

# 교류전압에서 PD 패턴(또는 유전체장벽 효과)에 미치는 공간전하의 영향

Effect of Space Charge on the PD Pattern or Dielectric barrier Discharge at AC Voltage

황보 승, 이 동영\*

Seung Hwang-bo, Dong-Young Lee

호남대학교 전기공학과, \*위덕대학교 전기공학과

## 요 약

본 논문에서는 최근 국내·외적으로 활발하게 연구되고 있는 고분자 절연재료에 있어서 공간 전하가 전기적 특성에 미치는 영향에 대한 연구로서, 기존에는 보고되지 않았던 새로운 측정시스템과 분석 방법을 제시하였다. 그리고, 이러한 측정시스템을 이용하여 교류전압 하에서 PD 발생 시에 절연체 표면에 축적되는 공간전하의 직접적인 관측을 통하여 공간전하와 PD와의 연관성에 대한 규명을 실시하였다. 실험결과로부터 PD 패턴은 방전에 의해 절연체 내부보다는 표면에 축적되는 동적 공간전하와 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것을 알 수 있었으며, 또한 PD 발생시 공기층 전압은 이러한 동적 공간전하에 의해 지배됨을 확인할 수 있었다. 그리고, 일정전계 이상에서는 공간전하의 축적에 의한 영향으로 PD 크기와 공기층 전압은 더 이상 증가하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 실험결과는 유전체장벽방전을 이용한 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등의 공해물질의 분해에 있어서, 현재까지는 분해시스템에 전달되는 전력은 인가전압의 주파수와 크기에 비례하는 것으로 생각해 왔으나, 본 실험결과를 통하여 일정전계 이상에서는 전압상승에 의한 분해 효율의 향상을 기대하기 힘들다는 것을 나타낸다.

## 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. 이와같은 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]

이러한 PD는 방전경로와 2차 전자방출을 포함한 방전형태의 차이에 의해 여러 가지로 분류가 가능하며, 코로나(corona), 압축글로우(constricted glow), 전

자사태(electron avalanche), 스트리머(streamer), 국부적인 타운젠트방전(localized Townsend discharge), 유전체장벽방전(dielectric-barrier discharge) 등이 포함된다.[1]. 또한, PD는 전자의 평균에너지가 gas 분자의 평균에너지보다 항상 매우 커서 상대적으로 cold discharge로도 불리운다. 그림 1은 결함부에서의 전형적인 PD 패턴과 그때의 전류파형을 나타낸 것으로[3],  $E_{inc}$ 는 공극에서의 방전개시전계(inception field)로서 Paschen's curve에서 구할 수 있으며,  $E_r$ 는 방전 후의 잔존전계(residual field) 또는 전압으로서 수백 Volt정도로 알려져 있다.[5,6] 공극에 걸리는 전계  $E(t)$ 는 PD에 의해 절연체표면에 공간전하가 축적되어 역전압이 발생하는 것으로 설명이 가능하다.

한편, dielectric-barrier(DB) discharge(또는 silent discharge)는 한쪽 또는 양쪽전극이 유전체로 덮힌 경우의 방전형태로서, 방전에 의해 유전체 표면에 축적된 공간전하가 공극전계를 완화시켜 방전을 억제

하는 자동소멸형(self-quenching)으로서, 최근 방전시에 발생하는 가속전자와 가스분자 사이의 충돌이온화(collision ionization) 작용을 이용하여 자동차 배기 가스에서 배출되는  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  등의 공해물질을 제거하는데 폭넓게 이용되고 있다.[7,8]

