

〈論 文〉

# 균일 유동장내 튜브배열의 유동관련 진동에 관한 연구(Ⅱ)

직렬로 배열된 두 원주의 유동여기 진동에 관하여

이기백\* · 김봉환\*\* · 양장식\*\*\*

(1992년 8월 10일 접수)

## A Study on the Flow-Induced Vibration of Tube Array in Uniform Crossflow(II)

On the Flow-Induced Vibration of Two Interfering Circular Cylinders in Tandem

Ki Baik Lee, Bong Hwan Kim and Jang Sik Yang

**Key Words :** Circular Cylinder(원주), Vortex-Induced Vibration(와여기 진동), Fluidelastic Instability(유력탄성 불안정), Wake-Induced Vibration(후류여기 진동), Proximity-Induced Vibration(근접유동여기 진동), Natural Frequency(고유진동수), Vortex Shedding Frequency(와유출 주파수)

### Abstract

The wake-induced vibration and proximity-induced vibration of two interfering circular cylinders in tandem are investigated experimentally, using an elastically supported cylinder and a fixed cylinder in uniform crossflow. Dynamic responses and flow periodicity in wake are measured to investigate the effect of system parameters on aerodynamic instability. The parameters include the free stream wind velocity and the position of two interfering circular cylinders. The oscillating behavior of the amplitude of the elastically supported cylinder is changed by varying the position, the relative gap spacing between two interfering circular cylinders and the reduced velocities. In small gap spacing between the elastically supported cylinder located to upstream and the circular cylinder fixed to downstream, the fluidelastic instability is founded. The vibration amplitude decreases notably as gap spacing between two interfering circular cylinders becomes large. The dynamic behavior at  $g/D=4.0$  is similar to that of the single circular cylinder.

#### 기 호 설 명

$a$	: 탄성지지된 원주의 진동진폭	$fn$	: 원주의 고유진동수
$D$	: 원주의 직경	$f_{nz}$	: 평행운동모드 진동에 대한 고유진동수
$f$	: 주파수	$f_{vm}$	: 진동하는 원주로부터의 와유출 주파수
		$g$	: 두 원주의 사이의 틈간격
		$k$	: 판스프링의 스프링상수
		$L$	: 원주의 길이
		$m$	: 단위길이당 원주의 질량

\*정회원, 부산대학교 기계공학과

\*\*정회원, 현대중공업(주) 종합연구소

\*\*\*부산대학교 기계공학과

- $S_{u1}, S_z$  : 속도와 변위의 파워스펙트럼 밀도분포
- $u$  : 유속변동의 X성분
- $U$  : 자유 유동속도
- $X, Y, Z$  : 좌표계
- $Z_L, Z_R$  : 원주 양 끝에서의 변위
- $Re$  : 레이놀즈수  $Re = U \cdot D / \nu$
- $St$  : 스트로할 수,  $St = f_{vm} \cdot D / U$
- $U_r$  : 환산유속,  $U_r = U / f_{nz} \cdot D$
- $\nu$  : 공기의 동점성계수
- $\delta$  : 대수감쇠율
- $\rho$  : 공기 밀도

## 1. 서 론

직교 유동내에 놓여진 원주 및 원관군에 관한 유동여기 진동(flow-induced vibration)은 각종 열교환기내 관, 발전설비의 전열면, 교각, 해양구조물, 그리고 공장내 연돌 및 냉각탑 등과 같이 실제적인 상황에서 많이 일어난다. 최근에는 이러한 설비들이 대형화되고 유동의 고속화가 진행됨에 따라 원주주위 유동장 변화에 의해 유발되는 여러 형태의 진동현상들이 심각한 구조적 문제를 일으키는 것이 보고되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 유동내에 있는 관배열에 있어서 가장 기본적인 배열중의 하나인 직렬(tandem)로 배열된 두 원주사이의 유체역학적 상호작용과 동적거동은 유체역학에 있어서 기본적인 중요성을 가지게 되며, 이에 관한 연구들이 진행되어 왔다.<sup>(3~9)</sup> 단일 원주에 있어서는 와여기 진동(vortex-induced vibration)이 가장 발생하기 쉽고 일반적이지만,<sup>(10)</sup> 두 원주가 서로 가까이 근접해서 위치한 경우에는 주위 유동이 상호간섭하기 때문에 단일 원주의 경우와는 달리 와여기 진동과는 별도의 형태인 유력탄성 불안정(fluidelastic instability) 진동이 발생하는 것도 예상된다. 유동방향에 일렬로 배열된 두 원주사이에 상류측 원주에 의해 만들어진 후류가 하류측 원주에 영향을 미치며, 또한 후류내에 하류측 원주가 놓여 있기 때문에 상류측 원주에 작용하는 전단층(shear layer)의 변화에 의하여 상류측 원주에도 영향을 미치게 되는 등 두 원주 상호간에 강한 유체역학적 간섭현상을 나타낸다. 직교 유동내 두 원주사이의 유동간섭 및 진동에 미치는 간섭 영향에 대해 Zdravkovich,<sup>(3~6)</sup> Langenhove와 Berlamont,<sup>(7)</sup> King과 Johns,<sup>(8)</sup> Jen-

drzejczyk 등<sup>(9)</sup>에 의해 많이 연구 되어졌으나 주로 두 원주가 고정되어 있는 경우에 유동장, 변동 양력 및 항력, 그리고 와류출 주파수를 측정하였거나 원주의 진동거동을 다룬 것이 대부분이다. 이러한 보고에 의하면 고정된 두 원주에 작용하는 저항이나 Strouhal수는 두 원주사이 간격 변화에 크게 의존한다.

