

## 단일경사열선을 이용한 3차원 유동장의 자동측정방법

정의준 · 김무현 · 김수태\*  
기계공학과

### 〈요 약〉

퍼스널 컴퓨터 및 스텝핑 모터를 사용한 자동계측장치를 개발하였고 이러한 자동계측장치를 이용하여 단일경사열선으로 유동장의 3차원 속도성분을 측정하였다. 검정실험을 통해 얻어진 검정실험식의 사용범위를 알아보기 위해 검정실험식으로부터 구한 속도, 스월각 및 피치각들을 실제 측정값들과 비교 검토하였다.

---

## An Automatic Measuring Method for Three-Dimensional Flow Field by Single Slanted Hot Wire

Chung, Wui-jun · Kim, Moo-Hyun · Kim, Soo-Tae\*  
Dept. of Mechanical Engineering

### 〈Abstract〉

The 3-D velocity components were measured by single slanted hot wire. An automatic measuring system which was controlled by means of a personal computer and stepping motors was developed. Absolute velocity, swirl angle and pitch angle are calculated from the outputs of hot wire anemometer using the calibration equations.

The difference between the measured and calculated values was investigated.

---

\* 창원대학교 기계공학과 조교수

본 논문은 1990년 울산대학교 대학연구비에 의해 이루어진 연구결과임.

## 1. 서 론

와류와 같은 2차유동, 틸새에서 나타나는 누설유동, 원심력과 코리올리스(Coriolis) 힘의 영향을 받는 경계층내의 3차원 유동과 같은 복잡한 유동이 복합적으로 어우러진 유동장에 있어서 3차원 속도의 정확한 측정을 통한 유동장의 이해는 자연과학적 측면 뿐만 아니라 공학적인 측면에서 광범위하게 응용될 수 있으며 따라서 정확한 측정에 의한 유동장의 이해는 이러한 복합적인 유동이 발생하는 유체기계의 성능을 향상시키는 데 결정적 역할을 할 수 있다.

3차원 유동장을 측정하는 대표적인 기구로는 레이저 도플러 유속계(LDV), 5공 피토폴관(Five-Hole Pitot Tube), 열선풍속계(Hot Wire Anemometer)들이 있다. 이중 열선풍속계는 유동장내의 속도, 온도, 밀도 등에 대한 순간치 및 평균치를 다른 측정기구보다 연속적으로 용이하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 단일경사열선은 열선이 차지하는 검사체적이 적어 전단율이 큰 유동의 측정에 유리하며 교체가 손쉽고 취급이 간단한 이점을 갖고 있다.

1972년 Whitefield<sup>1)</sup>은 프로브(probe) 중심축에 대한 54.7° 기울기를 갖는 단일경사열선을 회전시켜 3차원 속도를 측정했으나 이 측정에서는 측정기구인 정확한 54.7°의 경사열선을 제작하는데 어려움이 있다. 1977년 Hirsh와 Kool<sup>2)</sup> 및 Schmidt와 Okiishi<sup>3)</sup>는 열선의 냉각정도를 열선의 요우(yaw)각, 피치(pitch)각 및 유체속도들을 포함하는 2차함수의 실험식으로 제시하였다. 이 실험식은 임의각의 단일경사열선에 적용할 수 있어 단일경사열선의 사용범위를 확장시켰다. 1982년 Inoue<sup>4)</sup>는 Hirsh<sup>2)</sup> 및 Schmidt<sup>3)</sup>에서 제시한 변수들을 cosine함수로 표시되는 실험식으로 나타냈으며 이 실험식을 근거로 하여 주기적인 유동장을 측정하는 데 매우 유익한 주기적 다짐추출방법

(periodic multi-sampling method)이라는 새로운 개념을 도입하여 단일경사열선의 큰 단점이었던 측정시간을 단축시켰다. 국내에서도 단일경사열선을 이용한 유동장 측정에 관한 관심이 고조되고 있다.<sup>5)</sup>

유동장의 정확한 측정은 열선의 정확한 검정이 선행되어야만 하며 이렇게 되기 위해서는 순간적인 데이터를 처리할 수 있는 장치와 측정위치까지 열선의 이동을 정확하게 제어할 수 있는 장치의 개발이 먼저 이루어져야 한다. 그러므로 본 연구에서는 60kHz 샘플링 주파수(sampling frequency)를 갖는 데이터 처리장치와 열선프로브의 이송을 스텝핑 모터로 제어하는 이송장치로 구성된 자동계측장치를 개발하고 이 장치를 이용하여 단일경사열선의 검정방법 및 측정방법을 확립하고자 한다.

## 2. 열선의 원리

### 2-1. 열선풍속계의 기본원리

열선에 의한 유동측정의 기본원리는 원주모양인 열선과 열선 주위 유체사이에 일어나는 열전달 원리를 이용한 것이다. 열선과 유체사이의 열전달은 전도 및 자연대류에 의한 영향은 무시하고 강제대류에 의해 이루어 진다고 볼 때 정상상태 열전달 평형식은

$$\Gamma \cdot R_w = h \cdot \pi \cdot d \cdot l (T_w - T_g) \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서 좌변은  $R_w$ 의 저항을 갖는 열선에 흐르는 전류  $I$ 에 의한 열량이며 우변은 고온의 열선과 저온의 유체사이의 온도차( $T_w - T_g$ )로 인해 직경  $d$ , 길이  $l$ 인 열선의 표면으로부터 대류열전달계수  $h$ 에 의해 냉각되는 열량이다.

식 (1)을 Nusselt 수를 포함하는 식으로 나타내면

$$I^2 \cdot R_w = Nu \cdot K_g \cdot \pi \cdot l (T_w - T_g) \quad (2)$$

이다. 여기서  $K_g$ 는 유체의 열전도 계수이다.

Nusselt수는 일반적으로 다음과 같은 무차원군으로 나타낼 수 있다.

$$Nu = Nu(Re, Pr, Gr, \Delta T_w / T_g V^2 / (C_p \Delta T_w), \dots)$$

열선의 열전달에 대한 Nusselt수를 위의 무차원군으로 완전하게 나타내는 것은 불가능하다. 그러나 많은 학자들이 여러 가지 가정하에서 유동장에 수직한 무한히 긴 원통형 열선의 순간적인 열전달 반응에 대하여 Nusselt수로 나타내는 실험식을 제시하였다. 이러한 실험식을 식(2)에 대입하고 열선의 저항과 온도관계를 이용하면 비압축성 유체의 경우 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$I^2 \cdot R_w / (R_w - R_g) = A + B \cdot V^n \quad (3)$$

여기서  $V$ 는 유체속도이며  $A$ ,  $B$  및 상침자  $n$ 은 열선 및 유체의 특성에 의해 결정되는 상수이다. 또  $R_w$  및  $R_g$ 는 각각  $R_w = R_o \{1 + \alpha(T_w - T_o)\}$  및  $R_g = R_o \{1 + \alpha(T_g - T_o)\}$ 이다.

열선은 백금, 이리듐, 백금과 이리듐 혹은 로듐의 합금 및 텅스텐을 재료로 하여 1.3-25 $\mu$ m의 지름으로 만들어지며 전류에 의해 가열되고 주위 유체에 의하여 냉각된다. 현재는 일정온도 풍속계(CTA)가 주로 사용되며 이 풍속계의 원리는 유체의 속도가 달라짐에 따라 열선의 냉각정도가 변화하는데도 불구하고 열선의 온도를 일정하게 유지시키는 것이다. 열선을 일정온도로 유지시키기 위해서는 열선에 공급되는 전류를 유체속도의 변화에 따라 변화시켜야 하며 이 때 전류의 변화는 전압의 변화를 수반한다. 이 전압의 변화를 측정함으로써 유체속

도와 전압과의 관계를 측정할 수 있다.

