

## 계면특성이 전력케이블 열화에 미치는 영향

한재홍, 이동영, 김상준  
전력연구원 전력계통연구실

### Interfacial Effects on the Aging of Power Cables

Jae-Hong Han, Dong-Young Yi, Sang-Joon Kim  
Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

**Abstract** - In order to investigate the interfacial effects on the aging of power cables, we analyzed recently failed cables using characterization techniques. In this study, some cables showed a convolution which can cause the concentration of electric field and carbonized impurities at the surface of insulation. Also there is a relation between the degree of cross-linking and volume resistivity. From the hot oil test, the sites of water tree and void coincided with each other.

#### 2. 실험방법 및 결과

##### 2.1 시료제작 및 측정

시료는 전력케이블이 사고난 직후 사고 부위로부 터 30 cm 이내를 채취하였으며, 그림 1에 나와 있는 것처럼 선반을 이용하여 실험에 적당한 형태로 가공하였다. 코일형태로 가공한 시료는 내도의 굴곡과 수트리 현상을 관찰하기 위한 것이고, 리본형 태의 시료는 두께에 따른 가교도의 측정을 위한 것 이다. 한편 외부반도전층을 제거한 후 절연층 표면 에서의 이물질 분석을 하였으며, 실리콘 오일내에 서 가열시험을 통하여 계면에서의 보이드 분석을 하였다.

#### 1. 서 론

가교폴리에틸렌으로 절연된 배전용 전력케이블에 는 다양한 종류의 계면이 존재하지만, 그 중에서도 케이블 구조상 절연층과 반도전층에서의 계면특성 이 케이블의 절연성능에 큰 영향을 미친다. 또한 케이블의 수명을 단축시키는 수트리 현상도 절연층 내의 bow-tie 트리보다는 계면에서의 vented 트리가 더욱 위험하다는 사실로부터 계면특성은 매우 중요하다. 만약 계면에 결함이 존재하면 케이블의 열화현상이 촉진되며, 이러한 결함은 결국에는 사 고의 직접적인 원인으로 작용하기도 한다.

절연층의 전계분포를 완화하기 위해 사용되는 내 부 및 외부반도전층은 각기 요구되는 물성이 다르 며, 절연층 열화와 밀접한 관련이 있다. 예를 들어 절연층과 반도전층의 접착력이 부족하면 계면에서 부분방전 현상이 발생하기도 하며, 반대로 너무 강 하게 결합되어 있으면 접속작업시 절연층에 손상을 입힐 수도 있다. 또한 반도전층의 돌기 (protrusion) 나 굴곡 (convolution) 등은 전계집중 현상을 유발 하여 절연파괴 사고도 일어나게 한다.

본 연구에서는 현장에서 10년 이상 운전중 최근 에 사고가 발생한 케이블들을 수거하여 계면특성을 분석한 후 케이블 열화현상과의 관련성을 확인하고 자 하였다.

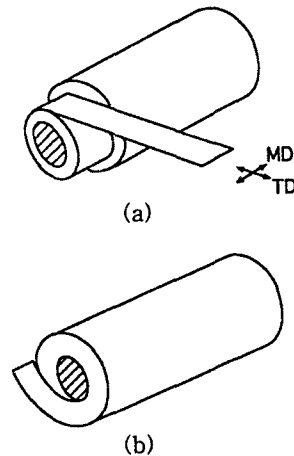


그림 1. 케이블 시료의 가공: (a) 리본시료, (b) 코일시료

##### 2.2 내도의 굴곡현상 분석

굴곡현상이란 내부반도전층이 압축도체 표면을 따라 굴곡을 보이는 것을 말하며, 그림 2와 같이 convolution간의 깊이를 측정하여 구하였다.

코일형태로 가공된 사고케이블 시료들을 현미경 으로 확대하여 측정한 결과 일부 케이블들이 외국

규격에서 규정하고 있는 180  $\mu\text{m}$ 에 근접하는 굴곡 현상이 보였다[1]. 이러한 굴곡현상은 돌기와 마찬가지로 국부적인 전계를 집중시키는 역할을 한다.

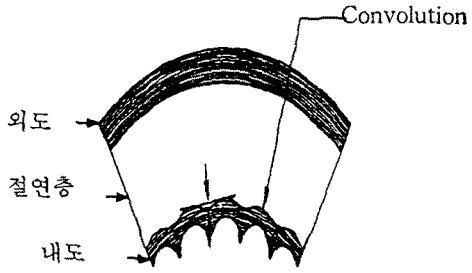
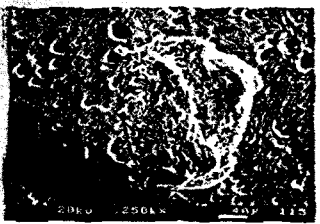


그림 2. 내도의 굴곡 측정방법

### 2.3 절연층 표면의 이물질 분석

사고케이블의 외부반도전층을 제거한 결과 일부 케이블에서 무수히 많은 검은 반점들이 육안으로 관찰되었으며, 이러한 반점의 정확한 분석을 위하여 SEM/EDX 분석을 실시하였다.

