

<論 文>

## 45° 圓形 衝突噴流의 統計學的 亂流特性 研究

盧秉俊\*·金張權\*\*

(1985年 10月 10日 接受)

### Study on the Statistical Turbulent Characteristics of 45° Circular Cross Jet Flow

Byung Joon Rho and Jang Kwon Kim

**Key Words:** Probability Density(確率密度), Joint Probability Density(結合確率密度), Skewness Factor(非對稱度), Flatness Factor(扁平度), Iso-Probability Density(等確率密度), Intermittency(間歇性), On-Line Computer System(온라인 컴퓨터 시스템), Hot-Wire Anemometer(熱線風速計)

#### Abstract

45° cross jet flow, at the mixing of two jet flows, was experimentally studied. For this study, only the statistical turbulent characteristics and high order moments will be analysed by on-line computer system(hot-wire anemometer system, dynamic analyser and computer system, plotting and printing system). Since mean velocity distributions, intensities of turbulence, Reynolds stresses, correlation coefficients, and other general results were already studied and presented.

One dimensional probability density distributions of  $u'$ ,  $v'$ , and  $w'$  were analysed comparing with Gaussian curve, which showed skew and flat tendency according to the  $Y$  and  $Z$  directions. For the analysis of the joint flow of turbulent components, the joint probability density distributions were examined. The figures were drawn so as to be read joint probabilities, joint probability densities, fluctuating velocities  $u'$ ,  $v'$ , and  $w'$ . For further detailed examination of the variations of skewness and flatness phenomena, iso-joint probability density contours obtained from the profiles of the joint probability density distributions were studied. According to the displacement of positions from the center of the mixing flow and the directions, the flatness and skewness factors were increased.

#### 記 號 說 明

$b_1, b_2$ :  $Y, Z$  方向의  $\frac{1}{2}\bar{U}_m$  에 서 의 流動半幅

\* 正會員, 全北大學校 工科大學 機械工學科

\*\* 全北大學校 大學院

$B$  : 레이놀즈(Reynolds)主應力의 回轉角

$C$  : 較正因子(calibration factor)

$d$  : 노출의 直径

$E$  : 動的 分析器(dynamic analyser)의 電壓範圍

$F$  : 扁平度(flatness factor)

- $k'$  : 1次元 히스토그램(histogram)의 區間數 (=100)
- $k$  : 2次元 히스토그램(histogram)의 區間數 (=64)
- $N_1$  : 1次元 히스토그램의 全體頻度數
- $N_2$  : 2次元 히스토그램의 全體頻度數
- $p(u'), p(v'), p(w')$  :  $u', v', w'$ 의 1次元 確率密度
- $P(u'), P(v'), P(w')$  :  $u', v', w'$ 의 1次元 確率
- $p(u', v'), p(u', w')$  :  $u', v'$ 과  $u', w'$ 의 結合確率密度
- $P(u', v'), P(u', w')$  :  $u', v'$ 과  $u', w'$ 의 結合確率
- $r_j$  : 1次元 히스토그램에서  $j$ 번째 區間에 存在하는 頻度數
- $r_{ij}$  : 2次元 히스토그램에서  $ij$ 번째 區間에 存在하는 頻度數
- $Re$  : 레이놀즈數(Reynolds number)
- $S$  : 非對稱度(skewness factor)
- $u', v', w'$  : 波動速度
- $X_0$  : 0 와 C.P. 사이의 距離(Fig. 4 참고)
- $X, Y, Z$  : 直角座標系에서 方向 및 距離
- $\sigma_{u'}, \sigma_{v'}, \sigma_{w'}$  :  $u', v', w'$ 의 標準偏差
- $\sigma_{max}$  : 레이놀즈(Reynolds) 主應力の 最大값
- $\sigma_{min}$  : 레이놀즈(Reynolds) 主應力の 最小값

1. 緒 論

靜止狀態의 大氣에 噴射시켜 형성되는 亂流流動에 關한 實驗的 研究는 주로 混合域에서 平均速度, 亂流強度, 亂流剪斷應力 및 亂流運動에너지 等を 測定하여 噴流의 流動特性과 亂流의 混合現象 等の 分析에 重點을 두어왔다. 그러나 亂流流動은 매우 不規則하고, 大部分이 複雜한 3次元流動을 하고 있기 때문에 亂流의 流動構造 및 그 特性을 正確히 解析하는 데에는 高度의 測定技術이 要求된다. 그리하여 最近에는 數值的인 測定으로 分析이 不可能한 亂流速度成分들의 發生現象을 온라인 컴퓨터 시스템(on-line computer system)에 依하여 統計學的 方法으로 測定分析되고 있다.

M. M. Ribeiro 等<sup>(1)</sup>은 圓形自由噴流에서 nozzle直徑에 57 倍되는 領域에서 軸方向 및 半徑方向으로 發生하는 亂流成分들을 確率密度(probability density), 非對稱度(skewness factor), 扁平度(flatness factor)等を 分析 研究하였다. 또한 그들<sup>(2)</sup>은 同軸噴流에서 同時에 發生하는 두方向 波動速度의 確率密度分布等を 立體的으로 圖示한 結合確率密度(joint probability density)分布와 等確率密度(iso-probability density)分布들을 通

두 亂流成分에 依한 亂流擴散은 강한 渦流發生에 基因됨을 發表하였다. 또 F. N. Frenkiel 等<sup>(3)</sup>은 亂流境界層에서 測定한 確率密度分布를 Gaussian 確率密度分布와 比較하여 境界層外部에서는 亂流의 間歇的發生(intermittency)의 영향으로 確率密度分布가 正規分布로 부터 상당히 이탈되고, 경계층내에서는 비교적 정규분포로 부터 적게 이탈됨을 發表하였다. A. K. Gupta 等<sup>(4)</sup>은 亂流境界層에서 波動速度 및 레이놀즈應力에 對한 統計學的 特性等を 考察하여 外部領域에서 確率密度分布들이 Gaussian 確率密度分布와는 전혀 다른 分布樣相을 보이고 있음을 究明하였다.

本 45° 衝突噴射에서는 衝突噴射流의 平均速度, 亂流強度, 亂流剪斷應力等を 測定分析하여 既 研究發表한 資料<sup>(5)</sup>를 토대로 하여 亂流의 衝突混合이 活潑히 일어나는 領域( $X/X_0=2, 3, 4$ )에서 衝突噴流의 特性을 統計學的으로 測定研究코저 한다. 따라서 各方向으로 發生하는 亂流成分을 Gauss의 確率分布式과 比較檢討하고, 2次元 結合確率密度線圖를 測定圖示하여 2方向의 亂流成分들의 結合流動形狀을 온라인 컴퓨터 시스템에 依하여 分析할 계획이다. 또한 亂流成分의 高次모멘트를 測定하여 非對稱도와 扁平度等도 研究 究明코저한다.

