

전력케이블 절연접속계면의 열연파괴 특성에 미치는 열처리 효과

11-7-1

Effect of Heat Treatment on Breakdown Properties in the Joint Interface of Power Cables

이창종*, 김진수*, 박강식**, 한상옥***

(Chang-Jong Lee, Jin-Soo Kim, Kang-Sik Park, Sang-Ok Han)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the breakdown properties in joint interface of power cables with heat treatment. The specimens have the structure of XLPE/EPDM interface like the joint of distribution power cable. The breakdown characteristics of the XLPE/EPDM joint were studied with crosslinking by-products. AC breakdown voltages were measured with heat treatment time and interfacial materials and crosslinking by-products as testing factors.

This study has shown that crosslinking by-product gases play an important role at the insulation properties of cable joints by heating. The dielectric strength shows the lowest values at 4 hours heat treatment. The AC breakdown strength in the untreated sample was increased with heat treatment time.

Key Word(중요용어): Power cable, XLPE, EPDM, Dielectric breakdown

1. 서 론

배전선로의 지중화에 따라 점차 전력 케이블의 사용이 증가하고 있다. 전력 케이블의 사고에 의한 피해 파급이 크므로 안전을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 전력 케이블 사고중에서 케이블 접속부위에서의 사고 비율이 높다.

전력 케이블에 전류가 흐르면 열이 발생하고, 이로 인해 온도가 상승하며, 이 열이 케이블 접속 부위의 결합 상태에 물리적 그리고 화학적으로 영향

을 줄 가능성이 있다. 1985년부터 1989년까지 5년간 국내에서의 케이블 접속재 사고 97건 중, 케이블 설치 후 2년 이내의 사고건수가 총 47건(48%)으로 나타났으며¹⁾, 이는 케이블 사용에 따른 열적 영향이 여러 원인 중 하나인 것으로 보인다.

그 동안, 국내외에서 전력 케이블의 절연재료인 XLPE(crosslinked polyethylene)와 접속재의 절연재료인 EPDM(ethylene propylene diene terpolymer) 각각에 대한 연구는 많이 있었지만, 두 재료의 계면 현상에 관한 물성 연구는 빈약한 실정이며, 특히 이 두 재료 사이에 들어가는 실리콘 그리스(silicone grease)의 성능과 열적인 변화에 대한 연구는 매우 부족하다.

이 연구의 목적은 배전용 전력 케이블 직선 접속부가 열을 받은 시간에 따라 어떠한 열연 열화 특성을 갖는지 규명하는데 있다. 전력 케이블 직선 접

* : 한국교원대학교 기술교육과
(충북 청원군 강내면 다락리 산 7, Fax: 0431-230-3787

E-mail : jskim@cc.knue.ac.kr

** : 충남전문대학 전기과

*** : 충남대학교 전기공학과

1998년 2월 25일 접수, 1998년 5월 14일 심사완료

속부와 함께 XLPE/grease/EPDM 계면 구조를 갖는 시편을 제작하여, 0.5~200시간 열처리함에 따라 교류 절연 파괴 강도가 어떻게 달라지는지 측정했다. 가교 부산물이 있고 없음에 따라, 그리고 계면을 실리콘 그리스로 처리한 경우, 실리콘 오일로 처리한 경우, 단순 접촉한 경우에 대해 실험을 실시하여 가교 부산물과 실리콘 그리스의 영향에 대해 연구했다.

2. 실험 방법

전력 케이블과 접속재 제조용 원시료를 이용하여 핫 프레스로 0.5 mm 두께의 XLPE와 EPDM 씨트를 만들었다. 씨트는 원시료를 120°C에서 10분간 예열하여 녹인후 XLPE는 180°C에서 15분간 가교했으며, EPDM은 175°C에서 10분간 가교후 냉각수를 순환시켜 제조했다. 이 씨트를 20×30×0.5 mm 크기로 절단하여 아세톤으로 세척 건조하여, 그중 일부는 80°C 진공 오븐 중에서 48시간 동안 가교 부산물을 제거하였으며(degassed 시편)³⁾, 나머지는 가교 부산물이 남아있는 상태(untreated 시편) 그대로 이용했다.

