

# 점토층 지반에 설치 가능한 8MW급 해상풍력발전기 하부구조물 개발

서광철\* · 최주석\*\* · 박주신\*\*\*†

\* 목포해양대학교 조선해양공학과 교수, \*\* 한국조선해양기자재연구원 전남본부장,  
\*\*\* 삼성중공업 중앙연구소 수석연구원

## Development of Foundation Structure for 8MW Offshore Wind Turbine on Soft Clay Layer

Kwang-Cheol Seo\* · Ju-Seok Choi\*\* · Joo-Shin Park\*\*\*†

\* Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Managing Director, Jeonnam Headquarters, Korea Marine Equipment Research Institute, Mokpo 58762, Korea

\*\*\* Principal Engineer, Central Research Institutes, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

**요 약** : 신재생에너지 신규설비 보급이 매년 꾸준히 증가하고 있으며, 그중 개발 확장성이 풍부하고 생산유발계수가 큰 해상풍력 시장이 급성장하고 있다. 특히 서남해 권역은 최고 수준의 해상풍력 잠재량을 보유하고 있으며, 관련 프로젝트들이 추진 중이다. 본 연구는 점토층 지반에 효과적인 해상풍력 하부구조물의 개발에 있어 EUROCODE에 의한 구조물의 설계 절차를 제시하고 구조 안전성을 고찰하여 관련 기술 분야에 이바지함을 목표로 한다. 선행연구에서는 풍력발전기 용량이 5MW급을 주요 대상으로 하였으나, 서남해 해상풍력발전기 시장의 기술 추세에 부합하는 발전 용량 8MW급을 연구 모델로 선정하였다. 이에 본 연구에서는 서남해 지질 조건에 부합하는 하부구조물을 개발하고, 구조 안전성을 유한요소법을 활용하여 검증하였다. 초기 설계안에서 일부 구간을 보강하여 구조 안전성을 확보하였다. 본 연구 결과를 기반으로 하여, 향후 다양한 형태의 하부구조물에 대한 구조 안전성 평가가 가능하며, 전문화된 구조 설계 및 평가 기준을 확립하였다.

**핵심용어** : 해상풍력발전기, 하부구조물, 구조해석, 안전계수, 구조 강도

**Abstract** : The construction of new renewable energy facilities is steadily increasing every year. In particular, the offshore wind farm market, which has abundant development scalability and a high production coefficient, is growing rapidly. The southwest sea has the highest possible offshore wind power potential, and related projects are to be promoted. This study presents a basic design procedure by the EUROCODE and considers structural safety in the development of an effective offshore wind foundation in the clay layer. In a previous study, the wind power generator of 5MW class was the main target, but the 8MW of wind turbine generator, which meets the technical trend of the wind turbine market in the Southwest sea, was selected as the standard model. Furthermore, a foundation that fulfills the geological conditions of the Southwest sea was developed. The structural safety of this foundation was verified using finite element method. Moreover, structural safety was secured by proper reinforcement from the initial design. Based on the results of this study, structural safety check for various types of foundations is possible in the future. Additionally, specialized structural design and evaluation guidance were also established.

**Key Words** : Offshore wind turbine, Foundation structure, Strength analysis, Safety factor, Structural strength

\* First Author : kcseo@mmu.ac.kr, 061-240-7303

† Corresponding Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

## 1. 서론

세계 각국은 기후변화 대응 및 화석연료 고갈 위기에 대한 즉각적인 대처와 온실가스의 감축, 일자리 창출의 핵심 방안으로 신재생에너지 비중을 확대함으로써, 관련 산업의 기술 및 시장이 급속도로 성장하고 있다. 해상풍력발전은 해상, 호수, 피오르 지형 및 연안과 같은 수역에 설치된 풍력발전으로 해상에서 친환경 바람 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 발전 방식을 일컫는다. 공기역학에 따라 블레이드가 회전하면서 발생하는 기계에너지를 발전기를 통해 전기에너지로 변환하는 풍력발전은 친환경 재생에너지 중 가장 높은 발전량 효율을 나타낸다. 해상풍력발전 설비는 크게 터빈 구조물, 하부구조물, 송전 시설, 터빈 설치 선박으로 분류되고, 설치 형식에 따라 터빈을 해상 위에 고정하는 방식에 따라 고정식과 부유식으로 나뉜다. Fig. 1은 대표적인 고정식 하부구조물 3가지를 나타내고 있다.

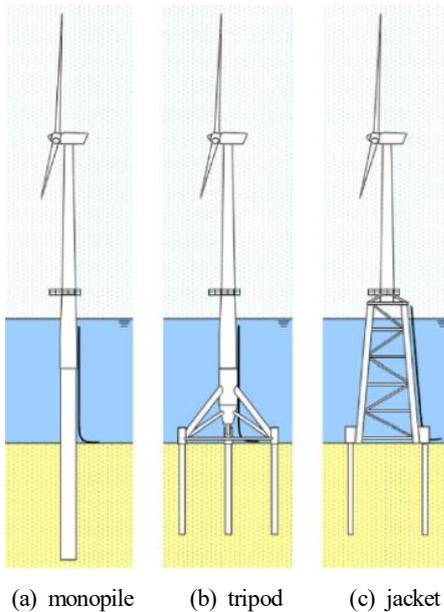


Fig. 1. Wind turbine foundation structures (de Vries et al., 2011).

