



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

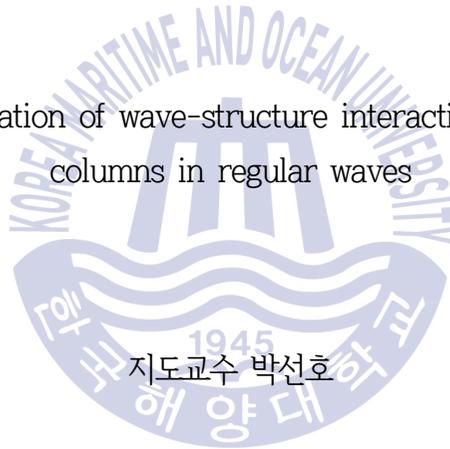
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

규칙파 중 원형 기둥에서의 파랑 구조물
상호작용에 대한 수치해석

Numerical investigation of wave-structure interaction around circular
columns in regular waves



지도교수 박선호

2017년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

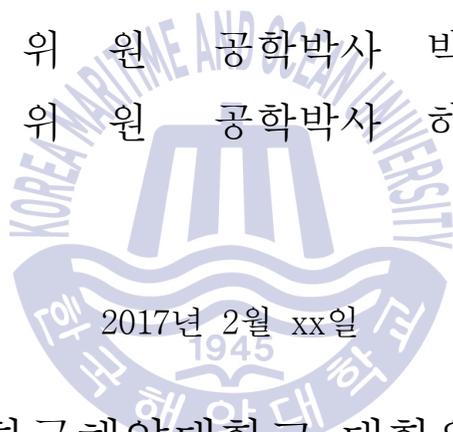
송성진

본 논문을 송성진의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 공학박사 박 선 호 (인)

위 원 공학박사 하 승 현 (인)



2017년 2월 xx일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 선행 연구	2
1.3 연구 내용	4

2. 계산 방법

2.1 지배 방정식	5
2.2 수치 방법	6
2.3 격자 생성 및 경계조건	6
2.4 수치파랑수조 기법	8

3. 수치적 검증

3.1 입사파 조건	10
3.2 파 이론 적용의 타당성	14
3.3 수치파랑수조 기법 검증	15
3.3.1 난류모델 설정	15
3.3.2 계산영역 크기의 영향	18

3.3.3 원형 기둥 경계조건의 영향	19
3.3.4 격자 수렴도 테스트	20
4. 결과 및 고찰	
4.1 수치해석 방법	25
4.2 단일 원형 기둥	26
4.3 정사각형 배열의 원형 기둥	28
5. 결론	42
참고문헌	44



List of Tables

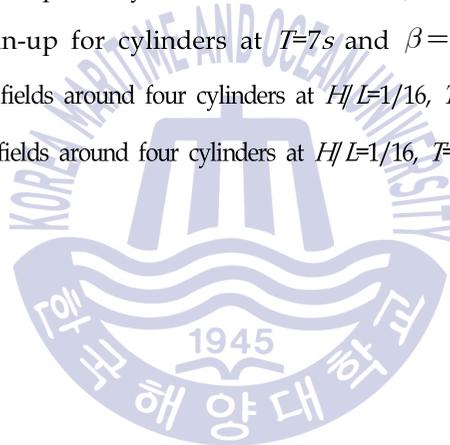
Table 3.1 Incident wave conditions	10
Table 3.2 Grid sizes for uncertainty analysis for 2D simulations	20



List of Figures

Fig. 1.1 Air gap and deck clearance in a semi-submersible structure	2
Fig. 2.1 Boundary conditions and domain size	8
Fig. 2.2 Wave generating and damping zones	9
Fig. 3.1 Regions of application of wave-force formulas for a vertical cylinder (captured from Chakrabarti (1987))	11
Fig. 3.2 Location of wave probes (solid circles indicate wave probes)	12
Fig. 3.3 Arrangement of four circular columns	13
Fig. 3.4 Ranges of suitability of various wave theories (captured from Sadeghi (2008))	14
Fig. 3.5 Comparison of wave elevation for turbulence models at $t=12T$	16
Fig. 3.6 Numerical diffusion of turbulent kinetic energy around free-surface	17
Fig. 3.7 RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30$, $T=9s$ (left: inner probes, right: outer probes)	18
Fig. 3.8 RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30$, $1/16$, $T=9s$ (left: RAOs, right: QTFs)	19
Fig. 3.9 Comparison of wave elevation with different grid sizes	21
Fig. 3.10 Comparison of wave elevation at two periods at $H/L=1/30$	22
Fig. 3.11 Comparison of wave elevation at $H/L=1/16$	24
Fig. 4.1 Wave analysis procedure	26
Fig. 4.2 RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle($0.513D$) of wave probes at $H/L=1/30$	31
Fig. 4.3 RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle($0.513D$) of wave probes at $H/L=1/16$	32

Fig. 4.4 RAOs and QTFs of surface elevations at nner circle(1.0D) of wave probes at $H/L=1/30$	33
Fig. 4.5 RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle(1.0D) of wave probes at $H/L=1/16$	34
Fig. 4.6 RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/30$	35
Fig. 4.7 RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/16$	36
Fig. 4.8 Snapshot of wave scattered field around a vertical cylinder at $H/L=1/16$ and $T=9s$	36
Fig. 4.9 Time domain and frequency domain of surface elevations at inner circle of wave probes, $H/L=1/16$, $T=9s$	37
Fig. 4.10 Maximum run-up for cylinders at $T=7s$ and $\beta=0^\circ$	38
Fig. 4.11 Maximum run-up for cylinders at $T=7s$ and $\beta=45^\circ$	39
Fig. 4.12 Scattered wave fields around four cylinders at $H/L=1/16$, $T=7s$ and $\beta=0^\circ$..	40
Fig. 4.13 Scattered wave fields around four cylinders at $H/L=1/16$, $T=7s$ and $\beta=45^\circ$..	41



Numerical investigation of wave-structure interaction around circular columns in regular waves

Seong Jin Song

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

Abstract

In offshore environment, an accurate estimation of a wave-structure interaction has been an important issue for safe and cost effective design of fixed and floating offshore structures exposed to a harsh environment. In this study, a wave-structure interaction around circular columns in single and square array conditions was investigated with the regular waves. To simulate 3D two-phase flow, open source computational fluid dynamics libraries, called OpenFOAM, were used.

Wave generation and absorption in the wave tank were activated by the relaxation method, which implemented in a source term. To validate the numerical methods, generated Stokes 2nd order wave profiles were compared with the analytic solution with deep water condition. From the validation test, grid longitudinal and vertical sizes for wave length and amplitude were selected. The simulated wave run-up and wave loads on the circular columns were studied and compared with existing experimental data.

KEY WORDS: Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학); Wave-structure interaction(파랑 구조물 상호작용); Numerical wave tank(수치파랑수조), Open Source Library(소스 공개 코드), Circular column(원형 기둥)

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

해양구조물은 해저석유 및 천연가스 개발을 위한 시추, 생산, 저장, 수송시설을 비롯하여 해양에너지 발전시설, 부유식 방파제, 해상 석유 저장 시설이나 해상호텔 또는 해양관측시설 등 적용되는 분야가 아주 넓다. 특히, 천해에서의 해저 자원 고갈과 현대기술의 발전에 따라 수심이 깊은 심해 및 극지유전으로 적용범위가 더욱 확장되고 있다. 심해유전 개발에는 주로 수면 상에 떠 있는 부유식 구조물(Floating type)을 사용하게 되며, 심해라는 극한환경 탓에 건조, 운송, 설치 단계에서 들어가는 비용이 막대하다. 이러한 이유로 오일 메이저들이 심해유전 개발 단계에서 손익분기점 유가(break-even price)을 고려하게 된다. 2014년 이후 유가의 하락이 지속되면서 심해유전 개발을 위한 해양구조물의 발주 위축이 장기화되고 있다. 그러나 최근 글로벌 오일 메이저사들이 각종 비용절감을 통해 해저유전 개발사업의 손익분기점을 배럴당 40~45달러까지 낮추는데 성공하면서 해양구조물의 발주가 재개될 가능성이 커졌다. 이에 따라, 저유가에도 불구하고 심해유전 개발을 위한 해양구조물의 수요는 지속될 것으로 기대된다.

해양구조물의 설계기술은 선박의 설계기술과 유사한 면이 많다. 하지만, 선박은 화물을 싣고 목적지에 도착하도록 설계의 주안점을 주는 반면, 해양구조물은 대부분 어느 한 장소에 고정되어 설계수명 동안 거친 해양환경에 대해 안전하게 작동하도록 설계되어야 한다. 또한, 파랑, 조류, 풍랑 등과 같은 해양환경 중 해양구조물의 운동 및 설계에 직접적인 요인으로 작용하는 것은 파랑이다. 특히, 극한 환경조건에서 파랑과 해양구조물의 상호작용을 정확히 예측하는 것은 해양구조물의 안정성(stability), 비용 효율성(cost effectiveness) 그리고 안전성(safety)에 있어서 중요한 요소이다.

구체적으로, 극한 환경에 있는 반잠수식 구조물(semi-submersible) 설계 시 데크(deck) 하부에서부터 정수 중 자유 수면까지의 거리(deck clearance)는 아주 중요한 고려요소이다(Fig. 1.1). 구조물 아래에서 부딪히는 파에 의한 손상을 최소화하기 위해서는 충분한 deck clearance가 확보되어야 한다. 하지만, Deck clearance가 클수록 건조비용이 올라갈 뿐 아니라 구조물의 무게중심이 높아져

복원력이 작아지므로 안정성에 영향을 준다. 또한, Fig. 1.1에서 데크 하부와 반잠수식 구조물에 의해 교란된 입사파의 파정(wave crest)과의 거리를 air gap이라고 한다. 2015년 12월 북해 Troll field에서 가동 중인 반잠수식 시추 리그 COSLInnovator의 사고는 이 air gap의 중요성을 보여준다. 이 사고에서 크고 가파른 파랑이 데크 하부에 있는 작업자 거주구의 창문(window)을 강타하면서 작업자 여러 명의 인명피해가 났고, 이 중 한 명이 사망하였다. 이후 이를 감독하였던 DNV GL에서는 새로운 air gap 가이드라인을 제시하였고, 이전에 승인 된 100 여개의 반잠수식 리그에 대해 재검토에 들어갔다. 이 사고는 해양구조물 설계 시 안전 규정 준수 및 air gap의 정확한 예측이 구조물의 안전성에 미치는 영향을 보여주었고, 이에 대한 지속적인 연구개발의 필요성을 제시하였다.

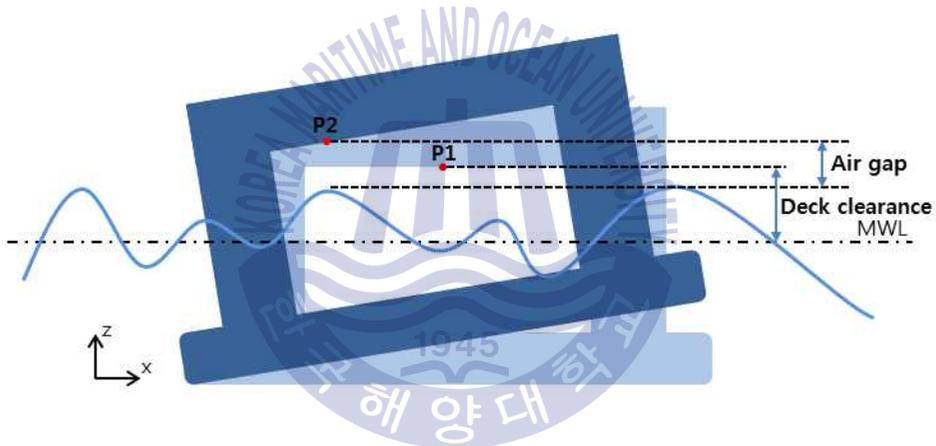


Fig. 1.1 Air gap and deck clearance in a semi-submersible structure

1.2 선행 연구

파랑과 해양구조물의 상호작용 연구로 wave run-up 및 air gap 현상에 대한 이론, 모형시험, 수치해석 기법들이 활발히 연구되어져 왔다. 파 경사가 완만하여 파랑과 구조물의 상호작용 시 점성의 영향이 작은 문제에 대해서는 포텐셜 이론에 기반을 둔 이론들과 수치해석 기법들이 비용 효율성 측면에서 많이 적용돼 왔다. McCamy and Fuchs (1954)는 포텐셜 이론으로 바닥에 고정된 단일 원형 기둥에 의한 파의 회절현상 대해 선형적인 해를 제시하였다. 반면에, 동일한 고정 단일 원형 기둥에 대한

모형실험이 Niedzwecki and Duggal (1992)와 Kriebel (1992)에 의해 수행되었으며, 그 결과 파 경사가 가파른 입사파 조건에서 선형 회절이론은 wave run-up을 낮게 예측하는 것을 보여주었다. 이는 Martin, et al., (2001)에서도 비슷한 결과로 나타났다. 또한, 포텐셜 이론을 적용한 수치해석기법의 경우에도, 구조물과 가파른 파랑 간의 강한 비선형 상호작용이 발생하는 조건에서는 wave run-up을 정확하게 예측하지 못하였다(Büchmann, et al., 1998; Morris-Thomas & Thagarajan, 2004; Stansberg & Kristiansen, 2005). 또한, Evans and Porter[1997]는 정다각형의 꼭짓점에 원형 기둥들이 배치된 구조물에 대해 계산을 수행하였다. 그 결과, 특정한 주파수에서 각각의 원형 기둥에 작용하는 파랑하중이 McCamy and Fuchs[1954]의 식으로 계산된 단일 원형 기둥에 작용하는 하중에 비해 상당히 큰 것을 확인하였다. 또한, Scolan and Malenica[1998]은 네 개의 수직 원형 기둥 배열 주위에서 규칙파에 의한 회절현상을 모형실험을 통해 연구하였고, 앞 쪽 두 개의 원형 기둥 사이에서 국부적으로 높은 2차 정도의 자유수면 변화가 관측되었다. 이러한 결과들은 배열된 원형 기둥의 내부 영역에서 발생하는 near-trapping 현상으로 설명 할 수 있다. Near-trapping 현상은 인장각식 구조물(tension-leg platform, TLP)과 반잠수식 구조물(semi-submersible structure)과 같은 기둥 지지형 구조물(column-based structure)에서 유체역학적 상호작용에 의해 발생하는 현상이다. 특히, 특정한 주파수에서 큰 진폭의 자유수면 진동이 발생하며, 이는 실제 해역에서 해양구조물의 테크하부에 큰 충격을 가하게 되고, 장비손상과 생산에 영향을 미친다(EaTock Taylor and Wu[1997]; Swan et al.[1997]).

최근 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)에 의한 수치적 연구가 비약적인 발전을 이루고 활용 폭 또한 넓어지면서, 점성을 고려한 파랑 구조물 상호작용(wave-structure interaction)과 비선형성 거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Danmeier, et al., 2008; Iwanowski, et al., 2009; Bøckmann, et al., 2014). 특히, 라이선스 비용이 없고 소스코드가 공개된 OpenFOAM 해석 프로그램은 해안 및 해양공학의 많은 문제에 적용되고 있다(Bredmose & Jacobsen, 2010; Cao, et al., 2011; Seiffert, et al., 2014). 또한, 다양한 파랑환경에 노출된 해양구조물의 거동 예측을 위해 Open source code를 이용한 수치파랑수조(Numerical wave tank, NWT)기법에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

Morgan, et al. (2010)은 OpenFOAM에 stokes 파를 생성하기 위해 파 입자 속도와 체적분율을 이용하여 입사파를 생성하였고, 규칙파에서 물속에 잠긴 물체에 대한 모형실험을 통해 8차 조화성분까지 정확하게 모델링하였다. Afshar (2010)은 relaxation technique를 이용하여 수치소파방법을 개발하였다. Jacobsen, et al. (2012)는 파랑의 진행과 쇄파를 모델링하기 위해 기존의 OpenFOAM에 'wave relaxation zones'을 적용하여 파랑을 생성하고 흡수할 수 있는 소스가 공개된 CFD 라이브러리인 "waves2Foam"을 개발하였다. Higuera, et al. (2013a, 2013b)도 특정한 경계조건을 만들어 현실적인 파랑 생성과 흡수를 하는 소스가 공개된 CFD 라이브러리인 "IHFoam"을 OpenFOAM에 추가하였다.

