

## Weibull통계함수를 이용 HDPE필름 절연파괴강도 통계적해석에 관한 연구

### A Study on the Statistical Analysis of HDPE films' Breakdown Strength using Weibull Statistical Function

강 무 성      원광대학교 공과대학 전기공학부  
오 재 형      원광대학교 공과대학 전기공학부  
박 대 희      원광대학교 공과대학 전기공학부

Moo-Sung Kang    School of Electrical Engineering, Wonkwang University  
Jae-Hyung Oh     School of Electrical Engineering, Wonkwang University  
Dae-Hee Park     School of Electrical Engineering, Wonkwang University

#### Abstract

In this paper, the breakdown strength of pure HDPE(High density polyethylene) films and aged HDPE films were evaluated using 2-parameter Weibull distribution function. The result show that both were fitted 2-parameter Weibull distribution. This method could be used to be the diagnostic tool to evaluate the insulation performance and endurance under the multiple stresses.

#### 1. 서 론

고체절연재료의 절연파괴강도를 평가하는 여러 방법이 존재하겠지만, 그 중에서도 통계적 해석법은 상당히 많은 양의 data를 필요로 한다. 절연재료에 전기적 혹은 열적으로 스트레스가 가해지면 시간의 진행과 함께 열화하게 된다. 절연재료에 가해지는 스트레스가 높아지면 높아질수록, 급속하게 열화된다고 이미 여러 문헌을 통하여 알려져 있으며, 이러한 특성을 이용하여 높은 스트레스가 가해지 절연재료의 수명으로부터 상용스트레스하에서의 절연재료의 수명을 추정하는 방법이 절연설계에 이용된다 1).

이와같이 절연재료의 성능 및 수명을 추정하고 신뢰성을 높이기 위하여 절연파괴강도의 많은 data를 통계적으로 처리하고 있다.

절연파괴강도를 해석하기 위한 절연파괴강도를 해석하기 위한 방정식은 2-parameter Weibull[2PW]함수와 3-parameter Weibull[3PW]함수가 있다 2).

3PW함수는 Weibull확률지 상에서 data의 직선화가 2PW함수보다 더 나은 것으로 보고되어지고 있다.3) 이

와 같은 연구로서 Mario Cacciari는 전처리된 XLPE 케이블과 전처리를 하지 않은 XLPE 절연파괴강도를 2PW함수와 3PW함수를 이용하여, 해석하였다. 그 결과, 적절한 온도로 전처리된 시편은, 순수시편보다 양호한 fitting방정식을 얻었다. 그러한 이유로서 적절한 열화는 시편의 특성을 더 균일하게 만든다는 것이다 4).

Weibull확률지 상에서 나타나는 직선의 적합화도를 객관적으로 평가하기 위하여, IEC에서 규정하는 M값을 도출하였다. M의 값이 적을수록, fitting방정식은 얻어진 data와 밀접하게 관련한다는 것이다. 절연재료의 특성을 나타내는 모수를 추정하기 위해서, Maximum likelihood(ML)방법을 이용하였다 5).

본 연구는 Weibull통계함수를 이용하여 절연내력을 평가하기 위한 방법을 검토하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Weibull분포함수와 모수의 추정

실험을 통하여 얻어진 data를 다음과 같은 2PW분포함수로 나타낸다 3), 4).

$$F(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{a}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

여기서, F는 누적파괴확률이며,  $a, \beta$ 는 각각 척도, 형의 모수가 된다. 방정식 (1)은 직각좌표계에서 아래의 식 (2)와 같은 1차 방정식에 대응하게 된다.

$$X = \log E$$

$$Y = \log\left[\ln \frac{1}{1-P}\right] \quad (2)$$

정식을 찾는 것이다. 그리고, 누적확률치는 식.(5)와 같은 Median rank방법을 이용하였다.

$$F(E) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3)$$

여기서, n은 실험된 개수를 나타내며, i는 파괴된 순서를 나타낸다. Weibull함수의 모수  $a, \beta$  값을 객관적으로 추정하기 위하여 Least square(LS)방법과 Maximum likelihood[ML] 방법을 이용하였다 3), 4).

ML방법은 다음과 같다.  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 를 실험을 통하여 얻어진 data라고 하면, ML함수는 다음과 같이 정의하게 된다.

$$\ln L(\alpha, \beta; X_n) = \sum_{i=1}^n \ln f(X_i, \alpha, \beta)$$

$$= n \ln \beta - n \ln \alpha + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln \frac{X_i}{\alpha} - \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{\alpha}\right]^\beta \quad (4)$$

여기서, f는 확률밀도함수가 되며,  $X_i$ 는 각각의 절연파괴강도에 대응하게 된다. 구하고자 하는 방정식의  $a$ 와  $\beta$ 는 Newton-Raphson반복법을 이용하여 각각 구하였다 3).

Weibull확률지 상에서의 직선의 fitting적합도를 알아 보기 위한 하나의 방법으로 IEC Standards에서 추천하는 Goodness-of-fit의 방법으로 M값을 구하였다 5). 이 M값은 0에 가까울수록 매우 양호한 값이라 볼 수 있다.

M값은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} l_i}{\frac{\ln(2l) + 1}{\sum_{i=1}^n l_i}} \quad (5)$$

여기서  $\{n\}$ 은 n과 같거나 작은 최대정수를 나타낸다.

$$l_i = \frac{x_{(i+1)} - x_i}{\ln\left[\frac{\ln[4(n-i-1)+3]/(4n+1)}{\ln[4(n-i)+3]/(4n+1)}\right]} \quad (6)$$

여기서,  $x_i = \ln E_i$ 이 된다.