국내 신재생에너지 발전 정책에도 불구하고 해상풍력발전기 관련 기자재 대부분을 수입하는 등 해외 기술 의존도가 높다. 이때 해상풍력 관련 국산화율은 20%이다. 해상풍력 하부구조물이란 해상에 설치되는 풍력발전설비를 지지해서 설치되는 구조 시스템을 말하며, 타워, transition piece, 하부구조물, 그리고 해저면에 설치되는 파일을 포함한다. 해상풍력발전 전체 공사비에서 하부구조물이 차지하는 비율은 25% 이상으로 그 비중이 풍력발전기 다음으로 높고, 수심의 증가에 따른 공사비가 많이 증가하는 특성 때문에 하부구조물의 경제성 확보가 사업의 경쟁력 결정하는데 중요한 인자이다.

유럽 해상풍력발전기에 주로 사용되고 있는 대구경 모노파일(monopile) 하부구조물은 수심 30 m 이내에서 시공되며 안전하고 효율적인 시공을 위하여 기초 굴착 장비가 필수적으로 필요하다. 이 장비들은 소수의 해외 선진업체들이 국내 시장을 상당 부분 점유하고 있어서 가격 경쟁력을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 세계적으로 가장 큰 RCD 장비 업체는 독일의 Wirth사로 대부분 국내 생산 RCD 장비의 모델이 되고 있으며, RCD Machine과 조합 장비인 오실레이터 역시 독일의 Leffer사가 국내의 시장을 넓게 점유하고 있다(Choi et al., 2010). 대구경 모노파일을 제작하기 위해서는 2,500톤 이상의 벤딩 머신 설비 및 용접 제작, 검사 경험이 있는 전문가가 필수적으로 필요하다. 서남해안 해상 풍력단지 설치 예상지역의 경우, 대부분 연약 점토층으로 구성되어 있으며, 지반 저항력 부족으로 인한 침하 방지에 적합한 하부구조물 및 지역 기반 산업단지에서 제작 및 운송을 할 수 있는 방식에 대한 다방면의 종합적인 검토가 필요하다. 본 연구와 관련이 있는 선행연구를 조사하여 주요 연구 결과를 아래와 같이 요약하였다.

Velarde et al.(2019)는 5 MW 해상풍력발전기의 중력식 하부구조물의 설계에 사용되는 다양한 매개변수를 활용하여, 피로 하중의 민감도 분석을 수행하였다. Monte Carlo 시뮬레이션의 선형회귀와 Morris 스크리닝을 사용하여 환경 하중과 토양의 속성 변경의 영향을 검토하였다. 검토 결과로부터 각 변수 간 중요도를 랭킹 하여 유사 구조에 대한 엔지니어링 시 우선순위를 제안하였다.

Ueda et al.(2020) 흡입 버킷 기초를 가진 해상풍력발전기의 지진파에 대한 구조 거동을 스케일 모델 테스트와 유한요소 분석 역학 공정 프로그램을 이용하여 다양한 조건에 대해 수치해석을 수행하였다. 다중 메커니즘 모델을 이용하여 태풍 조건에서 정적 및 주기적 하중조합에 대해 평가를 하였으며, 계산된 결과는 선행 실험결과와도 잘 일치함을 확인하였다.

Sun et al.(2014)는 5 MW급 해상풍력 하부구조물과 관련하여 구조물의 설계방법을 제시하고 그 구조 안전성을 고찰하였다. 연구에서는 바람의 영역과 접근하는 파동 행렬 간의 관련성을 수치적 모델링을 통하여 조사하였다. 설치 해역은 서남해안 실증 단지이며, 구조 강도 평가는 상용프로그램인 ANSYS를 활용하였다. 풍력발전기의 하중해석은 GH-BLADE를 이용하였고, 하부구조물의 구조 안전성 평가 기준은 AISC 9th를 근간으로 진행하였다. 설계안은 극한하중 조건에서 허용기준을 모두 만족하였다.

Ma and Yang(2020)은 하이브리드 모노파일을 기초로 한 5 MW 해상풍력발전기를 연구 대상으로 하였다. 하이브리드 하부는 기존 강관을 대체하여 모노 파일 지름을 줄여, 파일에 가해지는 파랑 하중을 감소시키는 초고성능 콘크리트 충전 강관 구조이다. 제안모델의 구조 안전성을 검증하기 위

하여 최종한계상태 설계법으로 검토하여 요구조건을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

Lee and Kim(2014)은 최근 개정된 DNV 선급 규정을 토대로 한 이론 및 경험적 평가 결과를 유한요소법을 이용한 수치해석 결과와 검증하였다. 또한, 해상풍력발전기의 대구경 파일의 경우 국내에서는 아직 설계 및 설치 경험이 적기 때문에 설계 민감도 분석을 통하여 지배적인 설계 변수들을 도출하고, 경제성을 고려한 최소중량 최적 설계를 수행하여 최종 형상을 결정하였다. 최적 설계를 통해 초기 설계안 대비 축하중 안전계수 23.4%, 굽힘 모멘트 안전계수를 10% 낮추면, 전체 안전계수를 만족하면서 파일의 무게를 24.2%, 그라우트와 TP는 3%의 무게를 줄일 수 있음을 확인하였다.