본 연구는 단일 원주의 와여기 진동특성에 관한 연구<sup>(10)</sup>의 연속연구로서 풍동내에 직렬로 배열된 두 원주의 직교유동에 의한 두 가지 경우의 동적 거동을 조사하였다. 첫째는 상류측 탄성지지 원주의 후류내에 가깝게 놓여진 하류측 고정원주의 간섭에 의한 상류측 원주의 진동(proximity-induced vibration)<sup>(11)</sup>이며, 둘째는 상류측의 고정원주의 후류내에 가깝게 놓여진 하류측 탄성지지 원주의 공기역학적 진동(wake-induced vibration)이다.<sup>(12)</sup> 본 연구의 목적으로 직렬로 배열된 동일 직경의 두 원주에 있어서 어느 한 쪽의 원주가 탄성지지가 되어 있을 경우, 두 원주사이의 간격과 유속변화에 따른 와여기 진동과 유력탄성 불안정 진동의 진동 특성 및 후류내에서의 와류출 특성을 명확히 하기 위해 실험적으로 조사, 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 풍동(wind tunnel)은 아음속 개방회로(subsonic open circuit)의 풍동으로써, 유속변화는 인버터(SV 075 GS-2)를 설치하여 구동 송풍기용 전동기의 주파수를 조정함으로써 얻어진다. 유속범위는 0~11 m/s이며, 레이놀즈수 범위는 250~14,700에 해당한다. 시험부 단면과 구간은 200 mm×200 mm×700 mm의 사각형 채널로 되어 있다. 유동의 맥동을 줄이기 위한 압축탱크(compression tank), 난류성분을 줄이기 위해 스크린이 설치되어 있는 안정실(settling chamber), 가속 및 흐름을 균일하게 하기 위한 축소 노즐과 2차원 시험구간(test section) 등으로 구성되어 있다. 원주의 상류측 균일 유동장의 난류강도는 0.8% 미만이다. 풍동에서의 축소 노즐과 연결된 시험구간은 투명 아크릴로 되어져 있고, 양 벽면에서는 원주가 통과할 수 있도록 구멍이 뚫려져 있다. 원주가 구멍을 통과했을 때 벽면의 틈새(slot)는 원주의 중심에서 반경보다 약 1.5 mm정도 더

Table 1 Experimental conditions for oscillating cylinders

Test No.	D (mm)	L (mm)	m ( $10^{-2}$ kg/m)	k ( $10^2$ N/m)	$f_{nz}$ (Hz)	$\delta$ ( $10^{-3}$ )	material
1	18.0	300	16.61	13.82	13.5	7.87	PVC
2	18.0	300	16.58	15.66	15.5	7.15	PVC

크게 해서 유동이 밖으로 새어 나가지 않도록 합과 동시에 진동만 할 수 있도록 하였다. 시험용 원주는 PVC를 사용하였으며 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 제작된 원주는 두께가 1mm이고, 폭이 15mm인 두 개의 판스프링으로 지지되며 이 판스프링은 풍동 바깥에 설치된 고정구에 완전 고정하였다.<sup>(12)</sup>

## 2.2 실험방법 및 실험조건

두 개의 원주 중 하나를 탄성지지 시키고, 다른 하나를 간격의 변화가 가능하도록 고정시켰다. 본 연구에서는 Fig. 1에 표시된 것과 같이 유동방향의 앞에 있는 원주를 상류측 원주, 뒤쪽의 원주를 하류측 원주라고 하였을 때 상류측 원주를 탄성지지하고 하류측 원주를 고정 시킨 경우(proximity-induced vibration)와 상류측 원주를 고정하고 하류측 원주를 탄성지지 시킨 경우(wake-induced vibration)에 대해서 실험을 하였다. 탄성지지된 원주의 양끝에서의 수직방향 진동변위를 풍동 바깥쪽에서 비접촉식 변위계인 캡센서(keyence AH-6 analog sensor)로 측정하고 시험용 원주의 후류 내에서의 유속 변동성분들을 열선풍속계(kanomax CTA)로 측정하였다. 진동과 유속 변동신호의 파형과 주파수를 오실로스코프(nicolet 2090-III)와 스펙트럼 분석기(scientific atlanta SD380)를 이용하여 관찰하였다. 두 원주간의 간격은  $0.125d$ 에서  $4d$ 까지 변화시켜 가면서 진동특성과 와류출 특성을

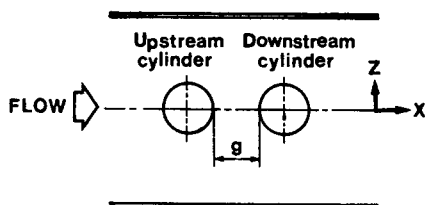


Fig. 1 Arrangement of two interfering circular cylinders in tandem

조사하였다. 실험장치의 개략도 및 측정 시스템은 본 연구의 앞선 연구인 전보<sup>(10)</sup>에 자세히 설명하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 상류측 원주를 탄성지지한 경우

먼저 상류측 원주를 탄성지지한 경우 하류측 고정원주의 간섭영향에 대해서 고찰한다. Fig. 2의 진폭과 환산유속과의 관계를 보면,  $g/D=0.125, 0.25$ 에서는 karman 와류출 주파수와 원주 고유진동수가 일치하는 와동에 의한 공진(vortex-induced resonance)이 나타나지 않고, 와공진 유속을 조금 지났을 때 급격히 큰 진폭의 진동이 일어났다. 상류측 탄성지지 원주는 와공진 유속보다 큰 임계유속에서 하류측 고정 원주 주위 유동과의 강한 간섭현상으로 인해 계속적인 유속증가와 함께 큰 진폭을 나타내는 유력탄성 불안정 진동거동을 나타낸다. 유력탄성력은 원주의 운동과 원주들 주위 유동 사이에 있어서 상호작용에 의해서 일어난다.<sup>(3)</sup> 이때의 진동거동은 中村 등<sup>(13)</sup>의 실험결과에 나타나 있는 단면 종횡비가 2이 사각주에서의 갤러핑(galloping) 현상과 유사하다. 사각주에 있어서의 갤러핑의 발생에 대해서는 일반적으로 단면 종횡비가 1혹은 2인 사각주에서 뒤쪽 가장자리에 회전중심이 있는 경우에는 사각주의 받음각 변화에 따른 유체력에 의한 회전 모멘트에 기인한 진동과 잘 대응하고 있다. Oka<sup>(17)</sup>와 Zdravkovich<sup>(4)</sup>의 유동실험 결과에서 확인된 것과 같이 원주 간격이 좁을 경우에는 두 원주는 원주사이의 좁은 정체영역에 의해서 이어져 있는 하나의 물체라고 생각되어지며, 상류측 원주의 진동은 Lakshmana<sup>(14)</sup>가 제시한 하류측 고정 원주를 중심으로 하는 회전진동과 유사하다고 생각되어 진다.  $g/D=0.5$ 인 경우에는  $0.125, 0.25$ 와는 달리 와공진 유속에서 진폭상의 공진 피크가 발생되기 시작하며, 더욱 유속을 증가시켰을

