

부유식 연직판의 규칙파 모델링을 위한 오픈폼 적용성 검토

Investigation of Applicability of OpenFOAM for Regular Wave Modeling of Floating Vertical Plate

오상호* · 김진우**
Sang-Ho Oh* and Gunwoo Kim**

요 지 : 본 연구에서는 OpenFOAM 기반의 부유식 연직판의 파랑 저감 성능 평가 수치해석 모델링을 수행하였다. Waves2FOAM 라이브러리를 기반으로 내부조파에 의한 파랑 생성 및 스폰지층에 의한 소파 기능을 추가로 적용하였다. 이렇게 추가된 조파 및 소파 기능을 먼저 간단한 2차원 해석으로 검증한 후, Briggs et al.(2001)의 규칙파 실험자료 2가지에 대한 수치모델링을 수행하였다. 모델링 결과는 실험자료와 대체로 잘 일치하였으며, Briggs et al.(2001)에 수록된 WAMIT 수치해석 결과보다 더 좋은 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 부유식 연직판, 신속설치방파제, 오픈폼, 수치 모델링, 전달파

Abstract : This study performed an OpenFOAM-based numerical modeling for simulating performance of wave reduction by a floating vertical plate. Based on the Waves2FOAM library, an internal wave generation and energy dissipation with sponge layers schemes were further implemented. The performance of wave generation and dissipation was first tested with a simple two-dimensional analysis. Then, numerical simulation was carried out with the experimental data of Briggs et al. (2001) for the two regular wave cases. In general, the modeling results agreed well with the experimental data, showing better agreement than the numerical analysis by WAMIT that is included in Briggs et al. (2001).

Keywords : floating vertical plate, rapidly installed breakwater, OpenFOAM, numerical simulation, wave transmission

1. 서 론

해상에서의 작업은 여러 제약 조건으로 육상 작업에 비해 어려움이 많다. 그 중 가장 큰 제약 조건의 하나로 파도에 의한 작업 환경의 어려움을 들 수 있다. 현지 날씨가 좋더라도 해상에서는 먼 바다에서 생성된 파도가 밀려와서 작업환경을 악화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 해상에서 파랑을 감쇠시키기 위해 제안된 방법 중 하나가 미 육군 공병단(US Army Corps Engineering)에서 개발한 신속설치방파제(Rapidly Installed Breakwater; 이하 RIB로 나타냄)이다(Briggs et al., 1999; Briggs, 2001).

처음 군사적인 목적으로 개발되기 시작한 RIB는 미 해군의 해상전력 변경으로 완전한 실용화에는 성공하지 못한 것으로 알려져 있다. 그러나 그 개념은 해상 군사작전뿐만 아니라 민간 부문에서 상업적 용도로 활용될 수 있다(Fowler et al., 1996). 특히 해상 공사 중 비교적 주기가 짧은 파랑의 파

고 저감을 위한 임시 구조물 설치 등에는 활용 가능성이 높다. 또한 미 육군 공병단에서는 RIB 성능을 평가하기 위해 실내 실험실 실험 및 현장실험을 수행하였는데, 그 주요 데이터를 관련 보고서(Briggs et al., 2001)에 공개하였다. 이러한 관점에서 RIB의 성능을 평가하는 수치모델을 개발하고 가용한 실험 데이터를 이용하여 검증하는 연구를 수행하였다. 특히 최근 여러 연구자들에게 관심을 받고 있는 공개 소프트웨어인 OpenFOAM 기반의 수치모델을 구축하고자 시도하였다.

OpenFOAM은 Navier-Stokes 방정식에 근거한 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 프로그램으로 다양한 유동해석에 폭 넓게 적용될 수 있다. 특히 프로그램 소스가 공개된 무료 소프트웨어이기 때문에 라이선스 비용이 매우 비싼 상용 CFD 소프트웨어의 대안으로서 최근 활발하게 연구 및 현업 적용이 이루어지고 있다. 해안공학 분야에서는 파랑 조파 및 소파 기능을 추가로 개발한 라이브러리(예: Waves2FOAM, IHFOAM 등)들이 최근 제공되고 있으며

*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Corresponding author: Sang-Ho Oh, Coastal Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111 Korea, Tel: +82-51-664-3523, coast.oh@gmail.com)

**국립목포해양대학교 해양 · 플랜트건설공학과(Department of Ocean Civil & Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University)

(Jacobsen et al., 2012; Higuera et al., 2013), 국내에서도 잠재 주변의 파랑장 해석에 OpenFOAM 모델을 적용한 연구 (Lee et al., 2016)가 이루어진 바 있다.

