



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

탠덤 실린더에 작용하는 보오텍스와 후류에
의해 발생하는 진동에 관한 실험적 연구

Experimental investigation of vortex- and wake-induced
vibration of tandem cylinders



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

박 철 영

본 논문을 박철영의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 조 효 제 (인)

위 원 공학박사 이 승 재 (인)

위 원 공학박사 이 성 욱 (인)

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

Table of contents

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. Introduction

1.1 Background	1
1.2 Literature review	3
1.3 Objectives and Scopes	6

2. Experimental set-up

2.1 Circulating Water Channel	7
2.2 Experimental equipment	8
2.3 Rigid circular cylinder models	10
2.4 Fixed and two degree of freedom	12
2.5 One and two degree of freedom	14

3. Test matrix for experiment

3.1 Parameters set-up	15
3.2 Cases for model experiment	18

4. Amplitudes and frequencies of cylinder's motion	
4.1 Single cylinder with 1-DOF and 2-DOF motions	20
4.2 Downstream cylinder of WIV	24
4.2.1 Fixed upstream cylinder & 2-DOF downstream cylinder ·	24
4.2.2 1-DOF upstream cylinder & 2-DOF downstream cylinder ·	32
5. An effect of WIV excitation mechanism	
5.1 Time history and Power spectral density	37
5.2 Trajectories of motion	42
5.3 Flow interference between tandem cylinders	45
5.4 Force coefficients with Wake shielding effect	47
6. Conclusions	
References	50



List of Tables

Table 3.1 Non-dimensional parameters	17
Table 3.2 Experimental conditions and main parameters	19



List of Figures

Fig. 1.1 Multiple riser configurations	2
Fig. 1.2 Hybrid riser tower	2
Fig. 1.3 Sketched flow interference regions about downstream cylinder's position (Zdravkovich, 1988)	6
Fig. 2.1 Circulating water channel in KMOU	7
Fig. 2.2 Differential pressure transmitter	8
Fig. 2.3 3-D displacement meter	9
Fig. 2.4 6-axis Load cell	9
Fig. 2.5 Configuration of installed riser in offshore	10
Fig. 2.6 Rigid circular cylinder model	11
Fig. 2.7 Schematic design of the experimental apparatus about Fixed & 2-DOF system	13
Fig. 2.8 Schematic design of the experimental apparatus about 1-DOF & 2-DOF system	14
Fig. 4.1 Amplitude and frequency response of single cylinder with single resonance condition ($f^* = 1.0$)	21
Fig. 4.2 Amplitude and frequency response of single cylinder with 2-DOF ($f^* = 1.9$)	23
Fig. 4.3 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with Fixed & 2-DOF system ($f^* = 1.0$)	25
Fig. 4.4 Comparisons of amplitude and frequency response with Korkischko & Meneghini(2010) ($S/D = 4.0, f^* = 1.0$)	27
Fig. 4.5 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with Fixed & 2-DOF system ($f^* = 1.9$)	28
Fig. 4.6 Comparisons of amplitude and frequency response with Assi et al.(2014) ($S/D = 4.0, f^* = 1.9$)	31
Fig. 4.7 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with 1-DOF & 2-DOF system ($f^* = 1.0$)	32
Fig. 4.8 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with 1-DOF & 2-DOF system ($f^* = 1.9$)	37

Fig. 5.1	Cross-flow motion time history ($f^* = 1.0$)	38
Fig. 5.2	PSD of in-line motion with Fixed & 2-DOF system ($S/D = 3.0$)	40
Fig. 5.3	PSD of in-line motion with 1-DOF & 2-DOF system ($S/D = 3.0$)	41
Fig. 5.4	x-y trajectory of the cylinders with Fixed & 2-DOF system	42
Fig. 5.5	x-y trajectory of the cylinders with 1-DOF & 2-DOF system	44
Fig. 5.6	Cross-flow motion time history ($S/D = 3.0, f^* = 1.0$)	45
Fig. 5.7	Flow field distribution acting on the downstream riser from the upstream riser (DNV-RP-F203, 2009)	46
Fig. 5.8	Force coefficient in Fixed & 2-DOF system	48



Experimental investigation of vortex- and wake-induced vibration of tandem cylinders

Park, Cheol Young

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

This paper presents the experimental investigation of wake-induced vibration (WIV) and vortex-induced vibration (VIV) acting on two circular cylinders. In particular, a riser installed in an offshore field may experience flow interferences between adjacent risers. Accordingly, scaled models were arranged in a tandem configuration in order to observe the flow interference between the cylinders. While an upstream cylinder is fixed or allowed to have one degree of freedom (1-DOF) motion, a downstream cylinder is allowed to have two degrees of freedom (2-DOF) motion. An experimental test is carried out in a circulating water channel with cylinders which are connected by linear springs in two horizontal directions. A three-dimensional displacement meter and a load cell were used to measure cylinder's motion and hydrodynamic force of a cylinder, respectively. In order to implement single and dual resonance conditions,

natural frequency ratio of in-line to cross-flow directions, $f^* = f_{nx}/f_{ny}$, was set as 1.0 and 1.9. To validate an experimental result, it is compared with that of previous study in terms of cylinder's motion response amplitude and oscillation frequency. From the experiment, we have identified that there are relative effects between VIV and WIV with respect to selected parameters. Influence of WIV are also quantitatively observed with in-line motion power spectral density and cross-flow motion time history.

KEY WORDS: Vortex-induced vibration 와 유기 진동, Flow interference 유동간섭, Wake-induced vibration 후류 유기 진동, Tandem cylinders 탠덤 실린더, Dual resonance 이중 공진.



제 1 장 Introduction

1.1 Background

최근 심해 해양자원 개발의 확대에 의해 석유와 가스의 시추를 위한 라이저(riser)의 수요가 증가하고 있다. 라이저는 기본적으로 둥근(bluff) 형상을 가지고 있기 때문에 일정한 유속이 작용하게 되면 라이저 표면을 따라 끝단에서 주기적으로 비대칭적인 보오텍스의 홀림(vortex shedding)이 발생하게 된다. 이러한 보오텍스(vortex)에 의하여 발생하는 진동을 와 유기 진동(vortex-induced vibration, VIV)이라고 하며, 이는 구조물에 작용하는 양력(lift force)을 증가시킬 뿐만 아니라 구조물의 고유 주파수(natural frequency)와 동요 주파수(oscillation frequency)가 일치하여 발생하는 공진(resonance)의 일종인 Lock-in 현상을 일으킬 수 있기 때문에 라이저의 설계에 있어 주요 연구대상이 되어왔다(Blevins, 1990). 또한 VIV은 구조물에 작용하는 높은 반복적인 하중을 가진 피로 데미지(fatigue damage) 때문에 라이저 설계에 있어 중요한 요소로 고려해야 한다(Assi et al., 2012).

Fig. 1.1과 같이 해양구조물에 연결된 라이저는 다양한 종류와 배치 상태가 있을 수 있으며, Fig. 1.2의 하이브리드 라이저 타워(Hybrid riser tower)와 같이 인접한 라이저들끼리 유동 간섭(flow interference)을 유발할 수 있다. 이러한 현상은 VIV뿐만 아니라, 유속 흐름 방향의 앞에 위치한 상류 라이저(upsream riser)에서 발생한 후류(wake)가 하류 라이저(downstream riser)로부터 생성되는 보오텍스의 홀림을 간섭하여 발생하는 wake-induced vibration (WIV)에 의한 응답도 유발하게 된다.

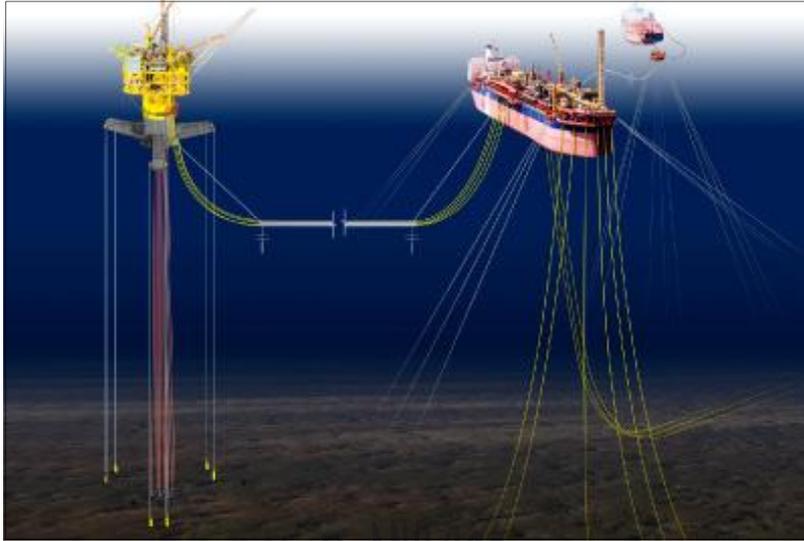


Fig. 1.1 Multiple riser configurations.

(source : <http://www.rigzone.com/>)

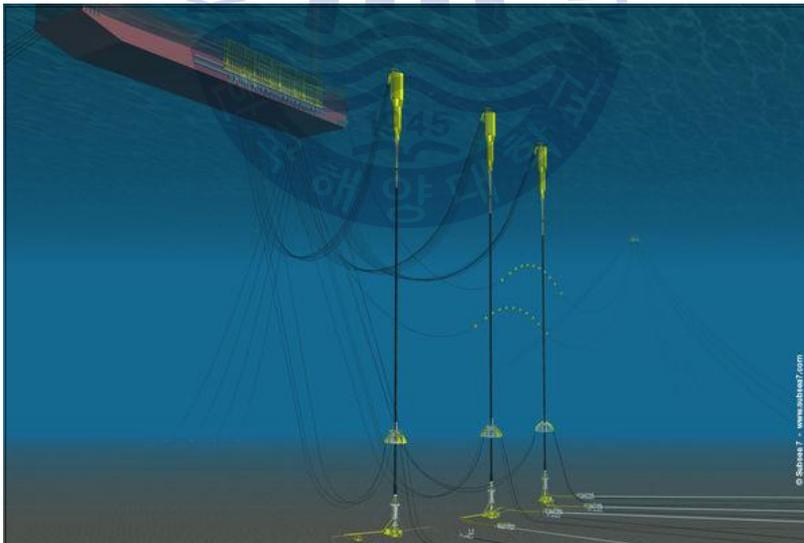


Fig. 1.2 Hybrid riser tower.

(source : <http://www.subsea7.com/>)

1.2 Literature review

VIV는 점성의 영향이 많이 작용하는 동적인 응답이기 때문에 주로 실험을 통한 연구가 많이 진행되어 왔다. 기존에 수행되었던 VIV에 관련된 실험들은 보텍스의 동적인 응답에 의해 야기되는 cross-flow만 고려하는 1-DOF system에 관한 실험을 해왔으나, 최근 몇몇의 연구에서는 유속과 같은 방향인 in-line과 수직하는 방향인 cross-flow를 동시에 고려하는 2-DOF system에 대한 실험들이 수행되었다. 이 결과, in-line 방향으로 발생하는 운동의 영향을 무시할 수 없으며, 전체적인 응답의 범위와 크기가 커질 수 있다(Blevins & Coughran, 2009; Bearman, 2011; Srinil et al., 2013; Kim et al., 2016). VIV에 의한 응답의 크기는 VIV 가진 메커니즘에 영향을 주는 주요 변수인 질량비(mass ratio)와 감쇠비(damping ratio)의 영향을 받는다.

질량비는 동요하는 구조물의 질량(oscillating structure total mass)과 물에 잠긴 구조물의 유체 질량(displaced fluid mass)의 비를 의미하며, 실제 해양구조물에서는 낮은 질량비의 시스템(low mass ratio system)을 취하게 된다. 낮은 질량비의 시스템에서 in-line을 고려하는 2-DOF 실험을 수행한 결과, 1-DOF에서 발생했던 cross-flow 응답 영역의 형태가 ‘upper branch’로 나타난 것에 비해 in-line의 영향으로 인해 더 큰 응답 영역의 형태인 ‘super upper branch’가 발생하였다(Jauvtis & Williamson, 2004; Stappenbelt et al., 2007).

WIV로 인한 응답에 관한 실험은 주로 두 개의 실린더를 이용하여 탠덤(tandem), 엇갈린 배치(staggered arrangements)를 통해 실린더간의 거리 비(spacing ratio, S/D)에 따른 응답에 관찰하였다(Hover & Triantafyllou, 2001; Assi et al., 2006; Assi et al., 2010). 하류 실린더의 cross-flow만 고려하는 1-DOF 실험을 수행하였으며, 상류에서 발생한 후류로 인하여 공진 범위(resonance range)를 벗어난 후에 응답이 작아지는 VIV의 응답특성과 달리 WIV로 인해 유속이 증가함에 따라 응답이 계속해서 증가하는 현상에 대해 다루고 있다.

Assi et al.(2013)과 Assi et al.(2014)은 VIV에 의해 야기되는 주파수뿐만 아니

라 WIV에 의해 in-line에서 발생하는 후류로 인한 주파수에 대하여 실험을 수행하였는데, 본 연구에서도 이와 같은 현상을 관찰할 수 있었다. 그리고 Chaplin & Batten(2014)은 두 개의 실린더를 이용하여 다양한 배치에 따른 실험을 수행하였으며 하류 실린더의 각 방향의 2-DOF를 고려하여 in-line에서 후류에 의한 주파수영역에서 발생하는 거동에 대해 분석하였다.

후류에 의해 영향을 받는 실린더의 동요 주파수는 보오텍스 홀림으로 인한 주파수나 실린더의 고유 주파수와는 다른 형태의 주파수이며, 공진 현상으로 여겨지는 VIV와는 다르게 WIV는 공진으로 인한 현상은 아니지만 구조물과 보오텍스의 상호작용 및 상류 실린더에서 후류가 발생하는 것을 통해 보오텍스 유기 메커니즘(vortex-induced mechanism)의 한 종류라고 볼 수 있다(Assi et al., 2010).

특히 라이저간의 거리가 가까운 경우에는 후류 간섭(wake interference)로 인해 하류 라이저에 유입되는 유속이 상류에 유입되는 유속에 비해 상대적으로 줄어든다. 이 때 하류 라이저에 작용하는 평균 항력(mean drag force)이 감소하여 발생하는 wake shielding 현상으로 인해 라이저간의 충돌(collision) 가능성을 증가시키게 된다. 이에 관한 연구로, Blevins(2005)는 수학적 모델(mathematical model)을 이용하여 하류 실린더에 작용하는 항력(drag force)과 양력(lift force)이 후류의 위치와 Reynolds number의 함수로 작용한다는 것을 밝혔으며, Blevins et al.(2007), Wu et al.(2008)는 wake shielding에 대한 실험 결과를 수학적 모델과 비교하였다.

Wake shielding 현상은 라이저간의 거리와 배치 상태가 중요한 변수로 작용하게 되는데, DNV-RP-F203(2009)에서는 라이저의 충돌을 피하기 위한 최소한의 거리를 라이저 직경의 2배라고 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 실린더간의 충돌을 피하기 위해 S/D 가 3.0이상인 되는 조건에서 실험을 수행하였다.

실린더의 배치 상태 및 S/D 의 크기에 따라 유동 간섭으로 인해 다양한 유동 패턴(flow pattern)이 발생하게 되며, Zdravkovich(1977)는 선행연구자들에 의해 수행된 실험적 연구 결과를 검토하여 유동 패턴에 따라 발생하는 다양한 효과

들에 대한 경향을 파악하고자 하였다. 그리고 Igarashi(1981), Zdravkovich(1988), Zhou&Yiu(2006)는 풍동(wind tunnel) 실험을 통해 실린더의 다양한 배치에 따른 유동 패턴의 특성을 S/D 에 따라 분류하였다.



1.3 Objectives and Scopes

Zdravkovich(1988)의 연구에서 두 개의 실린더의 배치상태로 인해 발생하는 유동 간섭의 특성을 병렬(side by side)로 배치된 상태에서 발생하는 근접 간섭 (proximity interference)과 탠덤 배치로 인해 발생하는 후류 간섭, 그리고 간섭이 발생하지 않는 3가지의 영역으로 분류하였다.

