

# 반도전층내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향

한재홍<sup>\*</sup>, 김상준<sup>\*\*</sup>, 권오형<sup>\*\*\*</sup>, 강희태<sup>†</sup>, 서광석<sup>‡</sup>

(\*전력연구원 선임연구원, \*\*전력연구원 책임연구원, \*\*\*한국전력공사 지중배전부장, †한국전력공사 송배전개발부장, ‡고려대 재료공학과 교수)

## 요 약 문

본 고를 통하여 전력케이블에서의 반도전층의 역할 및 중요성에 관하여 좀 더 정확하게 인식되었으면 한다.

## 1. 서 론

본 고는 전력연구원 연구과제인 “배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축”의 연구 수행 중 전력케이블의 반도전층내에 들어 있는 불순물 또는 외부로부터 침투된 불순물이 전력케이블의 수명에 미치는 영향에 관한 총설로서, 그 동안 문헌조사 및 해외출장을 통하여 수집한 자료를 정리한 원고이다.

본 총설은 전력케이블에 사용되는 반도전층 재료의 변천, 반도전층의 역할 및 반도전층내에 들어 있는 불순물의 역할 등에 관한 내용이 정리되어 있다. 본 고를 통하여 반도전층내에 들어 있는 불순물은 전력케이블의 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 점을 강조하여 국내 지중배전 케이블에서도 불순물이 제거된 반도전 컴파운드를 사용해야 한다는 점을 강조하였다.

최근 반도전 재료의 개선을 통하여 전력케이블의 성능을 크게 개선시킬 수 있다는 연구결과 및 실용화 연구가 이루어지고 있는데, 이 새로운 개선방법은 반도전층으로부터 불순물을 제거한다는 단순한 방법이 아니라 반도전층을 이루는 반도전 컴파운드의 조성을 변화시키는 방법이다. 이는 단순히 전도성 카본블랙의 종류만을 바꾸는 것이 아니라 반도전 컴파운드에 사용하는 고분자 수지를 개질하거나 또는 일정 종류의 첨가제를 첨가하는 방법으로서, 본 고에서는 이들 방법에 대하여 간략하게 소개하였다.

이와 같은 고찰을 통하여 본 고에서는 전력케이블에 있어서 절연재료에 관한 연구도 물론 중요하지만 반도전층도 매우 중요한 역할을 하며, 나아가서 전력케이블의 성능을 현저히 향상시키기 위해서는 절연재료 뿐만 아니라 반도전층 재료에 관한 연구도 필요하다는 점을 강조하고자 한다.

현재 우리가 사용하고 있는 전력케이블은 일반적인 경우 도체를 중심으로 도체차폐층 (conductor shield, strand shield), 절연층 (insulation), 절연차폐층 (insulation shield), 중성선 (neutral wire) 및 외피 (jacket)로 이루어져 있다. 국내에서는 최근 절연차폐층과 외피 사이에 부풀음테이프 (water tight tape)를 사용하기도 한다. 각 층은 각기 고유의 역할이 있으며 각 층의 재료가 이상 현상을 보이면 이는 결국 절연층의 절연파괴를 유발하고 이는 다시 전력케이블의 고장으로 이어진다 [1, 2]. 지금까지 많은 연구자들이 전력케이블 또는 전력케이블용 재료의 전기적 특성 측정 및 현상 연구에는 많은 노력을 기울여 왔는데, 이들 연구의 대부분은 절연층에 집중되어 왔다.

최근 전력케이블의 반도전층 역할에 관한 중요성이 새롭게 인식되면서 이에 대한 연구가 증가하고 있다. 예를 들어, 절연층과 반도전층 또는 차폐층/절연층 계면에 있는 불순물이나 결함이 전력케이블의 수명에 결정적인 요인으로 작용한다는 것은 잘 알려진 사실이며, 특히 금속성의 불순물은 고분자의 산화반응에도 참여하여 열화를 촉진하는 역할을 한다 [3-6]. 또한 이온성 불순물이 수트리 성장을 촉진하고 [7], 고분자내의 사슬을 열화시켜 극성기를 부여함으로써 수분의 유입을 증가시킬 수 있으며 절연층 내에 금속양이온이 유입되었다는 간접적인 증거가 발견되기도 하였다 [8]. 또한 최근의 연구결과에 따르면 반도전층에 존재하는 많은 이온성 불순물이 전계와 수분의 작용으로 절연층내로 유입될 수 있음이 증명되었다 [9, 10]. 그러므로 전력케이블의 수명연장 및 신뢰성 확보라는 면에서 절연층으로의 불순물 유입은 철저히 억제되어야 한다.

반도전층에 관한 연구는 먼저 반도전층 내에 들어 있는

이온성 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향에 관한 연구를 시작으로 최근에는 반도체층 재료의 성능개선을 통하여 전력케이블의 절연파괴강도를 증가시키는 방법을 찾고 나아가서 전력케이블의 절연두께 감소화까지 연구하고 있는 실정이다 [11-14].

이와 같이 전력케이블의 반도체층 재료, 즉 반도체 재료에 들어 있는 이온성 불순물이 전력케이블의 수명에 미치는 영향이 지대하므로 전력케이블의 성능향상을 위해서는 반도체층에 관한 연구에도 많은 관심을 기울여야 한다.

따라서 본고에서는 전력케이블의 신뢰도에 미치는 반도체층의 영향에 관하여 집중적으로 다루고자 한다. 특히 반도체층 내에 들어 있는 이온성 불순물이 전력케이블의 수명에 어떤 영향을 미치는 지에 관한 고찰을 통하여 전력케이블의 성능향상에 반도체층의 개선이 중요한 역할을 할 수 있다는 점을 강조하고자 한다.

## 2. 반도체층의 변천 및 역할

### 2.1 반도체층의 역사 [15]

전력케이블에서 반도체층은 절연층과의 상용성이 매우 중요하기 때문에 반도체층 재료의 변천은 절연층의 변천 역사와 같이 한다. 즉, 열가소성 수지를 절연체로 사용할 경우에는 반도체층의 원재료도 열가소성 수지를 사용해야 한다. 반면에 사용 전압이 높아짐으로서 발생하는 열적, 기계적 성질을 보완하기 위하여 열경화성 수지를 절연층 원재료로 사용할 경우 반도체층 원재료도 마찬가지로 열경화가 가능한 수지를 사용해야 한다.

