

# 해상풍력발전기 설치 선박 레그의 해저면 관입 깊이에 따른 고유 진동 모드와 구조 강도 평가

이명수\* · 서광철\*\* · 박주신\*\*\*†

\* 조선대학교 선박해양공학과 교수, \*\* 목포해양대학교 조선해양공학과 교수, \*\*\* 삼성중공업 조선해양연구소 그룹장

## Evaluation of the Natural Vibration Modes and Structural Strength of WTIV Legs based on Seabed Penetration Depth

Myung-Su Yi\* · Kwang-Cheol Seo\*\* · Joo-Shin Park\*\*\*†

\* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

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

\*\*\* Group manager, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung Heavy Industries, Geoje 53261, Korea

**요약** : 해상풍력발전 시장의 성장과 함께 해상풍력발전기 설치 선 시장에 대한 기대감이 커지고 있다. 해상풍력발전 시장 내 2030년까지 약 100척의 설치 선이 필요할 것으로 전망되고 있다. 척당 가격이 3,000~4,000억 원이라서 일반 운반선보다 고부가가치 시장이다. 특히, 풍력발전기 용량이 11MW 이상의 대형 설치 선의 수요가 커지고 있다. 중국을 중심으로 아시아 해상풍력발전기 시장의 급성장으로 이 지역에서 운용 가능한 설치 선에 대한 발주에 대한 협의가 많다. 아시아권역 대부분의 해저 지질은 지지 반력이 작은 점토층으로 구성되어 있다. 이러한 특성에 의해서 설치 선이 작업을 위해 수면 밖으로 오르고 내림 시 스퍼드캔(Spudcan)과 레그(Leg)의 관입 깊이가 크게 발생한다. 연구에서는 최소 3m에서 최대 21m까지 관입 변수를 이용하여 관입 깊이에 따른 고유 진동 주기, 레그의 구조 안전성 평가 그리고 전복 안전성 지수를 평가하였다. 관입 깊이가 증가하면 고유 진동 주기가 짧아지고, 레그의 모멘트 길이가 짧아져서 구조 강도의 여유치가 증가한다. 모든 입사각에서 전복 모멘트에 대해 안전하며, 최대값은 270도에서 발생한다. 본 연구를 통하여 검토된 조건들은 연약 지반에서 설치 선의 운용 절차를 작성 시 관입 깊이에 따라서 레그를 어떻게 운용해야 하는지 판단할 수 있는 중요한 자료로 활용할 수 있다. 결론적으로 관입 깊이에 따른 레그 구조 안전성을 정확히 파악하는 것은 설치 선의 안전과 직결된 문제이다.

**핵심용어** : 해상풍력발전기 설치선, 연약 지반, 점토층, 고유 진동 주기, 관입 깊이, 레그, 구조 안전성

**Abstract** : With the growth of offshore wind power generation market, the corresponding installation vessel market is also growing. It is anticipated that approximately 100 installation vessels will be required in the offshore wind power generation market by 2030. With a price range of 300 to 400 billion Korean won per vessel, this represents a high-value market compared to merchant vessels. Particularly, the demand for large installation vessels with a capacity of 11 MW or more is increasing. The rapid growth of the offshore wind power generation market in the Asia-Pacific region, centered around China, has led to several discussions on orders for operational installation vessels in this region. The seabed geology in the Asia-Pacific region is dominated by clay layers with low bearing capacity. Owing to these characteristics, during vessel operations, significant spudcan and leg penetration depths occur as the installation vessel rises and descends above the water surface. In this study, using penetration variables ranging from 3 to 21 m, the unique vibration period, structural safety of the legs, and conductivity safety index were assessed based on penetration depths. As the penetration depth increases, the natural vibration period and the moment length of the leg become shorter, increasing the margin of structural strength. It is safe against overturning moment at all angles of incidence, and the maximum value occurs at 270 degrees. The conditions reviewed through this study can be used as crucial data to determine the operation of the legs according to the penetration depth when developing operating procedures for WTIV in soft soil. In conclusion, accurately determining the safety of the leg structure according to the penetration depth is directly related to the safety of the WTIV.

**Key Words** : Wind turbine installation vessel, Soft soil, Clay layer, Natural vibration period, Legs, Structural safety

