

〈論 文〉

균일 유동장내 튜브 배열의 유동관련 진동에 관한 연구(I)

-단일 원형 실린더의 와유기 진동에 관하여-

이기백* · 김봉환** · 양장식*** · 김문경*** · 장석상****

(1991년 8월 28일 접수)

A Study on Flow-Induced Vibration of Tube Array in Uniform Crossflow (I)

-On the Vortex-Induced Oscillation of a Circular Cylinder-

Ki Baik Lee, Bong Hwan Kim, Jang Sik Yang, Moon Kyeong Kim
and Suk Sang Jang

Key Words : Vortex-Induced Vibration(와유기 진동), Circular Cylinder(원형실린더), Vortex Shedding Frequency(와유출주파수), Natural Frequency(고유진동수), Translation Mode(평행운동 모우드), Rotation Mode(회전운동 모우드)

Abstract

This paper presents the results of an experimental study on the characteristics of the vortex-induced vibration of an elastically supported circular cylinder in the cross air flow. For a range of velocities, power spectral densities of the signals from a hot-wire anemometer placed in the wake of an oscillating circular cylinder and gap sensors placed in the both ends of a circular cylinder were obtained to determine vortex-shedding frequencies, natural frequencies and vibrating frequencies of a cylinder. The effects of slots in the test section on vortex shedding and cylinder oscillation were investigated. The present study covered the reduced velocity range $1.0 \leq Ur \leq 64.6$. The response characteristics of the cylinder has been shown to vary extensively, depending on the slots in the test section as well as on the reduced velocity. For an elastically supported cylinder, a purely translation mode oscillation was observed at a low velocity, however a rotation mode oscillation was often superposed for higher velocities. These two oscillating frequencies were equal to their natural frequencies irrespective of the changes of free stream velocities.

기 호 설 명

d : 원형실린더의 직경(mm)
 L : 원형실린더의 길이(mm)

M : 단위길이당 탄성지지 실린더의 등가질량(kg/m)

f_{nz} : 실린더의 평행운동 모드에 대한 고유진동수

f_{no} : 실린더의 회전운동 모드에 대한 고유진동수

f_{vm} : 진동하는 실린더로부터의 와유출주파수

f_x : 평행운동 모드 진동주파수

f_o : 회전운동 모드 진동주파수

*정회원, 부산대학교 기계공학과

**정회원, 현대중공업 종합연구소

***부산대학교 기계공학과 대학원

****포항공과대학 전기전자공학과

- Re : 레이놀즈수(Reynolds Number), $Re=Ud/\nu$
- St : 스트로우할수(Strouhal Number), $St=fv_m d/U$
- $S_u, S_z, S_{zL}, S_\theta$: u, Z_A, Z_z, θ 의 파워스펙트럼
- U_∞ : 유입속도(ree stream velocity)
- U_r : 환산속도(reduced velocity), 혹은 무차원유속(dimensionless velocity) $U_r=U/f_n z d$
- u : x 방향 유속변동
- X, Y, Z : 좌표계
- Z_A : 실린더의 평행운동 모드 변위(translation mode displacement), $= (Z_R + Z_L)/2$
- Z_L, Z_R : 실린더 좌우 양 끝점에서의 변위
- θ : 실린더의 회전각 변위(rotation mode angle displacement), $= (Z_R - Z_L)/L$
- ν : 공기의 동점성계수(m^2/sec)
- ρ : 공기 밀도(kg/m^3)
- δ_r : 무차원 감쇠계수(reduced damping) $= 2M\delta_s/\rho d^2$
- δ_s : 대수 감쇠계수(logarithmic decrement of damping)

1. 서 론

유동관련 진동(flow-inuced vibration)은 진동문제의 약 20%를 차지한다고 보고되었으며,⁽¹⁾ 유체역학적 기진력에 의한 진동메카니즘의 규명은 건축구조물, 해양구조물 그리고 각종 열교환기등의 안정성에 관계되기 때문에 공학적으로 매우 중요하다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ 예컨대 열교환기내 관관을 지나는 유체는 여러가지 형태의 진동과 불안정성을 일으킬 수 있으며, 열교환기가 더욱더 대형화되고 효율적인 설계를 함에 따라 유속의 증가로 인하여 이러한 문

제는 더욱더 심각해 지고 있다. 실제적인 측면에서 볼 때 열교환기나 유동을 받는 구조물을 설계하는 사람들은 이러한 유동관련 진동의 특성을 반드시 이해 해야한다.

