

배전용 전력케이블의 반도체층에 함유되어 있는 불순물 분석

김 상준, 송 일근, 김 주용, 한 재홍
전력연구원

서 광석, 이 창용, 이 창호
고려대학교

Impurities of the Semiconductive Shield in the Power Distribution Cable

S.J. KIM, I.K. SONG, J.Y. KIM, J.H. Han
KEPCO KEPRI

K.S. Suh, C.R. Lee, C.H. Lee
KOREA UNIV.

Abstract

In order to evaluate the soundness of 10 year service-aged XLPE-insulated 22.9 kV underground distribution cables, semiconductive shields have been characterized. The edge of insulation near the insulation shield shows a drastic decrease of OIT. Impurities such as Ca, Mg, Fe, Cu were detected in both conductor and insulation shields. Their concentrations at the insulation shield are much higher than those at the strand shield. All these facts suggest that the edge of insulation near the insulation shield is degraded considerably, which might be attributed to the oxidation reaction of insulation by a large amount of impurities in the insulation shield.

1. 서 론

XLPE를 주절연체로 사용하고 있는 배전용 전력케이블은 도체표면의 전계완화와 도체와 절연체 사이의 공극에서 발생하는 부분방전을 방지하기 위하여 주절연체의 내외부에 반도체층을 형성하고 있다.

그 동안 꾸준한 공정기술 개발로 내부반도체층, 주절연체와 외부반도체층이 3층으로 동시에 압출되어 가고 됨으로써, 경계면의 평활성과 접착성이 우수해지고 전기적 특성이 대단히 향상되었다. 이러한 반도체층의 필요성능은 (1) 반도체층에서 Joule 손실과 $\tan \delta$ 손실 등에 의하여 발열이 없을 것, (2) 반도체층의 계면에서 부분방전이 발생하지 않을 것, (3) 뇌충격전압 등에 의하여 반도체층이 절연층보다 먼저 파괴되지 않을 것, (4) 반도체층 특성의 분산범위가 작고 특성이 안정될 것 등이다.

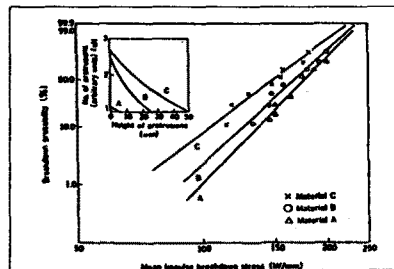
따라서 내외부 반도체층이 모두 절연체와 똑같은 고분자일 필요는 없으나, 반드시 절연체의 제질과 적합(compatible) 하여야 한다(AEIC CS5-94).

그러나 최근 수행한 배전케이블의 수명예측연구를 통하여, 내외부 반도체층에 금속성 불순물이 다량 함유되어 있음을 알 수 있었으며, 또한 이러한 불순물이 XLPE전력

케이블의 절연성능에 큰 영향을 미친다.

2. 반도체층에 함유된 불순물

전력케이블 내에 들어 있는 불순물은 여러 종류로 분류할 수 있는데, 대략 종류별로 분류하거나 또는 발생 요인별로 분류할 수 있다. 종류별 분류에는 유기불순물과 무기불순물 등이 있을 수 있으며, 발생 요인별로는 폴리에틸렌 제조공정 중에 발생하는 불순물과 제조공정 후 포장, 또는 이송과정 중에서 발생하는 불순물 등으로 나눌 수 있다. 이러한 불순물은 Bow-tie tree의 주요 발생원인으로 작용하며, 특히 물속에 녹아 있는 Ca 또는 K 등의 이온성 불순물은 수트리 발생 및 성장에 관여하여 간접적으로 절연파괴를 일으키는 요인으로 작용하거나, 또는 직접적인 절연파괴의 요인으로 작용하기 때문에 원료업체로부터 전선제조업체 및 사용자에게 이르기까지 불순물 관리가 중요하다. 또한 전력케이블의 반도체층과 절연층 사이에突起(protrusion)가 있는데, 이는 트리발생 나아가서 전력케이블 절연파괴의 주원인으로 작용한다.



[그림1] 突起의 크기에 따른 절연파괴 확률

가. 반도체 컴파운드의 불순물

PIXE 방법과 NAA 방법을 이용한 반도체 컴파운드에 대한 불순물 분석결과 <표 1>, furnace black을 사용한 보통의 반도체 컴파운드에는 많은 양의 불순물이 들어 있지만, acetylene black을 이용한 Extra-clean 반도체 컴파운드에는 불순물의 함량이 매우 적은 것을 알 수 있다.

<표 1>의 결과로부터 반도체층에는 절연층에 비하여 월등히 높은 농도의 불순물이 존재한다는 것을 알 수 있고, 이는 결국 반도체층이 불순물의 공급원 역할을 한다고 할 수 있다.

