

# 해상 풍력 타워의 모노파일 기초에 대한 다층 지반 해석

† 김남형 · 고명진\*

† 제주대학교 토목공학과 교수, \*제주대학교 대학원

## Analysis of the Multi-layered Soil on Monopile Foundation of Offshore Wind Turbine

† Nam-Hyeong Kim · Myeong-Jin Go\*

† Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju, 690-756, Korea

\* Graduate school of Jeju National University, Jeju, 690-756, Korea

**요 약** : 최근 화석 연료의 사용에 따른 문제들로 인해 다양한 그린 에너지들이 주목 받고 있다. 그린 에너지의 한 종류로써 풍력 발전의 원동력인 바람은 육상에서 보다 해상에서 양질의 값이 관측된다. 또한, 부지확보, 소음, 전자파와 같은 육상 풍력 발전의 문제점을 해결할 대안으로써, 또한 더 효율적인 풍력 발전을 위해 해상 풍력 발전의 개발이 주목받고 있다. 이에 따라 해상 풍력에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다. 풍력 타워가 해상으로 진출함에 따라 해상 풍력 타워는 점차 거대해지고 있다. 따라서 풍력과 파력을 견뎌내기 위한 안정성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 p-y 관계를 이용해 다층 지반의 기초에 작용하는 외력을 계산하였다.

**핵심용어** : 풍력, 파력, 다층지반, 변위, 지반 반력

**Abstract** : Recently, by the problems owing to utilization of fossil fuel, various green energies receive attention. Wind, the impetus for the wind power generation as one of the green energies, is observed higher quality value in the offshore than onshore. Also, the development of offshore wind turbines is in the spotlight as alternative to solve the problems of onshore wind farm such as securing sites, noise, and electromagnetic waves, and to get efficient wind energy. Therefore, the many researches on offshore wind energy have been carried out. As wind towers are advanced to ocean, offshore wind towers have been enlarged. Thus, stability is required to endure wind force and wave force. In this study, the external forces act on the foundation in multi-layered are calculated by p-y relation.

**Key words** : wind force, wave force, multi-layered soil, displacement, subgrade reaction

### 1. 서 론

최근 화석 연료 사용에 따른 환경오염과 지구 온난화 현상, 그리고 자원의 고갈로 인해 바람, 조석, 파랑, 태양을 이용한 그린에너지 개발이 진행되고 있다.

그린에너지의 한 종류인 풍력발전과 밀접한 관계를 가지고 있는 풍속은 육상보다 주로 해상 또는 연안지역에서 양질의 값이 관측되고 있다. 또 부지확보와 소음 및 전자파 등의 문제점의 해결과 동시에 효율적인 풍력에너지를 얻기 위한 새로운 방안으로써 해상 풍력발전의 개발이 크게 각광받고 있다(Nah. et al, 2011). 이에 따라 해상 풍력발전에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. Gaudiosi(1999)는 유럽에서의 해

상 풍력의 가능성에 대한 연구를 하였으며, 일본에서는 2000 년도에 이미 해상 풍력의 우위성에 관한 연구(Iguchi. et al, 2000)가 수행되었으며, 연안역에서의 중·대규모 풍차 개발에 관한 연구(Nagai. et al, 2008)가 진행되었다. 우리나라에서도 이에 따라 한반도 해역의 해상 풍력 자원에 관하여 Kyoung. et al.(2003)이 평가한 I바 있으며, Kim and Jin(2010)은 제주 연안지역의 잠재 풍력에너지에 관한 연구를 수행한 바 있다.

해상에서의 바람은 파랑을 발생시키는 주요소 중 하나이다. 따라서 해상의 구조물에는 바람의 크기에 따라 다양한 파랑이 생성되며, 이에 따라 해상 구조물에 작용하는 주요 외력 중 하나인 파압 또한 다양하게 변화된다. 해상 풍력 타워의 기초부에서는 풍력보다 파력의 작용이 우세하기 때문에

† Corresponding author : 종신회원, nhkim@jejunu.ac.kr 064)754-3452

\* 연회원, sptnsdl@jejunu.ac.kr 064)754-3453

주) 이 논문은 “해상 타워의 기초에 작용하는 풍력과 파력 해석”란 제목으로 “2013 공동학술대회 한국항해항만학회논문집 (해군사관학교, 2013.6.27-28, pp. 273-274)”에 발표되었음.

구조물에 작용하는 파압의 계산이 필수적이다. 이에 따라, Kim et al.(2007), Kim and Cao(2008)는 해상에 설치된 수직 원주에 작용하는 파력에 대한 수치해석을 수행하였다.

이러한 해상 풍력발전 타워는 기초의 형식에 따라 중력식, 모노파일식, 자켓식, 부유식이 있다. 중력식의 경우는 6m~10m, 모노파일식의 경우에는 25m~30m, 자켓식의 경우 20m~80m, 부유식의 경우에는 40m~900m의 수심에서 주로 사용된다. 이러한 해상타워의 기초들은 파압과 조류로 인한 압력 및 전도 모멘트와, 육상에서 보다 더 강한 풍압에 의한 영향을 견딜 수 있어야 한다(Kim and Jin, 2013).

