

고분자 절연재료의 특성 및 평가 <Ⅱ>



이 철 호
화인폴리머(주) 대표이사

3. 전기절연성

절연재료라 하더라도 완전한 절연물은 없고 실제로는 미세전류가 흐른다. 이 전기 전도에 의한 전류를 누설전류, 누설전류에 대한 전기저항을 절연저항이라 한다.

절연재료에 인가되는 전압이 크게 되어 어느 값에

도달하면 갑자기 대전류가 흘러 도체와 같이 되는 현상을 절연파괴라 한다.

3.1 전기전도

절연재료의 전기전도는 기체, 액체, 고체에 따라 다르다. 절연재료 중에 미소한 누설전류를 흐르게 하는 carrier는

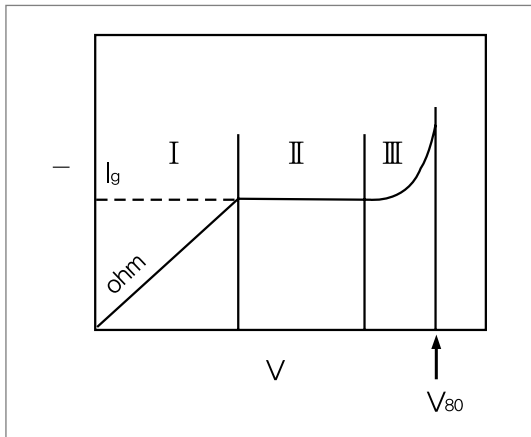
다음과 같이 구분된다.

- ┌ 전자 → 전자전도
- └ 정공 및 +, - 이온 → 이온전도

절연저항에 따른 재료의 분류는 다음과 같다.

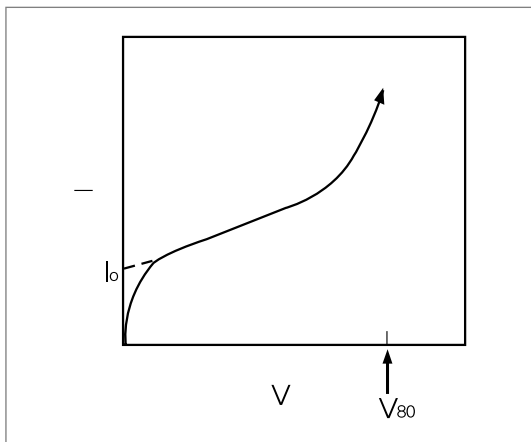
- ┌ 도 체 0 ~ 10³ Ω · cm
- └ 반도체 10³ ~ 10⁷ Ω · cm
- └ 절 연 체 10⁵ ~ 10¹⁸ Ω · cm

3.1.1 기체의 전기전도



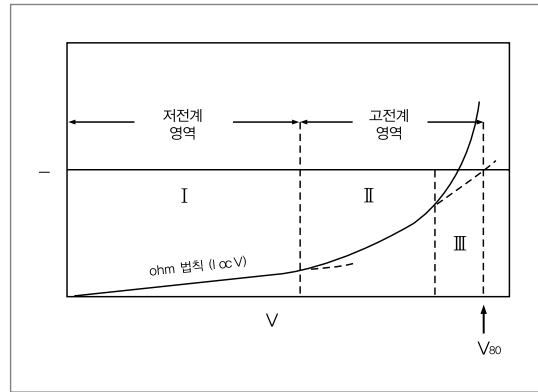
[그림 3.1] 기체의 전류-전압 특성

3.1.2 액체의 전기전도



[그림 3.2] 액체의 전류-전압 특성

3.1.3 고체의 전기전도

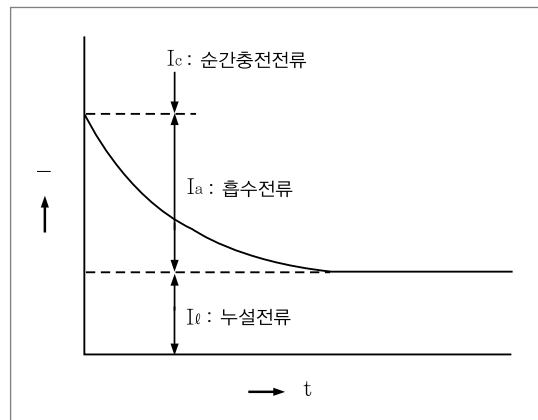


[그림 3.3] 고체의 전류-전압 특성

고체의 전기전도는 이온, 전자에 의한 전하가 이동하여 생긴다. 보통 누설전류에 기여하는 것은 이온인 경우가 많고 재료분자 자신의 해리에 의한 이온이나 불순물 이온 등에 의한 이온전도가 발생한다.

