

# 원주 후류의 응집구조에 대한 자유흐름 난류강도의 영향

정 양 범\* · 양 종 필\*\*

## The Effect of Free Stream Turbulence on the Coherent Structures in the near Wake of a Circular Cylinder

Y. B. Jung · J. P. Yang

**Key words :** Turbulence structure(난류구조), Near wake(근접후류), Coherent structure(응집 구조), Conditional sampling(조건부 샘플링), Free-stream turbulent intensity(자유흐름 난류 강도), Phase average(위상평균)

### Abstract

The effect of free stream turbulence on the coherent structure in the near wake of a circular cylinder was investigated by a conditional sampling technique. The measurements were made from C.T.A. with hot wire I-probe and a Split-film sensor. Contours of phase-averaged velocity and vorticities were presented and discussed. It was found that the value of the vortex strength increased with increasing free stream turbulence which can enhance the roll-up of the shear layer.

### 기호설명

d	: 실린더 모델 직경 (mm)	F <sub>s</sub>	: 와류유출 주파수 (Vortex shedding frequency)
E <sub>u</sub> , E <sub>v</sub>	: 에너지 스펙트럼 밀도함수 (Energy Spectral Density Function)	St	: Strouhal Number
L <sub>x</sub> , L <sub>y</sub>	: 적분 길이 척도 (Integral length scale)	U <sub>0</sub>	: 자유흐름 평균속도 (Reference velocity)
R(τ)	: 자기 상관 계수 (Autocorrelation Coefficient)	U, V	: X, Y 방향 평균속도 (m/sec)
F	: 주파수 (Hz)	u, v	: X, Y 방향 순간속도 (m/sec)
		u', v'	: X, Y 방향의 시간평균 난류 속도성분 (m/sec)

\* 부산대학교 대학원 생산기계공학과

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

- $u_p, v_p$  : X, Y 방향의 순간속도의 주기성의 성분 (m/sec)
- $u_r, v_r$  : X, Y 방향의 순간속도의 불규칙한 변동 성분 (m/sec)
- $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}$  : X, Y 방향의 난류 운동 에너지
- $-\overline{u'v'}$  : Reynolds 전단 응력
- X, Y, Z : 직교좌표계
- $t_{1,i}, t_{2,i}$  : time
- $\theta$  : 위상각
- $\tau$  : 지연 시간
- : 시간평균
- $\langle \rangle$  : 위상평균

## 1. 서 론

일반적으로 유체기계나 구조물 주위의 흐름-다단 터보기계, 열교환기의 관군, 복수의 구조물-에서는 상류측 물체의 난류 후류가 하류측 물체 후류의 속도변동, 압력변동 등 유동특성에 여러모로 영향을 주게 되며, 이러한 영향들을 평가하기 위하여는 상류측 후류의 물리적 상황이 고려된 실험이 수행되어야 한다. 상류측 물체에 의한 교란은 유동 조건과 장애물의 기하학적 배열에 의존되어 있으므로 일반적으로 취급하기는 어렵지만, 가장 대표적인 매개변수로는 난류 길이척도의 변화를 야기하는 자유흐름의 난류강도를 들 수 있다. 자유흐름 난류강도 및 난류 길이척도가 다른 경우, 흐름이 지나가는 물체 후류의 난류 에너지, 박리 전단층의 증가율, *strouhal* 수, *entrainment* 현상 등의 변화에 영향을 미치게 되며, 이에 관한 현상을 규명하기 위하여 각종 난류 전단류에서의 자유흐름 난류 특성이 난류 후류에 미치는 영향에 대한 연구들이 진행되어 왔다<sup>1-3)</sup>. 본 연구의 대상이 되는 원형 실린더 후류에 대한 자유흐름 난류강도의 영향에 대한 연구는 주로 항력계수 및 압력 변화등에 대한 공기역학적 연구 및 시간평균 유동장에 대한 난류 특성 변화에 국한되어 왔으며<sup>4,5)</sup>, 본 연구진에 의해 근접 후류의 난류 구조에 대하여, 역류 및 난류 구조에 미치는 자유흐름 난류의 영향을 시간평균 방법으로 정성적 및 정량적으로 조사한 바 있다. 한편 주기적 성질이 강하게 존재하는 난류전단 흐름에서

는 대규모 응집구조 (*large scale coherent structure*)가 혼합, 유입 및 열전달에 큰 영향을 미친다고 알려져 있으나, 자유흐름 난류강도가 응집구조의 형성 및 전개에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 연구가 미흡하다. 본 연구에서는 조건부 샘플링 기법 (*conditional sampling technique*)에 의한 위상평균방법 (*phase average method*)으로 원주의 근접 후류에 대한 대규모 응집구조의 특성 및 자유흐름 난류가 근접 후류의 구조에 미치는 영향에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 데이터 분석

### 2.1 실험장치 및 측정방법

실험에 사용된 풍동은 개회로 노즐형 흡입식 아음속 풍동으로 전체 길이는 4,950mm이고 노즐형의 입구 단면적은 533×533mm<sup>2</sup>이며 풍동 입구에는 *honey-comb* 를 장착하고 시험구간 입구에는 250mesh의 가는 철망을 설치하여 시험구간에서의 난류강도가 1% 미만의 균일 유동이 되도록 하였으며, 시험구간의 길이는 2,430mm, 단면적은 305×305mm<sup>2</sup>, 노즐면적축소비는 약 3이다. 실험에 대한 개략도 및 좌표계가 Fig. 1에 나와있다. 실험에 사용된 원주는 직경이 10mm인 매끈한 스테인레스 원봉이며 Z 방향에 평행하도록 시험구간 중심에 장착 시켰다. 이때 종횡비 (*aspect ratio*)는 30.5이고 폐쇄비 (*blockage ratio*)는 약 3%이다. 자유흐름 난류의 발생을 위하여 격자를 설치하였으며, 격자는 두께가 4mm인 정사각봉으로 봉사이의 거리는 14mm 되도록 만들었다. 실험조건은 격자가 없는 경우 (*case 1*)와 격자를 설치한 경우 (*case 2*)의 2가지이며, *case 2*의 경우 원봉은 격자로부터 250 mm 떨어진 위치에 설치하였고, 측정위치는 원주 중심부로부터  $x/d=3.5, 5.5, 10.5$ 이다. 위의 각 경우에 대해 원주의 위치에서 구한 자유흐름의 특성은 Table 1에 요약되어 있다. 이때 자유흐름의 평균 유속은 7.5m/sec로 고정하였으며, 원주 직경을 기준으로 한 Reynolds 수는 약 4970으로 아임계영역이며,  $L_y$ 가  $L_x$ 의 0.4배 이상이므로 자유흐름 난류는 균일난류라 볼 수 있다.

