

## 초기조건변화에 따른 횡단류 제트 유동의 전단층와류 거동 특성

김상기\* · 윤상열\* · 이석호\*\* · 김경천†  
(2001년 2월 27일 접수, 2002년 1월 10일 심사완료)

### Characteristics of Shear Layer Vortices in Crossflow Jets According to the Inlet Conditions

Sang Ki Kim, Sang Youl Yoon, Seok-Ho Rhi and Kyung Chun Kim

**Key Words:** Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Crossflow Jet(횡단류제트), Reynolds Number(레이놀즈수), Jet Inlet Condition(제트입구조건), Shear Layer Vortex(전단층와류)

#### Abstract

The instantaneous flow characteristics of a round jet issuing normally into a crossflow has been studied using a flow visualization technique and particle image velocimetry. The effects of parameters such as jet inflow profile and turbulence intensity of the jet are evaluated for various Reynolds numbers in range between 735 and 3150, which are based on the crossflow velocity and jet-pipe diameter. The jet-to-crossflow velocity ratio is fixed at the value of 3.3. Instantaneous laser tomographic images of the symmetry plane of the crossflow jet show that there exist very different natures in the flow structures of the near-field of the jet even though the velocity ratio is same. It is found that when the turbulence intensity of jet is elevated, the shear layer becomes much thicker due to the strong entrainment of the ambient fluid by turbulent interaction between the jet and crossflow. The detailed characteristics of instantaneous velocity and vorticity fields are presented to illustrate the effects of the above parameters on the vortical structures of the crossflow jet.

#### 기호설명

$D$  : 제트노즐직경

$M$  : 격자크기

$R$  : 속도비 ( $= V_j/U_\infty$ )

$Re_D$  : 레이놀즈수 ( $= U_\infty D/\nu$ )

$Re_j$  : 제트 레이놀즈수 ( $= V_j D/\nu$ )

$U$  : 국소 평균 유속

$U_\infty$  : 횡단류의 평균 유속

$V_j$  : 제트의 평균 유속

$u, w$  : 유동방향 및 수직방향 난류섭동성분

$x, z$  : 유동방향 및 수직방향 좌표

$\nu$  : 동점성 계수

$\omega_y$  : 유동횡방향 와도

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국에너지기술연구원 폐열이용 연구센터

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부,

기계기술연구소 열 및 물질전달 연구실

E-mail : kckim@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

#### 1. 서론

횡단류(crossflow)에 제트가 분사되는 유동은 각종 플랜트, 기관차 및 선박 등으로부터 분출되는 오염물질의 확산 메커니즘 해석, 수직 이착륙기

(V/STOL)나 가스터빈 연소기의 냉각계통 설계 등에서 응용될 수 있는 기본적인 유동이다. 따라서 많은 유체공학자들이 횡단류 제트의 초기분출영역에서 형성되는 매우 복잡한 3차원적 난류구조를 규명하기 위해 실험 및 수치적 연구를 수행해 오고 있다.

대부분의 난류전단유동과 마찬가지로 횡단류 제트 유동 역시 대규모의 조직적 구조(large-scale coherent structure)가 지배적이며, 이에 대한 물리적 이해가 공학적으로 매우 중요하다. 횡단류 제트 유동은 크게 4가지의 잘 알려진 와류구조들로 구성되는데, 제트의 상류에서 형성되어 제트기둥을 휘감겨 올라가는 말발굽와류(horseshoe vortex), 제트 경계에서 반지형 와류(ring vortex)를 형성하는 제트 전단층(shear layer), 제트기둥의 하류에서 형성되는 후류 구조(wake structure) 및 제트가 횡단류 방향으로 굽어지면서 형성되는 반전와류쌍(counter-rotating vortex pair, CVP) 등이 그것들이다.<sup>(1)</sup>

이러한 횡단류 제트 내의 다양한 와류구조들은 그 형성 메커니즘에 있어서 상호 유기적으로 작용한다. 많은 연구들은 이러한 횡단류 제트의 난류구조 및 특성을 규명하기 위하여 다양한 실험적 기법을 이용하여 수행되었다.

