

## 154kV 지중송전선로 접속함 절연파괴 고장원인 분석

윤형희, 강지원, **최경규**, 박준우, 박진우  
한국전력공사 전력연구원

### A Causative Analysis on Joint Box Breakdown of 154kV Underground Transmission Line

Hyung-hee Yoon, Ji-won Kang, Kyung-kyu Choi, Jun-woo Park, Jin-woo Park  
Korea Electric Power Corporation / Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 지중송전선로는 가공송전선로와는 달리 고장발생시 영구고장이 대부분이며 따라서 고장복구 기간도 상대적으로 긴 편이다. 고장 후 신속한 복구를 위해서는 무엇보다 고장원인을 빠르고 정확히 밝혀내는 것이 중요하다. 본 논문에서는 우리회사가 시행하고 있는 XLPE케이블 고장분석 종류와 그 결과를 통한 고장원인 도출까지의 과정을 다루었다.

#### 1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전과 도시인구 집중에 의한 전력수요의 급증으로 송·배전의 대용량화 필요성이 날로 증가하고 있으며, 인구 밀집지역 내의 가공 송·배전이 갖는 어려움 때문에 초기 투자비용이 크고, 사고 발생시 보수의 어려움으로 고장지속 시간이 긴 점 등의 단점에도 불구하고 지중화가 지속적으로 증대하고 있다. 국내에서 사용 중인 지중송전 케이블 종류는 크게 유입(OF) 전력케이블과 가교폴리에틸렌절연(XLPE) 전력케이블로 나뉜다. XLPE 케이블은 폴리에틸렌을 가교시켜 폴리에틸렌의 결점인 열연화성을 대폭 개선한 것으로 국내 전력 케이블의 주류를 이루고 있으며 현재 국내에서 600V에서 345kV 까지 넓은 전압 범위에서 사용되고 있다. 본 논문에서는 우리 회사에서 발생한 지중송전선로 XLPE 케이블 고장의 한 예에 대한 원인분석 과정과 그 결과를 다루었다.



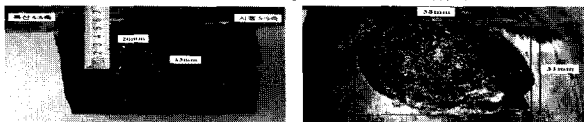
〈그림 1〉 154kV 지중송전선로 고장형상

#### 2. 본 론

##### 2.1 XLPE 케이블 고장분석 시험

###### 2.1.1 외관검사

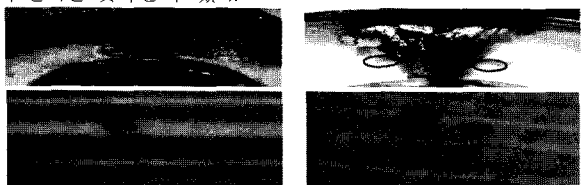
접속함의 S/S측 도체슬리브 부위에서 절연파괴가 발생하여 도체까지 진행되었다. Hole 외경은 가로×세로=20[mm]×13[mm]이며, 도체부위는 가로×세로=38[mm] ×31[mm]로 도체표면 Hole 크기가 외부 Hole 크기보다 큰 형상을 보이고 있다.



〈그림 2〉 B/D 발생부위 외형 및 도체 상태

###### 2.1.2 Hot-Oil Test

도체 및 외도를 제거한 케이블을 실리콘오일에 넣어 120~130[°C]로 끓이면 절연층이 투명해지며, 시료의 아래쪽에서 밝은 빛으로 비추어 절연층 내부를 관찰하면 절연층 내의 기포나 불순물 등의 흔적을 찾아낼 수 있다.



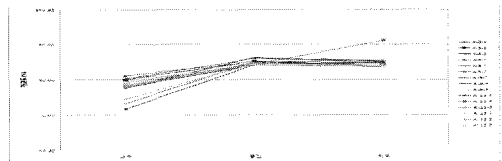
〈그림 3〉 시료 형상(bow-tree) 및 보이드 형상

파괴공 주변(내도측, 적색 표기부분)의 절연층 내 내도부근에서 보이드가 다수 발견(52~192[μm])되었으며 특히 192[μm] 크기의 Void에서는 이미 부분방전 현상인 Tree가 나타남에 따라 절연파괴 발생부위에서는 보다 큰 Void가 형성되었으리라 판단된다.

