

## V-t 특성 분석에 의한 고체 거시계면의 수명 평가

### Prediction of Life-Time on the Macroscopic Interface between Solid Materials with Analysis of V-t Characteristics

오 재한\*, 배 덕권\*\*, 김 충혁\*\*, 이 경섭\*, 이 준웅\*\*\*.

Jae-Han Oh\*, Duck-Kweon Bae\*\*, Chung-Hyeok Kim\*\*, Kyong-Sob Lee\* and Joon-Ung Lee\*\*\*

#### Abstract

The characteristics on the interface between Epoxy and EPDM which are materials of the underground insulation systems of power delivery have been studied. 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. AC breakdown strength and life time is improved by oiling to the interface. When the low viscosity oil is spread, interface has the highest life time.

**Key Words(중요 용어):** Macroscopic interface, Life exponent  $n$ , Inverse power law, V-t characteristic, AC interfacial breakdown strength

#### 1. 서 론

과학의 눈부신 발전으로 인류는 보다 편리한 삶을 영위할 수 있게 되었다. 그런데, 이러한 과학의 편리성을 위해 보다 많은 전력량과 신뢰성이 요구되며, 이에 따라 송전의 초고압·대용량화가 추진되고 있고, 미관, 안전 등의 문제로 인한 전력전송 시스템의 지중화가 이루어지고 있다. 그러므로 안정된 전력기기를 생산하는 것은 산업의 발전을 위한 기본이라 할 수 있다. 전력기기는 시간의 경과에 따라 열화에

의해 기능이 떨어지는데 이러한 현상은 기기의 기능을 저하시켜 고장을 유발할 수 있으므로, 안정된 시스템을 구축하기 위해서는 구성 재료의 열적, 기계적, 화학적 및 경년(經年) 열화에 대한 방안 및 열화 진단에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다.

본 연구에서는 지중 전력전송 시스템에서 많은 고장 비율을 차지하고 있는 케이블 접속함 중 PJs(Prefabricated Joints)를 선택하고, 그 내부에 형성되는 여러 계면 중 Epoxy/EPDM 계면을 인위적으로 형성한 시료를 제작하여 V-t 특성을 조사하고 이에 의한 계면의 수명을 예측하였다. 유한요소법(finite elements method)을 이용한 시뮬레이션으로 시료를 제작하였으며 역승법칙(inverse power law)으로 수명지수  $n$ 을 구하여 장시간 파괴전압을 예측하였다.

#### 2. 본 론

\* 동신대학교 전기전자공학과  
(전라남도 나주시 대호동 252 동신대학교,  
Fax: 0638-430-5001  
E-mail : thbang@netian.com )  
\*\* 광주대학교 전기공학과  
\*\*\* 한국전기전자재료학회장  
2000년 4월 24일 접수, 2000년 6월 21일 심사완료

## 2.1. 시료제작

### 2.1.1. 모체 수지의 재료

본 실험에서는 Bisphenol-A형 Epoxy와 EPDM을 각 모체 수지로 사용하였다. Epoxy는 CIBA-GEIGY사의 Araldite F(Viscosity: 9,000~13,000[mPas] at 25[°C], Epoxy content: 5.2~5.35 [equiv/kg], Density: 1.15~1.20[g/cm<sup>3</sup>] at 25[°C], Flash point: >200[°C])와 산무수물 계통의 경화제인 MeTHPA (Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였으며, 충격 강도와 인장 강도를 개선시키기 위하여 가소성 부여제(DY040)를 소량 첨가하였다. EPDM은 초고압 케이블 부속재 재료로 사용되는 제품을 사용하였다.

### 2.1.2. 시료의 제작

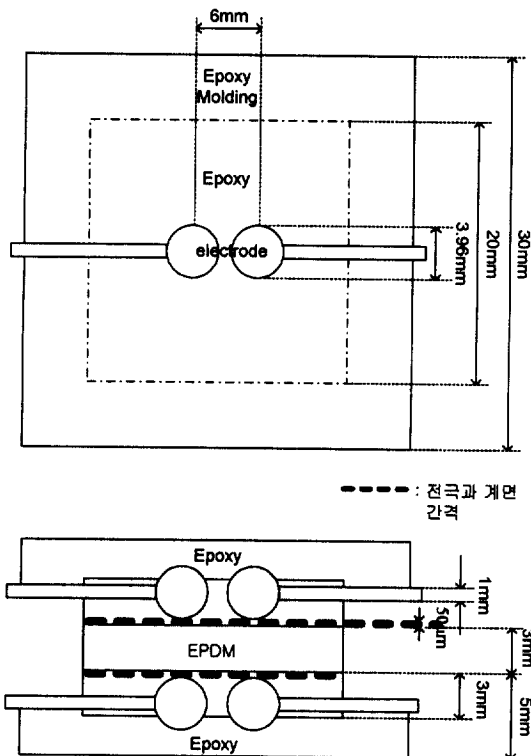


그림 1. 제작된 시료의 구조  
Fig. 1. Structure of specimen

유한요소법으로 시료를 모의 설계하여 각 부분의 전계, 등전위선 분포 등을 계산한 후 실제 시료를 제작하였다[1]. 시료는 두 개의 Epoxy 사이에

EPDM을 샌드위치시켰으며, 제작한 시료의 형상은 그림 1과 같다.

