Parametric Study on Scouring around Suction Bucket Foundation

Sunho Park*, Seongjin Song*, Haiqing Wang*, Taehwan Joung** and Yunsup Shin***

*Department of Ocean Engineering, Busan, Korea

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

***Norwegian Geotechnical Institute, NGI, Oslo, Norway

파라미터 변화에 따른 석션버킷기초에 발생하는 세굴현상에 대한 수치해석 연구

박선호* · 송성진* · 왕해청* · 정태환** · 신운섭***

*한국해양대학교 해양공학과

**한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(KRISO)

***노르웨이 지반연구소(NGI)

KEY WORDS: Computational fluid dynamics(CFD) 전산유체역학, Scour 세굴, OpenFOAM 오픈폼, Stick-up 석션버킷 돌출 높이, Suction bucket 석션버킷, Monopile 모노파일

ABSTRACT: In the case of fixed offshore wind turbines, scouring phenomena have been reported around sub-structures as a result of currents, which seriously damage the structural stability. A parametric study of the various sub-structures of a fixed offshore wind turbine was performed to investigate their effects on the scouring phenomena. For a suction bucket foundation and monopile, the effects of the stick-up heights and water depth were studied, respectively. The open source libraries, called OpenFOAM, were used to simulate a violent flow around a foundation. The numerical methods were selected based on a two-dimensional analysis of a suction bucket. Based on the results for various stick-up heights, a larger scouring region was observed with an increase in the stick-up height because of the down-wash flow around a foundation. Based on the results for various monopile water depths, the water depth had an insignificant effect on the scouring.

1. 서 론

해상풍력시장의 대부분을 차지하고 있는 유럽과 더불어 국내에서 고려하고 있는 해상풍력발전단지는 비교적 낮은 수심인 수심 60m 이하에 조성되었기 때문에 대부분이 고정식 구조물의 형태를 가지고 있다. 이러한 고정식 해상풍력발전기에서는 터빈의 크기가 커짐에 따라 그에 따른 하중이 증가하게 되고, 해상의 열악한 환경에서 발전기를 안정적으로 지지할 수 있는 해상기초구조물의 설치가 중요하게 작용한다.

고정식 해상풍력발전기와 같이 기초가 해저 면에 고정되어 있는 구조물에서 발생하는 문제점 중의 하나는 Fig. 1과 같은 세굴(Scour)에 의한 침식현상이다. 즉, 해류 및 파랑에 노출된 기초에서 발생하는 세굴은 유체 흐름과 구조물 사이의 상호작용으로 인해 해저 입자가 유실되는 현상으로 정의할 수 있으며, 설계 시 고려하는 하나의 인자이다. 이러한 세굴 현상은 터빈에

작용하는 큰 전복 모멘트를 견뎌야 하는 구조물의 안정성을 저하시키는 요인이며 이에 대한 대응 연구는 매우 중요하다. 또한, 이러한 현상을 물리적인 방법으로 보호하는 방법은 해저지반의 다짐, 기초 부근의 해저지반을 돌로 덮는 방법, 모니터링과 때로는 수리가 필요하다. 하지만, 이는 발전기가 대형화될수록 설치 및 유지보수 비용 증가의 요인이 된다.

해상풍력발전기의 경우 교량교각의 경우처럼 세굴 현상에 대한 연구가 광범위하게 진행되지는 않았지만, 고정식 해상풍력발전기의 운용 기간이 점차 증가함에 따라 관련 세굴 문제에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다(Whitehouse, 1998; Sumer and Fredsoe, 2002). 고정식 해상구조물의 형태는 크게 모노파일(Monopile), 중력식 기초(Gravity-based foundation), 자켓(Jacket), 트라이포드(Tripod), 트리파일(Tri-pile)로 나눌 수 있다. 특히, 가장 단순한 형태인 모노파일은 유럽에서 가장 많이 설치된 구조물이며, 모노파일 주위에서 발생하는 세굴현상에 대한 실험 및 수치적

Received 4 July 2017, revised 4 July 2017, accepted 25 August 2017

Corresponding author Taehwan Joung: +82-(0)42-866-3964, thjoung@kriso.re.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1 Scour around a jacket structure (Whitehouse, 1998)

연구가 주로 수행되어져 왔다(Dargahi, 1989; Pang et al., 2016).