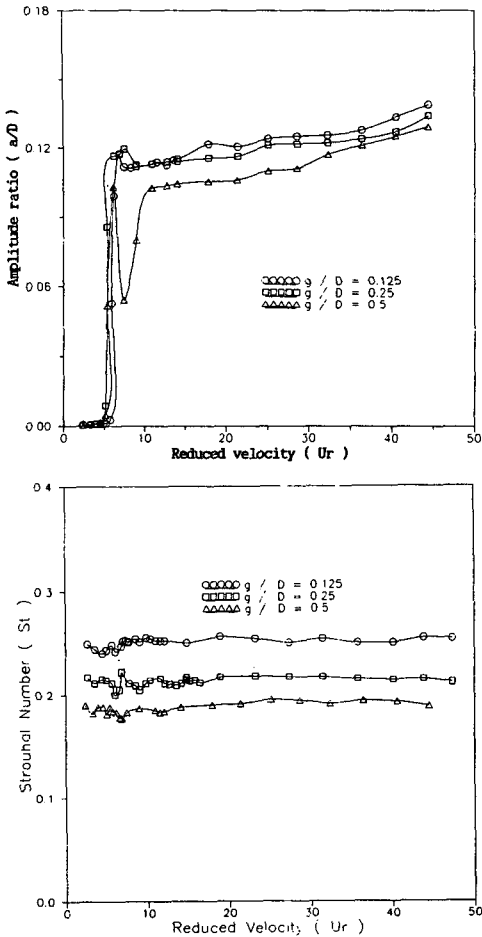


Fig. 2 Displacement response and Strouhal number of the upstream elastically-supported cylinder ( $g/D=0.125, 0.25, 0.5$ )

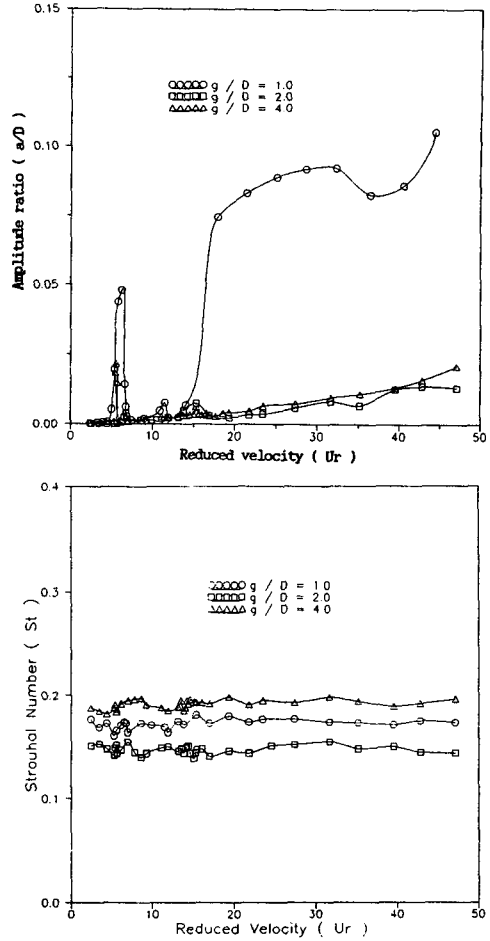


Fig. 3 Displacement response and Strouhal number of the upstream elastically-supported cylinder ( $g/D=1.0, 2.0, 4.0$ )

때는  $g/D=0.125, 0.25$ 와 마찬가지로 불안정 진동거동이 일어나고 있다. 즉  $g/D=0.5$ 에서는 와여기 진동과 불안정 진동이 결합된 진동거동을 나타내고 있다. 이러한 갤러핑 현상은 Bokaian 등<sup>(11)</sup>의 실험결과와 같이 하류측 원주가 상류측 원주의 후류 가까이 있을 때만 발생한다. 그리고 유속변화에 따른  $St$ 변화는 유속이 10 이하에서는 심한 변동이 발생하지만 차츰 일정한 값으로 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 두 원주 틈새 간격이 매우 작은 경우인  $g/D=0.125$ 일 때 0.26으로 나타났다.  $g/D$ 가 증가할수록  $St$ 값은 감소한다.

Fig. 3은 원주 간격  $g/D=1.0, 2.0, 4.0$ 인 경우의 실험결과로써 와공진 유속을 지나서  $g/D=1.0$

의 간격에서는 아직  $g/D=0.125, 0.25$ 의 유력탄성 불안정 진동을 완전히 벗어나지 못하고 있고 환산유속이 15에서 큰 진폭의 진동이 일어남을 알 수 있다. 그리고  $g/D=2.0, 4.0$ 의 경우에는 환산유속이 5인 지점에서 와공진이 일어났지만, 와공진 유속을 지나서는 급격한 큰 진폭의 진동은 없고, 완만한 진폭 증가가 있음을 알 수 있다. 이것은 유속이 매우 큰 경우에 난류의 영향으로 인해 진폭의 점진적인 증가 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히  $g/D=4.0$ 에서는 진폭형태가 앞선 연구의 실험결과인 단일 원주의 양상과 거의 유사한 거동을 하고 있음을 알 수 있다.<sup>(10)</sup> 이와같이 간격이 증가할수록 하류측 고정원주가 상류측 탄성지지 원주에

