

고분자 애자의 열화 진단



1. 서론

최근 고분자 재료는 그 우수한 전기적, 기계적 특성에 의하여 옥외용 고압 절연기기 즉, 선로나 발변전소의 애자(line and station insulators) 상간 스페이서(phase spacers), 지중 케이블의 단자, 서지용 피뢰기의 하우징(surge arrester housing) 등의 절연재료로서 점차 주목을 받기 시작하고 있다. 이것은 고분자 절연물이 갖는 다음과 같은 몇몇 중요한 특성에 기인한다.

우선 고분자 애자는 가볍고 내충격성이 뛰어나고 우수한 발수성을 가지며 또한 전기절연성이 기존의 절연재료를 능가하고 있다.

고분자 재료의 내충격성을 이용한 예로 고분자 피뢰기 하우징은 점성과 탄성특성이 뛰어난 재질로 이루어져 있어 피뢰기 동작시 폭발을 완화시켜 피뢰기 동작시 하우징의 파손으로 인한 손상을 최소화시킨다.

또한 고분자 애자는 우수한 발수성을 갖고 있어 누설전류에 대한 높은 저항을 나타냄은 물론 오염조건하에서도 오염물질의 부착이 용이하지 않다. 이러한 특성에 의해 실리콘 고무의 경우 수년동안 사용한 후에도 발수성이 유지되어 절연성능에 거의 변화를 일으키지 않는 것으로 알려져 있다.

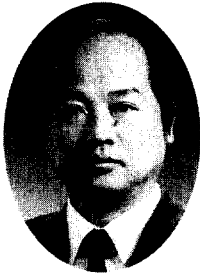
옥외용 절연재료로서 애자는 전기적 절연효과 이외에도 기계적인 기능을 갖도록 이루어져 있다. 이러한 다양한 기능이 요구

되는 옥외용 절연재료 분야에서 최근까지 세라믹이나 글라스 애자가 거의 독점적인 지위를 차지하여왔다. 세라믹 계통의 무기계 절연물질이 애자나 부싱 및 각종 하우징 재료로 이용되게 된 것은 이들 재료가 우수한 기계적 강도를 가지며 또한 전기절연성이 뛰어나기 때문이다.

반면 초기에 개발된 유기 고분자 절연재료는 전기절연성은 우수하지만 기계적인 강도가 만족할 만한 수준에 도달하지 못하였기에 절연전선이나 케이블등 각종 옥내용 절연재료 분야에서만 적용되어 왔으며 옥외용 절연재료로서는 이용되지 못하여 왔다. 그러나 유기 고분자 화학 기술의 발달로 인하여 고분자 절연재료도 우수한 기계적 강도를 갖게 되어 점차 옥외용 절연재료 분야에서도 적용되어가고 있는 실정이다.

한편 무기물계 절연재료의 자연환경에 대한 열화는 거의 무시할 수 있을 정도로 내후 특성이 뛰어나지만 유기물 절연재료는 물질의 특성상 무기물 절연재료에 비하여 옥외의 각종 자연 환경에 의한 노화의 현상이 비교적 활발하게 나타나는 것이 일반적인 특성이다.

유기 고분자 절연재료의 노화(aging) 현상은 자연환경 속에서의 수분, 먼지, 대기중의 오염물질이 절연물의 표면에 부착하여 화학적 반응을 일으켜 일어나는 노화, 태양의 복사와 냉각에 의한 열 사이클에서 오는 노화, 태양광의 자외선이나 공기중의 오



한 상 옥

충남대학교 전기공학과 교수
당학회 산학협동이사
당학회 충청지부장



박 강 식

대덕대학 전기과 교수



한 상 일

충남대학교 전기공학과
박사과정

존이 절연물의 화학적 결합에 손상을 주어 일어나는 노화 등 다양한 요인들에 의해 일어나게 된다.

우선 수분에 의해 유발되는 열화를 살펴보면 수분은 안개나 강우에 의해 절연물 표면에 수막을 형성시킨다. 이때 형성된 수막은 절연물 표면의 누설전류를 증가시키며 특히 공기중의 먼지나 염분 기타 각종 공해 물질들과 상호작용하여 절연물의 표면을 열화를 촉진시킨다.

표면 열화 그 자체가 전기적 성능을 저하시키기도 하지만 보다 큰 영향은 표면누설전류의 증가에 있다. 절연체에 전계가 인가된 상태에서 표면이 오손되거나 침식을 일으키면 누설전류의 증가를 가져오며 그 결과 표면 누설전류에 의한 발열을 일으키게 된다.

