

XLPE/EPDM laminate의 첨가제에 따른 전하분포 특성 Interfacial Breakdown Characteristics in XLPE/EPDM Laminate as a function of Additives

남진호*, 서광석
(Jin Ho Nam*, Kwang S. Suh)

Abstract

In order to determine what influences the interfacial charge in EPDM/XLPE laminates, We used PEA (pulsed electroacoustic) method. Interfacial properties such as space charge accumulation and breakdown strength in crosslinked polyethylene (XLPE)/ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) laminates were investigated. Interfacial charge develops when the EPDM is laminated with XLPE. It showed the positive polarity same as the simulation in case on intercase of EPDM/XLPE. In case of coupling agent added silicone oil, as increasing the content of coupling agent, the interfacial charge decreased. Details of the results are given and their origins discussed.

Key Words(중요용어) : EPDM, XLPE, Laminates, Interface, Breakdown

1. 서론

일반적으로 절연체로 사용되어지는 고분자 절연체는 세라믹으로 만든 절연체보다 우수한 성능을 나타내고 있으며 또한 여러 가지 장점을 가지고 있다. 이러한 고분자 절연체는 절연성능을 높이기 위하여 블렌드를 하거나 충전제를 사용하며 기타 연결부위를 통해 다른 절연체와도 접촉하게 된다. 이러한 절연재료에는 블렌드나 충전제의 사용에 의한 미세적 계면이 존재하게 되고 다른 절연체와의 접촉으로 인한 거시적 계면이 존재하게 된다. 이러한 계면에 전기장의 집중이 발생하면 상대적으로 약한 절연강도를 갖는 계면을 따라 절연파괴를 일으킬 수 있음은 널리 알려진 사실이며 실제로 네덜란드에서 1993년 150kV 급의 케이블 종단 접속부에서 절연파괴가 발생하였다. 이러한 계면의 존재로 전기전도도, 유전율 등의 차이로 인하여 전기장의 집중이나 전하축적 등이 일어나고 케이블과 같은 이중구조의 계면에서 기공, 불순물, 미세 돌기 등의 존재로 전기적 특성에

복잡한 양상을 띠게 된다. 현재 이러한 계면에서 일어나는 전기적 특성에 관해 다각적으로 연구가 진행되어지고 있다[1-4].

실제의 접속부위에서는 계면에 전극의 직접적인 접촉은 없으며 절연체 자체의 절연강도는 계면보다 높게 나타난다. 따라서 계면 방향으로 낮은 전기장이 걸리도록 접속부위를 설계하게 된다. 그러나 실제의 사고에서는 계면을 따라 트리가 발생하거나 파괴가 일어나는 것을 알 수 있다.

이러한 계면의 전기적 특성을 알아보기 위한 방법으로 공간전하분포 특성을 조사하면 전압을 인가하였을 때 발생하는 전하분포 특성과 이에 따른 전기장의 변화를 관찰할 수 있다. 이에 본 연구에서는 서로 다른 두 개의 절연체를 적층하여 계면에서 발생하는 전하분포 특성을 조사하였다.

2. 본론

2.1 계면전하

유전체라 부르는 많은 전기절연재료에서 전자는 핵과 강하게 결합되어 있다. 이 전자들은 움직이기 어려우나 전기장을 걸어주면 -극성을 띠는 전자들의 중심이 + 극성을 띠는 핵의 중심에서 적은 양의 변

* 고려대학교 재료공학과
(서울 성북구 안암동 5-1 고려대학교
Fax: 02-929-4408
E-mail: njh0105@korea.ac.kr)

위가 발생한다. 이를 전자분극 (electronic polarization)이라고 한다. 배향분극 (orientational polarization)은 전자를 대칭으로 공유하지 않는 극성물질에서 발생하는데 전기적으로는 중성이나 + 극성과 - 극성이 분리되어있다. 따라서 여기에 전기장을 가하면 분자에 전기장 방향으로 배열하는 토크를 발생시킨다. 분자에서 이온들도 약간의 변위를 일으켜서 이온분극 (ionic polarization)을 발생시킨다. 이러한 경우들에 있어서 약간의 분리된 전하는 전기 쌍극자 (electric dipoles)를 형성하는데 유전체는 이러한 쌍극자들의 분포를 가진다. 이러한 재료가 전기적으로는 중성을 나타내지만 국부적으로는 전기적 불균형을 이루어 전하를 나타낼 수 있다. 이러한 국부적으로 분극된 전하는 다른 자유전하에 추가하여 전기장의 원인이 될 수 있다.