\* First Author : true413@chosun.ac.kr, 062-230-7182

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

## 1. 서론

국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면 글로벌 해상풍력 시장은 2022년 55.7GW에서 2030년 228GW로 확대될 전망이다. 이러한 시장 규모가 빠르게 성장하는 만큼 해상풍력 설치선 수요 또한 매우 증가할 것으로 예상된다. 업계에 따르면 대형 풍력발전기 설치 선(Wind Turbine Installation Vessel)은 2030년까지 약 100척 이상이 필요하며, 약 40조 원의 시장이 형성될 것으로 전망하였다. 한국은 2030년 풍력 보급목표를 19.3GW를 고려하여 사업 공고를 확대하고 있어서 향후 보급이 본격화될 것으로 예상된다. 2023년도에 해상풍력 6개 프로젝트(총 2GW)의 위치를 보면 서남해(완도, 안마, 신안, 고창, 낙월, 한동)이며 한동 해상풍력 단지를 제외하면 모두 외산 풍력터빈이 설치될 계획이다. 지역적인 특징은 수심이 낮고 조수 간만의 차가 심하며 연약 점토층 해저면 조건을 갖고 있다. 설치 선은 해상풍력발전기 단지에서 발전기를 안정적으로 설치하기 위해서는 필수적으로 프리로딩(Pre-loading)을 통해 레그와 스피드캔을 해저 면에 고정하는 작업을 수행해야만 한다. 앞서 언급한 프로젝트 지역은 해저 면의 낮은 강성으로 인하여 수천 톤의 중량을 견디기 위해서는 모래층까지 관입이 필요하며 이 깊이는 조건별로 다르지만, 최대 21m까지 발생 가능성이 있다(Cho et al., 2015). 본 연구에서는 서남해 지질 조사 결과(Cho et al., 2015)를 참조하여 최소 관입 깊이를 3m에서 3m 간격으로 최대 21m까지 변화하여 레그 구조의 고유 진동수, 전복 안전성 그리고 레그 구조 안전성까지를 수치 해석적으로 검토하였다. 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Mahanta et al.(2010)은 벵골 해안의 수심 15m를 갖는 4개소에 대한 잭업리그 프리로딩 위치에 대해서 지질분석 결과를 제시하였고 3곳이 펀치 쓰루(Punch-through)에 취약하다는 점을 언급하였다. 실제로 한 개 사이트에서는 펀치 쓰루에 의한 구조 손상이 발생하였다. 저자들은 펀치 쓰루 발생 가능성을 낮추기 위한 권장 사항을 제시하였다. 첫 번째는 설치 위치의 지반 공학 조사를 통하여 토양 특성을 파악하는 것이다. 두 번째는 계측 데이터를 활용하여 다층 지지력 접근법을 적용한 관입 해석을 통한 예측이다. 세 번째는 스피드캔이 토양에서 제대로 추출하기 위해서 제팅(Zetting)시스템을 점검하는 것이다. 네 번째는 관입 깊이가 25m 이상으로 예측되는 경우, 현장에서 관입 테스트를 수행하여 제팅시스템과 흡착 저항력과의 관계를 재검토하여 현장 맞춤형 결정을 하는 것이다.

Cho et al.(2015)는 서남해(군산) 해상풍력 배후지를 대상으로 환경조건과 지질조건을 직접 계측 및 문헌 조사를 통해

서 대표 조건을 선정하였다. 계측된 토질 특성을 이용하여 스피드캔 관입 해석을 수행하여 특정 조건에서는 펀치 쓰루(Punch-through)가 발생할 가능성을 언급하였다. 이 자료를 기반으로 레그 구조설계를 수행하고 수치해석 프로그램인 SACS를 이용하여 환경 하중과 적재하중을 고려한 구조 안전성 평가를 수행하였다. 연구에서 사용한 레그 모델은 설계 하중 조건 대비 충분한 구조 안전성을 확보하고 있었으며, 전복 안전성 계수도 허용 기준보다 높게 평가되었다.

Lyu et al.(2019)는 구조와 토양 기초의 불확실성을 고려하여 펀치 쓰루 위험 분석 모델을 제시하였다. 구조적 취약성 개념은 기초 지층과 구조적 손상 간의 복잡한 상호 관계를 규명하기 위해 제안되었다. 남중국해에서 운영되었던 HYSY 941 잭업리그를 대상으로 하였다. 연구에서 제시한 HOMM-Pushover 방법은 표본 수가 적어도 높은 분석 정확도를 확인하였다. 그러나 이 방법은 구조 손상 취약성 곡선이 정규분포 확률에 부합하는 경우에만 적용할 수 있다. 구조적 실패 상태에서는 관입 깊이 변화에 따라서 구조적 취약성이 유사하게 변화하였다. 위험 수준이 증가함에 따라서 구조적 실패 조건이 복잡해지며 정확도를 보장하기 위해서는 실제 데이터 수를 늘려서 보완하도록 제시하였다.

Hu et al.(2021)는 잭업리그의 프리로딩 중 스피드캔의 토양 관입 거동에 의한 펀치 쓰루 예측의 중요성을 재확인하였다. 연구에서는 총 37개의 해상 지역과 120개의 관입 기록을 조사하여 분석하였다. 기존의 스피드캔 관입 평가는 상한치와 하한치 사이의 값으로 예측하여 그 범위가 넓었다. 연구에서는 모래-점토 모델을 이용하여 스피드캔의 관입 저항을 예측하기 위한 최적의 추정값을 제시하였으며, ISO(ISO 19905-1, 2023) 방법이 보수적인 하중-변위 결과를 계산하는 특징을 확인하였다. 제시된 방법은 현장에서 측정된 값을 잘 표현함을 입증하였다.

Yi and Park(2023)는 3개의 레그를 갖는 잭업리그를 대상으로 구조설계 및 안전성 평가에 영향을 주는 핵심 인자에 관한 연구를 수행하였다. 파도 높이, 파도 주기, 풍속, 파고와 선체 사이 떨어진 거리(Air gap)의 변화에 대한 구조 응답을 전용 소프트웨어인 SACS(SACS, 2020)를 사용하여 시리즈해석을 하였다. 레그와 선체 그리고 캔틸레버의 구조 강도를 함께 평가하기 위하여 통합된 평가 절차를 제안하였고, 한 개의 해석 모델을 이용하기 때문에 해석 시간을 대폭 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 레그의 구조 강도 평가에 중요한 변수는 파고의 높이 변수였으며 전복 안전성에도 큰 영향을 주었다. 파의 입사각은 120도 조건이 가장 큰 응력 값을 보였다. 실제 계측된 지반 강성을 경계 조건으로 적용한 경우에는 핀(Pinned) 지지 조건보다 모멘트 감쇄 효과가