미치는 영향이 점진적으로 작아져서 단일원주에 가까운 진동양상을 보여준다. Kiya 등,<sup>(18)</sup> Oka,<sup>(17)</sup> Zdravkovich<sup>(4)</sup> 그리고 Ishigai<sup>(19)</sup>의 유동 실험결과와 비교해서 고찰해 보면 두 원주사이의 간격비가 2.0에서 2.8보다 작을 경우에는 상류측 원주로부터 분리된 전단층이 하류측 원주에 재부착하여 이로 인한 상류측 원주로부터의 와유출을 억제하며 그 이상의 간격비에 대해서는 상류측 원주로부터 뚜렷한 와유출이 나타나기 시작하고, 간격비가 증가할수록 단일원주의 와유출과 같게 된다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과는 Bokaian<sup>(11)</sup>과 Lakshmana<sup>(14)</sup>의 결과와 잘 일치한다.  $St$ 값의 변화양상을 살펴보면,  $g/D=2.0$ 일 때 약 0.14 정도로 감소한 후, 간격이 증가할수록  $St$ 값이 단일 원주일 경우의 대표적 값인 0.2에 수렴하고 있다. 이러한 결과는 진동하는 원주가 유동장에 영향을 미치기 때문에 두 개의 고정원주에 대한 Kiya 등<sup>(18)</sup>의 실험결과와 다소 차이가 있으나 간격변화에 따른 변화추세는 거의 유사하다.

3.2 하류측 원주를 탄성지지한 경우

고정된 상류측 원주의 후류내에 하류측 원주를 탄성지지한 경우에 상류측 원주의 후류간섭 영향에 의해 발생하는 후류여기 진동에 대해서 고찰한다.

Fig. 4는 상류측 원주를 완전 고정하고, 하류측 원주를 탄성지지 시켰을 경우, 두 원주간의 간격이 좁은  $g/D=0.125, 0.25, 0.5$ 인 경우의 진폭 응답 특성과 와유출 특성을 나타낸 결과이다. 각각의 경우에 있어서 와공진 유속이 조금씩 다르게 나타나며, 비교적 좁은 간격  $g/D=0.125, 0.25$ 에서는 단일원주와 경향은 유사하지만, 와동에 의한 공진 진폭은 작다. 앞에서 언급한 것과 같이 Zdravkovich<sup>(4)</sup>의 실험결과에 의하면 상류측 고정원주의 뒤에서 유동이 정체되어 와유출이 억제되는 유동영역에 해당하기 때문에 고정원주의 후류에 의한 간섭 영향이 하류측 탄성지지된 원주에 미치지 못하며, 상류측 원주가 탄성지지된 경우보다 진폭이 훨씬 작다. 간격이  $g/D=0.5$ 일 때는 와에 의한 공진이 단일 원주의 와공진처럼 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 병진 모드의 진동특성뿐 만 아니라 아울러 회전 모드 진동특성이 함께 나타나는데 그 원인은 상류측 원주의 후류 영향과 하류측 탄성지지 원주의 후류영향이 중첩되어 와유출의 2차원성이 유지되지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 환산

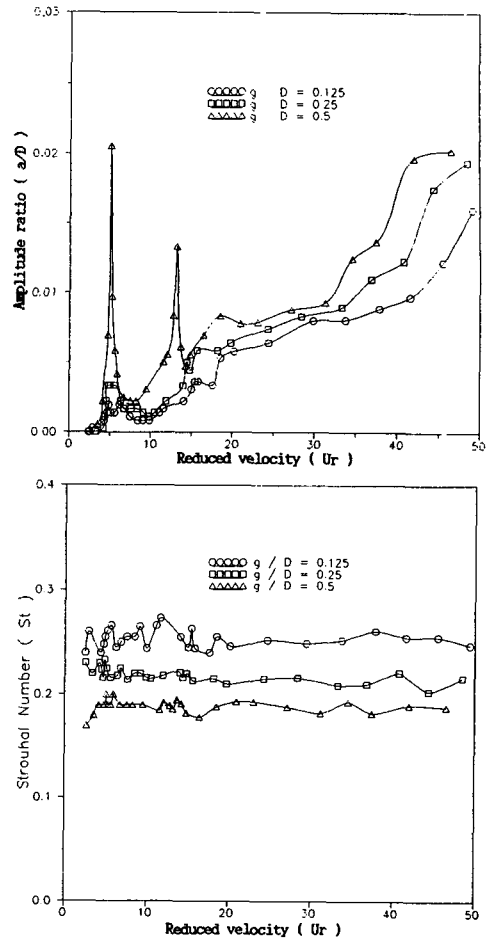


Fig. 4 Displacement response and Strouhal number of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=0.125, 0.25, 0.5$ )

유속과  $St$ 의 관계를 살펴보면, 상류측 원주가 탄성지지된 경우의 실험결과와 거의 유사하다.

Fig. 5는 두 원주 간격이  $g/D=1.0, 2.0, 4.0$ 인 경우의 진폭 응답특성과 와유출특성을 나타낸 것으로,  $g/D$ 의 간격이 증가할수록 와공진 유속에서 진폭상에 큰 피크가 나타난다. 하류측의 탄성지지 원주가 고정된 상류측 원주 후류내에서의 강한 간섭영향으로 인하여 큰 진동변위 파형을 나타내고 있다. 특히 간격  $g/D=4.0$ 에서는 와공진 유속을 지나 두번째 피크값을 가지다가 유속이 증가함에 따라 큰 진폭을 갖게 되는데 이것은 유력탄성 불안정 때문에 나타난 것이다. 이러한 현상은 Wong<sup>(16)</sup>이 보고한 것과 같이 상류측 원주의 변동후류가 하류측 원주의 그 자체 와유출에 기인한 하류측 원주

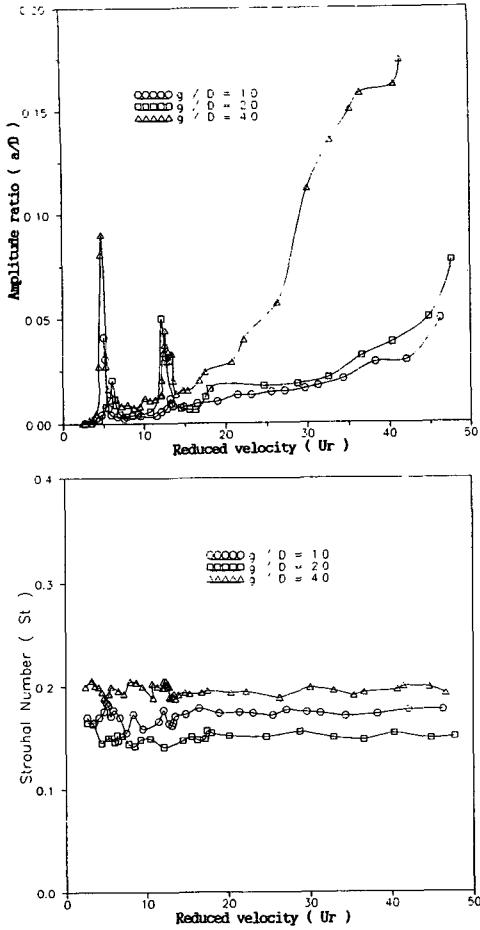


Fig. 5 Displacement response and Strouhal number of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=1.0, 2.0, 4.0$ )

