

(論 文)

종횡비에 따른 타원제트의 유동특성에 관한 실험적 연구

권영철* 이상준**

(1991년 8월 19일 접수)

The Effect of Aspect Ratio on the Flow Characteristics of Elliptic Jets

Young Chel Kweon and Sang Joon Lee

Key Words : Aspect Ratio(종횡비), Elliptic Jet(타원제트), Flow Characteristics(유동특성), Axis-switching(축교차), 3-D LDV(3차원 레이저 유속계)

Abstract

The effect of aspect ratio on the flow characteristics of elliptic jets was experimentally investigated. The flow characteristics of sharp-edged elliptic nozzles with aspect ratio of 1 (round nozzle), 2 and 4 were measured by using a 3-D LDV system along the major and minor axis at $X/De=2, 3, 5, 7$ and along the centerline up to $X/De=14$. At each measurement point mean velocities, turbulent intensities, skewness of three orthogonal velocity components, and Reynolds shear stress were obtained. The Reynolds number based on the nozzle exit velocity and nozzle equivalent diameter (De) was about 4×10^4 . Difference in the spreading rate along the major and minor axis was remarkable. The jet half width along the major axis decreased at first and then increased again with going downstream. But the jet width along the minor axis increased steadily. The elliptic jet of $AR=2$ had two switching points within the measurement range, while that of $AR=4$ had only one. (AAA) : The elliptic jet of $AR=2$ showed larger velocity decay rate than that of $AR=1$ and $AR=4$. The effect of aspect ratio on the flow characteristics of elliptic jets was dominant in the near jet regions of $X/De < 7$, and the skewness and Reynolds shear stress had quite different distribution depending on the aspect ratio of the elliptic nozzle.

기 호 설 명

a : 타원노즐의 장축반경
 AR : 종횡비 (a/b)
 b : 타원노즐의 단축반경
 De : 타원노즐의 동가반경 (60 mm)
 H_y, H_z : Y, Z축방향의 제트반폭
 Su : X축방향의 비대칭도 ; $\overline{u^3}/(\overline{u^2})^{3/2}$

u', v', w' : X, Y, Z 축방향의 난류강도 ;
 $\sqrt{u^2}/U_0, \sqrt{v^2}/U_0, \sqrt{w^2}/U_0$
 U : X축방향의 평균속도
 U_m : 제트 중심축에서의 X축방향 최대 평균속도
 U_c : 제트 중심축에서의 X축방향 평균속도
 U_0 : 노즐 출구속도 (10 m/s)
 uv, uw : 레이놀즈 전단응력
 X, Y, Z : 타원제트의 좌표축

*정회원, 포항공과대학 기계공학과 대학원

**정회원, 포항공과대학 기계공학과

1. 서 론

여러 공학분야에서 혼합과 추력을 증대시키기 위하여 제트유동이 많이 응용되고 있으며 또한 이에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 제트유동에 관한 대부분의 연구는 기하학적 형상과 해석이 비교적 용이한 원형제트에 관한 것이었다. Corrsin⁽¹⁾은 원형제트에 관한 연구에서 자유전단유동의 경계면은 난류구조에 크게 영향을 주고, 난류와 비난류의 경계면에서 나타나는 대규모 응집구조(coherent structure)는 난류유동의 성장과 확산, 그리고 유입(entrainment)에 큰 역할을 한다고 밝혔다. 그동안의 많은 연구를 통하여 제트 원점(far) 유동장의 유동특성은 많이 밝혀졌지만 강한 유입과 혼합 현상이 존재하는 근점 유동장에 대한 체계적인 연구는 그리 많지 않다.

