



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

OpenFOAM을 이용한 catenary 계류시스템의 준정적 해석 프로그램 개발

Development of quasi-static analysis program
for a catenary mooring system using OpenFOAM



2017년 8월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

최 준 혁

본 논문을 최준혁의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 이 성 욱 (인)

위 원 공학박사 이 승 재 (인)

위 원 공학박사 조 효 제 (인)

2017년 8월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 최근 연구동향	2
1.3 연구내용	2

2. 준정적 해석프로그램의 개발

2.1 지배방정식	3
2.2 6자유도 운동	4
2.3 부유체와 계류 시스템의 연성알고리즘	5
2.4 해석알고리즘	8
2.5 파랑조건의 정의	9
2.6 격자민감도 해석	10

3. 모형실험

3.1 실험조건	12
3.2 주요 제원	13
3.3 6자유도 운동 계측 장비 및 장력계	17
3.4 운동 계측 장비 변위 일치도	20

4. 포텐셜 기반의 연성해석	
4.1 부유체 운동	24
4.2 부유체와 계류 시스템간의 연성해석	24
5. 결과 비교	
5.1 정적평형과 초기장력	26
5.2 부유체의 거동과 계류장력	29
6. 결론	
Reference	46



List of Tables

Table 1 Regular wave condition I	9
Table 2 Regular wave condition II	9
Table 3 Main particulars of barge	13
Table 4 Main particulars of mooring line	15



List of Figures

Fig. 1 Coupled analysis diagram	5
Fig. 2 Fairlead & Anchoring in local plane	7
Fig. 3 Flowchart of solving algorithm	8
Fig. 4 Mesh sensitivity test	10
Fig. 5 Computational mesh of domain	11
Fig. 6 Dimensional ocean wave basin	12
Fig. 7 Barge model front view	14
Fig. 8 Barge model side view	14
Fig. 9 Mooring line shape & Lay-out	16
Fig. 10 Reflective marker	17
Fig. 11 3D Displacement meter	17
Fig. 12 Motion separation method	18
Fig. 13 Tension meter	19
Fig. 14 Dynamic strain amplifier	19
Fig. 15 Static displacement-correlation for Surge	20
Fig. 16 Static displacement-correlation for Sway	21
Fig. 17 Static displacement-correlation for Heave	21
Fig. 18 Model rotation shape for calibration	22
Fig. 19 Static displacement-correlation for Pitch	23
Fig. 20 Top view in Orcaflex	25
Fig. 21 Side view in Orcaflex	25
Fig. 22 Equilibrium profile	26
Fig. 23 Initial tension at fairlead	27
Fig. 24 Effective tension at Line 1 and Line 3 in static offset test	28
Fig. 25 Time history of Heave, Pitch motion response (Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)	29
Fig. 26 Measured and predicted Heave, Pitch motion characteristics	30
Fig. 27 Time history of Surge motion response (Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)	31
Fig. 28 Surge response spectrum	33

List of Figures

Fig. 29 Time history of tension response (Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)	34
Fig. 30 Mean & Maximum tension	35
Fig. 31 Time history of Heave, Pitch, Surge motion response (Period = 1.8s, Amplitude = 2cm)	36
Fig. 32 Time history of Heave, Pitch, Surge motion response (Period = 1.0s, Amplitude = 2cm)	37
Fig. 33 Time history of tension response (Period = 1.8s, Amplitude = 2cm)	38
Fig. 34 Time history of tension response (Period = 1.0s, Amplitude = 2cm)	39
Fig. 35 Spectrum of line tension (Period = 1.8s, Amplitude = 1.0cm)	40
Fig. 36 Spectrum of line tension (Period = 1.8s, Amplitude = 2.0cm)	40
Fig. 37 Spectrum of line tension (Period = 1.0s, Amplitude = 1.0cm)	41
Fig. 38 Spectrum of line tension (Period = 1.0s, Amplitude = 2.0cm)	41
Fig. 39 Comparison of line shape	42
Fig. 40 Line displacement of x-y plane	43

Development of quasi-static analysis program for a catenary mooring system using OpenFOAM

Choi, Jun Hyeok

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

Abstract

Generally, global performance analysis in offshore platforms is calculated by potential based numerical tools which neglect hydrodynamic viscous effects. In comparison with potential theory, CFD(Computational Fluid Dynamics) methods can take into account viscous effects by solving the Navier-stokes equation using the finite-volume method. For the FVM(Finite Volume Method) numerical analysis, the Open-source Field Operation and Manipulation(OpenFOAM) C++ libraries are employed. In this study, in order to apply CFD for global performance analysis of a hull-mooring coupled system, we have developed a numerical wave basin to analyze global performance problem of a floating body with catenary mooring system under regular wave condition. Mooring system is modeled using catenary equation and it is solved in quasi-static condition which excludes dynamics of mooring lines such as inertia and drag effects. To demonstrate the capability of a numerical basin, the global performance of a barge with 4 mooring lines was simulated under regular wave conditions. The simulation

results were compared to the measurements from the model tests carried out in two dimensional wave basin in KMOU(Korea Maritime and Ocean University) and analysis results from a commercial mooring analysis program, Orcaflex. The comparison includes wave elevation, motion of the barge, tension in mooring lines. The study concludes a good agreement between results from developed CFD-based numerical calculation, model tests, and commercial software.

KEY WORDS: Hydrodynamics 유체동역학, Mooring system 계류 시스템, Catenary equation 현수선 방정식, Quasi-static 준정적해석, Viscous effects 점성 효과, Computational Fluid Dynamics 전산유체역학, OpenFOAM 오픈폼, Wave basin 조파수조



제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

특정 해역에 머무르며 오랜 기간 작업을 수행하는 부유식 해양구조물의 특성상 정확한 운동 응답특성 및 위치유지성능이 요구된다. 특히 위치 유지 성능은 구조물의 가동률이나 작업능률에 크게 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 파랑 중 해양구조물의 위치를 유지하기 위해 계류 시스템을 사용하였으며, 그중에서 현수선 계류(catenary mooring)를 사용하였다. 부유식 해상구조물 및 계류 시스템의 설계 및 성능 검증을 위해서는 일반적으로 모형실험 및 포텐셜(potential)기반의 수치 기법을 이용한 연구가 보편적이다. 포텐셜 기반의 수치해석 방법은 계산시간이 빠르다는 장점이 있는 반면, 유동장의 유동을 계산하기 위한 가정이 들어가게 되고 이로 인해 자연이 주는 물리적인 현상인 점성으로 기인하는 효과를 고려하지 못한다는 한계가 존재한다. 모형실험은 복잡한 자연현상을 상대적으로 잘 고려하지만, 시간적 공간적 제약이 존재하고 모형실험 환경에 의한 제약(truncated 모델, 벽면 효과, 측정의 불확실성) 등이 존재한다. 최근 전산유체역학의 발달로 인해 유체동역학(Hydrodynamics) 분야에서 모형실험의 한계를 보완하고 포텐셜 기반의 수치해석과 비교하여 더욱 정도 높은 해석을 위한 접근이 가능해졌다. 이로부터 본 연구에서는 CFD를 이용하여 입사파에 따른 부유체의 운동특성과 내항성 문제에 대해 접근하고자 하였다.

1.2 최근 연구동향

부유식 해상구조물 및 계류 시스템의 설계 및 성능 검증을 위해서는 일반적으로 모형실험 및 포텐셜(potential)기반의 수치 기법을 이용한 연구가 보편적이다. 관련 연구로는 S.Y.Hong (1988)은 계류된 반잠수식 시추선의 규칙과 중 운동특성과 현수선 계류선의 인장력을 실험을 통해 계산하고 이를 3차원 포텐셜 이론의 수치해석을 통해 비교하였다. 이를 기반으로 국내에서는 다양한 계류 시스템 관련 연구가 확장되고 있다. Sirmivas, s, Seunu et al(2016)은 부유체와 계류 시스템의 연성운동을 위한 포텐셜 기반 프로그램을 개발하고 이를 상용프로그램과 모형실험을 통해 비교 및 검증하였다.

최근 전산유체역학의 발달로 인해 유체동역학(Hydrodynamic) 분야에서 CFD를 이용하여 정도 높은 해석을 위한 접근이 가능해졌다. Wu et al(2016)은 자체 계류 시스템 모듈을 개발하고 이를 상용 CFD 프로그램인 STAR CCM+과 연성을 통한 부유체와 계류 시스템의 운동특성을 파악하였다. 즉, CFD를 이용하여 유체동역학적 현상에 대한 접근이 최근 큰 이슈가 되고 있다.

1.3 연구내용

본 연구에서는 현수선 계류 시스템의 준정적 해석 라이브러리를 개발하고 이를 오픈소스 CFD 프로그램인 OpenFOAM(Open-source Field Operation and Manipulation)과의 연성을 통해 부유체와 계류 시스템 간의 양방향 연성 모듈을 개발하였다. 여기서 계류선의 관성과 항력 효과는 고려되지 않았다. 개발된 모듈에 대한 비교 및 검증을 위해 2차원 조파수조를 이용한 모형실험과 상용프로그램인 Orcaflex를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

제 2 장 준정적 해석프로그램의 개발

2.1 지배방정식

본 유동장의 유체는 비압축성·점성유체이며 유동장내의 유동에 대한 속도와 압력을 계산하기 위해 연속방정식과 Navier-stokes 방정식을 사용하였다. 각각의 방정식은 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u_m u_m) - \mu_m \nabla^2 u_m = -\nabla p + \rho g \quad (2)$$

여기서 u 는 유동장의 유체속도, ρ 는 밀도, t 는 시간, p 는 압력, μ 는 점성계수, g 는 중력가속도, 아래 첨자 m 은 물과 공기로 혼합된 유체의 물성치를 나타낸다. 유체 간의 구분은 격자 내에 차지하는 체적비율인 α 를 통해 자유수면을 수치적으로 표현하는 VOF 기법을 사용하였다. 격자가 물로 완전히 채워진 경우 $\alpha = 1$, 공기로 완전히 채워진 경우 $\alpha = 0$, 자유수면의 체적비율은 $0 \leq \alpha \leq 1$ 로 나타낸다. 두 유체의 밀도와 점성에 관한 비율은 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$\rho(\alpha) = \rho_w \alpha + \rho_a (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$\mu(\alpha) = \mu_w \alpha + \mu_a (1 - \alpha) \quad (4)$$

여기서 아래 첨자 a 는 공기 w 는 물을 각각 의미하며 유동장내에서 유동에 흐름에 따른 자유수면을 계산하기 위한 변수 α 의 변화는 이송방정식인 (5)와 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_m) + \nabla \cdot (\alpha\rho_m u_m) = 0 \quad (5)$$

2.2 6자유도 운동

강체로 가정한 부유체의 6자유도 운동은 다음과 같다.

$$(F_{CG})_i = m \frac{d^2(x_{CG})_i}{dt^2} = m \ddot{x}_{CG} \quad (6)$$

$$(M_{CG})_i = \frac{d}{dt} (I_{ij} \frac{d(\theta_{CG})_i}{dt}) = I_{ij} \ddot{\theta}_{CG} \quad (7)$$

식 (6)은 x, y, z 방향의 병진 운동 방정식이고, 식 (7)은 x, y, z 축에 대한 회전 운동 방정식이다. m 과 I_{ij} 는 각각 부유체의 질량과 관성모멘트이고 \ddot{x} 와 $\ddot{\theta}$ 는 부유체의 병진, 회전 방향의 가속도 성분 변화량을 나타낸다. x_{CG}, θ_{CG} 는 각각 부유체의 병진운동과 회전운동 변위를 나타내며 F_{CG} 와 M_{CG} 는 각각 부유체의 무게 중심에 작용하는 병진 운동과 회전운동의 힘과 모멘트를 나타낸다. F_{CG} 와 M_{CG} 는 식 (8), (9)와 같이 세 개의 성분으로 나눌 수 있다.

$$F = F_S + F_D + F_M \quad (8)$$

$$M = M_S + M_D + M_M \quad (9)$$

병진운동을 기준으로 F_C 는 정적 유체 하중(Hydrostatic force), F_D 는 동적 유체 하중(Hydrodynamic force), F_M 는 계류선에 의한 장력(Mooring line force)을 의미한다. F_M 은 현수선 계류를 적용하였으며 계류선에 작용하는 관성력과 항력에 의한 효과는 고려하지 않았다. 시간 영역에서의 수치적분은 2차 Adams-Moulton을 사용하여 계산하였다.

2.3 부유체와 계류 시스템의 연성알고리즘

Fig. 1에서는 입사파, 부유체, 계류 시스템 간의 상관관계에 따른 모식도를 나타낸다. 입사파는 선형규칙파이고, 파랑으로 야기된 부유체의 표류운동으로부터 위치제어를 위해 현수선 형태의 계류 시스템을 적용하였다. 즉, 시간 영역에서 파랑 중 부유체의 거동에 따른 페어리드(fairlead) 좌표가 현수선 계류 시스템 라이브러리(library)의 입력값이 되고 부유체의 표류운동 제어를 위한 계류선의 장력이 현수선 계류 시스템 라이브러리의 출력값이 되는 알고리즘이다.

