

해상풍력 파일 굴착직경 결정을 위한 하부구조물 설계해석

이기옥*, 선민영**,***,#

*군산대학교 ICT융합조선해양연구원,

전북대학교 기계설계공학부, *전북대학교 친환경기계부품연구센터

Design Analysis of Substructure for Offshore Wind Pile Excavation

Gi-Ok Lee*, Min-Young Sun**,***,#

*ICT Convergence Ship And Marine Research Institute, Kunsan National University, Korea

**Department of Mechanical Design Engineering, ChonBuk National University, Korea

***Eco-Friendly Machine Parts Design Research Center, ChonBuk National University, Korea

(Received 18 February 2019; received in revised form 8 March 2019; accepted 16 March 2019)

ABSTRACT

With recent rapid increases in the power generation capacity of offshore wind power generators, reliable structural analysis of the large-scale infrastructure needed to install wind power generators at sea is required. Therefore, technology for heavy marine equipment such as barges and excavation equipment is needed. Under submarine conditions, rock drilling technology to install the substructure for offshore wind pile excavation is a very important factor in supporting a wind farm safely under dynamic loads over periods of at least 20 years. After investigating the marine environment and on-site ground excavation for the Saemangeum offshore wind farm, in this study we suggest.

Key words : Offshore Wind(해상풍력), Substructure(하부구조), Excavation(굴착), Ultimate Limit State(극한한계상태), Fatigue Limit State(피로한계상태)

1. 서 론

해상풍력은 육상풍력과 다르게 해상에 풍력발전기를 설치하기 위한 대형 하부구조물의 고정을 위하여 바지선 및 굴착장비 등의 대형 해상장비 기술이 필요하다. 하부구조물(Substructure)의 설치를 위한 해저지반의 암반굴착 기술은 그 지지구조물이 25년 이상 동하중에 견딜 수 있도록 하는 매우 중요한 시공 기술이다.

고정식으로 수심 30~50m 내외의 해상에 설치되는

3MW 이상급 대형 해상풍력 터빈을 설계수명 동안 안전하게 지지할 수 있음은 물론 경제성면에서 국제적 경쟁력을 갖춘 하부구조물(Substructure, Support Structure + Foundation) 시스템을 안정적으로 지지하는 개발이 필요한데 이를 위한 암반 급속 굴착 기술개발이 절실하다.

하여 Substructure 시스템의 설계 Process에 지반 강도를 정립하고 선진국 수준의 지지설계기준에 관한 국내 해저지반의 조사 및 굴착정도의 기술을 마련함에 연구 목적을 두고 있으며, 일반적인 Substructure의 설치 Type^[1-2]은 Fig. 1과 같이 대형 강관파일을 해저 지반에 향타 또는 Pre-boring 후 그라우팅 고정하는 모노파일기초, 우물통 형식의 Caisson 구체로 육

Corresponding Author : smy5439@jbnu.ac.kr

Tel: +82-63-270-2453; Fax: +82-63-219-5433

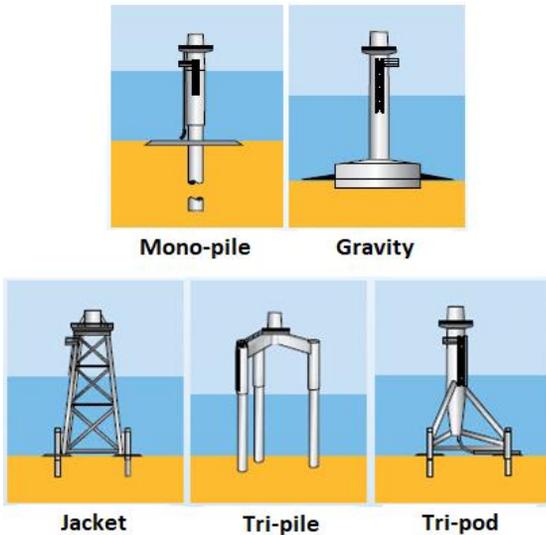


Fig. 1 Offshore wind substructure type

상에서 제작 후 운반 및 거치하는 형식의 중력식 기초, 육상 제작된 철골 구조물을 해저면 지반에 그라우팅 방법으로 고정하는 Jacket 기초, 대구경 강관파일 을 해상 항타 후(Ø2,000) 상부에 콘크리트 구조체 설치하는 합성파일 기초 등이 있다.

