

전력 케이블에서 반도체층의 역할과 요구 특성

The functions & Requirements of the Semi-Conducting layer in the power cable.

정 윤 택, 남 증 철
Yun-Tack Jung, Jong-Chul Nam

Abstract

For high voltage XLPE power cables, semiconducting layers have been applied to prevent discharge at the interface between conductor and insulation, and/or insulation and external shielding layer. The semiconducting layers may be also effective to release electrical stress in the interface. The property of semiconducting layers are significantly related to the quality and reliability of power cables. Generally, these semiconducting layers are formed by extruding, the conductivity of the material is given by the carbon black mixed with base polymer. The life of power cables is depended on the smoothness of the interface between insulation and semiconducting layer. If the smoothness is no good, the life of power cables is shorter because the electrical stress and water tree is increased. The causes of no good smoothness are the void of the interface, the protrusions, the contaminants and impurities of the semiconducting layer. The selection and dispersion of the Carbon Black is the significant factor to determine the life of power cable in the manufacturing of semiconducting compound.

요약: 고압용 가교 Polyethylene 절연 케이블의 도체와 절연체 사이, 절연체와 외부 차폐층 사이에는 계면에서의 부분방전을 방지하고 전기적 스트레스를 완화할 목적으로 반도체층이 설계되어 있다. 이 반도체층의 성질은 케이블의 품질과 신뢰성에 매우 중요한 관련이 있다.

일반적으로 반도체층은 압출 성형하는데 Base Polymer에 다량의 카본블랙을 혼합하여 도전화 한다.

절연층과 반도체층간 계면의 평활도는 전력 케이블의 수명과 깊은 관계가 있는데 만약 평활도가 좋지 않으면 전기적 Stress 가 증가하여 전선 수명이 짧아진다. 계면 평활도를 나쁘게 하는 주 요인은 계면의 Void, 반도체층의 돌기와 이물, 탄화물 등이다. 반도체 Compound 제조에 있어서 Carbon Black의 선택과 분산성은 전선수명을 결정하는 중요한 요소이다.

Key Words : power cables, semiconducting compound, 대양소재, 반도체재료, 전력케이블

1. 서 론

최근 국내 전선 업계, 피복재료 제조 업체를 막론하고 전력 케이블의 수명 연장과 품질의 신뢰성 향상을 위한 논의, 연구가 활발하게 진행되고 있다.

특히 전력 케이블의 내·외도 층으로 사용되고 있는 반도체층이 전선 수명에 매우 중요한 역할을 하고 있다는 것이 연구 발표되면서 반도체층의 품질 향상을 위한 노력이 꾸준히 전개되고 있다. 더구나 한국전력에서는 반도체층에 대한 재료 규격을 강화함으로써 2001년 6월 이후에 사용하는 한전 수주 전선에 대해서는 개정된 규격을 적용함으로써, 전력케

* (주) 대양소재 기술연구소

E-mail : DYMCOM@hitel.net

이불 수명 안정성을 확보하기 위한 노력을 지속하고 있다.

이처럼 전력 케이블의 장기 수명은 피복재료의 기능과 품질이 좌우한다는 것이 연구 발표되고 이같은 연구결과를 토대로 피복재료의 개선 변경을 위하여 한전 뿐 만 아니라, 전선재료 업체, 피복재료 업체의 노력 또한 꾸준히 진행되고 있다.

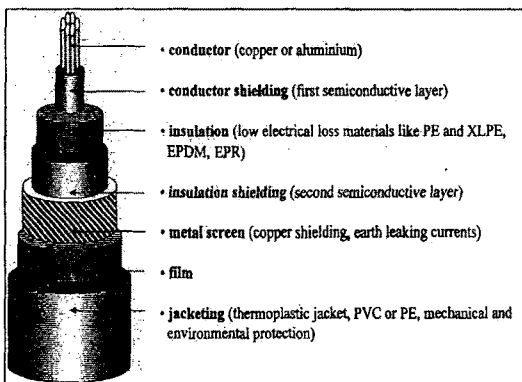
본고에서는 반도체층이 전력 케이블에서 어떤 기능과 역할을 하고 있으며 전선의 장기 수명 확보를 위해 반도체층이 갖춰야 할 요구 특성이 무엇인지를 중심으로 검토하였다.

