



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](#)

공학박사 학위논문

오픈 소스 라이브러리를 이용한 플랫폼
6자유도운동-계류계 연성해석 솔버 개발

Development of platform 6-DOF motion-mooring system
coupled solver using open source libraries



지도교수 박선호

2018년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과
이 상 철

본 논문을 이상철의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 최 경 식 (인)

위 원 공학박사 박 선 호 (인)

위 원 공학박사 하 승 현 (인)

위 원 공학박사 박 종 천 (인)

위 원 공학박사 정 세 민 (인)

2018년 6월 20일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	viii

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 선행 연구	3
1.3 연구 내용 및 논문의 구성	4

2. MoorDyn

2.1 개 요	7
2.2 집중 질량 모델	7
2.2.1 내력(internal forces)	9
2.2.2 외력(external forces)	11
2.2.3 절점의 운동방정식	13
2.3 코드 구조	15
2.3.1 LinesInit() 함수	15
2.3.2 LinesCalc() 함수	18
2.3.3 LinesClose() 함수	20
2.4 수치 안정성	20

3. OpenFOAM

3.1 개 요	22
3.2 지배방정식	22
3.3 체적비 이송방정식	24
3.4 난류 모델	25
3.5 수치해석 기법	26
3.6 6자유도운동	26
3.6.1 격자 변형 기법	27
3.6.2 6자유도운동 해석 기법	28
3.7 6자유도강체운동 라이브러리	31
3.7.1 라이브러리 구조	33
3.7.2 구속 모델(restraint model)	38
3.8 수치 파랑 수조 구현	40
3.8.1 완화구역(relaxation zone) 기법	40
3.8.2 파 이론(wave theory)	42

4. 양방향 연성해석 인터페이스

4.1 개 요	46
4.2 함수의 동적 로딩(dynamic loading)	47
4.3 새로운 구속 모델	49
4.4 연성 기법	51
4.4.1 느슨한 연성(loose coupling)	51
4.4.2 지연 연성(delayed coupling)	53
4.5 양방향 연성해석 인터페이스 구조	54
4.6 양방향 연성해석 인터페이스 검증	56
4.6.1 시간 동기화	56
4.6.2 변위와 속도 전달	58
4.6.3 계류계의 구속력 전달	60
4.7 디렉토리 구조	62

5. 검증 및 고찰	
5.1 계류계의 정적하중 및 형상	64
5.2 계류계의 동적하중	71
5.3 정수 중 자유 감쇠 운동	74
5.4 정수 중 계류 감쇠 운동	82
5.5 파랑 중 계류 운동	88
5.5.1 파랑 생성	88
5.5.2 부유체 계류 운동 및 인장 하중	90
6. 결론	97
참고문헌	100



List of Tables

Table 1.1 Acting forces on each mooring material	2
Table 3.1 Constants for RNG $k-\varepsilon$ turbulence model	25
Table 3.2 Arguments of restrain() function in the restraint models ...	39
Table 5.1 Mooring system properties for static load simulation	64
Table 5.2 Mooring system properties for profile simulation	65
Table 5.3 Mooring system properties for simulation with seabed contact	67
Table 5.4 Comparison of tensions at anchor and fairlead	68
Table 5.5 Mooring properties and environmental parameters for dynamic load simulation	72
Table 5.6 Properties of cylindrical buoy	74
Table 5.7 Comparison of free decay motion periods with experiment results	80
Table 5.8 Mooring properties and environmental parameters for moored decay test	83
Table 5.9 Comparison of moored decay motion periods with experiment results	87
Table 5.10 Description of Stokes 5 th wave	89

List of Figures

Fig. 1.1 Environmental loads acting on the offshore platform and mooring system	1
Fig. 1.2 Typical materials for mooring line	2
Fig. 2.1 Discretized mooring line and indices	8
Fig. 2.2 Internal and external forces acting on the nodes and segments	8
Fig. 2.3 Complete equation of motion for each node	14
Fig. 2.4 Flow chart of LinesInit() function	16
Fig. 2.5 Input file of MoorDyn	17
Fig. 2.6 Flow chart of LinesCalc() function	19
Fig. 2.7 Artificial resonance in discretized mooring line	20
Fig. 3.1 Description of earth- and ship-based reference systems	28
Fig. 3.2 Flow chart of interDyMFOAM solver in which a detail of the motion solver is provided (captured from Devolder et al. (2015))	32
Fig. 3.3 Structure of sixDoFRigidBodyMotion library	33
Fig. 3.4 Convergence characteristics of sixDoFSolvers	37
Fig. 3.5 Restraint models of OpenFOAM	38
Fig. 3.6 Relaxation zones with weighting function	42
Fig. 4.1 Interface between OpenFOAM and MoorDyn	47
Fig. 4.2 Dynamic loading and call of core functions in OpenFOAM	48
Fig. 4.3 Call locations of LinesInit() and LinesClose() functions	49
Fig. 4.4 Calculation procedures for external forces by restraint models	51
Fig. 4.5 Loose and tight coupling schemes	52
Fig. 4.6 Time steps of OpenFOAM and MoorDyn	53

Fig. 4.7 Flow chart of two-way coupling interface	55
Fig. 4.8 Time advancing methods of OpenFOAM and MoorDyn	57
Fig. 4.9 Fairlead tension output file of MoorDyn	58
Fig. 4.10 OpenFOAM logs for displacement and velocity input of MoorDyn	60
Fig. 4.11 OpenFOAM logs for restraint force and moment of MoorDyn ..	62
Fig. 4.12 Directory structure of two-way coupled solver	63
Fig. 4.13 MoorDyn input and output files in Mooring directory	63
Fig. 5.1 Comparison of static load with analytic solution	65
Fig. 5.2 Comparison of mooring line profile with numerical solution ·	66
Fig. 5.3 Comparison of mooring line profile with ANSYS AQWA	67
Fig. 5.4 Node positions with respect to the seabed stiffness	69
Fig. 5.5 Fairlead tensions with respect to the seabed damping coefficient	70
Fig. 5.6 Experimental setup for dynamic load simulation (captured from Bergdahl et al. (2016))	72
Fig. 5.7 Comparison of dynamic load with experiment result	73
Fig. 5.8 Experimental and numerical results for free pitch decay test (captured from Palm et al. (2016))	75
Fig. 5.9 Computational domain extent and grid system	76
Fig. 5.10 Computational domain extent and boundary conditions	77
Fig. 5.11 Initial buoy positions and free surfaces for free decay test ...	78
Fig. 5.12 Comparison of free decay motions with experiment results ..	79
Fig. 5.13 Comparison of heave motions with respect to the turbulence model	81
Fig. 5.14 Comparison of heave motions with respect to the numerical scheme	81
Fig. 5.15 Experimental setup and mooring system configuration for moored decay test (captured from Paredes et al. (2016))	84
Fig. 5.16 Computational domain extent and mooring grid system	85

Fig. 5.17	Initial buoy positions and free surfaces for moored decay test	86
Fig. 5.18	Comparison of moored decay motions with experiment results	87
Fig. 5.19	Comparison of Stokes 5 th wave profile with experiment results	90
Fig. 5.20	Initial buoy position and free surface for wave test	91
Fig. 5.21	Comparison of moored motions in wave with experiment results	93
Fig. 5.22	Comparison of fairlead tensions in cables with experiment results	94
Fig. 5.23	Noise analyses in tensions of cable 1 and 2	96



Development of platform 6-DOF motion-mooring system coupled solver using open source libraries

Lee, Sang Chul

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

It is very important to accurately predict the behavior of the platform and the tensile load of the mooring system to ensure the global performance and stability of the offshore plant. However, most of commercial softwares for mooring system analysis are based on the potential flow theory for the platform behaviour, so they can not consider the viscous effects around it. Also, as the depth of the offshore plant is increased, the dynamic characteristics of the mooring line are becoming more demanding. To estimate the platform responses more accurately even under the severe environments, the two-way (bidirectionally) coupled solver between the platform motion and mooring system is essential.

For this reason, in this thesis, the two-way coupled solver was developed using open source libraries such as OpenFOAM and MoorDyn. OpenFOAM is the open source computational fluid dynamics (CFD) library which can simulate the platform 6-DOF motion based on the viscous flow theory. MoorDyn is the open source mooring system analysis library which can simulate the tensile loads and restoring forces accurately based on the lumped mass model. In the two-way coupling procedure, the platform motion of OpenFOAM is transferred to

MoorDyn as boundary condition and the restoring force and moment of MoorDyn is transferred to OpenFOAM as external forces in each time step.

Finally, the validations of developed coupled solver were conducted for the static mooring tension and line profile, dynamic mooring tension, free and moored decay test in the still water, and the moored platform response and mooring tension in the Stokes 5th order wave. All results were confirmed by the comparison with the analytical solution, numerical solution and experimental results.

KEY WORDS: Open source library(소스 공개 라이브러리); Platform 6-DOF motion(플랫폼 6자유도운동); OpenFOAM(오픈폼); Mooring system(계류계); Lumped mass model(집중질량모델); MoorDyn(무어다인); Two-way coupling(양방향 연성)



오픈 소스 라이브러리를 이용한 플랫폼 6자유도운동-계류계 연성해석 솔버 개발

이 상 철

해양공학과
한국해양대학교 대학원

초록

해양플랜트의 작업 성능 및 안정성을 보장하기 위해서는 플랫폼의 거동과 계류계에 작용하는 인장 하중을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 하지만 대부분의 상용 계류계 해석 소프트웨어들은 플랫폼의 거동을 해석하는데 있어 포텐셜 이론을 기반으로 하고 있기 때문에 플랫폼 주위의 점성효과를 고려할 수 없다. 또한 해양플랜트가 설치되는 수심이 깊어질수록, 계류라인의 동역학적 특성이 더욱 요구되어지고 있다. 그리고 극심한 환경 조건하에서도 플랫폼의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 플랫폼 거동과 계류계간의 양방향 연성해석이 필수적이다.

이런 이유로, 본 논문에서는 OpenFOAM 및 MoorDyn과 같은 오픈 소스 라이브러리들을 이용하여 양방향 연성해석 솔버를 개발하였다. OpenFOAM은 플랫폼의 6자유도운동을 점성 유동 이론에 근거하여 해석할 수 있는 오픈 소스 전산유체역학 라이브러리이고, MoorDyn은 집중질량모델을 기반으로 계류계에 작용하는 인장 하중 및 복원력을 정확하게 계산할 수 있는 오픈 소스 계류계해석 라이브러리이다. 양방향 연성해석이 진행되는 때 시간간격마다 OpenFOAM에서 계산된 플랫폼의 거동은 MoorDyn으로 전달되어 경계조건으로 사용되고, MoorDyn에서 계산된 복원력은 OpenFOAM으로 전달되어 외력으로서 작용하게 된다.

끝으로, 개발된 연성해석 솔버에 대해서 계류계의 정적 하중과 형상 해석, 계류계의 동적 하중 해석, 정수 중에서의 자유 감쇠 운동 및 계류계와 연동된 감쇠 운동

해석, 스톱스 5차 과정 중에서의 플랫폼 계류 운동과 계류계에 작용하는 인장 하중 해석에 대한 검증을 수행하였다. 모든 계산 결과는 엄밀해, 수치해 및 실험결과와의 비교를 통하여 검증하였다.

KEY WORDS: Open source library(소스 공개 라이브러리); Platform 6-DOF motion(플랫폼 6자유도운동); OpenFOAM(오픈폼); Mooring system(계류계); Lumped mass model(집중질량모델); MoorDyn(무어다인); Two-way coupling(양방향 연성)



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

육상의 자원이 고갈되어감에 따라 새로운 자원개발에 대한 인간의 노력은 해양으로 눈을 돌리게 되었고, 현재는 천해(shallow water)와 심해(deep water)를 넘어 극지해역으로까지 진출하게 되었다. 이로 인해 텐션 레그 플랫폼(TLP), 스파(SPAR) 및 부유식 원유 생산/저장/하역설비(FPSO)와 같은 해양구조물들의 중요성이 대두되었다. 이러한 해양구조물들은 인원 및 물자의 수송을 목적으로 하는 선박과 달리 고정된 위치에서 오랜 기간 동안 작업을 수행해야 하는 특성을 가지고 있고, Fig. 1.1과 같은 파랑, 조류, 바람 등의 다양한 환경 하중(environmental load) 하에서도 위치를 유지할 수 있는 작업 성능(global performance)과 안정성(stability)을 보장할 수 있어야 한다.

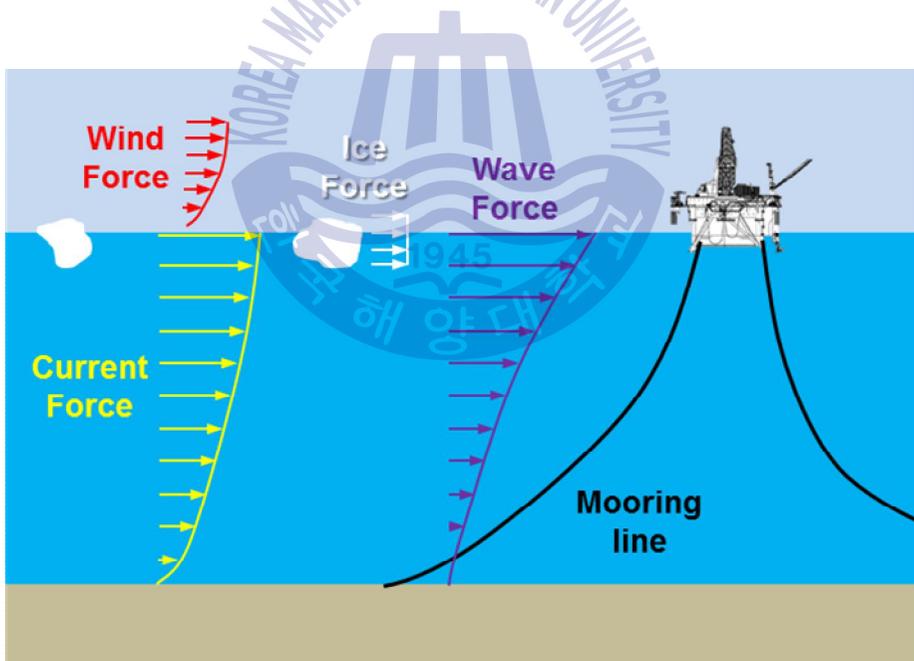


Fig. 1.1 Environmental loads acting on the offshore platform and mooring system

해양구조물의 위치유지를 위해서는 다양한 계류계(mooring system)가 사용될 수 있는데 그 중 현수선 계류(catenary mooring)가 대표적으로 널리 사용되고 있고, 적절한 계류계의 설계는 해양구조물의 작업 성능과 안정성에 매우 중대한 영향을 미친다.

계류계를 구성하는 대표적인 재료들로는 Fig. 1.2와 같이 체인(chain), 와이어 로프(wire rope) 및 합성섬유 로프(synthetic fiber rope)가 있고, 각 재료들로 구성된 계류계에 작용하는 힘들에 대해서는 Table 1.1에 정리하였다.



(a) chain

(b) wire rope

(c) synthetic fiber rope

Fig. 1.2 Typical materials for mooring line

Table 1.1 Acting forces on each mooring material

Types	Tension	Bending	Torsion
Chain	O	X	X
Wire rope	O	negligible	X
Synthetic fiber rope	O	X	X

일반적으로 해양구조물과 계류계의 설계에는 모형실험 또는 포텐셜 유동 이론(potential flow theory) 기반의 수치해석이 사용되어져 왔는데, 모형실험은 실제

물리적 현상을 직접 측정한다는 장점이 있지만 구현할 수 있는 모델의 물리적 한계 및 측정상의 불확실성 등의 문제가 있다. 그리고 대부분의 상용 코드들이 채택하고 있는 포텐셜 이론 기반의 수치해석은 계산속도가 빠르다는 장점이 있지만 해양구조물 주변에 존재하는 점성 효과(viscous effect)들을 고려하지 않으므로 정확한 해양구조물의 거동을 계산하기 어렵다는 문제가 있다. 또한 계류계의 모델링에 있어서도 현수선 방정식(catenary equation)을 바탕으로 한 준평형 모델(quasi-static model)이 일반적으로 사용되어 왔는데, 해양구조물의 설치가 심해로 갈수록 계류계의 질량, 부가 질량(added mass) 및 감쇠 효과(damping effect) 등이 해양구조물의 거동에 미치는 영향을 무시할 수 없기 때문에 이러한 요소들이 포함된 동역학적 모델(dynamic model)의 적용이 요구되어지고 있다.

앞에서 언급한 문제점들을 해결하기 위해서, 본 연구에서는 점성 유동 이론(viscous flow theory)을 기반으로 해양구조물의 거동을 해석할 수 있는 전산유체역학(CFD) 라이브러리와 계류계에 작용하는 여러 힘들을 고려할 수 있는 집중 질량 모델(lumped mass model) 기반의 계류계해석 라이브러리를 사용하여 해양구조물의 6자유도운동과 계류계의 인장 하중(tensile load)간의 양방향 연성해석(two-way coupled analysis)이 가능한 새로운 솔버를 개발하고자 한다.

1.2 선행 연구

해양구조물과 계류계간의 상호작용에 대한 연구에는 빠른 계산속도의 장점 때문에 여전히 포텐셜 유동 이론, 스트립 이론(strip theory) 및 준평형 모델이 널리 사용되고 있다. Masciola et al. (2013b)은 계류계가 DeepC-Wind 해상 풍력 터빈(offshore wind turbine)의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 미국 신재생에너지연구소 (National renewable energy laboratory, NREL)에서 개발된 해상 풍력 터빈 전용 솔버인 FAST와 집중 질량 모델이 적용된 상용 계류계해석 솔버인 OrcaFlex를 사용하여 연성해석 솔버를 개발하였다. Hall and Goupee (2015)는 동일한 목적을 위해 FAST와 자체 개발한 집중 질량 모델 기반의 계류계해석 솔버인 MoorDyn을 사용하여 연성해석 솔버를 개발하였다. FAST의 유체동력학(hydrodynamics)해석 모듈인 HydroDyn은

플랫폼 거동해석을 위해 포텐셜 유동 이론과 스트립 이론을 적용하고 있다. Sirmivas et al. (2016)은 파력 발전기(wave energy converter)와 계류계간의 상호작용을 연구하기 위해 Matlab을 이용한 파력 발전기 전용 솔버인 WEC-Sim과 MoorDyn을 사용하여 연성해석 솔버를 개발하였다. WEC-Sim은 플랫폼 거동해석에 대한 유체동력학 계수들(hydrodynamic coefficients)을 WAMIT이라는 포텐셜 유동 솔버로부터 가져온다.

최근 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)의 기법과 하드웨어의 비약적인 발전을 통해 점성을 고려한 플랫폼의 거동해석이 활발히 이루어지고 있다. Quallen et al. (2013)은 OC3-Hywind 해상 풍력 터빈과 계류계간의 상호작용을 연구하기 위해 유한차분법(finite difference method) 기반의 CFDShip-Iowa와 준평형 모델 기반의 Crowfoot 계류계 모델을 사용하여 연성해석을 수행하였다. Nicholls-Lee et al. (2013)은 파력 발전기에 대해서 다상 유동(multi phase) 전산유체역학과 비정상(transient) 계류 시스템을 적용한 해석을 위해 유한체적법(finite volume method) 기반의 범용 전산유체역학 솔버인 ANSYS CFX와 집중 질량 모델 기반의 OrcaFlex를 사용하여 연성해석을 수행하였다. Tran and Kim (2016)은 DeepCwind 해상 풍력 터빈에 대해서 터빈 로터의 공기역학 - 반잠수식 터빈 베이스의 유체동력학-계류계간의 완전 연성해석(fully coupled analysis)을 수행하기 위해 유한체적법 기반의 범용 전산유체역학 솔버인 STAR-CCM+와 준평형 현수선 방정식을 사용하였다. Palm et al. (2016)은 파력 발전기의 성능해석을 위하여 유한체적법 기반의 오픈 소스(open source) 전산유체역학 라이브러리인 OpenFOAM과 MATLAB을 이용해 자체 개발한 집중 질량 모델 기반의 계류계해석 코드인 MooDy를 사용하여 양방향 연성해석을 수행하였다.

1.3 연구 내용 및 논문의 구성

본 연구에서는 집중 질량 모델이 적용된 계류계해석용 오픈 소스 라이브러리인 MoorDyn과 오픈 소스 전산유체역학 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 해양 구조물의 6자유도운동과 계류계간의 양방향 연성해석 솔버를 개발하였다.

OpenFOAM의 표준 솔버(standard solver) 중 자유 수면(free surface)을 포함한 다상

유동(multiphase flow)해석이 가능하고 6자유도강체운동(6-DOF rigid body motion) 해석과 외력(restraint forces)의 적용이 가능한 interDyMFoam 솔버를 기반으로 MoorDyn과의 양방향 변수 전달을 위한 인터페이스를 구현하였고, 파랑(wave)의 생성 및 소멸이 가능한 수치 파랑 수조(numerical wave tank)를 구현하기 위해 waves2Foam 라이브러리(Jacobsen et al., 2012)를 추가하였다.

2장에서는 MoorDyn의 개요를 소개하고 분석을 진행하였다. 2.2장에서는 MoorDyn에 적용된 집중 질량 모델을 구성하는 방정식들과 소스 코드(source code)의 구조를 파악하고, 2.3장에서는 양방향 연성을 위한 주요 함수들에 대해서 분석하였다.

3장에서는 OpenFOAM의 개요를 소개하고 분석을 진행하였다. 3.2~3.5장에서는 OpenFOAM에 적용된 지배방정식, 체적비 이송방정식, 난류 모델 및 해석에 사용된 수치 방법에 대해서 설명하였고, 3.6장에서는 부유체의 6자유도운동을 해석하기위한 격자변형기법과 6자유도운동 해석기법을 설명하였다. 3.7장에서는 6자유도강체운동 라이브러리의 구조 및 구속 모델(restraint model)들에 대해서 분석하였다. 마지막으로 3.8장에서는 수치 파랑 수조를 구현하기 위해 추가한 wave2Foam 라이브러리의 완화구역(relaxation zone) 기법 및 파 이론(wave theory)에 대해서 설명하였다.

4장에서는 양방향 연성해석의 인터페이스(interface)를 구현하는 실제 과정을 설명하였다. 4.2장과 4.3장에서는 함수의 동적 로딩(dynamic loading) 및 이를 적용한 새로운 구속 모델의 생성에 대해서 설명하였다. 4.4장에서는 양방향 연성해석 인터페이스에 적용된 연성 기법들에 대해서 설명하였고, 4.5장에서는 완성된 양방향 연성해석 인터페이스의 구조에 대해서 설명하였다. 4.6장에서는 양방향 연성해석의 인터페이스를 통한 데이터의 전달을 검증하였고, 마지막으로 4.7장에서는 해석을 위한 케이스 디렉토리의 구조에 대해서 설명하였다.

5장에서는 라이브러리 및 솔버들에 대한 다양한 검증을 수행하였고, 그 결과에 대해서 토의하였다. 5.1장에서는 계류계의 정적 하중과 형상(static load and profile)에 대한 MoorDyn의 검증을 진행하였고, 5.2장에서는 계류계의 동적 하중(dynamic load)에 대한 검증을 진행하였다. 5.3장에서는 정수(still water) 중에서 부유체의 자유 감쇠 운동(free decay motion)에 대한 OpenFOAM의 검증을 진행하였고, 5.4장에서는 정수

중에서 부유체의 계류 감쇠 운동(moored decay motion)에 대한 양방향 연성해석 솔버의 검증을 진행하였다. 마지막으로 5.5장에서는 파랑 생성에 대한 waves2Foam의 검증과 함께 파랑 중에서 계류된 부유체의 운동 및 계류계에 작용하는 인장 하중에 대한 양방향 연성해석 솔버의 검증을 진행하였다. 모든 검증은 엄밀해(analytical solution), 수치해(numerical solution) 및 실험 결과와의 비교를 통해 수행되었다. 끝으로 6장에서는 본 연구에 대한 최종 결론을 도출하였다.



제 2 장 MoorDyn

2.1 개요

MoorDyn은 집중 질량 모델이 적용된 계류계해석용 라이브러리로 2014년 미국 메인대학교(University of Maine)의 Matthew Hall에 의해서 개발되었다. MoorDyn의 두 가지 버전 중 Fortran 버전은 미국 신재생에너지연구소에서 개발한 FAST의 계류계 해석용 모듈로 사용되고 있고, C++ 버전은 GNU General Public License version 3.0 (GPLv3) 하에 소스 코드를 공개하여 다양한 프로그램들과의 연동에 관한 연구들이 이루어지고 있다(Hall, 2017).

2.2 집중 질량 모델

MoorDyn은 계류계를 이산화(discretization)하기 위해 집중 질량 모델(Hall and Goupee, 2015)을 사용한다. Fig. 2.1과 같이 케이블을 N개의 동일한 길이를 갖는 분절(segment)들로 나누었을 때, 절점(node)들은 앵커(anchor)에서 페어리드(fairlead) 방향으로 0부터 N까지의 정수형 지수(index)를 갖고 분절들은 $i+1/2$ 형태의 지수를 갖는다. 이 때 벡터 r_i 는 각 절점들의 위치를 나타내고, 동일한 간격으로 나뉜 분절들은 길이, 직경, 밀도, 탄성계수(Young's modulus) 및 내부 감쇠계수(internal damping coefficient) 등의 물성치들(properties)에 대해서 동일한 값을 갖는다.

본 연구에 사용된 집중 질량 모델은 축방향(axial)의 내부 인장력과 내부 감쇠력(internal damping force), 자중(weight)과 부력, 모리슨 방정식에 의한 유체력(hydrodynamic force) 및 해저면과의 접촉력을 포함하고 있다. Fig. 2.2는 집중 질량 모델에 적용된 힘들을 나타내고 있다. 내부 인장력과 내부 감쇠력은 분절에서 계산되므로 $T_{i+1/2}$ 및 $C_{i+1/2}$ 로 나타내고, 중량과 같이 절점에서 계산되는 힘들은 W_i 의 형태로 표현된다. 그 외의 벡터 D_{pi} , D_{qi} 및 B_i 들은 각각 횡단방향의 유체력(transverse hydrodynamic force), 접선방향(tangential)의 유체력 및 해저면과의

접촉력을 나타낸다.

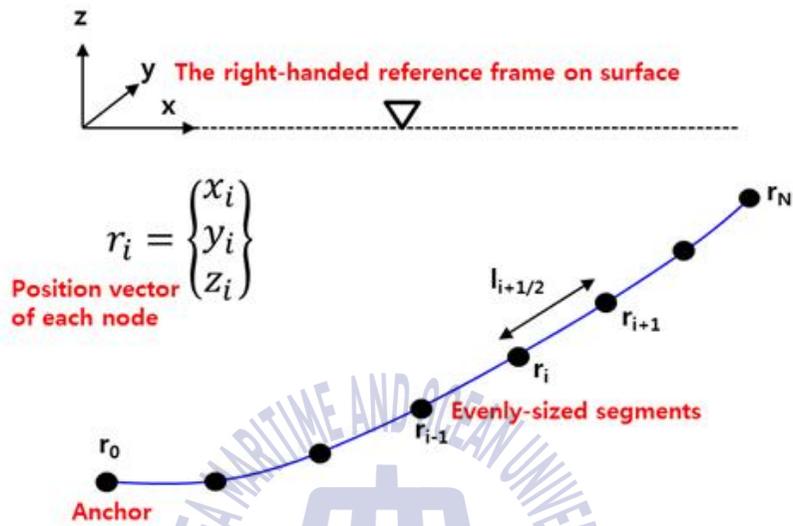


Fig. 2.1 Discretized mooring line and indices

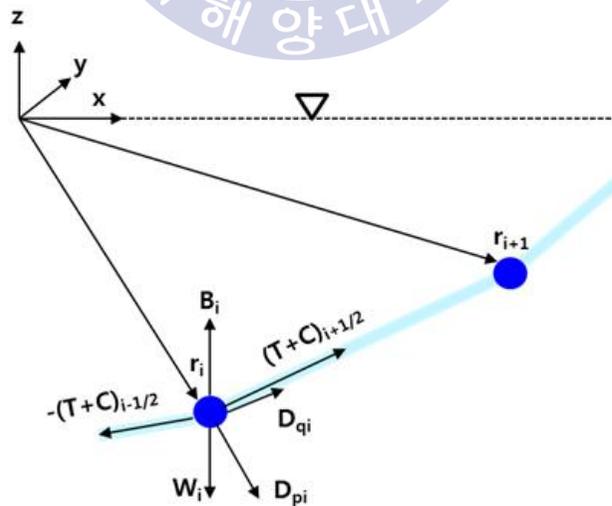


Fig. 2.2 Internal and external forces acting on the nodes and segments

절점에서의 접선방향은 인접한 두 분절의 접선방향을 평균하여 계산되고, 유체력을 계산할 때 사용된다. 계류계의 각 라인들은 원통형태의 세장체(slender body) 이므로 이에 작용하는 횡단방향의 유체력은 식 (2.1)의 모리슨 방정식(Morison's equation)에 의해서 계산되고, 점성항에 의한 저항력과 관성항에 의한 부가질량력(added mass force)으로 구분된다. 접선방향의 저항력과 부가질량력은 체인인 경우에 한하여 동일한 방법으로 계산된다.

$$F = \rho C_m V \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_d A u |u| \quad (2.1)$$

여기서, ρ , u , \dot{u} 는 유체의 밀도, 속도 및 가속도를 의미하고, C_m , C_d , V , A 는 각각 계류 라인의 관성계수, 항력계수, 체적 및 단면적을 의미한다.