반도체층 재료의 시대별 변천과정이 표 1에 정리되어 있는데, 각 시대별 반도체층의 역사를 아래에서 간략하게 언급하면 다음과 같다.

#### 2.1.1 초기 반도체층

반도체층의 초기 형태는 전기전도성을 부여하기 위해 카본블랙이나 graphite가 함유된 면테이프 (cotton tape)를 사용하였으나, 면이 쉽게 헤지는 (fraying) 성질로 인하여 나일론으로 대체되었다. 면의 헤짐으로 생긴 면단 (loose end)은 전계를 집중시켜 절연층의 파괴를 일으키기도 하였는데, 이러한 차폐층은 butyl과 오일계 고무로 절연된 초기 케이블에 사용되었다.

그 다음으로 사용된 것은 직물 테이프에 소위 "skim"이라는 얇은 층을 입힌 반도체고무를 충전한 skim tape이다. Skim tape는 고무 절연층으로부터 쉽게 박리할 수 있었고 수 년동안 PE나 XLPE 케이블에 사용되었으며, 1979년까지도 그와 관련된 특허가 출원되기도 하였다 [16]. 하지만 이 skim tape도 헤짐현상으로 인한 전계 집중 문제가 있었다 [17, 18].

최초의 압출 반도체층은 2차 대전 이후 낙뢰나 전자계 임펄스와 같은 전기적 서어지로부터 미사일 조정 케이블을

Table 1. Change of raw materials for semicon shields in power cables

Years	Materials/Techniques	Characteristics
Before 1970's	Cotton tape with carbon black or graphite ↓ Nylon tape with carbon black or graphite ↓ Skim tape ↓ Thermoplastic/thermoset semicon compounds	→ Breakdown by fraying  → Used for PE/XLPE cables Loose fiber end
1970's	Insulation: thermoplastic → thermoset Extrusion methods: cond. shield → ins. shield → ins. shield cond. shield/insulation → ins. shield cond. shield/ins./ins. shield  Deformation resistive shield	→ Dust, contamination, non-uniform adhesion  → Triple coextrusion Too strong adhesion
1980's	Insulation: thermoset Insu. shield: strippable type Extrusion: triple coextrusion Curing: steam cure → gas cure Ins. shield: strippable type  Contamination/impurities: Revision of compounding facilities	→ Reduced contamination → Reduced voids  → Reduced impurity content
1990's	Strippable ins. shield Acetylene black Processability/impurities Revision of furnace black	→ Reduced impurity content → Super-smooth/super-clean → Improved processability Reduced impurity content

보호하기 위하여 도입된 열가소성 외피재료이다. 카본블랙과 고분자가 단순히 혼합된 열가소성재료는 지중케이블에 적용되기도 하였으나, 비슷한 시기에 지중 배전케이블을 위한 XLPE로 된 가교 반도체층이 개발되었다.

#### 2.1.2 1970년대의 반도체층

1970년대 초반에는 가교된 케이블보다는 경제적으로 유리한 열가소성 케이블이 주류를 이루었으나, 사고 발생률이 점차 증가하는 경향이 나타나 교체되기 시작하였다. 초기 열가소성 케이블의 제조공정은 도체차폐층, 절연층, 절연차폐층의 순서로 한층씩 압출하는 방식이므로 상당한 양의

면지와 불순물이 절연층과 절연차폐층의 계면에 유입되는 현상이 발생했다. 또한 각 층을 차례로 압출해야 하므로 차폐층과 절연층과의 접착이 불균일해지고 이로 말미암아 부분방전이 유발되기도 하였다. 한편 높은 도체온도 등을 고려하여 가교된 차폐층이 도입되기도 하였다.

열가소성의 절연차폐층은 높은 사용온도에서 물리적 변형을 일으키는 문제를 유발하는 현상이 발견되어 70년대 중반부터 전도성이 좋으면서도 변형이 잘 안 일어나는 절연차폐층 개발이 요구되었다. 이러한 절연차폐층을 개발하기 위하여 초기에는 용융점이 높은 고분자 수지를 첨가하기도 하였다.

70년대 후반 절연층과 절연차폐층을 동시에 압출하는 공압출 방식이 도입되면서 불순물의 유입이 감소하여 양질의 케이블을 제조할 수 있는 전기가 되었다. 그러나 3층이 동시에 가교되므로써 가교공정이 매우 까다로워 졌으며 절연차폐층이 절연층에 강하게 결합하여 케이블 접속작업이 어려워지는 문제가 발생하였다.

2.1.3 1980년대의 반도전층

70년대 후반 트리에 강한 열가소성 절연층이 개발되었음에도 80년대에는 열가소성 케이블이 꾸준히 감소하여 거의 사용되지 않게 되었다. 가장 중요한 반도전 재료 개발은 80년대 초반에 이루어진 박리성 (strippability)이 좋은 절연차폐층의 개발 [19] 및 세 층을 동시에 압출하는 3중 압출 (triple extrusion) 공정의 도입이다. 또한 건식가교와 수트리 억제형 가교폴리에틸렌 (tree-retardant XLPE ; TR-XLPE)을 사용하는 추세가 급증하였고 [20-22], 결국 80년대 중반 이후 3중 압출 공정이 일반화되면서 도체차폐층과 절연층 사이의 계면에 불순물 유입이 감소하게 되었다. 그러나 트리를 성장시키는 불순물을 완전히 차단하지는 못하여 원재료 및 컴파운딩 과정에서 불순물을 줄이려는 노력이 시도되었다. 이를 위하여 모든 설비들을 개량하였으며, 불순물을 검출할 수 있는 장비들을 컴파운딩 설비에 도입하였다 [23]. 그 결과 불순물의 중요한 원천인 카본블랙에서 표 2에 보인 것처럼 불순물의 함량이 매우 낮아졌으며, 입자형태의 불순물이 감소하고 가공성을 높임으로서 표면 평활도가 개선되었다. 일본에서는 불순물 농도가 매우 낮은 acetylene black을 사용하였는데, 이는 주로 도체차폐층에 사용되었다.

