

해상풍력단지 다이내믹 해저케이블의 신뢰성 평가를 위한 복합특성시험 플랫폼 개발

이승원, 김동은, 박병배, 김해종, 권익수 

한국전기연구원 전력케이블연구센터

Development of a Multi-Stress Characteristic Test Platform for Reliability Assessment of Dynamic Submarine Cables in Offshore Wind Farms

Seung-Won Lee, Dong-Eun Kim, Byung-Bae Park, Hae-Jong Kim, and Ik-Su Kwon

Power Cable Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 51543, Korea

(Received December 12, 2025; Revised December 19, 2025; Accepted December 19, 2025)

Abstract: The increasing global demand for renewable energy has accelerated the deployment of offshore wind farms, thereby highlighting the need for advanced development and performance assessment techniques for dynamic submarine cables used in floating offshore wind systems. These cables are continuously subjected to combined thermal, electrical, and mechanical stresses, with mechanical loading playing a particularly dominant role. As a result, dynamic submarine cables exhibit degradation behaviors that differ significantly from those of conventional fixed submarine cables. This paper presents the design and implementation of a comprehensive evaluation system capable of applying combined thermal, electrical, and mechanical stresses to dynamic submarine cables. The system was validated using a 66 kV wet type submarine cable through commissioning tests and insulation performance measurements. Electrical stress of 72 kV, thermal stress exceeding 95°C, and mechanical stress corresponding to a bending radius of 20 times the cable diameter over 20 cycles were applied to verify system reliability. The subsequent insulation assessments quantitatively confirmed performance variations induced by the combined stresses. The results demonstrate that the proposed platform is the first system capable of simultaneously applying thermal, electrical, and mechanical stresses to dynamic submarine cables, and its operational performance has been successfully validated. This platform enables realistic reliability evaluation of dynamic cables used in floating offshore wind farms and is expected to improve the overall operational reliability of offshore wind power systems.

Keywords: Dynamic submarine cable, Floating offshore wind, Multi stress testing, Cable reliability assessment, Insulation performance

1. 서론

재생에너지 수요의 증가로 해상풍력 발전 단지의 구축이 가속화되고 있으며, 이에 따라 고정식 구조에서 부유식 해상풍력 구조로의 기술적 전환이 빠르게 진행되고 있다. 부유식 해상풍력단지가 확대됨에 따라 전력을 송전하기 위

✉ Ik-Su Kwon; iskwon@keri.re.kr

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 핵심 요소인 다이내믹 해저케이블의 중요성이 더욱 부각되고 있다 [1, 2]. 부유식 시스템에 적용되는 다이내믹 해저케이블은 기존의 지중 또는 고정식 해저케이블과는 달리 해양 환경의 영향을 크게 받으며, 열적, 전기적 스트레스뿐만 아니라 부유체와 케이블 간의 상호 운동으로 인해 반복적인 동적 기계하중을 지속적으로 받는다 [3-6]. 특히 이러한 기계적 하중은 케이블의 장기 신뢰성과 열화 거동에 중요한 영향을 미치는 핵심 요소이다.

현재 해저케이블의 성능 평가는 IEC 63026에서 정의된 전기적 특성 시험과 CIGRE TB 623, TB 862에서 제시된 전 규모 피로 시험 방법에 기반하여 수행되고 있다 [7-9]. 그러나 이러한 기존 시험 방식은 부유식 해상풍력 환경에서 실제로 발생하는 열, 전기 및 기계적 복합 스트레스 조건을 충분히 재현하기 어렵다는 한계를 지닌다. 부유식 해상풍력단지에서의 신뢰성 확보와 안정적 운영을 위해서는 실제 운용 조건을 모의하여 열, 전기, 기계적 스트레스를 동시에 적용할 수 있는 고도화된 시험 플랫폼의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 이러한 요구를 충족하기 위해 다이내믹 해저케이블의 복합 스트레스 평가를 수행할 수 있는 시험 플랫폼 개발을 목표로 한다.

