

# 부극성 직류전압에 의해 사전 형성된 공간전하가 XLPE의 부분방전특성에 미치는 영향

論 文

52C-7-7

## Effects of Pre-formed Space Charges by Negative DC Voltages on PD Characteristics in XLPE

皇甫勝\* · 李峻昊\*\*

(Seung Hwangbo · June-Ho Lee)

**Abstract** - The purpose of this paper is to evaluate the effects of pre-formed space charges by DC stress on partial discharge(PD) characteristics in XLPE. We have suggested a modified pulsed electro-acoustic(PEA) method and successfully measured both space charge distribution and current simultaneously. It has been demonstrated that the PD patterns are strongly influenced by the pre-formed space charge distributions, which are hardly disappeared up to AC 8kV in electrode configuration including air gap between XLPE layer and electrode. From the results, it could be said that the pre-formed space charges by DC stress can play harmful and dangerous roles in insulating system under AC operating voltages because of the field distortion and localization due to the pre-formed space charge.

**Key Words** : Pulsed electro-acoustic method, Space charge distribution, Partial discharge, XLPE

### 1. 서 론

XLPE를 절연체로 사용하는 전력용 케이블에서는 AC전압만이 인가될 때 XLPE에는 공간전하가 축적되지 않는 것으로 알려져 왔으며 이에 따라 AC전계 하에서 전계왜곡은 별로 고려되지 않았다[1]. 그러나 보이드나 수트리(water tree)와 같은 결함이 XLPE에 포함되었을 경우는 AC전압에 의한 공간전하형성은 전력시스템에 많은 영향을 준다[2]. 일반적으로 AC전압이 인가되고 보이드가 있는 절연체에서 부분방전패턴의 시간에 따른 변화로부터 알 수 있듯이[3] 가속된 전자들은 절연체의 표면에 기계적, 물리적 손상을 가하여 내부트랩(inner trap) 밀도를 증가시킴으로써 공간전하를 축적시키게 된다.

일단 공간전하가 축적되고 전계왜곡과 국부집중이 발생하면 같은 극성의 임펄스전압이 인가되었을 때 절연체에 더 큰 손상을 주는 것으로 보고되고 있다[4, 5]. 전력케이블 절연성능을 평가하기 위한 시험의 대부분은 비용문제 등으로 인해 DC전압을 인가하는 실정이다. 그러나 최근 DC전압시험에 의한 공간전하형성이 보고된 바 있고[2], 이러한 사전형성된 공간전하가 전력케이블의 AC특성에 미치는 영향에 관한 연구가 중요한 이슈가 되고 있다. 이러한 이유들 때문에 보이드와 같은 결함이 존재하는 경우, DC전압에 의한 사전형성 공간전하를 측정하고 AC전압인가 후 영향을 분석

하는 것은, 전력용 케이블에 대한 직류시험의 유효성 등을 검토하는 데 중요한 근거를 제공한다.

본 연구에서는, 전극과 XLPE층 사이에 공기층을 가지는 전극시스템에서 부극성(negative) DC전압에 의해 형성된 공간전하가 AC전압인가 후 부분방전의 특성에 미치는 영향 및 상관성을 살펴보았다. 이를 위하여 기존의 PEA(pulsed electro-acoustic) 측정법을 보완하여[6], DC 및 AC전압 인가 시 공간전하와 방전전류를 시료이 이동없이 하나의 전극계로 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고 구성하였다.

### 2. 실험

그림 1과 그림 2는 각각 측정시스템과 전극의 개념도이다. 1mm의 공기층과 530~580 $\mu$ m두께의 XLPE 필름이 직렬 배치되어 있다. 그리고 카본블랙을 사용한 반도체층이 하부 전극으로, 알루미늄이 상부전극으로 사용되었다. 그리고 XLPE에 펀치를 이용하여 30mm 직경의 홀을 뚫어 공기층을 만들었으며, 실험은 20 $^{\circ}$ C에서 AC 1~8 kV를 인가하면서 수행하였다. PEA방법을 위한 인가전압은 크기 -1kV, 폭 16ns의 펄스를 인가하였다.

