

〈論 文〉

## 유체유동에 의한 경사원주의 진동과 제진에 관한 연구

양보석\* · 岩壺卓三\*\* · 福井喜一郎\*\*

(1991년 12월 9일 접수)

### Flow Induced Vibration and Suppression of Inclined Cylinder

Bo Suk Yang, Takuzo Iwatsubo and Kiichirou Fukui

**Key Words :** Flow Induced Vibration(흐름여기진동), Suppression(제진), Inclination Cylinder(경사원주), Vortex Shedding(소용돌이 방출), Spiral Fin and Wire(나선핀과 와이어)

#### Abstract

This paper presents a dynamic characteristics of flow induced vibration of circular cylinder set with inclined angle against flow direction. The effect of the cylinder bounded by spiral fin and wire on the damping of flow induced vibration is investigated, i.e., inclined angle, spiral pitch angle and number of spiral thread are studied. As the results, the cylinder with spiral fin is most effective for the damping. Also the cylinder bounded by pitch angle 50° and 2 spiral thread is most effective.

#### 기 호 설 명

- $D$  : 원주 직경
- $f_n$  : 원주 고유진동수
- $f_s$  : 소용돌이 발생진동수
- $n$  : 나선권수
- $U_r$  : 환산유속 (=  $V/Df_n$ )
- $V$  : 유속
- $V_i$  : 유속의 원주에의 직교성분 (=  $V \sin \theta$ )
- $\alpha$  : 나선피치각
- $\theta$  : 경사각

후에서 흐름이 박리하고 원주에 여진력을 제공하기 때문에, 소용돌이 발생진동수(vortex shedding frequency)가 원주의 고유진동수에 일치하는 공진 상태에서는 원주부재가 파괴에 이르는 경우도 발생한다.

Karman 소용돌이에 의한 진동문제의 연구는 오래전부터 많은 연구자에 의해 수행되어 왔으며, 직교흐름에 대한 고정원주의 진동은 Feng,<sup>(1)</sup> Iwan과 Blevins<sup>(2)</sup>, Takahara<sup>(3)</sup> 등에 의해 연구되었고, 탄성지지 및 가진원주에 대한 Umemura<sup>(4)</sup> 등의 연구가 있다.

Karman 소용돌이에 의한 원주부재의 진동에 대한 대책으로는 첫째로 구조적인 방법이 있다. 즉 원주의 단면을 크게하면 강성이 증가하므로 임계유속(공진유속)이 높게 되고 진동이 발생하는 빈도가 적게 된다. 그러나 임계유속을 설계유속 이상으로 하는 일은 실제적으로 매우 어렵고 또한 임계유속이 높게되면 여진력도 크게되어 합리적인 방법이라 말하기 어렵다. 두번째로 소용돌이 여기진동을 억제하는 대책으로 유체동역학적인 방법이 있다. 이

### 1. 서 론

열교환기, 증기발생기, 연돌, 교량, 해양구조물 등의 원주부재를 사용한 구조물은 바람이나 해류 등 유체의 영향을 무시할 수 없는 환경에서 널리 사용되고 있고, 흐름에 의해 발생하는 진동이나 파괴가 문제로 되고 있다. 이 원인은 원주부재의 배

\*정회원, 부산수산대학교 기계공학과

\*\*일본 교베대학 기계공학과

는 원주단면의 유체동역학적인 형상을 변화시켜 유체동역학적인 특성을 개선하는 것으로 원주부재에 나선형의 fin이나 wire를 감는 것이 오래전부터 제안되고 있다.<sup>(5)</sup> 이 방법으로 진동이 방지된다면, 임계유속을 높일 필요가 없으므로 경제적인 설계가 가능하게 된다. Nakagawa,<sup>(6)</sup> Scruton과 Walshe,<sup>(7)</sup> Novak,<sup>(8)</sup> Ruscheweyh,<sup>(9)</sup> Weaver,<sup>(10)</sup> Simada<sup>(11)</sup> 등도 나선편이나 wire를 감은 직교원주에 대해 실험적으로 검토하고 제진이라는 관점에서 실용적인 대책에 대해 언급하고 있다.

그러나 이들 결과는 직교원주에 주목한 것으로, 현실적으로 원주부재는 흐름과 직교하지 않고 임의각도로 경사지게 설치된 경사원주가 많이 사용되고 있다. 이 경사원주에 관한 연구로는 평탄한 원주(plain cylinder)에 대해 경사각에 따른 Strouhal수와 소용돌이 발생진동수의 관계를 나타낸 Hanson<sup>(12)</sup>의 결과와 원주경사가 클수록 후류 소용돌이의 발생진동수에 편차가 크고, 흐름이 복잡하게 된다는 Nakagawa<sup>(13)</sup>의 결과가 있을 뿐, 제진의 관점에서 수행된 연구는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 경사원주에서 발생하는 소용돌이 여기진동을 억제하기 위한 방법으로 원주구조물 주위에서 발생하는 규칙적인 소용돌이 방출에 의한 여진력을 감소시키도록 원주표면에 fin이나 wire를 부착시켜 단면형상을 바꾸는 방안을 실험적으로 검토한다. 즉, 밀폐순환식 유로를 이용하여 흐름에 경사되도록 탄성지지된 원주에 나선상의 fin과 wire를 감아, 경사각( $\theta$ )을 45, 60, 75, 90도, 나선피치각( $\alpha$ )을 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60

