

전산유체역학을 이용한 규칙파와 원형 기둥 구조물의 상호작용 해석

송성진 · 박선호[†]
한국해양대학교 해양공학과

Analysis on Interaction of Regular Waves and a Circular Column Structure

Seongjin Song and Sunho Park[†]

Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

해양환경에서 파랑-구조물 상호작용의 정확한 예측은 극한 환경조건에 노출된 고정식 및 부유식 해양구조물의 안전성과 설계비용 효율성에 있어서 중요하다. 본 연구에서는 규칙파와 원형 기둥의 파랑-구조물 상호작용을 해석하였다. 3차원 이상유동(two-phase flow)을 해석하기 위해 오픈소스 전산유체역학 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하였다. 수치파랑수조에서 파를 생성 및 흡수하기 위해 소스항을 이용한 relaxation method를 적용하였다. 수치기법을 검증하기 위해 심해조건에서 생성된 2차 Stokes 파형은 이론적인 해와 비교하였다. 검증과정을 통해 파장과 진폭에 대한 길이 및 높이 방향의 격자크기를 정하였다. 원형 기둥에 작용하는 파랑 하중과 wave run-up을 계산하고 기존의 실험 데이터와 비교하였다.

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 a circular column was investigated with 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 column were studied and compared with existing experimental data.

Keywords: Circular Column(원형 기준), Numerical Wave Tank(수치파랑수조), Open Source Library(소스 공개 라이브러리), OpenFOAM(오픈폼), Wave-structure Interaction(파랑-구조물 상호작용)

1. 서 론

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. 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 작동하도

록 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 안전성(stability), 비용 효율성(cost effectiveness) 그리고 안전성(safety)에 있어서 중요한 요소이다. 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 바다에 고정된 단일

[†]Corresponding author: spark@kmou.ac.kr

원형 기둥에 의한 파의 회절현상 대해 선형적인 해를 제시하였다. 반면에, 동일한 고정된 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 비선형적 상호작용이 발생하는 조건에서는 wave run-up을 정확하게 예측하지 못하였다(Büchmann *et al.*[1998]; Morris-Thomas and Thiagarajan [2004]; Stansberg and Kristiansen[2005]).

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 and 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 수치파랑방법을 개발하였다. Jacobsen *et al.*[2012]은 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.

2. 문제정의

해양구조물에서 가장 일반적으로 쓰이는 형태인 원형 기둥에 대해서, 오픈소스 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하여 wave run-up현상에 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 대한 파랑하중과 wave run-up을 수치시뮬레이션을 하였다. 단일 원형 기둥에 대한 검증으로 27차 ITTC ocean engineering committee (OEC)에서 benchmark study로 사용되었던 KRISO의 파랑 조건을 적용하고, 모든 수치시뮬레이션은 full scale로 계산하였다. Fig. 1은 원형 기

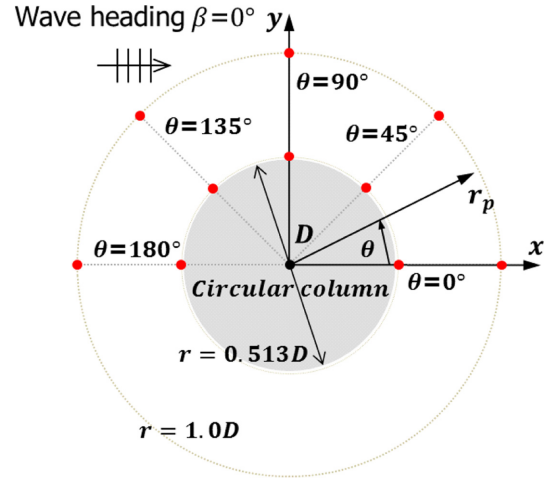


Fig. 1. Location of wave probes (solid circles indicate wave probes).

둥과 결과로 도식화할 위치를 나타낸다. 원형 기둥 근처($r=0.513D$)와 원형 기둥에서 $0.5D$ 떨어진 위치($r=1D$)에서 45° 간격으로 결과를 도식화하였다. 수치해석 결과는 모형 실험결과(sun *et al.*[2016])와 비교하였다.

3. 수치 방법

3.1 파의 생성 및 소멸

Fig. 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. 수치파랑수조에서 relaxation zone은 입사파를 생성하는 생성구간(wave generation zone)과 강제적으로 파의 진폭을 0으로 감소시키는 감쇠구간(wave damping zone)으로 구분된다. relaxation zone 안에 있는 파 입자 속도벡터(\vec{v})와 체적분율(α)은 매시간 다음의 식에 의해 계산된다.

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

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

$$\chi(\sigma) = 1 - \frac{\exp(\sigma^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \sigma \in [0; 1] \quad (2)$$

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 zone의 상호경계면에서 항상 1의 값을 가진다.

입사파가 생성되는 부분에 $2L$ 의 생성구간을, 유동이 빠져나가는 부분에 $3L$ 의 감쇠구간을 설정하여 출구에서의 반사파를 방지하였다. 이를 통해 계산시간 동안 계산 결과들의 오차를 최대한 줄이고

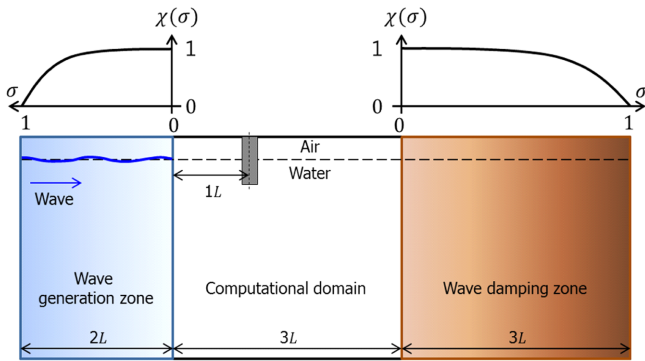


Fig. 2. Wave generating and damping zones.

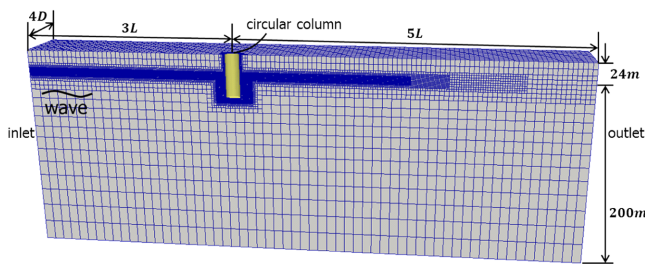


Fig. 3. Boundary conditions and domain size.

자 하였다. 또한, 계산영역은 $3L$ 로 설정하고, 파랑 생성구간과 계산영역의 경계면에서 발생하는 파랑의 불안정성을 피하기 위해 원형 기둥 중심은 파랑 생성구간이 끝나는 지점에서 $1L$ 거리에 설치하였다.

3.2 계산영역 크기, 경계조건 및 격자

계산영역 크기, 경계조건, 격자는 Fig. 3에 표현되어있다. 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. 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. 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.

입구면에서는 속도, 난류, 체적함수는 Dirichlet조건으로 설정하였고, 압력은 Neumann조건으로 설정하였다. 이와 반대로, 출구면에서 속도, 난류, 체적함수는 Neumann조건으로 설정하였고, 압력은 Dirichlet조건으로 설정하였다. 원형 기둥을 중심으로 물리현상이 대칭이기 때문에 원형 기둥의 절반만 해석하였다. 중앙 단면은 symmetry조건을 설정하였다. 또한, 본 연구에서 계산하는 입사파의 KC 수는 약 $0.5\sim 4.3$ 의 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 이론의 경계조건과 유사하지만, 점성응력에 대한 계산은 유지된다. 즉, 포텐셜 모델과 본 연구에서 적용된 모델과의 차이점은 전복(overturning)에 의한 쇄파와 물과 공기의 재진입(re-entry) 그리고 와도(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. 파 주기 $T=9s$, 파 경사 $H/L=1/30$ 인 입사파 조건에서 medium격자를 기준으로 파의 한 파장 길이 구간에 202개의 격자, 높이구간에 7개의 격자를 생성하여 약 327만개의 격자를 사용하였다.

