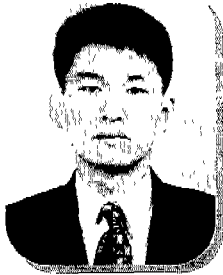


## 전력케이블에서의 유기재료 응용



· 한재홍 ·  
한전전력연구원  
선임연구원



· 이재봉 ·  
한전전력연구원  
선임보연구원

### 1. 서론

최근 전력산업 분야에서 유기재료의 적용이 크게 증가하고 있는데, 이러한 이유로는 유기재료가 절연성이 뛰어나면서도 경제성이 있고, 가공이 용이하기 때문이다. 이러한 유기재료의 특성을 가장 잘 이용한 제품이 지중 전력케이블이다. 종래에는 지중 전력케이블로써 지절연 케이블을 사용하기도 하였으나, 유기절연재료 제조 기술의 비약적 발전으로 인해 유기절연재료의 적용이 증가하고 있다. 최근 국내에서도 345kV급의 XLPE(cross-linked polyethylene) 전력케이블이 개발완료된 상태이며, 배전급의 경우에는 2001년을 기준으로 하여 전체 배전선로에서 지중선로가 8.9%(15,247C·km)를 점유하고 있다. 지중화가 많이 진행된 서울지역의 경우에는 약 50%에 육박하는 지중화율을 보이고 있다[1-2].

지중 전력케이블의 구조는 송배전용에서 약간의 차이가 있지만, 기본적으로 도체와 중성선을 제외하고는 대부분이 유기재료로 구성되어 있다. 따라서 전력케이블의 성능은 유기재료의 특성에 크게 의존할 수밖에 없으며, 설계시 이러한 점을 고려해야 한다.

본 고에서는 유기재료 제조기술의 발전에 따른 배전급 전력케이블의 변화와 기술규격 동향에 대해 소개하고, 최근의 XLPE 성능개선에 대해 언급하고자 한다.

### 2. 전력케이블의 변화

배전용 전력케이블의 절연재료로써 HMWPE (high molecular weight polyethylene)가 도입된 것이 1960년대 초의 일이다[3]. 많은 전력케이블 설계자들은 케이블의 수명이 50~100년에 이를 것으로 기대하였다. HMWPE는 기존의 고무 케이블보다 높은 교류파괴강도를 보였으며, 유전특성이 오일함침 절연지나 고무 컵과운드보다 우수한 것으로 나타났다.

초기의 전력케이블 구조는 그림 1과 같이 폴리에틸렌의 우수한 특성을 고려하여 테이프 형태의 반도전 차폐층, 주석 또는 납 코팅된 구리 중성선을 사용하였으며, 외피를 적용하지 않았다. 이 당시에는 재료의 청결도나 제품품질에 대한 관심을 거의 기울이지 않았다. 따라서 케이블 규격도 전혀 확립되어 있지 않았다.

XLPE 절연재료는 1960년대 말에 많은 관심을 얻기 시작하였는데, 이는 기계적 강도가 우수하고 열적으로 안정된 특성을 보였기 때문이었다. 케이블 운전온도는 75°C로부터 90°C까지 증가되었으며, 비상시의 과부하 온도도 90°C에서 130°C로 확대되었다. EPR (ethylene propylene rubber) 절연재료도 같은 시기에 도입되었지만, 비싼 가격으로 인해 대부분의 전력회사로부터 외면을 당하였다.

1960년대 말 HMWPE가 7~10년의 짧은 운전기간에 고장이 발

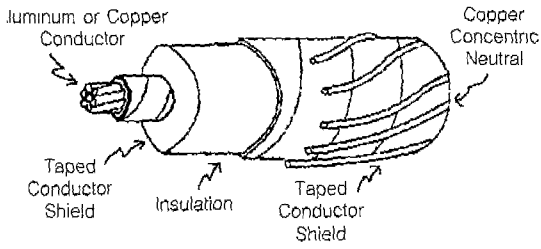


그림 1. 초기 전력케이블의 구조.

