

Epoxy/EPDM 계면의 절연 파괴 현상

논문
12-12-10

Dielectric Breakdown Phenomenon of the Interface between Epoxy/EPDM

배덕권*, 김상걸*, 이수길*, 정일형*, 이준웅*

(Duck-Kweon Bae*, Sang-Keol Kim*, Su-Kil Lee*, Il-Hyung Jung*, and Joon-Ung Lee*)

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.

Electrode system was designed by using MAGSOFT's FLUX2D based on the finite elements method to reduces the effect of charge transport from electrode in the process of breakdown and to have the tangential electrical potential with the Epoxy/EPDM interface.

Interfacial dielectric breakdown phenomenon of specimen was investigated by variation of interfacial conditions such as roughness, pressure, oil, and temperature which are supposed to have influence on the dielectric strength. We could find out the fact that the interfacial dielectric strength is improved by increased interfacial pressure, decreased surface roughness, and oil. Especially, the dielectric strength was saturated at certain interfacial pressure level. The decreasing ratio of the interfacial dielectric strength in non-oiled specimens was increased by the temperature rising, and its of oiled specimens was not affected by temperature.

Key Words(중요용어) : Straight Cable Joints, Interfacial Breakdown, Epoxy/EPDM Interface, PJs(Prefabricated Joints), Finite Elements Method

1. 서 론

전력 수요가 급증함에 따른 송전 전압의 초고압화가 급속히 진행되고 있다. 특히, 인구 집중 현상에 따라 대단위 수요 중심지가 도심지에 형성되면서 대용량 지중 송·배전 선로의 절연 시스템의 신뢰성이 중요시되고 있다.

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 [1]~[3]. 우리 나라의 지중 송전 선로의 고장 원인을 분석해 보면 케이블 고장의 35~40% 정도가 케이

블 부속재에서 일어났음을 알 수 있고, 일본의 77 kV 급 XLPE 케이블 선로의 경우를 살펴보면 전체 고장의 72% 정도를 차지하고 있는 것을 알 수 있다[1].

케이블 부속재에는 직선 접속재, 종단 접속재 등이 있으며, taping, premolding, extrusion molding 방법 등이 적용되고 있다. 이 중 extrusion molding 방법이 가장 우수한 성능을 가지고 있으나, 연속적인 긴 작업 시간과 접속 기술의 고난이도 등의 단점으로 MHV(medium-high-voltage) 뿐 아니라 EHV(extra-high-voltage)의 부속재에서도 premolding 방법으로의 전환이 이루어지고 있다[1], [2], [5], [6], [8], [9]. Premolding 방식은 케이블 부속재의 부품을 미리 제작하여 조립함에 따라 일정한 수준의 품질을 유지하고 작업 시간도 줄일 수 있는 장점이 있으나, 이종 절연물간의 계면이 필연적으로 형성되기 때문에, 계면의 전기적 특성이 전체 절연 시스템의 신뢰도에 큰 영향을 미친다. 케이블 부속재 계면의 전계는 계면에 수평 방향으로 형성되므로 [1], [2], [6], 계면의 전기적 특성을 조사하기 위해서는 전계가 계면에 수평 방향으로 형성되고, 이 형

* : 광운대학교 공과대학 전기공학과
(서울특별시 노원구 월계동 447-1, Tel : 02-940-5144, Fax : 02-912-5144 E-mail : dk7846@emlab2.kwangwoon.ac.kr)
1999년 7월 23일 접수, 1999년 11월 11일 심사완료

성된 전계가 계면 절연 파괴의 주된 원인이 되도록 전극 시스템을 구성하여야 한다. 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 계면 절연 내력에 많은 영향을 주었고, 전극으로부터의 전하 주입에 의해 계면 절연 내력이 낮게 측정되는 등[3]~[5] 시료 구조의 재현성과 정량적인 해석에 의한 연구가 불충분한 상태이다.