최근에는 제트유동에 의한 혼합효과의 향상을 위하여 타원제트에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 타원제트는 원형제트와 평면제트의 일반적인 경우로 중횡비(aspect ratio)가 1인 경우 원형제트가 되며, 중횡비가 크게 되면 평면제트의 유동특성을 나타내게 된다. 제트는 노즐의 기하학적 조건에 따라 다른 유입과 혼합과정을 가진다. 이는 자유전단유동에 발생하는 대규모 응집구조의 생성, 성장, 상호간섭에 기인하는 것으로 이를 통하여 혼합과 유입을 제어할 수 있다. 응집구조의 제어에는 능동제어(active control)와 수동제어(passive control)의 두가지 방법이 있다. 능동제어는 기진력(excitation)의 외부에너지를 필요로 하며, 수동제어는 초기조건의 변화, 노즐형상의 변화, 그리고 자기기진력(self-excitation) 등의 방법을 통하여 가능하다.⁽²⁾ 타원제트 근점 유동장에서 와류(vortical) 구조는 와(vortex)가 형성된 후, 즉시 3차원의 방사(azimuthal) 변형하면서 상호간섭을 한다. 이와같은 와의 형성, 변형, 그리고 상호간섭이 제트와 주위 유체간의 유입과 혼합을 증대시키는 것으로 알려져 있다. 또한 타원제트는 축교차(axis-switching) 현상으로 장, 단축을 따라 서로 다른 응집구조를 가지며 원형제트보다 유체유입률이 더 크다고 알려져 있다.⁽³⁻⁵⁾

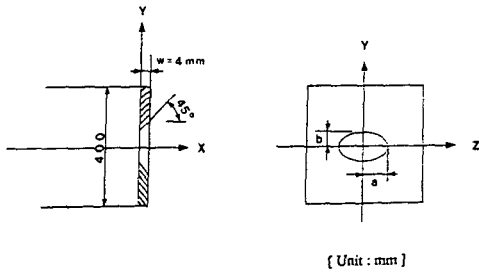
Hama⁽⁶⁾는 국소유도(localized induction) 개념을 사용하여 포물선 형태의 와(xy-평면)가 자기유도(self-induced) 속도(z방향)에 의해 3차원적으로

변형됨을 수치적으로 묘사하였다. Krothapalli et al.⁽⁷⁾은 사각평면제트에 관한 연구에서 장, 단축 방향의 다른 확산율로 인하여 축교차현상이 발생하며, 제트의 축교차 위치는 중횡비와 거의 선형적인 함수관계가 있음을 밝혔다. Husain과 Hussain^(2,3)은 중횡비가 2와 4인 완만한 곡률을 가진 타원 수축노즐의 제트실험에서 기진력이 주어지지 않는 상태와 제어된 기진력의 Strouhal수에 따른 제트중심축상의 난류강도 및 제트반폭을 비교 조사하였다. Ho와 Gutmark⁽⁴⁾는 12.5 : 1의 면적비에 중횡비가 2인 완만한 곡률을 가진 수축노즐을 이용하여 타원제트의 응집구조를 정성적으로 조사하였다. 측정된 와류링의 폭과 최대 변형율을 단일와류(single vortex)의 수치결과와 비교하였으며, 비대칭 응집구조로 인하여 원형제트보다 더 큰 유체유입율을 가지며, 측정구간내에서 세번의 축교차현상이 일어남을 관찰하였다. Quinn⁽⁸⁾은 중횡비 5의 날카로운 모서리를 갖는 타원제트의 근, 원점 유동장 모두에서 유체유입이 원형제트보다 크고, 측정구간내에서 2번의 축교차현상을 보이며 등가노즐직경의 약 30배 하류에서 축대칭유동이 형성됨을 밝혔다. Gutmark와 Schadow⁽⁹⁾는 중횡비가 3인 타원형의 슬롯노즐과 테이퍼된(tapered) 노즐의 실험을 통하여 노즐의 형상변화라 제트의 난류구조를 제어할 수 있음을 보여주었다.

날카로운 모서리(sharp-edged)를 가진 슬롯노즐은 노즐 모서리가 라운딩된 슬롯노즐에 비해 강하게 응집구조를 제어함으로써 유입과 혼합을 효과적으로 증대시킨다고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 또한 앞서 수행된 연구로부터 타원제트는 방사방향으로의 강한 유동구조를 가지고 있음을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 중횡비가 다른 3가지의 날카로운 모서리를 가진 타원 슬롯노즐($AR=1, 2, 4$)을 풍동 수축부 끝에 장착하여 타원제트의 유동특성 및 축교차현상을 3-D LDV 시스템을 이용하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구는 최대 풍속이 40 m/s, 시험부 크기가 400 mm×400 mm, 수축비가 9 : 1인 개방형 아음속 풍동에서 수행되었다. Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 타원 슬롯노즐의 개략도와 좌표계를 나타낸다. 본 실험에 사용되어진 타원노즐은 두께 4 mm



