

# 파이프유동장에 분사되는 제트의 유동특성 연구

김 경 천\* · 신 대 식\*\*

(1997년 12월 5일 접수)

## Flow Characteristics of a Cross Jet Issued in the Fully Developed Pipe Flow

Kyung Chun Kim and Dae Sig Shin

**Key Words :** Cross flow jet(횡단류 제트), Fully developed pipe flow(충분히 발달된 관유동), Flow visualization(유동 가시화), Velocity ratio(속도비), Horseshoe vortices(말굽와류), Upright vortices(수직와류)

### Abstract

In the fully developed pipe flow, when jet is injected in cross to the flow there are complex transition flows caused by interaction of the cross flow and jet. These interactions are studied by means of the flow visualization methods and frequency analysis using a hot-wire anemometer. The velocity range of cross flow of the pipe is 0.3 m/s~1.2 m/s and the corresponding Reynolds number,  $Re_p$ , based on the pipe diameter is  $2.25 \times 10^3 \sim 9.02 \times 10^3$ . The velocity ratio ( $R$ ), jet velocity/cross flow velocity, is chosen from 2 to 10. A circular cylinder is placed in the pipe instead of jet to observe the vortex shedding from the solid body. To compare the jet and circular cylinder flow, the vortical structure is analyzed in both cases and the structure of vortices and the origin of its formation are investigated, especially. The vortex shedding of the dominant coherent structure is compared between the jet flow and the circular cylinder flow. In the case of the jet flow, the Strouhal numbers are different depending on the existence of the upright vortex as well as the velocity ratio ( $R$ ).

### 기호설명

$d$ : 제트 입구 지름 (jet inlet diameter) [mm]	$U_{cf}$ : 횡단류 평균 속도 (mean cross flow velocity) [m/sec]
$d_{cy}$ : 실린더 직경 (cylinder diameter) [mm]	$St_{cy}$ : 실린더 스트로할수 (strouhal number) [ $fd_{cy}/U_{cf}$ ]
$D$ : 횡단류 파이프 지름 (cross flow pipe diameter) [mm]	$St_j$ : 제트 스트로할수 (strouhal number) [ $fd_{cy}/U_{cf}$ ]
$R$ : 속도비 (velocity ratio) [ $V_j/U_p$ ]	$X$ : 횡단류 유동방향
$Re_{cf}$ : 횡단류 레이놀즈수 (cross flow Reynolds number) [ $U_{cf} D/\nu$ ]	$Y$ : 횡단류 반경방향
$Re_j$ : 제트 레이놀즈수 (jet Reynolds number) [ $V_j d/\nu$ ]	$Z$ : 제트가 분사되는 방향
$V_j$ : 제트 평균 속도 (mean jet velocity) [m/sec]	하첨자
	$cf$ : 횡단류 (cross flow)
	$j$ : 제트 (jet)

\* 회원, 부산대학교 기계공학부

\*\* 회원, 부산대학교 대학원 생산기계공학과

cy : 실린더 (cylinder)

## 1. 서 론

제트가 주류에 횡단으로 분사되는 횡단류(cross flow) 유동은 기계, 항공 및 환경분야에 널리 적용되는 현상이다. 횡단류 제트유동은 액체나 기체의 전달을 위한 관로 시스템을 비롯하여, 배기 가스 냉각과 가스 터빈 익형의 냉각, 하수배출, 그리고 생물학적 계에서도 사용된다.

제트가 횡단류에 수직하게 분사될 때 전단층이 형성되어 두 유동사이에는 제트 쪽에서 횡단류 쪽으로 기울어지는 복잡한 교류유동이 발생하게 된다. 이러한 복잡한 3차원 교류유동에 대한 물리적 거동이 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다. 따라서 수치해석을 수행하는 일부 연구자들은 제트에 의한 와류구조의 발달 및 와류출이 실린더에 의한 것과 유사성이 있다고 가정하여 연구하였다.<sup>(1)</sup> 그러나 제트와 횡단류 사이의 경계면은 고체면이 아니기 때문에 고체면으로 이루어진 실린더와는 와류구조의 발달과 와류출 측면에서 많은 차이가 존재하게 된다. 이러한 차이는 유동을 형성하는 난류구조 및 그 발달과정에 직접적인 영향을 미친다.

제트가 횡단류에 분사될 때 가장 주목할만한 유동과정은 제트가 분사되어 구부러지고 횡단류와 평행하게 되는 과정이다. 이러한 유동과정이 이루어지는 영역을 근접 영역이라 하고, 근접 영역에서의 와류구조 및 유출형태는 하류에서의 유동과 제트의 발달, 후류 영역 주위의 유동에 중요한 영향을 미친다. 그러므로 횡단류 제트유동을 이해하려면 근접 영역에서 발생하는 와류들의 구조 및 성장과정을 파악하는 것이 필요하다.

횡단류와 제트는 3차원 상호작용을 하는 복잡한 유동이며, 제트의 근접 영역에는 전단층와류(shear layer vortices), 말굽와류(horseshoe vortices), 반전와류쌍(counter rotating vortex pair), 그리고 후류와류(wake vortices)로 구분되는 4가지 형태의 조직적 구조가 나타난다고 알려져 있다.<sup>(2,3)</sup>

전단층와류는 제트의 외부경계에서 발생한다. 이 와류는 흐름과 함께 변형되어 구부러지는 링 형상 또는 루프형상으로 나타난다. 벽면에 설치된 원형 실린더 주위 유동에서도 발생하는 말굽와류는 제트 상류 영역에서 생성되며 말굽모양으로 형성된다.