2.2.1 내력(internal forces)

내력에는 축방향의 인장력과 감쇠력 및 자중이 포함된다. 그리고 부력은 자중에 포함하여 정미부력(net buoyancy)으로 계산된다. 분절에서의 정미부력은 식 (2.2)와 같이 표현된다.

$$W_{i+1/2} = \frac{\pi}{4} d^2 l (\rho_w - \rho) g \quad (2.2)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도를 의미하고, g 는 중력가속도를 의미한다.

정미부력은 인접한 두 개의 분절에 균등하게 적용되므로, 절점에서의 정미부력은 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_i = \frac{1}{2}(W_{i+1/2} + W_{i-1/2})\hat{e}_z \quad (2.3)$$

여기서, \hat{e}_z 는 양의 z축 방향의 단위벡터를 의미한다.

분절에서의 인장력은 식 (2.4)와 같이 탄성계수(Young's modulus), 계류 라인의 단면적 및 변형률(strain)의 곱으로 나타낸다.

$$T_{i+1/2} = E\frac{\pi}{4}d^2\epsilon_{1+1/2} = E\frac{\pi}{4}d^2\left(\frac{\|r_{i+1} - r_i\|}{l} - 1\right) \quad (2.4)$$

여기서, $\epsilon_{1+1/2}$ 은 변형률을 의미하고, $\|\cdot\|$ 은 벡터의 크기를 의미한다. 그러므로 식 (2.4)의 결과는 스칼라인 인장력의 크기를 나타내고, 이를 벡터로 만들기 위해 절점 i 에서 절점 $i+1$ 방향으로의 단위벡터를 곱해주면 인장력은 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{i+1/2} &= E\frac{\pi}{4}d^2\left(\frac{\|r_{i+1} - r_i\|}{l} - 1\right)\left(\frac{r_{i+1} - r_i}{\|r_{i+1} - r_i\|}\right) \\ &= E\frac{\pi}{4}d^2\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{\|r_{i+1} - r_i\|}\right)(r_{i+1} - r_i) \end{aligned} \quad (2.5)$$

인장력은 오직 계류 라인에 인장이 발생한 경우($\|r_{i+1} - r_i\| > l$)에만 적용되고 그 외에는 모두 0으로 처리한다. 즉, 압축력(compression force)은 고려하지 않는다.

내부 감쇠력은 집중 질량 모델의 수치 안정성(numerical stability)에 중요한 역할을 하며, 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{i+1/2} = C_{int} \frac{\pi}{4} d^2 \dot{\epsilon}_{i+1/2} \left(\frac{r_{i+1} - r_i}{\|r_{i+1} - r_i\|} \right) \quad (2.6)$$

여기서, C_{int} 는 내부 감쇠계수(internal damping coefficient)를 의미하고, $\dot{\epsilon}_{i+1/2}$ 은 변형속도율(strain rate)을 의미한다. 변형속도율은 변형율에 대한 시간도함수(time derivative)로 식 (2.7)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{i+1/2} &= \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\|r_{i+1} - r_i\|}{l} \right) \\ &= \frac{1}{2l} \frac{1}{\|r_{i+1} - r_i\|} \frac{\partial}{\partial t} \left[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2 \right] \\ &= \frac{1}{l} \frac{1}{\|r_{i+1} - r_i\|} \left[(x_{i+1} - x_i)(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + (y_{i+1} - y_i)(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) \right. \\ &\quad \left. + (z_{i+1} - z_i)(\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_i) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2.2 외력(external forces)

외력에는 유체력 및 해저면과의 접촉력이 포함된다. 유체력은 정수(still water) 중에서 계류계의 움직임에 의해 발생하기 때문에 이를 적용하기 위해서는 먼저 계류계에 대한 유체의 상대속도(relative velocity)와 상대가속도를 절점들에서 횡단방향(transversal)과 접선방향(tangential)으로 나누는 작업이 필요하다. 절점에서의 접선의 방향은 양쪽에 인접한 두 개의 절점을 통과하는 직선의 기울기로 계산한다. 그러므로 접선방향의 단위벡터 \hat{q}_i 는 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{q}_i = \frac{r_{i+1} - r_{i-1}}{\|r_{i+1} - r_{i-1}\|} \quad (2.8)$$

정수 중에서 계류계 절점의 속도가 \dot{r}_i 일 때, 절점에 대한 물의 상대속도는 $-\dot{r}_i$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 이 상대속도의 접선방향 성분은 $-\dot{r}_i$ 와 \hat{q}_i 의 내적(inner product)으로 표현되고 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{rel,tangent} = (-\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i \quad (2.9)$$

물의 상대속도의 횡단방향 성분은 접선방향 성분인 식 (2.9)에 수직인 방향으로 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{rel,transverse} = (\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i - \dot{r}_i \quad (2.10)$$

식 (2.9)와 (2.10)의 속도를 이용하여 횡단 및 접선방향의 항력(drag force)을 계산하면 모리슨 방정식의 점성항에 의해 식 (2.11) 및 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{pi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dn} dl \|(\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i - \dot{r}_i\| [(\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i - \dot{r}_i] \quad (2.11)$$

$$D_{qi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{dt} \pi dl \|(-\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i\| [(-\dot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i] \quad (2.12)$$

여기서, C_{dn} 과 C_{dt} 는 각각 횡단 및 접선방향의 저항계수(drag coefficient)를 의미한다. 동일한 방법으로 횡단 및 접선방향의 부가질량력(added mass force)을 계산하면 모리슨 방정식의 관성항에 의해 식 (2.13) 및 (2.14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{\pi} \ddot{r}_i = \rho_w C_{an} \frac{\pi}{4} d^2 l [(\ddot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i - \ddot{r}_i] \quad (2.13)$$

$$a_{qi} \ddot{r}_i = \rho_w C_{at} \frac{\pi}{4} d^2 l (-\ddot{r}_i \cdot \hat{q}_i) \hat{q}_i \quad (2.14)$$

여기서, a_{π} 와 a_{qi} 는 각각 부가질량행렬(added mass matrix)의 횡단 및 접선방향의 성분을 의미하고, C_{an} 과 C_{at} 는 각각 횡단 및 접선방향의 부가질량계수(added mass coefficient)를 의미한다.

해저면과의 접촉력은 선형 스프링-댐퍼계(linear spring-damper system)로 모델링 되어 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있고, 오직 절점이 해저면에 닿았을 때, 즉 $z_i \leq z_{bottom}$ 일 때, 수직방향으로 작용하게 된다.

$$B_i = dl [(z_{bottom} - z_i)k_b - \dot{z}_i c_b] \hat{e}_z \quad (2.15)$$

여기서, k_b 와 c_b 는 각각 해저면의 강성계수(stiffness coefficient)와 감쇠계수(damping coefficient)를 의미하며, 해저면의 단위면적당 강성과 점성감쇠(viscous damping)를 단위로 갖는다.

2.2.3 절점의 운동방정식

앞에서 계산된 내력과 외력들을 이용하여 절점의 운동방정식을 세우기 위해서는 먼저 질량항의 처리가 필요하다. 집중 질량 모델에서는 계류계의 질량을 각 절점에 작용하는 점질량(point mass)으로 이산화 한다. 이산화된 질량항을 질량행렬(mass matrix)로 바꾸기 위해 3×3 형태의 항등행렬(identity matrix) I 를 곱하면, 질량항은 식 (2.16)과 같이 표현된다.

$$m_i = \frac{\pi}{4} d^2 l \rho I \quad (2.16)$$

그리고 가속도 \ddot{r}_i 에 비례하는 부가질량 역시 질량행렬에 포함되어야한다. 이를 위해 식 (2.13)과 식 (2.14)에서 가속도 \ddot{r}_i 를 인수분해하고, 뉴턴의 제2 운동법칙인 $ma = F$ 의 좌변으로 이항하기 위해 부호를 바꾸면 부가질량항을 식 (2.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i = a_{p_i} + a_{q_i} = \rho_w \frac{\pi}{4} d^2 l \left[C_{an} (I - \hat{q}_i \hat{q}_i^T) + C_{at} (\hat{q}_i \hat{q}_i^T) \right] \quad (2.17)$$

Fig. 2.3은 질량항과 부가질량항을 통합한 최종적인 절점의 운동방정식을 보여준다. 이러한 2차 상미분방정식(ordinary differential equation)은 균등한 시간간격(time step)을 갖는 2차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 시간적분(time integration)할 수 있다.

$$\underbrace{[m_i + a_i]}_{\text{Mass \& Added Mass}} \ddot{r}_i = \underbrace{T_{i+(1/2)} - T_{i-(1/2)} + C_{i+(1/2)} - C_{i-(1/2)}}_{\text{Internal Stiffness \& Internal Damping}} + \underbrace{W_i + B_i}_{\text{Weight \& Bottom Contact}} + \underbrace{D_{p_i} + D_{q_i}}_{\text{Drag}}$$

Fig. 2.3 Complete equation of motion for each node

2.3 코드 구조

MoorDyn은 처음 설계될 때부터 가능한 쉽고 일반적인(generic) 방법으로 다른 모델들과의 연동이 가능하게 하는 것을 목표로 하였다. 그래서 MoorDyn의 함수들은 각각의 모델들이 내부적으로 자신의 데이터 구조를 유지하면서 연성(coupling)을 위한 데이터의 전달을 최소화할 수 있게 설계되었다. 이와 같은 방법을 통해서 소스 코드의 수정 없이도 다른 시뮬레이션 도구(simulation tool)나 프로그래밍 언어(programming language)와의 연성을 쉽게 구현할 수 있다(Hall, 2017).

연성을 위한 MoorDyn의 핵심 함수(core function)들은 계류계의 초기조건(initial condition)을 생성하는 LinesInit() 함수, 매 시간간격 마다 계류계의 인장하중과 복원력을 계산하는 LinesCalc() 함수, 그리고 계산이 종료된 후 계산에 사용된 변수와 메모리를 정리하고 반환해주는 LinesClose() 함수로 구성되어 있다. 이 함수들은 모두 MoorDyn의 외부에서도 호출이 가능하고, 이를 통해 다른 시뮬레이션 도구들과 쉽게 연성시킬 수 있다.

2.3.1 LinesInit() 함수

LinesInit() 함수는 제일 먼저 호출되는 함수로 MoorDyn의 입력파일로부터 계류계에 대한 정보를 가져오고, 외부로부터 플랫폼의 위치와 속도에 대한 정보를 가져온다. 이 정보들을 바탕으로 해석조건을 설정하고, 계류계해석을 위한 변수들과 초기조건을 생성하고, 생성된 초기조건 및 상태에 대한 결과를 파일로 출력한다.

Fig. 2.4는 LinesInit() 함수의 기능을 자세히 보여주고 있다. 함수가 호출되면 입력파일로부터 정보를 가져오는데, MoorDyn의 입력파일은 Fig. 2.5와 같이 계류계의 물성치, 앵커(anchor)와 페어리드(fairlead)의 위치에 대한 정보, 슬버 설정에 대한 정보 및 결과출력에 대한 정보들을 포함하고 있다. 또한 외부로부터 플랫폼에 대한 정보를 6자유도에 대한 변위와 속도로 가져오게 되고, 이 두 변수들이 LinesInit() 함수의 인자(argument)가 된다.

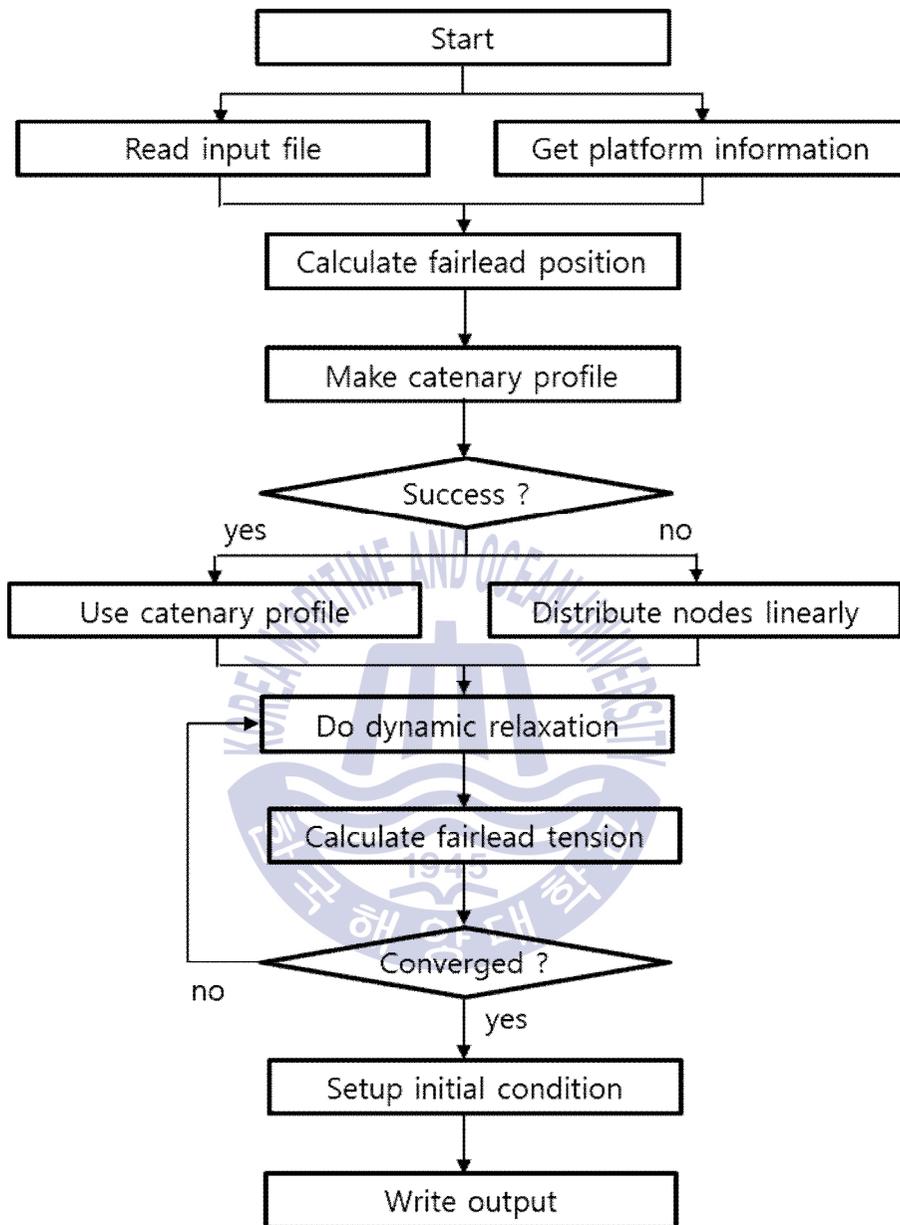


Fig. 24 Flow chart of LinesInit() function

```

MoorDyn input file for OCS-Hywind mooring system
-----
LINE DICTIONARY
LineType  Diam    MassDenInAir  EA      BA/-zeta  Can  Cat  Cdn  Cdt
(-)       (m)      (kg/m)        (N)     (Pa-s/-)  (-)  (-)  (-)  (-)
main      4.786E-3 0.1447        1.6E6   -1.0      3.8  0.0  2.5  0.5
-----
NODE PROPERTIES
Node      Type    X          Y          Z          M          V          FX          FY          FZ          CdA    CA
(-)      (-)    (m)        (m)        (m)        (kg)       (m^3)     (kN)       (kN)       (kN)     (m^2)  (-)
1        Fix     6.9175     0          -0.9       0          0         0          0          0         0       0
2        Fix     -3.4588    5.9907     -0.9       0          0         0          0          0         0       0
3        Fix     -3.4588    -5.9907    -0.9       0          0         0          0          0         0       0
4        Vessel  0.2725     0.0        0.096     0          0         0          0          0         0       0
5        Vessel  -0.1363    0.236     0.096     0          0         0          0          0         0       0
6        Vessel  -0.1363    -0.236    0.096     0          0         0          0          0         0       0
-----
LINE PROPERTIES
Line      LineType  UnstrLen  NumSegs  NodeAnch  NodeFair  Flags/Outputs
(-)      (-)      (m)       (-)      (-)       (-)       (-)
1        main      6.915     10       1         4         ptc
2        main      6.915     10       2         5         ptc
3        main      6.915     10       3         6         ptc
-----
SOLVER OPTIONS-----
0.00001  dtM      - time step to use in mooring integration
9.81     g        - gravitational constant
998.2    rho_w    - sea water density
0        WaveKin  - wave kinematics flag (0=neglect, the only option currently supported)
3E6     kBot     - bottom stiffness
3E5     cBot     - bottom damping
0.9     WtrDpth  - water depth
300     TmaxIC   - maximum simulation time to allow for IC gen
5.0     CdScaleIC - factor by which to scale drag coefficients during dynamic relaxation IC gen
0.001   threshIC - threshold for IC convergence
-----
OUTPUTS
FairTen1 FairTen2 FairTen3
-----
need this line

```

Fig. 25 Input file of MoorDyn

계류계와 플랫폼에 대한 정보를 얻은 후, 이 정보들을 이용하여 페어리드의 위치를 계산하고, 절점들의 분포를 위해 준평형 모델의 현수선 방정식을 이용하여 계류 라인의 현수선 형상(catenary profile)을 계산한다. 만약 현수선 형상의 생성이 실패하게 되면 솔버는 자동으로 앵커와 페어리드의 위치를 감안하여 절점들을 선형적으로 분포시킨다. 앞에서 계산된 절점들의 초기 분포에 동적이완(dynamic relaxation)을 적용시켜 절점들의 위치를 조정한다. 동적이완을 실행한 후 페어리드에 작용하는 인장력을 계산하여 초기조건의 수렴여부를 결정한다. 세 번의 동적이완이 진행되는 동안 인장력이 변하지 않는 경우 수렴한 것으로 판단하고, 수렴이 되지 않으면 계속해서 동적이완을 반복하게 된다. 최종적으로 수렴이 되면 초기조건을 확정하고 수렴된 값들을 초기시간($t=0$)에 대한 값으로 파일에 출력한다.

2.3.2 LinesCalc() 함수

LinesCalc() 함수는 매 시간간격마다 외부로부터 플랫폼의 위치 및 속도, 현재 시간, 시간간격을 인수로 받아 페어리드의 위치와 속도를 계산하고, 이를 계류계해석의 경계조건으로 하여 각 절점들에 대한 운동방정식을 계산한다. 이 때 각 절점들의 운동방정식은 2차의 상미분방정식(ordinary differential equation) 형태로 나타나게 되므로, 2차 룬게-쿠타(Runge-Kutta) 알고리즘을 이용한 시간적분(time integration) 방법을 통하여 방정식을 풀게 된다. 이 때 계류계해석의 내부 시간간격(dt_M)은 수치적 안정성(numerical stability)을 위해 플랫폼해석과의 연성 시간간격(dt_C)보다 작게 운용되며, 두 시간간격 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$N_t = dt_C / dt_M \quad (2.18)$$

2차 룬게-쿠타 알고리즘은 연성 시간간격(dt_C)동안 내부 시간간격(dt_M)을 이용하여 N_t 번 실행되고, 매번 다음과 같은 절차를 반복한다.

- 시간 t 와 $t + dt_M/2$ 에서의 페어리드의 위치와 속도를 계산한다.
- 각 계류계의 모든 절점에서의 힘을 계산한다.
- 각 계류계의 모든 내부 절점들에서의 가속도를 계산한다.
- 외력을 포함하여 모든 연결 절점(floaters 또는 clump weight)에서의 힘을 계산한다.
- 모든 연결 절점에서의 가속도를 계산한다.
- 시간 $t + dt_M$ 에서의 모든 내부 및 연결 절점들의 위치와 속도를 계산하기위해 위에서 계산된 가속도를 두 번 적분한다.

위의 절차들을 거쳐, 계류계의 모든 절점 및 분절에 작용하는 힘과 변위 및 속도 등을 계산한 후 매 시간간격별 결과들을 출력해준다. 그리고 이 때 계류계에 의해 플랫폼에 작용하는 복원력을 계산하여 이를 6자유도의 힘과 모멘트로 반환해준다.

LineCalc() 함수는 플랫폼의 거동이 지속될 때까지 계속해서 호출되고 위의 과정을 반복한다. 자세한 LinesCalc() 함수의 계산 절차를 Fig. 2.6에 나타내었다.

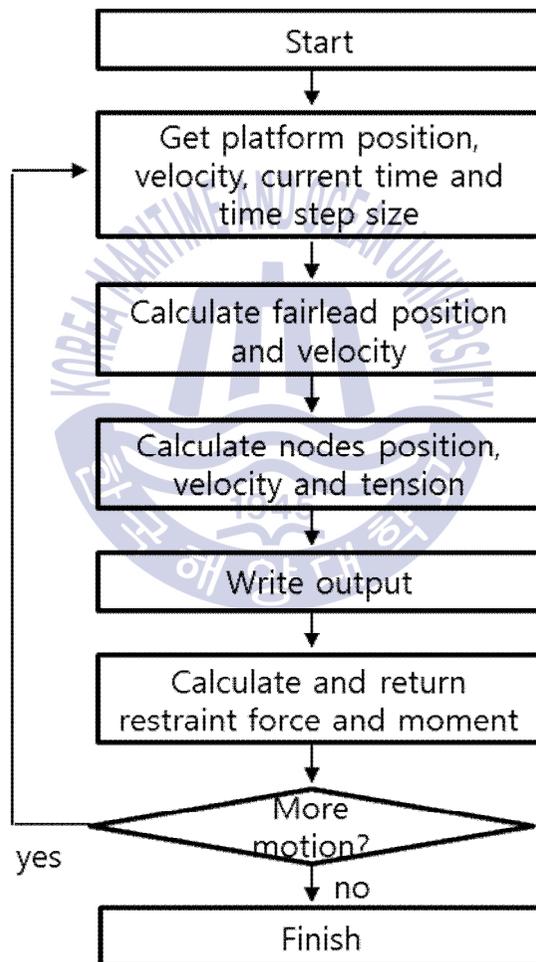


Fig. 2.6 Flow chart of LinesCalc() function

2.3.3 LinesClose() 함수

LinesClose() 함수는 인자 없이 단순하게 실행되는 함수로, 계류계의 해석에 사용되었던 전역 변수(global variable)들을 초기화하고 동적으로 할당했던 메모리들을 반납하기 위해 사용되는 함수이다. 동적메모리할당(dynamic memory allocation)은 배열의 크기(array size)가 변동될 때 메모리를 효율적으로 사용하기 위한 방법으로, 사용이 끝나면 다른 프로그램의 메모리 사용을 위해 반드시 반납해주어야 한다 (Stroustrup, 2013).

2.4 수치 안정성

본 연구에 사용된 MoorDyn은 본래 연속적인 구조를 이루고 있는 계류라인에 대해 해석을 목적으로 작은 요소들로 나누고 이를 질량-스프링-댐퍼 시스템(mass-spring-damper system)으로 모델링한다. 이런 이유로 실제 계류라인에서는 발생하지 않는 인위적 공진(artificial resonance)현상이 발생하게 된다. 게다가 MoorDyn의 외재적 특성(explicit characteristic)까지 고려하면 정확하고 안정된 계산을 위해서는 수치 안정성을 확보해 주는 것이 중요하다.

이산화된 계류라인의 공진현상이 극대화되는 상태는 Fig. 2.7과 같이 각 절점들이 서로 반대방향으로(out of phase) 진동할 때 발생하고, 이를 안정화시키는데 가장 큰 역할을 하는 것이 내부 감쇠계수(internal damping coefficient)이다.

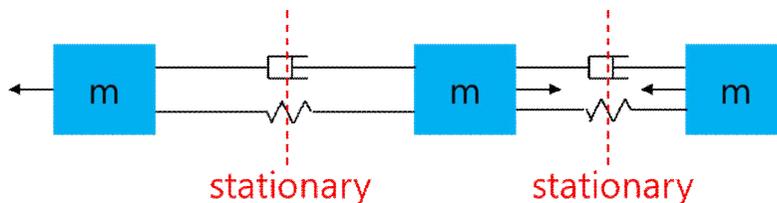


Fig. 2.7 Artificial resonance in discretized mooring line

케이블 제공업체로부터 정확한 내부 감쇠계수를 얻을 수 있으면 주어진 값을 사용하면 되지만, 일반적으로 정확한 내부 감쇠계수가 주어지지 않는다. 이런 경우 내부 감쇠계수를 임계감쇠(critical damping)에 가까이 맞추고, 계류계 모델의 수치 안정성을 위해 절점의 개수(분절의 길이) 또는 시간간격의 크기(time step size)를 조절해주어야 한다.

계류계 모델의 수치 안정성을 온전히 보장할 수 있는 시간간격의 크기를 정할 수 있는 계산식은 없다. 일반적으로 부유체의 거동을 계산하는 솔버에 비해 1/10 이하의 시간간격을 사용하는데, 이 또한 계류계의 탄성계수, 절점의 개수, 질량 등에 따라 달라지므로 시행착오방법을 사용하여 적절한 시간간격의 크기를 결정해야한다.



제 3 장 OpenFOAM

3.1 개요

OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)은 소스코드가 공개된 전산유체역학(CFD) 라이브러리로 텐서 연산(tensor operation)과 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)에서 사용하는 다양한 이산화 기법(discretization scheme), 난류 모델을 포함한 여러 물리적 모델 등을 포괄적으로 제공하고 있기 때문에 기본적으로 제공되는 standard solver들을 사용하는 것 이외에도 자체 솔버(solver)를 개발하거나 기존 솔버를 수정할 수 있다.

처음에는 영국의 Imperial College에서 FORTRAN기반의 FOAM이라는 이름으로 개발되었으나, 모듈화(modularity) 및 객체지향적 특성(object-oriented feature)을 통한 확장을 위해 Henry Weller와 Hrvoje Jasak의 주도하에 C++기반으로 변환되었고 GPL license를 통해 OpenFOAM이라는 이름으로 공개되었다.

현재 OpenFOAM은 유동, 열전달 및 연소 등의 문제에 사용할 수 있는 다양한 standard solver들과 대용량 계산을 위한 병렬처리 기능까지 무료로 제공하고 있다.

3.2 지배방정식

비압축성 다상유동에서의 속도와 압력은 혼합류(mixture)를 대상으로 다음과 같이 표현되는 연속방정식과 운동량방정식에 의해 계산된다.

$$\nabla \cdot \vec{v}_m = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + S \quad (3.2)$$

여기서, 아래첨자 m 은 여러 상(phase)으로 구성된 혼합류를 의미하고, ρ , \vec{v} 및 p 는 밀도, 속도벡터 및 압력을 각각 나타낸다. S 는 운동량방정식의 생성항(source term)으로 중력, 전자기력 또는 표면장력과 같은 체적력(body force)들을 포함한다. $\overline{\tau}$ 는 점성 응력을 나타내는 텐서이고, 비압축성 유동에서는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\overline{\tau} = \mu_m (\nabla \cdot \vec{v}_m + \nabla \cdot \vec{v}_m^T) \quad (3.3)$$

밀도와 점성계수 같은 혼합류의 물성치들은 다음의 식들과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_{air} \rho_{air} + \alpha_{water} \rho_{water} \quad (3.4)$$

$$\mu_m = \alpha_{air} \mu_{air} + \alpha_{water} \mu_{water} \quad (3.5)$$

$$\alpha_{air} = 1 - \alpha_{water} \quad (3.6)$$

여기서, α 는 하나의 검사체적(control volume) 내에서 각 상의 체적분율(volume fraction)을 나타내고, 아래첨자 air 와 $water$ 는 공기와 물을 각각 나타낸다.

난류 효과를 고려하기 위해 운동량방정식에 레이놀즈 평균(Reynolds average)을 취하면 다음과 같은 레이놀즈 응력항이 생성된다.

$$-\rho_m \overline{v_m' v_m'} = \mu_{m,t} \left[\left(\nabla \cdot \vec{v}_m + \nabla \cdot \vec{v}_m^T \right) - \frac{2}{3} \rho k \right] I \quad (3.7)$$

여기서, \vec{v}' 는 속도에 대한 난류변동성분(turbulent fluctuating component), μ_t 는 난류점성계수, k 는 단위질량당 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)를 나타낸다. 그리고 I 는 단위 텐서를 나타낸다.

