

# 고해상도 PIV 기법을 이용한 타원형 제트의 근접 유동장 해석

신 대 식\*, 이 상 준\*\*  
(1999년 8월 31일 접수)

## Flow Analysis on Near Field of Elliptic Jet Using a Single-Frame PIV

Dae Sig Shin and Sang-Joon Lee

**Key Words :** PIV(입자영상유속계), Elliptic Jet(타원형제트), Aspect Ratio(종횡비), Axis Switching(축교차)

### Abstract

Flow characteristics of turbulent elliptic jets were experimentally investigated using a single-frame PIV system. A sharp-edged elliptic nozzle with aspect ratio(AR) of 2 was tested and the experimental results were compared with those of circular jet having the same equivalent diameter( $D_e$ ). The Reynolds number based on the nozzle exit velocity and nozzle equivalent diameter was about  $1 \times 10^4$ . The spreading rate along the major and minor axis are different remarkably. The jet half width along the major axis decreases at first and then increases with going downstream. But along the minor axis the jet width increases steadily. The elliptic jet of AR=2 has one switching points at  $X/D_e = 2$  within the near field. Turbulence properties are also found to be significantly different along the major and minor axis planes.

### 기호설명

- a : 타원노즐의 장축반경(mm)
- AR : 종횡비(a/b)
- b : 타원노즐의 단축반경(mm)
- B : 제트반폭
- $D_e$  : 타원노즐의 상당직경(mm)
- $U_c$  : 제트 중심축의 축방향 평균속도(m/s)
- $U_o$  : 노즐출구속도(m/s)
- $u, v, w$  : X, Y, Z 방향의 난류강도
- X, Y, Z : 타원제트의 좌표축

### 1. 서론

여러 산업분야에서 혼합이나 추력을 향상시키기 위해 제트유동을 많이 사용하고 있으며, 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되어오고 있다. 제트유동에 대한 연구는 주로 기하학적 형태가 간단한 원형제트나 2차원 평면제트에 관한 것이었다. 그러나 최근에는 유체 유입과 혼합을 증대시키기

위하여 비원형(non-circular)제트에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

타원제트는 원형제트와 평면제트의 일반적인 경우로 종횡비(AR : aspect ratio)가 1인 경우 원형제트가 되며, 종횡비가 크게 되면 평면제트의 유동특성을 나타나게 된다. 그 동안의 제트에 대한 많은 연구들은 자기상사영역인 원접영역(far field)에 대해서 주로 행해져 왔다. 그러나 연료분사, 항력감소, 공기역학적 소음감소 문제 등과 같은 산업현장에 응용 가능한 유체문제는 원접영역이 아닌 제트 근접영역(near field)의 유동특성이 중요하다. 또한 최근 활발히 논의되고 있는 와류붕괴(vortex breakdown) 현상과 대규모 응집구조의 이해를 위해서도 제트 근접영역에 대한 연구가 필요하다.

제트 출구의 기하학적 노즐형상은 제트 발달에 매우 중요한 역할을 한다. 특히 타원제트, 사각제트 등은 노즐의 원주곡률 변화로 인해 노즐 주위에서부터 불안정한 상호간섭이 발달하여 원형제트보다 유체 유입률과 확산율이 증가한다고 알려져 있다.

Krothapalli,<sup>(1)</sup> Hussain & Husain,<sup>(2)</sup> 그리고 Ho & Gutmark<sup>(3)</sup> 등은 3차원 제트의 속도장에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 3차원 노즐의 원주곡률 변화에 의해 제트 근접영역에서 각 단면의 확산율이 서로 다르게 되어 제트가 하류로 나아감에 따라

\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과 연구원

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2169 FAX : (0562)279-3199

초기의 제트축이 서로 뒤바뀌는 축교차 현상을 발견하였다. 이러한 축교차 현상은 3차원 제트의 두드러진 특징으로서 제트와 주위 유체사이의 유입과 혼합을 증대시키는 주된 기구(mechanism)으로 알려져 있다.

제트실험에 사용되어진 노즐형상은 크게 C형(contoured type), O형(orifice type), S형(sharp-edged type)으로 구분된다. S형과 O형 노즐은 C형 노즐에 비하여 큰 응집구조를 제어할 수 있어 유입과 혼합을 보다 효과적으로 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

제트유동은 초기조건에 따라 유동구조가 변화하므로 유동특성을 비교하기 위해선 사용되는 노즐의 초기 조건이 같아야 한다. 날카로운 모서리를 가진 S형 노즐은 초기 운동량두께가 없기 때문에 초기조건이 동일하게 유지되는 장점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 S형 타원노즐을 사용하였다.