도, 나선권수( $n$ )를 1, 2, 3으로 하여, 진동특성을 실험적으로 조사하고, plain원주와 비교하여 제진효과를 확인하며, 더우기 나선편 원주의 최적형상을 구하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 이 장치는 저장된 물을 펌프 P1과 P2에 의해 유입시켜 측정부를 거쳐 탱크에 되돌리는 밀폐순환식 유로이다. 유속은 밸브 1, 2로 조정하며, 좌우로부터의 유량을 같도록 하기위해 바이패스 관로를 설치하여, 좌우 유입량이 동일하도록 유속측정용 관의 좌우에 부착한 동압관의 차압을 마노미터를 보고 조정한다. 또한 일정 흐름이 되도록 정류격자와 망격자를 설치하였고, 측정부 좌우면의 경계층의 영향을 피하고, 유로를 확보하기 위해 두께 10 mm의 아크릴제 칸막이를 설치하였다

### 2.2 측정부 및 측정장치

시험부의 좌표계를 시험부 단면중양을 좌표원점으로 하고, 유동방향을  $x$ 축, 수직방향을  $z$ 축, 양측과 직교하는 수평방향을  $y$ 축으로 정하였다. 직경 10 mm에 길이 400 mm의 시험원주를 수평방향( $y$ 축방향)으로 설치하였고,  $x$ 축과 이루는 각도  $\theta$ 를 원주의 경사각으로 정의하였으며, 이 경사각을 45도로부터 90도까지 변화하도록 마운트용 지지부를 설계하였다. 종래의 직교원주는  $\theta=90$ 도인 경

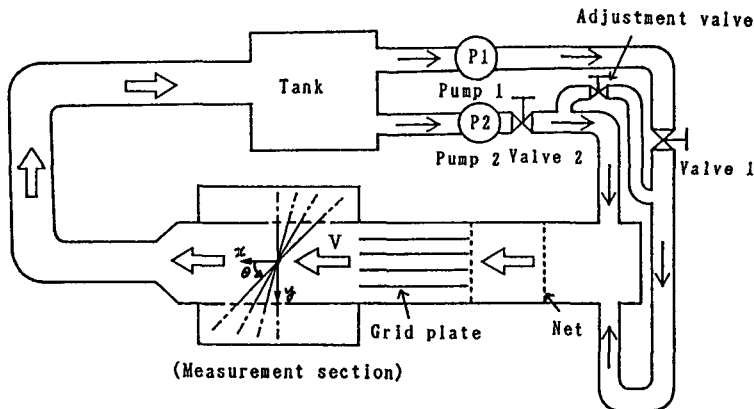


Fig. 1 Schematic test set-up

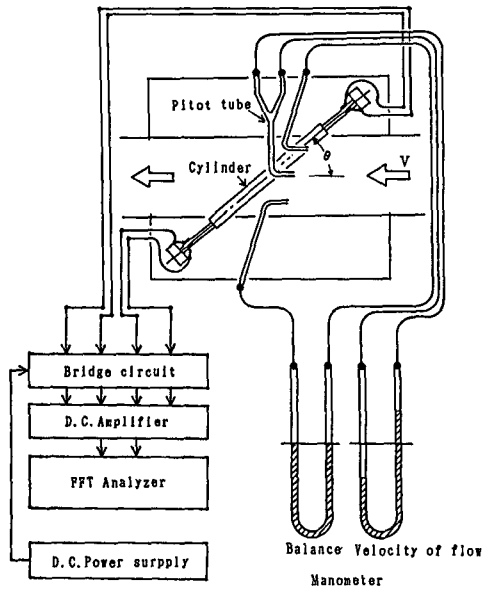


Fig. 2 Schematic diagram of the measuring set-up

우에 대응한다. 측정부분의 크기는 250 mm×150 mm로, 원주지지봉에 부착된 두개의 스트레인 게이지에서 진폭을 측정하고, FFT분석기에서 분석한다.

유속분포를 측정하기 위해 흐름과 직교하도록 Pitot관을 측정부의 양단과 중앙 등 5개소에 설치하여 유속을 측정하였다. 그 결과 측정부 중앙과 양단의 유속은 약 5%의 차가 있으나 거의 일정한 유속분포를 보였으며, 본 실험에서는 측정부의 중앙점에서의 유속을 대표 유속으로 하였다.

원주의 고유진동수는 양단고정된 직경 5 mm의 중실의 원주 지지봉으로 조정하였으며, 본 실험의

경우 고유진동수는 13 Hz였다. Fig. 2에 측정장치의 개략도를 보인다.

실험에는 Fig. 3과 같이 평탄한 원주(PC: Plain Cylinder), fin과 wire를 나선상으로 부착한 원주(이하에서는 SFC: Spiral Fin Cylinder, SWC: Spiral Wire Cylinder라 한다)의 세 종류로 하였다. 핀은 높이와 폭이 1 mm×2 mm의 고무판을, wire로는 직경 1 mm의 코드를 순간접착제로 원주에 부착하였다.

### 2.3 실험방법

흐름에 의해 발생하는 원주의 진동특성을 조사하기 위해 임계유속을 포함하도록 환산 유속( $V/D f_n$ )을 0에서 15까지 변경하면서 실험을 수행하였다. 이때의 Reynolds수 범위는  $0.42 \times 10^4$ 에서  $0.97 \times 10^4$ 의 아임계 Reynolds수 영역으로서, 유속은 0.42 m/s에서 0.99 m/s였다. 원주를 삽입하지 않을 때의 자유흐름의 난류강도는 단면중앙에서 평균유속 0.68 m/s에서 2.8%, 0.95 m/s에서 1.46%였다.