Lee et al.(2020)은 모노파일 플랜지 체결 방식에 사용되는 트랜지션 피스의 기본 설계를 수행하였다. 터빈 사로부터 모노파일 및 트랜지션 피스의 설계안이 반영된 통합하중해석 결과를 받아 극한한계상태 하중과 등가 피로 하중을 이용하여 구조 안전성 평가를 수행하였다. 평가 결과는 모두 허용치를 만족하였으며, 등가 피로 하중을 이용하여 플랜지와 볼트부의 피로 수명을 계산하고, 설계 요구 수명인 25년에 비교하여 1.13배의 마진이 있음을 확인하였다.

Jang et al.(2012)는 제주도 구좌읍 월정리 해안가 해상풍력 발전 단지 내의 해상환경 설계조건을 이용하여 3MW인 타워 기둥과 하부구조물인 자켓에 대하여 상용소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 정적해석을 수행하였다. 하중 조건 중에 최대 응력은 허용응력 값 이내에서 만족하였다.

Lee et al.(2017)은 서남해안을 대상으로 국내용 해상풍력 지지구조물 설계기준을 적용하여 자켓 하부구조물 설계를 진행하였다. 사용된 설계기준은 한국선급과 DNVGL, IEC와 비교하였으며 한국선급 기준이 다소 보수적인 평가 결과를 도출하였다. 차이가 발생하는 원인으로서는 하중 계수와 저항 계수의 차이에 기인하며 그 차이는 크지 않았다. 본 연구를 통하여 국내에서 시공되는 해상풍력 지지구조물의 설계에 한국선급 기준을 적용하는 것이 가능함을 검증하였으며, 추가적인 설계/시공 경험을 축적하여 아시아 지역에 대한 적용성을 넓히는 방안을 제안하였다.

선행연구 분석을 통하여 유럽을 중심으로 많이 사용되고 있는 모노파일과 국내에서 적용되고 있는 자켓 하부구조물에 관한 연구로 대상을 분류할 수 있었다. 연구의 세부 분야는 엔지니어링 평가 기술과 하부구조물 최적화 기법이었으며 가장 중요한 지반을 검토한 내용은 미흡하였다. 본 연구에서는 검토층 해저면에 설치 안전성을 확보할 수 있는 자켓 하부구조물의 개발에 관련하여 검토된 일련의 과정들을 소개하고자 한다. 논문에서 언급된 구조 안전성 평가 내용은 관련 엔지니어링 분야에 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 2. 해상풍력 발전기 설계조건

### 2.1 하부 구조 기본 설계

해상풍력발전기 하부구조물에 작용하는 자중은 나셀, 블레이드 및 타워의 자중, 하부구조물의 자중으로 나눌 수 있다. 재현주기 50년에 해당하는 바람, 파도, 바람에 따른 발전기의 진동, 지진과 같은 동하중을 고려하여 구조물의 안전성을 검토하며, 해석모델은 Fig. 2와 같으며, 참고문헌(GL Garrad Hassan, 2012)의 자료를 연구에서 인용하였다. 파도 하중은 모리슨(Morrison) 공식을 이용하며, 적용 파도 이론은 흐름 함수(Stream function)이다. 50년 재현주기의 유의 파고는 11.5m와 파의 주기는 14.2초를 고려하였으며, 풍속은 50m/sec를 산정하였다. 지진에 대한 영향은 국내설계기준(MOLIT, 2018)의 지반분류 방법과 설계 응답 스펙트럼을 적용하였다.

이 평가법은 미국 기준에서 제시하고 있는 증폭 계수는 국내 지반특성보다 단주기 영역의 증폭을 과소평가하며, 장주기 영역의 증폭은 과대평가하는 특성이 있다. 해상풍은 풍속의 증가에 따라 해수면의 거칠기가 증가하게 되고, 이로 인해 난류 강도가 증가한다. 풍속 변화에 따른 해수면 거칠기 효과를 반영하기 위하여 IEC 61400-3(IEC, 2019)의 제안식을 설계에 반영하였다.

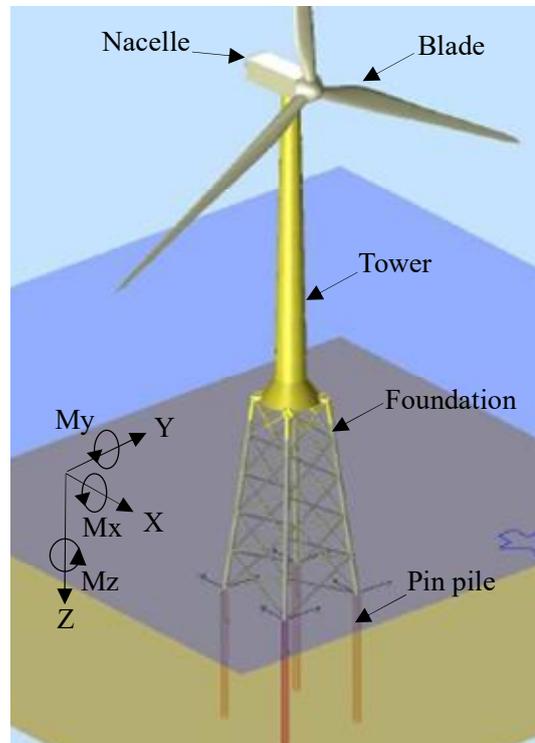


Fig. 2. General arrangement of the 8 MW offshore wind turbine on jacket foundation structure.

