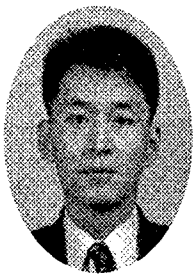
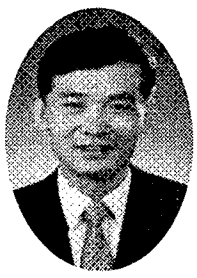
전력케이블용 반도전재료의 설계기술



한재홍
한전전력연구원 선임연구원

송일근
한전전력연구원 선임연구원

임장섭
목포해양대 해양전자통신공학부 교수



이동영
위덕대 전기공학과 교수

1. 서 론

1970년대 후반 국내에 처음으로 도입된 지중배전용 전력케이블은 동심중성선 전력케이블(CNCV)과 수밀형 전력케이블(CNCV-W)이 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 수분침투에 의한 케이블 고장발생으로 동심중선선 전력케이블은 더 이상 적용되지 않을 전망이다. 따라서 향후에는 수밀형 전력케이블과 수트리억제형(TR-XLPE) 전력케이블이 주류를 이루게 될 것이다. 전력케이블의 종류가 어떻게 변화든 케이블 구조는 도체(conductor), 도체차폐층(conductor shield), 절연층(insulation), 절연차폐층(insulation shield), 중성성(neutral wire) 및 외피(jacket)로 구성된다. 각 층은 고유한 역할을 갖고 있으며, 각 층의 재료가 제 기능을 수행하지 못하면 이는 결국 절연층의 절연파괴를 유발하여 전력케이블의 고장을 일으키게 한다. 지금까지의 많은 연구는 주로 절연층 재료에 대해서만 집중적으로 이루어졌으나, 최근에는 반도전층의 중요성이 크게 대두되면서 이에 대

한 연구가 증가하고 있다. 예를 들어, 반도전층 또는 반도전층/절연층 계면에 있는 불순물이나 결함이 전력케이블의 수명에 결정적인 요인으로 작용한다는 것은 잘 알려진 사실이며, 특히 금속성의 불순물은 절연층의 산화반응에도 영향을 미쳐 열화를 촉진하는 역할을 한다[1]. 또한 이온성 불순물이 수트리 성장을 촉진하고, 고분자내의 사슬을 왜곡시켜 수분의 유입을 증가시킨다는 연구결과도 발표되고 있다[2].

반도전층에 관한 연구는 반도전층 내에 들어 있는 이온성 불순물이 전력케이블의 수명에 미치는 영향에 관한 연구를 시작으로 최근에는 반도전층 재료의 성능개선을 통하여 전력케이블의 절연파괴강도를 증가시켜 절연두께를 줄이려고 노력하고 있으며[3], 서어지와 같은 이상전압을 완화시키기 위한 연구도 수행되고 있다[4].

이와 같이 전력케이블의 성능에 반도전층 재료가 중요한 역할을 담당하기 때문에 본 고에서는 반도전층의 설계시 고려해야 할 내용에 대해 기술하고자 한다.

2. 반도전재료의 변천

전력케이블의 반도전층 재료를 개선한다거나 설계를 위해서는 반도전층의 변천 역사를 이해하는 것이 중요하다. 전력케이블에서 반도전층은 절연층과의 상용성이 매우 중요하기 때문에 반도전층 재료의 변천은 절연층의 변천 역사와 궤를 같이 한다.

반도전층의 초기 형태는 면테이프(cotton tape)에 카본블랙이나 graphite를 첨가한 것이었으나, 면이 쉽게 헤지는 성질로 인하여 나일론으로 대체되었다. 면의 헤짐으로 생긴 면단(loose end)은 전계를 집중시켜 절연층의 파괴를 유발하였다. 이러한 차폐층은 부틸과 오일계 고무로 절연된 초기 케이블에 사용되었다.