2.1.4 1990년대의 반도전층

80년대의 연구가 계속적으로 이루어지고 있으며, 절연차폐층의 경우 박리가 넓은 온도범위에서 완전히 깨끗하게 되고 차폐층의 두께에 따라 박리성이 달라지는 종전의 문제가 해결되었다. 한편 도체차폐층의 경우에는 acetylene black을 사용한 super-smooth/super-clean 차폐층의 우수성이 인정되어 북미와 유럽에서 사용되고 있다. 그러나 acetylene black은 경제성 문제 때문에 그다지 많은 양이 사용되는 것은 아니다. 예를 들어, 유럽과 북미의 경우 acetylene black의 사용량은 전체의 약 5% 수준인 것으로

알려져 있다 [24].

그 동안의 경험을 보면 acetylene black을 사용하면 고분자 수지와 분산성이 좋지 않아 컴파운드의 점도가 증가하고 [25] 따라서 가공이 높은 온도에서 이루어져야 하거나 또는 압출 토크가 높아지므로 실제 케이블 제조가 어렵다는 문제점이 대두되었다. 이에 종전의 furnace black의 불순물을 제거하고 고분자 수지와의 분산성을 향상시켜 반도전층과 절연층 간의 평활도를 현저하게 향상시키고 불순물 함량이 현저히 저하되고 고분자 수지와의 분산성도 좋은 extra clean furnace black이 개발되었다 (예: Cabot Corporation의 Black Pearl 3700).

표 2에 나와 있듯이, 종래의 furnace black은 불순물의 함량이 매우 높고 acetylene black의 불순물이 가장 낮으며 최근의 clean furnace black은 종래제품에 비하여 불순물의 함량이 현저히 낮다.

Table 2. Typical blacks used for semiconductive shields : contamination levels

	Conventional furnace black	Clean furnace black	Acetylene black	Extra-conductive black
Volatile content @ 900°C, wt%	1.0	1.0	0.3	0.5
Particle contamination on 325 mesh screen (ppm)	20	<5	<2	<30
Total sulfur content, wt%	0.75	0.05	0.001	0.30
Ash content, wt%	0.3	0.02	<0.01	0.5
ICP of cations in ash (ppm)				
Al	30	3	<1	100
Ca	300	6	<1	5
Cu	<1	<1	<1	<1
Fe	100	20	5	3
Mg	150	3	<1	8
P	3	<1	<1	5
K	50	50	<1	2
Si	180	12	5	125
Na	750	10	<1	30
Zn	2	<1	<1	<1

2.2 반도전층의 역할

현재 국내에서 가장 많이 사용되는 22.9 kV급 지중배전용 전력케이블의 구조는 그림 1과 같이 중심에서부터 도체 (conductor), 도체차폐층 (conductor shield 또는 strand shield), 절연층 (insulation), 절연차폐층 (insulation shield),

중성선 (neutral wire), 외피 (jacket)로 구성되어 있다.

지중배전용 전력케이블은 절연층의 내·외부에 반도체성을 갖는 고분자 차폐층을 사용하는데 이러한 반도체층의 재료로는 에틸렌 비닐 아세테이트 (Ethylene Vinyl Acetate ; EVA), 저밀도 폴리에틸렌 (Low density polyethylene ; LDPE) 또는 에틸렌 에틸 아크릴레이트 (Ethylene Ethyl Acrylate; EEA), EPDM (Ethylene Propylene Diene Terpolymer) 등의 올레핀계 고분자에 다량의 전도성 카본 블랙, 산화방지제, 가공조제 또는 기타 첨가제 등을 혼합하여 제조한다. 이러한 반도체성 재료의 특성은 첨가하는 카본 블랙의 종류와 사용한 고분자의 성질에 크게 좌우된다.

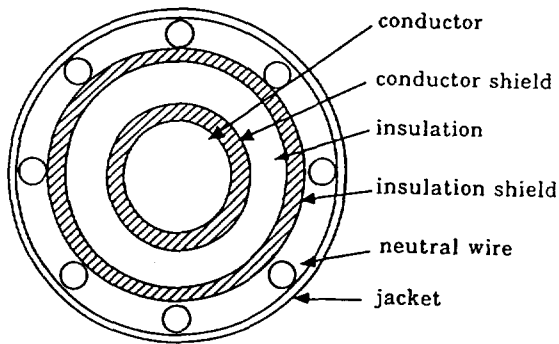


Fig 1. Structure of 22.9 kV CN/CV cables

전력케이블에서 반도체층의 역할은 크게 두 가지로 정리할 수 있다.

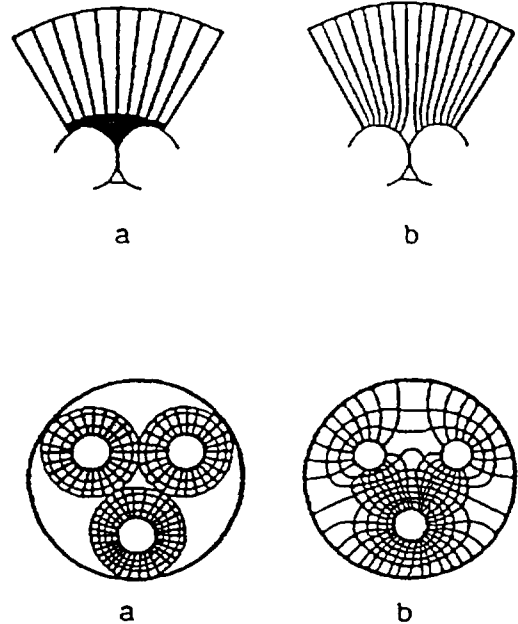
- (1) 전계차이 완화 및 방사 전기장 균일화 효과
- (2) 금속/고분자의 직접 접촉 방지 :
  - 도체 금속 표면거칠기 영향 배제
  - 자동산화반응에 의한 열화 억제

전력케이블의 경우 절연층에 걸리는 전압이 매우 높으므로 전기장이 방사형으로 균일해야만 국부 고전계가 형성되지 않는다. 그림 2는 도체차폐층의 유무에 따른 전력케이블에서의 전계분포를 나타낸 것이다 [26]. 그림에서 알 수 있듯이 도체차폐층이 있는 경우에는 전계의 분포가 균일하지만, 도체차폐층이 없는 경우에는 도체의 불규칙성으로 인하여 전계분포가 불균일함을 알 수 있다. 따라서 도체는 반드시 반도체층으로 싸여야 하며 절연층의 외부에도 다시 반도체층이 있어야 한다.

