

# 파랑과 정사각형 배열의 원형 기둥 구조물의 상호작용 수치해석

송성진\* · 박선호\*\*†

\*, \*\* 한국해양대학교 해양공학과

## Numerical Analysis of Four Circular Columns in Square Array and Wave Interaction

Seongjin Song\* · Sunho Park\*\*†

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

**요 약** : 해양환경의 극한 환경조건에 노출 된 고정식 및 부유식 해양구조물의 안전성과 설계비용 효율성에 있어서 파랑-구조물 상호작용의 정확한 예측은 중요하다. 본 연구에서는 규칙파 중 원형 기둥에 대한 파랑-구조물 상호작용을 해석하였다. 3차원 이상유동(two-phase flow)을 해석하기 위해 오픈소스 전산유체역학 라이브러리인 오픈폼을 사용하였다. 4개의 원형기둥이 정사각형 배열을 이루고 있을 때 규칙파의 입사각도에 따른 상호작용을 해석하였다. 원형 기둥 구조물에서의 wave run-up을 입사파의 기울기에 따라 비교하였다. 원형 기둥과 입사파의 상호작용으로 인해 원형 기둥 사이에 높은 파가 생성되는 것을 확인하였다. 본 해석 결과는 구조물과 입사파의 상호작용에 의한 air gap에 대한 연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

**핵심용어** : Air-gap, 원형기둥, Wave run-up, 오픈폼, 규칙파, 파랑-구조물 상호작용

**Abstract** : Accurate prediction of wave-structure interactions is important in the safety and design cost effectiveness of fixed and floating offshore structures exposed to extreme environmental conditions. In this study, regular waves and circular column structure interactions for four circular columns in regular waves are analyzed. To simulate 3D two-phase flow, open source computational fluid dynamics libraries, called OpenFOAM, were used. When the four circular columns are arranged in a square array, the interactions according to the incident slopes of the regular waves are analyzed. The wave run-up in the circular column surface was compared according to the slope of the incident wave. It was confirmed that high amplitude waves are generated between the circular columns due to the interaction between the circular column and the incident wave. It is expected that this analytical result will be used as the basic data of the study on the air gap due to the interaction between the structure and incident wave.

**Key Words** : Air-gap, Circular column, Wave run-up, OpenFOAM, Regular wave, Wave-structure interaction

### 1. 서 론

해양구조물은 대부분 어느 한 장소에서 수십 년 동안 운영되기 때문에 거친 해양환경에 노출된다. 특히, 해양환경 중 해양구조물의 운동 및 설계에 직접적인 요인으로 작용하는 것은 파랑이다. 따라서 극한 환경조건에서 파랑과 해양구조물의 상호작용을 정확히 예측하는 것은 해양구조물의 설계 시 중요한 요소이다. 특히, 입사파가 해양구조물의 기둥(columns)을 따라 상승하는 wave run-up 현상은 구조물에 손

상을 주기 때문에 정확한 예측이 매우 중요하다. 포텐셜 이론에 기반을 둔 수치해석 기법과 모형시험을 이용하여 고정된 원형 기둥 주위의 wave run-up 현상에 대한 많은 연구가 수행되었다. McCamy and Fuchs(1954)는 포텐셜 이론으로 바닥에 고정된 단일 원형 기둥에 의한 파의 회절현상 대해 선형적인 해를 제시하였다. Niedzwecki and Duggal(1992)와 Kriebel(1992)은 동일한 고정된 단일 원형 기둥에 대해 모형시험을 수행하였으며, 파 경사도가 가파른 입사파 조건에서 선형 회절 이론은 wave run-up을 실험결과보다 낮게 예측하였다. 또한, 포텐셜 이론을 적용한 수치해석기법의 경우에도, 구조물과 가파른 파랑 간의 강한 비선형적 상호작용이 발생하는 조건에서는 wave run-up을 정확하게 예측하지 못하였다(Büchmann

\* First Author : [ssong@kmou.ac.kr](mailto:ssong@kmou.ac.kr)

† Corresponding Author : [spark@kmou.ac.kr](mailto:spark@kmou.ac.kr), 051-410-4329

et al., 1998; Geng et al., 2010).