본 연구에서는 종횡비가 AR = 2인 타원제트의 근접영역에 나타나는 유동특성을 종횡비가 AR = 1인 원형제트와 비교하고, 타원제트의 장, 단축에 따른 난류특성 변화를 파악하고자 한다. 이를 위하여 싱글프레임 PIV(particle image velocimetry) 시스템을 사용하여 입자영상을 취득하고 속도장을 측정하였다. 이러한 연구로부터 얻어진 타원제트에 관한 정량적인 실험 결과들은 이론 및 수치해석에 기초자료로 제공될 수 있으며, 3차원 제트의 유입과 확산거동에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 시험부 크기가 200 mm(H) × 300 mm(W) × 1200 mm(L)인 회류수조 시험부내에 S형 타원 제트노즐을 설치하여 제트 근접영역에서의 속도장을 측정하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 제트노즐의 형상과 좌표계를 보여주고 있다. 여기서 a는 타원노즐의 장축반경을, b는 단축반경을 나타낸다. 타원 및 원형 노즐은 CNC 공작기계로 두께 3 mm의 스테인리스판으로 노즐출구가 45° 경사진 날카로운 모서리를 가지도록 제작하였다. 타원제트의 등가직경(D<sub>e</sub>)은 10 mm로 원형제트의 노즐출구 단면적과 동일하게 하였다.

실험은 대기온도 20 °C에서 수행되었고, 제트 출구 속도(U<sub>j</sub>)는 1 m/s로 유지 하였는데, 등가직경에 기준한 레이놀즈수는 Re<sub>De</sub> = 1 × 10<sup>4</sup> 이다.

2.2 PIV 속도장 측정

본 연구에 사용된 싱글프레임 PIV 속도장 측정

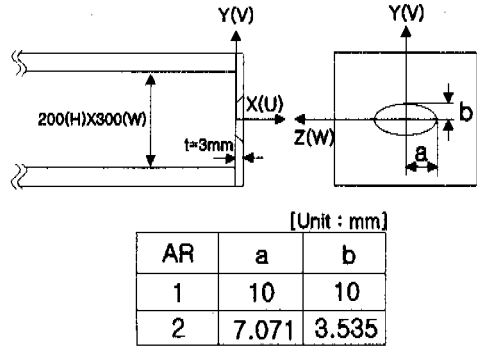


Fig. 1 Schematic diagram of the elliptic nozzles and coordinate system(unit : mm)

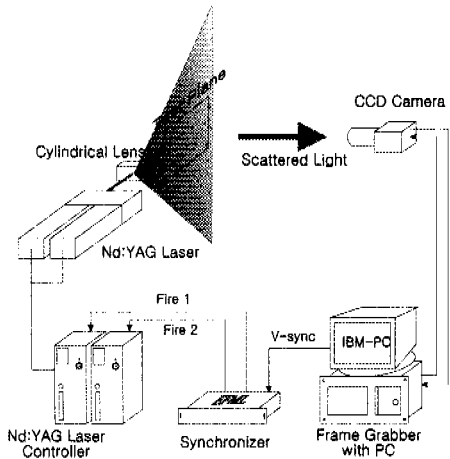


Fig. 2 Schematic diagram of a PIV velocity field measurement system

시스템은 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 영상처리보드, 제어 및 분석용 컴퓨터, 동기장치 등으로 이루어져 있으며 그 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

레이저는 두 개의 광원을 가지고 있는 2-head Nd:Yag 레이저를 이용하였고, 레이저 펄스 당 약 25 mJ 에너지를 방출한다. CCD 카메라(SMD4M4)는 영상편이(image shift) 기능이 카메라에 내장되어 있으며, 해상도는 2K × 2K 이다. 카메라에서 나오는 영상신호(video signal)는 12 비트(bit)이며, 카메라의 셀(cell) 충전율은 100%이고 초당 4장의 영상을 얻을 수 있다. 영상처리는 AM-DIG16R 카드를 장착하고 있는 IC-PCI 이미지 보드를 사용하였고, 시스템 제어 및 영상 데이터 분석은 컴퓨터를 이용하여 수행하였다.

본 연구에서 사용한 싱글프레임 PIV 기법은 하나의 프레임에 이중 노출된 입자영상으로부터 속도장을 추출하는 방식으로 상호상관법(cross-correlation)을 사용하였다. 상호상관 함수를 구하기 위해 사용되는 두 번째 미소조사구간(interrogation region)은 9 픽셀 만큼 영상이동 시켜 다른

위치에서 잡게 된다. 이 경우 상호상관 함수는 속도방향을 나타내는 큰 상관 값과 함께 상대적으로 작은 상관 값이 반대위치에 나타나게 되어 방향모호성 문제를 해결할 수 있다. 싱글프레임 PIV의 자세한 측정기법과 정확도에 대한 정보는 참고문헌<sup>(4)</sup>에 나와있다.