2. Briggs et al.(2001)의 수리실험

본 연구에서 수치모델링 대상으로 삼은 수리실험은 미 육군 공병단 평면 조파수조에서 수행되었다(Briggs et al., 2001). Fig. 1은 수조 내에 RIB 구조물이 설치된 모습을 나타낸다. 수조 바닥은 평평하며, 수심은 46 cm로 일정하였다. RIB의 끝은 조파판으로부터의 거리 5.73 m, 수조 한 쪽 벽으로부터의 거리 13.72 m 떨어진 곳에 위치하였다. 두 개의 RIB 다리는 안쪽의 각도가 45°를 이루도록 설치되었다. 길이 9.1 m인 RIB 다리 2개는 16 mm 두께의 강판으로 만들어져 각각 4곳에서 수조 바닥에 단단히 고정되었다.

실험 중 수면변위를 측정하기 위해 Fig. 1에 보인 것처럼 10개의 용량식 파고계가 사용되었다. Table 1에는 10개 파고계의 위치를 나타내었다. 파고계 5개는 입사파 평가를 위한 것이고, 나머지 5개는 RIB에 의해 차폐되는 영역 내로 전달되는 파랑의 전달파고를 평가하기 위한 것이다. 파향 및 주기가 서로 다른 14개의 실험파를 이용하여 계측이 수행되었다. 이 중에서 주기가 서로 다른 규칙파 2개 실험파에 대해 수치모델링을 수행하였다. Table 2에는 수치모델링이 수행된 실험파의 조건을 제시하였다. Briggs et al.(2001)의 보고서에는 이 외에 추가로 1개의 규칙파 실험자료(M120)가 더 있는데, 이 자료는 목표파고와 재현파고의 차이가 크고 계측값의 편차가 커서 본 수치모델링에서 제외하였다.

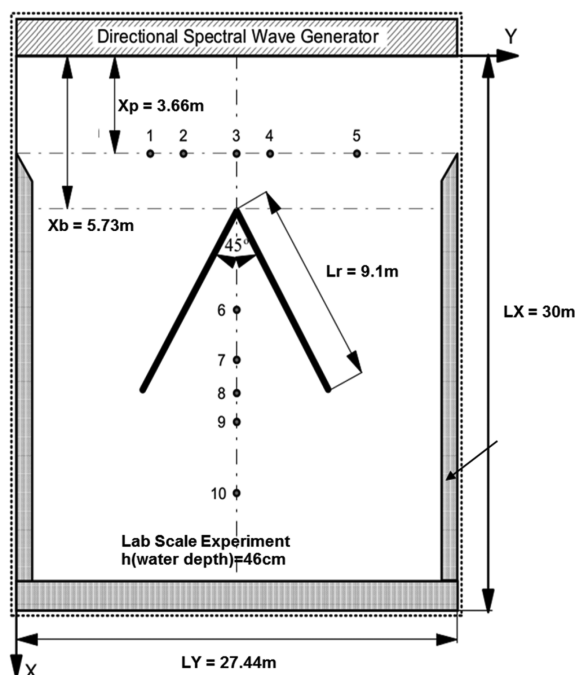


Fig. 1. Schematic view of basin layout of the experiment by Briggs et al. (2001).

Table 1. Wave gauge coordinates (Briggs et al., 2001)

Gage ID	X (m)	Y (m)
(a) Incident wave gauges		
1	3.66	10.67
2	3.66	11.89
3	3.66	13.72
4	3.66	14.33
5	3.66	18.59
(b) Wave transmission gauges		
6	9.54	13.72
7	12.19	13.72
8	14.17	13.72
9	15.42	13.72
10	18.53	13.72

Table 2. Test wave conditions selected from Briggs et al. (2001)

Test ID	Type	T (s)	H (cm)	θ (Deg)
M50	Regular	0.88	3.3	0
M80	Regular	1.41	3.3	0

3. 수치모형 구성

3.1 Waves2FOAM 모델

본 연구에서는 OpenFOAM 기반의 공개 소프트웨어 Waves2FOAM을 이용하여 수치모델링을 수행하였다(Jacobson et al., 2012). OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)은 C++ 언어로 작성된 CFD 소프트웨어로 프로그램 코드가 공개되어 누구나 수정 및 재배포가 가능하다. OpenFOAM은 1990년대 초반 영국 Imperial College에서 개발되기 시작하여 2004년 말부터 GNU-GPL(General Public License) 형태로 공개되었다. 다양한 유체역학 현상 해석을 위한 라이브러리(library) 및 솔버(solver)의 집합으로 구성되어 있으며, 대규모 병렬계산을 지원한다.

