

<論 文>

45° 自由衝突 噴射의 亂流流動에 관한 實驗的 研究

盧 秉 俊* · 金 張 權**

(1984年 4月 14日 接受)

An Experimental Study on the Turbulent Flow of a 45° Free Cross Jet

Byung Joon Rho and Jang Kwon Kim

Abstract

Turbulent jet flow has been studied in many ways; a plane jet, a rectangular jet, an annular jet, a round jet, a wall jet, a parallel jet, a valve jet, a cross jet, a slit jet and etc.

In this report, a 45° cross jet flow was tried by using two same dimensioned nozzels (dia. ϕ20) which were set up at the exit of the subsonic wind tunnel. Each jet flows to the direction of 22.5° to the axis of downstream of the mixed flow. The centerline of each jet meets at the distance of 217.3mm and their mixing flow could be imagined to develop beyond that distance, so the measurement was effectuated at X/X₀=1.2~1.5. The section of the mixed flow shows a elliptic circle which is formed by the 22.5° inclined flows to the X direction.

This experimental study aimed at the investigation of the turbulent mixing process of two jets; the mean velocities, the turbulent shear stresses, the correlation coefficients, and the momentum were respectively measured. The mean velocity distribution profiles of the downstream component measured in the Y direction coincide well with the empirical equation of Görtler and those measured in the Z direction agree with the equation of H. Schlichting. Other mean velocities \bar{V} and \bar{W} components were randomly distributed. The higher values with same order of the intensity of turbulence were largely distributed at the central part of the flow. The momentum was decreased up to 70% by the shock losses and the development of intense turbulences, but it kept its value constantly beyond X/d=14.

Two-channel hot-wire anemometer systems (model 1050 series), X-type hot-wire made of tungsten (dia. ϕ5μm, long 3mm, model 0252 T5), a computer(model HP 9845B), and a plotter (model HP 9872C) were used for the experiments and the analyses.

記 號 說 明

A : $\frac{1}{2} \bar{U}_n$ 位置에서 測定한 混合流의 斷面積
b₁, b₂ : Y, Z 方向의 $\frac{1}{2} \bar{U}_n$ 위치에서 各各 測定한

流動의 半幅

d : 노즐直徑
K : 亂流運動에너지
M : 混合領域에서의 모멘텀量
M₀ : 노즐出口에서의 모멘텀量
m : 質量

* 正會員, 全北大學校 機械工學科

** 全北大學校 大學院

p	: 瞬間壓力
p'	: 波動壓力
\bar{p}	: 時間平均壓力
$Re.$: 레이놀즈數
v	: 速度 벡터
u, v, w	: 瞬間速度
u', v', w'	: 波動速度
$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$: 時間平均速度
\bar{U}_m	: \bar{U} 의 最大值
X_0	: o 와 c.p. 사이의 距離(Fig.2 참조)
X, Y, Z	: 直角座標係에서 方向 및 距離
$\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$: 亂流剪斷應力
ρ	: 密度

1. 緒 論

亂流流動 중에서 제트의 亂流流動에 관한 實驗的 研究는 여러 形態로 實施되어 왔다.

E. Gutmark 등⁽¹⁾은 四角形 노즐 自由 噴射를 試圖하여 노즐의 出口로부터 노즐 直徑의 40倍以上 120倍되는 領域에서 平均速度, 亂流強度 및 두 點사이의 相關係數들의 分布를 測定 分析하였으며, A. Krothapalli 등⁽²⁾도 四角노즐 自由 噴射에서 噴射流의 混合 現象에 對하여 重點的으로 研究한 結果를 發表하였고, L.J.S. Bradbury⁽³⁾는 그의 平面제트에서 低速으로 平行流動되는 空氣에 空氣를 噴射시켜 形成되는 流動에 對해 考察하였다. 그는 특히 노즐幅의 30배되는 위치에서 噴流의 橫方向으로 測定한 亂流強度와 剪斷應力들의 分布가 平面後流(plane wake)에서의 값들과 類似하다는 結果를 얻었다. 이들과는 달리 노즐의 형태를 바꾸어 A.J. Yule⁽⁴⁾은 圓形노즐을 使用한 自由 噴射의 實驗的 研究에서 噴流의 混合層의 形成에 重點을 두어 考察하였다. 그는 이의 形成考察에서 可視化(visualization)方法을 試圖하였고, 제반 亂流成分들의 測定에는 熱線風速計를 利用하였다. 또한 外氣와 噴流가 混合되는 層에서 空氣의 流動은 渦流形狀을 이루고 이로 因한 3次元 流動이 形成됨을 밝혔다. I. Wygnanski 등⁽⁵⁾과 Eiichi Tanaka⁽⁶⁾는 자기 그들의 實驗에서 두개의 四角노즐을 平行하게 설치하여 噴射시키므로서 두 噴流가 混合되어가는 現象을 考察하였다. 이 平行 噴射(parallel jet)에서는 두 噴流사이에서의 混合形成에 依한 亂流發達 過程이 測定 分析되었으며, I. Wygnanski 등의 實驗에서는 두 噴流의 速度를 相互 다르게 噴射시켜 그 流動形成이 考察되었다. 나아가서,

W.T. Chan 등⁽⁷⁾은 環狀노즐噴射(annular jet)를 試圖하여 噴流가 外氣와 混合되는 現象을 實驗的으로 研究하여, 그 混合現象이 單一噴射에서의 結果와 類似함을 제시하였고, Masao Taga 등⁽⁸⁾은 噴流가 回轉되어 噴射되도록 環狀노즐의 出口에 안내깃을 設置하여 實驗하였다.

