

# 과도한 인장력에 따른 해상풍력단지 해저케이블의 절연 특성 평가

이승원, 최진욱, 권익수, 김동은, 김해종 

한국전기연구원 전력케이블연구센터

## Evaluation of Insulation Characteristics of Submarine Cables in Offshore Wind Farm by Excessive Tension

Seung-Won Lee, Jin-Wook Choe, Ik-Su Kwon, Dong-Eun Kim, and Hae-Jong Kim

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

(Received January 11, 2024; Revised January 19, 2024; Accepted January 22, 2024)

**Abstract:** Research on aged insulation of cables by stress is constantly being considered for reliable and stable power transmission of offshore wind farms. This study aimed to evaluate the insulation characteristic of aged XLPE (cross-linked polyethylene) insulation for application of offshore wind farms. In this study, The XLPE insulation of cable was set as various mechanical strains. The XLPE insulation is exposed to the mechanical stress below yield strain of 5%, 10%, and 20%. Aged samples were tested by using the method of AC BDV (alternative current breakdown voltage), tensile strength, elongation, and SEM (scanning electron microscope) to obtain insulation characteristics. The experimental results show that the dielectric breakdown of the sample with a strain 20% was 50% lower than the unaged sample; thereby, demonstrating that the mechanical strain that occurred in the submarine cables can weaken the insulation characteristics. Therefore, mechanical strain should be monitored when laying and operating submarine cables for offshore wind farms.

**Keywords:** Offshore wind farm, Cable, XLPE, Strain, AC BDV

### 1. 서론

친환경 에너지 수요가 증가함에 따라서 해상풍력 시장 규모가 확대되고 있으며 그에 따른 해상풍력단지 해저케이블의 연구도 지속적으로 증가하고 있다 [1,2].

해상풍력단지 해저케이블의 설치 및 운용 과정은 기존 지중 전력케이블과 다르게 열적 및 전기적 스트레스뿐만 아니라 기계적 스트레스도 복합적으로 작용한다. 해저 매설 구간과 하부구조물에 수직 고정 구간, 수평-수직을 연

결하는 free span, 세굴, 지진, 해류, 조석 현상, 저인망 및 닻 등 여러 가지 원인은 해저케이블의 기계적 스트레스를 초래한다 [3,4].

해상풍력단지 해저케이블의 설치 과정 및 운용 중에 발생하는 기계적 스트레스는 케이블 절연체의 성능을 저하시키며, 해상풍력단지 운영 및 관리 신뢰성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 기계적 스트레스에 따른 해상풍력 해저케이블의 절연 특성 평가 연구가 필요하였다.

본 논문에서는 설치 및 운용 중에 발생할 수 있는 과도한 인장력이 케이블 절연체에 미치는 영향성을 평가하기 위하여 XLPE (cross-linked polyethylene) 절연체의 항복 스트레인 이하의 값을 열화조건으로 설정하고, 절연 파괴 강도, 인장강도, 연신율 및 SEM을 측정하고 절연 특성을 평가하였다.

✉ Hae-Jong Kim; [hjkim@keri.re.kr](mailto:hjkim@keri.re.kr)

Copyright ©2024 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.

## 2. 이론

### 2.1 해저케이블의 기계적 스트레스

해상풍력 해저케이블에 인가되는 기계적 스트레스의 유형은 그림 1과 같이 축 방향 신장, 축 방향 압축, 비틀림, 굽힘, 측면 압축, 전단응력, 충격, 마모, 진동 등이 있다 [3].

해상풍력단지 해저케이블은 설치 시 포설선에 선적, 하부구조물에 입상, 해수면 위의 부유, 매설 등의 과정에서 인장력에 의한 과도한 스트레스를 받게 된다.

그림 2는 해상풍력단지 해저케이블의 선적 및 설치에 따른 인장력을 나타낸다.

