

횡단류 제트 와류구조의 3차원 토폴로지

신대식* · 김경천**
(1999년 2월 11일 접수)

Three Dimensional Topology of Vortical Structure of a Round Jet in Cross Flow

Dae Sig Shin and Kyung Chun Kim

Key Words: Cross Flow(횡단류), Shear Layer Vortices(전단층와류), Convection Velocity(대류속도) Mushroom Like Structure(버섯모양구조).

Abstract

In the fully developed internal flow fields, there are complex transition flows caused by interaction of the cross flow and jet when jet is injected into the flow. These interactions are studied by means of the flow visualization methods. An instantaneous laser tomographic method is used to reveal the physical mechanism and the structure of vortices formation in the branch pipe flow. The velocity range of cross flow of the pipe is 0.7 m/s and the corresponding Reynolds number Re_{cf} , based on the duct height is 5.6×10^3 , diameter/height ratios(d/H) 0.14 and velocity ratios 3.0. Oil mist with the size of $10\mu\text{m}$ diameter is used for the scattering particle. The instantaneous topological features of the vortex ring roll-up of the jet shear layer and characteristics of this flow are studied in detail by performing flow visualization in rectangular duct flow. It is found that the formation and roll-up of ring vortices is a periodic phenomenon. The detailed topology of the vortices in the near field of a cross-flow jet and the mechanism associated with them give enforced hints of vortex breakdown within the vortex system due to the interaction of the jet and the cross-flow.

기호설명	
d	: 제트의 지름 [mm]
H	: 사각덕트 폭 [mm]
R	: 속도비 [V_j / U_{cf}]
Re_{cf}	: 횡단류 레이놀즈수 [$U_{cf} D / \nu$]
Re_j	: 제트 레이놀즈수 [$V_j d / \nu$]
V_j	: 제트 평균 속도 [m/sec]
U_{cf}	: 횡단류 평균 속도 [m/sec]
X	: 횡단류 유동방향
Y	: 횡단류 반경방향
Z	: 제트가 분사되는 방향

하첨자	
cf	: 횡단류 (cross flow)
j	: 제트 (jet)

1. 서론

제트가 분사되는 횡단류 유동은 자연적인 현상에서 많이 등장하고 있는 기본적인 유동 현상이다.

제트가 횡단류에 분사될 때 가장 주목할 만한 유동과정은 제트가 분사되어 구부러지고 횡단류 유동과 평행하게 되는 동안의 성장과정이다. 이러한 유동과정은 주로 횡단류 제트의 근접 영역에서 이루어지고, 근접 영역에서의 유동 형태는 하류에서의 유동과 제트의 발달, 후류 영역 주위의 유동을 결정하는데 중요한 영향을 미친다. 그

* 회원 포항공과대학교 연구원
** 회원 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

러므로 평단류 제트유동을 이해하기 위해선 근접 영역에서 발생하는 와류들의 구조형태, 거동 및 성장 과정을 파악하는 것이 매우 중요하다.

평단류 제트유동의 근접 영역에는 전단층 와류 (shear layer vortices), 말굽와류(horseshoe vortices), 반전와류 쌍(counter rotating vortex pair) 그리고 후류와류(wake vortices)로 구분되는 4가지 형태의 조직적 구조가 나타난다.

전단층 와류는 제트의 외부 경계면에 발생하는 것으로, 유동방향거리(streamwise distance)와 함께 변형되어 구부러지는 링 형상(ring-like) 또는 루프 형상(loop-like)으로 나타난다. 말굽와류는 제트 상류 영역의 벽 경계층이 역압력 구배가 될 때 생겨나며 말굽모양으로 형성된다. 반전와류 쌍은 와류의 축이 제트의 유선 방향이며, 제트 하류 경계면의 중심부에서 발생하여 먼 하류에까지 유동장을 지배하고 있는 것으로 알려져 있다. 제트 후류 영역에서는 수직 와류 및 유출와류를 포함한 복잡한 와류계를 형성하게 된다.

4가지 조직적 구조중 전단층 와류와 후류와류는 불안정한 구조이고, 말굽 와류와 반전와류 쌍은 불안정한 성분을 가지고 있지만 비교적 안정된 조직적 구조라고 알려져 있다. 평단류 제트에 대한 많은 연구⁽¹⁻⁶⁾가 수행되었지만 4가지 조직적 구조에 대한 명확한 물리적 거동과 와류 형태를 밝혀내지 못하고 있다. 특히 대규모 와류 형태인 전단층 와류에 대해서도 아직 명확하게 알려져 있지 않다

Kelso 등⁽⁷⁾은 연기 또는 염료물 제트로 주입하는 유동 가시화 기법을 사용하여 3가지 조직적 구조에 대한 물리적 거동과 형태를 제시하였고, 또한 후류 영역에서 발생하는 수직 와류에 대해서도 생성원리 및 형태를 제시하였다. 그들은 유동가시화를 통하여 제트 외부 경계면에서 감아 올려지는 평와류들의 형태를 파악하였으나, 제트 내부 경계면에서는 감아 올려지는 평와류가 생성되지 않는다고 하였다. 그러나 그들이 사용한 유동 가시화 방법으로는 평단류와 제트유동이 접하는 외부 경계면에서 생성되는 와류구조는 나타낼 수 있지만, 분사되는 제트유동의 내·외부 경계면에 함께 발생하는 와류구조와 거동을 명확히 나타내지는 못한다.

본 연구에서는 3차원 평면에서 펄스 레이저의 순간적인 평면 조명으로 유동장을 절단하여 관찰

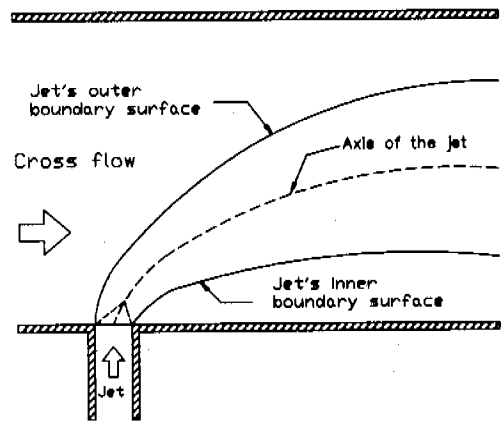


Fig. 1 Configuration of cross-flow jet boundaries.