2. 본 론

2-1. 반도체층의 기능과 역할

고압 전력 케이블의 피복용으로 사용되어지는 것은 대부분 고분자 재료이며 피복층의 기능과 용도별로 각기 다른 Polymer가 사용되어 진다. 그 중 반도체층으로 사용되고 있는 Base Polymer는 현재 국내에는 EVA가 주종을 이루고 있으며 세계적으로는 케이블의 사용용도 및 기능에 따라 EEA, EBA, LDPE, EPDM등이 사용되어진다. 반도체층은 명칭에서 보듯이 $10^1 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 범위의 저항을 갖는 Semi-Conductive Compound로써 Base Polymer에 Carbon Black 을 충전시켜 전기 전도성을 갖도록 만들어진다.

<그림> 전선의 구조



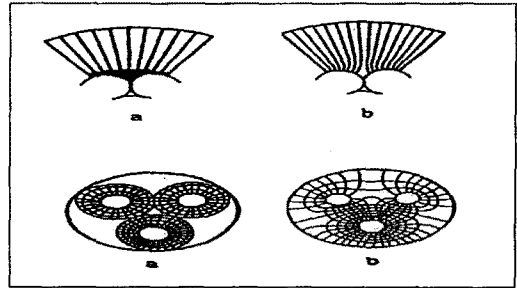
반도체 재료가 갖는 주요 기능은 다음의 2가지로 요약할 수 있는데 그 하나가 전계완화 효과이며 나머지 하나가 도체와 절연층 사이에서 발생하는 부분방전을 발생하지 않도록 억제하는 효과이다.

전계완화 효과란 <그림 2>에서 보는 바와 같이

반도체층이 피복되지 않은 전선은 전기장의 분포가 불균일 하여 전선피복의 주 기능을 상실하고, 절연층이 빠르게 열화하여 짧은 시간내 절연과피를 일으키므로써 전선의 수명을 짧게 하는 것이다.

반도체층을 삽입함으로써 등전위의 전기장 분포를 갖게 되고 고압의 전류가 흐를 때 발생하는 전기장의 집중화를 방지하여 절연층의 열화속도를 매우 느리게 하는 것이다.

부분방전 억제 효과란 도체에 흐르는 고전압의 전류와 절연층간에는 높은 전위차에 의한 방전이 발생하게 되는데 방전이 일어나게 되면 절연층과 도체층의 계면이 완화되어 전계 집중 현상으로 인한 연층 파괴가 일어나게 된다. 이러한 문제점을 보완해주는 기능을 부분방전 억제 효과라 한다.



a: 반도체층이 피복된 케이블

b: 반도체층이 피복되지 않은 케이블

<그림 2> 전계분포

2-2. 반도체층의 요구 특성

장기 수명과 관련하여 반도체층에 요구되는 성능은 매우 많다. 전선의 구조 형태를 유지하기 위한 기계적 특성외에도 전력 수송의 기능을 장시간 유지하기 위한 여러 성능들을 요구하고 있다. 우선 전력 케이블에 필요한 요구 성능과 이에 따른 반도체층의 요구특성을 알아보도록 한다.

전력 케이블의 요구 성능

- Longer life cycle :
 - Lower voids
 - Lower Contaminants & Protrusions
 - Lower Water tree
- Low transportation cost, Low installation cost
- Low Dielectrical Losses
- Improved Fire performance
- Easy & Quick to repair if damaged
- No problems with vertical installations

- High temperature properties
- No maintenance

시공의 원활성, 유지 보수의 원활성 등으로 많지만, 반도체층과 관련된 요구 성능은 전선의 수명을 얼마나 장시간 유지하느냐 하는 것이다.

