

# 횡단류 제트의 유동 및 난류특성치에 대한 PIV 측정

김경천\* · 김상기\*\* · 윤상열\*\*\*  
(1999년 4월 20일 접수)

## PIV Measurements of Flow and Turbulence Characteristics of Round Jet in Crossflow

Kyung Chun Kim, Sang Ki Kim and Sang Youl Yoon

**Key Words:** Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Crossflow Jet(횡단류제트), Reynolds Number Dependency(레이놀즈수 의존성), Flow and Turbulence Characteristics(유동 및 난류특성)

### Abstract

The instantaneous and ensemble averaged flow characteristics of a round jet issuing normally into a crossflow was studied using a flow visualization technique and Particle Image Velocimetry measurements. Experiments were performed at a jet-to-crossflow velocity ratio, 3.3, and two Reynolds numbers, 1050 and 2100, based on crossflow velocity and jet diameter. Instantaneous laser tomographic images of the vertical center plane of the crossflow jet showed that there exist very different natures in the flow structures of the near field jet even though the velocity ratio is the same. It was found that the shear layer becomes much thicker when the Reynolds number is 2100 due to the strong entrainment of the inviscid fluid by turbulent interaction between the jet and crossflow. The mean and second order statistics were calculated by ensemble averaging over 1000 realizations of instantaneous velocity fields. The detail characteristics of mean flow field, streamwise and vertical r.m.s. velocity fluctuations, and Reynolds shear stress distributions were presented. The new PIV results were compared with those from previous experimental and LES studies.

$u, w$  : 유동방향 및 수직방향 난류 섭동성분  
 $x, z$  : 유동방향 및 수직방향 좌표  
 $\nu$  : 동점성 계수

### 기호설명

$D$  : 제트 노즐 직경  
 $R$  : 속도비 ( $= V_j/U_\infty$ )  
 $Re_D$  : 레이놀즈수 ( $= U_\infty D/\nu$ )  
 $U$  : 국소 평균 유속  
 $U_\infty$  : 횡단류의 평균 유속  
 $V_j$  : 제트의 평균 유속

### 1. 서론

횡단류에 제트가 분사되는 유동은 대단히 복잡한 난류구조를 가지는 전형적인 유동형태인 동시에 공학적으로 많이 응용되는 유동이다. 특히 평판 경계층 유동에 수직으로 분출되는 난류제트는 굴뚝으로부터 오염물질이 확산되는 메커니즘과 연관되며, 수직 이착륙기의 설계에도 관련이 있다. 그 동안 횡단류 제트유동은 많은 연구자들이 실험적 및 수치적 연구를 수행해왔다.<sup>(1)</sup> 실험적 연구의 초기연구로 Pratter & Baines<sup>(2)</sup>는 여러 가지 유동조건에 대해 제트 중심축의 궤적을 구하

\* 부산대학교 기계공학부,  
기계기술연구소 열 및 물질전달 연구실  
E-mail : kckim@hyowon.pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

었다. 그후에는 열선 유속계와 레이저 도플러 유속계로 유동장의 평균속도 및 난류특성치를 측정하는 실험이 수행되었다.<sup>(3,4)</sup>

대부분의 난류전단유동과 마찬가지로 횡단류제트 유동 역시 대규모의 코히어런트 구조가 지배적이며, 이에대한 물리적 이해가 공학적으로 매우 중요하다. 유동가시화 기법의 급속한 발전과 더불어 횡단류 제트의 대규모 구조들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Fric & Roshko<sup>(5)</sup>는 레이저 평면광을 이용하여 연기에 의한 유동가시화 실험을 수행하고 횡단류 유동의 후류에 특징적으로 나타나는 수직와류의 거동을 관찰하였다. Kelso 등<sup>(6)</sup>은 수동 및 풍동을 이용한 가시화 실험을 통하여 제트의 전단층와류, 제트 전방의 말굽와류 및 제트후방에서 발생하는 권선형와동의 존재를 밝혔다. 김경천 등<sup>(7-9)</sup>은 펄스레이저에 의한 토모그래피 유동가시화를 통해 낮은 레이놀즈 유동에서 제트 전후방 전단층에 모두 Kelvin-Helmholtz 형의 roll-up 구조가 발생함을 보였으며, 속도비에 따른 링와류(ring vortex) 및 반전와류쌍(count-rotating vortex pair)의 구조를 규명 한 바 있다.

