

# 고전압공학 일반 및 부분방전 기초

전력연구원 차세대송변전연구소

이종건

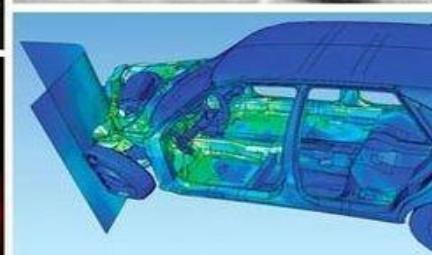
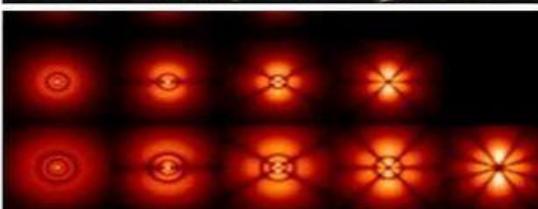
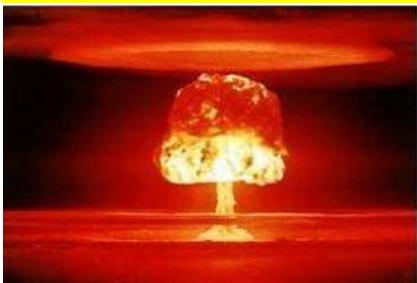
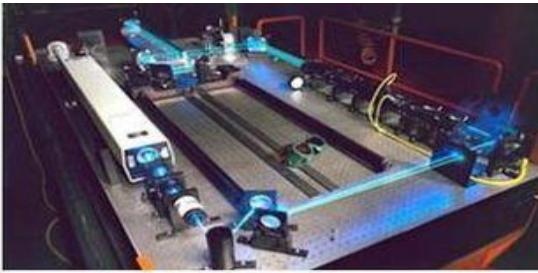
# Contents

- 
- 01 방전이론 기초
  - 02 절연체의 절연파괴
  - 03 부분방전의 발생 및 측정
  - 04 PRPD 패턴 예제

# 1. 방전이론 기초

## 서 론

### ❖ 물리 현상(Physical Phenomenon)

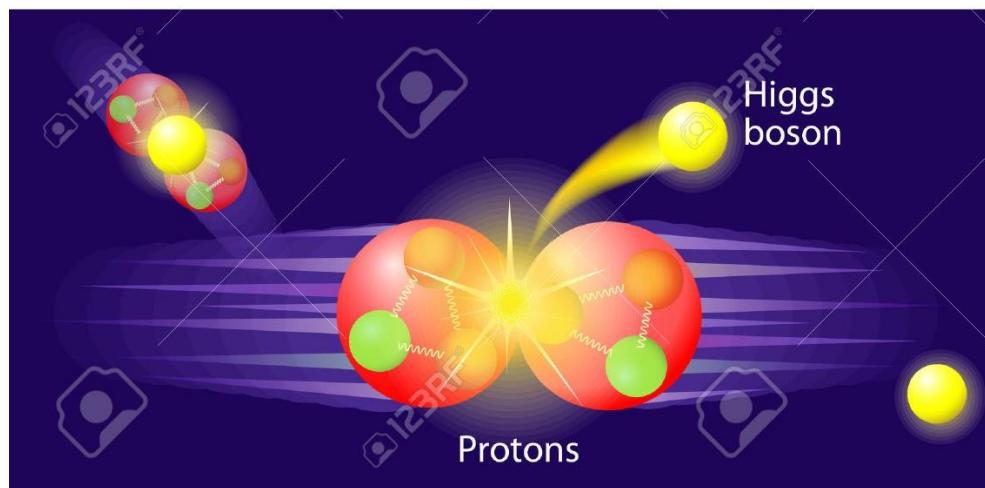
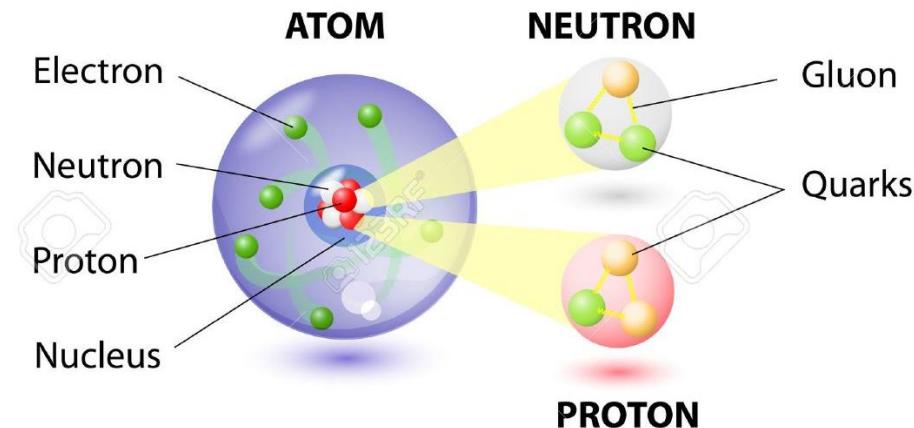


에너지가 매질을 통해 전달되는 현상

# 1. 방전이론 기초

## 서 론

### ❖ 매질(Medium)



# 1. 방전이론 기초

## 서 론

### ❖ 입자 유형에 따른 물리현상 분류

고전역학(Newton's Law)

- 원자, 분자 단위 물리현상



전자기학(Electromagnetics)

광학(Optics)

- 원자핵, 전자 단위 물리현상

양자역학 (Quantum Physics)

- 전자 이하 단위 물리현상



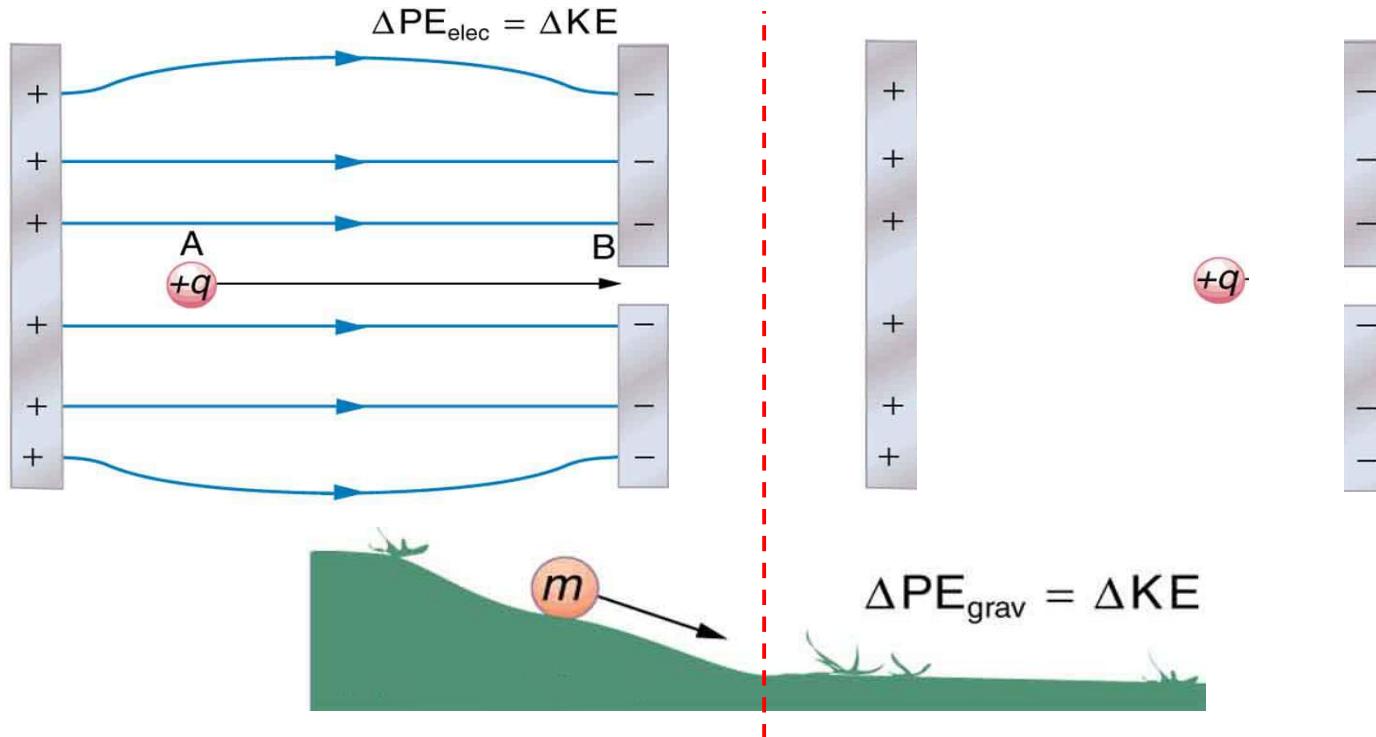
전기적인 현상은 Nucleus(원자핵)와 Electron(전자) 만으로도 설명 가능

# 1. 방전이론 기초

## ▶ 전압(Voltage), 전류(Current)

### ❖ 에너지의 전달

에너지 : 물질이 물리적인 일을 할 수 있게 하는 능력

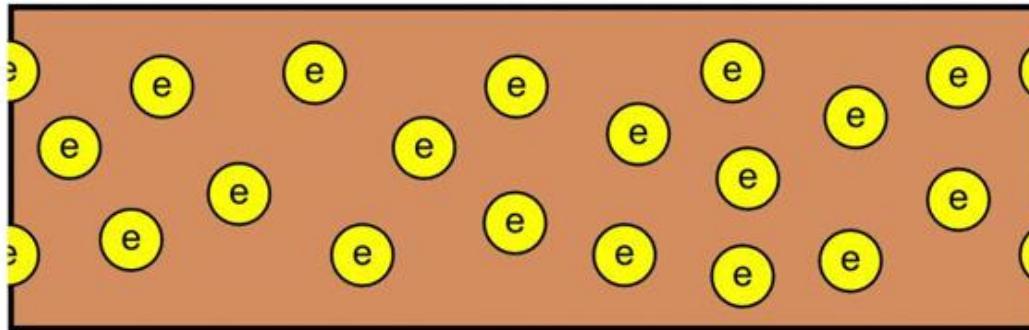


**전위(Voltage)** : 전기적 위치 에너지, 장(Field)을 형성하며,  
전자를 움직여(Current) 일을 수행함

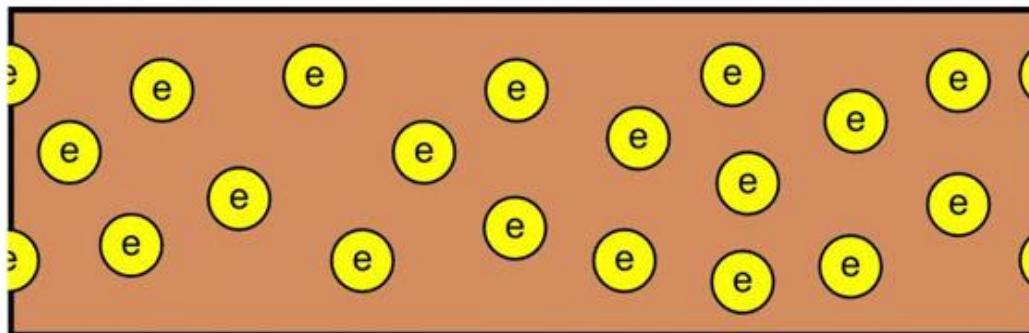
# 1. 방전이론 기초

## 전기장 유형

- ❖ AC/DC의 구분



Alternating Current (AC)



Direct Current (DC)

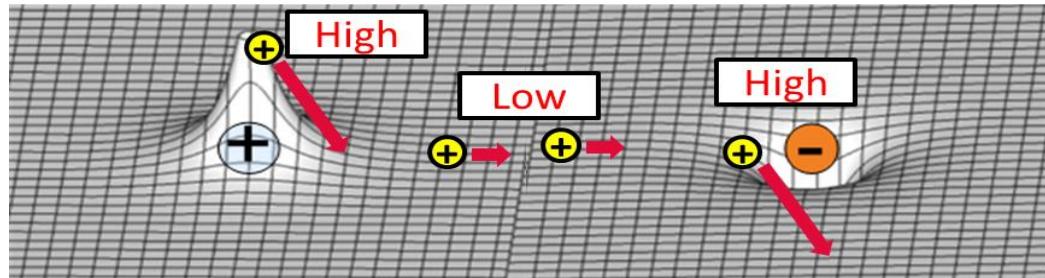
인가 전압의 유형에 따른 전자의 에너지 전달 방식 상이

# 1. 방전이론 기초

## ▶ 전계 (Electric Field)

### ❖ 전계의 형성

- Electric Field : 전기력을 갖는 전하가 주위 공간에 힘을 가하는 정도[V/m]
- Coloumb Force : 전기적인 성질을 갖는 대전체 사이에 작용하는 힘



양전하와 음전하에 의한 전계 형성

### ❖ 전계 이용률

- 무한 평판 사이에서 형성되는 균등 전계를 기준으로 대상 전계의 불평등 정도를 나타내어주는 지수

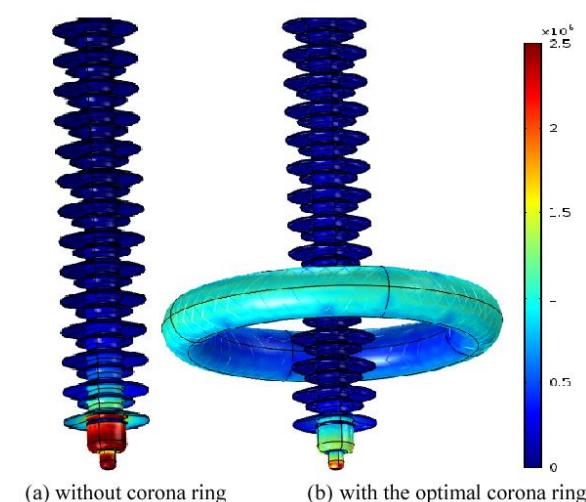
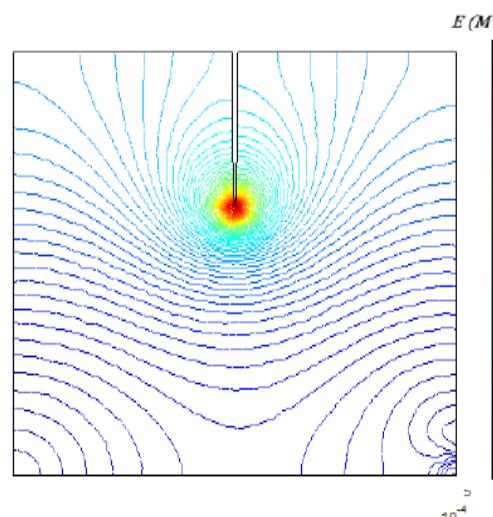
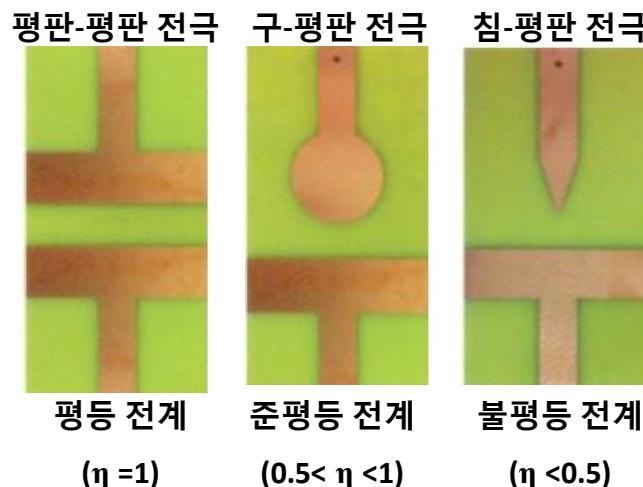
$$\eta = \frac{E_{Mean}}{E_{Max}} = \frac{V}{d} \frac{1}{E_{Max}} \quad (0 < \eta \leq 1)$$

# 1. 방전이론 기초

## ▶ 전계 (Electric Field)

### ❖ 전계 이용률에 따른 전계 유형 분류

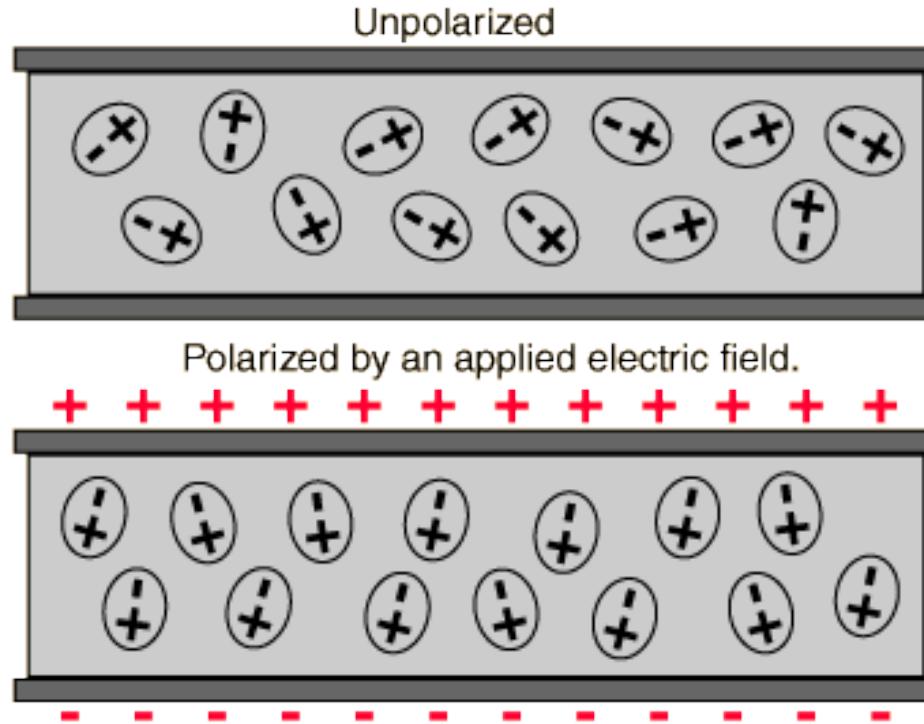
- 전극의 형상 및 배치에 따라 전계 이용률( $\eta$ )이 변화함
- $\eta$  값이 작을수록 불평등 전계 형성 → 국부적인 전하 집중 (전계 집중)
- 전계 집중도가 높은 위치에서 방전 개시 확률이 높음  
→ 절연 설계를 통한 전계 완화 필요



# 1. 방전이론 기초

## ▶ 유전분극(Polarization)

### ❖ 유전분극(Polarization) 현상



- 전계 인가 시 **극성분자들이 정렬**하여 물질 표면에 전기 극성을 나타내는 현상
- 분극 정도는 물질이 갖는 비유전율( $\epsilon$ )이 결정

# 1. 방전이론 기초

## ▶ 유전체(Dielectric)

### ❖ 유전체(Dielectric)의 정의

- 전기장 안에서 유전 분극(Polarization)으로 인해 극성을 갖는 절연체
- 비유전율이 허용하는 범위 내에서는 직접적인 전하 이동이 없음

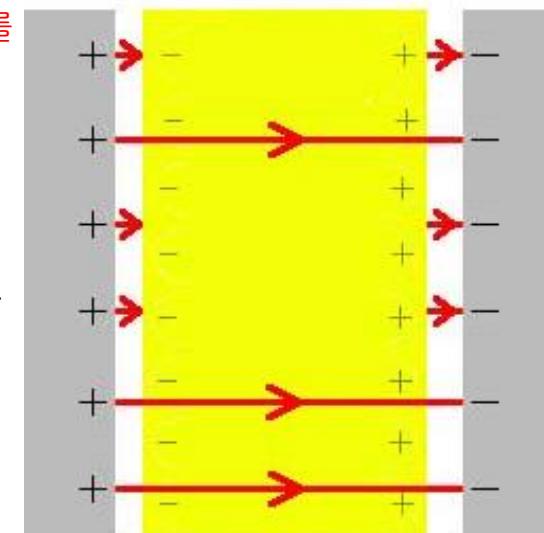
### ❖ 유전체와 절연체

- 유전체는 평판 전극 사이에 전하를 저장할 수 있는 물질  
→ 비유전율(Permittivity)에 의존
- 절연체는 도선과 도선 사이의 전하의 흐름을 차단하는 물질을 지칭함  
→ 비저항(Resistivity)에 의존
- 유전체는 절연체?  
→ 평판전극 사이 전하축적을 위해 정전류(DC Current) 차단 필요

# 1. 방전이론 기초

## 유전율(Permittivity)

- 일단 영어단어를 살펴보면 permit 은 허락한다는 뜻인데, 이것이 우리가 알고 있는 유전율과 어떤 관련이 있는지 살펴볼 필요가 있음
  - Dielectric이 electric field에 놓이게 되면 서로 영향을 줌
    - ① Dielectric은 electric field의 영향을 받아서 polarizing 되고
    - ② Electric field는 dielectric이 polarizing되는 만큼 줄어듬
  - 그럼 왜 'permit'일까? 이는 permittivity가 해당 dielectric이 electric field를 얼마나 '허락'해주느냐와 관련 있는 물리량이기 때문
  - Electric field가 멀쩡히 걸려 있는데 dielectric이 들어가면 electric field가 dielectric을 통과하지 못하고 E가 작아지는 모양을 보여준다고 볼 수 있음
  - Dielectric의 유전율이 크면, dielectric이 더 많은 양의 electric field가 dielectric 내부를 통과할 수 있게 "허락"을 해주고 그만큼 dielectric 외부의 E는 작아짐