본 연구에서는 후류 간섭이 발생하는 영역에서 하류 실린더에 작용하는 VIV 과 WIV에 의한 영향을 동시에 관측하기 위해 두 개의 실린더를 탠덤으로 배치 하였다(Fig. 1.3). 하류 실린더는 in-line과 cross-flow를 동시에 고려하는 2-DOF system을 사용하였으며, 상류 실린더는 고정된 조건과 cross-flow만 고려하는 1-DOF system을 사용함으로써 기존의 선행연구에서 수행하지 않았던 상류 실린더의 구속 조건에 따른 응답의 영향에 대하여 관측하였다.

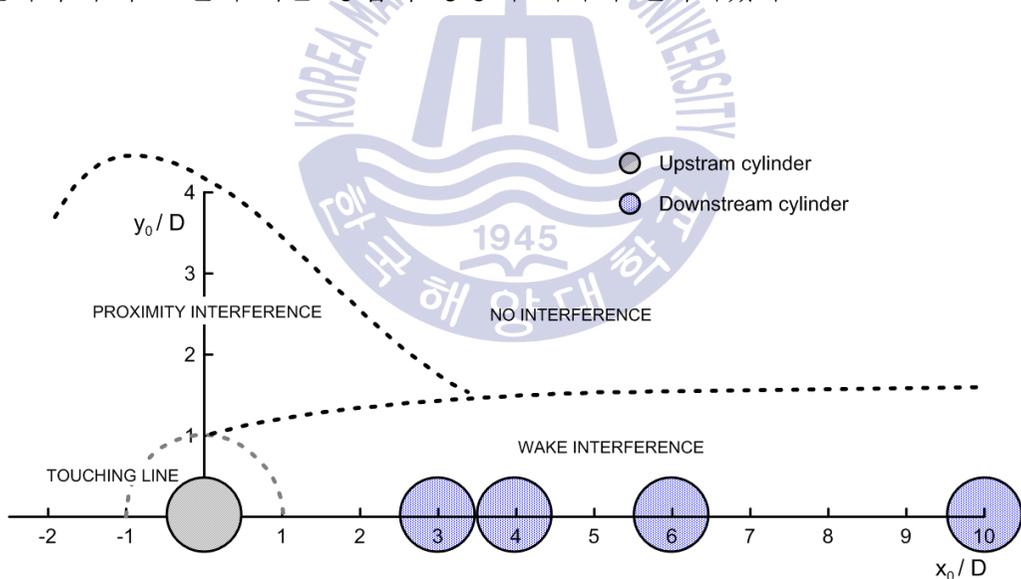


Fig. 1.3 Sketched interference regions about downstream cylinder's position (Zdravkovich, 1988).

제 2 장 Experimental set-up

2.1 Circulating Water Channel

본 연구는 한국해양대학교에 위치하고 있는 회류수조(Circulating water channel, CWC)에서 수행되었으며, 관측부(observation section)의 폭은 1.8m, 길이 1.2m, 길이는 4.0m이다(Fig. 2.1). 실험에 앞서 수조의 섹션 별로 유속을 측정하여 흐름의 균일성을 확보하였고, 실험을 수행한 유속 범위에서 평균 난류 강도(turbulence intensity)는 2%이다. 그리고 실린더가 설치되는 관측부의 중심에서는 최대 1m/s 유속까지 흐름이 균일하게 발생하였다.

VIV와 WIV에 의해 발생하는 동적인 응답에 의해 다양한 주기성을 띤 운동 변위의 계측을 위해 각 유속 범위마다 500초간 계측을 하였으며, 유속 변경에 따른 흐름의 안정성을 확보하기 위해 각 유속간의 시간 간격(time interval)을 180초로 하였다.

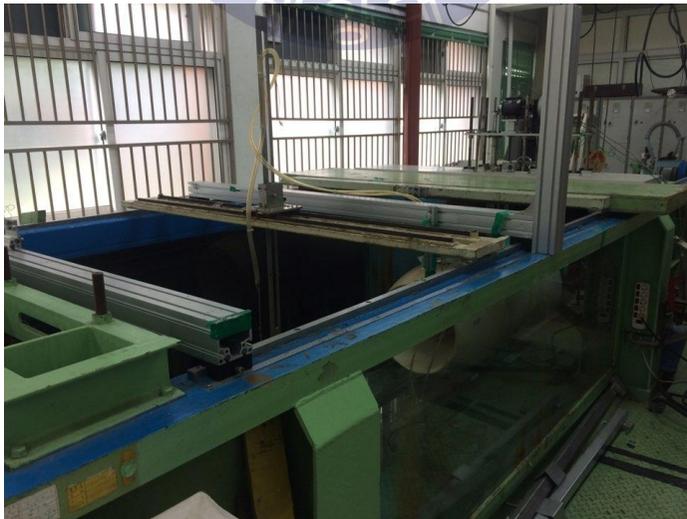


Fig. 2.1 Circulating water channel in KMOU.

2.2 Experimental equipments

회류 수조의 흐름 장치 성능 및 유속 측정을 위해 피토 튜브(pitot tube)와 압력 트랜스미터(pressure transmitter)를 사용하였으며 최대 압력차 62.2mbar까지 측정 가능한 차압용(differential) 압력 트랜스 미터(Fig. 2.2)를 사용하였다.

실린더의 거동을 측정하기 위해 3-D 변위계(displacement meter)를 사용하여 20Hz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 측정하였다. 5대의 카메라로 구성된 3-D 변위계(Fig. 2.3)는 실린더의 중심에 부착된 반사 마커(reflective marker)를 관측하여 변위를 계측하였고, 캘리브레이션(calibration)을 통해 측정된 변위의 평균 오차(average error)는 0.2mm이하이다.

또한 실린더에 작용하는 유체력을 계측하기 위해 6-분력계(load cell)을 사용하였다. Fig. 6은 로드셀의 실제 사진을 나타내며, x, y, z의 각 방향에 대한 힘(force)과 모멘트(moment)가 동시에 측정이 가능하며, 최대 측정 가능한 힘과 모멘트는 각각 $\pm 100\text{N}$, $\pm 10\text{N} \cdot \text{m}$ 이다. 본 연구에서는 실린더에 작용하는 항력과 양력을 계측하기 위해 x, y방향에 대한 힘을 계측하는 목적으로 사용하였다.



Fig. 2.2 Differential pressure transmitter.

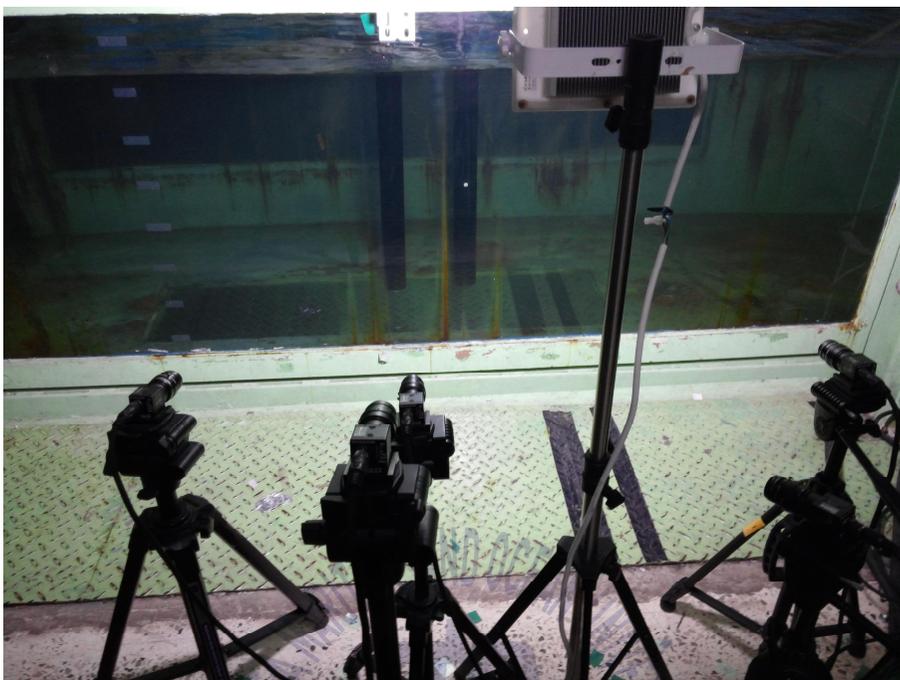


Fig. 2.3 3-D displacement meter.



Fig. 2.4 6-axis Load cell.

2.3 Rigid circular cylinder models

실제 라이저의 경우 직경에 비해 길이가 긴 세장체로 구성되어 있기 때문에 유연한 움직임으로 인하여 고유 주파수가 하나가 아닌 여러 개로 존재 할 수 있으며, 유속의 형태도 한 방향이 아닌 여러 방향과 수심 별로 다른 속도의 유속이 작용하게 된다.

그러나 라이저의 기하학적 및 역학적 상사를 하는 것은 수조 크기와 실험 장비의 한계로 인해 어렵기 때문에 전체 라이저의 길이 중 일부분만 고려하기 위해 강체 실린더를 사용하였다(Fig. 2.5).

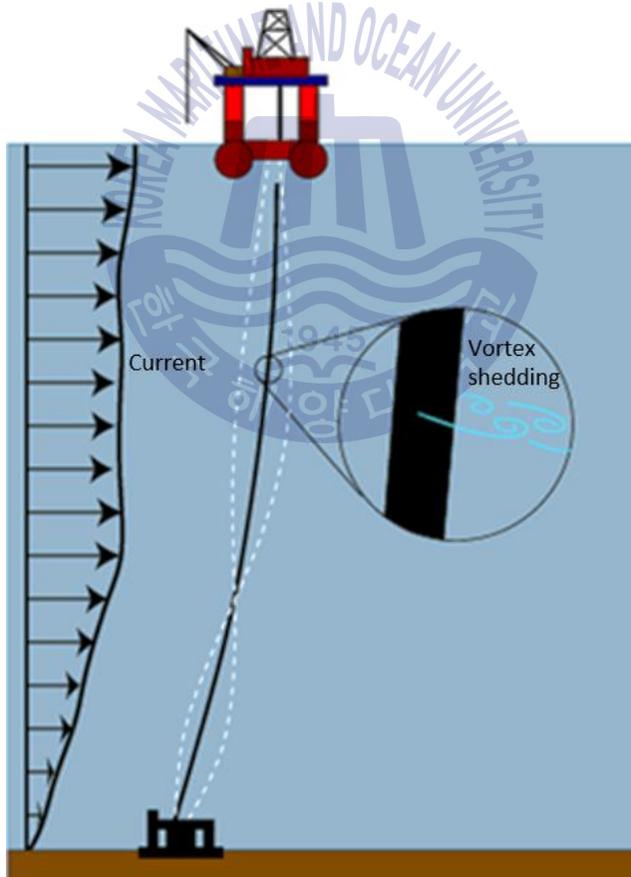


Fig. 2.5 Configuration of installed riser in offshore.

본 연구에서 사용된 실린더(Fig. 2.6)의 직경을 결정하기 위해 3가지의 사항을 고려하였다. 첫 번째로 보오텍스가 활발하게 발생하는 Reynolds number 범위, 두 번째는 수조 사양에 의한 유속의 범위를 고려하였고, 그리고 벽면 효과(wall effect)까지 고려하여 실린더의 직경은 7.5cm, 길이는 75cm로 결정하였다. 실린더의 종횡비(L/D)가 10으로 작기 때문에 강체로 가정하였다. 또한 질량비에 의한 영향을 최소화하여 실험을 하고자 물의 밀도와 유사한 밀도를 가진 아크릴(acrylic)을 사용하였다.



Fig. 2.6 Rigid circular cylinder model.

2.4 Fixed and two degree of freedom

Fig. 2.7은 수조에 실린더를 설치한 사진과 도식화 된 그림을 나타내며, 상류 실린더는 알루미늄(aluminum), 하류 실린더는 아크릴을 이용하여 제작하였다. 상류 실린더는 외력에 의해 움직이지 않게 수조에 고정을 하였고, 하류 실린더는 x-y방향의 거동이 자유롭게 움직이도록 설계하였다.

직선 운동으로 인한 하류 실린더의 경사를 막기 위해 실린더와 연결된 알루미늄 봉(aluminum bar)을 2.5m로 충분히 길게 제작하였으며, 실린더의 거동을 자유롭게 하도록 알루미늄 봉의 상부 끝단에는 유니버설 조인트(universal joint)를 사용하였다. 하류 실린더의 운동 진폭이 실린더의 직경과 같을 때 유니버설 조인트의 경사각은 1.8° 이다.

그리고 실린더에 작용하는 자유 표면 효과(free surface effect)를 줄이기 위해 실린더 상부 끝단이 수면 하 12cm에 위치하도록 설치하였다. 또한 실린더의 하단과 수조 바닥 사이의 거리에 따라 끝 효과(end effect)의 영향이 나타나는 데(Morse, 2008), 이러한 영향을 최소화하고 실린더 거동의 움직임에 대한 경사를 고려하여 실린더 하부 끝단이 수조 바닥으로부터 5cm가 되도록 설치하였다.

흐름으로 인한 실린더의 거동에 복원력을 제공하기 위해서 알루미늄 봉에 x-y방향으로 각각 선형 스프링(linear spring)을 설치하였고 실린더 운동에 따른 복원력의 방향을 균일하게 유지하기 위해서 스프링에 긴 와이어(wire)를 설치하였다. 또한 유속이 증가할수록 평균 항력의 증가로 인해 실린더가 흐름 방향으로 기울어짐에 따른 실험적 오차를 줄이기 위해 각 유속 별로 x방향의 와이어 길이를 조정하여 실린더의 초기 위치를 수조의 중심에 위치시켰다.

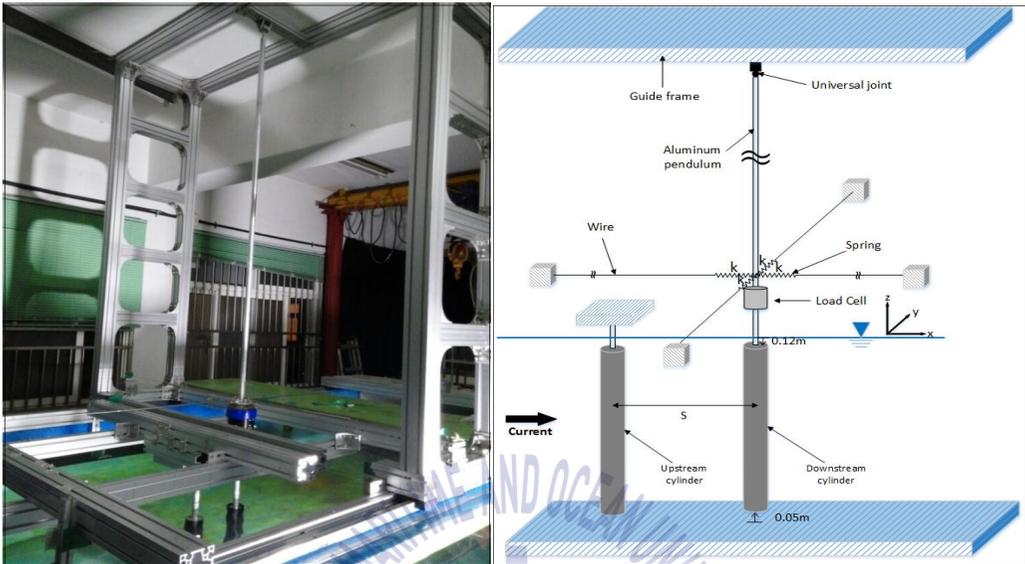


Fig. 2.7 Schematic design of the experimental apparatus about Fixed & 2-DOF system.