그림 3 (a)에서 알 수 있는 것처럼 검은 반점은 절연층 표면에 박혀 있으며, 이 부분에 대한 EDX 분석결과 탄소피크만 발견되고 형태가 둥근 것으로 보아 압출과정에서 혼입된 탄화된 덩어리인 것으로 생각된다. 아마도 압출기 다이에 존재하던 고분자 찌꺼기가 압출동안에 절연층에 묻어 나온 것으로 생각된다. 또한 그림 3 (b)는 절연층 표면과 접하고 있던 반도전층에 나타난 패인 자국으로 계면에 반점이 존재했음을 잘 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3. 이물질의 SEM 사진: (a) 절연층 표면, (b) 외도

### 2.4 두께에 따른 가교도 분석

일반적으로 전력케이블의 절연층은 두께에 따라 특성이 다소 달라지는 경향을 보인다. 따라서 두께에 따른 가교도의 변화를 관찰하기 위하여 리본형태로 가공한 시료를 일정 크기로 자른 다음 150 mesh의 스테인레스망을 사용하여 xylene 용액속에서 추출하였다. 48시간 동안 끓였으며, 진공오븐에서 건조시킨 다음 추출후 무게를 추출전 무게로 나누어 이를 백분율로 표시하였다.

그림 4는 1987년에 제작된 사고케이블의 가교도를 두께에 따라 나타낸 것으로, 0은 내부반도전층을 7은 외부반도전층을 의미한다. 표에서 알 수 있는 것처럼 내부반도전층 부근의 절연층이 거의 0%에 가까운 가교도를 나타내었다. 이러한 결과는 절연층의 일부분이 미가교되었다는 의미하는 것으로 케이블 제조과정중 케이블 안쪽이 가교가 제대로 일어나지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 가교제인 DCP를 분해시키기에 충분한 열이 전달되지 않아 발생한 것으로 생각된다.

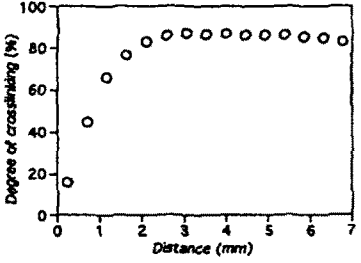


그림 4. 사고케이블의 가교도 분포도

### 2.5 체적고유저항 측정

반도전층의 체적고유저항은 가교도와 밀접한 상관관계가 있다. 일반적으로 고분자는 전도성 카본블랙과 혼합하면 저항이 낮아져 반도전성을 나타내며, 여기에 전압이 가해지면 고분자는 발열한다. 반도전성 고분자는 일정 수준 이상 발열되면 고분자의 열팽창에 의해 카본블랙 입자간의 거리가 멀어짐으로써 전도성을 잃게 되는데, 이때 적당한 가교가 이루어져 있으면 이러한 현상에 의한 영향을 많이 받지 않는다.

본 연구에서는 가교도와 체적고유저항의 상관성을 보기 위하여 절연층의 가교도가 0%에 가깝게 나타난 시료를 대상으로 내부반도전층의 가교도 및 체적고유저항을 측정하였다. 내부반도전층의 가교도는 14%로 나타났으며, 체적고유저항은  $\infty \Omega \cdot \text{m}$ 로 규격치를 만족하지 못하였다[2]. 이 재료에 대한 전도성 카본블랙의 함량을 측정한 결과 33 wt%인 것으로 밝혀져 함량부족으로 인한 발생한 현상이 아니라 내부반도전층의 가교도 부족에 따른 현상임이 밝혀졌다.

## 2.6 보이드 분석

도체 및 외부반도전층을 제거한 케이블을 끓는 실리콘 오일속에서 가열하면 절연층인 가교폴리에틸렌의 결정화도가 감소하므로 절연층에 존재하는 보이드나 수트리를 관찰하기가 용이하다.

이러한 원리를 이용하여 절연층과 외부반도전층의 계면에서 성장한 수트리를 가진 케이블에 대하여 분석한 결과 수트리가 발생한 지역인 절연층 표면에서 1 mm 이상의 큰 보이드가 집중적으로 존재함이 발견되었다. 그림 5는 실리콘 오일중에서 확인된 보이드로서 수트리가 발생한 위치와 보이드가 발견된 위치가 정확하게 일치하는 결과로부터 수트리가 보이드에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 절연층의 표면이 부풀어 보이는 현상은 아마도 보이드가 실리콘 오일로 채워져서 발생한 것으로 생각된다.

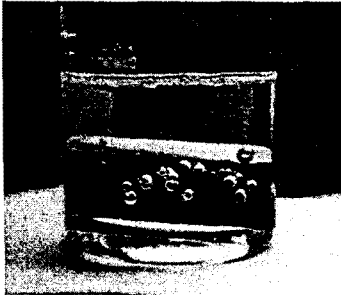


그림 5. 사고케이블내의 보이드

## 3. 결 론

전력케이블내의 대표적인 계면인 절연층과 반도전층의 계면특성이 케이블 열화에 미치는 영향을 확인하기 위하여 현장에서 10년 이상 열화된 사고 케이블을 특성분석하였다.

분석결과 일부 케이블에서 국부적인 전계를 증가시키는 내부반도전층의 굴곡현상이 발견되었고, 절연층과 외부반도전층 계면에서 탄화된 이물질이 존재함을 알았다. 또한 가교도와 체적고유저항이 상관성이 있음을 확인하였고, 실리콘 오일내에서 가열시험을 통하여 수트리 발생위치와 보이드 발생 위치가 일치하고 있음을 알았다.

### (참 고 문 헌)

- [1] AEIC CS5-94, "Specifications for Cross-linked Polyethylene Insulated Shielded Power Cables Rated 5 Through 46 kV", 1994.
- [2] 한전, "22.9 kV 동심중성선 전력케이블", 한국전력표준규격 ESB 126-640~647, 1992.