### 3. 결과 및 검토

그림 3 은 30분간 (-) DC전압을 인가한 후 다시 30분간 방전하고 측정한 XLPE 내의 공간전하분포이다. 이 그림에서, XLPE의 양쪽 표면에서 (-) 공간전하가 축적되어 있고, 공기층과 접한 면에 더 많은 양의 공간전하가 축적되어 있음을 알 수 있다. 이러한 축적공간전하는 전계왜곡을 일으키고 임펄스에 대한 절연성능 저하의 원인이 되는 것으로

\* 正 會 員 : 湖南大 工大 光電子工學科 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 湖西大 電氣情報通信工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2003年 4月 23日

最終完了 : 2003年 6月 2日

알려져 있다 [4, 5]. XLPE 상부전극쪽 표면에 형성된 공간 전하는 동종전하로서 상부전극(cathode)으로부터 방출된 전자에 의한 것으로 볼 수 있다.

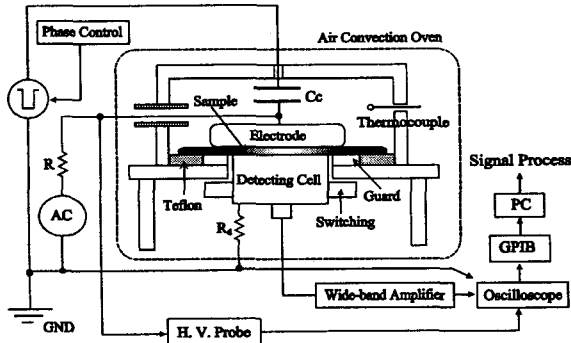


그림 1 측정시스템의 개념도  
Fig. 1 Schematic diagram of measuring system

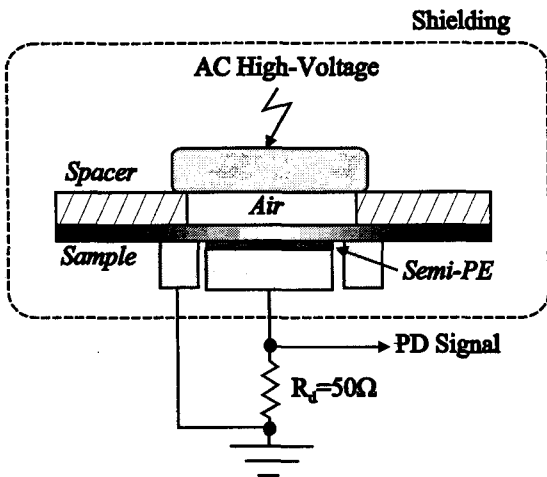


그림 2 전극계의 개념도  
Fig. 2 Schematic diagram of electrode configuration

한편, DC 6kV 이상에서 주로 공간전하가 형성된 것으로 부터 이때부터 전자사태 등에 의한 PD가 발생한 것으로 추론된다.

그림 4는 상부전극에 30분간 DC -1~-8 kV를 인가하는 동안 측정된 전류밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림으로부터 전류밀도는 시간에 따라 감소하나 DC -6kV 이상에서는 일정시간이 지난 후 포화되는 현상이 나타나면 이 포화되는 시간은 전압이 증가하면 짧아진다. 측정하는 동안 DC -6kV 부근에서 부분방전이 발생하였다. 이러한 현상은 분극작용보다는 XLPE 상부에 형성된 공간전하에 기인한 것으로 설명이 가능하다. 즉, 공기층이 없는 경우에는 전극-XLPE 계면에 존재하는 전위장벽과 표면에 존재하는 트랩 등에 의해 캐리어(carrier) 주입이 힘든 반면에, 공기층이 있는 경우에는 상부전극으로부터 방출된 전자(PD에 의해 발생한 전자 포함)가 XLPE 표면에 다량 축적됨으로서, 계면에서 캐리어 주입을 억제하는 장벽효과가 없어지는 것으로

설명될 수 있다. 또한, 이것은 측정된 평형상태의 전류가 전도전류임을 의미하고, 전도특성은 전극제한형(electrode limited)이 아닌 bulk limited 제한형 모델로 측정되었음을 나타낸다.

이러한 공간전하가 AC절연 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 공간전하의 AC전압 하에서의 거동을 알아야 한다. 이를 위하여, (-) DC 과전에 의해 공간전하가 미리 형성된 XLPE 시료에, AC 1~8kV의 전압을 약 3분간씩 인가하면서 PD 패턴과 접지한 후의 공간전하의 변화를 각각 측정하였으며, 그 결과를 각각 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다.

