

# 트리잉 파괴에 대한 와이블 확률 분포를 이용한 수명 평가

(Lifetime assessment using Weibull probability distribution according to treeing breakdown)

신성권\*\* 김경민\* 김탁용\* 이덕진\* 박세화\* 김경환\*\*\* 김재환\*

(S. K. Shin\*\* K. M. Kim\* T. Y. Kim\* D. J. Lee\* S. H. Park\*\*\* K. H. Kim\*\*\*\* J. H. Kim\*)

## Abstract

본 논문은 절연재료의 보이드(void)나 크랙(crack)과 같은 결함이 부분방전을 일으킴으로서 절연재료가 열화되어 최종적으로 파괴에 이른다. 특히 부분방전 중에서 트리잉 열화는 절연재료에 매우 치명적이다. 또한 고전압, 고전계 기술분야에서 절연파괴전압이나 일정전압 인가시 수명 시간 데이터는 중요하다. 파괴 통계에 주로 많이 사용하는 와이블 확률 분포를 이용하여 트리잉 파괴에 대한 수명을 평가를 시도하였다. 시료의 형태는 침대 평판전극이고 시료는 저밀도 폴리에틸렌이다. 인가 전압은 상용 교류 전압 8, 10, 12[kV]를 인가하였다. 척도 파라메타는 전압이 증가함에 따라 128.7→96.4→85.4로 감소하고 형상 파라메타는 전압이 증가함에 따라 2.39→2.19→2.02로 감소한다. 따라서 시료의 추정 수명은 110분, 81.57분, 49.27분으로 전압이 증가함에 따라 수명이 급격히 단축됨을 알 수 있다.

**Key Words(중요용어) :** 와이블 분포, 척도 파라메타, 형상파라메타, 추정수명

## 1장. 서 론\*

전력 기기나 절연성능을 유지하는 전기절연재료는 시간의 경과와 더불어 전기적, 기계적, 열적 열화를 받아 성능은 저하한다. 절연재료에 보이드(void)나 크랙(crack) 등의 결함이 존재하면 부분방전이 발생하여 전기절연재료를 열화시켜 최종적으로 절연파괴에 이른다. 고전계하에서 절연파괴 전압이나 임의의 일정 전압이 인가될 때 수명시간에 관한 데이터는 매우 중요하다. 이들 수명시간에 관한 데이터는 일반적으로 산만하고 흐트러져 있어서 일정한 통계처리를 하여 정량적인 평가할 필요가 있다.[1,2] 수명평가나 파괴통계에서 주로 이용되는 2-모수 와이블 확률 분포를 이용하여 절연재료에서의 파괴수명값을

추정하고 절연안정성을 판단하기 위하여 경년열화 데이터의 통계처리방법을 제안하였다.

## 2 장. 실험장치 및 방법

### 2.1 시 료

본 실험에 사용된 시료는 밀도 0.92[g/cm<sup>3</sup>]인 한양 화학제 LDPE 펠릿(Pellet)을 사용하였다.

완성된 시료의 형태는 블록 형태로 그림 2-1에서 나타낸 바와 같다. 시료의 규격 30×40×3[cm]로 제조하였다. 침전극은 직경 0.56[mm $\phi$ ]인 일본제 바늘(스테인레스 스틸재질)을 예칭법에 의해 침전단 곡률반경 5~6[ $\mu$ m]으로 조정하여, 시료에 사용하였다. 전극의 형태는 침대 평판전극이고 극간 거리는 2[mm]로 하였고 접지측 전극은 실버 페이스트(Silver Paste)로 도포하였다.

\* 광운대학교 전기공학과

\*\* 동해대학교 전기공학과

\*\*\* 경원대학교 전기전자공학부

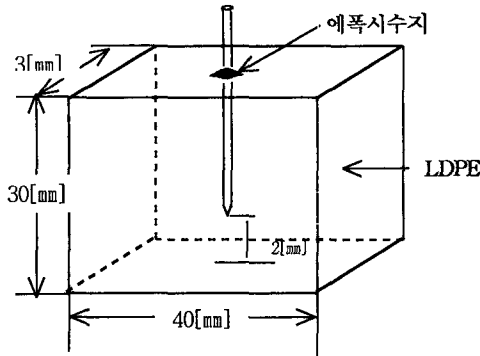


그림 2-1 전극배열

## 2.2 실험장치

음향방출 측정 및 파괴실험과 실험장치에 대한 블록선도는 그림 2-2에 표시하였다. 인가전압은 교류 60[Hz]이고, 50[kVrms]까지 연속으로 변화시킬 수 있다. 고전압 회로는 음향방출 검출회로의 잡음을 일으킬 수 있는 코로나 방전을 억제하기 위해 실리콘 오일(silicon Oil)에 함침하였다.