반도체층의 요구 특성

- Surface smoothness
- High conductivity at 20~130℃
- Resistance to ageing
- Strippability (outer semicon)
- Good homogeneity & dispersion
- Easy to extrude
- Low moisture content

상기와 같이 전력 케이블에서 요구되는 필요 성능은 장기수명 요구, 전력수송의 고효율성, Cost의 절감,

2-2-1. 반도체층의 물리적 기계적 요구 특성

반도체층에서 기본적으로 필요한 물리적, 기계적 특성은 다음 <표 1>과 같다.

상기와 같이 전력 케이블에서 요구되는 필요 성능은 장기수명 요구, 전력수송의 고효율성, Cost의 절감, 시공의 원활성, 유지 보수의 원활성 등으로 많지만, 반도체층과 관련된 요구 성능은 전선의 수명을 얼마나 장시간 유지하느냐 하는 것이다.

<표 1> 반도체층의 물리적 특성

시험항목		단 위	관리규격
형 상			균일한 pellet
밀 도		g/cm ³	1.00~1.20
인장강도(상온)		kgf/mm ²	0.8 ↑
신장율 (상온)		%	150 ↑
Ageing (121℃×168시간)	인장잔율	%	85 ↑
	신율잔율	%	60 ↑
가열변형		%	35 ↑
저온취하온도		℃	-10 ↓
박리력		kgf/½inch	1.4~10.8
이온함유량	내도	ppm	500
	외도	ppm	1,500
체적저항율	상온	Ω·cm	5×10 ⁴
	고온(90℃)	Ω·cm	5×10 ⁴
수분함량		ppm	3,000 ↓

2-2-2. 돌기 및 이물질의 규제

반도체층 뿐 만 아니라 절연층의 돌기 이물질 및 계면에서의 Void의 존재는 전선 수명 단축의 결정적 역할을 하고 있는데, Compound 제조 공정시 투입되는 이물질이나 Carbon Black의 분산 미흡으로 발생

되는 돌기, 전선 제조시 절연·반도체층의 계면에 생기는 Void는 절연 파괴의 주 요인으로써 세계 각국이 엄격하게 규제하고 있는 항목중의 하나이다.

<표 2> 반도체층 돌기의 규제

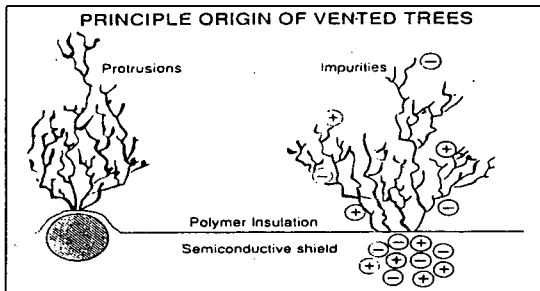
규 격	AEIC	IEC	동경전력	한국전력
적용전압	69~138kv	11~77kv	154~275kv	66~154kv
이물질의 종류	PE 이외의 물질 (metal, 타이물, carbon black)	PE 이외의 물질 (")	PE 이외의 물질 (")	PE 이외의 물질 (")
시험방법	tape test	tape test	tape test	tape test
허용기준	<250μm	타이물<250μm metal<100μm	타이물<250μm metal<100μm	타이물<250μm metal<100μm

<표 3> 한국전력 CV 케이블의 이물질 관리 규격(2001. 6월부터 적용)

항 목		전 압	22.9kv (ES-126-650-664)	154kv	22.9kv TR용
기공 (Void)	크기		70 μ m 이하	50 μ m 이하	내도 70 μ m 이하 외도 100 μ m 이하
	허용수량		0.05mm이상 30EA/60cm ²	-	0.05mm이상 1.8EA/cm ²
이물질	반투명	크기	250 μ m 이하	250 μ m 이하	-
		허용수량	0.05mm이상 15EA/16cm ²	-	-
	불투명	크기	100 μ 이하	100 μ m 이하	반도전 방향 150 μ m 이하 절연방향 70 μ m 이하
계면돌기	내도		절연층 방향 76 μ m이하 반도전층 방향 180 μ m이하	-	절연층 방향 70 μ m이하 반도전층 방향 150 μ m이하
	외도		130 μ m 이하	-	-