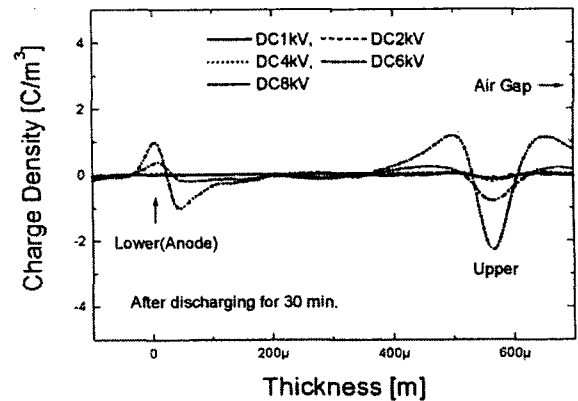


그림 3 30분간 (-) DC전압을 인가한 후 다시 30분간 방전하고 측정된 XLPE 내의 공간전하분포

Fig. 3 Space charge distributions in XLPE after 30 minutes (-) DC stress applying and 30 minutes discharging

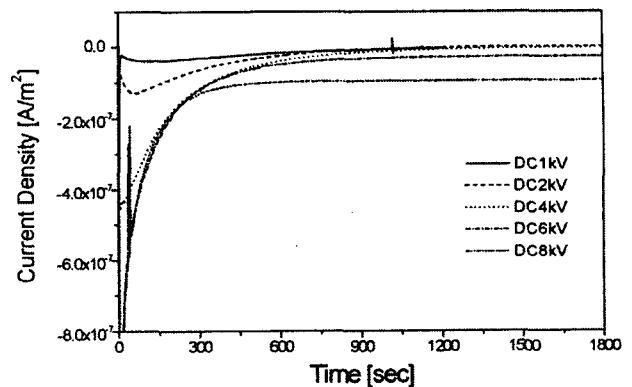


그림 4 상부전극에 30분간 DC -1~-8 kV를 인가하였을 때 전류밀도

Fig. 4 Current density curves when applying DC -1~-8kV to upper electrode for 30 minutes

그림 5에서 PD 패턴은 DC 전압에 의해 공간전하가 형성되기 전의 결과(그림 5 (a))와 함께 비교하였다. 이로부터 공간전하가 형성되기 전에는 각각 AC전압의 0~90°와 180~270°에서 (+)와 (-)의 PD가 발생하였으며,

