

## 회전하는 원주후류의 2차원 난류구조\*

부정숙\*\* · 김경천\*\*\* · 류병남\*\*\*\*

## Turbulent Wake Structure Behind a Spinning Circular Cylinder

J. S. Boo, K. C. Kim, B. N. Ryu

## Abstract

The coherent wake structures behind a spinning cylinder placed in a uniform flow were experimentally investigated by means of phase averaging technique. With a fixed cylinder Reynolds number ( $Re=6,600$ ), the conditionally sampled velocity vectors were obtained at a section of 3.0 and 10 diameters behind the cylinder for the range of spin parameter  $S$  (the ratio of the peripheral velocity to that of the uniform flow) 0 to 2.

Spectral analysis and vorticity contours of the velocity data show that up to  $S=1.2$ , a Karman vortex street exists within the wake, however, the coherent structures become obscure and their vorticity strength decreases as  $S$  increase. Beyond  $S=1.2$ , a distinct vortex shedding frequency no longer exists, furthermore coherent structures disappear when  $S$  is over 1.6.

## 기 호 설 명

|            |   |           |   |
|------------|---|-----------|---|
| $d$        | : 실린더 직경                                | $Re$      | : 레이놀즈 수 ( $Re=U_0 d/\nu$ )             |
| $E(F)$     | : 파워 스펙트럼 밀도함수                          | $R(\tau)$ | : 자기상관 계수 (autocorrelation coefficient) |
| $f_s$      | : 와류 유출 주파수 (vortex shedding frequency) | $S$       | : 회전 파라미터 (spin parameter)              |
| $F$        | : 주파수                                   | $S_t$     | : 스트로할 수 ( $S_t=f_s d/U_0$ )            |
| $n$        | : 원주의 시간 평균 회전수                         | $U_0$     | : 균일한 주류 속도                             |
| $\Delta n$ | : 회전수 편차                                | $U, V$    | : x, y방향의 시간 평균속도                       |
|            |   | $u, v$    | : x, y방향의 속도 변동                         |
|            |   | $u', v'$  | : 불규칙한 속도 변동 성분                         |

\* 이 논문은 1990년도 교육부 지원 한국예술진흥재단의 지방대 육성 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

\*\* 정회원, 부산대학교 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 생산기계공학과

\*\*\*\* 현대중공업 연구소

- $\tilde{u}, \tilde{v}$  : 순간 유동 속도
- $\sqrt{\tilde{u}^2}, \sqrt{\tilde{v}^2}$  : u, v의 r. m. s. 값
- $\langle u \rangle, \langle v \rangle$  : 위상 평균 속도
- x, y : 좌표계
- $\nu$  : 공기의 동점성 계수
- $\theta$  : 위상각( $\pi$ )
- $\tau$  : 지연 시간
- $\langle \omega_z \rangle$  : 위상 평균에 의한 코히어런트 와도( $\Delta \langle u \rangle / \Delta y$ )

## 1. 서 론

정지된 원주에 비해 후류구조에 많은 변화를 야기시키는 회전하는 원주 주위의 유동에 관한 연구는 비교적 오래전부터 연구되어 왔지만, 그 대상은 매우 작은 레이놀즈수의 경우 내지는 포텐셜 유동 문제와 관련된 연구들이다<sup>1,2)</sup>. 높은 레이놀즈수에 대한 본격적인 난류 후류 유동에 관한 연구는 비교적 최근에 시작되었으며<sup>3)</sup>, 후류의 난류구조에 대한 연구는 극히 최근에 시작되었을 뿐 아니라 연구의 수행도 미미한 상태이다<sup>4)</sup>. 이러한 형태의 유동은 학문적 입장에서 흥미로울 뿐 아니라, Flettner rotor나 Magnus 효과를 이용하는 풍력 발전 장치에는 바로 이러한 유동장이 형성되므로 공학적 및 산업적 응용의 측면에서도 중요성을 가진다<sup>5)</sup>.

정지된 원주의 후류유동에 비해 회전하는 원주의 후류는 원주표면의 원주속도가 존재함으로써 정체점의 위치와 원주주위의 경계층이 비대칭을 이루게 되며 이로 인한 와류출의 베카니즘이 완전히 달라지므로 균일 유동속도에 대한 원주속도의 비, 즉 회전 파라미터(spin parameter, S)가 대단히 중요하다. Diaz 등<sup>3)</sup>은 열선풍속계의 측정과 스펙트럼 해석으로부터 S가 1.0을 넘으면 칼만와열(Karman vortex street)에 의한 정현파상의 속도 변동이 점차 붕괴하여 랜덤한 성분이 상대적으로 증가하고, S가 2.0을 넘으면 후류에는 더이상 규칙적인 와가 존재하지 않는다고 주장했다. 한편, Taniguchi 등<sup>4)</sup>은 보다 체계적인 실험을 통하여 S가 0.8까지는 정지원주와 거의 같은

구조의 코히어런트 구조가 존재하고, S가 1.7을 넘으면 후류의 규칙성이 사라진다는 결과를 발표하였다.

난류경계층 또는 후류등의 난류장은 유동이 완전히 교란되어 있는 것이 아니고 그 중에는 조직적인 구조가 존재하는 것으로 파악되어 왔다. 특히, 칼만와열과 같은 주기적 변동을 갖는 유동장에 대해서는 조건부 추출법(conditional sampling)에 의한 위상 평균법이 쉽게 적용되며, 이 방법을 이용한 성과<sup>6,7,8)</sup>가 많이 발표되고 있다.

