

〈論 文〉

## 3-D LDV 시스템을 이용한 타원제트의 난류특성에 관한 연구

권영철\* · 이상준\*\*

(1991년 7월 29일 접수)

### Experimental Investigation on the Turbulent Elliptic Jets by Using a 3-D LDV System

Young Chel Kweon and Sang Joon Lee

**Key Words:** 3-D LDV (3차원 레이저 유속계), Elliptic Jet (타원제트), Turbulent Characteristics (난류특성), Coherent Structure (응집구조), Aspect Ratio (종횡비)

#### Abstract

Three-dimensional turbulent structures in the near field of elliptic jet were experimentally investigated by using a three-color, three-component Laser Doppler Velocimeter. The Reynolds number based on the nozzle exit velocity and nozzle equivalent diameter ( $De$ ) was about  $4 \times 10^4$ . The turbulent characteristics of a sharp-edged elliptic nozzle with aspect ratio of 2 were analyzed along major and minor axis at  $X/De=2, 3, 5, 7$  and along the centerline up to  $X/De=14$ . Quantities measured at each point with the 3-D LDV system were three orthogonal velocity components, turbulent intensity, skewness, flatness, and Reynolds shear stress. The nondimensional mean velocities coincided well with the Schlichting's empirical curve with going downstream. Elliptic jet of  $AR=2$  had two switching points at about  $X/De=2$  and 16. The turbulent intensity along the minor axis was distributed widely than that along the major axis. In the near field,  $X/De < 5$ , the Reynolds shear stresses of the inner part of the elliptic jet had negative value, which indicated the enhancement of entrainment toward the inner part.

#### 기호설명

$a$	: 타원노즐의 장축반경	$\sqrt{\overline{u^2}/U_o}, \sqrt{\overline{v^2}/U_o}, \sqrt{\overline{w^2}/U_o}$	
$AR$	: 종횡비 ( $a/b$ )	$U$	: $X$ 축방향의 평균속도
$b$	: 타원노즐의 단축반경	$Um$	: 제트 중심축에서의 $X$ 축방향 최대 평균속도
$De$	: 타원노즐의 등가반경 (60mm)	$Uc$	: 제트 중심축에서의 $X$ 축방향 평균속도
$Fu, Fv, Fw$	: $X, Y, Z$ 축 방향의 편평도; $\overline{u^4}/$ $\overline{(u^2)^2}, \overline{v^4}/\overline{(v^2)^2}, \overline{w^4}/\overline{(w^2)^2}$	$Uo$	: 노즐 출구속도 (10m/s)
$H_Y, H_Z$	: $Y, Z$ 축 방향의 제트반폭	$\overline{uw}, \overline{vw}, \overline{uw}$	: 레이놀즈 전단응력
$Su, Sv, Sw$	: $X, Y, Z$ 축 방향의 비대칭도; $\overline{u^3}/$ $\overline{(u^2)^{3/2}}, \overline{v^3}/\overline{(v^2)^{3/2}}, \overline{w^3}/\overline{(w^2)^{3/2}}$	$X, Y, Z$	: 타원제트의 좌표축
$u', v', w'$	: $X, Y, Z$ 축방향의 난류강도;		

\*정회원, 포항공과대학 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 포항공과대학 기계공학과

## 1. 서 론

실제 공학분야에서 일어나는 유체현상의 대부분은 난류유동이며 유동조건에 따라 다른 유동특성을 지니고 있다. 제트유동은 혼합(mixing)과 추력(thrust)의 증대 및 유동자체의 기본적인 특성으로 그동안 많은 연구가 수행되어왔다<sup>(1)</sup>. 그러나 난류전단층내에서 일어나는 복잡한 와 유동으로 인해 대부분의 연구는 원형제트에 관한 것이었다. 제트의 대규모(large scale) 응집구조(coherent structure)는 난류유동의 성장과 확산 그리고 유입(entrainment)에 큰 역할을 한다. 그러나 강한 유입과 혼합현상이 존재하는 근접 유동장의 난류특성을 체계적으로 다룬 연구는 그리 많지 않다. 근접 유동장에 관한 해석은 연료분사, 혼합과정, 항력감소, 공기역학적 소음문제등과 매우 밀접한 관계를 가진다. 제트의 유동특성을 응용한 예로는 반응로, 연소실, 열교환기, 에어 커튼, 항공기의 저저항(low drag) 날개와 고양력 수직이착륙기(V/STOL) 개발등에 응용되고 있다.

최근 혼합효과 극대화의 일환으로 타원제트가 많이 연구되고 있다. 그러나 타원제트는 기본 유동현상과 이론모델이 복잡하여 아직까지 단순화된 모델과 실험적 방법에 의해 연구되고 있다. 타원제트는 장, 단축을 따른 다른 응집구조로 인하여 원형제트보다 큰 유체유입률을 가진다고 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 정체된 유체내로 분사되는 제트는 노즐의 기하학적 조건에 따라 다른 응집구조의 생성, 성장 및 상호간섭을 가지므로, 이 응집구조를 연구함으로써 제트의 혼합과 유입현상을 살펴볼 수 있다. 타원노즐 출구면으로부터 근접영역에 발생하는 와류(vortical)구조는 와(vortex)가 형성된 후, 3차원의 방사(azimuthal)변형하면서 상호간섭을 한다. 이 와의 형성, 변형, 그리고 상호간섭이 제트와 주위 유체 간의 유입과 혼합을 증대시키는 주된 메커니즘으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>.