以上과 같이 亂流噴射에 관한 研究는 大氣에 噴射시키는 自由噴射의 경우가 大部分이다. 그러나, Toshio Tanaka 등⁽⁹⁾과 P.O. Witze 등⁽¹⁰⁾은 同一한 두 噴流를 正面으로 衝突시켜, 半徑方向으로 流動되어가는 噴流 形態에 對하여 考察하였다. 이들은 두 噴流를 大氣上에서 自由衝突 流動시키지 않고, 크기가 同一한 管을 通하여 상호 正面으로 流動되어오는 噴流를 管內에서 衝突시켜 收縮노즐을 通하여 半徑方向으로 噴射시켜 實驗하였다. Tanaka는 半徑方向의 노즐出口의 下部에 平板을 流動方向과 平行하게 설치하여 平板을 따라 流動되는 噴流의 流動形狀을 考察하였고, 단계적으로, 노즐下部의 平板을 噴流와 거리를 멀리하면서 流動分布를 測定하였다.

또, 內燃機關의 실린더內에서 吸入밸브의 周圍에 分布되는 亂流流動에 對하여 實驗的으로 研究한 벨브제트⁽¹¹⁾를 들 수 있으며, Tetsushi Okamoto 등⁽¹²⁾은 두개의 收縮노즐을 相互 垂直으로 設置하여 噴流를 直角 衝突 流動시켰다. 그는 本 實驗에서 主노즐과 副노즐로 區分하여 主노즐과 副노즐간의 거리를 변화시켜 가면서 각각의 경우에 對하여 相異한 速度로 噴射시켜 衝突된 噴流의 亂流流動 分布에 對하여 考察하였다.

本 研究에서는 두 噴流를 임의의 角度로 衝突流動되는 亂流의 發達過程과 混合現象을 實驗的으로 研究하기 위하여, 一次的으로 直徑 20mm의 두 圓形노즐을 噴流의 流動方向이 相互 45°되게 設置하여 實驗하였다.

本 實驗的 研究에서는 두 噴流가 交叉되어 混合이 이루어지는 流動域에서 3次元 方向에 對하여 平均速度 分布, 亂流強度 分布, 亂流剪斷應力 分布, 相關係數의 分布 및 亂流運動에너지와 運動量의 變化 등을 測定 分析하였다.

2. 流動方程式

일반적으로 원형 또는 사각노즐에 의한 自由噴射에서는 大部分이 2次元 流動으로 간주하고 있으나, A. Krothapalli 등⁽²⁾은 실제적으로 流動成分이 3次元으로 存在하고 있음을 그의 四角노즐의 空氣 噴射 實驗에서 發表한 바 있다. 따라서, 本 研究에서도 45°로 等速

噴射된 두 噴射流의 相互 衝突 後의 流動을 3次元 非 壓縮性 流動으로 간주하고 質量力을 無視하면, Navier-Stokes의 運動方程式은 連續方程式과 함께 다음과 같 이 쓸 수 있다.

$$\text{div } \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nu \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (2)$$

定常流動인 경우 速度와 壓力의 平均 및 波動成分들을 代入하여 整理하면, 式 (2)는

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{U}^2 + \rho \overline{u'^2} + P) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{U}\bar{V} - \tau_1 + \mu \zeta_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{U}\bar{W} - \tau_3 - \mu \zeta_3) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{U}\bar{V} - \tau_1 - \mu \zeta_1) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{V}^2 + \rho \overline{v'^2} + P) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{V}\bar{W} - \tau_2 + \mu \zeta_2) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{U}\bar{W} - \tau_3 + \mu \zeta_3) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{V}\bar{W} - \tau_2 - \mu \zeta_2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \bar{W}^2 + \rho \overline{w'^2} + P) = 0 \quad (5)$$

$$\text{단, } \tau_1 = -\rho \overline{u'v'}, \quad \zeta_1 = \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right)$$

$$\tau_2 = -\rho \overline{v'w'}, \quad \zeta_2 = \left(\frac{\partial \bar{W}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right)$$

$$\tau_3 = -\rho \overline{w'u'}, \quad \zeta_3 = \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} \right)$$

로 나타낼 수 있다. 또한 連續方程式은 Reynolds의 法則을 적용하면,

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

이 된다. 本 實驗에서는 상기 式들에서 나타난 平均速度, 波動速度, 亂流剪斷應力들을 측정 分析하고자 한다.

