

## 5공 피토관을 이용한 3차원 유동장 측정(1) -검정식-

정의준 · 이원규\* · 이재영\*\*  
기계공학과

### <요 약>

직접 설계 제작한 5공 피토관을 이용하여 3차원 유동장을 측정하기 위해서는 이 피토관의 특성을 나타내는 특성 곡선인 검정식이 필요하다. 이러한 검정식을 무차원 매개변수를 도입하여 제시하였고 정확한 위치제어를 위해 자동이송장치를 개발하였다.

---

## The Measurement for the Three-Dimensional Flow Field using the Five-Hole Pitot tube (1) -Calibration Equation-

W.J.Chung · W.K.Lee\* · J.Y.Lee\*\*  
Dept. of Mechanical Engineering

### <Abstract>

We directly designed and produced five hole pitotube to measure three dimensional flow field. To measure the flow field by the pitot tube, we need it's calibration equation which denotes it's characteristics. From the result of this study the calibration equation was suggested by using dimensionless parameters and an automatic traverse system was developed to controll the measuring position precisely.

---

\* 울산대학교 생산기계공학과 조교수

\*\* 울산대학교 기계공학과 대학원

## Nomenclature

- $P$  : 원통표면상의 임의의 위치에서의 동력학적 압력  
 $P_o$  : 원통과 무한히 떨어진 위치에서의 동력학적 압력  
 $P_1 \sim P_5$  : 피토관에 의한 측정압력  
 $P_d$  : 측정 유동장의 동압  
 $P_d'$  : 스월각 동압  
 $P_d''$  : 피치각 동압  
 $P_s$  : 측정유동장의 정압  
 $P_s'$  : 개이지 정압  
 $r$  : 원통 중심에서 임의의 위치까지의 거리  
 $U$  : 유동 속도  
 $V$  : 원통 표면상의 임의의 위치에서의 유체유동속도  
 $V_o$  : 원통과 무한히 떨어진 위치에서의 유체유동속도  
 $V'$  : 스월각 속도  
 $V''$  : 피치각 속도  
 $V_x$  : X방향 속도성분  
 $V_y$  : Y방향 속도성분  
 $V_z$  : Z방향 속도성분  
 $\varphi$  : 속도 퍼텐셜  
 $\psi$  : 유량함수  
 $\mu$  : 용흡중첩의 세기  
 $\alpha$  : 원통중심에 대한 임의의 점의 각도  
 $\theta$  : 스월각  
 $\phi$  : 피치각  
 $\xi_s$  : 스월각 방향계수  
 $\xi_{sd}$  : 스월각 동압계수  
 $\xi_{ss}$  : 스월각 정압계수  
 $\xi_p$  : 피치각 방향계수  
 $\xi_{pd}$  : 피치각 동압계수  
 $\xi_{ps}$  : 피치각 정압계수

## 1. 서 론

유체의 유동장에 관한 측정결과는 유동의 구조를 파악할 수 있으므로 내부유동 혹은 외부유동의 손실을 규명하는데 중요한 역할을 한다. 그러므로 유동에 관한 정확하고 간편한 측정기술의 요구는 근래의 산업발달과 더불어 더욱더 증가되고 있는 실정이다.

3차원 유동장의 측정 장치로는 레이저 도플러 유속계(LDV) 열선 풍속계 및 5공 피토티관 등이 있으며 특히 5공 피토티관은 압력 및 속도를 측정할 수 있는 잇점이 있다. 5공 피토티관의 종류는 구형, 반구형 피토티관, 앵글 튜브 프로브, 프리즘 프로브 및 반도체를 이용한 고주파 구형 프로브 등이 있다. 5공 피토티관 중 구,반구형 피토티관은 이것의 특성곡선을 무차원 매개변수를 이용하여 단순화시킬 수 있을 뿐만 아니라 이 특성 곡선으로 부터 압력과 속도성분을 간단히 얻을 수 있는 장점이 있다. 그런데 반구형은 구형과 비교하면 단순한 구조와 향상된 유동조건 때문에 특성곡선을 구하는 검정실험에서 더 유리하다.<sup>(1)</sup>

5공 피토티관에 관한 연구는 1915년 David Taylor 경<sup>(2)</sup>에 의해 처음 실시되었으며, Pien, P.C.<sup>(2)</sup>은 1958년에 2차원 유동장에 원통형 피토티관으로 원통 주위의 유동에 대한 이론을 적용하여 2차원 속도 및 압력성분을 측정하였으며 최근에 Kerrebrock<sup>(3)</sup>는 5공 피토티관으로 무차원 매개변수를 이용하여 3차원 속도 및 압력들의 순간성분을 측정하였다.

