

三軸 熱線 PROBE의 特性과 그 評價

金 旻 勳 *

The Characteristics of Triple Hot-Wire Probe and It's Evaluation

Kyung Hoon, KIM

ABSTRACT

A triple hot-wire probe has an essential potentiality for the measurement of an instantaneous velocity vector in a three dimensional unsteady flow with large amplitude of velocity fluctuations, the key problems associated with this instrument are the directional range of applicability and the accuracy.

This present paper is concerned with a new method of the techniques of calibration and data processing to estimate the three dimensional flow field using an arbitrary shaped triple hot-wire probe.

The method is not based on the assumptions of orthogonality or symmetry and it is especially useful for applications to a hand-made probe where probe geometry is not accurately known.

The test application is made to evaluate the effect of cone angles of symmetric non-orthogonal probe.

NOMENCLATURE

A_k, a_{ij}	= coefficient matrix and its components($i, j = 1, 2, 3$)	b, t	
C, c_i	= coefficient matrix and its components($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)	$F,$	= sensitivity coefficient
$E,$	= linearizer output voltage (V)	f, f_k	= vector function and its components($i = 1, 2, 3$)
$e_u,$	= unit vector of velocity direction	$G,$	= gain coefficient(m/s/v)
$e_i,$	= eigen-vectors($i = 1, 2, 3$ or n,	h, k	= coefficients in Jorgense s equation
		$J,$	= Jacobian matrix

* : 경희대학교 공대 기계공학과

M, N = number of angular positions
 P_i , = eigen value ($i=1,2,3$ or n,b,t)
 Q, Q_k = effective cooling velocity ($k=1,2,3$)
 U, u_i = velocity vector and its components ($i=1,2,3$ or n,b,t)
 X_i, Y_i = coefficients in Eq. (12) ($i=0,1,2$)
 U , = velocity magnitude (m/s)
 α , = parameter of probe geometry (deg.)

ϵ , = magnitude of the error (%)
 θ, ϕ = the probe orientation in polar coordinate (deg.)
 λ_i, μ_i, ν_i = components of eigen vector ($i=1,2,3$ or n,b,t)

Subscripts

k : sensor number
 n,b,t : normal, binormal and tangential direction
u : velocity direction
m : number of iteration

1. 緒 論

3次元的인 流動場의 計測法으로서는 LASER DOPPLER 流速計(L.D.V), 熱線 PROBE, 多空 PITOT管 YAW METER 등을 이용하는 방법들이 있다. 이 중에서, 流動이 非正常인 것을 問題時하는 경우에 사용될 수 있는 것은 L.D.V. 와 熱線 PROBE 이다. L.D.V. 는 非接觸으로 비교적 精確한 計測值를 얻을수가 있지만, 3次元的으로 計測하려고 하면 시스템이 매우 高價라는 點과 PROBE 自體도 大型이 되어버린다는 點으로 使用上의 制約이 많다. 한편 熱線 PROBE 를 이용하는 方法은 역사가 깊어서, 실제적인 KNOW-HOW의 蓄積도 많고 PROBE 自體를 小型化시킬 수 있으므로 비교적 용이하게 그리고 저렴한 가격으로 시스템을 構成할 수 있다.

3次元的인 流動의 計測에 熱線 PROBE 를 사용하는 것으로는 一軸의 傾斜型 熱線 PROBE 를 回轉시키는 方法, 二軸의 熱線 PROBE 의 軸을 流動方向에 놓는 方法등이 있지만, 3次元의 流動를 規程하는 3方向의 成分을 동시에 計測하기 위해서는 3개 이상의 熱線을 가진 多 SENSOR PROBE가 필요하다. 이 중에서도 일반적으로 많이 사용되는 것은 三軸 熱

線 PROBE (THREE SENSORS HOT WIRES, TRIPLE HOT WIRES, THREE ELEMENT HOT WIRE 등 명칭이 있지만, 以後 T.H.W. 라고 부른다)이다.^[1]

T.H.W. 를 사용함에 의해서 3개의 速度成分과 6개의 REYNOLDS 應力成分의 瞬間值를 구할 수가 있으며, 이것의 使用例로서는 B.L-AKSHIMINARAYANA^[2,3,4,5]등에 의한 터보機械에서의 三次元 流動의 計測에 이용된 것 외에, 高速走行中の 自動車 타이어內의 空氣流動에 관한 計測^[6]에 이용된 例도 있어서, 응용범위가 확대되고 있다.

T.H.W. 에는 여러 종류의 形狀과 크기를 갖는 PROBE 들이 있다. 形狀에 있어서, 크게 나누어 보면 PROBE 軸 (STEM)인 中心軸에 대해 對稱인 것과 非對稱인 것으로 分類되지만 對稱인 것이 일반적이다. 또한 各 센서는 서로 直交하고 있는 것으로 한다 (實際로는 製作上의 困難으로 인해 엄밀하게 直交하고 있다고는 말할 수 없다.)는 것이 일반적이다. 그리고 PROBE 의 크기에 있어서는, 작은 쪽이 檢査體積이 작아지므로 유리하지만 各各의 센서間의 干涉, 製作上의 어려움 등을 고려할 때 비교적 小型으로는 가능하지만 (檢査體積으로 直徑 6 mm 球의 程度), 극히 小型化하는 것은 곤란하

다.

다음으로, 計測시스템 HARD-WARE에 있어서는 熱線流速計 (C. T. A.), 直線化器 (LINEARIZER), 데이터處理裝置 및 데이터記錄裝置가 필요하다. 이들 裝置는 追從性을 問題時 할 경우에는 아날로그系로 행하는 쪽이 유리하지만 精度는 디지털系 쪽이 우수하다. 以前에는 流速成分까지 구할 수 있는 아날로그裝置가 이용되었던 것도 있지만,^[7] 最近에는 高速 A/D 變換器의 出現으로 인해 시스템이 디지털화가 이루어지고 있다. 또한, 計測方法으로는 대부분이 JORGENSEN (1971)^[1]에 의해 提唱된 熱線의 特性方程式에 基礎를 둔 方法을 따르고 있다.^[6,7,8,9,10]

T. H. W. 는 三次元 亂流計測에 특히 뛰어난 強點이 될 가능성을 지니고 있다. 測定이 가능한 流動角의 限界가 이 方法의 가장 큰 制約條件이^[9,11,12,13] 되고 있어서 이 限界를 극복하기 위해서 다양한 PROBE 形狀이나 檢定方法이 試圖되어 왔다. 그러나 이들을 系統적으로 比較評價된 例는 없으며, 각각의 PROBE 形狀과 檢定方法의 組合에 대한 評價가 單發적으로 행하여지고 있는 것이 現狀態이다. 따라서 本 研究에서는 PROBE 形狀에 좌우되지 않는 檢定方法과 데이터處理方法 및 角度特性의 表示方法을 고안하였으며, 이 方法은 센서의 直交性이나 對稱性을 가정하지 않기 때문에 임의 形狀의 三軸 熱線 PROBE 에 적용이 가능하다. 이러한 點은 自作 PROBE 를 사용할 때 특히 有用하다.