Viets와 Sforz<sup>(4)</sup>는 고립된 타원 와류링에 관한 연구에서 장, 단축이 교차하는 축교차현상(axis-switching)을 확인하였다. Dhanak와 Bernardinis<sup>(5)</sup>는 4가지 종횡비를 가진 평면 와류링의 전개과정을 cut-off 근사법을 사용하여 수치적으로 해석하였으며 유동가시화 방법으로 원형과 타원 오리피스로부터 생성되는 와류링을 서로 비교하였다. 그들

은 타원 와류링의 축교차현상과 와류링의 발달과정을 밝혔으며, 특히 종횡비 5의 오리피스로부터 생성된 와류링이 2개의 와류링으로 분리되는 현상(bifurcation)을 발견하였다. Ho와 Gutmark<sup>(2,6)</sup>는 면적비가 12.5 : 1이며 종횡비가 2인 수축노즐을 이용하여 기진된 타원제트의 necking, bending, merging등과 같은 현상을 관찰하였으며, 이 실험에서 타원제트가 장, 단축을 따른 비대칭 응집구조에 의한 자기유도(self-induction) 및 방사방향의 와류링 변형과 상호간섭으로 원형제트보다 더 큰 유체유입률을 가진다고 밝혔다. Gutmark와 Schadow<sup>(7)</sup>는 종횡비가 3인 슬롯노즐과 테이퍼진(tapered) 노즐의 유동특성을 연구함으로써 노즐의 형상변화를 통하여 유입과 혼합을 제어할 수 있음을 보였다.

LDV를 사용한 제트유동에 관한 연구로 Kotsosovinos<sup>(8)</sup>는 평면제트의 축방향 속도성분의 확률밀도함수를 구하여 제트유동에 존재하는 역류유동을 확인하였다. Lau et al<sup>(9,10)</sup>은 레이저 유속계를 이용하여 구한 원형제트의 축방향 속도성분에 대한 확률밀도함수를 열선 풍속계로 구한 결과와 비교하여 레이저 유속계의 유용성을 보였다. Morrison et al<sup>(11)</sup>은 121 : 1의 수축비를 가진 돌연 확대관에서의 제트유동을 이보다 적은 수축비를 가진 돌연 확대관 및 자유제트와 비교 연구하였다.

날카로운 모서리를 가진 슬롯노즐은 수축노즐의 경우보다 유입과 혼합을 효과적으로 증대시킨다고 알려져 있다<sup>(12,13)</sup>. 따라서 본 연구에서는 날카로운 모서리를 가진 타원제트( $AR=2$ )의 근접 영역에서 제트의 난류구조 및 축교차현상을 3-D LDV 시스템을 이용하여 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구는 최대 풍속이 40m/s, 시험부 크기가 400mm×400mm이며 수축비가 9 : 1인 개방형 아음속 풍동에서 수행되었다. Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 타원형 슬롯노즐의 개략도와 좌표계를 나타낸다. 여기서  $a$ 는 장축의 반경(42.4mm)을,  $b$ 는 단축의 반경(21.2mm)을 가리킨다. 노즐의 동가지름(equivalent diameter,  $D_e$ )은 60mm이다. 본 연구에 사용되어진 타원형 슬롯노즐은 두께 4mm의 황동판으로 45° 경사진 날카로운 모서리를 가지도

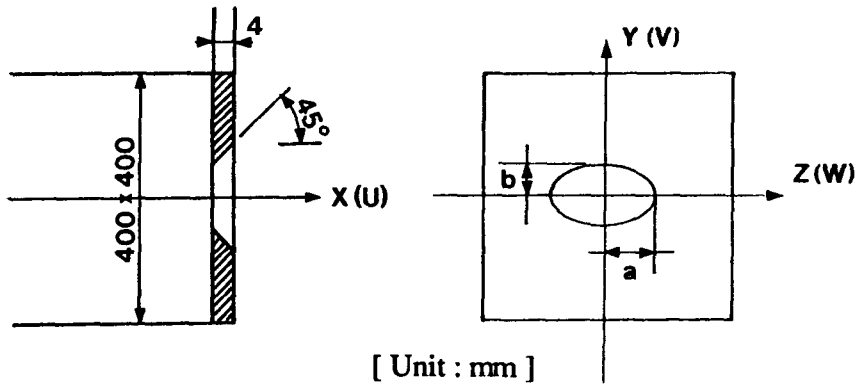


Fig. 1 Schematic of the elliptic nozzle

록 제작되었다. 실험하는 동안 제트출구의 평균속도( $U_0$ )를 10m/s로 유지하였으며, 등가노즐직경에 기준한 레이놀즈 수는  $4 \times 10^4$ 이었다. 제트의 초기 영역( $X/D=1$ )에서 측정된 축방향의 난류강도는 약 2%이었다.