###### 2.1.3 가교도 시험

가교폴리에틸렌(XLPE)의 가교가 제대로 되어 있지 않으면 각종 열화반응에 대한 저항성이 감소되어 고장 발생 확률이 높아지므로 일반적으로 80[%] 이상의 가교도를 유지해야 한다. 먼저 가교된 케이블 절연시편의 무게를 측정하고, 정해진 온도에서 추출 용매로 정해진 시간동안 추출 후 건조된 시편의 무게를 측정한 결과 도체인근 즉, void가 다수 발견된 절연체(내부 반도체층 부근)의 가교도가 대부분 80[%] 이하로 나타났다.

$$\text{가교도}(\%) = \frac{\text{xylene에 끓인 후 남아 있는 무게}}{\text{xylene에 끓이기 전의 무게}} \times 100$$



〈그림 4〉 가교도 시험 결과

###### 2.1.4 염색 Test

시료의 보이드 및 이물질 등을 관찰하기 위해 흑신(Fuchsin) 용액으로 염색하여 관찰한 결과 내도부근 시료에서 보이드가 다수 발견(52~192[μm])되었다.



〈그림 5〉 염색시험 결과(절연파괴공 주위)

###### 2.1.5 Hot-set Test

XLPE의 가교정도와 노화현상을 파악할 수 있는 시험으로서 준비된 시편의 하부에 규정된 하중(추)을 달고 오븐에서 15분간(약 200[°C]) 매단후의 시편 신율을 계산한 뒤 하중을 제거한 상태에서 5분간 오븐속에서 유지 후 시편을 꺼내어 상온에서 냉각시킨 후 시료길이를 측정하여 기준치와 비교하며 가교가 불량한 경우 신율이 증가하게 된다. 시험기준은 HOT-175[%] 이하, SET-15[%] 이하이며 시험결과 모두 양호한 것으로 나타났다.

〈표 2〉 Hot Set Test 결과

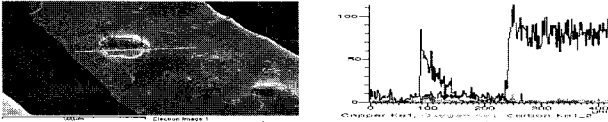
| 구분 | 두께 (mm) | 폭 (mm) | 무게 (g) | 가열중 (mm) | 신장율 (175% ↓) | 냉각중 (mm) | 신장율 (15% ↓) |
|----|---------|--------|--------|----------|--------------|----------|-------------|
| 내층 | 1.437   | 4      | 117.3  | 15       | 75           | 0        | 0           |
| 중층 | 1.201   | 4      | 98.0   | 10       | 50           | 0        | 0           |
| 외층 | 1.176   | 4      | 96.0   | 9        | 45           | 0        | 0           |

###### 2.1.6 열이력 시험

두께의 독립된 열이력 기준시료와 측정시료에 각각 하나씩 있어 두 시료간의 온도 차이를 감지하여 이 온도 차이를 동일하게 하기 위하여 증감되는 열량을 측정하는 시험으로서 건전 케이블로의 열전달로 인해 절연체 특성변화를 추정할 수 있다. 온도 Peak치가 106[°C](미가교테이프 녹는점) 인근에 위치해야 하며 시험결과 모두 양호한 것으로 나타났다.

### 2.1.7 EDX 분석시험(성분분석 시험)

케이블의 내부 절연체에 제조상 기본성분 이외의 이물질, 불순물 등의 혼입여부를 찾아내는 시험으로 절연과피부위 중심으로 성분분석을 하였으나 이물질이나 특이사항이 발견되지 않았다.



〈그림 7〉 EDX 분석결과

### 2.2 Void로 인한 부분방전 및 절연과피 현상 해석

J/B #1 절연과피공 부위에서 기준치 이상의 보이드(크기 : 52~192[μm])가 발견된 점에 근거하여, 보이드로 인한 절연과피(B/D) 발생 가능성 확인할 필요가 있다.