반구형 5공 피토티관은 비회전 이상유동장을 가정하여 설계제작되었으므로 점성이 있는 실제 유동장에서 그 측정값은 설계단계에서 예견했던 값과는 차이가 있을 것이다. 또한 반구형의 형상 및 표면 거칠기, 압력감지구의 배열로 인하여 피토티관 그 자체만이 갖고 있는 특정한 특성이 존재하므로 각 피토티관은 이러한 여러 요인들을 보정하고 규정해 주는 특성곡선이

필요하다.

본 연구에서는 원통형 피토티관의 이론을 확대 적용하여 반구형 5공 피토티관을 직접 설계제작하였으며 피토티관의 정확한 위치 제어를 위해 자동이송장치를 개발하였고 제작된 피토티관의 특성을 규명하기 위해 Kerrebrock<sup>(3)</sup>가 제시한 무차원 매개변수를 도입하여 이 피토티관에 적용할 수 있는 특성곡선을 제시하고자 한다.

## 2. 원 리

점성이 작은 유체의 유동은 물체 주위에 형성되어지는 경계층이 무시할 수 있을 정도로 얇고 경계층 외부에서는 비점성 유체 같이 거동하므로 물체 주위의 유동은 비압축성, 비점성 유체의 비회전 유동이라 가정할 수 있다.

5공 피토티관의 원리는 이상유체의 비회전 유동이라는 가정하에서 2개의 원통을 수평과 수직으로 조합하면 구형의 형태가 되며 이러한 구형의 한 측면만 취하면 반구형이 된다. 반구형 피토티관은 3차원 유동측정이 가능하다.

### (1) 원통형 피토티관의 원리

2차원 비점성, 비압축성, 비회전 유동에 있어서 원통 주위의 유동에 대한 속도 퍼텐셜 및 유량함수식<sup>(4)</sup>은 다음식과 같이 주어진다.

$$\varphi = U r \cos \alpha + \frac{\mu \cos \alpha}{r} \dots\dots\dots(1)$$

$$\psi = U r \sin \alpha - \frac{\mu \sin \alpha}{r} \dots\dots\dots(2)$$

정상유동에서 유선은 경계가 될 수 있으므로 유선  $\psi = 0$ 를 한 경계로 취하면

$$0 = (U r - \frac{\mu}{r}) \sin \alpha \dots\dots\dots(3)$$

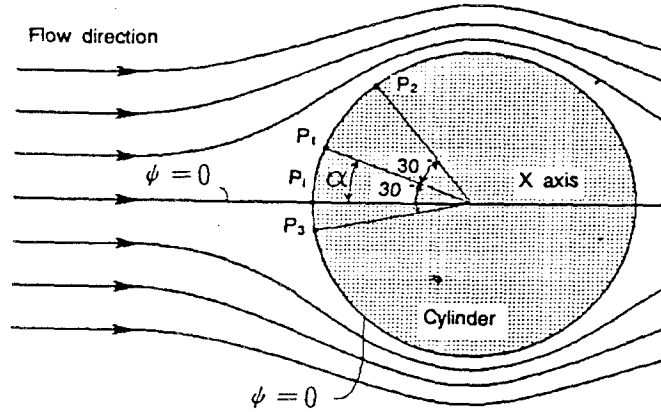


Fig.1 Cylindrical pitot tube and flow stream

이며, 식 (3)은  $a = 0$  또는  $Ur^2 = \mu$  일 때 만족한다. 원통의 반지름이  $r = a$ 이면  $\mu = Ua^2$ 이고, 유선  $\psi = 0$ 은  $X$  축과  $r = a$ 인 원이 될 때 만족한다. 위의 조건을 가지는 원통주위의 유동에 대한 속도퍼텐셜과 유량함수는 식 (1) 및 (2)로부터

$$\varphi = U\left(r + \frac{a^2}{r}\right) \cos \alpha \dots\dots\dots(4)$$

$$\psi = U\left(r - \frac{a^2}{r}\right) \sin \alpha \dots\dots\dots(5)$$

이고 원통 표면상에서 속도는 원통표면에서 접선방향이기 때문에  $V = \partial\psi/\partial r$ 로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V|_{r=a} &= \partial\psi/\partial r|_{r=a} = \\ U\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \sin \alpha|_{r=a} &= 2U \sin \alpha \\ \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