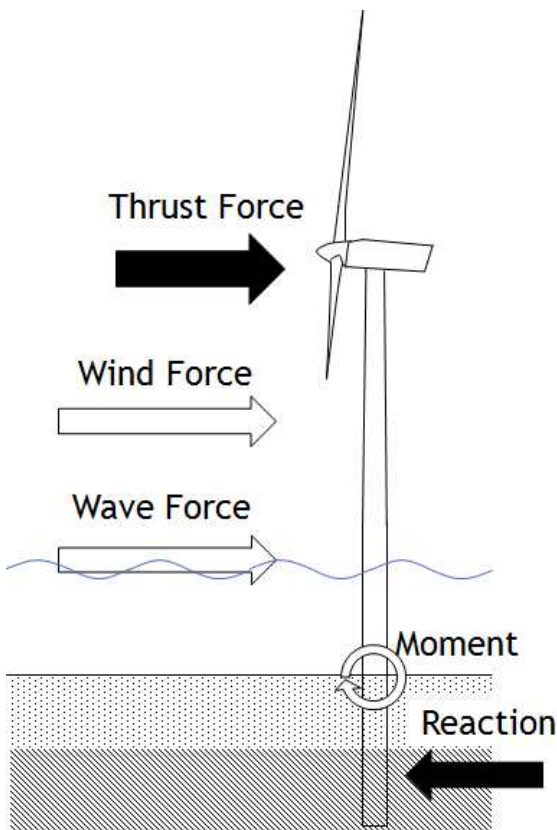


Fig. 1 Simple model of external forces acting on wind turbine tower

이와 더불어, 지구의 온난화 현상에 따라 태풍의 발생 빈도는 감소하고 있지만, 태풍의 세기는 점점 강해지고 있는 추세이다(Moon. et al, 2007). 특히, 선박 및 항만구조물 등의 안전에 직접적으로 영향을 미치는 최대순간풍속은 최대풍속의 약 1.5배에 상당한다. 또한, 온실효과 기체 배출량이 산업혁명 이전의 농도인 280ppm의 약 3.5배인 1,000ppm이 되면 해수면도 18~50cm 상승할 전망이다. 이에 따라, 해상 풍력발전 타워에 작용하는 풍력의 크기뿐만 아니라, 높아진 해수면과 강해진 바람에 의한 파압의 크기 역시 더욱 증가할 것으로 예상된다. 따라서 발전부(너셀, 블레이드)를 지지해주는 기초 및 해상 타

워부에는 풍압, 파압 그리고 블레이드 회전 시 발생하는 추력 등이 복합적으로 작용하기에 안정성에 있어서 다양한 연구가 요구된다(Fig 1.).

본 연구에서는 Kim and Jin(2013)의 연구에서 개발된 프로그램을 발전시켜, 모노파일 식 해상 타워에 작용하는 파압과 풍압이 기초 주변 지반에 미치는 영향에 관하여 해석하였다.

## 2. 기본 방정식

### 2.1 해상 타워에 작용하는 풍력

Coastal Development Institute of Technology의 Offshore Wind Power Generation Technical Manual(2011)을 참고하여, 풍력발전 타워에 미치는 풍력을 다음 식으로 계산하였다.

$$F_t = q \cdot C_f \cdot A \tag{1}$$

여기서,  $q = 0.6 \cdot \left( 1.7 \cdot \left( \frac{H}{250} \right)^n \right)^2 \cdot G_r \cdot U^2$ ,

$$C_f = \begin{cases} 0.7 & : H/D \leq 1 \\ 0.7 + 0.025 \cdot H/D & : 1 < H/D < 8 \\ 0.9 & : H/D \geq 8 \end{cases}$$

이다. 또한  $F_t$ 는 타워에 작용하는 풍력,  $A$ 는 타워의 높이별 수평면적,  $U$ 는 평균풍속(m/s),  $H$ 는 지상으로부터의 높이,  $D$ 는 타워의 직경,  $n$ 은 Table 1.에서 선정된 멱지수이다.  $G_r$ 은 거스트 계수로, Offshore Wind Power Generation Technical Manual(2011)에 제시된 것을 참고하여, 장애물이 없는 지형 일 때, 10m 이하에서는 2.0, 40m 이상에서는 1.8, 그 사이 범위에서는 두 값을 직선 보간 한 값을 사용하였다.

Table 1 Determination in the index in any regions(Coastal Development Institute of Technology, 2011)

Classification of	
Surface	$n$
I	0.33
II	0.22
III	0.15
IV	0.10

Table 1에서 I 은 고층 건물이 많은 지역이며, II는 낮은 건물이 많은 지역, III은 장애물이 있는 평지, 그리고 IV는 해양과 같이 장애물이 없는 지역을 뜻한다. 본 연구의 경우, 해상 풍력발전을 대상으로 하고 있으므로,  $n$  값은 Table 1에서 0.1을 사용하였다(Coastal Development Institute of Technology, 2011).