하류 영역에서는 제트 전단경계층의 중심 영역에서 발생하여 먼 하류까지 유동장을 지배하는 것으로 알려진 반전와류쌍 구조가 발생한다. 또한 제트의 후류 영역에서는 유출와 및 벽면 위에 발생하는 벽와류(wall vortices)를 포함한 복잡한 와류계를 형성한다. 이러한 4가지 조직적 구조중 전단층와류와 후류와류는 불안정하고, 말굽와류와 반전와류쌍은 불안정한 성분을 가지고 있지만 비교적 안정된 조직적 구조라고 알려져 있다.<sup>(4,6)</sup>

횡단류 제트유동의 특성은 횡단류의 운동량 플럭스와 제트의 운동량 플럭스의 비율에 의존하게 되며, 이 비율의 제곱근인 속도비  $R$ 로 나타내는 것이 일반적이다. 제트와 횡단류의 밀도가 동일할 때, 속도비  $R$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{V_j}{U_{cr}} \quad (1)$$

여기서  $V_j$ 는 제트의 평균속도이고  $U_{cr}$ 는 횡단류의 평균속도이다.

그 동안 횡단류 제트 유동특성에 관해서는 대부분 외부유동이나 사각채널 유동에서 연구되었고,<sup>(7-8)</sup> 충분히 발달한 관유동과 같은 내부유동에서 연구된 경우는 드물다.<sup>(9)</sup> 심지어는 내부유동에 대한 기초적인 실험자료가 부족하여 수치해석에도 많은 어려움이 있다. 이 연구의 목적은 파이프 유동에 제트가 횡단으로 분사되는 경우 레이저 광원을 이용한 유동가시화 방법과 열선유속계의 주파수 분석을 이용하여 횡단류 제트 유동장의 특성을 규명하고자 한다. 또한 제트대신 실린더를 수직으로 장착시킨 경우와 비교하여 상류 영역에 발생하는 말굽와류의 발달과정과 후류 영역에서 생성되는 와류구조 및 와류출의 차이점을 비교 분석하여 횡단류 제트유동에 대한 이해를 넓히고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 공기가 흐르는 주관의 측면에서 제트를 분사하는 횡단류 제트 혼합장치이다. 이 장치는 공기 흡입부, 주관, 시험부, 그리고 송풍장치로 구성 된다. 공기 흡입부는 1000 mm×1000 mm×1000 mm의 탱크로 만들어져 있으며, 탱크 내부에는 물순물 제거용 필터와 횡단류 유동의 균일성을 위한 그물 망이 설치되어 있다. 탱크는 돛형의 공기 유입구에 의하여 주관과 연결

되어있다. 주관은 불투명 관으로, 시험부는 가시화를 위하여 유리관으로 제작하였다. 외부공기는 공기 흡입부의 필터와 그물 망을 통과하여 주관 입구로 들어와 시험부에서 제트와 만나 혼합된다. 주파수 변환기로 송풍기의 회전수를 변화시켜 주관의 공기 속도를 조절하고, 속도는 피도정압관을 이용하여 측정하였다. 횡단류 유동은 원심 송풍기에 의해 유속이 유지되며 비틀림 유동을 방지하기 위해 원심 송풍기와 주관 파이프 사이에 하니콤과 그물 망을 설치하였다. 송풍기는 제트의 주입구로부터 주관직경  $D$ 의 20배 하류에 설치하였다. 외부공기가 흡입되는 주관의 입구와 제트가 분사되는 주입구 사이의 길이는  $70D$ 로 횡단류 유동이 충분히 발달된 유동이 되도록 하였고, 완전 발달된 제트 유동을 얻기 위하여 제트 주입 길이를 직경의 100배로 하였다. 또한 균일한 제트 유동이 발생하도록 제트 상류에 그물 망과 하니콤을 설치하였다.

실험은 상온에서 횡단류 평균 속도  $U_{cf}=0.3\text{ m/s} \sim 1.2\text{ m/s}$  ( $Re_{cf}=2.25 \times 10^3 \sim 9.02 \times 10^3$ )에서 수행되었다. 풍동의 시험부와 기타 구성요소는 Fig. 1과 같다.

유동가시화 장치의 개략도는 Fig. 2(a)에 나타나 있다. 좌표축은 Fig. 2(b)에 나타나 있는 바와 같으며  $X$ 축 방향으로 횡단류 주유동이 흐르고  $Z$ 방향으로 제트가 분사되어진다.

횡단류 제트 유동은 물리적 인자인 속도비 이외에 기하학적 인자인 주관과 제트노즐의 지름비  $d/D$ 에도 영향을 받는다. 본 연구에서는 널리 사용되는 제트 혼합장치의 지름비 범위  $d/D=0.1 \sim 0.4$  (10)에 포함되는  $d/D=0.14$ 인 제트노즐을 사용하였다. 제트는 내경이 14 mm인 원관으로부터 분사되며, 밸브에 의해 유량이 조절된다. 제트의 속도는 속도비  $R=2, 4, 6, 8, 10$  경우에 해당하는  $V_j=0.6\text{ m/s} \sim 12\text{ m/s}$  ( $Re_j=6.3 \times 10^2 \sim 1.26 \times 10^4$ ) 범위이다. 제트유동과 비교하기 위하여 사용한 원형실린더의 직경비는 제트노즐의 직경비와 동

등한 0.14 이고, 그 길이는  $5d_{cv}$  이다.