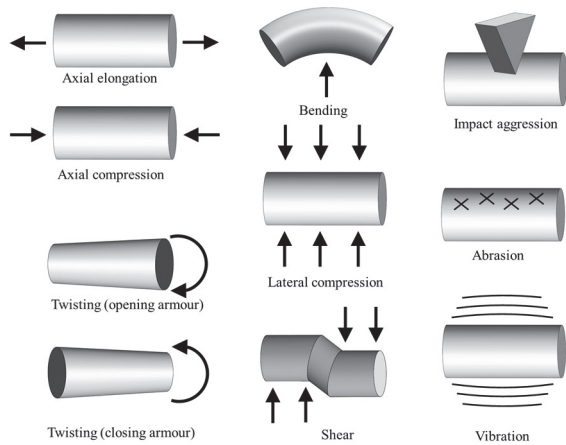


Fig. 1. Mechanical stress of submarine cables in offshore wind farm.

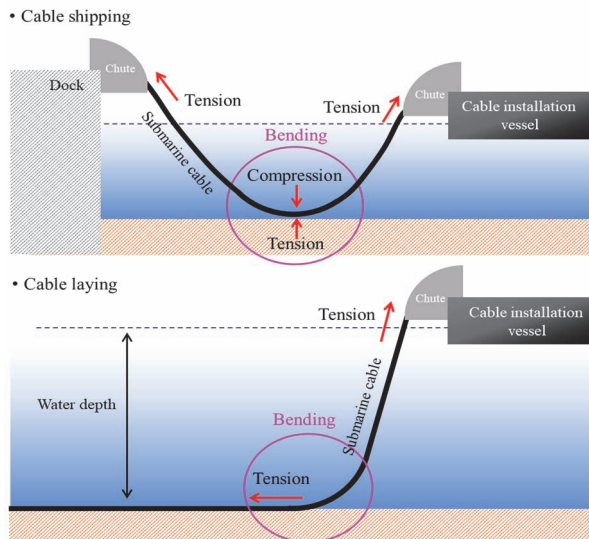


Fig. 2. Shipping and laying of submarine cables.

### 2.2 절연재료 특성 평가 방법

본 연구에서 케이블 절연재료의 성능은 절연파괴 강도, 인장강도, 연신율 및 SEM 촬영을 통하여 평가하였다.

절연파괴 시험은 절연재료의 특성 변화 또는 편차를 검출하는 데 유용한 방법이며, 절연재료를 고전압 전극과 접지 전극 사이에 위치시키고 일정한 속도로 전압을 상승시켜 파괴한다 [5,6]. 일반적으로 절연재료의 절연파괴 시험은 ASTM D149 및 IEC 60243을 참조하여 수행한다.

인장강도는 절연체의 파괴가 발생하기 전까지 버틸 수 있는 최대 인장응력을 말하며, 연신율은 인장시험에서 측정된 물질의 연성 정도를 나타낸다. 시험 방법은 절연재료를 표준 덤벨형으로 제작하여 일정한 속도로 인장력을 상승시켜 파괴한다 [7,8]. 절연재료의 인장강도 및 연신율은 IEC 60811-501을 준수하여 측정한다.

SEM 촬영은 진공 상태의 시험 샘플 표면에 미세한 전자선을 주사하여 발생하는 이차전자, 반사전자 신호를 검출하여 시료의 형태, 미세구조를 분석하기 위해 사용한다 [9,10].

## 3. 실험

### 3.1 시험 대상

본 연구에서는 기계적 스트레스가 케이블 절연체에 미치는 영향을 평가하기 위하여 기존 상용화된 22.9 kV CNCV-W 케이블을 대상으로 하였다. 그림 3은 시험 대상인 22.9 kV CNCV-W 케이블이다. 도체 단면적은 100 mm<sup>2</sup>, 절연체는 XLPE로서 두께는 6.6 mm이다. 해당 케이블에서 XLPE 절연체만 채취하여 기계적 스트레인 조건에서 열화 후 절연 특성을 평가하였다.

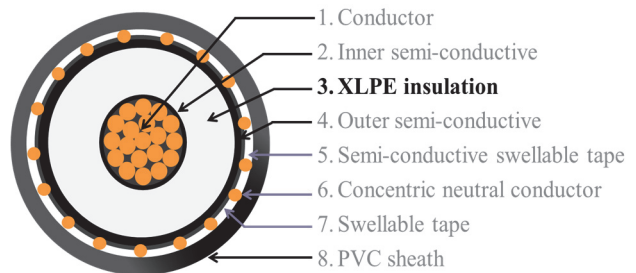


Fig. 3. Cross section of 22.9 kV CNCV-W cable.