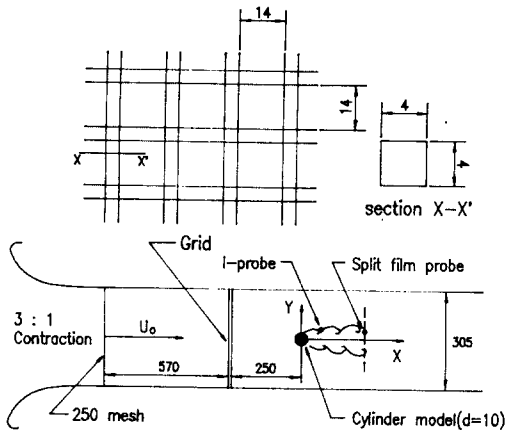


Fig. 1. Definition sketch and flow configuration

Table 1. Properties of Grid Generated Free Stream Turbulence

Grid	$u' / U_0$	$v' / U_0$	$Lx/d$	$Ly/d$
Case 1	0.008	0.006	-	-
Case 2	0.060	0.054	0.857	0.484

측정 장치로는 정온도형 열선 풍속계 (C. T. A., TSI Model 1054 A) 와 범용 파형 분석기 (D-6000 model 611, Data Precision Inc.)를 사용하였으며, 난류 신호 측정은 TSI Model 1288 split film probe를 이용하고, 조건부 샘플링을 위한 보조신호는 I형 프로브에 의한 u 속도 신호를 택하였다. 신호의 측정은 IBM-PC/AT에 의해 온라인으로 수행 했으며, 이때 split film probe에 의한 두 신호와 I형 프로브에 의한 하나의 신호는 범용 파형 분석기에 장착된 14-bit A/D Convert 와 Sample & Holder 에 의해 동시에 디지털 값으로 표본되며, 디지털 데이터는 범용 파형 분석기에 연결된 데이터 레코더 (Model 681)를 통해 디스커에 기록하였고 신호 분석은 오프라인 프로그램으로 수행하였다. 이때 표본율은 Niquist 표본 주기에 해당하는 초당 10,000개로 하였으며, 일회 표본수는 4096 개로 한 측정점당 20번을 표본하였다.

2.2 조건부 위상평균 기법

주기성이 강한 난류 유동장에서 코히어런트 구조를 규명하기 위하여는 기존의 시간평균법 보다

위상평균법을 이용하여 해석하는 것이 유리하다. 시간평균에 의한 난류 변동성분을 주기적인 속도 성분과 불규칙 속도성분으로 분리하여 다음 식으로 표현 할수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{u} &= \bar{U} + u_p + u_r \\ \hat{v} &= \bar{V} + v_p + v_r \\ \langle \hat{u} \rangle &= \bar{U} + u_p \\ \langle \hat{v} \rangle &= \bar{V} + v_p \\ u' &= u_p + u_r, v' = v_p + v_r \end{aligned} \tag{1}$$

식 1)에서  $\hat{u}, \hat{v}$ 는 순간속도,  $\bar{U}, \bar{V}$ 는 시간평균 속도,  $u_p, v_p$ 는 주기적인 변동속도,  $u_r, v_r$ 는 불규칙 속도성분,  $u', v'$ 는 시간평균 난류 속도성분,  $\langle \rangle$ 는 위상평균을 나타낸다. 순간속도를 위상평균하면 불규칙 속도성분은 소거되고 시간평균속도와 주기적인 변동속도만 남게되어 주기성이 있는 코히어런트 구조의 분석을 용이하게 한다. 위상평균을 하기위하여는 보조신호가 필요하며, 이 신호는 실제로 대규모 구조를 얻을 수 있느냐의 문제와 직결되기 때문에 잘 선정해야 한다. 보조신호는 박리점 부근의 표면압력변동, u, v 속도성분 등이 이용되며, 본 실험에서는 I형 프로브를  $x/d=2, y/d=1.8$ 부근에 고정하여 측정한 u 속도성분을 보조신호로 택했다. 위상평균을 위하여는 보조신호를 먼저 주파수 분석하여 위상을 알아야 하며, 이 신호를 난류신호와 동기시켜 난류 순간신호에 대해 각 위상별로 ensemble 평균을 구하여 분석하였다. Fig. 2.에 보조 신호와 난류신호의 예가 나와 있으며, 임의의 초기점으로부터  $u=0, du/dt > 0$

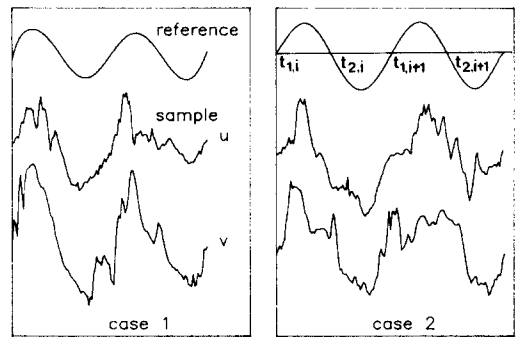


Fig. 2. Example of reference and sample signals

일때  $t_1, i, u=0, du/dt < 0$  일때  $t_2, i$  라면 위상각의 계산은 아래 식으로 할 수 있다.

$$\theta = \Pi \left( \frac{t-t_1, i}{t_2, i-t_1, i} \right) \quad (t_1, i \leq t_2, i)$$

$$\theta = \Pi \left( \frac{t-t_2, i}{t_1, i+1-t_2, i} \right) + \Pi \quad (t_2, i \leq t_1, i+1)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 와류유출 특성

Fig. 3, Fig. 4 에는  $x/d=2, y/d=1.8$ 에서 case 1, case 2 의 경우 I 형 열선 프로브로부터 받아진 보조신호 (reference signal) 에 대한 auto correlation 및 energy spectra 를 비교 하였다. case 1, 2 의 경우 모두 강한 주기성을 갖고 있으나 case 2 의 경우 주기가 길어지며 와류유출 주파수는 각각 156, 136 Hz, 이에 대한 strouhal 수는 각각 0.208, 0.181 정도로서 현격한 차이를 보이고 있다.

