

〈論 文〉

충돌분사의 충돌각 변화에 따른 난류특성의 실험적 연구

노병준\* · 최진철\*\* · 강신재\*\*

(1989년 3월 20일 접수)

An Experimental Study on the Turbulence Characteristics of a Cross Jet with Respect to Cross Angle Variations

Byung-Joon Rho, Jin-Chul Choi and Shin Jae Kang

**Key Words :** Cross Jet(충돌분사), Cross Angle(충돌각), Mixing Characteristics(혼합특성), Reynolds Stress(레이놀즈 응력, 난류응력), Semi-Empirical Equation(반실험식)

Abstract

This investigation was carried out for the purpose of studying the turbulent flow and mixing characteristics after collision of two jets depending upon the cross angle variations. For effectuating this experimental study, a subsonic wind tunnel and a constant temperature type two channel hot-wire anemometer system have been utilized. The jets issuing from two nozzles have same Reynolds numbers and their cross angle was variable. After collision of two jets, the cross section of the mixing flow, mean and fluctuating velocities and Reynolds stresses have been measured, and analyzed comparing them with semi-empirical equations. It was found that the non-dimensional contour of the cross section agreed well with an elliptic formula and the mean velocities along the centerline had a good similarity independent of cross angle variations. The distributions of  $\bar{U}$ -components measured in the  $Y$  direction have a good similarity and agree well with semi-empirical equations of Hinze and Görtler. The Reynolds stresses of  $\overline{u'v'}$  on the  $Y$  axis show a similar distributions and their agreement with the theoretical curve is remarkable but those of  $\overline{u'w'}$  measured along the  $Z$  axis are randomly scattered.

기 호 설 명

$b$  : 원형분류의 반폭

$b_m$  :  $Z/b_y$ 의 평균값

$b_o$  :  $Z/b_y - b_m$

$b_y, b_z$  :  $Y$  및  $Z$  방향의 충돌분류의 유동단면 반폭

$C$  : 일반상수

$r$  : 원통좌표의 반경방향

$Re$  : Reynolds 수

$\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$  :  $X, Y, Z$  방향의 시간평균속도

$\bar{U}_m, \bar{V}_m, \bar{W}_m$  :  $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ 의 최대값

$\bar{U}_{max}$  :  $X$ 축상에서  $\bar{U}_m$ 의 최대값

$\bar{U}_o$  : 노즐출구 평균속도

$\overline{u'}, \overline{v'}, \overline{w'}$  : 파동속도(R.M.S.)

$\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$  :  $Y$  및  $Z$  방향의 난류 전단응력

$\overline{u'v'_r}$  :  $r$ 방향의 난류 전단응력

$\overline{u'v'_m}, \overline{u'w'_m}$  :  $\overline{u'v'}, \overline{u'w'}$ 의 최대값

$\overline{u'v'_{rm}}$  :  $\overline{u'v'_r}$ 의 최대값

$X, Y, Z$  : 충돌분사의 좌표축

$X_o$  : 노즐출구와 분류의 기하학적 교차점간의 거리

$\theta$  : 두 원형분류의 충돌각

\* 정회원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

\*\* 전북대학교 대학원

$\epsilon_m$  : 와점성계수  
 $\eta$  :  $=r/b$ (원형분사의 경우),  $=y/b$ (평면분사의 경우)  $=Y/b_y$  또는  $Z/b_z$ (충돌분사의 경우)

1. 서 론

난류분사에 관한 연구는 항공기, 로켓등의 분사나 연소기관내의 혼합가스의 난류특성을 계측 분석함으로써 기관의 성능을 개선하기 위한 목적으로 많이 진행되어 오고 있다. 대부분의 연소기관에서 혼합가스의 유동은 충돌에 의한 난류 혼합 과정이며, 이 혼합조건의 개선은 연소에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 이러한 분야의 실제적인 개발이나 응용은 정확한 이론적 해석이나 실험에 앞서 실용화에 이르렀고, 실용화를 위해 개발된 제품의 성능을 계측 분석하는 것이 대부분이었다. 그리하여 근래에는 기관의 성능 향상과 연소의 효율을 높이기 위하여 혼합가스의 난류특성과 2개 이상의 분류들의 충돌 혼합유동 현상을 연구한 사례들이 많이 발표되고 있다.