3.3 수치방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE(Patankar and Spalding[1972])과 PISO(Issa[1986])를 결합한 PIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델(Orszag et al.[1993])을 사용하였다. 대류항은 TVD scheme에 van Leer[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 대수 방정식을 계산하였다.

4. 수치적 검증

4.1 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 1은 계산조건을 나타낸다. 입사파는 모두 심해조건($L/h < 0.5$)을 만족한다. 여기서 L 은 파장, h 는 수심을 나타낸다. Chakrabarti[1987]는 파랑하중 산출을 위한 여러 식의 적절한 적용범위를 제시하였다. 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.

KC 는 본 연구에서 고려된 Keulegan-Carpenter (KC) 수를 나타낸다. K 는 관성력과 점성력 성분의 상대적 크기를 의미하는 수이며, 평균수위(mean water level)에서 KC 수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. Incident wave conditions

Case number	Wave period T (s)	Wave steepness H/L	Wave height H (m)	Wave amplitude A (m)	Wave length L (m)	Scattering parameter 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

$$K_c = 2\pi A/D \quad (3)$$

여기서 A 는 파 진폭, D 는 원형 기둥 직경을 나타낸다. Table 1의 KC 수는 충분히 작으므로 점성항력 성분보다 관성력 성분이 지배적이며 산란현상을 무시할 수 있는 영역에 있다고 생각할 수 있다(Sumer, B.M. and Fredsø, J[2006]). 한편, 심해조건에서 파수(k_0)는 선형 분산관계식(dispersion relationship)에 의해 나타낼 수 있고, 파 주기가 $T=7s, 9s, 15s$ 일 때, 파수는 각각 $0.0821m^{-1}, 0.0497m^{-1}, 0.0179m^{-1}$ ($k_0=0.657, 0.398, 0.143$)이다. 파수는 주기와 반비례관계이기 때문에, 주기가 짧을수록 파수는 커진다. 원형 기둥의 직경은 $D=16m$, 흘수는 $24m$ 이고 축척비는 50.31이다. 파 이론 적용범위(Sadeghi, K [2008])에 따라 파 경사도 $H/L=1/30$ 에서는 2차 stokes 파 이론을, $H/L=1/16$ 에서는 5차 stokes 파 이론을 적용하여 생성하였다.

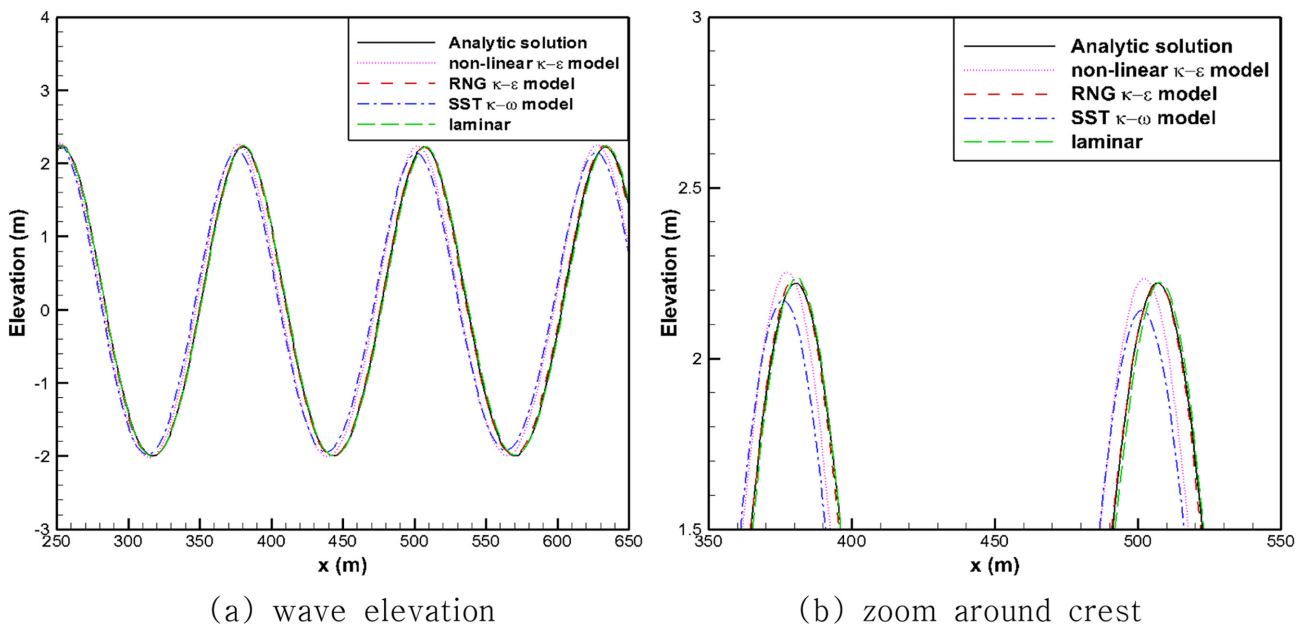
4.2 난류모델의 영향

극심한 해양환경에서 해양구조물은 높은 파고의 파랑에 의해 강한 충격을 받는다. 이때, 쇄파 현상에 의한 영향뿐만 아니라, Reynolds 수가 큰 난류 영역이기 때문에 난류 모델을 결정해야 한다. 난류 모델에 대한 의존도 평가에서는 non-linear $k-\varepsilon$ model (Shih *et al.*[1996]),

RNG $k-\varepsilon$ model (Orszag *et al.*[1993], SST $k-\omega$ model (Menter [1993]) 3가지 난류모델을 고려하였다(Brown *et al.*[2014]). 수치파랑수조의 정확한 구현을 위해 규칙파의 2차원 조파 시뮬레이션을 수행하였으며, 파 주기 $T=9s$, 파 경사도 $H/L=1/30$ 인 입사파를 기준으로 하였다. Fig. 4(a)는 계산 시간이 12주기 지났을 때 계산영역의 길이 방향에 대한 파고의 변화를 2차 stokes 파의 이론적인 해와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4(b)는 연속하는 2개의 마루를 확대하여 나타내었고, RNG $k-\varepsilon$ 모델이 2차 stokes 파를 가장 정확하게 표현하였다. Fig. 5는 물과 공기의 경계면에서 발생하는 난류에너지의 확산을 나타낸다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, 수치파랑수조에서 난류 에너지의 확산이 커질수록 진행되는 파의 파고 감소 및 점진적인 파형의 이동(wave shift)에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 본 연구에서는 물과 공기의 경계면에서 발생하는 변형률에 기인한 수치적 난류 확산을 최소화하는 RNG $k-\varepsilon$ 모델을 난류모델로 선정하였다.

