

<論 文>

# 온라인 컴퓨터 시스템에 의한 실린더내 충돌분류의 통계학적 난류특성 연구

노 병 준\* · 박 종 호\*\*

(1988년 2월 5일 접수)

## Study on the Statistical Turbulence Characteristics of Cross Jets in the Cylinder by On-Line Computer System

Byung-Joon Rho and Jong-Ho Park

**Key Words :** Statistical Turbulence Characteristics(통계학적 난류특성), Reynolds Stress(레이놀즈 응력), Cross Jet(충돌분류), Skewness Factor(비대칭도), Flatness Factor(편평도), Joint Probability Density(결합확률밀도), Iso-Joint Probability Density(등결합 확률밀도)

### Abstract

This study was carried out to investigate the mixing flow of a turbulent cross jet in a cylindrical chamber. A study on the turbulent mixing flow of a cross jet at 45° with respect to each other in the free atmospheric condition was conducted before this study and has given us some fundamental experimental results. Present data have been analyzed and compared with semi-empirical equations for a round and a plane jets. Interests on this kind of cross jets (flows) have been increasing during the past several years for the purpose of the analysis of mixing flows and their applications. In this study, a turbulent cross jet of air in a cylindrical chamber has been conducted and the turbulent characteristics in the mixing region have been analyzed experimentally. The experimental data were discussed by comparing with the semi-empirical equations of Hinze and Görtler. From the experimental curve, the semi-empirical equations of mean velocities and Reynolds stresses have been derived. Three dimensional data acquisitions and the statistical treatments of turbulence characteristics were carried out by on-line computer measurement system connected with the constant temperature type 2-channel hot-wire anemometer system.

### 기 호 설 명

$B$  : 주응력선의 회전각  
 $b$  : 원형분류에서의 분류반폭

$b_1, b_2$  : 충돌분류에서  $Y, Z$ 방향의 분류반폭  
 $C$  : 상수  
 $F(u'), A(v'), F(w')$  :  $u', v', w'$ 의 편평도  
 $N_0$  : 구간수  
 $N_2$  : 결합확률밀도에서 누적 샘플링 수  
 $\bar{P}$  : 평균압력

\* 정희원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과  
\*\* 정희원, 충남대학교 공과대학 기계공학과

- $Re$  : 레이놀즈 수
- $\overline{U}$  :  $X$ 방향의 평균속도
- $\overline{U}_c$  :  $X$ 방향의 분류중심 속도
- $\overline{U}_m$  :  $\overline{U}$ 의 최대치
- $u'$  :  $X$ 방향의 파동속도
- $\overline{V}$  :  $Y$ 방향의 평균속도
- $\overline{V}_r$  : 반경방향의 평균속도
- $v'$  :  $Y$ 방향의 파동속도
- $v'_r$  : 반경방향의 파동속도
- $\overline{W}$  :  $Z$ 방향의 평균속도
- $\overline{W}_m$  :  $\overline{W}$ 의 최대치
- $w'$  :  $Z$ 방향의 파동속도
- $\overline{u'v'}, \overline{u'v'_r}, \overline{u'w'}$  : 레이놀즈 응력
- $|\overline{u'v'}|_m, |\overline{u'w'}|_m$  :  $\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$ 의 최대 절대치
- $X_o$  : Fig. 2에서  $O$ 와  $C.P.$  사이의 거리
- $Y_m$  :  $\frac{1}{2}\overline{U}_m$ 의 값이 존재하는 점까지의  $Y$ 방향의 거리
- $Z_m$  :  $\frac{1}{2}\overline{U}_m$ 의 값이 존재하는 점까지의  $Z$ 방향의 거리
- $Z_o$  :  $Z_m/Y_m$ 의 평균치
- $\eta$  :  $Y/b_1, Z/b_2$  또는  $r/b$ 로 정의된 값
- $\epsilon_m$  : 와접성 계수
- $\rho$  : 밀도
- $\tau$  : 전단응력

### 1. 서 론

난류분사에 대한 연구는 일찌기 Abramovich<sup>(1)</sup>, Tollmien, Görtler, Schlichting 등<sup>(2)</sup>에 의하여 이론 및 실험적으로 많이 진행되어 왔으며, 그들이 유도한 반실험식들은 최근 난류분사 연구에 크게 활용되고 있다. 이에 대한 연구는 단계적으로 일반적이고 평이한 난류분사 연구<sup>(3~6)</sup>에서부터 반경방향분사(radial jet)<sup>(7,8)</sup>, 환형분사(annular jet)<sup>(9,10)</sup>등 비교적 간단한 연구들이 다방면으로 실시되어 왔으며, 최근에는 두 분류가 충돌 혼합유동되는 것에 관심을 두고 실제 연소기관의 개발 및 응용에 접근시키기 위하여 충돌분류(cross jet or cross flow)에 대한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>(11~15)</sup>. 또한 두 원형분류의 45° 등속 충돌분류의 혼합유동에 대한 연구<sup>(16~19)</sup>와 내연기관의 연소실의 모형을 제작하여 실린더내의 난류유동을 연구<sup>(20~22)</sup>한 것은 실제 응

용기관에 접근해 가는 연구 결과라 볼 수 있다 따라서 본 연구에서는 실린더내의 혼합유동을 고찰하기 위하여 두 분류를 충돌 유동시켜 충돌 후 혼합유동 상태를 온라인 측정 시스템에 의하여 예측하였다. 실린더내의 난류에 의한 혼합현상을 구명하기 위하여 혼합영역을 중심으로 3차원유동 성분들의 평균속도, 난류응력 등을 측정하여 일반 자유분류의 반실험식과 비교 검토하였으며, 본 실험 결과에 잘 일치하는 반실험식을 가정식으로부터 컴퓨터에 의한 점근적 방법으로 구하였다.

난류성분들의 유동현상을 통계학적으로 검토하기 위하여, 2차원 결합확률밀도(joint probability density)분포, 등결합확률밀도(iso-joint probability density)분포, 비대칭도(skewness factor), 편평도(flatness factor)등을 측정 분석하였다.

본 연구의 모든 실험치들은 등온형 2채널 열선풍속계(constant temperature type 2-channel hot-wire anemometer system)와 컴퓨터 온라인 계측 분석 장치로서 처리되었다.

### 2. 관련 이론 방정식

#### 2.1 자유 원형분사의 경우

자유 원형 난류분사에 대한 운동방정식은 Reynolds의 난류운동방정식으로부터 유도되었다. 유도과정을 정리하여 보면, 질량력을 무시하고 Prandtl의 경계층 근사법을 적용하여 2차원 정상유동의 경우에 원통좌표계로 표기한 난류운동 방정식은

$$\overline{U} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \overline{V}_r \frac{\partial \overline{V}}{\partial r} + \overline{u' \frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{v'_r \frac{\partial v'_r}{\partial r}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

연속방정식

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \overline{V}_r) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v'_r) = 0 \quad (3)$$

식 (3)을 평균치를 취하여 식 (1)에 대입한 후, 자유 정상 난류유동에서 점성의 영향과 압력구배를 무시하고, 유동방향에 대한 난류속도의 기울기는 반경방향에 비하여 극히 적으므로 이를 고려하여 식 (1)을 정리하면

$$\overline{U} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \overline{V}_r \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r (\overline{u'v'_r}) \quad (4)$$

또한 충분히 발달된 난류유동역에서 평균속도와 Reynolds응력들의 분포는

$$\frac{\overline{U}}{\overline{U}_m} = f(\eta) \quad (5)$$

$$\frac{\overline{u'u'_r}}{\overline{U}_m^2} = g(\eta) \quad (6)$$

반경방향의 평균속도  $\overline{V}_r$ 은 식(5)와 식(2)로부터

$$\begin{aligned} \overline{V}_r = \overline{U}_m \frac{db}{dx} \eta f(\eta) - \left( b \frac{d\overline{V}_m}{dx} + 2\overline{U}_m \frac{db}{dx} \right) \\ \times \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \eta F(\eta) d\eta \end{aligned} \quad (7)$$

식(5), (6), (7)을 식(4)에 대입하여 정리하면

$$g(\eta) = \frac{db}{dx} \frac{F(\eta)}{\eta^2} \frac{dF(\eta)}{d\eta} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } F(\eta) = \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta$$

Prandtl의 가정  $\tau = -\rho \overline{u'v'_r}$ 과 Boussinesq의 가정  $\tau = \rho \epsilon_m \partial \overline{U} / \partial r$ 로부터  $-\overline{u'v'_r} = \epsilon_m \partial \overline{U} / \partial r$ 의 관계를 구할 수 있으며, 식(5), (6), (8)을 여기에 대입하고  $\eta$ 에 대하여 적분하여 정리하면

$$f(\eta) = \frac{4C}{(1+C\xi\eta^2)^2} \quad (9)$$

$$\text{여기서 } \xi = b \overline{U}_m \frac{db}{dx} / 2\epsilon_m$$

여기에서 경계조건을 고려하면  $r=0$ 일 때  $\mu=0$ 이므로  $C=1/4$ 을 얻을 수 있으므로 최종적으로 충분히 발달된 유동역에서 구해진 관계식들은

