

병렬 배열된 2 원기둥의 유력 진동 특성과 그 메커니즘[§]

김 상 일* · 이 승 철**†

* 강원대학교 기계공학과, ** 강원대학교 소방방재공학전공

Flow-induced Vibration Characteristics of Two Circular Cylinders in a Side-by-Side Arrangement and the Vibration Mechanism

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 June 21, 2011; Revised September 30, 2011; Accepted October 10, 2011)

Key Words: Circular Cylinder(원기둥), Flow-Induced Vibration(유력 진동), Side-by-Side Arrangement(병렬 배열), Visualization(가시화), Switching Flow(격간흐름)

초록: 본 연구는 탄성 지지된 두 원기둥이 병렬로 배열되어 있을 때의 유력 진동 특성을 실험적으로 연구한 것이다. 구체적으로 2 원기둥의 각 간격(L/D , L : 2 원기둥의 최단 거리, D : 원기둥 직경)에서의 유속 변화에 따른 유력 진동 특성을 조사했다. 그리고 원기둥의 유력 진동 발생 메커니즘을 규명하기 위해 강제 진동 장치로 유력 진동을 정확히 재현한 가시화 실험을 하여 원기둥 주변의 흐름 패턴을 조사했다. 그 결과, 병렬 배열된 2 원기둥 사이의 스위칭 플로우의 변화에 따라 유력 진동 특성도 4 개의 패턴으로 변하는 것을 알 수 있었다. 그리고 직렬, 대각선, 병렬 배열된 2 원기둥 중에서 가장 유력 진동이 발생하기 쉬운 배열은 병렬 배열임을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

Abstract: This experimental study investigated the characteristics of flow-induced vibration of two elastically supported circular cylinders in a side-by-side arrangement. In particular, the characteristics of the flow-induced vibration of the two cylinders are investigated by changing the flow speed at each spacing ratio L/D (L is the space between two cylinders and D is the diameter of the cylinder). To clarify the mechanism generating the flow-induced vibration of the cylinders, the flow patterns around the two vibrating cylinders are also investigated using a flow visualization test that reproduces the flow-induced vibration of the cylinders with a forced vibration apparatus. As a result, it is clarified that the flow-induced vibration characteristics of the two cylinders arranged side-by-side switch among four patterns as the flow between the two cylinders is switched. Among the three arrangements considered (tandem, staggered, and side-by-side), the arrangement that generates flow-induced vibration of the two cylinders most easily is the side-by-side arrangement.

- 기호설명 -

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

유체 속에 존재하는 원기둥에 대해서는 형상이 가장 기본적인기 때문에 많은 연구가 행해지고 있다. 실제의 원기둥 구조물은 열교환기, 송전선 등

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 강원지회 춘계학술대회(2011. 5. 20., 강원대) 발표논문임
† Corresponding Author, sclee@kangwon.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

처럼 단독으로 존재하는 경우보다 복수로 존재하는 경우가 많지만 복수 원기둥에 관한 연구는 단독 원기둥처럼 많지 않다. 복수로 존재하는 원기둥의 배열은 유체 흐름 방향에 대해 직렬 배열, 대각선 배열 그리고 병렬 배열로 나뉘어지고 각각의 배열은 하나의 테마로서 취급되고 있다. 본 연구는 그 중에서 병렬 배열에 대해 조사한 것이다.

2 원기둥 주변의 흐름에 관한 연구로서 Huseyin⁽¹⁾은 2 개 또는 3 개의 같은 직경을 가지는 원기둥을 병렬로 배열하여 원기둥의 간격 L/D 를 0.25~2.0 까지 변화 시켜 각 L/D 에 있어서의 원기둥 주변의 흐름 모양을 조사했다. 또 Alam,⁽²⁾ Zhou,⁽³⁾ 岡島⁽⁴⁾는 같은 직경의 두 원기둥을 병렬 배열로 고정시켜서 아임계 레이놀즈수의 범위 내에서 두 원기둥 표면의 압력분포, 양력, 항력 등의 유체력을 조사함과 동시에 원기둥 주변의 흐름 모양을 조사했다. Sun⁽⁵⁾과 Chen⁽⁶⁾은 같은 직경의 2 원기둥의 병렬 배열 뿐만 아니라 직렬 배열 및 대각선 배열일 때의 유체력과 흐름 모양을 조사했다. Alam⁽⁷⁾은 5.5×10^4 의 레이놀즈수에서 고정 병렬 배열된 두 원기둥 사이를 통과하는 흐름이 한 쪽의 원기둥으로 편중되어 흐르다가 어느 순간 다른 쪽 원기둥으로 편중되어 흐르는 스위칭 플로우에 의한 양력과 항력 및 흐름 모양을 두 원기둥의 간격 비 L/D 를 체계적으로 변화 시키면서 조사했다. Lam⁽⁸⁾은 서로 다른 직경의 두 원기둥을 이용해 직경이 큰 원기둥을 상류쪽에 고정시킨 직렬 배열, 대각선 배열 및 병렬 배열의 각 배열에 있어서 작

