

## 고체-고체 거시계면의 수명예측에 관한 연구

Study on the Prediction of the Life-time in the Macroscopic Solid-Solid Interfaces

박 정규\*, 배 덕권\*, 정 동희\*, 오 재한\*\*, 김 충혁\*, 이 준웅\*\*\*

Jung-Gyu Park\*, Duck-Kweon Bae\*, Dong-Hoe Jung\*, Jae-Han Oh\*\*, Kyung-Sob Lee\*\*, Chung-Hyuk Kim\*, Joon-Ung Lee\*\*\*

### Abstract

In this paper, the life-time of macro interface between Epoxy/EPDM which consists in underground power cable joints is predicted. The electrode system of specimen is designed by FEM(finite elements method).

The breakdown strength of specimens are observed by applying high AC voltage at the room temperature. The breakdown times under the constant voltage below the breakdown voltage were gained. As constant voltage is applied, the breakdown time is proportion to the breakdown strength.

The life exponent  $n$  is gained by inverse power law, and the long breakdown life time can be evaluated.

**Key Words(중요용어) :** Microscopic interface, Macroscopic interface Inverse power law, Finite elements method, Life exponent  $n$

### 1. 서 론

전력기기에 형성되는 계면은 크기로 구분하여 크게 미소계면(microscopic interfaces)과 거시계면(macroscopic interfaces)으로 나뉜다[1]. 초고압화·대용량화에 의한 여러 조건을 만족시키기 위한 복합절연방식이 사용됨에 따라 거시계면이 필연적으로 존재하게 되는데 미소계면의 연구와는 달리 거시계면의 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 지중전력케이블에 구성되는 고체-고체 거시계면 중 절연을 위한 Epoxy와 스트레스 완화를 위한 Rubber인 EPDM의 계면을 인위적으로 구성하여 그 수명을 예측하였다.

수명예측은 계면의  $V-t$  특성을 역자승법칙(power inverse law)을 이용하였다.

### 2. 시료제작 및 실험방법

#### 2.1 시료 제작

유한요소법을 이용하여 계면 모델링 시료의 전극 구조를 모의 설계하였으며 이를 바탕으로 시료를 제작하였다. 전극을 삽입한 Epoxy 시료를 제작하고 두 개의 Epoxy 시료 사이에 EPDM을 두었다.[2]

Epoxy 시료는 CIBA-GEIGY사의 Bisphenol-A형 기본에폭시인 Araldite F resin를 산무수물 계통의

\*: 광운대학교 전기공학과

(서울특별시 노원구 월계동 447-1 광운대학교,

Fax: 02-912-5144

E-mail : greentea@emlab2.kwangwoon.ac.kr)

\*\* : 동신대학교 전기전자공학부

\*\*\* : 한국전기전자재료학회장

경화제인 MeTHPA(Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)로 경화시켜 제작하였으며, DY040을 소량 첨가하여 충격강도와 인장강도를 개선하였다.

EPDM은 초고압케이블 부속재로 사용되는 제품을 사용하였다.

그림 1은 제작된 시료의 구조를 나타내고 있다.

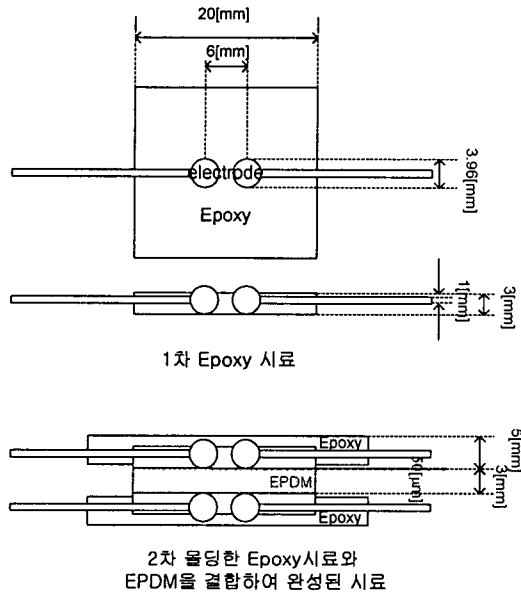


그림 1. 제작된 시료의 구조  
Fig. 1. Structure of specimen

### 2.1 실험 방법

계면의 단시간 파괴전압 측정은 상용주파수의 교류전압을 500[V/s]의 속도로 파괴시까지 상승시켜 측정하였으며, V-t 특성곡선을 위한 파괴시간측정은 상용주파수의 30, 28, 25[kV]의 교류 전압을 승압속도에 따라 상승시킨 후 파괴시까지 유지하였다. 이때 계면압은 3.1을 기준으로 5[kgf/cm<sup>2</sup>]을 인가하였고, 계면 접촉표면은 #1200의 sandpaper로 처리하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 단시간파괴전압 측정

그림 2는 계면압에 변화에 따른 단시간파괴전압의 변화를 나타내고 있다. 계면접촉부분은 #1200의 sandpaper로 처리하였으며, 접촉부분에 350[cSt], 12500[cSt]의 실리콘 오일을 도포하거나,

오일을 도포하지 않은 세가지 종류의 계면시료에 대하여 측정하였다.