4.3 계산영역 크기의 영향

수치파랑수조 벽면에 의한 반사효과를 알아보기 위해, 원형 기둥으로부터 측면 경계면까지의 폭이 $8D$ 인 수치파랑수조에 대해 자

**Fig. 4.** Comparison of wave elevation for turbulence models at $t=12T$.

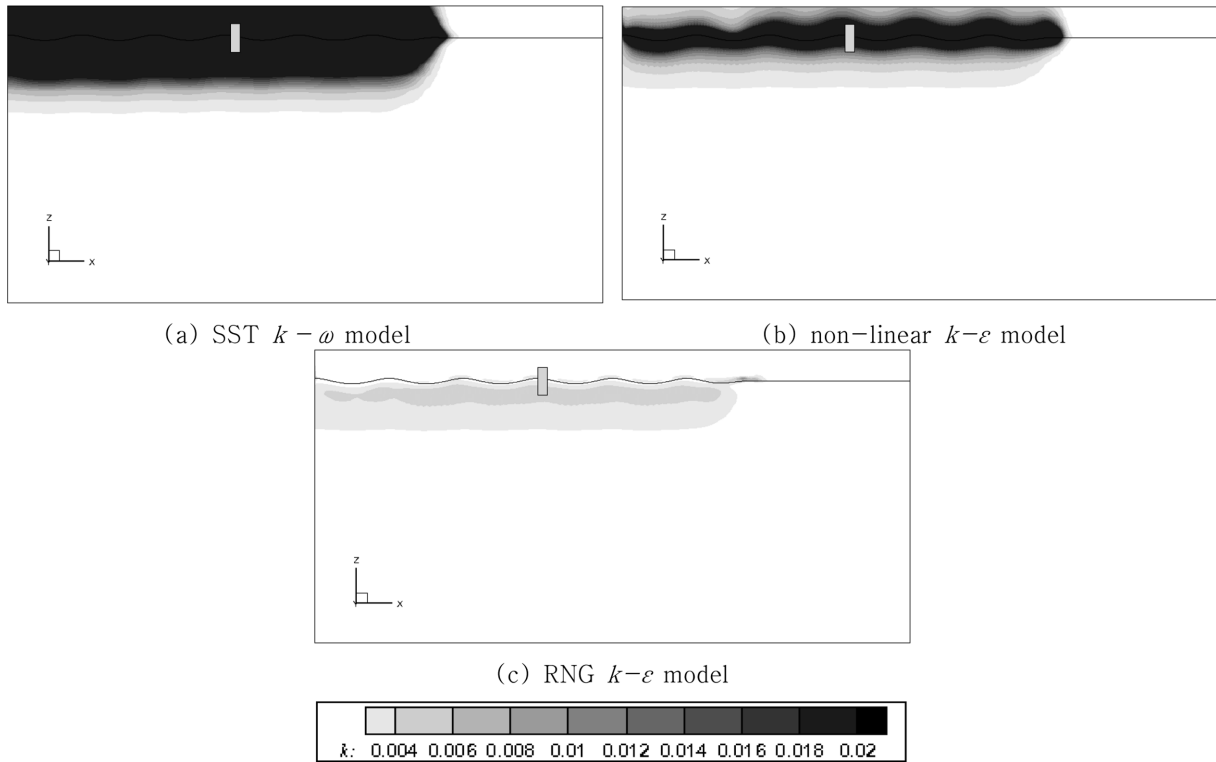


Fig. 5. Numerical diffusion of turbulent kinetic energy around free-surface.

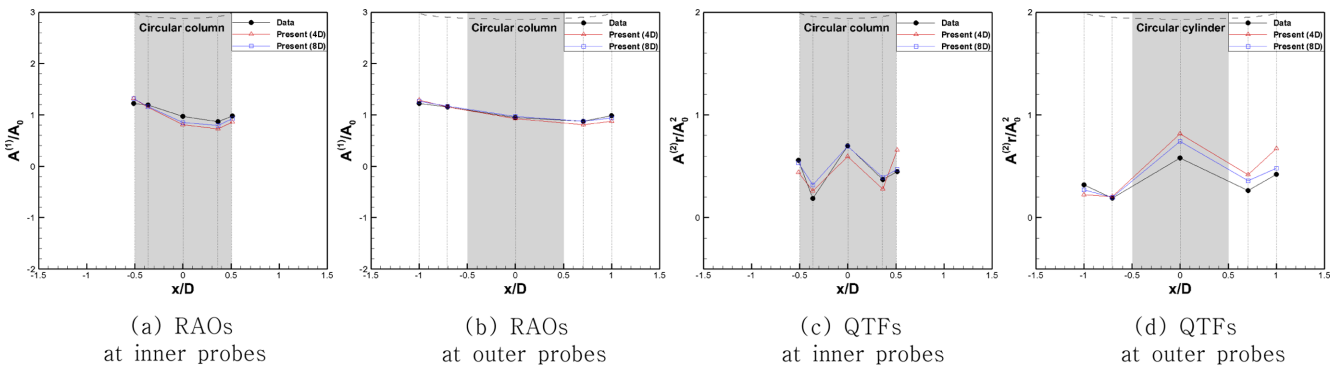


Fig. 6. RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30$, $T=9s$ (left : inner probes, right : outer probes).

유수면의 변화를 계산하여 폭이 4D인 수치파랑수조의 계산결과와 비교하였다(Fig. 6). 계산은 파 경사도 $H/L=1/30$, 파 주기 $T=9s$ 인 입사파 조건에서 수행하였다. Fig. 6에서 원형 기둥 측면과 후면에서 8D의 1, 2차 조화성분이 실험값(sun *et al.*[2016])과 더 일치하는 결과를 나타내었다. 이를 보면, 폭이 4D일 때 벽면에 의한 반사파가 원형 기둥 주변의 자유수면 변화에 영향을 주었지만, 폭 8D에 비해 오차의 정도는 크지 않아 폭을 4D로 선정하여 계산하였다.

4.4 원형 기둥 경계조건의 영향

원형 기둥에 대한 경계조건의 영향을 알아보기 위해 원형 기둥 표면에 slip 경계조건과 no-slip 경계조건 두 가지를 고려하여 계산하였다. Fig. 7은 경계조건에 따른 원형 기둥 표면 근처($r=0.513D$)에서의 파고를 나타낸다. 이때, 계산은 파 주기 $T=9s$, 파 경사도 $H/L=1/30$, 1/16인 입사파 조건에 대해서만 수행하여 나타내었다.

파 경사도가 커질수록 실린더 주위의 자유수면 변화는 no-slip 경계조건 결과가 더 낮게 예측되었다. 이는 점성으로 인해 표면에서의 변화가 제한된 결과로 예측된다. 결과적으로, 파랑-구조물 상호작용 문제에서 관성력이 지배적인 영역에서는 실린더 표면에 slip 경계조건을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.

4.5 격자 수렴도 테스트

격자 수렴도 테스트는 파도를 생성하는 데 중요한 요소로, 격자의 크기보다 파장 당 격자수가 중요하다(Kristiansen *et al.*[2004]). 파가 진행되는 영역에 격자의 크기를 균일하게 증감시켜, 수치시뮬레이션을 위한 격자수와 격자 크기를 결정하였다. Table 2과 같이 격

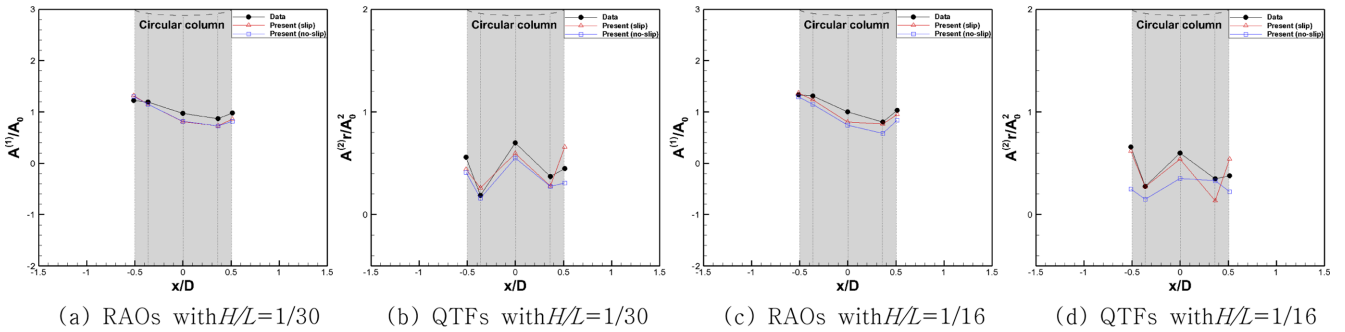


Fig. 7. RAOs and QTFs of surface elevations at $H/L=1/30, 1/16, T=9s$ (left : RAOs, right : QTFs).