2. 理論 解析

亂流成分들의 全流動幅을 任意的 微小區間으로 나누어 流動信號가 各 區間을 定해진 時間동안 通過하는 頻度數(frequency of occurrence)를 累積하여 圖示한 히스토그램(histogram)式과, 총빈도수에 對한 各區間에 累積된 頻度數의 比를 나타내는 確率式은 다음과 같이 表記된다.

$$P(u_i') = p(u_i') \Delta u_i' = \frac{r_i}{N_1} \quad (1)$$

(단,  $N_1 = \sum_{j=1}^{k'} r_j$ )

따라서 確率密度는

$$p(u_i') = \frac{P(u_i')}{\Delta u_i'} = \frac{r_i}{\Delta u_i' \cdot N_1} \quad (2)$$

또한 平均值와 標準偏差는 各各

$$\bar{u}' = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{k'} r_j \cdot u_j' = \int_{-\infty}^{\infty} u' \cdot p(u') du' \quad (3)$$

$$\sigma_{u'} = \left\{ \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{k'} r_j (u_j' - \bar{u}')^2 \right\}^{1/2} = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^2 p(u') du' \right\}^{1/2} \quad (4)$$

亂流成分들의 中心線에 對한 對稱性を 檢討하기 爲하

여 Gauss의 式을 亂流의 確率密度分布에 適用한다. Gauss의 式은

$$p(u') = \frac{1}{\sigma_{u'} \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u' - \bar{u}')^2}{2\sigma_{u'}^2}} \quad (5)$$

가 되며, 亂流流動의 確率密度分布과 比較할 경우  $\sigma_{u'} = 1, \bar{u}' = 0$  으로 놓아

$$p(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u'^2}{2}} \quad (6)$$

의 式으로 使用하고 있다.

Fig. 1에서와 같이 2方向의 亂流成分들에 依하여 流動이 形成되는 結合確率의 式은

$$P(u'_i, v'_j) = p(u'_i, v'_j) \Delta u'_i \cdot \Delta v'_j = \frac{r_{ij}}{N_2} \quad (7)$$

(단,  $N_2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_{ij}$ )

가 되며, 結合確率密度는

$$p(u'_i, v'_j) = \frac{P(u'_i, v'_j)}{\Delta u'_i \cdot \Delta v'_j} = \frac{r_{ij}}{\Delta u'_i \cdot \Delta v'_j \cdot N_2} \quad (8)$$

이 式을  $-\infty$ 에서  $+\infty$ 까지 積算하면

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(u', v') du' dv' = 1 \quad (9)$$

따라서  $p(u') = \int_{-\infty}^{\infty} p(u', v') dv', p(v') = \int_{-\infty}^{\infty} p(u', v') du'$ 이 됨을 알 수 있다. 또 亂流成分에 依하여 發生되는 모우멘트(moment)들을 구하는 式을 살펴보면 1次元의 경우  $m$ 次的 亂流모우멘트式은

$$\bar{u}'^m = \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^m p(u') du' = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^k r_{j \cdot} (u'_j - \bar{u}')^m \quad (10)$$

여기에서  $m=3$ 의 값을  $m=2$ 의  $\frac{3}{2}$ 승으로 除한 값을 非對稱度(skewness factor)라 하여 確率密度線圖의 中心軸에 對한 對稱성을 判定하고, Gauss의 分布에서는 이 값이 零이 된다.

$$S = \frac{\bar{u}'^3}{(\bar{u}'^2)^{3/2}} \quad (11)$$

또한  $m=4$ 의 값을  $m=2$ 의 2승으로 除한 값을 扁平度(flatness factor)라 하여 亂流發生의 間歇性(intermittency)을 分析할 수 있으며, Gauss의 分布에서는 이 값이 3이 된다.

$$F = \frac{\bar{u}'^4}{(\bar{u}'^2)^2} \quad (12)$$

두 方向의 亂流成分들의 結合에 依한 2次以上의 亂流모우멘트式은

$$\begin{aligned} \bar{u}'^m \bar{v}'^n &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (u' - \bar{u}')^m \cdot (v' - \bar{v}')^n \cdot p(u', v') du' dv' \\ &= \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_{ij} \cdot (u'_i - \bar{u}')^m \cdot (v'_j - \bar{v}')^n \end{aligned} \quad (13)$$

(단  $m, n=1, 2, 3, \dots$ )

로 나타내며, 특히  $m=1, n=1$ 인 경우에는 亂流剪斷應力의 式이 된다.

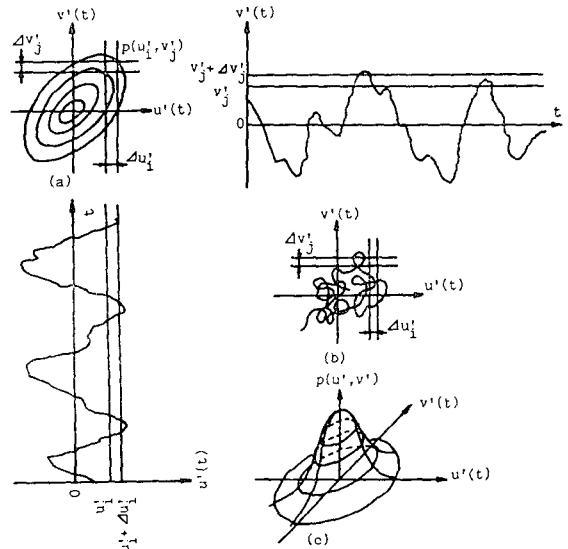


Fig. 1 Description of joint probability density

亂流成分에 依하여 發生하는 主應力들의 回轉關係를 살펴보면 Fig. 2에서와 같이 任意的 位置 P 點을 기준하여 座標의 變位關係에서

$$\vec{R} = \vec{i}u' + \vec{j}v' = \vec{e}_1 u'' + \vec{e}_2 v'' \quad (14)$$

여기서  $\vec{i} = \vec{e}_1 \cos B - \vec{e}_2 \sin B, \vec{j} = \vec{e}_1 \sin B + \vec{e}_2 \cos B$ 가 되므로 式(14)로부터

$$u'' = u' \cos B + v' \sin B \quad (15)$$

$$v'' = -u' \sin B + v' \cos B \quad (16)$$

가 되며, 式(15), (16)을 再整理하여 時間平均을 取하면,

$$\bar{u}''^2 = \bar{u}'^2 \cos^2 B + \bar{u}'v' \sin 2B + \bar{v}'^2 \sin^2 B \quad (17)$$

$$\bar{v}''^2 = \bar{u}'^2 \sin^2 B - \bar{u}'v' \sin 2B + \bar{v}'^2 \cos^2 B \quad (18)$$

$$\bar{u}''v'' = -\frac{1}{2}(\bar{u}'^2 - \bar{v}'^2) \sin 2B + \bar{u}'v' \cos 2B \quad (19)$$

Fig. 2에서 B 만큼 回轉한 極座標系에서 레이놀즈 垂直應力들이 主軸이 되기 위하여는 레이놀즈 剪斷應力이 零이 되어야 하므로,  $\bar{u}''v'' = 0$ 을 取하면 式(19)로부터 回轉角 B를 求할 수 있다. 즉

$$B = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\overline{u'v'}}{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}} \right) \quad (20)$$

이 값을 식 (17), (18)에 代入하면  $\sigma_{max}$  및  $\sigma_{min}$ 의 값을 求할 수 있다.

$$\overline{u'^2} = \sigma_{max} = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{2} + \left\{ \left( \frac{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}}{2} \right)^2 + (\overline{u'v'})^2 \right\}^{1/2} \quad (21)$$

$$\overline{v'^2} = \sigma_{min} = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{2} - \left\{ \left( \frac{\overline{u'^2} - \overline{v'^2}}{2} \right)^2 + (\overline{u'v'})^2 \right\}^{1/2} \quad (22)$$

