

<論 文>

열선 유속계를 이용한 3차원 유동의 계측 방법

강신형* · 유정열* · 백세진** · 이승배**

(1987년 4월 17일 접수)

A Method for Measuring the Three-Dimensional Flows by the Hot-Wire Anemometer

S.H. Kang, J.Y. Yoo, S.J. Baik and S.B. Lee

Key Words: Flow Measurement(유동계측) Hot-Wire Anemometer(열선유속계)

Abstract

A method for measuring three-dimensional turbulent flows by the hot-wire anemometer is introduced. Mojolla's method using the X-type probe is adopted and modified for the slant-wire probe without the linearizer. The probe is aligned with specified angles to the given uniform flow and the the shear layer to verify the measuring errors due to the three-dimensionality and the turbulence level. Errors in the measurements of mean velocities and Reynolds stresses increase with the degree of three dimensionality in the flow. The incoming flow angle of 20 degree seems to be the limit of reasonable flow measurements. But there still appear large data scatterings in Reynolds shear stresses.

1. 서 론

열선유속계를 이용한 3차원 유동 계측은 많은 연구가 되어 왔다. 사용하는 프로우브의 종류에 따라서 I형, 경사형, X형, V형 및 3선프로우브 등으로, 또 브리지 회로 출력 신호의 처리과정에 따라 선형화기기를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우로 나눌 수 있다. 유동속도와 브리지 회로 출력 전압의 관계는 비선형이므로 출력 전압으로부터 속도 성분을 구하기 위해서는 적절한 연산을 해야하며, 난류량이 존재하는 경우는 좀 더 복잡해진다. 특히 유동이 3차원인 경우는 피타고라스 비선형에 의해 계산이 매우 복잡하게

되며, 선형화 기기를 사용하더라도 유동의 3차원성에 의한 비선형은 선형화 되지 않으므로 계산이 간단해지지 않는다.

단선(single) 프로우브인 경사 프로우브는 열선이 차지하는 검사체적이 적어 전단율이 큰 유동의 측정에 유리하지만 한 위치에서의 속도측정에 많은 양의 자료가 필요하게 되고 이에 따라 실험에 소요 되는 시간도 많아지게 된다^(1,2). X형 프로우브를 사용하면 필요한 메타양과 실험 시간을 줄일 수 있으나 전단율이 큰 경우는 두 열선이 놓여진 위치가 서로 달라서 오차가 커지게 된다.

Fujita & Kovaszny⁽³⁾은 2차원 유동장에서 I형 프로우브를 회전시켜 레이놀즈응력 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, \overline{uv} 를 측정하였으며, Bissonnette & Mellor⁽⁴⁾ 등은 경사 혹은 I형

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

** 서울대학교 대학원

프로우브를 이용하여 6개의 베이놀즈 응력을 계측하였다.

평균 속도 방향으로 프로우브를 설치하여 3차원 난류 성분을 계측하는 방법은 Johnston,⁽⁵⁾ Gessner et al.⁽⁶⁾ 등에 의해 개발되었다. Johnston은 X형 혹은 3선 프로우브를 XY평면에 놓아 $\bar{u}^2, \bar{v}^2, \overline{uv}$ 를 구하고, XZ평면에서 \bar{w}^2, \overline{uw} 를 결정하는 방법을 고안하였다. Gessner et al.은 위의 방법이 평균 속도의 크기와 방향이 정확하지 않으면 난류량계측시 상당히 큰 오차가 발생하므로 평균 속도의 유입각에 따라 I형 혹은 경사 프로우브의 회전 각도를 결정하여 열선을 최적 평면에 위치시키는 방법을 제안하였다.

De Grande et al.⁽⁷⁾는 경사 프로우브를 연속적으로 회전시켜 많은 양의 데이터로부터 평균 유동 속도의 크기와 방향을 계측하였다. 또 Acrivlellis⁽¹⁾는 경사 프로우브와 I형 프로우브를 이용하여 3차원 난류유동을 계측하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 선형화된 브리지 출력전압을 제공하여 난류량의 고차항을 무시하지 않고 계산하였다. 또 요동양의 4차항까지 고려하는 방법이 Kitzing⁽⁸⁾에 의해 제안되었다. 그러나 이 두 방법은 몇 개의 열선 기기를 더 필요로 하는 단점을 갖고 있다.

Mojolla⁽⁹⁾는 X형 프로우브를 사용한 방법을 제안하였다. 브리지 출력전압과 속도 성분과의 비선형 관계를 프로우브 방향의 속도가 다른 방향속도보다 크다는 가정하에 이항 정리를 사용하여 전개하였으며, 평균속도 계산시에는 1차항까지만 고려하였다. 브리지 출력 전압을 선형화기기를 사용하지 않고 비선형 상태로 사용하는 경우는 속도 계산을 용이하게 하기 위해 적절한 가정을 하게 되므로 계측하려는 유동에 제한을 주게 된다. 따라서 평균 속도 방향과 프로우브 방향과의 각도차가 커질수록, 또 난류량이 증가할수록 오차는 커지게 된다.

본 연구에서는, X형 프로우브에 Mojolla의 방법을 적용하였으며, 경사프로우브에는 프로우브의 경사각도와 회전각도에 따른 속도성분과 출력전압과의 관계를 유도하여 적용하였으며, 이들 방법에 의한 3차원 유동계측의 정확성과 적용 범위를 조사하였다.

2. 열선 유속계의 기본 원리

King⁽¹⁰⁾에 의하면 열선에 수직한 속도 q 에 대해서 순간적인 열선의 반응은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E^2 = E_0^2 + Bq^{1/2} \quad (1)$$

여기서 E 는 열선의 브리지 회로의 순간 출력전압이고 E_0 와 B 는 유체와 열선에 따른 상수이다. 조금 더 일반적으로 유효 냉각속도 q_{eff} 를 이용하면 다음 식으로 표시된다.

$$E^2 = E_0^2 + Bq_{eff}^n \quad (2)$$

여기서 n, E_0, B 는 점정실험으로 구한다. 순간 출력전압 E 를 평균 전압 \bar{E} 와 요동전압 e 의 합으로 표시하여 q_{eff} 를 구한 후, 이항급수 정리에 의해 전개한 식에 시간 평균을 취하면 다음과 같이 된다.⁽⁹⁾

$$\bar{q}_{eff} = \left(\frac{\bar{E}^2 - E_0^2}{B} \right)^{1/n} (1+f) \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{n} \frac{\bar{e}^2}{(\bar{E}^2 - E_0^2)} + \frac{2}{n} \left(\frac{1-n}{n} \right) \frac{\bar{E}^2 \bar{e}^2}{(\bar{E}^2 - E_0^2)^2}$$

Fig. 1과 같이 열선에 고정된 좌표계 (ξ, η, ζ)는 (x, y, z) 좌표축을 z 축을 중심으로 ϕ , x 축을 중심으로 $-\psi$ 만큼 회전시켜 얻을 수 있다. 이때 (ξ, η, ζ) 방향의 속도 성분들을 q_n, q_r, q_s 라고 하자. 그러면 좌표변환에 의해 다음 관계가 성립한다.

