

〈論 文〉

난류충돌유동의 질량유량비에 따른 혼합유동구조에 관한 실험적 연구

이대옥*노병준**

(1992년 4월 27일 접수)

An Experimental Study on the Mixing Flow Structure of Turbulent Cross Flow with Respect to the Ratio of Mass Flow Rate

Dae Ok Lee and Byung Joon Rho

Key Words : Cross Angle(충돌각), Cross Mixing Jet(충돌혼합분류), Mass Flow Rate(질량유량),
Cross Mixing Flow Structure(충돌혼합유동구조), Cross Section(유동단면)

Abstract

This study was carried out to investigate the flow structure and mixing process of a cross mixing flow formed by two round jets with respect to the ratio of mass flow rate. This flow configuration is of great practical relevance in a variety of combustion systems, and the flow behaviour of a cross jet depends critically on the ratio of mass flow rate and the cross angle. The mass flow rate ratios of two different jets were controlled as 1.0, 0.8, 0.6, and 0.4, and the crossing angle of two round jets was fixed at 45 degree. The velocities issuing from jet nozzle with an exit diameter of 20 mm were adjusted to 40 m/s, 32 m/s, 24 m/s, and 16 m/s, and the measurements have been conducted in the streamwise range of $1.1 X_0$ to $2.5 X_0$ by an on-line measurement system consisted of a constant temperature type two channel hot-wire anemometry connected to a computer analyzing system. The original air flow was generated by a subsonic wind tunnel with reliable stabilities and uniform flows in the test section. For the analysis of the cross mixing flow structure in the downstream region after the cross point, the mean velocity profiles, the resultant velocity contours, and the three-dimensional profiles depending upon the mass flow rate ratio have been concentrately studied.

기 호 설 명

<p>b_y, b_z : Y방향 및 Z방향의 유동반폭[mm]</p> <p>b_{y0}, b_{z0} : Y_0방향 및 Z_0방향의 유동반폭[mm]</p> <p>D_0 : 노즐출구 직경[mm]</p> <p>M_0, M_1 : 고속측과 저속측의 질량유량[kg/s]</p> <p>R : 고속측과 저속측의 질량유량비 [= M_1/M_0]</p>	<p>Re : Reynolds 수</p> <p>U, V, W : 평균속도[m/s]</p> <p>u, v, w : 순간속도[m/s]</p> <p>u', v', w' : 파동속도[m/s]</p> <p>U_{c1} : 유동중심축상에서의 평균속도[m/s]</p> <p>U_m, V_m, W_m : Y_0 및 Z_0방향의 최대 평균속도[m/s]</p> <p>U_{max} : 유동중심축에서의 최대평균속도[m/s]</p> <p>U_0, U_1 : 고속측 및 저속측의 노즐출구속도[m/s]</p>
--	--

*정회원, 국방과학연구소

**정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

- X, Y, Z : 기하학적 직교좌표축
- X₀ : 원점 (0)과 충돌점 (C.P.) 간 거리 [mm]
- X₀, Y₀, Z₀ : 유동중심축을 따른 직교좌표축
- Y_D : 유동중심축의 Y방향 편위량 [mm]
- Y₀ : 노즐 끝단의 중심간 거리 [mm]
- θ : 두 원형노즐의 충돌각 [°]

1. 서 론

난류유동은 많은 산업분야에 광범위하게 응용되어 왔으며, 최근에 와서는 항공우주산업 및 자동차 산업분야에 적용범위가 확대되고 있다. 특히 제트 기관, 내연기관 및 산업용 연소장치 등의 설계와 열효율개선을 위한 난류 유동특성에 관한 연구가 심도있게 진행되고 있다. 난류 분사유동에 관한 연구는 원형분류(round jet),⁽¹⁾ 평면분류(plane jet),⁽²⁾ 환상분류(annular jet),⁽³⁾ 선회분류(swirling jet),⁽⁴⁾ 평행분류(parallel jet)⁽⁵⁾ 및 동축분류(coaxial jet)⁽⁶⁾ 등에 관하여 수행되어 왔으며, 주로 난류 혼합영역에서 유동구조, 평균속도, 파동속도, 난류강도, 난류전단응력, 난류운동에너지, 파동성분의 비대칭도(skewness factor), 편평도(flatness factor) 및 확률밀도분포 등을 측정분석함으로써 분사류의 난류 유동특성과 난류 혼합유동구조의 구명에 관심을 기울여 왔다. 또한, 난류 분사류들의 충돌에 관한 연구로서 수직충돌분류(wall jet or impinging jet),⁽⁷⁾ 경사 충돌분류(inclined jet),⁽⁸⁾ 반경방향 충돌분류(radial jet),⁽⁹⁾ 수직 충돌분류(normal cross flow),^(10,11) 45° 충돌분류(45° cross jet),^(12,13) 다중충돌분류(multiple cross jet)⁽¹⁴⁾ 등이 그 응용범위가 광범위하므로 유체역학적 측면에서 많이 연구되어 왔다.