1.3 연구 내용

본 연구는 해양구조물에서 가장 일반적으로 쓰이는 구조물 형태인 원형 기둥을 대상으로, 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 wave run-up 현상에 대한 수치해석을 진행하였다. 구체적으로는, OpenFOAM 표준 solver 중 체적비 이송방정식을 이용하여 2상 유동(two-phase flow)을 해석할 수 있는 "interFoam"을 기저 solver로 사용하였고, 파의 생성과 소멸을 위해 "waves2Foam"을 추가하여 사용하였다. 적용된 케이스로는 규칙파 중 고정된 단일 원형 기둥 및 정사각형 배열의 원형 기둥 4개에 대한 파랑하중과 wave run-up을 수치시뮬레이션을 하였고, 원형 기둥 4개의 경우 입사파의 진행방향($\beta = 0^\circ, 45^\circ$)에 따른 파고변화를 살펴보았다. 특히, 단일 원형 기둥에 대한 검증으로 27차 ITTC ocean engineering committee (OEC)에서 benchmark study로 사용되었던 KRISO의 파랑 조건을 적용하고, 수치해석 결과를 모형 실험결과(Sun, et al., 2016)와 비교하였다. 모든 수치시뮬레이션은 OEC에 따라 full scale로 계산하였다.

제 2 장 계산 방법

2.1 지배 방정식

비압축성 유동에서 속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존방정식과 모멘텀 보존 방정식을 지배방정식으로 사용하였으며 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \vec{v}_m = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + S \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도벡터를 나타낸다. S 는 소스항을 나타내고, 이러한 소스항에는 중력가속도가 포함된다. $\vec{\tau}$ 는 점성 응력 텐서를 나타내고 비압축성 유동에서 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{\tau} = \mu (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 m 은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_a \rho_a + \alpha_w \rho_w \quad (4)$$

$$\mu_m = \alpha_a \mu_a + \alpha_w \mu_w \quad (5)$$

여기서, a 는 체적분율을 나타내고, 아래첨자, w 와 a 는 water와 air을 의미한다.

난류를 고려하기 위해 운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 생성된다.

$$-\rho_m \overline{v_m v_m} = \mu_t (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \quad (6)$$

여기서, μ_t 는 난류점성계수이고, $\overline{\quad}$ 는 단위 텐서를 나타낸다.

또한, 아래와 같은 체적비 이송방정식을 고려하여 자유수면을 계산하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha \rho_m \vec{v}_m) = -C_{ad} \nabla \cdot (\alpha (1-\alpha) \vec{v}_r) \quad (7)$$

여기서, 체적분율 α 는 액체영역에서 1, 기체영역에서 0, 상호 경계면에서는 $0 < \alpha < 1$ 의 값을 갖는다. 오른쪽 항은 해의 확산을 감소시키기 위한 확산항이다(Lee & Rhee, 2015; Park, et al., 2016). 여기서 C_{ac} 는 확산 감소를 위한 상수이고 본 논문에서는 파형이 최대한 깨지지 않는 수인 1.0을 사용하였다. $\overline{v_r}$ 은 자유수면 경계면에서의 속도를 나타낸다.

2.2 수치 방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE(Patankar & Spalding, 1972)과 PISO(Issa, 1986)를 결합한 PIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델(Orszag, et al., 1993)을 사용하였다. 대류 항은 TVD scheme에 vanLeer (vanLeer, 1979) limiter로 차분을 적용하였고, 확산항은 중심 차분을 적용하여 계산하였다. 체적비는 하류차분과 상류차분을 혼합한 이산화 방법을 사용하여 계산하였다. 대수방정식의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법(Weiss, et al., 1999)을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 사용하여 대수방정식을 계산하였다.

2.3 계산영역 크기, 경계조건 및 격자

계산영역의 크기, 경계조건, 격자는 Fig. 2.1에 표현되어 있다. 입사파의 파장 길이를 $1L$, 원형 기둥 직경을 D 로 표현하였을 때, 직사각형 형태로 구성된 도메인의 전체 길이는 $8L$ 이며, 원형 기둥 중심에서 입구면 쪽으로 $3L$, 출구면 쪽으로 $5L$ 로 설정하였다. 단일 원형 기둥으로부터 측면 경계면까지의 폭은 $4D$ 로 계산하였고, 추가적으로 주기 $T=7, 9s$ 의 경우에는 폭을 $8D$ 로 설정하여 벽면에 의한 반사효과가 계산 결과에 미치는 영향을 살펴보았다. 정사각형 배열의 원형 기둥에 대해서는 원형 기둥으로부터 측면 경계면까지의 폭을 $7D$ 로 설정하여 계산하였다. 수면 위로는 파고가 가장 높은 주기 $T=15s$, 파 경사도 $H/L=1/16$ 일 때 $1.875D$ 로 설정하여 정상(top) 경계면이 자유 수면에 미치는 영향을 최소화 하였고, 그 외의 입사파조건에서는 수면 위를 $1.5D$ 로 설정하였다. 수면 아래는 $12.5D$ 로 설정하여 계산하는 모든 입사파에 대해 심해 조건을 만족하였다.

입구면에서 속도, 난류, 체적함수는 Dirichlet조건, 압력은 Neumann조건으로

설정하였다. 출구면에서 속도, 난류, 체적함수는 Neumann조건으로 설정하였고, 압력은 Dirichlet조건으로 설정하였다. 원형 기둥을 중심으로 물리현상이 대칭이기 때문에 원형 기둥의 절반만 해석하였다. 중앙 단면은 symmetry조건으로 설정하였다. 자유수면, 입구면, 출구면 및 중앙 단면 외에 나머지 하나의 경계는 원형 기둥 표면이며 경계조건으로 점성을 고려한 no-slip과 점성을 무시한 slip조건 중 하나를 선정할 수 있다. 선택의 기준은 파랑과 구조물 간의 상호 작용 시 관성력과 점성력의 상대적 크기를 보여주는 Keulegan-Carpenter 수($KC = uT/D$, u : 물 입자의 최대 속도, T : 파주기)이다. 이에 대해 Sumer and Fredsø (2006)는 KC 수의 범위에 따라 원형 기둥 구조물에 지배적으로 작용하는 파랑하중의 성분을 개략적으로 구분하였다. Sumer and Fredsø (2006)에 의하면 $KC=1.6$ 일 때 원형 기둥 뒤에서 박리현상 (separation flow)이 발생하지만, $0 < KC < 20 \sim 30$ 에서는 관성력이 지배적이고, $KC > 20 \sim 30$ 에서는 점성항력이 지배적이다. 본 연구에서 계산하는 입사파의 KC 수는 약 0.5~4.3의 범위로 관성력이 지배적인 영역이므로, 원형 기둥 벽면에서의 마찰에 의한 영향을 무시할 수 있다고 가정하여 원형 기둥 벽면에 slip조건을 적용하였다(Palomares, 2015). 이러한 경계조건 설정은 포텐셜 이론에서의 경계조건과 유사하지만, 본 연구의 지배방정식은 내부적인 점성응력에 대한 계산은 계속 유지한다. 즉, 포텐셜 모델과 본 연구의 모델의 차이점은 전도(overtopping)에 의한 쇄파와 물과 공기의 재진입(re-entry), 그리고 소용돌이도(vorticity)의 생성을 묘사할 수 있다는 것이다(Paulsen, et al., 2014).

격자를 생성하기 위해 OpenFOAM이 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 blockMesh와 snappyHexMesh를 이용하여 hanging node mesh와 cut cell mesh가 포함된 비정렬 격자로 생성하였다. 자유수면의 영향을 정확히 고려하기 위해 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 출구면으로 이동할수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 또한, 원형 기둥에 의한 파의 회절 및 산란 영역에 기존 격자보다 두 배의 밀집도로 격자를 생성하였다. 동일한 길이의 파장 생성과 정확한 진폭을 묘사하기 위해 길이 방향 격자 간격과 높이 방향 격자간격의 비를 1로 설정하였다(Jacobsen, et al., 2012). 주기 $T=9s$, 파랑의 경사가 $H/L=1/30$ 인 입사파 조건에서 medium격자를 기준으로 파의 한 파장 길이 구간에 202개의 격자, 높이구간에 7개의 격자를 생성하여 약 327만개의 격자를 사용하였다.

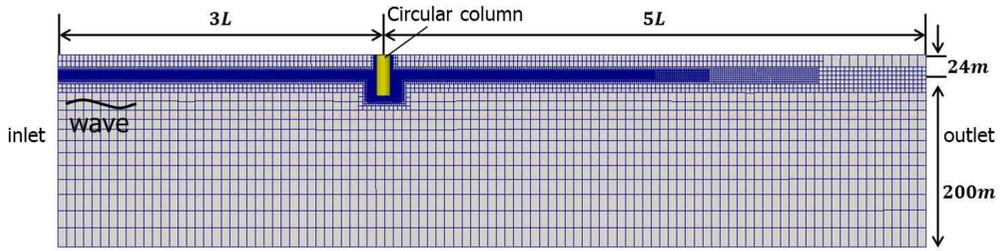


Fig. 2.1 Boundary conditions and domain size

2.4 수치파랑수조 기법

본 연구에서는 파랑의 생성과 소파를 모델링하기 위해 소스코드가 공개된 waves2Foam 라이브러리를 사용하였다(Jacobsen, et al., 2012). Fig. 2.2는 규칙파를 생성하기 위한 수치파랑수조의 개략도를 나타낸다. 입구경계면(왼쪽)을 수치조파 경계조건으로 설정하여 정의된 파 이론에 해당하는 물 입자의 속도와 체적분율을 이용하여 자유수면의 위치를 계산한다. relaxation zone은 입구경계면의 하류 부분에 파랑이 진행되는 생성구간(wave generation zone)과 출구경계면의 상류 부분에 강제적으로 파의 진폭을 0으로 감소시키는 감쇠구간(wave damping zone)으로 구분된다. relaxation zone 안에서 파 입자 속도벡터(\vec{v})와 체적분율(α)은 매시간 다음의 식에 의해 계산된다.

$$\phi = \chi(\sigma)\phi_{computed} + (1 - \chi(\sigma))\phi_{target} \quad (8)$$

여기서, ϕ 는 속도벡터(\vec{v}) 또는 체적분율(α)을 나타낸다. 아래첨자 *computed*과 *target*는 각각 계산된 해와 이론에 의한 해석 해를 의미한다. $\chi(\sigma)$ 는 가중인자(weighting factor)이고 국부좌표계 σ 의 함수로 나타낼 수 있다. $\chi(\sigma)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\chi(\sigma) = 1 - \frac{\exp(\sigma^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \sigma \in [0; 1] \quad (9)$$

여기서, 국부좌표계 σ 는 relaxation zone을 따라 길이 방향으로 정상화되어 0과 1 사이의 값을 가지는 좌표계이다. 즉, $\chi(\sigma)$ 는 계산영역(computational domain)과 relaxation zone

의 상호경계면에서 항상 1의 값을 가진다.

결과적으로, relaxation zone안에서 매시간 간격마다 속도 및 체적분율은 식 (8)에서와 같이 가중인자 $\chi(\sigma)$ 에 의해 계산된 해와 파 이론에 의한 해석 해로 수정된다. 즉, 입구경계면에서 생성된 파가 내부적으로 발생하는 반사파에 의한 영향 없이 계산영역으로 일정하게 진행하기 위해, 생성구간 안에서는 계산된 해를 정의된 파 이론의 해석 해로 보완한다. 또한, 감쇠구간에서는 물입자의 움직임이 없는 이론값으로 설정하여 계산영역에 미치는 반사파의 영향을 피하기 위해 강제적으로 파를 감쇠시킨다.

입사파가 생성되는 부분에 $2L$ 의 생성구간을, 유동이 빠져나가는 부분에 $3L$ 의 감쇠구간을 설정하여, 출구에서의 반사파를 방지하였다. 이를 통해 계산시간 동안 계산 결과들의 오차를 최대한 줄이고자 하였다. 또한, 계산영역은 $3L$ 로 설정하였고, 파랑 생성구간과 계산영역의 경계면에서 발생하는 파랑의 불안정성을 피하기 위해 원형 기둥 중심은 파랑 생성구간이 끝나는 지점에서 $1L$ 거리에 설치하였다.

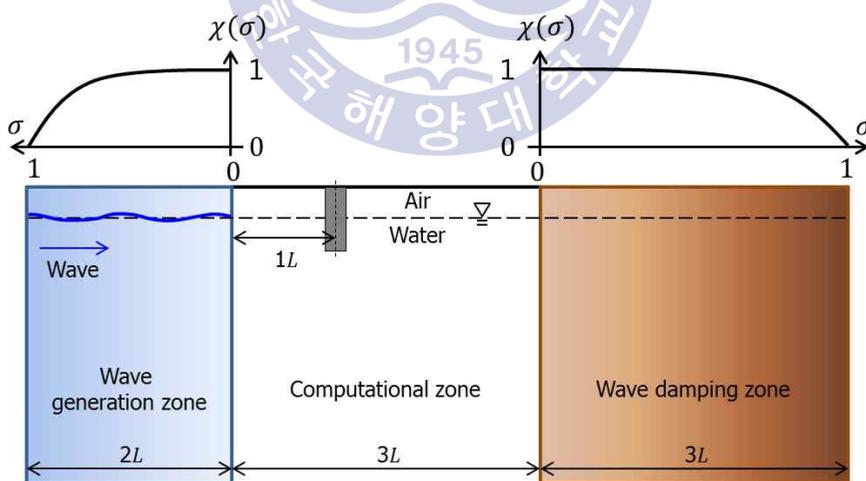


Fig. 2.2 Wave generating and damping zones

제 3 장 수치적 검증

3.1 입사파 조건

입사파 조건은 27차 ITTC OEC에서 진행하였던 benchmark study에서 적용된 조건 중 파 주기가 $T=7s, 9s, 15s$ 이고, 각각의 주기에 대해 파 경사 $H/L=1/30, 1/16$ 인 조건을 고려하여 총 6가지 조건을 선정하였다. Table 3.1은 계산조건을 나타낸다. 입사파는 모두 심해조건($L/h < 0.5$)을 만족하며, 여기서 T 는 입사파 주기, H/L 은 파 경사도, H 는 파고, $A(=H/2)$ 는 파 진폭, L 은 파장, h 는 수심을 나타낸다. Chakrabarti (1987)는 파랑하중 산출을 위한 여러 식의 적절한 적용범위를 Fig. 3.1과 같이 나타내었으며, 점으로 찍힌 부분은 본 연구에서 고려되는 입사파 조건을 나타낸다. D/L 은 파장과 직경의 비, H/D 는 직경과 파고의 비를 나타낸다. Fig. 3.1에서 알 수 있듯이, 파랑하중을 추정할 때 D/L 이 0.5보다 작을 경우 물체로 인한 입사파의 산란현상을 무시할 수 있고, 0.5보다 클 경우에는 산란효과가 반드시 고려되어야 한다.