Andreopoulos 등<sup>(3,5)</sup>은 자유상태로 유동되는 분류에 수직으로 제 2의 분류를 충돌시켜 두 분류가 충돌후에 형성하는 난류의 구조에 대하여 실험적으로 고찰하였으며, Rudinger 등<sup>(6)</sup>은 아음속 분류에 제 2의 아음속 분류를 충돌시켜 Laser계측을 통한 유동특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 Isaac 등<sup>(7)</sup>은 충돌유동을 동반하는 다중분류의 상호작용에 관한 실험적 연구 결과를 발표하였다. 아음속으로 유동되는 관로내에서 장애물에 의해 발생하는 충돌 확산유동에 대한 실험적 연구가 Gençay 등<sup>(8,9)</sup>에 의하여 실행되었으며, 선회 충돌유동에 수직으로 분사되는 공기 분류의 유동특성에 대한 Ahmed 등<sup>(10)</sup>의 연구 결과도 발표되었다. 나아가서 Less 등<sup>(11)</sup>은 고속으로 유동되는 가스에 수직으로 액체를 분사시켜 액체 입자들의 유동 및 무화현상에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

이상에서 살펴본 바와 같은 유동특성들은 응용 차원에서 많이 연구되고 있다. 직분사식 내연기관의 연소실에서 공기와 연료가 충돌 혼합되는 난류의 특성을 고찰하기 위하여, 노병준 등<sup>(12,14)</sup>은 두 분류를 45°로 충돌시킨 후 충돌후에 발달되어가는 난류의 혼합특성에 관한 연구를 발표하였으며, 보다 실용 기관내의 유동현상 고찰에 접근하기 위하

여 최근에는 두 분류를 원형 실린더내에서 충돌시켜 충돌후의 난류 혼합 특성을 실험적으로 측정 분석하였다<sup>(15)</sup>. 두 분류가 충돌하여 혼합류가 형성되는 조건에는 분류의 충돌각, 분류의 크기, 분류들의 유속비, 분류단면의 형상 등 많은 변수들이 있다. 그리하여 본 연구에서는 충돌각을 변수로 한 실험적 연구를 수행하기 위하여 여타의 변수를 고정하였으며, 유속은  $R_e=5.2 \times 10^4$ 의 결과를 제시하였다.

2. 실험장치

두 원형분류를 임의의 각도로 충돌 유동시키기 위해 아음속 풍동을 본체로 하여 실험장치를 구성하였다. Fig. 1에서 보는 바와같이 시험부의 균일 분포 유동영역 내에 직경이 60mm인 두개의 관로가 위치하도록 설계함으로써 두 관로에 유입되는 유속이 동일하도록 고안하였다. 균일유동을 유도하기 위하여 관로의 직관 부분의 길이를 175mm로 하였으며, 이후의 관로는 충돌각  $\theta$ 의 조절이 용이하도록 내경이 변하지 않는 유연한 비닐관으로 연결하였다. 두 노즐출구의 중심간 거리를 180mm로 되도록 고정하였으며, 정상 균일유동 및 가속을 위하여 수축노즐을 설치하였다. 충돌각  $\theta$ 가 변하여도 노즐출구의 중심선간의 간격을 180mm로 항상 유지하기 위하여 노즐끝 부분의 하단에 힌지고정을 택하였다. 또한 두 노즐의 출구속도가 동일하게 유지되도록 시험부에 연결된 두 관로의 직관부에 공기 배출구를 설치하여 미세한 압력차를 조절할 수 있도록 고안하였다.