XLPE를 절연층으로 사용한 케이블 부속재에는 도체/XLPE, XLPE/EPDM, Epoxy/EPDM 등의 계면이 존재하고 있으며 이들 이종 계면은 각각 다른 특성을 나타내고 있다[2]~[6].

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

2. 시료 제작 및 실험 방법

2.1 전극 구조의 설계

본 연구에서는 FLUX2D를 사용하여 시료의 전극 구조를 설계하였으며, 절연 파괴 진행 과정에서 도체로부터 주입되는 전하의 영향을 최대한 줄여 계면 전계에 의한 계면 절연 내력을 얻고 계면의 면적 효과 및 측정 대상 구역을 명확하게 하기 위하여 스테인레스 구와 원통 구리를 결합한 전극을 Epoxy 속에 삽입하고, 각 절연물의 연면 전계가 평등 전계가 되도록 전극을 삽입한 Epoxy 사이에 EPDM을 두는 전극 구조를 채택하였다. 그림 1은 시료의 형상과 시료 중앙 부분의 등전위선 분포를 그림의 상·하에 나타내었는데, 좌우 전극 사이 계면의 등전위선 분포가 균일하고 등전위선의 방향이 계면 방향과 수직이므로 계면에 수평 방향인 평등 전계가 형성됨을 확인할 수 있다. 그림 2는 Epoxy/EPDM 계면 전계의 벡터도를 화살표로 나타낸 것인데, 전극의 중간 지점에서 계면 전계가 계면의 수평 방향과 일치하였으므로 이 부분에서의 수평 성분 전계가 가장 클 것으로 예상할 수 있었다.

그림 3은 전극간 계면 전계의 크기와 계면 전계 중 수평 성분 전계의 크기를 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 계면 전계의 크기와 수평 성분 전계의 크기가 비슷한 값을 나타내고 있으며, 특히 계면 전계가 피크치를 나타내는 좌우 전극 사이 중앙 부분에서는 수평 성분 전계의 크기가 계면 전계와 같은 값을 알 수 있으므로 이 전극 구조는 각 모체 시료의 연

면 방향 전계를 형성하였으며 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.