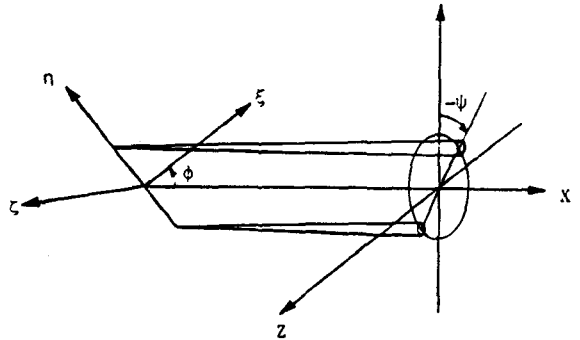


Fig. 1 The coordinate systems

$$q_n = (U+u)\cos\phi + \{(V+v)\cos\phi - (W+w)\sin\phi\}\sin\phi$$

$$q_r = -(U+u)\sin\phi + \{(V+v)\cos\phi - (W+w)\sin\phi\}\cos\phi \quad (4)$$

$$q_s = (V+v)\sin\phi + (W+w)\cos\phi$$

이때 q_{eff} 는 다음과 같이 정의한다⁽¹¹⁾

$$q_{eff} = (q_n^2 + k^2 q_r^2 + k^2 q_s^2)^{1/2} \quad (5)$$

k 와 h 는 점정실험을 통해 적당한 값을 결정하나, 보통 k 는 0.1~0.3, h 는 1.0으로 한다⁽¹²⁾. 3차원 난류 유동에서는 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 및 u, v, w 들이 비슷한 크기이나 \bar{U} 가 $\bar{V}, \bar{W}, u, v, w$ 들보다 훨씬 크다고 가정하면 (5)식을 이용하여 q_{eff} 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{eff} = k_0 \bar{U} \left(1 + \frac{u}{\bar{U}} + \frac{k_1}{2} \left(\frac{\bar{V}^2 + 2\bar{V}v + v^2}{\bar{U}^2} \right) + \frac{k_2}{2} \left(\frac{\bar{W}^2 + 2\bar{W}w + w^2}{\bar{U}^2} \right) + k_3 \left(\frac{\bar{V} + v}{\bar{U}} \right) - \frac{k_2^2}{2\bar{U}^2} (\bar{V}^2 + 2\bar{V}v + v^2) \right)$$

$$+0\left(\frac{u^2}{U^2}\right) \quad (6)$$

여기서

$$k_0 = [\cos^2\phi + k^2\sin^2\phi]^{1/2} \quad k_1 = \frac{\sin^2\phi + k^2\cos^2\phi}{k_0^2}$$

$$k_2 = \frac{(1-k^2)\sin\phi\cos\phi}{k_0^2} \quad k_3 = \frac{1}{k_0^2}$$

이다. 식 (3) 및 (6)으로부터 q_{off} 를 소거하면 출력 전압으로부터 속도 성분을 계산할 수 있다.

3. X형 프로우브를 이용한 계측

X형 프로우브를 이용하여 3차원 계측을 수행하는 경우를 생각하자. X형 프로우브의 경우 두 열선의 특성이 동일하지 않으므로 점자 A와 B로 구별한다. 이때 식 (3)과 (6)에서, A 열선의 경우

$$k_{0A}U\left[1 + \left(\frac{k_{1A}}{2} - \frac{k_{2A}^2}{2}\right)\left(\frac{\bar{v}^2 + V^2}{U^2}\right) + \frac{k_{3A}}{2}\left(\frac{\bar{w}^2 + W^2}{U^2}\right) + k_{2A}\frac{V}{U}\right] = \left(\frac{\bar{E}_A^2 - E_{0A}^2}{B_A}\right)^{1/2n_A} (1+f_A) \quad (7)$$

이고 B 열선도 같은 방식으로 나타낼 수 있다. 또 교정현시 기준 속도 U_0 에서는 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$(\bar{q}_{off})_{A_0} = k_{0A}U_0 = \left(\frac{\bar{E}_{A_0}^2 - E_{0A}^2}{B_A}\right)^{1/n_A} (1+f_{A_0}) \quad (8)$$

열선 B의 경우에도 마찬가지다.

상용하는 X형 열선의 경우 $\phi_A = 45^\circ$, $\phi_B = -45^\circ$ 이므로 다음 관계가 성립한다.

$$k_{0A} = k_{0B}, \quad k_{1A} = k_{1B}, \quad k_{2A} = -k_{2B}, \quad k_{3A} = k_{3B} \quad (9)$$

따라서 평균 유동 속도 U, V 는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{2(1+F)} \left\{ \left(\frac{\bar{E}_A^2 - E_{0A}^2}{\bar{E}_{A_0}^2 - E_{0A}^2}\right)^{1/n_A} \left(\frac{1+f_A}{1+f_{A_0}}\right) + \left(\frac{\bar{E}_B^2 - E_{0B}^2}{\bar{E}_{B_0}^2 - E_{0B}^2}\right)^{1/n_B} \left(\frac{1+f_B}{1+f_{B_0}}\right) \right\} \quad (10)$$

$$\frac{V}{U_0} = \frac{1}{2k_{2A}} \left\{ \left(\frac{\bar{E}_A^2 - E_{0A}^2}{\bar{E}_{A_0}^2 - E_{0A}^2}\right)^{1/n_A} \left(\frac{1+f_A}{1+f_{A_0}}\right) - \left(\frac{\bar{E}_B^2 - E_{0B}^2}{\bar{E}_{B_0}^2 - E_{0B}^2}\right)^{1/n_B} \left(\frac{1+f_B}{1+f_{B_0}}\right) \right\} \quad (11)$$

여기서

$$F = \left(\frac{k_{1A}}{2} - \frac{k_{2A}^2}{2}\right)\left(\frac{\bar{v}^2 + V^2}{U^2}\right) + \frac{k_{3A}}{2}\left(\frac{\bar{w}^2 + W^2}{U^2}\right) \quad (12)$$

이다.

