

## 배전케이블의 수트리 가속열화 후 와이בל분포 해석

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

김진국\*, 임장섭\*, 송일근\*\*, 김주용\*\*, 이우선\*\*\*

Kim. Jin-Gook\*, Lim. Jang-Seob\*, Song. Il-Gun\*\*, Kim. Ju-Yong\*\*, Woo-Sun Lee\*\*\*

\* : Mok-Po National Maritime University \*\* : KEPRI, \*\*\* : Dep. of Electrical Engineering of Chosun Uni

#### Abstract

for many years already, 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 is susceptible to water treeing or not.

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

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

**Key Words** : Weibull distribution(와이בל분포), standard deviation(표준편차) Skewness(왜도), Krutosis(첨도) 형상파라미터(Shape Parameter), 척도파라미터(Measuring parameter),

#### 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 수트리 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 절충

도 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 케이블 시스템에 대해서 적용될 수 있다.

2) 일반적인 결점의 형성은 케이블 시스템의 빠른 경우 수트리와 전기트리의 형성으로 말할 수 있다.

이러한 것은 가속열화숫자로 이해하기 쉽게 표현한다. 특히 XLPE 물질의 변화와 MV cable system에서 측정된 breakdown strength의 상호관계에 대해서 많은 연구를 한다.

#### 2 표준편차 및 왜도, 첨도

각각의 시료에 따른 평균 수명 시간을 구하기 위해서 우선 두께를 일치시킨 후 일정한 전압을 인가

\* : 목포해양대학교

\*\* : 전력연구원

\*\*\* : 조선대학교

하고 파괴수명 시간을 측정하였다.

각각의 시료에 파괴시간을 측정할 결과 ②가속열화 수트리 후(CS TR XLPE CS형)의 평균 파괴수명 시간이 제일 크게 나왔다.

파괴 데이터를 실제 기기에서 이용할 때 평균값이 중요한지 하나 호트러짐의 정도인 표준편차도 매우 중요한 데이터가 된다. 그러므로 표준편차가 높게 되면 실용성이 떨어지며 데이터들이 평균값에서 벗어나 있는 정도를 가진다.

표준편차 standard deviation ( $\sigma$ )는

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - X)^2 + (X_2 - X)^2 + \dots + (X_N - X)^2}{N}}$$

으로 구해진다.

왜도(Skewness)란 평균에 대한 분포의 비대칭 정도를 나타냅니다. 왜도가 양수이면 분포의 비대칭 꼬리가 양의 값 쪽으로 치우쳐 있으며, 왜도가 음수이면 이와 반대입니다.

$$Sk = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left[ \frac{(x_i - X)}{\sigma} \right]^3$$

X는 평균이며  $\sigma$ 는 표준편차를 뜻한다.

첨도(kurtosis)란 분포의 뾰족한 정도를 정규 분포와 비교하여 나타내는 것으로 양의 첨도는 상대적으로 더 뾰족하고 음의 첨도는 덜 뾰족하다.

$$Ku = \left[ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left[ \frac{(x_i - X)}{\sigma} \right]^4 \right] - \frac{3(n-1)^2}{(n-1)(n-2)}$$

X는 평균이며  $\sigma$ 는 표준편차를 뜻한다.

### 3. 실험방법 및 결과고찰

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

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

파괴 시간에 따른 수명을 예측하기 위해서 와이블 분포 통계 함수를 사용한다. 와이블분포 통계함수를 사용하기 위해서는 누적파괴확률(Fi), 척도파라미터 measuring parameter( $\alpha$ ), 형상파라미터shape

parameter( $\beta$ )를 구해야한 standard deviation( $\sigma$ )가 제일 큰 가속수트리전(SS TR XLPE CS형)의 경우 평균에 벗어나 있는 경우가 제일 크며, Skewness가 음수일 가속수트리후(SS TR XLPE CS형)의 경우 평균에 대한 정규분포에 비해서 왼쪽으로 치우쳐 있다는 것이면, 나머지는 반대쪽으로 치우쳐 있다. kurtosis가 음수일 경우는 뾰족한 부분이 거의 없고 평탄하다는 것이면 그 값이 클 경우 더욱더 평탄하다고 말할 수 있다.