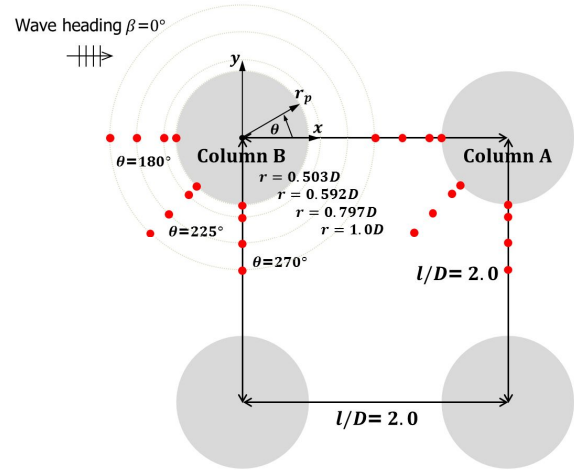
여러 개의 원형 기둥에 대한 연구 또한 많이 수행되었다 (Barlas, 2012). Evans and Porter(1997)는 정사각형으로 배치된 원형 기둥구조물에 대해 계산을 수행하였다. 그 결과, McCamy and Fuchs(1954)의 식으로 계산된 단일 원형 기둥에 작용하는 하중보다 특정 주파수에서 각각의 원형 기둥에 작용하는 파랑하중이 더 큰 것을 확인하였다. 또한, Scolan and Malenica(1998)은 사각형 배열의 원형 기둥 주위에서 규칙파에 의한 회절현상을 연구하였고, 앞 쪽 두 개의 원형 기둥 사이에서 국부적으로 높은 자유수면 변화가 관측되었다. 이러한 결과들은 특정 주파수에서 원형 기둥 내부 영역에서의 유체 역학적 상호작용에 의해 발생하는 near-trapping 현상으로 설명할 수 있다. Near-trapping 현상은 인장각식 구조물(Tension Leg platform, TLP)와 반잠수식 구조물(semi-submersible structure)과 같은 해양구조물의 테크 하부에 큰 충격을 가하게 되고, 장비손상과 생산에 영향을 미친다(Eatock Taylor and Wu, 1997).

최근 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)에 의한 수치적 연구가 비약적인 발전을 이루고 활용 폭 또한 넓어지면서, 점성을 고려한 파랑 구조물 상호작용과 점성을 고려한 비선형성 거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Danmeier et al., 2008; Bøckmann et al., 2014). 특히, 소스코드가 공개된 CFD 라이브러리인 오픈폼(OpenFOAM)은 해안 및 해양공학의 많은 문제에 적용되고 있다(Bredmose and Jacobsen 2010; Seiffert et al., 2014, Sun et al., 2016). 또한, 다양한 파랑 환경에 노출된 해양구조물의 거동 예측을 위해 공개소스코드를 이용한 수치파랑수조(Numerical wave tank, NWT)기법에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. Afshar(2010)은 relaxation technique를 이용하여 수치소파방법(numerical absorption method)을 개발하였다. Jacobsen et al.(2012)은 파랑 생성 영역과 흡수 영역을 적용하여 “waves2Foam” 라이브러리를 개발하였다. Higuera et al.(2013a, 2013b)도 특정한 경계조건을 적용하여 “IHfoam” 라이브러리를 개발하였다.

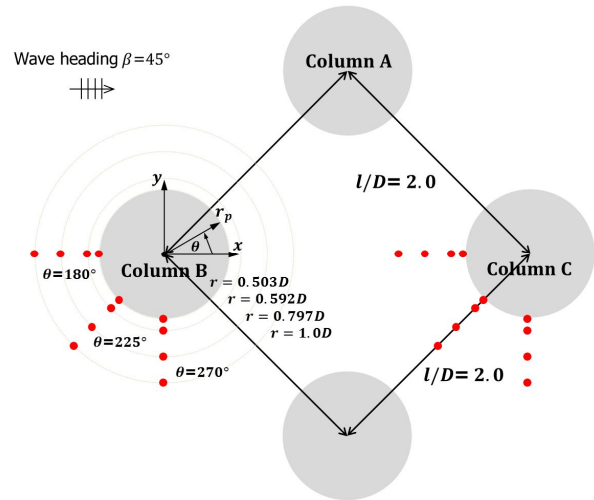
본 연구에서는 2상 유동(two-phase flow)을 해석할 수 있는 “interFoam”을 기저 solver로 사용하였고, 파의 생성과 흡수 경계조건을 적용하기 위해 “interFoam” slover에 “waves2Foam” 라이브러리를 추가하여 사용하였다.

## 2. 문제정의

본 연구는 규칙파 중 단일 원형 기둥에 대한 파랑-구조물 상호 작용의 후속 연구이다(Song and Park, 2017). 따라서 본 연구에서는 정사각형 배열의 원형 기둥에 대한 wave run-up을 수치시뮬레이션 하였다. 구체적으로, 정사각형 배열의 원형 기둥에 대해 입사파의 진행방향( $\beta$ )이  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ 일 때, 구조



(a) arrangement of four circular columns at  $\beta = 0^\circ$



(b) arrangement of four circular columns at  $\beta = 45^\circ$

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

물에 의한 파고변화를 살펴보았다. Fig. 1은 정사각형 배열의 원형 기둥 배치도와 결과로 도식화할 위치를 나타낸다. 결과는 특정한 거리( $r = 0.503D, 0.592D, 0.797D, 1.0D$ )에서  $45^\circ$ 간격으로 도식화하였다. 원형 기둥의 중심 간 거리는  $2D$ 로 설정하였다.