본 연구에 사용되어진 3-Color, 3-Component LDV 시스템(TSI 9100-12)은 레이저, 집광기와 흡광기, 광전관 및 주파수 편이기, 신호분석기, IBM PC/AT등으로 구성되어 있다. 각종 광학장치의 배열로  $0.06\text{mm} \times 0.06\text{mm} \times 0.24\text{mm}$ 의 공간분해능을 가진 측정체적부를 형성하며, 이 체적부를 지나는 유체입자의 순간속도를 green(514.5nm), blue(488nm), violet(476.5nm)의 서로 다른 파장을 가진 3가지 칼라로 각각 분리하여 3차원 속도성분을 동시에 측정한다. 측정 가능한 속도범위는 약  $2\text{mm/s} \sim 1.2\text{km/s}$  정도이다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에서는 타원제트의 근접위치에서의 난류특성을 조사하기 위하여 노즐출구면에서 하류방향으로  $X/De=2, 3, 5, 7$ 위치단면에서  $Y, Z$ 축을 따라 3차원 속도성분을 측정하였으며, 또한 제트중심축을 따라  $X/De=1 \sim 14$ 구간에서 유동속도를 측정하였다. 실험시 자동이송장치를 이용하여 LDV 시스템을 원하는 위치로 0.01mm의 정확도로 이동하였다. 각 측정점에서 동시에 측정된 3축방향 속도성분으로부터 평균속도, 난류강도, 비대칭도(skewness), 편평도(flatness) 및 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress)등을 구하였다. 한 측정점에서 10K 바이트의 순간속도 데이터를 추출하여

통계처리 하였으며, 이 방법으로 평균속도의 경우는 2%이하, 난류강도의 경우는 5% 이하의 불확실성을 가진다.

LDV 시스템으로 유속측정시 산란입자의 선정은 중요하다. 이는 산란입자의 크기, 무게, 공급량에 따라 측정 정확도가 달라지기 때문이다. 또한 속도 바이어스(bias) 현상도 제거하여야 한다. 본 실험에서는 입자시딩(seeding)을 위하여 프로필렌 그리콜(propylene glycol)과 물의 혼합액을 아토마이저(atomizer)에 주입하였다. 프로필렌 그리콜의 평균 입자반경은  $2\mu\text{m}$ , 평균 입자농도는  $10^5 \text{ particles/cm}^3$ 이며 물 입자의 평균반경은  $1 \sim 2\mu\text{m}$ , 평균 입자농도는  $6 \times 10^6 \text{ particles/cm}^3$ 이다. 이들 입자의 크기는 측정체적부의 프린지 간격( $3\mu\text{m}$ )보다 적다. 입자공급은 유체의 흐름을 방해하지 않으면서도 가능한 최대로 하기 위하여 아토마이저의 에어로졸 유동률(aerosol flow rate)을 약 1 liter/min로 유지하였다.

실험시, 노즐과 LDV 시스템의 좌표축을 일치시키기 위하여 미세조정을 하였고, 가능한 외부 교란(통풍)에 의한 영향이 제트유동에 미치지 않도록 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 제트중심축을 따라 구한 축방향 평균속도의 감소와 난류강도  $u'$ 의 변화를 나타내며 Quinn<sup>(12)</sup>의 실험결과와 비교하였다. 여기서 축방향 거리  $X$ 는 등가직경( $De$ )으로 무차원화 시켰다. 타원제트의 중심축 평균속도는 원형제트보다 큰 감소

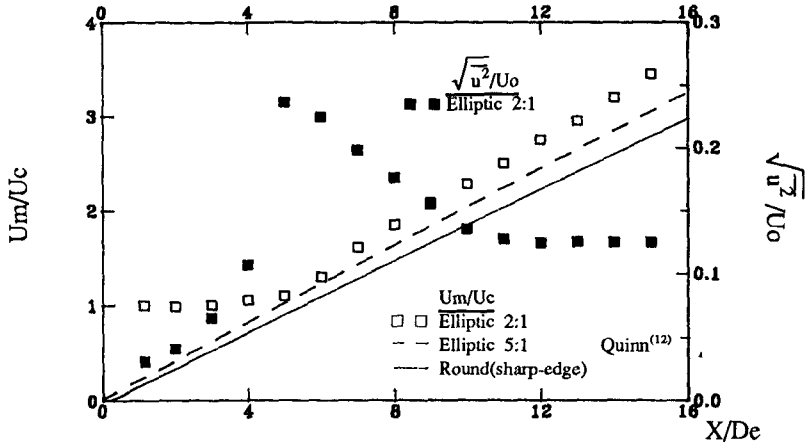


Fig. 2 Decay of mean streamwise velocity and variation of the streamwise turbulent intensity along the centerline

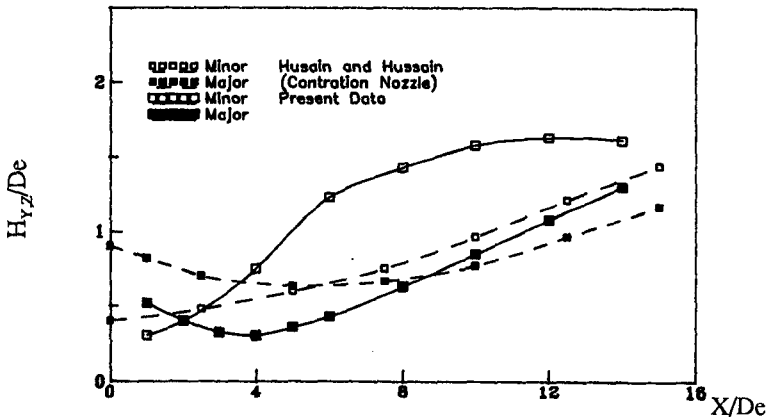


Fig. 3 Development of the half width with the downstream distance

울을 보여주며, 종횡비가 5인 Quinn의 경우보다도 속도감소율이 크다. 이는 종횡비가 2인 타원제트의 폭이 더 넓게 확장됨을 의미하며, 따라서 혼합과 유입이 증가됨을 알 수 있다.

