

근접한 세 원형구조물의 공기역학적 거동에 대한 연구

A Study on the aerodynamic response of approximated
three circular cylinders

崔暢根* · 金潤石**

Choi, Chang Koon · Kim, Yun Seok

Abstract

It this study, the aerodynamic responses of circular cylinder behind a pair of circular cylinders arranged side by side in a uniform flow were investigated. We confirmed that four types of oscillation are occurred on downstream cylinder in such an arrangement. Influenced by upstream cylinders, the amplitude of vortex induced oscillation is increased and wake buffeting occurred when S/D (S : distance between the centers of upstream cylinders, D : diameter of cylinder) is smaller than 1.2. When S/D is larger than 1.2, gap flow introduces to oscillation which maintains a uniform amplitude in spite of increasing wind speed. This oscillation is reduced to "wake galloping" if its amplitude exceeds the limit point.

요 지

본 연구에서는 橫列배치된 두 원형구조물의 下流側에 위치하는 원형구조물의 공기역학적 거동에 대하여 고찰하였다. 세 구조물의 배치에 따라, 下流側 구조물에는 4가지 종류의 진동이 발생하는 복잡한 거동이 나타난다. 上流側 구조물의 존재에 의하여 vortex induced oscillation은 큰 진폭증가를 보이며, wake buffeting으로 판단되는 限定진동이 발생한다. 또한, $1.4 \leq S/D \leq 3.6$ 간격에서는 풍속증가에 관계 없이 일정한 진폭을 유지하는 진동이 발생하며, 이 진동의 진폭이 어느 한계점을 넘게 되면, 풍속증가에 따라 진폭이 증가하는 發散型 진동으로 발달하게 된다.

1. 서 론

1.1 개요

流動場내에 여러개의 원형구조물이 서로 근접히 배치되어 있을 경우, 각 구조물에는 單獨의 경우와는 달리 매우 복잡한 거동이 존재하게 된다. 특히 下

流側에 존재하는 구조물은 上流側 구조물로부터의 vortex 방출, 剝離剪斷層의 간섭 등에 의해 複數구조물 특유의 거동을 나타내며, 근접배치에 따른 wake의 변형, 雙안정기류(bistable flow)의 발생은 이러한 공기력거동의 특성을 한층 더 복잡하게 한다. 근접배치된 複數원형구조물로서는 사장교의 병렬 케이블, 굴뚝群, 송전선, 원자력발전소의 냉각탑 및 열교환파이프 등, 인간의 편리생활에 밀접한 관계가

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 연구원

있는 구조물이 많고, 따라서 이들의 공기력 거동 특성을 파악해 둘 필요가 있다고 사료된다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 세 원형구조물을 대상으로, 이들이 서로 근접배치되어 있을 때에 가장 복잡한 거동이 예상되는 下流側 원형구조물의 공기역학적 특성을 파악하였고, 각 공기력 탄성진동에 대해서는 압력측정 및 기류의 가시화를 통하여 그 원인을 고찰하였다.

1.2 근접한 두 원형구조물주위의 기류의 특성

下流側에 배치된 원형구조물의 거동을 예측하기 위해서 우선, 上流側의 두 원형구조물주위의 기류의 특성에 대하여 조사하였다. 근접배치된 두 원형구조물주위의 기류의 특성에 대해서는 일찍부터 많은 연구자에 의해 연구가 수행되어 왔으며,^(1~6) 그 특성을 정리하면 다음과 같다.

(1) 縱列배치의 특성

기류에 대하여 縱列배치된 두 원형구조물의 경우는 下流側 원형구조물이 上流側 원형구조물의 wake 내에 존재하는가 아닌가에 따라 기류의 양상이 크게 변한다. 즉, 양 구조물의 중심간격 $L/D=3.8$ 부근에서 기류의 양상이 변하게 되는데, 이 간격을 臨界 중심간격(L/D_{cr})이라고 한다. 臨界 중심간격 $L/D_{cr}=3.8$ 에 있어서 양 구조물의 유체특성치의 변화는 다음과 같다.

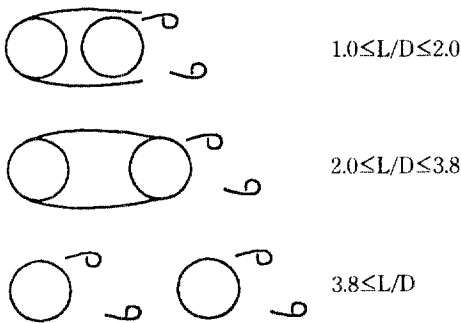


표 1. 각 배치에 따른 공기력진동현상의 분류

— 上流側 구조물

上流側 원형구조물의 wake가 下流側 원형구조물을 완전히 둘러싸는 $1.0 \leq L/D \leq 2.0$ 구간에서는 마치 單獨 원형구조물과 같은 압력분포를 보이고 있으나,

剝離剪斷層의 再附着이 발생하는 $L/D=2.0$ 부터는 背面負壓의 감소에 의해 抗力계수 C_d 는 감소하게 된다. 이와 같은 경향은 L/D_{cr} 부근에서 급변하여, 背面負壓의 급증에 의해 C_d 는 불연속적으로 증가하여 정상적인 값에 접근하게 된다. 또한 L/D_{cr} 부터 上流側 원형구조물에도 vortex 방출이 나타나게 된다.

— 下流側 구조물

L/D_{cr} 까지는 下流側 원형구조물의 C_d 는 매우 작으며, 특히 $1.0 \leq L/D \leq 2.0$ 구간에서는 負의 값을 갖는데, L/D_{cr} 이 되면 側面 및 背面의 負壓증가에 의해 정상적인 값에 접근한다. 또한, $L/D=2.0$ 부터 上流側 원형구조물의 剝離剪斷層의 再附着에 의한 두개의 $C_{p_{max}}$ 가 존재하는데, L/D_{cr} 가 되면서부터 하나의 $C_{p_{max}}$, 즉 停留點(stagnation point)이 나타난다. 한편, L/D 의 증가에 따라 vortex 방출이 감소하여 낮은 Strouhal number(이하 St數)를 보이지만, L/D_{cr} 부근에서 불연속적으로 증가하여 정상적인 St수에 접근한다.

(2) 橫列배치의 특성

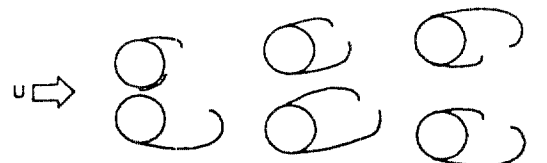
기류에 대하여 두 원형구조물이 橫列배치된 경우, 縱列배치와 마찬가지로 중심간격 S/D 에 따라 양 구조물의 유체특성치가 변화한다. 중심간격에 따른 기류의 특성변화는 다음과 같다.

— $1.0 \leq S/D \leq 1.2$ 간격

양 구조물간에는 코안다효과에 의해 원형구조물의 壁面을 따라 흐르는 곡면제트가 어느 한쪽의 구조물에만 존재하며, 이것에 의해 양 구조물간에는 引張力이 작용한다. 전체적으로는 gap flow에 의한 vortex의 방출은 찾아볼 수 없고, 하나의 vortex群만이 형성되어 單獨 구조물과 같은 양상을 보인다.

