

## XLPE에서 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향

### Effect of Space Charge on the PD Pattern in XLPE

황 보승\*, 심 재위\*, 이 진종\*, 이 동영\*\*, 박 대희\*\*\*

S. Hwang-bo\*, J. W. Shim\*, J. J. Lee\*, D. Y. Lee\*\*, D. H. Park\*\*\*

#### Abstract

We have measured the space charge distribution and PD patterns simultaneously in XLPE under AC voltages by modified PEA method in order to investigate the effect of space charge on PD patterns in XLPE with air-gap. From the experimental results, we found that the dynamic space charge accumulated on the surface of XLPE due to the PD dominantly affects the PD pattern in the dielectric-barrier structure and governs the voltage across the air-gap. Moreover, the space charge formed by applying DC voltage still remained after applying AC voltage, which means that the space charge formed during DC strength test is likely to be fatal to the long-time AC insulating characteristics of HV equipments. On the other hand, the PD patterns was much influenced by the pre-formed space charge by DC application. Therefore, it is possible to detect the effects of space charge by monitoring the infinitesimal change of PD patterns before and after DC strength.

**Key Words :** XLPE, 공간전하, 부분방전 패턴, DC 내전압, 펄스정전용력법

#### 1. 개요

절연시스템에서 열화와 사고의 대부분은 제조 또는 실사용 중에 일어나는 전기적, 기계적, 열적 및 화학적 과정에 의해 절연체 내에 발생한 공극(void, cavity)과 같은 국부적인 결함부에 기인하는 것으로 알려져 있다.[1] 한편, 절연체 내에 결함부가 존재하게 되면, 국부적인 절연파괴에 의해 PD가 발생하고, 이것에 의해 절연체의 절연내력과 전력설비의 수명은 현저히 감소하게 된다. 이와 같은 이유로, 현재 PD pulse의 패턴, 특히 PD의  $\phi$ (위상)- $q$ (크기)- $n$ (빈도)을 이용한 결함부의 원인규명과 절연체의 절연능력 및 전력설비의 on-line 수명예측을 위한 연구가 광범위하게 진행되고 있다.[2-4]

한편, 최근까지 XLPE(Cross-linked Polyethylene,

가교폴리에틸렌)을 주 절연체로 사용하고 있는 초고압 CV 케이블 등 주로 AC 전압을 사용하고 있는 전력설비에서는 AC 전압의 인가에 의해 절연체 내부에는 공간전하의 축적이 거의 발생하지 않는 것으로 알려져 왔으며, 따라서 최근까지 이러한 공간전하에 의한 전계 왜곡 현상 등은 중요시 인식되지 않았다.[1] 그러나, 최근 AC 전압 하에서도 수트리가 형성된 경우 극성 반전 시에 주입된 전하의 일부가 빠져나오지 못하고 축적되어 공간전하를 형성하고, 전계 왜곡을 일으키는 것으로 보고되었다.[5] 또한, AC 전압 하에서 장시간 지속적인 방전에 의해 부분방전(PD: Partial Discharge) 패턴이 변화하는 것으로부터 추론할 수 있듯이, 가속전자에 의해 유전체 표면에서 분자쇄 절단과 같은 기계적·물리적 손상이 발생하면 표면근처에 트랩이 증가하고, 이것에 의해 시료 내부에 공간전하가 축적될 가능성이 큰 것으로 볼 수 있다.