절연파괴전압은 계면압이 증가함에 따라 증가하였으며, 오일을 도포하지 않은 시료보다 오일을 도포한 시료의 절연파괴전압이 높았다. 특히 특정 계면압 이상에서는 파괴전압이 포화되는 경향을 나타낼 수 있었다. 이로써 포화되는 압력 이후에서의 절연내력이 계면자체의 절연내력이라 사료된다.

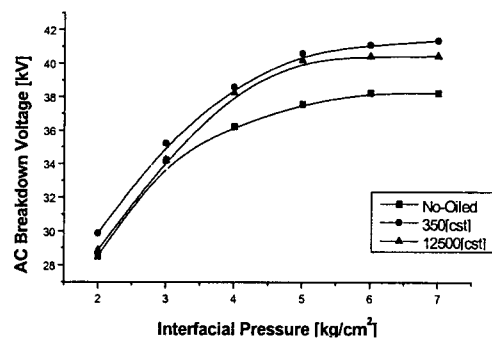


그림 2. 계면압 변화에 따른 계면의 단시간파괴전압의 변화

Fig. 2. Variation of short-time breakdown voltage due to interfacial pressure

### 3.2 오일을 도포하지 않은 시료의 V-t 특성

그림 3은 오일을 도포하지 않은 시료에 30, 25[kV]의 상용주파수의 교류전압을 인가하여 얻은 파괴전압으로 작성한 V-t 특성이다.

평균 파괴시간은 30, 25[kV]를 인가하였을 때 각각 1.12, 16.60시간이다.

### 3.3 350[cSt] 실리콘오일을 도포한 시료의 V-t 특성

350[cSt]의 실리콘오일을 도포한 시료에 30과 28[kV]의 두가지 전압을 인가하여 파괴시까지의 시간을 측정하여 그림 4를 작성하였다. 오일을 도포하지 않은 시료에 비하여 긴 파괴시간을 나타내었다. 실리콘 오일이 기체로 채워져 있는 계면의 보이드, 공동 등을 채워 계면의 부분방전전압을 상승시키는 작용을 한 것이 실리콘오일을 도

포한 시료의 파괴시간이 긴 여러 가지 원인 중 하나로 사료된다.

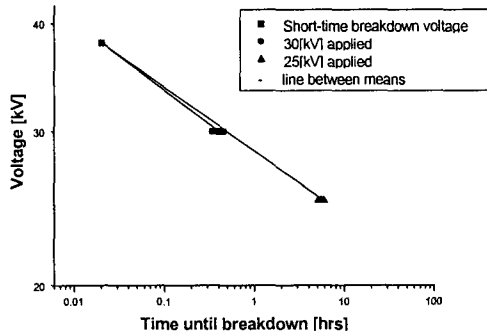


그림 3. 오일을 도포하지 않은 시료의 V-t 특성  
Fig. 3. V-t characteristic of no-oiled specimen

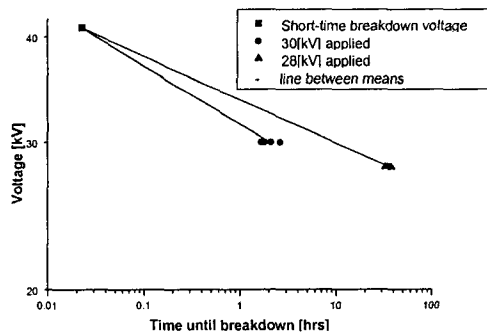


그림 4. 350[cSt] 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성  
Fig. 4. V-t characteristic of 350[cSt] silicone oiled specimen

### 3.4 12500[cSt] 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성

그림 5는 12500[cSt]의 실리콘오일을 도포한 시료의 V-t 결과이다. 3.4와 같은 전압을 인가하여 파괴 시까지의 시간을 측정하였다. 오일을 도포하지 않은 시료보다는 긴 파괴시간을 나타내었으나 350[cSt] 실리콘오일을 도포한 시료보다는 짧은 파괴시간을 나타내었다. 점도가 실리콘오일의 절연내력은 점도와 비례하나 계면 시료의 경우는 점도가 높은 오일을 도포한 경우 더 낮은 파괴전

압을 나타내었다. 그러나 이것은 상온의 경우이고, 온도가 증가할 경우 높은 점도의 실리콘오일을 도포한 계면의 절연파괴전압이 더 높다.[2] 이로써 상온에서는 점도가 높은 오일의 흐름특성이 나쁘기 때문에 계면에 기포가 생성될 가능성이 있음을 알 수 있다. 따라서 높은 온도에서의 측정은 상온에서의 결과와 다른 양상을 나타낼 수 있다. 실제 시스템의 경우 전류에 의한 열의 발생으로 상온보다 높은 온도가 유지되고 있으므로 차후의 연구에서 높은 온도에서의 수명예측이 필요하다고 사료되며 진행중이다.

