

차수형 케이블의 수트리 가속실험후 와이בל분포 해석

김진국*, 임장섭*, 송일근**, 이재봉**
(* : 목포해양대학교 ** : 전력연구원)

The Analysis of Weibull Distribution after an Accelerated Aging Test of MV Cable

Kim, Jin-Gook*, Lim, Jang-Seob*, Song, Il-Keun**, and Lee, Jae-Bong**

* : Mok-Po National Maritime University.
** : Korea Electrical Power Research Institute.

Abstract - For many years, testing laboratories, research institutes and manufactures try to find a reliable water tree accelerated ageing test that is able to show whether a polymer Medium Voltage cable os susceptible to water treeing or not.

Test on laboratory samples, model cable designs, and fell size cable are presented. Apart form aging, another important aspect of any accelerated aging test is the right choice of th preconditioning method.

This paper is the analysis of weibull distribution method after an accelerated aging test of MV(Medium Voltage) cable.

는 가속열화숫자로 이해하기 쉽게 표현할 수 있다. 특히 XLPE 물질의 변화와 MV cable system에서 측정된 Breakdown Strength 의 상호관계에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다.

2. 이 론

2.1 와이블 분포(Weibull Distribution)

수명데이터의 분석법은 크게 두가지로써 비모수(nonparametic) 방법과 모수(parametic) 방법으로 나눌 수 있다. 모수 방법인 지수 분포, 대수 정규분포, 감마분포, 정규분포, 와이블 분포가 있는데, 와이블 분포가 활용도 측면에서 가장 중요시되고 있다.

1. 서 론

전력산업의 발전과 더불어 전기에너지의 공급은 중요한 문제점이 되고있다. 이에 최근 10년에서 15년까지의 데이터를 비교 분석한 결과 water tree 가속열화 실험은 중요한 문제점의 해결책을 제시하고 있다. 수트리 가속열화 실험을 통해 학술 조사의 기초를 세우는 것과 제조하는 방법에 대한 연구가 큰 폭을 이루고 발표되었다.

최근 새로운 물질의 발견과 여러 실험 방법을 통한 경우 절연물질의 가속열화 실험에 대한 많은 데이터들이 모아지고 있다. 이러한 데이터를 기반으로 한 실험에서 water tree 가속열화에 의한 신뢰성 평가 및 잔존 수명의 평가에 대한 데이터가 두각을 보이고 있다.

어떤 기술 개발 단계에서도 신뢰성과 성능간의 절충이 이루어져야 한다. 또한 신뢰성과 cost와의 절충도 자주 거론되곤 한다.

배전케이블의 결점(온도, 기술수준, 그리고 케이블 시스템의 오용)은 오랜 가속열화 시간동안에 전기적 stress에 의해서 생성된다. 20KV급 케이블의 경우 최근 독일 및 세계각지의 케이블회사에서 그 결과가 발표되었다.

- 1) 일반적인 가속열화실험은 모든 물질의 케이블시스템에 대해서 적용될 수 있다.
- 2) 일반적인 결점의 형성은 케이블 시스템의 빠른 경우의 수트리와 전기트리의 형성으로 말할 수 있다.

이러한 수트리와 전기트리의 형성과 진전에 대한 이해

와이블 분포는 다양한 모양의 분포로서 1930년대 말 스웨덴의 볼베어링에 이용할 목적으로 스웨덴의 엔지니어인 와이블(W. Weibull)에 의해서 개발됐으며, 1950년부터 본격적으로 기계류에 많이 활용되고 있다. 와이블 확률치는 누적고장률과 시간축으로 하여 눈금을 만든 이중 대수 방안지로서 분포함수와 고장 형태를 예측할 수 있다.