본 연구는 튜브배열에 관한 유동관련 진동에 대한 실험적 연구중에서도 직교 균일 유동장내에 탄성적으로 지지된 단일 원형실린더에 있어서의 와유기 진동(vortex-induced vibration) 특성에 관한 연구를 기술한다. 단일 원형실린더의 와유기 진동이란 실린더가 유동장내에 놓여 있을 경우 유동박리로 인하여 실린더양 옆에서 교대로 발생하는 Kármán 와열의 유출로 인하여 실린더에 가해지는 유체동압력 변화에 의한 진동현상을 말하며, 많은 실험적 연구결과에 의하면 와유출주파수가 실린더의 진동수와 어느 유속영역에서 일치하게 되는 록인현상(lock-in phenomenon)이 존재한다. 앞선 연구들은 주로 록인영역(lock-in region)에 국한하거나 실린더 진동이 자유 유동방향에 대해 수직으로 일어나는 현상에 대하여 연구하여 왔다.⁽²⁻⁸⁾ 그래서 본 연구에서는 풍동내에 놓여진 탄성지지 실린더의 와유출 특성과 진동 응답을 동시에 측정하고 분석하여 유입속도 변화에 따른 이들의 상호관계를 확인하고 아울러 실린더가 통과하는 풍동측정부에 있는 틈새 간격변화가 와유출과 실린더의 진동특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 시험구간의 크기가 200 mm×200 mm인 아음속 풍동을 사용하였으며 유속변화는 인

Table 1 Characteristics of experimental test program

Test No.	d (mm)	L (mm)	m ($10^{-2}Kg/m$)	k ($10^2N/m$)	$f_n z$ (HZ)	δ_z (10^{-23})	f_{n0} (HZ)	$\frac{f_{n0}}{f_n z}$	Material
1	12.8	340	13.47	11.19	14.5	7.12	38.5	2.66	Al
2	12.8	340	13.34	13.56	16.0	7.71	41.0	2.56	Al
3	18.0	300	16.81	11.26	13.0	7.21	36.0	2.77	PVC
4	18.0	300	16.61	13.82	14.5	7.87	39.5	2.72	PVC
5	18.0	300	16.58	15.66	15.5	7.15	43.5	2.81	PVC

버터(inverter)를 설치하여 구동 송풍기 모터의 주파수를 조정함으로써 얻었다. 유속범위는 0~11 m/s이며 레이놀즈수 범위는 250~14,700에 해당한다. 원주의 상류측 균일 유동장의 난류강도는 0.8%미만이다. 풍동의 시험구간의 양벽면에서는 실린더가 통과할 수 있도록 구멍이 뚫려져 있다. 시험용 원형실린더는 PVC와 알루미늄 파이프가공하였으며 자세한 제원은 Table 1에 나타나 있다. 제작된 원형실린더는 두께가 1mm이고 폭이 15mm인 판스프링으로 지지되며 이 판스프링은 풍동 바깥에 설치된 고정구에 완전 고정된다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

2.2 실험방법 및 실험 조건

탄성지지된 원형실린더의 후류내에서 와유출주파수를 측정하기 위해 실험을 통하여 유속 변동파형

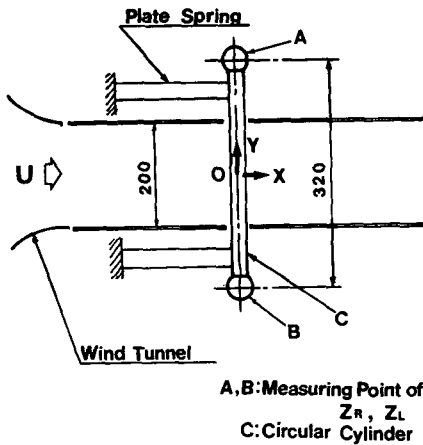


Fig. 1 Outline of the experimental apparatus (plan view)

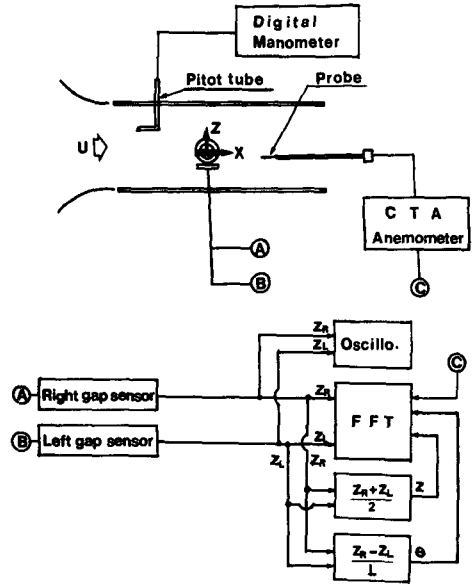


Fig. 2 Schematic representation of measuring system

이 잘 관찰되는 지점인 $X=3d, Y=0, Z=1.5d$ 인 근처 지점에 열선풍속계(Kanomax CTA)의 프로브를 설치하였다. 열선풍속계의 출력은 원형실린더 후류에서 흐름방향의 유속 변동성분을 나타내며 이 변동성분의 파형과 주파수를 오실로스코프(Nicolet 2090-III)와 신호 분석기(Scientific AtlantaSD-380)를 이용하여 와유출을 관찰하였다. 탄성지지된 원형실린더의 양끝에서의 수직변위인 Z_L 과 Z_R 를 측정하기 위해 비접촉식 변위계인 갭센서(Keyence AH-416 Analog Sensor)를 사용하였다. 실린더 양끝에서의 수직변위들로부터 평행운동 모드(translation mode)와 회전운동 모드(rotation mode)의 특성을 파악하기 위해 OP앰프를 이용한 평균회로와 감산회로를 사용하여 검출회