## 2.2. 실험방법

계면의 단시간파괴전압의 측정은 ASTM D 149-95a를 따랐으며 고전압 인가 장비는 PULSE ELECTRONIC ENGINEERING Co., LTD.의 IVG-600A를 사용하였다. 상용주파수의 교류 전압을 인가하였으며, 승압속도는 500[V/s], 전류 설정은 10[mA]로 하였다. 단시간파괴실험은 시료가 파괴될 때까지 전압을 상승시켰으며, 파괴시간 측정은 30, 28, 25[kV]의 전압을 승압속도에 따라 상승시킨 후 파괴 시까지 유지하였다. 그림 2는 본 실험에 사용된 장치를 나타내고 있다.

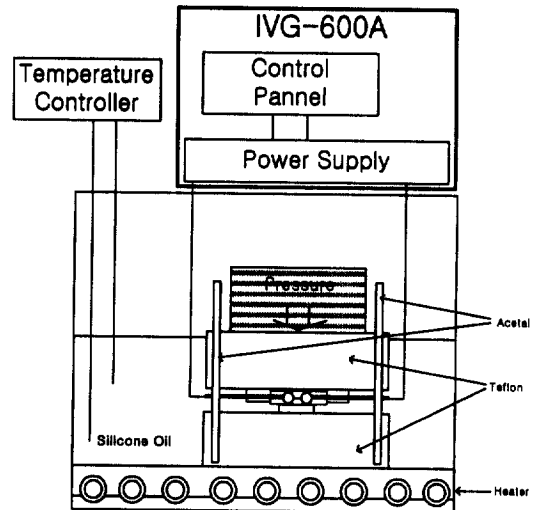


그림 2. 계면 절연내력 시험장치

Fig. 2 Structure of the Interfacial dielectric strength tester

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 계면의 단시간 파괴전압 측정

그림 3은 계면압에 다른 Epoxy/EPDM의 단시간 파괴전압을 나타내고 있다. 이중 절연물을 접합함에 따른 보이드, 공동 등의 결함을 줄이기 위하여 계면압을 인가하였는데, 계면압 증가에 따라 절연 파괴

전압이 상승되었으며 일정 압력 이상에서는 포화되는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 5[kgf/cm<sup>2</sup>] 이후에서 포화되었으므로, 5[kgf/cm<sup>2</sup>]가 절연내력 상승을 위한 충분한 계면압으로 사료된다. 계면에 존재하는 결함을 줄이기 위한 또다른 방법으로 실리콘 오일, 그리스 등을 접촉 부분에 도포하는데, 본 실험에서는 두가지 점도(350, 12500[cSt])의 실리콘 오일을 도포하였다. 실리콘 오일은 보이드, 공동 등을 채우는 작용을 하며, 부분방전 개시전압 등을 높여주므로[5] 오일 도포에 의해 파괴전압이 상승된다고 할 수 있다. 또한 점도가 낮은 오일을 도포한 시료의 파괴전압이 높는데 이는 낮은 점도의 오일이 보다 좋은 흐름특성을 가지고 있기 때문이라 사료된다.

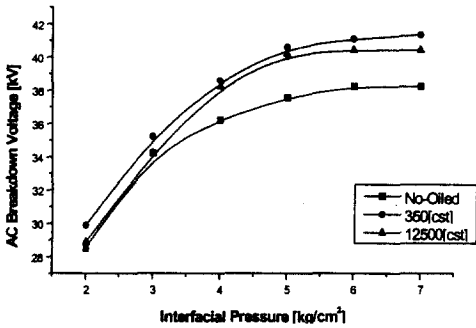


그림 3. 계면압 변화에 따른 교류 계면 파괴 강도의 변화

Fig. 3. Variation of AC interfacial breakdown voltage due to interfacial pressure

### 3.2. V-t 측정 및 수명지수 n값의 선정

아래의 그림 4에서 V<sup>n</sup>t가 일정하다는 역전력법칙 (inverse power law)[3],[4]을 이용하면,

$$V^n T = const.$$

$$\therefore V^n T = v^n t$$

이로부터,

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

를 얻을 수 있다.