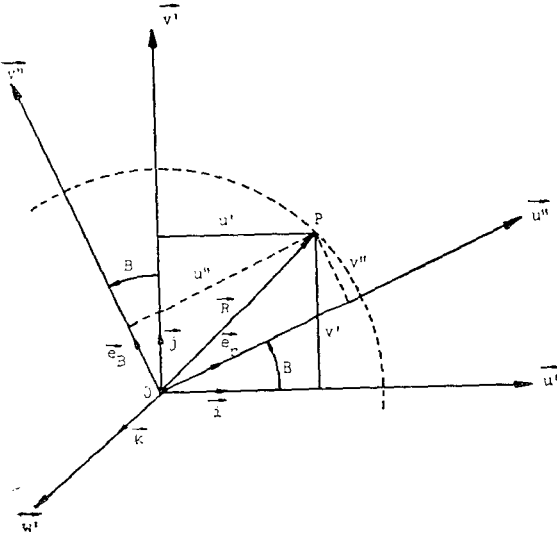


Fig. 2 Transformation of coordinates of Reynolds stress tensor in a plane

### 3. 實驗裝置 및 測定裝置

#### 3.1 實驗裝置

等速으로 噴流를 [發生시키는 實驗裝置로서는 5 HP, 220 V, 3相 V.S. 電動機를 送風機에 附着시켜 流速을 必要에 따라 조절이 可能하도록 한 壓送形 亞音速風洞을 使用하였다. 斷面이 200 mm × 200 mm인 亞音速噴流의 出口에 부착시켜 실험한 45°衝突噴射裝置는 Fig. 3과 같이 덕트(duct)의 斷面을 가로, 세로 各各 60 mm인 正四角形으로 하고, 두노즐의 중심선 的 距離를 180 mm, 교차각을 45°, 노즐의 入口直徑은 50 mm, 出口直徑은 20 mm, 收縮部의 長이는 200 mm로 제작하여 實驗하였다. 測定器機로서는 2채널 熱線風速計 (Tsi. 1050 series), 컴퓨터 (HP 9845 B), 動的分析器 (S.A. SD 375)를 온라인 시스템으로 연결하여 使用하

였다. 사용한 센서(sensor)는 X型 熱線(Kanomax 02 52 T 5)이었으며, 移送裝置로서는 프로브(probe)를 各測定位置에 正確하게 移送시키기 위해서 0.1 mm까지 自動移送이 可能한 自動프로브移送裝置(SD-100 C)를 使用하였고, 測定值의 圖示 및 資料處理는 플로터(HP 9872 C)와 프린터(HP 2601 A)를 使用하였다.

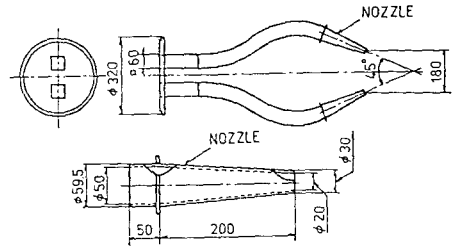


Fig. 3 Details of the cross jet kit

#### 3.2 測定方法

두노즐의 中心線의 距離를 180 mm, 中心線의 交叉角을 45°로 Y方向의 位置에서 相互 衝突시켰으므로, 두노즐의 中心線이 幾何學的으로 交叉되는 流動方向의 距離는  $X_0=217.3$  mm가 된다. 따라서 本 研究에서는  $X_0$ 를 無次元 變數로 使用하였고, 適用된 노즐 出口의 流速은  $Re=5.2 \times 10^4$ 이었으며, 混合이 活潑히 이루어지는 領域  $X/X_0=2, 3, 4$ 의 位置를 流動方向의 測定位置로 선정하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 各位置에서 流動斷面이 軸對稱을 이루고 있고, Y方向 및 Z方向의 流動幅이 다르기 때문에 X型 熱線을 利用하여 X-Y平面內의 Y方向으로 센서를 移送하여가며,  $u', v'$ 을 測定한 다음, 센서를 時計方向으로 90° 回轉시켜, X-Z平面에서도 同一한 方法으로  $u', w'$ 을 測定하였다. 또한 온라인 컴퓨터 시스템에 依한 測定過程은 Fig. 5에서와 같이 X型 熱線으로부터 얻어진 두 信號를 各各의 定溫型熱線風速計(Tsi. 1050)를 통해 線形器(Tsi. 1052)에 入力시켰다. 線形化된 두 信

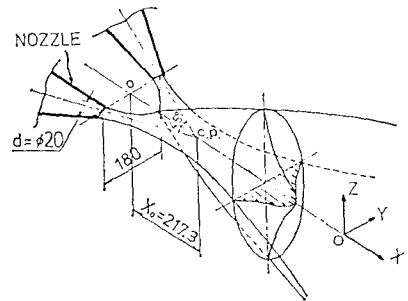


Fig. 4 Structure of the cross jet flow

號를 相關器(Tsi. 1015 C)의 AC. 0.1Hz high-pass 필터로 입력시켜서 流速에 比例하는 두 信號를 얻은 다음 컴퓨터와 連結된 動的 分析器에 入力하여 두 信號의 電氣的인 크기를 結定하고, low-pass 필터의 샘플링 주파수를 噴流의 特性에 맞추어 결정하였다. 動的 分析器에서 100 개의 區間에 對해 받은 信號는 컴퓨터에 依해 總 13 分 동안 1024 개의 頻度數를 128 回 累積平均處理

하여 1次元 히스토그래프로, 또 總 128 回 累積된 13 1072 개의 頻度數를 64×64 區間에 排列시켜 2次元 히스토그래프로 각각 구분하여 同時에 磁氣테이프에 저장시켰다. 저장된 資料로부터 컴퓨터, 플로터, 프린터를 利用하여 亂流成分의 1次元 및 2次元의 確率密度分布와 高次모멘트等을 計算圖示하였다.