이외에도 반도체층은 도체층/절연층 또는 절연층/중성선 사이에 전이상 (transition phase)을 제공하여 고분자 절연체인 폴리에틸렌과 알루미늄 또는 구리 등의 금속이 직접 접촉할 경우 발생할 수 있는 자동산화반응 (autocatalytic oxidation)을 억제하므로써 고분자 절연체의 급속한 열화를 억제하는 효과가 있다 [6]. 또한 고분자 반도체층은 각 도체

선간의 갭을 채워주는 역할도 하므로 부분방전을 억제하는 효과도 있다. 고분자 절연체, 특히 폴리에틸렌의 산화반응 및 산화방지제에 대하여는 다음 절에서 보다 상세하게 언급할 것이다.

절연층을 싸고 있는 두 반도체층은 사용목적이 다소 다르므로 요구되는 물성에도 차이가 있다. 도체차폐층은 전력케이블의 전기적 신뢰성을 결정하는 중요한 역할을 하는데,



(a) with and (b) without conductive shield

Fig 2. Electrical field distribution

이때 가장 중요한 요소는 도체차폐층과 절연층간에 존재하는 돌출물 (protrusion)의 유무이다. 도체차폐층과 절연층간에 돌출물이 있을 경우 이 부분에 전기장이 집중되어 국부적으로 절연파괴를 일으키고 이 미세한 절연파괴가 장시간에 걸쳐 반복적으로 일어나 결국 전력케이블 전체를 파괴시키는 역할을 한다 [3-5]. 따라서 전력케이블의 절연신뢰도를 증가시키기 위하여는 도체차폐층과 절연층 사이에 돌출물이 없어야 하며 평활해야 한다. 또한 도체차폐층과 절연층간의 접착력도 우수해야 하는데, 두 층간의 접착력이 좋지 않으면 층간의 delamination 또는 shrink back 현상이 일어나는데 이러한 곳에서 부분방전이 일어나면 전력케이블이 본래의 성능을 발휘하지 못하게 된다. 참고로 그림 3에 전력케이블에 존재하는 결함 및 불순물을 도식적으로 나타냈다.

절연층의 외부에 싸고 있는 절연차폐층은 외부반도체층이라고도 불리며 중성선을 포함하고 있다. 이러한 절연차폐층은 도체차폐층이 가져야 하는 전기전도성을 지녀야 함은 물론 접촉작업시 필요한 박리성 (easy strippability)을

가져야 한다 [27]. 만약 박리가 잘 되지 않으면 작업시 절연체에 손상을 입혀 전력케이블의 사고를 초래할 수 있으며, 너무 쉽게 박리되면 절연층과 반도전층의 계면이 쉽게 분리될 가능성이 있다.

### 2.3 반도전 재료의 구성요소

전력케이블에 사용되는 반도전층을 구성하는 요소중에서 카본블랙은 반도전재료의 주요 특성인 기계적 특성 및 전기전도성 등을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 가교화 반응(crosslinking)을 위하여 가교제가 사용되며, 가공시 또는 사용중 발생할 수 있는 산화반응을 방지하기 위해 산화방지제를 사용한다. 또한 고분자에서 카본블랙의 분산을 돕고 가공이 쉽도록 하기 위해 소량의 가공조제를 사용하며, 무기질 충전제와 고분자간의 계면결합력을 증가시키기 위하여 계면결합제 등을 사용하기도 한다. 고분자 수지에 전도성을 부여하기 위한 보강성 카본 블랙을 제외한 거의 모든 종류의 카본 블랙의 경우 무게비로 30-40% 정도를 사용한다.

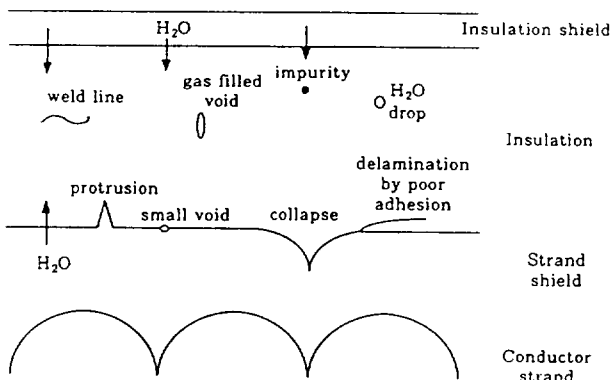


Fig 3. Typical defects and impurities in power cables

재료에 전도성을 주는 카본블랙은 카본블랙 자체의 고유한 성질로 인하여 충전할 수 있는 임계함량이 존재한다. 우선 카본블랙 자체는 물성을 강화하는 기능이 있기는 하나 임계함량 이상이 되면 충격강도 (impact strength)나 흐름성을 악화시킨다.

그림 4에 카본블랙의 함량에 따른 기계적 성질 및 전기전도도의 관계가 개략적으로 나와 있다. 일반적으로 고분자에 무기질 충전제가 첨가되면 임계함량까지는 기계적 특성상의 변화가 크지 않다가 임계함량이 지나면 기계적 특성이 급격히 저하된다 [28]. 마찬가지로 현상이 반도전재료에서도 일어나는데 카본블랙의 함량이 임계함량을 초과하면 기계적 특성이 급격히 저하하는 것으로 알려져 있다. 반면에 전기전도성은 카본블랙의 함량에 따라 좋아진다 [29]. 그러므로 전기전도성의 증가와 기계적 특성의 저하 사이의 적

정선을 찾아야 한다. 부수적으로 올레핀계 고분자에 섞여 있는 카본블랙은 산화방지 및 자외선 차단 효과가 있다 [30].

