



절연재료의 열화 및 평가진단기술 - 전력케이블 절연재료를 중심으로 -

박 대 회*, 임 기 조**, 김 상 준***, 서 광 석[§]

(*원광대 공대 전기공학부 조교수, **충북대 공대 전기공학과 교수, ***한전 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원,
[§]고려대 공대 재료공학과 부교수)

Key Words : 전력케이블, 절연열화, 절연파괴, 열분석

1. 서 언

절연재료는 상의 형태에 따라서 고체, 액체, 기체 등으로 구분되며, 전력기기의 요구 절연성능에 따라서 구분하여 사용되고 있다. 최근에 초고압화와 함께 절연재료의 열화는 전력기기의 성능저하는 물론이고 수명을 단축시키고 있어, 예방진단의 관점에서 많은 연구가 요구되고 있다.

절연열화는 시스템에 필요한 성능이 저하하는 방향으로 비가역적으로 변화하는 것으로, 열화과정으로는 절연시스템 고장율이 시간 경과와 함께 증가하는 경향으로 된다. 열화의 요인은 열, 전압, 기계적력과 기타의 환경 요인 및 그들의 몇 가지의 환경 요인에 의한 것이 있다. 절연열화를 열열화, 과전열화 기계적 열화 및 복합열화로 구분되어지며, 절연열화는 전력기기의 신뢰성을 단축시키고, 절연사고로 인한 피해는 점점 증가 추세에 있다. 본 고에서는 전력케이블의 고체절연재료의 열화기구, 사고 케이블절연재료의 분석 결과와 열화진단법에 대하여 소개하고자한다.

2. 고체절연재료의 열화기구

전력기기의 절연재료는 복합적인 열화 요인에 의해서 절연 성능이 저하되는 것으로, 전계, 열, 기계적인 영향 등을 생각할 수 있다. 이와 같은 열화에 대하여 각각의 조건하에서 열화의 기구를 검토하면 다음과 같다.

전력케이블의 대용량화는 연속사용온도하에서 절연재료의 열분해나 산화 등의 화학반응을 쉽게 일으키고, 그의 기계적 특성이 저하하는 과정을 열열화라 한다. 이 열화의 기본적인 과정은 처음에 어떤 원인에 의해서 발생한 Radical이 고분자의 주쇄나 측쇄와 반응하고, 연속적으로 서서히 라디칼을 발생시키는 것과 함께 쇠를 절단시키거나 2중결합을 생성시키거나 하는 화학반응이다.

열열화를 실용적 견지에서 보면, 라디칼이나 주쇄절단의 수, 농도라는 마이크로파라미터 보다는 기계적 성질(인장강도, 신율)이나 전기적 성질(절연저항, $\tan \delta$, 절연파괴강도 등)과 같은 파라미터가 중요하다.

고체절연재료에서 많이 발생되고 있는 Treeing열화는 절연체에 국소적으로 교류의 높은 전계가 인가되어지면 Tree상의 절연 파괴로가 형성되어 진전되어진다. 먼저 Treeing현상에는 (i)발생과정(유도시기)과 (ii) 진전과정이 있다. 발생 과정은 (i)기계적피로 (ii)미소부방전에 의한 열화 (iii) 전하주입추출에 의한 열화 등이 있다. 기계적 피로에서는 Maxwell응력의 반복에 의해 기계적으로 피로하여 전극 근방에 crack이나 보이드가 형성되어진다. 미소부방전에 의한 것으로는 현재의 측정 기술로는 검지 가능하지 않는 정도의 미소한 부분방전이 계면에서 발생하는 것으로 상상하고 있다.

또한 전하주입추출모델은 전계로부터 에너지를 얻은 전자와 재료와의 상호작용을 상상할 수 있다. 물질 내의 전자는 가속되어진 원자와 충돌하여 재료를 변질시키거나, 포획 준위에 Trap되어 전극이 정전압의 사이클에서는 전계강도를 상승시킨다. 재료 변질은 자유 체적의 증가라든가 산화의 진행 등이 있다. 이와 같은 재료 변질은 국소적인 절연파괴강도는 저하시키거나, 트랩 되었던 전자가 전계강도를 강하게 하는 협조 현상에 의한 Tree발생을 일으킨다.