전압은 전류와 저항의 곱이 되므로 King<sup>(6)</sup>은 식(3)으로부터 다음과 같은 열선의 순간 전압을 유체속도의 관계식으로 제시하였다.

$$(E + e)^2 = E_o^2 + B \sqrt{V + v} \quad (4)$$

여기서  $E$ ,  $V$  및  $e$ ,  $v$ 는 열선전압과 유체속도의 평균성분 및 요동성분이며 또  $E_o$ 는 유체속도 0에서 열선의 전압을 나타낸다.  $B$ 는 열선의 검정곡선의 기울기이다. 식(4)를 전개하여 시간평균을 취하면

$$E^2 = E_o^2 + B \sqrt{V} \quad (5)$$

이 된다. 식(5)로부터 알 수 있듯이 열선의 평균전압은 열선풍속계의 브리지(bridge)회로 특성에 따라  $E^2 \propto V^{1/2}$ 의 관계를 나타낸다. 열선풍속계에는 이러한 특성을 나타내는 곡선을 직선으로 바꾸어 주는 선형화장치(linearizer)가 부착되어 있다. 그림 1은 유속변화에 대한 열선풍속계의 순수한 브리지출력 및 이를 선형화시킨 출력에 대한 일반적인 경향을 보여주고 있다.

## 2-2. 단일경사열선의 원리

그림 2는 단일경사열선의 개략도이다. 프로브축과 수직으로 만나는 평면에 열선 및 속도벡터가 이루는 작은 각각 푸르브 경사각  $\theta_0$ , 및 피치각  $\theta$ 이다. 이 평면에서 X축은 기본좌표축이고  $X_i$ 는 열선이 투영된 방향이다. 이 두축 사이의 작은 스윙(swirl)각의 변화  $\Delta\psi$ 이며  $\psi_i - \psi$ 와 같다. 열선과 속도벡터가 이루는 요우각  $\alpha$ 는 열선의 방향벡터  $\vec{A}$ 와 속도벡터  $\vec{V}$ 를 내적함으로써 구한다.

$$\cos \alpha = \cos \theta_0 \cdot \cos \theta \cdot \cos(\psi + \Delta\psi) + \sin \theta_0 \cdot \sin \theta \quad (6)$$

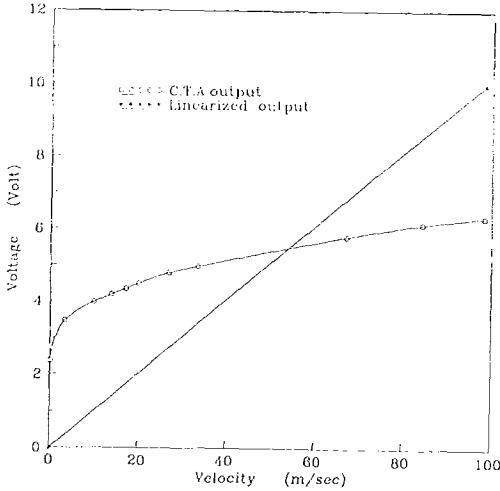


Fig. 1. C.T.A. output and linearized output according to velocity

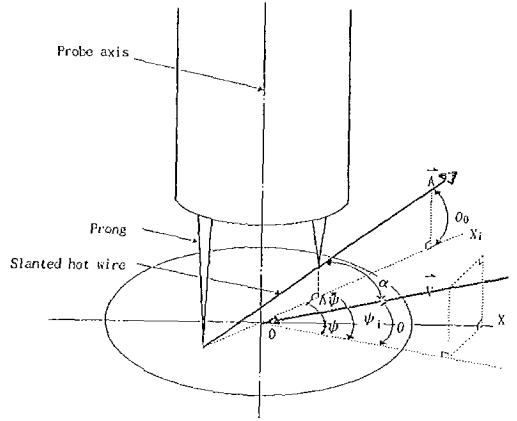


Fig. 2. Hot wire configuration

### 3. 검정방법

#### 3-1. 검정식

열선풍속계의 선형화된 출력은 많은 사람들에 의해  $V, \alpha$  및  $\theta$ 을 변수로 하는 cosine 함수임이 밝혀졌으며<sup>(7)</sup> Inoue<sup>(4)</sup>는 이 cosine 함수를 변형시킨 다음과 같은 식을 제시하였다. 본 연구에서도 이 식을 이용하고자 한다. 즉

$$E(V, \alpha, \theta) = F_1(\alpha, \theta) \cdot F_2(\theta) \cdot KV \quad (7)$$

여기서

$$F_1(\alpha, \theta) = E(V, \alpha, \theta) / E(V, 90^\circ, \theta)$$

$$= \sin\{A(\theta) \cdot (\alpha - 90^\circ) + 90^\circ\}$$

$$A(\theta) = A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2$$

$$F_2(\theta) = E(V, 90^\circ, \theta) / E(V, 90^\circ, 0)$$

$$= 1 + B_1\theta + B_2\theta^2$$

식(7)의  $A_0, A_1, A_2, B_1, B_2$ 는 각도검정,  $K$ 는 속도검정으로 정한다.

#### 3-2. 속도검정

열선의 속도에 대한 검정은 균일한 유동장을 만든 다음 유동의 방향을 그림 2의  $x$ 축에 일치시키고 열선이  $\alpha = 90^\circ$  되도록 조정한다. 이와 같은 조건을 만족했을 때  $\alpha = 90^\circ, \theta = 0^\circ$ 가 되며 식 (7)로부터  $F_1 = 1, F_2 = 1$ 이 되므로

$$E(V, 90^\circ, 0^\circ) = KV \quad (8)$$

가 된다. 식 (8)로부터 열선출력 및 유동속도를 측정함으로써 선형계수  $K$ 를 구할 수 있다.

구체적인 측정방법은 유체속도를 0m/s로부터 45m/s까지 변화시키면서 열선의 출력을 측정하고 이 데이터를 1차식의 최소자승법을 적용한다. 또한 열선은 양면의 냉각효과가 제작 및 장기간 사용에 의한 오염 등으로 서로 다르므로  $\alpha = 90^\circ$  뿐 아니라  $\alpha = -90^\circ$ 에서도 선형계수  $K$ 를 구한다.

그림 3은 속도검정 결과를 나타낸 것이며 그림 1의 선형화된 출력과 같은 경향을 보여주고 있다.

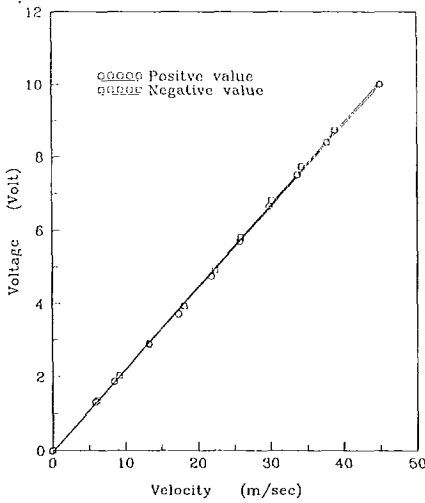


Fig. 3. Hot wire velocity calibration

### 3-3. 각도검정

열선의 3차원 방향에 대한 특성을 알기 위해 각도검정으로 스윙각 및 피치각의 영향을 조사하였다.