평균속도 분포식 :

$$\frac{\overline{U}}{\overline{U}_m} = (1 + \frac{\xi}{4}\eta^2)^{-2} \quad (10)$$

$$\frac{\overline{V}_r}{\overline{U}_m} = \frac{db}{dx} \left\{ \eta f(\eta) - \frac{1}{\eta} \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta \right\} \quad (11)$$

Reynolds응력 분포식 :

$$\frac{\overline{u'v'_r}}{\overline{U}_m^2} = \frac{db}{dx} \frac{f(\eta)}{\eta} \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta \quad (12)$$

## 2.2 자유 평면분사의 경우

직각좌표계에서 비압축성 정상유동의 경우 간략화된 난류운동 방정식은 연속 방정식과 함께

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\overline{U} \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \overline{V} \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} = -\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \quad (14)$$

식(5)와 (13)으로부터

$$\begin{aligned} \overline{V} = -b \frac{d\overline{U}_m}{dx} \int_0^\eta f(\eta) d\eta + \overline{U}_m \frac{db}{dx} \left\{ \eta f(\eta) \right. \\ \left. - \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

식(6)에서  $v'_r = v'$ 로 놓고 식(5) 및 식(15)와 함께 식(14)에 대입한 다음  $\eta$ 에 대하여 적분하고 평면분사에서의 운동량의 관계식  $b/\overline{U}_m d\overline{U}_m/dx = -1/2 db/dx$ 를 대입하여 정리하면

$$g(\eta) = \frac{1}{2} \frac{db}{dx} f(\eta) \int_0^\eta f(\eta) d\eta \quad (16)$$

다시 식(5), (6), (16)을  $-\overline{u'v'} = \epsilon_m \partial \overline{U} / \partial y$ 에 대입하여 정리하면

$$F''(\eta) + 2\beta^2 F(\eta) F'(\eta) = 0 \quad (17)$$

$$\text{여기서 } F(\eta) = \int_0^\eta f(\eta) d\eta,$$

$$\beta^2 = \frac{b}{4} \frac{\overline{U}_m}{\epsilon_m} \frac{db}{dx}$$

식(17)을  $\eta$ 에 대하여 적분하고 경계조건을 고려하면 최종적으로

$$F(\eta) = \frac{1}{\beta} \tan h \beta \eta \quad (18)$$

따라서 관련 방정식들을 정리하면  
평균속도 분포식 :

$$\frac{\overline{U}}{\overline{U}_m} = 1 - \tan^2 \beta \eta \quad (19)$$

$$\frac{\overline{V}_r}{\overline{U}_m} = \frac{db}{dx} \left\{ \eta f(\eta) - \frac{1}{2} \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta \right\} \quad (20)$$

Reynolds응력 분포식 :

$$\frac{\overline{u'v'_r}}{\overline{U}_m^2} = \frac{1}{2} \frac{db}{dx} f(\eta) \int_0^\eta \eta f(\eta) d\eta \quad (21)$$

## 3. 실험장치 및 측정방법

### 3.1 실험장치

실린더내 등속 45° 원형분사의 충돌유동을 위하여 5HP, 220V, 3상의 모터가 부착된 아음속 풍동(subsonic wind tunnel)을 사용하였다. 본 풍동은 원심형 송풍장치를 부착하였으며 V.S. 모터를 사용하여 유속을 임의로 조절할 수 있도록 되어 있다. 확산부의 확산각을 7°로 설계하여 유동시에 벽면과의 마찰손실을 최소화 하였으며, 유동의 균일분포를 위하여 15mm×15mm×30mm의 벌집망 1매, 3mm×3mm의 격자망(grid) 3매, 1.5mm×1.5mm

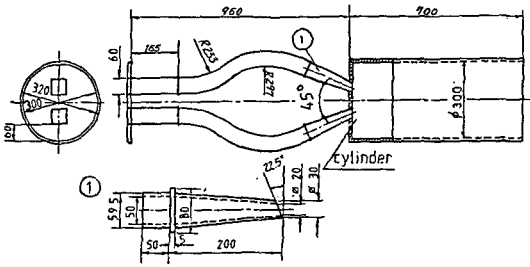


Fig. 1 Cross jet set-up

의 격자망 3매가 내장된 단면적이 600mm×600mm 이고 길이가 800mm인 정류실(settling chamber)을 부착하였다. 유동중 감속된 유속을 증속시키고 시험부(test section)에서의 균일분포 유동을 얻기 위하여 입구 단면적이 600mm×600mm이고, 출구 단면적이 200mm×200mm이며, 길이가 550mm인 수축부(convergent section)를 부착하였다. 수축부 출구에 부착된 시험부는 200mm×200mm의 단면적과 200mm의 길이를 갖는 4각 시험부를 사용하였다. 실린더내 충돌분사 장치는 시험부의 단면적을 고려하여 특별하게 설계 제작하였으며, 그 자세한 제원은 Fig. 1과 같다. 두 분류를 45°로 충돌유동시켜 원활한 유동을 유도하기 위하여 유동관의 내, 외부의 곡률이 각각  $R=297\text{mm}$ ,  $R=233\text{mm}$ 가 되도록 설계하였다. 분사노즐은 곡관 유동중 발생한 유동의 불안전성을 줄이고 증속 및 정상 균일분포 유동을 얻기 위하여 원형 수축노즐을 사용하였으며, 실린더는 내경이 300mm이고 길이가 700mm인 투명 아크릴관으로 제작하였다.

측정기기로서는 등온형 2차원 열선풍 속계 시스템(Tsi 1050 series)을 사용하였으며 측정 프로브는 직경이 5 $\mu\text{m}$ 이고, 길이 3mm인 텅스텐 X형 열선을 사용하였다. 난류의 통계학적 분석을 위하여 신호 분석기, 컴퓨터 시스템 등 온라인 계측장비가 사용되었으며, 측정 프로브의 이송장치는 3축방향

이송장치로서 특히 횡방향 이송은 0.1mm에서 450mm까지 임의로 이송거리를 조절할 수 있고, 각 점에서의 측정시간도 임의로 조절이 가능한 자동 프로브 이송장치를 사용하였다.

### 3.2 측정방법

실린더내 유동좌표는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유동방향을 X축, 지면에 수직인 방향을 Z축, 측 방향을 Y축으로 설정하였다. 두 노즐 중심간의 거리는 100mm로 고정하였고 두 노즐의 중심선이 교차하는 기하학적 교차점은 노즐 출구로부터 X방향으로  $X_0=120.7\text{mm}$ 인 점에 위치하도록 하였다.

충돌 혼합분류의 측정범위는 충돌분류의 발달이 활발히 일어나는  $1.1 \leq X/X_0 \leq 2.0$ 인 영역으로 정하였으며  $X/X_0=1.1, 1.3, 1.6, 2.0$ 인 위치에서 Y 및 Z방향으로 측정 프로브를 이송하여 가며 3차원의 평균속도 및 난류성분들을 측정하였다. 특히 Y방향으로의 프로브의 이송은 컴퓨터로 제어되는 자동 프로브 이송장치를 사용하였다. 각 측정점에서 얻어지는 모든 데이터는 A/D converter (12bits)와 AppleII 컴퓨터에 의하여 누적 평균 처리되었으며, 평균속도 및 난류의 제반 성분들의 값을 동시에 구할 수 있도록 온라인화 하였다. 난류의 통계학적 분석은 열선풍속계 시스템에서 출력되는 난류유동 신호를 동적 신호분석기(dynamic signal analyser : SA, SD 375)에 입력시켜, 한 측정점에서의 샘플링수를 13분간씩 누적 처리하여 온라인화되어 있는 컴퓨터(HP 9845B)와 플롯터(HP 9872C)에 의하여 처리되었다. 또한 측정 프로브의 유동장내에서의 정확한 위치와 방향은 카테토미터에 의하여 조절되었다.

### 4. 실험결과 분석

자유분사에서 유동축상의 평균속도는 출구로부터 멀어짐에 따라 거리에 역비례하여 감소되어 가는 것으로 밝혀져 있다.