실험적 연구의 초기연구로 Pratter와 Baines<sup>(2)</sup>는 여러 가지 유동조건에 대해 제트 중심축의 궤적을 구하였다. 그 이후에는 열선 유속계와 레이저 도플러 유속계로 유동장의 평균속도 및 난류특성치를 측정하는 실험이 수행되었다.<sup>(3,4)</sup>

유동가시화 기법의 급속한 발전과 더불어 횡단류 제트의 대규모 구조들에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Fric과 Roshko<sup>(1)</sup>는 레이저 평면광을 이용하여 연기에 의한 유동가시화 실험을 수행하고, 횡단류 유동의 후류에 특징적으로 나타나는 수직와류의 거동을 관찰하였다. Kelso 등<sup>(5)</sup>은 유동가시화 및 flying-hot-wire 측정 기법을 이용하여 제트의 전단층와류, 제트 전방의 말굽와류 및 제트후방에서 발생하는 권선형와동의 존재를 밝혔으며, 제트 전단층에서의 roll-up 구조가 CVP 형성의 기원이 됨을 밝혔다. 김경천 등<sup>(6,7)</sup>은 필스레이저에 의한 토모그래피 유동가시화를 통해 낮은 레이놀즈 유동에서 제트 전후방 전단층에 모두 Kelvin-Helmholtz 형의 roll-up 구조가 발생함을 보였으며, 속도비에 따른 반지형와류 및 반전와류

쌍(count-rotating vortex pair)의 구조를 규명한 바 있다. 또한 최근에는 2차원 PIV 측정기법을 이용하여 횡단류 제트의 중심면에 대한 평균난류유동장 특성을 보고한 바 있다.<sup>(8)</sup>

한편 Yuan 등<sup>(9)</sup>은 LES기법을 이용하여 횡단류 제트의 유동특성과 조직적 구조를 규명하여 실험에서 관찰하였던 현상들의 발생원인을 상세하게 기술하였다. 이들의 수치해석 결과에 의하면 횡단류 제트의 초기 발달과정은 제트출구 속도형상의 변화에 대해 매우 민감하게 변화하였다.

지금까지의 연구에서 제트 출구유동의 초기 조건들이 횡단류 제트유동의 초기 발달과정에서 나타나는 전단층 와류에 얼마나 큰 영향을 주는지에 대해 체계적으로 규명한 연구가 수행되지 않았다. 횡단류 제트의 가장 큰 영향인자인 속도비를 일정하게 두었을 경우에도 레이놀즈수, 제트의 초기 난류강도, 제트분출 속도분포형상 등과 같은 파라미터들이 횡단류제트의 초기 난류구조의 형성에 있어서 직접적인 영향을 미치며 난류구조의 변화를 유발시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 2차원 순간유동장을 측정할 수 있는 PIV 기법을 활용하여 제트 대칭면에 대한 순간난류유동장을 측정, 분석하고 이들 인자들이 제트 구조에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동은 소형 개회로 저속 풍동으로서 시험구간은 폭이 80 cm, 높이가 30 cm, 길이가 2 m 이며, PIV 실험을 위해 상하벽은 유리, 측면은 아크릴 판으로 구성되어있다. 3마력의 속도 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 단면축소비가 2.67인 2차원 수축노즐을 통과한 후 스크린을 거쳐 시험구간으로 유입된다. 시험구간 입구에는 자유흐름에 등방성 난류를 형성시켜주기 위해 격자의 크기가 1.8mm인 메쉬스크린(mesh screen)을 설치하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸다. 내경(D) 16 mm의 횡단류 제트노즐은 시험구간 입구로부터 250 mm 후방의 시험부 하판에 수직으로 위치하며, 제트 출구의 난류강도 및 속도분포를 제어하기 위하여 소형 정체실, 난류격자 및 일정 길이의 파이프를 구성된다. 제트출구의 난류강도를 제어하기 위한 난

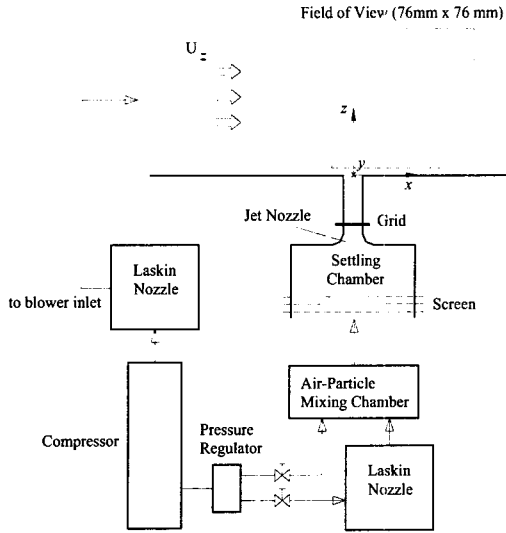


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

류격자는 두께가 0.38 mm인 메쉬스크린(mesh screen)으로서 격자의 크기( $M$ )는 1.8 mm이다. 제트출구의 유동형태를 제어하기 위해 40 mm(Case III) 또는 350 mm(Case IV, V)의 연결관이 사용되었다. 횡단류 제트는 압축기로부터 압력조절기 및 유량조절밸브에 의해 일정유량으로 조절되어 공급된다. PIV 실험을 위한 입자는 두 대의 Laskin 노즐에 의해 독립적으로 생성되어 횡단류와 제트유동으로 각각 공급된다. 이때 보다 정확한 PIV 측정을 위해서 관측부에서의 입자농도 분포가 균일하도록 횡단류와 제트유동에서의 농도 조절이 요구된다. 사용된 입자는 평균직경이 약 2  $\mu\text{m}$ 인 올리브오일 에어로졸이다.