OpenFOAM은 라이선스 비용이 발생하지 않고, 해석하고자 하는 물리 현상 전용으로 개발되기 때문에 원시 코드(source code)의 최적화를 통해 독립적인 해석 모델을 구축할 수 있다는 장점이 있다. 반면, 프로그램 언어 및 사용 환경에 익숙해지는데 시간이 소요되며 라이브러리나 솔버가 충분히 개발되지 않은 현상에 대해서는 해석이 어렵다는 단점이 있다. Waves2FOAM은 현재 연안 및 해양공학 분야에서의 OpenFOAM 모델링에서 가장 기본적으로 활용되고 있는 라이브러리로서 여러 형태의 파랑 생성 및 소파 기능을 제공한다. 본 연구에서는 OpenFOAM ver. 2.4.0을 프로그램 개발에 사용하였다.

3.2 지배방정식

OpenFOAM의 지배방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식이며 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{f}_b \quad (2)$$

여기에서 \mathbf{U} 는 유동의 속도 벡터를 나타내고 t 는 시간, p 는 압력, ρ 는 밀도, \mathbf{T} 는 점성응력텐서, \mathbf{f}_b 는 체적력을 나타낸다. 자유수면의 위치는 Eq. (3)~(5)에 의해 정의되는 VOF(Volume of Fluids)법으로 결정된다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \rho_l \alpha + \rho_g (1 - \alpha) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_l \alpha + \mu_g (1 - \alpha) \quad (5)$$

여기에서 α 는 물의 비율을 나타내고 ρ_l 과 ρ_g 는 각각 액체와 기체의 밀도, μ_l 과 μ_g 는 각각 액체와 기체의 점성을 나타낸다. 위 식을 직접 계산하게 되면 수치적인 확산으로 α 의 분포가 넓게 나타나 계산 정확도가 떨어질 수 있다. 따라서 수치확산을 감소시키기 위해 물과 공기의 속도 차이를 상대속도 \mathbf{U}_r 로 정의하여 식을 아래와 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) + \nabla \cdot [(1 - \alpha) \alpha \mathbf{U}_r] = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_l - \mathbf{U}_g \quad (7)$$

여기에서 \mathbf{U}_l 은 물의 속도, \mathbf{U}_g 는 공기의 속도를 나타낸다.

3.3 조파 및 소파 방법

OpenFOAM에 조파 및 소파 기능을 추가한 것이 Waves2FOAM(Jacobsen et al., 2012)이다. Waves2FOAM은 경계에서의 조파를 제공하며, 소파는 완화구간 (relaxation zone)을 통해 구현한다. 본 연구에서는 Waves2FOAM에서 제공하는 기본 조파 방법 외에 추가로 해석 영역 내부에서 조파하는 기법(Lin and Liu, 1999)을 구현하여 적용하였다. 원천함수(source function)를 $s(t)$ 라고 할 때 조파영역에서 연속 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = s(t) \quad (8)$$

$$s(t) = \frac{2C\eta W}{l_x l_y l_z} \quad (9)$$

여기에서 C 는 파 속도, η 는 수면 높이, W 는 조파 영역의 폭이며, l_x , l_y , l_z 는 조파 영역의 x , y , z 방향의 길이를 각각 나타낸다.

또한 조파 영역의 크기와 높이는 Chen and Hsiao(2016)의 방법을 따라 선형파의 정규화된 속도분포에 근거하여 정하였다. 이 방법에 따르면 조파 영역의 윗면(z_{s1})과 아랫면(z_{s2})의

연직 높이 및 파 진행방향으로의 폭(w_s)은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$z_{s1} = h \frac{\cosh^{-1}(0.67 \cosh kh + 0.33)}{kh} \quad (10)$$

$$z_{s2} = h \frac{\cosh^{-1}(0.57 \cosh kh + 0.43)}{kh} \quad (11)$$

$$w_s = 0.01L[-7.53(kh)^2 + 34.06(kh) - 3.56] \quad (12)$$

여기에서 k 는 파수, h 는 수심, L 은 파장을 각각 나타낸다. 조파하려는 파의 파장(주기)이 길어지게 되면 w_s 도 길어지게 되지만 z_{s1} 과 z_{s2} 의 값은 큰 차이가 없다. 즉, 파장에 따라 조파 영역의 연직 두께에는 큰 차이가 없고 파 진행 방향으로의 폭만 유의미하게 달라진다.