2. 理論解析

2.1 特性方程式

本 節에서는 일반화된 特性方程式을 유도하였으며 이것은 PROBE 에 고정된 임의座標系에서의 速度成分에 부합되는 LINEARIZER 出力電壓値와 직접적으로 관계된다. 熱線센서의

線型화된 出力電壓値 E는 센서의 方向이 변하지 않는 한 당연히 速度크기에 비례한다. 따라서 임의좌표계에서의 速度成分 (U_1, U_2, U_3) 는 E에 관련되며 (1)式과 같이 된다.

$$E^2 = C_1 U_1^2 + C_2 U_2^2 + C_3 U_3^2 + 2 C_4 U_1 U_2 + 2 C_5 U_2 U_3 + 2 C_6 U_3 U_1 \dots\dots\dots(1)$$

여기서 C는 檢定에 의해 결정되는 常數이며, 이 式은 또한 다음과 같은 正方行列의 형태로 쓰여진다.

$$E^2 = (U_1 U_2 U_3) \begin{pmatrix} C_1 & C_4 & C_6 \\ C_4 & C_2 & C_5 \\ C_6 & C_5 & C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = UCU^t \dots\dots\dots(2)$$

行例 C는 實數이며 對稱이고 또한 $E^2 \geq 0$ 이므로 일정한 陽의 값이다.

따라서 C는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} C_1 & C_4 & C_6 \\ C_4 & C_2 & C_5 \\ C_6 & C_5 & C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \mu_1 \nu_1 \\ \lambda_2 \mu_2 \nu_2 \\ \lambda_3 \mu_3 \nu_3 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 P_i ($i=1,2,3$)는 C의 陽의 固有値이며 $e_i = (\lambda_i, \mu_i, \nu_i)$ 는 이에 일치하는 固有벡터이다. 방정식 (3)에서 P가 증가하는 크기의 係數인 i대신에 “n, b, t”를 사용하면 임의의 固定方向의 單位벡터 e_n 를 얻게 된다. 또한 速度벡터 U가 e_n 에 일치하도록 만들고, 그 크기 U가 변할 때 LINEARIZER 出力電壓値 E는 U에 비례하므로 式(2)가 다음과 같이 된다.

$$G^2 E^2 = \frac{1}{P_n} UCU^t = UAU^t \dots\dots\dots(4)$$

여기서 G는 $G^2 = \frac{U^2}{E^2} (e_u = \frac{U}{U} = e_n)$ 으로 정의되는 比例常數이고 새로운 行列 A는 다음과 같이 定義된다.

$$A = G^2 C = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \lambda_n \lambda_b \lambda_t \\ \mu_n \mu_b \mu_t \\ \nu_n \nu_b \nu_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & h^2 & 0 \\ 0 & 0 & k^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_n \mu_n \nu_n \\ \lambda_b \mu_b \nu_b \\ \lambda_t \mu_t \nu_t \end{pmatrix} \dots (5)$$

여기서 $G^2 = 1/P_n$, $h^2 = p_b/p_n$, $k^2 = p_t/p_n$ 이다.

式 (2)는 일반적으로 熱線의 지배 방정식에 사용되는 JORGENSEN의 特性方程式에 관계가 있다. 지금, 問題時되고 있는 센서의 法線, 倍法線 그리고 接線方向에서의 單位벡터로서 固有벡터인 e_n, e_b, e_t 로 解析하면 다음과 같다.

$$e_n \cdot e_b = e_b \cdot e_t = e_t \cdot e_n = 0 \dots (6)$$

더우기 式(4)의 좌변이 有効冷却速度 Q의 제곱이라는 것에 주목하고 法線, 倍法線 및 接線方向에서의 速度成分에 대해 각각 통상적인 表現값 U_n, U_b 그리고 U_t 를 사용하면 式(4)는 다음과 같이 유도되며

$$Q^2 = U_n^2 + h^2 U_b^2 + k^2 U_t^2 \dots (7)$$

이것은 JORGENSEN에 의해 잘 알려진 特性方程式이다.

따라서 式(4)는 一般化된 JORGENSEN의 方程式형태로 생각될 수 있으며, 여기서 e_n, e_b 그리고 e_t 는 센서座標를 定義하는 單位벡터일 뿐만 아니라 係數行列 C의 固有벡터이다.

2.2 데이터處理法

前節에서 정의된 JORGENSEN의 流速成分과 實驗實座標係에서의 流速成分의 變換에, 本 研究에서는 임의의 어떠한 모양의 PROBE에도 적용될 수 있는 座標變換의 方法을 다음과 같이 導入하였다.

지금, 그림 1에 表示한 바와 같이 實驗室座

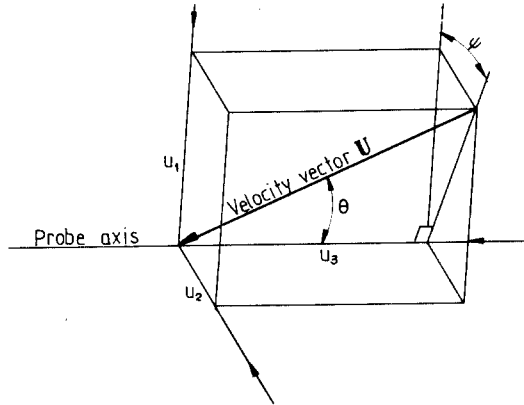


Fig. 1 Calibration arrangement and definition of coordinates

標係 (X_1, X_2, X_3) 에서 速度成分이 (U_1, U_2, U_3) 인 速度벡터 U 를 생각하자. 여기서 熱線의 法線, 倍法線 그리고 接線方向을 표시하는 單位벡터가 각각

$$e_n = (\lambda_n, \mu_n, \nu_n), \quad e_b = (\lambda_b, \mu_b, \nu_b),$$

$$e_t = (\lambda_t, \mu_t, \nu_t) \dots (8)$$

로서 定義해져 있다고 하면 有効冷却速度는 (7)式에 각기 대입됨으로서

$$Q^2 = (U \cdot e_n)^2 + h^2 (U \cdot e_b)^2 + k^2 (U \cdot e_t)^2 \dots (9)$$

가 된다. 더우기

$$\pi_1 = (\lambda_n, h \lambda_b, h \lambda_t), \quad \pi_2 = (\mu_n, h \mu_b, k \mu_t),$$

$$\pi_3 = (\nu_n, h \nu_b, k \nu_t) \dots (10)$$

로 놓음으로서 (9)式은

$$a_{ij} = (\pi_i, \pi_j) \dots (11)$$

이 되는 要素를 갖는 對稱行列 A 를 이용하여

$$Q_k^2 = U \cdot A_k \cdot U^t \dots (12)$$

$$\text{즉 } Q_1^2 = U \cdot A_1 \cdot U^t$$

$$Q_2^2 = U \cdot A_2 \cdot U^t$$

$$Q_3^2 = U \cdot A_3 \cdot U^t$$

와 같은 2次 形式으로 表示될 수가 있다. 以上과 같은 것은 三軸 熱線 PROBE 以外の 熱線 PROBE 에도 적용될 수 있는 것이다.

