

부분방전을 이용한 초고압 지중 송전 절연 케이블 내부 결함의 패턴분석

박재화[°] · 이광열^{*} · 채석⁺ · 오영석⁺⁺ · 김학성⁺⁺⁺

([°]금오공대 전자제어 대학원 · ^{*}LG전선 · ⁺금오공대 전자제어 정교수 · ⁺⁺금오공대 전자제어
부교수 · ⁺⁺⁺금오공대 전자제어 조교수)

Pattern Analysis of the Defects within the Cable Insulation for UHV Underground Transmission Using Partial Discharge

Jae-Hwa Park[°] · Kwang-Yeol Lee^{*} · Seog Choi⁺ · Young-Seog Oh⁺⁺ · Hack-Sung Kim⁺⁺⁺

(*LG Cable · [°]Graduate of KNUT · ⁺Prof of KNUT · ⁺⁺Associative Prof of
KNUT. · ⁺⁺⁺Assistant Prof of KNUT)

Abstract - The insulation of cables which used for Ultra-High Voltage(UHV) underground power transmission requires excellent insulation capability for high voltage. The typical insulation materials are used XLPE, EPR, etc, but insulation efficiency of these is affected by void or alien substances, existed at the inside of insulators. In this paper, the partial discharge patterns of the defects within insulation cable are observed and analyzed. In this test, void, fiber and metal inclusions which possibly exist in cables, are simulated and investigated the patterns of partial discharges for each models Also the relations between calculated field strength and the insulation breakdown voltage. The experiment shows distinct partial discharge patterns in accordance with the kinds of defects within Insulation cable.

1. 서론

전력케이블의 절연재료로 폴리에틸렌 압출절연층이 사용되어지면서, 케이블의 절연성은 종래의 지절연 케이블과 비교해 획기적인 발전을 이룩하였다. 하지만 압출에 의한 케이블 성형시 절연체 내부에

발생하는 공극(Void)은 교류전압송시 절체의 성능에 치명적인 결함으로 대두되었으며, 이로인한 절연체 내부의 공극에서 발생하는 결함을 측정하기 위한 기술의 필요성이 대두되었다. 이 논문은 부분방전을 이용해 실제품상에서 발생할 수 있는 여러 형태의 결함별 부분방전 패턴을 실제와 같은 환경에서 모의 제작, 실험, 분석 하였다. 일반적인 케이블 절연체로 많이 사용되는 XLPE와 접속구간에 사용되는 EPR의 원재료를 쉬트상으로 제작하되 내부에 모의하고자 하는 결함을 형성하고, 부분방전의 형태, 절연재료 및 결함별 방전개시 전압과 교류파피 전압을 측정하였고, 이론적으로 해석한 전계강도와 의 상관관계에 대하여 정량적으로 분석하였다.

2. 부분 방전 측정

부분방전 신호검출은 화학적 방법, 광학적 방법, 초음파를 이용한 방법, 전기적 검출방법 등으로 구분되며, 통상적으로 전기적 검출법이 가장 일반화되고 있다.

전기적 검출방법은 절연체에 전압을 인가함으로써 부분적으로 전기적 도통상태에 있는 방전량을 증폭기를 통하여 전기신호로 나타내는 방법으로 부분방전 측정은 정전용량에 비해 부분방전량이 대단히 미소하여 신호량이 적고 신호를 전파할 때의 감쇄현상 및 외부 전자기파에 의한 잡음 때문에 펄스 분석은 증폭기를 통한 신호 분석에 의하며 그림. 1은 실험의 실험상에서 이용한 등가회로를 표시하고 있다.

최근에는 전기신호의 디지털 펄스화로 광대한 데이터를 통계적 처리 및 인공지능 알고리즘을 이용한 방전량의 패턴을 분석하는 연구가 활성화되고 있다. [1]

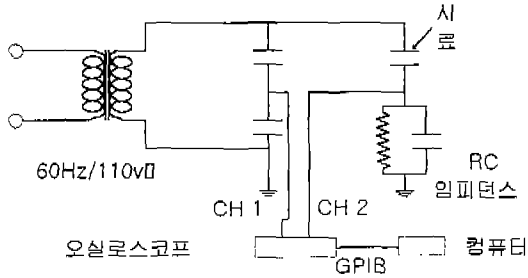


그림. 1 실험회로
Fig. 1 Test circuit

교류전압 인가시 케이블 절연체에서 발생하는 부분방전은 2개 이상의 콘덴서가 있는 것으로 가정할 수 있으며 그 등가회로는 그림 2 과 같고 방전 Gap에서의 방전전압은 식(1)와 같이 얻을 수 있다. [2]