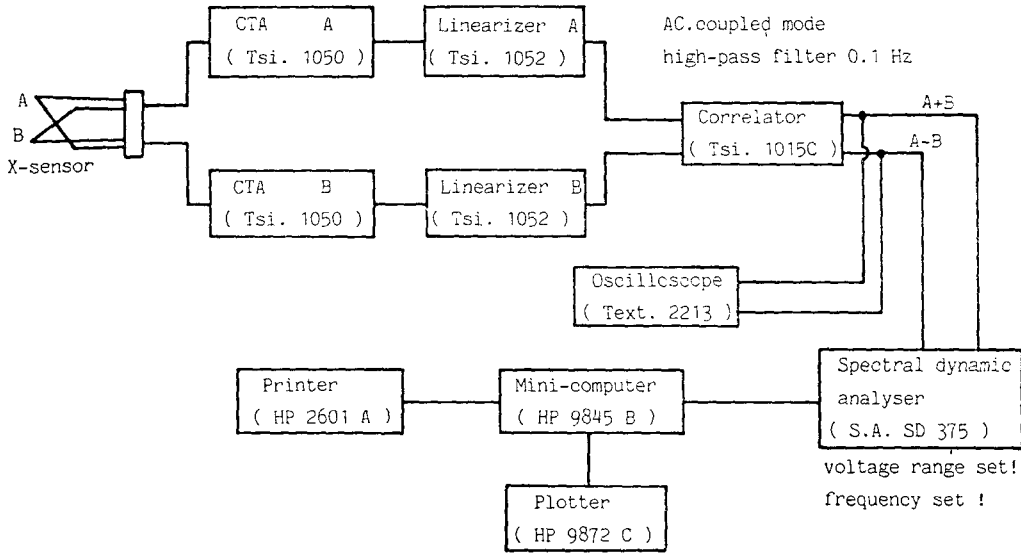


Fig. 5 Diagram of the data acquisition management

#### 4. 實驗結果分析

緒論에서 論한 바와 같이 45°衝突噴流의 亂流混合 形成過程에서 平均速度, 亂流强度, 亂流剪斷應力等은 既 研究 發表한바<sup>(5)</sup> 있으므로 本 研究에서는 混合域인  $X/X_0=2, 3, 4$ 에서 온라인 컴퓨터 시스템에 依한 亂流의 統計學的 分析에 重點을 두고자 한다.

Fig. 6은  $X/X_0=3$ 에서 Y方向의 距離에 따라 測定된 X方向 波動速度成分  $u'$ 과 Y方向 波動速度成分  $v'$ 의 1次元 確率密度分布線圖이다.

Gauss 確率密度分布인 정규분포선도와 Y方向의 거리에 따라 測定된 1次元 確率密度分布를 比較하였을 때,  $u'$ 의 확률 밀도분포는  $Y=0$ 인 噴流의 [中心에서 정규분포에 잘 一致하나,  $v'$ 의 경우는 약간의 차이를 보이고 있다. 이와같은 現象은 層流가 아닌 亂流의 測定에서 흔히 나타나는 現象으로 [장치설치의 微細한 精度差異나 測定센서를 流動噴流의 中心點에 正確히

一致시키지 못한 測定誤差等이 原因이 되기도 하나, 주어진 條件에 따른 亂流流動의 特性으로 간주할 수 있다.  $u'$ 의 확률밀도분포는 Y方向의 距離가 증가함에 따라  $u'$ 이 0과  $-1\sigma_{u'}$ 의 값에서 確率密度가 크게 형성되어 正規分布로 부터 현저히 이탈되어 나타나고 있다. 이것으로부터  $u'$ 의 亂流成分이 外部領域으로 갈수록 陰의 값으로 치우쳐 0과  $-1\sigma_{u'}$  사이에서 亂流가 強하게 形成되고 있음을 알 수 있다.  $v'$ 의 확률밀도분포는 Y方向의 距離가 증가함에 따라 거의  $v'$ 가 0에 가까운 위치에서 陰側으로  $u'$ 의 확률밀도의 크기와 유사한 最大값이 形成되어 正規分布로 부터 이탈되어 나타나,  $v'$ 의 亂流成分은  $v'$ 이 零에 가까운 陰의 方向에 亂流가 強하게 이루어짐을 볼 수 있다.

Fig. 7은  $X/X_0=3$ 에서 Z方向의 距離에 따라 圖示된  $u'$ 과  $w'$ 의 1次元 確率密度分布線圖이다.  $u', w'$ 의 확률밀도분포로부터  $u', w'$ 의 亂流成分은  $Z=0$ 인 噴流의 中心에서는 正規分布에 가까운 形狀을 이루나, Z의 距離가 증가함에 따라  $u'$ 의 亂流成分은 陰側으로

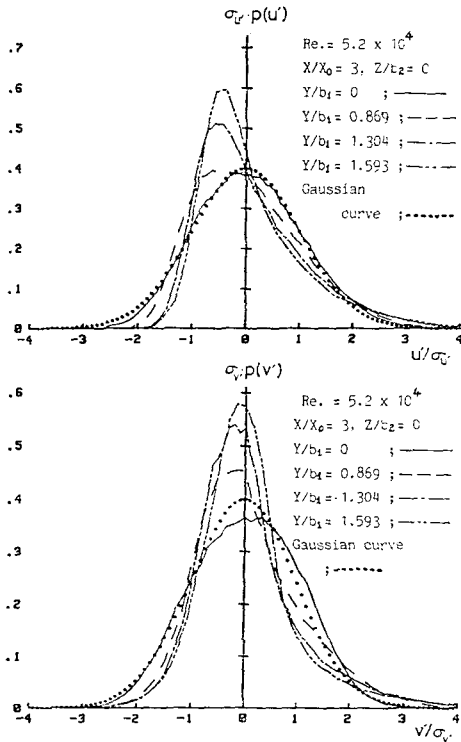


Fig. 6 Probability density distributions of  $u'$  and  $v'$  along the  $Y$  direction

치우쳐 零과  $-1\sigma_u$ 사이에서 亂流가 强하게 形成되고 있음을 알 수 있으며,  $w'$ 의 亂流成分은 陽側으로 치우쳐 零과  $+1\sigma_w$ 사이에서 亂流가 强하게 形成되고 있음을 보여주고 있다. 이와같이 噴流의 外部領域에서 確率密度分布線圖들이 正規分布로 부터 현저히 이탈되는 現象은 亂流境界層에서 F.N. Frenkiel 等과 A.K. Gupta 等이 밝힌 바 있는 外部空氣의 流入에 依해 나타나는 亂流의 間歇的 發生(intermittency)의 影響으로 解析될 수 있다.

Fig. 8은 同時에 發生되는 두 亂流成分의 結合流動 現象을 檢討하기 위해  $X/X_0=3$ 에서  $Y$ 方向의 距離에 따라 測定圖示한 結合確率密度分布이다. 이 결합확률 밀도 분포는 縱座標軸에 確率密度, 히스토그램, 確率을, 橫座標軸에는 波動速度를 나타내었다. 여기에서 샘플數, 確率, 確率密度값들은 히스토그램의 꼭지점에 對한 各各의 基準값으로 表記된 것이며, 特히 確率値는 基準값의 折半으로 나타낸 값이다. 單位流動區間  $\Delta u_i'$ 과  $\Delta v_i'$ 을 波動速度값으로 나타내면,  $\Delta u_i' = 2\sqrt{2} \cdot E_{u_i'} \cdot C_{u_i'}/64$ ,  $\Delta v_i' = 2\sqrt{2} \cdot E_{v_i'} \cdot C_{v_i'}/64$ 로 되어 式(8)로

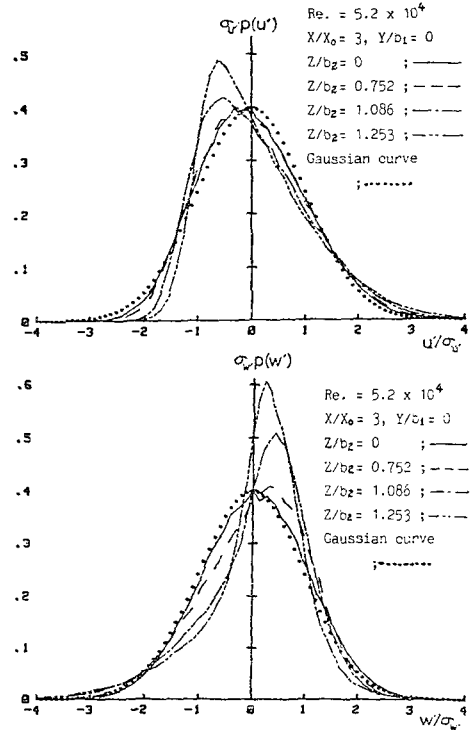


Fig. 7 Probability density distributions of  $u'$  and  $w'$  along the  $Z$  direction

부터 確率密度는 다음式과 같이 流速으로 換算된다.

$$p(u_i', v_i') = \frac{r_{ij}/N_2}{[2\sqrt{2} \cdot E_{u_i'} \cdot C_{u_i'}/64][2\sqrt{2} \cdot E_{v_i'} \cdot C_{v_i'}/64]} \quad (\text{m/s})^{-2}$$

(단,  $2\sqrt{2}$ 는 動的分析器의 固有因子이다.)