축방향 난류강도  $u'$ 은 노즐출구로부터 하류로 나아감에 따라 크게 증가하다가 약  $X/De=5$ 부근에서 최대값을 가진 후 감소하며  $X/De>12$ 에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 노즐의 기하학적 형태와 관계한다<sup>(7,14)</sup>. 이것으로부터 수축노즐이나 둥근 모서리를 가진 슬롯노즐에 비해 날카로운 모서리를 가진 슬롯노즐은 오리피스 효과와 날카로운 모서리에 의한 와류유출등으로 노즐출구면 부근의 유동이 매우 활발함을 알 수 있다.

Fig. 3은 타원제트의 제트반폭을 Husain과 Hussain<sup>(15)</sup>의 수축노즐의 결과와 비교한 것이다. 타원제트 출구면에서는 장축반폭이 단축반폭보다 크다. 그러나  $X/De<4$ 구간에서 장축반폭은 계속 감소하며 단축반폭은 증가하고 있다. 하류로 나아감에 따라 단축의 제트반폭이 장축보다 더 크게되므로 타원제트의 장, 단축이 상호교차됨을 알 수 있다. 축교차위치는  $X/De=2$ 와 약 16부근에서 나타나고 있다. 또한 날카로운 모서리를 가진 슬롯노즐은 오리피스 효과로 잘 디자인된 수축노즐보다 노즐출구면 가까이에서 축교차현상이 발생함을 알 수 있다.

종횡비  $AR=2$ 인 타원제트의  $X/De=2, 3, 5, 7$

위치단면에서의 축방향 평균속도를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 속도성분은 중심축에서의 축방향 평균속도  $U_c$ 로, 장 단축 방향 거리  $Z, Y$ 는 반경 방향의 속도반폭( $H_z, H_y$ )으로 무차원화시켰다. 축방향 속도성분  $U$ 는 와 점성계수가 일정하다는 가정 하에서 구한 다음과 같은 Schlichting의 실험식과 비교하였다. 장, 단축을 따라 구한 축방향 평균속도  $U$ 는  $X/De$ 가 증가할수록 Schlichting의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

$$\frac{U}{U_c} = \left[ 1 - (0.441 \times \frac{r}{b})^{1.5} \right]^2$$

Fig. 5와 Fig. 6은 장, 단축을 따라 측정된 3축방향 속도 변동성분을 노즐 출구속도( $U_0$ )로 무차원화한 난류강도  $u', v', w'$ 이다. Fig. 5의 축방향 난류강도  $u'$ 은  $X/De=2, 3$ 인 위치단면의  $Z/H_z < 0.3$ 인 코어영역에서 균질유동의 특성을 다소 가지며  $X/De=2, 3, 5$  단면에서 속도구배  $\frac{\partial U}{\partial Y}, \frac{\partial U}{\partial Z}$ 가 최

대가 되는 약  $Z/H_z=0.9$ 부근에서 최대값을 가진다. 그리고 장축을 따라 측정된 난류강도  $w'$ 로부터 방사방향으로 강한 난류유동이 존재함을 알 수 있다. Fig. 6에서 축방향 난류강도  $u'$ 은  $X/De=2, 3$  단면에서 장축을 따라 구한 난류강도 분포와는 달리 약  $Y/H_y=2$ 까지 큰 값을 나타내고 있다. 이로부터 노즐출구면 가까이에 장축보다 단축방향으로 더 강한 난류유동이 존재함을 알 수 있다. 그리고 장축의 난류강도  $v'$ 과 단축의  $w'$ 은 유사한 분포를 가지고 있으며, 장축의  $w'$ 과 단축의  $v'$ 도 비슷한 유동특성을 보이고 있다. 이는 타원제트 난류구조의 유니버설 거동을 암시하는 것으로 사료된다.

타원제트의 장, 단축을 따라 구한 3축방향 속도성분의 비대칭도 분포를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. Fig. 7에서 속도성분  $u$ 의 비대칭도  $S_u$ 는  $X/De=2, 3$ 단면의  $Z/H_z=0.5$ 부근에서 큰 음의 값을 가지며 같은 위치에서  $S_w$ 는 양의 값을 가진다. 또한  $S_u$ 와  $S_w$ 는  $X/De=5, 7$ 단면의 제트 내부에서 거의 정규분포에 가까운 값을 나타내고

