

## 고분자 절연 재료에서 부분방전에 의한 열화가 공간전하 축적에 미치는 현상

신 두성, 황보 승, 강 지훈, 한 민구  
서울대학교 전기공학부

### Effects of PD-induced Degradation on the accumulation of Space Charges in the Polymer Insulation

Doo-Sung Shin, Seung Hwangbo, Ji-Hoon Kang and Min-Koo Han  
School of Electrical Engineering, Seoul National Univ.

**Abstract** - 고분자 절연재료의 결함에 의하여 발생하는 부분방전은 고분자 재료의 화학적, 전기적 열화를 가져오며 때로는 전기 트리로 성장하여 재료의 절연파괴에 이르게 하기도 한다. 따라서 부분방전 현상의 메카니즘 뿐만 아니라 측정법에 대한 많은 연구들이 있었으나 부분방전 열화가 고분자 재료에 미치는 열화과정에 대하여서는 명확한 메카니즘이 보고되지 않았다. 본 논문에서는 부분방전에 의한 고분자 절연재료 내의 공간전하 축적 현상에 대하여 연구하였다. 고분자 재료로는 현재 전력용 케이블에 주로 사용되고 있는 가교 폴리에틸렌(XLPE)를 사용하였으며, 1kHz의 주파수로 6kV, 8kV, 10kV 및 11kV로 수시간 부분방전을 발생시킨 후 펄스정전용력법(PEA)으로 공간전하를 측정하였다. 실험결과 부분방전에 의하여 고분자 재료 내에 이중공간전하의 주입이 확인되었으며 따라서 부분방전에 의하여 고분자 재료가 열화되며 이러한 열화에 의한 전자의 방출율의 변화와 같은 고분자 표면의 상태 변화에 의하여 부분방전의 패턴에 지배적인 영향을 미친다. 이러한 공간전하의 축적에 의하여 부분방전 현상에 미치는 영향은 추후 보고할 예정이다.

#### 1. 서 론

전력용 케이블, 변압기, 회전기와 같은 전력기기의 고분자 절연재료에서 발생하는 부분방전 현상에 대한 많은 연구가 있어왔으나 부분방전에 의한 고분자 재료의 열화 메카니즘에 대해서는 이해가 깊어지고 있지 않다.

고분자 절연재료의 전계집중 결함부에서 발생하는 부분방전은 재료에 열적, 물리적 및 화학적 손상을 가져온다. 이러한 부분방전에 의한 열화 현상에 대한 연구로서 예폭시 수지에서 부분방전이 예폭시 수지 표면의 결정을 가져오며 따라서 부분방전의 패턴이 변화하게 된다고 보고된바 있다. 특히 부분방전이 시간에 따라서 비교적 큰 펄스의 패턴에서 펄스 형태가 아닌 pseudo glow, 또는 glow

타입의 방전으로 진행함에 따라 실제로 재료에 손상을 입히는 에너지가 줄어들지 않았음에도 방전 크기의 감소로 인해서 부분방전 신호 검출자체가 어렵게 되는 점이 있다. 게다가, 이러한 부분방전 신호 크기의 절대량으로서는 절연재료의 절연성능을 평가하는 것이 적합치 못함이 최근에 여러 연구에서 보고되고 있다[1]. 따라서 본 연구에서는 이러한 부분방전이 고분자 재료에 미치는 열화 메카니즘을 분석하기 위하여 수정된 정전용력펄스법(PEA)법을 이용하여 교류 부분방전에 의하여 주입된 공간전하를 측정하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시료의 준비 및 부분방전에 의한 열화

시료는 고전압 전력케이블로 주로 사용되는 가교 폴리에틸렌(Cross-linked Polyethylene)을 사용하였다. 먼저, 1.3mm 두께의 시트에 직경 20mm의 구멍을 펀치로 뚫은 후에 펀치를 뚫지 않은 시트를 교대로 엮어서 인위적인 보이드를 형성시켰다. 실험에서는 300 $\mu$ m과 500 $\mu$ m의 두종류의 XLPE 시트를 사용하였으며, 시료의 구성도를 그림 1에 표시하였다.

