

15 MW급 해상풍력 자켓기초 프리석션 구조물의 해상운송 안정성 평가 Stability Assessment of Marine Transportation for 15 MW Offshore Wind Jacket Foundation Pre-Suction Structures

안중은*† · 윤상준* · 손재훈*

Jungeun An*†, Sangjoon Yoon* and Jaehoon Son*

(Received 06 April 2026, Revision received 31 May 2026, Accepted 31 May 2026)

초록 : 최근 대형 해상풍력 발전기의 적용 확대에 따라 관련 구조물의 해상운송 시 안정성 확보의 중요성이 증가하고 있다. 자켓구조물의 지반 고정을 위해 적용되는 프리석션 구조물은 대형 원통 형상과 개방형 하부 구조를 가지며, 운송 중 파랑 및 선체 운동에 의해 발생하는 동적 하중에 민감하므로 운송 단계에서의 안정성 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 15 MW급 해상풍력 자켓기초용 프리석션 구조물을 대상으로 해상운송 시의 안정성 평가를 수행하였다. 선체 운동 해석을 기반으로 구조물에 작용하는 방향별 가속도와 설계하중을 산정하였으며, 이를 바탕으로 운송 시나리오와 선박 복원성을 검토하였다. 해석 결과, 프리석션 구조물의 운송 안정성은 횡동요에 의한 횡방향 가속도의 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 제한된 해상 환경조건 내에서 안정적인 운송이 가능한 것으로 평가되었다. 본 연구 결과는 대형 해상풍력 하부구조물의 해상운송 설계 및 안정성 평가를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 프리석션 구조물, 해상운송 안정성, 선체 운동 해석, 운송 가속도

Abstract : Recently, with the increasing deployment of large-scale offshore wind turbines, the importance of ensuring the stability of marine transportation for related structures has significantly increased. Pre-suction structures used for seabed fixation of jacket foundations have large cylindrical geometries and open-bottom configurations, making them sensitive to dynamic loads induced by waves and vessel motions during transportation. Therefore, stability assessment during transportation is essential. In this study, a stability assessment for the marine transportation of pre-suction structures for a 15 MW offshore wind jacket foundation was performed. Directional accelerations and design loads acting on the structure were evaluated based on vessel motion analysis, and transportation scenarios and vessel intact stability were subsequently assessed. The results showed that the transportation stability of the pre-suction structure was significantly affected by transverse accelerations induced by roll motion, while stable transportation was achievable within the specified environmental conditions. The results of this study are expected to provide useful reference data for the marine transportation design and stability assessment of large offshore wind substructures.

Key Words : Pre-Suction Structure, Marine Transportation Stability, Vessel Motion Analysis, Transportation Acceleration

*† 안중은(<https://orcid.org/0009-0001-2403-4139>) : 수석연구원,
고등기술연구원 그린시스템융합센터
E-mail : jungeun.an@iae.re.kr, Tel : 031-330-7833

*윤상준(<https://orcid.org/0000-0003-4730-9083>) : 수석연구원,
고등기술연구원, 그린시스템융합센터

*손재훈(<https://orcid.org/0009-0008-5691-2267>) : 선임연구원,
고등기술연구원, 그린시스템융합센터

*† Jungeun An(<https://orcid.org/0009-0001-2403-4139>) : Chief
Researcher, Institute for Advanced Engineering.

E-mail : jungeun.an@iae.re.kr, Tel : 031-330-7833

*Sangjoon Yoon(<https://orcid.org/0000-0003-4730-9083>) : Chief
Researcher, Institute for Advanced Engineering

*Jaehoon Son(<https://orcid.org/0009-0008-5691-2267>) : Senior
Researcher, Institute for Advanced Engineering.