Table 2 Experimental conditions for oscillating cylinders

Test No.	d (mm)	U_∞ (m/s)	Re ($= \frac{U_\infty \cdot d}{\nu}$)	Ur ($= \frac{U_\infty}{f_{nz} \cdot d}$)	mr ($= \frac{m}{\rho d^2}$)	δr ($= \frac{2m\delta}{\rho d^2}$)	L/d
1	12.8	0.3~11.0	250~10,400	1.5~64.6	690.9	9.84	25.56
2	12.8	0.3~11.0	250~10,400	1.5~64.6	684.7	10.56	25.56
3	18.0	0.3~11.0	350~14,700	1.0~51.3	436.0	6.29	16.67
4	18.0	0.3~11.0	350~14,700	1.0~51.3	430.8	6.78	16.67
5	18.0	0.3~11.0	350~14,700	1.0~51.3	430.0	6.15	16.67

로를 구성하였다. 판스프링의 스프링 상수는 원주 양단에 똑같은 무게의 분동을 올려 놓았을 때 원주의 정적인 처짐을 계측하여 구하였다. 평행운동 모우드와 회전운동 모우드의 고유진동수는 유속이 0m/s인 상태에서 풍동내에 설치된 원형실린더를 자유진동시켜 그 변위신호로부터 주파수 분석하여 구하였다.

모든 실험치를 측정할 때의 실험조건은 Table. 2와 같다. Fig. 2는 앞에서 설명한 본 실험의 계측시스템의 개략도를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진동하는 실린더로부터의 와유출

유동방향에 수직하게 탄성지지되어 진동하는 실린더로부터의 와유출주파수 f_{vm} 를 스트로우할수(St)로 무차원화하여 레이놀즈수(Re) 변화에 대해서 표시하면 Fig. 3과 같다. 비교적 유속이 낮은 범위 ($Re < 3,000$)에서 St수는 유속이 증가함에 따라 다소 변화하였으나, 그 이후에서는 거의 0.19정도로 일정하게 유지되었다. 이것은 유속이 증가함에 따라 와유출주파수가 거의 비례적으로 증가함을 나타낸다.

Fig. 4는 속도변동 u 의 스펙트럼 밀도분포 S_u 를 여러가지 유입속도에 대하여 표시한 것이다. Fig. 4에서 S_u 의 피크 주파수(peak frequency)는 일반적인 Kármán 와유출주파수를 나타내며, 유입속도가 증가할수록 S_u 의 피크 주파수인 와유출주

파수가 거의 비례적으로 증가함을 역시 알 수 있다. 또한 유속의 증가에 따라 와유출주파수가 탄성지지 실린더의 고유진동수와 일치할 경우에 속도변동 u 의 스펙트럼 밀도의 크기가 다른 것들에 비해 훨씬 커지는 것으로 나타났다. 이는 실린더의 동적거동과 와유출이 상호작용하여 와유출이 더욱더 강해짐을 의미하며, 어느 속도 범위에서 와유출주파수가 실린더의 고유진동수 쪽으로 길게되는 락인영역(lock-in region)이 형성되어 실린더가 공진상태가 됨을 알 수 있다.

3.2 탄성지지 실린더의 동적거동과 와유출과의 관계

Fig. 5, Fig. 6 그리고 Fig. 7은 유입속도가 증가함에 따라 탄성적으로 지지된 단일 원형실린더의 후류내에서의 유속 변동형태와 진동형태를 나타낸다. 이 그림들은 유속변동 u 와 실린더 양끝에서의 변위신호들을 동시에 기록한 오실로그래프와 스펙트럼 분포들이다. S_u 와 S_z 은 u 와 Z_L 의 스펙트럼 밀도를 나타내며 이러한 값들은 일련의 180개 신호들의 평균값이다. Fig. 5는 유속이 매우 낮은 경우 ($Ur=1.7$)을 나타내는 데 실린더 양끝에서의 변위들이 매우 작으며 응답 주파수는 평행운동 모우드 고유진동수 f_{nz} 와 같음을 알 수 있다.

Fig. 6은 와유출주파수 f_{vm} 과 평행운동 모우드 고유진동수 f_{nz} 가 일치하는 유속($Ur=4.3$)에서의 응답을 나타내는 데, 이 경우는 공진일 경우이다. 이때 유속변동 파형과 실린더 양끝에서의 변위들(Z_R 과 Z_L)의 위상이 일치하며, 이는 어떠한 순간