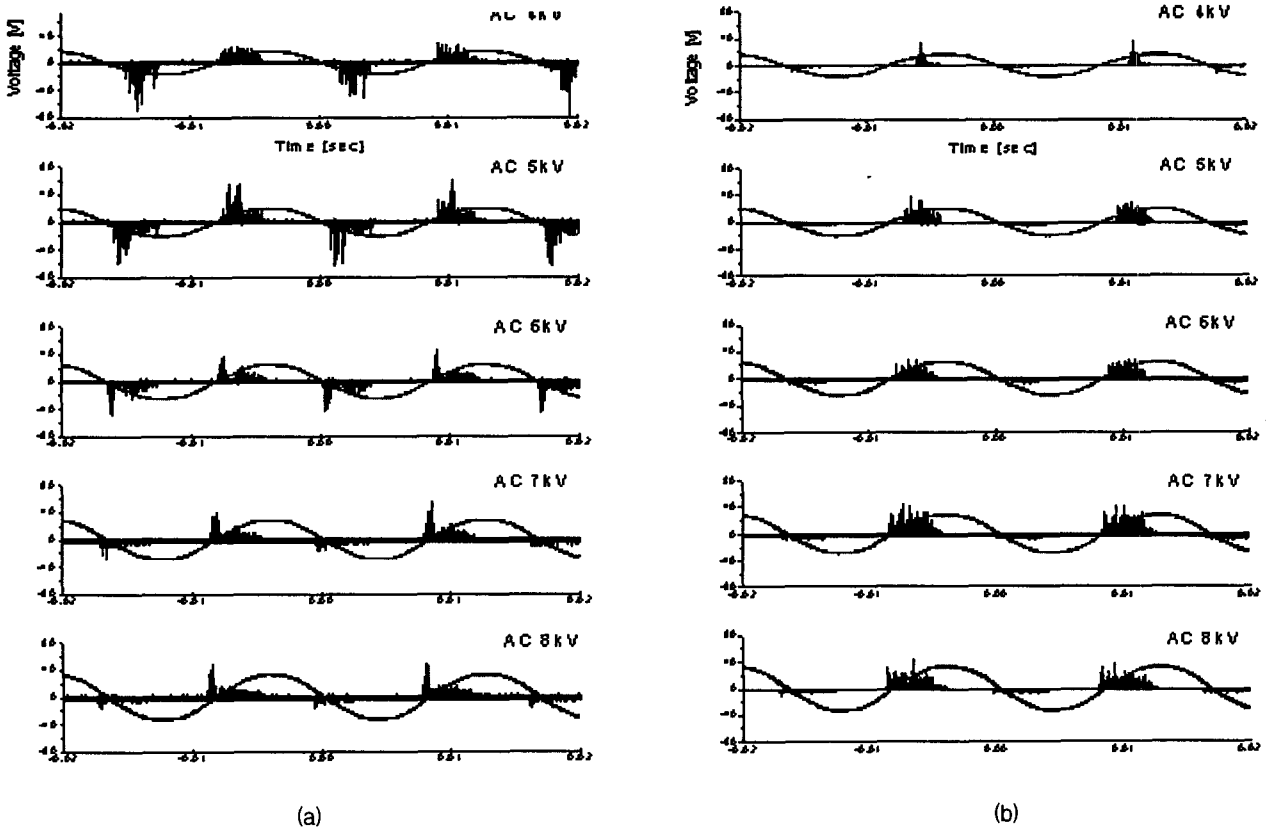


그림 5 (-)DC과전에 의한 PD 패턴 비교  
 (a) 공간전하 형성 전, (b) 형성 후  
 Fig. 5 Comparison of PD patterns by application of (-) DC  
 (a) before forming space charge, (b) after forming space charge

또한 인가전압이 증가함에 따라 극성반전 부근에서 (+) PD는 첨예(sharp)해지고, 왼쪽의 반주기로 확장되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 PD에 의해 발생한 전자가 XLPE 표면에 축적되어 공기층에 걸리는 전계를 변화시키는 것으로서 설명이 가능하다. 즉, 축적된 공간전하의 영향과 극성반전의 중첩효과로 극성반전 부근에서는 PD가 첨예해지게 된다. 한편, AC인가전압이 증가함에 따라 (-) PD의 크기는 점차 감소하는 경향을 나타내는데 이는 기존의 보고 [1,3]와도 일치하는 현상으로서, 인가전압과 시간이 증가함에 따라 공간전하의 축적이 증가하여 (-) PD가 발생하기 어려워진 것과 PD에 의해 상부전극 표면에 산화막이 생겨 초기전자의 방출이 어려워진 것, 또는 PD에 의해 발생된 분위기 gas가 전자상태의 진전을 억제하는 것 등 여러가지로 설명이 가능하다. 그러나, 그림 5 (b)에 나타난 PD 패턴으로부터 알 수 있듯이, XLPE 표면에 음(-)의 공간전하가 형성됨으로서, 0~90°에서는 (+) PD가 넓게 나타난 반면에, 180~270°에서의 (-) PD는 크게 감소하였다. 이것은 AC전압과 방전시간의 증가에 따른 (-) PD의 감소는 공간전하 효과가 관련이 있다는 것을 나타낸다.

따라서, 방전시간의 증가에 따른 PD 패턴의 감소현상은 방전에 의해 XLPE 표면근처의 분자쇄의 절단 등이 발생하여 트랩준위(trap sites)가 증가하고, 이것에 의해 공간전하

의 일부 축적이 발생하여 나타난 현상으로 해석할 수 있다. 그리고 미리 형성된 공간전하에 의한 이러한 PD 패턴의 변화는 현재 DC 내전압 또는 누설전류시험 시 문제가 되고 있는 공간전하의 형성여부를 DC 전압을 인가하기 전과 인가하고 난 후에 측정된 PD 패턴을 비교함으로써 어느 정도 짐줄이 가능하다는 것을 말해 준다.