의 자려운동과 공진이 이루어지는 곳에서 일어남을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 후류내에 있는 원주가 유동혼란으로 인하여 영향을 받을 때, 두 원주사이의 간격은 매우 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다.

3.3 간격변화에 따른 공진, 공진전후 유속에서의 응답특성

진동계에 영향을 미치는 변수 중 두 원주사이 간격변화에 대한 응답특성 변화에 대해서 살펴본다. Fig. 6은 상류측 원주를 탄성지지시키고, 하류측 원주를 고정시켰을 경우에 공진전( $U_r=3.30$ ), 공진( $U_r=4.94$ ), 공진후( $U_r=23.46$ )의 세가지 환산 유속에 있어서 간격변화에 대한 응답특성을 나타낸

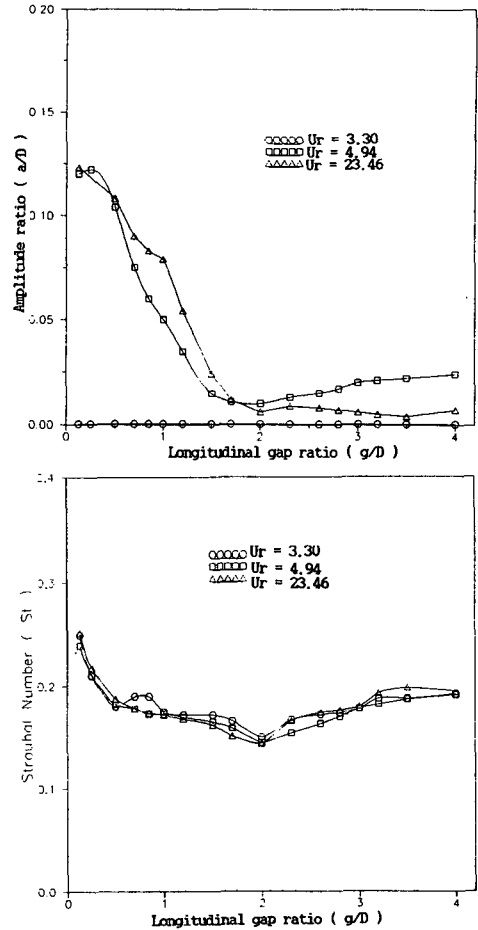


Fig. 6 Relations between  $g/D$  and amplitude scale & Strouhal number for the upstream elastically-supported cylinder

것이다. 환산유속이 3.30일 때는 간격변화에 관계 없이 진동진폭은 거의 0이다. 이러한 현상은 와류출 주파수가 고유진동수보다 낮기 때문에 원주는 거의 진동을 하지 않으며, 간섭을 일으키는 고정원주도 어떠한 영향도 주지 않는다. 공진유속과 공진후 유속( $U_r=23.46$ )에서는 두 원주사이의 간격이 2.0까지는 간격이 증가할 때 진동진폭이 크게 감소하며,  $g/D=2.0$  이후에서는 완만한 증감을 나타낸다. 즉 원주사이의 간격이 증가할수록 유력탄성 불안정성은 점점 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 Lakshmana<sup>(14,15)</sup>의 결과들과 경향이 일치한다. 간격변화에 대한  $St$ 의 변화를 살펴보면  $g/D=2.0$  이하에서는 간격이 증가할수록  $St$ 의 값이 감소하였으나,  $g/D=2.0$  이후에서는 서서히 증가

하는 경향을 나타내며  $g/D=4.0$ 일 경우에는 단일 원주의 값에 수렴한다. 본 실험결과는 Bokaian<sup>(11)</sup>과 Ishigai<sup>(19)</sup>의 유동 실험결과와 경향을 같이 하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 하류측 원주를 탄성지지 시키고 상류측 고정원주를 후류내에 위치시켰을 때의 응답과 와유출 특성을 나타낸다. 여기서도 공진전 ( $U_r=3.30$ ), 공진 ( $U_r=4.94$ ), 공진후 ( $U_r=22.02$ )의 세 가지 환산유속에 대해 간격변화에 대한 응답특성을 나타낸다.  $g/D$ 가 증가할수록 진폭도 증가함을 알 수 있다. 이것은 상류측 고정원주에 의한 후류에 기인한 영향이 간격이 클수록 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은  $g/D$ 가 증가할수록 두 원

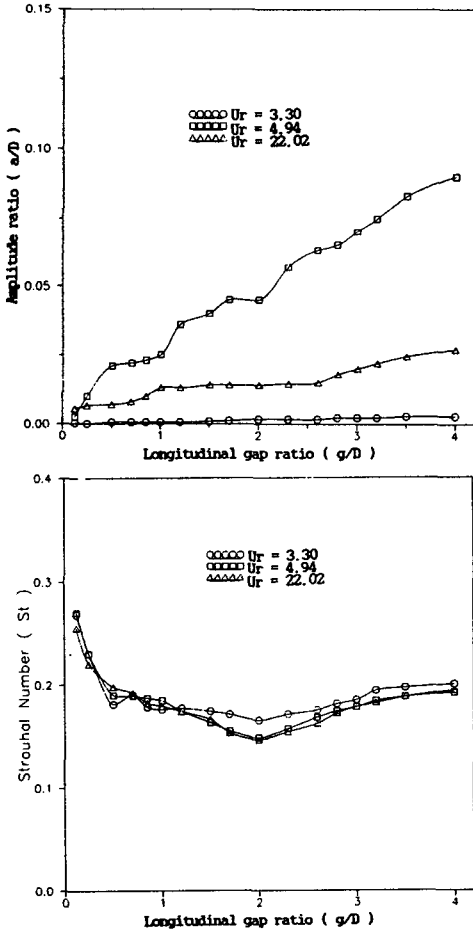


Fig. 7 Relations between  $g/D$  and amplitude scale & Strouhal number for the downstream elastically-supported cylinder

주사이 영역내에서 유동의 정체, 전단층의 재부착, 와유출등의 유동장이 변화함에 따라 후류의 영향이 커지기 때문이다. 이러한 결과는 Wong<sup>(16)</sup>의 결과와 경향이 거의 유사하다.

