

# 사질토에 근입된 해상풍력 모노파일 기초의 횡방향 거동 분석

장 화 섭<sup>1)</sup> · 김 호 선<sup>2)\*</sup> · 곽 연 민<sup>3)</sup> · 박 재 현<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 책임연구원, (사)한국선급, 창조기술연구팀 <sup>2)</sup> 선임연구원, (사)한국선급, 신재생에너지연구팀 <sup>3)</sup> 연구원, (사)한국선급, 신재생에너지연구팀  
<sup>4)</sup> 연구위원, 한국건설기술연구원, Geo-인프라연구실

## Analysis of Lateral Behavior of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation in Sandy Soil

Jang, Hwa Sup<sup>1)</sup> Kim, Ho Sun<sup>2)\*</sup> Kwak, Yeon Min<sup>3)</sup> Park, Jae Hyun<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Principal Researcher, Creative Technology Research Team, Korean Register of Shipping, Seoul, 150-871, Korea  
<sup>2)</sup> Senior Researcher, New&Renewable Energy Research Team, Korean Register of Shipping, Seoul, 150-871, Korea  
<sup>3)</sup> Researcher, New&Renewable Energy Research Team, Korean Register of Shipping, Seoul, 150-871, Korea  
<sup>4)</sup> Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea

**ABSTRACT** : To predict behaviors of offshore wind turbines which are highly laterally loaded structures and to design them rationally, evaluating the soil-foundation interaction is important. Nowadays, there are many soil modeling methods for structural analysis of general structures subjected to vertical loads, but using the methods without any consideration for design of a monopile foundation is eschewed because it might cause wrong structural design due to the deferent loading state. In this paper, we identify the differences of the member forces and displacements by design methods. The results show that fixed end method is barely suitable for monopile design in terms of checking the serviceability because it underestimate the lateral displacement. Fixed end method and stiffness matrix method underestimate the member forces, whereas virtual fixed end method overestimates them. The results of p-y curve method and coefficient of subgrade reaction method are similar to the results of 3D soil modeling method, and 2D soil modeling method overestimates the displacement and member forces as compared with other methods.

**KEYWORDS** : offshore wind turbine, monopile foundation, soil-structure interaction, sandy soil, lateral load-deflection, p-y curve

### 1. 서 론

현재 화석연료의 고갈성과 환경유해성이 범지구적 문제로 대두되고 있으며, 중동 산유국의 정치 불안이 계속되는 가운데, 세계 에너지 소비량은 연평균 2.2%씩 증가하고 있다.

에너지원 확보 경쟁이 심화됨에 따라 유럽연합, 미국, 일본 등의 에너지 선진국 뿐만 아니라 중국 등의 후발 국가들도 신재생에너지 산업에 적극적으로 참여하여 최근 5년간 세계 신재생에너지 시장은 연평균 28.2%의 성장률을 기록하고 있다<sup>[1]</sup>.

특히 우리나라는 에너지 자급률이 8.3%에 불과해 거의 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있으며, 지난 수십 년 간 에너지 다소비형 산업구조를 형성해왔기 때문에 국제 에너지 시장이 급변할 경우 그 경제적 타격은 매우 클 것으로 예상되고 있다. 따라서 우리나라 대체에너지 개발의 일환으로써 신재생에너지원의 개발과 보급은 시급한 문제로 대두되고 있다.

Note.-Discussion open until February 28, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 9, 2013; revised July 10, 2013; approved on July 30, 2013.  
© KSSC 2013

\* Corresponding author

Tel. +82-70-8799-8722 Fax. +82-70-8799-8744  
E-mail: kimhs@krs.co.kr

가용한 신재생에너지원 중 풍력에너지는 지역에 따라 지속적인 에너지 추출이 가능하며, 충분한 경제성을 갖고 있어 국제 에너지 시장에서 매우 빠른 속도로 확대되고 있다. 특히 해상풍력발전은 대규모 발전단지 조성이 가능하고 바람의 난류와 높이 및 방향에 대한 풍속변화가 적기 때문에<sup>[2]</sup>, 유사 조건의 육상풍력발전에 비해 약 1.5~2배의 높은 발전량을 유지할 수 있다. 또한, 국내에서는 경쟁력 있는 조선 해양플랜트 연관산업과의 접목이 가능하여, 세계적인 경쟁력을 보유할 수 있을 것이다<sup>[3]</sup>.

해상풍력 발전의 지지구조물 및 기초의 제작, 설치, 유지관리비용의 비율이 시스템 전체 설치비용의 약 30%를 차지하고 있어, 경쟁력있는 지지구조를 개발하기 위한 최적화된 해석 및 설계가 요구되고 있다<sup>[4]</sup>.

해상풍력발전기의 지지구조로써 모노파일은 직경 4~6m의 강관말뚝으로 해서 지반에 항타 또는 pre-boring 후 그라우팅하여 시공된다. 모노파일 형식은 제작 및 설치가 용이하고 해상풍력 기초 형식 중 비교적 얇은 수심에서 가장 경제적인 것으로 평가되고 있다<sup>[5]</sup>. 이에 따라 모노파일은 1994년부터 지속적으로 개발 및 설치되어왔으며, 현재 세계 해상풍력발전 단지에 기 설치된 기초 형식의 약 80%에 가까운 비중을 차지하고 있다<sup>[6]</sup>.

우리나라에서도 본격적인 해상풍력발전단지 구축을 앞두고 2010년부터 국토해양부 지원 하에 대구경 모노파일의 설계, 시공기술 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 서남해와 같은 얇은 수심에서 높은 경제성을 갖기 때문에 머지않은 시점에 대규모 발전단지에서 국내 적용이 가장 기대되는 해상풍력 기초형식 중 하나로 손꼽을 수 있다.

수평하중을 지배적으로 받는 해상 풍력발전기 설계 시에는 지반-기초구조물의 강성을 정확하게 모사하여야 상·하부구조물에 대한 정확한 거동 예측이 가능하며, 합리적인 설계가 이루어질 수 있다. 하지만 아직 국내에서는 동적/반복 수평하중에 대한 기초구조물의 거동에 관한 연구가 부족한 실정이며<sup>[7]</sup>, 해상풍력발전기의 모노파일 기초에 대한 지반 모델링 시, 여러가지 해석 기법에 대한 충분한 검증 절차 없이 해석 결과를 그대로 사용할 경우 구조물을 과다 또는 과소 설계할 우려가 있다.