Fig. 3은 두 분류가 실린더내에서 충돌하여 유동되는 혼합류의 측방향의 평균속도를 유동방향에 따라 측정한 것으로서, 두 분류의 중심선이 교차되는 교차점  $X/X_0=1.0$  이전에서는 급진적이고 선형적인 증가로  $0.6 \leq X/X_0 \leq 0.86$ 의 영역에서

$$\frac{\overline{U}_c}{U_m} = 3.21 \frac{X}{X_0} - 1.86 \quad (22)$$

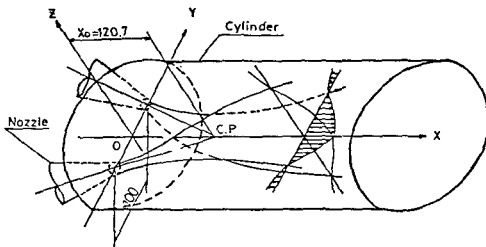


Fig. 2 Structure of a cross jet

의 관계식을 구할 수 있다.

충돌 혼합류의 중심선상의 최대속도는 유동의 관성력과 신장에 의하여 기하학적인 교차점을 약간 벗어난  $X/X_0 \approx 1.17$ 의 위치에서 측정되었다. 이후 유속은 감소현상을 나타내어  $X/X_0 \geq 1.45$ 의 영역에서는 일반 분류에서 볼 수 있는 다음과 같은 역비례 관계를 나타내고 있다.

$$\frac{\bar{U}_c}{\bar{U}_m} = \frac{1.188}{X/X_0 - 0.404} - 0.254 \quad (23)$$

Fig. 4는 충돌분류의 유동단면적내에서  $1/2 \bar{U}_m$ 의 값이 존재하는 위치를 측정하여 도시한 것이다. 유동단면이 타원형으로 형성되어 혼합류가 발달되어가는 현상을  $45^\circ$  자유 충돌분사<sup>(12,17)</sup> 상태에서 이미 실험적으로 연구 발표한 결과와 동일하며, 본 연구에서는 타원의 방정식을 도입하여 반 실험식을 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{(Y/Y_m)^2}{(0.95)^2} + \frac{(Z/Z_m)^2}{(3.15)^2} = 1 \quad (24)$$

평균속도의 분포를 자유분사 유동과 비교 검토하기 위하여 Y와 Z방향으로  $\bar{U}$ 의 성분을 측정 도시한 것이 Fig. 5와 Fig. 6이다. Hinze는 난류분사 유동분포식(10)에서  $\zeta = 1.656$ 을 실험적으로 구하였고, Görtler는 평면분류의 난류분사 유동분포식(19)에서  $\beta = 0.414$ 의 실험치를 구하여 반실험식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\text{Hinze식: } \frac{\bar{U}}{\bar{U}_m} = (1 + 0.414\eta^2)^{-2} \quad (25)$$

$$\text{Görtler식: } \frac{\bar{U}}{\bar{U}_m} = 1 - \tanh^2(0.881\eta) \quad (26)$$

Fig. 5와 6에서  $\bar{U}$ 값의 Y 및 Z방향으로의 분포는 Görtler식에 비하여 Hinze의 식에 더 잘 일치하고 있으나, Y방향의 분포도에서는 유동의 단면

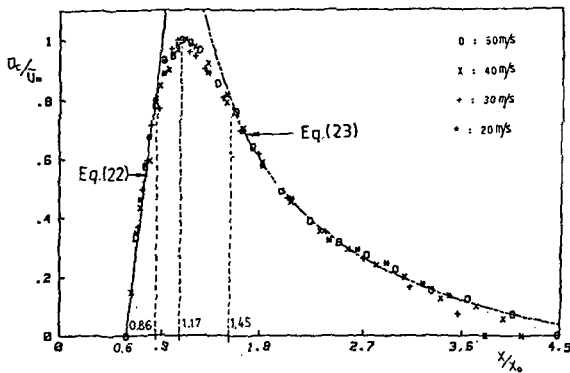


Fig. 3 Centerline mean velocity variation of a cross jet mixing flow

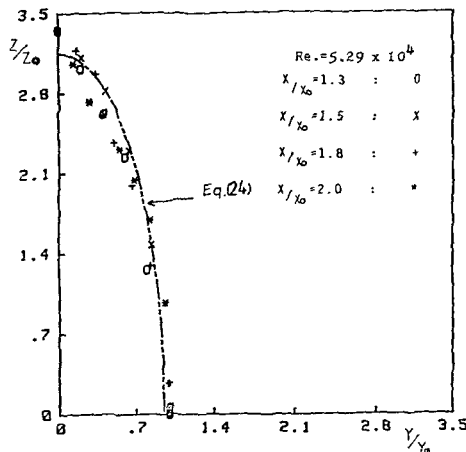


Fig. 4 Cross section of a mixing flow

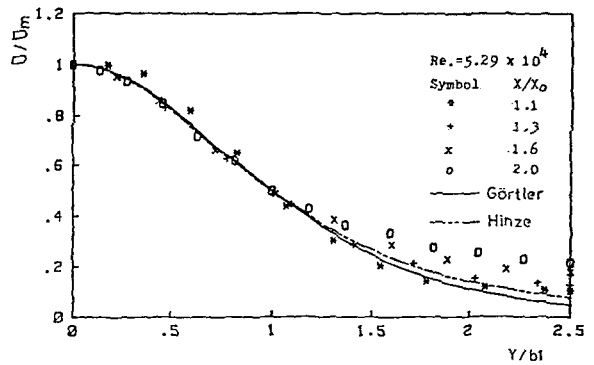


Fig. 5 Mean velocity distribution ( $\bar{U}$ ) in the Y direction

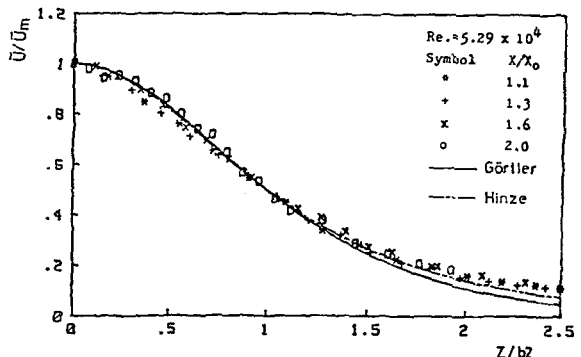


Fig. 6 Mean velocity distribution ( $\bar{U}$ ) in the Z direction

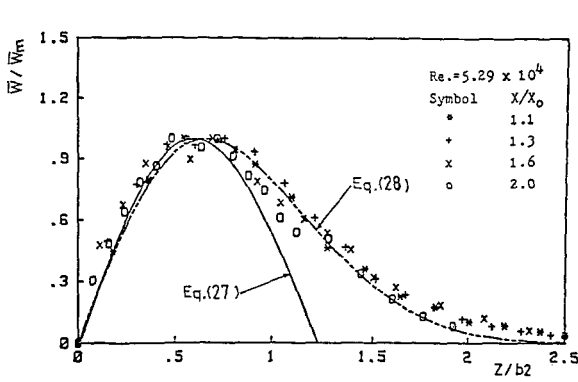


Fig. 7 Mean velocity distribution ( $\overline{W}$ ) in the Z direction

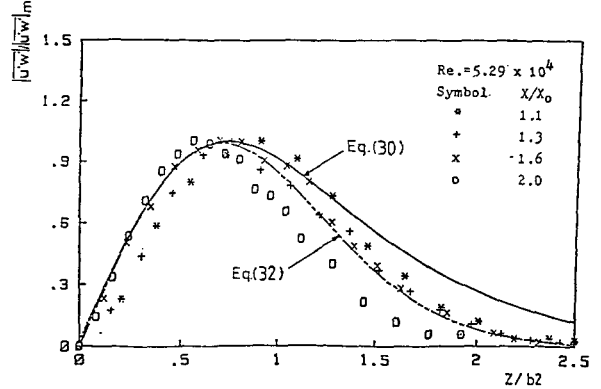


Fig. 9 Reynolds stress distribution ( $\overline{u'w'}$ ) in the Z direction

쪽이 Z방향에 비하여 작으므로 원형실린더의 내부 벽면과 분류의 외측 경계면 사이에 공간이 형성되어, 여기에서 발생하는 와류의 난동이 열선풍속계에 양의 값으로 나타나  $Y/b_1 \geq 1.5$ 에서는 Z방향의 분포에 비해 약간 산만하고 증가된 값을 나타내고 있다. Fig. 7은  $\overline{W}$ 의 성분을 Z방향으로 측정 도시한 것으로서 무차원화한 값들은 일정한 곡선상에 상사적인 분포양상을 보여주고 있다. 본 실험치와 비교하기 위하여 이론적으로 유도한 식 (20)을

$$\frac{\overline{W}}{\overline{W}_m} = \frac{\overline{U}_m}{\overline{W}_m} \frac{db_2}{dX} \left\{ \eta f(\eta) - \frac{1}{2} \int_0^\eta f(\eta) d\eta \right\} \quad (27)$$

