

초고압 XLPE 케이블용 조립형 직선 접속함을 모의한 계면에서의 부분방전 패턴 연구

*백주홍, 김정년, 신두성, 이창영, 김충식, 김동욱, 박완기
LG전선(주) 전력연구소

A Study of Partial Discharge Patterns On the Simulated Interface of Prefabricated Joint for Ultra Power Cable

*J.H.Baek, J.N. Kim, D.S. Shin, C.Y.Lee, C.S. Kim, D.W. Kim, W.K.Park
Electric Power Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

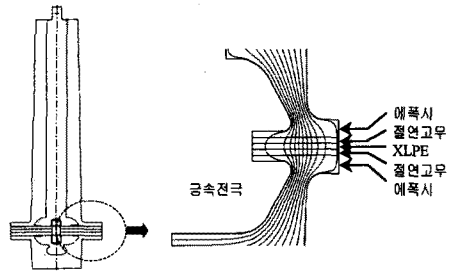
Abstract

It is very essential to find out defects and remove them in the insulation at the early stage because the defects in the insulation induce PD which deteriorates the material, resulting in the breakdown.

In the real application of high voltage, the interface of the different insulation is the weakest place for both electrical and mechanical aspects.

In this paper, characteristics of PD caused by the artificial defects, such as metallic particles, voids and moist fibers, at the interfaces of the cable joint (PJB) were investigated using the specially designed electrode system.

본 실험에서는 이러한 접속함 내부의 전계 분포와 동일하도록 전극 시스템을 구성하였고, 시편에서의 등전위 분포를 그림 2에 나타내었다.



[그림2] 모의 시편의 등전위 분포

1. 서 론

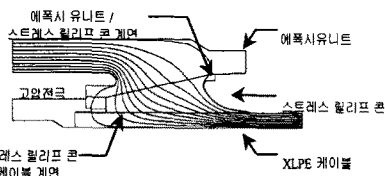
초고압 전력케이블용 조립형 접속함(Prefabricated Joint Box :PJB)은 에폭시 유니트, 전계 완화용 콘, 케이블 절연층 등, 이종의 절연물들로 구성되어진 접속함이다. 이러한 PJB에는 조립시 서로 다른 절연물로 인한 이종 계면이 존재하며, 조립 공정 중에 계면에 보이드 또는 이물이 혼입 될 가능성이 있다. 이러한 결함은 접속함 내부계면에서 부분방전을 발생시키고 절연물의 열화 요인으로 작용하여 결국 절연파괴에 이르게 한다.

본 논문에서는 실제 접속함의 계면조건과 동일하게 모의한 시편 상에서, 조립 공정에서 발생 가능한 결함인 계면압력 불균일, 보이드, 도전성 및 절연성 이물 등을 모의하여 이로 인한 부분방전 특성을 검토하였다. 본 연구는 향후, 실제 접속함에서 발생하는 부분방전특성의 검토시 초기 결함의 유형을 판정하는 진단의 자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.

2. 실험방법

2-1. 시편제작

PJB 내부에는 에폭시/고무/XLPE의 계면이 존재하며, 이러한 계면에서의 실제 등전위 분포를 그림 1에 나타내었다. 에폭시/고무 계면에서의 등전위 분포는 계면 방향에 수직 방향으로 형성되며 이때의 전계는 계면 방향으로 형성된다.



[그림1] 조립형 접속함 계면의 등전위 분포

2-2. 계면시험장치 및 시편 조립

계면 시험 장치는 고압부의 코로나 방지를 위해 실드 링을 설치하였고, 아크릴 챔버 내에 SF₆ Gas로 충전하여 절연하고, 유압 장치에 의해 계면에 압력을 가할 수 있도록 제작하였다.

시편의 조립은 전극 및 시료의 표면을 솔벤트를 이용하여 깨끗이 닦고, 실리콘 오일을 균일하게 도포한 후 전극과 시료의 계면에 5.5kgf/cm²의 계면압력이 가해지도록 조립하였다.

2-3. 모의 결함의 종류 및 위치

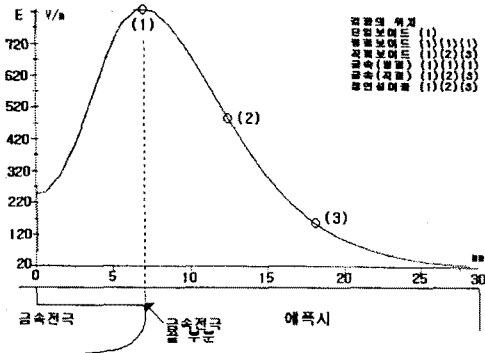
조립형 접속함의 계면에서 발생 될 수 있는 결함을 모의한 것을 표 1에 나타내었다.