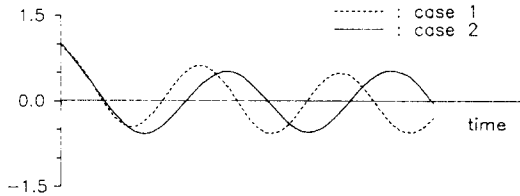


Fig. 3. Compare of auto correlation coef. on reference signal

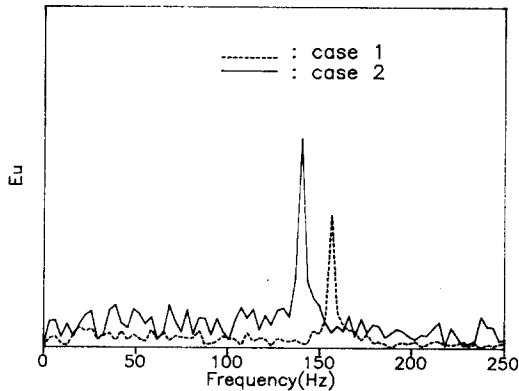


Fig. 4. Compare of energy spectra on reference signal

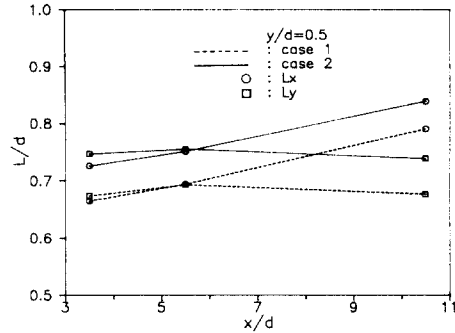


Fig. 5. Distributions of integral length scales

Fig. 5에서는  $y/d=0.5$ 에서 흐름방향에 대한 적분길이를 비교 하였으며, 흐름방향에 대하여  $L_x$ 가 증가하는 것은 일반적인 경향이지만 자유흐름 난류가 있을경우 같은 위치에서 적분길이  $L_x$ 가 커지는 것을 볼 수 있다. 즉 동일한 Reynolds 수에서도 자유 흐름 난류의 존재로 인해 후류내에 형성된 대규모 조직적인 와의 주기가 길어지며 와 사이의 간격이 커지고 strouhal 수는 작아지게 된다. 이 현상은 자유흐름 난류강도의 변화에 따라서 달라지게 되며) 자유흐름 난류의 길이척도  $L_x$ 의 영향도 받는다. 이와 같은 결과는 자유 흐름 난류의 존재로 인하여 실린더 표면의 압력분포가 변화하여 박리가 지연 되어지며, 또한 자유흐름 난류가 후류의 혼합 (mixing) 을 증가시키고 x방향 확산속도가 약해지면서 박리 전단층이 y방향으로 증가하여 와의 성장이 오래 지속되기 때문이라고 판단된다.

#### 3.2 위상평균속도 및 난류 에너지

Fig. 6, Fig. 7은 case 1, case 2의 경우  $x/d=3.5, 10.5$ 에서 위상평균에 의한  $u, v$  성분의 속도변동 파형을 균일유속  $U_0$ 로 무차원화한  $\langle u \rangle / U_0, \langle v \rangle / U_0$ 의 값을 나타낸 것이다.  $u$  성분의 경우 최대 진폭은 후류중심에서 벗어나 있으며 속도결손이 최대 속도결손의 1/2이 되는 위치에 근접 할수록 변동 진폭이 커지며, 난류 에너지도 이 위치에서 최대가 된다. 변동 파형은 후류 중심선을 기준으로 상하 대칭이며, 이는 와류 중심이 상하 180도의 위상차로 나타남을 의미한다.  $v$  성분의 경우에는 후류 중심선에 근접 할수록 변동파형의 진폭과 난류 에너지가 증가하여 후류 중심선에서 최대가

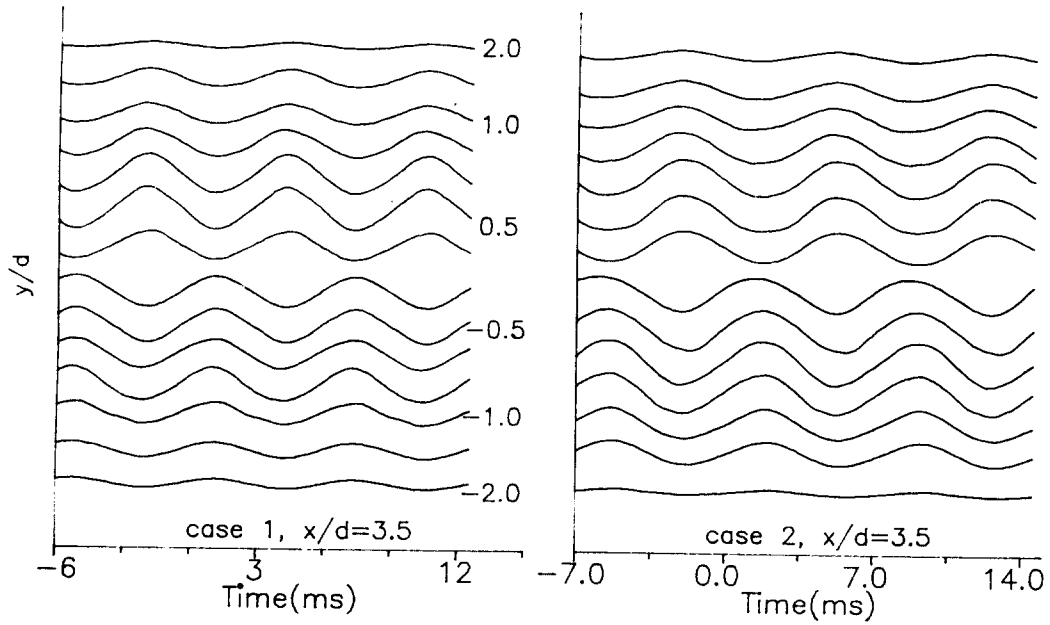


Fig. 6a. Phase averaged longitudinal velocity  $\langle u \rangle / U_o$  at  $x/d=3.5$

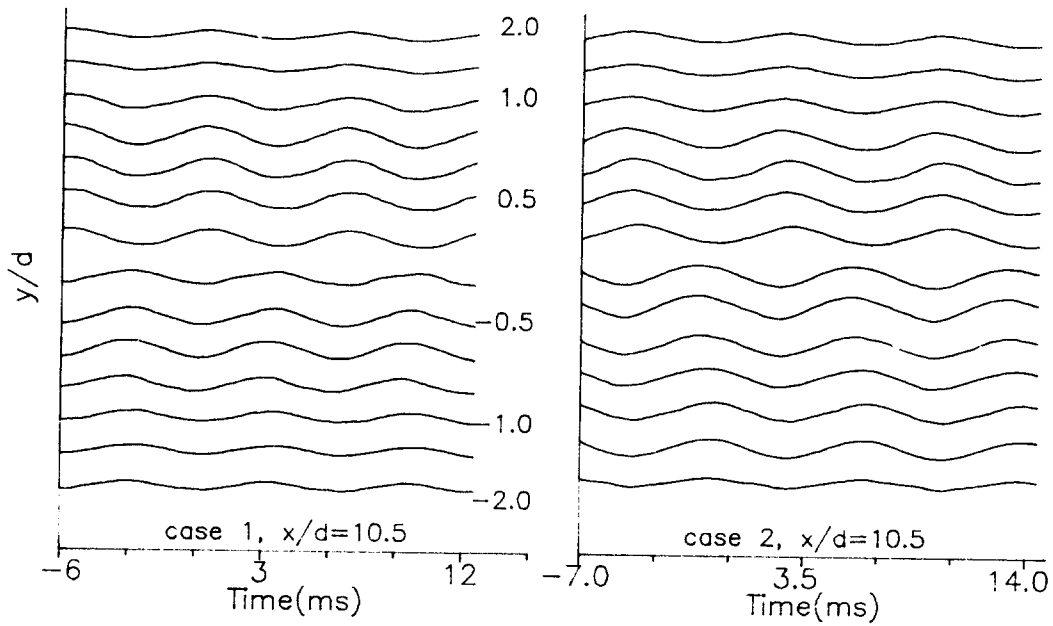


Fig. 6b. Phase averaged longitudinal velocity  $\langle u \rangle / U_o$  at  $x/d=10.5$

된다.  $u, v$  성분 모두 뚜렷한 주기성을 확인할 수 있으며, 하류로 갈수록 변동 진폭은 감소 하지만  $y$

방향에 대하여는 상대적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 하류로 갈수록 난류 에너지의 소

