

공기충을 가진 저밀도 폴리에틸렌에서의 전도특성과 공간전하 효과

박 회웅, 권 윤혁, 전 승익, 황보 송*, 한 민구
서울대학교 전기공학부, *호남대학교 전기공학과

Effects of Space Charge on Conduction Mechanism in Low density Polyethylene with Air Gap

H.W. Park, Y.H. Kwon, S.I. Jeon, S. Hwangbo*, M.K. Han
School of Electrical Engineering in Seoul Nat'l Univ., *Dep. of Electrical Engineering in Hona

Abstract - In this work, simultaneous measurement of space charge and conduction current was carried out in LDPE with air gap by Pulsed-Electro-Acoustic Method. Also, effect of long time charging at con electric field on the formation of space charge and conduction was investigated. From the experimental results, we knew that the homo space charge formed near the dielectric surfaces and moving the bulk of dielectric as the electric field elevated. This was related with the deep traps of carriers and detrapping by Poole-field lowering conduction current was coincident with the Poole emission. From the long time charging experiments obtained the results that the negative space charge was moving into the dielectric bulk as the charge continued and the positive space charge accumulated at upper surface of LDPE.

1. 서 론

절연재료로 널리 쓰이고 있는 고분자 절연재료, 특히 폴리에틸렌(PE)의 전도기구에 관한 많은 실험과 이론적인 연구들이 진행되어 왔으나[1], 그 물리적 메커니즘에 대해서는 충분히 정립되어 있지 않고 있다. 그 이유는 고분자 절연재료의 화학적, 물리적 구조의 다양성뿐만 아니라 전계 인가시 표면 또는 내부에 생기는 공간전하의 영향에 기인하는 바, 최근에는 전도에 미치는 공간전하의 영향에 관한 연구가 큰 관심이 되고 있다[2]. 그러나 이러한 연구는 전극과 절연체의 직접적 접촉에 의한 연구가 대부분이었으며 공기충이 있을 때 그 전도 및 공간전하분석에 관한 연구는 없었다. 공기충이 없을 때는 전하주입전극과 절연체의 계면특성으로 인한 전계변화로 인하여 전도전류와 고분자 절연재료의 특성 및 공간전하의 상관관계의 분석에 한계가 있었다.

따라서 본 논문에서는 주입전극과 고분자 절연재료(LDPE)사이에 공기충(1mm)이 있을 때 그 전도전류, 공간전하를 측정하였으며, 그 결과 공기충이 없을 때 계면에 의한 전위장벽과 표면에서의 전하포화으로 인한キャ리어주입이 제한을 받는 공간전하 제한전류(SCLC)와 Ohmic전도성과는 달리 상부전극으로부터 방출된 전하가 절연체 표면에 축적되고 Poole-field lowering에 의한 하의 detrapping 및 thermally activated hopping에 절연체 내부로 진전되는 유전체 제한형(bulk-limited) 모델을 성립시켰다. 또한 장시간동안 충전중에 공간전하의 이동메카니즘과 그에 따른 전도전류를 동시에 측정하여 직류전압 인가중에 공간전하가 절연체 내부로 이동하는 것을 확인하였고 그에 따른 전도전류를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 전극구조

본 연구에 사용된 시료는 일반 전력용 케이블에 상용되는 순수 LDPE(약 400μm)를 사용하였고, 공기충은 두 가지 약 1mm로서 같은 LDPE시편을 사용하였다. 또한 공기충에서의 Edge효과에 의한 영향을 제거하기 위하여 Spacer중앙에 하부전극(2cm)보다 약간 큰 구멍(3cm) 편침하여 공기충을 형성시켰다. 하부전극으로서는 carbon black이 함유된 반도전성 고분자를, 상부전극으로는 Al을 각각 사용하였다. 그 전극구조를 그림2-1에 나타내었다.

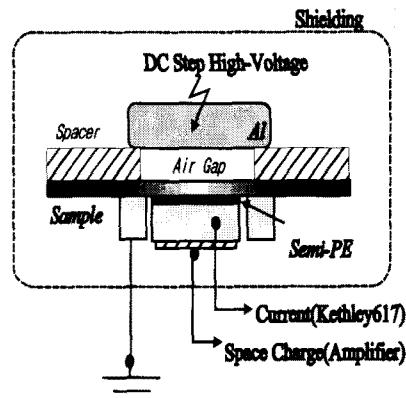


그림 2-1 전극구조의 개략도

2.2 실험방법

실험장치는 그림 2-2에 보는 바와 같이 Takada 등에 의해 제안된 펄스정전용력법(PEA)법을 개선한 측정시스템을 사용하였다. 즉, 하부전극에 가드 전극을 설치함으로써 전도전류와 공간전하분포를 동시에 연속적으로 측정할 수 있도록 하였다. 실험은 상온(25 °C) 및 DC 1~8kV 전압을 35분씩 인가하면서 전도전류 및 공간전하를 교대로 측정하였으며, 공간전하를 측정하기 위한 입력전압펄스의 크기와 폭은 각각 -1kV, 16ns이었다.

2.3 실험결과 및 분석

2.3.1 전압인가상태에서 전도전류 및 공간전하분포

그림 2-3은 DC 1~8kV의 전압을 각각 35분씩 인가후의 공간전하분포(a)와 35분동안 방전한 후의 공간전하분포(b)를 나타낸다. XLPE에서는 일정시간 충전시 상부에 이종전하가 형성되는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서의 LDPE에서는 그림에서 보듯이 동종의 전하가 유전체 내부, 즉 반대면 전극으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 또한 일정전계이상에서 전하가 내부로의 주입이 가속되는 것을 볼 수 있다. 이는 전계가 커질수록 공기충에서의 부분방전으로 인한 전하의 가속으로 유전체 표면에 쌓이는 것으로 생각된다.

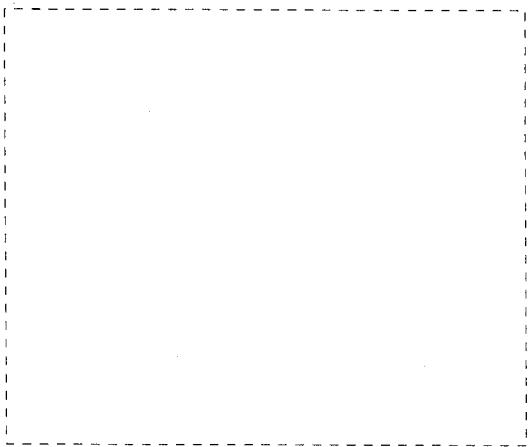


그림 2-2 공간전하-전도전류 측정 시스템 구성도

일반적으로 부분방전에 의하여 발생하는 개개의 이온들은 고분자의 결합을 끊기에는 충분한 에너지를 가지지 못하지만 국소적인 온도상승과 함께 반복적인 이온충돌로 인하여 이러한 고분자 사슬을 끊을 수 있으며 끊어진 고분자 끝단은 트랩으로서 작용할 수 있다. 이러한 트랩에 포획된 전하는 공간전하를 형성하며, 그림 하부에서 보듯이 방전시에도 빠져나오지 못하는 깊은(deep)트랩인 것으로 보이고, 전계가 높아질수록 Detrapping되어 유체 내부로 이동하는 것으로 생각된다. 이러한 이동은 비정질 영역에서 band tail states를 통한 therm activated Hopping에 의하는 것으로 알려져 있다[3]. 편 이러한 Detrapping은 트랩된 전하에 의한 Poole-fie lowering과 관련된 것으로 보인다.

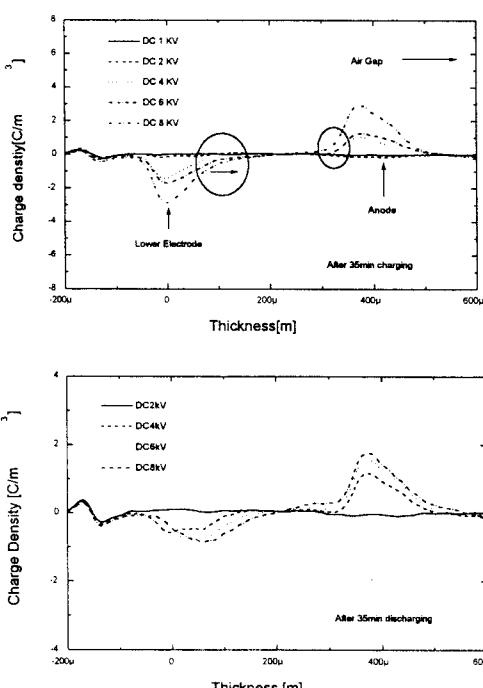


그림 2-3 (+)DC과전에 의한 공간전하분포
(상부:충전후, 하부:방전후)

