

〈論 文〉

## 정지 및 회전하는 원주에 의한 난류후류의 응집구조

부정숙\* · 이종춘\*\*

(1993년 11월 12일 접수)

### An Investigation of the Coherent Structures in Turbulent Wake Past a Stationary and Rotating Cylinder

Jung-Sook Boo and Jong-Choon Lee

**Key Words :** Large Scale Coherent Structure(대규모 응집구조), Conditional Sampling(조건부 추출법), Phase Average Technique(위상평균기법), Spin Rate(회전계수), Turbulent Intermittency Funtion(난류 간헐도 함수)

#### Abstract

Turbulent coherent structures in the intermediate wake of a stationary and rotating cylinder, spin rate  $S=0.7$ , situated in a uniform flow were experimentally investigated using a conditional phase average technique. Measurements were carried out at a section of 8.5 diameters downstream from the center of cylinder and a Reynolds number of  $Re=6.5 \times 10^3$ . The phase averaged velocity and velocity vector fields, contours of vorticity, turbulent intermittency function and velocity fluctuation energy are presented and discussed in relation to the large scale coherent structures by Kármán vortices that shed periodically from the cylinder. Coherent wake structures of the rotating cylinder is almost identical with stationary cylinder, but the lateral displacement and shrinkage of turbulent wake region is occurred by rotation. Rotation of the cylinder result in that the deflection of wake center to deceleration region ( $Y/D \approx -0.3$ ) and the decrease of mean velocity defect (10%), vorticity strength of large scale structures (19%), total velocity fluctuation energy (12%).

#### 기 호 설 명

$D$	: 원주직경	$U_0$	: 자유흐름속도
$f_s$	: 와류출주파수	$u, v$	: 변동속도
$I$	: 난류 간헐도 함수	$\langle u \rangle, \langle v \rangle$	: 기본 변동속도
$Re$	: Reynolds 수	$u^2, v^2, q^2$	: 전 변동에너지
$r$	: 원주반경	$\langle u \rangle^2, \langle v \rangle^2, \langle q \rangle^2$	: 기본 변동에너지
$S$	: 회전계수 (Spin Rate)	$u_r^2, v_r^2, q_r^2$	: 불규칙 변동에너지
$t_{i,j}$	: 데이터추출 시간점	$X, Y, Z$	: 직교좌표계
$U, V$	: X, Y방향 순간속도	$\emptyset$	: 위상각
$U_c$	: 와이동속도	$\nu$	: 동점성계수
		$\Omega$	: 와도
		$\omega_0$	: 원주의 회전각속도
		$\langle \rangle$	: 위상평균값

\*정회원 부산대학교 기계공학과

\*\*정회원 부산대학교 대학원

: 시간평균값

## 1. 서 론

간헐적이고 주기적인 유동을 포함하는 난류전단 흐름에서 대규모 응집구조(large scale coherent structure)는 혼합, 유입 및 운동량전달 등에 크게 기여하는 것으로 난류현상 규명에 중요한 연구대상이 되고있다. 대규모 응집구조의 연구초기에는 흐름의 가시화기법에 의해 많이 의존하였으나 이는 정량화에 어려운 점이 있어 한계가 있었다. 정량화된 물리량을 얻기 위해서는 물리평면에서의 구체적인 측정이 필요한데, 조건부 추출 및 평균기법(conditional sampling & averaging technique)이 가능해짐에 따라 대규모 응집구조의 연구가 활발해지기 시작하였고, 이는 빠른 A/D변환과 DSP(digital signal processing)기법의 발달로 더욱 발전하게 되었다.

조건부 추출 및 평균기법에 의한 정지원주의 난류후류유동의 응집구조에 관한 연구로는, Boisson과 Chassaing<sup>(1)</sup>이  $X/D=2, 4$ ,  $Re=52,300$ 에서 간헐도함수의 위상평균을 이용하여 난류영역을 제시하고 있고, Thomas<sup>(2)</sup>는 난류감지기(turbulence detector)를 이용한 난류와 비난류 각각에 대하여 평균하는 지역평균법(zone average)을 사용하고 있다. Davies<sup>(3)</sup>는 D형 Cylinder의 완전발달영역에서 기본적인 와의 구조를 추출하기 위해 후류 바깥 영역의 속도신호 위상을 기준으로 하는 조건부 평균기법을 이용하여 유선 및 와도분포를 제시하고 있다. 여기서는 전체신호의 25%가 와를 유출하는 것으로 나타나고 있다. Wlezien과 Way<sup>(4)</sup>는 가열된 원주에 의한 근접후류의 온도분포를 위상평균법에 의해 나타내고 있다. Kiya와 Matsumura<sup>(5)</sup>는  $X/D=8$ 에서 조직적인 와의 구조를 대규모 와구조와 소규모 와구조로 구분하여 연구하였으며, Hussain과 Hayakawa<sup>(6)</sup>는  $Re=13,000$ ,  $10 < X/D < 40$ 의 근접후류에서 대규모 와의 생성과 이의 역학적 관계에 대한 자세한 검토를 하고 있다. Cantwell<sup>(7)</sup>은 Flying hotwire기법을 이용하여 근접후류에서의 난류구조를 제시하고 있다.

최근에 발표된 회전원주에 의한 난류후류의 실험 연구로는 Badr와 Dennis 등<sup>(8)</sup>이 유동의 가시화를 통한 원주회전의 영향을 해석하여 수치해석과 비교

하였고, Diaz와 Gavalda 등<sup>(9)</sup>은  $Re=9,000$ 에서 회전계수가 1.0을 넘으면 칼만와열이 점차 붕괴되고 2.0을 넘으면 규칙성있는 변동은 존재하지 않는다고 지적하고 있다. Taniguchi와 Matsumura 등<sup>(10)</sup>은 위상평균법을 사용하여 회전계수  $S=1.7$  이상에서는 대규모 와의 구조는 볼 수 없다고 언급하고 있다.

지금까지의 연구대상은 정지원주와 회전원주 각각에 국한되어 있고, 이의 대규모 응집구조에 관한 자세한 정량적 정보를 측정하거나 역학적 중요성을 밝혀 비교, 검토한 예가 드문점을 감안하여, 본 연구에서는 조직적 구조가 아직 강하게 남아 있는 회전계수  $S=0.7$ 인 회전원주에 의한 난류후류구조를 정지원주( $S=0.0$ )인 경우와 비교해 봄으로써 대규모 응집구조의 변화를 구체적으로 제시하고자 한다. 강한 주기성이 내포되거나 외부여기(excitation)에 의해 조절되어지는 유동의 응집구조를 연구하는데 사용되는 강력한 기법중에 하나인 조건부 위상평균기법(conditional phase average technique)을 적용하였고, 이에 관한 일괄처리 프로그램을 개발, 이용하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 풍동은 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동으로 전체길이 4950 mm이고 시험구간의 크기는 305 mm×305 mm×2300 mm이며, 최대속도가 30 m/sec이다. 후류를 발생시키는 원주는 직경 15 mm의 알루미늄봉으로 시험구간의 입구에서 870 mm 하류의 단면중심에 위치한다. 이때 종횡비(aspect ratio)는 20.3이고, 폐쇄비(blockage ratio)는 4.9%이다. 시험구간의 입구에는 100 mesh의 스크린을 설치하여 시험구간의 난류강도가 3%의 균일유동이 되도록 하였다. 실험시 유속은 6.5 m/sec로 유지하여, 원주직경을 기준으로 한 레이놀즈수는  $6.5 \times 10^3$ 이다.

