

< 論 文 >

自由平面제트 및 衝突平面제트의 亂流特性

鄭必雲* · 李祥秀** · 夫禎淑** · 尹焯鉉**

(1983年 3月 19日 接受)

The Characteristics of Free and Impinging Turbulent Plane Jet

Pil Un Jung, Sang Soo Lee, Jung Sook Boo and Soon Hyun Yoon

Abstract

The turbulent structures of the free plane jet and two dimensional impinging jet are investigated experimentally. In order to get the two dimensional jet, the contour of the cubic equation suggested by Morel is used for a contracting nozzle. A linearized constant-temperature hot-wire anemometer is used for measurement.

Mean velocities and turbulent intensities are measured along the centerline of the jet. Jet half width spatial double velocity correlation coefficients and integral length scales are obtained.

It is established that the free plane jet is truly self-preserving about 40 slot widths downstream of the nozzle.

The experiments for the impinging jet are carried out at four different impingement wall locations within the self-preserving region of the free plane jet, and comparing the results with that of free plane jet, the mean velocity is changed in the region of $0.25H$ and turbulent intensities are affected in the region of $0.2H$ from the wall, respectively, where H means the distance between the nozzle exit and the wall.

記 號 說 明

- D : 노즐 出口의 幅(=20mm)
- H : 노즐 出口에서 衝突壁까지의 거리
- l : 噴流幅(jet half width), $V(x, l)$
 $= \frac{1}{2} U(x, 0) = \frac{1}{2} U_m$
- $R_e = U_j D / \nu$: 노즐 出口幅을 基準으로한 레이놀즈 수
- $R_{11}(\Delta x, 0, 0) = \frac{u(x)u(x-\Delta x)}{u'(x)u'(x-\Delta x)}$: Longitudinal spatial
double velocity correlation coefficient
- $R_{11}(0, \Delta y, 0) = \frac{u(\frac{1}{2}\Delta y)u(-\frac{1}{2}\Delta y)}{u'(\frac{1}{2}\Delta y)u'(-\frac{1}{2}\Delta y)}$: Lateral spatial

- double velocity correlation coefficient.
- U, V : x, y 方向의 平均速度 成分(mean velocity)
- U_j : 노즐出口에서의 最大 平均速度
- U_m : 噴流 中心線에서의 x 方向 平均速度
- u, v, w : 速度의 亂流變動分(turbulent fluctuation)
- u', v', w' : 亂流變動分の r.m.s. 즉
 $u' = \sqrt{\bar{u}^2}, v' = \sqrt{\bar{v}^2}, w' = \sqrt{\bar{w}^2}$
- x, y, z : Cartesian 좌표계
- X : 노즐出口로부터 x 方向 거리
- W : 노즐出口의 길이(=800mm)
- ν : 공기의 동점성계수
- $\Lambda_x = \int_0^\infty R_{11}(\Delta x, 0, 0) dx$: Longitudinal integral length
scale
- $\Lambda_y = \int_0^\infty R_{11}(0, \Delta y, 0) dy$: Lateral integral length scale
- '(prime) : Root mean square 를 의미함
- (bar) : 시간에 대한 평균을 의미함

* 釜山大學校 大學院 機械工學科

** 正會員, 釜山大學校 工科大學

1. 緒 論

2次元自由噴流(free plane jet)는 그應用範圍가 넓고亂流流動의研究에基本的資料를提供하여주기때문에 많은사람들에 의하여研究되어왔다¹⁻⁴⁾.

Miller & Comings(1957)⁵⁾는노즐出口에서부터出口幅의40배의거리까지에서平均速度(mean velocity)와主流方向의亂流變動分을測定하였으나充分的自體類似(self-preservation)는얻지못하였으며, Bradbury(1965)⁶⁾는亂流方向과같은방향으로약한外部流動(노즐분사속도의0.07~0.16배)이있는곳에공기로噴射시키고亂流測定을하였는데, 이경우는정지된流體속으로공기로噴射시키는경우에비하여噴流(jet)의끝부분에서일어나는큰亂流強度를피할수있어서測定誤차를減少시킬수있는장점이있으나流動이完全한自體類似성을가지지는않는다⁷⁾.

Jenkins & Goldschmidt(1973)⁸⁾는噴射되는空氣의溫度를變化시켜서平均速度및溫度에대한噴流의擴散率(spreading rate)을구하여열전달율과운동량전달율의비를觀察하였으며, Heskestad(1965)⁹⁾는定溫型熱線流速計를使用하여平均速度,亂流變動分그리고 Reynolds shear stress 등을測定하였는데, 平面噴流를만들기위하여단순히오리피스를사용하였으며노즐출구에서2次元噴流가총계이루어졌다고는볼수없다. 또한 Gutmark & Wygnanski(1976)¹⁰⁾는노즐出口幅의120배의거리에서平均速度,亂流變動分,亂流成分의3次,4次項들및2 point spatial correlation 등을測定하였다.

以上の結果에서噴流의擴散率과自體類似가이루어지는位置등,噴流의基本的構造를보이는경향은같지만定量的으로는많은差異를보이고있으며,大部分이主로噴流의自體類似領域(self-preserving region)에對하여實驗한것들이고噴流의初期條件(노즐出口에서의條件)및初期發達領域(initial development region)에對하여는별로언급하지않고있다.

2次元衝突噴流(impinging plane jet)는衝突壁(impingement wall) 근처에서噴流의中心平面에수직인vortex-line의stretching에依하여亂流成分이增加하게되며,¹²⁾亂流成分의增加는亂流運動에너지를增加시키고運動量傳達및熱傳達를활발하게하여주므로工學的으로매우重要的모델이되며,그應用으로는디젤엔진에서燃焼室內的燃料의噴射, painting

spray 등 각종 spray 장치 그리고 cavitating water jet drill 등이 있다.

이러한衝突噴流는 Beltaos & Rajaratnam(1974)¹³⁾, Gutmark et al(1978)¹⁴⁾, Wolfshtein(1970)¹⁵⁾ 등에 의해研究되어져왔으나正確한解析的모델은아직세워지지않고있다. Beltaos & Rajaratnam(1974)은圓形噴流(circular jet)를平面위에수직下向으로噴射시킬때피토우管을사용하여平均速度및露壓分布를測定하고衝突壁 근처에서噴流幅의급한增加를觀察하였으며, Gutmark et al(1978)은노즐出口에서부터出口幅의100배의 거리에衝突壁을설치하고噴流의中心線上에서平均速度和亂流變動分을測定하여速度分布가衝突壁에 의해變하는領域의範圍를觀察하였다.

本研究에서는2개의3次曲線으로이루어지는축소노즐(contracting nozzle)로부터噴射되는2次元噴流에서線形화된定溫形熱線流速計(linearized constant-temp. hot-wire anemometer)를使用하여自由噴流및衝突噴流의亂流特性에대해實驗하였다.

