초고압 절연재료에 있어서 불순물과 Void 영향의 연구
A Study Concerning the behavior of the Contaminats and Voids in Extra high voltage Insulation Materials

박 종 근 서울 대학교
이 광 철* 금성전선 기술연구소

1. 서론

최근 전력용 케이블 전기기기 등의 절연재료로 유기재료가 널리 사용되고 있다. 이것은 고체절연체 특유의 탁월한 전기적 특성 및 취급의 용이성등에 기인한다.

특히 초고압 케이블에 있어서 액체 절연케이블(OF 케이블)에 비해 고체 절연 케이블(XLPE케이블 또는 PE 케이블)이 송전용량이 크고 접속,포설 및 유지가 간단하고 펌프시설, 기름탱크, 배관시설 경보시설등이 불필요하여 장차 초고압 케이블의 주종이 될 것으로 기대된다.

실제 XLPE 절연체의 단시간 진성파괴 강도는 800KV/mm까지 되나 생산공정의 조건때문에 상용 평균 전계강도는 8KV/mm가 고작이다.

이것은 재질상의 불순물 함유에 관한 문제와 제조 공정 중의 부적절한 압출 및 가교조건과 수증기의 혼입에 의한 Void에 관한 문제가 있기때문이다.

그러나 점차 양호한 개선으로 말미암아 더 높은 절연 계급(grade)의 재료로서 사용영역을 넓혀 가고 있다.

그 개선 방향을 살펴보면 아래와 같다.

(1) 절연체로서 반도전층의 돌기방지
(2) 이물의 제거
(3) 산화방지제와 가교제의 균일한 분산
(4) Void 크기의 제한
(5) 절연재료의 기공성을 작게함

즉 3중동시 압출로서 반도전층 돌기를 방지하고 N_2가스의 높은 압력으로서 Void크기의 제한 및 기공성을 작게하고 적절한 이물 제거 방법으로 절연체의 절연내력을 높였다.

그런데 초고압 절연재료 시험의 경우 이 결함들의 원인 분석이 곤란하다.

초고압 절연기기의 시험 사양으로서는 사용전압 수배의 초고압의 인가가 필요하고, 시험시 Void의 코로나 방전에 의한 파괴와 이물등에 의한 진성파괴와의 구별이 필요하다.

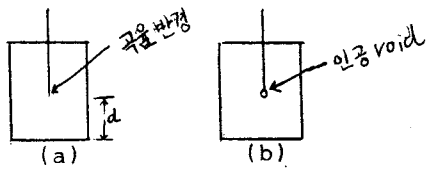
절연파괴 해석은 통계적 방법을 택하고 초고압에서의 파괴 현상이기 때문에 열적인 파괴는 없다고 가정한다.

결함없는 Sheet상, 인공 Void 함유Sheet 상, 불순물함유 Sheet상의 시료로 파괴시험 및 부분방전시험을 행하여 서로의 상관관계를 연구하였다.

2. 본론

(1) Tree

아주 높은 전계강도와 부분장전이 tree의 원인이 되는데 바늘을 이용하여 모의 시험이 가능하다. (그림1)



(그림1) tree 시험모델

(a)는 고전압기기에서 전계방향으로 도전불순물이 부착된 경우의 모델이고,

(b)는 Void가 있는 경우의 모델이다 (단 (a),(b)양 경우에 있어서는 가능한 한 최악의 경우를 고려하였다)

바늘모의 시험에 대한 전계의 세기는 식(1)과 같다.

$$E_{max}/E_{av} = 2d/r \ln\left(1+\frac{4d}{r}\right) \quad \text{--- 식(1)}$$

r : 바늘곡률반경
Eav : 평균전계강도
d : 맞은편 평판전극까지의 거리
Emax : 최대 전계강도
에서 154KV XLPE 케이블 모델에서의 평균전계는 표 1 과 같다.

< 표 1 >

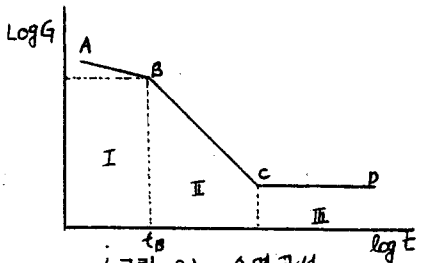
전 압	케이블크기	상용 최대전계(Eav)
154KV급	200□	7.6KV/mm
	600□	6.3KV/mm
	1200□	5.4KV/mm
	2000□	5.4KV/mm
22KV급	325□	1.0KV/mm
	38□	3.3KV/mm

주) 케이블내 최대 전계의 값 (Eav) 즉 내부 반도전층 표면의 전계는 다음식에서 계산된다.

$$E = \frac{V}{r \ln (R/r)}$$

V : 인가전압
r : 내부반도전층 직경
R : 외부반도전층 직경
주) 전압 $154/\sqrt{3}$ V 인가시의 값.

(2) 수학적 모델



(그림 2) 수명곡선

I 영 역 : 불순물 모의에 의한 파괴영역
II " : 부분 방전에 의한 파괴영역
III " : 부분방전이 없는 경우의영역

부분방전 개시전계가 아주 높거나 또는 불순물에 의한 최대전계가 아주 적을 경우 AB와 BC 직선은 교차하지 않는다. 그런데 코로나 방전 개시 전압이 낮을 경우에는 BC 곡선이 확실 하게 나타난다.

