

## Flow-3D 모형을 이용한 해상풍력기초 세굴현상 분석

박영진<sup>1</sup>, 김태원<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>서일대학교 토목공학과, <sup>2</sup>(주)지티이

### Analysis of Scour Phenomenon around Offshore Wind Foundation using Flow-3D Model

Young-Jin Park<sup>1</sup>, Tae-Won Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Dept., Seoil University., <sup>2</sup>GTE Co., Ltd.

**요약** 국내·외에서 다양한 형태의 석유 대체에너지는 온실효과 가스를 배출하지 않는 청정에너지로 개발되고 있으며, 특히 해상풍력은 풍력 자원이 풍부하고 육상보다 풍력 감소가 상대적으로 작아 다양하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 해상 풍력기초의 세굴현상을 분석하기 위해서 Flow-3D 모형을 이용하여 모노 파일과 삼각대 파일 기초에 대하여 수치모의를 수행하였다. 직경이 다른(D=5.0 m, d=1.69 m) 모노 파일 형식과 직경이 동일한(D=5.0 m) 모노파일에 대하여 세굴현상을 평가하였다. 수치해석 결과, 동일한 직경을 가진 모노파일에서 하강류가 증가되었으며, 최대세굴심은 약 1.7배 이상 발생하였다. 삼각대 파일에 대하여 관측유속과 극치파랑 조건을 상류경계조건으로 각각 적용한 후 세굴현상을 평가하였다. 극치파랑조건을 적용한 경우 최대 세굴심은 약 1.3배 정도 깊게 발생하였다. LES 모형을 적용하였을 경우 세굴심은 평형상태에 도달한 반면, RNG  $k-\epsilon$  모형은 해석영역 내 전반적으로 세굴현상이 발생하였으며, 세굴심은 평형상태에 도달하지 않았다. 해상풍력기초에 대하여 세굴현상을 평가하기 위해서 수치모형 적용시 파랑조건 및 LES 난류모형을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

**Abstract** Various types of alternative energy sources to petroleum are being developed both domestically and internationally as clean energy that does not emit greenhouse gases. In particular, offshore wind power has been studied because the wind resources are relatively limitless and the wind power is relatively smaller than onshore. In this study, to analyze the scour phenomenon around offshore wind foundations, mono pile and tripod pile foundations were simulated using a FLOW-3D model. The scour phenomenon was evaluated for mono piles: one is a pile with a 5 m diameter and d=1.69 m and the other is a pile with a 5 m diameter. Numerical analysis showed that in the latter, the falling-flow increased and the maximum scour depth occurred more than 1.7 times. For a tripod pile foundation, the measured velocity and the maximum wave condition were applied to the upstream boundary condition, respectively, and the scour phenomenon was evaluated. When the maximum wave condition was applied, the maximum scour depth occurred more than about 1.3 times. When the LES model was applied, the scour depth reached equilibrium, whereas the numerical results of the RNG  $k-\epsilon$  model show that the scour phenomenon occurred in the entire boundary area and the scour depth did not reach equilibrium. To evaluate the scour phenomenon around offshore wind foundations, it is reasonable to apply the wave condition and the LES turbulence model to numerical model applications.

**Keywords** : Flow-3D, LES model, Mono pile, Offshore wind foundation, RNG  $k-\epsilon$  model, Scour phenomenon, Tripod pile

본 논문은 2017년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

\*Corresponding Author : Tae-Won Kim (GTE Co., Ltd.)

Tel: +82-2-6969-7011 email: kimtw00@hanmail.net

Received October 24, 2017

Revised November 2, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

## 1. 서론

지구환경문제에 대한 관심이 증가되고 있는 현실에서, 풍력발전은 석유 대체에너지로서 뿐만 아니라, 이산화탄소 등 온실효과 가스를 배출하지 않는 청정에너지의 발전방식으로 국내·외에서 개발이 증가되고 있다. 특히, 해상풍력은 풍력 자원이 풍부하고, 육상보다 풍력 감소가 상대적으로 작아 전기 출력량이 크기 때문에 신재생에너지원 확보 차원에서 국내·외 해상풍력단지 사업 계획이 수립되어 추진되고 있는 실정이다. Fig. 1은 세계 최대 네델란드 해상풍력단지인 Nysted Offshore Wind Farm의 사진이다.