# 1. 방전이론 기초

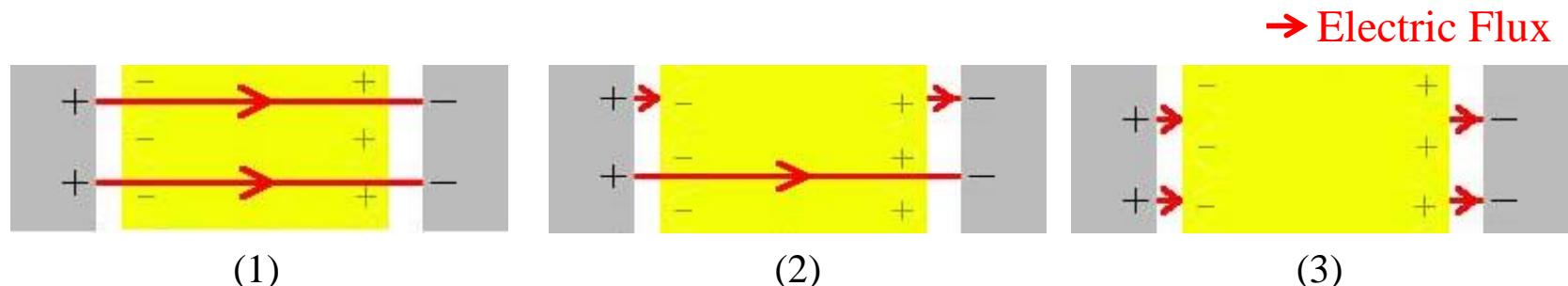
## ▶ 유전분극(Polarization)

### ❖ 비유전율( $\epsilon$ , Permittivity)

- ‘Permit’ tivity : 유전체가 전계를 얼마나 ‘수용’해 주는 정도를 의미함
- 비유전율이 큰 물질 : 분극이 잘 이루어짐 → 전기력선이 잘 채워짐

ex) 유전율 :  $1 > 2 > 3$ , 분극 정도 :  $1 > 2 > 3$ , 전계 집중 정도 :  $3 > 2 > 1$

→ 절연 용도로의 유전체 성능 :  $1 > 2 > 3$



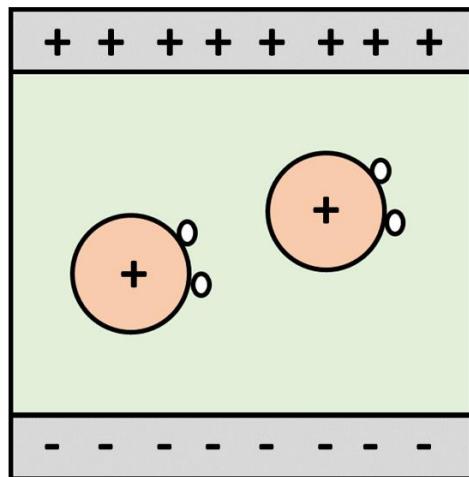
- 절연물의 Capacitance 가 커야 하는 이유  
→ 큰 유전율 값을 갖기 위해 → 절연성능 향상 및 절연체 열화 방지

# 1. 방전이론 기초

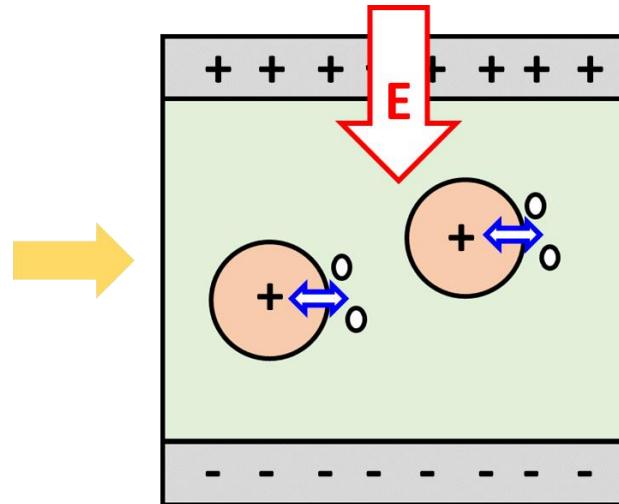
## 방전현상(Discharge)

### ❖ 방전현상의 정의

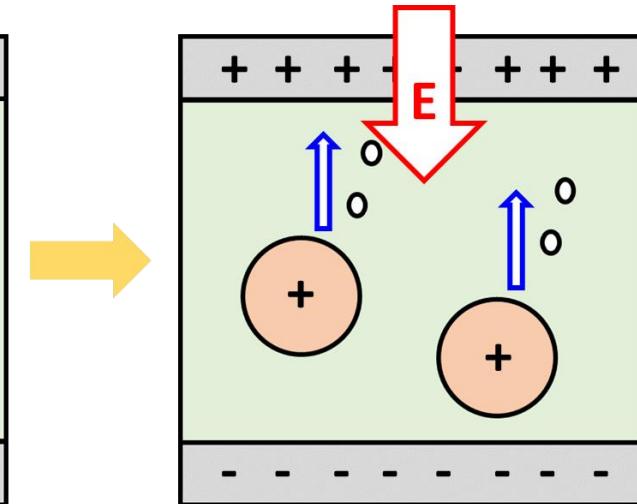
- 방전(放電, discharge) : 전자를 갖는 대전체가 전하를 잃는 과정
- 물질의 절연성능을 상회하는 전압 인가 → 전자 이동 및 방전전류 형성
  - 절연 성능 : 인가되는 전압에 대한 전자 이동을 억제하는 정도



분자 결합으로 이루어진 절연물



강한 전기장에 의한 결합 붕괴



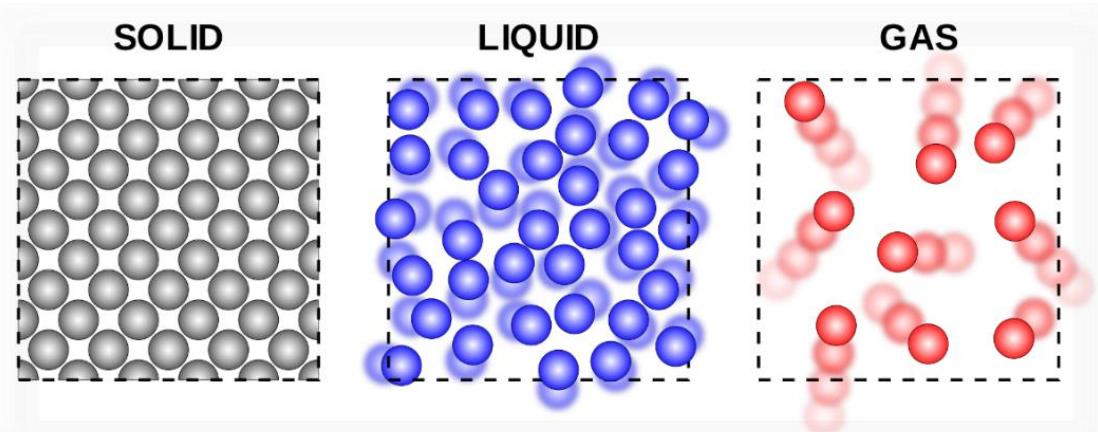
전자의 이동으로 인한 방전 전류 생성

## 2. 절연체의 절연파괴

### ▶ 절연체의 특성

#### ❖ 절연 방식에 따른 절연물 종류 분류

- 공기절연, 가스절연, 진공절연, 고체절연, 액체절연, 복합절연



Cable



Transformer



GIS



## 2. 절연체의 절연파괴

### ▶ 절연체의 특성

#### ❖ 절연체의 요구 사항

- Capacitance 값이 커야 함 → 높은 강도의 전계가 형성되지 않음
- 대상 전압에 대한 절연특성이 확보되어야 함
- 인장강도, 굽힘, 탄성과 같은 기계적 특성이 보장되어야 함
- 도전전류에 의한 손실, 유전체손 등으로 발생하는 열적 특성 확보
- 방전 발생에 따른 화학적 반응으로부터 안정되어야 함

절연물 특성	기체 ( $SF_6$ )	액체 (절연유)	고체 (에폭시)	진공
절연특성	O	O	●	O
기계적특성	△	△	●	△
열적특성	X	●	X	X
소호특성	●	O	X	●

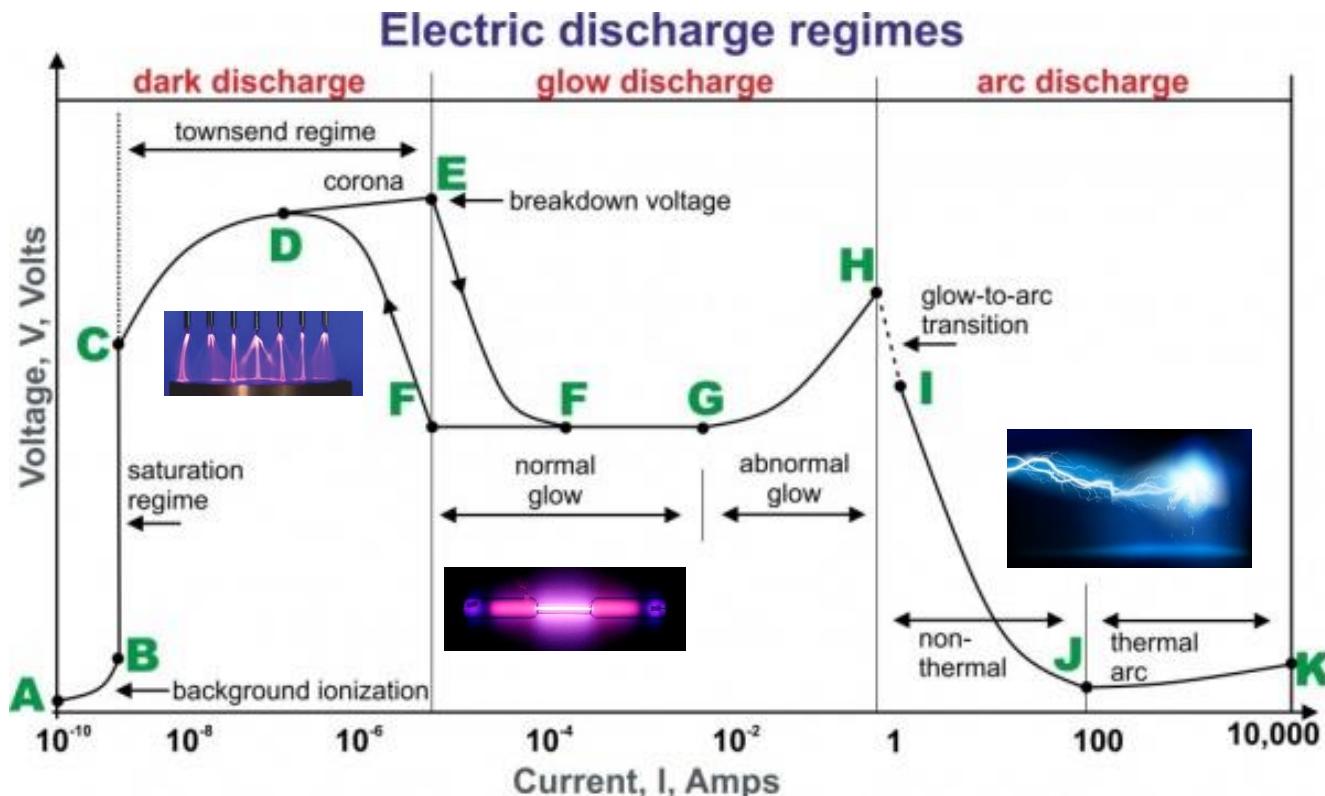
●: 아주양호, O: 양호, △: 고체의 지지율에 의존, X: 불량

## 2. 절연체의 절연파괴

### 기체 절연파괴

#### ❖ V-I 특성에 따른 방전 유형 구분

- 방전 시 발생하는 에너지의 정도에 따라 크게 3종류로 구분
- Dark discharge(암류) < Glow discharge(글로우 방전) < Arc discharge(아크 방전)



## 2. 절연체의 절연파괴

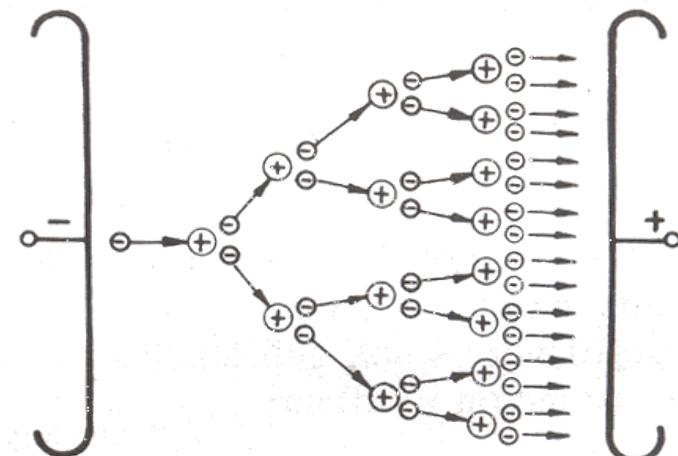
### 기체 절연파괴

#### ❖ 전자사태(Avalanche)

- 전계 인가  $\rightarrow$  전자 가속  $\rightarrow$  중성자 충돌  $\rightarrow$  (+)와 (-)로 전리  $\rightarrow$  추가 전리
- 전자사태만으로는 절연파괴 시 급증하는 전류를 설명할 수 없음

#### ❖ Townsend discharge

- J. S. Townsend에 의해 주장, 이차전자 방출 인자를 고려한 방전이론
- 3개의 프로세스로 구성되며 각 프로세스는 아래와 같음
  - $\alpha$  프로세스 : 전자사태에 따른 충돌 전리
  - $\beta$  프로세스 : 양이온에 의한 충돌 전리
  - $\gamma$  프로세스 : 전극에서의 충돌 전리
- 극간 거리가 증가하거나, 기체 압력이 증가할 경우 정확도가 떨어짐

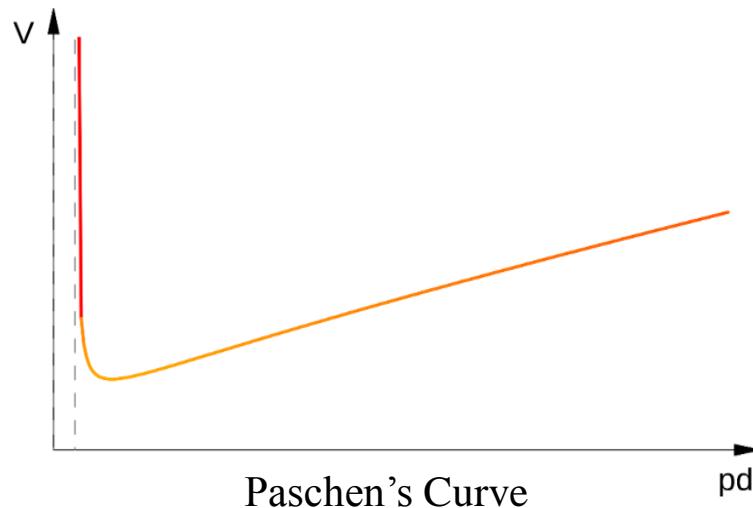


## 2. 절연체의 절연파괴

### 기체 절연파괴

#### ❖ Paschen's Law

- 타운젠트 방전 이론을 통해 압력-거리와 절연파괴 전압 상관관계 도출
  - 전계 및 온도가 일정할 경우를 가정함
  - 방전 개시전압 : 압력과 거리의 곱인  $pd$ 에 의해 결정됨



- $pd$  값이 약 67 kPa·cm 이상을 초과할 경우 타운젠트 방전 이론과 실험식 간 어긋남이 커짐을 도출함

## 2. 절연체의 절연파괴

### 기체 절연파괴

#### ❖ Paschen's Law 실증시험

##### 1. 배경

- 진공 작업 중 발생하는 저진공(0.1~0.5 Torr) 영역에서 345kV 가공선으로부터 GIB로 유기되는 유도전압에 의한 내부 방전 개시 가능성 검토

##### 2. 문헌자료 분석

- Paschen curve 분석을 통한 저진공 영역에서의 1kV 이하 전압 환경에서의 방전 개시 가능성 분석
- 저진공 영역에서 고장이 발생한 345kV GIB의 도체와 외함 간 절연거리를 적용하여 Paschen curve의 변수인  $pd$ (압력×거리)값 산출

	진공도	절연거리	pd 값	
1	0.1 ~ 0.5 Torr	10.3 cm	1.03 ~ 5.15 Torr·cm	0.14 ~ 0.69 kPa·cm 13.7 ~ 68.7 mbar·mm

## 2. 절연체의 절연파고

### 기체 절연파고

#### ❖ Paschen's Law 실증시험

- GIB 내에서 공기(Air)가 잔류할 경우와 SF<sub>6</sub> 가스가 잔류할 경우에 따른 산출된 pd 범위 내에서의 방전개시전압 도출

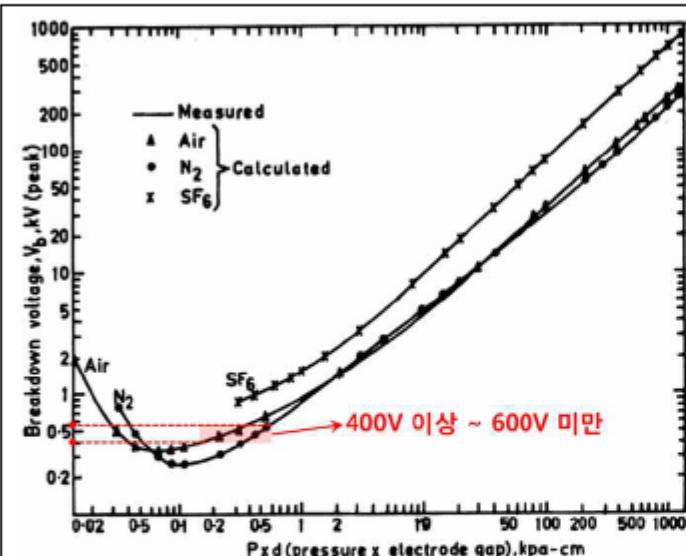


Fig. 1: Measured and calculated Paschen curves for air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>

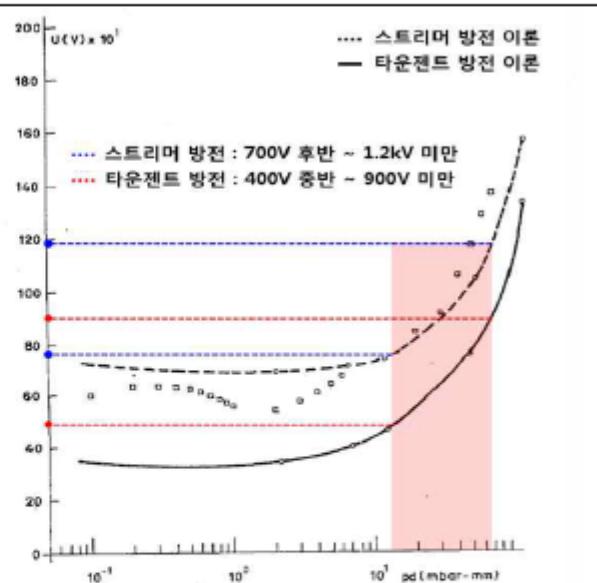


Fig. 2 Experimentally obtained points by static voltage and numerically calculated curves / criteria (1) curve (—) and (2) curve (---) ( $\gamma=10^{-6}$ )

공기	400V ~ 600V	SF <sub>6</sub>	스트리머 이론 타운젠트 이론	700V~1.2kV 400V~900V
----	-------------	-----------------	--------------------	-------------------------

※ E. Husain et al., "Analysis of Paschen Curves for Air, N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub> using the Townsend Breakdown Equation", IEEE Trans. Electrical Insulation, AUG 1982

※ P. Osmokrovic, "Electrical Breakdown of SF<sub>6</sub> at Small Values of the Product pd", IEEE Trans. Power Delivery, OCT 1989

## 2. 절연체의 절연파괴

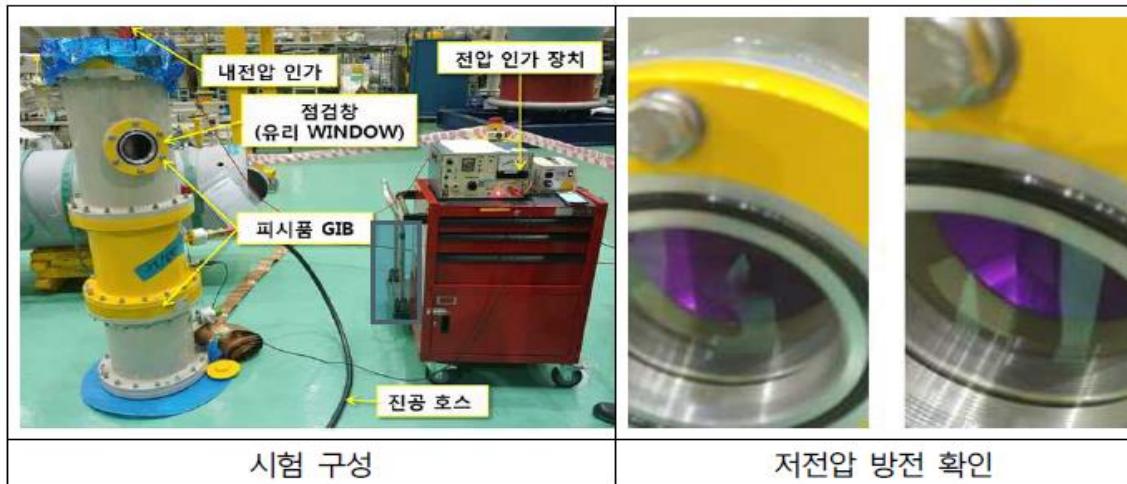
### 기체 절연파괴

#### ❖ Paschen's Law 실증시험

#### 3. 실증시험 결과

- GIB 내 공기(Air)가 잔류할 경우를 상정, 저진공 영역에서 전압을 인가하여 방전 개시전압을 측정함
- 문헌 자료 분석 결과와 동일하게 공기 중 저진공(0.25~0.5 Torr) 영역에서 448~500V 전압에서 방전이 개시됨을 확인함

