

파랑중 원형 실린더 주위 Wave Run-up 시뮬레이션

차경정* · 정재환** · 서광철*** · 구본국****†

*, ** 부산대학교 조선해양공학과, *** 목포해양대학교 조선해양공학과, **** 창원대학교 조선해양공학과

A Numerical Simulation of Wave Run-up
Around Circular Cylinders in Waves

Kyung-Jung Cha* · Jae-Hwan Jung** · Kwang-Cheol Seo*** · Bon-Guk Koo****†

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**** Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

요 약 : 본 연구에서는 파 주기와 기울기에 따른 단일 실린더와 다중 실린더의 wave run-up을 추정하였다. 3차원 비압축성 점성 난류 유동이며 서로 다른 상을 가지는 이상유체에 대한 수치해석을 수행하기 위하여, 본 연구에서는 전산 유체 역학 상용코드인 “STAR-CCM+”을 기반으로 하여 VOF기법과 realizable $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. 모델스케일에 대한 파 주기는 단일 실린더의 경우 1.269초와 1.692초이고, 다중 실린더의 경우 1.716초이다. 각 케이스 별로 1/30, 1/16의 파 기울기를 가진다. 최종적으로 파 기울기와 주기에 대한 wave run-up 추정 결과는 관련 실험 결과와 비교하였다. 수치해석 결과는 실험과 비교하여 정성적으로 유사함을 확인하였다.

핵심용어 : 파 치오름, 해양 구조물, VOF법, 전산유체역학, 다상유동

Abstract : This study presents the wave run-up height around single and multiple surface-piercing cylinders according to wave period and steepness. In order to simulate 3D incompressible viscous two-phase turbulent flow, the present study employed a volume of fluid (VOF) method with realizable $k-\epsilon$ turbulence model based on commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software, “STAR-CCM”. The wave periods at model scale were 1.269s and 1.692s for a single cylinder and 1.716s for multiple cylinders. In each case, wave steepness of 1/30 and 1/16 were used, respectively. Consequently, the results for wave run-up height with regard to wave steepness and period were compared with those of relevant previous experimental studies. The numerical simulation results showed a good qualitative agreement with experiments.

Key Words : Wave run-up, Offshore cylindrical structure, Volume of fluid method, CFD, Multi-phase flow

1. 서 론

해양구조물의 경우 파랑, 조류, 바람과 같은 해양환경에 의해 큰 영향을 받는다. 파랑에 의해 발생하는 유체 하중은 구조 안전성에 있어서 치명적인 영향을 미친다. 따라서 최근에는 극한 환경 조건에서 해양구조물의 구조적 안전성 파악이 대두되고 있다.

해양플랜트 분야에서 wave run-up과 air gap은 중요한 설계 변수로 작용하고 있으며 이에 대한 이론 및 수치해석적인

기법과 실험들이 활발하게 이루어지고 있다(Sung et al., 2007).

포텐셜 유동해석 기반의 방법은 과거에 wave run-up 추정과 파랑하중 계산에 사용되었었다. 그러나 최근 많은 연구자들에 의해서 점성 효과를 포함한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 등 run-up에 대한 정도를 높이려는 노력이 진행되고 있다.

먼저, RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 기반 해석 기법들의 타당성 검증을 위하여 위한 연구로, 규칙과 중 고정된 단일 원형 실린더에 대하여 수치해석을 실험 결과와 상호 비교하여 도입된 기법의 타당성을 확보하였다(Kim and Lee, 2014).

* First Author : supreme.cha@gmail.com, 051-510-2757

† Corresponding Author : bonguk9@changwon.ac.kr, 055-213-3685

Yoon et al.(2015)에서는 수치해석을 통하여 비선형 파와 구조물 사이 상호작용 등을 고려하여 포텐셜 유동해석 기반으로 예측할 수 없는 결과들을 나타내었다.

또한, 여러 가지 형상의 실린더와 반잠수식 구조물 등 다양한 구조와 형상에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다 (Lee et al., 2013; Nam et al., 2013; Watai et al., 2011).

본 연구에서는 해양구조물 기둥(column)의 일반적인 형태인 원형 실린더에 작용하는 wave run-up 현상에 대하여 수치해석을 수행하였다. 대상 실린더의 종류는 두 가지로, 단일 실린더와 네 개의 실린더로 이루어진 다중 실린더이다.

일정한 입사파 주기에서 파고 변화에 따른 wave run-up 특성을 분석하기 위하여 27차 International Towing Tank Conference Ocean Engineering Committee(ITTC OEC)에서 진행하였던 단일 원형 실린더와 다중 원형 실린더의 benchmark study 파랑 조건을 사용하였다.