이와 비슷하게 X형 열선을 xz 평면에 두면 W/U_0 를 구할 수 있다. U/U_0 는 다음에 구할 난류량 \bar{v}^2, \bar{w}^2 를 알아야 구할 수 있다. 난류량들을 구하기 위해 식 (6)에서 유도양에 대해 1차항까지만 고려하면 다음과 같다.

$$q_{off} = k_0U\left(1 + \frac{u}{U} + k_2\frac{V}{U} + k_3\frac{v}{U}\right) \quad (13)$$

q_{off} 를 시간 평균과 교란양으로 나눈 후 정리하면 다음과 같다.

$$q_n = \left(\frac{\bar{E}^2 - E_0^2}{B}\right)^{1/n}, \quad q_v = q_n \cdot \frac{2\bar{E}e}{n(\bar{E}^2 - E_0^2)} \quad (14)$$

따라서 식 (13)과 식 (14)로부터

$$e = \frac{n}{2} \left(\frac{\bar{E}^2 - E_0^2}{E}\right) \left(\frac{u + k_2v}{U + k_0V}\right) \quad (15)$$

따라서 식 (15)를 A, B 열선에 대하여 구한 후 난류량들과 각 열선의 유도전압과의 관계를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\bar{u}^2}{U^2} = \frac{1}{4} (C_A^2 \bar{e}_A^2 + 2C_A C_B \bar{e}_A \bar{e}_B + C_B^2 \bar{e}_B^2) \quad (16)$$

$$\frac{\bar{v}^2}{U^2} = \frac{1}{4k_2} (C_A^2 \bar{e}_A^2 - C_A C_B \bar{e}_A \bar{e}_B + C_B^2 \bar{e}_B^2) \quad (17)$$

$$\frac{\bar{w}^2}{U^2} = \frac{1}{4k_3} (C_A^2 \bar{e}_A^2 - C_B^2 \bar{e}_B^2) \quad (18)$$

여기서

$$C_A = \frac{2}{n_A} \left(1 + k_{2A} \frac{V}{U}\right) \left(\frac{\bar{E}_A}{\bar{E}_A^2 - E_{0A}^2}\right)$$

$$C_B = \frac{2}{n_B} \left(1 + k_{2B} \frac{V}{U}\right) \left(\frac{\bar{E}_B}{\bar{E}_B^2 - E_{0B}^2}\right) \quad (19)$$

한편 \bar{w}^2 의 계측은 다음과 같이 한다. X속을 중심으로 45° 회전한 좌표계를 (Ys, Zs)라고 하고 Ys, Zs 방향의 속도 유도양을 각각 v_s 와 w_s 라고 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{2}}(v+w), \quad w_s = \frac{1}{\sqrt{2}}(-v+w) \quad (20)$$

따라서 식 (20)을 제곱하고 시간 평균을 취하면 \bar{w}^2 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{w}^2 = \frac{1}{2}(\bar{v}_s^2 - \bar{w}_s^2) \quad (21)$$

여기서 \bar{v}_s^2 와 \bar{w}_s^2 는 \bar{v}^2 와 \bar{w}^2 의 경우와 같은 방법으로 X형 열선을 X-Ys 평면 및 X-Zs 평면에 위치시키고 구하게 된다. 이렇게 구한 난류량을 식 (10)에 대입하여 U 를 구하고, 다시 난류량과 U 가 수렴할 때까지 반복계산을 수행해야 한다.

4. 경사진 열선에 의한 계측

경사열선을 사용하기 위하여 프로우브의 경사각도와 임의의 회전각도에 대한 속도 성분과 출력 전압과의 관계를 구하여야 한다. 따라서 2절에서의 같이 식 (4)를 식 (5)에 대입하면⁽¹⁴⁾

$$q_{off} = k_0[(U+w)^2 + k_1(V+v)^2 + k_2(W+w)^2 + 2k_3(U+w)(V+v) + 2k_4(U+w)(W+w) + 2k_5(V+v)(W+w)]^{1/2}$$

이 된다. 여기서

$$\begin{aligned} k_0 &= (\cos^2\phi + k^2\sin^2\phi)^{1/2} \\ k_1 &= (\cos^2\phi\sin^2\phi + \sin^2\phi + k^2\cos^2\phi\cos^2\phi)/k_0^2 \\ k_2 &= (\sin^2\phi\sin^2\phi + \cos^2\phi + k^2\sin^2\phi\cos^2\phi)/k_0^2 \\ k_3 &= (1 - k^2)\cos\phi\sin 2\phi/2k_0^2 \\ k_4 &= -(1 - k^2)\sin\phi\sin 2\phi/2k_0^2 \\ k_5 &= -(\sin^2\phi - 1 + k^2\cos^2\phi)\sin 2\phi/2k_0^2 \end{aligned} \quad (23)$$

k_i 는 열선각도 ϕ 와 프로우브의 회전 각도 ψ 에 따라 변하게 된다. 식 (22)에서 q_{eff} 를 이항급수로 전개하여 2차항까지 고려한 후 시간 평균을 취한 다음 식 (3)으로부터 q_{eff} 를 소거하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_0 \left[\bar{U}^2 + \left(\frac{k_1}{2} - \frac{k_3^2}{2} \right) \bar{V}^2 + \left(\frac{k_2}{2} - \frac{k_4^2}{2} \right) \bar{W}^2 \right. \\ \left. + k_3 \bar{U}\bar{V} + k_4 \bar{U}\bar{W} + (k_5 - k_3k_4) \bar{V}\bar{W} \right. \\ \left. + \left(\frac{k_1}{2} - \frac{k_3^2}{2} \right) \bar{v}^2 + \left(\frac{k_2}{2} - \frac{k_4^2}{2} \right) \bar{w}^2 \right. \\ \left. + (k_5 - k_3k_4) \bar{v}\bar{w} \right] \\ = \bar{U} E^*(\phi, \psi) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} E^*(\phi, \psi) &\equiv \left(\frac{\bar{E} - E_0}{B} \right)^{1/n} (1 + f) \\ f &= \frac{1}{n} \frac{\bar{e}^2}{(\bar{E}^2 - E_0^2)} + \frac{2}{n} \left(\frac{1-n}{n} \right) \frac{E^2 \bar{e}^2}{(\bar{E}^2 - E_0^2)^2} \end{aligned} \quad (25)$$