3.3 체적비 이송방정식

본 연구에서 사용한 VOF(Volume of Fluid) 기법은 다상 유동에서 각 상들이 차지하는 유체 체적의 부피비를 통해 경계면의 위치와 움직임을 추적하는 수치기법이다(Hirt and Nichols, 1981). 이 기법은 각 상들이 서로 혼합되지 않는 유동에 적합하며, 검사체적 내에서 각 상이 차지하는 체적분율(α)을 사용하여 경계면을 표현할 수 있고 다음과 같은 체적비 이송방정식을 통해 계산된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_m) + \nabla \cdot (\alpha\rho_m\vec{v}_m) + C_{ad}\nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)\vec{v}_r) = 0 \quad (3.8)$$

여기서, 검사체적이 완전히 물로 채워진 경우 $\alpha = 1$, 검사체적이 완전히 공기로 채워진 경우 $\alpha = 0$, 자유수면에 접하고 있는 검사체적에서는 $0 < \alpha < 1$ 의 값을 갖는다. 위 식의 세 번째 항은 기본 체적비 이송방정식에 해의 확산을 인위적으로 감소시키기 위해 추가해준 생성항으로(Lee and Rhee, 2015; Park et al., 2016), $\alpha = 0$ 또는 $\alpha = 1$ 인 자유수면에서 벗어난 검사체적들에 대해서는 작용하지 않는다. C_{ad} 는 자유수면의 확산 감소를 위한 상수로서 0과 1사이의 값을 갖고, 본 연구에서는 0.5값을 사용하였다. \vec{v}_r 는 자유수면의 최대속도를 기반으로 하여 주어지는 인위적인 경계면 압축속도(artificial compression velocity)를 나타낸다.

3.4 난류 모델

본 연구에서 고려한 RNG(Re-Normalization Group) $k-\epsilon$ 난류 모델(Yakhot et al., 1992; Orszag et al., 1993)은 다음의 식들로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon \vec{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

여기서,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.11)$$

$$P_k = \mu_t S^2 \quad (3.12)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.13)$$

$$\eta = S k / \epsilon \quad (3.14)$$

이고, S 는 평균변형률계수(the modulus of the mean rate-of-strain) 이다. 그리고 그 외의 상수들은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Constants for RNG $k-\epsilon$ turbulence model

C_μ	σ_k	σ_ϵ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	η_0	β
0.0845	0.7194	0.7194	1.42	1.68	4.38	0.012

3.5 수치해석 방법

연속방정식, 운동량방정식 및 난류모델 방정식은 비압축성 기반 비정상(transient) 상태에서 계산하였다.

시간항에 대해서는 2차의 정확도를 갖는 내재적(implicit) 기법인 Crank-Nicolson scheme(Crank and Nicolson, 1947)을 사용하였고, 편심계수(off-centering coefficient)는 0.9를 사용하였다. 확산항과 대류항에 대해서는 각각 2차 정확도를 갖는 중심차분법(central differencing scheme)과 vanLeer limiter(Van Leer, 1974)를 적용한 TVD(Total Variation Diminishing) scheme을 사용하였다.

속도와 압력의 연성을 위해 SIMPLE(Patankar and Spalding, 1972) 알고리즘과 PISO(Issa, 1986) 알고리즘을 결합한 PIMPLE 알고리즘을 적용하였고, 내부 및 외부 루프의 반복 횟수는 각각 2회와 3회로 설정하였다. 그 외에 대수방정식에 대해서 수렴성을 증진시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법(Weiss et al., 1999)을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하여 계산하였다. 난류 모델에 대한 계산을 위해 벽면에는 벽함수(Park et al., 2013)를 적용하였다.

3.6 6자유도운동

부유체(floating body)의 6자유도운동해석은 부유체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하고, 이들을 부유체의 질량과 관성모멘트를 이용하여 가속도와 토크로 환산하는 과정을 통해 진행된다. 그리고 환산된 가속도와 토크를 이용하여 부유체의 병진(translational) 및 회전(rotational) 운동에 대한 변위를 계산하게 된다. 병진운동은 전후동요(surge), 좌우동요(sway) 및 상하동요(heave)의 3자유도로 구분되고, 회전운동 역시 횡동요(roll), 종동요(pitch) 및 선수동요(yaw)의 3자유도로 구분된다. 이러한 6자유도운동을 정확하게 해석하기 위해서는 부유체의 움직임에 따른 격자 변형 기법과 6자유도운동 해석 기법이 필요하다.

3.6.1 격자 변형 기법

부유체의 운동을 구현하기 위해서는 운동에 따른 격자의 변형이 수반되어야 한다. 해석 도메인 내에서 격자의 변형은 라플라스 방정식(Laplace equation)에 의해 계산되며 그 식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \vec{v}_p) = 0 \quad (3.14)$$

$$\gamma = \frac{1}{d^2} \quad (3.15)$$

여기서, γ 는 확산계수이며 본 논문에서는 식 (3.15)와 같이 거리의 제곱에 반비례(quadratic inverse distance)하는 확산계수를 사용하였다. d 는 지정한 경계면으로부터의 거리를 의미한다. \vec{v}_p 는 격자점의 이동 속도를 나타내고, 확산계수를 변화시킴으로써 격자의 이동 속도를 조절할 수 있다.

격자점의 이동 속도를 계산되면 내부 격자점들의 위치는 다음과 같은 식을 통해 이동된다.

$$\vec{x}_p = \vec{x}_{p0} + \vec{v}_p \Delta t \quad (3.16)$$

여기서, \vec{x}_{p0} 는 기존의 격자점 위치를 의미하고, \vec{x}_p 는 이동된 격자점의 위치를 의미한다. 이 방법은 격자점들 사이의 거리 비를 일정하게 유지하면서 격자를 변형시키므로 격자의 직교성(orthogonality)을 최대한 유지하면서 격자를 부드럽게 변형시키는 장점을 가지고 있다.

3.6.2 6자유도운동 해석 기법

부유체의 6자유도운동을 해석하기 위해서는 직교 좌표계(cartesian coordinate system)에서 부유체가 강체(rigid body)라고 가정하고 각 방향에 작용하는 힘과 모멘트의 합을 계산해야하고, Fig. 3.1과 같이 2가지 좌표계를 이용하여 해석할 수 있다(Carrica et al., 2007). 첫 번째 좌표계는 지구 좌표계(earth-based reference system, $oxyz$)로 유동장(flow field)을 계산하기 위해 사용되고, 두 번째 좌표계는 선박 좌표계(ship-based reference system, $o'x'y'z'$)로 부유체의 6자유도운동을 계산하기 위해 사용된다.

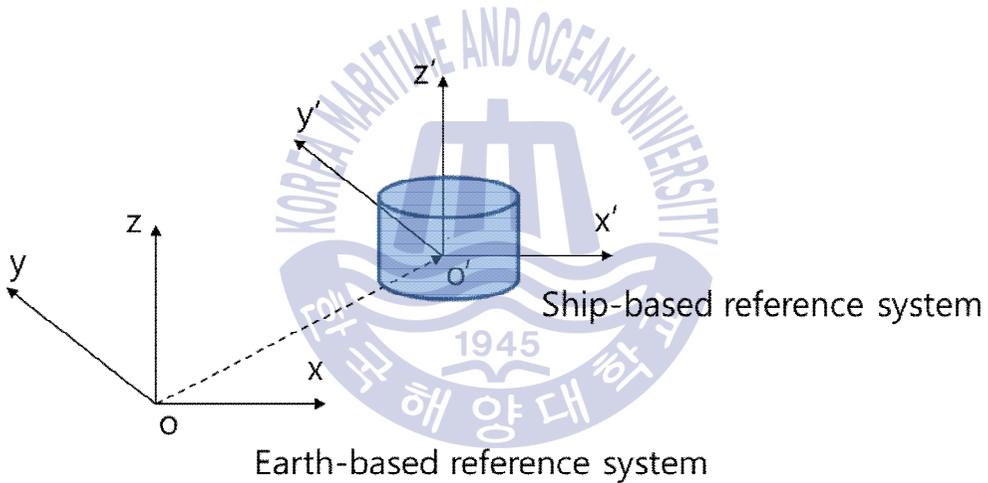


Fig. 3.1 Description of earth- and ship-based reference systems

지구 좌표계에서 각 축에 대한 병진 및 회전운동의 변위들은 선형 변위들과 오일러 각(Euler angle)들을 사용하여 식 (3.17)과 같이 표현할 수 있으며, 마찬가지로 선박 좌표계에서 6자유도운동으로 인한 병진 및 회전방향의 속도들은 식 (3.18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = (\eta_1, \eta_2) = (x, y, z, \phi, \theta, \psi) \quad (3.17)$$

$$v = (v_1, v_2) = (u, v, w, p, q, r) \quad (3.18)$$

여기서, $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ 는 지구 좌표계에서의 6자유도 변위들을 나타내고, u, v, w, p, q, r 은 선박 좌표계에서의 6자유도 속도들을 나타낸다.

회전방향의 속도들은 오일러 각들의 시간변화율(time rate of change)과 관련이 있고, 이를 적용하면 지구 좌표계와 선박 좌표계 간의 회전속도 변환은 식 (3.19) 및 (3.20)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_2 = J_2^{-1} \cdot \dot{\eta}_2 \quad (3.19)$$

$$\dot{\eta}_2 = J_2 \cdot v_2 \quad (3.20)$$

여기서, J_2 는 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$J_2 = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi / \cos\theta & \cos\phi / \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$J_2^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

여기서, $\theta = \pm 90^\circ$ 에서의 J_2 값은 정의되지 않는다. 그러나 부유체의 종동요(pitch)가 $\pm 90^\circ$ 가 되는 경우는 없다고 가정할 수 있으므로 무시한다.

지구 좌표계의 병진방향 벡터는 선박 좌표계에서 식 (3.23)과 같이 표현될 수 있고, 지구 좌표계와 선박 좌표계 간의 병진속도 변환은 식 (3.24) 및 (3.25)와 같이 표현할 수

있다.

$$a = J_1^{-1} a_e = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} a_e \quad (3.23)$$

$$\dot{\eta}_1 = J_1 \cdot v_1 \quad (3.24)$$

$$v_1 = J_1^{-1} \cdot \dot{\eta}_1 = J_1^T \cdot \dot{\eta}_1 \quad (3.25)$$

지구 좌표계에서 계산된 힘과 모멘트를 선박 좌표계에 다음과 같은 식으로 이동시키면, 최종적으로 선박 좌표계에서 작용하는 힘과 모멘트 계산을 얻을 수 있고 이를 통해 부유체의 6자유도운동을 계산할 수 있다.

$$F = J_1^{-1} \cdot F_e \quad (3.26)$$

$$M = J_1^{-1} \cdot M_e \quad (3.27)$$

선박 좌표계에서 부유체에 작용하는 힘과 모멘트의 합은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\sum F_x = m [\dot{w} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (3.28)$$

$$\sum F_y = m [\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \quad (3.29)$$

$$\sum F_z = m [\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] \quad (3.30)$$

$$\sum M_x = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m [y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \quad (3.31)$$

$$\sum M_y = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] \quad (3.32)$$

$$\sum M_z = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - \dot{\varphi} + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \quad (3.33)$$

여기서, x, y, z 는 선박 좌표계의 각 방향을 의미한다. 또한 F 는 힘을, M 은 모멘트를, I 는 관성모멘트를 의미한다. u, v, w 와 p, q, r 은 각 방향에 대한 속도와 각속도를 나타낸다. 또한 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 와 $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 은 각 방향에 대한 가속도와 각가속도를 의미한다. x_G, y_G, z_G 는 회전중심(center of rotation)과 무게중심(center of mass) 사이의 거리를 x, y, z 방향으로 나타낸 값이다.

본 연구에서는 계류계와의 양방향 연성해석을 진행하므로 계류계의 복원력에 의한 힘과 모멘트가 위의 식들에 추가된다.

3.7 6자유도강체운동 라이브러리

6자유도강체운동에 대한 해석은 `sixDoFRigidBodyMotion`이라는 라이브러리에 의해 수행된다. 이 라이브러리는 강체에 대한 6자유도운동을 계산하는 모듈, 계산된 6자유도운동의 결과에 따른 격자의 변형을 진행하는 모듈 및 6자유도운동에 대한 구속조건을 설정하는 모듈 등으로 구성되어 있다.

`sixDoFRigidBodyMotion` 라이브러리를 채택하고 있는 대표적인 기본 솔버인 `interDyMFoam`의 계산절차를 Fig. 3.2에 나타내었다. OpenFOAM의 기본 모션 솔버(motion solver)는 가속도를 기반으로 속도와 위치를 결정하는 2차 정확도의 leap frog scheme을 채택하고 있으며(Dullweber et al., 1997), 이 때 가속도는 뉴턴의 제 2법칙을 통해 계산될 수 있다.

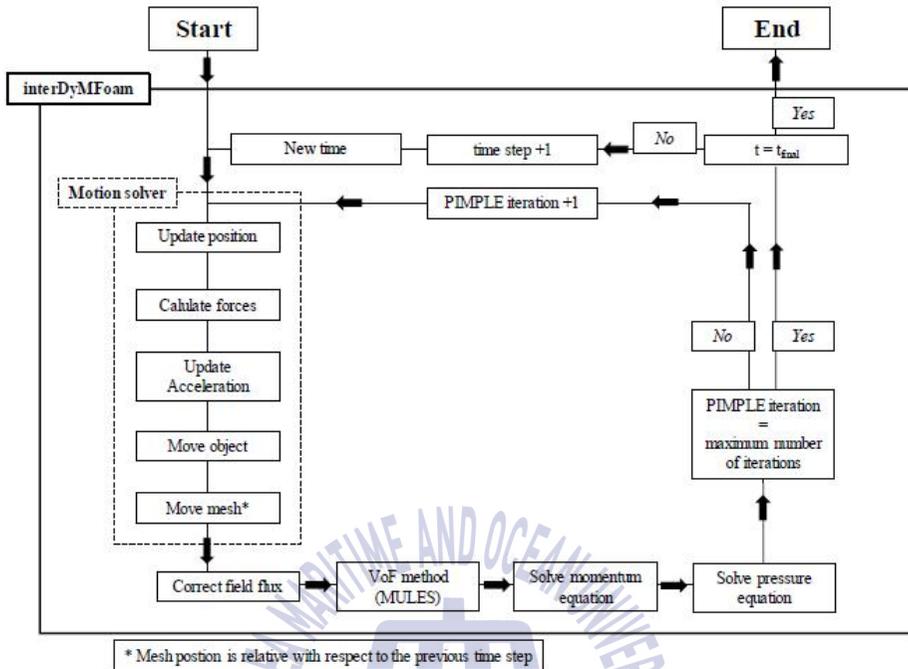


Fig. 3.2 Flow chart of interDyMFoam solver in which a detail of the motion solver is provided (captured from Devolder et al. (2015))

Fig. 3.2에서 보는 것과 같이, 매 시간간격마다 모션 솔버가 제일 먼저 호출되고 Update position, Calculate forces, Update acceleration, Move object 및 Move mesh의 과정을 거쳐 새로운 위치를 결정하고 그에 따라 격자를 이동시킨다. 새로운 격자가 결정되면, 유동장을 해석하기 위한 솔버가 시작된다.

유동장을 해석하기 위한 솔버는 제일 먼저 플럭스(flux)들을 수정하고, 자유수면을 추적하기 위한 VOF 방법을 실행시킨다. 그 후 운동량방정식과 압력방정식을 풀어서 유동장의 속도 및 압력을 계산한다. 이 때 PIMPLE 루프가 반복되면서 동일한 시간간격에서의 유동장 및 부유체 운동간의 평형상태를 찾기 위한 계산을 반복하고, PIMPLE 루프가 끝나면 새로운 시간간격이 시작되면서 6자유도강체운동에 대한 정보들을 이전 시간간격의 결과로 저장하게 된다.

3.7.1 라이브러리 구조

격자변형을 통해 6자유도강체운동 해석이 가능한 sixDoFRigidBodyMotion 라이브러리의 구조는 Fig. 3.3과 같다. sixDoFRigidBodyMotion 라이브러리는 그 하부에 각각의 클래스(class)들을 가지고 있고, 각 클래스들의 역할 및 기능들은 다음과 같다.

먼저 pointPatchFields 클래스는 6자유도강체운동에 의해 모션이 변경되면, 격자계 내의 각 격자점들을 모션에 따라 이동시켜주는 역할을 한다. 이와 동시에 작용하는 sixDoFRigidBodyMotionSolver 클래스는 격자의 변형을 계산하는 솔버를 포함하고 있고, OpenFOAM에서 정의하는 유한체적격자(fvMesh)를 6자유도강체운동에 맞추어 변형시켜주는 역할을 한다. 격자를 변형할 때는 지정된 경계면(patch)으로부터의 거리를 inner distance와 outer distance의 2가지로 설정해 주는데, inner distance 안에 위치하는 격자들은 6자유도강체운동과 동일하게 이동하므로 변형이 발생하지 않는다. 이는 경계면에서의 경계층(boundary layer)을 포착하는데 유리하다. 그리고 outer distance 밖에 위치하는 격자들은 6자유도강체운동에서 멀리 떨어져있어 영향을 받지 않는 영역이므로, 이 영역에서도 격자의 변형은 일어나지 않는다. 오직 inner distance와 outer distance의 사이에 위치하는 격자들만 운동에 따른 격자변형이 이루어진다.

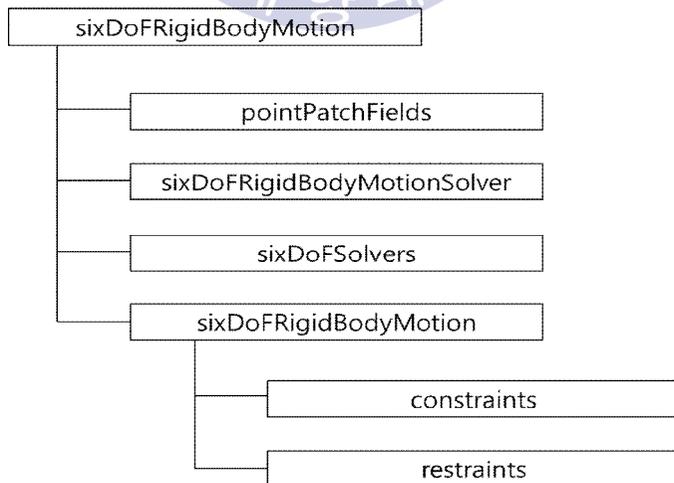


Fig. 3.3 Structure of sixDoFRigidBodyMotion library

다음으로 sixDoFSolvers 클래스는 부유체의 6자유도강체운동을 해석하는 3가지 솔버들을 포함하고 있다. 이 솔버들은 sixDoFRigidBodyMotion 클래스에서 계산된 가속도와 토크를 바탕으로 부유체의 6자유도강체운동을 계산하고, 그 계산방법에 따라 symplectic, Crank-Nicolson 및 Newmark(Newmark, 1959) 솔버로 구분된다.

Symplectic 솔버는 앞서서도 언급한 바와 같이 2차 정확도의 leap frog scheme을 사용하는 외재적(explicit) 솔버로서, OpenFOAM의 PISO 모드에서만 사용이 가능하다. 계산절차는 Fig. 3.2에서 나타낸 것과 같이 Update position, Calculate forces, Update acceleration의 순서를 따른다. Update position 단계에서는 이전 시간의 속도와 가속도를 이용하여, 중간 시간($n+1/2$)에서의 속도를 계산하고, 이 속도를 이용하여 부유체의 새로운 위치를 계산한다. Calculate forces 단계에서는 변경된 위치에서의 부유체에 작용하는 모든 힘을 계산한다. 마지막으로 Update acceleration 단계에서는 앞서서 계산된 힘을 이용하여 새로운 가속도를 계산하고, 이를 중간 시간에서의 속도에 적용함으로써 현재 시간에서의 최종 속도를 결정한다. 이 과정들은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

- Update position

$$v_{i+1}^{n+1/2} = v_i^n + 0.5 \cdot \Delta t^n \cdot a_i^n \quad (3.34)$$

$$CoM_{i+1}^{n+1} = CoM_i^n + \Delta t^{n+1} \cdot v_{i+1}^{n+1/2} \quad (3.35)$$

- Calculate forces

$$f_{i+1}^{n+1} = \sum pA + \sum \tau A - m \cdot g \quad (3.36)$$

- Update acceleration

$$a_{i+1}^{n+1} = \frac{f_{i+1}^{n+1}}{m} \quad (3.37)$$

$$v_{i+1}^{n+1} = v_{i+1}^{n+1/2} + 0.5 \cdot \Delta t^{n+1} \cdot a_{i+1}^{n+1} \quad (3.38)$$

여기서 위첨자 $n+1$ 은 현재의 시간을 의미하고, $i+1$ 은 현재의 PIMPLE 단계를 의미한다. v 와 CoM 은 부유체의 속도와 질량중심의 위치를 의미하고, Δt 는 시간간격을 의미한다. f , p , τ 및 A 는 부유체에 작용하는 전체 힘, 압력, 전단응력 및 부유체의 표면적을 의미하고, m 과 g 는 부유체의 건질량(dry mass)와 중력가속도를 의미한다.

Crank-Nicolson과 Newmark 솔버는 2차 정확도의 내재적(implicit) 솔버로서, OpenFOAM의 PISO 및 PIMPLE 모드에서 모두 사용이 가능하다. 계산절차는 symplectic 솔버와 달리 Calculate forces, Update acceleration, Update position의 순서를 따른다. Calculate forces 및 Update acceleration 단계에서는 symplectic 솔버와 동일하게 식 (3.36)과 (3.37)을 사용하여 부유체에 작용하는 모든 힘을 계산하고 이를 바탕으로 가속도를 계산한다. Update position 단계에서는 이전 단계에서 계산한 가속도를 이용하여 부유체의 속도와 위치를 계산하는데, 이 때 두 솔버의 계산방법에 차이가 있다.

Crank-Nicolson 솔버는 가속도를 이용하여 부유체의 속도를 계산하고, 이 속도를 사용하여 부유체의 위치를 계산한다. 그 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{i+1}^{n+1} = v^n + \Delta t^{n+1} \cdot \{aoc \cdot a_{i+1}^{n+1} + (1 - aoc) \cdot a^n\} \quad (3.39)$$

$$CoM_{i+1}^{n+1} = CoM^n + \Delta t^{n+1} \cdot \{voc \cdot v_{i+1}^{n+1} + (1 - voc) \cdot v^n\} \quad (3.40)$$

여기서, aoc 와 voc 는 각각 가속도 편심계수(acceleration off-centering coefficient)와

속도 편심계수(velocity off-centering coefficient)를 의미하고, 기본값은 모두 0.5이다.

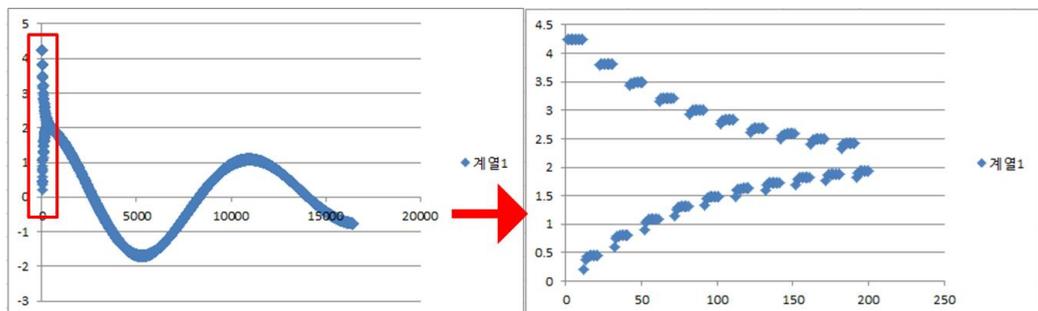
Newmark 솔버는 가속도를 이용하여 부유체의 속도와 위치를 각각 계산하고, 그 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{i+1}^{n+1} = v^n + \Delta t^{n+1} \cdot \{ \gamma \cdot a_{i+1}^{n+1} + (1-\gamma) \cdot a^n \} \quad (3.41)$$

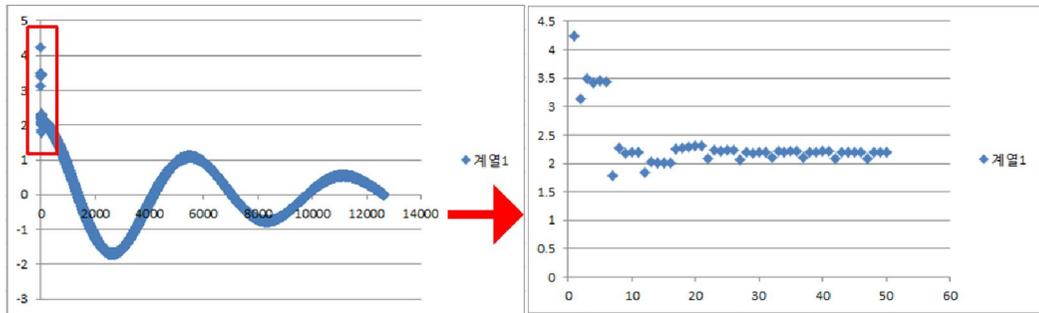
$$CoM_{i+1}^{n+1} = CoM^n + v^n \cdot \Delta t^{n+1} + (\Delta t^{n+1})^2 \cdot \{ \beta \cdot a_{i+1}^{n+1} + (0.5-\beta) \cdot a^n \} \quad (3.42)$$

여기서, γ 와 β 는 각각 속도 적분계수(velocity integration coefficient)와 위치 적분계수(position integration coefficient)를 의미하고, 기본값은 각각 0.5와 0.25이다. 그리고 두 솔버가 기본값들을 사용하면 동일한 솔버가 된다.

외재적 솔버인 symplectic과 내재적 솔버인 Newmark의 특성을 비교하기 위한 계산을 수행하였다. 본래 symplectic 솔버는 PISO 알고리즘에서만 이용할 수 있는 솔버이지만, 특성비교를 위해 PIMPLE 알고리즘에서도 동작할 수 있도록 소스 코드를 수정하였다. 두 솔버에 대해 동일한 조건을 설정하여 상하동요에 대한 자유 감쇠 운동 해석을 진행하였고, 매 PIMPLE iteration 마다 부유체의 가속도를 OpenFOAM 로그파일에 출력시키고 스크립트를 통해 추출한 결과를 Fig. 3.4에 나타내었다.



(a) symplectic solver



(b) Newmark solver

Fig. 3.4 Convergence characteristics of sixDoFSolvers

초기상태를 지나 안정된 이후에는 두 솔버 모두 전반적으로 동일한 가속도의 경향을 보였지만, 초기상태에서 두 솔버의 수렴 특성은 큰 차이를 보였다. symplectic 솔버의 경우, 외재적 특성으로 인해 동일 시간간격 내에서는 가속도의 단조로운(monotonic) 변화를 보였지만 시간간격 간에는 심하게 진동하는 변화를 보였다. 이와 반대로, Newmark 솔버는 내재적 특성으로 인해 동일 시간간격 내에서는 가속도의 진동하는 변화를 보였지만, 시간간격 간에는 단조로운 변화를 보였다.

결과적으로 Newmark 솔버의 경향이 symplectic 솔버의 경향보다 물리적으로 타당한 것으로 판단되고, Newmark 솔버는 다섯 번째 시간간격부터 전체적인 가속도가 안정화된 반면에 symplectic 솔버는 스무 번째 시간간격까지도 전체적인 가속도가 안정화되지 못했다. 그리고 두 솔버 모두 동일 시간간격 내에서 세 번째 PIMPLE iteration에서 수렴된 가속도를 보였다.

위의 특성비교 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 내재적 특성의 Newmark 솔버를 사용하였고, 계류계에 의한 복원력이 외력으로 추가되어야 하기 때문에 부유체에 작용하는 전체 힘과 모멘트를 계산하는 식 (3.37)에 계류계에 의한 힘과 모멘트가 추가된다.

마지막으로 sixDoFRigidBodyMotion 클래스는 부유체의 물성치 및 6자유도강체운동에 대한 상태정보(state)를 총체적으로 관리하고, 이를 위해 sixDoFRigidBodyMotionState

라는 하위 클래스를 포함하고 있다. 상태정보는 회전중심(center of rotation), 회전각도(orientation), 속도, 가속도, 각운동량(angular momentum) 및 토크로 구성되어 있으며, 매 시간간격마다 위의 정보들을 출력해준다. 또한 부유체의 운동에 대한 자유도를 제한하는 constraint 클래스와 운동을 구속하는 외력 모델을 포함하고 있는 restraint 클래스를 포함하고 있다. Restraint 클래스에 대해서는 다음 장에서 좀 더 상세히 설명하였다.