해상풍력발전기의 모노파일 기초는 육상의 말뚝기초와 형상 및 시공방법이 유사하지만 지배적인 하중-저항 거동 양상이 상이하므로 안전하고 경제적인 설계를 위해서는 합리적인 거동평가가 선행되어야 한다. 현재 말뚝-지반 사이의 상호작용에 대한 연구는 이론적인 방법이나 수치해석적인 접근으로 다양하게 진행되어 왔다<sup>[8],[9],[10]</sup>. 하지만 수평하중을 지배적으로 받는 해상풍력발전기의 모노파일 기초에 대한 연구는

아직까지 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 육상의 말뚝기초 거동 해석에 대해 제안되어온 다양한 지반-기초 모델링 기법에 대하여 수평하중을 지배적으로 받는 해상풍력발전기의 모노파일 기초의 거동 해석에 적용하고 각 모델링 기법의 특징과 모델링 방법이 해석결과에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 하였다.

## 2. 해석 개요

### 2.1 모노파일 기초 제원 및 지반 특성

Fig. 1에 도시된 바와 같이 해상풍력 발전기는 너셀과 블레이드, 타워 및 TP(transition piece), 기초부로 구성된다. 본 연구 대상 발전기의 규모는 5MW급으로써, 모노파일의 직경은 5m를 가정하였으며, API<sup>[11]</sup>에서 제시하고 있는 직경에 따른 최소 파일 두께를 고려하여 60mm의 파일 두께를 가정하였다. 본 모노파일은 STK 490 강관으로써탄성계수( $E_s$ ) 210,000MPa, 포아송비( $\nu$ ) 0.3, 단위중량( $\gamma_s$ ) 77kN/m<sup>3</sup>의 재료 물성치를 갖는다.

일반적으로 지반조건은 현장마다 각기 상이하고 변동성이 크며, 지층은 다양한 지층이 혼합된 다층지반으로 구성되어 있기 때문에 특정 현장의 지반조건을 반영한 구조물의 거동 분석결과를 타 현장에 그대로 적용하는 것은 무리이다. 따라서 국외 연구에서는 모노파일의 거동을 분석하기 위하여 지반을 사질토와 점성토, 암반층 등의 단일 층으로 고려하여 분석하고 이들 연구결과를 종합 분석하여 다층지반조건에 적용하는 해석을 시도하고 있다<sup>[12],[13],[14]</sup>. 본 연구에서도 사질토

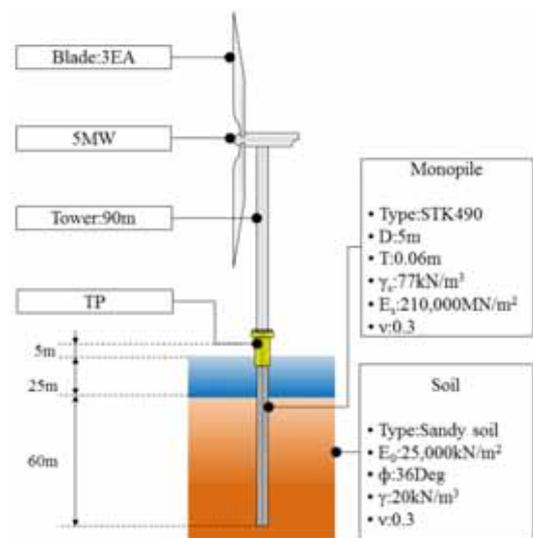


Fig. 1 Analysis condition of offshore wind turbine monopile

지반 거동을 고려한 해상풍력 모노파일 해석 시 지반 모델링 기법에 대한 방향을 제시하고자 함에 따라 효율적인 비교분석을 위하여 국내 서해안 지역의 사질토 지반 특성을 고려한 단일 층으로 지반을 단순화하였다. 이때, 침도에 따른 지반의 유효응력이 반영되도록 모델링하였으며, 지반 물성치는 지반 변형계수( $E_0$ ) 25,000kN/m<sup>2</sup>, 내부마찰각( $\phi$ ) 36 degree, 단위중량( $\gamma_s$ ) 20kN/m<sup>3</sup>, 포와송비( $\nu$ ) 0.3으로 적용하였다.

본 연구에서는 구조물기초설계기준<sup>[15]</sup>과 도로교설계기준<sup>[16]</sup>에서 제시한 극한지지력 산정식과 본 연구에서 적용한 연직하중(Table 1)을 고려하여 모노파일 기초 근입 깊이를 안전측으로 설계하여 60m로 산정하였다. 대구경 말뚝의 지지력 산정 시 선단의 폐색 정도에 따라 강관의 내부부 마찰력을 적용한 지지력과 선단 폐색을 가정하여 산정한 지지력 중 작은 값을 적용하도록 하는 국내 설계기준<sup>[16]</sup>의 제안사항을 반영하였다. 해당 모노파일을 각 지반 모델링 기법에 따라 모

델링하고 해석을 수행하였다. 작용하중에 대한 상세 해석은 다음 절에서 설명하였다.

### 2.2 작용 하중

본 연구 대상 모노파일 기초는 수심 25m의 서해안 해상에 설치됨을 가정하였으며, 수면 위 5m에서 타워부와 결속된다. 따라서 수면 위 5m에 해당하는 부분에서는 바람하중을, 수면 아래에서는 조류 및 파랑하중을 받게 된다.

본 연구에서는 상기 하중에 영향을 미치는 극한환경조건으로써 해당 지역의 10분간 최대풍속 47.4m/s, 조류속도 1.1m/s, 파장 7.5m, 파랑주기 11.1sec를 적용하였다.

상부구조에 작용하는 하중으로써 모노파일 기초의 수평 거동에 영향을 미치는 하중은 회전하는 블레이드에 의해 발생하는 추력과 바람하중이 있으며, 상부구조의 자중은 연직하중으로써 모노파일의 연직 거동에 영향을 미친다. 상기 하중들은 모노파일에 직접 재하되지는 않으나, 모노파일의 수평, 수직 거동에 영향을 미치므로 2.1절에 서술한 바와 같이 모노파일 상부에 작용하는 하중으로 적용시켜 해석을 수행하였다. 각 작용하중의 크기는 ISO 코드에서 정한 바에 따라 Table 2와 같이 산정하였으며<sup>[17],[18],[19]</sup>, 각 산정된 하중의 합력은 해저면 위치에서 수평력 14.1MN, 수직력 10.2MN, 모멘트 329.7MN·m인 것으로 나타났다.

