

## 열처리 조건에 따른 XLPE / EPDM 계면의 전기적 특성

### Electrical Characteristics of the Interfacial Layer between XLPE/EPDM Laminates on the Heat Treatment

최원창<sup>0</sup>, 이제정<sup>0</sup>, 김석기<sup>0</sup>, 조대식<sup>0</sup>, 박강식<sup>1</sup>, 한상옥<sup>0</sup>  
충남대학교<sup>0</sup>, 충남전문대<sup>1</sup>

W.C.Choi<sup>0</sup>, C.J.Lee<sup>0</sup>, S.K.Kim<sup>0</sup>, D.S.Jo<sup>0</sup>, K.S.Park<sup>1</sup>, S.O.Han<sup>0</sup>  
ChungNam National Univ.<sup>0</sup>, ChungNam Jnr. Coll.<sup>1</sup>

#### Abstract

The main fault in this interface is that power cable insulating materials are mainly composed of a double layered structure, XLPE/EPDM laminates in cable joint. In this paper, we instituted the interface of XLPE/EPDM laminates and then investigated the breakdown and conduction characteristics as a function of heat treatment time.

The results showed that conduction current was influenced by volatile crosslinking by-products which remained inside the insulating material during the production of XLPE and EPDM, especially during heat treatment process. And conduction current of XLPE/Oil 12500cSt/EPDM was more stable than XLPE/Grease/EPDM from the long heat treatment time. AC breakdown strength of silicone oil itself from the heat treatment was changed during the 4~12 hour heat treatment time.

#### 1. 서 론

최근 전력기기의 대용량화, 전력계통의 고전압화가 추진됨에 따라 기존의 절연재료 보다 우수한 절연재료의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 케이블 절연재료의 경우 절연재료의 성능개선과 전력계통의 신뢰성을 확보하기 위해 단일구조보다는 대부분이 복합구조 형태로 구성되어 있다. 그러나 케이블의 경우 이와같은 복합절연구조의 경계면에 사고가 집중되기 때문에 이에 대한 특성해석 및 원인분석이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 케이블 접속부분의 상태를 분석하기 위하여 XLPE/EPDM 계면을 설정하고 열처리 시간에 따른 전기전도와 절연유의 절연과괴강도를 측정하여 절연특성에 미치는 영향에 대하여 평가하였다.

#### 2. 시편의 제작 및 실험방법

##### 2.1 시편의 제작

실험에 사용된 절연재료의 원 시료는 한양화학의 가교폴리에틸렌으로서 밀도 0.92 [g/cm<sup>3</sup>]의 저

밀도 폴리에틸렌에 가교제인 DCP(dicyclopentadiene)가 3 % 첨가된 펠렛을 이용하였다. 이중구조의 라미네이트 시편을 제작하기 위하여 본 실험에서는 펠렛상의 폴리에틸렌으로부터 두께 0.5 mm의 쉬트로 제작하여 실험에 이용하였다. 이 시료는 DCP가 첨가되어 있어 120 °C이하에서 성형하였을 경우는 가교제가 분해되지않아 저밀도 폴리에틸렌(LDPE) 상태이나, 150 °C이상에서 성형하게 되면 열에 의해 가교제가 분해되어 가교폴리에틸렌이 된다.

시료의 가공방법은 폴리에틸렌(XLPE)을 Hot Press를 이용하여 120 °C에서 15분간 용융시킨 후 기포제거를 위해 6~7회의 가압과정을 거친 후 약 22 kg/cm<sup>2</sup>로 가압하여 180 °C에서 20분간 가교시킨 다음 냉각시켰다.

또한 두번째 재료인 EPDM은 Compound상태의 재료를 XLPE와 마찬가지로 과정을 거쳐 175 °C에서 10분간 가교시켜 동형의 쉬트상으로 제작하였다.

제작한 시료를 20×30×0.5 [mm<sup>3</sup>] 규격으로 절단하여 사용하였다.

전기전도 시험용 시편의 제작에 사용한 XLPE와 EPDM 쉬트는 라미네이트시키기 전에 두 그룹으로 나누어 한 그룹은 시료를 세척하여 50 °C의 일정한 온도로 유지된 진공 챔버속에서 1시간 동안 건조시켰으며, 다른 한 그룹은 세척 후 80 °C의 일정한 온도로 유지된 진공 오븐속에서 48시간 동안 건조시킨 다음 XLPE/EPDM의 이중계면을 갖는 복합구조의 절연파괴 시험용 시편의 제작에 이용하였다.