3.7.2 구속 모델(restraint model)

구속 모델은 부유체의 6자유도운동을 구속하는 외력을 전달해줄 수 있는 모델들로, 부유체의 변위와 속도에 의해 외력을 생성하고 전달해주는 스프링과 댐퍼들로 구성되어 있고, 모델의 종류들에 대해서는 Fig. 3.5에 나타내었다.

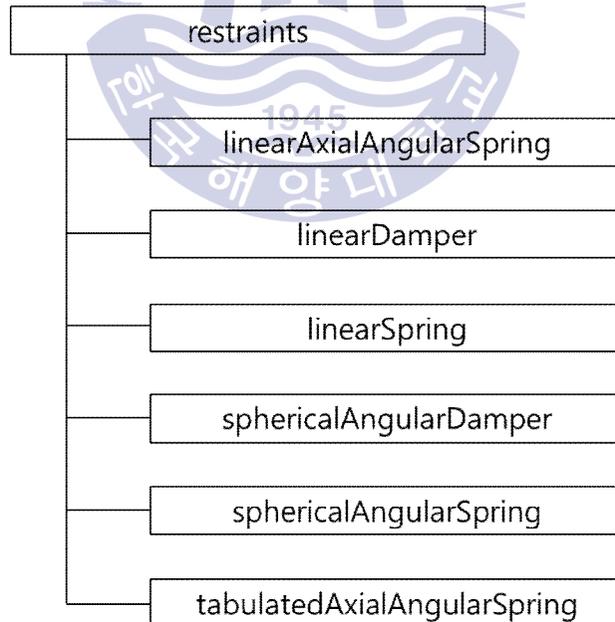


Fig. 3.5 Restraint models of OpenFOAM

구속 모델들은 작용원리에 따라 스프링과 댐퍼로 구분할 수 있고, 작용방향에 따라 선형(linear) 모델과 회전(angular) 모델로 구분할 수 있다. 선형 모델들은 병진운동에 대한 변위와 속도에 의해 작용하고, 회전 모델들은 회전운동에 대한 변위와 속도에 의해 작용한다.

구속 모델들은 sixDoFRigidBodyMotion 클래스에서 restrain() 함수에 의해 호출 되는데, restrain() 함수는 motion, rP, rF 및 rM과 같은 4개의 인수(argument)를 갖는다. motion은 부유체의 물성치와 6자유도강체운동에 대한 상태정보를 가지고 있는 객체(object)이고, rP는 구속위치(restraint position)로 변위의 기준점 또는 계산된 외력의 작용점으로 사용된다. 나머지 rF와 rM은 구속모델에 의해 계산된 외력을 병진방향과 회전방향으로 구분한 구속힘(restraint force)과 구속모멘트(restraint moment)를 의미한다. 대표적인 구속 모델들에서 인수들의 역할을 Table 3.2에 정리하였다.

Table 3.2 Arguments of restrain() function in the restraint models

	motion	rP	rF	rM
Linear spring	input	used as fairlead position and acting point of rF	calculated	not calculated
Angular spring	input	used only as acting point of rM	not calculated	calculated
Linear damper	input	used only as acting point of rF	calculated	not calculated
Angular damper	input	used only as acting point of rM	not calculated	calculated

모든 모델에서 motion 객체는 자신이 가지고 있는 부유체의 위치와 속도 등을 구속 모델의 입력값으로 제공한다.

선형스프링 모델은 구속위치를 페어리드(fairlead)의 위치로 사용하여 스프링의 변위를 계산하고, 이를 바탕으로 구속힘을 계산한 후 계산된 힘을 다시 구속위치를 작용점으로 하여 외력으로 전달해준다.

회전스프링 모델은 지정해준 축을 중심으로 회전변위를 적용하여 구속모멘트를 계산한 후 구속위치를 작용점으로 하여 외력으로 전달해주고, 이 때의 구속위치는 부유체의 회전중심(center of rotation)으로 지정해준다.

선형댐퍼 및 회전댐퍼 모델은 스프링모델들과 비슷한 방법으로 작용하지만, 부유체의 변위대신 속도를 이용하여 구속힘과 구속모멘트를 계산한다. 댐퍼모델들에 의해 계산된 힘과 모멘트는 기본적으로 좌표계의 원점이 작용점으로 지정되어 있는데, 이는 해석을 위한 격자계를 만들 때 일반적으로 초기 질량중심(회전중심)을 원점에 위치하도록 만들기 때문이며, 만약 초기 질량중심의 위치가 원점과 다르다면 구속위치를 변경시켜주어야 한다.

3.8 수치 파랑 수조 구현

파랑의 생성(generation) 및 소멸(absorption)이 가능한 수치 파랑 수조(numerical wave tank)의 구현을 위해 waves2Foam 라이브러리(Jacobsen et al., 2012)를 적용하였다. 이 라이브러리는 덴마크공대(Technical University of Denmark)의 Niels Gjøl Jacobsen에 의해 OpenFOAM에서 파랑조건을 구현하기 위한 플러그인(plugin)으로 개발되었으며, 현재는 GPL license를 통해 소스 코드가 공개되어 있다.

waves2Foam은 완화구역(relaxation zone) 기법을 통해 다양한 규칙파(stokes wave, cnoidal wave 등), 이중파(bichromatic wave) 및 불규칙파들을 생성할 수 있다. 또한 같은 기법을 통해 구현한 수치해변(numerical beach)를 통해 파랑을 소멸시켜 반사파를 효과적으로 제거할 수 있다.

3.8.1 완화구역(relaxation zone) 기법

파랑이 존재하는 해석에 있어서, 출구 경계면에서의 반사파를 방지하고 더 나아가서 반사파가 해석 영역을 가로질러 파랑이 생성되는 입구 경계면에 영향을 미치는 것을 방지하는 것은 매우 중요하다. 출구 경계면에서의 반사파는 해석결과를 오염시키고,

반사파가 입구 경계면에 영향을 미치게 되면 자유수면의 높이에 불연속성(discontinuity)이 발생하게 되어 수치해의 수렴에 방해가 되기 때문이다.

이런 이유로, 완화구역 기법은 해석 영역의 입구 경계면과 출구 경계면 주위에 완화구역을 설정하여 파랑의 생성 및 소멸을 강제적으로 조절할 수 있도록 하였다. 정확한 파랑의 생성 및 소멸을 위해, 완화구역 내에서는 목표하는 값과 계산된 값들을 가중함수(weighting function)를 이용하여 완화시킨다.

완화방법에 대해서는 외재적 및 내재적 접근법이 있는데, 현재의 waves2Foam에서는 외재적 접근법만 사용이 가능하고 그 식은 다음과 같다.

$$\phi = (1 - \omega)\phi_{target} + \omega\phi_{computed} \quad (3.43)$$

여기서, ϕ 는 완화구역 내에서 계산되는 변수로서 속도(\vec{v})와 체적비(α)가 해당된다. ω 는 가중함수를 의미하고 완화구역 내에서 $\omega \in [0, 1]$ 범위에서 계산된다. waves2Foam에서 가중함수를 계산하는 방법은 exponential wight, free polynomial weight 및 third order polynomial weight의 세 가지가 있고, 본 연구에서는 free polynomial weight 방법을 사용하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\omega = 1 - x^p \quad (3.44)$$

여기서, x 는 $x \in [0, 1]$ 의 범위에서 변화하는 완화구역 내의 국소 좌표(local coordinate)이다. ω 는 x 에 대한 함수로서, 입구 및 출구 경계면에서는 $\omega(x=1) = 0$ 과 같이 표현할 수 있고, 완화구역과 완화되지 않은 해석영역(computational zone) 사이의 경계면에서는 $\omega(x=0) = 1$ 과 같이 표현할 수 있다. p 는 지수(exponent)로서, 본 연구에서는 기본값인 10을 사용하였다. 완화구역과 가중함수에 대해서 Fig. 3.6에 자세히 나타내었다.

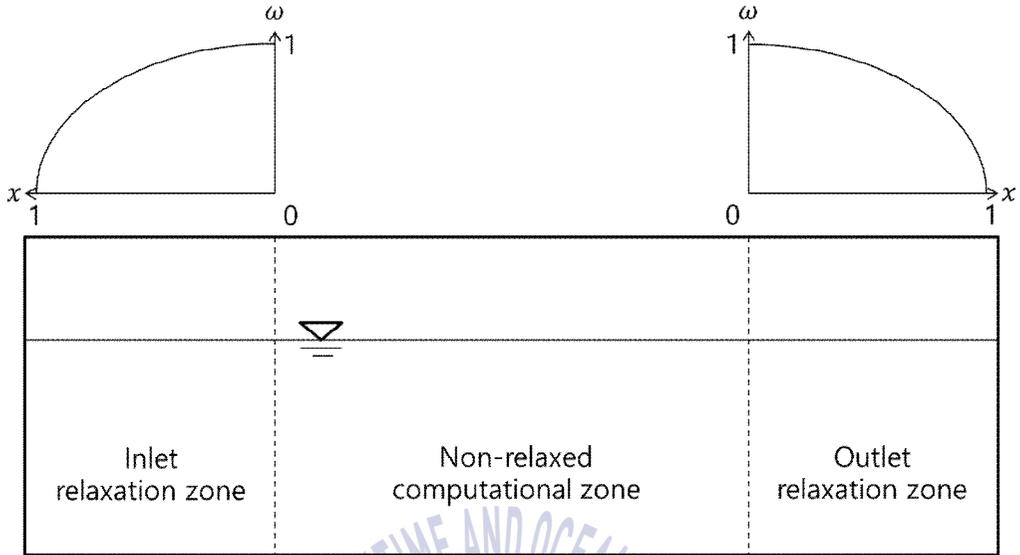


Fig. 3.6 Relaxation zones and weighting function

3.8.2 파 이론(wave theory)

본 연구에서 사용된 파랑은 5차의 스톱스 파(Stokes 5th order wave)이고, waves2Foam은 Fenton (1985; 1990)의 이론에 의해서 5차의 스톱스 파랑을 생성한다. 유체의 평균 수평 속도(mean horizontal fluid speed), 즉 파랑의 속도(wave speed), \bar{u} 가 식 (3.45)와 같이 주어질 때 속도 포텐셜(velocity potential) ϕ 을 통해 표현되는 파랑에 대한 해(solution)는 식 (3.46)과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{u} \left(\frac{k}{g} \right)^{1/2} = C_0 + \epsilon^2 C_2 + \epsilon^4 C_4 + O(\epsilon^6) \quad (3.45)$$

$$\phi(x, y) = -\bar{u}x + C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \epsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh jky \sin jkx + O(\epsilon^6) \quad (3.46)$$

여기서, k , g , ϵ 은 각각 파수(wave number), 중력가속도 및 무차원 파고(dimensionless wave height)를 의미하고, ϵ 는 파수와 파고를 곱한 값을 2로 나눈 수가 된다 ($\epsilon = kH/2$). C_0 , C_2 , C_4 , 및 A_{ij} 는 수식에 적용된 계수들을 의미한다. $O(\epsilon^6)$ 는 수식 전개에 있어서 무차원 파고 ϵ 이 6제곱 이상이 되는 항들은 오차항(error term)에 포함시키고 무시한다는 의미이다.

자유수면 η , 체적유량(volume flow rate) Q 및 베르누이 상수(Bernoulli constant) R 은 각각 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 k\eta(x) &= kd + \epsilon \cos kx + \epsilon^2 B_{22} \cos 2kx + \epsilon^3 B_{31} (\cos kx - \cos 3kx) \\
 &+ \epsilon^4 (B_{42} \cos 2kx + B_{44} \cos 4kx) + \epsilon^5 (- (B_{53} + B_{55}) \cos kx + B_{53} \cos 3kx \\
 &+ B_{55} \cos 5kx) + O(\epsilon^6)
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

$$\begin{aligned}
 Q \left(\frac{k^3}{g} \right)^{1/2} &= C_0 kd + \epsilon^2 (C_2 kd + D_2) + \epsilon^4 (C_4 kd + D_4) + O(\epsilon^6) \\
 &= \bar{u} d \left(\frac{k^3}{g} \right)^{1/2} + \epsilon^2 D_2 + \epsilon^4 D_4 + O(\epsilon^6)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\frac{Rk}{g} = \frac{1}{2} C_0^2 + kd + \epsilon^2 E_2 + \epsilon^4 E_4 + O(\epsilon^6) \tag{3.49}$$

여기서, 파수와 수심의 곱으로 나타나는 kd 는 무차원 수심(dimensionless water depth)을 의미하고, B_{22} , B_{31} , B_{42} , B_{44} , B_{53} , B_{55} , D_2 , D_4 , E_2 및 E_4 는 수식에 적용된 계수들을 의미한다.

식 (3.45)~(3.49)에 표시된 계수들 A , B , C , D 및 E 를 자세히 나타내면 다음과 같다.

$$A_{11} = 1/\sinh kd$$

$$A_{22} = 3S^2/[2(1-S)^2]$$

$$A_{31} = (-4-20S+10S^2-13S^3)/[8\sinh kd(1-S)^3]$$

$$A_{33} = (-2S^2+11S^3)/[8\sinh kd(1-S)^3]$$

$$A_{42} = (12S-14S^2-264S^3-45S^4-13S^5)/[24(1-S)^5]$$

$$A_{44} = (10S^3-174S^4+291S^5+278S^6)/[48(3+2S)(1-S)^5]$$

$$A_{51} = (-1,184+32S+13,232S^2+21,712S^3+20,940S^4+12,554S^5-500S^6 \\ -3,341S^7-670S^8)/[64\sinh kd(3+2S)(4+S)(1-S)^6]$$

$$A_{53} = (4S+105S^2+198S^3-1,376S^4-1,302S^5-117S^6+58S^7)/ \\ [32\sinh kd(3+2S)(1-S)^6]$$

$$A_{55} = (-6S^3+272S^4-1,552S^5+852S^6+2,029S^7+430S^8)/ \\ [64\sinh kd(3+2S)(4+S)(1-S)^6]$$

$$B_{22} = \coth kd(1+2S)/[2(1-S)]$$

$$B_{31} = -3(1+3S+3S^2+2S^3)/[8(1-S)^3]$$

$$B_{42} = \coth kd(6-26S-182S^2-204S^3-25S^4+26S^5)/[6(3+2S)(1-S)^4]$$

$$B_{44} = \coth kd(24+92S+122S^2+66S^3+67S^4+34S^5)/[24(3+2S)(1-S)^4]$$

$$B_{53} = 9(132+17S-2,216S^2-5,897S^3-6,292S^4-2,687S^5+194S^6+467S^7+82S^8)/ \\ [128(3+2S)(4+S)(1-S)^6]$$

$$B_{55} = 5(300 + 1,579S + 3,176S^2 + 2,949S^3 + 1,188S^4 + 675S^5 + 1,326S^6 + 827S^7 + 130S^8) / [382(3 + 2S)(4 + S)(1 - S)^6]$$

$$C_0 = (\tanh kd)^{1/2}$$

$$C_2 = (\tanh kd)^{1/2}(2 + 7S^2) / [4(1 - S)^2]$$

$$C_4 = (\tanh kd)^{1/2}(4 + 32S - 116S^2 - 400S^3 - 71S^4 + 146S^5) / [32(1 - S)^5]$$

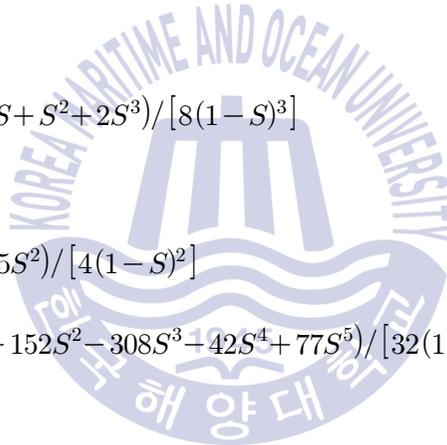
$$D_2 = -(\coth kd)^{1/2}/2$$

$$D_4 = (\coth kd)^{1/2}(2 + 4S + S^2 + 2S^3) / [8(1 - S)^3]$$

$$E_2 = \tanh kd (2 + 2S + 5S^2) / [4(1 - S)^2]$$

$$E_4 = \tanh kd (8 + 12S - 152S^2 - 308S^3 - 42S^4 + 77S^5) / [32(1 - S)^5]$$

여기서, $S = \operatorname{sech} 2kd$ 이다.



제 4 장 양방향 연성해석 인터페이스

4.1 개요

부유체의 6자유도운동과 계류계의 인장 하중간의 양방향 연성해석의 절차는 다음과 같이 진행된다. 먼저 부유체의 거동을 해석하는 OpenFOAM으로부터 계산된 6자유도 변위와 속도, 시간 및 시간간격크기(time step size)을 MoorDyn에 넘겨준다. 그러면 MoorDyn은 6자유도 변위와 속도를 경계조건(boundary condition)으로 사용하여 페어리드 및 모든 내부 절점들의 위치, 속도 및 가속도를 계산하여 페어리드에 작용하는 인장 하중을 계산한다. 그리고 페어리드에 작용하는 인장 하중을 바탕으로 계류계에 의한 6자유도 복원력(restoring force)을 계산한 후 이를 다시 OpenFOAM에 전달해준다. 마지막으로 OpenFOAM은 다음 시간 간격에서의 부유체의 거동을 계산하기 위해 넘겨받은 복원력을 추가된 외력으로 적용하여 부유체에 작용하는 전체 가속도와 토크를 계산하고, 이를 바탕으로 부유체의 거동을 계산 한다.

이러한 양방향 연성해석을 위해서는 OpenFOAM과 MoorDyn간에 서로 데이터를 주고받을 수 있도록 적절한 인터페이스를 만들어 주는 것이 중요하고, 이 인터페이스는 OpenFOAM과 MoorDyn의 양방향 연성을 위해 추가로 생성한 구속 모델 내에 존재하게 된다. OpenFOAM이 부유체의 6자유도운동에 대한 정보(motionState_), 시간(time_) 및 시간 간격(timeStep_)을 멤버 변수(member variable)로 갖는 motion 객체를 새로운 구속 모델의 내부로 보내주면, 인터페이스 통해 6자유도 변위와 속도, 시간 및 시간 간격으로 변환되어 MoorDyn으로 넘겨진다. 반대로 MoorDyn에서 계산된 6자유도 복원력을 두 개의 벡터 변수인 restraintForce와 restraintMoment로 반환해주면, 인터페이스를 통해 가속도와 토크로 변환되어 OpenFOAM으로 넘겨진다. 이 과정을 Fig. 4.1에 자세히 나타내었다.

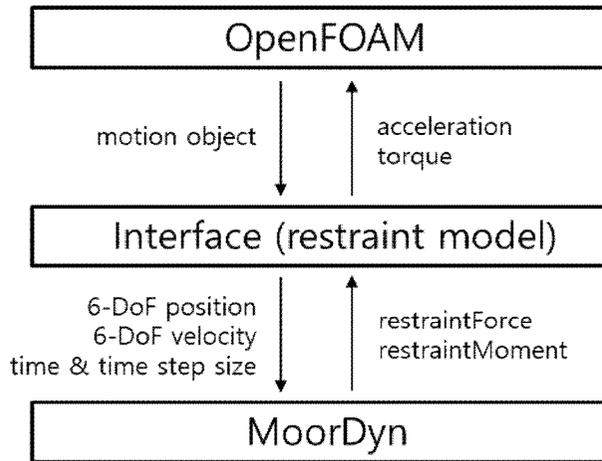


Fig. 4.1 Interface between OpenFOAM and MoorDyn

4.2 함수의 동적 로딩(dynamic loading)

양방향 연성해석 솔버는 OpenFOAM을 주 솔버(primary solver)로 사용하고, MoorDyn을 부 솔버(secondary solver)로 연동시켰다. 연동을 위해서는 2.3장에서 설명한 MoorDyn의 핵심 함수(core function)들을 OpenFOAM내의 원하는 위치에서 호출할 수 있어야 하는데, 이를 위해서 함수의 동적 로딩(Hjálmtýsson and Gray, 1998)을 사용하였다.

함수의 동적 로딩을 사용하기 위해서는 먼저 핵심 함수들을 동적 링킹(dynamic linking)이 가능하도록 공유 라이브러리 파일로 컴파일 하여야 한다. 윈도우즈에서는 dll(dynamically linked library)파일을 이용하는 것과 달리, OpenFOAM은 Linux기반에서 동작하므로 공유 라이브러리인 so(shared object)파일로 컴파일 하여 사용한다. 공유 라이브러리의 생성과 OpenFOAM 내에서의 함수 호출 위치에 대해서 Fig. 4.2에 자세하게 나타내었다.

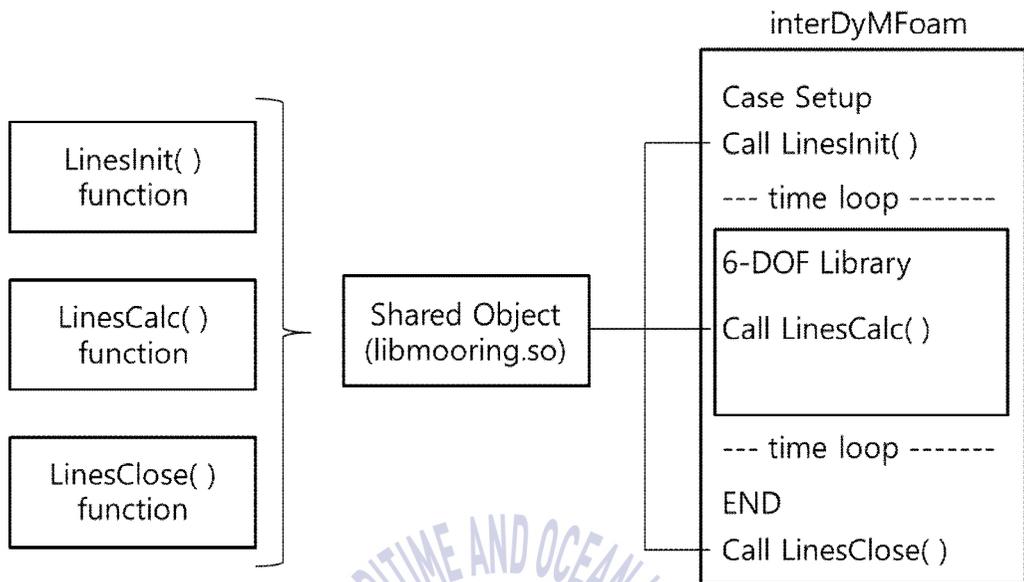


Fig. 4.2 Dynamic loading and call of core functions in OpenFOAM

먼저 LinesInit(), LinesCalc() 및 LinesClose() 함수들을 컴파일 하여 공유 라이브러리인 libmooring.so 파일을 생성하고, 동적 로딩을 통해 OpenFOAM 내에서 함수들을 호출한다. OpenFOAM의 솔버는 다상유동(multi-phase flow)의 해석과 격자의 변형을 바탕으로 부유체의 6자유도운동 해석이 가능한 interDyMFoam 솔버를 선택하였고, OpenFOAM의 케이스 설정이 끝나고 타임 루프(time loop)가 시작되기 전에 LinesInit() 함수를 호출하였다. 반복계산이 진행되는 타임 루프 동안, 매 시간 간격마다 호출되는 부유체의 6자유도운동 라이브러리 내에서 양방향 연성해석 인터페이스의 핵심인 LinesCalc() 함수가 호출된다. 끝으로 OpenFOAM의 계산이 모두 끝나고 난 이후에 LinesClose() 함수가 호출된다. 함수들이 정확한 위치에서 호출되었음을 Fig. 4.3을 통해서 확인할 수 있다.

```
GAMGPOG: Solving for pcorr, Initial residual = 0, Final residual = 0, No Iterations 0
time step continuity errors : sum local = 0, global = 0, cumulative = 0
Reading/calculating face velocity Uf

Courant Number mean: 0 max: 0

Running Mooring Module...
  Creating mooring system. 3 fairleads, 3 anchors, 0 connections.
  Finalizing ICs using dynamic relaxation (5X normal drag)
  Fairlead tensions converged to 0.1% after 6 seconds.

Starting time loop

Courant Number mean: 0 max: 0
```

(a) LinesInit() function

```
smoothSolver: Solving for epsilon, Initial residual = 0.00618365538809, Final residual = 1.80
ns 4
smoothSolver: Solving for k, Initial residual = 0.00675761613149, Final residual = 3.830645963
ExecutionTime = 395.91 s ClockTime = 401 s

End

Closing Mooring Module...
sclee@DESKTOP-SFDV05M: ~/test/floatingObject$ paraFoam
```

(b) LinesClose() function

Fig. 4.3 Call locations of LinesInit() and LinesClose() functions

4.3 새로운 구속 모델

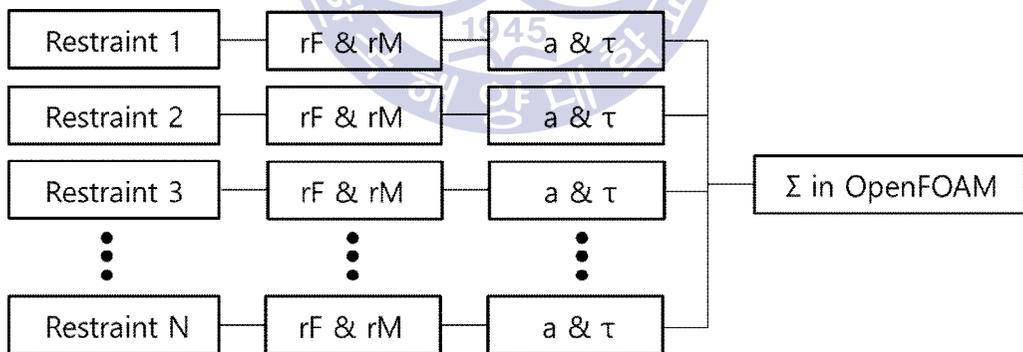
양방향 연성해석 인터페이스로 사용하기 위한 새로운 구속 모델 mooringLine을 추가로 생성하였고, mooringLine 구속 모델은 OpenFOAM에서 기본으로 제공하는 구속 모델들과 차별되는 두 가지 특징을 가지고 있다.

첫째로, OpenFOAM에서 기본으로 제공하는 구속 모델들은 6자유도운동 정보를 사용하여 구속힘과 구속모멘트를 직접 계산하지만, mooringLine 구속 모델은 6자유도운동 정보를 사용하여 MoorDyn의 입력 변수들만 직접 계산 및 설정하고 LinesCalc() 함수를 호출함으로써 구속힘과 구속모멘트를 얻을 수 있다.

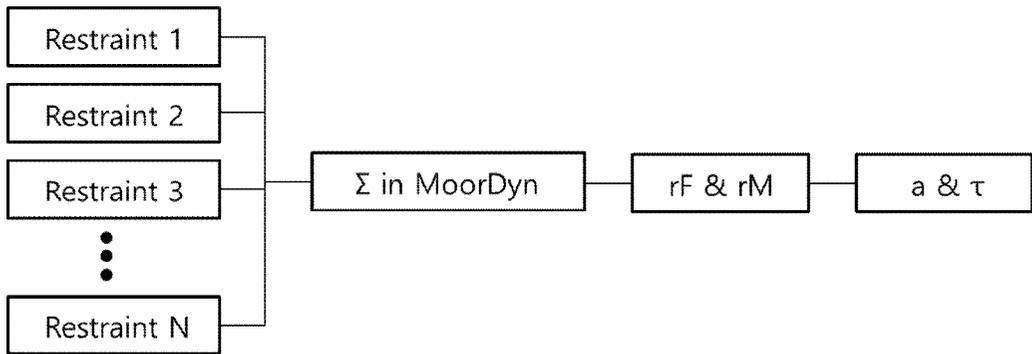
둘째로, OpenFOAM에서 기본으로 제공하는 구속 모델들은 구속 요소가 여러 개인

경우, 구속 모델을 설정하는 dynamicMeshDict 파일에 각 구속 요소들을 별도로 생성 및 설정해야 한다. 예를 들어, 계류 라인이 8개가 연결되어 있으면 8개의 구속 요소들을 각각 별도로 생성해주고 각 요소들의 물성치 및 입력변수들을 설정해주어야 한다. 그와 달리 mooringLine 구속 모델에서는 단 하나의 구속 요소만을 생성하면 된다. 계류 라인의 개수 및 세부 설정은 Fig. 2.5에서와 같이 MoorDyn의 입력 파일을 통해서 설정할 수 있다.