2차원 평면내에 놓여있는 원통으로부터 무한히 떨어진 위치에서의 동력학적 압력(dynamic pressure)을 기준으로 이 압력

을 0라고 놓으면  $P_0 = 0$ ,  $V_0 = U$ 가 된다. 또한 원통 표면상의 임의의 점의 압력 및 속도를  $P$  및  $V$ 라고 하고 이들 값을 비회전 유동장에 대하여 속도 에너지와 동력학적 압력에너지의 합이 보존되는 원리를 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} \dots\dots\dots(7)$$

$$P = \frac{\rho}{2} U^2 \left(1 - \left(\frac{V}{U}\right)^2\right) \dots\dots\dots(8)$$

원통 표면상의 점에 대하여 식 (6)을 이용하여 다시 정리하면 식 (9)를 얻는다.

$$P = \frac{\rho}{2} U^2 (1 - 4 \sin^2 \alpha) \dots\dots\dots(9)$$

식 (9)로부터 원통 중심에서의 각  $\alpha$ 의 변화에 따르는 원통 표면상의 동력학적 압력을 알 수 있고 원통 표면상에서 동력학적 압력이 특별히 0이 되는 점은  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 150^\circ$ 이다. 따라서 원통형 피토관은 원통에  $0^\circ$ 와  $\pm 30^\circ$ 의 위치에 3개

의 압력 감지구를 뚫어 만들면 0 와  $\pm 30^\circ$  사이의 압력차가  $P_i$  점에서 동력학적 압력이 된다.

그림 1과 같이 X 축으로부터  $P_1$  압력구가 임의의 각  $\alpha$ 로 회전했을 때 3개의 압력구로부터 얻은  $P_1, P_2$  및  $P_3$  를  $P_i$  점에서 동력학적 압력  $P_d$ , 정역학적 압력  $P_s$  와 조합하면 다음에서 정의한 무차원 매개변수인 방향계수, 동압계수, 정압계수로 나타낼 수 있다.

방향계수는  $P_1$  과 양단의 압력  $P_2$  및  $P_3$  값의 차이의 합을 분모로 하고  $P_2$  와  $P_3$  간의 차를 분자로 하면  $\alpha$ 의 작은 변화에 대해서도 민감하게 변화하는 Tangent 함수로 식 (10)을 얻을 수 있으며 식 (10)을 이용하여 측정 압력값에 대한 각  $\alpha$ 를 구할 수 있다.

$$\xi(\alpha) = \frac{P_2 - P_3}{(P_1 - P_2) + (P_1 - P_3)} = -\sqrt{3} \tan 2\alpha$$

.....(10)

동압계수도 임의의 각  $\alpha$ 에서  $P_1$  과 양단의 압력  $P_2$  및  $P_3$  값의 차이에 대한 동력학적 압력  $P_d$ 의 비를 나타내는 식 (11)을 유도할 수 있으며 따라서 식 (10) 및 식 (11)을 이용하면 측정압력값과 각  $\alpha$ 로 부터 동력학적 압력  $P_d$ 를 구할 수 있다.

$$\xi_d(\alpha) = \frac{P_d}{(P_1 - P_2) + (P_1 - P_3)} = \frac{1}{2 \cos 2\alpha}$$

.....(11)

정압계수는 중앙 압력 감지구  $P_1$ 과 정

역학적 압력  $P_s$ 간의 차와 동력학적 압력  $P_d$ 와의 관계를 나타내는 식 (12)로 유도된다. 이 때  $P_1, P_2$  및  $P_3$ 는 대기압을 기준으로 한 게이지(gage)압력이며 실질적으로 그 측정값 안에 각각 정역학적 압력  $P_s$ 를 포함하고 있다. 그러므로 정역학적 압력  $P_s$ 는  $\alpha = 0^\circ$ 일 때  $P_2$  및  $P_3$  감지구에서 구해진다. 또한 동역학적 압력  $P_d$ 는 원통에서 무한히 떨어진 위치의 동역학적 압력을 기준으로 하여  $\alpha = 0^\circ$ 일 때  $P_1$ 와  $P_2$  및  $P_3$  차로 구하였으므로  $P_s$ 가 소거된다.

$$\xi_s(\alpha) = \frac{P_1 - P_s}{P_d} = 2 \cos 2\alpha - 1$$

.....(12)

이상과 같이 매개변수인 방향계수, 동압계수, 정압계수는  $\alpha$ 의 함수로 표시될 수 있다.

(2) 5공 피토판의 원리

앞서 언급했듯이 원통형 피토판의 원리는 2차원에 대한 것이므로 2차원 두개를 조합함으로써 3차원 유동장에 적용할 수 있다.