— $1.2 \leq S/D \leq 2.0 \sim 2.2$ 간격

곡면제트가 충분히 발달하여 두개의 vortex群, 즉 4열의 vortex가 방출된다. 여기서 한쪽의 wake는



1.0 ≤ S/D ≤ 1.2 1.2 ≤ S/D ≤ 2.0 ~ 2.2 2.2 ≤ S/D ≤ 4 ~ 5

그림 1. 중심간격 L/D 에 따른 기류의 양상

크고, 다른 한쪽의 wake은 작은 형태로 안정되어 있는데, 이 반대의 형태로도 안정된 기류의 양상을 나타낸다. 즉, 양 구조물간에는 동일한 경계조건에도 불구하고 두 형태의 안정된 기류가 형성되는 雙安定(bistable)기류가 존재한다. 따라서 이 간격에 있어서 양 구조물에는 두 가지의 St數, Cd의 값이 존재한다. 또한, 이 간격에서는 양 구조물의 抗力の 합은 單獨 원형구조물의 抗力の 두배보다 항상 작다.

- $2.2 \leq S/D \leq 4.0 \sim 5.0$ 간격

雙安定기류는 발생하지 않게 되며, gap flow의 중심선에 대칭인 두 개의 vortex群이 형성된다. 이 간격에서 양 구조물의 유체특성치는 S/D의 증가에 따라 정상적인 값에 접근해 간다. S/D가 4~5를 넘게 되면, 상호간섭이 사라져 양 구조물은 單獨 원형구조물과 동일한 특성을 보인다.

이상과 같이 근접배치된 두 원형구조물주위에는 매우 복잡한 기류가 존재한다. 특히 橫列배치에 있어서 $1.2 \leq S/D \leq 2.0 \sim 2.2$ 간격에서의 雙安定기류의 존재는 구조물의 동적거동을 초래할 수 있는 흥미로운 현상이다. 만일 이와 같은 流動場에 자유도를 갖는 구조물이 존재한다면, 雙安定기류에 의해 복잡한 공기력 거동이 발생하리라 예상된다. 본 연구에서는 橫列배치된 두 원형구조물의 下流側에 존재하는 원형구조물을 대상으로 풍동실험을 수행하여, 그 실험결과를 토대로 下流側 원형구조물의 공기력 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 실험범위

일련의 실험에 있어서의 측정범위는 다음과 같다. 橫列배치에 있어서의 세 가지 기류특성이 모두 포함되도록, 上流側 원형구조물의 중심간격 S/D를 1.0부터 5.0까지 0.2씩 간격변화를 주면서 검토했다. 橫列배치된 上流側 원형구조물의 경우, 低풍속영역에서 vortex induced oscillation(이하 VIO)의 발생이 예상되는데, 본 실험에서는 고풍속영역에서의 대규모 發散型진동의 특성파악에 주목적을 두었기 때문에, 上流側 원형구조물의 VIO를 무시하여 下流側 원형구조물에만 자유도를 준 상태에서 일련의 실험을 수행하였다. 그림 3과 같이 下流側 원형구조물은

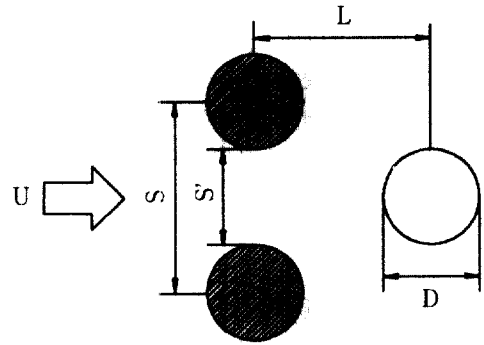


그림 3. 각 모형의 배치

橫列간격의 중심선에 배치되어, 각 縱列중심간격 L/D에 있어서의 특성을 검토하였다. 따라서 세 원형구조물의 배치는 기류에 대해 이동변삼각형 형태이며, 下流側 원형구조물의 자유도는 기류직각방향의 1자유도만으로도 대부분의 진동현상이 충분히 표현되리라 판단된다. 縱列중심간격 L/D는 1.0부터 5.0까지 0.5씩 변화시켜, 그 영향에 대해 검토했다. 진동응답측정실험의 결과, 진동현상이 발생하는 배치에 있어서는 진동발생의 원인을 고찰하기 위해 定常압력 및 非定常압력을 측정했다. 또한 이때의 gap flow의 방향성을 파악하기 위해 간단한 가시화실험도 수행하였다.

2.2 모형

실험에 이용한 모형은 두께 2mm, 外徑 50mm, 길이 800mm의 투명아크릴원통을 사용했다. 上流側의 양 모형은 풍동벽면에 고정시키고, 下流側의 모형에만 기류 직각방향의 자유도를 주었다. 이 모형의 고유진동수는 $f_n = 3.42\text{Hz}$, 대수감쇠율은 $\delta = 0.018$ 이다. 각 모형의 중심부에는 압력측정을 위한 壓力孔이 설치되어 있으며, 이 壓力孔의 상호간섭을 최소화하기 위해 모형마다 壓力孔의 위치에 차이를 두었다. 壓力孔은 22.5° 간격으로 총 16개가 설치되어 있으며, 導壓管은 內徑 1mm의 알미늄파이프를 이용했다.

2.3 풍동

본 실험에 사용된 풍동은 한국과학기술원 토목공학과에 설치된 Eiffel형 풍동으로, 측정부의 단면의

크기는 100×100 cm, 길이는 400 cm이다. 측정부를 흐르는 기류의 상태는 풍속 $U=8\text{ m/s}$ 에서 기류방향의 난류강도가 0.5%이하, 평균풍속에 대한 편차치가 1.3% 이하로 비교적 양질의 uniform flow이다. 이 풍동의 발생 가능한 풍속의 범위는 0.5~17.5 m/s이며, 이 범위에 있어서 풍속의 선형적인 제어가 가능하다.

2.4 진동응답측정실험

풍속에 대한 모형의 변위는 코일스프링端部에 연결된 ㄷ자형의 pick-up에 부착된 strain gauge로부터 얻어진다. 이 신호를 bridge box를 통해 dynamic strain amp., low pass filter를 거친 후, pen-oscillograph에 출력시켰다. 풍속의 산정은 피토크관(pitot tube)에서 얻어지는 動壓을 digital manometer를 통해, 기온을 고려하여 환산하였다. 본 실험은 풍속 $U=0.5\sim 12\text{ m/s}$ 의 범위에서 수행하였고, 따라서 亞臨界(subcritical) Re數영역의 응답특성이다.

2.5 압력측정실험

각 모형표면의 定常압력 및 非定常압력(unsteady pressure)의 측정은 모형표면의 壓力孔에서 얻어지는 압력과 피토크관에서 얻어지는 靜壓의 차이를 압력변환기를 통해 전기적인 신호를 변환시켜 bridge box, dynamic strain amp., low filter를 거친 후 pen-oscillograph에 출력시켰다. 특히 非定常압력측정의 경우, 變動압력의 시간적 처짐을 적게하기 위해서 모든 압력관의 길이를 1 m 이내로 하였고, 변위 및 압력의 low pass filtering은 7 Hz로 동일하게 하였다.

