

통계적 기법을 이용한 전력 케이블 절연층(XLPE)의 수명 예측

Life Expectancy for Power Cable Insulation(XLPE) Using Statistical Method

이승엽^{*}, 조대희, 이인호, 박완기
LG전선(주) 전력연구소

Seung-Yop LEE^{*}, Dae-Hee CHO, In-Ho LEE and Wan-Ki PARK
LG Cable Ltd.

ABSTRACT - Electrical stress makes insulating materials aged finally resulting in the dielectric failure. It becomes more and more important to recognize the degree of aging and the life time of the insulating materials since it is directly concerned with the reliability of the insulation system. In this paper, the life time of the Cross-linked Polyethylene(XLPE), the insulation layer in the 154kV-grade power cable, is expected and calculated using statistical and mathematical methods. The simulated results are compared with experimental ones and the life exponent of the material is obtained.

Key Words(중요용어) : electrical tree, life time, life exponent, Weibull distribution

1. 서론

절연 물질에 지속적으로 가해지는 스트레스는 절연 성능을 저하시킨다. 이러한 현상을 열화(aging) 현상이라 하는데, 열화 현상은 전기적인 스트레스뿐만 아니라 열적, 화학적, 기계적인 스트레스에 의해서도 유발되거나 가속되며, 일반적인 경우, 여러 가지 복수의 스트레스가 복합적으로 작용하여 절연 물질 내부에 부분 방전 및 전기 트리를 발생시켜 최종적인 절연 파괴에 이르게 한다.¹

절연 물질의 수명이란 전압을 인가한 후 최종적인 절연 파괴가 일어나기까지의 시간을 말하며, 절연 물질의 수명을 정확하게 예측하는 것은 전체 시스템의 신뢰도를 결정하는 데에 중요한 요소가 되므로, 수명 예측에 관한 연구와 노력이 활발히 진행되고 있다.

전력 케이블의 수명 예측에는 일정한 전압을 인가하고 파괴 시간을 측정하는 V-t 시험이 일반적으로 널리 이용되고 있다. 그러나 송전용 전력 케이블의

경우 단말 설치의 어려움과 높은 시험 전압, 긴 시험 시간 때문에 신뢰성 높은 결과를 얻기에 충분한 회수로 실제 시험을 수행하기에는 많은 어려움이 따른다.

케이블의 전기적인 특성을 얻기 위해서는 케이블 자체를 직접 시험하는 것이 가장 좋은 방법이겠으나, 실제의 경우 전술한 바와 같은 문제점들 때문에 시편상의 시험을 수행하게 되는 경우가 많다. 시편 시험의 이점은 시험 회수를 충분히 늘려 시험에 따른 오차를 줄이고, 높은 신뢰도를 얻을 수 있다는 데에 있다.

본 논문에서는 전력 케이블 절연체의 절연 파괴를 설명하는데 가장 적절한 모델로 여겨지는 전기 트리에 대한 실험을 행하여 트리 개시 전압을 측정하고 이를 통계적인 기법을 적용하여 해석하였다. 또한 수학적 이론의 뒷받침을 통하여 트리 개시 전압으로부터 트리 개시 시간을 계산하여 절연체의 수명을 예측하였으며 이를 실제 실험 결과와 비교하였다.

2. 기본 이론

2.1 V-t 특성

절연체에 전압 V 가 인가되어 시간 t 에서 절연 파괴가 일어났다면 전압과 시간 사이에는 실험적으로 [식.1]과 같은 관계가 성립되는 것으로 알려져 있다.

$$V^n \cdot t = const. \quad [식.1]$$

이 때 n 을 수명 지수라고 하며 절연체에 따라 서로 다른 값을 가진다. [식.1]을 이중 대수축에 그리면 선형적인 관계가 얻어짐을 알 수 있는데 이를 V-t 특성 또는 수명 곡선이라 하며, 일반적으로 케이블의 수명은 V-t 특성을 잘 만족시키는 것으로 알려져 있다. 초고압 전력 케이블의 수명 지수 n 값은 기존에는 8~9 정도의 값을 적용하였으나 오늘날에는 제조 기술의 발전과 더불어 12~15 이상인 것으로 보고되고 있다.^{2, 3}

2.2 Weibull 분포 함수

일반적으로 데이터의 신뢰성을 평가하는 데에는 통계적인 기법을 동원한 확률 분포가 널리 이용되고 있는데, 이 중에서 Weibull 분포는 전력 케이블과 같은 직렬 시스템의 절연 특성을 통계적으로 분석하는 데에 적절한 모델로 여겨지고 있으며, 특히 시간에 따른 절연 파괴 특성을 파악하는 경우 V-t 특성을 도출하기에 용이하다는 장점을 가지고 있어 널리 이용되고 있다.