### 2.2 풍파의 산정

해상에서의 파랑은 풍속의 증감에 따라 변화한다. 풍역에서 파랑이 충분히 발달되었다고 가정할 경우 풍속에 따른 유의파고와 유의파주기는 SMB법에 따라 식 (2)와 (3)으로 각각 나타낼 수 있다(Nakamura et al., 2002).

$$H_{1/3} = \frac{0.3u_a^2}{g} \quad (2)$$

$$T_{1/3} = 3.86 \sqrt{H_{1/3}} \quad (3)$$

여기서,  $u_a$ 는 풍속이며,  $g$ 는 중력가속도이다. 또한, 최대 파고는 식 (4)로부터 얻어진다.

$$H_{max} = 1.86H_{1/3} \quad (4)$$

### 2.3 해상 타워에 작용하는 파력

IEC 61400-1에서 제안한 해양구조물에 작용하는 전파력은 Morison식에 의해 식 (5)로 나타낸다.

$$dF = \left( \frac{1}{2} \rho C_D D u|u| + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} \right) dy \quad (5)$$

여기서,  $dF$ 는  $dy$ 에 대한 수평파력,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $C_D$ 는 항력계수,  $C_M$ 은 질량계수,  $D$ 는 타워의 직경,  $u$ 는 물입자 수평속도,  $\dot{u}$ 은 물입자 수평가속도이다.

### 2.4 사질토에서의 p-y 계산

풍력 타워의 기초는 모노파일로 고정되었으며, 구조물-기초-지반은 등가 스프링 모델로 연결되었다(Fig. 2).

본 연구에서는 Reese et al.(1974)이 사질토 층에 대하여 제안한 p-y 곡선을 이용하여 해석을 수행하였다.

$$pB = kz y \quad (7)$$

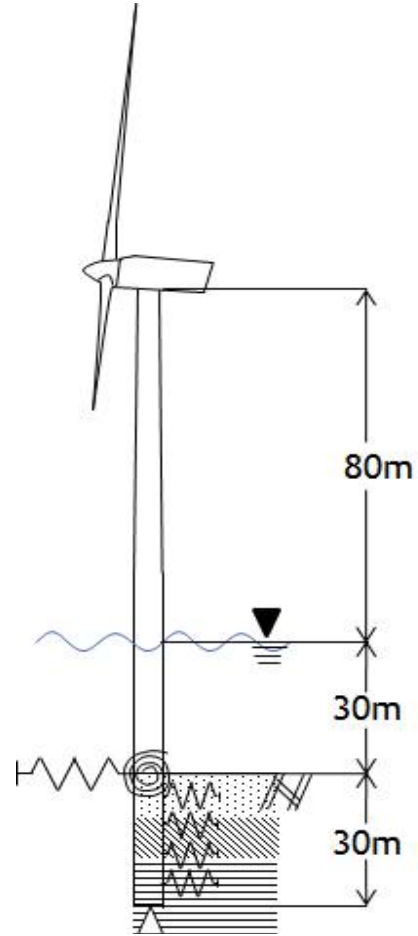


Fig. 2 Simple model with equivalent coupled spring

여기서,  $B$ 는 기초의 직경,  $k$ 는 스프링수이며 그 값은 Table 2와 같다. 또,  $z$ 는 지표면에서의 깊이,  $y$ 는 해상 타워 기초의 수평 변위이다. 한편, 변위가 충분히 커지면 지반이 소성화하고, 지반반력은 그 이후 증가하지 않는다. 이와 같은 극한지반반력  $p_u$  다음 식에 의해 주어진다.

$$p_u B = A_u P_c \quad (8)$$

여기서,  $P_c$ 는 극한저항이며, 지표면부근에서는

$$P_c = \gamma z \frac{K_0 z \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (B + z \tan \beta \tan \alpha) + \gamma z \{ K_0 z \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_A B \} \quad (9)$$

또 어느 정도 깊은 곳에서는

$$P_c = K_A B \gamma z (\tan^8 \beta - 1) + K_0 B \gamma z \tan \phi \tan^4 \beta \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서,  $A_u$ 는 경험적 보정계수이며, 재하방법과 깊이에 의해 주어진다.  $\gamma$ 는 흙의 유효 단위 체적중량,  $\phi$ 는 모래의 내부마찰각,  $K_0$ 는 0.4,  $K_A$ 는  $\tan^2(45^\circ - \phi/2)$ ,  $\alpha$ 는  $\phi/2$ ,  $\beta$ 는  $45^\circ + \phi/2$ 이다.