수치적 파 생성의 타당성 검토를 위해 규칙파를 재현하여 수치해석기법을 검증하였으며, 이후에는 본 수치 계산의 신뢰성을 보이기 위하여 단일 실린더의 경우 Nam et al.(2008)에 제시되어 있는 KRISO 실험 결과와 다중 실린더의 경우 Stansberg et al.(2005)에 제시되어있는 MARINTEK 실험 결과와 직접 비교하여 수치 기법의 신뢰성 확보를 목적으로 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 대상 실린더

본 연구의 대상 실린더는 단일 실린더와 네 개로 이루어진 다중 실린더로 두 타입 모두 고정된 모형이다. 단일 실린더는 실제와 모형의 축척비(scale ratio) 50.314로 제원은 Table 1에 나타내었으며, 다중 실린더는 축척비 48.930으로 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Principal particulars of single circular cylinder

Dimension		Prototype	Model
Scale ratio		50.314	
Diameter	D [m]	16.0	0.318
Draft	T_d [m]	24.0	0.477

Table 2. Principal particulars of multiple circular cylinders

Dimension		Prototype	Model
Scale ratio		48.930	
Diameter	D [m]	16.0	0.327
Draft	T_d [m]	24.0	0.490

단일 실린더 주변의 파고계(wave probe)는 실린더 표면 근처 5개, 실린더 중심으로부터 실린더 직경 길이만큼 떨어진 위치에 5개 배치하였으며 이는 아래 그림 Fig. 1에 도시하였다. 다중 실린더는 전면부 실린더의 중간 지점인 front center point와 네 실린더 중심 지점인 center point에 파고계를 배치하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 입사파 조건

입사파 조건은 27차 ITTC OEC에서 진행하였던 benchmark study 조건 중 두 가지를 선별하여 고려하였으며 이를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. λ 는 파장(wave length), D는 실린더 직경, T는 파의 주기(wave period), H는 파고(wave height)를 의미하며 아래첨자 M은 모델 스케일, 그리고 S는 실제 스케일을 의미한다.

입사파에 대한 이론한계 범위는 Fig. 3에 파란색 마름모로

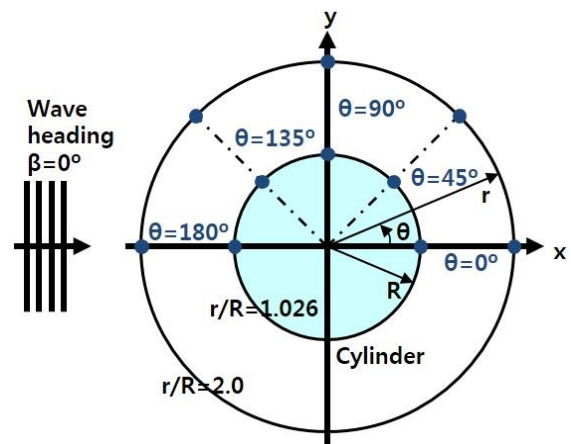


Fig. 1. Location of wave probes for single cylinder.

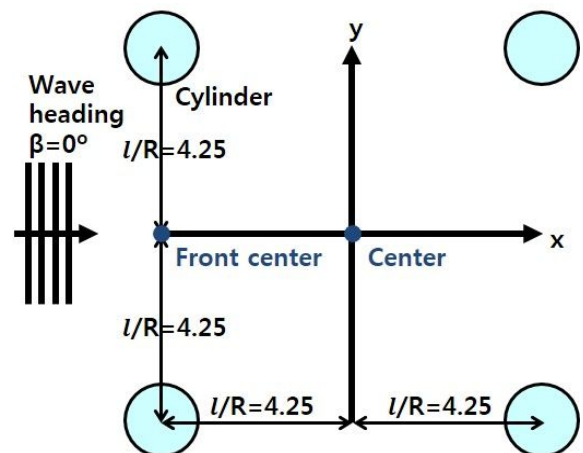


Fig. 2. Location of wave probes for multiple cylinders.

Table 3. Regular wave conditions for single circular cylinder

λ/D	T_s [s]	T_M [s]	λ_M [m]	H/λ	H_M [m]
7.9	9.0	1.269	2.511	1/30	0.084
				1/16	0.157
14.0	12.0	1.692	4.465	1/30	0.149
				1/16	0.279

Table 4. Regular wave conditions for multiple circular cylinders

λ/D	T_s [s]	T_M [s]	λ_M [m]	H/λ	H_M [m]
14.0	12.0	1.716	4.591	1/30	0.153
				1/16	0.287

