

### XLPE /EPDM laminate 의 절연파괴 특성

남진호, 서광석  
고려대학교 재료공학과

### Breakdown characteristics of EPDM/XLPE laminate

Jin Ho Nam, Kwang S. Suh  
Department of Materials Science, Korea University

**Abstract** - In order to determine what influences the interfacial breakdown between two internal dielectric surfaces, We studied the interfacial breakdown phenomena at several interfacial conditions. With the increase of interfacial pressure, at first breakdown strength in interfaces was increased, and then saturated. Breakdown strength in interface pasted with silicone oil was higher than that with silicone grease. As a function of heat treatment time in a vacuum oven, interfacial breakdown strength was increased much in XLPE/EPDM laminates pasted with silicone grease but increased a little in that with silicone oil. As an increase of curing agent in silicone oil and grease, breakdown strength in interfaces was increased and then saturated.

그림 1에 나타내었다.

계면에서 발생하는 절연파괴를 수행하기 위하여 본 연구팀에서는 계면압력을 조절할 수 있는 절연파괴 장치를 만들었다. 일반적으로 접속부에는 0.5 kg/cm<sup>2</sup>의 압력이 걸리며 1 kg/cm<sup>2</sup>은 1기압에 해당한다. 압력은 4개의 스프링을 통해 시편에 걸리게 되며 압력은 스프링의 길이 감소에 비례하므로 추를 이용하여 압력을 보정하였다. 이를 그림 2에 나타내었다. 시편에 장착된 전극의 형상은 수직 배열을 하여 침대 평판 구조를 갖도록 하였다. 계면에는 접속재에 사용되는 실리콘 그리스와 실리콘 오일을 도포한 시료와 진공 열처리한 실리콘 그리스와 실리콘 오일을 도포하여 계면조건을 달리하였다.

### 1. 서 론

일반적인 절연재료로 고분자가 널리 사용되어지고 있는데 이러한 고분자 절연재료는 절연성능을 높이기 위하여 블렌드를 하거나 충전제를 사용하기 때문에 이러한 절연재료에는 계면이 존재하게 된다. 이러한 계면에 전계 집중이 발생하면 시료내부를 통과하기보다는 상대적으로 약한 절연파괴를 갖는 계면을 따라 절연파괴를 일으킬 수 있음은 널리 알려진 사실이다. 계면은 크게 거시적 계면과 미시적 계면으로 양분할 수 있는데 이러한 계면의 존재로 전기전도도, 유전율 등의 차이로 인하여 전계의 집중이나 전하축적 등이 일어나고 케이블과 같은 이중구조의 계면에서 기공, 불순물, 미세 돌기 등의 존재로 전기적 특성에 복잡한 양상을 띠게된다. 현재 이러한 계면에서 일어나는 전기적 특성에 관해 다각적으로 연구가 진행되어지고 있다 [1, 2].

본 연구에서는 전력케이블의 접속부에 발생하는 절연층간의 계면을 설정하여 계면에서의 절연파괴 특성을 연구하였다.

### 2. 실험

본 연구에 사용된 ethylene propylene diene terpolymer (EPDM) 컴파운드는 Dupont 사의 제품으로 결정성이 없는 무정형의 고분자이며 diene은 1,4 hexadiene이 사용되었고 비유전율은 2.7이다. Cross-linked polyethylene (XLPE)은 국내 화학회사 제품으로 밀도는 0.920 g/cm<sup>3</sup>이고 비유전율은 2.3이다.

DC 절연파괴 실험에 사용된 EPDM과 XLPE는 고온 프레스를 이용하여 130 °C에서 두께 약 400 μm로 압축 성형한 후 180 °C에서 10분간 가교시켜 준비하였다.