Table 2 Recommended value of  $k$

Relative density	Value
Loose	5.4
middle	16.3
Compacted	33.9

### 2.5 점성토에서의 p-y 계산

점성토에서의 비선형 p-y곡선은 Matlock(1970)에 기초하여 적용되어왔다. 여기서, 파일의 단위 길이 당 극한 지반 강도는 식 (11)로 계산된다.

$$P_u = \max\left(\left(3 + \frac{\gamma}{c_u}z + \frac{J}{D}z\right)c_u D; 9c_u D\right) \quad (11)$$

여기서,  $\gamma$ 은 흙의 유효 단위 중량,  $c_u$ 는 비배수 전단 강도,  $z$ 는 깊이,  $D$ 는 파일 직경이며,  $J$ 는 경험적 무차원 파라미터 (0.5)이다. 극한 지반 저항의 절반에서의 굴절은 다음과 같이 계산된다.

$$y_{50} = 2.5\epsilon_{50}D \quad (12)$$

여기서,  $\epsilon_{50}$ 은 최대 주응력의 절반에 대응하는 변형률이다.

다음으로, 나머지 지반 저항은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{rest} = \begin{cases} 0.72P_u & : z \geq x_r \\ 0.72P_{u(z/x_r)} & : z < x_r \end{cases} \quad x_r = \frac{6c_u D}{\gamma} D + Jc_u \quad (13)$$

최종적으로 지반 저항은 다음과 같이 나타난다.

$$p = p_u \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad : y \leq 3y_{50} \quad (14)$$

$$p = p_{rest} + \frac{15y_{50} - y}{12y_{50}(0.72p_u - p_{rest})} \quad : 3y_{50} < y < 15y_{50}$$

$$p = p_{rest} \quad : y \geq 15y_{50}$$

여기서,  $y$ 는 파일 변형의 절대 값이며,  $p$ 의 부호는 파일 변형이 마이너스가 되면 바뀐다.

본 연구에서 사용한 p-y 곡선의 스프링 계수는

$$k = p/y = p_u / (8y_c)$$

로 단순화 시킨 곡선의 기울기를 취한다.

### 2.6 블레이드 형상 설계

로터 블레이드의 설계는 풍력 터빈이 설치될 장소에서 다년간의 풍향·풍속 데이터 측정을 통한 신뢰성 있는 정격풍속 ( $V_r$ ) 및 설계풍속 ( $V_D$ )의 결정으로부터 시작된다. 따라서 정확한 설계풍속의 결정과 신뢰성 있는 형상설계를 위해서는 설치 입지에서 다년간의 기상 데이터를 바탕으로 한 풍황 자원 조사가 필수적으로 선행되어야 하며, 이에 따른 풍력 터빈의 로터 직경은 다음 식으로 계산된다(Kim et al., 2008).

$$D_r = \sqrt{\frac{8P_r}{\eta C_P \rho_a \pi V_D^3}} \quad (15)$$

여기서,  $D_r$ 는 로터의 직경,  $P_r$ 은 정격출력,  $\eta$ 는 발전기의 효율로 0.9이며,  $C_P$  추정 동력 계수이며 0.45이다. 또한  $\rho_a$ 는 공기 밀도이다. 이에 사용된 값은 Table 3과 같다.

Table 3 General design parameters

$P_r$ (MW)	5
$V_D$ (m/s)	15
$\eta$	0.9
$C_P$	0.45
$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.225

블레이드의 회전은 블레이드 날개 끝 와류를 생성하며, 날개 끝 와류는 날개 끝 손실을 발생시킨다. 1919년에 Ludwig Prandtl은 해석적 방법으로 날개 끝 손실을 예측하기 위해 식 (16)를 제안하였다.

$$f = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} [e^{-\{[(N/2)(1-\mu)/\mu] \sqrt{1+(\lambda a)^2/(1-a)^2}\}}] \quad (16)$$

$$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2}$$

여기서,  $\mu$ 는 허브로부터 팁까지 블레이드 국부 위치를 무차원화 한 변수로 0.05이며,  $f$ 는 팁 손실률,  $N$ 은 블레이드 수 (3EA),  $a$ 는 축 간섭 계수로 0.64이다.

블레이드의 국부 현 길이는 풍력 터빈의 계산에서 일반적으로 사용되는 BEMT(Blade Element Momentum Theory)로부

터 유도된 식 (15)로부터 얻어진다.

$$C = \frac{8a(1-a)\pi R}{NC_1\lambda^2} \quad (17)$$

여기서,  $C_1$ 은 최적 양력 계수,  $R$ 은 국부 반경,  $\lambda$ 은 설계 주속 비로 6이다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 계산을 위한 조건으로 수심은 30m로 가정하였고, 타워 높이는 수면 아래 30m, 수면 위로 80m이다. 기초의 근입 깊이는 구조물기초설계기준과 도로교설계기준에서 제시한 산정식을 기초로 30m로 산정하였다. 타워의 상부 직경 3.87m, 하부 직경 6m로 직경이 일정하게 감소한다. 반전기의 규모는 5MW급이며 파일 두께는 60mm이다. 모노파일은 Jang et al.(2013)의 연구와 같은 STK 490 강관으로써 탄성계수는 210,000MPa, 단위중량은  $77kN/m^3$ 의 재료 물성치를 갖는다. 풍속의 경우, Thrust force의 영향을 확인하기 위해 10m/s, 20m/s와 30m/s의 경우로 나타내었다. 블레이드의 모델링을 위한 블레이드의 데이터는 NREL에서 개발된 S826, S825, S818이 적용되었다.