2.6 가시화실험

下流側의 모형에 진동이 발생할 경우, 上流側 양 모형의 gap을 흐르는 기류의 방향을 조사하기 위해 간단한 가시화실험을 수행하였다. 上流側의 양 모형의 gap에 회전이 가능한 색필름을 설치하여, 모형진동중의 색필름의 양상을 VTR로 촬영한 후, 느리게 재생시켜 진동중의 gap flow의 방향성에 대하여 검토했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진동응답특성

진동응답측정실험의 결과를 표 1에 제시한다. 표 1과 같이 下流側에 존재하는 원형구조물은 중심간격 S/D 및 L/D에 따라서 크게 4종류의 진동현상이 발생하는 복잡한 응답을 보인다. 각 배치에 있어서의 진동응답특성은 다음과 같다.

(1) $1.0\leq S/D\leq 1.2$ 간격의 특성

이 간격에서는 上流側의 양 구조물간에 gap flow가 거의 존재하지 않기 때문에 여기서 발생하는 진동은 上流側 구조물의 vortex 방출 또는 剝離剪斷層에 의한 진동으로 판단된다. 표 1의 A와 같이 L/D가 3.0이 되면, 풍속 $U=1.8\sim 2.0\text{ m/s}$ 부근에서 그림 4(a)과 같은 진동이 발생한다. 이 진동의 경우, 발생풍속이 한정되어 있다는 점이 單獨 원형구조물의 VIO와 동일하지만, VIO에 비해 최고 10배 정도의 진폭이 나타난다. 한편, L/D=1.5 부근에서는, 縱列 배치된 두 원형구조물에서 나타나는 wake galloping과 같은 진동이 발생한다. 이 진동의 기본적인 발생메카니즘은 wake galloping과 동일한 것으로 판단되나, 풍속증가에 관계없이 일정한 진폭을 유지하여 發散되지 않는 점이 상이하다. 이는 上流側 구조물의 형태가 8자형이며, 따라서 wake의 형태가 일반적인 원형구조물보다 상대적으로 축소되었기 때문으로 생각된다. 또한 그림 4(b)와 같이 풍속 $U=12\text{ m/s}$ 부근에서는 오히려 진폭이 감소하는데, 이것

	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
1.0	D	D		A	A	A
	BD	BD	BD	BCD	BD	
	BCD	BCD	BCD	BD	BD	
		BCD	BCD	BD	BD	B
		BCD	BCD	BD	D	
2.0		BCD	BCD	BD	B	
		BCD	BCD	BD		
		BC	BC	BCD		
		B	BC	BC	B	
		B	BC	B	B	
		B	BC	B		
		B	BC	B		
		B	B	B		
			B	B		
			B	B		
			B	B		
			B	B		
5.0			B	B		

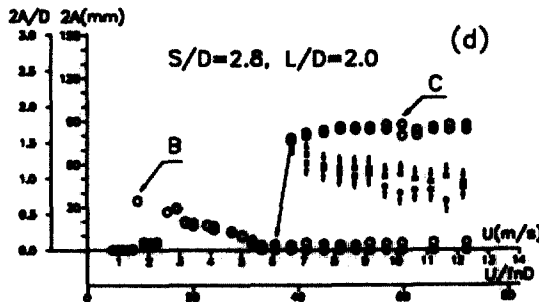
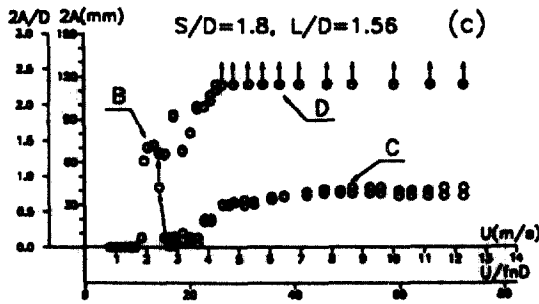
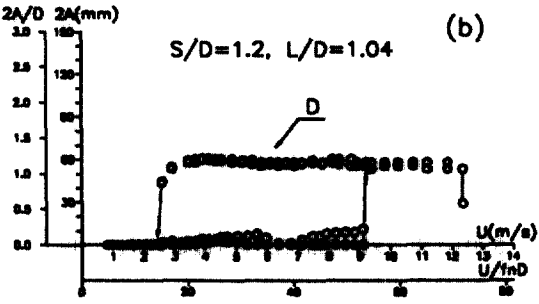
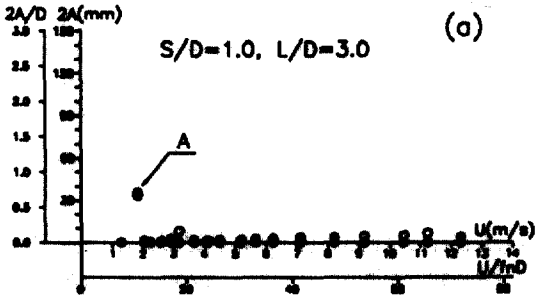


그림 4. 풍속-변위의 관계곡선

은 Re 수의 영향으로 판단된다. 上流側 구조물의 직경을 120 mm로 보면, $U=12$ m/s에서 Re 수는 약 1×10^5 이 된다. 이 Re 수는 臨界 Re 수보다 약간 작지만, 上流側 구조물의 형상에 의해 臨界 Re 수에서의

wake의 축소현상이 앞당겨져, 이에 따른 진폭감소가 아닌가 생각된다.

(2) $1.4 \leq S/D \leq 1.8$ 간격의 특성

이 간격은 前述한 바와 같이 上流側의 양 구조물간에 變安定기류가 발달하는 간격이다. 이 간격에서는 표 1의 B, C, D와 같은 3종류의 진동이 발생하는 복잡한 거동이 나타난다. 그림 4(c)와 같이 D type 진동은 주로 $L/D \leq 3.0$ 구간에서 발생하며, 풍속증가에 비례하여 진폭이 증가하는 發散型 진동의 특성을 보인다. 또한, $L/D \leq 3.0$ 구간에서는 진동이 발생하여 안정되면, 풍속증가에 관계없이 일정한 진폭을 유지하는 C type의 진동이 존재한다. 이 간격에서의 B type 진동은 그림 4(c)와 같이 구분하기가 곤란한 데, S/D의 증가에 따라 D 및 C type의 진동발생풍속이 높아져 확실히 구분되게 된다. 즉, 이 간격에서는 gap flow의 變安定성에 의해 D 및 C type의 진동발생풍속이 낮고, 따라서 B type의 진동이 그대로 D 또는 C type의 진동으로 발달해 가는 거동을 보인다.