2.5 One and two degree of freedom

Fig. 2.8은 상부 실린더의 움직임을 cross-flow 방향으로 허용한 1-DOF system 으로 설치하였고, 하부 실린더의 Fig. 2.7과 같은 방법으로 설치한 사진 및 도식화된 그림을 나타낸다. 상류 실린더에 의한 유동 간섭의 영향을 정확하게 관찰하기 위해 하류 실린더와 같은 2-DOF system으로 설계해야하나 동시에 서로 다른 움직임을 나타내는 구조물의 측정과 실험상의 제약으로 인해 상부 실린더는 1-DOF system으로 설치하였다.

상류 실린더가 움직이기 때문에 하류 실린더의 물리적인 움직임과 최대한 가깝게 설계하기 위해 하류 실린더와 같은 아크릴 재질로 제작하였으며, 실린더의 움직임에 마찰을 줄이기 위해 실린더 상부에 선형 베어링(linear bearing)을 설치한 플레이트(plate)와 직선 방향으로 설치된 샤프트(shaft)를 설치하였다. 또한 상부 플레이트에 하류 실린더와 같은 강성을 가진 선형 스프링을 설치하였고, 서로 다른 구조적인 설치로 인한 질량비의 차이를 최소화하기 위해 제작 시에 플레이트 무게를 조정하였다.

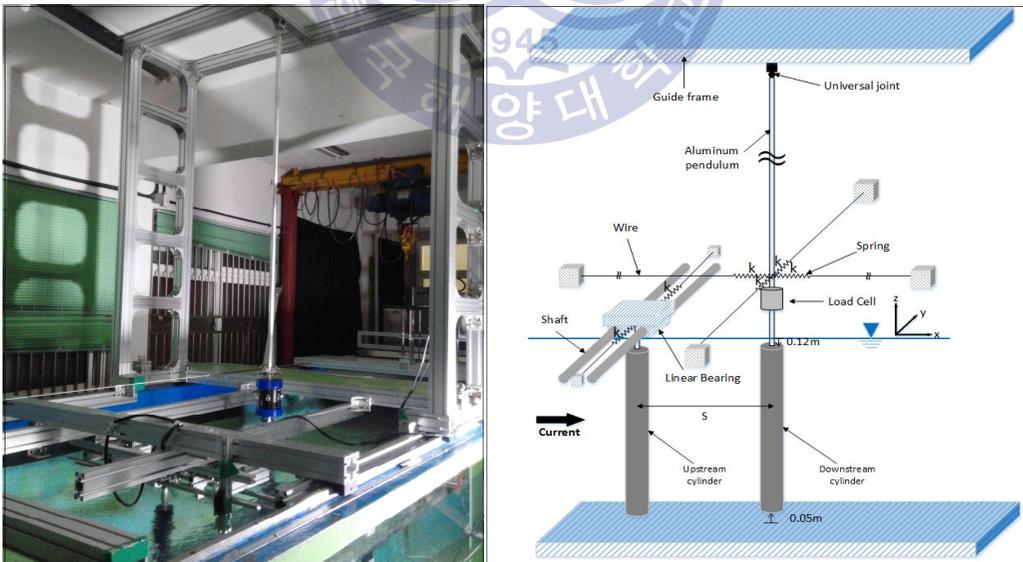


Fig. 2.8 Schematic design of the experimental apparatus about 1-DOF & 2-DOF system.

제 3 장 Test matrix for experiment

3.1 Parameter set-up

본 연구에서 사용한 유속의 범위는 0.092~0.69m/s이며, 이에 따른 Reynolds number 범위는 6900~51750이다. 유속은 무차원화된 reduced velocity(V_r)로 나타내었으며 이에 관한 정의는 아래 식 (1)과 같다.

$$V_r = \frac{U}{f_{ny}D} \quad (1)$$

여기서 U 는 유속, f_{ny} 는 cross-flow 방향의 실린더 고유 주파수, 그리고 D 는 실린더의 직경을 의미한다. 모든 경우에서 질량비(mass ratio, m^*)는 2.74가 되도록 제작하였으며, m^* 는 아래 식 (2)와 같이 표현된다.

$$m^* = \frac{4m}{\rho\pi D^2 L} \quad (2)$$

여기서 m 은 실린더의 전체 질량, ρ 는 물의 밀도, L 은 실린더의 길이를 의미한다. 이 외에 VIV와 관련된 다른 무차원 변수들(non-dimensional parameters)은 Table 3.1에 정의하였다. 그리고 실린더를 정지수역(still water)에서 자유 감쇠 실험(free decay test)을 수행하여 각 방향 별 고유 주파수(f_n)와 감쇠비(ζ)를 구하였다. 이 때 f_n 은 식 (3)으로 계산할 수 있으며, k 는 spring stiffness, m_a 는 실린더의 부가질량(added mass)을 의미한다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_a}} \quad (\text{still water}) \quad (3)$$

그리고 ζ 는 식 (4)로 표현되며, c 는 실린더 시스템의 감쇠(system damping), $2\sqrt{(m+m_a)k}$ 은 정지수역에서의 임계 감쇠(critical damping)를 의미한다.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{(m+m_a)k}} \text{ (still water)} \quad (4)$$

자유 감쇠 실험을 통해 계산된 ζ 의 결과는 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 Y_N 과 Y_{N+1} 는 각각 첫 번째와 두 번째로 발생한 실린더의 진폭을 의미한다.

$$2\pi\zeta = \ln\left(\frac{Y_N}{Y_{N+1}}\right) \quad (5)$$

$f^* = 1.0$ 에서는 x-y방향에 같은 강성을 가진 스프링을 설치하였고, 자유 감쇠 실험을 수행한 결과 방향에 따른 f_n 및 ζ 의 값이 거의 유사했기 때문에 y방향, 즉 cross-flow 방향을 기준으로 하여 사용하였다.

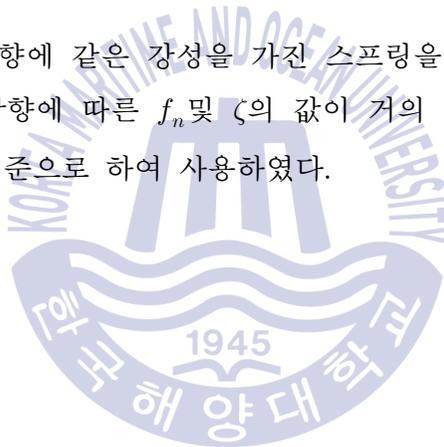


Table 3.1 Non-dimensional parameters.

A_{RMS}/D	Aspect ratio
f_o/f_n	Oscillation frequency ratio
$V_r = \frac{U}{f_{ny}D}$	Reduced velocity
$f^* = f_{nx}/f_{ny}$	Natural frequency ratio (still water)
$C_D = \frac{F}{0.5\rho U^2 DL}$	Drag force coefficient
$C_L = \frac{F}{0.5\rho U^2 DL}$	Lift force coefficient
S/D	Spacing ratio
L/D	Aspect ratio
$m^* = \frac{4m}{\rho\pi D^2 L}$	Mass ratio
$St = \frac{f_s D}{U}$	Strouhal number (f_s : vortex shedding frequency)
$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{(m+m_a)k}}$	Damping ratio (still water)
$Re = \frac{UD}{\nu}$	Reynolds number (ν : kinematic viscosity of water)

3.2 Cases for model experiment

Table 2는 본 연구서 수행된 실험 조건 및 변수를 나타내며, VIV와 WIV의 응답이 동시에 나타나는 탠덤실린더에서는 상류 실린더가 수조에 고정된 상태와 cross-flow만 고려하는 1-DOF system일 때에 대하여 실험을 수행하였다. 추가적으로 VIV에 의한 영향만 나타나는 싱글(single) 실린더에 대한 실험을 포함하여 크게 3가지의 실험으로 구성되어 있다.

본 연구에서 가장 중요하게 고려한 변수는 f^* 와 S/D 이고, VIV의 메커니즘에 영향을 주는 변수 중 m^* 에 대해서는 변수가 아닌 고정된 값을 사용하였으며 ζ 에 따른 응답은 앞서 수행했던 선행연구(Kim et al., 2016)에서 분석하였기 때문에 본 연구에서는 변수로 사용하지 않았다.

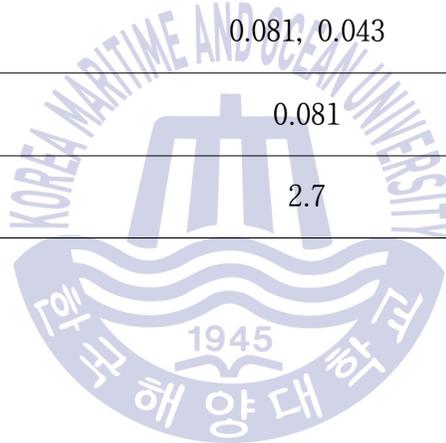
일반적인 VIV에서의 응답 메커니즘에 의하면 in-line방향의 동요 주파수(f_{ox})가 cross-flow방향의 동요 주파수(f_{oy})의 2배로 발생한다. 따라서 in-line방향의 고유 주파수(f_{nx})를 f_{ny} 의 2배로 증가시키면, in-line과 cross-flow에서 각각 공진 현상이 발생하는 이중 공진(dual resonance)이 발생하게 되며, 이러한 조건에서는 riser의 거동이 심각한 상태가 될 수 있다.

프로토타입(Prototype) 라이저는 f^* 가 1.0인 가지는 반면에 스틸 카티너리 라이저(steel catenary riser, SCR)와 같은 경우 구조물에 설치된 방향에 따라 축대칭(axisymmetric)이 아닐 수도 있기 때문에 방향 별로 라이저의 강성이 다를 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 이중 공진이 발생하는 조건도 구현하기 위해서 in-line의 스프링 강성(spring constant)을 조절하여, f^* 를 1.0과 1.9로 적용하였다.

실린더간의 거리에 따른 유동 간섭에 의한 영향을 관측하기 위해 S/D 를 3.0, 4.0, 6.0, 10.0으로 Fig. 1.3과 같이 변화시켰으며, 상류 실린더로부터 발생하는 후류의 영향에 대한 분석을 수행하였다.

Table 3.2 Experimental conditions and main parameters.

Parameter	Single cylinder (2-DOF)	Tandem cylinders (Fixed & 2-DOF)	Tandem cylinders (1-DOF & 2-DOF)
S/D	-	3.0, 4.0, 6.0, 10.0	
f^*	1.0, 1.9		
f_{nx} [Hz]	0.361, 0.676		
f_{ny} [Hz]	0.361		
ζ_x	0.081, 0.043		
ζ_y	0.081		
m^*	2.7		

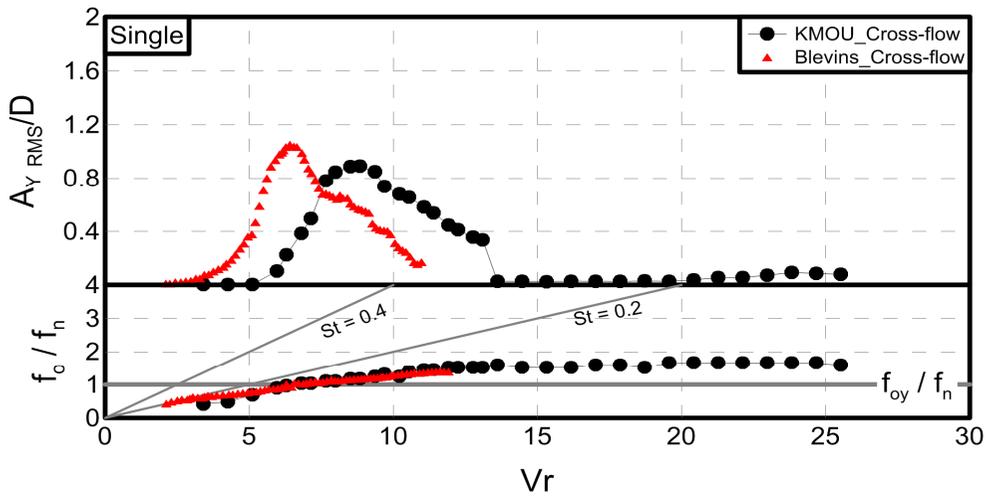


제 4 장 Amplitudes and frequencies of cylinder's motion

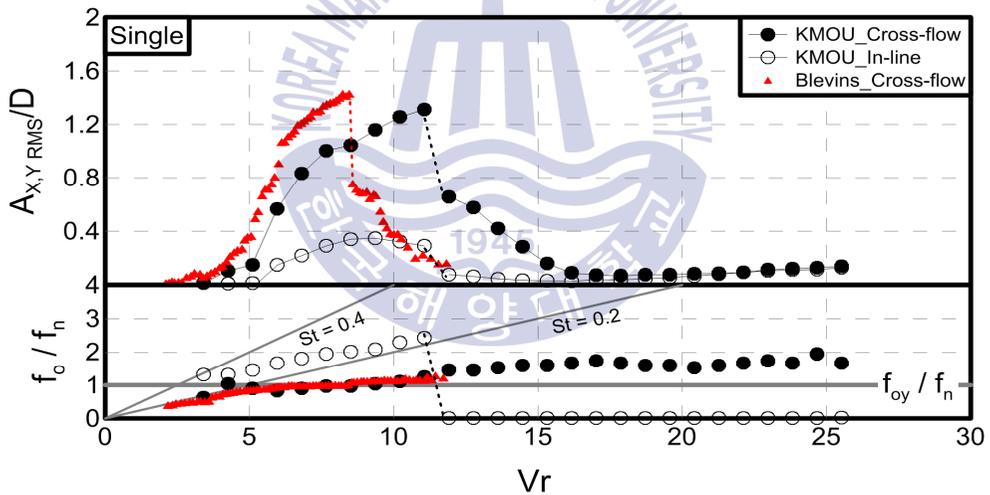
4.1 Single cylinder with 1-DOF and 2-DOF motions

Fig. 4.1은 단일 공진(single resonance)이 발생하는 f^* 가 1.0인 조건에서 실린더의 거동이 각각 1-DOF, 2-DOF system일 때의 결과이다. V_r 이 커짐에 따른 실린더의 운동 변위를 실린더의 직경에 대해 무차원화 하여 A_{RMS}/D 로 나타내었으며, 동시에 동요 주파수는 고유 주파수에 대해 무차원화 하여 f_o/f_n 로 나타내었다. St 가 0.2인 선은 cross-flow의 보오텍스 홀림 주파수(vortex-shedding frequency, f_s)를 의미하며, $3.0 < V_r < 5.0$ 에서는 실린더의 운동 변위가 작기 때문에 f_{oy} 가 f_s 와 근사하지만, V_r 의 커짐에 따라 f_s 에 비해 작아진다. 같은 방법으로 f_{oy} 의 2배로 발생하는 f_{ox} 는 St 가 0.4인 선과 비교될 수 있다.