생하면서 문제가 제기되었다. 이러한 고장은 소위 수트리(water tree)라고 불리는 열화에 의해 발생하였다. 수트리는 폴리에틸렌에서 수분과 전기의 복합작용으로 발생한다고 알려져 있다. 불순물, 계면 불규칙, 돌기 등이 전계집중 요인으로 작용하여 트리 형성을 돕는 것으로 나타났으며, 트리가 형성된 케이블은 교류파괴 강도가 크게 감소하는 특징을 보였다.

케이블 업계에서는 이러한 케이블의 조기고장 문제를 해결하기 위하여 1970년대 초에 규격을 강화하기 시작하였다. 이 당시에 구성된 그룹의 대표적인 예가 케이블 업계의 규격 그룹인 AEIC (Association of Edison Illuminating Companies), 케이블 업계의 기술자로 구성된 ICEA (Insulated Cable Engineers Association) 등이 있다.

테이프 형태의 반도체 차폐층은 평활한 계면이 되도록 압출되기 시작하였으며, 폴리에틸렌 절연층에서 불순물 및 돌기의 크기가 250 $\mu$ m로 제한되었다. 수분의 나쁜 영향이 알려지면서 습한 상태에서의 열화시험이 케이블 성능평가에 적용되었다. 일부 전력회사에서는 케이블의 기계적 손상과 증성선 부식을 방지하기 위하여 LDPE(low density polyethylene) 또는 PVC(polyvinyl chloride)를 채용하였다. 하지만 케이블 제조기술의 취약으로 인해 불순물의 혼입이 빈번하였다.

1970년대 말에 전력케이블의 절연층 재료가 HMWPE에서 XLPE로 급격하게 전환되었다. 물론 고압의 증기가교(steam curing)가 절연재료에 바람직하지 못한 수분을 제공하였지만, XLPE 절연재료가 보다 나은 선택이라고 판단하였다. 일부 전력회사에서는 수분에 덜 민감한 EPR 케이블을 적용하기도 하였다.

1980년대 초에 급격한 기술발전이 일어났는데, 이는 전식가교의 출현이었다. 또한 1+2tandem 압출방식이 개발되었다. 이 기술은 내부반도체층을 먼저 압출한 다음 절연층과 외부반도체층을 동시에 입히는 것으로, 깨끗하면서도 평활한 계면을 가능하게 하였다. 이러한 기술발전과 더불어 박리 가능한 외부반도체층이 개발되었다. 이것은 증기를 사용하지 않고 3개의 층을 동시에 가교할 수 있도록 기여하였으며, 보이드를 최소화하여 절연성능을 향상하였다.

이 시기에 폴리에틸렌에서의 불순물을 줄이기 위한 노력이 시도되었으며, 소위 "extra clean" 컴파운드가 상용화되었다. 또한 불순물을 검출하기 위한 광학적 장비도 개발되었다.

1983년에 수트리억제형 XLPE(이하 TRXLPE)가 상용화되었다. 물론 유전정접과 교류파괴강도가 기존 XLPE보다 다소 취약하였지만, 습한 상태의 가속시험에서 우수한 특성을 나타내었다. 전력회사는 습한 환경에 위치한 케이블을 TRXLPE로 대체하기 시작하였다. 또한 비슷한 시기에 도재의 수분침투를 방지하기 위하여 수밀 컴파운드를 채용하기 시작하였다.

1980년대에 일어난 또 다른 움직임은 외피를 적용하는 것이었다. 증성선 위에 외피를 입히는 overlaying 방식이 사용되었는데, 이는 가장 비용이 저렴하지만 보호 능력은 다소 취약하였다. 따라서 증성선을 외피 내에 포함시키는 캡슐형 방식이 보편화되었다. 외피 재료는 주로 PVC 또는 폴리에틸렌을 사용하였다.