충돌에 의한 난류 혼합유동은 실제 산업용 연소 기관에서 많이 응용되고 있다. 즉 가솔린기관의 기화기에서의 혼합기체의 형성, 디젤기관의 연소실에서의 공기와 연료의 혼합과정과 무화 및 확산, 로커식 분사장치와 전자제어식 분사장치에서의 공기와 연료의 충돌혼합과정, 그리고 보일러 및 버너 등에서의 충돌유동 등을 들 수 있다. 이 외에 가스터빈과 터보기계에서 냉각을 위하여 충돌유동이 적용되기도 하며, V/STOL 항공기의 추진장치와 배기물의 회석 및 방출 등에도 이용되고 있다.

본 연구에서는 위와같은 응용에 목적을 두고 복잡한 유동형태를 지닌 충돌분사류에 대한 유동특성

을 연구하기 위하여 단순화된 실험모델로써 형상이 동일한 두 원형분류의 충돌에 의한 충돌분류의 혼합현상 및 유동구조 등을 질량유량비의 변화에 따라 유체역학적으로 구명하고자 하였으며, 본 연구 결과는 연소기관에서의 연소효율 증대 및 구조개선 등의 공학적 응용을 위한 기본자료로 활용하고, 이론적 연구에 의한 난류의 유동구조 및 유동특성에 대한 타당성 입증과 이론적 모델의 보완을 위한 실험자료로 이용하고자 한다. 충돌유동에 영향을 미치는 주요인자는 노즐직경, 충돌각, 충돌질량유량비, 온도, 밀도 등이며, 이 인자들 중에서 충돌질량유량비와 충돌각이 충돌후 형성되는 난류혼합유동에 지배적인 영향을 미치므로, 본 연구에서는 두 원형분류의 충돌질량유량비를 가변할 수 있는 장치를 고안하였으며, 두 분류의 충돌각을 45°로 고정하고, 고속측과 저속측 노즐의 질량유량비를 1.0, 0.8, 0.6, 0.4로 설정하여 질량유량비에 따른 혼합유동구조의 구명을 위한 실험적인 연구를 수행하였다. 충돌후의 혼합유동의 특성을 연구하기 위하여 유동중심계적, 유동반폭, 유동단면, 2차원 및 3차원 유동장, 평균속도분포 등을 온라인 컴퓨터시스템을 이용하여 측정분석하였다.

2. 실험장치

두 원형분류의 충돌에 의한 혼합유동현상을 실험적으로 연구하기 위하여 충돌각 및 질량유량비를 가변시킬 수 있는 충돌분사장치를 설계제작하였으며, 이를 개방형 아음속풍동의 시험부에 부착하여 실험장치를 구성하였다.

아음속풍동은 압송형으로 송풍장치, 확산부, 정류실, 수축부 및 시험부 등으로 구성되어 있으며, 시험부 내부의 유동은 벽면상의 극히 좁은 범위의 경계층을 제외하고는 모든 단면에서 난류성분이 거의 제거된 속도분포가 얻어졌다. 또한 시험부 출구에 충돌분사장치를 장착하여 유체를 분사시켰을 때 노즐출구단면에서는 거의 균일한 속도분포를 보여 주었으며, 난류강도는 0.3~0.5% 정도였다.

속도가 다른 두 분류를 충돌시키기 위하여 Fig.1 과 같이 두 원형노즐을 원활하게 굽어질 수 있는 관에 부착하여 노즐의 중심선 간격이 180 mm가 되도록 설치하였다. 또한, 한 풍동으로부터 서로 다른 질량유량의 두 분류를 얻기 위하여 A부분에 유

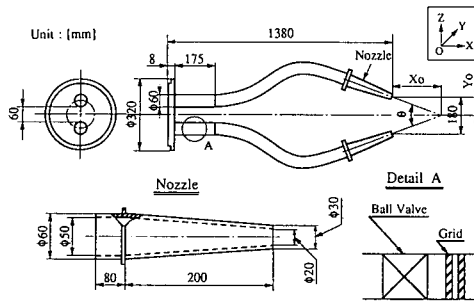


Fig. 1 Geometry of a cross jet kit

량제어밸브를 부착함으로써 유량을 정밀 조정할 수 있도록 하였으며, 후부에 격자를 설치하여 유동상태를 안정화시켰다. 노즐의 유입관 입구부분은 직관으로 설계하고, 그 이후에는 원활한 곡관으로 연결하여 유동의 균일성이 유지되도록 하였다. 또한, 곡관의 끝단에 황동으로 제작된 수축노즐을 부착하여 곡관을 통과하는 동안 마찰 및 충돌에 의한 유속감소와 불균일한 유동분포를 가속 및 균일화 하였다.

측정장치는 등온 2차원 열선풍속계시스템(Tsi 1050 시리즈)을 사용하였으며, 자료획득 및 분석처리를 위하여 A/D 변환기, 컴퓨터(IBM 386), 프린터, 프로터 등을 열선풍속계시스템과 온라인으로 연결하였다. 계측 프로브는 직경이 $5\mu\text{m}$ 이고 길이가 3mm인 텅스텐의 X형 열선으로 구성된 NKK사의 D025R-T5를 사용하였으며, 프로브의 이송은 마이크로 프로세서에 의해 총 이송거리, 이송간격, 정지시간 등을 제어할 수 있는 자동프로브 이송장치(SD-100C)를 부착한 3축 이송장치를 사용하였다.