	GIB 조건	시험 조건	결과
1	0.5 Torr	0V에서 1kV까지 가압	448V 방전 개시
2	0.25 Torr	0V에서 1kV까지 가압	500V 방전 개시
3	475V 고정	대기압에서 진공작업 실시	1.0 Torr에서 방전 개시

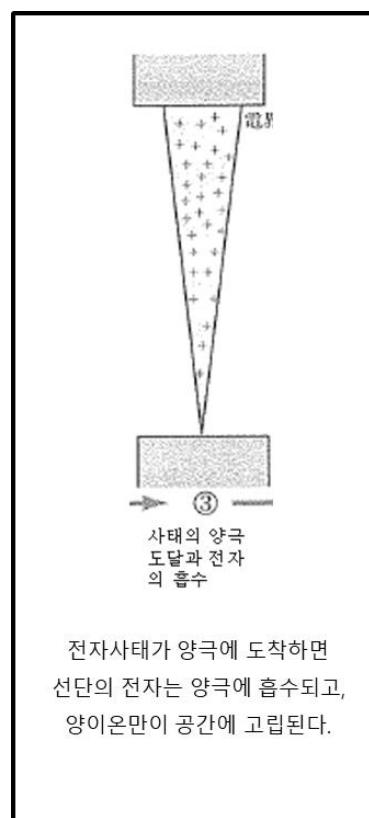
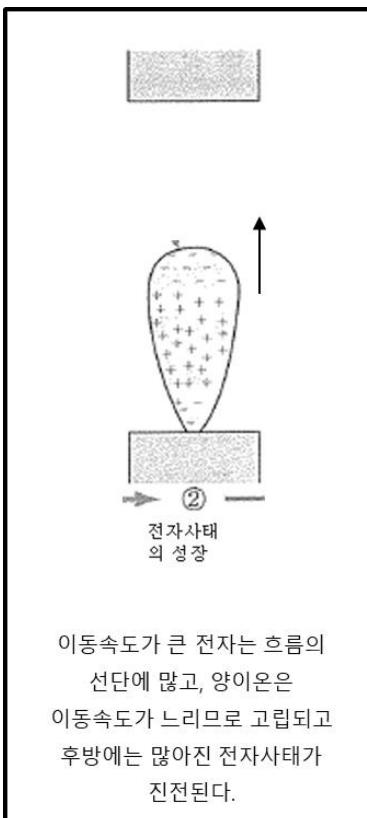


## 2. 절연체의 절연파괴

### 기체 절연파괴

#### ❖ Streamer Discharge

- Paschen's Law에 의해 도출된 Townsend 이론의 단점을 보완하기 위함
- 공간전하의 효과를 고려함 → 높은  $pd$  값에서의 방전 현상 설명 가능



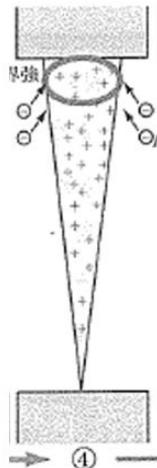
#### ※공간전하효과

: 물체의 주변 공간에 존재하는 전하가 가진 전위로 인해 물체의 전류흐름을 제한하는 효과

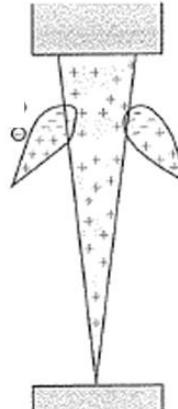
## 2. 절연체의 절연파괴

### 기체 절연파괴

#### ❖ Streamer Discharge



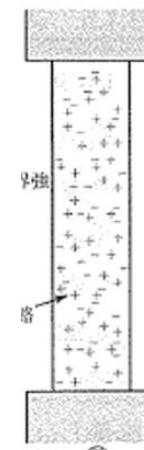
양극부근에서의 양이온 밀도는  
극히 커지므로, 그 양이온에 의한  
공간전하의 효과로 전계는 그  
근방에서 상당히 강해진다.



이 강한 전계에 의해 가까운  
전자를 끌어당긴다.



전자는 충돌전리를 반복하고, 새로운  
전자상태를 일으키면서 양이온의  
밀도가 커지는 공간의 가운데에  
들어가고, 양이온과 전자가 혼재한  
도전성이 높은 부분(스트리머)이 생김



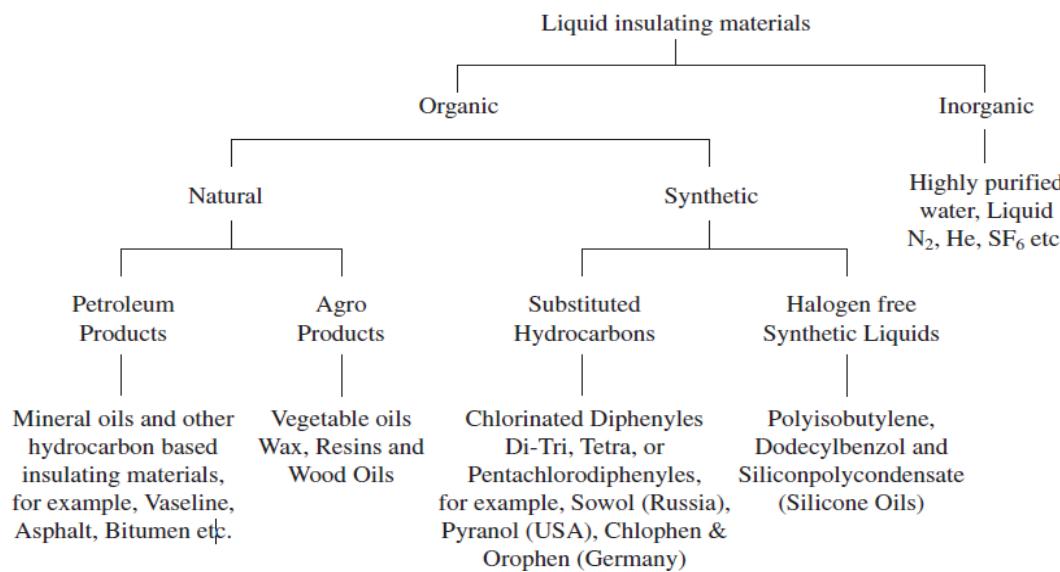
스트리머가 음극에 도달하면,  
방전로가 완성되고, 전극간에 단락  
되어 불꽃방전이 일어난다.

## 2. 절연체의 절연파고

### 액체 절연파고

#### ❖ 액체 절연물의 특성

- 액체의 정확한 절연파고 메커니즘은 규정되어 있지 않음
- 액체 절연파고 요인 → 캡 간격, 온도, 점도, 밀도, 분자 구조
- 탄화수소 계열 분자 구조를 갖는 액체가 절연 내력이 우수함  
→ 절연유(Transformer oil)가 주로 사용됨



액체 절연물의 분류

## 2. 절연체의 절연파괴

### 액체 절연파괴

#### ❖ 액체 절연물의 특성

- 기체와 다른 절연파괴 양상 → **분자 간 거리가 짧고 밀도가 크다**

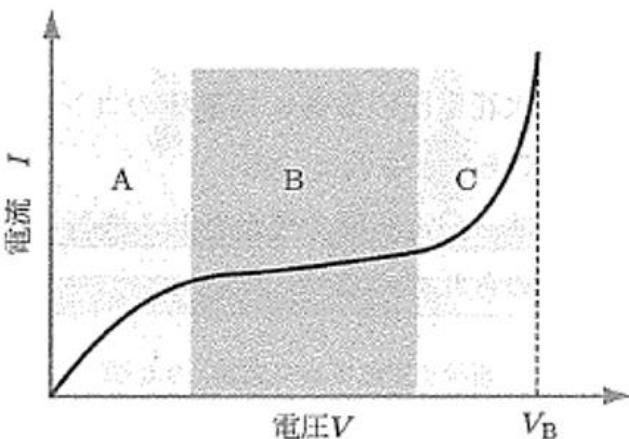


그림 3.10 평등전계하에서의 액체의 전류-전압특성

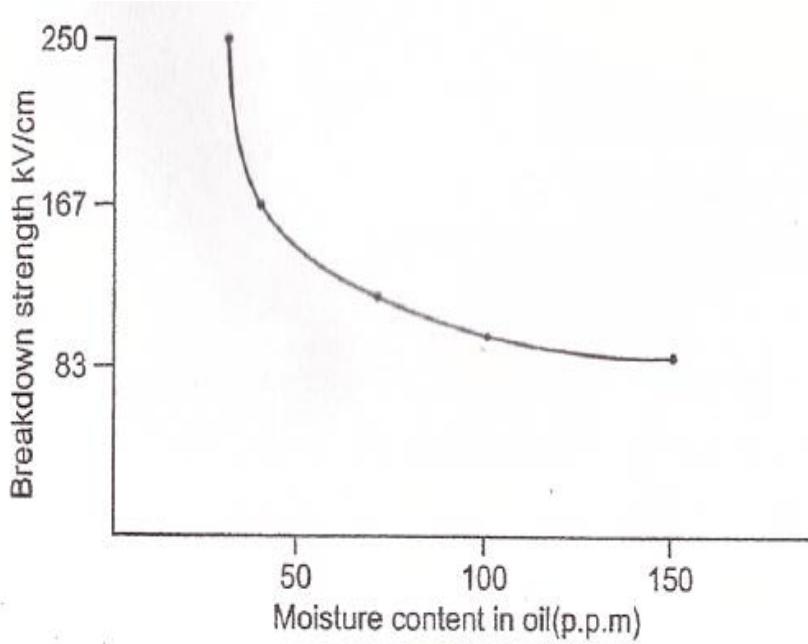
- A : 옴의 법칙에 따른  $V, I$  특성
- B : 액체에서만 나타나는 구간,  $I$ 가 포화 되거나 완만히 상승함 (재결합)
- C : 전류 급증 후 절연 파괴

## 2. 절연체의 절연파괴

### 액체 절연파괴

#### ❖ 절연유의 특성

- 일반적으로 절연유는 순수하지 않음 : **기포, 불순물 포함**  
→ 절연 내력 감소, **서로 다른 절연파괴 메커니즘**



절연유 내 수분에 따른 절연내력



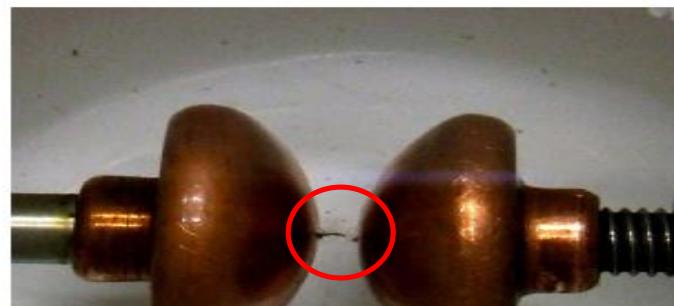
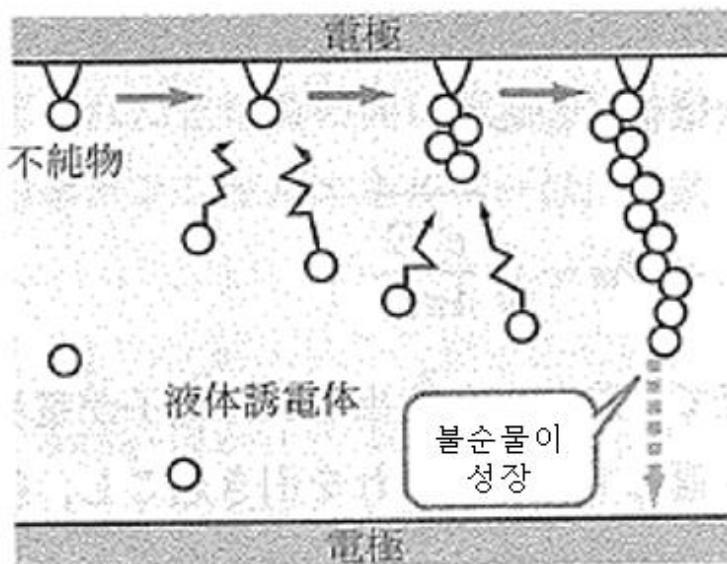
절연파괴시 절연유 불순물 형성

## 2. 절연체의 절연파괴

### 액체 절연파괴

#### ❖ 이물질에 의한 절연파괴

- 이물질이 클수록 절연 내력 저하
- 국부 전계가 절연유 절연파괴 전계보다 높으면 부분방전 및 기포 발생
- 이물질이 많으면 입자가 배열되어 전극 간 절연파괴 경로를 형성



이물질에 의한 전로 형성

그림 3.12 불순물에 의한 액체의 절연파괴

## 2. 절연체의 절연파괴

### 액체 절연파괴

#### ❖ 기포에 의한 절연파괴

- 기포 발생 원인
  - 전극 표면 gas pocket
  - 충돌에 의한 분해된 액체 분자
- 기포에 의한 절연파괴는 기포의 초기 크기에 의해 결정됨

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[ \frac{\pi}{4} \sqrt{\left( \frac{V_b}{2rE_0} \right) - 1} \right] \right\}^{1/2}$$

( $\varepsilon_1$ : 액체의 유전율,  $\varepsilon_2$ : 기포의 유전율,  $\sigma$ : 액체의 표면장력,  $r$ : 기포의 초기반경,  $V_b$ : 기포에서의 전압강하)



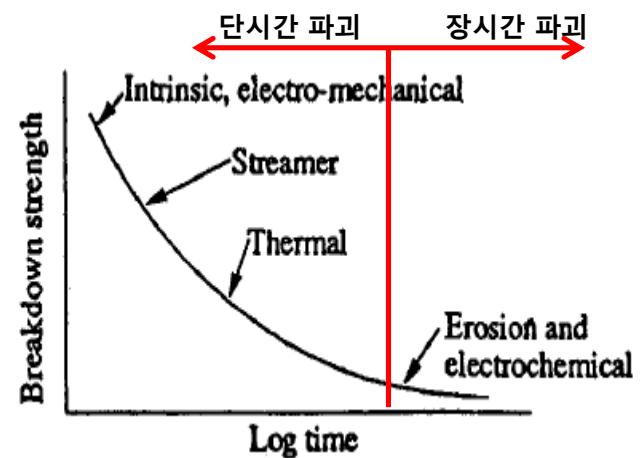
절연유 내부 기포

## 2. 절연체의 절연파괴

### 고체 절연파괴

#### ❖ 고체 절연물의 절연파괴 특성

- 단시간 파괴
  - 진성 파괴(Intrinsic breakdown)
  - 전기적 파괴(Electrical breakdown)
  - 전자사태 또는 스트리머(Avalanche or Streamer)
  - 열적 파괴(Thermal breakdown)
  - 전기역학적 파괴(Electromechanical breakdown)
- 장시간 파괴
  - 부식 혹은 전기적인 스트레스로 인한 열화
  - 내부 방전(Internal breakdown)으로 인한 열화
  - 트랙킹 또는 전기트리 (Tracking or Treeing)로 인한 열화



시간에 따른 파괴 특성 구분

## 2. 절연체의 절연파괴

### 고체 절연파괴

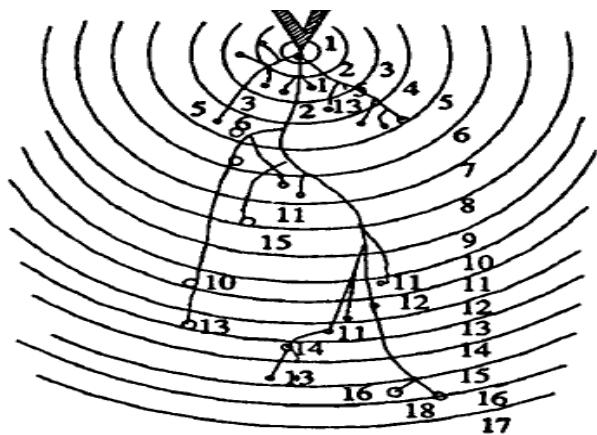
#### ❖ 진성 파괴

- 매우 짧은 시간( $10^{-8}$  s) 내 발생하는 절연파괴 현상
- 고체 격자 결함은 전자를 trap, 특정 전계 이상에서 trapped electron 전도 전자가 방출되어 격자 파괴

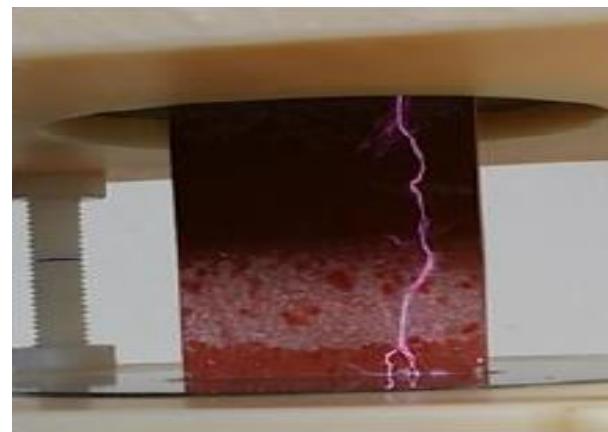


고체 절연물 내 격자 결함

#### ❖ 전자사태 또는 스트리머



전리 채널 형성



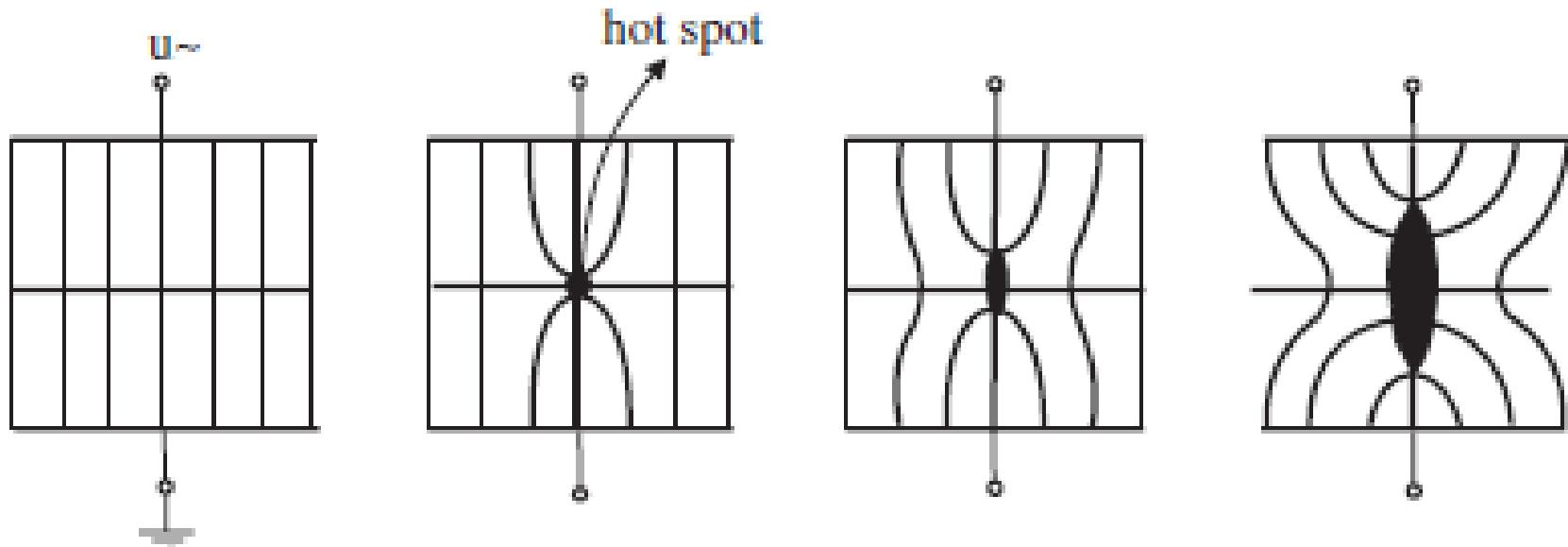
전리에 의한 절연파괴

## 2. 절연체의 절연파괴

### 고체 절연파괴

#### ❖ 열적 파괴

- 고체 절연물에 전압 인가 시 미소 전도 전류로 인한 hot spot 형성
- 고체 절연물 온도 상승, 절연물 표면 열 방출, 열전도 현상 발생  
→ 절연내력 약화

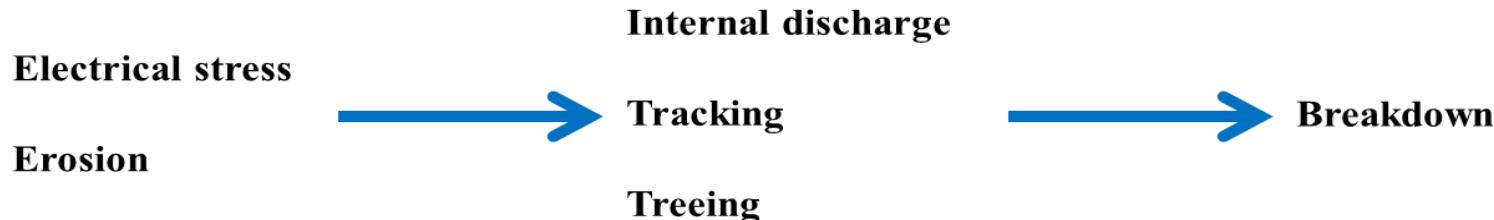


고체 절연물 내 등온선

## 2. 절연체의 절연파괴

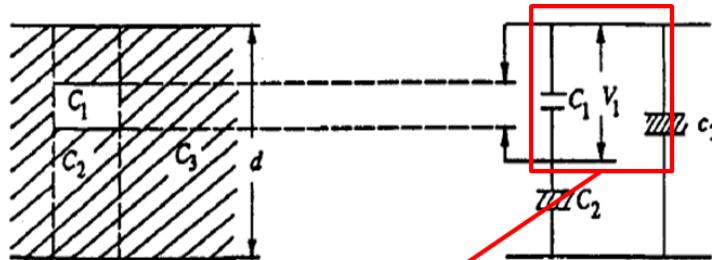
### 고체 절연파괴

#### ❖ 장시간 절연파괴

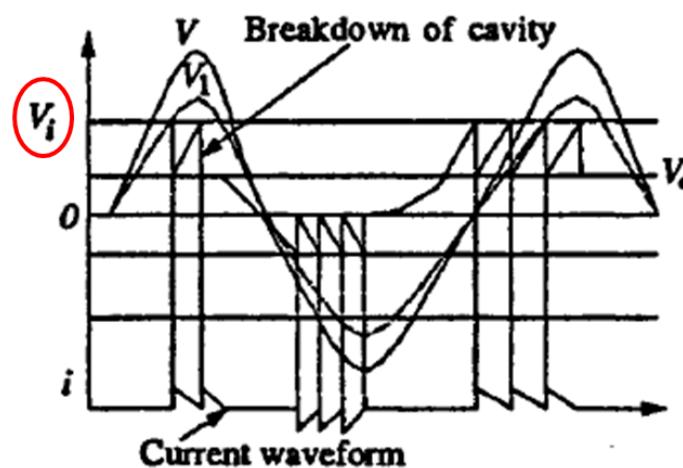


#### ❖ 내부 방전(Internal discharge)

- 내부 방전(=부분방전)은 절연 취약 부위에서 발생(Cavity, Void)
- Low permittivity = High electric field concentration



$$V_1 = \frac{C_1 V}{C_1 + C_2} = \frac{d_1 V}{d_1 + \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) d_2} \cong \epsilon_r V \frac{d_1}{d_2}$$



## 2. 절연체의 절연파괴

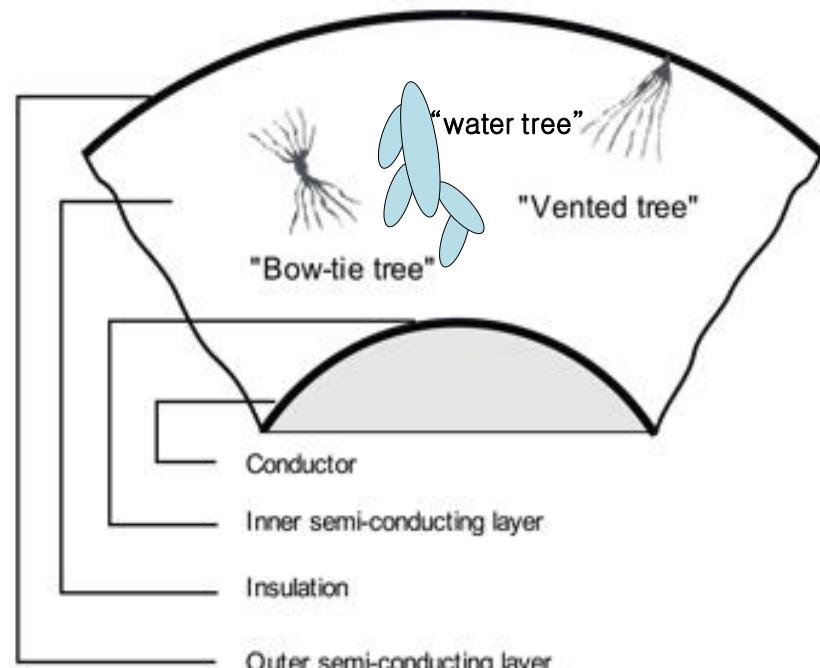
### 고체 절연파괴

#### ❖ 전기트리(Treeing)

- 장시간 동안 높은 전기적인 스트레스가 인가될 경우 발생
- 열화의 흔적을 나타내며, 절연파괴의 징조로 파악 가능

#### ❖ 전기트리 유형

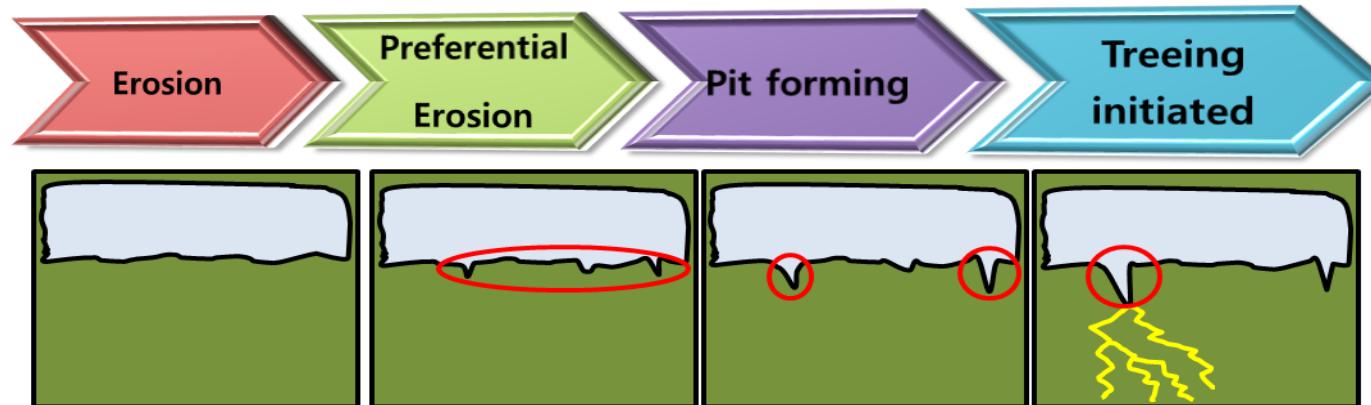
- Bow-tie tree : 절연물 내부에 발생,  
열화 시 대칭적으로 증가  
→ 절연성능 영향 X
- Vented tree : 전극 계면에서 발생,  
반대 전극으로 진전  
→ 절연성능에 큰 영향
- Water tree : 함침 절연 구조에서 발생  
→ 내부 절연내력 악화



## 2. 절연체의 절연파괴

### 고체 절연파괴

#### ❖ 전기트리 진전과정



#### ❖ 트랙킹(Treeing)

- 발생 시 영구적인 전로(Conduction path) 형성 → 고체 절연물의 가장 큰 약점
- 발생 요인
  - 표면 오염 : 습기 또는 금속 입자  
→ 누설전류 증가로 인한 트랙킹
  - 탄화 : 절연파괴로 인한 절연물 탄화

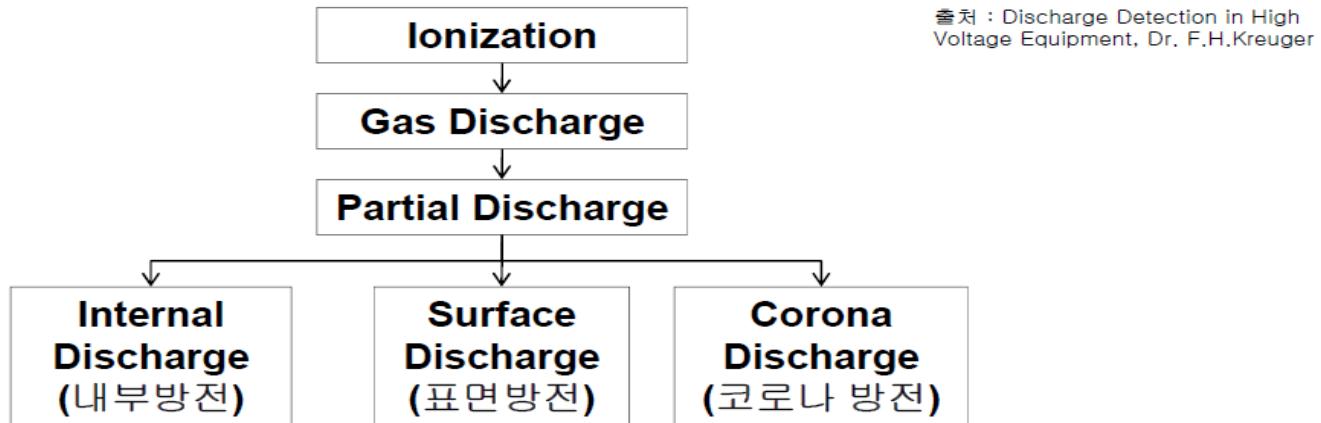


### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 부분방전의 발생

##### ❖ 부분방전(Partial discharge)

- 전극 사이를 가로지르지 않는 국부적인 방전 현상으로, 인가 전압이 PDIV(Partial Discharge Inception Voltage)를 초과할 경우 발생



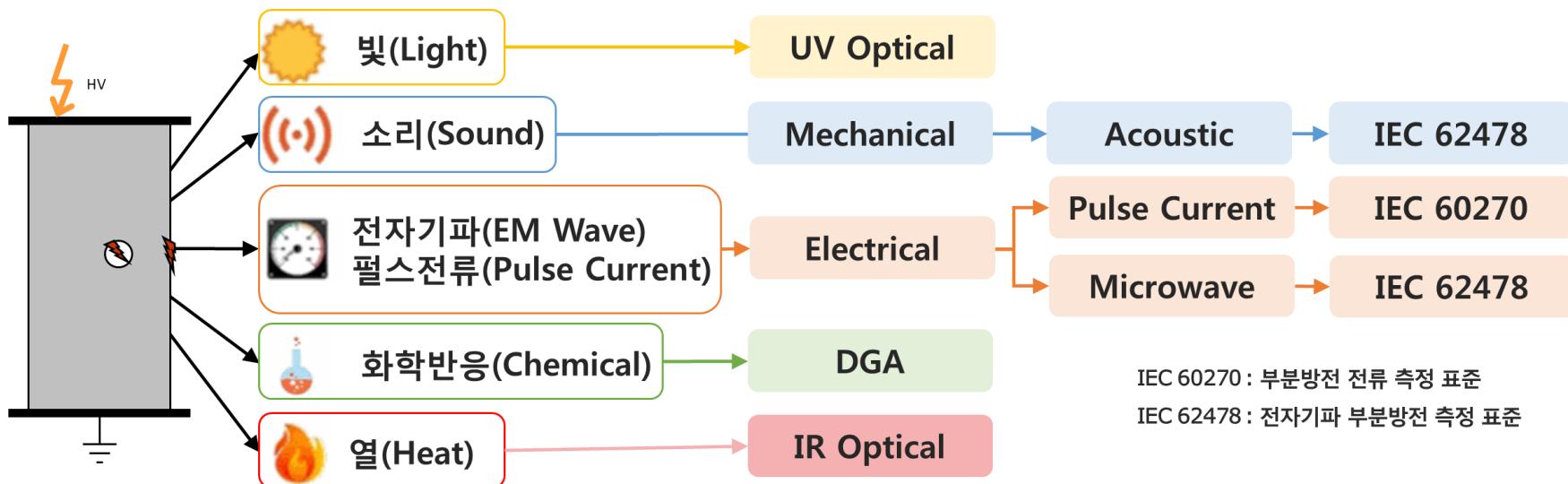
A **gas discharge** which does not bridge between the system electrodes (mentioned in std. IEC60270) caused by **insulation defect**

- ✓ Discharge due to a **Cavity (=Void)** or a **Fissure**(고체방전)
- ✓ **Corona discharge** due to a floating electrode or sharp edge(기체방전)
- ✓ **Tracking discharge** along an interface(표면방전)
- ✓ Discharge from **Electrical Tree** growth(전기트리 방전)

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전의 특징

##### ❖ 다양한 형태의 에너지 방출

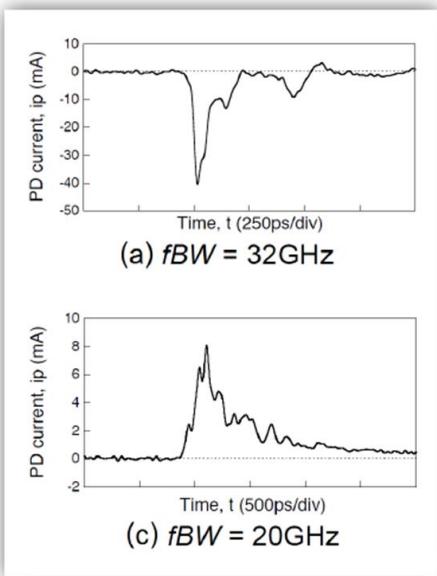


다양한 형태의 에너지가 넓은 주파수 영역에서 동시에 발생

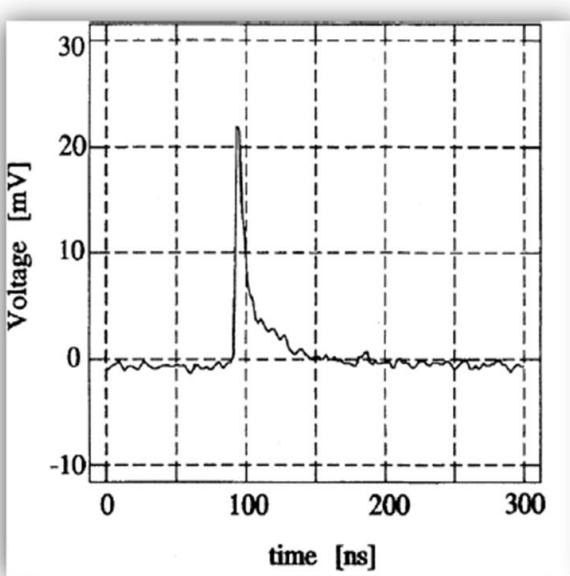
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전의 특징

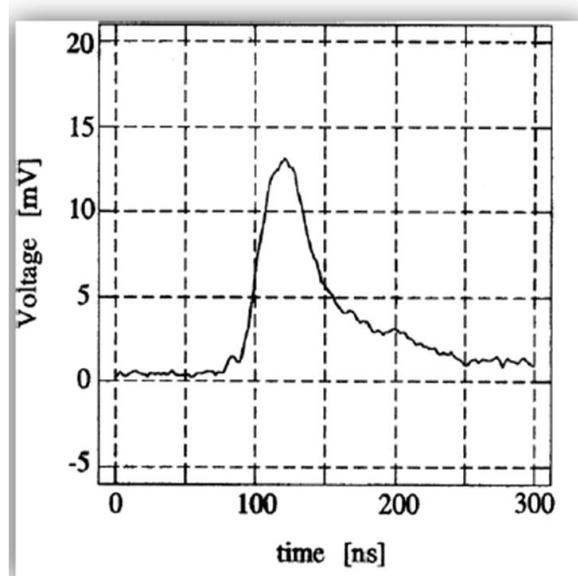
- ❖ 펄스 형태의 신호로 측정됨



기체 내부 방전



액체 내부 방전



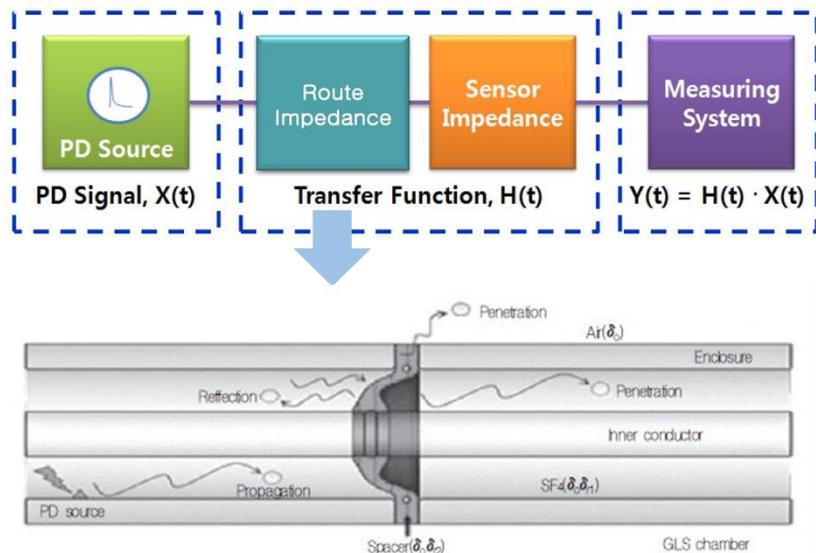
고체 내부 방전

- 펄스 형태의 신호, 빠른 상승/지속시간을 나타냄(수nsec)
- 유전율이 높을수록 상승시간 및 펄스 지속시간이 길게 측정됨

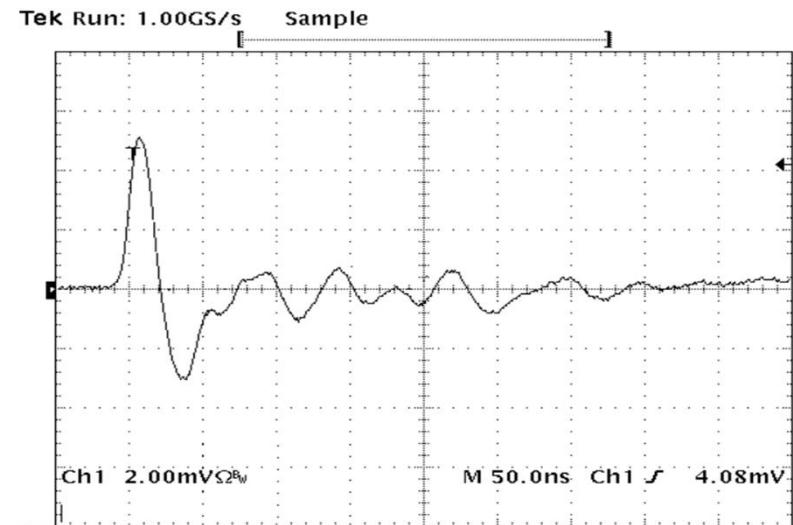
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전의 특징

- ◆ 전파경로 내 다양한 반사 요소로 인한 합성파 발생



부분방전 신호의 전파, 반사 및 합성파 투과



계측기를 통해 측정되는 부분방전 신호

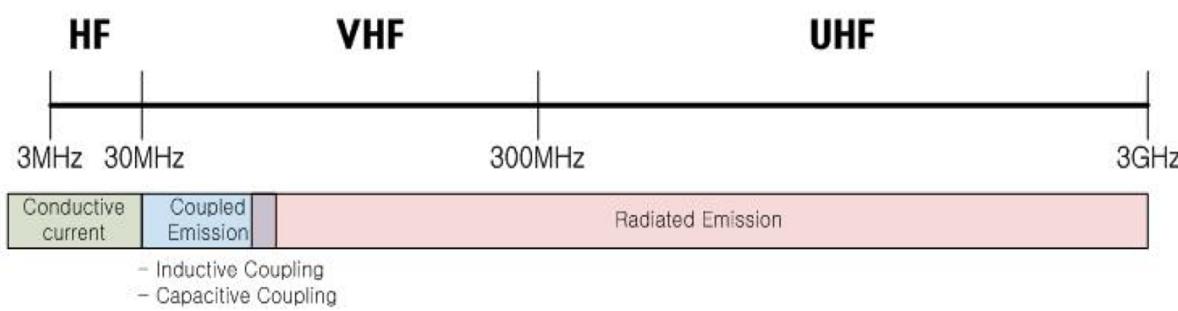
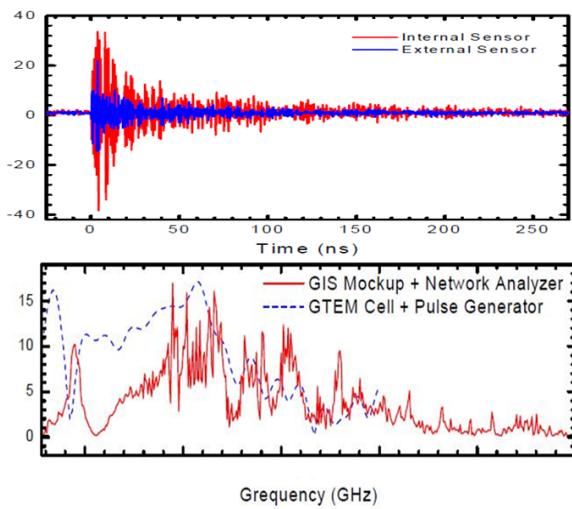
- 유전율이 서로 다른 매질의 접촉면에서 반사파 발생, 진행파와 합성
- 스페이서, 외함, 케이블 접속함, 절연물, 센서, 계측기 등

