

두 원기둥의 유동에 기인한 진동 특성에 관한 연구

김 상 일* · 이 승 철**†

* 강원대학교 기계공학과, ** 강원대학교 소방방재공학전공

Study on Characteristics of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders

Sang Il Kim* and Seung Chul Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

** Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received August 30, 2012 ; Revised December 4, 2012 ; Accepted December 11, 2012)

Key Words : Circular Cylinder(원기둥), Flow-induced Vibration(유동에 기인한 진동), Tandem Arrangement(직렬 배열), Staggered Arrangement(대각선 배열), Side by Side Arrangement(병렬 배열)

초록: 본 연구는 두 원기둥의 유동에 기인한 진동에 관한 실험적 연구이다. 두 원기둥이 직렬 배열($\alpha=0^\circ$), 대각선 배열($\alpha=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 60^\circ$), 병렬 배열($\alpha=90^\circ$) 됐을 때 두 원기둥의 간격(L/D)과 유속을 변화 시켰을 때의 진동 특성을 조사했다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. (i) 직렬, 대각선, 병렬 배열된 두 원기둥에서 발생하는 유동에 기인한 진동의 패턴은 7 개 패턴이다. (ii) 복수로 존재하는 두 원기둥의 유동에 기인한 진동은 서로 진동을 유발시킨다. (iii) 두 원기둥의 직렬, 대각선, 병렬 배열 중에 유동에 기인한 진동을 유발하기 가장 쉬운 배열은 병렬 배열이다. (iv) 모든 배열에서 두 원기둥의 간격 변화에 따른 최대 진폭의 변화는 변동 양력 계수의 변화와 유사하다.

Abstract: This study aims to investigate the characteristics of the flow-induced vibrations of two circular cylinders. The characteristics of the flow-induced vibrations are examined for various flow velocities and spaces between the two cylinders when they are arranged in tandem, staggered, and side-by-side positions. The results are as follows: (i) Seven flow-induced vibration patterns are observed when the two circular cylinders are placed in either tandem, staggered, or side-by-side positions. (ii) The two cylinders induce a vibration because they affect each other. (iii) The easiest way to induce a vibration of the two cylinders is by placing them in the side-by-side position among the three arrangements (tandem, staggered, and side-by-side). (iv) The change in the maximum flow-induced vibration of the two cylinders depends strongly on the fluctuating lift forces of each of them.

- 기호설명 -

A : 원기둥의 투영 면적
 a : 유체 흐름과 직각 방향의 진동 진폭 (RMS 값)
 a_{max} : 최대 진동 진폭값
 C_n : 환산 감쇠 파라미터[$=2m_0 \cdot \delta / \rho \cdot D^2$]
 D : 원기둥 직경
 f_c : 원기둥 고유 진동수
 L : 두 원기둥의 간격

m_0 : 원기둥의 단위 길이당 질량
 Re : 레이놀즈 수[$=U_0 \cdot D/\nu$]
 U_0 : 유속
 U_r : 환산유속[$=U_0/(f_c \cdot D)$]
 ρ : 유체 밀도
 ν : 유체의 동점도
 δ : 대수 감쇠율

1. 서론

흐르는 유체에 복수로 존재하는 원기둥형 구조물에는 송전선, 굴뚝, 교각, 쿨링타워, 원자로, 열교환기 등이 있다. 이렇듯 구조물의 형태 중 가장

† Corresponding Author, sclee@kangwon.ac.kr
 © 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

기본이 되는 형태로는 원기둥을 들 수 있다. 따라서 유체에 존재하는 원기둥에 관한 연구는 지금까지 많은 연구가 행해져 왔다. 이 원기둥에 관한 연구는 내용별로 구분을 한다면 네 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째로 흐르는 유체로부터 받는 유체력에 관한 연구이다. 이런 연구는 원기둥을 고정시킨 상태에서 항력과 양력을 조사한 연구이다. 두 번째로 원기둥의 유동에 기인한 진동에 관한 연구이다. 이 연구는 흐르는 유체에 원기둥을 스프링과 같은 탄성체로 고정시켜 유체 흐름에 따라 진동이 일어날 수 있도록 설치 한 후 흐름 방향에 대해 직각방향(직교류 진동) 또는 수평 방향(인라인 진동)의 진동 특성을 조사한 연구이다. 세 번째로는 원기둥 뒷 부분에 발생하는 와류에 대해 조사한 연구이다. 마지막으로 네 번째로는 지금 전술한 유체력, 유동에 기인한 진동, 후류(와류)를 제어 한 연구이다.