하는(laser tomographic method) 입자 유동 가시화 기법을 사용하여 분사되는 제트유동의 물리적 거동과 와류형태를 파악하고자 한다. 특히 평단류 제트유동에 가장 뚜렷이 나타나는 대규모 조직적 와류 형태인 전단층 와류 및 반전 와류쌍에 대한 물리적 거동과 와류구조 형태 및 발달 과정을 규명하고자 한다.

또한 초기 근접 영역에서 발생하는 조직적 난류 구조 형태 및 발달과정을 3차원적인 토폴로지(topology)를 제공하여 평단류 제트유동의 물리적인 거동에 대한 이해를 증진시키고자 한다.

평단류 제트유동의 근접 영역에서 제트의 경계면은 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 제트 외부 경계면(jet's outer boundary surface)과 내부 경계면(jet's inner boundary surface)으로 구분된다.

2. 실험 장치 및 방법

사각 덕트 내의 평단류 제트유동에 사용된 실험장치는 공기가 흐르는 정사각형 덕트에 측면 제트를 분사하는 평단류 제트 혼합장치이다. 이 장치는 공기 흡입부, 사각 덕트, 시험부, 그리고 송풍장치로 구성되어있다. 공기 흡입부는 1000mm × 1000mm × 1000mm인 탱크로 만들어져 있으며, 탱크 내부에는 공기의 불순물을 제거하기 위해서 그리고 평단류 유동의 균일성을 위하여 그물망이 설치되어 있다. 공기 흡입부 출구에는 벨마우스(bell-mouse) 형의 공기 유입구가 설치되어 덕트

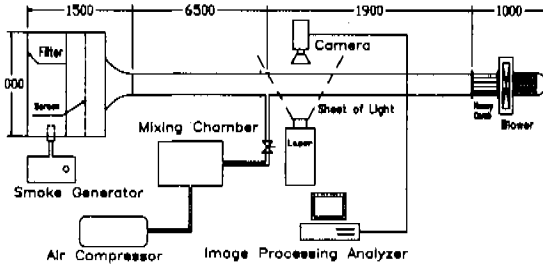


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

와 연결되어 있다. 사각 덕트는 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 크기의 아크릴로, 시험부는 유리로 제작하여 유동 가시화를 용이하게 하였다. 외부공기는 공기 흡입부의 그물망을 통과하여 사각 덕트 입구로 들어오게 된다. 덕트로 주입된 공기는 시험부에서 제트유동과 만나 혼합되어진다. 주파수 변환기로 송풍기의 회전수를 변화시켜 덕트에 흐르는 공기의 속도를 조절하고, 공기의 속도는 피토펙압관으로 측정하였다. 횡단류 유동은 원심 송풍기에 의해 유속이 유지되며 비틀림 유동을 방지하기 위해 원심 송풍기와 덕트 사이에 하나꼴을 설치하였다. 송풍기는 제트의 주입구에서 덕트 폭 지름(H)의 20배 하류에 위치한다. 외부공기가 흡입되는 덕트의 입구와 제트가 주입되는 주입구 사이의 길이는 65H로 횡단류 유동이 충분히 발달된 유동이 되도록 하였고, 완전 발달된 제트유동을 얻기 위하여 제트 주입 길이를 제트 직경(d)의 100배로 하여 사용하였다. 또한 제트유동의 비틀림을 방지하기 위해 제트 상류에 하나꼴을 설치하였다.

실험은 횡단류 유동의 평균속도 $U_j = 0.7 \text{ m/s}$ ($Re_{cf} = 5.26 \times 10^3$)에서 수행되었고, 유동장의 온도는 상온이며, 실험장치 내에서의 온도증가는 없었다. 풍동의 시험부와 실험에 필요한 기타 구성요소는 Fig. 2에 나타나 있다.

제트의 직경은 널리 사용되는 제트 혼합장치의 지름비 범위($d/H = 0.1 \sim 0.4$)에 포함되는 $d/H = 0.14$ 를 사용하였다. 제트는 원형 노즐로부터 분사되어지며, 밸브에 의해 유량이 조절된다. 횡단류 유동에 분사되는 제트를 정의하는데 중요한 변수는 제트와 횡단류와의 속도비 R이다. 제트의 속도는 속도비 $R=3$ 인 경우에 해당하는 $V_j = 2.1 \text{ m/s}$ ($Re_j = 2.07 \times 10^4$)에서 실험을 수행하였다.

유동 가시화 개략도 및 좌표계는 Fig. 3에 나타

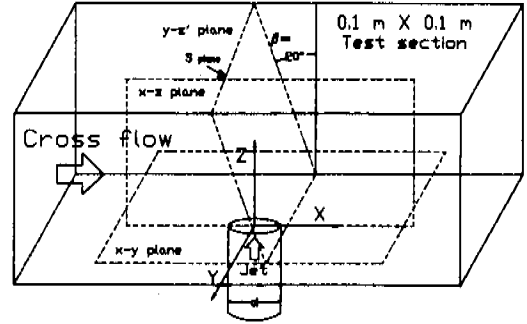


Fig. 3 Definitions of laser light sheet and coordinate system.

나 있다. 유동의 방향은 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 X방향으로 횡단류가 흐르고 있고, Y방향은 횡단류를 가로지르는 방향이며, Z방향으로 제트가 분사되어진다.

횡단류 제트유동장의 순간 영상을 획득하기 위해서 TSI사 PIVCAM 10 - 15 카메라를 사용하였고, 화상처리보드는 TSI사의 프레임 그래프(frame grabber) 610066 을 사용하였다.

횡단류 제트유동의 제트 내부 및 외부 경계면에 함께 생성되는 전단층와류의 물리적인 거동과 변화를 나타내기 위하여 필스레이저의 순간적인 평면 조명으로 유동장을 절단하여 관찰하는(laser tomographic method) 입자 유동 가시화 방법을 사용하였다.