마찬가지로, OpenFOAM에서 기본으로 제공하는 구속 모델들은 각 요소별로 계산된 구속힘 또는 구속모멘트를 바탕으로 가속도와 토크를 각각 계산하고, 각 구속 요소로부터의 가속도와 토크를 OpenFOAM 내에서 합산하는 과정을 거쳐 최종 가속도와 토크를 결정하는데 반해, mooringLine 구속 모델은 MoorDyn 내에서 모든 계류 라인들에 의한 총 힘과 모멘트를 합산하여 하나의 배열(array) 변수 Flines로 반환해주고 이를 바탕으로 최종 가속도와 토크를 결정한다. 따라서 OpenFOAM 내에서 별도로 합산하는 과정이 필요 없다. 각 구속 요소에서 계산된 구속힘과 구속모멘트가 최종 가속도와 토크로 변환되는 과정의 차이를 Fig. 4.4에 나타내었다.



(a) Standard restraint models



(b) New mooringLine restraint model

Fig. 4.4 Calculation procedures for external forces by restraint models

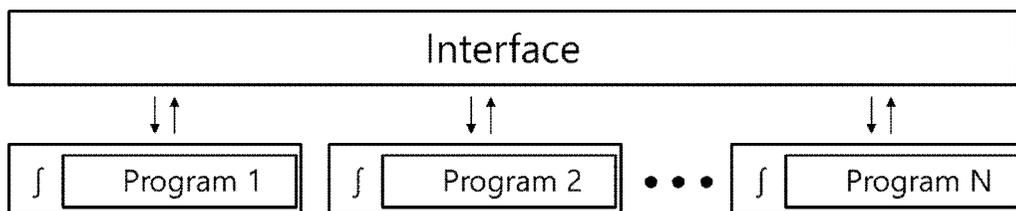
4.4 연성 기법

OpenFOAM과 MoorDyn의 양방향 연성을 위해 다음과 같은 연성 기법들이 사용되었다. 두 솔버 간의 결합도에 대해서는 연성 시점에만 필요한 정보들을 전달해주는 느슨한 연성(loose coupling) 기법을 사용하였고, OpenFOAM의 현재 시간간격에서의 계류계 계산에 이전 시간간격의 정보들을 바탕으로 계산된 구속힘과 구속모멘트를 전달해주는 지연 연성(delayed coupling) 기법을 사용하였다.

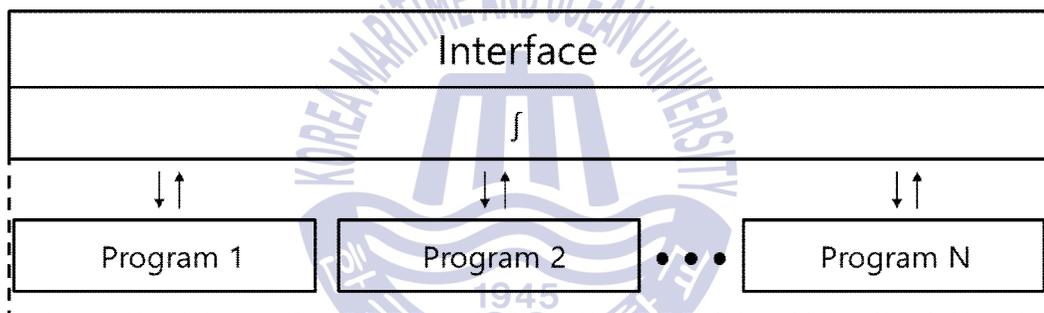
4.4.1 느슨한 연성(loose coupling)

일반적으로 서로 다른 두 프로그램을 연성시키는 방법은 긴밀한 연성(tight coupling)과 느슨한 연성(loose coupling)으로 구분된다(Jonkman, 2013). 느슨한 연성 기법은 각 프로그램들이 각자의 솔버를 사용하여 변수들을 계산하고 내부적으로 데이터를 유지하면서 연성 시점에만 인터페이스를 통해 필요한 변수들을 교환하는 반면에, 긴밀한 연성 기법은 각 프로그램들이 각자의 지배방정식을 설정하기만 하고,

변수들의 계산 및 저장은 모든 프로그램에 적용되는 공통된 솔버의 내부에서 이루어진다. 두 연성 기법에 대해서 Fig. 4.5에 자세히 나타내었다.



(a) Loose coupling scheme



(b) Tight coupling scheme

Fig. 4.5 Loose and tight coupling schemes

이런 이유로, 느슨한 연성 기법은 긴밀한 연성 기법에 비해 수치적 안정성(numerical stability)은 다소 부족할 수 있다. 하지만 각 프로그램의 소스 코드를 최소한으로 수정하여 연성할 수 있고, 각 프로그램별로 적절한 시간간격을 별도로 지정할 수 있으므로 계산 효율(computational efficiency)을 높일 수 있는 장점이 있으므로 본 연구에서는 느슨한 연성 기법을 사용하였다.

4.4.2 지연 연성(delayed coupling)

OpenFOAM의 모션 솔버는 내재적(implicit) 특성의 6자유도 솔버인 Newmark를 사용하였고, 이는 내재적 특성으로 인해 현재 시간간격에서의 최종 속도가 결정된 이후에 운동을 계산한다. 즉, 동일한 시간간격에서 속도를 먼저 계산하고 마지막에 운동을 계산한다. 이에 반해 MoorDyn은 외재적(explicit) 특성의 솔버로서 동일한 시간간격에서 페어리드의 시작위치와 이 위치로부터 이동하는 속도를 바탕으로 계류계에 대한 해석을 진행한다. OpenFOAM과 MoorDyn의 시간 진행의 차이를 Fig. 4.6에 나타내었다.

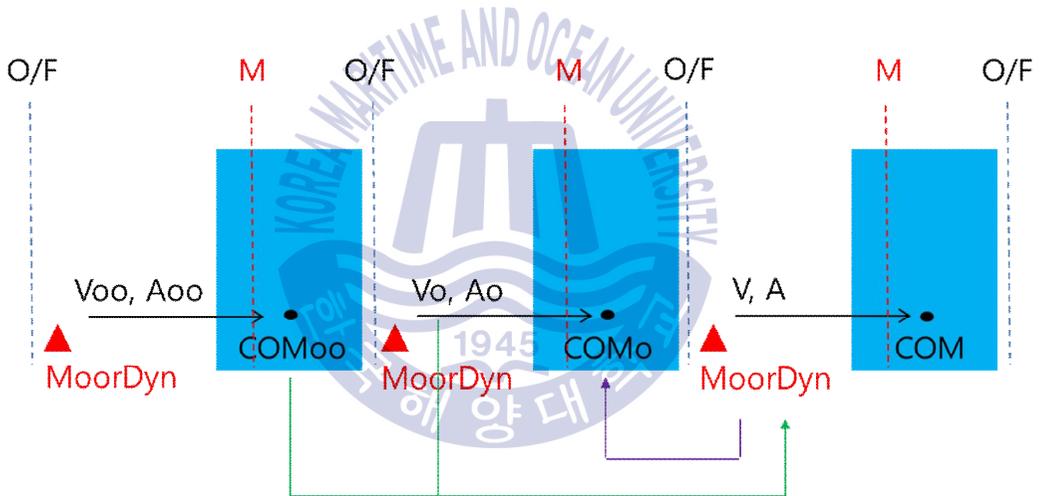


Fig. 4.6 Time steps of OpenFOAM and MoorDyn

이런 이유로, 현재 시간간격의 해석을 진행함에 있어서 MoorDyn의 LinesCalc() 함수가 호출되는 시점에서 OpenFOAM은 페어리드의 시작위치는 제공해 줄 수 있지만 속도를 제공해 줄 수 없는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 지연 연성(delayed coupling) 기법을 사용하였다.

지연 연성 기법의 절차는 다음과 같다. Fig. 4.6에서 보는 것과 같이, 두 단계 이전

시간간격에서 위치를 가져오고, 한 단계 이전 시간간격에서 속도를 가져온다. 그리고 이들을 이용하여 계산된 계류계의 복원력을 한 단계 이전 시간간격의 위치에 전달해 준다. 즉, MoorDyn에서 외재적으로 계산이 가능하도록 확정된 위치와 속도의 제공이 가능한 이전 시간간격들의 OpenFOAM 정보를 사용하는 것이다. 결과적으로 MoorDyn의 시간간격이 OpenFOAM의 시간간격보다 한 단계(0.001초) 지연되며, 이러한 지연 연성은 느슨한 연성 기법을 사용하였기 때문에 구현이 가능하다.

추가로, MoorDyn의 내부에서 위치와 속도 등의 변수들의 상태(state)를 일관성(consistency)있게 유지하기 위해서는 MoorDyn에서 계산한 새로운 위치와 OpenFOAM에서 가져온 새로운 위치가 일치해야 하는데, OpenFOAM에서 제공하는 속도를 직접 사용하는 경우 미세한 차이가 발생하는 것을 발견하였다. 이를 개선하기 위해 OpenFOAM에서 제공하는 속도를 직접적으로 사용하지 않고, 각 시간간격 마다의 위치를 가져와서 시간간격으로 나눈 속도를 사용하였다.

4.5 양방향 연성해석 인터페이스 구조

최종적으로 개발된 인터페이스의 구조를 Fig. 4.7에 나타내었다. 제일 먼저 구속 모델이 실행되면, 6자유도강체운동의 motion 객체로부터 운동정보와 시간정보를 가져오고 이 정보들을 바탕으로 위치와 속도를 계산한다. 그리고 위치, 속도, 시간 및 시간간격을 인수(argument)로 갖는 LinesCalc() 함수를 호출한다. LinesCalc() 함수는 호출되고 나서 현재 PIMPLE iteration이 몇 번째 단계인지에 따라 다르게 동작한다.

PIMPLE iteration은 OpenFOAM에만 있는 특수한 반복계산 루프(loop)로서, 부유체의 6자유도운동과 유동장(flow field)간의 평형 상태(equilibrium state)를 얻기 위해 동일한 시간간격에서의 계산을 반복하는 것이다. 매 PIMPLE iteration 마다 변경된 유동장에 의해 부유체에 가해지는 힘과 모멘트를 새로 계산하고, 이 힘과 모멘트에 의한 6자유도운동을 새롭게 계산하면서 평형 상태에 이르도록 하는 것이다.

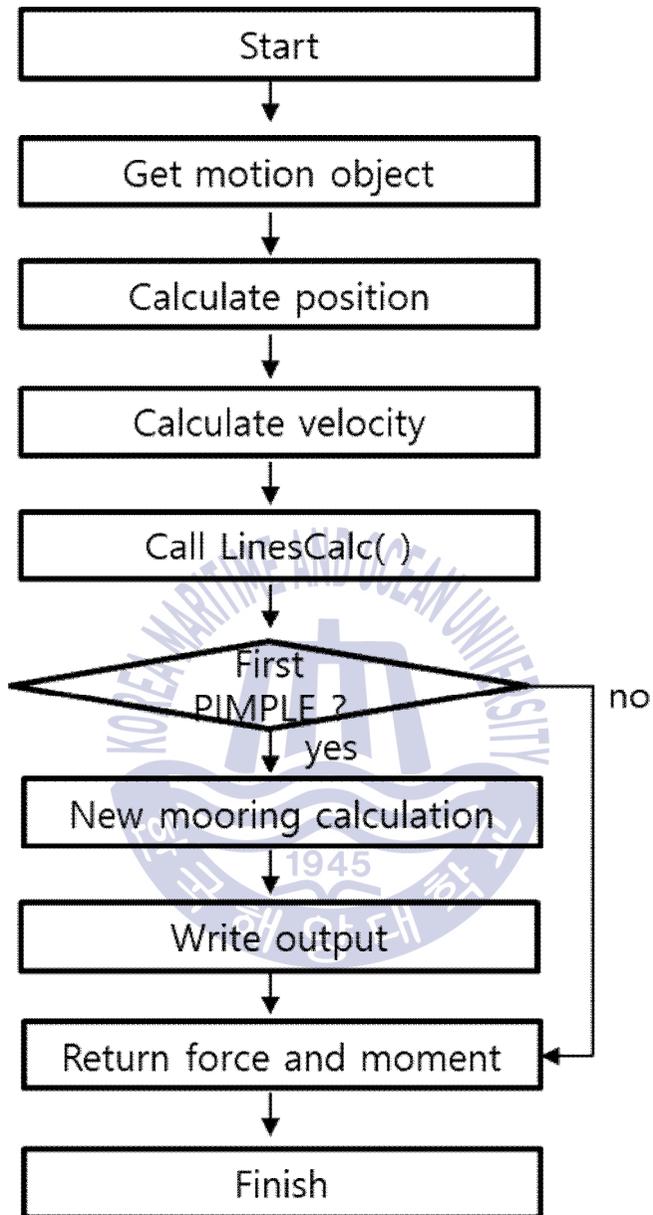


Fig. 4.7 Flow chart of two-way coupling interface

이 때 유동장에 의해 부유체에 가해지는 힘과 모멘트는 매번 변경되더라도 계류계에 의해 계산된 구속힘과 구속모멘트는 동일한 시간간격 동안에는 일정한 값이 유지되어야 한다. 이런 이유로, 첫 번째 PIMPLE iteration에서는 LinesCalc() 함수가 계류계에 대한 새로운 계산을 진행하고, 계산결과를 출력한 후 구속힘과 구속모멘트를 반환해준다. 첫 번째 PIMPLE iteration이 아니라면, 새로운 계산의 진행이나 계산결과 출력 없이 이전에 계산되었던 구속힘과 구속모멘트를 반환해준다.

이를 위해 첫 번째 PIMPLE iteration 여부를 확인할 수 있는 부울 변수(Boolean variable) moored_를 도입하였고, moored_의 값이 참(true)일 때만, LinesCalc() 함수가 새로운 계류계의 해석을 진행하도록 하였다. 이런 과정을 통해 동일 시간간격에서 구속 모델이 실행하는 PIMPLE iteration의 횟수에 상관없이 계류계에 의한 복원력은 일정한 값을 유지할 수 있고, 계류계 해석결과 출력도 매 시간간격 당 한번만 실행될 수 있다.

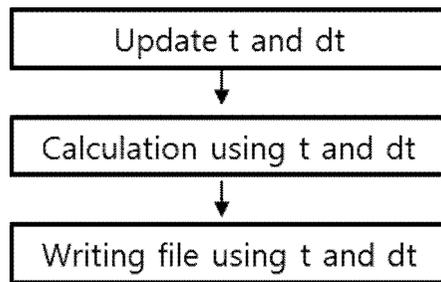
4.6 양방향 연성해석 인터페이스 검증

본 장에서는 개발된 양방향 연성해석 인터페이스를 통해서 변수들이 정확하게 전달되는지 확인 하였다. 두 솔버 간의 시간 동기화, 변위와 속도의 전달 및 구속힘과 구속모멘트의 전달에 대해서만 확인하였고, 계산된 구속힘 및 구속모멘트 값의 정확성에 대해서는 개발된 양방향 연성해석 솔버의 결과 검증에서 확인할 것이다.

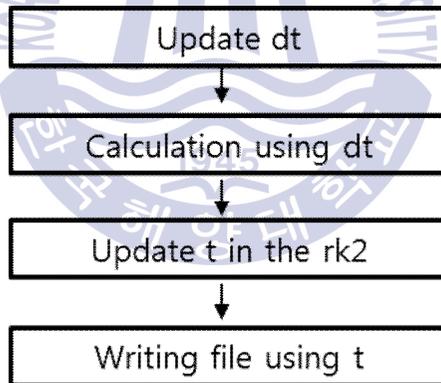
4.6.1 시간 동기화

먼저 시간 동기화에 대해서는 OpenFOAM과 MoorDyn의 시간 진행(time advancing) 방식에 차이가 있어서 소스 코드를 수정해주었다. 각 솔버의 시간 진행 방식을 Fig. 4.8에 나타내었다. OpenFOAM에서는 매 시간간격 초기에 시간(time)과 시간간격크기(time step size)를 갱신하고, 두 변수를 이용하여 계산을 진행하고 결과를 출력한다. 이와 달리 MoorDyn은 매 시간간격 초기에 시간간격크기만을 갱신하고, 계산도

시간간격크기 하나만을 이용하여 계산한다. Runge-Kutta 알고리즘을 이용한 시간적분 루프에서 계류계해석을 위한 MoorDyn의 시간간격크기를 이용하여 시간을 갱신하고, 최종적으로 갱신된 시간을 이용하여 결과를 출력한다.



(a) OpenFOAM



(b) MoorDyn

Fig. 4.8 Time advancing methods of OpenFOAM and MoorDyn

시간 동기화를 위해 OpenFOAM에서 현재 시간이 아닌 한 단계 이전 시간을 MoorDyn에 넘겨주도록 하였고, 실행 결과를 Fig. 4.9에 나타내었다. OpenFOAM에서 0.001초의 시간간격으로 계산했을 때, MoorDyn의 결과파일에서도 동일한 시간간격을

이용하여 파일을 출력하고 PIMPLE iteration을 3번 진행했음에도 매 시간당 한 번씩만 결과를 출력했음을 확인할 수 있다.

Time (s)	FAIRTEN1 (N)	FAIRTEN2 (N)	FAIRTEN3 (N)
0	2.33065	2.33027	2.33027
0.001	2.33068	2.33029	2.33029
0.002	2.3307	2.33031	2.33031
0.003	2.33071	2.33033	2.33033
0.004	1.81706	1.81652	1.81652
0.005	2.12198	2.12166	2.12166
0.006	2.19142	2.19107	2.19107
0.007	1.65128	1.65084	1.65084
0.008	1.60393	1.60367	1.60367
0.009	2.06851	2.06723	2.06723
0.01	2.20454	2.20425	2.20425
0.011	1.29536	1.29541	1.29541
0.012	1.58963	1.58953	1.58953
0.013	3.52465	3.52374	3.52374
0.014	1.38974	1.38974	1.38974
0.015	1.68986	1.6899	1.6899

Fig. 4.9 Fairlead tension output file of MoorDyn

4.6.2 변위와 속도 전달

변위와 속도의 전달을 확인하기 위한 OpenFOAM의 log파일을 Fig. 4.10에 나타내었다. 현재 시간간격(0.005초)에서 MoorDyn 계산을 위해 전달된 변위와 속도를 확인하기 위해서, 이전 두 시간간격(0.003초 및 0.004초)에서 최종 위치와 속도가 결정되는 세 번째 PIMPLE iteration의 log와 현재 시간간격에서 계류 시스템의 계산이 진행되는 첫 번째 PIMPLE iteration에 대한 log를 바탕으로 확인하였다.

0.003초에서의 회전중심의 위치가 0.005초에서의 MoorDyn 계산을 위한 초기 위치로 사용되었음을 확인할 수 있다. 이동 속도에 대해서는 OpenFOAM이 제공하는 속도(약 0.008803589m/s) 대신, 0.003초에서의 회전중심의 위치에서 0.004초에서의 회전중심의 위치로 이동한 속도(약 0.007161882m/s)가 MoorDyn 계산을 위한 속도로 사용되었음을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 설명한 지연 연성(delayed coupling) 기법을 통한 변위와 속도의 전달이 정확하게 이루어졌음을 의미한다.

```

PIMPLE: iteration 3
forces forces:
  Not including porosity effects
Restraint mooring1:
  linear velocity: (0 0 0.00305798713093)
  angular velocity: (0 0 0)
  linear displacement: (0 0 -0.172195141797)
  angular displacement: (0 0 0)
  restraint force: (0.000371845468647 0 -1.50312129869)
  restraint moment: (1.38777878078e-17 7.06687467441e-05 0)
  moored 0

6-DoF rigid body motion
  Centre of rotation: (0 0 -0.172187123938)
  Centre of mass: (0 0 -0.172187123938)
  Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)
  Linear velocity: (0 0 0.00552017502941)
  Acceleration: (2.32339613337e-05 -7.86814990539 0.307694878354)
  Angular velocity: (0 0 0)
  Local angular velocity: (0 0 0)
  Torque: (21.6753590799 8.5197431912e-05 -2.79589072886e-09)

```

(a) OpenFOAM log at 0.003s (3rd PIMPLE iteration)

```

PIMPLE: iteration 3
forces forces:
  Not including porosity effects
Restraint mooring1:
  linear velocity: (0 0 0.00495987202895)
  angular velocity: (0 0 0)
  linear displacement: (0 0 -0.17219208381)
  angular displacement: (0 0 0)
  restraint force: (8.99094418537e-05 0 -1.3515086118)
  restraint moment: (-1.38777878078e-17 -3.56579787813e-05 0)
  moored 0

6-DoF rigid body motion
  Centre of rotation: (0 0 -0.172179962056)
  Centre of mass: (0 0 -0.172179962056)
  Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)
  Linear velocity: (0 0 0.00880358855807)
  Acceleration: (4.48714898904e-06 -8.96948038145 6.25913217896)
  Angular velocity: (0 0 0)
  Local angular velocity: (0 0 0)
  Torque: (32.4550839109 -6.20042047995e-05 -3.2802816257e-09)

```

(b) OpenFOAM log at 0.004s (3rd PIMPLE iteration)

```

Time = 0.005

PIMPLE: iteration 1
forces forces:
  Not including porosity effects
Restraint mooring1:
linear velocity: (0 0 0.00716188179373)
angular velocity: (0 0 0)
linear displacement: (0 0 -0.172187123938)
angular displacement: (0 0 0)
restraint force: (0.000186051166753 0 -1.55718012952)
restraint moment: (0 -7.61661736004e-06 0)
moored 1

6-DoF rigid body motion
  Centre of rotation: (0 0 -0.17217185323)
  Centre of mass: (0 0 -0.17217185323)
  Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)
  Linear velocity: (0 0 0.00741406392905)
  Acceleration: (1.84920946219e-05 -6.14595896486 -9.038181437)
  Angular velocity: (0 0 0)
  Local angular velocity: (0 0 0)
  Torque: (4.74683744547 -5.57046056098e-05 -2.45673402283e-09)

```

(c) OpenFOAM log at 0.005s (1st PIMPLE iteration)

Fig. 4.10 OpenFOAM logs for displacement and velocity input of MoorDyn

4.6.3 계류계의 구속력 전달

앞서 언급한 바와 같이 동일한 시간간격에서 반복되는 PIMPLE iteration 동안 유동장에 의해 부유체에 가해지는 힘과 모멘트는 평형 상태를 이루기 위해 변하더라도, 계류계에 의한 구속힘과 구속모멘트는 일정하게 유지되어야 한다. 이를 확인하기 위해서 0.005초에서의 OpenFOAM의 log파일을 Fig. 4.11에 나타내었다.

부울 변수(Boolean variable)인 moored_가 첫 번째 PIMPLE iteration 여부에 대한 참/거짓 값을 표현해주고 있다. 그러므로 moored_가 1인 경우에만 계류계에 대한 새로운 해석을 진행하고, moored_가 0인 경우에는 첫 번째 PIMPLE iteration에서 계산된 구속력을 그대로 이용한다. 그 결과 매 PIMPLE iteration 마다 동일한 구속력이 적용되었음을 확인할 수 있고, 유동장에 의한 힘과 모멘트는 변하므로 최종적으로 결정된 가속도와 속도는 변하는 것을 확인할 수 있다.

Time = 0.005

PIMPLE: iteration 1

forces forces:

Not including porosity effects

Restraint mooring1:

linear velocity: (0 0 0.00716188179373)

angular velocity: (0 0 0)

linear displacement: (0 0 -0.172187123938)

angular displacement: (0 0 0)

restraint force: (0.000186051166753 0 -1.55718012952)

restraint moment: (0 -7.61661736004e-06 0)

moored 1

6-DoF rigid body motion

Centre of rotation: (0 0 -0.17217185323)

Centre of mass: (0 0 -0.17217185323)

Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)

Linear velocity: (0 0 0.00741406392905)

Acceleration: (1.84920946219e-05 -6.14595896486 -9.038181437)

Angular velocity: (0 0 0)

Local angular velocity: (0 0 0)

Torque: (4.74683744547 -5.57046056098e-05 -2.45673402283e-09)

(a) 1st PIMPLE iteration

PIMPLE: iteration 2

forces forces:

Not including porosity effects

Restraint mooring1:

linear velocity: (0 0 0.00716188179373)

angular velocity: (0 0 0)

linear displacement: (0 0 -0.172187123938)

angular displacement: (0 0 0)

restraint force: (0.000186051166753 0 -1.55718012952)

restraint moment: (0 -7.61661736004e-06 0)

moored 0

6-DoF rigid body motion

Centre of rotation: (0 0 -0.172164675918)

Centre of mass: (0 0 -0.172164675918)

Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)

Linear velocity: (0 0 0.0217686885995)

Acceleration: (3.35885229786e-07 -11.4450881564 19.6710679039)

Angular velocity: (0 0 0)

Local angular velocity: (0 0 0)

Torque: (56.7755414461 6.84469560169e-05 -5.44018451552e-09)

(b) 2nd PIMPLE iteration

```

PIMPLE: iteration 3
forces forces:
  Not including porosity effects
Restraint mooring1:
  linear velocity: (0 0 0.00716188179373)
  angular velocity: (0 0 0)
  linear displacement: (0 0 -0.172187123938)
  angular displacement: (0 0 0)
  restraint force: (0.000186051166753 0 -1.55718012952)
  restraint moment: (0 -7.61661736004e-06 0)
  moored 0

6-DoF rigid body motion
  Centre of rotation: (0 0 -0.172170450929)
  Centre of mass: (0 0 -0.172170450929)
  Orientation: (1 0 0 0 1 0 0 0 1)
  Linear velocity: (0 0 0.010218665513)
  Acceleration: (9.29688303502e-06 -7.17802605408 -3.4289782692)
  Angular velocity: (0 0 0)
  Local angular velocity: (0 0 0)
  Torque: (14.9024217355 7.31630492091e-05 -4.81731913333e-09)

```

(c) 3rd PIMPLE iteration

Fig. 4.11 OpenFOAM logs for restraint force and moment of MoorDyn

4.7 디렉토리 구조

양방향 연성해석 솔버의 실행을 위해서 OpenFOAM의 기본적인 케이스 디렉토리 (case directory) 구조에 MoorDyn의 입출력 파일들을 위한 별도의 디렉토리를 추가해주었고, 이를 Fig. 4.12에 나타내었다.

OpenFOAM은 초기 조건 및 경계 조건을 설정하는 0 디렉토리, 물성치 및 계산에 필요한 조건들을 설정하는 constant 디렉토리 및 솔버와 수치기법 등을 설정하는 system 디렉토리로 구성되어 있고, 해석이 진행되면서 해석 결과들을 출력하는 결과 디렉토리들(results directories)이 추가로 생성된다. 여기에 MoorDyn의 입출력 파일들을 위한 Mooring 디렉토리를 추가하였다. 해석이 시작되기 전에 계류계의 설정을 위한 입력 파일(lines.txt)만 존재하다가, 해석이 진행되면서 .out 확장자를 갖는 결과 파일들이 생성되는 것을 Fig. 4.13을 통해서 확인할 수 있고, 이를 통해 양방향

연성해석 솔버가 정상적으로 작동하는 것과 두 솔버가 하나의 플랫폼을 통해 완전히 일체화가 되었음을 확인할 수 있다.

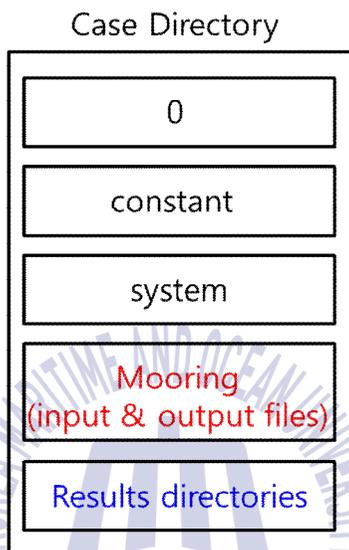


Fig. 4.12 Directory structure of two-way coupled solver

```
sclee@DESKTOP-SFDV05M: ~/test/floatingObject/Mooring$ ls
lines.txt
sclee@DESKTOP-SFDV05M: ~/test/floatingObject/Mooring$ cd ..
```

(a) Before solver run

```
sclee@DESKTOP-SFDV05M: ~/test/floatingObject/Mooring$ ls
Line1.out Line2.out Line3.out Lines.out lines.txt
sclee@DESKTOP-SFDV05M: ~/test/floatingObject/Mooring$
```

(b) After solver run

Fig. 4.13 MoorDyn input and output files in Mooring directory

제 5 장 검증 및 고찰

5.1 계류계의 정적하중 및 형상

계류계의 정적하중 및 형상에 대한 MoorDyn의 정확도를 검증하기 위해 비연성 (uncoupled) 해석을 진행하였고, 그 결과를 각각 엄밀해 및 수치해와 비교하였다.

계류계의 정적하중에 대해서는 Irvine(1992)의 현수선 방정식과 Masciola et al. (2013a)의 계류계의 물성치를 이용하여 해석을 진행하였고, 해석결과는 Irvine (1992)의 엄밀해와 비교하였다. 해석에 사용된 계류계의 물성치를 Table 5.1에 정리하였다.