Table 3.1 Incident wave conditions

Case number	T (s)	H/L	H (m)	A (m)	L (m)	D/L	KC
Case 1	7	1/30	2.55	1.27	76.44	0.21	0.50
Case 2		1/16	4.78	2.39			0.94
Case 3	9	1/30	4.21	2.11	126.36	0.13	0.83
Case 4		1/16	7.90	3.95			1.55
Case 5	15	1/30	11.70	5.85	351.00	0.046	2.30
Case 6		1/16	21.94	10.97			4.31

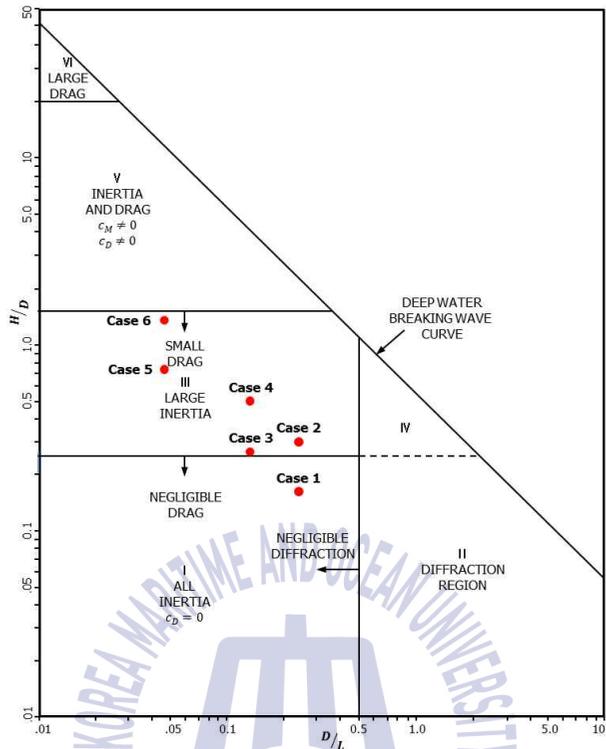


Fig. 3.1 Regions of application of wave-force formulas for a vertical cylinder (captured from Chakrabarti (1987))

Table 3.1의 KC 는 본 연구에서 고려된 Keulegan-Carpenter(KC) 수를 나타낸다. KC 는 구조물의 치수에 대한 입자운동의 상대적 거리를 의미하며, 평균수위(mean water level)에서 KC 수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

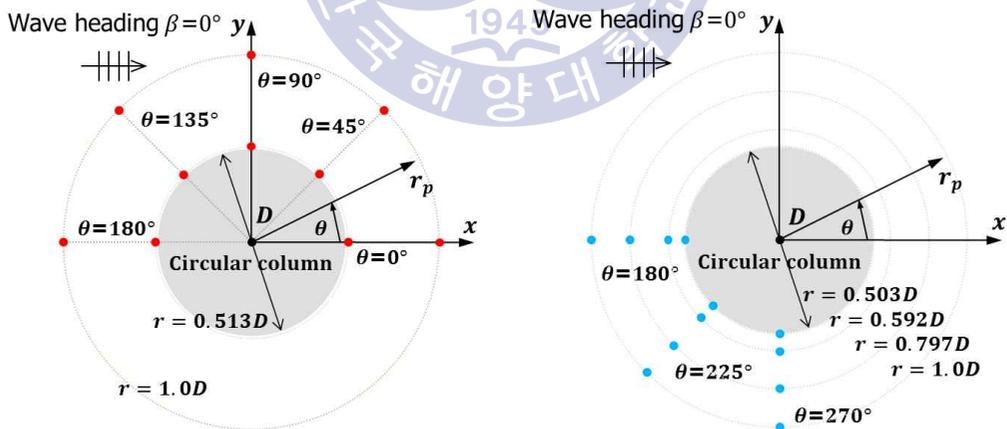
$$KC = 2\pi A/D \quad (10)$$

여기서 A 는 파 진폭, D 는 원형 기둥 직경을 나타낸다.

KC 수는 유동박리(flow separation)의 기준이 된다. 즉 난류 영역에서 이 값이 크면 와동(eddy)이 크게 형성되고 따라서 점성항력이 지배적인 반면 이 값이 작으면 현저한 유동박리나 와류방출(vortex shedding)이 일어나지 않아 벽면에서 점성효과에 의한 마찰이 약해져 관성력이 지배적이다. 결과적으로, Table 3.1의 KC 수는 충분히 작으므로 점성항력 성분보다 관성력 성분이 지배적이며 산란현상을 무시할 수 있는 영역에 있다고 생각할 수 있다(Sumer & Fredsø, 2006). 한편, 심해조건에서 파수(k)는 선형

분산관계식(dispersion relationship)에 의해 나타낼 수 있고, 파 주기가 $T=7s, 9s, 15s$ 일 때, 파수는 각각 $0.0821m^{-1}, 0.0497m^{-1}, 0.0179m^{-1}$ ($kr=0.657, 0.398, 0.143$)이다. 파수는 주기와 반비례관계이기 때문에, 주기가 짧을수록 파수는 커진다.

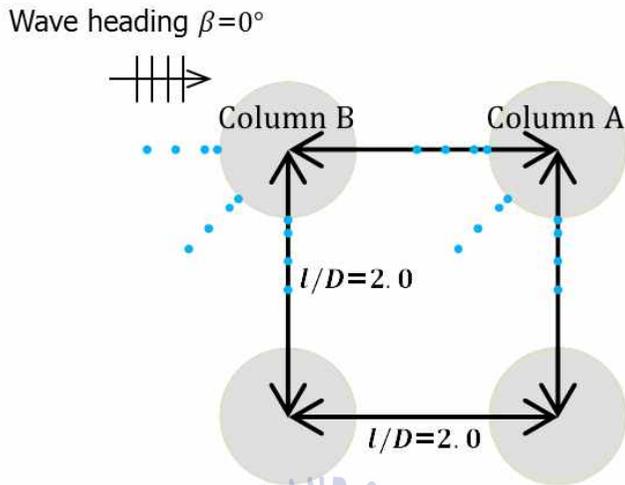
수치파랑수조의 기법을 검증하기 위해, Table 3.1에 나타난 입사파 조건에 대해 단일 원형 기둥(이하 1C)에 작용하는 파랑하중과 wave run-up을 KRISO에서 수행된 모형실험 데이터와 비교하였다(Sun, et al., 2016). 또한, 주기 $T=7s$ 이며, 파 경사도 $H/L=1/30, 1/16$ 인 두 가지 입사파 조건에서 정사각형 배열의 원형 기둥 4개(이하 4C)를 계산하였다. 원형 기둥 직경은 $D=16m$, 흘수는 $24m$ 이고 실제 크기로 계산하였다. Fig. 3.2는 원형 기둥과 결과로 도식화할 위치를 나타낸다. Fig. 3.2(a)는 1C 주변의 파고계를 나타낸다. 원형 기둥 근처($r=0.513D$)와 원형 기둥에서 $0.5D$ 떨어진 위치($r=1.0D$)에서 45° 간격으로 결과를 도식하였다. Fig. 3.2(b)는 4C 주변의 파고계를 나타낸다. 이 또한, 원형 기둥 중심으로부터 특정한 거리 ($r=0.503D, 0.592D, 0.797D, 1.0D$)에서 45° 간격으로 결과를 도식하였다. Fig. 3.3은 입사파의 진행방향(β)이 0° 와 45° 일 때, 정사각형 배열의 원형 기둥 배치도를 나타낸다. 원형 기둥사이 거리($1D$), r -원형 기둥 중심 간의 거리, D -원형 기둥 직경)는 2로 설정하였다.



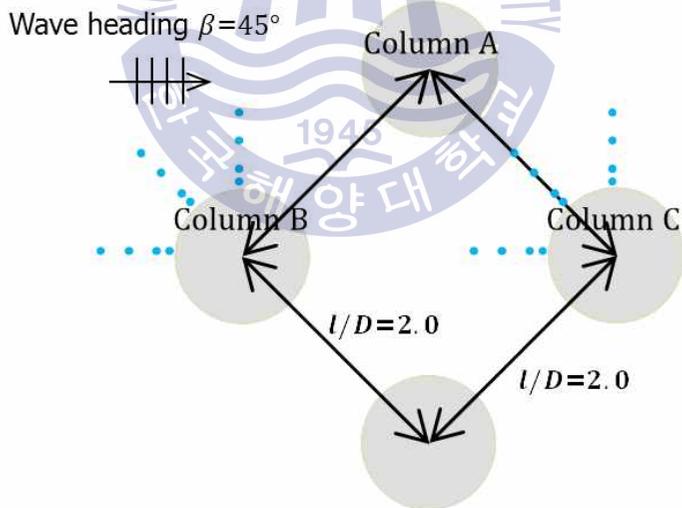
(a) single circular column

(b) four circular column

Fig. 3.2 Location of wave probes (solid circles indicate wave probes)



(a) incident wave angle ($\beta=0^\circ$)



(b) incident wave angle ($\beta=45^\circ$)

Fig. 3.3 Arrangement of four circular columns

3.2 파 이론 적용의 타당성

해양파를 이론적으로 해석하는 방법은 선형과 이론인 에어리(Airy)파 이론, 비선형과 이론인 스톡스(Stokes)파 이론, 크노이달(Cnoidal)파 이론, 고립(solitary)파 이론, 스트림(stream)함수 이론 등 여러 가지가 있다. 해양구조물을 설계할 때에는 이와 같은 여러 해양파 이론 중 가동해역의 수심, 파장, 파고에 따라 가장 적합한 파 이론을 선택하여 적용한다. Fig. 3.4는 각 해양파 이론의 적용영역을 보여주며, 본 연구에서 고려되는 입사파 조건을 점으로 표시하였다.

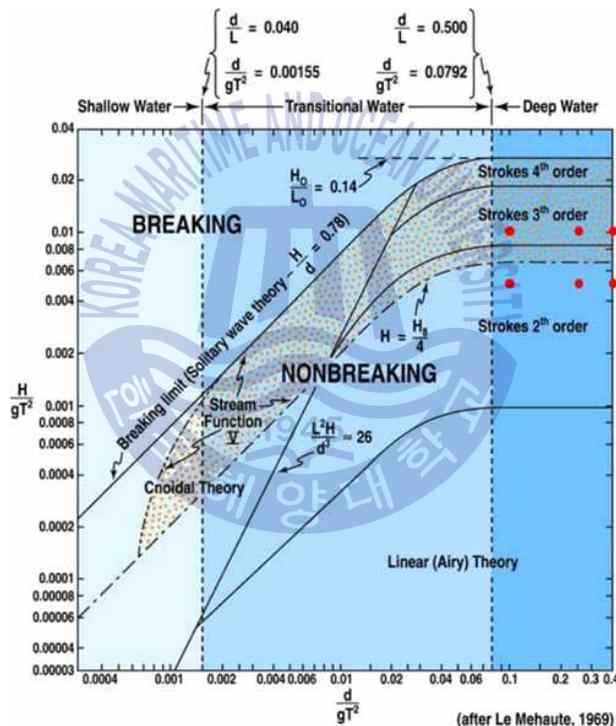


Fig. 3.4 Ranges of suitability of various wave theories (captured from Sadeghi (2008))

파 이론 적용범위에 따라 파 경사도 $H/L=1/30$ 에서는 2차 스톡스 파 이론을, 파 경사도 $H/L=1/16$ 에서는 5차 스톡스 파 이론을 적용하였다. 2.4절에서 설명하였듯이, 수치조파 경계조건에서의 파고 및 물 입자 속도는 파 이론에 근거하여 부여되며, 2차 스톡스파 이론에 대한 파고 및 물 입자 속도 성분은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2 k}{16} \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$u = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \omega k \cosh 2kh (h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \omega t) \quad (11)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \omega k \sinh 2kh (h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \omega t) \quad (12)$$

여기서 η 는 $z=0$ (평균수면)에 관한 자유수면의 변위이고, u 와 w 는 각각 물입자의 수평, 수직속도 성분이다. H 는 파고이며, g 는 중력 가속도, h 는 수심이다. t 는 시간, x 는 수평방향 거리, ω 는 각주파수, k 는 파수를 나타낸다. ω 와 k 는 다음의 식으로 정의된다. 여기서 L 은 파장이다.

$$\sigma = (gk \tanh kh)^{1/2} \quad (12)$$

$$k = 2\pi/L \quad (13)$$

5차 스톡스 파 이론의 경우, Fenton (1985)이 제시한 식을 적용하여 waves2Foam 라이브러리에서는 파를 생성하였다.

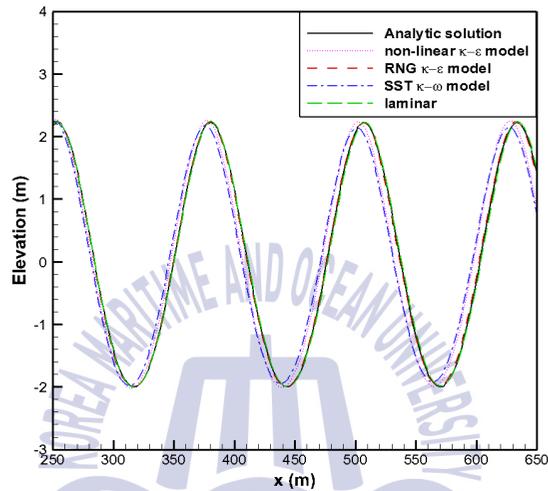
3.3 수치파랑수조 기법 검증

수치파랑수조의 정확한 구현을 위해 규칙파의 2차원 조파 시뮬레이션을 수행하였다. 파 경사도 $H/L=1/30$ 이고 주기 $T=9s$ 인 입사파를 기준으로 하였다. 시뮬레이션 시간은 1주기에 1000번의 시간 간격(time step)으로 총 12주기를 계산하였다. 적절한 난류모델 선정과 격자 수렴도 테스트를 위해 측정된 파고는 2차 스톡스 파의 이론적인 해와 비교하였다.

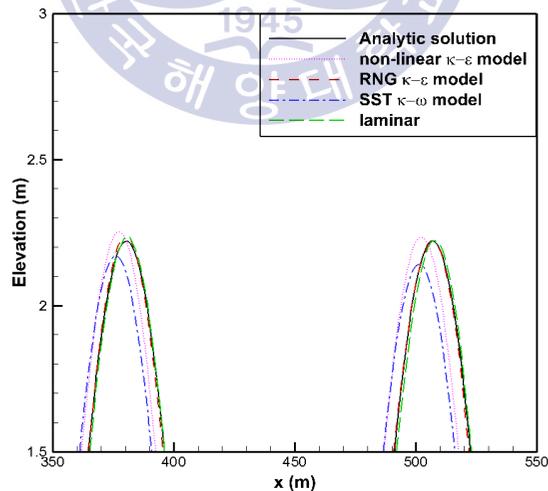
3.3.1 난류모델 설정

극심한 해양환경에서 해양구조물은 높은 파고의 파랑에 의해 강한 충격을 받는다. 이때, 쇄파 현상에 의한 영향도 고려해야 한다. 또한, Reynolds 수가 큰 난류 영역이기 때문에 난류 모델을 결정해야 한다. 난류모델에 대한 의존도 평가에서는 non-linear $k-\epsilon$

model(Shih, et al., 1996), RNG $k-\epsilon$ model(Orszag, et al., 1993), SST $k-\omega$ model(Menter, 1993) 3가지 난류모델을 고려하였다(Brown, et al., 2014). Fig. 3.5(a)는 계산 시간이 12주기 지났을 때 계산영역의 길이 방향에 대한 파고의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3.5(b)는 연속하는 2개의 파정(crest)을 확대한 그림이고, RNG $k-\epsilon$ 모델이 2차 스톱스 파를 가장 정확하게 표현하였다.