이 때 온도가 상승하면 누설전류를 증가되기도 하지만 표면이 강우 등에 의해 젖었을 경우에는 이 발열에 의해 표면이 국부적으로 건조시되는 “드라이 밴드(dry band)”가 형성된다. 이 드라이 밴드는 절연체 표면의 전계 분포를 왜곡시켜 국부적인 아크방전 (spot discharge)을 유발시키며 그 때 발생하는 열은 절연물 표면을 화학적으로 분해시켜 절연물 표면의 도전성을 증대시켜 열화를 촉진시키고 “트래킹”이라는 흔적을 남겨 놓게 된다. 이 트래킹은 방전의 흔적이라 할 수 있으며 결국 이 상태는 절연물이 절연과괴 직전단계에 도달하였음을 나타낸다.

특히 해안가와 같이 대기의 염분농도가 높은 지역에서는 이와 같은 영향이 현저하게 나타난다. 또한 공장지대의 경우 오염물질 농도가 높아지면 절연물 표면의 누설전류를 증가시키거나 강우의

산성도를 높여 절연재료의 표면의 열화를 촉진시키게 된다.

이외에도 옥외절연물의 영향은 주는 여러 가지 요인들 중 하나는 자외선이다. 자외선은 가시광선보다 짧은 파장을 갖는 주파수 대역의 광으로서 자외선의 높은 에너지는 유기 고분자 절연물의 화학결합을 깨뜨리는데 충분하다. 이것은 결국 절연물의 표면에 극성기를 도입시켜 수분의 부착을 용이하게 하고 누설전류를 증대시키는 효과를 가져오게 된다.

이와 같은 각종 열화 요인들은 실제 필드 상황에서 단독적인 효과에 의한 것이라기 보다는 두 가지 또는 그 이상의 요인들이 상승작용을 일으켜 열화를 보다 가속시키는 효과를 가져오게 된다. 그러나 실제 필드 서비시하에서 열화에 의해 나타나는 현상은 대개 두가지 형태 즉, 트래킹이나 침식의 형태로서 나타나 절연물을 사고에 이르게 한다.

따라서 절연물에 대한 열화현상규명과 열화 진단기술은 절연물의 장기적인 성능을 평가하고 그 절연물의 잔류수명을 예측하는데 있어 매우 중요한 수단이 되고 있다. 그리고 열화 진단을 위해서는 열화의 원인이 되는 메카니즘의 상세한 이해를 필요로 한다. 그러나 옥외용 절연재료 분야에서 고분자 애자가 채용되기 시작한 것은 극히 최근의 일이기 때문에 이에 대한 기술은 매우 미미한 상태이다.

따라서 본 고에서는 이와 관련된 문제들을 다루려는 시도로 열화진단 및 평가하기 위한 가속열화법에 대하여 설명하기로 한다.

2. 재료열화 특성을 평가하기 위한 가속열화시험

2.1 복합 가속열화 장치

이 시험법은 자연환경의 여러 가지 열화 요인들을 그대로 모의하기 위하여 챔버 내부에 별도의 각종 열화 장치를 부착하여 각 열화 요인들을 반복적으로 가하여 고분자 절연물의 전기적, 기계적 성능을 평가하는 시험법이다.

이 시험법은 시험목적에 따라 각기의 단일 열화만을 시험할 수도 있고 두 가지 이상을 조합시켜 사이클화하여 시험할 수도 있는 구조로서 자연의 환경 조건을 거의 동일하게 모의할 수 있는 장점이 있다. 반면 이 복합가속열화 시험장치는 여러 가지 가속열화 시험장치를 통합시킨 형태이기 때문에 각 열화시험장치가 상호간에 영향을 주는 문제가 있어 장치의 운용상의 어려움이 있다. 또한 이러한 문제를 최소화하기 위한 보호 장치를 제작하기 위해 많은 비용과 노력이 필요하다.

복합 열화시험장치의 구성을 살펴보면 다음과 같다.

가열 및 냉각 장치; 이 온도 제어 시스템은 절연물이 외기에 노출될 경우 태양열의 복사에 의한 가열과 냉각이 반복되는 것을 모의하기 위한 것이다.

분무장치; 이 장치는 자연환경에서의 안개나 강우 상태를 모의하기 위한 것으로 이때 사용하는 물은 필요에 따라 순수한 물을 이용하기도 하지만 대부분 염수를 이용하여 열화를 가속시킨다.