유동가시화를 위한 연기선(smoke-wire)은 직경 0.1 mm의 니크롬선에 파라핀 오일을 묻힌 뒤 일정전압을 가하여 발생시켰다. 유동가시화 방법으로 사용한 연기선은 수평면 ( $x-y$ 면)과 수직면( $x-z$ 면)을 따라 적절하게 설치하여 유동장을 가시화 하였다. 수평면에 장착된 연기선은  $Z=1.0d$ 의 위치에 설치하고, 수직방향의 연기선은  $Y$ 축 방향으로 이동하면서 설치하여 실험하였다( $Y=0, Y=0.5d, Y=1.0d, Y=1.5d$ ). 광원은 4W 아르곤 레이저, 카메라는 Sony CCD PRO 5000, 화상처리보드는 마스터 컨트롤러로 Trident 사의 TGUI9682Gi를 사용하였다.

횡단류 제트유동의 근점 영역에서 제트의 경계는 Fig. 3에 나타나 있는 것처럼 제트 외부경계와 내

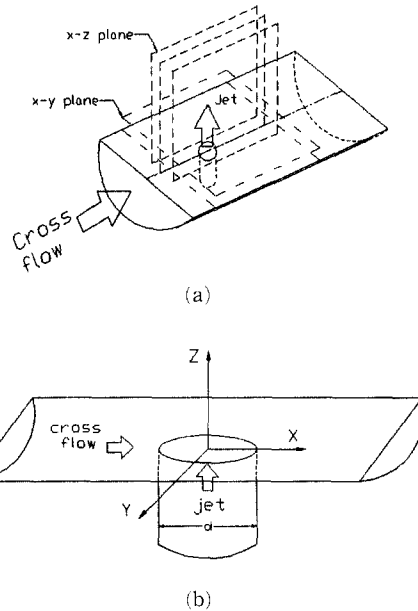


Fig. 2 Definitions of laser light sheet planes and coordinate system.

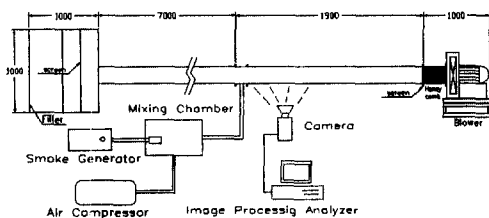


Fig. 1 Schematic of experimental set-up.

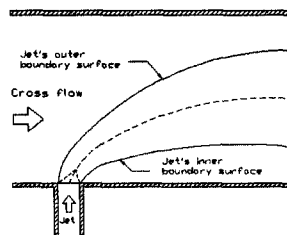


Fig. 3 Configuration of cross flow jet boundaries.

부경계로 구분하였다.

### 3. 난류 구조의 가시화

#### 3.1 제트 전단층와류

Fig. 4는 제트분사에 대한 수직단면의 유동가시화 한 예를 보여준다. Fig. 4에서 제트 외부경계에 나타나는 링형상의 전단층와류를 관찰할 수 있다. 이러한 링형상 와류는 제트 외부경계와 주변 횡단류의 속도차에 의해 Kelvin-Helmholtz 불안정성으로 발생하는 와류집중 현상에 의해 형성된다. 감김

→ Cross flow

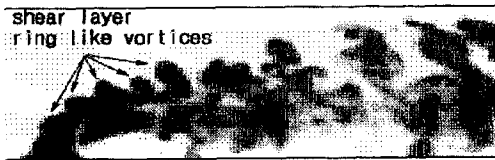
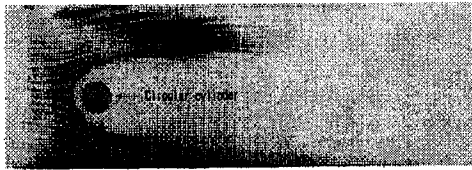
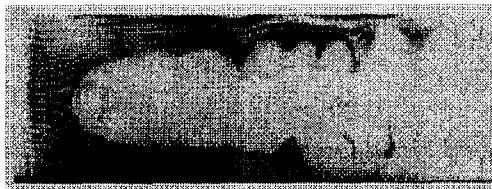


Fig. 4 Vortical flow pattern in  $x-z$  plane ( $U_{cf}=0.55$  m/s,  $R=2$ ).

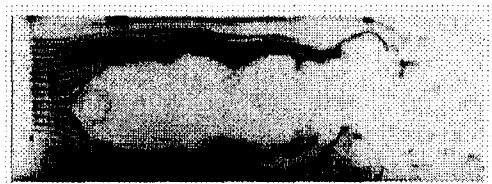
→ Cross Flow



(a)  $U_{cf}=0.3$  m/s



(b)  $U_{cf}=0.5$  m/s



(c)  $U_{cf}=0.7$  m/s

(roll-up)현상이 제트 외부경계에서 뚜렷이 나타나며 제트노즐 가장자리 근방에서 발생하여 제트 축을 따라 5d 하류까지는 조직적인 모양을 유지하면서 흘러간다. 제트 외부경계의 감김 현상은 대규모 난류구조의 기반을 이루며 주기적으로 나타난다.