먼저, 경사각의 영향을 조사하기 위해 경사각을 45, 65, 75, 90도로, 나선피치각을 40도, 나선권수를 1로 하여 흐름의 직각방향(양력방향)과 흐름방향(항력방향)의 진폭 및 소용돌이 발생진동수를 측정하였다.

피치각은 각도가 적은 것이 제작상 바람직하나 각도를 극단적으로 적게하면, fin이나 wire를 원주의 축방향으로 평행하게 부착한 상태에 가깝게 되므로 진동억제효과가 적게된다. 따라서 피치각의 변화에 따른 영향을 가장 제진효과가 탁월한 SFC를 이용하여 피치각을 30에서 60도까지 5도씩 변화

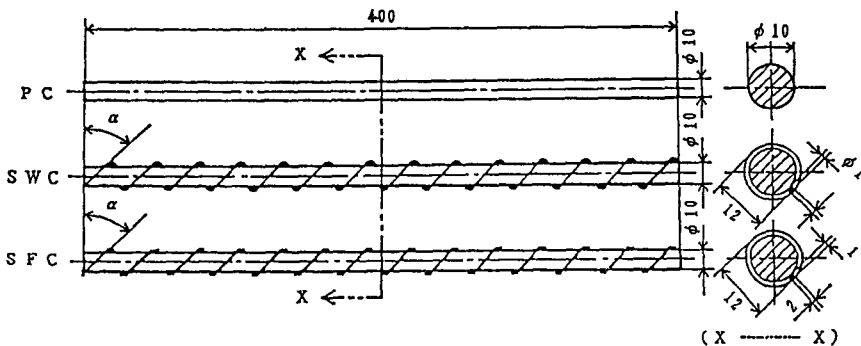


Fig. 3 Geometries for circular cylinders

시키면서 진동특성을 검토하였다. 다음에 나선권수는 제작상 권수가 적은 편이 경제적이 된다. 권수가 많게 되면 나선편에 의한 새로운 원형이 형성되고 제진효과가 감소될 것이 예상되어, 예비실험에 기초하여 나선권수를 1, 2, 3으로 하여 실험을 수행하였다. 또한 경사원주 표면에서의 흐름을 보다 명확히 하고 진동특성과의 관계를 조사하기 위해 가시화 실험을 하였다. 방법으로는 붉은색 염료를 주입기를 통하여 시험원주의 직전에 삽입하고 흐름과 평형하게 고정하는 직접 주입법을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 원주의 진동특성

Fig. 4는 PC원주의 진동특성을 경사각에 대해 나타낸 것이다. 종축은 양력진폭과 소용돌이 발생 진동수를, 횡축은 환산유속( $V/D f_n$ )을 나타낸다. 유속이 증가하면 소용돌이 발생 진동수도 비례하여 증가하고, 이 진동수가 원주의 고유진동수에 접근하게 되면 소용돌이 발생진동수는 고유진동수와 동기화(lock in 또는 synchronization)되고, 이때 원주는 자력적인 강제진동을 일으켜 진동진폭이 급격히 상승하고 있다. 유속이 동기화영역(lock in영

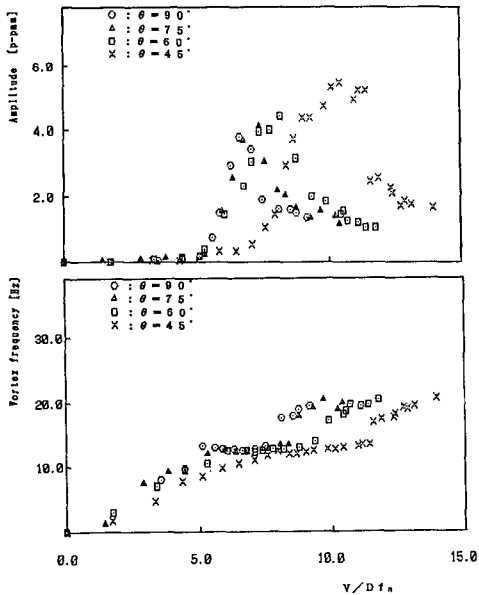


Fig. 4 Vibration amplitude and vortex frequency of plain cylinder for lift direction

역)이상으로 증가하면, 다시 원주는 소용돌이 발생 진동수로 진동을 하게 되고, 진동진폭도 감소한다. 경사각이 적을수록 공진영역은 유속이 큰 편으로 이동하고, 진폭도 크게 되는 경향을 나타낸다. 이와함께 소용돌이 발생 진동수와 원주의 고유진동수가 일치하는 lock in 영역도 경사각이 적을수록 유속이 큰 편으로 이동하고 있다.

여기서 유속에의 경사각의 영향을 고려하여  $V_z (= V \sin \theta)$ 에 의한 환산유속( $V_z/D f_n$ )으로 정리한 것이 Fig. 5에서 Fig. 7이다. 환산유속 5부근까지는 진폭은 매우 적고, 진동수는 유속에 비례하여 증가하고 있다. 환산유속이 5에서 8까지는 진폭은 크게 되어, 7부근에서 최대치를 나타낸다. 한편 진동수는 고유진동수와 일치하고 있다. 8이상에서는 진폭은 더욱 적어지고 진동수는 다시 유속에 비례하여 증가한다. PC의 경우, 경사각이 적을수록 진폭은 크게 된다. 45도에서의 진폭은 90도의 경우에 약  $\sqrt{2}$ 배( $=1/\sin 45^\circ$ )로 되며, 이는 90도일 때의 원주

