

<論 文>

# Reynolds 수 $10^4$ 일 때 천이영역에서의 원형제트의 Large-Scale 구조에 관한 연구†

이택식\* · 최은수\*\*

(1986년 6월 4일 접수)

## Large-Scale Structure of Circular Jet in Transitional Region at Reynolds Number of $10^4$

Taik Sik Lee and Oen Soo Choi

**Key Words:** Circular Jet(원형제트), Large-scale Structure(대규모 구조), Transition Region(천이영역)

### Abstract

The Large-scale structure of the circular jet in the transition region, which influences the subsequent flow in the turbulent region, was studied experimentally. Measuring equipments are composed of the two channel hot-wire anemometer, the computer controlled two-directional traverse mechanism, the data acquisition system, and FFT-analyzer. The circular jet has 50 mm diameter,

The mean velocity distribution, the velocity fluctuation, the auto & cross correlations and the power spectra were acquired at moderate Reynolds number of  $10^4$ . And the VITA method was used to measure the convection velocity of Large-scale eddy. The phase of  $u'$  is in advance of that of  $v'$  in all regions.  $\overline{R_{u'v'}}(\tau=0)$  is approximately zero in the potential core region, but a small regular deviation is observed. At a position in the mixing layer region the convection velocity is different along the part of the eddy, and in this experiment the convection velocity of the inner region is larger than the outer region. The average convection velocity of the eddy along  $y/D=0$  was approximately constant in the transition region.

### 기 호 설 명

$D$  : 노즐출구의 직경

$G$  : 파워스펙트럼 (power spectrum)

$L$  : 와동(eddy) 중심들 사이의 간격

$l$  : 대류속도측정시 두 프로우브사이의 간격

$M$  : 신호의 임의의 구간

$N$  : 데이터 갯수

$R_{u'}$  :  $u'$ 의 자기상관계수

$R_{u'v'}$  :  $u', v'$ 의 상호상관계수

$t$  : 시간

† '85년도 대한기계학회 추계 학술대회(1985. 11. 9.)에서 발표

\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

- $U$  : 평균속도
- $U_0$  : 노즐출구에서의 유동속도
- $u, v$  : 속도
- $u', v'$  : 변동속도
- $x$  : 유동방향으로의 위치
- $\bar{x}$  : 위치벡터
- $y$  : 유동의 직각 방향으로의 위치

회합문자

- $\eta$  :  $x/y$
- $\sigma$  : 표준편차
- $\tau$  : 지연시간
- $\tau^*$  : 최적지연시간

1. 서론

난류유동의 연구는 대규모 조직적 구조(Large-scale coherent structure)의 발견으로 인하여 커다란 변화가 일어났으며<sup>(1)</sup>, 이에 대한 연구가 시작된 시기는 J. Laufer<sup>(2)</sup>에 의하면 대체로 1960년대 이후이며 지금까지 평면제트, 원형제트, 경계층 등에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

이들 연구에 있어서 중요한 관심사 중의 하나는 대규모와동(Large-scale eddy)의 운동, 즉 대규모와동의 생성, 병합(coalescing) 등에 대한 정확한 기술이다. 그러나 와동은 그 경계를 명확히 기술할 수 있는 것이 아니므로 와동의 운동을 기술한다는 것은 더욱 어려울 수 밖에 없다.

전단층(shear layer)에서 와동의 대류속도는 가장 기본적인 데이터(data)이지만 아직도 명확한 값을 말하기가 어려운 것 같다. Paul E. Dimotakis 등<sup>(3)</sup>은  $U_1, U_2$ 의 평균속도로 형성된 전단층에서 대류속도를  $(U_1 + U_2)/2$ 로 하여 실험하였으며, Roland Meynard<sup>(4)</sup>는 노즐(nozzle) 출구속도가  $U_0$ 인 원형제트에서 대류속도를  $0.55U_0$ 로 하여 실험하였다. 그러나 와동의 대류속도는 H. H. Brunn<sup>(5)</sup>의 실험에 있어서와 같이 와동의 각 위치에 따라 크기가 다를 것으로 생각된다.

