

6.6kV CV케이블의 경년열화 특성연구

김광화 신종호 김영배 조연옥
한국전기연구소

A study on the characteristics of deterioration in 6.6kV CV cable

K.H. Kim, J.H. Sun, Y.B. Kim, Y.O. Cho
K.E.R.I

ABSTRACT

This paper is described the results of insulation characteristic tests that are DC leakage current test, $\tan \delta$ test, AC breakdown test and observation of tree in the used 6.6kV CV cables.

In the correlation of these tests, the $\tan \delta$ test stands for the main deterioration factor of cable insulation.

1. 서 론

전력케이블은 도심지역 및 공장의 부하밀집지역에 전력공급의 신뢰도 향상과 도시환경 미화라는 점에서 점차 확대시공되고 있으며, 고무절연 케이블의 절연성능 향상과 더불어 최근 경제적이다, 작업이 용이하고, 우수한 전기적 특성을 가진 CV케이블이 널리 보급되어 있다. 그러나 CV케이블은 제작과정에서 수분발생 및 이물질의 침투와 보이드 생성과 같은 결함등이 발생하고, 이러한 결함은 장기사용됨에 따라 전기적, 열적, 기계적, 환경적인 영향으로 트리발생이나 산화현상등으로 인하여 점차 열화되어 절연사고를 일으키며 고도의 자동화가 이루어진 생산현장에서의 이와 같은 사고는 막대한 산업적 손실을 가져오게 된다. 따라서 사고를 방지하기 위해서는 케이블의 절연열화를 나타내는 인자들의 상호관계를 연구하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 20년이상 현장에서 장기사용된 6.6kV CV케이블을 절거하여 전기적 시험으로서 절연저항측정, 직류누설전류측정, $\tan \delta$ 측정, 부분방전측정시험 및 교류전압파괴 시험을 실시하였으며, 비전기적시험으로서 수트리 관찰을 실시하여 이들 시험결과의 상호관계를 밝혔다.

2. 실험

가. 시료준비

본 연구시험의 시험대상 시료는 현장에서 장기사용되어

절거된 케이블로서 시료현황은 표 1과 같다.

표 1. 시료현황

시료	구성	도체면적	사용기간	비고
A	3C	100mm ²	24년	Tape식 내부반도체 유
B	3C	150mm ²	21년	내, 외부반도체 무
C	3C	200mm ²	20년	"
D	3C	200mm ²	20년	"

표1과 같이 시료는 구성에서 전부 3심으로 되어 있으며 이후 편리상 R, B, W로 구분하였다. 전기적 비파괴특성시험을 위하여 각 케이블에 종단접속을 실시하였으며, 특성시험이 완료된 시료는 외피를 전부 제거하고 각 상별로 10m정도씩 시료를 절단, 교류파괴시험을 실시하였다.

나. 실험방법

표1과 같은 시료에 대하여 전기적인 비파괴 시험으로서 직류누설전류시험, $\tan \delta$ 시험, 부분방전시험을 먼저 행하였고 파괴시험인 교류전류파괴시험을 행하였다. 그리고 수트리 관찰을 행하는 순서로 시험을 실시하였다.

(1) 직류누설전류시험

직류누설전류시험은 직류전압발생기로서 DC 10kV의 전압을 인가하고 발생한 누설전류를 X-Y기록계를 이용하여 측정하였다.

(2) $\tan \delta$ 측정시험

케이블의 $\tan \delta$ 측정은 Schering Bridge를 이용하였으며, 인가전압은 1kV부터 6.6kV까지 약 1kV간격으로 측정하였고, 대기전압인 3.8kV에서 측정된 $\tan \delta$ 및 정전용량값을 표준으로하여 절연열화분석에 사용하였다.

(3) 부분방전시험

부분방전시험은 부분방전측정기로 측정하였으며 최고인가

전압 AC 6.6kV까지 전체 시료에서 부분방전이 발생하지 않았다.

(4) 교류파괴시험

교류전압파괴시험에서는 파괴시험용 단말로서 수유단말을 사용하였으며, 초기 20kV의 전압을 인가 후 단계적으로 5kV씩 전압을 파괴될 때까지 상승시켰다.

(5) 수트리관찰

교류파괴시험후 파괴부위를 두께 약 0.4mm정도로 Slice한 하여 염색처리 과정을 거친 후 광학현미경으로 트리관찰을 행하였다.