전극은 두께 18 μm의 알루미늄 호일(aluminum foil)을 절단하여 날끝의 각도가 30° (radius ~1 μm)가 되도록 만들어, 아세톤으로 세척했다. 전극은 침대침으로 하여 2 mm 간격으로 배치하였으며, XLPE와 EPDM 계면 사이에 설치하고, 실리콘 오일 또는 실리콘 그리스를 계면에 도포하여 시편을 제작하였다. 이렇게 만든 시편을 80°C에서 시편에 따라 0.5, 1, 2, 4, 48, 200 시간 열처리하였다. 열처리하는 동안 산화되는 것을 방지하기 위해, 시편 상하

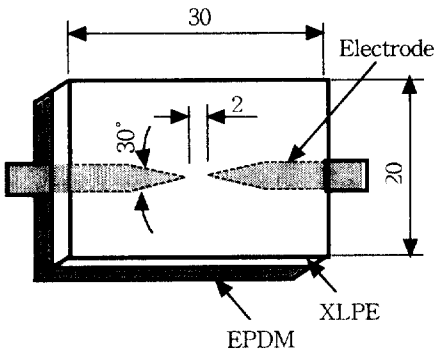


그림 1. 절연파괴 시험용 시편의 구성
Fig. 1. Specimen dimensions for testing of the electrical breakdown

양면을 페놀 수지로 덮고, 오븐 속의 공기를 빼진 공상태(1 Pa)로 유지했다.

그림 1은 시편의 구조를 나타낸 것이다. 이 시편을 시편 홀더에 설치하고, 실리콘 오일중에서 AC 내압기(Dainichi-noppon cable LTD 제품)를 이용하여 절연 파괴 전압을 측정하였다.

전극, 계면 압력(1kg/cm²), 측정 온도(25°C), 사용 전원(AC, 전압 상승 속도 0.5 kV/sec)을 일정하게 유지한 상태에서 가교 부산물 유무, 계면 처리제 종류에 따라 열처리 시간을 변화시켜가며 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도와 가교 부산물에 의한 특성 변화

그림 2에 가교 부산물 유무에 따른 측정온도 - 절연 파괴 강도를 나타냈다. 계면을 실리콘 오일 12500 cSt로 처리했는데, 실리콘 그리스를 쓰지 않은 이유는 실리콘 오일이 순수한 성분으로 이루어진데 비해 실리콘 그리스는 충전제(filler)가 들어있어 이것의 영향이 나타날 가능성이 있기 때문이다.

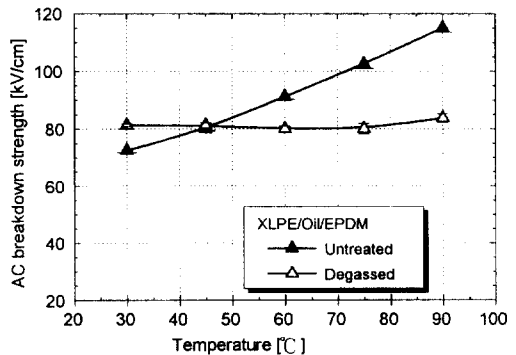


그림 2. 가교 부산물 유무에 따른 XLPE/EPDM 계면의 온도-절연 파괴 강도

Fig. 2. Temperature vs AC breakdown strength characteristics of XLPE/EPDM interface with crosslinking by-products

가교 부산물을 제거한 degassed 시편의 경우는 온도 상승에 따라 거의 절연파괴 강도에 변화를 보이고 있지 않다. 이에 반해, 가교 부산물이 남아있는 untreated 시편은 온도 증가에 따라 절연 파괴 강도가 증가하는 특성을 보였다

Untreated 시편의 XLPE와 EPDM 내 자유 체적(free volume)에 남아있던 휘발성의 극성 가교 부산

물이 온도 증가에 따라 에너지를 받아 운동이 활발해지고, 이것이 밖으로 빠져 나오는 과정에서 일부는 계면에 축적될 수 있다. 전계가 인가되면 계면에 축적된 극성 가교 부산물이 정전 인력에 의해 침전극 주위에 모여 공간 전하(space charge)로 작용할 수 있다. 침전극은 그 끝단에서 전계가 심하게 왜곡되는데, 전극 주변에 형성된 공간 전하는 침전극 끝단의 전계 왜곡을 완화시켜, 절연 파괴 강도를 증가시키는 방향으로 작용하는 것으로 보인다. 이 같은 결과는 절연체 내부에 잔류해있는 가교 부산물등이 전극주변의 전계를 완화시키는 작용을 하고 있다는 보고와도 잘 일치하고 있다²⁾.