한편, 실제 초고압 케이블은 제조 및 포설 후, 그리고 사용 중에 있어서 절연특성을 검사하기 위하여 AC에 비해 상대적으로 안정한 DC 전압을 사용하여

\* 호남대학교 전기전자전공공학부  
Fax: 062-940-5495, E-mail: hbs@honam.honam.ac.kr

\*\*위덕대학교 전기공학부  
E-mail: dyyi@viro.uiduk.ac.kr

\*\*\*원광대학교 전자정보공학부  
E-mail: parkdh@wonms.wonkwang.ac.kr

최대 교류정격의 2배 정도의 전압을 인가하고 있으며, 이때 공간전하의 형성 여부와 형성된 공간전하가 PD 패턴 및 교류절연 특성에 미치는 영향은 현재 국내·외적으로 중요한 관심사항 중의 하나이며, 이에 대한 조속한 규명을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여, 그림 1에 나타나 있는 측정시스템을 이용하여, 교류전압 하에서 공기층(1mm)과 절연체(XLPE)를 포함한 전극구조에서 PD 패턴과 공간전하분포의 동시 측정을 실시하였으며, 이를 바탕으로 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 DC 과전에 의한 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향을 분석하였다.

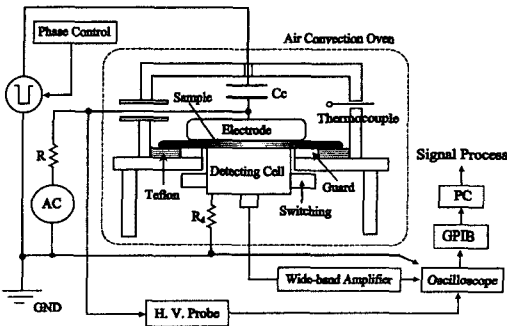


그림 1 교류전압 하에서의 측정시스템의 개략도  
Fig 1 Schematic diagram of measuring system under AC voltage

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 전극구조의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 시편과 spacer로서 각각 두께가 1mm와 550~580 $\mu$ m인 XLPE를 사용하였으며, 하부전극으로는 carbon black이 함유된 반도체성 고분자를, 상부전극으로는 Al을 각각 사용하였다. 또한, 공기층에서 Edge 효과에 의한 영향을 제거하기 위하여 spacer 중앙에 하부전극(2cm) 보다 약간 큰 구멍(3cm)을 펀칭(punching)하여 공기층을 형성시켰다. 실험은 상온(20 $^{\circ}$ C) 및 1~8kV의 AC전압에서 PD 패턴과 XLPE의 공간전하분포를 교대로 측정하였으며, 공간전하를 측정하기 위한 입력전압펄스의 크기와 폭은 각각 -1kV, 16ns이었으며, 압전소자로서는 두께 28 $\mu$ m의 PVDF를 사용하였다. 그리고, 공간전하분포는 위상제어를 통해 0~360 $^{\circ}$ 에서 약 18 $^{\circ}$ 간격으로 측정하였으며, S/N비를 향상시키기 위하여 약 1000회의 평균화와 보정(deconvolution) 처리를 실시하였다.

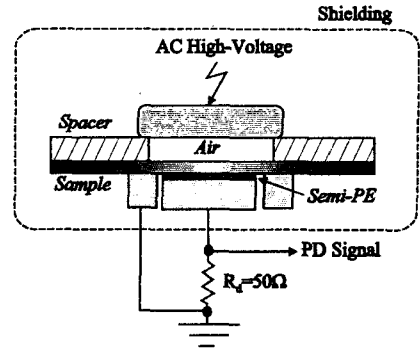


그림 2 전극구조의 개략도  
Fig 2 Schematic diagram of electrode configuration

## 3. 실험결과 및 분석

그림 3은 공기층에 걸리는 전압( $V_a$ )과 그 때의 PD 패턴을 함께 나타낸 것으로[6], 그림 (a)는 공간전하를 측정하기 전에 측정된 초기 PD 패턴을, (b)는 공간전하를 측정(약 40분 소요)하고 난 뒤의 PD 패턴이다.