(a) wave elevation



(b) zoom around crest

Fig. 3.5 Comparison of wave elevation for turbulence models at $t=12T$

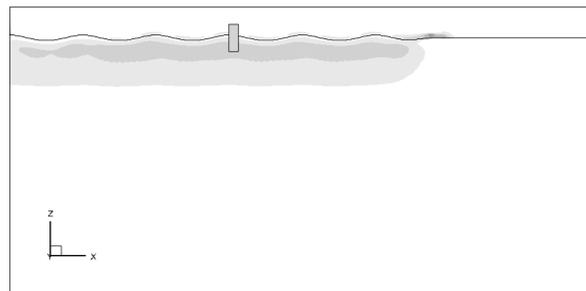
Fig. 3.6은 물과 공기의 경계면에서 발생하는 난류에너지의 확산을 나타낸다. Fig. 3.6에서 확인 할 수 있듯이, 수치파랑수조에서 난류 에너지의 확산이 커질수록 진행되는 파의 파고 감소 및 점진적인 파형의 이동(wave shift)에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 결과적으로, 본 연구에서는 반잠수식 구조물의 해양플랜트에서 air gap을 예측하기 위한 선행연구로서 난류 모델을 고려하였고, 일정한 파고와 주기를 가지며 일정한 방향으로 진행되는 규칙파를 재현하기 위해, 물과 공기의 경계면에서 발생하는 변형률에 기인한 수치적 난류 확산을 최소화하는 난류모델을 선정하였다.



(a) SST $k-\omega$ model



(b) non-linear $k-\epsilon$ model



(c)

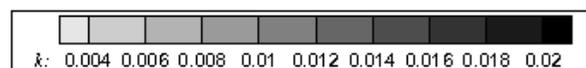


Fig. 3.6 Numerical diffusion of turbulent kinetic energy around free-surface

3.3.2 계산영역 크기의 영향

수치파랑수조 벽면에 의한 반사효과를 알아보기 위해, 원형 기둥으로부터 측면 경계면까지의 폭이 $8D$ 인 수치파랑수조에 대해 자유수면의 변화를 계산하여 폭이 $4D$ 인 수치파랑수조의 계산결과와 비교하였다(Fig. 3.7). 계산은 파 경사도 $H/L=1/30$, 파 주기 $T=9s$ 인 입사파 조건에서 수행하였다. Fig. 3.7에서 원형 기둥 측면과 후면에서 $8D$ 의 1, 2차 조화성분이 실험값(sun et al.[2016])과 더 일치하는 결과를 나타내었다. 이를 보면, 폭이 $4D$ 일 때 벽면에 의한 반사파가 원형 기둥 주변의 자유수면 변화에 영향을 주었지만, 폭 $8D$ 에 비해 오차의 정도는 크지 않아 폭을 $4D$ 로 선정하여 계산하였다.

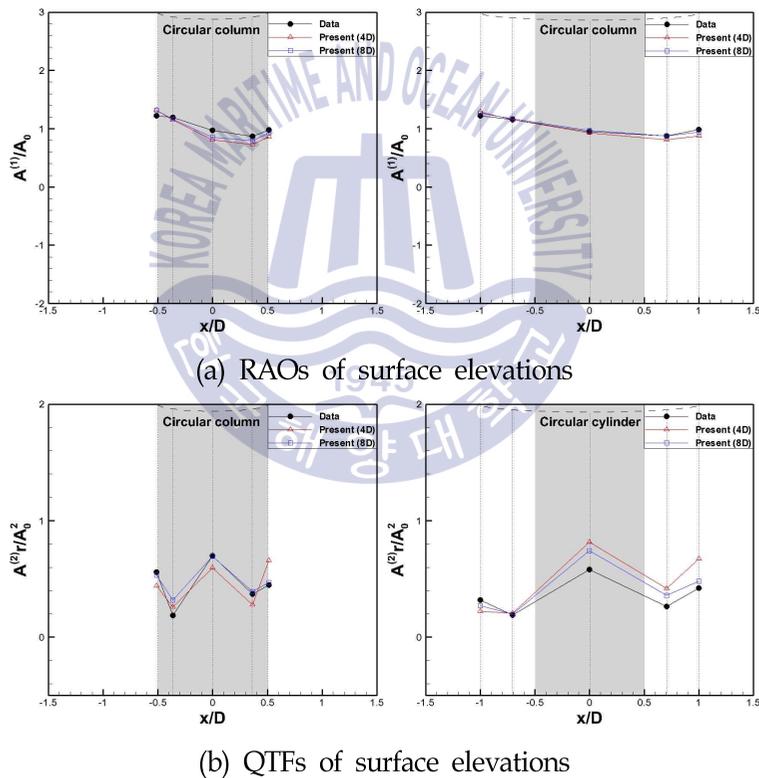
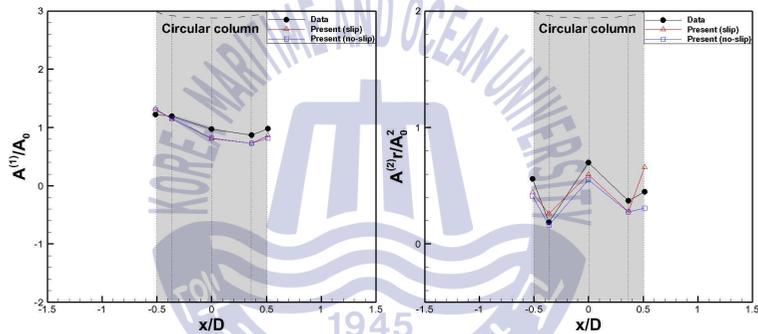


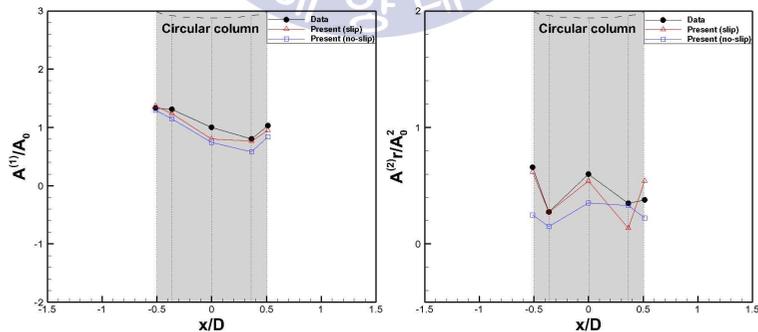
Fig. 3.7 RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30$, $T=9s$ (left: inner probes, right: outer probes)

3.3.3 원형 기둥 경계조건의 영향

원형 기둥에 대한 경계조건의 영향을 알아보기 위해 원형 기둥 표면에 slip 경계조건과 no-slip 경계조건 두 가지를 고려하여 계산하였다. Fig. 3.8은 경계조건에 따른 원형 기둥 표면 근처($x=0.513D$)에서의 파고를 나타낸다. 이때, 계산은 파 주기 $T=9s$ 과 경사도 $H/L=1/30, 1/16$ 인 입사파 조건에 대해서만 수행하여 나타내었다. 파 경사도가 커질수록 실린더 주위의 주유수면 변화는 no-slip 경계조건 결과가 더 낮게 예측되었고, 파랑하중의 1차 조화성분은 모형실험 및 slip 경계조건 계산결과에 비해 더 높게 예측되었다. 결과적으로, 파랑-구조물 상호작용 문제에서 관성력이 지배적인 영역에서는 실린더 표면에 slip 경계조건을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.



(a) surface elevation at $H/L=1/30$



(b) surface elevation at $H/L=1/16$

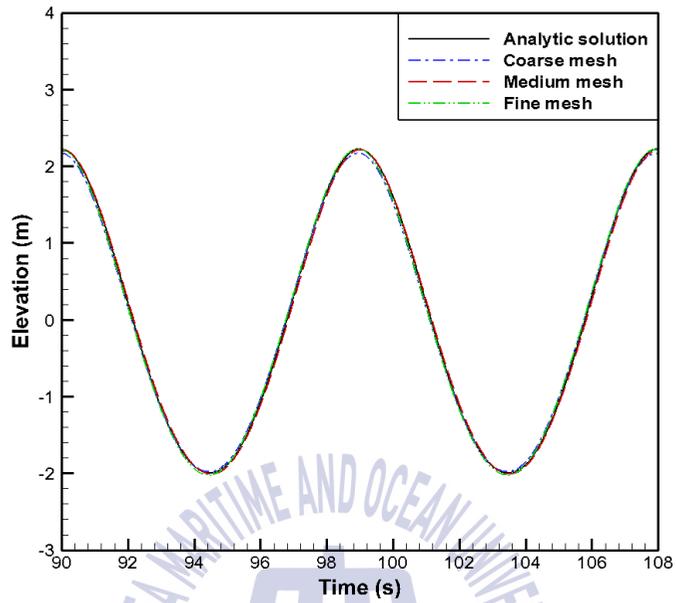
Fig. 3.8 RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30, 1/16, T=9s$ (left: RAOs, right: QTFs)

3.3.4 격자 수렴도 테스트

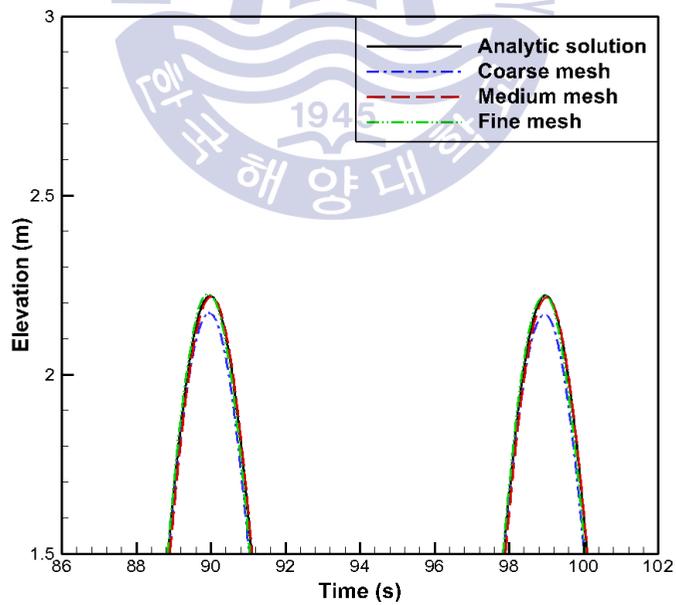
격자의 수렴도 테스트는 파도를 생성하는 데 중요한 요소로, 격자의 크기보다 파장 당 격자수가 중요하다(Kristiansen, et al., 2004). 본 연구에서도 파가 진행되는 영역에 격자의 크기를 균일하게 증감시켜, 수치시뮬레이션을 위한 격자수와 격자 크기를 결정하였다. Table 3.2와 같이 격자의 크기는 coarse, medium, fine 3단계로 설정하였으며 각 격자의 종횡비(aspect ratio)는 모두 1이다(Jacobsen, et al., 2012). 파가 전진하는 방향을 x-축으로 설정하였고, 높이 방향을 z-축으로 설정하였다. N_x 는 한 파장의 격자 분할 수, N_z 는 파고의 격자 분할 수를 의미한다. Δx 는 파랑의 길이 방향 격자 크기, Δz 는 높이 방향 격자 크기를 나타낸다. Fig. 3.9(a)는 3가지 격자에 대해 원형 기둥의 중심 위치에서의 시간에 따른 파고 변화를 2차 스톱스 파 이론과 비교하여 나타낸 것이다. 두 개의 연속한 과정을 확대한 Fig. 3.9(b)을 보면 최소한 medium격자 크기, 즉 파의 한 파장 길이 구간에 202개의 격자($0.626m$), 높이구간에 7개의 격자($0.625m$)를 만족해야 하는 것을 알 수 있다. Fig. 3.10은 입사파 주기 $T=7s$ 와 $T=15s$ 일 때 시간에 따라 생성된 파의 파고를 원형 기둥 중심에서 측정하여 2차 스톱스 파 이론과 비교한 것이다. Fig. 3.11는 파경사도 $H/L=1/16$ 일 때, 5차 스톱스 파 이론을 적용한 파랑 생성을 나타낸 것이다. Fig. 3.10과 Fig. 3.11에서 볼 수 있듯이 이론적인 해와 거의 유사한 규칙파를 생성하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.2 Grid sizes for uncertainty analysis for 2D simulations

Grid system	$N_x / \Delta x(m)$	$N_z / \Delta z(m)$	Number of mesh
Coarse	101/1.25	3/1.25	19,003
Medium	202/0.626	7/0.625	41,307
Fine	404/0.313	13/0.313	95,723