— 약어설명 —

CoG	: 무게중심, Center of Gravity
DNV	: 노르웨이 선급, Det Norske Veritas
DWT	: Deadweight Tonnage
GZ	: 복원정, Righting Arm, m
LOA	: Length Overall
RAO	: Response Amplitude Operator

1. 서 론

최근 해상풍력 발전기의 대형화 및 심해 설치 수요 증가에 따라 자켓(Jacket) 형식의 하부구조물 적용이 확대되고 있다.¹⁻²⁾ 특히 15 MW급의 초대형 해상풍력 발전기의 경우, 자켓 구조물의 규모와 중량이 급격히 증가함에 따라 기존 설치 및 운송 방식의 한계가 점차 부각되고 있다. 일반적으로 자켓 구조물과 석션 버킷(Suction Bucket)은 일체형으로 제작 및 조립된 후 운송 및 설치가 수행되나,³⁾ 구조물 대형화에 따라 전체 중량과 무게중심이 증가하게 되어 대형 운송 바지선 및 고사양 설치 장비가 요구된다. 또한 운송 중 선체 운동에 의한 동적 하중 영향이 증가하여 운송 안정성 확보 측면에서도 불리한 조건이 발생할 수 있다.

이러한 문제를 개선하기 위해 최근에는 자켓 구조물과 프리석션(Pre-Suction) 구조물을 분리하여 운송 및 설치하는 개념이 검토되고 있다. 프리석션 구조물은 자켓 하부에 연결되어 지반 고정을 위한 초기 석션 설치 기능을 수행하는 구조물로, 자켓과 분리 운송함으로써 운송 중량 분산 및 설치 장비 요구 사양 저감 측면에서 경제성 향상이 가능하다. 프리석션 구조물은 대구경 원통 형상과 개방형 하부 구조를 가지므로 파랑 및 선체 운동에 의해 발생하는 동적 하중에 민감하며, 운송 중 횡동요에 의한 가속도 증폭 및 복원성 영향 등을 고려한 안정성 평가가 요구된다.

본 연구에서는 15 MW급 해상풍력 자켓기초용 프리석션 구조물을 대상으로 해상운송 시의 안정성 평가를 수행하였다. 운송 환경조건을 기반으로

선체 운동 해석을 수행하여 구조물에 작용하는 방향별 가속도 및 설계하중을 산정하였으며, 이를 바탕으로 DNV의 해상 작업 규정에 따라 운송 시나리오 및 복원성 검토를 수행하였다.^{4,5)} 이를 통해 프리석션 구조물의 해상운송 시 주요 거동 특성과 운송 안정성을 평가하고, 향후 대형 해상풍력 하부구조물 운송 설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 프리석션 구조물과 운송 조건 정의

2.1 프리석션 구조물 개요

본 연구 대상은 15 MW급 해상풍력 자켓기초용 프리석션 구조물(pre-suction structure)로, 자켓 하부에 연결되어 설치 초기 지반 고정을 위한 석션 기초 기능을 수행하도록 설계되었다. 프리석션 구조물은 대구경 원통 형상과 개방형 하부 구조를 가지며, 자켓 구조물과 분리된 상태로 개별 운송 및 설치가 가능하도록 구성되었다. 이를 통해 자켓과 프리석션 구조물을 일체형으로 운송하는 기존 방식 대비 운송 중량 분산 및 설치 장비 요구 사양 저감이 가능하며, 대형 하부구조물 운송 및 설치 시 경제성 향상을 기대할 수 있다.

프리석션 구조물의 주요 형상 및 운송을 위한 배치 개념은 Fig. 1, 2에 나타내었다. 작업 효율을 위하여 미리 조립된 3개의 프리석션 구조물을 한번에 운송하는 시나리오를 고려하였다. 구조물은 운송 중 안정적인 하중 전달이 가능하도록 바지선 상부에 배치되었으며, 구조물 자중 및 운송 중 발생 가능한 동적 하중을 고려하여 지지 구조가 구성되었다.

2.2 운송 선박 및 경로

프리석션 구조물의 해상운송을 위해 대형 평지형 바지선(flat-top barge)이 적용되었다. 운송 바지선은 구조물 중량 및 배치 조건을 고려하여 선정되었으며, 운송 중 충분한 갑판 강도 및 복원 성능을 확보하도록 계획되었다.⁶⁾ 본 연구에서 적용한 운송 바지선의 주요 형상은 Table 1에 나타내었다.