#### 3.2 실린더와 제트 유동의 비교

횡단류 유동에서 제트유동을 실린더유동과 비교하기 위하여 먼저 벽에 부착된 원형 실린더의 수평가시화 화상을 얻었으며 그 한 예로  $Z=1.0d$ 인 경우가 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 횡단류의 방향은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되며, 화상의 왼쪽에 나타나 있는 둥근원이 벽에 설치된 실린더이다. Fig. 5(a)는 벽에 부착된 원형 실린더 주위에 생기는 개방형 말굽와류 형태를 보여준다. 실린더 상류에서 말굽와류가 생성되고 후류영역 가장자리 경계층에서는 에디가 생성되지 않는다. 이것은 횡단류의 속도가 낮아 층류흐름이 실린더 주위를 지나가고 있기 때문이다. 횡단류 속도가 0.5 m/s인 Fig. 5(b) 경우에도 개방형 말굽와류가 보여지며 하류 4d 근방에서 물결모양의 작은 에디가 나타나기 시작하며, 하류로 갈수록 성장하게 되지만 실린더 가까이 에서는 혼합이 일어나지 않는다. 횡단류 속도가 0.7 m/s인 Fig. 5(c) 경우는 물결모양의 와가 0.5 m/s인 경우보다 상류인 하류 3d 근방에서 생성되며, 1.0 m/s인 Fig. 5(d) 경우는 난류강도가 강하여 작은 에디들이 후류에 생성되고, 하류영역 3d 에서는 좌우 에디들이 번갈아 혼합되는 큰 에디들이 보여진다. 횡단류 속도가 1.2 m/s인 Fig.



(d)  $U_{cf}=1.0$  m/s



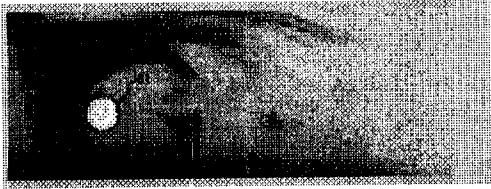
(e)  $U_{cf}=1.2$  m/s

Fig. 5 Flow patterns around a circular cylinder ( $x-y$  plane,  $Z=1.0d$ ).

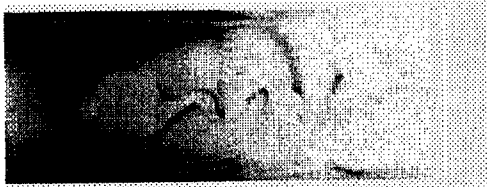
5(e)경우는 1.0 m/s과 비슷한 현상이 일어나고 하류에서 좌우교대로 에디들이 혼합되는 큰 에디 형상이 발생하여 Karman 와열구조를 형성하게 된다.

Fig. 6은 제트가 수직으로 분사하는 경우 속도비

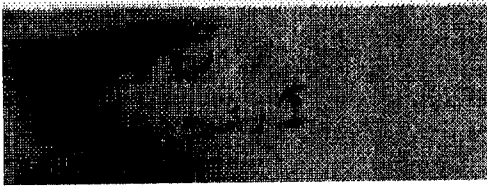
→ Cross flow



(a)  $U_{cf}=0.3$  m/s,  $R=2$



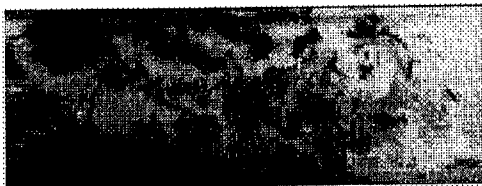
(b)  $U_{cf}=0.5$  m/s,  $R=2$



(c)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $R=2$



(d)  $U_{cf}=1.0$  m/s,  $R=2$



(e)  $U_{cf}=1.2$  m/s,  $R=2$

Fig. 6 Flow patterns around a jet with constant velocity ratio ( $x-y$  plane,  $Z=1.0d$ ).

$R=2$ 에 대하여 횡단류 속도변화에 따른 수평단면  $Z=1.0d$ 에서 가시화한 화상이다. 왼쪽 등근 원이 제트가 분사되는 노즐이다. 이 그림은 후류 속으로 빨려 들어가는 주위 유동의 유입을 잘 보여주고 있다. 그림에서 횡단류 속도가 증가할수록 제트 후면 중앙부에 에디가 발생하여 활발한 혼합을 일으키며 와류 구조가 실린더의 경우와는 판이하게 다를 수 있다.

횡단류 속도 0.3 m/s인 Fig. 6(a) 경우는 제트 상류에서 생성된 말굽와류가 제트후면 중앙부로 주기적으로 유입되어 하류로 흘러가고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 제트의 외부경계에서 형성된 주기적인 링형상 전단와류와의 상호작용 때문이라고 생각된다. 속도가 0.5 m/s인 Fig. 6(b)의 경우 말굽와류는 실린더의 경우와는 다르게 제트주위를 감싸면서 중앙에서 만나 좌우 교대로 요동치는 형태를 이루고 있다. Fig. 6(c)의 속도 0.7 m/s 인 경우는 제트기둥 가장자리에서 박리가 발생하여 전단층 에디가 생성되며, 하류로 갈수록 중앙으로 유입되어 주름이 있는 폐쇄형 말굽 와류를 형성한다. 속도가 1.0 m/s 와 1.2 m/s 인 Fig. 6(d), (e) 경우는 제트 주위를 감싸고 있는 폐쇄형 말굽와류가 형성된다. 제트 후류로 유입된 유체는 와류형태가 깨어지고 반전와류쌍 속으로 흡수되면서 하류로 흘러간다.