$Y=0$ 인 噴流의 中心에서는 비교적 軸對稱의 양상을 보이나,  $Y$ 方向의 距離가 증가함에 따라 陰側으로 치우쳐 非對稱分布를 나타내며, 流動半幅 以後의 領域에서는 非對稱現象과 扁平現象이 현저히 나타나고 있음을 알 수 있으며, 確率密度는  $Y$ 의 距離가 증가함에 따라 증가하는 現象을 보이고 있다.

Fig. 9는  $X/X_0=3$ 에서  $Z$ 方向의 距離에 따른  $u'$ 과  $w'$ 의 結合確率密度 分布로서  $Z=0$ 인 噴流의 中心에서 比較的 軸對稱을 이루나,  $Z$ 方向의 距離가 증가함에 따라,  $u'$ 은 陰側으로  $w'$ 은 陽側으로 치우쳐 非對稱의 分布를 나타내고, 確率密度도  $Z$ 가 증가함에 따라 증가하는 現象을 보이고 있다.

Fig. 10은  $X/X_0=3$ 에서  $Y$ 方向의 距離에 따라 測定된  $u', v'$ 의 結合確率密度 分布線圖를 Fig. 8에서  $u'$ ,

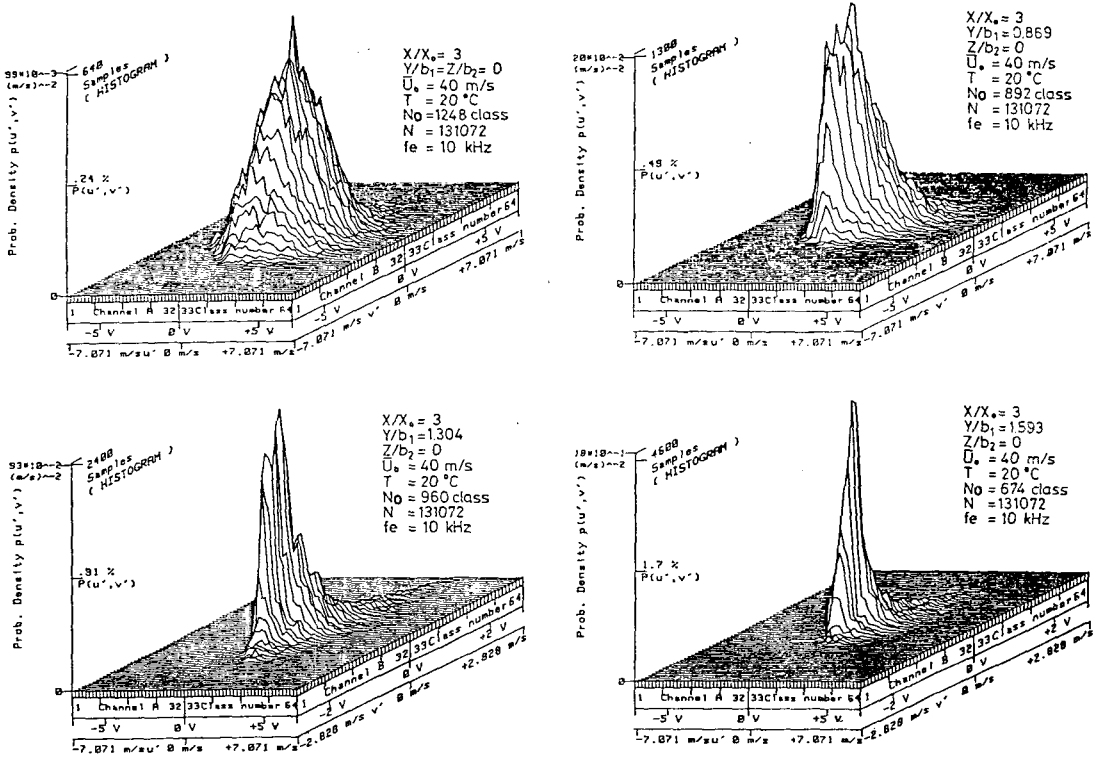


Fig. 8 Joint probability density distributions of  $u', v'$  along the  $Y$  direction

$v'$  면에 平行하게 10 等分하여 투영시켜 얻어진 等確率 密度分布線圖이다. 이는 2 次元 波動速度  $u', v'$  의 流動 形成의 特性을 쉽게 考察할 수 있는 資料이며, 全體의 非對稱性도 分析할 수 있다. 流動分布가 完全對稱이고,  $u'$  과  $v'$  의 分布의 크기가 동일한 경우에는 等確率 分布線들은 圓形을 이루어야 하나, 本 그림에서 보는 바와 같이 실제로는  $u', v'$  의 크기가 다르기 때문에 任意的 橢圓形의 分布를 이루고 있다.  $Y=0$  인 噴流의 中心點에서는 等確率分布가 比較的 對稱을 이루나,  $Y$  가 증가함에 따라 流動分布形狀이 反時計方向으로 回轉되어 나타나며, 外部領域으로 갈수록 流動形狀의 幅이 점차적으로 작아지고 있다. 이는 亂流의 크기가 점차적으로 감소해가기 때문이며, 전반적으로  $u'$  의 流動幅이  $v'$  의 流動幅보다 크게 나타나 있음을 알 수 있다.  $Y$  가 증가함에 따라 3 象限에서 等確率密度線들이 조밀하게 形成되어 있는 것은  $u'$  과  $v'$  의 亂流의 강한 發生을 의미하며, 圖表上的 點線은 레이놀즈 剪斷應力이 零이 되는 레이놀즈 主應力線을 表示한다.  $u'$  과  $v'$  의 結合流動特性에 依하여 中心部( $X/X_0=3$ ,  $Y/b_1=0$ ,  $Z/b_2=0$ )에서는 레이놀즈 主應力線이 이루

는 回轉角이  $B=-3.3^\circ$  를 나타내다가,  $Y$  方向으로 옮겨감에 따라  $Y/b_1=0.435$ ,  $Y/b_1=0.869$  에서는  $B=21^\circ$  의 큰 回轉角을 形成하고 있으나, 다시 外部로 옮겨감에 따라  $Y/b_1=1.304$  에서는  $B=17^\circ$ ,  $Y/b_1=1.593$  에서는  $B=14^\circ$  로 감소하여 감을 알 수 있다.