지반은 총 4개 층으로 설정하였으며, 깊이는 최상부를 시작점으로 각각 11m, 7m, 7m, 5m로 총 30m이며, 처음 11m는 점성토이며, 이때 비배수 전단 강도  $c_u$ 와 유효 단위 중량  $\gamma$ 는 Andersen et al.(2012)의  $150kN/m^2$ 와  $12kN/m^3$ 을 사용하였다. 나머지 지반은 사질토이며, 내부 마찰각과  $\gamma$ 는 상층부

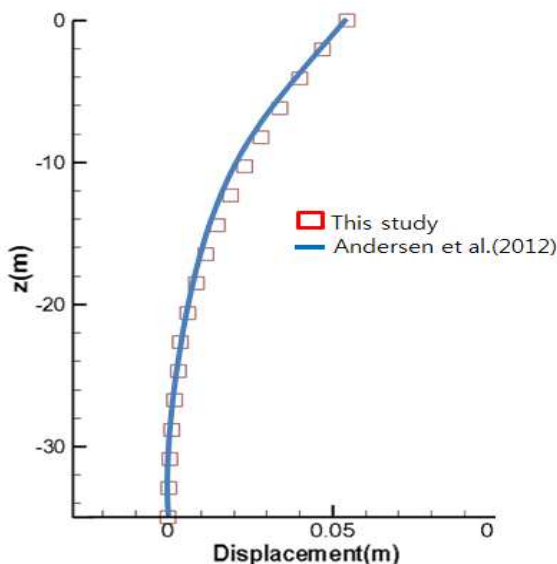


Fig. 3 Displacement in clayey soil

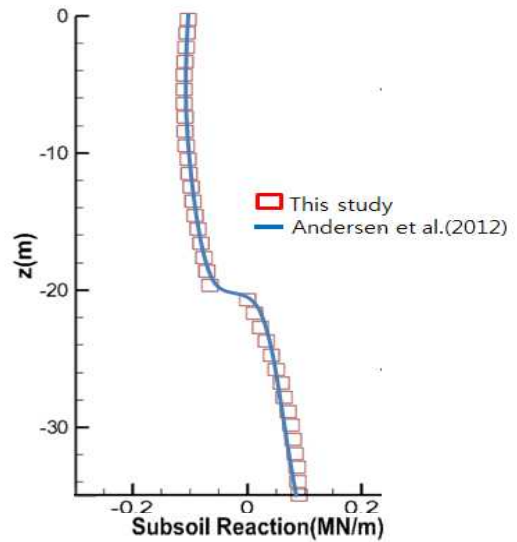


Fig. 4 Subsoil reaction in clayey soil

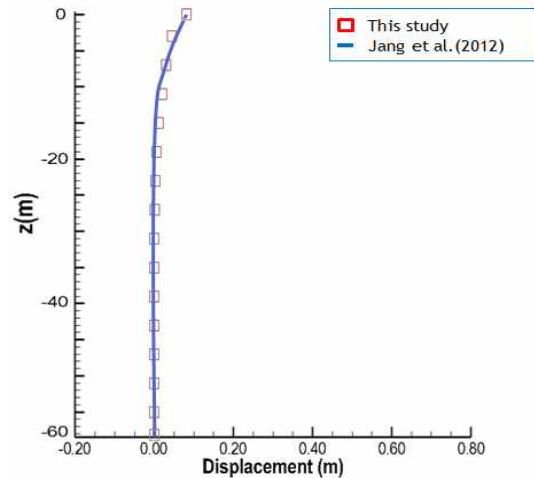


Fig. 5 Displacement and subgrade reaction in sandy soil

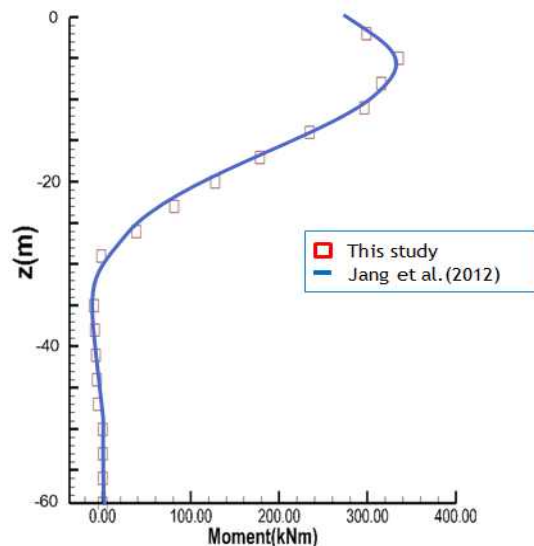


Fig. 6 Subsoil reaction in sandy soil

터 Kim and Park(2005)의  $30^\circ$ 와  $15.7kN/m^3$ , Jang et al.(2013)의  $36^\circ$ 와  $20kN/m^3$ , 중간값인  $33^\circ$ 와  $17.4kN/m^3$ 가 사용되었다. 본 연구의 타당성 검증을 위해 Andersen et al.(2012)의 점성토에서의 연구와 동일한 조건에서의 해석을 수행하였다. 이때의 지반은 깊이 35m, 비배수 전단 강도  $150 kN/m^2$ 의 점성토 지반이다. 비교 결과를 Figs. 3~4에 나타내었다.

