〈論 文〉

Tripping Wire가 부착된 회전원주에 의한 난류후류의 응집구조

부정숙* · 이종춘**

(1994년 5월 27일 접수)

Coherent Structures of Turbulent Wake Past a Rotating Circular Cylinder with a Tripping Wire

Jung-Sook Boo and Jong-Choon Lee

Key Words: Large Scale Coherent Structure(대규모 응집구조), Conditional Phase Average Technique(조건부 위상평균법), Tripping Wire(걸림선), Vortex Shedding Frequency(와유출주파수)

Abstract

An experimental investigation is conducted to find out the large scale coherent structures in the intermediate wake past a rotating cylinder with a single tripping wire attached. Relation between the vortex shedding frequency and the spin rate of rotating cylinder and the effects of the tripping wire on the flow characteristics were studied by using spectral analysis and conditional phase average technique, respectively. It is found that the vortex shedding frequency is bound to a certain range and varies regularly as spin rate increases. The coherent structures are compared with those of the plain rotating cylinder in the case of spin rate of 1.0. Distance between the upper and lower center of vortices increase and the vortex shedding time is delayed, the velocity fluctuation energy decreases near the center line of vortices and it spreads out to the outer region. The Reynolds shear stress increases highly in the upper region and the turbulent wake width expands with strong entrainment process.

기 호 설 명

D	: 원주직경
d	: Tripping wire직경
$E(f)$	: 파워스펙트럼
f_s	: 와유출 주파수
f_t	: Tripping wire의 회전주파수
I	: 난류간헐도 함수
Re	: 레이놀즈수($Re=U_0D/\nu$)
r	: 원주반경
S	: 회전계수(spin rate$=r\omega_0/U_0$)
S_p	: 무차원 회전주파수($S_p=f_tD/U_0$)
S_t	: 스트로할수(Strouhal number$=f_sD/U_0$)
T_f	: 와유출 주기
$t_{i,j}$	: 데이터추출 시간점
U, V	: X, Y방향 순간속도
U_c	: 와이동속도
U_0	: 자유흐름속도
u, v	: 변동속도
$\langle u\rangle, \langle v\rangle$	: 기본변동속도
u^2, v^2, q^2	: 전변동에너지(total fluctuation energy)
$\langle u\rangle^2, \langle v\rangle^2, \langle q\rangle^2$	: 기본변동에너지
u_r^2, v_r^2, q_r^2	: 불규칙변동에너지
X, Y, Z	: 직교좌표계
ϕ	: 위상각(radian)

*정회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소
**정회원, 대우정밀(주) 기술연구소

ν : 동점성계수
Ω : 와도
ω_0 : 원주의 회전각속도
$\langle\ \rangle$: 위상평균값
$-$: 시간평균값

1. 서 론

Bluff body에 의한 외부유동을 공학적으로 응용하기위해서는 유체역학적으로 효율이 높은 유동제어가 필수적이다. 특히 2차원 원주후류유동은 익형(airfoil)과 같은 공기역학적 물체(aerodynamic body)와 사각주(square)와 같은 날카로운 모서리를 갖는 비공기역학적 물체(non-aerodynamic boby)에 비해 자유흐름속도, 흐름의 형태, 자유흐름 난류강도, 기하학적 조건, 물체 표면조건 등에 따라 박리형태가 변하는 준공기역학적 물체(semi-aerodynamic body)에 의한 유동으로서 이론 및 물리적 현상규명의 주요대상이 되어왔다. 원주후류유동의 제어는 제어영역에 따라 경계층제어, 박리전단층제어, 후류제어로 나눌 수 있고 외부동력 또는 외부유체의 공급유무에 따라 능동제어와 수동제어로 크게 나누어진다. 최근 진행되고 있는 연구들을 살펴보면, 원주의 진동, 흡인 및 분출(suction or blowing), 표면거칠기 조절 및 분리판(splitter plate)의 사용, 음향파 교란, 제어원주, 회전원주, tripping wire 등을 적용한 유동제어를 통해 항력, 양력 등 유체역학적 측면이나 열전달 특성의 향상을 목적으로 하고 있다.[1~11]

본 연구에 관련된 회전원주나 tripping wire를 적용한 이전의 연구결과를 살펴보면 회전원주의 경우, Diaz[6]와 Taniguchi[7] 등이 원주후류의 조직적인 구조가 붕괴되기 시작하는 회전계수의 한계를 정하는 실험을 행하여 Diaz는 회전계수가 1.0을 넘으면 칼만(Karman)와열에 의한 변동성분이 점차 사라지고 불규칙한 성분이 상대적으로 증가하며 2.0을 넘으면 규칙적인 변동은 존재하지 않는다고 지적하고 있으며, Taniguchi 등은 회전계수 0.8까지는 정지원주와 거의 같은 조직적 구조를 보이나 1.7을 넘으면 규칙성은 사라진다고 보고하고 있다. 이밖에 Badr 등[8]은 가시화를 통해 원주회전의 영향을 보이고 수치해석과 비교하고 있다. Tripping wire를 정지원주에 적용한 경우로, Fujita 등[9]이 tripping wire의 크기와 부착위치에 따른 박리제어를 통해 항력계수가 50%까지 감소하며 열전달계수는 20% 증가하는 결과를 보였다. 또한 Igarashi[10] 등은 tripping wire의 개수와 크기, 부착위치, Re 수 변화 등에 따라 제어영역을 3가지로 구분하여 항력계수(C_d)와 Strouhal수(S_t)의 관계를 유도하면서 S_t는 0.3까지 증가함을 보이고 있다. Aiba[11] 등은 tripping wire의 위치를 변화하여 와형성 영역의 길이가 길어지면 원주후면의 열전달이 감소함을 나타내고 있다.

이상의 유동제어에 관한 선행연구에서 보면, 주로 정지된 물체에 관련된 것이 대부분이며 회전 물체를 지나는 유동의 경우는 단순한 회전원주에 국한되어 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 원주표면에 제어원주 역할을 할 수 있는 tripping wire를 부착하고 원주를 회전시키는 유동모델을 적용하였다. 원주의 회전계수에 따른 와유출(vortex shedding)의 특성을 구체적으로 알아보고 일정한 회전계수에서 후류유동장의 응집구조에 관한 비교자료를 제시하고자 한다. 특히 조건부 위상평균법(conditional phase average technique)을 적용하여 보다 타당성있는 물리적 현상규명과 후류구조에 대한 올바른 이해를 통해 대규모 응집구조를 내포하고 있는 난류후류 유동장의 제어가능성을 타진하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 풍동은 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동으로 전체길이가 4950 mm이고 노즐형의 입구단면적은 533×533 mm^{2}이다. 시험구간의 크기는 305 mm(폭)×305 mm(높이)×2300 mm(길이)이며, 최대속도가 30 m/sec이다. 후류를 발생시키는 주원주는 직경(D) 20 mm의 알루미늄 원봉으로 시험구간의 입구에서 870 mm 하류의 단면중심에 위치한다. 교란을 일으키는 tripping wire는 직경(d) 1 mm인 매끈한 스테인레스 원봉으로 주원주의 원주상에 in-line으로 부착되고 직경비(d/D)는 0.05이다. 주원주의 직경기준 시험구간의 종횡비(aspect ratio)는 15.25이고, 폐쇄비(blockage ratio)는 6.56%이다. 시험구간의 입구에는 100 mesh의 스크린을 설치하여 시험구간의 난류강도가 2%의 균일유동이 되도록 하였다. 실험시 유속은 4~8 m/sec이며, 주원주의 직경을 기준으로 한 레

이놀즈수($Re=U_oD/\nu$)는 $5.3\times10^3\sim1.07\times10^4$이다. 원주의 회전은 DC 모터를 이용하였으며 회전변동률은 0.5% 이내이고, 회전계수(spin rate, $S=r\omega_0/U_0$)는 $0.0<S<1.7$의 범위에서 실험하였다. 측정단면은 공학적으로 많은 연구대상이 되고 있는 중간유동영역(intermediate zone)에 속하는 원주중심으로부터 $7D$ 떨어진 하류지점을 택하였다.