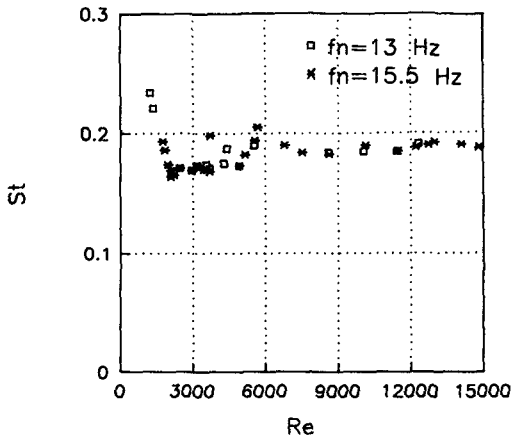


Fig. 3 Vortex shedding frequency from an elastically supported cylinder ($d=18.0$ mm)

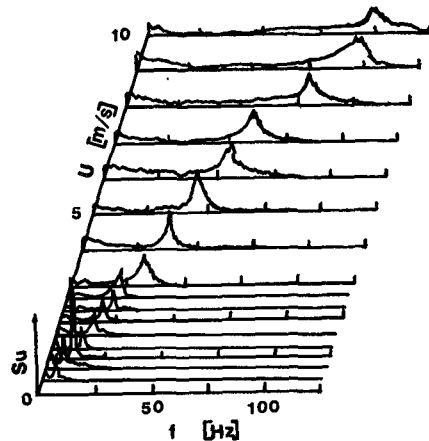


Fig. 4 Velocity spectra for an elastically supported cylinder ($d=18.0$ mm, $f_{nz}=13$ Hz)

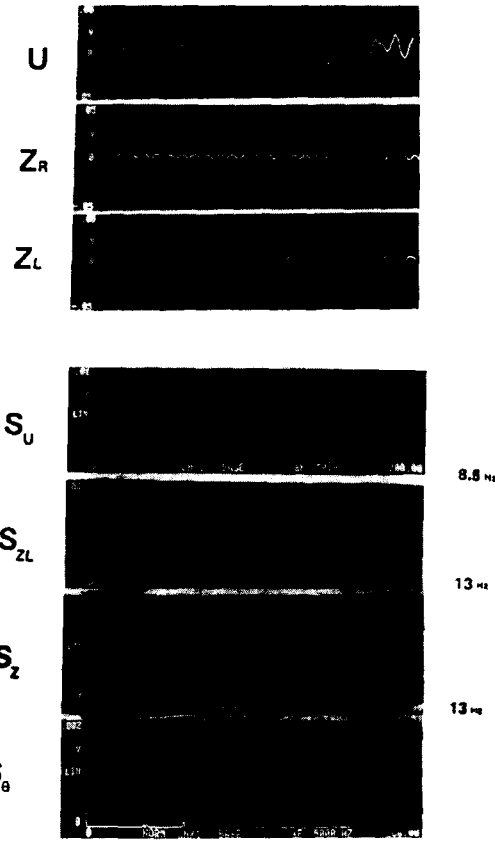


Fig. 5 Fluctuation signals and their spectra (1)
 (d=18.0 mm, $fn_z=13$ Hz, $fn_θ=36$ Hz, $U∞=0.4$ m/s, $Ur=1.7$)

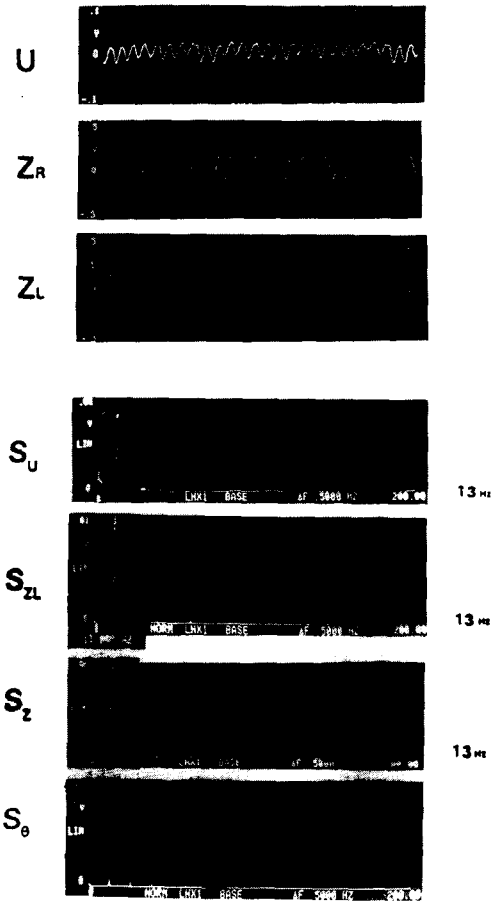


Fig. 6 Fluctuation signals and their spectra (2)
 (d=18.0 mm, $fn_z=13$ Hz, $fn_θ=36$ Hz, $U∞=1.0$ m/s, $Ur=4.3$)

에도 실린더의 운동이 순전히 평행운동 모우드 진동을 유지하며 이 경우 진동 그자체가 가진력을 만들어 내기 때문에 진동이 성장하여 큰 진폭으로 지속된다. 이것은 동압력변동 에너지가 진동계의 내부에서 진동적인 여진(excitation)으로 변환되어 발생하는 자력진동(self-excited vibration) 형태임을 의미한다.⁽⁹⁾ Fig. 7은 유입속도가 매우 큰 경우 ($Ur=29.9$)의 결과를 나타낸다. 이 그림에서 실린더 양끝에서의 변위들에 있어서 두개의 서로 다른 주파수 성분이 중첩되어서 나타남이 관찰되었는데, Z_R 과 Z_L 의 낮은 주파수 성분의 위상들은 거의 일치하나 높은 쪽 주파수는 위상이 서로 약 180° 정도 이동하였다. 이러한 결과는 S_{ZL} 에서도 알 수 있듯이 S_{ZL} 는 두개의 피크를 가지며 이는 Z_L 의 신호가 두개의 지배적인 주파수를 갖고 있다고 생각된다.