다음으로, 각 센서 k의 LINEARIZER 를 통과한 出力電壓值 E_k 로부터 각각의 有效冷却速度가

$$Q_k^2 = G_k^2 E_k^2 \quad (k = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (13)$$

(여기서 G_k 는 계인계수로 각 熱線고유의 定數가 된다.)로 결정될 때에 速度벡터 U를 구하는 方法을 생각해 보면

$$f_k(U) = Q_k^2 - U A_k U^t \quad (k = 1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (14)$$

인 函數에 대해

$$f(U) = \{ f_1(U), f_2(U), f_3(U) \} = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

를 풀면 되며, 이 式에는 NEWTON-RAPHSON 의 數值解法인

$$U_{m+1}^t = U_m - J^{-1}(U_m) \cdot f(U_m), \quad U = \lim_{m \rightarrow \infty} U_m \quad \dots\dots\dots (16)$$

을 이용하면 된다. 여기서 J는 f의 JACOBIAN 行列이며 J^{-1} 은 逆行列이다.

이 行列의 各 要素 $\frac{\partial f_k}{\partial u_j}$ 는 (11)式의 a_{ijk} (k 는 센서의 番號)를 이용하여

$$\frac{\partial f_k}{\partial u_j} = -2 a_{ijk} u_k$$

$$= -2 (a_{1j} u_1 + a_{2j} u_2 + a_{3j} u_3)_k \quad \dots\dots\dots (17)$$

와 같이 간단한 관계로부터 구할 수 있다. 따라서 $Q = (Q_1^2, Q_2^2, Q_3^2)$ 를 적용시켜

$$f^t = Q^t - 1/2 J U^t \quad \dots\dots\dots (18)$$

을 얻게 되고, 式(18)과 (12)를 치환하면 결국

$$U_{m+1}^t = 1/2 U_m^t - J_m^{-1} Q^t \quad \dots\dots\dots (19)$$

가 된다.

以上과 같은 計算方法으로 부터 살펴보면 式(7)의 h, k 가 角度의 函數關係가 아닌, 즉 熱線을 지닌 PROBE 에 있어서는 熱線流速計 LINEARIZER 의 각 出力電壓值와의 函數이므로 各 出力로부터의 適當한 初期值와 反復計算에 의해 流速벡터의 各 成分을 구할 수 있는 것이다.

2.3 方向感度係數

各 센서方向에 대한 感度を 方向感度係數라 하여

$$F = G^2 E^2 / U^2 = e_u A e_u^t \quad \dots\dots\dots (20)$$

로 定義한다. 여기서 式(4)가 이용되며 e_u 는 U 方向의 單位벡터이다. 그림 1과 같이 極座標系 (θ, ϕ)를 정의하면 U의 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$U = U e_u = (U \sin \theta \cos \phi, U \sin \theta \sin \phi, U \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (21)$$

F의 중요한 特徵은 U에 의해 좌우되는 것이 아니고 θ 와 ϕ 에 의한다는 것이다. 이 方向感度係數分布의 代表例는 실험결과 및 고찰부분의 그림 8에서 자세히 거론되겠지만 (7)式으로부터 알 수 있듯이 F값이 最大 最小가 되는 方向은 각각 그 센서에 있어서의 倍法線方向과 接線方向에 해당되며, 이 때의 값이 각각 h 와 k 가 된다. 단, 最大值의 方向과 最小值의 方向이 PRONG의 形狀으로 인해 直交하지 않는 경우가 있으므로 接線方向만을 이것으로 부터 決定하고 있다. 接線方向 單位벡터 e_t 는 方向感度係數 F의 最小值를 나타내는 θ_t, ϕ_t 를 그림 8과 같은 円形 CHART로부터 읽어서

$$\lambda_t = \sin\theta_t \cos\psi_t, \mu_t = \sin\theta_t \sin\psi_t, \nu_t = \cos\theta_t$$

..... (22)

가 된다. 倍法線方向과 法線方向에 대해서는 接線方向과 直交하는 方向에서의 最大點과 最小點으로 決定된다. 이것에 대해서는 円形 CH-ART 上에

$$\lambda_t \sin\theta \cos\psi + \mu_t \sin\theta \sin\psi + \nu_t \cos\theta = 0 \dots(23)$$

을 만족하는 曲線을 그리고, 그 曲線上의 F 값의 最大値로 부터 (θ_b, ψ_b) 를 구하여(22)式과 같은 方法으로 해서 e_b 를 구할 수 있으며 e_n 에 대해서도 (6)式인

$$e_t \cdot e_n = e_n \cdot e_b = e_b \cdot e_t = 0$$

를 풀어서 구한다. 더우기 e_n 가 주어진 方向에서의 F 값이 1이 되도록 계인係數를 보정하고 (7)式을 사용했다. 일반적으로 式(20)을 式(21)로 치환해서 풀면 F에 대해선 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(\theta, \psi) = X_2(\theta) \cos 2\psi + Y_2(\theta) \sin 2\psi + X_1(\theta) \cos \psi + Y_1(\theta) \sin \psi + X_0(\theta) \dots\dots\dots (24)$$

이들 형태들은 有效冷却速度가 固定된 方向內에서 速度의 크기에 비례하는 한, 센서排列에 관계없음을 나타내는 것이다.

2.4 檢定方法

세 센서를 동시에 檢定하기 위해서는 PROBE 座標系를 그림 1에 表示한 바와 같이 速度成分 U_3 가 PROBE 軸과 일치하도록 놓았으며 流動方向과 PROBE 軸이 이루는 角 θ (傾斜角)과 PROBE 軸 回轉의 回轉角 ψ 를 각각 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 와 $0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$ 의 半球狀範圍로 變換시키면서 5,000點의 方向에 대하여, 세계의 熱線流速計로부터 LINEARIZER 出力電壓值 E의 平均値와 그 變動의 RMS 값인 e 및

PITOT 管을 이용한 流動時의 平均流速 U를 측정하고 기록하였다.