본 연구에서는 석션버켓기초(Suction bucket foundation)의 돌출된 높이와 모노파일의 잠긴 깊이에 따른 세굴현상의 특징을 파악하였다. 수치해석을 위해서는 소스코드가 공개되어 있는 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하였다. 자유수면은 고려하지 않았으며 속도와 압력의 연성에 Pressure Implicit with Splitting of Operators-SemiImplicit Method for Pressure Linked Equations (PIMPLE) 알고리즘을 사용하는 해석자(Solver)인 “PimpleFOAM”을 사용하였다. 속도의 구배를 모사하기 위해 “Swak4Foam”라이브러리를 추가하여 입구 경계조건을 고려하였다.

2. 문제 정의

고정식 해상풍력발전기 하부구조의 가장 일반적인 형태인 모노파일과 석션버켓의 매입 높이(Stick-up height)에 따른 세굴현상을 검토하였다. Fig. 2(a)는 모노파일과 석션버켓기초의 형상을 나타내고, Fig. 2(b)는 해석에 사용되는 문제를 보여주고 있다. 모노파일은 현재 가장 많이 쓰이고 있는 해상풍력발전단지 기초 방식이며 주로 수심 25~30m에 기초부와 하부구조가 일체로 형성된 단일 파일을 지반에 항타(Pile driving) 또는 드릴링하여 설치하는 강제 구조물이다. 반면에, 석션버켓기초는 파일 기초의 대안으로 버켓 내부에 고립된 해수를 펌프를 통해 밖으로 배출하고, 이때 발생하는 내·외부 압력 차에 의한 흡입 압력을 이용하여 시공되는 기초를 말한다. 모노파일과 석션버켓의 구조상 차이는 모노파일은 큰 원통의 실린더가 수심 밖까지 연결되고 그 위에 지지대가 연결되는 구조에 반해 석션버켓은 큰 원통의 실린더가 대부분 해저지반에 관입되고 그 위에 지지대가 위치하는 구조이다. Table 1은 구체적인 해석 조건을 나타낸다. 석션버켓이 관입되는 정도에 따라 해저 면 위로 돌출된 높이 (Stick-up, h)와 수심(d)에 따른 3차원 원형 구조물이 사용되었다. 구조물의 직경(D)은 5m로 설정하였다. 석션버켓 돌출 높이(h)에 따른 영향 해석은 수심을 10m($=2D$)로 고정하고 Stick-up 높이를 0.2, 0.5, 1, 5, 9, 10m로 변경하면서 해석을 진행하였다. 모노파일에 대한 해석은 수심 5m($=1D$)와 20m($=4D$)에 대해 해석을 진행하였다. 또한, 해저 면 위의 유동 평균속도(U_∞)는 2m/s로 설정하였다. 이 속도는 구조물의 직경을 기준으로 레이

(a) monopile & suction bucket

(b) problem description

Fig. 2 Problem description

Table 1 Test cases

	Test case	h [m]	d [m]
Suction bucket	Case 1	0.2 (0.04D)	10 (2D)
	Case 2	0.5 (0.1D)	10 (2D)
	Case 3	1 (0.2D)	10 (2D)
	Case 4	5 (1D)	10 (2D)
	Case 5	9 (1.8D)	10 (2D)
	Case 6	10 (2D)	10 (2D)
Monopile	Case 7	5 (1D)	5 (1D)
	Case 8	20 (4D)	20 (2D)

놀즈수 $Re = 1 \times 10^7$ 에 해당한다. 해양파에 의한 영향은 고려하지 않았다. 본 논문에서 사용된 모노파일 직경, 유동 평균속도, 석션버켓의 직경은 우리나라 서해안에 개발 중인 해상풍력 단지의 정보이다(Seong and Oh, 2014).