유체력을 조사한 연구로서 Alam⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾은 같은 직경의 두 원기둥을 병렬 배열로 고정시키고 아임계 레이놀즈수 범위 내에서 두 원기둥 표면의 압력 분포, 양력, 항력 등의 유체력을 조사함과 동시에 원기둥 주변의 흐름을 조사했다. Owen⁽³⁾은 진동하는 원기둥 후류에 생기는 와류를 연구했고, Husein⁽⁴⁾은 두 개 또는 세 개의 같은 직경을 갖는 원기둥을 병렬로 배열시켜 놓고 원기둥의 간격 L/D (L :원기둥 간격, D :원기둥 직경)를 0.25~2.0 까지 변화 시켜 각 L/D 에서의 원기둥 주변의 흐름을 조사했다. 유체력 제어에 관한 연구로서는 원기둥

전방에 작은 평판⁽⁵⁾ 또는 작은 원기둥⁽⁶⁾ 등의 물체를 설치하고 원기둥으로 접근하는 흐름을 제어하는 연구가 있다. Kim⁽⁷⁾은 단독으로 존재하는 원기둥 뒷면에 폴리에틸렌 재질의 플렉서블 시트를 부착시켜 유동에 기인한 진동을 제어했고 그 메커니즘도 연구했다. 유동에 기인한 진동에 관한 연구로는 Lam⁽⁸⁾이 직경이 다른 두 원기둥을 사용해서 직경이 큰 원기둥을 상류에 고정시키고 작은 직경의 원기둥을 직렬, 대각선, 병렬로 배열 시켜

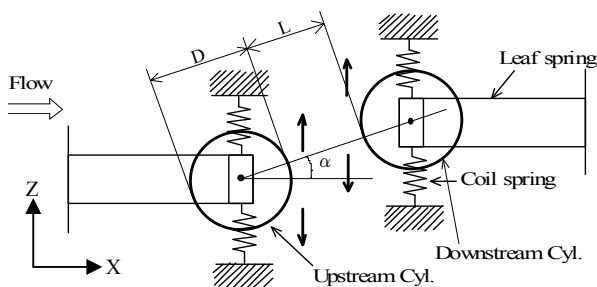


Fig. 1 View of free-vibration experimental equipment

작은 원기둥의 유동에 기인한 진동 특성을 조사했다. Zhou⁽⁹⁾는 병렬 배열된 두 원기둥의 유동에 기인한 진동을 조사했지만 두 원기둥의 간격이 커서 실험 변수로서 체계적이지 못했고, Brika⁽¹⁰⁾는 두 원기둥을 와이어로 기계적 커플링을 시켜 동위상과 역위상 일 때의 진동 특성을 조사했다. 이렇듯 유동에 기인한 진동에 관한 연구는 두 원기둥의 간격을 체계적으로 변화시키면서 조사한 연구가 적고, 배열을 직렬, 대각선, 병렬 중 한 개 또는 두 개의 배열에 관한 연구가 대부분인 것이 현 실정이다. 그래서 본 연구에서는 두 원기둥을 직렬, 대각선, 병렬로 배열시키고, 두 원기둥의 간격 (L/D)도 0.1 간격으로 세밀하게 변화 시키면서 두 원기둥의 유동에 기인한 진동 특성에 대해 체계적으로 조사했다. 두 원기둥의 간격은 0.1~3.2 까지 변화를 주어 각 배열, 간격에서의 유속 변화에 따른 두 원기둥의 진동 특성을 조사한 연구이다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 풍동 실험 장치는 측정단면이 길이 2.3m(X 방향) × 폭 0.3m(Y 방향) × 높이 1.2m(Z 방향)의 측정부를 갖는 환류형 풍동을 이

Table 1 Vibration pattern classification(I~VII) according to vibration characteristics of two circular cylinders

No vibration				I
Vibration	Divergence	Only down-Cyl.		II
		Both Cyl.		III
	Convergence	Only down-Cyl.		IV
		Both Cyl.		Simultaneous V Alternate type 1 VI Alternate type 2 VII