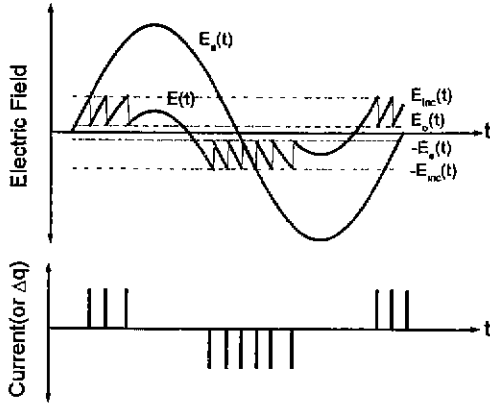


그림 1 전형적인 부분방전 패턴  
Fig 1 Typical pattern of partial discharge

그리고, 실제 유전체를 포함한 공극에서의 PD(dielectric-barrier discharge)는 단일방전이 아닌 다중(multi channel)방전으로서, 그림 1보다 복잡한 모양의 PD 패턴과 공간전하 효과를 나타내며, 이것에 의해  $E(t)$ 도 변화하게 된다. 따라서, PD 패턴과 공간전하의 상호관계를 규명하는 것은 PD 패턴의 정확한 분석을 통한 전력설비의 예방진단과  $E(t)$ 의 조절을 통한 공해물질 제거의 효율향상 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다.[9]

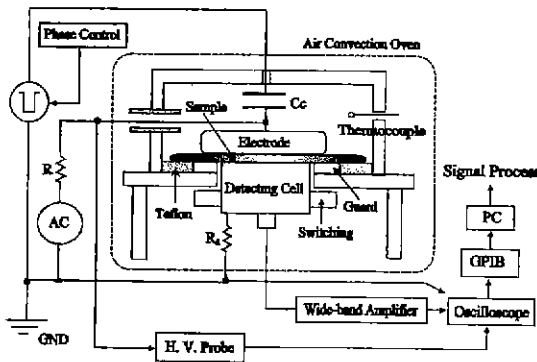


그림 2 교류전압 하에서의 측정시스템의 개략도  
Fig 2 Schematic diagram of measuring system under AC voltage

하지만, 현재까지 PD에 대한 연구는 PD 패턴의 현상학적 관찰과 신호처리를 통한 결함부의 위치검출과 형상, 크기분석 등에 대한 연구가 대부분이었으며[1], PD 자체에 의한 공간전하의 거동과 측정된 공간전하가 공극전계, PD 패턴 및 AC 절연특성에 미치는 영향에 대한 직접적인 연구는 극히 제한되어 왔다. 이에 대한 주 원인으로서는 검출방법의 한계를 들 수 있다. 즉, 현재까지 교류전압 하에서 공극을 포함한 절연시스템의 PD 패턴과 절연체에 축적되는 공간전하를 동시에 측정할 예는 아직까지 보고되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 이와같은 점을 고려하여, 그림 2에 나타나 있는 측정시스템을 이용하여, AC전압 하에서 공기층과 절연체(XLPE)를 포함한 전극구조에서 PD 패턴과 공간전하분포의 동시 측정을 처음으로 가능하게 하였다. 또한, PD 및 교류절연 특성과 공간전하의 직접적인 상호관계를 규명하기 위하여, PD 자체에 의해 절연체에 축적되는 공간전하의 거동과 공극전계의 변화를 직접적으로 조사하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용한 전극구조의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 시편과 spacer로서 각각 두께가 1mm와 550~580 $\mu\text{m}$ 인 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 $^{\circ}\text{C}$ ) 및 1~8kV의 AC전압에서 PD 패턴과 XLPE의 공간전하분포를 교대로 측정하였으며, 공간전하를 측정하기 위한 입력전압펄스의 크기와 폭은 각각 -1kV, 16ns이었으며, 압전소자로서는 두께 28 $\mu\text{m}$ 의 PVDF를 사용하였다. 그리고, 공간전하분포는 위상제어기를 통해 0~360 $^{\circ}$ 에서 약 18 $^{\circ}$ 간격으로 측정하였으며, S/N비를 향상시키기 위하여 약 1000회의 평균화와 보정(deconvolution) 처리를 실시하였다.