3. 實驗裝置 및 測定方法

3.1. 實驗裝置

等速으로 噴射되는 두 噴射를 45°로 衝突流動시키기 위한 장치로서 亞音速 風洞을 使用하였다. 5HP, 220V 三相 V.S. 모우터를 送風機에 부착하여 流速을 必要에 따라 調節이 可能토록 하였으며, 本 風洞의 性能은 出口에 부착한 直徑 50mm의 노즐에서 流速을 最大 90 m/sec 까지 얻을 수가 있었으며, 衝突噴射裝置로서는 斷面이 200mm×200mm인 風洞出口에 直徑이 20mm인 45° 衝突噴射노즐을 製作 부착하여 實驗하였다. 測定器機로서는 水柱 1μm까지 測定이 可能한 電氣 마이 크로 마노메타(P.P. F.A.—FC 060)를 使用하여 壓力을

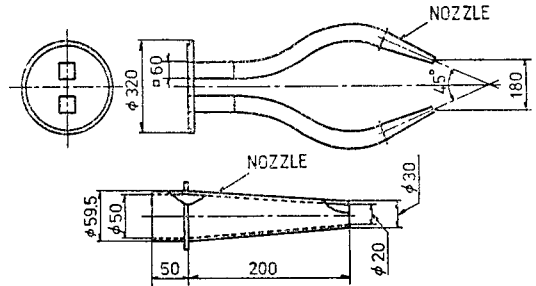


Fig. 1 Cross jet kit

測定하였으며, 平均速度와 波動速度, 亂流剪斷應力, 相關係數等은 2-채널 熱線風速計(Tsi model 1050 series)를 使用하여 測定 分析하였다. 熱線은 直徑 5μm의 X-형(model 0252T5)을 使用하였고, 프로브를 各測定位置에 精確하게 移送시키기 위하여 0.1mm까지 自動移送이 可能한 自動 프로브 移送裝置(automatic probe traversing controller system SD-100C)를 使用하였다. 測定值의 分析과 圖示를 爲하여 HP9845B 컴퓨터와 HP9872C 플로터를 使用하였다.

3.2. 測定方法

두 노즐의 出口 中心間의 距離가 180cm 되도록 衝突噴射키트를 設計 製作하였으므로 두 [노즐의 中心線이 幾何學的으로 交叉되는 距離는 노즐出口로부터 X 방향으로 217.3mm가 된다. 그러므로 두 噴射의 混合이 형성되는 領域(X/X₀=1.1~1.5)을 測定위치로 選定하였다. 流速은 Re=2.6×10⁴, Re=5.2×10⁴의 두 경우에 對하여 測定 分析하였으며, 混合流의 流動方向에 따라 측정구간을 X/X₀=1.2, 1.4, 1.5로 定하고, 橫方向으로 自動 프로브 移送裝置에 依하여 X-형 프로브를 移送하여가며 測定하였다. 特히 Z方向 成分의

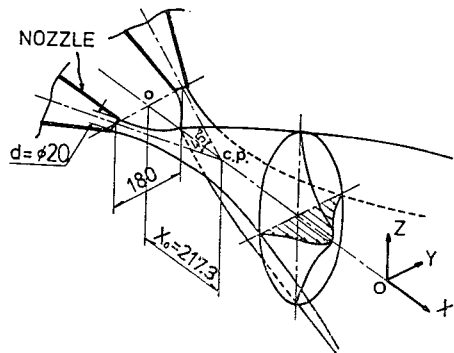


Fig. 2 Structure of the cross jet flows

平均 및 波動速度들은 X, Y 方向成分에 對하여 測定한 다음 X -형 프로브를 90° 回轉시켜 測定하였다.

4. 實驗結果 析分

두 노즐에서 噴射되는 噴流는 Fig. 2에서와 같이 X 方向에 對하여 22.5° 로 傾斜지게 流動하다가 相互 衝突流動되므로 衝突以後의 流動斷面은 타원을 形成하게 된다. 이는 두 噴流들이 X 方向에 對한 22.5° 로 流動을 계속할려는 慣性力에 依하여 橫方向의 斷面幅은 좁아지고, 縱方向의 斷面幅은 늘어나게 된다. Fig. 3은 $Re=2.6 \times 10^4, 5.2 \times 10^4$ 에서 流動方向의 各 位置에서 $\frac{1}{2} \bar{U}_m$ 의 位置를 測定 圖示한 等速度線圖로서 X 方向의 各 位置에 따른 流動斷面의 變化를 보여주고 있다.