## 3. 수치계산 방법

계산영역의 크기, 경계조건, 격자는 Fig. 2에 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 폭

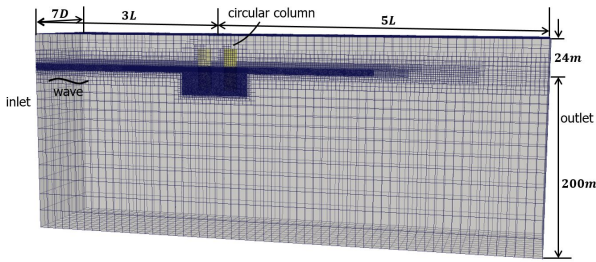


Fig. 2. Boundary conditions and domain size.

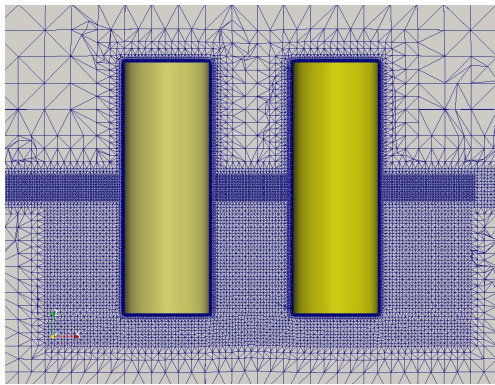


Fig. 3. Mesh generation around free-surface and circular columns.

은  $7D$ 로 각각 계산하였다. 여기서  $D$ 는 원형 기둥의 직경을 나타낸다. 자유수면과 정상(top) 경계면사이의 거리를  $1.5D$ 로 설정하여 경계면이 입사파에 미치는 영향을 최소화 하였다. 자유수면과 바닥(bottom) 경계면사이의 거리는  $12.5D$ 로 설정하여 심해조건을 만족하였다. 수치파랑수조에서 규칙파를 생성하기 위해 입구경계면에 수치조파 경계조건으로 속도, 난류, 체적함수는 Dirichlet조건, 압력은 Neumann조건을 설정하였다. 이와 반대로, 출구경계면에서 반사효과 없이 유동이 빠져나가기 위해 속도, 난류, 체적함수는 Neumann조건, 압력은 Dirichlet조건으로 설정하였다. 정사각형 배열의 원형 기둥 중심으로 물리현상이 대칭이기 때문에 절반만 해석하였다. 중앙 단면은 symmetry조건을 설정하였다. 원형 기둥표면의 경계조건은 slip조건을 고려하였다(Palomares, 2015).

오픈폼(OpenFOAM)이 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 blockMesh와 snappyHexMesh를 이용하여 비정렬 격자로 격자를 생성하였다. 자유수면의 영향을 정확히 고려하기 위해 자유수면 근처에 격자를 밀집시켰으며, 출구면으로 이동할수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 또한, 원형 기둥에 의한 파의 회절 및 산란 효과를 계산하기 위해 해당 영역에 밀집한 격자를 생성하였다(Fig. 3). 파 경사도  $H/L=1/30$ 을 기준으로 자유수면에서 높이 방향 격자 크기( $\Delta z$ )는  $0.625\text{ m}$ , 길이 방향 격자 크기( $\Delta x$ )는  $0.626\text{ m}$ 로 길이 방향 격자 간격과 높이 방향 격자간격의 비를 1로 설정하였다. 또한, 최소격자인 원

형 기둥 벽면의 첫 번째 격자 높이는  $0.063\text{ m}$ 로 설정하였다.

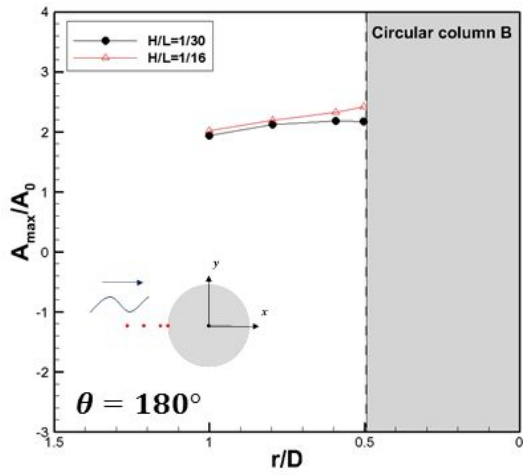
극심한 해양환경에 노출된 해양구조물 주위의 유동은 레이놀즈 수가 큰 난류영역이기 때문에 난류 모델을 고려해야 한다. Song and Park(2017)은 수치파랑수조의 정확한 구현을 위해 난류모델에 대한 의존도 평가를 실시하였다. 본 연구에서도 물과 공기의 경계면에서 발생하는 수치적 난류 확산을 최소화하는 RNG  $k-\epsilon$  모델을 난류모델로 선정하였다.