Fig. 4.1(a)는 cross-flow만 고려하는 1-DOF system의 결과로 V_r 이 증가함에 따라 VIV로 인해 f_{oy}/f_n 이 1이 되는 $6.0 < V_r < 8.0$ 에서 단일 공진이 발생하여 A_{YRMS}/D 가 크게 증가하고, 비공진 범위(non-resonance range)에서 감소한다. Fig. 4.1(b)는 in-line과 cross-flow를 동시에 고려한 경우로 1-DOF의 응답에 비해 상대적으로 넓은 V_r 범위($4.0 < V_r < 10.0$)에서 공진이 발생하고, A_{YRMS}/D 와 A_{XRMS}/D 가 각각 증가하는 현상을 볼 수 있다. 또한 A_{YRMS}/D 가 1-DOF의 응답보다 더 크게 발생하였다. 이는 2-DOF system으로 인해 실린더가 가지는 관성이 커져서 변위가 더 크게 발생한 것으로 판단된다. A_{XRMS}/D 의 피크값(peak value)이 0.4로 나타나는 것을 통해 in-line의 응답도 VIV에 상당한 영향을 받는 것을 알 수 있으며, V_r 이 11.0인 부근에서 VIV에 의한 영향이 급격히 감소하면서 동시에 f_{ox} 도 0에 수렴하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 4.1 Amplitude and frequency response of single cylinder with single resonance condition. ($f^* = 1.0$)

(a) Cross-flow motion of 1-DOF

(b) In-line and cross-flow motion of 2-DOF

(Blevins & Coughran, 2009 : $f^* = 1.0$, $m^* = 2.8$, $f_{ny} = 1.2[\text{Hz}]$, $\zeta_y = 0.002$)

본 실험 결과의 검증을 위해 Blevins & Coughran(2009)의 연구에서 실린더를 1-DOF와 2-DOF system으로 했던 실험 결과 중 m^* 가 유사한 조건에 대하여 비교 분석을 하였다. 본 연구 결과에 비해 낮은 V_r 범위에서 응답이 발생하는데 이는 V_r 을 계산하는데 사용되는 f_{ny} 이 본 연구의 경우보다 3배이상 크기 때문에 발생하는 영향으로 여겨진다. 또한 m^* 가 유사함에도 불구하고 ζ_y 의 차이로 인해 본 연구의 결과보다 A_{YRMS}/D 의 피크값이 작게 나타나지만, 1-DOF와 2-DOF system의 변화에 의한 응답이 나타나고 Jauvtis & Williamson(2004)와 Stappenbelt et.(2007)의 연구에서 언급했던 2-DOF로 인해 발생하는 ‘super upper branch’의 Fig. 4.1(b)의 공진 범위에서 나타나는 것을 통해 정성적인 비교만 가능하다.

Fig. 4.2는 이중 공진이 발생할 수 있는 조건에서 수행된 실험으로, f^* 가 1.9에서의 in-line과 cross-flow의 상호작용을 파악하기 위한 실험의 결과이다. f^* 가 1.0인 경우와 마찬가지로 각 방향에서 공진이 발생하면서 cross-flow와 in-line의 운동변위가 증가하는 현상이 나타났지만, 비공진 범위에서도 VIV로 인한 운동 응답이 발생하다가 서서히 감소하였다. 그리고 in-line과 cross-flow의 상호작용에 의한 영향으로 f^* 가 1.0인 결과에 비해 공진이 발생하는 V_r 의 범위가 줄어들며 운동 변위의 피크도 작아진다. 그러나 이중 공진이 발생하고 넓은 V_r 범위에서 응답이 나타나는 것은 f^* 가 1.0인 경우에 비해 구조적으로 더 심각한 문제가 발생할 수 있다는 점을 시사하고, f^* 는 VIV로 인한 운동 응답에 상당히 큰 영향을 주는 것도 알 수 있다.

Fig. 4.2에 Assi et al.(2014)의 실험 결과 중 f^* 가 1.9인 경우에 대하여 비교하였다. 본 연구의 실험결과는 $4.0 < V_r < 7.0$ 에서 이중 공진이 발생하였지만, Assi et al.(2014)에서는 f_{ny} 와 ζ_y 를 공기 중에서 자유 감쇠 실험을 수행하였기 때문에 상대적으로 f_{ny} 가 크게 측정되었기 때문에 낮은 V_r 범위에서 응답이 발생하였다. 부가질량을 고려하지 않는 f_{ny} 로 계산한 본 연구 결과의 A_{YRMS}/D 를 회색 점선으로 표시하였지만, 여전히 낮은 V_r 에서 응답이 발생하는 것은 Assi et

al.(2014)에서 사용된 f_{ny} 가 본 연구에 비해 크기 때문이라고 판단된다. V_r 이 커짐에 따라 응답이 발생하고 VIV의 영향이 줄어들면서 A_{XRMS}/D 와 A_{YRMS}/D 그리고 f_{ox} 의 감소하는 현상이 발생한다는 점은 본 연구 결과와 정성적으로 유사하다.

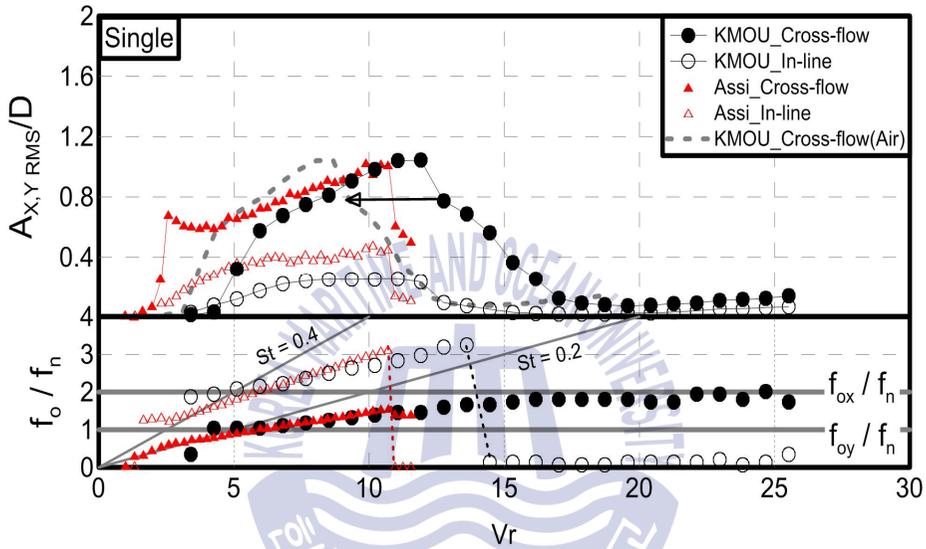


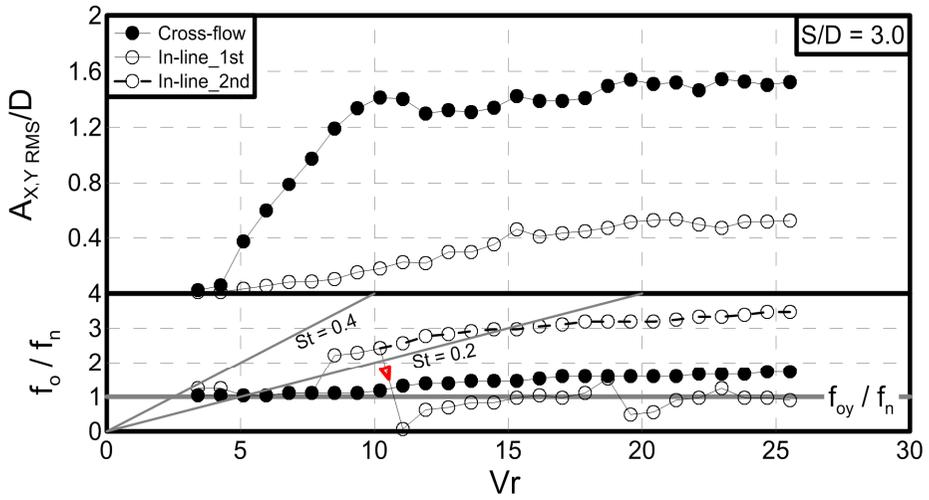
Fig. 4.2 Amplitude and frequency response of single cylinder with 2-DOF. ($f^* = 1.9$)

(Assi et al., 2014 : $f^* = 1.9$, $m^* = 1.6$, $\zeta_{ii} = 0.003$)

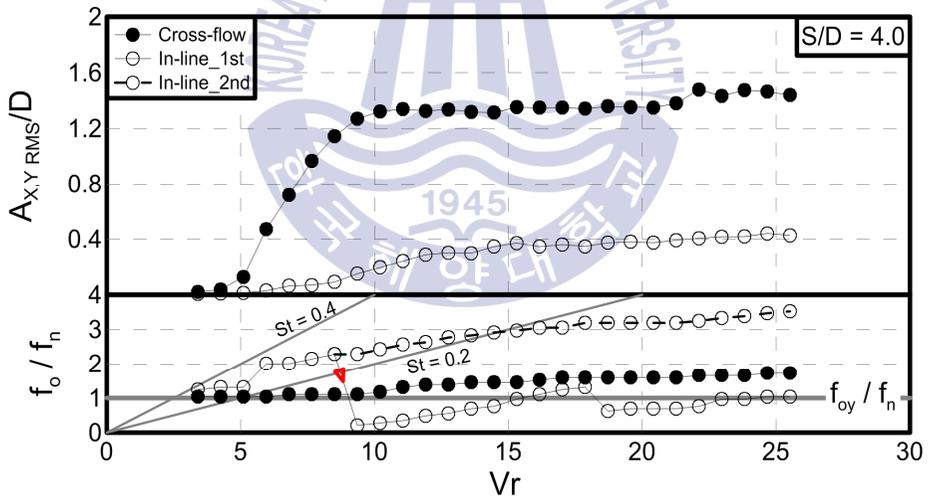
4.2 Downstream cylinder of WIV

4.2.1 Fixed upstream cylinder & 2-DOF downstream cylinder

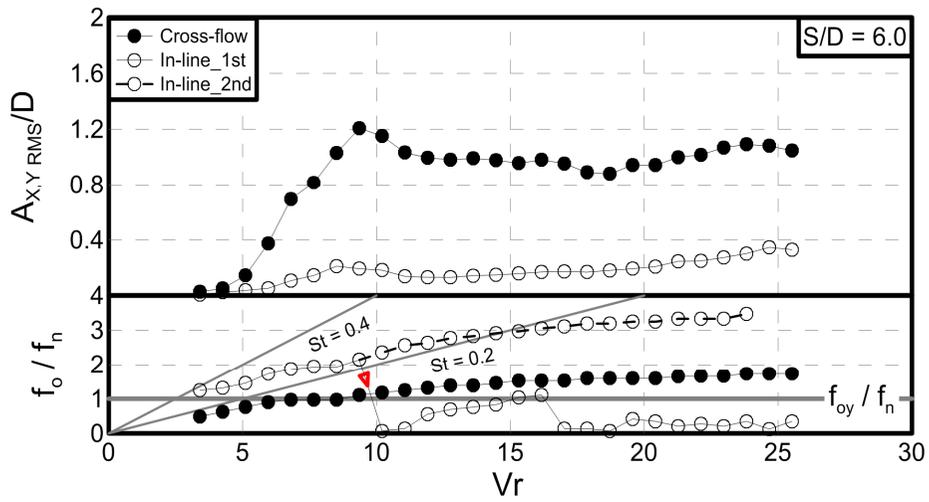
Fig. 4.3은 실린더를 탠덤으로 배치하여, 상류 실린더는 수조에 고정을 시키고 하류 실린더는 단일 공진이 발생하는 f^* 가 1.0인 경우에 대한 2-DOF system의 실험 결과이다. f_{ox} 는 in-line의 응답에 대한 파워 스펙트럴 밀도(power spectral density, PSD)의 스펙트럼(spectrum) 중 피크가 첫 번째와 두 번째로 큰 것을 각각 1st와 2nd의 주파수로 분리하여 나타내었다. 싱글 실린더의 결과인 Fig. 4.2(b)에서는 비공진 범위에서 응답이 감소하는 반면, Fig. 4.3(a)와 (b)의 운동 변위는 V_r 이 커짐에 따라 감소하지 않고 유지된다. 이는 상류 실린더에서 발생한 후류로 인해 하류 실린더에 유입되는 흐름이 난류화 되면서 불안정해진 때문이라고 볼 수 있다. 공진이 발생하는 $3.0 < V_r < 10.0$ 인 범위에서는 f_{ox} 가 1st 주파수로 발생하지만, V_r 이 10.0인 부근에서는 후류의 영향을 받아 f_{ox} 의 크기가 줄어든 형태의 후류 동요 주파수(wake oscillation frequency, f_{ow})로 발생하였다. 동시에 2nd 주파수는 VIV에 의해 발생하는 동요 주파수로 유지된다. Fig. 4.3(c)는 $10.0 < V_r < 16.0$ 에서 f_{ow} 가 발생하는 부분적인 후류 간섭이 작용하였고, Fig. 4.3(d)는 싱글 실린더의 결과인 Fig. 4.2(b)와 유사한 경향을 나타낸다. 이를 통해 S/D 가 커질수록 후류의 영향이 감소하여 운동 변위의 크기가 줄어들고, 독립적인 보오텍스 홀림이 발생한 것으로 판단된다.



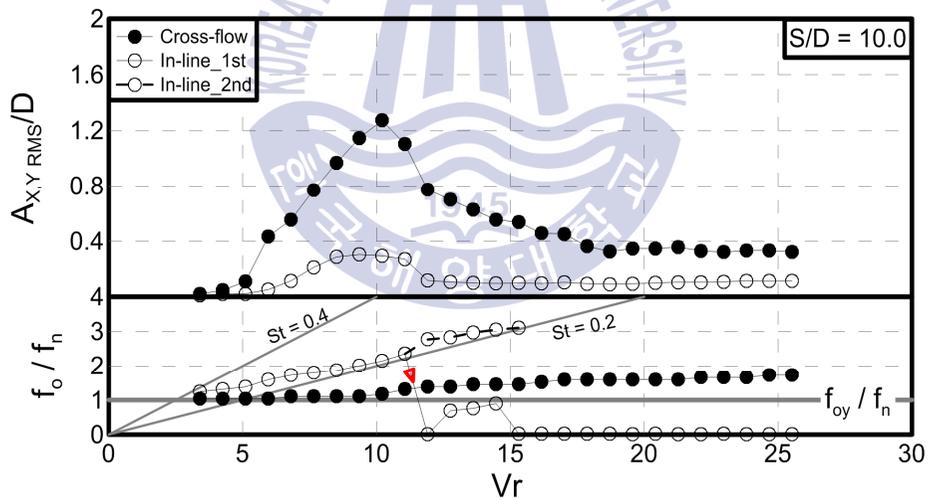
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.3 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with Fixed & 2-DOF system. ($f^* = 1.0$)

Fig. 4.4은 Korkischko & Meneghini(2010)에서 수행한 실험 결과 중 f^* 가 1.0이고 S/D 가 4.0인 경우의 결과를 본 실험 결과와 비교한 것이다. Cross-flow만 고려하는 1-DOF system에 대한 결과이기 때문에 본 연구와 정성적인 비교만 가능하지만, 실린더를 탠덤으로 배치함으로 인해 싱글 실린더의 경우와 다르게 V_r 이 커짐에 따라서 후류의 영향으로 인해 운동 변위가 계속 유지된다는 점과 f_{oy} 의 결과를 통해 유사함이 나타났다. 또한 본 실험 조건에 비해 질량비가 더 작은 조건에도 불구하고 A_{YRMS}/D 가 작다. 이는 Fig. 4.1에서 설명된 바와 같이 1-DOF와 2-DOF system에 따른 응답 특성 때문이라고 사료된다.