유동방향에 대한 열선의 특성은 식 (7)로부터  $F_1$  및  $F_2$ 이며,  $F_1$ 은 열선의 방향과 유동방향이 이루는 사이각인 요우각을 그림 2에서 X축이 포함된 평면위에 투영한 스윙각을 변화시키면서 측정된 열선의 출력에  $\alpha = 90^\circ$ 일 때 열선의 출력으로 무차원한 값이다. 또한  $F_2$ 는 요우각을 직각으로 고정시키고 유동의 피치각을 변화시켰을 때 열선의 출력을  $\alpha = 90^\circ$  및  $\theta = 0^\circ$ 일 때 열선의 출력값으로 무차원한 것이다. 이때 구한  $F_1$  및  $F_2$ 의 출력값으로 최소자승법을 사용하여 식(7)의  $A_0, A_1, A_2, B_1, B_2$ 를 결정한다.

그림 4는 한 피치각에서 스윙각에 따르는  $F_1$ 을 나타낸다. 피치각의 종류는 5가지( $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ )이며 각 피치각에서  $F_1$ 은 변형된 cosine곡선을 보여주고 있다. 또한 각 피치각의 실선은 전 피치각들에 대한 측정값을 이용하여 식(7)의 계수를 결정한다. 다음 결정된 계수를 사용하여 식(7)을 각

피치각으로 나타낸 것이다. 여기서 표시한 피치각 및 스윙각은 열선을 기준으로한 각들이다.

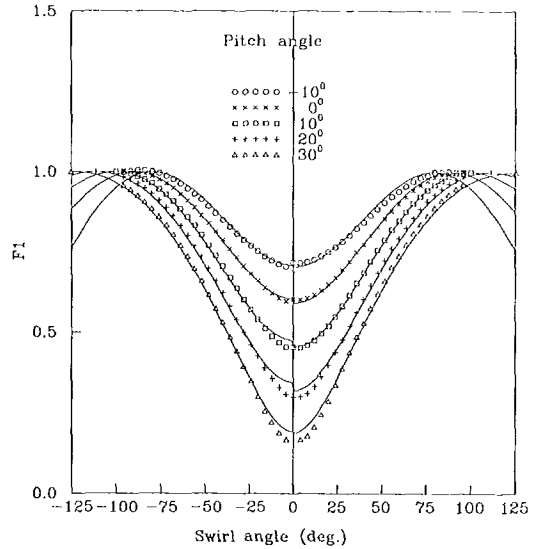


Fig. 4. Hot wire angle calibration

### 4. 측정방법

유동속도, 스윙각, 피치각 및 경사각을 알면 식(6), (7)로부터 유동장의 3차원 속도 성분을 구할 수 있다. 유동장의 측정은 측정하고자 하는 위치에 열선을 이동시킨 다음 열선출력이 최소로 나타나는 방향을 찾고 이 방향을 기준으로 하여 열선 프로브를  $\psi_m - 63^\circ$ 로부터  $\psi_m + 108^\circ$ 까지  $9^\circ$  간격으로 열선프로브를 회전시켜 열선출력값을 측정한다. 이때 열선프롱(prong)이 유동장에 교란을 일으킨다고 염려되는 부분, 즉  $\psi_m - 27^\circ$ 로부터  $\psi_m + 40^\circ$ 까지는 측정에서 제외시킨다. 한 측정점에서 열선은 12개 방향의 출력을 얻게 되며 한방향에서 열선의 출력은 1000번 측정의 평균값을 취한다. 12개 방향의 출력은 식(6), (7)에 대입하면 식(9), (10)과 같은 12개의 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{E}_i = F_1(\bar{\alpha}_i, \bar{\theta}) \cdot F_2(\bar{\theta}) \cdot K\bar{V} \quad (i=1, 2, \dots, 12) \quad (9)$$

$$\cos \bar{\alpha}_i = \cos \theta_0 \cdot \cos \bar{\theta} \cdot \cos(\bar{\psi} + \Delta\psi_i) + \sin \theta_0 \cdot \sin \bar{\theta} \quad (i=1, 2, \dots, 12) \quad (10)$$

이 12개의 식으로부터 최소자승법을 적용하면  $\bar{V}$ ,  $\bar{\psi}$  및  $\bar{\theta}$ 를 구할 수 있다.

그러나 이 식들은 비선형 방정식이므로

$$\bar{E} \cdot \bar{E}_i'' + \left(\frac{\partial E}{\partial V}\right)_i (\bar{V} - \bar{V}'') + \left(\frac{\partial E}{\partial \psi}\right)_i (\bar{\psi} - \bar{\psi}'') + \left(\frac{\partial E}{\partial \theta}\right)_i (\bar{\theta} - \bar{\theta}'') \quad (11)$$

여기서  $\bar{V}''$ ,  $\bar{\psi}''$  및  $\bar{\theta}''$ 는 가정된 근사값을 의미하며 미분계수들은 검정식(7)을 이용한 검정실험 결과에서 얻는다. 식(11)은  $i=1, 2, \dots, 12$ 에 의해 12개의 식이 되며 이 12개의 식으로부터 최소자승법에 의해 계산되는  $\bar{V}$ ,  $\bar{\psi}$  및  $\bar{\theta}$ 은 한 위치에서 3차원 속도성분을 나타낸다. 즉

$$\theta_y = \bar{\psi}$$

$$\theta_p = -\bar{\theta}$$

$$V_r = \bar{V} \cdot \sin \theta_p$$

$$V_t = \bar{V} \cdot \cos \theta_p \cdot \sin \theta_y$$

$$V_z = \bar{V} \cdot \sin \theta_p \cdot \sin \theta_y$$

## 5. 실험장치

그림 5는 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 유동을 발생시키고 또 균일하게 유지시키는 장치 및 자동계측 장치로 구성된다. 유동은 7.5마력 공기압축기로 발생시켰으며

Taylor 전개에 의하여 다음과 같이 선형화 방정식을 사용한다.

먼저 및 습기를 제거하는 2개의 공기청정기, 일정한 압력을 유지하는 3개의 레귤레이터(regulator)를 사용하였다. 유동을 균일하게 유지하는 장치로는 직경 6.5mm인 TSI모델 1125의 노즐을 사용하였다. 유속 변화에 따르는 유속측정은 노즐의 입, 출력 압력차를 디지털 압력계로 읽어 이것을 8255포트(port)를 통하여 퍼스널 컴퓨터에 입력 계산하였으며 이 디지털 압력계는 0.1mm H<sub>2</sub>O까지 측정 가능한 COSMO의 모델 DM-3500B를 사용하였다. 열선풍속계는 KANOMAX의 모델 SYSTEM 7102를 사용하였고 여기서 사용한 단일경사열선은 역시 KANOMAX 모델인 0253R-T5 제품으로 재질이 텅스텐이고 길이 및 직경이 각각 1.7mm 및 5 $\mu$ m이며 경사각이 45°이다.

