

# 전력케이블 특성분석 일반론 및 외국 분석 사례

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

(<sup>\*</sup>한전 전력연구원 전력계통연구실 연구원, <sup>\*\*</sup>동연구원 전력계통연구실 책임연구원  
<sup>\*\*\*</sup>한국전력공사 지중배전부장, <sup>†</sup>고려대 공대 재료공학과 부교수)

## 1. 서론

현재 국내에서 사용하고 있는 지중배전용 전력케이블은 가교폴리에틸렌 (XLPE)으로 절연되어 있고 반도체층을 사용하고 있으며 외피는 염화비닐수지 (PVC)를 사용하고 있다. 이러한 구조는 생산공정이 간단하여 경제적이고 사고 발생시 보수가 수월하다는 장점이 있는 반면, 주절연층이 전압, 수분 또는 기타요인에 의하여 열화되어 절연과피된다 는 단점이 있다.

1985년 이후 고장난 전력케이블에 대한 사고원인 및 사용년수를 조사한 바에 따르면 포설 후 5-6 년 후에 일어나 는 사고가 가장 많고 사고원인은 수분침투에 의한 사고가 가장 많은 것으로 조사되었다. 또한 포설 후 5-6 년 사이에 파괴가 일어나지 않은 자연열화에 의한 파괴는 평균수명이 약 10년 이상인 데 이는 일본이나 미국의 경우와 거의 비슷하다. 외국의 경우를 보면 XLPE 절연케이블의 경우 사용 년수가 약 10년이 되면 자연열화에 의한 절연과피 사고가 증가하기 시작하는 것으로 나타났는데, 일본의 경우 머지 않은 장래에 대규모의 지중케이블 교체가 필요하다는 논의 가 있다.

국내의 경우 XLPE 절연케이블을 22.9 kV급 지중배전케 이블에 본격적으로 적용한 후 최근 지중 배전케이블의 절 연과피 사고가 급증하기 시작하여, 전력공급의 신뢰도가 나 빠지며 전력케이블의 열화정도 판정이 심각한 문제로 대두 되고 있는 실정이며 또한 조만간에 케이블의 교체문제가 심각하게 대두될 전망이다.

지금까지 고분자 절연체 또는 배전케이블의 열화판정을 위하여 여러 가지 전기적인 방법이 제안되었으며, 이들 전 기적 방법은 그 동안 케이블의 열화판정에 있어서 많은 공 헌을 한 것도 사실이다. 그러나 우리나라처럼 다중접지 방 식을 채택하는 경우에는 간단하게 사용할 수 없다는 단점 이 있다. 이와 같이 다중접지 방식을 사용하는 경우에는 비 전기적 방법을 사용할 수밖에 없으며 많은 경우에 수트리 특성 및 사고빈도를 기초로 하는 통계적인 방법을 사용 한 다. 이때 전력케이블 절연체 및 구성성분의 특성분석 결과

는 케이블의 열화판정에 매우 귀중한 정보를 제공할 수 있 다. 이 케이블 특성분석을 통한 열화판정 방법은 미국, 카 나다 또는 일본 등에서 최근 시도되고 있는 방법으로서 현 재 국내에서도 일부 연구를 진행하고 있다[1].

케이블 절연체의 특성평가는 절연체의 특성분석으로부터 시작된다고 할 수 있다. 전력케이블의 열화판정을 위한 케 이블 특성분석은 특성분석 자체도 물론 중요하지만, 특성분 석 자체보다는 분석된 특성과 전기적 성질, 특히 케이블의 열화판정에 관련된 전기적 특성과의 연관성을 찾는 것이 매우 중요하다. 그러나 케이블의 특성과 열화상태를 직접 연결한다는 것은 많은 자료를 이용해야 하는 매우 어려운 작업이다. 또한 전기적인 방법이 아닌 화학적 방법을 이용 하여 케이블의 특성을 분석한다는 것은 일반 전기공학자들 에게는 생소한 방법이기 때문에 선뜻 접근하기 어렵다는 단점도 있다.

따라서 본고에서는 전력케이블의 절연체 특성분석의 필 요성 및 외국 분석사례와 고분자 특성과 절연성능과의 관 계 등에 대하여 언급하고자 한다. 고분자 절연체의 특성분 석 방법 및 주의사항 등에 대하여는 다음 기회에 발표하기 로 한다.

## 2. 전기절연과 절연체 특성 분석 기술

폴리에틸렌은 전기절연성이 매우 뛰어나면서 압출공정이 용이하기 때문에 전력케이블의 절연재료로서 가장 많이 사 용되고 있기는 하나 여러가지 요인에 의하여 열화되는 단 점이 있다. 전력케이블에 사용되는 XLPE의 경우 모든 외적 요인에 대한 저항성이 LDPE 보다는 우수하지만 장시간 사 용시 열화되기는 마찬가지이다. 이러한 열화현상은 결국은 전력케이블의 사고로 이어지고 이로 말미암아 전력공급상 의 신뢰도가 크게 실추되고 있다

이러한 문제는 세계 어느 나라에서나 공통으로 나타나는 특성으로서 최근에 이루어지고 있는 전력케이블의 열화에 관련된 연구는 주로 열화진단 연구와 재료개발 연구가 주 중을 이루고 있다고 할 수 있다. 열화진단 연구에 있어서 종래에는 주로 전기적 방법에 의한 평가가 주종을 이루었

으나 최근에는 고분자 특성분석 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 외국의 경우 10여년 전부터 사용하고 있는 방법으로서[2], 이 방법은 모든 외적요인은 재료의 구조변화를 유발하고 이 구조변화가 결국 특성변화와 직결되어 있기 때문에 결국 구조변화를 측정하여 특성변화의 정도를 예측하는 방법이다.

고분자 특성분석 기술이 전기절연 분야에 응용되는 예는 대부분 전기관련 제품개발에 따르는 고분자 재료의 기본물성 평가와 전기적 문제점이 발생되었을 때 이 현상을 정확하게 파악하고 나아가서 이 문제점을 해결하는 방향으로 발전되었다고 할 수 있다.

그림 1에 이들간의 관계를 개략적으로 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이, 고분자 절연체를 사용하고 있는 전력기기에서 문제점이 발생되면 이 현상을 이해하기 위하여 먼저 현상파악을 시도한다. 현상이 파악되면 거의 예외없이 이 현상을 상시 감시할 수 있는 진단방법을 개발하고 이와 병행하여 그 문제점에 대한 저항성이 강한 재료를 개발하고 이를 적용하는 단계를 거치고 있다.

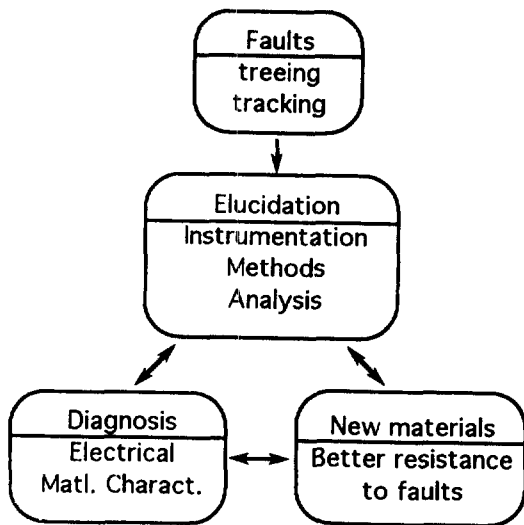


그림 1. 전기적 특성 연구발전 과정

고분자 절연재료에 기계적, 전기적 또는 환경적 외부요인이 가해질 경우 고분자의 물리적 특성은 반드시 변화하는데, 이는 결국 고분자 절연재료의 미시구조의 변화가 있었기 때문이다(그림 2). 이러한 변화는 초기상태에는 측정기기로 측정될 수 있을 정도는 아니겠지만 변화가 계속 축적되면 결국 적당한 측정기기에 의하여 탐지된다. 고분자 재료의 미시구조 변화와 거시적인 물리적 성질의 변화는 대부분 그 원인별로 각기 다른 영향을 미치고 따라서 측정된 특성변화를 역으로 이용하면 어떤 원인에 의하여 변화했는지 알 수 있으며, 나아가서 고분자 절연재료를 사용하는 전력 기기의 수명에측까지도 가능하다고 할 수 있다. 또한 전기적 열화현상에 저항성이 강한 고분자를 개발한다는 것

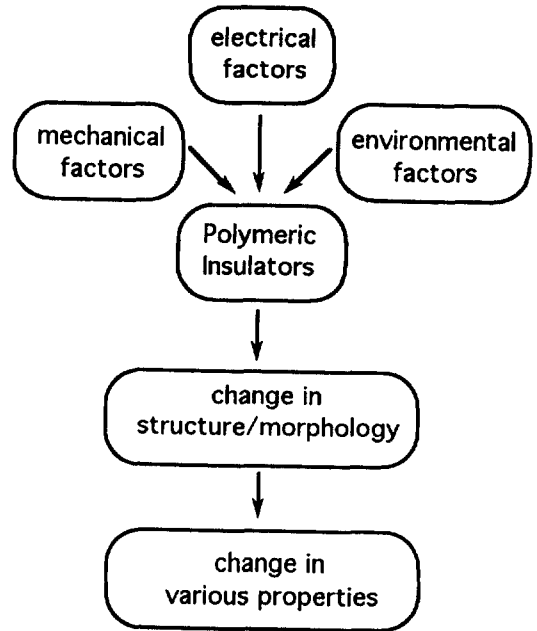


그림 2. 외적 요인과 고분자 특성 관계

표 1. 고분자 특성분석 방법

(1) Analysis of properties		
Thermal	Mechanical	Electrical
DSC/DTA	Tensile	Conduction
TGA	Impact	Breakdown
DMA	Creep	Dielectric loss
TMA	DMA	Space charge
		Treeing
(2) Analysis of structure, morphology and component		
Structure/morphology		Component analysis
FTIR, NMR, UV/Vis		LC, GPC, GC, Ion
X-ray, SEM/TEM		TGA, ICP, AA
ESCA, Density		Moisture analysis
Crystallinity		FTIR
Crosslinking		UV/Vis
(3) Surface Analysis : FTIR, ESCA		
(4) Depth profiling : Slicing, FTIR		

은 결국 이 구조적 변화를 방지하거나 또는 상당량 억제할 수 있는 방법을 개발하는 것이라고 할 수 있다.