3. 실험방법

실험을 수행하는 동안 실험실은 항온, 항습이 유지되도록 하였으며, 풍동을 30분 이상 작동시켜 유동상태가 안정화된 후에 실험데이터를 계속하였다. 또한, 분출공기의 온도와 공기중의 먼지 및 수분 등에 의한 영향을 최소화하기 위하여 송풍장치의 회전에 따른 흡입공기의 온도상승을 억제할 수 있는 냉각장치, 공기중의 먼지 및 수분을 제거할 수 있는 공기청정기와 공기필터 등을 사용하였고, 풍동 및 열선풍속계의 전원을 안정적으로 공급시켜줄 수 있는 자동전압조정기와 실내의 공기유동이나 외란에 의한 유동현상의 변화를 방지하기 위한 유동

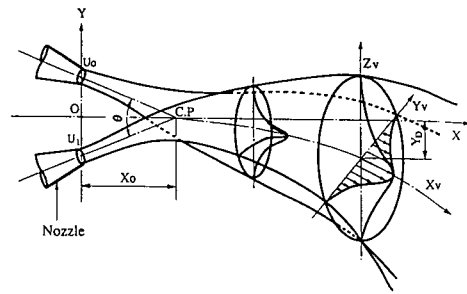


Fig. 2 Flow configuration and coordinate system of the mixing flow field of a cross jet

보호막을 설치하였으며, 풍동의 시험부 및 노즐출구에서의 유동조건을 주기적으로 측정하여 초기 유동조건과 동일한 유동조건이 되도록 함으로써 실험 결과의 정확성을 증대시켰다.

두 분류가 충돌하여 생성되는 충돌혼합유동의 구조는 두 분류의 질량유량이 동일한 경우($R=1.0$)는 유동이 대칭적으로 발달되지만, 상이한 경우($R \neq 1.0$)에는 Fig.2와 같은 비대칭 유동형태를 이룬다. 좌표축은 Fig.2에서와 같이 혼합류의 중심축을 X방향으로 정하고, 여기에 수직인 횡방향 및 상방향을 Y, Z로 정의하였으며, 원점은 두 노즐출구의 중심을 이은 선과 유동중심축과의 교점에 설정하였다. Fig.1에 나타난 바와같이 두 노즐의 중심축이 교차되는 기하학적 교차점(C.P.)과 원점(O)과의 거리를 X_0 , 중심축으로부터 노즐끝단의 중심점까지의 거리를 Y_0 , 노즐출구직경을 D_0 로 정의하여 3축 방향의 무차원변수로 사용하였다. 질량유량이 다른 충돌분류의 경우는 질량유량의 차에 의하여 유동장이 저속측으로 급속히 확산되어 유동중심축이 저속측으로 Y_D 만큼 휘어져 유동하므로 각 위치에 따라 유동방향이 변화하게 된다. 따라서 질량유량이 다른 경우는 유동중심축을 따른 새로운 좌표축을 설정하여, 유동방향축을 X_v , 유동방향에 수직인 축을 각각 Y_v, Z_v 라 정의하였다.

실험조건은 충돌각을 45° , 질량유량비를 1.0, 0.8, 0.6, 0.4로 설정하였으며, 유동방향으로의 측정범위는 충돌후 혼합이 활발히 일어나는 $X_v/X_0 = 1.1 \sim 2.5$ 로 하였다. 질량유량은 분류의 유속으로서 조정하였으며, 고속측 유속 $U_0 = 40\text{ m/s}$ [$Re (=UD_0/\nu) = 5.2 \times 10^4$]로 일정하게 유지하고, 저속측 유속 U_1 은 40 m/s ($Re = 5.2 \times 10^4$), 32 m/s ($Re = 4.2 \times 10^4$), 24 m/s ($Re = 3.1 \times 10^4$), 16 m/s ($Re = 2.1 \times 10^4$)로 조정하여 질량유량비가 1.0, 0.8, 0.6,

0.4가 되도록 하였다. 실험은 유동방향에 따라 7개의 측정단면을 설정하고, 각 설정된 위치에서 수평 및 수직방향으로 프로브를 이송하면서 계속하였다. 혼합류의 유동방향은 피토투브로서 유동장내의 최대압력점을 찾아 혼합류의 유동중심선을 구한 후 각 위치에서 유동중심선에 일치하도록 프로브를 설치하여 정밀측정을 실시함으로써 정확한 유동중심축을 구하였다. 수직 및 횡방향 측정은 프로브측을 각 지점에서 유동중심선의 접선방향과 일치하도록 이동시켜 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동중심계적