속도 측정영역의 크기는 75 mm × 75 mm 이며, 미소조사구간의 크기는 영상이동량을 고려하여 공간해상도와 SNR(signal-to-noise ratio)이 최적인 상태가 되는 64 × 64 픽셀로 설정하였다. 그리고 오버랩핑은 50%로 하였고, 이때의 공간해상도는 1.17 × 1.17 mm<sup>2</sup>이다. 산란입자로는 Vestosint® 1118 를 사용하였으며, 입자의 평균직경이 37μm 이고 비중은 1.016 이다.

모든 난류 통계량은 순간 속도장 700 장을 앙상블 평균하여 구하였고, 노즐 출구속도로 무차원화 시켰다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 제트반쪽과 속도감쇄

일반적으로 제트의 평균속도는  $X/D_0 = 8$  이후에 자체보존특성을 나타내므로 제트 근접영역에서의 유동특성을 조사하기 위하여 노즐 출구면으로부터 하류방향으로  $X/D_0 = 8$  까지 장, 단축면에서 속도장을 측정하였다.

Fig. 3은 제트중심을 따라 측정한 원형과 타원 제트의 평균 속도분포를 나타낸 것이다. 비교를 위해 Ho & Gutmark<sup>(5)</sup>와 Quinn<sup>(6)</sup>의 결과를 함께 표시하였다. Quinn의 C형 원형노즐과 본 실험의 S형 노즐(AR=1)의 속도감쇄를 비교하면, S형 노즐이 더 큰 속도감쇄율을 보이며, Ho & Gutmark의 C형 타원제트와의 비교에서도 같은 결과를 보여주고 있다. 이것은 S형 노즐의 경우 초기경계층과 운동량두께가 상대적으로 작기 때문에 강한 와도를 지닌 와구조를 형성하여 주위의 많은 유체를 유입 시키기 때문이다. 따라서 C형과 O형에 비해 S형 노즐에서 나온 제트유동이 더 큰 속도감쇄를 가진다.

S형 타원제트(AR=2)의 중심축 속도는 S형 원형제트(AR=1)에 비해 속도 감쇄가 빨리 시작된다. 이것은 타원제트가 원형제트 보다 유체유입이 더 크기 때문이다. 그리고 타원제트의 포텐셜코어는 대략  $X/D_0 = 1.5$ 에서 끝나며, 축방향 속도성분은  $X/D_0 = 2$  이후 영역에서 거의 선형적으로 감쇄된다.

제트유동은 간헐적인 유동특성 때문에 제트반쪽으로써 제트의 경계를 표시한다. Fig. 4는 타원제트의 장, 단축면에서의 제트반쪽변화를 나타낸 것이다. 비교를 위해 Hussain & Husain<sup>(6)</sup>의 실험결과(O형, AR = 2)를 같이 표시하였다. 단축면을 따른 제트반쪽변화를 살펴보면 Hussain & Husain의 결과와 거의 유사하지만 본 실험결과가

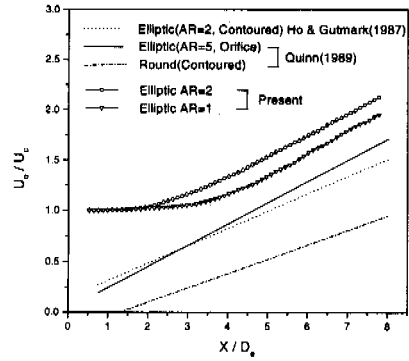


Fig. 3 Mean streamwise velocity decay along the jet centerline

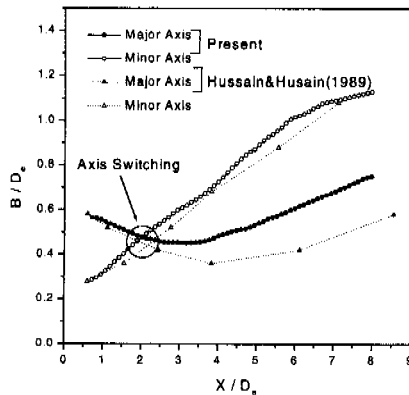


Fig. 4 Variations of jet half width

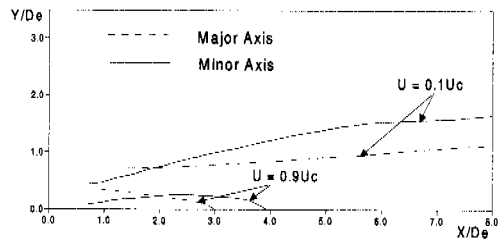


Fig. 5 Variations of shear-layer thickness

조금 큰 값을 가지며, 장축면에서는 하류로 나아감에 따라 제트반쪽이 상당한 차이를 보여주고 있다. 이것은 사용한 초기 노즐형상이 다르기 때문이며, O형 노즐 보다는 본 연구에서 사용한 S형 노즐의 타원제트가 보다 많은 주위 유체를 유입하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4를 보면 노즐 출구에 가까운 영역에서는 장축반쪽이 단축반쪽보다 크게 나타나지만, 하류로 나아감에 따라 장축반쪽은 초기 와구조의 변형으로 인하여 점차 감소되어  $X/D_0 = 3$  부근에서 최소 반폭을 가진 후 다시 증가한다. 반면에 단축반