한편 파 에너지의 소파를 위해서 스폰지층(sponge layer)을 사용하였다. 즉, 식 (2)의 운동량 방정식에 각 방향 성분별로 다음과 같은 감쇠항을 적용하여 에너지를 소산시켰다.

$$-D_x u = \theta_x \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N \quad (13)$$

$$-D_y v = \theta_y \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N \quad (14)$$

$$-D_z w = \theta_z \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left(\frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N \quad (15)$$

여기에서 x_0 와 y_0 는 스폰지층의 시작 위치를, N 과 θ 는 감쇠 계수의 크기 및 분포를 결정하는 파라미터이다. 본 연구에서는 $N=2$ 를 사용했고, θ 의 값은 예비 해석 결과를 통해 x , y , z 방향에 대해 동일하게 $\theta=0.6$ 을 적용하였다.

4. 수치 해석

4.1 2차원 내부 조파 테스트(S2)

3차원 RIB 해석을 수행하기 전에 내부조파 및 스폰지층에서의 에너지 감쇠 성능을 평가하기 위한 2차원 수치모델링을 먼저 수행하였다. Fig. 2에 보인 것처럼 $x=0$ 위치에 조파 영역을 설정하였으며, 계산 영역 양 끝 쪽으로 스폰지층을 두었다. 스폰지층의 폭은 파장의 2배로, 스폰지층과 조파 영역 사이의 거리 $D1$ 은 파장의 0.5배로 설정하였다. 한편, 바닥 경계조건은 No-slip 조건을 적용하였다. Fig. 3에는 이러한 구성으로 Stokes 2차 이론을 따르는 규칙파 조파가 이루어졌을 때의 자유수면 분포 모습을 나타내었다. 이 그림으로부터 조파 영역을 중심으로 대칭적으로 파랑이 전파되며 스폰지층에서 에너지가 잘 흡수됨을 확인할 수 있다.

4.2 3차원 RIB 해석(S3)

2차원 영역에서 내부조파 및 스폰지층의 성능평가를 마친

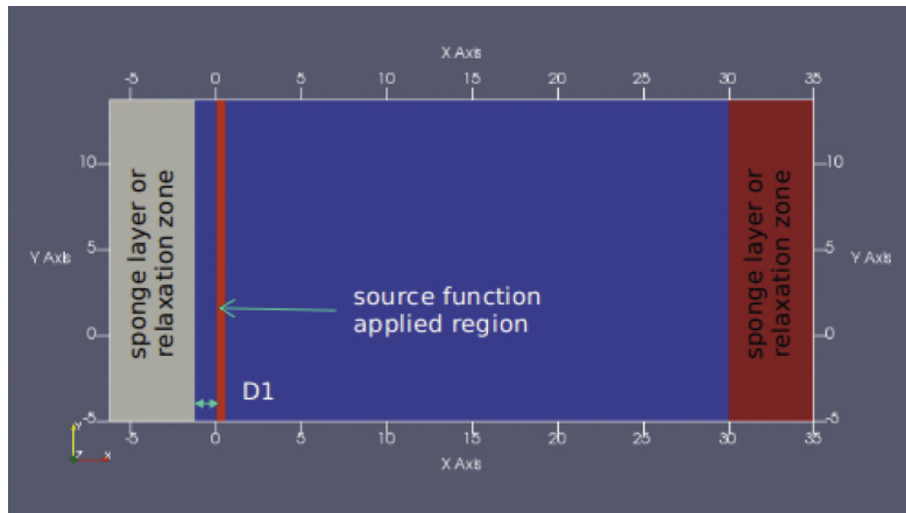


Fig. 2. Plan view of the computational domain for S2 setup.

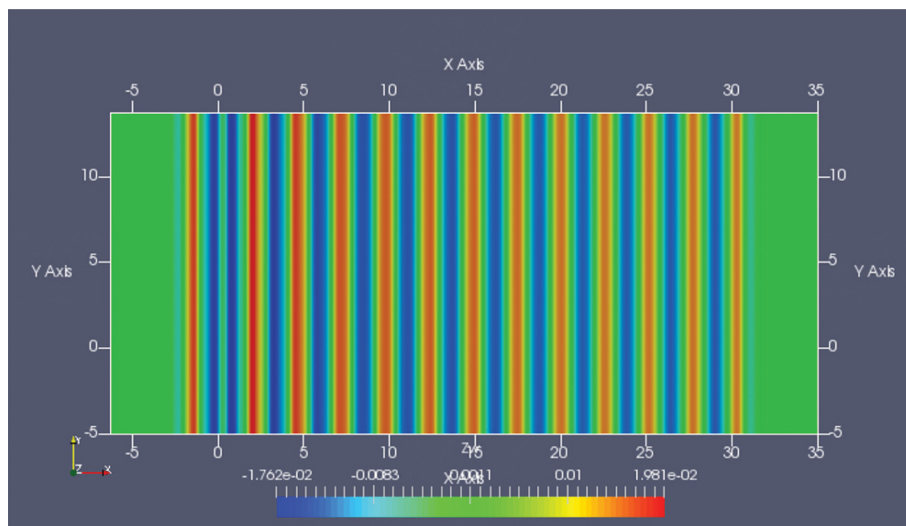


Fig. 3. A snapshot of water surface distribution for S2 setup.