이와 같이, 가교 부산물이 XLPE/EPDM 계면에서의 절연 파괴에 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다.

3.2 열처리 시간에 따른 절연 특성 변화

시편을 80℃ 진공 오븐에서 일정 시간 열처리 한 후, 열처리 시간 - 절연 파괴 강도 특성을 조사하였다. 단순접촉 시편의 경우를 그림 3에, 실리콘 오일 도포 시편은 그림 4에, 그리고 실리콘 그리스로 도포한 시편은 그림 6에 나타내었다.

동일조건에서 30분 동안 열처리한 시편에서 미리 가교 부산물을 제거한 것은 파괴 강도가 106 kV/cm 이지만 가교 부산물을 제거하지 않은 것의 파괴 강도는 제거한것의 84.9% 정도로 낮아져 가교 후 시편 내부에 잔류하는 가교 부산물의 영향이 열처리 초기에 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 열

처리 시간이 길어짐에 따라 가교 부산물을 제거하지 않았던 시편도 점차 부산물이 휘발 제거됨에 따라 파괴 강도가 부산물을 제거했던 시편과 거의 동일한 수준으로 접근하는 것을 관측할 수 있다. 이와 같이 열처리 초기에 나타나는 가교 부산물의 영향은 그림 4의 실리콘 오일로 처리한 경우와 그림 6의 실리콘 그리스로 처리한 경우의 가교 부산물을 제거하지 않은 시편에도 동일하게 나타났다.

Untreated, degassed 시편 모두 4~12시간 열처리에서 파괴 강도가 낮아지는 특이한 특성을 나타냈다. 그림 4, 6의 실리콘 오일과 실리콘 그리스로 도포한 것에서도 4시간 근처에서 특이하게 낮은 값을 보여주고 있다.

이 실험 방법과는 다르게 두께 방향이긴 하지만, XLPE/EPDM 계면에서 열처리 시간에 따라 계면에 축적되는 공간 전하 밀도 분포가 크게 달라지는 것으로 발표된 바 있다⁴⁾. 이처럼 열처리가 시편 내부의 전하 분포를 변화시켜 결국 계면 방향의 절연 특성에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

그림. 4는 실리콘 오일 12500 cSt로 도포한 시편의 가교 부산물 유무에 따른 열처리 시간 - 절연 파괴 특성을 나타낸 것이다. 열처리 초기에 낮은 절연 파괴 강도를 보이다가 열처리 시간이 길어짐에 따라 4시간 이후에는 파괴 강도가 급격히 증가하는 현상이 관측되었다. 열처리 초기의 낮은 값은 실리콘 오일이 가지고 있는 비교적 낮은 절연 파괴 강도에 기인하는 것으로 보인다. 이 연구와 같은 구조

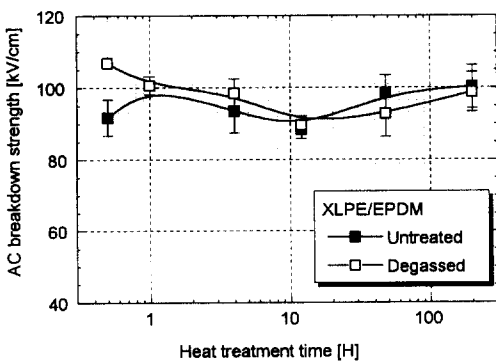


그림 3. 가교 부산물 유무에 따른 XLPE/EPDM 계면의 열처리 시간 - 교류 절연 파괴 강도

Fig. 3. Heat treatment time vs AC breakdown strength characteristics of XLPE/EPDM interface with crosslinking by-products