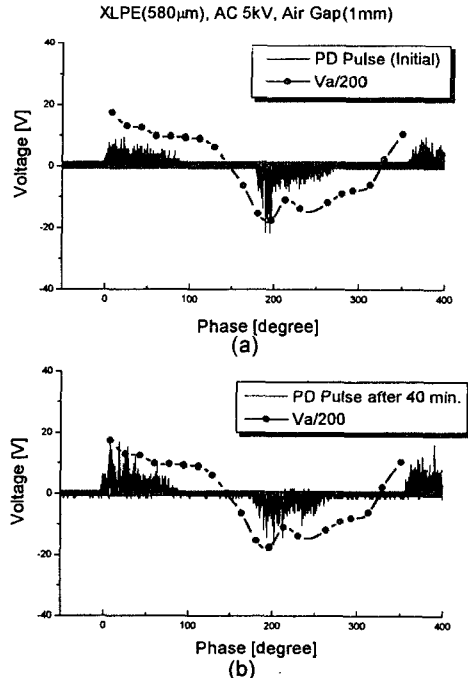


그림 3 AC 5kV에서 PD 패턴과 공극전압의 비교  
(a) 초기 (b) 40분 후  
Fig 3 Comparison of PD patterns with voltage across air gap at AC 5kV (a)Initial (b)after 40 min

그림에서 알 수 있듯이 PD 패턴은 방전이 지속됨에 따라 조금씩 그 패턴이 변하였지만, 전체적으로

PD 패턴과 공극전압은 매우 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 방전 패턴이 공극전압 또는 전계에 의해 지배되고 있는 것을 나타낸다.[6] 이와 같은 결과는 유전체장벽방전(dielectric-barrier discharge 또는 silent discharge) 현상으로 방전에 의해 유전체 표면에 축적된 공간전하가 공극 전계를 완화시켜 방전을 억제하는 자동소멸형(self-quenching) 방전으로서 최근 방전 시에 발생하는 가속전자와 가스분자 사이의 충돌이온화(collision ionization) 작용을 이용하여 자동차 배기가스에서 배출되는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등의 공해물질을 제거하는데 이용되고 있다.[7, 8]

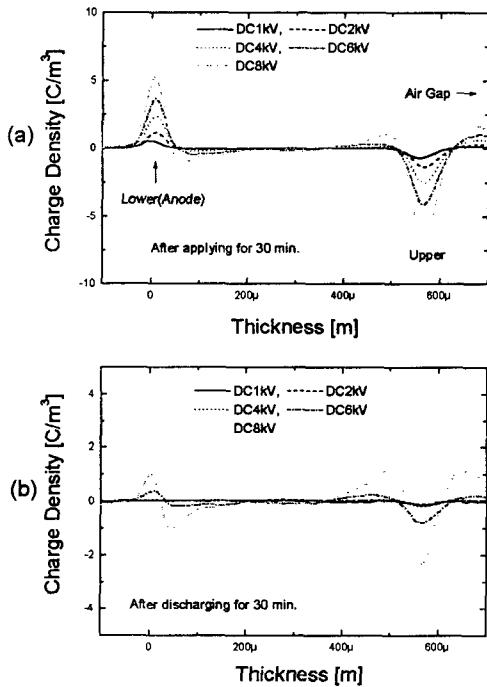


그림 4 공기층이 있는 경우, (-) DC 과전에 의한 XLPE 공간전하분포 (a)30분 충전후 (b)30분 방전후  
Fig. 4 Space charge distribution of XLPE by (-) DC application when air gap exists (a) after applying DC for 30min. (b) after discharging for 30min.

그림 4는 XLPE(약 560 $\mu$ m)와 공기층(두께 1mm)이 접해있는 경우에 상부전극에 DC -1~8kV의 전압을 각각 30분씩 인가하고 30분 방전한 후에 측정된 XLPE의 공간전하분포를 나타낸 것이다. 그림 4에서 DC 6kV(약 11MV/m)이상에서는 양쪽 절연체 표면 근처에 모두 음의 공간전하가 형성되고, 특히 공기층과 접해있는 절연체 표면(상부) 부근에 상대적으로 큰 음의 공간전하가 형성되었음을 알 수 있다.

