

분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(II)

김 경 천* · 신 대 식**

(1997년 1월 23일 접수)

Flow Visualization Study on the Turbulent Mixing of Two Fluid Streams(II)

Kyung Chun Kim and Dae Sig Shin

Key Words : Cross Flow Jet(횡단류 제트), Velocity Ratio(속도비), Ring Vortices(링 와류), Vortex Shedding(와류출)

Abstract

Various vortical structures are investigated by using three kinds of flow visualization methods in branch pipe flows. There are two typical flow patterns when a jet from the branch pipe with various angles is injected to the main pipe cross flow. The velocity range of cross flow of the main pipe is 0.2 m/s~1.2 m/s and the corresponding Reynolds number, R_p is of the range $1.5 \times 10^3 \sim 9.02 \times 10^3$. The velocity ratio (R), jet velocity/cross flow velocity, is chosen from 1.3 to 4. The subsequent behavior and development of the ring vortices which are created at the jet boundary mainly depend on the velocity ratio. An empirical relation for the shedding frequency of the ring vortices is derived. It is also found that there are two different vortex shedding mechanism in the mixing of two fluid streams.

기호 설명

d : 제트 입구 지름 (jet inlet diameter) [mm]
 D : 관 지름 (pipe diameter) [mm]
 R : 속도비 (velocity ratio) [V_j/U_p]
 Re_p : 관 레이놀즈수 (pipe Reynolds number)
 [$U_p D/\nu$]
 Re_j : 제트 레이놀즈수 (jet Reynolds number)
 [$V_j d/\nu$]
 V_j : 제트 평균 속도 (mean jet velocity)
 [m/sec]
 U_p : 관 평균 속도 (mean pipe velocity)
 [m/sec]
 X : 횡단류 유동방향
 Y : 횡단류 반경방향

Z : 제트가 분사되는 방향

그리스문자

α : 분사각 (jet injection angle)

하첨자

p : 관 (pipe)

j : 제트 (jet)

1. 서 론

제트가 분사되는 횡단류의 유동은 항공, 기계 및 환경분야에 적용되는 기본적인 물리적 현상이다. 이러한 횡단류 제트 유동은 액체나 기체의 전달을 취급하는 관로 시스템에서 널리 사용되고 있다. 관로 시스템을 효율적으로 설계하기 위하여 여러 가지 유동조건에 대한 최적혼합 조건 및 환경이 필요

* 회원, 부산대학교 기계공학부, 부산대학교 기계기술 연구소

** 회원, 부산대학교 대학원 생산기계공학과

하게 되었다. 따라서 선행연구인 유동가시화연구 (I)⁽¹⁾에서는 유동가시화를 통한 신뢰성 있는 최적 혼합에 대한 관정을 제시하였고, 직경비, 분사각, 속도비를 변화시켜 여러 가지 유동의 조건에 대한 최적 혼합 조건들을 제시하였다. 이 연구에서 최적 속도비는 여러 가지 유동조건에서 2에서 16사이로 나타났고, 최적 운동량비는 0.05-0.18사이의 값으로 나타났다. 최적속도비와 운동량비는 횡단류 레이놀즈 수가 증가함에 따라 감소하고, 분사각이 감소할수록 줄어든다는 것을 알았다. 최적 혼합시 운동량비가 최소가 되는 직경비를 발견하였고, 그 값은 $d/D=0.17$ 근방이며, 직경비가 횡단류 제트 유동에서 가장 지배적인 변수임을 알았다.

그러나 유동가시화연구(I)⁽¹⁾는 주로 최적 혼합에 대한 조건 및 관정에 대해서 연구하였고, 제트와 횡단류 사이에 생성되는 조직적 구조 및 와류들의 거동과 형태에 대해서 연구가 미흡하였다. 최근에 들어 횡단류 제트에 대한 관심이 높아지면서 여러 가지 연구들이 진행되었지만 대부분의 경우 외부유동장이나 사각채널 유동장에 대하여 연구하였고, 충분히 발달한 관유동과 같은 전단층에 분사된 횡단류 제트의 연구는 거의 없었으며, 심지어는 내부유동장에 대한 기초적인 실험자료들이 부족하여 수치해석을 수행하는데 많은 어려움이 있다.

제트가 횡단류에 분사될 때 두 유동 사이에는 제트 쪽에서 횡단류 쪽으로 기울어지는 복잡한 교류 유동이 발생하게 되고, 특히 제트가 분사되어질 때 이루는 경계층이 유동의 유입이 이루어지는 경계층이기 때문에 횡단류와 상호작용을 하는 근접영역에서 많은 중요한 효과가 일어나게 된다. 이러한 근접영역은 하류거동과 제트의 발달, 후류영역과 혼합영역 근처의 횡단류를 결정하는데 중요한 영향을 미치게 한다. 그러므로 횡단류 제트 유동을 이해하는데 근접영역의 조직적 구조와 와의 거동 및 형태를 파악하는 것이 필수적이다.