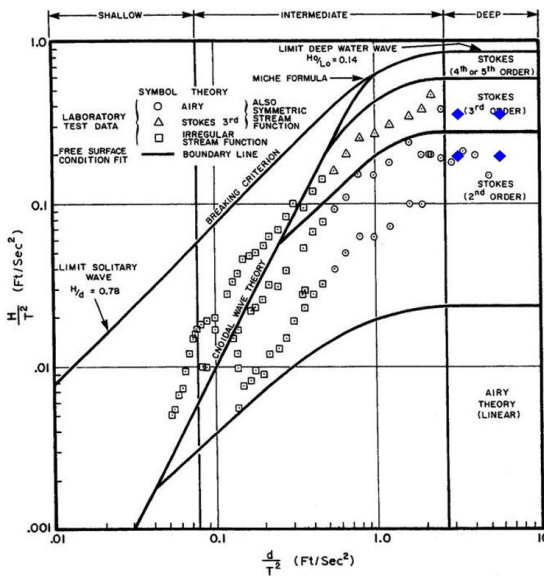


Fig. 3. Ranges of validity for various wave theories.

나타내었으며(DET NORSKE VERITAS, 2014), 이것을 바탕으로 하여 파 모델(wave model)에는 Stokes fifth-order wave를 사용하였다(Fenton, 1985).

2.3 지배 방정식 및 수치해석 방법

본 연구에서는 단일 및 다중 원형 실린더에 작용하는 wave run-up을 수치해석 하기 위하여 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 Star-CCM+를 사용하였다. 본 연구에서 고려되어진 지배방정식은 3차원 비정상 비압축성 유체의 질량 및 운동량 보존식으로써 연속(continuity) 방정식은 식(1)과 같으며, 난류 유동을 해석하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 레이놀즈 평균한 방정식인 RANS 방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') + \rho g_i \tag{2}$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, u_i 는 유속, p 는 압력, μ 는 유체 점성계수, g_i 는 중력 가속도이다. 식(2)의 $\overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress) 항으로 본 연구에서는 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 해석하였다.

부분적으로 차있는 유체는 서로 다른 상을 가지는 이상유체(two-phase)로 고려하였으며 유체의 계면을 추적하는 방법으로 VOF(Volume of Fluid) 기법을 이용하였다. 속도-압력 연성에는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였고, 대류항(convection term)은 Second order upwind를 사용하였다. 위에서 간략히 언급된 수치해석 방법들의 보다 자세한 내용은 Star-CCM+ user guide를 참고할 수 있다.

2.4 격자계 구성

본 연구에 계산 영역은 수치해석 영역(computational domain)과 감쇠 영역(damping domain)으로 나누며, 이와 경계조건을 Fig. 4에 나타내었다. 계산 영역의 길이는 파장의 2배이며, 입구면으로 부터 파장의 1배 떨어진 곳에 구조물을 위치하였다. 감쇠영역은 격자 감쇠(grid damping)와 수치 소산 기법(numerical damping scheme)을 적용하였으며, 길이는 파장의 4배이다.

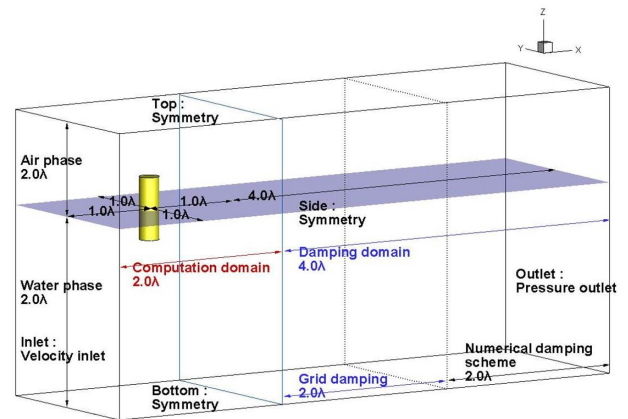


Fig. 4. Computational domain and damping domain with boundary conditions.

격자계 구성은 Fig. 5와 같다. 파장 및 파고 당 격자수 분포는 aspect ratio(길이방향 격자크기/높이방향 격자크기)와 수치소산(numerical damping) 최소화를 고려하여 선정하였으며 파장 당 약 150개, 파고 당 약 20개 적용하였다.

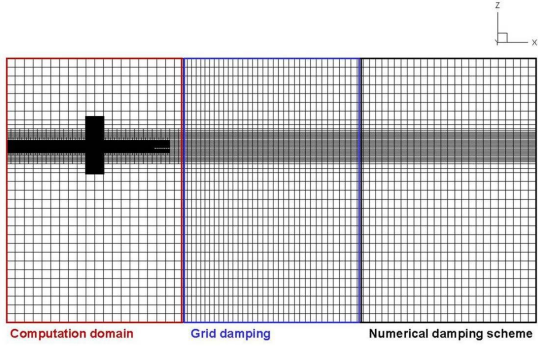


Fig. 5. Grid system.

