

## 5공 피토관을 이용한 3차원 유동장 측정(2) -적용범위-

정의준 · 이원규\* · 이성재\*\*  
기계공학과

### <요 약>

이미 알고 있는 속도와 5공 피토관의 검정식을 이용하여 측정한 속도를 비교함으로써 검정식의 사용범위를 제시하였으며 이 범위 안에서 유동의 측정이 이루어질 수 있도록 P.C. 및 스테핑 모터를 사용한 자동이송장치 및 소프트웨어를 개발하여 측정의 정확도를 높였다.

---

## The Measurement for the Three-Dimensional Flow Field using the Five-Hole Pitot Tube (2) -Range of Measurement-

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

### <Abstract>

We compared known velocities with the calculating velocities using the calibration equation of 5-hole pitot tube and then suggested the range of measurement.

We constructed the automatic traversing system and developed the software of this system for the range established. As the result, we improved the accuracy of measurement.

---

\* 울산대학교 생산기계공학과 조교수

\*\* 울산대학교 기계공학과 대학원

## 기호설명

$P_1 \sim P_5$	: 피토관에 의한 측정압력
$P_d$	: 측정 유동장의 동압
$P_d'$	: 스월각 동압
$P_d''$	: 피치각 동압
$P_s$	: 측정유동장의 정압
$P_s'$	: 게이지 정압
$V$	: 측정 유동장의 속도
$V'$	: 스월각 속도
$V''$	: 피치각 속도
$V_x$	: X방향 속도성분
$V_y$	: Y방향 속도성분
$V_z$	: Z방향 속도성분
$\theta$	: 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

유체를 취급하는 모든 분야에 있어서 유체유동의 거동을 정확히 규명하는 것은 유동구조를 이해하는 데 대단히 중요하다. 유동구조를 파악하면 이를 바탕으로 하여 유동손실을 줄일 수 있고 유동에너지 효율을 극대화시킬 수 있으며 따라서 유체를 사용하는 기계의 성능을 향상 시키는데 큰 도움을 준다. 유동구조의 파악은 정확한 측정이 선행되어야 하며 이러한 측정장치에는 편리성과 간편성의 장점을 갖고 있는 5공 피토관이 적합하다.<sup>(1),(2),(3),(4),(5)</sup> 5공 피토관의 직접 설계제작하여 사용하는 데는 검정식이 필요하며 이 검정식에는 허용오차를 감안하여 사용범위를 정해야 한다.

본 연구에서는 직접 설계제작한 5공 피토관의 사용범위를 제시하고 P.C. 및 스테핑 모터를 이용하여 이 사용범위 안에서 유동의 방향 및 크기를 찾을 수 있는 소프트웨어를 개발하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 1) 실험장치

5공 피토관은 검정실험으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 검정식을 구할 수 있고 이 검정식을 이용하면 미지의 유동장에서 압력과 속도의 측정이 가능하다.

유동장의 측정에 사용된 실험장치(그림 1)는 검정식을 구할 때 사용한 장치를 이용하였다.



Fig.1 Experiment system

## 2) 실험방법

실험방법은 먼저 5공 피토관을 균일한 유동장이 형성되는 내경 6.5mm 노즐 전방 6mm의 위치에 압력 감지구가 수평이 되도록 이송장치에 고정시킨다. 이때 5공 피토관의 압력 감지구는 검증실험식을 구할 때 기준으로 설정해 놓은 위치와 일치시킨다.<sup>(1)</sup>

이와같이 설치된 5공 피토관에 공기압축기로부터 나오는 유량을 노즐장치에 부착되어있는 유량조절 밸브(flow regulator)로 유체의 속도를 28m/sec, 40m/sec 및 49m/sec로 변화시키면서 각 속도에 대하여 스윙방향 및 피치방향의  $P_s'$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  및  $P_5$ 를 각각 측정한다.

피치방향의 측정은 스윙각을  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  및  $20^\circ$ 로 고정하고 각 스윙각에 대하여 피치각을  $-20^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 변화시키면서 각 위치에서의  $P_s'$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  및  $P_5$ 를 측정한다.