횡단류와 제트는 3차원 상호작용을 하는 복잡한 유동이며, 제트의 근접영역에는 4가지 형태의 조직적 구조가 나타난다고 알려져 있다.^(2,3)

이 4가지 형태의 구조는

- i) 전단층 와류 (shear layer vortices)
- ii) 말굽 와류 (horseshoe vortices)
- iii) CRP (counter rotating vortex pair)
- iv) 후류 와류 (wake vortices) 로 구분 할 수 있다.

전단층 와류는 횡단류 제트유동에서 제트의 바깥 경계면에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 유동방향거리(streamwise distance)와 함께 변형되어 구부러지는 링 형상(ring-like) 또는 루프 형상(loop-like)으로 나타난다. 말굽와류는 제트 상류영역에서 생겨나며 형상이 말굽모양으로 형성된다. 하류영역에서는 제트 내부경계면의 중심부에서 발생하여 먼 하류에까지 유동장을 지배하고 있는 것으로 알려진 한 쌍의 CRP 조직적 구조가 형성된다. 제트 후류 영역은 수직와류 및 유출와류를 포함한 복잡한 와류계를 형성한다. 이러한 4가지 조직적 구조중 전단층 와류와 후류 와류는 불안정한 구조이고, 나머지 두 개의 조직적 구조인 말굽와류와 CRP는 불안정한 성분을 가지고 있지만 유동에 대한 평균 개념을 가진 안정한 와구조라고 알려져 있다.⁽⁴⁻⁸⁾

본 연구에서는 여러 가지 각도의 제트 분지관을 사용하여 제트와 횡단류 유동의 상호작용으로부터 생겨나는 전단층에서의 조직적 구조 형태와 변화 그리고 제트 후류에서 생성되는 CRP 구조 형태 및 변화를 밝히고자 한다. 특히 제트 후류에 생성되는 와류출 형태와 거동에 대하여 입자 유동가시화 기법을 사용하여 3차원 직교평면에서의 유동 단면을 모두 나타내었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 공기가 흐르는 주관에 측면 제트를 분사하는 횡단류 제트 혼합장치이다. 이 장치는 공기 입구부, 주관, 시험부, 그리고 송풍장치로 구성 되어있다. 공기 입구부에는 여과지가 설치되어 있고, 크기는 1000 mm×1000 mm×1000 mm이다. 탱크내부에는 공기의 불순물을 제거하기 위한 필터와 횡단류 유동의 균일성을 위하여 그물망이 설치되어 있다. 공기 입구부 내부에는 벨마우스 (bell-mouse) 형의 공기 흡입구가 설치되어 주관과 연결되어 있다. 주관은 불투명 관으로, 시험부는 투명 아크릴 관 또는 유리관으로 제작하여 유동 가시화를 용이하게 하였다. 외부공기는 공기 입구부의 여과기와 그물망을 통과하여 주관 입구로 들어오게 된다. 주관으로 주입된 공기는 시험부에서 제트 유동과 만나 혼합되어진다. 주파수 변환기로 송풍기의 회전수를 변화시켜 주관에 흐르는 공기의 속도를 조절하고 공기의 속도는 피

토정압관으로 측정하였다. 횡단류 유동은 원심송풍기에 의해 유속이 유지되며 비틀림 유동을 방지하기 위해 원심 송풍기와 주관 파이프 사이에 허니콤과 그물망을 설치하였다. 송풍기는 분지관 제트의 주입구에서 주관직경(D)의 20배 하류에 위치한다. 외부공기가 흡입되는 주관의 입구와 제트가 주입되는 주입구 사이의 길이는 70D로 횡단류유동이 충분히 발달된 유동이 되도록 하였고, 완전 발달된 제트유동을 얻기 위하여 제트 주입 길이를 직경의 100배로 하여 사용하였다. 분사하는 제트 표면에서의 유동은 초기상태 동안에 중요하기 때문에 제트 상류에 그물 망을 설치하여 균일한 유동이 발생하도록 하였다. 유동장의 온도는 상온이며, 실험장치 내에서의 온도증가는 없었다. 모든 실험은 개방형 풍동에서 실험을 수행하였고, 풍동의 시험부와 실험에 필요한 다른 구성요소는 Fig. 1에 나타나있다.

횡단류 평균 유동의 속도 U_p 는 $0.2 \text{ m/s} \sim 1.2 \text{ m/s}$ ($Re_p = 1.5 \times 10^3 \sim 9.02 \times 10^3$)의 범위에서 수행되었고 유동의 균일성을 위하여 수개의 그물망을 풍동의 상류에 설치하였다. 주관의 난류강도는 1% 정도이다. 제트는 제트 노즐로부터 분사되어지며, 유량은 유량조절밸브에 의해 조절하였다.