본 실험에서는 CTA형 열선풍속계(Tsi 1050

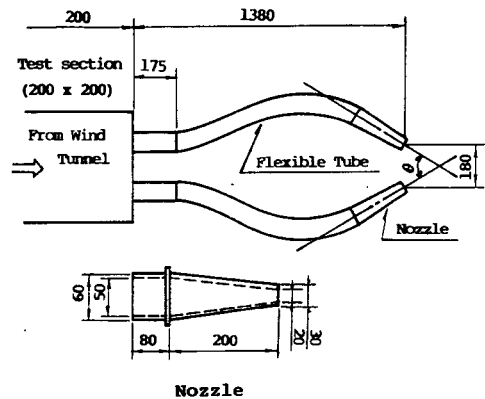


Fig. 1 Geometry of cross jet nozzle

Series)를 사용하여 3차원 유동의 평균속도, 난류 강도, 난류 전단응력 등을 계측하였으며, 계측에 사용한 X형 프로브는 텅스텐으로 제작된 직경이  $5\mu\text{m}$ 이고 길이가 3mm인 Tsi제품 (Model 0252 T5) 이었다. 열선의 특성을 고려한 교정곡선(calibration curve)을 구하기 위하여 교정기(Calibrator: Tsi model 1125)와 압력수두 0.01mm까지 계측이 가능한 전기식 미압계(Electric Micro-manometer: MDC-FC 060) 그리고 직경이 1mm인 스테인리스 관으로 제작된 피토판을 사용하였다. 계측용 이송장치는 유동방향(X-방향)으로의 최대 이송거리가 2m이고 정밀 이송거리가 0.5mm이며, 수직 방향(Z-방향)으로 최대 이송거리는 1m이고 정밀 이송거리가 0.5mm이다. 또한 Z-방향 이송대에는 측방향(Y-방향)의 이송거리, 이송 시간 등을 제어할 수 있는 마이크로 프로세서와 stepping motor를 이용한 자동 프로브 이송장치(SD-100C)를 부착하여, 이송정도가 0.1mm이고 최대 이송거리가 0.45m인 3차원 이송을 가능하게 하였다. 실험 데이터 처리장치로서는 A/D 컨버터(8 bits, 12 bits), 컴퓨터(Apple II, HP 9845B), 플로터(HP 9872C), 프린터(HP 2601A) 등으로 구성된 온라인 계측장치를 사용하였다.

### 3. 계측방법

충돌분사의 3차원 유동성분을 계측하기 위하여 Fig. 2와 같이 유동 좌표계를 설정하였다. 두 노즐 간의 간격은 180mm로 고정되었으며, 두 노즐 중심선의 기하학적인 교차점을 C.P., 이때 두 중심선

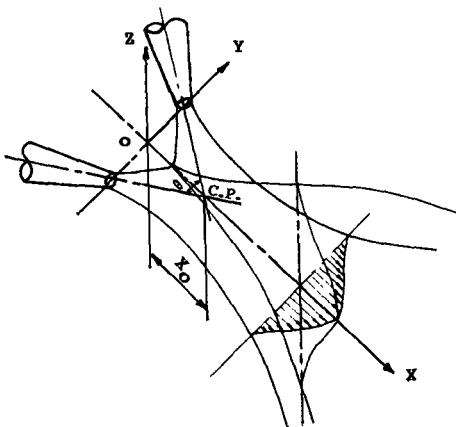


Fig. 2 Formation of a cross jet

이 이루는 각을 충돌각  $\theta$ 로 하였다. 또 노즐 출구로부터 교차점까지의 거리를  $X_0$ 로 하였으며, 충돌 후의 유동방향을 X축, 유동방향의 수평축 방향을 Y축, 두축에 수직한 방향을 Z축으로 설정하였다.

측정은 두 분류의 교차점 이후에서 난류의 혼합 특성에 중점을 두었으며, 측정위치는  $X/X_0=1.3, 1.7$ 을 설정하여 Y 및 Z 방향으로 계측하였다. 노즐에 분출되는 공기의 속도는  $Re=5.2 \times 10^4$ 이었으며, 측정 데이터들의 처리는 열선풍속계와 A/D 컨버터, 컴퓨터, 프린터 등을 온라인 계측장치로 구성하여, S/W에 의한 자동 계측방법을 사용하였다.

### 4. 결과분석

#### 4.1 유동단면의 발달

원형 노즐에서 분출되는 두 등속 충돌분류의 충돌 후 유동단면의 발달이 타원형태에서 유동거리가 멀어짐에 따라 점차적으로 단일 분류와 같이 원형으로 변형되어감을 Isaac 등<sup>(7)</sup>은 그의 연구에서 Abramovich<sup>(2)</sup>의 이론을 인용하여 기술하였다. 또한 노병준 등<sup>(12,14,15)</sup>이 연구한 45° 충돌분류의 연구에서도 타원이 형성되는 것으로 밝혀 졌다.

본 연구에서 충돌 후 발달되는 유동단면의 발달 양상이  $X/X_0=1.3, 1.7$  두 위치에서 충돌각을 변수로하여 계측한 결과로 Fig. 3,4에 도시되어 있다. 외부 유입공기의 영향과 오차를 줄이기 위하여 유동 중심으로부터  $1/2(\bar{U}_{max})$ 의 위치를 Y, Z 방향으로 계측하여 무차원으로 도시한 것이다. 도표에서 볼 수 있는 바와 같이 유동단면의 형상을 타