3. 실험결과

가. 직류누설전류시험 결과

직류누설전류 시험결과는 표2와 같으며, 표2의 성극지수 PI(Polarization ndex)는 다음식 (1)로 구하였다.

$$\text{성극지수 PI} = \frac{1\text{분치 누설전류}}{10\text{분치 누설전류}} \quad (1)$$

표 2. 직류누설전류 측정결과

구분	상	1분치	10분치	PI	저항 (Ω)
A	R	135	56	2.41	1.78×10^{11}
	B	72	16	4.50	6.25×10^{11}
	W	300	212.5	1.41	4.70×10^{10}
B	R	315	212.5	1.48	4.70×10^{10}
	B	212.5	137.5	1.54	7.27×10^{10}
	W	60	17	3.52	5.88×10^{11}
C	R	21	12.5	1.68	8.00×10^{11}
	B	94	32	2.93	3.12×10^{11}
	W	180	137.5	1.30	7.27×10^{10}
D	R	72.5	22.5	3.22	4.44×10^{11}
	B	86	25	3.44	4.00×10^{11}
	W	127	59	2.15	1.69×10^{11}

* 전류치단위는 (nA)

나. tan δ 시험결과

tan δ 측정결과는 표3과 같으며, tan δ 및 정전용량값을 보이고 있다. 또한 케이블의 대지간 전압인 3.8kV에서의 정전용량 값과 표2에서 구한 절연저항값으로 R·C(Ω·F) 값을 계산하여 표3에 나타내었다.

다. 교류전압 파괴시험 결과

교류전압 파괴시험결과는 표4와 같으며, 표4의 시험결과에서 평균치 및 표준편차를 산출하였다.

라. 수트리 관찰결과

염색된 시료의 수트리 관찰결과는 표5와 같다.

표 3. tan δ 시험결과

시료	상	특성치	전압 (kV)							R(DC-10kV) × C [Ω · F]
			1	2	3	3.8	5	6	6.6	
A	R	tanδ (%)	0.100	0.113	0.113	0.115	0.12	0.122	0.126	4.61×10^9
		C(nF)	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	
	W	tanδ	0.136	0.140	0.140	0.144	0.150	0.156	0.160	1.13×10^9
		C	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	
	B	tanδ	0.101	0.105	0.111	0.114	0.116	0.124	0.128	1.61×10^9
		C	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	
B	R	tanδ	0.16	0.178	0.200	0.213	0.228	0.237	0.241	1.93×10^9
		C	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	
	W	tanδ	0.505	0.685	0.986	1.189	1.45	1.64	1.736	2.74×10^9
		C	4.59	4.61	4.64	4.66	4.69	4.71	4.72	
	B	tanδ	0.490	0.750	1.130	1.515	1.890	2.190	2.340	3.3×10^9
		C	4.48	4.49	4.52	4.54	4.58	4.61	4.63	
C	R	tanδ	0.100	0.137	0.164	0.182	0.220	0.218	0.300	1.17×10^9
		C	4.711	4.71	4.674	4.642	4.58	4.53	4.515	
	W	tanδ	5.988	5.930	5.848	5.790	5.738	5.760	5.770	9.26×10^9
		C	12.83	12.79	12.77	12.75	12.72	12.71	12.71	
	B	tanδ	4.711	4.710	4.674	4.642	4.580	4.530	4.515	3.97×10^9
		C	12.82	12.78	12.75	12.73	12.71	12.69	12.69	
D	R	tanδ	0.190	0.195	0.216	0.224	0.245	0.254	0.254	1.60×10^9
		C	35.99	35.99	36.04	36.04	36.08	36.08	36.08	
	W	tanδ	0.180	0.190	0.194	0.200	0.200	0.215	0.220	6.17×10^9
		C	36.48	36.48	36.53	36.53	36.53	36.53	36.58	
	B	tanδ	0.170	0.170	0.162	0.166	0.172	0.178	0.180	1.47×10^9
		C	36.84	36.84	36.84	36.84	36.84	36.89	36.89	

표 4. 교류전압 파괴시험 결과

시료	상	측정 결과 (kV)	평균치	표준편차
A	R	30,	30.0	-
	B	30,		
	W	30,		
B	R	35, 30	32.5	2.74
	B	35, 35		
	W	30, 30		
C	R	25, 30, 40	28.8	5.46
	B	25, 30, 30		
	W	20, 30, 30		
D	R	35, 35, 35	35.0	4.33
	B	30, 30, 35		
	W	35, 45, 35		

총 평균 : 31.85kV 총 표준편차 : 4.833kV

4. 실험결과와 분석

가. tanδ와 절연저항과의 상관관계

케이블에서 누설전류에 의해 계산된 절연저항값과 정전용량의 곱으로 표시되는 값은 케이블절연체의 절연저항특성을 나타내며 신제품인 경우에 비해 10,000시간 이상 열화된 케이블은 13 - 36% 정도 감소하는 것으로 알려져 있다. 그리고 tanδ는 절연체의 평균적인 열화를 나타내는 특성이 있으므로 본 실험의 결과에서 절연저항과의 상관관계를 나타내면 그림 1과 같다. 그러나 그림 1에서 이들의 상관관계는 밀접한 관계가 없는 것으로 보인다. 이것은 절연저항 측정에서