두 원형노즐에서 분사되어 형성되는 충돌분류는 두 분류가 기하학적 중심축에 대하여 축대칭을 이루고 있기 때문에 임의의 충돌각에 대하여 질량유량이 동일한 경우는 유동중심축이 노즐중심축과 22.5°의 각을 이루는 X축을 따라 대칭적으로 유동이 발달하지만, 질량유량이 상이한 경우는 Fig.3과 같이 질량유량이 큰 쪽의 관성력에 의하여 질량유량이 작은 쪽으로 유동중심축이 휘어지게 된다. 질량유량비에 따른 유동중심축의 편위량은 유동방향 거리에 따라 선형적으로 증가하는 독특한 양상을 보였으며, 질량유량비가 감소함에 따라 크게 증가되었다. 본 충돌유동의 경우 두 유체가 형상이 동일한 원형노즐로부터 분사되므로, 분출시의 유동단면적이 같고, 충돌시에도 유동면적이 동일하고 물리적 성질이 변하지 않은 이상적인 유동이라고 하면, 두 유체가 충돌후 합체가되어 운동하는 경우의 운동계적은 충돌전후의 운동량보존 법칙에 의해 개략적으로 구할 수 있다. 즉, X방향 운동량(J_x)과 Y방향 운동량(J_y)으로부터 편위각 $\theta_i = \tan^{-1}(J_y/J_x) = \tan^{-1}[\tan(\theta/2)\{(1-R^2)/(1+R^2)\}]$ 가 성립되므로 계산된 편위각(θ_i)과 실험으로부터 얻은 편위각(θ_e)을 비교하여 보면, R=0.8일때 $\theta_i=5.2^\circ$, $\theta_e=5.9^\circ$, R=0.6 일때 $\theta_i=11.0^\circ$, $\theta_e=12.0^\circ$, R=0.4일때 $\theta_i=17.1^\circ$, $\theta_e=18.1^\circ$ 로써 질량유량비가 작아질수록 충돌에 의한 복잡한 유동현상의 발생이 감소되므로 계산치와 실험치의 오차가 작아짐을 알 수 있었다.

4.2 유동중심축상의 평균속도분포

Fig.4는 질량유량비에 따른 유동중심축상의 X_v

방향 평균속도분포를 중심축상의 최대속도 U_{max} ($X_v/X_0=1.1$ 에서의 속도 U_m)로 무차원화하여 도시한 것이다. 모든 질량유량비에 대하여 유동방

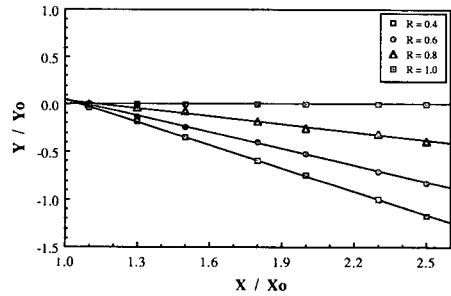


Fig. 3 Flow path lines of the maximum velocity

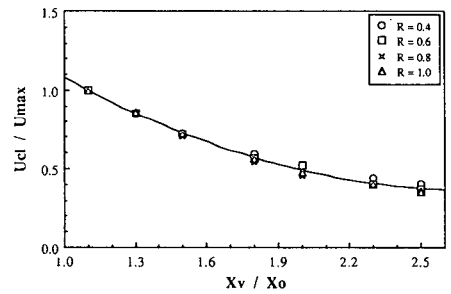


Fig. 4 Velocity deficit along the flow centerline

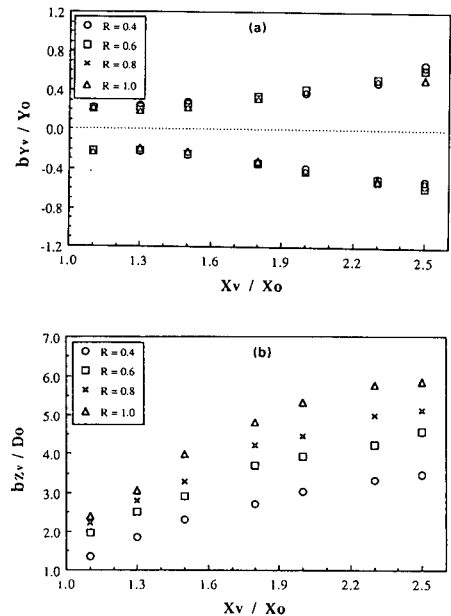


Fig. 5 Half-width variations of the mixing flows

항거리 X_v 에 따른 중심축 속도는 유동방향거리와 역비례관계를 유지하였으며, 중심축상의 최대속도 U_{max} 는 $R=1.0$ 일때 23.7 m/s, $R=0.8$ 일때 22.7 m/s, $R=0.6$ 일때 21.4 m/s, $R=0.4$ 일때 20.3 m/s로서 질량유량비가 감소함에 따라 감소되었다. 또한, 충돌점에 가까운 부분에서는 질량유량비가 클수록 속도가 커지나, 유동방향으로 감에 따라 그 반대현상이 나타났다. 이는 질량유량비가 클수록 충돌에 의한 유동손실의 증가와 강한 유동확산에 기인되는 것으로 사료된다. 모든 질량유량비에서 양호한 상사성을 보여주어 자유허형분류에서와 유사한 식(1)과 같은 유동중심축 속도변위 관계식을 만족하였다.

$$U_{c1}/U_{max} = 1.3667 / (X_v/X_0 + 0.0786) - 0.1596 \quad (1)$$

4.3 유동반쪽

충돌분류에 의하여 형성된 충돌후의 혼합영역에서 Y_v 방향의 유동반쪽은 노즐중심축을 따라 계속 운동하려는 관성력에 의하여 관성력의 영향이 크게 미치는 영역까지는 수축되어 감소되고, 그 이후에는 확산되어가고 있음을 알 수 있다. Z_0 방향 유동반쪽은 Y_v 방향의 유동반쪽이 수축됨으로 인하여 초기에는 급격히 증가되다가 충돌에 의한 관성력의 영향이 감소되는 영역 이후에는 유동속의 증가율이 둔화되는 현상으로 나타났다. Fig.5에서와 같이 전반적으로 Y_v 방향의 유동반쪽은 $X_v/X_0=1.3$ 인 단면에서 최소값을 나타내고, 그 이후는 거의 선형적인 증가를 보였으며, 질량유량비에 따라 거의 변화하지 않았으나 질량유량비가 감소함에 따라 미소하게 증가하였다. 질량유량이 다른 경우 Y_v 방향 유동반쪽은 고속분류의 영향으로 고속축의 유동속도