## 2.2 실험방법

열처리된 XLPE/EPDM의 이중구조의 계면에서의 전기전도시험을 위하여 기중에 제작한 시편을 놓고 완전차폐를 시킨 후 계면에 소정의 압력을 가한 후 실험하였다.

파괴전압 및 파괴시의 과도전류 등은 기록계(multi-pen recorder)를 이용하여 측정하였다. 전기전도시험용 전원은 출력전압 0~50 kV의 직류전원장치를 이용하였다. 또한 전기전도의 관측을 위하여 Electrometer를 이용하였다.

측정조건중 계면압력은 계면과 수직방향으로  $10\text{N}/\text{cm}^2$ (케이블 접속재의 실제압력)의 압력을 가하였으며, 전기전도 전압은 로그 스케일로 하여 전압을 상승하여 측정하였고, 절연유의 절연파괴 시험은 측정상의 오차를 고려하여 동일조건인 절연유를 구대 구전극을 사용하여 5회 측정후 평균치로부터 파괴전계를 구하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시료의 열처리 시간에 따른 전기전도특성

일반적으로 유전체에 직류 전압을 가했을 때의 전류는 시간 함수이며, 흡수 전류는 유전체내의 분극 작용에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서, 정확한 전도 전류를 측정하기 위해서는 분극에 의한 흡수 전류가 모두 제거 될 때까지 충분한 시간을 기다려야 한다.

그림 1은 전계 인가에 따른 시간 - 전류 특성을 나타낸 것이다. 순시 충전 전류는 짧은 시간 동안 급격히 증가했다가 감소하여 사라졌으며, 흡수 전류는 전형적인 고체 유전체의 전도 전류 특성을 보였다.

그림 1과 같이 모든 경우에 전계 인가 20분 후에는 안정해져 변화가 없었다. 이에 따라 본 연구의 실험에서는 전계를 인가 후 20분이 지난 시점에서 측정값을 취하였다.

가교 부산물이 XLPE/EPDM 계면의 전기적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 가교 부산물을 제거한 degassed 시편을 이용하여 전도 전류를 측정, 그 전압 및 열처리 시간에 따른 특성을 구하였다.

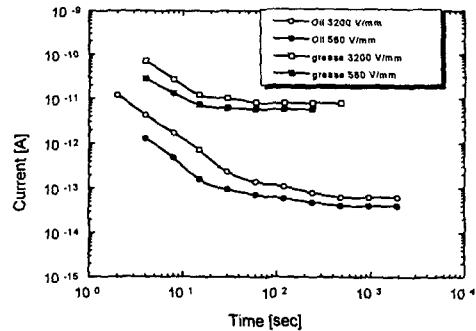


Fig. 1 Conduction current as a function of time t [sec]

그림 2는 열처리 시간과 계면 처리제에 따른 XLPE/EPDM 계면에서의 인가전계 - 전도 전류 특성을 나타낸 것이다. 그림 위쪽 1시간 열처리한 시편의 경우를 살펴보면, 약 1100 V/mm 이하의 저전계 영역에서 실리콘 오일 12500cSt로 처리한 경우 기울기가 0.95, 실리콘 오일로 처리한 경우의 기울기가 0.93으로 나타났다. 그림 아래쪽의 200시간 열처리한 경우는 약 3000 V/mm 이하의 저전계 영역에서 기울기가 각각 1.05, 1.05로 나타났다. 4가지 경우 모두 기울기가 1에 근사한 값을 나타내는데 이는 저전계 영역에서의 전도 전류 특성이 저항성(ohmic)임을 나타낸다.

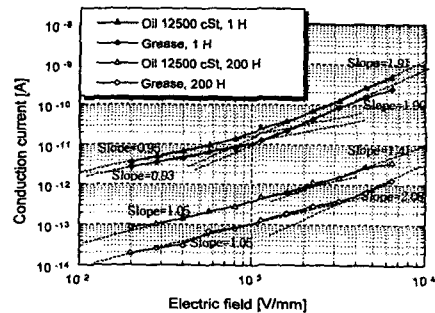


Fig. 2 Electric field-conduction current characteristics of XLPE/EPDM interface with interfacial materials