Fig. 1. Nysted Offshore Wind Farm

하천 내 교각 주변에서 세굴 현상은 발생하며 교각의 안정성 측면에서 세굴보호공을 설치한다. 해양에서 해상풍력발전 기초를 설치할 경우 구조물로 인해 교란된 흐름은 세굴을 유발시킨다. 따라서 해상풍력기초를 계획할 경우 안정성 측면에서 세굴현상을 검토할 필요가 있다. 특히 하천의 경우 교각 세굴보호공에 대하여 다양한 공법들이 설계에 반영되고 있으나, 해양구조물 기초에 대한 연구는 미흡한 상태이다. 이에 본 연구에서는 수치모형을 이용하여 해상풍력기초에 대한 세굴현상을 분석하였다.

수치모형을 이용하여 세굴현상을 예측함에 있어서 본 연구와 연관된 연구동향으로는 양원준과 최성욱(2002)은 FLOW-3D 모형을 이용하여 세굴영향 평가를 함에 있어서 난류모형을 비교·분석 하였다. 전반적으로 수리모형실험 자료와 좀 더 잘 일치하는 난류모형은 LES 모형으로 분석되었다[1]. 여창건 등(2010)은 세굴영향 평가를 위해 FLOW-3D 모형을 이용할 경우 세굴에 미치는 중요한 인자에 대하여 매개변수 민감도분석을 수행하였다. 검토결과, 세굴에 민감한 변수는 유사의 입경, 세

굴조절계수, 안식각 등의 순서로 민감한 것으로 검토되었다[2]. 오명학 등(2012)은 해상풍력발전기초 시설 주변에서 FLOW-3D 모형을 이용하여 세굴영향 검토를 수행하였다. 오명학 등이 검토한 지역은 본 연구 지역과 동일한 지역이나 경계조건 및 세굴평가에서 가장 중요한 평균입경이 다르다. 세굴검토를 위해 수치모형에 입력한 경계조건은 대조기 창조 최강유속 1.0 m/s를 상류경계조건으로, 평균입경은 0.0353 mm를 적용하였다. 이와 같은 조건에서 모노파일에서 발생하는 최대세굴심은 약 5.24 m로 분석되었다[3]. Stahlmann과 Schlurmann(2010)은 본 과업에서 적용할 해상풍력기초와 유사한 기초를 가진 구조물에 대하여 수리모형실험을 수행하였다. 연구대상 지역은 독일 해안가에 의한 해상풍력단지에 대하여 삼각대 형식의 해상풍력기초에 대하여 1/40과 1/12 축척으로 각각 수리모형실험을 수행하였다. 1/40과 1/12 축척에 따라서 세굴분포양상 및 최대세굴심의 위치가 다르게 관측되었다[4].

본 연구에서는 3차원 수치모형인 Flow-3D를 이용하여 세굴현상을 평가함에 있어서, 파일 형상 변화, 경계조건이 다른 경우 및 서로 다른 난류모형을 적용하였을 경우에 대하여 수치해석이 국부세굴 현상에 미치는 영향을 검토하였다. 이와 같은 연구는 향후 수치모형을 이용하여 해상풍력발전 기초에 대하여 세굴현상을 평가함에 있어서 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 Flow-3D 모형

FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc.에서 개발한 3차원 범용 전산유체역학 프로그램이다. 해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 운동량 보존 방정식 및 에너지 방정식을 사용하여 해석하고 있다. 수치기법은 유한차분법(Finite Difference Method)에 FAVOR 기법을 도입한 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하고 있다. 자유표면 해석을 위해 VOF (Volume of Fluid) 방법이 사용되고 있으며, 계산영역 내 복잡한 경계를 잘 표현하기 위하여 FAVOR(Fractional Area /Volume Obstacle Representation) 방법을 이용하고 있다. FLOW-3D는 유체의 난류 해석에 대해서는 혼합길이 모형, 난류 에너지 모형, Standard  $k-\epsilon$  모형,