Table 2. Grid sizes for grid convergence 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

자의 크기는 coarse, medium, fine 3단계로 설정하였으며 동일한 길이의 파장 생성과 정확한 진폭을 모사하기 위해 길이 방향 격자 간격과 높이 방향 격자간격의 비를 1로 설정하였다(Jacobsen *et al.*[2012]). 파가 전진하는 방향을 x-축, 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. 8(a)는 파 주기 $T=9s$, 파 경사도 $H/L=1/30$ 일 때, 3가지 격자에 대해 원형 기둥의 중심 위치에서의 시간에 따른 파고 변화를 2차 Stokes 파 이론과 비교하여 나타낸 것이다. 두 개의 연속한 과정을 확대한 Fig. 8(b)를 보면 최소한 medium 격자 크기, 즉 파의 한 파장 길이 구간에 202개의 격자(0.626m), 높이 구간에 7개의 격자(0.625m)를 만족해야 하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 파 경사도 $H/L=1/16$ 일 때, 5차 Stokes 파 이론을 적용한 파랑 생성을

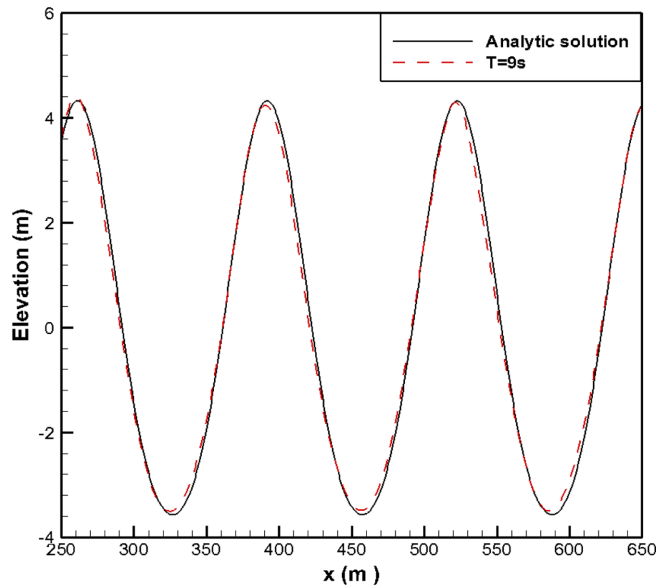
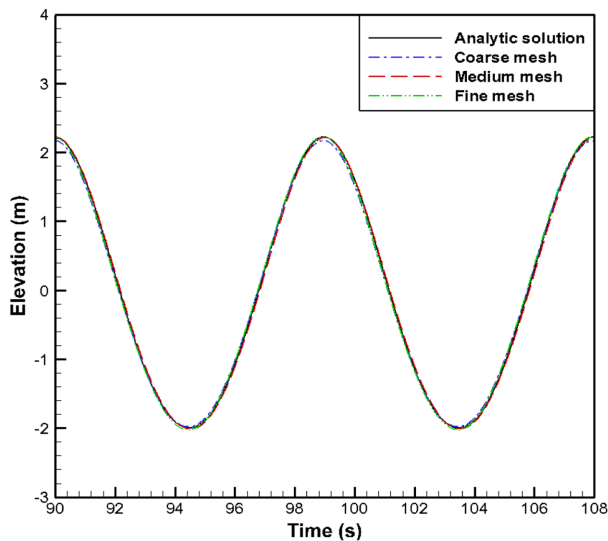
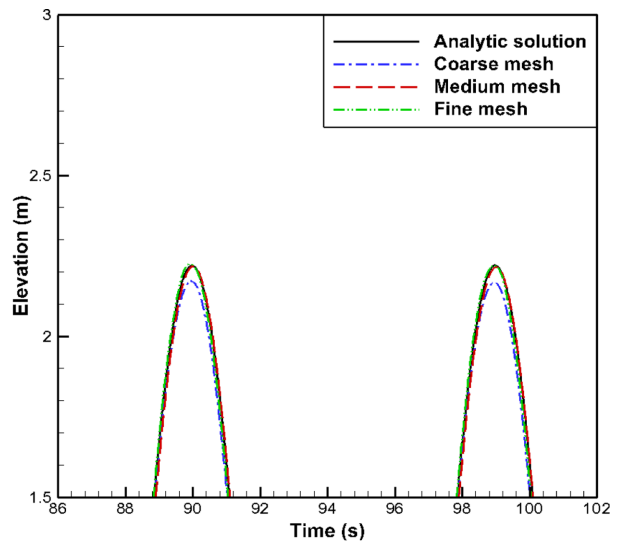


Fig. 9. Wave elevation at $H/L=1/16, T=9s$.

나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 이론적인 해와 거의 유사한 규칙파를 생성하는 것을 확인할 수 있다.



(a) time series of wave elevation



(b) zoom around crest

Fig. 8. Comparison of wave elevation with different grid sizes.

5. 원형 기둥 해석 결과 및 고찰

파 경사도 $H/L=1/30, 1/16$ 에 대해서 주기가 다른 입사파 조건에 따른 원형 기둥 주위의 wave run-up과 원형 기둥에 작용하는 파랑 하중을 분석하였다. 먼저, 원형 기둥 주위의 파고계에서 계산된 파고의 변화에 대해 1차 및 2차 조화성분 진폭을 추출하여 Fig. 10~13에 나타내었다. 이 때, 1차 및 2차 조화성분 진폭은 $A^{(1)}/A_0, A^{(2)}/r/A_0^2$ 으로 무차원화 하여 나타내었다. 이는 각 파고계에서 교란되지 않은 입사파의 1차 조화성분 진폭(A_0)에 대한 교란된 파의 1,2차 조화성분 비를 의미한다. 원형 기둥 표면에 대해서는 slip 경계조건을 사용하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 원형 기둥 표면 근처($0.513D$)에서

파 경사도에 따른 wave run-up을 나타낸다. 1차 조화성분을 보면, 원형 기둥 정면에서 상대적인 wave run-up은 파 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, 파 주기 $T=9s$, 파 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