Fig. 5, Fig. 6 그리고 Fig.7로 부터 유입속도가 낮은 경우에는 실린더의 거동은 평행운동 모우드 진동 형태만 나타내며 응답 주파수는 fn_z 와 같다. 유입속도가 점차 커지면 $fn_θ$ 로 진동하는 회전운동 모우들 평행운동 모드와 중첩되어 나타나게 된다.⁽¹⁰⁾

Fig. 8은 유속을 증가시켰을 때와 감소시켰을 때 록인(lock-in)현상이 일어나는 유속의 범위가 서로 다르게 나타나는 일종의 히스테리시스 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 유동장과 진동계사이에서 에너지를 서로 주고 받을 때 시간지연이 일어나기 때문이다.

유입속도 변화에 따른 실린더의 전체적인 진폭 변화특성을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 와유출주파수가 평행운동 모드 고유진동수와

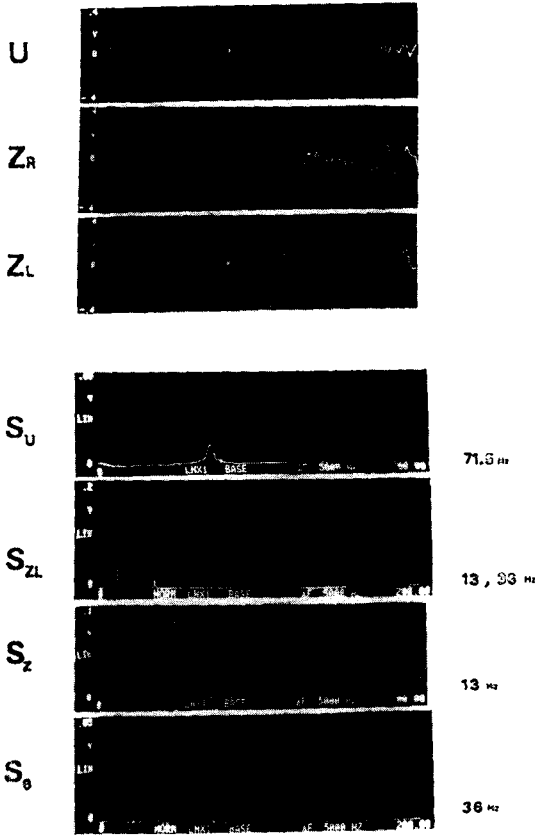


Fig. 7 Fluctuation signals and their spectra (3)
 (d=18.0 mm, $f_{nz}=13$ Hz, $f_{n\theta}=36$ Hz, $U_{\infty}=7.0$ m/s, $U_r=29.9$)

일치할 때 즉 $f_{vm}/f_{nz}=1$ 에서 진폭이 매우 큰 피크를 이루어지만, 그 이상으로 유속이 증가함에 따라 진폭은 급격히 감소한다. 또한 와류출주파수가 고유진동수의 3배 근처에 해당하는 속도지점에서 진폭이 완만한 증감을 나타내다가, 그 이후 부터는 유속 증가에 따라 진폭이 더욱더 커지는 양상을 나타내었다.

3.3 평행운동 모드 진동(Translation Mode Oscillation)

실린더의 동적거동을 평행운동 모드와 회전운동 모드의 2가지 모드로 분리하여 살펴 보기로 한다. 그 중에서 탄생지되된 원형실린더의 평행운동 모드 진동은 유동방향에 수직하게 평행으로 움직이는 진동형태이며, 실린더 양끝단에서의 변위의 평균값으로 실린더의 평행운동 진동변위로 한다.

Fig. 10은 유입속도 변화에 따른 평행운동 모드

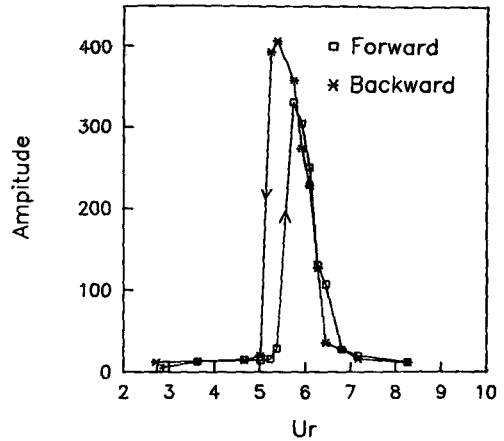


Fig. 8 Hysteresis effect of resonance occurrence
 (d=18.0 mm, $f_{nz}=15.5$ Hz, $f_{n\theta}=43.5$ Hz)