檢定을 위해서 要求되는 것은 LINEARIZER 出力電壓值들 뿐만 아니라 U에 대한 PROBE의 方向測定이며, 반면에 세 센서 自體의 方向測定에 대해서는 알 必要가 없다. 더우기 E, Q_k 는 瞬間値를 의미하지만 檢定에 사용되는 流動는 亂動이 적기 때문에 이것을 瞬間平均으로 치환해도 좋다.

式(24)에서 常數 X와 Y들을 결정하기 위해서는 檢定이 다음과 같이 행하여 진다. 速度 U 값을 알고 있는 임의의 等速流動에서 θ 와 ψ 는 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 와 $0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$ 의 範圍內를 變화하며 LINEARIZER 出力信號들 $E(\theta, \psi)$ 가 얻어진다. 임의의 주어진 θ 에 대해서 $\theta = \theta_i$ 라고 할 때, X와 Y들은 다음과 같이 계산 된다.

$X_2(\theta)$	$X_2(\theta) = (a_{11} - a_{22})(1 - \cos 2\theta)/4$	$X_2(\theta)/G^2 = 2/N \sum_{j=1}^N \{E(\theta, \psi_j)/U\}^2 \cos 2\psi_j$
$Y_2(\theta)$	$Y_2(\theta) = a_{12}(1 - \cos 2\theta)/2 = a_{21}(1 - \cos 2\theta)/2$	$Y_2(\theta)/G^2 = 2/N \sum_{j=1}^N \{E(\theta, \psi_j)/U\}^2 \sin 2\psi_j$
$X_1(\theta)$	$X_1(\theta) = \frac{a_{13} \sin 2\theta}{a} = a_{31} \sin 2\theta$	$X_1(\theta)/G^2 = 2/N \sum_{j=1}^N \{E(\theta, \psi_j)/U\}^2 \cos \psi_j$
$Y_1(\theta)$	$Y_1(\theta) = a_{23} \sin 2\theta = a_{32} \sin 2\theta$	$Y_1(\theta)/G^2 = 2/N \sum_{j=1}^N \{E(\theta, \psi_j)/U\}^2 \sin \psi_j$
$X_0(\theta)$	$X_0(\theta) = \frac{(2a_{33} - a_{11} - a_{22}) \cos 2\theta + (a_{11} + a_{22} + 2a_{33})/4}{}$	$X_0(\theta)/G^2 = 2/N \sum_{j=1}^N \{E(\theta, \psi_j)/U\}^2$
	$\theta = 0 \rightarrow F = a_{33}$	

여기서 N는 回轉角 ψ 에 있어서의 角位置들의 數가 되며 $\psi_i = \frac{2\pi i}{N}$ ($i=1 \sim N$)이다. 또한 θ 에 대해서도 M개의 角位置들에 대해, 이 過程을 반복해 나가고 式(25)에 관련시키면 C의 成分들이 같은 過程을 거침으로서 얻어진다. C가 구해지고 나면, JACOBI 法이라고 불리는 方法에 의해 이 固有値들은 계산된다. 세계의 固有値들에 대한 中間값을 C로 正規化하면 行列 A가 얻어진다.

3. 實驗裝置 및 方法

3.1. 實驗裝置

本 研究에서는 T.H.W. 를 平均速度의 크기가 最大 50 m/s 정도의 流動에 적용될 것으로 간주하므로 이것을 最大速度로 하여 壓縮機에서 壓縮한 空氣를 配管에 의해 SURGE-TANK 에 流入시켰고 SURGE-TANK 入口에 장착되어 있는 밸브로 流量을 조절함으로써 流速이 결정되며 流路의 中央에 놓인 PITOT 管의 差壓으로부터 計算된다.

또한 移送裝置는 YAWING ARM 과 ROTATOR HEAD 에 의해 PROBE 의 中心을 고정시킨 상태로 PROBE 에 傾斜角 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) 와 回轉角 ψ ($0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$) 를 줄 수 있게 했다. YAWING ARM 은 手動으로 움직이고, 그 回轉軸에 직결되어 있는 ROTARY ENCODER 로 부터의 出力을 카운트하여 角度를 구하도록 하고 있다. 이 ROTARY ENCODER 는一回轉 2000 PULSE 의 것으로서 그 分解能力이 0.18° ; 精度가 ± 0.0225 이고 이 出力을 DIGITAL COUNTER 에서 BCD-12 BIT 로 변화시킨 컴퓨터에 入力시키고 있다. 한편, ROTATOR HEAD 에서는 5相 STEPPING MOTOR 를 사용하여 PROBE 軸을 직접 回轉시키

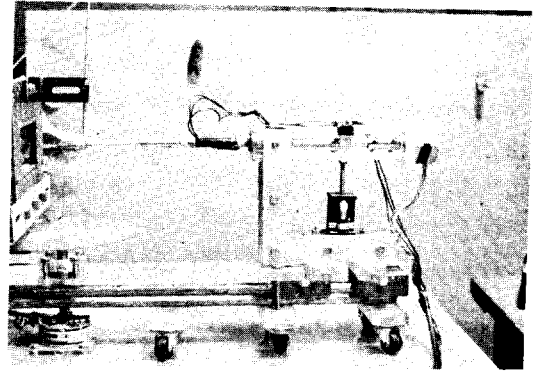


Fig. 2 Experimental apparatus

고 있으며, 이 STEPPING MOTOR 의 分解能力은 0.18° 로서 그 位置決定의 精度는 ± 0.05 이고 컴퓨터로 부터의 出力에서 專用 DRIVER 를 삽입시켜 制御될 수 있도록 하였다.

그림 2는 實驗裝置에서의 流路出口부분과 移送裝置 및 PITOT 管 그리고 HOT-WIRE PROBE 의 裝着狀態를 나타낸 것이다.

3.2. 實用 熱線 PROBE

本 實驗에서 사용하고 있는 PROBE 는 軸對稱型으로 自作 PROBE 와 DANTEC 社製 55 R91 型 PROBE 이다.

自作 PROBE 의 製作規格은 다음과 같으며

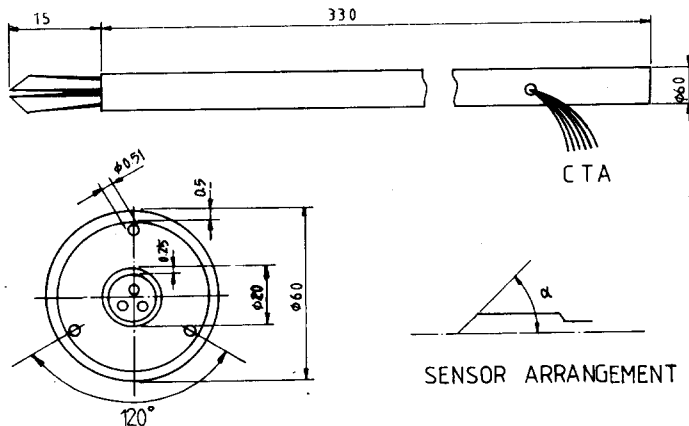


Fig. 3 Hand-made probe

- PRONG 部: $\phi 0.51\text{ mm}$ 강철봉
- STEM 部: $\phi 6\text{ mm}$ (外徑) STAINLESS PIPE
- 熱線部: 全體길이 약 2 mm , $\phi 5\mu\text{m}$ (直徑) 銅 텅스텐線

그림 3에 自作 PROBE의 外形과 寸수를 표시하였다. 自作 PROBE는 軸對稱型이며 센서의 設置角을 變化시켜서 여러 종류로 제작하였고 ($\alpha_1 = 30^\circ, 55^\circ, 90^\circ$ 등) 이것은 非直交型 PROBE의 性質을 조사하기 위함이다.