## 해상풍력발전기 설치 선박 레그의 해저면 관입 깊이에 따른 고유 진동 모드와 구조 강도 평가

발생하여 레그의 최대 응력이 약 20% 감소함을 확인하였다. 본 연구에서는 연약지반에 해상풍력발전기 설치 작업 중 레그-스퍼드캔의 관입 깊이에 따른 고유 진동수, 전복 안전성 그리고 레그의 구조 강도까지를 종합적으로 검토하였다. 선행연구에서는 주로 스퍼드캔의 관입 거동에 집중하여 수치 해석 기법, 관입 하중 계산에 집중되어 있었다. 연구를 통한 주요 결과는 작업 유닛의 운용 조건에 따른 구조 안전성 평가 분야에 관련한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

### 2. 해상풍력발전기 설치선

#### 2.1 주요 구성 및 제원

설치 선은 4개의 레그와 개별적인 잭킹 시스템을 갖추고 있으며 선미 레그에 대형크레인이 위치한다. 선체 내에는 C-type LNG 연료탱크 공간이 별도로 마련되어 있다. 설치 선은 계획된 위치에 해상풍력발전기를 설치하기 위해서 동역학적 위치제어가 가능한 전방위 추진기(Azimuth thruster)가 선미에 4개, 선수에 4개가 설치되어 있다. 설치 선은 항구에서 해상풍력발전기를 구성하는 타워, 나셀 그리고 블레이드를 적재한 후 설치 장소로 이동한다. 도착 후 레그를 해저면에 고정하기 위한 작업(Pre-loading)을 수행하며 설치 작업 중 가장 많은 시간(3시간~6시간)이 필요하다. 이 과정 중에 충분한 관입 하중을 만들기 위해서 선체를 수면 상부로 이동시키며, 대표적인 형상을 Fig. 1에 나타내고 있다. 이 작업까지 완료된 후에 비로소 대형크레인을 이용하여 타워, 나셀 그리고 블레이드 순서로 설치 작업을 차례로 수행한다.



Fig. 1. A example of the elevating wind turbine installation vessel (<https://www.splash247.com>).

Table 1. Main dimensions of the WTIV

Item	Value
Length overall (m)	160.0
Breadth overall (m)	60.0
Depth of hull (m)	12.0
Design draft (m)	8.0
Length of leg including spudcan (m)	115.0
Maximum pre-loading (ton)	21,000
Maximum elevated weight (ton)	42,000
Chord to chord center (m)	9.0
Spudcan area (m <sup>2</sup> )	200
Number of legs (EA)	4

연구에 사용된 대형 풍력발전기 설치 선박은 터빈 용량 15MW와 20MW를 설치할 수 있도록 설계되어 있으며, 주요 제원은 아래 Table 1과 같다. 풍력발전기를 적재하기 위하여 길이와 비교하면 폭이 넓고, 선체 높이가 낮은 특징이 있다.

### 3. 유한요소해석 및 변수 영향 검토

#### 3.1 모델링 및 경계, 하중 조건

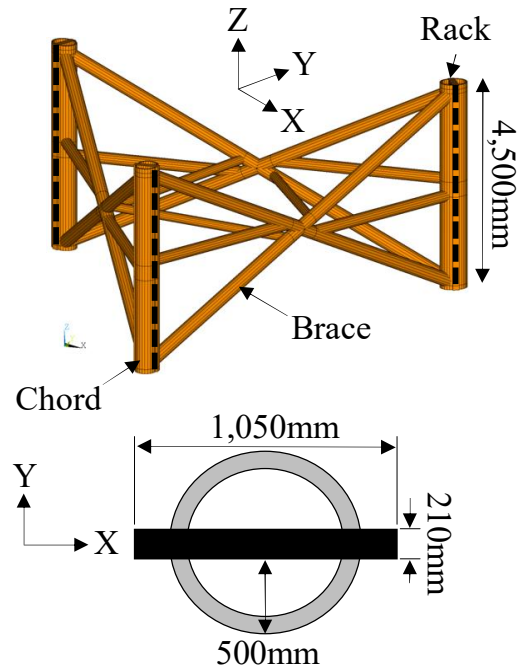


Fig. 2. Detailed geometry and definition (rack, chord and brace).

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 SACS-Bentley

11.3을 사용하였다(SACS, 2020). 상세 해석 대상 형상은 Fig. 2와 같다. 모델링은 2개의 joint를 갖는 1차원 빔 요소를 사용하였다. 해석의 경계 조건은 해저 면과 닿는 면적에 핀 고정 지지(x, y and z : fix) 조건을 Fig. 3과 같이 적용하였다. 구조 안전성 평가는 노르웨이선급(DNV, 2023)에 제공된 지침을 따른다. 선체를 지탱하고 있는 레그에 작용하는 환경 하중은 100년 재현주기의 파랑 하중과 풍하중을 고려하였다. 레그를 통해 전달된 하중은 잭케이스(Jackcase)와 선체 사이에서 Gap 요소를 통해 축력만 작용할 수 있도록 이상화 되어 있다. 선체 자중, 탑재 중량은 중량분포도를 참고하여 구현하고, 전체 무게중심 위치를 바로잡기 위하여 추가적인 임의하중을 선수와 선미에 부가하여 조정하였다. 이 과정이 끝난 모델 정보를 이용하여 고유 진동수 계산을 수행한다. 계산된 고유 진동수와 정해진 파 주기와의 관계를 이용하여 동적 응답 계수(DAF)를 계산하며 이 과정을 단자유도계(SDOF) 방법이라고 하며, 한 개의 물체가 한 방향으로만 움직이는 자유도를 의미한다. 즉, 하나의 좌표계와 하나의 운동방정식으로 표현할 수 있고 하나의 고유 주파수를 가진다. 평가하고자 하는 대상의 무게를 증가시키거나 강성을 보장해서 고유 진동수를 간단하게 변경할 수 있다. 주로 초기 제원 검토 시 사용하나, 공진이 발생하면 다자유도(MDOF)방법으로 전환하며 Fig. 5에 절차가 표기되어 있다. 이 방법은 대상물이 2개 이상의 자유도를 가지거나 2개 이상의 물체가 1개 이상의 자유도를 갖는 경우를 의미하며 고유 진동수를 계산하기 위하여 복잡한 시간 영역 시뮬레이션을 수행하며, 계산 결과 일부를 Fig. 4에 나타내고 있다.