전기 트리의 개시는 국부적인 절연 파괴 현상으로 여겨지므로, 본 논문에서는 측정된 결과의 해석에 Weibull 분포 함수를 적용하였으며, 사용된 트리 개시의 전압과 시간에 대한 Weibull 누적 확률 분포 함수를 [식.2]와 [식.3]에 각각 나타내었다.

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{\theta_V} \right)^{\beta_V} \right] \quad [식.2]$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta_t} \right)^{\beta_t} \right] \quad [식.3]$$

β_V : 트리 개시 전압의 형상 모수

θ_V : 트리 개시 전압의 척도 모수

β_t : 트리 개시 시간의 형상 모수

θ_t : 트리 개시 시간의 척도 모수

3. 실험 장비

3.1 시료 제작

전기 트리 실험을 위한 시료로 사용된 절연 물질은 154kV급 전력 케이블 절연체에서 채취된 가교 폴리에틸렌(Cross-linked Polyethylene, XLPE)을 블록 형태(20×30×3mm)로 절단하고 케이블 내도 쪽에서 고압부 침전극을 삽입하여 실제 케이블 내부의 전계 분포와 동일한 방향을 가지도록 제작하였다. 실험에 사용된 침전극으로는 Ogura Treeing Needle을 사용하였으며, 침전극과 절연 물질을 함께 몰딩시킬 때 발생하는 열적, 화학적 스트레스를 피하기 위해서, 침전극을 절연 물질 내부로 삽입하는 방법을 채택하였다. 또한 침전극을 절연 물질 내부로 삽입하는 경우 침전단 주변에 발생하는 기계적인 스트레스를 최소화시키기 위하여, 새로운 개념의 진일보된 전극 구조를 사용하였는데, 새롭게 제작된 전극 시스템은 고압부 침전극(선단 반경 5 μ m, 그림.1, n1)을 삽입시킬 때 편광 현미경으로 관찰하면서 기계적인 스트레스가 발생하지 않는 범위 내에서 삽입을 완료시키고, 그 상태 그대로 유지되도록 고정시켜, 삽입된 침전극이 움직이며 발생하는 보이드나 크랙을 방지할 수 있는 구조를 가지는 전극 시스템이다. 접지부 침전극은 고압부 침전극 선단 부위에 고전계를 형성시키기 위해 전극간 거리(2mm, 그림.1, d1)를 고려하여 고압부 침전극에 비해 선단 반경이 상대적으로 큰 침전극(선단 반경 200 μ m, 그림.1, n2)을 삽입하였다. 모든 시료의 준비 과정 전후에는 고압부 침전극 선단 부위에 보이드나 크랙의 존재 여부를 광학 현미경(Leica DMRM)을 사용하여 사전에 확인하였다.

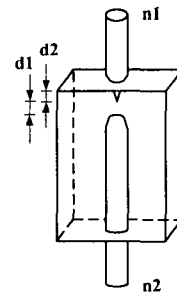


그림.1 트리 발생 전극(침-침 구조)
d1: 전극간 거리 2mm, d2: 미세 삽입 200 μ m
n1: 고압부 침전극, n2: 접지부 침전극

3.2 트리 발생 실험

트리 개시 전압을 측정하기 위해서는 short-time test(또는 ramp test) 방법을 적용하여 승압률 1kV/sec로 전압을 인가하였고, 트리 개시 시간을 측정하기 위해서는 V-t test 방법을 적용하여 트리 개시 전압의 Weibull 분포 척도 모수 값의 약 60% 정도인 25kV의 전압을 일정하게 인가하였다. 트리의 발생 여부는 광학 현미경(Olympus SZ-6045 TRPT)에 CCD Camera를 연결한 모니터를 통하여 실시간으로 관찰하면서 트리가 발생하는 순간을 포착하였다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 트리 개시 전압 측정

Short-time test에 의한 트리 개시 전압의 Weibull 누적 확률 분포를 [그림.2]에 나타내었다. 트리 개시 전압의 분포 범위는 31~49kV이며, 형상 모수의 값이 10 이상으로 큰 사실로부터 시료의 준비 및 실험의 과정이 균일한 조건에서 행하여졌고, 신뢰성 높은 결과를 얻었음을 알 수 있다. 이 경우의 Weibull 파라미터를 [표.1]에 정리하였다.