표 5. 수트리 관찰결과

Sample NO.	Water Tree			Bow-tie Tree			Note
	Core		Size (μm)	Core		Size (μm)	
	CSL 도체축	ISL 집지축		Contami (μm)	Void (μm)		
A _R	○		1360				
A _S				○		1270	
A _B	○		1240				
A _B	○		1200				
A _W	○		-				
B _R		○	340				
B _R				○		640	
B _B	○		2100				
B _B	○		2080				
B _W	○		790				
B _W	○		715				
C _R		○	610				
C _R		○	350				
C _B		○	680				
C _B		○	760				
C _W		○	1400				
C _W				○		1100	
C _W					○	500	
D _R				○		640	
D _R					○	850	
D _B				○		600	
D _W		○	230				
D _W				○		600	
D _W					○	160	

본 실험의 결과에서 트리의 발생 갯수와 tanδ와의 상관 관계를 나타내면 그림 2와 같다. 이 그림에서 트리 갯수 증가는 tanδ의 증가와 상관관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 이들의 관계에서는 트리의 갯수가 증가하면 tanδ가 증가하는 경향으로 나타나고 있다.

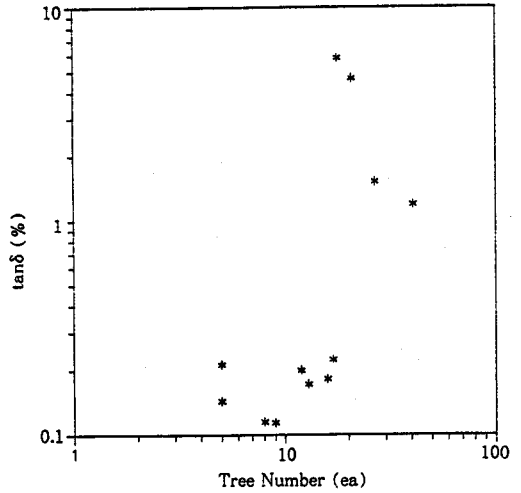


그림 2. tanδ와 트리 갯수와의 상관관계

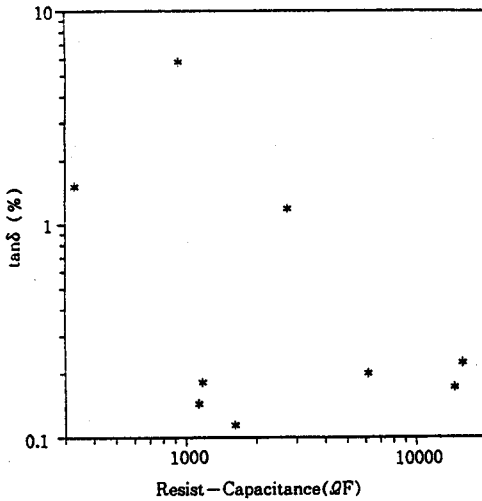


그림 1. tanδ와 절연저항과의 상관관계

절연체 누설전류가 매우 작기 때문에 극부적인 변화에 민감하게 작용한다. 따라서 평균적인 특성을 나타내는 tanδ와 절연저항의 상관관계는 이산된 형태로 보여주는 것으로 사료된다.

나. tanδ와 트리(Tree)갯수와의 상관관계

케이블의 열화진전기구에서 절연체 내부에 트리가 발생하는 것으로 알려져 있고, 열화가 많이 될수록 트리의 갯수 및 길이가 증가하는 것으로 알려져 있다.

다. 절연저항과 파괴전압과의 상관관계

그림 3은 절연저항과 파괴전압과의 상관관계를 나타낸 것이다. 절연저항이 증가함에 따라 파괴전압도 증가하는 경향이 있으며 이들의 관계는 밀접하지는 않지만 어느정도 상관관계를 유지하고 있다.

케이블의 파괴강도는 함유수분, 수분의 가속성에 따라 달라지므로 절연저항과 파괴전압이 잘 일치하지 않는 것으로 사료된다.

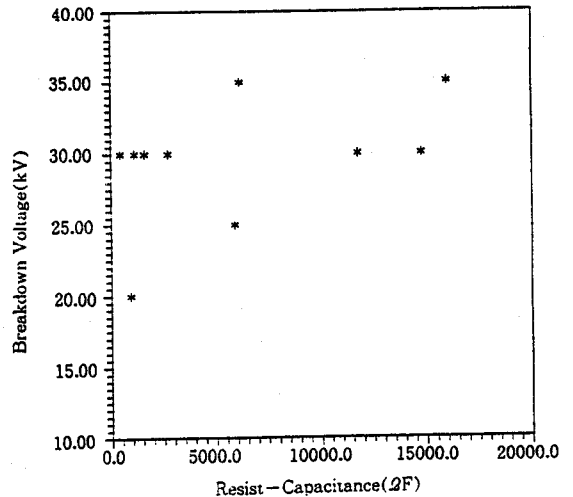


그림 3. 절연저항과 파괴전압과의 상관관계

라 $\tan \delta$ 와 교류파괴전압의 상관관계

$\tan \delta$ 는 전체적인 절연열화를 나타내고, 교류파괴전압은 국부적인 열화나 결함에 의존한다고 할 수 있다. 그러나 $\tan \delta$ 가 증가하면 케이블에 존재하는 큰 결함이 있을 확률이 높아 지므로 $\tan \delta$ 와 교류전압 관계는 상당히 밀접한 것으로 보고되고 있다.