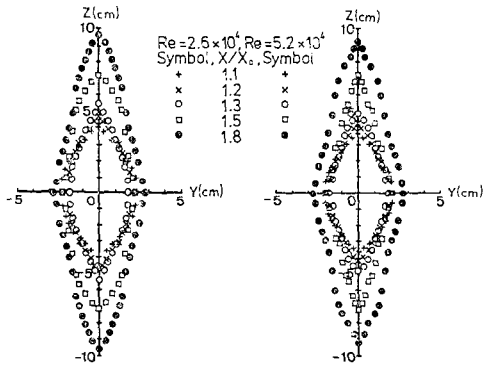


Fig. 3 Contour of the Equi-velocities measured at $\frac{1}{2} \bar{U}_m$

4.1. 平均速度의 分布

X, Y, Z 方向의 平均速度 分布를 考察하기 爲하여 Figs. 4~7에 $X/X_0=1.2 \sim 1.5$ 범위 內에서 混合流의 中心軸에서 橫方向(Y 方向)과 縱方向(Z 方向)으로 $Re=2.6 \times 10^4$ 과 $Re=5.2 \times 10^4$ 의 경우에 對하여 測定한 結果를 圖示하였다. 無次元 速度 分布式 $\bar{U}/\bar{U}_m=f(\eta)$ 을 Görtler 는 다음과 같은 半實驗式으로 나타내었다.

$$\bar{U}/\bar{U}_m = 1 - \tanh^2(C_1 \cdot Y/b_1) \quad (7)$$

또 H. Schlichting 은

$$\bar{U}/\bar{U}_m = [1 - (C_2 \cdot Z/b_2)^{1.5}]^2 \quad (8)$$

로 나타내었다. 여기에서 Görtler 는 係數 C_1 의 값을 $C_1=0.881$ 로 제시하였고, H.Schlichting 은 그의 式에서 $C_2=0.44$ 로 使用하였다. 本 實驗에서는 流動斷面이 타원을 이루고 있어 Y 方向으로 測定한 流動方向의 速度分布 線圖 Fig. 4와 Z 方向으로 測定 圖示한 線圖 Fig. 5는 相異함을 알 수 있다. Fig. 4는 收縮되는 橫 方向으로 測定 圖示한 것으로서 Görtler 의 實驗式과

극히 잘 一致하고 있으며, Görtler 의 係數 C_1 은 本 實驗結果에서 $C_1=0.879 \sim 0.881$ 범위 內에 있음을 알 수 있었다. 또 Fig. 5는 流動斷面이 확대되는 Z 方向으로 測定 圖示한 結果이며, 여기에서는 Görtler 의 式보다 Schlichting 의 式에 더 잘 一致하고 있으며, Schlichting 의 係數 $C_2=0.44 \sim 0.442$ 의 범위에서 本 實驗値와 잘 一致하는 것으로 나타났다. Figs. 4, 5에서 보는 바와 같이 流速의 變化에는 關係없이 混合流의 流動方向의 平均速度 分布는 測定方向에 따라 各已 同一한 曲線상에 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 Y 方向成分의 平均速度 分布를 圖示한 것으로서 X 方向 成分의 平均速度 測定과 同一한 位置에서 測定한 結果이다. 圖表에서 볼 수 있는 바와 같이 Y 方向 成分의 平均速度 값 \bar{V}/\bar{U}_m 은 아주 적은 값으로 나타나 있음을 알 수 있다. 또 \bar{V}/\bar{U}_m 의 값은 어느 一定한 曲線의 式에 一致하지 않고 各 測定位置 X/X_0 의 값에 따라 산만하게 分布되어 있다. Fig. 7은 Z 方向으로 測定 圖示한 Z 方向 成分의 平均速度 \bar{W}/\bar{U}_m 값의 分布이다. 이들의 값은 $Z/b_2 \approx 0.6$ 의 위치에서 各各 最大값을 나타내고 있으며 速度의 증가에 따른 \bar{W}/\bar{U}_m 의 증가는 \bar{V}/\bar{U}_m 의 경우에 비해 크게 나타났고, 分布의 樣相은 同一 曲線상에 存在하지는 않으나, 거의 同一한 曲率로 分布되어 있음을 알 수 있다.