속도성분 측정을 위한 센서는 공간 해상도가 좋고 순간유입각이 큰 근접후류영역에서도 난류측정이 정확한 직경 0.15 mm, 감지부길이가 2 mm의 수정봉에 서로 절연되어 있는 두개의 반원 백금막으로 이루어진 split film probe(TSI model 1288)를 이용하여 난류측정의 신뢰도를 높였다. 속도측정을 위해서는 정온형 열선유속계(C.T.A., TSI model 1054A)와 범용파형분석기(D6000, data precision model 611)를 이용하였다. 열선유속계의 bridge를 통한 출력은 5 kHz low pass filter를 거쳐 aliasing을 방지하고 범용파형분석기 장치에서 14 bit A/D 변환된 후 GPIB card(Natioal Instrument Co. PCIIA type)를 통해 PC의 hard disk나 D6000전용 자료저장장치인 data logger(model 681)에 저장된다. 자료의 추출간격(sampling time)은 100 μs(10 kHz)이고 한 측정점에 대해 61,440개의 자료가 통계처리를 위해 사용된다. 측정한 자료는 분석을 위해 오프라인 프로그램에 의해 처리된다. 한편, split film probe의 속도교정실험에서는 상기의 자료처리장치와 함께 압력조절기와 필터가 부착되어 있어 균일한 흐름을 제공해 주는 calibrator(TSI model 1125)를 사용하였다.

본 해석에서 사용되는 좌표계 및 주요기호 정의는 Fig. 1과 같다. 원주의 축에 수직한 면내에서 주류방향을 X축, 이에 수직한 방향을 Y축으로 한다. 원주의 회전으로 인해 원주의 상부는 유체가 가속되고 하부는 감속되므로 이에 의해 가속부와 감속부로 영역을 나눈다. 위상평균 유동장 해석에서 적용한 유동모델은 매끈한 원주가 회전계수 $S=1.0$으로 회전하는 경우와 이에 부가하여 원주표면에 tripping wire 1개를 부착한 경우로서 tripping wire의 개수를 기준으로 하여 전자를 $N=0$모델, 후자를 $N=1$모델로 칭한다.

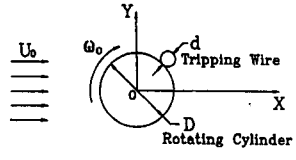


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental configuration and coordinate system

3. 조건부 위상평균법

난류전단유동에서 규칙적인 대규모 응집구조(large scale coherent structure)는 주유동에 수직한 방향으로의 난류유동의 성장, 확산에 기여하고 외부유체의 유입에 중요한 역할은 하는 것으로 알려져 있다. 무질서한 전체 유동속에서 대규모의 응집구조만을 뽑아 상세한 정보해석을 하기 위해서는 위상평균법(phase average technique)과 같은 조건부추출(conditional sampling) 방법의 사용이 필수적이다. 유동장에서 응집구조를 추출하기 위해서는, 지나가는 응집구조를 구별할 수 있는 특성량 즉, 기준신호를 찾아내고 적합한 조건을 정하여 흐름중에서 응집와를 선택적으로 추출해 내야 한다. 선택된 응집와의 신호를 같은 위상에 대해 정렬(phase align)시킨후 이를 ensemble 평균하면 그 지점에서의 위상평균된 정보를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 구한 위상평균 정보는 응집구조의 시간(위상)-공간상의 정보를 담고있기 때문에 유동기구(flow mechanism)를 좀더 정량적이고 구조적으로 파악할 수 있어 단순한 시간평균해석과 구별된다.

위상평균을 하기위한 기준신호의 선정 및 조건의 결정은 실제로 응집구조를 구하는 관건이 되는 것으로 여러가지 방법이 시도되고 있다.[13] 본 해석에서는 Kiya 등[12]이 적용한 각 측정점에서의 속도변동의 Y성분인 V신호를 기준신호로 취한다. 이 방법은 기준신호를 따로 측정하지 않고 위상평균을 취할 신호의 변동성분으로 부터 직접 기준신호를 잡는 방법으로, 기준신호와 측정신호를 따로 취함으로써 생기는 신호왜곡(signal jittering)을 피할 수 있고 응집구조의 와유출주파수(vortex shedding frequency)에 동조된 주기성분을 포함하고 있으므로 기준신호로 적합함을 알 수 있다. 이 기준신호는 와유출주파수 f_s를 중심으로 하는 대역필터(digital band pass filter)에 의해 저주파 및 고주파 성분을 제거하고 정현파에 가까운 형태의 신호(V_f)만 이용한다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 적용한 위상평균의 방법을 도시한 것이다. 위상각 는 기준신호 V_f의 파형이 처음 −에서 +로 바뀌는 점을 '0'으

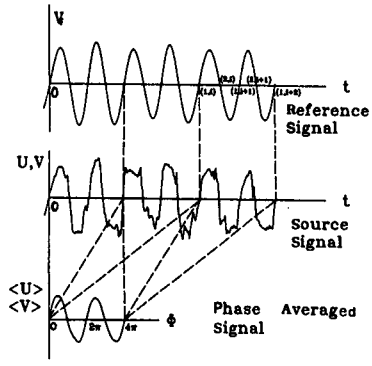


Fig. 2 (a) Definition of the phase average method

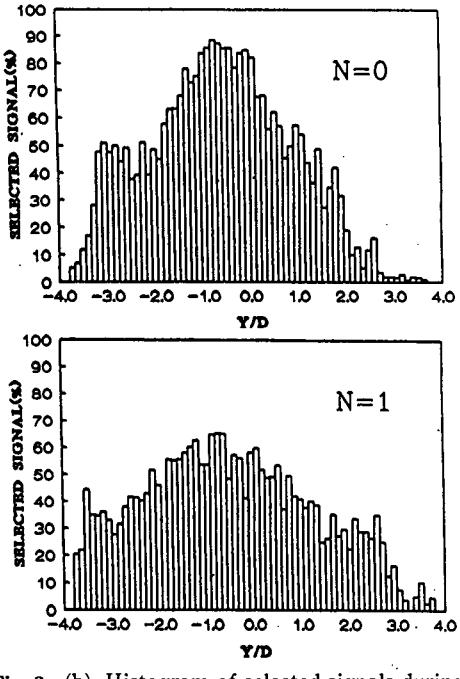


Fig. 2 (b) Histogram of selected signals during conditional sampling

로 하고, 다음 +에서 −로 변하는 점을 'π'의 순서로 한다. 위상평균을 위한 기준시간은 와유출주기의 2배에 해당하는 연속된 2주기 구간(0~4π 구간)인 $(t_{1,i} \le t \le t_{1,i+2})$으로 한다. 기준신호의 위상-시간관계는 식(1)과 같으며 여기서, $t_{1,i}$, $t_{2,i}$는 $t=0$에서 i번째 시간을 나타내는 것으로 $t_{1,i}$는 $V_f=0$, $dV_f/dt>0$인 경우이고, $t_{2,i}$는 $V_f=0$, $dV_f/dt<0$인 경우이다.

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

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

대역필터를 통과한 기준신호 V_f는 연속된 2주기 파장에서 1/2주기씩 다음의 조건을 점검하여 4개의 연속된 1/2주기 파장이 모두 이 조건을 만족하는 신호를 위상평균을 위한 조건신호(conditional signal)로 취한다.

$$0.7T_f \le T_v \le 1.3T_f \qquad (2)$$

여기서, T_f는 와유출주파수의 역수인 와유출주기를 나타내고, T_v는 기준신호 V_f의 주기를 나타낸다. 본 실험에서 측정한 전체신호중에 위의 조건(식(2))을 만족하는 신호의 비율을 측정위치에 따라 $N=0$일 때와 $N=1$인 경우를 비교하여 나타낸 것이 Fig. 2(b)와 같다. 평균적으로 $N=0$일때 43%, $N=1$일때 37%가 위의 조건을 만족하여 기준신호로 이용되었다.