입자 유동 가시화 방법은 횡단류 상류에 설치된 연기 발생기를 이용하여 에틸렌글리콜을 직경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 입자로 만들어 공기 흡입부에 공급하고, 시험부에서 제트 노즐을 통해 입자가 없는 공기를 분사하는 것이다. 공급된 입자는 횡단류 유동을 따라서 시험부에 흘러가게 되고, 시험부에서 입자들은 공기만 분사되는 제트를 만나 상호유입 작용을 하게 된다. 유입작용으로 인한 입자의 분포는 제트유동의 내·외부 경계에 형성되는 와류구조 형태 및 거동을 나타내어준다. 즉 시험부에 분포된 입자는 레이저의 평면광에 의해 산란하여 입자가 분포하는 밝은 곳과 분포하지 않는 어두운 곳으로 구별되어 화상에 나타나 형성되는 와류구조의 변화를 보여준다. 이러한 방법은 균일한 입자 공급과 강력한 광원이 필요로 한다. 광원은 200mJ Nd-Yag 레이저를 사용하였다. 평면광이 주사되는 조명시간은 5ns 정도의 순간적인 화상이다. 이러한 유동 가시화 기

법은 Fig. 3에 나타나 있는 3차원 평면에 형성되는 제트유동의 물리적 거동 및 와류구조를 나타내어 준다.

3. 물리적 거동과 와류 구조

횡단류 제트유동의 근접 영역에서 지배적인 현상은 제트 전단층에 의해 발생하는 유입현상이다. 속도비율 일정하게($R = 3$) 하여 제트 전단층 내·외부 경계면에 유입되는 와류들의 거동과 구조를 파악하였다.

Fig. 4는 수직 중심단면($Y = 0$)에서 횡단류 제트유동을 가시화한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 제트 외부 경계면에서 횡단류보다 제트의 운동량 플럭스가 크므로 제트에서 횡단류로 회전하는 반 시계 방향의 와가 형성된다. 형성되어진 와는 횡단류에 의해 하류로 발달하면서 계속적으로 주위 유체를 유입하고 와의 신장(vortex stretching)효과로 인하여 링모양의 와가 형성된다. 같은 원리로 내부 경계면에서도 횡단류로 유입되는 시계방향의 링와류가 형성된다. 따라서 제트 내·외부 경계면에서 서로 방향이 다른 링와류가 형성되어 버섯모양의 거동을 하게된다. 아울러 링와류의 감김 현상도 내·외부 경계면에 함께 발생된다.

버섯모양의 와류는 횡단류 방향으로 구부러지면서 하류방향으로 발달해 간다. 하류로 발달하면서 횡단류와의 운동량 교환으로 인하여 제트의 운동량이 감소되어 내·외부 경계면에서 발생된 링와류가 외부 경계면에서 링와류 쌍을 이루게된다. 3 ~ 4개 정도의 링와류 쌍을 지나면 링와류의 형태가 급속하게 깨어지면서 하류로 흘러간다. 이것은 제트유동이 횡단류에 의해 구부러지면서 유입현상이 급속하게 증가하여 횡단류와의 혼합이 활발하게 이루어지기 때문이다. 또한 링와류가 빠르게 감아 올려지면서 제트의 각 경계에서 반전와류 쌍의 발달을 촉진시켜 링와류를 급속하게 깨어지게 한다.

링와류는 Kelvin-Helmholtz 불안정성으로 발생되며 와류 집중 현상에 의해 주기적으로 발생되어 감아 올려진다. 또한 하류로 발달하면서 계속적인 유동의 유입으로 인해 회전하는 와의 형태가 조밀하게 되고 하류 방향으로 진행되면서 링모양으로 형성된 와류가 늘어지면서 깨져 버리는

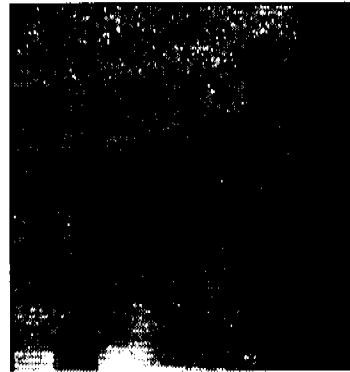


Fig. 4 Flow pattern of the near field of the cross-flow jet in x-z plane ($U_{cr} = 0.7 \text{ m/s}$, $R = 3$, $d/H = 0.14$, $Y = 0$).

데 이는 반전와류 쌍의 성장으로 인한 것이다. 따라서 사각 덕트 내의 횡단류 제트유동은 버섯모양을 이루면서 내·외부 경계면에 각각의 링와류를 형성한다. 그리고 제트의 각 경계면에서 링와류가 빠르게 감아 올려지면서 반전와류 쌍의 생성을 유발시키는 것으로 생각된다.

3.1 초기 영역의 발달 과정

횡단류 제트유동의 대규모 와류형태인 전단 링와류가 버섯모양의 거동을 하면서 하류로 발달한다. 그러면 이러한 링와류가 어떤 과정을 거쳐 형성되는지를 알아보기 위하여 제트 노즐로부터 형성되는 수직단면의 전형적인 화상들을 취득하고, 전단층 링와류가 생성되어 발달하는 대표적인 단계들을 추출하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림은 횡단류 속도 $U_{cr} = 0.7 \text{ m/s}$, 속도비 $R = 3$, 지름비 $d/H = 0.14$ 인 경우 제트 노즐로부터 형성되는 링와류의 발달 과정을 잘 보여주고 있다. Fig. 5 (a) ~ (g)에서 제트 노즐로부터 시작되는 제트유동 초기 영역의 링와류 형성 과정을 살펴보기로 하자. (a)는 제트 노즐로부터 링와류가 형성되기 직전의 상태이다. 제트 노즐 바로 위에서 외부 경계면의 링와류가 불특하게 형성되고 있는 초기 링와류 형태를 (b)에서 볼 수 있다. (c)에서는 이러한 초기 링와류가 제트의 운동량에 의해 제트 축을 따라 이동하고 있으며, 아울러 제트 내부 경계면에도 초기 링와류가 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. 초기 링와류가 계속적으로