본 시험에 모의한 결함들은 조립 과정 중에 발생 가능한 결함으로서^[3], 오일 도포불량, 계면압력 불 균일, 전계 완화용 콘 압축 시 접속함 내 공기의 압축 등으로 단일 또는 다수개의 보이드가 전계 수직방향과, 전계 방향으로(직, 병렬) 존재하는 경우와 이물이 계면에 존재할 때를 모의하였다.

그림 3은 전극 시스템의 전계해석 결과로서 전극 전체는 불평등 전계를 형성하며, 매입전극 끝부분에서 전계의 세기가 가장 크다. 각 이물별 결함 삽입 위치는 그림 3의 (1),(2),(3)과 같다.

표 1. 모의결함의 종류^[3]

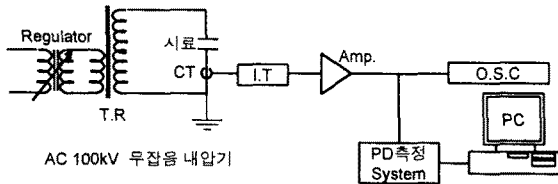
대상 계면	결함	결함 제작 방법
PJB 고무/에폭시 계면	보이드 (3.2mmd:2mm)	1. 단일보이드 2. 다수보이드(3ea) - 병렬보이드, 직렬보이드
	금속이물	동분 Size: (100~600 μ m 50ea)- 병렬, 직렬배치
	절연성이물	수분함유 면섬유(L:20mm)



(그림3) 모의시험 전극 계면에서의 유효 연면방향 전계의 세기 및 결합위치

2-4. PD 측정 방법

본 실험에서 이용한 PD 측정 방법은 그림 4에서와 같이 접지 측에 고주파 CT를 설치하여 접지측에 흐르는 PD 전류 pulse를 검출하였다. 측정된 PD 데이터의 저장과 분석은 PD사의 ICM System을 사용하였다.



(그림4) 부분방전 측정 등가회로

본 시험에 앞서 계면압력에 따른 파괴시험의 결과로 최적의 계면압은 5.5kgf/cm²로 설정하였으며, 건전 시료의 경우 80kV까지 PD가 발생하지 않음을 사전에 확인하였으며, 시험 조립 1시간 경과 후 PD시험을 진행하였다.

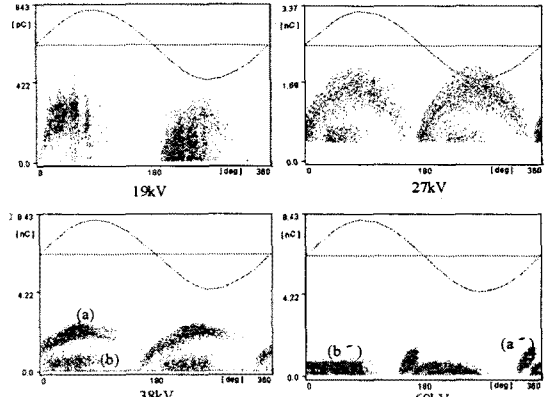
3. 시험결과 및 고찰

3.1. 단일 보이드에 의한 PD 패턴

PD개시 전압에서 시간 경과에 따른 단일 보이드에서 PD패턴은 PD개시 후 20분까지는 패턴의 변화는 거의 없었으나, 125분 이상의 장시간이 경과하면 완전히 소멸하였다.

전압 승압에 따른 PD패턴을 그림 5에 나타내었으며, 승압은 2kV/min씩 증가시켰다. 19kV에서 PD가 개시하여 27kV에서 PD량이 증가하면서 반원 형태의 PD 패턴으로 나타났다. 반원 형태의 PD패턴은 38kV에서 (a), (b)로 나누어지고, 40kV 이상의 전압에서는 PD 크기와 양은 변화가 거의 없었다. 전압 증가에 따라 위

상이 0° 쪽으로 이동하며 60kV에서 PD패턴(a'), (b')는 315~90°의 위상에서 검출되었다.

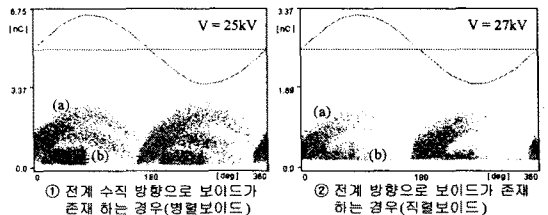


(그림5) 전압 승압에 따른 단일 보이드PD 패턴

3.2. 보이드 배치 형태에 따른 PD 패턴

다수개의 보이드가 계면 방향에 병렬로 존재하는 경우의 PD패턴은 그림 6의 ①과 같고, 다수개의 보이드가 계면방향에 직렬로 존재하는 경우의 PD패턴은 그림 6의 ②와 같다. 그림 5의 단일 보이드의 경우와 비교해 볼 때 계면방향에 다수 보이드가 직, 병렬로 존재 할 경우에 보이드의 수에 따라 PD는 ①, ②의 (a)와 같이 증폭되어 나타나 두꺼우며 (a)에 비해 (b)는 가늘고 작은 것으로 나타났다.