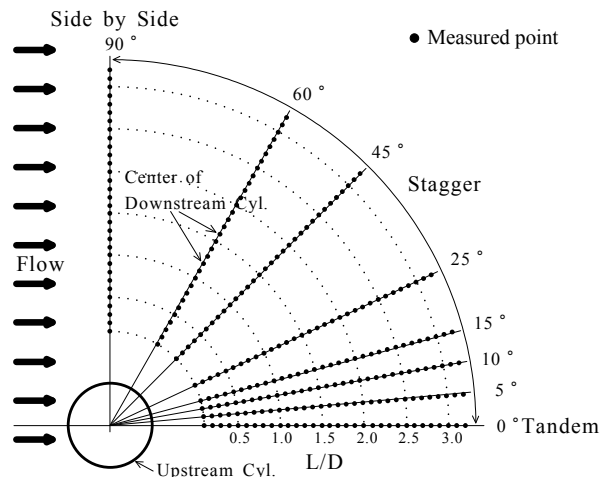


Fig. 2 An arrangement of two circular cylinders

용해 실험을 했다. 진동 실험에 사용한 두 원기둥의 직경은 모두 66mm 이고, 길이는 287mm(Y 방향)이다. 최대한의 경량화(241g)를 위해 종이 재질로 만들었고, 원기둥 내부에는 직경 10mm 의 알루미늄 재질의 지지축이 있다. 이 지지축과 종이 재질의 원기둥 사이에는 두께 1mm 의 아크릴 원판을 삽입하는 방법으로 원기둥과 지지축을 고정시켰다. 그리고 원기둥 표면은 얇은 알루미늄판으로 덮여져 있다. 실험에 쓰인 두 원기둥은 Fig. 1에서 나타내는 것과 같이 각각의 알루미늄 지지축을 통해 풍동 측정부 외부에 설치되어 있는 자유진동 실험 장치의 두 장으로 된 판스프링(인칭동판 재질, 두께 0.3mm)에 고정되어 있다. 그리고 이 판스프링의 상하에 코일 스프링이 걸려 있어 두 원기둥은 상하(Z 축 방향)로만 진동(직교류 진동)이 일어나게끔 되어 있다. 원기둥의 진동 변위는 레이저 변위계로 측정을 했다. 그리고 유체의 속도는 측정부의 상류 부분에 설치된 프로펠러식 유속계로 측정을 했다. 실험에 쓰여진 원기둥의 고유진동수는 10Hz 이다. 본 실험에서 원기둥의 고유진동수는 유체가 정지 해 있을 때 원기둥에 초기 진동을 가하여 1 초동안의 진동수로 측정을 하였고, 원기둥의 질량이 241g 이므로 본 실험에서 사용된 자유진동 실험장치의 스프링정수는 2.5kg/m 이 된다. 환산 감쇠 파라미터 $C_n=[2m_0 \cdot \delta / (\rho \cdot D_2)]$, m_0 : 원기둥의 단위 길이당 질량, δ : 대수 감쇠율을 6.36 으로 변화를 주지 않았고, 환산유속 $U_r=[U_0/(f_c \cdot D)]$, U_0 : 유속, f_c : 원기둥의 고유진동수, D : 원기둥 직경(66mm)]은 1.5~26 의 범위에서 실험을 했다. 그리고 환산유속 U_r 의 변화는 유속을 $U_0(1\sim 17\text{m/s})$ 변화 시키는 방법으로 했다. 이 때의 레이놀즈수 Re 는 4,300~74,000 으로 아임계 레이놀즈수의 범위이다. 두 원기둥의 배열에 있어서는 Fig. 2 와 같이 두 원기둥의 중심이 유체 흐름 방향과 이루는 각 α 를 0° 에서 90° 까지 직렬, 대각선, 병렬 배열로 배열의 변화를 주었고, 두 원기둥의 간격 $L/D(L$: 두 원기둥의 최단거리, Fig. 1 참고)는 0.1~3.2 의 범위에서 0.1 간격으로 서른 두 패턴의 간격의 변화를 주었다. 이 때 대각선 배열에 있어서는 Fig. 2 와 같이 두 원기둥의 중심을 이은 연장선이 유체와 이루는 각 α 를 5°, 10°, 15°, 25°, 45°, 60°로 여섯 패턴의 변화를 주어 실험을 했다. 구체적인 진동 특성 측정에 있어서는 각 배열, 간격에 있어서는 환산유속 U_r 의 변화에 따른 원기둥의 진동 진폭의 변화를 측정하였다. 그리고 진동이 발생하지 않는 배열 및 간격에 있어서는 인위

적인 초기 진동을 주었을 때의 진동 특성도 조사했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유동에 기인한 진동 특성에 따른 진동 패턴 분류

두 원기둥의 유동에 기인한 진동 특성은 배열 및 간격에 따라 상호 간섭의 정도가 변해서 여러 종류의 진동 특성(이하 진동 패턴이라 함)이 두 원기둥에 발생한다. 표 1 은 두 원기둥이 직렬($\alpha=0^\circ$), 대각선($\alpha=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 60^\circ$), 병렬($\alpha=90^\circ$)로 존재 할 때 발생하는 진동 특성에 따른 진동 패턴을 표로 나타낸 것이다. 표 1 과 같이 두 원기둥의 배열에 따른 진동 패턴은 일곱 가지(I~VII)로 분류 할 수 있다. Fig. 3 은 일곱 가지 진동 패턴 각각의 구체적인 진동 특성을 나타내고 있다. Fig. 3 에서 나타내는 것과 같이 두 원기둥의 배열이 직렬, 대각선, 병렬로 변함에 따라, 또 간격 L/D 이 0.1~3.2 로 변할 때, 두 원기둥에서 발생하는 진동 패턴은 크게 일곱 가지로 분류됨을 알 수 있다. 바꿔 말하면, 두 원기둥의 각 배열에 있어서 원기둥의 간격 변화가 있을 때, 이 일곱 가지의 진동 패턴 중 몇 개의 진동 패턴들의 조합된 형태로 진동이 발생한다.

우선 Fig. 3(a)에 나타내고 있는 것처럼 진동 패턴 I 은 두 원기둥 어느 쪽에도 진동이 발생하지 않는 패턴이다. 그러나 본 실험에서는 3.3.2 절에서 자세히 설명하겠지만 두 원기둥에 진동이 발생하지 않는 영역에서 한 쪽 원기둥에 초기진동을 주었을 때, Fig. 3(b)와 같이 하류쪽 원기둥이 유속이 증가함에 따라 발산 진동을 하는 진동 패턴 II, 또는 Fig. 3(c)처럼 유속의 증가와 동시에 두 원기둥 모두가 발산 진동하는 진동 패턴 III 으로 변하는 영역을 별도로 조사하였다.

진동 패턴 IV 는 Fig. 3(d)와 같이 하류쪽 원기둥에서만 유동에 기인한 진동이 발생하는 패턴이다. 이 패턴은 대각선 배열 각도 α 가 15°~60°일 때 임계간격($L/D=2.7$)미만에서 주로 발생하는 진동 패턴이다.