한편 지중 전력케이블에서의 반도체 차폐층 역할에 대해 집중적인 연구가 실시되었다. 이러한 연구에서 이온성 불순물이 케이블 수명에 나쁜 영향을 주는 것으로 알려졌다. 이러한 불순물은 운전환경에서 절연층으로 확산되며, 트리 형성에 기여한다. 또한 반도체 차폐층의 결함에 의해 전계가 집중되어 전기트리가 일어난다고 판단하였다. 이러한 인식은 "supersmooth" 반도체 차폐층의 개발을 유도하였다. Supersmooth 반도체 재료를 사용한 케이블은 XLPE 케이블의 수명을 연장하는 것으로 나타났다[4]. 이러한 반도체 차폐층은 새롭게 도입된 3중 압출방식에서 특히 적합하였다.

1980년대 말 EPR과 XLPE간에 경쟁이 과열되었다. 한 EPR 업체에서 실시한 시험에서 EPR 절연 케이블이 높은 전계와 90°C 온도 조건에서 XLPE보다 우수한 특성을 나타내었다[5]. EPR은 XLPE보다 유연하고, 낮은 열팽창계수를 가지며 고온에서 높은 파괴강도를 보인다. 하지만 가격이 비싸고 유전손실이 크며, 열화되지 않은 상태에서 교류파괴강도가 낮은 단점이 있다.

1990년대부터 현재까지는 큰 기술적 변화가 나타나지 않고 있으며, 단지 기술규격을 제정하는데 고려해야 할 많은 문제들이 제기되었다. 여기에는 절연재료의 선정, 불순물 검사의 범위, supersmooth 반도체 재료의 적용, 전식가교 및 3중 압출방식의 규격 명시 여부, 도체 수밀 등이 있다. 전력회사 입장에서는 케이블 단가를 억제하면서 성능을 향상시켜야 하기 때문에 규격 제정이 용이한 작업은 아니다.

### 3. 기술규격 동향

전력케이블에 대한 전력회사의 기술규격은 관련기술의 발전에 따라 지속적으로 변하고 있다. 특히 케이블에서 조기고장이 빈번하게 발생하거나 혹은 케이블 원재료, 디자인, 제조공정에서 기술적 변화가 크게 나타나면 이와 관련된 기술규격은 변화해 된다.

기술규격의 조사를 통해서 확인한 사실은 유럽과 북미의 전력회사들이 접근하는 방식에서 차이를 보인다는 점이다. 즉, 유럽의 전력회사들은 완벽한 전력케이블을 현장에 적용하는 반면에 북미의 전력회사들은 경제성을 고려하여 기술규격을 제정한다는 것이다.

이 중에서 북미지역의 전력회사들은 경제성을 최우선으로 하기 때문에 기술적 변화의 수용이 매우 빠르며, 많은 신기술을 적용하고 있다. 이와 같은 맥락에서 최근 북미지역 전력회사의 지중 케이블 기술규격에 대해 분석하였다[6]. 데이터는 가장 규모가 큰 45개 전력회사의 기술규격으로부터 얻어진 것이며, 전력회사 규모는 수용가의 수에 기초하여 선정하였다. 이러한 분석은 전력회사에게는 자신들의 기술규격을 평가하는데 도움이 되며, 제조업체로서는 공정개선에 반영하여 품질향상을 기할 수 있을 것이다.

전술한 바와 같이 미국에서는 약 35년전에 전력케이블용 절연체 재료로 HMWPE가 도입되었다. 이 재료는 저가이면서도 절연특성이 우수하기 때문에 지중케이블의 급속한 증가를 유발하였다. 하지만 초기 케이블에서 조기에 고장이 발생하면서 케이블 제조업체는 고장원인과 대책마련을 위해 면밀한 조사를 실시하였다. 지난 35년 동안 케이블 재료, 디자인, 제조 및 포설작업에서 많은 발전이 이루어졌다. 이 기간동안 전력회사는 이러한 발전을 수용하여 케이블 규격을 개정하여 왔다. 본 고에서는 케이블에 사용되는 유기재료의 기술규격에 대해 기술하였다.

