 본 연구를 통하여 개발되었다.

5. 결론

본 연구에서는 수조에서 선미 반류를 계측하는데 널리 사용되고 있는 5공 피토포니의 1차원 캘리브레이션 방법의 문제점을 지적하고, 이를 개선한 새로운 2차원 캘리브레이션 방법을 제안하였다.

2차원 캘리브레이션 방법을 이용하는 경우, 두 각도를 동시에 움직일 수 있는 캘리브레이션 장치(two-angle rotating device)가 필요하고, 또 20여 개(10×10)의 계측점으로 캘리브레이션이 완성되던 1차원 방법과는 달리 100여(10×10)개의 계측점이 있어야 캘리브레이션이 완성되는 등 더 많은 노력을 필요로 하는 것이 사실이다. 그러나 한 번 얻어진 캘리브레이션 계수들은 피토관 자체의 고유 특성으로 수년간 사용 될 수 있고, 실제의 반류 계측시는 1차원 방법과 동일한 계측치를 필요로 하는 등 새로운 노력이 전혀 들지 않는다. 일반 상선의 경우, 입사각이 국부적으로 큰 유동이 추진기 면에서 존재하는 경우가 많을 뿐 아니라, 계측된 반류는 추진기의 설계에 중요한 자료이다. 그러므로 정도높은 선미 반류의 계측치를 확보하기 위해서는 반드시 어떤 형태이든지 2차원 캘리브레이션 방법의 적용이 필요하다고 할 수 있겠다.

끝으로 본 연구에서는 무시한 속도의 크기에 대한 영향(즉, Reynolds No. 효과)를 고려하기 위해서는 속도의 크기(q)를 또하나의 변수로 하는 3차원 캘리브레이션 방법이 필요하게 되는데, 통상적

인 수상선의 반류 계측 속도 범위(1.0 ~ 2.5 m/sec)에 대해서는 본 연구에서 캘리브레이션에 사용한 속도(1.5 m/sec)에서의 값을 그대로 사용하여도 오차가 무시할 만 하다는 사실을 부연해둔다.

참 고 문 헌

- [1] Goldstein, R.J., *Fluid Mechanics Measurements*, Hemisphere Publishing Co., 1983
- [2] Yang, S.I., Kim, S.H., *Study on Wake Survey Testing Technique and Measuring Equipment*, KRIS Report No. UCE 55-73.80, 1980.
- [3] Treaster A.L., Yocum, A.M., "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, No. 3, pp. 23-34, 1979
- [4] Kim, W.J., "An experimental and computational study on longitudinal vortices in turbulent boundary layers," Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, 1991.