Table 5.1 Mooring system properties for static load simulation

Properties	Values
Horizontal span (m)	325
Vertical span (m)	350
Line length (m)	500
Line diameter (m)	0.25
Line weight (kg/m)	292.8
Stiffness (N)	9.817×10^{10}

계류계의 정적하중에 대한 해석결과를 Fig. 5.1에 나타내었다. 계류 라인의 길이를 따라 동일한 간격으로 9개의 지점에서 인장 하중을 비교하였고, 엄밀해와 비교하였을 때 매우 잘 일치함을 확인하였다. 9개의 지점 중 엄밀해와 가장 큰 차이를 보인 곳은 7번 지점으로 오차는 약 -0.34%였다.

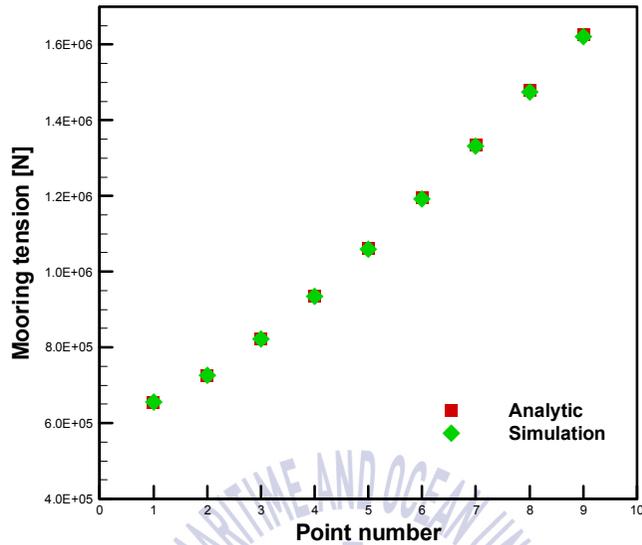


Fig. 5.1 Comparison of static load with analytic solution

계류계의 형상에 대해서는 집중 질량 모델을 사용한 Nakajima et al. (1982)의 수치해와 비교하였고, 해석에 사용된 계류계의 물성치를 Table 5.2에 정리하였다.

Table 5.2 Mooring system properties for profile simulation

Properties	Values
Horizontal span (m)	8.42
Vertical span (m)	3.0
Line length (m)	9.0
Line diameter (m)	5.99×10^{-3}
Line weight (kg/m)	0.222
Elasticity (kg/cm ²)	2.15×10^6

계류계의 형상에 대한 해석결과를 Fig. 5.2에 나타내었다. 페어리드에 작용하는 초기 인장 하중(약 29.9N)을 맞춰주기 위해 라인의 길이를 0.08m 증가시켜 해석을 진행하였다. 결과를 비교하기 위한 수치해에서 앵커와 페어리드를 제외하면 3개의 절점에 대한 위치만을 제공하고 있고 내부 절점들의 위치에서 미소한 차이가 있는데, 이는 페어리드에 작용하는 초기 인장 하중에 대한 설정이 다른데서 기인한 것으로 판단된다. Nakajima et al. (1982)에서 사용한 솔버는 페어리드에 직접 수평 및 수직 분력을 구분하여 제공할 수 있는 반면에, MoorDyn에서는 라인의 길이를 조절함으로써 페어리드에 작용하는 합력만을 조절할 수 있다. 그럼에도 불구하고 전체적인 계류계의 형상이 잘 일치함을 확인할 수 있다.

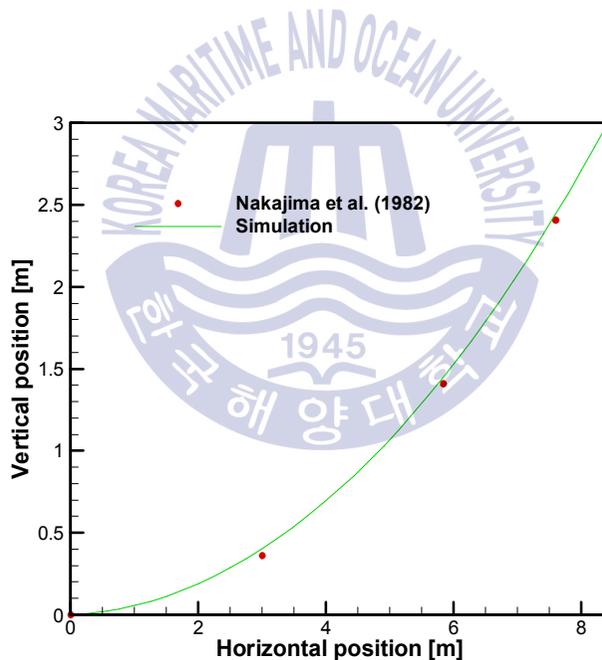


Fig. 5.2 Comparison of mooring line profile with numerical solution

앞의 두 케이스는 모두 계류 라인이 바닥에 닿지 않는 경우이기 때문에 해저면과의 접촉으로 인한 영향을 고려하기 위해 추가로 해석을 진행하였다. 계산을 위해 임의로

설정된 계류계의 물성치를 Table 5.3에 정리하였고, 계산결과를 상용 소프트웨어인 ANSYS AQWA의 결과와 비교하여 Fig. 5.3에 나타내었다.

Table 5.3 Mooring system properties for simulation with seabed contact

Properties	Values
Horizontal span (m)	487.5
Vertical span (m)	200
Line length (m)	550
Line diameter (m)	0.01
Line weight (kg/m)	150
Stiffness (N)	6.0×10^6

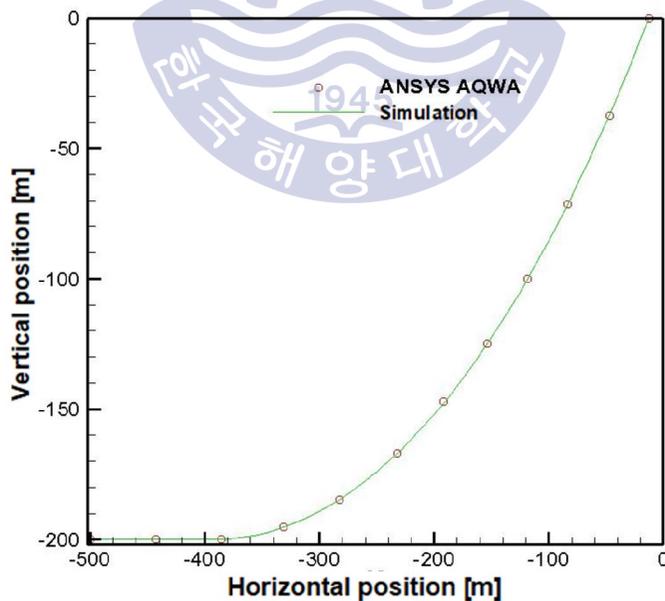


Fig. 5.3 Comparison of mooring line profile with ANSYS AQWA

MoorDyn에 의해 해석된 해저면에 놓인 계류 라인의 길이 및 내부 절점들의 위치가 ANSYS AQWA의 해석 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 추가로 계류계의 형상이 Fig. 5.3과 같을 때 앵커 및 페어리드에 작용하는 인장 하중의 계산결과를 비교하여 Table 5.4에 나타내었고, 두 솔버간의 오차가 1.0% 이하임을 확인하였다.

Table 5.4 Comparison of tensions at anchor and fairlead

Location	ANSYS AQWA Tension (N)	Simulation Tension (N)	Error (%)
Anchor	531,525	534,456	0.55
Fairlead	805,316	808,223	0.36

이러한 검증결과들을 통해 계류계의 정적하중 및 형상에 대한 MoorDyn의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 최종적으로 확인하였다.

여기에서 해저면 모델에 대해서 살펴보면, 2.2장의 식 (2.15)에 나타난 것과 같이, 해저면은 절점이 해저면으로 설정한 높이보다 밑으로 내려갔을 경우 수직방향으로 작용하는 스프링-댐퍼 시스템으로 모델링되어있다. 이 때, 실제로 해저면에 해당하는 구조체가 모델링 되어있는 것이 아니라, 스프링의 강성(stiffness)과 댐퍼의 감쇠 계수(damping coefficient)를 통해 수치적으로 해저면이 존재하는 것과 같은 효과를 주는 것이다. 해저면 모델의 강성과 감쇠 계수에 의해 구현되는 해저면의 특성은 다음과 같다.

먼저 해저면 모델의 강성변화에 따른 절점들의 분포위치를 Fig. 5.4에 나타내었다. 해저면의 강성은 절점의 자중(weight)과 부력의 합인 정미부력(net buoyancy)에 대해 절점이 아래로 가라앉지 않도록 받쳐줄 수 있을 만큼 충분한 크기를 가져야한다 (Davidson and Ringwood, 2017). Fig. 5.4에서 보는 것과 같이 강성이 충분히 제공되지 못하면 케이블은 단순히 두 끝점을 고정점으로 하여 허공에 매달린 케이블의 형상을

하지만, 강성이 충분히 제공되면 절점들은 마치 실제로 해저면이 존재하는 것처럼 설정된 높이에 위치하게 된다.

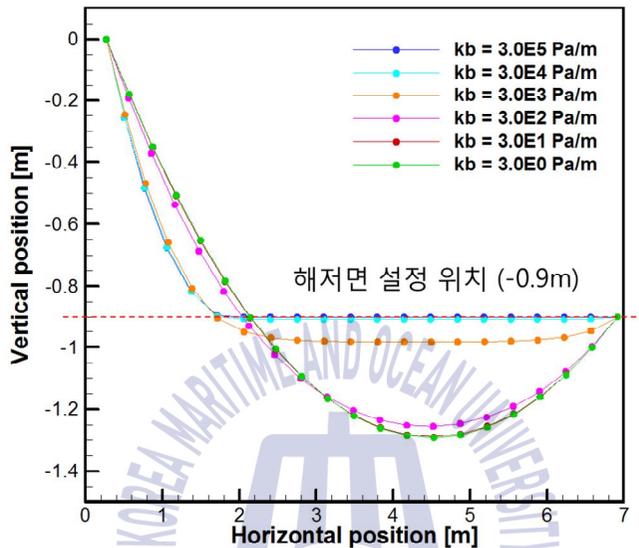
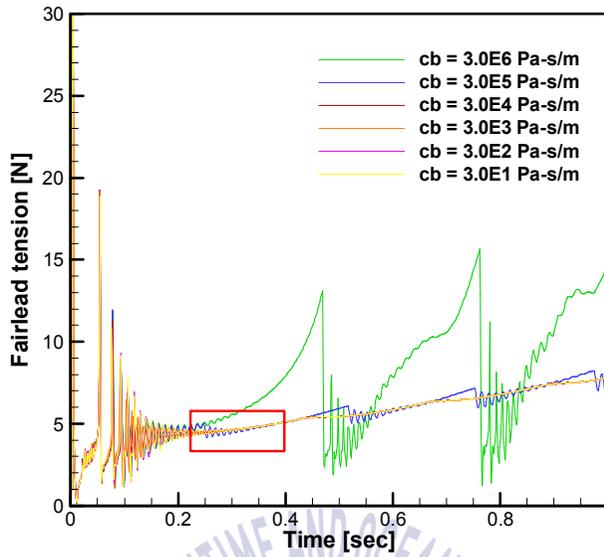


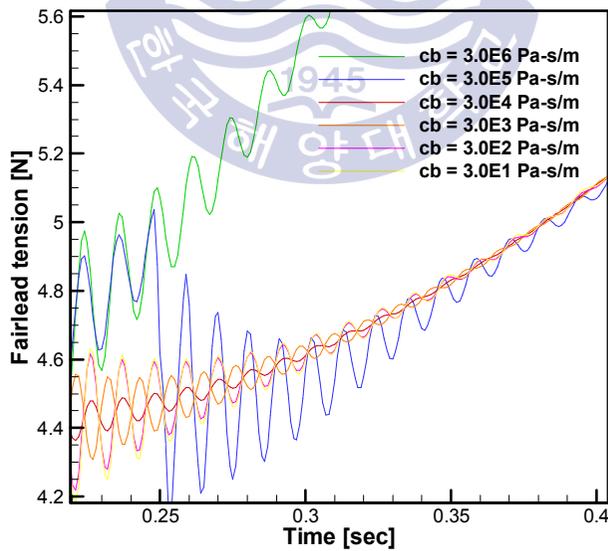
Fig. 5.4 Node positions with respect to the seabed stiffness

다음으로 해저면 모델의 감쇠 계수 변화에 따른 페어리드의 인장 하중을 Fig. 5.5에 나타내었다. 해저면 모델의 감쇠 계수는 절점이 해저면에 닿을 때와 해저면으로부터 들어올려질 때 각각 운동에너지의 소산(dissipation) 및 정적 마찰(static friction)의 역할을 담당하고, Fig. 5.5는 페어리드가 등속도로 상승하여 절점이 해저면으로부터 들어올려질 때의 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5.5의 (a)에서 녹색 및 파란색과 같이, 감쇠 계수가 과도하게 큰 경우에는 페어리드의 인장 하중에 현저한 불연속 영역이 나타나게 된다. 이는 절점이 해저면으로부터 들어올려질 때 과도한 마찰력이 작용하기 때문이며, 실제 물리현상에서 나타나는 것과는 현저히 다른 현상이라 할 수 있다.



(a) Global view for discontinuity of fairlead tension



(b) Local view for oscillation of fairlead tension

Fig. 5.5 Fairlead tensions with respect to the seabed damping coefficient

이와 반대로, Fig. 5.5의 (b)에서 분홍 및 노란색과 같이, 감쇠 계수가 과도하게 작은 경우에는 페어리드의 인장 하중에 불연속 영역은 나타나지 않지만 초기에 나타난 진동 현상이 오래 지속되게 된다. 이는 절점이 해저면으로부터 들어올려질 때, 인접한 해저면 절점에 전달된 운동에너지에 대한 소산이 작게 일어났기 때문이다.

결론적으로 해저면 모델을 통해 절점들이 해저면보다 가라앉거나 해저면에서 진동하는 현상이 일어나지 않도록 강성과 감쇠 계수를 적절히 선택해주어야 하고, 계류계의 형상, 크기 및 물성치 등에 따라 그 값이 달라질 수 있다.

5.2 계류계의 동적하중

계류계의 동적하중에 대한 MoorDyn의 정확도를 검증하기 위해 해석을 진행하였고, 그 결과를 Bergdahl et al.(2016)의 실험결과와 비교하였다.

Bergdahl et al. (2016)의 실험은 수심 3m의 수조에서 실시되었다. 계류 라인의 아래쪽 끝은 수조의 바닥에 고정되었고 위쪽 끝은 모터에 연결되어 회전하는 디스크에 고정되었다. 디스크의 회전중심은 수면으로부터 0.3m 위쪽에 위치하고, 회전중심으로부터 계류 라인 위쪽 끝의 고정위치까지의 거리와 디스크의 회전속도를 변수로 하여 다양하게 변경시키면서 실험을 진행하였다.

MoorDyn의 검증을 위해서, 회전주기는 3.5초 이고 계류 라인의 위쪽 고정점으로부터 회전중심까지의 거리가 0.2m인 경우의 실험결과와 해석결과를 비교 하였다. 실험장비의 설치 및 구성에 대해서는 Fig. 5.6에 자세히 나타내었고, 해석에 사용된 계류계의 모델 데이터들은 Table 5.5에 정리하였다. 계류계의 유체동역학 계수들은 Hall and Goupee (2015)의 값을 사용하였다.

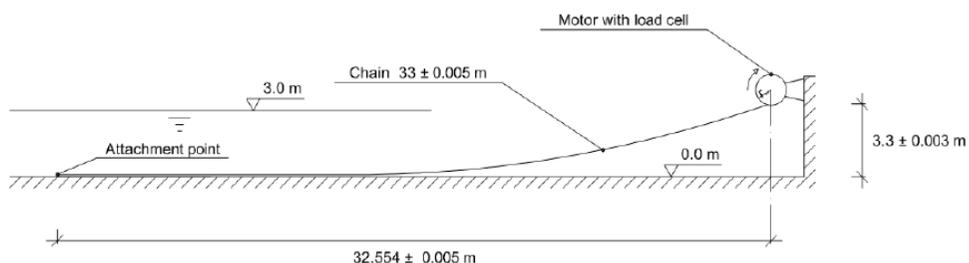


Fig. 5.6 Experimental setup for dynamic load simulation (captured from Bergdahl et al. (2016))

Table 5.5 Mooring properties and environmental parameters for dynamic load simulation

Properties	Values
Horizontal span (m)	32.554
Vertical span (m)	3.1
Line length (m)	33
Line diameter (m)	3.65×10^{-3}
Line weight (kg/m)	8.18×10^{-2}
Stiffness (N)	1.0×10^4
Normal drag coefficient	1.6
Tangential drag coefficient	0.1
Normal added mass coefficient	1.0
Tangential added mass coefficient	0.0
Bottom stiffness (Pa/m)	3.0×10^6
Bottom damping coefficient (Pa-s/m)	3.0×10^5

계류계의 동적하중에 대한 해석결과를 Fig. 5.7에 나타내었다. 실험 및 해석 초기에 발생할 수 있는 과도기적 특성(transient feature)을 배제하기 위하여, 약 3주기가 지난 후의 결과를 비교하였다. MoorDyn의 해석결과가 하중의 주기, 크기 및 하중 변화의 형상에 대해 실험결과와 매우 잘 일치하였고, 이는 모든 동적 효과(dynamic effect)들이 MoorDyn에 잘 반영되어 있음을 나타낸다. 느슨한 계류 영역(slack mooring region)에서 동적 하중이 다소 진동하는 경향을 보이는데, 이는 계류계의 이산화에 의한 영향 및 MoorDyn이 음의 변형률(negative strain)에 의한 압축력과 굽힘모멘트를 계산에 반영하지 않는 특성에서 기인한 것으로 판단된다. 그리고 검증결과를 통해 계류계의 동적하중에 대한 MoorDyn의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 최종적으로 확인하였다.

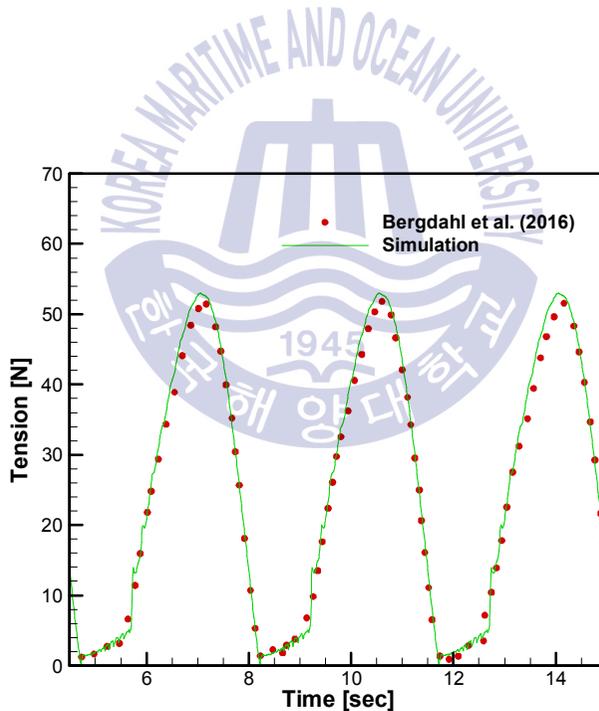


Fig. 5.7 Comparison of dynamic load with experiment result

5.3 정수 중 자유 감쇠 운동

부유체의 6자유도운동에 대한 OpenFOAM의 정확도를 검증하기 위해 정수(still water) 중에서의 자유 감쇠(free decay) 운동해석을 진행 하였고, 그 결과를 Paredes et al.(2016)의 실험결과와 비교하였다. Paredes et al. (2016)이 제공하는 데이터만으로는 해석을 위해 필요한 정보가 부족하여 동일한 팀에서 발표한 수치해석 논문인 Palm et al. (2016)의 데이터를 보충하여 사용하였다.

Paredes et al. (2016)의 실험은 길이 $15(x \in [-6, 9])\text{m}$, 폭 $5(y \in [-2.5, 2.5])\text{m}$ 및 깊이 $1.8(z \in [-0.9, 0.9])\text{m}$ 의 수조에서 실시되었고, 수심은 수조 깊이의 절반인 0.9m 로 설정하였다. 그리고 원통형 부이(cylindrical buoy)를 그 중심축이 좌표계의 원점을 지나도록 위치시켰다. 평형상태에서 부이의 초기 흘수(initial draft)는 0.172m 이고, 이때의 무게중심의 위치는 $(0, 0, -0.0962)\text{m}$ 이다. 원통형 부이의 자세한 물성치를 Table 5.6에 정리하였다.

Table 5.6 Properties of cylindrical buoy

Properties	Values
Mass (kg)	35.85
Diameter (m)	0.515
Height (m)	0.401
Moment of inertia, I_{xx} (kg-m ²)	0.9
Initial draft (m)	0.172
Initial center of mass (m)	(0, 0, -0.0962)

해석은 상하동요(heave)와 종동요(pitch)에 대해서 진행하였고, 초기 변위(initial offset)은 평형상태의 무게중심을 기준으로 각각 -0.075m 와 8.76° 로 설정하였다. 참고로 Palm et al. (2016)에서는 종동요에 해석에 대한 초기 변위를 9.898° 로 설정하였다고

언급 했지만, 논문에서 제시한 그래프를 확인한 결과 종동요에 대한 초기 변위는 8.76°가 타당하다고 판단하였고, 확인을 위하여 Palm et al. (2016)의 그래프를 Fig. 5.8에 나타내었다. 또한 유동장에 대한 해석은 정수 중에서 부이의 속도가 매우 작으므로 난류의 영향이 매우 작을 것으로 판단하여 층류(laminar) 조건으로 진행하였다.

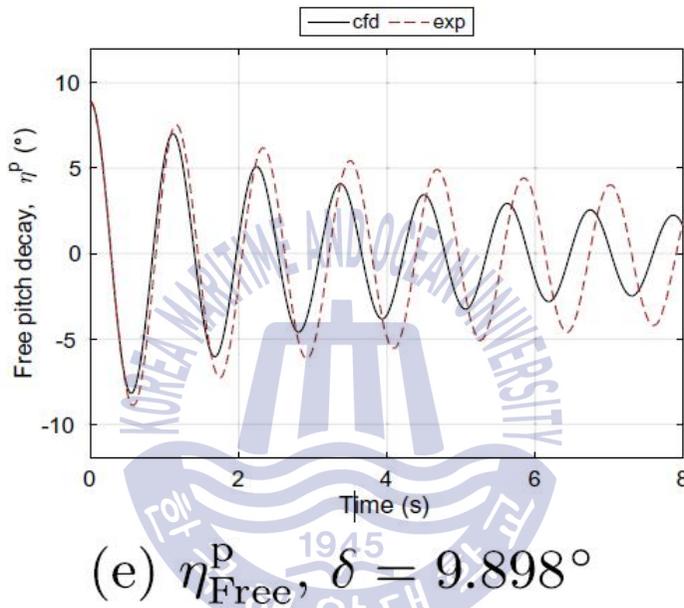


Fig. 5.8 Experimental and numerical results for free pitch decay test (captured from Palm et al. (2016))

해석에 사용된 격자계에 대해서 Fig. 5.9에 나타내었다. 전체 격자계는 $x \in [-6, 9]m$, $y \in [0, 2.5]m$ 및 $z \in [-0.9, 0.9]m$ 인 영역에 생성되었다. 총 격자의 수는 약 510만개로, 대부분의 격자를 부이 주위의 영역과 자유수면 영역에 격자를 밀집시켰고 부이로부터 멀어질수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 자유수면을 정확하게 예측하기 위하여, 파랑이 존재할 것으로 생각되는 영역에 파장(wave length) 당 최소 140개 및 파고(wave height) 당 22개의 격자를 위치시켰고, 이는 ITTC (2011)이 권장하는 파장 당 80개 및

파고 당 20개의 격자에 비하면 충분한 숫자이다.

부이의 표면에는 약 74,000개의 격자를 위치 시켰고, 점성경계층을 잘 포착하기 위해 부이 표면에 세 개 층의 레이어(layer)를 두고 첫 번째 격자의 높이는 1.5mm로 설정하였다. 격자계의 생성을 위해서 OpenFOAM 에서 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 blockMesh와 snappyHexMesh를 사용하였다. blockMesh는 기본 배경격자를 만들기 위해 사용하였고, snappyHexMesh는 실린더 형상의 부이 생성, 부이의 표면격자 생성 및 부이 주변과 자유수면 영역의 격자밀집도를 증가시키는데 사용하였다.

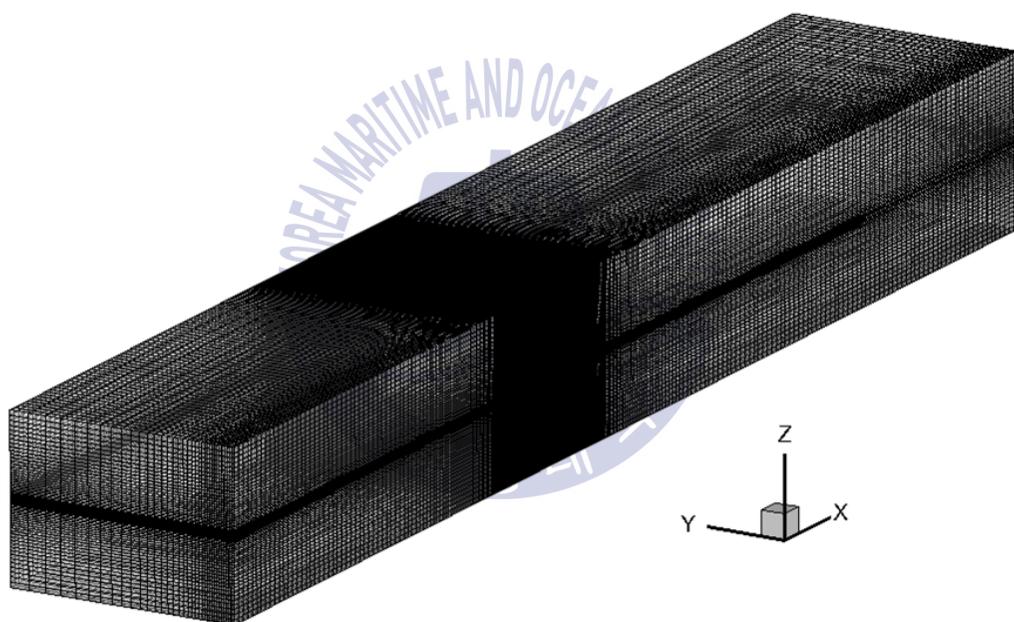


Fig. 5.9 Computational domain extent and grid system

해석에 사용된 경계조건에 대해서 Fig. 5.10에 나타내었다. 원통형의 부이에는 이동벽면(moving wall)조건을 적용하였고, 입구면과 출구면에 대해서는 부이의 운동으로 인해 발생한 파랑을 흡수하여 반사파를 방지할 수 있도록 완화구역 기법을 통한 정수(still water)조건을 적용하였다. 윗면에는 대기(atmosphere)조건을 적용하였고,

해석하고자 하는 운동이 $x-z$ 평면에 국한된 운동이므로 $y=0$ 인 면에 대해서는 대칭 (symmetry)조건을 적용하였고, 그 외의 모든 밑면과 옆면에는 고정벽면(fixed wall) 조건을 적용하였다. $x-z$ 평면에 대한 대칭조건을 이용한 관계로 Table 5.6에 나타난 부이의 질량과 관성모멘트는 절반의 값을 사용하였다.