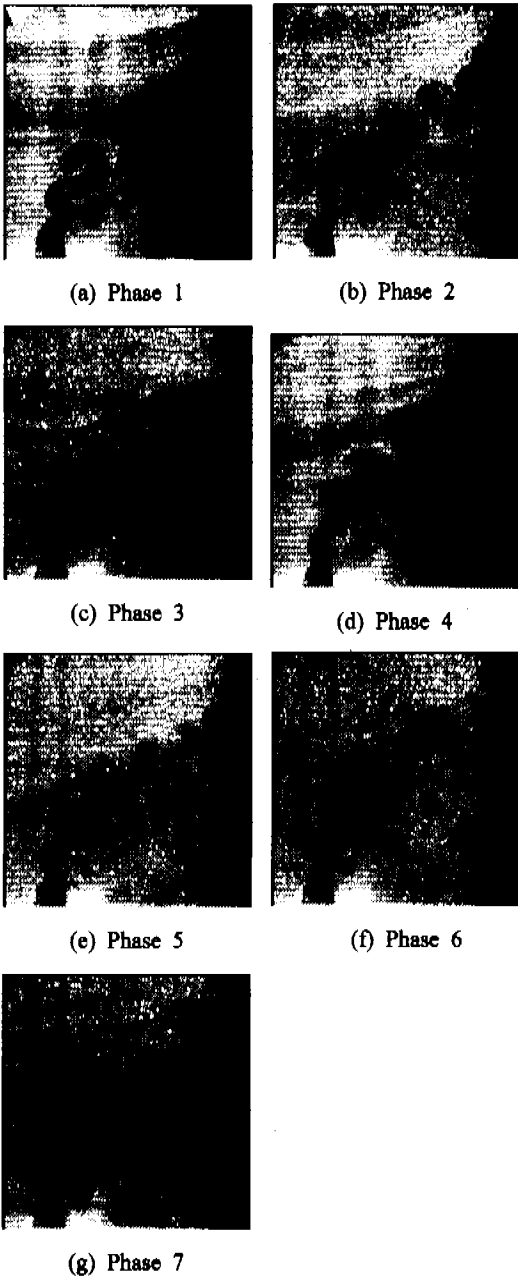


Fig. 5 Typical subsequent flow patterns of the near field in cross-flow jet. ($U_{cr} = 0.7$ m/s, $R = 3$, $d/D = 0.14$, $Y = 0$).

제트 축을 따라 이동하면서 (d), (e)와 같이 제트 내·외부 경계면에 모두 타원형의 링와류가 형성

된다. 이러한 타원형의 링와류는 횡단류에 계속적으로 유입작용을 하면서 (f), (g)에서 보는 바와 같이 감겨 올려지는 전형적인 링와류 형태를 이루게 된다. 전형적인 링와류 형태를 이루면 (a)에서 보는 것과 같이 제트 외부 경계면에 링와류쌍을 형성하기 시작한다. 링와류쌍이 형성되면 (b)에 나타나 있는 것과 같이 또 다른 초기 링와류가 형성되어 Fig. 5 (a) ~ (g) 과정을 계속 반복하게 된다. 이처럼 제트 내·외부 경계면에 링와류를 형성하면서 (a)에서 (g)까지 이어지는 하나의 주기를 형성한다. 또한 (a) ~ (g)에서 보는 바와 같이 형성된 제트 내·외부 경계면의 링와류는 제트 축을 따라 하류로 이동하면서 외부 경계면에서 링와류 쌍을 계속 형성한다. 따라서 전단층 링와류는 본 실험 조건에서 주기적으로 생성되는 안정한 구조임을 확인 할 수 있다.

Fig. 5에서 링와류가 형성되는 주파수를 가시화 화상에서 분석할 수 있다. 내·외부 경계면에 나타나는 링와류들 사이의 간격과 와의 대류속도 (convection velocity)를 고려하여 링와류 형성 주파수를 구하면 35Hz정도가 된다. 이 때의 스트로울 수 (Strouhal number)는 횡단류를 기준으로 하면 $S = f d/U_{cr}$ 이므로 0.7 가 된다.

Fig. 6은 횡단류 제트의 중심을 수직으로 절단한 수직화상의 윤곽선을 나타낸 것으로 제트유동 초기 영역의 링와류 형성과정을 알기 쉽게 나타낸 것이다. (a) ~ (g)까지 링와류의 형성 및 발달과정을 7단계로 나타내었다. 횡단류 제트유동은 이러한 7가지 전형적인 링와류의 형태가 주기적으로 반복되면서 발달한다.

링와류가 주기적으로 생성되면서 하류로 발달하기 때문에 수평단면 또한 계속적으로 변하게 된다. 제트 노즐로부터 수직거리가 증가할수록 단면의 변화가 심하게 일어나며, 그 형상 또한 복잡할 것이다. 이러한 수평단면의 변화를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 유동조건을 Fig. 5와 동일하게 하고 수직거리를 $Z = 1.0d$, $1.5d$ 로 증가시키면서 수평단면의 화상을 취득하였다.

Fig. 7은 수직거리 $Z = 1.0d$ 에서 수평단면 화상들을 취득하고 전단층 링와류의 발달과정을 나타내고 있는 Fig. 5의 7단계에 해당하는 화상들을 추출하여 나타낸 것이다. 이 결과로부터 노즐 출구로부터 매우 근접된 위치임에도 불구하고 제트의 기동은 원형이 아니라는 사실을 알 수 있다.