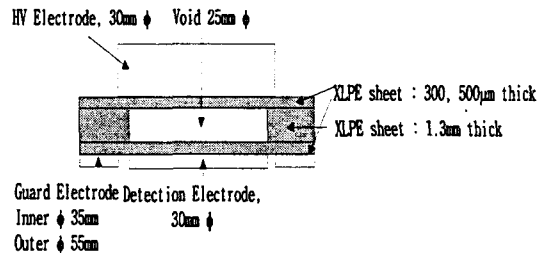


그림 1. 전극 및 시료의 구성도

교류 부분방전에 의한 공간전하 주입을 위하여 오븐에서 1kHz의 주파수로 6kV, 8kV, 10kV와

11kV에서 수시간동안 부분방전을 발생시켰다. 이후, 시료를 꺼내어 공간전하 주입을 측정하였다

## 2.2 실험

고분자 절연재료에서의 공간전하분포의 측정을 위하여 Takada 등에 의하여 제안된 펄스정전용력법(Pulse Electro-Acoustic Meathod)을 사용하여 측정하였다[2]. 아래 그림 2에 측정 전극 및 측정 장치의 개략도를 표시하였다.

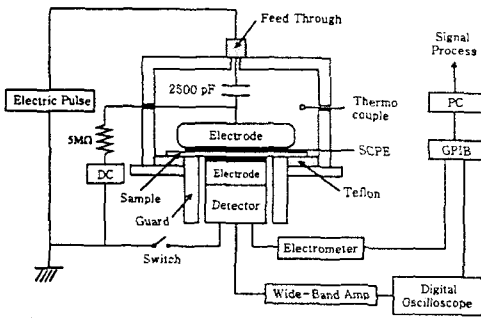


그림 2. 공간전하 측정 장치의 개략도

## 2.3 분석 및 고찰

### 2.3.1 교류 부분방전에 의한 공간전하 주입

그림 3은 500 $\mu$ m의 두께의 시료에 6kV 및 8kV 및 11kV에서 수시간 부분방전에 의하여 열화시킨 시료에서 부분방전에 의하여 주입된 공간전하 분포를 나타낸 것이다.

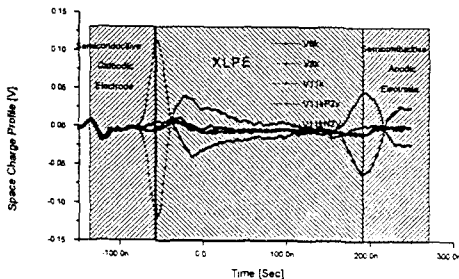


그림 3. 500 $\mu$ m 시료의 전압별 공간전하 분포

그림 3에서 보는 바와 같이, 6kV와 8kV에서는 공간전하가 형성되지 않았으며, 11kV에서 약간의 음극성의 공간전하가 측정되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 4는 10kV의 전압으로 두께 300 $\mu$ m의 시료에 15시간 부분방전을 발생시켜 열화시킨 시료에서의 공간전하 분포를 나타낸 것이다.

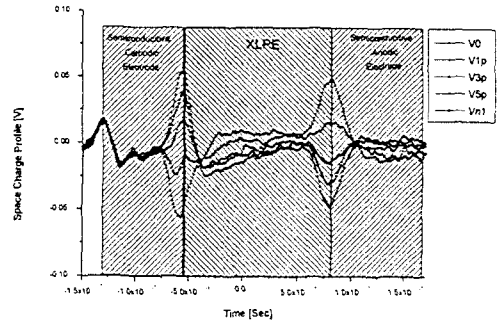


그림 4. 10kV에서 15시간 부분방전에 의하여 열화시킨 시료에서의 공간전하분포

V0는 DC를 인가하지 않고 접지상태에서 측정된 공간전하 분포이며, V1p, V3p, V5p, V1n은 각각 DC 100, 300, 500, -100V를 인가하여 측정된 공간전하 분포이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 XLPE 내에 음의 공간전하가 주입되었음을 알 수 있다. 따라서 이러한 공간전하는 전자 혹은 음이온이 고분자 벌크내로 주입된 것으로 생각된다. 이러한 음극성 전하의 주입으로 인하여 교류 고전압을 인가하는 경우 음의 반주기에서는 이러한 공간전하 분포가 전계를 상승시켜 부분방전의 발생이 쉽게 하며, 양의 반주기에서는 공간전하에 의하여 보이드 내부의 전계를 감소 시키는 역할을 하는 것으로 보인다.

### 2.3.2 부분방전에 의한 고분자 재료의 열화

보이드가 있는 시료에서 발생하는 부분방전 메카니즘은 타운젠트 메카니즘, 스트리머 메카니즘으로 설명되고 있다. 이러한 부분방전 메카니즘은 보이드의 크기 및 형상, 보이드에 인가되는 전계의 크기 및 보이드 내의 압력, 보이드 벽면의 표면상태 등 다양한 파라메타에 의존하는 복잡한 현상이다.