본 연구는 균일한 유동장에 놓인 회전하는 2차원 원주후류구조에 대해서 회전파라미터의 변화에 의해서 칼만와열의 형성에 의한 조직적 구조가 어떠한 변형을 이루고 소멸되는가를 시간평균과 위상평균법을 도입한 실험으로 규명할 것이다. 특히 조건부추출법에 의한 위상평균으로 코히어런트 구조의 특성을 보다 분명히 밝히고 아울러 후류의 코히어런트 구조가 특정한 S값에서 급격히 붕괴되는 현상을 정량적인 분석을 통하여 고찰하고 타당성있는 물리적 원인을 유추해보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

균일 유동이 회전하는 원주를 지날때 형성되는 유동장에 대한 개념도가 Fig. 1에 나와있다. 여기서 x와 y는 각각 유동방향과 x에 대한 수직 방향이고, 좌표의 원점은 회전 원주 중심이다. Fig. 2는 회전하는 원주 장치이다. 원주 모델은 직경이 25mm인 알루미늄제이며 표면은 매끈하게 연마되어 있고, 개회로 소형 풍동의 시험구간(305mm×305mm) 중심에 수직으로 설치되어 있다. 실린더의 길이 내 직경비는 12.2로써 벽면효과<sup>14)</sup>는 약간 있으나 회전의 영향에 비하면 무시할 수 있으며 후류는 2차원으로 취급될 수 있다. 원주는 풍동 양벽에 상하로 베어링으로 고정되어 있고 아래쪽 축이 타이밍 벨트로 가변속 DC모우터에 연결되어

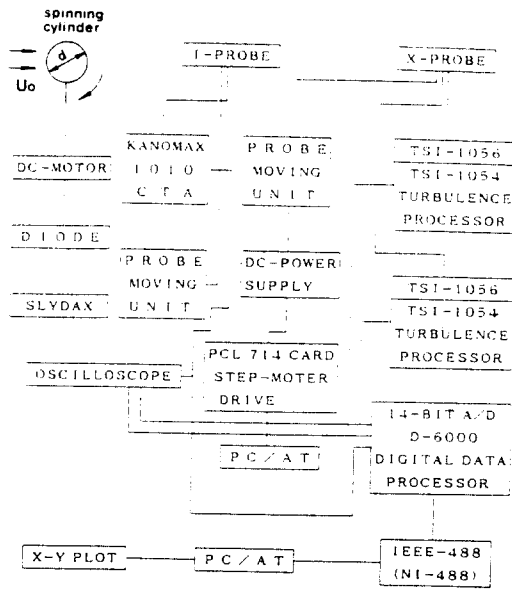


Fig. 1 Schematic diagram of wake flow behind a spinning circular cylinder and measuring system.

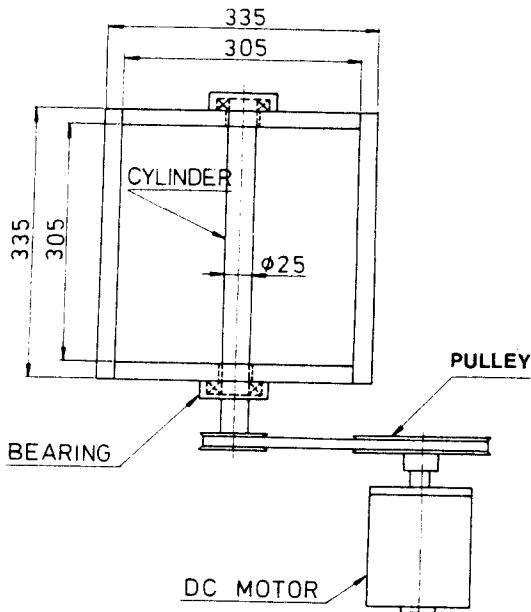


Fig. 2 Schematic diagram of the test section and DC motor.

있으며, 원주 회전수는 슬라이탁스의 전압을 변화하여 DC모터의 전압 조정으로 제어된다. 회전수의 범위는 0~8000rpm까지 조절가

능하고, 회전 변동율은  $\Delta n/n < 0.4\%$ 이다. 그리고 원주속도는 자유흐름속도의 약 2.5배 까지 변화시킬수 있다.

## 2.2 실험방법

자유흐름의 속도는 4m/s로 고정하였고 이때 적경기준 레이놀즈수는 약 6,600 정도이다. 그리고 회전원주는 시계방향으로 회전하고 있으므로 주류속도에 의하여 윗부분은 주류 속도와 같은 방향의 속도가 되어 증속이 될 것이고(증속측), 아랫부분은 그 반대방향의 속도가 되어 감속이 된다(감속측). 난류순간속도의 측정에는 TSI 1052 및 KANOMAX 7224 정온열선풍속계를 사용하였다.  $x=2d$ ,  $y=2d$  근방의 위치에는 위상평균을 위한 기준신호를 얻기위해 I-형 열선 프로우브를 위치시켰고,  $x=10d$ 의 위치에서는 수평 중심선을 따라 흐름방향과 직각 방향인 y방향으로 순간속도를 X-형 프로우브로 측정하였다. 프로우브의 교정은 Yaw Test를 거친 다음, 풍동내부에서 본 실험실에서 개발한 온라인 교정프로그램<sup>9)</sup>에 의해 실시되며, 이때 구해진 교정곡선을 데이터 획득에 곧바로 적용시켜 교정오차를 최소화 하였다. 정온열선 풍속계로부터 나오는 아날로그 신호는 10kHz의 low-pass filter를 통과시킨후 D6000 범용 파형분석기의 3채널에 연결하여 동시에 14bit로 A/D 변환시키고 각 측정점당 4,096개씩 20번을 취한 디지털데이터를 초당 10,000개의 표본율로 획득한후 GPIB를 거쳐 IBM-PC/AT의 하드디스크에 저장한다.

데이터의 처리는 오프라인으로 실시하였다. 위상평균을 위한 속도 신호의 조건부 추출 방법은 먼저 기준신호를 FFT분석을 하여 와류 유출 주파수를 판정한후 모형 정현파를 발생시키고 다시 이를 기준신호와 비교하면서 동기여부를 판별한다. FFT 분석에는 기준 신호의 사용 여부를 판정하는데 데이터 한 파일(데이터 갯수 4,096)을 각 주기마다 최대점과 최소점을 선별하여 한 파일의 여러 주기 동안 각 최대값과 최소값이 지정된 주기의 범위안에 들 때, 그 파일을 기준신호로 선정하였다. 이 과

정에서 구한 주기가 예상되는 와류 유출 사이클 범위를 벗어날 경우에 해당 데이터 파일은 위상평균에서 제외시켰다. 선정된 기준신호는 각주기에 대하여 32등분하여 각 위상별로 난류 순간 속도값을 추출해서 따로 정리하고 각 위상에 따른 앙상블 평균을 취하여 속도벡터의 위상평균값을 구했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 난류강도