RNG(ReNomalized Group)  $k-\epsilon$  모형, LES(Large Eddy Simulation) 모형 등을 제공하고 있다. Flow-3D는 유사의 세굴 및 퇴적 현상을 재현하기 위해서 세굴 모형을 제공하고 있다. 이모형은 부유사(suspended sediment)와 고형퇴적물(packed)의 형태로 공간적인 농도분포를 이용하여 해석된다. 부유사는 국지적인 압력경사의 영향으로 인해 유체와 함께 이송(advection)에 의해 이동된다. 부유사는 경계에서 유입되거나 또는 고형퇴적물의 침식(erosion)으로부터 발생한다. 고형퇴적물은 이송되지 않으며, 주변 퇴적물 입자와 결합되어 있는 퇴적물을 말한다. 고형퇴적물은 셀 내에 퇴적물이 차지하는 부피의 비율이 임계압축값(critical packing fraction)보다 크거나 같으며, 유체와의 경계면에서 유체에 의해 부유사 형태로 침식이 일어날 때만 움직인다. 유체의 흐름에 의해 부유사가 발생하면 유체의 평균 점성이 증가하는 것으로 가정한다. 이러한 점성의 증가가 계속되어 퇴적물 농도가 일정한 값에 도달하면 점성은 더 이상 증가하지 않으며 입자들이 서로 고체와 같은 상호작용을 시작한다. 이런 고체와 같은 움직임은 투과성 매체를 통한 흐름으로 가정하여 각 고체 입자의 선형 항력항을 운동량 방정식에 대입함으로써 산정된다[3, 5]. 유사의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}_{s,i}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \mathbf{u}_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla P + \mathbf{F} - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} \mathbf{u}_{r,i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla P + \mathbf{F} \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{u}_{s,i}$ 는 유사의 유속,  $t$ 는 시간,  $\rho_{s,i}$ 는 유사의 밀도,  $f_{s,i}$  유사의 volume fraction,  $P$ 는 압력,  $K_i$ 는 이차 항력계수,  $\mathbf{F}$ 는 항력 또는 점성력,  $\mathbf{u}_{r,i}$ 는 상대유속,  $\bar{\mathbf{u}}$ 는 유체-유사 혼합의 평균유속이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면,

$$\frac{\partial \mathbf{u}_{drift,i}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \mathbf{u}_{drift,i} = \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{s,i}} \right) \nabla P - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} \mathbf{u}_{r,i} \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{u}_{drift,i}$ 는 표류유속(drift velocity),  $\mathbf{u}_{drift,i} = \mathbf{u}_{s,i} - \bar{\mathbf{u}}$ 이다. 이 표류유속은 유사의 운동에 영향을 준다[5].

## 2.2 모형의 구성 및 입력조건

본 연구에서는 2.5GW급의 대규모 해상풍력발전단지 개발 계획이 추진 중인 서남해안의 부안·영광 지역의 실증단지이다. 실증단지의 수심은 7.5 m ~ 10 m 사이로 천해영역이며, 2014.3.28.부터 1개월간 실증단지 내 해상변전소 지점에 대하여 유속을 측정된 결과, 재현기간 50년 빈도에 해당하는 유속은 1.066 m/s, 창조류시 최대 수심은 8.62 m, 낙조류시 7.16 m로 관측되었다. 또한 극치과랑 조건에서 유의파고는 5.97 m, 첨두과 주기는 11.18 초이다. 해저 표층의 퇴적물을 분석한 결과, 세립질 모래로 평균입경은 0.095 mm로 분석되었다[6].

Fig. 2와 같이 파일 직경(D)이 5 m와 1.69 m(d)인 해상풍력기초에 대하여 파일 형상 변화에 따른 세굴현상 모의를 수행하였다. Fig. 3과 같이 해석영역은 조류 방향(x)으로 600 m, 직각방향(y) 방향으로 200 m, 수심방향(z)으로 40 m를 설정하였으며, 격자 간격은 조류 방향은 0.45 m ~ 2.04 m, 직각 방향은 0.67 m ~ 1.02 m, 수심 방향은 0.31 m ~ 0.71 m로 가변 격자를 적용하였다.