와동의 대류속도는 위와 같은 유동가시화(flow visualization) 실험에서 뿐 아니라 Taylor 가설의 적용에서도 중요시 되는 바, 본 연구에서는 와동의 대류속도를 H. H. Brunn의 방법과 달리 측정하였으며, 또 이를 이용하여 와동의 중심들 사이의 간격을 구하고자 한다. 이를 위하여 먼저 포텐셜코어영역(potential core region)과 혼합층영역(mixing layer region)의 경계 및 천이영역(transition region)과 난류영역(turbulent region)

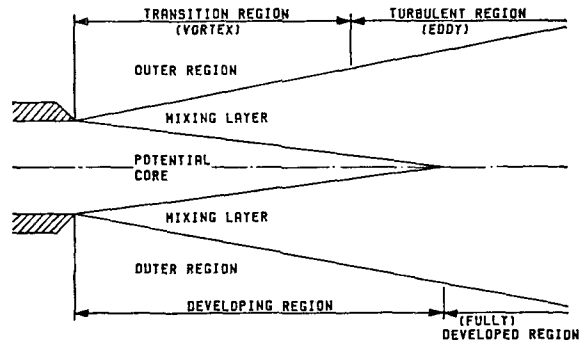


Fig. 1 Schematic diagram of circular jet

경계를 구하여야 한다. 각 영역들의 대체적인 구분은 Fig. 1과 같다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치에 대한 블록선도(block diagram)는 Fig. 2와 같다. 풍동은 Mehta & Bradshaw<sup>(6)</sup> 및 Morel<sup>(7)</sup>의 논문에 근거를 두고 제작하였으며, Fig. 3과 같다. 노즐의 출구직경은 50 mm, 단면축소를(contraction ratio)은 8.51이다. 노즐출구에서 난류강도(turbulence intensity)는 실험속도( $Re=10^4$ )에서 0.5% 미만이며, 반경방향으로의 위치에 대한 평균속도의 변동은 2.5%미만이었다.

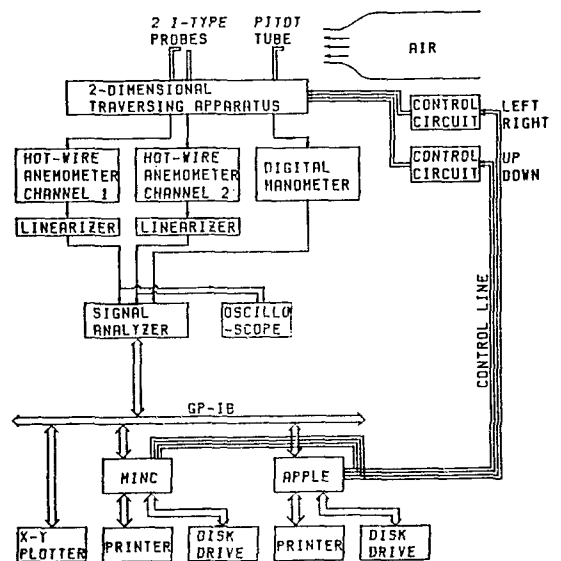


Fig. 2 Block diagram of the data acquisition system

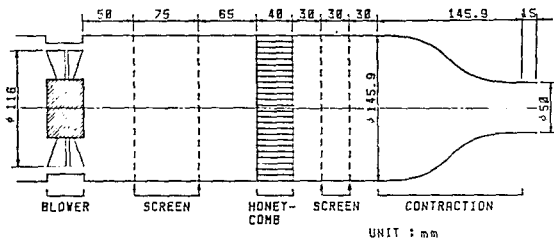


Fig. 3 Schematic diagram of wind-tunnel

정온도형 열선유속계를 사용하였으며 주파수응답 (frequency response)은 d.c.에서 10 kHz 정도까지 평탄하였다. X형, I형 열선프로우브(hot-wire probe)를 사용하였으며 프로우브의 이송을 위하여 스테핑모터를 이용하여 디지털컨트롤(digital control)되는 2차원 자동이송장치를 제작하였으며, 1개의 펄스(pulse)당  $2.100\mu\text{m}$ 씩 이동한다. 데이터(data)처리는 Fast Fourier Transform Analyzer (Iwatsu SM-2100B)로써 수행하였으며, 전체 시스템(system)은 GP-IB 및 컨트롤라인에 의해 온라인(on-line)화 하였고 미니 또는 퍼스널 컴퓨터로써 제어하였다.