후 Briggs et al.(2001)의 수리실험(Fig. 1)을 재현하기 위한 수치모델링을 수행하였다. Fig. 4에 보인 것처럼 계산 영역을 둘러싼 네 면에 모두 스폰지층을 두어 반사파의 영향을 제거하였다. 바닥 경계조건은 마찬가지로 No-slip 조건을 적용하였다. 격자 간격은 파 진행방향(x) 및 측방향(y)으로 0.04 m의 균등격자를, 연직 방향(z)으로는 0.005~0.0575 m의 가변격자를 적용하였으며, 이에 따른 총 격자 수는 16,293,070개였다. 한편, RIB 구조물은 두께 없는 벽면으로 모델링하였다.

Table 2에 제시된 조건에 대하여 수치모델링을 수행하였고, Fig. 5에는 $T=1.41$ s인 경우의 수면변위 모습을 제시하였다. 조파선에서 조파된 파가 계산 영역 내로 전파되며 네 면의 스폰지층에서 파랑 에너지가 잘 흡수됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6과 7에는 RIB 구조물 전면에서의 정압력과 동압력의 분포 그림을 제시하였다. 한편 파고 평가는 각 조건 별로 Table 1에 제시된 열 군데(Gauge 1~10)에서 조파 시작 후 40초에서 50초까지 10초 동안의 수면변위 자료를 추출하여

수행되었다. Fig. 8에는 Briggs et al.(2001)에서 제공하는 파고 관측 자료와 수치모델링 결과를 비교한 결과를 제시하였다. $x=3.66$ m의 값은 파고계 1번부터 5번까지 다섯 개 위치에서의 파고를 평균한 값이며, 나머지는 $y=13.72$ m 단면을 따라서 배치된 파고계 6번부터 10번까지에서의 값이다.

$T=0.88$ s의 경우 RIB에 의해 차폐된 파고계 6번 이후의 파고가 입사파고에 비해 훨씬 작아 RIB에 의한 파고 저감 효과가 확실하게 나타남을 알 수 있다. 반면 $T=1.41$ s의 경우 파고계 6번 이후에서의 파고가 입사파고에 비해 그다지 작아지지 않음을 알 수 있다. 대체로 실험자료와 수치모델링 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

한편, Fig. 9에는 두 가지 실험과 조건에 대한 수치해석 결과로부터 얻은 전달파고비(K_T)를 실험자료 및 WAMIT 수치모델 결과와 비교한 그림을 제시하였다. WAMIT은 경계적분법(Boundary integral equation method)으로 부유체의 운동 해석에 널리 활용되는 모델로 Briggs et al.(2001)에는 수리

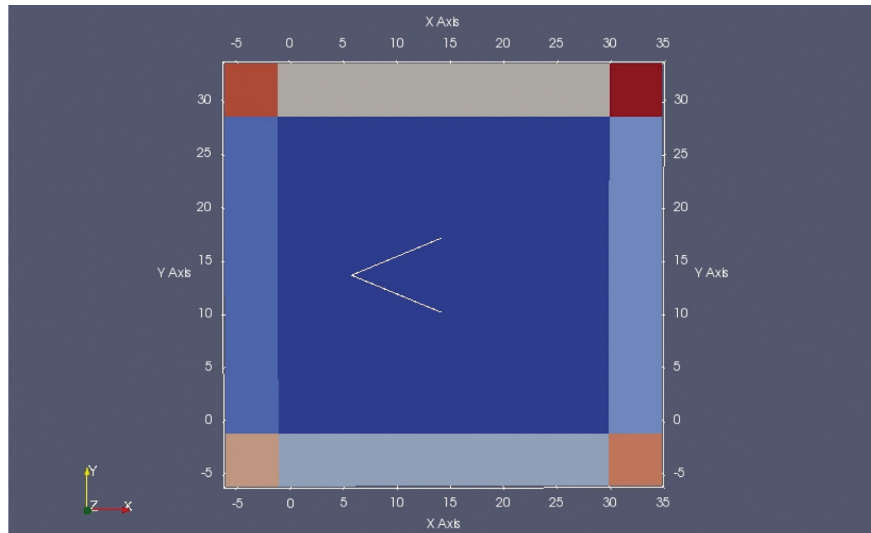


Fig. 4. Plan view of the computational domain for S3 setup.