### 3.2 시험 샘플 제작

시험 샘플을 제작하기 위하여 그림 3의 케이블에서 외피, 부풀음 테이프, 중성선, 반도체성 부풀음 테이프 및 도체를 제거하여 외부반도전, XLPE 절연체, 외부반도전만 남도록 하였다. 이를 선반 작업을 통해 회전시키고 칼날에 근접하여 얇은 시트 형태로 필링하였다. 그림 4는 케이블 절연체를 선반 작업을 통하여 필링하는 개념도 및 과정을 나타낸다.

그림 5는 절연 특성 평가를 위하여 케이블로부터 제작된 시험 샘플을 나타낸다. 좌측 그림은 기계적 열화 및 절연 파괴 시험을 위한 시험 샘플이며 가로 50 mm, 세로 80 mm, 두께는 0.25 mm이다. 우측 그림은 인장강도 및 연신율 측정을 위한 덤벨 형태의 샘플로서 가로 12.5 mm, 세로 75 mm, 두께는 0.25 mm이다.

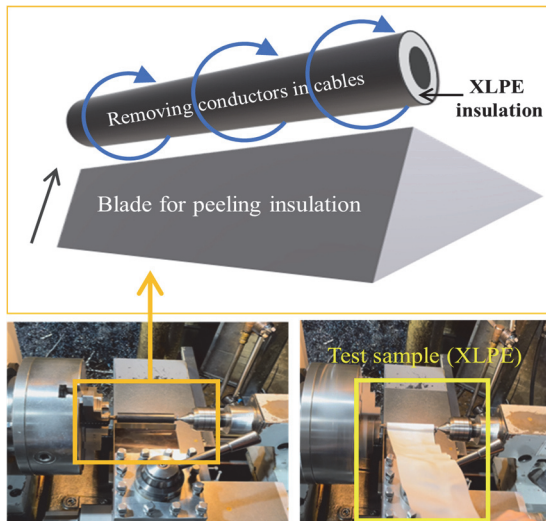


Fig. 4. Peeling for manufacturing test samples.

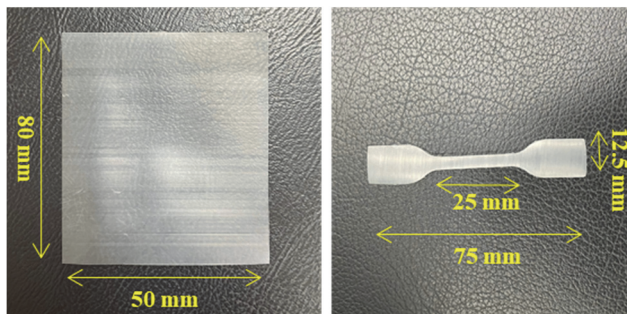


Fig. 5. Test samples made of XLPE insulation.

### 3.3 기계적 열화 시험

필링된 케이블 절연체를 덤벨 형태로 제작하고 3회 반복 측정된 항복 스트레인의 평균은 27%였으며, 열화조건은 그 이하의 스트레인 5%, 10% 및 20%로 설정하여 1시간 동안 유지하였다 [11]. 그림 6 및 표 1은 XLPE 절연체의 항복 스트레인에 따른 인장력을 나타내며, 그림 7은 XLPE 절연체에 스트레인을 인가하는 사진이다.

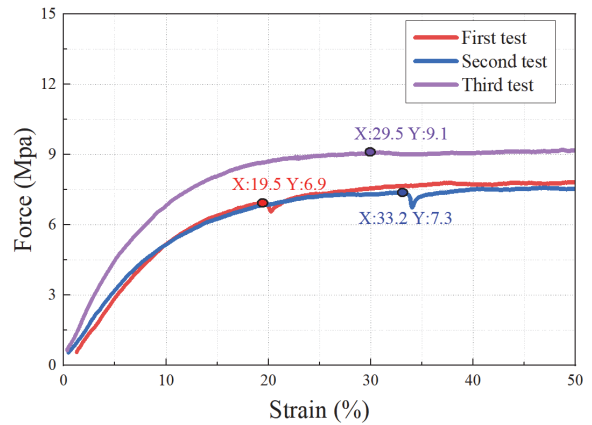


Fig. 6. Yield strain of XLPE insulation.