(3) $2.0 \leq S/D \leq 3.6$ 간격의 특성

본 실험에 있어서는 모형의 지지조건상, 下流側 모형의 최대변위는 $2A=120$ mm를 넘을 수 없고, 따라서 $S/D > 2.6$ 간격에서는 D type 진동의 검토가 불가능하였다. 이 간격에서 D type의 진동이 발생하는 구간은 세 구조물이 정삼각형을 이루는 L/D 전후에 집중되어 있다. 한편 C type의 진동은 $L/D=2.0$ 를 중심으로 발생하고 있으며, $1.4 \leq S/D \leq 1.8$ 의 간격과는 달리, 그림 4(d)와 같이 확실한 limit cycle을 갖는 풍속-변위곡선을 보인다. 즉, S/D가 2.0이 되면서부터 gap flow의 變安定성이 약화되어, S/D가 증가할수록 hard type의 galloping적인 특성이 현저해진다. 이 진동의 발생풍속은 S/D가 증가할수록 높아져 S/D가 3.6을 넘게 되면 발생하지 않는다. 한편, 이 간격부터는 그림 4(d)와 같이 B type 진동의 발생이 확실히 구분된다. 이 진동은 일정한 풍속범위 $U=1.5 \sim 2.0$ m/s에서만 발생하며, 진폭은 單獨 원형 구조물의 VIO에 비해 최고 15배 정도로 커져 마치 A type 진동과 같은 진동특성을 보이나, 진동이 발생하는 간격 및 구간을 볼 때, 양 진동의 발생대카니즘은 본질적으로 다른 것으로 판단된다.

S/D가 3.6보다 커지면 B type의 진동만이 존재

하는데, 이 진동은 S/D 증가에 따라 약화되어, S/D가 5.0이 되면 下流側 구조물은 單獨 구조물과 동일한 거동을 보여, 下流側 구조물의 영향권으로부터 벗어나게 된다.

이상과 같이 橫列배치된 두 원형구조물의 下流側에 존재하는 원형구조물에는 4종류의 진동현상이 존재하게 된다. 특히 세 구조물이 서로 근접한 S/D ≤ 3.6, L/D ≤ 3.0의 배치에서는 이러한 진동현상들이 單獨적으로 또는 複合적으로 발생하는 복잡한 공기력거동이 나타난다. 이하, 각 진동의 응답특성 및 압력측정결과, 가시화실험결과를 토대로 이들의 발생원인에 대해 고찰한다.

3.2 A type의 진동에 대하여

S/D=1.0 간격에 있어서 L/D가 3.0보다 커지면 A type의 진동이 발생하게 된다. L/D < 3.0 구간에서는 전혀 진동발생이 없으나, L/D가 3.0이 되면, 갑자기 이 진동이 발생하게 된다. 이 진동은 單獨 원형구조물의 VIO에 비해 최고 10배 정도의 진폭을 보이나, L/D의 증가에 따라 진폭은 감소한다. 이러한 진동특징의 원인을 파악하기 위해, 下流側 구조물에 작용하는 압력을 측정하였는데, 그 결과를 그림 5에 제시한다. 그림에서, L/D=1.0~1.5구간에서는 下流側 구조물에 비교적 균일한 負壓이 작용하고 있어, 下流側 구조물은 上流側 구조물의 wake에 의해 완전히 shielding되어 있음을 알 수 있다. 그러나, L/D=2.5부터 下流側 구조물의 양側面에 Cp_{max} 점이 나타나기 시작해, 이 구간부터 上流側 구조물의 剝離剪斷層이 再附着됨을 알 수 있다. 이 再附着점은 L/D가 증가함에 따라 前面으로 이동되지만, L/D=4.5까지도 기류의 stagnation에 의한 하나의 Cp_{max} 점은 보이지 않는다. 이 압력분포로부터 下流側 구조물은 L/D_{cr} 이전의 상태라 할 수 있다. 前述한 바와 같이 縱列배치된 두 원형구조물에서 L/D_{cr}까지는 下流側 구조물만이 vortex를 방출한다. 이 특징으로 판단하면, A type의 진동은 下流側 구조물 자신의 VIO로 사료되는데, 그렇다면 L/D < 3.0 구간에서도 이 진동이 발생해야 한다. 또한, 진폭증가의 이유와 L/D의 증가에 따른 진폭감소현상은 설명이 안된다. Novak et al.⁽⁷⁾과 Albrecht et al.⁽⁸⁾의 실험결과에 의하면, 縱列배치된 두 원형구조물에 있어서 양 구조물의

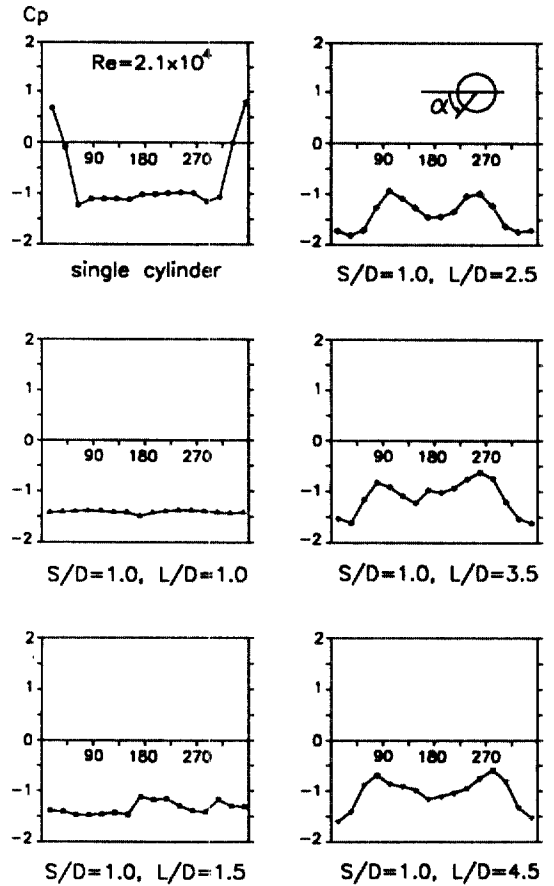


그림 5. L/D에 따른 下流側 구조물의 압력분포

직경이 다를 경우, L/D_{cr}은 크게 변하며, 특히 上流側 구조물이 클 경우는 L/D_{cr} 이전에서 下流側 구조물의 vortex 방출은 上流側 구조물의 vortex 방출에 의해 억제된다. 즉, S/D=1.0의 간격에서 上流側의 양 구조물의 단면형상이 원형이 아닌 8자형이더라도, 직경은 下流側 구조물의 두배이며, Novak의 실험결과와 같이 上流側 구조물만이 vortex를 방출한다고 볼 수 있다. Okajima et al.⁽⁶⁾에 의하면, S/D=1.0에 있어서 上流側 원형구조물의 St數는 0.09로 측정되어 있다. 여기에 이 진동이 발생하는 풍속 U=1.8~2.0m/s를 대입하여, 上流側 구조물의 vortex 방출 주파수 f_v를 산출하면 f_v=3.24~3.60이 되어 下流側 구조물의 고유진동수 f_n=3.42와 일치하고 있음을 알 수 있다. 근접한 複數 구조물의 공기역학적 거동의 하나로 wake buffeting이라는 현상이 있다. 이 현

상은 上流側 구조물에 의해 기류가 난류화되어, 이 난류에 동반된 變動공기력이 下流側의 구조물에 작용할 때 발생하는 강제진동으로, 이 난류의 變動 성분은 上流側 구조물의 vortex 방출 주파수에 일치하는, 탁월한 주파수성분을 내포한다. 결국 A type의 진동은 上流側 구조물의 vortex 방출에 의한 진동으로, wake buffeting 효과에 의해 진폭이 증가된다고 볼 수 있다. 그림 5에서 예측하면, $L/D=3.0$ 부근에서 剝離剪斷層의 再附着점이 90° 및 270° 가 된다. A type의 진동이 $L/D=3.0$ 에서 발생하기 시작하며, 가장 큰 진폭증가효과가 나타나는 것은 이 剝離剪斷層의 再附着점의 위치에 따른 것으로 사료된다. 단, 이 진폭증가의 효과는 L/D 가 커질수록 감소한다. $S/D=1.2$ 에서의 A type 진동의 경우, 진폭 및 발생구간에 약간의 차이를 보이는데, 이는 작은 양이나마, gap flow가 존재하기 때문이라고 생각된다.