본 연구시험 결과에서 이들의 상관관계를 구하면 그림4와 같다. 그림4에서 $\tan \delta$ 의 증가는 교류파괴전압의 감소를 보이고 있다.

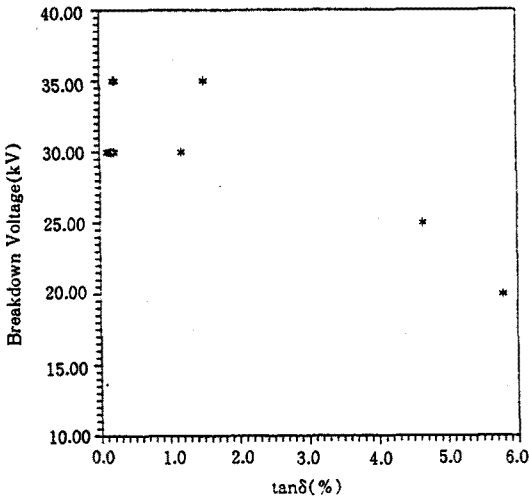


그림 4. $\tan \delta$ 와 교류파괴 전압과의 상관관계

마. 트리길이의 교류파괴전압의 상관관계

많은 보고서에서 트리길이의 교류파괴전압과의 관계는 밀접한 것으로 보고되고 있다. 절연체 내부에서 수트리나 보타이 트리가 성장하면 트리 부분은 전계의 외곽이 발생하고 트리 선단은 침전극으로 작용하여 이부분에서 전기트리가 성장하여 결국 절연파괴에 이르게 된다.

본 실험의 트리관찰결과에서 파괴전압과의 상관관계를 나타내면 그림5와 같다. 그림5의 결과에서도 트리길이의 절연파괴전압은 밀접한 관계가 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

상기의 연구결과에 의하면 $\tan \delta$ 와 트리갯수의 상관관계에서 트리갯수가 증가에 따라 $\tan \delta$ 가 증가하는 경향을 보이고 있고, 절연파괴전압과 상관관계가 있는 것은 $\tan \delta$ 와 트리길이였으며, $\tan \delta$ 와 트리길이의 증가는 절연파괴전압을 저하시켰다. 그러므로 케이블의 절연열화 평가를 위한 전기적인 비파괴 수법으로서는 $\tan \delta$ 시험이 중요한 인자인 것으로 사료된다.

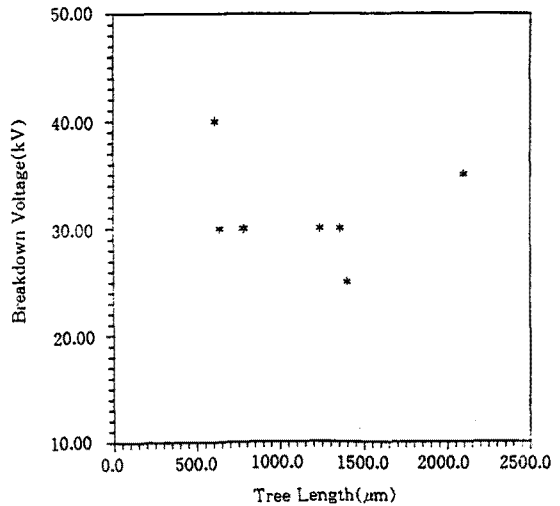


그림 5. 트리길이의 교류파괴전압과의 상관관계

- 참고 문헌 -

- [1] 구주전력(주)총합연구소, "가교폴리에틸렌 케이블의 장시특성", 연구보고 No.86002, 1986.6
- [2] A. Garton 외 2인, "Ionic Impurities in Crosslinked Polyethylene Cable Insulation", IEEE EI Vol 25, No. 2 pp427-434, 1990.4
- [3] Grzybowski 외 2인, "Changes of Thermoplastic PE Cable Insulation Properties caused by Overload Current", IEEE T.P.D., VOL.4, No.3 pp 1507-1512, 1989.6
- [4] 일본전력중앙연구소, "가교폴리에틸렌의 수트리 열화와 그의 판정법", 종합보고 113, 일본전력중앙연구소, 1983.5