고체 절연재료의 기계적열화는 고분자에 응력을 가할 때 일어나는 주쇄의 절단 등에 기인하는 기계 특성이나 전기특성의 저하를 시키는 것으로, 이 과정에는 (i)응력완화 (ii) 반복응력에 의한 피로가 있으며, 고분자의 응력완화에는 물리적인 완화와 화학적인 완화로 구분하고 있다. 전자는 분자쇄의 재배열에 대응하며, 후자는 메카노케미칼한 반응이 관여하는 화학반응으로서 주쇄나 측쇄의 절단반응, 교환반응 및 가교반응이 있다. 절연표면상에서 crack이 시작되면 산소나 화학적으로 촉진되어지며, 한편 반복응력에 의한 피로는 회전진동이나 전자진동을 받으면 전기 기기의 절연을 급속하게 저하를 일으키는 중요한 과정이다.

전력기기의 사용조건은 고성능화, 대용량화와 함께 열화의 요인이 2중이상의 스트레스에서 절연성능의 저하를 일으키는

복합열화가 있다. 지금까지 연구의 대상으로 되어 있는 복합 요인열화는 수Tree열화, 방사선·열열화, 과전·기계·열열화 등이 있으며, 수Tree열화의 경우는 물과 전계에 의해서 일어나며, 각각의 조건하에서도 열화를 일으킨다.

수트리 열화는 수분을 포함한 절연재료에 전압이 인가되 되면 트리의 열화흔적이 수트리로 성장한다. 수트리는 전기트리와 달라서, 권Channel이 아니고 미소보이드의 집합체이다. 수트리는 트리상의 수트리와 Bow-tie트리상수트리로 구분되어지고, 전력케이블의 반도체층의 돌기부 등에서 발생하고 후자는 절연체의 이물이나 보이드에서 발생되어진다. 이와 같은 수트리의 발생기구는 제 1단계로서 물의 고전계부에 의해서 모아지고, 제 2단계로서 수트리를 발생시키는 과정으로 나누어진다. 제 1단계는 교류전계하에서 고전계부로 물질이동이 일어나는 과정으로서 유전영동이 일어난다. 제2단계로서 기계적 및 화학적(주로 산화)열화를 포함한 일종의 스트레스 Cracking이다. 절연재료의 미시적인 부분에 걸리는 응력의 발생 원인은 자기적 응력으로 (i) 보이드 근방의 인장력 (ii) 보이드에서 풀리머로 젯트류 (iii) 물의 전계응축등으로 각각을 설명할 수 있다. Joule열, 유전가열, 전하의 발생 등도 열화의 화학반응에 관여하고 있으며, 방사선·열열화에서는 유기절연재료가 고온 하에서 방사선이 조사되어지므로 절연특성이 저하하여 간다. 방사선 열화의 과정은 고분자에 방사선이 조사되어지면 라디칼이 발생하고, 가교나 산화 반응이 일어난다.

전압·기계·열열화에서는 전압 및 온도의 스트레스를 받는 절연체의 열화에 대하여 최근에는 이들의 3가지의 요인을 현상론적으로 동일 양으로 나타내는 평가하는 방법이 개발되어지고 있다. 그의 하나로서 Life Capacity K_0 를 정의하고 열화의 속도 K 를 V^m (전압), $K_0 \exp(-B/T)$ (열), ϵ^a (기계적)으로 표현으로 $\int kdt$ 가 K_0 에 달하기까지의 시간으로 생각하는 해석 방법이 이용되고 있다.

3. 절연파괴에 의한 열화평가법

절연재료의 열화수명은 전기적, 열적, 기타의 환경 스트레스 등의 요인으로 열화가 진행되고, 절연파괴라는 파국적 과정에 이른다. 열화되어진 절연재료를 진단 혹은 수명을 예측하기 위하여 절연열화의 현상적인 파악이 먼저 규명되어야 한다. 절연재료의 수명 해석을 잘 표현할 수 있는 모델을 이용하는 것이 적당하다. 예를 들면 수명의 단시간대와 장시간대의 열화의 기구를 먼저 고려하여 수명모델을 결정해야 된다.