2次元自由噴流에서는噴流의擴散率,假想原點(virtual origin) 그리고自體類似등噴流의基本構造를觀察하고,各方向亂流強度와노즐出口速度的變化가噴流의自體類似가이루어지는位置에미치는영향을調査하였다. 한편衝突噴流에서는自由噴流의自體類似가이루어지는領域에서衝突壁의位置를4가지로變化시켜서衝突壁으로인한噴流의平均速度및亂流性質들의변화를조사하고,噴流의中心線을따라spatial correlation을測定하고各方向의integral length scale을구하여衝突壁 근처에서의亂流의large scale eddy의stretching構造를觀察하였다.

2. 實 驗

2.1. 實驗裝置

實驗裝置의概略圖는Fig. 1과같다. 空氣의供給은5마력삼상교류전동기로구동되는遠心送風機(centrifugal blower)에依하며,供給된空氣는擴大部(diffuser)와整流室(plenum chamber)및축소노즐(contracting nozzle)을통과하여流動場으로噴射된다.

送風機의空氣流入部分에는안내管(guiding duct)을두었으며,案内管의入口에는250mesh/in의철망을設置하여空氣中の먼지를除去하도록하였다. 또한,空氣가通過하는단면적을變更시킬수있는조절판을철망앞에設置하여送風機로들어가는空氣의量

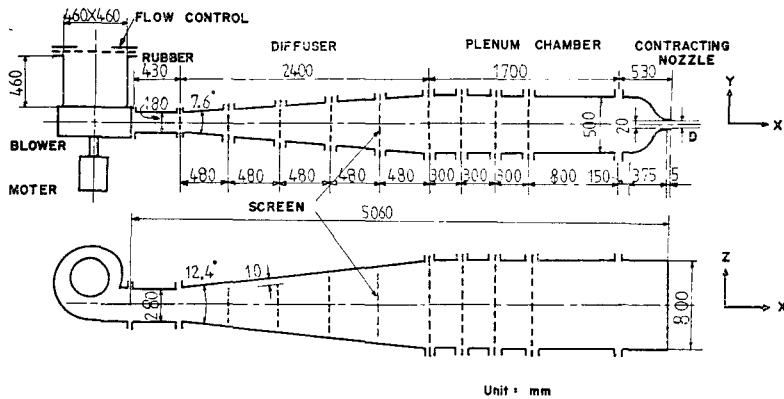


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

을 調節하였다. 送風機와 擴大部 사이에는 전동기의 진동이 전달되는 것을 막기 위하여 고무판을 사용하였고 확대부와 정류실에는 각각 4군데씩 모두 8군데에 24 mech/in의 철망(선의 직경은 0.23mm)을 설치하여 축소노즐로 들어가는 空氣의 平均速度分布(mean velocity distribution)를 均一하게 하고 亂流度(turbulent level)를 줄이도록 하였다¹⁶⁾.

擴大부의 擴大角(diffuser angle)은 7.6°와 12.4°인데, 12.4°인 부분에서는 流動의 剝離(separation)현상이 발생할 가능성이 크므로 철망과 擴大부의 벽 사이에 10mm의 간격을 두어 擴大部 벽을 따라 형성되는 壁噴流(wall-jet)에 의하여 剝離가 저지되도록 하였다.

均一한 平均速度를 갖고 亂流強度가 작은 2次元 自由噴流를 얻기 위하여 縮小노즐이 使用되었다. 축소(contraction)가 流動에 미치는 영향은 Prandtl 이후 여러사람들에 의해 研究되어 왔다^{16,17)}. Ramjee & Hussain¹⁸⁾은 軸대칭 縮小노즐(axisymmetric contracting nozzle)에 對한 實驗을 하여 縮小比(cocontracting ratio)가 增加함에 따라 가로방향(lateral)의 亂流強度는 계속 감소하지만 軸方向(longitudinal)의 亂流強度는 縮小比 45일때 最小值를 나타내어, 노즐 出口에서의 亂流強度를 줄이기 위하여 縮小比를 無限대로 크게 할 필요가 없음을 밝혔다.

Hussain & Ramjee¹⁷⁾는 4가지 軸對稱 縮小노즐(3次式, Batchelor-Shaw, ASME High-β series, ASME low-β series)에 對하여 調査하여, 3次式노즐이 노즐 出口에서 境界층의 두께와 境界층에서의 亂流強度가 가장 작게 나타남을 알아 내었다.

Morel^{19,20)}은 3次曲線(cubic equation) 2개로 이루어진 縮小노즐에 對한 研究를 하여 最適 노즐 設計를 위한 道具와 設計方法을 제시하였다.

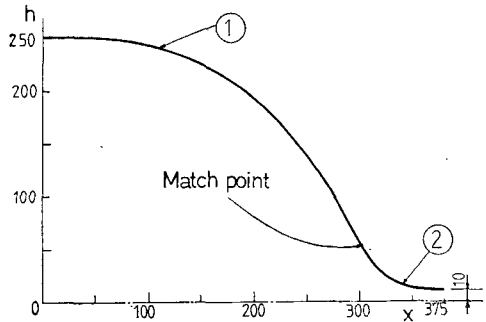
本 研究에서는 Morel의 方法에 따른 縮小曲線을 使用하였으며, 그 모양은 Fig. 2와 같고 2개의 3차방정식은 각각 다음과 같다.

$$h = 250 - \frac{x^3}{140625} \quad (0 \leq x \leq 300)$$

$$h = 10 + 6000\left(1 - \frac{x}{375}\right)^3 \quad (300 \leq x \leq 375)$$

여기서 모든 단위는 mm이고, x는 노즐 入口에서부터의 軸方向거리, h는 噴流 中心線에서의 수직(y방향)거리이다. 노즐 入口과 出口에서 曲線의 기울기는 0이며 조합되는 두 곡선은 x=300mm에서 같은 기울기를 가진다. 순수한 축소길이는 375mm이고, 제작의 편의와 速度分布 不均一의 改善을 위하여¹⁹⁾ 노즐 出口부분에 5mm의 평행부를 두었으며, 정류실과 축소노즐을 結合시키는 플랜지(flange)의 영향을 고려하여노즐 入口 부분에도 150mm의 平행부를 두었다.

노즐의 제작은 두께 1.5mm의 철판을 정밀 판금 가공하여 축소노즐의 벽부분을 만들고, 두께 20mm의 아크릴 평판을 Fig. 2의 곡선이 매칭으로 이루어지도록



$$\textcircled{1} \quad 0 \leq X \leq 300 : H = 250 - \frac{X^3}{140625}$$

$$\textcircled{2} \quad 300 \leq X \leq 375 : H = 10 + 6000\left(1 - \frac{X}{375}\right)^3$$

Fig. 2 Contour of contracting nozzle(unit: mm)

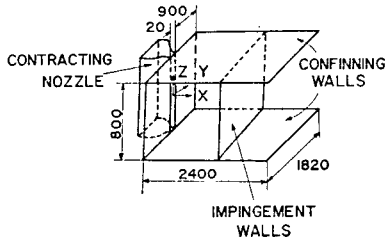


Fig. 3 Flow geometry and coordinate system (unit : mm)

록 가공하여 노즐의 上下부분을 만들었으며, 철판과 아크릴을 나사로 결합시켰다. 노즐 出口의 幅 D 는 20 mm이며 높이 W 는 800mm로서, 노즐의 형상비(aspect ratio) W/D 는 40이며 면적 축소비(contraction ratio)는 25이다.