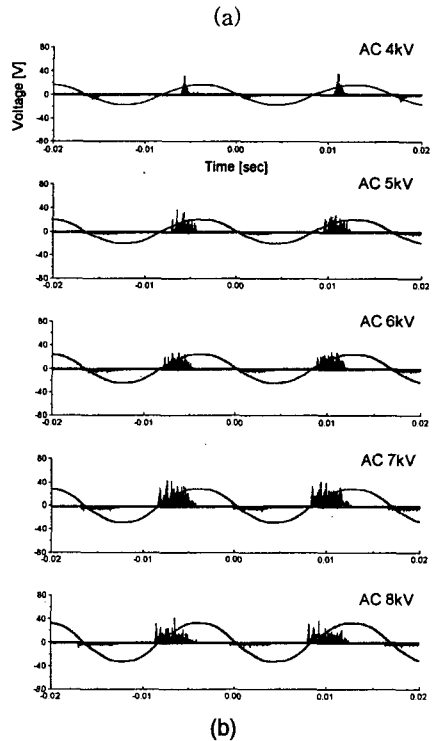
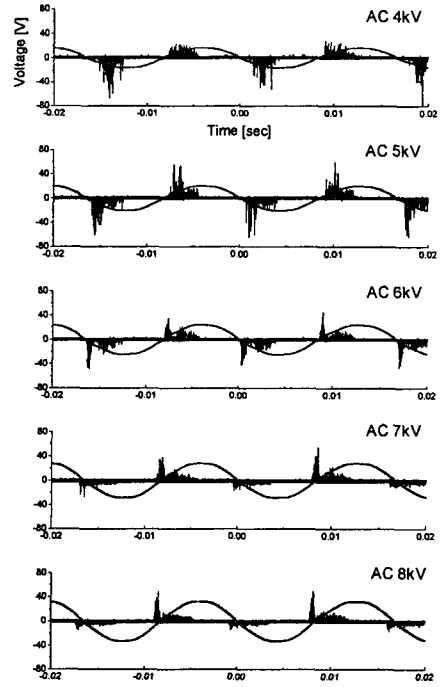


그림 5 (-)DC과전에 의한 PD 패턴 비교 (a) 공간전하 형성 전 (b) 형성 후  
Fig. 5 Comparison of PD patterns by application of (-) DC ; before(a) and after(b) forming space charge

이러한 공간전하분포는 공기층이 없는 경우의 결과와 비교하면, 저전계임에도 불구하고 양쪽 모두에 큰 공간전하가 형성된 것임을 알 수 있다.[9] XLPE 하부(anode)에 형성된 음의 공간전하는 이중전하로서 절연체 내부 또는 XLPE 상부로부터 전도된 전자로 볼 수 있지만, 공기층이 없는 경우와 비교하여 상대적으로 큰 음의 전하가 형성된 것으로 보아 일부는 상부로부터 전도되어 온 것임을 알 수 있다. 그리고, XLPE 상부에 형성된 공간전하는 동종전하로서 상부전극(cathode)으로부터 방출된 전자에 의한 것으로 볼 수 있다. 한편, DC 6kV 이상에서 주로 공간전하가 형성된 것으로부터 이때부터 전자사태 등에 의한 PD가 발생한 것으로 추론되며, 이것은 다음에 나타낸 AC 전압 하에서 PD 개시전압보다 높은 값이다.

이러한 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향을 파악하기 위하여 AC 1~8kV의 전압을 약 3분간씩 인가하면서 PD 패턴과 접지한 후의 공간전하의 변화를 각각 측정하였으며, 그 결과를 각각 그림 5와 6에 나타내었다.