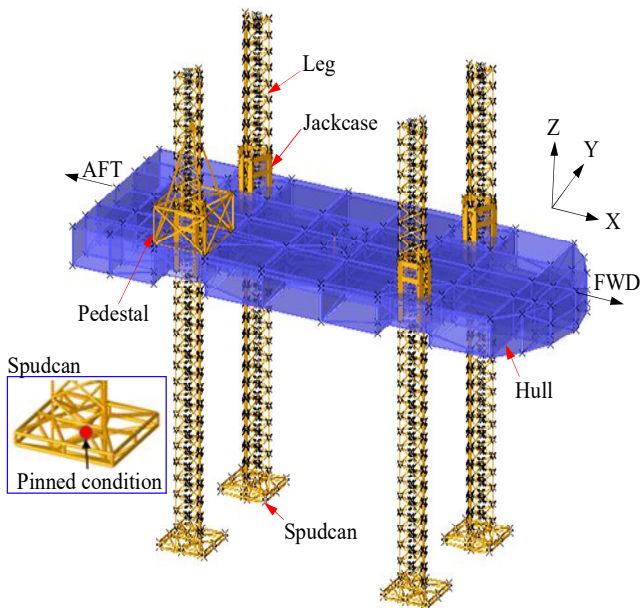


Fig. 3. Structure definition and boundary condition at the center of spudcan in the analysis model.

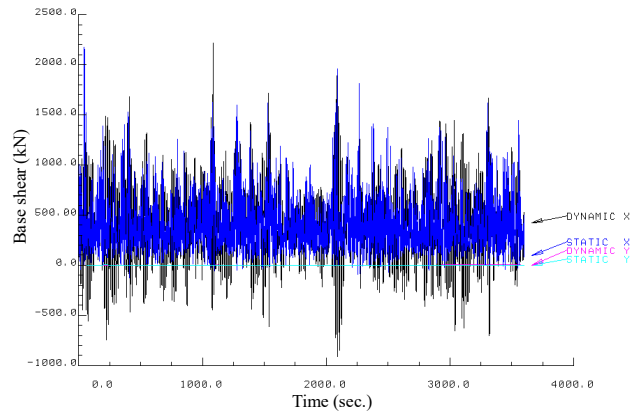


Fig. 4. Base shear distribution both static and dynamic component based on MDOF (heading angle 0 degree).

3600초의 시뮬레이션을 통하여 파 입사각에 따라서 방향별 정적하중과 동적 하중을 계산한다. 이때 구조의 댐핑은 2%, 지반은 1% 그리고 유체는 2%를 고려하였다(ISO, 2023). 파의 스펙트럼은 Pierson-Moskowitz를 사용하였으며, 분포의 비대칭도를 나타내는 왜도(Skewness)는  $\pm 0.03$ , 분포의 꼬리부분의 길이와 중앙부분의 뾰족함 정보를 제공하는 통계량인 첨도(Kurtosis)는  $2.9 < kurtosis < 3.1$ 로 적용하였다.

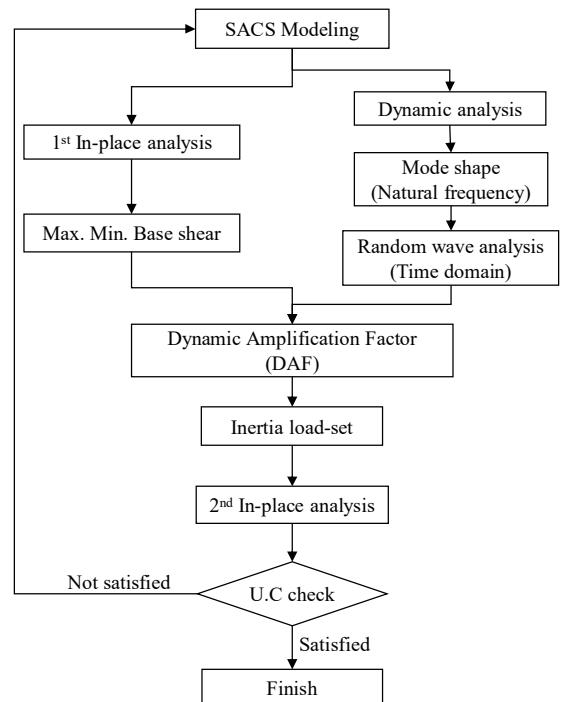


Fig. 5. Structural analysis flow-chart of the WTIV's leg system.

해상풍력발전기 설치 선박 레그의 해저면 관입 깊이에 따른 고유 진동 모드와 구조 강도 평가

Table 2. Material properties of leg and hull (Cho et al., 2015)

Item	Value
Elastic Modulus (MPa)	206,000
Rack, Chord, Brace (Yield strength, MPa)	690.0
Jackcase, Guide plate (Yield strength, MPa)	540.0
Hull, Tertiary members (Yield strength, MPa)	235.0, 355.0
Poisson's ratio	0.3

설치 선을 구성하는 구조 부재 가운데 가장 큰 환경 하중을 담당하는 레그는 항복 응력 690MPa 강재를 적용하였다. 이 고장도 강재는 주문자 생산 방식으로 재료의 구조 강도 특성 저하를 방지하기 위하여 저온 가공하는 특수 강재이다. 레그에서 선체로 하중을 직접 전달받는 부재인 jackcase와 guide plate는 항복 응력 540MPa 강재를 사용하고, 나머지 선체 부재는 235MPa, 355MPa로 구성되어 있으며, Table 2와 같다. 파단 변형률은 20%~25%의 값을 갖는다.