본 연구는 그림 2와 같이 5공 피토판과 3차원 유동장이 이루는 각 중에서 수평각의 변화를 스윙각  $\theta$ 로, 수직각의 변화를 피치각  $\phi$ 로 하고 Kerrebrock가 제시한 무차원 매개변수를 도입하면 이들 무차원 매개변수들은 스윙각  $\theta$ 와 피치각  $\phi$ 에 대해서 다음과 같이 제시된다.

$$\xi_s(\theta) = \frac{P_2 - P_3}{(P_1 - P_2) + (P_1 - P_3)} = -\sqrt{3} \tan 2\theta$$

.....(13)

$$\xi_{sd}(\theta) = \frac{P_d}{(P_1 - P_2) + (P_1 - P_3)} = \frac{1}{2\cos 2\theta}$$

.....(14)

$$\xi_{ss}(\theta) = \frac{P_1 - P_s}{P_d} = 2\cos 2\theta - 1$$

.....(15)

$$\xi_{\phi}(\phi) = \frac{P_4 - P_5}{(P_1 - P_4) + (P_1 - P_5)} = -\sqrt{3}\tan 2\phi$$

.....(16)

$$\xi_{\phi d}(\phi) = \frac{P_d}{(P_1 - P_4) + (P_1 - P_5)} = \frac{1}{2\cos 2\phi}$$

.....(17)

$$\xi_{\phi s}(\phi) = \frac{P_1 - P_s}{P_d} = 2\cos 2\phi - 1$$

.....(18)

### 3. 실험장치 및 방법

#### (1) 실험장치

그림 3은 실험장치의 구성에 대한 개략도이다. 실험장치는 유동을 발생 시키고 또 균일하게 유지시키는 장치 및 자동제측 장치로 구성되며 실험에 사용한 유체는 공기이다.

##### 1) 유동발생장치

유동은 7.5마력 공기압축기로 발생시켰으며 먼지 및 습기를 제거하는 2개의 공기청정기(air cleaner)와 일정한 압력을 유지하는 3개의 레귤레이터(regulator)를 사용하였으며 유동을 균일하게 유지하는 장치로써는 그림 4의 TSI의 노즐을 사용하였다.

