

Epoxy/EPDM계면의 최적처리 조건과 수명 예측

오 재한\*, 배 덕권\*\*, 최 운식\*\*\*, 이 경섭\*

\*: 동신대학교 전기전자공학부

\*\* : 광운대학교 전기공학과

\*\*\*: 대륜대학교 정보공학부

The Optimum Treatment Conditions and the Estimation of Life in the Interface between Epoxy/EPDM

Jae-Han Oh, Duck-Kweon Bae, Woon-Shik Choi, Kyong-Sob Lee

\*: Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ., Chonnam

\*\* : Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon Univ., Seoul

\*\*\*: Dept. of information Eng., Daebul Univ., Chonnam

**Abstract** - Because the interfaces between two different materials are the weak-link in the underground power transmission systems, they affects the stability of insulation systems.

In this paper, Epoxy/EPDM interface is selected and investigated the optimum condition by variation of interfacial conditions such as roughness of surface, spreading of oils, interfacial pressure and temperature. The breakdown times under the constant voltage below the breakdown voltage were also gained. The breakdown voltage at the after laying time equivalent to is calculated by the V-t characteristic and the inverse power law. When this is done, the characteristic life exponent n is used and the long time breakdown voltage can be evaluated.

1. 서 론

지중 전력전송 시스템의 초고압화 대응량화는 산업사회의 발전을 위한 기본요소이며 이에 따라서 고신뢰성의 절연시스템의 요구가 확산되고 있다. 초고압 전력기기의 신뢰성을 위하여 절연시스템은 각각의 요구조건을 만족시키기 위하여 복합절연방식을 선택하고 있는데 이 방식에는 기기 내부에 계면이 필연적으로 형성된다. 계면의 형태를 나누는 방식으로 여러 기준이 사용되고 있으나, 그 크기에 따라 미시계면(micro interfaces)과 거시계면(macro interfaces)으로 나눌 수 있다. 이 계면 중 복합절연시스템의 신뢰도 향상을 위해서는 이종 절연물의 결합으로 생기는 거시계면의 전기적 특성을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 여러 거시 계면 중 Epoxy/EPDM 계면을 선택하여 절연강도 향상을 위한 계면의 최적 조건과 이에 따른 장시간 파괴 특성을 이용하여 수명을 예측하였다.

2. 본 론

2.1. 시료의 설계 및 제작

계면의 전기적 특성을 조사하기 위한 시료는 1) 계면에 전극이 접촉하여서는 안되며, 2) 계면압을 인가할 수 있는 구조이어야 하며, 3) 계면 거칠기에 따른 효과를 확인할 수 있어야 하며, 4) 계면 접촉 표면에 오일과 같은 액체를 도포하고 이에 의한 효과를 확인할 수 있어야 한다. 따라서, 유한요소법 기반 시뮬레이션 프로그램인 FLUX2D를 사용하여 위 조건을 만족시키는 시료를 설계하였다. 시료 제작에 사용된 Epoxy는 Ciba Specialty Chemicals의 Bisphenol-A형 Epoxy인 Araldite F를 사용하였으며 경화제는 산무수물 계통의 eTHPA (Methyl Tetra Hydro