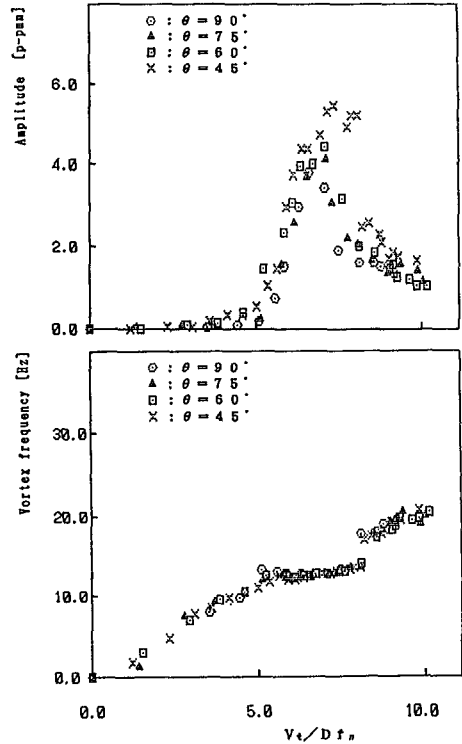


Fig. 5 Vibration amplitude and vortex frequency of plain cylinder based on normal velocity component  $V \sin \theta$

가 흐름과 접하는 부분의 체적(노출체적)에 대한 45도의 노출체적의 비율과 일치하고 있다. 다른 각도에서도 마찬가지로 노출체적의 영향을 고려하면 경사각에 관계없이 거의 일정치로 된다. 따라서 PC에는 lock in 영역의 범위는 유속의 원주에 직교하는 성분에 의한 환산유속을 이용하여 표시하면 거의 동일한 진폭-환산유속곡선이 얻어진다.

Fig. 6은 SWC의 진동특성을 나타내고 있다. PC와 같이 경사각이 적을수록 진폭은 크게 되고 있다. 그러나 노출체적의 영향을 고려하면, 75도의 경우 진폭이 크게 되고 PC와 차이를 보인다. 또 lock in은 환산유속 6에서 시작되고 있고, lock in 영역은 PC의 경우에 비해 약간의 증감이 보여지고 있으나 계통적인 변화를 나타내고 있지는 않다.

Fig. 7은 SFC의 경우로, 원주의 최대진폭은 가장 낮은 60도의 경우를 제외하고는 거의 같은 값을 나타내고 있다. 노출체적의 영향을 고려해도 PC의 경향과 일치하지 않는다. 또 lock in은 환산유속 6.5에서 시작되며, lock in영역의 폭이 PC에 비해

매우 좁다.

이상으로부터, 원주에 wire 및 fin을 나선형으로 부착함으로써 이들에 의해 경계층에서 인공적으로 난류를 촉진시키게 되므로 원주에 발생하는 양력을 감소시키게 되며, lock in의 시작을 늦추고, 영역의 폭도 좁게하는 것이 가능하다. 또 wire를 부착한 경우보다도 fin을 부착한 경우가 원주 표면에서의 원주에 직교하는 흐름을 흐트러 트리는 정도가 크게되고, 따라서 진동억제효과가 크게 된다.

이러한 결과를 설명하기 위하여 경사각 90°와 75°에서 PC와 SFC에 대한 가시화 실험의 예를 Fig. 8에 나타낸다. 이 사진에서 보듯이 경사원주의 흐름은 원주의 축중심선에 수직방향으로 흐르고 있고, 이는 유속에 경사각의 영향을 고려한  $V \sin \theta$ 로 표현하는 것이 타당함을 나타내고 있다. Fin을 부착한 SFC의 경우, 원주 주위의 흐름은 fin에 의해 박리를 일으키고 또한 흐름의 흐트러짐이 PC보다 크게 되며, 원주의 수직방향으로 흐르는 것이 방해되고 있다. 즉 PC의 경우, 원주 후면에서 확

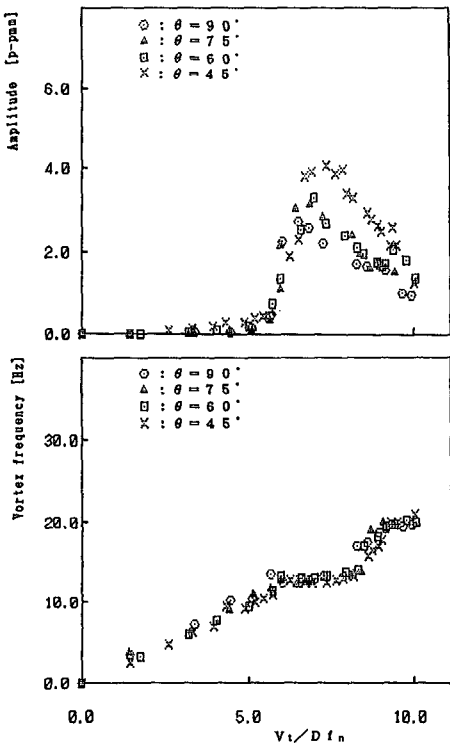


Fig. 6 Vibration amplitude and vortex frequency of cylinder with spiral wires for lift direction