2.2 실험방법

유동의 방향을  $x$  축으로 하여 Fig. 4와 같이 좌표계를 설정하였다.  $x$  축 방향으로  $0.5D$  간격으로 11개의 측정점을,  $y$  축 방향으로  $0.1D$  간격으로 11개의 측정점을 설정하여,  $11 \times 11$  측정점 전 영역에서 데이터를 얻었다. 좌측 상단점이  $P(1, 1)$ , 우측 하단점이  $P(11, 11)$ 이며, 먼저 프로우브를 점  $P(6, 1)$ 에, 즉  $y/D=0$ ,  $x/D=0$  인 점에 정확히 설치하고, 다음에 디지털컨트롤에 의해 점  $P(1, 1)$ 로 자동이송시키고, 이후에는 프로그램(program)에 의해 전영역으로 이동시키면서 필요한 데이터를 얻도록 하였다.

평균속도  $U$ ,  $u'$ 의 자기상관계수(auto-correlation coefficient)  $R_{u'}$ ,  $u'-v'$ 의 상호상관계수(cross-correlation coefficient)  $R_{u'v'}$  및  $u'$ 의 파워스펙트럼(power spectrum)  $G_{u'}(f)$ 는 다음과 같이 정의하였다<sup>(8)</sup>.

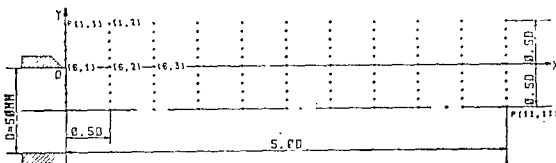


Fig. 4 Schematic diagram of the measuring points

$$U = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(t_k) \tag{1}$$

$$R_{u'}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u'(t_k) \cdot u'(t_k + \tau) \tag{2}$$

$$R_{u'v'}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u'(t_k) \cdot v'(t_k + \tau) \tag{3}$$

$$G_{u'}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{u'}(\tau) \cdot e^{-j2\pi f \tau} d\tau \tag{4}$$

$u', v'$  신호가 저주파의 큰 진폭변동을 포함하므로 샘플링(sampling) 시간 및  $N$ 의 크기가 적절하여야 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있다. 유동장내의 위치에 따라 신호의 형상이 어떻게 다른가를 비교하기 위하여, 변동속도를 측정하여 전영역에서의 형상을 하나의 도면에 X-Y Plotter로 그렸다. 각 측정항목에 대한 데이터량이 방대하므로 일단 Signal Analyzer의 floppy disk에 모든 데이터를 저장하였다가 나중에 이를 해석하였다.

대류속도는 어떠한 현상이 특정방향으로 실려가는 속도를 말하며 본 실험에서는  $x$  축 방향만 고려하였다. 2개의 프로우브를 유동방향으로 일정간격을 두고 설치하여 신호를 얻어 비교하여 보면, 하류 위치의 프로우브에서는, 상류 위치의 프로우브에서 얻어진 신호와 파형은 유사하지만, 어느 정도 시간이 지연된 신호가 얻어진다. 만일 두 신호 사이의 지연시간을 적절히 구할 수 있다면, 두 프로우브 사이의 간격을 지연시간으로 나누면 대류속도가 된다.

두 신호의 형상이 시간지연 외에는 완전히 같다면 지연시간을 이상적으로 구할 수 있으나, 실제로는 상류 위치의 프로우브에 도달한 신호가 하류 위치의 프로우브로 가면서 위상 및 진폭이 변하므로 지연시간을 구하는데 문제가 생긴다. 따라서 근본적으로 두 프로우브 사이의 간격이 극히 작아야 하나, 이 경우에는 시간이 극히 짧기 때문에, 측정하는 방법의 시간에 대한 정밀도가 문제가 된다. Ventura 등<sup>(9)</sup>은 노즐출구 직경이 25.4 mm인 화염제트에서 두 프로우브 사이의 간격을 최소 5 mm까지로 하여 신호를 얻고 이것의 상호상관계수를 구하여 지연시간을 구하였으며, H.H. Brunn<sup>(5)</sup>은 노즐출구 직경이 50 mm인 제트에서 두 프로우브 사이의 간격을 12.5 mm로 하여 신호를 얻어 이것을 조건부평균(conditional average)하여 지연시간을 구하였다. 본 실험에서는 두 프로우브 사이의 간격을 1.593 mm로 하였기 때문에 위상 및 진폭의 변화가 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 극히 작다.