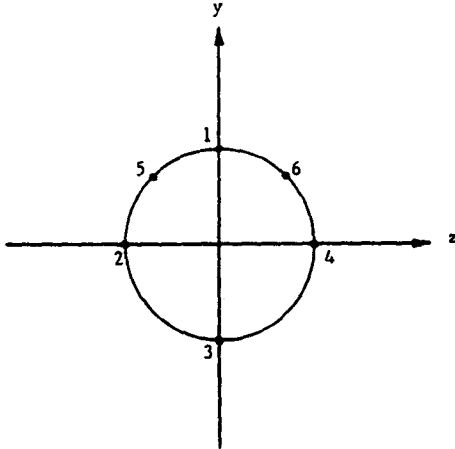


Fig. 2 The positions of ϕ

이다. 수정된 열선의 출력 전압을 $\phi=0^\circ$ 및 45° 일때 각각 $E_*(i)$ 및 $E_*(i)$ 라고 하며 i 는 $\phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 에 따라 순서 대로 1~6으로 Fig. 2에 나타내었다. 식 (24)에서 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=180^\circ$ 일때의 차를, 또 $\phi=90^\circ$ 와 $\phi=270^\circ$ 일때의 차를 이용하여 \bar{V} 와 \bar{W} 를 구할 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{k_0(E_*(1) - E_*(3))}{(1 - k^2)} \quad (26)$$

$$\bar{W} = \frac{k_0(E_*(2) - E_*(4))}{(-1 + k^2)} \quad (27)$$

또 식 (24)를 \bar{U} 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{U}^2 + \left(k_3 \bar{V} + k_4 \bar{W} - \frac{E^*}{k_0} \right) \bar{U} + \left(\frac{k_1}{2} - \frac{k_3^2}{2} \right) (\bar{V}^2 + \bar{v}^2) \\ + \left(\frac{k_2}{2} - \frac{k_4^2}{2} \right) (\bar{W}^2 + \bar{w}^2) + (k_5 - k_3k_4) (\bar{V}\bar{W} \\ + \bar{v}\bar{w}) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

ϕ 가 1~6 위치까지 변함에 따라 식 (28)은 6개의 식이 된다. 2차항까지 고려한 식 (28)로부터 $\bar{v}^2, \bar{w}^2, \bar{v}\bar{w}$ 는 구할 수 있으나 나머지 3개의 레이놀즈 응력은 못 구하므로 6개 레이놀즈 응력 모두를 다음과 같이 구한다. 식 (22)를 1차항까지만 이항 전개한 후 식 (14)를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$\begin{aligned} \bar{e}^2 = \frac{n^2}{4} \left(\frac{\bar{E}^2 - E_0^2}{\bar{E}} \right)^2 \\ \frac{\bar{v}^2 + k_3^2 \bar{v}^2 + k_4^2 \bar{w}^2 + 2k_3 \bar{v}\bar{w} + 2k_4 \bar{u}\bar{w} + 2k_3 k_4 \bar{v}\bar{w}}{(\bar{U} + k_3 \bar{V} + k_4 \bar{W})^2} \end{aligned} \quad (29)$$

따라서 6각도에서의 \bar{E} 와 \bar{e}^2 을 읽어 들이면 식 (29)는 6개의 레이놀즈 응력들에 대한 6개의 연립 방정식이 된다. 그런데 6위치 모두 경사프로우브만 사용하면 식 (29)가 특이해지므로 한 위치 이상에서 경사각도가 다른 프로우브를 사용하여야 한다. 유동방향에 따라 프로우브 종류 및 측정위치 선택에 있어 최적 방법이 있을 것으로 사료되나 본 연구에서는 간단히 1위치에서만 I형 프로우브를 사용하였다. 먼저 식 (26)과 (27)로부터 \bar{V} 와 \bar{W} 를 구하고 식 (28)에서 난류량

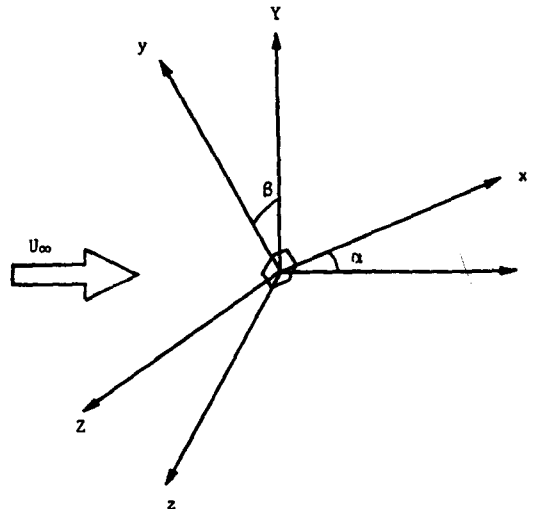


Fig. 3 The setting angle of the probe

들을 모두 0 이라 가정 한 후 6개의 ψ 위치에서 구한 \bar{U} 의 값들을 평균한다. 이렇게 구한 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 를 이용하여 6개의 레이놀즈응력들에 대한 연립 방정식인 식 (29)를 풀고 다시 이들 레이놀즈응력값들을 이용해 \bar{U} 를 구하며, \bar{U} 와 난류량들이 수렴할 때까지 반복계산한다.

5. 검증 실험 및 결과

검정 실험은 난류량이 존재하지 않는 균일한 유동장과 난류량이 큰 실린더 후류 유동에서 Fig. 3과 같이 열선을 임의의 각도 α, β 로 설치하여 열선에 대해 상대적으로 3차원 유동이 되도록 하였다. 열선 좌표계 (x, y, z) 에 대해 평균 속도 성분 및 난류량들을 구한 후, 원좌표계 (X, Y, Z) 에서의 속도 성분 및 난류량들로 환산한다. 설정한 α, β 에 대하여 속도 성분 및 Reynolds 응력들을 구한 뒤 원좌표계로 환산한 평균속도 성분 및 난류량들의 각도 α 와 β 에 대한 변화를 고찰하였다.