스윙방향에 대해서도 피치각을  $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  및  $20^\circ$ 로 고정하고 각 피치각에 대하여 스윙각을  $-20^\circ$ 에서  $20^\circ$ 까지  $10^\circ$  간격으로 변화시키면서 피치방향과 같은 방법으로 측정을 반복한다.

위의 모든 과정은 G.W Basic Version 3.23언어로 작성된 컴퓨터 프로그램에 의해 제어되며 각각의 방향에서 읽은 디지털 압력계값을 데이터 파일로 저장한다. 측정에 이용된 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 그림 2과 같다.

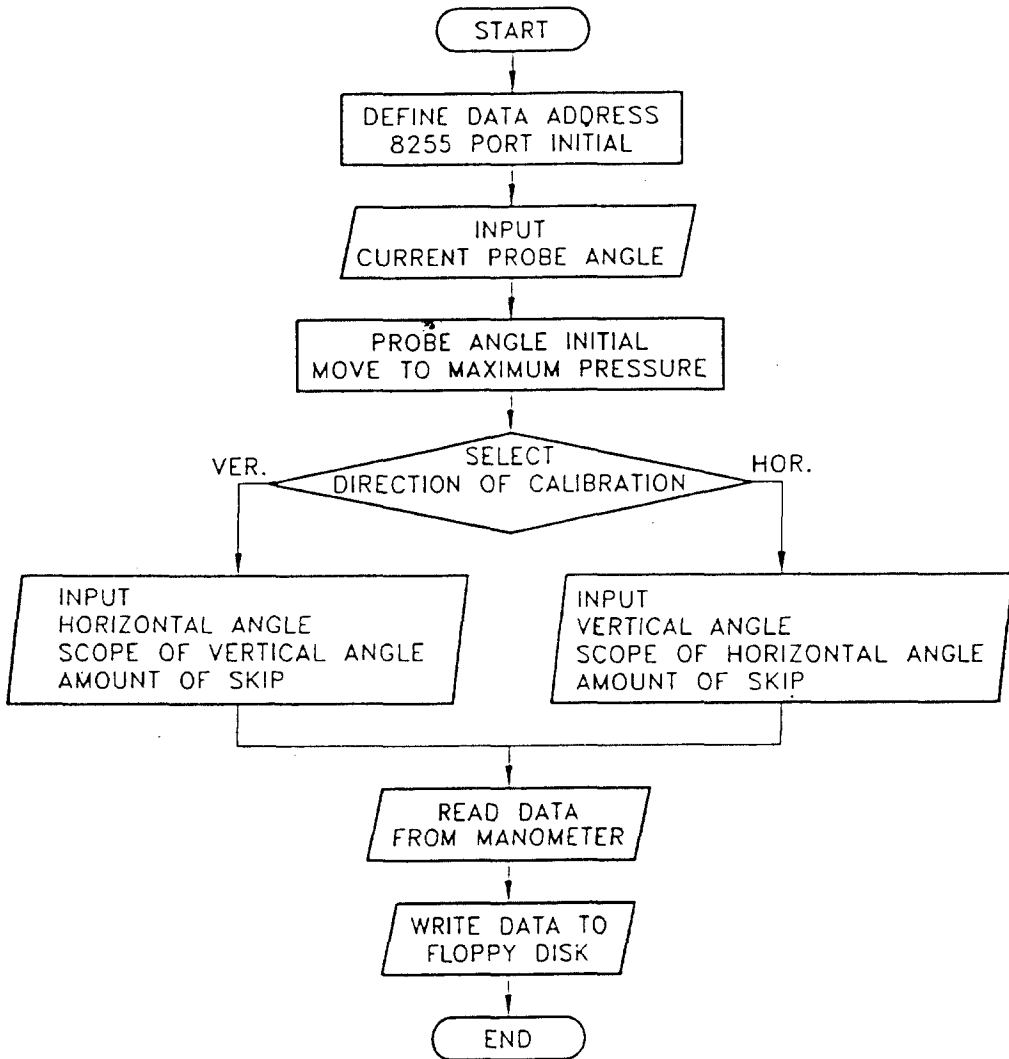


Fig.2 Compensation experiment's flow chart

### 3. 계산방법

검정실험에서 사용된 무차원 매개변수인 방향계수 ( $\xi$ ), 동압계수 ( $\xi_d$ ), 정압계수 ( $\xi_s$ )들은 식(1)-식(3)으로 정의된다.<sup>(1),(3)</sup>