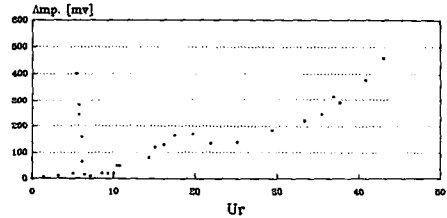


Fig. 9 Amplitude of displacement at an end of a cylinder
 (d=18.0 mm, $f_{nz}=15.5$ Hz, $f_{n\theta}=43.5$ Hz)

의 변위스펙트럼 분포를 나타내며, Fig. 11은 와류출주파수 및 평행운동 모드 진동수와 고유진동수와 의 관계를 나타낸다. 두 그림으로 부터 진동하는 실린더의 평행운동 모드 진동수는 유속의 변화에 관계없이 항상 실린더의 평행운동 모드 고유진동수인 f_{nz} 와 같음을 알 수 있으며 와류출주파수는 환산속도(U_r)가 4~5 근처에서 와류출주파수와 평행운동 모드 고유진동수(f_{nz})가 일치하게 되는 특인 영역(lock-in region)이 형성됨을 알 수 있다. 평행운동 모드 진동 성분만 갖는 진동이 발생할 경우에는 앞선 Fig. 5에 나와 있는 것처럼 실린더 양끝에서의 변위 신호는 정현파형(sinusoidal)이며 변위의 크기와 위상이 일치하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 와류출주파수와 평행운동 모드 고유진동수가 일치 될 때 공진이 발생하며 이때는 순전히 평행운동 모드의 진동만 일어난다.

3.4 회전운동 모드 진동(Rotation Mode Oscillation)

회전운동 모드 진동은 실린더의 길이 방향축을

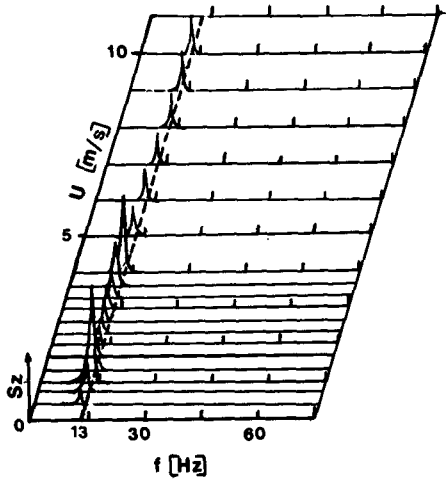


Fig. 10 Spectra of the mean displacement ($d=18.0$ mm, $fn_z=13$ Hz)

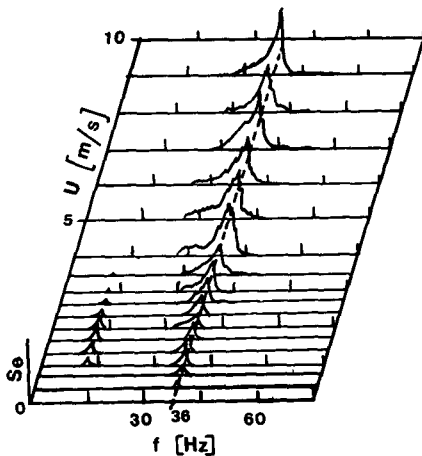


Fig. 12 Spectra of the angular displacement ($d=18.0$ mm, $fn_z=13$ Hz, $fn_\theta=36$ Hz)

중심으로 좌우로 경사지게 움직이는 진동형태를 말하며 이때 실린더의 회전각 $\theta=(Z_R-Z_L)/L$ 로 나타낼 수 있다. Fig. 12는 유입속도 변화에 따른 회전운동 모드 성분인 회전각 변위 스펙트럼 분포를 나타낸다. 유입속도가 낮을 경우에는 회전운동 모드 진동이 거의 나타나지 않거나 미미하다. 그러나 유입속도가 크게 증가할 수록 회전각 변위 스펙트럼 밀도가 점점 커지게 됨을 알 수 있다. 이는 유속이 매우 커질수록 회전운동 모우드 진동성분이 지배적으로 나타남을 의미한다. 실린더의 회전운동 모드 진동응답도 앞절에서 언급한 평행운동 모우드 진동응답과 마찬가지로 실린더가 갖고 있는 회전운