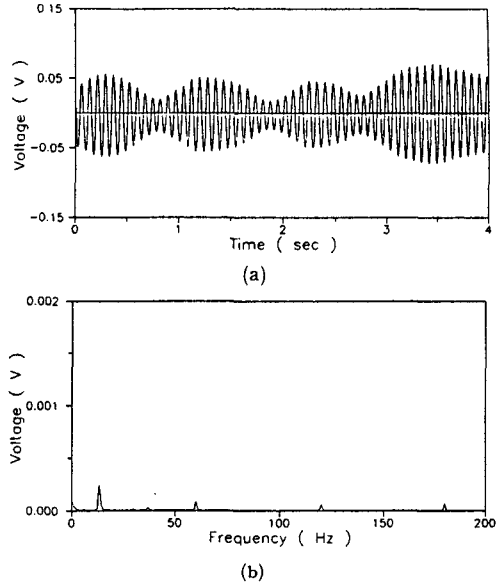


Fig. 8 (a) Signal and (b) Spectra of displacement of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=2.0, U_r=4.0$ )

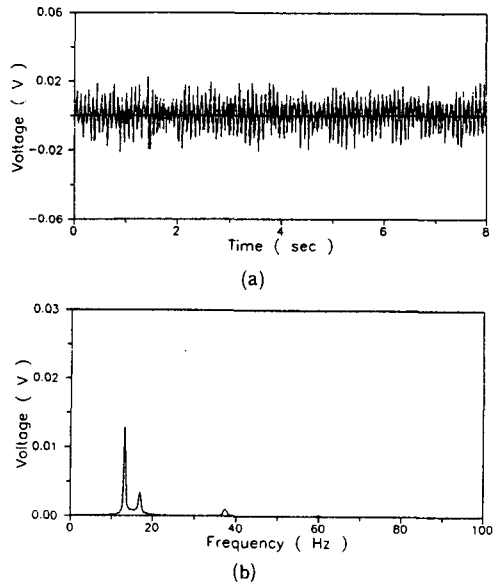


Fig. 9 (a) Signal and (b) Spectra of fluctuating velocity of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=2.0, U_r=4.0$ )

Fig. 8에서 Fig. 11까지는  $g/D=2.0$ 인 경우, 공진 근처에서 하류측 탄성지지 원주의 진동과 두 원주 중간 지점에서의 유속변동의 파형과 스펙트럼 밀도분포를 보여주고 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 와공

진 전 유속에서의 실험결과를 나타내고 있으며, 유속변동 스펙트럼 밀도분포에서 와유출 주파수 성분과 원주의 진동주파수 성분이 나타나는 두 종류의 스펙트럼 피크가 발생하고, 특히 하류측 원주가 진

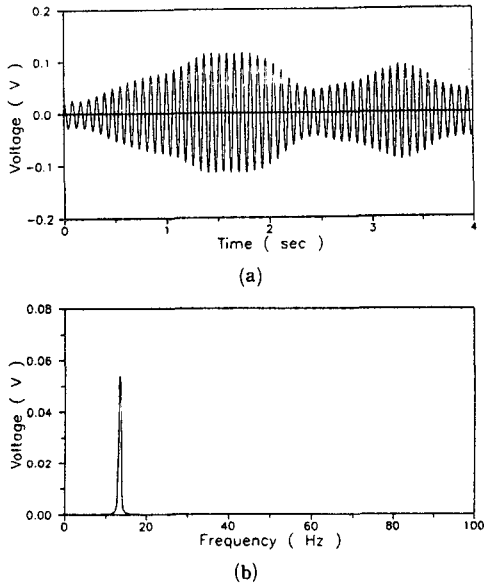


Fig. 10 (a) Signal and (b) Spectra of displacement of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=2.0, U_r=5.5$ )

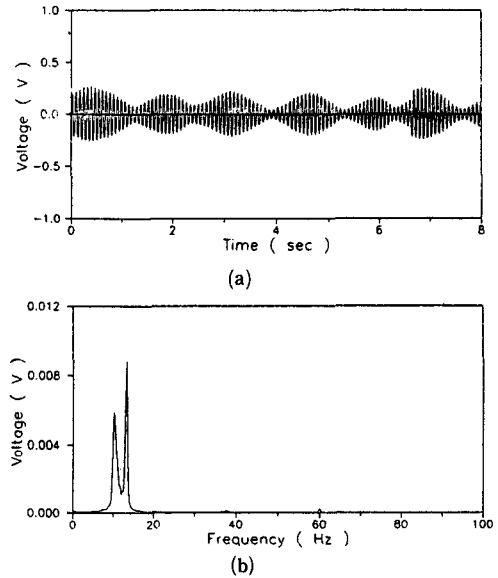


Fig. 12 (a) Signal and (b) Spectra of displacement of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=4.0, U_r=4.0$ )

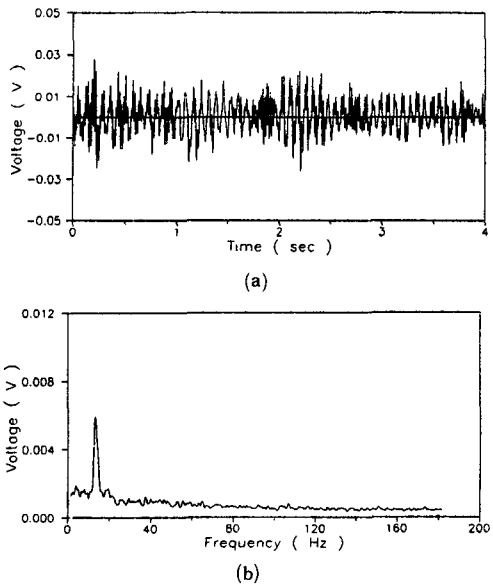


Fig. 11 (a) Signal and (b) Spectra of fluctuating velocity of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=2.0, U_r=5.5$ )