#### 4. 해석 결과 및 고찰

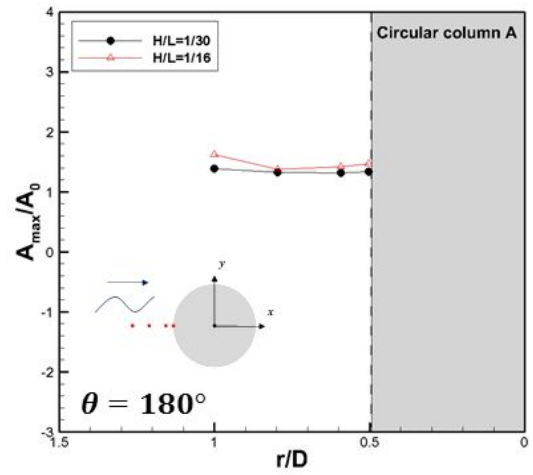
단일 원형 기둥에 대한 해석 결과는 파랑 하중 및 자유수면 변화의 1차 조화성분에 대해서는 충분히 만족할 만한 결과로 신뢰성을 검증하였다(Song and Park, 2017). 본 연구에서는 단일 원형 기둥에 대한 수치기법 검증을 토대로 정사각형 배열로 놓여진 4개의 원형 기둥의 상호작용을 예측하였다. Song and Park(2017)에서 단일 원형 기둥 전방으로 산란된 파 Type 1과, 원형 기둥을 지나 측면에서 발달하는 Type 2 산란 효과가 본 연구에서도 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 복잡한 해양구조물에서는 Type 1, 2의 상호작용으로 인해 구조물에 손상을 야기하는 vertical jetting 현상이 발생하기 때문에 이에 대한 예측이 중요하다. Vertical jetting은 Type 1, Type 2와 같이 구조물에 의해 산란된 파들의 상호중첩이 일어나면서 국부적으로 수직 상승하는 현상을 말한다.

파 주기  $T=7\text{ s}$ , 파 경사도  $H/L=1/30$ ,  $1/16$ 인 입사파 조건이 고려되었다. 파 경사도에서  $H$ 는 입사파의 파고를 나타내고,  $L$ 은 파장을 나타낸다. Fig. 4~7은 두 가지 입사파 진행방향에 대해 파 경사도에 따라, 최대 진폭( $A_{\max}$ )을 교란되지 않은 입사파의 1차 조화성분 진폭( $A_0$ )으로 무차원화하여 나타내었다. Fig. 4, 5는 입사파의 진행 방향이  $\beta=0^\circ$ 일 때, 파 경사도  $H/L=1/30$ ,  $1/16$ 에 대해 원형 기둥 A, B 주위의 파고 변화를 각각 나타내었다. 파랑이 원형 기둥 B 정면으로 들어올 때, 파 경사도  $H/L=1/30$ 과  $1/16$ 에서 전체적으로 상승하는 최대 파고가 원형 기둥 B의  $225^\circ$ 에서 발생하고 파랑이 원형 기둥 내부 영역으로 진행한다(Fig. 4). 반면에, 내부 영역에서는 원형 기둥 A의  $225^\circ$ 에서 국부적으로 상승하는 vertical jetting현상이  $H/L=1/16$ 에서 두드러지게 나타난다(Fig. 5). 이는 Fig. 8에서 자세히 나타난다. Fig. 9은 파 경사도  $H/L=1/16$ , 파 주기  $T=7\text{ s}$ 일 때, 한 파 주기 안에서 반복적으로 일어나는 파의 흐름을 나타낸 것이다. 전방 2개의 원형기둥 상류부에서 진행되는 입사파의 약 2.5배의 최대 파고가 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