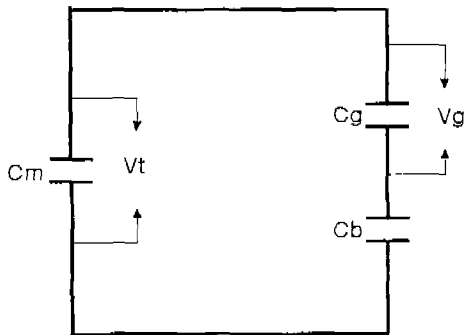


그림. 2 절연체 부분방전 등가회로
Fig. 2 Partial discharge equivalence circuit of insulator

V_t : 인가전압, V_g : 방전전압
 C_g : 방전 Gap의 정전용량
 C_b : C_g 에 직렬인 합성정전용량
 C_m : C_g, C_b 의 전극간 정전용량

$$V_g = V_t \times \frac{C_b}{C_g + C_b} \quad (1)$$

또, C_g 간의 펄스전류를 $I_r(t)$ 라고 할 때 방전후

C_g 간의 전압 V_g' 는 다음과 같다.

$$V_g'(t) = V_g(t) - \frac{1}{C_g'} \int_0^t I_r(t) dt \quad (2)$$

$$\left(\text{단, } C_g' = C_g + \frac{C_m \cdot C_b}{C_m + C_b} \right)$$

아래 그림에서는 C_g 간의 방전전류와 전압변화를 나타내고 있으며, 일반적인 방전형성시간은 0.01 [μs]이하이다.

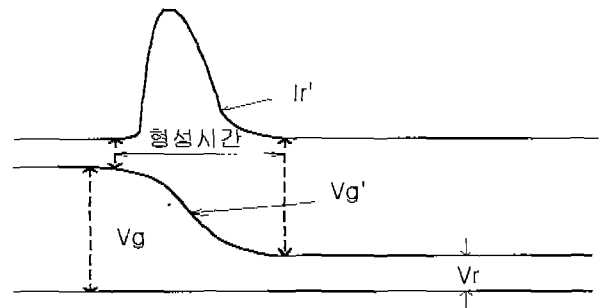


그림. 3 방전전류와 C_g 간 전압의 시간적 변화
Fig. 3 Discharge current and across voltage of C_g

V_g : 방전전압, V_r : 잔류전압
 V_g' : 방전 후 C_g 간의 전압

$$V_g - V_r = V_g - V_g'(\infty) = \frac{1}{C_g'} \int_0^{\infty} I_r(t) dt \quad (3)$$

[방전 펄스 1개의 방전 전하량]

$$q_r = \int_0^{\infty} I_r(t) dt = (V_g - V_r) \cdot C_g' \approx V_g \cdot C_g' \quad (\text{단, } V_r \approx 0, C_g \gg C_b) \quad (4)$$

[방전 에너지]

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot C_g' \cdot (V_g^2 - V_r^2) \approx \frac{1}{2} C_g' \cdot V_g^2 \quad (\text{단, } V_g \gg V_r) \quad (5)$$

[부분방전시의 전극간 전압변화량]

$$\Delta V = \frac{C_b}{C_m + C_b} \cdot (V_g - V_r) \quad (6)$$

$$\Delta V = \frac{C_b}{C_m + C_b} \cdot \frac{q_r}{C_g}$$

$$= \frac{C_b \cdot q_r}{C_g C_m + C_g C_b + C_m C_b} = \frac{q}{C_a} \text{ [V]} \quad (7)$$

$$\text{(단, } C_a = C_m + \frac{C_g \cdot C_b}{C_g + C_b} \text{)}$$

[전극 축에서 본 절보기 방전전하]

$$q = \Delta V \cdot C_a = \frac{C_b}{C_g + C} \cdot q_r$$

$$\simeq \frac{C_b}{C_g} \cdot q_r \simeq C_b \cdot V_g \quad (8)$$

$$\text{(단, } q > q_r, C_m \gg C_g \text{ or } C_b, C_g \gg C_b \text{)}$$

[방전에너지 : ω]