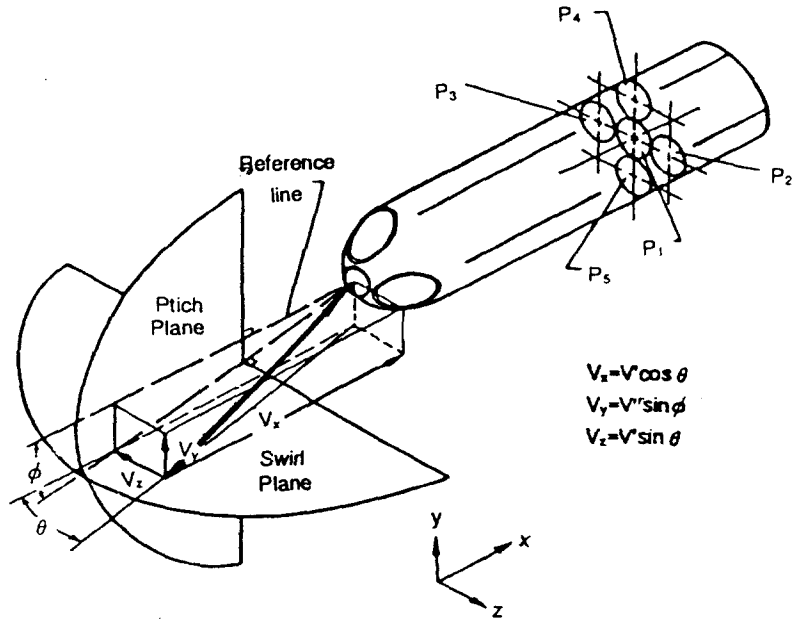


Fig.2 Five-hole pitot tube and swirl or pitch angle

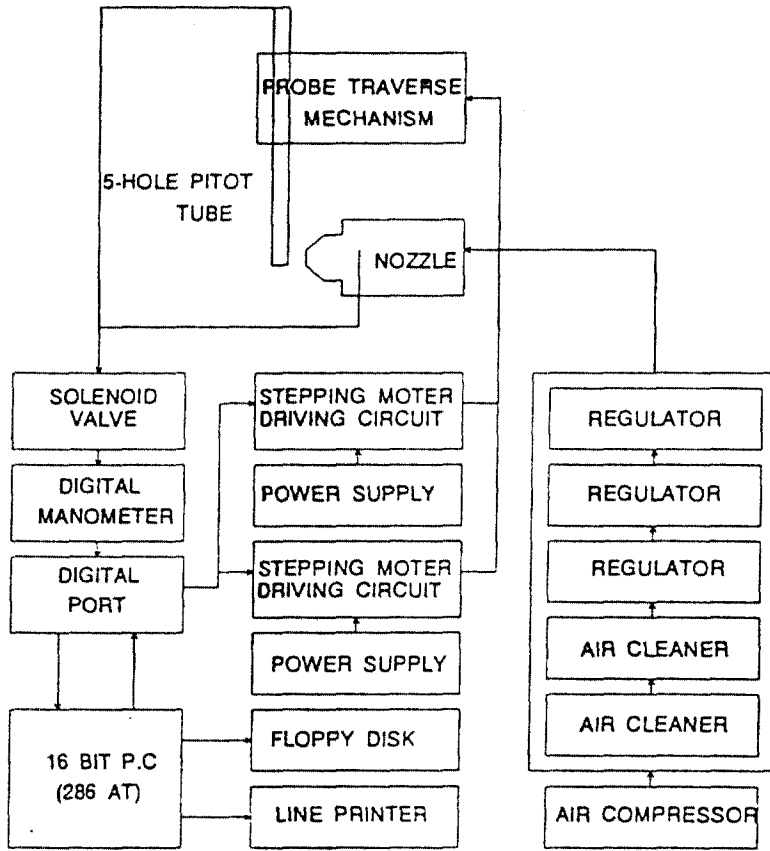


Fig.3 Schematic diagram of five-hole pitot tube calibration system

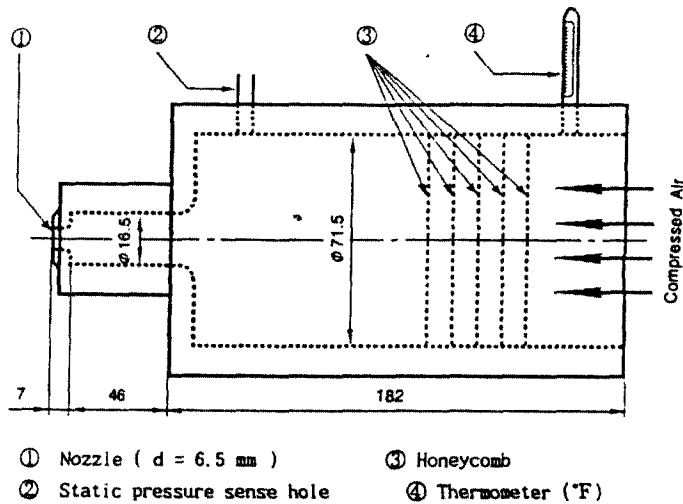


Fig.4 Calibration nozzle

## 2) 자동계측장치

자동계측 장치는 데이터 처리장치 및 피토관 이송장치로 되어있으며 모두 퍼스널 컴퓨터로 제어한다.

## ① 데이터 처리장치

데이터 처리장치는 유동장의 측정위치에서 5공 피토관의 5개 압력 감지구(그림 5의 1,2,3,4,5)와 노즐의 정역확적인 압력 감지구(그림 4의 ②)의 압력을 디지털 압력계(digital manometer)로 읽어 이것을 8255포트(port)를 통하여 퍼스널 컴퓨터에 입력 계산하였다.

실험에 사용한 5공 피토관(그림 5)은 바깥지름 1.0mm, 안지름 0.65mm의 금속관 5개를 써서 각 압력 감지구의 경로로 사용했고 피토관의 머리부분은 지름 6.5mm의 반구형이며 황동으로 제작하였다. 또 디지털 압력계는 하나의 압력밖에 측정할 수 없기 때문에 솔레노이드 밸브(solenoid valve) 5개를 조합하여 전기적인 스위치 조작으로 5공 피토관의 압력 감지구 및 노즐의 정역확적인 압력 감지구를 선택하여 압력을 측정하였다.