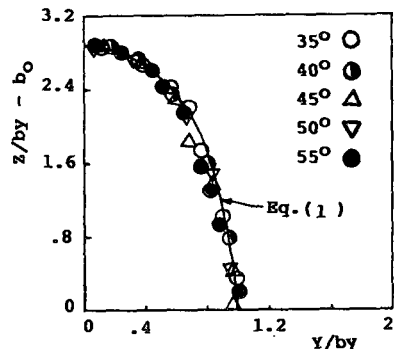


Fig. 3 Similarity of cross-section of the mixing flow ( $X=1.3X_0, Re=5.2 \times 10^4$ )

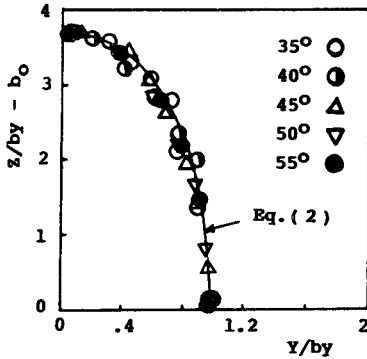


Fig. 4 Similarity of cross-section of the mixing flow ( $X=1.7X_o, Re=5.2 \times 10^4$ )

원을 이루고 있으며, 타원의 공식을 적용하여 수치적 접근법에 의해 다음과 같은 반실험식들을 구할 수 있다.

$$\frac{(Y/b_y)^2}{0.98^2} + \frac{(Z/b_y - b_o)^2}{2.9^2} = 1, \quad (X/X_o = 1.3) \quad (1)$$

$$\frac{(Y/b_y)^2}{0.98^2} + \frac{(Z/b_y - b_o)^2}{3.72^2} = 1, \quad (X/X_o = 1.7) \quad (2)$$

이와 같은 타원단면의 형상은 한정된 영역에 국한되며 유동거리가 멀어짐에 따라 점진적으로 단일원형분사와 동일한 형태로 발달되어 가고 있음이 노병준 등<sup>(14)</sup>의 연구에서 밝혀졌다.

4.2 평균속도 분포

Fig. 5는 충돌각의 변화에 따른 혼합류의 최대속도의 변화를 측정 도시한 것으로써 충돌각의 증가에 따라 최대속도가 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 충돌각이 증가하게 되면 충돌손실이 증가하기 때문에 최대속도는 감소하여야 하나, 본

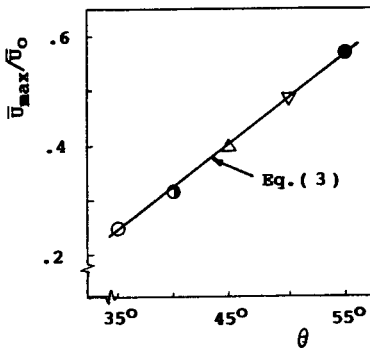


Fig. 5 Variations of maximum mean velocity on the centerline

연구에서 사용한 충돌분사 장치에서는 두 노즐간의 거리를 일정하게 고정하고 충돌각을 증가시킴으로서 두 분류의 충돌점이 노즐 출구로부터 상대적으로 가까워지게 된다. 그러므로 충돌각의 증가에 따라 최대속도가 선형적으로 증가하는 이유는, 충돌각의 증가에 따른 충돌손실에 비해 거리의 감축으로 인한 최대속도의 증가가 크게 나타나기 때문으로 분석된다. 이 직선의 실험식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{U_{max}}{U_o} = 0.0167\theta - 0.335, \quad (35^\circ \leq \theta \leq 55^\circ) \quad (3)$$

두 분류가 충돌한 후 형성되는 혼합류의 평균속도를 중심선을 따라 측정한 결과가 Fig. 6에 도시되어 있다. 자유분류에서 유동방향에 따른 중심선상의 유속은 운동량 이론에 의하여 거리에 역비례하는 것으로 밝혀졌으며, 이는 노병준 등<sup>(12,14,15)</sup>과 김장권<sup>(20)</sup>의 충돌분류 연구에도 실험적으로 증명되었다. Fig. 6은 상기 경우들과는 달리  $Re=5.2 \times 10^4$ 에서 충돌각을 변화시키면서 유속을 측정한 결과로서 충돌각의 변화에 큰 영향을 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 이 경우 교차점(C.P.) 이전에서는 심한 증가 양상을 보이고, 이후에서는 심한 감소 현상을 보이다가 거리가 멀어질수록 점진적인 감소 양상을 나타내고 있다. 이 두 영역의 유속의 변화를 도식적 방법과 분수식을 적용하여 각각 구하여 보면 다음과 같은 반실험식이 유도된다.