3. 계산 방법

3.1 계산영역의 크기, 경계조건 및 격자

Fig. 3은 계산영역의 크기 및 격자를 보여준다. 전체 계산영역은 직사각형 형태로 구성하였고 구조물 직경을 D 로 표현하였을 때, 계산영역 전체 길이는 $20D$ 이며, 구조물 중심에서 입구 경계면까지 $10D$, 출구경계면까지 $10D$ 의 크기로 구성하였다. 폭은 $20D$, 수심은 $2D$ 이다. 모노파일에 대한 계산에서는 수심의 높이만 변경하였다.

Fig. 3 Domain extent and meshes

입구경계면에서는 속도와 난류값을 Dirichlet조건으로 설정하였고, 압력은 Neumann조건으로 설정하였다. 이와 반대로, 출구경계면에서는 속도와 난류값을 Neumann조건으로 설정하였고, 압력은 Dirichlet조건으로 설정하였다. 바닥 면과 구조물 표면은 No-slip 조건으로 설정하였다. 자유수면은 해양파에 의한 세굴의 영향을 적다고 가정하여 해양파를 고려하지 않고 Slip조건으로 설정하였다.

격자를 생성하기 위해 OpenFOAM이 제공하는 자동 격자 생성 유틸리티인 “BlockMesh”, “SnappyHexMesh”를 이용하였다. Fig. 3은 생성된 비정렬 격자를 나타낸다. 세굴에 직접적으로 기인하는 말굽 와류(Horseshoe vortex)의 영향을 정확히 고려하기 위해 바닥 면과 구조물 근처에 격자를 밀집시켰으며, 출구경계면으로 이동할수록 격자의 밀집도를 감소시켰다. 수심 2D인 모노파일을 기준으로 약 300만 개의 격자를 사용하였다.

3.2 수치 방법

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류 모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SSemi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) 알고리즘과 Pressure Implicit with Splitting of Operator(PISO)알고리즘을 혼합한 PIMPLE알고리즘을 적용하였다. SIMPLE알고리즘의 향상된 수렴성으로 계산 비용 감소의 장점과, PISO알고리즘의 비정상 상태에서 비교적 큰 시간 간격에 대해 안정성을 보여주는 장점을 결합하여 해의 수렴성과 안정성을 높이기 위해 PIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 난류모델은 Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation (SADDES)모델(Spalart et al., 2006)을 사용하였다. 여기서, Spalart-Allmaras난류모델은 벽면 근처에서는 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)모델로 계산되며, 벽면에서 떨어진 영역에서는 Large Eddy Simulation(LES)모델로 계산된다. 또한, DDES모델은 Spalart et al.(2006)가 제안한 DES모델의 개선된 버전이며, 원형 실린더와 단일 에어포일에 대한 표면마찰계수(skin friction coefficient)를 실험값과 비교하여 DDES모델이 DES모델보다 더 좋은 계산 결과를 나타내는 것을 보여준 바가 있다(Spalart et al., 2006). 대류항은 Linear와 LinearUpwind scheme을 혼합한 LUST로 차분을 적용하였고, 확산항은 LimitedLinear차분을 적용하여 계산하였다.

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 2차원 모노파일 단면 해석

해상풍력발전기가 설치된 해역은 보통 높은 레이놀즈 수 유동으로 난류 영역에 포함된다. 따라서 적절한 난류 모델을 선정

Fig. 4 Averaged-pressure coefficient distribution around 2-D monopile with three turbulence models

Fig. 5 Drag coefficients of monopile

하기 위해 2차원 모노파일 단면에 대해 RANS모델과 LES모델을 사용하여 계산을 수행하였다. RANS모델은 Realizable $k-\epsilon$ model(Shih et al., 1995)과 SST $k-\omega$ model(Menter, 1993)을, LES 모델은 SpalartAllmarasDDES model(Spalart et al., 2006)을 고려하였다. Fig. 4는 3가지 난류모델에 대한 시간에 따라 평균화된 압력계수분포를 나타낸다. 실린더 후류에서 RANS 모델과 LES모델의 압력분포가 확연히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 2차원 해석을 통해 얻은 실린더의 항력 계수를 실험결과(Massey, 1989)와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 높은 레이놀즈수에서 LES모델의 항력 계수가 RANS모델보다 실험 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 3차원 하부 구조물 해석에는 LES 모델을 사용하였다.