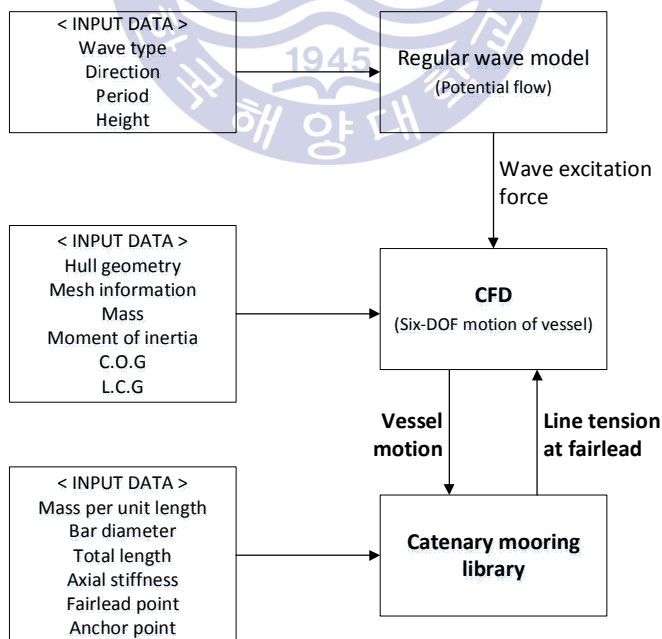


Fig. 1 Coupled analysis diagram

적용된 현수선 방정식은 식 식(10), (11)와 같다.

$$x(l_s) = \frac{TH}{w} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{TV + w \cdot l_s}{TH} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{TV}{TH} \right) \right] + \frac{TH \cdot l_s}{K} \quad (10)$$

$$z(l_s) = \frac{TH}{w} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{TV + w \cdot l_s}{TH} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{TV}{TH} \right)^2} \right\} + \frac{TV \cdot l_s}{K} + \frac{w \cdot l_s^2}{2K} \quad (11)$$

여기서 l_s 는 해저면까지의 계류선 길이(suspend length), $x(l_s)$, $z(l_s)$ 는 해저면까지의 계류선 길이에 따른 노드(node)의 x 방향과 z 방향의 변위, TH 와 TV 는 수평, 수직 방향의 장력, w 는 계류선의 단위 길이 당 무게, K 는 계류선의 축방향 강성을 의미한다. 매 시간 간격마다 계류선의 해저면 접촉지점(touchdown point)과 해저면까지의 계류선 길이를 계산하고, 이로부터 현수선 방정식을 이용하여 전체 계류 시스템의 정적 평형상태 형상과 페어리드에 작용하는 장력을 계산한다. 여기서, x , z 방향의 정적 평형상태의 계류선 형상 및 장력을 나타내는 식 (10), (11)을 만족시키기 위해 비선형 수치해석 방법인 Newton-raphson & Jacobian 방법을 이용하였다. 수치해석을 위한 과정은 다음과 같이 3가지 단계를 따른다.

step. 1

식 (10), (11)을 각각 $f_{x,z}(\alpha_n)$ 의 함수로 재배열한다. x' 은 계류선의 로컬 평면에서의 수평 방향의 좌표를 의미하며, z 는 수심 방향의 좌표를 의미한다.

$$f_x(\alpha_n) = \frac{TH}{w} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{TV + w \cdot l_s}{TH} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{TV}{TH} \right) \right] + \frac{TH \cdot l_s}{K} - x(l_s) \quad (12)$$

$$f_z(\alpha_n) = \frac{TH}{w} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{TV + w \cdot l_s}{TH} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{TV}{TH} \right)^2} \right\} + \frac{TV \cdot l_s}{K} + \frac{w \cdot l_s^2}{2K} - z(l_s) \quad (13)$$

step. 2

Newton raphson & Jacobian 방법을 이용하여 매 시간 간격 마다 변화하는 페어리드 좌표로부터 계류선의 장력을 계산하기 위한 수치해석을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} TH_{n+1} \\ TV_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TH_n \\ TV_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial (TH)} & \frac{\partial f_1}{\partial (TV)} \\ \frac{\partial f_2}{\partial (TH)} & \frac{\partial f_2}{\partial (TV)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot f \left(\begin{bmatrix} \delta_{TH_n} \\ \delta_{TV_n} \end{bmatrix} \right)$$

$$\text{단 } f_{x,z}(\alpha_n) = \begin{bmatrix} \delta_{TH_n} \\ \delta_{TV_n} \end{bmatrix} \leq 10e^{-7}$$

step. 3

좌표변환 단계이다. 앞서 계산된 TH , TV 는 페어리드와 앵커링 지점이 이루는 로컬평면에서의 수평, 수직 방향의 장력을 의미한다. Fig. 2는 z 방향을 수심 방향 기준으로 계류선의 x - y 평면을 나타내는데, 앵커링 지점이 고정된 환경에서 일직선상 거리가 동일한 원주에서의 페어리드 장력은 같다는 원리를 통해 전역좌표계로 좌표변환을 수행하였다.

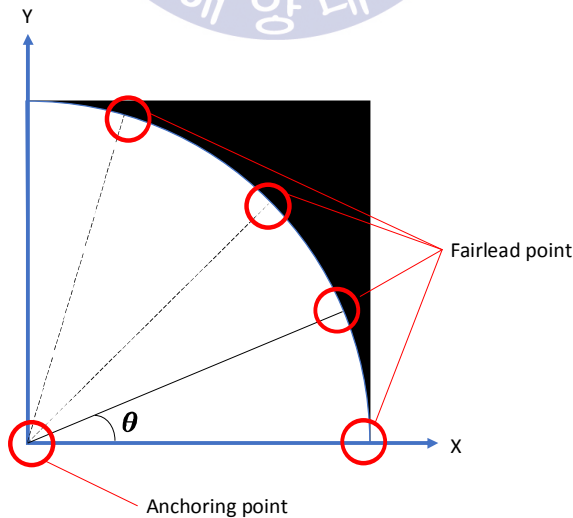


Fig. 2 Fairlead & Anchoring in local plane

2.4 해석알고리즘

유체의 VOF 이송 방정식과 지배방정식은 유한 체적법(Finite Volume Method)에 의하여 이산화 된다. 지배방정식 중 시간 항은 1차 정확도의 Euler scheme, 공간 항은 2차 정확도의 Linear upwind scheme을 사용하였다. 속도와 압력의 연성을 위해 SIMPLE 알고리즘과 PISO 알고리즘을 결합한 PIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 수치해석 과정은 Fig. 3과 같다.

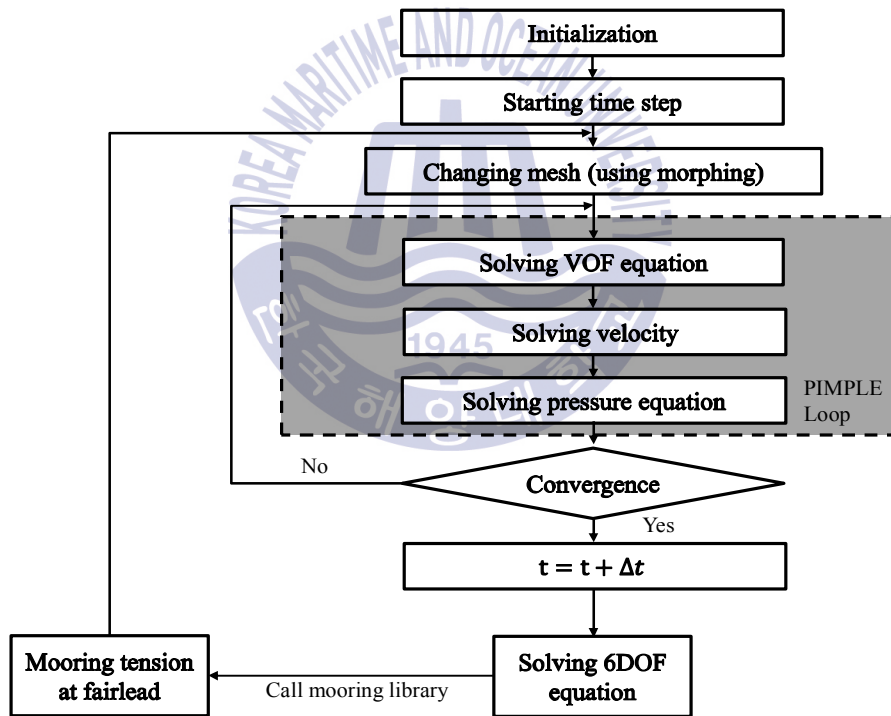


Fig. 3 Flowchart of solving algorithm

2.5 파랑조건의 정의

해석 도메인은 $25m(L) \times 1m(B) \times 1m(D)$ 로 모델링 하였다. 파랑의 수치 오차를 고려하여 대상 부유체는 파랑 조파가 시작되는 경계면으로부터 한 파장 떨어진 곳에 위치하며 유동장의 앞, 뒤, 양옆의 경계면으로부터 파의 감쇠 영역을 설정하여 벽면효과를 최소화하도록 설정하였다. 입사파의 방향은 선수파이며 진폭의 크기에 따라 2가지 조건으로 나누어 해석을 수행하였다. 첫 번째 조건은 개발된 모듈에 대한 비교 및 검증을 위해 비선형성을 최소화하고자 입사파의 파경사각을 3° 미만으로 선정하였으며 Table 1과 같다. 두 번째 조건은 상대적 대 파고에 의한 부유체의 운동 및 계류선의 장력 변화를 확인하기 위해 Table 2와 같이 입사파의 진폭을 2배로 높인 조건에서 수치해석을 수행하였다.

Table 1. Regular wave condition I

Wave amplitude [cm]	Wave direction [deg]	Wave period [s]
1.0	0.0	1.0, 1.2, 1.4 1.6, 1.8, 2.0

Table 2. Regular wave condition II

Wave amplitude [cm]	Wave direction [deg]	Wave period [s]
2.0	0.0	1.0, 1.2, 1.4 1.6, 1.8

2.6 격자민감도 해석

파랑에 의한 부유체 운동 응답의 해석에 앞서 규칙파에 대한 격자 민감도 테스트를 수행하였다. Fig. 4는 주기가 1.0s인 파를 기준으로 z 방향의 격자 개수에 따른 파 진폭의 크기를 나타내고 있다. 그래프의 x축은 파 진폭 방향으로의 격자 수를 의미하고, y축은 예측된 파 진폭을 의미한다.

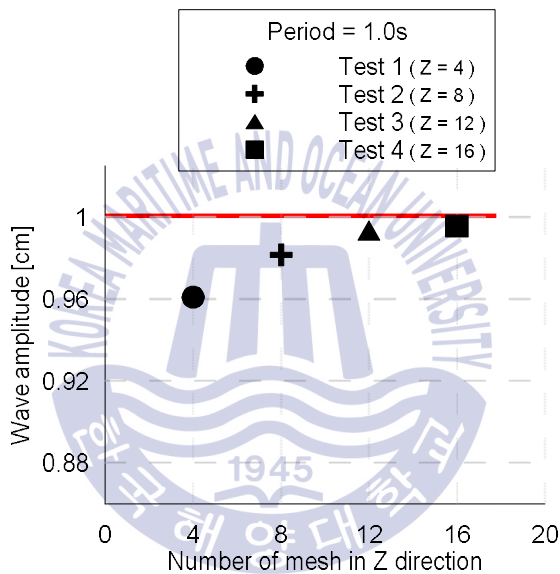


Fig. 4 Mesh sensitivity test

입력한 파 진폭과 계산된 파 진폭을 비교한 결과, 격자 크기가 가장 큰 Test1에서는 약 4%의 오차가 발생하였고, 격자 크기가 가장 작은 Test4에서는 약 0.5% 오차가 발생하였다. 격자민감도 해석으로부터 계산 정도와 계산 시간의 합리적인 절충안으로써 약 0.7%의 오차를 보이는 Test3 격자 크기를 선정하여 수치해석을 수행하였다.

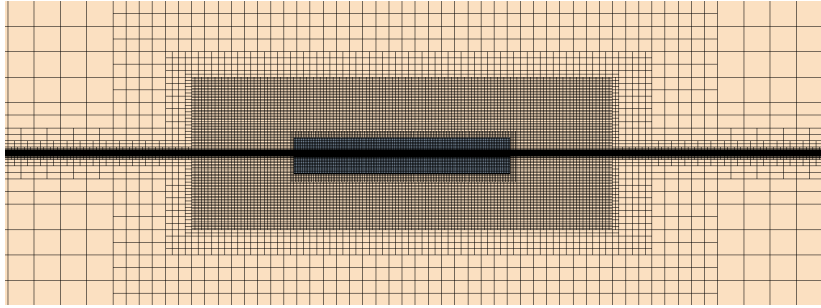


Fig. 5 Computational mesh of domain

Fig. 5는 유동장의 격자분포를 나타낸다. 자유수면의 정도 높은 계산을 위해 파가 지나가는 영역에 가장 조밀한 격자를 생성하였으며 앞서 수행한 격자 수렴도 테스트를 바탕으로 한 파장을 기준으로 x 방향 약 130개, z 방향 12개의 격자를 적용하였다. 또한, 부유체의 운동 응답의 정도를 높이기 위해 부유체 주위에 격자 조밀도를 증가시켰다. 시간 영역 계산을 위한 시간 간격은 $T(\text{주기})/200$ 초이고, 총 사용된 격자의 수는 1,300,000개이다.