$$\omega = \frac{1}{2} C_g' (V_g^2 - V_r^2) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2} C_c (V_g + V_r)(V_g - V_r)$$

$$\text{(단, } C_c = \frac{C_g C_m + C_g C_b + C_m C_b}{C_m + C_b} \text{)}$$

식(6)와 (7)에 의해

$$\omega = \frac{1}{2} q \frac{C_g + C_b}{C_b} (V_g + V_r)$$

$$= \frac{1}{2} q \frac{V_s}{V_g} (V_g + V_r)$$

$$\simeq \frac{1}{2} q \cdot V_s \text{ [J]} \quad (10)$$

(단, $V_r = 0$, V_s 는 방전개시 전압 순시치)

3. 측정모델 선정 및 이론적 검토

케이블용 절연재료로 가장 널리 쓰이는 XLPE와 부속 절연재료로 쓰이는 EPR 측정용 원재료 내부에 Void 및 이물질질을 삽입하여 쉬트상으로 모의 제작하였다.

Void에 의한 부분방전 특성을 확인하기 위하여 XLPE 내부에서 전극간 병렬회로를 구성하여, 실제

경우를 감안하여 다수개의 Void를 모의하였으며, 절연층과 반도체층 계면에 존재하는 Void도 함께 구성하였다. EPR은 실제회로에서는 복합 절연물 중 전계완화 역할을 하기 때문에 다수개의 Void 보다는 Void의 존재 자체에 대한 특성을 확인하기 위하여 단일 Void를 모의하였으며, 절연층과 반도체층간에 존재하는 Void도 모의하였다. 또한, XLPE와 EPR의 절연층 내부에 존재하는 이물질의 영향을 분석하기 위해 섬유질 및 금속성 이물을 삽입하였다. 섬유질 이물은 1[mmφ] - 5[mm]로 금속성 이물은 500[μmφ] - 1[mm]의 초퍼로 하였다. 그리고 내전압 특성도 동시에 확인하기 위하여 전전한 XLPE 및 EPR을 모델로 선정하였다.

일반적으로 케이블 절연체 내부에 존재하는 결함은 절연층에 비해 아주 작다. 그래서 모델의 평균 크기를 매우 작게하여 전기적 특성에 미치는 영향을 분석해 보았다. 일반적인 모델의 전체두께는 2.5[mm] 또는 3[mm]로 하였으며 결함의 두께는 0.5[mm] 또는 1[mm]로 하여 전압 인가시 결함에 미치는 전계의 영향을 최대한 크게 하였다. 표. 1은 모델별 결함의 유형을 나타내는 표이다.[3]

절연파괴는 절연체에 가해지는 전기적 강도에 의해 일어나며, 이는 결함에 의한 부분방전 및 국부적 열화에 기인한다. 즉, 절연체와 결함에 가해지는 전계강도를 알아봄으로써 절연내력을 추정할 수 있다. 그림. 3, 4는 방전개시전압과 방전의 패턴 및 절연 파괴 전압과의 상관관계를 분석한 결과를 나타내 준다. 유전율은 XLPE, EPR을 각각 2.3 및 2.7로 하고 인가전압은 10[KV]로 하여 각각의 모델 내부에 존재하는 결함에서의 최대 전계치를 계산하였다. XLPE의 경우 모델의 두께를 2.5[mm]와 3[mm]로 구분한 관계로 결함형태에 따른 전계강도를 절대상대비교하기는 어려웠으나, 전계강도 차에 따른 방전개시전압과 파괴전압 등에 대한 영향을 분석할 수 있었다.

XLPE의 경우 3[mm]두께 모델일 때 평균전계치는 3.3[KV/mm](10/3[KV/mm])이며 금속이물질의 경우 전계상승이 미소하였지만 섬유질 이물질의 경우 전계집중으로 인해 약 36[%]정도의 전계치 상승이 있었다.