원주의 회전은 DC모터를 이용하였으며 회전변동율은 0.5% 이내이고 회전계수는  $S=0.7$ 로 일정하게 유지시켰다. 속도성분의 측정을 위하여 직경 0.15 mm, 감지부 길이가 2 mm의 수정봉에 서로 절연되어 있는 두개의 반원 백금막으로 이루어진 Split Film Probe(SFP)를 이용하여 난류측정의 신뢰도를 높였다.

다단 터빈기관이나 열교환기의 관(pipe)배열에서

보면, 상류측 물체에서 발생된 난류후류는 물체 대표길이의 몇배 정도되는 거리에 놓여있는 하류측 물체에 큰 영향을 미친다. 즉, 이 영역은 초기 발생된 후류가 먼후류(far wake)로 발달해가는 중간영역(intermediate zone)으로 많은 연구의 대상이 되고 있으며, 특히 칼만와열에 의한 속도의 주기적 변동이 강하게 남아있어 조건부 위상평균과 같은 주기적인 추출(periodic sampling)기법을 적용할 수가 있다. 본 실험에서는 이를 감안하여 원주중심으로부터 8.5D 떨어진 하류지점을 측정단면으로 정하였다.

SFP로부터 데이터획득을 위한 컴퓨터 On-Line system은 Fig. 1에 나타내었다. 측정에 사용된 SFP는 TSI model 1288이며, 정온 열선유속계(C.T.A., TSI model 1054A)로부터의 출력은 5 KHz Low Pass Filter를 거쳐 범용 파형분석기인 D6000(data precision model 611) 장치에서 14 bit A/D 변환되고 GPIB card(National Instrument Co. PCIIA type)를 통해 PC의 hard disk나 D6000전용 자료 저장장치인 Data Logger(model 681)에 저장된다. 자료의 추출간격(sampling time)은  $100 \mu\text{s}$ (10 kHz) 이고 한 측정점에 대해 61,440개의 자료가 통계처리를 위해 사용된다. 측정된 자료는 분석을 위해 오프라인 프로그램에 의해 처리된다. SFP의 속도 교정실험에서는 상기의 자료처리 장치와 함께 압력조정기와 필터가 부착되어 있어 균일한 흐름을 제공하는 calibrator(TSI model 1125)를 사용하였다.

본 해석에 사용되는 좌표계 및 주요기호 정의는 Fig. 2와 같다. 원주의 축에 수직한 면내에서 주류 방향을 X축, 이에 수직한 방향을 Y축으로 한다. 회전계수(spin rate)는 원주의 회전속도  $\omega_0$ 와 자유흐름속도  $U_0$ 의 비율을 나타내는 것으로,  $S = \omega_0/U_0$ 로 나타낸다.

또한 원주의 회전에 의해 원주의 상부는 유체가 가속되고 하부는 감속되므로 이에의해 가속부와 감속부로 영역을 나눈다.

위상평균을 위한 기준신호의 선정은 여러가지의 방식이 시도되었다. Cantwell<sup>(7)</sup>은 박리점 근처에서의 표면압력변동을, Boisson,<sup>(1)</sup> Davies<sup>(3)</sup> 등은 후류바깥의 비회전 유동영역에서의 속도변동을 기준신호로 취하고 있다. 이는 주실험영역인 후류내부에서 떨어진 곳의 신호를 기준신호로 정함으로써 신호사이에 상당한 왜곡현상(jittering)이 발생한

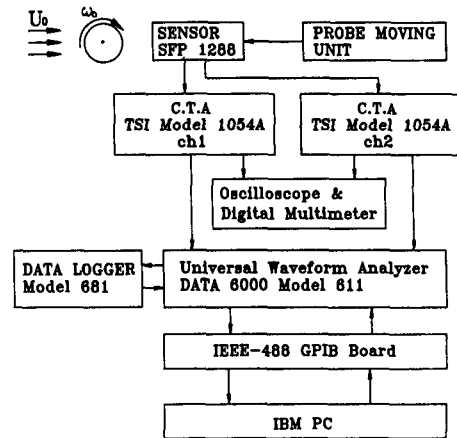


Fig. 1 Schematic diagram of measuring and data processing system

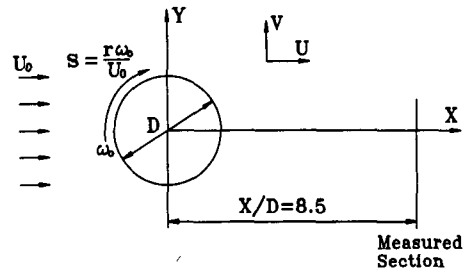


Fig. 2 The coordinate system and definition sketch of the flow field

다. 이를 줄이기 위해서 Taniguchi 등<sup>(10)</sup>은 후류중심에서의 변동성분을 기준신호로 취하며, Kiya 등<sup>(5)</sup>은 기준신호를 따로 측정하지 않고 위상평균을 취할 신호의 변동성분으로부터 직접 기준신호를 잡는 방법을 시도하고 있다.

본 연구에서는 Kiya 등이 적용한 방법과 같이 각 측정점에서의 속도변동의 Y성분인 V신호를 기준신호로 취한다. V신호의 Power Spectrum분석을 해보면  $-2.5 < Y/D < 2.5$  범위에서 와류출주파수(vortex shedding frequency)에 해당하는 주파수에서 매우 빠른 침투치가 나타난다. (Fig. 3) 즉 속도성분 V신호는 매우 주기적인 변동성분을 포함하고 있으며, 이는 후류영역에서의 위상평균을 위한 기준신호로 적합함을 알 수 있다. 이 기준신호는 와류출주파수  $f_s$ 를 중심으로 하는 Digital Band Pass Filter(BPF)에 의해 저주파 및 고주파성분을 제거하고 정현파에 가까운 형태의 신호( $V_r$ )만 이용한다.

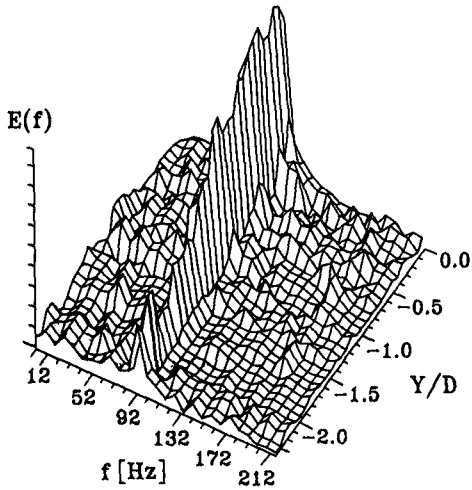


Fig. 3 Power spectrum of the reference signal at  $X/D=8.5, S=0$

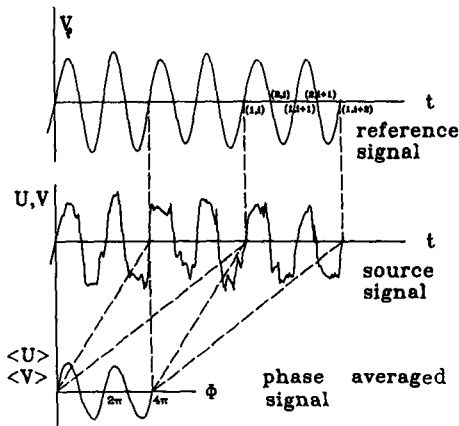


Fig. 4 Definition of the phase average method

Fig. 4는 본 연구에서 적용하는 위상평균의 방법을 도시한 것이다. 위상각  $\phi$ 는 기준신호  $V_r$ 의 파형이 처음 -에서 +로 바뀌는 점을 '0'으로 하고, 다음 +에서 -로 변하는 점을 ' $\pi$ '로 나타낸다. 위상 평균을 위해서는 연속된 2주기 구간( $0 \sim 4\pi$  구간)인  $(t_{1,i} \leq t \leq t_{1,i+2})$ 을 기준시간으로 잡는다.