제 2 장 모형실험

3.1 실험 조건

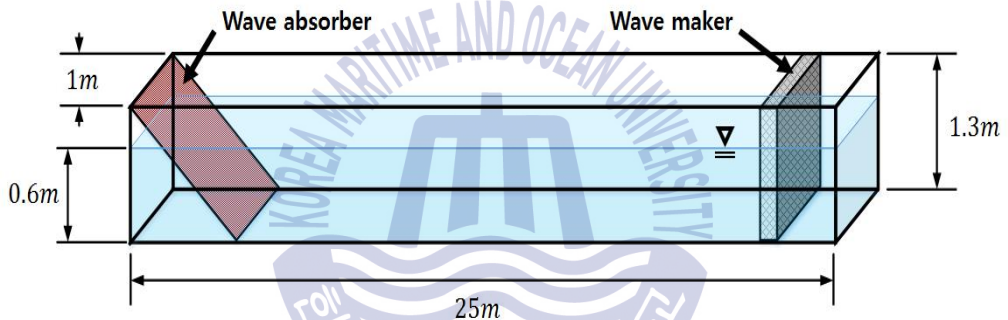


Fig. 6 Dimensional ocean wave basin

모형실험은 한국해양대학교 해양시스템연구실에서 보유하고 있는 길이 25m, 폭 1m, 깊이 1m 크기의 2차원 조파수조에서 수행되었다. 조파기는 피스톤 형식이며 구현 가능한 파의 주기는 0.5~3.0s, 파고는 2~30cm까지 발생 가능하다. 소파장치는 수조 끝단에 스펀지와 함께 그물형 소파제를 설치하여 반사파의 영향을 최소화하고자 하였다. 또한, 본 실험에서 입사파의 진폭을 측정하기 위해 servo(서보)식 파고계를 사용하였다. 서보식 파고계는 수면 측정지점에 놓인 바늘 전극과 접지 바늘이 접하고 있어 파고계와 파랑간의 간섭 없이 파고 계측이 가능하다는 장점이 있다.

3.2 주요 제원

모형실험의 목적은 개발된 CFD 모듈에 대한 비교 및 검증으로 수행되었기 때문에 대상 선형은 없으며, 제작된 모형선 제원의 기준은 이전에 같은 수조에 서 수행된 모형선의 데이터베이스를 참고하여 벽면 효과 최소화를 기준으로 제작되었다. 주요제원은 Table 3 실험 모델의 형상은 Fig. 7, 8과 같다. 바지 형상의 실험모델은 아크릴로 수밀이 가능하도록 제작하였으며, 실험모델의 안정성을 확보하기 위해 무게추를 중앙부에 위치시켰다.

Table 3. Main particulars of barge

Description	Magnitude
Length between perpendicular [<i>cm</i>]	80.0
Breadth [<i>cm</i>]	15.0
Depth [<i>cm</i>]	14.0
Draught [<i>cm</i>]	7.805
Mass [<i>kg</i>]	9.366
Vertical center of gravity [<i>m</i>]	-4.596
Vertical center of buoyancy [<i>m</i>]	-3.903
Mass radius of inertia around X-axis [<i>kg cm²</i>]	116.53
Mass radius of inertia around Y-axis [<i>kg cm²</i>]	2406.0
Mass radius of inertia around Z-axis [<i>kg cm²</i>]	2417.9



Fig. 7 Barge model front view



Fig. 8 Barge model side view

Table 4는 모형실험에 사용된 체인의 제원을 나타낸다. 실제 엔지니어링 단계의 계류선 설계과정은 다음과 같다. 우선 해양구조물 투입해역(West Africa, Gulf of Mexico, etc.)이 선정되고 그에 따른 환경 외력이 산정된다. 해양구조물이 해저 자원(Oil&Gas)을 생산하기 위한 목적이면 일반적으로 라이저(riser)를 통해 생산이 이루어지는데, 라이저는 원통형 세장체 형상이며 휨 강성(Bending stiffness)으로부터 휨 각도에 의해 손상범위가 결정된다. 따라서 라이저를 통해 안정적인 해저 자원 생산이 이루어지기 위한 부유체의 오프셋(offset)이 결정되고, 오프셋을 만족시키기 위한 계류선의 등급(R4, R4S, R5, etc.)이 결정된다. 일반적으로 페어리드에 작용하는 초기 장력은 MBL(Minimum Breaking Load)의 5~20%가 되도록 설계가 이루어진다. 하지만 본 연구에서는 보유하고 있는 장력계의 계측 범위에 의한 제약으로 인해 계류선 제원 선정에 한계가 있었다. 그러므로 실제 프로젝트의 부유체와 계류선의 무게비를 고려하여 일차적인 범위를 선정하고 보유하고 있는 장력계 센서로부터 계측이 가능한 장력의 범위를 바탕으로 제원을 선정하였다. Fig. 9와 같이 총 4개의 계류선이 선수 선미로부터 좌현, 우현으로 향하도록 배치하였고 바닥의 앵커링 지점은 무게추를 이용하여 고정하였다. 또한, 페어리드와 앵커링 지점의 수직, 수평 방향 거리 비를 의미하는 계류선반경(foot print radius)은 수심에 약 2배로 설계하였다.

Table 4. Main particulars of mooring line

Description	Magnitude
Diameter [<i>cm</i>]	0.1
Effective diameter [<i>cm</i>]	0.18
Mass per length [<i>kg/cm</i>]	0.0012
Submerged weight per length [<i>N/cm</i>]	0.001192
Elasticity [<i>N</i>]	9.366

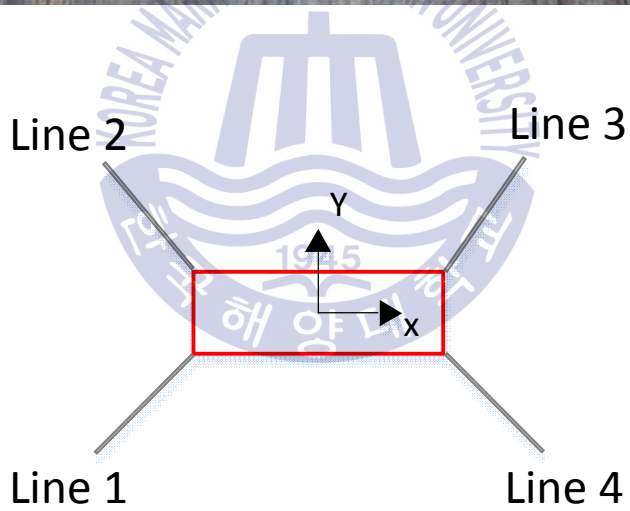


Fig. 9 Mooring line shape & Lay-out

3.3 6자유도 운동 계측 장비 및 장력계

실험수조에서 파랑에 의해 발생하는 선체 운동의 변위를 측정하기 위해 3차원 운동 응답 계측 장비를 사용하였다. 광학계를 이용하여 Fig. 10의 부유체에 부착된 마커의 운동을 5대의 트래킹(tracking) 카메라가 실시간으로 계측할 수 있도록 설정되어 있다. Fig. 11과 같이 설치된 3차원 운동 응답 계측 장비로부터 마커의 x, y, z 방향의 변위를 계측하였다. 또한, 샘플레이트(sample rate)는 20Hz로 설정하여 0.05s의 시간 간격으로 모드별 운동응답을 측정하였다.



Fig. 10 Reflective marker



Fig. 11 3D Displacement meter

계측된 반사 마커의 운동좌표를 모형선의 병진 및 회전운동으로 분리하였다. 부유체는 무게중심을 기준으로 운동한다는 가정에 따라, 순수 Surge, Heave를 분리하기 위해 Fig. 12와 같이 반사 마커로부터 무게중심까지 거리인 l_1 을 측정하였다. 운동 분리는 회전운동인 Pitch가 선행되고 병진운동인 Surge, Heave 순서로 진행되었다. 회전운동인 Pitch는 Fig. 12의 2개 마커의 상대적 회전 변위로부터 분리하였다. 정수 중 두 마커의 위치를 기준으로 입사파 중 부유체가 운동하는 과정에서 두 마커가 이루는 각도(θ)를 계산하였으며 식 (12)와 같다. 병진운동인 Surge, Heave는 계산된 반사 마커로부터 무게중심까지 거리인 l_1 와 Pitch 변위로부터 마커의 병진 변위를 선체의 무게중심으로 변환하였다. Surge 변환은 식 (13), Heave 변환은 식 (14)와 같다.

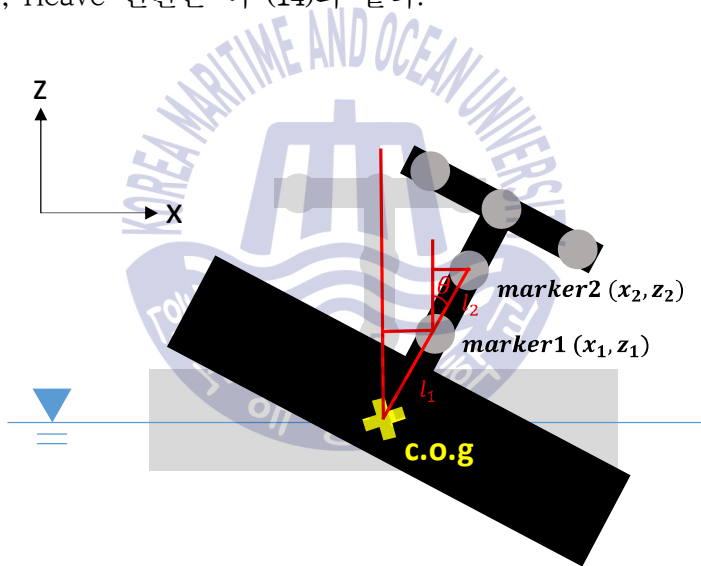


Fig. 12 Motion separation method

$$\text{atan}\left(\frac{x_1 - x_2}{z_1 - z_2}\right) = \theta \quad (12)$$

$$x_{c.o.g} = x_1 - l_1 \cdot \sin\theta \quad (13)$$

$$z_{c.o.g} = z_1 + (l_1 - l_1 \cdot \cos\theta) \quad (14)$$

장력계를 이용하여 계류선에 작용하는 장력을 계측하였다. 장력계의 재질은 알루미늄이며 Fig. 13과 같이 장력계 양 끝단에 고리를 부착하여 연결할 수 있도록 제작 하였다. 인장력 계측은 계류선과 모형선의 연결 상부에서 이루어졌다. 즉, 장력계의 한쪽은 페어리드 지점, 한쪽은 계류선을 연결하여 시간에 따른 장력을 변화를 계측하였다. 계측된 장력은 Fig. 14의 신호 증폭기(Dynamic strain amplifier)로부터 전압(voltage) 값으로 측정되며, 이를 캘리브레이션(calibration)을 통해 힘으로 환산하였다.



Fig. 13 Tension meter



Fig. 14 Dynamic strain amplifier

3.4 운동 계측 장비 변위 일치도

테스트의 목적은 모형선의 실제 움직인 거리 및 각도가 3D 변위계로부터 측정된 값과 동일한지 여부를 확인하기 위함이다. 테스트 방법은 다음과 같다. Surge, Sway 방향으로 각각 10mm씩 늘여가며 측정을 하고, Heave 방향으로는 58mm씩 늘여가며 측정을 한 후, 실제 이동한 거리와 계측된 거리 간의 비교를 수행하였다. 아래의 Fig. 15, 16, 17로부터 병진운동인 Surge, Sway, Heave 운동의 비교 결과, 평균 2.22%의 오차를 가지는 것으로 확인하였고, 높은 정도의 계측이 가능함을 확인할 수 있었다.

1. Surge

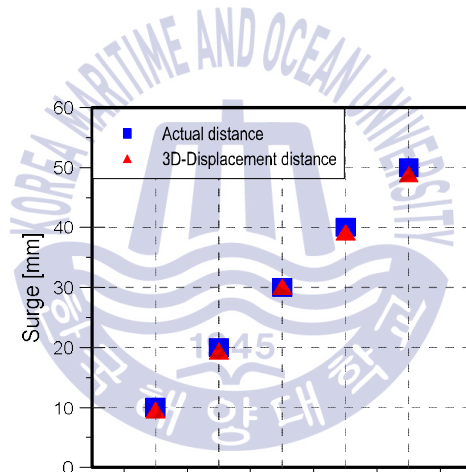


Fig. 15 Static displacement-correlation for Surge

실제 움직인 거리 (mm)	0	10	20	30	40	50
계측된 거리 (mm)	0	9.574	19.398	30.104	39.209	48.896

2. Sway

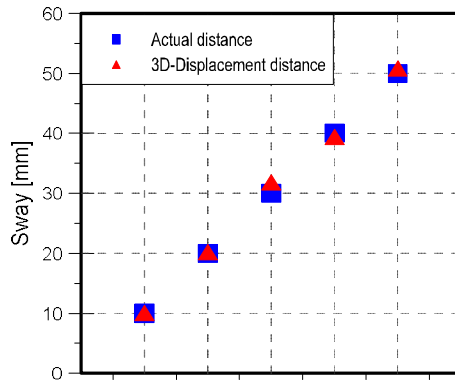


Fig. 16 Static displacement-correlation for Sway

실제 움직인 거리 (mm)	0	10	20	30	40	50
계측된 거리 (mm)	0	9.574	19.398	30.104	39.209	48.896

3. Heave

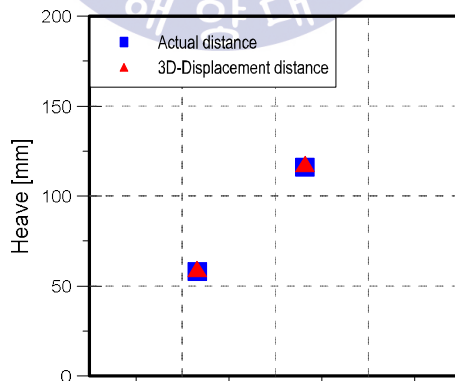


Fig. 17 Static displacement-correlation for Heave

실제 움직인 거리 (mm)	0	58	116
계측된 거리 (mm)	0	59.539	117.936

회전운동은 모형선에 특정 기울기를 부여하고 이를 디지털 각도기, 거리측정을 통한 계산, 3D 변위계를 통한 측정을 통해 비교하였다. 이 중 3D 변위계는 반사 마커의 두 점이 이루는 각도를 이용해 모형선의 회전 변위를 측정하였다.