$$\frac{U_m}{U_{max}} = 2.7 \frac{X}{X_o} - 1.65, \quad (0.5 \leq X/X_o \leq 1.1) \quad (4)$$

$$\frac{U_m}{U_{max}} = \frac{0.39}{(X/X_o - 0.72)} - 0.105, \quad (1.1 \leq X/X_o) \quad (5)$$

등속 원형 충돌분류에서 혼합류의 발달은 1.1 <math>

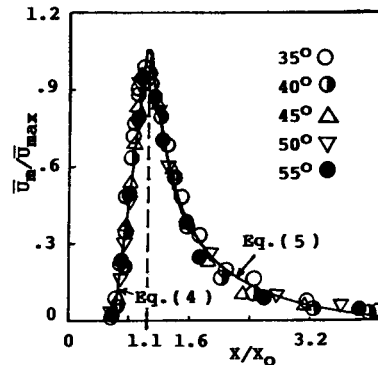


Fig. 6 Variations of mean velocity on the centerline

$X/X_0 \leq 2.0$ 의 영역에서는 타원단면을 형성하므로  $Y$ 축과  $Z$ 축의 유동확산폭이 다르나 평균속도들의 무차원적 분포는 거의 일치되는 상사성을 나타내고 있다.<sup>(12,14,15)</sup> 그리하여 평균속도분포의 측정결과는  $Y$ 축상의 측정결과만을 Fig. 7과 8에 제시하였다. 층돌 후 측방향의 유속  $\bar{U}$ 의 분포는 자유분사에서 반실험적으로 유도된 Hinze나 Görtler의 분포식과 잘 일치하고 있으며,  $X/X_0=1.3$ 의 위치보다  $X/X_0=1.7$ 의 위치에서 혼합류 외곽 부근의 값이 약간 증가하는 것으로 나타나 있으나, 이는 난류의 확산 발달 과정에서 외부 공기의 유입으로 인한 혼합난동의 영향이 측정오차의 증가 요인으로 작용하는 것으로 사려된다.

$$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_m} = (1 + 0.414\eta^2)^{-2} \quad (\text{Hinze}) \quad (6)$$

$$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_m} = 1 - \tanh^2(0.881\eta) \quad (\text{Görtler}) \quad (7)$$

### 4.3 난류강도 분포

혼합류의 중심선을 따른 3축 방향의 난류강도를 측정한 결과 Fig. 9에서와 같이  $X/X_0=1.0$ (C.P.) 이후에 난류가 3방향 공히 크게 발달하는 것을 알 수 있다. 두 원형분류가 층돌해서 혼합되어  $Y$ 축상에서는 크게 수축되고,  $Z$ 축상으로는 크게 확산되면서 분류의 혼합난동은 활발하게 발달되어 R. M.S.값  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ 는  $X/X_0=1.8$  영역에서,  $\bar{w}$ 는  $X/X_0=2.2$  영역에서 최대치를 나타내고 있다. 또 이 위치까지는 난류강도가 공히 급진적인 증가 양상을 보이다가 그 이후에서는 점진적으로 감소하여 감소로써 평균속도 분포양상과 유사한 경향을 보여주고 있다. 또 난류강도의 크기를 보면  $\bar{u}$ 은 약 28%,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ 은 약 20%의 최대값을 나타내고 있다.

### 4.4 난류 전단응력

난류 전단응력에 대한 해석은 자유 원형분사의 경우 원통좌표에서 고려한 Reynolds의 운동방정식과 Prandtl 및 Boussinesq의 가정으로부터 유도된 이론식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\overline{u'v'}}{\bar{U}_m^2} = \frac{db}{dx} \frac{f(\eta)}{\eta} \int_0^\eta f(\eta) d\eta \quad (8)$$

여기서  $p(\eta) = 4C/(1 + C\xi\eta^2)^{-2}$ ,  $\xi = bU_m(db/dx)$  ( $1/2\varepsilon_m$ )이며, 다시 식 (8)에서  $f(\eta)$ 를 대입하여 적분하고 이를 변형하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{|\overline{u'v'}|}{|\overline{uv'}|_m} = \frac{\bar{U}_m^2}{|\overline{uv'}|_m} \frac{db}{dx} \frac{\eta}{2} (1 + 0.25\xi\eta^2)^{-3} \quad (9)$$