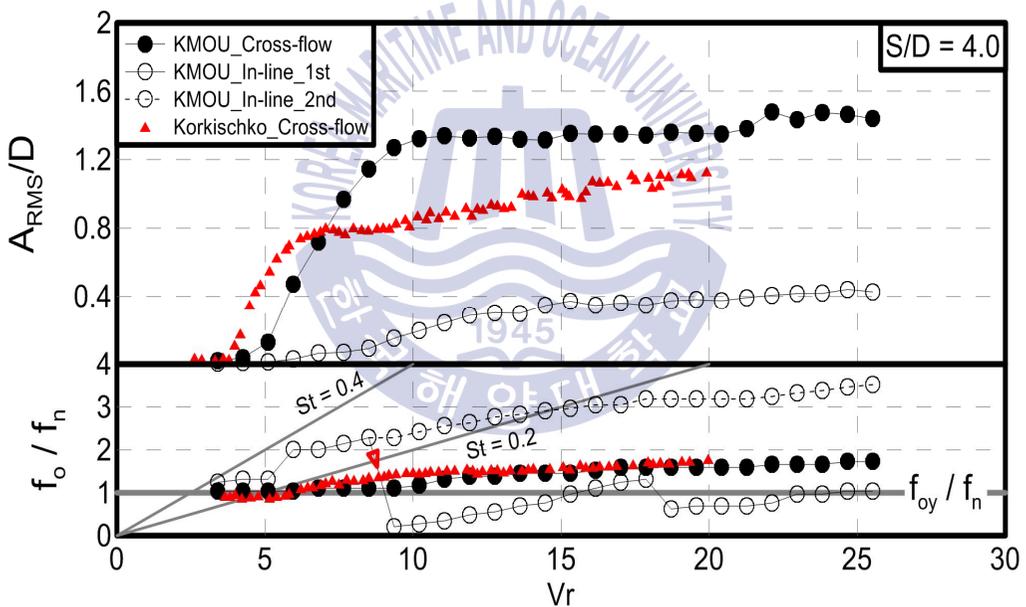
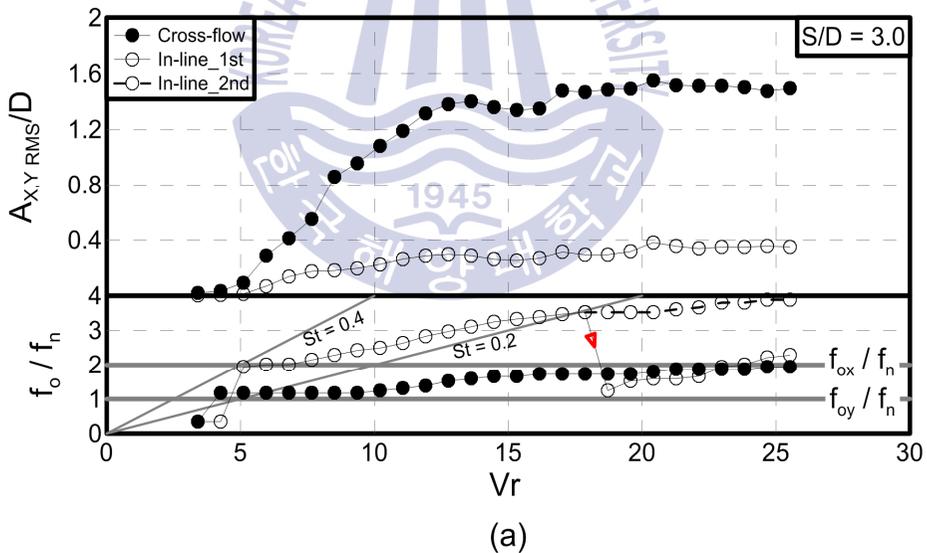
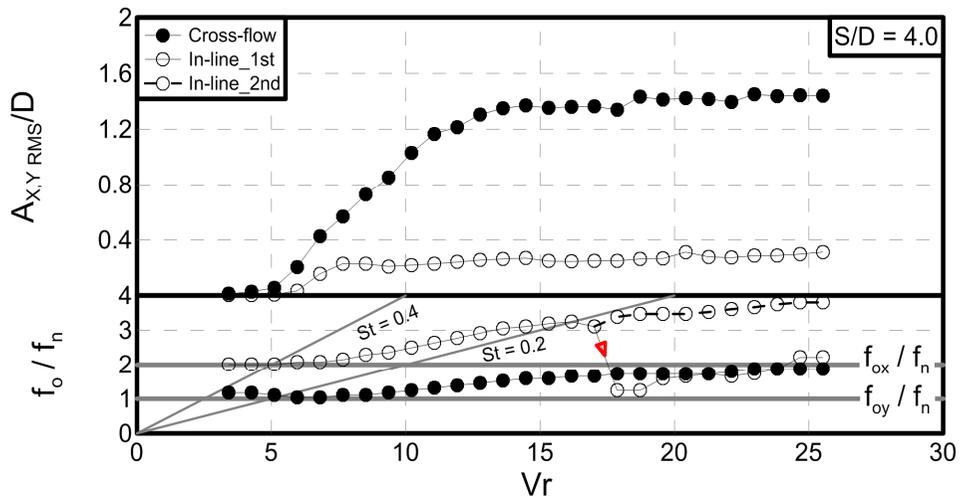


Fig. 4.4 Comparisons of amplitude and frequency response with Korkischko & Meneghini(2010). ($S/D=4.0, f^*=1.0$)

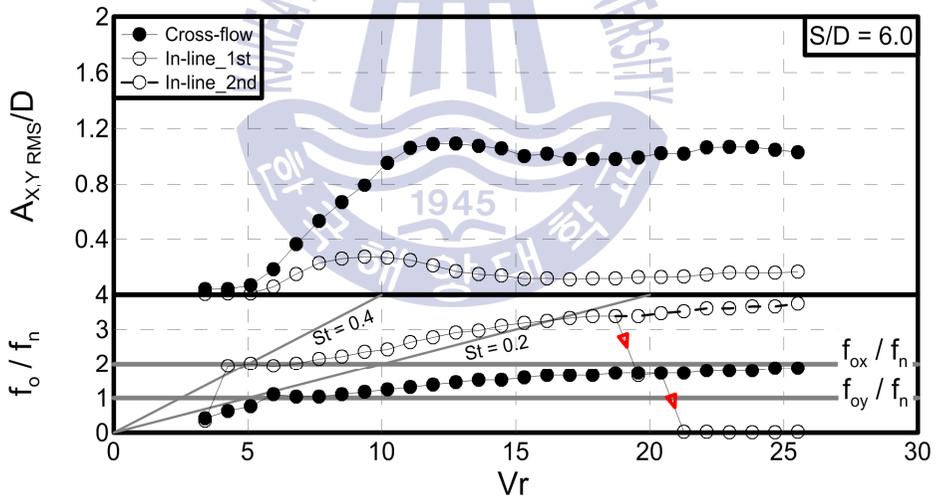
(Korkischko & Meneghini, 2010 : $f^*=1.0, m^*=1.8, \zeta_y=0.0045, S/D=4.0$)

Fig. 4.5은 탠덤 실린더인 경우에서 이중 공진의 영향을 보기 위해 f^* 를 1.9로 적용하여 실험한 결과이다. S/D 가 3.0인 Fig. 4.5(a)를 관찰하면 $5.0 < V_r < 7.0$ 에서 발생하는 이중 공진이 상대적으로 f^* 가 1.0인 Fig. 4.3(a)의 경우보다 줄어들었는데, 이는 f^* 의 변화로 인해 단일 공진보다 이중 공진이 발생하는 범위가 줄어들었던 싱글 실린더의 경우와 유사한 결과이다. Fig. 4.5(a)와 (b)의 운동 변위는 f^* 가 1.0인 경우와 근소한 차이를 가지며 발생하였지만, Fig. 4.3(a)와 (b)의 단일 공진이 끝나는 V_r 범위인 10.0에서 f_{ow} 가 발생하는 것과는 달리 in-line의 강성이 커짐으로 인해 상대적으로 후류의 영향이 감소되어 V_r 이 18.0에서 발생하였다. 그리고 Fig. 4.5(c)와 (d)에서는 f_{ow} 가 거의 발생하지 않았기 때문에 f^* 가 증가함에 따라 후류의 영향이 상당히 감소한 것을 의미한다.

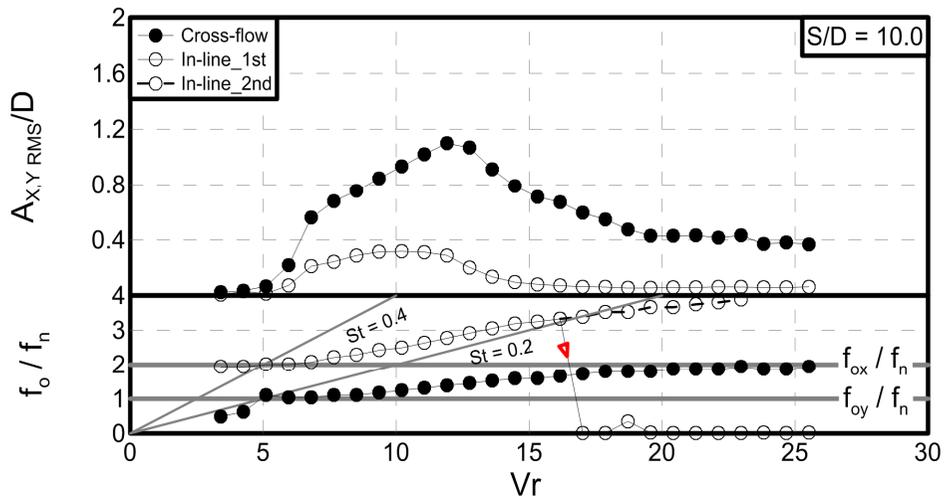




(b)



(c)



(d)

Fig. 4.5 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with Fixed & 2-DOF system. ($f^* = 1.9$)

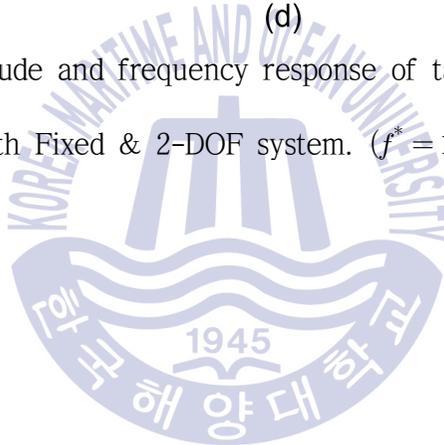


Fig. 4.6은 Assi et al.(2014)의 연구결과 중, f^* 가 1.9이고 S/D 가 4.0인 경우에 대하여 본 실험 결과와 비교한 것이다. V_r 이 커짐에 따라 in-line과 cross-flow의 운동 변위가 증가하고, f_{ow} 가 발생한다는 점에서 본 연구 결과와 정성적으로 유사하지만 f_{ow} 가 발생하는 범위가 V_r 이 9.0 부근으로 상대적으로 낮은 범위이다. 언급한 부가 질량을 고려하지 않는 f_{ny} 로 계산한 본 연구 결과를 회색 점선으로 표기하였지만 Fig. 4.2와 동일하게 Assi et al.(2014)에서 사용된 f_{ny} 이 본 연구에 비해 크기 때문이라고 판단된다.

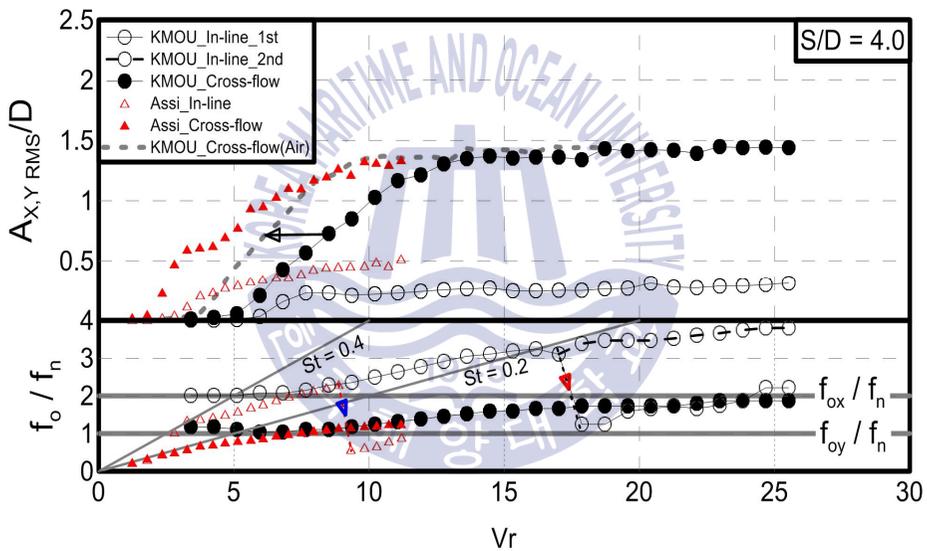
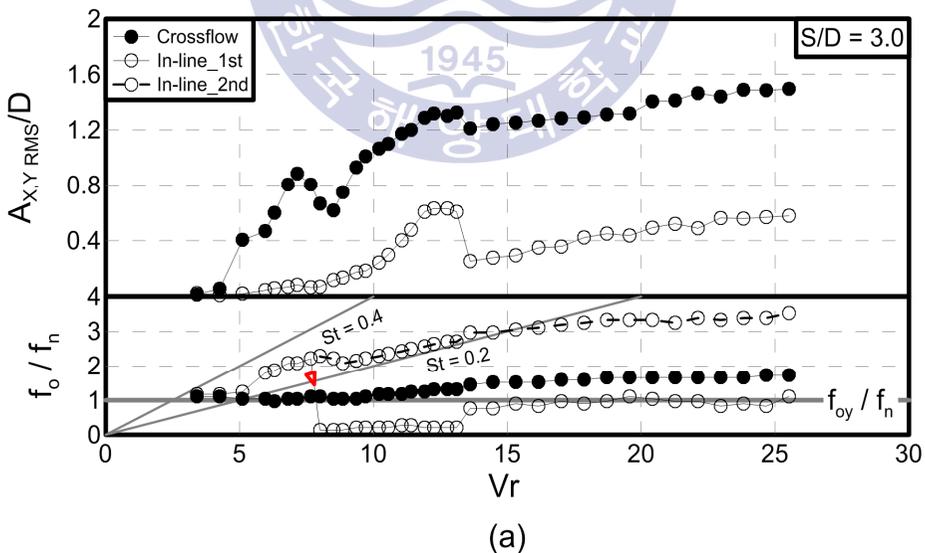


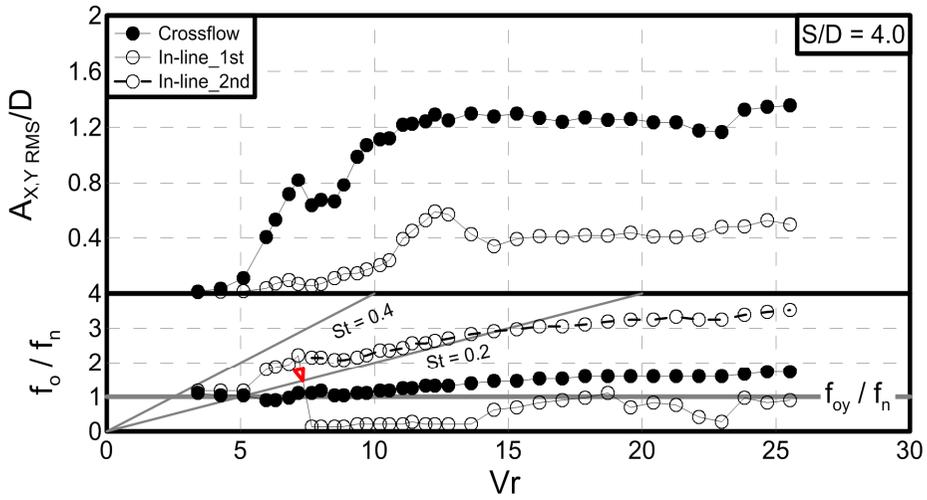
Fig. 4.6 Comparisons of amplitude and frequency response with Assi et al.(2014). ($S/D=4.0, f^*=1.9$)

(Assi et al., 2014 : $f^*=1.9, m^*=1.6, \zeta_{ii}=0.003, S/D=4.0$)

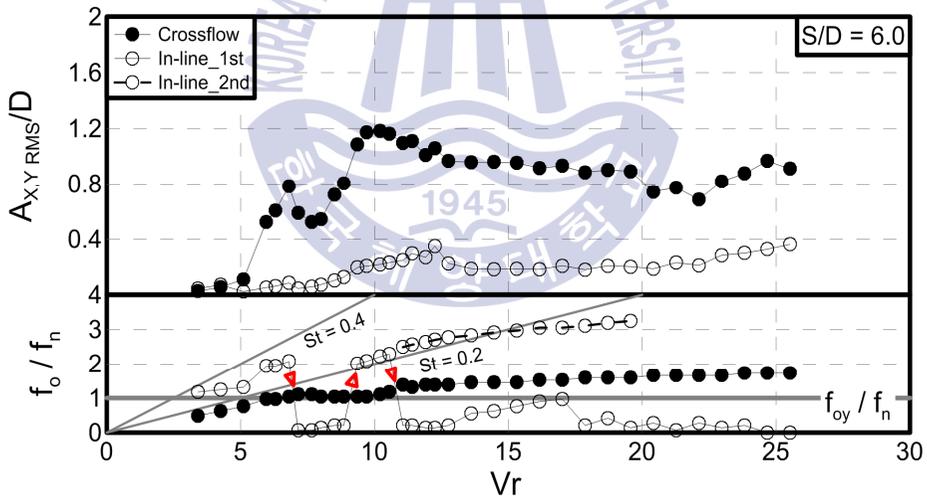
4.2.2 1-DOF upstream cylinder & 2-DOF downstream cylinder

Fig. 4.7은 단일 공진이 발생하는 f^* 가 1.0인 조건에서 상류 실린더가 1-DOF system일 때 발생하는 하류 실린더의 2-DOF 응답 결과이다. S/D 의 변화에 영향을 받지 않는 상류 실린더의 운동 변위는 싱글 실린더의 1-DOF 결과인 Fig. 4.1(a)와 동일하다. Fig. 4.7의 V_r 이 7.0에서는 상류 실린더가 고정된 경우인 Fig. 4.3에서 발생하지 않았던 A_{YRMS}/D 의 피크와 f_{ow} 가 발생하였고, 이는 WIV의 영향을 촉진시킨 것으로 판단된다. Fig. 4.7(a)와 (b)의 V_r 이 12.5에서는 A_{XRMS}/D 의 피크가 0.6의 값으로 발생하고, 이는 Fig. 4.3의 같은 V_r 범위에 비해 상당히 크다. 따라서 상류 실린더의 움직임은 in-line에도 상당한 영향을 미치고 있다. 반면에 두 실린더 간의 거리가 멀어진 Fig. 4.7(c)와 (d)는 후류에 의한 영향이 줄어들어 V_r 이 커짐에 따라 간헐적으로 f_{ow} 가 발생하는 결과를 보이고 있다.