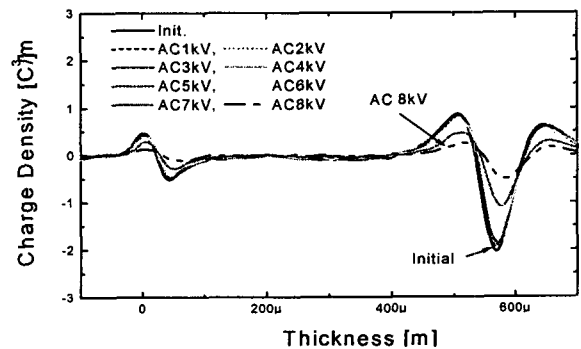


그림 6 AC 1~8kV 전압을 인가한 후에 측정된 공간전하분포  
 Fig. 6 Space charge distributions measured after applying AC 1~8kV

그림 6 은 (-) DC 과전후 약 3분간 AC전압 하에서 PD 패턴을 측정하고 난 뒤 다시 차단한 상태에서 측정한 공간전하분포로서, 인가전압이 증가함에 따라 양쪽 전극근방에 형성된 공간전하량이 점차 줄어드는 경향을 나타내었다. 이것은 그림 5 의 PD 패턴변화를 해석할 수 있는 결과로써, 축적된 전자의 일부가 0~90°의 위상에서 방출되어 (+) PD 를 발생시킨 반면에, 축적된 음의 공간전하로 인한 공기층 내의 전계완화로 (-) PD는 감소하여 전체적으로 음의 공간전하량이 감소한 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 DC 및 AC 전압이 인가되었을 때 공간전하분포와 방전전압을 시료의 이동없이 하나의 전극계로 측정할 수 있는 개선된 PEA 방법을 제안하였다. 이러한 방법을 이용하여, 전극과 XLPE 사이에 1mm 두께의 공기층이 존재하는 형상에서 - DC 전압에 의해 XLPE에 형성된 공간전하가 AC 부분방전 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 실험결과로부터 공기층이 존재할 경우 계면에서의 전위장벽 제거로 인하여 전류밀도가 증가하며 공기층과 접한 XLPE 표면의 공간전하량이 증가함을 알 수 있었다. 이로부터 PD 패턴은 사전 형성된 공간전하에 크게 영향을 받으며 이러한 전하는 AC 8kV까지 전압을 인가하여도 남아있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

과기부-과학재단지정 2003년도 조선대학교 레이저 응용 신기술 개발 연구센터 연구비에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다

#### 참 고 문 헌

- [1] R. Liu, T. Takada, N. Takasu, "Pulsed Electro-acoustic Method for Measurement of Space Charge Distribution in Power Cables under Both DC and AC Electric Fields", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 26, pp. 986-993, 1993.
- [2] N. Hozumi, T. Okamoto, Y. Ikeda, "Space Charge Measurement in Water Tree Degraded XLPE Cables", Proc. 4th ICPADM, pp. 394-396, 1994.
- [3] C. Hudon, R. Bartnikas, M. Wertheimer, "Effect of Physico-chemical Degradation of Epoxy Resin on Partial Discharge Behavior", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 2, No. 6, pp. 1083-1094, 1995.
- [4] Y. Suzuoki, Y. Matsukawa, S. O. Han, A. Fujii, J. S. Kim, T. Mizutani, M. Ieda, N. Yoshifuji, "Study of Space-charge Effects on Dielectric Breakdown of Polymers by Direct Probing", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, No. 4, pp. 758-762, 1992.
- [5] 藤井 明廣, 服部恒司, 鈴置保雄, 水谷照吉, 家田正之, 鈴木建, "高分子絶縁材料中の 空間電荷と 絶縁破壊", 日本 電氣學會

·絶縁材料研究會資料, Japan DEI-92-88, 1992.

- [6] S. Hwangbo, Y. H. Kwun, S. I. Jeon and M. K. Han, "Direct Correlation between Space Charge and Conduction Characteristics of LDPE at Various Temperature", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 7, pp.4419-4427, 1998.

## 저 자 소 개



#### 황보 승 (皇甫勝)

1964년 5월 28일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사), 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1989년~1991 LG전선(주) 연구소 근무, 1998년~현재 호남대 공대 광전자공학과 조교수.  
Tel : 062-940-5495, Fax : 062-940-5077  
E-mail : hbs@honam.ac.kr



#### 이 준 호 (李峻昊)

1962년 3월 14일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사), 1987년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1993년~1994년 일본 전력중앙연구소 연구원, 2001년~2002년 미국 MIT High

Voltage Research Laboratory 파견연구원(학술진흥재단 지원), 1994년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수  
Tel : 041-540-5656, Fax : 041-548-6685  
E-mail : leejh@office.hoseo.ac.kr