Table 1. 5MW NREL wind turbine<sup>(17)</sup>

Rating	5MW
Rotor orientation	Upwind
Rotor diameter	126m
Hub height	87.6m
Rotor mass	110,000kg
Nacelle mass	240,000kg
Tower mass	347,460kg

Table 2. Offshore wind turbine loads

작용하중	산정식	비고
모노파일 작용하중	바람 프로파일 $U_{w,1h}(z) = U_{10} [1 + C \ln(z/z_r)]$	$U_{10}$ : 기준유지풍속, $C$ : 형상의존계수, $z$ : 해발고도, $z_r$ : 기준높이
	바람하중 스펙트럼 해석 $S(f,z) = \frac{(320m^2/s)(\frac{U_{10}}{U_{ref}})^2 (\frac{z}{z_r})^{0.45}}{(1 + \tilde{f}^n)^{4/(3n)}}$	$U_{10}$ : 기준유지풍속, $U_{ref}$ : 표준풍속 $f$ : 주파수, $z$ : 해발고도, $z_r$ : 기준높이 $\tilde{f}$ : 무차원 주파수
	바람하중 $F_{wind} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$	$C_D$ : 항력계수, $\rho$ : 공기밀도, $V$ : 풍속, $A$ : 바람을 받는 모노파일의 면적
	파랑하중 JONSWAP 스펙트럼 $S_{JS}(w) = F_n \circ S_{PM}(w) \left\langle \gamma^{\exp(-\frac{1}{2})} [(w - w_m)/(\sigma w_m)] \right\rangle$	$\gamma$ : 무차원 피크 형상 파라미터 $\sigma$ : 숫자 파라미터, $F_n$ : 정규화인자
	파랑하중 Morrison 식 $F_{wave} = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + C_D \frac{1}{2} \rho D u  u $	$C_m$ : 관성력 계수, $C_D$ : 항력계수, $u$ : 수립자 속도, $du/dt$ : 수립자 가속도, $D$ : 모노파일 기초 직경, $\rho$ : 물의 밀도
	조류하중 조류속도 $U_c(z) = U_{d0} (\frac{z+d}{d})^\alpha$	$U_{d0}$ : 표면해류속도, $z$ : 수심, $d$ : 정수깊이, $\alpha$ : 지수(1/7)
	조류하중 조류하중 $F_{current} = \frac{1}{2} \rho C_D d A_p U^2$	$\rho$ : 물의 밀도, $C_D$ : 항력계수, $d$ : 정수깊이, $dA_p$ : 단위면적, $U$ : 조류속도
상부구조 작용하중	자 중 $F_{gravity} = F_{nacelle} + F_{blades} + F_{tower}$	-
추력 $F_{thrust} = \frac{1}{2} \rho C_F V^2$	$\rho$ : 물의 밀도, $C_F$ : 추력계수(0.64), $V$ : 바람의 속도	

### 3. 지반 모델링 기법 적용

본 연구에서는 수평하중을 지배적으로 받는 해상풍력발전기의 모노파일 기초부에 대하여 지반 모델링 기법에 따른 거동 해석의 차를 분석하기 위하여 단일 경계조건만으로 지반을 구현하는 고정단 모델, 가상고정점 모델, 지반강성행렬 모델과 모노파일 모델의 각 절점에 대한 스프링 경계조건으로 지반을 구현하는 지반반력계수 모델, p-y 곡선 모델에 의한 해석 결과를 상호 비교하였다. 최종적으로 상기 해석기법의 결과와 지반을 직접 모델링한 수치해석 결과와의 비교를 통해 수평하중을 지배적으로 받는 모노파일 기초에 대한 각 해석기법 적용의 타당성을 검토하였다.

#### 3.1 고정단 모델(Fixed support model)

고정단 모델은 지반을 고정단으로 가정하는 경우로써 모델링 및 해석이 가장 간단하다. 하지만 실제 기초의 연성을 고려하지 못하므로 모노파일의 변위가 과소평가 될 수 있다.

본 연구에서는 해지면 상부 모노파일에 대한 고정단 모델을 구축하고 작용하중을 재하여 단면력을 검토하였다.

#### 3.2 가상고정점 모델(Virtual fixed support model)

가상고정점 모델은 해저 지반 아래 일정 깊이의 가상고정점을 가정하여 지반을 구현하는 방법으로써 모노파일의 직경과 강성 및 지반반력계수를 이용하여 해당 깊이를 산정한다.

즉, 상기 변수를 이용하여 식 (1)과 같이 기초의 특성치

( $\beta$ )를 산정한 후, Fig. 2 (b)에 도시된 바와 같이 해저 지반 아래  $1/\beta$ 인 지점에 가상고정점이 있다고 가정하고 해석을 수행한다<sup>[20]</sup>.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4EI}} \tag{1}$$

여기서,  $k_h$ 는 모노파일 주변지반의 횡방향 지반반력계수,  $D$ 는 모노파일 직경,  $EI$ 는 모노파일의 휨 강성을 각각 의미한다.

본 연구 대상 모노파일 제원에 따라 기초의 특성치  $\beta$ 값은  $0.0588\text{m}^{-1}$ 로 도출되었다. 따라서 가상고정점의 위치는  $1/\beta$  깊이인  $-11.3\text{m}$ 로 고려하여 해당 가상고정점 모델을 구축하고 해석을 수행하였다.

#### 3.3 지반강성행렬 모델(Stiffness matrix model)

일반적으로 모노파일 기초는 3개의 병진운동 성분과 3개의 회전운동 성분으로 구성된 총 6개의 자유도를 갖는다 (Fig. 2(c)). 따라서 모노파일 기초는 6개의 자유도를 갖는 선형 스프링으로 모델링할 수 있으며, 스프링 강성은 다음 식 (2)와 같이 6×6 행렬 형태로 나타내어진다.

$$K_{pile} = \begin{bmatrix} K_{x'} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & K_{y'} & & & & K_{y'\theta_z} \\ & & K_{z'} & & -K_{z'\theta_x} & \\ & & & K_{\theta_x} & & \\ \text{Symm.} & & & & K_{\theta_y} & \\ & & & & & K_{\theta_z} \end{bmatrix} \tag{2}$$