횡단류 0.3 m/s~0.7 m/s 속도 범위에서 실린더 경우와 비교하면 근접 하류영역에서 제트의 경우가 혼합이 훨씬 잘 이루어지고 있다. 또한 실린더의 경우와 마찬가지로 제트의 경우도 말굽와류가 제트 상류에 생성되지만, 실린더의 경우와는 다르게 폐쇄형 와가 형성되고 제트 후류 중심 영역에서도 와를 형성한다. 그러므로 이러한 두 유동 사이에 유사성이 존재한다는 기존의 개념은 수정되어야 할 것이다.

### 3.3 횡단류 제트유동의 특성

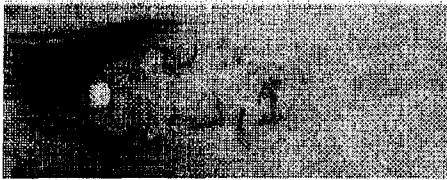
#### 3.3.1 속도비의 영향

일반적으로 횡단류 제트유동은 속도비에 따라서 특성을 달리한다. 횡단류 속도는 0.7 m/s로 일정하게 하고 속도비를 변화시키면서 수직거리  $Z=1.0d$ 에 설치한 연기선에 의해 얻어진 화상을 Fig. 7 나타내었다.  $R=2$ 와 4인 경우, 제트 주위를 감싸면서 하류방향 중앙부에서 만나는 폐쇄형 말굽와

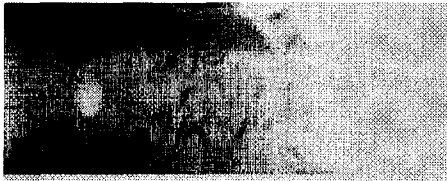
류가 형성되고,  $R=6, 8, 10$ 에서는 제트 주위를 조밀하게 감싸는 원형말굽와류가 형성된다. 제트의 큰 운동량이 횡단류 주유동의 운동량을 상류 쪽으로 밀어내기 때문에 제트 상류 영역에 생기는 말굽와류의 위치가 속도비가 클수록 더 높은 상류에 발

생하는 것을 볼 수 있다. 속도비 6인 경우는 말굽와류가 제트 후류 중앙 영역으로 유입되고 그 부근에서 에디들이 생성되는 형태를 나타내지만, 아직 제트기둥을 완전히 감싸지는 않는다. 그러나 속도

→ Cross flow



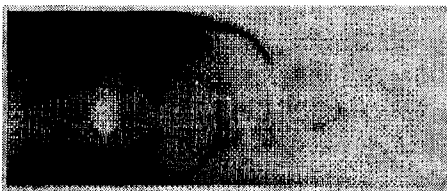
(a)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $R=2$



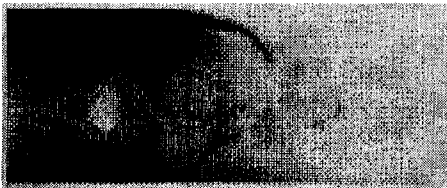
(b)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $R=4$



(c)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $R=6$



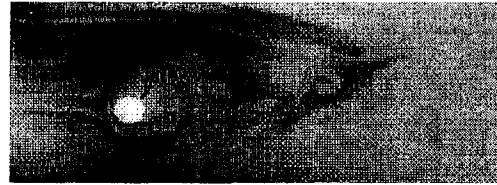
(d)  $U_{cf}=1.7$  m/s,  $R=8$



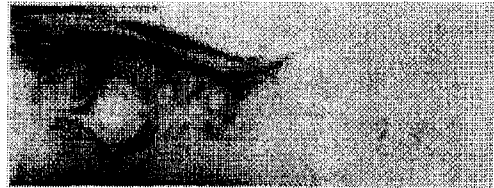
(e)  $U_{cf}=1.7$  m/s,  $R=10$

Fig. 7 Flow patterns around a jet with constant cross flow velocity condition ( $x-y$  plane,  $Z=1.0d$ ).

→ Cross flow



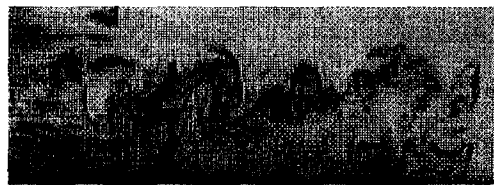
(a)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $R=10$



(b)  $U_{cf}=1.0$  m/s,  $R=8$



(c)  $U_{cf}=1.0$  m/s,  $R=10$



(d)  $U_{cf}=1.2$  m/s,  $R=8$



(e)  $U_{cf}=1.2$  m/s,  $R=10$

Fig. 8 Flow patterns around a jet for high velocity ratio ( $x-y$  plane,  $Z=1.0d$ ).