노즐 出口의 경계조건(boundary condition)을 균일하게 하고 20×800 mm의 노즐 出口 단면을 유지시키기 위하여 800×900 mm의 두 아크릴 평판을 Fig. 3과 같이 노즐 出口의 양옆에 出口단면과 나란히 설치하였다. 또한 噴流의 2次元性を 보존하기 위하여²¹⁾ 1820×2400 mm의 두 평판을 流動場 上下에 설치하였으며 衝突壁으로는 두께 15mm의 아크릴 평판을 사용하였다.

縮小노즐을 제외한 대부분의 實驗裝置는 주로 합판(plywood)과 아크릴 평판으로 제작하였는데, 합판의 사용은 제작이 용이하고 경제적이며 振動의 傳達를 감소시켜주는 이점이 있었다.

제작된 實驗裝置는 22.5×18 m의 充分히 큰 실험실의 中央에 바닥으로부터 약 1.2m 그리고 천정과 거의 같은 약 2.5m가 되도록 장치하여, 실험실 바닥으로부터의 振動의 전달 및 噴射된 空氣에 의한 실내 공기순환의 효과등 기타 실험에 영향을 줄 수 있는 要因을 最大한 遮斷시켰다.

노즐 出口에서 最大速度는 31.3m/sec이며, 送風機의 空氣 流入部에 設置된 조절판에 의하여 送風機에 들어가는 空氣의 量을 조절하여 노즐 出口速度를 變化시켰다.

2.2. 實驗方法

測定에는 5μ 텅스텐 선(tungsten wire)으로 된 단일 직선형 I probe와 X probe가 사용되었으며, 신호처리에는 지수가변형 선형계(lineariser)가 부착된 定溫型 熱線流速計(constant temp. hot-wire anemometer; KANOMAX 2-channel system 7224)가 사용되었다.

Probe의 좌표를 정밀하게 하기 위해 0.05mm의 정밀도를 갖는 길이 측정용 현미경이 사용되었다.

I형 probe가 사용될 때, 熱線(hot-wire)의 冷却에 영향을 미치는 有效速度 U_{eff} 는 熱線이 Z축(노즐의 길이방향 : 그림 3 참조)에 평행한 경우는 $U_{eff} = \sqrt{(U+u)^2 + (V+v)^2}$ 이 되고, y축에 평행한 경우는, 熱線에 평행한 速度성분의 영향을 무시한다면²²⁾, $U_{eff} = \sqrt{(U+u)^2 + w^2}$ 이 된다. 따라서 y방향의 평균속도가 x방향 평균속도에 비해 크게 되는 분류의 가장자리부분과 층돌분류의 벽 가까이에서는 I probe의 熱線을 축에 평행하게 두고 測定하였다.

衝突噴流의 實驗에서는 衝突壁 근처에서의 測定을 容易하게 하기 위하여 衝突壁의 中央에 직경 12mm의 구멍을 뚫고 probe를 流動場內에 測定位置에 고정시킨 다음 뚫은 구멍의 틈으로 공기가 새는 것을 막기 위해 테이프를 사용하여 구멍을 막았다.

測定도중의 溫度變化는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이였으므로 溫度보상 장치는 使用하지 않았다.

3. 實驗結果 및 考察

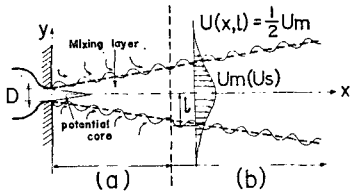
노즐 出口 가운데($z=400$ mm, $x=y=0$)에서의 最大 平均速度 U_j 는 3.3m/s이었고, 노즐 出口幅 D 를 특성길이로 하는 레이놀즈 수($Re = U_j D / \nu$)는 3.7×10^4 이였으며, x, y, z 방향의 亂流強度는 各各 $u'/U_j = 0.001$, $v'/U_j = 0.002$, $w'/U_j = 0.002$ 이었다.

또한 노즐 出口에서 平均速度의 2次元성이 검토되었는데, $z=400$ mm에서 hot-wire probe를 y방향으로 移動하여 測定한 경우 각 점에서의 平均速度와 U_j 와의 差異가 3%이내 이였으며, $y=0$ 에서 hot-wire probe를 z방향으로 이동하여 測定한 경우는 노즐의 양 끝 부분(위, 아래 각각 10%)을 제외한 부분에서의 平均速度와 U_j 와의 차이는 2%이내 이었다. 따라서 본 實驗에서 使用된 縮小노즐은 亂流強度가 작은 2次元 噴流를 잘 發生시키고 있음을 알 수 있었다.

3.1. 2次元 自由噴流

2次元 自由噴流는 Fig. 4에 보이는 바와 같이 初期 發達領域(initial development region)과 自體類似領域(self-preserving region)으로 나누어 진다. 초기발달 영역은 噴流의 出口速度 U_j 가 거의 그대로 保存되는 potential core와 주위 유체와의 혼합이 활발히 일어나는 혼합층(mixing layer)으로 이루어진다.

노즐 出口로부터 x방향으로의 거리가 增加함에 따



(a) Initial development region
(b) Self-preserving region
Fig. 4 Sketch of free plane jet

라 potential core는 줄어들게 되고 혼합층은 커지게 되며 더욱 증가하면 噴流는 充分히 發達된 自體類似的 亂流流動이 된다.

Townsend²³⁾는 레이놀즈 수가 충분히 클 때 自由噴流에 對한 運動量方程式(momentum equation)이 類似性을 갖기 위해서는 特性길이 l (length scale)과 特性速度 U_m (Velocity scale)이 다음과 같이 표시되어야 함을 밝혔다.

$$l \propto (x-x_0) \quad (1)$$

$$U_m \propto (x-x_0)^{-1/2} \quad (2)$$

여기서 x_0 는 噴流의 가상원점(virtual origin)이고, x 는 노즐 出口로부터의 거리를 표시하는 좌표이다. 또한 U_m 은 噴流의 중심선($y=0$)에서의 最大平均速度이며, l 은 噴流幅이며 平均速度 U 가 U_m 의 $1/2$ 이 되는 곳과 중심선과의 거리(jet half width)가 된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 여러 x 의 위치에서 I probe의 熱線을 z 축에 평행하게 놓고 測定한 U 와 u'/U_m 의 방향 분포이다.