그림에서와 같이 적당한 구간  $M$ 의 신호를 서로 비교하여 표준편차  $\sigma$ 를 구하면,  $\sigma$ 는 아래와 같이 표현

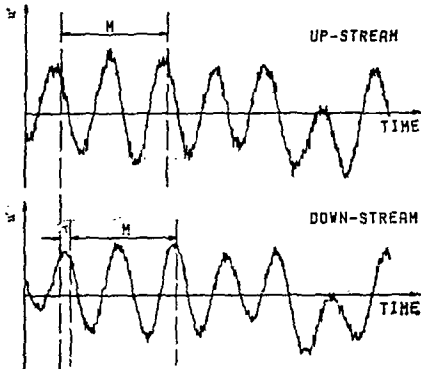


Fig. 5 Signals obtained from two hot-wire probes at point  $y/D=0, x/D=0$

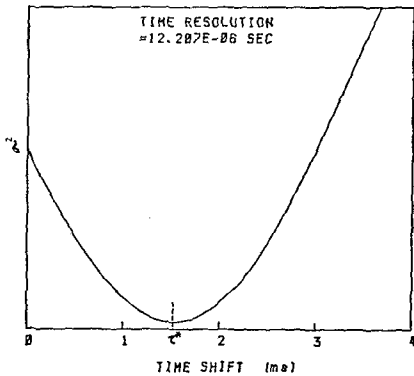


Fig. 6 Standard deviation with time shift

된다<sup>(10)</sup>.

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M [u'(\bar{x}, t) - u'(\bar{x}, t + \tau)]^2 \quad (5)$$

$\tau$ 를 변화시키면서  $\sigma$ 의 변화를 보면 Fig. 6과 같이 되며,  $\sigma$ 를 최소로 만드는  $\tau^*$ 가 지연시간이 된다. 여기서 시간구간  $M$ 을 적절히 변화시키면  $M$ 의 크기에 관계없는 안정된  $\tau^*$ 를 구할 수 있으며, 이것을 평균하였다. 두 프로브 사이의 간격을  $l$ 이라 하면, 대류 속도  $U_c$ 는 다음과 같다.

$$U_c = \frac{l}{\tau^*} = \frac{1.593 \times 10^{-3}}{\tau^*} \quad (6)$$

어느 위치에서 구한 파워스펙트럼의 피크(peak) 주파수는 그 위치에서 가장 확률이 큰 와동의 주파수이며, 이 위치에서 와동의 대류속도를 안다면 와동중심들 사이의 간격을 계산할 수 있다고 생각한다. 즉 피크 주파수를  $f_p$ , 대류속도를  $U_c$ 라 하면, 와동 중심들 사이의 간격  $L$ 은 다음과 같다.

$$L = \frac{U_c}{f_p} \quad (7)$$

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 포텐셜 코어영역과 혼합층영역의 경계

포텐셜 코어영역과 혼합층영역의 경계는  $y$ 값에 대한 평균속도 분포에서 구할 수 있다. 노즐출구에서는 평탄한 속도분포 영역과 속도가 전혀 없는 영역이 뚜렷이 구분되지만,  $x/D$ 가 점차 커짐에 따라, 즉 노즐출구로부터 멀어짐에 따라, 두 영역의 경계가 폭선으로 이어져  $x/D=5.0$ 에서는 전영역이 하나의 폭선으로 이어졌음을 볼 수 있었다. 본 실험에서는 제트 중심선에서의 속도의 99%가 되는 위치들을 포텐셜 코어영역과 혼합층영역의 경계로 간주하였다. Fig. 7은 이와 같이 하여 구한 경계를 표시한 것이다. 이것을 직선으로 근사(fitting)시키면  $y/D = -0.0994(x/D) - 0.0514$ 가 되며  $x/D=4.5$ 에서 포텐셜 코어가 없어져 완전 발달영역이 시작된다. 포텐셜 코어영역과 혼합층영역의 경계를 원점을 지나는 직선으로 근사시키면  $\eta = -0.126$ 이 되나 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 편이가 크다.