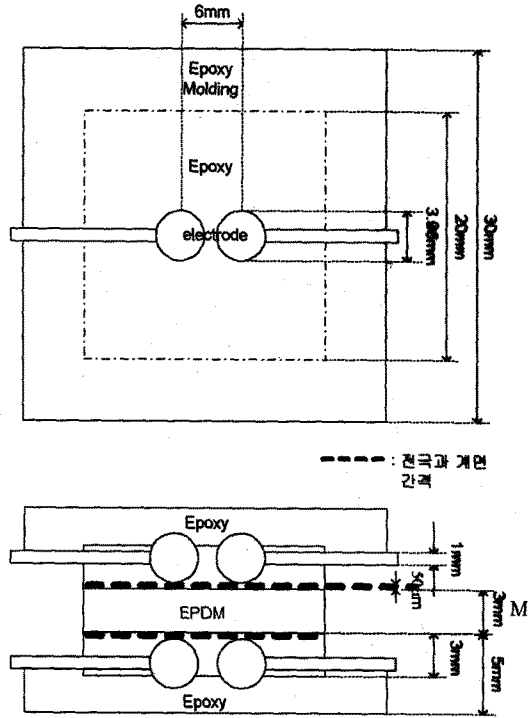


그림 1. 제작된 시료의 구조

Fig. 1. Structure of manufactured specimen

Phthalic Anhydride)를 사용하였다. EPDM은 EHV 케이블 부속재의 재료로 사용되는 제품을 사용하였다. Epoxy의 유리 전이 온도는 90~100(°C)인 반면, EPDM은 -60(°C)이다. 즉 에폭시는 탄성이 거의 없지만 EPDM은 고무의 일종으로 탄성이 있는 물질이다. 그러므로 Epoxy의 표면 상태가 계면의 전기적 특성에 보다 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

전극과 계면 간격의 재현성과 전극의 삽입을 위하여 전극을 넣은 Epoxy를 1차 경화한 후 사포로 전극과 EPDM에 접합 부분의 두께를 50(µm)로 처리하고, Epoxy로 한번 더 몰딩하는 이중 몰딩 방법을 채택하였다. 제작된 시료의 구조는 그림 1과 같다.

2.2. 교류 계면 절연 파괴 강도 측정

계면절연파괴강도 측정은 PULSE ELECTRONIC

ENGINEERING Co., LTD.의 IVG-600A로 전압을 인가하였으며, 인가 전압은 AC를 사용하였다.

Teflon, Acetal 등의 절연 재료로 계면압을 가할 수 있는 계면절연과피 시험장치를 구성하였으며, Air Cylinder, Regulator, Air Compressor 등으로 Air Compress System을 제작하여 계면압을 인가하였다.

## 2.3. 실험 결과 및 고찰

### 2.3.1. 계면의 절연과피 강도 변화

계면의 절연과피는 여러 작용에 의한 복합적 양상을 보이고 있으나, 계면에서 발생하는 부분 방전 현상의 누적에 의한 트래킹 성장[3]이 계면 절연 과피를 일으키는 중요한 원인 중 하나이다.[4]

계면에 존재하는 보이드나 공극 속의 물질은 고체 유전체보다 낮은 절연 강도를 가지고 있으며, 유전율도 고체보다 낮으므로 이곳에서의 전계 집중에 의해 보이드나 공극의 절연 과피가 일어나면서 트래킹 열화가 진행되어 결국은 계면의 절연 과피를 일으키게 된다[4]-[5].

그림 2는 계면압, 오일도포, 거칠기 변화에 따른 계면의 절연과피 강도의 변화를 나타내주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 계면압의 증가, 오일도포, 거칠기 감소에 의해 절연 내력이 향상되었다. Epoxy/EPDM 계면에 존재할 수 있는 결합으로는 수분, 도전성 불순물, 보이드, 공극, 돌기 등이 있는데, 압력에 의해 보이드, 공극 등의 체적 감소와 이들 내부의 압력을 높여 방전 개시 전압을 높임에 따라 계면의 트래킹 성장을 억제하고, 계면압의 분포를 균일하게 해 주므로 계면압 증가에 따라 계면 절연과피강도가 증가하였다고 생각되며, 일정 수준의 압력(본 연구에서는 5[kgf/cm<sup>2</sup>]) 이후에서 포화되는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 그러므로 5[kgf/cm<sup>2</sup>] 정도의 계면압이 계면의 보이드, 공극, 돌기 등에 의한 부분 방전 진행을 억제하기에 충분한 압력이라 생각된다.

계면의 접합부분에 실리콘 오일을 도포하면 결합 접촉 면적이 증대되는 효과 외에 기계적 결합을 증대시키고, 실리콘 오일의 방전개시 전압이 기체보다 높기 때문에 계면의 방전 개시 전압을 상승시키므로, 오일의 도포에 의해 교류 계면절연과피강도가 증가한 것으로 생각된다.

계면압이 낮을 때에는 고점도 오일을 도포한 시료의 계면절연과피강도가 오일을 도포하지 않은 시료보다 약간 낮게 측정되었음을 알 수 있는데, 이는 고점도 오일의 흐름 특성이 나쁘기 때문에 오일 도포 시 계면에 보이드가 생성될 가능성이 있음을 말해 준다.