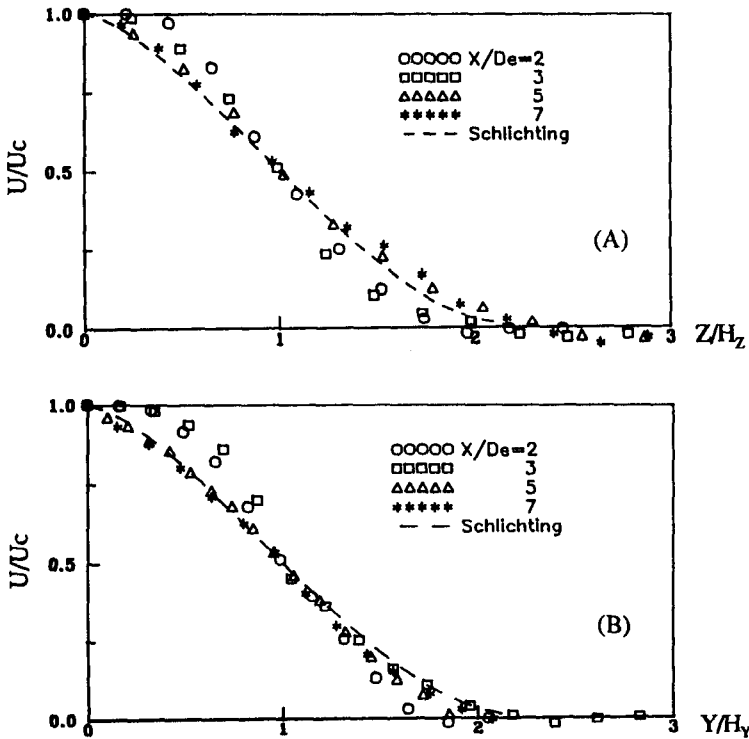


Fig. 4 Mean streamwise velocity profiles of the elliptic jet (A) the major axis : (B) the minor axis

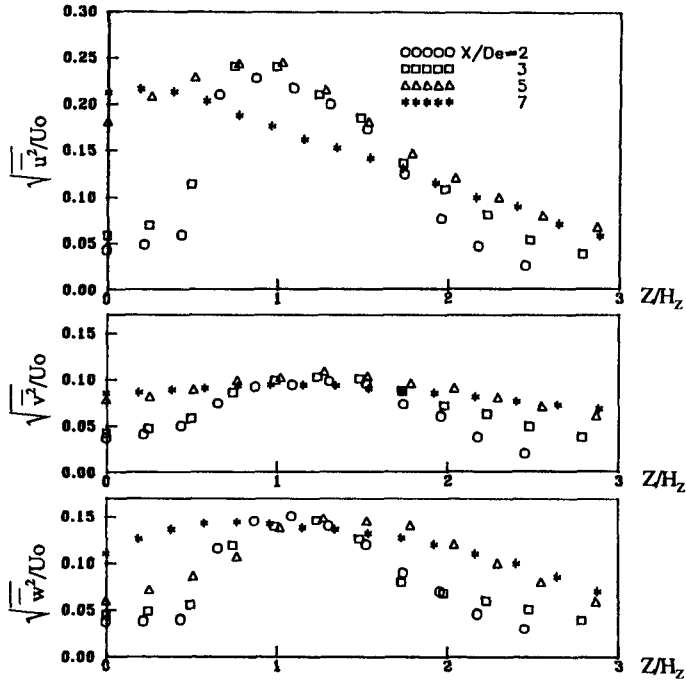


Fig. 5 Turbulent intensity profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the major axis of the elliptic jet

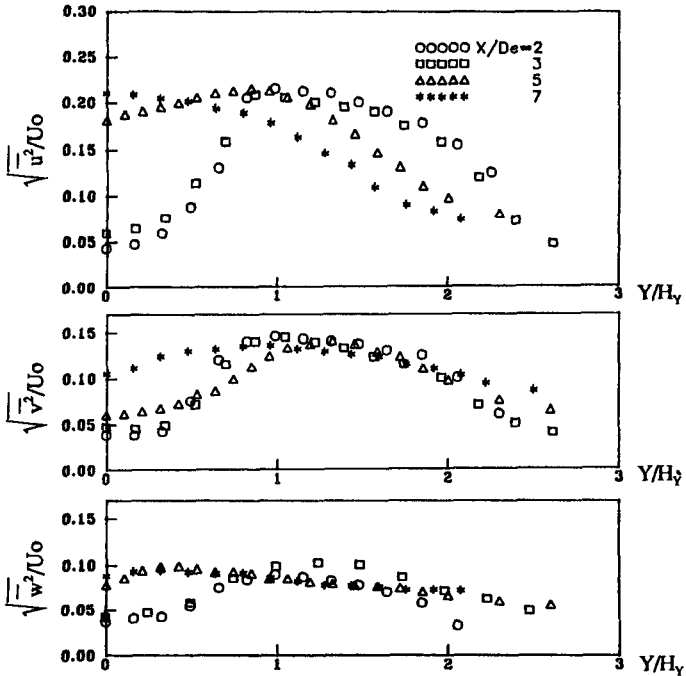


Fig. 6 Turbulent intensity profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the minor axis of the elliptic jet