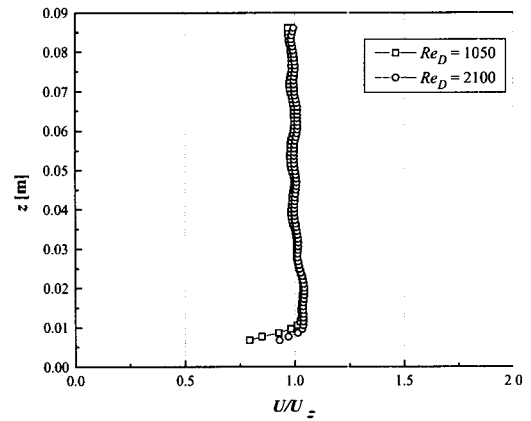
Table 1은 본 실험에 사용된 실험조건들을 나타낸다. 횡단류제트의 유동특성을 지배하는 가장 중요한 변수는 횡단류와 제트의 운동량비라고 볼 수 있다. 만약 두 유체가 밀도가 일정하면 운동량비는 다음과 같이 속도비,  $R$ 로 근사시킬 수 있다.

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

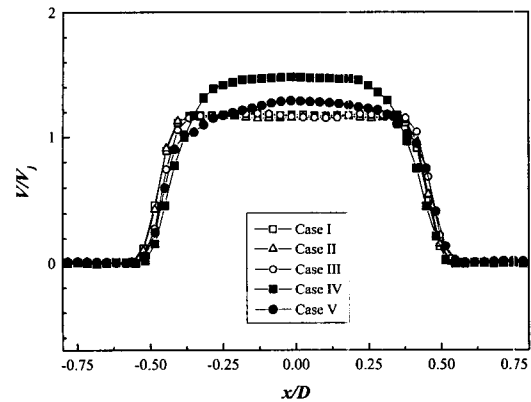
여기서  $V_j$ 는 제트의 유량을 제트 단면적으로 나눈 값인 제트평균유속이며,  $U_\infty$ 은 횡단류 유속이다.

Table 1 Experimental conditions for vorticity measurements

| Case | $R$ | $Re_D$ | $Re_j$          | Flow Condition      |     |      |      |                   |    |     |      |      |           |   |     |      |      |                     |
|------|-----|--------|-----------------|---------------------|-----|------|------|-------------------|----|-----|------|------|-----------|---|-----|------|------|---------------------|
| I    | 3.3 | 1050   | 3470            | Top-hat profile     |     |      |      |                   |    |     |      |      |           |   |     |      |      |                     |
| II   | 3.3 | 2100   | Top-hat profile | III                 | 3.3 | 2100 | 6940 | Top-hat with grid | IV | 3.3 | 1050 | 3470 | Pipe flow | V | 3.3 | 2100 | 6940 | Pipe flow with grid |
| III  | 3.3 | 2100   | 6940            | Top-hat with grid   |     |      |      |                   |    |     |      |      |           |   |     |      |      |                     |
| IV   | 3.3 | 1050   | 3470            | Pipe flow           |     |      |      |                   |    |     |      |      |           |   |     |      |      |                     |
| V    | 3.3 | 2100   | 6940            | Pipe flow with grid |     |      |      |                   |    |     |      |      |           |   |     |      |      |                     |



(a) Crossflow velocity profiles without jet



(b) Jet inflow profiles without crossflow

Fig. 2 Velocity profiles for experimental conditions

다. 본 실험에서는  $R$ 을 3.3으로 고정시켰다. 동일한 속도비에서 가장 중요한 유동변수로는 레이놀즈수를 생각할 수 있으며, 여기서 레이놀즈수