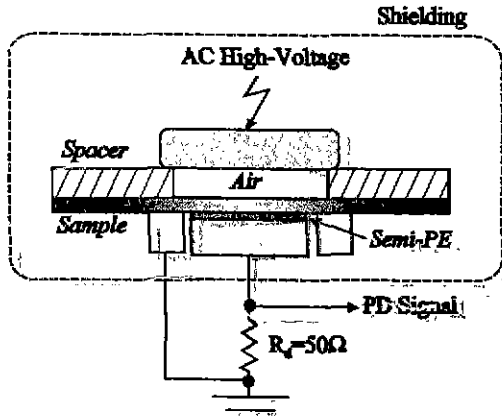


그림 3 전극구조의 개략도  
Fig 3 Schematic diagram of electrode configuration

### 3. 실험결과 및 분석

그림 4는 전압에 따른 PD 패턴의 변화를 나타낸 것으로, oscilloscope를 사용하여 64회의 envelope mode로 측정하였으며, 인가전압은 PD 패턴과 비교하기 위하여  $\times 3$ 을 하여 표시하였다. 그림에서 3, 5, 7kV의 전압과형에 표시된 각점은 공간전하가 측정된 인상을 나타낸 것으로, 측정에는 약 40분이 소요되었으며, 측정 후의 PD 패턴을 함께 비교하였다.

그림에서 알 수 있듯이 PD는 약 3.5kV의 전압에서 개시되었으며, 5kV 이상에서는 다중방전의 양상을 나타내었다. 그리고, 인가전압의 증가에 따라 PD 크기는 비례적으로 증가하지 않고 포화되는 경향을 나타내었으며, PD 개시시간은 왼쪽의 반주기로 확장되는 경향을 나타내었다. 또한, 반주기 내의 PD 패턴은 초기에 비교적 큰 pulse를 나타내지만, 시간에 따라 약간씩 감소하는 특성을 나타내었다. 이러한 PD 패턴은 일반적인 void 내의 PD 특성과 거의 일치하는 현상으로서[10], 방전시 XLPE 표면에 축적되는 공간전하에 의한 영향, 즉 유전체장벽방전 효과와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각할 수 있다.

한편, PD 패턴에 미치는 spacer의 edge 효과를 파악하기 위하여, 하부전극과 guard 전극을 단락 시켜 같은 실험을 실시한 결과, PD 패턴에 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 spacer의 edge 부분에서는 상대적으로 저항이 작아 PD가 발생하는 어렵고, 표면을 따라 누설전류만 흐르기 때문인 것으로 생각된다.

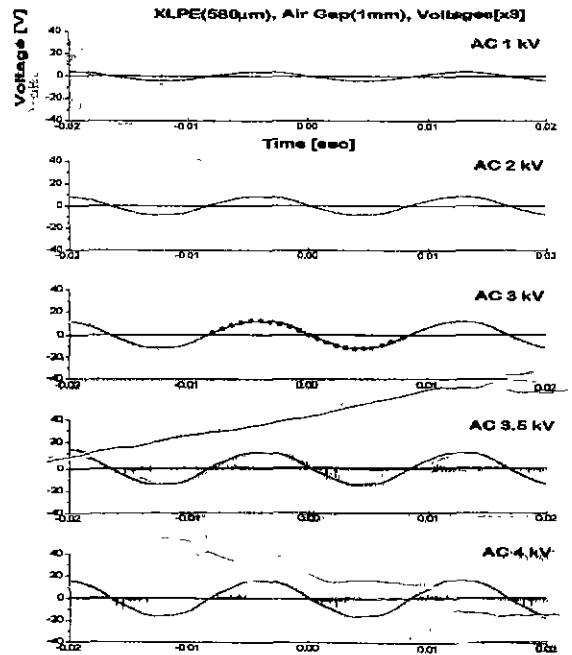


그림 4(a) 인가전압에 따른 PD 패턴의 변화  
Fig 4(a) Variation of PD patterns according to applied voltage

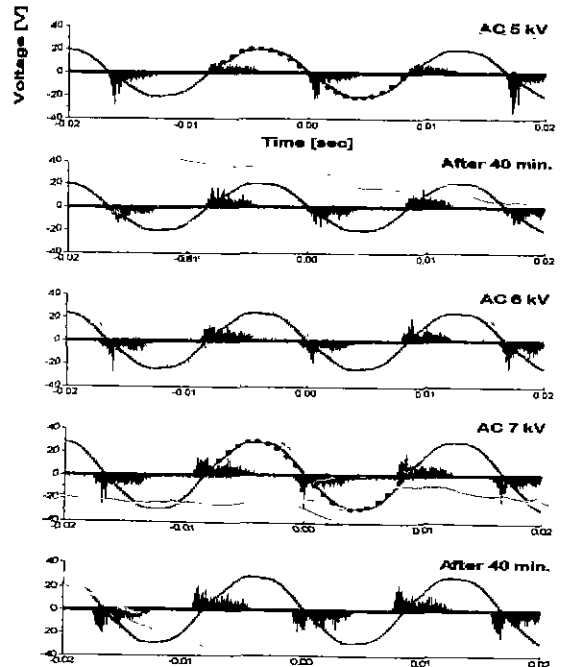


그림 4(b) 인가전압에 따른 PD 패턴의 변화  
Fig 4(b) Variation of PD patterns according to applied voltage