Fig. 5에서는 x/D 가 8보다 큰 위치에서 y/l 에 대한 U/U_m 의 分布는 하나의 曲線에 잘 일치하고 있으며, 平均速度가 좋은 自體類似性을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 u'/U_m 의 分布는 x/D 가 30 이후 부터 한 曲線에 거의 일치하게 되어, 平均속도의 경우 보다는 늦으나, 自體類似性이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 噴流의 中心線上(x 축상)에서의 平均速度인 U_m/U_j 의 분포와 噴流幅 l/D 의 분포를 보인 것으로, potential core가 소멸되고 平均속도의 自體類似性이 나타나는 $x/D=8$ 이후에서는, 噴流幅은 x/D 에 따라 선형적으로 增加하고 平均速度는 $(x/D)^2$ 에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 식 (1)과 식 (2)을 변형시킨 다음 식들로 나타낼 수 있다.

$$\frac{l}{D} = K_1 \left(\frac{x}{D} + C_1 \right) \quad (3)$$

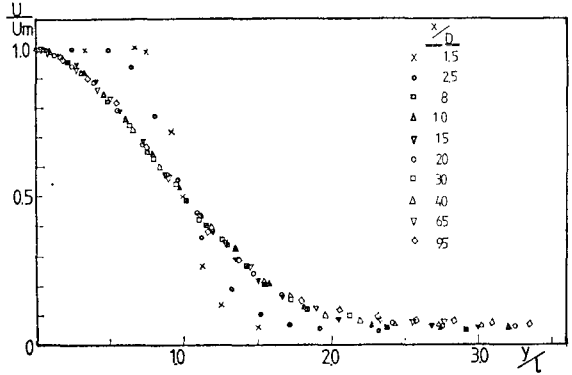


Fig. 5 The development of mean velocity profile

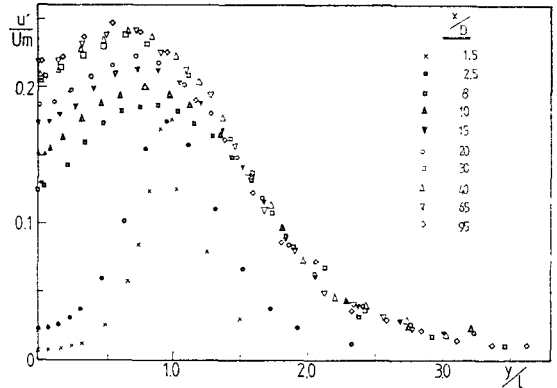
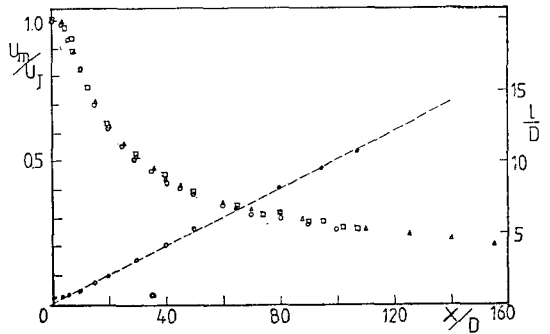


Fig. 6 The development of axial turbulent intensity profile



- ; X probe, along the center-line,
- ; I probe, data from Fig. 5
- △ ; I probe, along the center-line,
- ; Jet half width obtained from Fig. 5

Fig. 7 Variations of mean velocity on the center-line of free plane jet and jet half width

$$\left(\frac{U_m}{U_j} \right)^{-2} = K_2 \left(\frac{x}{D} + C_2 \right) \quad (4)$$

여기서 $K_1 (= \frac{dl}{dx})$ 은 噴流의 擴散率이며 C_1 은 가상

Table 1 Literature review

| Author(s) | $^1 \frac{W}{D}$ | $\times R \cdot 10^3$ | K_1 | C_1 | K_2 | C_2 | $^* \frac{L_s}{D}$ |
|-----------------------|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Miller & Comings | 40 | 17.8 | 0.07 | 1.57 | 1.03 | . | . |
| Bradbury | 48 | 30 | 0.11 | . | 0.16 | . | 30 |
| Heskestad | 120 | 34 | 0.11 | -6.49 | 0.16 | -6.49 | 65 |
| Mih & Hoopes | 59 | 17.7 | 0.117 | . | . | . | . |
| Jenkins & Goldschmidt | 24 | 14.3 | 0.03 | 2.5 | 0.16 | -4.0 | 30 |
| Gutmark & Wignanski | 38.5 | 30 | 0.1 | 2 | 0.18 | . | 40 |
| Gortari & Goldschmidt | 48 | 10 | 0.08 | 6.62 | 0.24 | -4.53 | . |
| Goldschmidt et al. | 48 | 10 | 0.09 | 8.75 | 0.15 | 1.25 | . |
| Present investigation | 40 | 37 | 0.10 | 1.73 | 0.182 | 0.07 | 40 |

¹ aspect ratio of nozzle exit

* L_s ; self-preserving distance from the nozzle

원점 x_0 에 관계되는 상수로써 $C_1 = -\frac{x_0}{D}$ 이고, K_2 는 평균속도의 감소율을 나타낸다. 본 연구의 경우 $K_1 = 0.10$, $C_1 = 1.72$, $K_2 = 0.128$, $C_2 = 0.07$ 였으며, 참고로 지금까지 발표된 다른 연구결과들과의 비교를 Table 1에 보였는데 값들의 차이가 있음을 알 수 있다.

Kotsovinos¹¹²는 자유분류의 분류폭이 선형적으로 증가하는 것이 아니라 비선형적으로 증가한다고 보고 실험결과들을 정리하여 l/D 를 x/D 의 3차식으로 표시하였으며, Bradshaw²⁴는 실험실 내의 순환流動에 의한 분류주위의 분류도가 각 실험실마다 다른 것이 그 원인이라고 보고있다. 또한 노즐의 형상²⁵과 노즐出口에서의 분류強度^{26,27}와 momentum thickness²⁸도 그 원인이 될 수 있다. 그러나 본 실험에서는 위의 원인들 중 어느것이 큰 효과를 미치는지 판단하기 어려웠다. Fig. 8은 분류의 中心線을 따라 X probe를 사용하여

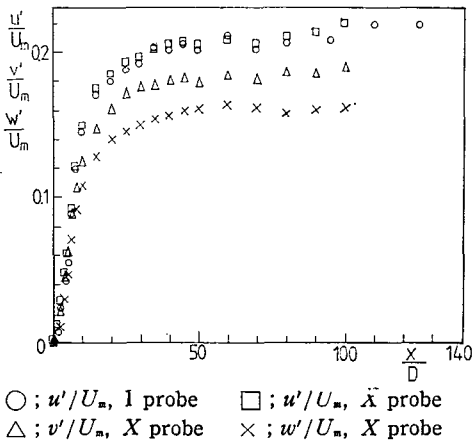


Fig. 8 Variations of the turbulent intensities on the centerline of free plane jet

測定한 분류強度의 分布를 보인것으로, x/D 가 약 40 이후 되는 곳에서 自體類似性을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 이 영역에서의 분류強度의 값은 각각 $u'/U_m = 0.21$, $v'/U_m = 0.18$, $w'/U_m = 0.16$ 이다.