본 연구에서는 강관파일(Steel Pile) 하부지지구조의 좌굴, 전단력, 휨모멘트 등에 견디는 단면구조 결정에 따른 하중해석(연직하중 및 수평하중, 진동하중, 기타 하중에 대해 구조물이 저항할 수 있도록) 후에 RCD 천공 굴착직경 결정이 주요 목적이다.

2. 하부구조물 설치를 위한 Process

[풍황 조사] → [해양환경 기초조사] → [지질굴착 조사] → [상부풍력시스템선정] → [지지구조물설계 해석] → [상·하부시스템 통합설계] → [하부구조물 상세설계] → [굴착장비운반/설치] → [하부구조물 설치(암반굴착)] → [상부시스템 거치]

본 연구에서는 상기 프로세서 중 새만금해상풍력 Site의 해양환경 여건조사 및 지반굴착조사 후 선정 하부구조물의 하중해석 실시, 암반굴착을 위한 단면의 결정과 소요 굴착장비의 Bit 단면 결정에 대해서 제시 하고자 한다.

Table 1 The harmonic constant and inharmonic constant of tide

Topic		Offshore Mast	
Observed position		35°27'55"N 126°07'45"E	
Observed time		2011.4.12.~6.17	
Harmonic Constant	Component tide topic	Semi range (cm)	Crust (°)
	M2	187.7	50.09
	S2	71.29	103.1
	K1	31.24	252.1
	O1	25.86	213.5
Inharmonic Constant	Mean high water interval	1h 44min	
	Mean low water interval	7h 56min	
	Highest high water	632.18m	
	Mean sea level	316.09cm	
	Lowest low water	0.00cm	
Tide form number		0.22	

2.1 하부구조물 설치 Site 해양여건 조사

지지구조물이 설치되는 해양지반 환경, 설치될 발전기하중, 운전 시 동하중, 해양환경 하중의 정확한 평가는 Substructure의 안전성 설계의 필수 항목이다.

본 연구에서 적용한 해상 풍력 지지구조물의 설치 해역은 새만금 해상풍력 99.2MW 단지 중 No.15 중심이다. 해상 풍력 발전의 해양환경 하중 계산을 위해서는 설치 지점에서 수위 변동을 고려하고, Table 1 과 같이 국립해양조사원, 영광 검조소, 해모수의 계측데이터 분석에 따른 수위(Water Level)를 참조하였다.

2.2 Bracket Type Substructure 설치를 위한 해저지반 탄성파탐사 및 굴착조사

본 연구는 국내 서·남해 Deep Mud층(약40~60m)의 해저지반에 해상풍력발전단지 개발을 위한 3-Leg Bracket Type Substructure의 설치를 목적으로 지반 굴착 기술에 관한 사례^[3]를 연구하고 고정식 하부구조물 시공 및 상용화를 돕는데 있다. 이를 위해

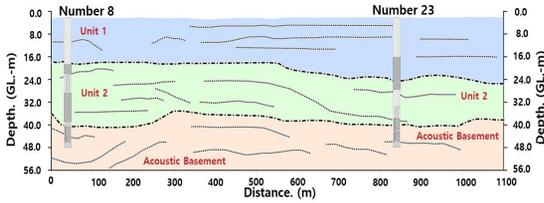


Fig. 2 Seismic exploration

Fig. 2와 같이 새만금 해저지반조사를 기준으로 3 - Leg Bracket Type Substructure 설치를 위한 지반 굴착기술에 적용 하고자 한다.

- 설계하중 산정 시 적용된 지반조건(지질주상도, N치 등)
- 압축강도: UCS - 50.04 MPa(No.15 지점)
- Pile Boundary Condition : fixed boundary at 2 times of pile diameter below seabed (EL-15.0).

2.3 지지구조물 하중 해석

파랑에 의한 하중을 산정하기 위해서는 Morison Formular를 이용한다. 단위 길이 당 파하중은 아래의 식 (1)과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u^2 + \rho C_m V \frac{du}{dt} \quad (1)$$

여기에서, C_m 은 Inertia 계수, C_D 는 Drag 계수, A 는 단위면적, u 는 물 입자 속도이다.