결국 고분자 절연재료를 사용하는 전력 기기에서 어떤 현상이 발생하면 이에 대한 현상규명을 통하여 진단방법 및 새로운 재료를 개발하는데 있어서 가장 기본이 되고 중요한 것은 고분자 특성변화 또는 구조변화를 관찰할 수 있는 분석기법의 확립이라고 할 수 있으며, 또한 전기적 현상과

고분자 특성분석은 서로 밀접한 관계를 가지고 있다고 할 수 있다.

고분자 특성 및 구조/성분 분석방법은 표 1에 나와 있는 바와 같이 매우 다양하다. 고분자의 분석은 일정한 규칙에 의하여 이루어지는 것이 아니라 측정하고자 하는 대상에 따라 실험방법이 결정되는 것이 일반적이며, 통상 한 가지 방법이 아니라 여러 가지 방법을 사용하여 결과를 얻은 다음, 이를 종합적으로 판단하여 그 재료의 특성을 파악한다. 가장 중요한 것은 분석 자체가 중요한 것이 아니라 분석결과를 전력케이블의 사고원인과 잔존 수명 등과의 연결성에 대한 해석이다. 이를 원활히 하기 위해서는 절연체 특성과 전기적 성질간의 연결성을 말해 주는 많은 보충자료가 필요하다.

국내의 경우 전력케이블용 절연재료의 전기적 성질 및 전력케이블의 열화와 수명과의 관계에 대한 연구는 미약하며, 이를 바탕으로 전력케이블의 교체시기를 결정 또는 예측한다는 것은 현 상태에서는 거의 불가능하다. 결국 포설된 전력케이블의 사고를 사전에 방지할 수 있는 방법이 현재로서는 없다고 할 수 있다.

전력케이블의 절연수명 또는 잔류수명을 결정하거나 또는 열화정도를 판정하는 것은 매우 어려운 작업이고, 이를 성공적으로 수행하기 위해서는 많은 data가 축적되어야만 가능하다. 어느 나라에서나 이를 정확하게 판단하기 위한 많은 노력을 기울이고 있는데, 아직도 신뢰성 높은 열화판정 방법이 완전하게 개발된 것은 아니다.

전력케이블의 특성분석과 열화판정, 그리고 특성분석의 이용 등의 관계가 그림 3에 개략적으로 나와 있다.

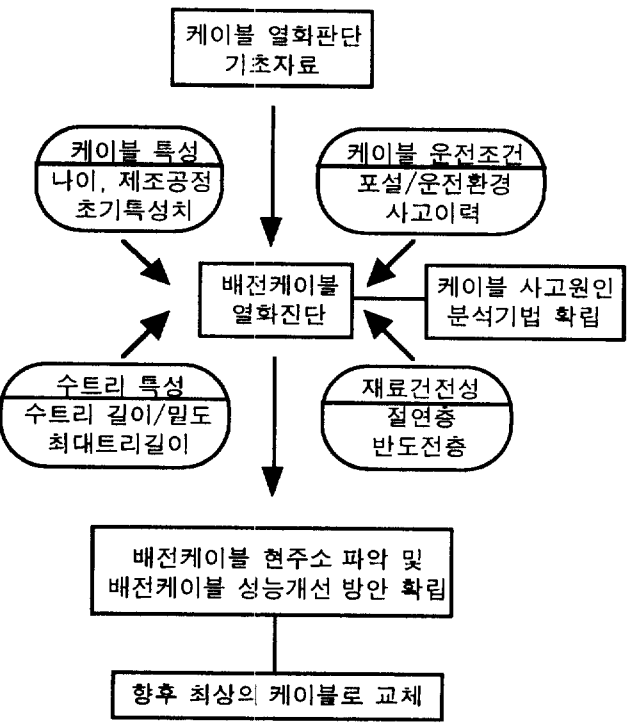


그림 3. 열화판정을 위해서 고려할 사항

그림 3을 보면 알 수 있듯이, 신뢰성 있는 열화판정을 위해서는 많은 부분에 대한 고찰이 필요하다. 즉, 케이블이 사용된 연수, 고장횟수, 중성선 부식정도, 절연층의 전기전도도, 그 동안의 고장원인 및 빈도 등 많은 정보가 필요하다. 일반적으로 지금까지 이루어진 열화판정은 대부분 전기적인 측정방법에 의존하였으나 이 방법도 또한 많은 문제점을 안고 있다.

전력케이블의 신뢰도는 원재료, 케이블 제조공정, 포설 및 운용 등 전 과정이 영향을 미친다(그림 4). 먼저, 원재료의 경우 절연재료의 종류, 구조 및 불순물 또는 첨가제 등 여러 가지 사항이 케이블의 성능에 영향을 미친다. 특히 수지의 가공성은 오랜시간 압출해야 하는 케이블의 특성상 매우 중요한 특성으로서 압출가공시 부하가 많이 걸리지 말아야 하며 장시간 압출특성이 매우 좋아야 한다. 케이블 제조공정상의 요인으로는 압출가공시 먼지 등의 이물질이 투입되는 것을 막기 위하여 작업장의 청정도를 유지해야 하며 압출온도, 가교관 온도 조절 및 압출속도 등 많은 부분에 세심한 주의가 필요하다. 압출속도는 특히 중요한 요인으로서 압출속도를 높이기 위해서는 가교온도를 높여야 하고 이는 다시 가교도 및 가교도 분포에 중대한 영향을 미칠 수 있으므로 주의해야 한다. 이외에도 포설 및 운용상의 요인도 케이블의 신뢰도에 큰 영향을 미친다. 특히 포설 작업시 케이블에 칼 흠집 등의 손상, 관로에 차 있는 물 등은 케이블의 수트리 현상을 악화시키는 직접적인 요인이다.

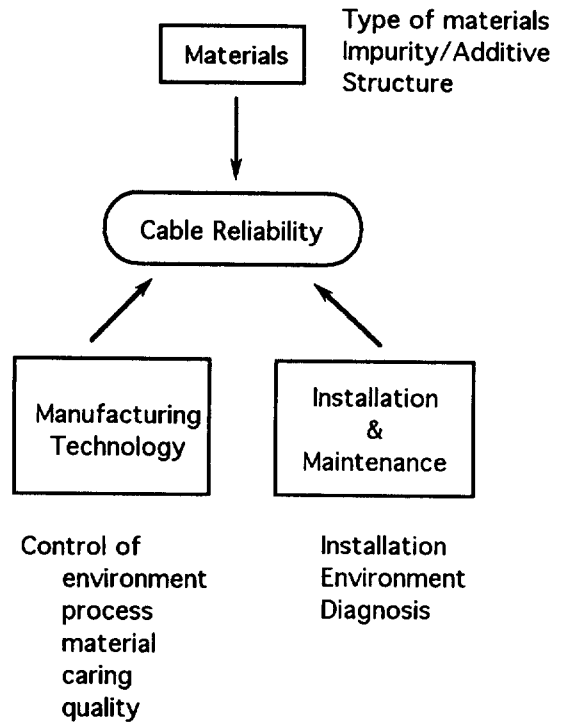


그림 4. 케이블 신뢰도에 영향을 미치는 요인

전력케이블의 열화는 위에서 언급한 많은 사항들이 영향을 미치므로 주의해야 한다. 전력케이블의 절연과피 사고를 줄이는 가장 이상적인 방법은 원재료, 케이블의 제조공정, 포설 및 운용에 이르는 전 과정에 대한 엄격한 관리가 매우 중요하다. 그러나 수트리 열화에 강한 저항성을 보이는 절연재료의 개발도 중요하다.