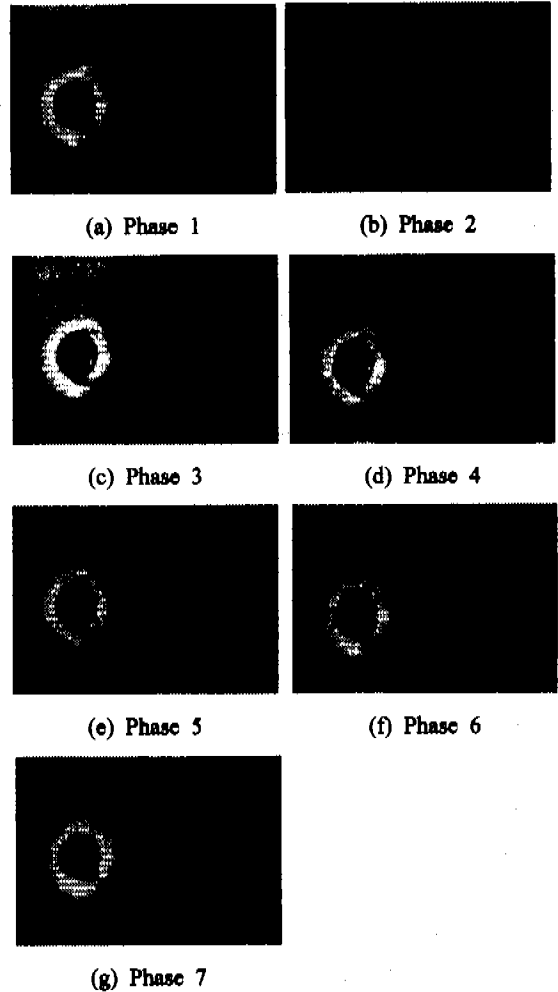
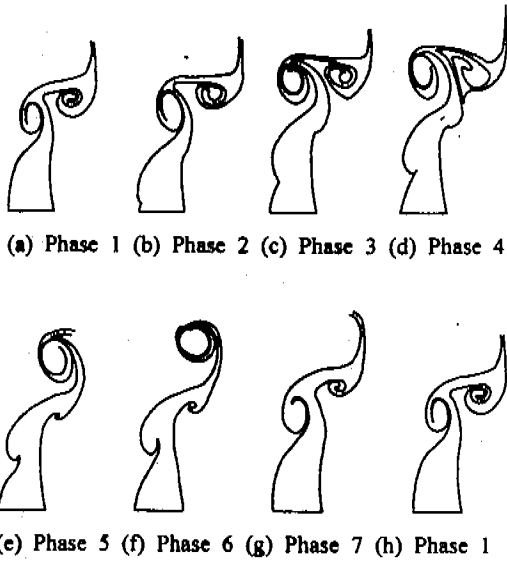


Fig. 6 Typical subsequent flow topology of cross-flow jet.

Fig. 7 Cross sectional flow patterns at $Z=1.0d$ in $x-y$ plane ($U_{cr} = 0.7 \text{ m/s}$, $R = 3$).

측면에서 형성되는 소용돌이 와외 발전으로 제트 기둥은 초생달 모양으로 얇아지며 양쪽 측면의 얇은 유체층이 휘감기는 모양이 발생하여 복잡한 양상을 보이고 있다. Fig. 7 (d), (e)에서는 타원형의 와류가 형성되어 앞면이 불룩하게 튀어나와 있다. 이 타원형의 와류는 외부 경계면에 형성되는 평와류의 수평단면이다. Fig. 7 (d)는 외부 경계면에 평와류가 형성되고 있는 수평 단면이며, Fig. 7 (e)는 평와류가 제트축을 따라 감겨져 올라가는 형상을 나타내고 있는 수평 단면이다. Fig. 7 (f)는 평와류가 제트 축을 따라 이동하고 평와류의 양쪽 가장자리 부분이 남아있는 수평 단면이다. 양쪽에 형성된 평와류의 가장자리 형태는 Fig. 7 (g)에서 보는 것처럼 모양을 유지하면서 하류로 흘러간다. 흘러간 평와류는 Fig. 7 (a)에서와 같이 중앙으로 유입되고, Fig. 7 (b), (c)에서 나타나 있는 것처럼 단면이 넓어지면서 외부 경계면에 또 다른 평와류가 형성하는 것을 볼 수 있다. 따라서 수직거리 $Z = 1.0d$ 에 형성되는 수평단면은 (a)에서 (g)까지 주기적으로 반복되어 형성된다. 따라서 외부 경계면의 평와류가 주기적으로 반복되어 형성함에 따라 수직거리 $Z = 1.0d$ 의 수평단면 형상도 주기적으로 반복되어

형성된다.
 Fig. 8은 수직거리 $Z = 1.0d$ 에서 나타나는 수평단면의 윤곽선을 알기 쉽게 나타낸 것이다. 대표적인 수직화상의 윤곽도인 Fig. 6와 함께 (a)에서 (g)까지 7단계로 나타내었다. 제트 노즐에서부터 수직거리가 $Z = 1.0d$ 가 되는 곳의 수평단면은 주기적으로 생성되는 외부 경계면의 평와류 발달 형상에 따라 (a) ~ (g)까지의 형상이 반복적으로 나타난다. 또한 제트 유동의 수평단면 형태는 제트 기둥이 아니라 뒷면에 반전 와류 및 후류와류 쌍이 존재하는 복잡한 형태를 이룬다는 것을 알 수 있다. 그러므로 수직거리가 더욱 중