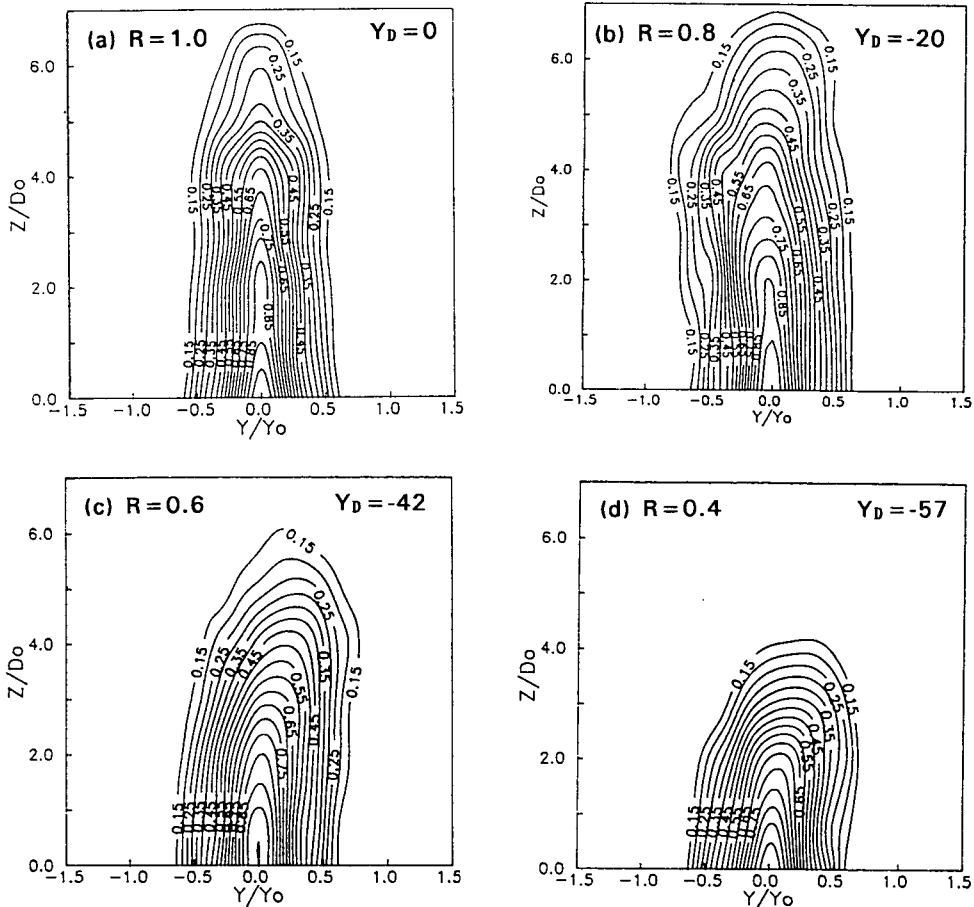


Fig. 6 Iso-velocity contours of the mixing flow cross section ($X/X_0=1.8$)

분포가 증가되어 고속측의 유동반폭이 저속측의 유동반폭보다 약간 더 크게 나타났다. Z_0 방향 유동반폭은 질량유량비에 따라 $X_0/X_0=1.8\sim 2.0$ 단면까지는 급격히 증가되나, 그 이후 영역에서는 증가구배가 둔화되는 경향을 보였으며, 질량유량비가 감소함에 따라 충돌에너지의 감소에 의하여 확산현상이 크게 감소하였다.

4.4 유동단면

유동단면 형상은 일반적으로 $U_m/2$ 의 위치를 측정하여 도시하고 있으나 강한 난류의 경우에는 전체단면의 유동형태를 정확하게 분석하기가 어렵다. 특히 질량유량이 다른 충돌유동의 경우는 유동구조가 복잡하여 전체적인 경향을 파악하기가 더욱 힘들기 때문에 본 연구에서는 전체단면의 평균속도분포를 도시함으로써 유동가시화의 효과를 나타내고자 하였다. Fig.6은 질량유량비에 따라 합성평균속

도를 유동중심축의 최대속도 U_m 으로 무차원화하고, Y 축 및 Z 축은 각각 Y_0, D_0 로 무차원화한 등속선도를 보여주고 있다. 질량유량비 R 이 1.0인 경우 충돌후 유속이 $U_m/2$ 인 유동단면은 유동질량의 관성력 및 유체의 점성력에 의하여 Y 방향은 수축되고 Z 방향은 상대적으로 크게 확산되어 타원과 유사한 확대칭 형상을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 질량유량비가 작아짐에 따라 유동단면이 비대칭적으로 발달되고 있으며, 저속측으로 휘어지는 양상을 보이고, 중심축은 X 축으로부터 크게 편심(Y_0 는 편심량)되어 있음을 알 수 있다. 또한 유동단면의 Z 축 역시 휘어져 전단면은 바나나 형상을 보여주고 있다. 충돌질량유량비의 감소는 충돌후에 발달되는 혼합류의 질량유량의 감소를 가져오므로 동일한 축방향의 위치($X/X_0=1.8$)에서 측정된 단면의 크기가 질량유량비 R 의 감소와 함께 크게 감소하고, 충돌관성력에 의해 나