전력케이블의 열화상태를 판정하기 위한 방법은 다음과 같이 요약할 수 있다. 먼저, 전술한 바와 같이 전력케이블의 종류별로 케이블 사용년수, 중성선 부식정도, 외부반도전층의 박리강도 및 전기전도도, void의 밀도 및 크기, 불순물의 밀도 및 크기, 도체저항, 사고빈도 등 일반적인 케이블 운전 에 관한 사항을 기본으로 알아야 한다. 그리고 경년케이블 또는 사고케이블로부터 분석된 결과, 즉 육안 또는 현미경 검사에 의한 수트리 특성, 특히 최대트리길이 또는 전기트리로의 전이정도 등을 파악하고, 나아가서 절연층에 대한 정밀 검사를 통하여 절연수명과 관련 깊은 요인을 찾아야 한다. 특히 절연층의 건전성은 동일 종류의 케이블의 잔여수명을 판단하는데 매우 중요하므로 반드시 확인해야 한다.

지금까지 알려진 일반적인 방법은 운전 에 관련된 사항과 수트리 검사 정도였는데, 이들만으로는 완전한 예측이 어렵다. 따라서 전술한 바와 같이 전력케이블의 절연수명을 정확하게 판단하기 위해서는 절연층 재료의 특성을 정확하게 평가하여 절연층의 건전성 정도를 정확하게 평가해야 할 것이다.

또한 전력케이블에 있어서 절연층 못지 않게 중요한 것이 반도전층인데, 이 반도전층은 균일한 전계분포를 갖도록 하는 동시에 도체인 알루미늄선 또는 동선이 고분자인 절연층과 직접 접촉하는 것을 방지하는 효과도 있다. 만일 동선과 절연층이 직접 접촉되면 고분자는 급격한 산화반응을 겪게 되어 결국 극심히 열화될 가능성이 매우 높다. 또한 내부반도전층과 외부반도전층의 가교도를 측정하면 케이블 제조시 열분포 및 열전달이 어느 정도 이루어졌을 지를 알 수 있으므로 케이블의 제조 조건에 대한 매우 귀중한 정보를 얻을 수 있다.

결국 전력케이블의 열화판정을 위해서는 절연층뿐만 아니라 반도전층을 포함하는 도체 및 중성선에 이르는 거의 전 성분에 대한 분석이 이루어져야 하고 각 성분의 특성치를 종합하여 판단해야 한다. 전력케이블 절연층의 건전성 평가에 의한 절연수명의 평가는 북미를 중심으로 매우 활발하게 진행되고 있다. 즉, EPRI는 북미의 여러 대학, 연구 기관 및 전선회사에 연구용역을 주어 많은 연구를 수행한 바 있다.

이러한 연구결과, 지중배전선 전력케이블의 많은 사양이 변화했는데, 대표적인 변화는 수트리 발견 후로 확산된 스팀가교 방식의 변화이다. 스팀가교 방식은 가교 반응 후 약 1000 ppm에 달하는 수분이 절연층에 남아 있고, 이 수분이 수트리의 근원으로 밝혀짐에 따라 스팀가교 방식을 질소가스를 사용하는 건식가교 방식으로 바꾸었다. 또한 반도전층으로부터 돌출물 (protrusion)이 생기고 이 돌출물이 전계집

중을 유발하여 수트리 및 전기트리를 발생시킨다는 연구결과, 현재는 불순물이 현저히 감소된 소위 super smooth and super clean 반도전층을 도입하였다. 이외에도 많은 사양이 변화했는데, 시험적인 면에서 보면 가속시험 조건의 강화가 매우 엄격하게 적용된다.

전력케이블의 특성분석은 케이블의 건전성 파악을 통하여 전력케이블의 열화판단을 위한 자료로 사용될 수 있다. 이 외에도 매우 중요한 두 가지 효과를 얻을 수 있다.

첫째, 현재 국내에서 사용되고 있는 전력케이블, 특히 지중배전선의 현주소를 정확하게 파악할 수 있다. 22.9 kV 지중배전선의 경우 80년도대 중반부터 본격적으로 사용하기 시작한 이후 양적인 면에 있어서는 많은 발전을 거듭하여 현재는 154 kV급 송전선은 물론 345 kV 송전선도 XLPE 절연화를 추진하고 있다. 이와 같이 양적인 팽창은 어느 정도 이루어졌으나 질적인 수준과 포설된 전력케이블의 상태 에 관한 정보는 거의 없는 실정이다. 따라서 현재 국내에서 사용하고 있는 전력케이블의 현주소를 정확하게 파악하여 문제점은 개선해야 할 필요가 있다.

둘째, 전력케이블은 한계수명을 다하면 반드시 교체되어야 한다. 결국 모든 케이블은 언젠가는 교체되는데, 이때 교체되는 케이블의 성능은 먼저 사용된 케이블의 성능보다 월등히 향상되어야 향후 전력케이블의 절연과피 사고를 줄일 수 있다. 전력케이블의 성능을 향상시키기 위해서는 현재 우리가 사용하고 있는 케이블의 성능평가를 통하여 문제점을 정확하게 평가해야만 한다. 만약 현재 사용되고 있는 케이블의 단점 또는 문제점이 발견되면 이를 개선하여 차세대 에 사용할 전력케이블은 현재 케이블의 문제점을 모두 개선한 최상의 케이블이 되어야 한다.

위에서 언급한 전 과정이 가능토록 하는 기초적인 작업이 케이블의 특성분석이므로, 결국 전력케이블의 특성분석은 케이블의 열화판정 뿐만 아니라 향후 사용되어질 케이블의 요구조건 확립을 위해서도 반드시 이루어져야 할 과제이다.

### 3. 외국 전력케이블 특성분석 실례

#### 3.1 개요

외국의 경우 약 10여년 전부터 고분자 특성분석 방법을 전력케이블 절연층의 특성분석에 이용하고 있다. 지금까지 보고된 바에 의하면 고분자 특성분석 방법을 전력케이블의 열화판단에 직접적으로 사용된 흔적은 아직 발견할 수 없고 아직까지는 고분자 특성분석 방법을 이용하여 전력케이블 절연층의 특성분석 방법 자체에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있는 것으로 보인다. 예를 들어, 캐나다의 IREQ에서 수행된 연구결과 (EPRI Report EL-6207, 1989)를 보면 여러 종류의 특성분석 방법을 동원하여 절연층에 대한 특성 분석을 시도하고 이 결과를 보고하는 형식을 취하였다.

본 연구에서는 전력케이블의 특성을 분석하기 위한 방법을 개발하고 이를 통하여 전력케이블의 특성분석을 실시하며 여기서 얻은 결과를 전기적 성질 측정치에 접목하여 최종적으로는 전력케이블의 수명에측을 시도하는 것이다. 이를 위해서는 지금까지 이루어진 여러 종류의 특성분석 방법 및 결과를 비교 검토하여 이상적인 분석방법을 확립하는 작업이 선행되어야 한다. 따라서 본 절에서는 EPRI 보고서 (EL-6207, 1989)를 중심으로 외국 전력케이블 특성분석 방법 및 그 결과에 대하여 간략하게 정리하려고 한다. 이 연구에서 중점적으로 수행한 절연층 특성분석은 다음과 같다.

- (1) Polariscope를 이용한 visual evaluation
- (2) DSC 방법을 통한 밀도 및 용융열 측정
- (3) FTIR 방법을 통한 산화반응 및 가교잔류물 측정
- (4) PIXE 및 NAA 방법을 동원한 불순물 측정

### 3.2 Visual inspection

수거된 케이블을 일정 두께로 절단하여 표면을 sandpaper (grade 600)로 연마한 후 두 유리판 사이에 놓고 여기에 빛투과를 향상을 위하여 triethanolamine을 바른 후 polariscope로 관찰한 결과,

- (1) weld line이라고 불리는 flow structure를 관찰할 수 있었고,
- (2) bow-tie tree와 vented tree를 관찰할 수 있었으며,
- (3) halo도 관찰되었으며,
- (4) 기계적 잔류응력 (mechanical residual stress) 때문에 나타나는 fringe pattern을 관찰할 수 있었다.

그러나 기계적 잔류응력의 척도인 fringe pattern이 송전 케이블에서는 관찰된 반면 배전케이블에서는 관찰되지 않았다는 특징이 있다. 또한 halo에서는 건전지역에 비하여 약 10-50배 정도로 많은 양의 수분을 포함하고 있다. 그러나 halo 지역에는 수분 이외에도 acetophenone 등의 가교부산물도 많이 존재하는 것으로 보고된 바 있다[3].

### 3.3 밀도

DSC 방법을 이용한 밀도, 용해열 및 결정화도 관계가 그림 5에 나와 있는데 몇 가지 특징을 보여준다.

- (1) 절연체가 HMWPE (high molecular weight polyethylene)인 경우가 XLPE에 비하여 밀도, 용해열 및 결정화도가 높다.
- (2) XLPE의 경우 건식 XLPE가 스팀 XLPE에 비하여 밀도, 용해열 및 결정화도가 높다.