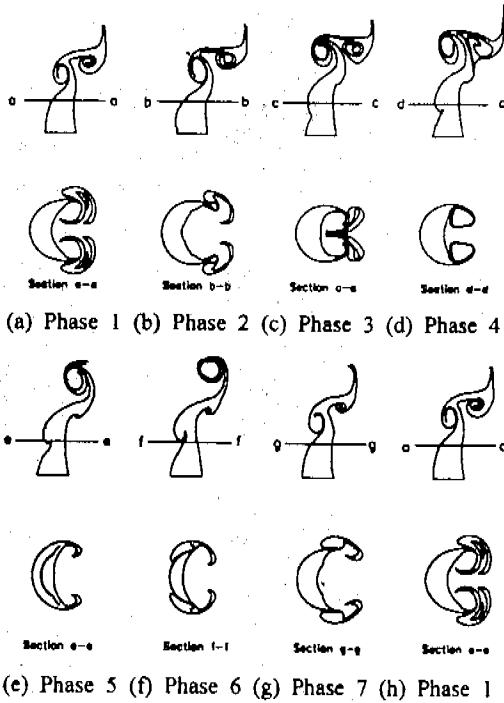
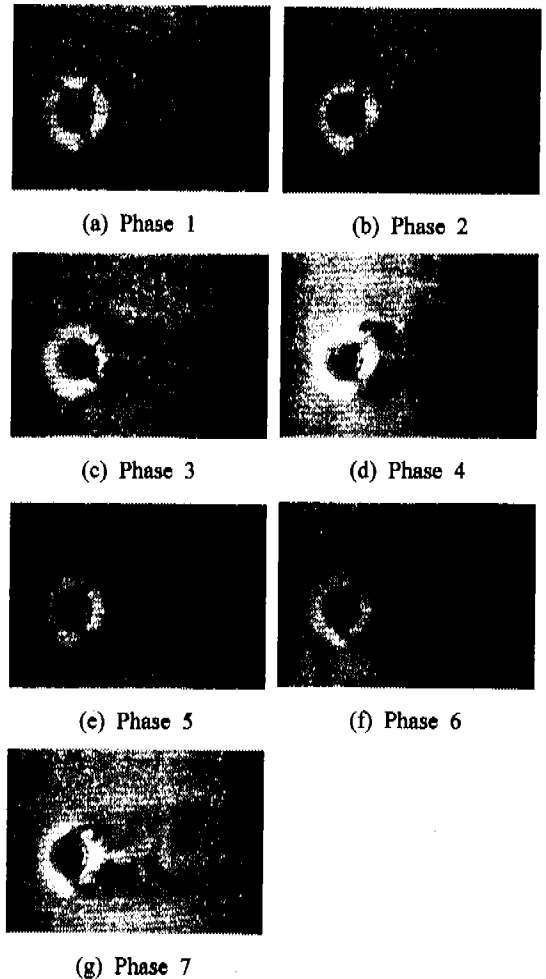


Fig. 8 Schematic diagram of cross sectional views at $Z = 1.0d$ in two planes (x-z plane, x-y plane).

가하면 내부 경계면에 생성되는 링와류와 더불어 복잡한 수평단면이 형성되리라 생각된다.

Fig. 9는 수직거리 $Z = 1.5d$ 에서 화상들을 취득하고 전단층 링와류의 발달과정을 대표적인 7 단계로 나타내고 있는 Fig. 5의 $Z = 1.5d$ 수평단면에 해당하는 화상들을 추출하여 나타낸 것이다. Fig. 9 (g)에서 앞면에 타원형의 폐곡선을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이 구조는 제트 외부 경계면에 형성되는 링와류의 수평단면의 형상이다. 이러한 링와류는 Fig. 9 (a)는 반전 와류쌍의 작용으로 인하여 양쪽으로 늘어지면서 제트 축을 따라 이동하여 링와류의 양쪽 가장자리 부분이 남아있는 형상이다. 계속적으로 링와류가 제트 축을 따라 이동하므로 Fig. 9 (b)에서와 같이 양쪽 옆면에 형성된 링와류는 하류 가장자리로 이동하여 유출된다. Fig. 9 (c)에서 보는 바와 같이 수평단면의 뒷면이 불룩하게 튀어나와 뒷면에 불룩한 타원형의 와류가 형성한다. 이것이 바로 내부 경계면에 형성하는 링와류이다. 내부 경계면



(g) Phase 7
Fig. 9 Cross sectional flow patterns at $Z = 1.5d$ in x-y plane ($U_{ef} = 0.7 \text{ m/s}$, $R = 3$).

에 형성된 링와류는 반전와류 쌍의 작용으로 줄어들면서 하류로 진행되어 Fig. 9 (d), (e)와 같은 형상이 된다. 그 다음 Fig. 9 (f)에서 보듯이 앞면의 단면폭이 증가하면서 다시 외부 경계면의 링와류가 형성된다. 이처럼 (a) ~ (g) 까지 수평단면이 주기적으로 반복되면서 내·외부 경계면에 형성되는 링와류를 나타내고 있다.

수평단면에서 후류 영역의 와류출 형상은 Fig. 9 (c)에 잘 나타나 있으며, 좌우로 퍼지면서 연속적으로 하류로 유출되고 있다.

Fig. 10은 수직거리 $Z = 1.5d$ 인 경우 수평단면의 형상을 윤곽선으로 알기 쉽게 나타낸 것이다. 이 그림은 주기적으로 반복되는 수평단면의 진행

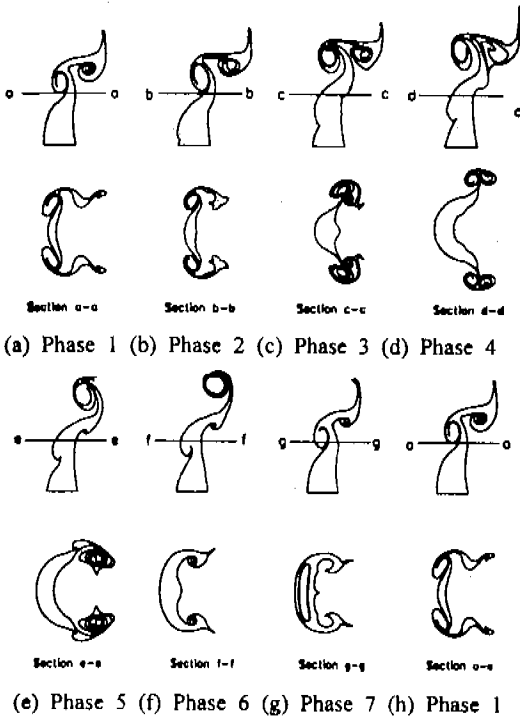


Fig. 10 Schematic diagram of cross sectional views at $Z = 1.5d$ in two planes (x-z plane, x-y plane).