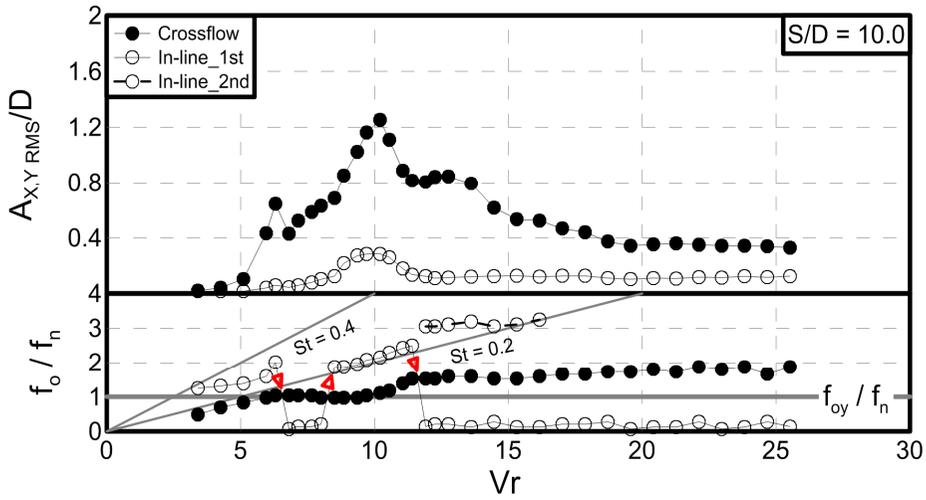




(b)



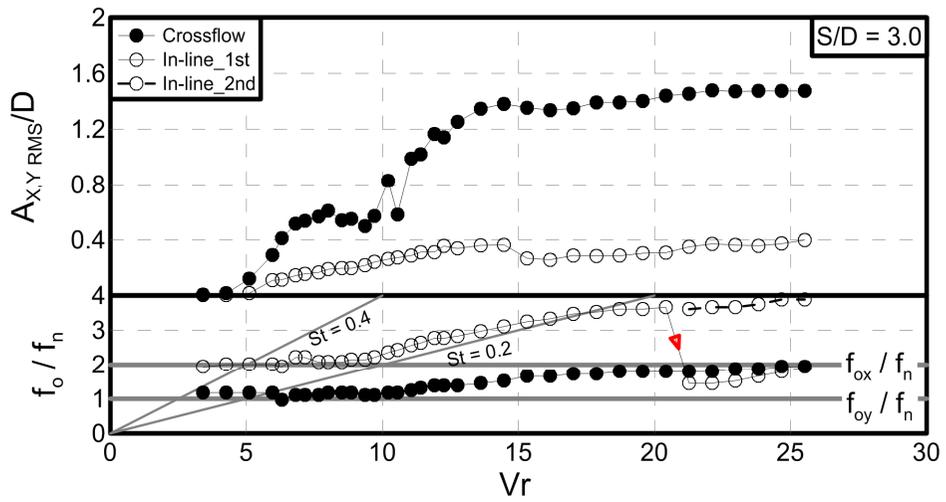
(c)



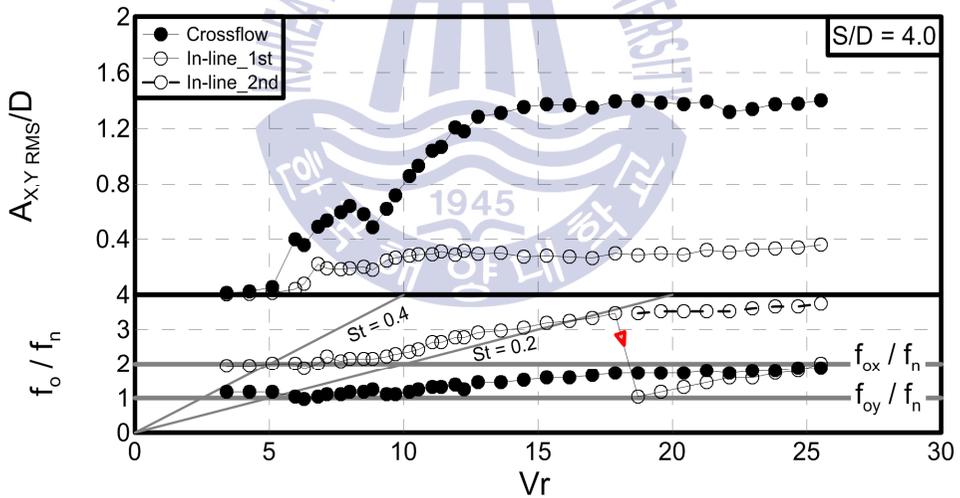
(d)

Fig. 4.7 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with 1-DOF & 2-DOF system. ($f^* = 1.0$)

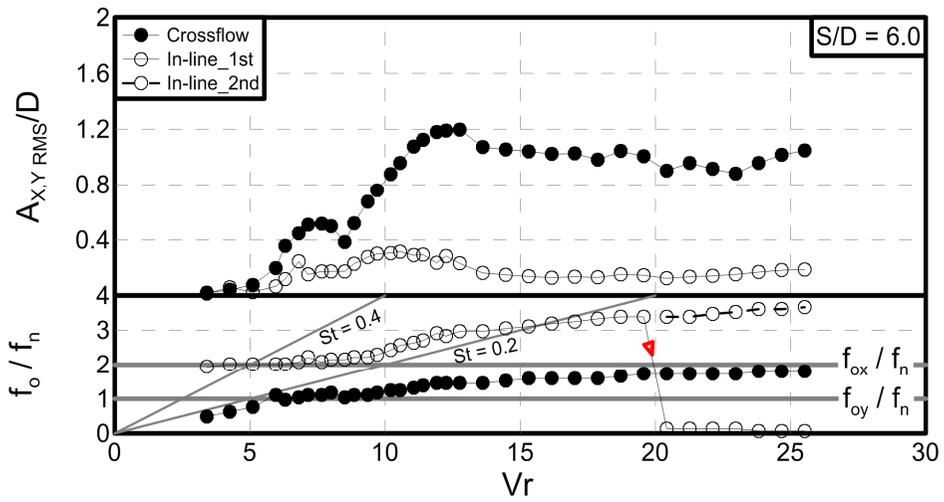
Fig. 4.8는 Fig. 4.7과 동일하게 실린더를 배치한 조건에서 f^* 를 1.9로 적용한 실험 결과이다. 모든 S/D 의 경우에 있어 이중 공진이 발생하는 $5.0 < V_r < 10.0$ 에서 상류 실린더의 거동에 의해 나타나는 A_{YRMS}/D 의 피크값이 Fig. 4.7에 비해 작게 발생하였다. 그리고 두 실린더 사이의 거리가 상대적으로 가까운 Fig. 4.8(a)와 (b)의 A_{XRMS}/D 도 응답의 형태가 완만하게 나타났다. 이중 공진 때문에 Fig. 4.7(a)와 (b)에 비해 f_{ow} 가 더 높은 V_r 에서 발생하지만 실린더 사이의 거리가 상대적으로 먼 Fig. 4.8(c)와 (d)는 상류 실린더가 고정된 경우인 Fig. 4.5(a)와 (b)의 결과와 유사하게 f_{ow} 가 발생하지 않았다. 따라서 f^* 는 상류 실린더의 구속 조건에 관계없이 WIV와 VIV가 발생하는 V_r 범위에 영향을 주는 변수라고 판단된다.



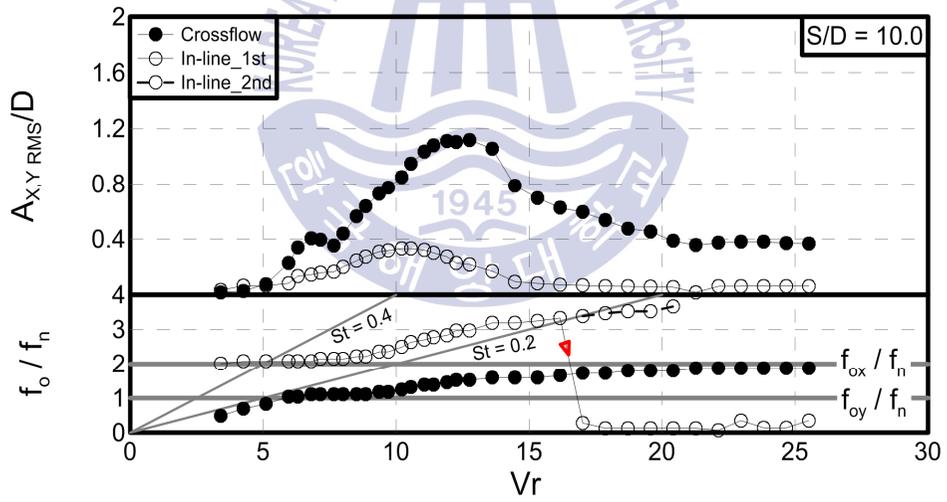
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.8 Amplitude and frequency response of tandem cylinders with 1-DOF & 2-DOF system. ($f^* = 1.9$)

제 5 장 An effect of WIV excitation mechanism

5.1 Time history and Power spectral density

Fig. 5.1은 f^* 가 1.0일 때 싱글 실린더와 탠덤 실린더의 결과 중 S/D 가 3.0에 대한 cross-flow 운동 변위의 시간이력 중 50개의 주기(cycle)만 발췌한 결과이다. Fig. 5.1(a)는 싱글 실린더의 결과 중 공진이 발생했던 V_r 범위에 해당되며, VIV의 영향만 발생하여 응답이 규칙적으로 나타난 것을 관찰할 수 있다. 그러나 상류 실린더가 고정된 상태에서의 하류 실린더의 결과인 Fig. 5.1(b)는 V_r 이 5.95에서 규칙적이거나 V_r 이 커짐에 따라 불규칙적으로 변화한다. 이는 상류 실린더에서 발생한 후류가 V_r 이 커질수록 하류 실린더에 더 큰 영향을 주기 때문에 WIV의 영향이 커진다는 것을 의미한다. Fig. 5.1(c)는 상류 실린더가 cross-flow으로 움직이는 경우로 V_r 이 5.95에서도 불규칙한 응답이 발생하고, V_r 이 커짐에 따라 상대적으로 Fig. 5.1(b)의 경우보다 더 불규칙한 응답이 발생하였다. 이는 상류 실린더의 움직임으로 인해 V_r 이 커질수록 하류 실린더에 더 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

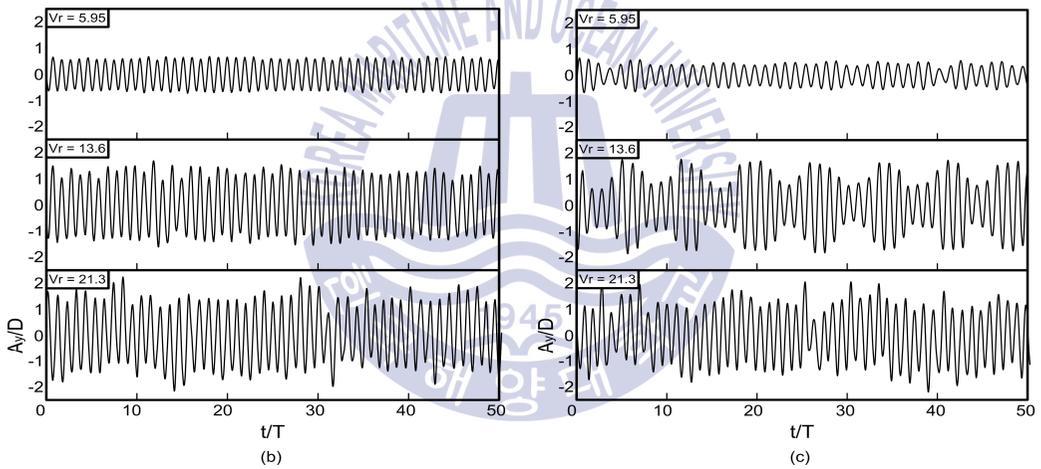
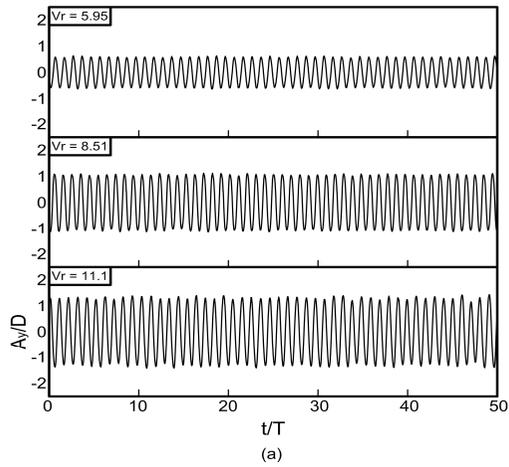


Fig. 5.1 Cross-flow motion time history. ($f^* = 1.0$)

(a) Single cylinder with 2-DOF system

(b) Tandem cylinders with Fixed & 2-DOF system about $S/D = 3.0$

(c) Tandem cylinders with 1-DOF & 2-DOF system about $S/D = 3.0$

Fig. 5.2는 상류 실린더가 고정되고 S/D 가 3.0인 조건에서 in-line 운동 변위의 파워 스펙트럴 밀도 결과이다. f_{oy} 의 2배로 발생하는 f_{ox} 는 VIV의 영향을 받는 보오텍스 동요 주파수(vortex oscillation frequency, f_{ov})로 표기하였고, f_{ov} 를 제외한 주파수 중 스펙트럼의 피크가 가장 큰 성분에 대하여 f_{ow} 로 표기하였다. Fig. 5.2(a)는 f^* 가 1.0인 경우로 V_r 이 10.2에서는 f_{ov} 에서 우세한 응답이 발생하지만, V_r 이 커질수록 f_{ow} 에서 우세한 응답이 나타난다. f^* 가 1.9인 Fig. 5.2(b)는 Fig. 5.2(a)의 결과와 달리 V_r 이 13.6일 때 f_{ow} 에서 우세한 응답이 발생하였다. 파워 스펙트럴 밀도의 결과를 통해 f_{ov} 에서만 응답이 발생하는 싱글 실린더보다 f_{ov} 와 f_{ow} 에서 동시에 응답이 발생하는 탠덤 실린더에서 더 심각한 피로 손상을 받을 수 있다.