폭은 초기부터 선형적으로 증가하며,  $X/D_0 \geq 6$  이후 구간에서 증가 폭이 점차 감소한다. 따라서  $X/D_0 = 2$  부근에서 장, 단축반폭이 서로 교차하고 있는데, 이러한 결과는 LDV를 이용하여 비슷한 중형 비를 가지는 S형 타원제트를 연구한 Lec<sup>(7)</sup>의 연구 결과와 잘 일치하고 있다. O형 노즐을 사용한 Hussain & Husain의 결과와 비교하면 S형 노즐의 축교차 위치가 약 10% 정도 빨리 발생함을 알 수 있다. 축교차가 발생한 후 단축반폭이 하류로 나아감에 따라 장축보다 큰 값을 가진다. 이것으로부터 장축에 비해 단축면에서 보다 강한 유체유입이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 5는 하류위치에 따른 장, 단축면에서의 전 단층 두께변화를 나타낸 것이다. 내부경계층 ( $U=0.9U_0$ )의 경우 단축보다 장축면에서 더 빠르게 제트 중심축에 접근하고 있으며, 외부경계층 ( $U=0.1U_0$ )은 장축보다 단축면에서 보다 빨리 반경 방향으로 확장되고 있다. 이것으로부터 장축면에서는 속도가 높은 제트 중심면으로 빨리 확장되며, 단축면에서는 낮은 속도의 주위 유체를 유입하여 바깥의 비점성 구간으로 빠르게 확장되어 감을 알 수 있다.

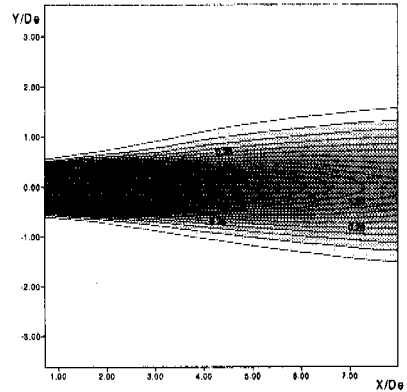
3.2 평균속도분포

Fig. 6은 원형제트와 타원제트의 장, 단축에 따른 축방향 평균속도분포를 나타낸 것이다. 축방향 속도성분은 모두 하류로 나아감에 따라 반경방향으로 퍼지고 있는데, 그 퍼짐율(spreading rate)이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 여기서 보면 장축에서 퍼짐율이 작고, 단축에서 크게 나타난다. 이것은 장축에 비해 단축에서 원주방향의 곡률이 커서 자기유도(self-induction)에 의해 축방향 속도 성분이 보다 넓게 주위로 퍼져나가기 때문이다.

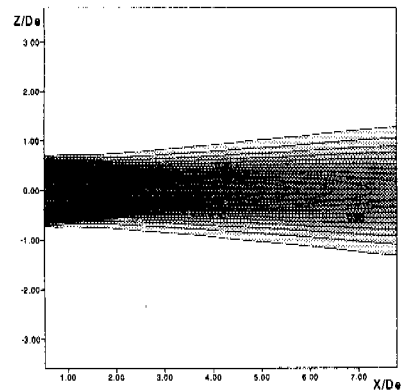
Fig. 7은 원형제트와 타원제트의 장, 단축에 따른 반경방향의 속도분포변화를 나타낸 것인데, 그 분포형태가 매우 다르게 나타난다. 타원제트의 장축면에서는 노즐 초기의 날카로운 모서리로 인하여 반경방향의 속도 성분이  $X/D_0 = 2$  부근까지는 큰 값을 갖지만, 그 이후로 급격히 감소하여 원형제트와 마찬가지로 작은 값을 갖는다. 그러나 단축면인 경우는 하류로 나아감에 따라 강력한 반경방향 속도성분이 분포하며,  $X/D_0 = 2\sim 3$  근처에 최대값을 가진다. 따라서 단축과 장축, 그리고 원형제트의 반경방향 속도분포는 매우 다르며, 타원제트의 단축면에서 큰 반경방향 속도성분 및 확산율을 가진다.