Fig. 3은  $x/d=3$ 에서 각각 시간평균에 의한 와류변동의  $u$  성분과  $v$  성분에 대한 난류강도를 회전파라미터의 변화에 따라서  $y$  좌표에 대해서 나타낸 것이다.  $S=0.8$ 에 관해서는 난류강도의 크기 및 분포형상은 2차원 정지 원주 ( $S=0$ )의 경우와 유사하다. 회전 파라미터  $S$ 가 0.8을 넘어 1.2가 되면, 각 난류강도값은

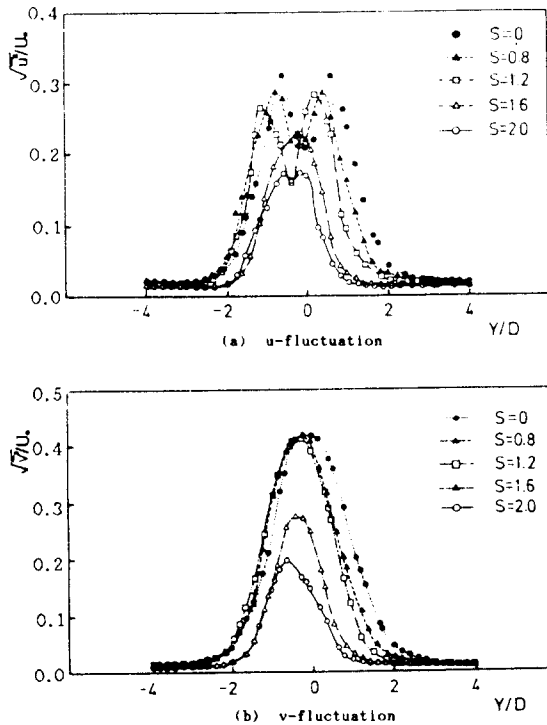


Fig. 3 Distributions of turbulent intensity for spin parameter  $S$  at  $x/d=3$ .

전체적으로 약간 저하하지만 그 분포형상에는 거의 변화가 없다. 이것은  $S>1.2$ 이 되면 원주표면에 형성된 회전 유체층의 증가등으로 인해서 칼만와열의 형성 과정에 본질적 변화가 있는 것을 지적하고 있다. 그러나 원주의 회전이 난류강도의 크기에 주는 영향은 난류강도의 크기 저하와 그 최대치의 위치가 감속측으로 이동하는 것이다.  $S=1.6$ 에서는 각 난류강도의 값은 더욱 작게되고 특히  $S$ 가 더욱 커짐에 따라 이후의 난류강도의 값은 훨씬 크게 떨어진다. 즉 난류강도의 값이 회전파라미터  $S$ 가 1.2를 넘으면 떨어지기 시작하고  $S=1.6$ 을 넘으면 급속 저하하여  $S=2.0$ 이 되면 정지원주의 값보다 훨씬 적게 된다.

#### 3.2 자기상관계수 및 파워스펙트럼

Fig. 4는  $x/d=2$ ,  $y/d=2$ 에서 흐름방향과 수직인 속도성분에 대한 I형 프로우브에 의해서 측정된 기준신호의 자기상관(auto-

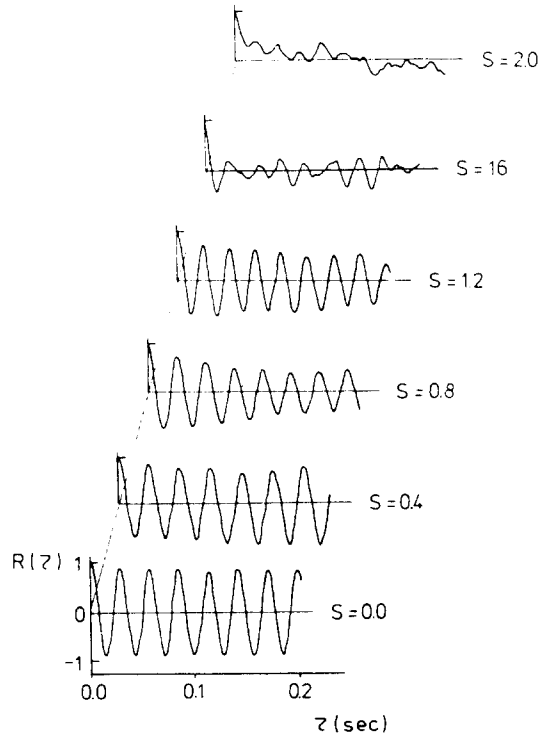


Fig. 4 Transverse velocity autocorrelations for spin parameter  $S$  at  $x/d=3$  and  $y/d=-0.8$ .

correlation) 계수를 레이놀즈 수 6,000에서 회전파라미터(S)의 변화에 대해 나타내었다. 이 지점은 와류유출이 가장 잘 나타나는 곳으로써,  $S=0$ 일 때 와류 유출은 더욱 강하게 나타난다. 여기서 S가 증가할수록 자기상관계수의 진동폭도 작아지고 파형의 일그러짐도 많이 나타난다. S가 1.2를 초과하면 자기상관계수의 진동성이 급격히 줄어들며, S가 1.6을 넘어서면서는 위상평균법으로 해석할 기준이 모호해진다. 또한 S가 2.0을 넘어서면 전혀 주기성을 찾아볼 수 없다. 이와같은 결과로부터 실린더의 회전속도가 증가할수록 동일한 자유흐름의 속도로 인한 후류내에 형성된 난류의 거시적구조와 미시적구조가 다같이 작아지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 위치에서 구한 파워스펙트럼이다. Fig. 4에서 예상할 수 있듯이 S가 1.2일때까지는 narrow band의 탁월 주파수가 보이고 회전속도가 그 이상이 되면 peak가 거의 형성되지 않으며 S가 2인 경우에는 거의 균일 난류의 경우로 접근한다. 이 그림에서 회전 파라미터가 증가되면서 탁월주파수가 조금씩 증가되고 있음도 알 수 있다. S가 1.2를 초과하면서 근점후류 영역에서 특정한 와류유출 주파수가 급격히 사라지는 이유는 원주의 회전이 증가하면서 칼만와의 형성을 지배하는 메카니즘이 근본적으로 변화되었음을 의미하는 것이다. 특히 회전이 증가되면서 원

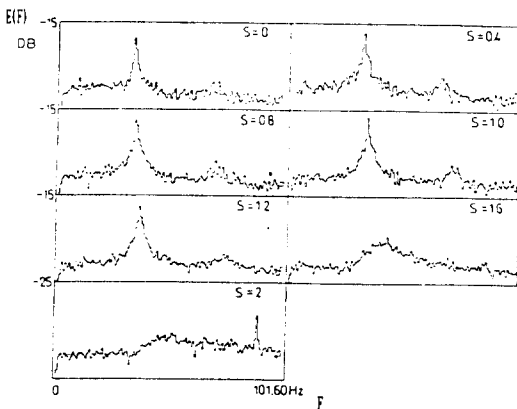


Fig. 5 Transverse velocity autospectra for spin parameter S at  $x/d=3$  and  $y/d=-0.8$ .