이와같은 PD 패턴에 대한 공간전하의 영향을 확인하기 위하여, 각각 AC 3, 5, 7kV의 전압 하에서 위상변화에 따른 XLPE의 공간전하분포를 측정하였으며, 그 중에서 AC 5kV의 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 오른쪽은 시료의 상부, 즉 공기층과 직접 닿아있는 부분에서의 공간전하를 나타내고, 왼쪽은 하부전극과 접촉된 부분이다. 그림에서 알 수 있듯이, 교류전압 하에서 공기층을 포함한 전극구조에서 PD 패턴과 함께 XLPE의 공간전하분포가 성공적으로 측정되었음을 확인할 수 있었다. 그리고, 그림에서 GND 결과는 AC전압을 차단하고 측정한 공간전하분포로서, PD에 의해 시료 표면에 축적되어있는 공간전하가 없는 것을 확인할 수 있었다. 또한, AC 8kV를 약 1시간 인가한 경우에 있어서도 동일한 현상을 나타내었다. 이것은 상대적으로 PD에 의해 순간적으로 절연체 표면에 축적된 전하가 짧은 시간 동안 소멸되는 것을 의미하는 것으로, DC와 달리 AC전압 하에서는 절연체 내에 순수한 공간전하가 형성되기 힘들다는 것을 나타낸다.

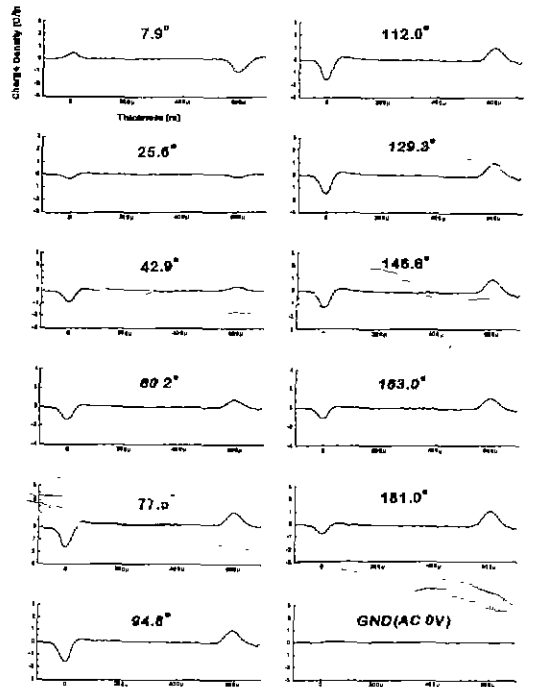


그림 5(b) AC 5kV에서 위상에 따른 공간전하분포  
Fig 5(b) Space-charge distributions at AC 5kV according to phase

한편, 공기층을 포함한 전극구조에서 측정된 공간전하는 주로 각 계면에서의 표면전하로 볼 수 있으며, 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