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

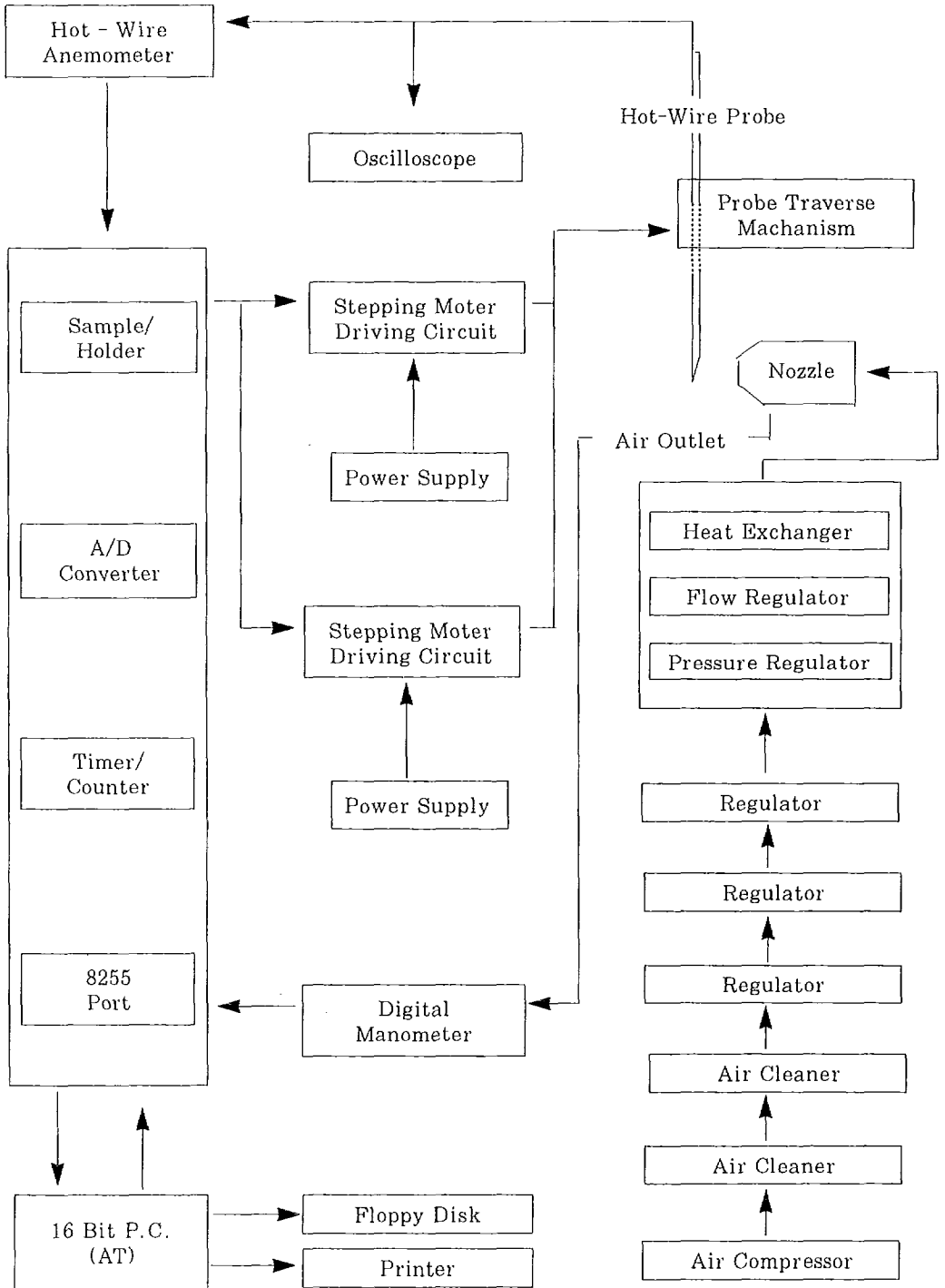


Fig. 5. Schematic diagram of calibrating and experimental system

### 5-1. 데이터 처리장치

퍼스널 컴퓨터로부터 샘플링 주파수 및 출력값을 평균해야하는 반복회수를 포함하는 데이터 입력신호를 받은 샘플링 홀더(sampling holder)는 그 순간부터 측정위치에 있는 열선에서 열선풍속계를 거친 아날로그 출력신호를 받아들인다. 그 다음 A/D 변환기에서 컴퓨터로부터 지시받은 샘플링 주파수 및 반복회수에 의해 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾼다. 이 디지털 신호는 최종적으로 컴퓨터 메모리에 저장된다. 데이터 저장 방법은 평균값을 구하기 위해 바로 전에 메모리에 저장했던 값과 합하여 그 자리에 저장하는 방법을 취한다. 각 측정점의 한 방향에서 평균값은 1000개의 신호를 평균하였다. 이와 같은 컴퓨터 제어는 Macro Assembler Version 5.1 언어와 G.W Basic 3.2 언어로 구성된 프로그램으로 한다. 데이터를 얻은 기계어 프로그램의 흐름도를 부록에 실었다.

### 5-2. 이송장치

프로브 이송장치는 측정위치에서 프로브를 정확히 제어하기 위해 측정점에서 스윙각을 조정하는 스텝핑 모터와 피치각을 변화시키는 스텝핑 모터 모두 2개의 스텝핑 모터로 구성되어 있다.

이들 모터들의 제어는 컨트롤러(controller) 및 8255포트를 통하여 퍼스널 컴퓨터로 행하였다. 모터들은 모두 1펄스에  $1.8^\circ$  씩 회전하며 스윙각의 모터는 잇수비 5:9 기어를 사용하여 1펄스에  $1^\circ$  회전하도록 하였으며 피치각 모터는 1:36의 잇수비 기어를 사용하여 1펄스에  $0.05^\circ$  회전하도록 정밀성을 기하였다.

## 6. 실험결과 및 고찰

본 연구는 속도검정 및 각도검정을 거친 경사열선으로 이미 알고 있는 유체속도(10m/s, 20m/s, 30m/s, 40m/s)를 스윙각( $-90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) 및 피치각( $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ )을 변화시키면서 12개 방향의 열선출력값을 측정하여 유체속도, 스윙각 및 피치각을 확인하였다.

이와같은 과정에서 유체유동의 스윙각과 피치각은 그림 2에 있는 열선프로브의 스윙각과 피치각에 대해 부호가 반대로 나타난다. 그러므로 여기서 스윙각 및 피치각은 그림 4의 열선프로브의 각들에 대해 반대부호를 의미한다.

### 6-1. 스윙각

그림 6-10은 일정한 5가지 스윙각에서 속도 및 피치각의 오차 범위를 보여준다. 각 스윙각에서 속도는 기준속도에 대하여 약간의 오차는 있지만 비교적 잘 일치한다. 그러나 피치각들은 기준 피치각들에 대해 상당한 오차가 있다. 피치각  $\theta = -10^\circ$ 에서는 피치각이 기준 피치각에 비교적 잘 일치하나  $\theta = -20^\circ$  및  $\theta = 0^\circ$ 에서는 이 각들이 기준 각들에서 약  $1.2^\circ$  벗어나며  $\theta = 10^\circ$ 는 약  $3.8^\circ$ ,  $\theta = 20^\circ$ 에서는 약  $7.2^\circ$ 의 오차가 있음을 보여주고 있다. 이같은 경향은 전 스윙각에서 거의 비슷하게 나타난다.

이러한 현상은 그림 4의 각도검정곡선의 각 스윙각에 있어서 측정값들이 실험식의 실선과 비교하면 측정값들은 피치각  $\theta = 10^\circ$ 을 기준으로 하여 상하로 좁혀져 편향되어 나타나기 때문이다. 특히 그림에서 피치각  $\theta = 10^\circ$  이상에서 나타나는 오차는 그림 4에서 알 수 있듯이  $\theta = -10^\circ$  이하의 영역으로 실험값들이 없는 영역이므로 그림 4의 피치각  $\theta = 10^\circ$  이하의 경향이 그대로 반영된 것으로 고려된다.