횡단류제트에 대한 수치적인 연구는 RANS 방정식을 난류모형을 이용하여 해석을 시도해 왔으나 유동의 복잡성으로 인해 평균유동장과 같은 단순한 실험결과도 제대로 재현하지 못하고 있다.<sup>(10)</sup> 최근 대용량의 메모리를 가진 빠른 컴퓨터의 등장으로 복잡한 난류유동장의 거동을 대규모와 모사법(LES)으로 재현함이 가능하게 되었다. Yuan 등<sup>(11)</sup>은 LES 기법을 이용하여 횡단류제트의 유동특성과 코히어런트와의 구조를 규명하여 실험에서 관찰하였던 현상들의 발생원인을 상세하게 기술하였다.

이상과 같은 많은 연구에도 불구하고 횡단류제트 유동과 관련된 많은 의문들이 미해결 상태에 있으며, 특히 횡단류 제트의 가장 특징적인 현상인 반전와류쌍의 생성원인과 이를 지배하는 유동인자의 영향에 대한 규명이 요구되고 있다. 또한 LES 기법에 의한 유동 예측 결과의 신뢰성을 확보하기 위한 정확하고 상세한 유동장 데이터가 필요하다. 본 연구는 PIV 기법으로 횡단류제트의 수직중심면에서의 순간 및 시간평균 유동장을 구하고 레이놀즈수가 횡단류제트의 초기 유동발달에 어떤 영향을 미치는가를 조사한다. 또한 기존

의 실험 및 LES 결과들과 PIV 결과들을 비교 분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

유동가시화 실험 및 유동장 측정 실험은 소형 개회로 저속 풍동에서 행하였다. 풍동의 시험구간은 폭이 80 cm, 높이가 30 cm, 길이가 2 m 이며, 유리 및 아크릴 판으로 제작되어 있다. 3마력의 속도 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 단면비 2.67:1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 촘촘한 그물망을 거쳐 시험구간으로 유입된다. 시험구간으로 유입되는 공기는 자유유동 난류강도가 1 % 이내로 유지된다.

횡단류 제트는 시험구간 입구로부터 25 cm 후방의 시험부 하판에 내경 16 mm의 원형 파이프를 횡단류에 수직으로 위치시키고 공기압축기로부터 나오는 공기를 압력조절기와 유량계를 거쳐 풍동속으로 분출시킴으로써 형성시킨다. 유량계로부터 분출되는 공기는 입자들을 혼합시키는 혼합실에 유입되며, 혼합실에서 제트 출구까지는 35 cm의 직관으로 연결되어 있다. 따라서 제트출구의 속도분포는 완전발달되기 이전의 파이프유동 형태이다.

횡단류의 유동특성을 지배하는 가장 중요한 변수는 횡단류와 제트의 운동량비라고 볼 수 있다. 만약 두 유체가 밀도가 일정하면 운동량비는 다음과 같이 속도비  $R$ 로 근사시킬 수 있다.

$$R = V_j / U_\infty \quad (1)$$

여기서  $V_j$ 는 제트의 유량을 제트 단면적으로 나눈 값이며,  $U_\infty$ 은 횡단류의 자유유동 속도이다. 본 실험에서는  $R$ 을 3.3으로 고정시켰다. 동일한 속도비에서 가장 중요한 유동변수로는 레이놀즈수를 생각할 수 있으며, 여기서 레이놀즈수는 횡단류의 자유유동 속도와 제트의 직경을 기준으로 결정한다. 본 실험에서는 레이놀즈수를 1050과 2100 두 가지에 대해 측정을 수행하였는데, 이 값들은 Yuan 등이 LES를 수행하였던 조건과 동일한 경우이다. 각 경우 자유유동 속도는 각각 1.0 m/s 및 2.0 m/s였다. 실험을 수행할 시 풍동 및 파이프 내부에는 인위적으로 난류를 형성하는 tripping wire를 사용하지 않았다. 따라서 접근하

는 횡단류 경계층은 층류로 사료되며, 제트의 분출구 전방의 경계층 두께는 레이놀즈수 1050 인 경우 12 mm, 2100 인 경우 10 mm 정도 였다. 한편, 제트 유동의 레이놀즈수는 파이프 평균속도와 직경을 기준으로 각각 3470, 6940 이다.

PIV 기법으로 속도장을 측정하기 전에 유동가시화 실험을 실시하였다. 라스킨 노즐에서 발생된 평균입자 직경 2  $\mu\text{m}$ 인 올리브 오일 입자를 제트에만 주입시키고 200 mJ/pulse의 Nd:Yag 레이저를 4 ns 동안 주사하여 순간적인 유동장 절단 영상을 얻었다. 본 연구에서 사용한 온라인 PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 1K  $\times$  1K의 고해상도 CCD 카메라, 동기화장치(Synchronizer, TSI 610032) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 실험에 사용된 광학장치 및 PIV 시스템의 개략도와 좌표계가 Fig. 1에 나와 있다. CCD 카메라에 Nikon 50 mm 표준렌즈를 부착시켜 영상의 왜곡오차를 최소한으로 줄였다. 사용한 입자는 유동가시화와 같은 올리브 오일 에어로졸이며, 제트와 풍동 내부에 모두 주입시켰다. 입자의 분포에 대한 균일성과 입자의 산란광의 크기를 조사한 후 실험을 진행하였다. 본 실험에서 속도벡터의 추출은 TSI사의 INSIGHT-NT 프로그램을 이용하여 2화상 상호상관기법으로 구하였다. 속도 벡터의 격자수는 모두 16002 개이고 벡터간의 공간해상도는 0.63 mm이다. 최대 상호상관계수를 구하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 16  $\times$  16 pixels이고 50%의 겹침이 허용되었다. 구해진 속도 벡터는 본 실험실에서 보유하고 있는 후처리 프로그램으로 불량벡터의 제거, 속도구배의 계산 및 앙상블 평균 등 통계적처리를 수행하였다.

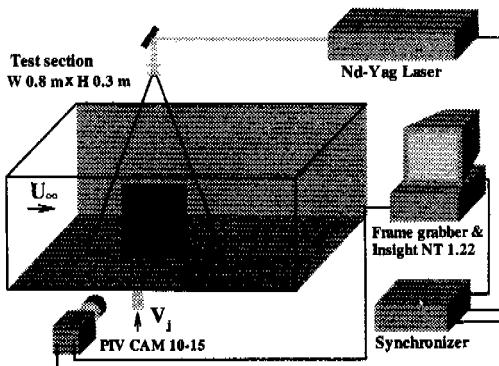


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2 와 3에는 속도비가 3.3일 때 레이놀즈수 1050 및 2100인 경우에 대한 횡단류 제트의 중심 수직단면에서의 순간적인 유동단면을 각각 보여주고 있다. 레이놀즈수가 1050인 경우 제트의 상류 및 하류 경계에서 형성되는 전단층에 Kelvin-Helmholtz 형의 vortex roll-up 현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 규칙적인 전단층 와류는 김경천 등<sup>(7-9)</sup>이 레이놀즈수 710에서 관찰한 바와 같으며, 레이놀즈수가 다소 커짐으로 인하여 와류출 주파수가 커져서 상류측 전단층에 나타난 조직적 구조의 개수가 증가한 것을 알 수 있다. 전단층에서 나타난 조직적 구조는 반전와류쌍의 발달과 더불어 급격히 깨어지는 현상이 보인다. 한편 레이놀즈수가 2100인 경우에는 1050의 경우와는 판이하게 다른 구조를 보여주고 있다. 제트의 상, 하류측 전단층에는 횡방향(spanwise)와의 존재가 보이고는 있으나, 제트 분출 초기부터 불규칙한 난류특성을 보여주고 있다. 이 결과로부터 속도비가 비록 3.3으로 일정하더라도 레이놀즈수에 따라 횡단류 제트의 발전과정이 매우 다르므로 레이놀즈수 1050과 2100 사이에 어떤 임계 레이놀즈수가 존재한다는 것을 분명히 알 수 있다. Fig. 3을 자세히 보면 흰색으로 보이는 제트의 유체가 레이놀즈수 1050 경우보다 훨씬 광범위하게 혼합이 되고 있음을 알 수 있다. 제트 출구 상부 2D 위치에 횡단류의 비점성 유체가 제트 속으로 깊이 침입된 증거가 보이고 있다. 이러한 거동은 Yuan 등이 수행한 동일 조건에서의 LES 결과에서도 나타난 바 있다.

Fig. 4와 5에는 각 경우에 대한 순간속도장이 나와 있다. 순간유동가시화에서 보이는 바와 같이 레이놀즈수가 1050인 경우 전단층 와류가 보다 규칙적으로 형성되어 제트 기둥과 함께 이동되다가 제트가 급격히 구부러짐과 동시에 와류의 파괴현상이 관찰된다. 레이놀즈수가 2100인 경우 전단층의 조직적 와의 존재를 관찰할 수 있으나 활발한 난류혼합작용으로 제트의 전단층 폭이 두꺼워지고, 이와 함께 제트의 구부러짐도 더욱 빨리 진행됨을 알 수 있다. 또한 활발한 외부유체의 유입으로 난류의 간헐도(intermittency)가 1050의 경우보다 커짐을 볼 수 있다. 두 경우 모두

제트측면 후부에서 발생하는 음의 압력으로 역류가 발생하고 있으며, 측면에서 각각 반대방향으로 선회하는 고깔형의 와류가 중첩되어 수직중심단면에서 광범위한 수직상승류가 관찰되고 있다. 이와같은 유동은 횡단류제트의 대표적인

유동 특성인 반전와류쌍의 기원이 된다. 한편, 벽면근처에서 간헐적으로 변화하는 속도벡터의 뭉치들이 관찰되는데, 이는 횡단류제트의 후류에서 발생하는 수직와류(upright vortex)의 흔적으로 판단된다.



Fig. 2 Instantaneous tomographic image at the centerplane,  $Re_D = 1050$

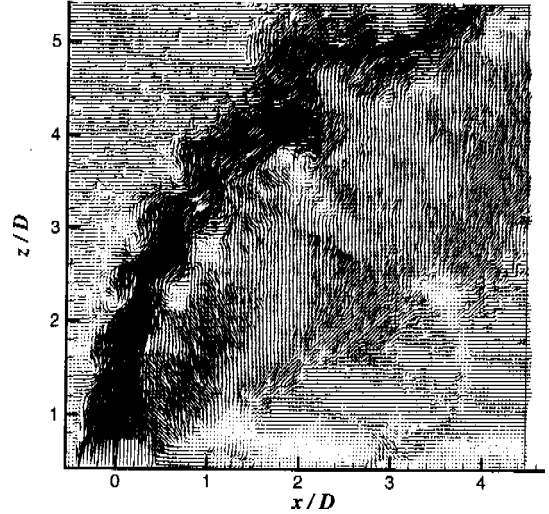


Fig. 4 Instantaneous velocity vector field at the centerplane,  $Re_D = 1050$



Fig. 3 Instantaneous tomographic image at the centerplane,  $Re_D = 2100$

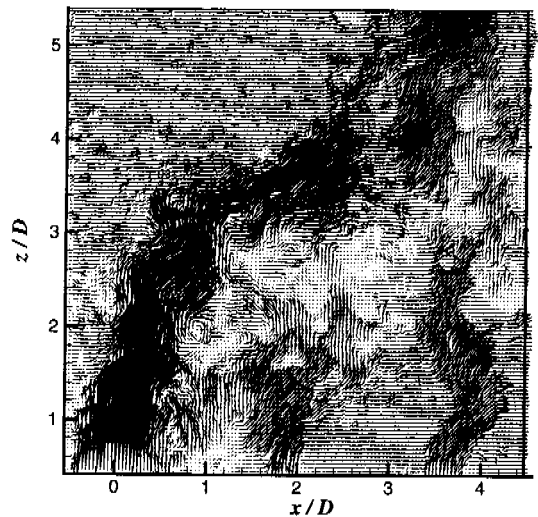


Fig. 5 Instantaneous velocity vector field at the centerplane,  $Re_D = 2100$

Fig. 6과 7은 레이놀즈수 1050과 2100에 대해 1000장의 순간속도장을 앙상블 평균한 후 유선의 분포를 그린 그림이다. 본 실험은 2장의 연속 영상으로 상호상관법에 의해 속도벡터를 구하였기 때문에 각 경우에 사용된 영상화일은 각각 2000 개씩이다.

시간평균유동장을 살펴보면 초기의 횡단류 제트 중심단면에서는 분출된 제트 유체가 구부러지면서 이동되는 주유동, 제트 후부의 횡단류 유체가 주유동에 여기되어 경사지게 이동되는 여기유