은 원기둥의 유력 진동 특성을 조사했다. 이와 같이 병렬 배열된 두 원기둥에 관한 연구에서는 고정된 원기둥의 유체력 특성 및 흐름 모양에 관한 연구가 대부분이고 자유 지지된 원기둥의 유력 진동 특성에 관한 연구는 적은 것이 현 실정이다.

우리들은 지금까지 두 원기둥에 관해서 직렬 배열된 경우의 유력 진동 특성 및 그 제어^(9,10)와 대각선 배열된 경우의 유력 진동 특성⁽¹¹⁾에 대해 연구 해 왔다. 본 연구는 병렬 배열된 두 원기둥의 유력 진동 특성에 관한 것이다. 구체적으로는 병렬 배열된 같은 직경의 두 원기둥으로 풍동에서의 자유진동 실험 및 수로에서의 강제 진동 실험을 실시했다. 자유 진동 실험은 두 원기둥의 간격 비 L/D 를 체계적으로 변화시켜 환산 유속 U_r 의 변화에 따른 유력 진동 특성을 상세히 조사했다. 그리고 강제 진동 실험에서는 자유 진동 실험에서 얻어진 두 원기둥의 간격과 진동 진폭 및 진동 위상 등의 진동 특성을 강제 진동 장치로 정확히 재현해서 진동할 때의 두 원기둥 주변의 흐름 모양을 조사했다. 그래서 진동 특성 및 흐름 모양을 근거로 한 유력 진동 발생 메커니즘을 규명했다.

2. 실험 장치 및 방법

유력 진동 특성을 조사하는 자유 진동 실험에서는 단면 $0.3\text{m} \times 1.2\text{m}$, 길이 2.3m 의 축정부를 갖는 환류형 풍동을, 두 원기둥 주변의 흐름 모양을 조사하기 위한 가시화 관측 실험(강제 진동 실험)에서는 폭 0.3m,