실험에 사용된 Göttingen 형 풍동의 시험부 크기는 900mm×900mm×3600mm이며, 최대 속도 60m/s까지 연속 조절이 가능하다. 또 풍속 20m/s에서 균일도의 편차는 0.3%, 난류 강도는 0.2% 이내이므로 본 실험의 목적에 매우 적합하다.

프로브는 마이크로 컴퓨터에 의해 제어되는 스텝모투어에 의해서 회전되었으며, 열선 유속계로부터의 애널로그 신호는 선형화 기기를 통과시키지 않고 곧바로 다채널 디지털 레코더에서 디지털 값으로 바뀌며, 그 값들은 마이크로 컴퓨터에 입력된다.

실험은 α 를 0°, 10°, 20° 및 30°로 변화시키고 각각의 α 에 대해 β 를 0°, 30°, 60° 및 90°로 변화시킨 각각의 위치에서, 난류량이 거의 존재하지 않으며 평균유속이 20m/s인 균일 유동장과 직경 32mm인 실린더 후류($L=16d$) 즉 난류량이 존재하는 유동장에서 속도량들을 측정하였으며, X형 프로브를 사용하는 방법과 경사 프로브를 사용하는 방법의 두 경우에 대해 검정 실험을 하였다. α 가 45°까지는 열선지지봉(prong)에 의해 열선이 직접 가리지 않으며, α 가 30°내에서는 지지봉후류에 의한 가림효과도 없을 것으로 생각된다.

X형 프로브를 사용하여 $k=0.3$ 으로 보정한 경우(경우 1)와 $k=0$ 인 cosine cooling law의 경우(경우 2), 또 평균 횡단 속도 W 를 무시하고 계산한 경우(경우 3)에 대해 모든 속도량들을 비교하였다. 먼저 균일유동의 경우를 살펴 보면 $k=0.3$ 으로 보정한 경

우 측정된 평균 유동 속도 크기 U_m 을 α 의 변화에 따라 점점 크게 측정되고 있다. 즉 $\alpha=30^\circ$ 인 경우에는 약 3% 정도 크게 예측하고 있다. 이는 α 가 커짐에 따라 \bar{U} 가 \bar{V}, \bar{W} 보다 매우 크다고 한 가정이 맞지 않기 때문이다. 또 경우 2와 3에서는 $\alpha=30^\circ$ 인 경우 각

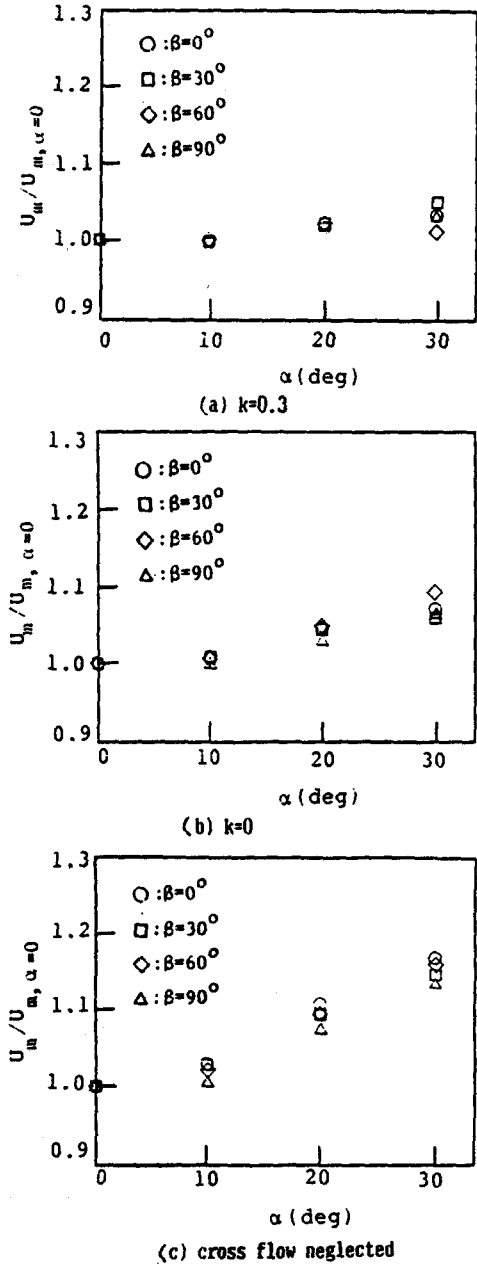
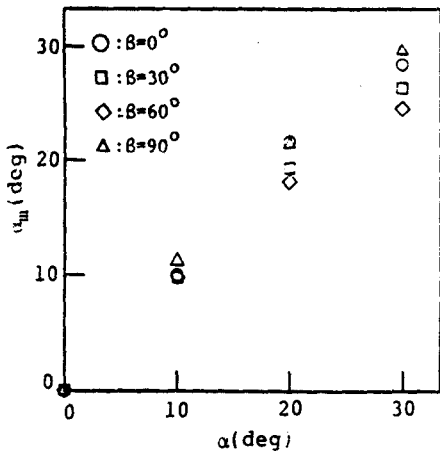
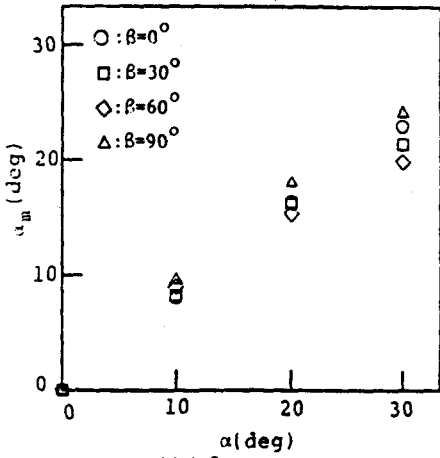