와 같이 변형하여 도시한 것이 도표상의 실선곡선이다. 이는 자유 평면분류에서 유도된 식으로서  $Z/b_2 \approx 0.6$ 의 영역까지는 본 실험치와 잘 일치하고 있으나 외부 영역에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 그리하여 본 연구에서는 실험치들의 분포곡선을 지

수함수로 가정하고, 컴퓨터 수치계산에 의한 점근법으로서 다음과 같은 반실험치를 구하였다.

$$\frac{\overline{W}}{\overline{W}_m} = 2.4967 \left( \frac{Z}{D_2} \right) \exp \left\{ -1.149 \left( \frac{Z}{b_2} \right)^2 \right\} \quad (28)$$

Fig. 8과 9는 Reynolds의 응력을 잘 측정위치에서 최대값으로 무차원화하여 도시한 것으로서, 실곡선은 자유분사에서 유도된 식을 변형하여

$$\frac{|u'v'|}{|u'v'|_m} = \frac{\overline{U}_m^2}{|u'v'|_m} \frac{1}{2} \frac{db_1}{dx} f(\eta) \int_0^\eta f(\eta) d\eta \quad (29)$$

$$\frac{|u'w'|}{|u'w'|_m} = \frac{\overline{U}_m^2}{|u'w'|_m} \frac{1}{2} \frac{db_2}{dx} f(\eta) \int_0^\eta f(\eta) d\eta \quad (30)$$

로서 각각 도시한 것이다. 여기서  $f(\mu)$ 는 식 (26)을 대입하여 계산하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Y, Z축으로 분류반폭 이상이 되는 외측부에서는 본 실험 데이터와 상이한 분포를 보여주고 있다. 본 실험 결과에 접근될 수 있는 실험치를 구하기 위하여, Duct내 난류 wake의 연구에서 Elliott와 Townsend등<sup>(23)</sup>이 구한 Reynolds응력 분포식으로부터 다음과 같은 실험식을 구하였다.

$$\frac{|u'v'|}{|u'v'|_m} = 0.85 e^{(Y/b_1)} \exp \left\{ - \left( \frac{Z}{b_1} \right)^2 \right\} \quad (31)$$

$$\frac{|u'w'|}{|u'w'|_m} = 0.85 e^{(Y/b_2)} \exp \left\{ - \left( \frac{Z}{b_2} \right)^2 \right\} \quad (32)$$

