

유한요소해석을 이용한 Tree Retardant XLPE 절연재의 수트리 특성 분석

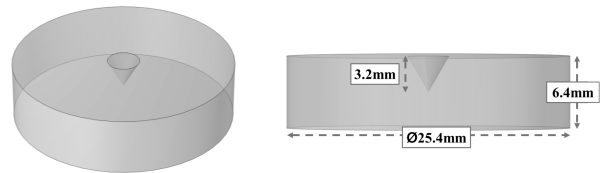
서예슬*, 김가현*, 임장섭*
국립목포해양대*

Finite Element Analysis of Water Tree Characteristics in Tree-Retardant XLPE Insulation Materials

Ye-Seul Seo*, Ga-Hyun Kim*, Jang-Seob Lim*
Mokpo National Maritime University*

Abstract - 지중 및 해저 전력 케이블의 장기 신뢰성을 확보하기 위해서는 수트리(water tree) 열화 현상에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 전력 케이블의 절연재 내 결함 부위에서 발생하는 전계 집중 현상을 분석하고, 이를 바탕으로 실제 가속 열화 조건에서의 수트리 성장 특성을 평가하였다. 최근 내열화성 절연재로 널리 채택되고 있는 TR XLPE (Tree-Retardant Cross-Linked Polyethylene) 시편을 대상으로 11kV의 전압으로 14일간 인가하는 가속 수트리 열화 시험을 수행하였다. 시험 결과, TR XLPE 결함 침단부에서 약 309 μ m~331 μ m 길이의 수트리가 성장한 것을 확인하였다. 본 연구는 XLPE를 통한 전계 스트레스 해석 결과와 실제 TR-XLPE의 물리적 열화 진행 과정을 교차 검증함으로써, 고전압 절연체의 열화 메커니즘 해석 및 수명 예측을 위한 기초 자료를 제공한다.

며, 시편 중앙에 전계 집중을 위한 pin hole 결함이 있다. 시편 성형 과정에서 미반응 가교 부산물을 제거하기 위하여, 80℃의 온도 조건에서 160시간 동안 열처리를 수행하였다. 실제 시편 형상은 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 가속 열화 시험용 시편 구조

1. 서 론

가교폴리에틸렌 (Cross-Linked Polyethylene, XLPE)은 우수한 전기적 특성, 높은 열적 안정성 및 뛰어난 기계적 강도로 인해 전력 케이블의 절연 재료로 적용되어 왔다[1]. 그러나 지중 및 해저 환경에서 장기간 교류 전압이 인가될 경우, 절연체 내부에 수분과 국부적 전계 집중으로 인하여 수트리(Water tree)가 발생한다. 이는 절연체의 파괴 강도를 급격히 저하시켜 케이블 고장을 유발하는 치명적인 요인으로 작용한다[2].

이러한 문제를 억제하기 위하여, 수트리 억제제를 첨가한 TR XLPE (Tree Retardant XLPE)가 적극 활용되고 있다[3]. 절연재료의 내수트리 특성을 평가하는 대표적인 국제 표준인 ASTM D6097은 침-평판 전극 구조를 통해 인위적인 결함부의 전계 집중을 모사하고, 가속 전압 및 주파수를 인가하여 수트리의 발생과 성장을 정량적으로 평가하는데 널리 활용된다[4].

수트리의 개시 및 진전 경로는 절연체 내부의 국부적인 전계 분포와 밀접한 관련이 있으므로, 결함부 주변의 전계 집중 현상을 수치해석적으로 분석하는 것은 열화 메커니즘 규명에 필수적이다[5].

이에 따라 본 연구에서는 유한요소법 (FEM)을 활용한 전계 해석을 선행하여 결함부 선단의 이론적 전계 분포를 도출하였다. 이후 해당 해석 결과를 바탕으로 ASTM D6097 규격에 따라 TR XLPE 시편을 제작하고, 600Hz, 11kV의 교류 전압을 14일간 인가하는 가속 열화 시험을 수행하여 실제 수트리의 성장 거동을 관찰하였다. 본 연구는 수치해석을 통해 도출된 전계 조건이 실제 절연체의 수트리 발생에 미치는 영향을 고찰함으로써, 향후 수트리 진전 전후의 특성 변화 비교 연구를 위한 기초 데이터를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 시편 제작 및 가속 열화 시험 구성