또한 자유 평면분사의 경우 직각좌표계에서 고려한 Reynolds 운동 방정식과 운동량 이론을 적용하여 난류 전단응력의 식을 유도하면

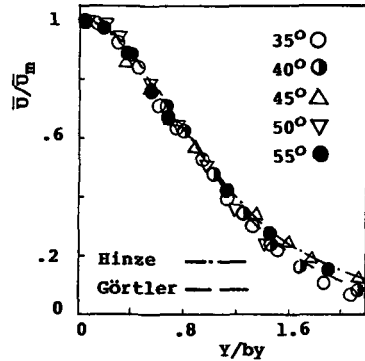


Fig. 7 Distributions of mean velocity on the  $Y$  axis ( $X=1.3X_0$ ,  $Re=5.2 \times 10^4$ )

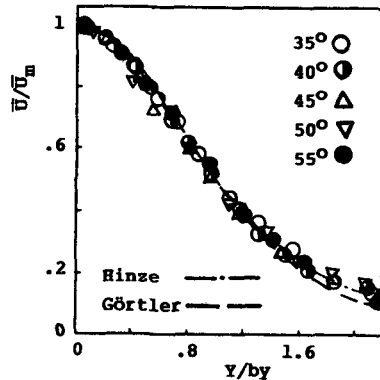


Fig. 8 Distributions of mean velocity on the  $Y$  axis ( $X=1.7X_0$ ,  $Re=5.2 \times 10^4$ )

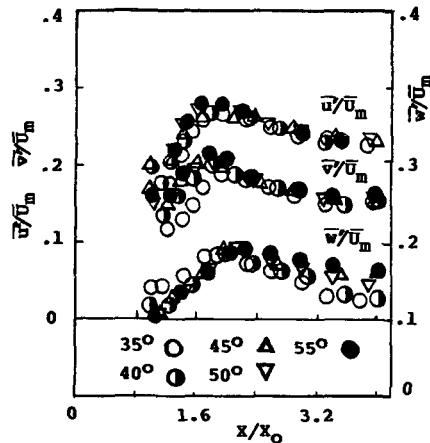


Fig. 9 Distributions of turbulence intensity on the centerline ( $Re=5.2 \times 10^4$ )

$$\frac{\overline{u'v'}}{\overline{U_m^2}} = \frac{1}{2} \frac{db}{dx} f(\eta) \int_0^\eta f(\eta) d\eta \quad (10)$$

여기서  $f(\eta) = 1 - \tanh^2 \beta \eta$ 를 대입하여 적분하면

$$\frac{\overline{u'v'}}{\overline{u'v'_m}} = \frac{\overline{U_m^2}}{\overline{u'v'_m}} \frac{db}{dx} \frac{2e^{2\beta\eta}}{\beta} \frac{(e^{2\beta\eta} - 1)}{(e^{2\beta\eta} + 1)^3} \quad (11)$$

여기서  $\beta = \left(\frac{b}{4} \frac{db}{dx} \frac{\overline{U_m}}{\epsilon_m}\right)^{1/2}$ 이다.

Fig. 10, 11은 난류 전단응력  $\overline{u'v'}$ 의 값을  $X/X_0 = 1.3, 1.7$ 에서 교차각의 변화에 따라  $Y$ 방향으로 측정된 결과이다. 도표에서 볼 수 있는 바와 같이 난류 전단응력은 층돌각의 변화에 관계없이 각 경우 동일한 분포양상을 나타내고, 최대값은 유동방향  $X$ 와 층돌각  $\theta$ 에 무관하게  $Y/b_y = 0.8$ 의 위치에서 측정되었다.

본 실험결과와 이론적으로 유도된 식 (9)와 (10)을 비교 검토하기 위하여 식 (9)에 Hinze의 실험상수  $\zeta = 1.656$ 과 Görtler의 계수  $\beta = 0.881$ 을 각각 대입하여 도기한 결과,  $X/X_0 = 1.3$ 의 위치에서는 혼합류의 외부 영역인  $Y/b_y \geq 2.0$  이외의 영역에서는

잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나  $X/X_0 = 1.7$ 의 경우에는  $1.0 \leq Y/b_y \leq 1.8$ 의 영역에서 실험치가 이론치보다 약간 크게 나타나 있다. 그리고  $Z$ 방향으로 측정한  $\overline{u'w'}$ 의 값은 층돌 후 급신장하면서 확산유동이 비정상적으로 일어나는 방향으로서, 난류 전단응력의 발달이 불안정한 상태로 나타나 있음을 Fig. 12, 13에서 볼 수 있다. 이 산만한 발달 양상은 두 분류의 교차점이 가까운 곳에서 심하게 나타나고 멀어질수록 유사한 분포를 나타내며, 이론식들과 더 잘 일치되어 가는 현상을 Fig. 12와 13을 비교하여 알 수 있다. 그러나 최대 전단응력은 이러한 영향에는 관계없이  $Y$ 축상에서와 같이  $Y/b_y = Z/b_z = 0.8$  영역에서 발달되고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

