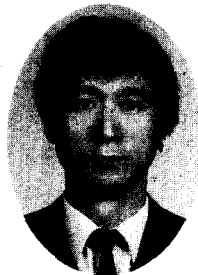


특성분석을 통한 케이블 열화진단의 기본개념



김종은
고려대학교 공학기술연구원
연구원



서광석
고려대학교 재료공학과 교수
전공분야 : 고분자 전기적 성질,
고분자 Compounding 및 가공,
광섬유 센서 기술

1. 서 론

현재 국내에서 사용하고 있는 전력케이블은 가교폴리에틸렌 (XLPE)으로 절연되어 있고 반도체층을 사용하고 있으며 외피는 염화비닐수지 (PVC)를 사용하고 있다. 이러한 구조는 생산공정이 간단하여 경제

적이고 사고 발생시 보수가 수월하다는 장점이 있는 반면, 주절연층이 전압, 수분 또는 기타요인에 의하여 열화되어 절연파괴된다는 단점이 있다.

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

국내의 경우 XLPE 절연케이블을 22.9 kV급 전력케이블에 본격적으로 적용한 후 최근 지중 배전케이블의 절연파괴 사고가 급증하기 시작하여, 전력공급의 신뢰도가 나빠지며 전력케이블의 열화정도 판정이 심각한 문제로 대두되고 있는 실정이며 또한 조만간에 케이블의 교체문제가 심각하게 대두될 전망이다.

지금까지 고분자 절연체 또는 배전케이블의 열화판정을 위하여 여러 가지 전기적인 방법이 제안되었으며, 이들 전기적 방법은 그 동안 케이블의 열화판정에 있어서 많은

공헌을 한 것도 사실이다. 그러나 우리나라처럼 다중접지 방식을 채택하는 경우에는 간단하게 사용할 수 없다는 단점이 있다. 이와 같이 다중접지 방식을 사용하는 경우에는 비전기적 방법을 사용할 수밖에 없으며 많은 경우에 수트리 특성 및 사고빈도를 기초로 하는 통계적인 방법을 사용 한다. 이때 전력케이블 절연체 및 구성성분의 특성분석 결과는 케이블의 열화판정에 매우 귀중한 정보를 제공할 수 있다. 이 케이블 특성분석을 통한 열화판정 방법은 미국, 캐나다 또는 일본 등에서 최근 시도되고 있는 방법으로서 현재 국내에서도 일부 연구를 진행하고 있다 [1-2].

케이블 절연체의 특성평가는 절연체의 특성분석으로부터 시작된다 고 할 수 있다. 전력케이블의 열화판정을 위한 케이블 특성분석은 특성분석 자체도 물론 중요하지만, 특성분석 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 이용하여 케이블의 특성을 분석한다는 것은 일반 전기공학자들에게는 생소한 방법이기 때문에 선뜻 접근하기 어렵다는 단점도 있다. 따라서 본고에서는 전력케이블의 절연체 특성분석의 필요성에 대하여 언급하고자 한다.

2. 전기절연과 절연체 특성 분석 기술

2-1. 열화현상 및 원인규명 과정

폴리에틸렌은 전기절연성이 매우 뛰어나면서 압출공정이 용이하기 때문에 전력케이블의 절연재료로서 가장 많이 사용되고 있기는 하나 여러가지 요인에 의하여 열화되는 단점이 있다. 전력케이블에 사용되는 XLPE의 경우 모든 외적요인에 대한 저항성이 LDPE 보다는 우수하지만 장시간 사용시 열화되기는 마찬가지이다. 이러한 열화현상은 결국은 전력케이블의 사고로 이어지고 이로 말미암아 전력공급상의 신뢰도가 크게 실추되고 있다

이러한 문제는 세계 어느 나라에서나 공통으로 나타나는 특성으로서 최근에 이루어지고 있는 전력케이블의 열화에 관련된 연구는 주로 열화진단 연구와 재료개발 연구가 주종을 이루고 있다고 할 수 있다. 열화진단 연구에 있어서 종래에는 주로 전기적 방법에 의한 평가가 주종을 이루었으나 최근에는 고분자 특성분석 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 외국의 경우 10여년 전부터 사용하고 있는 방법으로서[3], 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.

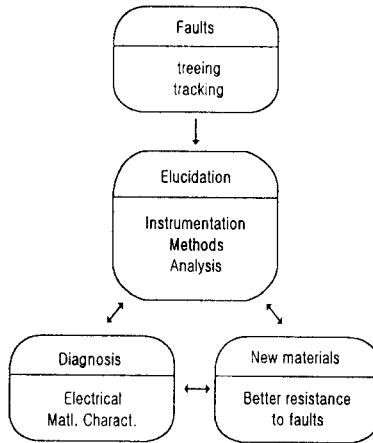


그림 1. 전기적 특성 연구발전 과정

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 변화했을 지를 알 수 있으며, 나아가서 고분자 절연재료를 사용하는 전력 기기의 수명예측까지도 가능하다 할 수 있다. 또한 전기적 열

화현상에 저항성이 강한 고분자를 개발한다는 것은 결국 이 구조적 변화를 방지하거나 또는 상당량 억제할 수 있는 방법을 개발하는 것이라고 할 수 있다.