DANTEC社製 55R91型 PROBE를 使用한 理由는 製作키 곤란할 정도의 복잡한 형상을 지니고 空間分解能力이 뛰어난 PROBE로서 다수의 文獻 [8][9][11] 등에서 취급되고 있으며 3軸 PROBE의 標準器의 存在라는 점과 本實驗에서 使用되는 同社製 CTA와 의 適合性에도 우수하기 때문이다.(그림 4 참조)

3.3. 實驗方法

그림 5에는 實驗에 관련된 計測機器들의 概略圖를 나타내었으며, 本實驗에 앞서 그림 6의 LINEARIZER 設定에 따라 直線化 增幅器의 係數를 결정하여 行하며 그 數値는 표 1과 같다. 이 때의 各 센서의 流動方向에 대한 角度는 그 센서가 流動方向에 대해 直角이면서

또한 센서와 그 프롱이 존재하는 平面이 流動方向에 平行하게끔 놓고 行하였다.

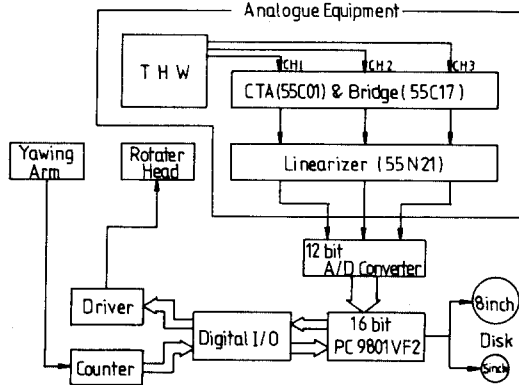


Fig. 5 Measuring instrument system

실제로 實驗은 그림 7의 系統圖를 따라 P-ROBE의 檢定과 함께 行하였다. $\theta = 0^\circ$ 인 點을 基準點으로 하여, 이 方向은 임의의 노즐 基準線^{c)} YAWING ARM의 中心을 目測으로 일치시켜 設定한다. 또한 ϕ 는 實驗을 開始한 時點에서의 水平方向이 0° 가 된다. θ 는 1.8° 씩을, ϕ 는 3.6° 씩을 1 STEP으로 變化시켜 50×100 STEP으로 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq$

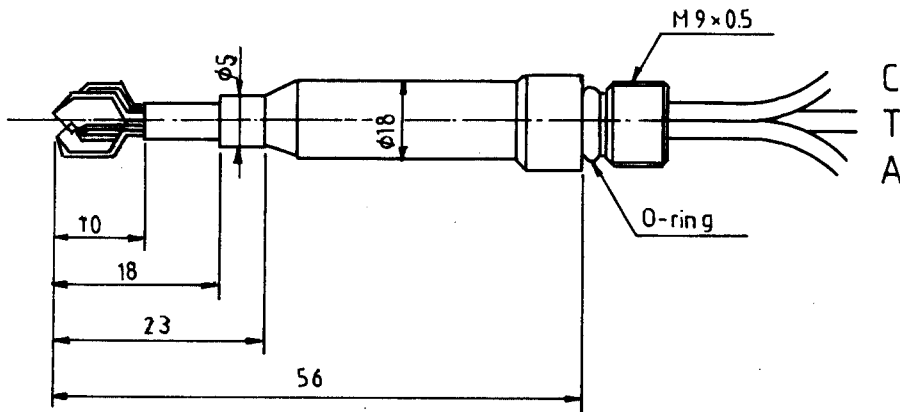


Fig. 4 Dantec 55R91 probe

PROBE	SENSOR	CONSTANT					U _{max}	v
		A	B	C	D	E		
MODEL 1 ($\alpha = 30^\circ$)	No. 1	0.1165	0.0980	-0.1	-1.4925	0	22.2012	1.3368
	No. 2	-0.0207	0.11	-1.0042	-1.0042	0	22.1540	1.3570
	No. 3	0.4694	0.07	-0.0860	-4.8574	0	22.2222	1.2663
MODEL 2 ($\alpha = 55^\circ$)	No. 1	-0.0082	0.1067	-0.1	-0.4491	0	22.2863	1.5006
	No. 2	-0.1731	0.1227	-0.15	0.1853	0	22.2226	1.4045
	No. 3	-0.5058	0.1513	-0.1	0.8385	0	22.2353	1.4531
MODEL 3 ($\alpha = 90^\circ$)	No. 1	-0.0183	0.1583	-0.15	-0.8542	0	22.3621	1.5124
	No. 2	-0.1940	0.1454	-0.24	0.1173	0	22.1568	1.5068
	No. 3	0.7238	0.19	-0.16	0.9654	0	22.4079	1.4986
DANTEC 55R 91	No. 1	0.31	0.0839	-0.0895	-3.199	0	21.5839	1.1349
	No. 2	-0.1321	0.12	-0.0618	-1.0735	0	21.6495	1.1209
	No. 3	0.1037	0.0936	-0.1	0.0473	0	21.5936	1.2080

(m/s) (v)