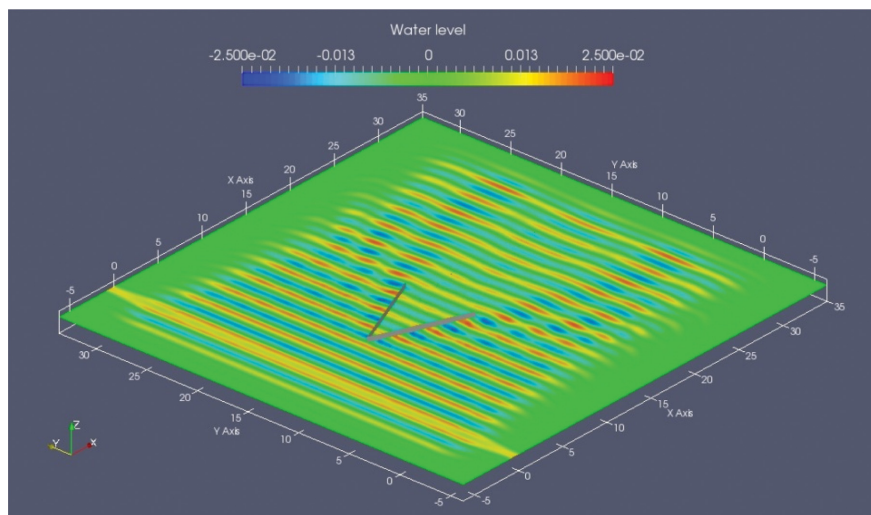


Fig. 5. A snapshot of water surface distribution for S3 setup.

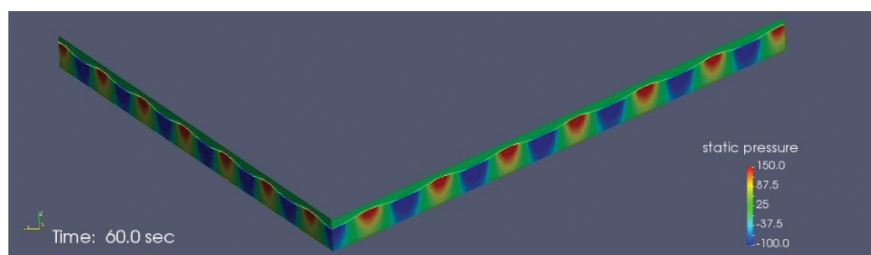


Fig. 6. A snapshot of static pressure distribution for S3 setup.

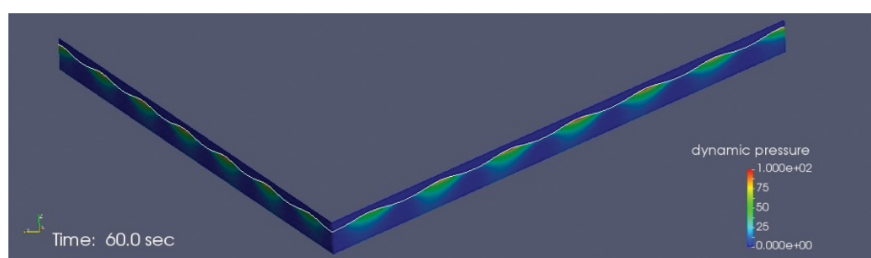


Fig. 7. A snapshot of dynamic pressure distribution for S3 setup.

실험 조건에 대한 WAMIT 해석 결과가 함께 수록되어 있다.