Fig. 11 은  $X/X_0=3$  에서  $Z$  方向의 거리에 따라 測定된  $u', w'$  의 結合確率密度(Fig. 9)로 부터 얻어진 等確率 密度線圖이다.  $Z=0$  인 噴流의 中心에서는  $u', w'$  공히 比較的 軸對稱을 이루나,  $Z$  가 증가함에 따라 流動이 時計方向으로 回轉되어 나타나며, 外部領域으로 갈수록 亂流流動幅이 점차적으로 작아지고 있다. 전반적으로  $u'$  의 流動幅이  $w'$  의 경우보다 크게 나타나,  $u'$  의 亂流크기가  $w'$  의 경우보다 더 큰 波動值를 갖음을 알 수 있다. 이 경우는  $u'$  과  $v'$  의 경우와는 달리 回轉角  $B$  가 時計方向으로 回轉하여 中心部( $X/X_0=3$ ,  $Y/b_1=0$ ,  $Z/b_2=0$ )에서  $B=-0.96^\circ$  를 나타내고,  $Z/b_2=0.376$  에서  $B=-15^\circ$ ,  $Z/b_2=0.752$  에서  $B=-20^\circ$ ,  $Z/b_2=1.086$  에서  $B=-21^\circ$ ,  $Z/b_2=1.253$  에서  $B=-16^\circ$  를 나타내어,  $Z/b_2=1.086$  領域까지는 계속 시계 방향으로 비틀림이 증가하다가,  $Z/b_2=1.253$  에서는

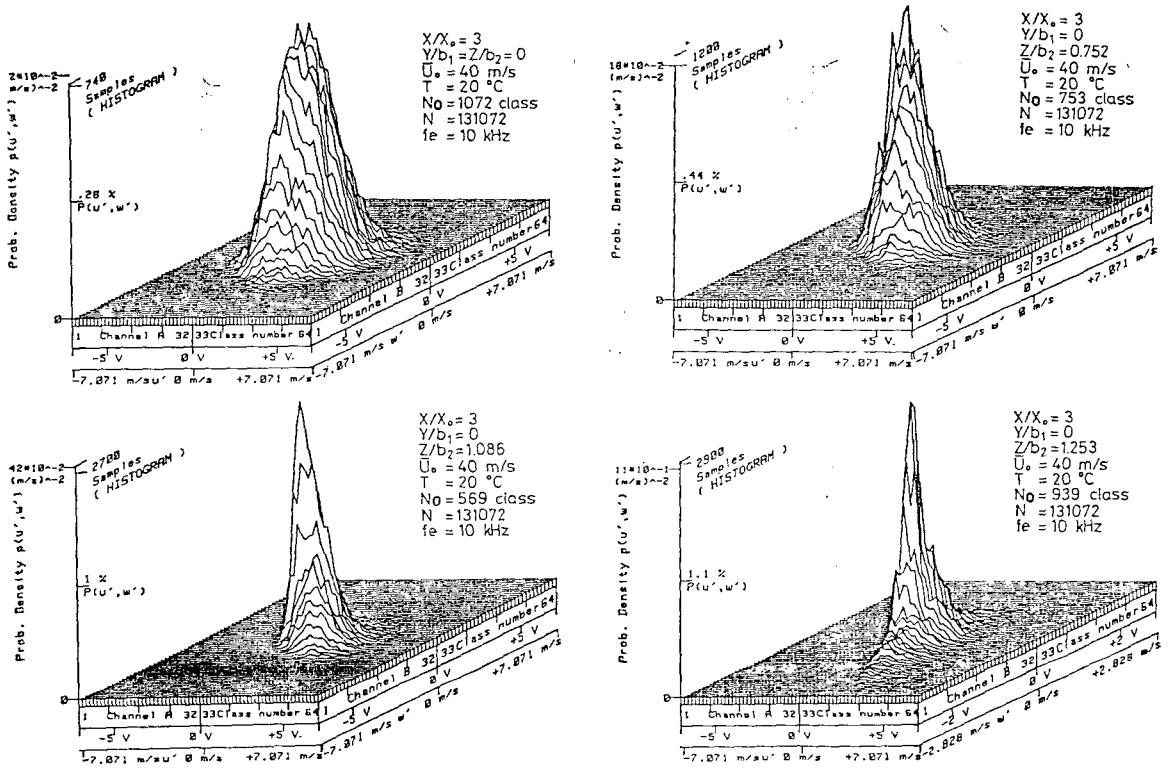


Fig. 9 Joint probability density distributions of  $u', w'$  along the  $Z$  direction

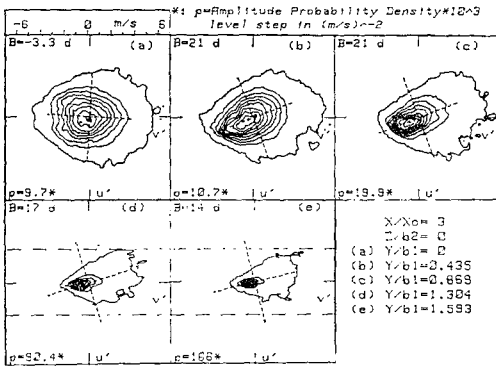


Fig. 10 Iso-probability density contours of  $u', v'$  along the  $Y$  direction

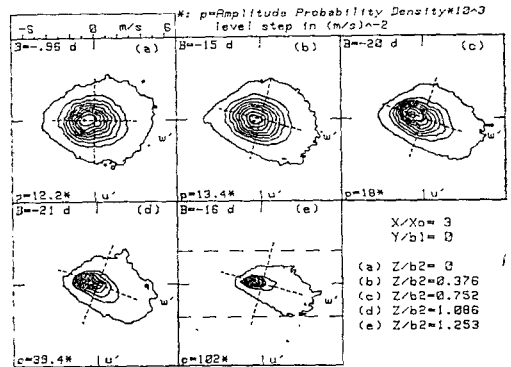


Fig. 11 Iso-probability density contours of  $u', w'$  along the  $Z$  direction

감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 12는  $X/X_0 = 2, 3, 4$ 의 위치에서  $Y$  방향의 거리에 따라 회轉角의 變化를 圖示한 것으로서, 회轉角  $B$ 는 (20)式으로 定義되기 때문에 전반적인 流動分布에서  $\overline{u'^2}$ 의 값은  $\overline{v'^2}$ 의 값보다 크게 形成되어 있어서 그 差異는 항상 陽의 값을 나타낸다. 따라서  $B$ 의 分布는

레이놀즈 剪斷應力の 符號 및 크기에 좌우되어 레이놀즈 剪斷應力の 流動分布와 類似한 形態를 나타내고 있다.  $Y=0$ 인 噴流의 中心點에서는  $B=0$ 에 가까운 값으로 분포되었으나, 이론적으로는  $\overline{u'v'}=0$ 이 되어  $B=0$ 이 되어야 한다.  $Y$ 가 증가함에 따라  $B$ 는 점차 증가하여  $Y/b_1 \approx 0.7$  부근에서 최대값을 보이다가, 그 이