본 연구에 사용된 전극은 두께 150 μm의 구리선을 사용하였으며 부식과정을 통해 곡률 반경 10 μm의 전극을 자체 제작하여 사용하였다. 전극의 SEM 이미지를

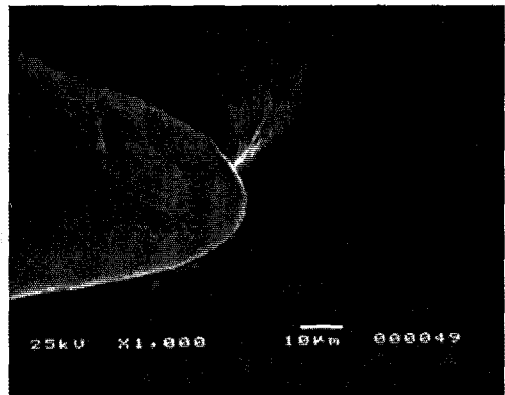


그림 1. 전극의 SEM 이미지

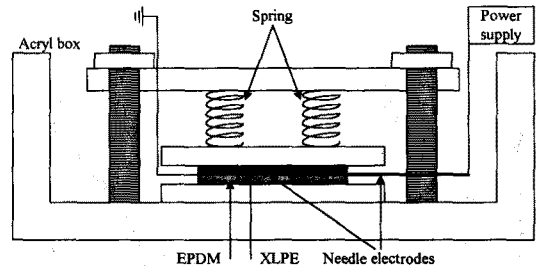


그림 2. 절연파괴용 가압장치 및 구성도

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 접속재의 계면을 실험적으로 가상 설정하여 계면에서 일어나는 절연파괴 특성을 계면의 조건에 따라서 측정하고자 하였다. 실제 접속재에서는 계면 방향으로 강한 전계의 형성을 이루게 되어 취약한 계면을 따라서 절연파괴가 일어날 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 실제로 계면에 전극을 삽입하여 계면조건에 따른 절

연파괴 특성에 대해 조사하였다.

실제 침대 평판 전극을 사용하여 모의 전체분포 결과를 조사하였는데 전계는 침의 중심과 평판까지 최단 거리로 전계가 집중되는 것으로 나타났으나 취약한 계면을 따라서 전계가 집중됨을 확인할 수 있었다.

전극 거리간 절연파괴 강도 의존성을 알아보기 위하여 12,500 cSt의 점도를 가진 실리콘 오일을 계면에 도포한 후 계면절연파괴강도를 측정하였다. 전극간 거리는 반사현미경을 이용하여 80 ~ 500  $\mu\text{m}$ 로 조절하여 실험하였고 이를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전극간거리가 250  $\mu\text{m}$  이하에서는 전극간 거리의 증가에 따라 급격한 절연파괴 강도의 저하를 나타낸 반면, 250  $\mu\text{m}$  이상의 전극간 거리에서는 수평적 분포를 나타내었다. 따라서 이후의 실험에서는 전극간 거리를 약 300  $\mu\text{m}$ 로 정하여 절연파괴 실험을 수행하였다.

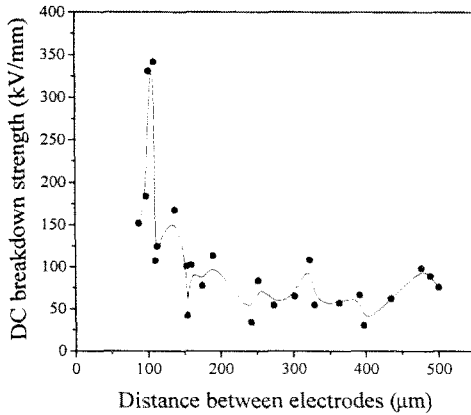


그림 3. 절연파괴 강도의 전극간 거리 의존성

그림 4는 계면에 가해지는 압력에 따른 계면절연파괴 강도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 초기의 낮은 압력에서는 압력증가에 따라 절연파괴 강도가 증가다가 일정 압력에 이르면 포화되는 경향을 나타내었다. 이는 계면에 가해지는 압력이 증가할수록 계면의 면적이 줄어들고 있다고 생각할 수 있으며 취약한 계면이 줄어들수록 절연파괴강도는 증가한다고 생각할 수 있다. 또한 일정 압력 이상이 되면 계면을 밀착하게 되고 중간층인 실리콘 오일이 이 계면을 다시 채워주므로 계면절연파괴 강도가 포화되는 현상을 나타낸 것으로 생각된다. 이는 Fournier 등의 결과와 일치하는 것으로 [3] Fournier 등은 또한 계면에 실리콘 오일이 없는 경우에는 계면 절연파괴 강도가 직선적으로 증가하는 것으로 발표하였다. 실리콘 그리스와 실리콘 오일로 계면조건을 달리한 상