Table 1. Average yield strain of XLPE insulation.

| No.     | Force (Mpa) | Strain (%) |
|---------|-------------|------------|
| First   | 6.9         | 19.5       |
| Second  | 7.3         | 33.2       |
| Third   | 9.1         | 29.5       |
| Average | 7.7         | 27.4       |

Table 2. Mechanical aging conditions.

| No.             | Strain (%)   | Time (s) |
|-----------------|--------------|----------|
| Aging condition | 5, 10 and 20 | 3,600    |

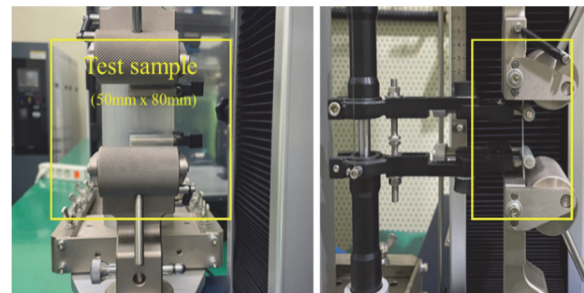


Fig. 7. Mechanical aging test of XLPE insulation.

### 3.4 절연 특성 측정

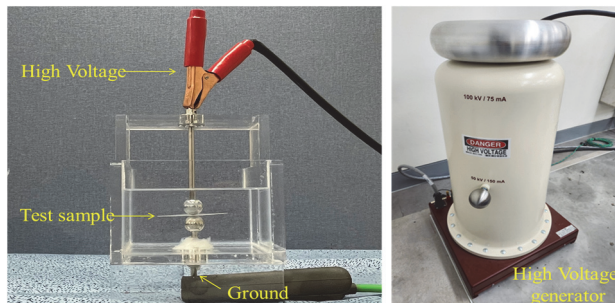
표 3은 기계적 스트레스에 의하여 열화된 XLPE 절연체의 절연 특성 평가를 위한 측정 조건을 나타낸다.

시험 샘플의 절연파괴 시험은 IEC 60243 및 ASTM D149를 준수하여 수행하였으며, 전압인가부 및 접지전극은 지름 20 mm로 크기가 동일한 구 대 구 전극을 사용하였다. 또한, 절연파괴 시험 시 발생할 수 있는 전극 표면의 방전을 방지하기 위하여 오일에 전극을 담그고 수행하였다. 가로 50 mm, 세로 80 mm, 두께 0.25 mm인 XLPE 절연체를 열화조건별 6개씩 준비하여 상온에서 1 kV/s 상승 속도로 절연파괴 강도를 측정하였다. 그림 8은 기계적으로 열화된 XLPE 절연체의 절연파괴 강도를 측정하기 위한 전극과 Phenix사의 100 kV, 75 mA의 용량을 갖는 AC 내압기이다.

기계적으로 열화된 XLPE 절연체의 인장 강도 및 연신율은 IEC 60811-501 규격을 준수하여 측정하였으며, XLPE 절연체를 덤벨 형태의 샘플로 제작하여 25 mm/min의 상승속도로 파괴하였다. 또한, 이때의 XLPE 절연체의 최대 인장응력과 표점 거리의 증가량을 기록하였다. 덤벨 형태의 샘플은 그림 5와 같으며, 열화조건별 3개씩 인장강도 및 연신율을 측정하였다. 인장강도 및 신율 측정장비는 DAEHA사의 장비로서 QC-548M1F-M 및 QC-551 모델을 이용하였다. 그림 9는 XLPE 절연체의 인장 강도 및 연신율 측정 사진을 나타낸다.