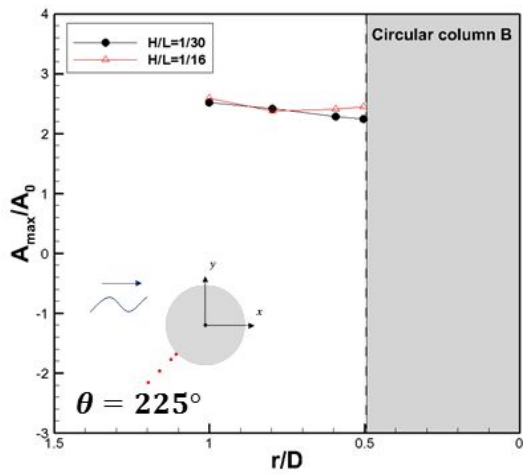
파랑과 정사각형 배열의 원형 기둥 구조물의 상호작용 수치해석



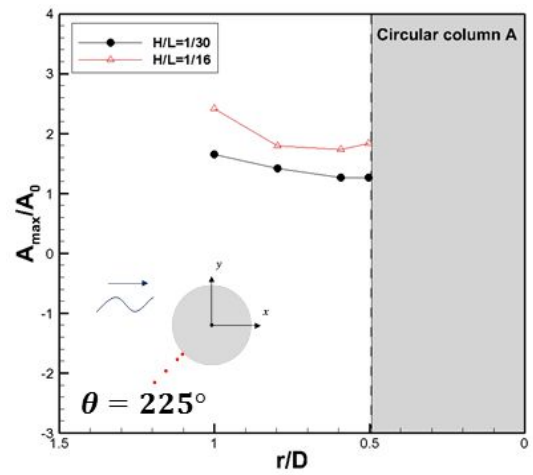
(a) column B with  $\theta = 180^\circ$



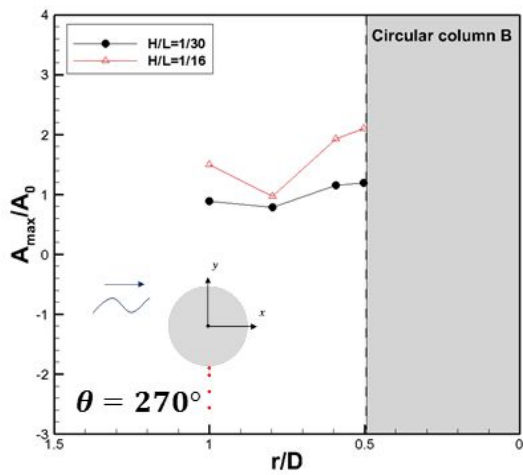
(a) column A with  $\theta = 180^\circ$



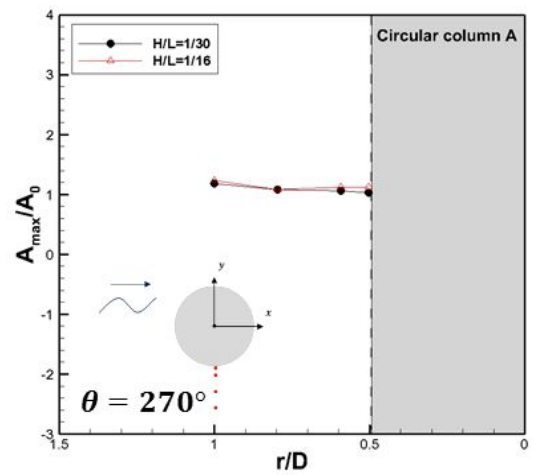
(b) column B with  $\theta = 225^\circ$



(b) column A with  $\theta = 225^\circ$



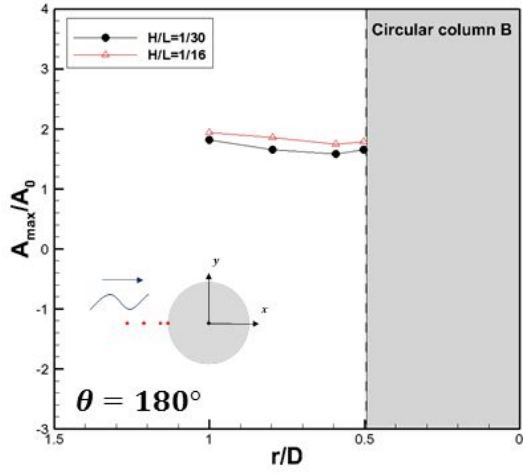
(c) column B with  $\theta = 270^\circ$



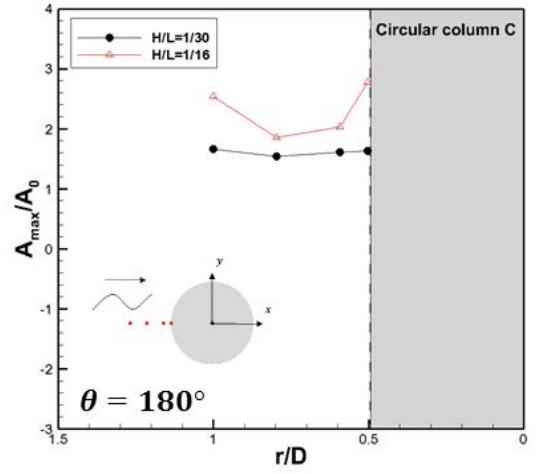
(c) column A with  $\theta = 270^\circ$

Fig. 4. Max. run-up around circular column B at  $T=7s$ ,  $\beta=0^\circ$ .

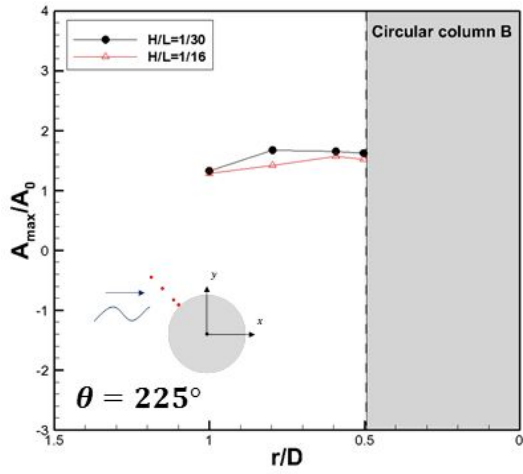
Fig. 5. Max. run-up around circular column A at  $T=7s$ ,  $\beta=0^\circ$ .