난류변동성분을 포함하고있는 X, Y방향의 순간속도 U, V는 다음과 같이 일반적인 Reynolds decomposition 형태로 표현된다.

$$U=\bar{U}+u$$
$$V=\bar{V}+v \qquad (3)$$

여기서, $\bar{U}$, $\bar{V}$는 시간평균속도이고 u, v는 전체변동속도를 나타낸다. 위상평균을 적용하면 전체변동속도 u, v는 기본변동속도 $\langle u\rangle$, $\langle v\rangle$와 불규칙변동속도 u_r, v_r를 합한 형태로 나타낸다.

$$U=\bar{U}+\langle u\rangle+u_r$$
$$V=\bar{V}+\langle v\rangle+v_r \qquad (4)$$

여기서, u_r, v_r는 기본변동속도에 중첩된 불규칙적인 변동속도로 위상평균화 처리과정에서 $\langle u\rangle=\langle\langle u\rangle\rangle+\langle u_r\rangle=\langle u\rangle$가 되어, u_r, v_r는 소거되고 다음과 같이 된다.

$$\langle U\rangle=\bar{U}+\langle u\rangle$$
$$\langle V\rangle=\bar{V}+\langle v\rangle \qquad (5)$$

$\langle U\rangle$, $\langle V\rangle$는 유동의 기본구조를 나타내는 조직적인 구조(coherent structure)에 관련된 속도성분이고 $\langle u\rangle$, $\langle v\rangle$는 $\langle U\rangle$, $\langle V\rangle$로부터 직류성분을 제거한 값으로 칼만와열에 기초한 변동속도이므로 기본변동속도라 칭한다.

한편, 전변동에너지의 X, Y성분인 u^2, v^2를 위상평균화 처리를 하면 다음과 같이 된다.

$$\langle u^2\rangle=\langle u\rangle^2+\langle u_r^2\rangle$$
$$\langle v^2\rangle=\langle v\rangle^2+\langle v_r^2\rangle \quad (6)$$

여기서, $\langle u\rangle^2$, $\langle v\rangle^2$은 기본변동에너지, u_r^2 , v_r^2는 불규칙변동에너지를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 검토

3.1 회전계수와 와유출주파수

회전하는 원주의 회전속도에 따른 와유출(vortex shedding)의 특성변화를 설명하기 위해 무차원함수인 회전계수(spin rate, S)와 스트로할수(Strouhal number, S_t)를 다음과 같이 정의한다.

$$S=\frac{R\omega}{U_0}=\frac{D/2\times 2\pi f_t}{U_0}=\frac{\pi f_t D}{U_0} \quad (7)$$

$$S_t=\frac{f_s D}{U_0} \quad (8)$$

위의 식에서 f_t는 tripping wire의 회전주파수를 나타내며, f_s는 와유출주파수(vortex shedding frequency)를 나타낸다. Fig. 3은 tripping wire의 부착여부에 따른 속도성분의 주파수특성 변화를 알아보기 위해 $X/D=7$, $Y/D=0$인 지점에서 주속도 $U_0=5$ m/sec($Re=6.7\times10^3$)인 경우의 속도신호, V의 power spectrum을 각각의 회전계수 S에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보면, tripping wire를 부착하지 않은 회전원주($N=0$)의 경우, S가 1.1까지는 와유출주파수 f_s에 해당하는 주파수에서 선명한 peak값을 유지하고 있는데 이는 규칙적인 와유출에 의한 주기적인 유동구조가 지속됨을 의미한다. 한편 $S=1.3$에서는 peak값의 크기가 급격히 감소하고 넓은 주파수 범위에서 power가 분산되어 나타나기 시작하고 있으므로 S가 1.3 이상으로 증가하게 되면 와유출의 주기성이 떨어지고 결국에는 와유출주파수를 구할 수 없는 상태로 됨을 알 수 있다.

Tripping wire를 부착한 회전원주($N=1$)의 경우는 S의 변화에 따라 peak주파수의 변화가 심하고 S의 증가에도 불구하고 선명한 peak주파수를 나타내고 있어 $N=0$인 경우와 대조를 이루고 있는데, 이는 tripping wire의 주기적인 교란이 S가 증가해감에 따라 유동의 주기성을 지배하고 있음을 나타낸다. Fig. 4는 앞의 Fig. 3에서와 같은 방법으로 구해진 peak주파수, 즉 와유출주파수에 의한 스트로할 수와 회전계수의 관계를 나타낸 것으로, Re

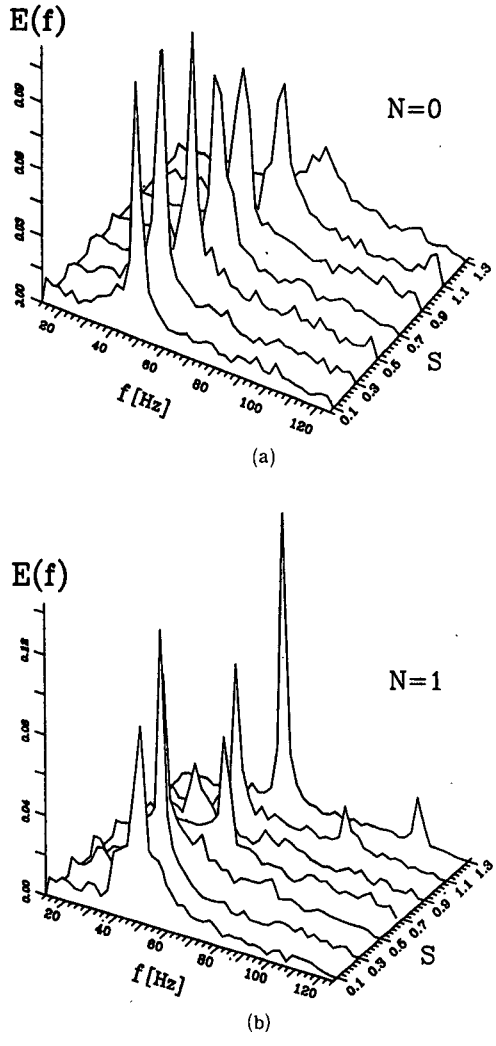


Fig. 3 Power spectrum of lateral velocity at X/D=7.0, Y/D=0.0 and U_0=5 m/sec

수의 영향을 보기 위해 3가지의 주속도 즉, U_0= 4, 5, 8 m/sec($Re=5.3\times10^3$, $6.7.\times10^3$, $1.0.3\times10^4$)를 적용하였다. $N=0$인 경우, S의 증가에 따른 S_t의 변화는 $S<1.0$에서 완만한 증가를 보이다가 $S>1.0$에서는 급속한 증가현상를 보이고 있다. 이는 $S>1.0$인 경우 가속측 영역에서 원주상부 주위의 유속이 원주회전속도보다 크게 되어 와유출주파수가 증가하고 감속측의 와유출주파수도 이에 연동하여 증가하는 것에 기인하는 것으로 생각된다. $N=1$의 경우 S에 따른 S_t의 변화는 다음의 3가지 특정영역으로 나눌 수 있다. 영역 Ⅰ은 $0<S<0.45$, 영역 Ⅱ는 $0.45<S<0.9$, 영역 Ⅲ은 $S>0.9$

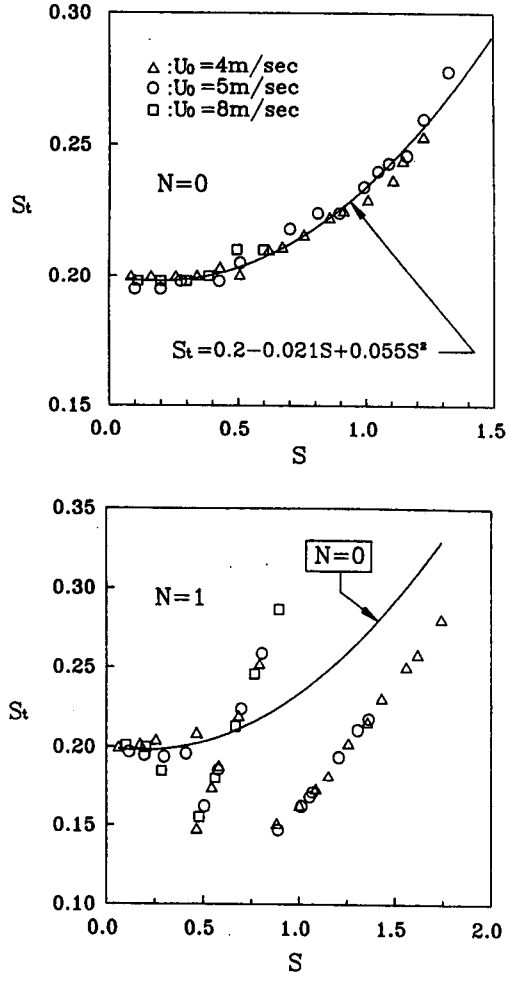


Fig. 4 Comparision of Strouhal number with various spin rate for U_0=4, 5, 8 m/sec