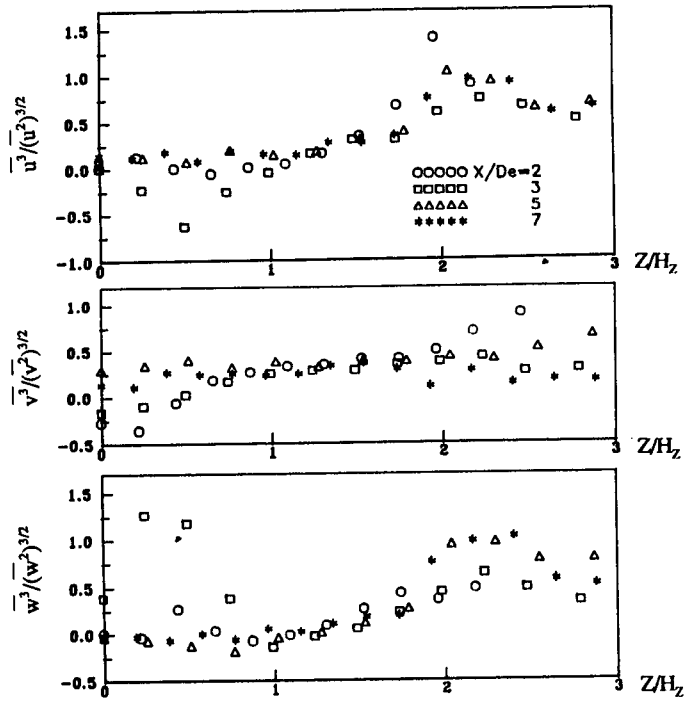


Fig. 7 skewness profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the major axis of the elliptic jet

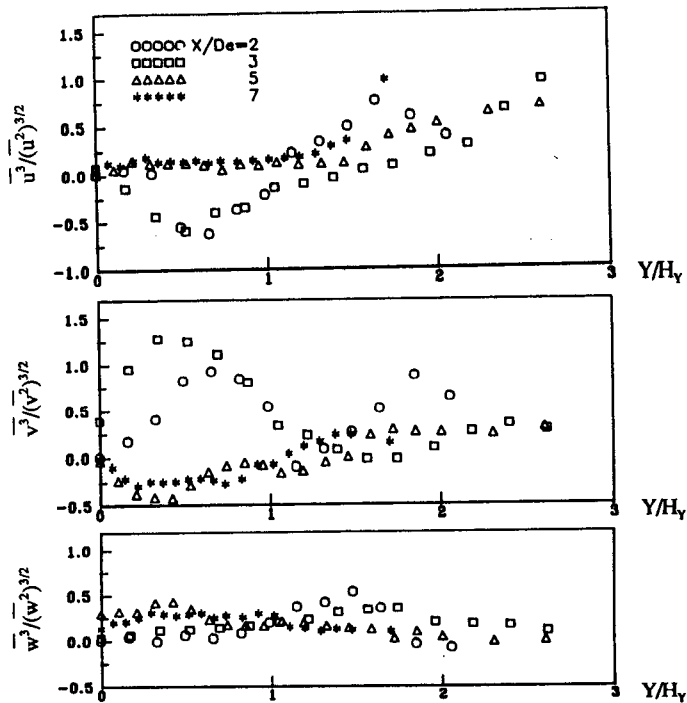


Fig. 8 Skewness profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the minor axis of the elliptic jet

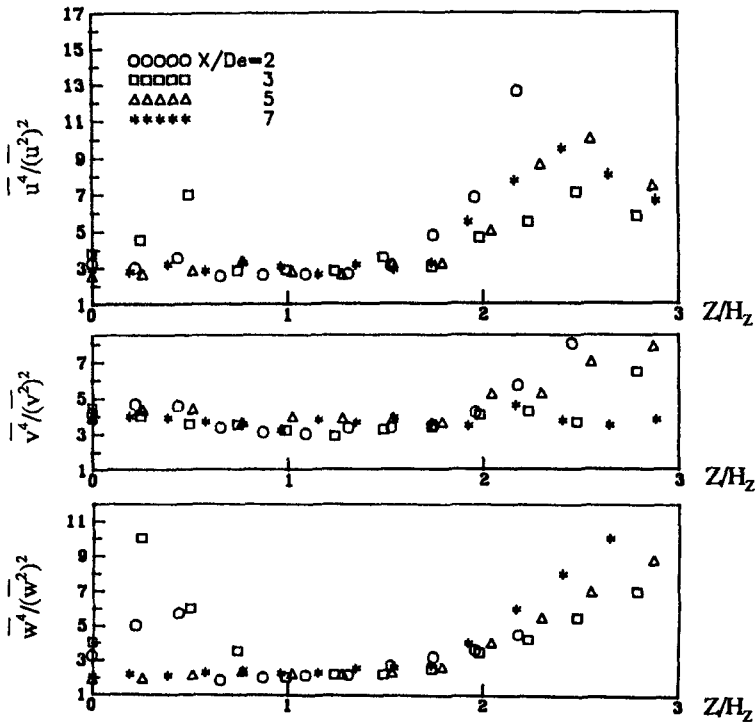


Fig. 9 Flatness profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the major axis of the elliptic jet

