

RANS 난류 모델이 원형 실린더 주위 wave run-up에 미치는 영향에 관한 연구

서인덕*·정광열*·정재환**·조석규**

*넥스트폼(주) 기술연구소

**선박해양플랜트연구소

A Study on the Effect of RANS Turbulence Model on Wave Run-up Around a Circular Cylinder

In-Duk, Seo*, Kwang-Leol, Jeong*, Jae Hwan, Jung**, Seok-Kyu, Cho**

*Research Center, NEXTfoam Co. Ltd, Seoul, Korea

**Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

KEY WORDS: CFD (Computational Fluid Dynamics), OpenFOAM (Open-source Field Operator And Manipulator), VoF (Volume of Fraction), RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equation), Regular wave, Wave run-up, Circular mono-cylinder

ABSTRACT:

Performing a 2D regular wave generation CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis under RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equation) turbulence model using OpenFOAM (Open-source Field Operator And Manipulator), a wave damping phenomenon occurs in which the wave height gradually attenuates as the wave progresses. The reason why wave damping phenomenon is observed is because RANS turbulence models in OpenFOAM do not consider density variation around free surface, which is indispensable when using the VoF (Volume of Fraction) algorithm. To solve such problems, two modified RANS turbulence models, Density-modified model and Buoyancy-modified model, are used. When the modified RANS turbulence models are used, the wave damping problem is improved, but the 2D regular wave generation analysis is not suitable for observing the effect of the buoyancy term because the wave non-linearity is not strong. Therefore in this research, we performed wave run-up CFD simulation around circular mono-cylinder and compare the wave profile results with model test result.

1. 서론

해양환경 중 해양구조물의 거동을 예측하는 것은 해양구조물의 안정성, 운영 효율성 그리고 작업자의 안전성 파악에 있어서 중요한 역할을 한다. 따라서 다양한 해상환경 중에서 가장 큰 영향을 미치는 파랑 중 해양구조물의 동역학적 특성을 추정하기 위한 CFD 해석이 활발히 진행되고 있다. 그 중 open-source CFD toolkit 중 하나인 OpenFOAM의 파랑 생성 라이브러리인 waves2Foam을 이용한 CFD 해석의 활용 폭이 넓어지고 있다.

송성진, 박선호 [2017]의 경우 OpenFOAM 라이브러리를 활용하여 규칙파 중 원형 기둥 구조물 주위의 wave run-up 해석을 수행하였다. 그러나 RANS 난류모델을 이용하여 규칙파 생성 해석 시 파고의 감소 및 파형의 이동(wave shift) 현상이 나타나는 것을 확인하였고 이에 대한 원인이 자유수면 근처에서 난류 에너지 확산이라고 추정하였다. Sun et al[2016]는 27th ITTC Ocean engineering committee [2014]에서 기술되어있는 단일 원형 실린더 주위 wave run-up 조건에 대하여 potential 해석 및 CFD 해석을 수행하였고 MOERI 모형시험 결과와 비교를 하였다. Devolder et al[2017]의 경우 OpenFOAM을 이용하여 원형 기둥 근처에서 wave run-up 해석을 수행할 경우 밀도 구배에

의한 효과가 무시되어 파랑이 감소 된다고 주장하였고 이를 보완하였고 더 나아가 상용코드에서 사용되고 있는 부력 항을 추가하여 Breaking wave CFD 해석을 수행하였다. 또한 Devolder et al[2018]에서는 앞서 개발한 난류 모델을 Breaking wave 해석에 적용하였다. 그 결과 자유수면 근처에서 난류 에너지의 확산이 줄어들었음을 확인하였지만 Breaking wave의 파형의 개선은 확인하기 힘들었다.

본 연구에서는 Devolder et al[2017]에서 제시한 Density modified 난류 및 Buoyancy modified 난류모델을 적용하여 3차원 단일 원형 실린더 wave run-up 해석을 수행하여 Buoyancy modified 난류모델이 파랑 생성 CFD 해석에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

2. 해석 기법

2.1. 수치 해석 기법

속도-압력 연성을 위해 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 알고리즘을 사용하였다. 일반적으로 파랑 생성 CFD 해석의 시간차분법은 2nd order Crank-Nicolson scheme을 사용하였다. Gradient scheme으로는 중심 차분법이 사용되

었으며 divergence scheme으로는 Limiter가 적용된 2nd order upwind scheme이 사용되었다.

다상 유동 해석을 수행하기 위해 VoF(Volume of Fraction) 기법이 사용되었으며, 체적분율(α)의 대류항은 TVD(Total Variation Diminishing) 기법 중 하나인 vanLeer가 사용되었다. 자유수면 확산을 막고 날카로운 상경계면을 구하기 위해 자유수면 압축 기법과 OpenFOAM에서 제공하는 FCT(Flux Correction Transport) 기법인 MULES(Multi-dimensionsal Limiter for Explicit Solution) 기법이 적용되었다.