2. 이론적 배경

2.1 부유식 해상풍력단지

부유식 해상풍력단지는 깊은 수심에서도 설치가 가능하도록 부유체와 계류 시스템을 이용하는 반면, 고정식 해상풍력 단지는 해저면에 직접 고정되는 구조로 수심 제한이 존재한다. 표 1은 고정식 및 부유식 해상풍력단지의 차이점을 나타내며, 그림 1은 개념도를 나타낸다 [9].

부유식 해상풍력단지는 부유체의 지속적인 운동으로 인해 열적, 전기적 스트레스뿐만 아니라 기계적 동적 하중까지 동시에 작용하는 환경에 놓인다. 반면 고정식 해상풍력 단지는 구조적으로 안정되어 있어 주로 열적, 전기적 스트레스가 케이블 열화의 주요 요인으로 작용한다.

2.2 다이내믹 해저케이블

CIGRE TB 862에 따르면, 다이내믹 해저케이블은 반복적인 동적 하중을 견딜 수 있도록 설계되고 시험된 케이블로 정의되며, 이러한 케이블은 부유식 플랫폼에 연결되어 서비스 수명 동안 부유체의 움직임으로 인해 발생하는 다

양한 하중을 견뎌야 한다고 명시하고 있다. 그림 2는 다이내믹 해저케이블의 단면도를 나타낸다.

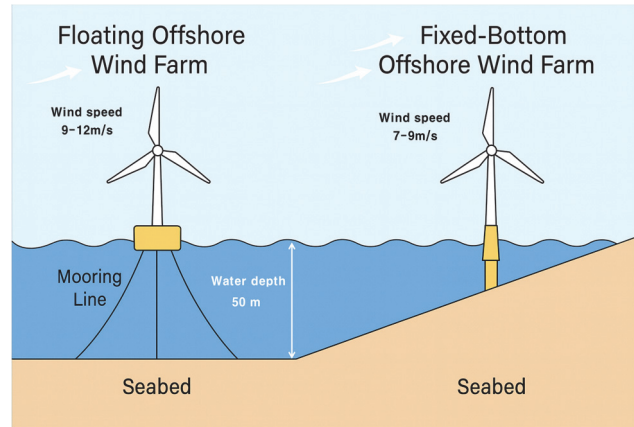


Fig. 1. Concept of floating and fixed-bottom offshore wind farm.

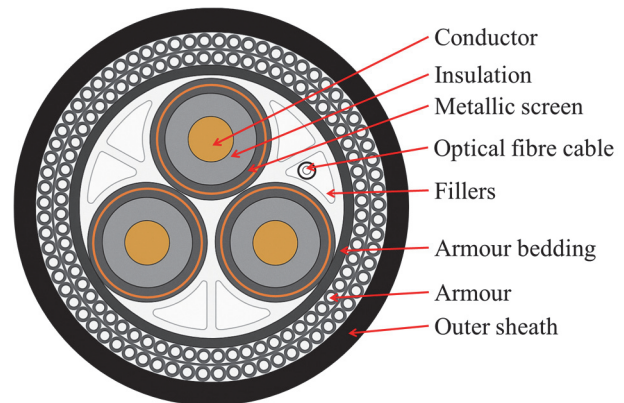


Fig. 2. Example of cross-section of dynamic cable.

Table 1. Comparison of floating vs. fixed offshore wind farms.

Category	Fixed	Floating
Structural	Turbines fixed	Turbines floating
Water depth	< 50 m	> 50 m
Wind speed	7-9 m/s	9-12 m/s
Cable	Single armour	Double armour
Stress	Thermal and electrical stresses	Combined thermal, electrical, and dynamic mechanical stresses

3. 연구 방법

3.1 복합특성시험 플랫폼 설계

다이나믹 해저케이블은 열, 전기 및 기계적 스트레스가 동시에 작용하는 환경에서 사용되므로, 이를 재현하기 위한 복합특성시험 플랫폼 구축이 필요하다. 본 플랫폼은 각 스트레스원을 정밀하게 인가할 수 있도록 구성되었다.