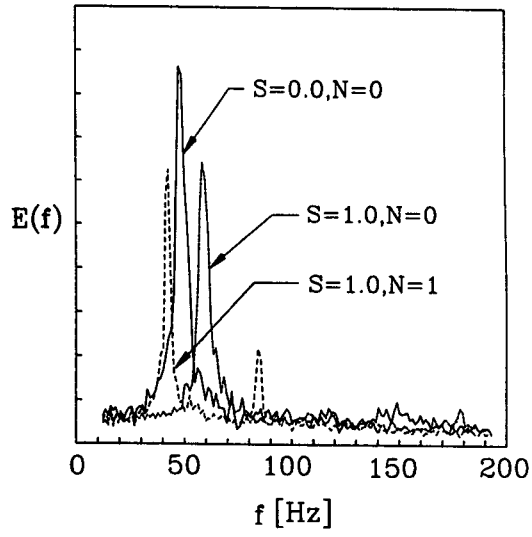


Fig. 5 Variation of power spectrum with each condition for lateral velocity at X/D=7.0, Y/D=0.0

인 경우이다. 영역 Ⅰ은 tripping wire의 회전주파수(f_t)가 와유출주파수(f_s)보다 작은 영역에 해당하는데 이 영역에서는 S_t가 N=0인 경우와 거의 같은 일정한 값을 유지하고 있어서, tripping wire가 회전원주에서 발생되는 와유출 특성을 변화시킬 만큼 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 한편, tripping wire의 회전주파수가 계속 증가하여 $S\approx$ 0.45가 되면 와유출주파수가 tripping wire의 회전주파수와 일치하는데, 이는 tripping wire가 한번 회전할 때에 와유출이 한번씩 일어나는 것을 의미하는 것으로서 tripping wire의 회전에 의한 경계층내에서의 규칙적인 교란(disturbance)이 후류유동의 주기성에 영향을 미치기 시작함을 알 수 있다.

영역 Ⅱ에서는 S의 증가에 따라 S_t가 선형적으로 증가하는데, 이 영역에서는 $f_s=f_t$의 관계가 계속 유지되고 있어서 tripping wire의 회전에 의한 규칙적 교란에 의해 후류유동장의 와유출 주기가 지배되고 있음을 알 수 있다.

영역 Ⅲ에서는 $2f_s=f_t$의 관계가 유지되는 영역으로, 이는 tripping wire가 2번 회전할 때에 와유출이 한번씩 발생함을 의미한다. 또한 Fig. 3에서 이 영역에 해당하는 S에서 spectrum을 보면, S=1.1, 1.3에서 2차 harmonics에서 작은 peak를 보이고 있는데 이는 영역 Ⅱ의 주파수특성($f_s=f_t$)을 약하게나마 지니고 있음을 나타낸다.

이상에서 보면, 회전하는 tripping wire에 의해 와유출주기가 지배되는 영역 Ⅱ, 영역 Ⅲ에서 S_t의 변화범위는 $0.15<S_t<0.3$로서, N=0인 경우의 와유출주파수 범위를 크게 벗어나지 않고 있다. 따라서 tripping wire의 회전이 와유출주기를 크게 변화시키지는 못하고 있으나, 이 영역에서의 와유출주파수는 tripping wire 회전주파수와 일정한 관계가 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 회전계수 S=1.0에서 tripping wire를 부착하지 않은 경우(S=1.0, N=0), tripping wire를 부착한 경우(S=1.0, N=1)와 회전계수 S=0.0인 즉, 정지한 원주에 tripping wire를 부착하지 않은 경우(S=0.0, N=0.0)의 속도 스펙트럼을 주속도 U_0=5 m/sec(Re=6.7×10³)에서 측정하여

비교한 것이다. 그림에서, peak주파수인 와유출주파수를 비교해 보면, 각각 f_s=60 Hz, 42 Hz, 48 Hz로 나타나고 있다. 여기서, f_s=60 Hz는 S=1.0, N=0인 경우로서 앞서 Fig. 4에서 설명하였듯이 가속측 영역에서 원주표면의 주위 유속이 원주의 회전속도보다 크게 되어 와유출주파수가 증가한 것으로 추정된다. f_s=42 Hz는 S=1.0, N=1인 경우로서 tripping wire가 두번 회전할때마다 한번씩 능동적으로 발생하는 와유출의 주파수에 해당한다.

Fig. 5에서 보면, 회전계수 S=1.0에서 tripping wire의 부착여부에 관계없이 peak주파수가 선명한 와유출주파수를 나타내고 있어서, 이를 기준으로 조건부 위상평균법을 적용하여 이 두가지 후류유동구조를 비교 분석하였다.

3.2 위상평균 유동장

위상평균기법을 이용한 유동장 해석에서는 X/D=7, $-3<Y/D<3$ 영역에서 주유동속도 및 회전계수를 U_0=5 m/sec(Re=6.7×10³), S=1.0으로 일정하게 유지하였다.

Fig. 6은 주유동속도의 시간평균분포를 비교해 보기위해 각각의 Y지점에서 조건부 추출된 위상평균신호를 다시 시간평균하여 나타낸 것이다. N=0의 경우는 원주회전의 영향으로 주유동속도가 감속부로 편향되다가 tripping wire의 부착(N=1)으로 다시 중앙선(Y/D=0)쪽으로 이동함을 알 수 있다. 즉, 최대속도 결손($(U_0-\overline{\langle U\rangle})$의 최대치)이 일어나는 후류중심선이 N=0일 때는 $Y/D\fallingdotseq-0.70$이고 N=1일 때는 $Y/D\fallingdotseq-0.35$이며, 이때 최대속도결손은 N=1일 때가 9%정도 크게 나타나고 있다. 또한 후류폭을 나타내는 반폭(속도결손이 최대속도결손의 1/2이 되는 점에서의 후류폭, half width)은 N=1인 경우가 약 15% 크게 나타난다. 이러한 후류폭의 증가는 tripping wire에 의한 유동의 교란, 원주직경의 증대효과($D+2d$)와 박리현상의 변화등에 기인하는 것으로 보인다. 그리고 N=1일때는 가속측 영역 에서의 주유동속도가 N=0에 비해 큰 속도구배를 보이고 있다.

Fig. 7은 위상평균속도($\langle U\rangle$, $\langle V\rangle$)를 후에 설명될 와이동속도 U_c로 이동할 때의 속도벡터($\langle U\rangle-U_c$, $\langle V\rangle$)를 도시한 것이다. 후류중심선 상하에서 각각 서로 반대방향으로 회전하고 있는 응집와를 확연히