횡단류에서 제트의 특성은 횡단류 유동과 제트의 운동량 플럭스 비율에 의존하게 되며, 이 비율의 제공근인 속도비 R로 정의하는 것이 일반적이다. 제트와 횡단류의 밀도가 동일할 때, 속도비 R은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 V_j 는 제트의 면적으로 나누어진 평균속도이고 U_p 는 횡단류의 평균 속도이다. 횡단류 제트 유동은 물리적 인자 이외에 기하학적 인자에도 크게 지배를 받는다. 이러한 유동의 가장 지배적인 기하학적 인자는 주관과 분지관의 지름비(d/D)

라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 실제 사용되는 혼합기의 사양 범위에 포함되는 지름비 $0.10 \sim 0.25$ 가 되는 제트 노즐을 사용하였다.

횡단류 유동에 분사되는 제트를 정의하는데 중요한 변수는 제트와 횡단류와의 속도비 R이다. 제트의 속도(V_j)는 속도비(R)가 1.3~4 경우인 $0.3 \text{ m/s} \sim 4.8 \text{ m/s}$ ($Re_j = 3.15 \times 10^2 \sim 5.05 \times 10^3$) 사이의 범위에서 실험을 수행하였다.

횡단류 제트 유동에 생성되는 와류들의 구조 형태 및 거동을 살펴보기 위하여 3가지 유동가시화 기법을 사용하였다. 3가지 유동가시화 방법은 스모크 발생기에 의한 직접적인 유동가시화, 입자 유동가시화 그리고 스모크 와이어에 의한 유동가시화 방법이다.

제트 전단와류의 거시적 형태와 변화를 파악하기 위하여 스모크 발생기 (Smoke generator)에 의한 직접적인 유동가시화 방법을 사용하였다. 이 유동가시화 방법은 스모크 발생기를 통하여 탱크로 스모크를 공급한 후, 스모크는 탱크에 연결된 제트 노즐을 통해 유동장에 분사되어 유동장의 대규모와 형태 및 거동을 파악하게 된다.

제트유동의 와류출 형태 및 구조 변화를 분석하기 위하여 입자유동가시화 방법을 사용하였다. 입자유동가시화 방법은 횡단류 상류에서 스모크 발생기를 이용하게 되는데, 액체오일에 열을 가하여 오일을 직경 $10 \mu\text{m}$ 이하의 미세한 기체입자로 만들어 공기 흡입구에 공급한다. 공급된 입자는 횡단류 유동을 따라서 시험부에 흘러가게 되고, 시험부에서 제트와 횡단류의 상호작용으로 인하여 입자들은 공기만 분사되는 제트유동을 만나 제트유동의 와류 구조 형태 및 변화를 나타나게 한다. 즉 제트가 분사되면 횡단류와 상호작용을 하여 유입이 발생하게 되는데, 이러한 유입으로 인하여 시험부에 분포된 입자는 레이저의 평면광에 의해 산란하게 되어 입자를 공급하지 않은 제트와 구분되어 제트가 형성하는 와류 구조 형태와 변화가 화상에 분명하게 구별되어 나타나게 된다. 이 방법은 균일한 입자 분포와 강력한 광원이 필요로 한다.

벽근접 하류영역의 와류출 형태를 파악하기 위해 선 스모크 와이어(smoke-wire) 유동가시화 기법을 사용하였다. 스모크 와이어 기법은 유동의 유적선(streakline)으로 나타나게되며, 직경 0.1 mm 니크롬선을 사용하였고, 여기에 파라핀 오일을 묻힌 뒤 전압조정기로 일정전압을 가하여 발생되는

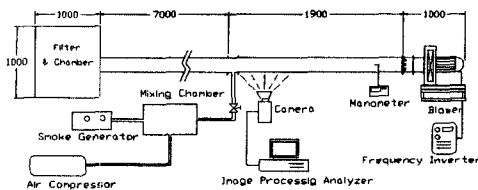


Fig. 1 Schematic of experimental set-up.

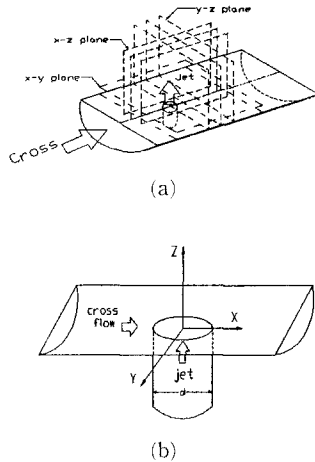


Fig. 2 Schematic of laser light sheets and coordinate system.

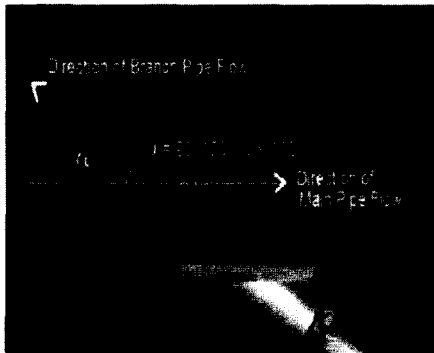


Fig. 3 Combination of main and branch pipe.

스모크를 이용하여 실험을 수행하였다. 광원은 5 W의 아르곤 레이저를 사용하였다.