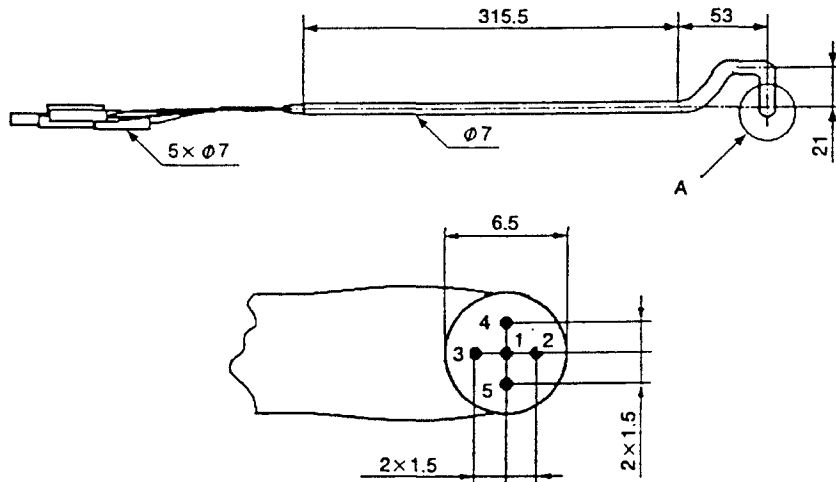
## ② 이송장치

피토관 이송장치는 피토관의 정확한 측정위치를 제어하기 위해 피토관의 스윙각을 조정하는 스테핑모터(stepping moter)와 피치각을 제어하는 스테핑모터, 즉 2개의 스테핑모터와 이들을 제어하는 컨트롤러(controller)로 구성되어 있다.

이들 스테핑모터는 각각의 컨트롤러와 8255포트를 통해서 퍼스널 컴퓨터로 제어한다. 스테핑모터는 모두 1펄스에 1.8° 씩 회전하는데 스윙각 제어 모터는 잇수비 1:36인 기어를 사용하여 피토관을 1펄스당 0.05° 회전하도록 하였고, 피치각 제어 모터는 잇수비 5:9인 기어를 사용하여 1펄스당 1° 씩 회전하도록 정밀 제작하였다.

## (2) 실험방법

실험은 이미 알고 있는 균일한 유동을 발생시키는 노즐 전방에 5공 피토관을 장착한 자동 이송장치를 설치한다. 이 때 노즐의 선단과 5공 피토관 선단의 거리는 6mm이다. 그 다음 5공 피토관의 기준점을 조정하고 측정하고자 하는 위치 및 방향에 따라 스윙각과 피치각을 회전시켜



The extended section of A.

Fig.5 Five-hole pitot tube



측정위치에 고정된 후  $P_s$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  및  $P_5$ 를 측정하고 앞서 제시한 식(13)-(18)을 이용하여 5공 피토관의 특성곡선을 찾는다.

속도에 대한 보정은 TSI에서 제작된 노즐 몸체의 정역학적인 압력 감지구(그림 4-②)를 통해 측정된 수두로 계산한 속도와 노즐 출구(그림 4의①)에서 표준 피토관으로 측정된 동역학적인 압력으로 계산한 속도의 관계가 여러번의 실험결과 속도계수 "1"로 측정되어 속도보정계수의 측정 실험결과의 수록은 생략하였다.

5공 피토관을 제작한 후 피치각의 기준선으로 그림 5에서 피토관의 압력 감지구 1,2 및 3을 지나는 중심선을 피토관에 표시하여 이를 앞으로의 기준선으로 정한다. 이송장치에 있어서 각의 변화에 대한 기준은 노즐의 위에서 아래로 보았을 때 노즐 출구 중심선에서의 유동방향을 이송장치의 스윙각의 기준점( $0^\circ$ )으로 표시하였고 이송장치의 측면에서 본 노즐 중심선에서의 유동방향을 피치각 기준점( $0^\circ$ )으로 표시하였다. 그러므로 5공 피토관의 기준점 설정은 자동 이송장치의 스윙각과 피치각을 각각  $0^\circ$ 로 조절하고 5공 피토관에 표시된 피치각 기준선과 이송장치의 피치각 기준선을 서로 일치시키면 된다.

일정한 유속에서 스윙방향에 대한 실험은 피토관의 피치각을  $0^\circ$ 로 고정하고 노즐 몸체의 압력 감지구의 정역학적인 압력  $P_s$ 를 측정하고 스윙각을  $-20^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지  $2^\circ$ 간격으로 이동시키면서 각각의 방향에 대해 5공 피토관의 압력 감지구(그림 5의 1,2,3)의 압력  $P_1$ ,  $P_2$  및  $P_3$ 를 측정한다. 피치방향에 대한 실험은 스윙방향에 대한 실험과 마찬가지로 먼저 스윙각을  $0^\circ$ 로 고정시키고 정역학적인 압력  $P_s$ 를 측정할 다음 피치각을  $-20^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지  $2^\circ$ 간격으로 이동시키면서 5공 피토관의 압력 감지구(그림 5의

1,4,5)의 압력  $P_1$ ,  $P_4$  및  $P_5$ 를 측정하였다. 위의 모든 과정은 G.W Basic Version 3.23 언어로 작성된 프로그램에 의하여 제어하며 계산된다. 실험 프로그램의 흐름도는 그림 6과 같다.