파란 실선은 Andersen et al.(2012)의 연구 결과이며, 빨간 포인트는 본 연구 결과이다. 비교 결과 좋은 일치를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 사질토에서의 타당성 검토를 위해 Jang et al.(2013)의 해석 결과와 비교한 결과를 Figs. 5~6에 나타내었다. 비교 결과 잘 일치함을 확인 할 수 있었다.

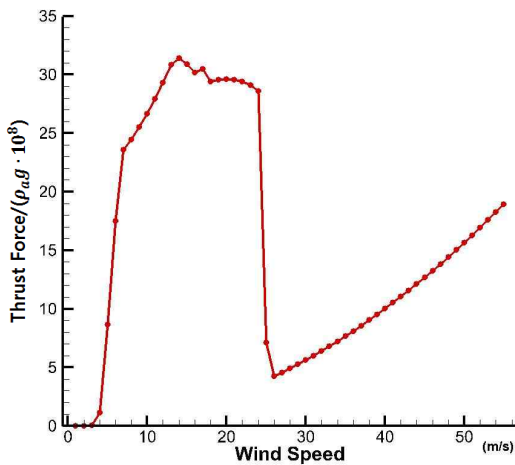


Fig. 7 Thrust force of the designed blade

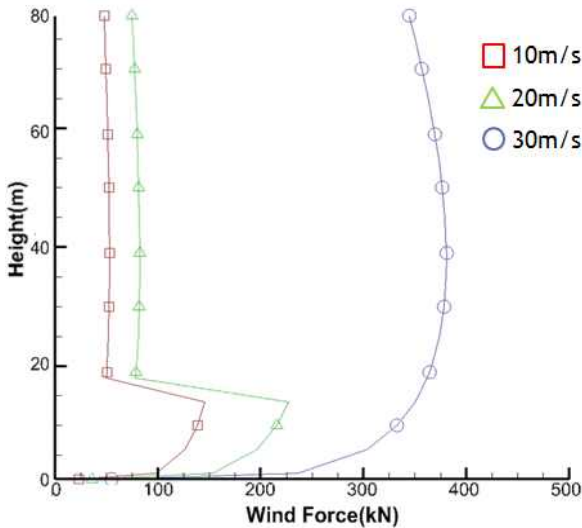


Fig. 8 Wind forces acting on the offshore wind tower according to wind velocities

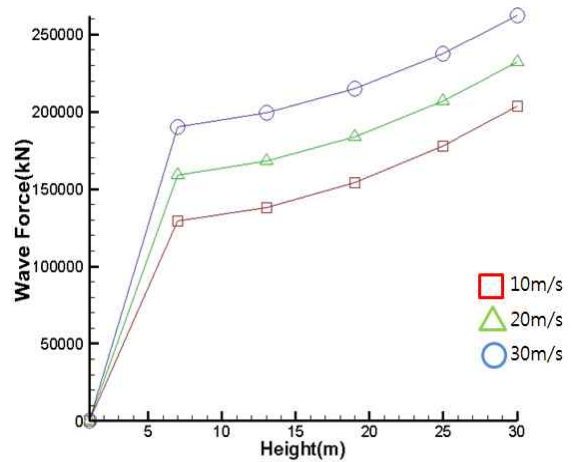


Fig. 9 Wave forces acting on the offshore wind tower according to wind velocities

Fig. 7은 풍속에 따른 추력의 변화를 나타낸다. 추력은 cut-in 풍속인 4m/s와 날개 끝 손실이 발생하는 7m/s 사이에서 급격한 증가를 보인다. 7m/s 이후에는 날개 끝 손실로 인해 추력의 증가가 조금 더딘 양상을 보이다가 15m/s 이후 점차 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 블레이드에 걸리는 하중을 낮추기 위해 블레이드의 피치각 변화로 인한 것으로 사료된다. cut-out 풍속인 25m/s에서 추력은 급감하고 이후에는 블레이드는 풍속에 의한 영향만을 받게 되는 것으로 보인다.