수명은 미시적인 물리적 원인에 의해 거시적으로 일어나고, 절연파괴의 형태로 나타내는 것이 많은 실험 결과로부터 증명되어 졌으며 절연파괴는 시간적으로도 공간적으로도 확률적인 분포를 나타낸다. 이와 같은 특성을 고려하여 최근의 절연재료의 수명의 연구에는 수명 분포를 고려한 model을 생각해 하여 통계적 방법에 의해서 해석하는 것이 합리적이다.

본 평가법은 케이블의 절연체를 파괴시킴으로 열화진단을 하는 방법에 대하여 간단히 소개한다. 보통 절연재료는 장시

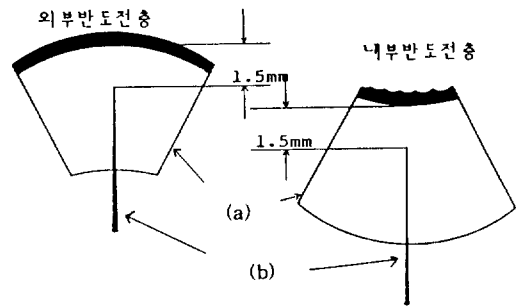


그림 1. 케이블절연체의 절연과파괴용 Needle전극 (a) 절연체 (b) Needle

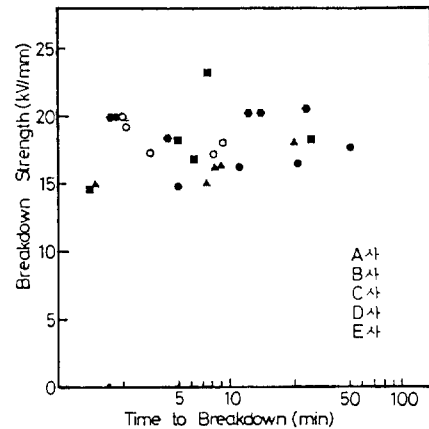


그림 2. 각 시료별 절연과파괴강도와 파괴시간의 결과

간의 수명을 대상으로 하는 것으로, 수명시험시간은 대단히 길어진다. 그러나 시간을 단축시키고, 실제의 케이블 재료의 재현성을 갖도록 샘플 시료에 대하여 그림 1과 같은 케이블의 반도체층과 Needle전극을 이용한다. 이와 같은 시료로부터 절연과파괴의 특성을 각 시료별로 나타내면 그림 2와 같은 결과가 얻어진다. 측정결과는 거의 비슷하게 보이나 실제로 통계적인 방법을 이용하면, 열화시료와 신품과의 차이, 회사별로 a, b, E_L , E_0 , t_0 의 값이 다를 수 있다. 이와 같은 결과로부터 각 시료의 열화상태 및 수명의 예측도 가능할 것으로 사료된다. 많은 파괴강도의 결과를 평가하기 위하여 통계적인 Weibull 분포함수를 이용하면, 일정시간과 전압하에서의 각각의 분포함수식 $F(t) = 1 - \exp [- (t / t_0)]^{1/b}$ (t 는 시간변수, t_0 는 척도모수), b 는 형상모수 과 $F(E) = 1 - \exp [- (\frac{E - E_L}{E_0})^{1/a}]$ (E ; 인가전압 변수, E_0 ; 척도모수, E_L ; 위치모수, a ; 형태모수)로부터 각각의 상수 a, b를 구하고, 케이블의 수명계수 n 을 구한다. 즉 절연체에 과전하는 스트레스 E 와 파괴시간(수명)의 평균치(혹은 중앙치) t 와의 관계 $F(E, t)$, $V-t$ 특성은 $t = k E^{-n}$ 의 $n(=b/a)$ 승축 모델에 적용한다. 이와 같은 결과는 실 크기 절연체의 수명을 외삽할 수 있고, 실용적인 면에서 볼 때 케이블의 수명평가 및 절연

체의 열화특성을 파악하는데 기초가 될 것으로 사료된다.