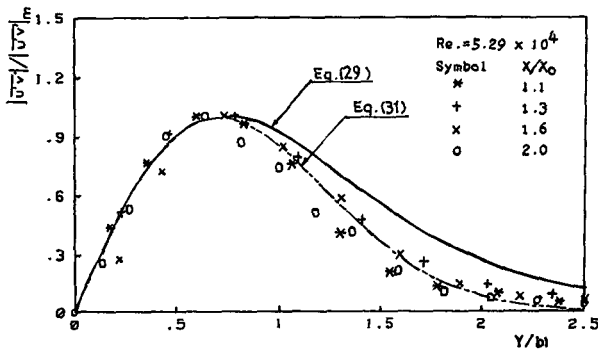


Fig. 8 Reynolds stress distribution ( $\overline{u'v'}$ ) in the Y direction

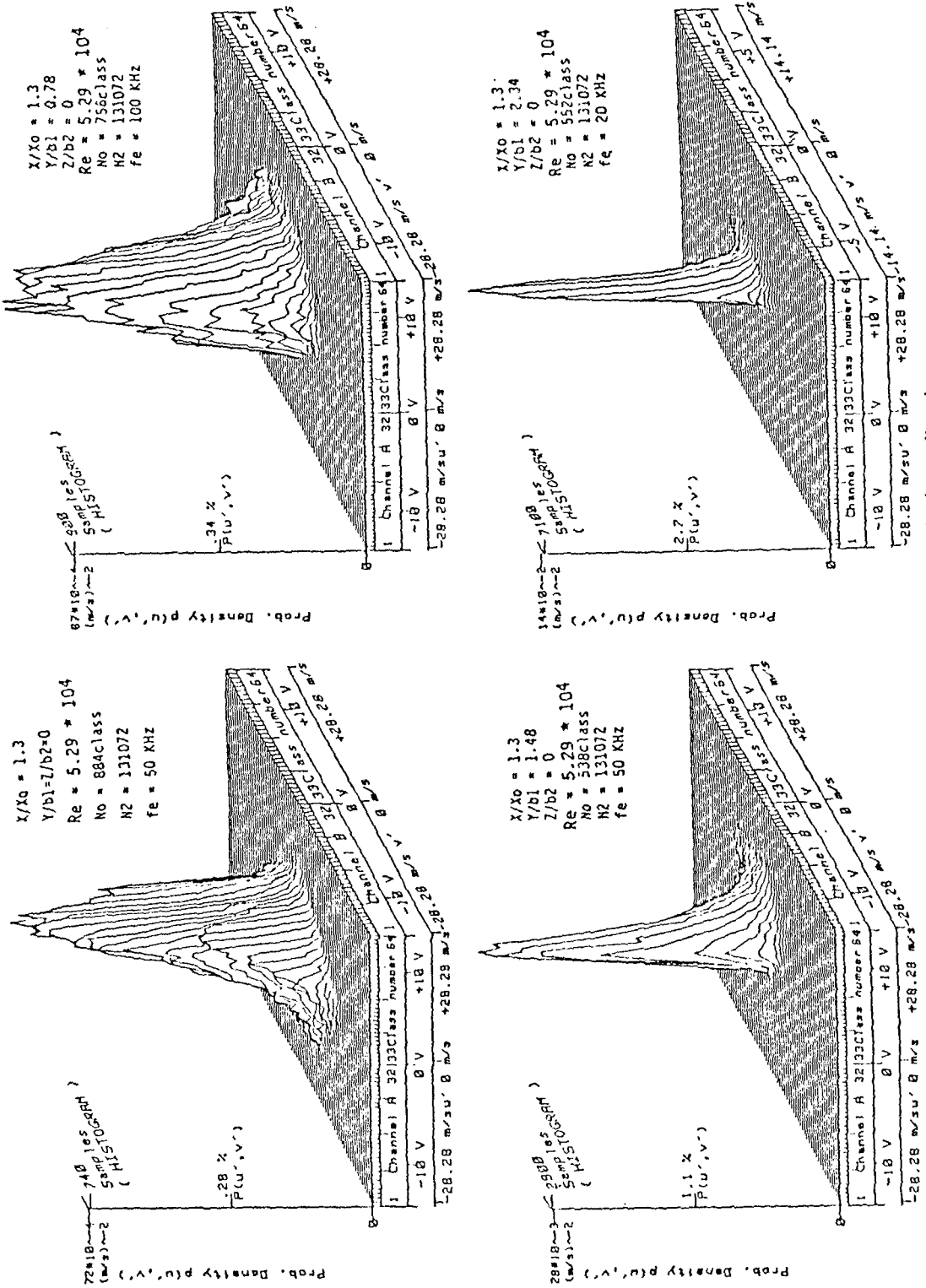


Fig.10 Joint probability density distribution ( $u, v$ ) in the Y direction

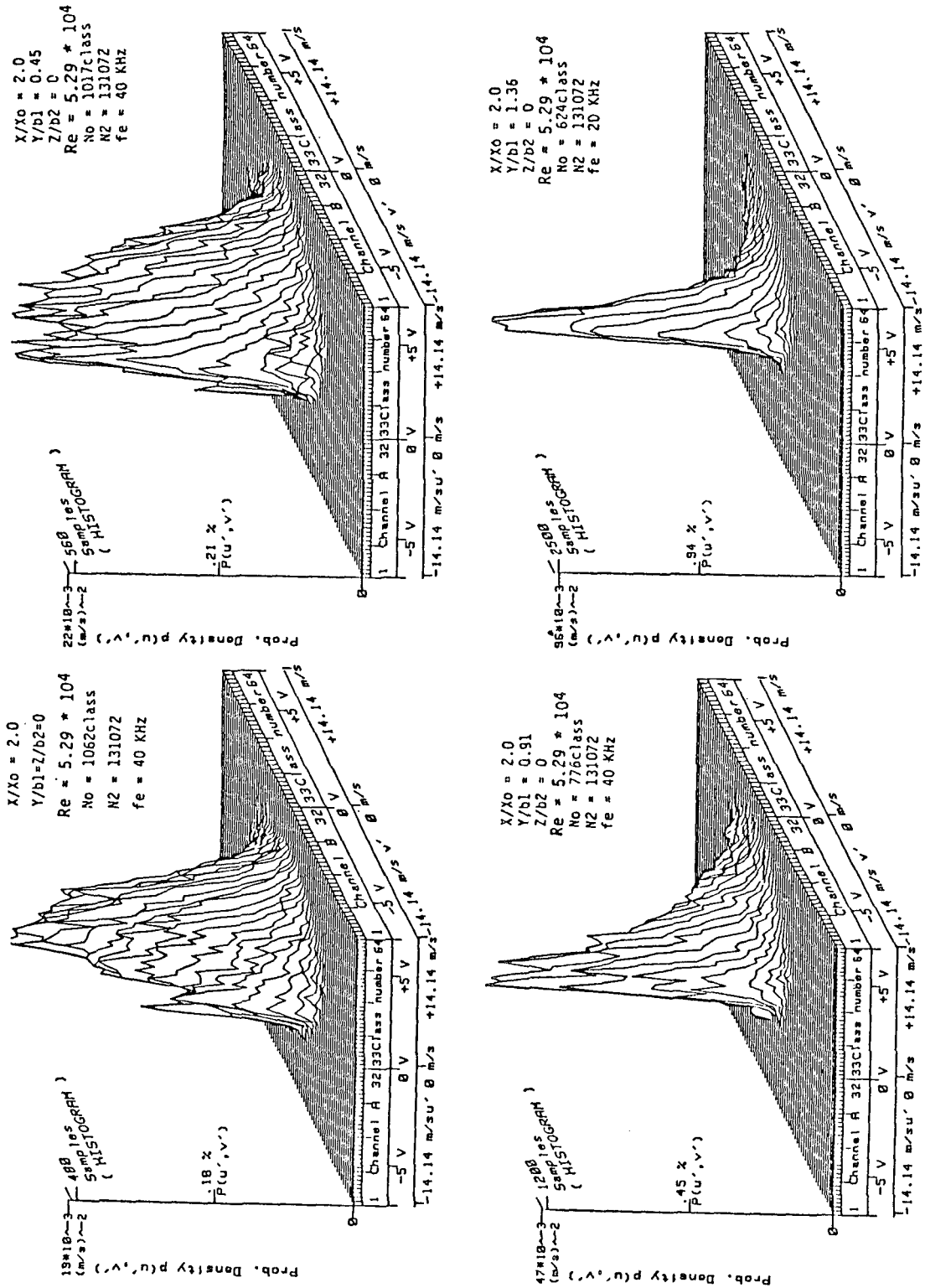


Fig.11 Joint probability density distribution ( $u'$ ,  $v'$ ) in the Y direction



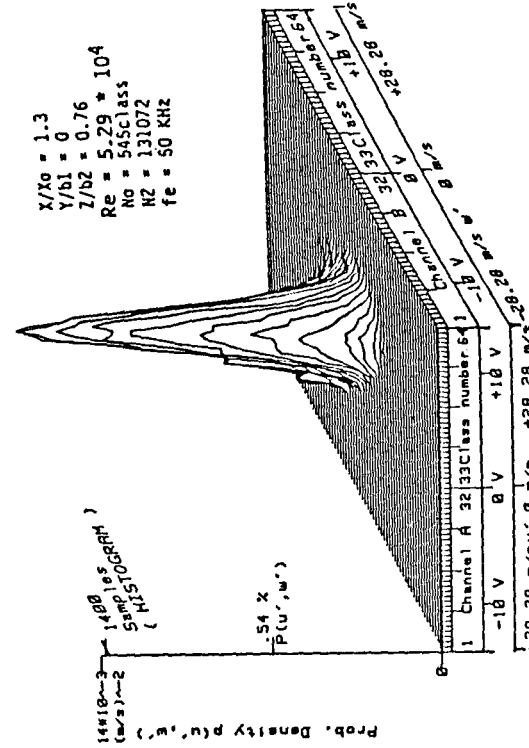
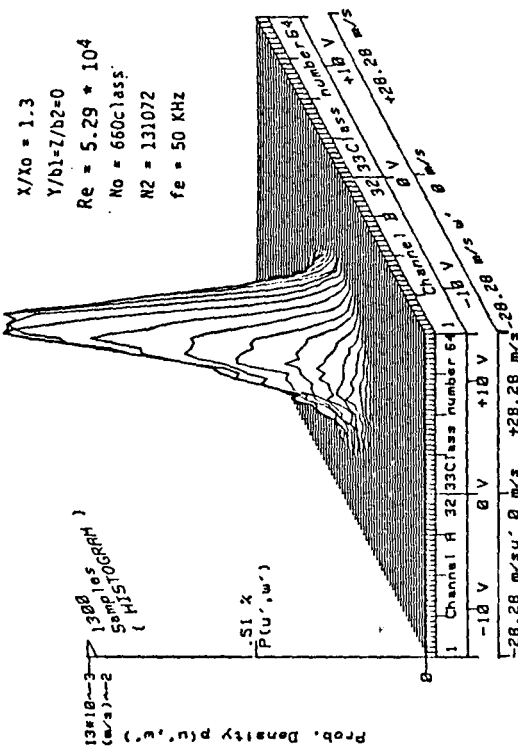
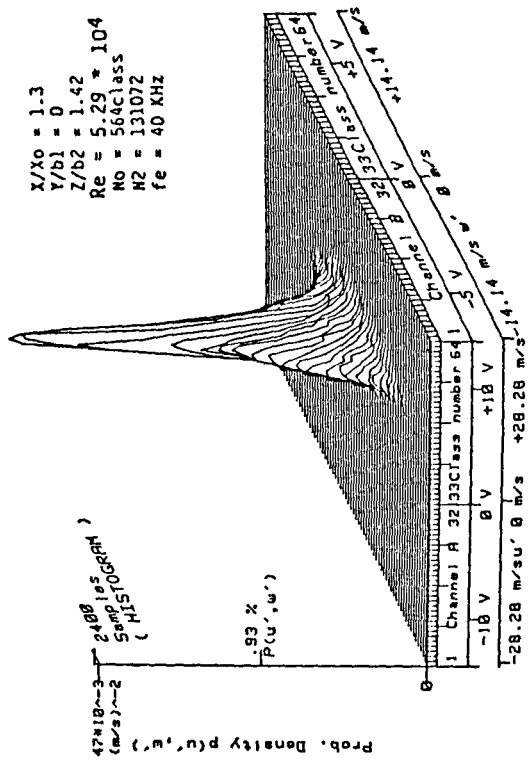
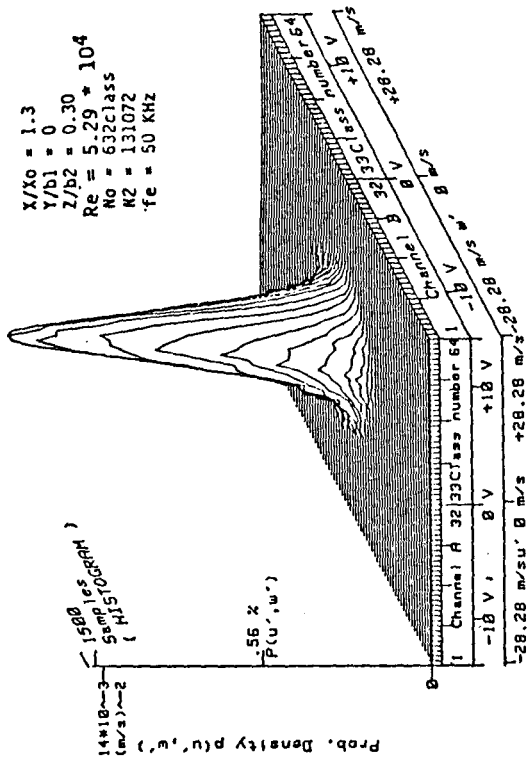