첫번째 특징은 가교시 결정의 일부분이 가교화가 되고,

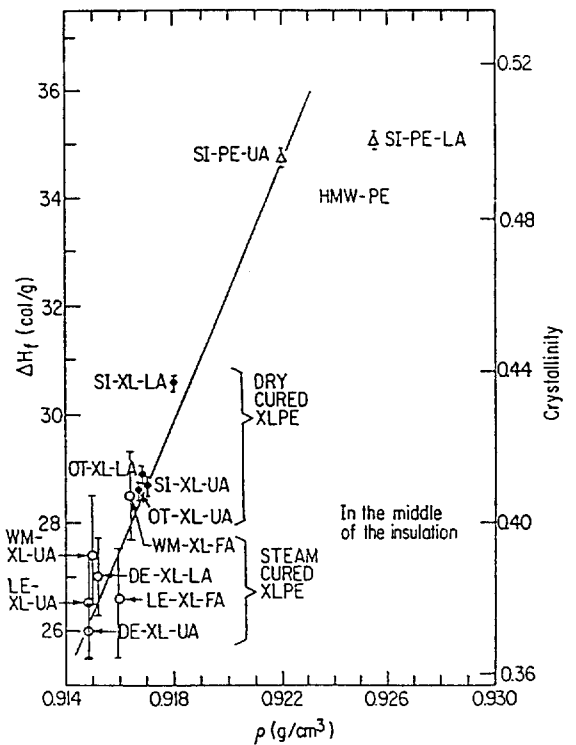


그림 5. 전력케이블의 밀도, 용융열과 결정화도의 관계

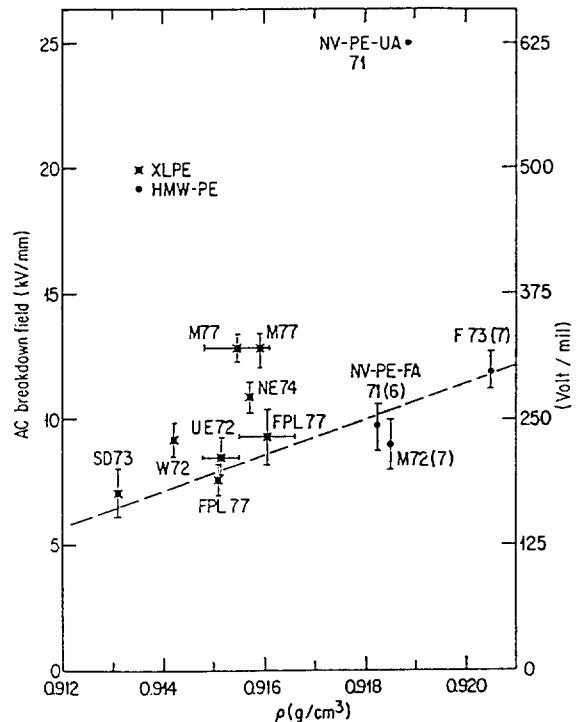


그림 6. 전력케이블의 밀도와 절연파괴강도의 관계

일단 가교된 부분은 결정화될 수 없기 때문에 XLPE의 밀도 및 용융점 등은 PE에 비하여 감소한다는 일반적인 이론

을 뒷받침하는 결과라고 생각한다. 그러나 두번째 특징에 대한 해석은 현재로서는 매우 어려운 상태이다. 각 시료에 대한 교류과피강도 결과와 각 케이블의 밀도를 도시한 결과(그림 6), 밀도가 높을수록 교류 과피강도가 높은 것으로 관찰되었다. 이 결과를 보면 절연층이 HMWPE인 경우가 XLPE인 경우에 비하여 교류 과피강도가 더 높다는 것을 알 수 있다. 이는 실험실 시료에서도 발견되는 현상으로서 XLPE내에 남아 있는 가교잔류물과 깊은 연관이 있는 것으로 밝혀졌는데, 전력케이블 내에 남아 있는 가교잔류물이 많을수록 전력케이블의 교류과피전압은 낮아진다. 폴리에틸렌을 가교시키면 사슬구조가 3차원 망목구조를 가져 구조적으로 보면 폴리에틸렌을 가교시키면 과피강도가 증가할 것으로 생각될 수 있으나 실제로 XLPE의 과피강도가 LDPE에 비하여 낮게 측정되었다.

이는 결국 절연 과피강도는 재료의 구조적인 요인이 중요한 것은 사실이나 그 재료를 구성하고 있는 성분도 매우 중요하다는 것을 의미한다. 전력케이블 또는 전력케이블용 절연재료인 XLPE의 전기적인 성질에 있어서 많은 연구결과와 가교부산물의 일종인 acetophenone은 전압안정제 역할을 하기 때문에 수트리 성장을 억제하며 절연과피강도를 증가시킨다고 알려져 있다. 또한 cumyl alcohol도 dodecyl alcohol 처럼 케이블의 수트리 성장을 억제할 것으로 기대되는데, 이러한 결과는 실험실에서 얻은 결과이므로 실제 케이블 시료와는 차이가 있는데, 추후 이에 대한 확인작업이 필요하다.

그림 7에 배전케이블의 밀도분포가 나와 있다. (a)는 HMWPE 절연 배전케이블 그리고 (b)는 XLPE 절연 배전케이블에 대한 밀도변화를 보여 주는데, 앞에서 언급한 바와 같이 HMWPE 절연의 경우 XLPE 절연보다 밀도가 높음을 알 수 있고 두 경우 모두 외도쪽으로 갈수록 밀도가 감소한다는 것을 알 수 있다. (c)는 HMWPE 절연케이블에서 서로 다른 위치에서 시료를 채취하여 이를 모두 한 그래프에 도시한 결과인데, 이 그림에서도 외도쪽의 밀도가 낮음을 알 수 있다.

밀도는 결정화도에 영향을 미치고 결정화도는 다시 불순물 또는 산화방지제 등의 확산에 큰 영향을 미친다. 즉, 밀도가 낮아 결정화도가 감소하면 산화방지제 등의 저분자량 성분의 확산을 높이며, 이는 결국 접촉각 (contact angle) 또는 불순물 농도에 영향을 미친다. 일반적으로 밀도가 감소하면 확산에 의한 불순물의 농도가 증가하여  $\tan \delta$  를 증가시키고 산화방지제의 농도가 증가하는 것으로 관찰된다.

### 3.4 FTIR

FTIR은 절연층의 산화유무를 확인하는 목적으로 가장 많이 사용되고 있다. 산화반응의 유무는 1742, 1733, 1720, 1710  $\text{cm}^{-1}$  피크들을 이용하여 확인하는데, 산화반응 피크들을 산화방지제 피크들과 혼동되지 않도록 주의해야 한다.

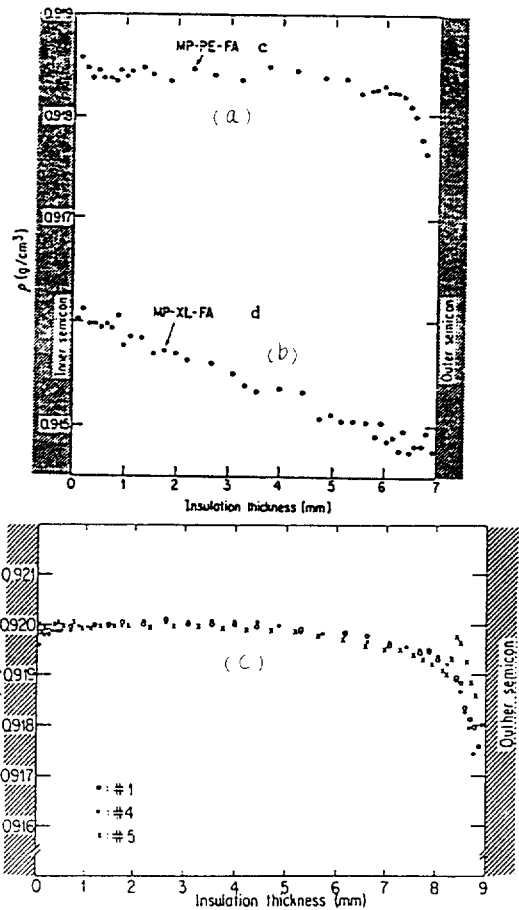


그림 7. 전력케이블의 밀도 분포

그림 8은 HMWPE 절연케이블의  $1742 \text{ cm}^{-1}$  흡수도의 분포도를 보여주는데, 이 시료에서  $1742 \text{ cm}^{-1}$ 는 산화반응에 의한 피크로 확인되었는데, 그림에서 알 수 있듯이 반도체 쪽 절연층이 내부보다 월등히 더 산화되었음을 알 수 있다. 지금까지 발표된 자료를 종합하면 반도체층에 가까운 절연층은 내부보다 더 심하게 산화된다는 것은 사실인 것으로 보인다. 그러나 내도쪽과 외도쪽을 비교하면 일관된 경향이 부족하다.

그림 9에 가공 중에 발생하는 현상에 의하여  $1742 \text{ cm}^{-1}$  피크의 흡수분포가 다를 수 있다는 결과가 나와 있다[4]. (a)는 일반적인 경향을 따르는 결과를 보여 주는 반면에 (b)는 이와는 달리 반도체층에 가까운 절연층에서  $1742 \text{ cm}^{-1}$  피크의 흡수도가 (a)와는 다른 결과를 보여준다. 이들은 as-received 케이블이기 때문에 이는 가공 중에 발생한 어떤 현상에 의한 결과라고 추정된다. 특히 (b) 결과는 가공 도중에 반도체층에 가까운 절연층의 산화방지제가 소모되었음을 말하는데, 이는 가공 도중에 발생할 가능성이 있는 산화반응과 밀접히 연관되어 있는 것으로 추정된다.