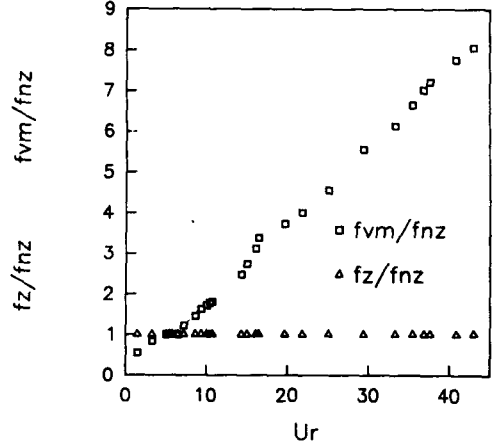


Fig. 11 Feature of the translation mode oscillation

동 모드 고유진동수 fn_θ 와 언제나 같음을 알 수 있다. 회전운동 모드 진동의 원인은 실린더의 길이 방향축을 따라 Kármán 와류출이 불규칙하게 위상 이동을 하면서 2차원성이 유지되지 못하기 때문인 것으로 추측되나,⁽¹¹⁾ 그 정확한 원인은 앞으로의 연구과제이다. 실린더의 동적 거동은 유속 변화에 관계없이 평행운동 모드와 회전운동 모우드가 다 같이 항상 각 모드의 고유진동수로 진동함을 확인하였다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 진동형태가 자력진동 (self-excited vibration)임을 의미한다.

3.5 실린더가 관통하는 풍동 측정부 틈새의 영향

풍동의 측정부 양 벽에는 실린더가 관통할 수 있도록 구멍이 뚫려져 있다. 이 구멍과 실린더의 틈새 간격의 변화에 따른 와류출과 진동특성의 변화를 알아 보기 위해 Fig. 13과 같은 세가지 틈새 간격에 대해 실험을 행하였다. Fig. 14는 틈새 간격이 와류출에 미치는 영향을 나타낸다. 레이놀즈수가 약 3,000이상의 영역에서 틈새가 비교적 넓은 slot 1에서는 와류출의 무차원수인 St수가 0.18정도이며, 중간인 slot 2에서 0.19, 그리고 틈새 간격이 가장 작은 slot 3에서는 0.22로 나타났다. 이러한 결과들로 부터 실린더가 통과하는 풍동측정부의 틈새 간격이 좁으면 좁을수록 St수가 증가함을 확인하였으며, 틈새 간격이 넓을수록 와류출주파수가 본 실험에서는 10~20%정도 낮아짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 틈새 간격이 넓을수록 구멍을 통하여 누설되는 유량이 커짐으로써 유속변화에

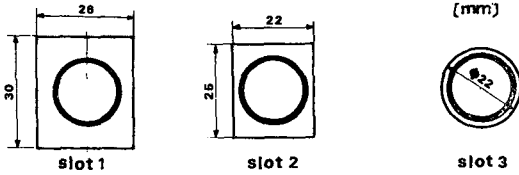


Fig. 13 Geometry of the slot in test section

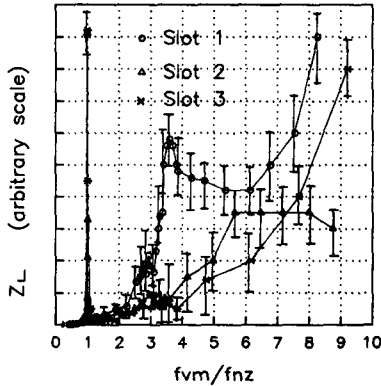


Fig. 15 Effect of the slot condition on the cylinder oscillation amplitude

의해서 똑같은 상류측유입속도에 대해 와유출주파수가 낮아지는 것으로 생각된다.⁽¹¹⁾

Fig. 15는 틈새 간격 변화가 실린더의 진동진폭에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 틈새 간격이 가장 넓은 slot 1인 경우에 와유출주파수 f_{vm} 과 평행운동 모드 고유진동수 f_{nz} 와 일치하는 록인영역(lock-in region)에서 진폭상의 작은 피크를 나타낸 반면에 f_{vm}/f_{nz} 이 3과 4 사이에 해당하는 유속에서 아주 큰 진폭의 피크를 보이다가 유속이 더욱더 증가할수록 계속해서 진폭이 증가하였다. 틈새간격이 slot 1보다 좁은 slot 2에서는 록인영역에서 slot 1보다 훨씬 큰 진폭상의 피크치를 갖는 공진특성을 나타내며, 그 이후 유속에서는 진폭이 급격히 감소하다가 더욱더 유속이 증가할수록 진폭이 서서히 증가하였으나 slot 1과 같은 f_{vm}/f_{nz} 이 3과 4 사이에서의 큰 진폭이 나타나지 않았다. 틈새 간격이 가장 좁은 slot 3에서는 록인영역(lock-in region)에서 slot 2 경우의 약 4배에 해당하는 매우 큰 진폭을 갖는 아주 날카로운 진폭상의 피크치를 나타내었다. 그러나 그 이후 유속에서는 진폭이 급격히 감소하였으며, 와유출주파수가 평행운동 모드 고유진동수 f_{nz} 의 3배 근처에서