직렬로 연결된 두 개의 다른 절연체에 단계적으로 전압을 가하는 경우 저항성질과 커패시터 성질로 사이의 차이를 관찰하여 설명해보자. 계면에 전하를 축적시키는 시간이 소요되기 때문에 계면전하는 $t=0$ (초기조건)에서는 즉각적으로 변하지 않아서 초기조건에서는 계면전하는 0이다. 표면전하밀도가 0이기 때문에 변위 전기장 (displacement field)은 계면에 수직방향으로 연속적이다. 즉 초기조건 ($t=0$)에서는 서로 다른 두 물질에서 전기전도도에 관계없이 변위 전기장은 같다.

$$\text{즉 } D_x = \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \quad (1)$$

전압의 조건은

$$\int_0^{a+b} E_x dx = E_1 a + E_2 b = V \quad (2)$$

따라서 Displacement field는

$$D_x(t=0+) = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 V}{\epsilon_2 a + \epsilon_1 b} \quad (3)$$

Laminate에서 전체 전류는 전기전도와 변위전류에 의해 결정된다.

변위전류는 변위 전기장이 0에서 (3) 까지 즉시 변하기 때문에 무한대이며 각 전극에서 표면전하를 발생시킨다.

$$\sigma_f(x=0) = -\sigma_f(x=a+b) = D_x \quad (4)$$

전압을 오랜 시간 적용시킨 후에 전기장은 거의 정상상태에 이르게 된다. 더 이상의 시간에 따른 변화는 없기 때문에 전류밀도는 유전상수에 관계없이 직렬의 저항체에서 계면에 수직방향으로 일정하다.

즉

$$J_x(t \rightarrow \infty) = \sigma_1 E_1 = \sigma_2 E_2 = \frac{\sigma_1 \sigma_2 V}{\sigma_2 a + \sigma_1 b} \quad (5)$$

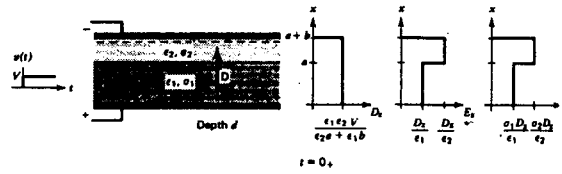


그림 1 직렬로 연결된 서로 다른 두 유전체의 계면: 초기조건

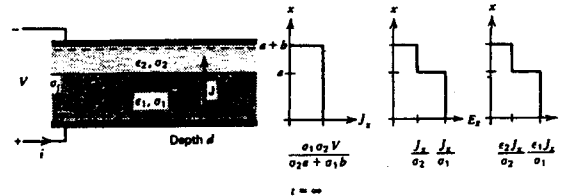


그림 2 직렬로 연결된 서로 다른 두 유전체의 계면: 정상상태

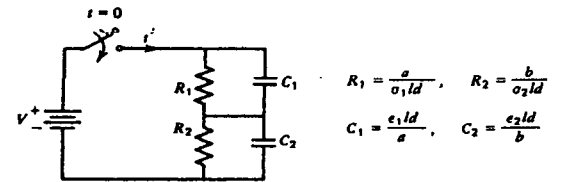


그림 3 직렬로 연결된 서로 다른 두 유전체의 계면의 등가회로

여기서 (2) 식을 이용하여 계면전하는 다음과 같다.

$$\sigma_f(x=a) = \epsilon_2 E_2 - \epsilon_1 E_1 = \frac{\epsilon_2 \sigma_1 - \epsilon_1 \sigma_2}{\sigma_2 a + \sigma_1 b} (1 - e^{-t/\tau}) V$$

$$\tau = \frac{\epsilon_1 b + \epsilon_2 a}{\sigma_1 b + \sigma_2 a}$$

즉 계면전하는 가한 전압과 두 유전체의 전기전도도 유전율에 따라서 전하가 축적됨을 알 수 있다.

여기서 보여주는 것은 초기에는 system이 커패시터 특성을 가지고 오랜 시간이 지난 후에는 완전한 저항성질을 나타낸다는 것이다.

부가적으로 교류 전압을 가하는 경우를 알아보면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_f = \epsilon_2 \bar{E}_2 - \epsilon_1 \bar{E}_1 = \frac{\epsilon_2 \sigma_1 - \epsilon_1 \sigma_2 V_0}{[b(\sigma_1 + i\omega\epsilon_1) + a(\sigma_2 + i\omega\epsilon_2)]}$$

frequency가 완화시간의 역수 값보다 커짐에 따라서

즉 $\omega \gg \frac{\sigma_1}{\epsilon_1}$, $\omega \gg \frac{\sigma_2}{\epsilon_2}$ 이 됨에 따라서 계면전하는 0으로 간다.