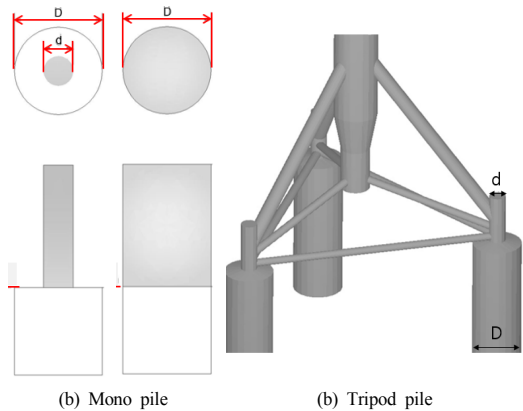


Fig. 2. Shape of Pile

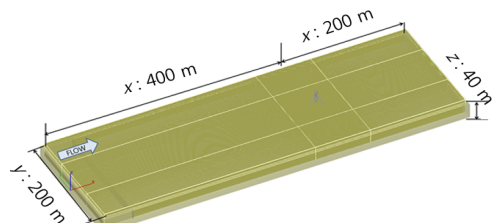


Fig. 3. Boundary Area and Grid of Flow-3D

해상풍력기초에 대하여 상류 경계조건은 실증단지 관측유속인 1.066 m/s와 극치파랑 조건을 적용하였을 경우에 대하여 세굴현상을 비교·분석 하였다. 또한 서로 각기 다른 RNG  $k-\epsilon$ 과 LES 난류 모형을 적용하였을 경우에 대하여 세굴현상을 비교·분석 하였다(Table 1 참조).

### 3. 수치해석 결과 및 분석

#### 3.1 모노파일

Fig. 2와 Table 1에서 직경이 서로 다른 모노파일(Case 1)과 동일한 직경을 가진 모노파일(Case 2)에 대하여 LES 모형을 적용하였을 경우 세굴현상을 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. 서로 다른 직경을 가진 모노파일 주변에서 최대 세굴심은 4.13 m, 동일한 직경을 가진 모노파일 주변에서는 7.13 m의 최대 세굴심이 발생하였다. 기존 연구결과[7, 8]에서는 직경이 동일한 모노파일의 경우 상대세굴심(relative scour depth, S/D)은 1.3 ~ 2.5 범위에 있다고 제안하였다. 본 연구결과 상대세굴심은 1.46으로 기존 연구결과에 부합되고 있다. 최대 세굴심이 다르게 나타난 원인을 분석하고자 Fig. 5와 같이 모노파일 상류 지점에서 조류 방향인 종방향 유속과 연직 방향 유속 즉 하강류(falling-flow)를 분석하였다. 종방향 유속을 분석한 결과, 약 250 초에서 1.0 m/s 차이가 발생하였다. 직경이 서로 다른 모노파일의 경우 상류에서 빠른 유속이 발생하였으나, 세굴현상이 진행됨에 따라서 종방향 유속은 같아지는 것으로 분석되었다. 연직방향 유속인 하강류를 분석한 결과, 약 325초에서 최대 유속 차이는 약 1.8 m/s까지 발생하였다. 즉 직경이 동일한 모노파일의 유속이 4.0 m/s 까지 발생하여 Case 2 보다 최대세굴심이 약 3 m 더 깊게 발생하였다. 수치모의 결과 모노파일 주변에서 하강류는 최대세굴심에 영향을 주는

인자로 이와 같은 결과는 기존 연구결과[9]와 잘 일치함을 보여주고 있다. 따라서 해상풍력기초에 대하여 동일한 직경을 가진 기초 형식보다는 서로 다른 직경을 가진 파일 형식을 적용하였을 경우 세굴현상이 감소될 것으로 예상된다.

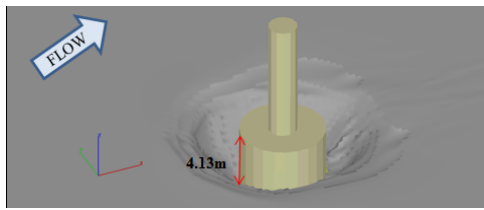
#### 3.2 삼각대 파일

실증단지 내 삼각대 형식의 해상풍력기초가 설치될 경우 세굴현상을 예측하기 위해서 Flow-3D를 이용하였다. 수치모형을 이용하여 세굴현상을 예측함에 있어서 경계조건의 선택은 중요하다. 하천에서 교각세굴 현상을 예측함에 있어서 대부분 상류에 평균유속과 수위를 적용하고 있다. 그러나 해상에서는 하천과 달리 조석 현상이 발생한다. 해상에서 세굴현상을 예측함에 있어서 관측된 평균유속을 적용하였을 경우와 극치파랑조건을 적용하였을 경우 세굴현상이 어떻게 발생하는지를 비교·분석 하였다. 난류모형은 LES 모형을 적용하였으며, 평균입경 0.095 mm이다.

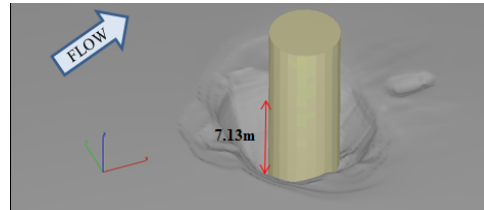
Fig. 6은 상류 경계조건을 각각 다르게 적용하였을 경우 유동현상 및 세굴현상을 분석한 결과이다. Case 3은 평균유속 1.066 m/s를 적용하였을 경우 최대세굴심은 3.90 m가 발생하였으며, Case 4는 극치파랑조건을 적용하였을 경우 최대세굴심이 5.01 m 발생하였다. 극치파랑조건을 적용하였을 경우가 최대세굴심이 약 1.3배 정도 깊게 발생하였다. 상대세굴심은 Case 3이 0.78, Case 4는 1.0이다. 기존 연구결과 삼각대 파일 조건을 가지고 축척 1/12, 극치파랑조건에서 수리모형실험을 수행하였을 때 상대세굴심은 약 1.0에서 1.14정도 관측되었다[4]. 본 연구결과는 기존 연구결과[4]와 잘 일치함을 보여주고 있다. 해상에서 세굴현상을 검토하기 위해서는 기초의 안전성 측면에서 상류 경계조건은 파랑조건을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Table 1. Numerical simulation cases and input data

Case	Shape of pile	Dimension	Boundary Condition		Turbulence Model
			Upstream	Downstream	
1	Mono	D=5.0 m, d = 1.69 m	Velocity	Outflow	LES
2		D=5.0 m			
3	Tripod	D=5.0 m, d = 1.69 m	Velocity	Outflow	LES
4			Max. wave		LES
5					RNG $k-\epsilon$

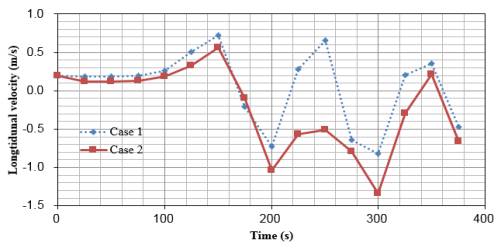


(a) Case 1 ( $D = 5 \text{ m}$  &  $d = 1.69 \text{ m}$ )

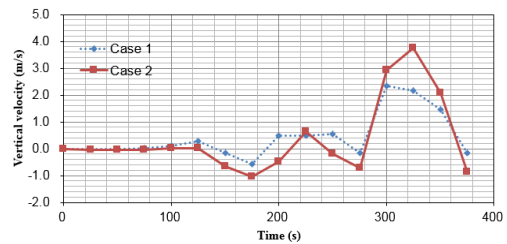


(b) Case 2 ( $D = 5 \text{ m}$ )

Fig. 4. Scour around Monopile

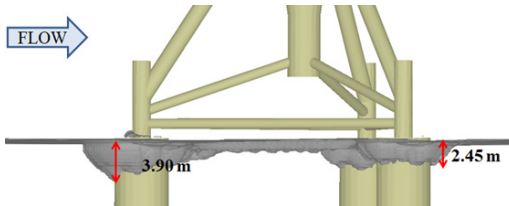
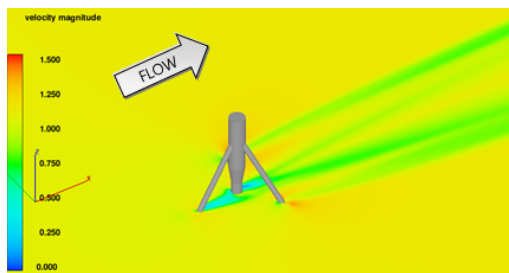


(a) Longitudinal Velocity

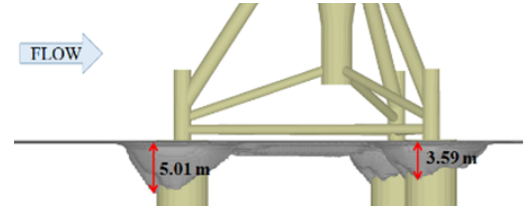
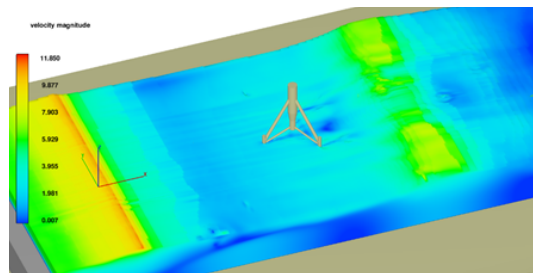


(b) Vertical Velocity

Fig. 5. Velocity Development around Monopile

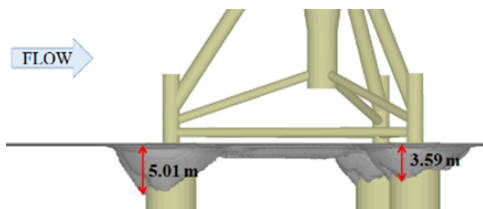


(a) Case 3

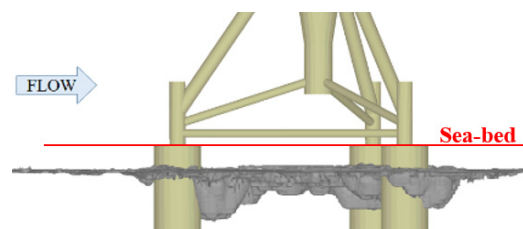


(b) Case 4

Fig. 6. Flow Phenomenon and Scour around Tripod Pile Foundation



(a) Case 4



(b) Case 5

Fig. 7. Scour according to Turbulence Models(RNG  $k-\epsilon$  & LES Model)

실제 흐름은 난류현상이 발생한다. 본 연구에서는 극치파랑조건에서 RNG  $k-\epsilon$ 과 LES 모형을 적용하였을 경우에 대하여 비교·분석 하였다. Fig. 7은  $x-z$  방향에 대한 세굴현상 결과이다. LES 난류 모형을 적용하였을 경우 파일 주변에서 세굴현상이 발생하였으며, 세굴심은 일정 시간이 경과된 후에는 증가되지 않는 평형상태에 도달하였다. RNG  $k-\epsilon$  모형을 적용하였을 경우 전반적으로 해석 영역 전체에서 세굴현상이 발생하여 세굴심을 평가할 수 없었으며, 평형상태에 도달하지 않고 지속적으로 세굴현상이 발생하였다. 3차원 난류에 대하여 수치모의를수행하기 위해서는 Naver-Stokes 방정식을 직접 수치모의 하거나 Naver-Stokes 방정식을 시간 평균한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 수치 해석하는 방법이 있다. LES는 전자에 해당하며, RNG  $k-\epsilon$  모형은 후자에 속한다. LES는 수치모의에 사용된 격자크기 이상의 와(eddy)는 직접 계산하되 이보다 작은 크기의 와는 통계적으로 처리하는 기법으로 난류의 비등방성을 구현할 수 있다. 이에 반해 RNG  $k-\epsilon$  모형은 Yakhot 등(1992)[10]이 개발한 모형으로  $k-\epsilon$  모형에 통계적인 기법을 이용하여 얻은 수정된 모형상수를 적용하여 난류가 Naver-Stokes 방정식에 미치는 영향을 고려하며, 흐름을 등방성 난류로 가정하여 해석하기 때문에 말굽형 와 및 후류 등을 잘 모의하지 못한다[1]. Fig. 7에서 RNG  $k-\epsilon$  모형을 적용하였을 경우 해상풍력기초 주변 뿐만 아니라 해저면에서 전반적으로 세굴현상이 발생하는 것은 통계적 기법에 기반을 두고 난류의 등방성을 가정하였기 때문인 것으로 판단된다. 수치해석 결과, 수리구조물 주변에서 정확한 세굴 현상을 재현하기 위해서는 LES 모형을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 해상풍력기초 형식이 모노파일과 삼각대 파일일 경우 세굴현상을 평가하기 위해서 3차원 수치모형인 Flow-3D를 이용하였다.

직경이 서로 다른( $D=5.0$  m,  $d=1.69$  m) 모노파일과 직경이 동일한( $D=5.0$  m) 모노파일에 대하여 LES 모형을 적용하여 세굴현상을 평가하였다. 서로 다른 직경을 가진 모노파일 주변에서 최대 세굴심은 4.13 m, 동일한 직경을 가진 모노파일 주변에서는 7.13 m의 최대 세굴

심이 발생하였다. 또한 동일한 직경을 가진 파일에서 하강류가 증가되어 최대세굴심이 증가된 것으로 분석되었다. 수치해석 결과, 세굴에 대한 기초의 안정성 측면에서 서로 다른 직경을 가진 기초 형식이 유리한 것으로 분석되었다.

수치모형을 이용하여 세굴현상을 평가함에 있어서 경계조건 및 난류모형의 선정은 중요하다. 본 연구에서는 서로 다른 직경을 가진 삼각대 형식의 해상풍력기초에 대하여 상류경계조건으로 관측유속과 극치파랑조건을 각각 적용하였을 경우 세굴현상을 평가하였다. 극치파랑조건을 적용하였을 경우가 최대세굴심이 약 1.3배 정도 깊게 발생하였다. 또한 극치파랑조건에서 RNG  $k-\epsilon$ 과 LES 모형을 적용하여 세굴현상을 평가하였다. LES 모형을 적용하였을 경우 파일 주변에서 세굴현상이 발생하였으며, 세굴심은 일정시간이 경과된 후에는 증가되지 않는 평형상태에 도달하였다. 그러나 RNG  $k-\epsilon$  모형을 적용한 경우는 평형상태에 도달하지 않고 계속해서 세굴이 진행되어 세굴심을 평가할 수 없었다. 현재 해양구조물 기초에 대한 세굴현상 연구는 미흡한 상태로 하천에서 교각 세굴현상을 검토하기 위해서 적용되는 경계조건을 적용하기보다는 해상 조건인 파랑조건을 적용하여 검토하는 것이 기초의 안정성 측면에서 유리할 것으로 판단된다. 또한 정확한 세굴현상을 예측하기 위해서는 RNG  $k-\epsilon$  모형보다는 LES 모형을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

향후 해상풍력기초에 대한 세굴관측을 수행하여 수치모의 결과와 비교·분석이 필요하며, 또한 다양한 파랑조건에서 난류모형에 대한 비교·분석이 필요할 것으로 생각된다.

#### References

- [1] W. J. Yang, S. U. Choi. "Three- Dimensional Numerical Simulation of Local Scour around the Bridge Pier using Large Eddy Simulation", *Journal of KWRA*, vol. 22, no. 4-B, pp. 437-446, 2002.
- [2] C. G. Yeo, J. E. Lee, S. O. Lee, J. W. Song. "Sensitivity Analysis of Sediment Scour Model in Flow-3D", *Proceedings of KWRA*, pp. 1750-1754, 2010.
- [3] M. H. Oh, O. S. Kwon, W. M. Jeong, K. S. Lee. "FLOW-3D Analysis on Scouring around Offshore Wind Foundation", *Journal of KAIS*, vol. 13, no. 3, pp. 1346-1351, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1346>

- [4] A. Stahlmann, T. Schlurmann, "Physical Modeling of Scour around Tripod Foundation Structures for Offshore Wind Energy Converters", *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China*, no. 32, pp. 1-12, 2010.
- [5] Flow Science. Flow-3D User's Manual. Los Alamos, NM, USA, 2016.
- [6] KEPRI. 『Test Bed for 2.5GW Offshore Wind Farm at Yellow Sea』 Interim Design Report(in Korea), 2014.
- [7] Germanischer Lloyd. Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines. Hamburg, Germany, 2005.
- [8] B. M. Sumer, J. Fredsøe, The Mechanics of Scour in the Marine Environment. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2002.
- [9] S. J. Ahn, U. Y. Kim, J. K. Lee. "Experimental Study for Scour Protection around Bridge Pier by Falling-Flow Interruption", *Journal of KSCE*, vol. 19, no. II-1, pp. 57-65, 1999.
- [10] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, C. G. Speziale, "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids*, vol. 4, no. 7, pp. 1510-1520, 1992.  
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.858424>

---

**박 영 진(Young-Jin Park)**

[정회원]



- 1991년 2월 : 홍익대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 홍익대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 서일대학교 토목공학과 교수

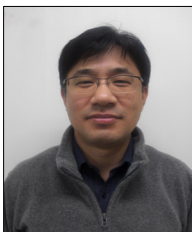
<관심분야>

수자원시스템, 수치해석

---

**김 태 원(Tae-Won Kim)**

[정회원]



- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2005년 1월 ~ 2013년 2월 : 웹솔루스 수자원부
- 2013년 3월 ~ 현재 : (주)지티이 대표이사

<관심분야>

수치해석, 수자원시스템