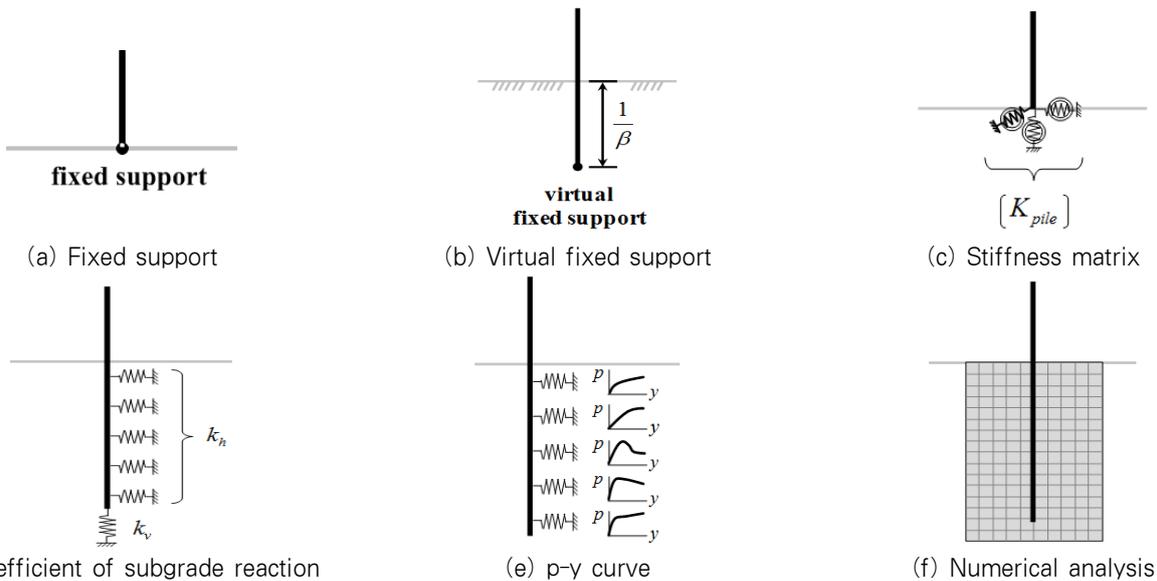


Fig. 2 Analysis model diagram

여기서,  $K_x$ 는 모노파일 기초의 축방향 강성을,  $K_y$ 와  $K_z$ 는 횡방향 강성,  $K_{y'\theta_z}$ 와  $K_{z'\theta_y}$ 는 전단력과 휨모멘트 간의 상호간섭 강성,  $K_{\theta_x}$ 는 비틀림강성,  $K_{\theta_y}$ 와  $K_{\theta_z}$ 는 휨 강성을 각각 의미한다.

### 3.4 지반반력계수 모델(Coefficient of subgrade reaction model)

지반반력계수 모델을 이용한 해석법은 지반이 각각 독립된 일련의 선형 탄성 스프링으로 거동함을 가정한다.

지반반력계수는 지반 특성과 더불어 모노파일 기초 제원 및 강성에 영향을 받는다. 모노파일 기초의 수평반력계수 ( $k_h$ ) 및 연직반력계수( $k_v$ )는 각각 식 (3)과 (4)를 통해 산정한다<sup>[15],[16]</sup>.

$$k_h = 0.339 \times \alpha E_0^{1.1} \times D^{-0.31} \times (EI)^{-0.1} \quad (3)$$

$$k_v = k_{vo} \left( \frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (4)$$

여기서,  $E_0$ 는 지반변형계수,  $\alpha$ 는 지반반력계수 추정계수,  $D$ 는 모노파일의 직경,  $E$ 는 모노파일의 탄성계수,  $I$ 는 모노파일의 단면 2차모멘트,  $k_{vo}$ 는 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상응하는 연직방향 지반반력계수,  $B_v$ 는 기초의 환산 재하 폭을 각각 의미한다.

본 연구에서 지반변형계수( $E_0$ )는 25,000kN/m<sup>2</sup> 값을 가정하였으며,  $\alpha$ 는 평상시에 해당하는 값으로써 계수 4를 적용하였다.  $k_{vo}$  값은 도로교 설계기준에 제시된 바에 따라 다음 식 (5)와 같이 추정하여 산정하였으며, 본 연구 대상 모노파일은 원형의 단면을 갖기 때문에  $B_v$  값은 모노파일의 직경인 5m를 적용하였다<sup>[16]</sup>.

$$k_{vo} = \frac{1}{3} \alpha E_0 \quad (5)$$

전술한 산정 식에 따라 수평반력계수( $k_h$ )는 28,017 kN/m<sup>3</sup>, 연직반력계수( $k_v$ )는 369,183kN/m로 도출되었으며, 해당 값을 각 절점의 경계조건으로 적용하여 해석을 수행하였다. 즉 Fig. 2(d)에 도시된 바와 같이 지반과 접하는 모노파일에 대하여 각 절점에 수평 스프링 계수를 적용하고 모노파일 단부에는 연직 스프링 계수를 추가 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 모델의 절점 간 간격은 1m로 하였으며, 절

점 간격에 따른 해석 결과의 차를 확인하기 위해 0.5m와 2m 절점 간격에 대한 해석을 추가로 수행하였다.

### 3.5 p-y 곡선 모델(p-y curve model)

p-y 곡선 모델은 모노파일 기초를 모델링 한 후, 인접지반의 횡방향 강성을 모노파일 기초와 지반 간의 비선형 관계를 고려한 p-y 스프링으로 구현한다. 지반반력계수 모델을 비롯한 지반강성행렬 모델, 고정단 및 가상고정점 모델은 모노파일 기초에 가해지는 수평하중에 의해 지반이 탄성범위 내에서 압축될 때 얻어지는 변형만을 고려할 수 있으나, p-y 곡선 모델을 이용할 경우 전술한 바와 같이 지반의 비선형성과 더불어 깊이에 따른 지반반력계수의 변화를 종합적으로 반영할 수 있다. 따라서 타 기법에 비해 보다 실제에 가까운 해석 결과를 얻을 수 있다.

다만 각 지반을 대표하는 p-y 곡선을 산정하는 것이 쉽지 않기 때문에 많은 연구자들에 의해 다양한 지반과 하중조건을 고려한 p-y 곡선이 제안되어 왔으며<sup>[21]</sup>, 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 Reese 등<sup>[22]</sup>이 사질토 층에 대하여 제안한 p-y 곡선을 이용하여 해석을 수행하였다.

하중 조건으로써 정적 하중을 고려하였으며, 사질토 지반 대뿔값( $K_{py}$ )은 상대밀도( $D_r$ )가 보통수준(35~65%)임을 가정하여 16,300kN/m<sup>3</sup>을 적용하였다<sup>[22]</sup>.