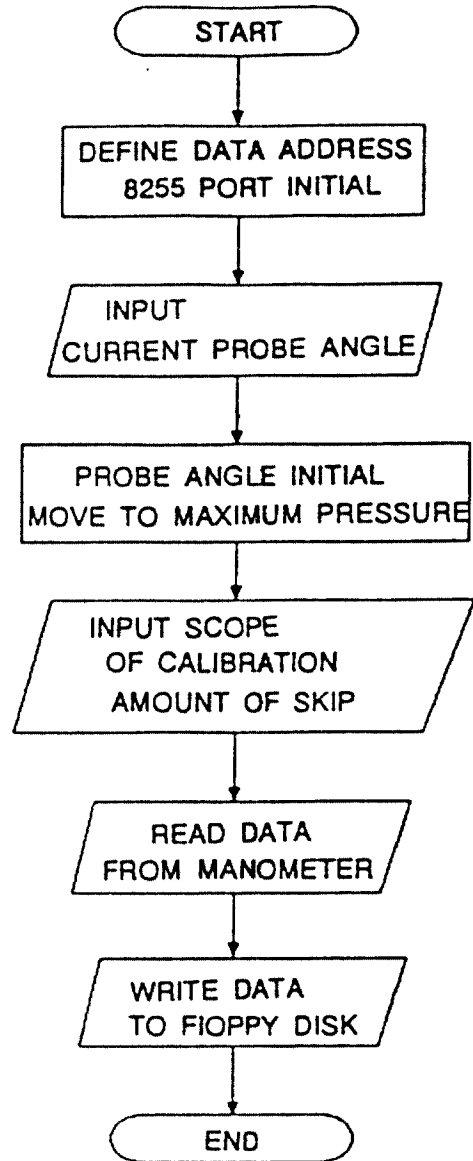


Fig.6 Calibration experiment's flow chare

### 4. 실험결과 및 고찰

디지털 압력계로 측정된 실험 데이터는 식(13)-(18)에 의하여 무차원 매개변수  $\xi$ ,  $\xi_d$  및  $\xi_s$  값을 계산하고 이를 피치각  $\phi$  와 스윙각  $\theta$  에 대하여 각각 그림 7과 그림 8로 나타내었다. 그림에서 횡축은 5공 피토관의 피치각  $\phi$  및 스윙각  $\theta$  를 나타내고 종축은 무차원 매개변수  $\xi$ ,  $\xi_d$  및  $\xi_s$  를 나타내었다. 그림에서 작은 원은 실험값이며 실선은 실험값으로부터 구한 최적곡선이다. 그림 7, 8에서 방향계수  $\xi_p$ ,  $\xi_s$  는 원점을 중심으로 윗방향으로 조금 벗어난 경향을 보이고 있다.

그림 7의 동압계수  $\xi_{pd}$  및 정압계수  $\xi_{ps}$  는 피치각  $\phi = 0^\circ$  을 기준으로 대칭을 이루고 있으며 그림 8의 동압계수

$\xi_{sd}$  은 측정값과 최적곡선이 스윙각  $\theta = 0^\circ$  부근에서 잘 일치하고 있으나 스윙각이 증가할수록 크게 차이가 나고 있다. 그러나 정압계수  $\xi_{ss}$  는 전 구간에서 측정 실험값과 최적곡선이 잘 일치하고 있다. 위와같은 현상이 나타나는 가장 큰 이유는 압력 감지구의 배열위치의 부정확과 반구형의 형상 및 표면거칠기에 기인하는 것으로 고려된다. 이러한 오차는 제작상의 오차이므로 충분히 예상된 것이며 이러한 이유에서 피토관은 반드시 검정실험에 의한 검정곡선이 필요하다. 그림에서 무차원 매개변수의 함수식값은 식(13)-(18)로 나타내야 하나 앞서 지적한 이유로 차이점이 발견된다. 앞으로 실험하는데 있어서 이 피토관을 사용하기 위해서는 허용오차 범위를 정해야 할 것이며 이 범위 안에서 검정곡선을 이용하면 이 피토관을 이용하는데 문제점이 없으리라 생각한다.

