

유한요소법과 켈빈프로브를 이용한 유전체 표면 전하 추정

김민우*, 김용희*, 이도현*, 이세희*
경북대*

Estimation of Dielectric Surface Charge Using Finite Element Method and Kelvin Probe

Min-Woo Kim*, Yong-Hee Kim*, Do-Heon Lee*, Se-Hee Lee*
Kyungpook National University*

Abstract - 본 연구는 침-평판 구조에서 부분방전(Partial Discharge)에 의해 발생한 유전체의 표면 전하(Surface Charge) 축적을 켈빈 프로브(Kelvin Probe)와 유한요소법(FEM)을 활용하여 정량적으로 규명하는 데 목적이 있다. 전력 시스템의 고전압화 추세에 따라 절연 성능의 중요성이 대두되고 있으며, 특히 절연 파괴의 주요 원인으로 작용하는 표면 전하 분포에 대한 정밀 해석이 요구된다. 이를 해석하기 위해서, 본 연구에서는 켈빈 프로브를 이용하여 표면 전위 분포를 실험적으로 측정하고, 이를 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 활용하여, 유전체 표면의 전하 밀도 분포를 정량적으로 도출하였다.

주요어(Keywords): 부분방전, 표면 전하 밀도, 켈빈 프로브, 유한요소법

1. 서 론

최근 신재생 에너지원의 연계 확대, 대용량 장거리 송전의 효율성 향상, 그리고 직류 배전망의 도입 등으로 인해 고전압 직류(HVDC)를 기반의 전력 시스템에 대한 수요가 전 세계적으로 급증하고 있다. 이에 따라 직류 기반의 다양한 전력 설비 및 신소재 부품의 안정적인 운용을 위한 고전압 직류 절연 기술의 신뢰성 확보가 최우선 과제로 부각되고 있다.

교류(AC) 환경과 달리 직류(DC) 절연 시스템에서는 유전체 표면에 전하가 축적되는 현상(Surface Charge Accumulation)이 필연적으로 발생하며, 이는 방전 및 절연 파괴 양상에 물리적으로 다른 특성을 유발한다. 특히 설비 내부의 도체 돌기나 국부적인 결함 등으로 인한 극심한 불균일 전계와 표면 전하의 축적은 부분방전을 쉽게 유발하며, 이는 결국 치명적인 절연파괴로 이어질 수 있다.

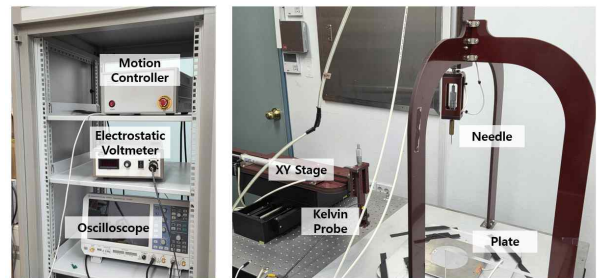
따라서 본 연구에서는 이러한 현상을 근본적으로 이해하고 제어하기 위해, 대표적인 불균일 전계 모델인 침-평판 구조를 활용한 표면 전하의 거동 특성을 분석하였다. 직류 전압을 인가하여 부분방전을 모의한 후, 유전체 표면의 정전기적 전위 분포를 켈빈 프로브로 측정하였다. 취득한 데이터의 연속성을 확보하기 위해 수치적 보간법(Interpolation)을 적용하여 1차원(1D) 전위 프로파일을 구축하였으며, 이를 상용 유한요소해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics와 연계함으로써 유전체 표면의 실제 전하 밀도 분포를 정량적으로 도출하였다.

2. 본 론

2.1 실험 구성

본 실험에서는 비유전율 2.3, 전도도 10^{-16} S/m의 LDPE (Low Density Polyethylene)를 시료로 사용하였다. 침 전극의 곡률 반경은 $300 \mu\text{m}$ 이며, 침 전극과 시료 표면 간격은 1 mm로 설정하였다. 실험 시작 전, 기존 시료 표면에 축적된 잔류 전하의 영향을 최소화하기 위해, 순도 99.9%의 에탄올로 실험용 와이어에 묻혀 시료 표면을 세척하고 건조하였다. 전체 실험은

대기압 및 상온(23°C) 환경에서 측정하였다.