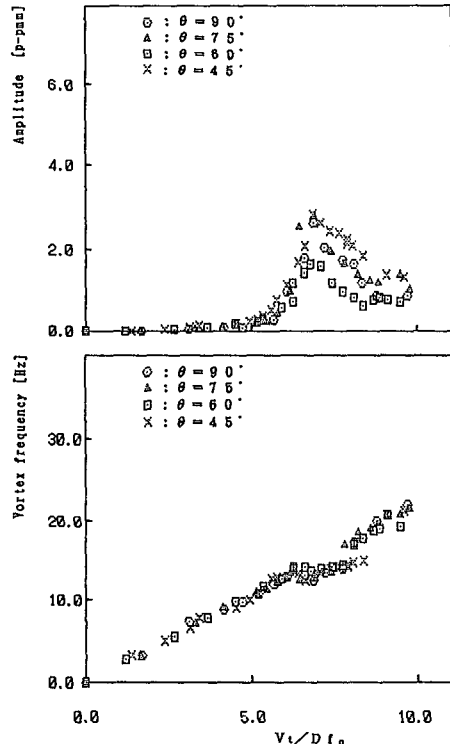


Fig. 7 Vibration amplitude and vortex frequency of cylinder with spiral fins for lift direction

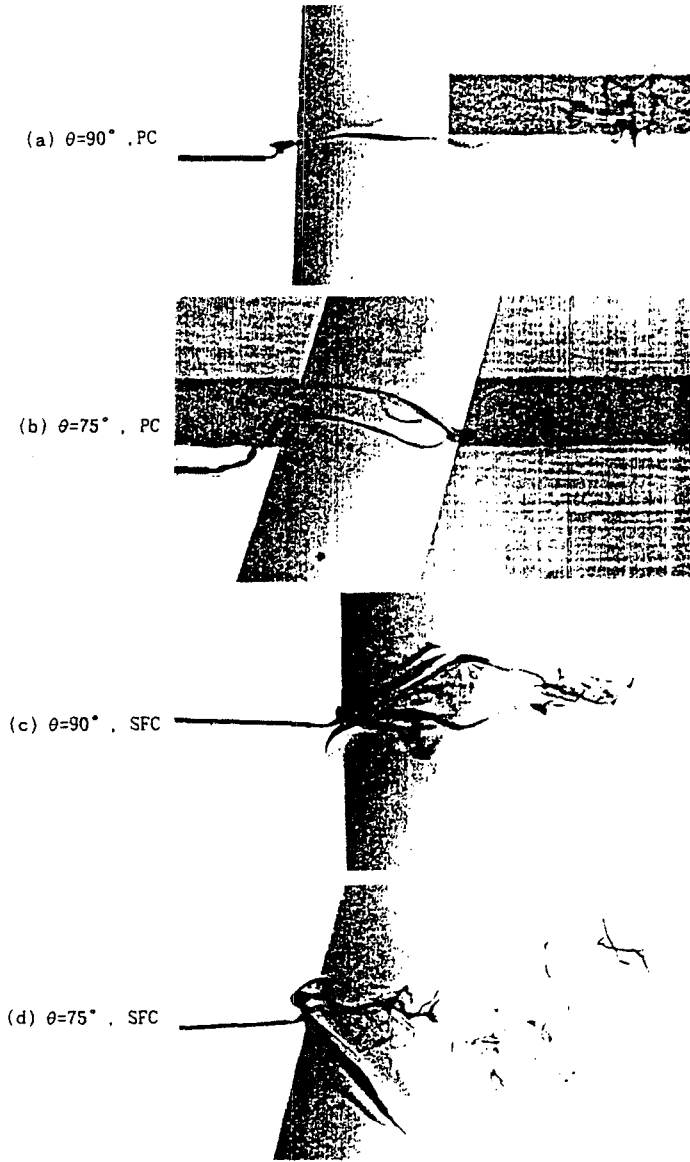


Fig. 8 Comparison of flow patterns by flow visualization( $n=1$ )

실한 소용돌이가 형성되나 SFC는 fin의 영향으로 박리가 일어나고 큰 소용돌이가 형성되지 않는다. 따라서 이 Karman소용돌이의 축소가 양력의 감소를 일으키고, 따라서 여진력의 감소에 의해 진동이 적게 된다고 생각된다

Fig. 9과 10는 경사각이 일정한 경우, PC, SWC 및 SFC의 양력과 항력진폭의 비교를 나타낸다. 그림 (a)는 경사각 90도의 경우로, PC의 진폭이 가

장 크고, SWC와 SFC는 차가 거의 보이지 않는다. 공진영역은 PC, SWC, SFC의 순으로 좁게 되는 경향을 나타내고 있다. 75도의 그림 (b)는 진폭이 PC, SWC, SFC의 순으로 적고, 이에 따라 공진영역도 적게 되고 있다. 60도의 경우도 75도의 경향이 보다 확실히 나타나고 있다. 특히 SFC의 진폭이 극히 낮게 된다. 그림 (d)의 45도에서는 진폭이 다른 경사각보다도 비교적 큰 값을 나타내나,