$$\phi = \pi \left( \frac{t - t_{1,i}}{t_{2,i} - t_{1,i}} \right), \quad (t_{1,i} \leq t \leq t_{2,i})$$

$$\phi = \pi \left( \frac{t - t_{2,i}}{t_{1,i+1} - t_{2,i}} \right), \quad (t_{2,i} \leq t \leq t_{1,i+1}) \quad (1)$$

여기서,  $t_{1,i}, t_{2,i}$ 는 임의로 정한  $t=0$ 에서  $i$ 번째 시간을 나타내는 것으로  $t_{1,i}$ 는  $V_r=0, \frac{dV_r}{dt} > 0$ 인 경

우이고,  $t_{2,i}$ 는  $V_r=0, \frac{dV_r}{dt} < 0$ 인 경우이다.

Band Pass Filter를 통과한 기준신호  $V_r$ 는 연속된 2주기 파장에서 1/2 주기씩 다음의 조건을 점검하여 4개의 연속된 1/2주기 파장이 모두 이 조건을 만족하는 신호를 위상평균을 위한 조건신호(conditional signal)로 취한다.

$$\frac{0.8T_f}{2} \leq \frac{T_v}{2} \leq \frac{1.2T_f}{2} \quad (2)$$

여기서,  $T_f$ 는 Fig. 3에서 구한 와유출주파수의 역수인 와유출주기를 나타내고,  $T_v$ 는 기준신호  $V_r$ 의 주기를 나타낸다.

본 실험에서 위의 조건을 만족하는 신호는 측정 위치 ( $-3 \leq Y/D \leq 3$ )에 따라 전체신호의 25%에서 91%까지 나타났고, 평균 68%의 신호가 위상평균을 위해 추출되어진다. 이를 데이터 추출시간(sampling time)과 관련하여 생각해 보면, 한 측정지점에서 조건을 만족하는 2주기 파장을  $3.3^\circ$ 의 피치로 추출하고 각각의 위상각에서 71~258회(평균 192회) 가산평균되어 위상평균량으로 나타난다.

### 3. 속도분해, 변동속도 에너지 및 난류 간헐도함수

센서로부터 측정되어진  $X, Y$ 방향의 순간속도  $U, V$ 는 다음과 같이 분해된다.

$$U = \bar{U} + u$$

$$V = \bar{V} + v \quad (3)$$

여기서,  $\bar{U}, \bar{V}$ 는 시간평균속도이고  $u, v$ 는 전체 변동속도를 나타낸다. 한편, 전체 변동속도  $u, v$ 는 기본 변동속도  $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ 와 불규칙 변동속도  $u_r, v_r$ 를 합한 형태, 식(4)로 나타낸다.

$$u = \langle u \rangle + u_r$$

$$v = \langle v \rangle + v_r \quad (4)$$

여기서,  $u_r, v_r$ 는 기본 변동속도에 중첩된 불규칙적인 변동속도로 위상평균화 처리과정에서  $\langle u \rangle = \langle u \rangle + \langle u_r \rangle = \langle u \rangle$ 가 되어,  $u_r, v_r$ 는 소거되고 다음과 같이 된다.

$$\langle U \rangle = \bar{U} + \langle u \rangle$$

$$\langle V \rangle = \bar{V} + \langle v \rangle \quad (5)$$

$\langle U \rangle, \langle V \rangle$ 는 유동의 기본구조를 나타내는 조직적인 구조(coherent structure)에 관련된 속도성분이

고  $\langle u \rangle$ ,  $\langle v \rangle$ 는  $\langle U \rangle$ ,  $\langle V \rangle$ 로부터 직류성분을 제거한 값으로 칼만외열에 기초한 변동속도임으로 기본 변동속도라 한다.

변동에너지를 Z방향의 성분을 제외하고 변동속도의 제곱의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{전 변동에너지, } q^2 &= u^2 + v^2 \\ \text{기본 변동에너지, } \langle q \rangle^2 &= \langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2 \\ \text{불규칙 변동에너지, } q_i^2 &= u_i^2 + v_i^2 \end{aligned} \quad (6)$$

한편, 전 변동에너지의 X, Y 성분인  $u^2$ ,  $v^2$ 를 위상평균화 처리를 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \langle u^2 \rangle &= \langle u \rangle^2 + \langle u_i^2 \rangle \\ \langle v^2 \rangle &= \langle v \rangle^2 + \langle v_i^2 \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

난류상태의 정도를 판정하는 방법의 하나인 난류간헐도함수(turbulent intermittency function),  $I$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$I = 1(A \geq k) = 0(A < k) \quad (8)$$

여기서, 판정의 기준값  $A$  및 문턱값  $k$ 는 다음과 같이 구한다. 속도성분,  $U$ 를 와류출주파수의 2배주파수를 절단주파수로 하는 High Pass Filter를 통과시킨 고주파성분  $U_h$ 을 1차 미분화시키면,  $(dU_h/dt)_i = (U_{i+1} - U_{i-1}) / (2\Delta t)$ , 여기서  $i$ 는 획득한 데이터중 임의의 한시간점을 나타내고  $\Delta t$ 는 데이터 추출간격을 나타낸다. 기준값  $A$ 는  $(dU_h/dt)_i^2$ 을 임의의 시간점  $i$ 를 중심으로 5시간점에 대해 평균을 취해서 그시간점의 기준값  $A$ 로 한다. 난류와 비난류를 구분하는 문턱값(threshold)  $k$ 는 속도성분  $U_h$ 의 난류, 비난류를 적절히 판별할 수 있도록 결정하는 것으로 본 실험에서는 모든 측정점에서의  $(dU_h/dt)_i^2$ 값을 평균화한 값의 15%로 정하였다.