주상의 정체점 위치가 바뀌게 되며, 원주표면 주위의 회전유체의 층이 두꺼워 지면서 차이가 더욱 크게 되고 또한 경계층의 발달로 인한 엔트레인먼트 구조가 상실 또는 정체점의 분리로 인한 원주 상하 방향의 와도 증가 구조의 변형 등으로 인하여 실린더 상하에서 주기적으로 볼텍스를 유출시킬 근거가 없어진 것으로 볼 수 있다.

### 3.3 스트로할 수

기준신호의 탁월주파수  $f_s$ 에 기초를 둔 스트로할 수  $St = f_s d/U_0$ 와 회전파라미터와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 정지된 원주인 경우  $St$ 는 0.21로 이미 잘 알려진 아 임계후류(subcritical wake) 영역의 대표값과 일치하나 S가 증가함에 따라 스트로할 수가 점차 증가하다가 1.2를 넘어서는 특정한 피크 값이 존재하지 않지만 평균치는 급격히 증가한다. 직경기준의 레이놀즈 수가 16,000 정도인 Taniguchi 등<sup>4)</sup>의 실험에서는 S가 0.8정도부터 주기성이 급격히 감소되었음을 발표하였고, 레이놀즈 수가 약 9,000이었던 Diaz 등<sup>3)</sup>의 실험에서는 S가 1.0부터 칼만와열이 붕괴되기 시작하였다고 보고된 바 있다. 본 실험에서는 이들 보다 낮은 약 6,600 정도의 레이놀즈 수 영역인데, 면밀히 검토한 결과 S가 1.2정도 까

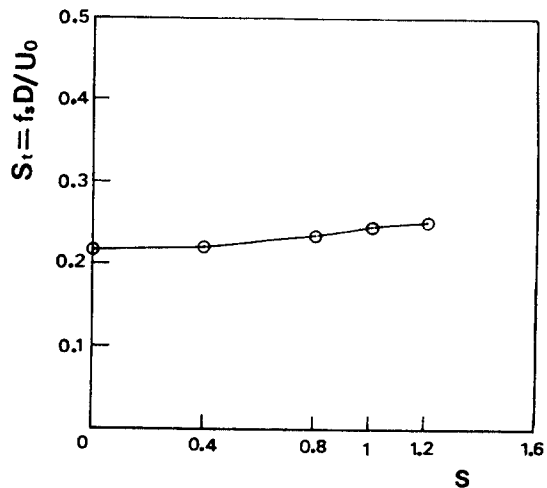


Fig. 6 Variation of the Strouhal number.

지는 탁월주파수의 피이크가 보였음을 고려해 볼 때, 칼만와열의 붕괴는 회전파라미터 이외에 실린더 레이놀즈 수도 부차적 파라미터가 됨을 알 수 있다. 그러므로 낮은 레이놀즈수 일수록 칼만와열의 붕괴가 회전수 증가에 대해 다소 지연되고 있음을 의미한다.

### 3.4 코히어런트 와의 구조

실린더 후류와 같이 어느정도 주기성을 갖는 난류유동은 일반적인 레이놀즈 분해(Reynolds decomposition)로 순간속도를 취급하는 것 보다는 Reynolds와 Hussain<sup>10)</sup>에 의해 제안된 평균류와 각 변동성분간의 간섭을 고려한 위상평균법을 적용하는 것이 실제유동을 더욱 잘 설명해 줄 수 있다. x, y방향의 순간속도를  $\tilde{u}, \tilde{v}$  라고 할 때,

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= U + \langle u \rangle + u' \\ \tilde{v} &= V + \langle v \rangle + v' \end{aligned} \quad (1)$$

으로 나눌 수 있다. 여기서 U, V는 시간평균 속도,  $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ 을 위상평균속도로서 주기성을 갖는 후류 유동의 구조에 기본적으로 기여하는 기본 변동속도라 할 수 있고,  $u', v'$ 을 기본 변동 속도에 중첩하는 불규칙 변동 속도라 한다. 따라서 순간속도의 변동성분을 위상평균하면 불규칙 변동 속도는 소거되고 위상평균속도성분만 남게되며, 이로부터 주기성을 갖는 코히어런트 구조를 시간적, 공간적으로 알 수 있게 된다.

#### 3.4.1 순간속도

Fig. 7과 8은 위상평균에 의한 u, v 성분의 속도변동 파형들을 각각 균일유속  $U_0$ 로 무차원화 한 값을  $x/d=10$ 의 위치에서 회전 파라미터 S의 변화에 따라서 측정된 결과들이다.

Fig. 7을 보면, 정지된 실린더(S=0)의 경우에 대하여 후류중심(y/d=0)에서는  $\langle u \rangle$ 의 변동률은 거의 없으나 와류의 중심(y/d $\approx$ 0.8)으로 여겨지는 위치에서는 최대의 변동진폭을 가지며 또한 후류중심에 대해 상하 대칭되어 있음도 알 수 있다. 한편, Fig.8에서  $\langle v \rangle$ 의 변동은  $\langle u \rangle$ 의 변동과는 달리 후류중심선에