유동가시화 개략도 및 좌표계는 Fig. 2에 나타나 있고, 카메라는 Sony CCD PRO 5000와 PIVCAM 10-15을 사용하였다. 화상처리보드는 마스터 컨트롤러로 Trident사의 TGUI9682Gi와 TSI사의 frame grabber 610066를 사용하였다. 유동장의 방향은 Fig. 2 (b)에 나타나 있는 바와 같이 X 방향으로 횡단류 주유동이 흐르고 있고, Y방향으로 횡단류 반경 방향이며, Z방향으로 제트가 분사되어진다.

제트 분지관의 분사각은 90°, 45°, 60° 경우를 사용하였다. 분사각(α)에 대한 정의는 Fig. 3에 나타나 있다.

제트가 분사하는 경우 근접영역에서 제트의 경계면을 Fig. 4에 나타나 있는 것처럼 제트 외부 경계

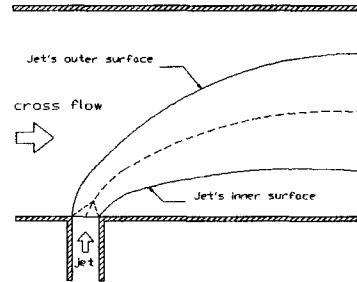


Fig. 4 Definition sketch of jet's surfaces.

면(Jet's outer surface), 내부 경계면(Jet's inner surface)으로 구분할 수 있다.

3. 유동가시화 결과

Fig. 5는 $d/D=0.15$ 인 경우 분지관 각도를 90°와 45°인 경우에 제트의 중심축이 횡단류 중심축과 기하학적으로 일치하는 최적혼합 상태가 되었을 경우를 나타낸 화상이다. 최적혼합에 대해서는 선행 연구인 유동가시화(I)에서 20장 이상의 순간화상을 평균하여 Z축에 따라 Grayscale의 앙상블평균(ensemble average)을 취하여 대칭 분포도가 중심으로부터 면적 적분치의 편차가 $\pm 5\%$ 이내가 되면 최적혼합이라고 판정하였다. Fig. 5 (a)에서 최적속도비는 $R=4$ 이며 제트 외부 경계면에 링형상의 와류가 발생되고 내부 경계면에서는 나타나지 않는다. Fig. 5 (b)은 최적속도비 $R=3.5$ 인 경우이며, (a)보다 제트 외부면에서 더욱 강력한 링와류를 가지고 있는 것을 볼 수 있으며, 제트 내부 경계면에서는 45°와 마찬가지로 링와류가 나타나지 않는다. 제트가 수직으로 분사되는 경우($\alpha=90^\circ$)보다 각도를 가지는 경우가($\alpha=45^\circ$) 제트 외부 경계면에서 더욱 강력한 링와류를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 각도를 가지는 분지관이 수직인 분지관보다 최적혼합 속도비가 작다는 것은 혼합이 더욱 잘된다는 의미이다. 이것은 주기적으로 균일하고 강력한 링와류가 제트 외부 경계면에 발생하여 CRP와 연계하여 CRP 속도로 말려 들어가서 혼합에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 그러므로 강력한 링와류가 하류유동의 혼합에 큰 영향을 주는 것으로 생각된다.

근접영역에서 횡단류 제트유동 형태를 보면, Fig. 5 (a)는 원뿔 모양의 형태를 가지고 있으며, Fig. 5 (b)는 반 부채꼴 모양을 나타내고 있다. 이

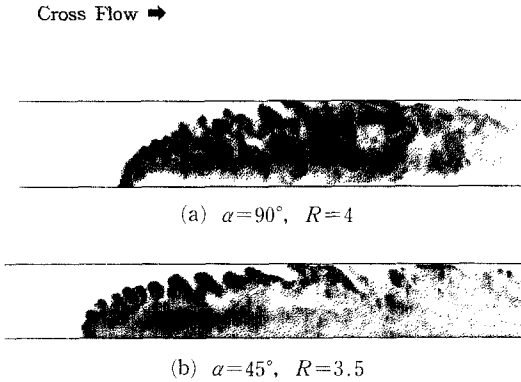


Fig. 5 Vortical flow pattern in $x-z$ plane. ($Re_p=4.1 \times 10^3$, $d/D=0.15$).

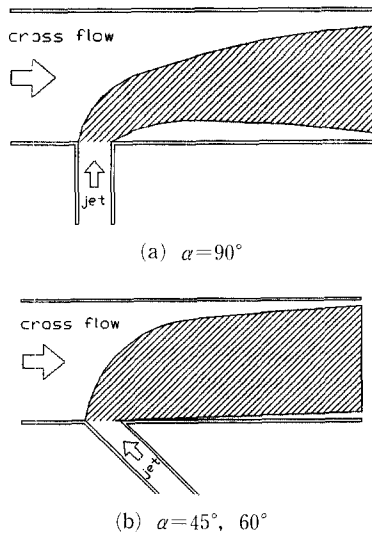


Fig. 6 Typical jet flow patterns at different jet injection angles in $x-z$ plane.

는 제트를 45° 상류쪽으로 분사시켰을 경우 제트 후면에 음압이 커져 횡단류 제트의 유체를 벽면쪽으로 강하게 당기기 때문으로 생각할 수 있다. 그러므로 근접영역에서 제트의 유동 형태는 수직인 경우와 각도를 가지는 경우로 구분 될 수 있으며, Fig. 6 (a), (b)는 분지관 각도로 구분되는 두 가지 경우의 전형적인 제트 유동형태를 나타내고 있다.

Fig. 7는 유동장이 층류인 경우 제트 전단층에 링와류가 생성되어 하류 방향으로 흘러 가는 화상을 나타낸 것이다. 층류이므로 링와류의 생성, 발달, 소멸 과정이 가시적으로 잘 나타나있다. 제트 노즐 출구 외부 경계면에 타원형으로 링 와류가 생



Fig. 7 Ring vortex and bound vortex for laminar flow in $x-z$ plane ($Re_p=1.5 \times 10^3$, $d/D=0.25$, $R=1.8$, $\alpha=60^\circ$).

성되어 하류로 이동하면서 원형 형태로 성장하게 된다. 원형 형태의 와는 하류방향으로 발달되면서 와를 받치고 있는 경계와(bound vortex)와 분리되어진다. 분리되어진 링와류는 납작한 타원형의 형태로 변형되면서 하류 유동 방향으로 파괴되어 흘러 들어간다. 제트 전단층에서는 이러한 조직적 구조가 규칙적으로 생성되면서 혼합이 이루어지고 있다.

Fig. 8은 횡단류 속도분 일정하게 하고, 분지관 각도 45°인 경우에 $R=1.3$ 에서 $R=4.0$ 이 될 때까지 속도비를 증가하면서 얻은 유동가시화 화상이다. 속도비가 작은 경우 ($R=1.3$) 제트 외부 경계면에서 링와류가 생성되기 시작하고, 속도비가 1.5 이상이 되면 주기적으로 균일하게 링와류가 생성된다. 속도비가 1.5 이상이 되면 링와류가 횡단류의 중심 영역으로 진행되어 발달되며, 안정한 와류 형태를 형성하게된다. 속도비가 증가하여 링와류들이 횡단류 벽근접 지역에 접근하면서 불안정한 와류형태가 형성되어지는 것을 볼 수 있다. 이는 벽근처에는 점성이 강력하게 작용하여 벽경계층의 에디들과 상호작용을 하기 때문이다. 그러므로 전단층에 발생하는 링와류는 링와류가 발달되는 횡단류의 영역에 따라 안정성이 변하고 있다.

Fig. 8 (b), (f) 화상을 비교하면 링와류의 간격이 두배 정도차이가 나며, 속도비 또한 2배 차이가 난다. 이 두화상에서 링와류의 주파수를 구하면 (b) 경우 주파수는 12.5 Hz이고, (f) 경우는 주파수가 25 Hz가 된다. 그러므로 속도비를 증가시키면 링와류 형성 주파수가 증가하므로 생성되는 링와류의 주기가 빨라지며 링와류 사이의 간격이 줄어들게 된다. 또한 안정된 링와류가 발생되면 Kelvin-Helmholtz 불안정성으로 인해 발생하는 링와류 형성 주파수를 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$f = \frac{\alpha U_p R^\beta}{D} \quad (2)$$

여기서 $\alpha=1.191$ 이고, $\beta=1.0$ 이다.

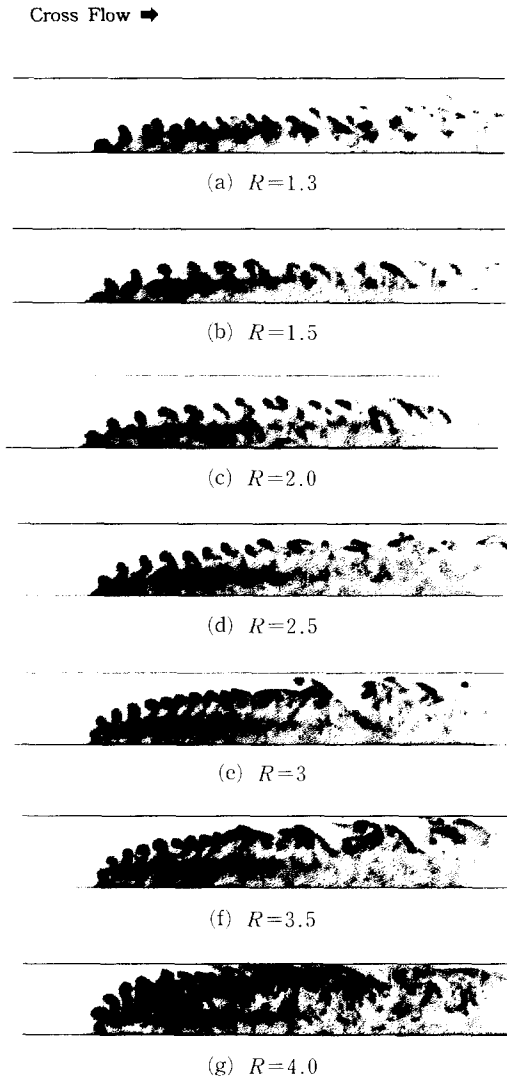


Fig. 8 Vortical flow patterns with increasing velocity ratios in $x-z$ plane ($Re_p=4.1 \times 10^3$, $d/D=0.15$, $\alpha=45^\circ$).

식(2)에서 링와류 형성 주파수는 속도비에 따라 선형적으로 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

속도비가 최적혼합속도비에 가까운 Fig. 8 (e), (f) 화상에서 하류영역을 보면 왼쪽에서 오른쪽으로 기울어지는 나선 방향으로 큰 유입이 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 제트 분지관이 여러 가지 직경비와 속도비를 가지고 수직으로 분사되는 경우를 나타낸 화상이다. 이 화상에서 하류 영역의 지배적인 구조인 CRP의 유동 방향을 살펴보면 화살표로 나타낸

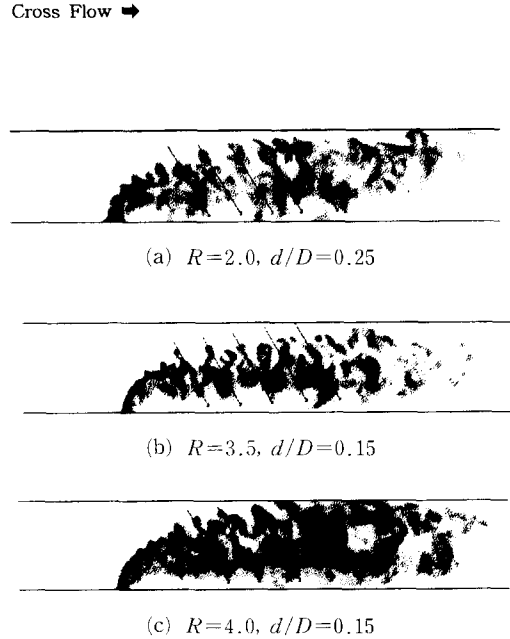


Fig. 9 Vortical flow patterns at different diameter ratios in $x-z$ plane ($Re_p=4.1 \times 10^3$, $\alpha=90^\circ$).

것처럼 제트 외부 경계면에서 나선 방향으로 내부 경계면 방향으로 흘러감을 알 수 있다. 이것은 CRP가 나선 방향으로 형성되면서 혼합이 이루어진다는 것을 말해 주고 있다.

Fig. 10은 하류영역에서 유동을 지배하는 CRP를 수직단면($z-y$ 면)에 가시화 평면광을 만들어 얻어진 화상이다. Fig. 10 (a), (b)는 속도비를 증가하면서 얻어진 화상이며, CRP가 생성되어 발달되는 과정을 나타낸 것이다. 초기에는 반전와(counter rotating vortex) 회전으로 인해 제트 아래 중심영역에서 유입 부분이 생기며 (a)-1, 서로 반대 방향으로 회전하는 와의 상호작용으로 윗면에서 반전와가 벌어지면서 유출이 되는 와류 구조 형태를 이루게 된다(a)-2. 반전와로 인한 유입·출로 달걀모양의 타원형 와류가 서로 붙어있는 CRP 구조 형태를 형성하게 된다(a)-3. Fig. 10 (b)은 (a)와 마찬가지로 CRP의 형성 과정을 나타낸 것이다. 화상 (b)-2을 보면 (a)-2와 마찬가지로 초기에는 아래 중앙 부분에서 유입이 이루어지고, (b)-3에서 나타나 있는 것처럼 중앙 위, 아래면에 유입·출이 함께 이루어지는 CRP형태를 이루게 된다. 그러므로 하류 영역에서 유동을 지배하는 CRP는 반전와로 인해 유입·출이 발생하는 달걀

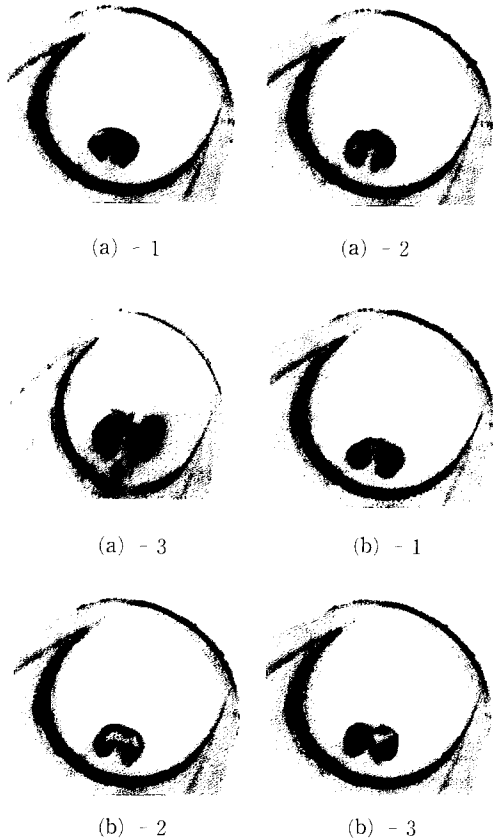


Fig. 10 Flow formation patterns of counter rotating vortex pair in $y-z$ plane ($Re_p=4.1 \times 10^3$, $\alpha=90^\circ$, $d/D=0.14$).