열적 스트레스는 유도전류 방식의 가열시스템을 이용해 케이블 도체에 전류를 흘리는 방식으로 구현하였으며, IEC 기준에 따라 도체 온도 95°C 이상을 달성할 수 있도록 용량을 설계하였다. 전기적 스트레스는 66 kV급 해저케이블에 3U₀ 이상의 전압을 안정적으로 인가할 수 있도록 200 kV급 AC 내압기를 제작하여 적용하였다. 여기서 U₀는 케이블에서의 상대지 전압을 나타낸다. 기계적 스트레스 시스템은 장력과 굽곡을 동시에 부여할 수 있는 액추에이터 기반 구조이며, 외경 대비 20배 굽힘 반경을 적용해 실제 다이나믹 케이블 환경을 모사하였다. 그림 3은 이러한 복합 스트레스를 통합적으로 인가하는 플랫폼의 설계 개념을 나타낸다.

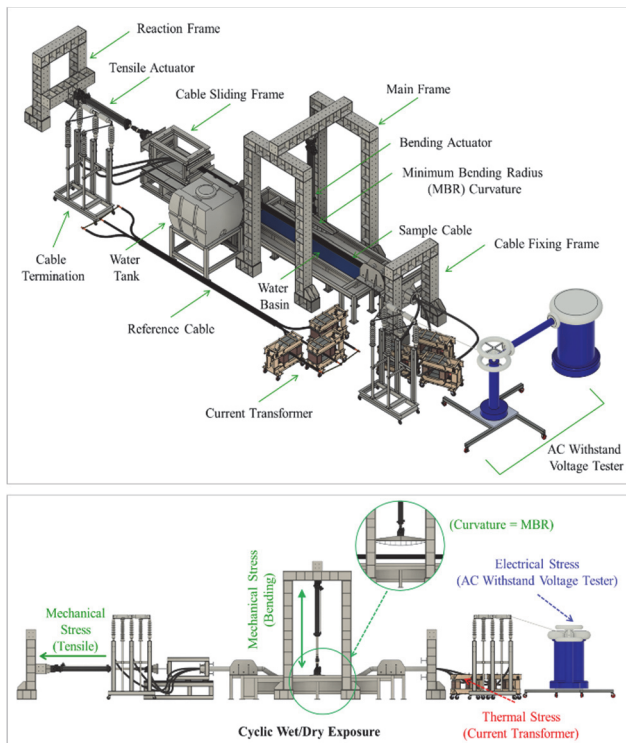


Fig. 3. Design concept of multi-stress characteristic test platform for applying combined stresses.

3.2 신뢰성 평가

다이나믹 해저케이블의 복합특성을 평가하기 위해 시험 플랫폼을 설계 및 개발하였으며, 구축된 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 66 kV wet type 해저케이블을 대상으로 20주기 동안 열, 전기 및 기계 복합시험을 수행하였다. 그림 4는 다이나믹 해저케이블에 열, 전기 및 기계적 복합 스트레스를 인가할 수 있는 복합특성시험 플랫폼을 나타낸다. 또한, 표 2는 설계 및 개발된 복합특성시험 플랫폼의 성능 평가를 위한 시험 조건을 나타낸다.

열적 스트레스는 20주기 부하시험 기반으로 1주기 24시간으로 구성하였다. 이 중 8시간은 도체 가열 단계, 16시간은 냉각 단계로 구성하였다. 전기적 스트레스는 동일한 20주기 동안 연속적으로 인가되며, 66 kV 해저케이블의 상대지 전압을 고려하여 그 2배인 72 kV를 시험 전압으로 선정하였다. 열 및 전기적 시험 조건은 IEC 63026 Electrical Type Test를 근거로 설정하였다. 기계적 스트레스는 극한 굽힘 반경 및 인장 조건을 포함하도록 구성하였다. 케이블의 최소 곡률반경을 기반으로 굽곡 인가장치의 굽힘 요건을 0.294 rad/m으로 설정하였으며, 인장 스트레스는 20 kN으로 하여 케이블에 연속적인 기계적 하중을 인가하였다. 이러한 기계적 시험 조건은 CIGRE TB 862 시험 규격을 참고하여 도출하였다.