**Table 3.** Methods of insulation characteristics evaluation according to measurement condition.

| Method                | Measurement condition          |
|-----------------------|--------------------------------|
| AC breakdown strength | Ramping test 1 kV/s (AC 60 Hz) |
| Tensile strength      | Separation rate 25 mm/min      |
| Elongation            |                                |
| SEM                   | Magnification of 5 k and 10 k  |



**Fig. 8.** Electrode for measuring breakdown strength.

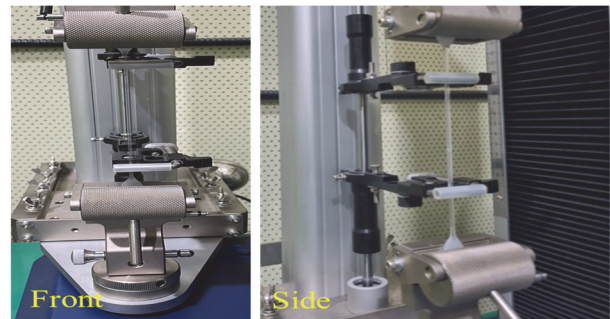
SEM 촬영 및 분석을 위하여 XLPE 절연체를 가로 4 mm, 세로 4 mm, 두께 0.25 mm의 사각형태로 제작하였다. SEM 촬영 시 5 K 및 10 K 측정배율을 적용하여 열화된 XLPE 절연체의 표면을 촬영하였다. SEM 촬영 장비는 HITACHI사의 SEM S-4800 모델을 사용하였다.

## 4. 결과 및 토론

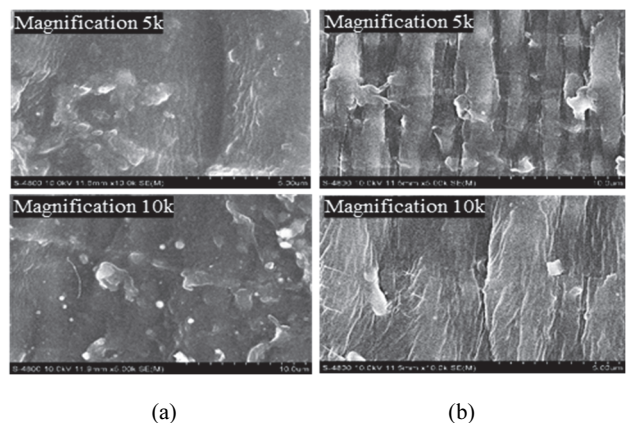
### 4.1 절연 특성 평가

기계적 스트레인 5%, 10% 및 20%에 의하여 열화된 XLPE 절연체를 대상으로 절연파괴 시험, 인장강도 및 연신율 측정, SEM 촬영을 수행하여 절연 특성을 평가하였다.

그림 10(a)는 열화 전 XLPE 절연체의 표면이며, 10(b)는 기계적 스트레인 20%로 열화된 XLPE 절연체의 표면의 SEM 촬영이다. 그림 11 및 12는 기계적 스트레인에 따른 XLPE 절연체의 절연파괴 강도 와이בל 분포와 박스 차트이다



**Fig. 9.** Measuring tension strength and elongation.



**Fig. 10.** SEM after mechanical aging test ; (a) unaged (b) strain 20%.

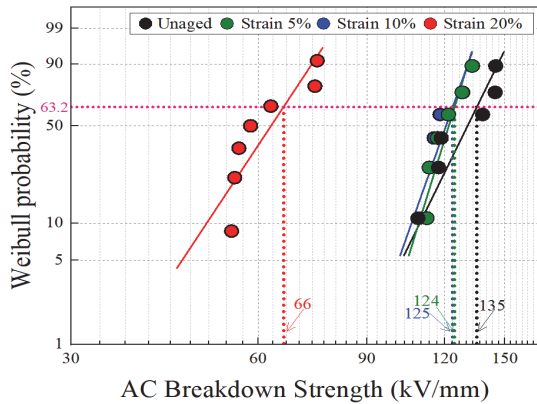


Fig. 11. AC breakdown strength according to aging conditions.

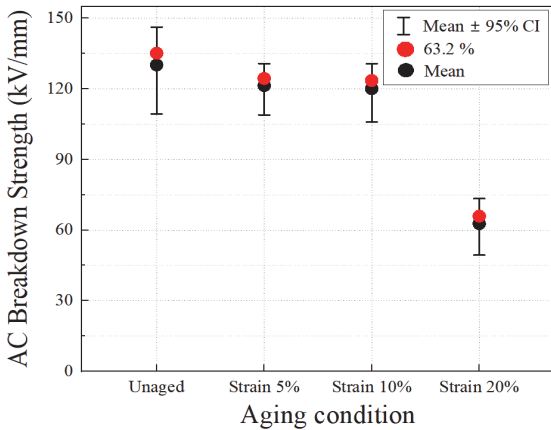


Fig. 12. Weibull distribution of AC breakdown strength according to aging conditions.