점토층 지반에 설치 가능한 8MW급 해상풍력발전기 하부구조물 개발

연구에서 적용된 해상풍력발전기 및 하부구조물의 설계 순서도를 Fig. 3에 나타내고 있다. 설계 인자들에 대한 정의를 한 후, 개념설계와 기본 설계, 그리고 상세설계 순서로 진행되며, 단계별 결과물이 기준을 만족하는지 비교하는 과정을 반복하는 흐름도이다.

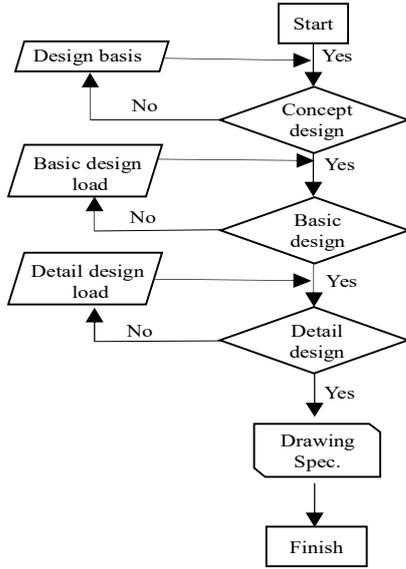


Fig. 3. Design flow-chart.

연구에 적용된 자켓 레그(leg)와 브레이스(brace) 치수와 강재 정보를 Fig. 4와 Table 1에 나타내고 있다. 모든 강재 종류는 고장력강이고 항복 응력이 355 MPa이다. 구조부재의 연결조인트(Can)에는 국부 보강구역이 위치하며, Fig. 4에서 나타내고 있다. 하중 정보는 12가지 조건별로 힘(Force)과 모멘트(Moment) 성분으로 분류하였으며, 각각 Table 2와 3에 도시하였다.

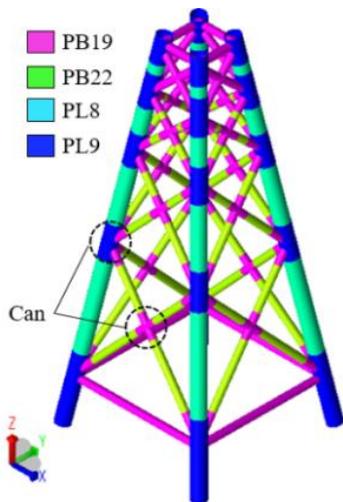


Fig. 4. Main section and can joint.

Table 1. Member dimension and type

Group	Grade	Type	O.D (mm)	thickness (mm)
PL9	S355	Leg can	2,170	36
PL8	S355	Leg	2,140	22
PB19	S355	Brace can	1,070	36
PB22	S355	Brace	1,050	22

where, OD is out diameter

Table 2. Summary of the forces by Garrad Hassan 2012

No.	L.C	Force (kN)		
		Fx	Fy	Fz
1	B01	12	-315	-11,255
2	B02	-340	223	-9,079
3	B03	-1,981	-1,958	-12,800
4	B04	1,620	1,493	-12,466
5	B05	2,208	-10	-12,466
6	B06	-2,630	180	-12,458
7	B07	-1,137	193	-6,950
8	B08	-1,870	17	-16,600
9	B09	2,370	-20	-12,400
10	B10	2,354	16	-12,707
11	B11	1,710	1,405	-12,560
12	B12	-1,720	-1,850	-12,480

where, Fx, Fy and Fz determined in each directional force

Table 3. Summary of the moments by Garrad Hassan 2012

No.	L.C	Moment (kNm)		
		Mx	My	Mz
1	B01	32,230	-20,844	27,634
2	B02	-3,898	-50	-28,536
3	B03	187,870	-189,000	-9,067
4	B04	-110,255	137,310	830
5	B05	10,800	160,128	725
6	B06	-3,325	-243,700	-8,510
7	B07	-16,400	-51,040	-1,755
8	B08	-12,580	-82,200	5,920
9	B09	12,150	152,660	820
10	B10	-9,750	-110,607	4,260
11	B11	-120,740	126,680	1,350
12	B12	162,175	-145,150	-10,450

where, Mx, My and Mz determined directional rotating moment

## 2.2 자켓 형식

서남해 연약 점토층의 특징을 반영하여, 레그상단 변위가 가장 작게 발생하고, 하중에 대한 반력 비가 가장 적게 나타

나는 경사형 자켓을 개발 모델로 선정하였다. 이 모델은 지지구조물의 인발 성능이 가장 우수하여, 조합형과 수직형과 비교하면 선호되는 방식이며, 이미 해양 고정지지 구조물로서 많은 실적을 가지고 있다. 자켓의 레그를 경사지게 배치하여 상부에 있는 발전기 하중을 효과적으로 분배할 수 있다. 하부의 전개 면적이 넓어서 고유진동수를 공진 범위에서 이격시키는 데 유리하고, 횡 방향 하중에 대한 저항성을 키울 수 있어서 구조물의 안정성을 추구하는 데 적합하다.