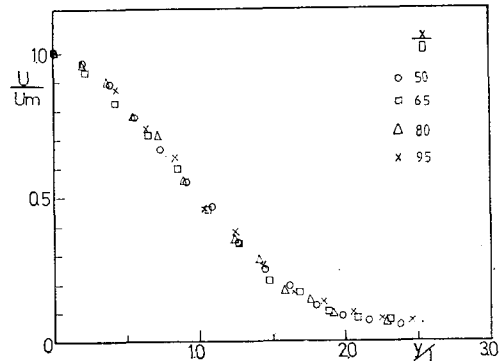
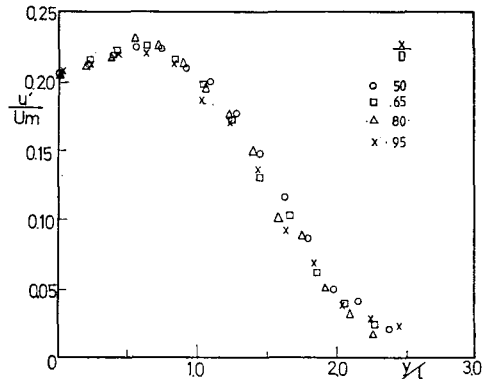
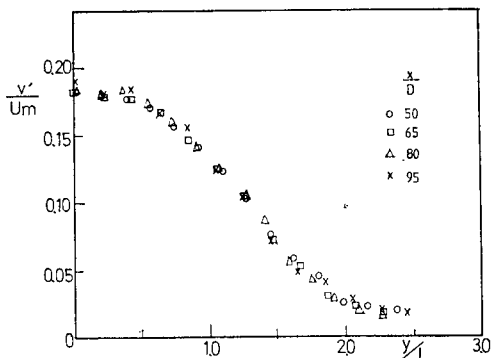


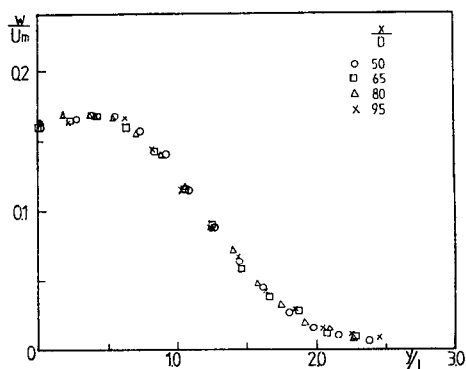
Fig. 9 The distributions of mean velocity at the self-preserving region, X probe



(a) axial



(b) lateral

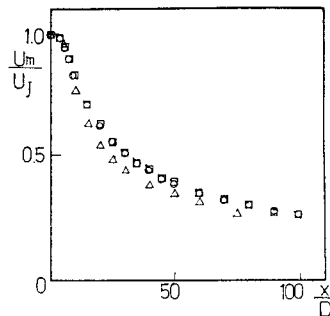


(c) transverse

Fig. 10 The distributions of turbulent intensities at the self-preserving region, X probe

Fig. 9와 Fig. 10은 x/D 가 50, 65, 80 및 95인 지점에서 X probe를 사용하여 U/U_m 와 亂流强度($u'/U_m, v'/U_m, w'/U_m$)를 측정하여 y방향에 대한 분포를 보인 것으로, 평균속도와 단류강도 모두 좋은 自體類似성을 보임을 알 수 있다.

Fig. 10 (a)와 (c)의 u'/U_m 과 w'/U_m 은 y/l 가 약



○ ; $U_j=31.3\text{ m/s}, R_e=3.7 \times 10^4$
 □ ; $U_j=20.2\text{ m/s}, R_e=2.4 \times 10^4$
 △ ; $U_j=12.3\text{ m/s}, R_e=1.45 \times 10^4$

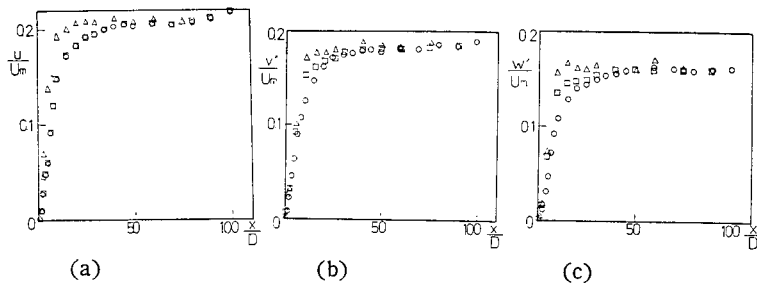
Fig. 11 Variations of mean velocities on the center-line of free plane jet at several Reynolds numbers

0.7에서 최대치를 갖고 있는데, 이는 測定範圍內에서 엄밀한 의미의 완전한 자체유사가 이루어 지지 않았음을 나타낸다¹⁰⁾.

Fig. 11과 Fig. 12는 세가지의 노즐 출구속도($U_j=31.3\text{ m/s}, 20.2\text{ m/s}, 12.3\text{ m/s}$)에 대하여 U_m/U_j 및 $u'/U_m, v'/U_m, w'/U_m$ 의 분포를 보인 것으로, 노즐 出口速度가 작을때 自體類似는 약간 上流쪽에서 이루어짐을 알 수 있다.

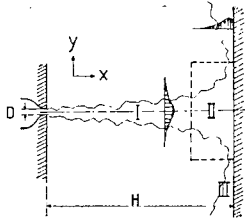
3.2. 2次元 衝突噴流(Impinging Plane Jet)

衝突壁은 自由噴流의 自體類似領域內에 놓이게 되며 그 위치는 4가지로 변화시켰다. Fig. 13은 2次元 衝突噴流의 구조를 보인 것으로 3가지 領域으로 區分되는데, 自由噴流의 狀態를 維持하는 自由噴流領域(free jet region)과 自體類似가 이루어진 噴流의 모든 性質들이 衝突壁으로 因하여 變形이 되는 衝突領域(impingement region), 그리고 速度가 壁에 平行하게 되고 그 境界가 점점 擴散되어가는 壁噴流領域(wall-jet reg-



(a) axial. see Fig. 11 for legend, (b) lateral, (c) transverse

Fig. 12 Variations of turbulent intensities on the center-line of free plane jet at several Reynolds numbers



I ; free jet region
 II ; impingement region
 III ; wall jet region

Fig. 13 Sketch of impinging plane jet

ion)이며, 本 研究에서는 衝突領域에 주로 관심을 둔다.