이와 같이 Weibull 확률분포를 이용하여 초기 시료와 열화 시료를 비교하여 n값을 구분하는 방법으로 아직은 완전한 결과가 얻어지지 않았으나, 지금까지 이용해 왔던 절연및 유전 특성 평가법보다는 평가법으로서 신뢰성이 높을 것으로 사료된다. 그러나 하나의 문제점은 시료를 케이블로부터 채취해야 하는 어려움이 있으나, 아직은 연구단계로, 시험방법의 확립과 통계적인 열화기구의 S/W는 현재 연구중에 있다.

4. 전기절연과 고분자 특성분석 기술

폴리에틸렌을 포함하는 모든 고분자 절연재료에 기계적, 전기적 또는 환경적 외부요인이 가해질 경우 고분자의 물리적 특성은 반드시 변화하는데, 이는 결국 고분자 절연재료의 미시구조 또는 특성의 변화가 있었기 때문이다. 이러한 변화는 초기상태에는 측정기기로 측정될 수 없을 정도로 미미한 상태이나 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 변화했는지를 알 수 있으며 나아가서 고분자 절연재료를 사용하는 전력기기의 수명예측까지도 가능하다고 할 수 있다. 지금까지의 대부분의 연구는 전기적 특성과 구조적 특성을 별도로 생각하는 경향이 강하였으나 두 특성은 매우 밀접하게 관련되어 있다. 결국 고분자 절연재료를 사용하는 전력기기에서 어떤 현상이 발생하면 이에 대한 현상구명을 통하여 진단방법및 새로운 재료를 개발하는데 있어서 가장 기본이 되고 중요한 것은 고분자 특성변화 또는 구조변화를 관찰할 수 있는 분석기법의 확립이라고 할 수 있다.

고분자 특성및 구조및 성분 분석방법은 매우 다양하며, 고분자의 분석은 일정한 규칙에 의하여 이루어지는 것이 아니라 측정하고자 하는 대상에 따라 실험방법이 결정되는 것이 일반적이며, 통상 여러 가지 방법을 사용하여 결과를 얻은 다음 이를 종합적으로 판단하여 그 재료의 특성을 파악한다.

5. 국내 지중배전케이블 분석사례

본 분석에 사용된 케이블은 약 10년전 전식가교방식으로 제조된 22.9 kV CN/CV 케이블로서 전력구내에서 사용되었기 때문에 수분의 대량유입은 없었음을 미리 밝히며 본 고의 특성상 수트리 관찰에 관한 결과는 수록하지 않으며 케이블 열화판단에 도움을 줄 수 있는 결과만을 수록하기로 한다.

먼저 그림 3은 절연층의 각 부위에서 채취한 시료에 대한 FTIR 분석결과 중 1700 cm⁻¹ 영역에서 나타나는 피크의 단위두께당 흡광도의 분포도를 보여 준다. 이 분포도를 보면 절연층의 외도부근에서 흡광도가 급증하는 현상을 볼 수 있다. 이는 결국 외도 부근의 절연층에서 화학반응이 일어났다는