해상 타워에 작용하는 풍력의 분포를 Fig. 8에 나타냈다. 역함수로 계산되는 해상에서의 풍속은 고도가 높아질수록 빠르지만 고도가 높아질수록 풍속 증가의 폭은 감소한다. 따라서 높이에 따라 직경이 일정하게 감소되는 해상 타워에서는 직경이 작은 상부에서보다 직경이 큰 하부에서 더욱 큰 풍력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 로터의 가동 구간인 10m/s와 20m/s에서는 블레이드의 회전에 의한 풍력의 손실로 인해 타워에 가해지는 풍력의 크기가 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 풍속에 따른 파력의 변화를 나타낸 것이다. 풍속이 증가할수록 발생된 파력의 크기는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 10~13은 풍속 변화에 따른 기초의 변형, 지반 반력, 전단력 및 모멘트를 나타낸 것이다. 풍속이 증가할수록 모노파일의 변형에 의해 지반 변형이 증가하며 전단력 및 모멘트는 지반 반력에 비해 변화하는 것을 확인할 수 있다. 지반의 반력은 각 지반의 지반 반력 계수의 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 지반 층에서는 지반의 변형이 커질수록 지반 반력 또한 커짐을 알 수 있다. 그러나 기초 깊이의 절반 이후에는 지반 반력의 감소를 확인할 수 있는데, 이는 지표에 가까워짐에 따라 지반의 상재 하중 감소로 인한 지반 반력 계수의 감소로 인한 것으로 사료된다.