( $Re_D$ )는 횡단류 유속과 제트의 직경을 기준으로 결정한다. 본 실험에서는 레이놀즈수를 1050과 2100 두 가지에 대해 측정을 수행하였는데, 각 경우 자유유동 속도는 각각 1.0 및 2.0 m/s 였다. 한편, 제트 유동의 레이놀즈수( $Re_j$ )는 파이프 평균유속과 직경을 기준으로 각각 3470과 6940이다. 본 연구에서의 실험조건 설정에 대한 마지막 변수는 제트출구조건(유속분포 형상 및 난류강도 변화)이다. 이것은 횡단류의 경계층과 관련되어 제트 전단층의 와류구조에 직접적인 영향을 미칠 것으로 기대된다. Fig. 2는 레이놀즈수에 따른 시험부 입구에서의 횡단류 유속분포 및 각 실험조건에 대한 제트출구 유속분포형상들을 나타낸다. Fig. 2의 유속분포는 모두 PIV로 측정된 결과들이다. 횡단류는 모든 실험조건에 대해 난류강도 1% 이하의 균일유동으로서 제트의 중심이 위치하는 좌표계의 원점에서 약 10 mm의 벽면 경계층 두께를 가진다. 난류격자의 부착시 제트출구 중심의 난류강도는 약 3%이다. 난류강도는 열선 유속계를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서 사용한 온라인 PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저와 1K×1K의 고해상도 CCD 카메라, 동기화 장치(Synchronizer, TSI 610032) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 본 실험에서 속도벡터의 추출은 2화상 상호 상관기법으로 구하였으며, 속도 벡터의 격자수는 모두 16,384개이고 벡터간의 공간해상도는 약 0.6 mm 이다. 최대 상호상관계수를 구하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 16×1 pixels 이고 50%의 겹침이 허용되었다. 구해진 속도 벡터는 후처리 프로그램(PIVACE)으로 불량벡터의 제거, 속도구배의 계산 및 앙상블 평균 등 통계 처리되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동가시화

레이놀즈수에 따른 제트구조의 정성적 분석 및 제트출구 난류강도에 대한 영향을 파악하기 위하여 유동가시화를 수행하였다. 모든 조건들에 대해서 속도비는 3.3으로 일정하게 부여하였다.

Fig. 3은 제트노즐에 난류격자가 부착되지 않은 Top-hat 제트 속도분포형상에 대해 레이놀즈수 변화에 따른 유동가시화 결과이다. 영상들은 4 ns

동안의 레이저 주사에 대한 제트의 대칭면을 획득한 것이다. 모든 레이놀즈수에 대해서 제트기둥의 상·하류경계에서 형성되는 전단층에 Kelvin-Helmholtz형의 vortex roll-up 현상이 매우 조직적으로 형성되고 있으며, 레이놀즈수가 증가하면서 와류유출 주파수가 증가하여 그 크기가 점차 작아지고 있다. 이러한 구조는 제트가 굽어지면서 반전와류쌍의 발달과 함께 급격하게 붕괴되는데 그 위치 또한 레이놀즈수가 증가함에 따라 짧아지며 하류의 제트 전단층이 두꺼워지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 레이놀즈수가 커짐에 따른 유동의 불안정성의 증가에 기인한다고 판단된다.

Kelso 등<sup>(5)</sup>은 하류쪽 전단층에는 roll-up 구조가 발생하지 않는다고 주장한 반면 김경천 등<sup>(6)</sup>은 하류쪽 전단층에도 roll-up 구조가 분명히 관찰된다고 상반된 주장을 한 바 있다. 그러나 본 실험의 연구결과로부터 이들 두가지 주장은 모두 사실이며 단지 레이놀즈 수의 차이에 의해 현상이 달라짐을 알 수 있다(Fig. 3 (a)와 (g)참조). 난류격자가 부착된 Fig. 4의 경우에는 Fig. 3과 판이하게 다른 결과를 보여준다. 속도비가 일정하므로 레이놀즈 수가 증가함에 따라 제트가 분출되는 관 내의 레이놀즈 수도 비례적으로 증가하게 된다. 제트출구에서의 난류강도는 Fig. 2 (c)에서 보는 바와 같이 레이놀즈 수가 증가할 때 격자의 후류에 의한 섭동성분이 증가하여 점점 증가하는 경향을 보인다. 가장 낮은 레이놀즈수에서는 제트의 전, 후방에 모두 규칙적인 Kelvin-Helmholtz형 roll-up 구조가 관찰된다. 그러나, grid에 의한 초기전단층의 교란으로 roll-up이 발생하는 위치가 상당히 달라진 것을 알 수 있다. 이는 교란이 전단률(shear rate)을 감쇄시킨 결과로 판단된다. 레이놀즈수가 증가할수록 Fig. 3에서와 같은 규칙적인 roll-up 구조는 아니더라도 불규칙적인 roll-up구조가 발생되다가 레이놀즈수가 2100이 넘어서면서 규칙적인 전단층 구조는 거의 찾아볼 수 없다. 이것은 제트 자체의 난류성분에 의해 자유유동과의 간섭이 불규칙하게 형성되기 때문으로 판단되며, 활발한 난류혼합작용에 의해 제트의 전단층 폭이 Fig. 3의 동일 레이놀즈수 결과에 비해 두꺼워지고 3차원적 구조로 빨리 발달하기 때문이다.