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전의 특징

##### ❖ 다양한 대역의 주파수 성분을 포함

- 부분방전 신호는 수 kHz ~ GHz 정도까지의 주파수 성분을 가짐
- 350psce ~ 수 nsec 정도의 상승 시간과 수 nsec 정도의 펄스 지속시간을 가짐
- PD 전파경로, 검출 센서등에 따라 검출 신호의 주파수 차이 발생



- ❖ HF/VHF ((Very) High Frequency) : 3M~300MHz,
- ❖ UHF (Ultra High Frequency) : 300M~3,000MHz

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

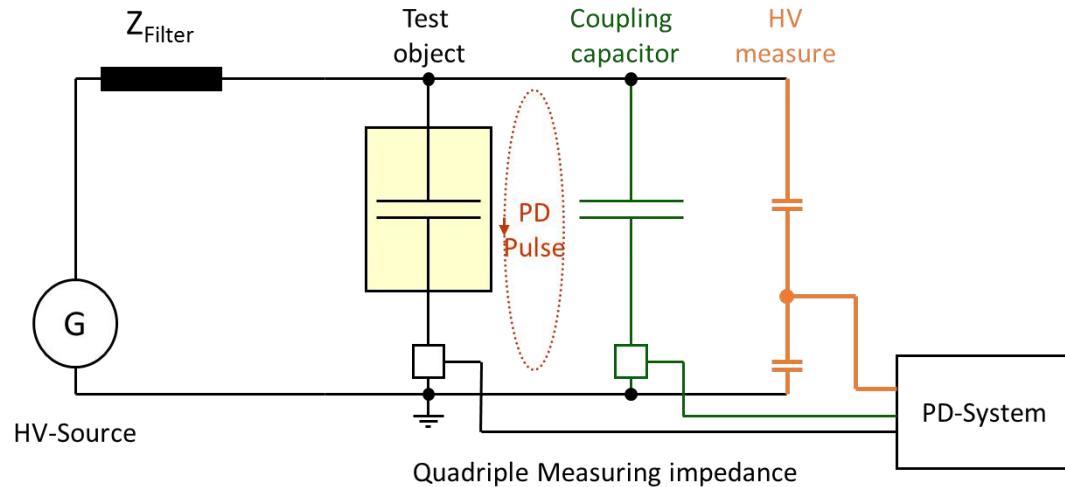
#### ▶ 부분방전 검출

##### ❖ 부분방전 검출 – IEC 60270

- IEC 60270 : High Voltage Test Techniques – PD Measurement
- 커플링 커패시터 활용 : 수십kHz ~ 수MHz 주파수 대역 측정
- 외부 노이즈에 취약 → 주로 차폐실에서 활용



전자파 차폐실



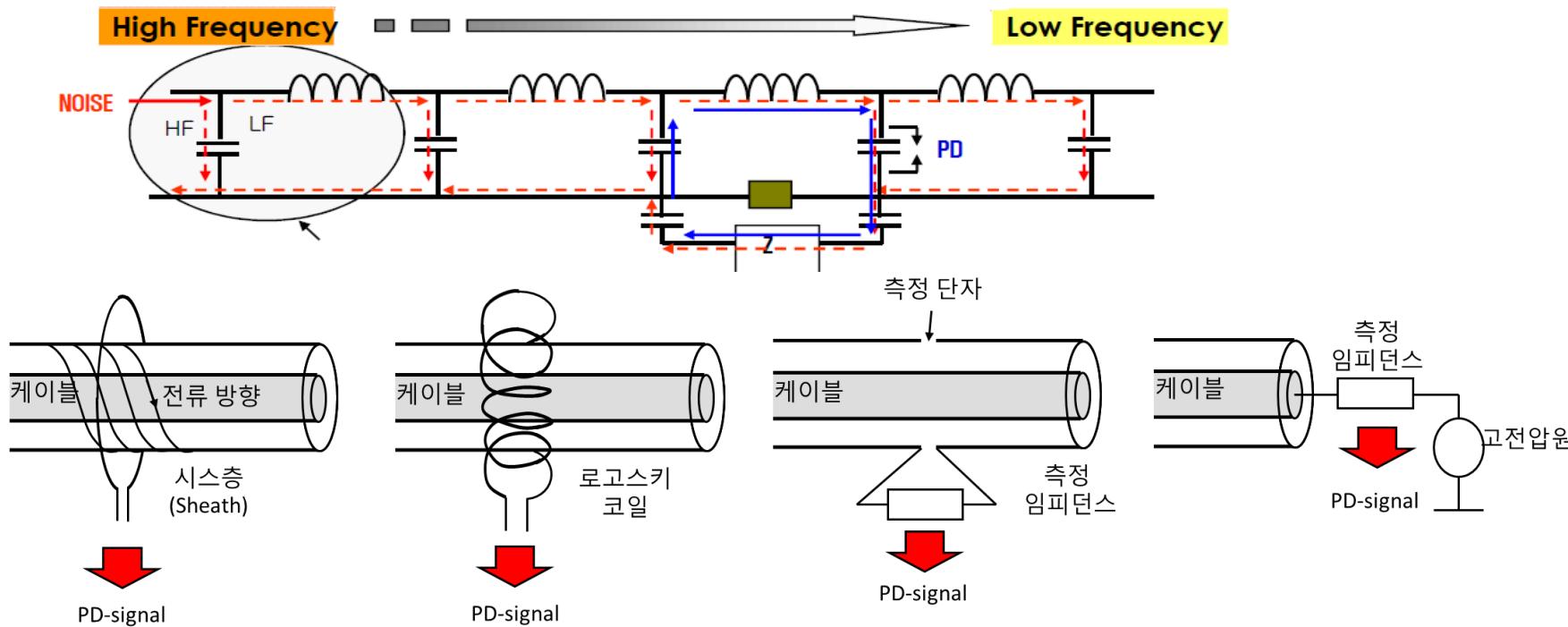
커플링 커패시터를 활용한 IEC 60270 측정 회로

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 검출

##### ❖ 부분방전 검출 – HF(High Frequency)

- 케이블의 경우 외부 노이즈의 영향이 작은 편, HF 영역에서 PD 검출
- 1~50 MHz 대역의 부분방전 전류 성분 검출 (CT 센서 사용)
- C값이 크기 때문에 초고주파 이상의 영역(UHF)에서 PD 신호 검출 불가



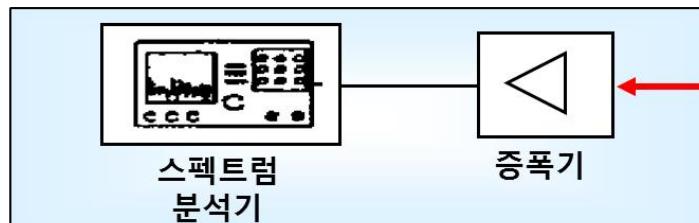
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 검출

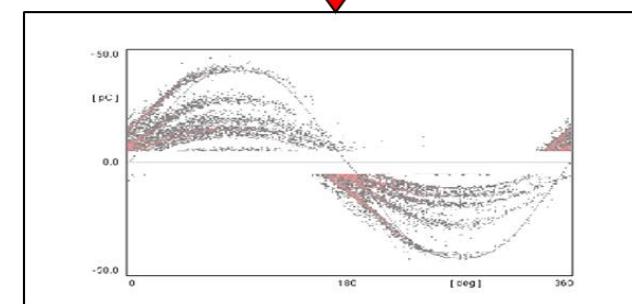
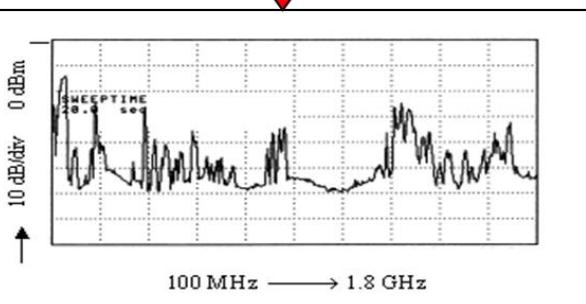
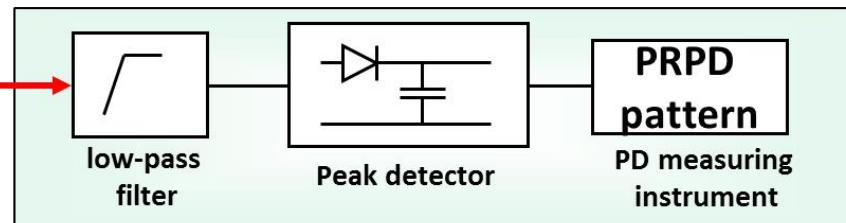
##### ❖ 부분방전 검출 - UHF(Ultra High Frequency)

- 외부 노이즈의 영향을 크게 받는 변전 설비(GIS, 변압기)에 주로 사용
- 500~1,500 MHz (300~1,800 MHz) 대역의 전자파 성분 검출(UHF 전자기파 센서)

협대역 측정방식



광대역 측정방식



안테나 센서를 활용한 UHF 대역에서의 부분방전 측정

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

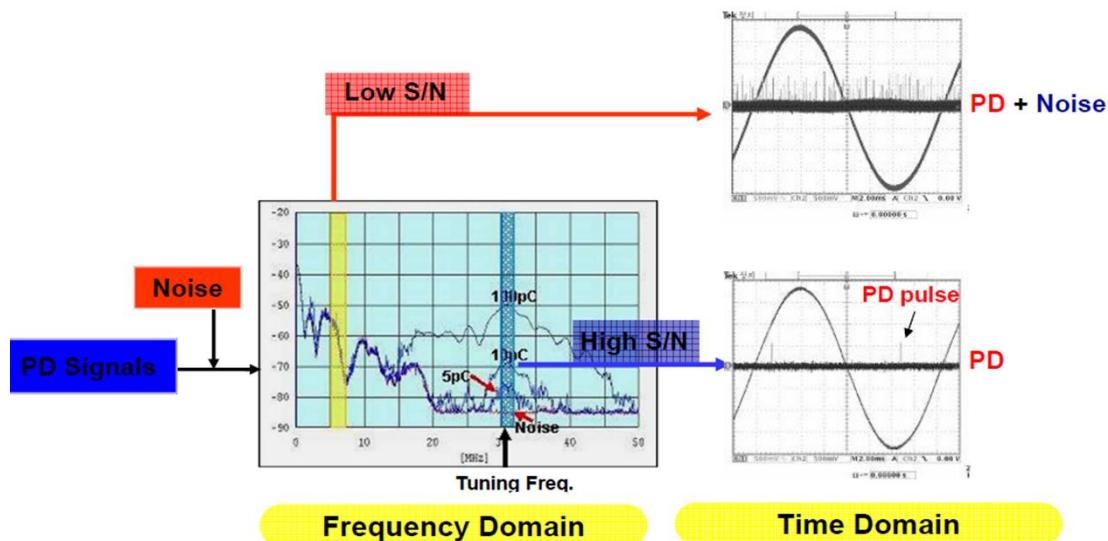
#### 부분방전 분석법

##### ❖ 펄스 신호 분석법(Pulse Analysis)

- 부분방전 펄스의 상승 시간, 발생주파수 등을 측정
- 외부 노이즈에 대한 추가 대책 필요(Gating/Masking)



센서와 오실로스코프 활용



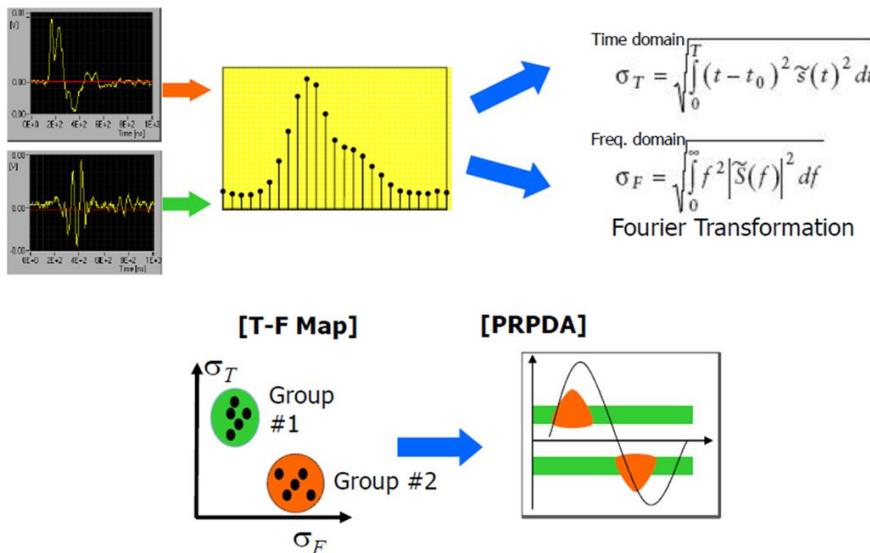
주파수/시간 도메인을 활용한 펄스 분석

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

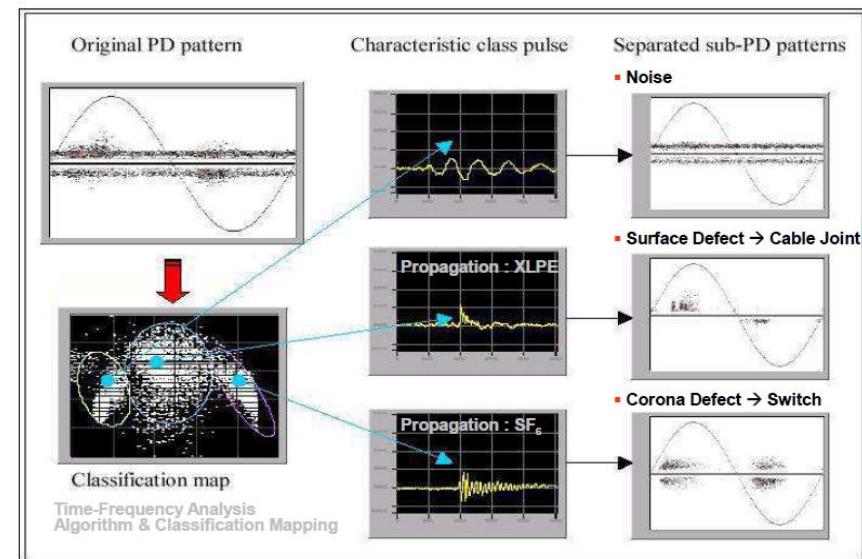
#### 부분방전 분석법

##### ❖ TF Map(Time-Frequency Map)

- 2차원 Map에 클러스터를 형성, 구역 별 부분적인 PRPD 분석  
-X축 : 펄스 지속시간, Y축 : 펄스 주요 주파수(FFT)
- 다중 결합에서 발생하는 부분방전 및 노이즈 신호 분리 가능



TF Map 도식화



TF Map 을 활용한 결함 분류

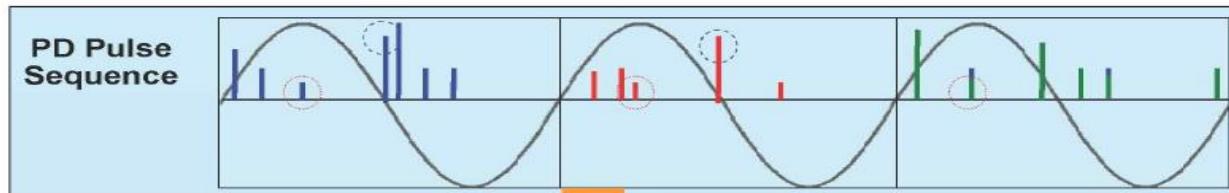
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 분석법

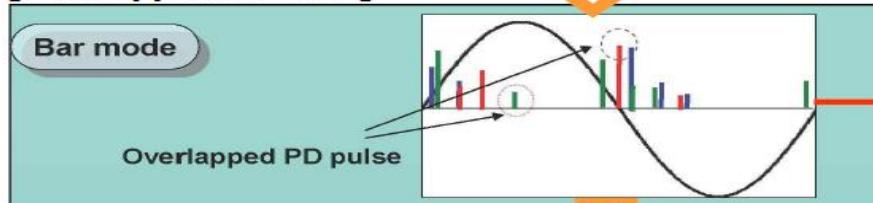
##### ❖ PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)

- 방전량의 크기, 발생시간을 인가전압의 위상으로 집적시킴
- 결함에 따라 다양한 패턴을 나타냄
- 다중 방전, 노이즈가 심한 경우에는 패턴 구분의 정확도 저하

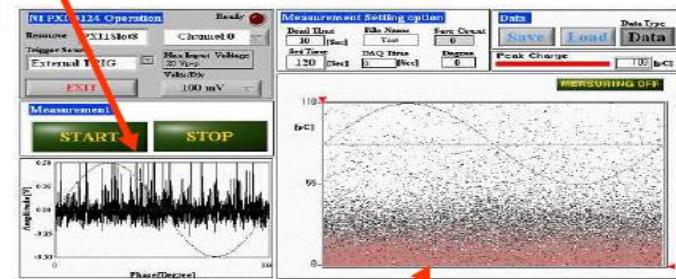
[Measurement PD]



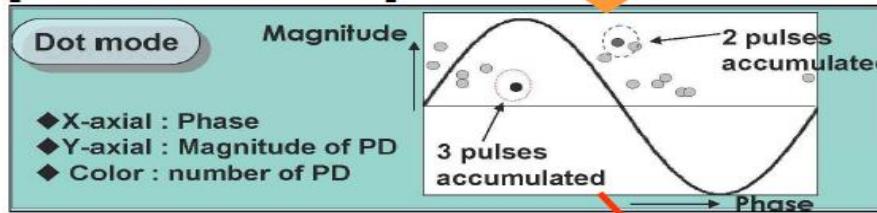
[Overlapped PD Data]



< PRPD S/W >



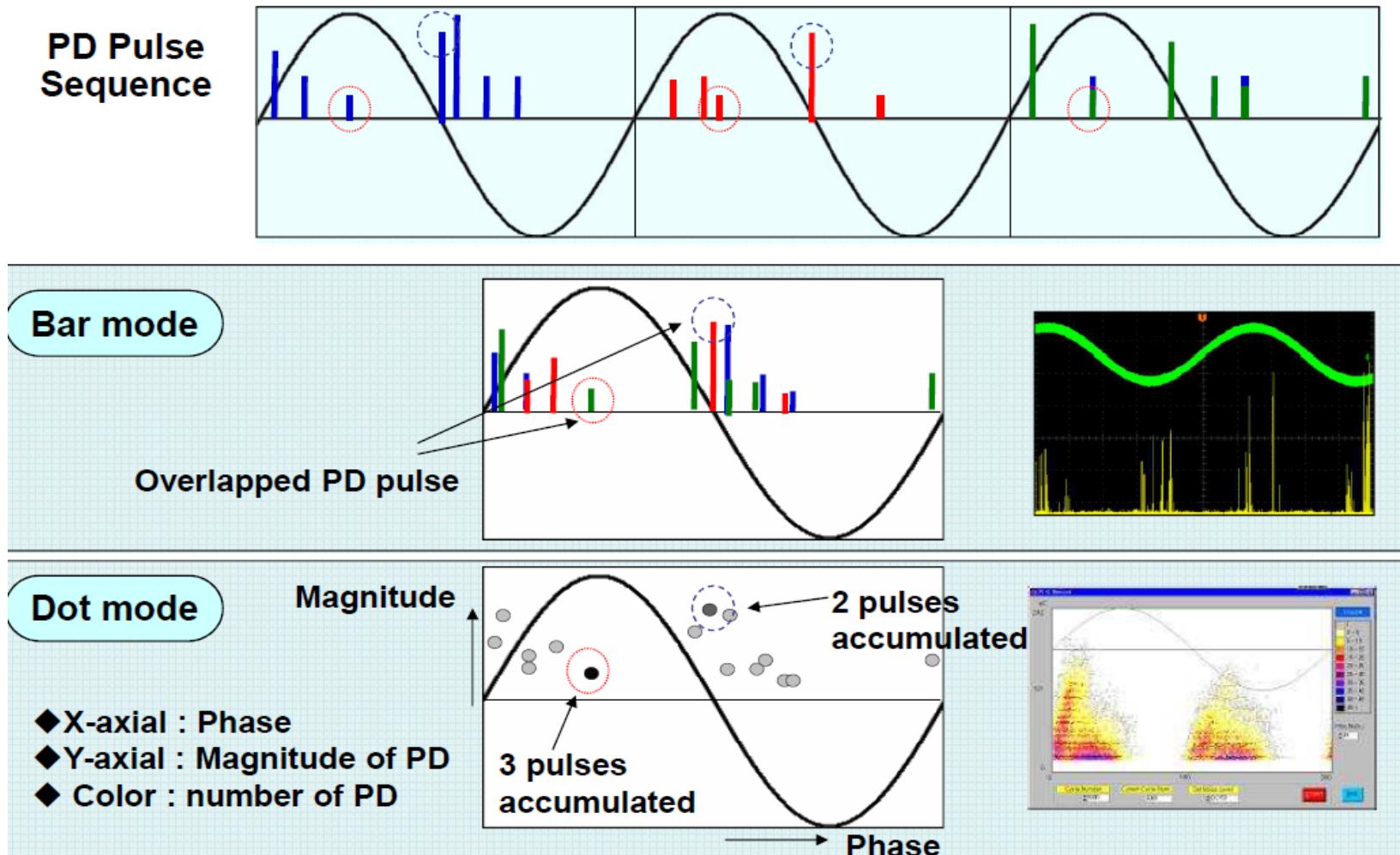
[Accumulated PD Data]



### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 분석법

##### ❖ PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)



### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 부분방전 신호

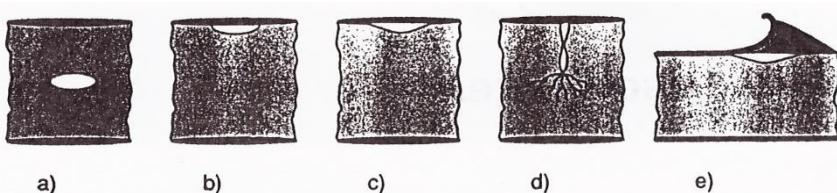
- 부분방전 결함에 따른 방전 유형 구분
  - 절연물 내부 : **공극**(Void), **트리잉**(Treeing)
  - 절연물 경계 : **코로나**(Corona), **연면방전**(Surface Discharge)
  - 외부 요인 : **부유전극**(Floating), **자유도체**(Metallic Particle)
- 각 결함에서 발생하는 부분방전 펄스는 **서로 다른 시간/주파수 특성**을 가짐
  - 구조적 차이로 인해 유전율이 다름 → 신호 전파특성이 상이함
  - 결함 별로 **고유한 펄스 파형 및 PRPD 패턴**을 나타냄

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

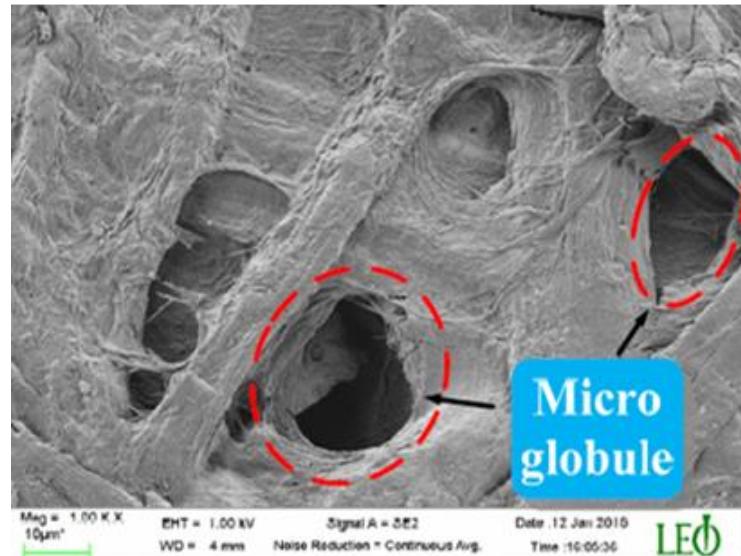
#### 부분방전 신호

##### ❖ 내부방전(Internal Discharge)

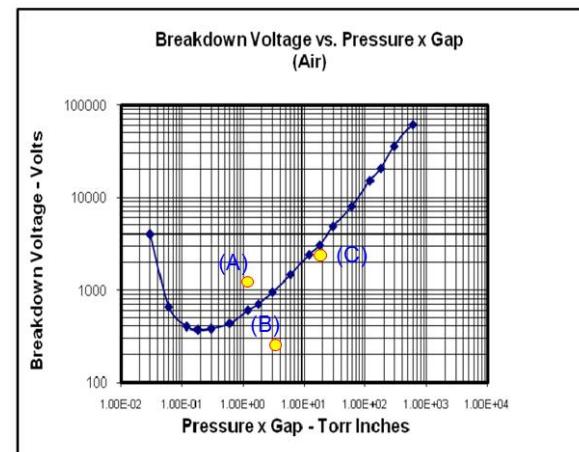
- 주로 고체 혹은 액체 절연물 내부의 가스로 찬 공극(Gas-filled void)에서 발생
- 절연물-공극의 유전율 차이로 인해 공극 주위에는 강한 전계[kV/mm] 형성
- 공극 내부의 가스는 Paschen 법칙을 따름  
→ 파괴전압 이상의 전계 집중 시 방전



- (a) Completely surrounded by the dielectric
- (b) Electrode bounded cavity.
- (c) Non-adhering electrode
- (d) Initiated by treeing.
- (e) In an interface with a longitudinal field.



절연물 내부 공극 생성

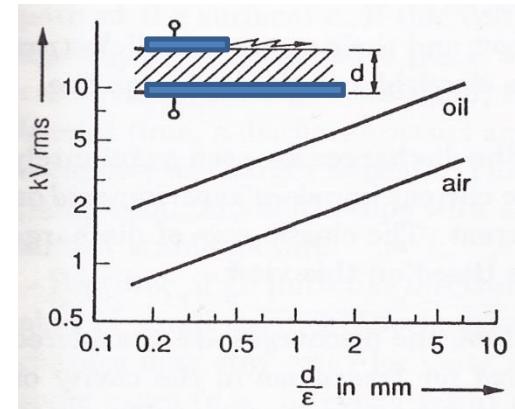


### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 신호

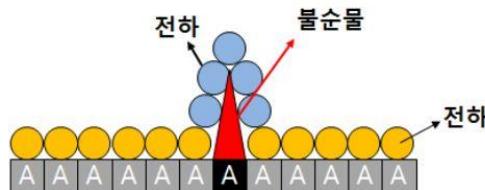
##### ❖ 표면방전(Surface Discharge)

- 상대적으로 절연이 취약한 절연물 계면에서 발생
- 절연유-공기, 케이블 절연층간, 스페이서 표면 등의 절연체 계면에서 발생  
→ 방전 개시전압 : 더 취약한 절연물의 내력을 따름

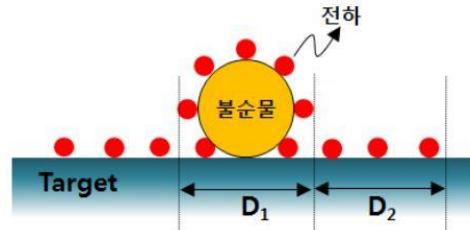


##### ❖ 코로나 방전(Corona Discharge)

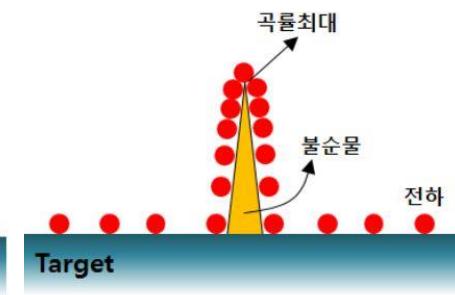
- 전극 표면에 돌출부(Protrusion) 존재 시 전계 집중으로 전하 밀도 증가  
→ 전극이 단위면적당 허용 가능한 전자 밀도 수치를 넘어설 경우 방전(PDIV)



돌출여부에 따른 전하밀도



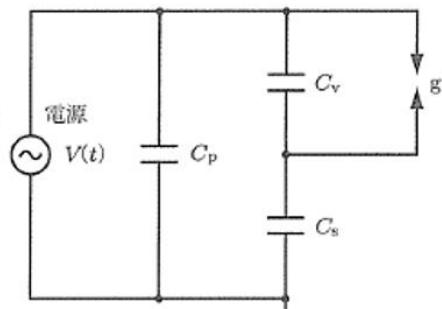
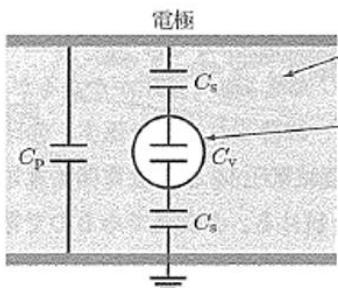
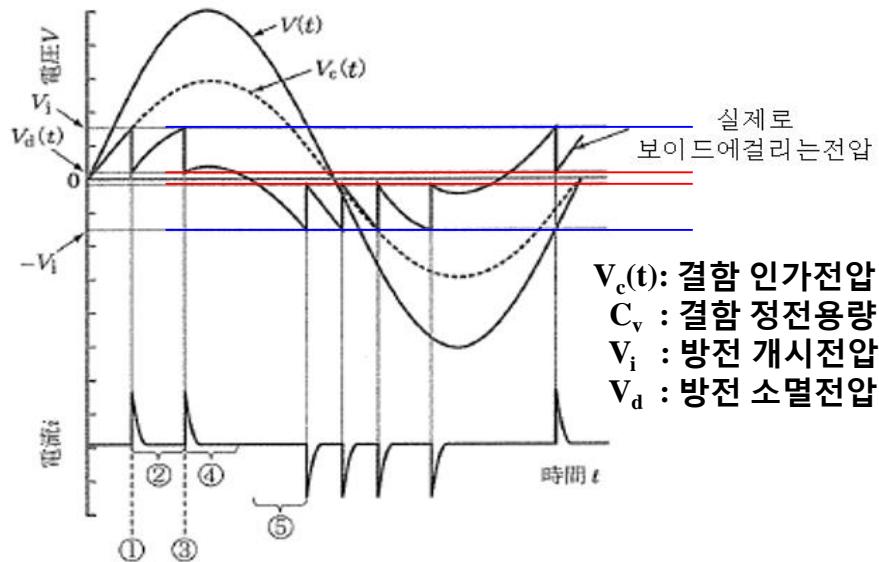
돌출부 곡률에 따른 전하밀도



### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 신호

##### ❖ 부분방전 신호 발생 (보이드 방전)



- $V_c(t)$ 가 방전개시전압 초과  
→ 내부 공극에서 단락 발생  
→ 공극에 축적된 전하 방전
- $V_c(t)$  방전소멸전압 도달  
→ 방전 중단, 전하 다시 축적
- 전압 최대치까지 반복

- 인가전압 최대치  
→  $V_c(t)$ 는  $V_i$ 에 도달하지 못함  
→ 방전 정지상태 유지

- 전압 극성 반전  
→ 상기 과정 반복

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 부분방전 신호

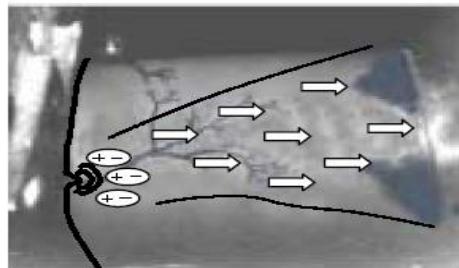
##### ❖ 부분방전 신호 발생 (연면 방전)



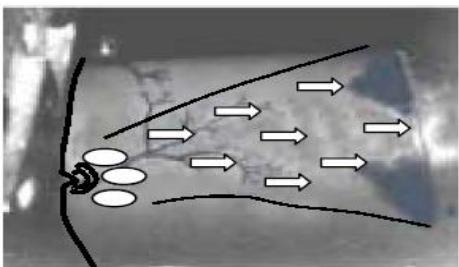
Irregular surfaces, with needle end-points create a High Electric Field at these pointed ends.



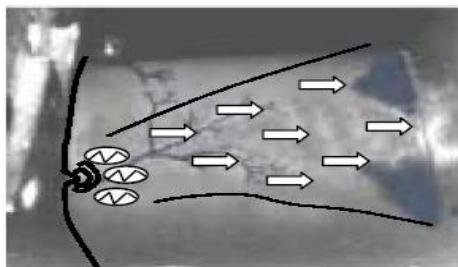
High Electric Field ionizes the surrounding air. Some partial discharges may occur in this region.



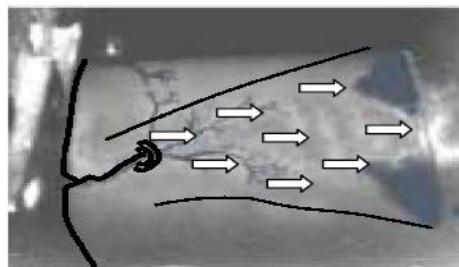
Additional surface contamination and moisture creates a leakage current path to ground.



The temperature rise from the leakage current evaporates the moisture, creating tiny islands, or very small voids. The current, which was flowing, is now interrupted across these tiny island voids.



Since all of the remaining surface is still conductive, most of the voltage drop will be applied to the dry surface creating an arc across it. Partial discharge arcing is more prevalent in the region of the ionized air.



As the partial discharges continue, the arcing burns the insulation material, creating a permanent carbon path. The new end points are even finer "needles" and the process continues across the insulation until failure results.

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 부분방전 신호

##### ❖ 보이드 방전과 연면방전 비교

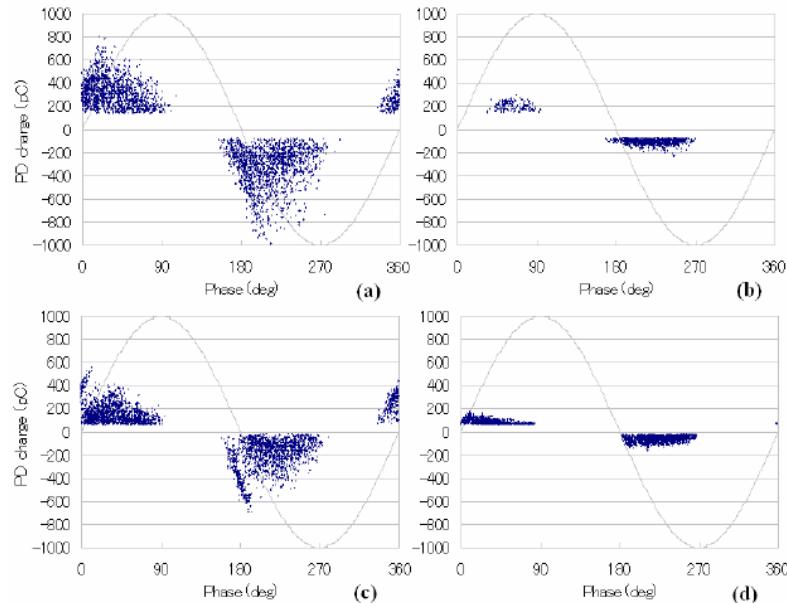


Figure 15. PD pattern transition under sine-wave with 200 Hz in sample B. The voltage peak value is 6 kV. (a) 1 min, (b) 25 min, (c) 180 min, (d) 520 min, (e) 600 min.

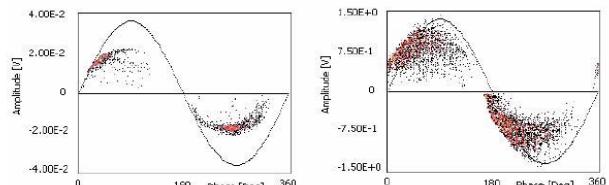


Fig. 8. PD pattern associated to a large (2 mm diameter) flat void between pressboard layers. Test voltages: 4.5 kV,  $v=1.5$  (left), 6 kV,  $v=2$  (right).

#### 보이드 방전

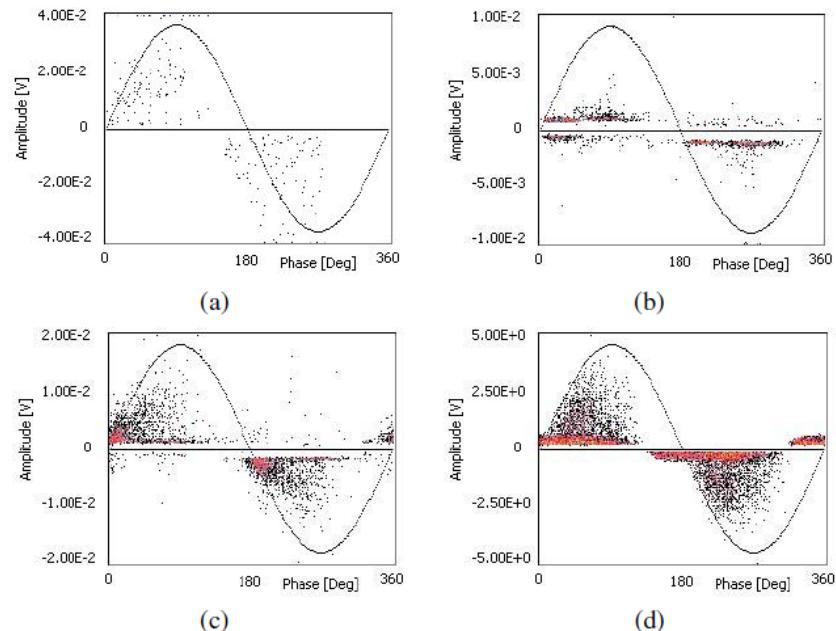


Fig. 2. PD pattern recorded from an electrode configuration consisting of a cylindrical electrode placed on a pressboard sheet. Test voltages: (a) 9 kV,  $v=1$ , (b) 11 kV,  $v=1.22$  (c) 13 kV,  $v=1.44$  (d) 16.7 kV,  $v=1.85$ , immediately before breakdown.

#### 연면방전

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 부분방전 신호

##### ❖ 자유도체

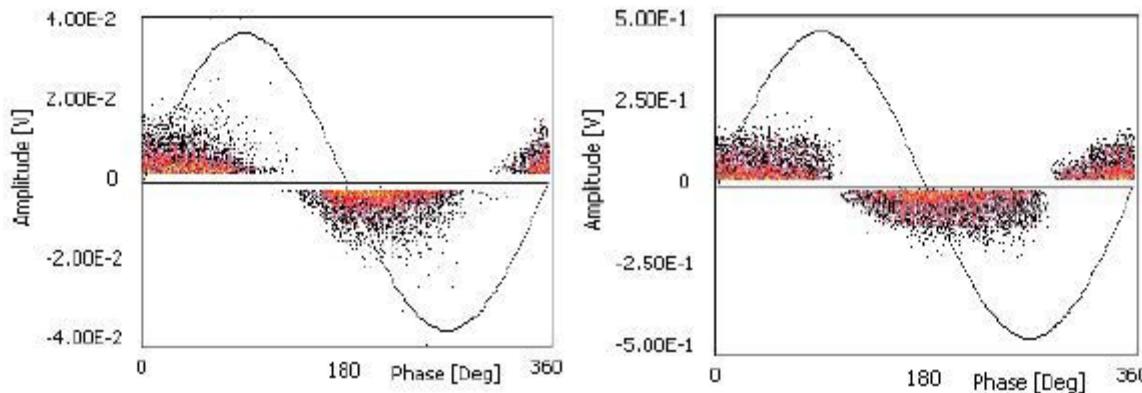


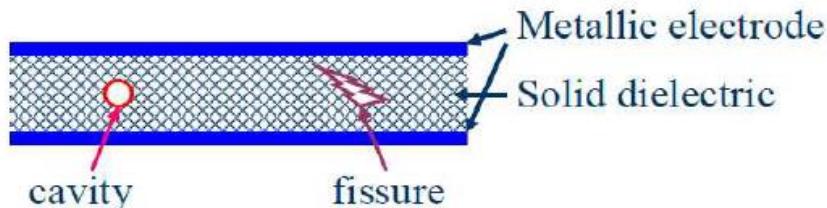
Fig. 2. PD pattern obtained from a point/plane electrode configuration: oil contaminated with free metallic particles. Test voltages: 10 kV,  $v=2$  (left), 20 kV,  $v=4$  (right).