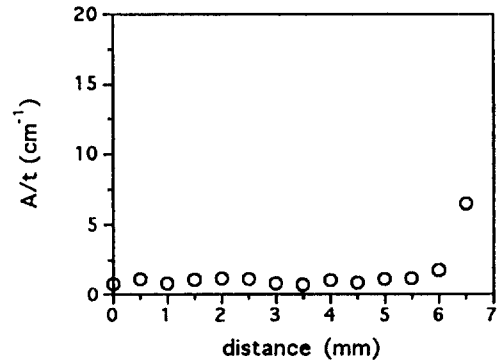


그림 3. 케이블 절연층의 1700cm⁻¹피크의 단위 두께당 흡광도의 분포도

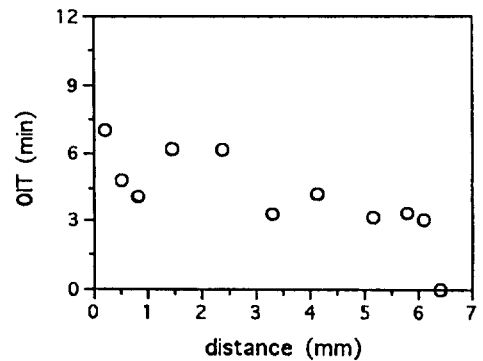


그림 4. 케이블 절연층의 산화유도시간 분포도

표 1. 케이블 반도체층의 불순물 분석 결과

원소	내부반도체	외부반도체	EPRI 분석결과
Ca	312	414	51
Mg	46.8	8031	0
K	199	141	23
Fe	137	82.8	0
Cu	0	999	11
Al	446	73.1	26
Si	0	1026	0

것을 의미하는데, 이는 산성의 카보닐기 (acidic carbonyl) 피크로서 산화반응이 일어났음을 의미한다.

그림 4에는 절연층의 각 부위에 대한 산화유도시간의 분포도를 보여 주는데, 이 결과를 보면 절연층의 외도부근의 산화유도시간이 측정이 어려울 정도로 낮음을 알 수 있고, 이는 결국 앞의 FTIR 결과에서 보여 준 바와 같이 외도부근의 절연층이 심각하게 산화되었음을 의미한다. 표 1를 보면 반도체층에 들어 있는 불순물의 종류 및 함량이 나와 있는데, 이를 보면 반도체층에는 여러 종류의 불순물이 있으며 함량은 종

참 고 문 헌

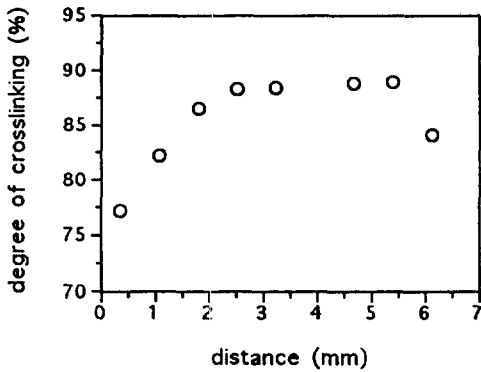


그림 5. 케이블 절연층의 가교도 분포도

류에 따라 심지어 거의 8000 ppm에 이른다. 이러한 수치는 외국의 분석사례에서는 찾아볼 수 없을 정도로 높은 수치로서 약 10년전 국내 전력케이블에는 불순물이 많은 반도체 재료를 사용했음을 알 수 있다. 또한 가교도 분석결과가 그림 5에 나와 있는데, 이 결과를 보면 절연층의 가교도가 77-88% 정도로서 비교적 높다. 이러한 분석결과를 종합하면 본 전력케이블의 경우 외도부근의 절연층이 심하게 열화되어 있음을 알 수 있고 이때 반도체층에 들어 있는 불순물이 일부분 기여했을 것으로 생각된다.

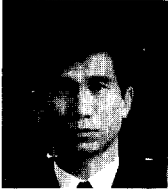
앞에서 언급한 내용을 보면 전력케이블용 재료분석에 있어서 다음과 같은 몇 가지 중요한 사실을 알 수 있다. 첫째, 절연재료의 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 절연층의 여러 부분을 분석하여 분포도를 작성해야 한다는 점이다. 종래에는 절연층의 어느 특정 부위에서 채취한 시료만을 분석하였는데, 이는 올바른 방법이 아님을 알 수 있다. 둘째, 전력케이블용 재료의 특성분석이 전력케이블의 현 상태를 파악하는데 매우 중요한 정보를 줄 수 있다는 사실이다. 즉, 본 분석에 사용된 전력케이블의 경우 절연층의 매우 불안한 상태임을 알 수 있으며 실제로 동종의 케이블의 사고가 많이 보고된 바 있다.

6. 결 언

전력기기의 절연열화는 복합적으로 이루어지는 것으로, 절연성능저하를 사전에 파악하고, 평가하기 위해서는 열화 Data·실험Data의 종합적인 분석평가 기술이 요구된다, 절연재료의 열화진단은 전기적인 평가법만이 아니고 고분자의 특성 분석적인 측면에서 접근과 열화판정기준의 설정이 시급하게 요구되고 있다. 이와 같은 절연진단 기술은 전력설비의 보수지원의 고도화 및 사고예방을 위하여 지속적인 연구가 필요하고, 절연잔여수명을 추정하는 기술의 확립도 요구되고 있다.