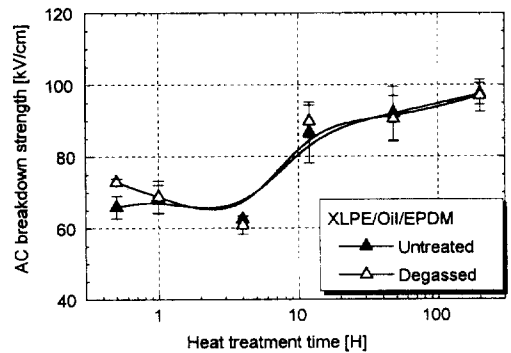


그림 4. 가교 부산물 유무에 따른 XLPE/oil/EPDM 계면의 열처리 시간 - 교류 절연 파괴 강도(oil: Silicone oil 12500 cSt)

Fig. 4. Heat treatment time vs AC breakdown strength characteristics of XLPE/oil/EPDM interface with crosslinking by-products

인 침대 침 전극을 만들어 실리콘 오일의 절연파괴 강도를 시험해본 결과 약 54 kV/cm로 나타났다.

4시간 이후에 급격하게 증가하는 특성을 보이는 것은 두 가지 이유가 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 첫째, 계면을 형성하고 있는 XLPE 시료 표면에 형성되어 있는 보이드와 균열이 점차 실리콘 오일에 의해 채워져 파괴 강도가 급격히 상승하는 것으로 판단된다.

XLPE 표면에 형성되는 미세한 보이드나 균열은 전자 현미경을 통하여 확인 할 수 있으며, 또한 보고된 바 있다⁵⁾. 그림 5는 XLPE와 EPDM 표면의 전자 현미경 사진인데, 미세한 보이드와 균열이 있음을 알 수 있다.

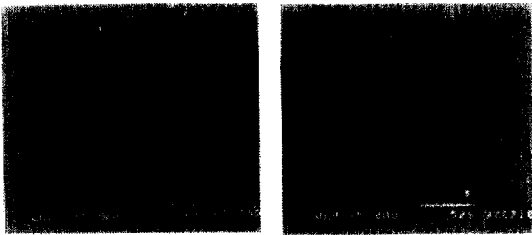


그림 5. 열처리에 의해 XLPE와 EPDM 표면에 형성된 보이드와 균열

Fig. 5. SEM photographs of voids and cracks in the XLPE and EPDM by heat treatment

둘째, 실리콘 오일이 XLPE와 EPDM내의 자유 체적으로 침투 확산되기 때문으로 판단된다. 서광석 등은⁴⁾ 실리콘 그리스가 XLPE내로 침투 확산되는 것을 적외선 분광기(FTIR)에 의한 흡광도 분석에 의해 연구 발표한 바 있다. 이러한 침투 확산에 의해 계면에 있는 실리콘 오일의 양이 감소 한다. D. Fournier와 L. Lamarre의 연구에서⁶⁾ 0~100 kPa 범위의 압력을 가함에 따라 직선적으로 절연 파괴 강도가 증가하였다. 한상옥 등의 연구에서는⁷⁾, 계면에 100~600 kPa의 압력을 가하면, 절연 파괴 강도가 증가하다가 어느 시점 이후 포화되었다. 계면에 압력을 가하면 유동성의 실리콘 오일이나 실리콘 그리스 층이 얇아져 파괴 강도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 열처리 시간이 지남에 따라 실리콘 오일이 XLPE와 EPDM의 자유 체적으로 침투 확산되어, 계면에 남아있는 실리콘 오일이 적어지고, 압력을

가했을 때와 같이 얇은 막이 될 것이다. XLPE나 EPDM에 비해 비교적 낮은 절연 파괴 강도를 갖고 있는 실리콘 오일의 특성이 점차 없어져 절연 내력이 회복되는 것으로 판단된다.