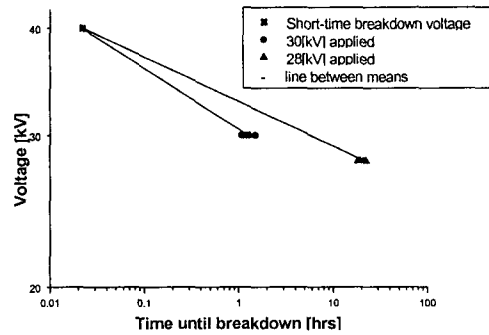


그림 5. 12500[cSt] 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성  
Fig. 5. V-t characteristic of 12500[cSt] silicone oiled specimen

3.5 역전력법칙을 이용한 수명지수 n값의 선정  
3.1~3.4에서 파악한 V-t 특성을 역승법칙(inverse power law)에 적용하여 수명지수 n값을 구하였다.[3],[4] 즉, 역승법칙의  $V^n t = \text{const.}$ 로

$$V_1^n \cdot t_1 = V_2^n \cdot t_2$$

그러므로,

$$n = \frac{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{\log\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} \quad (1)$$

을 얻을 수 있다.

표 1.은 각 조건에 따른 수명지수  $n$ 값을 나타내고 있다. 수명지수  $n$ 값이 클수록 열화속도가 느리므로 수명이 길다고 할 수 있다. 본 실험에서는 350[cSt]의 실리콘 오일을 도포한 시료의  $n$ 값이 가장 컸으며 이로써 이 계면의 수명이 가장 길다고 할 수 있다.

표 1. 계면의 수명지수  $n$

Table 1. life exponent  $n$  of interfaces

	minimum	mean	
No-oiled	11.78	12.42 30[kV] applied	13.30 25[kV] applied
350[cSt]	13.74	14.32 30[kV] applied	14.02 28[kV] applied
12500[cSt]	13.52	14.02 30[kV] applied	19.10 28[kV] applied

### 3.4 장시간 파괴전압 예측

표 2는 각 조건에서 가장 낮은 수명지수  $n$ 값에 대한 장시간 파괴전압을 나타내고 있다.

본 논문에서 측정한 세가지 조건 중 350[cSt]의 실리콘오일을 도포한 계면이 상온에서 가장 우수한 성능을 나타내었다. 유한요소법으로 환산한 이 경우의 전계는 3.75[kV/mm]이다.

표 2. 계면의 장시간 파괴전압

Table 2. Long time breakdown voltage

수명지수 $n$		1000시간	10000시간	30년 (262800시간)
No-oiled	11.78	15.2[kV]	12.5[kV]	9.5[kV]
350[cSt]	13.74	18.8[kV]	15.9[kV]	12.6[kV]
12500[cSt]	13.52	18.1[kV]	15.3[kV]	12.0[kV]

## 4. 결 론

Epoxy/EPDM 계면의 수명을 예측한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 역승법칙을 이용한 수명예측에서 인가전압이 낮은 경우의 수명지수가 더 높은 것으로 나타났다.
- 2) 상온에서는 350[cSt]의 실리콘오일을 도포한 계면의 절연내력이 가장 우수하며, 수명 또한 가장 긴 것으로 나타났다.
- 3) 350[cSt] 실리콘오일을 도포하고 계면압을 5[kg/cm<sup>2</sup>] 인가할 경우 설계전계 3.75[kV/mm]의 시스템에서 30년 이상의 수명을 보장한다.

## 참고 문헌

- [1]. H. C. Kärner, M. Ieda, "Technical Aspects of interfacial Phenomena in Solid Insulating Systems", Proceedings of the 3rd ICPADM, Tokyo, Japan, July 8-12, 1991
- [2]. Duck-Kweon Bae et al, "Dielectric Breakdown Phenomenon of the Interface between Epoxy/EPDM", Journal of the KIEEME. Vol. 12, No. 12, pp. 1164-1171, 1999. 12
- [3]. Katsumi Uchida et al., " Study on Detection for the Defects of XLPE Cable Lines" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996
- [4]. G. C. Stone, "The Statistic of Aging Models and Practical Reality" IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 5, October 1993