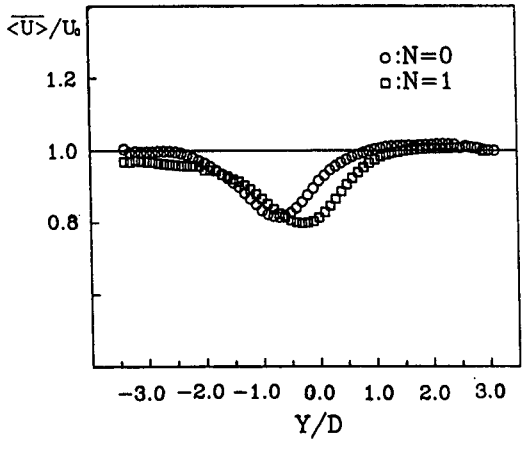
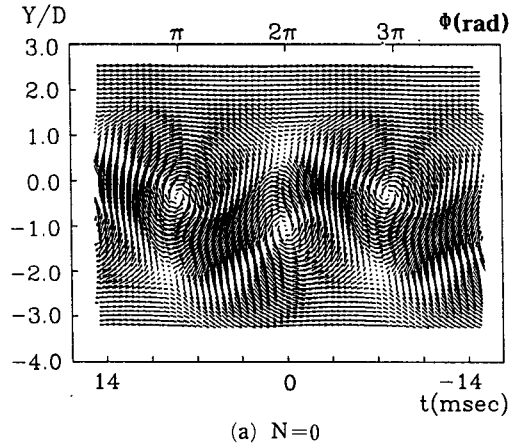
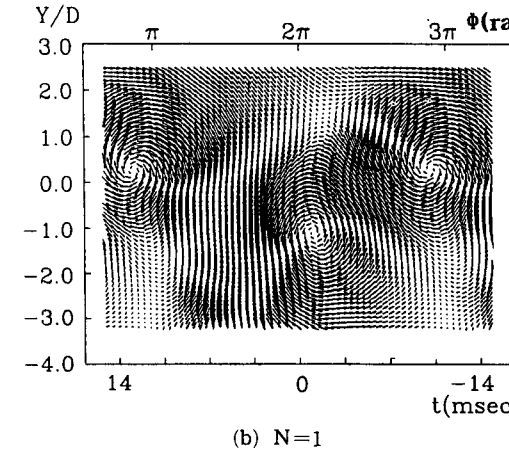


Fig. 6 Distribution of phase averaged velocity, $\overline{\langle U\rangle}/U_0$ across the wake width



(a) N=0



(b) N=1

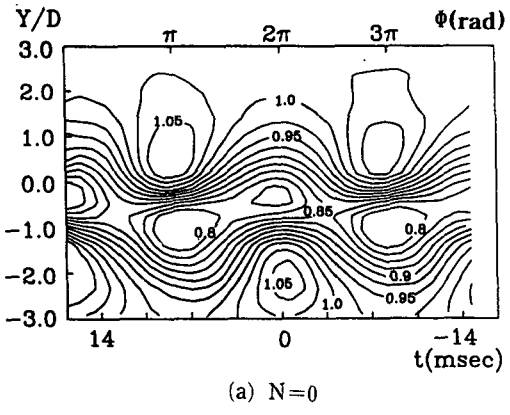
Fig. 7 Velocity vector field,($\langle U\rangle-U_c$, $\langle V\rangle$) of large scale structures

볼 수 있다. 한편, 응집해 있는 상하의 와중심간의 거리(핵간거리)가 $N=0$일 때는 약 $0.75D$, $N=1$일때는 약 $1.3D$이며, 와유출주파수로 계산한 와유출주기가 $N=0$일 때는 16.7 msec, $N=1$일 때는 23.8 msec으로 나타나고 있어, tripping wire의 영향으로 상하간의 와핵 사이가 떨어지고 와유출주기가 길어짐을 알 수 있다.

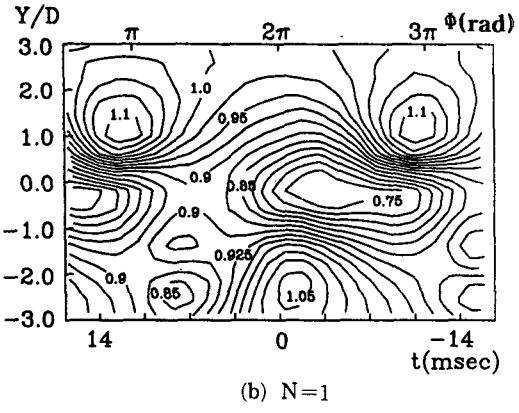
Fig. 8과 Fig. 9은 위상평균속도 $\langle U\rangle$, $\langle V\rangle$를 자유흐름속도 U_0로 무차원화한 등속도선도를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 8의 $\langle U\rangle$분포를 보면, 후류중심선 부근에서는 속도변동이 작지만 응집와의 중심영역에서는 큰 섭동을 갖는 속도형태를 갖는다. 와이동속도 U_c보다 작은 속도층이 상하에 유출된 응집와의 사이에 존재하는데, $N=1$인 경우 이 내부층이 $N=0$에 비해 넓어진다. 내부층의 하부경계는 서로 비슷하지만 상부측의 경계는 $N=1$인 경우가 $+Y$방향으로 옮겨가서 내부층이 넓어지고 있는데 이는 앞에서의 속도벡터분포에서 상하의 와중심간의 범위, ΔY_c가 $N=0$일때 $-1.10<\Delta Y_c<-0.35$이고 $N=1$일 때는 $-1.0<\Delta Y_c<+0.3$인 사실에서 알 수 있다.

Fig. 9의 $\langle V\rangle$분포에서, 원주회전방향의 영향으로 전체유동이 감속부 영역으로 편향되며, 최대값은 이웃하고 있는 응집와의 사이에서 나타나고 있다. $N=0$일때는 후류중심선($Y/D\fallingdotseq-0.7$)에서 부호가 서로 반대인 최대값이 교대로 나타나지만, $N=1$인 경우는 최대값이 후류중심선($Y/D\fallingdotseq-0.35$) 상하영역에서 위상차의 주기로 교대로 발생하고 있다. 특히 음(−)성분의 V의 경우, 후류중심 상부에서의 와회전에 의한 후류 내부로의 유입, 하부의 와회전에 의한 후류 외부로의 유출작용과 함께, 같은 방향으로 회전하는 tripping wire의 영향이 중첩되어 넓은 Y영역에서 $-V$성분이 나타나고 있다. 이상에서 tripping wire의 영향으로 상하의 넓은 Y영역으로부터 후류 내부로 유입이 일어나 활발한 혼합이 발생됨을 알 수 있다.

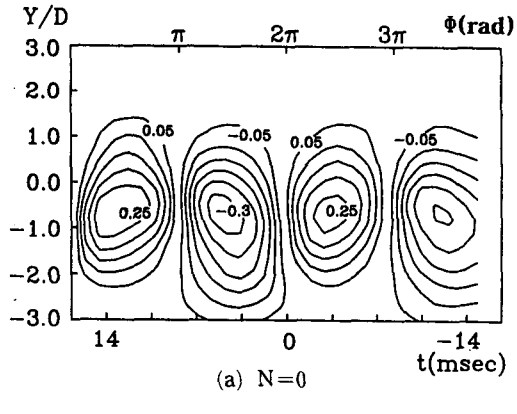


(a) N=0

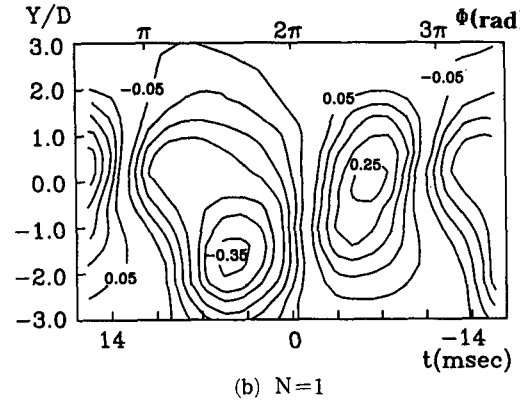


(b) N=1

Fig. 8 Contours of phase averaged streamwise velocity, $\langle U\rangle/U_0$



(a) N=0

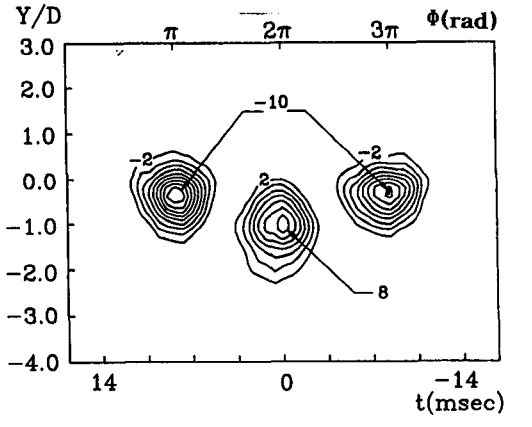


(b) N=1

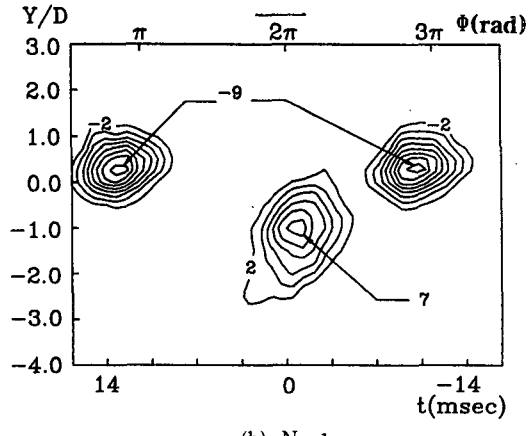
Fig. 9 Contours of phase averaged lateral velocity $\langle V\rangle/U_0$