조력하중은 임의 지점에서 여러 가지 형태의 조류의 합으로 이루어져 있으므로, 설계변수를 결정하기 위해서는 실제로 측정을 하거나 기록된 자료를 사용해야 한다. 조류의 속도는 Owner의 Design Specification에서 Field 데이터로 수심에 따라 주어 지지만 이러한 데이터가 없을 경우 아래의 식 (2)을 이용하여 계산한다.

$$V(z) = V_{tide}(z) + V_{wind}(z) \quad (2)$$

$V(z)$ 는 Sea Floor에서 거리 z 인 지점의 Total Current Velocity, V_{tide} 는 해수면에서 Tide Current Velocity, V_{wind} 는 해수면에서 Wind Generated Current Velocity이다.

타워에 작용하는 풍하중은 아래의 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$F_{wind-t} = \frac{1}{2} A C_D \rho_a V_w^2 \quad (3)$$

여기에서, A 는 바람에 영향을 받는 타워 면적, C_D 는 추력계수, ρ_a 는 공기밀도, V_w 는 바람의 속도이다. 기타 하중으로는 빙하중과 지진, 충격하중 등이 있다.

본 연구에서는 Table 2과 같이 풍력 시스템사 (Siemens-3.6-130, 85m Tower)의 하중 Data를 바탕으로 자하중과 외력하중의 데이터를 조합한 극한 하중을 하부구조물에 적용(하부구조물의 TP상부) 하여 하부구조물 각 부재의 허용응력을 계산 적용 하였다.

해상풍력발전기 지지구조물은 해상의 다양한 환경하중조건하에서^[8] 발전기의 수명이 지속되는 기간 동안 충분한 구조강도를 유지하여야 한다. 하중 평가과정을 거쳐 산정된 하중케이스를 지지구조물에 적용한 뒤, 유한요소법을 응용한 상용프로그램 (ANSYS)을 이용하여 지지구조물 중요 부위의 변위, 응력, 변형률, 피로수명 등의 평가를 수행하였다. 해석절차는 국제 설계 기준에 따라 (DNV-OS-J 101 Unfactored Load)^[9-10] 해상풍력 지지구조물 해석

Table 2 Design load(Ultimate Load, Fatigue Load)

Extreme (ULS) Loads at Interface Level					
Load Case	Fz [MN]	Fx [MN]	My [MNm]	Mz [MNm]	Comment
S-3.6-130 (85m Tower) - Extreme Overturning Moment	3.67	0.905	72.3	0.935	Characteristic Loads
S-3.6-130 (85m Tower) - Extreme torsional moment	3.48	0.265	18.8	8.95	Characteristic Loads
S-3.6-130 (85m Tower) - Extreme Overturning Moment	4.04	0.995	79.3	1.03	Factored Loads
S-3.6-130 (85m Tower) - Extreme torsional moment	4.7	0.355	24.7	12.1	Factored Loads

을 위해서 상용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 이용하였다. ANSYS Design Modeler를 이용하여 3D 모델링 및 Meshing을 한 뒤, 하중에 대한 구조 해석을 ANSYS R18.2 Design Simulation으로 수행하였다.

2.4 경계 조건 및 Ultimate Limit State/Fatigue Limit State 해석

2.4.1 경계 조건

본 해석에서 등가 파일(점토층 아래 15m)은 범 요소로 포함되었다. 파일은 점토층 아래 15m에 고정되며, Wave Loads는 Shaft-0.81[MN], Pile Sleeves-0.81[MN], Load Factor Included=1.35이다.

2.4.2 Ultimate Limit State 해석

해석 경계조건으로는 Fig. 3과 같이 해저면에 닿는 3개 부분을 완전 고정하여 자유도를 구속시켰으며, 본 해석을 위해 사용된 재료는 355MPa의 압축 및 인장 항복강도(Table. 3)를 가지는 구조용 강 및 그라우팅 부분에 대한 그라우팅 재료이다.

