

도포된 오일의 변화에 따른 Epoxy/EPDM 계면의 교류 절연 파괴 특성에 관한 연구

배 덕권, 이 수길, 정 일형, 이 준웅
 광운대학교 전기공학과

A Study on the AC Interfacial Breakdown Properties of the Interface between Epoxy/EPDM with the variation of spreaded oil

Bae, Duck-Kweon Lee, Su-Kil Jung Il-Hyung
 Dept., of Electrical Engr., Kwangwoon Univ., Seoul

Abstract - In this paper, the interfacial dielectric breakdown phenomenon of interface between Epoxy/EPDM(ethylene propylene diene terpolymer) was discussed, which affects stability of insulation system of power delivery devices.

Specimen structure was designed by using MAGSOFT's FLUX2D based on the finite elements method. Design concepts is to reduce the effect of charge transport from electrode in the process of breakdown and to have the tangential electrical potential with the Epoxy/EPDM interface.

AC interfacial breakdown phenomenon of was investigated by variation of interfacial conditions oil and temperature which are supposed to have influence on the interfacial breakdown strength. Interfacial breakdown strength was improved by spreading oil over interfacial surface. The decreasing ratio of the AC interfacial breakdown strength in non-oiled specimens was increased by the temperature rising, and its of oiled specimens was not affected by temperature.

1. 서 론

일반적으로 지중 전력 케이블은 그 길이의 유한성으로 인한 케이블 간 직선 접속과 가공 선로와의 접속이 불가피하고, 케이블 부속재에는 여러 절연 부품들이 사용됨에 따라 형성되는 이종 재료간의 계면 성능이 전체 절연 시스템의 안정성에 중대한 영향을 미친다. 일본의 77kV 급 XLPE 케이블 선로의 경우를 살펴보면 전체 고장의 72% 정도가 케이블 부속재에서 일어났다[2].

케이블 부속재 등에서 생성되는 이종 절연물간의 계면의 전기적 전기적 특성은 전체 절연 시스템의 신뢰도에 큰 영향을 미친다. 재료의 연면에 수평 방향으로 전계를 형성시키기 위하여 여러 가지 전극 구조가 시도되었지만 대부분의 경우 전극이 계면 사이에 위치하게 함으로써 계면에 도포된 오일, 그리스 등의 절연 내력이 계면절연파괴강도에 많은 영향을 주었고, 전극으로부터의 전하 주입에 의해 계면절연 파괴강도가 낮게 측정되는 등 시료 구조의 재현성과 정량적인 해석에 의한 연구가 불충분한 상태이다[1],[3],[4].

본 논문에서는 케이블 부속재에 형성되는 여러 이종 계면 중 Epoxy/EPDM 계면을 인위적으로 형성하여 그 전기적 특성을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 시료의 전극 구조 설계

절연 파괴 진행 과정에서 도체로부터 주입되는 전하의 영향을 최대한 줄여 전압에 의한 절연파괴를 유도하고, 계면의 면적 효과 및 측정 대상 구역을 명확하게 하기 위하여 구 스테인레스와 원통 구리를 결합한 전극을 Epoxy 속에 삽입하고, 각 절연물의 연면 전계가 평등 전계가 되도록 전극을 삽입한 Epoxy 사이에 EPDM을 두는 전극 구조를 채택하였으며, 모의 설계의 도구로 FLUX2D를 사용하였

다. 그림 1에 모의 설계한 시료의 등전위선 분포를 나타내었다. 좌우 전극 사이의 계면과 등전위선이 수직을 이루므로 계면의 길이 방향으로 전계가 형성되고, 중앙 지점으로 갈수록 등전위선 간격이 일정해짐으로써 평등 전계가 형성된다고 할 수 있다. 그림 2에서는 좌우 전극 사이(그림 1의 a~b)의 계면 전계 크기 분포와 계면 전계 중 수평 성분 전계 크기의 분포를 나타내고 있다. 계면 전계의 대부분을 수평 성분이 차지하고 있고 특히, 계면 전계가 피크치를 나타내는 좌우 전극 사이 중앙 부분에서는 수평 성분 전계의 크기가 계면 전계와 같은 값이므로 이 부분이 부분 방전에 의한 트래킹 열화의 시작점이 될 것으로 예상된다. 전극 사이 중앙 부분의 전계는 1[kV] 인가 시 0.298[kV/mm] 인 것으로 계산되었다.