### 3.1 절연층 재료

지난 10~15년 동안 TRXLPE와 EPR이 지중케이블의 절연체 재료로 부상하였다. 이것은 TRXLPE가 HMWPE나 기존의 XLPE보다 가속수명시험에서 우수한 성능을 보였기 때문이다. XLPE가 전세계적으로 사용되고 있지만, 비용절감에 민감한 미국 전력회사들은 케이블을 총체적으로 수밀하는 것보다는 오히려 수분에 저항할 수 있는 절연컴파운드를 선호하였다. 하지만 69kV 이상의 높은 전압에서는 XLPE 절연을 명시하고 있다.

절연컴파운드 사용에서 흥미로운 것은 1983년까지는 XLPE가 주로 사용되었지만, TRXLPE 도입과 EPR의 사용증가에 따라 급격하게 수요가 감소된 것이다. 조사에서 56%의 전력회사가 TRXLPE를 규격에서 명시하고 있으며, 24%는 EPR, 나머지 20%는 두 개를 조합하여 사용하고 있다. 오늘날 XLPE를 규격에 명시한 전력회사는 없다. 이러한 전력회사의 18%는 높은 용량에서는 EPR, 낮은 용량에서는 TRXLPE를 명시하고 있다.

모든 전압의 새로운 케이블 포설에서 TRXLPE가 EPR보다 3:1의 비율로 더 많이 선호되고 있다. TRXLPE 사용자는 선택의 이유를 저가이면서 손실이 적고 우수한 수명을 갖기 때문이라고 말하고 있으며, EPR 사용자는 취급과 포설이 용이하고 고온에서의 열적 성질이 우수해서 사용한다고 주장하고 있다.

### 3.2 반도전 차폐층 재료

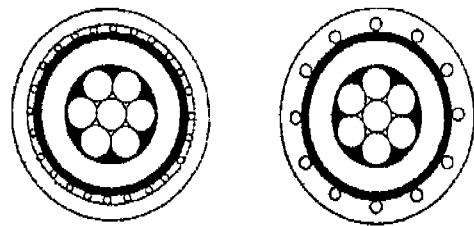
도체 차폐재료는 보통 절연층과의 상용성을 고려하여 선정된다. 도체 차폐재료로는 기존의 도전성 반도전층, supersmooth 반도전층, EPR 반도전층이 있다. 1988년 처음 도입된 supersmooth 반도전층은 기존의 furnace black보다는 아세틸렌 black을 사용한다. 이러한 컴파운드는 아세틸렌 black의 미세한 입자크기로 인해 보다

평활한 표면을 제공하며, 가속열화시험에서 케이블 수명을 뚜렷하게 증가시킨다.

조사에서 supersmooth 반도전층은 40%(1993년)에서 51%(1998년)로 증가한 반면, 기존의 반도전층은 40%에서 23%로 크게 감소하였다. EPR 반도전층은 약간 증가하였는데, 이는 EPR 절연재료의 증가와 관련이 있다.

### 3.3 외피 재료

지난 20년 동안 케이블 외피의 장점이 분명하게 입증되었다. 외피는 중성선 부식을 억제하며, 포설시의 기계적 손상으로부터 케이블을 보호해준다. 또한 수분침투를 방지하는 기능도 수행하여 케이블 수명을 획기적으로 향상시켜 준다. 중성선 위에 외피를 덮은 구조는 가장 저렴하고 벗겨내기 쉽지만, 가장 적은 보호를 한다. 캡슐형 외피는 중성선을 완전히 감싸서 수분침투를 억제하므로 중성선 적용에서 가장 많이 사용된다.