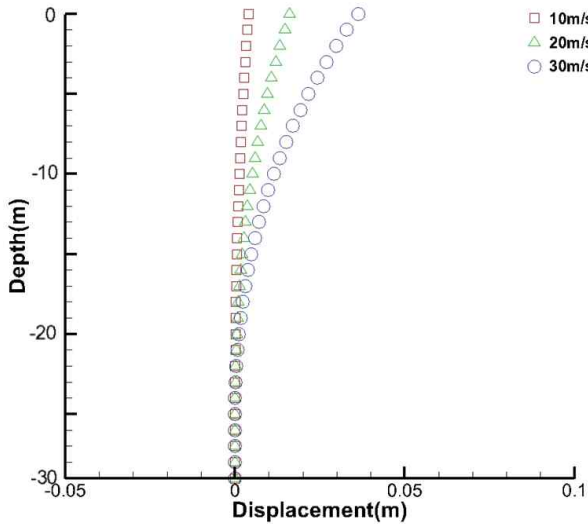


Fig. 10 Displacement according to wind velocity

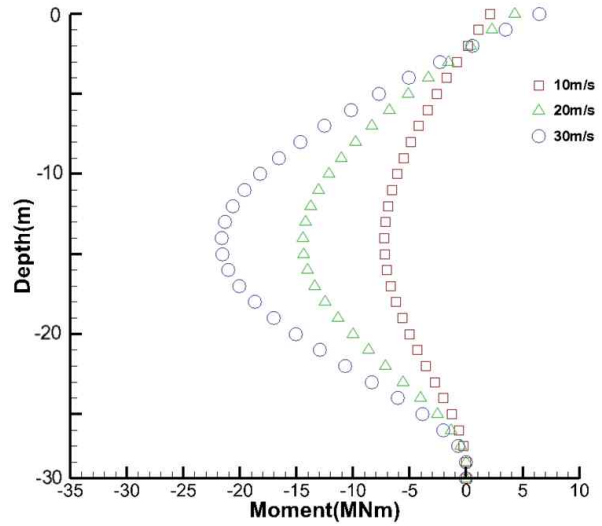


Fig. 13 Moment according to wind velocity

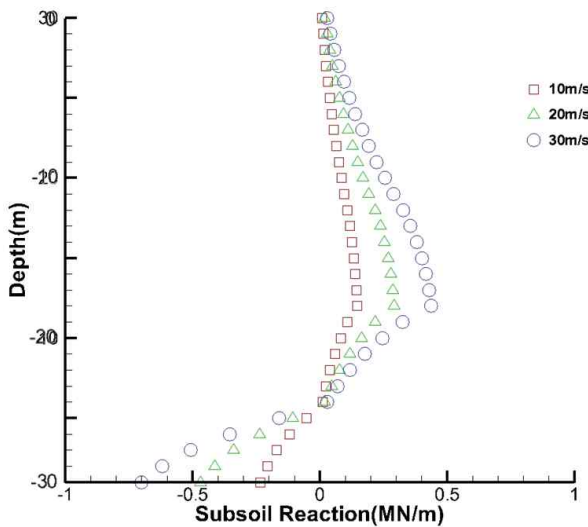


Fig. 11 Subsoil reaction according to wind velocity

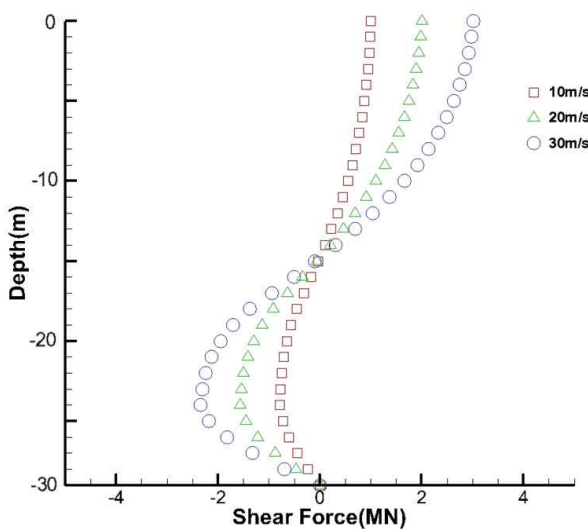


Fig. 12 Shear force according to wind velocity

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다층지반에 근입된 모노파일 기초의 해상 풍력 타워가 수평하중을 받을 때, 풍속에 따라 해상 풍력 타워에 작용하는 풍력과 파력을 산출하여 기초 주변 지반의 응답을 해석하였다. 지반 응답 해석을 위해 p-y 곡선이 사용되었으며, 풍속은 태풍의 분류 기준인 10m/s, 20m/s, 30m/s가 사용되었다. 해석 결과는 점성토의 경우 Andersen et al.(2012)의 해석 결과와 비교하였으며, 사질토의 경우에는 Jang et al.(2013)의 해석 결과와 비교 검증하였다.

해석 결과 기초의 중심부에 반력의 집중이 나타며, 지표와 가까운 층에서는 하중을 거의 견디내지 못함을 확인할 수 있다. 따라서 기초의 직경 혹은 강성의 변화를 통한 고른 하중 분포의 유도가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 해상 풍력 타워의 안정성의 해석에 기초 해석으로써 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 광역 경제권 선도 사업(제주도 해상 풍력 단지 개발을 위한 해양환경 측정 및 분석 기술 개발)의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

#### References

[1] Andersen, L.V., Vahdatirad, M.J., Sichani, M.T., Sorensen, J.D.(2012), "Matural frequencies of wind turbines on monopile foundations in clayey soils-A probabilistic approach", *Computers and Geotechnics*.



43 1-11

- [2] Coastal Development Institute of Technology,(2011). *Offshore Wind Power Generation technical manual*. Coastal Development Institute of Technology, Japan.(in Japan)
- [3] Gaudiosi. G.(1999), “Offshore Wind Energy Prospects”, *Renewable Energy*. Vol. 16, No. 2, pp. 828-834.
- [4] Iguchi, T., Sekita, K., Yamamoto, K. and Morita, Y.(2000), “A Feasibility Study on Advantage of Offshore Wind Turbine”, *JSCE Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 16, pp. 141-146.(in Japan)
- [5] Jang, H.S., Kim, H.S., Kwak, Y.M. and Park, J.H.(2013), “Analysis of Lateral Behavior of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation in Sandy Soil”, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 25, No. 4, pp. 421-430.(in Korean)
- [6] Kim, B.S., Kim, M.E. and Lee, Y.H.(2008), “Basic Configuration Design and Performance Analysis of a 100kW Wind Turbine Blade using Blade Element Momentum Theory”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 6, pp. 827-833.
- [6] Kim, N.H and Cao, T.N.T.(2008), “Wave force analysis of the two vertical cylinders by boundary element method”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 359-366.
- [7] Kim, N.H. and Jin, J.W.(2010), “Assessment of Wind Energy Potential around Jeju Coastal Area”, *KSCE Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 6, pp. 617-625.(in Korean)
- [8] Kim, N.H. and Jin, J.W.(2013), “Sensitivity Analysis of Offshore Wind Turbine Tower Caused by the External Force”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 859-864.
- [9] Kim, N.H, Park, M.S. and Yang, S.B.(2007), “Wave force analysis of the vertical circular cylinder by boundary element method”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 31-35.
- [10] Kim, S.H and Park, S.S.(2005), “A Study on the Behavior of High-rise Buildings Considering Soil-Structure Interaction”, *Journal of the Korea structural Maintenance Inspection*, Vol. 9, No. 4, pp. 243-251.(in Korean)
- [11] Kyoung, N.H., Yoon, J.E., Jang, M.S. and Jang, D.S.(2003), “An Assessment of Offshore Wind Energy Resources around Korean Peninsula”, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 23, No. 2, pp. 35-41.(in Korean)
- [12] Matlock, H.(1974) “Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay”, *Proceedings 2<sup>nd</sup> Annual Offshore Technology Conference*, Dallas, No. OTP 1204.
- [13] Moon, S.R., Kang, T.S., Nam, S.Y. and wang, J.(2007), “A Study on Scenario to establish Coastal Inundation Prediction Map due to Storm Surge”, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 492-501.(in Korean)
- [14] Nah, D.B., Shin, H.S. and Nah, D.J.(2011), Offshore Wind Power. Review, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 143-153.(in Korean)
- [15] Nagai, T., Suzuki, K., Ushiyama, Y., Hosomi, M., Ogawa, R. and Noguchi, H.( 2008), Development of Medium Size Wind Power System and its Application to Coastal Areas. ISSN 1346-7540, *Port and Airport Research Institute*.(in Japan)
- [16] Niedzwecki, J.M. and Duggal, S.D.(1992), “Wave run-up and forces on cylinder in regular and random waves”, *Journal of waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 615-634.
- [17] 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. 2, No. 2080, pp. 473-484.

원고접수일 : 2013년 11월 14일

심사완료일 : 2013년 12월 24일

원고채택일 : 2013년 12월 27일