FTIR을 이용하여 절연층내에 들어 있는 가교부산물을 확인할 수 있는데, 대표적인 결과가 그림 10에 나와 있다. 이 결과를 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

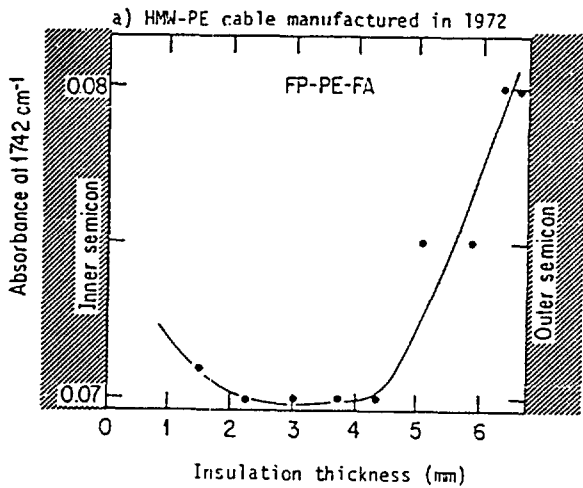


그림 8. HMWPE 케이블의 1742 cm<sup>-1</sup> 흡광도 분포

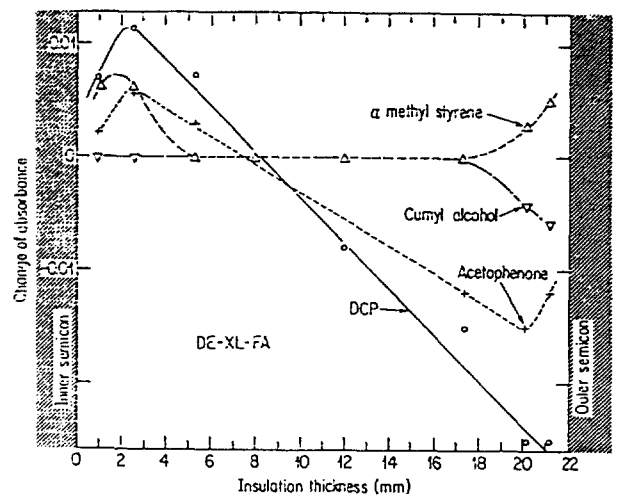
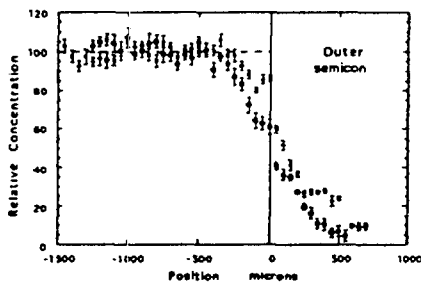
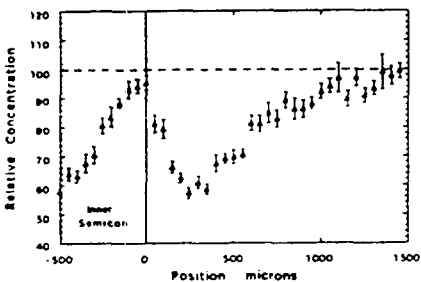


그림 10. 전력케이블의 가교부산물 분포



(a)



(b)

그림 9. 전력케이블의 1742 cm<sup>-1</sup> 흡광도 분포

- (1) 절연층에는 미분해된 DCP가 있으며, 그 농도는 내도쪽으로 갈수록 높으며,
- (2) Acetophenone과 cumyl alcohol은 외도쪽으로 갈수록 그 농도가 낮아지며,
- (3) α-methylstyrene은 외도쪽의 농도가 약간 높다.

위 현상 중에서 미분해 DCP 농도가 내도쪽으로 갈수록 높아지는 것은 가교반응시 외도쪽으로부터 가교되므로 미반응 DCP는 내도쪽으로 이동하는 경향이 강하다는 사실로 설명될 수 있다. 이러한 현상을 감안하여 내도용 반도체 컴파운드에

혼합되는 DCP의 농도는 외도용 반도체 컴파운드보다 약간 낮게 설계되는 것이 일반적이다. 이와 같이 DCP의 농도가 내도 쪽으로 갈수록 높아지기 때문에 이때 발생하는 가교부산물 농도도 증가할 것으로 생각된다. 또한 절연층 내에 있는 휘발성분은 전력케이블 사용 도중 외부로 증발되어 소멸될 수 있다. 이때 사용도중에 저항성분에 의하여 열이 발생하면 휘발성분의 증발은 더욱 심화될 것이다. 이때 내도부근은 외부와 멀리 떨어져 있으므로 휘발성분의 소멸이 적을 가능성, 즉 잔류가교부산물 농도가 높을 가능성이 매우 높다. Cumyl alcohol에서 H<sub>2</sub>O를 제거하면 α-methylstyrene이 된다는 화학반응을 생각하면 α-methylstyrene의 농도가 외도쪽에서 약간 높다는 것은 쉽게 설명될 수 있다.

### 3.5 불순물

전력케이블내에는 수많은 종류의 불순물이 존재하는데, 이들은 제조공정 중에 또는 사용 도중에 혼입된다. 특히 외부에서 수분이 침투된 경우 이 수분과 함께 섞여 있는 이온성불순물들이 검출될 수 있다.

NAA 방법과 PIXE 방법을 이용하여 배전용 케이블에서 불순물 종류 및 농도를 측정된 대표적인 결과가 표 2에 나와 있다. 이 표를 보면 많은 종류의 불순물이 존재하기는 하지만 이들의 농도는 황 (sulfur; S)을 제외한 모든 성분이 10 ppm을 넘지 않는다. S의 농도는 HMWPE보다 XLPE에서 더 많은 것으로 나타났으며 반도체층에서는 절연층에 비하여 최고 몇 십배 정도로 높은 것으로 나타났다. 여기에서 S는 대부분 산화방지제로부터 유래되는데, 이 결과로부터 XLPE의 경우 HMWPE에 비하여 산화방지제의 함량이 월등히 높게 설계된다는 사실을 알 수 있다. 표 2의 결과로부터 반도체층에는 절연층에 비하여 월등히 높은 농도의 불순물이 존재한다는 것을 알 수 있고, 이는 결국 반도체층이 불순물의 공급원 역할을 한다고 할 수 있다. 위 표에서

표 2. 전력케이블의 절연층 중간과 외도의 불순물 함량

		H M W P E	C A B L E	NV	NV	MP	FP	S T E A M	MP	FP	UE
				PE UA	PE FA	PE FA	PE FA		XL FA	XL FA	XL FA
S	I			75	65	75	150		220	150	180
	S			2380	2320	893	3890		6330	4000	3300
Na	I			2.5	2.0	2.5	2.5		2.7	3.0	6.0
	S			220	285	85	290		400	259	220
Ca	I			3.5	5	3.0	6.0		4	4.5	7
	S			112	124	93	542		75	51	112
K	I			2.5	1.5	2.2	2.0		2.5	2.5	3
	S			13	20	53	6		155	23	13
Cl	I			12	5	12	9		6	4	8
	S			152	81	68	158		87	36	66
Al	I			1.5	20	1.0	2.5		4	5	4
	S			29	51	95	42		400	26	44
Cu	I			0.18	0.35	0.5	0.5		0.5	0.5	0.8
	S			-	-	50	0.8		12	1.1	20

- (2) 일반적으로 두 반도체층 사이에 함량분포가 있으며,
- (3) 불순물이나 첨가제가 반도체층으로부터 확산되어 들어오며,
- (4) 배전용 케이블은 송전용 케이블에 비하여 불순물 함량이 많다.

위 특징 중에서 송전케이블에 비하여 배전케이블에서 발견되는 불순물의 양이 많은 것은, 첫째 배전케이블용 원재료가 송전케이블용 원재료에 비하여 깨끗하지 못하며 배전케이블의 경우 절연층 두께가 송전케이블에 비하여 작기 때문에 외부로부터 유입되는 불순물의 양도 많은 것으로 추정된다.

앞에서 언급한 바 있는 NAA, PIXE 방법은 절연층 전반에 걸쳐 존재하는 불순물의 존재유무 및 함량 결정에는 좋은 방법이지만 절연층 조기파괴의 가장 큰 원인인 큰 크기 불순물의 확인은 매우 제한적인 방법으로 생각한다. 큰 크기의 불순물의 확인은 eddy current, magnetic 또는 optical 방법으로 확인하여 오염된 pellet을 사전에 제거해야 한다.

는 Mg 성분이 검출되지 않은 것으로 관찰되었는데, 네덜란드의 경우 반도체층과 절연층에서 많은 양의 Mg가 검출된 바 있다. 위 결과는 열화되지 않은 virgin 시료, 즉 resin 시료와 케이블 시료에 대한 불순물 분석 결과와 비교할 수 있다.