반도전 재료가 평활하기 위해서는 카본블랙이 다음의 두 가지 특성을 갖고 있어야 한다 [15, 25, 31]. 첫째는 우수한 분산성 (dispersibility)으로, 이는 카본 블랙의 구조, 입자크기, 표면화학 등에 의해 결정된다. 둘째로는 grit 혹은 micro residue라고 불리는 잔류물이 적어야 한다. 카본블랙은 열분해 또는 부분연소법 (partial combustion)으로 제조되며 제조공정은 제품특성에 큰 영향을 준다. 제조공정 중 사용하는 냉각수의 종류에 의한 영향도 매우 크다. 만약 grit가 생성되면 단단해서 분산되기 어렵고, 너무 작은 잔류물인 micro residue가 존재하면 제거가 곤란하므로 반도전층/절연층 계면에서 결함으로 존재한다.

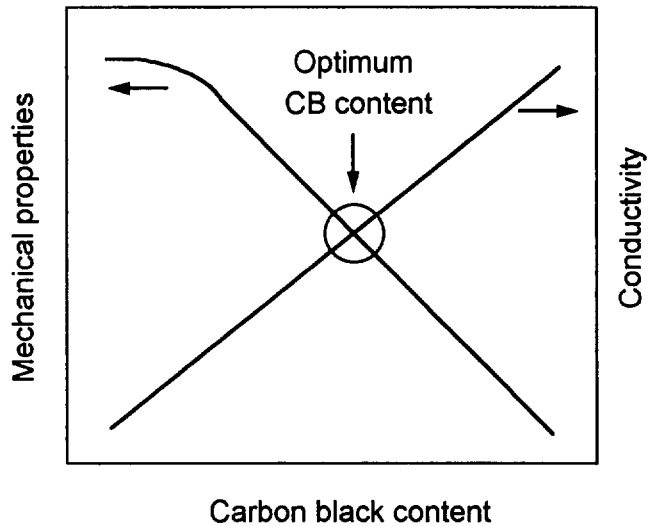


Fig 4. Mechanical properties and conductivity of semicon compounds as a function of carbon black content

### 2.4 불순물의 형성

전력케이블내에 형성되는 불순물은 여러 가지 경로를 통하여 반도전층 또는 절연층 내로 유입되는데, 그 경로와 불순물이 전력케이블의 수명에 미치는 영향 등이 그림 5에 개략적으로 나와 있다. 그림 5에 나와 있는 바와 같이, 전력케이블내 불순물 형성 요인은 크게 다음 4 가지 면에서 고려될 수 있다.

- (1) 고분자 수지내의 불순물
- (2) 압출공정 중 발생하는 불순물
- (3) 취급과정 중 발생하는 불순물
- (4) 운전도중 발생하는 불순물
  - 지하수에 녹아 있는 불순물 유입
  - 반도전층에 있는 불순물의 유입

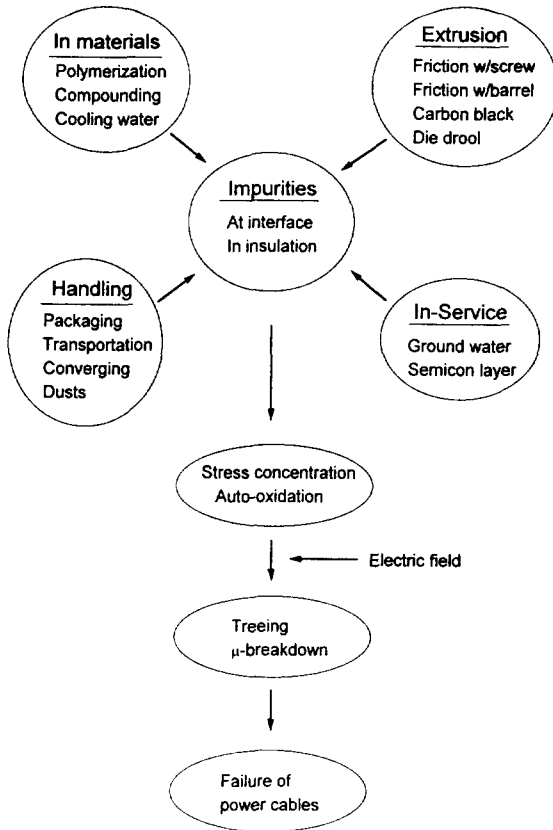


Fig 5. Formation of impurities and its effects on performance of power cable

첫째, 고분자 수지내에 포함되어 있는 불순물은 절연재료 자체에 들어 있는 불순물로 고분자의 중합과정이나 첨가제 사용시에 유입될 수 있으며 또한 고분자 제조과정 중 공기나 냉각수에 섞여 있는 불순물의 유입도 가능하다. 이들 불순물을 억제하기 위해서는 고분자 중합관의 내부를 항상 깨끗이 보관하고 pelletizing시 탈이온된 냉각수를 사용해야 하며, 이 냉각수에 들어 있는 이온성 불순물의 농도를 항상 감시해야 한다.

둘째, 압출과정에서 발생하는 불순물로서 압출기의 screw 마모에 의한 불순물과 압출시 발생하는 die drool 현상이 있다. 이들 불순물은 반도체층과 절연층에 모두 해당되는 사항이다. 고분자 펠렛을 칼로 자르면 칼로부터 금속성 불순물이 고분자 표면에 묻어 나는 현상은 간단한 실험에 의해서도 확인할 수 있다. 압출과정시 발생하는 불순물은 컴파운드의 압출토크가 크게 걸릴수록 압출과정시 screw 또는 barrel로부터 묻어나는 불순물의 농도가 높을 것으로 예측된다. 특히 반도체층 압출시 반도체층에 들어 있는 카본블랙은 경도가 높으므로 이 카본블랙이 screw 또는 barrel과 마찰시 불순물이 유입될 수도 있다. 따라서 압출과정시 유입되는 불순물의 함량을 줄이기 위해서는 screw 또는 barrel용 금속을 불순물이 적거나 또는 쉽게 묻어나지 않는 종류의 금속을 사용하거나 되도록 압출 토크가 크게 걸리