4. 실험결과

측정하고자 하는 모델의 시편을 측정회로에 적용

표 1 XLPE, EPR 절연체의 결함의 종류
Table 1 Defections of XLPE, EPR insulator

절연체	결함종류	내용	그림	모델명	절연체	결함종류	내용	그림	모델명
XLPE	섬유 Void	섬유:1.5[mm]l Void:0.5[mm]φ 두께:3[mm]t		XLPE-GLSVOID	EPR	섬유이물	1[mm]φ, 5[mm]l 두께:3[mm]t		EPR-GLS
	금속이물	0.5[mm]φ, 1[mm]t 두께:3[mm]t		XLPE-MTL		금속이물	0.5[mm]φ, 1[mm]l 두께:3[mm]t		EPR-MTL
	직렬 Void	2[mm]φ, 0.5[mm]t 직렬 2개 두께:2.5[mm]t		XLPE-VSRL		Void	1[mm]φ, 0.5[mm]l 1개 두께:3[mm]t		EPR-VOID
	병렬 Void	2[mm]φ, 0.5[mm]t 병렬 2개 두께:2.5[mm]t		XLPE-VPRL		섬유 Void	섬유:1[mm]φ 5[mm]l Void:1[mm]φ 0.5[mm]l 모델두께:3[mm]t		EPR-GLSVOID
	계면 Void	2[mm]φ, 0.5[mm]t 반도전층 계면 1개 두께:2.5[mm]t		XLPE-VSEMI		Void	0.5[mm]φ, 3[mm]t 반도전층 계면 1개 침전극:60[μm]φ 모델두께:5[mm]t		EPR-VSEMI
	Void	1[mm]φ, 1[mm]δ 침전극:60[μm]φ 두께:6[mm]t		XLPE-VETD		건전 시료	모델두께:3[mm]t		EPR-ORGN
	형상 왜곡	전극축R현상으로 왜곡 10[mm]φ, 0.5[mm]δ 두께:3[mm]t		XLPE-DIP					
건전 시료	두께:3[mm]t		XLPE-ORGN						

하여 부분방전 신호를 측정하였다.

방전개시 전압과 전계강도의 상관관계를 살펴보면, XLPE-VETD모델은 침전극에 의한 Void의 방전이 0.95[KV]의 낮은 전압에서 개시되었으나 XLPE-GLSVOID 모델은 반대로 8.5[KV]의 높은 전압에서 방전을 시작하였는데 이는 내부 결함 중 Void의 크기와 전극 구조에 따라서 방전의 크기 차이가 있음을 보여준다. 반면, XLPE 모델 중에서 XLPE-MTL, XLPE-DIP 그리고 XLPE-ORGN 모델은 13[KV]정도에서도 부분방전이 일어나지 않았다. 이는 고전압 및 충분한 열화가 된 상태에서 부분방전이 발생됨을 말해준다. 섬유이물질의 경우는 전압을 서서히 승압하는 과정에서 섬유이물질의 인접부위에서부터 열화가 시작될 것으로 판단된다.

EPR모델의 경우 Void만 존재시 4.9[KV], 섬유이물질과 동시 존재시 3.0[KV]에서 방전을 개

시하였다. 즉, EPR의 경우는 부분방전은 Void에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 이물질의 모델들은 초기에는 방전이 없었으나 5[KV]~10[KV]에서 약 2시간정도 열화시킨 후 부분방전을 측정한 결과 섬유이물질의 경우 9.5[KV]에서 방전을 개시하였고, 금속이물질의 경우 3.8[KV]에서 방전을 개시하였다. 즉, 전계강도와 방전개시전압은 밀접한 관계가 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 그림. 4, 5은 모델별 전계강도 및 방전개시전압의 크기를 나타내고 있다.

5. 결론

절연체 내부에서의 결함은 부분방전을 발생시키고 절연성능을 저하하는 원인이 된다는 것을 실험을 통해서 확인 할 수 있었다. 이물질에 의한 부분방전은

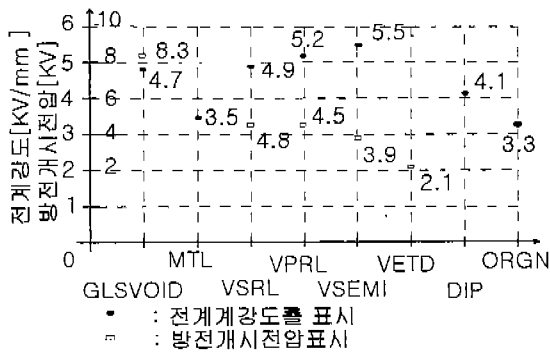


그림. 4 XLPE 모델별 전계강도와 방전개시전압
Fig. 4 Electric field intensity and discharge starting voltage of XLPE models