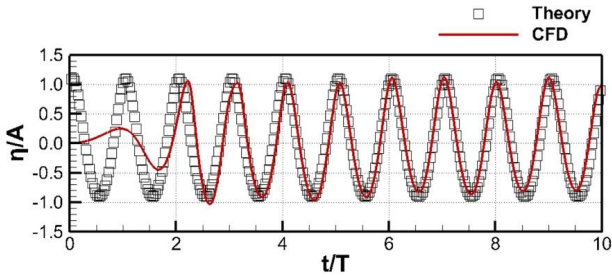


Fig. 6. The regular wave generation.

2.5 수치해석 기법 검증

수치적 조파의 정확도와 특성을 파악하기 위하여 규칙파에 대한 조파 시뮬레이션을 수행하였다. 파에 주요한 영향을 미치는 방향은 유동의 흐름 방향과 중력 방향이므로, 계산이 수행된 영역은 기존의 영역에서 폭 방향으로 크기를 줄인 형태이다.

조파 시뮬레이션 검증을 위하여 수치해석 영역과 수치소산 기법을 적용한 영역의 각 지점에서 시간에 따른 파 구현을 확인하였다. Fig. 6은 본 연구의 입사파 조건 6가지 중 가장 극한 케이스인 $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/16$ 에 대한 파 테스트 결과이다.

3. 해석 결과

3.1 단일 실린더

단일 실린더에서 수치해석을 통한 wave run-up 추정치는 평균성분(mean component) 및 1차 조화성분(first-order harmonic component)을 위주로 결과를 해석한다. A 는 입사파의 진폭, $A_R^{(0)}$ 는 평균 성분 진폭을 의미하며, $A_R^{(1)}$ 는 1차 조화성분 진폭을 나타낸다.

파고의 평균 성분은 파랑 상호작용으로 생기는 수면의 평균적인 상승(set-up) 및 침하(set-down)이다. Fig. 7과 Fig. 8은

파고의 평균에 대해 실험 계측치와 수치해석을 통한 계산치 결과를 비교하여 보여주고 있다. 모든 파장에 대하여 수면의 평균 상승 또는 침하는 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

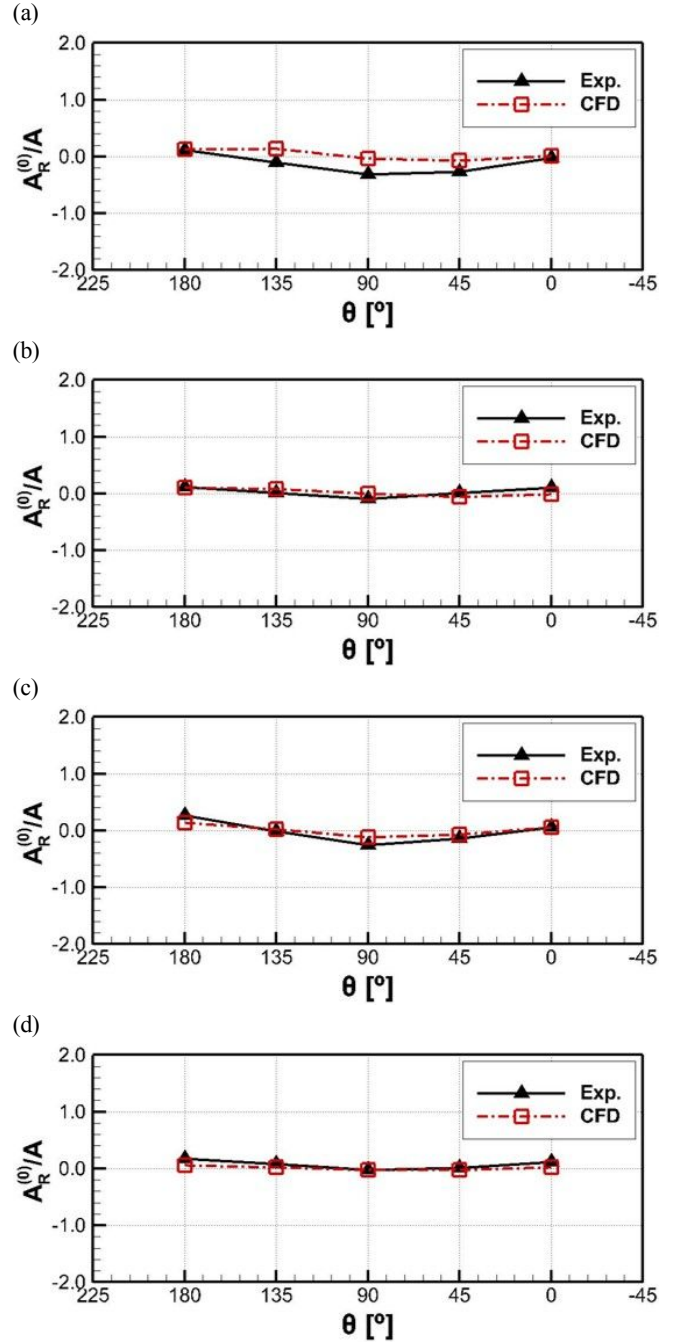


Fig. 7. Mean values of wave elevation for single cylinder; (a) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/30$, (b) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/30$, (c) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/16$, (d) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/16$.