3.3 난류강도

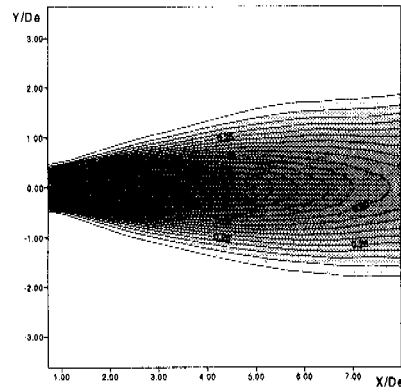
Fig. 8에 원형제트와 타원제트의 장, 단축에 따른 축방향 속도성분의 난류강도분포를 하류위치  $X/D_0 = 1, 2, 4, 5, 6, 7$  단면에서 반경방향(Y축, Z축)을 따라 나타내었다.



(a) Circular jet



(b) Major-axis

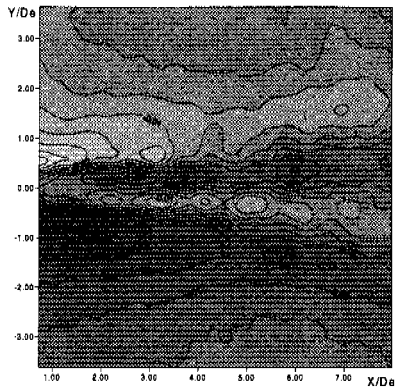


(c) Minor-axis

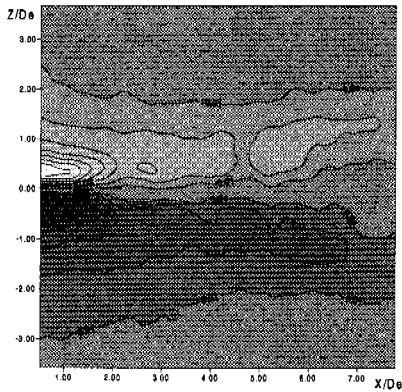
Fig. 6 Mean streamwise velocity fields

장축의 경우 축방향 난류강도분포는 원형제트 처럼  $X/D_0 = 4$  부근에서 최대값을 가지는 포물선 형태를 이루고 있다. 그러나 원형제트는 하류로 나아감에 따라 최대값이 반경방향으로 느리게  $Y/D_0 = 0.5$  근처까지 이동하는데 비해, 장축면에서는 최대값이 노즐 출구면에서  $X/D_0 = 4$ 까지는 반경방향으로 감소하다가 다시 느리게 증가하고 있다.

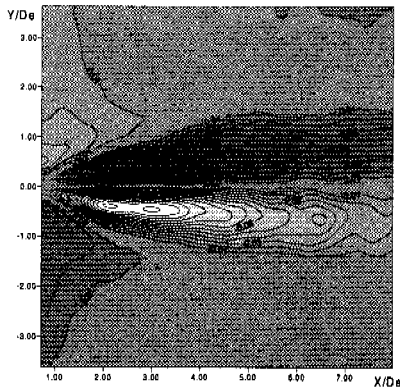
단축면에서의 축방향 난류강도분포는 하류로 나아감에 따라 최대값의 위치가 장축에 비해 빠르게  $Y/D_c = 1$  근처까지 이동하며, 넓은 폭을 가진 포물선형태를 이루고 있다. 이것은 반경방향의 확산율이 상대적으로 커서 축방향 속도의 변동성분이 크기 때문이다.



(a) Circular jet



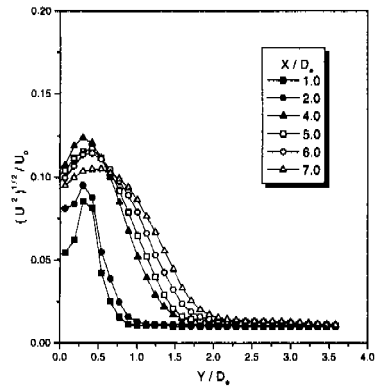
(b) Major-axis



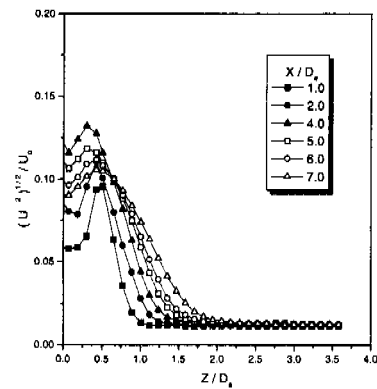
(c) Minor-axis

Fig. 7 Mean spanwise velocity fields

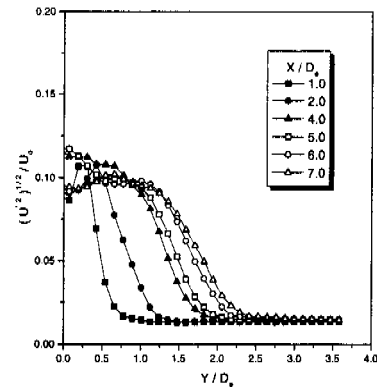
Fig. 9는 장, 단축에 따른 반경방향의 난류강도 분포를 하류단면에 따라 나타낸 것이다. 원형제트의 경우 하류로 나아감에 따라  $X/D_c = 6$  부근까지는 최대값이 거의 일정한 위치에 ( $Y/D_c = 0.5$ ) 나타