#### 3.2 천이영역과 난류영역의 경계

A. J. Yule<sup>(11)</sup>은  $u', v'$  상호상관계수를 이용하여 천이영역과 난류영역의 경계를 구하는 방법을 생각해 내었다.  $x$ 축( $y=0$ )을 따라 프로브를 이동시키면서 상호상관계수를 구하여 보면, 처음에는 짧은 주기로 진동하는 형상이지만,  $x/D$ 가 커짐에 따라 점차 주기가 길어지다가 마침내 cusp-type이 되는 영역이 생긴다. 처음에는 유동이 2차원적이어서  $u'$ 과  $v'$ 이 서로 관련성이 있으며, 따라서 변동속도의 주기에 해당하는 주기의 폭선이 얻어지지만  $x/D$ 가 커짐에 따라 유동이 3차원적이 되어  $u'$ 과  $v'$ 이 서로 관련성이 없어지며, 마

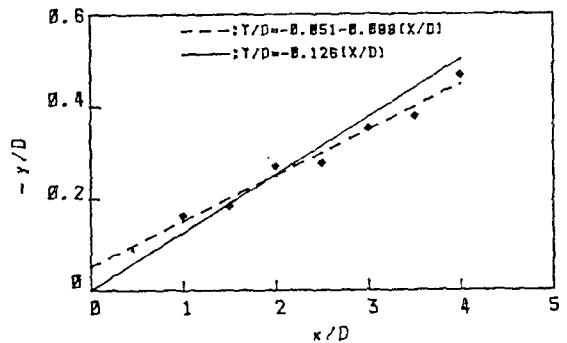


Fig. 7 Boundary between mixing layer and potential core

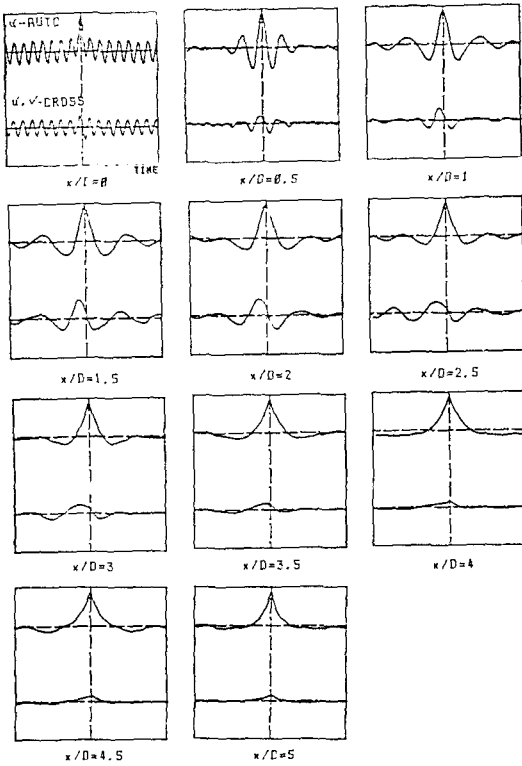


Fig. 8  $u'$ -auto and  $u', v'$ -cross correlations with time at various  $x/D$  points on  $y/D=0$  surface

치 random 신호들의 상호상관계수곡선과 같이 cusp-type 이 된다. 위와 같이 상호상관계수곡선의 형태를 보아 판단하는 방법은 난류강도의 변화를 이용하는 방법보다 경계를 구하기에 편리하였다.

본 실험에서는 Yule의 방법을 적용하였으며 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 점  $x/D=4$ 에서 상당히 변한 모양을 볼 수 있으며, 점  $x/D=4.5$ 에서는 완전히 cusp-type 이 되었으며, 그 이후에는 이 형상이 그대로 유지되고 있음을 볼 수 있다. 따라서  $x/D=4$ 에서부터 난류영역이라고 생각된다.

### 3.3 각 영역의 특성

Fig. 9는  $y/D=0$ 과  $y/D=-0.1$ 인 면에서  $x/D$ 가 각각 0, 0.5, 1인 점들에서의 변동속도를 나타낸 것이다. 위의 것은  $u'$ , 아래의 것은  $v'$ 에 대한 것이다.  $y/D=0$ 인 면에서 점  $x/D=0$ 에서는 아주 작지만 뚜렷한 속도변동을 볼 수 있으며 이것이 점  $x/D=0.5$ 와  $x/D=1$ 에서는 상당히 큰 속도변동이 된다. 여기서 변