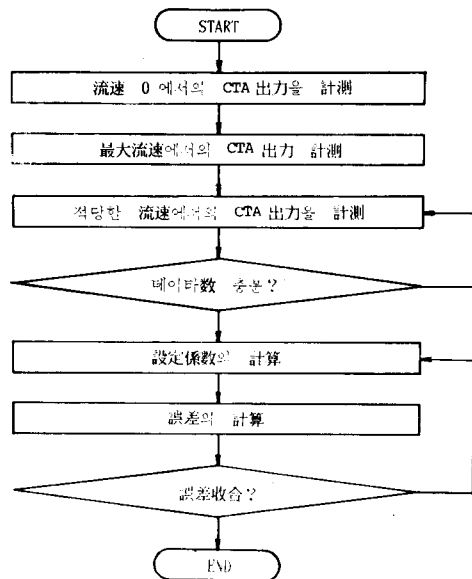


Fig. 6 Linearizer set-up flow chart

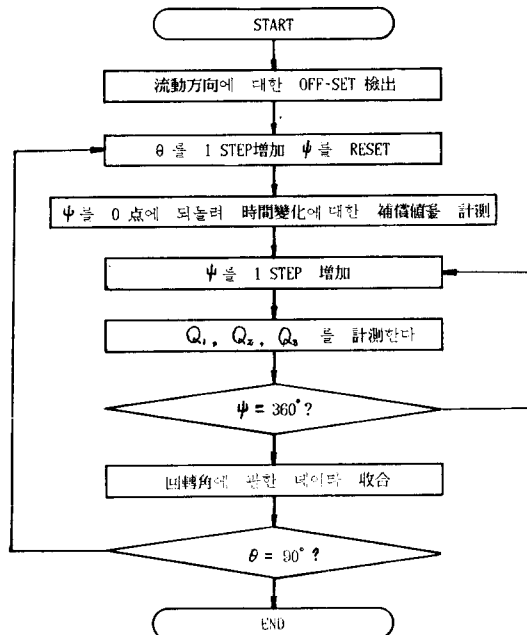


Fig. 7 Experimental flow chart

360°의 半球狀方向을 計測토록 하였다. 이들 合計인 5000點의 角度方向에 대해서 Q_k 의 세 가지를 測定하고 있으며 Q_k 의 값은 LINEARIZER의 出力을 각 成分으로 각각 150회 SAMPLING 하여 그 平均值로서 얻고 있다. 回轉角 ψ 를 變化시킬 때에는 θ 를 일정하게 유지시켰으며 回轉角에 관한 데이터를 傾斜角 1 STEP에 대하여 計測完了한 후, 일단 傾斜角을 基準點($\theta=0^\circ$)에 되돌려 놓고 時間 變化에 대한 補償值를 測定한다.

4. 實驗結果 및 考察

三軸 熱線 PROBE의 檢定方法과 데이터處理方法을 自作 PROBE와 DANTEC社製 55 R91型 PROBE에 적용시켰고 모든 處理를 컴퓨터에서 數值的으로 行하였다.

우선 그림 8에서는 센서의 設置角 $\alpha=55^\circ$

인 PROBE에 대한 感度計數 F 를 측정한 等高線圖가 주어졌다. 여기서 F 에 대한 最小 및 最大의 角位置가 ㉠과 ㉡로 表現되었으며 또한 ㉢는 ㉠과 ㉡ 각각에 대해 垂直인 것이다. 울퉁불퉁한 等高線들은 ㉠에 대해 垂直方向으로 주어진 값들이 그려진 것이며 點 ㉠, ㉢와 ㉡는 센서의 接線, 法線 그리고 倍法線方向으로서 해석된다.

더우기 等高線의 密度가 方向感度に 비례하는 것이므로 본 그림에서의 高感度 ㉠ 주위에서 얻어질 수 있으며 이와 같은 方法으로서 感度係數 等高線圖가 각 센서의 特性을 아는데 有効함을 알 수 있다.

동일한 센서에 대한 感度係數 F 를 傾斜角 θ 들에 대해 측정한 것이 그림 9이다. 직선은 식 (24)로부터 계산된 값이며 測定值의 불일치가 傾斜角이 큰 경우에서 볼 수 있음을 알 수 있다. 이것은 실제로 $E^2 \propto U^2$ 의 가정으로 부터 얻어진 결과이며 直線化增幅器의 셋팅은 하

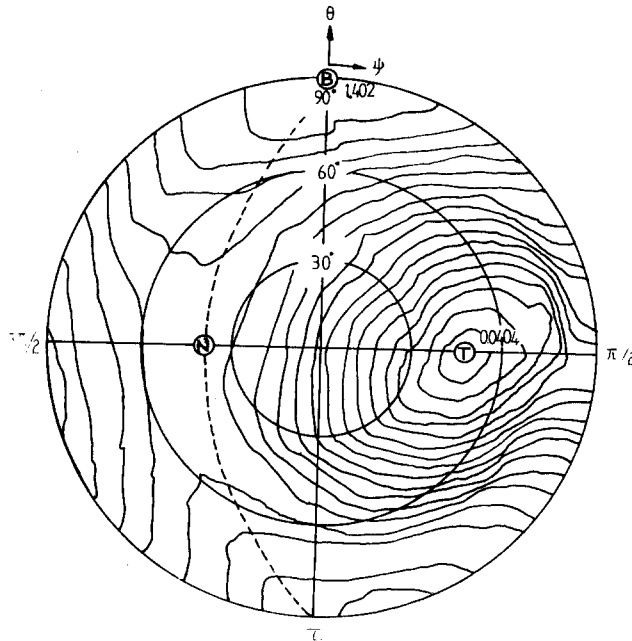


Fig. 8 Contour lines of sensitivity coefficient $F(\alpha=55^\circ)$

나의 代表的인 角位置에서 이루어지고 더우기 熱線이 다른 方向에 設定되어 있다면 直線性이 항상 보장되지 않는 것이다.

그림 10은 $\alpha = 55^\circ$ PROBE 에 대한 感度 係數行列 a_{ij} 의 成分을 나타낸 것이며 表示된 값들은 檢定方法에 의해 구해진 것이고 이들