自由噴流에서 特性值로 使用되었던 U_m 과 l 은 衝突領域에서 變形이 되므로 使用할 수 없다. 그래서 衝突壁이 除去되었을 경우 그 位置에 存在할 速度 및 길이 scale 을 特性速度 및 特性길이로 使用하였다. 이들은 U , 및 δ , 라 하면 $U_i/U_j \propto (H/D)^{-1/2}$, $\delta_i/D \propto H/D$ 이므로 $U_i \propto U_j \left(\frac{H}{D}\right)^{-1/2}$, $\delta_i \propto H$ 가 된다. 따라서 $U_i/(H/D)^{-1/2}$ 과 H 를 衝突噴流에서의 特性值로 使用하였다.

여기서 H 는 노즐 出口로부터 衝突壁까지의 距離이다. Fig. 14 는 여러 H/D 에 대하여 噴流의 中心線을 따라 平均速度를 測定한 結果로, H/D 가 달라도 한개의 曲線에 잘 일치하고 있음을 보여준다. 따라서 特性치가 잘 선택 되었음을 알 수 있다. 自由噴流와 비교해 볼 때 衝突領域은 衝突壁으로부터 약 0.25H 까지 입을 알 수 있다.

噴流의 中心線을 따라 각 方向 亂流強度들의 結果는 Fig. 15 에 보인다. u'/U_m 및 w'/U_m 은 上流쪽에서는 自由와 같은 舉動을 하다가 X/H 가 약 0.8 이 되는 곳에서부터 增加하기 시작하여 u'/U_m 은 0.45, w'/U_m 은

0.32 정도까지 增加한다. 그러나 v'/U_m 은 그 增加정도가 아주 작은데, 이는 衝突壁 근처에서 噴流의 중심 평면에 수직인 (y 방향) vortex-line의 stretching에 의하여 u' 과 w' 이 增加하게 되고, 中心線方向(x 방향)의 vortex-line의 compression으로 v' 과 w' 은 감소하게 되어, u' 은 增加하고 w' 은 감소하며, w' 은 stretching 효과가 더 크기 때문에 u' 보다는 작지만 조금 增加하게 된다. 한편 衝突壁 가까이에서는 平均속도가 급속히 감소하므로 u'/U_m 과 w'/U_m 은 增加하고 v'/U_m 의 增加는 아주 미세하게 된다.

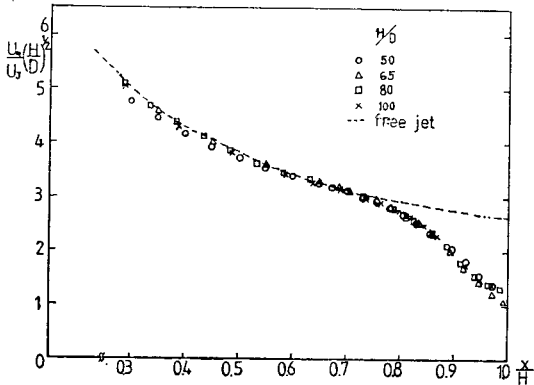
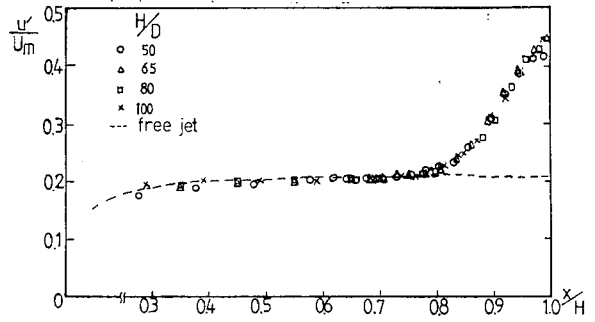
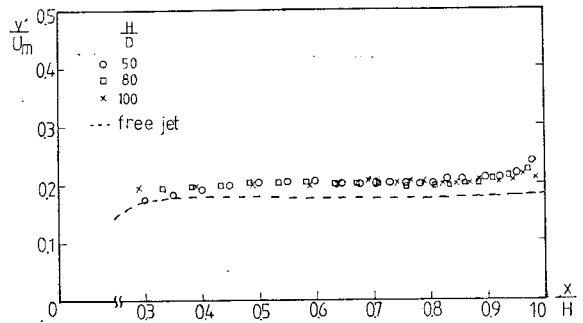


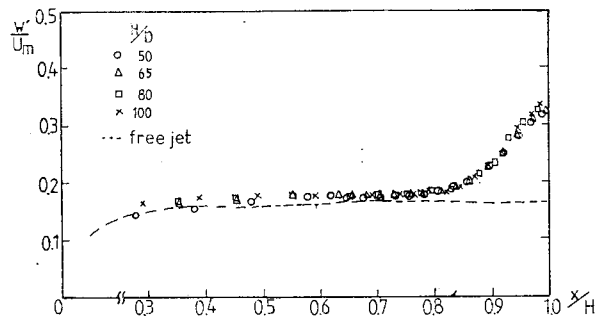
Fig. 14 Variations of mean velocity on the center-line of impinging plane jet



(a) axial



(b) lateral



(c) transverse

Fig. 15 Variations of turbulent intensities on the center-line of impinging plane jet

0.32 정도까지 增加한다. 그러나 v'/U_m 은 그 增加정도가 아주 작은데, 이는 衝突壁 근처에서 噴流의 중심 평면에 수직인 (y 방향) vortex-line의 stretching에 의하여 u' 과 w' 이 增加하게 되고, 中心線方向(x 방향)의 vortex-line의 compression으로 v' 과 w' 은 감소하게 되어, u' 은 增加하고 w' 은 감소하며, w' 은 stretching 효과가 더 크기 때문에 u' 보다는 작지만 조금 增加하게 된다. 한편 衝突壁 가까이에서는 平均속도가 급속히 감소하므로 u'/U_m 과 w'/U_m 은 增加하고 v'/U_m 의 增加는 아주 미세하게 된다.

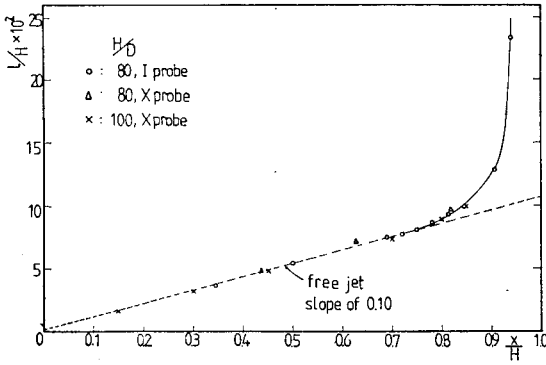


Fig. 16 Jet half width of impinging plane jet

Fig. 16 은 噴流幅을 나타낸 것으로 $X/H < 0.75$ 에서 自由噴流과 잘 一致하지만 그 以後에서는 크게 增加함을 보여준다. X/H 가 0.94 보다 큰 부분에서는 x 方向 速度 U 는 감소하게 되고 y 方向 速度 V 는 크게 增加하게 되어 l 의 精確한 값을 구할 수 없었다.