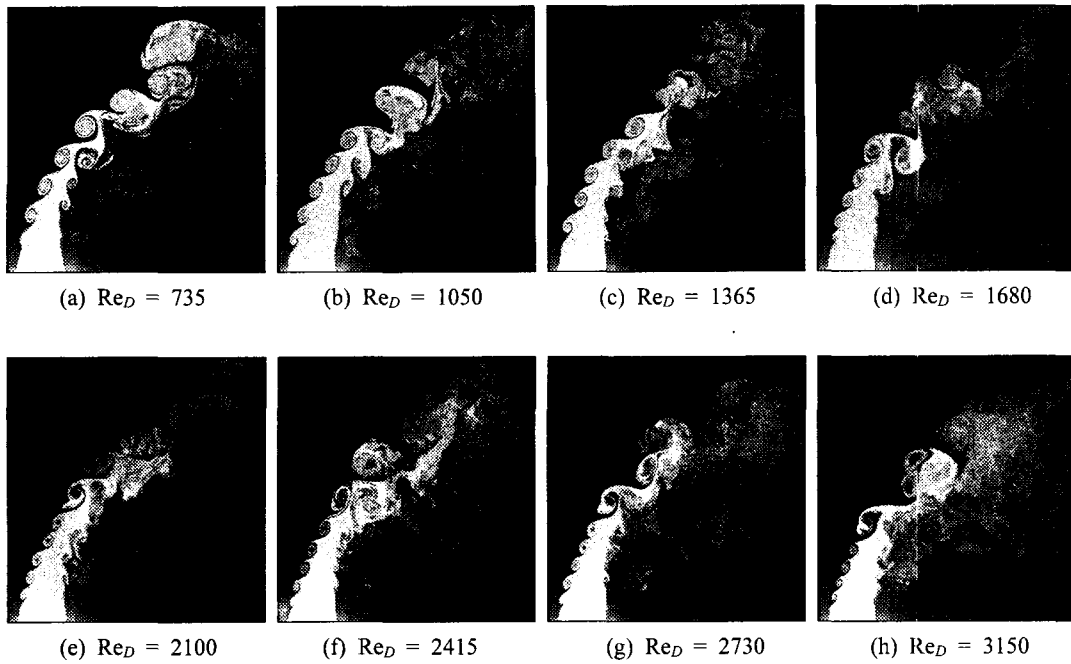


Fig. 3 The variation of jet structure with increase of  $Re_D$  (top-hat, without grid)

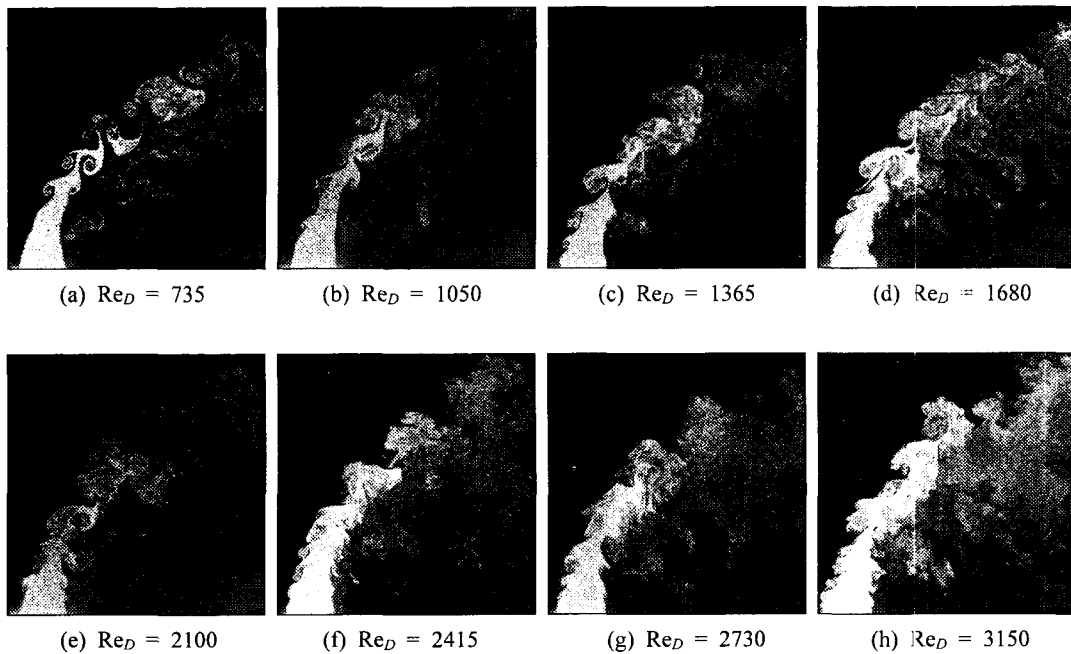


Fig. 4 The variation of jet structure with increase of  $Re_D$  (top-hat, with grid)