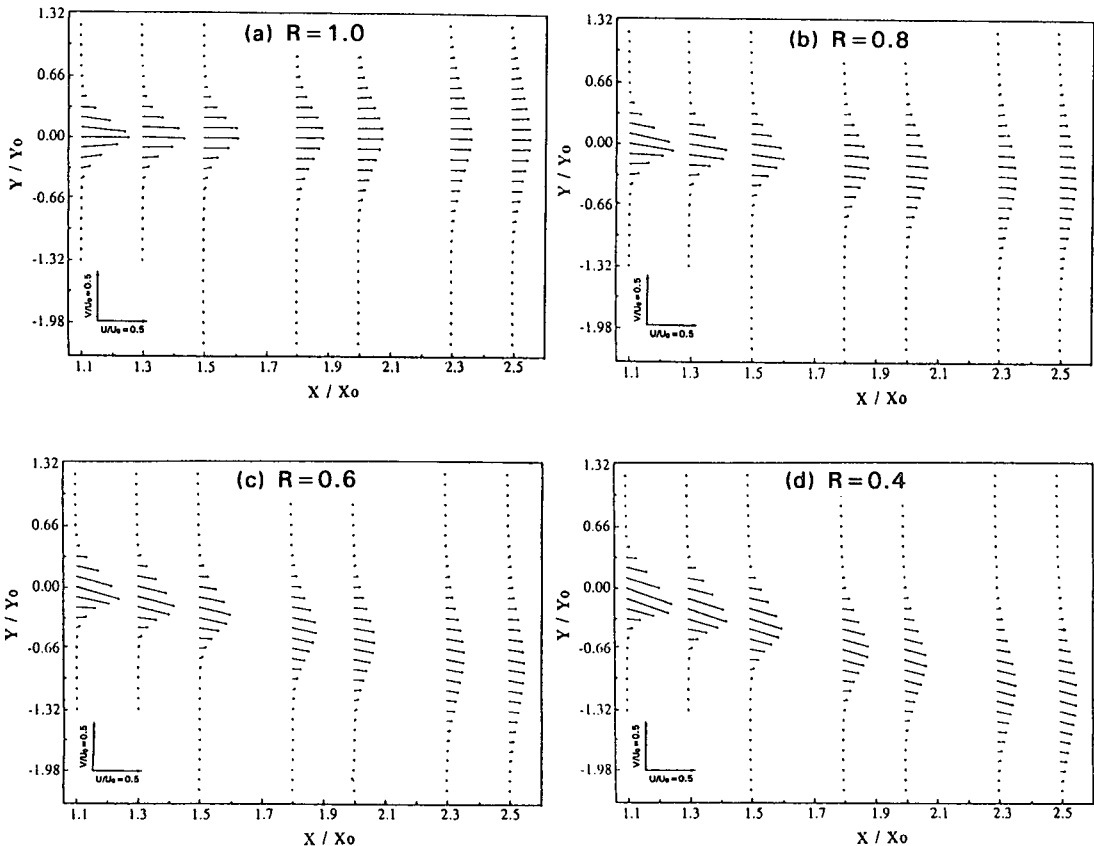


Fig. 7 Flow profiles of the resultant velocity in the horizontal center plane

타나는 급수축 급팽창의 영향이 두드러지게 약화되어 확산유동이 보다 자연스럽게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4.5 2차원 유동장

Fig.7은 각 위치에서의 유동방향 및 유속분포의 크기를 비교검토하기 위하여 합성평균유속을 노즐 출구속도 U_0 로 무차원화하여 도시한 벡터선도이다. 모든 질량유량비의 경우 유동중심축에서 최대 속도값을 보여주고, 유동중심축을 기준으로 유동방향이 서로 반대로 바뀌었다. 질량유량이 동일한 경우 다른 경우와는 달리 유동중심축에 대하여 서로 대칭인 양상을 보이며, 충돌점 근방에서는 유동방향이 중심축을 향하는 수축유동형태를 나타내었다. 질량유량비가 작아짐에 따라 고속분류의 관성력의 영향으로 Y방향의 음속도성분이 증가하여 속도벡

터방향의 저속분류측으로의 편위가 증대되었다. 또한, 유동방향으로 감에 따라 급속한 확산이 일어나 완만한 속도분포선도를 보여주었다.

질량유량비에 따라 유동중심평면의 유동형태를 가시적으로 표현하기 위하여 합성평균속도를 노즐 출구속도 U_0 로 무차원화한 2차원 유동장의 등속도 선도를 Fig.8에 도시하였다. 질량유량비가 1.0인 경우는 중심축에 대하여 대칭인 유속분포를 이루나, 질량유량비가 작아질수록 저속측에서 최대속도 분포가 나타나 유동장이 휘어져 발달되는 불안정한 유동형태를 보여주었다. 유동중심축의 편위는 질량유량비가 작아질수록 더 커지며, 평균속도분포의 크기는 질량유량비가 커질수록 증가하였다.