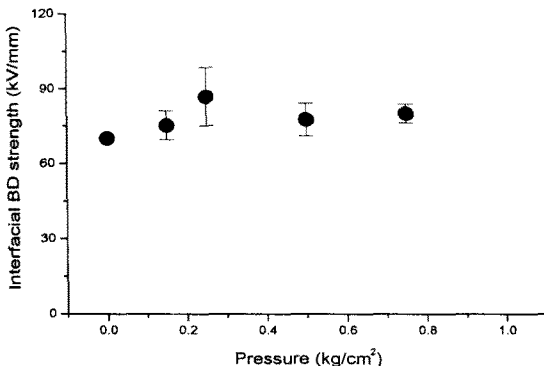


그림 4. EPDM/XLPE 계면 절연파괴 강도의 압력의존성

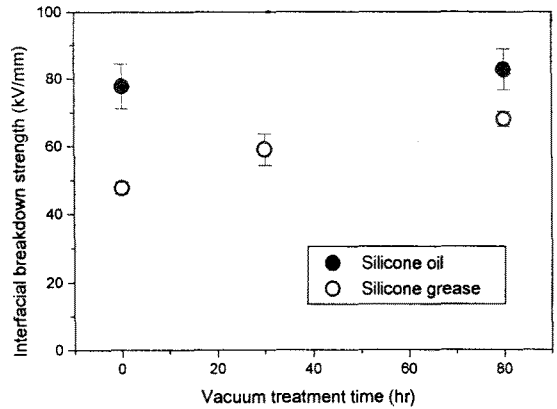


그림 5. 실리콘 그리스와 실리콘 오일에 따른 XLPE/EPDM laminates의 절연파괴강도

태에서 측정된 계면절연파괴강도를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 열처리하지 않은 실리콘 오일과 그리스를 도포했을 때 실리콘 오일을 도포한 경우가 실리콘 그리스를 도포한 경우보다 높은 절연파괴 강도를 나타내었다. 이는 실리콘 그리스에 충전제와 첨가제가 포함됨으로 인하여 계면절연파괴강도가 낮게 나타난 것으로 생각된다.

각각의 실리콘 그리스와 실리콘 오일의 진공 열처리 시간에 따른 절연파괴강도 값을 비교해보면 실리콘 오일에서는 약간 증가하지만 큰 변화는 없는 것으로 나타났으나 실리콘 그리스의 진공 열처리 시간에 따라서 더 많이 증가함을 알 수 있다. 이는 실리콘 그리스의 진공 열처리에 내부적인 화학구조의 변형에 기인한 것으로 생각할 수 있다.

실리콘 오일이나 그리스의 열처리에 따른 변화로 고려할 수 있는 내용은 일반적으로 산화에 의한 변화와 수분에 의한 영향으로 고려된다. 오일이 산소에 노출되면 산화에 의하여 carboxylic acids를 포함하는 카보닐 컴파운드를 형성한다 [4-6]. 이 carboxylic acids는 오일의 산도 (acidity)에 기여하고 오일에 있는 염기성 첨가제를 소모시키고 부식에도 역할을 하게 된다. 또한 산화는 오일의 점도를 증가시키게 된다. 그러나 본 연구에서 사용한 열처리 조건이 진공 중에서 실행되었으므로 산소 분위기에서 산화에 의한 변화는 배제하였다.

다른 원인으로 수분을 고려할 때에 실리콘 오일에 수분이 존재하면 절연파괴강도가 감소하는 것으로 알려져 있다.

그림 6은 계면결합제로 사용되며 EPDM과 XLPE에 충전제를 첨가할 때 사용되는 실란을 선택하여 각각 실리콘 오일과 실리콘 그리스에 첨가하여 첨가량에 따른 절연파괴 특성을 나타내고 있다. 실리콘 오일의 경우가 더 높은 절연파괴 강도를 나타내고 있으며 계면결합제 함량의 증가에 따라서 절연파괴 강도가 증가함을 알 수 있다. 이의 원인으로 두 가지를 생각할 수 있는데 계면결합제의 함량이 증가함에 따라서 실리콘 오일과 그리스의 점도 저하가 발생하고 이에 따라서 wetting이 잘되게 된다. 따라서 계면의 불균일성을 줄이게 되어 절연파괴강도가 증가했다고 생각할 수 있고 또 하나는 실리콘 오일 및 그리스에 첨가된 계면결합제로 인해 EPDM과 XLPE 각각의 계면에 wetting의 증가로 인해 계면의 취약성을 낮추게 되어 절연파괴강도가 증가했다고 생각할 수 있다.