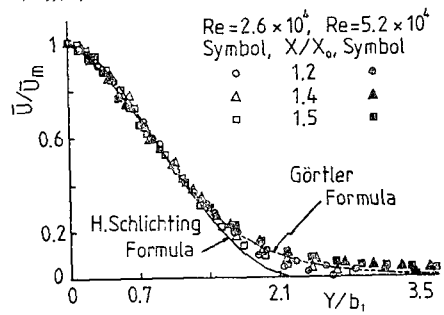


Fig. 4 Mean velocity distributions of \bar{U} measured in the Y direction

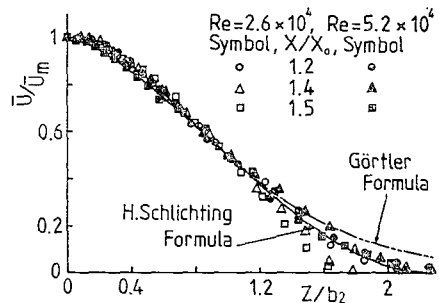


Fig. 5 Mean velocity distributions of \bar{U} measured in the Z direction

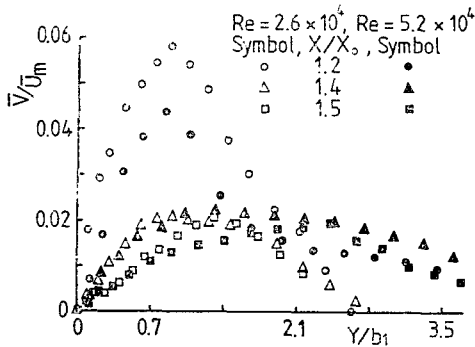


Fig. 6 Mean velocity distributions of \bar{V} measured in the Y direction

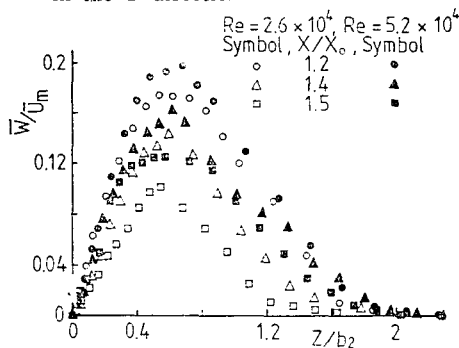


Fig. 7 Mean velocity distributions of \bar{W} measured in the Z direction

4.2. 亂流強度 分布

Figs. 8~10 은 X, Y, Z 方向에 對한 波動速度 成分을 混合流의 中心線에서 Y 方向으로 測定하여 圖示한 것이다. 波動速度의 測定범위를 平均速度 測定범위와 同一하게 잡았으며, 이는 두 噴流의 混合의 發達이 가장 활발하게 이루어 지는 곳으로서 亂流의 形成도 이 범위에서 가장 크게 발달하게 된다. 일반적으로 단일 자유 분류에서 流動方向에 對한 亂流強度는 포텐셜 코어 (potential core) 즉 外氣와 接하지 않고, 亂流가 充分히 發達되지 않는 領域에서는 流動 中心軸을 基準하여 兩側으로 對稱을 이루면서 同一한 最小의 값을 갖게 된다. 流動方向으로 거리가 멀어짐에 따라 포텐셜 코어는 점점 적어져 없어지고, 亂流가 充分히 發達된 流動 領域에서의 平均速度 分布는 포물선을 이루는 반면 亂流 強度는 流動 中心線上에서 最小의 값을 나타내고, 外 側으로 移動해 갈수록 증가하여 대개 $\frac{1}{2} \bar{U}_m$ 이 되는 위치에서 最大값을 보이다가 그 以後부터는 계속 감소하는 경향을 나타낸다.

그러나, 本 實驗에서와 같이 單一噴流가 아니고 어

는 角度로 두 噴流가 衝突하여 混合 流動되는 噴流에서는 포텐셜 코어가 存在할 수 없게 된다. Fig. 8 과 같이 두 噴流의 中心線이 交叉되는 $X/X_0=1$ 보다 큰 $X/X_0>1.2$ 범위에서는 포텐셜 코어가 存在하지 않고, 또 두 噴流가 衝突하여 混合이 이루어지는 領域임에도 $0 < Y/b_1 \leq 0.9$ 범위에서 $(\bar{u}^2)^{1/2} / \bar{U}_m$ 의 값이 거의 一定한 領域이 存在함은 亂流強度의 分布가 同一하기 때문이며, 두 噴流가 그 영역에서는 均一條件으로 混合되어 지고 있음을 알 수 있다. Fig. 9 에 나타난 Y 方向 成分의 亂流強度의 分布는 Y 方向으로 移動해 가며 測定한 값으로서 $(\bar{u}^2)^{1/2} / \bar{U}_m$ 의 값과는 달리 流動의 中心部에

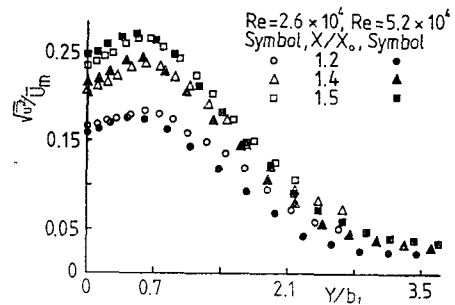


Fig. 8 Intensity of turbulence distributions of u' measured in the Y direction

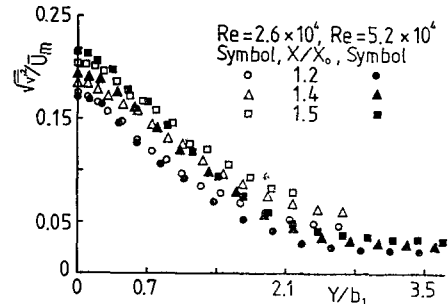


Fig. 9 Intensity of turbulence distributions of v' measured in the Y direction

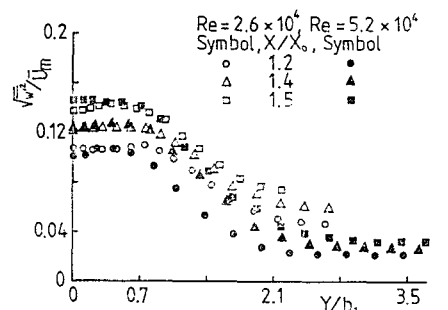


Fig. 10 Intensity of turbulence distributions of w' measured in the Y direction

서 $(v'^2)^{1/2}/\bar{U}_m$ 의 값이 大部分 最大值를 보여주고 Y/b_1 이 증가하여 감에 따라 감소하여 가는 경향을 알 수 있다. Fig. 10은 Z 方向 成分에 對한 亂流強度를 圖示한 圖表로서 $0 \leq Y/b_1 \leq 0.7$ 의 범위에서 $Re=2.6 \times 10^4$, 5.2×10^4 의 경우, $(w'^2)^{1/2}/\bar{U}_m$ 의 값의 分布가 10~15% 범위에 있으며, 측정 위치에 따라 비교적 균일 분포되어 있음을 보여주고 있다.