## 2.2 실험방법

실험에 이용된 시편은 HDPE 필름이며, 두께가 60  $\mu\text{m}$ 이다. 절연파괴시 필름의 크기는 3 $\times$ 3[cm]로 하였다. 시료는 순수한 HDPE 필름과 90 $^\circ\text{C}$ 에서 1000시간 열화시킨

2가지로 하였다. 절연파괴전극은 직경이 20mm인 구 대 구 전극을 이용하였으며, 인가전압은 60Hz, 1kV/sec로 가하였다. 필름상의 절연파괴강도는 파괴가 발생한 지점의 주위 8점을 측정하여 두께를 측정후에 계산하였다. 각 조건에서의 절연파괴를 위한 시료의 개수는 30개씩 2개 묶음으로 하였다.

## 2.3 실험 결과

그림.1과 그림.2는 순수HDPE 필름의 절연파괴강도를 2모수 Weibull확률지상에 나타낸 결과이다. 그림.1의 최적의 적합화 방정식은 식.(7)과 같다.

$$Y = 14.38X - 35.21 \quad (7)$$

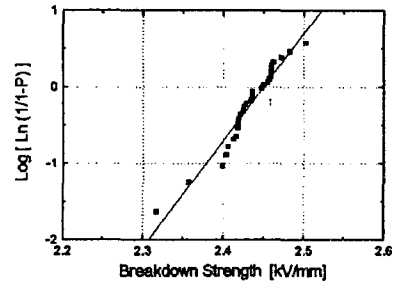


그림. 1 순수HDPE 절연파괴강도 분포

그림. 2의 적합화 방정식은 식.(8)과 같다.

$$Y = 14.46X - 35.28 \quad (8)$$

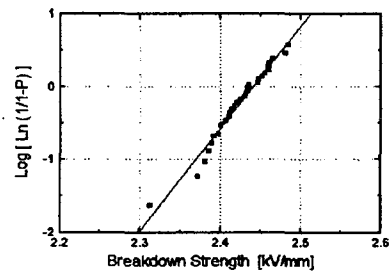


그림. 2 순수HDPE 절연파괴강도 분포

위의 그림 모두 파괴확률 27.1%이하에서는 적합화 직선과 어긋나는 경향을 보이고 있다. 적합화도를 나타내는 M값은 1.32과 1.07로서 유효한 적합화 방정식이 얻어졌다.

그림. 3과 그림. 4는 90 $^\circ\text{C}$ 에서 1000시간 가열한 후 Weibull확률지 상에 나타낸 그림이다. 그림. 3의 적합화 방정식은 식.(9)와 같다.

$$Y = 1.27X - 1.95 \quad (9)$$

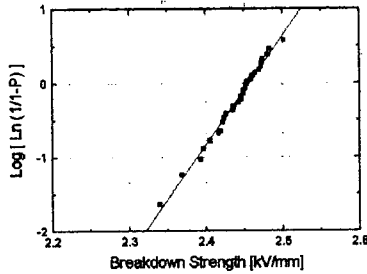


그림. 3 열화된 HDPE 절연파괴강도 분포

그림. 4의 적합화 방정식은 다음 식.(10)과 같다.

$$Y = 15.70X - 38.62 \quad (10)$$

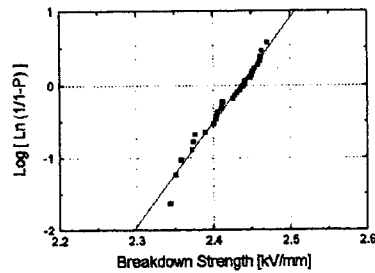


그림. 4 열화된 HDPE 절연파괴강도 분포

열화된 HDPE 절연파괴강도의 분포는 순수 HDPE의 것과는 약간 달리 실험결과값들이 적합화 방정식에 잘 맞고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 Cacciari가 제안했듯이, 적절한 전처리는 재료의 균일도를 높인다고 가정할 수 있다. 적합화 정도를 알아보기 위한 M값은 각각 0.92와 0.79로서 매우 양호한 결과값을 구할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 실험조건의 변화에 따른 모수값의 변화를 Weibull통계 함수를 이용하여 추정하였다. 실험결과로서, 첫째, 적절한 열화를 통해서 절연체의 균일성과 확일성이 더 나아지는 결과를 얻을 수 있었다. 둘째로, 동일한 조건 동일한 상태하에서도 모수값의 변화는 HDPE필름 불균일성으로 인한 내부 영향과 전계왜곡과 같은 외부영향의 복합적인 현상으로 생각되어진다. 마지막으로서는, 이

러한 통계적 평가법을 이용하여 절연재료의 내구성 평가 및 운전수명 예측에도 이용되어질수 있다고 생각되어진다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Hideo Hirose, et.al, "Residual Lifetime Estimation by the Mixture Weibull-Power-Law Model", T.IEE Japan, Vol.116.B, No.12, 1996.
- [2] C.Chauvet, C.Laurent, "Weibull Statistics in Short-term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films", IEEE Trans. EI, Vol.1, No.1, pp.18-29, 1993.
- [3] J.F.Lawless, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", John Wiley & Sons, pp.169-194, 1976.
- [4] Nancy R. Mann, "Method for Statistical Analysis of Reliability and Life Data", John Wiley & Sons, pp.160-282, 1974.
- [5] Mario Cacciari, et.al, "Weibull Statistics in Short-term Dielectric Breakdown of Thin Polyethylene Films", IEEE Trans. EI, Vol.1 No.1, pp.153-159, 1994.