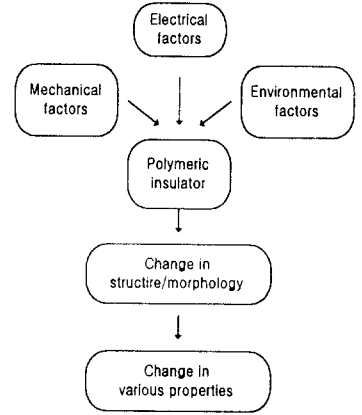


그림 2. 외적 요인과 고분자 특성 관계

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.

2-2. 고분자 특성분석 및 열화 판정

고분자 특성 및 구조/성분 분석 방법은 매우 다양하다. DSC, TGA, DMA, TMA 등을 통한 열적 성질, Tensile, Impact test 등을 통한 기계적 성질, Conduction, Break-down, Treeing, Space charge 등의 측정을 통한 전기적 성질들을 측정할 수 있다. 또한 FTIR, X-ray, SEM/EDX, NMR, LC, GC, AA 등의 방법을 이용하여 고분자가 어떤

구조를 가지고 있으며 어떠한 성분으로 구성되어 있는지 측정할 수 있다. 이러한 다양한 방법을 통한 고분자의 분석은 일정한 규칙에 의하여 이루어지는 것이 아니라 측정하고자 하는 대상에 따라 실험방법이 결정되는 것이 일반적이며, 통상한 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 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 용 등의 관계가 그림 3에 개략적으로 나와 있다. 그림 3을 보면 알 수 있듯이, 신뢰성 있는 열화판정을 위해서는 많은 부분에 대한 고찰이 필요하다. 즉, 케이블이 사용된 년수, 고장횟수, 중성선 부식정도, 절연층의 전

기전도도, 그 동안의 고장원인 및 빈도 등 많은 정보가 필요하다. 일반적으로 지금까지 이루어진 열화판정은 대부분 전기적인 측정방법에 의존하였으나 이 방법도 또한 많은 문제점을 안고 있다.

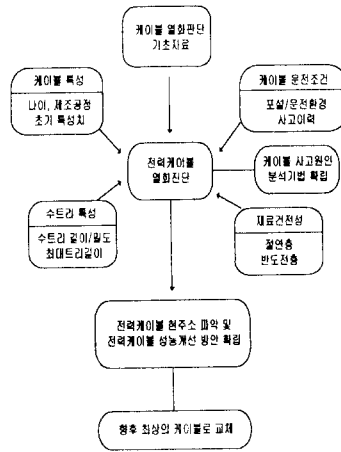


그림 3. 열화판정을 위해서 고려해야 할 사항

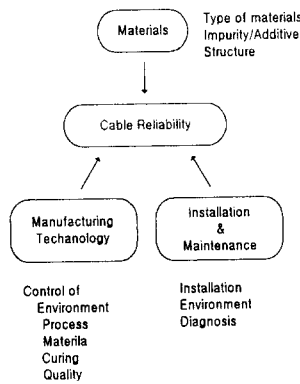


그림 4. 케이블 신뢰도에 영향을 미치는 요인

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 압출 가공시 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, 판로에 차 있는 물 등은 케이블의 수트림 현상을 악화시키는 직접적인 요인이다.

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 수트림 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 운전에 관한 사항을 기본으로 알아야 한다. 그리고 경면케이블 또는 사고케이블로부터 분석된 결과, 즉 육안 또는 현미경

검사에 의한 수트리 특성, 특히 최대트리길이 또는 전기트리로의 전이정도 등을 파악하고, 나아가서 절연층에 대한 정밀검사를 통하여 절연수명과 관련 깊은 요인을 찾아야 한다. 특히 절연층의 건전성은 동일 종류의 케이블의 잔여수명을 판단하는데 매우 중요하므로 반드시 확인해야 한다.

지금까지 알려진 일반적인 방법은 운전에 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 반도체층인데, 이 반도체층은 균일한 전계 분포를 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 반도체

층을 포함하는 도체 및 중성선에 이르는 거의 전 성분에 대한 분석이 이루어져야 하고 각 성분의 특성을 종합하여 판단해야 한다.

3. 결 론

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 전력케이블의 현주소를 정확하게 파악할 수 있다. 22.9 kV 전력케이블의 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 상태에 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 절연파괴 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 차세대에 사용할 전력케이블은 현재 케이블의 문제점을 모두 개선한 최상의 케이블이 되어야 한다.

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

참 고 문 헌

- [1] 배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축, KEPRI Report, TR.95YJ16.L. 199787, 1997.
- [2] K. S. Suh, C. H. Lee, M.K. Lee, J. H. Han and S. J. Kim, "Characterization of XLPE-Insulated Underground Residential Power Cables", *Trans. KIEE*, 45(6), pp. 882-889, 1996.
- [3] EPRI Reports: EL-5387 (RP 1782-1), EL-6207 (RP7897-2), EL-7076s (RP 7897-1).

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >