

오일 점도가 케이블 절연체의 절연파괴강도에 미치는 영향 분석

이승원 , 권익수, 박병배, 김동은, 김해종

한국전기연구원 전력케이블연구센터

Experimental Analysis of the Effect of Oil Viscosity on the Breakdown Strength of Cable Insulation

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

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

(Received December 17, 2025; Revised December 23, 2025; Accepted December 23, 2025)

Abstract: Breakdown strength is an essential parameter for evaluating the electrical performance and degradation behavior of cable insulation and IEC 60243 also emphasizes its importance for detecting changes in insulation characteristics due to aging. However, the current IEC standards are mainly limited to specifying electrode configurations and test voltage conditions for breakdown tests, while the influence of insulating oil, is not clearly addressed. In this study, the breakdown strength of a 66 kV wet-type submarine cable was experimentally evaluated using insulating oils with different kinematic viscosities of 10, 100, 500, and 1,000 cSt in order to achieve reliable and reproducible breakdown measurements. The experimental results show that the measured breakdown strength decreases by up to approximately 20% depending on the oil viscosity. This indicates that the viscosity of the insulating oil has a significant influence on the measured breakdown strength during breakdown test. Therefore, it is necessary to perform breakdown strength measurements under identical test conditions, including the physical properties of the insulating oil, to ensure reliable comparison and accurate assessment of insulation performance and degradation characteristics.

Keywords: Breakdown strength, Insulating oil viscosity, Submarine power cable, Wet-type insulation, Dielectric degradation

1. 서론

전력케이블 절연체의 절연파괴강도는 절연 성능 및 열화 특성을 평가하는 대표적인 전기적 지표로서, 케이블의

신뢰성 평가에 널리 활용되고 있다. 일반적으로 고분자 절연재료의 절연파괴시험은 절연 오일 환경에서 수행되며, 절연 오일은 외부 환경의 영향을 차단하고 시험 중 전계 분포를 안정화하기 위한 보조 매질로 사용된다 [1-3]. 절연 오일은 연면 절연파괴, 연명 방전, 그리고 벌크 영역에서의 절연파괴가 안정적으로 발생하도록 시험 환경을 조성하는 중요한 역할을 수행한다 [4-6].

IEC, ASTM 규격에서는 전극 형상, 전압 상승률, 시편 형상 등 절연파괴시험 조건에 대해 체계적으로 정리되어

✉ Seung-Won Lee; 815lsw@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.

있다 [7, 8]. 반면, 절연파괴시험 시 보조 매질로 사용되는 시험 오일의 물성에 대한 영향, 특히 점도가 시험 결과에 미치는 영향에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 않았다.

절연 오일의 점도는 열 전달 특성, 기포 거동, 국부 전계 완화 특성 등에 영향을 미칠 가능성이 있음에도 불구하고, 이에 대한 체계적인 실험적 검증은 아직 제한적인 실정이다. 이에 본 연구에서는 절연 오일의 점도 변화에 따라 절연파괴강도가 최대 약 20%까지 저감될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 절연파괴시험 시 절연유의 점도가 측정된 절연파괴강도에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 절연 성능의 정량적 비교 및 열화 특성 평가를 위해서는 전극 조건 및 시험 전압과 같은 기본 시험 조건뿐만 아니라, 절연유의 물성 조건을 포함한 시험 환경의 표준화가 필요함을 강조한다.

2. 이론적 배경

2.1 절연파괴시험의 개요

절연파괴강도 시험은 절연재료의 특성 변화 또는 편차를 검출하는 데 유용한 방법이다. 본 시험은 절연재료를 고전압 전극과 접지 전극 사이에 위치시킨 후, 일정한 속도로 전압을 상승시켜 절연파괴가 발생하는 시점의 전압을 측정하는 방식으로 수행된다 [9, 10]. 그림 1은 절연파괴시험을 위한 기본적인 회로 구성을 나타낸다.

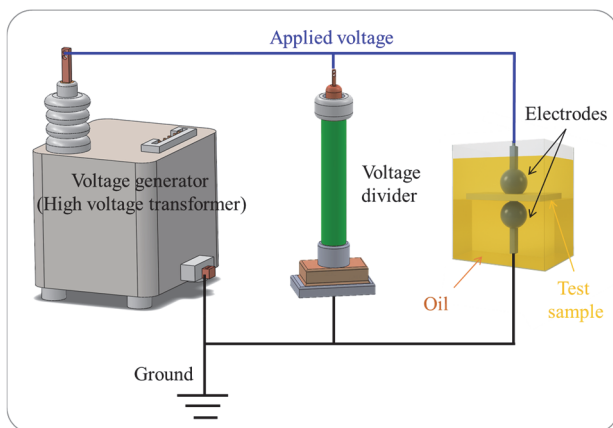


Fig. 1. Circuit diagram for breakdown test.

2.2 절연파괴시험에서 절연 오일 역할

절연 오일이 사용되지 않을 경우, 시험 샘플 표면에서 절연파괴가 발생할 수 있어 절연재료의 고유한 절연파괴강도를 측정하기 어렵다. 또한 절연 오일은 시험 샘플 표면에서의 부분방전을 억제하는 역할을 수행한다. 절연 오일은 시험 샘플 및 전극 주변의 전계 분포를 안정화함으로써, 절연재료의 벌크 영역에서 절연파괴가 발생하도록 유도하는 경로를 형성한다.

3. 연구 방법

3.1 시험대상 및 시편

시험대상은 66 kV wet type 해상풍력용 해저케이블이다. 해저케이블로부터 절연체를 슬라이스하였으며, 50 mm × 50 mm 크기의 사각 형태로 가공하여 절연파괴시험을 수행하였다.

절연파괴시험 시 전극 형상, 인가 전압 및 온도 등의 시험 조건을 동일하게 유지하였으며, 모든 시편은 동일한 제작 공정과 치수 조건을 적용하여 표면 거칠기 및 두께 편차를 최소화하였다. 표 1은 절연파괴시험을 위한 조건을 나타낸다. 또한 그림 2는 케이블로부터 절연체를 샘플링하는 과정을 보여준다.

3.2 절연파괴시험 오일

본 연구에서는 절연 오일의 점도를 대표 변수로 설정하여 XLPE의 절연파괴강도를 측정하였으며, 점도는 10, 100, 500 및 1,000 cSt 조건에서 시험을 수행하였다.

3.3 절연파괴시험 방법

절연재료에 전압은 AC 내압기를 통해 인가하였으며, 시험 전극은 IEC 60243에서 제시하는 구대구 전극을 사용하였다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 전극 및 시험샘플을 절연 오일에 침지한 상태에서 1 kV/s로 절연파괴가 발생할 때까지 시험을 수행하였다.

3.4 데이터 분석 방법

절연파괴시험을 통해 획득한 절연파괴강도 데이터는 시

험 조건에 따른 분산 및 편차 특성을 정량적으로 평가하기 위해 그림 4와 같이 박스차트를 이용하여 1차적으로 분석하였다.

그림 5와 같이 점도에 따른 Weibull 분포 함수의 특성 모수간의 관계를 멱수 법칙에 근거하여 해석하였다.

그림 6은 와이블 분포 분석을 통해 형상 모수와 척도 모수를 도출하였으며, 이를 기반으로 절연파괴강도의 신뢰도 곡선과 누적분포 특성을 평가하였다 [11].

Table 1. Specifications of test samples.

Category	Detailed	Note
Size	50 mm × 50 mm	IEC 60243 Sphere to sphere
Electrode	Diameter 20 mm	
Ramping speed	1 kV/s	
Number of samples	15 samples	Sliced samples
Oil condition	10 cSt, 100 cSt, 500 cSt and 1,000 cSt	-
Temperature	Room temperature	-

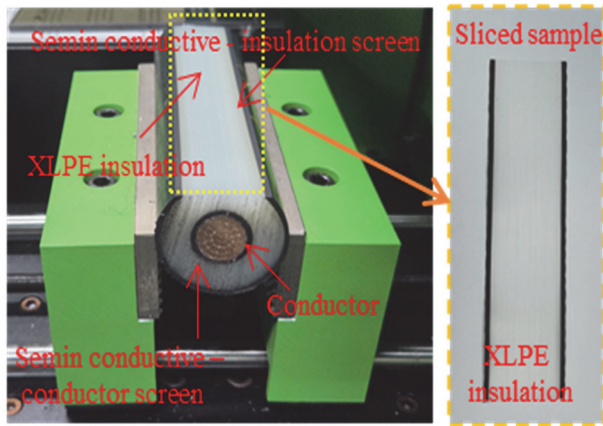


Fig. 2. Insulation slicing for breakdown test.