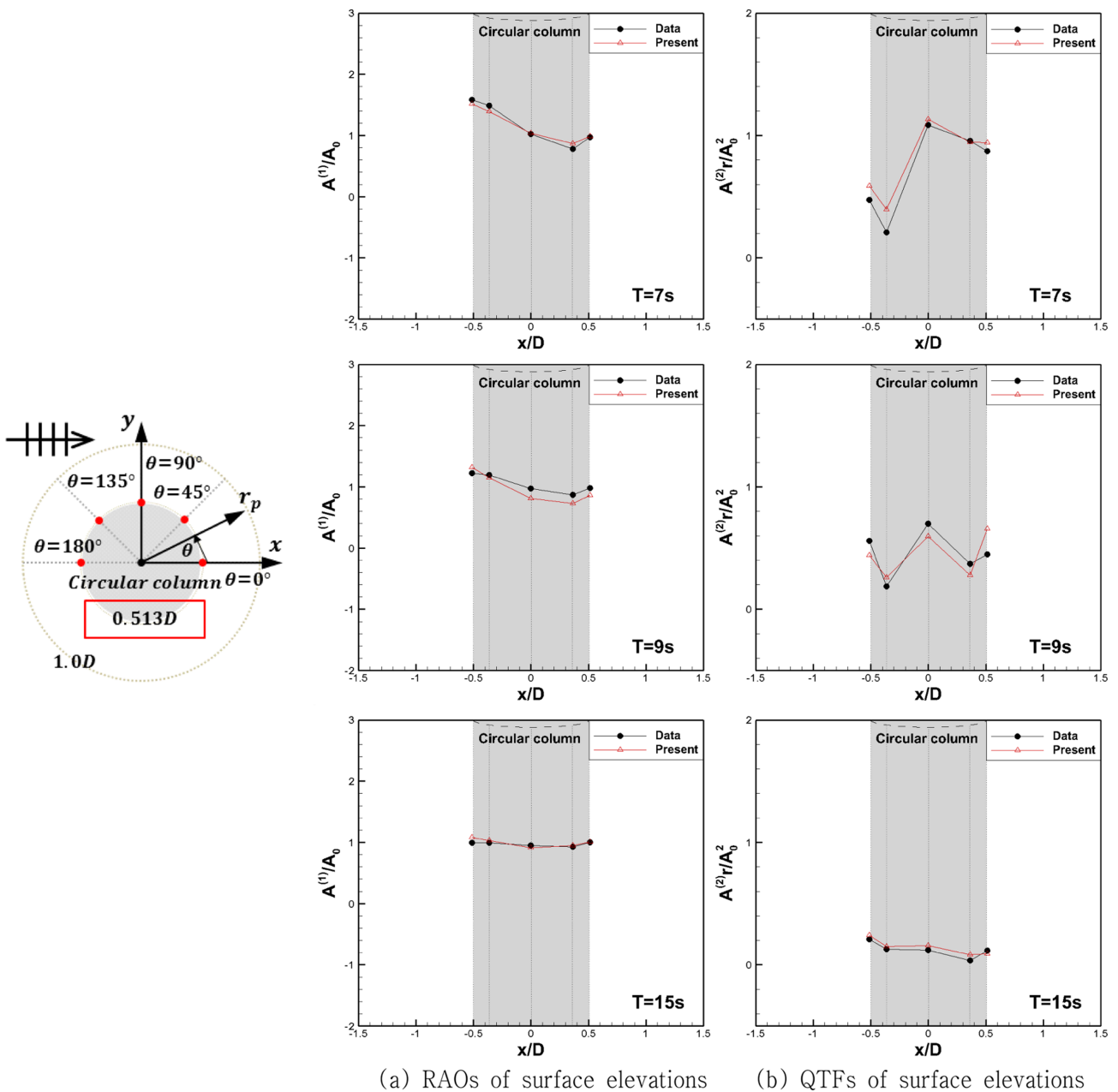


Fig. 10. RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle ($0.513D$) of wave probes at $H/L=1/30$.

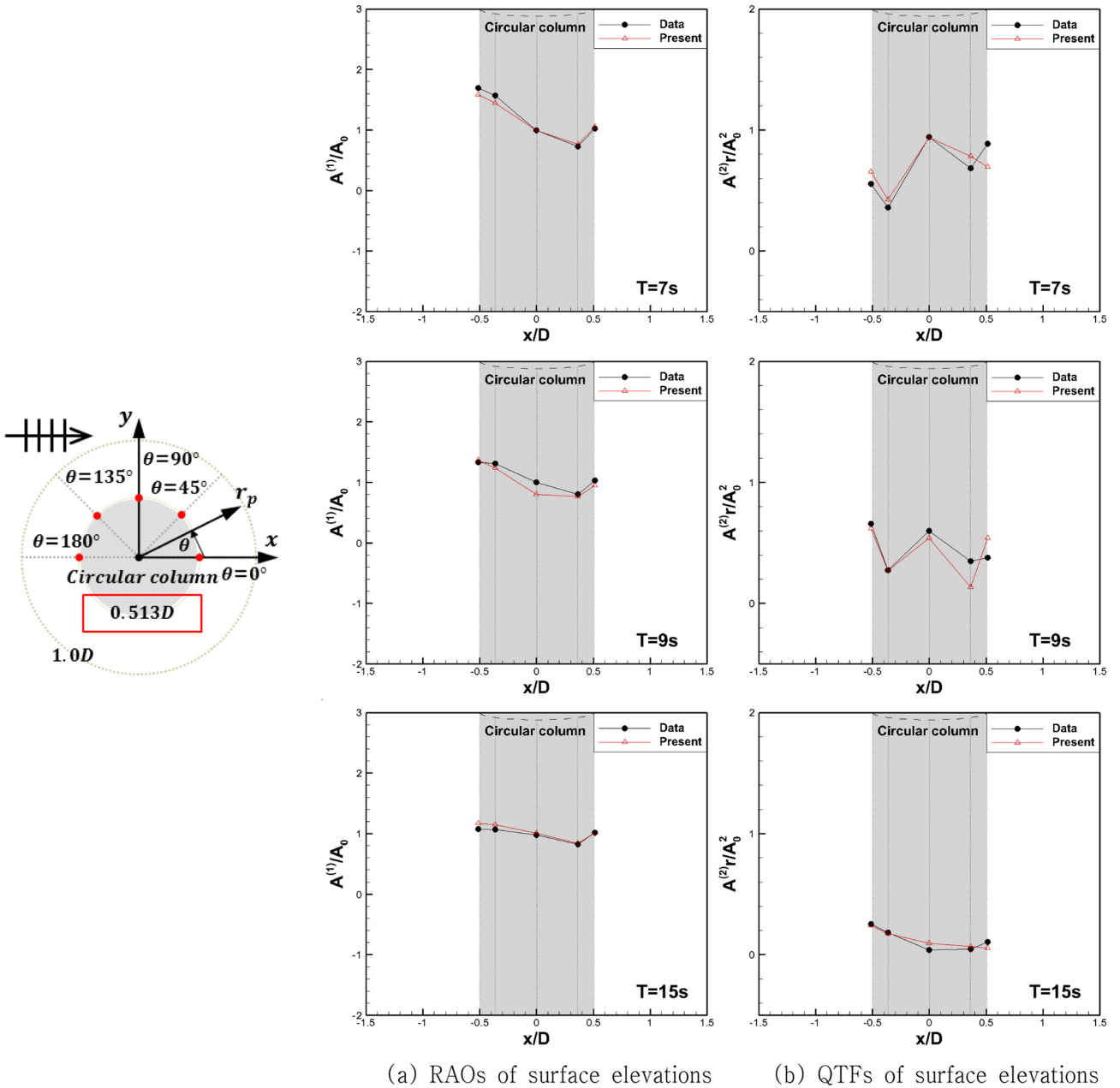


Fig. 11. RAOs and QTFs of surface elevations at inner circle (0.513D) of wave probes at $H/L=1/16$.