설치 선이 작업을 위해 작업이 된 상황을 Fig. 6에 나타내고 있다. 작업 수심은 35m이고, 유의 파고는 3.76m, 파의 주기는 11.86초이며, 풍속은 1분, 10m 평균 풍속 34m/sec을 적용하였다. 조류는 최대 유속 2.2m/sec이고 패턴은 DNV에서 제공하는 값을 적용하였다. 환경 하중에 의한 구조 응답을 계산하기 위해서는 입사각 정의가 필요하며, Fig. 7에 표기하였다. 30도 간격으로 총 12개의 입사각으로 구성되며, 한 개의 입사각은 파도, 바람 그리고 조류가 같은 방향이다.

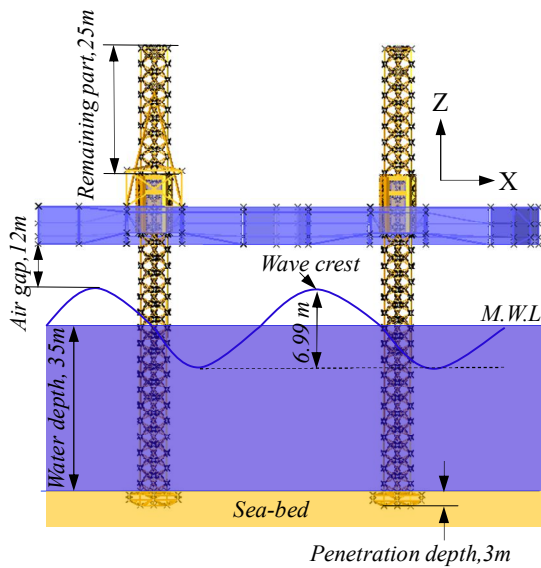


Fig. 6. Definition and value of the elevation view.

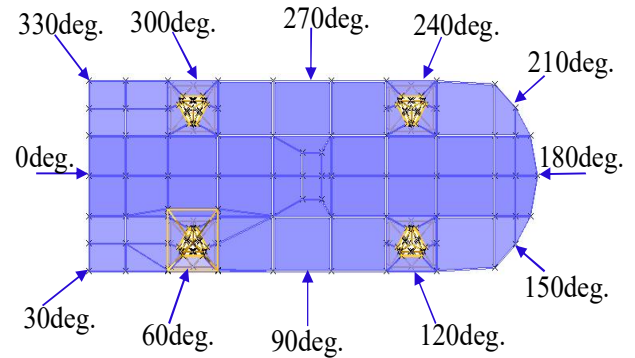


Fig. 7. Heading angles against environmental loads.

3.2 고유 진동 주기 변화

스퍼드캔의 관입 깊이가 3m에서 21m까지 증가하면서, 고유 진동 주기는 작아지는 경향을 나타내며, Fig. 8과 같다. 모든 조건에서 파도의 주기인 8.6초(Offshore Wind T/F, 2022)와 공진을 회피하였으며, 관입 깊이가 깊을수록 공진 영역과 멀어지는 경향을 나타낸다. 이러한 현상으로 인하여 환경 하중에 의한 동적 관성력이 작아져서 레그의 구조 강도 여유는 증가하게 된다.

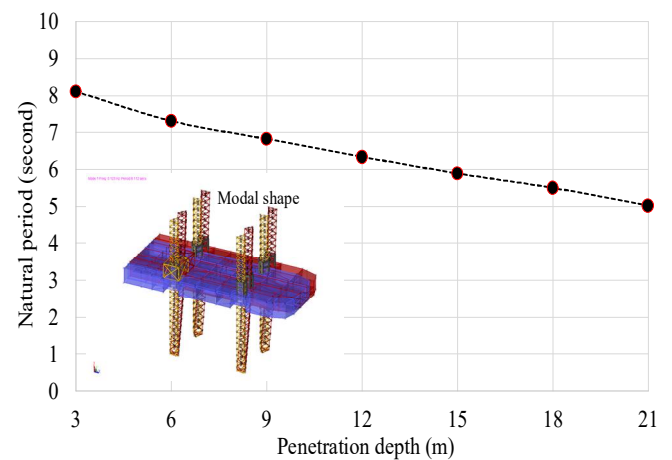
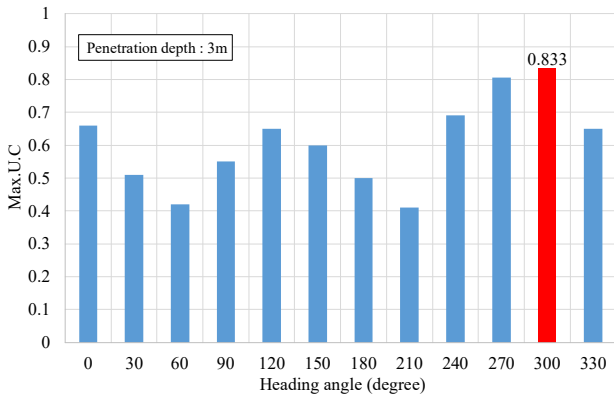


Fig. 8. A results of natural period varying penetration depth for WTIV.