亂流의 運動量 傳達은 주로 large scale eddy 에 의 하여 이루어지면, large scale eddy 의 크기는 integral length scale 로 표시될 수 있다^{29,30}.

Spatial double velocity correlation coefficient 가 다음과 같이 定義되며,

$$R_{11}(\Delta x, 0, 0) = \frac{\overline{u(x)u(x-\Delta x)}}{\overline{u'(x)u'(x-\Delta x)}} \quad (5)$$

$$R_{11}(0, \Delta y, 0) = \frac{\overline{u(\frac{1}{2}\Delta y)u(-\frac{1}{2}\Delta y)}}{\overline{u'(\frac{1}{2}\Delta y)u'(-\frac{1}{2}\Delta y)}} \quad (6)$$

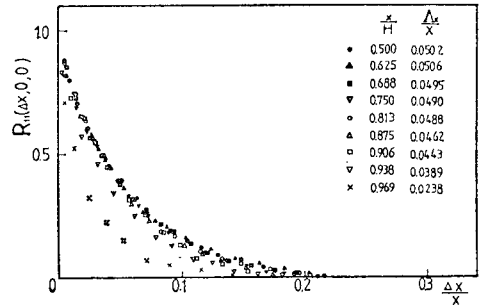
integral length scale 은 이들을 積分하여 얻어진다.

$$\Lambda_x = \int_0^\infty R_{11}(\Delta x, 0, 0) dx \quad (7)$$

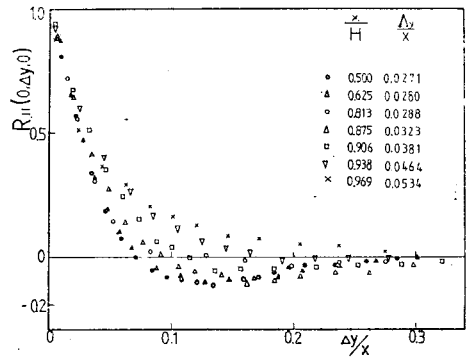
$$\Lambda_y = \int_0^\infty R_{11}(0, \Delta y, 0) dy \quad (8)$$

本 實驗에서 $R_{11}(\Delta x, 0, 0)$ 는 噴流의 中心線上에서 hot-wire probe 하나를 固定시키고 다른 probe 를 上流 쪽으로 移動시켜서 測定하였고, $R_{11}(0, \Delta y, 0)$ 는 두 probe 를 중심선에서부터 같은 間隔으로 移動시켜서 測定하였다.

몇몇 X 의 位置에서 噴流의 中心線을 따라 식 (5)와



(a) longitudinal



(b) lateral

Fig. 17 Spatial double velocity correlation coefficients on the center-line of impinging plane jet ($H/D=80$)

식 (6)을 測定한 結果를 Fig. 17 에 보인다.

Fig. 17 (a)에서 보면, $R_{11}(\Delta x, 0, 0)$ 는 $X/H=0.813$ 까지는 單一曲線으로 표시되고 $X/H=0.875$ 에서 조금씩 이탈하기 시작하여 $X/H=0.969$ 에서는 曲線의 幅이 매우 좁아짐을 알 수 있으며, Fig. 17 (b)에서는 모든 自由噴流과 wake flow 의 lateral correlation 에서 나타나는^{10,31} $R_{11}(0, \Delta y, 0)$ 의 0 以下の 沈下($\Delta y/X > 0.07$)가 $X/H=0.969$ 에서는 完全히 사라짐을 알 수 있다.

Λ_x (longitudinal)와 Λ_y (lateral)의 積分은 각각 Fig. 17 (a)와 Fig. 17 (b)의 曲線 아래의 面積을 구하여 계산하였으며, Λ_y 에서는 (+)部分만 考慮하였다.

Integral length scale Λ_x 와 Λ_y 는 自由噴流領域에서는 노즐 出口로부터의 거리에 線形的으로 比例하여 增加하며^{10,31}, 그 增加比는 Gutmark & Wygnanski(1976)¹⁰에 의하면 $\Lambda_x/X=0.048$, $\Lambda_y/X=0.022$ 이다. 그러나 衝突領域에서는 衝突壁 가까이에서 亂流의 large scale eddy 의 y 方向 stretching 과 x 方向 compression

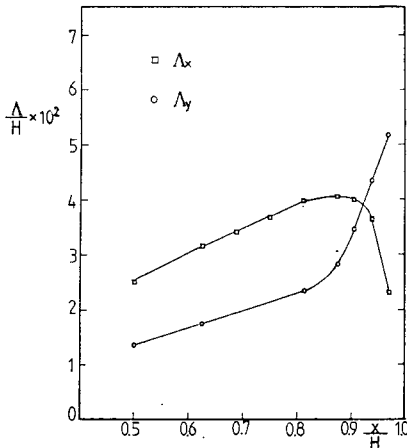


Fig. 18 Integral length scales at the impingement region ($H/D=80$)

때문에 Λ_x 는 減少하게 되고 Λ_y 는 增加하게 되는데, 이것이 Fig. 18에 잘 나타나 있다.

Fig. 18에서 Λ_x 와 Λ_y 의 增加比는 $X/H < 0.8$ 에서 $\Lambda_x/X=0.0490$, $\Lambda_y/X=0.0314$ 이며 噴流幅 l 과의 比는 $\Lambda_x/l=0.490$, $\Lambda_y/l=0.314$ 인데, 이는 Gutmark & Wygnanski¹⁰⁾의 結果와 잘 一致하고 있다.

Fig. 7과 Fig. 18로부터, 亂流成分들은 X/H 가 약 0.8이 되는 곳에서부터 衝突壁의 영향을 받음을 알 수 있다. 즉, 亂流成分에 대한 衝突領域은 衝突壁에서부터 노즐과 壁사이의 거리의 약 20%되는 部分이라고 볼 수 있다.

4. 結 論

2次元 自由噴流 및 衝突噴流의 亂流特性에 관한 實驗的 解析으로 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 自由噴流에서 自體類似는 노즐 出口로부터 노즐 出口幅의 약 40 배의 거리에서 이루어지고, 噴流의 特性值인 中心線 平均速度 U_m 과 噴流幅(jet half width) l 은 $l/D=0.10(x/D+1.72)$, $(U_m/U_j)^{-2}=0.128(x/D+0.07)$ 와 같이 표시된다. 또한 自體類似領域內의 中心線에서의 亂流強度는 각각 $u'/U_m=0.21$, $v'/U_m=0.18$, $w'/U_m=0.16$ 이다.