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

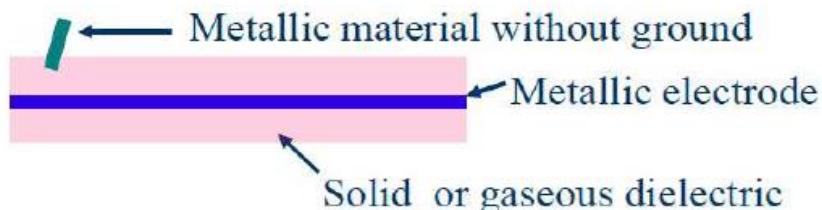
#### ▶ 부분방전의 발생

##### ❖ 그 외 부분방전 발생 가능한 절연체 결함

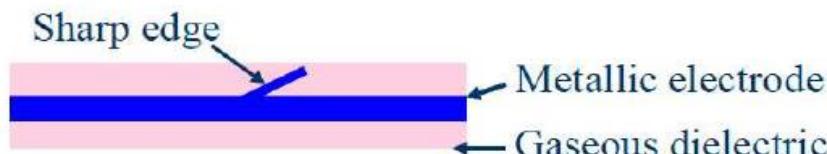
- Cavity or Fissure



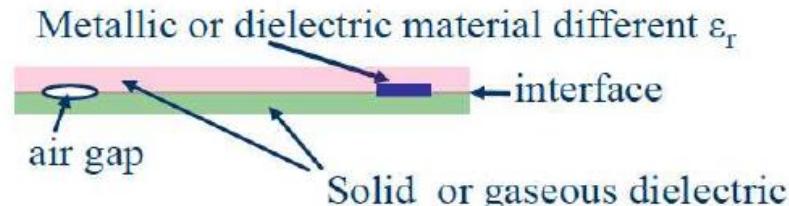
- Floating Electrode



- Sharp Edge



- Interfacial Defects



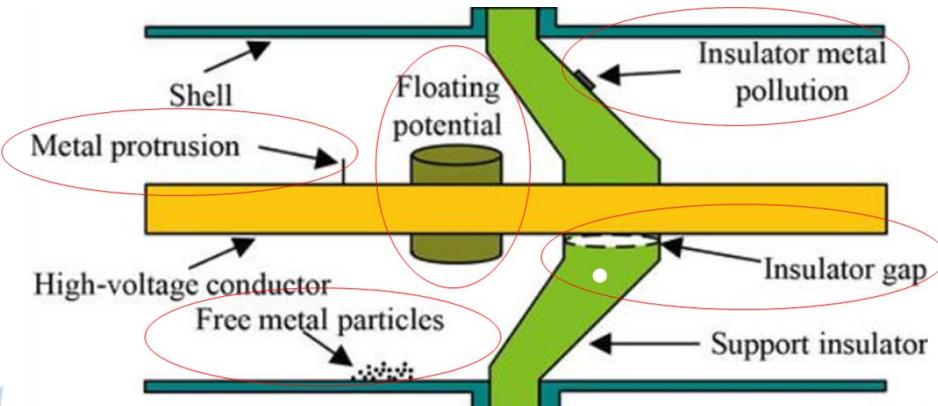
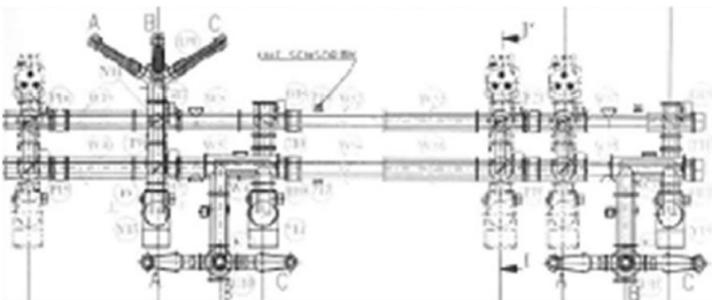
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### GIS 부분방전 측정

##### ❖ GIS PD 발생원인

###### GIS PD 발생 원인

- 절연물 이상 : 스페이서 내부 공극 또는 크랙
- 도체 돌출 : 제작불량/용삭 등
- 금속 분진 : 시공/조립 불량 등
- 부유 전극 : 볼트 체결 풀림, 접점 마모 등



###### GIS PD 진단

- 스페이서를 통한 구역 분리
- 철 외함으로 인한 전기적인 내부 차폐  
→ UHF 진단이 효율적

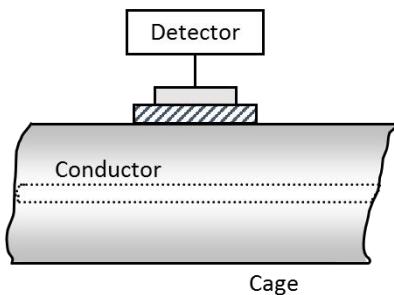
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### GIS 부분방전 측정

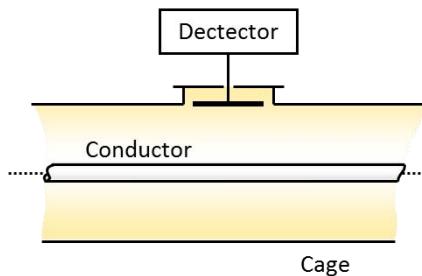
##### ❖ GIS PD 신호 취득

##### ◉ 내/외장 UHF 안테나 센서를 활용한 전자파 신호 측정

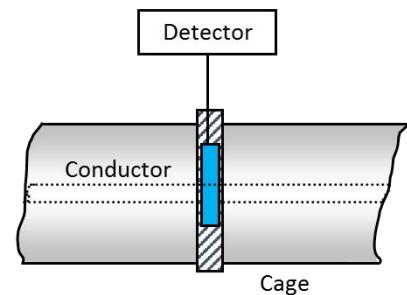
- 측정 주파수 대역 : 500 MHz ~ 1,500 MHz



감시창 부착 센서(내장형)



Dics/cone type 센서(내장형)



스페이서 부착 센서(외장형)

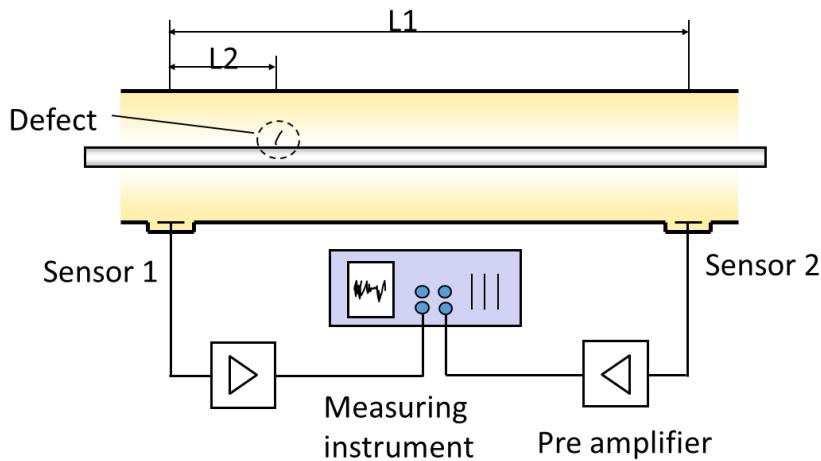
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### GIS 부분방전 측정

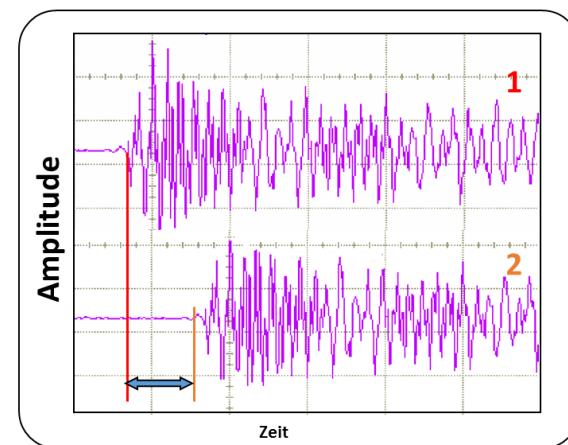
##### ❖ GIS PD 위치추정

✓ 센서에 도달하는 전자파 신호의 시간차를 활용한 위치 추정

- 방전 신호는 광속( $c=3\times 10^{10}$ )으로 진행, 시간차를 통한 거리 산출



Schematic arrangement



Time delay

1 ... Sensor 1

2 ... Sensor 2

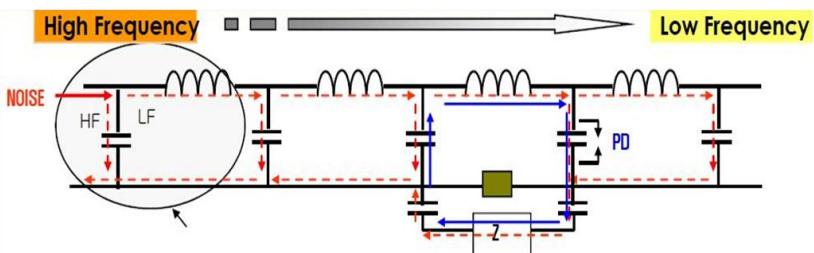
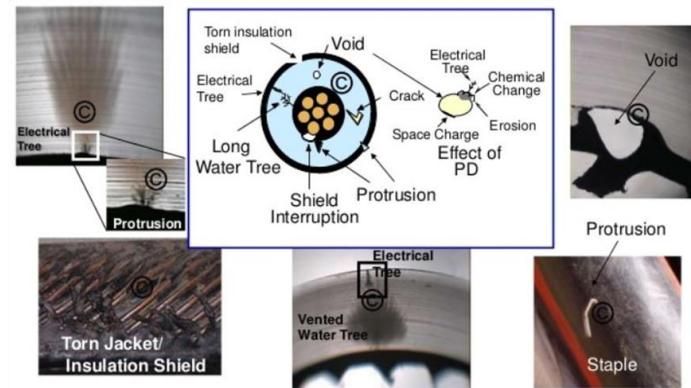
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### 케이블 부분방전 측정

##### ◆ 케이블 PD 발생원인

###### 케이블 PD 발생 원인

- 절연물 이상 : 수분 침입, 내부 절연물 열화
- 도체 돌출 : 제작불량/용삭 등
- 금속 이물 : 시공/조립 불량 등



###### 케이블 PD 진단

- 중간 접속함을 통한 구간 분리
- 방전 신호의 전파 거리가 길어 고주파 성분 소멸  
→ HF 진단이 효율적

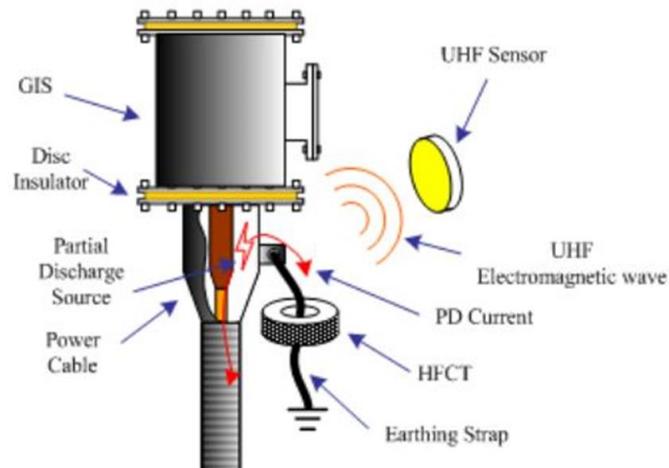
### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 케이블 부분방전 측정

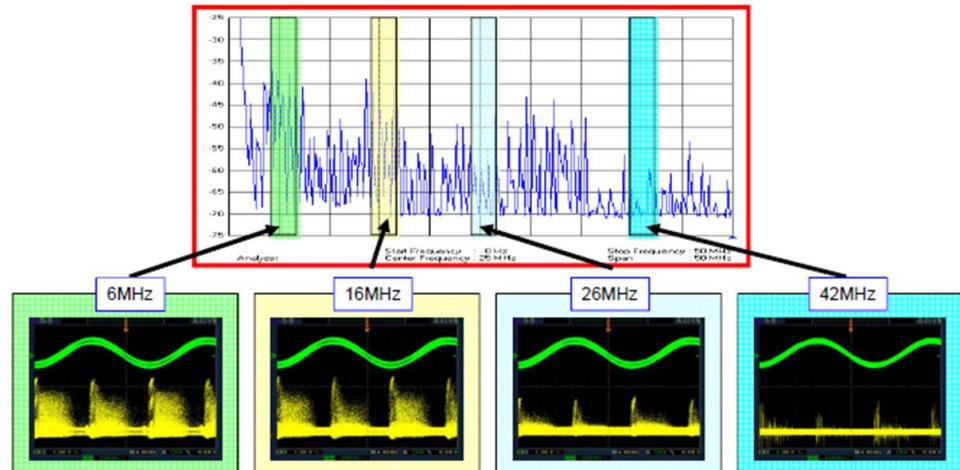
##### ❖ 케이블 PD 신호 취득

##### ✓ HFCT를 활용한 접지 측 방전 전류 측정

- 외부 노이즈에 취약하여 협대역(Narrow-band) 방식 채택
- 측정 주파수 대역 : 1 MHz ~ 50 MHz (2MHz 이하 필터링)



케이블 접속함 HFCT 센서 장착



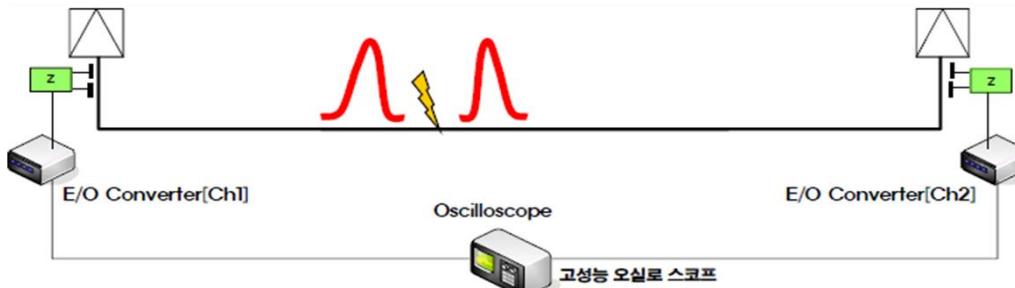
협대역 방식에 따른 대역 별 부분방전 신호 차이

### 3. 부분방전의 발생 및 검출

#### ▶ 케이블 부분방전 측정

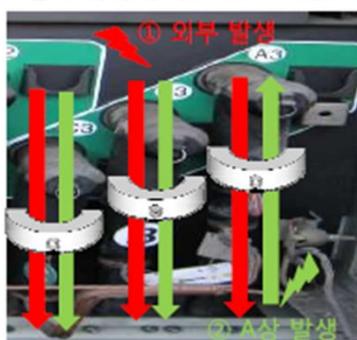
❖ 케이블 PD 결함 위치추정

🟡 양단의 펄스 도달 시간차 / 전파 방향 분석을 통한 결함 위치 추정



펄스 도달 시간차를 활용한 결함 위치 추정

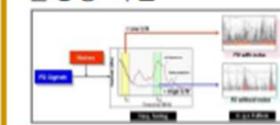
- 결함 위치에 따른 펄스 진행 방향



3상 주파수 분석

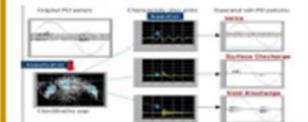
- PD 발생여부 판단
- 3상 PRPD 분석
- 크기 비교를 통한 발생상 확인

발생상 확인



3상 펄스 분석

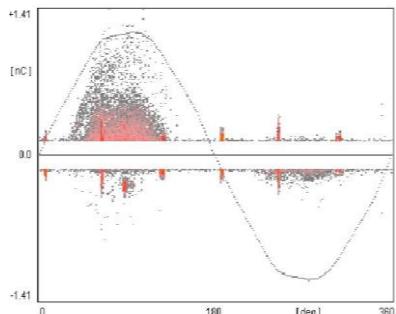
- 다중 결함 판별
- 펄스 극성 분석을 통한 발생상 확인
- 3상 위치 추정



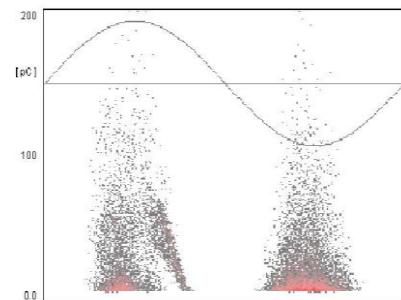
진행 방향에 따른 결함 위치 추정

# 4. PRPD 패턴 예제

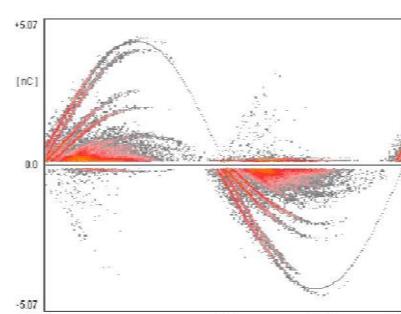
## PRPD 패턴 인식



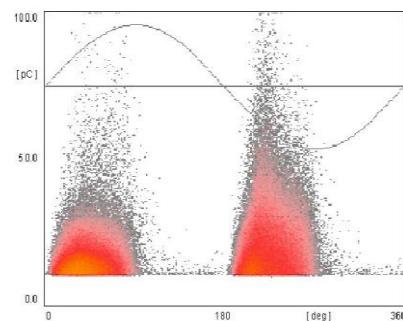
(a)



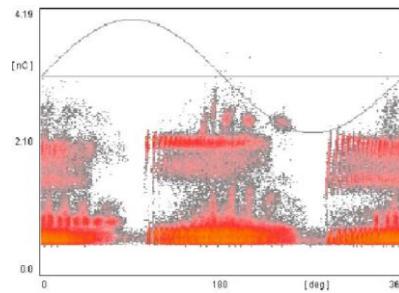
(b)



(c)



(d)



(e)

# 4. PRPD 패턴 예제

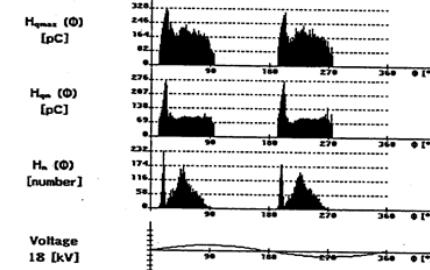
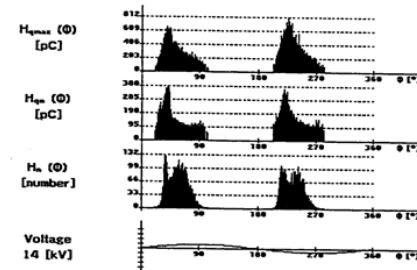
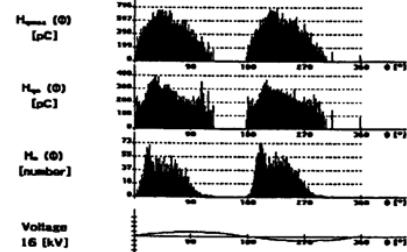
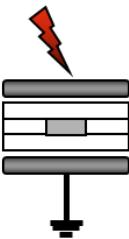
## PRPD 패턴 인식

### 여러 가지 부분방전 패턴

PD Patterns	특 성	결합의 형태
a)	<ul style="list-style-type: none"><li>- 반주기의 중심(90도, 270도)으로부터 대칭적으로 일정한 크기의 펄스 발생.</li><li>- 전압증가에 따라 펄스수 증가, 크기변동 없음.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-전극의 뾰족함(기체절연,코로나) 고전압 전극: 음의 반주기에서 펄스 발생 접지 전극 : 양의 반주기에서 펄스 발생</li></ul>
b)	<ul style="list-style-type: none"><li>- 반주기의 중심(90도, 270도)으로부터 대칭적으로 일정한 크기의 펄스 발생.(작은 펄스의 크기는 일정함)</li><li>- 전압증가에 따라 펄스수 증가.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>전극의 뾰족함 (액체 절연) 고전압 전극 : 낮은 전위로 양의 반주기에 서 큰 펄스 발생 접지전극 : 음의 반주기에서 큰 펄스 발생</li></ul>
c)	<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>\frac{1}{4}</math>주기와 <math>\frac{3}{4}</math>주기에서 크고 작은 펄스 발생.</li><li>- 두 구간에서 평균적인 펄스 크기는 동일함.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-고체절연체 내의 보이드 - 액체절연체 내의 기포 - 절연체로 감싸인 도체간의 접촉</li></ul>
d)	<ul style="list-style-type: none"><li>- <math>\frac{1}{4}</math>주기와 <math>\frac{3}{4}</math>주기에서 크고 작은 펄스 발생.</li><li>- 한쪽 구간의 평균적인 펄스 크기가 더 큼</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-도체·고체절연체 사이의 보이드 -전극에서의 표면 방전 고전압 전극: <math>\frac{1}{4}</math> 주기에서 큰 펄스 출현 접지 전극 : <math>\frac{3}{4}</math> 주기에서 큰 펄스 출현</li></ul>
e)	<ul style="list-style-type: none"><li>- 0을 지나는 점을 중심으로부터 대칭적으로 크고 작은 펄스 발생.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-도체·반도전층 사이의 접촉 불량</li></ul>

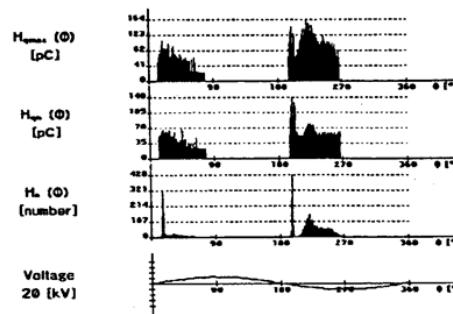
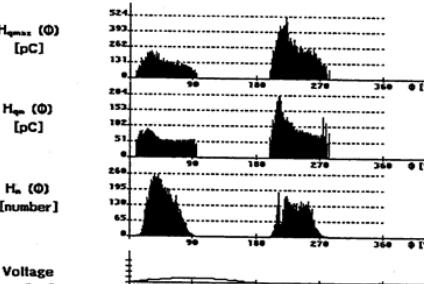
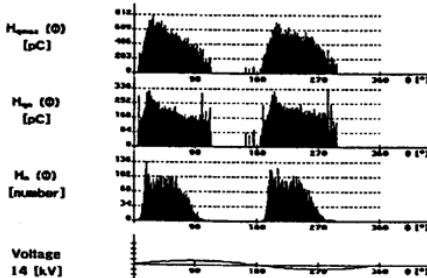
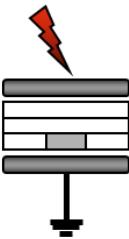
# 4. PRPD 패턴 예제(Void)

## ◆ Dielectric bounded cavity



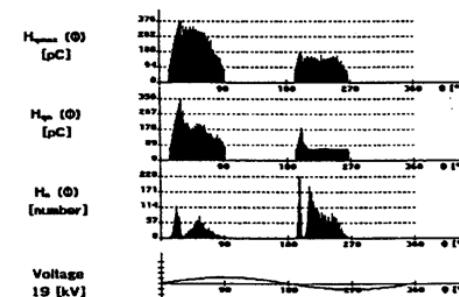
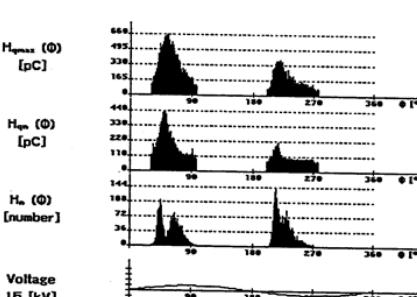
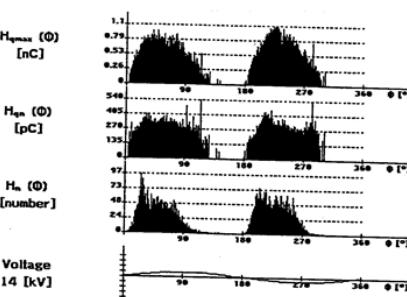
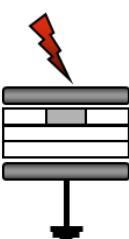
※ 전압이 증가함에 따라 방전량은 일정