모양 타원형의 와가 서로 붙어있는 CRP 형태를 이루게 된다.

Fig. 11은 제트가 수직으로 분사하는 경우 $Z=3d$ 위치에 가시화 평면광을 만들어서 얻어진 연속적인 화상이다. 이 화상에서 검은색으로 나타나는 것이 입자가 없는 제트 성분이고, 흰색으로 나타나는 것이 스모크 입자이며 횡단류 유동을 나타낸다. 화상 (a)~(f)를 보면 제트 출구 상류면에 말굽 와류가 나타나고 있으며, 제트 하류 영역에서 좌우 대칭적으로 발달되는 와류를 볼 수 있다. 이 와류는 하류방향으로 연속적으로 생성, 발달되고 있다. 이처럼 제트 노즐 출구에서 수직방향으로 일정한 거리가 떨어지면 하류 영역에서 좌우 대칭적인 와류출이 발생되어진다.

Fig. 12는 벽 근처 ($Z=0.5d$)에서 속도비를 일정하게 하고, 횡단류 속도를 증가하면서 얻어진 수평단면 화상이다. (a)~(e)는 제트를 지나 와류들

Cross Flow →

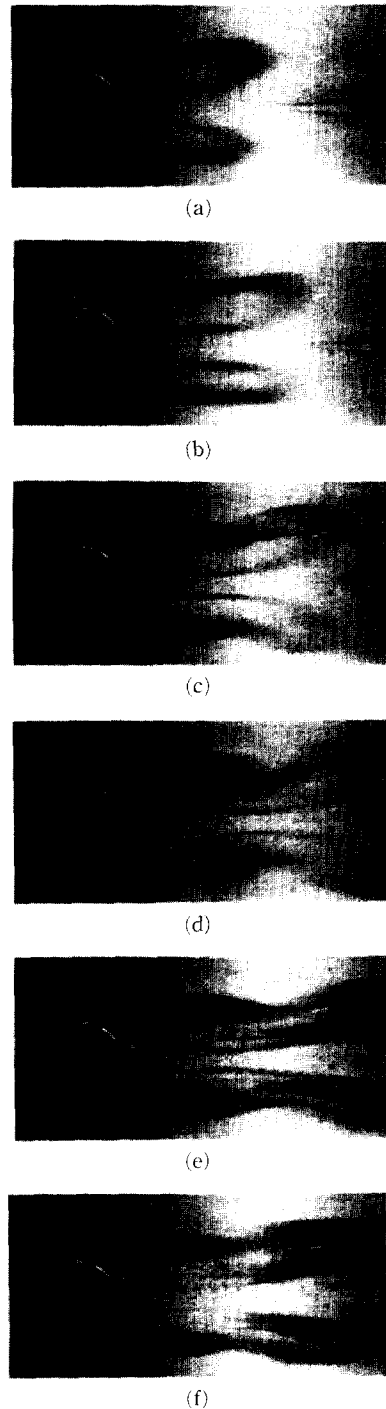


Fig. 11 Continuous flow patterns for vortex formation in $x-y$ plane ($Re_p=4.1 \times 10^3$, $\alpha=90^\circ$, $Z=3.0d$)

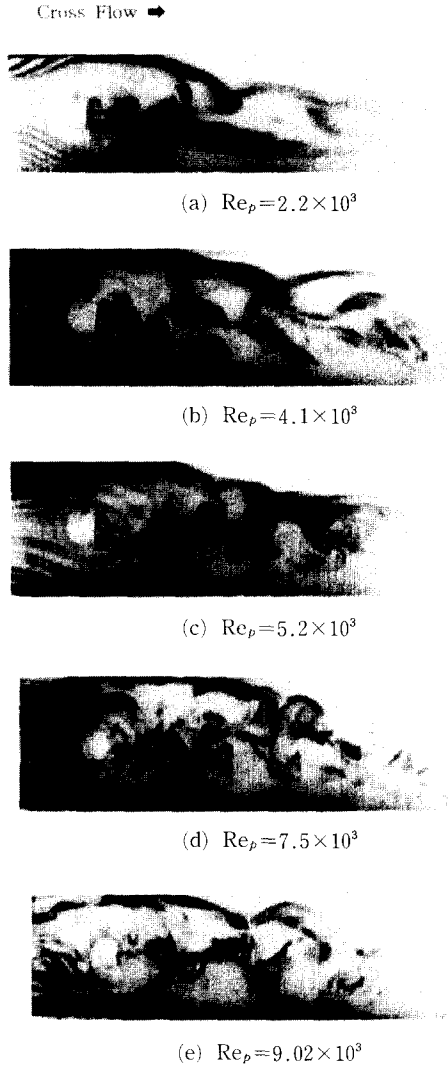


Fig. 12 Flow patterns for the near field of jet with increasing main velocity in x - y plane ($Z = 0.5d, R=4$).