진동 패턴 V 는 Fig. 3(e)와 같이 거의 같은 환산 유속 U_r 의 범위에서 두 원기둥의 진동 진폭도 비슷하게 나타나는 패턴이다. 직렬 배열된 두 원기둥에 있어서는 위에서 설명한 진동 패턴 I, III, V 가 조합된 형태로 발생한다. 그 중 패턴 V 가 가장 많이 발생한다.

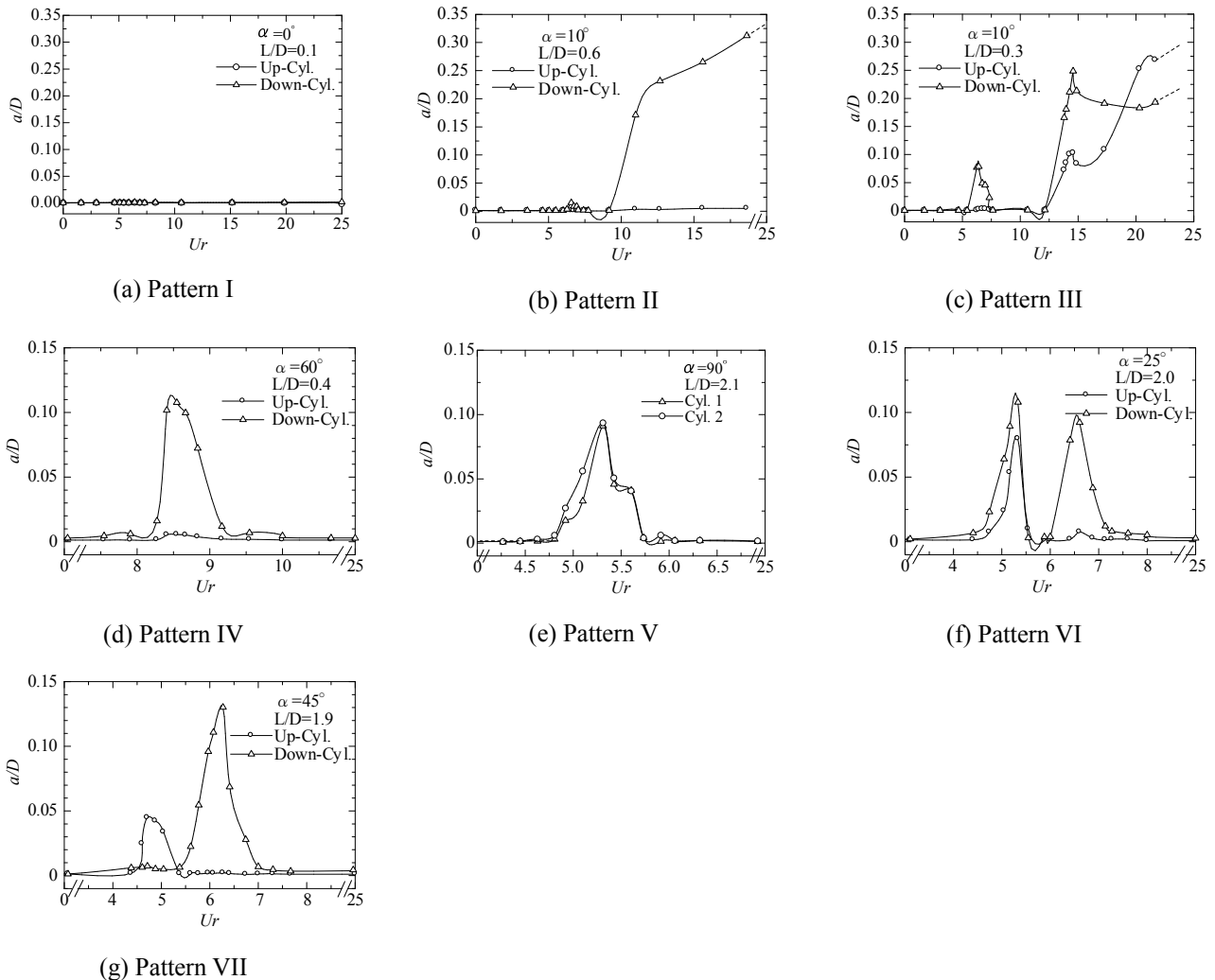


Fig. 3 Classification of vibration patterns of flow-induced vibration of two circular cylinders

진동 패턴 VI 은 Fig. 3(f)와 같이 패턴 IV 와 V 가 결합된 형태로 진동이 발생하는 패턴이다. 이 진동 패턴은 대각선 배열 각도 α 가 15°, 25°이고 두 원기둥의 간격 L/D 이 2.0 을 넘었을 때 발생하는 진동 패턴이다.

마지막으로 진동 패턴 VII 은 Fig. 3(g)와 같이 두 원기둥의 유동에 기인한 진동이 발생하는 U_r 의 위치가 상류쪽 원기둥과 하류쪽 원기둥이 다른 패턴이다. 이 패턴은 주로 대각선 배열 각도 α 가 45°, 60°이고 두 원기둥의 간격 L/D 이 2.0 을 넘었을 때 발생하는 진동 패턴이다.