지 않도록 주의해야 한다. Die drool 현상은 압출가공시 고분자 찌꺼기가 die 출구에 남는 현상이다. 이러한 고분자 찌꺼기가 die 온도에 의해서 탄화되었다가 어느 순간에 압출물과 섞여 나오면 절연층과 반도체층 사이의 계면에 돌출물로 존재하여 케이블의 수명에 나쁜 영향을 준다. Die drool 현상의 원인으로는 수분, 저분자량 성분, die swell, 그리고 정전기 발생 등이 복합적으로 작용하는 것으로 보이나, 그 중에서 재료내에 있는 수분이 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 어느 압출기를 사용하던지간에 상관없이 die drool 현상은 발생한다. 일반적으로는 숙련된 작업자가 주기적으로 수작업에 의해서 제거하는 방법이 사용되는데, 이때 세심한 주의를 기울여야 한다. 또한 재료적인 입장에서 die drool이 적게 발생하는 고분자 수지의 개발에 관한 연구도 병행되어야 할 것이다.

셋째, 반도체 컴파운드의 handling 과정 중 유입되는 불순물로 주로 포장과정이나 이송과정중에 발생한다. 이들은 주로 먼지 또는 포장 찌꺼기 등으로서 사용하기 전에 air shower를 완벽하게 해서 불순물이 유입되지 않도록 해야 한다. 또한 모든 공정이 외부 대기에 노출되지 않도록 주의해야 한다.

넷째, 전력케이블이 운전되는 환경 (in-service environment)에서 발생하는 것이다. 이온성 불순물을 함유한 지하수가 케이블의 절연차폐층을 통해 유입되거나, 외부로부터 수분이 절연차폐층을 통하여 절연층으로 침투될 때 절연차폐층내에 있던 수용성의 불순물이 유입된 수분에 녹아 절연층으로 침투되는 경우도 있다. 이외에도 반도체층에 형성된 불순물이 절연층내의 불순물의 농도와의 차이 때문에 확산에 의해서 절연층으로 유입될 수도 있다.

이와 같이 절연층 내에 이온성 불순물이 형성되는 경로는 여러 가지 있는데, 카본블랙에 들어 있는 불순물의 제거를 제외한 모든 부분은 특별히 어려운 기술을 요구하는 것이 아니라 전체 공정, 특히 취급공정을 엄격하게 관리해야 한다.

불순물 형성요인이 무엇이던지간에 금속성 이온 불순물은 Fick의 확산법칙에 의하여 절연층으로 유입되는 것으로 보이는데, 이에 대하여는 본고에서는 취급하지 않기로 한다.

### 3. 국내 수거케이블 반도체층의 불순물 분석

현재 우리가 사용하고 있는 전력케이블에 있어서 이온성 불순물의 영향을 극소화시켜 케이블의 성능을 현저하게 향상시키기 것이 바람직하다. 이를 위해서 선행되어야 할 일은 현재 우리가 사용하고 있는 전력케이블의 상황을 정확하게 파악하는 것이다. 이에 최근 국내에서 발생한 지중배전선의 사고 중 반도체층과 연관성이 있다고 판단되는 사례를 몇 가지 소개하고자 한다.

먼저 국내에서 제조되어 사용되다가 최근 사고를 유발한

지중 배전케이블의 반도전층을 수거하여 불순물의 종류 및 함량을 측정된 결과가 표 3에 나와 있다 [32]. 이 표를 보면 알 수 있듯이, 반도전층 재료에는 많은 양의 금속성 불순물이 포함되어 있음을 알 수 있는데, 다음과 같은 특징이 있다.

Table 3. Impurities in removed domestic power cables (ppm)

	Cables	Element						
		Ca	Fe	Zn	Cu	Mg	K	Ni
Insulation	A84F1	0.107	-	0.02	0.03	0.02	0.02	-
	B87F2	0.162	-	0.05	0.03	0.01	0.04	-
	B87S2	-	-	0.01	-	-	0.02	-
	C84F1	0.7	-	-	-	0.2	-	-
	C94F1	2.3	-	-	1.68	12.5	-	0.47
	C94F2	1.563	0.67	-	0.34	0.66	-	0.33
Conductor shield	A84F1	265.9	13.4	-	-	26.4	31.0	13.2
	A85F1	356.8	108.8	-	-	40.3	-	-
	B87F2	240.1	121.2	-	9.9	351.7	-	-
	C84F1	298.5	2.5	-	12.2	44.0	-	-
	C94F1	45.5	22.2	-	18.9	129.1	-	21.2
	C94F2	63.3	22.9	-	165.1	2159.1	-	18.8
Insulation shield	A84F1	343.7	78.4	-	6.2	7379.5	80.0	28.2
	A85F1	439.7	123.7	-	24.7	8720	-	-
	B87F2	288.3	119.5	-	4.5	20.38	-	-
	C84F1	395.8	24.5	4317.2	28.0	591.2	-	-
	C94F1	274.0	36.2	-	72.2	1761.8	-	13.3
	C94F2	221.3	38.0	-	174.4	12729	-	13.7

-: Not detected or less than 0.05 ppm

서는 많은 함량의 Mg 성분이 검출된 반면 다른 제품에서는 Mg 대신 Zn 성분이 검출되고 있다. 국내 제품의 경우 불순물의 총 함량이 16,000 ppm에 이르는 제품도 있다. 특이한 사실은 동일 목적으로 사용되는 외국제품의 경우 불순물 총 함량이 100 ppm을 넘지 않는다. 특히 외국 제품의 경우 Mg와 Zn 함량이 수 십 ppm 정도로서 국내 제품에 비하여 월등히 낮다.