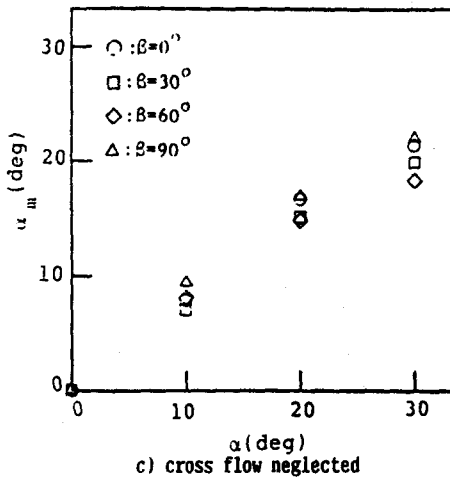
Fig. 4 The measured U in the uniform flow (X-probe)



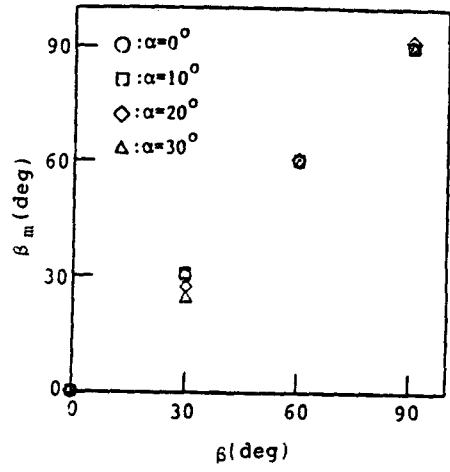
a) $k=0.3$



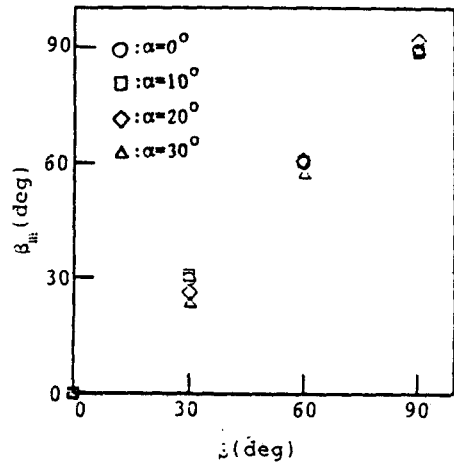
b) $k=0$



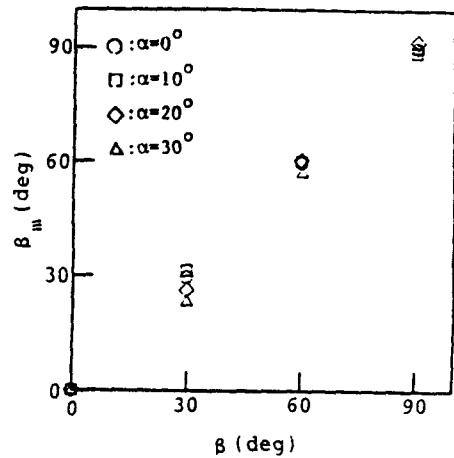
c) cross flow neglected



a) $k=0.3$



b) $k=0$



c) cross flow neglected

Fig. 5 The measured α in the uniform flow (X-probe) Fig. 6 The measured β in the uniform flow (X-probe)

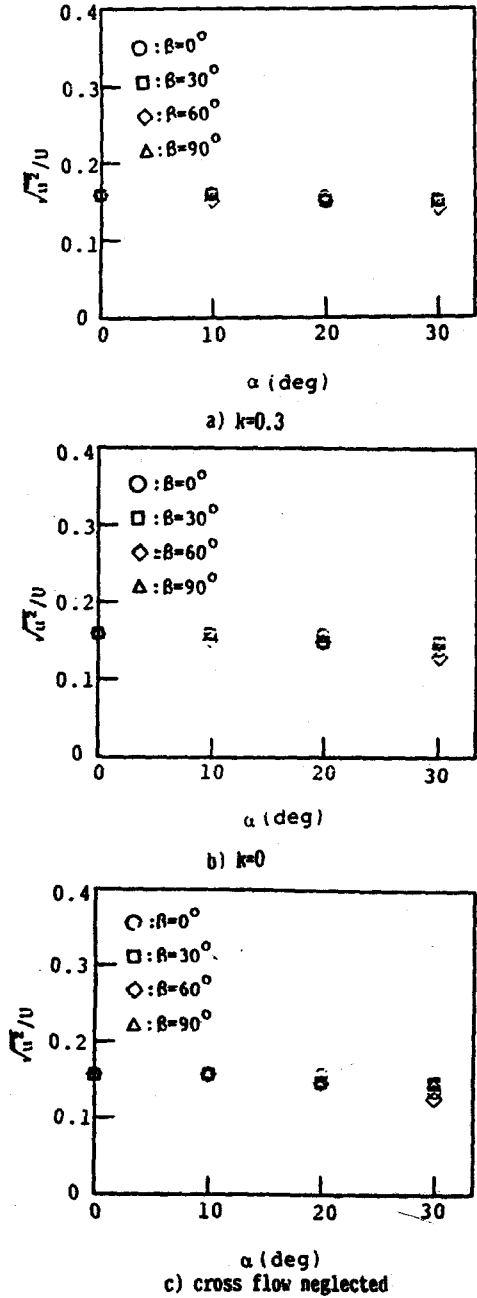


Fig. 7 The measured $\sqrt{u'}$ in the turbulent region (X-probe)

각 7%, 15% 가량의 큰 오차를 보여주고 있음을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 그 이유는 경우 2에서는 열선에 평행한 방향속도의 영향, 경우 3에서는 열선의 평행 방향 속도 및 열선의 횡방향 속도 영향이 모두 U 의 효과로 오인되는 까닭이다.