각 조건 별로 파괴값 미만의 두 전압을 인가하였으며, 이 조건에서 얻은 5개의 데이터의 평균으로 수명지수 n값을 구하였다. 계면압은 3.1을 근거로 5[kgf/cm<sup>2</sup>]을 인가하였다.

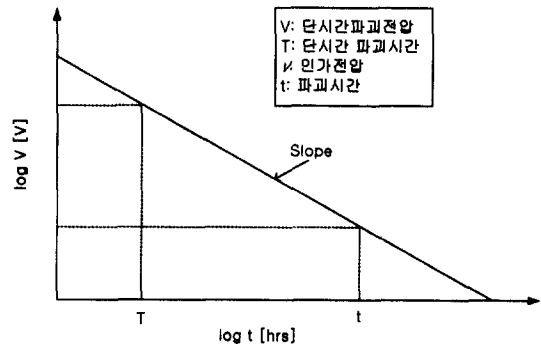


그림 4. V-t 특성도

Fig. 4. Plots of V-t Properties

### 3.2.1. 오일을 도포하지 않은 시료의 V-t 특성

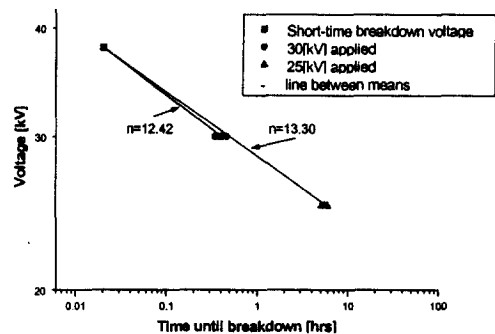


그림 5. 오일을 도포하지 않은 시료의 V-t 특성

Fig. 5. V-t characteristic of no-oiled specimens

오일을 도포하지 않은 시편으로 상온에서 측정된 계면의 파괴시간을 그림 5에 나타내었다. 단시간 파괴전압은 38[kV]이고, 30[kV], 25[kV]의 교류 전압을 인가한 후 파괴될 때 까지의 시간을 측정하였다.

오일을 도포하지 않은 시편의 각 인가 전압에 따른 수명 지수  $n$  값은 30[kV] 인가 시 12.42, 25[kV] 인가 시 13.30으로 낮은 전압을 인가하였을 경우 더 높은 수명 지수  $n$  값을 가지는 것으로 나타났다. 이로써, 인가전압이 낮을수록 파괴되는 시간은 증가할 수 있다는 가능성을 예측할 수 있다.

3.2.2. 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성

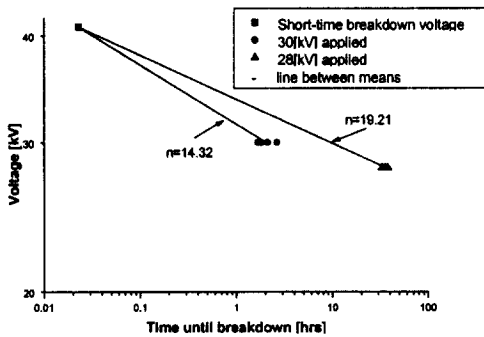


그림 6. 350[cSt] 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성

Fig. 6. V-t characteristic of 350[cSt] silicone oiled specimen

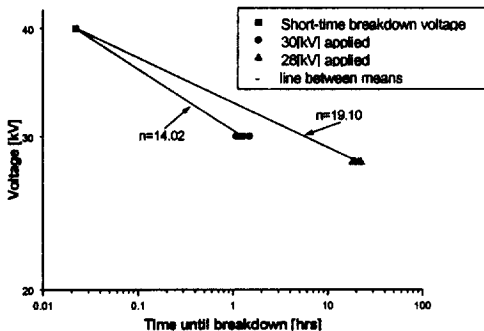


그림 7. 12500[cSt] 실리콘 오일을 도포한 시료의 V-t 특성

Fig. 7. V-t characteristic of 12500[cSt] silicone oiled specimen

점도 350[cSt]와 12500[cSt]의 실리콘 오일을 도포한 시편을 상온에서 상용주파수의 교류 전압 30[kV], 28[kV]을 인가한 후 파괴 시까지의 시간을 측정된 값들과 수명지수를 그림 6과 7에 나타내었다.

점도가 낮은 실리콘 오일을 도포한 계면이 가장 높은 단시간 파괴전압 및 긴 파괴시간을 나타내었다. 즉, 상온의 계면은 점도가 낮은 오일을 도포하는 것이 보다 높은 신뢰도를 가질 수 있다고 할 수 있다. 그러나, 실제 절연 시스템의 온도는 상온보다 높은 온도이고[2] 단시간 파괴전압의 경우 온도가 높아지면 높은 점도의 실리콘 오일을 도포한 시료의 절연파괴 특성이 우수하므로[1] 이에 대한 연구가 추가되어야 할 것이다. 각각의 인가 전압에 의한 수명지수  $n$ 은 그림 6과 7에 나타난 바와 같으며 상온에서의 수명지수는 350[cSt]의 실리콘 오일을 도포한 시료에 28[kV]의 전압을 인가한 경우 가장 높은 것으로 나타났다.