Fig. 10은 응집와도 $<\Omega>$의 등와도분포를 나타낸 것으로, $<\Omega>=\partial\langle V\rangle/\partial X-\partial\langle U\rangle/\partial Y$를 나타내며, $X=U_c\phi/2\pi f_c$로 변환하여 대입하였다. 여기서 와이동속도 U_c는 응집와 구조의 대류속도를 대표하는 값으로 본 실험에서는 후류중심선 상하의 가속부와 감속부에 유출된 응집와의 중심속도를 구해서 이를 평균화하여 사용하였다. 이러한 방법으로 구한 U_c는 $N=0$일때 $U_c=0.91U_0$, $N=1$일때 $U_c=0.92U_0$로서 비슷한 값을 보여 tripping wire에 의한 응집와의 대류속도변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 등와도분포는 응집와를 중심으로 거의 동심원 구조를 하고 있으며 응집와의 중심위치는 속도벡터에서의 와중심 위치와 일치한다.

원주회전의 영향으로 $N=0$, $N=1$인 경우 모두 최대와도의 크기가 후류중심선 윗쪽에서 나타나고

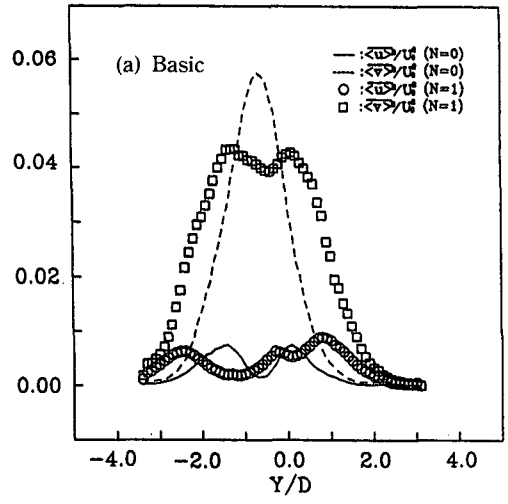


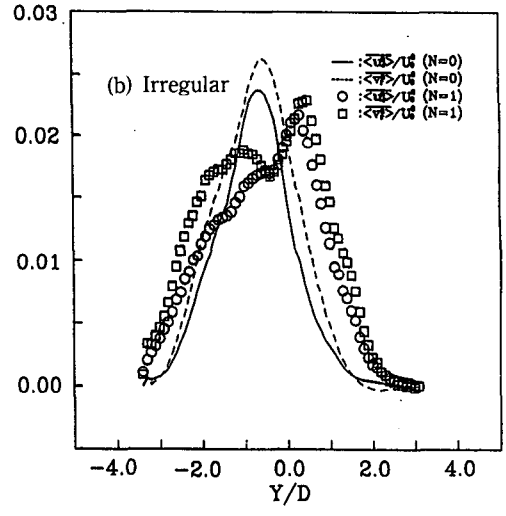
(a) N=0



(b) N=1

Fig. 10 Contours of phase averaged coherent vorticity, $\langle\Omega\rangle\times10$





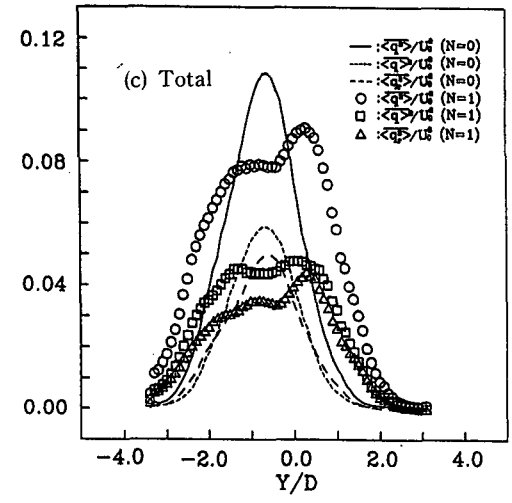


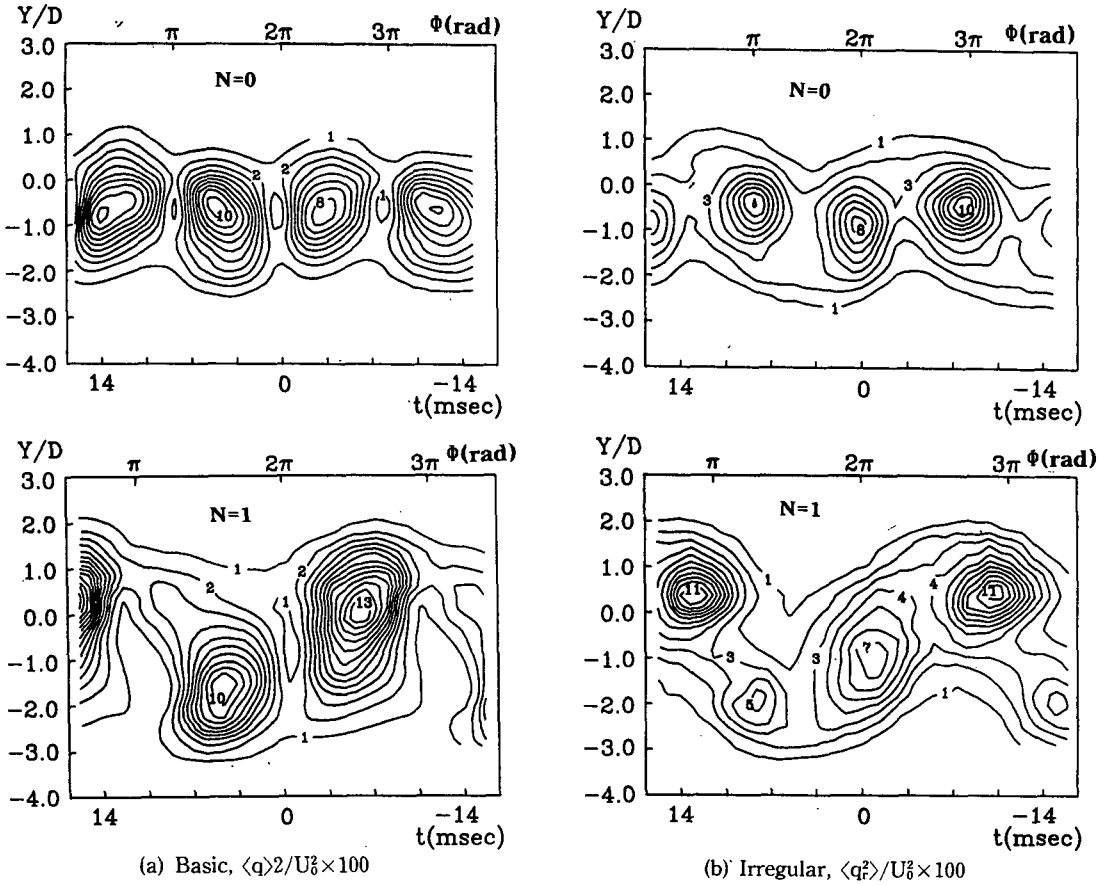
Fig. 11 Distribution of the velocity fluctuation energy

있으며, $N=1$일 때는 tripping wire의 영향으로 와중심의 최대와도가 $N=0$에 비해 감소(약 12%)하고 반면에 응집와 영역은 약간 넓게 변형되어 나타난다. 한편 $N=1$인 경우, 후류중심선 윗측의 응집와는 조직적인 구조를 강하게 유지하고 있으나 아래측의 와는 상대적으로 변형이 크고 와도영역이 확산되어 진다.