적인 변화과정을 대표적인 수직화상의 윤곽도인 Fig. 6과 함께 (a) ~ (g) 까지 7단계로 나타내었다. 제트 외부 경계면 뿐만 아니라 내부 경계면에 형성되는 링와류의 발달과정을 수직, 수평단면에서 잘 보여주고 있다. 따라서 수직거리 $Z = 1.5d$ 에서 평단류 제트유동의 수평단면은 내·외부 경계면에 주기적으로 생성되는 링와류의 형상에 따라 주기적으로 변화하면서 형성된다. 그리고 제트 유동의 수평단면 형태는 윗면에 반전 와류 및 후류와류 쌍의 영향으로 $Z = 1.0d$ 보다 더욱 복잡한 형태를 이룬다는 것을 알 수 있다.

평단류의 유동방향에서 쳐다본 제트 단면의 형상을 파악하기 위하여 유동조건을 Fig. 5 경우와 동일하게 하고 Fig. 3의 사각 덕트 유동장에서 보는 바와 같이 $X = 0.68d$ 인 곳에서 평면판을 반시계 방향으로 20° 도 기울인 ($\beta = 20^\circ$) $y-z'$ 면에 주사하여 제트 초기 영역의 가시화 화상을 취득하였다. 이 면을 S단면이라 한다. 즉 S단면은 $X = 0.68$ 인 곳에서 반 시계방향으로 $y-z$ 면을

20° 기울인 경사면이다.

Fig. 11은 S단면에서 얻어진 가시화 화상이다. 이 그림은 전단 링와류의 발달과정을 나타내고 있는 Fig. 5 7단계의 S단면에 해당하는 화상들을 추출하여 나타낸 것이다. Fig. 11 (a), (b)에서 보는 바와 같이 아랫부분에 등급게 나타나는 것은 제트 기둥의 몸체이고 윗부분의 타원형 와류는 제트 외부 경계면에 형성되는 링와류를 나타낸 것이다. 외부 경계면에 형성되는 링와류의 모양은 초기에는 (a)와 같은 타원형태가 이루어지며, 제트 축을 따라 이동하면서 반전와류 쌍의 작용과 와외 인장효과에 의해 (b)와 같은 양쪽 가장자리가 아래로 처지고 중앙부가 오목해지는 둥근 삼각형 모양의 링와류를 이룬다. (b)의 아랫부분에서는 양쪽옆면에 형성되기 시작하는 옆면 링와류를 볼 수 있다. Fig. 11 (c), (d)에서는 아랫부분의 제트 기둥 양쪽 옆면에 링와류가 형성하여 제트 축을 따라 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 평단류 제트유동인 경우 옆면에서도 링와류가 형성한다는 사실을 말해주고 있다. 그리고 윗부분의 링와류가 크기가 줄어들고 있는 것은 링와류가 제트 축을 따라 이동하기 때문이다. Fig. 11 (e)에서는 링와류가 제트 축을 따라 계속 이동하면 보이지 않게 된다. 옆면의 링와류는 더욱 발달하여 Fig. 11 (f)에서와 같이 링와류 아랫부분으로 유입이 활발히 이루어져 제트 기둥 윗부분이 분리된다. 분리된 후 Fig. 11 (g)와 같은 둥근 모양의 제트 기둥이 다시 형성되고 외부 경계면의 링와류도 다시 나타난다. 평단류를 가로지르는 경사단면(S단면)도 수평단면과 마찬가지로 외부 경계면의 링와류와 옆면의 링와류가 주기적으로 형성함에 따라 단면의 형상이 주기적으로 반복된다.

Fig. 11 (a) ~ (g)의 S단면 화상은 링와류 형성과정을 7단계로 보여주는 Fig. 6 (a) ~ (g) 윤곽도의 중심부 수직단면을 나타낸 것으로 생각할 수 있다. 그래서 Fig. 6 윤곽도와 일대일 대응시켜 알기 쉽게 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 (a)는 링와류가 쌍을 이루고 있는 형상이므로 S단면의 중심부 형상은 윗부분에 링와류가 나타나고 아랫부분에는 둥근 모양의 제트 기둥이 나타난다. Fig. 12 (b)는 링와류가 하류로 계속 이동하고 있으며, 제트 노즐 가까이 에는 외부 경계면의 링와류가 형성하고 있는 상태이다. 그러므로 S단면

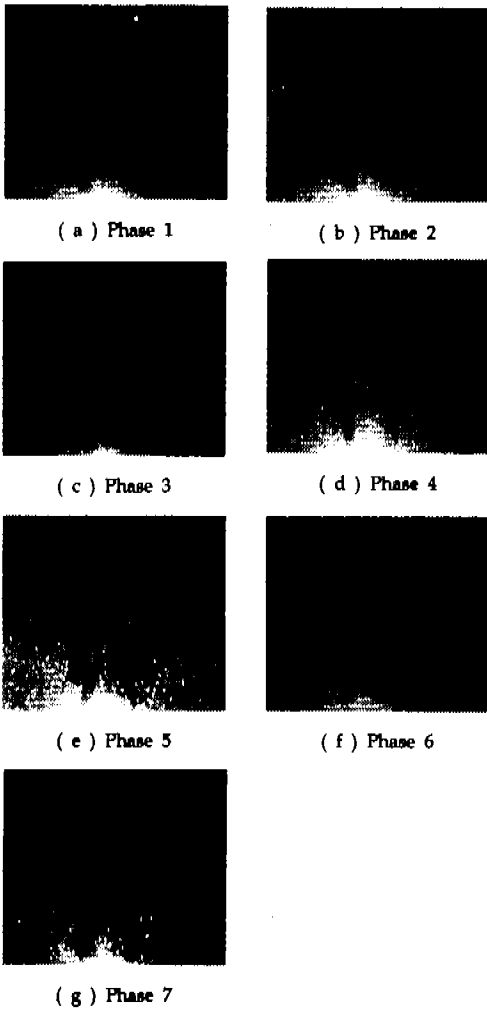


Fig. 11 Traverse sectional flow patterns at $X=0.68d$, $\beta=20^\circ$ in $y-z'$ plane ($U_{cr}=0.7$ m/s, $R=3$).