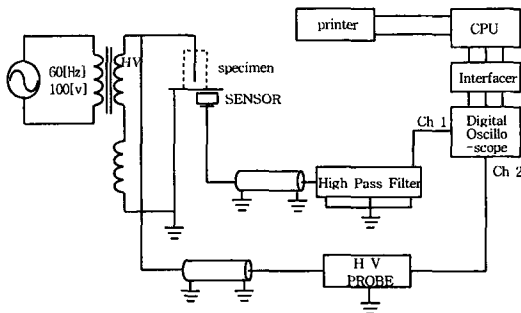


그림 2-2. 실험장치의 블록선도

음향탐촉자(Acoustic transducer)는 공진주파수 300[kHz]를 갖는 PZT탐촉자가 사용되었고, 평판전극 바로 아래 거리 1[mm]에 설치하였다. 음향의 원신호 자체는 너무 미약해서 신호는 이득이 60[dB]인 차동 증폭기로 150~450[kHz]의 대역필터(band pass filter)를 사용하였다. 문턱준위(threshold level)는 증폭된 신호를 5[mV]로 하여 확실한 음향신호를 얻을 수 있었다. 탐촉자(transducer)에서 포착된 신호는 증폭된 후, 디지털 오실로스코프(Tektronix Co. TDS210 샘플링 시간 1[nHz])의 채널 1에 입력된다. 그리고 AE 펄스의 위상각 특성을 보기 위해 인가전압을 고전압 프루브(HP 34300A)로 전압강하(1000:1)시켜 채널 2에 입력된다. 오실로스코프에서 디지털화된 신호는 인터페이스(RS-232C)케이블을 통해 컴퓨터의 입력되고 디지털 신호를 취득하였다.

## 2.3 실험방법

전압인가 방식은 승압속도 1[kV/S]로 트리개시로부터 파괴 시까지 일정전압에서 인가했으며, 무보이드/보이드 시편에 각각 교류(60[Hz]) 전압 8,10,12[kV]를 인가하였다. 각각 시료 10개씩 상온에서의 파괴 수명을 측정하였다. 트리개시에서 파괴까지 트리형태의 관찰은 광학현미경에 부착한 CCTV를 통하여 관찰하고 사진 촬영을 하였다.

## 3 장. 실험 결과

각 시료에 절연파괴수명을 진단하기 위해서 사용한 재료로서 저밀도 폴리에틸렌을 사용하였고, 전극 형태는 침대 평판 전극계에서 절연파괴시험을 하였다. 무보이드 시료에 대하여 인가전압 8[kV], 10[kV], 12[kV]로 각각 시료 10개씩 상온에서의 파괴 수명을 측정하여 표 3-1에 나타내었다.

표3-1 시료의 파괴 수명

단위[분]

| 시료번호 | LDPE 시료 |        |        |
|------|---------|--------|--------|
|      | 8[kV]   | 10[kV] | 12[kV] |
| 1    | 50      | 32     | 27     |
| 2    | 65      | 45     | 35     |
| 3    | 79      | 57     | 45     |
| 4    | 82      | 69     | 52     |
| 5    | 95      | 75     | 69     |
| 6    | 100     | 85     | 75     |
| 7    | 130     | 93     | 82     |
| 8    | 140     | 106    | 98     |
| 9    | 165     | 110    | 106    |
| 10   | 180     | 135    | 118    |
| 평균   | 108.6   | 80.5   | 70.7   |

전기적 트리를 진전시키면서 절연파괴강도를 평가하고 얻어진 결과를 통계적으로 검토하기 위해서 2-파라메타 와이블 함수를 이용하였다.[3,4]

먼저시편에 따른 누적 파괴 확률, 척도 파라메타, 형상파라미터 값을 구해야 하는데 이를 위해서 먼저 표 3-1의 데이터를 이용하여 파괴 시간이 적은 순서대로 늘어놓은 다음  $i$ 번째의 데이터  $t_i$ 에 대하여 누적 파괴 확률  $F(t)$ 는 다음 (3-1)식과 같다.

여기서  $n$ 은 데이터의 수이다.  $i$ 는 파괴되는 순서를 나타낸다.

$$F(t) = \frac{i}{n+1} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3-1)$$

시료가 절연 파괴될 때까지의 교류 전압인가 시간  $t$ 의 분포를  $t$ 를 확률 변수로 하는 2-파라메타 와이블 분포로 표시한다면 그 밀도 함수를  $f(t)$  분포함수(누적파괴확률)를  $F(t)$ 와 할 때 각각은 다음 식과 같다.