### 3.6 수치해석(Numerical analysis model)

범용 지반 해석프로그램을 이용할 경우, 지반 재료의 역학적 특성과 역학모델을 정의하여 지반을 직접 모델링하고 모노파일 기초의 거동을 해석할 수 있다.

수치해석의 경우 2D 및 3D 모델링에 따라 거동의 양상이 다르게 평가되므로, 본 연구에서는 2D 모델과 3D 모델에 대

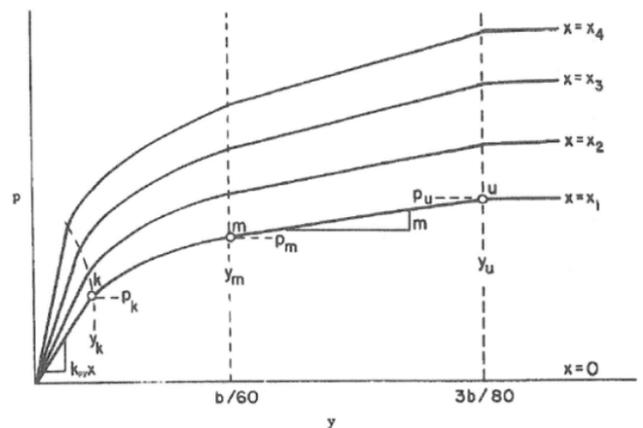


Fig. 3 p-y curve in the sandy soils<sup>[22]</sup>

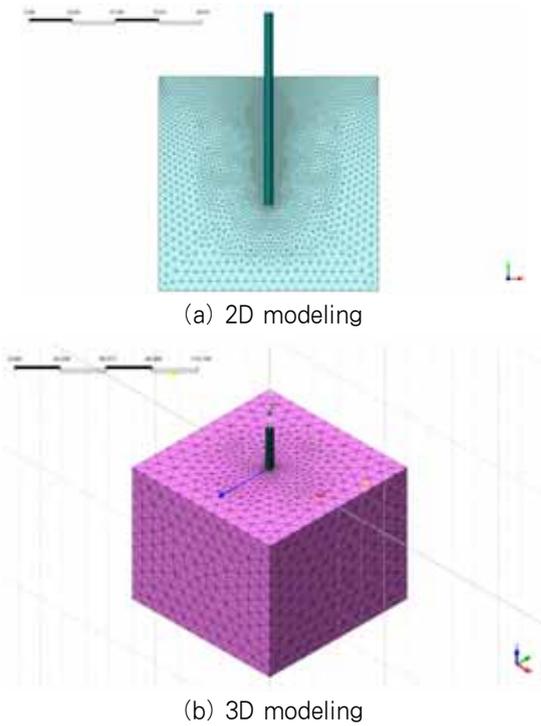


Fig. 4 Analysis modeling

한 해석을 수행하였다. 이때, 모노파일은 Beam 요소를 적용하였고, 지반 모델의 경우 2D는 Shell 요소, 3D는 Solid 요소를 이용하여 모델링을 실시하였으며, 범용 지반해석 프로그램인 MIDAS/GTS ver. 430을 사용하였다. 본 연구는 지반의 거동이 아닌 모노파일의 변위 및 모멘트에 관한 비교가 목적임에 따라, 모노파일과 지반의 Interface는 Rigid 조건을 적용하였고, 지반은 M-C(Mohr-Coulomb)모델을 사용하였으며, Fig. 4에는 수치해석 요소망을 나타내었다.

#### 4. 해석 결과

해석 결과는 지반 구현 특성 상, 해저지반에 근입된 모노파일과 지반을 직접 모델링하지 않고 하나의 경계조건으로써 지반특성을 반영하는 단일 경계조건 해석법(고정단 모델, 가상고정점 모델, 지반강성행렬 모델)과 지반에 근입된 모노파일의 각 절점에 대한 스프링 경계조건으로 지반특성을 반영하는 스프링 경계조건 해석법(지반반력계수 모델, p-y 곡선 모델), 그리고 수치해석(2D, 3D)으로 구분하여 분석하였다.

##### 4.1 단일 경계조건 해석 결과

고정단 모델과 가상고정점 모델, 지반강성행렬 모델을 이용하여 모노파일의 거동을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다.

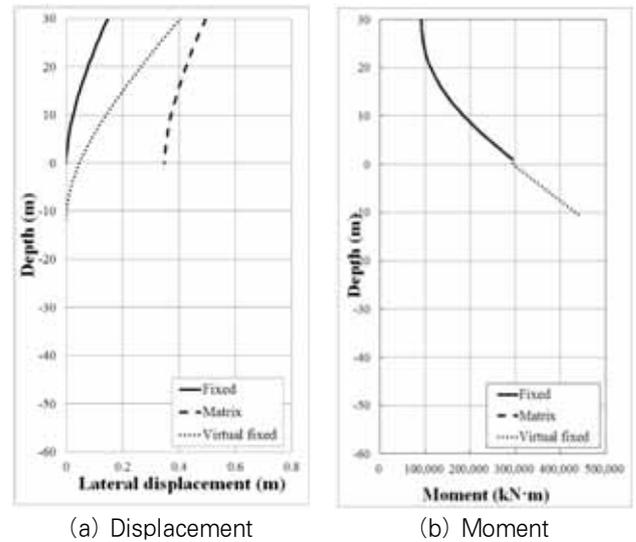


Fig. 5 Single boundary condition

모노파일 상부에서 발생된 최대 수평변위의 경우, 고정단 모델은 0.15m, 가상고정점 모델은 0.41m, 지반강성행렬 모델은 0.50m로 나타나 고정단 모델이 타 기법보다 수평변위를 과소평가하는 것으로 나타났다.

위 세 해석기법은 단일 경계조건으로 지반을 구현하고 동일한 강재물성치를 갖는 빔요소로써 모노파일을 구현한다. 따라서 동일한 하중 하에 있는 각 모델은 동일 위치에서 동일한 휨모멘트값을 나타냈다.

가상고정점 모델의 경우 해저면 아래 -11.3m 지점에 경계점이 위치하기 때문에 해저면에 경계점을 갖는 고정단, 지반강성행렬 모델보다 큰 값의 최대 휨모멘트가 발생하고, 해저면 하단부에는 수평하중이 재하 되지 않기 때문에 부재의 응력의 변화가 없다. 따라서 가상고정점 모델의 휨모멘트는 해저면 아래에서 선형하게 증가하여 -11.3m 지점에서 446,709kN·m의 최대 휨모멘트 값을 나타내, 고정단 및 지반강성행렬 모델의 294,841kN·m 값보다 약 1.52배 큰 값을 나타냈다.