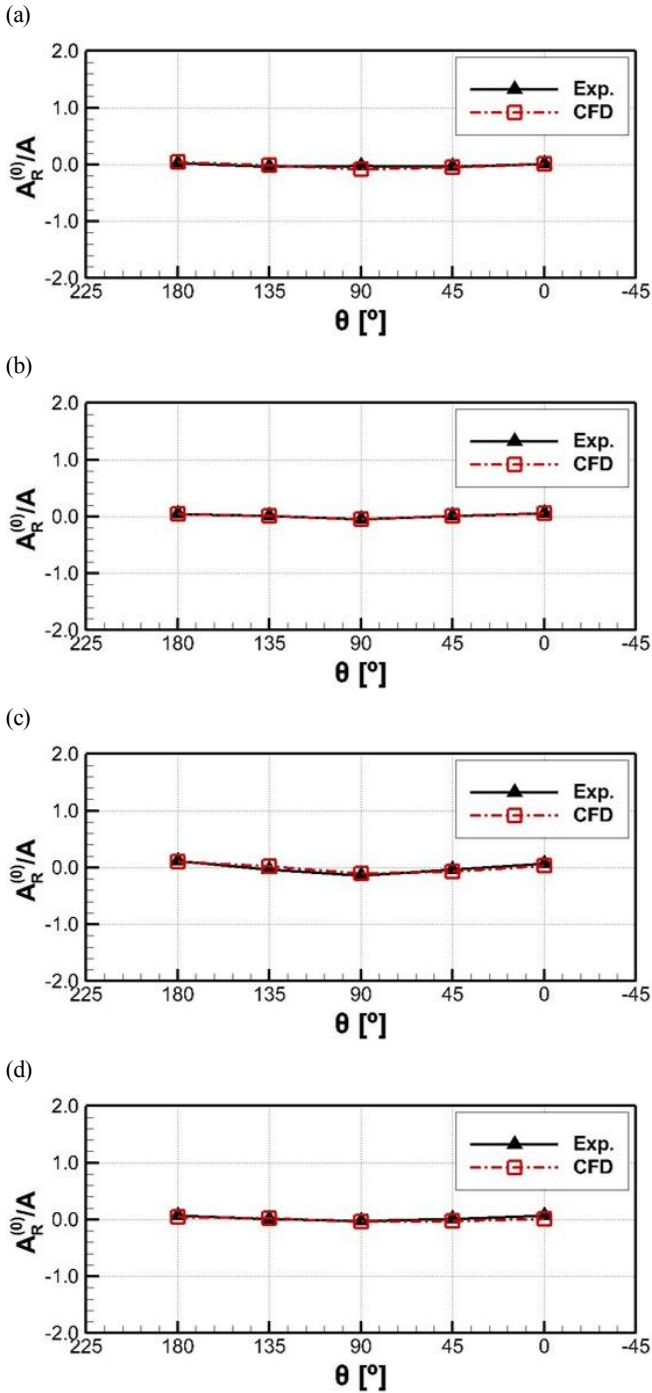


Fig. 8. Mean values of wave elevation for single cylinder; (a) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/30$, (b) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/30$, (c) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/16$, (d) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/16$.