비 8이상이 되면 제트가 강력하게 분사되어 관측 단면  $Z=1.0d$  에서 말굽와류가 제트기둥을 완전하게 감싸고 있는 형태가 된다. 그러므로 속도비가 증가할수록 제트의 운동량이 증가하므로 폐쇄형 와의 크기가 감소하고 제트 기둥을 조밀하게 감싸는 원형 말굽와류가 형성된다. 또한  $R=2, 4, 6$ 인 경우는  $Z=1.0d$ 인 단면에서 제트 좌우에 큰 에디들이 발생하여 제트 후류에서 혼합이 일어나며,  $R=8, 10$ 인 경우는 제트가 분사되는 속도가 커서 제트 좌우의 가장자리 면에서는 에디가 보이지 않지만 제트 후류 중앙 영역에 큰 와가 발생한다. 이 와가 다음절에 기술되는 수직와이다.

3.3.2 수직와류

속도비가 8이상인 경우 횡단류의 속도와 속도비에 따른 후류의 와류 구조를 살펴보기 위해 얻어진 화상들을 Fig. 8에 나타내었다. 속도비가 큰 경우에는 제트 하류 중심부 근방에 큰 에디들이 교대로 발생하고 있다. 횡단류 속도가 0.7 m/s인 Fig. 8(a) 경우는 제트 후류 중심부에 와가 연속적으로 발생함을 뚜렷이 볼 수 있었고, 1.0 m/s 이상인 경우에도 횡단류 파이프 유동의 난류에 영향을 받고 있지만 제트 후류 중심 영역에서 와가 생성되고 있다.

제트 중심 영역에서 생성되는 와류를 자세히 관찰하기 위하여 유동장에 수직으로( $x-z$ 면) 연기선을 설치하여 얻어진 화상을 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9(a)에서는 벽 경계층에서 발생되어 제트의 내부경계를 향해 수직방향으로 유입되는 와류를 관찰할 수 있다. 이러한 와류를 Perry등은 수직와류라고 하였다.<sup>(2)</sup> 횡단류 속도가 증가한 (b)~(d)인 경우도 수직와류가 발생하고 있다. 이러한 사실로부터 속도비가 큰 경우 충분히 발달된 내부유동장에서도 수직와류가 생성된다는 것을 알 수 있다. 기존의 외부유동과는 다르게 관유동의 경우에는 속도분포의 영향으로 수직와류가 활처럼 휘어져 있음을 볼 수 있다. 유동가시화 결과에 의하면 수직와류는 제트에서 생성되는 것이 아니라 횡단류 주관 벽면 경계에서 발생하는 것을 알 수 있다. 횡단류 속도가 증가할수록 제트 후류 중심에서 발생하는 수직와류의 강도가 증가하고 발생주기가 길어져서 수직와류사이의 거리가 증가한다. 수직와류의 강도가 커지는 이유는 제트의 운동량 증가에 의해 벽면에서 발생하는 수직와류를 끌어당기는 힘이 커지기

때문이다.

Fig. 9(a)를 자세히 보면 짝을 이루는 수직와류를 관찰할 수 있다. 이러한 형태는 수직와류가 제트 후류 중심부뿐만 아니라 제트 후류의 가장자리에서도 존재하는 것으로 생각된다. 제트 중심을 벗어난 영역에서 발생하는 수직와류를 관찰하기 위하여 Fig. 10에 보이는 바와 같이 수직으로 설치된 연기선을 횡단류 반경방향( $Y$ 방향)으로 이동하면서 화상을 취득하였다.  $Y=1.5d$ 인 Fig. 10(a)에서는 수직와류가 잘 보이지 않고,  $Y=1.0d$ 인 Fig. 10(b)와  $Y=0.5d$ 인 Fig. 10(c)화상에서는 수직와류가 생성되는 것을 볼 수 있다. 횡단류속도를 0.7 m/s로 증가시켰을 경우 Fig. 10(d), (e), (f)에서

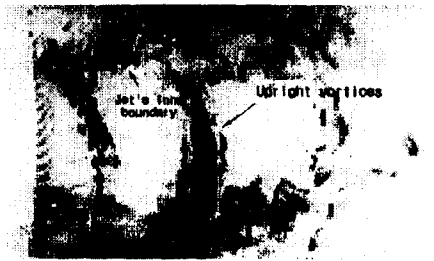
⇒ Cross flow



(a)  $U_{cj}=0.5$  m/s,  $R=10$



(b)  $U_{cj}=0.7$  m/s,  $R=10$



(c)  $U_{cj}=1.0$  m/s,  $R=10$

Fig. 9 Flow patterns of wake vortices at  $x-z$  plane center ( $Y=0$ ).

## → Cross flow

(a)  $U_{cf}=0.5$  m/s,  $Y=1.5d$ (b)  $U_{cf}=0.5$  m/s,  $Y=1.0d$ (c)  $U_{cf}=0.5$  m/s,  $Y=0.5d$ (d)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $Y=1.5d$ (e)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $Y=1.0d$ (f)  $U_{cf}=0.7$  m/s,  $Y=0.5d$ Fig. 10 Upright vortices at various  $x-z$  planes ( $R=10$ ).