Table 4. Impurity analysis data of commercial insulation shield materials

Element	Domestic A	Domestic B	Domestic C	Foreign
Ti	0.606	1.041	0.956	0.054
Ca	103.907	67.919	262.675	8.574
Mn	1.692	0.977	1.907	0.430
Si	-	-	42.617	-
Fe	17.531	15.598	19.196	-
Pb	-	-	5.564	-
Al	69.132	70.817	25.118	12.748
Zn	690.510	634.861	803.074	6.254
Cu	0.413	0.278	-	0.348
V	14.688	6.514	2.314	-
Mg	3286.816	3615.065	14757.212	16.715
Cr	1.410	1.457	3.835	-
K	20.379	20.477	-	-
Na	51.195	51.102	74.242	42.187
Mo	1.400	0.877	7.221	-
P	15.515	16.529	70.388	2.664
Ni	7.074	3.586	2.552	0.173
<b>Total</b>	<b>4282.268</b>	<b>4507.098</b>	<b>16078.681</b>	<b>90.147</b>

Method: ICP-AES, dry ashing/filtering, ~ 1g

-: Not detected or less than 0.05 ppm

(1) 도체차폐층과 절연차폐층에는 상당히 많은 종류의 불순물이 들어 있는데, 양 반도전층 모두 불순물 종류는 거의 비슷하나 그 함량은 큰 차이가 있다.

(2) 도체차폐층의 경우 총량이 대부분 400 ppm 정도 이하인데, 일부 회사의 경우 수 천 ppm에 이르는 Mg 성분이 검출되기도 한다.

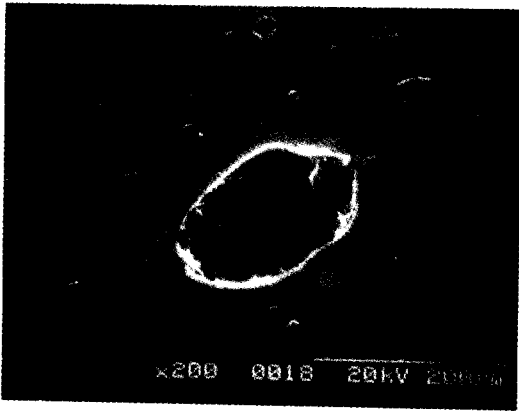
(3) 절연차폐층의 경우 불순물의 함량은 매우 높아 최대 10,000 ppm을 넘는 경우도 있다. 특히 Mg와 Zn 성분이 가장 많으며 Ca, Na, Fe 등의 불순물도 높은 편이다.

이와 같이 국내 케이블의 반도전층, 특히 절연차폐층의 금속성 불순물의 함량이 높은 것으로 관찰되었으므로 이를 확인하기 위하여 현재 국내에서 사용하고 있는 절연차폐용 반도전 컴파운드 원재료에 대한 불순물 분석을 실시하였으며 그 결과가 표 4에 나와 있다. 이 표를 보면 제조회사별로 금속성 불순물의 종류는 거의 비슷하나 그 함량은 큰 차이를 보임을 알 수 있는데, 일부 제품에

위 분석결과에서 보듯이, 약 10여년 전 도체차폐층과 절연차폐층의 불순물 함량이 매우 다르다는 결과는 매우 흥미로운 분석결과이다. 반도전층 내에 들어 있는 불순물의 영향에 대한 지식 숙지 유무에 상관없이, 도체차폐용 반도전 컴파운드는 수트리 발생과 연관이 있다고 생각하여 그대로 두고 (즉, 비교적 불순물 함량이 적은 고급의 카본 블랙을 사용했고), 절연차폐층은 수트리 발생과 연관이 없다는 판단하에 절연차폐용 반도전 컴파운드 제조시 불순물 함량이 많은 저급의 카본블랙을 사용했을 가능성이 매우 높다. 그 결과 최근 국내에서 사고난 일부분의 케이블에 외도로부터 성장한 수트리가 전체 케이블을 뒤덮고 있을 정도로 손상을 입었을 가능성이 매우 높다.



(a) Insulation surface



(b) Insulation shield surface

Fig 6. SEM pictures of contamination at insulation shield-insulation interface

그림 6에 보여 주는 사진은 최근 사고난 케이블을 분석하는 과정 중 발견한 현상으로서, 이는 고분자 덩어리가 절연차폐층과 절연층 계면에 박혀 있는 모습이다 [32]. 이 고분자 덩어리는 압출과정 중 분산되지 못한 것으로 보아 탄화된 고분자 찌꺼기 덩어리임이 분명하다. 이 고분자 덩어리는 절연차폐층을 받기면 거의 전체 케이블에 덮혀 있는 것으로 판명되었으며, 최근 제조된 새 케이블에서도 발견한 바 있다. 이 고분자 덩어리는 전술한 바 있는 소위 die drool 현상에 의하여 형성된 것으로 보이는데, 이는 전계집중의 원인이 되고 이 부분으로부터 수트리가 성장한다고 할 수 있다. 이 탄화덩어리는 정상적인 경우 압출기 끝의 breaker plate에 screen pack이 설치되었다면 충분히 예방할 수 있었을 것으로 생각된다. 중요한 사실은 이러한 고분자 덩어리가 절연층/절연차폐층 계면에서 발견되면 이는 금속성 불순물의 함량을 줄인다해도 큰 문제점을 야기할 가능성이 있다는 사실이다.

그림 6을 보면 절연층 표면에 상당히 많은 기공이 존재하는 것을 알 수 있는데, 이러한 현상이 국내에서 제조된 전력케이블에서 공히 발견되는 현상인 지에 관한 조사가 현재 진행 중에 있다. 이 기공은 마치 절연층 내부로부터 기체가 밖으로 분출되면서 형성된 것으로 보인다. 이 기공은 케이블 가교 공정 중 케이블의 각 구성층, 특히 절연층이 가교되는 되는 동안 수분 또는  $CH_4$  가스가 발생하는 것으로 알려져 있는데, 이들이 급작스럽게 분출되기 때문인 것으로 생각 된다. 중요한 것은 이들 기공 주위에서 전계집중 현상이 발생할 가능성이 매우 높아 케이블을 크게 손상시킬 우려가 있다. 실제로 이 케이블은 절연차폐층으로부터 성장한 수트리가 전체 케이블을 뒤덮고 있는 것으로 판명되었는데, 이 기공이 절연차폐층/절연층 계면의 탄화덩어리와 함께 절연차폐층으로부터 성장한 대규모 수트리의 한 원인이 될 수 있다.