자외선 조사 장치; 이 장치는 태양광의 자외선이 절연물에 미치는 영향을 평가하기 위한 것으로 자연광과 동일한 스펙트럼을 갖는 자외선 등기구를 이용하는 방법과 자외선 열화에 주도적인

표 1. 각종 열화시험방법

시험방법	샘플형태	평균 전기적 스트레스 (V/mm)	전해질 및 용액 도전율 ($\mu S/cm$)	인공적인 습윤물질	평가기준	건조시간	비고 (시험시간 및 가속 열화인자)
경사평면법 ASTM D 2303	슬래브 (slabs)	50-75	암모늄 염화물, 2500	트리톤 100 (비이온성)	25 mm 트레이 일어나는 시간	없음. 연속적인 습윤상태	10h
Dust 및 Fog, ASTM D 2132	슬래브	60	나트륨 염화물, Clean Fog	종이, 펄프필터, 진흙	과전류를 트립하는 시간	없음. 연속적인 습윤상태	200h
ASTM D 3638 및 IEC 212 Drop Test	슬래브	37.5-150	암모늄 염화물, 2600	없음	트래킹을 일으키는 전압	없음. 매 30초마다 1번	몇분
Ontario Hydro의 Tracking Wheel	로드(Rods) 및 애자류 (insulators)	133	나트륨 염화물, 333	없음	과전류를 트립하는 시간	없음. 주기적인 건조 및 습윤상태 Wheel 속도: 1rpm	1,000
Merry Go Round	로드	67	나트륨 염화물, 1300	없음	과전류를 트립하는 시간	없음. Wheel 속도: 1.5rpm	500h
Salt Fog Test	시제품의 애자류	25-40	250-2000	없음	500시간의 전압과 Fog를 가했을 때 트래킹과 침식정도	salt fog: 8h 건조 : 6h, 건조시 전압이 인가 안됨	누설전류관측
Solid Contaminant	시제품	25-40	ASTM D2132와 동일, 700	ASTM D 2303과 동일	과전류를 트립하는 시간	없음. spray water 속도: 3rpm	2,000시간
CEA Stepped(S) and Continuous(C) Tracking wheel	애자류	35	나트륨 염화물, 2200(S), 350(C)	없음	30,000사이클(S), 1,000시간(C)	없음. 192초의 사이클중 40초 동안 전압인가 (S) 회전속도: 1rpm(C)	허용기준에 따라 평가
IEC 1109	애자류	50	16,000	없음	과전류 장치를 3번 트립한 시간	salt fog: 4h 건조시간: 6h 항상전압인가	UV, 습도, 열 인공강우, 총사이클시간: 5,000h
EPRI HVTRC의 열화챔버	시제품의 애자류	25-40	나트륨 염화물, 4,000	없음	시물레이션된 싸이클의 년수	여름: 30m/3.5h (rain) 겨울: 1h/3.5h (salt spray) 항상전압인가	UV, 온도, 인공강우, 누설전류관측

역할을 하는 파장대역의 광만을 주로 제공하는 발광기구를 이용하는 방법이 있다.

오존발생장치; 이 장치는 최근 대기 오염도 증가에 따라 빈번한 오존 경보가 일어나고 있는 자연 환경을 모의하기 위한 장치로서

전기방전 방식에 의해 오존을 발생시킨다. 이 오존은 산화력이 강하여 절연물 표면에 작용하여 절연물을 열화시키는 것으로 알려져 있다.

오염개스발생장치; 대기 오염도 증가에 따라 각종 오염물질이 절

연물 표면에 미치는 영향을 모의하기 위한 장치로서 주로 NO_x, SO_x 계통의 개스들이 이용되고 있다.

2.2 단일 가속열화시험장치

복합 가속열화 시험장치는 하나의 시험 챔버에 다양한 열화장

치를 통합시킨 방식이기 때문에 할 수 있다는 점에서 가장 바람

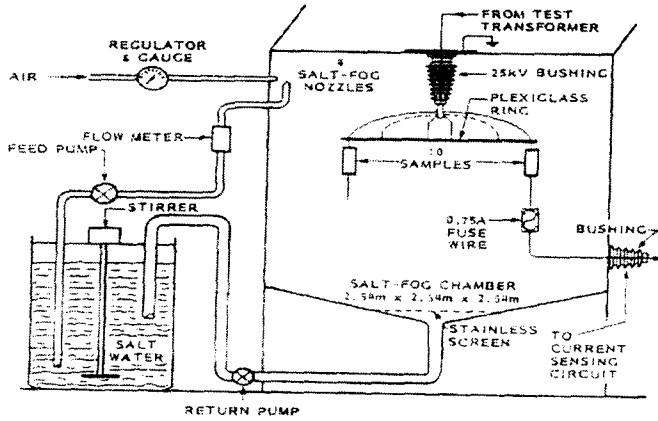


그림 1. University of Windsor의 Salt-fog Chamber의 개략도

제작 및 운용상 어려움이 많다. 때문에 단일 열화시험장치는 열화를 주도하는 요인들에 대해서만 집중적인 시험하기 위한 장치로서 복합열화 시험장치를 구성하는 염수 분무장치, 열싸이클 시험장치, 자외선 조사장치 등이 있으며 이외에도 트래킹 시험장치 등이 있다.