Fig. 18 Model rotation shape for calibration

Fig. 19로부터 회전운동인 Pitch 회전 변위의 비교 결과, 세 가지 방법 간의 편차는 약 0.118deg로써 실험에 사용된 3D 변위계는 높은 정도의 계측이 가능함을 확인할 수 있다.

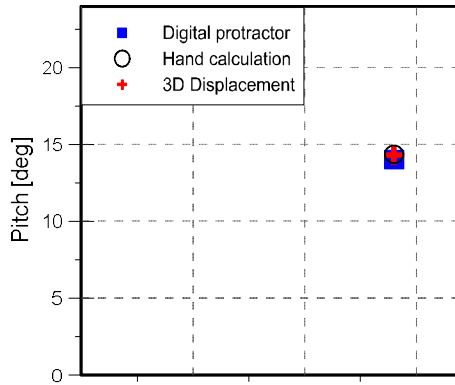
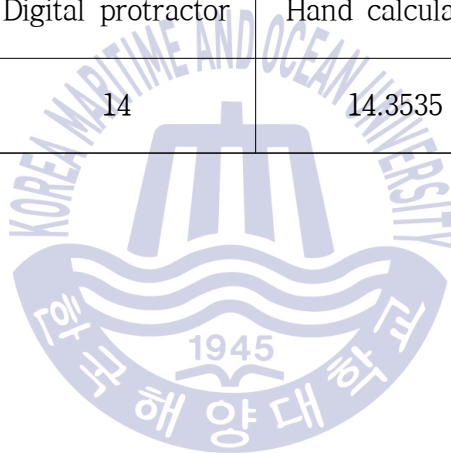


Fig. 19 Static displacement-correlation for Pitch

측정 방법	Digital protractor	Hand calculation	3D Displacement
각도 (deg)	14	14.3535	14.2947



제 4 장 포텐셜 기반의 연성해석

4.1 부유체 운동

부유체의 운동은 BEM(경계요소법) 기법을 이용하는 ANSYS AQWA로부터 계산하였다. 이상유체를 가정한 선형 포텐셜 이론을 기반으로 단위진폭을 가지는 선형파에 대한 파랑 하중 및 부유체의 운동 응답을 계산하였다. 주파수 영역에서 부가질량계수(added mass coefficient), 방사감쇠계수(radiation damping coefficient), 파진기력(wave exciting force) 등을 산출하고 이를 통해 입사파의 주파수에 대한 운동의 크기를 나타내는 진폭 응답 함수(motion RAO)를 계산하였다.

4.2 부유체와 계류 시스템간의 연성해석

FEM(유한요소법) 기법을 이용하는 상용프로그램인 Orcaflex를 통하여 부유체와 계류 시스템 간의 시간 영역 연성해석을 수행하였다. Orcaflex를 통한 수치해석은 전체 계류선의 세그먼트에 따라 노드점과 스프링의 개수가 정해지고, 이를 통해, 각 노드점에 질량을 부과하는 집중질량법(lumped mass)을 기반으로 한다. Fig. 20, 21과 같이 총 4개의 계류선이 선수 선미로부터 좌현, 우현으로 향하도록 계류선을 배치하였고 페어리드와 앵커링 지점의 수평 방향 거리와 중심의 비를 의미하는 계류선반경(foot print radius)은 2배로 설계하였다. 또한, 계류선의 양력 및 항력계수들은 DNV GL-OS-E301에서 제공하는 값들을 적용하였다.

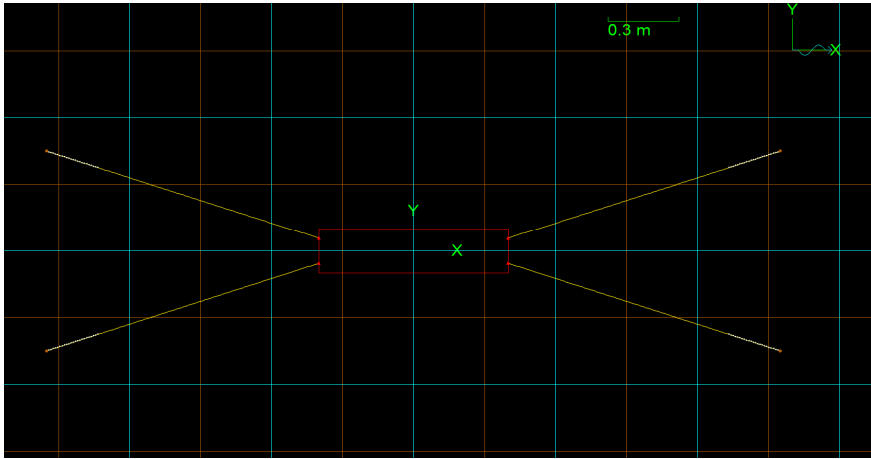


Fig. 20 Top view in Orcaflex

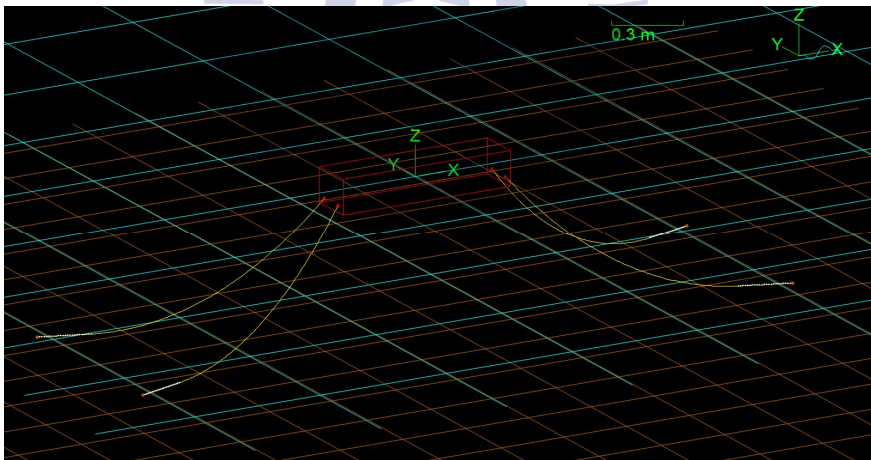


Fig. 21 Side view in Orcaflex

제 5 장 결과 비교

5.1 정적평형과 초기장력

파랑 하중을 적용하기에 앞서 정적 평형상태(static equilibrium state)에서 계류선의 형상 및 페어리드에 작용하는 장력을 비교하였다. Fig. 22는 페어리드에서 앵커링 지점까지 총 50개의 세그먼트로 나눈 계류선의 형상을 나타내고 있다. 모형실험에서는 세그먼트에 따른 계류라인의 형상을 계측하기에 한계가 있었기 때문에 OpenFOAM과 Orcaflex간의 비교를 수행하였다. 개발된 OpenFOAM과 상용프로그램인 Orcaflex 간의 전체적인 형상이 잘 일치함을 확인할 수 있다.

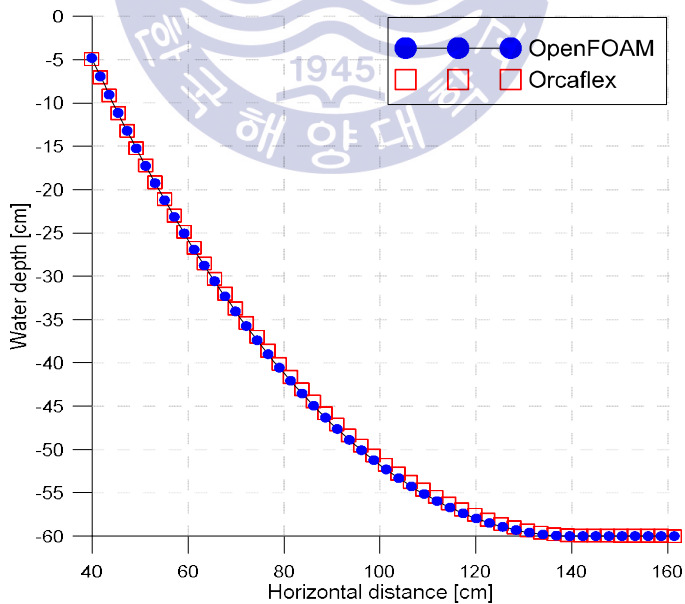


Fig. 22 Equilibrium profile

Fig. 23은 정적 평형상태에서 페어리드에 작용하는 계류선의 초기장력을 비교한 그래프이다. Line 1, Line 3은 각각 선수, 선미에 위치하여 대각선 방향에 놓인 계류선을 나타낸다. 정적 평형상태에서 현수선 방정식으로부터 계산된 OpenFOAM 계류 시스템의 초기장력은 Orcaflex와 모형실험 간에 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

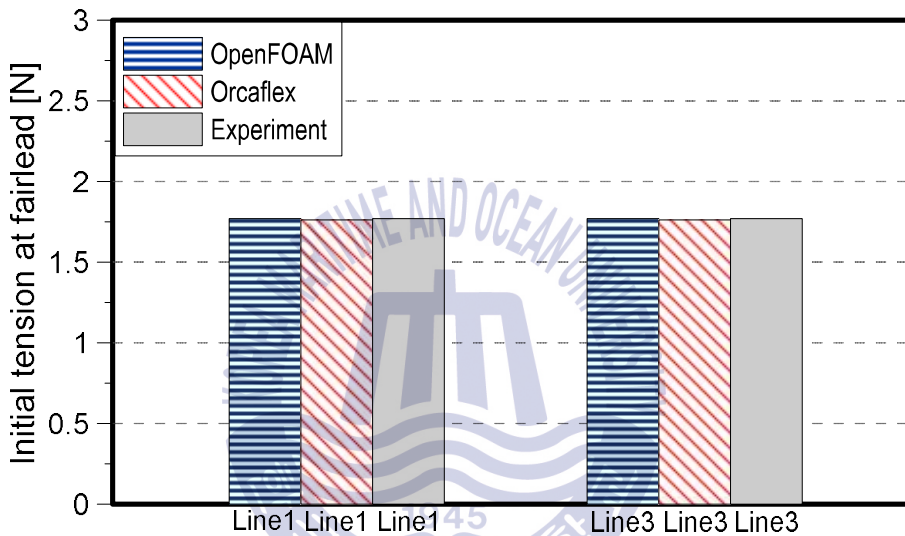


Fig. 23 Initial tension at fairlead

부유체의 오프셋(offset)에 따른 계류선의 장력 변화를 위해 static offset test(정적오프셋시험)를 수행 하였다. 정적 평형상태에서 4개의 계류선 페어리드를 고정시키고 앵커링 지점을 이동하며 계류선의 페어리드에 작용하는 장력을 비교하였다. Fig. 24로부터 현수선 방정식으로 계산한 OpenFOAM의 장력과 집중질량법 기반의 Orcaflex 간에는 같은 강성(stiffness)을 보이며 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 비교 결과로부터 입사파 중 개발된 OpenFOAM 계류시스템의 장력 변화에 대한 신뢰성을 확보하였다.