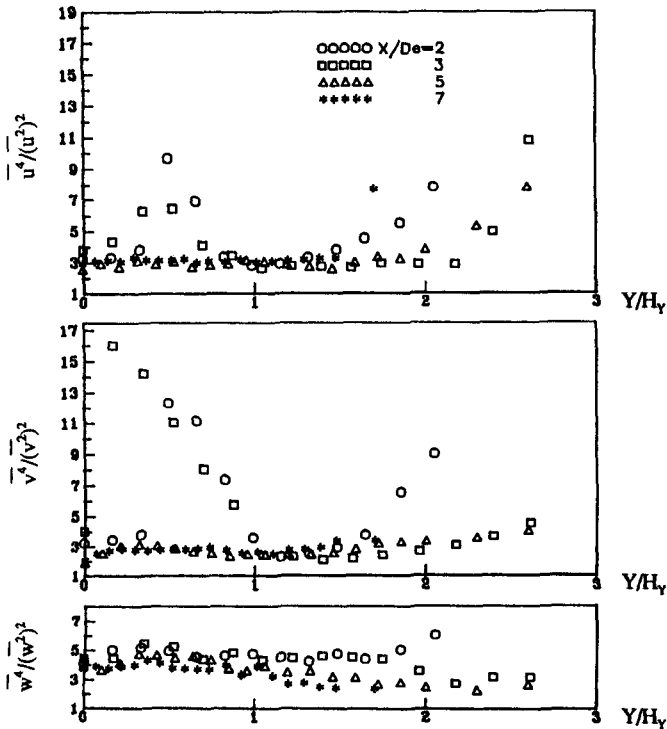


Fig. 10 Flatness profiles of X-, Y-, and Z-velocity components along the minor axis of the elliptic jet



있다. 장축방향의  $S_v$ 는  $X/D=2$ , 3단면의 약  $Z/H_z=0.5$  부근에서 비대칭도의 부호가 바뀌고 있어 이 위치를 경계로 서로 반대방향으로 치우치는 유동이 형성됨을 알 수 있으며, 하류로 나아갈수록 전 단면에 걸쳐 비슷한 값을 보여주고 있다. Fig. 8의 단축을 따른 비대칭도 분포를 보면  $S_u$ 는  $X/De=2$ , 3단면에서 장축의  $S_u$ 와 비슷한 경향을 가진다. 그러나  $S_w$ 는  $X/De=2$ , 3단면의 제트내부에서 정규분포 값을 가지며 하류로 나아갈수록 정규분포로부터 벗어난다.

Fig. 9와 Fig. 10은 유동장의 간헐 정도를 보여주는 장, 단축의 편평도이다. Fig. 9에서 축방향 편평도  $F_v$ 는  $X/De=3$ 단면의 약  $Z/H_z=0.5$ 위치에서 정규분포를 크게 벗어나고 있어, 이 단면에 다소 강한 간헐유동이 존재함을 알 수 있다. 속도 성분  $V$ 의 편평도  $F_v$ 는  $Z/H_z < 2$ 영역에서 거의 균일한 값을 나타내고 있다.  $F_w$ 는  $X/De=2, 3$  단면의  $Z/H_z < 0.7$  영역에서  $F_u$ 보다 큰 값을 가지고 있어  $X$ 방향의 속도변동보다 방사방향의 속도변동

이 유동에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한  $F_w$ 는  $X/De=5$ , 7단면에서 낮은 값을 보이고 있어 이 부근에서 제트출구 근방보다 오히려 변동폭이 적은 유동이 존재함을 알 수 있다. 그리고 중심축에서 제트의부로 나갈수록 간헐현상의 증대로 정규분포 값을 벗어나고 있다. 제트내부영역( $Y/H_y < 1$ )에서 단축의 편평도(Fig. 10)는 장축의 경우보다 큰 값을 갖고 있어, 장축에 비해 단축의 제트내부에 보다 강한 간헐유동이 존재함을 알 수 있다. 전반적으로 3축방향 속도성분의 편평도는 제트출구면에 가까운  $X/De=2$ , 3단면보다  $X/De=5$ , 7단면에서 정규분포에 가까운 값을 보이고 있다.

Fig. 11은 각각 장, 단축에서 구한 레이놀즈 전단응력 분포도이다. 장축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력  $\bar{u}w$ 는 하류로 나아갈수록 제트내부에서 음의 값을 갖는 부분이 점차 사라지고,  $X/De=7$ 단면에서 장축을 따라 양의 값을 가지고 있다. 단축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력  $\bar{u}v$ 는 장축의

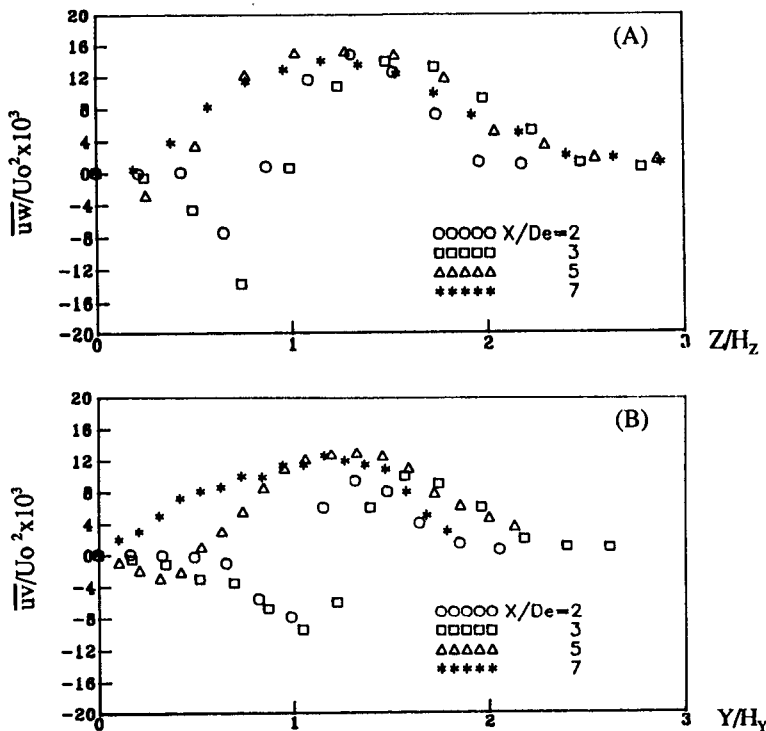


Fig. 11 Profiles of the Reynolds shear stress of the elliptic jet (A) the major axis ; (B) the minor axis