### 2.3 지반조건 및 파일 연결

토사 층은 약 17m, 암반은 약 15m로 분포되어 있다고 가정하였다. 특히 토사 구간의 경우에는 극한한계상태 조건을 검토하기 위하여 P.S.I(Pile Soil Interaction) 해석을 통하여 지반의 비선형성을 반영하였으며, 적용 구간은 Fig. 5의 “Soil” 영역이다. 암반에 대한 지질 강성은 별도의 PSI 없이 참고문헌(Soil measurement report, 2013)의 대꽃값을 인용하였다.

지질자료는 서남해 안마도와 위도 사이 수심 20m에 있는 풍력단지의 데이터(Soil measurement report, 2013)를 사용하였으며, 대부분 해저면은 퇴적층이 위치하고, 수심이 깊어지면 점토층과 모래층이 얇게 존재하였다. 하부구조물과 해저면의 연결을 위하여, 하부구조물 거치 후 레그(leg) 안쪽에 핀(pin) 파일을 설치하고 현장 타설 말뚝을 시공하여 하부 구조와 일체화시키는 공법을 고려하였다. 이 공법은 자켓 레그와 핀 파일이 일체형 구조를 이룰 수 있어서 구조 안정성이 우수하고, 다양한 실적이 있고 시공성이 우수하고 장비 수급이 원활하다.

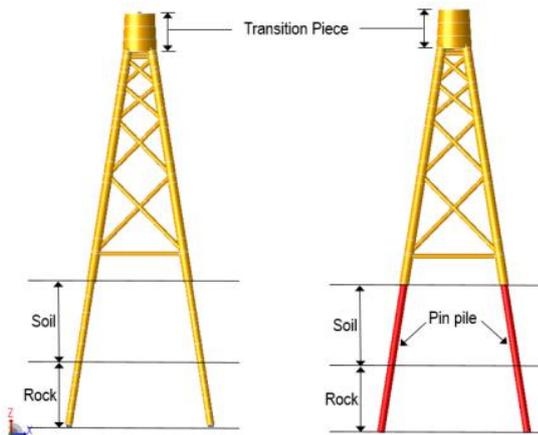


Fig. 5. Soil stiffness application of the pile.

### 2.4 Transition piece

하중 전달부(Transition piece)는 상부 하중을 하부구조물에 전달하는 시스템이며, Fig. 5의 하부구조물 최상단에 위치한다. GH-blade의 경우 빙 요소 전용프로그램으로서 이 시스템

을 빙으로 모델링한다. 따라서 하중 전달부의 실제 거동과 유사한 거동을 유발하는 등가 강성 계산이 필요하다. 상부의 자중 및 동적 하중을 하부구조물에 효율적으로 분산하기 위한 구조적 성능, 경제성, 생산성 등을 충분히 검토하여야 한다. 본 연구에서는 플랫폼 작업공간을 최소화하고, 설치 및 경제성이 우수한 콘 구조(Cone structure) 형태로 선택하였다.

### 2.5 부식 두께

해수의 영향 범위 산정은 저 극 조위 아래로 유의 파고의 40%에 해당하는 높이부터 고 극 조위 위로 유의 파고의 60% 높이까지를 고려하였다. 파고에 의해 해수의 영향을 받는 구역은 구조해석 시 부식 두께를 계산하여, Fig. 6과 같이 두께조정을 하였다.

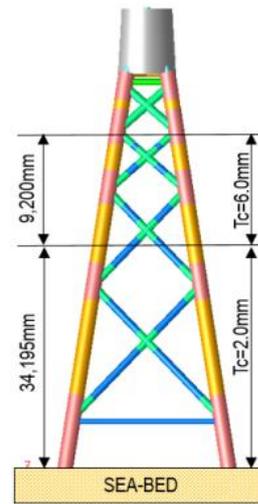


Fig. 6. Corrosion thickness (Tc).

### 2.6 환경 하중 및 하중 계수

실제 파도 조건은 50년 재현주기 조건에서 파고를 기준으로 하였으며, 최대파고는 19.3m이다. 하부구조물의 경우 고정식 설치이기 때문에, 해양부산물 부착에 의한 두께증가는 50mm를 해수의 영향을 받는 구역에 적용하였다. 보수적인 구조 강도 설계를 위하여, 터빈 상부 하중과 파랑 및 조류 하중의 방향을 같게 구성하였다. 극한한계상태설계의 5가지 하중 조건별로 적용해야 하는 재현주기에 대해서 Table 4에 나타내고 있으며, 5가지 조합을 모두 평가하여 구조 안전성 여부를 결정짓는다. 하중조합 시, 극한한계상태설계법 3가지로 분류하고 (a)와 (b)는 환경 하중이 지배적인 조건을 구성하였고, (c)는 설계조건에 결합이 있는 상황을 가정하여 Table 5와 같이 구성하였다. 세트별로 구조물에 영향을 미치는 결과지수에 가중치를 주도록 하중 계수를 하중별로 차별적으로 고려하였다.