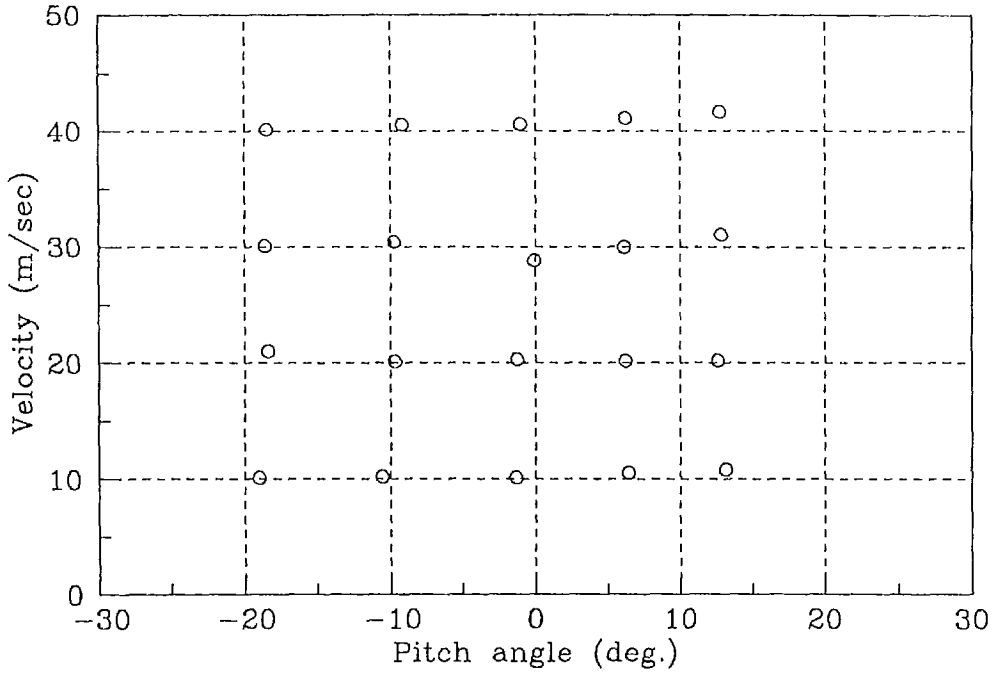


Fig. 6. Velocities according to pitch angle at swirl angle( $\psi = -90^\circ$ )

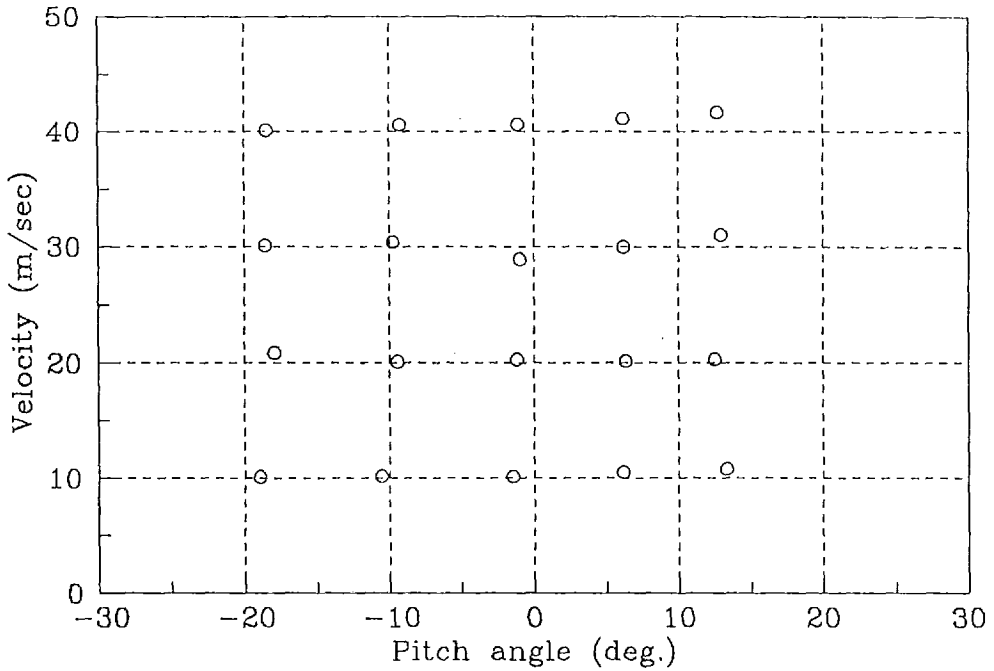


Fig. 7. Velocities according to pitch angle at swirl angle( $\psi = -45^\circ$ )

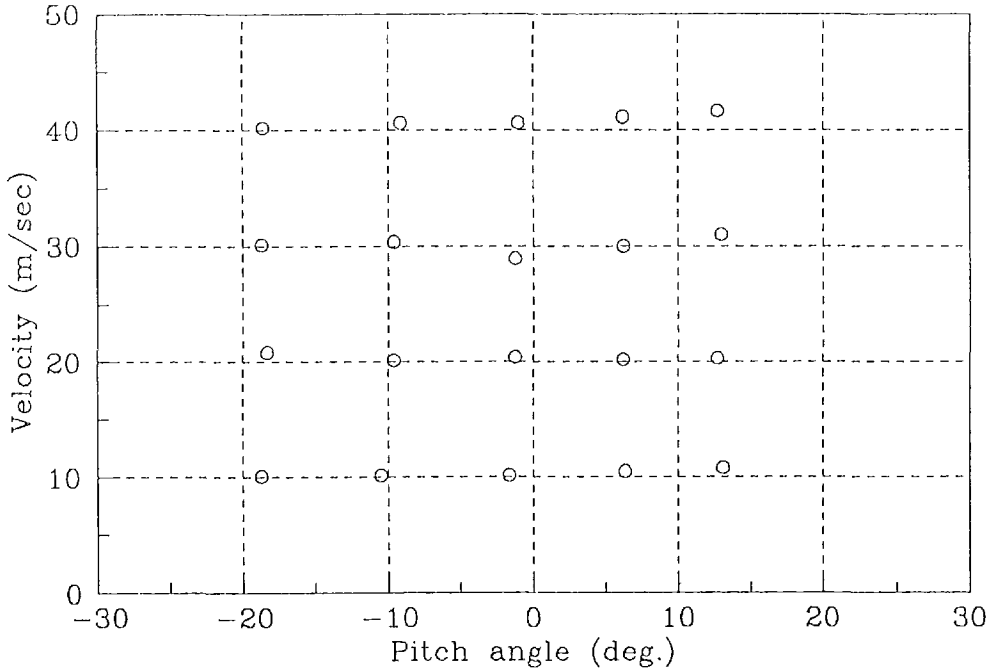


Fig. 8. Velocities according to pitch angle at swirl angle ( $\psi = 0^\circ$ )

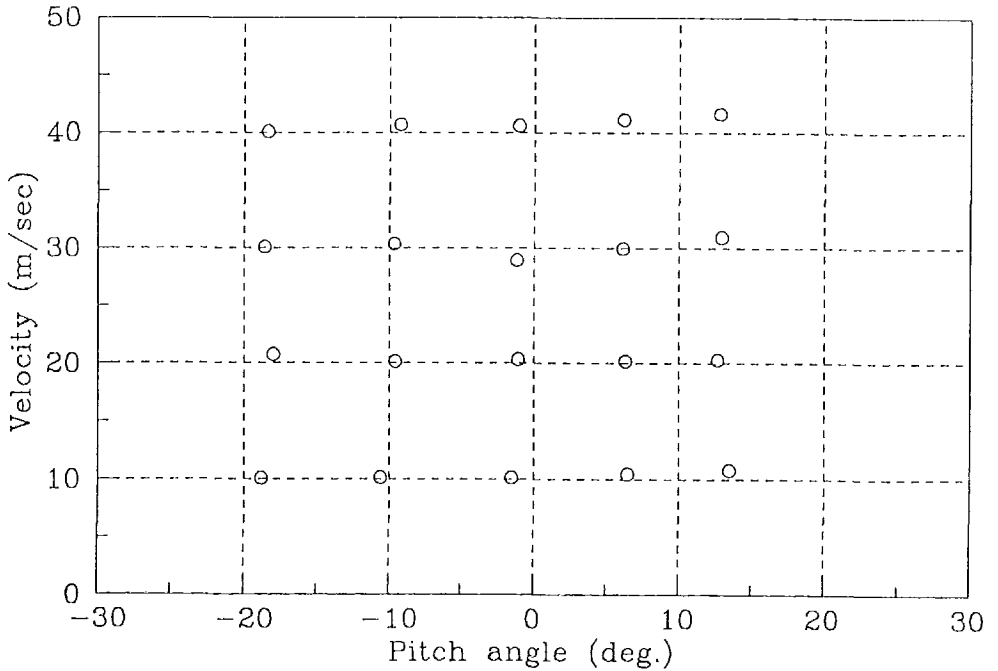


Fig. 9. Velocities according to pitch angle at swirl angle ( $\psi = 45^\circ$ )