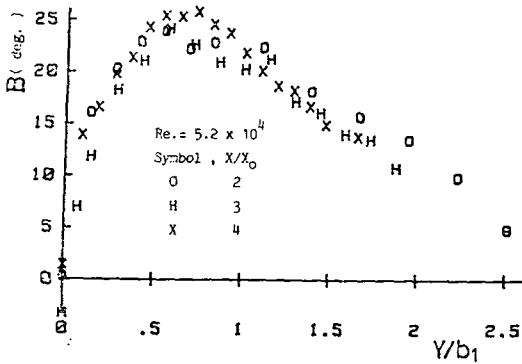


Fig. 12 Distribution of the rotation angle of Reynolds stress tensor along the Y direction

後에서는 점차 감소하고 있다. Fig. 13은  $X/X_0=2, 3, 4$ 의 위치에서 Z 방향의 거리에 따라 얻어진 회轉角의 分布로서 이 경우  $\overline{u'w'}$ 의 分布가 陰의 값으로 形成되어 있고, 전반적으로  $\overline{u'^2} > \overline{w'^2}$ 이므로,  $B = \frac{1}{2} \tan^{-1} \times \left( \frac{2\overline{u'w'}}{\overline{u'^2} - \overline{w'^2}} \right)$ 으로 주어져 Fig. 13에서와 같이 B가 陰의 값으로 分布되어 있음을 알 수 있다.  $Z=0$ 인 噴流의 中心點에서 B는 零의 값을 가지며, Z가 증가함에 따라 陰의 값으로 점차 증가하고  $Z/b_2 \approx 0.7$  부근에서 최소치에 달하나, 그이후 점차 증가하고 있다.

Fig. 14는  $X/X_0=2, 3, 4$ 에서 Y 방향의 거리에 따라 測定된 X 방향 및 Y 방향 波動速度成分의 非對稱度(skewness factor)의 分布를 나타낸다. 確率密度分布 曲線이 中心軸을 基準하여 對稱을 이룰때는 非對稱도가 零이 되며, 비대칭인 경우에는 그 정도에 따라 任意의 값을 갖게 된다. 다시 말해서 非對稱도는 亂流의 波動成分이 어느 方向으로 强하게 發生하고 있는가를 나타 내주는 尺度이기도 하다. 그림에서 두 分布가 公히 陽의 값의 比대칭도를 나타내는 것은  $u', v'$ 의 陽의 값들이 陰의 값보다 流動幅이 크게 形成되어 있기 때문이다. 또한  $u'$ 의 非對稱도는 非線形으로 증가하나,  $v'$ 의 경우는 比較的 線形인 증가를 보이고 있다. 두 線圖 公히 噴流의 가장자리에서 最大値를 보이고 있다. Fig. 15는  $X/X_0=2, 3, 4$ 에서 Z의 증가에 따른 X 방향 및 Z 방향 波動速度成分의 非對稱도를 나타낸 것으로  $u'$ 의 非對稱도의 分布는 陽의 값으로 증가하나,  $w'$ 의 경우는 陰의 값으로 감소하고 있다. 다시말하면,  $u'$ 의 亂流發生은 陽側에서 현저히 이루어지나,  $w'$ 은 陰側에서 發生되고 있음을 알 수 있다. 두 分布는 噴流의 가장자리에서 各各 最大, 最小값을 나타내고 있다. Y方

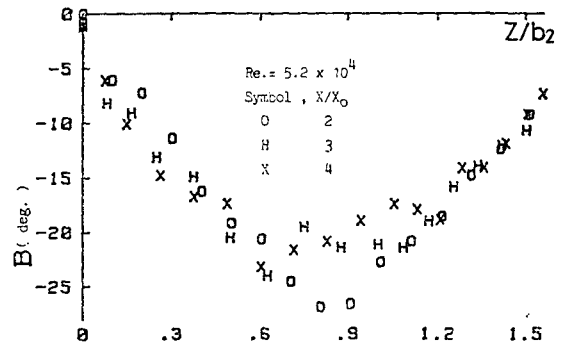


Fig. 13 Distributions of the rotation angle of Reynolds stress tensor along the Z direction

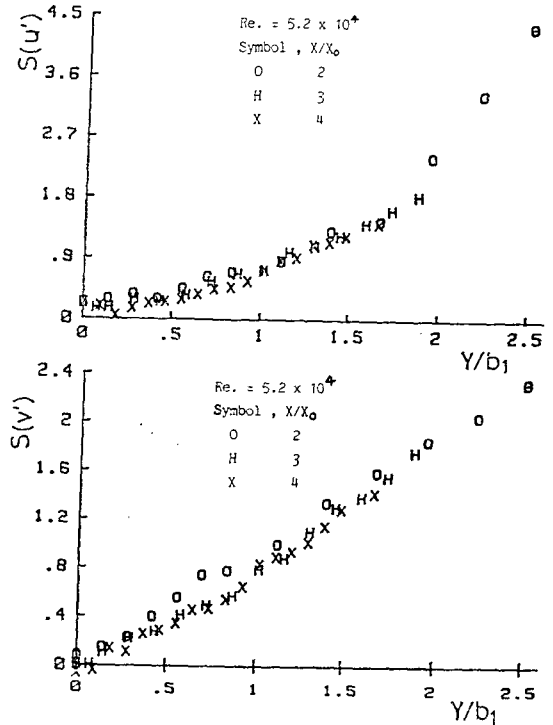


Fig. 14 Distributions of the skewness factor of  $u'$  and  $v'$  along the Y direction

向과 Z 방향에 따라 測定된 非對稱度 分布로 부터 噴流의 가장자리에서 Y 방향에 따라 測定된 比대칭도분 포가 더 큰값을 나타내므로, Y 방향에서 亂流가 더 强하게 發生하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은  $X/X_0=2, 3, 4$ 에서 Y의 증가에 따른 X 방향 및 Y 방향 波動速度成分의 扁平度(flatness factor)를 圖示한 것이다. 扁平도는 確率密度曲線이 正規 分布와 같이 完全對稱을 形成할 경우 3의 값에 수렴

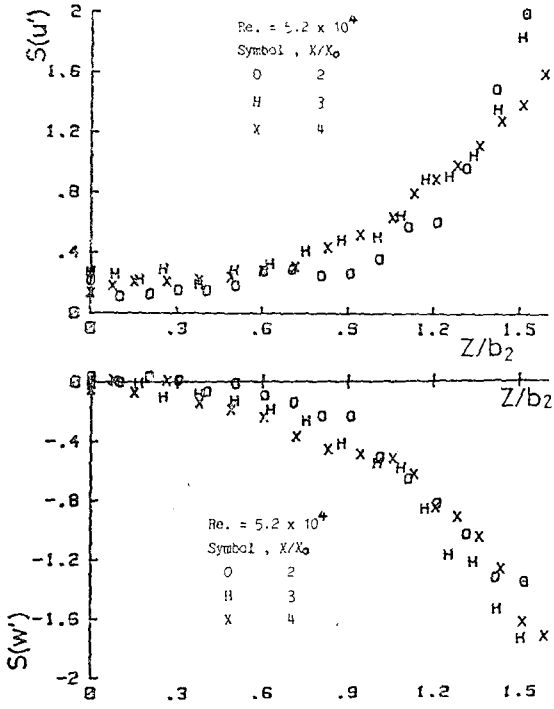


Fig. 15 Distributions of the skewness factor of  $u'$  and  $w'$  along the  $Z$  direction