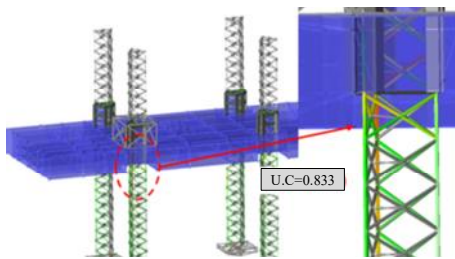
3.3 레그 구조 강도 평가

파이프 단면은 API(2014) 기준을 적용하고 그 외 단면들은 AISC(1989)를 적용하며, 압축-인장, 전단, 휨 응력 중 가장 크게 발생하는 두 가지 성분을 조합 응력으로 표현하여 구조물의 안전성을 평가한다. 결과에서 표기하고 있는 U.C(Unity Check)는 최대 응력을 허용응력으로 나눈 무 차원값을 나타내며, 최댓값이 1.0이다. 1.0보다 큰 값이 나타나는 경우 적절한 구조 보강 혹은 환경 하중 회피를 검토해야만 한다.



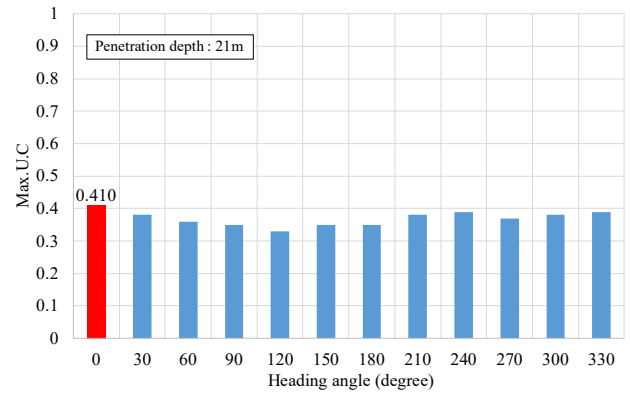


(a) maximum U.C value

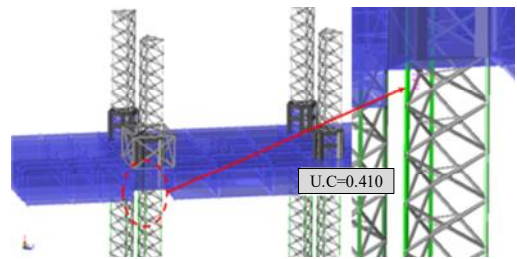


(b) location of maximum U.C

Fig. 9. Leg structural U.C result under penetration depth of 3m.



(a) maximum U.C value



(b) location of maximum U.C

Fig. 10. Leg structural U.C result under penetration depth of 21m.

3m 관입 조건에서의 최대 U.C는 0.833이며, 발생하는 위치는 크레인이 위치한 레그이고, 파 입사각은 300도를 Fig. 9에서 보여주고 있다. 원형 분포도에서 알 수 있듯이 선미부 레그의 대각 방향 환경 하중이 큰 구조 응답을 보였다. 일반적으로 스퍼드캔에 핀 조건을 적용한 경우 최대 휨 모멘트는 선체와 구속이 발생하는 선체 하부이다. 3m는 설치 선 기본 요구조건 작업 시 기준이 되는 값이다.

관입 깊이가 최대인 21m에서의 U.C 결과를 Fig. 10에 나타내고 있다. 최대값이 발생하는 위치는 같으며 U.C 0.41로 2배가량 변화가 있었다. 레그의 구조설계 시 파도 하중이 집중되는 수선 면 근처의 구조 강성을 크게 하고, 해저 면으로 가까워질수록 상대적으로 약한 강성으로 부재 배치를 한다. 관입 깊이가 7배 길어지면서 휨 모멘트 거리가 줄어들었고 레그 부재 배치의 특성에 기인하여 구조 안전성 평가 결과의 차이가 발생하였다.

관입 깊이가 7가지 조건에 대한 레그에서 발생하는 최대값 분포를 Fig. 11에 나타내고 있다. 관입 깊이가 3m에서 6m로 변화하는 구간이 U.C값의 변동이 크며, 관입 깊이가 12m 이상에서는 U.C 변화량이 많지 않게 나타난다. 이러한 특징은 연약 지반에서 설치 선의 운용 시 레그 운용 위치를 결정 시 유용하게 활용될 수 있다.

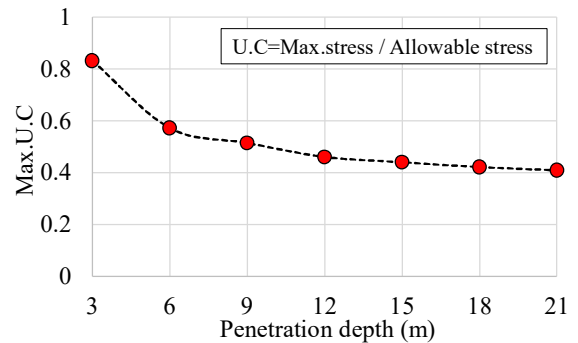


Fig. 11. Leg structural U.C result according to change penetration depth (3m~21m).