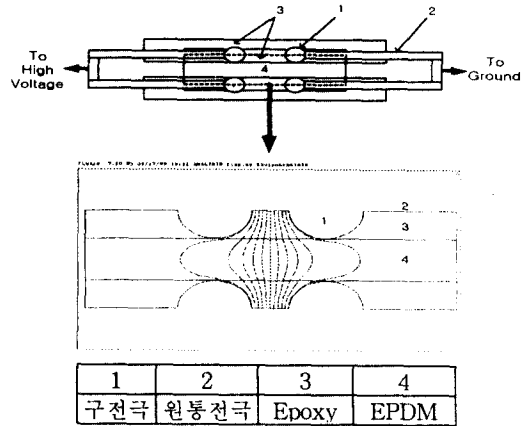


그림 1. 시료의 등전위 분포

Fig. 1. Equipotentials of Specimen

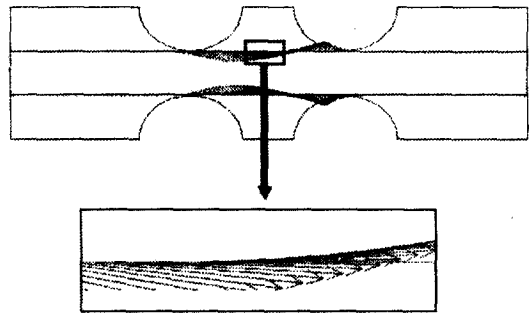


그림 2. Epoxy/EPDM 계면의 전계 벡터도

Fig. 2. Boundary Vector Diagram at Epoxy/EPDM Interface

2.2 시료의 제작

2.2.1 모체 수지의 재료

본 실험에서는 Bisphenol-A형 Epoxy와 EPDM을 각 모체 수지로 사용하였다. Epoxy는 CIBA-

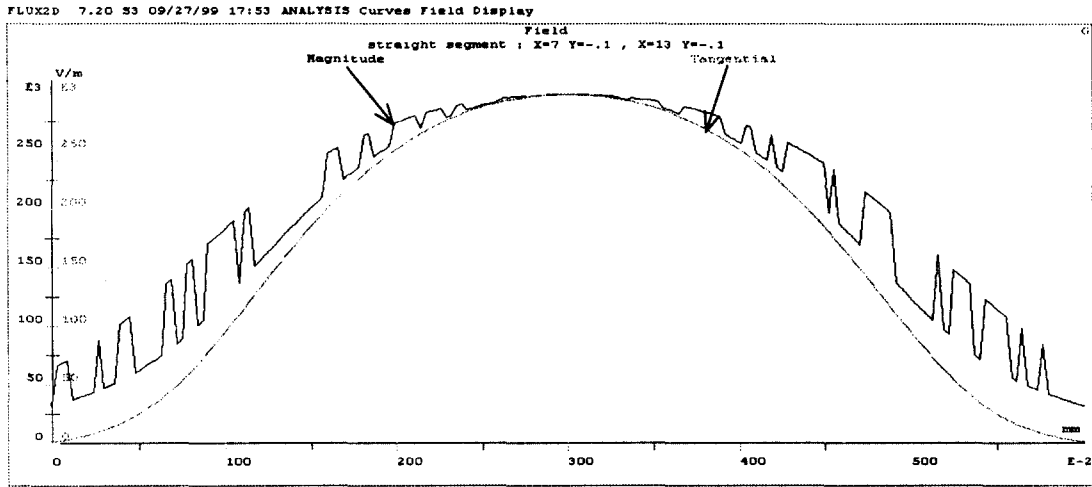


그림 3. 전극간 계면 전계 분포
Fig. 3. Interfacial Field Distribution between Electrodes

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/cm³] 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 부여제를 소량 첨가하였다. EPDM은 초고압 케이블 부속재 재료로 사용되는 제품을 사용하였다.

Epoxy의 유리 전이 온도(glass transition temperature)는 90~100[°C], EPDM의 그것은 -60[°C] 인데 이 두 재료의 접합으로 형성되는 계면은 탄성이 없는 물질과 탄성이 있는 물질과의 계면이므로 이들 계면의 상태는 Fournier[3]~[5]에 의해 연구된 XLPE/EPDM의 계면과는 다른 양상을 보일 수도 있을 것으로 예상된다.

탄성이 있는 EPDM의 경우 계면압 등에 의하여 표면상태에 의한 보이드, 공공 등의 결함이 탄성이 없는 Epoxy보다 쉽게 제거될 수 있으므로 Epoxy의 표면 상태가 계면의 전기적 특성에 보다 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2.2.2 시료의 제작