3.3 절연특성평가

복합특성시험 플랫폼의 성능뿐만 아니라, 시험 과정에서 66 kV wet type 해저케이블의 성능 변화를 평가하기 위해 IEC 60243, 62631을 참조하여 절연저항, AC 절연파



Fig. 4. Multi-stress characteristic test platform for dynamic submarine cables.

Table 2. The test conditions for evaluating the performance of multi-stress test platform.

Category	Test conditions
Thermal stress	20 cycles (one cycle = 24 h (8 h heating + 16 h cooling)) Maintain maximum conductor temperature ≥ 95 °C for at least 2 h during the heating stage
Electrical stress	Electrical stress applied simultaneously during the 20-day thermal load-cycle period Test voltage: 72 kV
Mechanical stress	Bending curvature: 0.294 rad/m Horizontal (tension) force = 20 kN Based on a 24 h: 40 bending cycles applied for 2 h

Table 3. Measurement conditions for evaluating the insulation integrity after multi-stress testing.

Category	Test conditions
Insulation resistance	Applied 1 kV Recorded the value after 1 minute
Tan δ	Applied 36 kV Recorded the value after 1 minute
AC breakdown test	Applied an initial voltage of 90 kV and maintained for 5 minutes Increased voltage in 18 kV increments, maintained for 5 minutes, and repeated the step-up procedure until breakdown

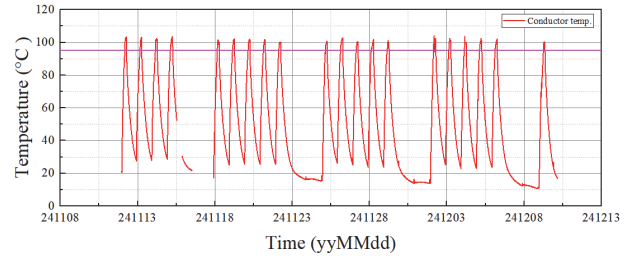
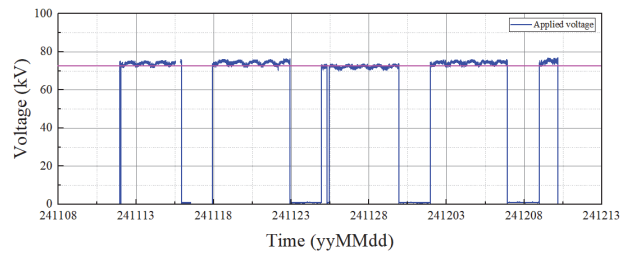
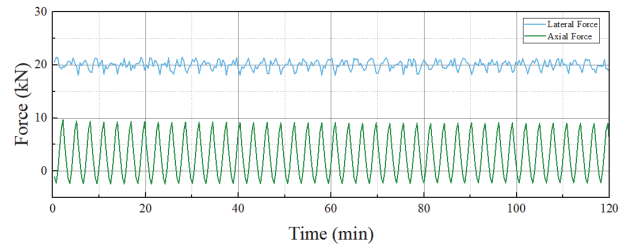
괴시험, Tan δ 를 측정하였다 [10,11].

표 3은 케이블의 절연 성능 평가에 적용된 측정 조건을 나타낸다.

4. 연구결과

4.1 복합특성시험 플랫폼 성능 검증

복합특성시험 플랫폼의 스트레스 인가 성능을 검증하기 위해 IEC 규격과 CIGRE TB 862를 참조하여, 20주기의 시험 기간 동안 66 kV wet type 해저케이블에 열, 전기적, 기계적 스트레스를 인가하였다. 본 시험에서는 표 2에 제시된 조건을 20주기 동안 안정적으로 달성하였으며, 이를

**Fig. 5.** Raw data of thermal stress applied by the multi-stress characteristic test platform over 20 cycles.**Fig. 6.** Raw data of electrical stress applied by the multi-stress characteristic test platform over 20 cycles.**Fig. 7.** Raw data of mechanical stress applied by the multi-stress characteristic test platform over 1 cycle.