<표 1> 반도체 컴파운드의 불순물 분석결과

Element	Conventional (with furnace black)		Extra-conductive super smooth black		Extra clean (with acetylene black)	
	PIXE	NAA	PIXE	NAA	PIXE	NAA
Na	271-1325	335	ND	6.9	ND	3.6
Mg	62-111	90	ND	<4	ND	<1
Al	29-101	68	14-28	19.3	ND	0.13
Si	210-306	196	46-103	48	35-201	<6
S	3535-4066	4470	61-88	106	2.3-15	<20
Cl	54-1195	84	7.5-15.6	14.9	2.8-8.9	4.8
K	22-240	23	1.5-3.8	0.87	1-4.2	0.92
Ca	218-380	237	2.2-12	1.4	1-3.2	0.6
Ti	5-20	1	1.9-2	0.8	.9-1.4	0.06
Fe	0.4-71	<100	0.8	<15	0.4	<10
Cu	0.73	<0.8	ND	0.15	ND	0.1
Zn	0.83	<5	43-75	57	ND	<1
Total	4407-7971	5504-<5630	177-335	255-<274	43-238	10-<49

나. 내외부 반도체층에 함유된 불순물

전력케이블의 내외부 반도체층 내에 들어 있는 불순물의 종류 및 농도는 전력케이블의 수트리 특성을 비롯한 절연수명에 중요한 영향을 미치는데, 주로 절연특성을 감소시키는 역할을 한다.

불순물은 Inductively coupled plasma - Atomic Emission Spectroscopy(ICP-AES) 방법을 사용하였는데, 시료 전처리 과정은 다음과 같다. 시료 2 g을 잘게 자른 뒤 각각 50 ml 용량의 테프론병에 넣고 진한 황산 4 ml을 가하여 hot plate에서 150℃로 40 시간동안 분해한 뒤 H₂O₂ 10 ml을 가한다. 여기에 초순수를 가하여 50 ml을 만든 후 ICP를 이용하여 분석하였다.

국내에서 운전중 고장이 발생한 배전용 전력케이블의 내외부 반도체층에 함유된 불순물은 <표 2>와 같다.

<표 2> 내부, 외부 반도체층의 원소분석 결과

불순물	부산(#8)		울산(#12)		강남(#13)		강남(#14)		비고
	내부	외부	내부	외부	내부	외부	내부	외부	
Zn	-	19	709	863	-	469	-	470	
Ni	-	90	-	-	-	-	-	1	
Cu	-	158	147	17	8	30	19	35	
Fe	-	65	47	1	32	64	14	83	
Mg	197	9,329	3,641	234	36	1,408	36	1,223	
Ca	-	543	84	3	40	83	49	77	
K	-	284	-	-	131	-	154	-	

- : 검출한계 이하

원소분석결과, 반도체층에는 절연층보다 월등히 많은 양의 불순물이 존재한다. EPRI 보고서의 결과와 비교하면 Ca, K, Na, Cu 등 모든 원소에 있어서 국내케이블의 불순물 농도가 월등히 높다. 특이한 사항은 국내케이블의 경우 반도체층에서 약 9300 ppm 정도의 Mg가 검출되었다.

다. 반도체층의 불순물에 대한 고찰

현재까지 얻은 분석결과 중에서 케이블의 절연수명과 관련된 중요한 사항은 다음과 같다.

- (1) 내부 반도체층의 재료에는 용융점이 높은 LDPE 성분이 혼합되어 있으며, 외부 반도체층의 재료는 EVA로 이루어져 있다(#8).
- (2) #8 시료에 대한 FTIR 분석결과 산화반응을 대표하는 oxalic acid 성분의 경우 의도적으로 갈수록 흡광도가 급증한다[그림 2].

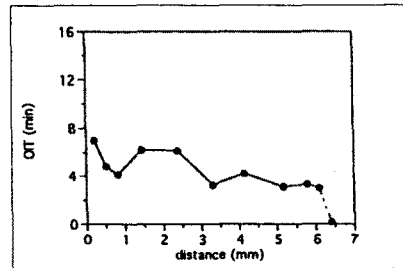


그림 2. 울산(#8) 시료의 산화유도시간 분포

- (3) 절연층의 불순물 농도가 외국 자료에 비하여 월등히 높으며, 특히 반도체층 재료의 경우 불순물 농도가 매우 높다.

(4) #8 시료의 경우 산화유도시간이 대략 4-6분 정도인데, 외부 반도체층측에서 산화유도시간이 급격히 감소하여 측정이 어려운 정도로 낮아진다.