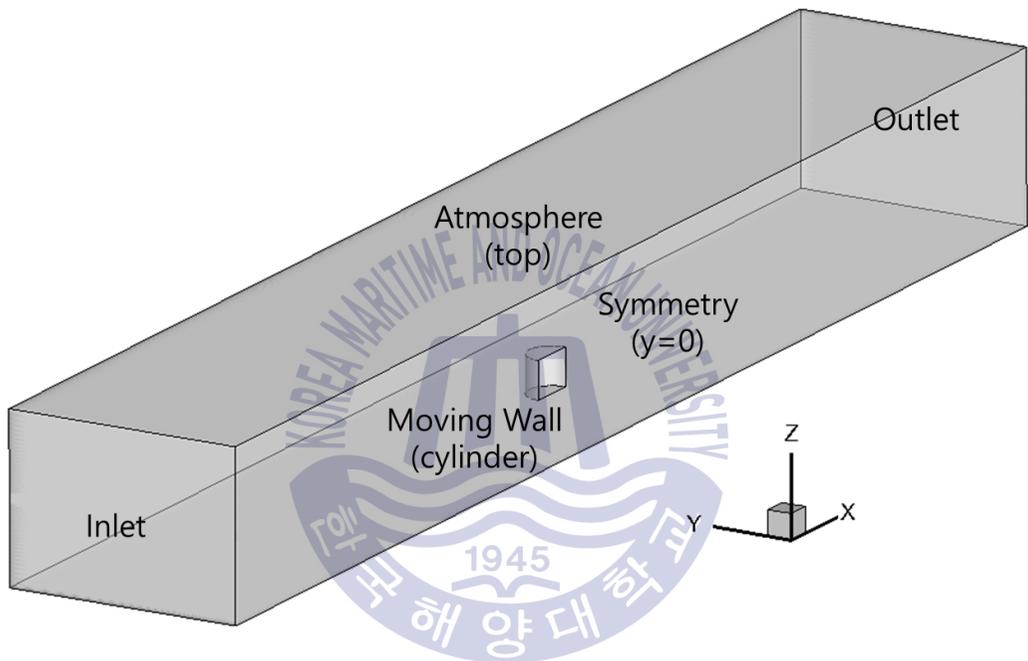
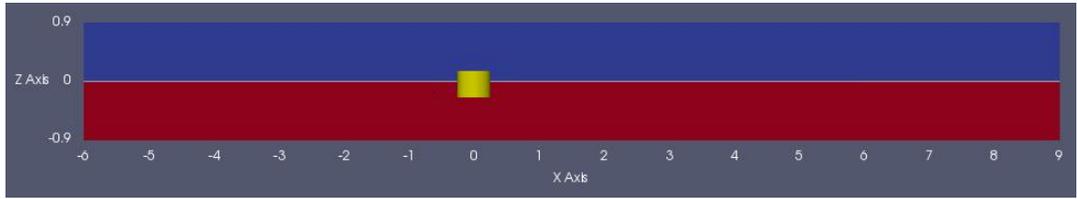
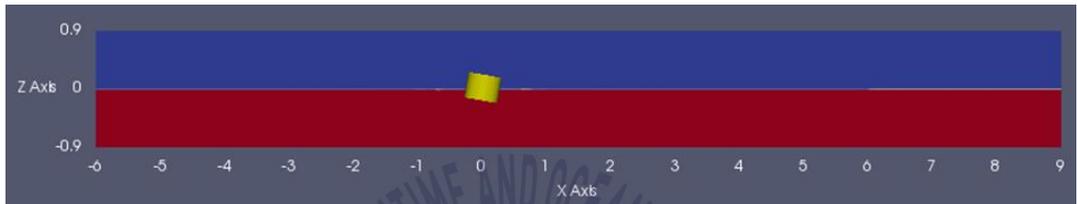


Fig. 5.10 Computational domain extent and boundary conditions

자유 감쇠 운동해석에 대한 초기 부이의 위치와 자유수면을 Fig. 5.11에 나타내었다. 해석은 시간간격의 크기를 0.001초로 고정한 상태로 상하동요에 대해서는 4.5초까지, 종동요에 대해서는 8.0초까지 진행하였고 그 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 5.12에 나타내었다.



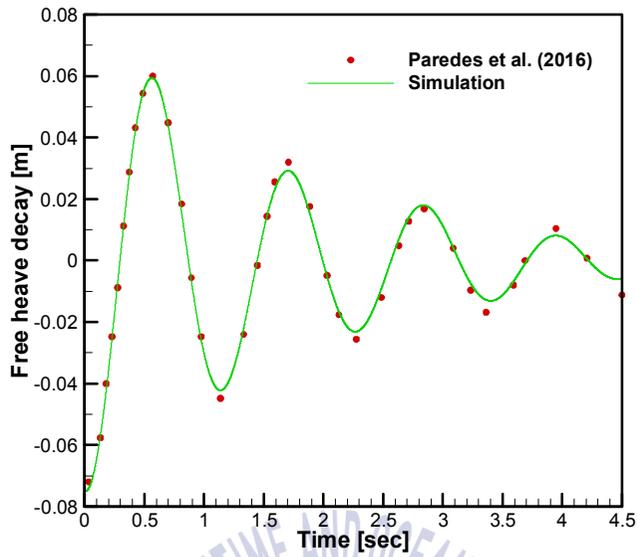
(a) Free heave decay (initial offset : -0.075m)



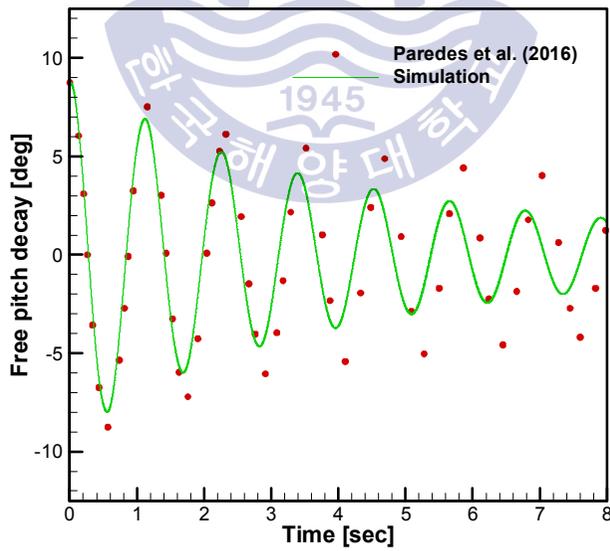
(b) Free pitch decay (initial offset : 8.75deg)

Fig. 5.11 Initial buoy positions and free surfaces for free decay test

상하동요의 경우 주기와 운동의 크기 모두 실험결과와 매우 잘 일치하였지만, 종동요의 경우 주기가 약간 짧아지고 운동의 크기에서는 감쇠가 제법 일어났다. 종동요의 주기는 일반적으로 무게중심의 위치 및 관성모멘트와 밀접한 관계가 있다. 그리고 Paredes et al. (2016)의 실험과 같은 작은 스케일의 모형시험에 대해서는 측정오차가 발생하기 쉽고, 비록 작은 측정오차일지라도 수치해석의 결과에는 큰 영향을 미칠 수 있다. 그래서 Palm et al. (2016)은 부이의 물성치에 대한 민감도 테스트를 시행한 결과, 부이의 무게중심을 3mm 위로 이동시키고 관성모멘트를 0.05kgm^2 증가시켰을 때 실험결과와 매우 잘 일치하는 주기를 OpenFOAM 계산을 통해 얻었다고 밝히고 있다.



(a) Free heave motion



(b) Free pitch motion

Fig. 5.12 Comparison of free decay motions with experiment results

OpenFOAM에 의해 계산된 자유 감쇠 운동의 크기는 전체적으로 실험결과에 비해 감쇠가 일어난 결과를 보이고 있다. 이는 실험에서 사용된 원통형 부이는 모서리부분을 부드럽게 처리해준 반면에 수치해석에 사용된 부이는 완전한 직각을 유지하는 날카로운 모서리를 가지고 있어 이로 인한 점성 저항이 크게 예측되었기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 원통형 모양의 특성 상 상하 동요는 압력의 영향을 주로 받는데 반해 종동요는 점성의 영향을 상대적으로 크게 받기 때문에 종동요의 감쇠가 더 크게 일어난 것으로 판단된다.

OpenFOAM에 의해 계산된 상하동요 및 종동요 운동의 주기를 실험결과와 비교하여 Table 5.7에 정리하였다. 상하동요 및 종동요에 대해 각각 4주기 및 7주기에 대한 평균값을 비교하였으며, 그 결과 상하동요는 -0.18%, 종동요는 -3.63%의 오차를 보였다. 검증결과를 통해 정수 중 자유 감쇠 운동에 대한 OpenFOAM의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

Table 5.7 Comparison of free decay motion periods with experiment results

Motion	Experiment	Simulation	Error (%)
Heave period (s)	1.112	1.110	-0.18
Pitch period (s)	1.170	1.129	-3.63

OpenFOAM을 이용하여 부유체의 운동을 해석함에 있어서 난류모델 및 수치기법의 변화에 따른 해석 결과의 경향을 확인하기 위한 추가적인 해석들을 진행하였다. 먼저 난류모델에 따른 경향을 확인하기 위해, 상하동요에 대한 자유 감쇠 운동을 층류, RNG $k-\epsilon$ 모델, SST $k-\omega$ 모델(Menter, 1993)을 각각 적용하여 해석하였고 그 결과를 비교하여 Fig. 5.13에 나타내었다. 그리고 시간항에 적용된 수치기법의 변화에 따른 경향을 확인하기 위해, 동일한 해석에 대해서 1차 정확도의 Euler기법과 2차 정확도의 Crank-Nicolson기법을 적용한 결과를 비교하여 Fig. 5.14에 나타내었다.

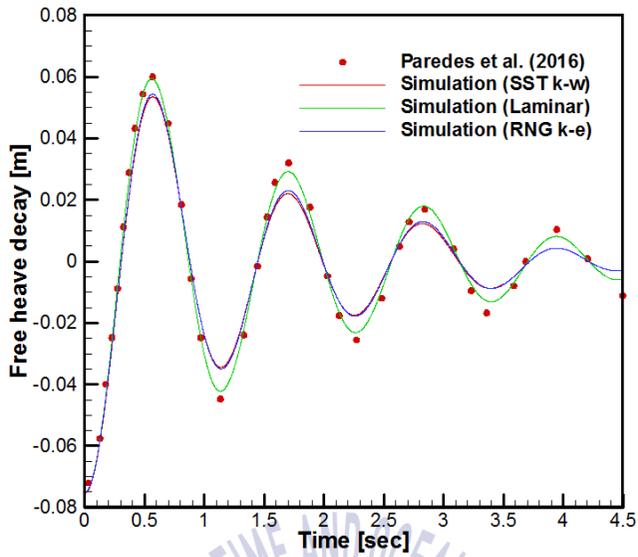


Fig. 5.13 Comparison of free heave motions with respect to the turbulence model

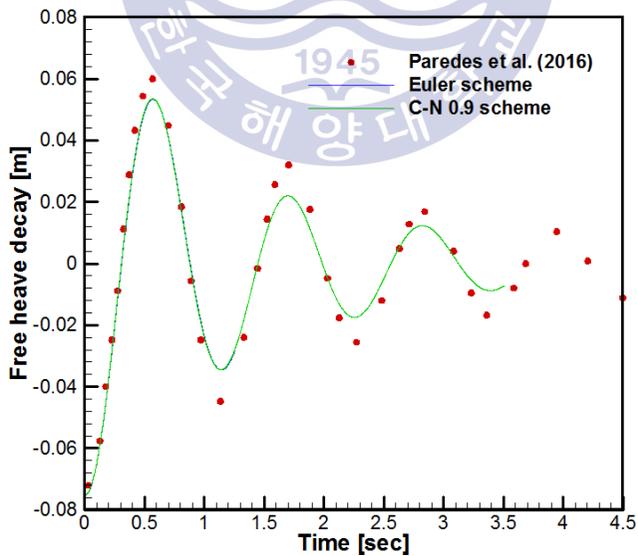


Fig. 5.14 Comparison of free heave motions with respect to the numerical scheme

Fig. 5.13에서 층류와 난류 모델의 적용결과는 큰 차이를 보였고, 난류 모델을 적용했을 때 상하동요 운동에 현저한 감쇠가 일어났다. 이는 난류 모델 및 벽 함수에 의해 계산된 점성 저항이 층류에 비해 상당히 컸음을 의미한다. 추가적으로 두 난류 모델 간의 차이는 매우 작았으며, RNG $k-\epsilon$ 모델에 비해 SST $k-\omega$ 모델이 상대적으로 더 큰 운동의 감쇠를 보였다.

Fig. 5.14에서 Crank-Nicolson 기법의 경우 0.9의 편심계수를 사용하여 Euler 기법과 동일하게 내재적 기법으로 적용하였고, 두 수치기법 간의 결과차이는 거의 없었다. 단지, 1차 정확도의 Euler 기법을 적용하였을 때 2차 정확도의 Crank-Nicolson 기법에 비해 상하운동의 주기가 미세하게 길어지는 경향을 보였다.

5.4 정수 중 계류 감쇠 운동

부유체의 6자유도운동과 계류계의 연성해석에 대한 양방향 연성해석 솔버의 정확도를 검증하기 위해 정수(still water) 중에서의 계류 감쇠(moored decay) 운동해석을 진행하였고, 그 결과를 Paredes et al. (2016)의 실험결과와 비교하였다. Paredes et al. (2016)이 제공하는 데이터만으로는 해석을 위해 필요한 정보가 부족하여 동일한 팀에서 발표한 수치해석 논문인 Palm et al. (2016)의 데이터를 보충하여 사용하였다.

해석은 상하동요(heave) 및 종동요(pitch)에 대해서 진행하였고, 초기 변위(initial offset)는 평형상태의 무게중심을 기준으로 각각 -0.076m 및 11.353° 로 설정하였다. 격자계와 경계조건을 비롯한 모든 설정은 5.3장과 동일하게 하였으며, 계류계에 대한 정보만 추가로 설정하였다. 부이의 질량과 관성모멘트를 절반으로 하였으므로, 계산된 구속힘과 구속모멘트도 절반으로 적용하였다.

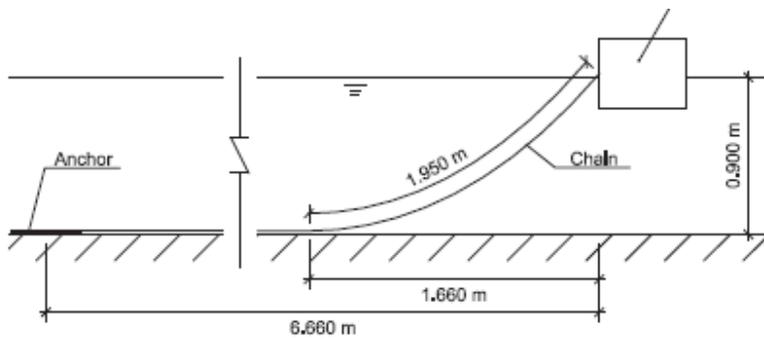
계류계는 3개의 현수선 체인(catenary chain)으로 구성되어있고, 각 체인은 120° 의 간격으로 설치되었다. 체인과 부이를 연결하는 페어리드는 수면높이에 위치하고 있으며 부이의 표면으로부터 0.015m 떨어져서 설치되었다. 각 체인은 수렴도 테스트를 통해 30개의 요소(element)들로 분할하였고, 실험에 사용된 계류계의 물성치를 Table 5.8에 정리하였다. 계류계의 유체동력학 계수들은 Hall and Goupee (2015)의 값을

사용하였다.

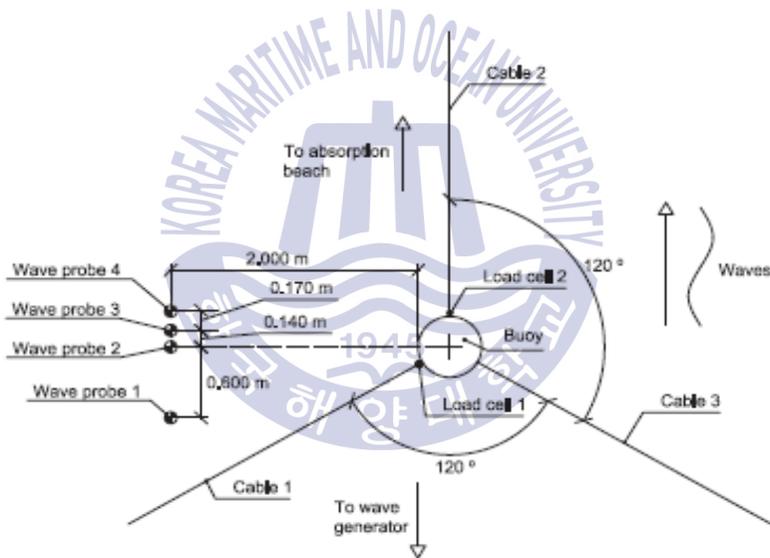
Table 5.8 Mooring properties and environmental parameters for moored decay test

Properties	Values
Horizontal span (m)	6.66
Vertical span (m)	0.9
Line length (m)	6.95
Line diameter (m)	4.786×10^{-3}
Line weight (kg/m)	0.1447
Stiffness (N)	1.6×10^6
Normal drag coefficient	1.08
Tangential drag coefficient	0.213
Normal added mass coefficient	0.865
Tangential added mass coefficient	0.269
Bottom stiffness (Pa/m)	3.0×10^6
Bottom damping coefficient (Pa-s/m)	3.0×10^4

실험설정과 계류계의 설치에 대해서는 Fig. 5.15에 자세히 나타내었고, 계류계 해석을 위한 격자계에 대해서는 Fig. 5.16에 나타내었다. 전체적인 시스템의 이해를 위해 Fig. 5.16에 유동장에 대한 해석 영역과 계류계 해석을 위한 격자계를 같이 표현하였지만, 실제로 유동장과 계류계는 해석 영역을 공유하지 않고 별도로 해석이 진행된다.



(a) Side view of catenary mooring leg



(b) Top view of the mooring setup

Fig. 5.15 Experimental setup and mooring system configuration for moored decay test (captured from Paredes et al. (2016))

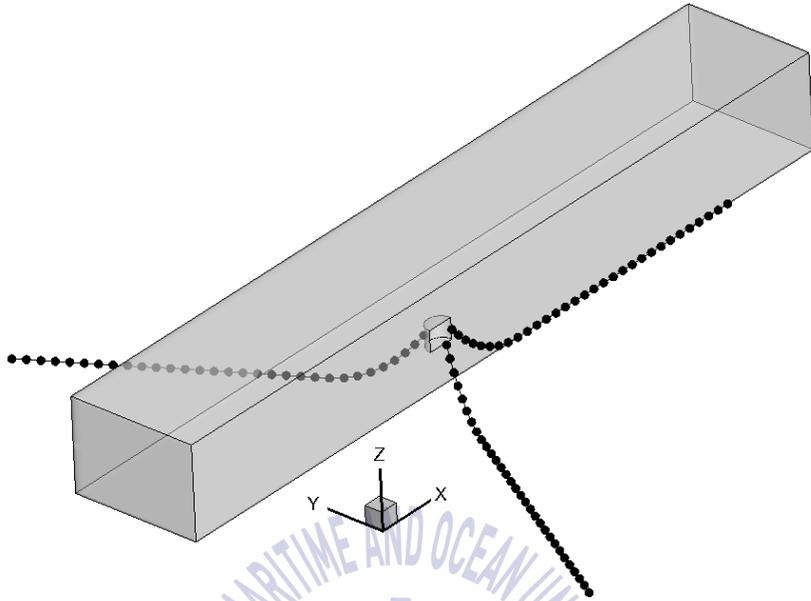
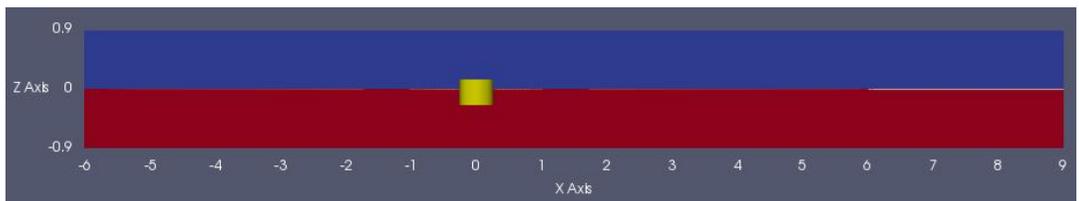
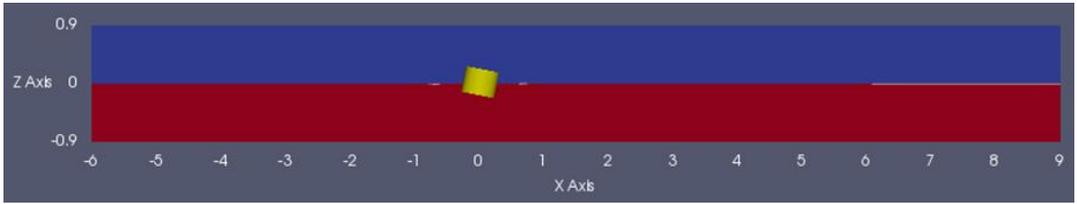


Fig. 5.16 Computational domain extent and mooring grid system

계류 감쇠 운동해석에 대한 초기 부이의 위치와 자유수면을 Fig. 5.17에 나타내었다. 해석은 5.3장과 마찬가지로 시간간격의 크기를 0.001초로 고정한 상태로 상하동요에 대해서는 4.5초까지, 종동요에 대해서는 8.0초까지 진행하였고, 그 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 5.18에 나타내었다.



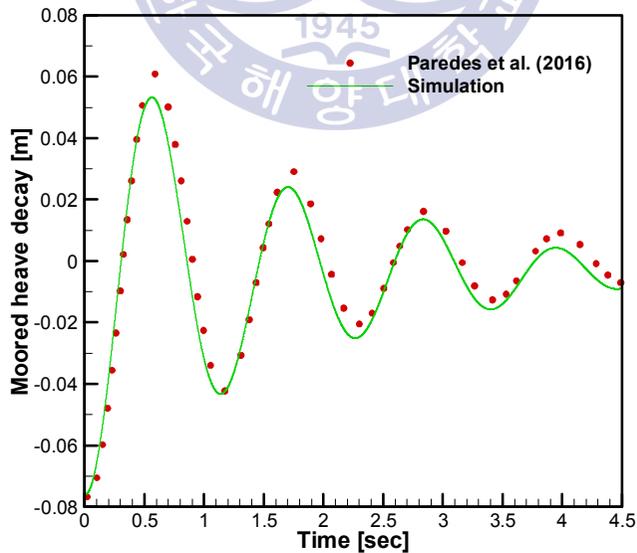
(a) Moored heave decay (initial offset : -0.076m)



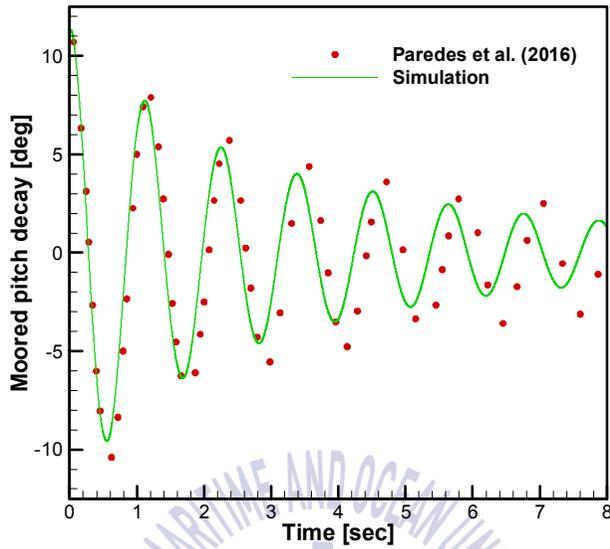
(b) Moored pitch decay (initial offset : 11.353deg)

Fig. 5.17 Initial buoy positions and free surfaces for moored decay test

정수 중에서의 계류 감쇠 운동해석결과에서도 중동요의 경우 주기와 운동의 크기 모두 자유 감쇠 운동의 결과와 동일한 경향을 나타냈다. 상하동요의 경우 실험결과와 전반적으로 잘 일치하였지만, 운동의 평형위치가 약간 아래쪽으로 내려온 경향을 보였다. 이는 계류계의 설치에 의해 초기 평형 상태와 비교하여 흘수(draft)가 커졌을 것임에도 불구하고 초기 평형 상태의 흘수를 그대로 사용한 결과로 판단된다.



(a) Moored heave motion



(b) Moored pitch motion

Fig. 5.18 Comparison of moored decay motions with experiment results

양방향 연성해석 솔버에 의해 계산된 상하동요 및 종동요 운동의 주기를 실험결과와 비교하여 Table 5.9에 정리하였다.

Table 5.9 Comparison of moored decay motion periods with experiment results

Motion	Experiment	Simulation	Error (%)
Heave period (s)	1.130	1.114	-1.44
Pitch period (s)	1.163	1.125	-3.38

상하동요 및 종동요에 대해 각각 4주기 및 7주기에 대한 평균값을 비교하였으며, 그 결과 상하동요는 -1.44%, 종동요는 -3.38%의 오차를 보였다. 검증결과를 통해 정수 중 계류 감쇠 운동에 대한 양방향 연성해석 솔버의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

5.5 파랑 중 계류 운동

부유체의 6자유도운동과 계류계의 연성해석에 대한 양방향 연성해석 솔버의 정확도를 검증하기 위해 파랑(wave) 중에서의 계류(moored) 운동해석을 진행 하였고, 그 결과를 Paredes et al. (2016)의 실험결과와 비교하였다. Paredes et al. (2016)이 제공하는 데이터만으로는 해석을 위해 필요한 정보가 부족하여 동일한 팀에서 발표한 수치해석 논문인 Palm et al. (2016)의 데이터를 보충하여 사용하였다.

이번 장의 검증은 waves2Foam 라이브러리를 통해서 구현된 파랑의 정확도를 먼저 검증하고, 구현된 파랑 중에서의 부유체 계류 운동 및 계류계의 인장 하중에 대한 양방향 연성해석 솔버의 정확도를 검증하였다.

5.5.1 파랑 생성

본 연구에서는 5차의 스톡스 파랑(Stokes 5th wave)를 사용하였고, waves2Foam은 Fenton (1985; 1990)의 이론에 의해서 5차의 스톡스 파랑을 생성한다. 5차의 스톡스 파랑 모델을 구현하기 위해서는 스톡스 이류 속도(Stokes drift velocity)가 입력되어야 하는데, 스톡스 이류는 파랑의 물 입자(water parcel)가 궤도운동 후 수면으로 돌아왔을 때 원래의 위치가 아닌 파랑의 진행방향으로 약간 이동한 위치로 돌아오는 물질전달(mass transfer)현상을 의미한다.

본 연구에 적용한 수심과 파장의 비율(h/λ)이 약 0.31이므로 심수(deep water)로 가정하고, 심수조건일 때의 스톡스 이류 속도는 다음의 식과 같이 계산 된다.

$$c_{drift} = A^2 \omega k e^{2kh} \quad (5.1)$$

여기서, A 는 파의 진폭, ω 는 파의 회전 주파수, k 는 파수(wave number) 및 h 는 수심(음의 값을 이용)을 각각 의미한다. 해석에 사용된 5차 스톱스 파의 특성을 Table 5.10에 정리하였다.

Table 5.10 Description of Stokes 5th wave

Properties	Values
Period (s)	1.4
Wave height (m)	0.08
Wave length (m)	2.94
Stokes drift velocity (m/s)	3.2776×10^{-4}
Reynolds number (-)	0.925×10^5
Keulegan-Carpenter number (-)	0.488

난류 모델링을 위해 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용한 것과 입구면의 경계조건을 정수조건(still water) 대신 파랑생성조건(wave generation)을 적용한 것을 제외한 모든 해석조건은 5.4장과 동일하게 하였다. 효과적인 파랑의 생성 및 흡수를 위해 입구면에 3m(약 1파장) 출구면에 6m(약 2파장)의 완화구역을 설정하였다. 해석시간은 시간간격을 0.001초로 고정시키고, 초기에 발생할 수 있는 과도기적 특성(transient feature)을 배제하기 위하여 약 18초(13주기)까지 계산하였고 수렴된 결과를 실험결과와 비교하였다.

waves2Foam에 의해 생성된 파랑의 형상을 Fig. 5.15 (b)에 표현된 2번 파고 게이지(wave probe)에서 추출하여 실험결과와 비교하였고, 이를 Fig. 5.19에 나타내었다.

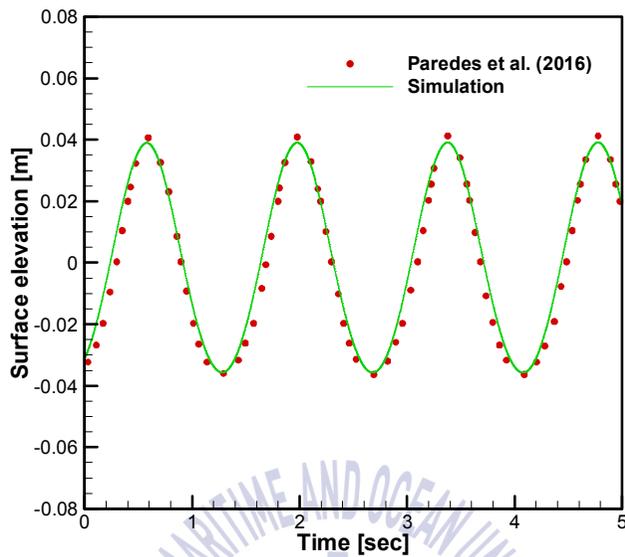


Fig. 5.19 Comparison of Stokes 5th wave profile with experiment result

파랑의 진폭(amplitude) 및 주기(period) 모두 실험결과와 잘 일치하였고, 특히 파저(trough)에서는 파형이 평평하고 파정(crest)에서는 파형이 날카로운 스톱스 파의 특성이 잘 나타났다. 검증결과를 통해 파랑의 생성 및 흡수에 대한 waves2Foam 라이브러리의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 확인하였다.