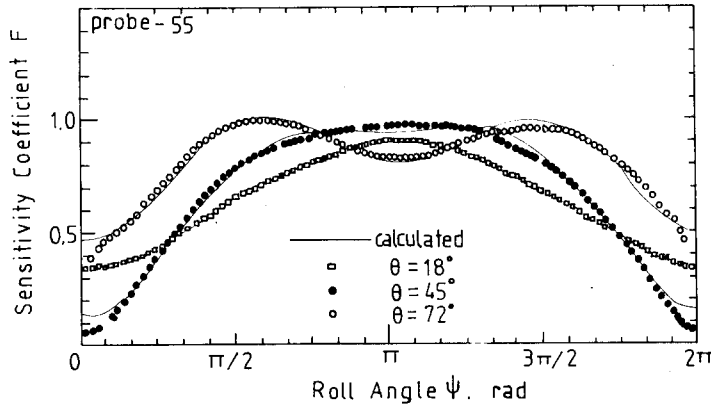


Fig. 9 Sensitivity Coefficient $F(\alpha = 55^\circ)$

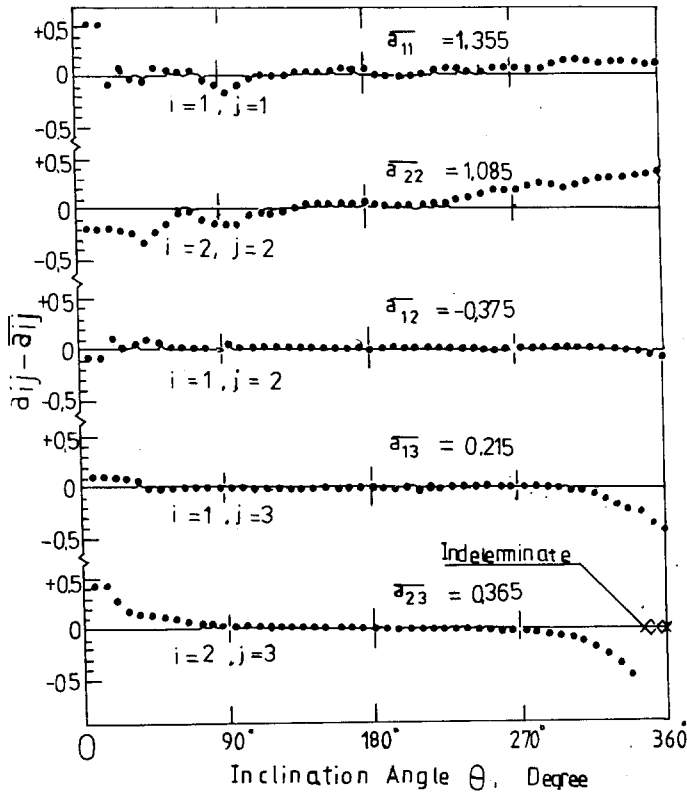


Fig. 10 Components of sensitivity Coefficient matrix $a_{ij}(\alpha = 55^\circ)$

은 예상한 대로 넓은 범주의 θ 에 대해서 거의 일정하다. $\theta = 0^\circ$ 와 $\theta = 90^\circ$ 근처에서의 偏差는 式(25)의 $1 - \cos 2\theta$ 와 $\sin 2\theta$ 가 $\theta = 0^\circ$ 와 90° 에서 零에 가까워진다는 사실에 의하므로 부정확한 것으로 나타난다. 未知의 速度벡터는 데이터 處理法을 使用함으로써 檢定된 PROBE의 LINEARIZER 出力電壓值로부터 결정된다. $\alpha = 55^\circ$ PROBE 에 의해 얻어진 세 성분 U_i ($i=1,2,3$)가 그림 11에 表示되었다. 여기서 θ 와 ψ 는 데이터 變換에 사용

된 것이 아니고 PROBE 方向設定에 關係되어 使用된 것이다.

直線으로 그려진 순수한 速度成分들과 測定值들을 비교해 볼 때 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 NEWTON-RAPHSON 解法은 이 점들 대부분에 대해 적어도 열번 이상을 반복해서 수렴시켜 계산된 것이다. 또한 垂直線으로 표현된 것은 거의 $\frac{\partial F_k}{\partial u_i} \approx 0$ 인 상태의 解에서 볼 수 있는 發散이다.

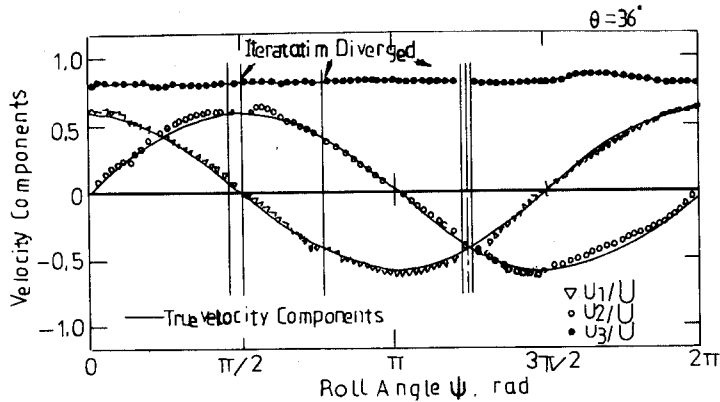


Fig. 11 Comparison of the measured and true velocity components ($\alpha = 55^\circ$)

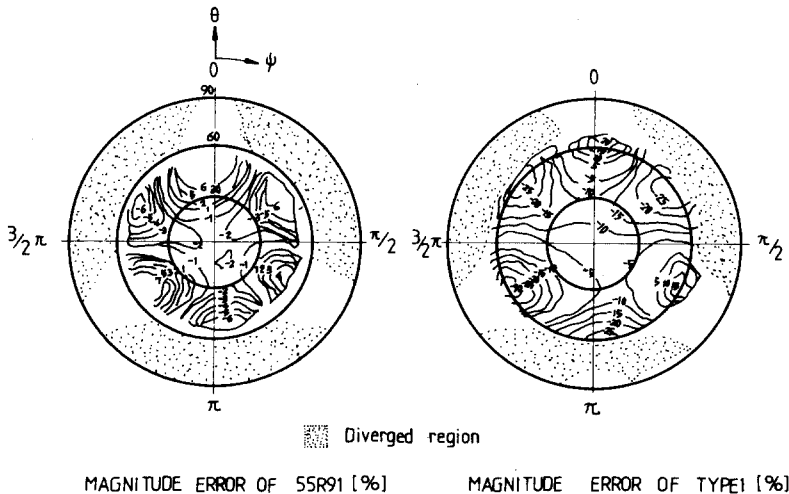


Fig. 12 Error profile of flow velocity vector

그림 12에서는 自作 PROBE TYPE-1과 市販의 DANTEC 55R91 PROBE에 대한 流速 벡터의 크기에 관한 誤差가 표시되었으며 이것은 $\epsilon = |U' - U| / U \times 100 (\%)$ 로 정의된 誤差 벡터 絶對值의 等高線이고 여기서 U' 와 U 는 각각 測

定 및 理論速度 벡터이다. 또한 그림 13에는 순수한 流速 벡터와 計算結果로서 얻어진 벡터가 이루는 偏向角의 크기를 円形 CHART로 표시하였다. 어떠한 PROBE에서도 傾斜角이 60° 以上이 되는 方向에서는 振動 혹은 發散으로 인해