비선형 좌굴 해석 모델은 최고 임계하중이 기초로 선택되는 선형좌굴해석을 기반으로 구성되는데, 실제로 이것은 항복에 대해 사용되는 완전 탄성 - 완전 소성 모델이 비선형 모델에 적용될 수 없다는 것을 확인하였다. 이는 소성역(Plastic Region)에서 완전하지 않은 강재에 대한 이중선형(bi-linear) 응력-변형 곡선을 추정함으로써 해결된다. 경험식에 따르면 접선계수(Tangent Modulus) $E/1000$

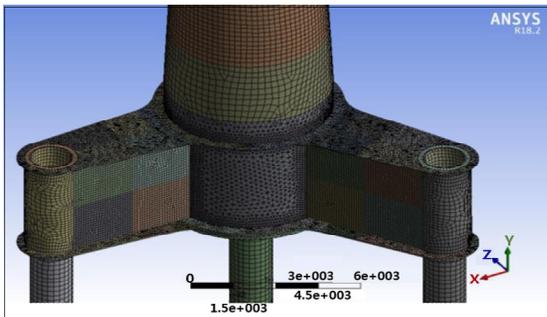


Fig. 3 Bracket substructure 3D mesh model

Table 3 Structural steel properties

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive From	Young's Modulus	
7	Young's Modulus	2.00E+11	Pa
8	Poisson's Ratio	0.3	
9	Bulk Modulus	1.67E+11	Pa
10	Shear Modulus	7.69E+10	Pa
11	Tensile Yield Strength	3.55E+02	Mpa
12	Compressive Yield Strength	3.55E+02	Mpa

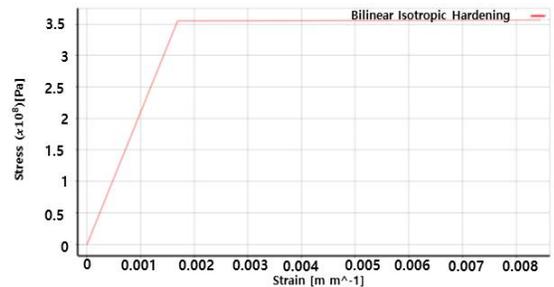


Fig. 4 Non-linear material properties

이 사용되어야 하며, 여기서 E는 구조강의 영률(Young's Modulus)이다. 자세한 내용은 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

2.4.3 Fatigue Limit State 해석

하부구조물은 Autodesk Inventor에서 모델을 생성하고 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench 18.2를 사용하여 해석하였고, DIN EN 1993-1-6에 따라 부재의 중간면을 고려한 Shell Model로 구성하였으며, Mesh 구성은 Shell요소를 사용하여 ULS 해석은 60mm의 Mesh 크기로, FLS 해석은 아래 Fig. 5와 같이 30mm의 매쉬 크기를 적용하였다.

ULS 좌굴과 FLS 해석은 Hooke의 법칙에 기반한

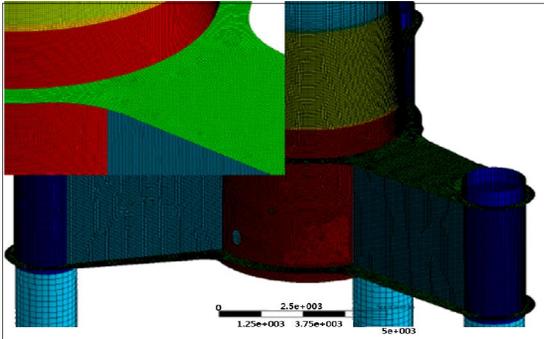


Fig. 5 Mesh for FLS

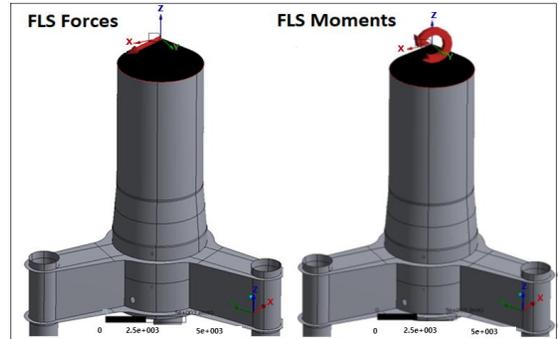


Fig. 6 FLS forced and moments

선형 탄성재료(Young's modulus는 210,000 MPa이고 Poisson's 비는 0.3임)를 사용하였고, 설치구조물의 해수위 적용은 15.0m, 부분 안전계수($\gamma=1.35$)를 적용하여 아래 Table 4와 Fig. 6과 같은 결과(이때 S-N 곡선에서 $N=2e^8$ 일 때 그 기울기 $m=3.5$ 임).