그림 5에서 PD 패턴은 DC 전압에 의해 공간전하가 형성되기 전의 결과(그림 5(a))와 함께 비교하였으며, 전체 인가전압은 PD 패턴과 비교를 위하여  $\times 3$ 을 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 공간전하가 형성되기 전에는 각각 AC 전압의  $0\sim 90^\circ$ 와  $180\sim 270^\circ$ 에서 (+)와 (-)의 PD가 발생하였으며, 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. 그러나, 그림 5(b)에 나타난 PD 패턴으로부터 알 수 있듯이, XLPE 표면에 음(-)의 공간전하가 형성됨으로서,  $0\sim 90^\circ$ 에서는 (+) PD가 넓게 나타난 반면에,  $180\sim 270^\circ$ 에서의 (-) PD는 크게 감소하였다. 이것은 AC 전압과 방전시간의 증가에 따른 (-) PD의 감소는 공간전하 효과가 관련이 있다는 것을 나타낸다.

따라서, 미리 형성된 공간전하에 의한 이러한 PD 패턴의 변화는 현재 DC 내전압 또는 누설전류시험시 문제가 되고있는 공간전하의 형성여부를 DC 전압을 인가하기 전과 인가하고 난 후에 측정한 PD 패턴을 비교함으로써 어느정도 검출이 가능하다는 것을 말해 준다.

그림 6은 (-)DC 과전후 약 3분간 AC전압 하에서 PD 패턴을 측정하고 난 뒤 다시 차단한 상태에서 측정한 공간전하분포로서, 인가전압이 증가함에 따

라 양쪽 전극근방에 형성된 공간전하량이 점차 줄어드는 경향을 나타내었다. 이것은 그림 5의 PD 패턴과 일치하는 현상으로서, 축적된 전자의 일부가  $0\sim 90^\circ$ 의 위상에서 방출되어 (+) PD를 발생시킨 반면에, 축적된 음의 공간전하 영향으로 (-) PD는 감소하여 전체적으로 음의 공간전하량이 감소한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 이러한 PD 패턴과 공간전하의 감소현상은 방전시간이 지속됨에 따라 전혀 다른 특성을 나타내었다.

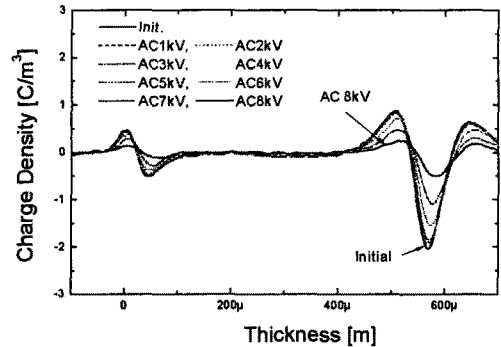


그림 6 AC 1~8kV를 인가한 후의 공간전하분포  
Fig. 6 Space charge distributions measured after applying AC 1~8kV

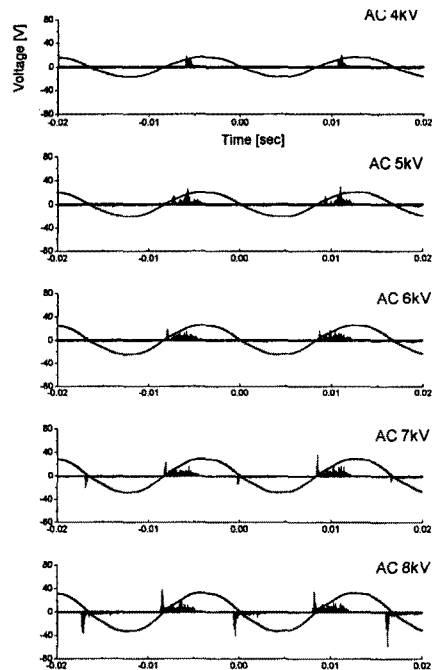


그림 7 AC 8kV를 100분 인가한 후의 PD 패턴  
Fig. 7 PD patterns after applying AC 8kV for 100 minutes

그림 7은 AC 8kV에서 약 100분 동안 방전을 지속시킨 후에 다시 측정된 PD 패턴으로서, (+) PD 패턴이 현저히 감소하였으며, 또한 저전계에서도 (-) PD가 거의 검출되지 않았으며, PD 자체도 다른 모양을 나타내었다.