표 3에 virgin 시료에 대한 불순물 분석 결과가 나와 있는데[5], 시료의 종류가 다르므로 직접적인 비교는 곤란하나 대체적으로 virgin 시료의 경우 특수한 경우(즉, 산화방지제 및 수트리억제제)를 제외하고는 미량의 불순물이 존재하나 일단 aging되면 불순물의 양이 증가하는 것을 알 수 있다.

이외에도 배전용 전력케이블에 대한 불순물 분석 결과 다음과 같은 사실이 밝혀졌다.

- (1) 경우에 따라서는 도체금속 성분이 다량 검출되며,

표 3. 전력케이블 종류에 따른 불순물 함량

		Mean impurity concentration (ppm)								Relative Classification	Type
		Na	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cu		
Conductor Shield	C-CSIA	11.8	3.4	-	1590	6.67	1.57	2.81	0.17	59%	conventional
	C-CSIB	11.3	0.62	-	1260	9.70	20.7	2.02	0.23	59%	conventional
	C-CS2	4.3	5.0	270	<59	6.7	0.90	3.9	0.98	55%	clean/supersmooth
	R-CS2	5.99	0.26	<50	<37	2.64	0.62	0.6	<0.03	100%	clean/supersmooth
Insulation	C-I1	0.81	0.34	-	173	1.1	0.21	0.44	0.089	68%	XLPE
	C-I2	0.65	3.5	728	<52	11.7	0.49	0.71	0.029	43%	TR-XLPE
	R-I1	0.49	0.016	<10	176	0.75	-	<0.2	0.010	100%	XLPE
	R-I2	0.61	3.16	714	<35	7.0	0.39	0.3	0.014	75%	TR-XLPE
Insulation Shield	C-IS1	13.6	27.1	-	1775	38.4	129.4	227	0.78	100%	conventional
	C-IS2	16.8	24.8	2002	2154	29.3	11.1	236	0.91	83%	clean
	R-IS2	16.9	25.0	2391	2071	27.8	15.3	230	0.81	83%	clean



EPRI 보고서에서는 케이블 수거 후 1 시간내에 수분함량을 측정하도록 추천하고 있으며, 분석용 사고케이블의 수거시 수분이 시료케이블의 양단에서 증발되는 것을 막기 위하여 end capping하는 방법을 모색해야 한다. 특히 절연과 피강도와 유전손실은 케이블내의 잔류 수분함량과 밀접한 연관이 있으므로 사고케이블은 수거한 후 최단시간내에 실험해야 한다. 경우에 따라서는 시료의 무게 감량을 수분측정의 한 가지 방법으로 사용하는 경우도 있는데, 이때는 가교부산물의 휘발에 의한 영향을 심각하게 고려해야 한다.

즉, XLPE의 경우 내부에 남아 있던 가교부산물 등의 휘발성분도 동시에 증발하므로 정확한 수분함량 측정을 위해서는 최소한 가교부산물의 휘발에 의한 영향은 배제해야 한다. EPRI 보고서에 의하면 무게 감량에 의한 측정시 무게 감량이 약 8500 ppm인 경우 Mitsubishi Moisturemeter로 측정된 실제 수분함량은 약 2700 ppm에 불과한 것으로 관찰된 바 있다.

표 4에 송전케이블의 절연층내에 들어 있는 수분함량을 측정한 결과이다. 이 표의 특징은 다음과 같다.

- (1) Halo가 있는 부분에서의 수분함량은 수천 ppm에 이르며 halo가 없는 부분에서는 건식가교와 습식가교 모두 수십 ppm 정도의 수분함량을 보이는데, 습식가교의 경우 수분함량이 약간 높다. 일반적으로 알려져 있기로는 습식가교의 경우 수분함량이 건식가교에 비하여 월등히 높은 것으로 알려져 있는데, 본 결과는 이와는 상반된 결과라고 할 수 있다.
- (2) 가교 직후에는 습식가교의 경우 약 1000 ppm에 이르는 것으로 알려져 있는데, 본 결과로 보아 가교직후 절연층내에 형성된 수분은 대부분 사용도중에 증발되어 소멸되는 것으로 추정된다.
- (3) 본 결과의 흥미로운 사실은 EPDR로 만들어진 joint에서 1000 ppm 이상의 수분농도가 관찰되었다는 점이다.

### 3.7 고찰

EPRI 보고서에는 앞에서 언급한 실험방법 이외에도 EDX 및 ion chromatography 방법에 의한 불순물의 종류 및 함량 분석, 유전손실, 접촉각, photoacoustic spectroscopy 방법, 핵자기공명(NMR) 방법 및 Interferometric holography 방법에 의한 분석 등이 기술되어 있으나, 이들 결과는 불충분하거나 시료준비 과정중 표면상태에 의한 영향이 너무 큰 것으로 생각되기 때문에 본절에서는 소개하지 않았다.

EPRI 보고서에서 추천하는 분석방법은 본고에 나와 있는 바와 같이 visual inspection, 밀도, 수분함량, FTIR 방법 및 NAA 방법에 의한 불순물 분석 등이 매우 유용한 방법으로 나와 있다. 이러한 방법중에서 밀도구배관을 이용한 밀도측정은 간단하면서도 매우 유용한 방법으로 추천되고 있으나, 이 방법은 밀도만을 측정할 수 있는 방법이기 때문에 DSC를 이용하는 방법이 더 유용할 것으로 생각된다.

표 4. 송전케이블의 수분함량

Cable specimen	Curing	Water barrier	Water
SI-PE-UA	None	c	23.5
SI-PE-LA			42
OT-XL-UA	Dry-cured	Lead sheath	60
OT-XL-LA			b
OT-XL-LA	Dry-cured	c	18
SI-XL-UA			29.5
SI-XL-LA	Dry-cured	c	36
DE-XL-UA (halo)			Steam-cured
DE-XL-FA	25 <sup>d</sup>		
LE-XL-UA	Steam-cured	Corrugated copper sheet + jacket	52 <sup>d</sup>
LE-XL-UA (halo)			2700
LE-XL-FA			48
EPR (joint)			1228
WM-XL-UA	Steam-cured	e	60 <sup>d</sup>
WM-XL-UA (halo)			2250
WM-XL-FA			7 <sup>d</sup>

- a: All samples were at least 10 cm from the exposed end of cable.
- b: The sample were taken in cable sections stripped of their lead sheath for at least 2 years.
- c: These cables were received without lead sheath or jacket.
- d: These samples were taken in cable stored in dry condition for at least 2 years.
- e: These cable had a jacket

그 이유는 DSC를 이용하면 밀도 이외에도 용해열 및 구성성분에 대한 정보를 얻을 수 있기때다.

NAA 방법에 의한 불순물 분석은 좋은 방법이기도 하지만 NAA 측정기기 자체가 일반적인 방법이 아니기 때문에 원소분석 방법을 사용해도 무난할 것으로 생각된다. 이외의 방법들은 좋은 분석결과를 줄 수 있는 가능성은 충분히 있지만 아직 확립된 방법이 아니며 일반적으로 사용가능한 방법이 아니기 때문에 사용에 어려움이 있다.

## 4. 고분자 특성과 절연성결과의 관계

지금까지는 전력케이블의 절연체로 사용되는 절연재료의 특성분석에 치중하였으나 분석된 측정결과가 전력케이블용 절연재료의 절연성질에 어떤 영향을 미치는지에 대한 언급은 없었다. 절연재료에 대한 분석은 결국 전력케이블 또는 절연재료의 절연성질에 어떤 영향을 미치는 지를 알아내기 위한 것이므로 본 절에서는 고분자 특성이 절연성질에 미치는 영향에 대하여 기술하려고 한다.