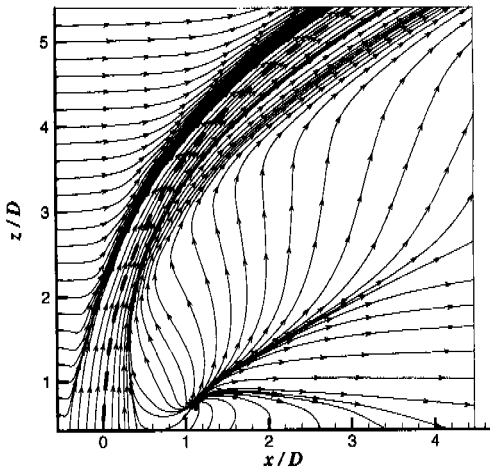


Fig. 6 Streamlines from ensemble averaged velocity field,  $Re_D = 1050$

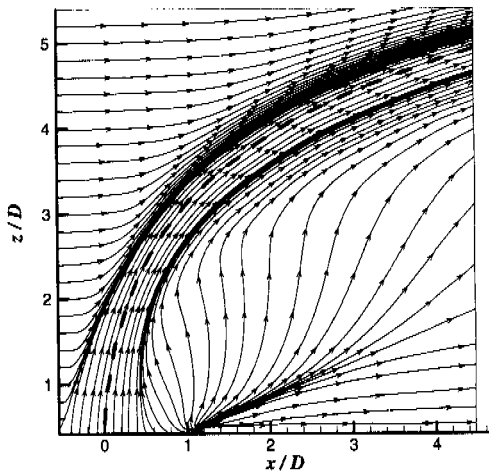


Fig. 7 Streamlines from ensemble averaged velocity field,  $Re_D = 2100$

동, 그리고 주유동과 여기유동 사이에 있는 유체들이 수직방향으로 이동되어 주유동에 합쳐지는 유입유동과 같은 세 가지 특징들을 보여주고 있다.

그림에서 점선으로 나타낸  $x = 0$ 을 통과하는 유선은 횡단류 제트의 평균계적이라고 정의할 수 있으며 이후 그림들의 기준으로 사용된다. 제트 후방에서는 여기유동과 유입유동이 하나의 점 소스로부터 출발하는 현상을 볼 수 있다. 시간평균 유동장의 유선들은 동일한 속도비 조건에서 레이놀즈수가 유동장에 미치는 영향을 보다 분명히 보여주고 있다. 가장 큰 특징은 레이놀즈수가 2100인 경우 제트의 구부러짐이 1050인 경우보다 빠르며,  $x/D$ 가 3정도 위치에서 중심선이 약  $1D$  정도 낮아짐을 알 수 있다. 여기유동이 출발하는 소스점의 위치도 레이놀즈수에 의존되며, 레이놀즈수가 1050일 때 소스점은  $x/D = 1.06$ ,  $z/D = 0.75$  위치에서 발생되고 2100인 경우  $x/D = 1.13$ ,  $z/D = 0.5$ 에서 발생한다. 제트 후방에서의 소스점 근처의 유동에서 또 하나 주목해야 하는 사실은 소스점과 벽면사이에서 횡단류와 수직인 방향으로 유선이 형성되어 있다는 점이다. 이러한 상황은 와도가 생성되는 벽면 유동을 구부러지는 제트 유동과 연결시켜 주는 상황을 의미하므로 수직와류의 생성메커니즘과 연관이 있다고 생각 된다.

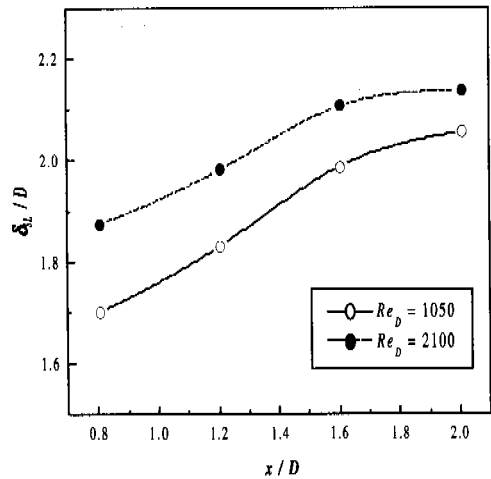


Fig. 8 Changes of jet shear layer thickness in streamwise direction

Fig. 8은 유동방향에 따른 두 레이놀즈수에 대한 제트의 전단층두께의 변화를 나타낸다. 그림에서  $\delta_{SL}$ 은 제트 전단층두께로서 제트의 상하 경계에서 유동속도크기( $=\sqrt{(U^2+W^2)}$ )의 수직방향 구배가 0이 되는 지점으로 정의하였다. 전단층두께는 제트가 발달함에 따라 두 레이놀즈수 모두에 대해 점진적으로 증가하고 있으며, 앞서 Fig. 2~Fig. 5에서 고찰한 바와 같이 레이놀즈수가 2100인 경우 1050인 경우에 비해 그 값이 크게 나타나고 있다.

난류응력항을 구하기 위해 모든 순간속도장에서 시간평균유동장을 뺀 r.m.s.값을 1000번 이상을 평균하였다. PIV 실험에서 구한 속도벡터의 간격이 0.63 mm이므로 이보다 작은 스케일의 난류응력은 필터링된 결과이다. 그러나 난류응력의 대부분은 규모가 큰 에디에서 발생되므로 PIV에서 얻은 결과를 충분히 신뢰할 수 있다. Fig. 9와 10에는 각각 흐름방향 및 수직방향의 레이놀즈 법선응력 분포가 나와있다.