2.2. Wave relaxation zone

규칙과 생성을 위해 입구면 인근 영역과 반사파 억제를 위해 출구면 인근 영역을 relaxation zone으로 설정하였다. Relaxation zone에서는 파 조건에 맞게 속도와 체적분율을 다음과 같이 explicit 한 형태로 계산된다.

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

이때 아래첨자 computed는 이전 step에서 계산된 값을 의미하고 target은 analytic 한 물리량을 의미한다. σ 는 relaxation zone 길이로 무차원화 된 거리로 relaxation 계수인 $\chi(\sigma)$ 를 계산하는데 사용된다. σ 에 대한 $\chi(\sigma)$ 는 다음과 같은 식으로 표현되며 relaxation zone에서 $\chi(\sigma)$ 의 분포는 Fig. 1과 같이 나타난다.

$$\phi = \chi(\sigma)\phi_{computed} + (1 - \chi(\sigma))\phi_{target} \quad (2)$$

$$\chi(\sigma) = 1 - \frac{\exp(\sigma^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1}$$

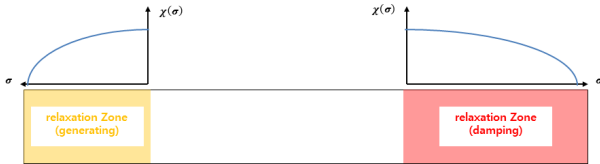


Fig. 1 Relaxation zone & relaxation parameter

2.3. RANS 난류모델

본 연구에서는 3가지 RANS 난류 모델을 사용하여 wave run-up 해석을 수행하였다.

1) $k-\omega$ SST 난류 모델

OpenFOAM에서 제공하는 RANS 난류모델 중 $k-\omega$ SST 난류모델은 식 (3)과 같이 표현된다. 비압축성 유동해석을 수행할 경우 ‘strictly incompressible’ 가정이 적용되어 밀도에 대한 항이 좌우 변에서 소거되어있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] &= P_k - \beta^* w k \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] &= \frac{\gamma}{\nu_t} G - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

2) Density modified $k-\omega$ SST 난류모델

다상유동 해석을 수행할 경우 자유수면 근처에서 밀도는 체적분율(α)에 의한 식으로 표현된다.

$$\rho = \alpha \rho_{liquid} + (1 - \alpha) \rho_{gas} \quad (4)$$

따라서 자유수면 인근에서 밀도는 체적분율에 의한 식으로 표현되기 때문에 일정하지 않다. 따라서 Devolder et al[2017]에서는 밀도 변화를 고려한 Density modified $k-\omega$ SST 난류모델을 제안하였고 이는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] &= \rho P_k - \rho \beta^* w k \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] &= \frac{\gamma}{\nu_t} \rho G - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

3) Buoyant modified $k-\omega$ SST 난류모델

Devolder et al[2017]은 중력에 의한 부력 항을 추가한 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류모델도 함께 제안하였는데 이는 Van Maele & Merci[2006]가 제안한 방법으로 공기 중 열에 의한 부력 효과를 고려한 방법으로 식 (6)과 같이 부력항이 추가된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] &= \rho P_k - \rho \beta^* w k - \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} g_j \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] &= \frac{\gamma}{\nu_t} \rho G - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 해석 조건

3.1. 계산 영역 및 경계조건

전체 해석 영역은 파가 진행하는 방향으로 10λ 로 선정하였고 횡 방향으로는 Sun et al[2016]의 wave run-up 시뮬레이션의 해석 영역을 참고하여 cylinder 지름의 5배로 선정하여 해석 영역을 구성하였다. 해석 영역의 깊이는 1λ 로 선정하여 바닥에 의한 영향을 최소화했으며 높이는 0.5λ 로 선정하였다.

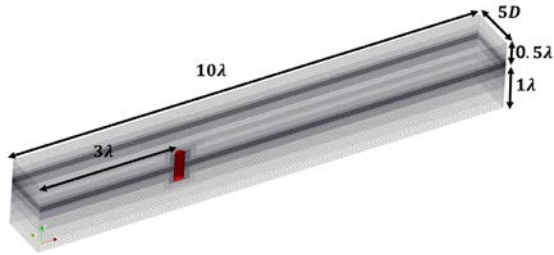


Fig. 2 Domain used in wave run-up simulation

입구 면에서 2λ 그리고 출구 면에서 4λ 떨어진 영역을 wave relaxation zone으로 설정하였으며 원형 cylinder는 입구 면에서 3λ 만큼 떨어진 곳에 위치 한다.