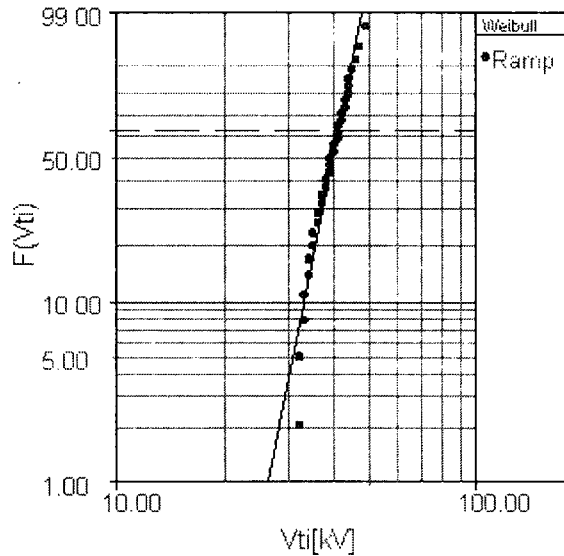


그림.2 Short-time test로부터 얻은 트리 개시 전압의 Weibull 누적 확률 분포

표.1 트리 개시 전압의 Weibull 파라미터

트리 개시 전압	β_V	θ_V
	10.07	41.33

4.2 트리 개시 시간 시뮬레이션

[그림.2]와 같이 얻어진 트리 개시 전압의 결과를 이용하여 다음과 같은 절차에 따라 트리 개시 시간을 계산하였다. 이와 같은 논리가 적용되기 위해서는 다음과 같은 전제 조건이 필요하다.

전제 조건

1. 절연 파괴는 일정량의 열화가 진행된 경우에만 발생한다.
2. 절연 파괴에 기여하는 요소는 $V^n=t$ 를 만족시키는 전기적인 스트레스뿐이다.

먼저 Step 전압 인가에 의한 트리 개시 측정 실험을 하는 경우, k번째 step인 $V_k[V]$ 에서 트리가 개시되었다고 가정하면, 트리가 개시될 때까지의 열화량 Q_1 은 [식.4]와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_1 = V_1^n t_1 + V_2^n (t_2 - t_1) + \dots + V_k^n (t_k - t_{k-1}) \quad [식.4]$$

한편 Constant 전압 인가에 의한 트리 개시 측정 실험을 하는 경우, 시간 $t=t_c[sec]$ 에서 트리가 개시되었다고 가정하면, 트리가 개시될 때까지의 열화량 Q_2 는 [식.5]와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_2 = V_c^n t_c \quad [식.5]$$

앞서 전제한 것과 같이 동일한 절연 물질에 대해서는 절연 파괴까지의 열화량이 동일하다면, 일정한 부위에서 추출한 케이블 시편의 트리 개시 특성은 Step 전압을 인가한 경우와 Constant 전압을 인가한 경우에 서로 같은 열화량을 가진다.

$$Q_1 = Q_2 \quad [식.6]$$

또는

$$V_1^n t_1 + V_2^n (t_2 - t_1) + \dots + V_k^n (t_k - t_{k-1}) = V_c^n t_c \quad [식.7]$$

$t_0=0$ [sec]일 때, [식.7]을 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^k V_i^n(t_i - t_{i-1}) = V_c^n t_c \quad \text{[식.8]}$$

또는

$$t_c = \frac{1}{V_c^n} \sum_{i=1}^k V_i^n(t_i - t_{i-1}) \quad \text{[식.9]}$$

[식.9]를 이용하면 Step 전압 인가시 트리가 발생하기까지의 총 열화량을 이용하여 일정한 전압 V_c 를 인가했을 때의 트리 개시 시간 t_c 를 구할 수 있다.

본 논문에서는 Ramp 전압 인가 방식으로 트리 개시 실험을 행하였으나, 이를 1kV의 전압 step과 1초의 시간 step을 가지는 Step 전압 인가 방식으로 간주하여 n 이 14, 15, 16일 때의 경우를 [식.9]에 적용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 [그림.3]과 [표.2]에 나타내었다.