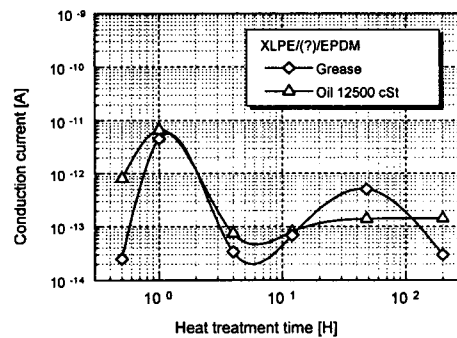
1시간 열처리한 경우 약 1100 V/mm 이상의 고전계 영역에서 실리콘 오일 12500 cSt로 처리한 경우는 기율이 1.91, 실리콘 그리스로 처리한 경우는 기율이 1.90으로 나타났다. 200시간 열처리한 경우는 고전계 영역의 기율이 실리콘 오일 12500 cSt로 처리한 경우는 1.41, 실리콘 그리스로 처리한 경우는 2.08로 나타났다. 실리콘 오일 12500 cSt로 처리한 경우를 제외하고는 모두 2에 근사한 값이었다.

이러한 특성은 기존에 학계에 보고된 고체 유전체의 전형적인 인가 전계-전도 전류 특성이다. 액체 유전체의 전도 전류는 전계가 증가함에 따라 내부 캐리어(carrier)의 제한으로 인하여 포화된다. 계면 사이의 실리콘 오일이나 실리콘 그리스 층이 아주 얇은 막 상태이기 때문에, 액체에서의 이온성 캐리어 이동 효과보다는 호핑 사이트(hopping sites)의 영향을 더 많이 받기 때문으로 볼 수 있다. XLPE/EPDM 계면에 실리콘 오일이나 실리콘 그리스로 처리한 구조에서, 비록 계면의 전극 사이에 반 유동성의 오일이나 그리스가 들어 있다 하더라도, 고체 유전체의 특성을 갖고 있음을 알 수 있게 했다.

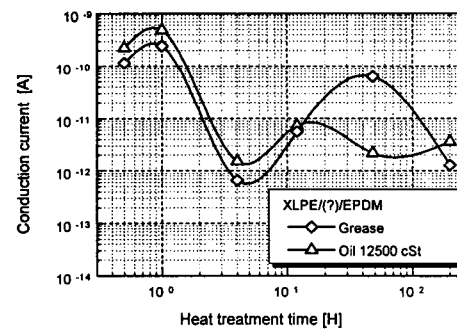
열처리 시간이 1시간인 경우 저전계 영역에서 고전계 영역으로 이행하는 전계가 약 1100 V/mm로, 열처리 시간이 200시간인 경우는 약 3000 V/mm로 나타났다. 일반적인 고분자 재료의 고전계 영역으로의 이행 전계가 일반적으로  $1 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$  V/mm 정도로 알려진 것에 비해 낮은 이행 전계를 나타내고 있다. 이렇게 나타난 것은 전극이 18  $\mu$ m 두께의 얇은 판 상태이므로, 전극 끝단에서 전계가 심하게 왜곡되어, 전극과 유전체 사이의 계면에 국부적으로 높은 전계가 형성되기 때문으로 보인다.

그림 3(a)는 400 V/mm의 저전계를 인가했을 때의 계면 처리제에 따른 XLPE/EPDM 계면의 열처리 시간-전도 전류 특성을 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 6400 V/mm의 고전계를 인가했을 때의 특성을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 계면에 실리콘 오일 12500 cSt로 처리한 경우는 열처리 초기에 전도 전류가 큰 폭으로 변하다가 시간이 지남에 따라 점차 안정하게 감소되는 특성을 보였다. 이에 반해 실리콘 그리스로 처리한 시편은 열처리 시간이 지남에 따라 점차 안정되기는 하지만, 오일로 처리한 것에 비해 불안정한 모습으로 전류가 증가와 감소를 반복했다. 그리스로 처리한 시편이 불

안정한 상태를 보이는 것은 열처리 시간에 따른 절연 파괴 특성에서 그리스로 처리하여 열처리한 경우 낮은 절연 파괴 값을 나타내는 것과 일치한다. 또한, 열처리한 시간이 4~12시간 범위에서 아주 낮은 전도 전류 값을 가지고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것 또한 열처리 시간에 따른 절연 파괴 특성과 비교할 때 주목할 필요가 있다.