이 좌우 교대로 하류 방향으로 진행되고 있는 것이 보여진다. 이러한 형태는 횡단류 제트 유동의 벽 근처에서 하류로 진행되는 전형적인 와유출 형태이다. 모든 화상에서 횡단류 속도에 관계 없이 벽 근처에서 Karman 와열이 발생하게 된다. 이는 제트 노즐 출구 근처에서는 제트 기둥이 형성되어 제트 기둥을 지나는 횡단류 유동이 좌우 교대로 와유출을 이루면서 진행되기 때문이다. 그러나 좌우로 유출되는 와형태가 실린더 경우처럼 명확하지 않은 것은 제트기둥이 고정되어 있지 않고 유동의 유입

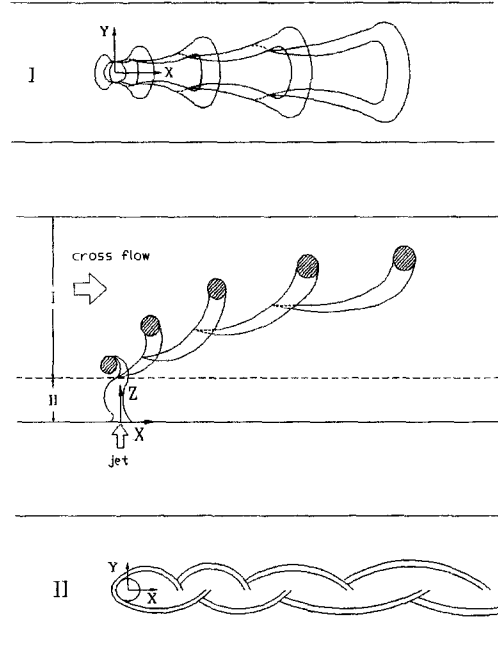


Fig. 13 Conceptual sketch of the ring vortices (I) and the horseshoe vortices (II).

으로 인하여 제트 기둥이 요동치기 때문이다.

Figure 13은 횡단류 영역에 따라 제트 유동의 와유출 형태를 두 가지 영역으로 나타낸 그림이다. 상류영역 I에서는 링와류와 경계와의 상호작용으로 좌우 대칭적으로 와유출이 일어나고 있으며, 벽 근접영역인 하류영역 II에서는 제트 상류 발굽와류를 기준으로 하여 좌우 교대로 와유출이 일어나고 있다는 것을 나타내고 있다. 이처럼 횡단류 상, 하류영역에 따라 와유출 형태가 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

횡단류 제트 유동의 특성을 파악하기 위하여 레이저 광원을 이용하여 3가지 유동가시화 방법을 사용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제트가 수직으로 분사되는 경우 보다 각도를 가지는 경우가 제트 외부 경계면에서 더욱 강력한 링와류가 생성된다. 또한 횡단류 제트유동 형태가 제트 분지관 각도 변화에 따라 크게 두 가지 형태로 나타나게 된다.

(2) 속도비가 증가하면 제트 외부 경계면에 생성

되는 링 와류의 주기가 빨라지며 링 와류 사이의 간격이 줄어들게 된다. 제트 전단층에 안정된 링 와류가 발생하면 링와류 주파수는 간단한 식으로 나타낼 수 있다.

(3) 하류영역에서 유동을 지배하는 CRP는 반전 와로 인해 중심영역에서 유입·출이 발생하는 달걀 모양의 타원형 와가 서로 붙어있는 CRP형태를 이루게 되고, CRP가 나선 방향으로 거동하면서 혼합이 이루어진다. 된다.

(4) 제트 노즐 출구 벽근접 영역에서는 제트 기둥으로 인하여 Karman 와열이 나타나며, 노즐 출구에서 일정한 거리가 떨어진 영역에서는 와유출이 좌우 대칭적으로 발달되어 진행되는 형태를 이루고 있다. 그러므로 횡단류 제트 유동은 횡단류 영역에 따라 와유출 형태가 다르게 나타난다.

참고문헌

- (1) 김경천, 신대식, 이부환, 1998, “분지관 혼합기의 난류혼합에 대한 유동가시화 연구(Ⅰ),” 대한기계학회논문집, 제22권 제1호(통권 제148호).
- (2) 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.
- (3) Eric 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, “Horseshoe Vortex systems resulting from the interaction between a laminar boundary layer and a transverse jet,” *Phys. Fluids* 7 (1).
- (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) Yasuhiro Kamotani and Issac Greber, 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.