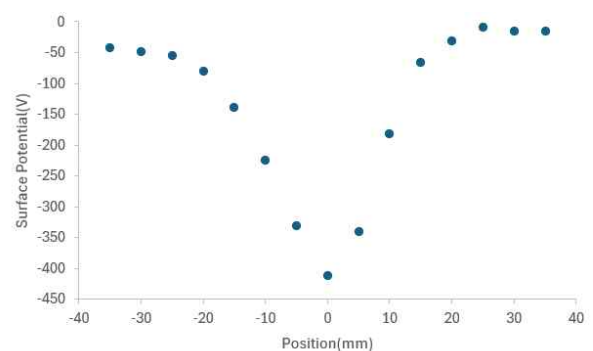
〈그림 1〉 표면 전위 측정용 장치 사진



〈그림 2〉 표면 전위 측정 과정

표면 전위 측정 시스템의 상세 구성과 실험 프로세스는 〈그림 1〉과 〈그림 2〉에 나타내었다. 실험은 고전압 직류 전원 공급 장치를 통해 침 전극에 부극성 전압을 인가하면서 시작된다. 이때 발생하는 부분방전 신호는 메인 접지선에 설치된 HFCT를 통해 계측된다. 방전 발생이 확인되면 침 전극을 상부로 이동시켜 시료와 이격시킨다. 이후 LabVIEW 제어 프로그램을 통해 X-Y 스테이지를 구동하여 비접촉식 켈빈 프로브(Trek PN 6000B)를 시료 상부로 이동시킨다. 최종적으로 켈빈 프로브를 통해 측정된 표면 전위 데이터는 전압계(Trek 347)와 오실로스코프(Rohde&Schwarz RTB2004)를 거쳐 LabVIEW 소프트웨어로 수집된다.

2.1.1 실험 결과



〈그림 3〉 표면 전위 측정 결과

전압 인가 시 대략 3.6 kV의 전압에서 부분방전이 발생하였다. 고전압 인가 후 절연체 내부의 전하 축적 효과 및 이로 인한 왜곡을 최소화하기 위해 전압 인가 시간은 1분 이내로 제한하였다. 부분 방전이 발생한 직후에는 전하 감쇄 영향을 줄이기 위해 10초 이내에 켈빈 프로브를 시료 표면의 측정 위치로 이동시켰다. 표면 전위 측정은 X-Y 스테이지를 제어하여 시료의 중앙을 가로지르는 중심선 상을 따라 -35 mm 지점부터 +35 mm 지점까지 일정 간격으로 수행되었다.

실험을 통해 획득한 LDPE 시료의 표면 전위 분포는 <그림 3>과 같다. 중심부(0 mm)에서 최대 -411.7 V의 가장 높은 전위를 나타냈으며, 대칭적으로 완만하게 감소하였다. 외곽 영역인 -35 mm와 35 mm 지점에서 전위가 각각 -42.6 V와 -14.8 V 수준으로 낮아져, 침 전극 중심으로 표면 전하 주입 및 축적이 집중되었음을 확인하였다.

2.2 정전장의 경계 조건을 이용한 표면 전하 밀도 추정

정전장(Electrostatic field)의 경계 조건을 활용하여 유전체 표면에 축적된 전하 밀도를 해석적으로 계산할 수 있다. 두 매질의 경계면에서 전속밀도의 법선 성분은 표면 전하 밀도와 같으므로, 표면 전하 밀도(σ_s)는 식 (1)~(3)과 같다.

$$D_{1n} - D_{2n} = \sigma_s \quad (1)$$

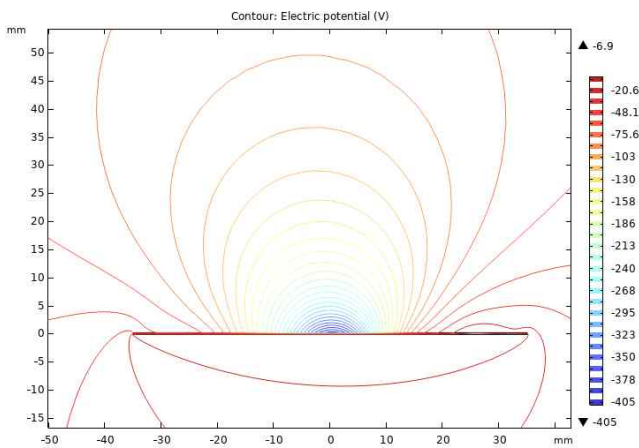
$$\epsilon_1 E_{1n} - \epsilon_2 E_{2n} = \sigma_s \quad (2)$$

$$\epsilon_1 \left(-\frac{\partial V_1}{\partial n} \right) - \epsilon_2 \left(-\frac{\partial V_2}{\partial n} \right) = \sigma_s \quad (3)$$

여기서 D_{1n} 과 D_{2n} 은 각 매질에서 전속밀도 법선 성분, ϵ_1 및 ϵ_2 는 각 매질의 유전율, E_{1n} 및 E_{2n} 은 전계 법선 성분, V는 전위를 말한다.

본 해석식을 활용한 표면 전하 밀도 추정의 이론적 타당성을 확보하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다. 첫째, 부분방전으로 인해 유전체 표면에 주입된 전하는 중심으로부터 외곽으로 가우시안(Gaussian) 형태의 연속적인 분포를 형성한다. 둘째, 축적된 전하 분포 영역의 크기는 켈빈 프로브의 팁에 비해 충분히 넓다. 이러한 조건 하에서는 복잡한 역산 과정을 거치지 않고, 정전장 경계 조건 식만을 활용하여 유전체 표면 전하 밀도를 추정할 수 있다.