(a) Circular jet



(b) Major-axis



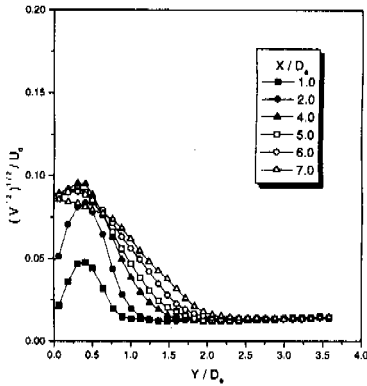
(c) Minor-axis

Fig. 8 Streamwise turbulent intensity profiles

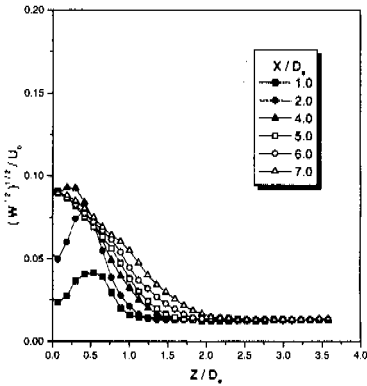
난다. 장축면에서의 반경방향 난류강도분포는 하류로 나아감에 따라 축방향 난류강도분포와는 달리 최대값 위치가 반경방향인 아닌 제트 중심축으로 이동하고 있다. 따라서 타원제트의 장축과 원형제트의 축방향 속도성분의 난류강도는 하류로 나아감에 따라 최대값의 위치가 반경방향으로 이동하고, 반경방향 난류강도의 경우는 제트 중심축으로 이동하면서 발달하고 있다.

단축면에서의 반경방향 속도성분의 난류강도분

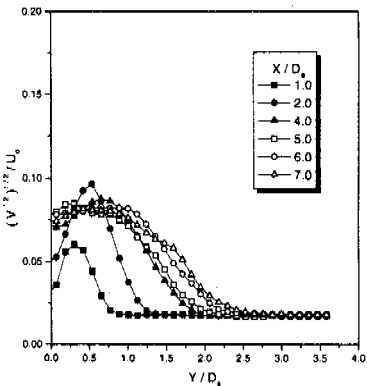
포는 축방향 속도성분의 난류강도분포와 거의 유사한 경향을 보여주고 있으며, 축교차가 일어나는  $X/D_0 = 2$  근처에서 가장 큰 값을 가진다. 그러므로 축교차 현상이 단축의 반경방향 난류강도에도 영향을 미친다고 생각되어진다.



(a) Circular jet

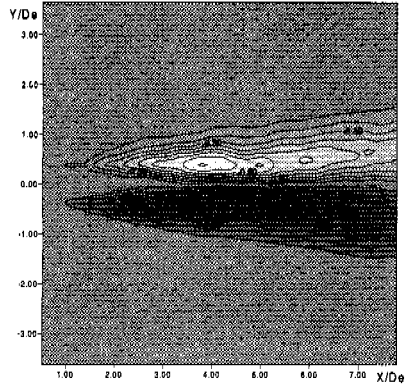


(b) Major-axis

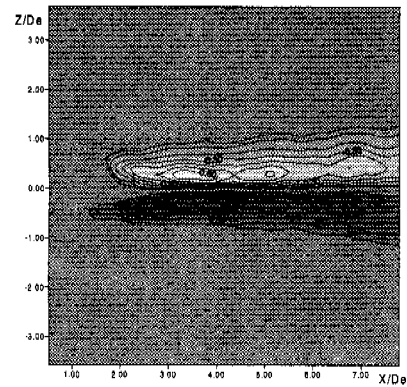


(c) Minor-axis

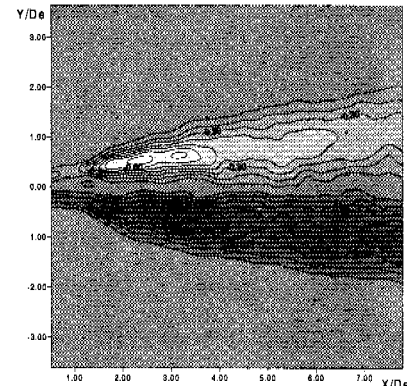
Fig. 9 Spanwise turbulent intensity profiles