##### 4.2 스프링 경계조건 해석 결과

스프링 경계조건 해석에 앞서, 지반 반력계수를 부여할 지점 간격을 결정하기 위하여 절점 간격을 0.5m, 1m, 2m로 변화시켜 스프링 간격에 대한 민감도를 검토하였다.

분석 결과 Table 3에 나타난 바와 같이 지반 위 30m, 지반 내 60m의 길이를 갖는 본 모노파일 길이에 대하여 절점 간격 0.5m, 1.0m, 2.0m에 대한 민감도는 변위의 경우 0.5mm 이하, 모멘트의 경우 3.6% 미만으로 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구 조건에서 절점 간격(0.5m~2.0m)에

Table 3. Horizontal displacement and moment in the nodal spacing

Monopile high	Horizontal displacement(m)			Moment (kN·m)		
	0.5m	1.0m	2.0m	0.5m	1.0m	2.0m
30m	0.4286	0.4280	0.4255	90,287	90,788	91,795
0m	0.0523	0.0521	0.0516	294,841	294,841	294,841
-30m	-0.0043	-0.0043	-0.0042	6,942	6,878	6,625
-60m	0.0008	0.0008	0.0008	-205	-207	-213

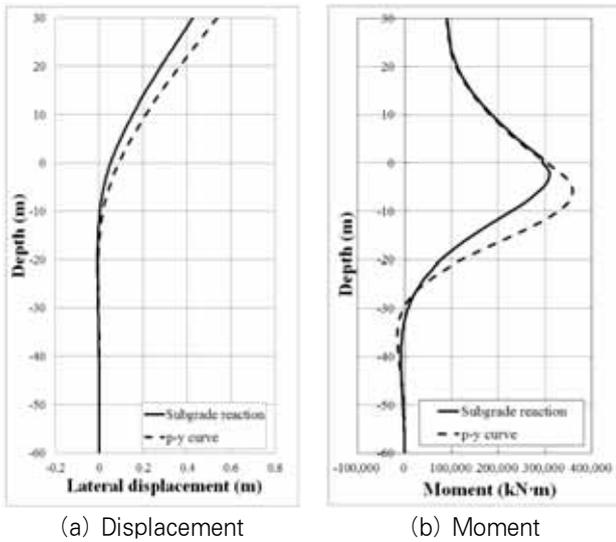


Fig. 6 Spring boundary condition

대한 구조해석은 결과 값의 신뢰도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료됨에 따라, 본 연구에서는 절점 간격을 1m씩 나누어 지반반력계수를 부여하였으며, 지반반력계수와 p-y 곡선 모델을 이용하여 모노파일의 거동을 비교한 결과는 Fig. 6과 같다.

모노파일 높이에 대한 지반반력계수 모델과 p-y 곡선 모델의 수평변위와 휨모멘트 값은 유사한 경향으로 나타났다. 최대 수평변위는 지반반력계수 모델에서 0.43m, p-y 곡선 모델에서 0.54m를 나타내 지반의 비선형성을 고려하는 p-y 곡선모델에서 다소 큰 변위 값을 산정하였으며, 최대 휨모멘트 역시 지반반력계수 모델에서 309,701kN·m, p-y 곡선 모델에서 358,964kN·m 값을 나타내 p-y 곡선 모델이 지반 반력계수 모델보다 약 1.15배 큰 최대 휨모멘트 값을 산정하였다.

### 4.3 수치 해석 결과

수치 해석의 2D 및 3D 모델 별 거동을 분석하기 위하여 2D와 3D 요소를 이용하여 해석을 실시하였으며, 수치 해석

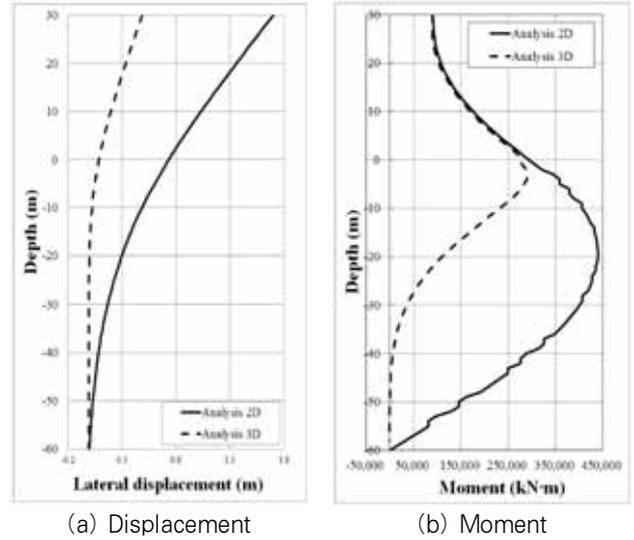


Fig. 7 Numerical analysis

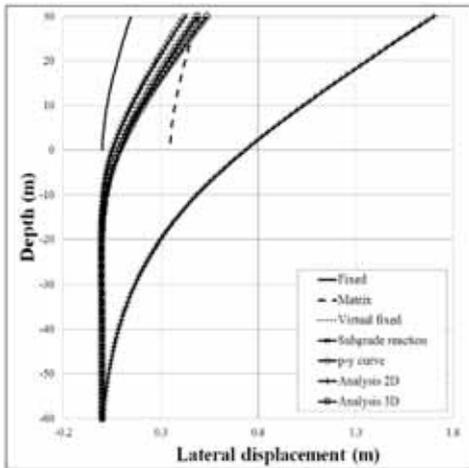
을 이용하여 모노파일의 거동을 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. 2D 수치해석의 최대 수평변위는 1.71m, 3D 수치해석은 0.49m로서 2D 해석이 3D 해석에 비해 약 3배 이상 큰 변위가 나타났다. 2D 수치해석의 최대 모멘트는 해저면에서 -20m 지점에 439,760kN·m이 발생되었으며, 3D 수치해석은 -2.5m 지점에 306,518kN·m가 발생되어, 최대 모멘트 또한 2D 해석이 과다하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.4 검토 결과

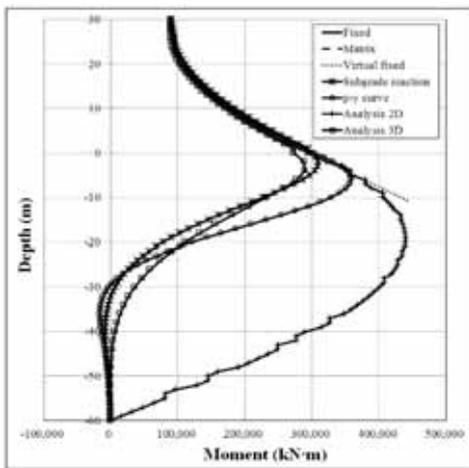
수평하중을 지배적으로 받는 모노파일의 각 지반 모델링 조건에 따른 모든 변수들을 상호 비교하였으며, 해석결과는 Table 4와 Fig. 8에 나타났다.