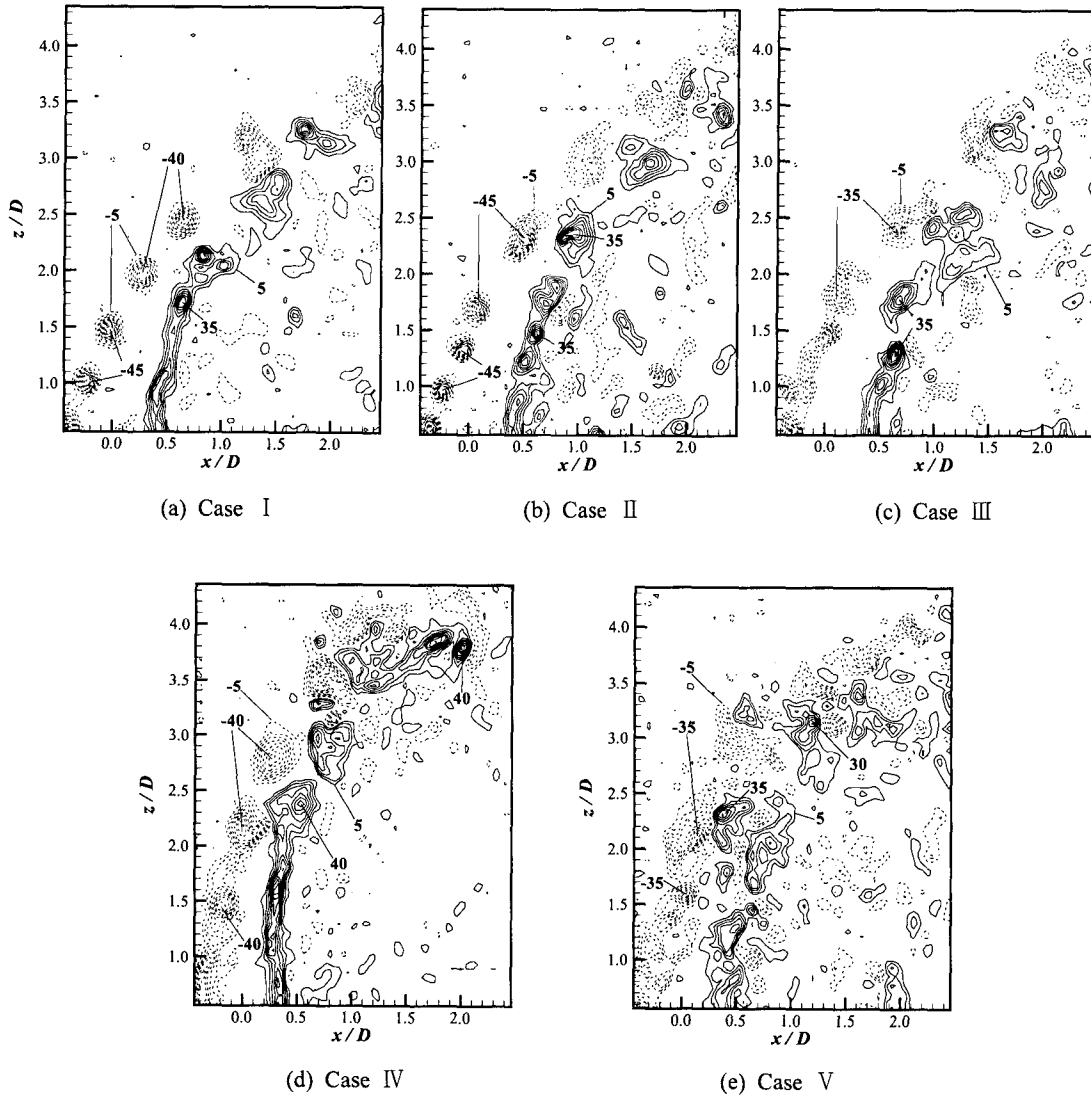


Fig. 5 Instantaneous contours of  $\omega_y D / U_\infty$  showing jet shear-layer vortices. Contour interval:  $\omega_y D / U_\infty = 5$ . Dotted contours indicate negative values