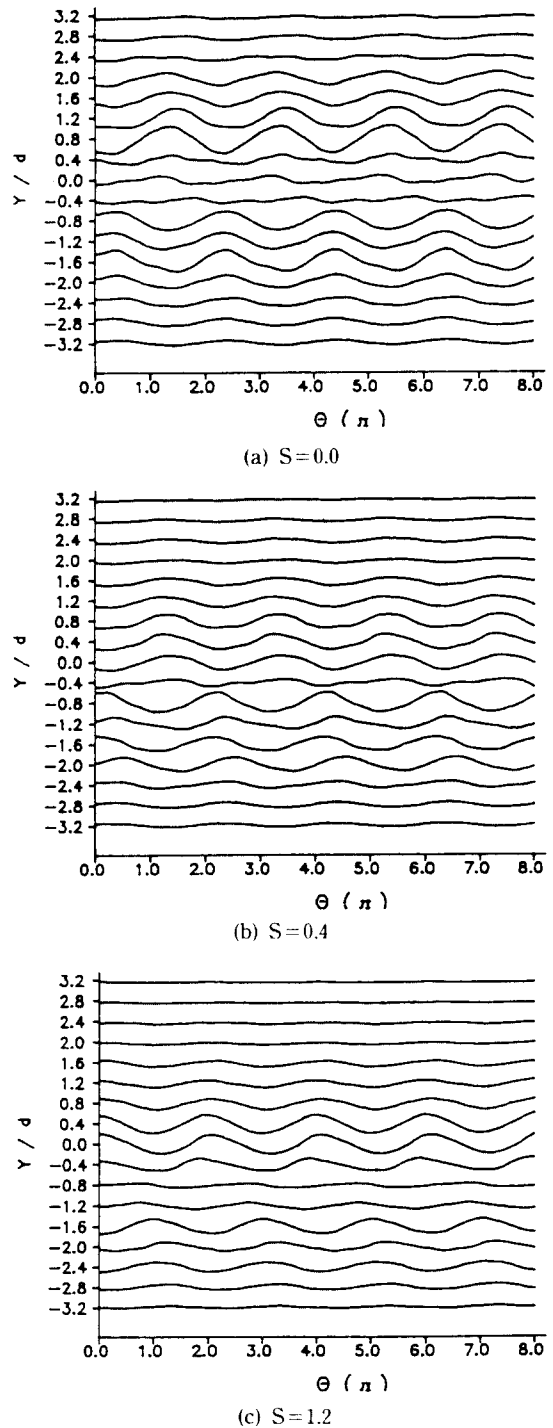


Fig. 7 Phase averaged longitudinal velocity  $\langle u \rangle / U_0$  for spin parameter S at  $x/d=10$ .

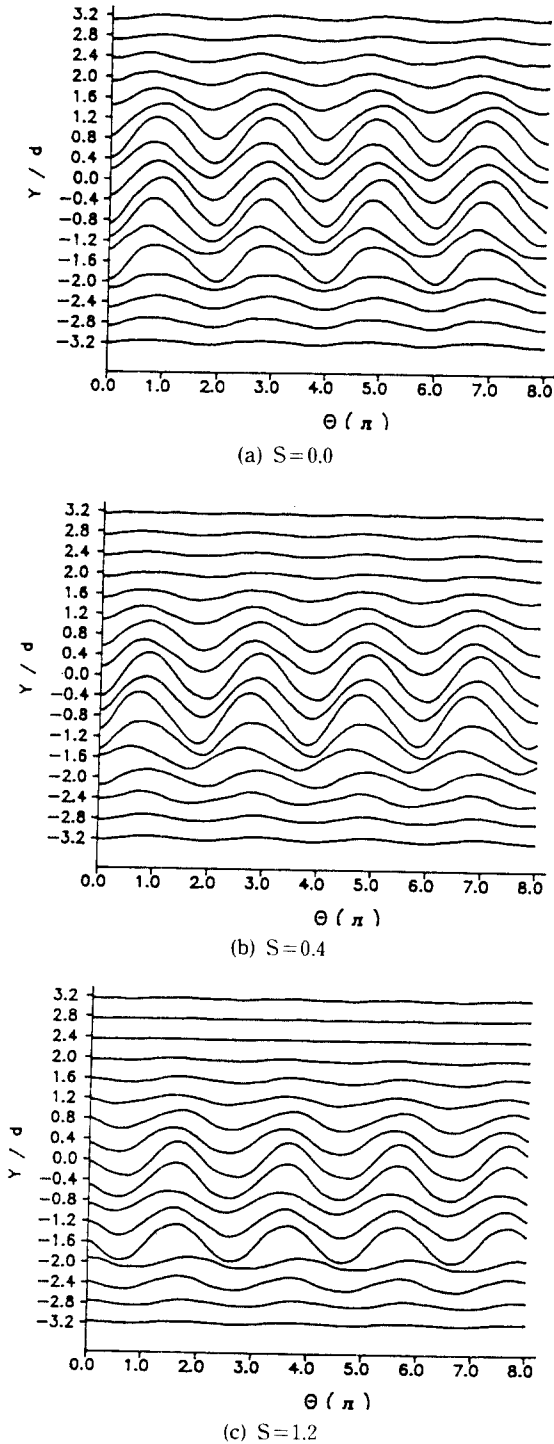


Fig. 8 Phase averaged transverse velocity  $\langle v \rangle / U_0$  for spin parameter  $S$  at  $x/d=10$ .

서 최대 진폭을 가지며, 후류중심에서 멀어질수록 진폭은 작아진다. 이러한 결과들로부터 와류중심은 칼만와열의 특징인 상하 180도의 위상차를 가지고 있으며 회전파라미터가 증가할수록 위상평균속도들의 변동진폭이 줄어들면서 와류중심들이 감속측으로 이동되고 있음을 보여주고 있다.

### 3.4.2 등와도선과 등속도선

Fig. 9에는  $x/D=10$ 인 단면에서의 위상평균에 의한 등와도선(equi-vorticity line)의 분포도를 나타낸다. 그림에서 동심원에 가까운 와도선의 와류가 형성되었음을 의미한다. 위상평균에 의한 코히어런트 와도는

$$\langle \omega_z \rangle = \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial y} \quad (2)$$