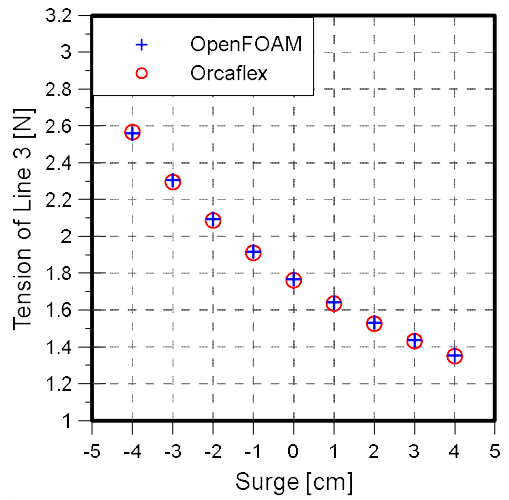
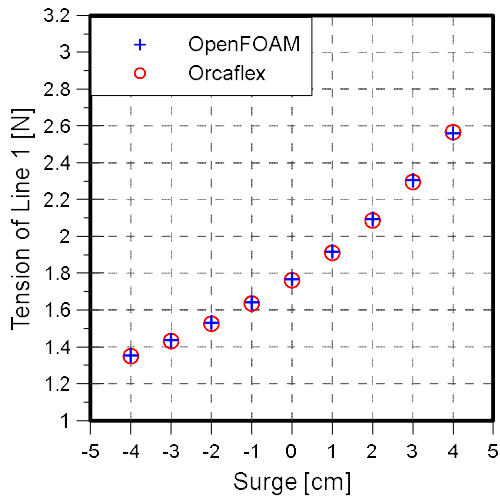
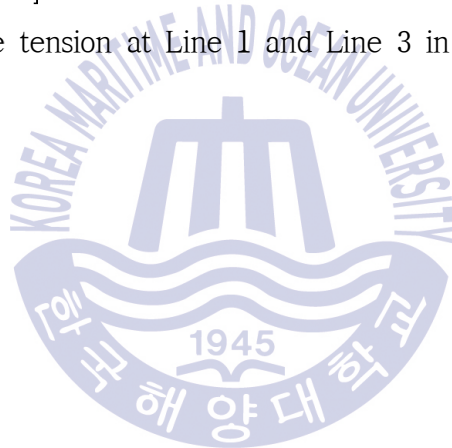


Fig. 24 Effective tension at Line 1 and Line 3 in static offset test



5.2 부유체의 거동과 계류장력

입사파의 각도가 0° (선수파)인 조건에서 입사파 주기에 따른 부유체 운동 응답 특성 및 계류선의 장력 변화에 대한 비교를 수행하였다.

Fig. 25는 진폭 1cm, 주기가 1.6s인 조건에서 OpenFOAM, 모형실험, Orcaflex로부터 계산된 부유체의 운동 응답에 대한 시계열을 나타낸다. 정량적 비교를 위해 두 수치해석과 모형실험 간의 위상(phase)을 맞추어 비교하였다. Heave와 Pitch의 경우 세 개의 시계열이 정량적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

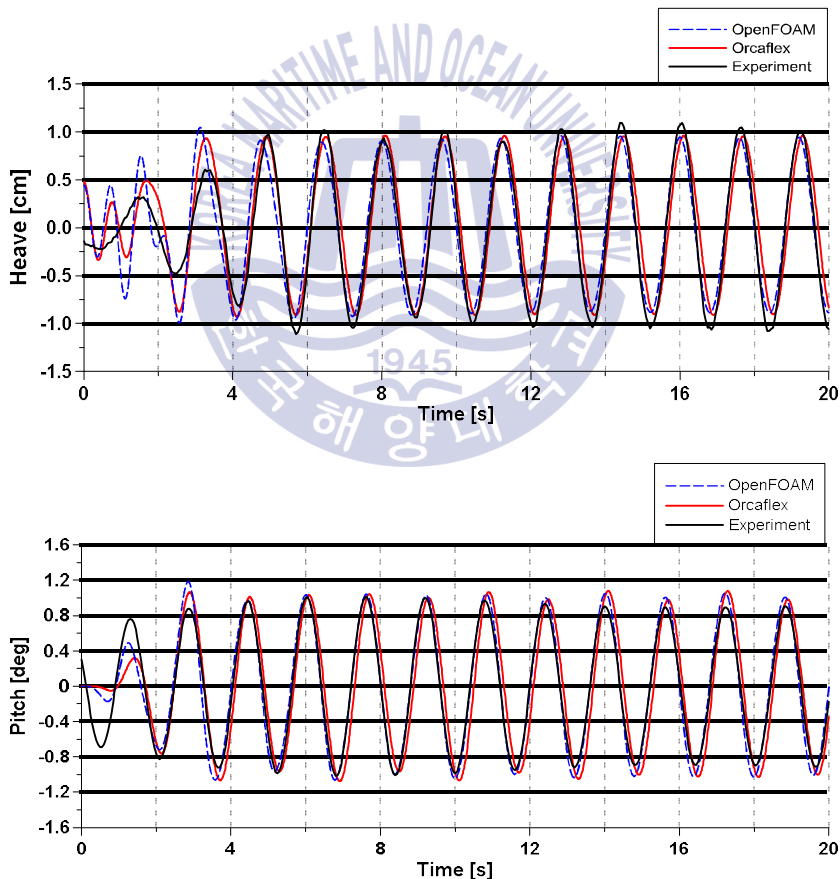


Fig. 25 Time history of Heave, Pitch motion response

(Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)

주파수 별로 Heave와 Pitch의 운동 응답을 비교하기 위해 transient motion이 진행되는 시간은 배제하고, steady motion이 진행되는 구간에서 5주기의 운동 진폭을 평균 내어 Fig. 26과 같이 나타냈다. AQWA의 결과와 Orcaflex에서 계류 라인이 연결되지 않은 부유체의 Heave, Pitch 운동의 결과가 일치하므로 Orcaflex에서의 부유체와 계류 시스템 간의 연성해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한, Orcaflex에서 계류선의 영향으로 Heave, Pitch 운동이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, OpenFOAM의 결과는 전반적인 주기에서 Orcaflex, 모형실험간에 잘 일치함을 확인할 수 있다.

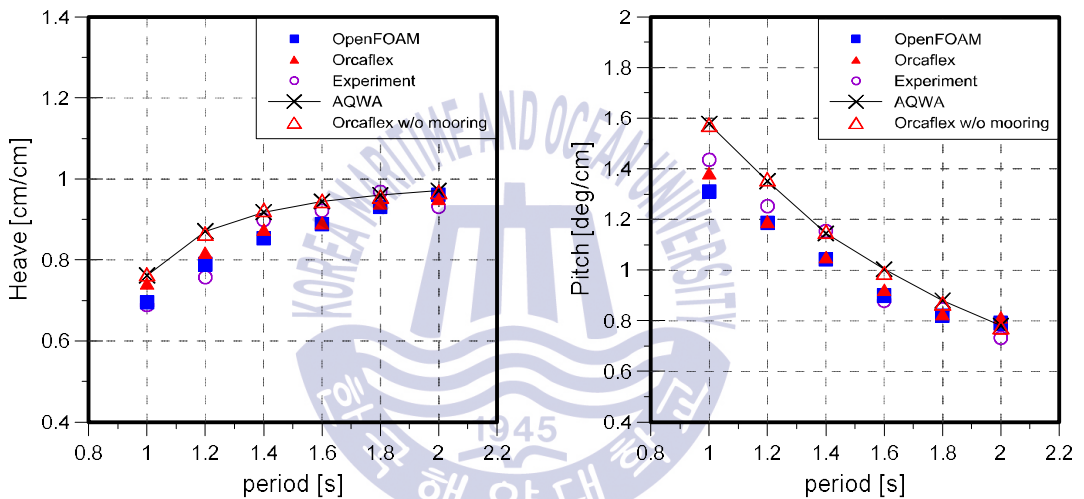


Fig. 26 Measured and predicted Heave, Pitch motion characteristics

Fig. 27은 진폭 1cm, 주기가 1.6s인 조건에서 OpenFOAM, Orcaflex, 모형실험으로부터 계산된 부유체의 Surge 운동 응답에 대한 시계열을 나타낸다. Surge 응답에서는 정량적으로 일부 상이한 결과가 나타나지만, 개발된 계류 모듈이 연결되어있는 OpenFOAM의 Surge 운동 응답은 Orcaflex, 모형실험의 결과와 정성적으로 유사한 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 또한, Surge 응답으로부터 부유체와 계류 시스템 간의 연성 운동으로부터 기인하는 하모닉(harmonic) 현상이 관측되고 있는데, 이를 해석하고자 각 주파수에 따른 시간 이력을 파워 스펙트럼으로 Fig. 28에 나타내었다.

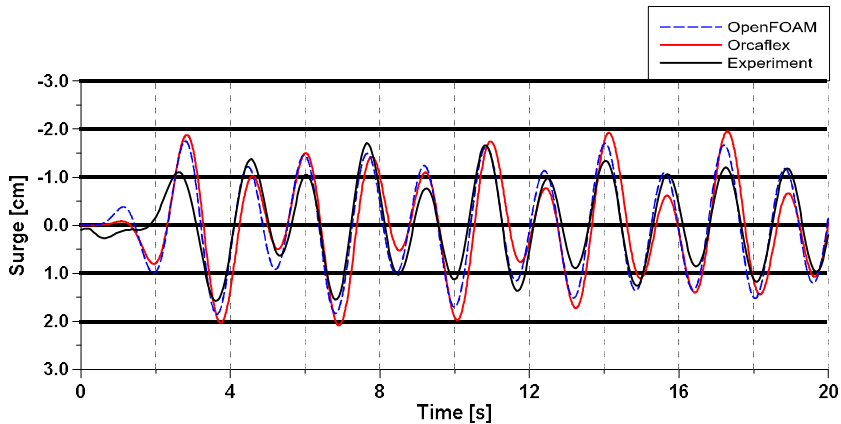
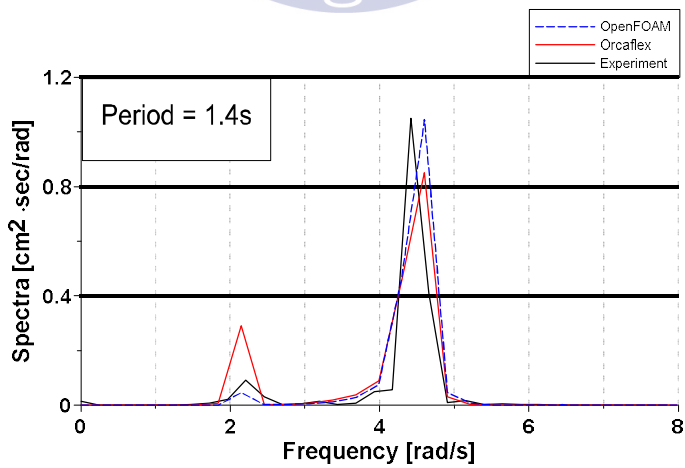
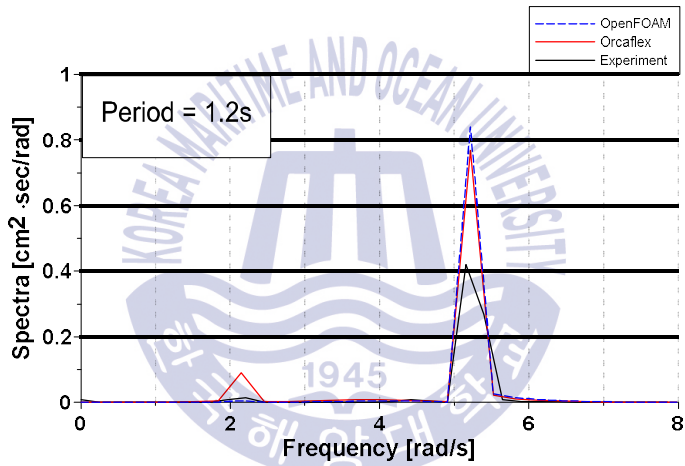
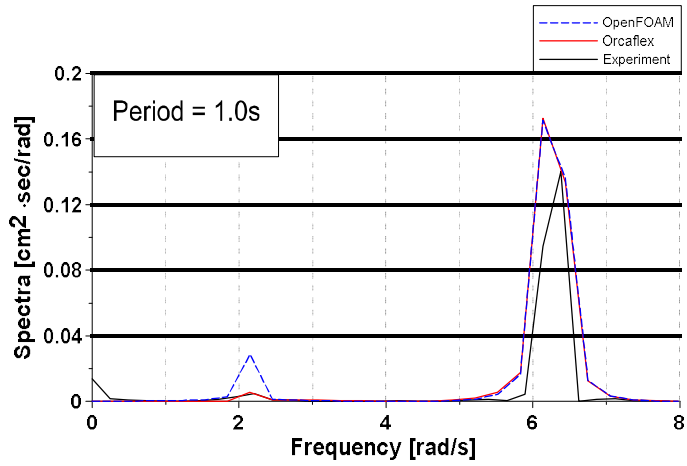


Fig. 27 Time history of Surge motion response

(Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)

Fig. 28은 1cm 진폭에서 주기에 따른 Surge 운동의 파워 스펙트럼을 나타낸다. 스펙트럼마다 2개의 피크치가 확연히 구분되어 관찰되는데 상대적으로 고주파수에 위치한 피크는 입사파의 주파수를 의미하고 저주파수인 2.2rad/s에 위치하는 고정된 피크는 계류 시스템의 고유진동수를 의미한다. OpenFOAM, Orcaflex, 모형실험 결과 간에 진폭의 차이는 존재하지만, 각각의 파 주파수와 계류 시스템의 고유진동수에 의한 피크위치는 정확히 예상하는 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 개발된 OpenFOAM 코드는 부유체와 계류 시스템 간의 양방향 연성 효과가 잘 반영되는 것을 확인할 수 있다.