그림 6의 ①, ②경우에 방전의 크기가 다른 이유는 그림 6의 ① 경우는 3개의 보이드 모두가 동일 전계 부분에 위치해 모든 보이드에서 동시에 방전이 발생되어 방전 크기가 증가하는 반면, ②의 경우는 보이드의 위치에 따라 보이드 부의 전계의 세기가 각각 다르기 때문에 전계의 세기가 비교적 약한 부분에 위치한 보이드에서는 방전량이 작기 때문인 것으로 생각된다.



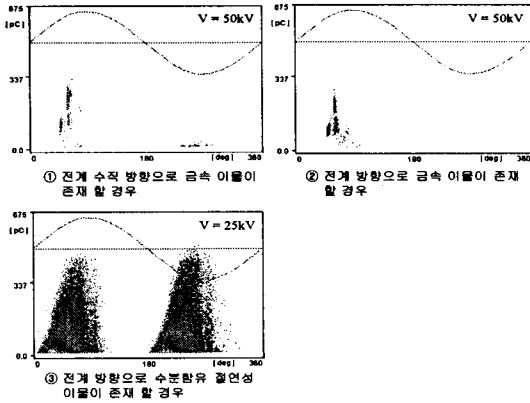
(그림6) 다수개의 보이드 PD 패턴

3.3. 도전성 이물 및 절연성 이물의 PD 패턴

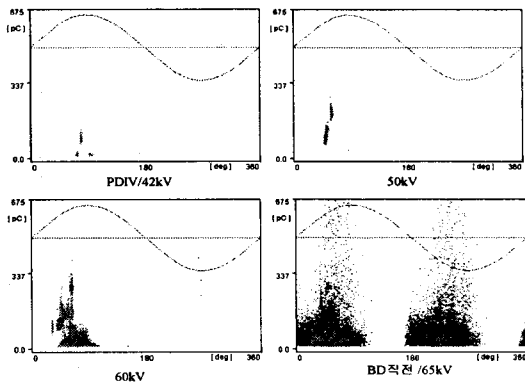
금속 이물이 계면에 존재할 경우 PD패턴은 그림 7의 ①, ②에서와 같이 70~80° 위상에서 코로나와 같은 방전형태를 나타내었다. PD개시 전압에서 시간이 경과됨에 따라 방전량과 개수가 점차 줄어들지만 보이드에서와는 달리 완전히 소멸되지 않는 것으로 확인되었다.

계면에 수분이 함유된 절연성 이물이 존재하는 경우에 그림 7의 ③과 같이 PD개시 전압에서 정극성과 부극성에서 동일한 형태의 방전량과 크기로 나타나며, 시간이 경과됨에 따라 방전량과 크기도 계속 증가하는 것으로 나타났다. 한편 금속 이물이 존재시 전압 증가에 따른 PD패턴을 그림 8에 나타내었다. 전압이 증가할수록 방전량이 증가하며, 위상은 변하지 않는 것으로 보아 방전 메카니즘이 코로나와 유사한 것으로 사료된다. 금속(동분) 이물이 계면방향에 직, 병렬로 존재하는 경우에 모두 정극성에서는 PD신호가 검출되었으나 부극성에서는 PD 신호가 검출되지 않거나 미소 신호만이 검출되었다.

또한 BD직전에는 정극성과 부극성에서 크기와 양이 증가하는 것으로 나타났다.



(그림7) 이물의 종류에 따른 PD패턴



(그림8) 금속 이물이 전계 방향으로 존재할 때 전압 증가에 따른 PD패턴

3.4. 결함별 PD패턴의 고찰

표2는 계면에 삽입된 결함의 종류에 따라 방전패턴을 분석한 표이다.

도전성 이물의 경우에는 PD 메카니즘은 코로나의 경우와 유사하며, 즉 전계가 집중되면 전하의 공급은 주로 전자에 의하여 이루어지며, 보다 전압이 상승하는 경우에는 계면 방향으로의 스트리머 진전의 크기 즉 방전량과 발생 빈도 모두 증가하는 것으로 생각되며, 전압 증가에 따라 위상의 이동은 발생하지 않고 코로나와 같이 일정한 위상에서 발생하는 것으로 생각된다.