3.3 B type의 진동에 대하여

S/D 가 1.2보다 커지면, 모든 간격에서 A type의 진동과 매우 비슷한 B type 진동이 발생한다. 양자의 상이점은 A type의 진동이 $S/D \leq 1.2$, $L/D \geq 3.0$ 의 배치에서 발생하는데 반해, B type의 진동은 $S/D \geq 1.4$, $L/D = 1.5 \sim 2.5$ 의 배치에서 주로 발생한다. 또한, $S/D \geq 1.4$ 에서는 上流側 양 구조물간에 충분한 gap flow가 발달하여, B type의 진동은 이 영향을 받게 된다. 이 진동의 발생원인을 파악하기 위해 다음과 같은 검토를 하였다. 우선, 이 진동이 上流側 구조물의 vortex 방출에 의한 것인가, 下流側 구조물의 vortex 방출에 의한 것인가를 판단하기 위해 세 구조물이 정삼각형을 이루는 배치를 대상으로 검토하였다. Lam et al.⁽⁹⁾은 이와 같은 정삼각형 배치에서 각 구조물의 St數를 측정하였는데, 그 결과는 그림 6과 같다. 上流側의 구조물 2와 3은 동일한 St數를 갖기 때문에 여기서는 구조물 2와 1을 대상으로 한다. 그림 6과 같이 S/D 가 작을 경우, 上流側 구조물은 下流側 구조물의 존재에 의해 매우 높은 vortex 방출을 보이고 있으며, 반대로 下流側 구조물은 單獨 구조물의 절반이하의 vortex 방출을 보이고 있다. 이와 같은 상호간섭은 S/D 의 증가에 따라 감소하여, $S/D=5.0$ 부근에서는 정상적인 St

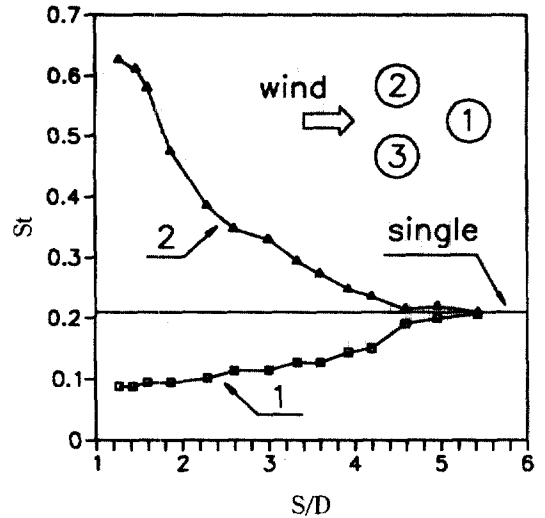


그림 6. 정삼각형배치에서의 Strouhal number

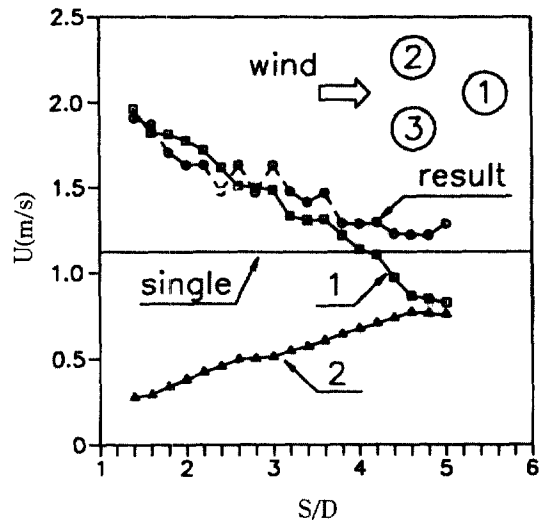


그림 7. 진동발생풍속의 비교

數에 수렴하게 된다. 각 St數에 구조물의 고유진동수를 대입하여 B type의 진동발생풍속을 예측한 결과, 그림 7과 같이 본 실험에서 얻어진 결과는 구조물 1에 의한 폭선과 일치하고 있으며, 구조물 2와는 무관함을 알 수 있다. 따라서 B type의 진동은 下流側 구조물 자신의 vortex 방출에 의한 진동임을 알 수 있다. 그림 7에는 본 실험에서 얻어진 單獨 원형구조물의 VIO의 발생풍속이 제시되어 있는데,

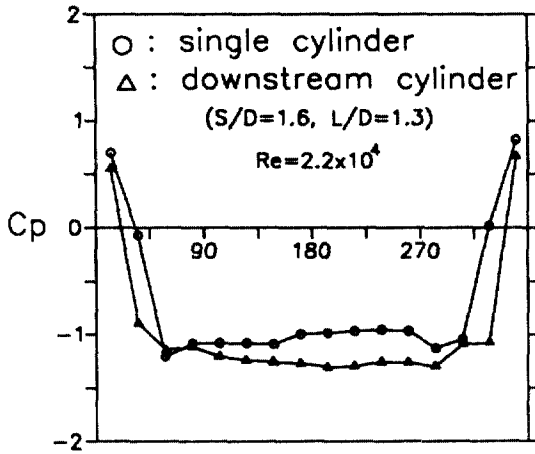


그림 8. 하류측원주와 단독원주의 압력분포

이것이 Lam et al.의 실험결과와 다소 차이를 보이는 것은 양 실험간의閉塞효과, 모형의 표면조도 등의 차이에 의한 결과로 판단된다. 그림 8은 B type 진동이 발생하는 배치에서의 下流側 구조물의 定常 압력분포이다. 前面의 正壓영역은 單獨 구조물에 비해 좁으며, 剝離剪斷側의 생성 및 剝離점은 上流側에 이동되어 있어 背面負壓이 單獨 구조물보다 발달되어 있음을 알 수 있다. 이 압력분포로부터 下流側 구조물은 上流側 구조물의 존재에 의해 wake의 규모가 확대 되었음을 알 수 있고, 따라서 vortex 방출시 구조물이 받는 유체력도 증가되어, 이 진동의 진폭이 크게 증가되는 것으로 사료된다. 이 진동은 L/D의 증가에 따라 소규모화 되며, 발생풍속도 낮아져 정상적인 VIO에 접근해 간다.