- [1] Metra, P., Occhini, E., and Portinari, G., High voltage cables with extruded insulation-satistical controls and reliability evaluation, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 94(3), 967, 1975.
- [2] Devaux, A., Oudib, J. M., Rerolle, Y., Jocteur, R., Noirclerc, A., and Osty, M., *Reliability and Development towards High Voltages of Synthetic Insulated Cables*, CIGRE Paper 21-10, CIGRE, Paris, 1968.
- [3] Kaneko, R., Haruta, K., Sugiyama, K., Consideration on impulse breakdown stress in power cables by application of statistical method, (in Japanese), *Trans. Inst. Elec. Eng. Jpn.*, 93-B(4), 147, 1973.
- [4] Matsuba, H., *Reliability Study of a System Consisting of a Cable and its Accessory*, (in Japanese), Proc. 7th Symp. Electr. Insul. Mats., Institute of Electrical Engineers of Japan, Tokyo, 1974, 163
- [5] Tanaka, T. and Okamoto, T., Modified Weibull distribution-distributed lowest voltage model unpublished.
- [6] Matsuba, H. and Maruyama, Y., *Deviation from the Weibull Distribution Fuction*, (in Japanese), Proc. 7th Symp. Electr. Insul. Mats., Institute of Electrical Engineers of Japan, Tokyo, 1974, 163.
- [7] A.Kelen : "Aging of Insulating Materials and Equipment Insulation in Service and Tests," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-12, 55 (1977)
- [8] 杉江 : 「熱劣化」, *電學誌*, 95, 380 (昭 50-5)
- [9] 電學會絶縁材料微小放電劣化調査専門委員會 : 「部分放電劣化」, *電學技報*, 第II部, No. 164 (昭 59)
- [10] 田中 : 「高電界下での高分子の絶縁破壊前驅現象」, *靜電學誌*, 9, 138 (昭 60-3)
- [11] 岡本・田中 : 「ポリエチレン中トリ-發生に伴う非破壊性放電パルス」, *電學論A*, 104, 613 (昭 59-11)
- [12] IEC Pub. : "Test Procedures," No. 792-1 (1985)
- [13] 電學會絶縁材料直流・インパルストリ-インク調査専門委員會 : 「有機絶縁材料における水トリ-について(3)」, *電學技報*, 第I部, No.134 (昭 57)
- [14] I. Kuriyama, N. Hayakama, Y. Nakesa, J. Ogura, H. Yagyu & K. Kasai : "Effect of Dose Rate on Degradation Behavior of Insulating Polymer Materials," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-14, 272 (1979)
- [15] 電學會絶縁システム複合ストレス劣化調査専門委員會 : 「絶縁システム複合要因劣化に関する研究の現状」, *電學技報*, 第II部, No.225 (昭61)

저 자 소개



박대희(朴大熙)

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년-89년 일본 오사카대 전기공학과 졸업(공박). 1979년-91년 금성전선(주) 연구소 선임연구원. 현재 원광대 공대 전기공학부 조교수. 당 학회 편집위원 및 조사위원.



서광석(徐光錫)

1954년 3월 6일생. 1978년 고려대 공대 재료공학과 졸업. 1982년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1987년 미국 코네티컷 주립대학 고분자 전공(공박). 1987년-88년 미국 MIT 고전압연구실(Post-Doc). 현재 고려대 공대 재료공학과 부교수. 당 학회 편집위원.



임기조(林基祚)

1852년 5월 20일생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977년-81년 국방과학연구소. 현재 충북대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.



김상준(金相俊)

1951년 2월 7일생. 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1987년 발송배전 전기기술사. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1976년-현재 한진 전력연구원 배전자동화그룹장/책임연구원. 관심분야 전력케이블, 전기재료, 전기화재, 전기안전.