Fig.12 Joint probability density distribution ( $u', w'$ ) in the Y direction

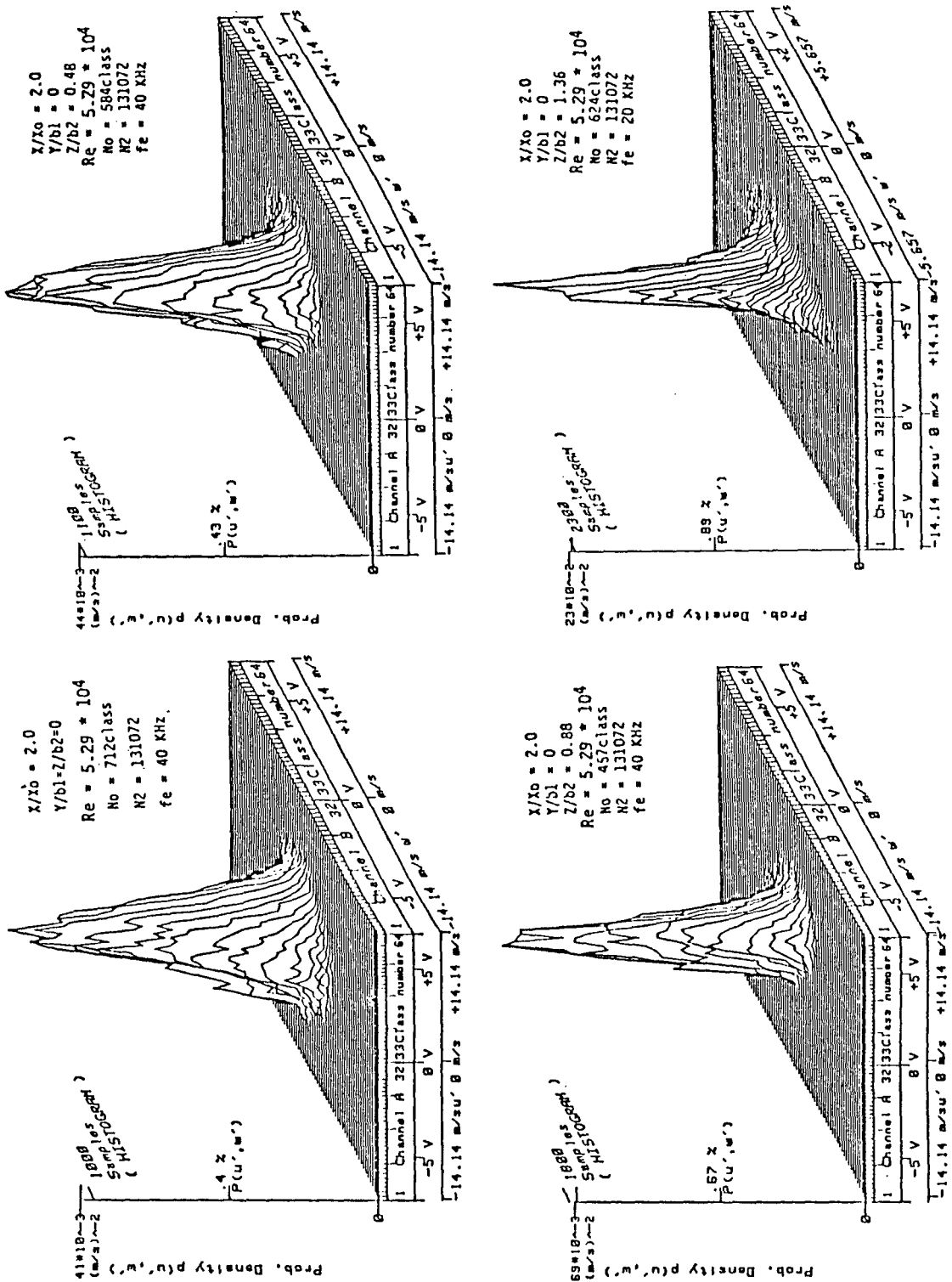


Fig.13 Joint probability density distribution ( $u', w'$ ) in the Z direction

따라서 Reynolds응력들은 Y, Z방향 공히 각 방향의 분류반폭의 약 0.7배 되는 영역에서 최대값들이 형성되고, 약 2.5배 되는 영역에서부터는 거의 값이 존재하지 않음을 알 수 있다.

층돌분류의 난류특성을 통계학적으로 분석하기 위하여  $X/X_0=1.3, 2.0$ 의 위치에서 Y, Z방향으로 2차원 난류 확률밀도를 입체적으로 도시하여 분석하였고, 이들을 10등분으로 나누어 등확률밀도선도를 도시하여 두 난류성분들의 결합 유동특성을 고찰하였다.

또한 보다 많은 측정위치를 선정하여 3차원의 난류성분들이 각 방향에 따라 발달되어 가는 양상을 고찰하기 위해 난류유동 분포의 비대칭도와 편평도 등을 측정하여 대칭분포도에서 얻어지는 Gauss의 값과 비교 분석하였다.

Fig. 10과 11에는  $u', v'$ 성분들의 결합확률 밀도를  $X/X_0=1.3, 2.0$ 에서 Y방향으로 측정도시한

것으로서, 혼합류의 중심부에서는  $u', v'$ 의 값의 차이가 나타나고 있으나 비대칭 및 편평면상을 거의 나타나지 않고 있다. 그러나 분류의 외부영역으로 이동해 감에 따라 비대칭 및 편평현상이 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12와 13에 도시한 Z방향의  $u', w'$ 의 분포도 Y방향에서 볼 수 있는 양상과 유사하나 후자에 비하여 전자의 경우는 그 정도가 약하게 나타나 있다.

$u'$ 와  $w', u'$ 와  $v'$ 가 결합으로 발생하는 난류특성을 보다 명확하게 분석하기 위하여 Fig. 14와 17에 등확률밀도선도들을 도시하였다. 결합확률밀도선도에서 나타난 난류특성들 즉,  $u', v', w'$ 들의 값의 크기와 상호 발생빈도의 분포등을 비교하여 볼 때  $u'$ 값이  $v'$ 나  $w'$ 의 값보다는 항상 크게 나타나 있고, 이 현상은 분류의 중심부에서 외측으로 이동해감에 따라 더 큰 차이를 보여 주고 있다. 또

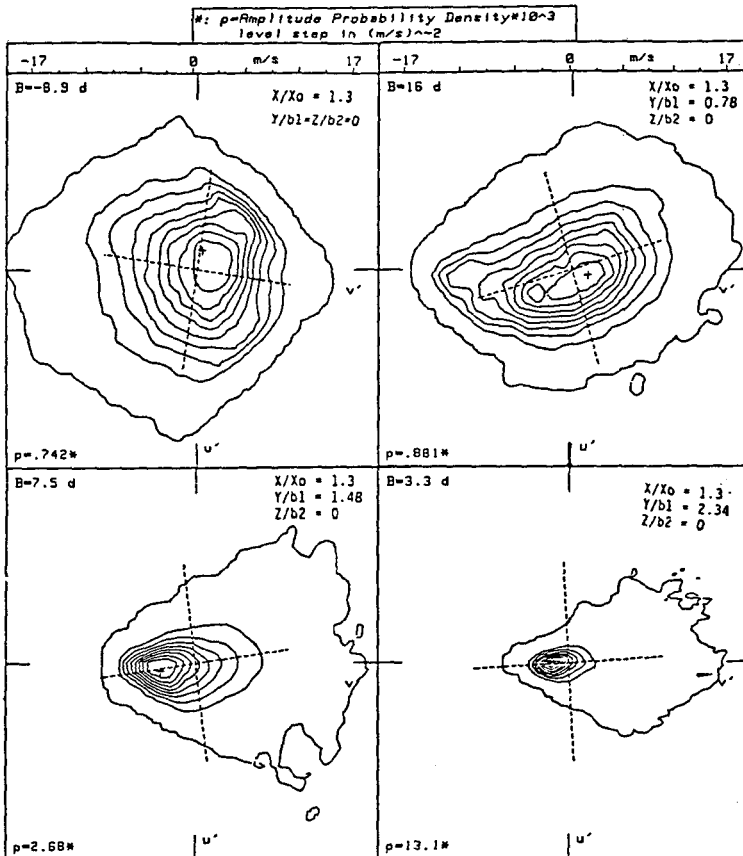


Fig.14 Iso-joint probability density distribution ( $u', v'$ ) in the Y direction

한  $u'$ ,  $v'$ 의 경우보다  $u'$ ,  $w'$ 의 경우는 편평 및 비대칭분포 현상이 비교적 적게 나타나 있음을 알 수 있다.

비대칭도 평평도를 분류의 중심으로부터  $Y$  및  $Z$ 방향으로 측정하여 도시한 것이 Fig. 18~21이다. 비대칭도의 분포는  $u'$ 의 경우 충돌방향인  $Y$ 방향에서  $Z$ 방향보다 값의 증가와 산만한 분포의 정도가 더 크게 나타나고,  $v'$ 의 값은  $Y$ 방향에서는 분류의 반쪽위치까지 증가하다가 그 이후에 감소하는 현상을 보이고 있으나  $w'$ 의 값은 지속적인 증가를 나타내고 있다. 편평도의 분포 역시  $Y$ 방향으로 측정된 값이  $Y/b_1 \geq 1.2$ 영역에서  $u'$  및  $v'$  공히 산만한 증가 현상을 보이고,  $Z$ 방향의 경우는  $Z/b_2 \approx 1.6$ 의 영역까지 Gauss의 분포값 3에 가까

운 값을 유지하고 있음이 밝혀졌다.