### 3.4 전복 안전성 평가 결과

설치를 위해 작업된 설치 선은 각 설계 하중 조건에 대해 환경 하중에 의한 전복 모멘트를 견딜 수 있어야 한다. 일반적으로 파도, 바람 그리고 조류가 같은 방향에서 발생한다고 가정한다. 전복 안전성 평가 흐름도를 Fig. 12에서 보여주고 있다. 강도 해석용 모델링이 완성되면 외력에 의한 선형 해석을 수행하고, 전복 모멘트(식 1, 2)와 복원 모멘트(식 3)를 계산(DNV, 2014)하고 선급에서 요구하는 안전 계수를 만족하는지 비교하게 된다. 설치 선의 평면 상태에서 외력에

해상풍력발전기 설치 선박 레그의 해저면 관입 깊이에 따른 고유 진동 모드와 구조 강도 평가

대한 전복 안전성을 검토하기 위한 주요 변수 정의를 Fig. 13에서 표기하고 있다. 논문에서는 선급(DNV, 2012) 제시 값인 1.25를 평가 기준으로 사용하였다. 전복 모멘트에 대한 분석은 건물, 용벽, 댐, 타워 등 다양한 구조물은 물론 작동 중 횡력을 받을 수 있는 기계 및 장비의 안전과 안정성 평가에서 중요한 항목이다. 엔지니어는 잠재적인 전복 모멘트와 같거나 이를 초과하는 반작용 또는 안정화 모멘트를 생성하여 예상 하중에서 구조가 안정적으로 유지되도록 설계를 해야 한다.

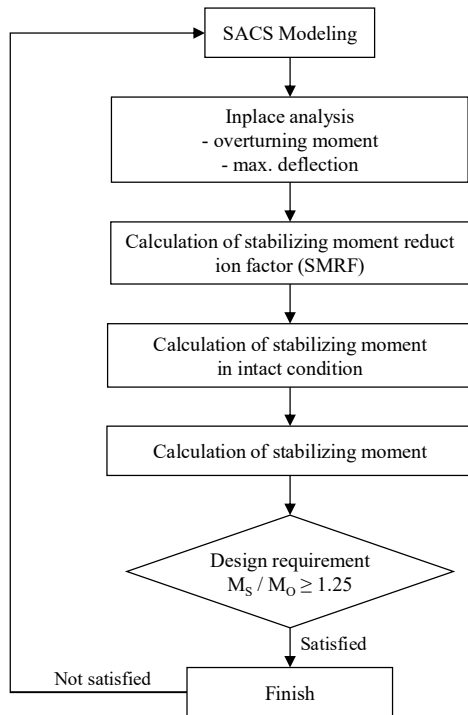


Fig. 12. Assessment flow-chart of the overturning stability

$$M_S = M_{SO} - \frac{nP(e_o + e)}{1 - P/P_E} \quad (1)$$

여기서,  $M_S$ 는 전체 안정모멘트,  $M_{SO}$ 는 레그가 완벽하게 직선인 상태에서 안정모멘트,  $n$ 은 레그 개수,  $e_o$ 는 선체의 측면 방향의 변위,  $P$ 는 평균 축 하중,  $P_E$ 는 오일러 좌굴 하중

$$M_{SO} = W_E \times L_{WT} + \sum_{i=1}^n [(W_H + W_L) \times L_i] \quad (2)$$

여기서,  $W_E$ 는 책임된 선체의 중량,  $W_H$ 는 선체 중량,  $W_L$ 는 레그와 스피드캔 중량,  $n$ 은 레그 개수,  $L_i$ 각 레그에서의 모멘트 거리,  $L_{WT}$ 는 무게중심에서의 모멘트 거리

$$M_O = M_{WD} + M_{W/C} \quad (3)$$

여기서,  $M_O$ 는 전복 모멘트,  $M_{WD}$ 는 풍하중에 의한 전복 모멘트,  $M_{W/C}$ 는 파도, 조류하중에 의한 전복 모멘트

식(3)의  $M_{WD}$ 는 풍하중의 작용 중심점까지의 거리와 하중을 이용하여 모멘트를 계산하고,  $M_{W/C}$ 는 파도, 조류하중 성분에 대해서 같은 절차로 계산을 수행하게 된다.

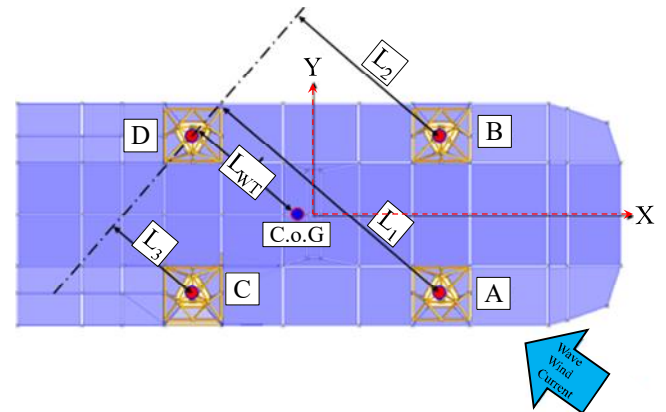


Fig. 13. Schematic definition of stabilizing moment calculation.

Fig. 13에서 표시된 주요 기호는 선체의 무게중심(C.o.G)과 선미 레그 D 중심까지 거리( $L_{WT}$ ), 선수 레그 A에서 선미 레그 D의 가상선까지의 거리( $L_1$ ), 선수 레그 B에서 거리( $L_2$ ), 선미 레그 C에서 떨어진 거리( $L_3$ )를 의미한다. 관입 깊이에 따른 전복 안전성 계수를 계산하였고, 최소 깊이 3m와 최대 깊이 21m 조건을 Fig. 14에 비교하였다. 선급 요구사항인 안전성 계수 1.25보다는 모든 조건에서 충분히 만족하고 있으며, 230도 입사각에서 최댓값이 나타난다. 최소값은 입사각 270도이며 관입 깊이가 늘어날수록 안전도는 증가한다.