표1 파괴 수명 시간 및 평균 표준편차

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
average(x)	121.3	201.8	104.8	119.5
standard deviation( $\sigma$ )	73.58	41.71	67.1	48.83
skewness	0.98	0.45	0.47	-0.58
kurtosis	0.05	-1.19	-1.38	-0.60

#### 3.1 누적파괴확률

표1에서 시편의 파괴수명시간을 가지고 파괴시간을 순서대로 정렬한 후 i번째 데이터까지의 누적파괴확률을 대응시키면

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

--(1)

표2 누적파괴확률

Specimens	누적파괴확률(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

### 3.2 척도파라미터(Measuring parameter)

척도파라미터는 누적파괴확률에 따른 파괴시간을 도시하여 최소자승법을 이용 직선상에서 63.2%의 값을 표시한다. 각각의 시료에 따른 최소자승법을 이용한 척도 파라미터는 다음과 같다.

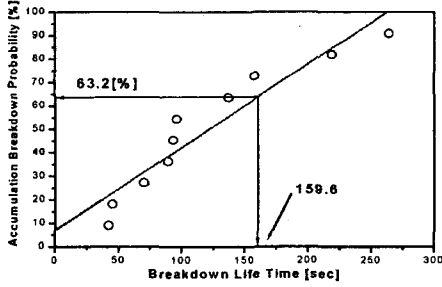


그림 1. 가속 수트리지전 CS TR XLPE CS형

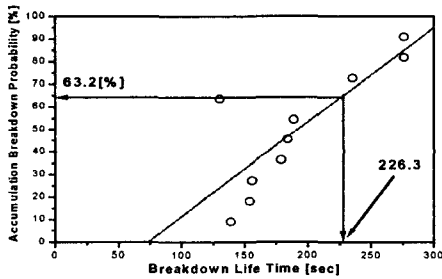


그림 2 가속 수트리지후 CS TR XLPE CS형

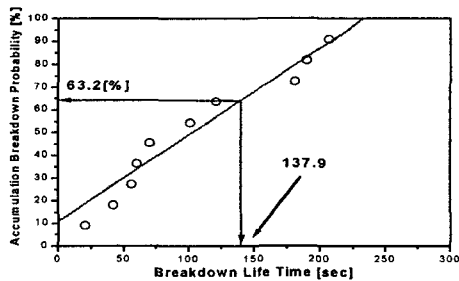


그림 3 가속 수트리지전 SS TR XLPE CS형

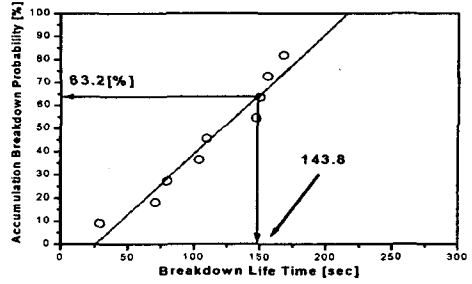


그림 4 가속 수트리지후 SS TR XLPE CS형  
다음의 척도파라미터를 표3에 도시하여 정리하였다

표3 measuring parameter( $\alpha$ )

Measuring parameter( $\alpha$ )	①가속수트리지전 (CS)	②가속수트리지후 (CS)
		159.6
Measuring parameter( $\alpha$ )	③가속수트리지전 (SS)	④가속수트리지후 (SS)
		137.9

### 3.3 형상파라미터(Shape Parameter)

형상파라미터는 와이블분포 방정식을 변형하여 각각의 시료에 따른 최소자승법을 이용한 직선의 기울기가 된다. 형상 파라미터를 구하기 위한 와이블 함수와 그 변형은

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

-(1)

양변에 대해 역수를 취하고 자연대수를 두 번 취하면

$$\ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] = \beta \ln \left( \frac{t}{\alpha} \right) \quad -(2)$$

를 얻어지고 이 식에서

$$Y = \beta X \quad -(3)$$

라고 한다면

$$X = \ln \left( \frac{t}{\alpha} \right) \quad -(4)$$

$$Y = \ln \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad -(5)$$

된다. 이에 따른 각각의 수치를 계산하여 그 기울기인 형상파라미터( $\beta$ )를 계산한다.

표4 와이블 분포 방정식 변형 변환값

①	②	③	④	파괴순서 (i)	중앙 순위	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

표5 형상 파라미터( $\beta$ )를 위한 X, Y 좌표

		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

표5 는 수식에 대입한 X, Y 값을 표시한 것이며  
그림으로 표시하면 다음과 같다.