4.2 모노파일 검증 계산

수심이 2D인 case 6을 기준형상으로 설정하여 해석을 진행하였다. 해석 결과는 실험결과(Roulund et al., 2005)와 비교하였다. Fig. 6은 원형 파일 주위에서 발생하는 말굽와류(Horseshoe vortex)를 도식화한 그림이다. 원형 파일 전방에서는 구조물로 인해 하부로 내려오는 하강유동(Down-wash flow)가 발생하고 역류(Back flow) 하면서 말굽 와류가 발생하게 된다. 말굽 와류로 인해 전단력이 음의 값을 가지게 되고 이러한 음의 값이 커진 영역에서 세굴이 발생된다. 결국 말굽와류의 크기는 $z/D=0$ 에서의 바닥 전단응력(Bed shear stress)을 시간 평균하여 추정할 수 있다. Fig. 7은 해저면($y/D=0$, $x/D < 0.5$)에서의 시간 평균 바닥 전단응력 계수(Bed shear stress coefficient τ/τ_{∞})를 실험값과 비교하여 나타내었다. 여기서, τ 는 중앙선에서의 바닥 전단응력을 나

Fig. 6 Horseshoe vortex system around vertical circular pile (Roulund et al., 2005)

Fig. 7 Bed shear stress coefficient at $y/D=0$ and $z/D=0$.

타내고, τ_{∞} 는 모노파일에 의해 교란되지 않은 곳에서의 바닥 전단응력을 나타낸다(Trygslund, 2015). 실험값과 비교해 전단력의 절대값은 다소 차이를 보인다. 이는 본 논문의 계산결과만으로 세굴의 강도를 예측하는 것은 어렵다는 것을 의미한다. 다만 세굴현상과 직접적인 관련이 있는 말굽와류가 시작되는 전단력이 0보다 작은 영역은 유사한 것을 알 수 있다. 이는 비록 세굴의 강도는 예측이 어렵지만 세굴이 발생하는 영역에 대해서는 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

4.3 석션버킷의 매입 높이 영향

트라이포드(Tripod)나 모노포드(Monopod)와 같은 석션버킷의 설치에 있어서 가장 중요한 것은 전복모멘트를 견디기 위한 수평 제어이다. 이를 위해 보통 석션버킷은 해저 면에 완전히 삽입되어야 하지만, 해저 면의 경사 또는 기술적인 문제에 의해 완전히 삽입되지 않는 경우가 있다. 이와 같이 완전히 삽입되지 않아 해저 면 위에 돌출된 석션버킷 돌출 높이(Stick-up)가 하나

Fig. 8 Averaged pressure coefficient contours for cases 1 to 6 at $z/D=0.2$

의 설계인자로 작용한다. 본 연구에서는 실제 해역에서 석션버킷 돌출 높이가 세굴 현상에 미치는 영향을 살펴해보았다.

Fig. 8은 석션버킷 주위 $z=0.02D$ 위치에서의 시간 평균화된 압력분포를 보여주고 있다. 석션버킷 돌출 높이가 1m(Case 3)까지는 유동이 석션버킷 위로 지나가기 때문에 압력변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 5m(case 4) 이상에서는 속도가 가속되는 측면의 압력이 낮아지고 10m에서는 와동 방출로 인해 후류의 압력이 낮게 분포하는 것을 알 수 있다. 일반 실린더 주위 유동과 비교해 주목할 만한 부분은 석션버킷 주위의 압력분포가 링벨트(Ring belt) 모양으로 불연속한 것이다. 이와 같은 불연속은 석션버킷 앞쪽부터 발달하는 말굽와동으로 인해 나타난다. Fig. 9는 수직방향 속도분포와 유선을 나타낸다. Case 1, 2에서는 유동이 위로 지나가기 때문에 하강유동이 뚜렷이 보이지 않는다. 이에 반해 Case 3부터는 석션버킷 돌출 높이로 인해 전면부에서 상승과 하강기류가 보이고 바닥에서는 강한 하강기류 발달한 것을 알 수 있다. 이와 같은 하강기류는 석션버킷 앞쪽에서 발달하면서 유입유와 만나 말굽유동을 유발한다. Fig. 10는 석션버킷 주위의 유선을 보여주고 있다. 석션버킷 돌출 높이가 1m보다 높은 Case 3부터는 말굽와동이 관찰되는 것을 알 수 있다. 또한, 석션버킷 돌출 높이 9m이상에서는 석션버킷 뒤쪽의 박리가 뚜렷하게 관찰되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 Averaged non-dimensionalized z-velocity contours for cases 1 to 6 at $y/D=0$