(2) 衝突噴流에서의 特性길이는 노즐과 衝突壁 사이의 거리 H 로, 特性速度는 $U_j(D/H)^{-1/2}$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 衝突壁이 平均速度에 영향을 미치는 범위는 壁으로부터 약 $0.25H$ 의 領域이고, 亂流速度가 영향을 받는 범위는 약 0.2의 영역이다. 衝突壁 근처에서 integral length scale Λ_x 는 감소하나 Λ_y 는 증가한다.

Reference

- (1) W.C. Mih & J.A. Hoopes, "Mean and Turbulent Velocities for Plane Jet", J. Hydraulics Div. ASCE, Vol. 98, pp.1274-1294, 1972.
- (2) J.N. Moum, J.G. Kawall & J.F. Keffer, "Structural Features of the Plane Turbulent Jet", Phys. Fluids, Vol. 22, pp.1240-1244, 1979.
- (3) V. W. Goldschmidt, M. F. Young & E. S. Ott, "Turbulent Convective Velocities in a Plane Jet", J. Fluid Mech., Vol. 105, pp.327-345, 1981.
- (4) J.C. Gortari & V.W. Goldschmidt, "The Apparent Flapping Motion of a Turbulent Plane Jet-Further Experimental Results", Trans. of ASME, J. Fluids Engr., Vol. 103, pp.119-126, 1981.
- (5) D.R. Miller & E.W. Comings, "Static Pressure Distribution in the Free Plane Jet", J. Fluid Mech., Vol. 3, pp.1-16, 1957.
- (6) L.J.S. Bradbury, "The Structure of a Self-Preserving Turbulent Plane Jet", J. Fluid Mech., Vol. 23, pp.31-64, 1965.
- (7) K.W. Everitt & A.G. Robins, "The development and Structure of Turbulent Plane Jet", J. Fluid Mech., Vol. 88, pp.563-538, 1978.
- (8) P.E. Jenkins & V.W. Goldschmidt, "Mean Temperature and Velocity in a Plane Turbulent Jet," Trans. of ASME, J. Fluids Engr., pp.581-587, 1973.
- (9) G. Heskestad, "Hot-Wire Measurement in a Plane Turbulent Jet", Trans. of ASME, J. Appl. Mech., Vol. 32, pp.721-734, 1965.
- (10) E. Gutmark & I. Wygnanski, "The Planar Turbulent Jet", J. Fluid Mech., Vol. 73, pp.465-495, 1976.
- (11) N.E. Kotsovinos, "A Note on the Spreading Rate and Virtual Origin of a Plane Turbulent Jet", J. Fluid Mech., Vol. 77, pp.305-311, 1976.
- (12) S.P. Sutera, P.F. Maeder & J. Jertin, "On the Sensitivity of Heat Transfer in the Stagnation-Point Boundary Layer to Free-Stream Vorticity", J. Fluid Mech., Vol. 16, pp.497-520, 1963.

- (13) S. Beltaos & N. Rajaratnam, "Impinging Circular Turbulent Jets", J. Hydraulics Div. ASCE, Vol. 100, pp. 1313-1328, 1974.
- (14) E. Gutmark, M. Wolfshtein & I. Wygnanski, "The Plane Turbulent Impinging Jet", J. Fluid Mech., Vol. 88, pp. 737-756, 1978.
- (15) M. Wolfshtein, "Some Solutions of the Plane Turbulent Impinging Jet", Trans. of ASME, J. Basic Engr., Vol. 92, pp. 915-922, 1970.
- (16) S. Corrsin, "Turbulence: Experimental Methods", Handbuch der Physik, Vol. VIII/2, 1963, Springer
- (17) A.K.M.F. Hussain & v. Ramjee, "Effects of the Axisymmetric Contraction Shape on Incompressible Turbulent Flow", J. Fluids Engr., Vol. 98, pp. 58-69, 1976.
- (18) V. Ramjee & A.D.M.F. Hussain, "Influence of the Axisymmetric Contraction Ratio on Free-stream Turbulence", Trans. of ASME, J. Fluids Engr., Vol. 98, pp. 506-515, 1976.
- (19) T. Morel, "Comprehensive Design of Axisymmetric wind Tunnel Contractions", Trans. of ASME, J. Fluids Engr., Vol. 97, pp. 225-233, 1975. Discussions; Vol. 98, pp. 131-133, 1976.
- (20) T. Morel, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions", Trans. of ASME, J. Fluids Engr., Vol. 99, pp. 371-378, 1977.
- (21) K. Krothapalli, D. Baganoff, & K. Daramcheti, "On the Mixing of a Rectangular Jet", J. Fluid Mech, Vol. 107, pp. 201-220, 1981.
- (22) F.H. Champagne, C.A. Sleicher & O.H. Wehrmann, "Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wires, Part 1. Heat Transfer Experiments With Inclined Hot-Wire", J. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 153-175, 1967.
- (23) A.A. Townsend, "The Structure of Turbulent Shear Flow", 2nd ed., Cambridge University press, 1976.
- (24) P. Bradshas, "Effect of External Disturbances on the Spreading Rate of a Plane Turbulent Jet", J. Fluid Mech., Vol. 80, pp. 795-797, 1977.
- (25) J.J. Flora Jr. & V.W. Goldschmidt, "Virtual Origins of a Free Plane Turbulent Jet", AEA Journal, Vol. 7, pp. 2344-2346, 1969.
- (26) A.K.M.F. Hussain & M.F. Zedan, "Effects of the Initial Condition on the Axisymmetric Free Shear Layer: Effect of the Initial Fluctuation Level", Phys. Fluids, Vol. 21, pp. 1475-1481, 1978.
- (27) A.K.M.F. Hussain & A.R. Clark, "Upstream Influence on the Near Field of a Plane Turbulent Jet", Phys. of Fluids, Vol. 20, pp. 1416-1426, 1973.
- (28) A.K.M.F. Hussain & M.F. Zedan, "Effects of the Initial Condition on the Axisymmetric Free Shear Layer: Effects of the Initial Momentum Thickness", Phys. Fluids, Vol. 21, pp. 1100-1112, 1978.
- (29) J.O. Hinze, Turbulence, 2nd ed., pp. 30-134, McGraw-Hill, 1975.
- (30) A.J. Reynolds, "Turbulent Flows in Engineering", pp. 71-80, 353-373, John Wilkey & Sons
- (31) I. Wygnanski & H. Fideler, "Some Measurements in the Self-Preserving Jet", J. Fluid Mech., Vol. 38, pp. 577-612, 1969.
- (32) A.P. Govindan & K.S. Raju, "Hydrodynamics of a Radial Wall Jet", J. Appl. Mech., Vol. 41, pp. 518-519, 1974.
- (33) H. Tennekes & J.L. Lumely, "A First Course in Turbulence, MIT Press.
- (34) P. Bradshaw, "An Introduction to Turbulence and its Measurement", pp. 10-34, Pergamon Press, London