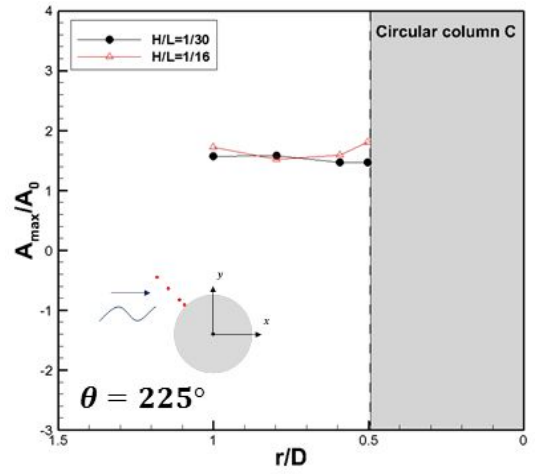
(a) column B with  $\theta = 180^\circ$



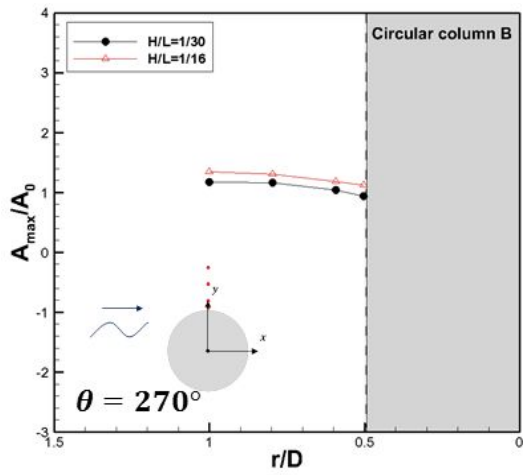
(a) column C with  $\theta = 180^\circ$



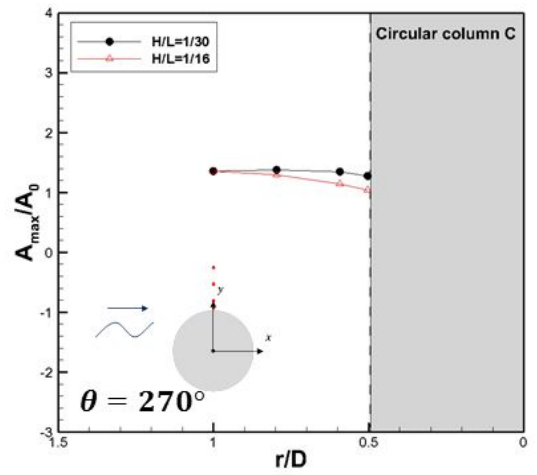
(b) column B with  $\theta = 225^\circ$



(b) column C with  $\theta = 225^\circ$



(c) column B with  $\theta = 270^\circ$



(c) column C with  $\theta = 270^\circ$

Fig. 6. Max. run-up around circular column B at  $T=7s$ ,  $\beta = 45^\circ$ .

Fig. 7. Max. run-up around circular column C at  $T=7s$ ,  $\beta = 45^\circ$ .

파랑과 정사각형 배열의 원형 기둥 구조물의 상호작용 수치해석

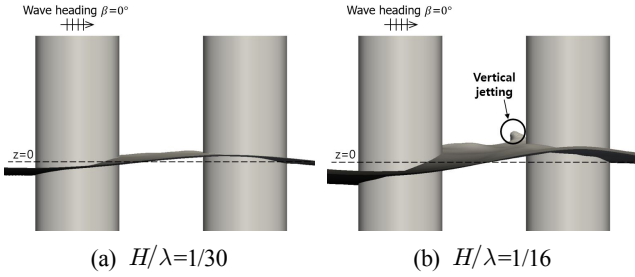


Fig. 8. Vertical jetting flow at  $T=7s$ ,  $\beta = 0^\circ$ .

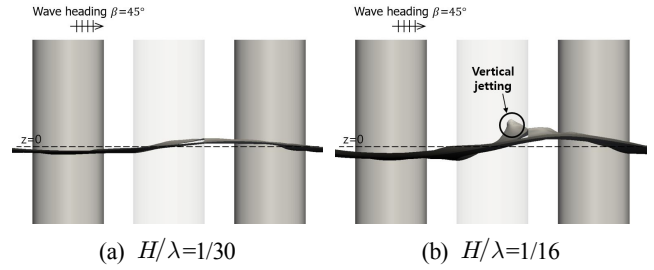


Fig. 10. Vertical jetting flow at  $T=7s$ ,  $\beta = 45^\circ$ .