그림 4에 Epoxy 시료의 제작 공정을 나타내었다. 전극과 계면 간격의 재현성과 전극의 삽입을 위하여

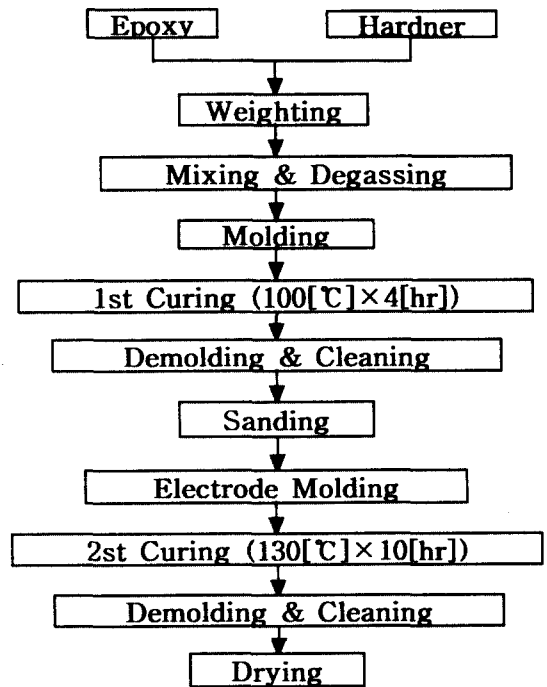


그림 4. Epoxy 시료의 제작 공정
Fig. 4. Production Process of Epoxy Specimen

전극을 넣은 Epoxy를 1차 경화한 후 사포로 전극과 EPDM에 접할 부분의 두께를 50[μ m]로 처리한 후, Epoxy로 한번 더 몰딩하는 이중 몰딩 방법을 채택하였다. 이중 몰딩 한 Epoxy를 2차 경화 한 후 EPDM과 결합하여 시료를 완성하였다. Epoxy의 2차 경화 반응에서는 1차 경화 시 반응하지 못한 미반응 구조가 결합되어 더욱 강한 구조를 나타내게 되므로 이중 몰딩에 의해 생성된 Epoxy 계면 사이의 결합력을 강화시킬 수 있었다고 생각된다. 계면 절연 내력 측정 시 Epoxy 계면에서 발생하는 절연 파괴는 없었다. 완성된 시료의 구조를 그림 5에 나타내었다.

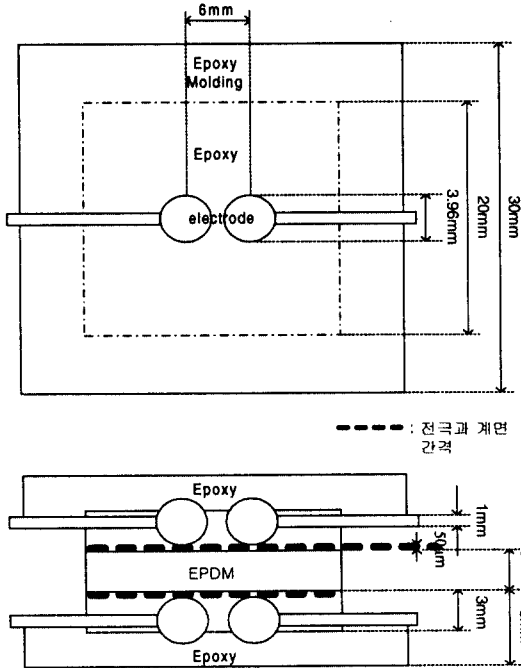


그림 5. 제작된 시료의 구조
Fig. 5. Structure of Manufactured Specimen

2.3 교류 계면 절연 내력 측정

계면 절연 내력 측정은 PULSE ELECTRONIC ENGINEERING Co., LTD.의 IVG-600A로 전압을 인가하였으며, 인가 전압으로는 AC를 사용하였다.

Teflon, Acetal 등의 절연 재료로 계면압을 가할 수 있는 계면 절연 내력 시험 장치를 구성하였으며, Air Cylinder, Regulator, Air Compressor 등

로 Air Compress System을 제작하여 계면압을 인가하였다. 그림 6은 이 장치의 구조를 나타내고 있다.

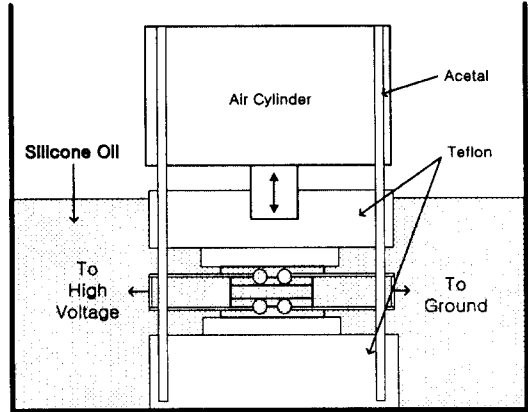


그림 6. 계면 절연 내력 시험 장치
Fig. 6. Interfacial Dielectric Strength Tester

교류 계면 절연 내력 측정은 ASTM D 149-95a의 Method A, Short-Time Test를 따랐으며 Current Setting은 10[μ A], Rate-of-Rise는 500 [V/s]로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 계면압에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화

그림 7은 사포(#1200)로 계면과 전극과의 두께를 50[μ m]로 처리한 시료로 계면압을 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7[kgf/cm²]으로 변화시키면서 상온에서 측정된 교류 계면 절연 내력의 변화를 나타내고 있다. 계면에서 발생되는 부분 방전 현상의 누적에 의한 트래킹 성장이 계면 절연 파괴를 일으키는 중요한 원인 중 하나이다[3], [4], [7], [12]. 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.