흐름방향의 난류성분은 제트가 분출되기 전 파이프에서도 작은 값을 가지므로 제트의 상부전단층에서는 수직위치 0.5D까지는 매우 작은 값을 보이고 있다. 제트의 상하류측 전단층이 발달해 가면서 유동방향 난류응력은 점점 증가하다가 전단층의 roll-up 구조들이 서로 만나면서 급격히 증가한다. 유동방향 난류응력의 최대값은 제트의 평균궤적을 기준으로 할 때, 하류측에 위치하며 주유동이 급격히 구부러지는 위치와 일치한다.

수직방향의 난류성분은 제트의 상,하류측 전단층에서 roll-up 구조가 발생하는 지역에 집중되어 있으며, 조직적인 와류가 빨리 생성되는 상류측 경계에 큰 값이 분포되어 있다. 또한 흐름방향의 난류응력에 비해 응력의 크기도 1.5배 정도 크다. Fig. 9와 10을 비교해 보면 전반적인 횡단류 유동의 난류는 비등방성을 가지며, 수직방향 난류응력의 최대값은 흐름방향과는 반대로 제트 중심선을 기준으로 상류(외부)측에 위치하고 있다. 또한 제트가 하류로 진행할 때 수직방향 난류성분은 두갈래로 나뉘어짐을 알 수 있다. 제트중심축을 따라 진행하는 수직성분 난류는 전단층 와류의 결합구조가 제트와 함께 이송됨을 뜻하며, 제트 중심축 아래쪽 피크는 제트와 횡단류 사이의 전단층 또는 반전와류쌍의 간헐도로부터 기인된다고 볼 수 있다.

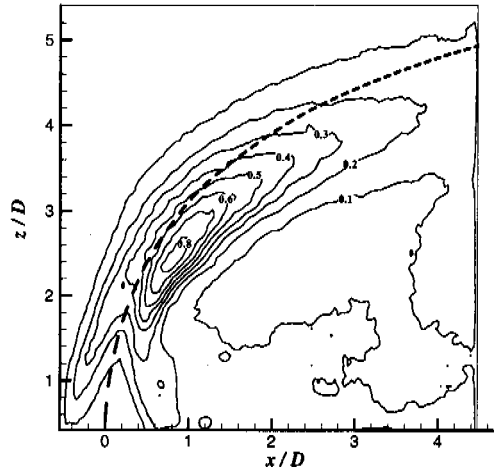


Fig. 9 Contours of streamwise normal stress  $\langle uu \rangle / U_\infty^2$  at the centerplane ( $Re_D=2100$ )

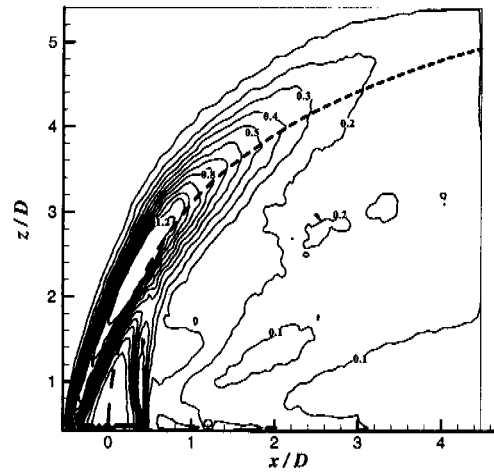


Fig. 10 Contours of vertical normal stress  $\langle ww \rangle / U_\infty^2$  at the centerplane ( $Re_D=2100$ )

Fig. 11은 레이놀즈 전단응력의 분포를 보여주 고 있다. 이 그림에서도 제트의 초기영역에서는 전단층에서 생성된 roll-up 구조들이 난류전단응력 생성에 가장 큰 역할을 하고 있다는 사실을 알 수 있다.  $\langle ww \rangle$  값은 상류측 전단층에서 큰 음의 값을 가지는 반면, 하류측 전단층에서는 양의 값을 가지며, 이 지역은 수직속도의 수평방향 구배가 매우 큰 영역이다. 따라서 난류전단응력은  $u$ 성분의 난류성분과 전단층에서의 강한 수직속도의 수평방향구배의 상호작용으로 생성된다.  $z/D$ 가 3정도부터 제트의 방향이 구부러지면 오히려 제트중심축 하부(하류측)에 음의 전단응력이