전력케이블용 절연재료의 열화현상에 관한 연구중에서 가장

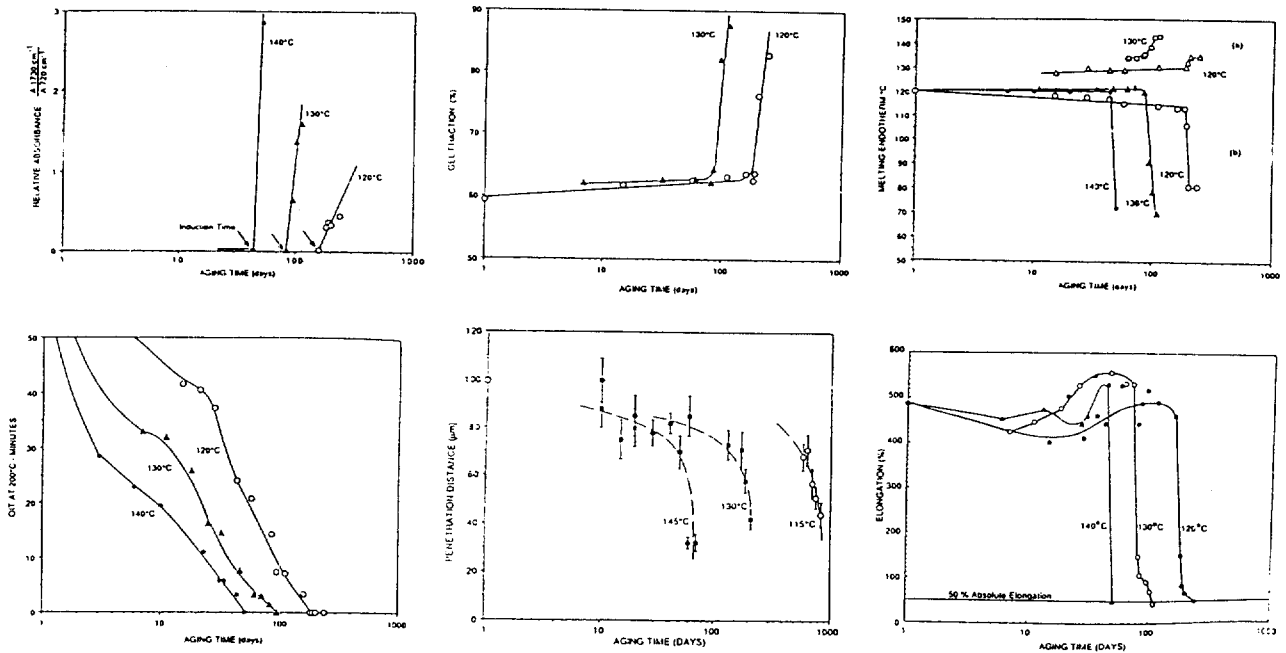


그림 11. XLPE의 열열화에 의한 특성 변화

많이 이루어진 내용은 폴리에틸렌의 열적 열화현상이다. 이는 폴리에틸렌 시료를 열순환 오븐 (air convection oven)에 넣고 일정 시간 지난 후에 화학적 변화 및 전기적 특성 변화를 측정하는 것이 일반적이다.

XLPE의 열적열화시 유발되는 변화가 그림 11에 나와 있다[6]. 이 그림에서 알 수 있듯이 일정 시간이 지난 후 FTIR 방법에 의한 산화 지수 또는 gel 함량 등이 급증하는 반면 결정화도, 용융점 및 연신율등은 급격히 감소한다. 200°C에서의 OIT는 열적 열화가 진행됨에 따라 열화 초기부터 감소하는 것으로 나타났다.

XLPE가 열적으로 열화되면 처음에는 등온결정화가 일어나므로 결정상의 변화가 별로 없으나 결국에는 열화가 진전되어 결정영역이 붕괴되는 결과를 초래한다. 대표적인 예가 그림 12과 13에 나와 있다. 그림 12은 XLPE를 130°C에서 71일과 102일 열화시킨 후 DSC thermogram의 변화를 보이는데, 그림과 같이 일정 시간이 지난 후에는 결정영역이 붕괴되어 melting endotherm이 낮은 온도쪽으로 변하는 것을 알 수 있다[6]. 그림 13은 XLPE를 165°C에서 열화시킨 시편에 대한 X선 회절시험 결과로서 열화가 진행될수록 결정이 파괴되며, 이때 카보닐기가 형성되기 때문에 XLPE의 tangent  $\delta$ 가 증가하는 것을 보여준다(그림 14) [7].

실제 상황에서 사용된 년수에 따른 전력케이블의 성능변화에 대한 결과가 그림 15에 있는데, 이 결과는 일본에서 사용된 33 kV급 전력케이블 327개 케이블 시료에 대한 시험 결과이다[8]. 이 결과를 보면 사용년수가 증가할수록 교류 파괴강도가 감소하고 유전손실이 증가할수록 그리고 bow tie tree의 길이가 증가할수록 교류 파괴전압이 감소하는 것으로 관찰되었으나 케이블의 DC 누설전류는 케이블의 교류

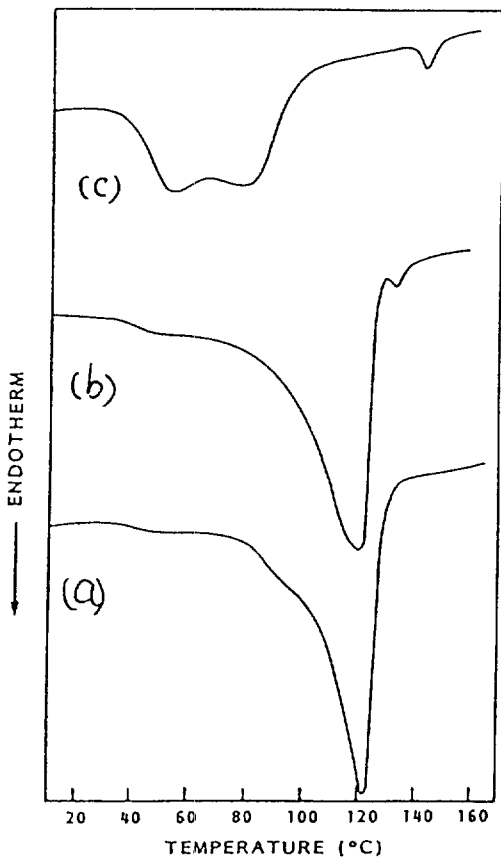


그림 12. XLPE의 열열화에 의한 DSC 곡선 : (a) 미처 XLPE, (b) 130°C, 71일 열화, (c) 130°C, 102일 열

과피전압에는 큰 영향을 못 미치는 것으로 관찰되었다.

4-18년 사용된 66-77 kV급 전력케이블의 경우에는 사용년수에 따라 최대 트리길이가 증가하며 교류 파괴강도가 감소하는 것으로 관찰되었으나 33 kV급 전력케이블과는 달리 사용년수에 따라 유전손의 변화가 매우 미미하며 따라서 유전손과 교류 파괴강도와의 관계가 미약하다는 결과를 얻기도 하였다[9]. 특히 66-77 kV급 전력케이블의 경우에는 케

이블이 물속에 잠겨 있던 부분과 그렇지 않은 부분을 구분하여 실험하였는데, 중요한 사실은 물속에 잠겨 있던 부분의 교류 파괴강도 및 유전손실 등의 전기적 특성이 일반적으로 알려져 있는 것과는 달리 물속에 잠겨 있지 않던 부분과 비하여 큰 차이가 없거나 경우에 따라서는 더 좋은 특성을 갖는다는 것이다. 배전용 전력케이블이 대부분 물속에 잠겨 있는 상황에서 운전되는 국내 실정에 비추어보아 매우 중요한 시험결과라고 할 수 있다. 그러나 이 경우 케이블의 구조, 즉 금속관의 사용여부에 대한 확인이 필요하다.

기존에 발표된 EPRI Report (EL-5387, RP 1782-1)에는 수거된 케이블의 특성을 비교적 자세히 비교되어 있다. 일부분의 결과가 그림 16와 17에 나와 있는데[10], 이 보고서의 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 운전전압과 교류파괴강도와는 무관하다.
- (2) Halo가 없는 경우에는 교류파괴전압과 운전전압과