각 지반모델링 기법과 수치해석을 수행하여 모노파일에 발생하는 변위를 검토한 결과, 최대 변위의 경우 고정단 모델이 가장 낮게 평가되었고, 2D 수치해석 모델이 가장 크게 평가되었다. 또한, 가상고정점, 지반반력계수, p-y 곡선 및 3D 수치해석 모델의 변위 최대값과 변위도의 양상이 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 지반강성행렬 모델의 경우 최대 변위 값은 비슷했으나, 해저면 근처에서 변위가 상쇄되지 않는 현상을 확인할 수 있었다.

모멘트 검토 결과, 해저면 상부에 작용하는 모멘트는 모든 변수가 비슷하게 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 단일경계조건 해석을 제외한 변수들의 경우 해저면 하부로 갈수록 특정 포인트를 지나서 부터는 모멘트가 상쇄되는 경향을 확인할 수 있었다. 그중, 지반반력계수 모델과 p-y 곡선 모델의 경우 -30m 지점부터 역방향(-) 모멘트가 발생하는 현상이 나타났다.



(a) Horizontal displacement



(b) Moment

Fig. 8 Total analysis results

Table 4. Analysis results

Type	Maximum displacement (m)	Maximum moment	
		Position (m)	Moment (kN·m)
Fixed	0.15	0	294,841
Virtual fixed	0.41	-11.3	446,709
Matrix	0.50	0	294,841
Subgrade reaction	0.43	-2.0	309,701
p-y curve	0.54	-6.0	358,964
Analysis 2D	1.71	-20	439,760
Analysis 3D	0.49	-2.5	306,518

모든 변수들의 최대 응답값을 상호비교하기 위하여 Fig. 9에 나타내었으며, 지반강성행렬 모델, 지반반력계수 모델 및 3D 수치해석 모델은 비교적 비슷한 값을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다. p-y 곡선 모델의 경우 최대 변위는 비슷한 값을 나타냈으나, 모멘트를 다소 과다평가 하는 것으로 나

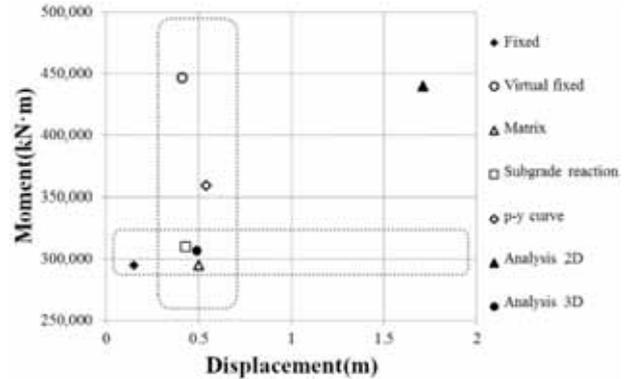


Fig. 9 Analysis results comparison

타났다.

2D 수치해석의 경우 타 변수에 비하여 응답값이 과다하게 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 일반적인 경우 해지면 하단 -10m 이내에서 모멘트 감소 형상이 나타났으나, 2D 수치해석의 경우 -20m를 지나서야 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 입체 요소인 지반을 단위폭으로 고려된 2D 모델로 치환하여 해석하는 과정에서 원활한 응력전달이 이루어지지 않아 나타나는 현상으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수평하중이 지배적인 해상풍력발전기 모노파일 기초 설계 시, 단일 사질토 지반에 대하여 모델링 기법에 따른 부재력 및 수평변위 차를 비교 분석하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 고정단 모델은 수평하중이 지배적인 해상풍력발전기 모노파일 기초 설계 시, 최대 수평변위를 과소평가 하여 사용성 검토측면에서 적합하지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 일반적으로 횡하중을 받고 있는 모노파일은 해지면 이하에서 최대 휨모멘트가 발생한다. 따라서 해지면 이하 모노파일을 구현하지 않는 고정단 모델, 지반강성행렬 모델은 모노파일 부재력을 다소 과소평가하는 것으로 나타났다. 상기 기법의 오차는 지반강성이 작을수록 커지기 때문에 해당 기법 사용 시 3D 해석 모델병행검토가 권장된다.
- (3) 지반 특성을 일부 반영하나 모노파일 근입 깊이에 따른 효과를 반영하지 못하는 가상고정점 모델의 경우 모노파일에 발생하는 최대 휨모멘트를 과대평가하여 경제성 측면에서 적합하지 않은 모델링 기법인 것으로 나타났다.
- (4) 지반 특성을 일부 반영하여 모노파일 근입 깊이까지의

지반 거동을 구현하는 지반반력계수 모델과 p-y 곡선 모델의 경우 3D 지반 모델링 해석 결과와 유사한 수평 변위와 부재력 값을 나타냈다. 다만 지반의 비선형 거동을 구현하는 p-y 곡선 모델에서 조금 더 큰 최대 수평 변위를 산정했다.

- (5) 지반을 2D로 모델링한 경우 타 지반 모델링 기법에 비해 과대한 수평변위와 부재력을 산출했다. 이는 해상풍력발전기와 같이 큰 수평하중을 받고 있는 구조물 주변 지반을 단위 폭으로 고려된 2D 모델로 치환하여 해석할 경우, 오차가 크게 나타날 수 있음을 나타낸다. 따라서 모노파일 횡방향 거동 설계 시 2D를 이용한 지반 모델링 기법 사용은 가급적 지양할 것을 권고한다.

### 감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비 지원(20120093)과 국토교통부 산하 국토교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업 연구비 지원(10기술혁신E04)에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌(References)

- [1] 지식경제부 (2010) 신재생에너지산업 발전전략. MKE (2010) *Renewable energy industry development strategy*, Korea (in Korean).
- [2] Musial, W., Butterfield, S., and Ram, B. (2006) *Energy from offshore wind*, NREL, pp.2-11.
- [3] 황병선, 이종훈, 유태승 (2011) 국내 해상풍력 추진 현황, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, Vol. 23, No. 5, pp.7-11.  
Hwang, B.S., Lee, J.H., and Yoo, T.S. (2011) The Development Status of Offshore Wind Farm in Korea, *Magazine of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 5, pp. 7-11 (in Korean).
- [4] 이대용, 임성우 (2011) 해상풍력 Substructure 기술개발 동향, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, Vol. 23, No. 5, pp.12-16.  
Lee, D.Y. and Im, S.W. (2011) Special Issue] Technical Aspects for Development of Offshore Wind Power Substructure, *Magazine of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 5, pp.7-11 (in Korean).
- [5] 한국선급 (2011) 해상용 풍력발전 시스템의 기술 기준. KR (2011) *Technical guidelines for offshore wind*

- turbines*, Korea (in Korean).
- [6] AWS Truewind (2009) *Offshore wind technology overview*, NYSERDA PON 995, Task Order No. 2, Agreement No. 9998.
- [7] 최창호, 이준용, 장영은 (2011) 해상 풍력터빈 Sub-structure 설계를 위한 지반공학적 고려사항, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, Vol. 23, No. 5, pp.23-27.  
Choi, C.H., Lee, J.Y., and Jang, Y.E. (2011) Geotechnical Aspects for Designing Offshore Wind-turbine Substructure, *Magazine of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 5, pp.23-27 (in Korean).
- [8] Achmus, M., Kuo, Y-S., and Abdel-Rahman, K. (2009) Behavior of monopile foundation under cyclic lateral load, *Computer and Geotechnics*, Vol. 36, No. 5, pp.725-735.
- [9] 조재연, 이성준, 정상섭 (2010) 말뚝두부구속조건을 고려한 말뚝지반 전면기초의 최적단면 설계, 한국지반공학회는 문집, 한국지반공학회, Vol. 26, No. 12, pp.31-40.  
Cho, J.Y., Lee, S.J., and Jeong, S.S. (2010), A Study on the optimum design of piled-raft foundation considering pile head condition, *Journal of Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 26, No. 12, pp.31-40 (in Korean).
- [10] Kuo, Y.S., Achmus, M., and Abdel-Rahman, K. (2012) Minimum embedded length of cyclic horizontally loaded monopile, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 138, No. 3, pp.357-363.
- [11] API (2002) *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - working stress design*, American Petroleum Institute.
- [12] ABDEL-RAHMAN, K. and ACHMUS, M. (2005) Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in germany, *Proceedings of International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Perth, Australia, London, Taylor & Francis, pp. 309-396.
- [13] LI, Z., HAIGH, S.K., and BOLTON, M.D. (2010) Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads, *Physical Modelling in Geotechnics*, pp.965-970.
- [14] Roesen, H.R., Andersen, L.V., Ibsen, L.B., and Foglia, A. (2012) Experimental setup for cyclic lateral loading of monopiles in sand, *Department of Civil Engineering*, Aalborg University, pp.857-864, Denmark.
- [15] 한국지반공학회 (2009) 구조물 기초 설계기준 해설.

KGS (2009) *Structure foundation design standards specification*, Korean Geotechnical Society (in Korean).

[16] 대한토목학회 (2008) 도로교설계기준 해설. KSCE (2008) *Bridge design standards specification*, Korean Society of civil Engineers (in Korean).

[17] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. (2009) *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, NREL, Technical Report.

[18] ISO 19901-1 (2009) *Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 1: Metocean design and operating considerations*.

[19] 장화섭, 김호선, 음학진, 김만웅 (2012) 5MW급 해상풍력발전기 모노파일 기초의 수직도 오차에 따른 거동 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol. 32, No. 2.C, pp.61-68.  
Jang, H -S., Eum, H -J., Kim, H -S., and Kim, M -E. (2012) Behavior analysis by verticality error of monopile foundation for 5MW offshore wind turbine, *Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 2.C, pp.61-68 (in Korean).

[20] 해운항만청 (1993) 항만시설물설계기준서. Maritime Transport & Port Office (1993) *Harbor facilities design Standards* (in Korean).

[21] 이용안, 정문경, 박재현, 이주형 (2011) 강관합성 현장타설말뚝 머리의 수평하중-변위 거동 분석, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, Vol. 27, No. 12, pp.97-106.  
Lee, Y -A., Chung, M -K., Lee, J -H., and Park, J -H. (2011) Analysis of pile head lateral load-deflection behavior of steel-concrete composite drilled shafts, *Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 27, No. 12, pp.97-106 (in Korean).

[22] Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974) Analysis of laterally loaded piles in sand, *Proceedings of Offshore Technology Conference*, Houston, TX, Vol. II, Paper No. 2080, pp. 473-484.

---

**요 약:** 수평하중이 지배적인 해상 풍력발전기 설계 시에는 지반-기초구조물 거동을 정확히 모사하여야 상부구조물에 대한 정확한 거동 예측이 가능하며, 합리적 설계가 이루어질 수 있다. 현재 다양한 지반 모델링 기법이 존재하나, 모노파일 기초 설계 시, 각 해석 기법에 대한 충분한 검증 절차 없이 해석 결과를 그대로 사용할 경우 구조물을 과다 및 과소하게 설계할 우려가 있다. 이에 본 연구에서는 지반 모델링 기법 차에 따른 모노파일의 부재력 및 수평변위 차를 비교 분석하였다. 검토 결과 고정단 모델은 최대 수평변위를 과소평가 하여 사용성 검토 측면에서 적합하지 않은 것으로 나타났으며, 고정단 모델, 지반강성행렬 모델은 모노파일의 부재력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 반면 가상고정점 모델은 모노파일의 부재력을 과대평가하여 경제성 측면에서 적합하지 않은 것으로 나타났다. 지반반력계수 모델과 p-y곡선 모델의 경우 3D 지반 모델링 해석 결과와 비교적 유사한 수평변위 및 부재력을 나타냈으며, 지반을 2D로 모델링한 경우 타 모델링 기법에 비해 과대한 수평변위와 부재력을 산정했다.

**핵심 용어:** 해상풍력, 모노파일 기초, 지반-구조물 상호작용, 사질토, 수평하중-변위, p-y 곡선

---