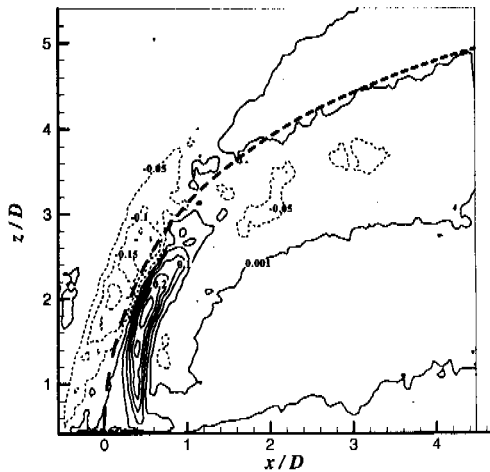


Fig. 11 Contours of Reynolds shear stress  $\langle uw \rangle / U_\infty^2$  at the centerplane ( $Re_D=2100$ )

분포되고 있음을 볼수 있다. 이는  $\langle uw \rangle$  전단응력의 발생 요인이 제트에서 횡단류로 전환되는 결과이다. 즉, 제트가 구부러지고 난 후에는 수직속도의 구배가 작아지는 반면 수평속도의 수직방향 구배가 더 큰 값을 가진다. 또한 반전와류쌍의 발전으로 수직성분의 난류가 활발해지므로 이 두 요인이 결합하여 난류전단응력이 생성된다.

본 연구에서 구한 결과를 기존의 실험결과와 최근에 수행된 수치해석결과와 서로 비교하여 보았다. 실험결과는 Sherif & Pletcher<sup>(12)</sup>가 수행한 single hot-film 데이터인데, 이들이 실험한 경우는 속도비가 4.0, 레이놀즈수가 4820으로 본 실험의 경우보다 모두 조금씩 높은 경우이다. 수치해석은 Yuan 등<sup>(11)</sup>이 수행한 LES 결과인데, 속도비와 레이놀즈수는 본 실험과 정확히 일치하나 접근유동의 경계층 특성과 분출되는 제트의 조건이 다소 차이가 있다.

Fig. 12에는 제트 중심단면의 세 위치에서 구한 평균속도의 크기에 대한 분포도이다. Hot-film 실험에서 I형 프로우브를 사용하였기 때문에 비교를 위해 LES 결과는 3차원속도 벡터의 크기를, PIV 결과는 2차원 속도벡터 크기를 구하였다. 그림에서  $x/D = 0$  의 위치에서 LES 결과와 PIV 결과가 매우 잘 일치함을 보여준다. Hot-film 결과는 속도 데이터가 약간 벽면쪽으로 이동하고 제트 출구 가까이에서의 속도가 더 큰값을 가지고 있다. 이는 레이놀즈수가 커질수록 최대속도

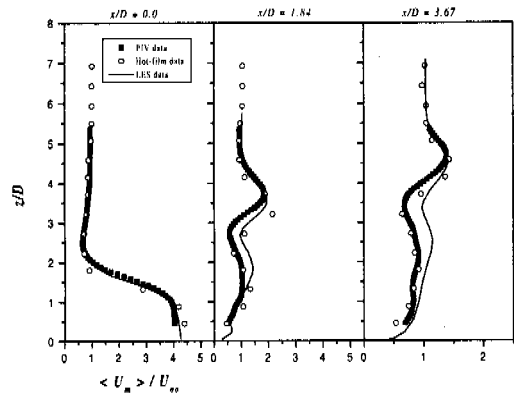


Fig. 12 Comparison of vertical profiles of mean velocity magnitude at the centerplane

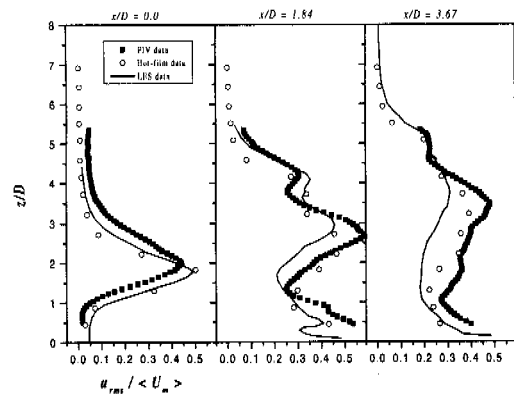


Fig. 13 Vertical profiles of r.m.s. fluctuations in velocity magnitude at the centerplane