Sanding은 제품 제작 시 생성된 돌기, 불순물 등을 제거할 수 있으므로 절연내력 향상을 위한 작업이라 할 수 있다. 그러나, sanding 작업으로 계면의 거칠기가 생기게 되는데 그림 2에 나타난 것처럼 거칠기를 작게 하는 것이 절연내력 증가에 도움이 된 것으로 사료된다.

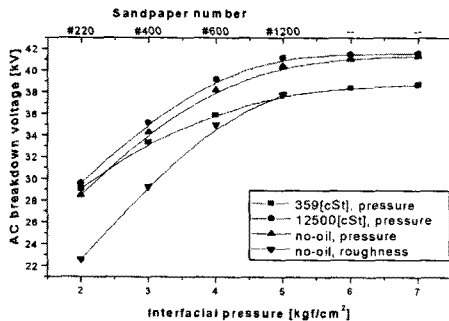


그림 2. 계면압, 오일도포, 거칠기 변화에 따른 계면의 절연과피 강도의 변화

Fig. 2. Variation of the breakdown strength due to interfacial pressure, oils and roughness

그림 3은 계면압: 5[kgf/cm<sup>2</sup>], 계면조도: #1200으로 처리한 시료의 온도변화에 따른 계면의 절연과피 강도의 변화를 나타내주고 있다.

실리콘 오일을 도포하지 않은 시료는 상온 계면절연과피 강도를 기준으로 70[°C]에서 약 1.2 [kV/mm], 90[°C]에서 약 1.9[kV/mm]의 감소를 나타낸 반면, 저점도 실리콘 오일을 도포한 시료와 고점도 실리콘 오일을 도포한 시료의 경우 90[°C]에서 각각 1.23(kV/mm), 0.9(kV/mm)의 감소를 나타내었으므로 온도 변화에 따른 교류계면절연과피 강도의 변화가 작은 것으로 나타났다.

계면에 존재하는 결합 속의 물질이 기체인 경우 액체인 경우보다 방전 개시 전압이 낮고, 온도에 의한 방전 개시 전압의 하강 폭도 크므로 오일을 도포하지 않은 시료의 온도 증가에 의한 교류계면절연과피강도의 감소 비율이 더 큰 것으로 생각한다. 실리콘 오일의 절연 내력이 온도에 따라서 크게 변하지 않는 것도 오일을 도포한 시료의 교류계면절연과피강도의 온도 의존도가 낮은 원인 중 하나라고 추정할 수 있다.

상온에서는 고점도 실리콘 오일을 도포한 시료의 교류계면절연과피강도가 저점도 실리콘 오일을 도포한 시료보다 낮았으나 70[°C] 이상에서는 고점도 실리콘 오일을 도포한 시료의 교류계면절연과피강도가 높게 측정되었다. 온도 증가에 의한 오일 점도의 감소로 고점도 오일의 흐름 특성이 향상되었기 때문에 70[°C] 이상에서 고점도 실리콘 오일을 도포한 시료의 교류계면절연과피강도가 저점도 실리콘 오일을 도포한 시료의 것보다 높아졌을 것으로 추정된다.

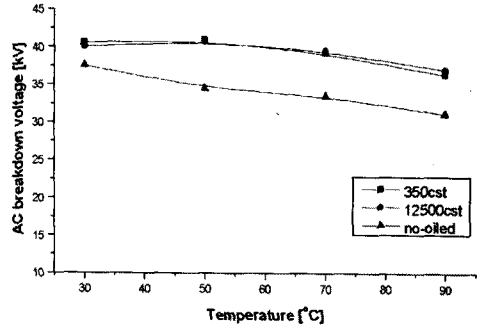


그림 3. 온도변화에 따른 계면의 절연과피 강도의 변화  
Fig. 3. Variation of the breakdown strength due to temperature

### 2.3.2. 계면의 수명예측

그림 4는 계면의 V-t 특성을 나타내었다. 이 값을 기준으로 V<sup>n</sup>t가 일정하다는 역승법칙(inverse power law)[6]을 이용하면,

$$V^n t = const.$$

로부터,

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

을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 상온에서 파괴전압이 가장 우수한 조건 즉, 표면처리: sandpaper #1200, 실리콘 오일: 350[cSt], 계면압: 5[kgf/cm<sup>2</sup>]으로 제작한 시료의 인가전압에 따른 파괴 시간을 측정하여 그 수명을 예측하였다.