[Unit : mm]

	AR(a/b)	a (mm)	b(mm)	De(mm)
Case A	1	30	30	60
Case B	2	42.4	21.2	60
Case C	4	60	15	60

Fig. 1 Schematic diagram of the elliptic nozzles

의 황동판으로 45° 경사진 날카로운 모서리를 가지도록 제작되었다. 여기서 *a*는 타원노즐의 장축반경을, *b*는 단축반경을 가리킨다. 3가지 노즐의 등가지름(equivalent diameter, *De*)은 모두 60 mm로 노즐출구 단면적을 같게 하였다. 실험동안 제트출구의 평균속도(*U₀*)를 10 m/s로 유지하였으며, 등가노즐직경에 기준한 레이놀즈 수는 4×10^4 이었다.

본 연구에서는 종횡비에 따른 타원제트 근접영역에서의 유동특성을 조사하기 위하여 노즐출구면에서 하류방향으로 $X/De=2,3,5,7$ 위치단면에서 *Y*, *Z* 축을 따라, 또한 제트 중심축을 따라 $X/De=1\sim 14$ 구간에서 3축방향 속도성분을 측정하였다. 그리고 입자 시딩(seeding)을 위하여 프로필렌 그리콜과 물의 혼합액을 아토마이저(atomizer)에 주입하였다.⁽¹²⁾ 실험하는 동안 한 측정위치에서 10,240개의 3축방향 속도성분 데이터를 획득하여 각 속도성분의 평균속도, 난류강도, 비대칭도(skewness), 및 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress) 등을 구하였다. 평균속도의 경우는 2% 이하, 난류강도의 경우는 5% 이하의 불확실한 값(uncertainty)을 가진다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 제트중심축을 따라 구한 축방향 평균속도의 감소를 나타내며 Quinn⁽⁶⁾의 실험결과와 비교하였다. 여기서 종횡비 1인 타원제트는 원형제트(round jet)를 나타낸다. 또한 축방향 거리 *X*는 등가직경(*De*)으로 무차원화 시켰다. 본 실험의 원

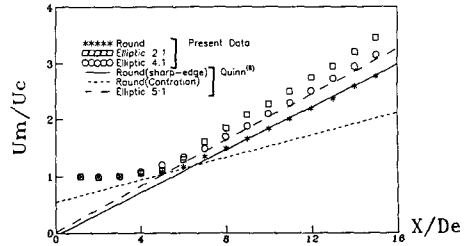


Fig. 2 Decay of mean streamwise velocity along the centerline

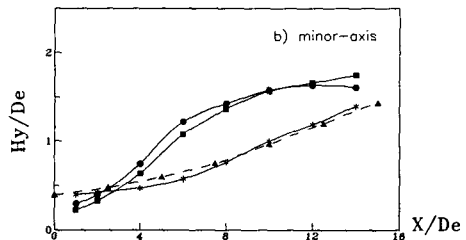
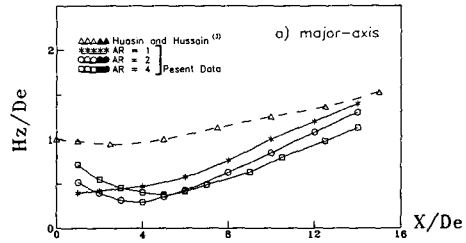


Fig. 3 Jet half width with the downstream distance

형제트 결과와 Quinn의 결과는 잘 일치하고 있다. 본 연구에서 다룬 3가지 종횡비 중에서 종횡비 2인 타원제트의 경우 가장 큰 평균속도 감소율을 보여주고 있다. 이것은 종횡비가 2인 타원제트의 단면이 더 넓게 확장됨을 의미한다. 또한 날카로운 모서리를 가진 노즐이 완만한 곡률을 가진 수축노즐보다 큰 속도감소율을 보여주고 있다. 이와같은 현상은 Gutmark와 Schadow⁽⁹⁾의 실험결과에서도 나타나고 있다.

Fig. 3(a),(b)는 타원제트의 장, 단축을 따른 제트반폭을 나타낸 것으로 Husain과 Hussain⁽³⁾의 완만한 내부곡면을 갖는 수축노즐 결과와 비교하였다. Husain과 Hussain의 결과와 비교하여 날카로운 모서리를 갖는 슬롯노즐의 경우 장축반폭은 작은 값을, 단축반폭은 큰 값을 보여주고 있다. 이것으로부터 날카로운 모서리를 가진 노즐은 수축노즐보다 더 강하게 제트유동구조를 변화시킴을 알 수

있다. 노즐출구면에서 장축반폭이 단축반폭보다 크지만 장축반폭은 노즐출구에서 하류로 나아감에 따라 점차 감소하며 종횡비가 2인 경우에 $X/De=4$, 종횡비가 4인 경우에 $X/De=5$ 부근에서 최소반폭을 가진 후 다시 증가하기 시작한다. 반면에 단축반폭은 초기에 거의 선형적으로 증가하다가 $X/De > 6$ 이후에 증가폭이 점차 감소하였다. 이로부터 타원제트의 장, 단축이 서로 교차됨을 알 수 있다. 축교차 위치는 종횡비 2인 경우 $X/De=2$ 와 약 16 부근에서 두번 발생하며, 종횡비 4의 경우는 $X/De=3$ 에서 한번 나타나고 있다. 종횡비 2인 경우 $X/De=1$ 위치단면에서 단축반폭은 장축반폭의 약 1/2이며, 종횡비 4인 경우는 약 1/4이므로 장, 단축의 제트반폭이 같아지는 축교차 위치는 종횡비가 증가할수록 하류쪽에 나타나게 된다. 또한 날카로운 모서리의 타원제트는 오리피스 효과로 인하여 잘 디자인된 완만한 곡률을 갖는 수축노즐의 경우보다 출구면 가까이에서 축교차현상이 발생함을 알 수 있다. $X/De > 8$ 영역에서 장축의 제트반폭 증가율은 원형제트의 제트반폭 증가율과 대략 비슷한 경향을 가진다.

Fig. 4는 종횡비 4인 경우에 대한 타원제트의 확산을 표시하였다. 장, 단축반경 Y 와 Z 를 등가노즐직경 (De)로 무차원화하면 초기영역에서 타원제트는 원형제트와 달리 장축의 제트반경은 줄어들고, 단축의 제트반경은 증가하게 된다. 또한 단축에서의 확산 정도는 장축의 경우보다 현저하게 크다. 따라서 타원제트는 근접영역에서 단축방향의 유입과 혼합이 장축방향보다 많음을 알 수 있다.

Fig. 5는 타원제트 장, 단축에서 측정된 X방향의 난류강도 u' 을 나타낸다. 축방향 난류강도 u' 은 평균속도 U 의 구배가 최대가 되는 위치부근에서 최대값을 가지며, 하류로 나아갈수록 최대값의 위치

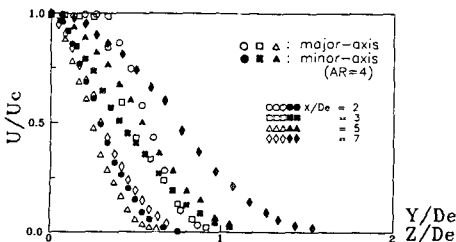


Fig. 4 Mean streamwise velocity profiles of the elliptic jet (AR=4)

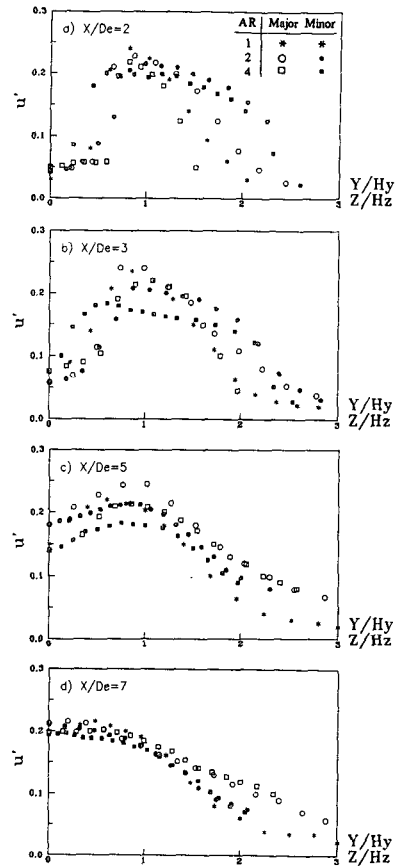


Fig. 5 Turbulent intensity profiles of X-velocity component along the major axis

는 제트중심축으로 이동하면서 완만한 포물선 형태를 가진다. $Y/Hy, Z/Hz > 1.3$ 영역에서 타원제트의 난류강도는 원형제트보다 큰 값을 가지므로 타원제트의 경우 제트의외부 갈수록 유동이 더 활발해짐을 알 수 있다. $X/De < 3$ 구간의 제트의외 영역에서 단축의 난류강도 u' 은 장축의 난류강도 u' 보다 큰 값을 나타내다가 $X/De > 3$ 에서는 반대로 장축의 난류강도 u' 가 다소 큰 값을 보여주고 있다. 이는 노즐출구면 부근에서 장축보다 단축방향으로 더 강한 유동이 존재함을 의미한다. Fig. 6은 타원제트의 장축평면에서 측정된 난류강도 w' 과 단축평면에서 측정된 난류강도 v' 을 나타낸다. 원형제트에 비해 타원제트의 경우 큰 난류강도 값을 가지며, 하류로 갈수록 완만한 분포를 나타낸다. 또한 축방향 난류강도 u' 에서처럼 난류강도 v' 과 w' 은 노즐 출구면 가까이에서 장축보다 단축에서

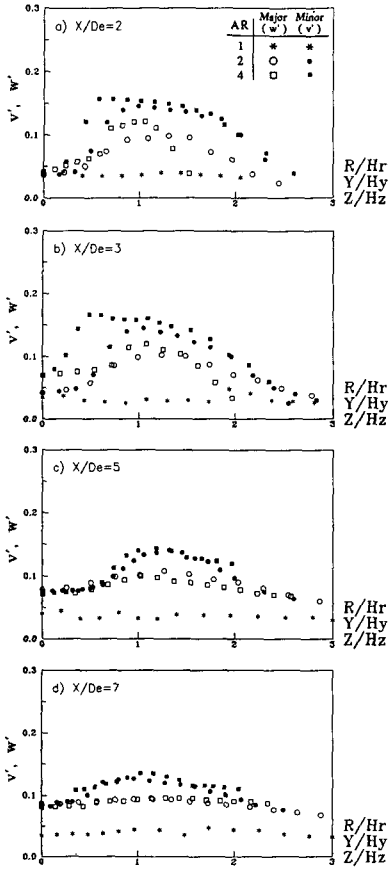


Fig. 6 Turbulent intensity profiles of Y, Z -velocity component along the minor axis

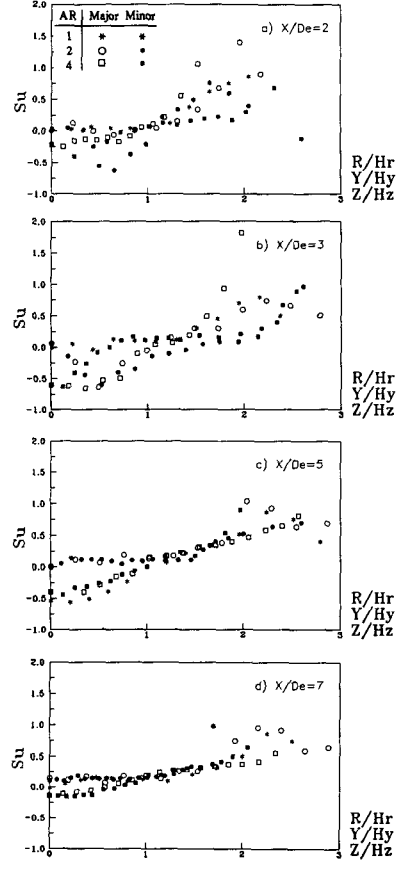


Fig. 7 Skewness profiles of X -velocity component along the major axis

더 큰 값을 가진다. 따라서 타원제트의 경우 주유동방향에 수직한 속도성분(v', w')이 제트유동의 혼합을 보다 크게 증대시켜 원형제트와 현저히 다른 유동구조를 가지게 됨을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5와 Fig. 6의 장, 단축 방향 속도성분으로부터 $X/De=2,3$ 단면의 균일 유동영역은 종횡비가 2인 경우보다 4일 때 더 뚜렷히 나타난다. 이것으로부터 단일 전단층을 이루는 원형제트의 코어형상과는 달리 타원제트에서는 종횡비가 증가할수록 장, 단축을 따라 각기 다른 두개의 전단층이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7은 타원제트 장, 단축에서 구한 축방향 속도성분의 비대칭도 분포를 도시한 것이다. 비대칭도 Su 는 노즐출구 가까운 영역에서 종횡비 변화와 장, 단축에 따라 서로 다른 비대칭도 분포를 보여 주고 있다. 특히 노즐출구면에 가까운 $X/De=2,3$

단면에서 원형제트의 경우 비대칭도 Su 는 제트내부에서 거의 정규분포를 이루고 있지만, 타원제트의 경우는 이것으로부터 크게 벗어나고 있다. 이는 타원제트 장, 단축의 축교차 현상으로 제트내부의 유동구조가 원형제트의 유동구조와는 달리 3차원 방사변형등으로 복잡하게 변하기 때문으로 여겨진다. 반면 $X/De=5$ 부근의 제트내부에서는 종횡비 4인 타원제트의 장, 단축 비대칭도 값이 정규분포를 크게 벗어난 반면 종횡비 2인 타원제트의 장, 단축 비대칭도 값은 거의 정규분포에 가까운 값을 가진다. 그리고 장, 단축의 제트확산율이 비슷한 $X/De=7$ 단면에서 원형제트와 타원제트의 비대칭도는 대략적으로 정규분포에 가까운 값을 보이고 있다.

Fig. 8은 난류 운동에너지 생성에 관계하는 레이놀즈 전단응력 분포를 나타낸 것으로 원형제트와

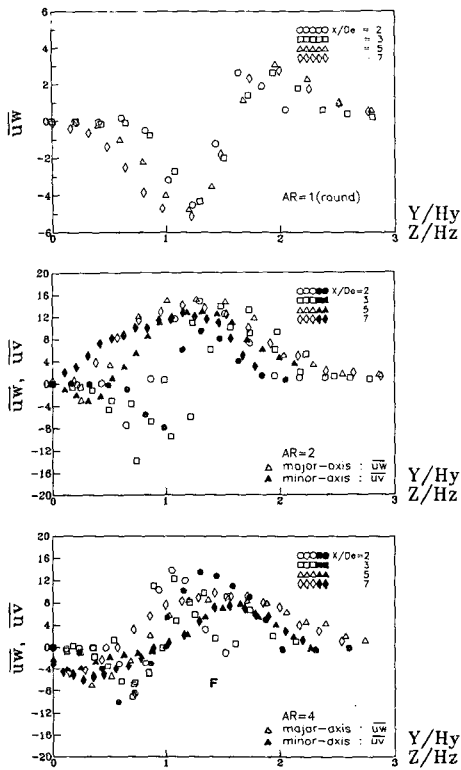


Fig. 8 Profiles of the Reynolds shear stress $\overline{u'w'}$ along the major axis and $\overline{uv'}$ along the minor axis

타원제트는 현저히 다른 응력분포를 가진다. 여기서 장축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력은 $\overline{u'w'}$ 를, 단축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력은 $\overline{uv'}$ 를 나타낸다. 원형 제트의 레이놀즈 전단응력 $\overline{u'w'}$ 는 약 $R/H_R=1.5$ 를 기준으로 대칭적인 분포를 갖고 있으며, 난류 운동에너지 생성은 제트 내부영역이 외 부간형영역보다 높음을 알 수 있다. 타원제트의 레이놀즈 전단응력은 원형제트의 경우보다 상당히 큰 값을 가지며, 중횡비에 따른 타원제트의 레이놀즈 전단응력 분포는 현저히 다른 경향을 보여주고 있다. 즉, 타원제트의 내부영역에서 중횡비 2인 경우 $X/De=7$ 부근단면에서 장, 단축 모두 양의 분포를, 중횡비 4인 경우 측정구간내에서 장, 단축 모두 음의 분포를 가진다. 이와 비슷한 현상은 Quinn^(13,14)의 날카로운 모서리를 갖는 평면제트 실험에서도 살펴볼 수 있다. 그리고 Fig. 5, Fig. 6에서처럼 노즐출구에 가까운 $X/De < 3$ 구간에서 장축을 따른 레이놀즈 전단 응력은 중횡비가 2인 경우가 중횡비가 4인 경우 보다 더 넓게 분포한다.

단축에서의 레이놀즈 전단응력도 장축의 경우와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 노즐 중횡비에 따라 타원제트의 장, 단축 유동구조는 다소 다른 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 타원 노즐의 장, 단축에 의한 제트의 축교차현상에 기인하는 것으로 사료된다. 장축의 미약한 V 방향의 속도성분과 단축의 미약한 W 방향의 속도성분으로 인하여 장축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력 $\overline{u'w'}$ 와 단축을 따라 구한 레이놀즈 전단응력 $\overline{uv'}$ 는 X/De 에 상관없이 장축의 레이놀즈 전단응력 $\overline{u'w'}$ 와 단축의 레이놀즈 전단응력 $\overline{uv'}$ 보다 매우 낮은 값을 가졌다.

4. 결론

본 연구에서는 중횡비가 1, 2, 4인 날카로운 모서리를 가진 타원제트의 3차원 유동 특성을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 타원제트는 원형제트에 존재하지 않는 축교차현상을 보이며 중횡비가 증가할수록 축교차 위치 및 장축의 최소 반폭위치는 하류로 이동하였다.

(2) 본 연구에서 다른 타원제트 중 중횡비가 2인 경우가 활발한 유입과 혼합으로 가장 큰 속도감소를 보이며, 또한 단축의 난류강도는 장축보다 넓게 분포하고 있다.

(3) 중횡비에 따른 타원제트의 유동특성 변화는 노즐출구면에 가까운 $X/De < 7$ 영역에서 현저히 나타나며 비대칭도와 레이놀즈 전단응력은 크게 다른 경향을 가진다.

후기

본 연구는 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 지방대육성과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분에게 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) Corrsin, S., 1943, "Investigation of Flow in an Axially Symmetric Heated Jet of Air," ACH Wartime Report W-94
- (2) 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.
- (3) Husain, H.S. and Hussain, A.K.M.F., 1933, "Controlled Excitation of Elliptic Jets," *Phys. Fluids*, Vol. 26(10), pp.2763~2766
- (4) 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.
- (5) Ho, C.M. and Gutmark, E., 1986, "Visualization of a Forced Elliptic Jet," *AIAA*, Vol. 24, pp. 684~685.
- (6) Hama, F.R., 1962, "Progressive Deformation of a Curved Vortex Filament by its Own Induction," *Phys. Fluids*, Vol. 5, pp. 1156~1162.
- (7) Krothapalli, A., Baganoff, D. and Karamcheti, K., 1981, "On the Mixing of a Rectangular Jet," *J. Fluid Mech*, Vol. 107, pp. 201~220.
- (8) Quinn, W.R., 1989, "On Mixing in an Elliptic Turbulent Free Jets," *Phys. Fluids(A)*, Vol. 1(10), pp. 1716~1722.
- (9) Gutmark, E. and Schadow, K.C., 1987, "Flow Characteristics of Orifice and Taped Jets," *Phys. Fluids*, Vol. 30, pp. 3448~3454.
- (10) Woods, W.A. and Clark, D.G., 1988, "Visualized Flow," Pergamon Press.
- (11) 권영철, 이상준, 1991, "3-D LDV 시스템을 이용한 타원제트의 난류특성에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제 15권, 제6호, pp. 2160~2170.
- (12) 권영철, 이상준, 1991, "3-D LDV 시스템을 이용한 3차원 난류구조 해석," *한국항공우주학회지*, 제 19권, 제 2호, pp. 37~45.
- (13) Quinn, W.R., 1991, "Effects of Slot Aspect Ratio on Turbulent Free Jet Flows Issuing from Sharp-Edged Rectangular Slots," *Proc. of the 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, Dubrovnik, Yugoslavia, Elsevier Pub. Co, pp. 170~177.
- (14) Quinn, W.R., 1991, "Passive Near-Field Mixing Enhancement in Rectangular Jet Flows," *AIAA*, Vol. 29, No. 4, pp. 515~519.