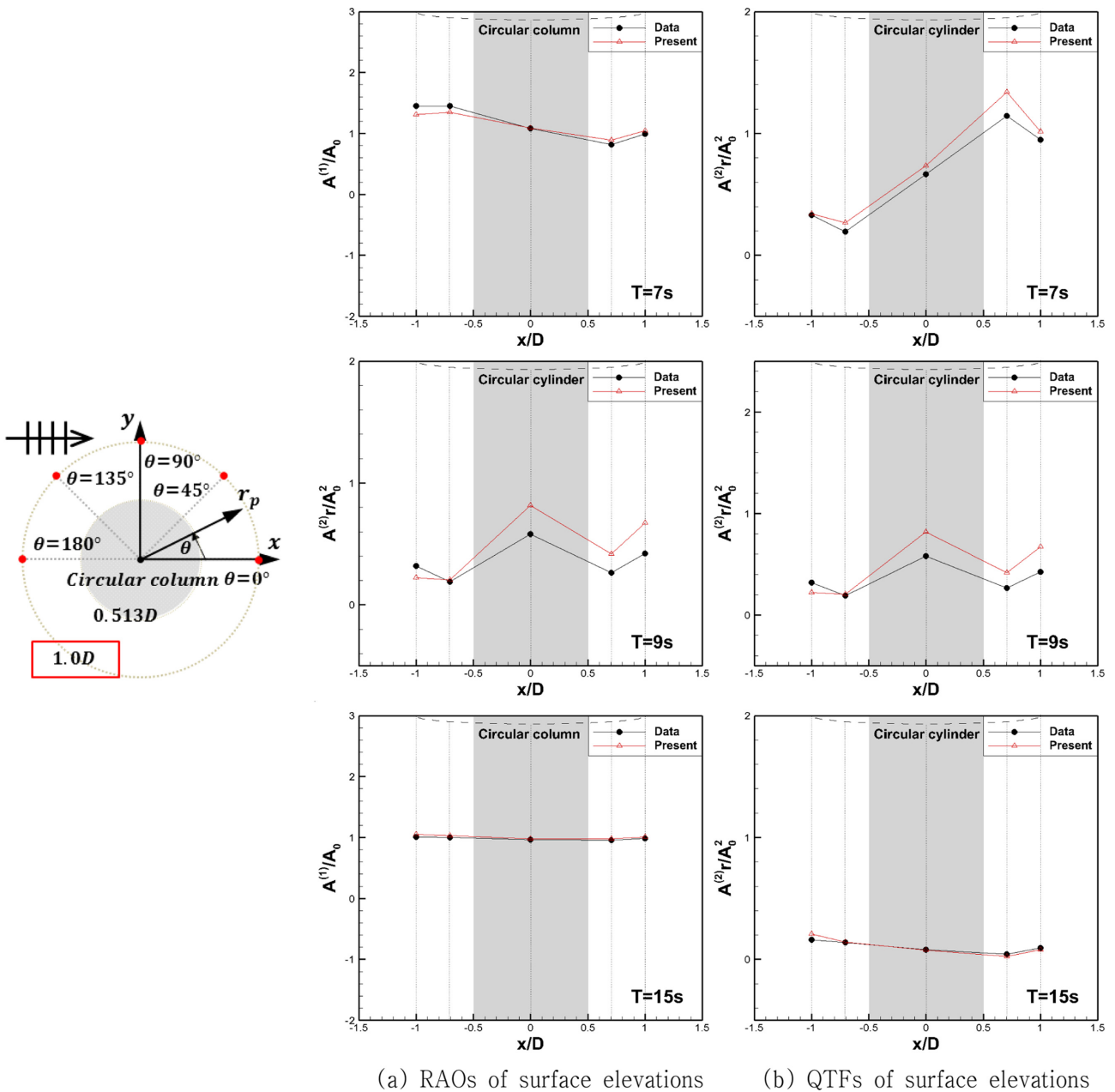
기둥 측면에서의 박리(separation)가 발생하게 되는데(Sumer, B.M. and Fredsø, J.[2006]), 이 역시 벽면에서의 마찰을 무시하는 slip 조건을 적용하여 발생한 오차로 판단된다. 2차 조화성분에서 계산결과와 경향성은 모형실험결과와 비슷하지만 1차 조화성분에 비해 오차의 정도가 크게 나타났다. 다음 Fig. 12와 13은 원형 기둥 중심에서 1.0D만큼 떨어진 위치에서의 파고의 변화를 나타낸다. 이는 정도의 크기는 다르지만 원형 기둥 표면 근처에서의 wave run-up특성과 비슷한 경향을 나타낸다. Fig. 14와 15는 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.

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

$$F^{(2)} = Force^{(2)} \frac{1}{4} \rho g A_0^2 D^2 \quad (5)$$

여기서, $Force^n$ 는 파랑하중의 n 차 조화성분이며, ρ 는 밀도, g 는 중력가속도, A_0 는 구조물이 없을 때 입사파의 1차 조화성분의 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 기



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

Fig. 12. RAOs and QTFs of surface elevations at outer circle (1.0D) of wave probes at $H/L=1/30$.

둥 주위의 wave run-up에서의 경향성과도 부합한다. 또한 Fig. 14(a)와 15(a)를 보면, Park[2011]의 연구결과와 같이, 파수가 커질수록 실험값과의 오차가 조금씩 커지는 경향을 알 수 있다. 기본적으로, 파수가 커질수록 원형 기둥 정면에서 상대적인 wave run-up이 높아진다. 그래서 원형 기둥 표면에서의 자유수면의 경사도가 높아지게 되고, 이에 따라 더 많은 파장 및 파고당 격자수가 사용되어야 한다. 본 계산결과는 파수가 커질수록 원형 기둥 정면에서 그리고 후면으로 갈수록 wave run-up이 낮게 예측되기 때문에, 이것이 원형 기둥이 받는 수평 파랑하중의 오차를 만들어 낸 원인이라 판단할 수 있다.

입사파 조건을 달리하면서 단일 원형 기둥에 대한 계산을 진행

하였다. 특히 파 경사가 높을 때 원형 기둥에 의해 산란된 파를 Type 1, 진입하는 입사파에 의한 산란현상을 Type 2로 정의하였다(Swan and Sheikh[2015]). Type 1파는 입사파와 산란파의 상호작용으로 인해 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. 16은 파 경사도 $H/L=1/16$, 주기 $T=9s$ 의 입사파에 대한 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

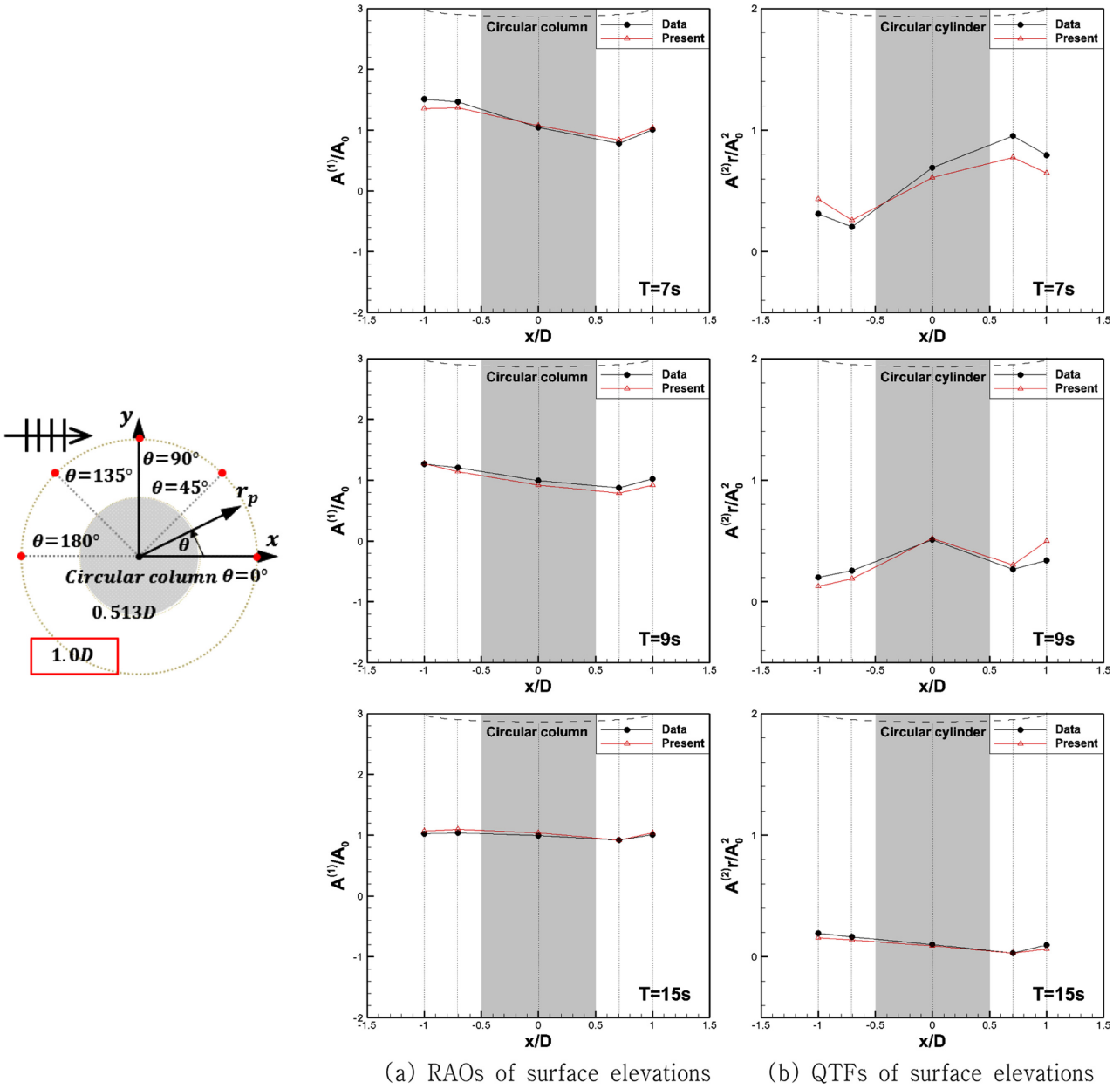


Fig. 13. RAOs and QTFs of surface elevations at outer circle (1.0D) of wave probes at $H/L=1/16$.