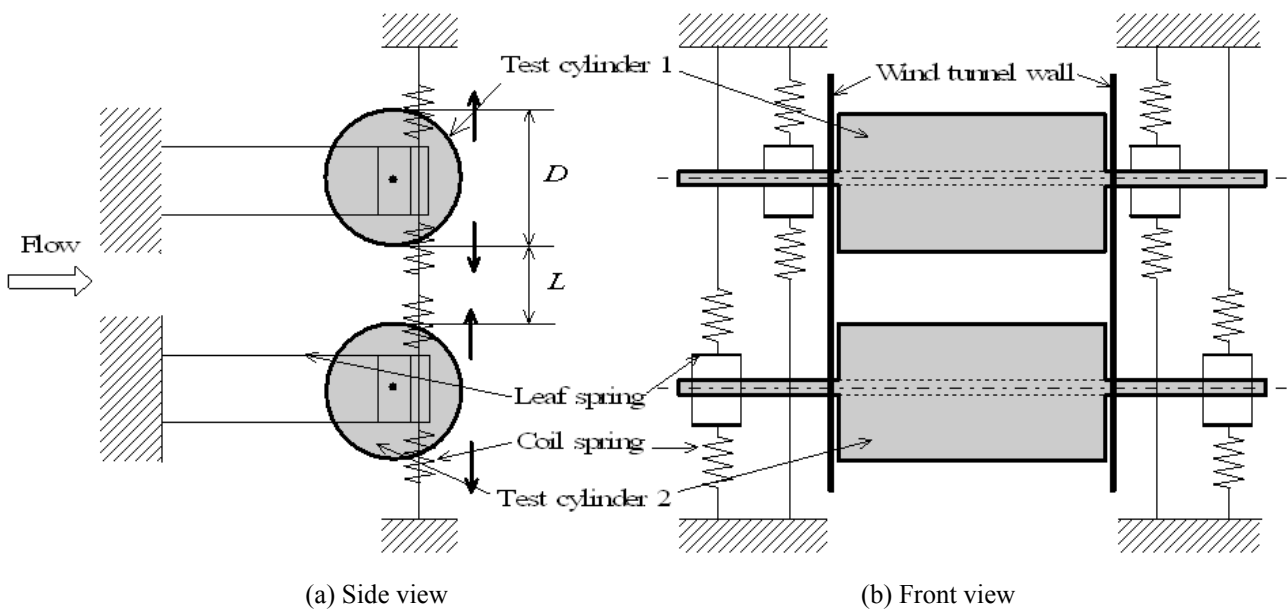


Fig. 1 Experimental arrangement and definitions of symbols

깊이 0.4m, 길이 2m 의 측정부를 갖는 회류식 수로를 사용했다. 자유 진동 실험에 사용한 두 원기둥은 직경 66mm로 동일하며, 원통의 경량화를 위해 종이 재질의 원통을 사용하였고, 표면은 얇은 알루미늄 판을 붙였다. 원기둥 내부에는 직경 10mm 의 알루미늄 지지축을 설치하였다. 실험에 쓰인 원기둥은 Fig. 1에서 나타내는 것처럼 각 원기둥의 지지축을 통해 풍동 측정부 바깥쪽에 있는 자유 진동 장치의 두 장의 판스프링(두께 0.3mm 의 인칭동판)에 연결 시켜 유체 흐름에 대해 직각 방향의 진동(크로스 플로우 진동)만 일어나도록 되어 있다. 그리고 판스프링 상하에 코일 스프링을 설치하므로써 정지시에 중력에 대해 평형 위치를 잡을 수 있도록 했다. 두 원기둥의 진동 변위는 레이저 변위계(측정 범위 ±40mm, 분해능력 10μm)로 각각 측정했다. 두 원기둥의 환산 감쇠 파라미터 C_n 을 7.24 정도로 하고, Fig. 1 의 두 원기둥의 간격 L 을 원기둥의 직경 D 로 무차원화한 L/D 를 0.1~3.2 의 범위에서 변화시켜, 각 L/D 에서의 환산유속 U_r 의 변화에 따른 유력 진동 특성을 조사했다. 본 실험에서의 U_r 의 변화는 유속(U_0)만을 변화시키는 것으로 했고, 이 때의 레이놀즈 수는 100~74000 이다. 유속 측정은 원기둥의 상류 쪽에 설치된 프로펠러식 유속계(측정 범위 0.6~40m/s, 분해능력 0.01m/s)로 측정했다. 본 실험에서 얻어진 측정값들의 오차는 풍동의 측정 단면과 원기둥 직경의 기하학적 오차 그리고 레이저 변위계와 프로펠러식 유속계의 측정오차를 고려했을 때 최대 ±1.6%이다.

진동 시의 원기둥 주변의 흐름 모양을 조사하는 가시화 실험은 자유 진동 실험에서 얻어진 두 원기둥의 진동 진폭, 위상 등의 유력 진동 특성을 정확하게 재현 할 수 있는 강제 진동 장치(Fig. 2)를 이용했다. 가시화 실험에서 사용한 두 원기둥의 직경은 20mm 로 하고, 수소 기포법에 의한 가시화 실험을 했다.