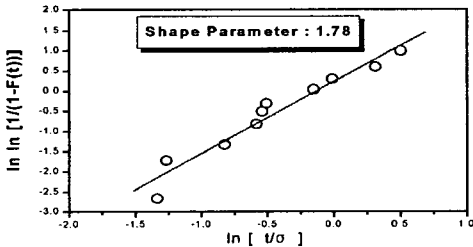


그림 5 가속 수트리전 CS TR XLPE CS형

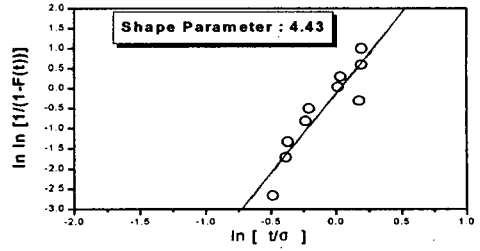


그림 6 가속 수트리후 CS TR XLPE CS형

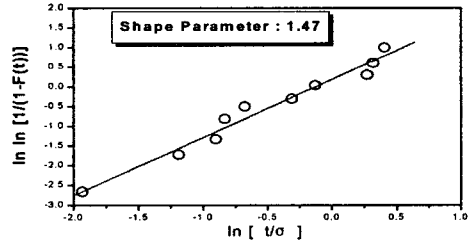


그림 7 가속 수트리전 SS TR XLPE CS형

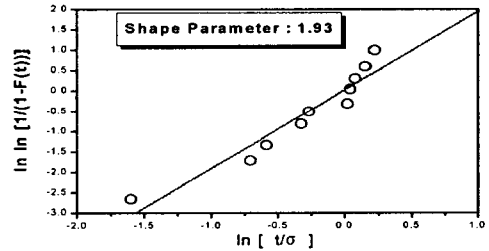


그림 8 가속 수트리후 SS TR XLPE CS형

그림에서 표시한 직선의 기울기가 형상파라미터  
( $\beta$ )이며 이를 도시하여 표6 에 정리하여 나타내었다.

표6 shape parameter( $\beta$ )

	①	②	③	④
Shape parameter( $\beta$ )	1.78	4.43	1.47	1.93

### 3.4 와이블분포 함수

위에서 구한 척도파라미터와 형상파라미터를 아래  
의 와이블분포 함수에 대입하면

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$$

아래의 표7의 결과로 나타난다.

표7 와이בל분포함수 데이터

$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]$							
①		②		③		④	
42	1.093	139	1.115	20	1.058	29	1.045
45	1.105	154	1.182	42	1.174	71	1.256
70	1.230	156	1.192	56	1.266	80	1.322
89	1.354	179	1.354	60	1.294	104	1.535
93	1.382	184	1.399	70	1.369	110	1.596
96	1.405	189	1.450	101	1.633	147	2.042
137	1.762	230	2.074	121	1.825	150	2.085
158	1.982	235	2.182	181	2.492	156	2.170
219	2.756	276	3.409	190	2.602	168	2.350
264	3.449	276	3.409	207	2.817	180	2.542

표6에서 구한 데이터를 가지고 파괴확률에 따른 수명 예측값을 1%~99.99%까지 파괴수명을 예측하여 표8에 도시하여 정리하였다. 와이블 함수에서 보이듯 형상파라미터( $\beta$ )에 따라 와이블 함수의 형상이 변하며 척도파라미터( $\alpha$ )에 따라서 평균수명이 길어지거나 고장률 등의 변화를 가져온다.

표8 파괴 확률에 따른 수명 예측값

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
93	268.24	285.06	267.74	270.77
95	271.91	289.62	272.79	274.88
97	276.90	292.15	278.42	279.95
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 에 도시하면 아래와 같다.

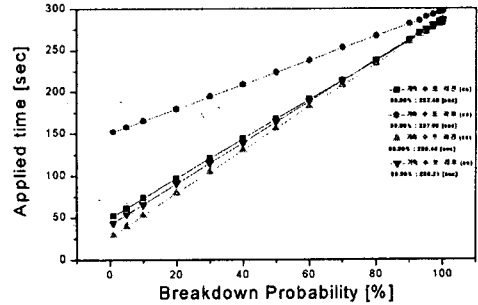


그림 9 와이블분포 통계함수

#### 4. 결 론

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

1. weibull 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 케이블 내로 축의 반도체전성 검과운드의 박리현상의 발생으로 추정된다.

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

#### [REFERENCE]

- [1] GULSKI. E. 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)