Epoxy/EPDM 계면에 존재할 수 있는 결함으로는 수분, 도전성 불순물, 보이드, 공극, 돌기 등이 있는데[2], 계면압의 증가가 이중 절연 재료 표면에 존재하는 도전성 불순물 등에 의한 방전은 억제 할 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 해 주므로 계면압 증가에 따라 계면 절연 내력이 증가하였다고 생각되며, 일정 수준의 압력(본 연구에서는 5[kgf/cm²]) 이후에서 포화되는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 5[kgf/cm²] 정도의 계면압이 계면의 보이드, 공극, 돌기 등에 의한 부분 방전 진행을 억제하기에 충분하기 때문이라 생각된다. 계면압 5[kgf/cm²]에서의 교류 계면 절연 내력은 11.2[kV/mm]로 측정되었다.

그림 8은 파괴된 시료의 표면에 생성된 트래킹 흔적을 나타내었다.

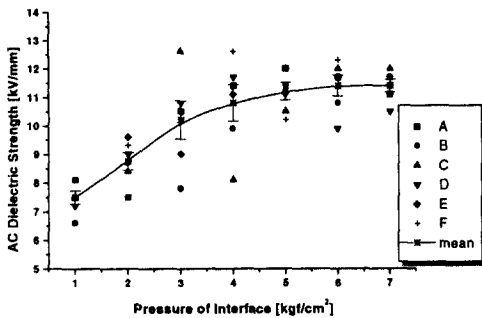


그림 7. 계면압에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화
Fig. 7. Variation of the AC Interfacial Dielectric Strength due to Interfacial Pressure

그림 8. 파괴된 시료의 트래킹 흔적
Fig. 8. Tracking trace after breakdown

3.2 계면 거칠기에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화

그림 9는 계면압 5[kgf/cm²]에서 sand paper #220, #400, #600, #1200으로 시료 표면을 처리한 시료로 상온에서 측정된 교류 계면 절연 내력의 변화를 나타내고 있다.

모체 시료의 표면 거칠기에 대한 계면 절연 내력의 변화는, 거칠기의 감소에 따라 감소[10], 증가[11], 증가 및 포화하는 경향[14]을 나타낸다는 여러 연구 보고가 있었다. 각 연구에 사용된 상이한 전극 구조가 이러한 결과의 원인이 될 수 있을 것이라 생각되며, 본 연구에 사용된 전극 구조에 의한 계면 절연 내력의 변화는 거칠기의 감소에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이는 거칠기가 감소함에 따라 요철부로의 전계 집중이 완화되고, 요철에 의해 생성될 수 있는 결합이 줄어들었기 때문이라 생각한다. 계면 절연 내력은 계면압, 거칠기 뿐아니라, 계면을 형성하는 모체 수지 재료의 특성에도 크게 영향을 받는다[13]. 탄성이 있는 물질의 경우 계면압에 의하여 보이드, 공극 등에 의한 pre-breakdown discharge를 억제할 수 있을 것으로 예상되나, 탄성이 없는 물질의 계면에 요철, 돌기 등이 있는 경우 계면의 절연 성능은 탄성이 있는 물질과 비교하여 저하될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 탄성이 없는 물질(Epoxy)과 탄성이 좋은 물질(EPDM)의 접합으로 계면이 형성되었으며, XLPE/EPDM 계면의 경우 Epoxy/EPDM 계면보다 낮은 압력에서 계면 절연 내력이 포화되는 경향을 나타낸다는 연구 보고가 있다[14].