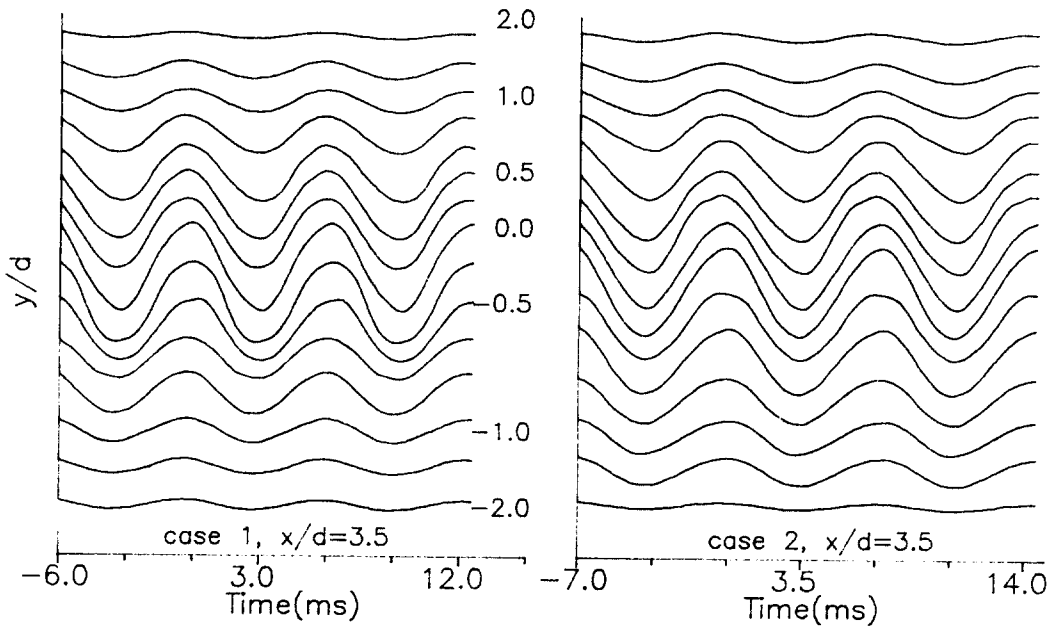


Fig. 7a Phase averaged transverse velocity  $\langle v \rangle / U_o$  at  $x/d=3.5$

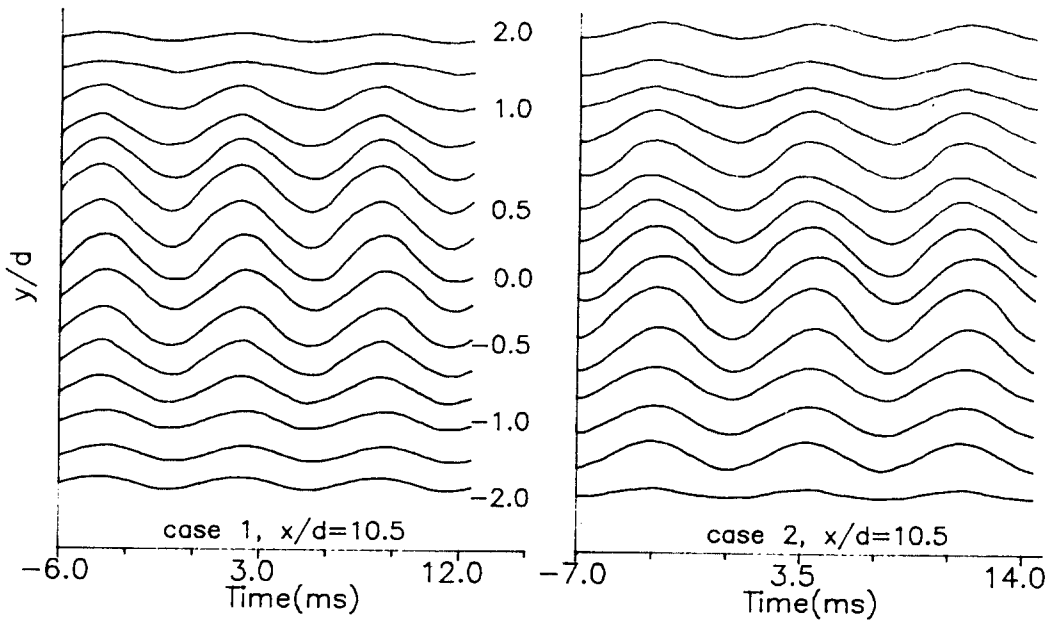


Fig. 7b Phase averaged transverse velocity  $\langle v \rangle / U_o$  at  $x/d=10.5$

산에 의해 와의 세기가 작아져 대규모 조직적인 운동은 감소하지만 와가 성장되어감을 의미한다. 자

유흐름 난류의 존재로 인한 가장 특징적인 변화는 속도 변동파형의 주기가 길어져 주파수가 작아진

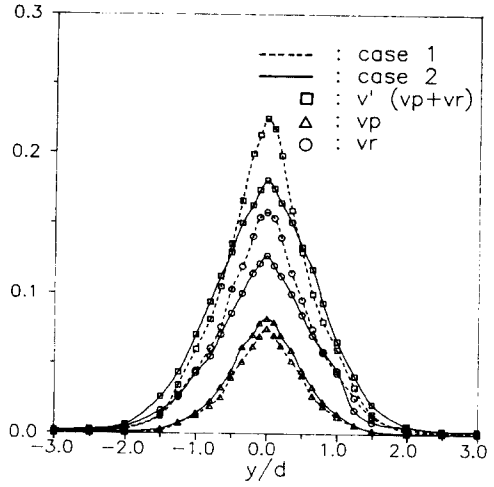
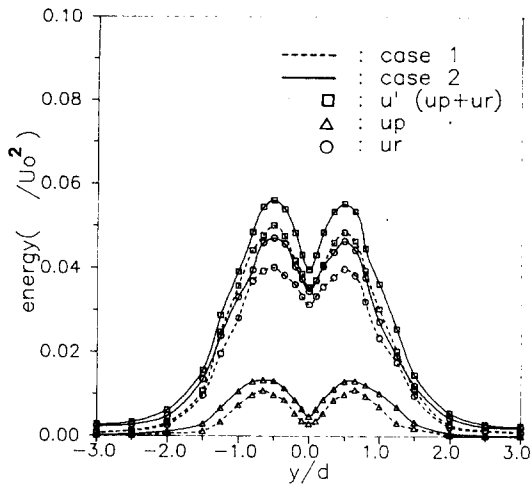