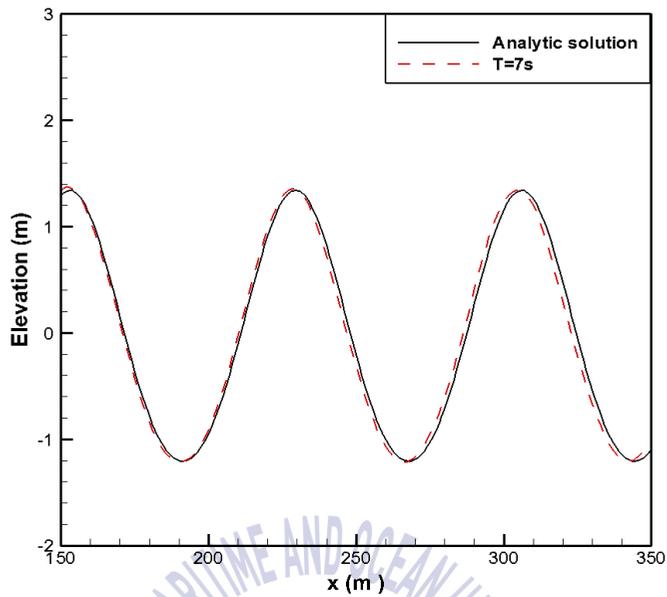


(a) time series of wave elevation

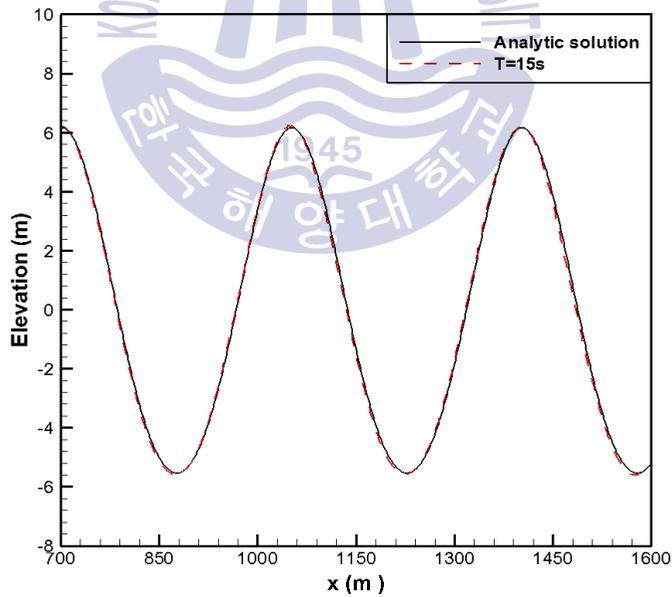


(b) zoom around crests

Fig. 3.9 Comparison of wave elevation with different grid sizes

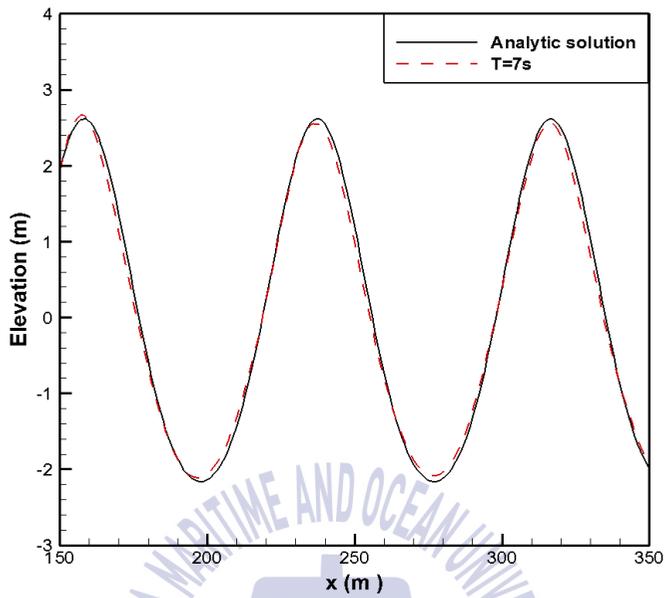


(a) wave elevation at $T=7s$

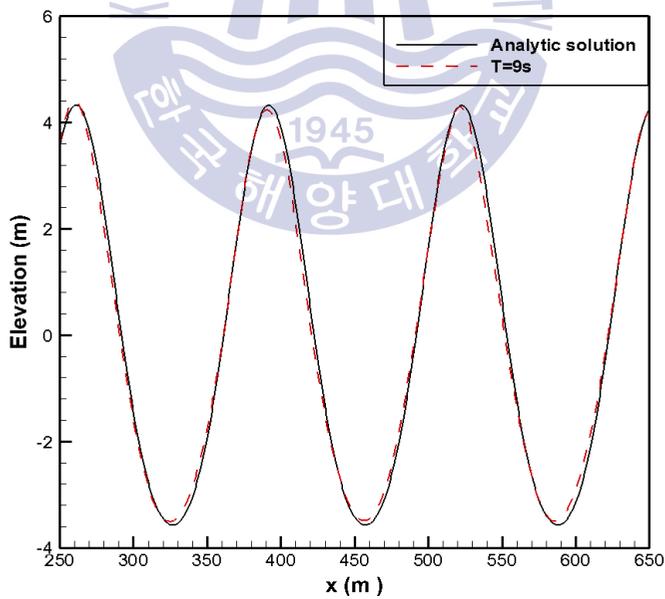


(b) wave elevation at $T=15s$

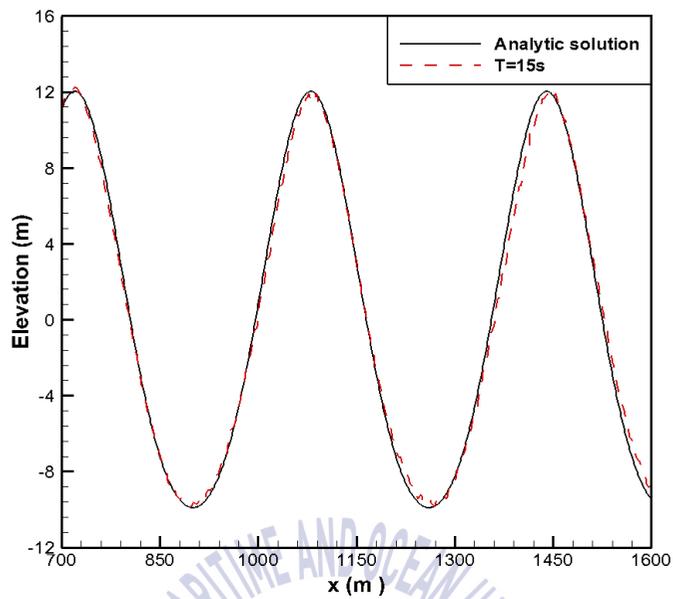
Fig. 3.10 Comparison of wave elevation at two periods at $H/L=1/30$



(a) wave elevation at $T=7s$

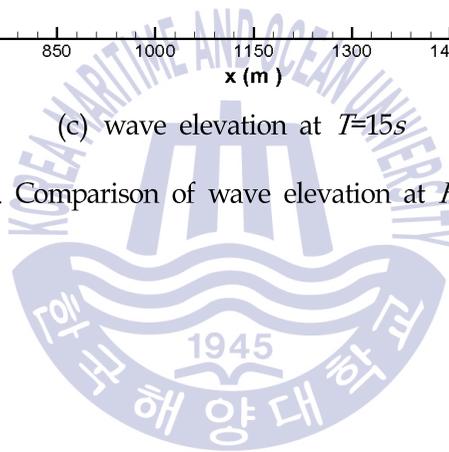


(b) wave elevation at $T=9s$



(c) wave elevation at $T=15s$

Fig. 3.11 Comparison of wave elevation at $H/L=1/16$



제 4 장 결과 및 고찰

4.1 수치해석 방법

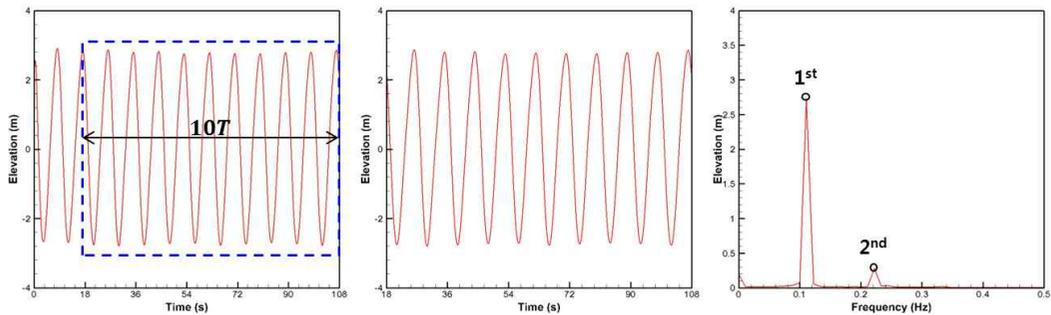
본 연구에서는 원형 기둥에 작용하는 파랑하중과 wave run-up에 대한 수치해석결과의 1차 및 2차 조화 성분을 푸리에 분석(Fourier analysis)을 통해 추출하여 모형실험결과와 비교하였다. 1차 조화성분은 진폭 응답함수(Response amplitude operators, RAOs), 2차 조화성분은 이차전달함수(Quadratic transfer functions, QTFs)이며, 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$RAO = A^{(1)}/A_0 \quad (10)$$

$$QTF = A^{(2)}r/A_0^2 \quad (11)$$

여기서, r 은 원형 기둥 반경, $A^{(1)}, A^{(2)}$ 은 구조물에 의해 교란된 자유수면의 1, 2차 조화 진폭, 그리고 A_0 는 구조물이 없을 때 입사파의 1차 조화성분의 진폭을 의미한다.

시계열로 얻어진 진폭의 조화성분을 추출하는 절차는 Fig. 4.1과 같다. 먼저 시간-진폭 그래프에서 안정적인 결과를 나타내는 시간 구간을 설정한 뒤 Fig. 4.1(a),(b), 이 구간에 대해 고속 푸리에 변환(Fast fourier transform, FFT)을 수행하여 주파수영역에 대한 진폭으로 나타낼 수 있다 Fig. 4.1(c)(Yang, et al., 2015). 이 때, 첫 번째 정점(peak) 값이 1차 조화성분, 두 번째 정점 값이 2차 조화성분이다. 본 연구에서는 총 12주기를 계산하였고, 불안정한 결과를 나타내는 초기 2주기를 제외한 10주기에 대해 수치해석을 하였다. 이러한 해석 방법을 통해, 특정한 결과 값에 대한 고차항의 비선형성을 파악할 수 있다.



(a) time domain of wave elevation (b) selected time window (c) frequency domain of wave elevation

Fig. 4.1 Wave analysis procedure

4.2 단일 원형 기둥

과 경사도 $H/L=1/30$, $1/16$ 에서 주기가 다른 입사파 조건에 대하여 단일 원형 기둥 주위의 wave run-up과 원형 기둥에 작용하는 파랑하중을 분석하였다. 먼저, 원형 기둥에서 주위의 파고계에서 측정된 파고의 변화에 대해 1차 및 2차 조화성분 진폭을 추출하여 Fig. 4.2~4.5에 나타내었다. 이 때, 1차 및 2차 조화성분 진폭은 $A^{(1)}/A_0$, $A^{(2)}/A_0^2$ 로 무차원화 하여 나타내었다. 이는 각 파고계에서 교란되지 않은 입사파의 1차 조화성분 진폭(A_0)에 대한 교란된 파의 1,2차 조화성분 비를 의미한다. 원형 기둥표면에 대해서는 slip 경계조건을 사용하였다. Fig. 4.2와 Fig. 4.3는 원형 기둥 표면 근처 ($0.513D$)에서 과 경사도에 따른 wave run-up을 나타낸다. 1차 조화성분을 보면, 원형 기둥 정면에서 상대적인 wave run-up은 과 경사도와 파수가 커질수록 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 반면에, 원형 기둥 후면에서는 파수의 변화와 관계없이 입사파의 진폭과 거의 동일한 wave run-up이 발생한다. 또한, 모든 입사파조건에서 원형 기둥 전면과 후면에서의 1차 조화성분은 계산결과와 실험값이 거의 일치하지만, 원형 기둥 측면에서 후면으로 갈수록 wave run-up이 실험값에 비해 비교적 낮게 측정되었다. 이는 경계조건이 slip이어서 기둥 표면에서 wave가 다소 빨리 감쇠되는 것으로 판단된다. 특히, 과 주기 $T=9s$, 과 경사도 $H/L=1/16$ 일 때, 원형 기둥 표면 $\theta=90^\circ$ 에서 가장 큰 오차가 발생하였다. 난류 영역에서 KC 수가 1.6 부근에 있을 때 원형 기둥 측면에서의 박리

(separation)가 발생하게 되는데(Sumer, B.M. & Fredsø, J. 2006), 이 역시 벽면에서의 마찰을 무시하는 slip 조건을 적용하여 발생한 오차로 판단된다. 2차 조화성분에서 계산결과와 경향성은 모형실험결과와 비슷하지만 1차 조화성분에 비해 오차의 정도가 크게 나타난다. 다음으로, Fig. 4.4, 4.5는 원형 기둥 표면에서 $1.0D$ 만큼 떨어진 위치에서의 파고의 변화를 나타낸다. 이는 정도의 크기는 다르지만 원형 기둥 표면 근처에서의 wave run-up 특성과 비슷한 경향을 나타낸다. Fig. 4.6, 4.7은 파수에 대한 수평($Force_x$), 수직($Force_z$) 파랑하중의 1차 및 2차 조화성분을 나타낸 것이다. 파랑하중의 1차($F^{(1)}$), 2차($F^{(2)}$) 조화성분은 다음과 같이 나타내었다.

$$F^{(1)} = Force^{(1)} / \frac{1}{4} \rho g A_0 D^2 \quad (12)$$

$$F^{(2)} = Force^{(2)} / \frac{1}{2} \rho g A_0^2 D \quad (13)$$

여기서, $Force^{(n)}$ 는 파랑하중의 n 차 조화성분이며, ρ 는 밀도, g 는 중력가속도, A_0 는 구조물이 없을 때 입사파의 1차 조화성분 진폭을 의미한다.

전체적으로 실험과 계산결과 모두 파수가 커짐에 따라, 수평 파랑하중의 1차($F_x^{(1)}$)조화성분은 증가하며 수직 파랑하중의 1차($F_z^{(1)}$)조화성분은 감소하는 특징을 나타낸다. 파랑하중의 2차 조화성분보다 1차 조화성분에서 실험결과와 더 잘 일치하며, 이는 원형 기둥 주위의 wave run-up에서의 경향성과도 부합한다. 또한 Fig. 4.6(a), 4.7(a)을 보면, Park (2011)의 연구결과와 같이, 파수가 커질수록 실험값과의 오차가 조금씩 커지는 경향을 알 수 있다. 기본적으로, 파수가 커질수록 원형 기둥 정면에서의 상대적인 wave run-up이 높아지기 때문에 물 입자와 충돌하는 원형 기둥의 전체 면적이 증가하고, 결과적으로 원형 기둥이 받는 수평 파랑하중이 증가한다. 하지만, 본 계산결과는 파수가 커질수록 그리고 원형 기둥 정면에서 후면으로 갈수록 wave run-up이 조금 낮게 예측되기 때문에, 이것이 원형 기둥이 받는 수평 파랑하중의 오차를 만들어 낸 원인이라 판단할 수 있다.

입사파 조건을 달리하면서 단일 원형 기둥에 대한 계산을 진행하였다. 특히 진입하는 입사파에 의한 산란현상을 Type 1, 파 경사가 높을 때 원형 기둥에 의해 산란된 파를

Type 2로 정의하였다(Swan & Sheikh, 2015). 이러한 현상은 복잡한 해양구조물에서 국부적으로 파고를 증가시키고 vertical jetting 현상을 일으킨다. Vertical jetting이 해양구조물의 갑판(deck)에 닿게 되면 구조물이 손상을 입기 때문에 vertical jetting과 해양구조물의 갑판사이의 거리인 air gap에 대한 추정이 중요하다. Fig. 4.8는 파 경사도 $H/L=1/16$, 주기 $T=9s$ 일 때, 원형 기둥에 의한 산란 현상을 나타낸 것이다. Swan and Sheikh, (2015)의 실험결과와 유사하게, Type 1, Type 2와 같은 비선형 상호작용에 의한 산란현상이 나타났다. 원형 기둥에 접근하는 입사파에 의한 상호작용으로 동심원 형태의 wave run-up현상인 Type 1이 나타난다($t = T_0$). 이후 원형 기둥 정면에서 최대 wave run-up이 발생하고, 원형 기둥 측면에서 발달한 산란효과에 의해 Type 2가 원형 기둥 양 측면에서 비 동심원 형태로 발달한다($t = T_0 + \frac{1}{4} T$). 과정이 진행하면서 Type 2가 원형 기둥 측면과 후면으로 진행하고, 이는 원형 기둥 후면에서 합쳐지면서 자유수면의 상승이 발생한다($t = T_0 + \frac{2}{4} T$). 뒤따라오는 파저가 원형 기둥에 접근하면서 원형 기둥 정면에서 Type 1이 다시 관찰된다($t = T_0 + \frac{3}{4} T$). 이러한 물리적 상호작용은 파주기로 반복된다. 또한, Fig. 4.9은 Fig. 3.2(a)에서 원형 기둥 표면에 위치한 파고계 중 90° 와 45° 방향에 위치한 파고계에서의 자유수면 변화를 시간영역과 주파수 영역 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4.9(b)의 주파수 영역 그래프를 보면, 원형 기둥 측면에서 발생하는 산란효과(Type 2)에 의한 비선형성이 4차 이상의 고차 항으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