(a) 저전계 영역(400 V/mm)



(b) 고전계 영역 (6400 V/mm)

Fig. 3 Heat treatment time - conduction current characteristics of XLPE/EPDM interface with interfacial materials

### 3. 2 열처리 시간에 따른 절연유 자체의 절연 파괴 특성

그림 4는 열처리 시간에 따른 절연유 자체의 절연 파괴 특성을 보인 것이다. 열처리 시간에 의해서 절연유 자체도 절연 성능에 상당한 영향을 받는다. 절연유의 점도는 각각 Silicone Oil 100, 1000, 12500 cSt와 Silicone Grease로 설정하고 구전극의 Gap을 0.5 mm로 하여 절연 파괴 실험을 하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이, 실리콘 오일의 점도에 따라 상당한 차이를 보이고 있었다. 점도가 낮은 100, 1000 cSt Silicone Oil의 경우 열

처리 시간에 따라 상당히 낮은 절연파괴 강도를 나타냈다. 반면에 점도가 높은 12500 cSt와 Silicone Grease는 상당히 높은 절연파괴 강도를 나타냈다. 즉 점도가 높을수록 열처리 시간에 따라 상당히 높은 절연파괴 강도를 갖는다는 것이다.

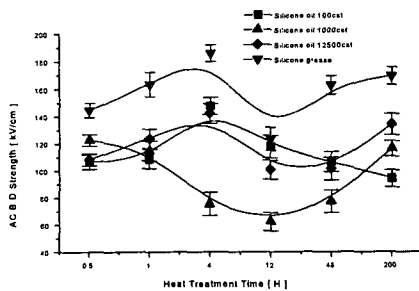


Fig. 4 AC B.D. Strength of silicone oil itself from the heat treatment time

그리고 열처리 시간 12시간을 기점으로해서 모든 Silicone Oil들이 파괴강도가 낮아지고 있다는 점이다. 이와 같이 열처리 시간 12시간에서 파괴강도가 낮아지는 이유는 절연유 중의 수분, 가스 등이 용해도가 80 °C의 열처리 온도에서 변화하는 것 및 유중에 이 온도에서 용해되는 협잡물이 있는 경우 이들이 용해된다는 것 등으로 인하여 절연파괴강도가 낮아진다.

이러한 전지에서 볼 때 실리콘 오일의 점도가 상당히 절연성능에 영향을 미치고 있다는 점이다. 즉 절연성능이 좋은 실리콘 오일을 개량해 계량해 계면에 도포한다면 케이블의 사고를 방지하는데 큰 역할을 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고압용 전력케이블의 접속시 가교 폴리에틸렌(XLPE)/절연고무(EPDM) 계면에서 계면의 처리시간에 따른 전도도와 절연유 자체의 절연파괴 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. EPDM이나 XLPE는 제작시 절연재료 내부에 잔류하는 각종 휘발성의 가교부산물들이 영향을 끼치게 되며 특히 열이 가해짐에 따라 전기전도에 변화를 주는 것을 알 수 있었다. 실제 전력 케이블의 접속 계면에 사용하고 있는 절연 그리스가 불안정한 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 장

시간의 열처리에서 순수한 실리콘 오일에 비해 전기전도는 불안정한 변화를 보였다. 이는 장시간의 열을 받았을 때 절연 그리스의 성능이 저하되기 때문이다.

2. 열처리 시간에 따른 절연유 자체의 절연파괴 특성에서 저점도의 실리콘유 ( 100, 1000 cSt )는 열처리 시간에 따라 낮은 절연파괴 강도를 나타낸 반면 12500 cSt의 실리콘 오일과 실리콘 그리스는 높은 절연파괴 강도를 나타내었다. 그리고 열처리 시간 4~12시간에서 절연파괴 특성이 변화하였다.

#### 5. 참고문헌

1. "Development of technology for improving interfacial properties of insulating material for power cable" Annual report of Electrical Engineering & Science Research Institute (1996. 9.~1997. 8)
2. Steennis, E. F. and Kreuger, F. H., "Water treeing in polyethylene cables", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol. 25, pp. 989-992, 1990.
3. S.S. Bamji, A.T. Balinski, R.T. Densley, M.matsuki, "Degradation Mechanism at XLPE/Semicon Interface Subjected to High Electrical Stress", IEEE. Transactions on Elect. Ins., Vol. 26, No. 2, 1991, pp. 278~283
4. Shaw, M. T. and Shaw, S. H., "Water treeing in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol. 19, pp. 419-452, 1993.
5. S.S. Bamji, A.T. Balinski, "Luminescence in Crosslinked Polyethylene of High Voltage Cables", 5th ICPADM May 25-30, 1997, Vol. 1, pp. 11~15
6. W.C.Choi, K.S.Park, S.O.Han, "Breakdown Characteristics of XLPE/EPDM on the treatment condition of the Interfacial layer", 5th ICPADM May 25-30, 1997, Vol. 1, pp. 345~348

"본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다."