2.2.1 시뮬레이션 결과

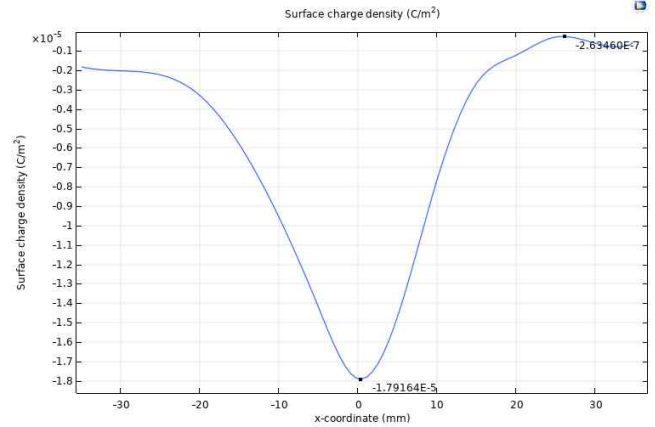


<그림 4> 전위 등포텐셜 분포

본 연구에서는 수치해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 활용하여 실험된 표면 전위 데이터를 기반으로 유전체의 표면 전하 밀도를 도출하였다. 정전장 해석 모델의 경계 조건으로 실제 실험에서 획득한 표면 전위 데이터를 적용하기 위해, COMSOL 내장 함수인 Cubic Spline을 사용하여 이산적인 실험 데이터를 연속 함수로 변환 및 삽입하였다. 특히, 앞서 수행한 실험 계측 경로와 동일하게 시료의 중심을 가로지르는 선상의 데이터를 활용함으로써, 유전체 표면 전하 밀도를 1차원 수준의

분포로 해석을 수행하였다.

Cubic Spline 보간 전위 데이터를 기반으로 해석한 유전체 주변의 전위 등포텐셜 분포는 <그림 4>와 같다. 중심 부에서 외곽으로 멀어질수록 전위의 크기가 감소하는 분포 특성을 보였다. 정전장의 경계 조건 해석을 통해 유전체 표면에 축적된 1D 표면 전하밀도를 계산한 결과는 <그림 5>와 같다. 침 전극에 인가된 부극성 전압에 의한 방전 현상으로 인해 표면 전하 밀도는 전체적으로 음(-)의 값을 나타내었다. 전하 밀도 곡선은 방전 중심부인 0 mm 지점에서 최대 피크값인 $-1.79 \times 10^{-5} C/m^2$ 를 기록하였으며, 중심에서 양단으로 갈수록 전하 밀도가 가우시안 형태로 완만하게 감쇄하였다.



<그림 5> 표면 전하 밀도 값

3. 결 론

본 연구에서는 HVDC 환경 하에 놓인 LDPE 유전체의 표면 전하 축적 거동을 정밀하게 분석하기 위해, 실험적 계측 데이터와 유한요소법(FEM) 기반의 수치해석을 연계한 표면 전하 밀도 추정법을 제안하였다. 비접촉식 켈빈 프로브 실험을 통해 시료 중심선을 가로지르는 최대 -411.7 V의 표면 전위 프로파일을 성공적으로 확보하였으며, 이를 COMSOL Multiphysics의 Cubic Spline을 사용하여 수치 해석 모델의 경계 조건으로 연계하였다. 이를 바탕으로 복잡한 역산 과정 없이 정전장 경계 조건 식만을 활용하여 유전체 표면 전하 밀도를 1차원 수준에서 도출하였으며, 방전 중심부에서 최대 $-1.79 \times 10^{-5} C/m^2$ 의 부극성 전하 밀도 피크값을 정량적으로 확인하였다.

결론적으로, 본 연구에서 제안한 방법론은 공간 전계 왜곡 해석에 요구되는 복잡한 수학적 역산 연산 과정 없이, 직접적인 1D 실험 계측 데이터와 수치해석적 경계 조건의 결합만으로 표면 전하 밀도를 도출할 수 있음을 입증하였다. 본 연구를 통해 확보된 표면 전하 밀도 도출 기법은 고전압 유전체의 절연 성능 신뢰성을 검증하기 위한 유효한 방식으로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다.
(RC-2026-25477267)

[참 고 문 헌]

- [1] M. Kim, "Numerical Prediction of DC Electric Breakdown with Space Charge Dynamics for Polymeric Insulator," Ph.D. dissertation, School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, 2021.
- [2] H. Kang, "Multiphysics Analysis of Electric Discharge for Air-Lossy Dielectric Space Forming Hetero-Interface," M.S. thesis, School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, 2025.