으로 표시되나 본 실험 영역에서는  $\langle v \rangle \ll \langle u \rangle$ ,  $\partial/\partial x \ll \partial/\partial y$ 가 되어 결국  $\partial \langle v \rangle / \partial x$  값은 무시하고 코히어런트 와도는  $\Delta \langle u \rangle / \Delta \langle y \rangle$ 의 근사치로 구할 수 있다. 와도를  $d/U_0$ 로 곱하여 무차원화 시키면 그림에서와 같은 수치로 표현된다. 정지된 실린더 후류에서는 상하 대칭인 와류가 180도의 위상차로 뚜렷이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 회전 파라미터가 증가할수록 와도 중심의 절대값이 감소되고 있음과 동시에 와류의 중심도 감속측으로 편향되어 있음도 알 수 있다. 절대값이 감소된다는 것은 와류가 확산됨을 의미하며 결국  $S$ 가 증가할수록 와류는 더욱 빨리 확산하게 되는 것이다. 한편, 와류중심의 간격들은 실린더 상하에서 형성되는 각각의 코히어런트 와의 입장에서 볼 경우 정지된 실린더인 경우에는 180도의 위상차로 형성되지만,  $S$ 가 증가할수록 증속측 와가 형성되고나서 감속측 와는 180도 이전에 형성되어 따라나옴을 볼 수 있다. 증속측과 감속측에 각각 형성된 와류의 최대와도의 차이도 원주회전의 증가와 더불어 점점 차이가 작아짐을 볼때, 코히어런트 구조에 의한 운동량 전달효과가 비대칭임과 난류확산효과도 후류 중심선을 기준으로 매우 상이할 것으로 예상된다.