그 다음으로 사용된 것은 직물 테이프에 소위 "skim"이라는 얇은 층을 입힌 반도전고무를 충전한 skim tape이다. Skim tape는 고무 절연층으로부터 쉽게 박리할 수 있었고 수 년동안 PE나 XLPE 케이블에 사용되었으나, 이 skim tape도 헤짐현상으로 인한 전계집중 문제가 있었다.

열가소성 수지를 절연체로 사용한 1970년 초반에는 반도전층의 원재료도 열가소성 수지에 카본블랙이 단순하게 첨가된 형태였다. 초기 열가소성 케이블의 제조공정은 한 층씩 압출하는 방식이었기 때문에 상당량의 먼지와 불순물이 절연층과 반도전층의 계면에 유입되는 현상이 발생했으며, 절연층과 반도전층의 접착이 불균일하여 부분방전이 유발되기도 하였다.

전력케이블의 열적·기계적 성질을 보완하기 위하여 열경화성 수지를 절연층 원재료로 사용한 1970년 후반에는 반도전층 원재료도 마찬가지로 열경화성 수지로 변화되었다. 절연층과 절연차폐층을 동시에 압출하는 방식이 도입되면서 불순물의 유입이 감소하였다. 그러나 3층이 동시에 가교됨으로써 가교공정이 매우 어려워 졌으며 절연차폐층이 절연층에 강하게 결합하여 케이블 접속작업이 어려워지는 문제가 발생하였다.

가장 중요한 반도전재료 개발은 1980년대 초반에 이루어진 박리성(strippability)이 좋은 절연차폐층의 개발[5] 및 세 층을 동시에 압출하는 3중 압출(triple extrusion) 공정의 도입이다. 이로 인해 접속작업이 용이하게 되었으며, 3중 압출 공정이 일반화된 80년대 중반 이후에는 도체차폐층과 절연층 사이의 계면에 불순물 유입이 감소하게 되었다.

1980년대 후반과 1990년대에는 주로 원재료 및 컴파운딩 과정에서 수트리를 성장시키는 불순물을 줄이기 위한 노력을 시도하였다. 따라서 불순물의 중요한 원천인 카본블랙에서 불순물의 함량이 매우 낮아졌고, 반도전재료의 생산설비가 개량되었으며, 불순물을 검출할 수 있는 장비들이 컴파운딩 설비에 도입되었다. 또한 가공성을 높임으로서 표면 평활도가 개선되었다.

3. 반도전재료의 역할 및 요구조건

3.1 반도전재료의 역할

도체를 감싸고 있는 반도전층인 도체차폐층의 역할은 도체의 균일하지 못한 표면을 감싸 급격한 전압의 차이를 완화시켜 주는 역할과 도체와 절연층의 직접 접촉함으로서 발생할 수 있는 부분방전이나 산화반응에 의한 열화를 방지하는 역할을 한다[6]. 또한 도체와 절연층간의 갭에 의하여 발생할 수 있는 부분방전을 방지해 주는 역할도 하고 있다[7].

이와 같이 전계완화를 위하여 반도전재료를 사용하는 케이블은 원통형 전극구조를 가지고 있으며 이때 절연층에 걸리는 전기장은 다음의 식으로 표현된다.

$$E = \frac{V}{r \ln a/b}$$

여기에서 E는 전기장, r은 거리, a는 내부전극의 외경, b는 외부전극의 내경, V는 가해진 전압을 의미한다. 그림 1은 도체차폐층의 유무에 따른 전력케이블에서의 전계분포를 나타낸다[8]. 그림에서 알 수 있듯이 도체차폐층이 있는 경우에는 전계의 분포가 균일하지만, 도체차폐층이 없는 경우에는 도체의 불규칙성으로 인하여 전계의 분포가 불균일하다.

한편 절연층은 다시 반도전재료로서 차폐되는데 이

를 절연차폐층이라 한다. 절연차폐층은 엄밀한 전기적 특성을 요구함과 동시에 특히 쉬운 박리성(strippability)을 가져야 한다. 박리성이란 전력케이블의 접속작업시 외피를 제거해야 하는데 이때 쉽게 벗겨지는 성질을 말한다. 이 절연차폐층의 박리성은 일반적으로 카본블랙의 함량과 올레핀계 수지의 성질에 크게 의존한다.