Fig. 11은 석션버킷 주위의 와류를 나타낸다. 와류는 Q criteria 가 1의 값을 가지는 Iso-surface로 표시하였다. 석션버킷 돌출 높이가 0.2m인 경우는 말굽와류가 발생하지 않지만 높이가 높아질수록 말굽와류가 명확해지고 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12은 석션버킷 주위 해저 면에서의 무차원화된 전단력 분포를 나타낸다. 말굽와류가 발생하는 부위와 석션버킷의 측면 부에서 속도가 가속되어 압력이 낮아져 전단력이 큰 것을 확인할 수 있다. 전단력의 절대값은 세굴심도와 연관된다. Fig. 13는 $y/D=0$ 에서 무차원화된 전단력 분포를 나타낸다. 석션버킷은 $-0.5 < x/D < 0.5$ 에 위치하고 있다. 석션버킷 돌출 높이가 높아질수록 전단력 계수가 0보다 작은 값이 넓은 영역에서 분포하는 것을 알 수 있으며, 이는 말굽와류가 발생하는 영역으로 결국 세굴이 발생하는 영역이 넓어진다는 것을 의미한다. 하지만 석션버킷 돌출 높이가 5m일 때, 9m와 10m보다 세굴 강도에 있어서 큰 차이가 난다. 이는 4.2에서 언급하였듯이, 본 연구에서는 세굴의 영역은 예측 가능하지만, 강도를 예측하는 데 다소 무리가 있다. 따라서 물리적 또는 수치적 원인을 찾기 위해 향후 연구가 필요하다.

Fig. 10 Streamlines around suction bucket foundation for cases 1 to 6

Fig. 11 Vortices structure around suction bucket foundation for cases 1 to 6

Fig. 12 Bed shear stress coefficient contours for cases 1 to 6 at $z/D=0$

Fig. 13 Bed shear stress coefficient distribution for cases 1 to 6 at $y/D=0$

4.4 모노파일의 수심 영향

모노파일의 수심에 대한 영향을 조사하기 위해 3가지 수심 (case 6, 7, 8)에 대한 세굴 현상을 해석하였다. 자유수면에서의 해양파는 고려하지 않았으며, 높이 방향 도메인의 높이를 수심

Fig. 14 Averaged pressure coefficient contours for cases 6 to 8 at $z/D=0.2$

Fig. 15 Streamlines around suction bucket foundation for cases 6 to 8

과 동일하게 설정하였다. 격자크기는 3가지 수심 모두 동일하게 설정하였다. Fig. 14는 $z/D=0.2$ 위치에서의 평균화된 압력분포를 보여주고 있다. 후류에서 발생하는 와류의 세기는 다르지만 전체적인 형상은 매우 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 15는 석션버킷 주위의 유선분포를 보여주고 있다. 석션버킷 전면부에서부터 링벨트 모양으로 위치한 말굽유동이 관찰된다. 석션버킷 후류에서의 박리도 유사하게 관찰되는 것을 알 수 있다.

Fig. 16는 석션버킷 주위의 와류를 나타낸다. 와류는 Q criteria 가 1의 값을 가지는 iso-surface로 표시하였다. 수심이 변화되어도 말굽와류의 위치 및 크기가 거의 유사하게 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 17은 석션버킷 주위 해저 면에서의 무차원화된 전단력 분포를 나타낸다. 석션버킷의 후류를 제외하고는 수심변화에도 분포가 거의 유사한 것을 알 수 있다. 특히, 세굴심도와 연관

Fig. 16 Vortices structure around suction bucket foundation for cases 6 to 8

Fig. 17 Bed shear stress coefficient contours for cases 6 to 8 at $z/D=0$

Fig. 18 Bed shear stress coefficient distribution for cases 6 to 8 at $y/D=0$

있는 전단력의 절대값이 큰 위치와 크기가 거의 동일한 것을 알 수 있다. Fig. 18은 $y/D=0$ 에서의 전단력 분포를 나타낸다. 전단력 분포가 동일한 것을 알 수 있다. 이로부터, 모노파일 주위에서 발생하는 세굴은 수심의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

고정된 해상풍력발전장치의 하부구조물 주위에서 발생하는 세굴현상에 대해 설계 변수를 변경하면서 해석하였다. 전산유체역학해석에는 소스코드가 공개된 오픈폼(OpenFOAM)을 사용하였고, 오픈폼 해석은 압력과 속도를 PIMPLE알고리즘으로 연성하는 “pimpleFOAM”해석자를 사용하였고, 입구경계면에서의 속도분포를 구현하기 위해 “swak4Foam”라이브러리를 해석자와 함께 사용하였다.

석션버킷 돌출 높이를 변경하면서 세굴현상에 대한 해석을 진행하였다. 석션버킷 돌출 높이가 커질수록 석션버킷 전면부에서 하강하는 유동이 발생하고 하강하는 유동이 역류하면서 유입유와 만나 말굽와류로 발달하였다. 말굽와류로 인해 해저면의 전단력이 증가하고 이로부터 세굴이 발생하는 영역을 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 석션버킷 기초의 상부에 트라이포드와 같은 복잡한 형식의 하부구조물을 고려한 경우의 기초

자료로 활용 될 수 있다.

모노파일에 대해서는 수심을 변경하면서 해석을 진행하였다. 수심의 변경에도 불구하고 모노파일 주위의 유동 및 전단력 분포는 거의 동일하게 계산되었다. 이를 통해 모노파일 주위에서 발생하는 세굴에 있어서 수심은 주된 설계인자가 아닌 것을 확인하였다.

본 연구에서는 실제 해역에서 발생하는 세굴에 영향을 미칠 수 있는 요인을 해석해보았다. 이는 해상풍력발전기 지지구조물의 설계단계에서 고려될 수 있다. 향후에는 다양한 환경조건을 고려한 세굴현상 및 세굴심도에 대한 연구가 진행될 것이다.

후 기

이 논문은 미래창조과학부 “신진연구지원사업(2015037577)”의 지원으로 수행되었으며, 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행중인 “해양플랜트 구조안전성평가 체계구축을 위한 구조설계엔지니어링 기반기술 연구(1/3)[PES9050]”의 중 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

References

- Dargahi, B., 1989. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 8(1), 1-12.
- Massey, B.S., 1989. *Mechanics of Fluids*. Van Nostrand Reinhold.
- Menter, F.R., 1993. “Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows. Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida.
- Pang, A.L.J., Skote, M., Lim, S.Y., Gullman-Strand, J., Morgan, N., 2016. A numerical approach for determining equilibrium scour depth around a mono-pile due to steady currents. *Applied Ocean Research*, 57, 114-124.
- Roulund, A., Sumer, B.M., Fredse, J., Michelsen, J., 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401.
- Seong, C.K., Oh, J.H., 2014. Current issue and state of south-west 2.5GW offshore plant farm project. *The Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), 23-26.
- Shih, T. H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., 1995. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238.
- Spalart, P.R., Deck, S., Shur, M.L., Squires, K.D., Strelets, M.K., Travin, A., 2006. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and computational fluid dynamics*, 20(3), 181-195.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J., 2002. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, World Scientific, Singapore.
- Trygslund, E., 2015. Numerical Study of Seabed Boundary Layer Flow around Monopile and Gravity-based Wind Turbine Foundations. Master's thesis, NTNU.
- Whitehouse, R., 1998. *Scour at Marine Structures: A Manual for Practical Applications*, Thomas Telford, London, UK.