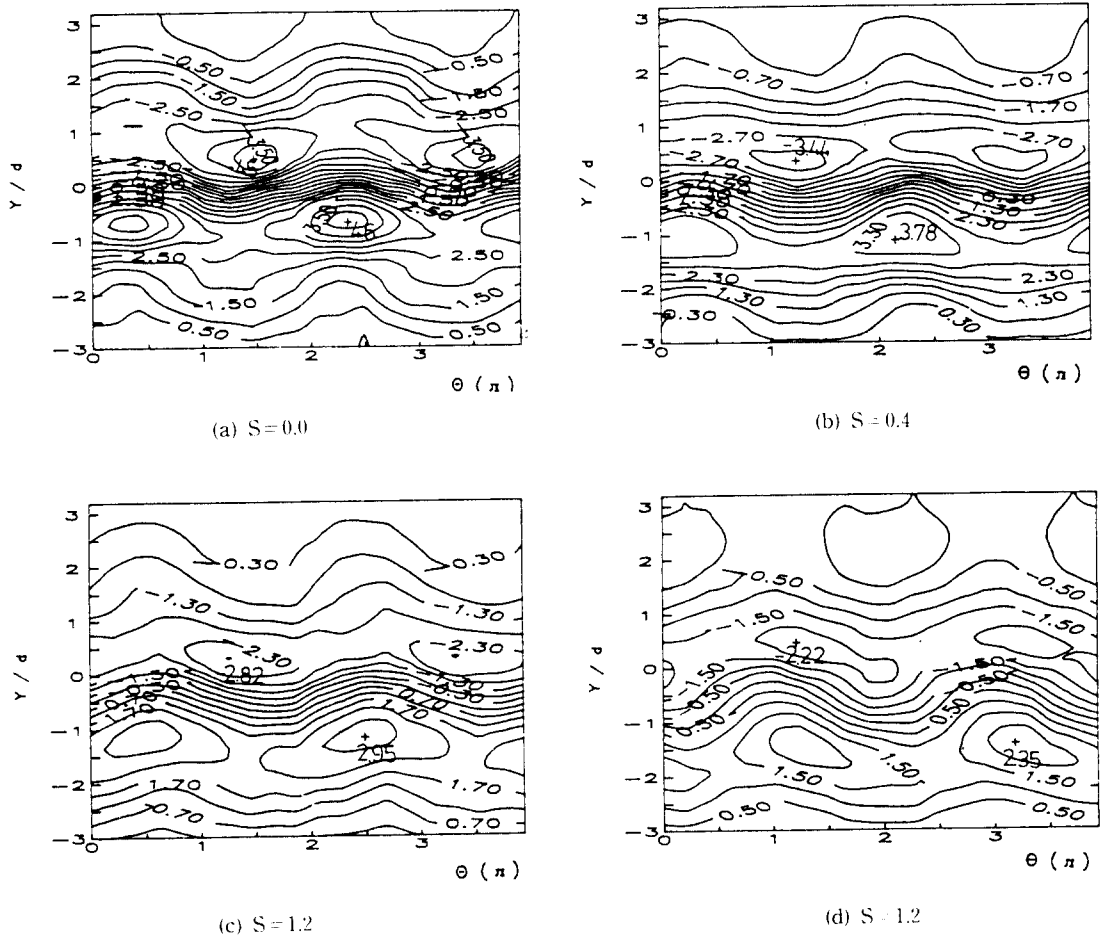


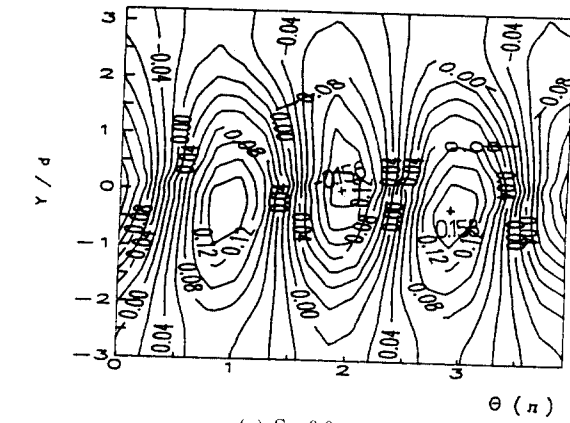
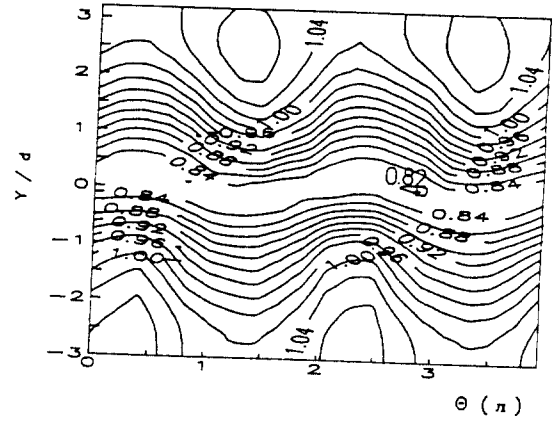
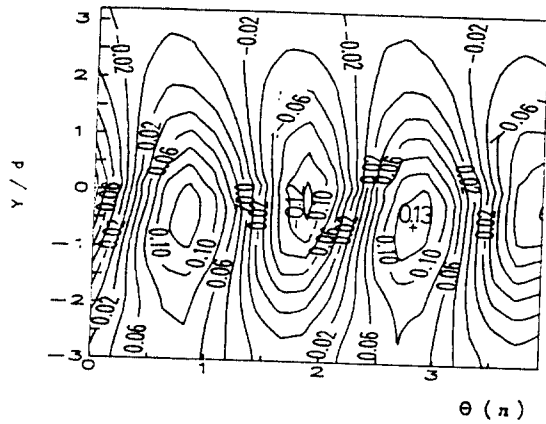
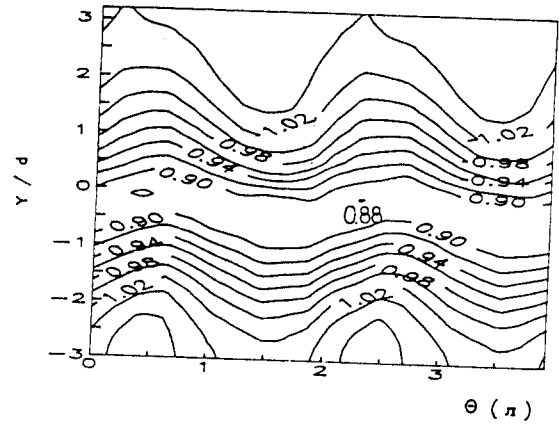
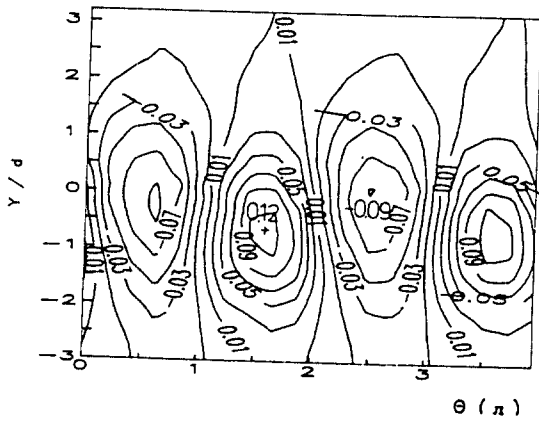
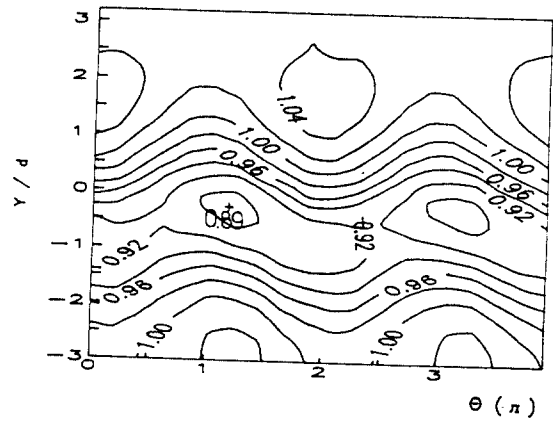
Fig. 9 Contour of the phase averaged equivorticity  $\langle \omega \rangle d/U_0$  for spin parameter S at  $x/d=10$ .

Fig. 10과 Fig. 11에는 같은 위치에서 위상평균에 의한 v 성분속도 및 u 성분속도를 균일 유속으로 무차원화 하여 등속도선도를 위상평면에 표시한 그림이다. Fig. 10에서 보면 각 최대 값들이 와핵(Fig. 9의 최대값)과 와핵사이 존재하고 있음은 이곳에서 v 성분속도가 가장 크게 변화하고 있음을 의미한다. 또한 S가 1.2까지는 최대 속도점이 180도의 위상차를 가지고 있고, 등속도선도의 값의 부호가 반대로 나타나는 칼만와열의 특성이 분명히 보여지지만, 회전수가 증가하면서  $\langle v \rangle$ 의 피이크

값이 감소되고 있고 최대값의 위치도 원주 중심선에서 감속측으로 이동되고 있다.

Fig. 11에서는 S=0인 경우에 대해서는 원주 중심선을 따라서 u 성분속도값은 최소값이고 중심선에서 멀어질수록 1.0에 가깝다. 그리고 S가 증가함에 따라 최소값의 위치는 감속측으로 이동되고 있으나 최소값의 크기는 점점 커지고 있다. 이것은 회전 파라미터가 증가함에 따라 180도의 위상차가 붕괴되어 가고 있음을 의미한다.



(a)  $S = 0.0$ (a)  $S = 0.0$ (b)  $S = 0.4$ (b)  $S = 0.8$ (c)  $S = 1.2$ (c)  $S = 1.2$ 

**Fig. 10** Contour of the phase averaged transverse equi-velocity  $\langle v \rangle / U_0$  for spin parameter  $S$  at  $x/d = 10$ .

**Fig. 11** Contour of the phase averaged longitudinal equi-velocity  $\langle u \rangle / U_0$  for spin parameter  $S$  at  $x/d = 10$ .