3.2 유동에 기인한 진동 패턴의 발생 영역

Fig. 4 는 Fig. 3 에서 소개한 두 원기둥이 직렬 ($\alpha=0^\circ$), 대각선(여섯 개 각도), 병렬($\alpha=90^\circ$) 배열됐을 때 생기는 유동에 기인한 진동 특성의 일곱 가지 패턴(I~VII)이 발생하는 L/D 영역을 나타낸 것

이다. 그림 중에서 문자 [P]로 표시한 영역은 3.1 절에서 설명한 것처럼 본래 유동에 기인한 진동이 발생하지 않는 영역이지만 어느 한 쪽의 원기둥에 초기 진동을 인위적으로 가했을 때 진동이 발생하는 영역을 나타내고 있다. Fig. 4 와 같이 직렬 및 대각선 배열에 있어서 각도 α 가 작고, 원기둥의 간격(L/D)이 가까운 곳에서는 두 원기둥의 상호 간섭이 크기 때문에 L/D 의 작은 차이에 의해서도 전혀 다른 진동 특성이 발생하는 것을 알 수가 있다. 이것을 증명해 주는 첫 번째 근거로 진동 패턴 III(발산 진동)이 발생하는 영역이다. Fig. 4 와 같이 두 원기둥이 발산하는 진동을 하는 영역은 각도가 15°이하이고 두 원기둥의 간격 L/D 이 0.6 미만으로 밀접해 있을 때 이 진동 패턴이 집중되어 있다. 두 번째 근거로는 진동 패턴의 종류이다. 그림처럼 각도 α 가 15°이하인 조건에서는 유동에 기인한 진동 패턴의 수가 다른 각도보다 많은 것

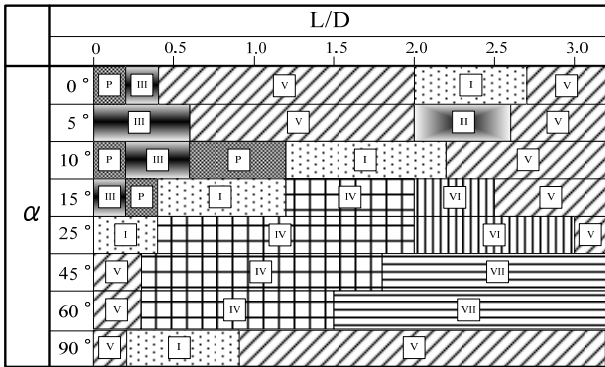


Fig. 4 Classification of generation region of vibration patterns for two cylinders in various arrangements

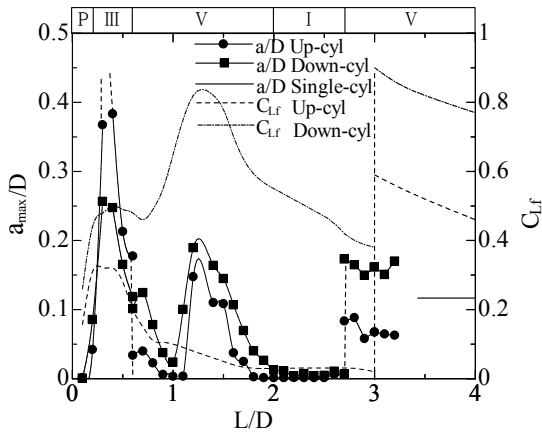


Fig. 5 Maximum amplitude and coefficient of fluctuating lift force of two cylinders in change of L/D in tandem arrangement

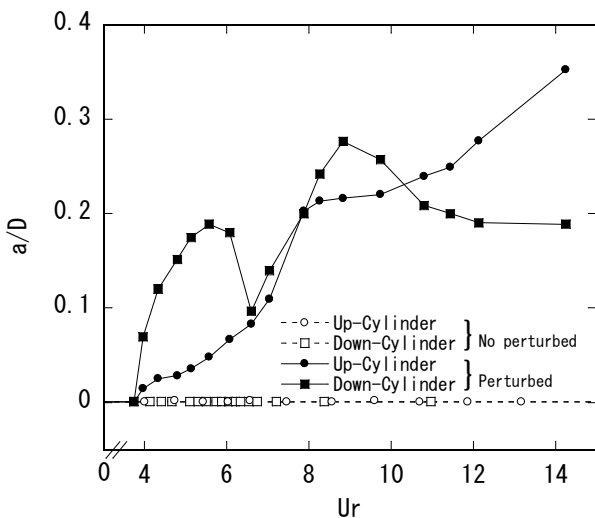


Fig. 6 Characteristics of flow-induced vibrations of two cylinders caused by primary perturbation. $L/D=0.1$ in tandem arrangement

을 알 수 있다. 그러나 대각선 각도가 커질수록 진동 패턴 수가 적고, 각각의 진동 발생 영역이

넓어지는 것으로 보아 두 원기둥간의 상호 간섭이 작아짐을 알 수 있다.