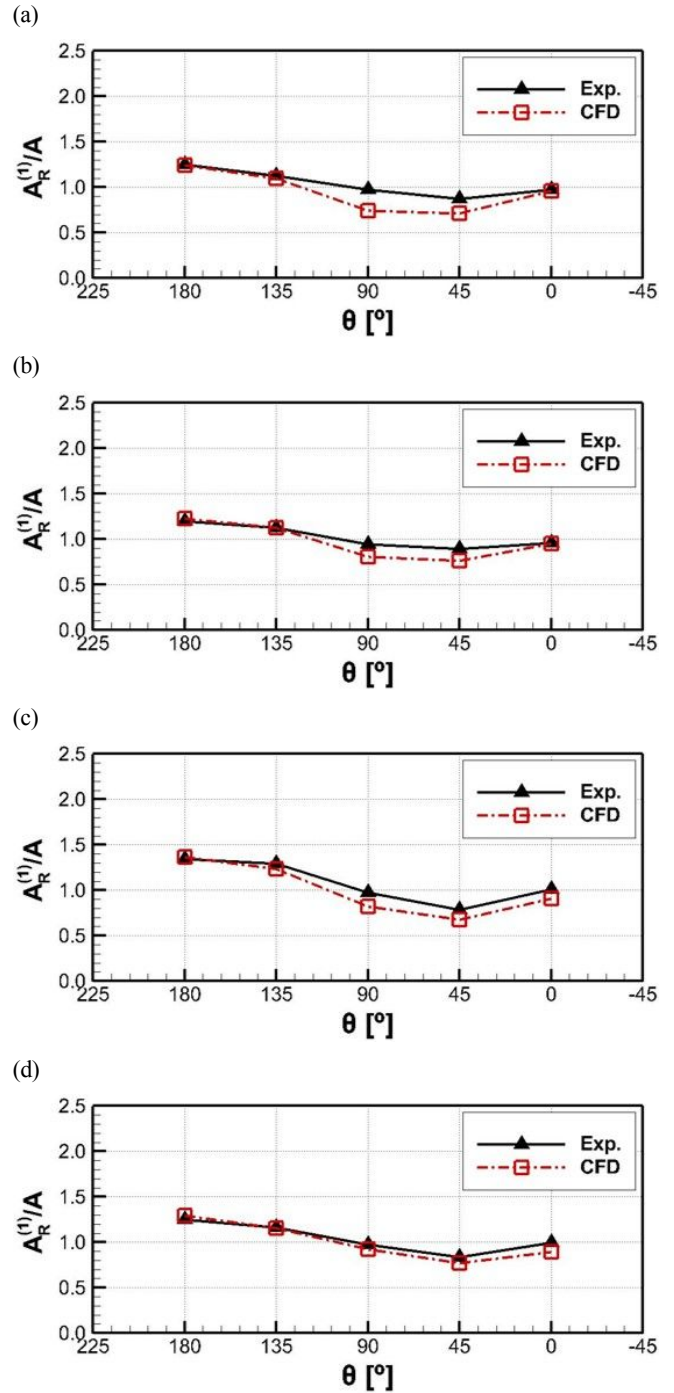


Fig. 9. 1st harmonics of wave elevation for single cylinder; (a) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/30$, (b) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/30$, (c) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/16$, (d) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=7.9$, $H/\lambda=1/16$.

파랑중 원형 실린더 주위 Wave Run-up 시뮬레이션

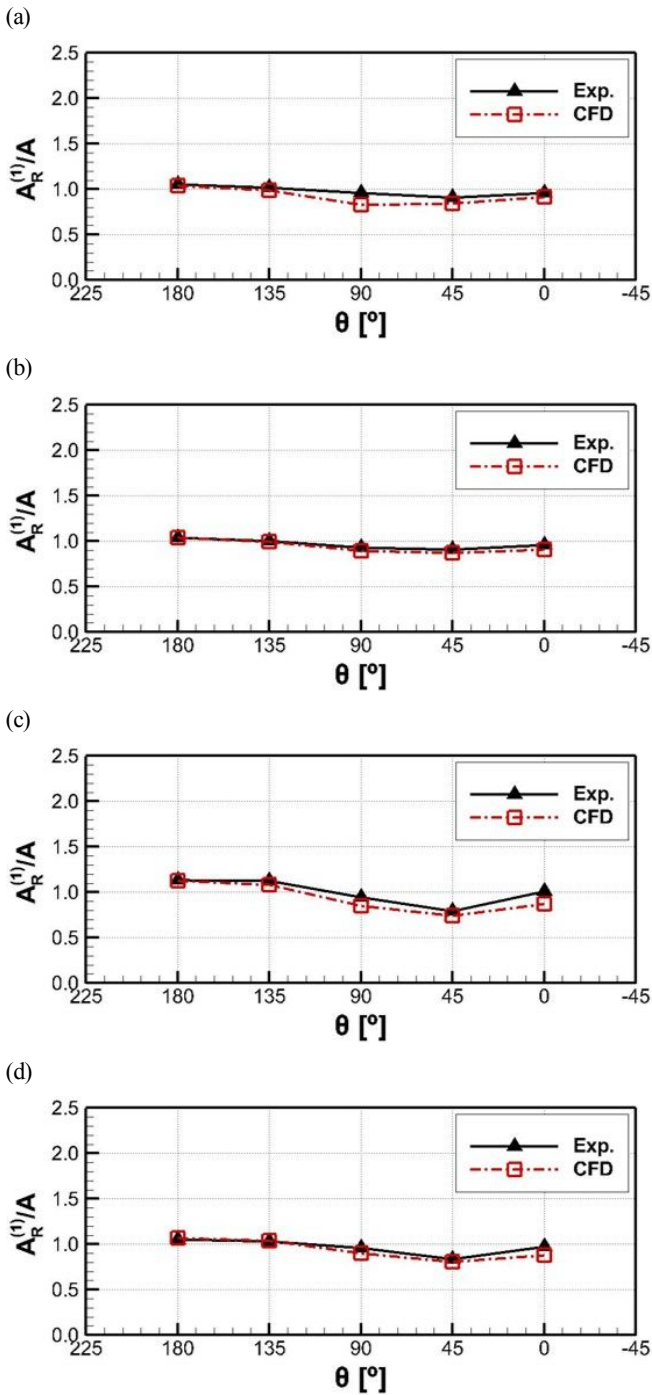


Fig. 10. 1st harmonics of wave elevation for single cylinder; (a) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/30$, (b) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/30$, (c) Wave probe at the cylinder surface, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/16$, (d) Wave probe off the cylinder, $\lambda/D=14.0$, $H/\lambda=1/16$.