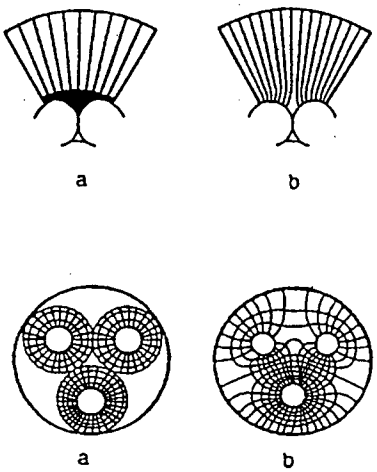


그림 1. 도체차폐층 유무에 따른 전계분포 : (a) 차폐층이 있는 경우, (b) 차폐층이 없는 경우

3.2 반도전재료의 요구조건

절연층의 내외부에 존재하는 반도전층은 사용목적이 다소 다르기 때문에 요구물성도 또한 약간씩 다르다.

도체차폐층은 전력케이블의 전기적 신뢰성을 결정하는 중요한 역할을 하는데, 이때 가장 중요한 요소는 도체차폐층과 절연층 사이의 계면 평활성이다. 주로 문제가 되는 것은 돌기(protrusion)로써, 계면에 돌기가 존재하는 경우에는 전계가 집중하여 국부적인 절연파괴를 일으키고 이 미세한 절연파괴가 장시간에 걸쳐 반복적으로 일어나 결국 전력케이블의 고장을 유발하는 역할을 한다[7]. 따라서 전력케이블의 절연신뢰도를 증가시키기 위해서는 도체차폐층과 절연층의 계면에 돌기가 없어야 한다.

이러한 돌기는 카본블랙이 분산이 좋지 않은 경우에 주로 생기고 또한 압출가공시 발생하는 소위 die drool 현상에 의해서도 발생한다. 카본블랙이 고분자에서 분산이 좋은 경우에는 문제가 생기지 않으나, 카본블랙이 분산이 특히 좋지 않은 경우에는 이들이 집합체(aggregate)의 형태로 남아 고분자와 같이 압출되면 돌기가 형성된다. 이러한 돌기는 수트리 및 전기트리의 원인이 되며 따라서 전력케이블의 신뢰성을 높이기 위해서는 카본블랙의 분산이 잘 되어야 한다. 한편 die drool 현상에 의해서도 돌기가 생길 수 있는데 이는 압출가공시 고분자 찌꺼기가 die 출구에 남아 있는 현상을 말한다. 이러한 고분자 찌꺼기가 die 온도에 의해 탄화되어 어느 순간에 압출물에 섞여 나오게 되면 반도전층과 절연층 사이에 돌기로 존재하게 된다. 이는 고분자가 탄화된 것이므로 전계가 가해지면 이 지점에서 전계가 집중되어 결국 절연파괴로 이어지게 된다. 이러한 die drool 현상은 대부분의 고분자가 압출될 때 발생하는 현상으로서 컴파운드에 섞여 있는 수분, 저분자량 성분, die swell, 정전기 발생 등의 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 보이나 그 중에서 재료내에 존재하는 수분이 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[9].

외국에서는 돌기뿐만이 아니라 계면 굴곡(convolution)에 대해서도 규제를 하고 있으나[10], 국내에서는 이에 대한 관심이 거의 없었다. 그러나 최근 계면 평활성이 전력케이블 성능에 중요한 영향을 미친다는 사실에 관심이 증대되면서 한국전력의 규격에서도 이를 추가할 예정이다. 또한 도체차폐층과 절연층 사이의 접착력도 우수해야 하는데, 접착력이 불량하면 층 사이에서 분리(delamination) 또는 수축현상이 일어나는데 이러한 곳에서 부분방전이 일어나면 전력케이블이 본래의 성능을 발휘하지 못하게 된다.