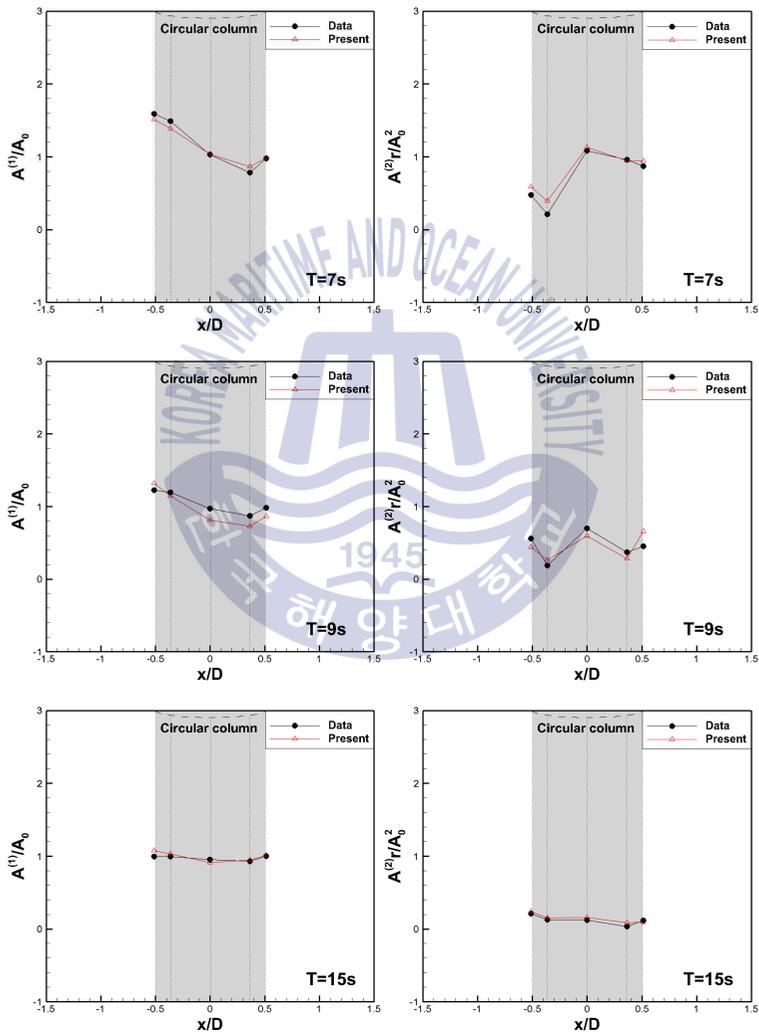
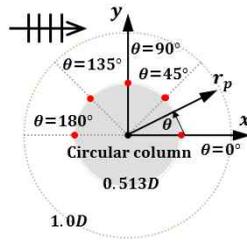
4.3 정사각형 배열의 원형 기둥

반잠수식 해양구조물의 일반적인 형상은 하부선체(lower hull)라고 불리는 2~4개의 부력체 상부에 4~8개의 기둥(column)이 연결되어 있는 것이다. 이러한 기둥 지지형 구조물들은 해양환경의 특성에 따라 구조물의 유형이나 설계가 바뀌는 해양플랜트 산업에 많이 사용된다. 또한, 인접한 기둥 사이의 거리는 일반적으로 좁기 때문에, 해양환경에 따른 기둥들 사이의 유체 상호간섭 등 파랑에 의한 구조물의 물리적 특성을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구는 TLP와 같은 반잠수식 해양구조물의 air gap을

예측하기 위한 선행 연구로, 정사각형 배열로 놓여진 4개의 수직기둥과 파랑에 의한 상호작용을 예측하였다. 파 주기 $T=7s$ 이며, 파 경사도 $H/L=1/30, 1/16$ 인 입사파 조건에서 두 가지 입사파 진행방향($\beta=0^\circ, 45^\circ$)에 대해 계산하여 원형 기둥 내부에서 일어나는 비선형적 상호작용의 물리적 현상을 살펴보았다. Fig. 4.10과 4.11은 입사파의 진행방향이 $\beta=0^\circ, 45^\circ$ 일 때, 파 경사도에 따른 최대 파고(A_{max})를 교란되지 않은 입사파의 1차 조화성분 진폭(A_0)으로 나누어 나타내었다. Fig. 4.10는 원형 기둥 A, B 주위의 자유수면 변화를 나타내었다. 파랑이 원형 기둥 정면으로 들어올 때, 원형 기둥 B의 225° 파고계에서 최대 파고가 발생하면서 파랑이 원형 기둥 내부 영역으로 진행한다. 이때, 파 경사도 $H/L=1/30$ 에서 원형 기둥 내부 영역에서 큰 파고변화가 일어나지 않았다. 반면에, 파 경사도 $H/L=1/16$ 일 때, 전방에서 발생한 최대파고는 전방 원형 기둥의 중앙에서 내부 영역까지 그 에너지를 유지하며 진행하였다. 그 결과 원형 기둥 A의 225° 파고계에서 상대적으로 더 큰 자유수면의 상승이 발생하였다. 이는 Fig. 4.12에서 자세히 살펴볼 수 있다. Fig. 4.12는 입사파의 진행방향이 $\beta=0^\circ$, 파 경사도 $H/L=1/16$, 파 주기 $T=7s$ 일 때, 한 파 주기 안에서 반복적으로 일어나는 물리적 흐름을 나타낸 것이다. 전방 원형기둥의 상류부분에서 진행되는 입사파의 약 2.5배의 최대 파고가 원형 기둥 전면부에 발생하고($t=T_0$), 이는 전방 원형 기둥 사이에서 국부적인 자유수면 효과로 나타난다($t=T_0+\frac{1}{4}T$). 이러한 상호작용의 에너지는 원형 기둥 내부영역으로 전파되면서 입사파의 약 2.4배의 수직으로 상승하는 자유수면 효과가 발생하게 된다($t=T_0+\frac{2}{4}T$). 이후 진입하는 파저에 의해 전방 원형 기둥 사이에서 또 다시 국부적인 자유수면효과가 나타난다($t=T_0+\frac{3}{4}T$). 이러한 물리적 상호작용은 파주기로 반복된다. Fig. 4.11은 원형 기둥 B, C 주위의 자유수면 변화를 나타내었다. 전체적인 자유수면의 상승은 크지 않다. 하지만, 파 경사도가 $H/L=1/16$ 일 때, 원형 기둥 C의 180° 파고계, 즉, 원형 기둥 내부영역에서 국부적인 자유수면의 상승이 발생하였고 원형 기둥 C의 표면 근처에서 최대 파고가 관측되었다. 이는 Fig. 4.13에서 자세히 살펴볼 수 있다. Fig. 4.17은 입사파의 진행방향이 $\beta=45^\circ$, 파 경사도 $H/L=1/16$, 파 주기 $T=7s$ 일 때, 한 파 주기 안에서 반복적으로 일어나는 물리적 흐름을 나타낸 것이다.

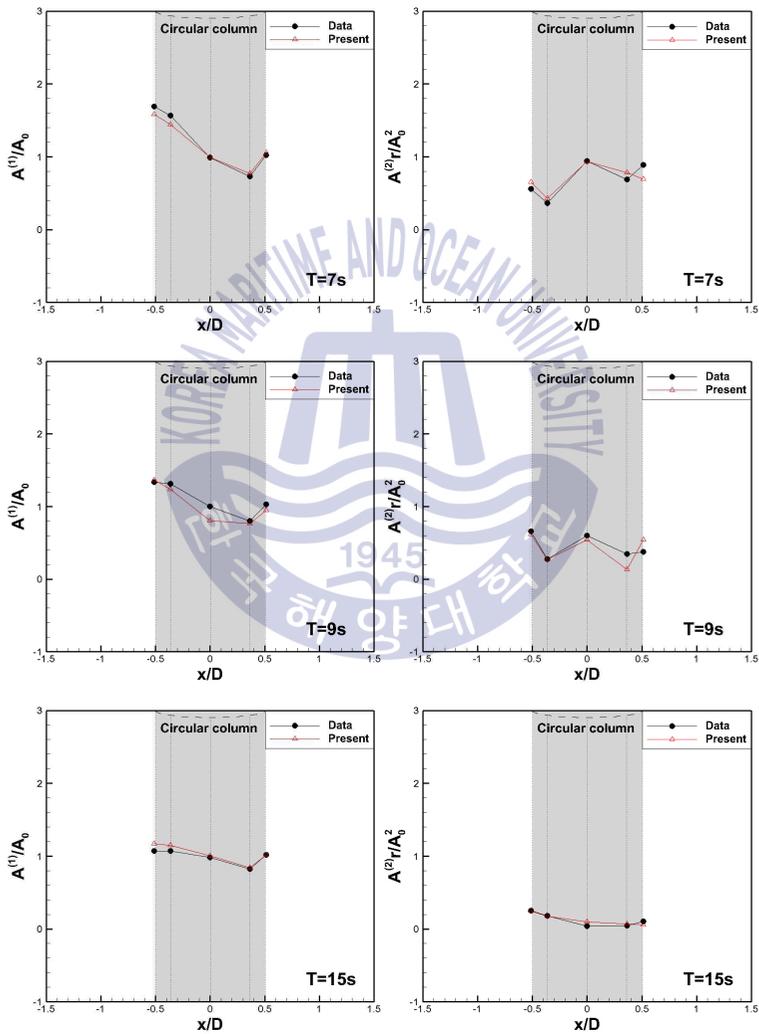
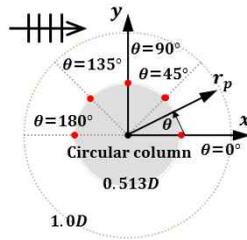
파랑이 원형 기둥 B를 지나갈 때, 단일 원형 기둥에서 정의한 Type 1, Type 2의 파랑 상호간섭이 발생하고($t = T_0$), 이는 원형 기둥 내부영역으로 진행하며 국부적인 자유수면 효과가 나타난다($t = T_0 + \frac{1}{4} T$). 파정이 원형 기둥 C의 전방으로 접근할 때, 원형 기둥 내부영역에서 입사파의 약 2.5배의 수직으로 상승하는 자유수면 효과가 발생하게 된다($t = T_0 + \frac{2}{4} T$). 이후 파정이 원형 기둥 C를 지나가면서 입사파의 2.8배의 최대 wave run-up이 원형 기둥 C의 전방 표면에서 발생하게 된다($t = T_0 + \frac{3}{4} T$). 이러한 결과는 Ohl, et al., (2001)과 Cong, et al., (2015)의 실험결과와 유사하게 정사각형 배열의 원형 기둥 구조물에서 입사파의 진행방향이 $\beta = 45^\circ$ 일 때, 원형 기둥 내부에서 최대 자유수면의 변화가 관측되었다.





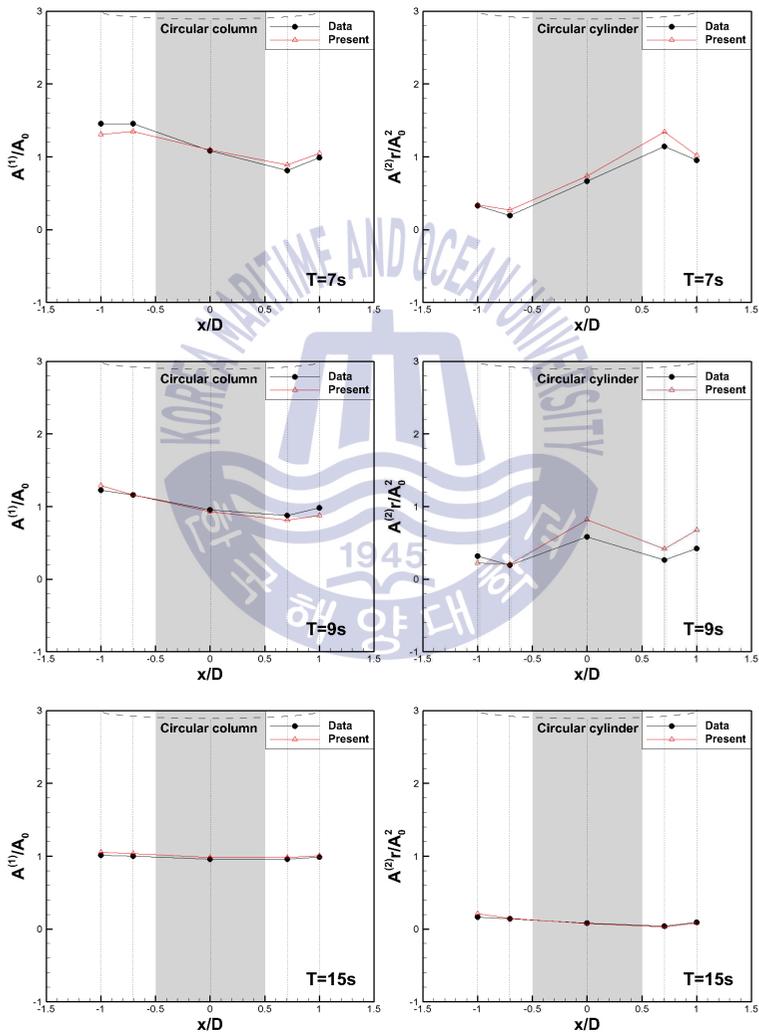
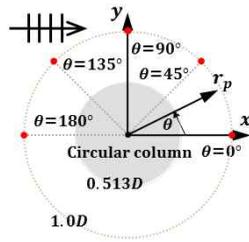
(a) RAOs of surface elevations (b) QTFs of surface elevations

Fig. 4.2 RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle(0.513D) of wave probes at $H/L=1/30$



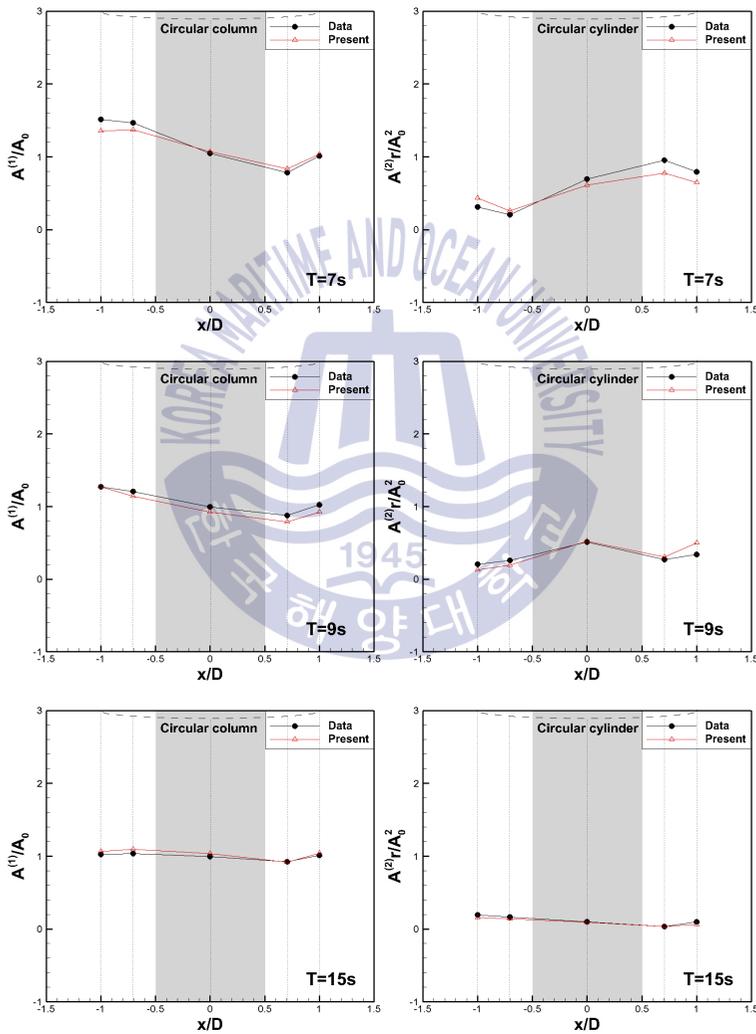
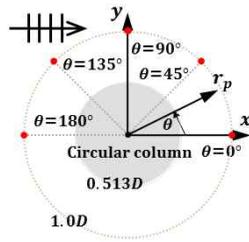
(a) RAOs of surface elevations (b) QTFs of surface elevations