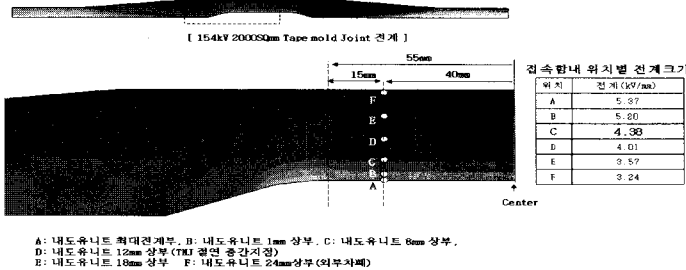
#### 2.2.1 TMJ 접속함내 전계분포

접속함 내에서의 전계분포  $E_x$ 는 다음과 같다.

$$E_x = \frac{V}{r_x \cdot \ln(R_0/r_0)} \quad \text{----- 식 (1)}$$

- $r_0$  : TMJ 내부 반도전층까지의 반경 (=40[mm])
- $R_0$  : TMJ 외부 반도전층까지의 반경 (=70.5[mm])
- $V$  :  $U_0$ (=89kV)

식 (1) 및 전계해석(FEM) 결과 TMJ 접속함내 전계분포  $E_x=3.24 \sim 5.37$  [kV/mm]로 분포되며 금번 보이드가 다수 발견된 도체인근에서 가장 큰 전계가 분포함을 알 수 있다.〔그림 8〕참조)



〈그림 8〉 154kV TMJ 전계해석 결과

#### 2.2.2 절연체내 부분방전 발생가능 Void 크기

일반적으로 TMJ 내부의 가교과정 중에, 고온·고압력하에서는 용융된 폴리에틸렌(PE)중에서 발생하는 기체는 용융 폴리에틸렌의 압력 균형이 유지되기 때문에 구형이 되나 폴리에틸렌의 수축이 균일하지 않은 경우에는 구형이 약간 편평해지기 때문에 타원형이 되기도 한다. 이때 보이드 양단에 걸리는 전압  $V_g$ 는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$V_g = \int E dl = \int f E_0 dl = f E_0 (2a) \quad \text{----- 식 (2)}$$

$$E = f E_0 \quad \text{----- 식 (3)}$$

- $E$  : 보이드 내부의 전계
- $E_0$  : 보이드가 위치한 곳의 외부 전계값
- $a$  : 전계 방향의 보이드 반경 [mm]

$$f : \text{전계집중율}(E와 E_0와의 비) = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \cdot k}$$

(구형 보이드의 경우 :  $k = \frac{1}{3}$ )

또한, 보이드 내부 부분방전 개시전압  $V_i$ 는 다음 식 (4)으로 구한다.

$$V_i = 26.2 P \cdot d + 0.55 = 26.2 P \cdot (2a) + 0.55 \quad \text{[kV]} \quad \text{----- 식 (4)}$$

- $P$  : 보이드 내부의 압력 [MPa]
- (기체 확산에 의해 대기압으로 간주(=0.1013 Mpa))
- $d$  : 부분방전 발생가능 보이드 크기(=2a[mm])

즉,  $V_g \geq V_i$ 인 경우에 부분방전이 발생하게 되며, 식 (2) ~ 식 (4)을 이용하고 구형보이드인 경우( $k=1/3$ )의 부분방전 발생 가능한 사이즈는 다음과 같다.

$$2a = \frac{550}{1.23 \cdot E_0 - 2.65} \quad \text{[μm]} \quad \text{----- 식 (5)}$$

단, 상기 식 (5)는 상온에서의 조건으로 온도 Factor를 고려하지 않은 식으로, 고온 운전 중인 실제용 접속함(TMJ)에서는 온도 계수  $K(K=1.2)$ 를 보정함.

$$2a = \frac{550}{1.23 \cdot K \cdot E_0 - 2.65} \quad \text{[μm]} \quad \text{----- 식 (6)}$$

- $K$  : 온도보정계수(=1.2)
- $E_0$  : 보이드가 위치한 곳의 외부 전계값 [kV/mm]

식 (2) 및 (6)을 이용하여 TMJ 접속함 각 부위별 부분방전 발생 가능한 사이즈는 다음 [표 3]과 같다.