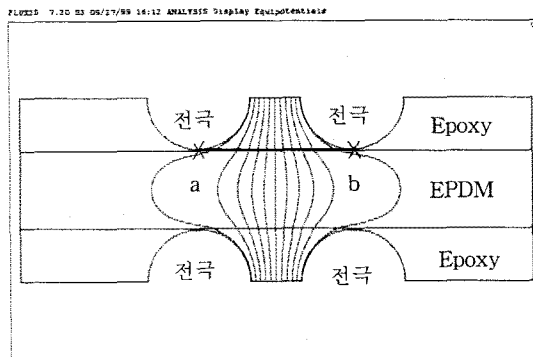


그림 1. 시료의 구조와 등전위선 분포
 Fig. 1. Structure of specimen and mapping of equipotential

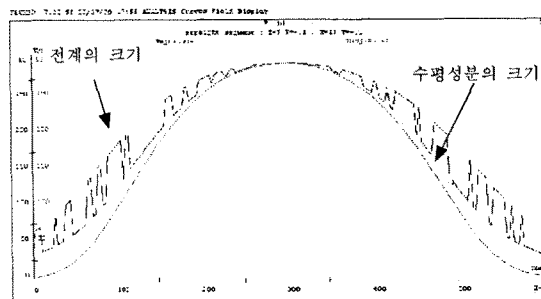


그림 2. 전극 사이 계면의 전계 분포
 Fig. 2. Distribution of electric field between electrodes(a~b)

2.2 시료의 제작

본 실험에서는 Bisphenol-A형 Epoxy와 EPDM을 각 도제 수지로 사용하였다. Epoxy는 CIBA-GEIGY사의 Araldite F와 산무수물 계통의 경화제인 MeTHPA (Methyl Tetra Hydro Phthalic Anhydride)를 사용하였으며, EPDM은 EHV 케이블 부속재의 재료로 사용되는 제품을 사용하였다.

Epoxy의 유리 전이 온도는 90~100(°C), EPDM의 그것은 -60(°C)이므로, 이 두 재료의 접합으로 형성되는 계면은 탄성이 없는 물질과 탄성이 있는 물질과의 계면이다. 탄성이 있는 EPDM의 경우 계면압 등에 의하여 표면상태에 의한 보이드, 공극 등의 결합이 탄성이 없는 Epoxy보다 쉽게 제거될 수 있으므로 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 접할 부분의 두께를 50(μm)로 처리한 후, Epoxy로 한번 더 몰딩하는 이중 몰딩 방법을 채택하였다. 이중 몰딩한 Epoxy를 2차 경화 한 후 EPDM과 결합하여 시료를 완성하였다. Epoxy의 2차 경화 반응에서는 1차 경화 시 반응하지 못한 미 반응 구조가 결합되어 더욱 강한 구조를 나타내게 되므로 이중 몰딩에 의해 생성된 Epoxy 계면 사이의 결합력을 강화시킬 수 있었다고 생각된다. 계면 절연 파괴 강도 측정 시 Epoxy 계면에서 발생하는 절연 파괴는 없었다. 완성된 시료의 구조를 그림 3에 나타내었다.

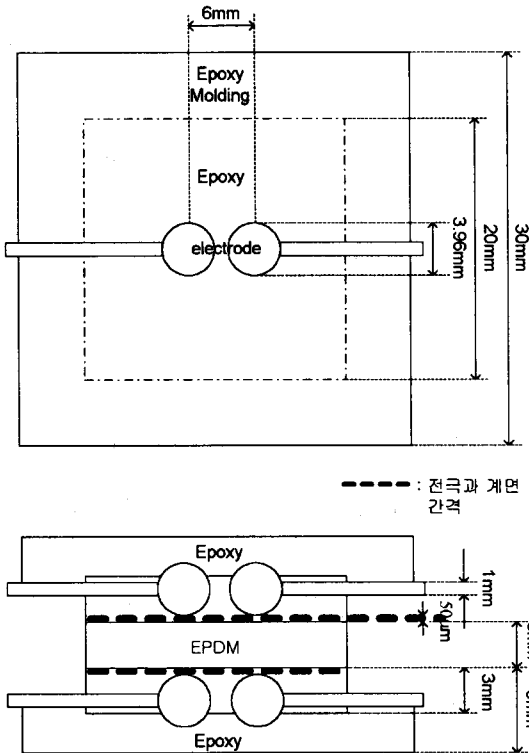


그림 3. 제작된 시료의 구조
Fig. 3. Structure of manufactured specimen

2.3 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 계면절연파괴 시험장치를 구성하였으며, Air Cylinder, Regulator, Air Compressor 등으로 Air Compress

System을 제작하여 계면압을 인가하였다.