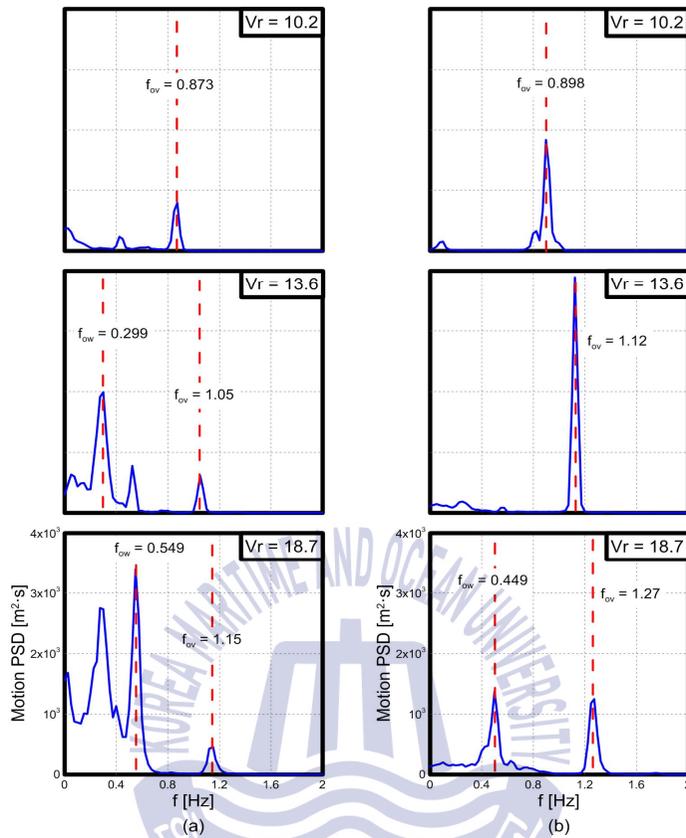


Fig. 5.2 PSD of in-line motion with Fixed & 2-DOF system. ($S/D=3.0$)

(a) $f^* = 1.0$, (b) $f^* = 1.9$

Fig. 5.3은 상류 실린더가 1-DOF system이고 S/D 가 3.0인 경우에 대한 결과로, f^* 가 1.0인 Fig. 5.3(a)에서는 V_r 이 8.51일 때 f_{ow} 에서 우세한 응답이 나타났다. 반면에 f^* 가 1.9인 Fig. 5.3(b)의 경우에는 V_r 이 13.6에서 Fig. 5.2(b)에서 관찰되지 않았던 f_{ow} 에서의 응답이 발생하며, Fig. 4.7(a)와 Fig. 4.8(a)에서 상류 실린더의 거동으로 인해 낮은 V_r 에서 WIV의 영향이 발생하는 결과를 반증하고 있다.

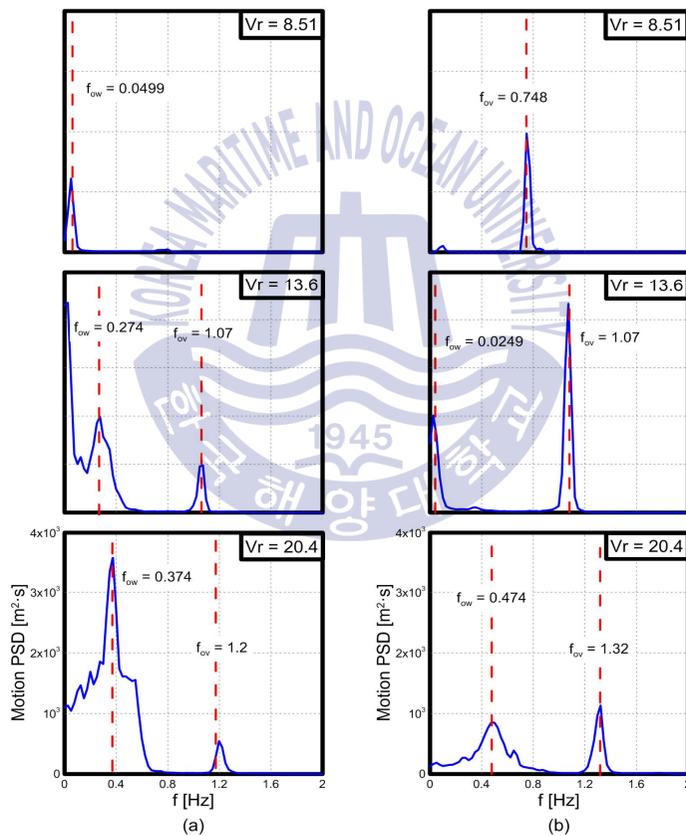
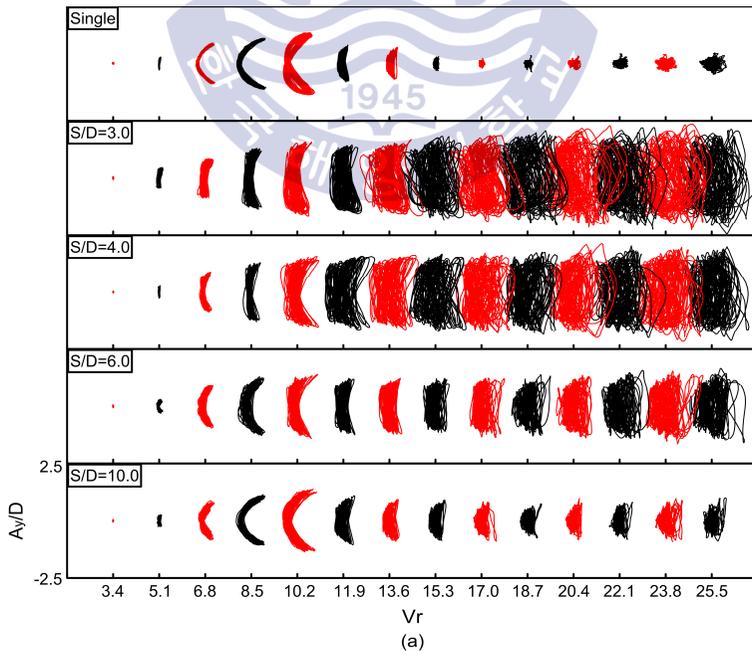


Fig. 5.3 PSD of in-line motion with 1-DOF & 2-DOF system. ($S/D=3.0$)

(a) $f^* = 1.0$, (b) $f^* = 1.9$

5.2 Trajectories of motion

Fig. 5.4은 싱글 실린더와 상류 실린더가 고정된 상태에서 S/D 에 변화에 따른 하류 실린더의 운동 변위에 대한 x-y방향의 궤적을 나타낸다. Fig. 5.4(a)는 f^* 가 1.0인 결과로, VIV에 의한 영향이 우세한 V_r 범위에서 궤적 모양은 ‘C’의 형태로 나타났다. 특히 S/D 가 3.0, 4.0인 경우, 상류에서 발생한 후류가 상대적으로 WIV의 영향이 커지는 V_r 인 10.2보다 증가하는 범위에서 하류 실린더에 재부착(reattachment)되어, 와류강도(vorticity)가 더 강한 보오텍스에 의해 불규칙한 응답이 발생하였다(Zdravkovich, 1988). 반면에 S/D 가 6.0, 10.0인 경우, 후류에 의한 영향이 상대적으로 작아지면서 독립적인 유동 패턴을 가지기 때문에 궤적의 크기가 작아졌다. Fig. 5.4(b)에서 나타나는 ‘8’의 형태인 궤적은 이중 공진으로 인해 발생하는 in-line과 cross-flow의 위상 차이에 의한 영향이다(Dahl et al., 2010).



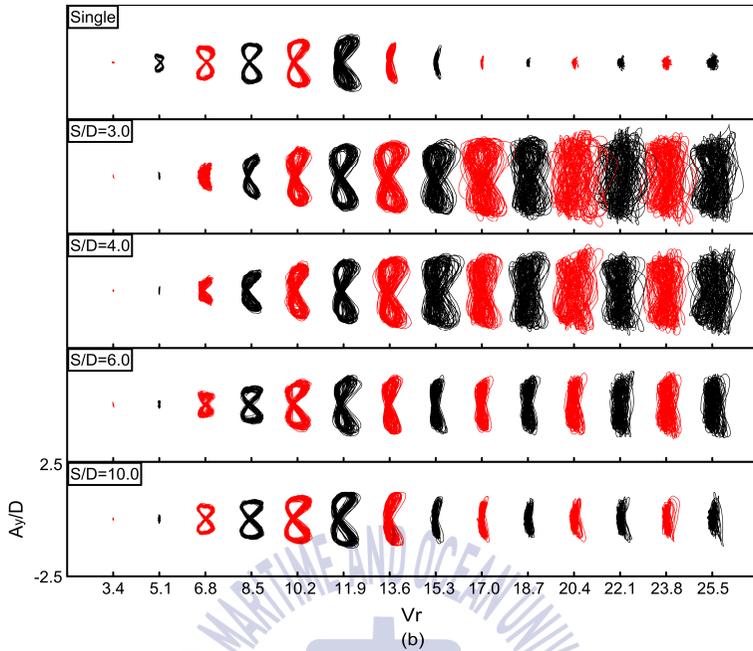


Fig. 5.4 x-y trajectory of the cylinders with Fixed & 2-DOF system.

(a) $f^* = 1.0$, (b) $f^* = 1.9$

Fig. 5.5는 상류 실린더가 cross-flow으로 움직이는 1-DOF system의 x-y방향의 궤적 결과를 나타낸다. Fig. 5.4(a)와 (b)에서는 V_r 이 11.9에서 각각 ‘C’와 ‘8’의 형태로 궤적이 나타나지만, Fig. 5.5는 동일한 V_r 범위에서 응답의 형태가 불규칙하게 발생하였다. 이는 Fig. 4.7과 Fig. 4.8의 결과에서 발생했던 상류 실린더의 거동으로 인해 WIV의 영향이 촉진되는 현상이다. S/D 에 관계없이 x-y의 궤적은 VIV의 영향이 우세한 V_r 범위인 $3.4 < V_r < 10.2$ 에서는 궤적의 형태가 보다 명확하게 발생하였다.

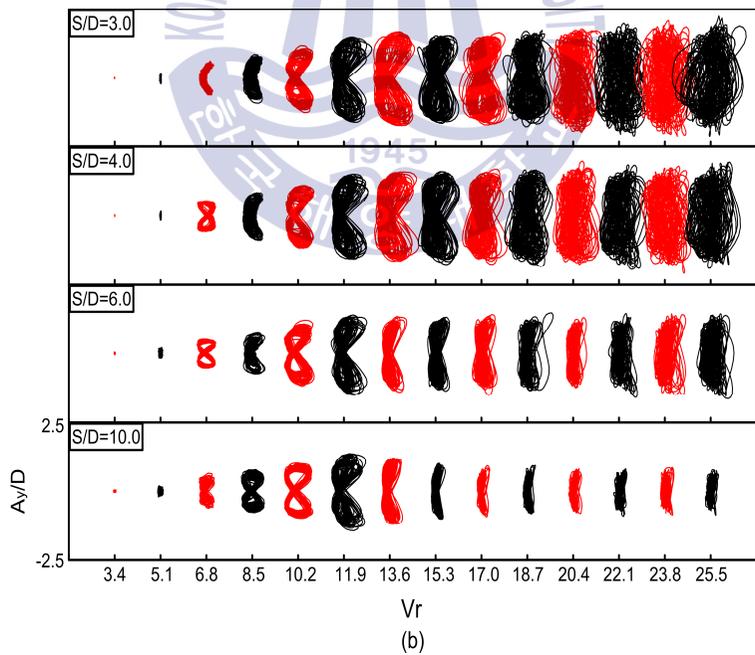
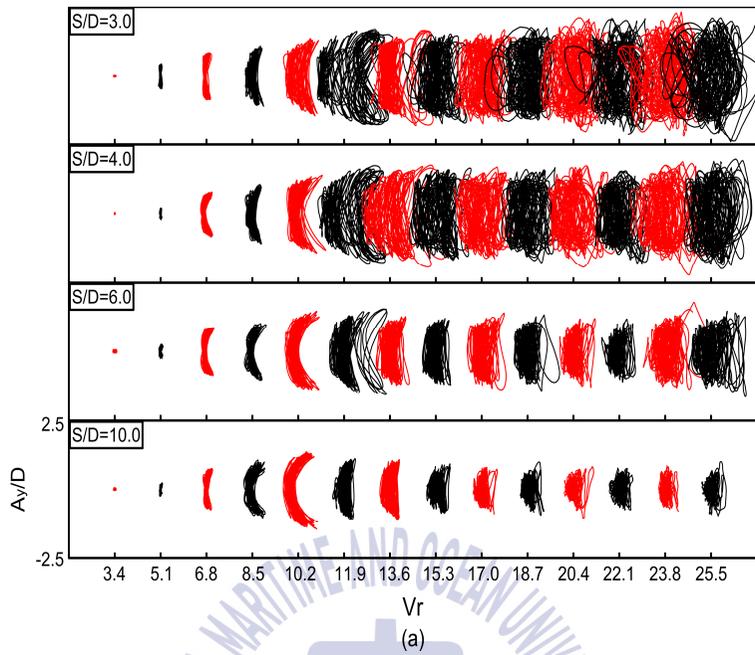


Fig. 5.5 x-y trajectory of the cylinders with 1-DOF & 2-DOF system.

(a) $f^* = 1.0$, (b) $f^* = 1.9$

5.3 Flow interference between two tandem cylinders

Fig. 5.6는 상류 실린더가 cross-flow으로 움직일 때 하류 실린더와 유동 간섭으로 인한 영향을 보기 위해 S/D 가 3.0인 cross-flow 운동 변위의 시간이력 결과를 나타낸 것이다. 관측 범위는 $7.0 < V_r < 10.0$ 으로 Fig. 4.7(a)에서 $A_{Y_{RMS}}/D$ 의 피크가 발생하고 다시 감소하는 응답을 중점으로 분석하였다. V_r 이 6.81일 때 실린더 사이의 위상이 in-phase로 발생하여 상류 실린더에 비해 하류 실린더의 cross-flow 운동 변위가 크게 발생하였다. 반면에 V_r 이 8.01인 경우에서 30초 부근의 응답을 살펴보면, 실린더 사이의 위상이 in-phase에서 out-phase로 변화하여 하류 실린더의 운동 변위가 줄어들었고, V_r 이 8.85까지 응답이 감소하였다.