그림 6은 실리콘 그리스로 도포한 시편의 가교 부산물 유무에 따른 열처리 시간 - 절연 파괴 특성을 나타낸 것이다. 앞의 그림 4과 다른 실험 조건은 단지 실리콘 오일 12500 cSt 대신에 실리콘 그리스로 처리하였다는 것이다. 실리콘 그리스가 실리콘 오일과 다른 점이 있다면, 실리콘 그리스는 실리콘 오일에 충전제를 넣었다는 것이다. 그림 6의 실리콘 그리스로 도포한 경우, 가교 부산물을 제거하지 않은 시편은 그림 4의 실리콘 오일로 처리한 시편과 거의 같은 특성을 보이고 있다. 그에 반해, 가교 부산물을 제거한 시편은 실리콘 오일로 처리한 시편과는 다르게, 열처리 시간이 경과함에 따라 12시간까지는 계속 낮아지다가 조금씩 절연 내력이 회복되는 특성을 보이고 있다.

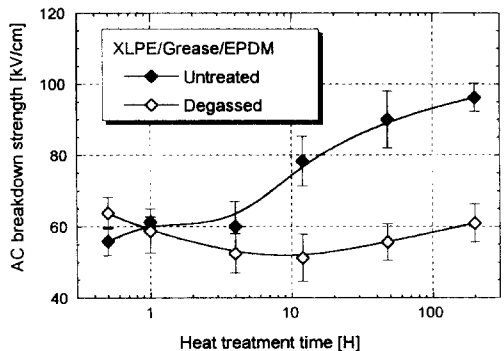


그림 6. 가교 부산물 유무에 따른 XLPE/grease/EPDM 계면의 열처리 시간 - 교류 절연 파괴 강도

Fig. 6. Heat treatment time vs breakdown strength characteristics of XLPE/grease/EPDM interface with cross-linking by-products

이런 결과는, 가교 부산물 제거 과정에서 나타나는 보이드의 영향과 열처리 과정에서 일어나는 변화, 두 가지 요인으로 나누어 생각해 볼 수 있다.

첫째, 시료를 제작할 때, 특히 가교 부산물을 제거할 때 시료 표면에 미세한 보이드나 균열이 형성될 수 있다^{7,9)}. 이러한 보이드나 균열에 유동성이 낮은 실리콘 그리스가 도포 되면서 기포들이 계면에서 미처 빠져나가지 못하여 이들이 계면의 결함

이 되어 파괴 강도를 크게 낮추는 역할을 하는 것으로 판단된다. 80℃의 고온에서 진공으로 처리하지 않은 시편에서 4시간 열처리 이후 절연 회복이 급속히 이루어지는 것은, 보이드나 균열이 많이 형성되지 않아 그 영향이 작게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

80℃의 고온에서 진공처리 하여 가교 부산물을 제거한 시편의 파괴 강도 상승이 지연되는 것은 이러한 제거 과정에서 미세한 보이드나 균열이 많이 발생되어 실리콘 그리스가 그곳을 채워가는데 걸리는 시간이 길어지기 때문으로 판단된다.

둘째, 열처리 과정에서 실리콘 그리스의 변질 가능성이 있다. 앞에서 XLPE 내로 침투 확산되는 실리콘 오일성분에 대해 논했다. 실리콘 그리스를 구성하고 있는 실리콘 오일에 대한 연구는 있지만 충전제 성분의 침투 확산 정도에 대해서는 연구된 것이 없다. 그러나, 유동성이 큰 액체 실리콘 오일에 비해 고체 분말인 충전제는 고분자 모체 수지 내로 침투 확산되는 능력이 낮을 것은 분명하다. 이러한 침투 확산 능력의 차이는 열처리 시간이 경과함에 따라 충전제 농도가 증가하고, 이에 따른 실리콘 그리스의 변질이 절연 파괴 강도를 낮추는 것으로 보인다. 열처리 시간이 48시간 이상 길어짐에 따라 점차 절연 파괴 강도가 회복되는 것은 충전제가 침투 확산되어 농도가 회복되거나, 충전제는 남아있지만 실리콘 오일의 양이 아주 적어져 절연 내력이 회복되는 것으로 보인다.

이 경우, 가교 부산물을 제거하지 않은 untreated 시편에 나타나는, 4시간 이후에 급격히 절연 파괴 강도가 높아지는 특성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 가교 부산물을 제거하지 않은 시편에서는 열처리함에 따라 자유 체적내의 휘발성 가교 부산물이 빠져나가면, 가교 부산물이 있던 그 자리는 진공 상태가 된다. 계면에 있는 실리콘 오일이 진공으로 인하여 쉽게 침투 확산되어 절연 파괴 강도를 증가시키는 것으로 보인다.