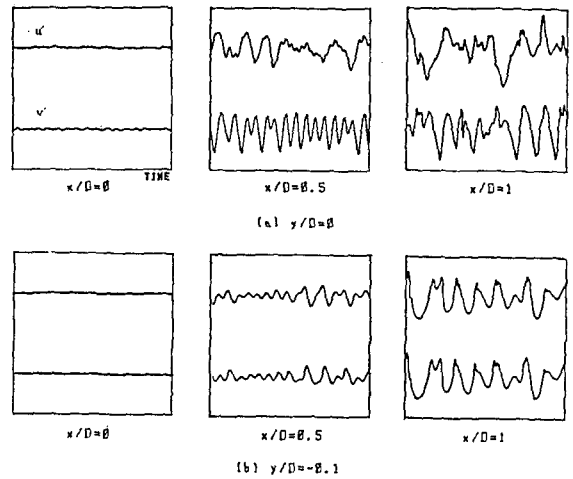


Fig. 9  $u', v'$  fluctuation velocities with time

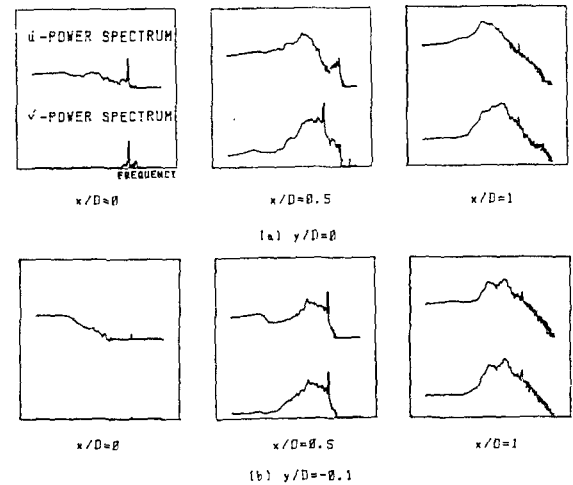


Fig. 10  $u', v'$  power spectra (Abscissa indicates frequency)

동속도의 대체적인 주기를 보면, 점  $x/D=1$ 에서는 점  $x/D=0.5$ 에서의 주기의 두 배가 됨을 관찰할 수 있었다. 또  $y/D=-0.1$ 인 면에서도 같은 경향을 나타내었다. Fig. 10은  $y/D=0$ 과  $y/D=-0.1$ 인 면에서  $x/D$ 가 각각 0, 0.5, 1인 점들에서의  $u'$ 과  $v'$ 의 파워스펙트럼들인데, 위의 것은  $u'$ , 아래의 것은  $v'$ 에 대한 것이다.  $y/D=0$ 인 면에서 점  $x/D=0$ 에서는 128 Hz의 피크 주파수와 256 Hz의 아주 미약한 피크 주파수, 점  $x/D=0.5$ 에서는 60 Hz 및 128 Hz의 피크 주파수, 점  $x/D=1$ 에서는 30 Hz와 60 Hz의 피크 주파수가

존재하였다. 이와 같이 변동속도의 주파수가 급격히 반감하는 것은 병합(coalescing)으로써 설명되는데, 두 개의 작은 와동이 합쳐져 하나의 큰 와동이 되는 현상이다. 그러나 어떤 특정주파수의 값이  $x/D$ 가 커짐에 따라 변하지는 않았다. 또  $y/D = -0.1$ 인 면에서도  $y/D = 0$ 인 면에서와 같은 경향을 보였다.

전영역에서  $u'$ 의 자기상관계수 및  $u', v'$ 의 상호상관계수를 구하였다<sup>(12)</sup>. 그 결과  $u', v'$ 의 상호상관계수의 침투치는 항상 양(+)의 시간에서 나타났으며, 이것은 전영역에서  $u'$ 의 위상(phase)이  $v'$ 의 위상보다 앞선다는 것을 의미한다. 포텐셜 코어 내부에서  $\overline{R_{u'u'}}(\tau=0)$ 의 값은 혼합층 영역에서의  $\overline{R_{u'u'}}(\tau=0)$ 의 값에 비해 대체로 0이나 어느정도의 규칙적인 작은 값이 존재하였다.