절연과피값 미만의 30[kV]와 28[kV] 두 전압을 인가하였으며, 이 조건에서 얻은 5개의 데이터의 평균을 식 1에 대입하여 수명지수 n값을 구하였다.

수명지수는 30[kV]와 28[kV]를 인가하였을 경우 각각 14.32와 19.21로 계산되었으며, 장시간 파괴전압은 표 1과 같다. 이 값은 상온에서 측정된 결과이며, 실제 시스템의 사용온도는 상온보다 높은 온도이므로 상온보다 높은 온

도에서의 수명지수에 대한 추가적인 실험이 요망된다. 순간 파괴값의 경우에도 약 70(°C) 이상에서는 12500(cSt)의 실리콘오일을 도포한 시료의 파괴값이 350(cSt)의 실리콘 오일을 도포한 시료보다 높게 측정되었다.

Epoxy/EPDM 계면이 형성되는 PJs(Prefabricated Joints)의 경우 조사된 계면의 전계는 420(kV)급에서 1.9(kV/mm)이다. 본 실험에 의한 장시간 파괴전압을 전계로 환산하여 볼 때, FLUX2D에 의한 가장 짧은 파괴시간에 의한 30년 이후의 파괴전계는 3.75(kV/mm) 이상으로 본 연구에서 수행한 Epoxy/EPDM 계면은 30년 이상의 수명을 보장한다할 수 있다.

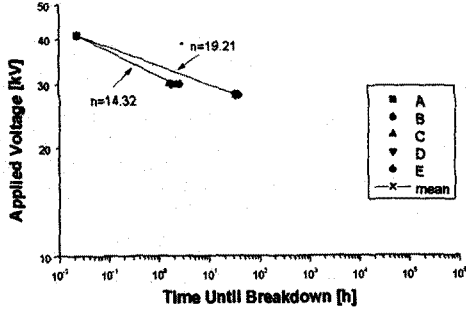


그림 4. 계면의 V-t 특성  
Fig. 4. V-t characteristics of the interface

표 1. 계면의 시간경과에 따른 파괴전압  
Table 1. Breakdown voltage with time of the interfaces

수명지수 n	1000시간	10000시간	30년(262800시간)
13.74 (minimum)	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]

### 3. 결 론

Epoxy/EPDM 계면의 최적 조건 및 장기 수명 연구한 결과 본 계면 절연내력은 접촉표면의 거칠기와 계면압, 접촉표면에 도포된 오일 등에 영향을 받는 것으로 나타났으며 #1200의 sandpaper로 표면을 처리하고, 실리콘 오일을 표면에 도포하여 5(kgf/cm<sup>2</sup>)의 계면압을 유지시킬 때 가장 우수한 성능을 나타내는 것으로 나타났다. 온도에 의한 영향은 고온에서 높은 점도의 실리콘 오일을 도포한 경우 조금 우수한 절연내력을 나타내는 것으로 나타났으나, 점도가 높은 오일은 흐름특성이 나빠므로 이에 따른 계면 내부 보이드의 생성 가능성이 있으므로 본 연구에서는 350(cSt)의 실리콘 오일을 도포하는 것이 보다 안정적인 계면을 형성할 것으로 사료된다.

또한 위 조건에 대한 수명예측 실험을 행한 결과 Epoxy/EPDM 계면은 420(kV)급 전력 케이블 접속재에서 30년 이상의 수명을 보장하는 것을 확인할 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] M. Nagao et al., "Model Specimens for Testing Interfacial Electrical Insulating Properties in EHV Extruded Cable Splices and Preliminary Results -Specimen with sphere electrode (EPR- XLPE Interface)-", WG. 15-10, CIGRE 1999 Session
- [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] Chinh Dang "Effect of Surface Condition on the Breakdown strength of Various Dielectric Interface" 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1995
- [4] J. D. Smith and L. L. Hatfield, "Measurements of the effects of surface roughness on flashover," 1988 Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ottawa, Ontario, Canada, Oct. 16-20, 1988, pp. 47-52.
- [5] 日本電氣學會 技術報告 固體絶縁材料の界面效果 調査専門委員会編, "固體絶縁材料の界面效果," p. 6, 10 6~122, 1994. 4.
- [6] 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
- [7] P. Andersen et al., "Development of a 420kV XLPE Cable System for the Metropolitan Power Projection in Copenhagen", CIGRE, 21-201, 1996