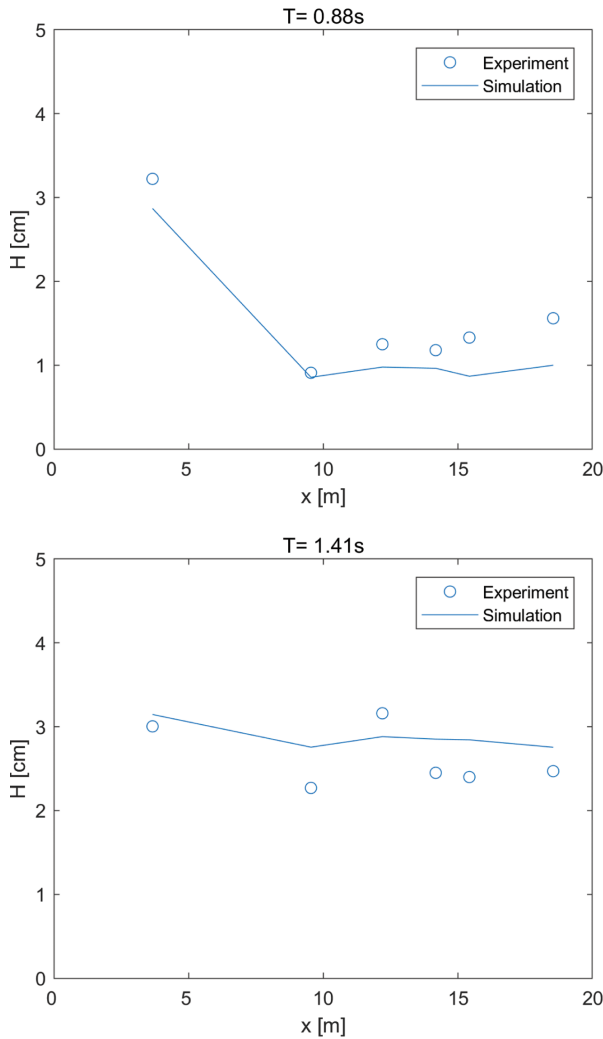


Fig. 8. Comparison of wave height simulation results with the experimental data.

Fig. 9에 보인 것처럼 $T = 0.88$ s 및 $T = 1.41$ s의 경우 WAMIT 보다 본 연구에서 개발된 수치모델이 실험 자료에 더 근접한 결과를 제시하고 있다. Willmott et al.(2012)이 제안한 수정 일치지수(refined index of agreement)는 모델의 예측 정확도를 가장 합리적으로 평가하는 것으로 알려져 있다. Fig. 9의 결과에 대하여 수정 일치지수를 계산해보면 $T = 0.88$ s인 경우 WAMIT은 $d_r = -0.51$, 본 수치모델은 $d_r = 0.32$ 였고, $T = 1.41$ s인 경우 WAMIT은 $d_r = 0.14$, 본 수치모델은 $d_r = 0.38$ 로 나타났다. 수정 일치지수는 -1에서 1 사이에서 변하는 값으로 1에 가까울수록 예측 정확도가 더 높음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 적용한 OpenFOAM 모델이 WAMIT에 비해 Briggs et al.(2001)의 수리실험 결과를 더 정확하게 예측함을 통계적 지표로도 확인할 수 있다.

WAMIT은 근본적으로 자유수면 및 구조물 주변에서의 선형 경계조건을 만족하는 라플라스 방정식의 속도 포텐셜을 구하며, 전달계수는 이 속도 포텐셜의 시간 미분항에 연계되어 구해진다. 따라서 부유식 연직판처럼 구조물 전후에서 속도장의 급격한 변화가 나타나는 물리 현상에 대한 모델링에는

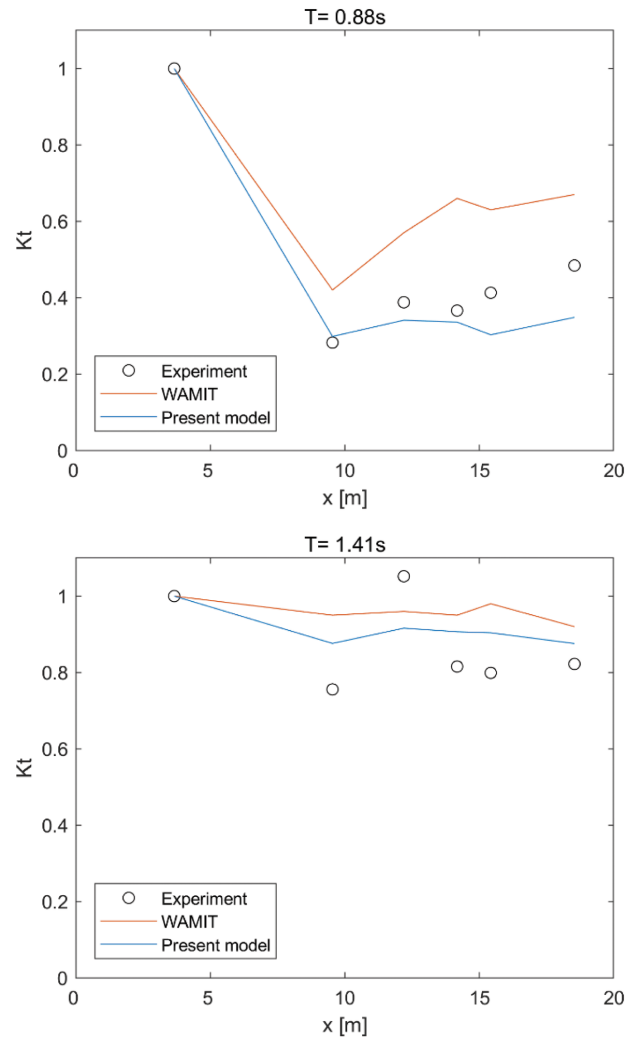


Fig. 9. Comparison of wave transmission coefficients obtained by WAMIT (Briggs et al., 2001) and the present model with the experimental data.