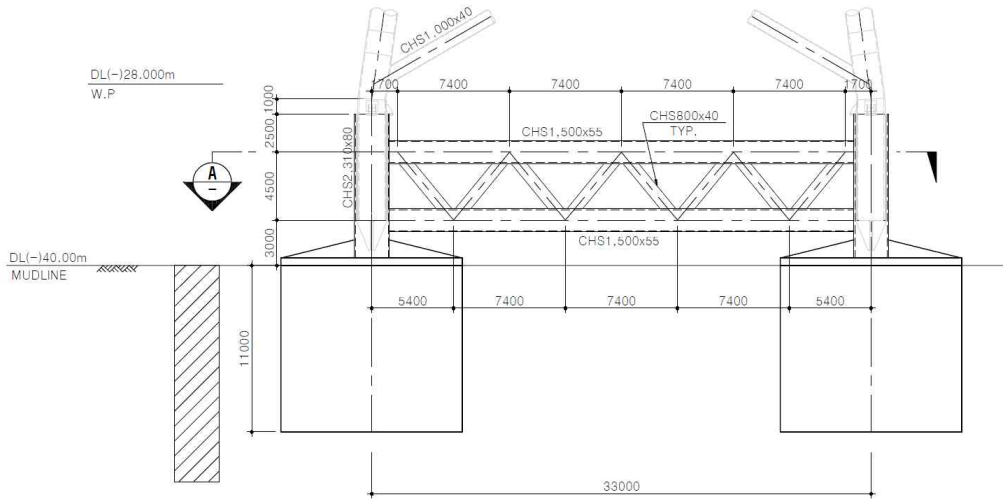


Fig. 1 Geometry of Pre-suction structure⁶⁾

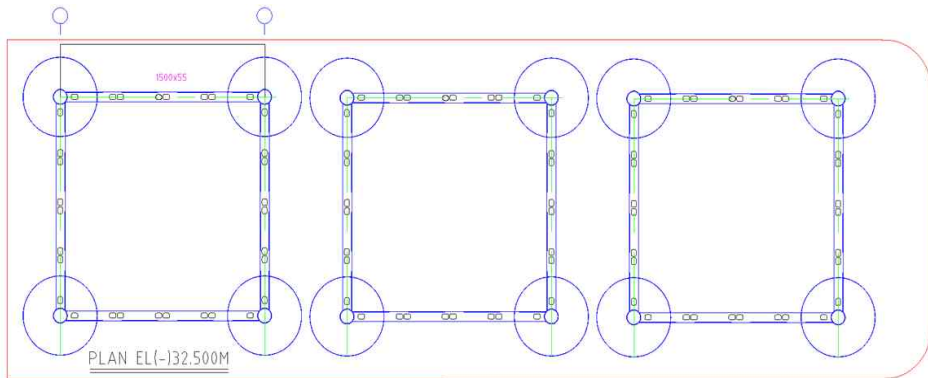


Fig. 2 Transportation arrangement

프리석션 구조물의 운송은 남해안 여수 인근 야드에서 출항하여 완도 해역 방향의 설치 예정지까지 운송하는 조건을 기준으로 설정하였다. 전체 운송 거리는 약 175 km로 추정되며, 5 knot(9.3 km/h)의 속도로 운송시 약 19시간이 소요된다. 계획 중인 전체 운송 경로는 Fig. 3에 나타내었다.

운송 환경조건은 대상 해역의 일반적인 해상 상태 및 운항 조건을 기반으로 설정하였으며, 작업은 허용파고 및 조류 상황 하에서만 진행하는 것으로 가정한다(weather restricted operations 조건). 운송 중 발생 가능한 선체 운동 및 구조물 응

답 특성을 평가하기 위하여 다양한 각도의 파랑 조건을 반영하였다.