2.3 가속 열화시험방법

절연재료의 특성을 평가하기 위해서는 아주 다양한 방법이 이용되고 있다. 표 1은 최근에 널리 이용되고 있는 열화시험법과 그 특징을 나타내고 있다.

복합열화시험법; 이 방법은 자연환경을 그대로 모의할 수 있다는 면에서 다른 열화시험과 많은 차이가 있다. 즉, 자연환경 조건과 동일하게 열싸이클을 가하고 분무와 오염가스 및 자외선을 가하여 각 열화 요인들이 상승작용을 일으켜 단독으로 존재할 때와는 다른 열화양상을 나타낼 수 있다. 이와 같이 자연환경과 동일한 조건에서 시험함으로써 필드에서의 절연물의 수명을 예측

직한 시험법이라 할 수 있다. 그러나 이 시험법은 각 factor를 어떻게 구성하는가, 열화시험 강도를 어느 정도로 할 것인가 등이 시험의 최종적인 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 여러 가지 종류의 절연재료에 대한 비교 평가나 각 메이커 제품간의 비교 평가에는 그다지 큰 문제는 없으나 실제 수명을 예측하기 위한 시험에서는 열화 factor들의 선정에 신중을 기울여야 할 필요가 있다.

따라서 이러한 열화시험법은 필드 시험을 거쳐 비교 평가하여 평가 결과의 신뢰성을 높이는 문제가 중요하다고 할 수 있다.

염수 분무법; 자연환경의 여러가지 열화요인들 중 가장 주도적인 열화를 나타내는 것은 염수의 영향으로 알려져 있다. 절연물 표면에 부착되는 염분이나 염수는 절연물의 누설전류를 증가시켜 절연파괴 사고에 이르게 하기 때문에 이러한 시험을 통하여 발생할 수 있는 절연파괴 현상 등을 모의하고 평가할 수 있으며 비교적 단기간에 각 제품들간의 성능

을 비교 평가를 할 수 있다는 점이 장점이다. 그러나 이 시험법은 절연물의 수명 평가 등에는 다소 미흡한 시험법이다.

트래킹 시험법; 이 시험 방법은 절연파괴 및 섬락현상을 일으키는 주원인이 트래킹의 발생에 있다고 보고 이 트래킹이 발생하는 시점이 언제인가를 평가할 수 있는 방법이다. 특히 염수를 분무하거나 염수에 담그고 꺼내는것을 반복하면서 부분방전을 발생시켜 트래킹 현상을 관측하고 누설전류를 검출하는 방법이다. 그러나 이 시험방법도 결국 절연체의 장기적인 수명을 예측하거나 평가하는것은 다소 미흡하다고 할 수 있다. 하지만, 단기간에 절연물의 열화현상을 평가하기 위한 경우 또는 제품 상호간의 비교 평가에는 적절한 방법이기 때문에 IEC나 IEEE에서 권장하는 시험법중 하나이다.

3. 열화 평가 방법

3.1 누설전류측정법

고체절연체의 열화상태를 평가하기 위한 여러가지 방법 중 가장 대표적인 방법중의 하나는 누설전류 측정법이다.

열화가 진행되지 않은 정상적인 상태의 절연물에서 표면 누설전류는 IEC 규정의 염분농도와 규정 인가전압 하에서 그 크기는 매우 작게 (0.1 mA이하) 나타난다.

그러나 열화가 진행됨에 따라 표면을 통하여 흐르는 누설전류는 점차 증가하여 수 ~ 수십 mA의 크기로 증가한다. 이와 같이 열화가 진행되면 고체 절연물의 표면이 안개나 강우에 의해 젖게 되어서 표면은 dry band가 형성되어 부분방전 현상을 거쳐 flashover를 일으키게 된다.

따라서 표면누설전류를 관측함으로써 절연체 표면의 열화 진행 정도와 잔류수명을 평가할 수 있는 중요한 수단이 되고 있다.

3.2 접촉각 측정법

고체 절연체 특히 고분자애자와 같은 유기절연물은 발수성이 매우 뛰어나다. 그러나 옥외에서 장기간 사용될 경우 표면의 열화가 진행되어 발수성이 저하된다. 이렇게 되면 표면에는 물에의 젖음성이 매우 증가하게 되고 오염물의 부착이 점점 용이해 지게 된다.