점토층 지반에 설치 가능한 8MW급 해상풍력발전기 하부구조물 개발

Table 4. A components of the environmental loads and return period

L.S	LC	Wind	Wave	Current	Ice
ULS	1	50-yr	5-yr	5-yr	
	2	5-yr	50-yr	5-yr	
	3	5-yr	5-yr	50-yr	
	4	5-yr		5-yr	50-yr
	5	50-yr		5-yr	50-yr

Where, ULS is ultimate limit states

Table 5. Basic load factor in the ULS

SET	Limit states	Load categories			
		G	Q	E	D
(a)	ULS	1.25	1.25	1.00	1.00
(b)	ULS	1.00	1.00	1.35	1.00
(c)	ULS for abnormal wind load cases	1.00	1.00	1.10	1.00

Where, G is permanent loads such as tower weight, jacket pile weight

Q is variable functional loads according to boat impact

E is environmental loads such as extreme wind and wave loads, tidal and marine growth effect

D is deformation loads such as temperature, built-in deformation, creep load

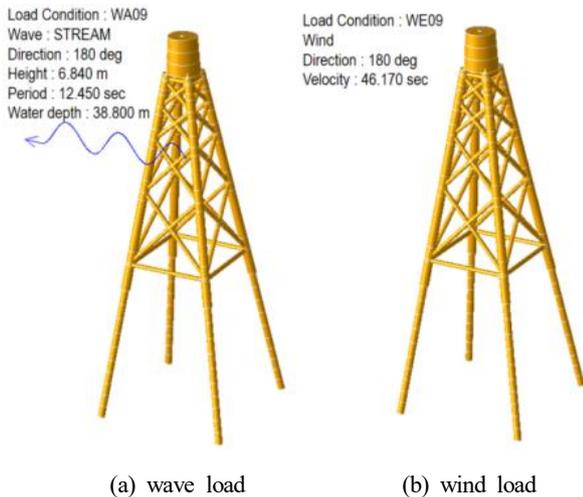


Fig. 7. Load contour from heading angle of 180 degrees.

SACS 프로그램(SACS, 2018) 내에서 입사각 180도 조건에서의 파랑 및 바람 하중이 적용된 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 파랑 하중의 경우, 파이론 및 높이, 주기 등의 정보가 표시되면서 입사각 방향을 화살표로 출력한다. 바람 하중은

지정된 풍압 면적에 입사각에 따라서 적용되며 풍속이 표시된다.

### 3. 구조 강도 해석

#### 3.1 해석 모델링 및 하중

해양구조물 및 빔 구조물의 유체-구조 연성 해석 기능을 가진 SACS V.12(SACS, 2018)를 적용하여 해상풍력발전기 하부구조물에 대한 구조해석을 수행하였다. 이 프로그램은 일반적인 유한요소해석(FEM : Finite Element Method) 알고리즘을 이용하고 있으며, 국제 구조 강도 평가 기준(NORSOK, ISO, EUROCODE, API/AISC etc) 및 선급 환경 하중 구현 기능을 포함하고 있다. 1-D 빔 요소를 사용하여, 기하학적 형상 및 구조 부재의 거동을 표현하였으며, 사용 재료의 실제 두께를 포함한 부재 치수를 적용하여 Fig. 8에 나타내고 있다. 하부구조물과 내부 관통하는 Pin-pile을 포함하고 있으며, 232개의 조인트와 291개의 멤버로 구성되고, 사용된 부재 단면은 1844개이다. 유한요소모델은 아래 Fig. 8과 같다. 단일 하중은 93개로 구분되어 있으며, 하중조합은 193개이다. 하부구조물을 구성하는 구조부재의 재료 물성값 정보는 Table 6과 같다.

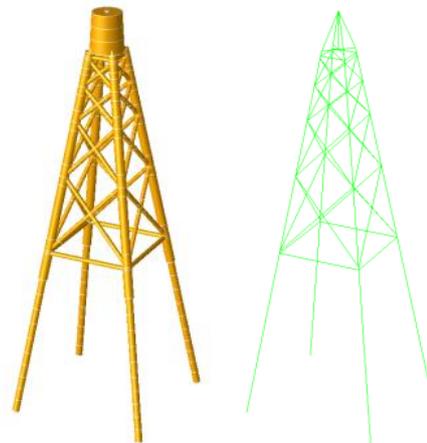


Fig. 8. FE-modeling of the jacket typed foundation structure.