2.2 실험방법

본 연구에 사용된 ethylene propylene diene terpolymer (EPDM) 컴파운드는 국내사의 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^3 이고 비유전율은 2.3이다.

전하분포의 측정에 사용된 EPDM과 XLPE는 130°C 에서 두께 약 $350 \mu\text{m}$ 로 압축성형한 후 180°C 에서 10 분간 가교시켜 사용하였다. EPDM과 XLPE를 laminate 시킨 시료의 두께는 $700 \mu\text{m}$ 정도이다. XLPE/EPDM laminate는 두 쉬트 사이에 실리콘 오일 및 여러 가지 chemical을 도포한 후 접촉시켜 laminate를 만들었다. 열처리를 위한 시료는 두 시트를 포갠 후 laminate 시료에 일정 압력이 가해지도록 클램프로 고정한 후 진공오븐에 넣어 열처리하였다. 이때 열처리는 80°C 의 진공오븐에서 48 시간으로 하였고 시료 표면에서의 산화반응을 억제하기 위하여 시료 표면을 테프론 판으로 보호하였다.

전하분포는 Pulsed Electroacoustic (PEA) 방법을 사용하여 측정하였으며 이에 대한 원리는 기존에 발표된 바 있으며[5] 장치의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 시편에 전압을 10 kV/mm 에서 40 kV/mm 까지 5 kV/mm 간격으로 30분 동안 가하였다. 단계적으로 전압을 가한 후 각 단계에서 형성된 잔류전하를 폭이 10 ns 이고 크기가 2 kV 인 전기펄스를 가하여 측정하였다.

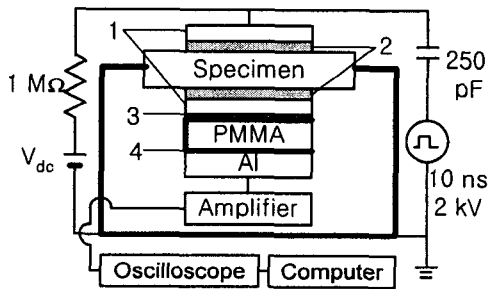


그림 4. PEA 장치의 개요도

3. 실험결과 및 고찰

3.1 계면결합제 선정

첨가제로 사용할 계면결합제의 선정을 위해 4 종류의 계면결합제를 선정하여 XLPE/EPDM laminate의 계면결합제에 따른 전하분포특성을 실험하였다. 그림 5에 나타나 있듯이 전하 측정은 XLPE 측으로 측

적되었으며 vinyl group을 가진 계면결합제의 경우에 가장 적은 계면전하를 나타내었다. 계면전하가 작다는 것은 시료 내부에서 전계의 왜곡현상이 가장 적다는 것으로 연결된다. 이에 vinyl group의 계면결합제를 선정하여 실리콘 오일과 실리콘 그리스에 넣었을 경우에 나타나는 현상에 대해 알아보겠다.

그림 5에서 계면전하가 (+)의 값을 나타낸 것은 앞절에서 수식으로 설명했듯이 EPDM과 XLPE의 유전율과 전기전도도 값에 따라서 결정되는데 유전율은 값이 2.3과 2.7로 비슷한 값을 보이나 전기전도도는 EPDM이 XLPE 보다 order의 차이로 크기 때문에 (+)의 계면전하를 나타낸다.

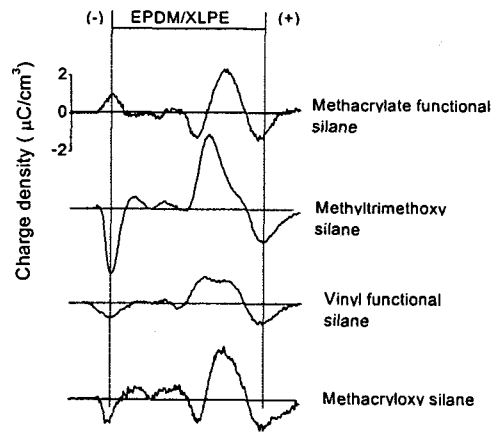


그림 5. XLPE/EPDM laminate의 계면결합제에 따른 전하분포특성

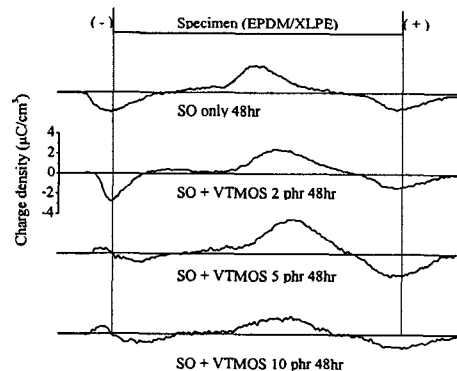


그림 6. XLPE/EPDM laminate의 48시간 열처리한 후 전하분포 특성 (silicone oil)