3.4 C type의 진동에 대하여

S/D가 1.2를 넘게 되면, 上流側 구조물간의 gap flow에 의해 C type의 진동이 S/D=3.6까지 발생한다. 이 진동은 縱列배치된 두 원형구조물에서 발생하는 wake galloping과는 달리, 진동이 발생하여 안정되면 풍속의 증가에도 불구하고 일정한 진폭을 유지하는데, 이 진폭은 上流側 양 구조물의 純 간격 $S'(=S-D)$ 의 약 90%이다. 또한 그림 4의 (c) 및 (d)와 같이 S/D<2.0 간격에서는 變安定기류에 의해 limit cycle이 존재하지 않는 soft galloping적인 진동으로, 비교적 넓은 L/D 구간에서 발생하는데 비해, S/D≥2.0 간격에서는 기류의 變安定성의 감소에 의해

hard galloping적인 진동특성을 보이며, 진동발생풍속은 S/D에 비해하여 높아진다. 또한 이 진동의 발생구간은 L/D=2.0 전후에 집중되어 있으며, 발생풍속도 L/D=2.0에서 가장 낮다. 이 진동의 발생원인을 조사하기 위해 진동중의 非定常압력을 측정하였는데, 上流側 구조물의 경우, stagnation point가 약간 側面으로 이동되어 있을 뿐, 현저한 압력變動은 없었다. 下流側 구조물이 진동중이므로 gap flow의 방향은 진동주기에 따라 변하며, 上流側 구조물의 gap 부근의 압력은 실제로 變動하고 있음이 분명하다. 본 실험의 배치보다 세 구조물의 배치가 조금 더 근접하게 되면 變動압력은 현저해 지리라고 사료된다. 그림 9는 진동중의 下流側 구조물표면의 압력분포이다. 그림에서 진동변위에 대해 압력의變動성분이 현저한 곳은 gap flow의 영향을 직접받는 前面부근이다. 이 압력의變動성분이 진동에 미치는 영향을 검토하기 위해 비교적 큰 變動압력이 작용하는 곳의 압력-변위관계를 그림 10에 제시한다. 이 관계와 gap flow의 방향에 대한 가시화실험결과를 토대로 진동의 발생원인을 고찰하면 다음과 같다. 그림 11에 있어서의 화살표는 VTR 촬영에 의한 gap flow의 방향이다. 구조물 1이 下向이동하는 Ps(Position)1에서 gap flow의 방향은 구조물 1의 下面을 흐르는데, 구조물 1이 중심선보다 약간 下向이동한 Ps2가 되면 급히 방향을 바꾸어 구조물 1의 上面을 흐르게 된다. 여기서 화살표의 방향은 구조물 2와 3을 흐르는 gap flow의 주방향일 뿐, gap flow의 전부가 이 방향으로 흐른다는 의미는 아니다. 따라서 그림 10에서 Ps2부근의 급격한 압력변화는 찾아볼 수 없고, 下向이동함에 따라 負壓은 오히려 증가된다. 즉, 구조물 1과 2를 흐르는 gap flow의 주방향에 관계없이 구조물 1과 3 사이에는, 구조물 3의 剝離剪斷層이 흐르는 것을 알 수 있다. 이 剝離剪斷層은 구조물 1이 下向이동함에 따라 변형되어, 더 빠른 속도로 구조물 1의 下面을 流下하게 된다. 이와 같은 기류의 존재는 그림 10의 負壓증가로 입증될 수 있다. 이러한 경향은 구조물 1이 下向이동함에 따라 증가되다가, 어느 한계점에서 전환된다. 즉, Pt (Point)¹¹의 압력변화를 보면 최소변위점의 직전부터 負壓이 회복되기 시작하는데, 이 위치에서 구조물 1의 下面을 흐르는 剝離剪斷層이 약화되어, 흐름의

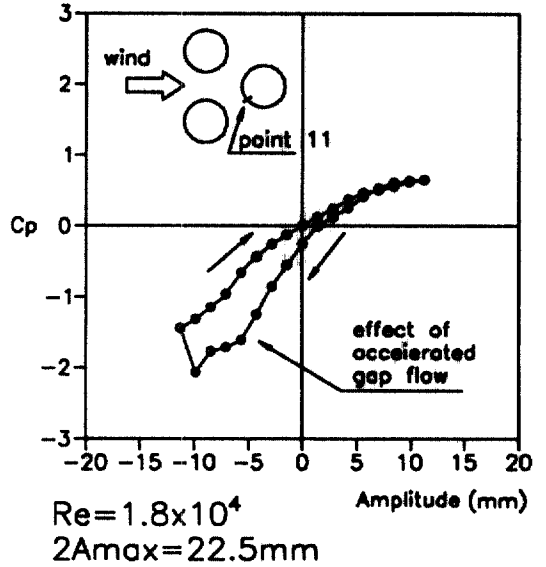
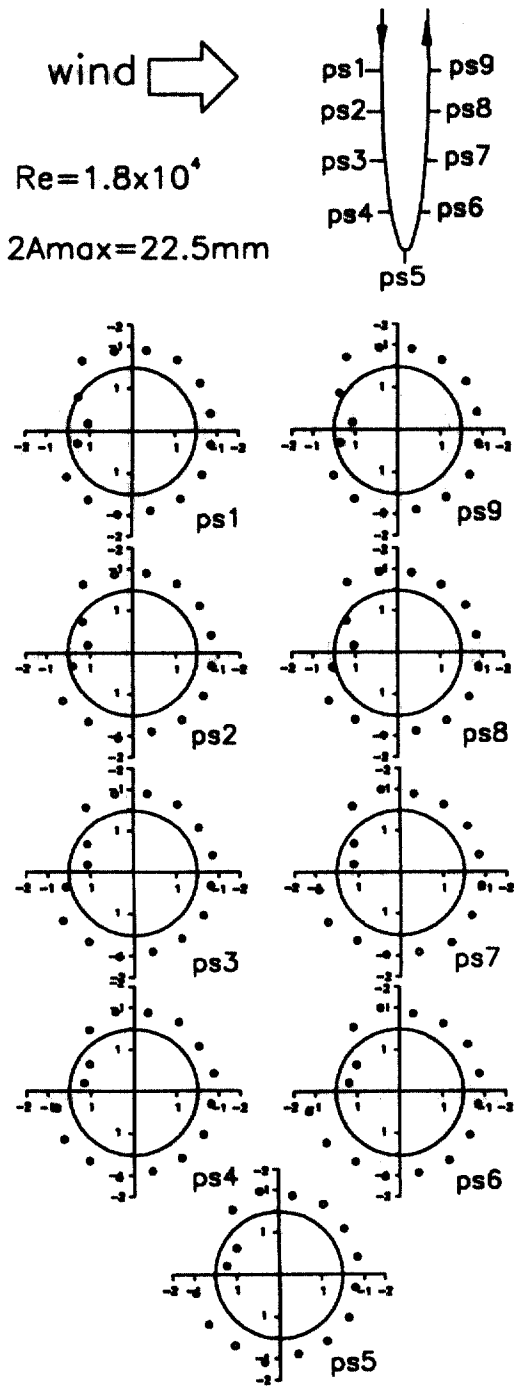


그림 10. 압력-변위의 관계곡선($S/D=2.0$, $L/D=1.5$)