의 윗부분에는 하류로 이동하는 링와류가 보이고 있으며 아랫부분에는 양쪽 옆면에서 링와류가 형성하고 있다. 형성되는 옆면 링와류의 위치는 외부 경계면에 형성된 링와류 보다는 더 위쪽에 위치하고 있다. 왜냐하면 제트 기둥의 옆면은 외부 경계면 보다는 약한 횡단류 플럭스와 접하게 되므로 제트 기둥이 수직방향으로 조금 더 상승한 후에 횡단류로 유입이 이루어지기 때문이다

Fig. 12 (c), (d)는 링와류 쌍이 계속적으로 하류로 이동하고 있으며, 제트 노즐 가까이에서 형성된 외부 경계면의 링와류가 제트 축을 따라 진행되고 있다. 따라서 S단면의 형상은 윗부분에는

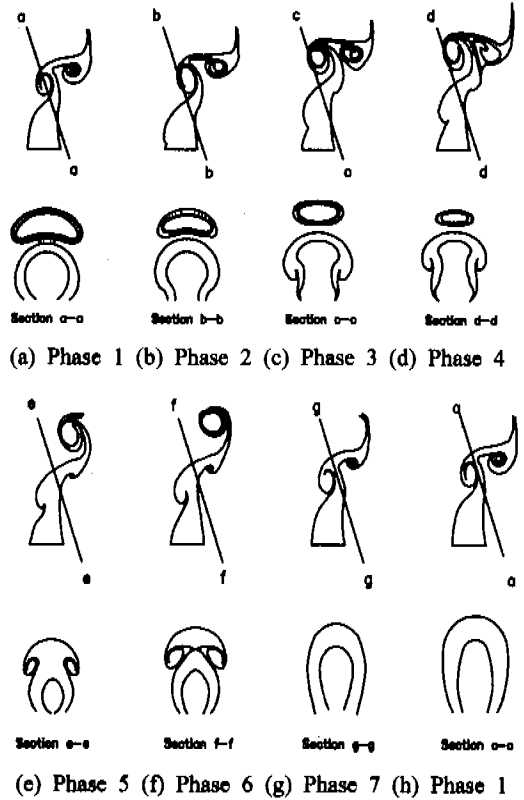


Fig. 12 Typical subsequent flow topology of traverse sectional views with $\beta=20^\circ$ in two planes ($U_{cr}=0.7$ m/s, $R=3$).

링와류가 제트 축을 따라 계속적으로 이동함으로써 그 크기가 계속 감소되고 있는 현상을 나타낸다. 아랫부분에서는 양쪽 옆면에 형성된 링와류가 제트 축을 따라 계속 발달하고 있다. Fig. 12 (e)에서는 제트 노즐로부터 형성된 링와류는 제트 기둥에서 계속 발달하고 있으며, 이전에 형성된 링와류는 하류로 이동하여 수직 중심부에 나타나지 않는다. 그러므로 S단면 중심부 형상은 윗부분에 링와류가 나타나지 않고, 아랫부분에서만 옆면의 링와류가 발달하는 송이버섯 모양이 된다. Fig. 12 (f)에서는 제트 기둥에 형성되는 링와류가 제트 축을 따라 더욱 발달하고 있다. 이때의 S단면 형상은 윗부분에는 링와류가 하류로 이동하여 나타나지 않으며, 아랫부분에서는 제트 기둥에 형성된 옆면의 링와류는 반전 와류쌍의 작용으로 활발하게 내부로 유입을 일어나 제트 기둥에서 분리되려고 한다.

옆면 텡와류가 제트 기둥에서 분리되면 Fig. 12 (g)에서 보는 바와 같이 외부 경계면에 형성하는 텡와류가 다시 S단면 윗부분에 나타나게 되고, 제트 기둥도 다시 Fig. 12 (g), (h)와 같이 등근 모양으로 형성된다.

그러면 다른 옆면 텡와류가 Fig. 12 (b)와 같이 형성하게 된다. 따라서 제트유동의 중심부를 가로지르는 S단면은 Fig. 12 (a) ~ (g) 까지 일련의 과정이 텡와류 형성과정에 따라 주기적으로 반복되어 형성된다.

4. 결 론

입자 유동 가시화 기법을 사용하여 횡단류 제트유동의 근접영역에 나타나는 와류구조를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 횡단류 제트유동 초기영역의 와류 구조는 속도비 $R = 3$ 인 경우는 버섯모양을 이루면서 발달한다.
- (2) 본 실험의 조건에서 초기 영역에 형성되는 제트유동의 물리적 거동과 와류구조는 주기적으로 생성되는 안정한 구조이다.
- (3) 제트의 외부, 내부 그리고 옆면 경계면에서 텡와류가 형성된다
- (4) 제트 노즐 출구에서 수직방향으로 $Z = 0.1d$ 이상 떨어진 근접영역에서 제트 유동의 형태는 제트 기둥이 아니라 뒷면에 반전 와류 및 후류 와류 쌍이 존재하는 복잡한 형태를 이룬다.
- (5) 와류 깨어짐 현상은 횡단류에 의해 구부러

지면서 유입현상이 증가하고, 빠르게 감아 올려지는 텡와류에 의해 촉진되는 반전와류 쌍의 발달에 의해 일어나는 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) T. F. Fric and A. Roshko, 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1~47.
- (2) 김정천, 신대식, 이부환, 1998, "분지판 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(I)," 대한기계학회논문집, 제22권, 제1호, pp. 25~33.
- (3) 김정천, 신대식, 1998, "분지판 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(II)," 대한기계학회논문집, 제22권, 제7호, pp. 1013~1021.
- (4) 김정천, 신대식, 박기영, 1998, "분지판 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(III)," 대한기계학회논문집, 제22권, 제11호, pp. 1571~1581.
- (5) Haven B. A. and Kurosaka M., 1997, "Kidney and Anti-kidney Vortices in Crossflow Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 352, pp. 27~64.
- (6) Cenedese A. and De Angelis G., 1998, "Near Field Analysis of a Jet in Cross-flow by Means of LIF and PTV," *8th International Symposium on Flow Visualization*, pp. 2031~2036.
- (7) R. M. Kelso, T. T. Lim and A. E. Perry, 1996, "An Experimental Study of Round Jets in Cross-flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 306, pp. 111~144.