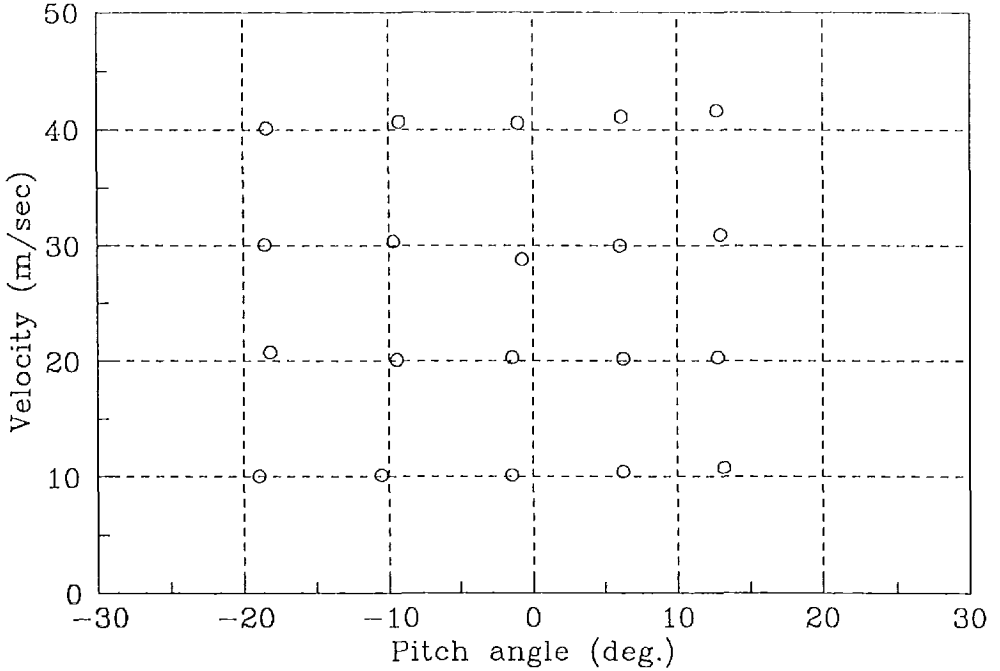


Fig. 10. Velocities according to pitch angle at swirl angle( $\psi = 90^\circ$ )

6-2. 피치각

그림 11-15는 스월각 및 속도의 변화를 일정한 피치각에서 보여주고 있다. 피치각  $\theta = -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ$ 인 그림 11-13은 스월각 및 속도가 기준값들과 비교하여 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 피치각  $\theta = 10^\circ$ 인 그림 14에서는 속도는 양호하나 스월각은 전체적으로 음의 방향으로 약  $3.5^\circ$ 로 편중되어 나타나고 있으며 피치각  $\theta = 20^\circ$ 인 그림 15에서는 스월각의 오차는 더욱 커져 약  $5.3^\circ$ 에 이른다.

속도가 전체적으로 오차가 적은 것은 속도검정곡선이 실험치와 비교적 잘 일치하기

때문이다. 피치각  $\theta = 10^\circ$ 에서 스월각이 음의 방향으로 전이된 것은 각도검정 실험식의 오차로 추정되며 정확한 이유를 밝히기 위해 더 많은 연구가 필요하다. 피치각  $\theta = 20^\circ$ 에서 오차의 범위가 더욱 커지는 이유는 앞서 스월각에서 지적한 이유와 같은 것으로 추정된다. 그러므로 열선의 사용 범위는 절대 유동방향을 하향으로 제한하면 오차의 범위를 줄일 수 있다고 판단된다.

앞으로 더 많은 실험을 통하여 스월각 및 피치각에서 나타나는 오차를 분석하고 이들 오차를 줄일 수 있는 개선된 각도검정 실험식의 확립이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

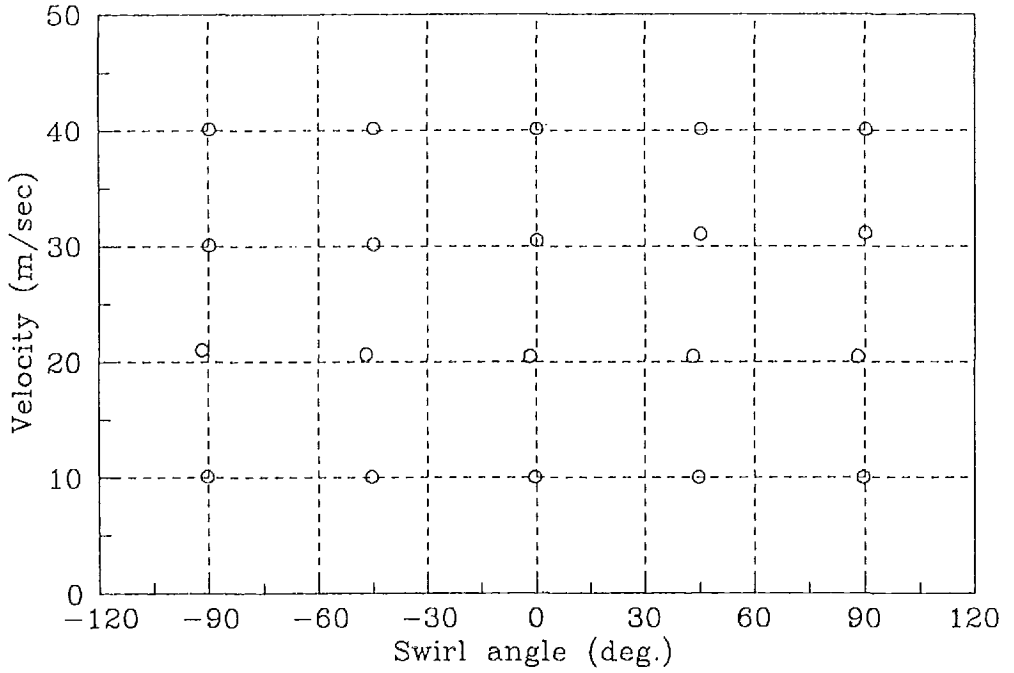


Fig. 11. Velocities according to swirl angle at pitch angle ( $\theta = -20^\circ$ )