와이블 분포(Weibul Distribution)는 신뢰도 계산에서 가장 널리 쓰이는 분포종의 하나로, 모수를 적절히 선택하면 다양한 고장률 형태를 모형화할 수 있다. 마모(Wear-out)와 역마모(Weat-in) 현상을 모형화하는 고장 예에도, 특별한 경우로, 상수 고장률도 묘사할 수 있다. 형상모수(Shape Parameter)와 특성수명(Characteristic Life)를 갖는 와이블 분포는 고장률이 멱수 법칙의 형식을 취한다고 가정하면 식(1)과 같다.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

CDF(누적분포함수)에서 F(θ) = 0.632라는 것을 유의하면 CDF 도표로부터도 얻을 수 있다. β=1일 때에는 상수 고장률(CFR)에서 해당하는 지수 분포가 얻어진다. β < 1의 값에 대해서는 고장률은 역마모(wear-in) 현상의 전형으로 감소하고(DFR), β > 1의 값에 대해서는 고장률은 노화 영향(Aging Effect)의 전형으로 증가한다.(IFR)

절연 수명과 절연 신뢰도를 조사하는데 주로 사용되고 있는 와이블 분포식은 파괴 수명을 예측하는 방법중 하나로 가장 많이 쓰이는 방법중 하나이다. 와이블 분포는 최약점 파괴 분포라고도 하며, 열 및 진계집중에 따른 절연재료의 고장 및 응력에 의한 금속재료의 크랙(Crack)성장과 파괴수명의 예측에 이용된다. 이러한 와이블 분포(Weibull Distribution)의 확률 밀도는 β 에 따라 그 형상이 변하므로 β 을 형상파라미터라 한다. α 의 값이 크면 고장율은 작고 평균 수명이 길어지므로 α 를 척도 파라미터라 한다. 이들 파라미터는 보통 실험적으로 결정된다. 이에 따른 와이블 함수식은 다음과 같다.

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\frac{(t-r)^\beta}{t_0}\right\} \quad (1)$$

위치파라미터 r 은 정해져 있는 것이 아니라 관심의 대상인 피시험물에 의존한다. 예를 들어 전기 절연 시스템에 인가된 전압이 임계 또는 최저 전압 r 보다 작은면 고장은 절대로 일어나지 않음을 의미하며 r 은 부분방전 개시 전압이 될 수 있다.

3. 실험방법

- ①가속열화 수트리 전(CS TR XLPE CS형)
- ②가속열화 수트리 후(CS TR XLPE CS형)
- ③가속열화 수트리 전(SS TR XLPE CS형)
- ④가속열화 수트리 후(SS TR XLPE CS형)

본 실험에서 사용된 시료는 CS TR XLPE CS형과 SS TR XLPE CS형 수치로써 가속 수트리 시험을 위한 전압은 15KV를 연속인가 하였으며 시료의 75% 이상을 침수하고, 도체온도 85℃를 유지하며 전류를 시험기간 동안 인가하였다. 1000 시간을 유지하며 측정회수는 동일 조건하에서 10개의 시료를 실험하였다.

3.1 와이블 함수식 유도

확률변수 시간 t 에 대해서 확률 밀도 함수 $f(t)$ 를 가지고 있는 한 시스템을 가정한다. 확률 밀도함수에서 신뢰도 함수(1) 및 누적분포함수(2)을 다음과 같다고 가정하면 고장률 함수는 식(3)으로 정의한다. 여기서 확률 밀도 함수를 $f(t) = -dR(t)/dt$ 라 하면 식(4)와 같고, 이를 적분하면 $R(0) = 1$ 의 관계에서 식(5)이 된다. 따라서 수명 분포의 확률 밀도함수는 $f(t)$ 는 식(5)의 양변을 미분하면 식(6)과 같이 나타난다.

$$R(T) = \int_T^\infty f(t)dt \quad (1)$$

$$F(T) = \int_0^T f(t)dt, \text{ 및 } F(T)+R(T)=1 \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{d}{dt}R(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt} \quad (4)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^T \lambda(t)dt\right\} \quad (5-1)$$

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^T \lambda(t)dt\right\}, \quad (5-2)$$

$$f(t) = \lambda(t) \exp\left\{-\int_0^T \lambda(t)dt\right\} \quad (6)$$

따라서, 와이블 분포에서는 고장 함수 $\lambda(t)$ 를 나타내며 식(5)를 대입하여 와이블 분포 누적확률함수를 유도한다.