XLPE(580um), AC 5kV, Air Gap(1mm)-

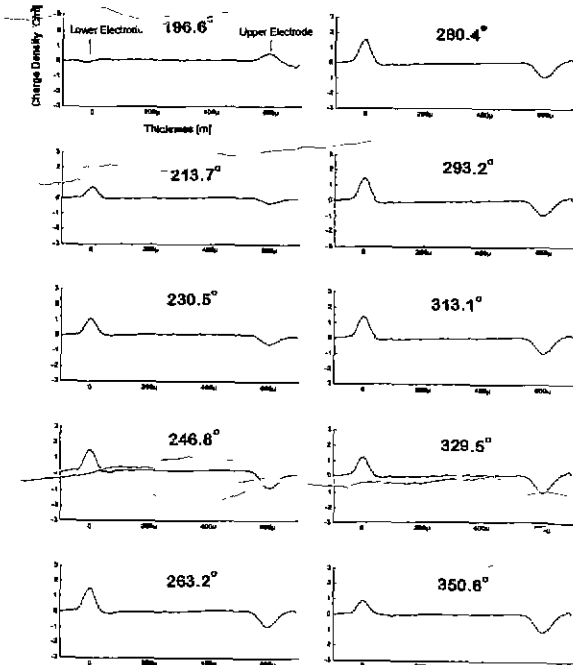


그림 5(a) AC 5kV에서 위상에 따른 공간전하분포  
Fig 5(a) Space charge distributions at AC 5kV according to phase

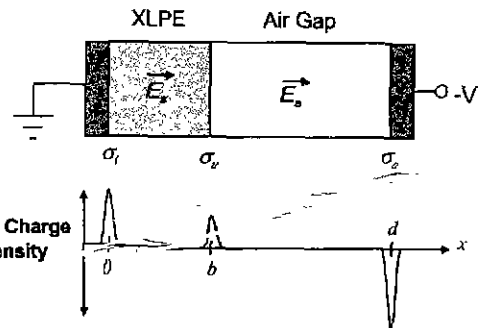


그림 6 공기층이 존재할 때 각 계면의 전하분포  
Fig 6 Charge density of each interface when air gap exists

여기서,  $E_x$ 와  $E_a$ 는 각각 시료와 공기층에 걸리는 전계를,  $\sigma_a$ 는 상부전극에 유기된 표면전하를,  $\sigma_x$ 와  $\sigma_d$ 는 XLPE 하부와 상부의 net 표면전하를 나타낸

것으로, 그림 5에서 일정구간 적분하여 구할 수 있다. 이때 측정된 공간전하를 분극의 영향을 포함한 net charge로서, 전파에 따른 감쇄효과를 무시하면 각 표면전하 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$\sigma_a = -(\sigma_l + \sigma_w)[C/m^2], \quad E_s = \frac{\sigma_l}{\epsilon_0},$$

$$E_a = -\frac{\sigma_a}{\epsilon_0} \quad [V/m] \quad (1)$$

즉, XLPE 양단에 형성된 공간전하를 측정함으로써 시료에 걸리는 전계와 전압을 구할 수 있게 된다. 그림 7, 8, 9는 이와같은 방법으로 각각 AC 3, 5, 7kV에서 구한 각 layer에서의 전압분포를 나타낸 것이다.

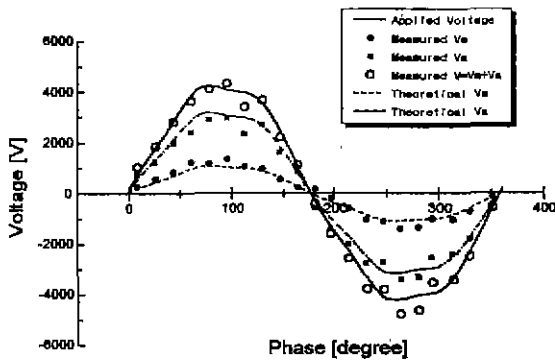


그림 7 AC 3kV에서 공간전하에 의한 전압분포 (Vs: 시료전압, Va: 공극전압)  
Fig 7 Voltage distribution by space charge distribution at AC 3kV (Vs: Voltage across XLPE, Va: Voltage across air gap)

그림 7은 PD가 개시되기 전인 AC 3kV에서의 결과로서, 용량성(capacitive) 전압분포를 나타낸다. 즉, PD에 의한 공간전하의 축적이 발생하지 않아 인가전압은 공기와 XLPE의 정전용량(capacitance) 성분에서 분압된다. 그림에서 점선은 공기와 XLPE의 유전율에 따른 분압비를 계산한 이론곡선으로, 공간전하분포로부터 구한 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 공간전하가 성공적으로 측정되었음을 나타내며, 기존에는 측정이 불가능하였던 유전체장벽효과와, PD와 공간전하의 직접적인 비교가 가능하게 되었다는 것을 의미하며, 또한 유전체 특성등을 이용하여 공극전계(또는 전압)와 방전 특성을 조절할 수 있게 되었다는 것을 의미한다.