3.5. Epoxy/EPDM 계면의 수명 예측

표 1은 가장 낮은 수명지수와 각 경우의 평균에 의한 수명지수를 기준으로 일정시간 경과 후의 파괴 전압을 나타내었다. V-t 특성에 의한 수명 지수 산정에 있어서 각 경우의 평균으로 구하는 방법 외에 각 경우에서 가장 낮은 수치를 가지는 값을 기준으로 삼으면 가장 안정적인 시스템을 구축할 수 있다. 오일을 도포하지 않은 경우, 가장 낮은 수명지수에 의한 30년 이후의 파괴 전압은 9.5[kV]이며 이 값을 전계로 환산하면 2.83[kV/mm]가 된다. 또 수명지수 13.74, 13.52인 경우 30년 이후의 파괴전계는 각각 3.75, 3.58[kV/mm]이다. 이 값들은 PJs의 Epoxy/EPDM 전계값(1.9[kV/mm] at 420[kV] Class) 보다 높은 값을 가진다.[6]

세 가지 경우의 결과를 종합해 볼 때 상온에서 가장 높은 수명지수를 가지는 것은 저점도 실리콘 오일을 도포한 시료이다. 그러므로, Epoxy/EPDM 계면의 경우 계면에 낮은 점도의 실리콘 오일을 도포하고, 5[kgf/cm<sup>2</sup>]의 계면압을 유지할 경우 가장 긴 수명을 보장할 수 있다. 본 연구는 상온에서의 측정이므로 사용온도가 상온보다 높은 절연 시스템의 경우 추가적인 연구가 진행되어야 된다고 사료된다.

표 1. 계면의 시간 경과에 따른 파괴 전압  
Table 1. Breakdown voltage with time of the interface

수명지수 n		1000 시간	10000 시간	30년 (262800 시간)
No - oiled	11.78 (min)	15.2[kV]	12.5[kV]	9.5[kV]
	12.42 (mean at 30[kV])	16.0[kV]	13.3[kV]	10.2[kV]
	13.30 (mean at 25[kV])	16.9[kV]	14.2[kV]	11.1[kV]
350 [cSt]	13.74 (min)	18.8[kV]	15.9[kV]	12.6[kV]
	14.32 (mean at 30[kV])	19.4[kV]	16.6[kV]	13.2[kV]
	19.21 (mean at 28[kV])	23.5[kV]	20.9[kV]	17.6[kV]
12500 [cSt]	13.52 (min)	18.1[kV]	15.3[kV]	12.0[kV]
	14.02 (mean at 30[kV])	18.6[kV]	15.8[kV]	12.5[kV]
	19.10 (mean at 28[kV])	22.8[kV]	20.2[kV]	17.0[kV]

4. 결 론

전력기기에 형성되는 여러 고체 거시계면 중 Epoxy/EPDM 계면의 V-t 특성 분석에 의한 수명을 예측한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 계면의 절연내력을 향상시키기 위해서는 적절한 계면압을 인가하여야하며, 접촉표면에 실리콘 오일 등을 도포하여야 한다.
- 2) 파괴 전압 이하의 전압을 인가하여 수명 지수를 구해본 결과 낮은 전압을 인가하였을 경우의 수명 지수가 높은 전압을 인가하였을 경우보다 높은 것을 알 수 있었다.
- 3) 상온에서 Epoxy/EPDM의 수명특성을 평가한 본

연구에서 낮은 점도의 실리콘 오일(350[cSt])을 도포한 계면의 수명특성이 가장 우수하게 나타났으며 420[kV]급 전력용 케이블 접속재의 경우 30년 이상의 수명을 가짐을 확인할 수 있었다.

4) 본 실험은 상온에서 행하여 졌으나 실제 시스템의 온도는 상온보다 높은 온도이므로 상온과는 다른 양상을 보일 수 있으며, 고온에서의 실험이 진행중이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] H. Nakanishi et al., "Stability of interfaces for prefabricated joint" 1993 IEEE National Convention No. 1601
- [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
- [5] 日本 電氣學會 技術 報告 固體 絶縁材料의 界面 效果 調査 専門 委員會 編, "固體 絶縁材料의 界面 效果," p. 6, 106~122, 1994. 4.
- [6] P. Andersen et al., "Development of a 420kV XLPE Cable System for the Metropolitan Power Projection in Copenhagen", CIGRE, 21-201, 1996