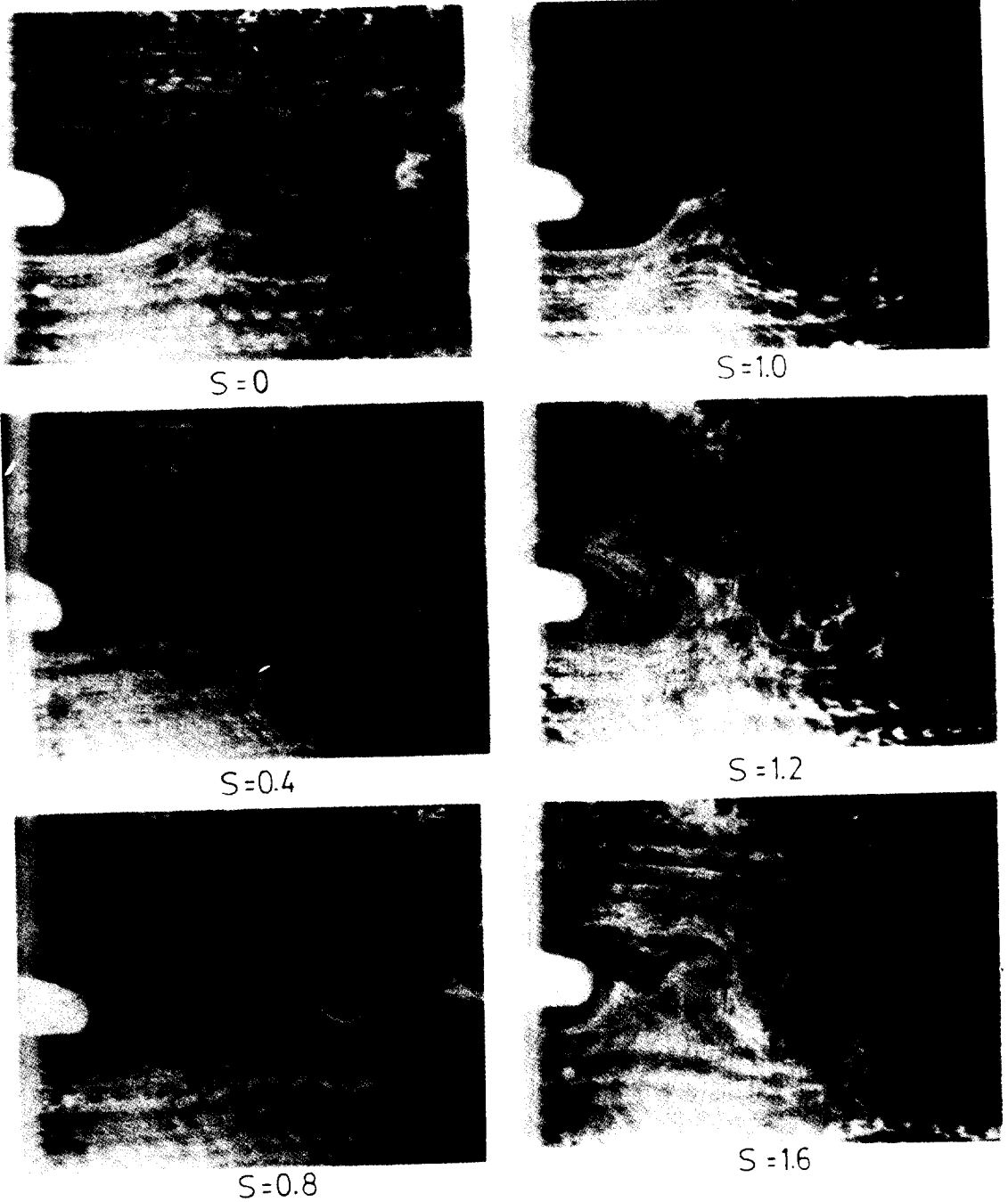


Fig. 12 Flow visualizaiotn.

### 3.5 유동의 가시화

Smoke-wire법을 이용한 가시화법을 이용하였다. 원주 상류측 80mm 전방에 0.3mm의 니

크롬선을 원주와 직각되도록 설치하였으며 니크롬선은 액체 파라핀을 균일하게 입힌 다음 전류를 통하게 하여 smoke를 발생시켰다.

Fig. 12는 균일속도 1.0m/s에서 회전파라미터 S에 따라서 유동형태를 가시화한 것으로서 S가 1.2보다 적을 때는 칼만 와열은 감속측으로 이동됨을 알 수 있으나, S가 1.6을 초과하게 되면 칼만 와열의 형태는 불명료해짐을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

균일류(uniform flow)중에 회전하는 원주의 회전파라미터를  $0.0 < S < 2.0$ 의 범위로 변화시키면서  $x/d=3$  및  $x/d=10$ 의 위치에서 후류구조를 시간평균 및 위상평균법에 의한 실험과 가시화로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 회전 파라미터 S가 증가함에 따라 난류강도는 감소하고 최대 난류강도값이 위치도 감속측으로 이동한다.
2. S값이 1.2정도 까지는 칼만와열형태의 구조를 유지하고 있으나 S가 1.6을 넘으면 원주의 근접후류에서도 주기적 와류유출은 발견할 수 없다.
3. 원주회전이 증가함에 따라 와류는 비대칭성이 되고 와류중심은 감속측으로 편향되며, 또한 와도값도 감소된다.
4. 칼만와열의 붕괴가 시작되는 회전파라미터의 범위는 선행연구결과들과 비교를 통해 보면 레이놀즈 수의 영향도 함께 고려되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1) Moore, D.W., 1957, "The flow past a rapidly rotating circular cylinder in a uniform stream", J. Fluid Mech., Vol. 2, No. 6, pp. 541.

- 2) Aldoss, T.K. and Mansour, A., 1988, "Theoretical calculations of the flow around a rotating circular cylinder placed in a uniform flow", ASME J. Fluids Eng., Vol. 110, pp. 96-98.
- 3) Diaz, F., Gavalda, J., Kawall, J. G., Keffer, J. F., and Giralt, F., 1983, "Vortex shedding from a spinning cylinder", Phys. Fluids, Vol. 26, No. 12, pp. 3454-3460.
- 4) Taniguchi, S., Matsumura, M., Yamauchi, T., and Dohda, S., 1989, "Wake structure of a spinning cylinder in a uniform flow", JSME J., Vol. 55, No. 509, pp. 41-48.
- 5) Fleming, P.D., and Probert, S.D., 1984, "The evolution of wind turbines: A historical review," Applied Energy, Vol. 18, pp. 163-170.
- 6) Davies, M.F., 1976, "A comparison of the wake structure of a stationary and oscillating bluff body using a conditional averaging technique", J. Fluid Mech., vol. 70, pp. 209-231.
- 7) Cantwell, B. and Coles, D., 1983, "An experimental of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder", J. Fluid Mech., vol. 136, pp. 321-374.
- 8) Hussain, A.K.M.F., 1986, "Coherent structures and turbulence", J. Fluid Mech., vol. 173, pp. 303-356.
- 9) 김경천, 최경현, 이석희, 1989, "난류유동의 측정 및 분석을 위한 마이크로 컴퓨터 온라인 시스템의 개발", 부산대 공대 연구보고, Vol. 37, pp. 53-62.
- 10) Reynolds, W.C., and Hussain, A.K.M.F., 1972, "The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow, part 3. Theoretical models and comparison with experiments," J. Fluid Mech., Vol. 54, pp. 263-288.