보이드 결함이나 도전성 이물 결함 모두 시간이 지남에 따라 감소하거나 사라지고 다시 나타났다가 사라진다. 이러한 이유는 방전이 계면의 상태의 영향을 받기 때문으로 생각되며 즉 방전이 일정 지속되면 방전에 의하여 발생한 전자/이온 등의 전하 캐리어로 인하여 보이드 벽면의 전도율이 일시적으로 증가하기 때문에 방전량이 감소하거나 소멸하였다가 어느 정도의 시간이 지난 후에는 캐리어간의 재결합 혹은 누설의 영향으로 사라져서 초기의 상태로 회복되는 경우에 방전이 다시 발생하는 것으로 생각된다.

그러나, 이러한 방전이 오랜 기간 지속되면 보이드 벽면의 탄화에 의하여 전도율의 영구적인 변화를 가져오기 때문에 방전이 완전히 사라졌다가 보이드 벽면의 침식(pitting), 전기 트리 개시 및 진전에 의하여 방전량이 급격히 증가하며 중극에는 절연파괴에 이르게 된다고 보고되어 있다.

반면, 수분이 함유된 섬유인 경우 방전이 발생한 이후

에 수분의 영향으로 빠른 시간 내에 계면파괴가 되는 것으로 보여진다. 오일 중에 수분이 있는 경우의 절연파괴 특성에 관한 많은 보고에 따르면, 수분의 입자는 전계 집중에 의하여 전계 방향으로 끌려와서 큰 입자가 형성되며 따라서 순간적인 파괴에 이르는 것으로 보고되어 있다. 따라서 수분이 함유된 결함의 경우, PD 특성보다는 절연파괴 특성에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 보이드 방향의 경우 보이드의 배치형태에 따라 부분방전 특성이 다르며, 방전량의 경우 병렬보이드, 직렬보이드, 단일 보이드의 순으로 크다.

이러한 이유는 방전량은 방전이 발생하는 결함에 유효 면적, 결함의 크기 및 전계의 세기에 의존하며 병렬 배치 보이드의 경우에 방전이 발생하는 전계의 세기 및 유효면적이 크기 때문에 직렬 보이드나 단일 보이드에 비하여 방전량이 큰 것으로 생각된다.

금속이물의 경우에는 배치 형태보다는 금속 동분의 입자 크기와 전계의 세기가 방전량에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 그러나 금속이물 결함의 경우에는 방전 개시 후에 절연파괴에 이르는 속도가 보이드에 비하여 상당히 빠르기 때문에 치명적인 결함으로 작용할 수 있다.

표 2. 결함에 따른 PD패턴 분석

결 함	방전 패턴	정·부극 성	전압에 따른		시간에 따른	
			위상 변화	패턴 변화	방전량	방전 갯수
보이드		대칭	有	有	감소	감소
도전성 (동가부)		비대칭	無	無	감소	감소
절연성 (수분함유)		대칭	無	無	증가	증가

4. 결 론

PJB 접속함 내의 이종의 고체 절연물 계면에 결함이 존재할 경우 PD특성을 평가하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 단일 보이드 또는 다수 보이드가 존재 할 경우, 방전 개시 이후 시간의 경과에 따라 PD가 감소하거나 사라지며, 전압 증가에 따라서는 일정 전압까지는 방전량과 크기가 증가하나 이후 전압에서 감소하여 PD패턴의 변화 없이 위상만 0° 쪽으로 이동한다.
2. 금속이물이 존재 할 경우, 파괴 전압에 이르기까지 위상의 변화는 없고, 전압 증가에 따라 방전량과 방전갯수는 점차 증가하는 추세를 보인다. 또한 방전개시 이후 절연 파괴에 이르는 속도가 빠르다.
3. 수분이 함유된 절연성 이물의 경우, 정, 부극성에서 좌우 대칭의 방전패턴이며, PD개시 전압에서 시간 경과에 따라 방전량과 방전갯수는 증가하고, PD개시 이후 급속히 파괴로 이어진다.

(참 고 문 헌)

[1] 久野 浩, 外 "固體絶緣體界面を模擬した電極系による部分放電劣化特性の検討". 1997年電氣學會誘電・絶緣材料研究會, DEI-97-42. pp.85'90. 1997.2.
 [2] 劉 勤氏, 外 "絶緣體界面の空隙に連なるボイドにおける部分放電特性". 1997年電氣學會誘電・絶緣材料研究會, DEI-97-61. pp.55'60. 1997.6.
 [3] 内田克己, 外 "CVケーブル接續部缺陷の部分放電及び絶緣破壊特性". 電學論B, 115卷10号. pp.1185'1189. 95.10.