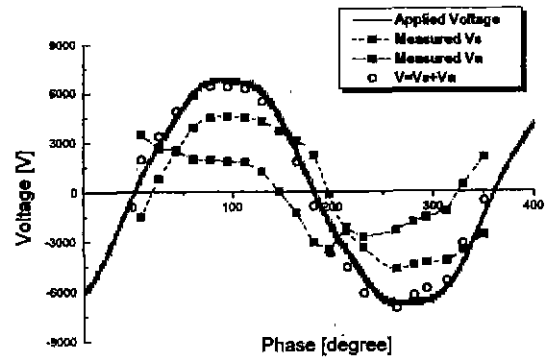


그림 8 AC 5kV에서 공간전하에 의한 전압분포 (Vs: 시료전압, Va: 공극전압)  
Fig 8 Voltage distribution by space charge distribution at AC 5kV (Vs: Voltage across XLPE, Va: Voltage across air gap)

그림 8은 PD가 발생 중인 상태인 AC 5kV에서 측정된 공간전하분포로부터 구한 전압분포를 나타낸 것으로, PD가 발생하기 전의 용량성 전압분포와는 매우 다른 모양을 나타내고 있으며, 또한 그림 1의 전형적인 PD 패턴과도 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 그림 5에서 알 수 있듯이 PD에 의해 XLPE 표면에 축적되는 공간전하의 영향으로 볼 수 있다. 즉, 극성 반전이 일어나는 부근에서는 절연체 표면에 축적되어 있던 공간전하에 의한 반대전계와 극성반전이 중첩됨으로서 공극에 걸리는 초기 전압은 증가하게 되고, 이것에 의해 축적되어 있던 전하가 다시 PD를 발생시킴에 따라 초기 PD 패턴은 증가하고, 또한 이것에 의해 다시 절연체 표면에 전하가 축적되어 공극전계를 점차 감소시켜 PD를 소멸시키는 주기적인 유전체장벽 효과가 나타나는 것으로 설명될 수 있다.

그림 9은 공기층에 걸리는 전압 Va와 그림 4에 표시된 PD 패턴을 함께 비교하여 나타낸 것으로, 그림 (a)는 공간전하를 측정하기 전에 측정한 초기 PD 패턴을, (b)는 공간전하를 측정(약 40분 소요)하고 난 뒤의 PD 패턴이다. 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. 한편, 시간에 따른 PD 패턴의 변화는 기존에 많은 연

구자에 의해 보고된 것과 일치하는 것으로[1,11], PD에 의한 절연체의 열화현상과 깊은 관련이 있는 것으로 볼 수 있다. 그리고, 그림 5에서 볼 수 있듯이 방전시간의 증가에 따라 초기 PD 패턴이 감소하며 넓어지는 현상과 공기층 전압에 비해 시간지연이 생기는 것은 지속적인 가속전자의 충돌에 의해 절연체 표면이 손상되어, 표면근처에 트랩준위(trap site)를 발생하고 상대적으로 방전시에 축적된 공간전하가 빠져나오기 힘든 것에 기인하는 것으로 추측된다.