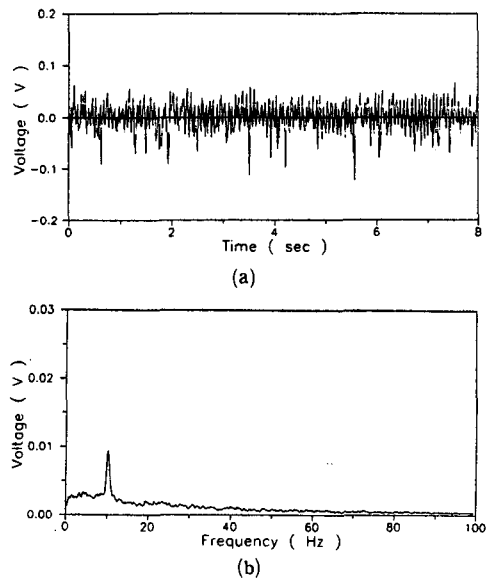


Fig. 13 (a) Signal and (b) Spectra of fluctuating velocity of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=4.0, U_r=4.0$ )



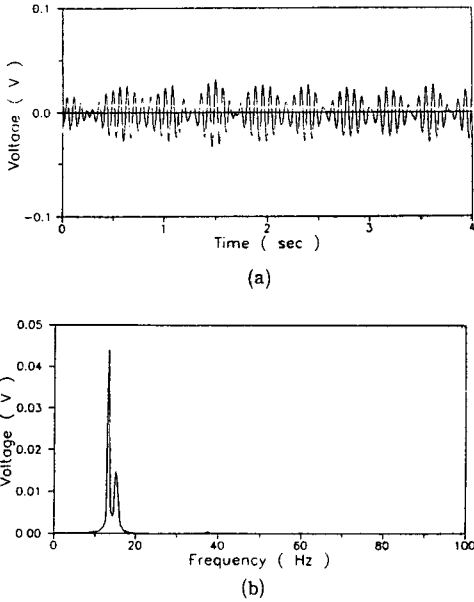


Fig. 14 (a) Signal and (b) Spectra of displacement of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=4.0, U_r=6.5$ )

동하고 있으면서도 스펙트럼상에는 와유출 주파수와 하류측 탄성지지 원주의 고유진동수가 함께 나타남을 알 수 있다.<sup>(18)</sup> 이는 하류측 원주의 진동이 상류측 원주 뒤에서의 후류변동에 영향을 주게 됨을 의미한다. 물론 진동하는 원주의 변위 스펙트럼에는 원주의 고유진동수 성분만의 단일 피크밖에 확인되지 않았다. Fig. 10과 Fig. 11은 와공진 유속 근처에서 와유출 주파수가 원주의 고유진동수와 일치하게 되는 것을 나타내고 있는데, 이때의 하류측 원주의 변위는 최대로 큰 진동파형을 나타내고 있고, 그때의 스펙트럼상의 밀도분포를 보면 두 주파수가 각각 하나의 큰 피크값을 갖게 됨을 알 수 있다.

Fig. 12에서 Fig. 15까지는 간격이 넓은 경우인  $g/D=4.0$ 일 때의 공진 전후에서의 진동 및 변동 유속의 파형과 스펙트럼 밀도분포이다. 앞의 것과 같이 진동변위 파형은 현저한 beat형상을 나타내고 있으며,  $g/D=2.0$ 과는 달리 상류측 원주로부터 강한 와유출에 의해서 와유출 주파수 성분이 진동 변위 스펙트럼상에 나타나는 현상을 볼 수 있다. 원주 사이의 간격이 넓은 경우에는 하류측 원주가 상류측 원주의 후류 중 공진 유속 범위에서 진동하고 있어도 주변 유동의 유속변동 스펙트럼분포에는

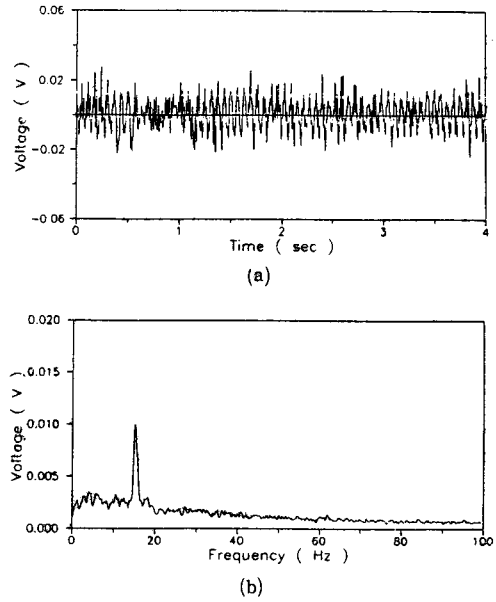


Fig. 15 (a) Signal and (b) Spectra of fluctuating velocity of the downstream elastically-supported cylinder ( $g/D=4.0, U_r=6.5$ )

원주의 진동에 의한 성분은 나타나지 않았다. 이러한 것은 하류측 탄성지지 원주는 상류측 원주의 후류 중에 놓여 있기 때문에 강한 후류변동에 의해서 강제적인 진동을 받게 됨을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 kiya 등,<sup>(18)</sup> Zdravkovich,<sup>(4-6)</sup> 그리고 Ishigai<sup>(19)</sup>의 유동 실험결과와 종합해서 비교 고찰해 보면 두 원주사이의 간격이 2.0 이하에서는 하류측 탄성지지된 원주의 진동에 의한 유동 간섭이 두 원주사이의 후류에 영향을 미치게 되며,  $g/D=4.0$  이상에서는 상류측 고정원주의 와유출에 의한 영향이 하류측 탄성지지 원주의 진동에 영향을 미치게 되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

균일 유동장내에 직렬로 배열된 두 원주의 두 가지 상호간섭 형태에 있어서 간격 및 유속변화에 따른 진동특성에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상류측 원주가 탄성지지되고, 하류측 원주가 고정된 경우에 원주 사이의 간격이 작을 때는 와공진(vortex-induced resonance) 현상이 나타나지 않았으며, 공기역학적으로 불안정한 유력탄성 불안정 진동이 나타났다. 간격이 증가할수록 와공진 현상

은 더욱 뚜렷해졌으며,  $g/D=4.0$ 인 경우에는 단일 원주의 진동거동과 거의 유사함을 알 수 있었다.