3.3 직렬 배열된 두 원기둥

3.3.1 변동 양력 특성과 유동에 기인한 진동 특성

직렬 배열된 두 원기둥에 발생하는 직교류 진동하는 유동에 기인한 진동은 각각의 변동 양력에 크게 의존한다. 그래서 두 원기둥의 변동 양력의 크기를 아는 것은 유동에 기인한 진동 특성을 평가하는 데 있어서 중요하다. Fig. 5는 Alam⁽¹¹⁾이 연구한 고정된 두 원기둥의 변동 양력 계수 C_{L_f} (RMS 값)를 나타내고 있다. Alam⁽¹¹⁾은 변동 양력 계수를 원기둥 표면에서의 압력변화에 의한 양력의 변화(RMS) 크기를 판가름 하는 척도로서 표현을 했고, C_{L_f} =양력의 RMS 값 / $(0.5 \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot A)$ 으로 계산을 했다. 그리고 Fig. 5에는 직렬 배열된 두 원기둥의 각 간격(L/D)에서의 최대 진폭치(a_{max}/D)의 변화를 나타내고 있다. 그림처럼 L/D 가 0.1~4.0까지 변하는 동안 원기둥 주변의 흐름이 급변하는 임계간격은 변동양력(C_{L_f})에 있어서는 $L/D=3.0$ 에서 나타나고 있다. 그러나 본 진동 실험에 있어서는 임계간격이 $L/D=2.7$ 인 곳에서 발생되었다. 이것은 본 실험에서는 두 원기둥이 고정되지 않았기 때문에 미세한 진동에 의해 다른 원기둥의 진동유발에 영향을 주었기 때문에 고정 두 원기둥의 변동 양력에 있어서는 임계간격보다 약간 앞서서 생겼다고 사료된다. 이 임계간격 이하에서의 C_{L_f} 변화를 보면, $L/D=0.3$ 부근에서 상류쪽 원기둥의 C_{L_f} 는 최댓값이 되고, 하류쪽 원기둥에 있어서는 $L/D=1.3$ 부근에서 최댓값이 된다. 이와 유사하게 본 실험의 최대 진동 진폭의 변화도 $L/D=0.3$ 부근에서 발산을 하는 큰 진동이 발생하고, $L/D=1.3$ 부근에서 두 원기둥의 진동이 크게 발생한다. 이처럼 원기둥의 진동 특성은 변동양력 특성과 아주 밀접한 관계가 있음을 알 수 있고, 본 실험에서 알 수 있는 중요한 사실은 자유 진동계의 두 원기둥의 진동은 어느 한 쪽의 진동으로 다른 원기둥의 진동을 유발한다는 사실이다.

3.3.2 초기진동을 주었을 때의 진동 특성

흐르는 유체에 존재하는 물체는 난류와 같은 유체의 불규칙한 흐름에 의해 유동에 기인한 진동이 생긴다. 이른바 버피팅(Buffeting) 현상이다. Fig. 6은 두 원기둥이 아주 근접해 있지만 유동에 기인한 진동이 발생하지 않는 $L/D=0.1$ (직렬)일 때 버피팅 현상을 가정하여 초기 진동($a/D=0.1$ 정도)을 어느 한 쪽 원기둥에 가했을 때의 진동 특성을 나타내고 있다. 그림과 같이 어느 한 쪽의 원기둥에

초기 진동을 가하면 두 원기둥에서는 큰 진동이 발생한다. 그 진동 패턴은 Fig. 3(c)와 같은 패턴 III(발산 진동)과 유사하다. 이러한 초기 진동을 가했을 때 진동이 발생하는 현상은 Fig. 4에서 나타난 것처럼 두 원기둥의 간격이 근접해 있고 대각선 각도 α 가 작은 경우에서만 발생한다. 이 현상은 유동에 기인한 진동을 취급하는 데 있어서는 알아두어야 할 중요한 지견으로 사료된다.

3.4 대각선 배열된 두 원기둥

3.4.1 변동 양력 특성과 유동에 기인한 진동 특성

Fig. 7은 Fig. 5와 같이 과거 연구 보고된 대각선으로 배열하고 두 원기둥을 고정했을 때의 변동 양력(C_{L_f}) 특성(Alam⁽²⁾)과 본 실험의 대각선 배열된 두 원기둥의 각 간격(L/D)에서의 최대 진폭치(a_{max}/D)의 변화를 나타내고 있다. 또 L/D 의 변화에 따른 진동 패턴의 발생영역도 나타내고 있다. 본 진동 실험에서 대각선 배열의 각도는 여섯 종류로 변화를 주어 진동 특성을 조사 했고, Fig. 7은 그 중에서 대표적으로 각도가 45도 일 때를 나타낸 것이다. Fig. 7에는 비교를 위해 원기둥이 단독으로 존재 할 때의 변동 양력과 최대 진폭치도 함께 나타내고 있다. 그림과 같이 두 원기둥의 간격이 0.2와 1.6 부근에서 변동 양력 값이 급변하는 곳에서 본 실험의 최대 진폭치의 변화도 급변함을 알 수 있다. 이와 같이 대각선 배열된 두 원기둥의 간격에 따른 최대 진폭치의 변화는 변동 양력의 변화와 유사함을 알 수가 있다.