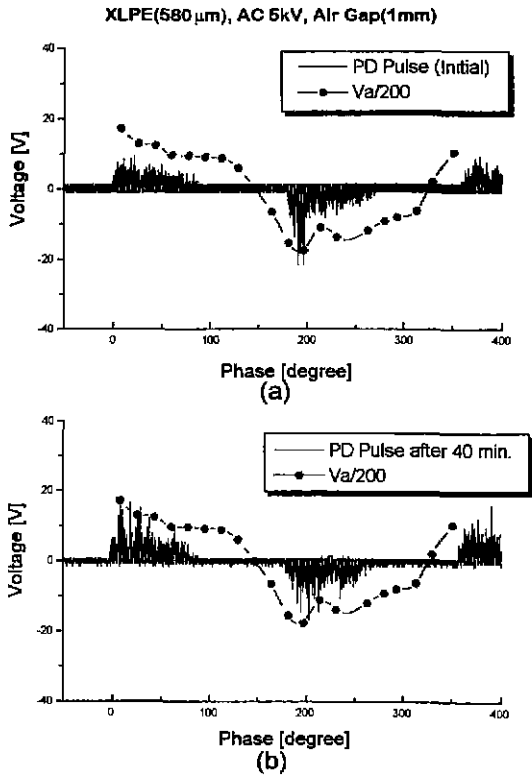


그림 9 AC 5kV에서 PD 패턴과 공극전압의 비교 (a) 초기 (b) 40분 후  
Fig 9 Comparison of PD patterns with voltage across air gap at AC 5kV (a) Initial (b) after 40 min.

그림 10은 AC 7kV에서의 공간전하분포로부터 구한 전압분포를 나타낸 것으로서, AC 5kV에서와 마찬가지로 PD가 발생 중인 상태에서 측정된 결과이다. 그림 10의 결과를 5kV에서의 결과와 비교하면, 전체적인 파형은 비슷하지만 인가전압의 상승에 의해 XLPE에 걸리는 전압은 증가한 반면에 공기층에 걸리는 전압은 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 그리고,

상대적으로 공극에 걸리는 최대전압이 왼쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 7kV에서의 PD 패턴과 공기층에 걸리는 전압을 AC 5kV에서의 결과와 함께 비교한 그림 11의 결과에서 확인할 수 있다. 즉, PD 패턴의 크기는 5kV인 경우와 비교하여 거의 증가하지 않았으며, 또한 왼쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다. 하지만, 상대적으로 PD 패턴의 폭은 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

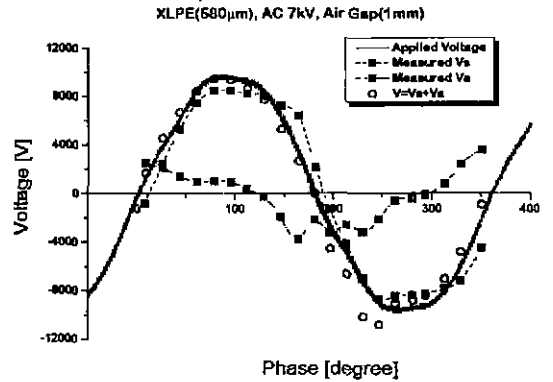


그림 10 AC 7kV에서 공간전하에 의한 전압분포 ( $V_s$ : 시료전압,  $V_a$ : 공극전압)  
Fig 10 Voltage distribution by space charge distribution at AC 7kV ( $V_s$ : Voltage across XLPE,  $V_a$ : Voltage across air gap)

이러한 결과는 인가전압이 증가로 인해 상대적으로 PD 개시시간이 짧아진 반면에, 방전에 의해 축적된 공간전하의 증가로 공기층에 걸리는 전압은 거의 증가하지 않은 것으로 설명될 수 있다. 즉, 전체적으로 PD 빈도는 증가하였지만, 전자의 에너지는 공간전하의 영향으로 거의 일정하다고 볼 수 있다. 한편, 이러한 특성은 인가전압이 어느정도 증가하여도 스트리머(streamer) 방전이 아크(arc)로 진전되기 어렵기 때문에, 유전체장벽방전을 이용한 공해물질 제거 방법이 높은 분해효율을 계속 유지할 수 있는 장점이 있는 반면에, 일정 전계이상에서는 전압상승에 의한 분해효율의 향상을 기대하기 어렵다는 단점을 나타낸다. 따라서, 유전체장벽방전을 이용하여  $NO_x$ ,  $SO_x$  등과 같은 공해물질을 효율적으로 제거하고자 할 때는, PD에 의한 유전체 표면의 손상문제뿐만 아니라 유전체에 축적되는 공간전하의 분석을 통하여 최적의 유전체 종류, 전극간격 및 전압 조건 등을 구할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