접촉각의 측정은 고체표면에 물방울이 부착할 때 접촉하는 각도를 측정하여 재료 표면의 열화 상태를 평가하는 방법으로서 고체와 액체(물방울)와 기체가 만나는 계면에서의 각 물질간 에너지 상태에 의해 결정되는 값이다.

그러나 액체(물방울)나 기체의 표면 자유 에너지(surface free energy) 값은 일정하다고 하면 결국 접촉각은 고체(고분자절연체)의 에너지 상태에 의해 결정된다고 할 수 있다. 대개 고분자애자와 같이 옥외용 절연체는 표면의 에너지가 낮아 접촉각이 매우 크게 나타난다.

그러나 장기간의 열화에 의해 표면이 활성화상태가 되면 접촉각은 감소하게 된다.

이와같이 표면의 접촉각이 감소하는 것은 표면의 열화와 밀접한 관계가 있으며 이 표면열화는 표면누설전류를 야기시켜 절연 파괴로 연결된다. 따라서 절연물 표면의 접촉각을 측정하여 그 절연물이 어느정도 열화가 진행되었는가를 평가할 수 있다.

그러나 이 방법은 시편으로부터 측정하는 방법이어서 실제 선로에 장착된 상태로의 측정은 어렵다는 문제점이 있으며 또한 접

촉각 측정시 시편을 취한 후 측정하기까지의 시간 간격도 측정 결과에 영향을 미친다.

어떤 고분자 절연체는 외부 환경에 의해 표면이 열화되어도 내부로부터 표면으로의 물질이동에 의해 상당기간 동안 소수성이 유지되는 특성을 지니고 있다.

따라서 외부로부터의 열화 요인이 제거되면 수시간 또는 수십시간이 지나면 내부로부터 표면으로 확산되어 나온 물질들에 의해 소수성이 회복되는 특성을 지니고 있어 각종 열화요인에 노출시에도 장기간 소수성을 유지할 수 있다.

3.3 트래킹 측정법

이 방법은 앞서서도 소개한 바 있지만 열화 평가법인 동시에 재료의 성능을 비교 평가하는 방법 중의 하나이다.

즉, 시편이나 완제품을 염수와 같은 오염된 물로 분무하거나 그 용액속에 적신과 건조를 반복하면서 동시에 전압을 인가하여 트래킹이 발생하는지 여부와 트래킹에 도달하는 시간을 측정하여 절연물의 성능을 평가하는 방법이다.

이외에도 미국의 재료 특성시험 표준인 ASTM에서는 드라이밴드 아킹에 대한 시험법이 있으며 적외선 탐지기를 통하여 표면 누설전류에 의한 발열을 감지하는 적외선 탐지법, 표면에서 발생하는 부분방전에 의한 전자파를 검출하는 전자파 탐지법 등이 있다.

4. 결 론

고분자 애자는 우수한 전기절연성과 기계적 특성이 우수하며 또한 내후 특성 역시 우수하지만 재료의 특성상 내후 특성은 무기

물 절연재료를 능가 할 수 없기 때문에 고분자 애자나 부싱등과 같이 옥외에서 장기간 사용해야 하는 고분자 절연물은 적절한 열화평가와 성능시험을 통하여 제품에 대한 인식변환이 필요하며 또한 장기적인 제품의 품질 안정성과 전력공급의 신뢰성 제고를 위해서는 옥외용 고분자 절연물에 대한 열화 평가기술 확보가 반드시 필요하다.

참 고 문 헌

1. G. R. Mitchel, "Present Status of ASTM Tracking Test Methods", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 2, No. 1, pp. 121-132, 1984
2. R. S. Gorur, L. A. Johnson and H. Hervig, "Contamination Performance of Silicone Rubber Cable Terminations", IEEE Trans. Power Delivery, 3. IEC 1109, "Composite Insulator for ac Overhead Lines with a Nominal Voltage Greater than 1,000V", 1992
4. CIGRE Working Group 22.10, "Technical Basis for Minimal Requirement for Composite Insulators", Electra No. 88, pp. 89 - 114, 1983
5. H.M. Schneider and A. Lux, "Mechanism of HVDC Wall Bushing Flashover in Non-uniform Rain", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp 448 - 455, 1991
6. R. S. Gorur, B. S. Bernstein, T.Champion, "Evaluation of polymeric materials for HV outdoor insulation", CIGRE, 1994.

< 이준호 위원 > < 김정태 위원 >