Fig. 11는 속도변동에 의한 변동에너지의 위상평균값을 각각의 Y지점에 대해 평균화하여 나타낸 것이다. (a)는 기본 유동구조의 중심적 역할을 하는 기본변동에너지, (b)는 이에 부가된 불규칙 변동성분에 의한 불규칙변동에너지를 u변동과 v변동으로 나누어 비교한 것이다. (c)는 위의 각각에서 u변동에너지와 v변동에너지를 단순히 합친 형태로서 기본변동에너지, 불규칙변동에너지와 전변동에너지를 $N=0$인 경우와 $N=1$인 경우를 비교하여 나타낸 전체에너지 분포이다.

그림 (a)에서 기본변동에너지 분포를 보면, v변동에너지가 u변동에너지에 비해 최대 4배 이상 큰 값을 가지고 있다. 이는 잘 발달된 칼만와에서는 v변동에너지가 큰 비중을 차지하고 있음을 단적으로 보여주고 있다. u변동에너지는 $N=0$일때 vortex shedding에 의한 특유의 쌍봉(bimodal)구조를 하고 있으며, $N=1$에서는 $N=0$일 때보다 넓게 변형된 형태로 가속측 영역에서의 값이 감속측 영역보다 크게 나타나고 있다. v변동에너지는 $N=0$일때 후류중심($Y/D\fallingdotseq-0.7$)에서 peak치를 보이고 반면에 $N=1$일 때는 상하응집와의 중심선인 $Y/D\fallingdotseq-1.0$, $Y/D\fallingdotseq0.3$에서 peak값을 보이는 쌍봉구조를 한다. Tripping wire의 영향으로, 기본변동에너지가 후류내부 영역에서는 약해지며, 바깥영역에서는 오히려 $N=0$에 비해 높은 수준의 에너지값을 보이고 있다.

그림 (b)에서 불규칙변동에너지는 $N=0$, $N=1$



(a) Basic, $\langle q\rangle 2/U_0^2\times100$ (b) Irregular, $\langle q_r^2\rangle/U_0^2\times100$

Fig. 12 Cotours of velocity fluctuation energy

일때 u변동에너지와 v변동에너지가 각각 비슷한 분포와 크기를 하고 있다. Tripping wire에 의해 후류내부에서의 에너지 감소와 바깥영역으로의 에너지 확산현상은 기본변동에너지와 같으나, 감속부보다 가속부 영역이 보다 높은 에너지 수준을 보이고 최대값은 상부 응집와의 중심인 $Y/D \fallingdotseq 0.3$에서 나타난다.

이상에서 기본변동에너지와 불규칙변동에너지를 비교해보면, u변동에너지는 불규칙변동에너지가 2배 이상 큰 반면, v변동에너지는 기본변동에너지가 2배 이상 크게 나타나고 있어, u변동에너지와 v변동에너지를 단순히 합친 형태의 전체 변동에너지 분포를 나타낸 그림 (c)에서 보면, 기본변동에너지와 불규칙변동에너지가 전체변동에너지에 기여하는 정도는 $N=0$ 및 $N=1$일때 각각 약 55%, 45%로서 거의 비슷함을 알 수 있다.

그림 (c)의 전체에너지 분포에서 후류 내부층 부근인 $-1.4 < Y/D < -0.2$에서의 변화를 보면, $N=0$인 경우는 후류중심선인 $Y/D \fallingdotseq -0.7$에서 최대치가 나타나는 형태이지만, $N=1$인 경우는 거의 일정한 값을 유지하면서 $N=0$에 비해 낮은 변동에너지를 나타내는데 전변동에너지, 기본변동에너지, 불규칙변동에너지가 $N=0$의 최대값에 비해 약 30%씩 감소되고 있다.

한편 이 영역 바깥에서는 그림 (a), (b)에서 설명하였듯이 오히려 $N=1$일때 더 강한 변동에너지를 보이고 있는데, 이는 $N=0$인 경우는 근접해 있는 응집와의 회전으로 인한 강한 변동에너지 성분이 후류중심에 집중하여 높은 peak치를 보이지만, $N=1$일때는 $N=0$에 비해 상대적으로 떨어져 있는 응집와로 인해 변동에너지의 세기가 넓은 영역으로 확산되어 나타나는 결과이다. $N=1$일 때는 불규칙변동에너지의 작용으로, 같은 에너지 수준을 보이는 지점이 감속측보다 가속측으로 더 넓혀져 있고 변동에너지의 최대값은 상부 응집와의 중심선에 해당하는 $Y/D \fallingdotseq 0.3$ 지점에서 나타난다.

Fig. 12는 위상평균한 변동에너지의 contour를 보인 것으로 (a)는 기본변동에너지 (b)는 불규칙변동에너지를 각각 나타낸다. 에너지의 대부분이 $N=0$일때는 $-2.5 < Y/D < 1.0$ 부근에 포함되어 있고, $N=1$일 때는 $-3.0 < Y/D < 2.0$ 부근에 포함되고 있어서, tripping wire의 영향으로 인해 난류에너지를 갖는 후류의 폭이 감속측으로 약 $0.5D$ 가속측으로 약 $1.0D$ 정도 넓어진 형태를 보인다.

기본변동에너지는 이웃하는 응집와 사이에 동심원 모양으로 분포하는데, $N=0$일 때는 최대값이 후류중심축에서 연속적으로 발생되어 에너지가 이 곳에 집중되어 있다. 반면에 $N=1$의 경우는 최대값이 $N=0$일 때보다 큰 값을 나타내지만 상하로 늘어진 동심원 형태로 최대값 발생지점이 후류중심축의 상하에 교대로 분포하여 에너지가 한 곳에 집중되지 않고 상하로 분산되어 있다. 이는 Fig. 11에서 설명한 변동에너지의 분포형태 및 크기에 관한 내용을 잘 뒷받침해 주고 있다. 불규칙변동에너지는 응집와의 중심에서 최대값을 갖는 동심원구조를 하며 $N=1$일때 후류중심의 상부는 $N=0$보다 중심에너지가 큰 조직적 구조를 유지하지만 하부에서는 상부에 비해 응집강도가 약해지고 분산된 구조를 보인다.

Fig. 13은 전변동성분에 의한 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress)의 위상평균을 각각의 Y지점에서 시간평균한 것을 나타낸다. 유동의 전단작용(shearing action)은 $N=0$, $N=1$ 모두 변동에너지 분포에서 언급한 난류후류 내에서 일어나고 있으며, $N=0$인 경우는 원주회전에 의해 유동이 감속측으로 편향되어 가속측에서는 전단영역이 줄어들고 크기가 감소한 반면 감속측 유동에서는 전단영역이 넓어지고 높은 전단응력 수준을 보인다. 반면에 $N=1$인 경우는 앞서 변동에너지가 후류중심의 상부영역에서 큰 값을 나나낸 것과 같이 전단응력 또한 이 영역에서 $N=0$에 비해 최대값 기준 4