절연차폐층은 도체차폐층과 마찬가지로 적당한 전기전도성을 가져야 함은 물론 접속작업시 쉽게 벗겨질 수 있는 박리성을 가져야 한다. 만약 박리강도가 너무 높은 경우에는 작업시 절연층에 손상을 입혀 전력케이블 고장을 유발할 수 있으며, 반대로 박리강도가 너무 낮으면 절연층과 반도전층의 계면에서 부분방전이 일어날 수도 있다. 한편 최근에는 절연차폐층내에 존재하는 이온성 불순물이 수분유입시 절연층내로 확산되어 수트리 성장을 촉진한다는 연구결과에 따라 한국전력의 규격에서도 이에 대한 규제가 새로이 추가될 예정이다. 표 1은 곧 확정될 한국전력의 구매시방서에서 요구하는 반도전재료에 관련된 사항을 정리한 것이다[11]. 표에서 기계적 성질, 계면 굴곡, 이온성 불순물 함량의 항목은 새로 추가된 것이며, 계면돌기는 현행 250 ㎛에서 변경되는 항목이다. 참고적으로 가열노화의 조건은 121±1℃, 168시간이다.

4. 반도전재료의 구성요소

4.1 반도전재료 조성

전력케이블에 사용되는 반도전층 재료의 구성요소를 살펴보면 업체별로 다소 차이는 있지만, 대략적으로 다음과 같이 구성된다.

표 1. 한국전력 구매시방서의 반도전층 요구조건

항목		단위	도체차폐층	절연차폐층
상온	인장강도	kg/㎟	0.8 이상	0.8 이상
	신장율	%	150 이상	150 이상
가열노화후	인장강도	kg/㎟	0.64 이상	0.64 이상
	신장율	%	90 이상	90 이상
계면돌기		㎛	절연층쪽 : 75 반도전층쪽 : 180 이하	절연층, 반도전층 모두 130 이하
계면굴곡		㎛	180 이하	-
체적고유저항		Ωm, 90℃	1000 이하	500 이하
이온성 불순물 함량		ppm	500 이하	1500 이하
외부반도전층 박리력		kg	-	1.4~10.8

반도전재료의 기저고분자로는 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 고분자를 사용한다. 여기에 다량의 전도성 카본블랙, 산화방지제, 가공조제 또는 기타 첨가제 등을 혼합하여 제조한다. 이러한 반도전성 재료의 특성은 첨가하는 카본블랙의 종류와 기저고분자의 성질에 크게 좌우된다.

반도전재료를 구성하는 여러 요소중에서 카본블랙은 반도전재료의 주요 특성인 기계적 특성 및 전기전도성 등을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 가교화 반응(crosslinking)을 위하여 peroxide 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 카본블랙의 경우 무게비로 30~40% 정도를 사용한다.

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 약화시킨다. 그러므로 전기전도성과 기계적 특성의 적정선을 찾아야 한다. 부수적으로 카본블랙은 산화방지 및 자외선 차단의 효과가 있는 것으로 알려져 있다[12].

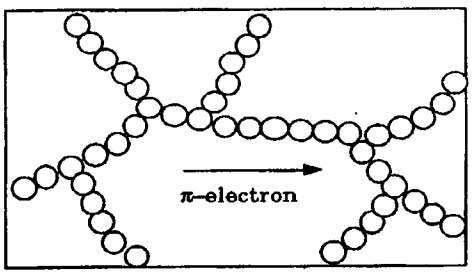
반도전재료가 평활하기 위해서는 카본블랙이 다음의 두 가지 특성을 갖고 있어야 한다[7]. 첫째는 우수한 분산성(dispersibility)으로 카본 블랙의 구조, 입자크기, 표면화학 등에 의해 결정된다. 둘째로는 grit 혹은 micro residue라고 불리우는 잔류물이 적어야 한다. 카본블랙은 열분해 또는 부분연소법(partial combustion)으로 제조되며 제조공정은 제품특성에 큰 영향을 준다. 제조공정 중 사용하는 냉각수의 종류에 의한 영향도 매우 크다. 만약 grit가 생성되면 단단해서 분산되기 어렵고, 너무 작은 잔류물인 micro residue가 존재하면 제거가 곤란하므로 반도전층/절연층 계면에 결함으로 존재할 수 있다.