3.5 병렬 배열된 두 원기둥

3.5.1 변동 양력 특성과 유동에 기인한 진동 특성

Fig. 8은 Fig. 5와 같이 과거 연구 보고된 병렬

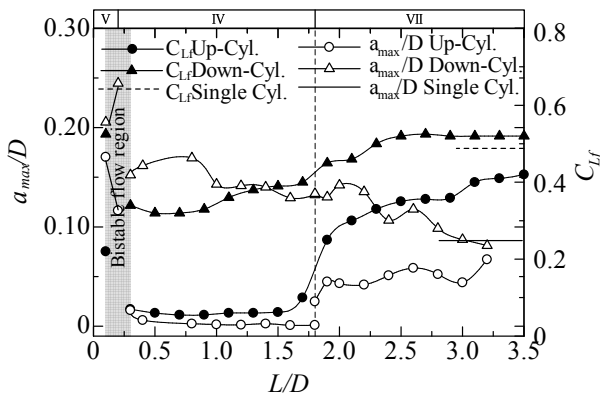


Fig. 7 Maximum amplitude and coefficient of fluctuating lift force of two cylinders in change of L/D in staggered arrangement ($\alpha=45^\circ$)

배열된 고정 두 원기둥의 변동 양력(C_{L_f}) 특성(Alam⁽¹²⁾)과 본 실험의 병렬 배열된 두 원기둥의 각 간격(L/D)에서의 최대 진폭치(a_{max}/D)의 변화를 나타내고 있다. 또 L/D 의 변화에 따른 진동 패턴의 발생 영역도 나타내고 있다. 병렬 배열에서의 유동에 기인한 진동 특성의 큰 특징은 다른 배열에 비해 진동 패턴의 수가 적다는 것이다. 그림과 같이 병렬 배열에 있어서도 최대 진폭의 변화는 직렬 배열과 같이 변동 양력 변화와 유사하게 변함을 알 수 있다. 특히 $1.0 < L/D < 1.8$ 구간에서 Alam⁽¹²⁾은 원기둥 사이의 흐름이 한 쪽 원기둥의 후류로 편중되어 흐르는 스위칭 유동으로 인해 Wide Wake(Mode 'WW')와 Narrow Wake(Mode 'NW')가 발생되고 이로 인해 두 원기둥의 변동 양력이 서로 다른 값을 나타내고 있다고 발표한다. 이에 상응하여 본 진동 실험 결과에서도 그림과 같이 두 원기둥의 진폭이 $1.0 < L/D < 2.1$ 구간에서 상이하게 나타나고 있다. 단지 본 진동 실험에서의 구간($1.0 < L/D < 2.1$)이 Alam($1.0 < L/D < 1.8$)의 구간보다 넓은 것은 앞서 3.3.1절에서 설명한 바와 같이 진동계의 두 원기둥의 진동은 어느 한 쪽의 진동으로 다른 원기둥의 진동을 유발하기 때문에 Alam⁽¹²⁾의 구간보다 넓게 나타난 것으로 사료된다.

3.6 유동에 기인한 진동이 발생하는 유속 U_r

Fig. 9은 두 원기둥이 직렬, 대각선($\alpha=25^\circ$), 병렬 배열 됐을 때의 유동에 기인한 진동이 발생하기 시작하는 환산 유속 U_r 을 두 원기둥의 간격 L/D 로 정리 한 것이다. 그리고 비교를 위해 단독 원기둥의 것도 나타내고 있다. 여기서 유동에 기인한 진동이 발생한다는 기준은 원기둥의 진동 진폭이 원기둥 직경의 2% 이상이 되면 진동이 시작

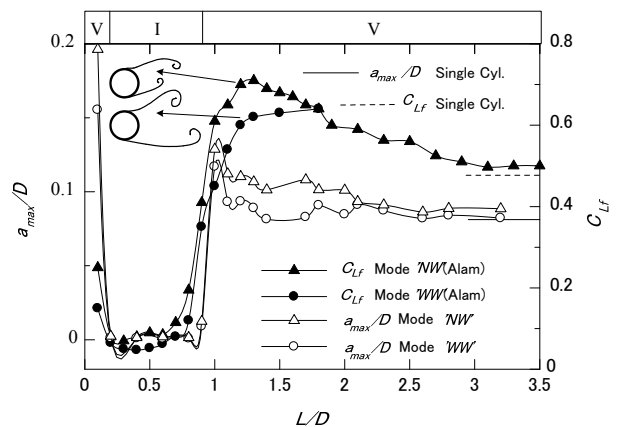


Fig. 8 Maximum amplitude and coefficient of fluctuating lift force of two cylinders in change of L/D in side by side arrangement

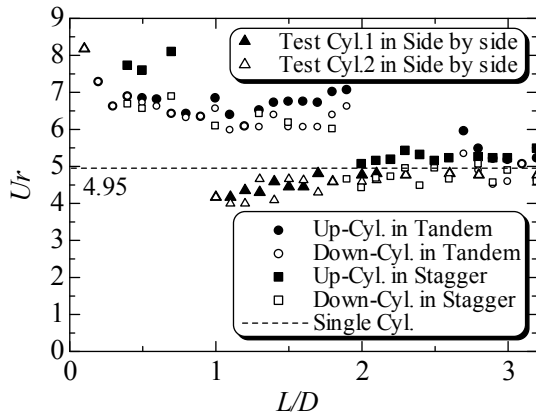


Fig. 9 Reduced velocity U_r when the one and two cylinders begin the flow-induced vibration for various arrangements