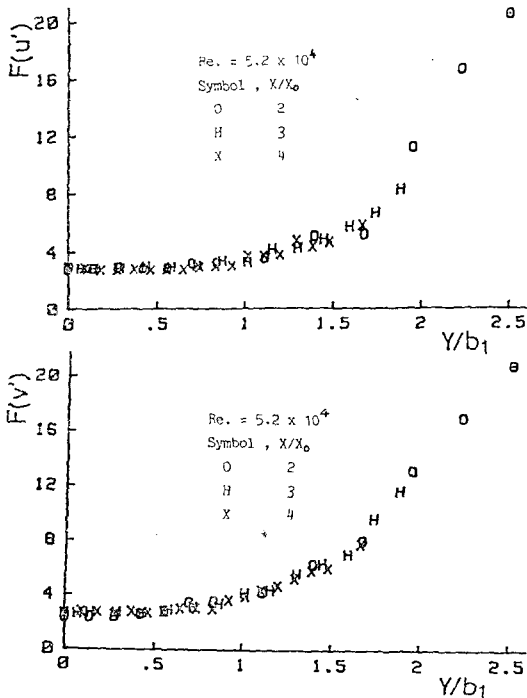


Fig. 16 Distributions of the flatness factor of  $u'$  and  $v'$  along the  $Y$  direction

하게 된다. 그림에서  $u', v'$ 공히 유사한 曲線을 形成하며  $Y/b_1 \approx 0.5$  부근까지는  $u', v'$ 의 亂流成分이 扁平度 3에 가까운 값을 유지하기 때문에 두 分布는 比較的 正規分布에 가깝게 形成됨을 알 수 있으며,  $Y/b_1 \geq 0.5$ 에서는 亂流成分이 현저히 비대칭을 形成하므로, 扁平度의 分布는 점차적으로 증가하여 噴流의 가장자리에서 最大值에 달한다. Fig. 17은  $X/X_0=2, 3, 4$ 에서  $Z$ 의 증가에 따른  $u', w'$ 의 扁平度를 圖示한 것으로서,  $Z/b_2 \approx 1$  부근까지는 扁平度 3에 가까운 값을 유지하나,  $Z/b_2 > 1$ 에서는 亂流成分이 현저히 非對稱을 形成하여 發生되므로 扁平度의 分布는 점차적으로 증가하여 噴流의 가장자리에서 最大值에 達한다.  $u', v'$ 과  $u', w'$ 의 扁平度의 分布가 相異한 것은 噴流의 流動斷面이 橢圓形을 形成하여<sup>(5)</sup>,  $Y$ 方向 및  $Z$ 方向의 流動幅이 다르기 때문이다.

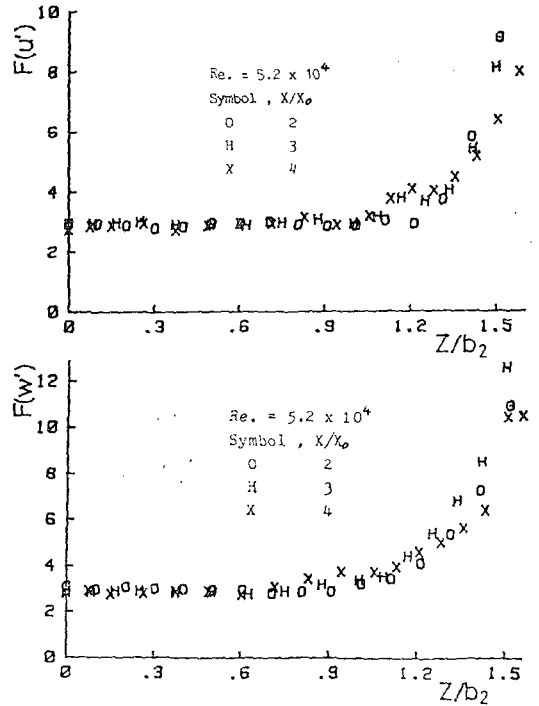


Fig. 17 Distributions of the flatness factor of  $u'$  and  $w'$  along the  $Z$  direction

5. 結 論

두 圓形噴流가 45°로 衝突하여 混合이 活潑히 이루어지는 領域( $X/X_0=2, 3, 4$ )에서  $Y, Z$ 方向으로 測定分析한 亂流의 統計學的 特性을 要約하면 다음과 같다.

(1) 流動軸方向의 中心에서 亂流의 統計學的 分布는 Gaussian 分布에 거의 一致하고 있으며,  $Y, Z$  方向으로 移動하여 감에 따라  $u', w'$ 의 確率密度分布線圖에서 뚜렷한 非對稱現象을 볼 수 있으며, 이는 亂流生成 發達이  $u'$ 은 陰側에서,  $w'$ 은 陽側에서 強하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

(2) 結合確率密度分布와 等確率密度分布로 부터 두 亂流成分들의 結合流動 形成이 中心軸線上外에서는 뚜렷한 非對稱現象과 扁平現象이 두드러지게 나타나고 있다.

(3) 非對稱度는  $Y, Z$  方向에 따라  $u', v'$ 에 對한 값은 계속적인 증가를 보이고  $Z$  方向에 對한  $w'$ 의 非對稱度는 陰의 값으로 계속적인 감소를 보이고 있다.

(4)  $u', v', w'$ 의 扁平度는  $Y, Z$  方向으로  $0 \leq Y/b_1 \leq 0.5$ ,  $0 \leq Z/b_2 \leq 1$  領域에서 Gaussian 扁平度 3을 유지하고, 그 以後부터는 증가양상을 보이고 있다.

#### 參 考 文 獻

- (1) M.M. Ribeiro et al., Statistical characteristics of a turbulent jet. *J. Fluid Mech.* Vol. 70, part 1, pp. 1~15, 1975
- (2) M.M. Ribeiro et al., Coaxial jets with and without swirl. *J. Fluid Mech.*, Vol. 96, part 4, pp. 769~795, 1980
- (3) F.N. Frenkiel et al., Probability distributions and correlation in a turbulent boundary layer. *The physics of fluids*, Vol. 16, No. 6, pp. 725~737, 1973
- (4) A.K. Gupta et al., Statistical characteristics of Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *The physics of fluids*, Vol. 15, No. 6, pp. 981~985, 1972
- (5) 盧秉俊, 金張權, 45°自由衝突噴射의 亂流流動에 關한 實驗的 研究, 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第5號, pp. 442~449, 1984
- (6) S. Tavoularis et al., Experiments in nearly homogeneous turbulent shear flow with a uniform mean temperature gradient. *J. Fluid Mech.* Vol. 104, part 1,2, pp. 311~367, 1981
- (7) I. Wygnanski et al., Some measurements in the self-preserving jet. *J. Fluid Mech.*, Vol. 41, part 2, pp. 327~361, 1970
- (8) H. Tennekes et al., *A first course in turbulence*, MIT press, 1973
- (9) J.S. Bendat et al., *Random data*, Wiley-interscience, 1971
- (10) J.O. Hinze, *Turbulence*, 2nd edition, MGH, 1975
- (11) 盧秉俊 外 2 名, 온라인 시스템에 의한 亂流의 統計學的 解析方法, 大韓機械學會誌, 第25卷, 第3號, pp. 216~224, 1985