시편의 파괴수명시간을 가지고 파괴시간을 순서대로 정렬한 후 i 번째 데이터까지의 누적파괴확률을 대응시켜 표2의 누적파괴확률을 구한다. 누적분포함수식은 다음과 같다.

$$F_i = \frac{i}{n+1} (i=1,2,3,4 \dots n)$$

척도파라미터는 누적파괴확률에 따른 파괴시간을 도시하여 최소자승법을 이용 직선상에서 63.2%의 값을 표시하며, 형상파라미터는 와이블분포 방정식을 변형하여 각각의 시료에 따른 직선의 기울기가 된다. 형상 파라미터를 구하기 위한 와이블 함수와 그 변형으로 양변에 대해 역수를 취하고 자연대수를 두 번 취하며, 지수분포 확률 작도에 의한 형상 파라미터를 구한다.

4. 결과 및 고찰

파괴 시간에 따른 수명을 예측하기 위해서 와이블분포 통계 함수를 사용한다. 와이블분포 통계함수를 사용하기 위해서는 누적파괴확률(F_i), 척도파라미터 *measuring parameter*(α), 형상파라미터 *shape parameter*(β)를 구해야 한다.

standard deviation(σ)가 제일 큰 가속수트리전(SS TR XLPE CS형)의 경우 평균에 벗어나 있는 경우가 제일 크며, *Skewness*가 음수인 가속수트리후(SS TR XLPE CS형)의 경우 평균에 대한 정규분포에 비해서 왼쪽으로 치우쳐 있다는 것이면, 나머지는 반대쪽으로 치우쳐 있다. *kurtosis*가 음수일 경우는 뾰족한 부분이 거의 없고 평탄하다는 것이면 그 값이 클 경우 더욱더 평탄하다고 말할 수 있다.

4.1 와이블 분포의 특징

1) $\beta > 1$: 마모 고장

고장율은 시간 t 에 따라 증가한다. β (형상파라미터)이 증가할 때 고장은 갑자기 나타난다. 시험대상이 절연과 파괴에 이를 정도의 절연 저하를 나타낼 때가 이에 속한다. 이런 이유로 이를 마모형 고장이라 하며, β 값이 4이상일 때 고장 확률 함수는 정규분포 함수에 가깝다.

2) $\beta = 1$: 우발 고장

순간 고장율은 t 에 무관하다. 따라서 시험 대상은 절연 저하 없이 우발 고장을 일으킨다. 고장 확률함수는 지수분포함수와 아주 흡사하다.

3) $\beta < 1$: 초기 고장

순간 고장율은 t 에 따라 감소한다. 고장 발생은 초기에 집중되어 초기고장으로 분류된다.

Table 1. Breakdown lifetime of each specimen

n	①(Sec)	②(Sec)	③(Sec)	④(Sec)
1	42	139	20	29
2	45	154	42	71
3	70	156	56	80
4	89	179	60	104
5	93	184	70	110
6	96	189	101	147
7	137	230	121	150
8	158	235	181	156
9	219	276	190	168
10	264	276	207	180
Aver. (x)	121.30	201.80	104.80	119.50
STD (σ)	73.58	41.71	67.1	48.83
Skew	0.98	0.45	0.47	-0.58
kurt	0.05	-1.19	-1.38	-0.60

4.2 누적파괴확률

Table 2. Accumulation breakdown probability

Specimens	누적 파괴확률(Fi)
1	9.1
2	18.2
3	27.3
4	36.4
5	45.5
6	54.5
7	63.6
8	72.7
9	81.8
10	90.9

4.3 척도파라미터(Measuring parameter)

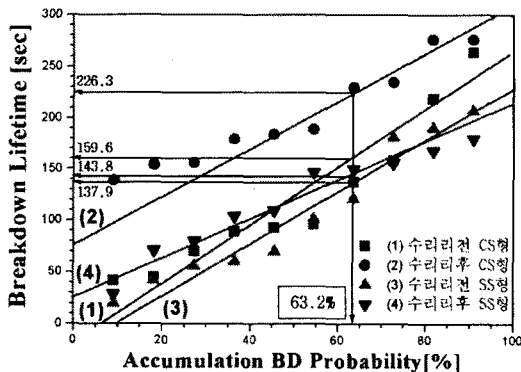


Figure 1. Measuring parameter of each specimen.