4.2 반도전재료에서의 카본블랙의 역할

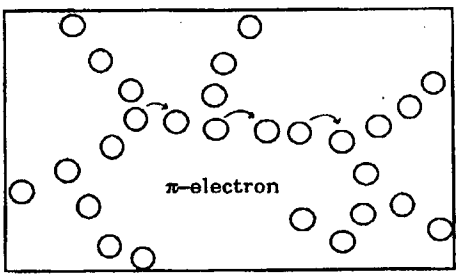
반도전재료에서 전도성을 부여해주는 전도성 카본블랙은 최근에 furnace 블랙을 중심으로 다양한 종류가 사용되고 있으며, 아세틸렌 블랙(acetylene black)도 일부 사용된다. 예전에는 아세틸렌 블랙이 전도성 및 청결도 면에서 우수하여 주로 사용되어 왔으나 최근에는 furnace 블랙의 제조기술이 많이 발전하여 아세틸렌 블랙과 거의 동등한 특성을 보이고 또한 경제성과 가공성의 면에서 우수하여 주로 사용되고 있다. 일반적으로 카본블랙은 제조방법에 의해 분류되는데 아세틸렌 가스로부터 제조되는 아세틸렌 블랙, 천연가스나 오일을 열분해하여 제조하는 fur-

nace 블랙, thermal 블랙 등이 있다. 카본블랙을 구성하는 성분은 탄소가 약 83~99%로 거의 대부분을 차지하고 그 외에 수소, 산소, 불순물(황, 철, 칼슘 등)들로 구성되어 있다. 여러 가지 카본블랙중에서 전체 생산량의 90% 이상을 furnace 블랙이 차지하고 있으며, 입자의 크기는 5~90 ㎚ 정도이다. 입자크기는 카본블랙의 가장 중요한 성질중의 하나로 입자크기의 측정은 주로 전자현미경을 이용한다. 입자는 구형에 가까운 형태이고 일반적으로 cluster를 이루고 있다. 보통 전기전도도의 값은 체적저항의 값으로 대신할 수 있는데, 일반적으로 반도전재료의 경우에는 10^0~10^4 Ω · ㎝ 정도의 저항값을 갖는다.

실제적으로 모든 카본블랙은 어느 정도의 전기전도 기능을 갖고 있다. 고분자에 카본블랙이 혼련된 경우 전도성을 나타내는데 이러한 카본블랙의 전도기구는 매우 복잡하나 일반적으로 2가지 이론이 유력시되고 있다. 첫째는 구조설(structure theory)로 연쇄상의 카본사슬을 통해서 전도가 일어난다는 이론이고, 둘째는 점핑설(jumping theory)로 분산된 카본입자 사이를 전자가 점핑하여 전도된다는 이론이다[6, 13]. 그림 2와 같이 연쇄상의 카본사슬을 통한 전도기구에서는



(a)



(b)

그림 2. 카본블랙 전도기구 : (a) 구조설, (b) 점핑설

연쇄상을 형성하기 위하여 카본블랙의 양이 충분해야 한다. 그러나 구조설로는 설명하기 곤란한 넓게 분산된 카본입자 사이의 전도는 전자가 수 ㎚의 갭을 hopping하여야만 일어날 수 있다. 따라서 소위 "tunnelling effect"라고 알려진 전도기구가 제안되고 있다.