2-파라메타 와이블 확률 분포 함수는

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_s}\right)^m\right] \quad (3-2)$$

로 나타내는데, 여기서  $F(t)$  : 누적 확률 분포

$t$  : 시료의 파괴 시간

$t_s$  : 척도 파라메타(누적 파괴 확률이 63.2[%]에 해당하는 평균적인 파괴 시간에 대응하는 값)

$m$  : 형상 파라메타(누적 파괴 확률 분포의 분포 형상을 결정하는 파라메타로서  $m$ 가 커짐에 따라 흐트러짐이 작은 분포로 되며  $m$ 가 1 정도로 지수 분포에 가까운 분포 형상이 되고  $m$ 가 4 정도 이상이면 정규분포에 가까운 분포 양상이 된다.)

먼저 척도 파라메타( $t_s$ )를 구하면 무보이드 시료의 그림3-1, 3-2, 3-3를 나타낼 수 있다.

X축은 절연파괴 시간[분]을 Y축은 누적 확률 분포로 놓고 이때의 누적 확률이 63.2[%]에 해당하는 곳의 시간이 척도 파라메타( $t_s$ )의 값이 된다. 이 척도 파라메타는 무보이드 시료는 표3-2에 표시하였다.

(1) 무보이드 시료의 척도 파라메타( $t_s$ )

표 3-2 무보이드 시료의 척도 파라메타( $t_s$ )

| 시 료    | 무보이드 시료 |        |        |
|--------|---------|--------|--------|
| 인가전압   | 8[kv]   | 10[kv] | 12[kv] |
| 척도파라메타 | 128.7   | 96.4   | 85.4   |

(2) 무보이드 시료의 형상 파라메타 ( $m$ )

이것을 와이블 플롯을 무보이드 시료의 경우 그림 3-4, 3-5, 3-6에 나타내었다. 형상 파라메타( $m$ )는 이 최적화 방정식의 기울기에 해당한다.

표 3-3 형상 파라메타 ( $m$ )

| 시 료    | 무보이드 시료 |        |        |
|--------|---------|--------|--------|
| 인가전압   | 8[kv]   | 10[kv] | 12[kv] |
| 형상파라메타 | 2.39    | 2.19   | 2.02   |

척도 파라메타와 형상 파라메타로부터 추정수명  $M$ 을 구하면 다음과 같다.[5]

$$M = t_s \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{m}} \quad \dots \quad (3-3)$$

여기서  $t_s$ 는 척도 파라메타이다.  $(\ln 2)^{\frac{1}{m}}$ 은  $m$ 가 1

보다 큰 영역에서 거의 0.8~1에 가까운 값이 된다. 따라서 추정수명  $M$ 의 계산 결과값은 표3-4와 같다.

표3-4 시료의 추정 수명

| 시 료   | 무보이드 시료 |        |        |
|-------|---------|--------|--------|
| 인가전압  | 8[kv]   | 10[kv] | 12[kv] |
| 수명[분] | 110.69  | 81.57  | 71.38  |

무보이드 시료는 인가전압이 증가함에 따라 추정수명이 110.69→81.57→71.38로 감소함을 알 수 있다.

이것은 보이드가 시료의 수명을 급격히 단축시키는 유해한 결함임을 와이블 통계 처리로 본 실험에서 확인하였다.

#### 4장. 결 론

저밀도 폴리에틸렌 절연체내에 인가전압(8[kv], 10[kv], 12[kv])에 대한 와이블 확률분포의 V-t특성을 구하고 얻은 결론은 다음과 같다. 무보이드 시료의 척도 파라메타( $t_s$ )는 전압이 증가함에 따라 128.7→96.4→85.4로 감소한다. LDPE 시료의 척도 파라메타가 급격히 감소함을 확인하였다. 형상파라메타( $m$ )는 인가전압이 증가할수록 2.39 →2.19→2.02로 감소하고 보이드 시료도 2.07 →1.95 →1.54로 감소하고 따라서 전압이 증가할수록  $m > 1$ 이므로 트리잉 파괴는 집중적인 절연파괴 현상으로 마모형 파괴이다. 무보이드 시료의 추정수명은 전압이 증가함에 따라 110.4[분], 81.57[분], 71.28[분]을 얻었다.

#### 참고문헌

- [1] Harrold, R. T ; "Acoustic Technology Application in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.20, No 1, February, pp.3-19, 1985
- [2] M.Onoe : J. Inst. ELectr. eng. Jpn. 96 ,pp.265 [in Japanese] ,1976
- [3] Harrold, R. T ; "Acoustic Technology Application in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.20, No 1, February, pp.3-19, 1985
- [4] M.Onoe : J. Inst. ELectr. eng. Jpn. 96 ,pp.265 [in Japanese] ,1976
- [5] 李致雨,李聖雨 著 : "應用 信賴性工學", pp.58-65,