2.4. 실험 결과 및 고찰

2.4.1. 계면압에 따른 교류계면절연파괴강도의 변화

그림 4는 사포(#1200)로 계면과 전극과의 두께를 50(μm)로 처리한 시료로 계면압을 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7[kgf/cm²]으로 변화시키면서 상온에서 측정된 교류계면 절연파괴강도의 변화를 나타내고 있다.

계면에서 발생하는 부분 방전 현상의 누적에 의한 트래킹 성장이 계면 절연 파괴를 일으키는 중요한 원인 중 하나이다. 계면에 존재하는 보이드나 공극 속의 물질은 고체 유전체보다 낮은 절연 강도를 가지고 있으면서, 유전율도 고체보다 낮으므로 이곳으로의 전계 집중에 의해 보이드나 공극의 절연 파괴가 일어나면서 트래킹 열화가 진행되어 결국은 계면의 절연 파괴를 일으키게 된다[5]-[7]. Epoxy/EPDM 계면에 존재할 수 있는 결합으로는 수분, 도전성 불순물, 보이드, 공극, 돌기 등이 있는데, 계면압의 증가가 이중 몰딩 재료 표면에 존재하는 도전성 불순물 등에 의한 방전은 억제할 수 없지만, 압력에 의해 보이드, 공극 등의 체적 감소와 이들 내부의 압력을 높여 방전 개시 전압을 높임에 따라 계면의 트래킹 성장을 억제하고, 계면압의 분포를 균일하게 해주므로 계면압 증가에 따라 계면 절연파괴강도가 증가하였다고 생각되며, 일정 수준의 압력(본 연구에서는 5[kgf/cm²]) 이후에서 포화되는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 그러므로 5[kgf/cm²] 정도의 계면압이 계면의 보이드, 공극, 돌기 등에 의한 부분 방전 진행을 억제하기에 충분한 압력이라 생각된다. 계면압 5[kgf/cm²]에서의 교류계면절연파괴 전압은 11.2[kV/mm]로 측정되었다.

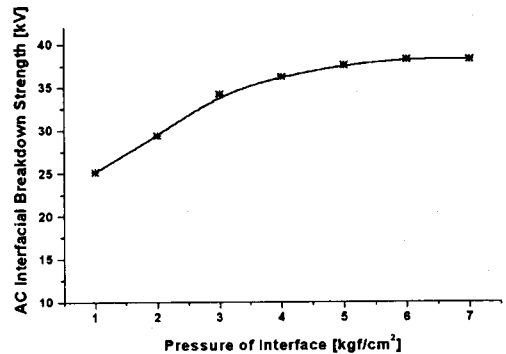


그림 4. 계면압에 따른 교류계면절연파괴강도의 변화
Fig. 4. Variation of the AC interfacial breakdown strength due to interfacial pressure

2.4.2 오일 도포에 따른 교류계면절연파괴 강도의 변화

그림 5는 저점도 실리콘 오일(점도: 350(cst))과 고점도 실리콘 오일(12500cst)을 도포한 시료로 압력을 2, 3, 4, 5, 6, 7[kgf/cm²]로 변화시키며 상온에서 측정된 교류계면절연파괴강도의 변화를 나타내고 있다. 오일을 도포한 시료의 교류계면절연파괴강도도 일정 압력 이상에서 포화되는 경향을 나타내었으며, 계면압 5[kgf/cm²]에서 실리콘 오일을 도포하지 않은 시료의 교류계면절연파괴강도는 그림 4에 나타난 바와 같이 11.2[kV/mm]이며, 저점도 실리콘 오일 도포 시료, 고점도 실리콘 오일 도포 시료의 계면 절연 내력은 그림 5에 나타난 바와 같이 각각 12.1[kV/mm], 11.95 [kV/mm]로 측정되었다. 실리콘 오일을 도포함에 따라 결합 접촉 면적이 증대되는 효과 외에 기계적 결합을 증대시키고, 계면의 방전 개시 전압을 상승시키므로, 오일의 도포에 의해 교류계면절연파괴강도가 증가한 것으로 생각된다.

실리콘 오일을 도포한 시료의 절연파괴강도가 실리콘 오

일을 도포하지 않은 시료보다 증가하였는데, 액체 유전체의 계면절연파괴강도가 압력의 증가에 따라 증가하는 것이 이 원인 중 하나로 생각된다.