2-2-3. Water tree 현상과 반도체층 재료

전선 피복재료의 열화에 의한 절연 파괴 현상을 규명하고 진단 도구로 활용되는 것이 Water tree이다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 케이블의 절연체에 tree 모양의 수분을 함유한 Crack현상을 볼 수가 있는데 이 Water tree는 통전이 시작되면 시간이 흘러갈수록 성장하여 커지며 수량도 증가하게 된다. 즉 절연층이 열화되고 있는 증거이며 전계가 이 Water tree에 집중되어 결국 절연 파괴로 이어지는 것이다.



<그림 3> Schematic shapes of Water trees

Water tree 억제하는 방법

- Clean Insulating and Semi-conducting materials.
- Smooth Semi-conducting materials.
- Dry curing to minimize the Number of voids.
- Water tight barriers.
- Tree retardant additives.

상기 그림에서 보는 바와 같이 반도체층에 존재하는 돌기나 절연층과의 계면이 평활하지 못하면 Water tree가 쉽게 발생하게 되고 전선의 수명을 단축시키는 요인이 되는 것으로 발표되어 있다.

2-2-4. 반도체 Compound의 재료 구성

반도체 Compound는 전력케이블에 반도체층이 채용된 이후로 70년대 이전에는 면 Tape에 Carbon Black을 도포하여 사용하였으나 여러단계를 거쳐 개선되어 오다가 70년대 중 후반부터 열가소성, 열경화성 Polymer로 대체되면서 현재까지 계속사용되고 있다. 기본적으로 반도체 Compound는 앞서서도 서술하였듯이 Base Polymer에 Carbon Black을 충전시켜 반도체화 시킨 것으로 전선의 요구 성능을 만족시키기 위해 제조 공정에서의 이물질관리, 수분관리, Carbon Black의 분산성을 품질관리의 기본 Factor로 삼고 있다.

<반도체 Compound의 재료구성>

구 분	내 용
Base Polymer	LDPE, EVA, EBA, EEA, EPDM
전도성 부여	Carbon Black
산화 방지제	Phenol계 산화방지제
윤활제	Oil류, Wax류, 스테아린산 금속염
가교제	유기 과산화물
기 타	전압 안정제, Tree 억제제

<전도성 카본 블랙 종류별 특성>

구분 \ 종류	Normal Furnace Black	Clean Furnace Black	고도전성 Carbon Black	Acetylene Black
비표면적 (m ² /G)	42	42	800	87
DBP 흡유량 (CC/100g)	127	115	301	225
도전성	중	중	고	중·고
금속이온함량 (PPM)	700	50 이하	80	-
S 함유량(PPM)	5000	30	1000	30
용 도	22 KV 이하	66 KV 이상	22 KV 이하	66 KV 이상

3. 결 론

현재 전력 케이블의 장기 수명 안정성을 높이고자 하는 여러 연구와 제품 개발이 활발하게 진행되고 있으며, 전선 수명에 영향을 미치는 것은 피복 재료 뿐 만 아니라 케이블 제조 가공조건, 시공조건, 선로 관리, 케이블 운전조건 등 여러 사항이 상호 복합적으로 작용한다고 볼 수 있다. 그러나 상기 검토한 바와 같이 전력 케이블에 있어서 반도체층의 사용은 전선 본래의 목적인 효율적인 전력 수송에 있어서

커다란 기여를 하고 있지만 만족시키지 못할 때 전선 수명 단축으로 인한 경제적 손실을 감안한다면 그 역할이 얼마나 중요한가를 인식 할 수 있었다.

본고에서는 전력케이블에서 반도체층을 사용하게 된 배경과 요구 특성을 논하였으며 전선수명 향상을 위해서 Compound 제조 과정에서 뿐 아니라 사용 재료의 선택 및 Formulation의 개발에 더욱 노력해야 할 것으로 판단된다.