그림 2-4에서는 위에서 언급한 공간전하 효과를 분석하기 위하여 전류특성을 보였다. 유전체(bulk)제한형 전류 메카니즘인 Poole-field emission에 의한 전류식은 다음과 같으며 \sqrt{E} 에 비례함을 알 수 있다.

$$J = A T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_f - \beta_{PF} \sqrt{E}}{kT}\right)$$

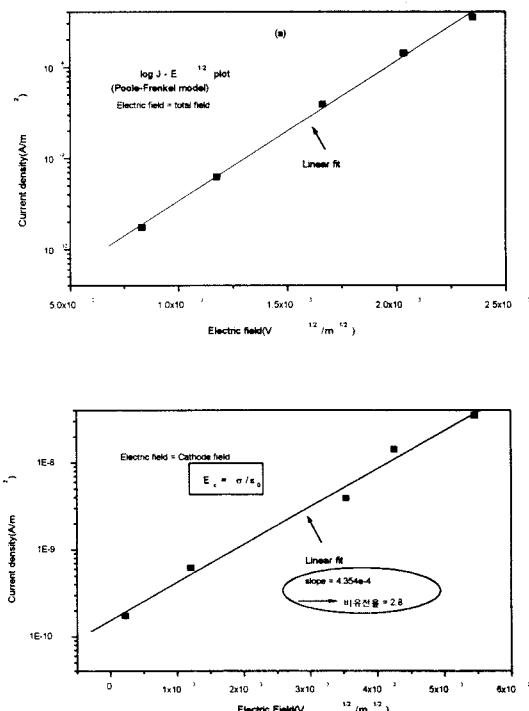


그림 2-4 (+)DC과전에 의한 전계(\sqrt{E})-전류($\log J$) 그래프

그림에서 보듯이 $\log J - \sqrt{E}$ 의 선형관계가 성립함을 알 수 있으며, (a)는 전체 전계, (b)는 공간전하에 의한 전계를 계산한 전류-전계분포이다. 또한 기울기와 Poole-Frenkel coefficient(β_{PF})를 통해 비유전율(ϵ_r)을 계산할 수 있으며, 그 결과 $\epsilon_r = 2.8$ 을 얻었다. 이 LDPE의 비유전율인 2.8에 근접한 값으로써 본 실험을 통한 전도전류 및 공간전하 분석이 일치해감을 알 수 있다. 그러나 위의 그림(a)에서는 비유전율이 0.23으로 큰 차이가 있지만, 이는 공기총과의 유전율 차이 및 방전에 의한 유전체 표면에서의 전하의 축적등과 깊은 연관이 있다고 생각되며 이에 대해서는 추후 연구가 필요하다고 판단된다. 이로부터 유전체 내부의 공간전하이동 메카니즘과 그에 따른 전도전류의 직접적인 관계를 알 수 있으며 그것은 유전체 제한형 모델임을 확인했다.

2.3.1 장시간 충전시 전도전류 및 공간전하 분포

그림 2-5에서는 DC 7kV에서 150분동안 인가하면서 3분 간격으로 각각 충전전류 및 충전후 공간전하분포를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 충전이 진행됨에 따라 하부전극에서 음전하가 시료내부로 이동해 감을 알 수 있으며, 공기총에서의 방전이 일어나는 동안 유전체 상부에서는 계속해서 전하가 축적됨을 직접적으로 알

수 있다. 또한 유전체 하부 표면에서의 전하량의 첨두값은 감소하는 반면에 내부로 침투해 들어감을 알 수 있다. 이는 주입전극으로부터 방출된 전하가 유전체 표면의 트랩에 포획 및 축적되면서 국부적인 전계를 강화시켜 하부 표면에서의 음전하를 유전체 내부로 이동시키는 것으로 생각된다. 따라서 이를 통해 절연체의 장기적 절연능력 저하를 초래함을 공간전하 분석을 통해서 직접적으로 알 수 있었다.