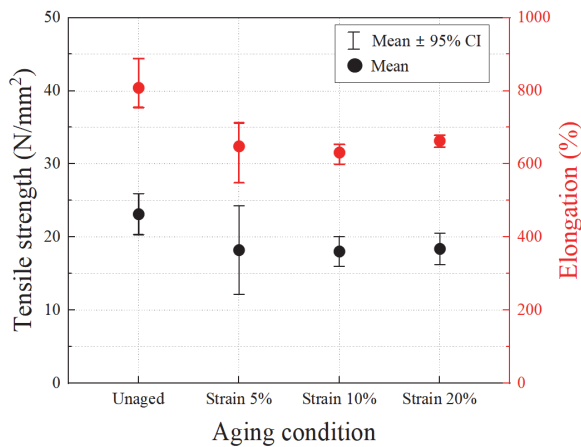


Fig. 13. Tensile strength and elongation according to aging conditions.

다. 열화 전 XLPE 절연체의 절연파괴 강도는 135 kV/mm이며 5%, 10% 및 20% 스트레인에 의해 열화된 XLPE 절연체는 각각 124 kV/mm, 125 kV/mm, 66 kV/mm였다. 그림 13은 기계적 스트레인에 따른 XLPE 절연체의 인장 강도 및 신율을 나타낸다. 열화 전 XLPE 절연체의 인장 강도 및 연신율은 23.1 N/mm<sup>2</sup>, 807%이며 5%, 10% 및 20% 스트레인에 의해 열화된 XLPE 절연체의 인장 강도 및 신율은 각각 18.1 N/mm<sup>2</sup>, 650%, 18 N/mm<sup>2</sup>, 632%, 18.4 N/mm<sup>2</sup>, 662%였다.

### 4.2 기계적 열화 특성 분석

표 4는 케이블 XLPE 절연체의 기계적 스트레인에 따른 절연 특성 평가 결과를 나타낸다.

기계적 열화조건인 스트레인 5%, 10% 및 20% 조건에서 열화 전 대비 열화 후 XLPE 절연체의 절연파괴 강도는 각각 8%, 8% 및 52%, 인장 강도 및 연신율은 최대 20% 하락하였다. SEM 촬영 결과 XLPE 절연체의 기계적 스트레인이 증가할수록 표면에 반복적인 굴곡이 발생하고, 미세 크랙 증가가 관측되었다.

그림 10과 같이 스트레인 20%의 과도한 기계적 스트레스는 케이블 절연체에 반복적인 굴곡 및 미세 크랙을 증가시켜 물리적 손상을 초래하며, 이에 따라서 절연파괴 강도, 인장강도 및 연신율 등의 절연 성능이 급격하게 저하되는 것으로 분석된다.

해상풍력단지 해저케이블의 설치 및 운용 중에 발생하는 과도한 인장력은 케이블 절연체의 성능을 저하하고 열화 원인으로 작용할 수 있으므로 기계적 스트레스에 주의해야 한다.

### 4.3 토론

기 발표된 논문은 열적 및 전기적 열화에 따른 케이블의 절연특성 평가를 주로 다루며, 기계적 스트레스 열화조건을 고려하더라도 해상풍력단지 해저케이블에서 발생하는

Table 4. Insulation characteristics by aging conditions.

|            | AC breakdown strength | Tensile strength       | Elongation |
|------------|-----------------------|------------------------|------------|
| Unaged     | 135 kV/mm             | 23.1 N/mm <sup>2</sup> | 807%       |
| Strain 5%  | 124 kV/mm             | 18.1 N/mm <sup>2</sup> | 650%       |
| Strain 10% | 125 kV/mm             | 18.0 N/mm <sup>2</sup> | 632%       |
| Strain 20% | 66 kV/mm              | 18.4 N/mm <sup>2</sup> | 662%       |

과도한 인장력을 대상으로 시험을 수행하지 않는다. 본 연구에서는 해상풍력단지 해저케이블의 설치 및 운용 과정에서 발생하는 과도한 인장력이 절연체에 미치는 영향성을 분석하였다는 점에서 기존 연구와 차이가 있다.