지점이 벽쪽으로 이동하는 경향과 속도비가 더 크다는 조건으로 설명될 수 있다.  $x/D = 1.84, 3.67$  위치에서 두 실험결과는 최대 속도점의 위치만 조금 차이가 있을 뿐 서로 잘 일치하고 있다. LES 결과는 두 개의 피크가 나타나는 속도분포의 경향을 잘 예측하고 있으며 최대속도의 크기나 위치도 PIV 결과와 정확히 일치한다. 속도의 크기는 최대속도점 상부에서는 실험결과를 잘 재현하나 하부에서는 전반적으로 다소 큰 값을 가진다. 아마도 이 차이에는 LES에서 속도벡터 크기를 구할 때 3차원 성분을 모두 사용하므로 횡방향 속도성분이 큰 영역에서  $v$  성분이 더해진 영향도 포함되었으리라 추측한다.

Fig. 13에는 속도크기의 r.m.s. 성분의 수직방향 분포가 비교되어 있다. 전반적으로 두 실험결과의 값은 서로 근접하나 레이놀즈수가 다소 높은 Hot-film 결과에서 최대점의 위치가 아래에 있다. 이

는 속도크기 분포에서 속도구배의 최대점이 아래에 위치함과 같은 경향이다. LES 결과는 제트 출구 위치에서 PIV 결과보다 Hot-film 결과와 더 잘 맞는데, 이는 LES를 수행할 때 제트출구 조건이 초기 유동에 매우 민감한 영향을 끼침으로 인하여 기존의 실험결과와 가능한 일치되는 초기조건을 부여하였기 때문으로 볼 수 있다. LES 결과는 제트 중심축 하부에서 전반적으로 PIV 결과보다 작은 값을 보였는데, 이는 r.m.s. 값을 국소속도의 크기로 나눌 때 Fig. 13에서 보인 바와 같이 평균속도의 크기가 전반적으로 큰 것이 일부 원인이 될 수 있다.

#### 4. 결론

횡단류제트의 수직중심면에 대한 순간 및 평균유동장을 PIV 기법으로 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 속도비에도 불구하고 레이놀즈수가 다른 경우 제트의 발전 거동에 매우 큰 차이가 있음을 발견하였다.
- (2) 속도비가 3.3인 경우 레이놀즈수가 1050부터 2100 사이에 임계 레이놀즈수가 존재함을 알 수 있었다.
- (3) 레이놀즈수가 큰 경우 강한 난류확산으로 제트의 전단층 두께가 커지고 제트의 평균궤적이 일찍 구부러진다.
- (4) 평균유동장으로부터 횡단류 제트의 중심면에는 주유동, 여기유동 및 유입유동의 세 가지 특징적인 유동장이 존재함을 알 수 있다.
- (5) 제트의 초기영역에서는 상·하류측 경계면에서 발생된 roll-up 구조의 와류들이 난류생성의 지배적인 메커니즘을 이룬다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지원 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

#### 참고문헌

(1) Margason, R. J., 1993, "Fifty Years of Jet in

Crossflow Research," *In Computational and Experimental Assessment of Jets in Cross Flow*, AGARD-CP-534, Winchester, UK.

- (2) Pratte, B. P. and Baines, W. D., 1967, "Profiles of the Round Turbulent Jet in a Crossflow," *Journal of the Hydraulics Division, Proc. of the ASCE*, HY(6), pp. 56~63.
- (3) Crabb, D., Durao, D. F. G. and Whitelaw, J. H., 1981, "A Round Jet Normal to a Crossflow," *J. Fluids Engineering*, Vol. 103, pp. 142~153.
- (4) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "On the Structure of Jets in Crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 157, pp. 163~197.
- (5) Fric, T. F. and Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1~147.
- (6) Kelso, R. M., Lim, T. T. and Perry, A. E., 1996, "An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 306, pp. 111~144.
- (7) 김경천, 신대식, 이부환, 1998, "분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(I)," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제1호, pp. 25~33.
- (8) 김경천, 신대식, 1998, "분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(II)," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제7호, pp. 1013~1021.
- (9) 김경천, 신대식, 박기영, 1998, "분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(III)," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제11호, pp. 1571~1581.
- (10) Claus, R. W. and Vanka, S. P., 1992, "Multigrid Calculations of a Jet in Crossflow," *J. Propulsion and Power*, Vol. 8(2), pp. 425~431.
- (11) Yuan, L. L., Street, R. L. and Ferziger, J. H., 1999, "Large Eddy Simulations of a Round Jet in Crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 379, pp. 71~104.
- (12) Sherif, S. A. and Pletcher, R. H., 1989, "Measurements of the Flow and Turbulence Characteristics of Round Jets in Crossflow," *J. Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 165~171.