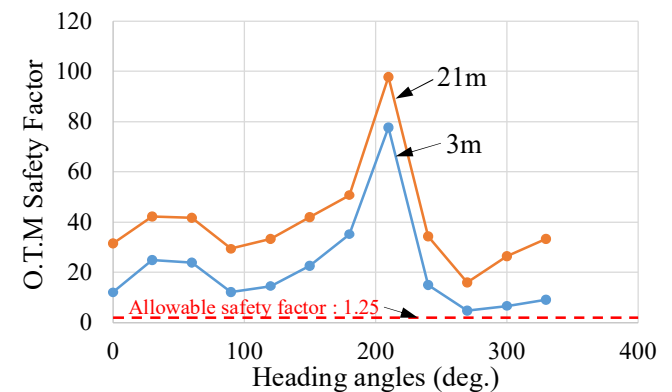


Fig. 14. O.T.M safety factor varying heading angles by penetration depth 3m and 21m.

#### 4. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 대형 해상풍력발전기(15MW~20MW)를 설치할 수 있는 선박을 대상으로 연약 지반에서 운용 시 예로 사항 중 한 가지인 과대 관입에 대한 영향을 분석하고자 수치해석을 통하여 레그 구조설계에 대한 안전성을 검토하였다. 주요 검토 사항은 고유 진동수 계산을 통하여 파 주기와 공진 여부, 환경 하중에 의한 전복 안전성 그리고 레그의 구조 강도를 차례대로 평가하였다. 주요 평가 항목은 개발된 절차서를 제안하였으며, 빨리 정확한 진단이 될 수 있다. 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 레그-스퍼드캔의 관입 깊이가 깊어 질수록 설치 선의 고유 진동 주기가 줄어들며 선형적인 관계를 갖는다. 이는 외팔보 거동의 모멘트 길이가 줄어드는 효과와 유사하다.
- [2] 동적 응답 증폭 계수를 계산 시, 단자유도계 방법을 사용할 경우 특정 조건에서 공진이 발생한다. 이럴 때 단자유도계 방법을 적용하여 합리적인 값을 재계산하여야 한다.
- [3] 설치 선의 레그 구조는 다양한 구조 단면이 사용되기 때문에 구조 안전성 평가 시 적합한 평가 기준이 필요하다. 본 연구에서 사용한 API와 AISC 조합은 좋은 대안이 될 수 있다. 제안 이유는 두 개의 평가 기준의 포맷이 같고 사용하는 안전도 계수가 같아 평가 시 혼선이 발생하지 않는다. 또한, 모든 단면 속성에 대한 평가가 가능하여 활용성을 극대화할 수 있다.
- [4] 전복 안전성 평가에서는 관입 깊이와 관계없이 모든 조건에서 선급 기준을 만족한다. 관입 깊이가 증가하면 전복 안전도는 증가하는 경향이 나타난다.

향후 연구과제로서는 설치 선 레그의 구조 안전성 평가 시 복잡한 수치 해석용 모델링을 하지 않고, 등가 강성으로 표현한 1-D 빔으로 구현하여 시리즈 해석을 자동으로 수행할 수 있는 시스템 개발이다. 이 시스템은 추후 기계학습 알고리즘과 연계하여 다양한 시리즈해석 결과에 대한 패턴 분석으로 새로운 조건에 부합한 모델을 구성하는 데 도움이 될 수 있다.

#### References

[1] American Institute of Steel Construction(1989), Specification for Structural Steel Buildings, Allowable Stress Design and Plastic Design, A5. Allowable Stresses, pp. 29-35.

[2] Cho, T. -M., J. -S. Park, Y. -S. Ha, B. -J. Kim, and K. -B. Jang(2015), Global In-Place Analysis of WTIV Leg for Korean West-South Offshore Wind Zone, Journal of Ocean and Wind Energy, Vol. 2, No. 2, pp. 121-127.

[3] DNV(2023), DNV Offshore Standard C-101, Structural Design of Offshore Units, Design Loads and Load Effects, pp. 16-32.

[4] DNV C104(2012), DNV Recommended Practice 104, Sec. 9-Overtuning Stability Analyses, pp. 65-67.

[5] Hu, P., A. Haghghi, J. Coronado, C. Leo, S. Liyanapathirana and Z. Li(2021), A Comparison of Jack-up Spudcan Predictions and Record Field Data, Applied Ocean Research, Vol. 112, No. 2, pp. 132-145.

[6] ISO 19905-1(2023), Oil and Gas Industries including Lower Carbon Energy, Site-Specific Assessment of Mobile Offshore Units, Part 1 : Jack-ups-elevated at a site, pp. 115-130.

[7] Lyu, T., C. Xu, G. Chen and Y. Zhao(2019), Punch-Through Risk of Jack-Up Under the Dual Uncertainty of Structure and Foundation, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 142, pp. 1-25.

[8] Mahanta, R., K. S. Prakasha, and A. K. Mishra(2010), Geotechnical Problems of Jack-up Rig Deployment in Offshore West Bengal and Mahanadi Area of Indian Offshore-Case Studies, Indian Geotechnical Conference, pp. 763-766.

[9] Offshore Wind T/F(2022), Report of the environment data, Chapter 4-Wave, pp. 80-86.

[10] SACS User's Manual(2020), Supplemental Manual-Analysis Options-Tubular connection Redesign Options, pp. 3-15.

[11] Yi, M. -S. and J. -S. Park(2023), Global Structural Behaviour and Leg Strength for Jack-up Rigs with Varying Environmental Parameters, Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 11, pp. 1-19.

Received : 2024. 01. 04.

Revised : 2024. 02. 08. (1st)

: 2024. 02. 22. (2nd)

Accepted : 2024. 02. 23.