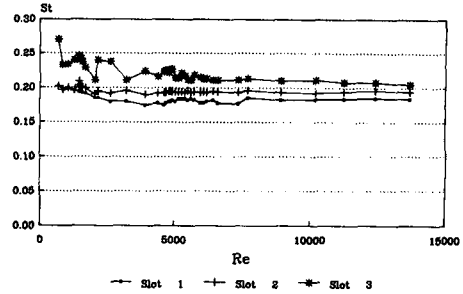


Fig. 14 Effect of the slot condition on vortex shedding

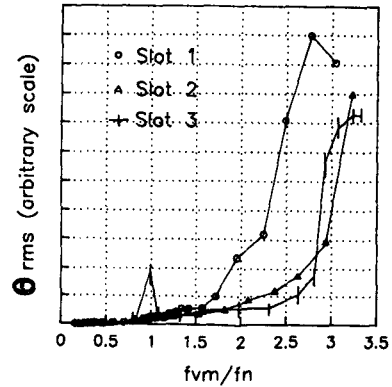


Fig. 16 Effect of the slot condition on the rotation mode oscillation

완만한 증감을 하다가 계속 유속이 증가함에 따라 큰 폭으로 진폭이 증가하였다. 결과적으로 틈새 간격이 좁을수록 와유출 주파수 f_{vm} 과 평행운동 모드 고유진동수 f_{nz} 가 일치하는 공진영역에서 피이크 진폭이 매우 날카롭게 커지는 반면에 f_{vm}/f_{nz} 이 3과 4사이에서 일어나는 피이크 진폭이 현저하게 작아짐을 확인하였다.

Fig. 16은 틈새 간격이 회전운동 모드 진동성분에 미치는 영향을 나타내는 데, 틈새 간격이 가장 작은 경우에 와유출주파수 f_{vm} 이 회전운동 모드 고유진동수 f_{nz} 와 일치할 때 작은 피이크치를 가지며 유속이 증가함에 따라 틈새 간격이 넓을수록 회전운동 모드 성분이 강하게 나타났다.

4. 결 론

탄성지지된 단일 원형실린더의 와유기 진동에 관한 실험적 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 유입속도를 증가시켜 와유출주파수가 평행운동 모드 고유진동수와 일치하는 유속영역(f_{vm}/f_{nz}

=1)에서 진폭이 매우 크게 되는 공진현상이 일었으며, 아울러 공진영역에서 히스테리시스 현상이 일어났다.

(2) $fvm/fnz=1$ 이상으로 유입속도를 계속해서 증가시켰을 때 진폭이 급격히 감소하였으며, fvm/fnz 가 3 근처 까지는 완만한 피크를 이루다가 유속이 증가할수록 증가하였다.

(3) 낮은 유속에서는 평행운동 모드 진동성분이 지배적이었으나 높은 유속에서는 회전운동 모드 진동성분이 중첩되어 나타났다.

(4) 실린더가 관통하는 풍동 측정부의 벽면에 틀린 틈새 간격이 넓을수록 같은 유속에서 와류출주 파수가 10~20% 더 낮아진다.

(5) 틈새 간격이 좁을수록 $fvm/fnz=1$ 인 록인영역(lock-in region)에서의 공진진폭이 더욱더 커지는 반면에 $fvm/fnz=3$ 근처에서의 진동진폭이 급격히 감소하였다.

후 기

이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국 학술진흥재단의 자유공문과제 학술연구 조성비에 연구되었음.

참고문헌

- (1) 白 正高, 1983, "彈性支持された圓柱の流體力學的振動に關する研究", 日本機械學會 論文集(B編), Vol.49, No.446, pp.2102~2110.
- (2) Griffin, O.M., 1972, "Flow Near Self-Excited and Forced Vibrating Circular Cylinders," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, pp. 539~547.
- (3) King, R., 1977, "Vortex Excited Oscillations of Yawed Circular Cylinders," Trans. of ASME, Journal of Fluids Engineering, pp. 495~502
- (4) Tanida, Y., et al., 1973, "Stability of Circular Cylinder Oscillating in Uniform Flow or in a Wake," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 61, Part 4, pp. 769~784.
- (5) John, A.M., 1973, "Large Amplitude Oscillations of a Circular Cylinder in a Low-Speed Stream," Ph.D. Thesis, Stevens Institute of Technology.
- (6) Chen, Y.N., 1972, "Fluctuating Lift Forces of the Kármán Vortex Streets on Single Circular Cylinders and in Tube Bundles: Part 1-The Vortex Street Geometry on the Single Circular Cylinder," Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, pp. 603~612.
- (7) Lefebvre, P.J., 1977, "An Investigation of Primary and Secondary Vortex Street Lock-in," M. S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute.
- (8) Stasaities, J.F., 1976, "The Interaction of Elastically Mounted Cylinders with Secondary Vortex Streets," M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute.
- (9) Dugin, W.W., et al, 1978, "Lower Mode Response of Circular Cylinders in Cross Flows," ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, Nonsteady Fluid Dynamics Volume, pp. 193~200.
- (10) Shirakashi, M., et al., 1984, "Vortex Excited Oscillation of a Circular Cylinder in a Uniform Flow," Bulletin of JSME, Vol. 27, No.228, pp. 1120~126.
- (11) Shirakashi, M., et al., 1985, "Higher Velocity Resonance of Circular Cylinder in Crossflow," Trans. of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 392~396.