4.3. 亂流剪斷應力 分布

亂流剪斷應力은 亂流運動 方程式에서 $-\rho\overline{u'v'}$, $-\rho\overline{u'w'}$, $-\rho\overline{v'w'}$ 등으로 表示되나, 本 實驗에서 熱線風速計에 의해 Y 方向과 Z 方向으로 프로브를 移送해 가며 測定한 $-\rho\overline{u'v'}$, $-\rho\overline{u'w'}$ 의 값들을 $-\rho\bar{U}_m^2$ 으로 除하여 圖示한 線圖가 Figs. 11, 12이다. Fig. 11에서 $\overline{u'v'}/\bar{U}_m^2$ 의 分布는 X 方向의 各 測定位置와 Re 數에 관계 없이 $Y/b_1 \approx 0.6$ 의 위치까지는 크게 증가하여 가다가 그 이후 부터는 감소현상을 나타내어 공히 $Y/b_1 \geq 2.8$ 에서는 영에 수렴하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12의 경우는 Z 方向으로 測定한 $\overline{u'w'}/\bar{U}_m^2$ 의 값의 分布로 同一

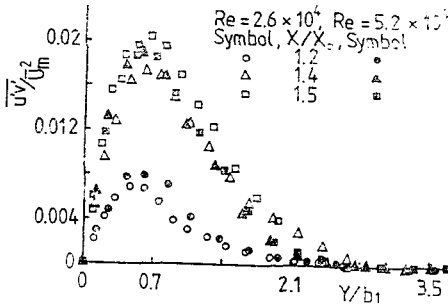


Fig. 11 Distributions of the turbulent shear stresses on the X-Y plane measured in the Y direction

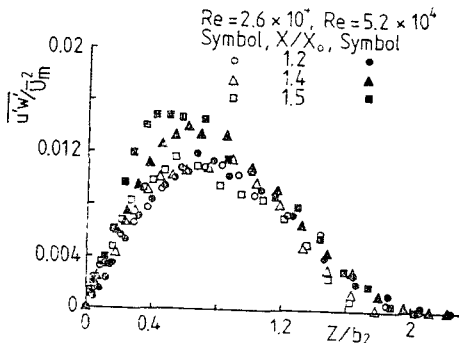


Fig. 12 Distributions of the turbulent shear stresses on the X-Z plane measured in the Z direction

한 位置에서 剪斷應力의 값은 Re 數가 큰 경우가 적은 경우보다 일반적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이 경우에도 $\overline{u'w'}/\bar{U}_m^2$ 의 값은 中心部에서 Z 方向으로 거리가 멀어짐에 따라 증가하는 현상을 나타내어 $Z/b_2 \approx 0.6$ 의 위치에서 최대값을 보이다가 그 이후부터는 감소하여 $Z/b_2 \geq 2$ 의 영역에서 공히 영에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

4.4. 相關係數(Correlation Coefficient)의 分布

相關係數는 同一한 方向의 두 點間의 相關係數 $R_{x_1x_2}$, $R_{y_1y_2}$, $R_{z_1z_2}$ 와 一定한 點에서 경과시간에 따른 相關係數 $R_{x_1x_2}$ 로 表示되나 실제로 各 測定位置에서 同時에 測定된 서로 다른 方向에 對한 相關係數 R_{xz} , R_{yz} , R_{xy} 를 많이 測定 分析하게 된다. 本 實驗에서도 두 Re 數의 경우 X -형 프로브를 Y 方向과 Z 方向으로 移送하면서 各 點에서 測定한 값들을 Figs. 13~14에 圖示하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Y 方向으로 測定한 $\overline{u'v'}/(\bar{u}^2)^{1/2}(\bar{v}^2)^{1/2}$ 의 값과 Z 方向으로 測定한 $\overline{u'w'}/$

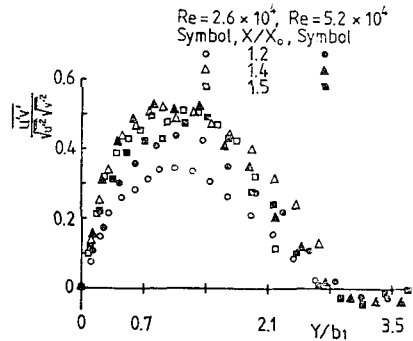


Fig. 13 Distributions of correlation coefficient of X-Y components measured in the Y direction