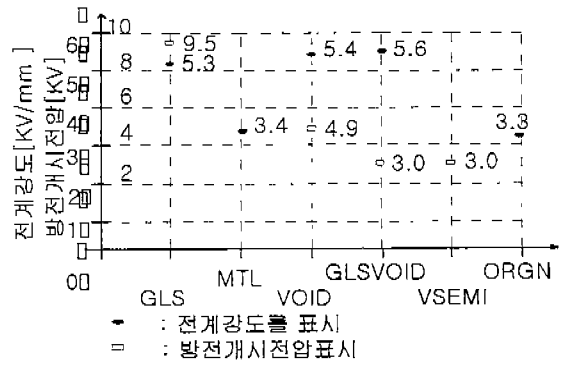


그림. 4 EPR 모델별 전계강도와 방전개시전압
Fig. 4 Electric field intensity and discharge starting voltage of EPR models

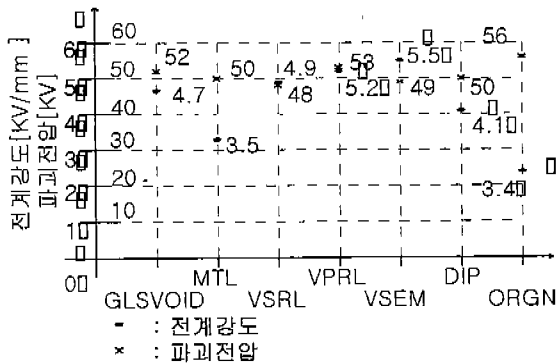


그림. 6 XLPE 모델별 전계강도와 파괴전압
Fig. 6 Electric field intensity and breakdown voltage of XLPE models

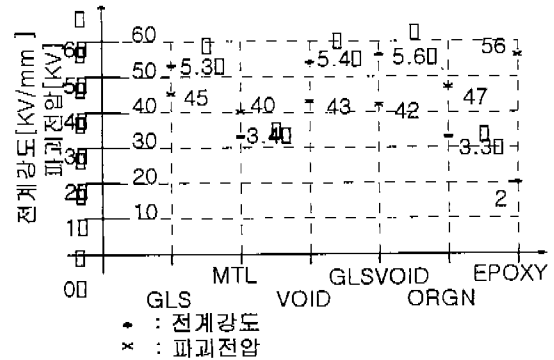


그림. 7 EPR 모델별 전계강도와 파괴전압
Fig. 7 Electric field intensity and breakdown voltage of EPR models

고전압에서 절연체의 열화에 의해 발생되며, 섬유 이물질은 입상부와 입하부의 전 위상에서 미소전하량의 방전이 다량발생하는 형태를 띤다. 금속 이물질은 큰 전하량의 부분방전이 좁은 범위의 위상에서 국부적으로 집중되는 패턴을 보였다. 또한, 부분방전과 절연체 열화의 가장 큰 원인이 되는 Void는 입상부와 입하부의 전위상에서 매우 큰 량의 방전을 일으킴을 확인하였다.

파괴시험 결과 Void가 직렬 형태의 경우 절연 파괴 특성이 가장 나쁘게 나타났으며, 반도체층 계면의 Void는 방전개시전압이 가장 낮았으며, 병렬 형태의 Void보다 절연특성상 치명적 결함을 나타냄을 확인할 수 있었다. 그림. 6, 7은 모델별 절연체의 파괴전압을 분석한 결과를 표시한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 황 돈하, 김 진봉 외, "수력 발전기 권선에서의 운전 중 부분방전 측정기법", 대한전기학회 논문지, Vol. 45, No. 2, 1996.
- [2] I.W. McAllister, "Electric Field Theory and the Fallacy of Void Capacitance", IEEE Trans. EI., Vol. 26, No. 3, 1991.
- [3] 전 승익, "절연체 내 다수 보이드의 분포 형태에 따른 부분 방전 특성 연구", 서울 대학교 대학원, 전기공학과, 1995.