본 연구의 한계점으로는 XLPE의 과도한 인장력이 케이블 절연 특성에 미치는 영향을 평가하기 위한 시험 대상이 케이블이 아닌 시트였다는 것으로 이는 열화된 절연체의 특성 변화를 이룬 시일 내에 확인하기 위함이었다. 향후에는 케이블을 침수하고 MBR (minimum bending radius)를 부여한 상태로 전압을 인가하여 해저와 유사한 환경에서 열화 시험을 진행할 예정이다. 추가된 전기적 및 수위 스트레스에 의한 케이블 절연체의 열화시험은 기존 기계적 스트레스보다 절연체의 절연 특성 저하를 심화할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

해상풍력단지 해저케이블의 설치 및 운용 중에 발생할 수 있는 과도한 인장력이 절연 특성에 미치는 영향성을 평가하였다. XLPE 절연체에 기계적 스트레인 5%, 10% 및 20%를 인가하여 열화하고, 절연파괴 강도, 인장 강도, 연신율 및 SEM 측정을 수행하여 절연 특성을 평가하였다. 본 연구의 주요 시사점은 다음과 같이 요약할 수 있다.

기계적 스트레인 20% 조건에서 XLPE 절연체의 절연파괴 강도는 열화 전 샘플에 비해 52%, 인장 및 연신율은 20% 성능이 저하되었다. 또한 SEM 측정 결과 기계적 스트레인이 증가함에 따라서 XLPE 절연체 표면의 굴곡 및 미세 크랙이 증가함을 알 수 있었다. 이를 통해서 해상풍력단지 해저케이블의 선적, 포설, 매설, 입상, 부유 및 운용 중에 발생할 수 있는 과도한 인장력이 절연체의 절연 특성 저하를 초래할 수 있음을 추론하였다. 따라서 해상풍력단지의 안정적이고 신뢰성 높은 운용 및 관리를 위해서는 해상풍력단지 해저케이블의 과도한 인장력을 제한하고 취약 지점에 관해서는 우선적인 감시 및 모니터링이 필요하다.

## ORCID

Hae-Jong Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5963-1016>

## 감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20213000000020, 해상풍력단지 해저 전력망 구축을 위한 핵심기자재 및 평가 기술 개발).

## REFERENCES

- [1] B. S. Kim, *Green Energy Technol. Insight*, **12**, 10 (2021).
- [2] Y. Jiang, Y. Qi, G. Zhao, H. E. Li, A. Pang, R. Huang, T. Song, and Z. Zhou, *Proc. The Seventh International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection (IOP Publishing Ltd, Zhuhai, China)* p. 012014.  
doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1171/1/012014>
- [3] RECOMMENDED DNVGL-RP-0360-Subsea Power Cables in Shallow Water, Edition Mar. 2016.
- [4] RECOMMENDED DNV-RP-J301-Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications, Feb. 2014.
- [5] ASTM D149-20 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies.
- [6] IEC 60243-1:2013 Electric Strength of Insulating Materials - Test Methods - Part 1: Tests at Power Frequencies.
- [7] IEC 63026:2019 Submarine Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 6 Kv ( $U_m = 7,2$  Kv) up to 60 Kv ( $U_m = 72,5$  Kv) - Test Methods and Requirements
- [8] IEC 60811-501:2012 IEC 63026:2019 Submarine Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 6 Kv ( $U_m = 7,2$  Kv) up to 60 Kv ( $U_m = 72,5$  Kv) - Test Methods and Requirements.
- [9] H. Habibi, A. S. Alam, O. Prasetyawan, and G. Supriyadi, *Proc. 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)* (IEEE, Bandung, Indonesia, 2021).  
doi: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601095>
- [10] J. Johnsen, F. Grytten, O. S. Hopperstad, and A. H. Clausen, *Mech. Mater.*, **114**, 40 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.07.003>
- [11] F. Pirnia, *Master Thesis, Experimental Analyses on XLPE under Tension and Compression*, Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Sweden (2014).