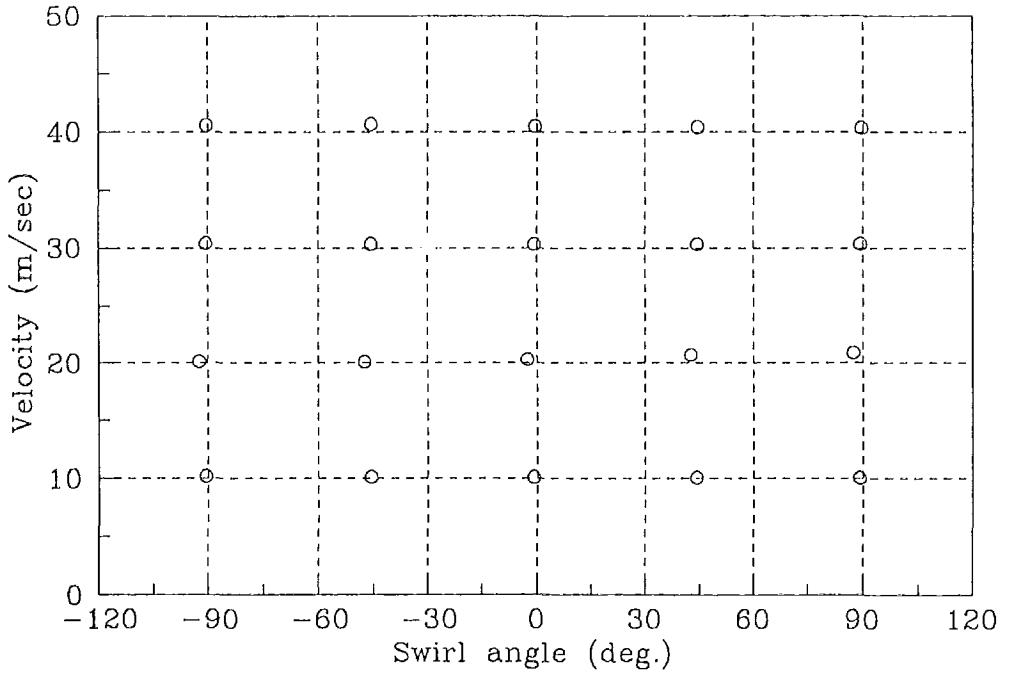


Fig. 12. Velocities according to swirl angle at pitch angle ( $\theta = -10^\circ$ )

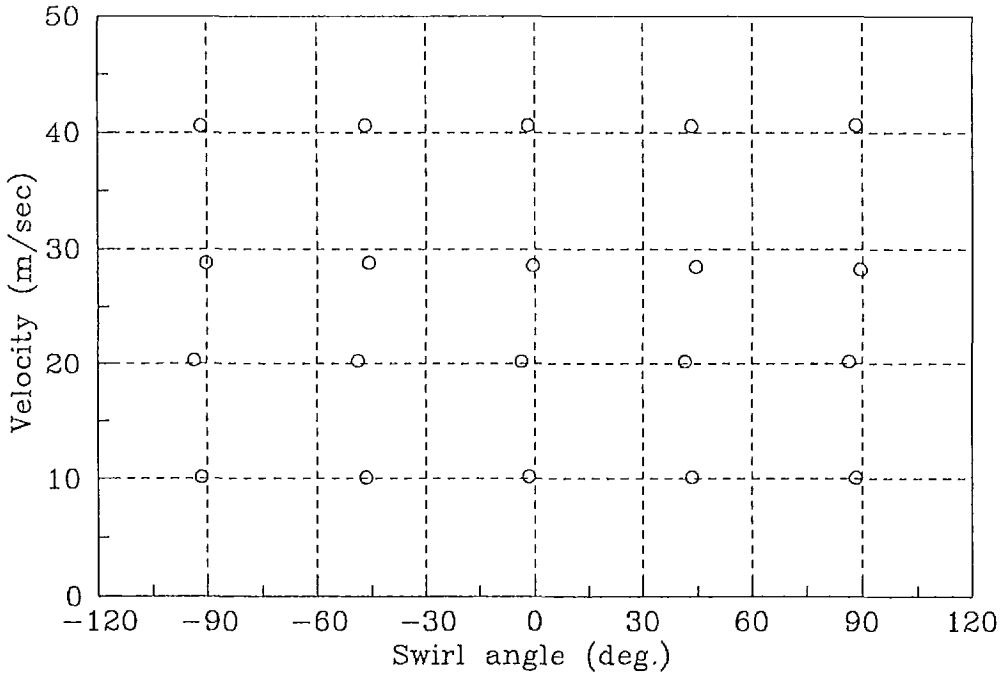


Fig. 13. Velocities according to swirl angle at pitch angle( $\theta = 0^\circ$ )

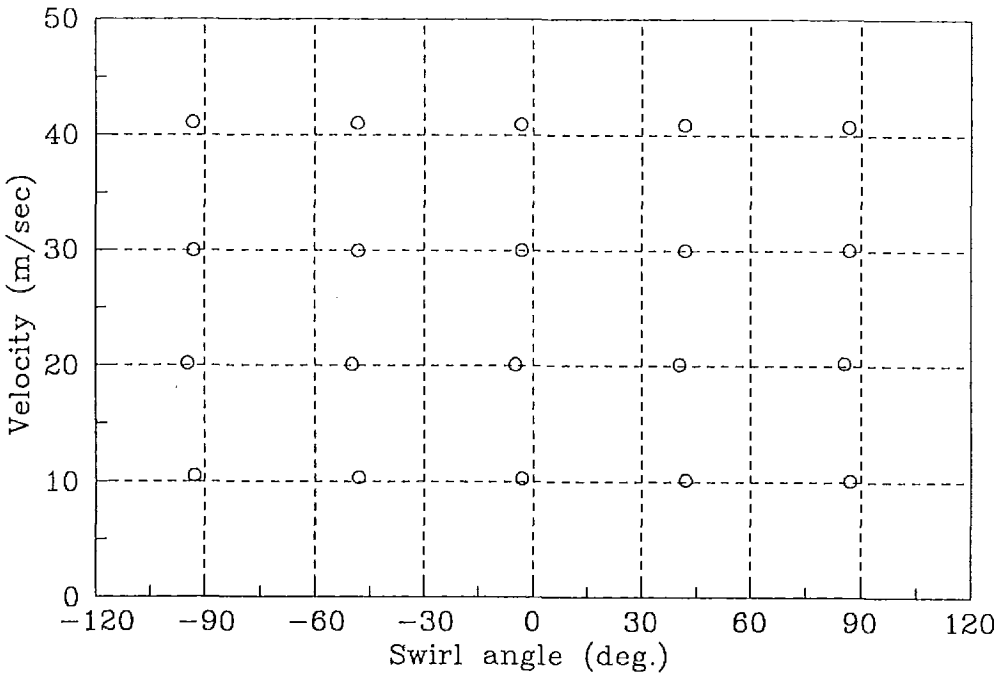


Fig. 14. Velocities according to swirl angle at pitch angle( $\theta = 10^\circ$ )

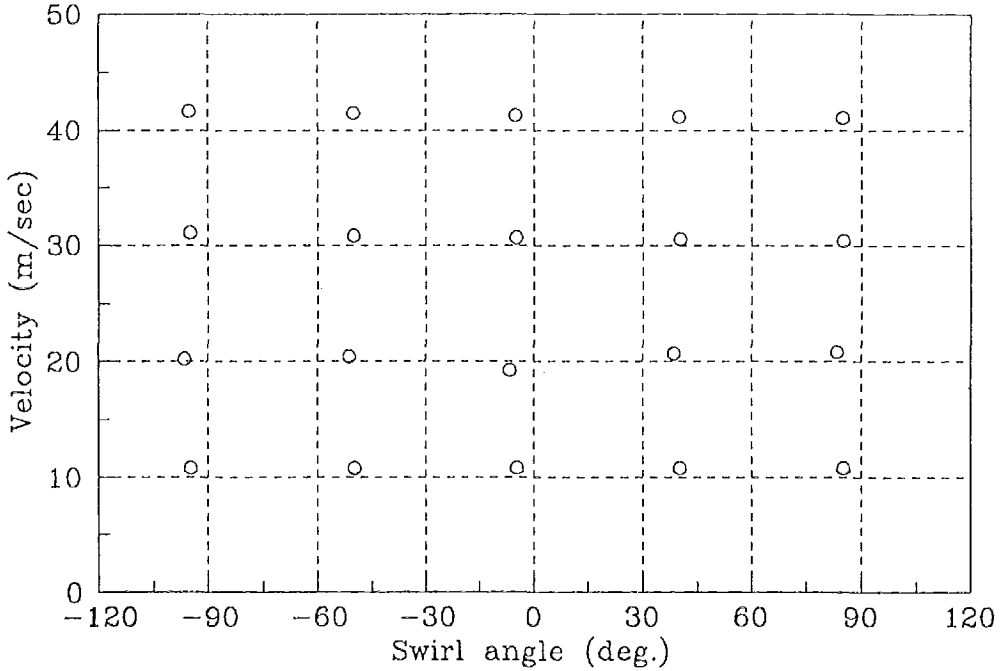


Fig. 15. Velocities according to swirl angle at pitch angle( $\theta = 20^\circ$ )

### 7. 결 론

단일경사열선으로 측정된 유동장의 3차원 속도성분을 확인하기 위해 검정실험식으로부터 얻어진 스윙각, 피치각 및 속도 변화량을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절대유동속도는 스윙각 및 피치각에 거의 영향을 받지 않는다.