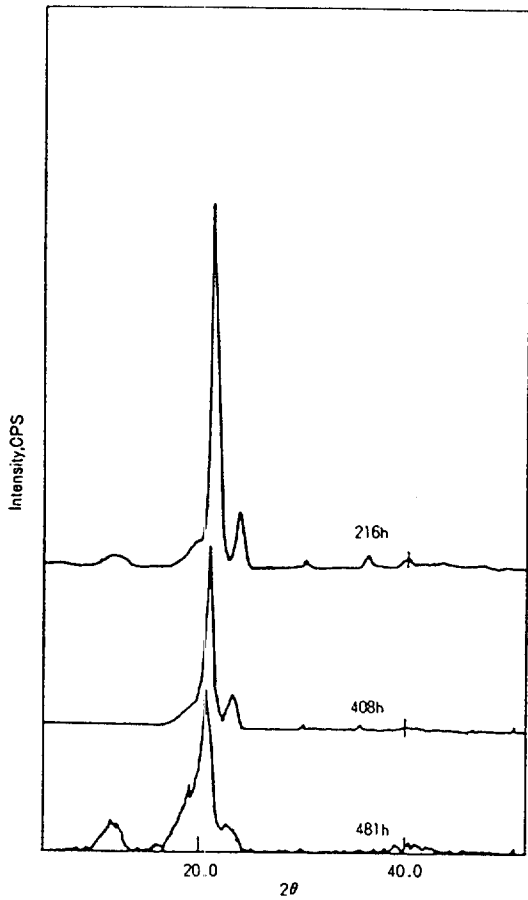


그림 13. 165°C에서 열화된 XLPE의 X-선 회절패턴

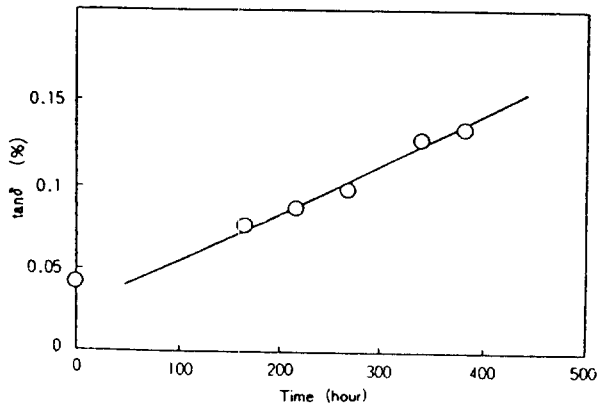


그림 14. 165°C에서 열화된 XLPE의  $\tan \delta$

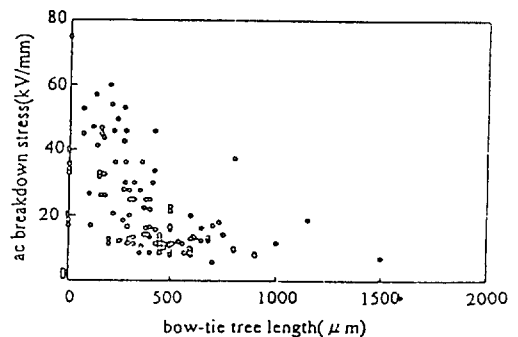
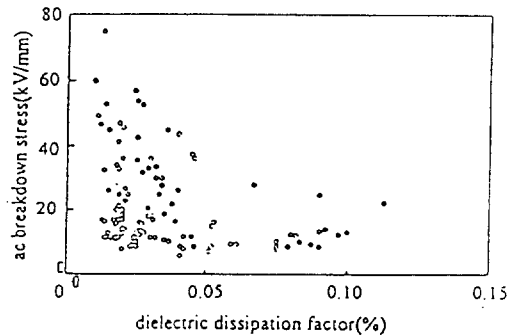
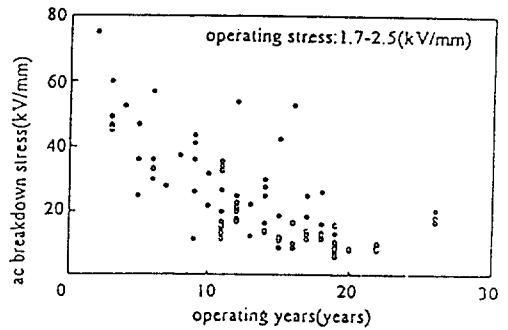


그림 15. 수거된 전력케이블 (33 kV)의 전기적 특성

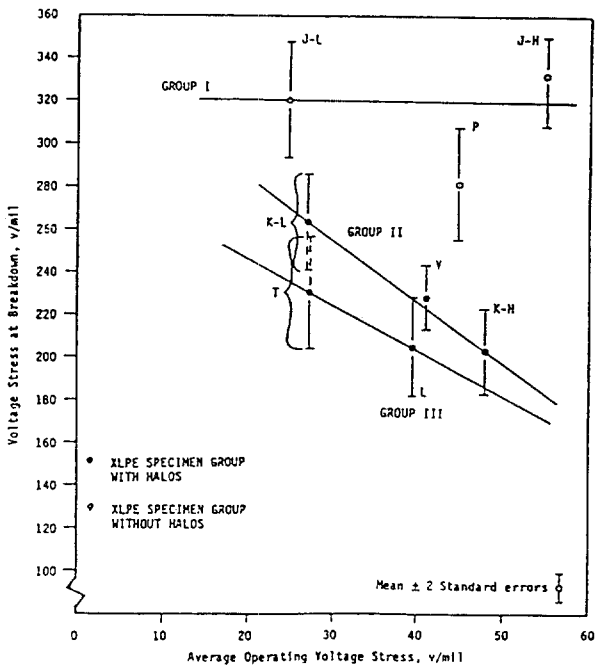


그림 16. 평균운전전계와 절연파괴전계와의 관계

상관관계가 없는 반면 halo가 있는 경우에는 운전 전압이 높을수록 교류파괴전압이 감소한다.

- (3) 수거케이블에서 측정된 가교부산물의 양이 많을수록 교류파괴전압이 낮아지며,
- (4) 밀도, 가교도 및 불순물의 양은 radial distribution을 갖는다.
- (5) 증류수로 세척한 pellet을 사용하면 물에 용해될 수 있는 이온성 불순물이 어느 정도 제거되므로 수트리를 감소시키는 것으로 보아 수용성 이온성 불순물이 수트리를 증가시키는 역할을 한다.
- (6) 케이블의 교류파괴강도는 케이블의 유전손실, 수트리특성 및 수분함량과 밀접히 연관되어 있다.

### 5. 결 론

본 고에서는 전력케이블의 특성분석의 필요성과 사용성에 대하여 간략하게 언급하고 외국에서 수행된 바 있는 전력케이블 특성분석 사례에 관하여 언급하였다. 그리고 절연재료의 열화와 절연능과의 관계에 관한 사항도 언급하였다.

전력케이블 특성분석은 케이블 절연층의 건전성 평가를 통한 열화판정, 국내 전력케이블의 현주소 파악을 통한 문제점 확인 및 개선책 검토, 그리고 차세대 전력케이블을 위한 재료 요구조건의 확립 등을 위하여 반드시 필요한 과제이며, 이는 외국의 분석사례를 통하여 입증되었다고 할 수 있다.

전력케이블의 특성분석은 사고원인을 규명하고 책임을

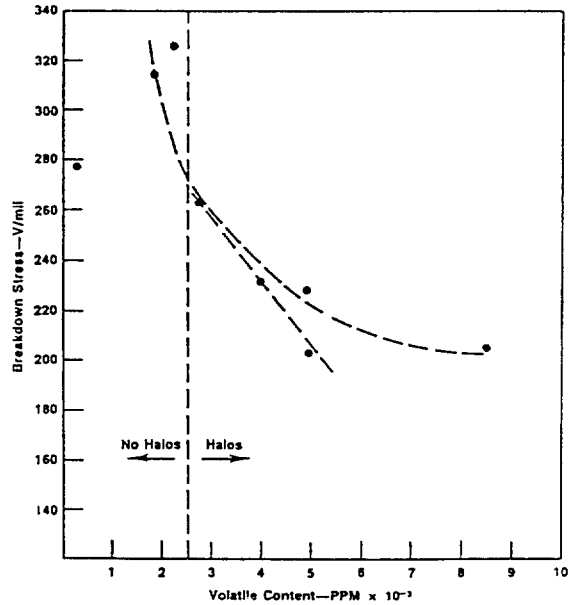


그림 17. 휘발성분 함량과 절연파괴강도의 관계

묻기 위한 작업이 아니라, 우리가 사용하고 있는 전력케이블의 문제점을 파악하고 이를 개선하여 최종적으로는 전력공급의 신뢰성을 높이기 위한 작업이라고 생각해야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 전력연구원 연구과제, 배전케이블 수명예측 기준결정 및 교체 프로그램 작성
- [2] EPRI Reports: EL-5387 (RP 1782-1), EL-6207 (RP 7897-2), EL-7076s (RP 7897-1).
- [3] J. Tanaka and R. Luther, "Analysis of Cables with Visible Halos", *Proc. Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 292-295, 1982.
- [4] P. F. Hinrichsen, A. J. Houdayer, C. Vicat, J. L. Parpal, E. David, J. Roy, and L. Paquin, " $\mu$ -PIXE, UV and FTIR Spectroscopy Studies of Antioxidant Depletion at the XLPE-Semicon Interfaces of HV Cables", *Proc. 5th ICSD*, Leicester, England, pp. 685-689, 1995.
- [5] S. Pelissou, "Impurities in Extruded Cable Components", IERE Workshop on Underground Cables, Toronto, Canada, June 13-16, 1994.
- [6] K. Anandakumaran and D. J. Stonkus, "Assessment of Oxidative Thermal Degradation of Crosslinked polyethylene and Ethylene Propylene Rubber Cable Insulation", *Poly. Engr. and Sci.*, Vol. 32, pp. 1386-1393, 1992.

- [7] J. Tsujimoto, Y. Miyashita, and H. Kato, "On the Characterization of Crosslinked Polyethylene", *Sumitomo Cable Technical Note*, Vol. 80, pp. 49-58, 1990.
- [8] K. Uchida and T. Hirata, "Deterioration of Removed XLPE Cables", *IERE Workshop on Underground Cables*, June 13-16, Canada, 1994.
- [9] S. Nakagawa and M. Jinno, "Electrical Characteristics of XLPE Cable After Service", *IERE Workshop on Unserground Cables*, Toronto, Canada, June 13-16, 1994.
- [10] EPRI Report EL-5387, *Characterization of Failed Solid-Dielectric Cables: Phase 2*, 1987

저 자 소 개



**한재홍(韓在鴻)**

1967년 10월 5일생. 1990년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1996년 고려대 대학원 재료공학과 졸업(공학박). 현재 한국전력 전력연구원 연구원



**김상준(金相俊)**

1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1987년 방송배전 전기기술사. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년~현재 한전 전력연구원 배전자동화 그룹장/책임연구원. 관심분야는 전력케이블, 전기재료, 전기화재, 전기안전



**권오형(權五炯)**

1950년 12월 15일. 1975년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1987년 국제배전기술교육수료(영국). 현재 한국전력 배전처 지중배전부장



**서광석(徐光錫)**

1954년 3월 6일생. 1978년 고려대 공대 재료공학과 졸업. 1982년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1987년 미국 코네티컷 주립대학 고분자 전공(공학박). 1987년~1988년 미국 MIT 고전압연구실(Post-Doc). 현재 고려대 공대 재료공학과 부교수. 당 학회 편집위원