Table 6. Material properties of structural member

Properties	Specification
Elastic Modulus	205,800 MPa
Poisson's ratio	0.3
Density	78.5 kN/m <sup>3</sup>
Yield strength	355 MPa
Tensile ultimate strength	420 MPa
Tensile Strain at break	15 %

### 3.2 구조 강도 평가 결과

구조 안전성 평가 기준은 EUROCODE(BS EN, 2005)이며, 해상풍력발전기 하부구조물 평가 시 빈번하게 이용되고 있다. EUROCODE는 해상풍력발전기 하부구조물 설계를 위한 전용 설계기준은 아니지만, 육상, 해상토목 분야에서 많은 실적을 보유하고 있다. 이 기준은 구조물의 붕괴와 불안정성을 해소하기 위하여 극한한계상태설계(ULS)와 사용한계상태(SLS) 설계를 권고하고 있다.

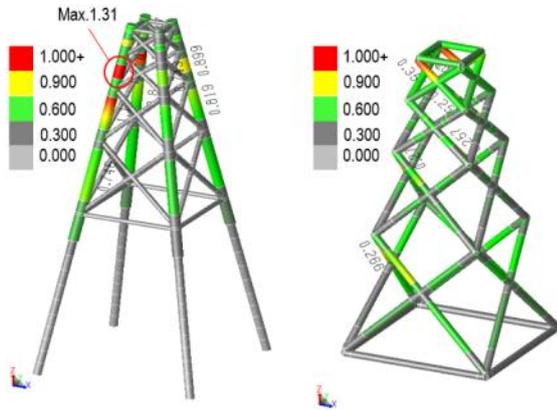


Fig. 9. Result of maximum combined UC (Initial design).

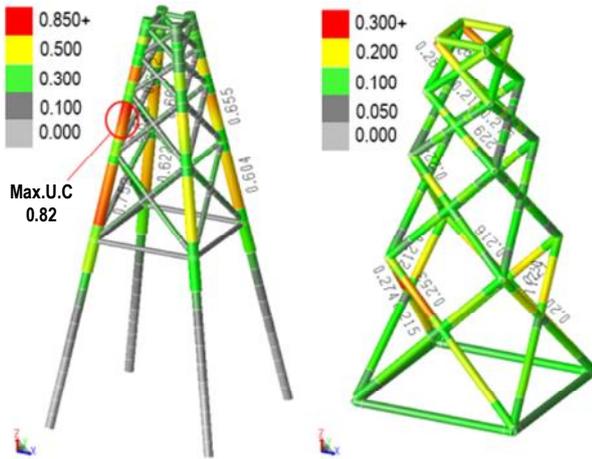


Fig. 10. Result of maximum combined UC (Reinforced design).

초기 설계된 하부구조물은 ULS 하중조합에서 일부 파이프 부재에서 허용기준(U.C-Unity Check = 1.0)을 초과(U.C = 1.3)하는 부재가 발생하였으며, Fig. 9에서 나타나고 있다. 주요 하중 성분은 축하중이며, 구조 강도를 만족시키기 위한 보강을 하였다. 브레이스 부재는 첫 번째 교차 지점 상단에서 최대 0.35가 발생하였으며 허용기준을 만족하였다. 부재보강이 필요한 구역은 초기 두께 36 mm를 48 mm로 2 m 구간을

변경하였고, 인접하는 Brace can 1 m 구간은 22 mm에서 28 mm 두께증가를 반영하였다. 자켓 레그 보강 효과로 인하여, 최대 조합 응력 비율은 0.82로 구조 강도 허용기준을 만족하였으며, 브레이스는 최대 0.26으로 초기 설계안보다 허용 안전율이 증가하였으며 Fig. 10과 같다.

### 3.3 Pin-pile 지지 효과 검증

연구에서 적용한 pin-pile 방식과 하부구조물의 끝단이 고정조건이라고 가정하였을 때의 최대 조합 응력 비율을 위하여 같은 위치의 leg와 brace can에서의 결과를 Table 7과 Fig. 11에서 나타내고 있다. 결과에서 나타내듯이 pin-pile에 의한 하부구조물은 지반 고정효과가 완전구속 효과와 큰 차이를 보이지 않으며, 충분히 깊은 해저면에 설치된 효과라고 볼 수 있다.

Table 7. A comparison of combined unity ratio for foundation structure according to end fixity

Max.UC location	Soil condition	Fixed condition	Ratio (Soil/Fixed) ×100
Leg	0.82	0.83	98 %
Brace	0.26	0.27	96 %

점토층이 넓게 분포하고 있는 서남해권 풍력발전기 설치 단지에서는 지반의 지지력에 의한 발전기의 진동문제 및 소음문제로 인한 발전효율 문제가 발생할 가능성이 있으며, 이러한 특성을 충분히 고려한 하부구조물 방식을 선택할 필요가 있다.