4.6 3차원 유동장

Fig.9는 질량유량비에 따라 유동속도가 유동중심

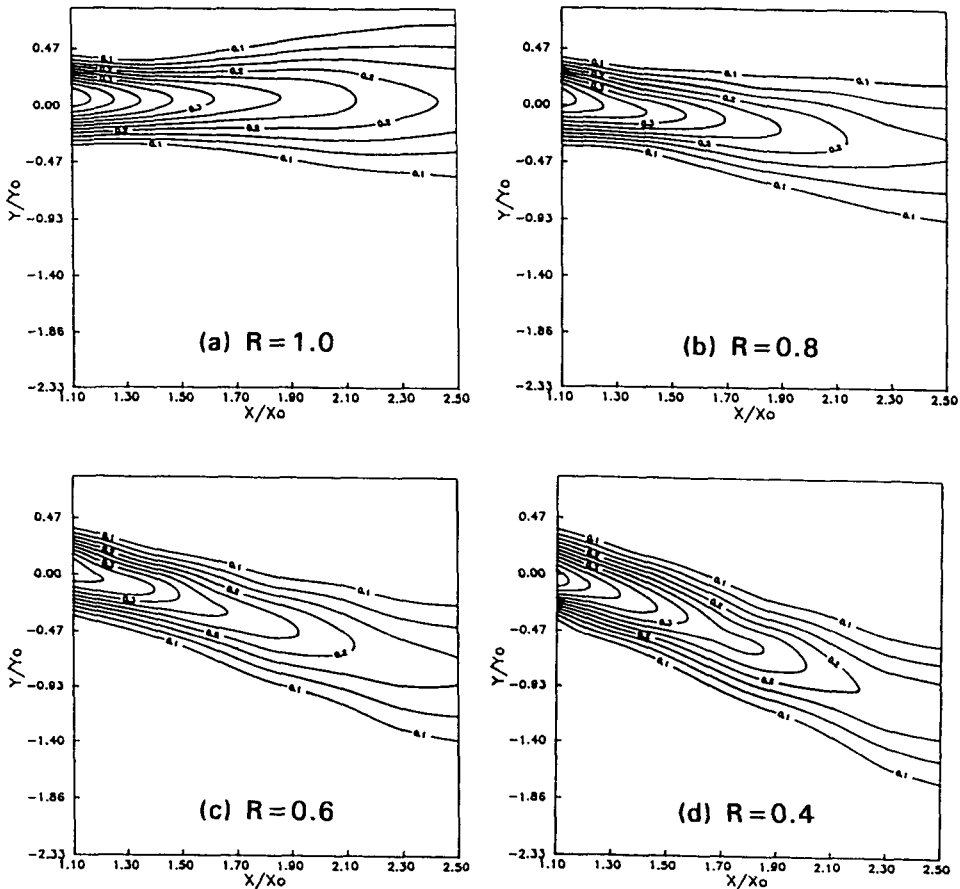


Fig. 8 Iso-velocity contours of the resultant velocity in the horizontal center plane

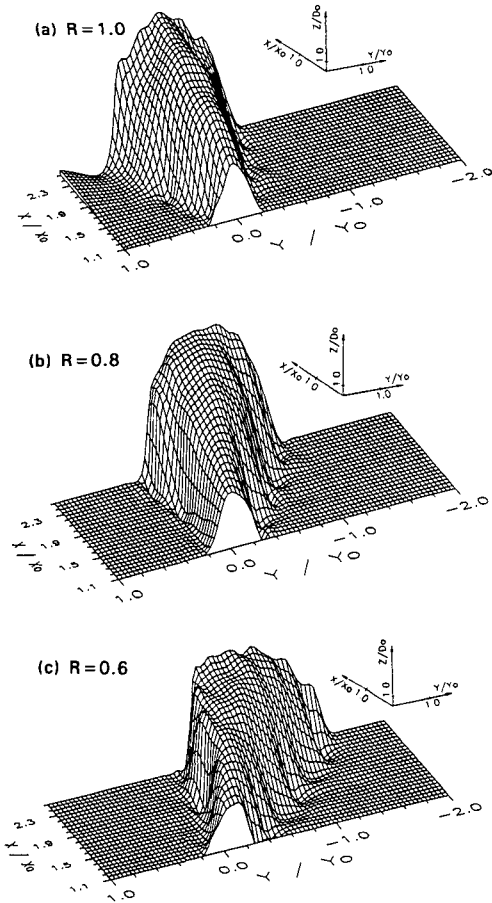


Fig. 9 Topologies of the three-dimensional flow structure

속속도의 절반($U_m/2$)인 위치를 측정하여 각축을 X_0, Y_0, D_0 로 무차원화하여 $X-Y-Z$ 좌표계에 도시한 3차원 유동장을 보여주고 있다. 가시화가 불가능한 3차원적 유체유동구조의 형상을 도식적으로 가시화함으로써 유동구조의 입체적 형태를 분석할 수 있어 유동장의 발달을 이해하는데 효과적이었다. 유동구조의 입체적 형태를 실제적으로 도시하기 위하여 유동반쪽 영역에서 측정함으로써 외측부의 난동에 의한 불안정성을 극소화하였으나, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 질량유량비의 감소에 따라 혼합류의 형성에서 불안정한 비대칭성이 증가하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