그림 7은 현재 cable cure 재료 (CCM)로 사용되는 실란계 화합물의 실리콘 오일과 그리스에 첨가하는 양에 따른 절연파괴강도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 CCM 첨가량이 증가할수록 절연파괴 강도가 증가

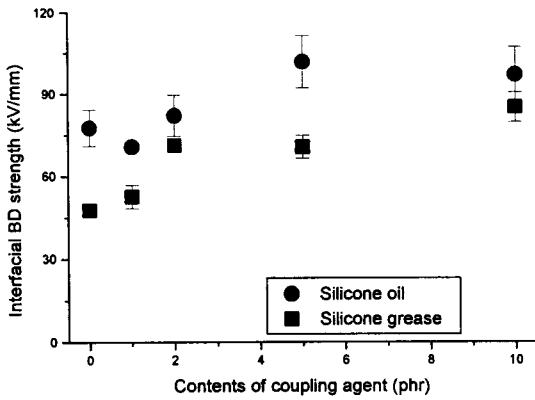


그림 6. 계면결합제에 따른 XLPE/EPDM laminate 절연파괴강도

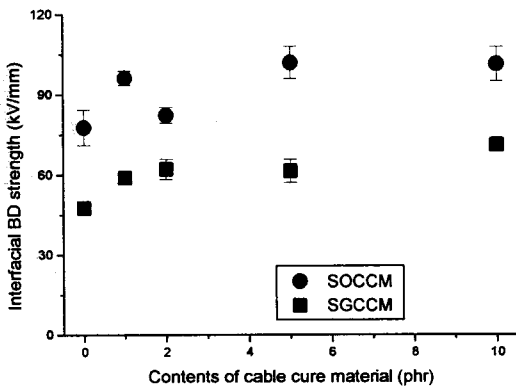


그림 7. Cable cure 재료에 따른 계면절연파괴강도

하는 경향을 나타내었다. 그러나 실리콘 오일에서는 CCM의 첨가량에 따라서 절연파괴강도가 증가하는 양상이 계면결합제의 함량에 따른 것과 비슷한 결과를 보이지만 실리콘 그리스에서는 계면결합제의 첨가에 의한 효과보다는 낮다. 첨가량에 따른 증가의 원인은 CCM도 계면결합제와 비슷한 실란계 화합물로서 앞서 서술한 계면결합제 첨가량에 따른 결과와 유사하다고 생각된다. CCM은 수분 유입의 시간에 따라서 또한 온도의 영향에 따라 경화가 이루어진다. 본 실험에서는 경화가 이루어질 수 없는 조건에서 CCM의 영향을 평가하였다. 이에 대해서는 추후 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

1. XLPE/EPDM laminates에 가한 압력에 따라서 증가후 포화되는 경향을 나타내었으며 이는 압력에 의해 계면이 밀착하게 되었으며 중간의 실리콘 오일이 계면의 불균일함을 감소시킨 결과로 생각된다.

2. XLPE/EPDM laminates에서 실리콘 오일을 계면에 도포한 경우가 실리콘 그리스를 바른 경우보다 실리콘 그리스에 함유된 첨가제의 영향으로 높은 절연파괴강도를 나타내었다.

3. 실리콘 오일과 실리콘 그리스의 진공 열처리시간이 증가할수록 실리콘 오일을 바른 laminates는 약간 증가하는 것으로 나타났으나 실리콘 그리스를 도포한 XLPE /EPDM laminates에서는 증가폭이 더 컸다.

4. 실리콘 오일과 그리스에 첨가한 계면결합제와 cable cure 재료의 양에 따라서 절연파괴강도는 증가하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] K. S. Suh et al., IEEE Trans. Dielectrics EI, Vol. 3, 201, 1996.
- [2] T. Ditchi et al., IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, 403, 1989.
- [3] D. Fournier et al., Proc. ISEI, Pittsburgh, PA, 450, 1994
- [4] R. Ross et al., IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, 405, 1987.
- [5] A. T. Bulinski et al., IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 5, 558, 1998.
- [6] F. Delor et al., Polym. Degrad. Stab., Vol. 62, 395, 1998.