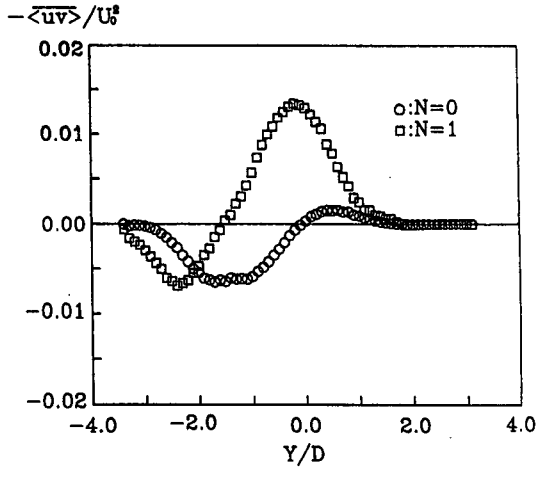
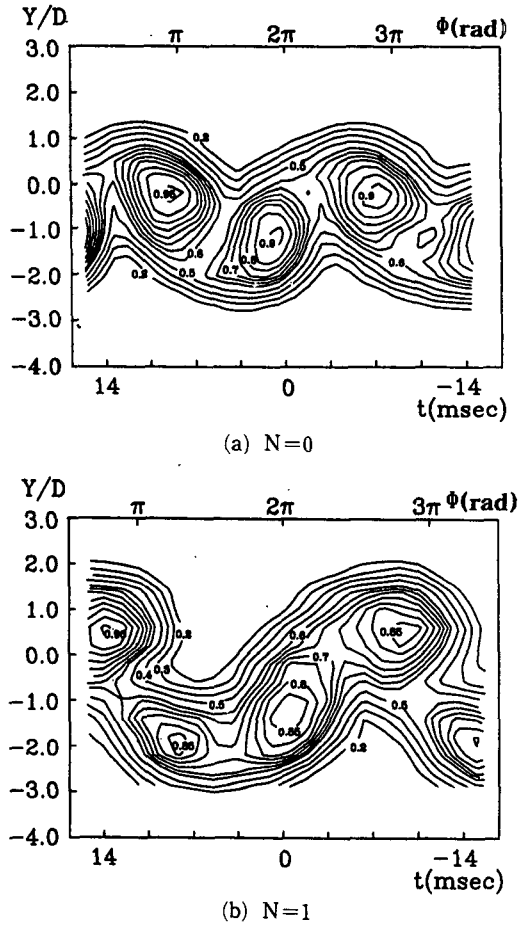


Fig. 13 Distribution of phase averaged Reynolds stress across the wake width

배이상 증가된 높은 수준을 보이고 하부영역에 비해 높은 값을 보인다. 이는 tripping wire가 시계방향으로 회전하면서 유동에 가하는 교란에 의해 후류중심선 상부의 비난류 영역으로부터 유입의 증대 및 응집와 사이의 상호작용에 따른 변동성분의 증가에 의해 큰 전단응력을 생성하는 것으로 보인다.

Fig. 14는 난류간헐도함수(turbulent intermittency function, I)의 위상평균 contour $\langle I\rangle$를 나타낸 것이다. 함수 I는 $(dU_h/dt)^2$의 짧은시간 평균이 주어진 문턱값(threshold)보다 큰 경우는 $I=1$, 작은 경우는 $I=0$로 정의한다. 여기서, U_h는 속도성분 U를 와유출주파수의 2배를 절단주파수로 하여 high pass filtering한 고주파 성분이다. 여기서 평균화시간 및 문턱값의 선정은 임의성을 갖는 것으로 직접 U_h와 난류간헐도함수를 비교, 대응하여 U_h의 난류, 비난류를 적절히 판별할 수 있도록 결정해야 한다. 본 실험에서는 평균화시간을 와유출주기의 1/10로 하였으며 문턱값은 전체 측정점에서 $(dU_h/dt)^2$ 평균값의 15%로 정하였다.



(a) N=0

(b) N=1

Fig. 14 Cotours of phase averaged intermittency function of turbulence, $\langle I\rangle$

난류간헐도함수의 분포를 보면, 앞서 설명한 변동에너지의 위상평균 contour에서의 난류후류영역과 일관성을 보이고 또한 응집와의 중심지점에서 최대값을 갖는 동심원구조를 나타내고 있어 난류간헐도함수 분포를 통해 난류영역의 상대적 범위 및 크기, 응집와의 중심위치, 회전 및 비회전유동의 영역 등을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 전체적인 분포는 불규칙변동에너지의 분포(Fig. 12(b))와 유사한 형태를 하고 있으며, tripping wire에 의해 난류성분을 갖는 후류폭이 커지면서 난류영역이 확장되고 난류경계선이 $N=0$에 비해 큰 섭동을 갖고 움직이고 있어 넓은 Y영역으로부터 후류내부로의 유입이 강하게 일어남을 확인할 수 있다.

4. 결 론

균일유동장에 놓인 tripping wire가 부착된 회전하는 원주에 의한 난류후류의 대규모 응집구조를 파악하기위해 주파수분석을 통한 회전계수와 와유출주파수의 관계를 해석하고, 또한 회전계수가 1.0일때의 유동을 조건부 위상평균법에 의해 tripping wire를 부착하지 않은 경우와 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 회전계수가 낮은 범위에서는 와유출주파수가 tripping wire의 영향을 적게 받지만, 일정한 회전계수 이상에서는 tripping wire의 회전에 의한 주기적인 교란주파수와 와유출주파수가 일정한 관계를 갖는다. 이때 회전계수 증가에 따른 와유출주파수는 일정범위내($0.15<S_t<0.3$)에서만 변화하며, 회전계수에 따른 와류유출의 주기성에 상당한 변화가 발생되므로 tripping wire의 회전을 이용하여 난류후류 유동장을 능동제어할 수 있는 기초를 제공한다.

(2) 회전계수 $S=1.0$으로서 시계방향으로 회전하는 tripping wire에 의한 주기적인 교란의 결과, tripping wire를 부착하지 않는 경우에 비해, 응집와의 상하 핵간거리가 길어지고 와유출주파수가 감소한다. 또한 tripping wire의 영향으로 후류중심이 가속부 방향으로 이동되고, 후류중심에 집중되

던 변동속도에너지가 넓은 Y영역으로 분산되어 나타나며 최대값이 상부 응집와의 중심에서 발생된다. 또한 가속측에서 전단응력이 크게 증가하고 난류후류 폭이 넓어진 형태를 보인다. 특히 tripping wire의 회전에 의해 후류중심의 넓은 y영역에서 유입이 강하게 일어나 후류내부에서의 활발한 혼합을 주도한다.

참고문헌

(1) Nakamura, Y. and Tomonara, Y., 1982, "The Effect of Surface Roughness on the Flow Past Circular Cylinder at High Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 363~378.

(2) Igarashi, T., 1985, "Effect of Vortex Generator on the Flow around a Circular Cylinder Normal to Air Stream," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, 236, pp. 274~282.

(3) Igarashi, T. and Tsutsui, T., 1991, "Flow Control around a Circular Cylinder by a New Method," *JSME*, Vol. 57, 533, pp. 8~13.

(4) Sakamoto, H. and Haniu, H., 1991, "Control of Fluid Forces Acting on a Circular Cylinder and its Effectiveness," *JSME*, Vol. 57, 535, pp. 882~890.

(5) Achenbach, E. and Heinecke, E., 1981, "On Vortex Shedding from Smooth and Rough Cylinder in the Rage of Reynolds Numbers 6×10^3 and to 5×10^6," *J. Fluid Mech.*, Vol. 109, pp. 239~251.

(6) Diaz, F. and Gavalda, J., 1985, "Asymmetrical Wake Generation by a Spinning Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 23, 1, pp. 49~54.

(7) 谷口清一, 松村昌典, 1989, "一様流中で 回轉する 圓柱の 後流構造," 日本機械學會論文集(B編), 第55卷, 第509號, pp. 41~47.

(8) Badr, H. M. and Dennis, S. C. R., 1990, "Unsteady Flow Past a Rotating Circular Cylinder at Reynolds Numbers 10^3 and 10^4," *J. Fluid Mech.*, Vol. 220, pp. 459~484.

(9) Fusita, H. and Takahama, H., 1985, "Effect of Tripping Wires on Heat Transfer from a Circular Cylinder in Cross Flow," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, 235, pp. 80~87.

(10) Igarashi, T., 1986, "Effect of Tripping Wires on the Flow around a Circular Cylinder Normal to Air Stream," *Bulletin of JSME*, Vol. 29, 255, pp. 2917~2924.

(11) Aiba, S., 1991, "Heat Transfer around a Circular Cylinder with a Single Tripping Wire," *JSME*, Vol. 57, 536, pp. 1371~1378.

(12) Kiya, M. and Matsumura, M., 1985, "Turbulence Structure in Intermediate Wake of a Circular Cylinder," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, 245, pp. 2617~2623.

(13) Hussain, A. K. M. F. and Hayakawa, M., 1987. "Eduction of Large Scale Organized Structures in a Turbulent Plane Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 180, pp. 193~229.