(a) Circular jet



(b) Major-axis

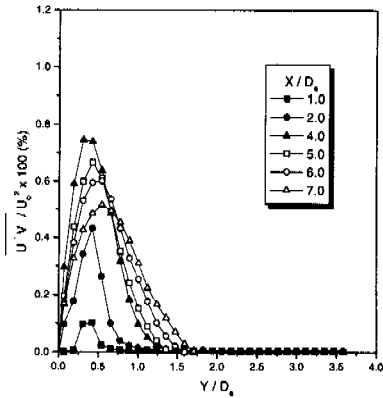


(c) Minor-axis

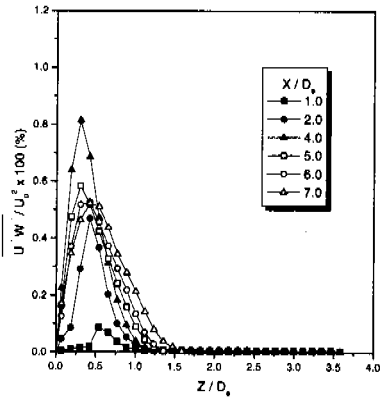
Fig. 10 Distributions of Reynolds shear stress  $\overline{u'v'}$

3.4 난류 레이놀즈 전단응력

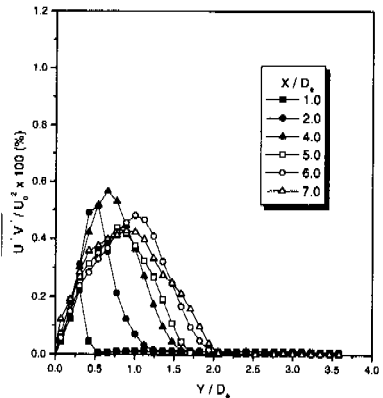
Fig. 10은 원형제트와 장, 단축면을 따라 측정 한 타원제트의 레이놀즈 전단응력분포를 나타 낸 것이다. 장, 단축 모두 하류로 나아갈수록 반경 방향으로 원뿔 형태로 퍼지는 전단응력분포를 보여주고 있는데, 장축면에 비해 단축면에서 확장을 이 커 넓은 영역에서 큰 값을 보여주고 있다. 원



(a) Circular jet



(b) Major-axis

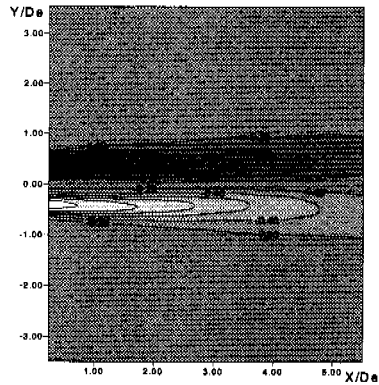


(c) Minor-axis

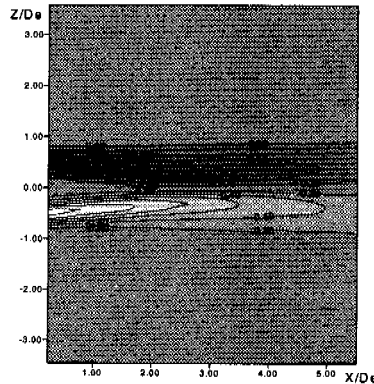
Fig. 11 Profiles of Reynolds shear stress  $\overline{u'v'}$

형제트와 타원제트의 장축면에서는 전단응력 최대 값이  $X/D_0 = 4, Y/D_0 = 0.5$  근처에 분포하고 있으며, 단축면에서는  $X/D_0 = 2-3, Y/D_0 = 1$  부근에서 최대값 을 보여주고 있다.

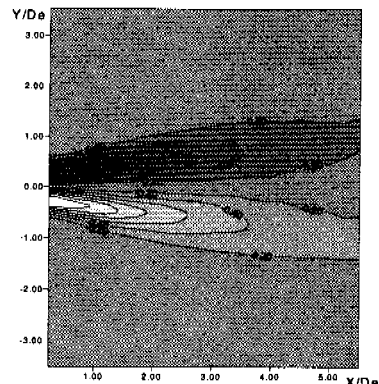
Fig. 11에 레이놀즈 전단응력분포를 하류  $X/D_0 = 1, 2, 4, 5, 6, 7$  위치 단면에서 반경방향(Y축, Z축) 을 따라 나타내었다. 난류강도분포와는 달리 제트의 중심축에서는 전단응력이 거의 나타나지 않 는다.