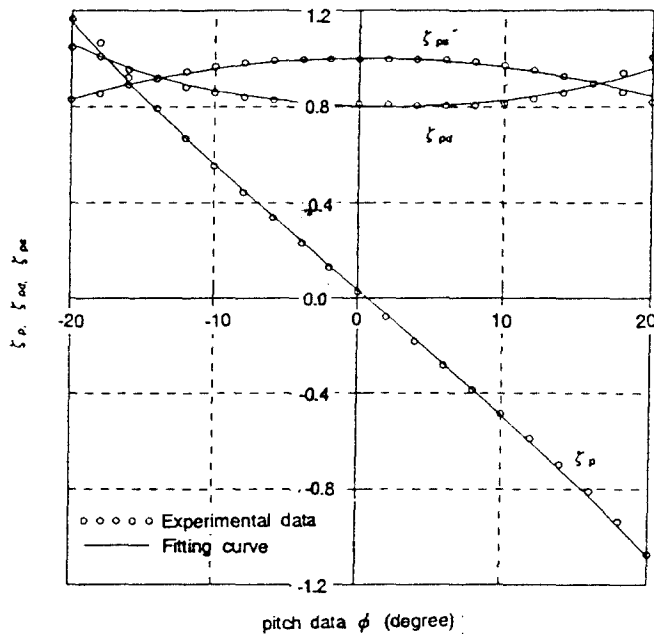


Fig.7 Vertical dimensionless factors

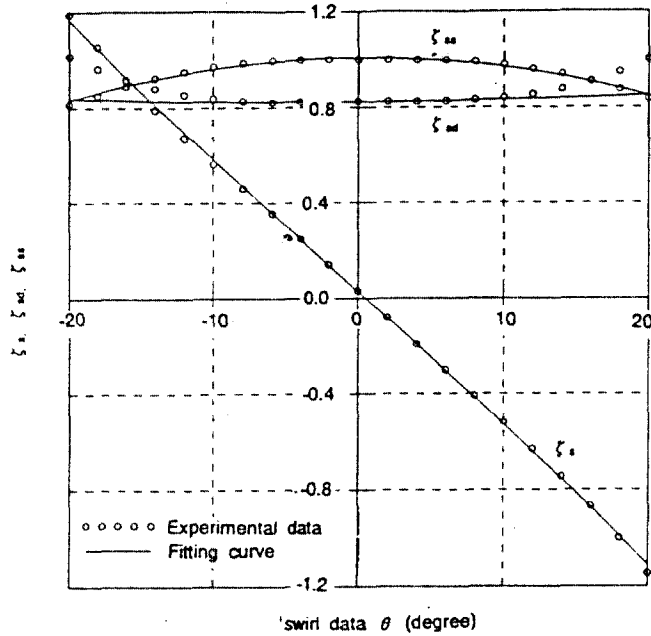


Fig.8 Horizontal dimensionless factors

## 5. 결 론

## 참고문헌

제작한 5공 피토관의 피치각 및 스윙각의 변화에 따르는 데이터로부터 무차원 매개변수들의 함수를 계산한 결과 다음과 같은 검정곡선식을 얻었다.

### 1) 스윙방향

$$\xi_s(\theta) = -3.2213 \tan(0.97512 \theta) + 0.02859$$

$$\xi_w(\theta) = \frac{1}{1.4589 \cos(1.9412 \theta + 0.5)} + 0.12$$

$$\xi_n(\theta) = 2.4569 \cos(1.065 \theta - 0.45) - 1.45$$

### 2) 피치방향

$$\xi_p(\phi) = -2.149 \tan(1.3733 \phi) + 0.035$$

$$\xi_w(\phi) = \frac{1}{1.33055 \cos(1.904 \phi + 4)} + 0.05$$

$$\xi_n(\phi) = 2.4536 \cos(1.065 \phi - 0.4) - 1.45$$

1. M.A.Wright, "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, 1970, pp. 356-362.
2. Allen L. Treaster and Adam M.Yocum, "The calibration and application of five-hole probe", Proceedings of the 24th International instrumentation symposium, Inst. Soc. of America (ISA) Albuquerque, May, 1978.
3. A.H.Epstein, J.L.Kerrebrock and W.T. Thompkins, Jr., "A miniature high frequency sphere probe", Proceedings of ASME symposium on measurement methods in Rotating components of Turbomachinery, editors B.Lakshmin

- arayna and P.Runstadler, ASME, 1980, pp. 91-98
4. Victor L.Streeter and E.Benjamin Wyllie 원저, 손병진·조강래 공역, “유체역학”, 제8판, 회중당, pp. 335-360