국내 케이블에서 발견되는 반도체층의 특징은 도체차폐층의 가교도이다. 현재 국내에서 사용하고 있는 케이블은 가교방식을 채택하고 있기 때문에 절연차폐층은 물론 도체차폐층도 가교되어 있어야 한다. 종래에는 반도체층은 단순히 전극역할만을 하는 것으로 알려져 있기 때문에 반도체층이 어느 정도의 가교도를 유지해야 하는 지에 관한 규정은 국내는 물론 외국의 경우에서도 찾을 수 없다.

현재 국내에서 사용되고 있는 반도체층의 가교도 현황을 알아보기 위하여 약 20종의 케이블에 대한 도체차폐층의 가교도를 조사하였으며 그 결과가 표 5에 나와 있다.

이 표를 보면 알 수 있듯이 국내 케이블의 경우 도체차폐층의 가교도는 케이블마다 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 특히 A, B 두 회사의 경우 도체차폐층의 가교도는 대체적으로 거의 비슷한 수준을 유지하기는 하나 일부 낮은 가교도를 보이는 경우가 종종 있다. 그러나 C 회사의 경우 도체차폐층의 가교도는 일정한 수준을 보이지 못하고 편차가 심한 것으로 나타났다. 특히 C회사의 경우 도체차폐층의 가교도가 20% 미만인 케이블이 많이 발견되었다. 이 회사의 도체차폐층의 경우 94년도 케이블도 30-40% 정도의 낮은 가교도를 보인다. 참고로 C 회사의 경우 도체차폐층의 가교도가 낮은 케이블의 경우 절연층에서도 도체쪽의 절연층은 가교도가 매우 낮다는 사실을 밝혀 둔다.

도체차폐층의 가교도가 20% 미만이라는 사실은 상당히 중요한 사항으로서 그 원인을 살펴 보면 다음과 같다. 먼저, 도체차폐층의 가교도가 낮다는 것은 (1) 반도체 컴파운드에 가교제가 들어 있지 않았을 가능성과 (2) 가교관 내에서 열이 충분히 전달되지 못했을 가능성이 매우 높다. 이 회사 제품의 경우 절연층의 도체쪽도 가교도가 낮다는 사실은 후자의 가능성을 높음을 암시한다. 즉, 외부로부터 전달되어야 할 열이 내부로 충분히 전달되지 못하였기 때문에 가교제의 분해가 충분히 이루어지지 않아 가교도가 낮은 것으로 생각된다. 다른 제품도 마찬가지로 이유 때문에 가교도가 낮은 것으로 생각 된다. 외부에서 가한 열이 가교관 내에서 케이블의 내부에까지 전달되지 못했다는 것은 케이블



Table 5. Degree of crosslinking of semicon shields in domestic cables

Specimen	Conductor shield		Insulation shield	
	Temp. (°C)	Cross-linking (%)	Temp. (°C)	Cross-linking (%)
A85F1	33	66.74	38.5	71.60
A85S1	38	61.31	41	69.32
A87N1	37	73.74	39	74.49
A87S1	-	-	40	75.09
A90F2	37	55.88	33	42.96
A90S2	34	58.78	39	29.40
B90F1	32	67.08	35	59.43
B90S1	33	66.56	38	58.37
B87F1	36	55.78	40	39.64
B87S1	35	36.18	39	41.57
B93F1	35	41.77	40	54.7
C84F1	34	14.00	38	70.9
C85F1	34	20.22	-	-
C85F3	34	18.37	38	69.41
C85F5	-	-	40	41.73
C87F1	36	55.78	40	39.64
C87S1	35	36.18	39	41.57
C94F1	36	33.58	38	36.23
C94F2	33	37.79	40	29.3

못하고 국부전계가 불균일해짐으로서 케이블이 파괴되는 현상을 보일 것으로 생각 된다. Convolution 이란 도체 차폐층이 도체의 선 모양에 따라 함몰되는 현상을 말하는데, 이러한 현상이 심할 경우 두께 방향으로의 전계분포가 균일하지 않을 가능성이 높다. AEIC에서는 convolution이 180  $\mu\text{m}$  이하로 규정되어 있으나 국내 규격에서는 이에 대한 규정이 없다. 국내 수거케이블에서 convolution이 심한 경우 약 500  $\mu\text{m}$  정도 되는 경우도 있다.

Table 6. Volume resistivity at room temperature

Specimen	Temp. (°C)	Volume resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	
		Conductor shield	Insulation shield
B87	F1	18.74	15.37
	N1	7.95	20.87
	S1	18.82	26.44
B87	F3	$\infty$	4.64
	N3	$\infty$	5.16
	S3	$\infty$	4.96
Spec.		90°C: $< 10^3$	RT: $< 5 \times 10^2$ , 90°C: $< 5 \times 10^2$

\*이후의 단락은 학회지 3월호로 이어집니다.\*

제조사 매우 중요한 사실을 암시하는데, 중요한 것은 케이블 제조공정이 잘못되었다는 것을 의미한다. 절연차폐층과 절연층 일부는 충분한 가교도를 가지고 있다는 것은 외부에서는 충분한 열을 받았다는 것을 의미한다. 이와 같이 같은 케이블 내에서 외부는 비교적 충분한 열을 받았고 내부는 충분한 열이 전달되지 못한 원인은 케이블 생산속도와 열전달 방법 등과 깊은 관련이 있을 것으로 생각 된다.

반도전층 내에 들어 있는 불순물과 직접적인 관계는 없을 것으로 예상되나 국내 배전케이블에서 종종 발견되는 문제점은 크게 두 가지 있는데, 첫째는 도체차폐층의 체적고유저항값이 너무 높은 경우가 종종 있다는 것이고 둘째는 convolution이 너무 심한 경우가 종종 있다는 것이다. 표 6에 국내에서 최근 사고를 일으킨 배전 케이블 도체차폐층의 체적고유저항 측정치가 나와 있는데, 표에서 볼 수 있듯이 이 케이블의 도체차폐층의 체적고유저항이 규정치를 훨씬 벗어난  $\infty$  값을 보인다. 이와 같이 도체 차폐층의 체적고유저항이  $\infty$  값을 보일 경우 도체차폐층의 본래 목적인 케이블 두께 방향으로의 균일한 전계분포를 유지하지