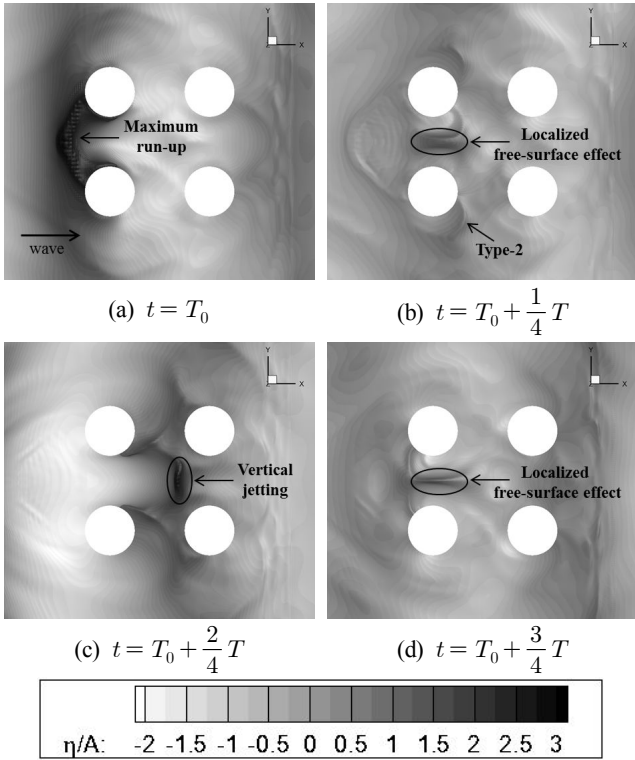


Fig. 9. Scattered wave field around four cylinders at  $H/\lambda=1/16$ ,  $T=7s$ ,  $\beta = 0^\circ$ .

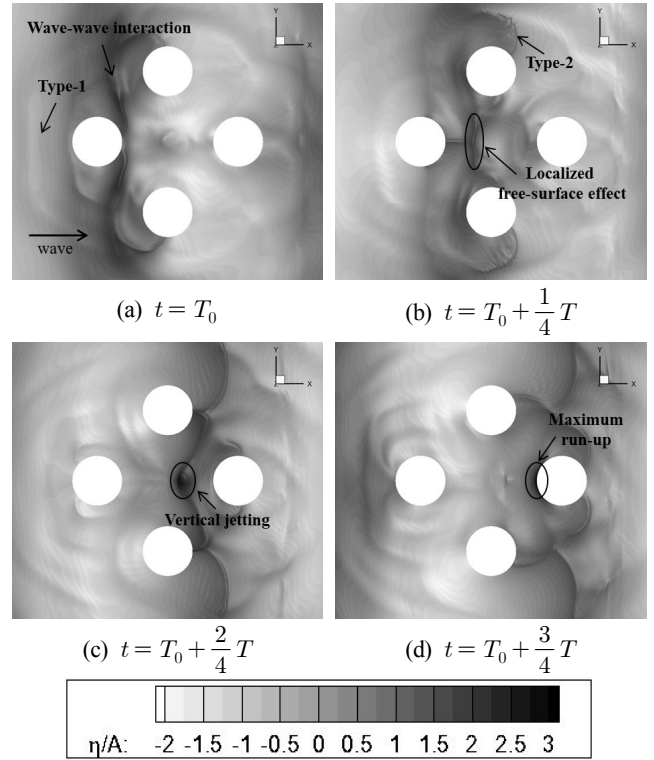


Fig. 11. Scattered wave field around four cylinders at  $H/\lambda=1/16$ ,  $T=7s$ ,  $\beta = 45^\circ$ .

2.4배의 수직으로 상승하는 자유수면 효과가 발생하게 된다 ( $t = T_0 + \frac{2}{4}T$ ). 이후 진입하는 입사파에 의해 2개의 전방 원형 기둥 사이에서 또 다시 국부적인 자유 수면효과가 나타난다 ( $t = T_0 + \frac{3}{4}T$ ). 이러한 물리적 상호작용은 파 주기로 반복되며, 설계 시 중요한 air-gap에 영향을 미친다. Fig. 6, 7은 입사파의 진행방향이  $\beta = 45^\circ$ 일 때, 원형 기둥 B, C 주위의 무차원화된 최대 진폭을 각각 나타내었다. 전체적인 자유수면의 상승은 크지 않다. 하지만, 파 경사도가  $H/L=1/16$ 일 때, 원형 기둥 C의  $180^\circ$ , 즉, 원형 기둥 내부영역에서 자유수면이 국부적으로 상승하는 vertical jetting 현상이 발생하였고 원형

기둥 C의 표면 근처에서 입사파의 진행방향이  $\beta = 0^\circ$ 일 때보다 더 큰 최대 파고가 관측되었다(Fig. 7). 이는 Fig. 10에서 자세히 나타난다. Fig. 11은 입사파의 진행방향이  $\beta = 45^\circ$ , 파 경사도  $H/L=1/16$ , 파 주기  $T=7s$ 일 때, 한 파 주기 안에서 반복적으로 일어나는 파의 흐름을 나타낸 것이다. 파랑이 원형 기둥 B를 지나갈 때 Type 1과, 산란된 파들의 상호작용이 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 파가 원형 기둥 C를 지나 가면서 입사파의 2.8배의 최대 wave run-up이 원형 기둥 C의 표면 전방에서 발생하게 된다( $t = T_0 + \frac{3}{4}T$ ).