(a) Circular jet



(b) Major-axis



(c) Minor-axis

Fig. 12 Streamwise vorticity fields of the jet

장측면에서의 난류전단응력은 하류로 나아감에 따라 최대값이 반경방향  $Z/D_c = 0.5$  부근에 위치하며, 축방향  $X/D_c = 4$  인 곳에서 최대값을 가진다. 따라서 난류강도의 최대값들도 이 부근에 형성되므로 이곳에서 유입과 혼합이 가장 활발하게 일어남을 알 수 있다.

단측면의 난류전단응력은 하류로 나아감에 따라  $Y/D_c = 1$  부근에서 최대값을 가지는데, 재미있는 것은 이 부근에서 난류강도도 최대값을 가진다. 일반적으로 와구조의 변형은 유입과 혼합을 증대시켜 난류강도와 전단응력을 증가시킨다. 따라서 단측면의 와구조 변형이 이 위치에서 매우 큼을 알 수 있다.

### 3.5 와도분포

타원제트의 장, 단축에 따른 평균 와도분포변화를 Fig. 12에 나타내었는데, 모두 제트 중심축에 거의 대칭인 분포를 가지고 있다.

여기서 와도( $\omega$ )는 다음과 같은 식(1)에 의해 정의 되어지고, 식(2)와 같은 중앙차분 미분계산공식을 이용하여 계산하였다.

$$\omega = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (1)$$

$$\left( \frac{df}{dx} \right)_i \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta X} \quad \Delta X: \text{grid dimension} \quad (2)$$

원형제트인 경우는 직선상으로 퍼지다가  $X/D_c = 3.5$  부근에서 반경방향으로 확산되고 있다. 장측면에서는 제트 중심축을 향해 퍼지다가  $X/D_c = 3$  부근에서 반경방향으로 완만하게 확산되며, 단측면에서는 반경방향으로 계속적으로 확산되는 와도 분포를 보여주고 있다.

타원제트의 장측면에서 와도분포 중심은  $Y/D_c = 0.5$  부근에 위치하는데, 여기서 하류위치에 따른 각 단면의 난류강도 및 전단응력이 최대값을 가진다. 단측면에서도 마찬가지로 난류강도와 전단응력의 최대값이 와도분포 중심면에 분포한다. 따라서 타원제트의 와도분포 중심면에서 주위 유체의 유입과 혼합을 활발히 일어남을 알 수 있다. 원형제트의 레이놀즈 전단응력과 와도분포는 타원제트의 단축보다는 장측면의 결과 분포와 비슷하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 싱글프레임 PIV 속도장 측정기법을 사용하여 종횡비  $AR=2$  인 타원제트의 근접 유동장의 유동특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 종횡비 2인 타원제트의 축교차는  $X/D_c = 2$  부근에서 일어난다.

(2) 타원제트의 장측면에서는 속도가 높은 제트 중심축쪽으로 확장하며, 단측면에서는 낮은 속도의 주위 유체방향으로 빠르게 확장되어 나간다.

(3) 타원제트의 단축과 장측면에서의 반경방향 속도분포는 매우 다르며, 단측면이 장측면에 비해 큰 반경방향 속도 및 확산율을 가진다.

(4) 하류로 나아감에 따라 장측에서의 축방향 속도성분의 난류강도 최대값은 반경방향으로 이동하고 반경방향 속도성분의 난류강도는 제트 중심축방향으로 이동한다. 또한 단측면에서의 난류강도는 반경방향으로 이동하면서 최대값을 가진다.

(5) 와도분포의 중심을 따라 난류강도와 레이놀즈 전단응력의 최대값들이 존재하며, 이곳에서 활발한 혼합과 유입이 일어난다.

## 참고문헌

- (1) Krothapalli A., Baganoff, D. and Karamcheti, K., 1981, "On the Mixing of a Rectangular Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 201-220.
- (2) Hussain F. and S. Husain H., 1991, "Elliptic jets. Part2. Dynamics of Coherent Structures: Pairing," *J. Fluid Mech.*, Vol. 208, pp. 439-482.
- (3) Gutmark E. and Ho C. M., 1987, "Vortex Induction and Mass Entertainment in a Small-aspect-ratio Elliptic Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 179, pp. 383-405.
- (4) 이상준, 신대식, 1999, "고해상도 CCD 카메라를 이용한 Single-frame PIV 속도장 측정기법 개발," 대한기계학회논문집, 심사중.
- (5) Quinn W. R., 1989 "On the Mixing in an Elliptic Turbulent Free Jets," *Phys. Fluids(A)*, Vol. 1 (10), pp. 1716-1722.
- (6) Hussain F. and S. Husain H., 1989, "Elliptic jets. Part1. Characteristics of Unexcited and Excited Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 208, pp. 257-320.
- (7) Lee Sang-Joon and Baeg Seung-jo, 1994, "The Effect of Aspect Ratio on the Near-Field Turbulent Structure of Elliptic Jets," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 5 (3) pp. pp. 170-180.