측정된 α_m 은 경우 1에서도 α 가 증가할수록 점점 오차가 크게 발생하였으며, 경우 2와 3에서는 더욱 큰 오차를 보여 주고 있다(Fig. 5) 측정된 β_m 은 경우 1, 2, 3 모두 비슷한 경향을 보이며 대체로 잘 일치하고 있다. 그 이유는 k 값이나 횡방향 속도가 U 값에는 큰 영향

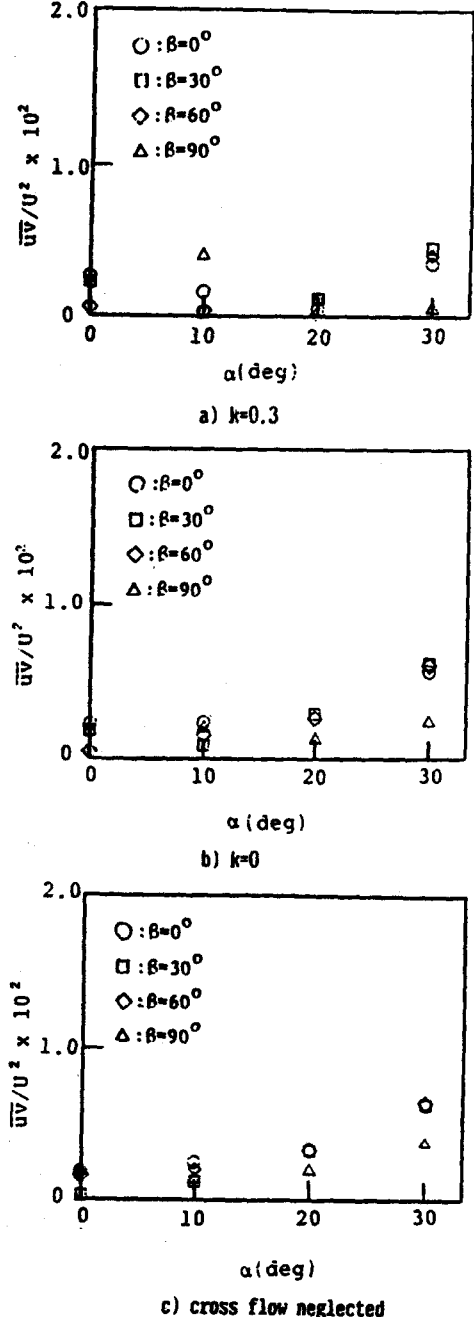


Fig. 8 The measured $\overline{uv'}$ in the turbulent region (X-probe)

을 주나 ∇ 및 ∇ 에는 직접적인 영향을 주지 않기 때문이다(Fig. 6) 난류량이 거의 존재하지 않는 균일 유동장에서는 유동각이 20° 보다 작은 경우에는 평균유동 계측시 약 2% 정도의 오차 내에서 예측이 가능하다고 판단된다.

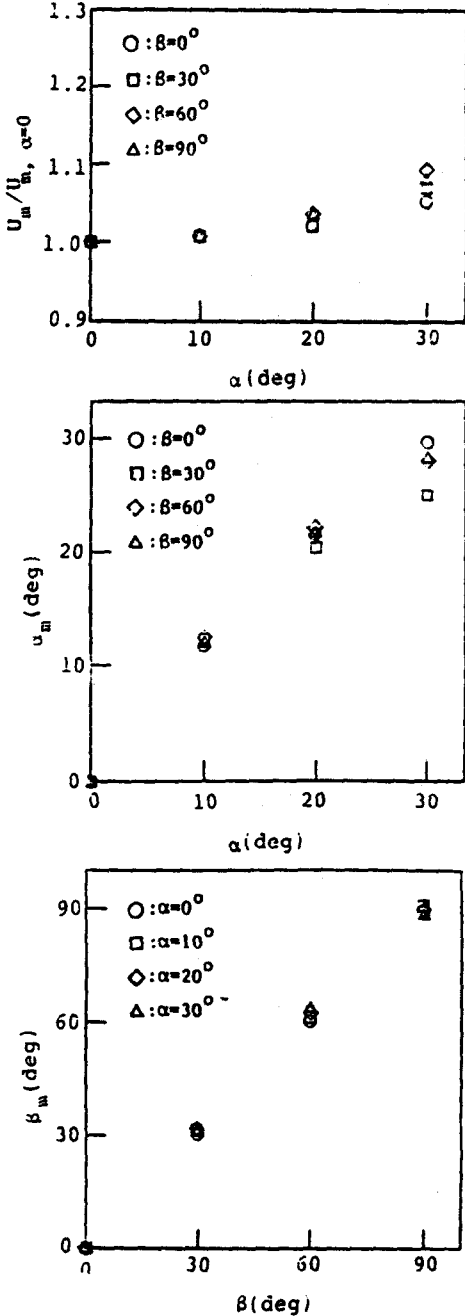


Fig. 8 The measured U in the uniform flow (slant wire probe)

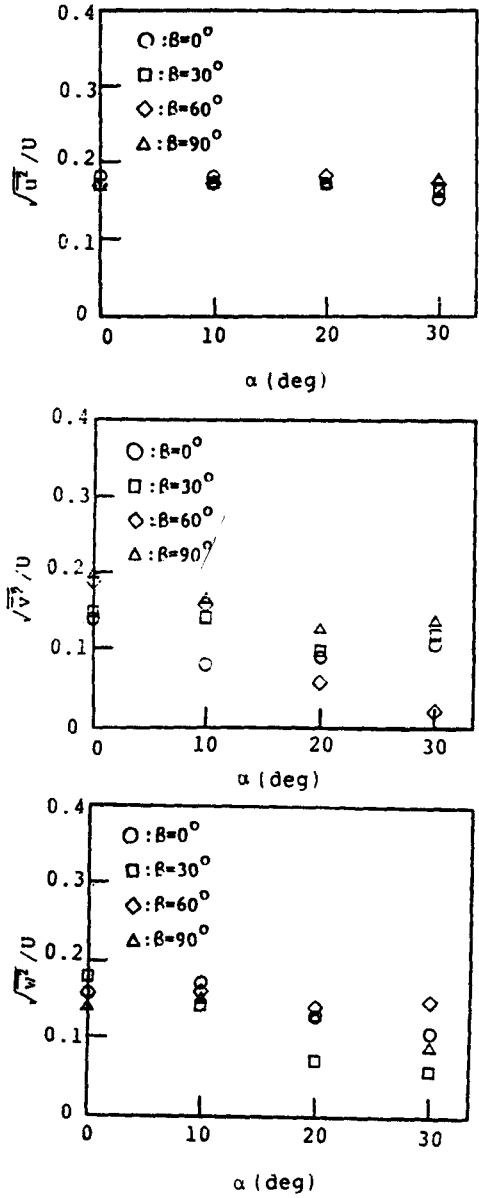


Fig. 10 The measured $\sqrt{u^2}$, $\sqrt{v^2}$, $\sqrt{w^2}$ in the turbulent region (slant wire probe)