하부구조물의 피로 평가는 모든 주 강제 요소에 대해 수행되는데, 그 결과 모든 요소가 25년의 피로수명을 만족하는 것으로 나타났다. 최대 핫스팟 응력 범위가 해석 결과로부터 도출되었다. 그 다음 해당하는 사이클 횟수가 식 (4)을 사용하여 계산되었다.

최대 핫스팟 응력 범위가 해석 결과로부터 도출되었고, 그 다음 해당하는 사이클 횟수가 아래의 식을 사용하여 계산되었다.

$$\log N = \log a - m \log \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad (4)$$

여기서, N =사이클 횟수, m =SN-곡선의 기울기, $\log a$ = $\log N$ 축에 대한 평균 SN곡선의 절편, t =부재의 두께, k =두께 효과 지수, 강판의 $t_{ref}=0.25\text{mm}$ 이며, 다른 파라미터들은 Fig. 7 S-N곡선에 의해 주어진다.

Table 4 Considered DEL for FLS

Load	Fx [kN]	Fy [kN]	Fres [kN]	Fz [kN]
FLS	141.3	82.9	163.8	48.5
Load	Mx [kNm]	My [kNm]	Mres [kNm]	Mz [kNm]
FLS	5816.0	9330.3	10994.7	1853.9

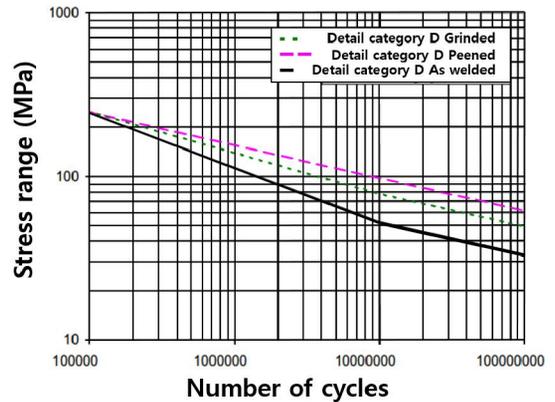


Fig. 7 S-N curve by grinding and peening as welded condition

Table 5 S-N Curves for improved details

S-N curve	Improvement by grinding			Improvement by hammerpeening
	$N \leq 10^7$ cycles $m_1=3.5$	$N > 10^7$ cycles $m_2=5.0$	Thickness exponent	For all N $m=5.0$
	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$	k	$\log \bar{a}$
D	13.540	16.343	0.15	16.953
E	13.360	16.086	0.15	16.696
F	13.179	15.828	0.20	16.438
F1	12.997	15.568	0.20	16.178
F3	12.819	15.313	0.20	15.923
G	12.646	15.066	0.20	15.676
W1	12.486	14.838	0.20	15.448
W2	12.307	14.581	0.20	15.191
W3	12.147	14.353	0.20	14.963

적합한 SN곡선은 DNVGL-RP-C203에서 도출되었으며, Table 5에서 확인할 수 있다.

3. Pile 직경 및 굴착 단면 결정

Fig. 8에서와 같이 하부구조물과 그 지지파일의 모델링과 해석결과를 기반으로 단면이 결정되고, 아래와 같이 해저지질의 수평변위, 벤딩모멘트/응력 등 특성을 분석하여 지지파일의 직경에 따른 굴착직경을 결정하였다.

- 1) 28공의 지반시추 결과 UCS(=32MPa Mean)와 RQD(%)는 Fig. 8과 같고,
- 2) 해저 토질 상호 구조작용 매개 변수에 따른 파일 상단 하중특성은 Fig. 8과 같다.
 - 안전 측면 평가 : 가장 낮은 토양피복 횡 저항
 - 암반 횡 방향 강성의 변화
 - : 평균 공칭 100%에 안전율 25% 고려
 - Mud Depth에 따른 수평파일 상단하중 변화
- 3) Table 6의 파라미터들이 비선형 스프링 모델링에 관련하여 퇴적층 및 암반에 대해 사용되었다.