Fig. 8 Distributions of the turbulence kinetic energy at  $x/d=3.5$

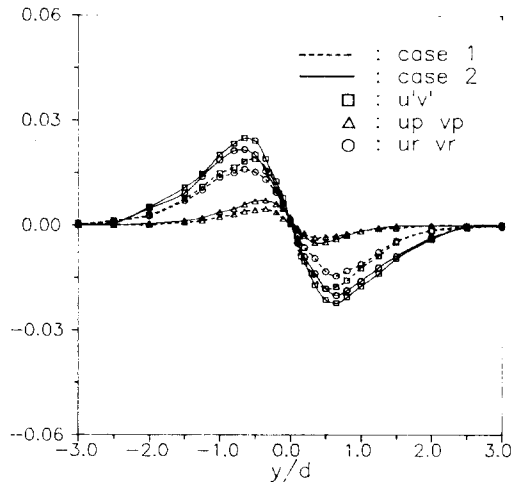
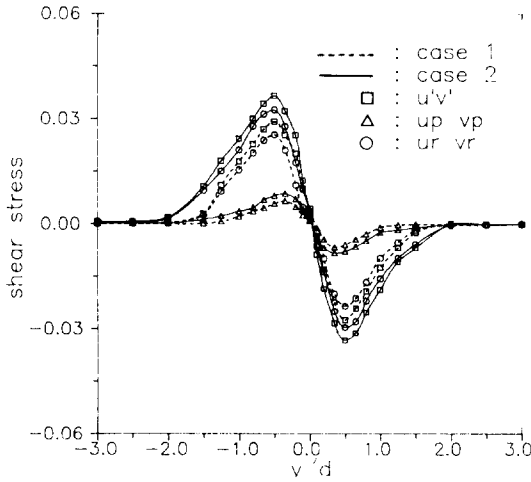


Fig. 9 Distributions of the turbulence shear stress at  $x/d=3.5, 10.5$

다. Fig. 8은 case 1, case 2의 경우  $x/d=3.5$ 에서 난류 운동에너지를 비교한 것이며, Fig. 9는  $x/d=3.5, 5.5$ 에서 속도변동 상관을 비교한 것이다. 전체 난류에너지를 주기적인 성분과 불규칙 변동성분으로 분리하여 각각 구하였으며, 대규모 난류구조의 위상 변동성분에 의한 에너지를 비교하면  $\langle v_p \rangle^2$ 의 값이  $\langle u_p \rangle^2$ 의 값보다 커며, 이는  $v$  성분이 대규모 와의 운동에 대한 기여도가 크다는 것을 나타내고, 그 차이는 후류 중심에서 최대가 된다. 자유흐름 난류가 있을 경우 대규모 난류에너지는 증가하며, 전체 난류에너지의 최대값은 동

일 지점에 대하여  $u'^2$ 은 증가하고  $v'^2$ 은 감소하는 경향을 보여준다. 또한 대규모 구조에 의한  $\langle u_p \rangle \langle v_p \rangle$  상관관계는  $\langle u_r \rangle \langle v_r \rangle$ 에 비해 작은값을 나타내지만, 전체 에너지에 대한  $u, v$  위상 변동성분의 비율은 각각 25, 40 % 정도로 대규모 구조가 에너지 전달에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. Fig. 10은  $x/d=3.5, y/d=0.5$ 의 위치에서 주파수에 대한 난류 에너지 분포를 나타내었으며,  $u$  속도성분의 난류 에너지는 자유흐름 난류로 인하여 증가되고 있음을 알 수 있다.

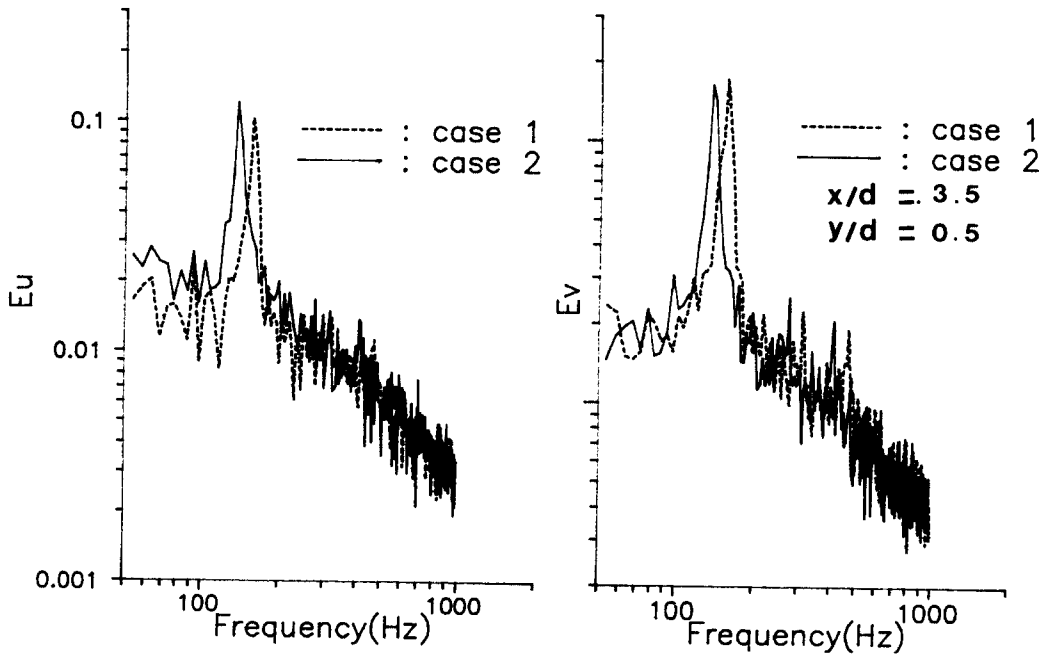


Fig. 10 Energy spectra at  $y/d=0.5, x/d=3.5$

### 3.3 등속도선 및 등와도선

Fig. 11은 Case 1, 2의 경우  $x/d=3.5, 10.5$ 에서의 위상평균에 의한  $u$ 성분을 균일유속으로 무차원화한 등속도선을 위상평면에 나타낸 그림이다. 평균속도는 후류 중심선상에서 가장 작고  $y$  방향으로 갈수록 균일유속  $U_0$ 에 가까워 지지만 속도의 최소값은 후류 중심선상에서 벗어나 있으며,  $x/d=3.5, 10.5$ 에서 각각 case 1의 경우 0.56, 0.72 및 case 2의 경우 0.53, 0.70정도이며, 이는 속도 결손이 최대 속도결손의 1/2이 되는 위치에 접근할수록 변동진폭이 커짐을 의미한다. 근접후류에서는 등속도선이  $y$ 방향의 넓은 영역에서 폐곡선으로 형성되어지고 하류로 갈수록 그 범위가 작아지며, 이러한 유동 현상은 원주에 가까울수록 강한 회전(rolling)이 있으며, 이러한 회전이 하류로 갈수록 약하게 된다는 것을 의미한다. 동일 지점에서 자유흐름 난류가 있을 경우 속도의 최소값은 작아지며 폐곡선의 범위가  $y$ 방향으로 넓어지는 현상을 보이며, 이 경향은 자유흐름 난류가 후류의 혼합(mixing)을 도와 박리 전단층을 증가시켜 후류

영역을 확장하기 때문이라 판단된다. Fig. 12는 위상평균에 의한  $v$ 성분의 평균속도 분포도로서 정의 값과 부의 값이 교대로 형성되고 후류 중심선상에서 최대값을 나타내고 있으며, 이 위치에서 파형의 진폭이 최대가 됨을 알 수 있다. 이 현상은 후류 유동에서 위상차  $180^\circ$  간격으로 형성된 와류유동에 의하여 후류 중심으로 향하는 난류 전단층의 규칙적인 회전과 관련 된다고 판단된다. 최대값은  $x/d=3.5, 10.5$ 에서 case 1의 경우 각각 0.30, 0.16 및 case 2의 경우 0.35, 0.18 정도이며, 자유흐름 난류가 있을 경우  $x$  방향의 같은지점에서 최대값이 커지고, 등속도가  $y$ 방향으로 넓게 분포되어 있어 후류유동의 에너지전달, 등이 더욱 활발해짐을 알 수 있다. Fig. 13은 Case 1, 2의 경우에 대해 위상평균에 의한 등와도선 분포도이다.