식(2)는 V-t 곡선의 일반식이다.

$$G^n t = K \quad ---(2)$$

그러나 정확한 의미의 표현은 식(3)과 같다.

$$(G-Gi)^n \quad (t+\theta) = K \quad ---(3)$$

여기서 G : 걸리는 전계
Gi : 부분방전개시 전계
: 부분방전개시 까지의 시간

전압이 Gi보다 높고 의 값이 무시될 경우 V-t 곡선이 만들어진다. (영역 II)
그러나 t가 0에 가까울 경우 G는 무한대까지 가지 않고 식(4)와 같은 식이 된다.

$$G = Gi + (-\frac{k}{\theta})^{\frac{1}{n}} \quad ---(4)$$

여기서 G 값은 진성 파괴강도로서 존재하는 이물의 크기에 따라서 좌우 된다. (영역 I)
또 t가 무한대로 가면 G값은 Gi에 가깝게 되어 영역 III에 들어간다.
따라서 식(4)는 식(5)와 식(6)으로 분리가능하다.

$$G^{n1} t = k_1 \quad ---(5) \quad (t < t_B)$$

$$(G-Gi)^{n2} t = k_2 \quad --(6) \quad (t > t_B)$$

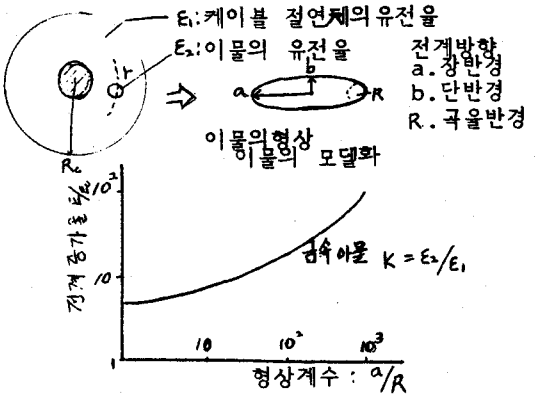
식(5)에서 n_1이 아주 크기 때문에 직선은 평평하다. 실제 1시간과 30년 수명곡선의 차이는 불과 30%밖에 바뀌지 않는다.
따라서 G_B 라고 들수 있다. 식(6)을 식(7)로 바꿀 수 있다.

$$t_B = \frac{k_2}{(G_B - Gi)^{n2}} \quad ---(7)$$

여기서 k_2, G_B, n_2의 값을 실험으로 얻을 수 있다.

(4) 시험의 방법

. 이물의 크기로서 tree시험의 경우를 표(2)에 모델화 하였다.
. 전계의 증가율은 그림(3)에 의하여 계산 되었다.[2]



(그림3) 전계 증가율 특성

< 표 2 >

[이물의 제한 크기와 모의 tree 시험배치 (154KV 200㎜ 경우]

이물 크기	곡율 반경	전계 증가율	시험 전압 (KV)	최대 전계 (KV/mm)	바늘 거리	바늘 곡율 반경	바늘 모의 시험 전압 (KV)
50 um	7 μm	5.62 배	600	286	10 mm	5 μm	12.8
			450	214			9.6
			300	143			6.4
			150	713			3.2
			100	47.5			2.1
150um	"	10 배	600	507.2	"	"	22.8
			450	380			17.1
			300	253.6			11.4
			150	126.8			5.7
			100	84.5			3.8
800um	"	31 배	600	1572	"	"	70.7
			450	1179			53.1
			300	786			35.4
			150	393.1			17.7
			100	262.1			11.8

* PE와 XLPE의 진성파괴 강도는 220KV/mm 이다.

(2) 시험 방법

시험 전압	곡율 반경	전극 간 거리	전압 인가
3.8KV - 70.7KV	5 um이하	10 mm	시험전압의 1/2을 걸고 5KV/30초씩 올렸다.

(3) 시험 결과

20KV 이상 에서	진 성 파 괴
20KV 이하 에서	코로나방전파괴 (V-t 곡선)
코로나방전개시 전압 이하	파 괴 불 가

3. 결론

1) SPEC의 시험에서 짧은 시간의 파괴는 불순물의 원인이고 코로나 방전에 의한 파괴 특성은 V-t curve를 갖는다.
2) 고전압 절연체 파괴시험의 경우 이물의 크기가 중대한 영향을 미칠수 있고 진성파괴가 되지 않기 위해서는 약 100um이하의 불순물 크기를 제한해야 된다.
3) 시험전압에서의 단시간 진성파괴 강도는 약 400KV/mm 정도 이다.

4. 참고 문헌

1) Research and Development in France in the field of Extruded Polyethylene insulated High voltage Cables -CiGRE 21-07 1974-
2) 전기협동연구 제34권 제 1호
特別高圧架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の高電圧試験法
-特高架橋ポリエチレンケーブル高電圧試験法専門委員会
3) 有機絶縁材料のトリーイングについて
-樹枝状放電劣化の調査と研究 -