전영역에서  $u', v'$ 의 파워스펙트럼을 구하여 본 결과, 바깥쪽 정지유체영역 근처에서는 변동속도가 아주 불규칙하여 특별한 경향을 파악할 수 없었으나, 포텐셜 코어영역과 혼합층영역에서는 뚜렷한 경향을 볼 수 있었다<sup>(12)</sup>.  $x/D$ 가 일정하면  $y/D$ 가 변화해도 피이크 주파수는 거의 일정하며,  $x/D$ 가 변하면 어떤 피이크 주파수 성분은 값을 일정하게 유지하다가 상대적으로 피이크 주파수가 되지 못하는 영역이 나타나는데, Fig. 11에서는 이것을 Strouhal 수로 나타내었다.  $x/D \leq 1$ 인 영역에 대해서는 앞에서 언급한 바와 같으며,  $x/D \geq 1.5$ 인 영역에서는 대체로 30 Hz 정도의 피이크 주파수만이 생긴다. 포텐셜 코어의 마지막 부분에서의 주파수는 24 Hz이며 "preferred mode"<sup>(13)</sup>는 Strouhal 수로 0.383이다. Strouhal 수는  $f_p D / U_0$ 이며, 여기서  $f_p$ 는 피이크 주파수,  $D$ 는 노즐출구직경,  $U_0$ 는 노즐출구에서의 평균속도이다.

### 3.4 대류속도

Fig. 12는 Reynolds 수가  $10^4$ 일 때,  $x/D=1$ 인 면에

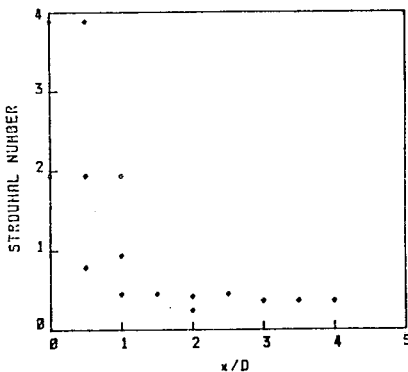


Fig. 11 Strouhal numbers with axial distance

서  $-0.4 < y/D < 0.3$ 인 영역에 대하여 대류속도를 측정할 것으로서, 포텐셜 코어는 대체로  $y/D = -0.15$  정도까지이다. 포텐셜 코어영역 내부에서는 대류속도가 크게 변하며, 혼합층영역에서도 어느 정도 변하는 모양을 볼 수 있다.  $y/D > 0.1$ 인 영역에서는 대류속도가 평균속도보다 큰데, 이것은 유동이 간헐적이기 때문이다. Fig. 13은  $x/D=2$ 인 경우로서, 대류속도가 전영역에서 크게 변하였다. 이와 같이 포텐셜 코어에 가까운 부분이 다른 부분에 비해 대류속도가 크므로 와동이 크게 변형되어 점점 더 길쭉한 타원형이 된다.

와동의  $x$ 축 방향으로의 각 부분에 대한 대류속도는 측정하지 않았으나,  $y=0$ 인 면, 즉  $x$ 축을 따라 평균 대류속도를 측정하였으며, Fig. 14에 이것을 나타내었다.  $x/D < 2$ 인 영역에서는 대류속도가 그다지 변하지 않았으나 그 이후부터는 미소하나마 약간씩 증가하는 듯하였다. 와동 스케일(eddy scale)로서, 대류속도를 피이크 주파수로 나누어서  $x$ 축 방향으로의 와동 중심들 사이의 간격을 구하여 Table 1에 나타내었다.

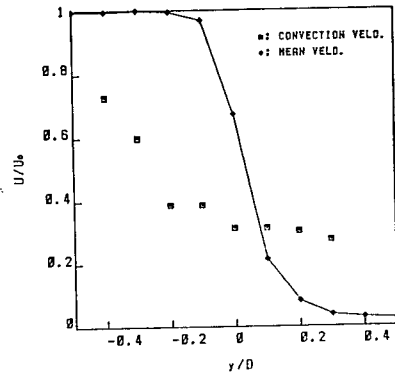


Fig. 12 Convection velocity profile on  $x/D=1$  surface ( $U_0$ : velocity at the jet centerline)

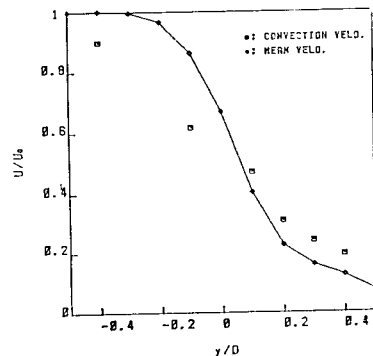


Fig. 13 Convection velocity profile on  $x/D=2$  surface ( $U_0$ : velocity at the jet centerline)