#### 4. 결과 및 검토

Fig. 5는 원주중심( $Y/D=0$ )에서 측정한 속도성분  $V$ 신호에 대한 Power Spectrum을 각각의 회전계수에 대해 나타낸 것이다. 회전계수가 1.1까지는 와류출주파수  $f_s$ 에서 뾰족하고 큰 첨두치를 보이고 있는데, 이는 칼만외열에 의한 규칙적인 와류출에 의해 강한 주기성을 유지하는 유동구조가 존재함을 알 수 있다. 한편, 회전계수 1.3에서는 그 크기가 급격히 감소하고 넓은 주파수범위에서 Power를 나타내고 있어 와류유출의 주기성이 점점 희박해지기 시작함을 알 수 있다. 본 실험에서 선정된 회전계

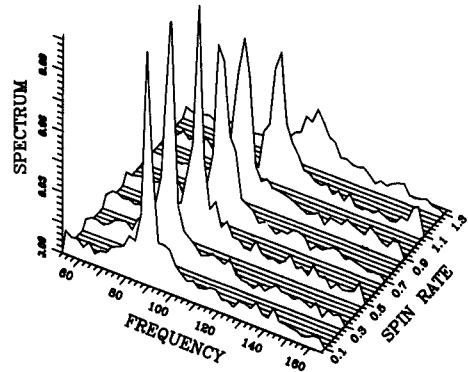


Fig. 5 Power spectrum for various spin rate at  $X/D = 8.5$ ,  $Y/D = 0$

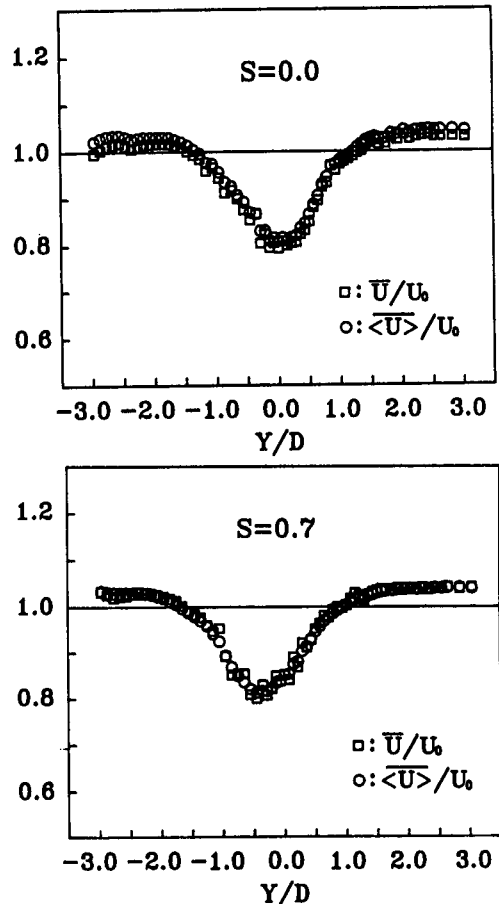


Fig. 6 Comparison of the time mean velocity,  $\bar{U}/U_0$  and  $\langle \bar{U} \rangle / U_0$ .

수  $S=0.7$ 에서 보면 아직까지 Narrow band의 탁월주파수가 유지되고 있어 강한 주기성에 의한 조직적인 구조를 예상할 수 있으므로 정지원주와 합

계 조건부 위상평균기법을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 원주가 정지( $S=0$ ) 및 회전( $S=0.7$ )할 때의 주속도를 비교한 것으로 추출한 전체신호를 시간평균값( $\bar{U}/U_0$ )과 조건부 추출된 위상평균신호의 평균값( $\langle U \rangle/U_0$ )을 나타낸 것이다. 전체신호의 시간평균값과 위상평균된 신호의 평균값의 차이가 거의 없는 것으로 나타나 위상평균을 한 신호는 전체 유동의 정보를 대표한다고 할 수 있다.  $S=0$ 일 때는  $X$ 축(후류중심축)에 대해 상하 대칭된 구조를 보이고,  $S=0.7$ 일 때는 원주회전의 영향으로 주속도가 감속부(- $Y$ 방향)쪽으로 편향된 형태를 볼 수 있으며, 이로 인해 속도결손(mean velocity defect)이 원주회전 방향으로 향하게 된다. 결과적으로 후류내에서 감속부방향으로 운동량이 전달되고 이는 원주회전에 의해 발생하는 양력 즉, 마그너스힘

(magnus force)을 발생시키게 된다. 속도결손의 최대값은  $S=0$ 일 때는  $Y/D=0$ ,  $S=0.7$ 일 때는  $Y/D \approx 0.3$  위치에서 나타나고 그 크기변화는 미소하다.

Fig. 7, 8은 위상평균에 의해 얻어진 위상평균속도  $\langle U \rangle, \langle V \rangle$ 의 분포를 각각의 위상에 대해 나타낸 것이다. 각점에서의 위상  $\phi$ 와 측정점  $Y$ 에 대해 전후 각각 2점씩을 합해 모두 9점의 데이터를 단순 산술평균하여 평활화처리를 한 것이다. 이 조 작은 데이터의 불확정 편차를 제거한 것으로 유체의 기본적인 성질을 소거한 것은 아니다.  $S=0$ 일 때  $Y/D=0$ ,  $S=0.7$ 일 때  $Y/D \approx 0.3$ 의 선은 여러 유동특성을 대칭으로 나누는 후류중심선으로 이하에서 대칭선이라 칭한다. 그림에서 보면,  $\Delta\phi = \pi$ 의 주기로 하여  $\langle U \rangle$ 분포는 대칭선에 대해 선대칭된 형태가 한번씩 나타나고,  $\langle V \rangle$ 분포는 각위상에서

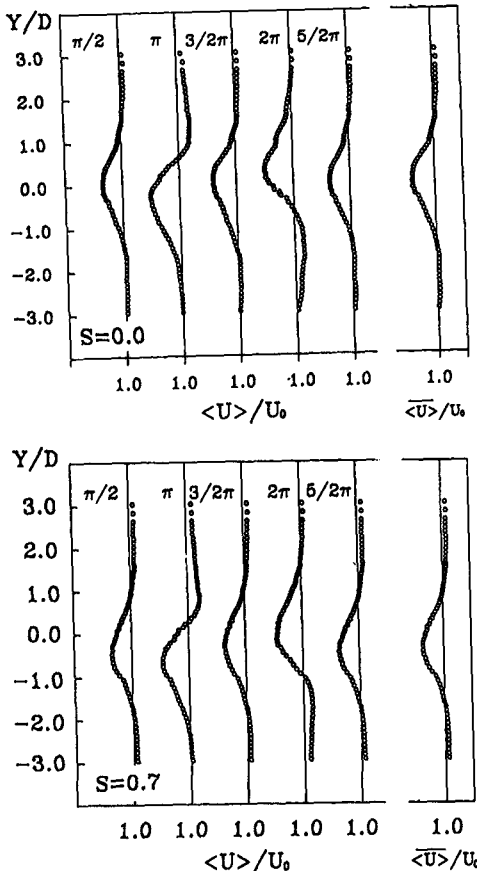


Fig. 7 Distributions of phase averaged velocity,  $\langle U \rangle/U_0$  across the flow cross section

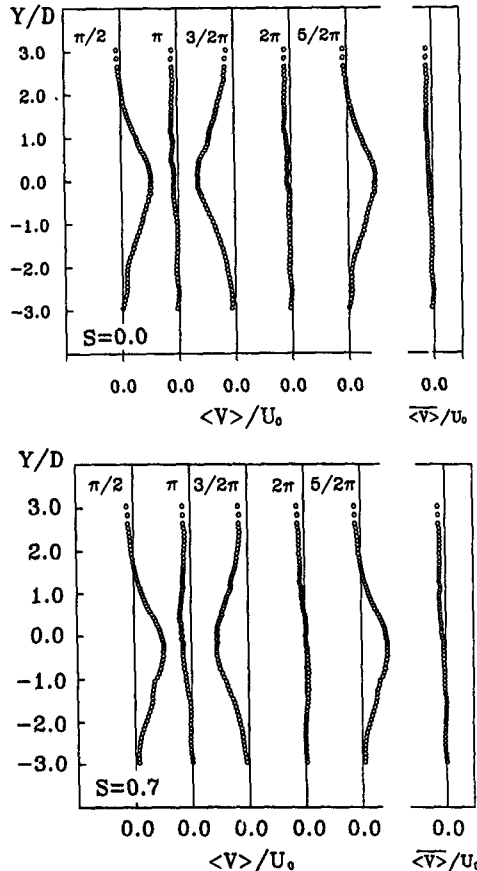


Fig. 8 Distributions of phase averaged velocity,  $\langle V \rangle/U_0$  across the flow cross section

대칭선과 만나는 점을 중심으로 하는 점대칭된 형태가 한번씩 교대로 나타난다. 이는 반주기 (180°)마다 원주상하로부터 교대로 방출되어 형성되는 칼만와열에 의한 속도변동을 반영하고 있다.

Fig. 9, 10은 위상평균화된 속도인  $\langle U \rangle, \langle V \rangle$ 를 자유흐름속도  $U_0$ 로 무차원한 등속도선을  $Y-\phi$ 평면에 각각 나타낸 것이다.

Fig. 9의  $\langle U \rangle$ 분포에서 보면, 대칭선 상하부근에서는 신호의 변동율이 낮지만 응집와의 중심이 있는 위치에서는 Contour가 밀집되고 있는 것으로 보아 큰 섭동진폭을 보임을 알 수 있다. 또한, 최대속도 결손,  $(U_0 - \langle U \rangle)/U_0$ 지점이  $\phi = \pi, 2\pi, 3\pi$  선상에서 위상차  $\pi$ 의 주기로 대칭선 상하에서 교대로 일어나고 있다. 원주회전 ( $S=0.7$ )의 영향으로 속도결손의 큰 부분이 후류중심선에서 원주회전 방향인 아래 ( $-Y$ )로 내려오게 되고 그 크기가 정지원주에 비해 낮아져 항력의 감소를 알 수 있는데, 최대속도 결손값을 기준으로 약 10%정도 낮아

지고 있다. 한편, 후류 외곽에서는 자유흐름영역의 유체가 대규모 응집와에 의해 야기된 속도로 인해 가속되어 자유흐름속도  $U_0$ 보다 약간 크게 나타나고 있다.

Fig. 10의  $\langle V \rangle$  분포에서는,  $\langle U \rangle$  성분과는 달리 대칭선으로 갈수록 신호의 진폭이 증가함을 알 수 있고, 응집와의 중심 위상선인  $\phi = \pi, 2\pi, 3\pi$  선을 기준으로 부호가 반대로 바뀌고 있다. 이는 근본적으로 대규모 응집와의 각각의 구조가 회전함에 따른 것으로, 구조전면(하류측)에서는 유체가 후류 내로 흡입되고 구조후면(상류측)에서는 후류 바깥으로 방출됨에 따른 것이다. 결과적으로  $\langle V \rangle$ 의 등속도분포는 응집와의 중간선인 대칭선을 가로지르는 2개의 인접한 응집와의 중첩에 기인되는 것이다.

$\langle V \rangle/U_0$ 의 최대치는 이웃하고 있는 응집와의 사이인  $\phi = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, 7\pi/2$ 에서 나타나며 최대값을 기준으로  $S=0$ 일 때는  $-0.32$   $S=0.7$ 일 때

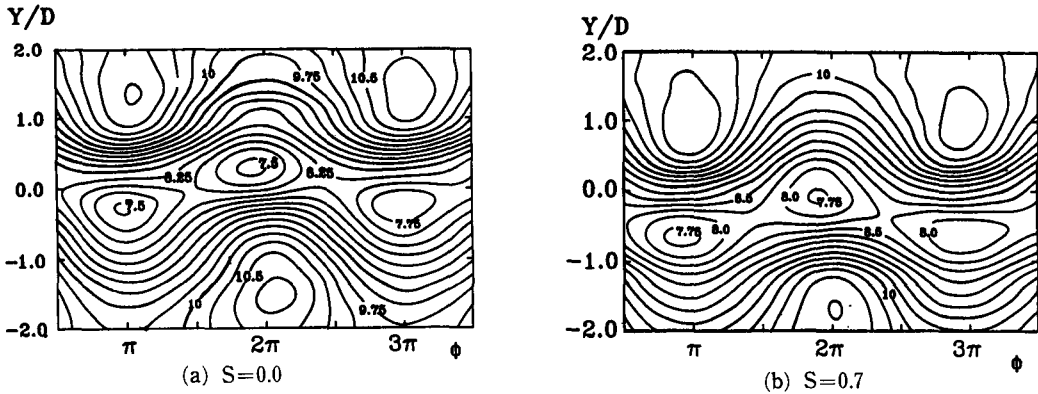


Fig. 9 Equi-velocity lines of the phase averaged velocity,  $\langle U \rangle/U_0 \times 10$

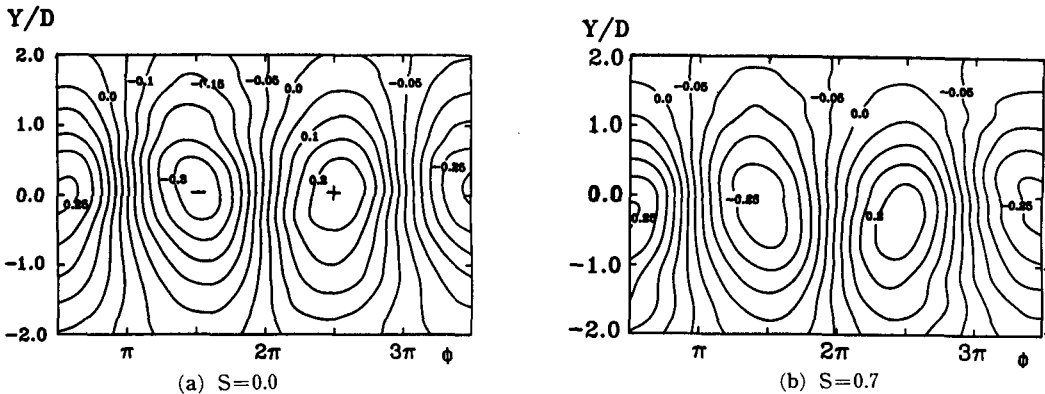


Fig. 10 Equi-velocity lines of the phase averaged velocity,  $\langle V \rangle/U_0$

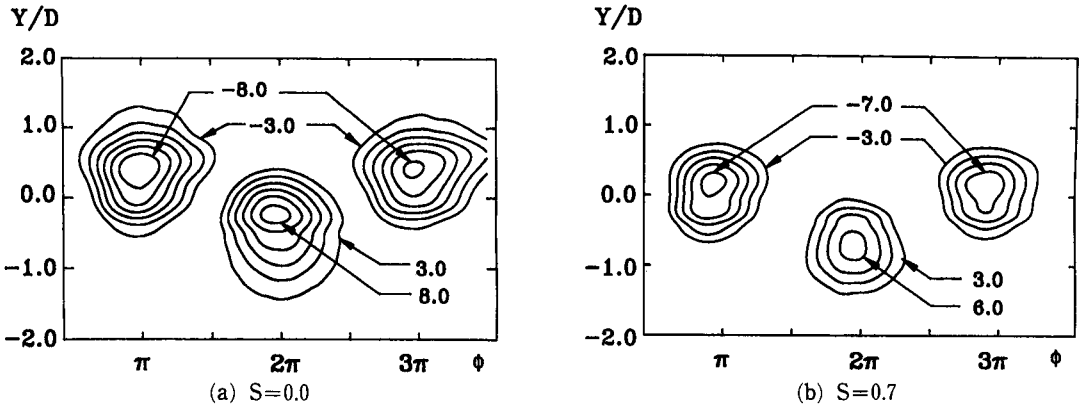


Fig. 11 Equi-velocity lines of the large scale structures,  $\langle Q \rangle / \times 10$

는  $-0.28$ 로 나타나고 있어 원주회전으로 그 값이  $12.5\%$  감소하고 있으며 최대값의 위치도 감속측으로 이동된 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 대규모 응집구조의 대표적인 물리량인 응집와도의 등와도분포를 나타낸 것이고, Fig. 12는 와이동속도  $U_c$ 로 같이 이동하면서 관찰한 위상 평균속도의 벡터장(Vector field) ( $\langle U \rangle - U_c, \langle V \rangle$ )을 나타낸 것이다. 응집와도량  $\langle Q \rangle$ 는 식(9)와 같이 정의하고 위상  $\phi$ 와 좌표  $X$  사이의 변환관계는 식(10)과 같다.

$$\langle Q \rangle = \frac{\partial \langle V \rangle}{\partial X} - \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial Y} \quad (9)$$

$$X = \frac{U_c \phi}{2\pi f_c} \quad (10)$$

여기서, 와이동속도  $U_c$ 는 대칭선 상하의 가속부와 감속부에 있는 응집와 중심속도를 구해 이의 평균값으로 취한다. 응집와 중심에서의 최대와도는 원

주직경  $D$ 와 자유흐름속도  $U_0$ 로 무차원화하면 정지 및 회전원주에 대해서 각각  $-0.86$ 과  $0.81$  및  $-0.75$ 와  $0.66$ 으로, 가속부로부터 방출되는 와의 중심와도 세기가 감속부보다 강하게 나타나고 있다. 또한 위의 방법에 의한 와이동속도  $U_c$ 는 정지 원주인 경우  $0.93 U_0$ , 회전원주인 경우  $0.9 U_0$ 로 나타났다.

Fig. 11에서 보면, 등와도분포는 거의 동심원구조를 하고 있으며, 대칭선의 상하에 매우 조직적인 대규모 와가 응집되어 있음을 알 수 있다. 이는 대규모 응집구조에 대한 Hussain<sup>(6)</sup>의 정의 “공간적으로 위상상관된 와도를 갖는 대규모 난류유체의 질량”를 잘 뒷받침해 주고 있다. 와유출(vortex shedding)은  $180^\circ$ 의 위상차로 대칭선 상하에서 교대로 발생함을 알 수 있고, 응집 와도량은 응집와의 중심에서 최대값을 나타낸다. 원주회전( $S=0.7$ )으로 인해 응집와의 영역이 감소되고 중심의

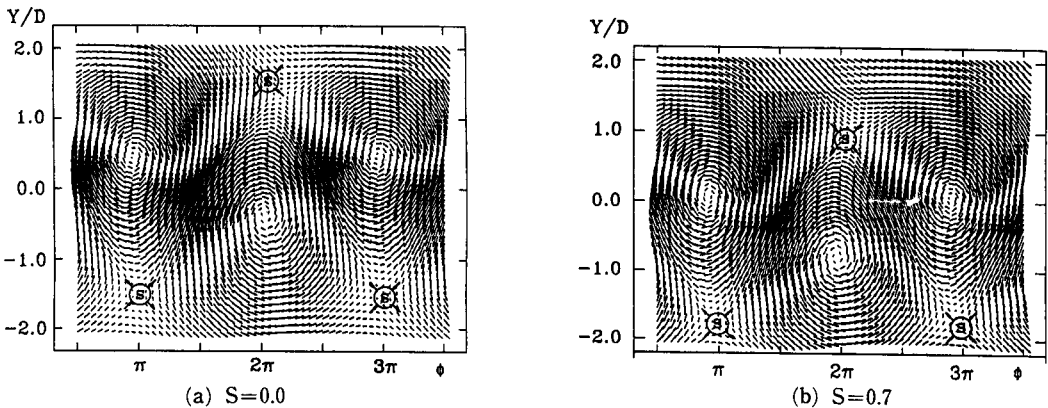


Fig. 12 Vector fields ( $\langle U \rangle - U_c, \langle V \rangle$ ) of the large scale structures



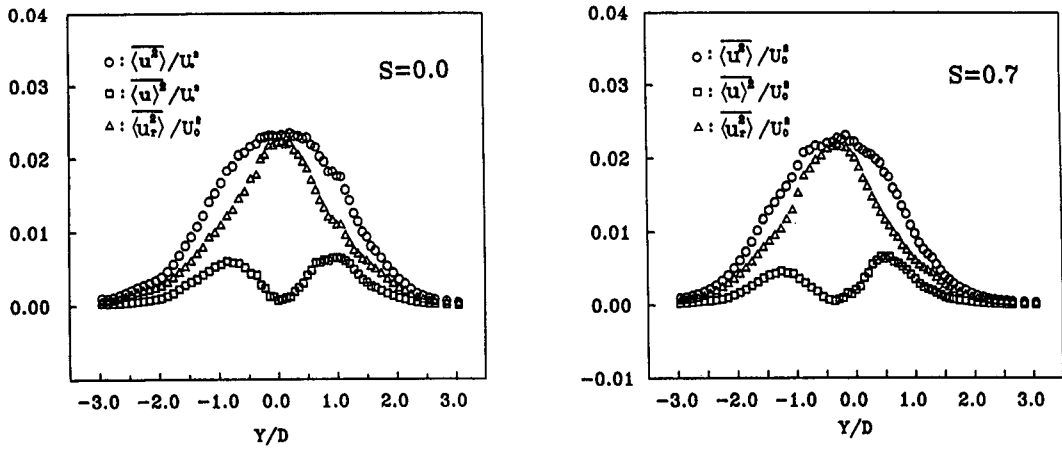


Fig. 13 Distributions of the turbulent energy,  $\langle u^2 \rangle$ ,  $\langle u^2 \rangle^2$ ,  $\langle u^2 r^2 \rangle$

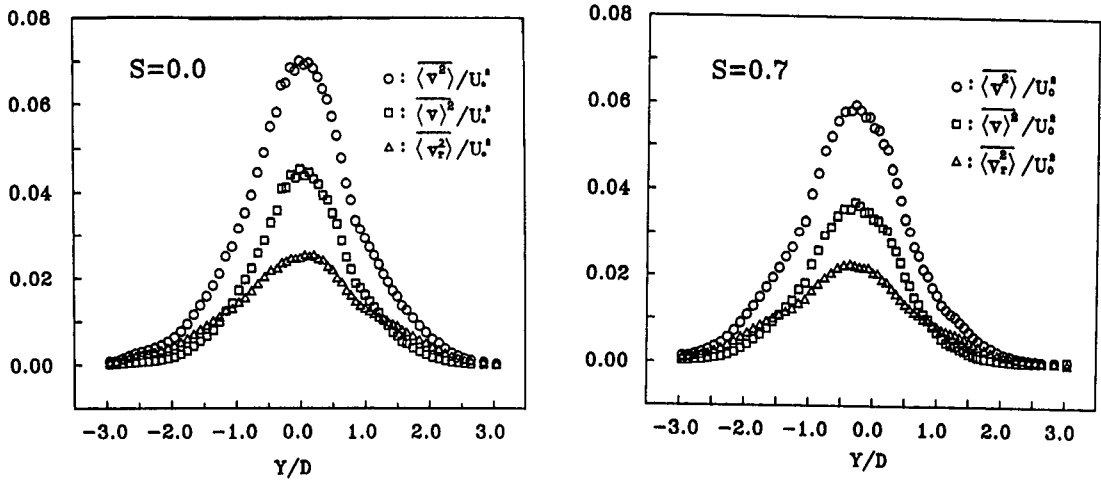


Fig. 14 Distributions of the turbulent energy,  $\langle v^2 \rangle$ ,  $\langle v^2 \rangle^2$ ,  $\langle v^2 r^2 \rangle$