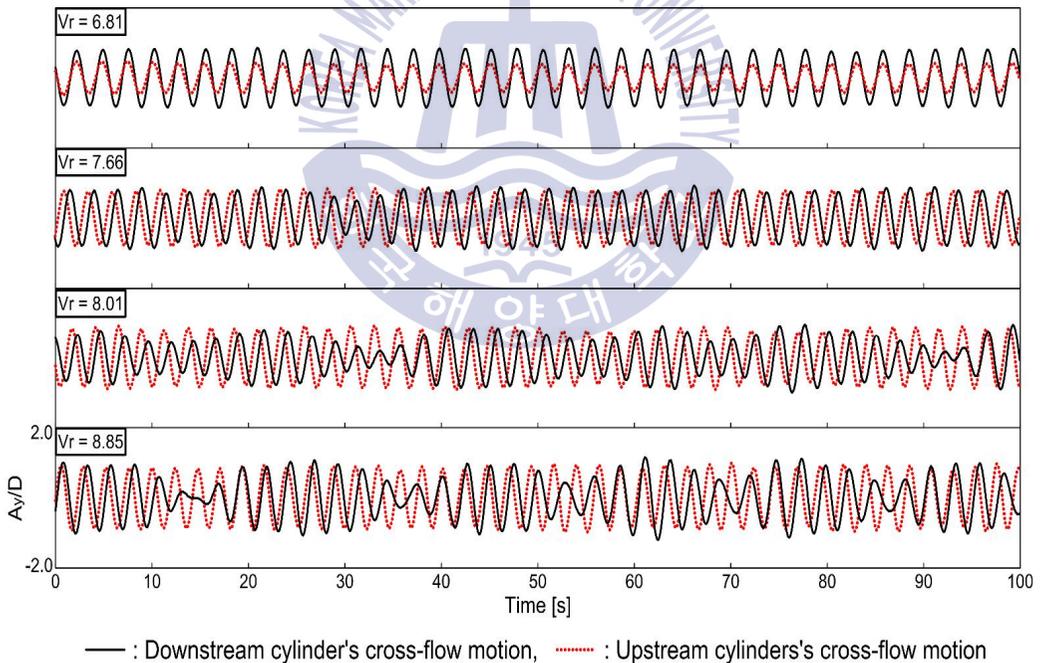


Fig. 5.6 Cross-flow motion time history. ($S/D = 3.0, f^* = 1.0$)

5.4 Force coefficients with Wake shielding effect

Fig. 5.7은 상류와 하류 라이저에 일정한 유속이 유입될 때 발생하는 유동 장(flow field)의 분포를 나타낸다. U_0 는 자유 흐름 속도(free stream velocity), U_w 는 후류 속도(wake velocity), 그리고 U_d 는 감소 속도(deficit velocity)를 의미한다. 상류 라이저에 U_0 가 유입되면서 발생하는 후류로 인해 하류 라이저에 U_d 만큼 줄어든 U_w 가 유입되는 wake shielding 현상이 발생한다. 이는 하류 라이저에 작용하는 평균 항력을 상류 라이저에 비해 감소시켜 라이저 사이의 충돌 가능성을 증가시킨다(Blevins, 2005; DNV-RP-F203, 2009).

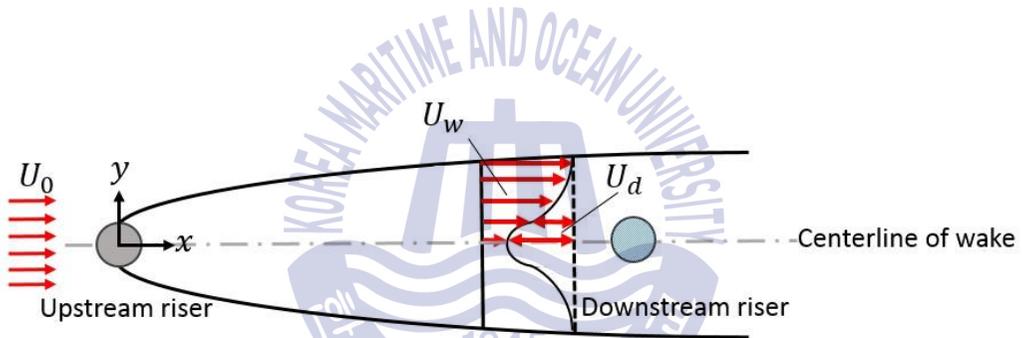
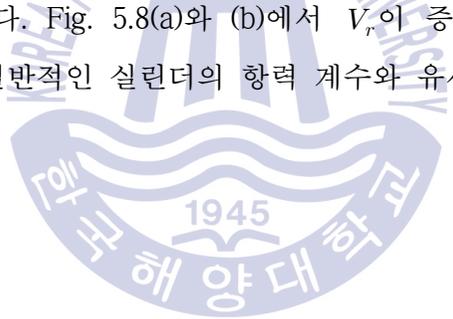


Fig. 5.7 Flow field distribution acting on the downstream riser from the upstream riser (DNV-RP-F203, 2009).

Fig. 5.8은 싱글 실린더와 탠덤 실린더에서 상류 실린더가 고정된 경우에서 하류 실린더에 작용하는 항력과 양력을 로드셀을 이용하여 측정한 결과이다. Fig. 5.8(a), (b)는 f^* 가 1.0, 1.9인 결과로 항력과 양력의 계수를 각각 평균값(mean value)과 표준편차(standard deviation, STD)로 나타냈다. Fig. 5.8(a)의 싱글 실린더의 $C_{D,mean}$ 는 V_r 이 10.0 부근에서 피크가 3.0으로 나타나지만, wake shielding이 발생하는 탠덤 실린더의 피크는 2.0으로 나타났다. 또한 후류가 하류 실린더에 유입되는 흐름의 난류화를 촉진시켜 형상 항력(form drag)을 감소시키

기 때문인 것으로 추측된다. 싱글 실린더의 $C_{D,STD}$ 는 공진이 발생하는 $5.0 < V_r < 10.0$ 에서 나타나지만, 탠덤 실린더에서는 후류의 영향이 상대적으로 작게 작용했던 S/D 가 6.0, 10.0에서만 발생하였다. 반면 wake shielding의 영향이 나타나지 않는 탠덤 실린더의 $C_{L,STD}$ 는 공진이 발생하지 않는 V_r 범위에서 0에 수렴하는 싱글 실린더의 결과와 달리 V_r 이 증가함에 따라 서서히 감소한다. $C_{L,mean}$ 는 대칭적으로 발생하는 보오텍스 홀림과 후류 간섭으로 인해 0에 수렴한다.

Fig. 5.8(b)의 탠덤 실린더의 $C_{D,mean}$ 는 V_r 이 10.0 부근에서 피크가 발생한 Fig. 5.8(a)와는 달리 V_r 이 13.0 부근에서 발생하였는데, 이는 f^* 가 커짐에 따른 영향이 실린더에 작용하는 유체력에도 나타난 것으로 판단된다. In-line의 영향이 강하게 작용하여 싱글 실린더와 탠덤 실린더의 $C_{D,STD}$ 는 f^* 가 1.0인 경우에 비해 상당히 증가하였다. Fig. 5.8(a)와 (b)에서 V_r 이 증가함에 따라 $C_{D,mean}$ 이 1.0에 수렴하는 것은 일반적인 실린더의 항력 계수와 유사하다.



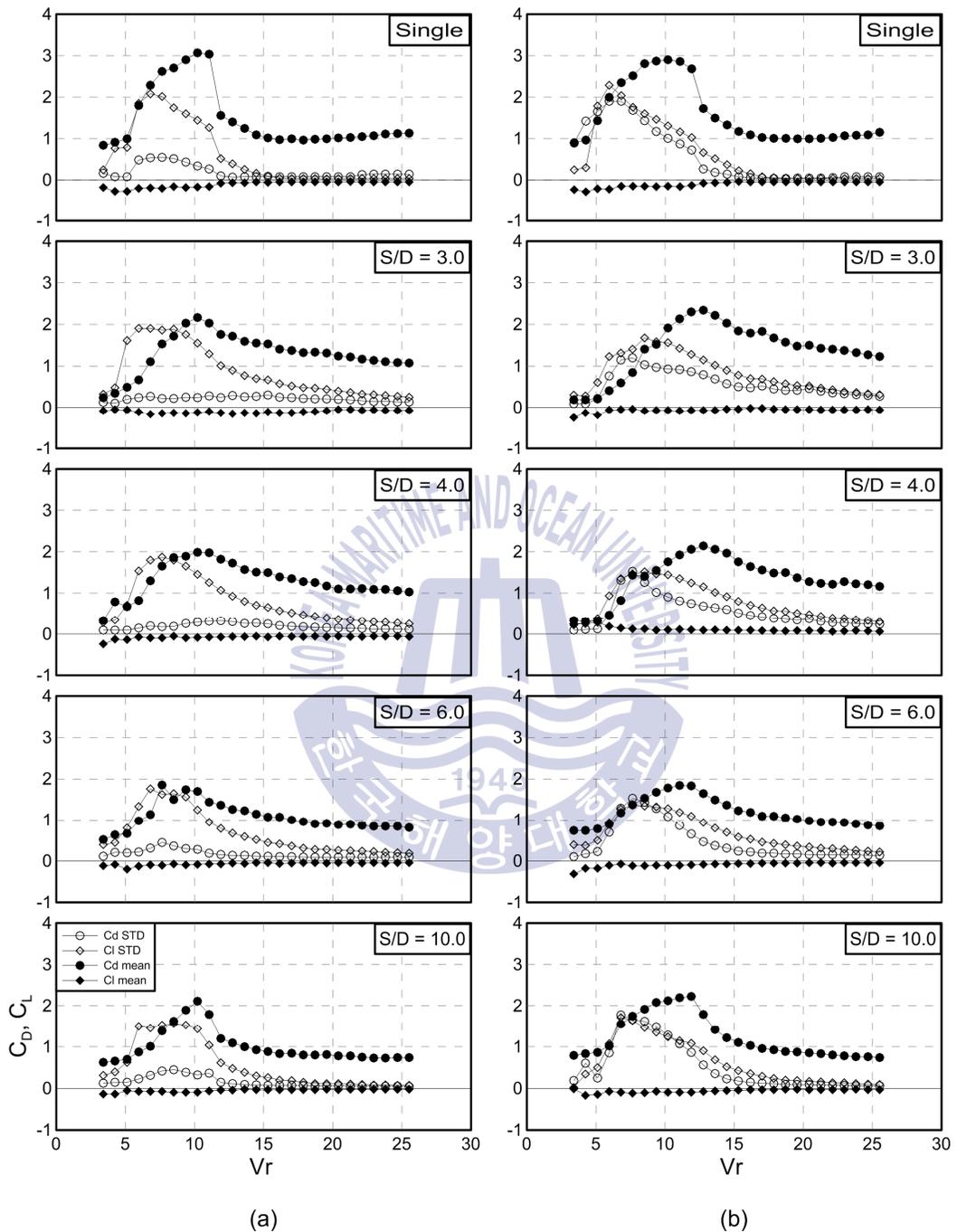


Fig. 5.8 Force coefficient in Fixed & 2-DOF system.

(a) $f^* = 1.0$, (b) $f^* = 1.9$

제 6 장 Conclusion

본 연구에서는 실린더를 탠덤으로 배치하여 상류 실린더의 후류로 인해 하류 실린더에 작용하는 WIV의 응답 특성에 대해 분석하였다. f^* 의 변화에 관계없이 탠덤 실린더에서는 WIV와 VIV의 응답이 함께 발생하며, V_r 이 증가함에 따라 운동 변위가 계속하여 증가하며 in-line에서 f_{ow} 가 존재하였다.

싱글 실린더에서 1-DOF의 경우에 비해 in-line을 고려하는 2-DOF system에서 A_{YRMS}/D 의 피크값이 더 높은 V_r 에서 더 크게 발생하였고, 이러한 응답 특성은 탠덤 실린더의 결과에서도 발생하였다.

S/D 가 3.0, 4.0에서 WIV의 영향이 가장 크게 발생하였고, S/D 가 커짐에 따라 후류 간섭의 영향이 줄어들어 S/D 가 10.0인 경우는 싱글 실린더의 결과와 유사하다. f^* 가 1.0에서 1.9로 변화하면서, 이중 공진이 발생되고 in-line의 강성이 커짐에 의해 상대적으로 후류의 영향이 감소되어 f_{ow} 가 더 높은 범위에서 발생하였다. 따라서 f^* 는 VIV와 WIV의 상대적인 영향을 결정하는 변수이다.

탠덤 실린더에 나타나는 wake shielding 현상은 $C_{L,mean}$ 뿐만 아니라 $C_{L,STD}$ 도 줄이게 된다. 상류 실린더의 움직임으로 인해 발생하는 실린더 사이의 위상 차는 상류 실린더가 고정된 경우에 비해 낮은 V_r 에서 A_{YRMS}/D 의 피크를 발생시켰다. 또한 상대적으로 불규칙적인 응답이 발생하였으며, A_{XRMS}/D 의 응답도 크게 발생하였다. 따라서 상류 실린더의 움직임으로 인한 WIV의 촉진과 함께 동시에 발생하는 f_{ov} 와 f_{ow} 는 싱글 라이저보다 다수의 라이저 배치 상태에서 더 심각한 피로 문제를 유발시킬 수 있다.

Reference

- Assi, G. R. S., Meneghini, J. R., Aranha, J. A. P., Bearman, P. W., Casaprima, E., 2006. Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 22(6), 819-827.
- Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Kitney, N., 2009. Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 25(4), 666-675.
- Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Meneghini, J. R., 2010. On the wake-induced vibration of tandem circular cylinders: the vortex interaction excitation mechanism. *Journal of Fluid Mechanics*, 661, 365-401.
- Assi, G. R. S., Freire, C. M., Korkischko, I., Srinil, N., 2012. Experimental investigation of the flow-induced vibration of a curved circular cylinder. *Proceedings of the 10th International Conference on Flow-Induced Vibration and Noise*, Dublin, Ireland.
- Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Carmo, B. S., Meneghini, J. R., Sherwin, S. J., Willden, R. H. J., 2013. The role of wake stiffness on the wake-induced vibration of the downstream cylinder of a tandem pair. *Journal of Fluid Mechanics*, 718, 210-245.
- Assi, G. R. S., 2014. wake-induced vibration of tandem and staggered cylinders with two degrees of freedom. *Journal of Fluids and Structures*, 50, 340-357.
- Bearman, P. W., 2011. Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations.

- Journal of Fluids and Structures, 27(5), 648-658.
- Blevins, R. D., 1990. Flow-induced vibration. Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- Blevins, R. D., 2005. Forces on and Stability of a cylinder in a wake. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 127(1), 39-45.
- Blevins, R. D., Wu, M., 2007. Investigation of Interference between Upstream and Downstream cyclinders in a Current for the HRTs and Jumpers with FPSO application. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.
- Blevins, R. D., Coughran, C.S., 2009. Experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, and Reynolds number. Journal of Fluids Engineering, 131(10), 101202
- Chaplin, J. R., Batten, W. M. J., 2014. Simultaneous wake-and vortex-induced vibrations of a cylinder with two degrees of freedom in each direction. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 136(3), 031101.
- Dahl, J. M., Hover, F. S., Triantafyllou, M. S., Oakley, O.H., 2010. Dual resonance in vortex-induced vibrations at subcritical and supercritical Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics, 643, 395-424.
- Det Norske Veritas, 2010. Recommended Practice DNV-RP-F204 riser Fatigue, DNV.
- Hover, F. S., Triantafyllou, M. S., 2001. Galloping response of a cylinder with upstream wake interference. Journal of fluids and structures, 15(3), 503-512.
- Igarashi, T., 1981. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. Bulletin of JSME, 24(188), 323-331.
- Jauvtis, N., Williamson, C.H.K., 2004. The effect of two degrees of freedom

- on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics*, 509, 23–62.
- Korkischko, I., Meneghini, J. R., 2010. Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes. *Journal of Fluids and Structures*, 26(4), 611–625.
- Kim, S. W., Lee, S. J., Park, C. Y., Kang, D. H., 2016. An experimental study of a circular cylinder's two-degree-of-freedom motion induced by vortex. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(4), 330–343.
- Morse, T. L., Govardhan, R. N., Williamson, C. H. K., 2008. The effect of end conditions on the vortex-induced vibration of cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 24(8), 1227–1239.
- Srinil, N., Zanganeh, H., Day, A., 2013. Two-degree-of-freedom VIV of circular cylinder with variable natural frequency ratio: Experimental and numerical investigations. *Ocean Engineering*, 73, 179–194.
- Stappenbelt, B., Lalji, F., Tan, G., 2007. Low mass ratio vortex-induced motion. *Proceedings of the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Gold Coast, Australia. 1491–1497.
- Wu, M., Saint-Marcoux, J. F., Blevins, R. D., Quiggin, P., 2008. Innovative 3-D Implementation of riser wake Interference Assessment. In *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Zdravkovich, M. M., 1977. REVIEW—review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements. *Journal of Fluids Engineering*, 99(4), 618–633.
- Zdravkovich, M. M., 1988. Review of interference-induced oscillations in flow

past two parallel circular cylinders in various arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28(1), 183-199.

Zhou, Y., Yiu, M. W., 2006. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 548, 17-48.