난류 유동장에서도 주유동의 속도 크기 U_0 및 계측된 방향각 α_m, β_m 은 균일 유동에서의 경향과 거의 일치하지만 오차는 증가하였으며 α 가 20° 보다 클 때부터 유동각 계측 오차가 크게 발생하고 있음을 알 수 있었다. 원좌표계 (x, y, z) 로 환산된 난류량 $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$ 및 $\overline{w^2}$ 의 크기들은 α 가 커짐에 따라 약간 작게 계측되는 경향을 보이고 있다. (Fig. 7, Fig. 8) 즉 $k=0.3$ 의 경우 $\overline{u^2}$ 는

α 의 변화에 무관하게 거의 같은 크기로 계속되었고 $\overline{v^2}$ 와 $\overline{w^2}$ 는 $\alpha=30^\circ$ 에서 약 20% 정도 작게 예측하고 있다. 이는 α 가 증가함에 따라 \overline{U} 가 조금씩 크게 측정되었기 때문이기도 하지만 값의 크기로 볼 때 난류량 $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$ 등이 작게 계속되었기 때문이라 생각한다. 경우 2와 3에서도 비슷한 경향을 보이고 있으며 오차의 크기는 경우 1보다 크게 나타났다. 레이놀즈 응력의 크기는 매우 작지만 α 에 따라 \overline{uv} 는 증가, \overline{vw} 는 감소 하였으며, \overline{uvw} 는 일정하였다.

경사프로우브에 대해서도 X형 프로우브를 사용한 경우와 같이 균일유동장 및 난류 유동장에서 α 및 β 의 변화에 따른 U_m 및 난류량 계속실험을 하였다. (Fig. 9, Fig. 10) 먼저 균일 유동장의 실험 결과를 보면 평균 속도의 크기 U_m 은 α 에 따라 점점 증가하는 경향을 보이고 있으며 유동각 20° 내에서는 매우 잘 계속하고 있음을 알 수 있다. 난류유동장의 경우 평균 속도 U_m 은 α 에 따라 역시 증가하는 경향을 보이고 있으며 균일 유동보다 약간 더 증가하였다($\alpha=30^\circ$ 에서 약 10%) α_m 은 20° 까지, β_m 은 거의 모든 각에서 잘 일치하고 있다. 난류량중 $\overline{v^2}$ 는 α 에 대해 일정하게 계속되었으며, $\overline{v^2}$ 와 $\overline{w^2}$ 는 α 에 따라 감소하였다.

6. 결 론

본 연구에서 도입한 X형 및 경사 프로우브를 이용한 3차원 유동 계속방법의 정확성 및 측정 가능 범위를 검증하였다.

X형 프로우브에는 Mojola의 방법을, 경사 프로우브에는 회전 각도에 따른 속도 성분과 출력 전압과의 관계를 유도하여 적용하였다. 두 방법 모두 열선 유속계의 브리지 출력 전압을 선형화하지 않고 사용하였으며, 평균 속도 계산에는 요동양의 2차항까지, 난류량 계산에는 1차항까지만 고려하였다.

속도 계산에 사용한 두 방법의 전개 과정에서, 주유동 방향과 프로우브방향에 대해 일치하여 유입각이 작고, 또 난류 강도가 작다는 가정을 이용하였으므로 그 가정에서 벗어나는 유동에서의 오차 크기는 실험으로 확인하였다. 유입각 α 가 20° 정도까지는 잘 계속되었으며 그 이상의 각도에서는 계산상 무시한 양들의 영향이 커져서 오차가 상당히 발생하였다. 또 난류 강도가 증가함에 따라 평균 속도의 크기 및 방향의 오차가 증가하였다.

검정 실험에 사용한 X형 프로우브를 $k=0.3$, 경사 프로우브를 $k=0.2$ 로 보정한 경우는 α 가 20° 까지, 난류 강도가 15% 정도까지는 잘 계속되었다.

참 고 문 헌

- (1) M. Acrivelllis, 1978, "An Improved Method for Determining the Flow Field of Multi-Dimensional Flows of any Turbulent Intensity", DISA INFO. No. 23.
- (2) M. Hoffmeister, 1972, "Using a Single Hot-Wire Probe in Three Dimensional Turbulent Flow Field", DISA INFO. No. 29
- (3) H. Fujita, L.S.G. Kovaszny, 1968, "Measurement of Reynolds Stresses by a Single Rotated Hot Wire", Rev. Sci. Instrum, Vol. 39.
- (4) L.R. Bissonnette, G.L. Mellor, 1974, "Experiment on the Behavior of an Axisymmetric Turbulent Boundary Layer with Sudden Circumferential Strain", J.F.M. Vol. 63.
- (5) J.P. Johnston, 1970, "Measurements in a Three Dimensional Turbulent Boundary Layer Induced by a Swept Forward-Facing Step", J.F.M., Vol. 42.
- (6) F.B. Gessner, S.H. Arterberry, 1982, "A Method of Flow Field Determination for Moderately Skewed Three Dimensional Flows", IUTUM Symposium.
- (7) G. De Grande, P. Kool, 1981, "An Improved Experimental Method to Determine the Complete Reynolds Stress Tensor Using a Single Rotating Slant Hot Wire", J. Phs. E. Sci. Instrum, Vol. 14.
- (8) H. Kitzing, B. Sammler, 1984, "Analysis of Hot-Wire Measurements in High Turbulent Three Dimensional Flow", DISA INFO., No. 29.
- (9) O.O. Mojola, 1974 "A Hot-Wire Method for Three Dimensional Shear Flows", DISA INFO., No. 16.
- (10) L.V. King, 1914, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 214.
- (11) F.H. Champagne, 1967, "Turbulent Measurements with Inclined Hot Wire", J.F.M., Vol. 28.
- (12) F.E. Jorgensen, 1971, "Directional Sensitivity of Wire and Hot-Film Probes", DISA INFO., No. 11.
- (13) M. Acrivelllis, 1977, "Hot Wire Measurements in Flows of Low and High Turbulence Intensity", DISA INFO., No. 29.
- (14) 강신형, 유정열, 백세진, 이승배, 1986, "선체주위의 점성유동 계속에 관한 연구", 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소, 연구보고서.
- (15) 이승배, 1987, 열선 유속계에 의한 선미에서의 3차원 난류유동 계속", 서울대학교, 석사학위 논문.