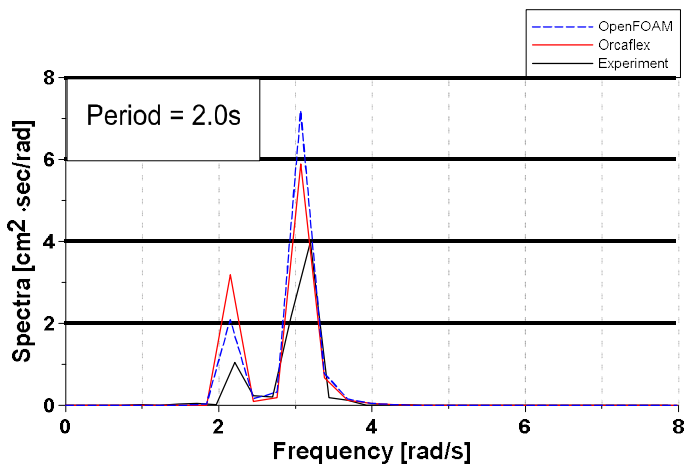
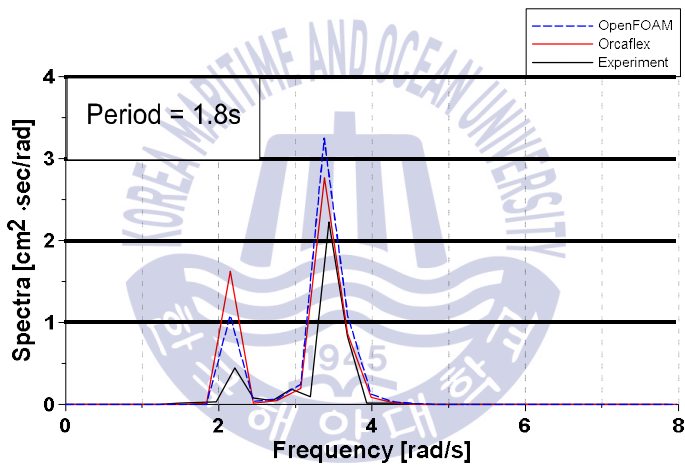
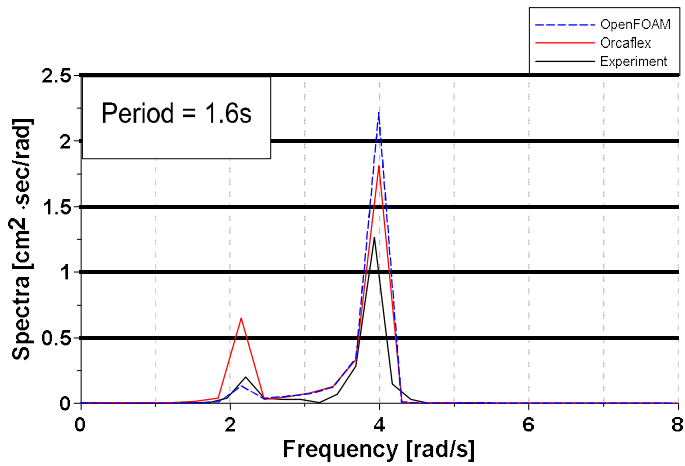


Fig. 28 Surge response spectrum

Fig. 29는 진폭 1cm, 주기가 1.6s인 조건에서의 계류선의 장력에 대한 시계열을 나타내고 있다. 각각 선수, 선미에 위치한 계류선의 장력 응답을 비교하였으며, 장력 응답은 부유체의 Surge 운동과 같은 패턴의 하모닉 현상이 관측되는 것을 확인할 수 있다.

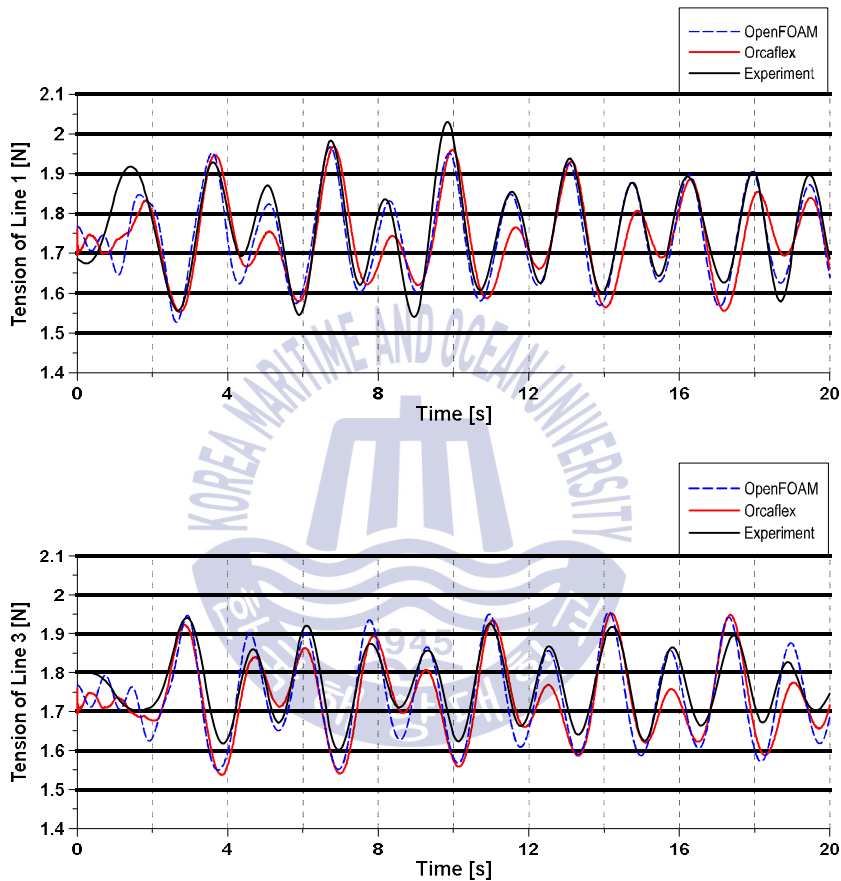


Fig. 29 Time history of tension response

(Period = 1.6s, Amplitude = 1cm)

모든 주기에서 계산 및 측정된 계류선 장력 시계열로부터 평균값과 최대값을 나타내었다. Fig. 30으로부터 장력의 평균값은 세 방법 간에 큰 차이를 보이지 않았으나 장력의 최대값은 특정 파주기에서 약간의 차이를 보이는데, 이는 개

발된 계류 시스템용 모듈이 현수선 방정식을 사용함으로써 평면 내의 운동만 표현이 가능하고, 동역학적 계류선의 거동을 표현하는데 한계가 있어서 발생하는 차이라고 판단된다. 이러한 가정을 증명하기 위해, 상대적 대 파고의 입사파를 산정하여 계류 시스템의 장력 및 거동을 확인하고자 하였다.

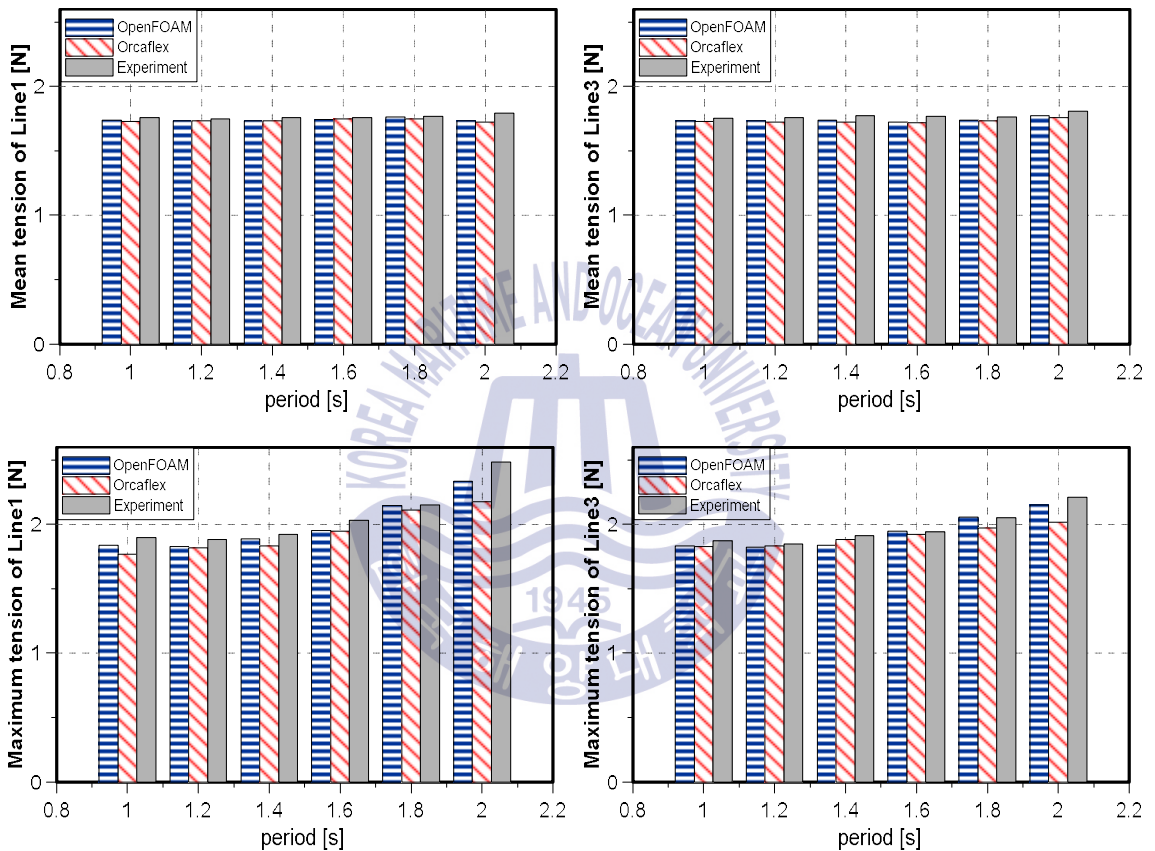


Fig. 30 Mean & Maximum tension

상대적 대파고인 진폭이 2cm, 주기는 1.0s부터 1.8s의 조건하에 OpenFOAM 결과와 Orcaflex 결과 간의 비교를 수행하였다.

Fig. 31은 주기가 1.8s, Fig. 32는 주기가 1.0s에서 각각 Heave, Pitch, Surge 운동 응답 시계열을 나타낸다. OpenFOAM과 Orcaflex의 결과는 허용 범위 내의 차이를 보이며 같은 경향을 보임을 확인하였다.

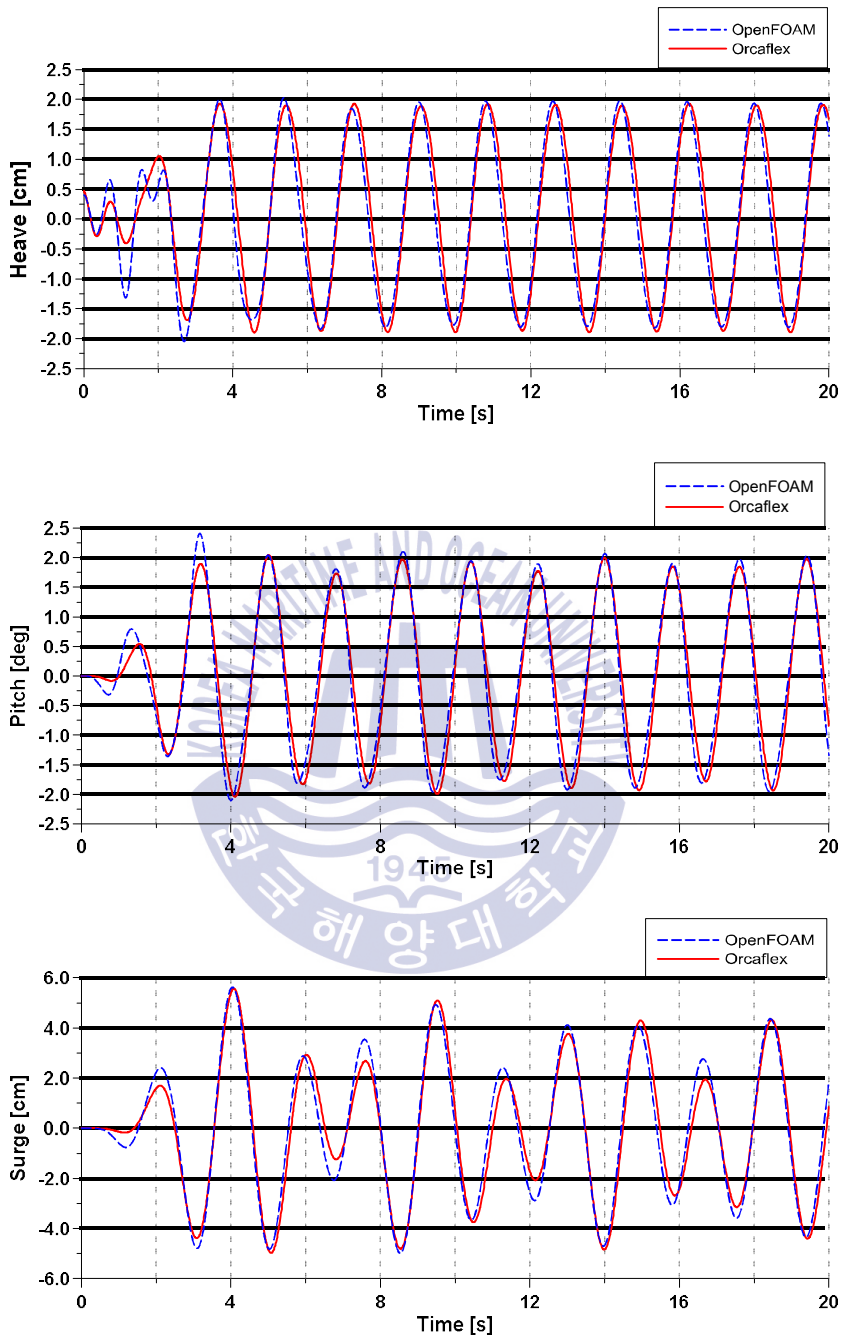


Fig. 31 Time history of Heave, Pitch, Surge motion response
 (Period = 1.8s, Amplitude = 2cm)