본 혼합분류의 통계학적인 분석을 종합적으로 검토하여 볼 때 부분류의 충돌력이 크게 작용하는  $Y$ 방향에서 압축현상과 심한 난류가 발생하고, 신장이 일어나는  $Z$ 방향에서는 비교적 약하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

두 원형분류의 실린더내  $45^\circ$  충돌 혼합유동의 난류구조를 실험적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 분류의 충돌 후 혼합류의 단면은 타원을 형성하며, 혼합류의 중심선상의 평균속도는 두 분

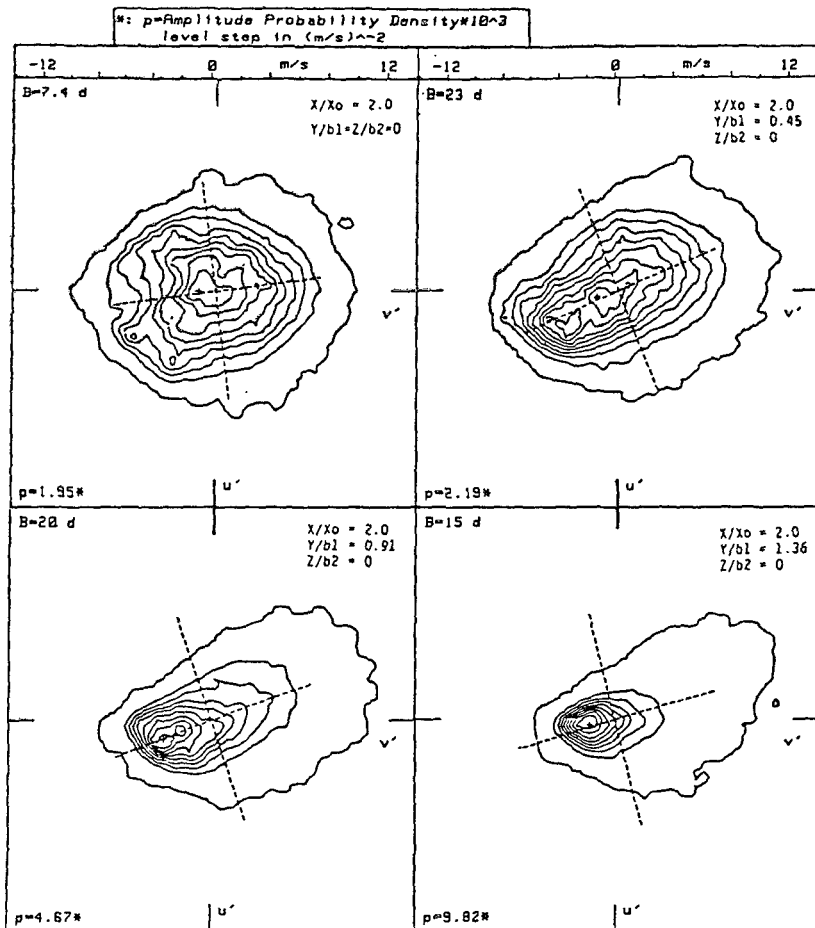


Fig.15 Iso-joint probability density distribution ( $u'$ ,  $v'$ ) in the  $Y$  direction

류의 교차점 이전에서는 직선적인 증가를 보이고, 교차점 영역에서 최대치를 나타내나 그 이후 점진적인 감소로 유동거리에 역비례 하는 관계를 나타내고 있다.

(2)  $Y, Z$  방향으로 측정된 초기 혼합영역의 평균속도  $\bar{U}$ 의 분포는 원형분류의 완전 발달 유동역에서 반실험식으로 구한 Hinze식에 잘 일치하고  $Y$ 방향보다는  $Z$ 방향에서 더욱 좋은 일치성을 보였다.  $Z$ 방향으로 측정된  $\bar{W}$ 의 분포는 분류 외곽에서는 잘 일치하지 않아 본 실험 결과와 일치되는 반실험식 (28)을 컴퓨터 점근법에 의하여 구하였다.

(3) Reynolds응력의 분포는 Elliott와 Townsend의 가정식으로부터 반실험식 (31), (32)를 구하여 분석한 결과 본 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

(4) 난류성분들의 통계학적인 분석에서 결합확률 밀도 및 등결합확률밀도를 살펴 보면, 두 분류의  $45^\circ$  충돌로 인한 혼합류의 수축 및 충돌력이 크게 작용되는  $Y$ 방향에서 심한 난류의 발생으로 편평 및 비대칭 현상이  $Z$ 방향에 비하여 두드러지게 나타났다.

$u', v', w'$ 의 비대칭도 분포는 혼합류의 중심에서 측방향으로 현저한 증가 현상을 나타내고, 평평도는  $Y$ 방향에서는 산만한 증가를 보이거나  $Z$ 방향에서는 큰 변화를 나타내지 않았다.

후 기

본 연구는 과학재단의 1985년도 일반 연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 대한 감사를 드리는 바이다.

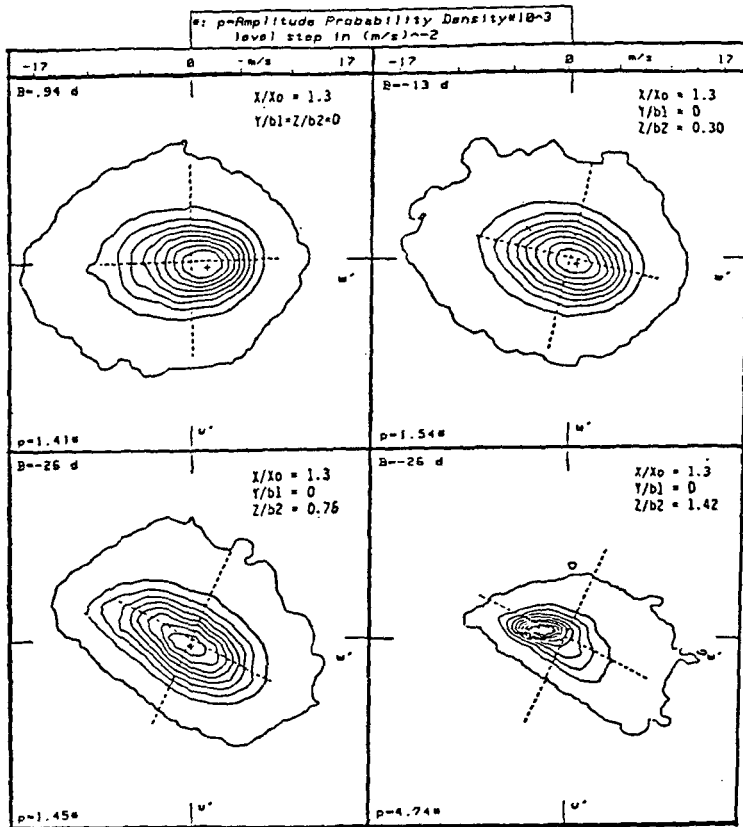


Fig.16 Iso-joint probability density distribution ( $u', w'$ ) in the  $Z$  direction

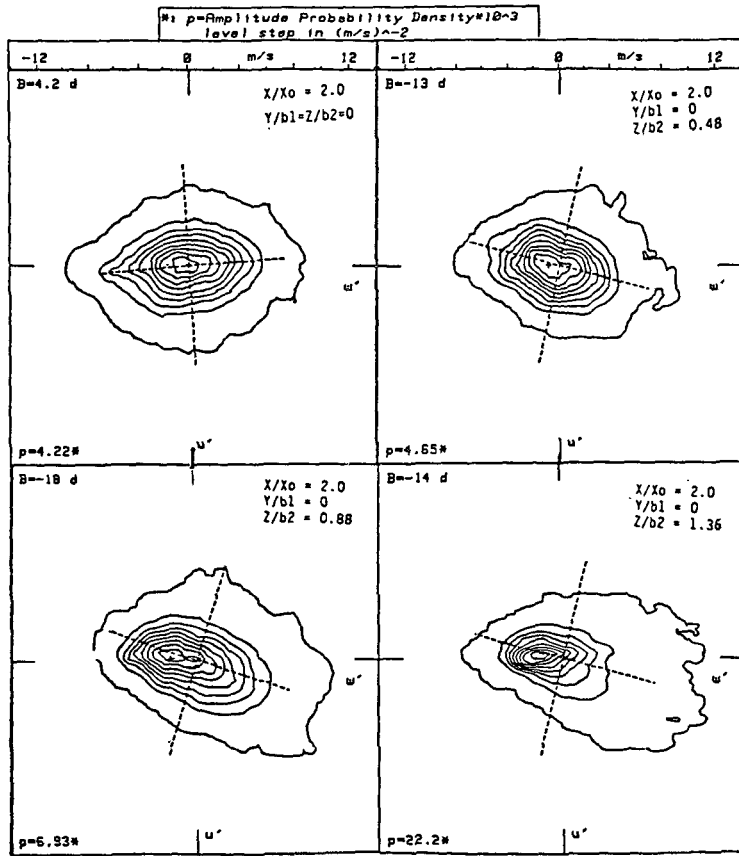


Fig.17 Iso-joint probability density distribution ( $u'$ ,  $w'$ ) in the Z direction