통해 개발된 복합특성시험 플랫폼의 신뢰성과 성능을 검증하였다. 그림 5 및 6은 20주기 동안 케이블에 인가된 열적 및 전기적 스트레스를, 그림 7은 1주기 동안의 기계적 스트레스를 각각 나타낸다.

4.2 케이블 절연성능 평가

복합특성시험 이후 케이블을 대상으로 전기적 특성 평가를 수행하였다. 표 3의 조건에서 절연 특성을 평가한 결과, 절연저항은 3 T Ω 이상으로 나타났다. 또한, 468 kV에서 절연파괴가 발생하였으며, 이때의 최대 전계강도는 24.8 kV/mm이었다. Tan δ 도 0.001 이하로 측정되었다. 측정된 절연성능은 정상범주로 양호함을 나타내었다. 이를 통해 복합특성시험 플랫폼의 성능뿐만 아니라, 본 시험을 위해 제작된 66 kV wet type 해저케이블의 절연 성능

Table 4. Evaluation of insulation performance.

Category	Evaluation
Insulation resistance	Greater than 3 TΩ, within acceptable performance
Tanδ	Less than 0.001, within acceptable performance
AC breakdown test	Breakdown occurred at 468 kV, The electric field was 24.8 kV/mm, within acceptable performance



Fig. 8. Photographs of the cable insulation performance evaluation.

도 시험 기간 동안 건전함을 확인하였다. 해당 절연특성 값은 IEC 60243 및 CIGRE TB 722에서 요구하거나 보고된 정상 운전 범위와 동등한 수준에 위치함을 확인하였다. 그림 8은 케이블 절연 성능 평가 사진을 나타내며 표 4는 특성평가 결과를 나타낸다.

4.3 복합특성시험 플랫폼 개발

본 연구를 통해 세계 최초로 다이나믹 해저케이블에 열·전기·기계적 복합 스트레스를 동시에 인가할 수 있는 복합 특성시험 플랫폼을 개발하였다. 이는 기존의 단일 스트레스 기반 시험장비로는 구현할 수 없었던 실제 부유식 해상 풍력 환경의 복합 스트레스 조건을 정밀하게 재현할 수 있다는 점에서 중요한 기술적 진전을 의미한다.

특히 부유식 해상풍력단지의 확대에 의해 다이나믹 해

저케이블의 상용화 필요성이 빠르게 증가하는 상황에서, 본 플랫폼은 실해역과 유사한 열적 변동, 전기적 부하, 반복적 기계하중을 동시에 모사할 수 있는 세계 유일의 통합 시험 시스템으로 평가된다. 이를 통해 다이나믹 케이블의 장기 신뢰성 확보, 설계 검증, 소재선정 및 구조 최적화 등 다양한 기술적 과제를 해결할 수 있는 기반을 마련하였다.

5. 논의

본 연구에서는 세계 최초로 복합특성시험 플랫폼을 구축하였으며, 이를 활용하여 66 kV wet type 케이블의 절연 성능을 검증하였다. 그러나 본 플랫폼 개발이 다이나믹 해저 케이블에 대한 실제 시험 방법론의 완성을 의미하는 것은 아니며, 본 연구가 달성한 주요 성과는 시험 환경을 구성할 수 있는 하드웨어 및 시스템적 기반을 확보한 것이며, 향후에는 이 플랫폼을 기반으로 보다 체계적인 시험 절차, 평가 항목 등 시험 방법론을 구체화하는 연구가 필수적이다.