어느 정도 한계를 가지게 될 것이라고 추론해 볼 수 있다. 반면에 본 연구에서 적용한 OpenFOAM의 경우 VOF 기법에 의해 보다 엄밀하게 자유수면을 모델링하며, 난류에 의한 에너지 소산도 수치적으로 고려되므로 WAMIT에 비해서 상대적으로 더 정확하게 부유식 연직판 앞뒤의 파고를 계산하게 된다. Fig. 9에서 WAMIT이 OpenFOAM 모델링에 비해서 전반적으로 전달계수를 더 크게 평가하는 것도 이러한 이유에서 비롯된다고 할 수 있다.

본 수치모델 결과로부터 파고계 6번부터 10번까지의 파고를 평균하여 입사파고로 나누어 전달파고비(K_t)를 계산한 값은 $T = 0.88$ s일 때 0.33, $T = 1.41$ s일 때 0.90이었다. 주기가 길어짐에 따라 전달파고비가 급속하게 증가함을 알 수 있다. Briggs et al.(2001)의 수리실험 축척이 1:32인 점을 고려하면 $T = 0.88$ s는 현장에서 $T = 5$ s에 해당하고, $T = 1.41$ s는 현장에서 $T = 8$ s에 해당한다. 이러한 점을 고려할 때 RIB 구조물에 의한 파랑 저감 효과는 주기 5초 이외의 단주기파에 대해서만 제한적으로 기대할 수 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 전산유체역학 분야에서 적용성이 확대되고 있는 OpenFOAM을 이용하여 미 육군 공병단에서 개발된 부유식 파랑저감장치의 일종인 신속설치방파제(RIB)의 파랑저감 효과를 평가할 수 있는 수치해석 모델을 구현하였다. OpenFOAM을 기반으로 파랑의 조파 및 소파 기능을 제공하여 파랑 모델링을 수행할 수 있는 Waves2FOAM 라이브러리를 활용하여 Stokes 2차 이론을 따르는 규칙파 조파 모델을 구축하였다. Waves2FOAM에서 기본적으로 제공하는 외부조파 및 경계에서의 소파 성능을 개선하기 위하여 내부조파 기법과 스폰지층을 이용한 소파 모듈을 추가로 적용하였다. 이렇게 구축된 수치모델의 적용성을 검토하기 위해서 Briggs et al.(2001)에 제시된 $T=0.88$ s와 $T=1.41$ s 규칙파 실험자료에 대한 수치모델링을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 구축된 수치모델이 부유식 구조물 배후의 전달파고를 비교적 잘 예측함을 확인할 수 있었다. 특히 Briggs et al. (2001)에서 사용된 WAMIT 수치모델에 비해서 실험자료와 더 잘 일치하는 결과를 얻었다. 본 연구에서 구축된 수치모델은 신속설치방파제와 같이 수면에서부터 일정 수심까지 연직으로 설치되는 부유식 연직판의 운동이 구속되어 움직임이 허용되지 않는 경우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업(PE99524)의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 논문을 심사해 주신 심사위원분들의 조언을 받아 논문 내용이 더욱 명료해 졌으며, 이에 감사드립니다

References

Briggs, M.J. (2001). Performance characteristics of a rapidly installed breakwater system,. ERDC/CHL-TR-01-13, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg,

MS.

- Briggs, M., Ye, W., Demirebilek, Z. and Zhang, J. (1999). Comparison of hydrodynamic parameters for a floating breakwater. Proceedings of First International Symposium on Monitoring of Breakwaters, 37-51.
- Chen, Y.L. and Hsiao, S.C. (2016). Generation of 3D water waves using mass source wavemaker applied to Navier-Stokes model. Coastal Engineering, 109, 76-95.
- Fowler, J., Resio, D., Briggs, M. and Pollock, C. (1996). Potential Uses for the Rapidly Installed Breakwater System. Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering In Coastal Engineering, 1631-1639.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®, Coastal Engineering, 71, 102-118.
- Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. Coastal Engineering, 101, 35-47.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70(9), 1073-1088.
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2016). Numerical Analysis on Wave Characteristics around Submerged Breakwater in Wave and Current Coexisting Field by OLA-FOAM. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 28(6), 332-349.
- Lin, P. and Liu, P.L.F. (1999). Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 125(4), 207-215.
- Willmott, C.J., Robeson, S.M. and Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. International Journal of Climatology, 32(13), 2088-2094.

Received 7 December, 2017

Revised 23 December, 2017

Accepted 26 December, 2017