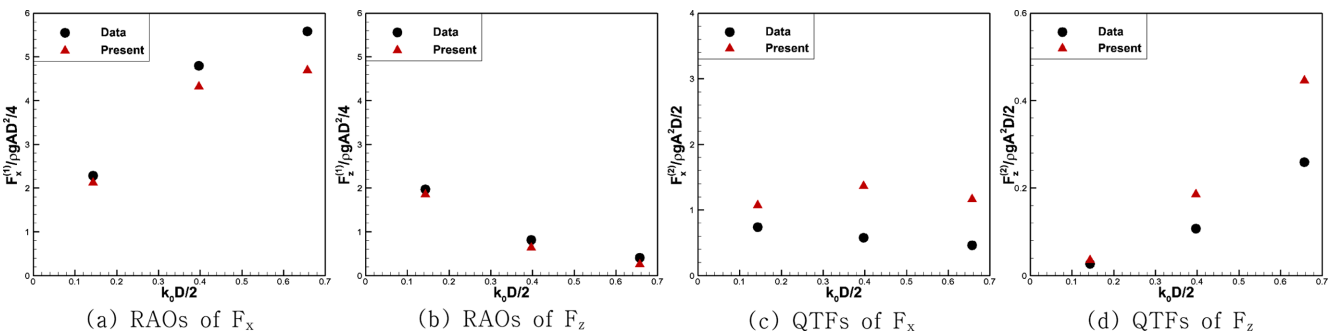


Fig. 14. RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/30$.

동심원 형태의 wave run-up 현상인 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 원

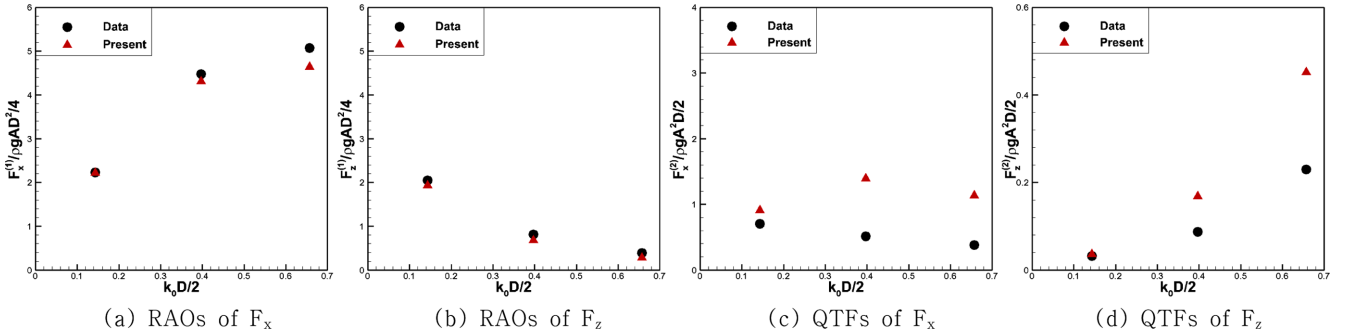


Fig. 15. RAOs and QTFs of wave forces at $H/L=1/16$.

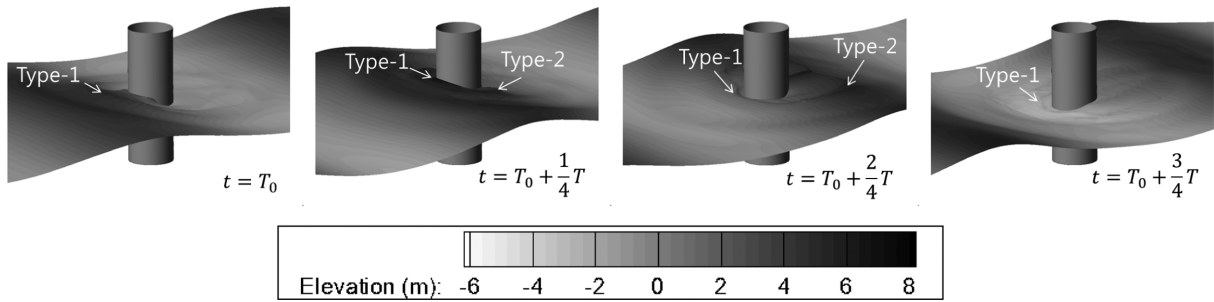


Fig. 16. Snapshot of wave scattered field around a vertical cylinder at $H/L=1/16$ and $T=9s$.

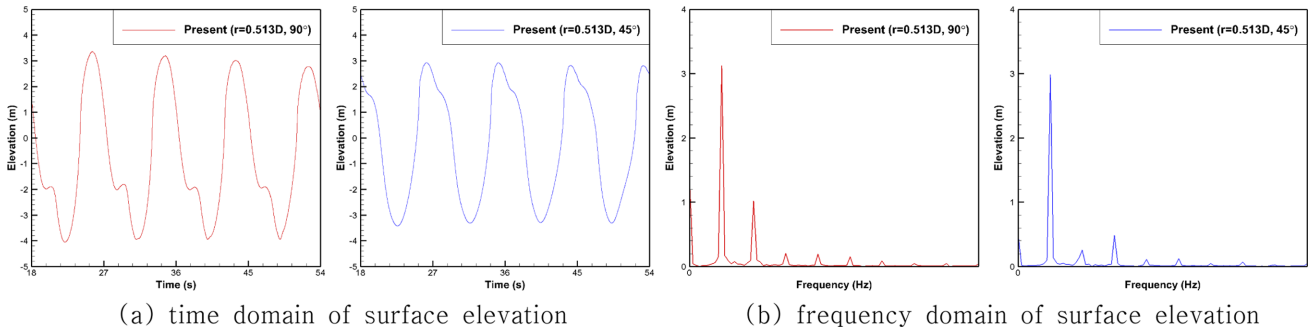


Fig. 17. Time and frequency domain of surface elevation at inner circle (90° , 45°) of wave probes, $H/L=1/30$, $T=9s$.

형 기둥 측면과 후면으로 진행하고, 이는 원형 기둥 후면에서 합쳐지면서 자유수면의 상승이 발생한다($t=T_0 + \frac{2}{4}T$). 뒤따라오는 파가 원형 기둥에 접근하면서 원형 기둥 정면에서 Type 1이 다시 관찰된다($t=T_0 + \frac{3}{4}T$). 이러한 물리적 상호작용은 파주기로 반복된다. 또한, Fig. 17은 Fig. 1에서 원형 기둥 표면에 위치한 파고계 중 90° 와 45° 방향에 위치한 파고계에서의 자유수면 변화를 시간영역(Fig. 17(a))과 주파수 영역 그래프(Fig. 17(b))로 나타낸 것이다. Fig. 17(b)의 주파수 영역 그래프를 보면, 원형 기둥 측면에서 발생하는 산란효과(Type 2)에 의한 비선형성이 4차 이상의 고차 항으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

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 경계 조건을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다. 이는 점성 경계층의 영향은 무시하고, 수치 계산은 포텐셜 이론과 비슷하다. 그러나 본 연구는 향후 쇄파와 강한 비선형 자유수면 효과가 나타나는 해양 구조물에 대한 선행연구이기 때문에 난류모델을 고려하였다. 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 zone 설정에 따른 격자수의 급격한 증가에 대한 개선 뿐만 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 구현 하면서 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.