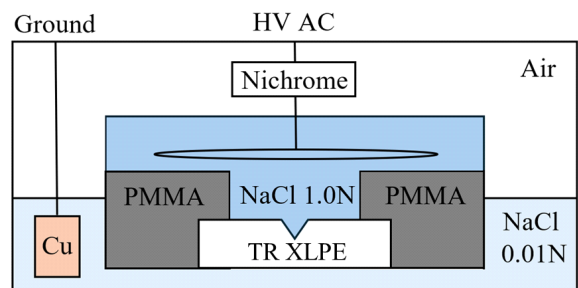
2.1.1 시편 제작 및 열처리

본 연구에 사용된 TR XLPE 시편은 ASTM D6097 규격에 따라 직경 25.4mm, 두께 6.4mm의 원통형 시편을 제작하였으

2.1.2 수용액 전극 및 시험 장치 구성

열처리가 완료된 시편은 안정적인 가속 열화 시험을 위해 PMMA 지그에 수밀이 유지되도록 부착하였다. ASTM D6097에 따라 시편 상부에는 1.0N 농도의 염화나트륨(NaCl) 수용액을 주입하였으며, 평판 형태의 시편 하부인 접지부에는 0.01N 농도의 NaCl 수용액을 채워 이중 수용액 전극 시스템을 구성하였다.

고전압 인가를 위한 전기적 폐회로는 내부식성이 강한 니크롬(Nichrome)선을 상부 NaCl 수용액에 직접 침지시켜 구성하였다. 하부 접지 수용액에는 구리(Cu)판을 배치하여 접지 전극으로 활용함으로써 안정적인 전기적 폐회로를 구성하였다. 전체적인 수트리 가속 열화 장치의 구성 및 시편 결합 상태는 그림 1과 같다.



〈그림 2〉 수트리 가속 열화 시험 장치 구성

2.2 유한요소해석(Finite Element Methode, FEM)

2.2.1 전계 해석 파라미터 및 경계 조건

수트리 개시 및 성장의 주요 원인이 되는 pinhole 선단부의 전계 집중도를 정량적으로 분석하기 위하여, COMSOL Multiphysics 소프트웨어를 활용하여 2차원 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. 해석 모델의 기하학적 치수 및 재료 물성은 실제 시험 시편과 동일하게 설정하였다. 시편의 두께는 6.4mm이며, 비유전율은 일반 XLPE와 동일한 2.3으로 적용하였다. Pinhole의 각도는 60°로 설정하였다. pinhole에 11kV의 고전압

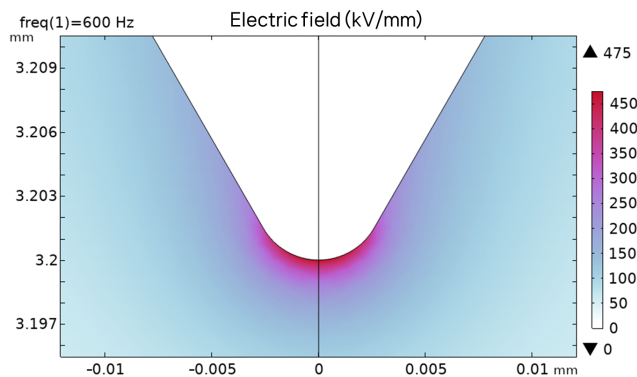
을 인가하고, 시편 하단의 평판을 접지로 설정하여 정전계 해석을 수행하였다. 본 해석에 적용된 상세 파라미터 및 경계 조건은 표 1과 같다.

〈표 1〉 시뮬레이션 파라미터 및 경계조건

item		condition
Physics		Electrostatics
Physics interface		Voltage
Study		Stationary
Sample	material	XLPE ($\epsilon_r=2.3$)
	thickness	6.4mm
	pin hole angle	60°
	pinhole radius	3 μ m
Test voltage		11kV
Boundary condition	High voltage	pin hole
	Ground	Lower flat

2.2.2 전계 해석 결과

경계 조건을 바탕으로 11kV의 전압을 인가했을 때의 전계 분포를 해석한 결과는 그림 3과 같다. 해석결과, pinhole 선단부로 갈수록 극심한 전계 집중 현상이 발생함을 확인하였다. pinhole 선단 반경이 3 μ m로 매우 미세함에 따라, 11kV 인가 시 선단부에서 관찰되는 최대 전계 강도는 약 475kV/mm에 달한다. 이러한 국부적인 고전계 스트레스는 절연체 내부의 분자 사슬 결합을 약화시켜 가속 열화 시험 시 수트리의 초기 발생 및 진전을 유발하는 핵심적인 구동력으로 작용한다.

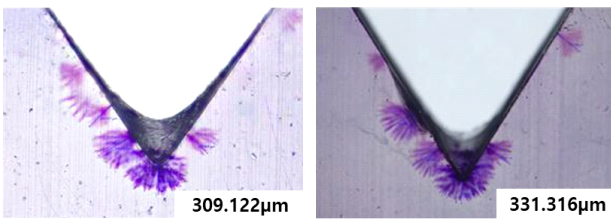


〈그림 3〉 Pinhole 선단의 전계 집중 해석 결과

2.3 가속 열화 시험 및 수트리 관찰 결과

유한요소법 기반의 전계 해석 결과를 바탕으로, 실제 고전계 스트레스가 절연체 내부의 물리적 열화에 미치는 영향을 평가하기 위해 가속 수트리 시험을 진행하였다. ASTM D6097 규격에 따라 수용액 전극이 구성된 TR XLPE 시편에 11kV, 600Hz의 교류 전압을 14일간 인가하였다. 인가 완료 후, 절연체 내부에 형성된 수트리의 형태와 진전 길이를 분석하기 위해 메틸렌블루와 NaOH 혼합 용액으로 시편을 염색 후 0.2~0.4mm의 두께로 절단하고 단면을 관찰하였다.

실제 TR XLPE 시편 내부의 수트리 관찰 결과는 그림 4와 같다. 관찰 결과, 전계 집중이 될 것으로 예측되었던 pinhole 선단부에서 국부적으로 수트리가 개시되어 절연체 내부 방향으로 뚜렷하게 진전된 것을 확인 할 수 있다. 측정된 수트리의 최대 진전 길이는 331.316 μ m로 나타났다. 이러한 결과는 전계 해석에서 도출된 최대 전계 강도(약 475kV/mm) 발생 지점과 실제 물리적인 수트리 개시점이 일치함을 보여준다.



〈그림 4〉 수트리 발생 및 진전 길이

3. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통한 이론적 전계 분포 분석과 TR XLPE 소재의 가속 열화 시험을 병행하여 수행하였다.

1. 침-평판 전극 구조를 모사한 유한요소해석 결과, 11kV 인가 시 pinhole 선단부에서 약 475kV/mm의 전계 집중 현상이 발생함을 정량적으로 확인하였다.

2. TR XLPE 시편에 11kV, 600Hz, 14일간 인가한 결과 전계 집중이 클 것으로 예측된 pinhole 선단부에서 수트리가 개시됨을 실증하였다.

3. 도출된 이론적 스트레스가 실제 TR XLPE의 장기 열화 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

결론적으로, 본 연구는 TR XLPE가 보이는 열화 특성을 정량적으로 평가함으로써, 향후 고전압 전력 케이블의 장기 신뢰성 평가 및 수명 예측 모델링을 위한 실증적 기초 데이터를 제공한다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 한국에너지기술평가원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다(RS-2024-00449926).

[참 고 문 헌]

[1] S. S. Sengupta, et al., "A New Generation of Tree-Retardant Crosslinked Polyethylene (TR-XLPE) Insulation," in Proc. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Diego, CA, 2010, pp. 1-5.

[2] I. C. Radu, et al., "The Effect of Water Treeing on the Electric Field Distribution of XLPE — Consequences for the Dielectric Strength," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, no. 6, pp. 860-868, Dec. 2000.

[3] P. J. Caronia, et al., "A Next Generation Advanced Water Tree-Retardant Crosslinked Polyethylene Insulation for Long Life Power Cables," in Proc. IEEE International Wire & Cable Symposium (IWCS), 2016, pp. 1-6.

[4] ASTM International, ASTM D6097: Standard Test Method for Resistance to Propagation of Electrical Trees in Solid Dielectric Insulating Materials, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

[5] W. Tao, et al., "The Mechanism of Water Tree Growth in XLPE Cables Based on the Finite Element Method," in Proc. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2016, pp. 1-4.