1차 조화 성분은 가장 지배적인 파에 의한 run-up 효과를 나타내며, Fig. 9와 Fig. 10를 통하여 실험 결과와 수치해석 결과의 일치도가 전반적으로 높은 것을 확인하였다. 파 기울기(wave steepness)가 커질수록 그리고 실린더가 입사파를 맞는 부분(weather side)에서 run-up현상이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 Koo et al.(2014)의 연구에서도 관찰되는 결과로 입사파를 정면으로 맞는 부분에 파로부터 큰 에너지가 전달되는 것을 알 수 있다. 파 기울기와 파 에너지의 상관관계 이해는 실린더의 구조 안전성 해석에 있어서 중요하기 때문에 추후 이러한 상관관계에 대한 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한, 실린더 표면 근처의 파고 계측 결과 그래프에서 파 계측 위치가 45도 일 때 진폭 변화가 가장 큰 것을 확인하였다. 파 기울기 효과(wave steepness effect)는 파 계측 위치 45도에서 가장 크게 나타났다.

1차 조화성분을 통하여 파장이 길어짐에 따라 가장 지배적인 파에 의한 wave run-up 현상이 줄어들고, H/λ 가 작으면 상대적으로 균일류(uniform flow)에 가까워짐으로 run-up 현상이 작아지는 것을 확인하였다.

3.2 다중 실린더

다중 실린더의 경우 계측 값과 1차 조화성분을 위주로 해석한다. A 는 입사파의 진폭, A_R 는 wave run-up 진폭, $A_R^{(1)}$ 는 1차 조화성분 진폭을 나타낸다.

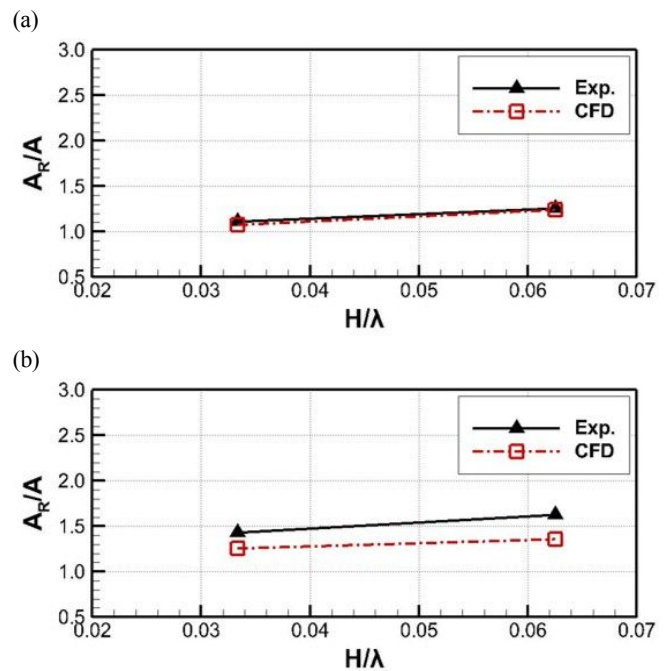


Fig. 11. Wave elevation for multiple cylinders (wave elevation); (a) Front center point, (b) Center point.

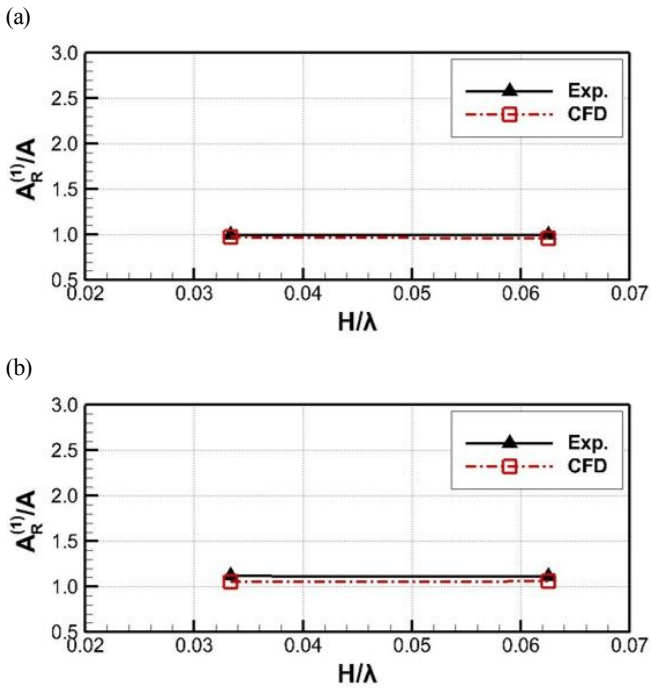


Fig. 12. Wave elevation for multiple cylinders (1st harmonics of wave elevation); (a) Front center point, (b) Center point.