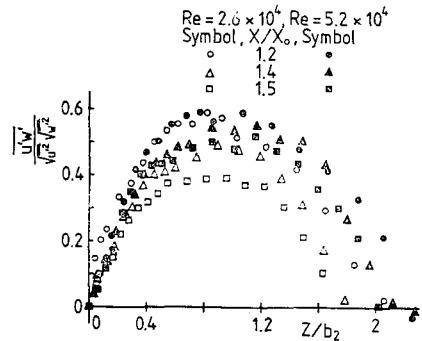


Fig. 14 Distributions of correlation coefficient of X-Z components measured in the Z direction

$(\overline{u'^2})^{1/2}(\overline{w'^2})^{1/2}$ 값의 분포는 거의 同一한 양상으로 나타나 있으며, Re 數의 變化에 關係없이 公히 流動半幅 즉 $Y/b_1=1.0, Z/b_2=1.0$ 의 위치에서 各々 最大値를 나타내고 있으며, $u'v'/(\overline{u'^2})^{1/2}(\overline{v'^2})^{1/2}=f(Y/b_1)$ 과 $u'w'/(\overline{u'^2})^{1/2}(\overline{w'^2})^{1/2}=f(Z/b_2)$ 를 圖示한 Figs. 13, 14에서 測定位置와 Re 數에 關係없이 이들은 各々 유사한 곡률로 분포되어 있음을 알 수 있다.

4.5. 亂流運動 에너지의 分布

Fig. 15는 亂流運動 에너지의 값 $K=\frac{1}{2}(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2})$ 을 Y 方向으로 各 位置에서 測定한 값으로 圖示한 것이다. 一般的인 分布現象을 보기 爲하여 $K/\overline{U}_m^2=f(Y/b_1)$ 으로 圖示하였을 때, K 의 값은 $Y/b_1 \approx 0.6$ 以後에서는 各 線圖들 公히 減少하여 가는 傾向을 보이고 있다.

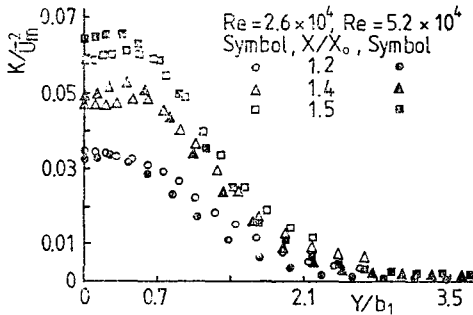


Fig. 15 Distributions of turbulent kinetic energy measured in the Y direction

各 線圖마다 $0 \leq Y/b_1 \leq 0.6$ 의 범위에서 K/\overline{U}_m^2 값의 變化가 크지 않으며, 큰 값들을 유지하고 있어, 그 영역에서 $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$ 의 값이 크게 形成됨을 알 수 있다.

4.6. 運動량의 變化

運動量の 變化는 自由噴射에서 運動量 保存의 理論에 依하여 $mu = \rho Au^2 = C$ (一定)가 되고, 이 結果는 實驗에 依해서도 쉽게 證明이 되어 왔다. 두 노즐에서 噴出되는 噴流의 運動量の 合을 $2Me$, 混合流의 運動量を $M = \rho A \overline{U}^2 = \frac{1}{4} \rho A (\overline{U}_m^2)$ 으로 나타내어 두 噴流가 中心線이 交叉되는 $X/d \approx 11$ 以後에서 運動量を 計算하였다. $Re = 2.6 \times 10^4, 3.9 \times 10^4, 5.2 \times 10^4$ 의 세 速度에 對하여 $M/2Me = f(X/d)$ 로 圖示한 것이 Fig. 16이다.

圖表에서 알 수 있는 바와 같이 $11 \leq X/d \approx 14$ 에서는 레이놀즈수에 關係없이 減少하는 傾向을 나타내고, 圖式的으로 세 速度에 對한 減少區配를 구하면 $-1/36$

이 된다. 運動量 保存의 法則에 依하여 $M/2Me=1$ 을 유지하여야 하나, $M/2Me=0.3$ 까지 감소되어 있는 現象은 두 噴流의 衝突에 依한 衝突損失에 크게 기인되며, 混合流動과정에서 強한 亂流의 形成과 渦流等으로 인한 平均流速 減少等으로 運動量이 크게 減少하고 있는 것으로 考慮된다. 그러나, 衝突에 依한 流動形成이 이루어진 후 單一噴射와 같은 流動이 發達된 流動域 $X/d \geq 14$ 에서는 流速에 關係없이 $M/2Me=C$ 로서 運動量이 不變함을 알 수 있다.