5.5.2 부유체 계류 운동 및 인장 하중

부유체의 6자유도운동과 계류계의 연성해석에 대한 양방향 연성해석 솔버의 정확도를 검증하기 위해 파랑(wave) 중에서의 계류 운동 및 계류계의 인장 하중해석을 진행하였고, 그 결과를 Paredes et al. (2016)의 실험결과와 비교하였다.

난류 모델링을 위해 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용한 것과 입구면의 경계조건을 정수조건(still water) 대신 파랑 생성 조건(wave generation)을 적용한 것을 제외한 모든

해석조건은 5.4장과 동일하게 하였다. 효과적인 파랑의 생성 및 흡수를 위해 입구면에 3m(약 1과장) 출구면에 6m(약 2과장)의 완화구역을 설정하였다.

파랑 중 계류 운동해석에 대한 초기 부이의 위치와 자유수면의 형상을 Fig. 5.20에 나타내었고, 정상상태(steady state)에 도달하는 시간을 줄이기 위해 Fig. 5.19의 파형을 사용하여 자유수면을 초기화하였다. 해석은 전후동요(surge), 상하동요(heave) 및 종동요(pitch)를 포함하는 3자유도(degree of freedom)운동 및 계류계에 작용하는 인장 하중에 대해서 진행하였고, 부이의 초기 위치는 정수 중에서 부이의 평형상태 위치와 동일하게 하였다. 해석시간은 시간간격을 0.001초로 고정시키고, 초기에 발생할 수 있는 과도기적 특성 (transient feature)을 배제하기 위하여 약 28초(20주기)까지 계산하였고 수렴된 결과를 해석결과와 비교 하였다.

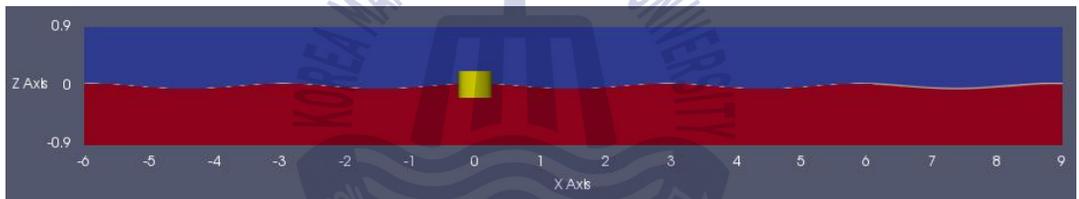
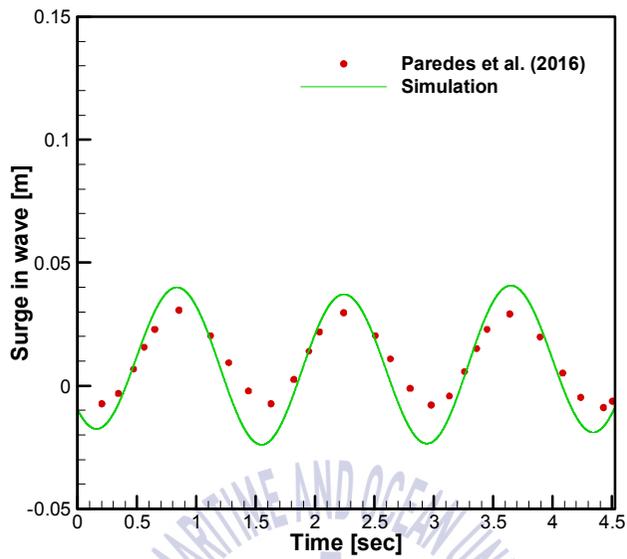
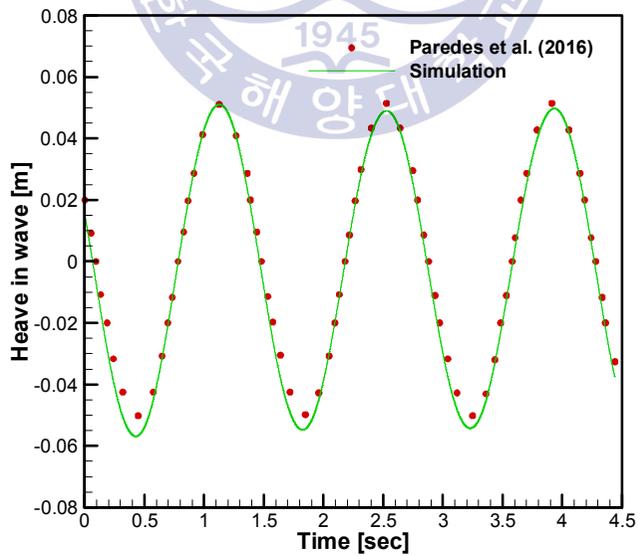


Fig. 5.20 Initial buoy position and free surface for wave test

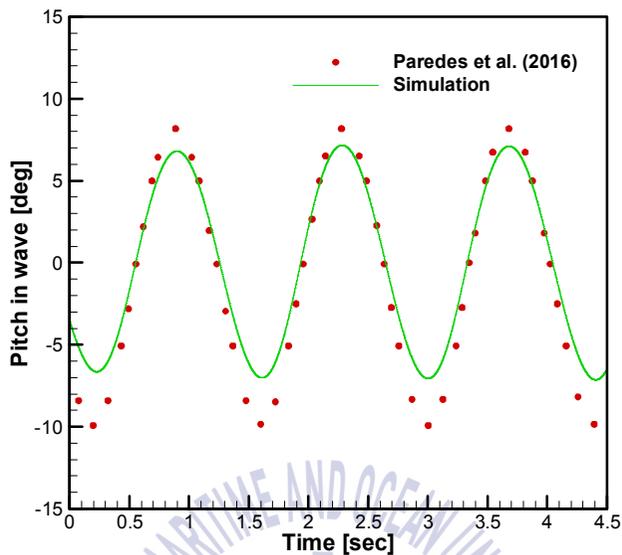
양방향 연성해석 솔버에 의해 계산된 파랑 중 전후동요, 상하동요 및 종동요 운동의 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 5.21에 나타내었다. 3자유도운동 모두 운동의 크기와 주기가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 특히 상하동요의 경우 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 전후동요의 경우 저주파수 모션(low frequency motion)은 수렴되었으나, 파랑주파수 모션(wave frequency motion)은 완전히 수렴되기 위해서 조금 더 시간이 필요할 것으로 판단된다. 종동요의 경우도 마찬가지로 완전히 수렴되기 위해서는 몇 주기의 시간이 더 지나야 할 것으로 보이고, 점차적으로 실험결과의 경향과 가까워지고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) Moored surge motion in wave



(b) Moored heave motion in wave

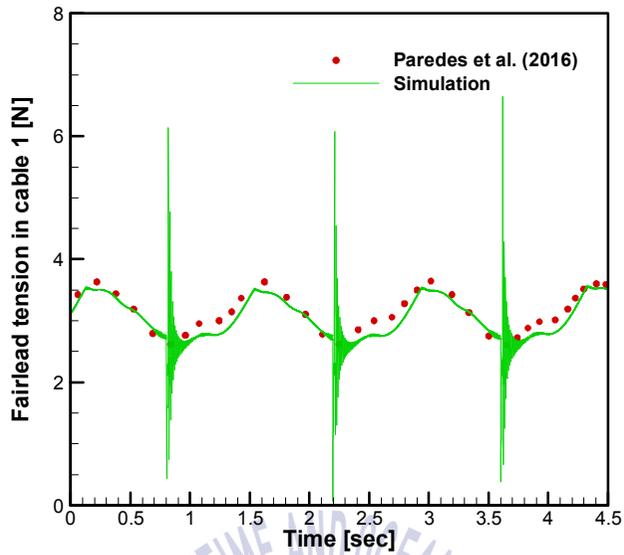


(c) Moored pitch motion in wave

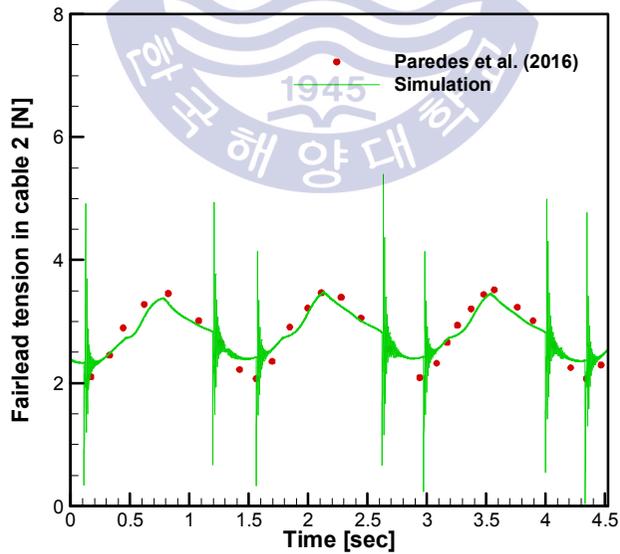
Fig. 5.21 Comparison of moored motions in wave with experiment results

양방향 연성해석 솔버에 의해 계산된 계류계의 인장 하중 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 5.22에 나타내었다. 결과 비교는 Fig. 5.15에 나타낸 상류 측(seaward) 케이블 1과 하류 측(leeward) 케이블 2에 대해서만 진행하였고, 상류 측 케이블 3은 케이블 1과 대칭인 조건이므로 결과비교를 생략하였다.

계류계에 작용하는 인장 하중의 해석 결과는 하중의 크기, 주기 및 하중 변화의 형상 면에서 전반적으로 실험결과와 잘 일치하였다. 상류 측에 위치한 케이블 1의 인장 하중이 하류 측에 위치한 케이블 2의 인장 하중에 비해 크게 나타났으며, 이는 전후동요 운동에서 초기 평형 위치보다 파랑의 진행 방향으로 표류(drift)가 발생한 결과이다. 시간에 따른 인장 하중의 패턴도 전반적으로 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보였고, 특히 인장 하중이 증가하는 구간에서 작은 돌출형태의 국소적 하중 증가가 발생하는 현상에 대해서도 잘 예측하였다.



(a) Fairlead tension in cable 1



(b) Fairlead tension in cable 2

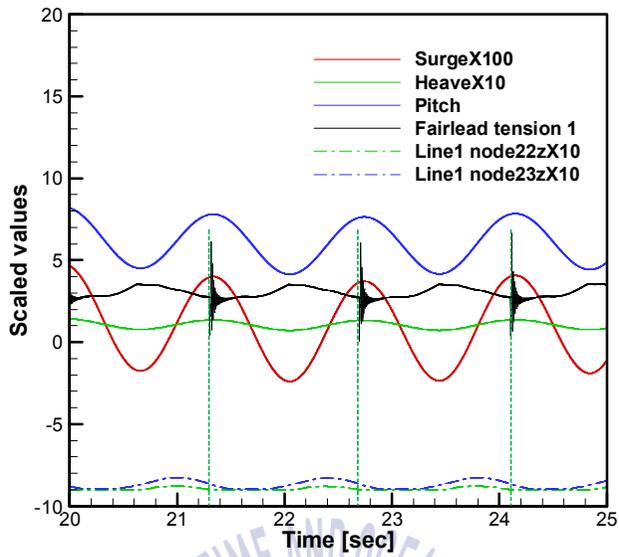
Fig. 5.22 Comparison of fairlead tensions in cables with experiment results

특이사항으로, 계류계의 인장 하중이 낮은 영역에서 소음(noise)이 발생함과 동시에 하중이 진동하는 경향을 보이는데, 이에 대한 원인을 분석하기 위해 전후동요, 상하동요, 종동요, 인장 하중 및 해저면에 접촉하는 절점의 위치를 한 눈에 볼 수 있게 스케일을 조절하여 Fig. 5.23에 나타내었다. 분석의 결과로, 이러한 소음들은 케이블 상의 절점들이 해저면과 접촉할 때 발생하고 있는 것을 확인하였다.

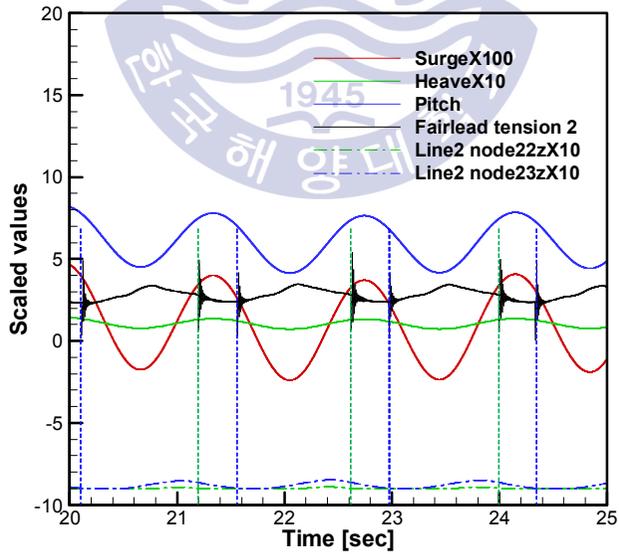
케이블 1의 경우 주기 당 1번의 소음이 발생하는데 이는 22번 절점이 해저면에 접촉하는 순간에 발생하고, 23번 절점의 경우는 해저면에 접촉하지 않는다. 케이블 2의 경우 주기 당 2번의 소음이 발생하는데 이는 각각 22번 및 23번 절점이 해저면에 접촉할 때 발생한다. 절점이 해저면에 접촉할 때 소음이 발생하는 것은 케이블의 이산화 및 MoorDyn의 특성(케이블에 작용하는 굽힘모멘트와 압축력을 무시)에 의한 영향으로, 해저면 모델의 강성 및 감쇠 계수들을 적절히 조절하여 최소화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 이러한 소음들은 매우 짧은 시간동안 나타났다가 사라지고, 계류계의 인장 하중이 즉시 정상적인 하중을 회복하고 있기 때문에 부유체의 운동에는 별다른 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 이러한 계류계 인장 하중의 소음은 마찬가지로 케이블의 압축력과 굽힘모멘트를 계산에 반영하지 않은 Palm et al. (2016)의 해석결과에서도 동일하게 나타나고 있다.

또한, 계류계의 인장 하중이 증가하는 구간에 나타나는 국소적인 하중의 증가는 부유체 운동의 방향이 바뀌고 속도가 증가하는 구간에서 발생하고 있다. 이는 부유체의 속도 증가에 따른 케이블의 항력 증가로 인한 현상이고, 그 중에서도 케이블 각도의 변화에 따른 횡단(transverse)방향의 항력 증가가 주된 원인인 것으로 판단된다.

최종적으로 검증결과들을 통해 파랑 중 부유체의 6자유도운동과 계류계의 인장 하중에 대한 양방향 연성해석 솔버의 계산 결과를 신뢰할 수 있음을 확인하였다.



(a) Cable 1



(b) Cable 2

Fig. 5.23 Noise analyses in tensions of cable 1 and 2

제 6 장 결 론

본 연구에서는 집중 질량 모델이 적용된 계류계해석용 오픈 소스 라이브러리인 MoorDyn과 오픈 소스 전산유체역학(CFD) 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 해양구조물의 6자유도운동과 계류계의 인장 하중간의 양방향 연성해석 솔버를 개발하였고, 수치 파랑 수조의 구현을 위해 OpenFOAM에 파랑의 생성 및 흡수에 대한 경계조건을 설정해 줄 수 있는 오픈 소스 waves2FOAM 라이브러리를 연동시켰다. 그리고 개발된 양방향 연성해석 솔버의 검증을 위해 계류계와 부유식 파력발전기(wave energy converter, WEC)를 간략히 모델링한 원통형 부이에 대해서 계류계의 정적하중 및 형상해석, 계류계의 동적하중 해석, 정수 중 자유 감쇠 운동해석, 정수 중 계류 감쇠 운동해석, 파랑 중 계류 운동 및 계류계 인장 하중해석 등 다양한 해석을 진행하여 그 결과를 엄밀해, 수치해 및 실험결과와 비교하였다.

양방향 연성해석 솔버는 매 시간간격마다 OpenFOAM에서 계산된 부유체의 위치와 속도를 MoorDyn에 넘겨주고, MoorDyn은 이를 계류계해석을 위한 경계조건으로 받아 계류계에 작용하는 인장 하중과 계류계에 의한 복원력을 계산한다. 계산된 복원력(힘과 모멘트)은 가속도와 토크로 변환되어 부유체에 전달되고, 이 가속도와 토크는 다음 시간간격에서 OpenFOAM이 계산하는 부유체의 운동에 외력으로 작용하게 된다. 이러한 양방향 연성해석을 위해 MoorDyn의 주요 함수들을 OpenFOAM이 인식할 수 있는 공유 라이브러리파일로 컴파일하고 함수의 동적로딩을 사용하여 MoorDyn의 주요 함수들을 OpenFOAM내에서 호출할 수 있도록 하였다. 또한 새로운 구속 모델을 생성하여 양방향 연성해석의 인터페이스 역할을 하도록 하였고, 인터페이스를 통해 각 솔버간의 데이터를 적절한 형태로 변환시키고 전달하였다.

연성을 위한 기법으로는 각 해석들이 각자의 솔버를 이용하여 변수들을 계산하고 자신의 데이터를 내부적으로 유지하면서 연성되는 시간간격에서만 필요한 변수들을 교환하는 느슨한 연성(loose coupling) 기법을 사용하였다. 또한 매 시간간격에서 시작위치와 이 점으로부터 이동하는 속도를 통해 계산되는 MoorDyn과 속도를 먼저 계산하고 이를 통해 부유체의 최종 위치를 계산하는 OpenFOAM의 특성 차이로 인해 발생하는 문제를 해결하기 위해, 이전-이전 시간간격에서의 위치와 이전 시간간격

에서의 속도를 사용하여 계류계해석을 진행하고 계산된 복원력을 이전 시간간격의 회전중심에 전달해주는 지연 연성(delayed coupling) 기법을 사용하였다. 그리고 OpenFOAM에서 유동장과 부유체 운동간의 평형상태를 얻기 위해 동일한 시간에 대해 여러 번의 PIMPLE 루프를 반복하는데, 동일한 시간에 대해서는 계류계에 의한 복원력이 일정하게 유지되도록 첫 번째 PIMPLE 루프에서만 계류계에 대한 새로운 해석을 진행하고 그 외의 PIMPLE 루프에서는 앞에서 계산된 값을 단순히 반환하도록 하였다. 마지막으로 연동되는 라이브러리의 디렉토리 및 파일의 입출력을 위한 케이스 디렉토리 구조를 통합시켜 하나의 솔버인 것처럼 동작하는 일체화된 솔버를 구현하였다.

각각의 솔버들과 개발된 양방향 연성해석 솔버를 검증하기 위하여 다양한 해석들을 진행하였으며, 계류계의 정적하중과 형상해석, 계류계의 동적하중해석 및 정수 중 자유 감쇠 운동해석은 비연성(uncoupled) 해석으로 진행하였고, 정수 중 계류 감쇠 운동해석, 파랑 중 계류 운동 및 계류계의 인장 하중해석은 연성(coupled) 해석으로 진행하였다.

MoorDyn의 정확도를 확인하기 위해 진행한 계류계의 비연성 해석결과들을 열밀해, 수치해 및 실험결과 등과 비교하였을 때 매우 높은 정확도를 보였다. 특히 대표적 상용코드인 ANSYS AQWA와 비교한 결과에서 해저면과의 접촉이 포함된 계류계의 정적형상도 매우 잘 일치하였고, 이 때 앵커와 페어리드에 작용하는 정적하중의 오차가 1% 이내로 나타났다. 그리고 계류계의 동적하중에 대한 해석결과를 하중의 크기, 하중의 주기 및 시간에 따른 하중 변화의 형상에 대해서 실험결과와 비교하였을 때 매우 잘 일치함을 확인하였다.

OpenFOAM의 정확도를 확인하기 위해 진행한 정수 중에서의 자유 감쇠 운동해석(비연성 해석) 결과들도 실험결과와 비교하였을 때 높은 정확도를 보였다. 전반적인 운동의 크기는 실험결과에 비해 다소 감쇠된 경향을 보였고, 이는 실험에서 사용된 부이와 달리 해석에 사용된 부이는 모서리 부분이 완전한 직각을 이루고 있으므로 점성에 의한 감쇠가 크게 계산된 것으로 판단된다. 원통형 부이의 특성 상 다른 운동에 비해 점성의 영향이 크게 작용하는 종동요 운동에서 감쇠가 현저히 크게 일어난 것이 그 증거라 할 수 있다. 또한 종동요 운동에서는 운동의 주기 또한 실험결과에 비해 짧아지는 경향을 보였다. 이는 종동요 운동의 주기가 회전중심의 위치 및 관성

모멘트와 매우 밀접한 관계에 있는데, 실험에서 제시한 측정값들에 오차가 많이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

양방향 연성해석 솔버의 정확도를 확인하기 위해 진행한 연성 해석결과들 역시 실험 결과와 비교하였을 때 높은 정확도를 보여주었다. 계류 감쇠 운동해석의 결과는 전반적으로 자유 감쇠 운동해석의 결과와 비슷한 경향을 보였고, 특히 상하동요의 경우 운동의 기준점이 다소 아래로 이동한 경향을 보였는데, 이는 계류계의 추가로 증가된 초기 흘수를 반영하지 않고 초기 평형상태의 흘수를 이용한 결과로 판단된다. 이를 통해 계류계의 추가에 의한 효과가 정상적으로 반영되었음이 확인되었다.

끝으로 파랑 중 부유체 계류 운동의 경우, 전후동요와 종동요 운동의 안정화를 위해서는 좀 더 연장된 해석시간이 필요하지만 전반적으로 실험결과와 잘 일치하였다. 계류계 인장 하중의 경우에도, 하중의 크기 및 주기에 대한 예측결과도 정확했고 집중 질량 모델을 통한 계류계의 동역학적 특성들 또한 잘 반영된 것이 확인되었다.

추가적으로 양방향 연성해석 솔버를 운용하는데 있어서, MoorDyn은 연속적인 실제 계류계와 달리 이산화된 계류계 모델을 사용하기 때문에 발생하는 수치적 불안정성을 해결하기 위해 OpenFOAM의 시간간격보다 더 작은 시간간격을 사용해야 한다. 일반적으로 10분의 1 이하의 시간간격을 사용하지만, 계류계의 길이, 탄성계수 및 절점의 개수 등에 따라 수치적 안정성이 보장될 수 있는 시간간격을 설정해주어야 한다. 또한 이산화된 케이블 및 MoorDyn의 특성으로 인한 계류계 인장 하중의 소음을 방지 또는 최소화하기 위해서는, 해지면 모델의 계수들을 적절히 설정하여 절점이 해지면보다 가라앉거나 해지면에서 진동하지 않도록 해야 한다.

본 연구를 통해 개발된 양방향 연성해석 솔버를 다양한 해석들을 통해 검증하고, 그 정확도를 확인하였다. 이를 통해 OpenFOAM과 MoorDyn을 이용한 양방향 연성해석 솔버가 성공적으로 개발되었음을 확인하였고, 향후에는 개발된 양방향 연성해석 솔버를 토대로 불규칙파를 포함한 다양한 파랑조건에 대한 연구를 진행 할 것이다.

참고문헌

- Bergdahl, L., Palm, J., Eskilsson, C. & Lindahl, J., 2016. Dynamically scaled model experiment of a mooring cable. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1), pp.5-22.
- Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noac, R.W. & Stern, F., 2007. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. *Computers & Fluids*, 36, pp.1415-1433.
- Crank, J. & Nicolson, P., 1947. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 43, pp.50-67.
- Davidson, J. & Ringwood, J.V., 2017. Mathematical modelling of mooring systems for wave energy converters-A review. *Energies*, 10(5), pp.666-711.
- Devolder, B. et al., 2015. A review of the implicit motion solver algorithm in OpenFOAM to simulate a heaving buoy. *Proceedings of the 18th International Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, September 28-30, 2015.
- Dullweber, A., Leimkuhler, B. & McLachlan, R., 1997. Symplectic splitting methods for rigid body molecular dynamics. *Journal of Chemical Physics*, 107(15), pp.5840-5851.
- Fenton, J.D., 1985. A fifth-order Stokes theory for steady waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 111(2), pp.216-234.
- Fenton, J.D., 1990. Nonlinear Wave Theories. Wiley, Ch. 1, pp.3-25, from *The Sea. Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. Part A*. Editors: B. Le Méhauté and D. M. Hanes.
- Hall, M., 2017. MoorDyn User's Guide. [Online] (Updated 16 August 2017) Available at: <http://www.matt-hall.ca/moordyn.html> [Accessed 22 October 2017].
- Hall, M. & Goupee, A., 2015. Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data. *Ocean Engineering*, 104, pp.590-603.
- Hirt, C.W. & Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp.201-225.

Hjálmtýsson, G. & Gray, R., 1998. Dynamic C++ Classes - A lightweight mechanism to update code in a running program. *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, June 15-19, 1998.

Irvine, M., 1992. *Cable Structures*. Dover Publications.

Issa, R.I., 1986. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, 62(1), pp.40-65.

International Towing Tank Conference (ITTC), 2011. Practical guidelines for ship CFD application. *Proceedings of 26th International Towing Tank Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, August 28 - September 3, 2011.

Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. & Fredsøe, J., 2012. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), pp.1073 - 1088.

Jonkman, J., 2013. The new modularization framework for the FAST wind turbine CAE tool. *Proceedings of 51st AIAA Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Dallas, Texas, USA, January 7-10, 2013.

Lee, H. & Rhee, S.H., 2015. A dynamic interface compression method for VOF simulations of high-speed planing watercraft. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(5), pp.1849-1857.

Masciola, M., Jonkman, J. & Robertson, A., 2013a. Implementation of a multisegmented, quasi-static cable model. *Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, Alaska, USA, June 30-July 5, 2013.

Masciola, M. et al., 2013b. Assessment of the importance of mooring dynamics on the global response of the DeepC-Wind floating semisubmersible offshore wind turbine. *Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, Alaska, USA, June 30-July 5, 2013.

Menter, F.R., 1993. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *24th AIAA Fluid Dynamics Conference*, AIAA Paper 93-2906, Orlando, Florida, USA, July 6-9, 1993.

Nakajima, T., Motora, S. & Fujino, M., 1982. On the dynamic analysis of multi-component mooring lines. *Proceedings of 14th Annual Offshore Technology Conference*, Huston, Texas, USA, May 3-6, 1982.

Newmark, N.M., 1959. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(3), pp.67-94.

Nicholls-Lee, R., Walker, A., Hidley, S. & Argall, R., 2013. Coupled multi-phase CFD and transient mooring analysis of the floating wave energy converter OWEL. *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France, June 9-14, 2013.

Orszag, S.A. et al., 1993. Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations. *Proceedings of International Conference on Near-Wall Turbulent Flows*, Tempe, Arizona, USA, March 15-17, 1993.

Palm, J., Eskilsson, C., Paredes, G.M. & Bergdahl, L., 2016. Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation. *International Journal of Marine Energy*, 16, pp.83-99.

Paredes et al., 2016. Experimental investigation of mooring configurations for wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 15, pp.56-67.

Park, S., Lee, H. & Rhee, S.H., 2016. Numerical Investigation of Anti-Diffusion Source Term for Free-Surface Wave Flow. *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, 2(2), pp.48-60.

Park, S. et al., 2013. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5, pp.33-46.

Patankar, S.V. & Spalding, D.B., 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp.1787-1806.

Quallen, S. et al., 2013. CFD simulation of a floating Offshore wind turbine system using a quasi-static crowfoot mooring-line model. *Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, Alaska, USA, June 30-July5, 2013.

Sirnivas, S., Yu, Y.-H., Hall, M. & Bosma, B., 2016. Coupled mooring analyses for the WEC-Sim wave energy converter design tool. *Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Busan, South Korea, June 19-24, 2016.

Strousstrup, B., 2013. *The C++ Programming Language*. 4th Ed. Addison-Wesley.

Tran, T.T. & Kim, D.H., 2016. Fully coupled aero-hydrodynamic analysis of a semi-submersible FOWT using a dynamic fluid body interaction approach, *Journal of Renewable Energy*, 92, pp.244-261.

Van Leer, B., 1974. Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *Journal of Computational Physics*, 14(4), pp.361-370.

Weiss, J.M., Maruszewski, J.P. & Smith, W.A., 1999. Implicit solution of preconditioned Navier-Stokes equations using algebraic multigrid. *AIAA Journal*, 37(1), pp.29-36.

Yakhot, V. et al., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Journal of Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), pp.1510-1520.