본 연구에서 주로 이루어진 #8 시료에 대한 분석결과 는 매우 흥미로운 결과들이다. 즉, 외부 반도체층 부근의 절연층의 산화유도시간이 측정이 어려운 정도로 거의 0에 가까웠다. 또한 외부 반도체층의 불순물이 매우 높았으며 산화반응의 척도를 나타내는 oxalic acid 피크가 외부 반도체층 부근에서 급증하였다. 이러한 결과들은 서로 매우 깊은 연관이 있는 것으로 생각된다. 즉, 고분자가 금속, 특히 2가와 3가 사이를 변환할 수 있는 Cu, Fe 등의 금속과 접촉해 있으면 고분자는 소위 자동산화반응이라는 반응을 거쳐 급격히 산화된다. 이러한 점을 감안하면 앞에서 언급한 세 가지 사실은 모두 외부 반도체층 부근의 절연층이 극심하게 산화되었을 가능성이 매우 높다는 것을 의미하며, 이때 외부 반도체층에 있는 금속성 불순물이 큰 역할을 하였음을 유추할 수 있다.

모든 케이블 시료의 특성은 분포도를 갖고 있다. 특히 절연층의 두께 방향으로 균일한 분포를 갖는 경우는 매우 드물고, 거의 모든 시료들의 특성들은 절연체의 중간 부분과 반도체층 측에서 상당히 큰 차이를 보였다. 대부분의 시료가 보여 주는 공통적인 특성은 반도체층으로 갈수록 절연층의 특성이 저하된다는 사실이다.

이는 매우 중요한 점을 시사한다고 할 수 있다. 즉, 앞서서도 언급한 바와 같이 국내 전력케이블의 반도체층은 모두 상당량의 금속성 불순물을 함유하고 있고, 이 금속성 불순물은 고분자의 물리적 성질을 저하시키는 가장 중요한 요인으로 작용했을 가능성이 매우 높다는 것이다. 따라서 국내 지중 배전용 전력케이블의 절연성능을 향상시키고 열화반응을 감소시켜 케이블의 절연수명을 연장시키기 위해서, 가장 먼저 해야 할 일은 외국의 경우와 마찬가지로 소위 super smooth and super clean 반도체 컴파운드를 전력케이블에 적용해야 할 것이다[3].

<표 3> Supersmooth Extra Clean 반도체층의 불순물 허용 권장치

불순물	허용권장치(ppm)
S	<20
Al	<1
Ca	<1
Cu	<1
Fe	<2
Mg	<1
P	<1
K	<1
Na	<5
Si	<5
Zn	<1

4. 결론

최근 국내에서 운전중 고장이 발생한 지중배전케이블을 시료로 채취하여 분석한 결과 외국의 경우와는 다른 특징을 발견하였는데, 주요 특징은 다음과 같다.

- (1) 전력케이블의 절연층의 특성은 위치에 따라 다른 것으로 나타났다. 즉, 절연층 두께방향으로 분포도를 갖는다. 따라서 모든 케이블의 분석은 어느 한 지점에 대한 분석이 아니라, 절연층 전체에 대한 분석을 통하여 분포도를 얻어야만 정확한 특성분석이 가능함을 알았다.
- (2) 국내 지중배전케이블의 내도재료는 용융점이 높은 LDPE 성분이 혼합되어 있다. 이는 불완전 용융, 전도상 카본블랙의 불완전 혼합 등 전력케이블의 수명에 악영향을 미칠 수 있는 가능성이 높으므로 이에 대한 정밀한 검토가 필요하다.
- (3) 국내 지중배전케이블의 반도체층에는 외국의 경우와 비교하여 월등히 많은 불순물이 들어 있다. 이 불순물들은 전력케이블의 수명에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 이에 대한 정밀 검토가 필요하다.

위 특징들은 지금까지 분석한 모든 지중 배전케이블에서 보이는 특징이므로 이들이 국내 배전케이블의 현주소라고 할 수 있다.

반도체층 재료의 불순물 함량 및 LDPE와의 혼용문제는 매우 심각하게 고려되어야 하는데, 지금까지 알려진 바에 의하면 전력케이블의 수명에 직접적인 요인이 되는 수트리는 반도체층과 절연층 사이의 돌출물에 의해서 발생되고 불순물이 수트리 성장을 돕는다. 따라서 증가추세에 있는 지중배전케이블의 절연파괴고장을 억제하기 위해서는, 현재 국내에서 사용하고 있는 반도체층 재료의 성능개선이 필수적이며, super smooth and super clean 반도체 재료를 사용하여야 한다.

참고문헌

- [1] "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", 전력연구원, 1996
- [2] Steven L. Greene, Smoothness Evaluation of Clean Furnace Blacks, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 23-29, March/April 1996.
- [3] N.M. Burns, R.M. Eichorn, C.G. Reid, Stress Controlling Semiconductive Shields in Medium Voltage Power Distribution Cables, ibid, pp. 8-24, September/October 1992
- [4] S.A. Boggs, J.M. Braun, G.C. Stone, Attenuating Voltage Surges in Power Cable by Modifying the Semiconductive Shields, Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 491-494, 1992