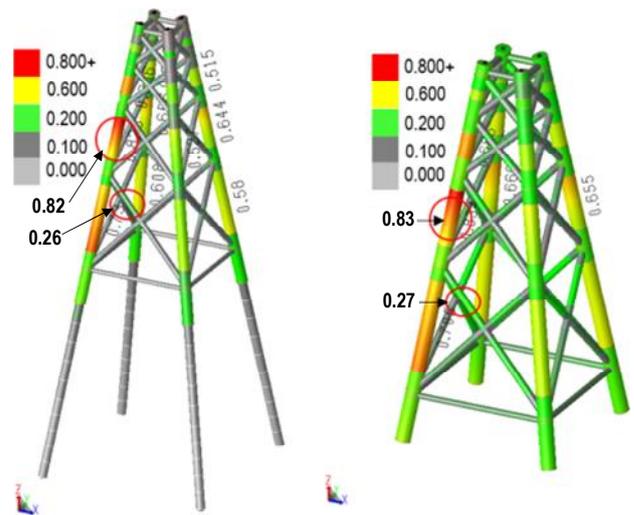


Fig. 11. Combined unity ratio contour according to end fixity.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구논문에서는 점토층 지질기반에 설치 가능한 자켓형 해상풍력터빈 하부구조물을 개발하기 위하여 구조 안전성 검토를 수행하고, 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 국내의 설치환경과 개발 요구를 반영하였을 때, 발전기용량은 8MW급이 합당할 것으로 유추하여, 연구에서 사용한 터빈 제원을 일치시켰다.
- [2] 서남해 조건에 부합하는 해상풍력발전기 고정식 하부구조물 중에서 하중분산이 쉽고 점토층에서도 높은 정밀도가 좋은 자켓형을 연구 대상으로 선정하였다. 현재 구조형식은 충분한 pin-pile 시공으로 인하여 해저면 고정지지 조건의 효과가 나타난다.
- [3] 초기 설계안 대비, 50년 재현주기 환경 하중 적용 시, 일부 구간 보강이 발생하였다. 보강 후, 충분한 구조마진을 확보하였으며, 제작성에도 문제가 없는 수준이다.
- [4] 점토층 영역에서의 pile 토양 강성을 고려하기 위하여, PSI를 통하여 지반의 비선형성을 고려하는 것이 바람직하다.

논문에서 사용한 엔지니어링 절차는 터빈 엔지니어링 변화 상황을 바로 반영할 수 없는 단점을 갖고 있다. 향후 연구과제로서는 해상풍력터빈과 하부구조물을 일체화 해석 및 평가하는 프로세스에 관한 연구 및 그에 대한 검증 알고리즘이 필요하다.

#### References

- [1] BS EN 1993-1-1(2005), Eurocode 3: Design of steel structures, General rules and rules for buildings, 1993-1-1.
- [2] Choi, C. H., S. D. Cho, J. H. Kim, and J. G. Chae(2010), Technical issues for offshore wind-energy farm and monopile foundation, KSC fall national conference, pp. 486-493.
- [3] de Vries, W., N. K. Vemula, P. Passon, T. Fischer, D. Kaufer, D. Matha, and F. Vorpal(2011), Final report WP4: Support structure concepts for deep water sites, Technical report-Project wind.
- [4] GL Garrad Hassan(2012), Final load calculations for the 8MW wind turbine to ice class IA, Document No; 104855-04, pp. 14-167.
- [5] IEC 61400-3-1(2019), Wind energy generation systems, design requirements for fixed offshore wind turbines, Part. 3-7, pp. 23-69.
- [6] Jang, H. S., J. S. Goo, D. M. Bae, and S. Y. Bae(2012), Analysis of offshore wind turbine considering environmental loads, KSCE 2012 convention, pp. 149-152.
- [7] Lee, D. H., H. S. Choi, S. Y. Ha, H. S. Jang, and H. S. Kim(2017), The design of a jacket sub-structure for offshore wind turbine based on offshore wind turbine design criteria, Journal of new and renewable energy, pp. 85-89.
- [8] Lee, J. H. and S. Y. Kim(2014), Design sensitivity and optimum design of monopile support structure in offshore wind turbine, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 1, pp. 78-87.
- [9] Lee, K. H, S. K. Park, G. H. Kim, and T. G. Hwang(2020), Basic design of a flange connected transition piece between offshore wind turbine and monopile foundation, Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 1, pp. 160-168.
- [10] Ma, H. and J. Yang(2020), A novel hybrid monopile foundation for offshore wind turbines, Ocean engineering, Vol. 198, pp. 971-983.
- [11] MOLIT(2018), Earthquake Design Standard-MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transportation), Korean design standard KDS 11 50 25, pp. 15-50.
- [12] SACS User's manual(2018), Introduction of linear and nonlinear analysis and it's application of shell modeling, Vol. 2, pp. 50-65.
- [13] Soil measurement report(2013), Optimized leg design and development of jack-up system for wind turbine installation vessel(WTIV), Project No.20123010020090 3-7, pp. 23-69.
- [14] Sun, M. Y., S. B. Lee, K. Y. Lee, and B. Y. Moon(2014), 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.
- [15] Ueda, K., R. Uzuoka, S. Iai, and T. Okamura(2020), Centrifuge model tests and effective stress analyses of offshore wind turbine systems with a suction bucket foundation subjected to seismic load, Soils and foundation, Vol. 60, pp. 1546-1569.
- [16] Velarde, J., C. Kramhoft, and J. D. Sorensen(2019), Global sensitivity analysis of offshore wind turbine foundation fatigue loads, Renewable energy, Vol. 140, pp. 177-189.

---

Received : 2021. 03. 03.  
 Revised : 2021. 04. 19.  
 Accepted : 2021. 04. 27.