했다고 간주했다. Fig. 9 과 같이 두 원기둥에 유동에 기인한 진동이 발생하는 환산 유속 U_r 은 $L/D \geq 2.0$ 의 영역에서 어느 배열이든 단독 원기둥의 진동 발생 유속과 비슷한 값을 나타내지만 $L/D < 2.0$ 의 영역에서는 두 원기둥의 배열에 따라서 각각 유동에 기인한 진동이 발생하는 유속이 다르다. 직렬 배열과 대각선 배열의 경우에는 유동에 기인한 진동이 발생하기 시작하는 환산유속은 단독 원기둥의 $U_r=4.95$ 보다 큰 값을 알 수가 있다. 또 병렬 배열에서 $L/D < 0.2$ 인 영역에서도 단독 원기둥보다 고유속에서 유동에 기인한 진동이 발생한다. 그러나 병렬 배열의 $0.9 < L/D < 2.1$ 의 영역에서는 단독 원기둥보다 작은 유속에서 유동에 기인한 진동이 발생하기 시작한다. 따라서 두 원기둥의 배열 중에 $0.9 < L/D < 2.1$ 의 조건에서 병렬 배열된 경우에는 다른 배열에 비해 유동에 기인한 진동이 발생하는 유속이 가장 작은 것으로 볼 때 유동에 기인한 진동 발생을 서로 유도하는 배열임을 알 수가 있다. 이 점은 복수로 존재하는 원기둥형 구조물의 설계 시에 고려 되어야 할 중요한 사항 중 하나로 사료된다.

4. 결론

(1) 직렬, 대각선, 병렬 배열된 두 원기둥에서 발생하는 유동에 기인한 진동의 패턴은 크게 일곱 개 패턴으로 분류되고, 본 연구를 통해 원기둥의 배열과 간격에 따른 진동 패턴의 발생 영역 구분이 명확해 졌다. 뿐만 아니라 본 실험에서 행하지 않은 각도 α 와 간격 L/D 의 진동 특성을 본 실험 결과로 유추 할 수가 있다.

(2) 복수로 존재하는 두 원기둥의 유동에 기인한 진동은 서로 진동을 유발시킨다.

(3) 두 원기둥이 근접해 있을 때, 유동에 기인한 진동이 없는 간격이더라도 어느 한쪽의 원기둥에 초기 진동을 가하게 되면 큰 진동이 발생한다.

(4) 두 원기둥의 직렬, 대각선, 병렬 배열 중에 상대적으로 낮은 유속에서 유동에 기인한 진동을 유발하는 배열은 병렬 배열이다.

(5) 모든 배열에서 두 원기둥의 간격변화에 따른 최대 진폭의 변화는 선행 연구의 변동 양력 계수의 변화(Alam^(11,12))와 유사하다.

참고문헌

- (1) Alam, M. M., Moriya, M. and Sakamoto, H., 2003, "Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on the Switching Phenomenon," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 18, pp. 325~346.
- (2) Alam, M. M., Sakamoto, H and Zhou, Y., 2005, "Determination of Flow Configurations and Fluid Forces Acting on Two Staggered Circular Cylinders of Equal Diameter in Cross-flow," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 21, pp. 363~394.
- (3) Owen, M, G and Steven, E, R., 1974, "The Vortex-Street Wakes of Vibrating Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 66, pp. 553~576.
- (4) Huseyin, A., Atakan, A. and Cuma, K., 2004, "Flow Characteristics of Circular Cylinders Arranged Side-by-side in Shallow Water," *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 15, pp. 187~197.
- (5) Tan, K., Sakamoto, H. and Moriya, M., 2002, "Suppression of Fluid Forces of a Circular Cylinder by Passive Control of Flow," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 68, No. 674, pp. 2772~2779.
- (6) Lee, S., Lee, S. and Park, C., 2004, "Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of a Small Control Rod," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 34, pp. 233~250.
- (7) Kim, S., Lee, S., 2012, "Suppression of Flow-induced Vibration of a Circular Cylinder by Means of a Flexible Sheet," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 6, pp. 1773~1779.
- (8) Lam, K. M. and To, A. P., 2003, "Interference Effect of and Upstream Larger Cylinder in the Lock-in Vibration of a Flexibly Mounted Circular Cylinder," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, pp. 1059~1078.
- (9) Zhou, Y., Wang, Z. J., So, M. C. and Jin, W., 2001, "Free Vibrations of Two Side-by-side Cylinders in a

- Cross Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 443, pp. 197~229.
- (10) Brika, D. and Laneville, A., 1997, "Vortex-induced Oscillations of Two Flexible Circular Cylinders Coupled Mechanically," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69, No. 71, pp. 61~70.
- (11) Alam, M. M., Moriya, M., Takai, K. and Sakamoto, H., 2003, "Fluctuating Fluid Forces Acting on Two Circular Cylinders in a Tandem Arrangement at a Subcritical Reynolds Number," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 139~154.
- (12) Alam, M. M., Sakamoto, H. and Moriya, M., 2003, "Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 18, pp. 347~366.