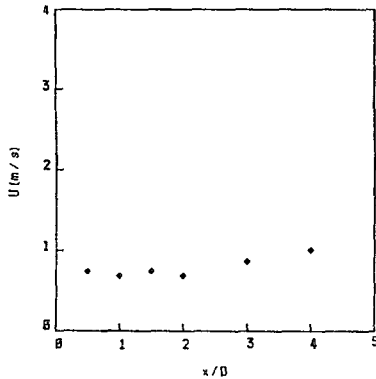


Fig. 14 Convection velocity profile with axial distance ( $y/D=0$ )

Table 1 Convection velocity, peak frequency and length scale

$x/D$	Time delay (ms)	Convection velocity (m/s)	Peak frequency (Hz)	Eddy scale (mm)
0.5	$2.148 \times 10^{-3}$	0.742	128	5.8
1.0	2.344	0.682	62	11.0
1.5	2.148	0.742	30	24.7
2.0	2.344	0.680	28	24.3
3.0	1.855	0.859	24	35.8
4.0	1.587	1.004	24	41.8

#### 4. 결 론

천이영역에서의 원형제트의 Large-scale 구조에 관한 실험의 결과로서 Reynolds 수가  $10^4$  인 경우에 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 시도한 원형제트의 구조는 포텐셜 코어의 영역과 혼합층영역 경계를  $y/D = -0.0994(x/D) - 0.0514$  의 식으로 나타낼 수 있으며 포텐셜 코어의 영역은  $x/D \leq 4.5$ , 난류영역은  $x/D \geq 4$ 에 존재함을 알 수 있었다.

(2) 천이영역에서  $u'$ 의 위상이  $v'$ 의 위상보다 앞서며, 포텐셜 코어 내부에서  $\overline{R_{u'v'}}(\tau=0)$ 이 규칙적인 작은 값을 가지며 혼합층 영역에서의  $\overline{R_{u'v'}}(\tau=0)$ 에 비해 0에 가깝다.

(3) 와동(eddy)의 병합(coalescing)을 천이영역에서 볼 수 있었으며 특히  $x/D < 2.5$ 인 영역에서 주로 관찰되었다.

(4) 와동의 대류속도는 와동의 각 부분에 따라 다른데, 포텐셜 코어영역에 가까운 부분의 대류속도가 컸으

며 이로 인하여 와동이 하류로 갈수록 유동방향의 길이가 점점 커졌다.

#### 참 고 문 헌

- (1) A.K.M.F. Hussain, Coherent Structures-Reality and Myth, *Phys. Fluids*, Vol. 26(10), pp. 2816~2850, 1983
- (2) J. Lauer, Deterministic and Stochastic Aspects of Turbulence, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 1079~1085, 1983
- (3) Paul E. Dimotakis, Francois D. Debussy, and Manoochehr M. Koochesfahni, Particle Streak Velocity Field Measurements in a Two-Dimensional Mixing Layer, *Phys. Fluids*, Vol. 26(6), pp. 995~999, 1981
- (4) Roland Meynart, Speckle Velocimetry Study of Vortex Pairing in a Low- $Re$  Unexcited Jet, *Phys. Fluids*, Vol. 26(8), pp. 2074~2079, 1983
- (5) H.H. Brunn, A Time-Domain Analysis of the Large-Scale Flow Structure in a Circular Jet, Part 1. Moderate Reynolds number, *J. Fluid Mech.* Vol. 83, pp. 641~671, 1977
- (6) R.D. Mehta & P. Bradshaw, Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels, *Aeronautical Journal* (November), pp. 443~449, 1979
- (7) T. Morel, Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions, *Journal of Fluids Engineering* (June), pp. 225~233, 1975
- (8) J.S. Bendat & A.G. Pierori, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley-Interscience, 1971
- (9) J.M.P. Ventura, T. Suzuki, A.J. Yule, S. Ralph & N.A. Chigier, The Investigation of Time Dependent Flame Structure by Ionization Probes, *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, pp. 1543~1551, 1981
- (10) Ron Blackwelder, On the Role of Phase Information in Conditional Sampling, *Phys. Fluids*, Vol. 20(10), pp. 232~242, 1977
- (11) A.J. Yule, Investigations of Eddy Coherence in Jet Flows, *Lect. Notes Phys.*, Vol. 136, pp. 188~207, 1980
- (12) 최은수, 천이영역에서의 원형제트의 Large-Scale 구조에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1986
- (13) Ephraim Gutmark and Chin-Ming Ho, Preferred Modes and the Spreading Rates of Jets, *Phys. Fluids*, Vol. 26(10), pp. 2932~2938, 1983