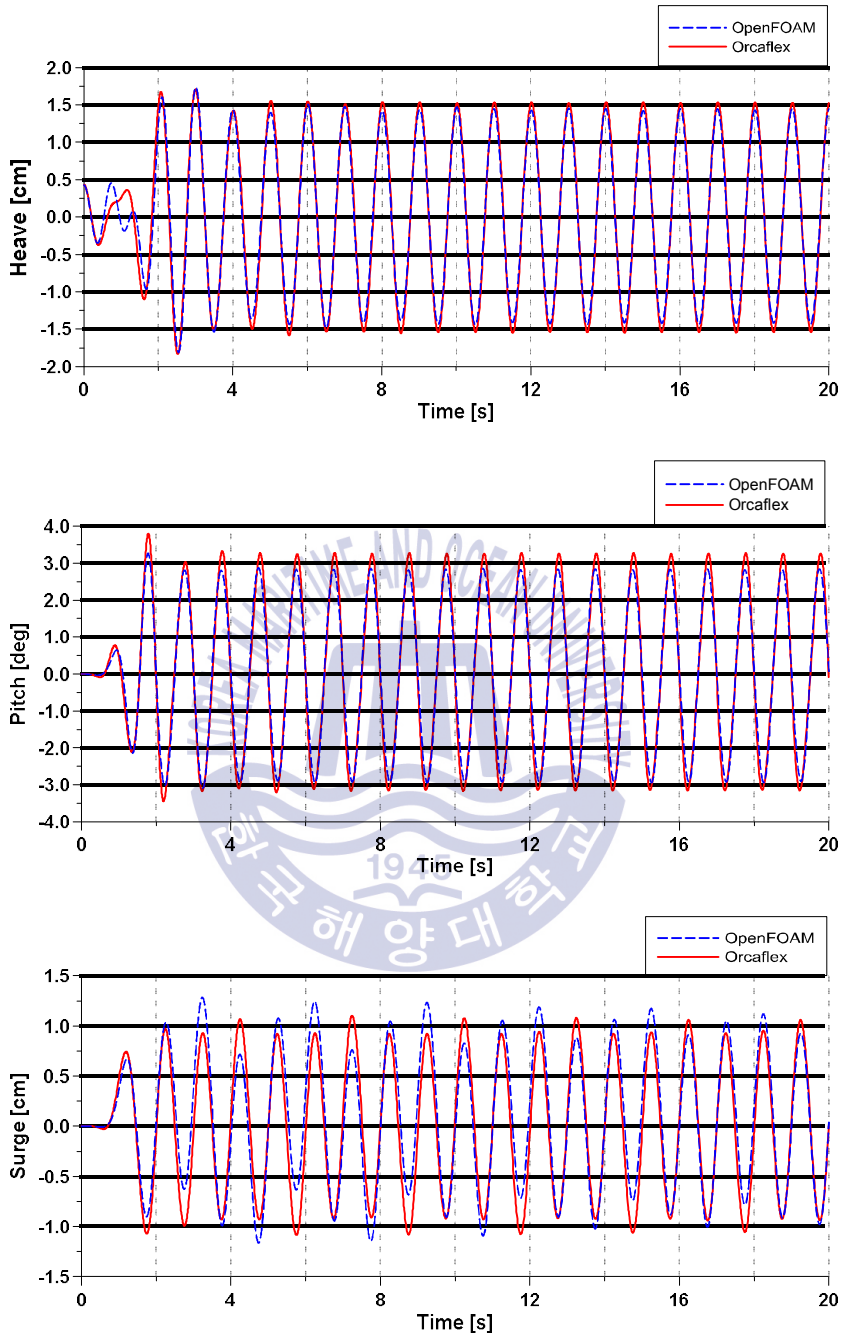


Fig. 32 Time history of Heave, Pitch, Surge motion response
(Period = 1.0s, Amplitude = 2cm)

Fig. 33은 주기가 1.8s, Fig. 34는 주기가 1.0s에서 OpenFOAM과 Orcaflex의 장력에 대한 시계열을 도시하였다. 즉, 계류선의 현수선 방정식을 사용하여 거동을 나타내는 OpenFOAM과 집중질량법 기반의 평면을 벗어나는 동역학적 거동을 나타내는 Orcaflex 결과 간의 비교를 나타낸다. 주기 1.8s의 장력 시계열은 OpenFOAM과 Orcaflex 결과 간에 같은 패턴을 나타내며 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 주기 1.0s의 장력 시계열에서는 두 수치해석 간의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. Orcaflex의 장력 시계열에서는 입사파 주파수의 피크 지점에서 추가적인 이웃한 피크가 생성되는 것을 관측할 수 있다.

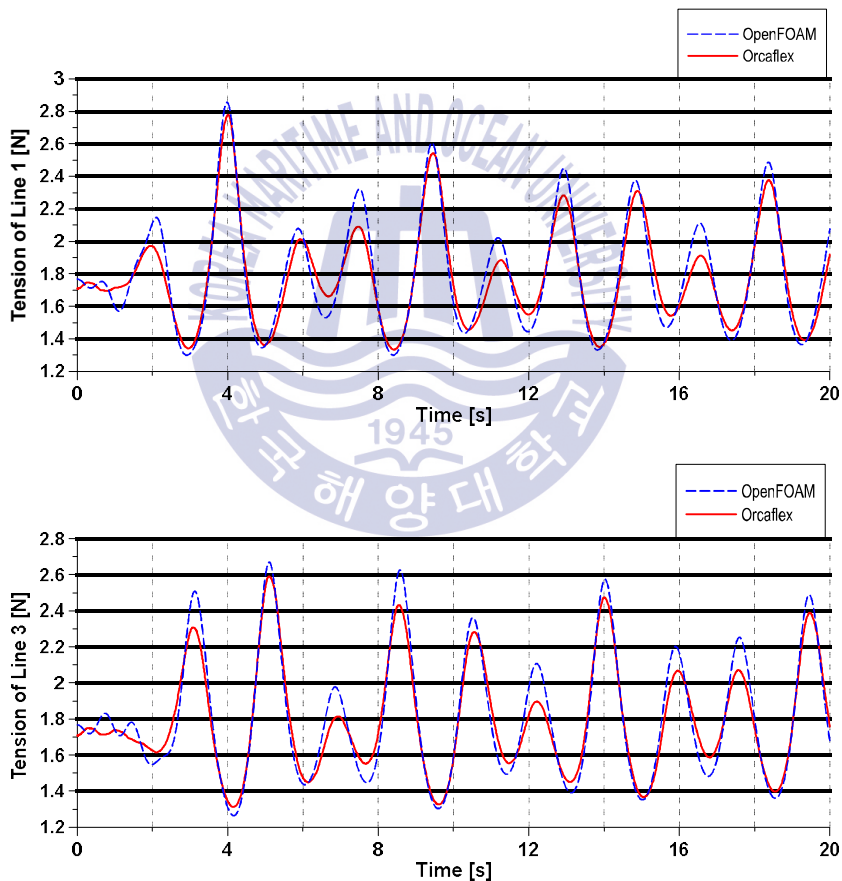


Fig. 33 Time history of tension response

(Period = 1.8s, Amplitude = 2cm)

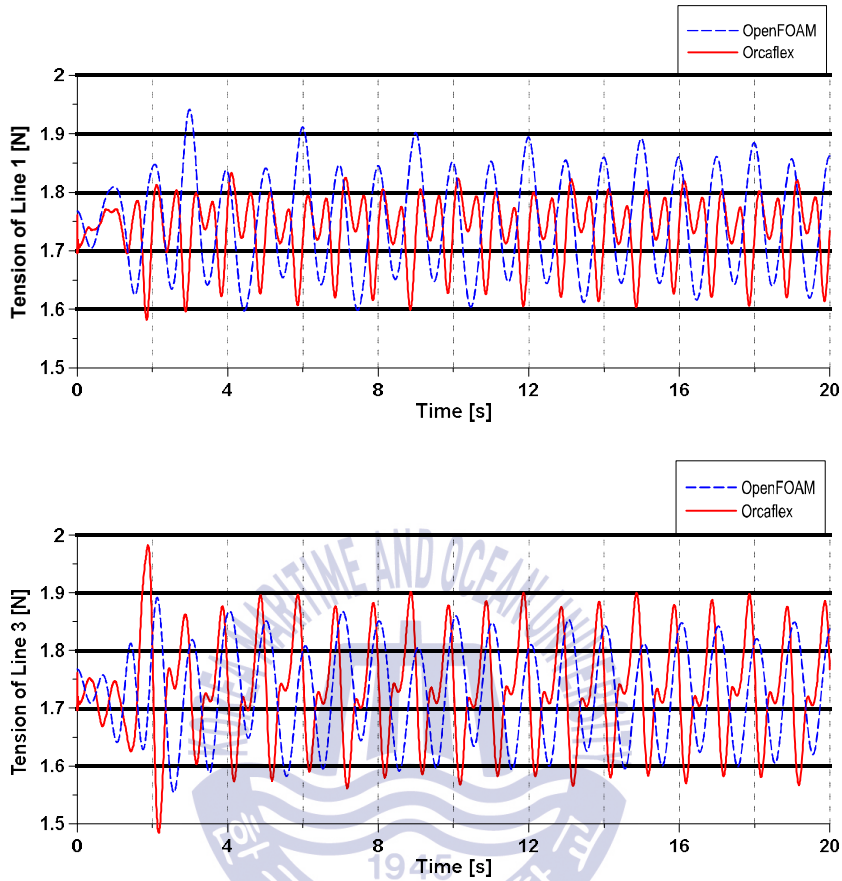


Fig. 34 Time history of tension response

(Period = 1.0s, Amplitude = 2cm)

장력 시계열에 나타나는 응답의 주기성을 확인하기 위해 입사파의 주기가 1.8s, 1.0s의 장력 시계열을 파워 스펙트럼으로 변환하였다. 그리고 입사파의 진폭이 1cm인 조건과 비교를 수행하였다. Fig. 35, Fig. 36은 주기가 1.8s에서 진폭이 각각 1cm, 2cm인 입사파에 대한 계류선의 장력 파워 스펙트럼을 의미한다. 스펙트럼으로부터 부유체의 Surge 운동과 같은 패턴으로 2개의 피크가 확연히 구분되는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 고주파수에 위치한 피크는 입사파의 주파수를 의미하고 저주파수인 2.2rad/s에 위치하는 피크는 surge 방향 자유감쇠시험(free decay test)을 통한 계류 시스템의 고유진동수와 일치한다.

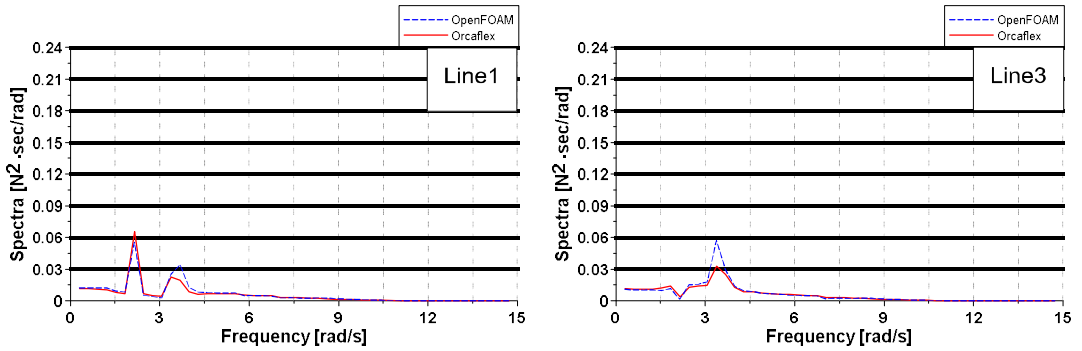


Fig. 35 Spectrum of line tension (Period = 1.8s, Amplitude = 1.0cm)

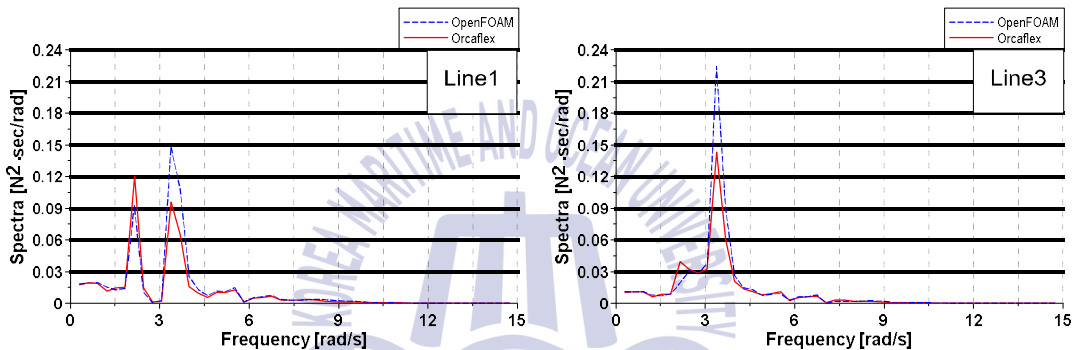


Fig. 36 Spectrum of line tension (Period = 1.8s, Amplitude = 2.0cm)

Fig. 37, Fig. 38은 주기가 1.0s에서 진폭이 각각 1cm, 2cm인 입사파에 대한 계류선의 장력 파워 스펙트럼을 의미한다. 1.8s에서 관측된 2개의 피크 이외에 상대적 고주파수 영역에서 추가적인 피크가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 추가적인 피크는 입사파의 진폭이 1cm인 Fig. 37에서는 생성된 응답의 크기가 상대적으로 작지만, 2cm 진폭인 Fig. 38에서는 확연히 관측된다. 즉, OpenFOAM과 Orcaflex간에 부유체의 운동 응답인 Heave, Pitch, Surge는 정량적으로 허용 범위 내의 차이를 보이며 같은 경향을 보이지만 장력의 시계열은 특정 주기에서 다른 응답을 보이는 것을 확인하였다. 두 응답 간의 차이는 OpenFOAM의 현수선 방정식과 Orcaflex의 집중질량법에 의한 차이라고 판단이 되어 계류선의 장력 시계열로부터 특정 시간에서의 두 방법 간 계류라인 형상을 비교하였다.