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.

후 기

이 논문은 미래창조과학부 “신진연구지원사업(2015037577)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Afshar, M.A., 2010, “Numerical Wave Generation in OpenFOAM”, Master’s thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, sweden.
- [2] Bøckmann, A., Pákozdi, C., Kristiansen, T., Jang, H. and Kim, J., 2014, “An Experimental and Computational Development of a Benchmark Solution for the Validation of Numerical Wave Tanks”, Proc. ASME 33rd Int. Conf. Ocean Offshore Arct. Eng. Am. Soc. Mech. Eng. San Francisco, California, USA, V002T08A092-V002T08A092.
- [3] Bredmose, H. and Jacobsen, N.G., 2010, “Breaking wave impacts on offshore wind turbine foundations: focused wave groups and CFD”, Proc. ASME 29th Int. Conf. Ocean Offshore Arct. Eng. Am. Soc. Mech. Eng. Shanghai, China, 397-404.
- [4] Brown, S.A., Magar, V., Greaves, D.M. and Conley, D.C., 2014, “An evaluation of rans turbulence closure models for spilling breakers”, Proc. 34th Int. Conf. Coastal Eng. Vol. 1, 1-5.
- [5] Büchmann, B., Skourup, J. and Cheung, K.F., 1998, “Run-up on a structure due to second-order waves and a current in a numerical wave tank”, Appl. Ocean Res, Vol. 20, No. 5, 297-308.
- [6] Cao, H., Zha, J. and Wan, D., 2011, “Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder”, Proc. ISOPE 21th Int. Offshore Polar Eng. Conf, Int. Soc. Offshore Polar Eng, Maui, Hawaii, USA.
- [7] Chakrabarti, S.K., 1987, Hydrodynamics of offshore structures, WIT press, UK.
- [8] Danmeier, D.G., Seah, R.K., Finnigan, T., Roddier, D., Aubault, A., Vache, M. and Imamura, J.T., 2008, “Validation of wave run-up calculation methods for a gravity based structure”, Proc. ASME 27th Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. Am. Soc. Mech. Eng, Estoril, Portugal, 265-274.
- [9] Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013a, “Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM[®]”, Coastal Eng, Vol. 71, 102-118.
- [10] Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J., 2013b, “Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM[®]”, Coastal Eng, Vol. 71, 119-134.
- [11] Issa, R.I., 1986, “Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting”, J. Comput. Phys, Vol. 62, No. 1, 40-65.
- [12] Iwanowski, B., Lefranc, M. and Wemmenhove, R., 2009, “CFD simulation of wave run-up on a semi-submersible and comparison with experiment”, Proc. ASME 28th Int. Conf. Ocean Offshore Arct. Eng. Am. Soc. Mech. Eng, Honolulu, Hawaii, USA, 19-29.
- [13] Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J., 2012, “A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM”, Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 70, No. 9, 1073-1088.
- [14] Kriebel, D.L., 1992, “Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part II: Wave run-up”, Ocean. Eng, Vol. 19, No. 1, 75-99.
- [15] Kristiansen, T., Baarholm, R. and Stansberg, C.T., 2004, “Validation of second-order analysis in predicting diffracted wave elevation around a vertical circular cylinder”, Proc. ISOPE 14th Int. Offshore Polar Eng. Conf, Int. Soc. Offshore Polar Eng, Toulon, France.
- [16] Martin, A.J., Easson, W.J. and Bruce, T., 2001, “Runup on columns in steep, deep water regular waves”, J. Waterw. Port Coastal

- Ocean Eng. Vol. 127, No. 1, 26-32.
- [17] McCamy, R. and Fuchs, R., 1954, "Wave forces on piles: a diffraction theory", Tech. Memo No. 69, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board.
- [18] Menter, F.R., 1993, "Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows", Proc. 24th Fluid Dyn. Conf, Orlando, Flo, USA.
- [19] Morgan, G.C.J., Zang, J., Greaves, D., Heath, A., Whitlow, C. and Young, J., 2010, "Using the rasInterFoam CFD model for wave transformation and coastal modelling", Proc. 32nd Conf. Coastal Eng, Shanghai, China.
- [20] Morris-Thomas, M.T. and Thiagarajan, K.P., 2004, "The run-up on a cylinder in progressive surface gravity waves: harmonic components", Appl. Ocean Res, Vol. 26, No. 3, 98-113.
- [21] Niedzwecki, J.M. and Duggal, A.S., 1992, "Wave runup and forces on cylinders in regular and random waves", J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng, Vol. 118, No. 6, 615-634.
- [22] Orszag, S.A., Yakhot, V., Flannery, W.S., Boysan, F., Choudhury, D., Maruzewski, J. and Patel, B., 1993, "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations", Proc. Int. Conf. Near-Wall Turbulent Flows, Tempe, Arizona, Netherlands.
- [23] Palomares, G.D., 2015, "CFD Simulations on a Partially Submerged Cylinder under Regular Waves Using OPENFOAM?", Master's thesis, University of Stavanger, Norway.
- [24] Park, Y.S., Chen, Z.S. and Kim, W.J., 2011, "CFD application to evaluation of wave and current loads on fixed cylindrical substructure for ocean wind turbine", J. Ocean Eng. Technol, Vol. 25, No. 2, 7-14.
- [25] Patankar, S.V. and Spalding, D.B., 1972, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, No 10, 1787-1806.
- [26] Paulsen, B.T. Bredmose, H. Bingham, H.B. and Jacobsen, N.G., 2014, "Forcing of a bottom-mounted circular cylinder by steep regular water waves at finite depth", J. Fluid Mech, Vol. 755, 1-34.
- [27] Sadeghi, K., 2008, "Significant guidance for design and construction of marine and offshore structures", GAU J. Soc. Appl. Sci, Vol. 4, No. 7, 67-92.
- [28] Seiffert, B., Hayatdavoodi, M. and Ertekin, R.C., 2014, "Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: flat plate", Coastal Eng, Vol. 88, 194-209.
- [29] Shih, T.H., Zhu, J. and Lumley, J.L., 1996, "Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows", Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 23, No 11, 1133-1144.
- [30] Sun, L., Zang, J., Chen, L., Taylor, R.E. and Taylor, P.H., 2016, "Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations", Appl. Ocean Res, Vol. 59, 650-662.
- [31] Sumer, B.M. and Fredsø, J., 2006, Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, Revised edition. World Scientific, Vol. 26.
- [32] Swan, C. and Sheikh, R., 2015, "The interaction between steep waves and a surface-piercing column", Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 373, No. 2033.
- [33] Stansberg, C.T. and Kristiansen, T., 2005, "Non-linear scattering of steep surface waves around vertical columns", Appl. Ocean Res, Vol. 27, No. 2, 65-80.
- [34] VanLeer, B., 1979, "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme", J. Comput. Phys, Vol. 32, No. 1, 101-136.
- [35] Weiss, J.M., Maruszewski, J.P. and Smith, W.A., 1999, "Implicit Solution of Preconditioned Navier-Stokes Equations Using Algebraic Multigrid", AIAA J, Vol. 37, No. 1, 29-36.

Received 13 December 2016

Revised 16 March 2017

Accepted 20 March 2017