(2) 상류측 원주를 고정시키고, 하류측 원주를 탄성지지 시켰을 경우에는 간격이 작을 때는 단일 원주에서의 와공진 특성과는 달리 아주 작은 여기 진동만 존재하였고, 차츰 간격이 클수록 고정된 상류측 원주의 후류성분으로 인해 강한 beat형상을 갖는 강제진동의 양상을 보여주었다.

(3) 공진, 공진후의 간격변화에 따른 응답특성에서 보면, 상류측 원주를 탄성지지 시키고 하류측 원주를 고정시켰을 때, 간격이 비교적 좁은 경우인 즉  $g/D=0.5$  이하에서는 유속이 클수록 유력탄성적 불안정에 기인한  $0.12D$  정도의 큰 진폭을 나타내고  $g/D=2.0$ 까지는  $g/D$ 가 증가할수록 진동진폭이 급격히 감소하여 공진유속에서,  $g/D=0.125$ 일 경우의  $1/20$ 까지 감소한다. 이때 스트로할 수도 간격이 클수록 차츰 작아져서  $0.14\sim 0.15$ 에 가까운 값을 나타낸다.  $g/D=2.0$ 은 유동장 및 진동특성에 있어서도 임계 간격비인 것으로 판명되었다.

하류측 원주를 탄성지지 시켰을 경우에는  $g/D$ 가 증가할수록 진동진폭은 증가하며, 공진유속에서  $g/D=4.0$ 일 경우는 와여기 진동으로 인하여  $g/D=0.125$ 인 경우의 진동진폭보다 약 30배 큰  $0.08D$  정도이다.

### 참고문헌

(1) Blevins, R. D., 1990, "Flow-Induced Vibration," Van Nostrand Reinhold Company.  
 (2) Nakamura, Y. and Mizota, T., 1975, "Unsteady Lifts and Wakes of Oscillating Rectangular Prisms," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, pp. 855~871.  
 (3) Zdravkovich, M.M., 1985, "Flow Induced Oscillations of Two Interfering Circular Cylinders," Journal of Sound and Vibration, Vol. 101, pp. 511~521.  
 (4) Zdravkovich, M. M., 1977, "Review of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Various Arrangements," Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 99, pp. 618~633.  
 (5) Zdravkovich, M.M., 1987, "The Effects of

Interference between Circular Cylinders in Crossflow," Journal of Fluids and Structures, No. 1, pp. 239~261.  
 (6) Zdravkovich, M.M., et al, 1972, "Flow-Induced Vibrations of Two Cylinders in Tandem and their Suppression," Flow-Induced Structural Vibrations, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, pp. 630~639.  
 (7) Langenhove, G.V. and Berlamont, J., 1978, "Fluid Dynamic Interference on the Oscillatory Movements of Pairs of Cylinders," 3rd Colloquium on Industrial Aerodynamics, Aachen. West Germany, Vol. 2, pp. 151~161.  
 (8) King, R. and Johns, D.J., 1976, "Wake Interaction Experiments with Two Flexible Circular Cylinders in Flowing Water," Journal of Sound and Vibration, Vol. 45, pp. 259~283.  
 (9) Jendrzejczyk, J.A. Chen, S.S. and Wambsgan-ss, M.W., 1979, "Dynamic Response of a Pair of Circular Tubes Subjected to Liquid Cross-Flow," Journal of Sound and Vibration, Vol. 67, pp. 263~273.  
 (10) 이기백, 김봉환 등, 1992, "균일 유동장내 튜브배열의 유동관련 진동에 관한연구(I). -단일 원형 실린더의 와유기 진동에 관하여-, " 대한기계학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 924~932.  
 (11) Bokaian, A. and Geoola, F., 1984, "Proximity-Induced Galloping of Two Interfering Circular Cylinders," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 146, pp. 417~499.  
 (12) Bokaian, A. and Geoola, F., 1984, "Wake-Induced Galloping of Two Interfering Circular Cylinders," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 146, pp. 383~415.  
 (13) 中村, 溝田, 1973, "矩形断面柱のねじりフラッタについて", 日本土木學會論文報告集, 제216호, pp. 21~39.  
 (14) Lakshmana Gowda, B.H and Prabhu, D.R., 1987, "Interference Effects on the Flow-Induced Vibrations of a Circular Cylinder," Journal of Sound and Vibration, Vol. 112, No. 3, pp. 487~502.  
 (15) Lakshmana Gowda, B.H and Deshkulkarni, K.P., 1988, "Interference Effects on the Flow-

- Induced Vibrations of a Circular Cylinder in Side-By-Side and Staggered Arrangement," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 122, No. 3, pp. 465~478.
- (16) Wong, H.Y., 1980, "Vortex-Induced Wake Buffeting and its Suppression," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 6, pp. 49~57.
- (17) Oka, S., Kostic, Z. G., and Sikmanovic, S., 1972, "Investigation of the Heat Transfer Processes in Tube Banks in Cross Flow," *International Seminar on Recent Developments in Heat Exchangers*, Trogir, Yugoslavia.
- (18) Kiya, M., et al., 1980, "Vortex Shedding from Two Circular Cylinders in Straggered Arrangement," *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 166~173.
- (19) Ishigai, S., et al., 1972, "Experimental Study of Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow(Part 1, Karman Vortex Flow Around Two Tubes at Various Spacings)," *Bull. JSME*, Vol. 15, No. 86, pp. 949~956.