(a) overlaying (b) encapsulating

그림 2. 외피적용 방법

93%의 전력회사가 외피 사용을 명시하고 있으며, 캡슐형 외피가 overlaying 외피보다 좀 더 선호된다. 동심중성선 디자인을 갖는 케이블은 거의 캡슐형 외피를 명시하고 있다. 9%의 전력회사는 두 가지 종류를 모두 사용하는데, 200A 케이블에서는 캡슐형을, 600A에서는 overlaying을 쓰고 있다. Overlaying 외피를 선호하는 이유는 LC 차폐층 또는 flat strip을 중성선으로 사용하거나 수밀제 사용, 특별한 외피 사용 등이다. 또한 대부분의 overlaying 케이블은 관에서 사용된다.

폴리에틸렌계 재료가 외피 재료로서 선호되는데, 특히 LLDPE (linear low density polyethylene)가 높은 내마모 저항성과 낮은 수증기 투과율을 가져서 많이 사용된다. 일부 전력회사(13%)는 반도전성 외피를 사용하기도 하는데, 주로 통신선과 같이 직매로 사용되는 200 A 케이블에 적용된다. 소수의 전력회사(7%)만이 600A 케이블에 PVC, 폴리프로필렌, 반도전성 외피를 사용하고 있다.

## 4. XLPE 성능개선 연구

전술한 바와 같이 XLPE는 여전히 전력케이블용 절연체 재료로서의 위치를 확고히 점하고 있다. 폴리에틸렌의 가교(crosslinking)는

비교 폴리에틸렌에 비해 높은 운전온도와 향상된 물리적 성질을 제공하기 때문에 전력케이블의 성능을 크게 향상시켰다. 유기 과산화물에 의한 폴리에틸렌 가교는 전세계적으로 고전압 전력 케이블의 주요한 생산공정이 되었다.

압출과정을 통해 과산화물 XLPE를 제조하는 기술은 30년 이상 지속되어 왔지만, 이러한 재료의 압출은 제조공정과 컴파운드 조성기술이 매우 많은 연관이 있다는 점에서 아직도 복잡한 부분이다. 한편으로는 빠른 속도로 긴 길이를 압출하는 것이 제조의 경제적 면에서 바람직하다. 한편 완성된 케이블의 요구특성을 만족시키기 위해서는 가교제가 비교적 낮은 온도에서 조기에 분해되는 현상이 적어야 한다. 이러한 조기의 가교를 소위 "Scorch"라고 부르며, 제품에 심각한 결함을 초래한다. 그러므로 적합한 품질의 제품을 제조하기 위해서 케이블 제조회사는 낮은 속도로 낮은 온도에서 XLPE를 제조할 필요성이 있다.

또 다른 중요한 요인은 첨가제가 소멸되지 않고 유지되는 성능이다. 많이 사용되는 일부 첨가제는 높은 소멸특성을 갖고 있어서 잠재적인 전계상승뿐만 아니라 오염물 레벨의 측정을 곤란하게 한다. 이러한 문제는 케이블의 생산성과 품질에 영향을 미친다. 고전압 케이블에서 XLPE의 사용이 꾸준히 증가함에 따라 생산성을 향상하기 위한 노력이 진행되고 있다. 재료 공급자, 설비 공급자 및 케이블 생산자는 제조공정을 개선하기 위한 방법을 지속적으로 찾고 있다.

새로운 절연 컴파운드는 조기가교를 고도로 억제할 수 있으며, 첨가제 소멸이 거의 일어나지 않아 전기적 특성이 매우 우수하다 [7]. 이러한 높은 조기가교 저항성과 낮은 첨가제 소멸 특성은 케이블 성능과 생산성을 크게 증가시킬 것이다.

#### 4.1 조기가교 억제특성

케이블 생산자는 압출공정보다는 가교튜브내에서 가교가 시작되기를 원하지만, 일부 가교는 압출시 용융된 고분자에 존재하는 열에 의해 불가피하게 발생한다. 이러한 것은 케이블 결합이 되거나 또는 생산을 방해하는 요소가 된다. 따라서 압출조건에서 가교의 시작을 지연하는 기술은 조기가교를 감소시키고 생산공정을 개선하며, 케이블 결합을 줄인다. 따라서 고전압 절연재료로 사용되는 폴리에틸렌의 조기가교 특성에 미치는 다양한 첨가제의 영향을 평가하였다. 이러한 조기가교 억제용 첨가제는 폴리에틸렌보다 자유라디칼에 반응성이 높다.