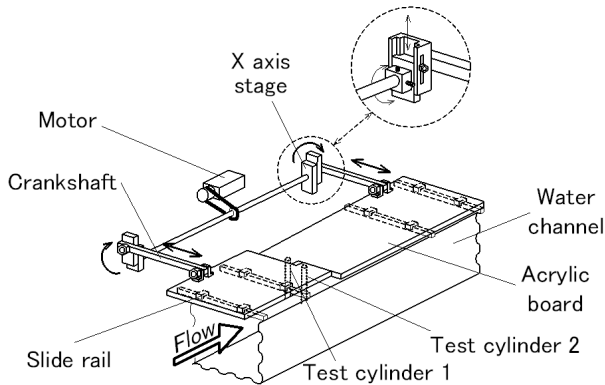
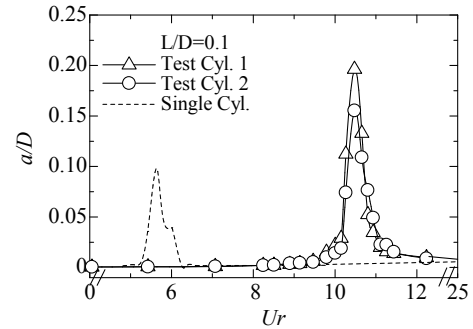


Fig. 2 View of forced-vibration experimental apparatus for flow visualization

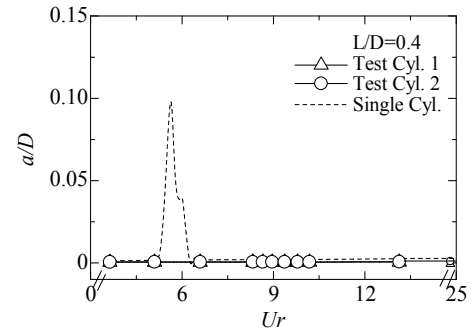
3. 결과 및 고찰

3.1 변동 양력 특성과 유력 진동 특성

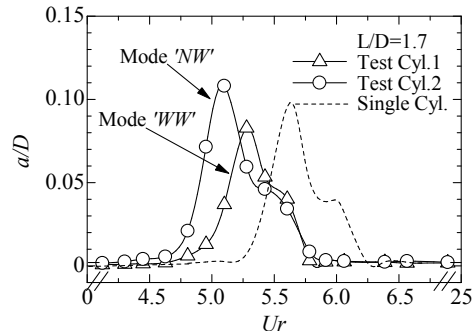
Fig. 3 은 병렬 배열된 2 원기둥의 간격비 L/D 를



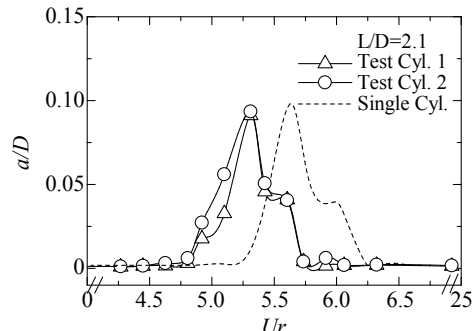
(a) Region I ($0.1 \leq L/D < 0.2$)



(b) Region II ($0.2 \leq L/D \leq 0.9$)



(c) Region III ($0.9 < L/D < 2.1$)



(d) Region IV ($2.1 \leq L/D \leq 3.2$)

Fig. 3 Characteristics of flow-induced vibration of two cylinders in side by side arrangement at each flow region

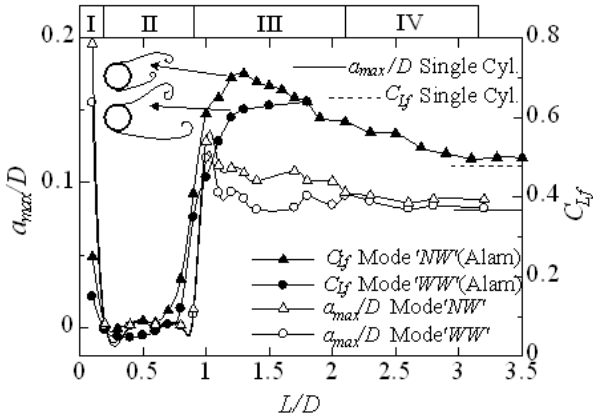


Fig. 4 Classification of vibration mode of flow-induced vibration of two circular cylinders