$$\xi = \frac{P_2 - P_3}{(P_1 - P_2) - (P_1 - P_3)} \quad \text{-----(1)}$$

$$\xi_d = \frac{P_d}{(P_1 - P_2) - (P_1 - P_3)} \quad \text{-----(2)}$$

$$\xi_s = \frac{P_1 - P_s}{P_d} \quad \text{-----(3)}$$

그림 3 및 그림 4는  $\theta$  및  $\phi$  방향에 따라 검정실험에서 얻어진 데이터들이며 이 데이터들의 최적곡선을 검정식인 식(4)-식(9)로 나타내었다.<sup>(1)</sup>

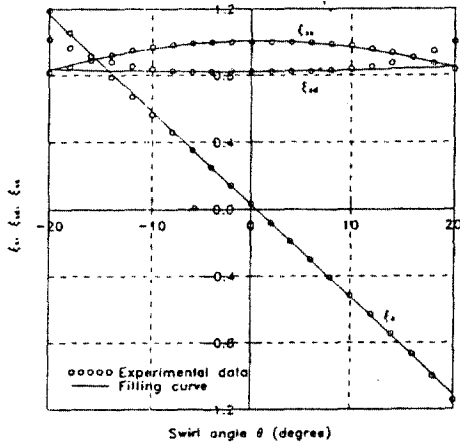


Fig.3 Vertical dimensionless factors

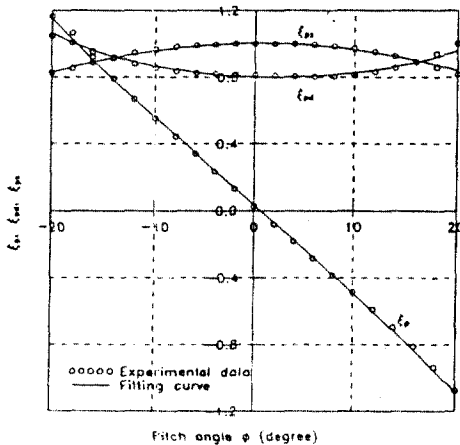


Fig.4 Horizontal dimensionless factors

스윙방향으로는

$$\xi_s(\theta) = -3.2213 \tan(0.97512\theta) + 0.02859 \quad (4)$$

$$\xi_w(\theta) = \frac{1}{1.4589 \cos(1.9412\theta + 0.5)} + 0.12 \quad (5)$$

$$\xi_n(\theta) = 2.4569 \cos(1.065\theta - 0.45) - 1.45 \quad (6)$$

이고 피치방향으로는

$$\xi_s(\phi) = -2.149 \tan(1.3733\phi) + 0.035 \quad (7)$$

$$\xi_w(\phi) = \frac{1}{1.33055 \cos(1.904\phi + 4)} + 0.05 \quad (8)$$

$$\xi_n(\phi) = 2.4536 \cos(1.065\phi - 0.4) - 1.45 \quad (9)$$

이다.

실험에 의해 얻어진 데이터를 검정식(4)-(9)에 대입하여 각각의 스윙각(-20°, -10°, 0°, 10°, 20°) 및 피치각(-20°, -10°, 0°, 10°, 20°)을 기준점으로 하였을 때 유체속도의 크기 및 그 방향을 구한다.

먼저  $P_1, P_2$  및  $P_3$ 를 식(4)에 대입하여 스윙각  $\theta$ 를 구한다. 다음으로  $P_1, P_2, P_3$  및  $\theta$ 를 식(5)에 대입하여 그 스윙각에서 동력학적 압력( $P_d'$ )을 구한다. 그리고  $P_1, \theta$  및  $P_d'$ 를 식(6)에 대입하여 그 스윙각에서의 정역학적 압력( $P_s'$ )을 구한다.

본 측정에서 측정위치인 노즐 전방 6mm에서는 노즐을 나오는 유동의 유선이 나란하고 직선이므로 이때의 정역학적 압력은 대기압과 같다. 본 연구에서 측정되는 압력은 모두 게이지 압력으로 취급하므로  $P_s' = 0$ 으로 간주한다.