위상평균에 의한 와도의 식은  $\Omega_z = \partial \langle v \rangle / \partial x - \partial \langle u \rangle / \partial y$ 로 표현되지만 2차원 유동이므로  $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$ ,  $\partial / \partial x \ll \partial / \partial y$ 가 되어  $\partial \langle v \rangle / \partial y$ 는 무시 할 수 있으며, 따라서 와도의 식은  $\Omega_z = \partial \langle u \rangle / \partial y \Delta \langle u \rangle / \Delta y$ 로 근사적으로 표현될 수



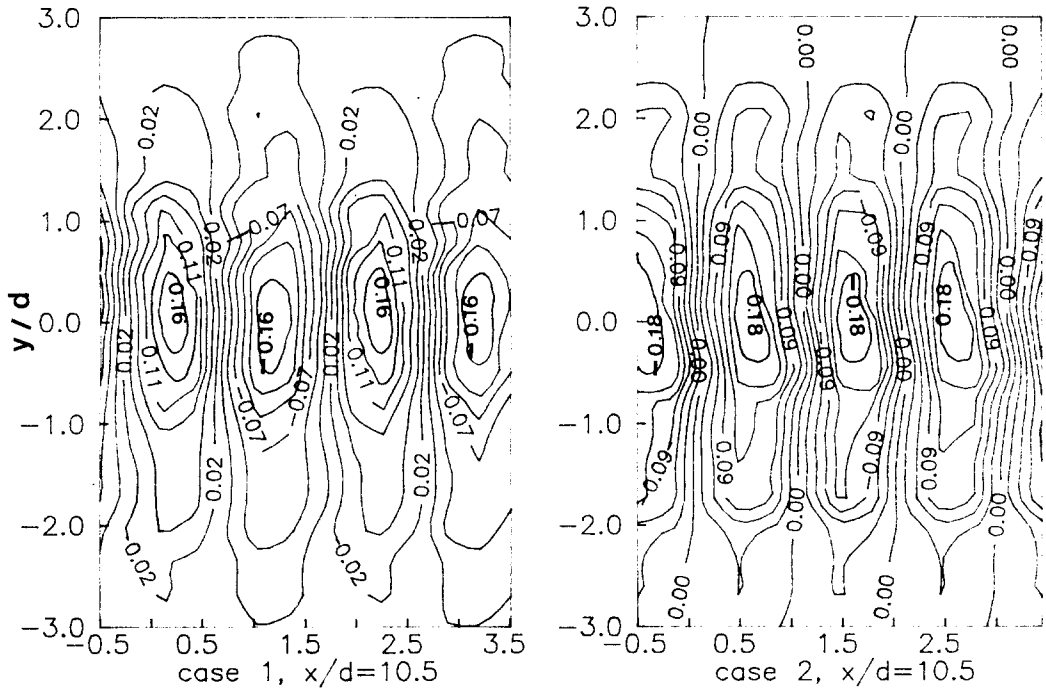


Fig. 11a Contours of the phase averaged longitudinal velocity

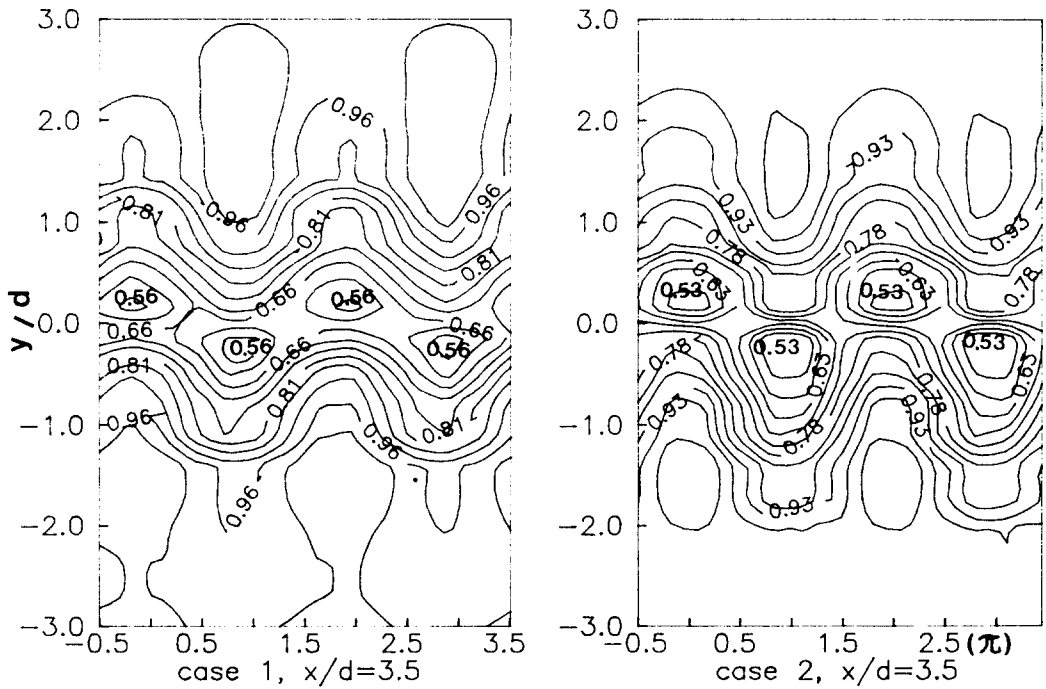


Fig. 11b Contours of the phase averaged longitudinal velocity

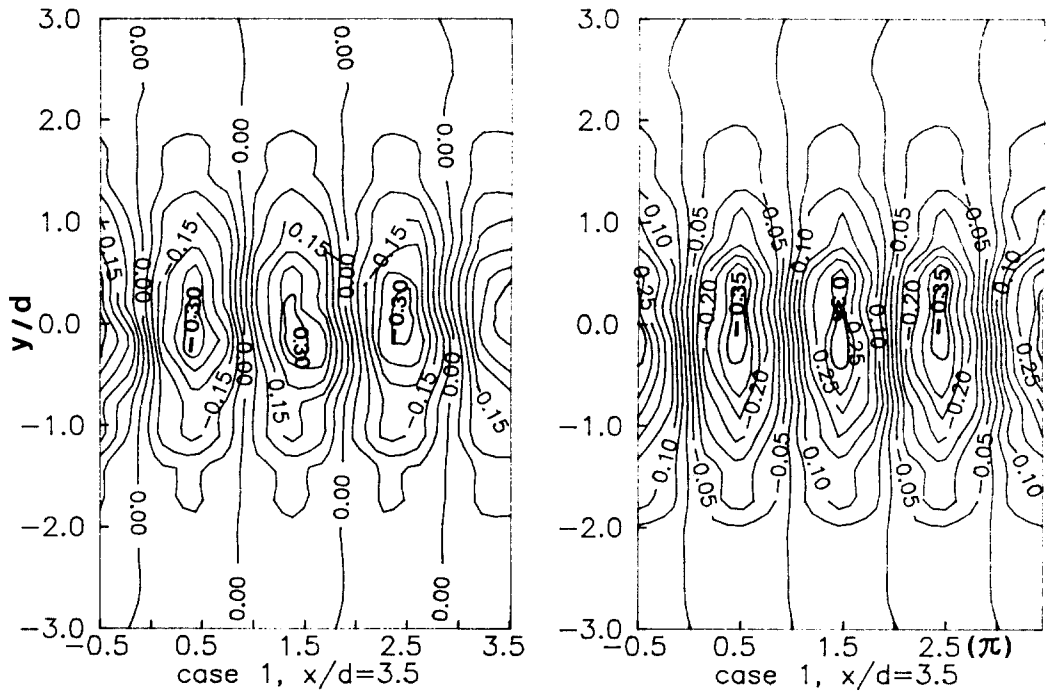


Fig. 12a Contours of the phase averaged transverse velocity

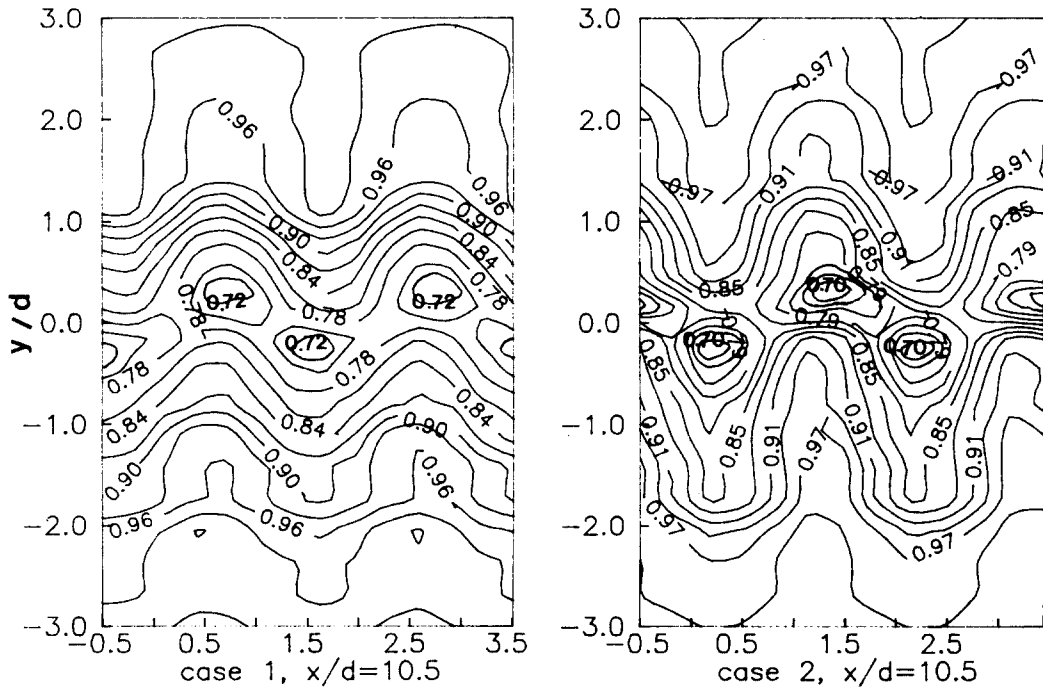


Fig. 12b Contours of the phase averaged transverse velocity

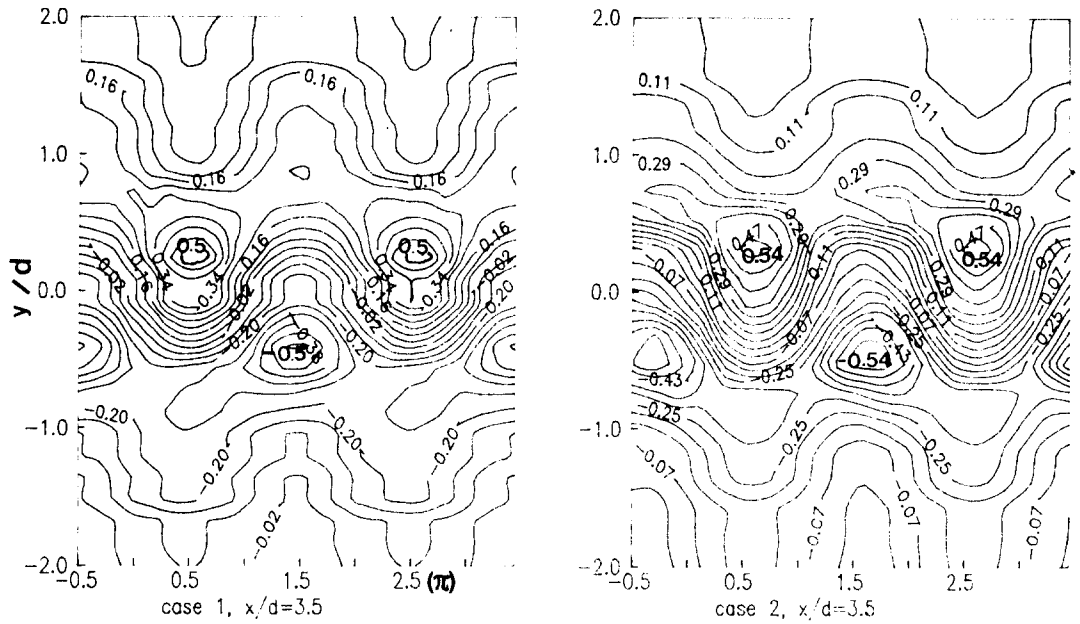


Fig. 13a Contours of the phase averaged equi - vorticity

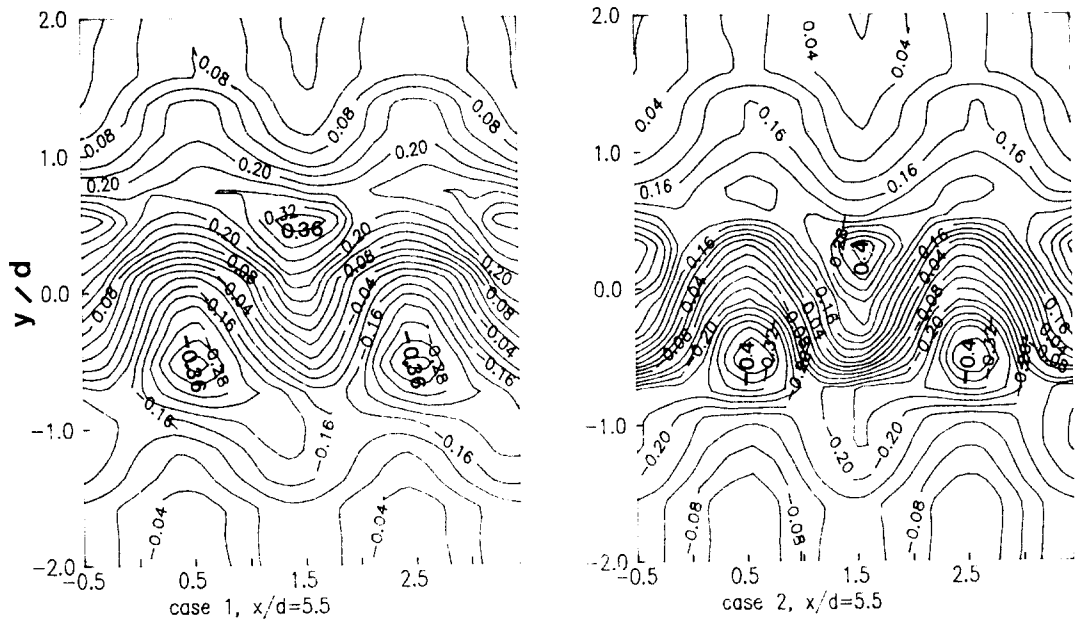


Fig. 13b Contours of the phase averaged equi vorticity