Fig. 4.3 RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle(0.513D) of wave probes at $H/L=1/16$

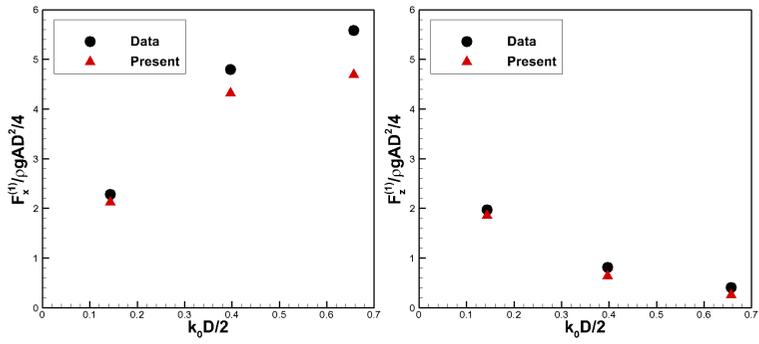


(a) RAOs of surface elevations (b) QTFs of surface elevations

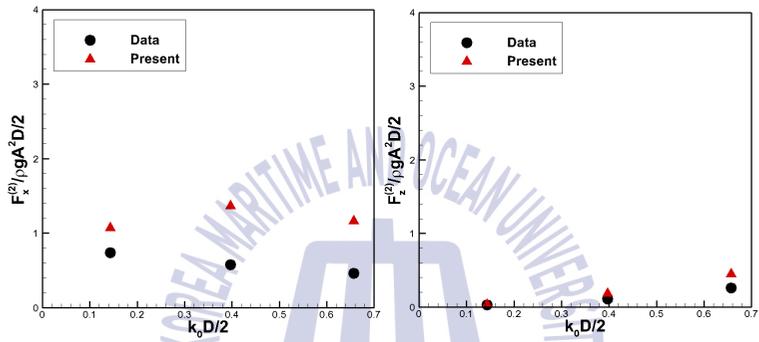
Fig. 4.4 RAOs and QTFs of surface elevations at outer circle(1.0D) of wave probes at $H/L=1/30$



(a) RAOs of surface elevations (b) QTFs of surface elevations
Fig. 4.5 RAOs and QTFs of surface elevations at outer circle(1.0D) of wave probes at $H/L=1/16$

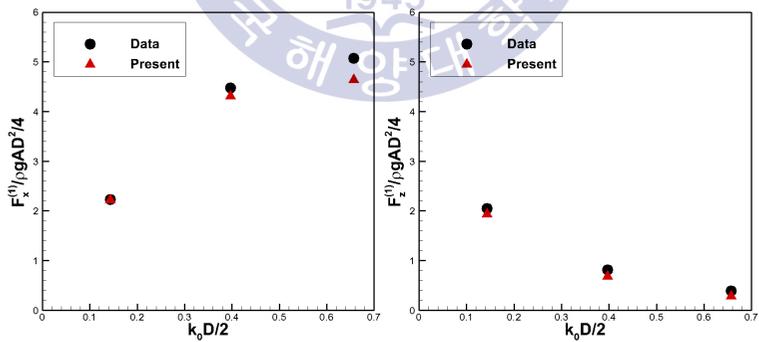


(a) RAOs of wave forces

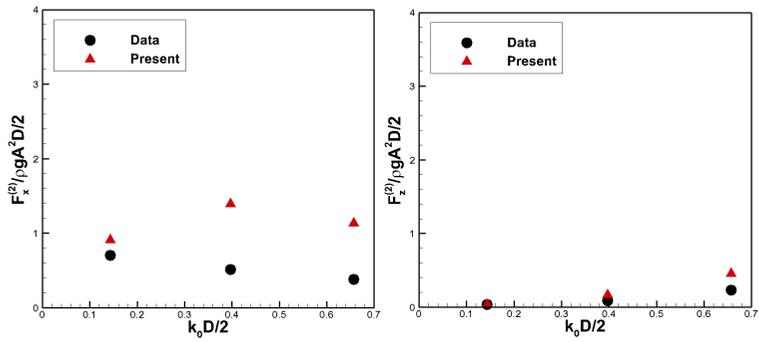


(b) QTFs of wave forces

Fig. 4.6 RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/30$



(a) RAOs of wave forces



(b) QTFs of wave forces

Fig. 4.7 RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/16$

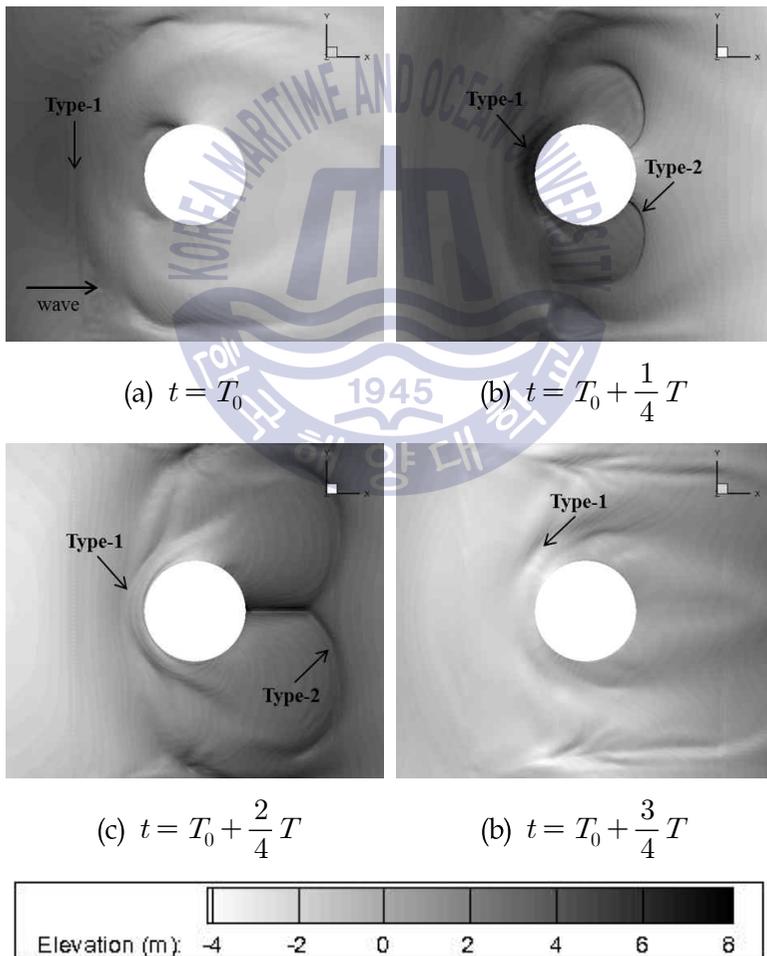
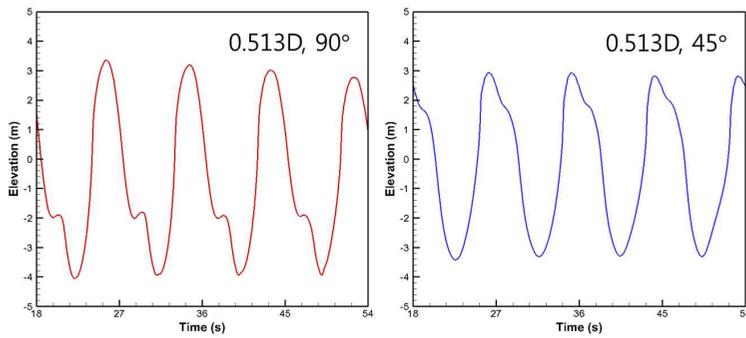
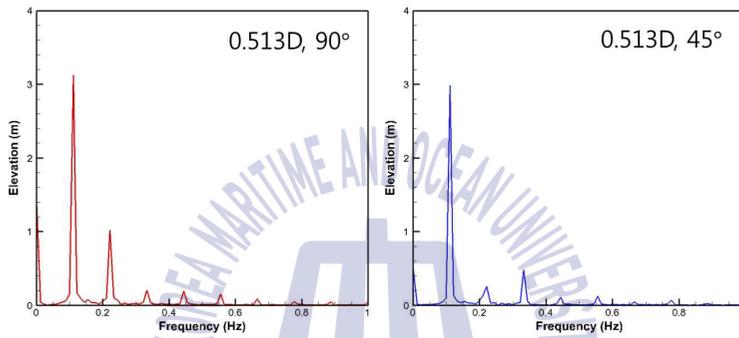


Fig. 4.8 Snapshot of wave scattered field around a vertical cylinder at $H/L=1/16$ and $T=9s$

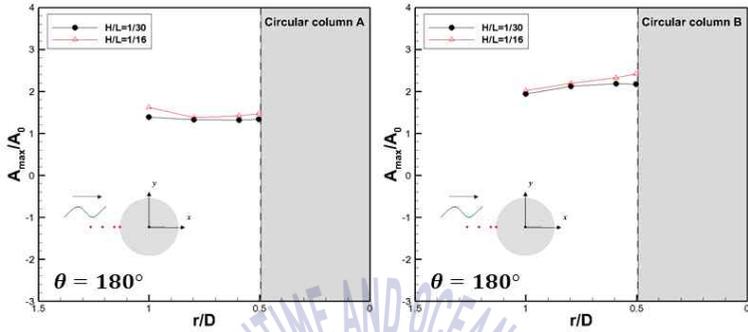
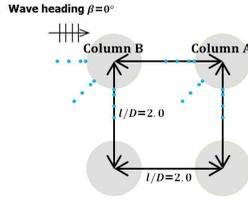


(a) inner circle with $\theta = 90^\circ$ (b) inner circle with $\theta = 45^\circ$

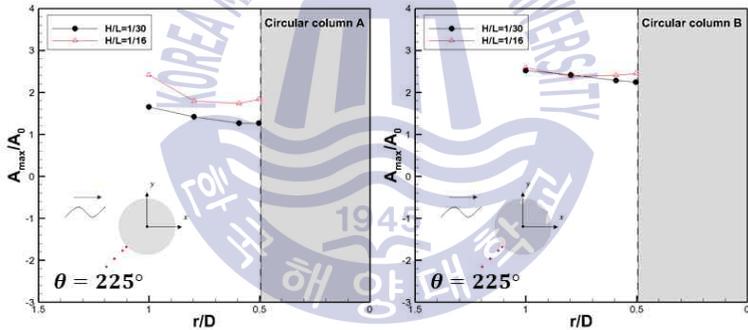


(c) inner circle with $\theta = 90^\circ$ (d) inner circle with $\theta = 45^\circ$

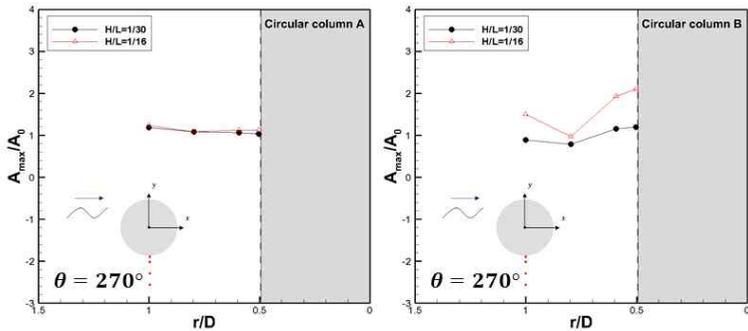
Fig. 4.9 Time and frequency domain of surface elevation at inner circle of wave probes, $H/L=1/16$, $T=9s$