실제 계산에서는  $P_d'$ 를 식(5) 뿐만 아니라 앞서 제시한 이유로 식(6)에서도 구할수 있다. 식(5)과 식(6)에서 구한 두개의  $P_d'$ 값은 서로 같은 값이어야 하지만 실험상의 오차로 인하여 같아 질 수 없다.

이러한 오차를 줄이는 방법으로 식(5)과 식(6)에서 구한 두개의  $P_d'$ 의 평균값을  $P_d'$ 값으로 취하여 실험의 정확성을 기하였다.

또 피치방향에 대해서도 식(7)에  $P_1, P_4$  및  $P_5$ 를 대입하여 피치각  $\phi$ 를 구한다. 다음에  $P_1, P_4, P_5$  및  $\phi$ 를 식(8)과 식(9)에 대입하여 스윙방향에서와 마찬가지로 방법으로 그 피치각에서의 동력학적 압력 ( $P_d''$ )을 구한다.

앞에서 구한 동력학적 압력  $P_d'$  및  $P_d''$ 를 이용하여 각 각도(스윙각 및 피치각)에서의 속도벡터  $V$  및  $V'$ 를 구하고 두 속도벡터로부터 3차원 속도벡터의  $X, Y, Z$  성분  $V_x, V_y$  및  $V_z$ 를 구한다. 즉  $V_x = V \cos \theta, V_y = V' \sin \phi, V_z = V' \sin \theta$ 이다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구는 검정실험을 거친 5공 피토판으로 이미 알고있는 유체속도를 5가지 스윙각( $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ) 및 5가지 피치각( $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ ) 중 고정된 한 스윙각 및 피치각에서 각각 피치각 및 스윙각을 변화시키면서 5개 감지구의 동력학적 압력( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ ) 및 정역학적 압력( $P_s'$ )을 측정하여 스윙각 및 피치각에 따르는 유체속도를 확인 하였다.

##### 1) 스윙각

그림 5에서 그림 9까지는 5가지 스윙각( $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ )에서 피치각에 따르는 유체 속도를 나타내고 있다.

스윙각을  $-10^\circ, 0^\circ$  및  $10^\circ$ 에 고정시켰을 때(그림 6,7,8) 피치각이  $\pm 10^\circ$  범위 내에서의 측정 속도는 기준 속도에 대해 그림 8(스윙각  $0^\circ$ )의 경우 기준 피치각  $10^\circ$ 의 기준 속도  $40\text{m/sec}$ 에서 최대 오차 2.5%를 나타내었지만 전 범위에 걸쳐 비

교적 잘 일치한다. 이 범위에서 기준으로 정한 피치각에 대하여 측정 피치각도를 살펴보면 그림 6(스윙각  $-10^\circ$ )의 경우 기준 속도  $49\text{m/sec}$ 의 기준 피치각  $10^\circ$ 에서 최대 오차  $0.6^\circ$ 로 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 피치각이  $\pm 20^\circ$ 일때 측정 속도는 기준 속도에 대하여 오차 4.5~12%로 큰 오차를 나타냈고 측정 피치각도 기준으로 정한 피치각에 대하여 최대  $1^\circ$ 의 큰 오차를 보였다.

스윙각을  $-20^\circ$  및  $20^\circ$ 에 고정시켰을 때(그림 5,9)는 측정 속도 및 측정 피치각이 기준 속도 및 기준 피치각에 대하여 전 범위에 걸쳐 큰 차이를 나타내고 있다.

이러한 결과는 그림 3에서 알 수 있듯이 피치각이  $-10^\circ \leq \phi \leq 10^\circ$ 인 범위내에서는 방향계수, 정압계수 및 동압계수의 실제 측정값과 검정실험식 곡선이 잘 일치하고 있으나 피치각이  $-20^\circ$  및  $20^\circ$ 에서는 방향계수, 정압계수 및 동압계수의 측정값과 검정실험식 곡선이 상당한 차이를 나타내기 때문으로 생각된다.