Table 1 Model parameters of transportation barge

Parameter	Value
LOA	176.8 m
Breadth	48.8 m
Height	11.0 m
DWT	26,000 tons
CoG Z	6.79 m
Radius of Gyration, Rxx	14.6 m



Fig. 3 Transportation route

3. 선체 운동 해석 및 운송 안정성

3.1 운송 허용 기준

운송 안정성 평가는 DNV-ST-N001에서 제시하는 해상운송 관련 기준을 참고하여 수행하였다. 선체 운동에 의한 roll, pitch 및 heave 응답은 운송 중 구조물 안정성에 직접적인 영향을 미치는 주요 평가 항목으로 고려하였으며, 특히 roll 운동에 따른 횡방향 가속도와 침수각 조건을 중점적으로 검토하였다.

본 연구에서는 운송 조건에서 산정된 최대 운동 응답값과 DNV-ST-N001 기준에서 제시하는 허용 기준을 비교하여 운송 적합성을 평가하였다. 주요 운동 응답 및 현재 작업에 필요한 허용 기준은 Table 2에 발췌하여 정리하였다.

Table 2 Default motion acceptance criteria for weather restricted operations in non-benign areas for a duration of less than 24 hours (Case 8, DNV-ST-N001)

	Values
Roll/Single amplitude	10 °
Pitch/Single amplitude	5 °
Heave	0.1 g
Full cycle period	10 sec

3.2 운동 해석

프리석션 구조물 운송 시 발생 가능한 선체 운동 특성과 구조물 응답을 평가하기 위하여 주파수 영역 기반의 운동 해석을 수행하였다. 선체 운

동 해석은 상용 해석 프로그램인 OrcaWave를 이용하여 수행하였으며, 운송 바지선의 형상 및 적재 조건을 반영한 수치 모델을 적용하였다.

해석은 운송 경로 해역의 환경조건을 고려하여 다양한 파주기 및 파고 조건에 대해 수행되었으며, 선체 운동 응답 특성을 파악하기 위하여 Response Amplitude Operator(RAO)를 산정하였다. 본 연구에서는 운송 안정성에 주요한 영향을 미치는 heave, roll 및 pitch 운동을 중심으로 응답 특성을 검토하였다.

Fig. 4는 운송 바지선의 heave, roll 및 pitch 운동에 대한 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과, roll 운동은 파주기 8.2초 전후의 영역에서 상대적으로 큰 응답 특성을 나타내었으며, 이는 프리석션 구

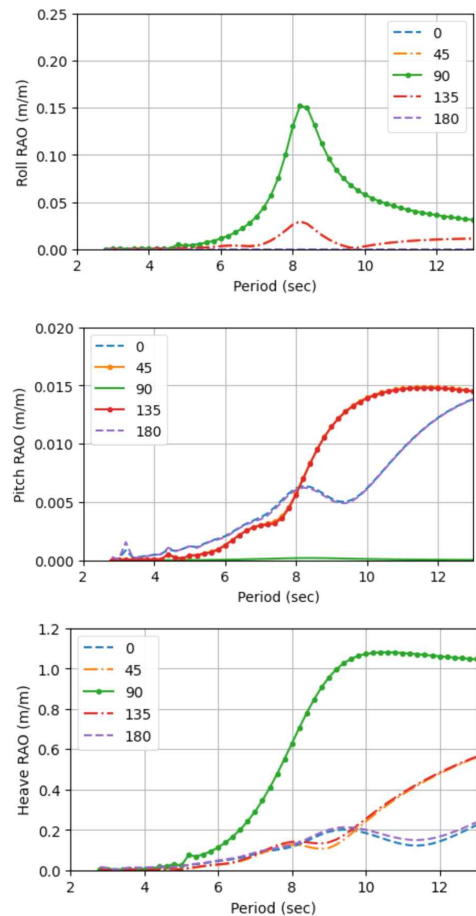


Fig. 4 RAO results

Table 3 Maximum vessel motion responses during transportation

Wave Height (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Heave (g)
1.6	6.970	0.720	0.0380
2.0	8.712	0.900	0.0475
2.2	9.583	0.990	0.0522

조물에 작용하는 횡방향 가속도 증가에 주요한 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 반면, heave 및 pitch 운동은 비교적 제한적인 응답 특성을 나타내었다.