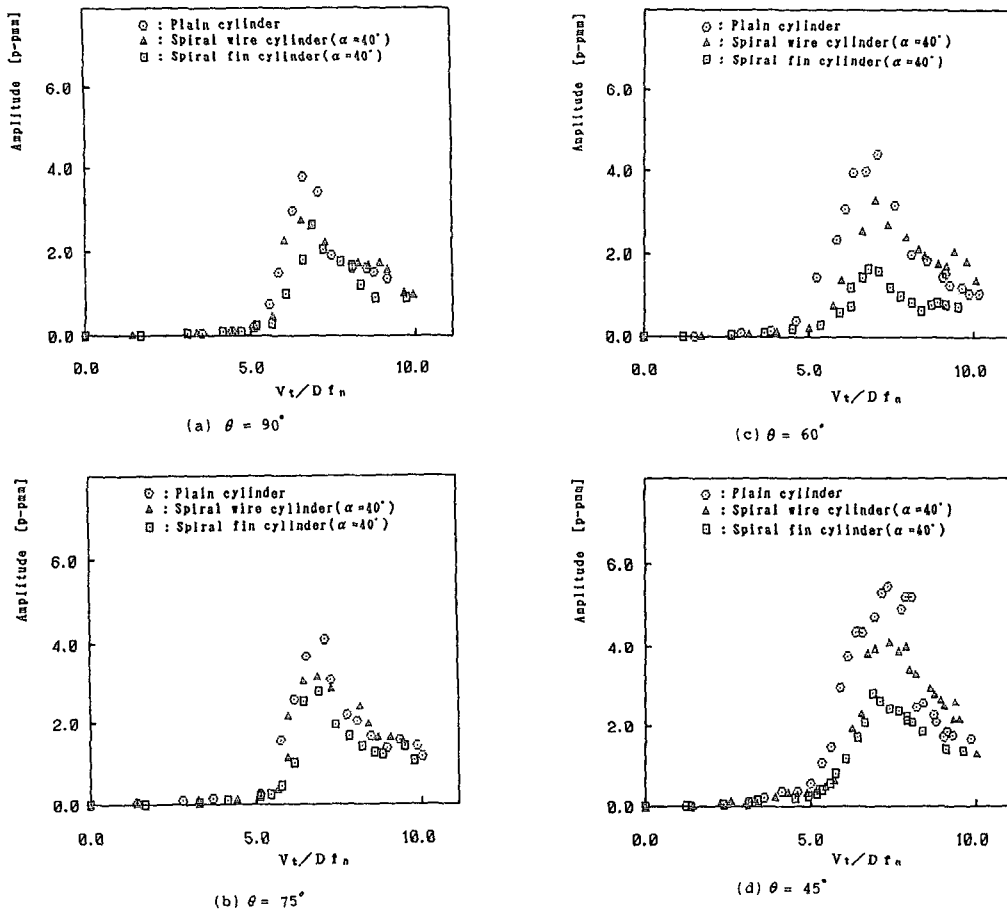


Fig. 9 Effects of inclined angle  $\theta$  (lift direction)

경향은 진폭도 공진영역도 60도와 75도와 일치하고 있다. 이로부터 lock in 영역이 좁을수록 진폭은 적게 되고, 역시 이 효과는 wire보다도 fin이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10는 경사각이 45도 및 90의 경우에 항력진폭을 나타낸다. 45도의 경우가 약간 크지만 경사각의 변화에 따라 큰 차이가 없고, 양력진폭에 비해 매우 적은 진폭을 나타낸다

Fig. 11은 PC의 lock in 전후의 주파수 분석결과를 나타낸다. 유속을 점차로 증가시키면 소용돌이 발생진동수도 비례하여 증가하고 탄성지지 원주의 고유진동수와 같게 되는 경우, 흐름과 원주진동이 lock in이 되는 동기현상이 발생한다. 이 영역에서는 유속에 관계없이 진동수가 원주의 고유진동수로 일정하고 이 영역을 벗어나면 재차 유속에 비례하여 진동수가 변화한다. (a)는 lock in 전의 상태를

나타내며, 낮은 편은 주파수는 소용돌이 발생진동수, 높은 편은 13 Hz의 원주고유진동수이다. (b)는 lock in의 상태를 나타내고, (c)는 최대진폭으로 진동하고 있는 상태로서, 피크의 power spectrum치가 크게 된다. (d)는 lock in 후의 상태에서 다시 피크가 2개 나타나며, 낮은 편은 원주의 고유진동수, 높은 편은 소용돌이 발생진동수이다.

Fig. 12은 종축에 최대진폭을, 횡축에 경사각으로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 가장 제진효과가 큰 조건은 SFC에 60도이다.

### 3.2 나선 피치각의 영향

Fig. 13는 나선권수가 1인 SFC의 피치각과 경사각에 의한 최대진폭의 변화를 나타낸다. 피치각이 35도에서부터 55도까지는 경사각이 60도에서 큰 제진효과를 나타내고, 또 피치각이 60도에서는 45도

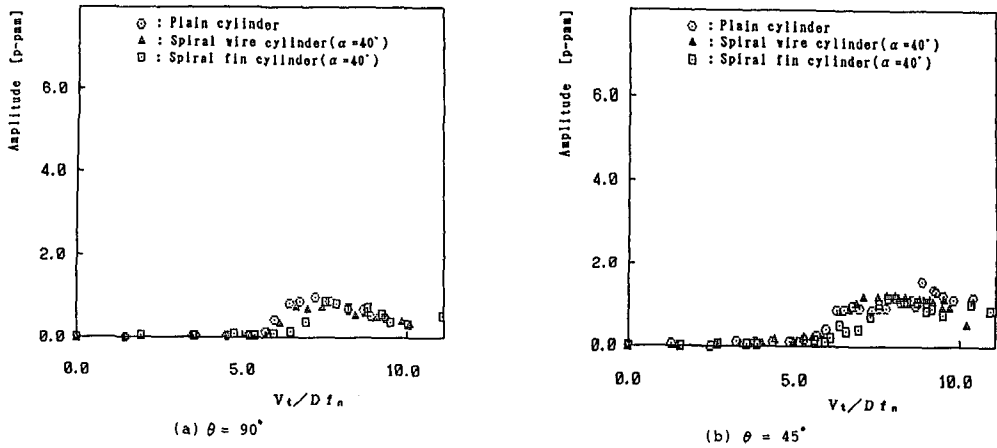


Fig. 10 Effects of inclined angle  $\theta$  (drag direction)

의 경사각에서 적은 값을 나타내고 있다. 이와 같이 경사각에 의해 피치각의 제진효과와 차이가 나타나기 때문에 흐름방향이 변화하는 경우에는 어느 피치각의 SFC를 이용할 것인가를 확실히 말할 수 없다. 흐름방향이 일정하고 제작상 피치각이 변경될 수 없는 경우에는 최적의 경사각으로 설치하며, 역으로 경사각을 변경할 수 없는 경우에는 최적의 피치각의 SFC를 이용하므로써 진동을 효과적으로

억제할 수 있다. 이상으로부터 피치각을 50도, 경사각을 60도로 설치하면, 최대진폭은 PC의 약 13% 미만으로 되어 제진에 가장 효과적으로 된다.