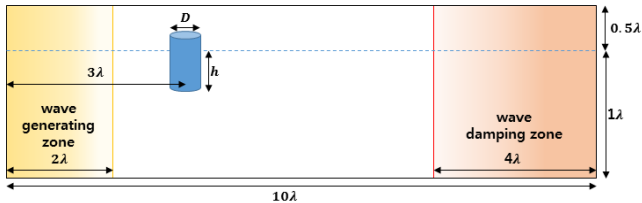


Fig. 3 Wave relaxation zone specification

3.2. 격자 생성 조건

비정렬 격자를 사용하여 해석을 수행하였으며 상경계면을 잘 포착하기 위해 자유수면 인근에서 격자를 z 방향으로 refine 하여 구성을 하였다. 이때 가장 많이 refine 되었을 때 격자 조건은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Unstructured mesh refinement criteria

Refine level	z_{min}	z_{max}	$\lambda/\Delta x$	$\Delta x/\Delta z$
Background	-	-	12.5	2
Refine 1	-0.75λ	0.5λ	25	2
Refine 2	-0.5λ	0.25λ	50	2
Refine 3	-0.25λ	0.125λ	100	2
Refine 4	$-H$	H	200	2

3.3. 파랑 조건

Stokes 5th 파 조건을 사용하였으며 MOERI에서 수행한 Single circular cylinder 모형시험 조건 중 일부를 사용하였다.

Table. 2 Wave specification

Case No.	Period T [s]	Steepness H/λ [·]	Height H [m]	Length λ [m]
wave 1	9	1/30	4.21	126.36
wave 2	7	1/16	4.78	76.44

Table. 2에서 나타난 조건의 경우 실스케일의 파조건이고 모형시험 조건은 축적비 1:50.314 로 축소시켜 수행을 했기 때문에 본 논문에서도 모형시험 스케일에 해당하는 파를 이용하여

해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

4.1. 2차원 규칙파 생성 CFD 해석 결과

먼저 앞서 설명한 격자 criteria 조건 하에서 규칙파 생성이 잘 되는지 확인을 하기 위해 2차원 규칙파 생성 CFD 해석을 수행하였다.

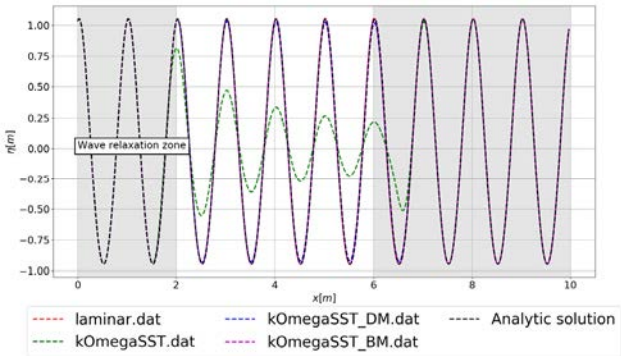


Fig. 4 Wave elevation for wave1 condition

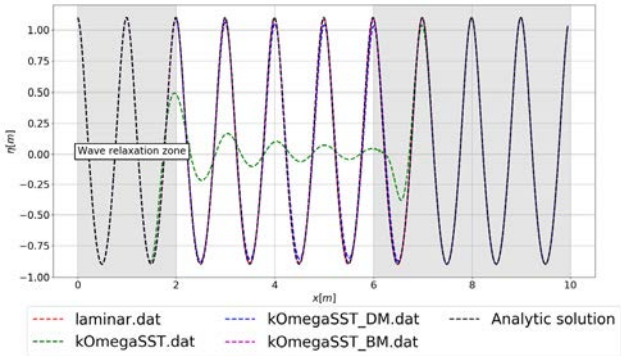


Fig. 5 Wave elevation for wave2 condition

Fig. 5 와 Fig. 6은 2차원 규칙파 생성 해석 수행 후 30 주기가 지난 후 wave elevation 형상이다. $k-\omega$ SST 난류 모델의 경우 파고 감쇠 효과가 발생하여 이론적인 파형을 추정하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그 외의 laminar, density modified $k-\omega$ SST, buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용한 결과 모두 이론적인 stokes 5th 파형을 잘 추정하는 것으로 보아 앞서 설명한 격자 criteria가 유효한 것을 알 수 있다.

4.2. 3차원 원형 실린더 wave run-up 해석 결과

$k-\omega$ SST, Density modified $k-\omega$ SST 그리고 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용하였을 때 wave run-up 해석 결과를 모형시험 결과와 비교하였다. 이때 지정된 위치에서 RAO (1st harmonics) 와 QTF (2nd harmonics) 결과를 비교하였으며 관측한 위치는 다음과 같다.