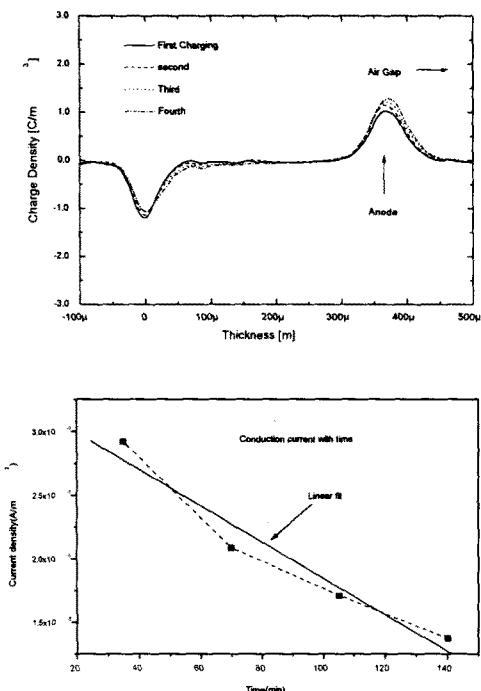


그림 2-5 DC 7kV에서 150분간 충전중의 공간전하분포와 시간에 따른 전도전류특성

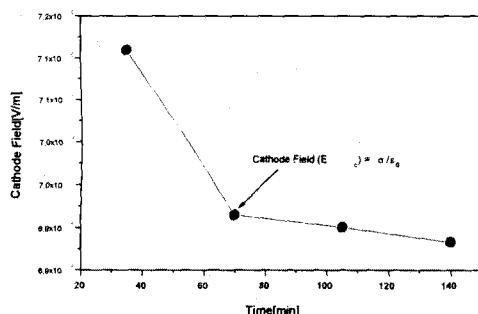


그림 2-6 하부전극 전하량으로부터 구한 음극전계

전도전류는 그림 2-5에서 보듯이 시간이 지남에 따라 감소하며, 이는 그림 2-6에서 보이는 것처럼 음극-LDPE의 계면전계, 즉 음극전계와도 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 즉, 충전이 계속됨에 따라 공간전하분포에서처럼 전하가 유전체 내부로 트랩에 포획되어 가면서 계면에서

의 음극전계가 감소하는 것으로 여겨진다. 이러한 측정 전류의 시간특성으로부터 상부전극으로부터 방출된 전하가 표면에 계속해서 축적되면서 공간전하를 형성하고 이러한 공간전하가 포획될 때까지 전도전류는 감소하면서 평형상태(steady-state)에 도달할 수 없음을 알 수 있다

3. 결 론

공간전하와 전도전류의 동시 측정시스템을 이용하여 LDPE-Air Gap구조에서의 공간전하 및 전도전류실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) XLPE에서 외는 달리 전계가 커짐에 따라서 동종의 공간전하가 유전체 내부로 이동함을 알 수 있었으며, 이는 부분방전이 시작되는 전계부터는 현저히 증가함을 알 수 있었다. 이는 가속된 전하가 고분자 내 트랩을 생성하는 것에 기인하는 것으로 생각되며, 고전계로 갈수록 Poole-field lowering에 의한 전하의 트랩으로부터의 탈 및 트랩을 통한 흐핑(Hopping)에 의해 유전체내로 이동한다고 생각된다.

(2) 방전시에는 공간전하가 거의 그대로 남아있음을 확인했으며, 이는 전하가 깊은(deep)트랩에 포획되어 빠져 나오지 못하는 것으로 생각된다.

(3) 장시간 충전시에는 유전체 상부에서는 전하가 계속해서 축적됨을 알 수 있었으며, 하부 표면에서는 음전하가 유전체 내부로 침투해감을 알았다. 이를 통해 공간전하에 의한 절연체의 장기적 절연능력 저하를 확인할 수 있었다.

추후 발전사향으로 온도에 따른 공간전하와 전도전류를 통한 연구를 통해서 전하의 이동 메카니즘과 전류의 상관관계를 정성적으로 보강 분석 할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Nath R., Kaura T. And Perlman M.M., "Steady Conduction in Linear Low-density Polyethylene Poole-lowered trap depth", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, pp419-425, 1990
- [2] D. Malec, R. Essolbi, T.G. Hoang, B. Ai and B. Carro charge and Anomalous Discharge Currents in Cross Polyethylene", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 3, pp64-69, 1
- [3] M. Ieda, "Electrical Conduction and Carrier Transport in Polymeric Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 19, pp162-178, 1984