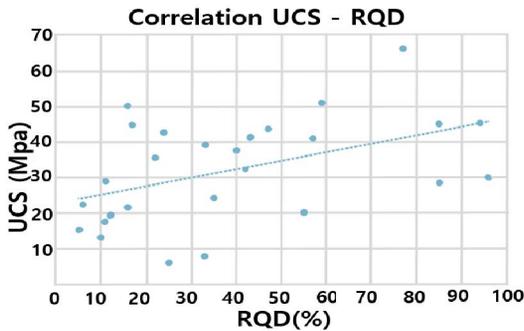


Fig. 8 Correlation UCS(=32MPa Mean) - RQD(%)

Table 6 Ground parameters (characteristic values) for soil-pile springs

		Subm. Dersity	Friction Angle	UCS	Material SF
	Type	[t/m ³]	[deg]	[MPa]	[-]
Soil	Sand	0.7	17	-	1.5
Rock	Mudst one	1.7	-	32	1.5

본 연구에서는 예측하지 못하는 실제 수평파일 상부하중의 잠재적인 변화를 검토하기 위하여, 1,000kN에서 1,500kN 범위에서 효과가 연구되었다. 이 상황에서는 2m의 세굴 깊이가 고려되었다. 그 반응은 아래 Fig. 9~11에 나타내었다.