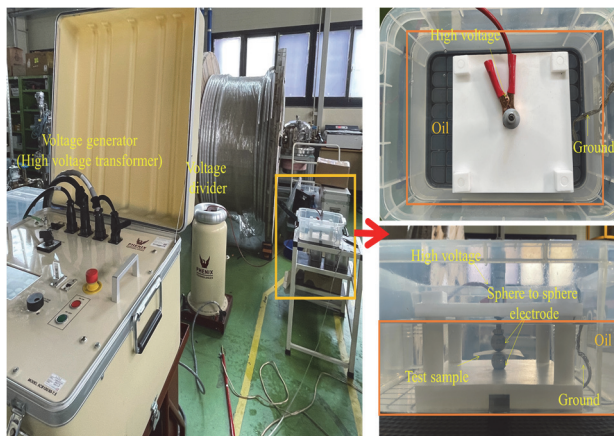


Fig. 3. Circuit configuration and experimental setup for breakdown test.

4. 연구결과

4.1 절연파괴시험 결과

표 2의 통계 분석 결과에서 표준편차는 6.6~8.0 kV/mm, 변동계수(CV)는 6.3~7.9% 범위로 점도 조건에 관계없이 유사한 수준을 유지하였다. 이는 오일 점도 변화가 절연파괴강도의 변동성보다는 평균값 변화에 주로 영향을 미쳤음을 의미하며, 고점도 조건에서도 절연파괴강도 데이터의 재현성은 저점도 조건과 유사한 수준임을 시사한다. 따라서 본 실험에서 관측된 절연파괴강도 저감 현상은 데이터 산포 증가에 기인한 것이 아니라, 오일 점도 변화에 따른 시험 환경의 영향으로 판단된다.

4.2 절연파괴강도 통계적 분석

표 3의 절연파괴강도의 Weibull 불신뢰도 분석 결과, 모든 오일 점도 조건에서 상관계수 ρ 는 0.95~0.97 범위로 높게 나타나 절연파괴강도 데이터가 Weibull 분포를 잘 따르고 있음을 확인하였다. 이는 본 실험에서 획득된 절연파괴강도 데이터의 통계적 신뢰성이 확보되었음을 의미한다.

척도 모수 η 는 오일 점도가 증가함에 따라 10 cSt 조건에서 120.2 kV/mm, 100 cSt에서 109.2 kV/mm, 500 cSt에서 107.7 kV/mm, 그리고 1,000 cSt 조건에서 100.6 kV/mm로 점진적으로 감소하였다. 이러한 결과는 동일한 불신뢰도 수준에서 절연내력이 오일 점도 증가에 따라 저하됨을 의미하며, 절연파괴강도 분포 전체가 저강도 영역으로 이동하였음을 나타낸다.

형상 모수 β 는 15.0~18.6 범위로 모든 점도 조건에서 비교적 높은 값을 유지하였으며, 이는 오일 점도 변화에도 불구하고 절연파괴강도 데이터의 산포가 크게 증가하지 않았음을 시사한다.

따라서 오일 점도 변화는 절연파괴강도의 변동성을 증가시키는 요인이 아니라, 절연파괴강도의 평균 및 신뢰도 수준을 저하시키는 인자로 판단되며, 이러한 경향은 표 2를 통해 확인된 평균값 감소 및 변동 특성과도 일치한다.

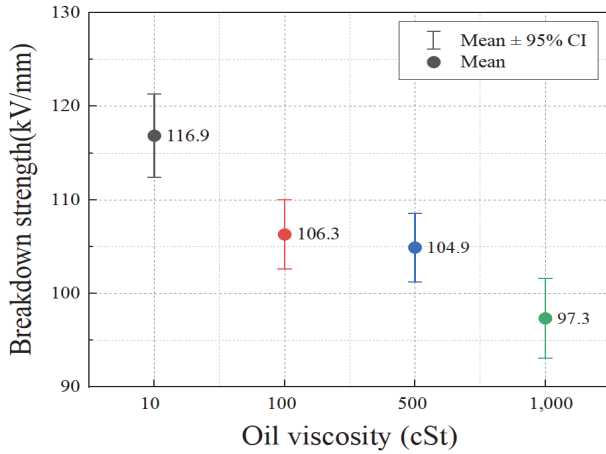


Fig. 4. Box plot of XLPE breakdown strength.