입사파의 진행 방향과 파 경사도에 따른 파랑 구조물 상호 작용을 예측하였다. 파 경사도가  $H/L=1/30$ 일 때,  $H/L=1/16$ 보다 전체적으로 낮게 예측되었지만 그 경향은 비슷하게 나타났다. 또한, 구조물에 의해 산란된 파들이 상호 중첩하는 위치에서는 파 경사도가 클수록 상대적인 파고가 더욱 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

전산유체역학 오픈소스 라이브러리인 오픈폼(OpenFOAM)을 사용하여 규칙파 중 정사각형 배열의 원형 기둥을 대상으로 wave run-up과 원형 기둥 주위에서 일어나는 상호작용에 대해 해석하였다. 본 연구는 기저 slover인 interFoam을 이용하여 이상유동(two-phase flow)을 해석하고, 파 경계조건을 구현하기 위해 “waves2Foam“을 사용하였다(Jacobsen et al., 2012).

단일 원형 기둥에 대한 검증(Song and Park, 2017)을 바탕으로 정사각형 배열의 원형 기둥에서의 파랑 상호작용을 해석하였다. 파 경사도가 커질수록 원형 기둥 내부영역에서 발생하는 자유수면 상승이 증가한다. 입사파의 진행방향이  $\beta=45^\circ$ 일 때, 원형 기둥 내부영역에서 자유 수면이 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.

## 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] Barlas, B.(2012), Interaction of waves with an array of tandem placed bottom-mounted cylinders, Journal of Marine

Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 103-110.  
 [3] Böckmann, A., C. Pákozdi, T. Kristiansen, H. Jang and J. Kim(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.  
 [4] Bredmose, H. and N. G. Jacobsen(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, pp. 397-404.  
 [5] Büchmann, B., J. Skourup and K. F. Cheung(1998), Run-up on a structure due to second-order waves and a current in a numerical wave tank, Applied Ocean Research, Vol. 20, No. 5, pp. 297-308.  
 [6] Danmeier, D. G., R. K. Seah, T. Finnigan, D. Roddier, A. Aubault, M. Vache and J. T. Imamura(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, pp. 265-274.  
 [7] Eatock Taylor, R. and G. X. Wu(1997), Interaction of steep waves with offshore structures, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 355, pp. 593-605.  
 [8] Evans, D. V. and R. Poter(1997), Near-trapping of waves by circular arrays of vertical cylinders, Applied Ocean Research, Vol. 19, pp. 83-99.  
 [9] Geng, B. L., B. Teng and D. Z. Ning(2010), A time-domain analysis of wave force on small-scale cylinders of offshore structures, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, pp. 875-882.  
 [10] Higuera, P., J. L. Lara and I. J. Losada(2013a), Realistic wave generation and active wave absorption for Navier - Stokes models: Application to OpenFOAM®, Coastal Engineering, Vol. 71, pp. 102-118.  
 [11] Higuera, P., J. L. Lara and I. J. Losada(2013b), Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM®, Coastal Engineering, Vol. 71, pp. 119-134.  
 [12] Jacobsen, N. G., D. R. Fuhrman and J. Fredsøe(2012), A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFOAM, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 70, No. 9, pp. 1073-1088.

- [13] Kriebel, D. L.(1992), Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part II: Wave run-up, *Ocean Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 75-99.
- [14] McCamy, R. and R. Fuchs(1954), Wave forces on piles: a diffraction theory. Technical memo, U.S. Washington D.C.: Army Corps of Engineers.
- [15] Niedzwecki, J. M. and A. S. Duggal(1992), Wave runup and forces on cylinders in regular and random waves. *Journal of Waterway Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 615-634.
- [16] Palomares, G. D.(2015), CFD Simulations on a Partially Submerged Cylinder under Regular Waves Using OPENFOAM, Master's thesis, University of Stavanger, Norway.
- [17] Scolan, Y. M. and S. Malenica(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.
- [18] Seiffert, B., M. Hayatdavoodi and R. C. Ertekin(2014), Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: flat plate, *Coastal Engineering*, Vol. 88, pp. 194-209.
- [19] Sun, L., J. Zang, L. Chen, R. E. Taylor and P. H. Taylor(2016), Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations, *Applied Ocean Research*, Vol. 59, pp. 650-662.
- [20] Song, S. and S. Park(2017), Analysis on Interaction of Regular Waves and a Circular Column Structure, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 20, No. 2, pp. 63-75.

---

Received : 2017. 06. 01.

Revised : 2017. 07. 11.

Accepted : 2017. 08. 28.