4.4 형상파라미터(Shape Parameter)

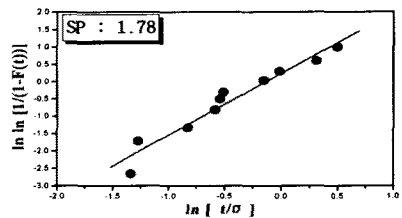
Table 3. Exponential distribution probability

①	②	③	④	파괴순서	중앙순위	변환	ln(변환)
42	139	20	29	1	0.06	1.07	0.0697
45	154	42	71	2	0.16	1.19	0.1784
70	156	56	80	3	0.23	1.29	0.2623
89	179	60	104	4	0.35	1.55	0.4396
93	184	70	110	5	0.45	1.82	0.6013
96	189	101	147	6	0.51	2.07	0.7323
137	230	121	150	7	0.64	2.81	1.0334
158	235	181	156	8	0.74	3.85	1.3482
219	276	190	168	9	0.83	6.11	1.8109
264	276	207	180	10	0.93	14.85	2.6986

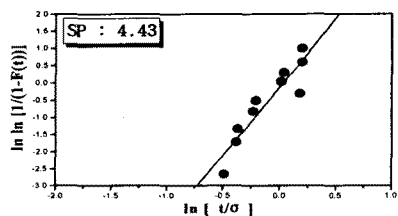
Table 4. Coordinate shape parameter(β)

		1	2	3	4	5
①	X	-1.335	-1.266	-0.824	-0.584	-0.540
	Y	-2.663	-1.724	-1.338	-0.822	-0.508
②	X	-0.487	-0.385	-0.372	-0.234	-0.207
	Y	-2.663	-1.724	-1.338	-0.822	-0.508
③	X	-1.931	-1.189	-0.901	-0.832	-0.678
	Y	-2.663	-1.724	-1.338	-0.822	-0.508
④	X	-1.601	-0.706	-0.586	-0.324	-0.268
	Y	-2.663	-1.724	-1.338	-0.822	-0.508
		6	7	8	9	10.
①	X	-0.508	-0.153	-0.01	+0.316	+0.503
	Y	-0.312	+0.033	+0.299	+0.594	+0.993
②	X	-0.180	+0.016	+0.037	+0.199	+0.199
	Y	-0.312	+0.033	+0.299	+0.594	+0.993
③	X	-0.311	-0.130	+0.272	+0.320	+0.406
	Y	-0.312	+0.033	+0.299	+0.594	+0.993
④	X	+0.022	+0.042	+0.081	+0.155	+0.224
	Y	-0.312	+0.033	+0.299	+0.594	+0.993

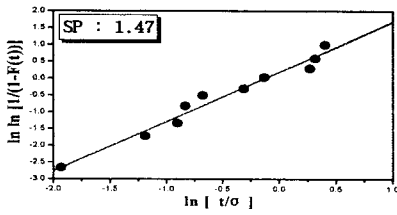
모든 시료의 파괴시간을 측정하여 표로 나타낸 결과를 이용하여 척도파라미터 및 형상파라미터를 구하였다.



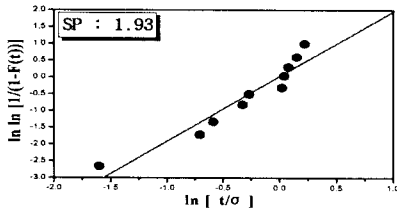
a) 가속 수리리전 CS TR XLPE CS형.



b) 가속 수리리후 CS TR XLPE CS형.



c) 가속 수트리전 SS TR XLPE CS형.



d) 가속 수트리후 SS TR XLPE CS형.

Figure 2. Shape parameter of each Specimen.