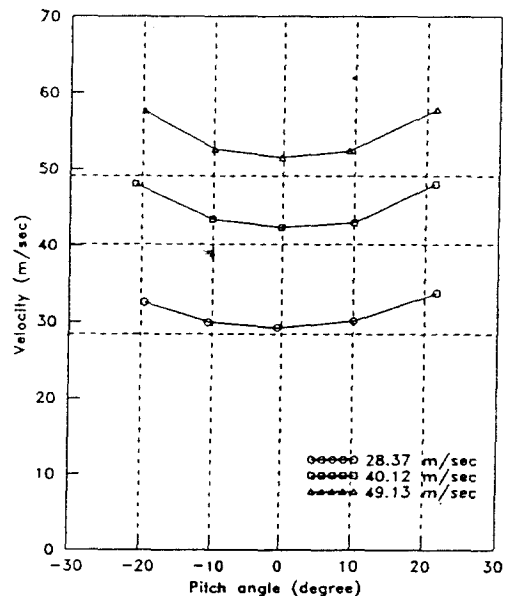


Fig.5 Calculated velocity at swirl angle  $\theta = -20^\circ$

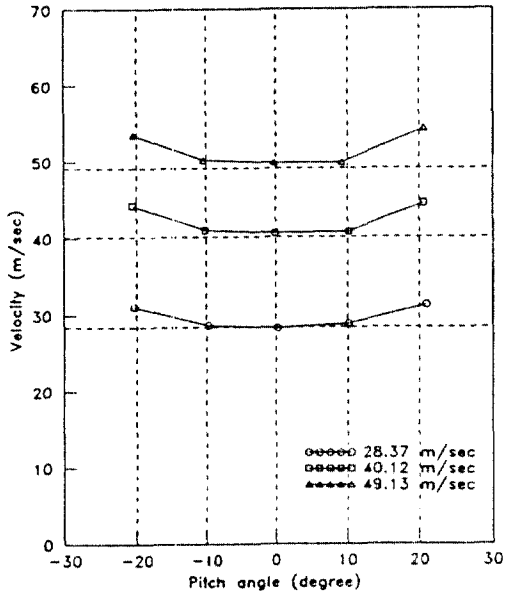


Fig.6 Calculated velocity at swirl angle  $\theta = -10^\circ$

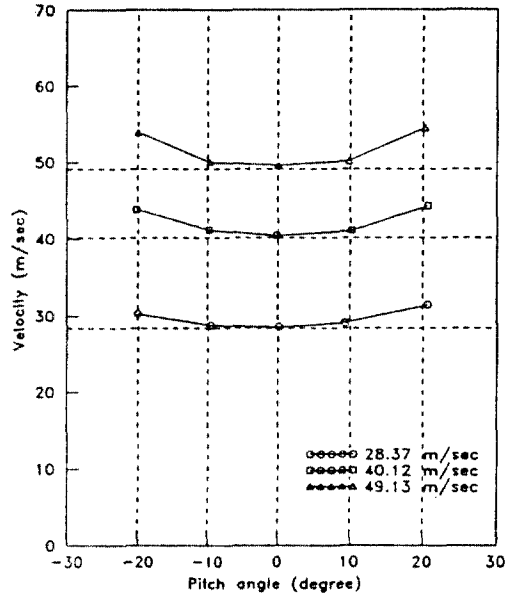


Fig.8 Calculated velocity at swirl angle  $\theta = 10^\circ$

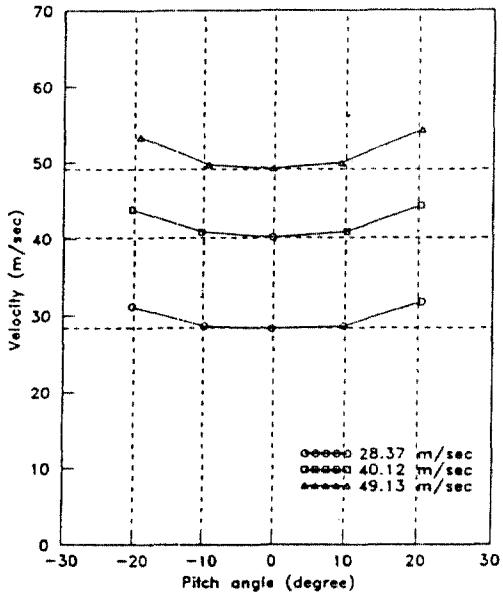


Fig.7 Calculated velocity at swirl angle  $\theta = 0^\circ$

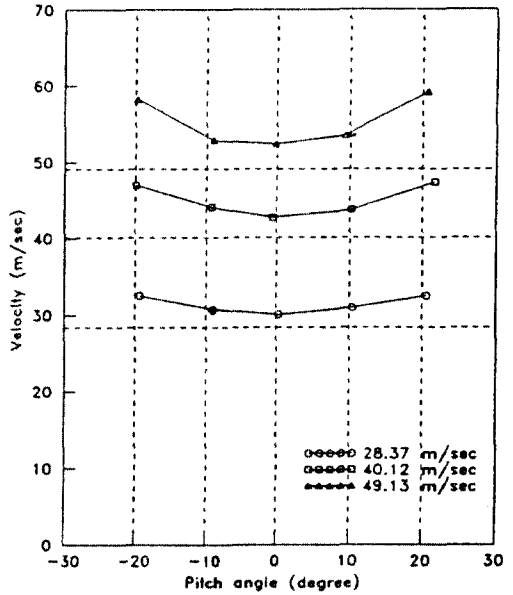


Fig.9 Calculated velocity at swirl angle  $\theta = 20^\circ$

그림 10에서 그림 14까지는 5가지 피치각(-20°, -10°, 0°, 10°, 20°)에서 스윙각에 따르는 유체 속도를 나타내고 있다.

피치각을 -10°, 0° 및 10°에 각각 고정 하였을 경우(그림 11, 12, 13) 스윙각이 ±10° 범위 내에서의 기준 스윙각에 대한 측정 스윙각의 오차는 그림 11(피치각 -10°)의 경우 기준 속도 49m/sec의 기준 스윙각 -10°에 대하여 최대 오차 0.7°가 나타났지만 비교적 잘 일치한다. 또 같은 범위에서 기준 속도에 대한 측정 속도의 오차도 그림 11(피치각 -10°)의 경우 기준 스윙각 10°의 기준 속도 40m/sec에서 최대 오차 2.2%가 나타났지만 전 범위에 걸쳐 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 스윙각이 ±20°일때 기준 스윙각에 대한 측정 스윙각의 최대 오차는 1.5°로 크게 나타났고 기준 속도에 대한 측정 속도의 최대 오차도 12%로 크게 나타났다.