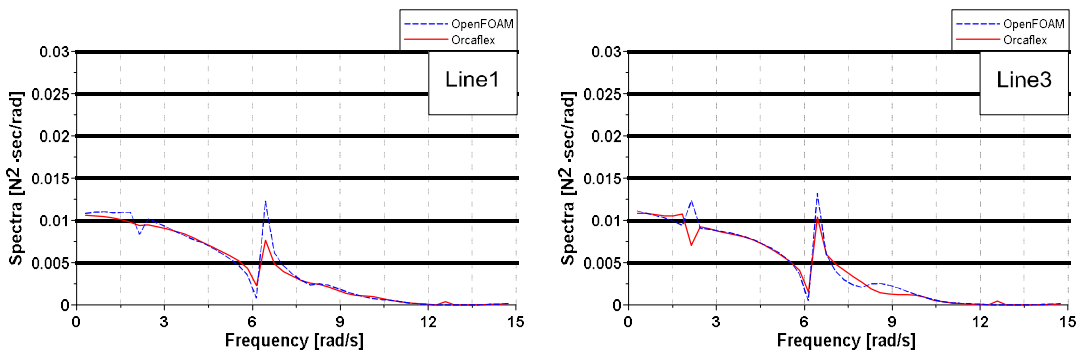


Fig. 37 Spectrum of line tension (Period = 1.0s, Amplitude = 1.0cm)

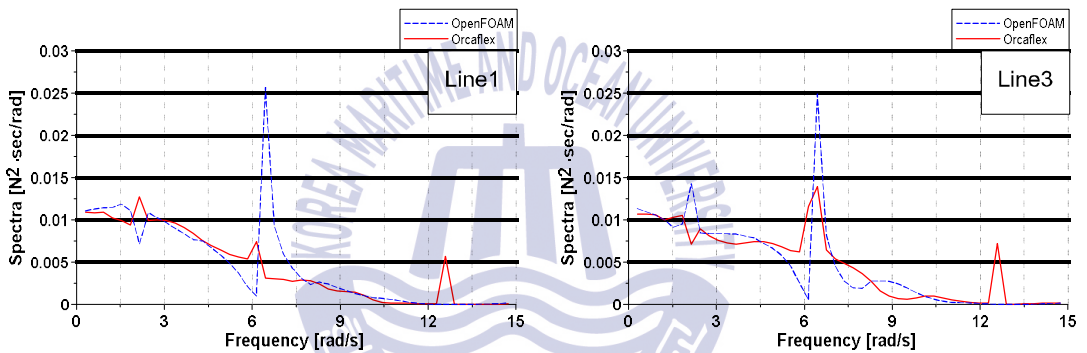


Fig. 38 Spectrum of line tension (Period = 1.0s, Amplitude = 2.0cm)

Fig. 39는 입사파의 주기가 1.0s, 진폭이 2cm일 때, 특정 시간에서의 Orcaflex와 OpenFOAM로 수치 해석한 계류선의 형상 비교를 나타낸다. 3D 평면에서의 전체형상, x-y 평면, x-z 평면에서의 형상을 비교하였다. 결과로부터 OpenFOAM과 Orcaflex의 계류선 형상의 차이는 x-y 평면에서 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. OpenFOAM에서의 계류선 형상은 페어리드와 앵커링 지점을 잇는 직선 형태가 나타나는 반면, Orcaflex에서는 직선을 벗어나는 주기 운동이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, Orcaflex의 직선을 벗어나는 계류선 형상 변화 주기는 장력 파워 스펙트럼에서 관측된 고주파수 성분(12.567rad/s)과 일치하는 것을 확인하였다.

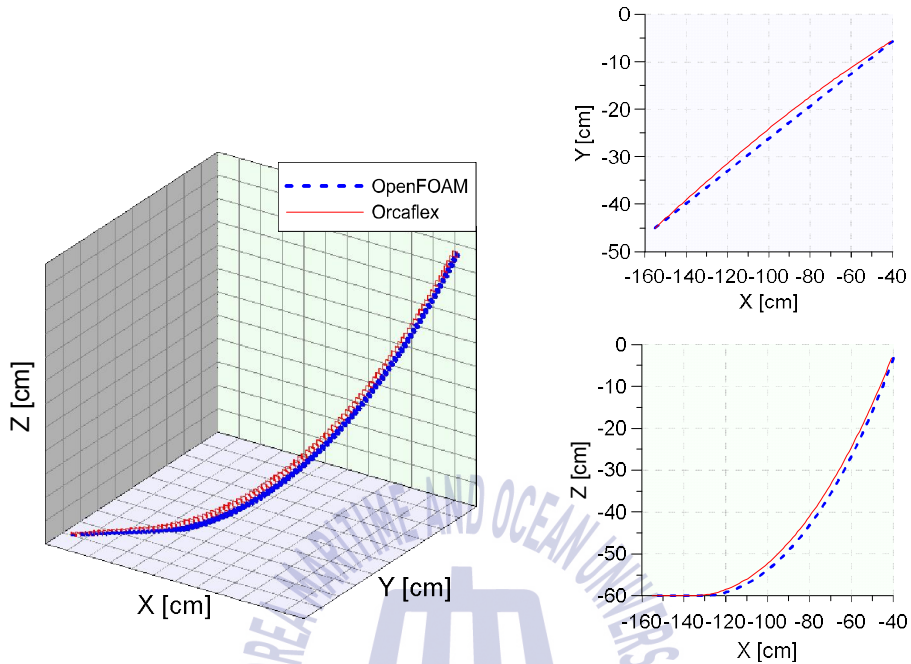


Fig. 39 Comparison of line shape

장력 파워 스펙트럼에서 관측되는 고주파수 성분은 집중질량법 기반인 Orcaflex에서만 나타나며 특정 입사파 주기인 1.0s 부근에서 관측된다. 이는 계류선이 현수선 방정식으로부터 2D로 모델링이 이루어진 OpenFOAM과 집중질량법으로부터 3D로 모델링이 이루어진 차이라고 판단하고, 계류선이 이루고 있는 평면에 수직인 방향의 고유주기를 계산하였다. Fig. 40은 Orcaflex로부터 계산된 초기조건에 따른 계류선 운동을 나타내고 있다. 결과로부터 계류선이 이루고 있는 평면에 수직인 방향의 first mode 주기는 약 0.9s임을 확인할 수 있다. 즉, Orcaflex에서만 나타나며 특정 입사파 주기인 1.0s 부근에서 나타나는 추가적인 시그널은 계류선의 first mode 주기와 입사파 주기가 같아서 발생하는 공진에 의한 현상이라는 것을 확인할 수 있다.

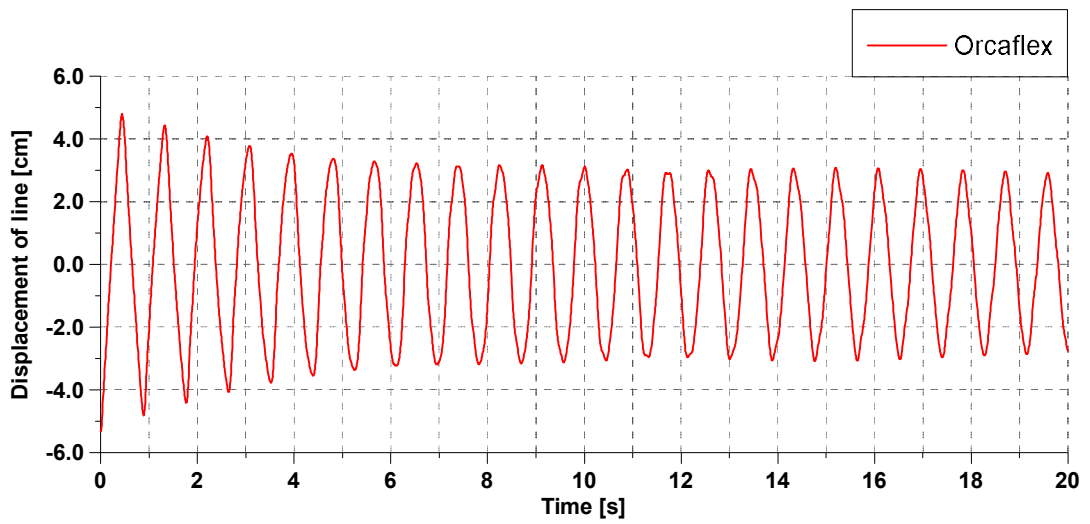


Fig. 40 Line displacement of x-y plane



제 6 장 Conclusions

본 연구는 본 연구에서는 오픈소스 CFD 프로그램인 OpenFOAM를 이용하여 부유체와 계류 시스템 간의 양방향 연성 모듈을 개발하고 이를 상용프로그램의 수치해석결과와 모형실험 결과를 비교하여 검증하였다. 정적평형 상태에서 계류선의 형상, 초기장력, 정적오프셋시험을 비교했으며, 선수와 조건의 규칙과 조건에서 부유체의 거동 및 페어리드 지점의 장력을 주파수 영역에서의 스펙트럼 및 시간 영역에서의 최대값과 평균값을 통해 정량적으로 평가하였다. 그리고 상대적 대과고를 입사파로 산정하여 현수선 방정식을 사용한 평면 내의 운동과 집중질량법(Lumped mass)를 사용한 계류선의 거동 간의 차이를 평가하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 개발된 OpenFOAM 코드의 Heave, Pitch 운동은 모형실험과 상용프로그램인 Orcaflex간에 정량적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

(2) 개발된 OpenFOAM 코드의 Surge 운동 및 계류선의 장력은 모형실험과 상용프로그램인 Orcaflex와 정량적으로 허용 범위 내의 차이를 보이며 같은 경향을 보임을 확인하였다.

(3) 현수선 방정식을 사용하여 계류선의 거동을 계산한 OpenFOAM에서는 계류선이 이루고 있는 평면 내의 운동만 표현이 가능한 반면, 집중질량법 기반의 동역학적 거동을 계산하는 Orcaflex에서는 평면을 벗어난 거동을 나타낸다.

(4) 계류선이 이루고 있는 평면에 수직인 방향의 고유주기와 입사파의 주기가 같아서 발생하는 계류선의 공진현상은 집중질량법 기반의 3D로 모델링이 이루어진 Orcaflex에서만 나타나는 것을 확인하였다.

(5) 본 논문에서는 점성효과를 고려하는 CFD를 이용하여 부유체와 계류 시스템간의 연성 운동을 구현하였다. 추후 계류시스템 연성모듈의 개선을 통해 동

적영향(Dynamic effect)을 고려한 추가적인 비교 및 검증이 요구된다.

(6) 본 논문에서는 대상선형 없이 수치해석 및 모형실험을 수행하였기 때문에 부유체 및 계류 시스템의 제원 선정과정에서 모형실험에서 구현 가능한 실험 장비 성능을 기준으로 하였다. 이는 실존하지 않는 제원이므로 전체 시스템의 물리적 현상을 구현하는데 다소 제한적일 것이라 판단된다. 추후, 실존하는 부유체 및 계류 시스템 제원을 기반으로 추가적인 수치해석과 모형실험이 요구된다.



Reference

- Hong, et al. "An Experimental Analysis on the Motion Response of a Moored Semi-Submersible Platform in Regular Waves." 한국해양공학회지 2.1 (1988): 59-70.
- Kim, Jang Whan, et al. "CFD-Based Numerical Wave Basin for Offshore Floater Design." Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference, 2015.
- Kyoung, Johyun, et al. "Validation of the HVS Semisubmersible Global Performance by Model Tests." ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- Ok, H. T., S. J. Lee, and J. H. Choi. "Numerical simulation of motion of single and side-by-side vessels in regular waves using OpenFOAM." Ships and Offshore Structures (2016): 1-11.
- Sirnivasa, Senu, et al. "Coupled Mooring Analyses for the WEC-Sim Wave Energy Converter Design Tool." ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- Wu, Guangyu, et al. "CFD-Based Numerical Wave Basin for Global Performance Analysis." ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016.