다음은, 열처리에 의해 실리콘 그리스와 실리콘 오일이 단독으로 변질될 가능성을 알아보기 위해, 유리/(실리콘 그리스 또는 실리콘 오일)/유리 구조의 시편을 만들었다. 동일한 방법으로 열처리하여 열처리 시간 - 절연 파괴 특성을 조사하여 그림 7에 나타냈다.

전체적으로 균일한 절연 파괴 강도 특성을 보여주고 있다. 실리콘 오일은 내열성이 뛰어난 물질이고, 위의 결과로 볼 때, 열처리에 의해 실리콘 오일이나 실리콘 그리스가 단독으로 변질될 가능성은

아주 적다고 본다.

지금까지 배전용 전력 케이블 직선 접속부의 XLPE/EPDM 계면에서 전기적 성질이 열처리에 의해 어떻게 변하는지 알기 위해, 휘발성이 강하여 열에 민감한 가교 부산물 유무에 따라, 그리고 계면처

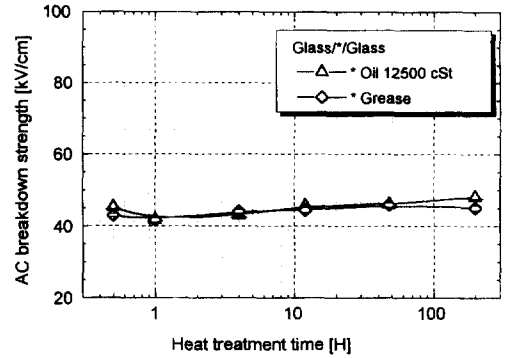


그림 7. 실리콘 오일과 실리콘 그리스 자체의 열처리 시간 - 절연 파괴 강도

Fig. 7. Heat treatment time vs breakdown strength characteristics of silicone grease and oil

리 재료인 실리콘 그리스와 실리콘 오일에 따라 절연 파괴 강도를 측정하여 그 결과를 살펴보았다.

EPDM이나 XLPE 재료는 가교 반응할 때 각각 부산물이 발생하여, 자유 체적 내에 잔류한다. 열을 받으면 휘발성의 가교 부산물이 활발하게 활동하여 전기적인 성질에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 극성을 가지고 있는 가교 부산물이 소량 계면에 존재할 때는, 침 전극 주위에 높은 전계에 의해 형성된 공간 전하가 집중된 전계를 완화시키는 방향으로 작용하는 것으로 보인다. 그러나, 가열 후 냉각시는, 그림 3, 4, 6의 열처리 초기에 보는바와 같이, 극성의 가교 부산물이 응집되어 기포를 형성하고, 절연 내력에 치명적인 손상을 주는 것으로 보인다. 이러한 현상은 실제의 전력 케이블이 운전될 때, 가열과 냉각을 반복하게 되어 이와 같은 기포를 형성할 것이므로, 케이블 시설 초기의 절연에 나쁜 영향을 줄 것으로 보인다.

동일조건에서 EPDM/XLPE 계면이 열을 받을 경우, 실리콘 그리스가 실리콘 오일보다 더 불안정하게 나타났다. 그림 6의 계면을 실리콘 그리스로 처리한 degassed 시편의 절연 특성이 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 이것은 실리콘 그리스중의 오일 성분과 충전제 성분이 열을 받았을 때, XLPE와

EPDM 내로 침투 확산하는 능력에 차이가 있어 충전제 농도 변화가 발생하는 것이 한 가지 원인으로 보인다.