4.5 와이블분포 함수

Table 5. Weibull distribution calculation data

$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$				
①	②	③	④	
42	1.093	139	1.115	20
45	1.105	154	1.182	42
70	1.230	156	1.192	56
89	1.354	179	1.354	60
93	1.382	184	1.399	70
96	1.405	189	1.450	101
137	1.762	230	2.074	121
158	1.982	235	2.182	181
219	2.756	276	3.409	190
264	3.449	276	3.409	207
				2.817
				180
				2.542

표5에서 구한 데이터를 가지고 파괴확률에 따른 수명 예측값을 1%~99.99%까지 파괴수명을 예측하였다. 와이블 함수에서 보이듯 형상파라미터(β)에 따라 와이블 함수의 형상이 변하며 척도파라미터(α)에 따라서 평균수명이 길어지거나 고장률 등의 변화를 가져온다.

Table 6. Estimated Values of Lifetime According to Breakdown Probability

BD[%]	BD Lifetime [sec]			
	①	②	③	④
1	51.96	152.02	29.22	43.52
5	60.89	157.40	39.41	53.71
10	73.36	164.86	52.82	65.42
20	96.47	179.03	79.20	90.53
30	120.58	194.34	104.63	114.76
40	143.86	208.58	130.13	138.80
50	167.33	223.38	156.13	164.29
60	190.74	237.68	182.64	188.72
70	213.70	252.93	207.57	213.20
80	237.11	266.72	233.57	238.19
90	261.09	281.46	259.57	262.61
95	271.91	289.62	272.79	274.88
99	281.84	295.25	282.98	284.56
99.9	282.66	296.26	283.80	285.38
99.99	283.48	297.09	285.44	286.21

가장 수명이 긴 것은 가속수트리후(cs)이며 가장 수명이 짧은 것은 가속수트리전(cs)이며 파괴확률에 따른 수명 예측값을 그림으로 예 도시하면 아래와 같다.

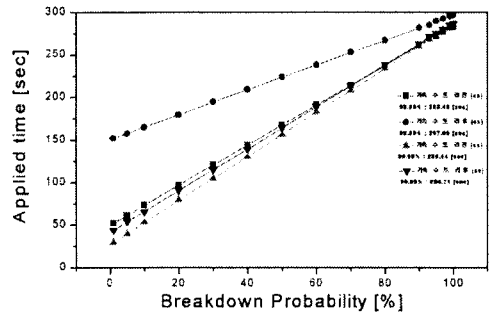


Figure 3. Estimated lifetime according to BD probability.

4. 결 론

MV 케이블의 수트리 가속열화 후 와이블분포 해석을 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. weibull Distribution 해석을 통한 결과 중 ②가속열화 수트리 후(CS TR XLPE CS형)모델의 경우에 다른 모델과 비교할 때 수명특성이 현저히 변화되었다.
2. 열화된 케이블 모델은 수트리 열화로 인한 일시적인 가속수명치 증대로 나타나지만 이는 ②가속열화 수트리 후(CS TR XLPE CS형)모델의 수트리 열화된 결과로 추정된다.
3. 수명증대는 케이블내의 축에 반도체성 컴파운드의 박리현상의 발생으로 추정된다.

상기의 가속실험된 신형 케이블은 수트리에 효과적인 방지 능력을 갖춘 것으로 판단되지만 보다 더 정확한 결과를 위해서는 여러 가지의 방법이 수반되어야 한다.

[REFERENCE]

- [1] E. Gulski 외 3인 "On-site Partial discharge diagnostics of medium voltage power cables" A9.1 Jicable 1999
- [2] S. pelissou. "Characteristics of field-aged medium voltage cable" 4th Int. Conf. on Insul. Power Cables. pp. 456-60(1995)
- [3] Steennis E.F. "water tree accelerated ageing tests for MV XLPE cable"(Jicable)
- [4] Mofzsidgz. K. New interpretation of long-term test result of MV cables. B4.1 Jicable 1999
- [5] R. bach and W. kalkner "comparison of different voltage type for the evaluation of layed medium voltage cable" 8th International Symposium on High Voltage engineering, 61.04(1993)