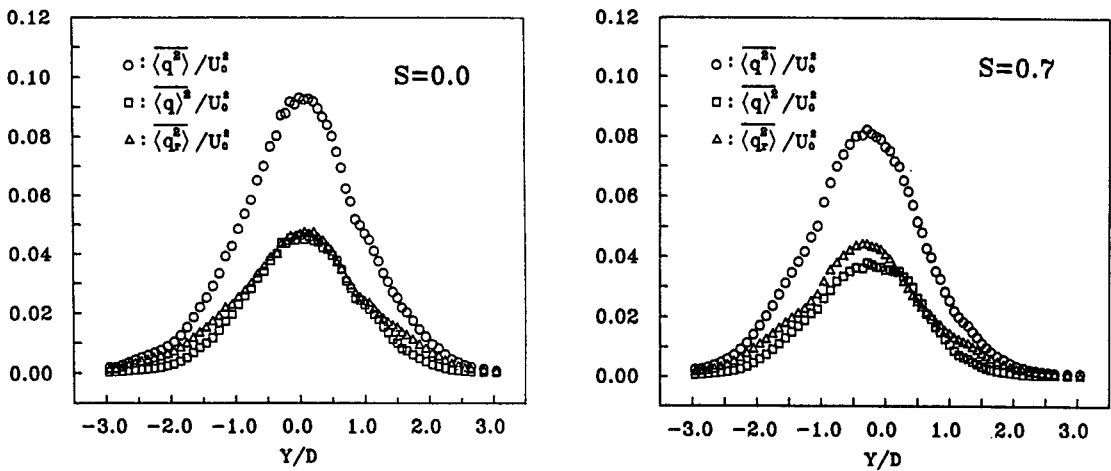


Fig. 15 Distributions of the turbulent energy,  $\langle q^2 \rangle$ ,  $\langle q^2 \rangle^2$ ,  $\langle q^2 r^2 \rangle$

응집와도값이 정지원주에 비해 최대 19% 감소하는 것으로 나타났다. 이에 따라 회전계수가 더욱 커질 경우 응집와가 작고 약해지다가 결국에는 소멸되어 전유동장이 균일난류(homogeneous turbulence)로 접근해 감을 예상할 수가 있다.

Fig. 12의 벡터장분포에서 보면, 각 응집와의 중심은 등와도분포에서의 최대응집와도 위치와 일치하며, 응집와 중심주위를 대칭선 상하에서 각각 서로 반대 방향으로 회전하는 유체를 볼 수 있다. 또한 대규모 응집와의 'Center'와 'Saddle'을 확연히

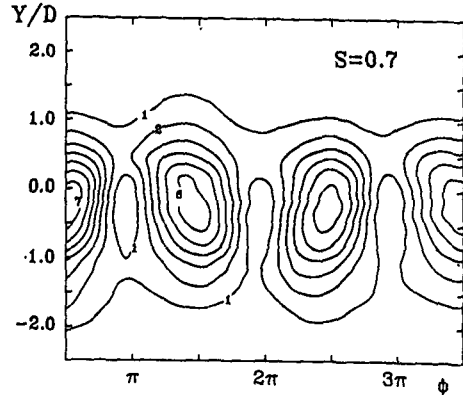
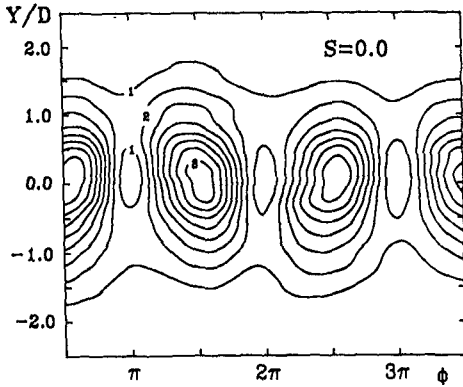


Fig. 16 Contour of the basic fluctuation energy,  $\langle q^2 \rangle / U_0^2 \times 100$

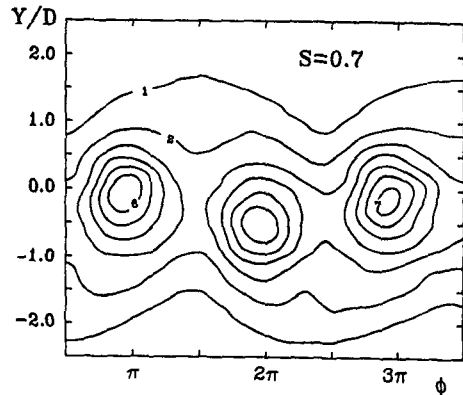
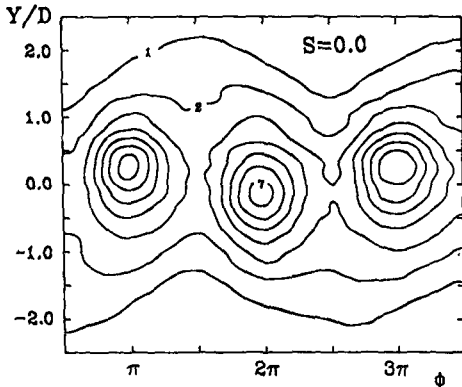


Fig. 17 Contour of the basic fluctuation energy,  $\langle q^2 \rangle / U_0^2 \times 100$

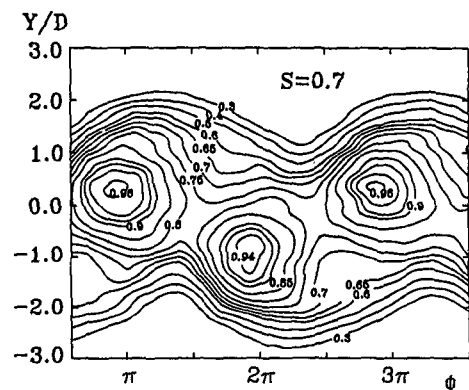
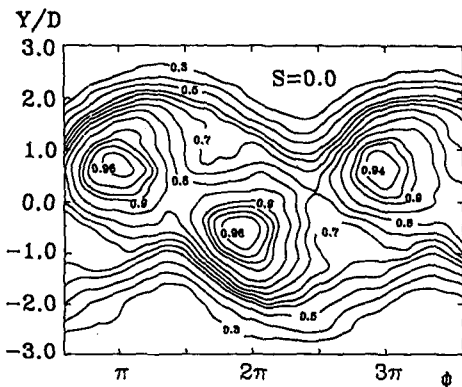


Fig. 18 Contour of the phase averaged intermittency function of turbulence,  $\langle I \rangle$

볼 수 있는데, 'Center'와 'Saddle'은 흐름의 형태를 위상학적으로 나누는 2개의 극점으로서, 'Center'는 최대와도가 발생하는 응집와의 중심이며, 'Saddle'은 최대, 최소 와도에 의해 구성된 응집와의 구조 사이에 있는 것으로, 그림에서 ㉓로 표기하고 주위의 흐름의 방향을 화살표로 나타내었다. 이 'Saddle'은 혼합층에서 난류의 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 근접후류에 있어서 지배적인 위상상관 형태는 이 'Saddle'의 형성 및 발달에 의한 것으로 알려져 있다.<sup>(6,7)</sup>

한편, 원주회전( $S=0.7$ )의 경우는 아직도 대규모 와의 응집구조가 강하게 남아 있음을 알 수 있다.