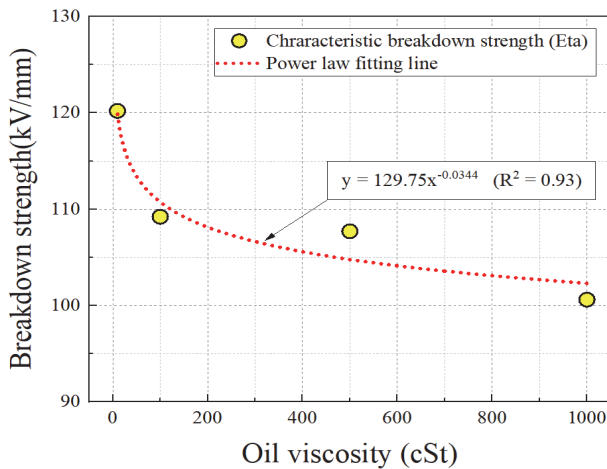


Fig. 5. Power-law relationship between oil viscosity and breakdown strength.

4.3 오일 점도 영향에 따른 결과 해석

그림 5에 나타난 바와 같이 절연 오일의 점도와 절연파괴강도 간의 관계는 멱수 법칙 형태로 표현되었으며, 결정 계수 0.93을 통해 실험 결과와 높은 적합성이 확인되었다. 도출된 지수 $b = -0.034$ 는 점도 증가에 따라 절연파괴강도가 저하됨을 의미하는 동시에, 점도 증가에 따른 영향이 선형적으로 확대되지 않고 고점도 영역에서 점차 완만해지는 비선형적 특성을 보여준다.

저점도 영역에서는 오일의 유동성이 상대적으로 높아 전극 및 절연체 주변에서의 열 제거가 비교적 원활하게 이루어질 수 있으며, 이로 인해 국부적인 열 축적이 억제되는 환경이 형성될 가능성이 있다. 이러한 조건은 본 연구에서 관찰된 바와 같이 상대적으로 높은 절연파괴강도를 나타내는 경향과 일치한다. 반면, 점도가 증가함에 따라 오일의 유동성이 저하되고 열 제거 효과가 제한될 가능성이 커진다. 이로 인해 전극 인근에서의 국부적인 열 축적 가능성이 증가할 수 있으며, 이는 절연파괴강도의 감소로 이어질 수 있다 [12]. 다만, 고점도 영역에서는 오일 유동 및 열 전달 특성이 이미 제한된 상태에 도달하므로, 점도를 추가로 증가시키더라도 열 환경의 변화는 상대적으로 제한적으로 나타나며, 그 결과 절연파괴강도의 감소율은 완만해지는 경향을 보인다.

Table 2. Variation of XLPE breakdown strength.

Category	Oil viscosity (cSt)			
	10	100	500	1,000
AVR (kV/mm)	116.9	106.3	104.9	97.3
STDEV (kV/mm)	8.0	6.7	6.6	7.6
CV (%)	6.9	6.3	6.3	7.9

Table 3. Weibull unreliability analysis of breakdown strength.

Category	Oil viscosity (cSt)			
	10	100	500	1,000
Eta (kV/mm)	120.2	109.2	107.7	100.6
Beta	17.4	18.2	18.6	15.0
Pho	0.96	0.95	0.97	0.97

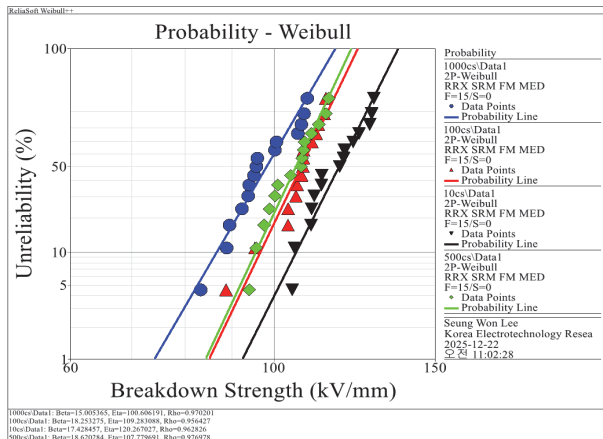


Fig. 6. Weibull unreliability analysis of XLPE breakdown strength.