노즐형상이 동일한 두 원형분류의 충돌각이 45°

인 경우 충돌질량유량비의 변화($0.4 \leq R \leq 1.0$)에 따른 충돌혼합유동에서 2차원 유동장 및 속도분포와 3차원 Topology 등으로 도시함으로써 혼합유동구조를 가시적으로 구명할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 질량유량이 동일한 충돌유동의 경우 유동이 대칭적으로 발달되나, 질량유량이 상이한 충돌유동의 경우 유동이 저속분류측으로 휘어져 발달됨으로 인한 유동중심축의 편위는 유동방향의 거리($1.1 \leq X_v/X_0 \leq 2.5$)와 선형관계를 유지하였으며, 유동중심축의 편위각(θ_c)은 $R=0.8$ 일때 5.9° , $R=0.6$ 일때 12.0° , $R=0.4$ 일때 18.1° 였다.

(2) 유동중심축상의 속도는 모든 질량유량비에 대하여 자유원형분류와 유사하게 유동방향 거리와 역비례 관계를 유지하였으며, 유동중심축상의 최대속도는 $R=1.0$ 일때 23.7 m/s , $R=0.8$ 일때 22.7 m/s , $R=0.6$ 일때 21.4 m/s , $R=0.4$ 일때 20.3 m/s 로서 질량유량비가 감소함에 따라 감소되었다.

(3) 유동반쪽은 질량유량비의 변화에 따라 수평(Y_v)방향은 큰 차이가 없으며, 전반적으로 $X_v/X_0=1.3$ 단면에서 최소값을 나타내었다. 반면 수직(Z_v)방향은 질량유량비의 증가에 따라 큰 증가를 보여주었으며, $X_v/X_0=1.8 \sim 2.0$ 단면 이후에는 증가구배가 둔화되었다.

(4) 유동단면은 질량유량이 동일한 경우 축대칭형상을 이루나 질량유량이 상이한 경우 내부영역에서는 타원현상을 이루며, 외부영역으로 갈수록 고속분류측으로 휘어지는 비대칭형상을 보였다. 또한, 유동방향으로 갈수록 수직축이 고속분류측으로 더욱 크게 휘어지는 불안정한 비대칭 형상을 보였으며, 질량유량비가 감소함에 따라 충돌에너지의 감소에 의하여 유동단면이 작아졌다.

참고문헌

- (1) Yule, A.J., 1978, "Large Scale Structures in the Mixing Layer of a Round Jet," J. of Fluid Mechanics, Vol.89, part 3, pp.413~432.
- (2) Weir, A.D., Wood, D.H. and Bradshaw, P., 1981, "Interacting Turbulent Shear Layers in a Plane Jet," J. of Fluid Mechanics, Vol.107, pp. 237~260
- (3) Chan, W.T. and Ko, N.W.M., 1978, "Coherent Structure in the Outer Mixing Region of an

- Annular Jets," J. of Fluid Mechanics, Vol.89, part 3, pp.515~535.
- (4) Yowakim, F.M. and Kind, R.J., 1988, "Mean Flow and Turbulence Measurements of Annular Swirling Flows," ASME J. of Fluids Engineering, Vol.110, pp.257~263.
- (5) Elbanna, H. and Sabbagh, J.A., 1987, "Interaction of Two Nonequal Plane Parallel Jets," AIAA J., Vol.25, No.1, pp.12~13.
- (6) Ko, W.M. and Lam, K.M., 1989, "Flow Structures of Coaxial Jet of Mean Velocity Ratio 0.5," AIAA J., Vol.27, No.5, pp. 513~514.
- (7) Gutmark, E. and Wolfshtein, M., 1978, "The Plane Turbulent Impinging Jet," J. of Fluid Mechanics, Vol.88, part 4, pp.737~756.
- (8) Masuda, W. and Andoh, S., 1989, "Turbulence Structure in a Initial Mixing Region of a Two-Dimensional Curved Jet," AIAA J., Vol. 27, No.8, pp.1038~1043.
- (9) Witze, P.O. and Dwyer, H.A., 1976, "The Turbulent Radial Jet," J. of Fluid Mechanics, Vol. 75, part 3, pp. 401~417.
- (10) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow," J. of Fluid Mechanics, Vol. 138, pp. 93~127.
- (11) Sherif, S.A. and Pletcher, R.H., 1989, "Measurements of the Flow and Turbulence Characteristics of Round Jets in Crossflow," ASME J. of Fluids Engineering, Vol.111, pp.165~171.
- (12) 노병준, 김장권, 1986, "45° 원형 충돌분류의 통계학적 난류특성 연구," 대한기계학회논문집, 제10권, 제1호, pp.110~120.
- (13) Rho, B.J., Kim, J.K. and Dwyer, H.A., 1990, "Experimental Study of a Cross Jet," AIAA J., Vol.28, No. 5, pp.784~789.
- (14) Schweiger, G., 1983, "Regular Structures in a Plane Triple Jet," ASME J. of Fluids Engineering, Vol.105, pp.42~46.