보는바와 같이 수직와류가 모두 존재하고 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서 횡단류 속도가 증가할수록 수직와류가 발생하는 영역이 폭방향으로 넓어진다는 사실을 의미한다. 또한 중심부 화상( $Y=0$ )인 Fig. 9(b)인 경우와 그 주변화상( $Y=1.5d$ )인 Fig. 10(d)에서 수직와류의 생성빈도를 살펴보면 중심부에서 가장 많은 수직와류가 관찰됨을 알 수 있다.

### 3.3.3 수직와류의 생성기구

횡단류 제트는 유동의 특성상 두 영역으로 나눌 수 있다. 하나는 초기 제트의 운동량이 지속되어 벽에서 수직방향으로 이동하는 영역이고 다른 하나는 횡단류방향으로 굽어져서 수평방향으로 이동하는 영역이다. 후자는 제트쪽으로 횡단류 유체가 유입함으로써 이루어진다. 제트의 근접영역에서는 횡

단류에 변위효과를 주며, 벽면 경계층의 영향으로 말굽와류와 후류와류가 발생한다.

Fig. 11은 실린더와 제트 유동에 대해 상류에 발생하는 말굽와류의 궤적을 개념적으로 나타낸 것이다. Fig. 11(a)의 실린더인 경우 말굽와류는 상류에 발생하여 실린더를 지나 하류의 중심영역과 혼합되지 않고 그대로 흘러간다. 반면 제트 유동에서는 속도비가 낮은 경우 말굽와류 궤적은 Fig. 11(b)에 나타나 있는 것과 같이 제트기둥을 지나 제트 하류 중앙영역에 연합되면서 폐쇄형 말굽와류를 형성한다. 속도비가 높은 경우는 Fig. 11(c)와 같이 폐쇄형 말굽와류의 한줄기가 제트기둥에서 박리된 와류와 연계하여 수직와류를 형성하고 교대로 하류쪽으로 이동하는 기구를 가진다.



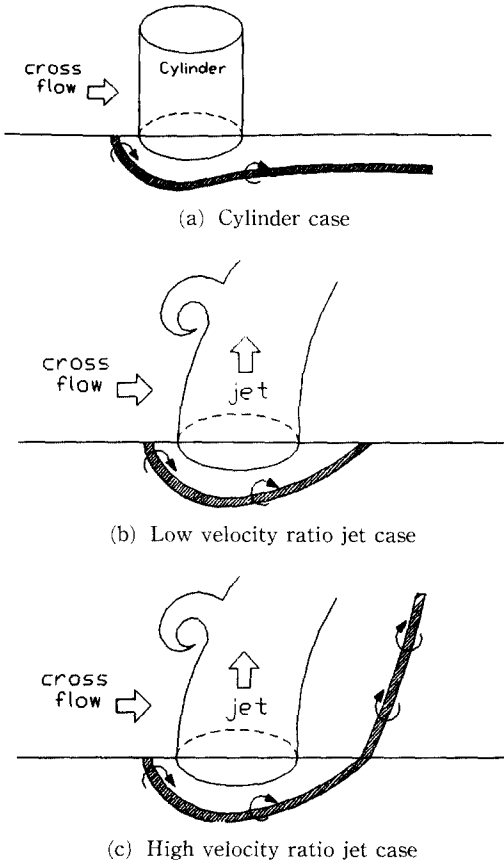


Fig. 11 Trajectory of the horseshoe vortices.

#### 4. 실린더와 제트유동의 후류 영역에 대한 와유출 특성

후류 영역에 대한 와유출 특성을 알아보기 위하여 열선유속계를 이용한 주파수 분석 방법을 사용하였다. 유동가시화 화상에서 나타난 와열사이의 거리와 속도를 측정하여 주파수 분석으로 얻어진 결과와 비교하였다.

원형 실린더를 지나는 외부유동의 경우 레이놀즈 수  $1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$  범위에서 스트로할수는 0.21로 알려져있다. 관벽에 부착된 원형 실린더의 스트로할수는 열선유속계의 I형 탐침을 사용하여  $X=3d, Y=1.0d, Z=1.0d$ 인 위치에서 측정하였다. 실린더 경우 스트로할수는  $St_{cv} = fd_{cv}/U_{cr}$ 로 정의하였다. 여기서  $f$ 는 주파수 분석에서 나타난 탁월주파수,  $d_{cv}$ 는 횡단류에 설치된 원형 실린더 지름 그리고  $U_{cr}$  횡단류 평균 속도이다. 측정결과 횡단

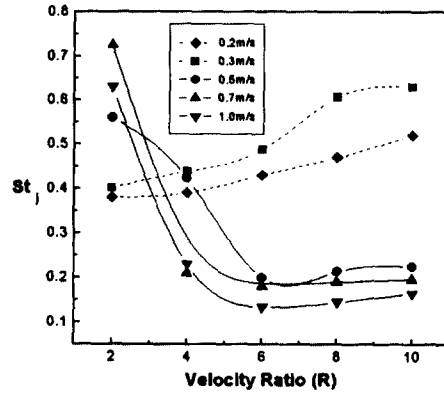


Fig. 12 Wake strouhal number variation.

류 속도 범위 (0.5 m/s~1.0 m/s)에서는 스트로할수는 0.28로 일정하였다. 균일 유동장에 비해 스트로할수가 증가한 이유는 파이프의 전단유동 및 폐쇄효과로 인해 와의 크기가 줄어들고 와유출 주파수가 빨라지기 때문이다.