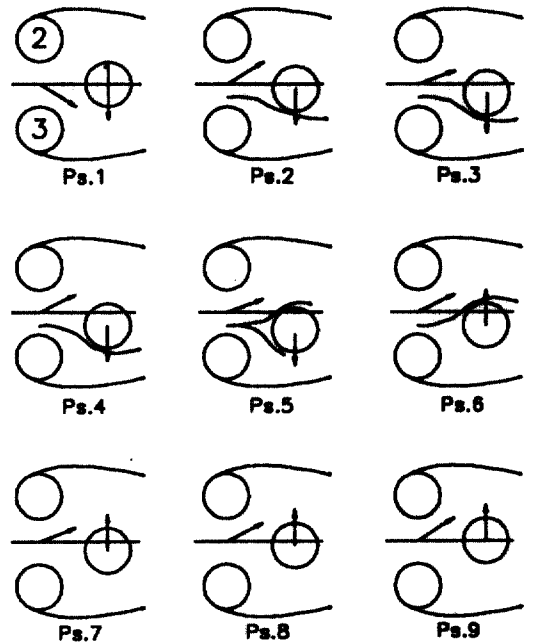


그림 9. 下流側 구조물의 非定常압력분포($S/D=2.0$, $L/D=1.5$)

그림 11. 진동중의 下流側 구조물 주위의 기류의 양상 ($S/D=2.0$, $L/D=1.5$)

방향을 gap flow의 주방향으로 바꾸게 된다. 이 때 부터 구조물 1에는 반대방향의 유체력이 작용하여, 구조물의 복원력과 함께 上向이동하게 된다. 결국 C type의 진동은 下流側 구조물의 운동에 의해, 上流側 구조물의 剝離剪斷層이 변형되어, 이에 의해 발생하는 기류의 가속화현상에 기인하는 진동이라 할 수 있다. 이와 같은 메카니즘은 기류에 대해 서로 상대각을 갖는 배치(staggered arrangement)에서의 두 원형구조물에 있어서도 발생한다고 보고된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 즉, 이 진동의 경우, 剝離剪斷層의 흐름방향이 전환되는 상대위치가 존재하며, 이 위치가 진동변위의 한계값이 된다. C type 진동의 진폭이 上流側 구조물의 純 간격 S'의 90% 정도로 안정되는 것도 이 상대위치에 의한 것으로 판단된다.

3.5 D type의 진동에 대하여

S/D가 1.2를 넘게 되면, 그림 4(c)와 같은 D type의 發散型진동이 발생한다. C type의 진동이 발생하는 배치의 대부분에서 이 진동도 발생하며, 진동이 발생하면 풍속의 증가에 관계없이 일정한 진폭을 유지하는 C type진동과는 달리, 풍속증가 따라 진폭이 증가하는 發散型진동의 특징을 보인다. Gap flow에 雙安定성이 충분한 S/D<2.0, L/D<2.5 구간에서는 비교적 低풍속영역에서, B type의 진동에서 그대로 D type의 진동으로 발달하는 경향을 보이나, 전체적으로는 limit cycle이 존재하는 진동 특성을 보인다. 이 진동의 발생원인을 파악하기 위해 측정된 非定常압력분포를 그림 12에 제시한다. 이 진동에 있어서도 上流側 구조물에는 현저한 압력變動이 없었다. 따라서 여기서는 下流側 구조물의 非定常압력만을 제시한다. 이에 의하면 gap의 중심선에 위치하는 Ps1에서는 상하대칭적인 압력분포를 보이고 있으나, 구조물 1이 下向이동하여 C type 진동의 한계진폭을 넘은 Ps2에 도달하면, 구조물 3의 外側剝離剪斷層의 영향에 의해 下面의 負壓이 증가하여 下向운동은 지속된다. Ps3에 도달한 구조물에는 負壓만이 작용하여, 구조물 3의 wake의 의해 shielding되어 있음을 알 수 있다. Ps4의 압력분포에는 구조물 3의 外側剝離剪斷層의 再附着에 의한 正壓부분, 그리고 前面부근에서의 負壓증가 부분이 나타난다. 즉, Ps4사이에서 기류의 흐름에 변화가

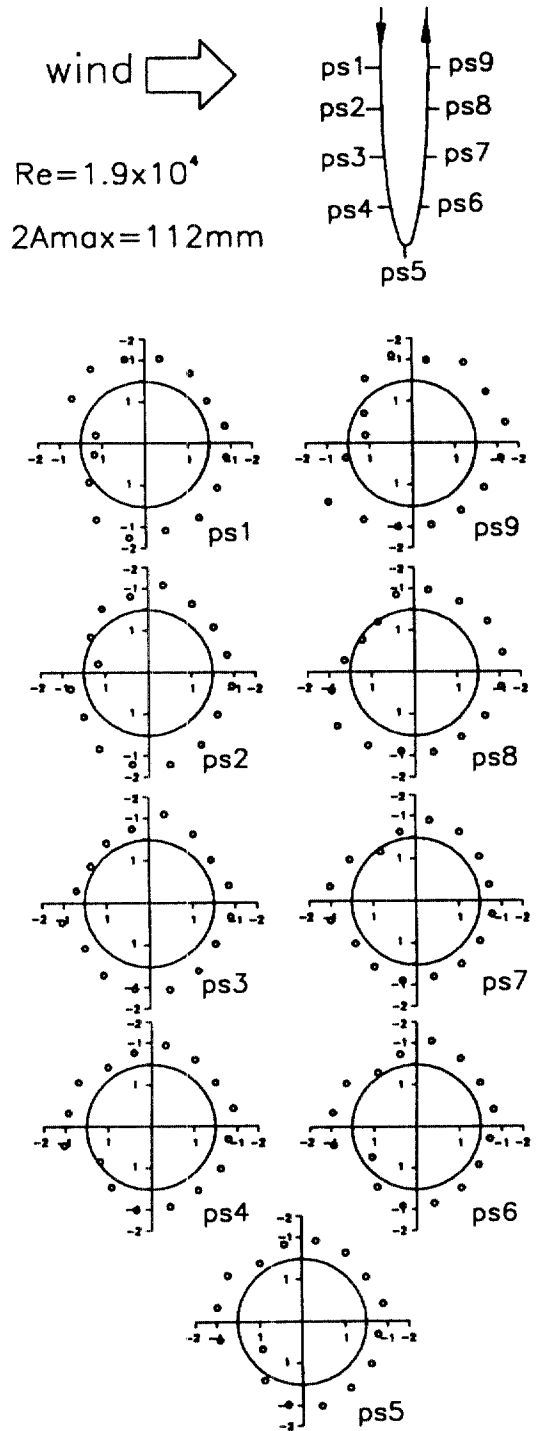


그림 12. 下流側 구조물의 非定常압력분포(S/D=2.0, L/D=3.0)

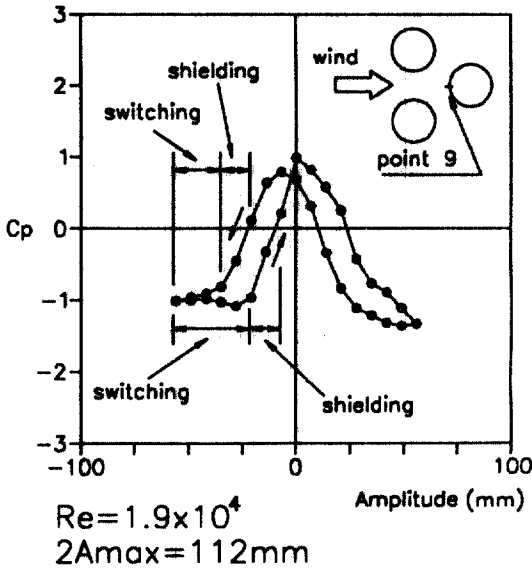


그림 13. 압력-변위의 관계곡선($S/D=2.0$, $L/D=3.0$)