3.2 와도장

횡단류 제트의 출구 속도분포 형상이나 난류강도와 같은 미세한 조건들은 제트가 분출되어 초기 형성과정에서 작용하기 때문에 제트분출 초기의 상·하류 전단층에서 발생하는 반지형와류의 형성을 관측함으로써 그 영향도를 판단할 수 있다. 제트의 대칭면에서 반지형와류는 단지 유동횡방향의 roll-up 구조로서 나타나며 이것은 순간

유동장의 유동횡방향 와도(vorticity)분포로부터 가장 잘 관찰할 수 있다. 이때 유동횡방향 와도,  $\omega_y$ 는 순간속도장의 2차원 속도벡터의 구배로부터 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

Fig. 5는 각 실험조건에 대한 대표적인 순간속도장의 와도분포를 나타낸다. 그림에서 점선은 음의 값으로서 반시계 방향으로 회전하는 와류를 의미한다. 그림을 살펴보면 전반적으로 제트의 상류측 전단층에는 반시계 방향의 와도 집중이 일찍부터 주기적으로 발생함을 볼 수 있으나, 하류측 전단층에서는 시계방향의 와류가 다소 지연되어 생성됨을 알 수 있다. 이러한 차이는 제트의 상류측 및 하류측 경계를 따라 형성되는 압력구배가 서로 다르기 때문이다. 상류측 전단층은 벽면경계층 횡단류를 통과하면서 증가하는 유동방향속도와 제트가 부딪힐 때 정체압력이 증가하므로 역압력구배가 발생하는 반면, 하류측 전단층은 제트기동 하류에서 형성되는 음의 압력장으로 제트가 분출되고 있으므로 순방향 압력구배가 발생된다. 따라서 역압력구배는 전단층의 불안정성을 증가시켜 roll-up 구조를 빨리 발생시키며, 순압력 구배는 안정도를 증가시킴으로 와도집중이 지연된다.

각 조건에 대해 살펴보면, 우선 제트의 난류강도가 거의 없고 top-hat 속도분포형상을 가진 Case I과 Case II는 상류측 전단층에서의 roll-up 구조가 매우 주기적으로 형성되고 있다. Case II의 경우 레이놀즈수가 증가함으로써 앞서 가시화 결과에서와 유사하게 와도집중의 크기가 Case I에 비해 작으며 와류유출주파수가 크게 형성되고 있음을 볼 수 있으며, 제트 후반부 전반에 걸쳐 상대적으로 와도의 확산이 크게 일어나고 있다.

반면 Case III는 레이놀즈수가 증가됨과 동시에 제트에 난류강도가 부가됨으로써 Case II와는 달리 상류 및 하류측 전단층에서 불규칙적인 roll-up 구조가 빨리 형성되고, 제트의 전후방에서 생성된 와류들이 서로 결합되면서 복잡한 상호작용을 유발하고 있다. 또한 Case II의 경우 상류측 전단층에서 형성된 반대방향의 roll-up들이  $x \approx 2.0D$ ,  $z \approx 3.5D$ 에서 만나는데 비해 Case III의 경우에는  $x \approx 1.0D$ ,  $z \approx 2.5D$ 에서 서로 만나고 있다. 이러한 와류들의 상호작용은 이러한 와류들의 상호작용은 Fig. 4의 순간유동장에서 볼 수 있듯이 횡단류 제트의 주유동 궤적에 교란을 유발시킴으로써 주변유체가 많이 유입될 수 있는 공간을 형성하게 된다. 이는 횡단류 유체가 제트에 유입되는 중요한 메커니즘이 된다.

한편, Case IV와 Case V는 각각 Case I과

Case III에 해당하는 조건으로서 제트 분출시 속도분포형상이 파이프유동의 형태를 띠는 경우이다. 전반적으로 레이놀즈수에 대한 경향은 유사하게 나타나고 있지만 Case IV, V는 Case I, III에 비해 와의 크기가 훨씬 크게 형성되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 제트의 속도분포가 상·하류 경계에서 완만한 구배를 이루고 있어서 외부의 횡단류 유동이 제트 내부로의 유입이 원활하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 PIV측정으로부터 얻어진 약 1000장의 순간속도장에 대해 앙상블평균된 횡방향 와도분포를 수직위치에 따라 나타낸 것이다. 대표적으로 레이놀즈수( $Re_D=2100$ )가 동일한 Case II, III,