계면압이 낮을 때에는 고점도 오일을 도포한 시료의 계면절연파괴강도가 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.

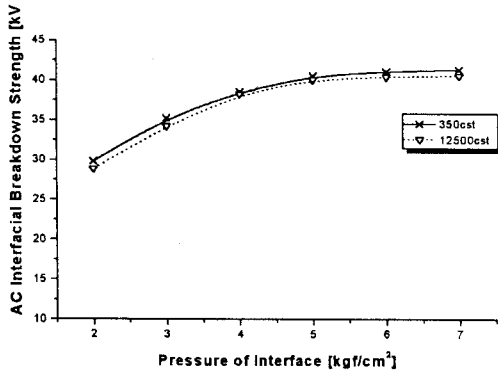


그림 5. 실리콘 오일 도포에 따른 교류계면절연파괴강도의 변화

Fig. 5. Variation of the AC interfacial breakdown strength due to the silicone oil

2.4.3 온도 변화에 따른 교류계면절연파괴강도의 변화

그림 6은 온도 변화에 따른 교류계면절연파괴강도의 변화를 나타내었다. IEC 규정에서 케이블의 동작 온도를 90[°C]로 규정하고 있고, 실제 케이블 접속부의 Epoxy/EPDM 계면에서 측정된 온도는 약 70[°C]이므로, 상온에서 90[°C]까지의 범위에서 20[°C] 간격으로 온도를 변화시켰다. 이 때 다른 조건들은 계면압: 5[kgf/cm²], 계면조도: #1200으로 하였다[2].

실리콘 오일을 도포하지 않은 시료는 상온 계면절연파괴강도를 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 교류계면절연파괴강도의 변화가 작은 것으로 나타났다.

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

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

3. 결 론

Epoxy/EPDM 계면의 절연 파괴 특성 연구한 결과 다음과 같은 내용을 얻었다.

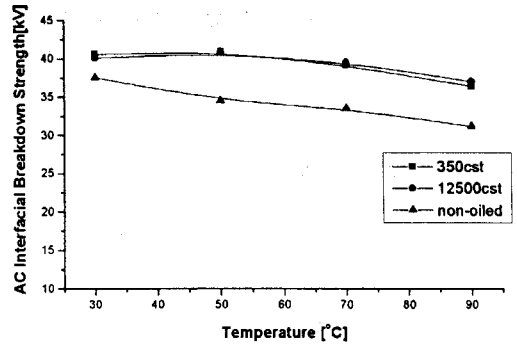


그림 6. 온도 변화에 따른 교류 계면절연파괴강도의 변화

Fig. 6. Variation of the AC interfacial breakdown strength due to temperature

- 1) 실리콘 오일의 도포는 계면에 존재하는 결합을 줄이고, 방전 개시 전압을 높여 계면의 절연파괴강도를 향상시켰다.
- 2) 계면압 증가는 계면에 존재하는 보이드, 공극 등의 체적 감소와 이들 내부의 압력 증가, 계면압 분포도 균일하게 할 수 있어 계면의 절연파괴강도가 증가되었을 것으로 생각된다.
- 3) 계면압 증가에 의한 교류계면절연파괴강도의 증가가 일정 압력(본 연구에서는 5[kgf/cm²]) 이후에서는 포화되는 경향을 나타내었으므로, 5[kgf/cm²]이후의 계면 절연 파괴값이 계면 자체의 절연파괴강도 수준으로 증가되었다고 생각된다.
- 4) 오일을 도포하지 않은 시료의 교류계면절연파괴강도는 온도 증가에 따라 감소하는 비율이 점차 증가하였고, 오일을 도포한 시료의 그것은 온도의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yutaka Nakanishi et al. "Development of Prefabricated Joint for 275-kV XLPE Cable" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995
- [2] 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
- [3] D. Fournier and L. Lamarre, "Effect of pressure and length on interfacial breakdown between two dielectric surfaces," Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, MD, USA, June, 7-10, 1992, pp. 270-272
- [4] H. Nakanishi et al. "Stability of interfaces for prefabricated joint" 1993 IEEJ National Convention No. 1601
- [5] Chinh Dang "Effect of Surface Condition on the Breakdown strength of Various Dielectric Interface" 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1995
- [6] 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.
- [7] 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會編, "固體絶縁材料の界面效果," p. 6, 106~122, 1994. 4.