3.2 실리콘 오일에 계면결합제

실리콘 오일에 계면결합제 (vinyl group)를 넣고 열처리를 하였을 때 나타난 전하분포 특성이 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 열처리시간이 48시간과 400시간의 경우에 모두 계면결합제의 함량이 증가함에 따라서 계면전하가 감소함을 알 수 있고 48 시간 처리한 경우가 더 작음을 알 수 있다.

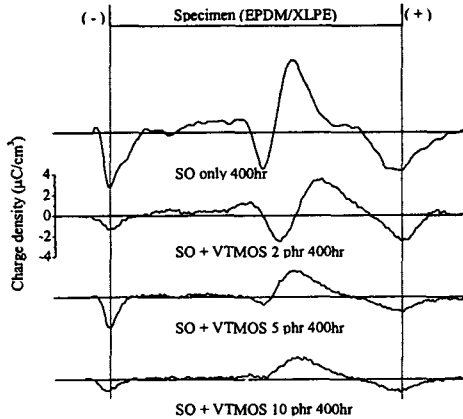


그림 7. XLPE/EPDM laminate의 400시간 열처리한 후 전하분포 특성 (silicone oil)

3.2 실리콘 그리스에 계면결합제

실리콘 그리스에 계면결합제 (vinyl group)를 넣고 열처리를 하였을 때 나타난 전하분포 특성이 그림 8과 그림 9에 나타나 있다. 열처리시간이 48시간인 경우는 계면전하의 큰 차이를 나타내지 않았고 400시간의 경우에는 5phr의 계면결합제를 넣은 경우가 가장 적고 10 phr을 넣은 경우는 오히려 증가함을 알 수 있다.

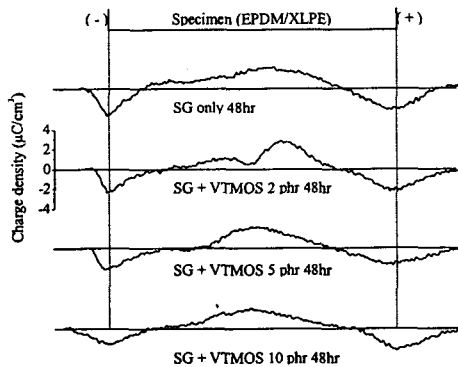


그림 8. XLPE/EPDM laminate의 48시간 열처리한 후 전하분포 특성 (silicone grease)

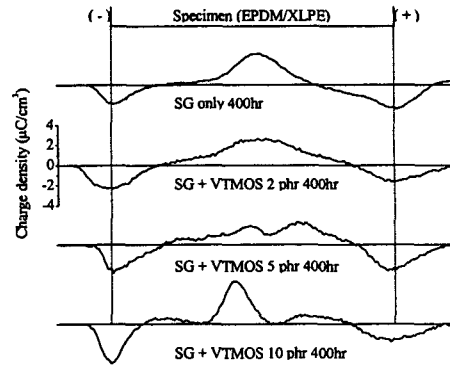


그림 9. XLPE/EPDM laminate의 400시간 열처리한 후 전하분포 특성 (silicone grease)

4. 결론

1. 계면에서 (+)의 계면전하를 나타내었는데 이는 수식에서 나타난 결과와 일치하는 것이다.
2. 계면결합제를 vinyl group을 가진 것으로 선정하여 각각 실리콘 오일에 넣고 열처리를 48시간과 400시간 처리했는데 계면결합제의 함량에 따라 계면전하가 감소했다.
3. 실리콘 그리스의 경우에는 큰 변화를 나타내지 않았으나

참고 문헌

- [1]. K. S. Suh et al., *IEEE Trans. Dielectrics EI*, Vol. 3, 201 (1996).
- [2]. K. S. Suh et al., *IEEE Trans. Dielectrics EI*, Vol. 4, 725, (1997).
- [3]. K. S. Suh et al., *IEEE Trans. DEI*, Vol. 7, pp. 216-221, (2000).
- [4]. T. Ditchi et al., *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 24, 403 (1989).
- [5]. Y. Li et al., *IEEE Trans. Dielectrics EI*, Vol. 1, 188 (1994).