산정된 운동 응답 결과를 기반으로 운송 시 발생 가능한 최대 운동 각도 및 가속도를 평가하였다. 운송 조건에서의 최대 roll 및 pitch 각도와 heave 가속도는 운송 안정성 평가 및 복원성 검토를 위한 입력 조건으로 활용하였다. 주요 운동 응답 결과는 Table 3에 정리하였다.

또한 선체 운동 해석 결과를 바탕으로 프리석선 구조물에 작용하는 방향별 설계하중을 산정하였으며, 이를 이용하여 운송 중 구조물 안정성 평가를 수행하였다.

4. 운송 안정성 평가

운송 안정성 평가는 화물 적재시의 선체 운동 해석 결과를 기반으로 이루어지며⁷⁻¹⁰⁾, 프리석선 구조물 운송 시 작용하는 최대 관성하중 (inertial force)은 Table 4와 같이 계산되었다.

방향별 가속도 응답에 의한 하중을 기반으로 운송 중 프리석선 구조물의 지지 안정성을 평가하였다. 프리석선 구조물은 바지선 갑판 상부에 부목을 이용한 단순 거치 조건으로 배치된 상태를 기준으로 검토를 수행하였다.

Table 4 Inertial forces acting on the cargo

Direction	Value (ton)
Longitudinal (surge)	13.5
Transverse (sway)	135.2
Vertical (heave)	108.1

운송 중 발생 가능한 heave 운동에 의한 최대 부상력을 고려하여 지지 반력을 평가하였으며, 부목과 갑판 사이의 마찰계수는 보수적으로 0.2를 적용하였다. 이를 고려하면, heave 응답에 따른 수직 하중 효과를 고려한 상태에서도 약 249 ton 수준의 최대 마찰 저항력이 확보된다. 이는 운송 중 발생 가능한 최대 횡방향 관성하중인 135.2 ton를 충분히 상회하는 수준으로, 별도의 강성 고박 구조 없이 단순 거치 조건만으로 구조물의 미끄러짐에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

또한 구조물 자중과 지지 배치 조건에 의한 들림 및 전도 가능성은 제한적인 것으로 나타났으며, 운송 중 안정적인 하중 전달이 가능한 것으로 확인되었다.

화물 적재 상태에서 운송 조건에서의 기본적인 복원 성능 평가를 위하여 바지선의 복원정(GZ, Righting Arm) 곡선을 산정하였다. Fig. 5는 운송 상태에서의 복원정 곡선을 나타내며, 값이 클수록 선체를 원래 상태로 복원시키려는 능력이 우수함을 의미한다.

일반적으로 침수각(flooding angle) 이상의 범위에서는 복원정은 큰 의미가 없으며, 운송 조건을 검토한 결과, 약 10도 이내의 경사 조건에서 4.4 m 정도의 충분한 복원정을 확보하는 것으로 확인되었다. 또한 양(+)의 복원정 구간이 넓게 유지되는 것으로 나타나 운송 중 충분한 초기 및 종합 복원 성능을 확보하는 것으로 평가되었다.

특히 적용된 운송 바지선은 폭이 큰 평저형 구조 특성으로 인해 상대적으로 큰 복원 모멘트를 형성하는 것으로 나타났으며, 프리석선 구조물 적재 조건에서도 안정적인 복원 특성을 유지하는 것으로 확인되었다. 침수각 이전 구간에서 복원정이 지속적으로 증가하는 경향을 나타내어 운송 중 예상 가능한 운동 응답 범위 내에서는 안정적인 자세 유지가 가능한 것으로 평가되었다.

또한 복원정 곡선 하부 면적은 충분한 동적 복원 에너지가 확보되고 있음을 의미하며, 대상 운송 조건에서의 최대 roll 응답과 비교할 때 운송 중 복원성 측면에서 큰 문제는 없는 것으로 판단된다.