조기가교 특성을 측정하는 설비로 MDR(moving die rheometer)을 사용하는데, 이 설비는 재료의 점도변화로부터 가교과정을 분석하는 것이다. 이 설비는 빠르고 소량의 시료만을 사용한다는 점에서 제품개발이나 조성결정에 유용하다.

그림 3은 182°C에서 측정된 가교폴리에틸렌의 대표적인 MDR 곡선이다. 초기의 토크 감소는 재료 용융에 따른 것이며, 이후 시간에 따라 토크가 상승하는 것은 가교와 관련된 것이다. 가교공정이 진행됨에 따라 다이올 회전시키기 위한 토크가 증가된다. 최소

토크치 이상으로 토크를 한 단의 증가시키는데 소요되는 시간은 TS1로 정의되며, 이것은 재료의 조기가교에 대한 민감성을 나타낸다. TS1이 높을수록 조기가교에 대한 저항성이 높다.

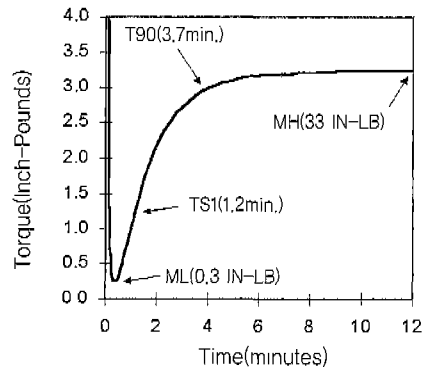


그림 3. 가교폴리에틸렌의 대표적 MDR 곡선.

또 다른 중요한 변수는 MH인데, 이는 얻어지는 최대 토크레벨이다. 재료에서 MH와 가교도는 좋은 상관성이 있으며, 재료는 MH로 표현되는 동등한 가교도에서 평가되어야 한다.

세 번째 변수는 T90인데, 이는 최대 및 최소 토크간 차이의 90%에 해당하는 토크에 이르는 데 걸리는 시간이다. T90은 전체적인 가교속도의 척도이며, 가교반응을 얻기 위해 가교튜브내에서 머무는 시간과 관련이 있다. MH와 T90은 182°C에서 얻어지는데, 이는 가교튜브내에서의 온도를 대표한다. 그러나 과산화물 XLPE의 압출은 140°C 근처에서 이루어지기 때문에 조기가교 실험(TS1의 측정)도 이 온도에서 수행하였다. 140°C MDR 곡선은 182°C와 비교하여 토크증가가 훨씬 낮은 속도로 나타나는데, 이는 낮은 온도에서 과산화물 분해가 낮은 속도로 일어나기 때문이다.

표 1은 새로운 조기가교 억제 기술로 만들어진 새로운 컴파운드와 3개의 상용 컴파운드의 대표적인 TS1과 T90 데이터를 나타낸 것이다. 표로부터 새로운 컴파운드가 높은 조기가교 저항성을 갖는 것을 알 수 있다.

MDR 설비는 재료의 고유한 가교특성을 평가하는데 효과적이지만, 실제의 케이블 압출조건과는 차이가 있다. 따라서 MDR 결과를 검증하기 위해서는 보다 큰 규모로 압출기 조기가교 시험을 해야 한다.

따라서 조기가교 시험을 10rpm으로 하였으며, 이것은 생산 압출기보다 약 2~3배 느린 것이다. 그러므로 압출기 조기가교 시험

표 1. 가교폴리에틸렌의 MDR 측정결과.

조성	XLPE1	XLPE2	XLPE3	New XLPE
TS1	40±5	55±6	75±6	55±4
T90	3.7	3.7	4.2	3.6