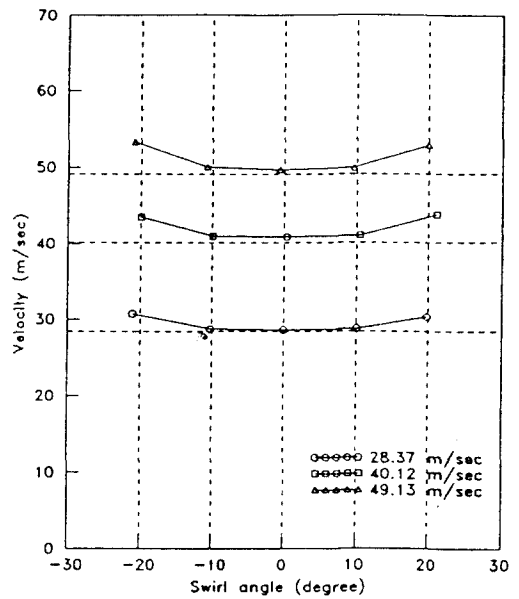


Fig.11 Calculated velocity at pitch angle  $\phi = -10^\circ$

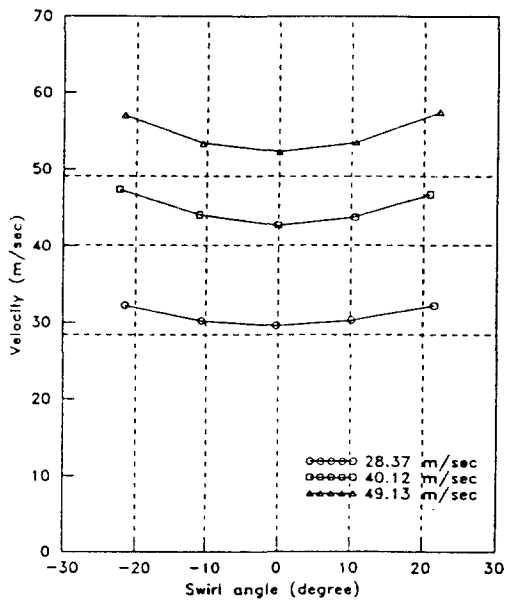


Fig.10 Calculated velocity at pitch angle  $\phi = -20^\circ$

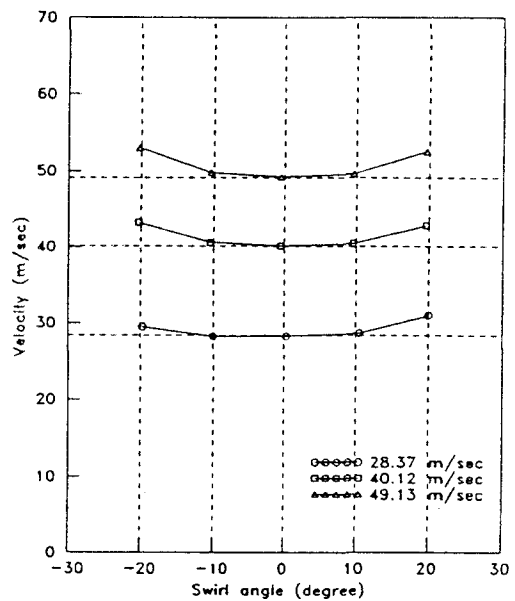


Fig.12 Calculated velocity at pitch angle  $\phi = 0^\circ$



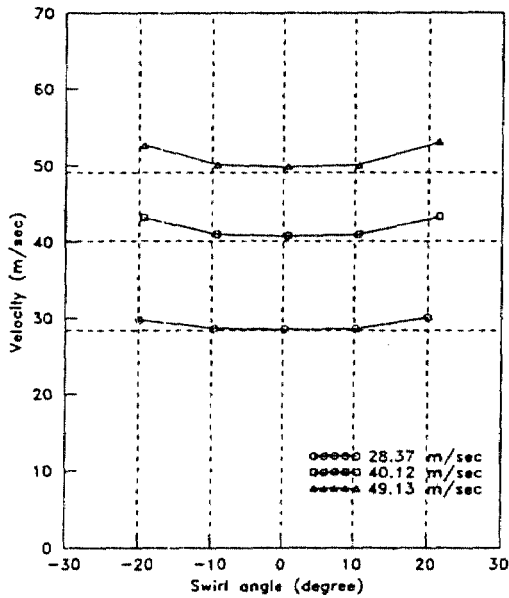


Fig.13 Calculated velocity at pitch angle  $\phi = 10^\circ$

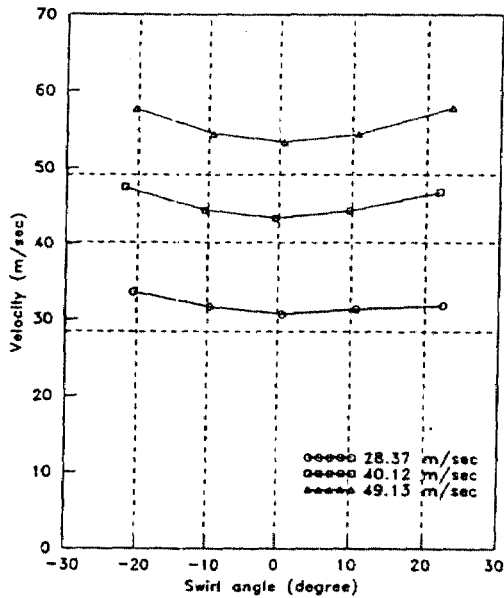


Fig.14 Calculated velocity at pitch angle  $\phi = 20^\circ$

피치각을  $-20^\circ$  및  $20^\circ$  에 고정시켰을

경우(그림 10,14)는 기준 속도 및 기준 스윙각에 대한 측정 속도 및 측정 스윙각의 오차는 전 범위에 걸쳐 큰 오차를 나타내고 있다.

이와 같은 현상은 그림 4에서 스윙각이  $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  일 때 검정실험식 곡선과 동압계수, 정압계수 및 방향계수의 실제 측정값이 거의 일치하나 스윙각이  $-20^\circ$  및  $20^\circ$  일 때는 검정실험식 곡선과 동압계수, 정압계수 및 방향계수의 실제 측정값의 오차가 크기 때문으로 고려된다.