Fig. 5 GZ curve under transportation condition

본 연구 결과를 통해 자켓 구조물과 프리석션 구조물을 분리하여 운송 및 설치하는 개념이 대형 해상풍력 하부구조물의 운송 및 설치 효율 향상에 효과적으로 적용 가능함을 확인하였다. 또한 본 연구 결과는 향후 대형 해상풍력 하부구조물의 해상운송 설계 및 안정성 평가를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 15 MW급 해상풍력 자켓기초용 프리석션 구조물을 대상으로 해상운송 시의 안정성 평가를 수행하였다. 운송 환경조건을 기반으로 선체 운동 해석을 수행하여 방향별 운동 응답 및 설계하중을 산정하였으며, 이를 바탕으로 운송 중 구조물 안정성 및 복원 성능을 검토하였다.

해석 결과, 대상 운송 조건에서 선체 운동 응답은 DNV 기준에서 제시하는 허용 범위 내에 존재하는 것으로 나타났으며, 유의파고 2.2 m 조건까지 운송 모션 측면에서 안정적인 운송이 가능한 것으로 평가되었다. 특히 roll 운동에 의한 횡방향

가속도가 주요 지배 인자로 나타났으나, 전체 응답 수준은 허용 가능한 범위 내에 존재하는 것으로 확인되었다.

또한 프리석션 구조물은 자체 중량에 의한 단순 거치 조건으로도 충분한 운송 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었으며, 별도의 강성 고박 구조 없이도 안정적인 운송이 가능한 것으로 확인하였다. 복원성 검토 결과에서도 운송 바지선은 충분한 복원 성능을 확보하는 것으로 평가되었으며, 침수각 조건 내에서 안정적인 운송 상태를 유지하는 것으로 확인되었다.

후 기

이 논문은 2024년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00456423, 15 MW급 고정식 해상풍력 단지의 기간 및 비용 10% 이상 절감형 프리파일링 자켓 지지구조 운송/설치 공법 개발).

Author contributions

J. An; Conceptualization, analysis, and writing. S. Yoon; Project administration. J. Son; Writing-review & editing.

References

1. IEA, Offshore Wind Outlook 2019, International Energy Agency, 2023.
2. DNV, Energy Transition Outlook - Offshore Wind Forecast, 2024.
3. G. T. Houlsby and B. W. Byrne, 2025, "Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Clay and Other Materials", The Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 158(2), 75-82. (DOI:10.1680/jge.158.2.75.61630)
4. DNV, 2024, Environmental Conditions and Environmental Loads (DNV-RP-C205).

5. DNV, 2023, Marine Operations Standard (DNV-ST-N001).
6. J. An, S. Yoon and J. Son, 2025, “A Study on Transportation Stability of Pre-Suction Installation of Offshore Wind Jackets of 15MW or Higher”, Proceedings of the 2025 KSPSE Spring Conference, 52.
7. R. Shi, X. Zhang, Y. Xia, B. He, Z. Zhang and J. Zhang, 2026, “Parametric Study on the Dynamic Response of a Barge-Jacket Coupled System During Transportation”, Journal of Marine Science and Engineering, 14(1), 100. (DOI:10.3390/jmse14010100)
8. J. Seok, Y. S. Back, J. C. Park, S. Y. Kim, T. H. Cha and Y. J. Yang, 2017, “Stability Evaluation during Transportation of Offshore Wind Turbine by Barge”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 54(3), 196-203. (DOI:10.3744/STNAK.2017.54.3.196)
9. B. W. Nam, J. Y. Park, S. Y. Hong, H. G. Sung and J. W. Kim, 2013, “Numerical Simulation of Towing Stability of Barges in Calm Water”, Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(1), 67-73.
10. Q. D. Zhu, M. He, S. Q. Liu, W. C. Meng, G. L. Cui and K. C. Chen, 2021, “Analysis on Stability and Motion Response Sensitivity of Large Jacket in Semi-submersible Barge Transportation”, Petro-Chemical Equipment, 24, 28-34.