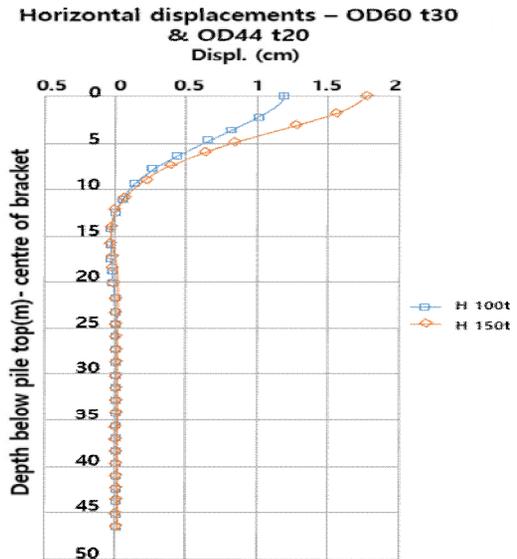


Fig. 9 Pile lateral displacements - 1000 to 1500kN

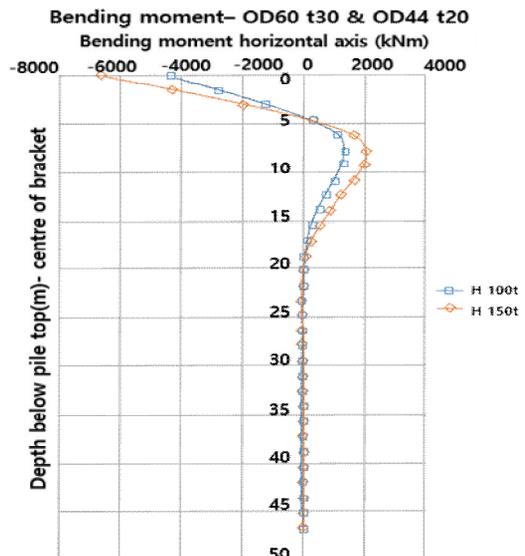


Fig. 10 Pile lateral bending moment - 1000 to 1500kN

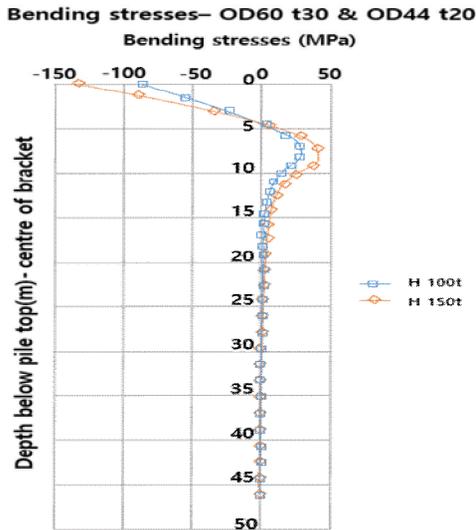


Fig. 11 Pile lateral stress - 1000 to 1500kN

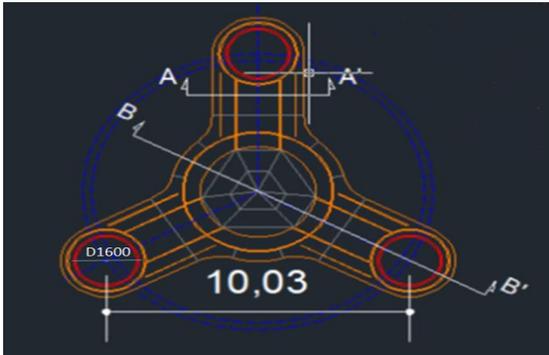


Fig. 12 Bracket substructure cross-section decision

결과적으로, 해양환경 및 해저토질의 특성을 고려하여 시뮬레이션 한 결과 3-Leg Bracket Pile의 초기 단면은 Fig. 12와 같이 1,600mm로 선정되었다.

Bracket 기초구조물의 시공은 공장에서 Bracket을 제조하고, 이를 바지선에 선적하여 운반하여 가설위치에 거치한 후 Bracket Type 파일을 천공 압입한 후 Bracket을 Sea Bed에 설치 및 타워설치의 순서로 진행되는데, Fig. 13과 같이 굴착단면의 직경은 3-Leg Bracket Pile단면 직경 D1,600mm보다 약간 크게 조합 Bit로 굴착이 필요하다고 판단된다.



Fig. 13 Excavating equipment : (a) foundation drilling (b) integral type hammer

4. 결론

Bracket 기초구조물 설치를 위한 Deep Mud층을 관통하는 암반 천공작업은 현재 석유 및 가스 채굴 과정에서 많이 응용되었던 RCD(Reverse Circulation Drill) 장비가 보편적으로 사용되고, 3MW이하의 해상풍력 Substructure로 많이 쓰이는 Jacket 구조물의 지지 Pile의 직경 300mm 이하의 파이프를 사용하여 만들어져 비교적 가벼운 천공장비(10~15ton)를 사용하여 시공해 설치도 쉽지만 본 연구에서와 같이 3MW 이상의 해상풍력발전기 Substructure로 Jacket /Bracket/Tri-Pod Type 지지 Pile의 직경은 1,600~2,500 mm 이상의 대구경 파이프에 조합비트로 제작하여 굴착하는 방법으로 구조물의 급속시공과 안전성 확보가 필요하겠다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업 제 2016-4호 (에너지기술개발사업)의 지원으로 수행된 결과로 관계자 여러분께 감사를 드리며, 연구에 많은 도움을 주신 OWEC사, 광성지엠(주), 전북대학교 해양발전플랜트연구소 연구원들 및 군산대학교 ICT 융합조선해양연구원 연구원들께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Sun, M. Y., Lee, S. B., Lee, K. Y., Moon, B. Y., "The study on substructure design and analysis for 5MW offshore wind turbine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1075-1080, 2014.
2. Jeon, J. D., Jeon, E. C., "Optimize Design for 5MW Offshore Wind Turbine Sub-structure Jack-up Platform," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 115-122, 2012.
3. Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B., Designers' guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design-General rules, ThomasTelford, pp. 19-47, 2004.
4. De Normalización, C. E., EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, pp. 15-48, 2005.
5. DNV-GL, DNVGL-ST-0126: Support Structures for Wind Turbines, DNV-GL, pp. 65-72, 2016.
6. Choi, Y. H., Kang, M. G., Park, S. H., "Seismic Qualification Analysis of a Small Savonius Style Vertical Axis Wind Turbine," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 122-129, 2018.
7. Choi, Y. H., Hong, M. G., "Seismic Qualification Analysis of a Vertical-Axis Wind Turbine," The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 21-27, 2016.
8. Chen, I. W., Wong, B. L., Chau, S. W., Huang, H. H., "Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines," Energies, Vol. 9, No. 4, pp. 5, 2016.
9. DNV-GL, Fatigue Design Of Offshore Steel Structures, DNV-GL, pp. 12-16, 2012.
10. DNV-GL, Design of Offshore Wind Turbine Structures (DNV-OS-J101), DNV-GL, pp. 99-139, 2014.