0.1~3.2의 범위에서 변화시켰을 때 유력 진동 성상의 결과 중 특징적인 4개의 진동 패턴을 나타낸 것이다. 그림에는 비교를 위해 단독 원기둥의 진동 성상도 나타내고 있다. 그림과 같이 병렬 배열된 두 원기둥에서는 발산 진동은 발생하지 않고, 한정 진동만 발생한다. 그리고 $L/D=0.1\sim 3.2$ 의 범위에서 병렬 배열된 두 원기둥의 유력 진동은 4개의 진동 패턴으로 나누어지는 것을 알 수가 있다. 진동 패턴 I은 설치 조건이 $0.1 \leq L/D < 0.2$ 일 때, 두 원기둥이 단독 원기둥의 진동이 발생하는 유속보다 더 큰 유속에서 진폭이 큰 유력진동이 발생하는 패턴이다. 진동 패턴 II는 $0.2 \leq L/D < 0.9$ 일 때, 두 원기둥 어느 쪽에서도 유력 진동이 발생하지 않는 패턴이다. 진동 패턴 III은 $0.9 < L/D < 2.1$ 일 때, 단독 원기둥의 진동 발생 유속보다 작은 유속에서 진동이 발생하는 것이다. 그리고 이 패턴 III의 경우에는 두 원기둥이 진동하는 유속범위는 같지만 진동 진폭의 최대치 및 그 때의 유속은 두 원기둥이 다르게 나타난다. 진동 패턴 IV는 $2.1 \leq L/D \leq 3.2$ 일 때, 단독 원기둥보다 약간 작은 환산 유속에서 진동이 발생하고, 두 원기둥 모두 단독 원기둥과 거의 같은 진동 성상을 나타내는 패턴이다.

Fig. 4는 병렬 배열된 두 원기둥의 간격 L/D 의 변화에 따른 유력 진동의 최대 진폭치 a_{max}/D 의 변화를 나타낸 것이다. 그림의 상부에는 4개의 진동 패턴이 발생하는 L/D 의 영역을 나타내고 있다. 그리고 그림에는 Alam⁽⁷⁾에 의한 병렬 배열된 고정 2 원기둥의 변동 양력 계수 C_{Lf} 의 변화와 단독 원기둥의 진동 진폭의 최대치 및 변동 양력 계수를 나타내고 있다. Fig. 4와 같이 2 원기둥의 간격 L/D 의 변화에 대한 진동 진폭의 최대치의 변화는 변동양력 계수의 변화와 비슷한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또 Alam은 $L/D < 1.7$ 이 되면 병렬 배열된 2 원기둥의 사이에서는 스위칭 플로우가

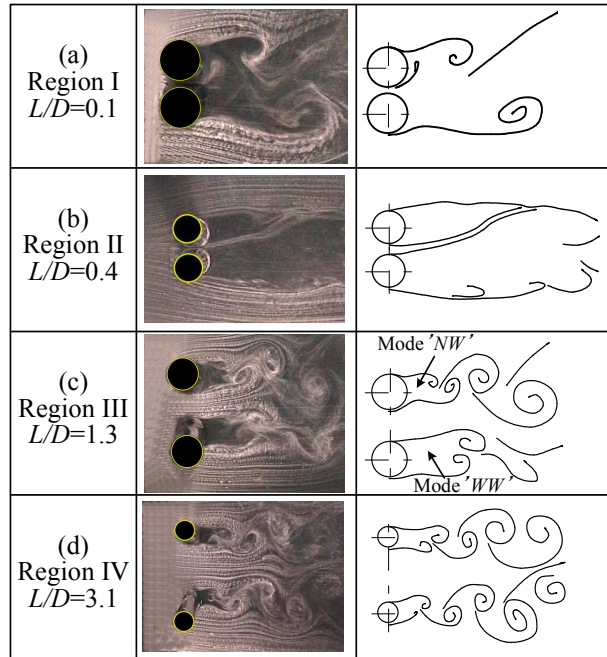


Fig. 5 Visualized flow patterns and schematic diagrams around two cylinders in each vibration region

발생하고, 어느 한 쪽의 원기둥 후류에 편중이 되어 Fig. 4 좌측 상단의 모식도와 같이 2 원기둥의 뒷부분에서 좁은 웨이크(Narrow wake : 'NW')와 넓은 웨이크(Wide wake : 'WW')가 간헐적으로 교체되면서 발생하는 것이 발표된 바 있다. 그래서 2 원기둥에서는 $0.9 \leq L/D < 1.7$ 의 범위에서 서로 다른 변동 양력 계수 C_{Lf} 가 발생하고, 유력 진동 실험에서의 최대 진폭치 a_{max}/D 도 같은 경향으로 2 원기둥에서 서로 다른 진폭의 진동 성상이 발생하고 있는 것은 2 원기둥 사이의 스위칭 플로우에 의한 2개의 웨이크 모드에 기인하는 것으로 사료된다.

3.2 각 진동 영역에서의 유력 진동 특성

Fig. 5는 각 진동 영역에 있어서 2 원기둥 주변의 흐름 모양을 가시화한 결과와 그 모식도를 나타내고 있다. 또 Fig. 6은 각 영역에 있어서 후류의 속도 스펙터 분포를 나타내고 있다. 이하 설명은 각 진동 영역에 있어서의 진동 특성과 관련시켜 2 원기둥에 발생하는 유력진동 발생 메커니즘에 대해 고찰하는 것이다.

우선 진동 영역 I은 2 원기둥의 어느 쪽에서든 단독 원기둥에 비해 큰 환산유속 U_r 에서 유력 진동이 발생하고 그 진동 진폭도 단독 원기둥에 비해 크다. 이것은 Fig. 5(a)와 같이 2 원기둥의 간격이 아주 좁기 때문에 2 원기둥의 사이를 통과하는 흐름은 거의 없고, 2 원기둥의 각각 바깥쪽에서 박리된 전단층이 후

류에서 크게 와류로 발전하여 2 원기둥이 한 개의 물체인 것과 같은 흐름 모양으로 와류가 발생하기 때문이다. 이처럼 2 원기둥은 일체화한 상태로 되기 때문에 원기둥에서 나오는 와류 방출 주파수는 작아지고 유력 진동이 발생하는 환산 유속은 크게 된다. 또 Fig. 6의 $L/D=0.1$ 에서와 같이 진동 시의 원기둥 후류의 스펙터 정점이 아주 높게 나타나기 때문에 유력 진동을 유발하는 유체력도 큰 것으로 사료된다.

다음으로 진동 영역 II에서는 2 원기둥의 어느 쪽에서도 유력 진동이 발생하지 않는다. 이 영역 II에서는 Fig. 5(b)와 같이 2 원기둥의 간격이 약간 크게 돼서 2 원기둥의 사이를 통과한 흐름이 어느 한 쪽의 원기둥 후류에 간헐적으로 편중되는 스위칭 플로우가 발생하는 흐름 모양으로 되어 있다. 이처럼 원기둥 사이에서 스위칭 플로우가 발생하는 경우에는 원기둥 바깥쪽에서 박리된 전단층이 후류에서 와류로 발전되지 않기 때문에 2 원기둥 어느 쪽 후류에서도 명료한 카르만 와열(Karman's trail)이 형성되지 않는다. 따라서 Fig. 6의 $L/D=0.4$ 처럼 후류에는 눈에 띄는 스펙터의 정점이 존재하지 않고, 주기성이 있는 흐름이 형성되지 않기 때문에 2 원기둥의 어느 쪽에서도 유력 진동이 발생하지 않는다.

진동 영역 III에서는 2 원기둥이 진동하는 환산 유속 U_r 의 영역은 같지만 2 원기둥의 최대 진폭치 및 그 때의 환산 유속이 다른 영역이다. 이 진동 영역에서도 Fig. 5(c)와 같이 2 원기둥 사이에서 스위칭 플로우가 발생하고, 2 원기둥 사이를 흐르는 흐름은 어느 한 쪽에 편중된 흐름으로 나타나고 있다. 그러나 전술한 진동 영역 II에 비해 2 원기둥의 간격이 넓기 때문에 2 원기둥 사이를 지난 박리 전단층은 각 원기둥 후류에서 각각 와류로 발전을 하여 2 원기둥 모두 명료한 카르만 와열이 형성된다. 단지 스

위칭 플로우가 어느 한 원기둥에 편중되는 것에 의해 2 원기둥의 후류에는 좁은 웨이크(Mode 'NW')와 넓은 웨이크(Mode 'WW')가 형성된다. 이 웨이크 폭의 차이에 의해 2 원기둥의 진동 진폭은 다르게 된다. 좁은 웨이크가 형성되는 원기둥은 Fig. 5(c)와 같이 와류가 원기둥 후방의 가까운 곳에서 형성되기 때문에 원기둥의 진동 진폭이 크게 발생하는 것으로 사료된다. 한편, 넓은 웨이크가 형성되는 쪽의 원기둥 후방에서는 원기둥으로부터 먼 곳에서 와류가 형성되기 때문에 원기둥의 유력 진동이 작게 발생하는 것으로 사료된다. 또 Fig. 6의 $L/D=1.0$ 과 같이 원기둥의 고유 진동수와 같은 주파수에서 스펙터 정점이 존재하고, 주기성이 강한 와류가 형성되고 있다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 진동 영역 IV는 Fig. 3(d)와 같이 단독 원기둥보다 약간 작은 환산 유속에서 진동이 발생하고 2 원기둥의 어느 쪽에서든 단독 원기둥과 거의 비슷한 진동 성상을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 5(d)와 같이 2 원기둥의 간격이 넓기 때문에 각 원기둥이 서로 강하게 영향을 미치지 못하고 각각 독립된 원기둥으로서 후류에 카르만 와열을 형성하는 흐름으로 되어 있다. 또 Fig. 6의 $L/D=2.6$ 과 같이 원기둥에서 나오는 와류 방출 주파수는 원기둥의 고유진동수와 같은 주파수로 명료한 스펙터 정점이 있는 것으로 보아 후류에서 명료한 카르만 와열이 형성되고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 2 원기둥이 서로 유력 진동을 유발시키므로 단독 원기둥일 때 보다는 약간 빠른

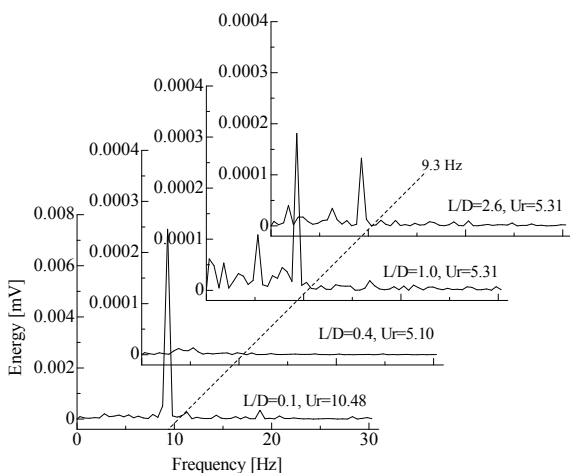


Fig. 6 Spectral analysis of vortex behind vibrating cylinders at each vibration region

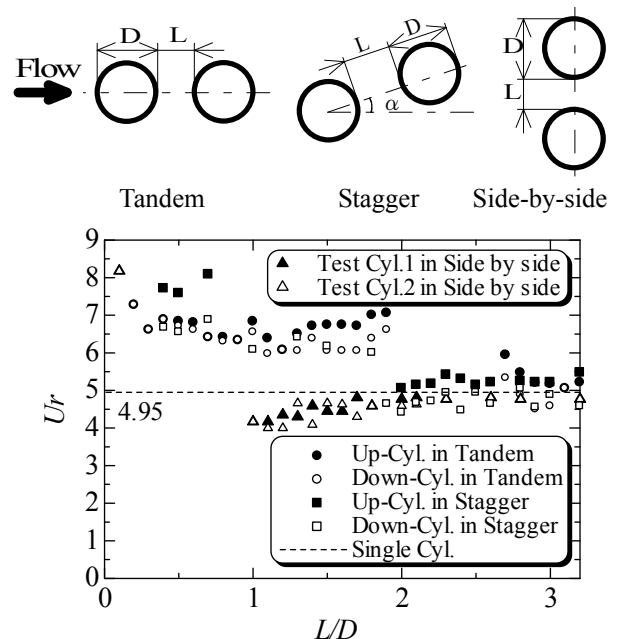


Fig. 7 Reduced velocity U_r when the one and two cylinders begin the flow-induced vibration for various arrangement

유속에서 진동이 시작되는 것으로 사료된다.