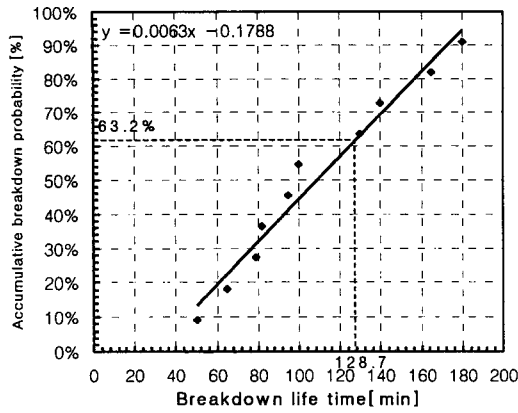


그림3-1 무보이드 시료(8[kV])의 척도  
파라메타(  $t_s=128.7$  )

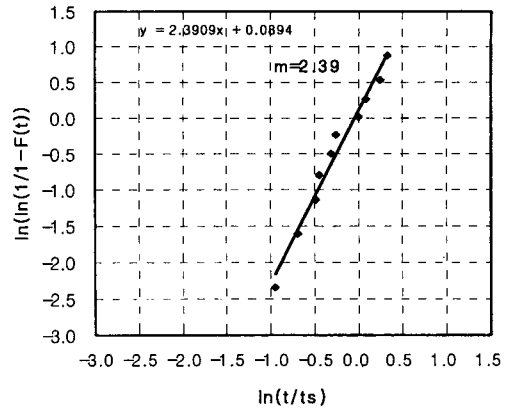


그림3-4 무보이드 시료(8[kV])의 형상  
파라메타(=  $m=2.39$  )

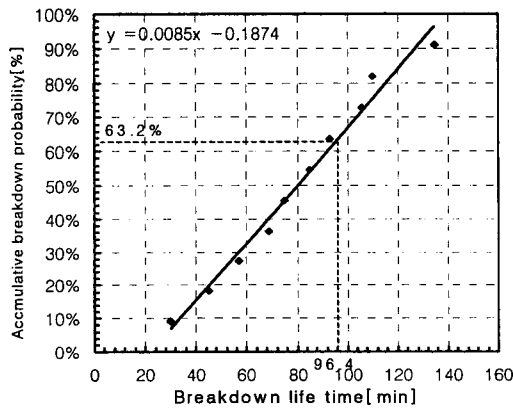


그림.3-2 무보이드 시료(10[kV])의 척도  
파라메타(  $t_s=96.4$  )

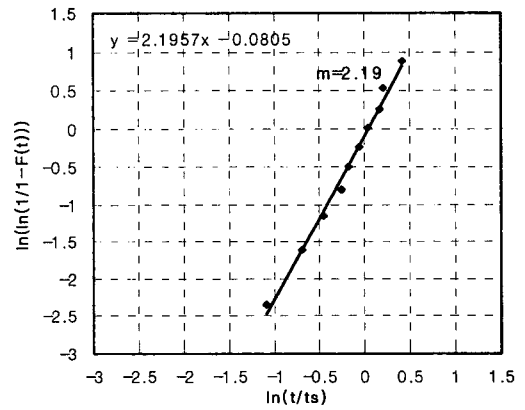


그림.3-5 무보이드 시료(10[kV])의 형상  
파라메타(  $m=2.19$  )

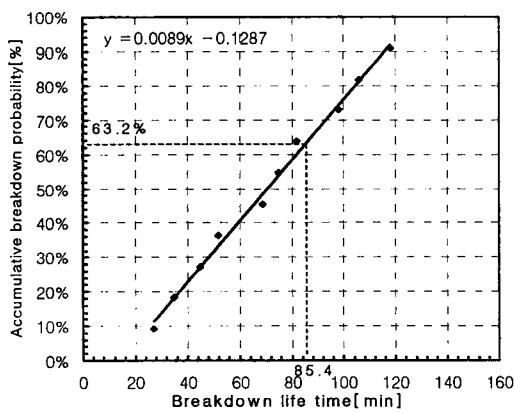


그림.3-3 무보이드 시료(12[kV])의 척도  
파라메타(  $t_s=87.91$  )

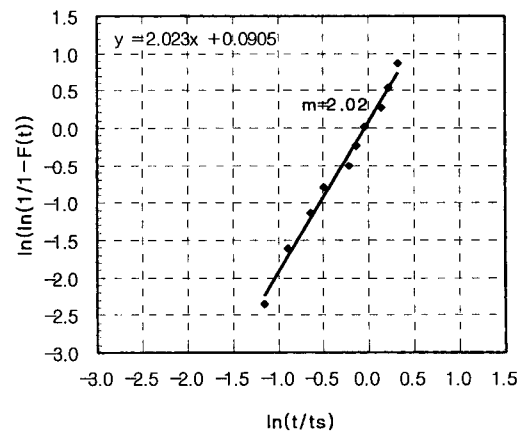


그림.3-6 무보이드 시료(12[kV])의 형상  
파라메타(  $m=2.02$  )