(a) column A with $\theta = 180^\circ$ (b) column B with $\theta = 180^\circ$



(c) column A with $\theta = 225^\circ$ (d) column B with $\theta = 225^\circ$



(e) column A with $\theta = 270^\circ$ (f) column B with $\theta = 270^\circ$

Fig. 4.10 Maximum run-up for circular column at $T=7s$ and $\beta=0^\circ$

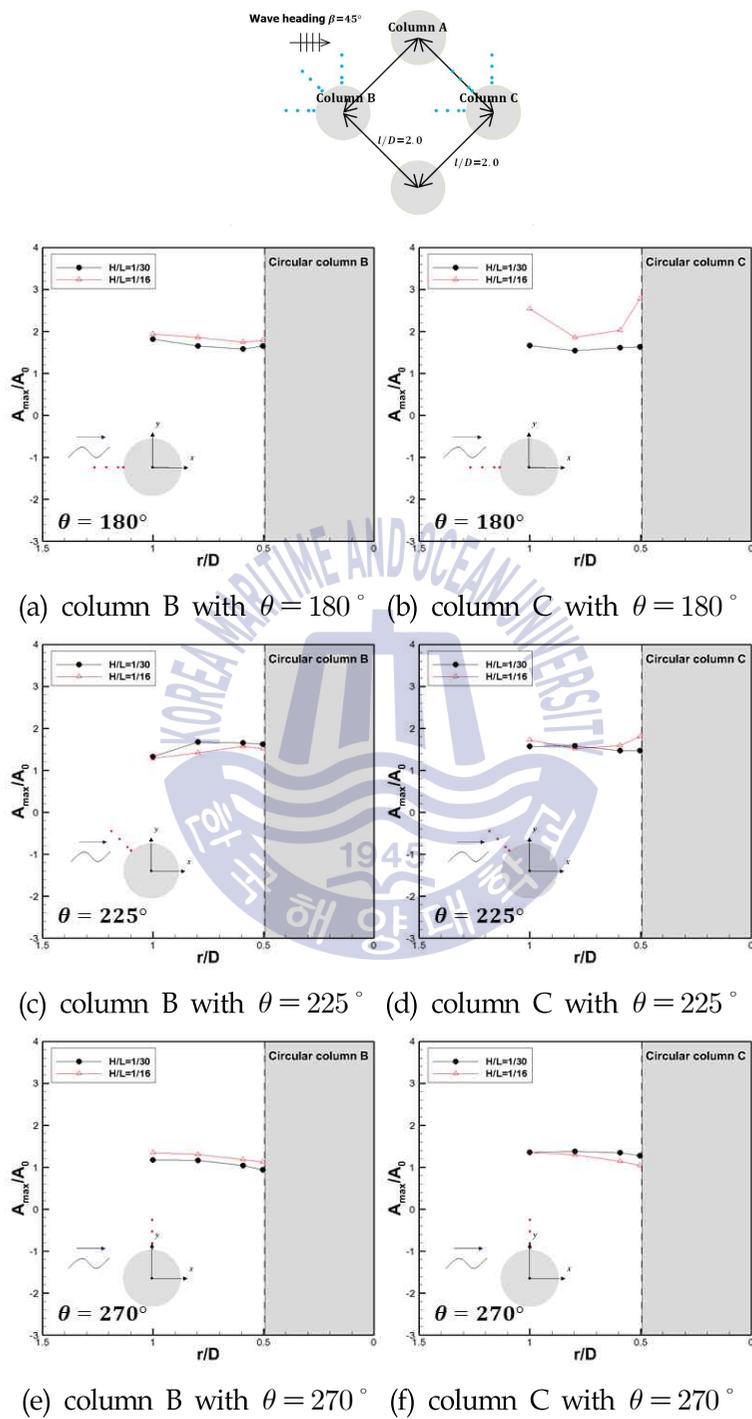


Fig. 4.11 Maximum run-up for circular column at $T=7s$ and $\beta=45^\circ$

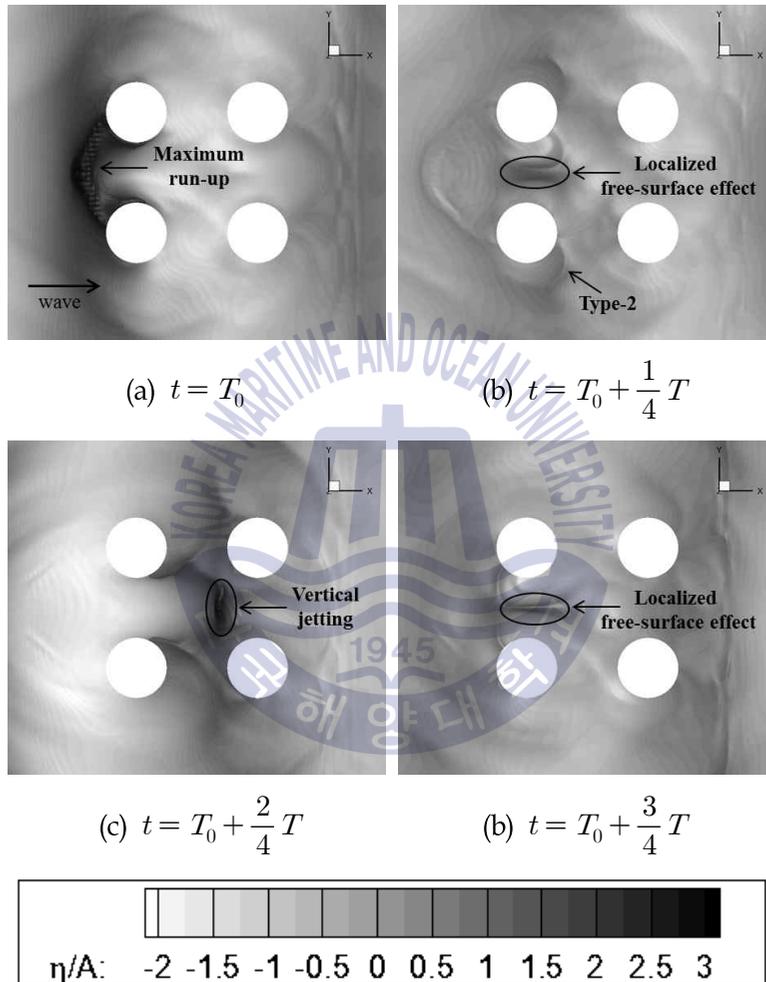


Fig. 4.12 Scattered wave field around four cylinders at $H/L=1/16$, $T=7s$ and $\beta=0^\circ$

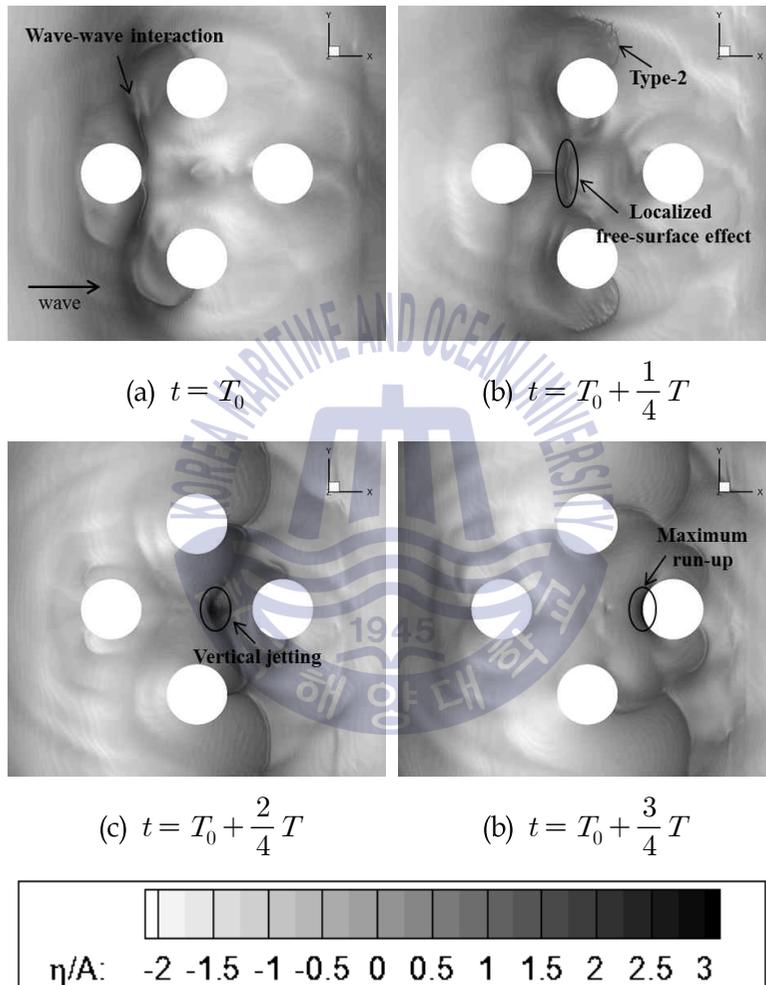


Fig. 4.13 Scattered wave field around four cylinders at $H/L=1/16$, $T=7s$ and $\beta=45^\circ$

제 5 장 결론

오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 고정된 단일 원형 기둥과 정사각형 배열의 원형 기둥을 대상으로 wave run-up과 원형 기둥 주위에서 일어나는 상호작용에 대해 해석하였다. 기저 slover인 interFoam을 이용하여 이상유동을 해석하고, waves2Foam으로 수치파랑수조를 구현하였다. 6가지 다른 입사파 조건에서 단일 원형 기둥에 대한 수치해석 결과를 모형 실험결과와 비교하여 수치파랑수조 기법을 검증하였다.

본 연구는 규칙파에서의 파랑-구조물 상호작용을 해석하는 것이 목적이기에 수치파랑수조를 통하여 규칙파를 생성하였다. 이때 계산영역 안에서 일정한 파랑을 유지하기 위해, 물과 공기의 경계면에서 발생하는 변형률에 기인한 수치적 난류 확산을 최소화하는 난류모형을 선정하였다. 계산영역의 크기에 대해서는 원형 기둥으로부터 측면 경계면까지의 폭이 $4D$ 일 때, 벽면에 의한 반사파가 원형 기둥 주변의 자유수면 변화에 영향을 주었지만, 폭 $8D$ 에 비해 오차의 정도가 크지 않아 폭을 $4D$ 로 선정하여 계산하였다. 원형 기둥 표면에 slip 경계조건과 no-slip 경계조건 두 가지를 고려하여, 원형 기둥 표면에서의 파고를 나타내었다. 파랑-구조물 상호작용 문제에서 관성력이 지배적인 영역에서는 실린더 표면에 slip 경계조건을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다. 또한, 격자 수렴도 테스트를 통해 규칙파랑을 생성할 때 격자의 크기보다 파장 당 격자수가 중요하며, 본 연구에서는 최소 medium 격자 크기에 해당하는 파장 및 파고 당 격자수가 고려되어야 하는 것을 알 수 있었다. 추후 다양한 파랑환경에 대한 검증과, 3차원 계산에서 relaxation zone설정에 따른 격자수의 급격한 증가에 대한 개선뿐만 아니라 벽면에 의한 반사효과를 효과적으로 없앨 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

원형 기둥에서 파랑에 의한 상호작용을 살펴보면 wave run-up의 1차 조화성분은 파 주기 $T=9s$ 파 경사도 $H/L=1/16$ 일 때, 원형 기둥 표면 $\theta=90^\circ$ 에 있는 파고계에서의 최대 오차 19.75%를 제외하면 실험값과 대체적으로 비슷한 값을 나타내었다. 또한, 파수가 커질수록 원형 기둥 정면에서 wave run-up 및 수평하중은 증가하고 수직하중은 감소하는 경향도 모형실험과 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 2차 조화성분에서는

파수가 커질수록 원형 기둥 정면부근($\theta = 180^\circ, 135^\circ$)에서 오차가 커지고, 파수가 작을수록 원형 기둥 측, 후면부근($\theta = 90^\circ, 45^\circ$)에서 오차 범위가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 2차 조화성분에서 오차의 범위가 큰 이유로는 벽면에 의한 반사효과와 격자의 조밀도 그리고 데이터를 산출하는 시간간격의 영향으로 판단된다.

Swan and Sheikh, (2015)이 정의한 Type 1과 Type 2 현상을 구현하면서 관성력이 지배적인 $D/L < 0.2$, $KC < 5$, 파랑 조건에서도 고차항의 파 산란효과가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이로 인해, 본 연구에서 KC 수가 매우 작아 관성력이 지배적인 영역에서 벽면의 마찰을 무시할 수 있다는 가정은 타당하다고 판단할 수 있다.

단일 원형 기둥에 대한 검증을 바탕으로 정사각형 배열의 원형 기둥에서의 파랑 상호작용에 대한 물리적 현상을 해석하였다. 파 경사도가 커질수록 원형 기둥 내부영역에서 발생하는 자유수면 상승 정도가 커지고, 입사파의 진행방향이 $\beta = 45^\circ$ 일 때, 원형 기둥 내부영역에서 자유수면이 입사파의 최대 2.8배까지 상승하는 것을 확인 할 수 있다.

향후에는 본 연구에서 검증된 수치기법을 토대로 다양한 해양환경에 노출되어 있는 해양구조물과 파랑의 상호작용 해석을 통해 정도 높은 비선형을 예측하고 효율적인 air gap 예측에 관한 연구를 진행 할 것이다.

참고문헌

- Afshar, M.A., 2010. *Numerical Wave Generation in OpenFOAM*. Master's thesis. Gothenburg :Chalmers University of Technology.
- Bøckmann, A. et al., 2014. An Experimental and Computational Development of a Benchmark Solution for the Validation of Numerical Wave Tanks. *proceedings of the ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, California, USA, June 2014.
- Bredmose, H. & Jacobsen, N.G., 2010. Breaking wave impacts on offshore wind turbine foundations: focused wave groups and CFD. *proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, January 2010.
- Brown, S.A. Magar, V. Greaves, D.M. & Conley, D.C., 2014. An evaluation of rans turbulence closure models for spilling breakers. *Journal of Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), pp.1-5.
- Büchmann, B. Skourup, J. & Cheung, K.F., 1998. Run-up on a structure due to second-order waves and a current in a numerical wave tank. *Journal of Applied Ocean Research*, 20(5), pp.297-308.
- Cao, H. Zha, J. & Wan, D., 2011. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder. *proceedings of the ISOPE 21th International Offshore and Polar Engineering Conference on International Society of Offshore and Polar Engineers*, Maui, Hawaii, USA, June.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of offshore structures*. WIT press : UK.
- Cong, P. et al., 2015. Model experiments on wave elevation around a four-cylinder structure. *Journal of Ocean Engineering*, 96, pp.40-55.
- Danmeier, D.G. et al., 2008. Validation of wave run-up calculation methods for a gravity based structure. *proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal, June 2008.

- Eatock Taylor, R. & Wu, G.X., 1997. Interaction of steep waves with offshore structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 355(1724), pp.593-605.
- Evans, D.V. & Potter, R., 1997. Near-trapping of waves by circular arrays of vertical cylinders. *Journal of Applied Ocean Research*, 19(2), pp.83-99.
- 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.
- Higuera, P. Lara, J.L. & Losada, I.J., 2013a. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier - Stokes models: Application to OpenFOAM®. *Journal of Coastal Engineering*, 71, pp.102-118.
- Higuera, P. Lara, J.L. & Losada, I.J., 2013b. Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM®. *Journal of Coastal Engineering*, 71, pp.119-134.
- Issa, R.I., 1986. Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting. *Journal of Computational Physics*, 62, pp.40 - 65.
- Iwanowski, B. Lefranc, M. & Wemmenhove, R., 2009. CFD simulation of wave run-up on a semi-submersible and comparison with experiment. *proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA, January 2009.
- 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 - 088.
- Kriebel, D.L., 1992. Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part II: Wave run-up. *Journal of Ocean Engineering*, 19(1), pp.75-99.
- Kristiansen, T. Baarholm, R. & Stansberg, C.T., 2004. Validation of second-order analysis in predicting diffracted wave elevation around a vertical circular cylinder. *proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference on International Society of Offshore and Polar Engineers*, Toulon, France, May 2004.

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.

Martin, A.J. Easson, W.J. & Bruce, T., 2001. Runup on columns in steep, deep water regular waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 127(1), pp.26-32.

McCamy, R. & Fuchs, R., 1954. Wave forces on piles: a diffraction theory. U.S. Washington D.C.: Army Corps of Engineers. Tech. Memo No 69.

Menter, F.R., 1993. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, Fla, USA, July 1993.

Morgan, G.C. et al., 2010. Using the rasInterFoam CFD model for wave transformation and coastal modelling. *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*, Shanghai, China, 2010.

Morris-Thomas, M.T. & Thiagarajan, K.P., 2004. The run-up on a cylinder in progressive surface gravity waves: harmonic components. *Journal of Applied Ocean Research*, 26(3), pp.98-113.

Niedzwecki, J.M. & Duggal, A.S., 1992. Wave runup and forces on cylinders in regular and random waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(6), pp.615-634.

Ohl, C.O.G. Taylor, R.E. Taylor, P.H. & Borthwick, A.G.L., 2001. Water wave diffraction by a cylinder array. Part 1. Regular waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 442, pp.1-32.

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

Palomares, G.D., 2015. *CFD Simulations on a Partially Submerged Cylinder under Regular Waves Using OPENFOAM®*, Master's thesis of University of Stavanger, Norway

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, Y.S. Chen, Z.S. & Kim, W.J., 2011. CFD application to evaluation of wave and current loads on fixed cylindrical substructure for ocean wind turbine. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), pp.7-14.
- 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.
- Paulsen, B.T. Bredmose, H. Bingham, H.B. & Jacobsen, N.G., 2014. Forcing of a bottom-mounted circular cylinder by steep regular water waves at finite depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 755, pp.1-34.
- Sadeghi, K., 2008. Significant guidance for design and construction of marine and offshore structures. *GAU Journal of Social and Applied Sciences*, 4(7), pp.67-92.
- Scolan, Y.M. & Malenica, S., 1998. Experimental and numerical second-order diffracted waves around an array of 4 cylinders, *Proceedings of the 13th International Workshop on Water waves and Floating Bodies*, Delft.
- Seiffert, B. Hayatdavoodi, M. & Ertekin, R.C., 2014. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: flat plate. *Journal of Coastal Engineering*, 88, pp.194-209.
- Shih, T.H. Zhu, J. & Lumley, J.L., 1996. Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows. *International Journal of Numerical Method in Fluids*, 23, pp. 1133 - 1144.
- Stansberg, C.T. & Kristiansen, T., 2005. Non-linear scattering of steep surface waves around vertical columns. *Journal of Applied Ocean Research*, 27(2), pp.65-80.
- Sun, L. Zang, J. Chen, L. Taylor, R.E. & Taylor, P.H., 2016. Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations. *Journal of Applied Ocean Research*, 59, pp.650-662.
- Sumer, B.M. & Fredsø, J., 2006. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Revised edition. World Scientific.

Swan, C. & Sheikh, R., 2015. The interaction between steep waves and a surface-piercing column. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033).

Swan, C. Taylor, P.H. & Van Langen, H., 1997. Observations of wave-structure interaction for a multi-legged concrete platform, *Applied Ocean Research*, 19(5), pp.309-327.

vanLeer, B., 1979. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. *Journal of Computational Physics*, 32(1), pp.101-136.

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.

Yang, I.J. Lee, Y.G. & Jeong, K.L., 2015. Numerical simulation of the free surface around a circular column in regular waves using modified marker-density method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 7(3), pp.610-625.