파 기울기에 대한 진폭의 비율을 나타내는 그래프로 계측 진폭의 비율은 Fig. 11에, 1차 조화성분의 비율은 Fig. 12에 나타내었다. 계측 지점 center point는 지배적인 파 이외의 파 영향이 front center point에 비하여 큰 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 단일 실린더와 다중 실린더에 대하여 다양한 파 조건에서 wave run-up 수치적 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. 이를 통하여 하기와 같은 결론을 얻을 수 있으며, 아래의 결론은 실제 해상에서 해양 구조물의 구조적 안전성 파악을 위한 이전 단계의 데이터로 사용될 수 있다.

- (1) 실린더 주위 유동 특성으로서 wave run-up에 대한 수치 결과를 실험 결과와 비교하였을 때 전반적으로 일치하는 것을 확인할 수 있다.
- (2) 실린더의 수에 상관없이 다양한 입사파 조건에 대하여 정도 높은 해석 결과를 얻을 수 있다.
- (3) 파장이 길고 파 기울기가 작을수록 물리적 현상을 잘 재현하고 있는 것을 관찰 할 수 있다.
- (4) 파 기울기와 wave run-up 상관관계의 이해를 바탕으로

구조물의 안전성에 대한 추가적인 논의가 필요할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 극한 환경에서 wave run-up의 구현을 위하여 난류 모형 효과(turbulence model effect) 등을 고려한 정도 높은 모사에 관한 연구를 진행할 계획이다.

사 사

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] DET NORSKE VERITAS(2014), Environmental Conditions and Environmental Loads, Recommended Practice DNV-RP-C205.
- [2] Fenton, John D.(1985), A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 111, No. 2, pp. 216-234.
- [3] Kim, H. T. and D. Y. Lee(2014), Benchmark Studies of Wave Run-up, 2013 KTTCC Ocean Engineering Committee, pp. 1-47.
- [4] Koo, B. G., D. W. Park and K. J. Paik(2014), A Study on Wave Run-up height and Depression Depth around Air-water Interface-piercing Circular Cylinder, Journal of Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 20, No. 3, pp. 312-317.
- [5] Lee, S. B., S. Y. Han, Y. M. Choi, S. H. Kwon, D. W. Jung and J. S. Park(2013), Study on Wave Run-Up Phenomenon over Vertical Cylinder, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 4, pp. 62-67.
- [6] Nam, B. W., N. W. Kim,, Y. H. Kim,, S. Y. Hong, and H. G. Sung,(2013), Computation of Nonlinear Wave Run-up around a Semi-submersible Platform, Proceedings of the PRADS2013, pp. 809-815.
- [7] Nam, B. W., H. G. Sung, Y. S. Kim and S. Y. Hong(2008), Experiments and Second-order Computations for Run-up around a Truncated Cylinder in Waves, Journal of Ships and Ocean Engineering, Vol. 46, pp. 43-52.
- [8] Stansberg, C. T., R. Baarholm, T. Kristiansen, E. W. M. Hansen and G. Rortveit(2005), Extreme Wave Amplification and Impact Loads on Offshore Structures, Offshore Technology Conference 2005, OTC 17487, pp. 1-10.

- [9] Sung, H. G., Y. S. Kim, B. W. Nam and S. Y. Hong(2007), Experimental Investigation of Wave Loads on a Truncated Vertical Circular Cylinder, Proceedings of the Journal of Ocean Engineering and Technology, pp. 105-111.
- [10] Watai, R. A., F. T. Matsumoto, J. V. Sparano, A. N. Simos and M. D. A. S. Ferreira(2011), Wave Run-up Simulations with a Moving Large Volume Semi-submersible platform, Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2011), pp. 1-10.
- [11] Yoon, S. H., D. H. Kim, H. Sadat-Hosseini, J. Yang and F. Stern(2015), High- Fidelity CFD Simulation of Wave Run-up for Single/multiple Surface-piercing Cylinders in Regular Head Waves, Applied Ocean Research, pp. 1-22.

Received : 2016. 09. 05.

Revised : 2016. 10. 12. (1st)

: 2016. 10. 19. (2nd)

Accepted : 2016. 10. 27.