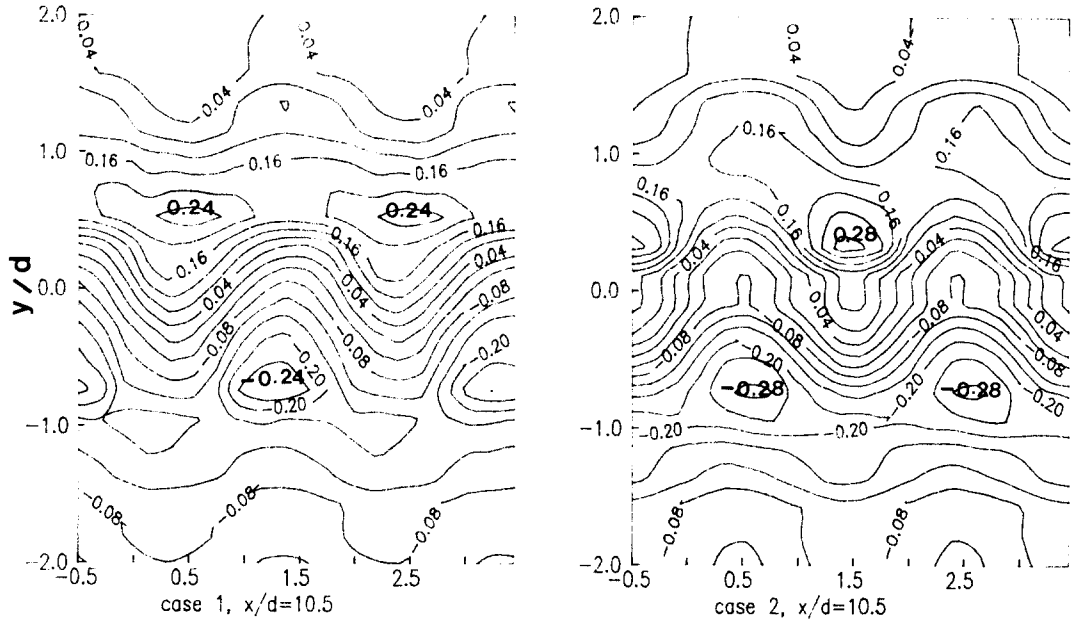


Fig. 13c Contours of the phase averaged equi - vorticity

있다

여기서는 와도를 무차원화 하기 위하여  $d/U_0$ 를 곱하여  $d/U_0 \Delta \langle u \rangle / \Delta y$ 로 와도를 계산 하였다. 그림에서 동심원과 같은 와도선은 와류가 형성되었음을 의미하고 그 중심에 핵이 존재하며, 이 위치가 와류의 중심이다. 와도의 최대값은  $x/d=3.5, 5.5, 10.5$ 에서 case 1의 경우 각각 0.50, 0.36, 0.24 및 case 2의 경우 0.54, 0.4, 0.28 정도이며, 와의 세기는 난류 에너지의 소산등에 의해 하류로 갈수록 감소하고, 와류 중심의 위치는 후류 중심에서 멀어지며 모양도 x방향으로 약간 신장되는 경향을 보여 와가 계속 확산되어 감을 알 수있으며, 와도의 값들이 정, 부의 값으로 교대로 나타나는 것은 와류가 후류 중심선을 기준으로 상하에 위상차 180도 간격으로 교대로 형성됨을 의미한다. 자유 흐름 난류가 존재할 경우 동일 지점에서 와의 세기 및 와 사이의 간격이 커지며, 와의 구조가 커지는 경향을 보이는데 이는 자유흐름 난류로 인하여 후류유동이 활발해지면서 혼합이 증가되고, 난류에

너지  $u'^2$ 이 커지는 것등과 관련이 있다고 볼 수 있다. 이같은 결과로 보아 자유흐름 난류가 후류의 혼합, 에너지 전달 및 전단층의 roll-up 현상등 후류의 유동특성에 많은 영향을 미침을 알수 있다.

#### 4. 결 론

조건부 샘플링에 의한 위상 평균법을 이용하여 2차원 원주의 근접 후류에 미치는 자유흐름 난류 강도의 영향에 대한 실험적 연구로 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1). 자유흐름 난류가 존재할 경우 난류 후류의 주기가 길어져 와류유출 주파수가 작아진다.