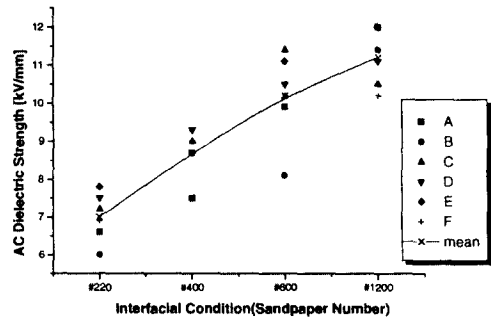


그림 9. 계면 상태에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화
Fig. 9. Variation of the AC Interfacial Dielectric Strength due to Interfacial Pressure

3.3 오일 도포에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화

그림 10은 저점도 실리콘 오일(점도 : 350[cst]) 과 고점도 실리콘 오일(12500cst)을 도포한 시료로 압력을 2, 3, 4, 5, 6, 7[kgf/cm²]로 변화시켜가며 상온에서 측정된 교류 계면 절연 내력의 변화를 나타내고 있다. 오일을 도포한 시료의 계면 절연 내력도 일정 압력 이상에서 포화되는 경향을 나타내었으며, 계면압 5[kgf/cm²]에서 실리콘 오일을 도포하지 않은 시료의 계면 절연 내력은 그림 7에 나타낸 바와 같이 11.2[kV/mm]이며, 저점도 실리콘 오일 도포 시료, 고점도 실리콘 오일 도포 시료의 계면 절연 내력은 그림 10에 나타낸 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[14], 오일의 도포에 의해 계면 절연 내력이 증가한 것으로 생각된다.

실리콘 오일을 도포한 시료의 절연 내력이 실리콘 오일을 도포하지 않은 시료보다 증가하였는데, 이는 액체 유전체의 계면 절연 내력이 압력의 증가에 따라 증가하는 것이 이 원인 중 하나로 생각된다.

계면압이 낮을 때에는 고점도 오일을 도포한 시료의 계면 절연 내력이 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.

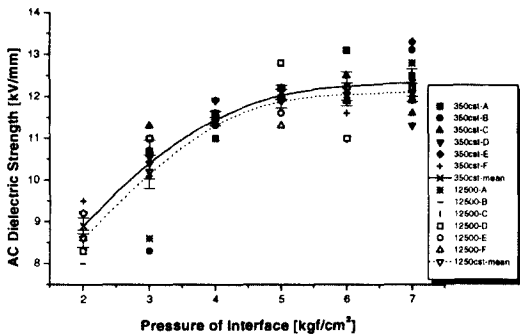


그림 10. 실리콘 오일 도포에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화
Fig. 10. Variation of the AC Interfacial Dielectric Strength due to the presence of silicone oil

3.4 온도 변화에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화

그림 11는 온도 변화에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화를 나타내었다. 실제 케이블 접속부의 Epoxy/EPDM 계면에서 측정된 온도는 약 70[°C]이므로[6], 상온에서 90[°C]까지의 범위에서 20[°C] 간격으로 온도를 변화시켰다. 이 때 다른 조건들은 3.1, 3.2에서 참조하여 계면압 : 5[kgf/cm²], 계면조도 : #1200으로 하였다.

실리콘 오일을 도포하지 않은 시료는 상온 계면 절연 내력을 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 계면 절연 내력의 변화가 작은 것으로 나타났다.

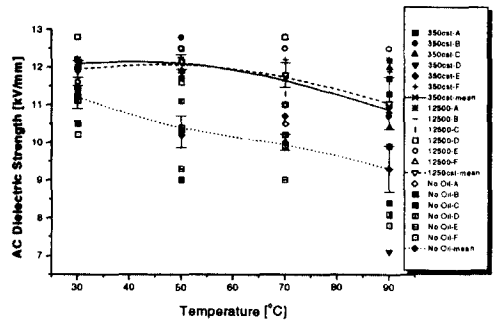


그림 11. 온도 변화에 따른 교류 계면 절연 내력의 변화
Fig. 11. Variation of the AC Interfacial Dielectric Strength due to Temperature