2. 전 스윙각에서 피치각은  $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  범위에서 기준 피치각과 잘 일치하나 나머지 피치각들에서는 기준 피치각에서 피치각  $\theta = -10^\circ$ 을 향하여 편향되어 나타난다.

3. 피치각  $\theta = 0^\circ$  이하에서는 스윙각이 기준 스윙각과 잘 일치하나 그 이상의 피치각에서는 기준 스윙각들을 기준하여 스윙각들이 음의 방향으로 편향된다.

4. 이상을 종합하면 앞서 제시된 각도검정 실험식은 피치각  $-10^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$  범위에서는 스윙각에 관계없이 사용할 수 있다.

#### 기호설명

- A : 열선특성계수, 열선방향
- B : 열선특성계수
- A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, K : 검정계수
- C<sub>p</sub> : 정압비열
- E, E<sub>i</sub>, e : 전압
- F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> : 실험함수
- V, v : 절대속도
- Gr : Grashof수

$h$	: 대류열전달계수
$I$	: 전류
$K_g$	: 유체열전도계수
$l$	: 열선길이
$Nu$	: Nusselt수
$Pr$	: Prantl수
$Re$	: Reynolds수
$Ro$	: 초기온도의 열선저항
$R_w, R_g$	: 저항
$T_o$	: 열선의 초기온도
$T_w, T_g$	: 열선 및 유체온도
$X, X_i$	: 기준축, 열선방향축

그리스 문자

$\alpha$	: 열선요우각, 저항의 온도계수
$\theta, \theta_p$	: 절대유동의 피치각
$\theta_y$	: 절대유동의 요우각
$\theta_0$	: 열선의 경사각
$\psi, \psi_i, \Delta\psi$	: 스윙각

윗첨자

—	: 시간평균치
"	: 추측근사치

아래첨자

$r, t, z$	: $r, \theta, z$ 방향성분
-----------	-----------------------

참고문헌

1. Whitefield, C.E., Barry, B., 1972, "A Three-Dimensional Analysis of Rotor Wake", Aeronautical Quarterly, Vol.23, No.4, pp.285-300.
2. Hirsh, C., Kool, P., 1977, "Measurement of the Three-Dimensional Flow Field Behind an Axial Compressor Stage", ASME Journal of Eng. for Power, Vol.99, No.2, pp.168-180.
3. Schmidt, D.P., Okiishi, T., 1977, "Multistage Axial Flow Turbomachine Wake Production Transport and Interaction", AIAA Journal Vol.15, No.8, pp.1138-1145.
4. Kuromaru, M., Inoue, M., Higaki, T., 1982, "Measurement of Three-dimensional flow field Behind an Impeller by Means of Periodic Multi-Sampling with a Slanted Hot Wire", Bulletin of JSME, Vol.25, No.209, pp.1674-1686.
5. 조강래, 정의준, 1990, "축류압축기 회전의

의 후방유동장(1)-누설와류의 제적-", 대  
한기계학회 논문집, 제15권, 제3호, pp.  
963-969.

Philos. Trans. R. Society London ,  
Vol. 214, No.14, p.373.

- 6. King L.V., 1914, "On the Convect  
ion of Heat from Small Cylinders in  
a Stream of Fluid, with Applic  
ations to Hot-Wire Anemometer".

- 7. Frieche C.A., Schwarz W.H., 19  
68, "Deviations from the Cosine  
Law For Yawed Cylindrical Ane  
mometer Sensors", Trans. ASME,  
Series E, Vol.35, p.655.

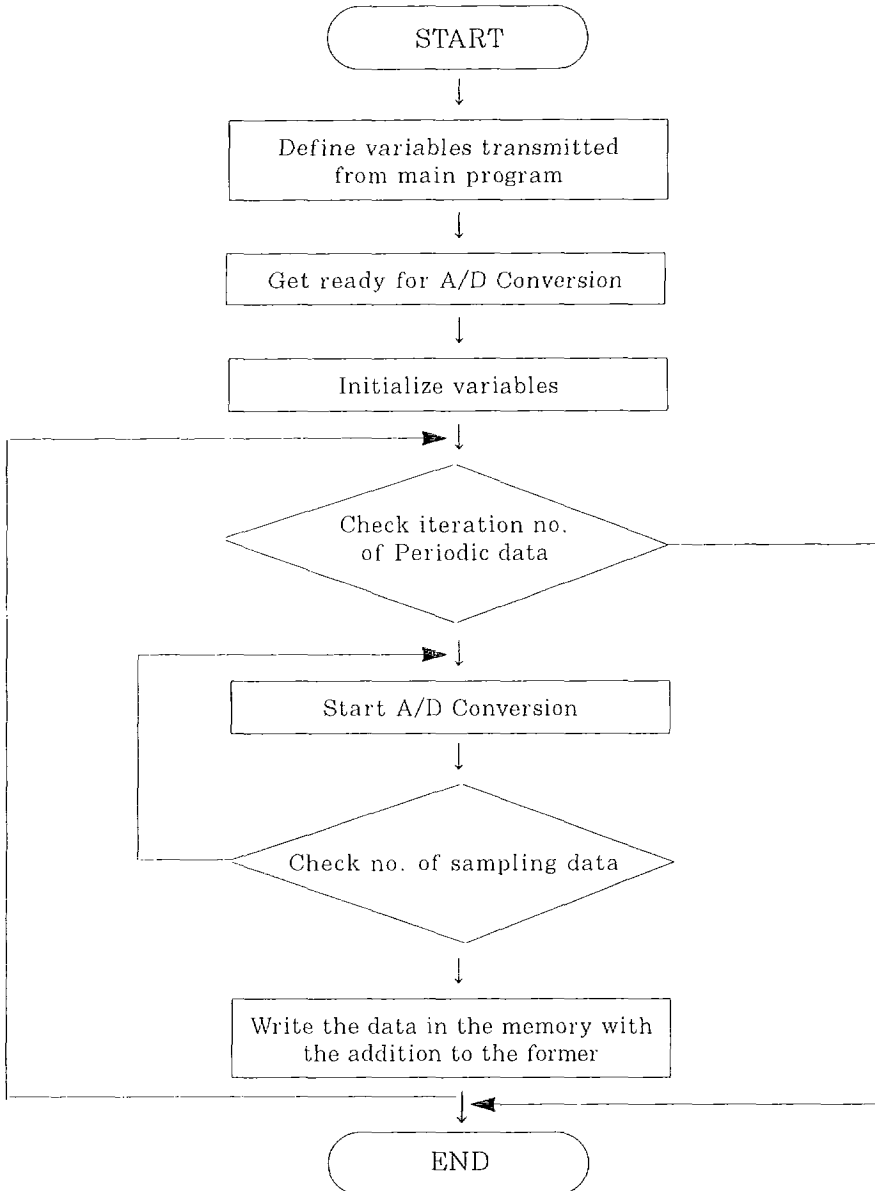


Fig. A. Flow chart of data acquisition program with assembler language