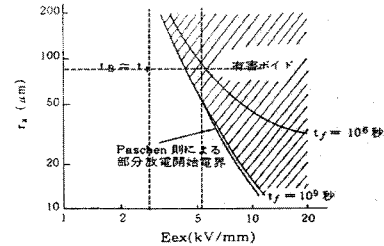
〈표 3〉 TMJ내 각 부위별 전계 및 부분방전 발생 Void(구형)

| 위치 | TMJ 내부전계 [kV/mm] | 부분방전 발생 보이드 직경 [μm] |
|----|------------------|---------------------|
| A  | 5.37             | 104                 |
| B  | 5.20             | 109                 |
| C  | 4.38             | 144                 |
| D  | 4.01             | 168                 |
| E  | 3.57             | 210                 |
| F  | 3.24             | 258                 |

즉, 금번의 경우에서 발견된 보이드는 52~192[μm]로써 부분방전 발생 가능함을 알 수 있다.

#### 2.2.3 Void로 인한 Tree 진전 및 절연과피 시간

외부 인가전계와 보이드 사이즈에 따른 절연과피까지 걸리는 시간관계는 [그림 10]에 잘 나타나 있다.



〈그림 10〉 외부 인가전계  $E_{ex}$  및 보이드 반경에 따라 절연과피까지 이르는 시간 ( $t_a$  : 보이드 반경)

즉, 금번의 경우 운전 개시후 약 3년( $9 \times 10^7$ 초) 이후 절연과피 되었으므로 이러한 조건을 검토한 결과 약 200[μm] 이상의 큰 보이드가 도체 슬리브 부근 전계 집중 지역에 있었다고 판단된다.

### 2.3 분석결과

금번 OOT/L J/B #1에서의 절연과피부위 시료를 현미경으로 분석한 결과 절연체내 생성된 보이드 크기가 기준치를 초과하고 있으며, 보이드를 중심으로 전기트리현상이 나타나고 있다. 절연과피된 부분 바로 인근(내도부근)에서 발견된 보이드의 크기는 52~192[μm]로 분석된 점에 미루어 절연과피 부위의 Void는 보다 큰 것으로 판단된다. 접속함 내도부근에 구형 보이드가 존재할 경우 보이드의 최대 허용직경은 104[μm]로서, 금번 도체직상(내도부근)에서 발견된 192[μm]의 보이드는 방전이 진행중이었으며 절연과피 발생부위에서는 약 200[μm] 이상의 큰 보이드가 존재한 관계로 운전 개시후 약 3년( $9 \times 10^7$ 초) 이후 절연과피 되었다고 판단된다. 보이드의 발생경위는 물당작업 기록 등을 검토한 결과 가류과정에서 생성된 다수의 보이드가 전형적인 bow-tree 형상을 갖는 전기적 tree로 발전되어 결국 절연과피 사고로 이어졌다고 판단된다.

### 3. 결 론

이상으로 7가지 분석시험과 이론적인 해석을 통해 XLPE 전력케이블 고장의 원인분석 및 결론도출 과정을 살펴보았다. 고장 발생 후 신속한 복구와 복구 후 안정적이고 효율적으로 전력을 공급하기 위해서는 고장의 현상을 파악하고 그 원인을 정확하게 밝혀내어 최단기간에 복구를 하고 향후 동일한 고장이 재발하지 않도록 해야 한다. 그러기 위해서는 위와 같은 원인분석과정이 체계적으로 정립되어야 하고 과거의 사고 데이터를 지속적으로 축적·관리 할 필요가 있다. 또한 지중송전선로 고장에 대한 원인분석을 위해 전문인력 양성 프로그램을 개발하고 전문가간 사고 데이터 공유를 통해 보다 정확한 원인분석이 도달할 수 있어야겠다.

### [참고 문헌]

- [1] 부분방전 발생가능 Void 크기, 절연과피 시간 검토, 전기협동연구(日), 제 51권, 제 1호.