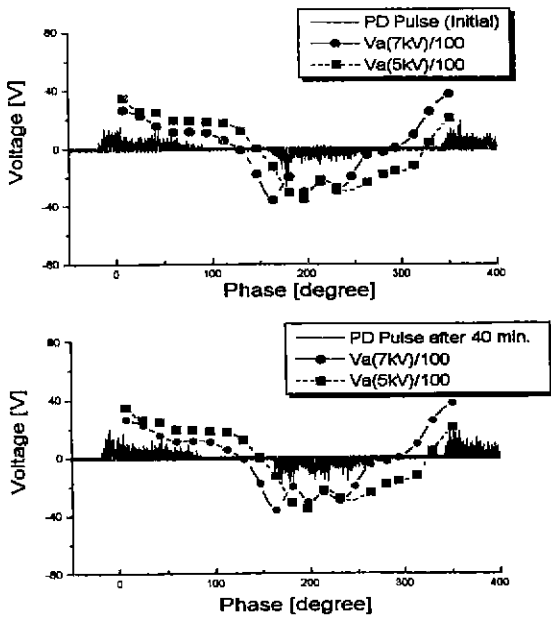


그림 11 AC 7kV에서 PD 패턴과 공극전압의 비교  
(a) 초기 (b) 40분 후  
Fig 11 Comparison of PD patterns with voltage across air gap at AC 7kV (a) Initial (b) after 40 min.

#### 4. 결론

기존의 펄스정전용력법(PEA)을 개선하여, AC전압 하에서 공기층과 XLPE를 포함한 전극구조에서 PD 패턴과 XLPE의 공간전하분포의 동시측정을 성공적으로 수행하였다. 이와같은 측정은 기존에는 측정이 불가능하였던 PD와 공간전하의 직접적인 비교를 가능하게 한 것으로서, 아직까지 보고된 바가 없는 최초의 실험이다. 또한, 이러한 동시 측정을 통하여 PD 발생시 XLPE 표면에 축적되는 공간전하가 PD 패턴에 미치는 영향, 즉 유전체장벽방전 효과를 직접적으로 확인할 수 있었다.

지금까지의 실험결과로부터 PD 패턴은 방전에 의해 절연체 내부보다는 표면에 축적되는 공간전하와 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 PD가 발생하는 공기층에 걸리는 전압(또는 전압)은 이러한 공간전하에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 그리고, 일정전계 이상에서는 공간전하의 축적에 의한 영향으로 PD 크기와 공기층의 전계는 더 이상 증가하지 않는 것을 알았다. 이것은 인가전

압이 증가하여도 PD가 arc로 진전하기 어려움을 나타낸다. 그리고, 유전체장벽방전을 이용한 공해물질 분해에 있어서 현재까지 분해시스템에 전달되는 전력은 주파수와 인가전압의 크기에 비례하는 것으로 알려져 있었으나, 본 결과를 통하여 일정전계 이상에서는 전압상승에 의한 분해효율의 향상을 기대하기 힘들다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 이러한 PD 패턴과 공간전하의 동시 측정을 통하여, 유전체장벽방전을 이용하여 공해물질을 효율적으로 제거하려면, PD에 의한 유전체 표면의 손상 문제뿐만 아니라 유전체 표면에 축적되는 공간전하의 분석을 통하여 최적의 유전체 종류, 전극간격 및 전압조건 등을 구할 필요가 있다는 것을 나타낸다.

#### 참고문헌

- [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] F. H. Kreuger, Industrial High Voltage, Ch. 9, Delft Univ. Press, 1991.
- [6] F. H. Kreuger, Industrial High Voltage, Ch. 8, Delft Univ. Press, 1992.
- [7] T. Suzuki, H. Murakami, M. A. Jani, K. Takaki, S. Katoh, T. Fujiwara, S. Maekawa, "Flue Gas Treatment Using Dielectric-Barrier Discharge II", 日本電氣學會・絶縁材料研究會資料, DB-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] L. Niemeyer, "A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 2, No. 4, pp. 510-534, 1995.
- [10] 市川裕己, 伊藤邦博, 鈴置保雄, 水谷照吉, 内田克己, "Computer 計測による高分子材料の部分放電劣化現象の検討", 日本電氣學會・絶縁材料研究會資料, DB-94-12, 1994.
- [11] C. Rodehed, A. Gustafsson, U. W. Gedde, "Electrical Strength and Chemical Surface Analysis of Polypropylene after Exposure to External Partial Discharges", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, No. 6, pp. 1066-1076, 1990.