두 원형분류의 층돌 혼합 유동에서 층돌각의 변

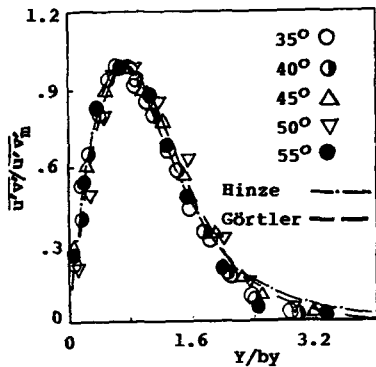


Fig. 10 Similarity of shear stress on the Y axis ( $X = 1.3X_0, Re = 5.2 \times 10^4$ )

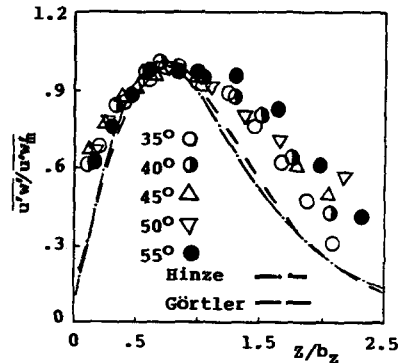


Fig. 12 Similarity of shear stress on the Z axis ( $X = 1.3X_0, Re = 5.2 \times 10^4$ )

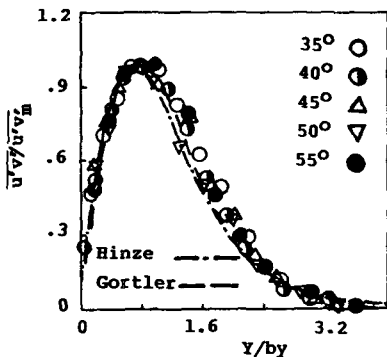


Fig. 11 Similarity of shear stress on the Y axis ( $X = 1.7X_0, Re = 5.2 \times 10^4$ )

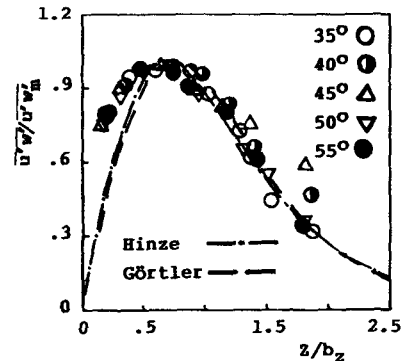


Fig. 13 Similarity of shear stress on the Z axis ( $X = 1.7X_0, Re = 5.2 \times 10^4$ )

화에 따른 난류의 특성을 실험을 통해 이론식들과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 두 원형 분류의 충돌 후 유동단면의 발달은 충돌각에 관계없이 일정한 범위 내에서는 타원을 형성하며, 타원의 방정식을 만족한다.

(2) 혼합류의 유동 중심축상의 평균속도 변화는 충돌각에 관계없이 교차점 이전에서는 선형적이고 급진적인 증가를 나타내고, 이후에서는 유동거리에 역비례하고 있음을 알 수 있다. 또 측방향( $Y$ -방향)으로의 평균속도는 각 위치에서 거의 동일한 분포를 보이고 자유분사의 반실험식과도 잘 일치하는 것으로 나타났다.

(3) 중심축을 따라 측정된 최대 난류강도는  $\bar{u}$ 의 경우 약 28%이고,  $\bar{w}$ ,  $\bar{v}$ 는 약 20%의 값을 나타내며,  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$ 는  $X/X_0=1.8$ 에서  $\bar{v}$ 은  $X/X_0=2.2$  영역에서 최대값이 발생하고, 최대값 이전 영역에서는 급진적인 증가를 보이다가 이후부터 점진적인 감소를 나타낸다.