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

상온에서는 고점도 실리콘 오일을 도포한 시료의

계면 절연 내력이 저점도 실리콘 오일을 도포한 시료보다 낮았으나 70[°C] 이상에서는 고점도 실리콘 오일의 절연 내력이 높게 측정되었다. 상온에서 계면 절연 내력이 낮은 것은 3.3에서 언급한 것과 같은 이유일 것으로 생각되며, 온도 증가에 의한 오일 점도의 감소로 고점도 오일의 흐름 특성이 향상되었기 때문에 70[°C] 이상에서 고점도 실리콘 오일 도포 시료의 절연 내력이 저점도 실리콘 오일 도포 시료의 절연 내력보다 큰 이유일 것으로 생각된다.

4. 결 론

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

- 1) 계면 거칠기의 감소와 실리콘 오일의 도포가 계면에 존재하는 결함을 줄이고, 방전 개시 전압을 높여 계면의 절연 내력이 증가하였다고 생각된다.
- 2) 계면압 증가는 계면에 존재하는 보이드, 공극 등의 체적 감소와 이들 내부의 압력 증가, 계면압 분포도 균일하게 할 수 있어 계면의 절연 내력이 증가되었을 것으로 생각된다.
- 3) 계면압 증가에 의한 계면 절연 내력의 증가가 일정 압력(본 연구에서는 5[kgf/cm²]) 이후에서는 포화되는 경향을 나타내었으므로, 5[kgf/cm²] 이후의 계면 절연 파괴값이 계면 자체의 절연 내력 수준으로 증가하였다고 생각된다.
- 4) 오일을 도포하지 않은 시료의 계면 절연 내력은 온도 증가에 따라 감소하는 비율이 점차 증가하였고, 오일을 도포한 시료의 계면 절연 내력은 온도의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 5) 본 연구에서 가장 이상적인 Epoxy/EPDM 계면 조건은 표면 처리(sandpaper #1200), 저점도 실리콘 오일(350[cst]) 도포, 계면압 5[kgf/cm²]인 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, pp. 1139-1146, 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, pp. 663-668, 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, pp. 270-272, 7-10, June, 1992.
- [4] C. Dang and D. Fournier, "A study of the interfacial breakdown in cable joints", 1994 Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Arlington, Texas, USA, pp. 518-523, 23-26, Nov. 1994.
- [5] C. Dang and D. Fournier, "Dielectric Performance of interfaces in Premolded Cable Joints", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 29-32, January, 1997.
- [6] H. Nakanishi et al., "Stability of interfaces for prefabricated joint" 1993 IEEJ National Convention No. 1601.
- [7] Blaise, G., "Space-Charge Physics and the Breakdown Process", Journal of Applied Physics, vol. 77, pp. 2916-2927, April 1995.
- [8] J. Becker, "Successful Testing of 345-kV XLPE Cables and Premolded Joints at IREQ" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 547-550, April, 1997.
- [9] A. Toya et al., "Study on Molded Joint by Curable PE Block Insulation for XLPE Insulating Cable Under Extra High Voltage", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 669-675, April, 1996.
- [10] Chinh Dang, "Effect of Surface Condition on the Breakdown strength of Various Dielectric Interface" 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1995.
- [11] 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, pp. 47-52, 16-20, October, 1988.

- [12] D. Fournier and L. Lamarre, "Interfacial Breakdown Between Two EPDM Surfaces", Proceeding of the 1994 IEEE 6th international Symposium on Dielectric Materials, Measurements and Applications, Manchester, U. K., pp. 330-333, September 1992.
- [13] V. Homburg and H. C. Karner, "Basic investigation of a macroscopic interface between two solid dielectrics", Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA, USA, pp. 446-449, June, 5-8 1994.
- [14] 日本 電氣學會 技術 報告 固體 絶縁材料の 界面 効果 調査 専門 委員會 編, "固體 絶縁材料の 界面 効果," p. 6, 106~122, april, 1994.