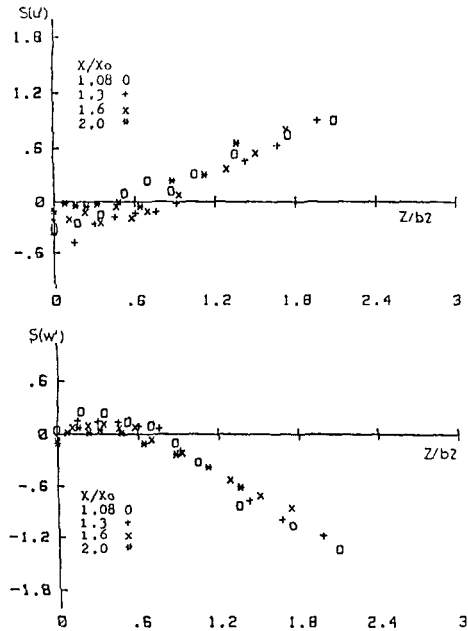
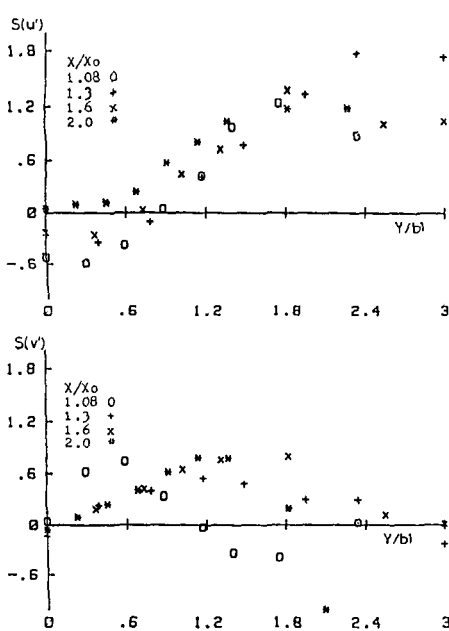


Fig.18 Skewness factor distribution in the Y direction    Fig.19 Skewness factor distribution in the Z direction

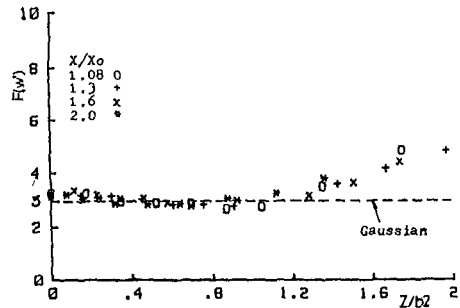
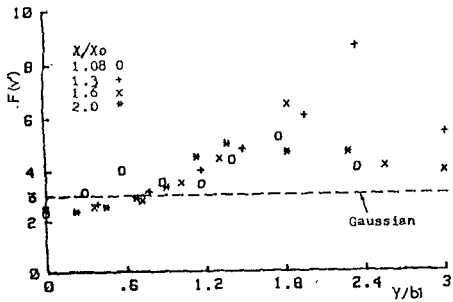
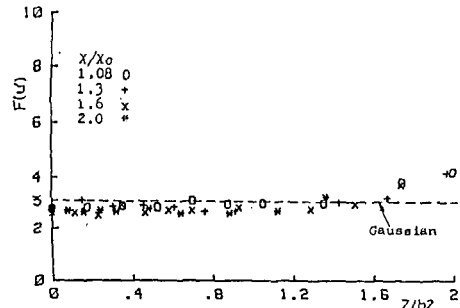
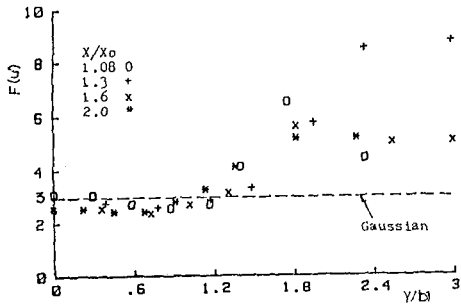


Fig.20 Flatness factor distribution in the Y direction

Fig.21 Flatness factor distribution in the Z direction

참고 문헌

(1) Hinze, J.O., 1975, "Turbulence", McGraw-Hill, 2nd ed.,  
 (2) Abramovich, G.N., 1963, "The Theory of Turbulent Jets", MIT Press.  
 (3) Davies, P. O. A. L., Fisher, M.J. and Barratt, M. J., 1962, "The Characteristics of Turbulence in the Mixing Region of a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol. 15, pp. 337~367.  
 (4) Gibson, M.M., 1962, "Spectra of Turbulence in a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol. 15, pp. 161~173.  
 (5) Yule, A. J., 1978, "Large Scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet", J. Fluid Mech., Vol. 89, Part 3, pp. 413~432.  
 (6) Ribeiro, M. M., and Whitelaw, J. H., 1975, "Statistical Characteristics of a Turbulent Jet", J. Fluid Mech., Vol. 70, Part 1, pp. 1~15.  
 (7) Witze, P. O., and Dwyer, H., 1976, "The Turbulent Radial Jet", J. Fluid Mech., Vol. 75, Part 3, pp. 401~417.  
 (8) Tanaka, T., and Tanaka, E., 1978, "Experimental Study of a Radial Turbulent Jet (4th Report ; Flow

at and after an Attaching Point of Attaching Jet Flow.)", Bulletin of the MSME, Vol. 21, No. 159.  
 (9) Ko. N. W. M., and Chan. W. T., 1978, "Similarity in the Initial Region of Annular jets: Three Configurations", J. Fluid Mech., Vol. 84, Part 4, pp. 641~656.  
 (10) Chan, W. T., and Ko. N. W. M., 1978, "Coherent Structures in the Outer Mixing Region of Annular Jets", J. Fluid Mech., Vol. 89, Part 3, pp. 515~533.  
 (11) Andreopoulos, J., 1985, "On the Structure of Jets in a Crossflow", J. Fluid Mech., Vol. 157, pp. 163~197.  
 (12) Rudinger, G., Moon. L. F., Sept., 1976, "Laser-Doppler Measurements in a Subsonic Jet Injected into Subsonic Crossflow", Transactions of ASME, pp. 516~520.  
 (13) Shirakashi, M., Tomita, Y., July, 1978, "The Diffusion of Jets in a Crossflow", Bulletin of the JSME, Vol. 21, No. 157.  
 (14) Okamoto, T., Enokida, K., 1981, "2개의 난류 2차원 자유분류의 직각충돌", 일본기계학회논문집 B편 47권, 419호, pp. 1207~1213.  
 (15) Andreopoulos, J., Rodi, W., 1984, "Experimental

- Investigation of Jets in a Crossflow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 138, pp. 93~127.
- (16) 노병준, 김장권, 1984, "45° 자유 충돌 분사의 난류 유동에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집*, 제 8 권, 제 5 호, pp. 442~449.
- (17) 김장권, 1987, "등속 45° 2원형 상호 충돌 분류의 통계학적 난류 특성에 관한 실험적 연구", 전북대학교 대학원 공학박사 학위논문.
- (18) 조원일, 1986, "실린더내 45° 등속 상호충돌분사의 난류 혼합 유동에 관한 실험적 연구" 전북대학교 대학원 공학박사 학위논문.
- (19) 노병준, 김장권, 1987, "원형 분류와 45° 원형 상호 충돌 분류의 비교적 연구", *한국항공우주학회지*, 제15권, 제 1 호, pp. 23~24.
- (20) 노병준, 1981, "풍동을 이용한 벨브제트에서 난류 제트 유동 고찰", *대한기계학회논문집*, 제 5 권, 제 4 호, pp. 257~265.
- (21) Horatin, M., and Hussmann, A. W., 1969, "Measurement of Air Movements in Internal Combustion Engine Cylinders", *DISA Inf.*, No. 8.
- (22) Bicen, A. F., Vafidis, C., Whitelaw, J. H., 1985, "Steady and Unsteady Airflow through the Intake Valve of a Reciprocating Engine", *J. of Fluid Engineerng*, Vol. 107, pp. 413~420.
- (23) Elliott, C.F., and Townsend., A.A., 1981, "The Development of a Turbulent Wake in a Distorting Duct", *J. Fluid Mech.*, Vol. 113, pp. 433~467.