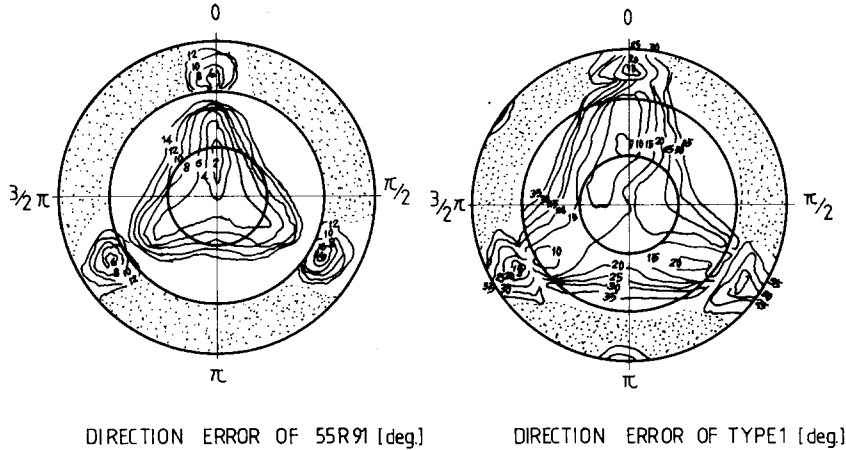


Fig. 13 Direction error of flow velocity vector

구할 수 없는 方向이 있음을 알 수 있었으며, 自作 PROBE와 市販 PROBE의 精度差는 있으나 경향이 일치함을 알 수 있다. 誤差分布는 그림 14의 PROBE 形狀을 참조함으로써 이해된다. 振動 혹은 發散뿐만 아니라 가장 큰 誤差는 ②, ④, ⑥ 方向에서 생긴다. 이 位置에서 특히 θ 가 클때, 센서中 하나는 中間 PRONG의 바로 下流 方向에 위치한다. ①-②, ③-④ 그리고 ⑤-⑥ 方向에서 적은 誤差範圍가 주위로 확장되며 이들 方向에서 세 센서들은 모두 PRONG의 간섭이 가장 적은 位置에 있는 것이다.

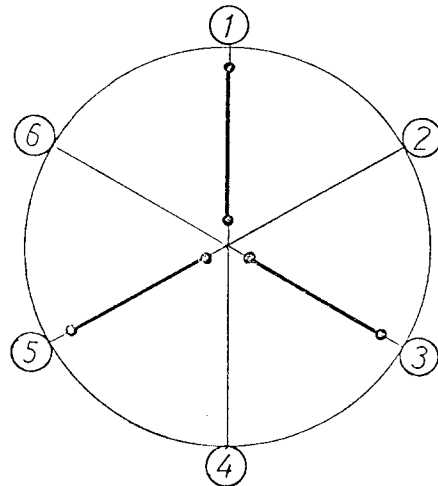


Fig. 14 End view of the test probe

5. 結 論

本 研究에서 提案된 데이타處理法과 檢定方法으로 三軸 熱線 PROBE의 特性評價를 PROBE

形狀에 관계없이 系統的으로 할 수 있도록 하였으며 今後에는 더욱 많은 多種의 形狀을 갖는 三軸 熱線 PROBE에 대해서 이 評價法을 적용시켜 많은 情報를 축적할 必要가 있다고

생각하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 熱線 PROBE 의 세밀한 方向에 대한 感度の 分布를 測定하는 데에 성공하였다.
- 2) 方向感度函數가 三軸 熱線 PROBE 의 特性을 명확하게 표시하는 파라미터임을 확인 할수 있었다.

- 3) 프롭의 干涉效果가 나타나는 範圍에서의 熱線의 感度分布가 어느 精度인지를 알았다.
- 4) 方向感度函數가 分布하는 方式으로부터 三軸 熱線 PROBE 의 形狀을 定性的으로 예측 할수 있음을 알았다.

[參 考 文 獻]

1. 「流體計測法」 JSME DATA BOOK:FLOW MEASUREMENTS 日本機械工學會編, 1985
2. LAKSHMIRAYANA, B AND PONCET, A. "A METHOD OF MEASURING THREE-DIMENSIONAL ROTATING WAKES BEHIND TURBOMACHINERY ROTORS" JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING, JUNE 1974 /P. 87-91
3. RAJ, R AND LAKSHMINARAYANA B. "THREE DIMENSIOANL CHARACTERISTICS OF TURBULENT WAKES BEHIND TURBOMACHINERY" TRANSACTIONS OF THE ASME, APRIL 1976/P. 218-228
4. GORTON, C. A. AND LAKSHMINARAYANA, B. "A METHOD OF MEASURING THE THREE-DIMENSIONAL MEANS FLOW AND TUBULENCE QUANTITIES INSIDE A ROTATING TURBOMACHINERY PASSAGE" JOURNAL OF ENGINEERING FOR POWER, APRIL 1976 /P. 137-146.
5. ANAD, A. K AND LAKSHMINARAYANA, B. "AN EXPERIMENTAL STUDY OF THREE-DIMENTIONAL TURBULENT BOUNDARY LAYER AND TURBULENCE CHARACTERISTICS INSIDE A TURBOMACHINERY ROTOR PASSAGE" TRANSACTIONS OF THE ASME, VOL 100, OCTOBER 1974/P. 676-690
6. SKINNER, G. T AND RAE, W. J. "CALIBRATION OF A THREE-ELEMENT HOT-WIRE ANEMOMETER" REV. SCI. INSTRUM., 55(4), APRIL 1984/P. 578-581
7. MATHIOUDAKIS, K AND BREUGELMANS, F. A. E. "USE OF TRIPLE HOT WIRES TO MEASURE UNSTEADY FLOWS WITH LARGE DIRECTION CHANCES" J. PHYS. E, SCI. INSTRUM., VOL. 18, 1985/P. 414-419
8. LAKSHMIRAYANA, B. "THREE SENSOR HOT WIRE/FILM TECHNIQUE FOR THREE DIMENSIONAL MEAN AND TURBULENCE FLOW FIELD MEASUREMENT" TSI QUART. X 3-12, ISSUE 1, JAN-MAR. 1981/P. 3-23.
9. ANDREOPOULOS, J. "IMPROVEMENT OF THE PERFORMANCE OF TRIPLE HOT WIRE PROBES" REV. SCI. INSTRUM., 54(6), JUNE 1983/P. 733-740.
10. BUTLER, T. L AND WAGNER, J. W. "APPLICATION OF THREE-SENSOR

- HOT-WIRE PROBE FOR INCOMPRESSIBLE FLOW" AIAA JOURNAL, VOL. 21, NO. 5, MAY 1983/P. 726-732.
11. ANDREOPOULOS, J.
"STATISTICAL ERRORS ASSOCIATED WITH PROBE GEOMETRY AND TURBULENCE INTENSITY IN TRIPLE HOT-WIRE ANEMOMETRY"
J. PHYS. E. SCI. INSTRUM., VOL. 16, 1983/
P. 1264-1271.
12. MOFFAT, R. J., YABVZKURT, S AND CRAWFORD, M. E.
"REAL-TIME MEASUREMENTS OF TURBULENCE QUANTITIES WITH A TRIPLE HOT-WIRE SYSTEMS"
PROCEEDINGS OF THE DYNAMIC FLOW CONFERENCE 1978 / P. 1013-1035.
13. GRACIO FABRIS
"PROBE AND METHOD FOR SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF "TURE"
INSTANTANEOUS TEMPERATURE AND THREE VELOCITY COMPONENTS IN TURBULENT FLOW"
REV. SCI. INSTRUM., 49(5), MAY, 1978/
p. 654-664.