5. 논의

본 연구에서는 오일 점도가 증가함에 따라 절연파괴강도의 평균값은 일관되게 감소하는 경향을 보였으며, 표준편차와 변동계수는 점도 조건에 관계없이 유사한 수준을 유지하였다. 이는 오일 점도 변화가 절연파괴강도의 변동성이나 불안정성을 증가시키는 요인이 아니라, 절연파괴강도의 절대적인 수준을 체계적으로 저하시킨다는 점을 시사한다.

이와 같은 오일 점도 증가에 따른 절연파괴강도 저하 현상은 점도 변화에 수반되는 시험 환경의 물리적 특성 변화와 관련되어 해석될 수 있다. 점도가 증가함에 따라 오일의 유동성이 저하되고 전극 및 절연체 주변에서의 열 제거 효과가 제한될 가능성이 있으며, 이에 따른 국부적인 열 축적에 영향을 미쳐 절연파괴강도의 감소로 이어질 수 있다 [12]. 본 연구 결과는 절연파괴시험에서 사용되는 절연 오일의 점도가 시험 결과에 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 실험적으로 보여주며, 향후 보다 정밀한 물리적 메커니즘 규명을 위한 후속 연구의 필요성을 시사한다.

6. 결론

본 연구에서는 절연 오일의 점도 증가에 따라 절연파괴강도의 평균값과 신뢰도 수준이 최대 약 20%까지 저감됨을 확인하였다. 반면, 변동성 지표는 점도 조건에 관계없이 유사하게 유지되어, 오일 점도 변화는 절연파괴강도의 산포 증가가 아닌 절대적 수준 저하를 유발하는 체계적인 인자로 작용함을 나타낸다. 따라서 절연파괴강도의 신뢰성 있는 비교를 위해서는 절연 오일의 점도를 포함한 시험 환경 조건의 엄격한 통제가 필요하다.

ORCID

Seung-Won Lee

<https://orcid.org/0000-0002-7711-1732>

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] S.Z.A. Dabbak, H. A. Illias, B. C. Ang, N. A. Abdul Latiff, and M.Z.H. Makmud, *Energies*, **11**, 1448 (2018). doi: <https://doi.org/10.3390/en11061448>
- [2] Y. Wu, A. Ma, X. Wei, X. Li, K. Zhou, H. Lv, W. Xiao, and X. Yang, *Proc. 2025 International Conference on Electrical Engineering, Automation and Information Science (EEAIS)* (IEEE, Lanzhou, China, 2025), pp. 290–293. doi: <https://doi.org/10.1109/EEAIS66172.2025.11171213>
- [3] T. G. Arachchige, L. Narampanawa, C. Ekanayake, and H. Ma, *Proc. 2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (IEEE, East Rutherford, NJ, USA, 2020), pp. 71–74. doi: <https://doi.org/10.1109/CEIDP49254.2020.9437457>
- [4] W. Lick, G. J. Pukel, H. M. Muhr, and M. Baur, *Proc. 2009 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* (IEEE, Montreal, QC, Canada, 2009), pp. 491–494. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166397>
- [5] S. S. Ghoneim, S. S. Dessouky, A. A. Elfaraskoury, and A.B.A. Sharaf, *Electr. Eng.*, **100**, 2231 (2018). doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0697-5>
- [6] C. S. Huh, J. I. Jeong, and H. W. Cho, *Proc. 13th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL '99)* (IEEE, Nara, Japan, 1999), pp. 160–162. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDL.1999.798894>
- [7] ASTM D149-20, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies, ASTM, West Conshohocken, PA, USA (2020).
- [8] IEC 60243-1:2013, Electric Strength of Insulating Materials - Test Methods - Part 1: Tests at Power Frequencies, IEC, Geneva, Switzerland (2013).
- [9] 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>
- [10] S. W. Lee, J. W. Choe, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 570 (2023). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.5>
- [11] IEEE Std 930-2004, First Edition, IEEE, New York, NY, USA, (2007).
- [12] G. Dombek, Z. Nadolny, and A. Marcinkowska, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, **21**, 384 (2019). doi: <https://doi.org/10.17531/ein.2019.3.4>