일반적으로 4eV이상의 에너지를 가진 hot electron은 유전체 표면에 trap을 발생시키는 것으로 보고되고 있다. 보이드가 방전하기 전에는 고분자 표면 및 벌크 지역에 trap이 일정하게 있으며 back radiation 등에 의하여 방전 프로세스가 시작 되면 고분자의 표면 트랩에서 전자가 방출된다. 따라서 새로운 트랩이 활성화되고 유전체 표면에 보다 깊은 트랩이 형성된다. Cartier 등의 연구에 따르면 부분방전에 의하여 유전체가 열화함에 따라 background radiation에 의하여 생긴 trap density가  $10^{12}$ 에서  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 으로 빠르게 증가한다.

그림 3과 그림 4에서 보는 바와 같이 일정한

전계 이하에서는 부분방전에 의한 공간전하의 주입이 확인되지 않았으며, 일정한 전계를 넘었을 때만이 공간전하의 주입되는 것으로 보인다.

일정한 전계 이하에서는 공간전하의 주입이 일어나지 않으며 일정전계 이상에서 공간전하의 주입이 일어나는 것은 먼저, 전계가 낮은 경우엔 전자 어벌런체에 의한 타운첸트방전으로 전하입자가 충분히 가속되지 못하여 고분자 표면에 이온 충돌 또는 화학반응에 필요한 에너지를 가지지 못하였기 때문으로 보이며, 또한 일단 trap site에서 트랩된 경우에도 교류 부분방전의 경우 얕은 trap에 갇힌 공간전하는 극성이 반전되면서 detrapping되기 때문에 사라져서 공간전하의 주입이 확인되지 않은 것으로 설명된다.

그러나 충분한 에너지를 가진 전자 혹은 이온 충돌로 인하여 고분자 표면의 deep trap에 갇힌 공간전하는 극성반전에도 계속 존재할 수 있다. 이러한 부분방전에 의한 고분자 재료의 열화와 공간전하의 주입에는 스트리머 타입의 부분방전이 관련이 있는 것으로 생각할 수 있다. 부분방전으로 인한 열화는 여기 분자( $O^-, O_2^-$  등)들과 고분자 표면 및 벌크지역 사이의 화학작용과 높은 에너지를 가진 이온과 광자에 의한 고분자 표면으로의 이온충돌 및 지역적인 온도상승 등에 이르는 높은 에너지의 기체 생성 등으로 발생한다.

일반적으로 부분방전에 의하여 발생하는 개개의 이온들은 고분자의 결합을 끊기에 충분한 에너지를 가지지 못하지만, 지역적인 온도상승과 함께 좁은 지역에 집중되어 반복적으로 이온충돌이 발생하면 고분자 표면의 결합을 끊을 수 있다. [3]

이러한 고분자 표면의 결합을 끊음으로 인하여, 고분자 사슬의 끝단은 이러한 전하들을 잡을 수 있는 trap site으로서 작용하며 공간전하를 형성할 수 있다. 실험결과로부터 이러한 trap density의 증가로 인하여 부분방전에 의하여 공간전하가 주입되는 것으로 보이며, 충분히 높은 전계에서 전자 또는 이온이 가속되어 충분한 에너지를 가지는 경우에만 공간전하의 주입이 일어나며, 극성반전시에도 detrapping되지 않는다.

### 3. 결 론

실험 결과로부터, 충분히 높은 전계에선 부분방전에 의하여 고분자 재료 내부에 음극성의 공간전하가 주입되었음을 확인하였으며 이러한 공간전하의 주입이 부분방전에 의한 재료의 열화메카니즘과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 공간전하의 주입은 교류 부분방전의 경우 극성의 반전에 따라 전계의 상승 또는 완화를 가져오므로 부분방전 패턴에 영향을 미쳐서 부분방전이 시간에 따라 부분방전의 모드의 전이를 가져오는 것으로 생각된다. 이러한 공간전하에 의한 부분방

전 패턴의 변화는 추후 보고할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials", IEEE Trans. El. Insul., 1995, Vol. 2, No. 4, pp. 641-652.
- [2] J. B. Bernstein, "Analysis of the electrically stimulated acoustic-wave method for observing space charge in semi-insulating films", Physical Review B: Vol. 44, pp 804-814, 1992
- [3] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, The Redwood Press, England, 1992