현재 전 세계적으로 다이나믹 해저케이블에 대한 공식적이고 표준화된 복합스트레스 시험 규격의 필요성이 증가하고 있으며, 특히 열·전기·기계적 복합 환경을 동시에 고려한 장기 신뢰성 평가 기법은 산업계와 표준화기구(CIGRE, IEC)에서도 적극적으로 논의되고 있다. 이러한 상황에서 본 연구에서 개발한 플랫폼은 향후 시험 방법 및 규격 개발을 위한 기반 기술로서 중요한 의미를 갖는다.

향후 연구에서는 복합하중 조건에서의 열화 메커니즘 분석 플랫폼을 활용한 시험 데이터의 축적을 통해 국제 표준화 논의에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 부유식 해상풍력단지에서 사용되는 다이나믹 해저케이블의 열·전기·기계 복합 환경을 실험적으로 재현하기 위해 세계 최초의 복합특성시험 플랫폼을 개발하였다. 개발된 플랫폼은 도체 온도 95°C 이상의 열적 스트레스, 72 kV 전기적 스트레스, 굽힘 반경 20D 및 20 kN 인장하중을 동시에 인가할 수 있도록 설계되었으며, IEC 63026 및 CIGRE TB 862의 요구 사항을 충족하는 성능을 확보하였다.

- 플랫폼의 신뢰성을 검증하기 위해 66 kV wet type 해저 케이블을 대상으로 20주기 복합시험을 수행한 결과, 모든 스트레스 조건이 시험 기간 동안 안정적으로 유지됨을 확인하였다.
- 복합특성시험 이후 케이블의 절연저항(3 TΩ 이상), Tan

δ (0.001 이하) 및 AC 절연파괴강도(468 kV, 24.8 kV/mm) 측정을 통해 절연 성능이 양호함을 확인함으로써, 플랫폼이 실제 복합 스트레스를 안정적으로 인가하고 평가할 수 있음을 입증하였다.

이러한 결과는 기존 단일 스트레스 기반 시험장비로는 구현하기 어려웠던 부유식 해상풍력 환경의 복합 하중 조건을 재현할 수 있는 시스템을 세계 최초로 구축하였다는 점에서 중요한 기술적 의미를 가진다.

ORCID

Ik-Su Kwon

<https://orcid.org/0000-0001-9540-9148>

감사의 글

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20213000000020, 해상풍력단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발).

REFERENCES

- [1] B. Tounsi, A. Henry, and L. Vanfretti, *Proc. IECON 2012 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (IEEE, Montreal, QC, Canada, 2012).
doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6388540>
- [2] Z. Zhang and Z. Liu, *Proc. 2024 6th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET)* (IEEE, Beijing, China, 2024).
doi: <https://doi.org/10.1109/ICPET62369.2024.10940650>
- [3] DNV-RP-J301, *Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications*, DNV, Høvik, Norway (2014).
- [4] DNVGL-RP-0360, *Subsea Power Cables in Shallow Water*, DNV GL, Høvik, Norway (2016).
- [5] S. W. Lee, J. W. Choe, I. S. Kwon, D. E. Kim, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 286 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.7>
- [6] J. K. Seo and H. S. Ryoo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **38**, 404 (2025).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2025.38.4.8>
- [7] IEC 63026:2019, *Submarine Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 6 kV up to 60 kV – Test Methods and Requirements*, IEC, Geneva, Switzerland (2019).
- [8] CIGRE, *Recommendations for Mechanical Testing of Submarine Cables*, Brochure, CIGRE, Paris, France, (2015).
- [9] CIGRE, *Recommendations for Mechanical Testing of Submarine Cables for Dynamic Applications*, Brochure, CIGRE, Paris, France (2022).
- [10] IEC 60243-1:2013, *Electric Strength of Insulating Materials – Test Methods – Part 1: Tests at Power Frequencies*, IEC, Geneva, Switzerland (2013).
- [11] IEC 62631-1:2011, *Dielectric and Resistive Properties of Solid Insulating Materials – Part 1: General*, IEC, Geneva, Switzerland (2011).