그리고 Fig. 14에서는 직교원주( $\theta=90^\circ$ )의 경우, 피치각에 의한 최대진폭의 변화를 본 실험결과와 Simada<sup>(11)</sup>의 실험결과를 비교하였다. 그림으로부터 본 실험과 Simada의 결과 모두 45도에서 가장 제진효과를 나타내고 있고, 또 30도 및 50도에서도

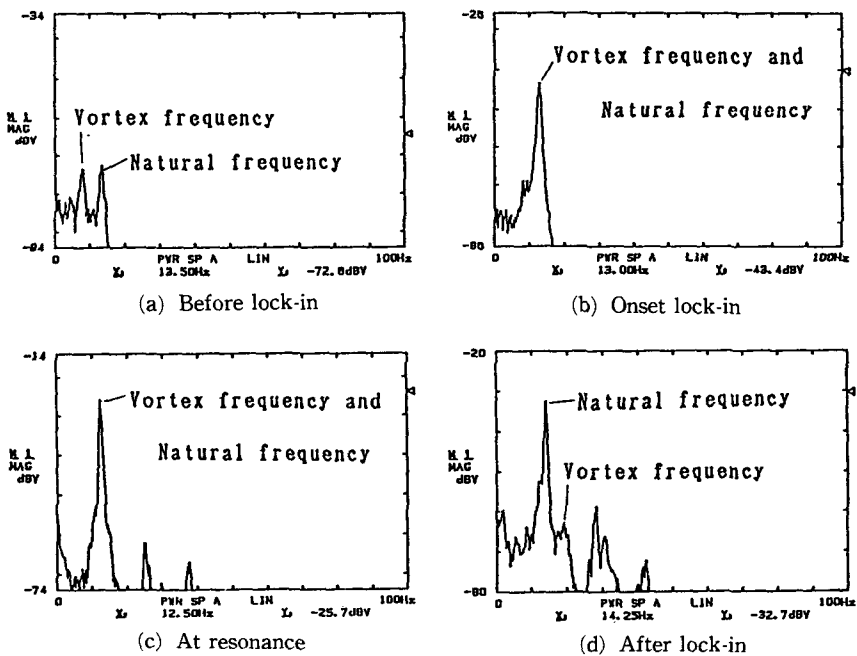


Fig. 11 Power spectra of cylinder displacement for plain cylinder ( $\theta=90^\circ$ )



동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

### 3.3 나선권수의 영향

Fig. 15에는, 나선권수( $n$ )의 최대진폭에의 영향을 보여준다. 나선권수가 증가하면 경사각의 증가에 따라 최대진폭은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 권수가 2에 경사각이 75도인 경우에서는 PC의 약 12%, 그리고 권수가 1, 경사각이 60도에서는 PC의 약 13% 미만으로 억제되고 있다. 그러

나 나선권수의 최적치는 경사각에 의해 다르다. 예로 경사각 45도 및 75도에서는  $n=2$ 가, 또 경사각 60도에서는  $n=1$ 이, 90도에서는  $n=3$ 이 최적치가 된다. 흐름방향이 변화하는 경우에는 평균적으로 적은  $n=2$ 가 제진에 있어서 효과적이다. 한편 흐름방향이 변화하지 않는 경우에는 이 결과에 따라 권수를 결정하므로써 진동을 효과적으로 억제할 수 있다. 이상으로부터 나선권수  $n=2$ , 피치각 50도의 SFC를 75도의 경사각으로 설치하면, 가장 제진

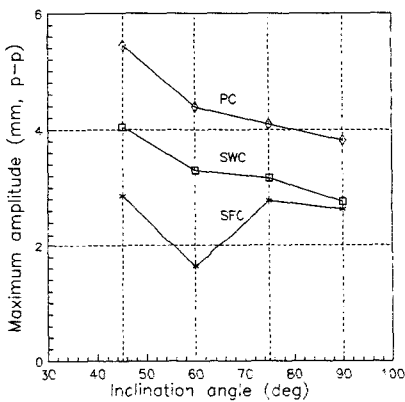


Fig. 12 Variation of maximum amplitude with inclined angle for cylinder fitted with spiral wires and fins

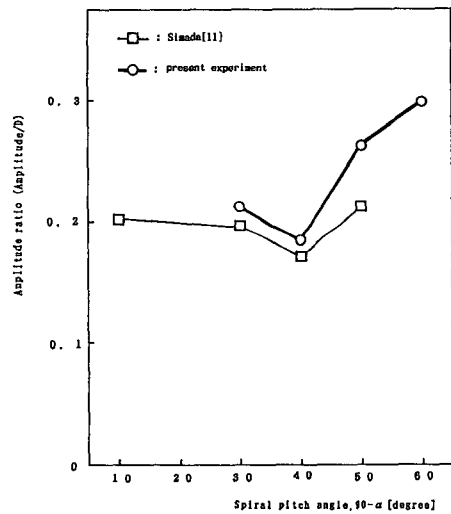


Fig. 14 Comparison of results of present experiments with Simada's values(SFC,  $\theta=90^\circ, n=1$ )