생겨 운동진행의 반대방향으로 유체력이 작용하게 되며, 구조물은 Ps5를 정점으로 上向이동된다. 이와 같은 기류의 양상은 구조물 1의 前面부근에서의 압력-변위관계에서도 예측할 수 있다. 그림 13과 같이 Pt9의 압력변화를 보면, 구조물이 下向이동함에 따라 압력은 감소하며, 구조물 3의 wake의 shielding에 의한 負壓의 급증영역이 나타난다. 이 영역을 벗어나도 Pt9에는 계속하여 큰 負壓이 작용하고 있는데, 이는 Ps3과 Ps4 사이의 기류변화에 의한 것으로 사료된다. 즉, 縱列배치된 두 원형구조물에서 발생하는 wake galloping의 메카니즘과 같이, Ps4에서 구조물 3의 外側剝離剪斷層의 흐름방향이 급변하는 현상이 발생하며, 이는 Ps4, 5, 6의 가시화 실험결과의 화살표에서도 확실히 나타난다. 이 메카니즘을 그림 1를 이용하여 간단히 설명하면, Ps1에서 구조물 1의 下面을 흐르는 gap flow의 주성분은 Ps1(1)에서 급격히 방향을 바꾸어 구조물 1의 上面을 흐르게 된다. C type 진동의 한계진폭을 넘어 Ps2에도달한 구조물 1은, 구조물 3의 外側剝離剪斷層에 의해 이동방향으로 끌려가게 된다. 이 운동중의 Ps3에서는 구조물 3의 wake에 의해 shielding되며, Ps4에서 구조물 3의 外側剝離剪斷層이 흐름방향을 바꾸어 구조물 1의 前面을 흐르는 switch 현상이 발

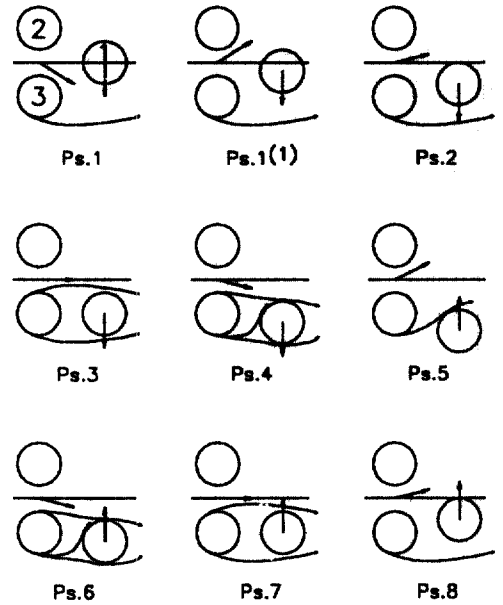


그림 14. 진동중의 下流側 구조물주위의 기류의 양상 ($S/D=2.0$, $L/D=3.0$)

생한다. 이 위치로부터 운동진행의 반대방향으로 유체력이 작용하여, 구조물은 Ps5를 정점으로 上向이동하게 된다. 결국, D type의 진동은 C type의 진동이 어느 한계진폭을 넘어, 上流側 구조물의 外側剝離剪斷層에 접근함에 의해 발생하는 진동이라 할 수 있다. 따라서 이 진동은 두 원형구조물에서 발생하는 타원형진동과 기류직각방향의 진동이 複合된 진동메카니즘을 보이며, C type의 진동이 발생하지 않는 $S/D > 3.6$ 간격에서는 D type의 진동도 발생하지 않게 되리라 사료된다. 또한, 이 진동은 그림 13의 압력-변위관계로부터 알 수 있듯이, 진동변위 1 cycle에 대해 2 cycle의 압력변동성분이 기류방향으로 작용하고 있어, Y방향으로도 자유도를 갖는 구조계에서는 8자형의 진동궤도가 나타날 가능성이 있다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 橫列배치된 두 원형구조물의 上流側에 존재하는 원형구조물에는, 배치에 따라서 4종류의 진동현상이 발생하는 복잡한 거동이 나타난다.

2) $S/D \leq 1.2$ 간격에서는 上流側 구조물의 vortex 방출에 의한 한정진동이 발생하며, 이 진동은 wake buffeting 효과에 의해 큰 진폭을 보인다.

3) $S/D \geq 1.4$ 간격에서 上流側 구조물의 wake는 上流側 구조물의 존재에 의해 확대되어 큰 진폭 VIO가 발생하게 된다.

4) $1.4 \leq S/D \leq 3.6$ 간격에서는 풍속증가에 관계없이 純간격 S'의 90% 정도의 진폭을 유지하는 진동이 존재하며, 이 진동의 발생원인은 gap을 流下하는 上流側 구조물의 剝離流의 非正常性에 의한 것으로 판단된다.

5) 이 진동의 진폭이 어느 한계치를 넘게 되면, 上流側 구조물의 外側剝離剪斷層의 영향에 의해 發散型의 진동이 발생한다. 이 진동중에 있어서 wake의 shielding에 의해 기류방향의 주기적인 變動압력이 작용하며, 따라서 진동궤도는 8자형이 될 가능성이 있다.

참 고 문 헌

1. Biermann, D., and Herrnstein, W.H., Jr., "The Interference between Struts in Various Combinations", *National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep.* 468, 1933.
2. Hori, E., "Experiments on Flow around a Pair of Parallel Circular Cylinders", *Proc. 9th Japan National Congress for Applied Mech.*, Tokyo, 1959, pp. 231-234.
3. Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K., and Cho, K., "Experimental Study on Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow (Part 1, Karman Vortex Flow around two Tubes at Various Spacing)", *Bulletin of the Japan Society Mechanical Engineers*, Vol. 15, No. 86, 1972, pp. 949-956.
4. Bearman, P. W., and Wadcock, A. J., "The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 61, 1973, pp. 499-511.
5. Zdravkovich, M.M., "Interference between two Circular Cylinders; Series of Unexpected Discontinuities", *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol. 2, 1977, pp. 255-270.
6. Okajima, A., Sugitani, K., Mizota, T., "Lift and Drag Forces on two Structures arranged Side by Side in a Uniform Flow", *Proceedings of 8th National Symposium on Wind Engineering*, 1984. 12, pp. 285-290.
7. Novak, J., "Strouhal Number for two Cylinders of Different Diameters arranged in Tandem", *Acta Technica, Czechoslovak Academy of Sciences*, No. 3, 1975, pp. 366-373.
8. Albrecht, T., Barnes, F.H., Baxendale, A.T. and Grant, I., "Vortex Shedding from Two Cylinders in Tandem", *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 28, 1988, pp. 201-208.
9. Lam, K., and Cheung, W.C., "Phenomena of Vortex Shedding and Flow Interference of Three Cylinders in Different Equilateral Arrangements", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, 1988, pp. 1-26.
10. Matsumoto, M., Shiraishi, N., Shirato, H., "Aerodynamic Instabilities of Twin Circular Cylinders", *Journal of Wind Engineering*, No. 37, 1988, pp. 131-140.

(接受 : 1992. 3. 9)