실린더와 같은 영역에서 제트 유동에 대해 스트로할수를 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 제트 유동인 경우 스트로할수는  $St_j = f d / U_{cr}$ 로 정의하였다. 여기서  $f$ 는 탁월주파수,  $d$ 는 제트노즐의 지름 그리고  $U_{cr}$ 는 횡단류의 평균속도이다.

Fig. 12에서 나타나 있는 스트로할수를 보면 제트유동의 와유출이 실린더의 경우와는 현저히 다른 것을 알 수 있다. 즉 실린더 유동과 제트유동의 후류와류가 다르게 형성되어 유출되고 있다는 것을 말해주고 있다. Fig. 12에서 층류인 경우와 난류인 경우가 분명하게 구별되어 두 가지 경향을 나타내고 있다. 층류인 경우 속도비에 따라 스트로할수가 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 난류인 경우 속도비 6까지는 급속하게 감소되며 그 이상에서는 완만하게 증가한다. 따라서 속도비 6을 경계로 와유출 현상에 큰 변화가 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 와유출 특성의 변화는 속도비가 높은 경우에 발생하는 수직와류로 인한 것이다.

층류인 경우 스트로할수가 증가하는 것은 수직와류가 발생하지 않기 때문이라고 판단된다. 이러한 스트로할수 변화는 유동가시화 결과에서도 확인할 수 있다. 먼저 속도비가 작으면서 스트로할수가 큰 경우인 Fig. 6(c) 화상을 보면, 와열사이의 거리가 19 mm 이며, 횡단류 속도가 0.7 m/s 임으로 와유출 주파수는 50 Hz가 된다. 이 조건에 대한 스트로할수를 구하면 Fig. 12에 나타나 있는  $St_j=0.73$

과 일치된다. 그러므로 낮은 속도비에서 스트로할 수가 크게 나타나는 것은 제트주위에 주기적으로 발생하는 후류와류에 기인된다. 속도비가 높은 경우인 Fig. 8(a)에서 제트 후류 근접영역에 나타나 있는 수직와류의 와열사이 거리가 60 mm 가 되므로, 주파수는 12 Hz,  $St_j=0.23$ 이 된다. 횡단류 속도 0.7 m/s,  $R=10$ 인 경우 Fig. 12 에 나타난 스트로할수가 0.2 임으로 유동가시화에서 얻어진 스트로할수와는 조금 차이가 있지만 거의 유사한 값을 가지고 있다. 따라서 속도비가 높은 경우에 나타난 스트로할수는 수직와류가 발생하는 주파수를 나타낸 것이다. 속도비 6이상에서는 같은 속도비에 대하여 횡단류 속도가 증가할수록 스트로할수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 횡단류 속도가 증가하면 수직와류의 강도가 강해지고 와류 사이의 거리가 길어지는 Fig. 9 의 유동가시화 결과와 일치된다.

## 5. 결 론

횡단류 제트 유동의 특성을 유동가시화와 열선유속계에 의한 주파수 분석을 통해 파악하고 원형실린더가 부착된 경우와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실린더 상류에서 형성된 말굽와류는 하류에서 개방형태를 유지하나, 제트 상류에서 형성된 말굽와류는 하류에서 즉시 중앙에서 만나 폐쇄형태를 이룬다.

(2) 제트 속도비가 충분히 커지면 ( $R>6$ ), 말굽와류의 일부가 박리된 후류와류와 결합하면서 수직와류로 발전한다.

(3) 실린더 후류와류의 스트로할수는 0.28로 본 실험의 범위 내에서는 일정하였다.

(4) 제트유동에서 스트로할수는 횡단류가 총류일 때 속도비에 따라 증가하나, 난류유동인 경우 속도비가 커지면 수직와류가 발생하므로 스트로할수가 급격히 감소한다.

## 후 기

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Coelho, Sergio L. V. and Hunt, J. C. R., 1989, "The Dynamics of the Near Field of Strong Jets in Crossflows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 95~125.
- (2) Kelso, R. M., Lim, T. T., and A. E. Perry, 1996, "An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 306, pp. 111~144.
- (3) Fric, T. F., and Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet", *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1~47.
- (4) Kelso, R. M., and Smits, A. J., 1995, "Horse-shoe Vortex Systems Resulting from the Interaction Between a Laminar Boundary Layer and a Transverse Jet," *Phys. Fluids* 7 (1), pp. 153~158.
- (5) Andreopoulos, J. and Rodi, W., 1984, "Experimental Investigation of Jets In a Crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 138, pp. 39~127.
- (6) Broadwell, J. E., and Breidenthal, R. E., 1984, "Structure and Mixing of a Transverse Jet in Incompressible Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 148, pp. 405~412.
- (7) Kamotani, Yasuhiro and Greber, Issaac, 1972, "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*. Vol. 10, No 11.
- (8) Moussa, Z. M., Trischka, John, W. and Eskinazi, S., 1977, "The Near Field in the Mixing of a Round Jet with a Cross-Stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 80, pp. 49~80.
- (9) Brucker, C., 1997, "Study of the Three Dimensional Flow in a T-Junction Using a Dual-scanning Method for Three-Dimensional Scanning-Partial-Image Velocimetry(3-d SPIV)," *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 1435~1444.
- (10) 김경천, 신대식, 이부환, 1998, "분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(I)," 대한기계학회논문집, 제22권 제1호(통권 제148호).