$\bar{u}\bar{w}$ 와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 전체적으로 낮은 값을 가지고 있다. 또한,  $X/De=2$ , 3단면에서 레이놀즈 전단응력이 0에 가까운 값을 가지는 영역도 대략  $Z/H_z=0.4$ ,  $Y/H_y=0.7$  정도로 나타나고 있는데, 이와 비슷한 현상을 Quinn<sup>(10)</sup>의 날카로운 모서리를 갖는 종횡비 2인 평면 사각제트에서도 살펴볼 수 있다. 그리고 장축의 미약한 V방향의 속도성분과 단축의 미약한 W방향의 속도성분으로 인하여 장축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력  $\bar{u}\bar{v}$ ,  $\bar{v}\bar{w}$ 와 단축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력  $\bar{u}\bar{w}$ ,  $\bar{v}\bar{w}$ 는  $X/De$ 에 상관없이 거의 0에 가까운 값을 가졌다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3-D LDV 시스템을 이용하여 날카로운 모서리를 가진 종횡비 2인 타원제트의 3차원 난류특성을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 날카로운 모서리를 가진 종횡비 2인 타원제트는  $X/De=2$ 와 16부근에서 축교차현상을 가지며 수축노즐보다 노즐출구면 가까이에 축교차점이 위치한다.

(2) 타원제트는 원형제트에 비해 더 큰 속도감소를 가지므로 보다 강한 혼합과 유입이 일어남을 알 수 있다.

(3) 타원제트는 방사방향의 활발한 유동구조를 가지고 있으며 단축의 난류강도는 장축보다 넓게 분포하고 있다.

(4) 근접영역에서 장, 단축의 레이놀즈 전단응력  $\bar{u}\bar{w}$ ,  $\bar{u}\bar{v}$ 는 제트내부까지 강하게 유입되는 와류구조로 제트내부에서 음의 값을 가진다.

#### 후 기

본 연구는 첨단유체공학센터(AFERC)의 연구지원으로 수행된 결과의 일부로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

(1) Rajaratnam, N., 1976, "Turbulent Jets," Elsevier Scientific Publishing Company.

(2) Ho, C. M. and Gutmark, E., 1987, "Vortex Induction and Mass Entrainment in a Small Aspect-Ratio Elliptic Jet," J. Fluid Mech., Vol. 179, pp. 383~405.

(3) Hussain, A. K. M. F. and Husain, H. S., 1987, "Passive and Active Control of Jet Turbulence," Turbulence Management and Relaminarisation, IUTAM Symposium, pp. 445~457.

(4) Viets, H. and Sforz, P.M., 1972, "Dynamics of Bilaterally Symmetric Vortex Ring," Phys. Fluids, Vol. 15, pp. 230~240.

(5) Dhanak, M.R. and De Bernardinis, B., 1981, "The Evolution of an Elliptic Vortex Ring", J. Fluid Mech., Vol. 109, pp. 189~216.

(6) Ho, C. M. and Gutmark, E., 1986, "Visualization of a Forced Elliptic Jet," AIAA, Vol. 24, pp. 684~685.

(7) Gutmark, E. and Schadow, K. C., 1987, "Flow Characteristics of Orifice and Taped Jets," Phys. Fluids, Vol. 30, pp.3448~3456.

(8) Kotsovinos, N.E., 1975, "A Study of the Entrainment and Turbulence in a Plane Buoyant Jet," Ph. D. Thesis., CALTECH, Pasadena, California, pp. 306.

(9) Lau, J. C., Morris, P.J. and Fisher, M. J., 1979, "Measurements in Subsonic and Supersonic Free Jets Using A Laser Velocimeter," J. Fluid Mech, Vol. 93, pp. 1~27.

(10) Lau, J. C., Whiffen, M. C., Fisher, M. J. and Smith, D.M., 1981, "A Note on Turbulence Measurements with A Laser Velocimeter," J. Fluid Mech., Vol. 102, pp. 353~366.

(11) Morrison, G. L., Tatterson, G. B. and Long, M. W., 1988, "Three-Dimensional Laser Velocimeter Investigation of Turbulent, Incompressible Flow in an Axisymmetric Sudden Expansion," J. Propulsion, Vol. 4(6), pp. 533~540.

(12) Quinn, W. R., 1989, "On Mixing in an Elliptic Turbulent Free Jets," Phys. Fluids(A), Vol. 1(10), pp. 1716~1722.

(13) Woods, W.A. and Clark, D.G., 1988, "Visualized Flow," Pergamon Press.

(14) 권영철, 이상준, 1991, "3-D LDV 시스템을

- 이용한 3차원 난류구조 해석,” 한국항공우주학회지, 제 19권 제2호, pp. 37~45.
- (15) Husain, H.S. and Hussain, A.K.M.F., 1983, “Controlled Excitation of Elliptic Jets,” Phys. Fluids, Vol.26(10), pp. 2763~2766.
- (16) Quinn, W.R., 1991, “Passive Near-Field Mixing Enhancement in Rectangular Jet Flows,” AIAA, Vol. 29(4), pp. 515~519.