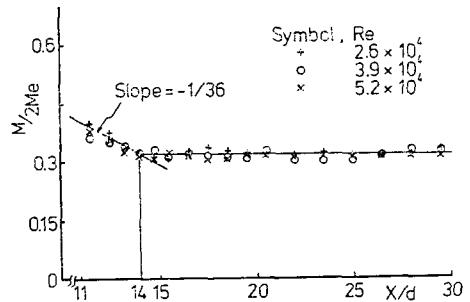


Fig. 16 Momentum variation in the X direction

5. 結 論

等速 45°交叉 衝突噴射되는 混合流의 亂流流動 形成을 考察한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 두 噴流의 衝突에 依한 混合流의 流動斷面은 타원을 이루며, Y 方向(斷徑方向)으로 測定한 流動方向의 平均速度線圖는 Görtler의 實驗式 $\overline{U}/\overline{U}_m = 1 - \tanh^2(0.881 Y/b_1)$ 에 잘 一致하고, Z 方向(長徑方向)으로 測定한 結果는 H. Schlichting의 實驗式 $\overline{U}/\overline{U}_m = [1 - (0.44 Z/b_2)^{1.5}]^2$ 에 잘 一致하고 있다.
- (2) 亂流強度 分布는 $(\overline{u'^2})^{1/2}/\overline{U}_m, (\overline{w'^2})^{1/2}/\overline{U}_m$ 의 경우, $0 \leq Y/b_1 \leq 0.7$ 의 領域에서 各 測定位置($X/X_0 = 1.2, 1.4, 1.5$)에 따라 유사하게 큰 값의 分布를 나타내고 있는 領域이 있음을 알 수 있다. 그러나, $(\overline{v'^2})^{1/2}/\overline{U}_m$ 의 값은 中心部에서 최대값을 나타내고 公히 Y 의 증가에 따라 감소해 가는 傾向으로 나타나 있다.
- (3) 亂流剪斷應力 $u'v'/\overline{U}_m^2, u'w'/\overline{U}_m^2$ 의 分布는 公히 $Y/b_1 = Z/b_2 \approx 0.6$ 의 位置에는 最大値를 나타내고, 그 이후부터는 감소하는 傾向을 나타내고 있다.
- (4) 運動量 流動에서 두 噴流의 運動量の 合에 對한 混合流의 運動量の 比는 $X/d \approx 14$ 까지는 크게 減少하여 최소 $M/2Me = 0.3$ 을 나타내나, $X/d > 14$ 에서는 流速變化에 關係없이 一定한 값 0.3을 유지함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) E. Gutmark et al., The planar turbulent jet, J. Fluid Mech. Vol. 73, part 3, pp.465~495, 1976
- (2) A. Krothapalli et al., On the mixing of a rectangular jet, J.Fluid Mech. Vol. 107, pp.201~220, 1981
- (3) L.J.S. Bradbury, The structure of self-preserving turbulent plane jet, J. Fluid Mech. Vol. 23, part 1, pp.31~64, 1965
- (4) A.J. Yule, Large scale structure in the mixing layer of a round jet, J. Fluid Mech. Vol. 89, part 3, pp.413~432, 1978
- (5) D. Oster, I. Wagnanski, The forced mixing layer between parallel streams, J. Fluid Mech. Vol. 123, pp.91~130, 1982
- (6) Eiichi Tanaka, The interference of two-dimensional parallel jets, JSME, Vol. 17, No. 109, 1974
- (7) W.T. Chan et al., Coherent structure in the outer mixing region of an annular jets, J. Fluid Mech. Vol. 89, part 3, pp.515~535, 1978
- (8) Masao Taga et al., Study on annular jet JSME, Vol. 13, No. 65, 1970
- (9) Toshio Tanaka et al., Experimental studies of a radial turbulent jet (2nd report, wall jet on a flat smooth plate), JSME, Vol. 20, No. 140, 1977
- (10) P.O. Witze et al., The turbulent radial jet, J. Fluid Mech. Vol. 75, part 3, pp.401~417, 1976
- (11) 盧秉俊, 風洞을 이용한 벨브제트에서 亂流제트流動 考察, 대한기계학회논문집 제 5권, 제 4호, pp. 257~265, 1981
- (12) Tetsushi Okamoto et al., Perpendicular impinging of two turbulent plane free jets, JSME, Vol. 47, No. 419, 1981
- (13) A.D. Weir et al., Interacting turbulent shear layers in a plane jet, J. Fluid Mech. Vol. 107, pp.237~260, 1981
- (14) B.R. Ramaprian, Turbulence measurements in an equilibrium axisymmetric wall jet, J. Fluid Mech. Vol.71, part 2, pp.317~338, 1975
- (15) C.Borrego et al., A method for the measurement of mixing properties in a turbulent jet flow, Von KARMAN Institute, 1979
- (16) C. Chandrsuda, D. Bradshaw, Turbulence structure of a reattaching mixing layer, J. Fluid Mech. Vol. 110, pp.171~194, 1981
- (17) M.R. Davis et al., Shear fluctuations in a turbulent jet shear layer, J. Fluid Mech. Vol. 93, part 2, pp.281~303, 1979
- (18) O.O. Mojola, A hot-wire method for three-dimensional shear flow, DISA Information.
- (19) O.O. Mojola, The effects of orientation of hot-wire probe body in turbulent shear flow, DISA Information.
- (20) Shoji Kinoshita et al., An experimental study on the turbulence characteristics of a coaxial round jet, JSME, Vol. 21, No. 155, 1978
- (21) 盧秉俊, Cross jet의 亂流流動에 對한 實驗的考察, 全北大學校 論文集 제 25집 Vol. 25, 1983.