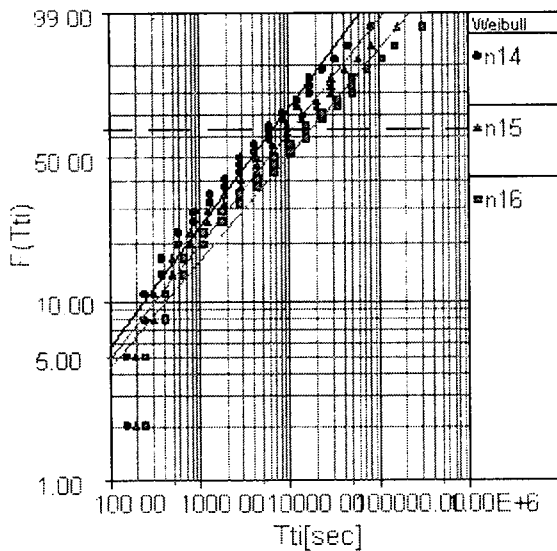


그림.3 시뮬레이션으로 구한 트리 개시 시간의 Weibull 누적 확률 분포

표.2 시뮬레이션으로 구한 수명 지수에 따른 트리 개시 시간의 Weibull 형상 모수

수명 지수(n)	14	15	16
β_t	0.68	0.64	0.60

4.3 트리 개시 시간 측정

V-t test에 의한 트리 개시 시간의 Weibull 누적 확률 분포를 [그림.4]에 나타내었다. 트리 개시 시간의 분포 범위는 2~3000sec이며, 이 경우의 Weibull 파라미터를 [표.3]에 정리하였다.

실험에 의해 얻어진 β_t 의 값은 0.64로서 시뮬레이션 결과 중 $n=15$ 일 때의 값과 일치하므로, 이 결과로부터 실험에 사용된 XLPE의 수명 지수 값이 15임을 예측할 수 있다.

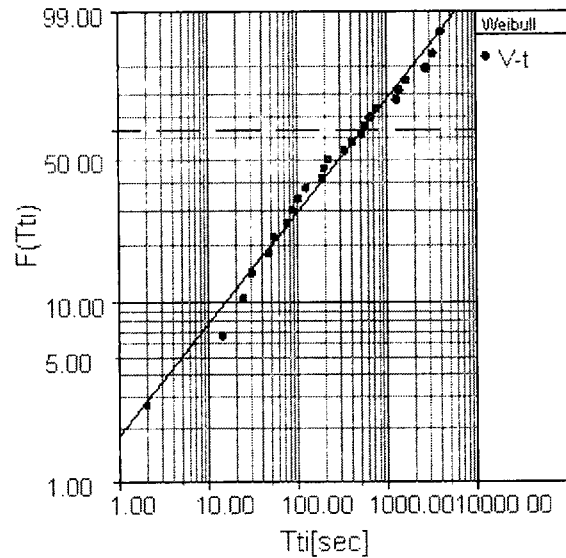


그림.4 V-t test로부터 얻은 트리 개시 시간의 Weibull 누적 확률 분포

표.3 트리 개시 시간의 Weibull 파라미터

트리 개시 시간	β_t	θ_t
	0.64	533

4.4 수명 지수 계산

트리 개시 전압의 Weibull 형상 모수(β_v)와 트리 개시 시간의 Weibull 형상 모수(β_t) 사이에는

[식.10]과 같은 관계가 있으므로, 실제 실험으로부터 얻어진 [표.1]과 [표.3]의 결과로부터 수명 지수 n 을 구하면 $n=15.73$ 임을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션 결과와도 잘 일치하는 값으로 시뮬레이션과 실제 실험에 대한 신뢰도를 더욱 더 높여주는 결과로 여겨진다.

$$\beta_V = n\beta_t \quad [\text{식.10}]$$

5. 결론

본 논문에서는 초고압 전력 케이블 절연체인 XLPE를 대상으로 전기 트리 개시 실험과 이에 대한 통계적, 수학적인 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다;

1. 트리 개시 전압 실험을 수행하고, 이를 Weibull 분포 함수로 해석하여 $\beta_V=10.07$, $\theta_V=41.44$ 의 값을 얻었다.
2. 트리 개시 전압 실험의 결과를 토대로 수리적인 시뮬레이션을 행하여 XLPE의 수명 지수 값으로 $n=15$ 를 얻었다.
3. 트리 개시 시간 실험을 수행하여 수명 지수 $n=15.73$ 의 값을 얻었으며, 이 값은 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였다.

절연 물질의 성능을 향상시키기 위해서 수명에 대한 연구는 향후에도 그 중요성에 비추어 활발하고도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

6. 참고 문헌

- [1] Rayner E. H., Journal of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 49, 1935, pp. 90-103.
- [2] Fischer P. H. H. and Nissen K. W., IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. E1-11, 1976, pp. 37-40.
- [3] McKeown J. J., Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 112, 1965, pp. 824-830.