3.3 유력 진동의 발생개시 유속 U_c

Fig. 7 은 2 원기둥이 직렬배열, 대각선 배열, 및 병렬 배열된 경우의 모식도와 각 배열에 있어서의 유력 진동이 발생하는 환산 유속 U_c 을 2 원기둥의 간격 L/D 의 변화로 나타낸 것이다. 아울러 비교를 위해 단독 원기둥의 진동 특성도 나타내고 있다. 여기서 유력 진동의 발생 판정 기준은 원기둥의 진동 진폭 (RMS 값)이 원기둥 직경의 2%이상이 되는 것을 기준으로 했다. Fig. 7 과 같이 2 원기둥에 유력 진동이 발생하는 환산 유속 U_c 은 $L/D \geq 2.0$ 일 때 어떤 배열의 경우에도 단독 원기둥의 진동 발생 개시 유속과 비슷한 값을 가지지만, $L/D < 2.0$ 일 때에는 2 원기둥의 배열에 따라 각각 유력 진동이 발생하기 시작하는 환산 유속이 다르다. 직렬 배열 및 대각선 배열의 경우에 유력 진동이 발생하기 시작하는 환산 유속은 단독 원기둥의 $U_c = 4.95$ 보다 큰 값에서 유력진동이 발생하기 시작한다. 그리고 병렬 배열에 있어서는 진동 영역 I 의 $L/D < 0.2$ 일 때에도 단독 원기둥보다 큰 유속에서 유력 진동이 발생한다. 그러나 병렬 배열의 진동 영역 III 의 $0.9 < L/D < 2.1$ 의 경우에는 단독 원기둥보다도 작은 환산 유속에서 유력 진동이 발생하기 시작한다. 따라서 2 원기둥의 배열 중에 $0.9 < L/D < 2.1$ 의 조건에서 병렬 배열된 경우에는 다른 조건에 비해 유력 진동이 발생하는 환산 유속이 가장 작은 것으로부터 유력 진동을 서로 유발하기 쉬운 조건임을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) 2 원기둥의 간격 $L/D = 0.1 \sim 3.2$ 의 범위에서의 병렬 배열된 2 원기둥의 유력 진동은 4 개의 진동 패턴으로 분류된다. 그리고 각 진동 패턴의 발생 메커니즘을 규명하였다.

(2) 병렬 배열된 2 원기둥에 발생하는 유력 진동은 어느 간격이든 진동 진폭과 진동 발생 유속 범위가 한정되어 있는 한정 진동이다.

(3) 병렬 배열된 2 원기둥의 간격의 변화에 따른 유력 진동 특성은 고정 2 원기둥의 변동 양력 변화의 경향과 같다.

(4) 2 원기둥의 배열 중에서 $L/D = 0.9 \sim 2.1$ 의 병렬 배열을 했을 때, 유력 진동이 발생하는 환산 유속은 가장 작고, 유력 진동을 유발하기 쉬운 배열 조건이 된다.

참고문헌

(1) 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.

- (2) 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.
- (3) Zhou, Y., Wang, Z. J., So, R. M. C., Xu, S. J. 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.
- (4) Okajima, A., Sugitani, K. and Mizota, 1986, T., "Flow Around a Pair of Circular Cylinders Arranged Side by Side at High Reynolds Numbers," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.52, No.480, pp.2844~2850.
- (5) Sun, T. F., Gu, Z. F., He, D. X. and Zhang, L. L., 1992, "Fluctuating Pressure on Two Circular Cylinders at High Reynolds Numbers," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.41, No.44, pp. 577~588.
- (6) Chen, S. S., 1986, "A Review of Flow-induced Vibration of Two Circular Cylinders in Crossflow," *Transaction of the ASME*, Vol.108, pp. 382~393.
- (7) Alam, M. M., Sakamoto, H. and Moriya, M., 2003, "Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders by Using Tripping Rods," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.18, pp.347~366.
- (8) Lam, K. M. and To, A. P., 2003, "Interference Effect of an 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) Kim, S., Sakamoto, H., 2006, "Characteristics and Suppression of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement (1st Report, Characteristics of flow-induced vibrations in cross-flow vibration)," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.714, pp.314~321.
- (10) Kim, S., Sakamoto, H., 2006, "Characteristics and Suppression of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement (2nd Report, Suppression of flow-induced vibrations in cross-flow vibration)," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.721, pp.2164~2171.
- (11) Kim, S., Sakamoto, H., 2007, "A study on Characteristics of Flow-Induced Vibrations of Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No.725, pp.139~146.