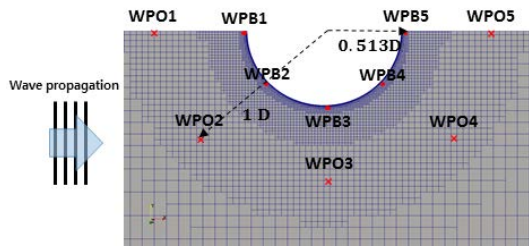


Fig. 6 Wave probe location in 3D wave run-up simulation

Table. 3 Wave probe location

Inner	x [m]	y [m]	Outer	x [m]	y [m]
WPB1	-0.1631	0.0	WPO1	-0.3180	0.0
WPB2	-0.1153	0.1153	WPO2	-0.2249	0.2249
WPB3	0.0	0.1631	WPO3	0.0	0.3180
WPB4	0.1153	0.1153	WPO4	0.2249	0.2249
WPB5	0.1631	0.0	WPO5	0.3180	0.0

RAO(Response Amplitude Operator) 와 QTF(Quadratic Transfer Function) 을 계산하기 위하여 5T ~ 10T 사이의 값을 사용하여 FFT(Fast Fourier Transform) 을 수행하였으며 먼저 wave1과 wave2 의 RAO 결과는 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

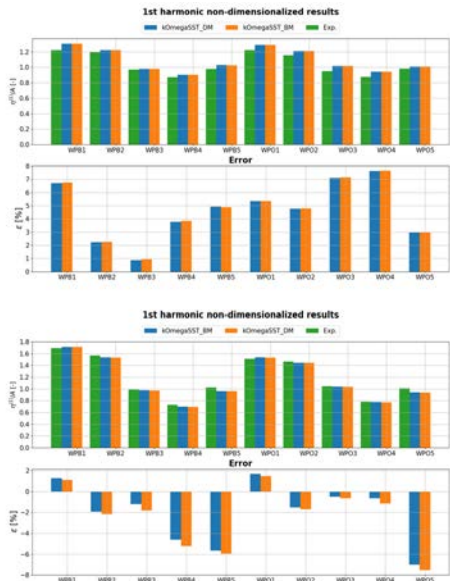


Fig. 7 RAO results for wave1 & wave2
wave1과 wave2 의 QTF 결과는 다음과 같다.

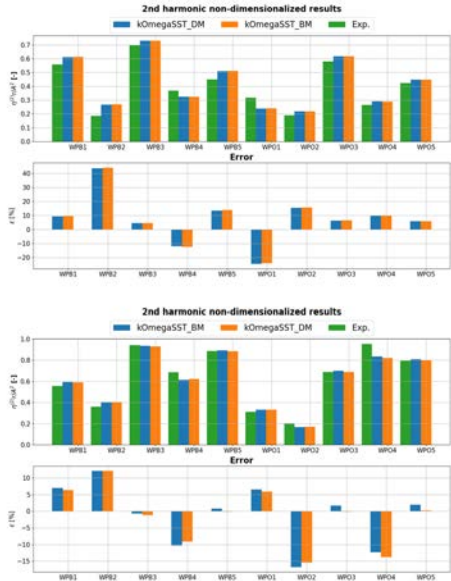


Fig. 8 QTF results for wave1 & wave2

Density modified $k-\omega$ SST 난류모델 과 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 적용하였을 때 wave1과 wave2의 RAO 및 QTF 결과 모두 큰 차이를 보이지 못하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 원형 실린더 주위의 wave run-up 해석을 수행하였다. 이 때 사용된 난류 모델은 Density modified $k-\omega$ SST 난류모델 과 Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델을 사용하였는데 자유수면의 비선형성이 강할 때 Buoyancy modified 난류 모델을 사용한 결과가 더 정확하라는 예상과는 달리 Density modified 난류모델과 Buoyancy modified 난류모델의 결과에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양구조물 전역거동해석 전산유체역학 핵심기술 개발”에 의해 수행되었습니다 (PES3500).

This research was supported by a grant from Endowment Project of “Development of CFD Technology for Global Performance Analysis of Offshore Structure” funded by Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering (PES3500).

참 고 문 헌

Devolder, B., Rauwoens, P., & Troch, P. (2017). “Application of a buoyancy-modified $k-\omega$ SST turbulence model to simulate wave run-up around a monopile subjected to

regular waves using OpenFOAM®". Coastal Engineering, 125, 81-94.

Devolder, B., Troch, P., & Rauwoens, P. (2018). "Performance of a buoyancy-modified $k-\omega$ and $k-\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®". Coastal Engineering, 138, 49-65.

Lee, J. H., Joo, Y. S., & Kim, J. B. (2004). "Development of mechanical structural design technology for liquid metal reactor" (No. KAERI/TR--2704/2004). Korea Atomic Energy Research Institute.

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". Applied Ocean Research, 59, 650-662.

Van Maele, K., & Merci, B. (2006). "Application of two buoyancy-modified $k-\epsilon$ turbulence models to different types of buoyant plumes". Fire Safety Journal, 41(2), 122-138.