Fig. 13, 14, 15는 속도변동에 의한 변동에너지의 위상평균량을 평균화처리하여 나타낸 것이다. 원주회전으로 인해 변동에너지의 전체적 분포가 감속측으로 이동되어 분포하고 있으며, 기본구조의 중심적 역할을 하는 기본 변동에너지 크기가 정지원주에 비해  $u$ 변동에너지는 차이가 거의 없고,  $v$ 변동에너지는 최대 22%의 감소를 나타낸다. 또한,  $u$ 변동에너지는 대칭선에 대해 쌍봉구조(bimodal)를 보이고 있으며 회전의 영향으로 가속측에서의 난류에너지값이 감속측보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 13에서 보면,  $u$ 변동은 불규칙 변동에너지가 전체  $u$ 변동에너지의 대부분을 차지하지만, Fig. 14의  $v$ 변동에서는 불규칙 변동에너지가 전체  $v$ 변동에너지에 기여하는 정도가 최대값 기준으로 정지 및 회전원주인 경우, 각각 36%와 58%로 나타나고 있어, 회전의 영향으로 불규칙 변동에너지에 의한 기여정도가 커지고 있다. 한편, Fig. 15의  $u$ 변동에너지와  $v$ 변동ener지를 단순히 합친 형태의 전체 변동에너지 분포에서 보면, 기본 변동에너지와 불규칙 변동에너지가 전 변동에너지에 기여하는 정도는 거의 같게 나타나고 있으며, 원주회전에 의해 전 변동에너지는 최대값 기준으로 12% 감소하고 있다.

Fig. 16, 17은 변동에너지 위상평균량의 Contour를 나타낸 것으로, Fig. 16은 기본 변동에너지, Fig. 17은 불규칙 변동ener지를 각각 정지 및 회전원주에 대해 비교하여 보인 것이다. 에너지의 대부분이 정지원주의 경우는  $-2 < Y/D < 2$ 에 포함되지만, 회전원주의 경우는 회전의 영향으로 가속측의 유체가 감속측으로 편향되어  $-2 < Y/D < 1.5$  안에 포함되고 있으며, 이 경계 밖의 에너지량은 무시할

정도이므로 원주회전의 영향으로 후류내 난류영역이 좁아짐을 알 수 있다. 회전에 의해 에너지의 최대값은 감속측으로 이동하고 있으며, 그 크기는 정지원주에 비해 약해지고 있다. 기본 변동에너지의 최대값은 이웃하는 응집와의 중간에서 나타나며, 불규칙 변동에너지의 최대값은 응집와들의 중심부근에서 나타나고 있다.

Fig. 18은 난류 간헐도함수를 위상평균화한  $\langle I \rangle$ 의 Contour를 나타낸 것이다. 최대값은 역시 최대와도점인 응집와도의 중심에서 나타난다.  $\langle I \rangle = 0.5$ 를 난류영역과 비난류영역을 나누는 경계선으로 하면, 정지원주의 경우  $-2 < Y/D < 2$ , 회전원주의 경우는  $-2 < Y/D < 1.5$ 가 난류영역으로 분류될 수 있다. 이는 앞에서 언급한 변동에너지의 한계와 비슷하고 응집와도의 분포에서 와도영역의 감소현상과 일치하는 것으로 원주회전의 결과이다.

## 5. 결 론

조건부 위상평균법에 의해,  $Re=6.5 \times 10^3$ ,  $X/D=8.5$ 의 균일 유동장에 놓인 정지( $S=0$ ) 및 회전( $S=0.7$ )하는 원주에 의한 난류후류의 대규모 응집구조를 비교, 검토하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 난류후류의 대규모 응집구조를 규명하는데 적합한 조건부 위상평균기법을 개발하였다.
- (2) 회전계수  $S=0.7$ 은 난류후류의 기본구조 변화에 기여도가 적으며, 정지원주에서의 주기성 강한 대규모 응집구조가 아직까지 강하게 나타난다.
- (3) 원주회전의 영향으로 후류중심이 감속부로 편향되고( $Y/D \cong -0.3$ ), 최대속도 결손 10% 감소, 최대 응집와도세기 19% 감소, 전 변동에너지가 12% 감소한다.
- (4) 난류후류영역이 정지원주일 때  $-2 < Y/D < 2$ , 회전원주일 때  $-2 < Y/D < 1.5$ 로서 원주회전으로 난류후류폭이 감속부로 치우치고 그 크기가 좁아지며 응집와의 영역이 축소된다.
- (5) 속도 변동에너지와 난류 간헐도함수의 위상평균분포는 대규모 응집구조의 위상에 상관된 형태를 보이며, 후류유동내의 난류영역 및 크기를 파악할 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Boisson, H. C., Chassainag, P. and Minh, H.

- Ha, 1983, "Conditional Analysis of Intermittency in the near Wake of a Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, 26, 3, pp. 653~658.
- (2) Thomas, R. M., 1973, "Conditional Sampling and other Measurements in a Plane Turbulent Wake," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 57, 3, pp. 549~582.
- (3) Davies, M. E., 1976, "A Comparison of the wake structure of a Stationary and Oscillating Bluff Body, using a Conditional Averaging Technique," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 75, 2, pp. 209~231.
- (4) Wlezien, R. W., 1979, "Techniques for the Experimental Investigation of the near Wake of a Circular Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 17, 6, pp. 563~570.
- (5) Kiya Masaru and Matsumura Masanori, 1985, "Turbulence Structure in Intermediate Wake of a Circular Cylinder," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, 245, pp. 2617~2623.
- (6) Hussain, A. K. M. Fazle and Hayakawa, M., 1987, "Eduction of Large Scale Organized Structures in a Turbulent Plane Wake," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 180, pp. 193~229.
- (7) Cantwell, T., 1983, "An Experimental Study of Entrainment and Transport in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp. 321~374.
- (8) Badr, H. M. and Dennis, S. C. R., 1990, "Unsteady Flow past a Rotating Circular Cylinder at Reynolds Numbers 103 and 104," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 220, pp. 459~484.
- (9) Diaz, F. and Gavalda, J., 1985, "Asymmetrical Wake Generation by a Spinning Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 23, 1, pp. 49~54.
- (10) 谷口清一, 松村昌典, 1989, "一様流中で回転する圓柱の後流構造," 日本機械學會 論文集(B編), 55卷, 509, pp. 41~47.