(4) 난류 전단응력의 발달은  $\overline{uv}$ 의 경우에는 이론적으로 유도된 분포 곡선의 식과 잘 일치하고 있으며,  $\overline{uw}$ 의 경우에는 충돌에 의한 급진적 확산의 영향으로 산만한 분포를 나타내어 이론식들과 일치하지 않으나, 최대값의 발생 위치는  $Y/b_y=Z/b_z=0.8$ 로써 동일함을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Hinze, J.O., 1975, "Turbulence", McGraw-Hill, 2nd ed.
- (2) Abramovich, G.N., 1963, "The Theory of Turbulent Jet", MIT Press.
- (3) Andreopoulos, J., 1982, "Measurements in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly into a Cross Stream", Transaction of the ASME, Vol. 104, pp. 493~499.
- (4) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", J. Fluid Mech., Vol. 138, pp. 93~127.
- (5) Andreopoulos, J., 1985, "On the Structure of Jets in a Cross Flow", J. Fluid Mech., Vol. 157, pp. 163~197.
- (6) Rudinger, G. and Moon, L.F., 1976, "Laser-Doppler Measurements in a Subsonic Jet Injected into a Subsonic Cross Flow", Transaction of the ASME, pp. 516~520.
- (7) Isaac, K.M. and Jakubowski, A.K., 1985, "Experimental Study of the Interaction of Multiple Jets with a Cross Flow", AIAA J., Vol. 23, No. 11, pp. 1679~1683.
- (8) Gençay, S., Tapucu, A., Troche, N. and Merilo, M., 1984, "Experimental Study of the Diversion Cross-flow Caused by Subchannel Blockages", Part I: Experimental Procedures and Mass Flow Rates in the Channels, Transaction of the ASME, Vol. 106, pp. 435~440.
- (9) Gençay, S., Tapucu, A., Troche, N. and Merilo, M., 1984, "Experimental Study of the Diversion Cross-flow Caused by Subchannel Blockages", Part II: Pressures in the Channels and the Comparison of the COBRA III-C Predictions with Experimental Data, Transaction of the ASME, Vol. 106, pp. 441~447.
- (10) Ahmed, A.S. and So, R.M.C., 1987, "Characteristics of Air Jets Discharging Normally into a Swirling Crossflow", AIAA J., Vol. 23, No. 3, pp. 429~435.
- (11) Less, D.M. and Schetze, J.A., 1986, "Transient Behavior of Liquid Jets Injected Normal to a High-Velocity Gas Stream", AIAA J., Vol. 24, No. 12, pp. 1979~1985.
- (12) 노병준, 김장권, 1984, "45° 자유 충돌분사의 난류유동에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제 8 권, 제 5 호, pp. 442~449.
- (13) 노병준, 김장권, 1986, "45° 원형 충돌분류의 통계학적 난류특성 연구" 대한기계학회논문집, 제 10 권, 제 1 호, pp. 110~120.
- (14) 노병준, 김장권, 1987, "원형분류와 45° 원형 상호 충돌분류의 비교적 연구", 대한기계학회논문집, 제 15 권, 제 1 호, pp. 23~34.
- (15) 노병준, 박종호, 1988, "온라인 컴퓨터 시스템에 의한 실린더내 충돌 분류의 통계학적 난류특성 연구", 대한기계학회논문집, 제 12 권, 제 4 호, pp. 876~891.
- (16) Krothapalli, A., Banganoff, D. and Karamcheti, K., 1981, "Partially Confined Multiple Jet Mixing", AIAA J., Vol. 19, No. 3, pp. 324~329.
- (17) Simmons, J.M., Platzer, M.F. and Smith, T.C., 1978, "Velocity Measurements in an Oscillating Plane Jet Issuing into a Moving Air Stream", J. Fluid Mech., Vol. 84, Part 1, pp. 163~197.
- (18) Makihata, T. and Miyai, Y., 1983, "Prediction of the Trajectory of Triple Jets in a Uniform Crossflow", Transaction of the ASME, Vol. 105, pp. 91~97.
- (19) Shirakashi, M. and Tomita, Y., 1978, "The Diffusion of Jets in Cross Flows", Bulletin of the JSME, Vol. 21, No. 157, pp. 1160~1167.

- (20) 김장권, 1987, “등속 45° 2원형 상호 충돌분류의 통계학적 난류특성에 관한 실험적 연구”, 전북대학교 대학원 공학박사 학위 논문.
- (21) 조원일, 1986, “실린더내 45° 등속 상호 충돌분사의 난류 혼합 유동에 관한 실험적 연구”, 전북대학교 대학원 공학박사 학위 논문.
- (22) 최진철, 1989, “충돌분사의 교차각변화에 따른 난류 특성연구”, 전북대학교 대학원 석사 학위논문.