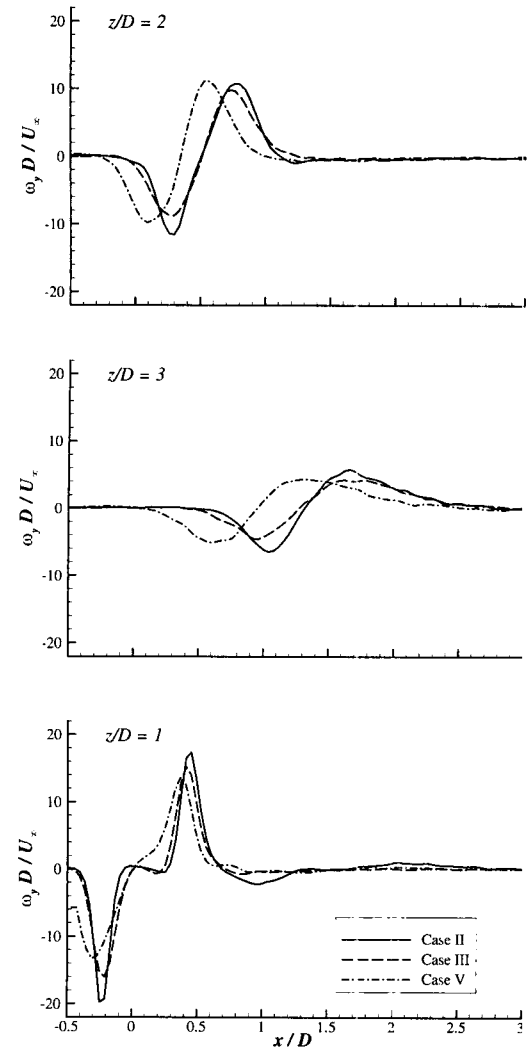


Fig. 6 Ensembled averaged vorticity distributions

V에 대해 비교하였다. 순간유동장의 결과에서 관찰된 바와 같이 와도분포는 난류격자가 부착된 Case III가 부착되지 않은 Case II에 비해 넓게 나타나며, 속도분포 형상이 파이프유동 형태이고, 난류격자까지 부착된 Case V의 경우가 Case II와 III 보다 더욱 넓게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 와도의 피이크 값은 제트 분출 초기인  $z/D = 1$ 에서 뚜렷한 차이를 보이다가 제트가 발달할수록 유동확산에 의해 그 차이는 점차 줄어들고 있다. 이것은 순간유동장에서 나타난 각 조건에 따른 와도분포 특성들이 시간이 흐름에 따라 지속적으로 유지되고 있음을 반영하는 것이다. 또한 모두 동일 속도비이긴 하나 Case V의 경우 제트의 중심속도가 큼으로 인해 제트기동이 유동상류로 치우쳐 형성되고 있음을 잘 나타내고 있다. 따라서 제트출구의 속도분포가 균일하지 않은 경우에는 단순한 속도비가 지배적인 영향인자가 될 수 없음을 유념해야 하며, 수치해석 등 이론적 연구를 수행할 시에는 속도경계조건을 정확히 기술해 주어야 한다.

#### 4. 결 론

횡단류 제트의 대칭면에서의 유동장을 유동가시화 및 PIV 기법을 이용하여 측정하였으며, 유동의 레이놀즈수, 제트출구의 난류강도 및 속도분포 형상에 대한 영향을 관찰하였다.

(1) 동일한 속도비에 대해 레이놀즈수가 증가할 경우 제트 상·하류 전단층에서의 와류의 크기는 작게 형성되며 roll-up 형성 주파수가 증가함을 볼 수 있었다.

(2) 격자를 이용하여 약 3 %의 난류강도를 제트에 부가하였을 경우, 제트 상·하류의 주기적인 roll-up 구조의 형성이 파괴되어 제트 내부의 난류혼합이 증가함을 알 수 있었다.

(3) 제트의 분출속도분포가 균일하지 않고 파이프유동의 형상을 가질 경우 완전한 속도구배로 인해 자유 전단층의 와도가 약해지며, 와의 규모가 더욱 커짐을 알 수 있었다. 또한, 중심의 속도가 커짐으로 인해 제트의 중심이 보다 상류측에

위치하였다.

#### 후 기

본 연구는 두뇌한국21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

#### 참고문헌

- (1) Fric, T. F. and Roshko, A., 1994, "Vortical structure in the wake of a transverse jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1~147.
- (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) 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.
- (6) 김정천, 신대식, 1998, "분지관 혼합기의 난류 혼합에 대한 유동가시화 연구(II)," *대한기계학회논문집 B권*, 제22권, 제7호, pp. 1013~1021.
- (7) 김정천, 신대식, 박기영, 1998, "분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(III)," *대한기계학회논문집 B권*, 제22권, 제11호, pp. 1571~1581.
- (8) 김정천, 김상기, 윤상열, 2000, "횡단류 제트의 유동 및 난류특성치에 대한 PIV 측정," *대한기계학회논문집 B권*, 제24권, 제3호, pp. 382~389.
- (9) 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.