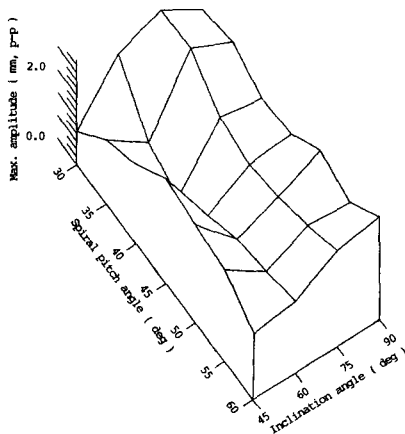


Fig. 13 Three-dimensional amplitude map of spiral fins ( $n=1$ )

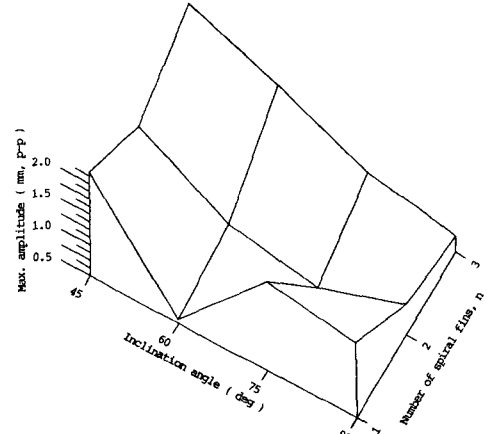


Fig. 15 Effect of number of spiral fins on reduction of amplitude ( $\alpha=50^\circ$ )

효과가 좋음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

경사원주에서 발생하는 Karman소용돌이 진동의 특성을 조사하고, 이의 제진을 위하여 흐름에 대해 경사진 원주에 wire 및 fin을 나선형으로 부착하고, 경사각, 피치각 및 나선권수를 파라미터로 하여 진동특성을 실험적으로 조사하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 원주에 wire나 fin을 부착함으로써 경계층에서 이들에 의해 난류를 촉진하게 되고 원주에 발생하는 양력이 감소하게 된다. 따라서 lock in의 발생을 늦추고 또한 영역의 폭을 좁히며, 진폭을 억제하는 것이 가능하다. 특히 fin을 부착한 경우가 진동억제효과가 뛰어나다.

(2) 직교원주의 경우, 가장 제진효과가 큰 조건은 피치각 50도 및 나선권수 3이다.

(3) 경사원주의 경우, 각 경사각에 있어서 평균적으로 제진효과를 나타낸다. 피치각 50도, 나선권수 2의 나선핀을 부착하면 효과적이다.

(4) 흐름방향이 변화하지 않는 경우에는 각 경사각에 있어서 특정의 나선 피치각, 나선권수를 이용함으로써 효과적으로 진동을 억제하는 것이 가능하다.

(5) 본 실험에서는 나선핀 원주의 피치각을 50도, 나선권수를 2로 하면 가장 제진 효과를 나타내었고, 특히 이것을 경사각 75도로 설치하면 효과적이다.

#### 참고문헌

- (1) Feng, C.C., 1963, "The Measurement of Vortex-induced Effects in Flow Paststationary and Oscillating Circulators and D-section Cylinder," M.Sc. Thesis, Univ.of British Columbia.
- (2) Iwan W.D. and Blevins, R.D. 1974, "A Model for Vortex Induced Oscillation of Structures," Tran. ASME, J. of Applied Mechanic, Sept. pp. 581~586.
- (3) 高原, 田中, 1970, "固定圓柱の流體勵起振動,"

三菱重工技報, Vol. 7, No.2, pp. 123.

- (4) Umemura, N. et al., 1971, "Karman Vortex-Induced Vibration of Circular Cylinders," Trans. JSME, Vol. 37, No.293, pp. 42~51.
- (5) Zdravkovich, M.M., 1981, "Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding," J. of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, Vol. 7, pp. 145~189.
- (6) Nakagawa, K. et al., 1963, "An Experimental Investigation of Aerodynamic Instability of Circular Cylinders," Symp. on Wind Effects on Buildings and Structures, pp. 774~793.
- (7) Scruton, C. and Walshe, D.E.J., 1957, "A Means for Avoiding Wind-Excited Oscillations of Structures with Circular or Nearly Circular Cross-sections," Natl. Phys. Lab., Aero Rep. 335.
- (8) Novak, M., 1967, "The Wind Induced Lateral Vibration of Circular Guyed Masts, Tower-shaped Steel and Reinforced Concrete Structures," Int. Res. Semin. on Wind Effects on Buildings and Structures, Vol.2, pp. 429~457.
- (9) Ruscheweyh, H., 1972, "Tip Effect on Vortex Excited Oscillation of a Model Stack with and without Efflux Stream," Symp. on Flow Induced Structural Vibrations, pp. 101~103.
- (10) Weaver, W. 1961, "Wind-Induced Vibrations in Antenna Members," Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div., Vol. 87, pp. 141~165.
- (11) Simada, T. et al., 1986, "The Efficiency of Helical Strakes for the Suppression of Vortex Excited Oscillation and its Application of Steel Stack in Use." J. of Wind Engineering, Vol.27, pp. 3~16.
- (12) Hanson, A.R., 1966, "Vortex Shedding from Yawed Cylinders," AIAA J., Vol.4, No.4, pp. 738~739.
- (13) Nakagawa, K. et al., 1984, "Vibration and Lift Force of Yawed Cylinders," Wind Tunnel, Osaka Univ., pp. 1~8.