이러한 실험결과는 (-) DC과전에 의해 공극과 같은 결함부에 일단 음의 공간전하가 형성되면, AC 전압 하에서도 그 영향은 계속 지속되는 것을 나타내며, 매우 중요한 현상으로 생각된다. 즉, (-) DC 과전에 의해 형성된 음의 공간전하는 AC 전압 하에서도 계속 유지됨에 따라 전계 왜곡에 의한 국부적인 고전계와 유전손실 등을 발생할 수 있어 장기적인 교류 절연특성에는 매우 불리할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

기존의 펄스정전용력법(PEA)을 개선하여, AC 전압 하에서 공기층과 XLPE를 포함한 전극구조에서 PD 패턴과 XLPE의 공간전하분포의 동시 측정을 수행하였다. 이와 같은 측정은 기존에는 측정이 불가능하였던 PD 패턴과 공간전하의 직접적인 비교를 가능하게 하였으며 PD 발생시 XLPE 표면에 축적되는 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향, 즉 유전체장벽방전 효과를 직접적으로 확인할 수 있었다.

전극부근에 공기층이 있는 경우, (-) DC 전압을 인가한 경우, 공기층과 접해있는 XLPE 표면 부근에 큰 음의 공간전하가 형성되었으며, 이러한 공간전하는 AC전압 하에서도 계속 유지되는 것을 확인하였다. 그리고, DC 과전에 의해 형성된 공간전하는 PD 패턴에 큰 영향을 미쳤으며, 따라서 DC 과전 전·후의 PD 패턴의 변화를 검출함으로써 어느 정도 DC 과전에 의한 공간전하의 영향을 검출할 수 있는 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 논문은 기초전력공학공동연구소(EESRI)의 “전력기술기초연구지원사업(EESRI 98-05)”에 의해 지원되었습니다.

#### 참고 문헌

[1] R. J. Van Brunt, “Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona: Recent Advances and Future Challenges”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 1, No. 5, pp. 761-784, 1994.  
 [2] 日本電氣學會技術報告(Ⅱ部), 誘電·絶縁材料計測

技術, 第408号, 1992.  
 [3] T. Ishida, M. Nagao, Y. Mizuno, M. Kosaki, “Swarming Pulsive Microdischarge Characteristics of Internal Void Specimen and the Factors Affecting its Occurrence”, T. IEE Japan, Vol. 113-A, No.1, 1993.  
 [4] F. H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda, “Classification of Partial Discharges”, IEEE Trans. El. Insul., Vol. 27, No. 5, pp. 909-923, 1992.  
 [5] Y. Li, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, “Space Charge Distribution in Polyethylene Sheet degraded by Water Tree”, 日本電氣學會·絶縁材料研究會資料, DEI-95-112, 1995.  
 [6] 권 윤혁, 황보 승, 이 동영, 한 민구, “교류전압에서 PD 패턴 및 유전체 장벽 방전에 미치는 공간전하의 영향”, 대한 전기학회 논문지, 제 49권, 4월, 2000.  
 [7] T. Suzzuki, H. Murakami, M. A. Jani, K. Takaki, S. Katoh, T. Fujiwara, S. Maekaawa, “Flue Gas Treatment Using Dielectric-Barrier Discharge II”, 日本電氣學會·絶縁材料研究會資料, DEI-97-54, 1997.  
 [8] B. M. Penetrante, M. C. Hsiao, B. T. Merritt, G. E. Vogtlin, P. H. Wallman, M. Neiger, O. Wolf, T. Hammer, S. Broer, “Pulsed Corona and Dielectric-barrier Discharge processing of NO in N<sub>2</sub>”, Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 26, 1996.  
 [9] 황보 승, 박 대희, 남 석현, 권 윤혁, 한 민구, “LDPE에서 공간전하 분포와 측정전류의 시간특성에 대한 수치해석”, 대한 전기학회 논문지, 제 49권, 9월, 2000.