일반적으로 반도전재료에서의 전도도는 카본블랙의 함량과 직선적으로 비례하지는 않는다. 즉, 카본블랙의 함량이 20~40% 범위에서 지수함수적으로 변하는 것으로 알려져 있다[14]. 우수한 전기전도도를 얻기 위해서 카본블랙이 갖추어야 할 중요한 성질은 첫째, 입자크기가 미세하여야 한다. 즉, 입자크기가 미세해지면 단위부피당 카본블랙의 수가 증가되므로 입자간 거리가 적어져서 전도성이 커지게 된다. 둘째, high structure를 가진 카본블랙일수록 전자가 통과할 수 있는 통로가 증가하게 되므로 전도성이 향상된다. 셋째로는 기공도(porosity)가 높으면 단위중량당 카본블랙의 수가 증가되므로 입자간 거리가 줄게 되어 전도도가 커진다. 넷째로는 휘발성분이 전자의 tunnelling을 방해하여 전도도를 저하시키는 역할을 하므로 낮은 휘발성을 가진 카본블랙이어야 한다.

카본블랙은 전기전도성을 향상시키는 것 이외에도 부수적으로 산화방지와 자외선을 차폐하는 기능, 기계적 물성을 보강해주는 기능, 충전제로서 원가를 절감해 주는 기능을 갖고 있다.

5. 결 론

본 고에서는 전력케이블의 반도전층 재료의 설계시 고려해야 할 내용으로 반도전층 변천사, 반도전층의 역할 및 요구조건, 반도전재료 구성요소 등에 대하여 기술하였다. 전력케이블에서 반도전층이 중요한 역할을 한다는 것은 자명한 사실이기 때문에 전력케이블의 성능 향상을 위해서는 절연층 재료만이 아니라 반도전층 재료에 대한 기술개발도 동시에 이루어져야 한다. 최근 한국전력이나 반도전재료 제조업체 모두 이에 대한 관심이 지대하기 때문에 전력케이블의 신뢰성이 높아질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] M. T. Shaw and S. H. Shaw, "Water Treeing in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 19, pp. 419-452, 1993.

[2] M. J. Given et al., "The Role of Ions in the Mechanism of Water Tree Growth", *IEEE Trans. Elec. Ins.*, Vol. 22, pp. 151-

156, 1987.

[3] T. Okamoto, N. Hozumi, M. Ishida and T. Imazo, *Development of EHV XLPE Power Cables with half Insulation Thickness*, CRIEPI Report W90042, CRIEPI, Japan, 1990.

[4] J. M. Braun et al., "High-frequency Dielectric Characteristics of Surge Attenuating Semiconductive Cable Compounds", Proc. of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 11-15, 1992.

[5] N. M. Burns, "An Improved Strippable Insulation Shield for Triple Process Power Cable", *Kabelitems No. 156*, Union Carbide Corporation, 1981.

[6] H. S. Katz, J. V. Mileski, *Handbook of Fillers for Plastics*, Van Nostrand Reinhold Company, Ch. 19, pp. 389-419, 1987.

[7] S. L. Greene, "Smoothness Evaluation of Clean Furnace Carbon Blacks", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 10, No. 2, pp. 23-29, 1994.

[8] "Semiconductive Compounds based on Carbon Black", Neste Polyethylene Co. Catalogue.

[9] "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", TR.95YJ16.L.199787, 한전전력연구원, 1997.

[10] "Specifications for Cross-Linked Polyethylene Insulated Shielded Power Cables Rated 5 Through 46 kV", AEIC CS5-94, 1994.

[11] "22.9 kV 동심중선선 전력케이블 구매시방서 개정(안)", ES 126-640~647, 한국전력공사 구매시방서, 1999.

[12] *Pigment Blacks for Plastics*, Technical Bulletin Pigments, No. 40, Degussa Corporation.

[13] "Ketjene Black : Part I Basic", Akzo Chemie Co. Catalogue.

[14] T. Okamoto et al., "Effects of Agglomeration of Carbon Particles in the Semiconductive Material on the Dielectric Strength of XLPE Insulation", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol. 23, No. 3, pp. 335-344, 1988.