D. Fournier 등이¹⁰⁾ 실제 전력 케이블 접속 부위를 절단하여 신품과 경년품으로 구분하여 XLPE/EPDM 계면 절연 파괴 특성을 조사하여 발표한 것과 비교해 볼 수 있다. 사용함에 따라 케이블 자체의 발열에 의한 가열 효과가 있으므로 이 연구의 열처리 효과와 비교해 볼 수 있다. 경년 열화된 시편의 절연 파괴 강도가 신품에 비해 절반 정도로 낮게 나타났고, 더 분산되어 나타났다. 이렇게 나타난 이유를 D. Fournier의 연구에서는 실리콘 그리스의 성능 저하와 계면 압력 변화로 보았다. 이 연구에서도 열처리 하지 않은 시편의 절연 파괴 강도에 비해 열처리 시간 경과에 따라 낮아져 12시간 부근에서는 절반 이하가 되었고, 절연 파괴 강도가 분산되어 나타났다. 그러나, 이 연구에서는 계면 압력을 일정하게 유지했는데도 열처리 시간 경과에 따라 절연 파괴 강도가 열처리하지 않은 것에 비해 현저히 낮아졌다. 이로 보아, 파괴 강도가 낮아지는 이유가 계면 압력 변화는 아닌 것으로 판단된다. 또한, 그림 7의 결과를 보듯이 실리콘 그리스나 실리콘 오일이 단독으로 열처리에 의해 화학적으로 변질되었을 가능성은 없는 것으로 보인다.

4. 결 론

전력 케이블 직선 접속부의 XLPE/EPDM 계면이 열에 의해 전기적 성질이 어떻게 변하는지 알기 위해, 가교 부산물 유무와 계면 처리제의 종류에 따라 전도 전류와 절연 파괴 강도를 측정 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, XLPE와 EPDM 수지를 가교할 때 발생하는 가교 부산물은 열을 받으면 전기적 성질에 많은 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

둘째, XLPE/EPDM 계면구조의 절연체는 열을 받을 때 4시간 전후에서 절연 성능이 나빠지는 것으로 나타났다.

셋째, 실제 현장에서 XLPE/EPDM 계면에 사용되고 있는 절연 그리스가 열을 받음에 따라 불안정한 특성을 나타냈다.

전력 케이블 직선 접속부의 XLPE/EPDM 계면은, 시설 초기에, 열에 의한 가교 부산물의 영향과 실리콘 그리스의 성능 저하로 절연 성능이 나빠지는 것으로 나타났다. 가교 부산물의 영향을 배제할 수 있는 방법을 찾아야 할 것이고, 현재 사용하고

있는 절연 그리스를 개선해야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사 전력연구원, 배전용 CN-CV 케이블과 접속재의 열화사고 방지대책에 관한 연구(Ⅲ)(최종보고서), pp. 10-78, 1992.
2. Bamji, S. S., Bulinski, A. T. and Densley, R. J., "Degradation of Polymeric Insulation Due to Photoemission Caused by High Electric Fields", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, pp. 91-98, 1989.
2. Bamji, S. S., Bulinski, A. T. and Densley, R. J., "Degradation Mechanism at XLPE/Semicon Interface Subjected to High Electrical Stress", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 2, pp. 278-283, 1991.
4. 박성국, 남진호, 서광석, 이철호, "EPDM/XLPE Laminate의 전하형성 특성", 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, pp. 287-290, 1996.
5. 한재홍, 김상준, 권오형, 강희태, 서광석, "반도전층내 불순물이 전력케이블의 신뢰도에 미치는 영향", 전기학회지, 46권, 1호, pp. 19-27, 3호, pp. 7-19, 1997.
6. Fournier, D. and Lamarre, L., "Interfacial breakdown Phenomena between EPDM surfaces", Sixth International Conf. on Electric Materials, Measurements and Applications, pp. 330-333, 1992.
7. 한상욱, 김진수 외, 전력케이블용 절연재료의 계면특성 향상기술(중간보고서), 기초전력공학공동연구소, pp. 109-113, 1997.
8. Steennis, E. F. and Kreuger, F. H., "Water treeing in polyethylene cables", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol. 25, pp. 989-992, 1990.
9. Shaw, M. T. and Shaw, S. H., "Water treeing in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol. 19, pp. 419-452, 1993.
10. Fournier, D., Dang, C. and Paquin, L., "Interfacial Breakdown in Cable Joints", Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA, USA, pp. 450-452, 1994.
11. 이창중, 熱處理에 의한 電力케이블 接續界面의 絶緣特性 變化, 한국교원대학교 대학원 기술교육과 석사학위논문, 1998.2