## ◆ LV bounded cavity



※ 전압이 증가함에 따라 방전량은 일정하고 양쪽반주기에 발생하는 방전량이 상이함

## ◆ HV bounded cavity



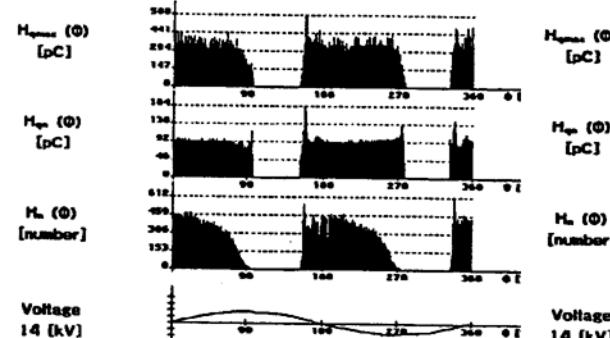
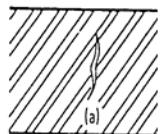
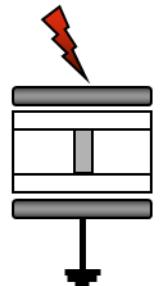
< Virgin Stage >

< Conditioned Stage >

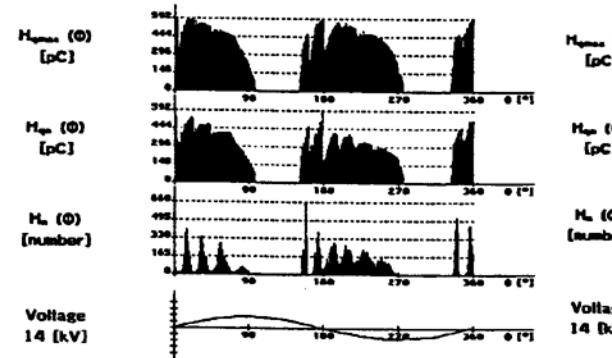
< Aged Stage >

# 4. PRPD 패턴 예제(Void)

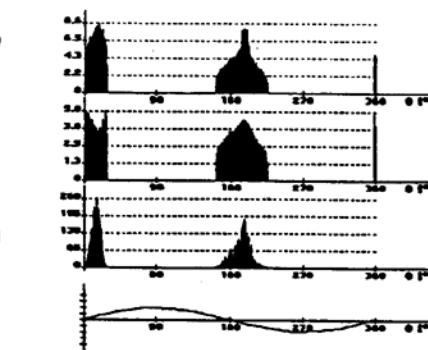
## ◆ Dielectric bounded cavity with time



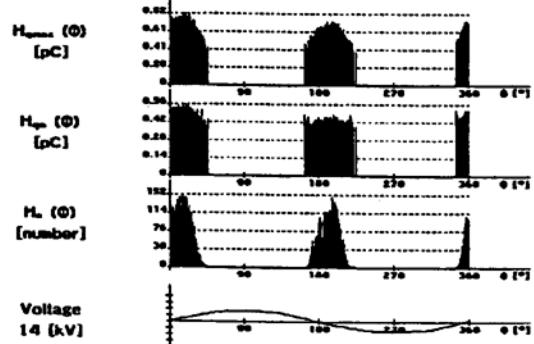
< Stage 1 > ~0.2 h



< Stage 2 > ~2 h



< Stage 3 > ~93 h



< Stage 4 > ~285 h

# 4. PRPD 패턴 예제(Corona)

## ◆ HV single-point corona in air

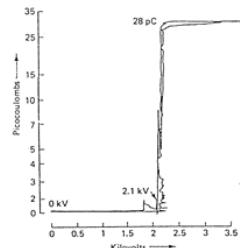
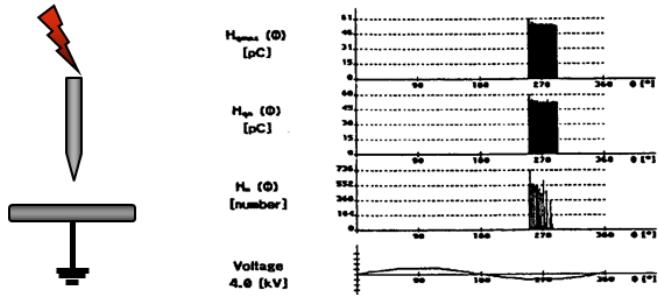
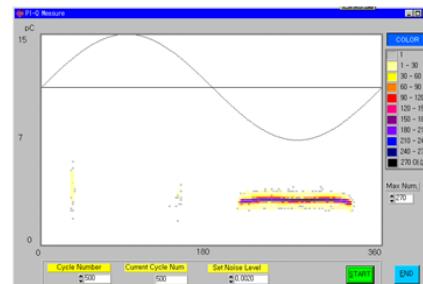
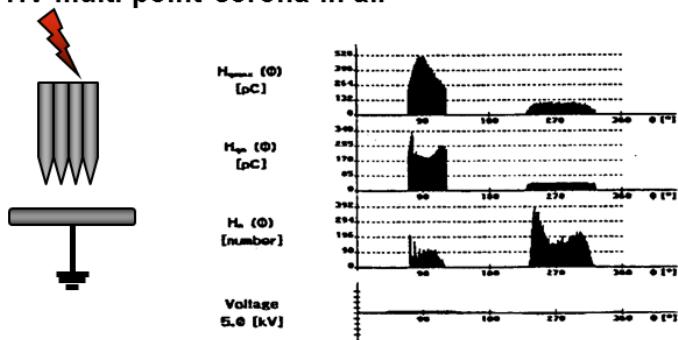


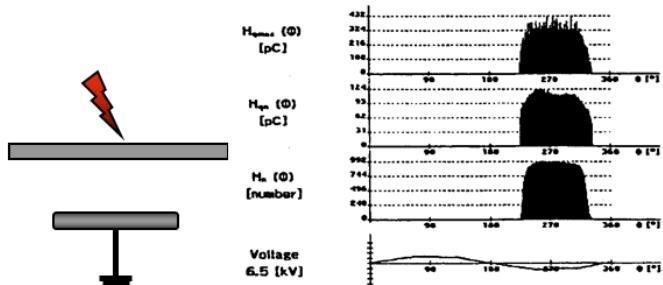
Figure 8.18 X-Y diagram of a corona discharge<sup>1</sup>

전압이 증가함에 따라 방전량은 일정

## ◆ HV multi-point corona in air

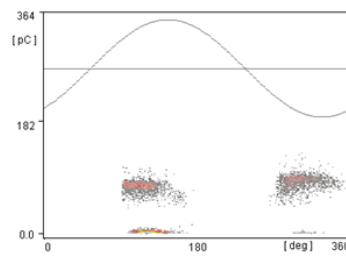
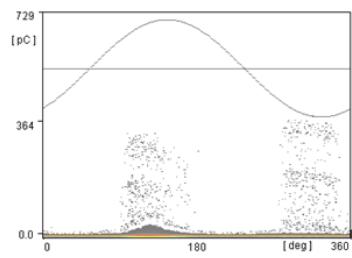


## ◆ HV wire-plan corona in air

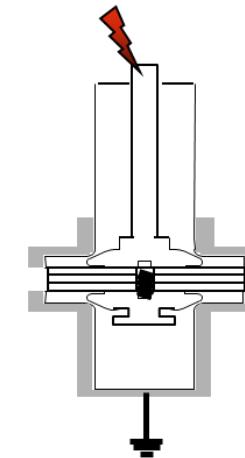
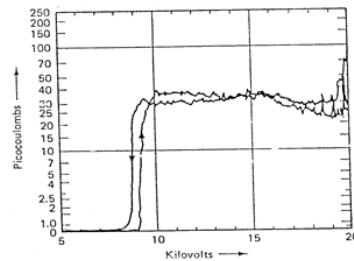
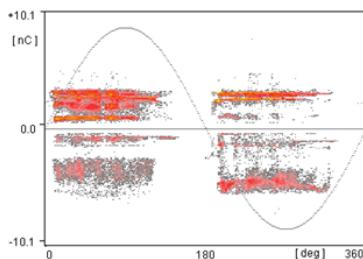
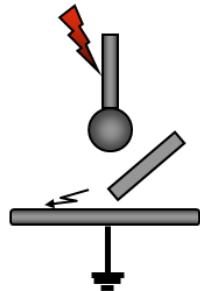


# 4. PRPD 패턴 예제(Corona)

## ◆ EBA(by metal foil electrode in high frequency)

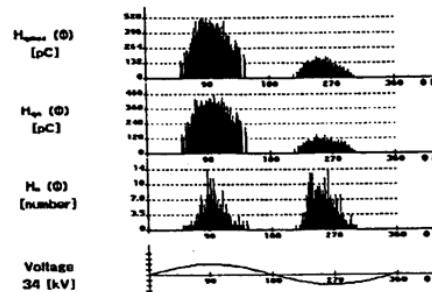
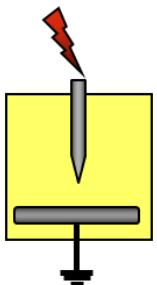


## ◆ Floating metal( Conventional sensor )

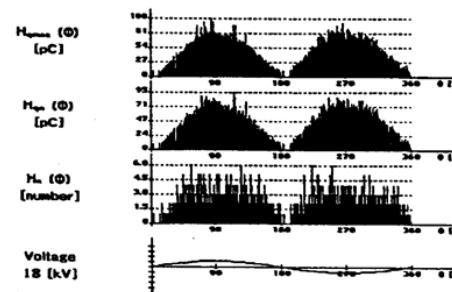


전압이 증가함에 따라 방전량은 일정

## ◆ HV single-point corona in oil

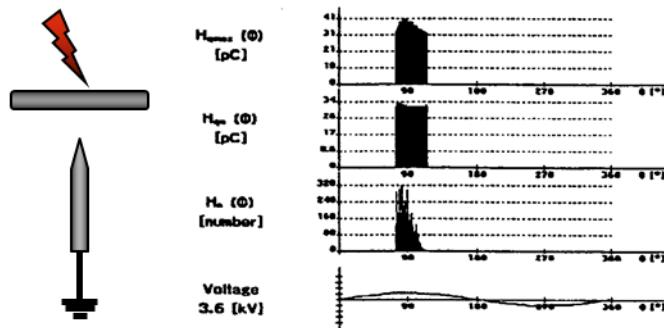


## ◆ Air bubbles in oil

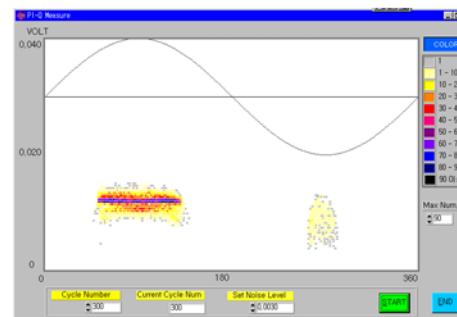
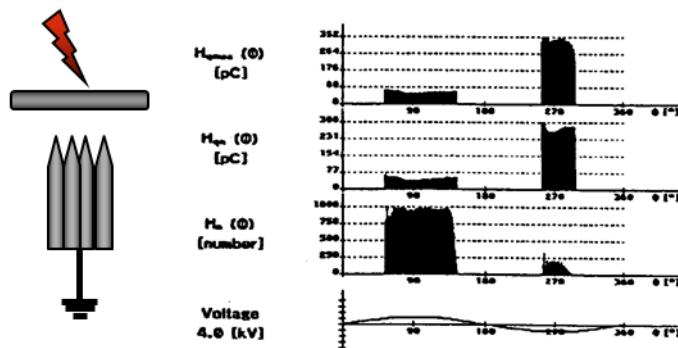


# 4. PRPD 패턴 예제(Corona)

## ◆ LV single-point corona in air

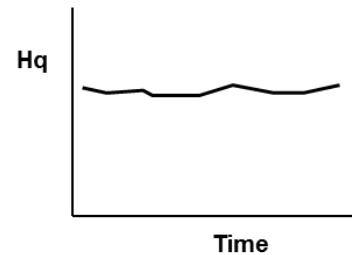
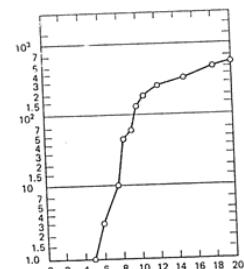
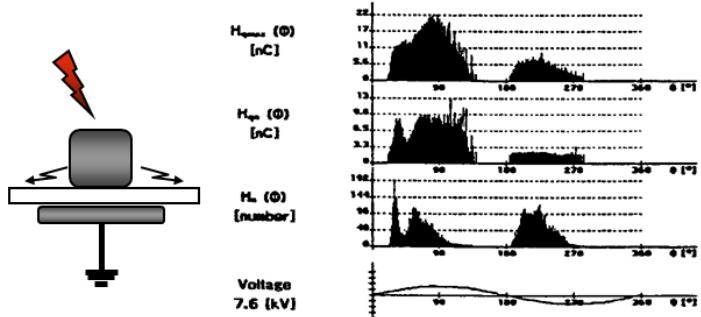


## ◆ LV multi-point corona in air



# 4. PRPD 패턴 예제(Surface)

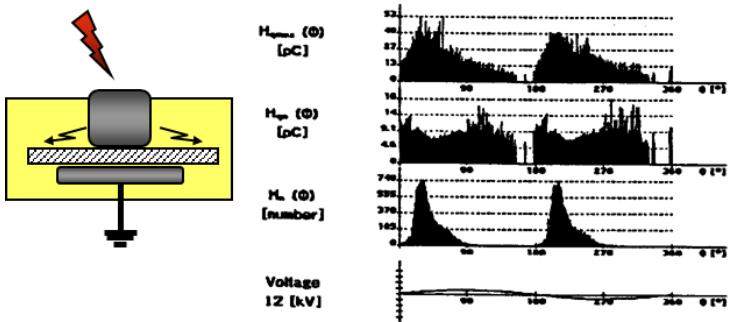
## ◆ HV surface discharge in air



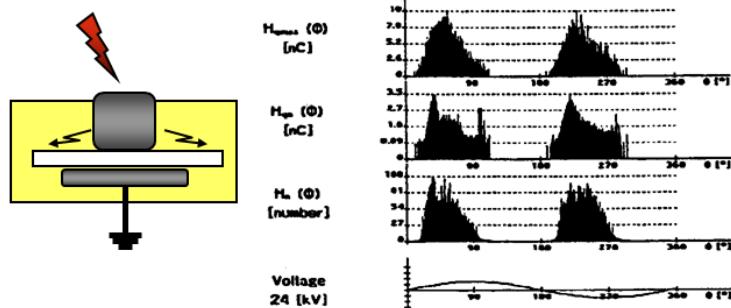
Increasing magnitude of PD according to voltage

Constant magnitude of PD according to time

## ◆ HV surface discharge in oil on an oil-impregnated paper

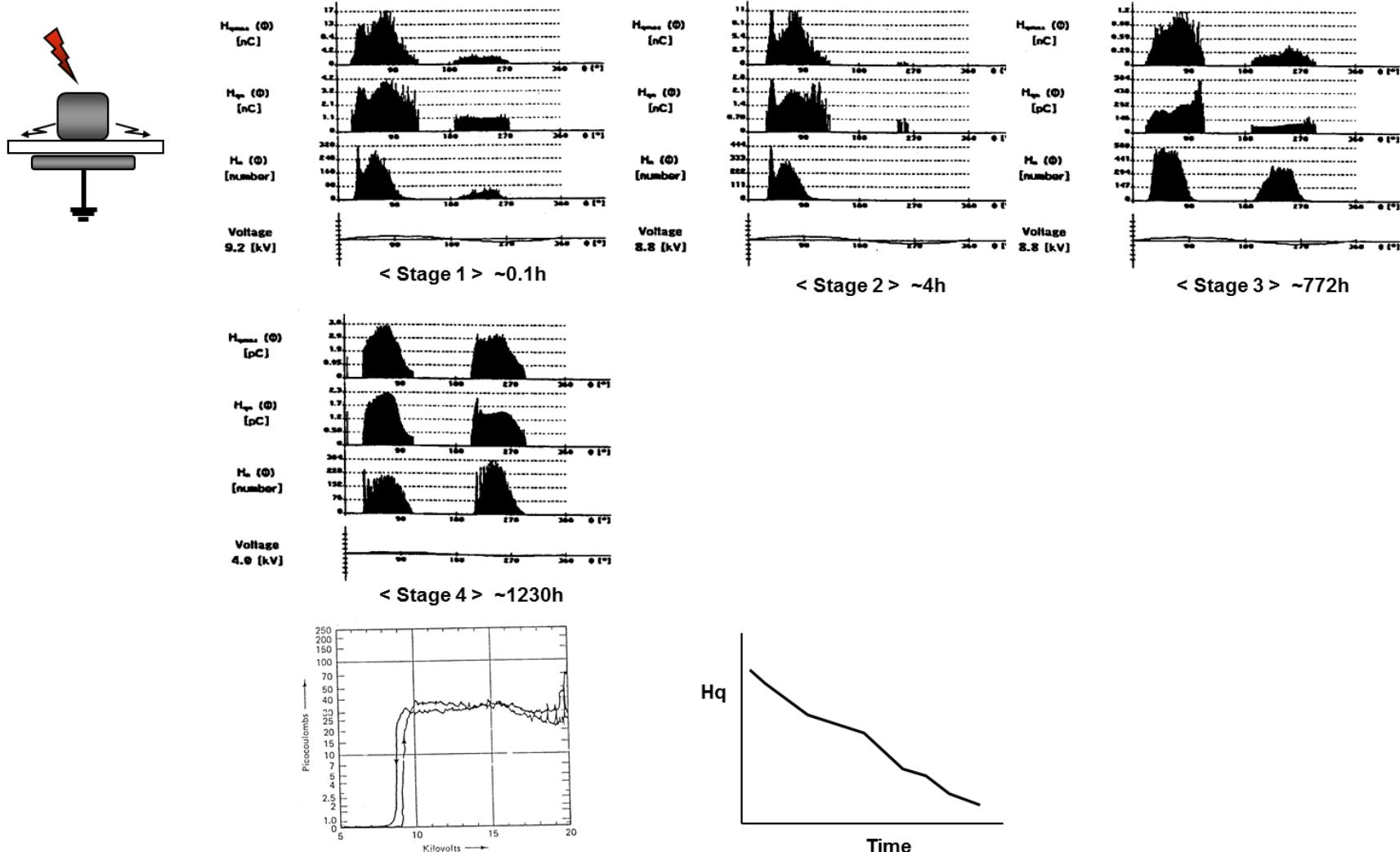


## ◆ HV surface discharge in oil on a PE slab



# 4. PRPD 패턴 예제(Surface)

## ◆ HV surface discharge in air with time

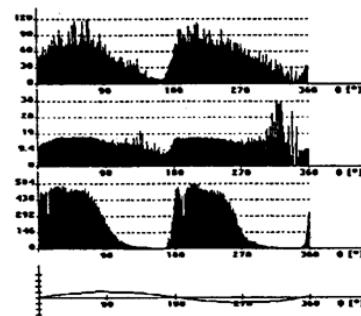
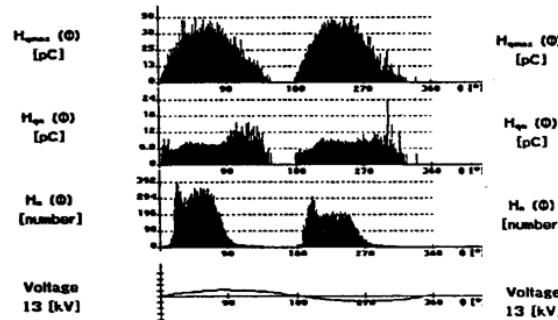
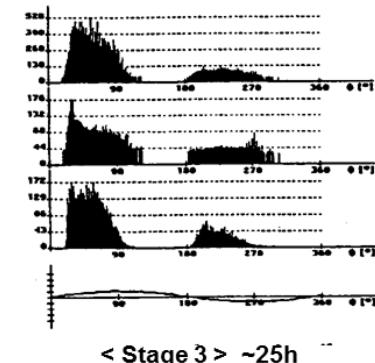
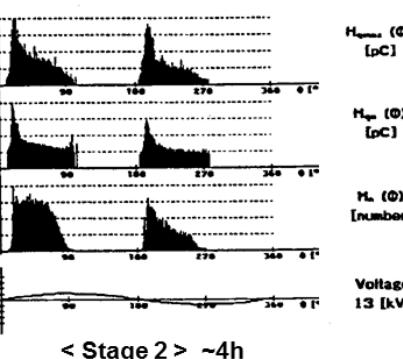
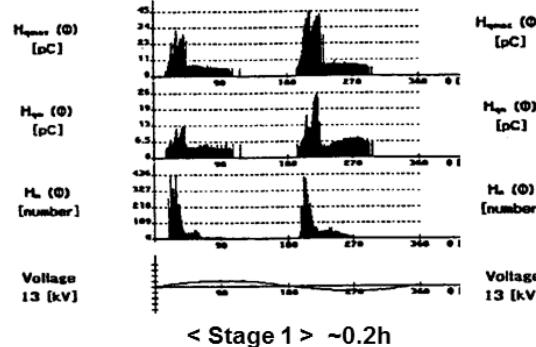
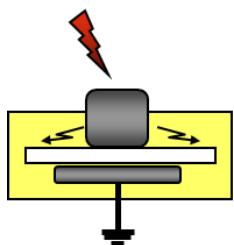


전압이 증가함에 따라 방전량은 일정

시간이 증가함에 따라 방전량은 하강

# 4. PRPD 패턴 예제(Surface)

◆ HV surface discharge in oil with time



감사합니다