- 2). 위상평균법에 의해 난류후류의 주기적 성질을 잘 알수 있으며, v 변동성분은 후류 중심, u 변동성분은 와류중심에서 최대진폭을 갖는 주기성이 있다.
- 3). 자유흐름 난류로 인해 같은 위치에서 와의 세기 및 와 사이의 거리는 커지고 후류의 혼합이

증가하며 유동폭이 넓어진다.

## 5. 참고문헌

- 1) Dziomba. B., Fiedler. H. E.,1985, "Effect of Initial Conditions on Two - Dimentional Free Shear Layers" J. Fluid Mech.,Vol. 152, pp. 419 - 442.
- 2) Yasuhiro SUZUKI, Masaru KIYA, 1985 "Effect of Free Stream Turbulence on Separated - Reattaching Flows for Different Angles of Separation" Bull. JSME, Vol. 28, pp. 1887 - 1892.
- 3) Yasuharu Nakamura, Yuji Ohya,1984, "The Effect of Turbulence on The Mean Flow Past Two - Dimensional Rectangular Cylinders" J. Fluid Mech., Vol. 149, pp. 255 - 273.
- 4) Masaru KIYA, Yasuhiro SUZUKI, Mikio AREA, 1982 "A Contribution to The Free Stream Turbulence Effect on The Flow Past a Circular Cylinder" J. Fluid Mech.,Vol. 115,pp.151 - 164.
- 5) Surry. D., 1972 "Some Effect of Intense Turbulence on the Aerodynamics of a Circular Cylinder at a Subcritical Reynolds Number" J.Fluid Mech., Vol. 52, pp. 543 - 563.