본 연구의 결과를 살펴보면 피치각 및 스윙각이  $\pm 10^\circ$  범위에서는 그림 3과 그림 4에서 알 수 있듯이 검정실험식 곡선과 실제 측정값이 거의 일치하므로 미지 유동장의 압력 및 속도 측정시 유동방향에 대한 피치각 및 스윙각의 최대 속도가 나타나는 위치로 5공 피토관을 자동이송시키는 자동이송장치 및 이를 제어하는 소프트웨어를 개발하면 본 검정실험식을 이용하여 보다 정확한 유동장의 3차원 압력 및 속도를 측정할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 유동방향을 기준으로 하여 피치각 및 스윙각이  $\pm 5^\circ$  범위내에서 유동의 방향 및 크기를 측정할 수 있는 자동이송장치 및 소프트웨어를 개발하여 그 흐름도를 제시한다.(그림 15)

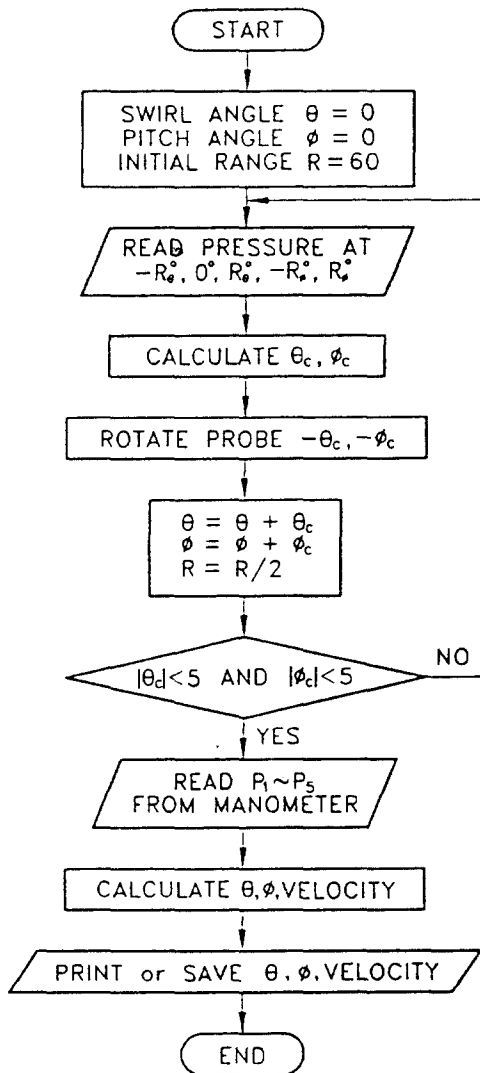


Fig.15 Improved measurement's flow chart

## 6. 결 론

검정실험의 결과로 실험에 사용된 5공 피토관의 적용범위를 임의로 정할 수 없으므로 본 실험에서 피치각 및 스윙각을 변화시키면서 속도의 실제값과 검정식을 통한 값을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스윙각을 사용할 수 있는 범위는  $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ 이며 이 범위에서 측정 속도는 기준으로 정한 피치각의 기준 속도에 대하여 최대 오차는 2.5%이다.
2. 피치각을 사용할 수 있는 범위는  $-10^\circ \leq \phi \leq 10^\circ$ 이고 이 때 기준으로 정한 스윙각의 기준속도에 대한 측정 속도의 최대 오차는 2.2%이다.
3. 스윙각 및 피치각이  $0^\circ$  일 때는 속도의 실제 측정값은 기준속도에 대하여 잘 일치한다.

## 참고문헌

1. 정의준, 이원규, 이성재, "5공 피토관을 이용한 3차원 유동장 측정(1) -검정식-", UOU report, Vol.26, No.1, 1995.
2. K.DAU, M.McLeod and D.Surry, "Two probes for the measurement of the Complete velocity vector in subsonic flow". Aeronautics Journal, Vol.72, 1968, pp. 1006-1008.
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.Lakshminarayana and P.Runstadler, ASME, 1980, pp. 91-98
4. 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.
5. 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.