직류전압에 대한 전기전도는 다음 그림 3.4와 같이 3부분으로 나눌 수 있다.

$$I = I_c + I_a + I_e$$



[그림 3.4] 전류-시간 특성

- ① I_c : 전압인가와 동시에 흐르는 급격상승 전류부 (=순간충전전류)

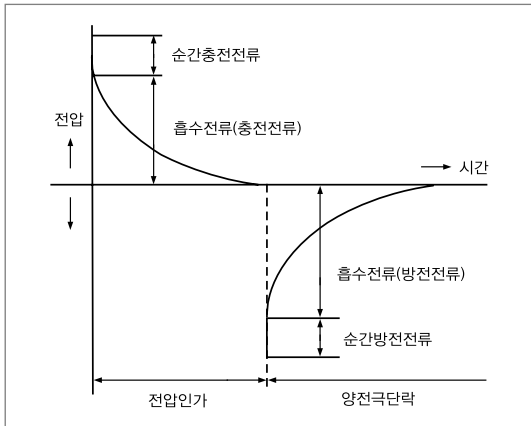
→ 절연체에 형성되는 정전용량과 전자, 원자 분극으로 발생하는 전류성분

- ② Ia : 충전전류에 지속적으로 흘러 완만하게 감소하는 전류부 (=흡수전류)
 - 비교적 완만한 전기분극 (배향분극, 계면분극 등)에 기초를 둔 전류성분
- ③ Ib : 전류가 궁극적으로 일정치에 도달한 전류부 (=누설전류)
 - 순수한 누설전류 (=절연저항)를 단시간에 계산하는 것은 어려우며 절연체 상호의 비교를 행하는 의미에서 전압인가 후 1분 경과할 때의 값을 지표로 한다.

이상적인 절연체와 실제 절연체의 전기 전도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

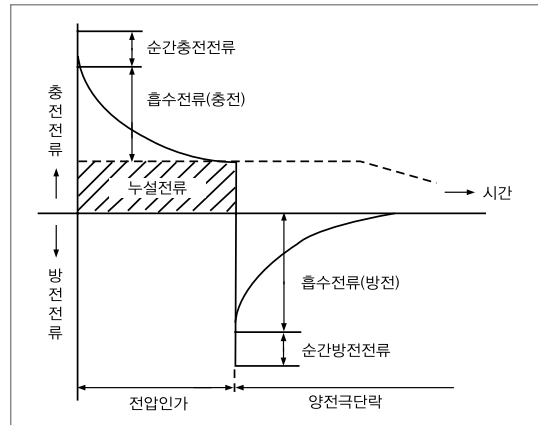
① 이상적인 절연체

전압을 인가하고 양 전극을 단락하면 충전에 소요되었던 전하량과 방전으로 회수되는 전하량은 같다.



[그림 3.5] 이상적인 절연체의 충전과 방전전류

② 실제의 절연체



[그림 3.6] 실제 절연체의 충전과 방전전류

실제로는 절연체 표면의 전기전도가 문제가 되는 것이 많다. 절연체의 표면은 기체의 흡착, 산화, 액체의 누유, 분진이나 미립자 등이 부착하여 오염되기 쉬우며 절연체 표면에 부착하는 수분의 영향이 크기 때문이다.

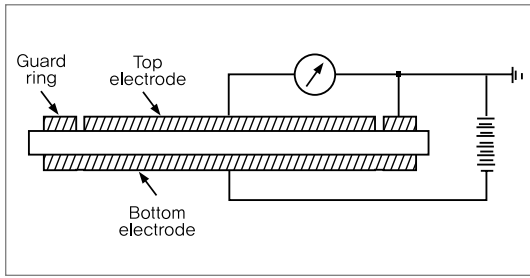
3.2 절연저항 측정 방법

국제적인 표준규격으로는 다음과 같은 표준이 있다.

- IEC 60093 : Methods of Tests for Volume Resistivity and Surface Resistivity of Electrical Insulating Materials
- ASTM D 257 : D-C Resistance or Conductance of Insulating Materials

측정 방법은 500±5 V의 직류전압을 60초 인가한 후 측정한다.

3.2.1 체적저항률 (Volume Resistivity)



[그림 3.7] 체적저항 측정용 전극 및 회로

$$\rho_v = R_v \cdot A / d \quad \Omega \cdot \text{cm}$$

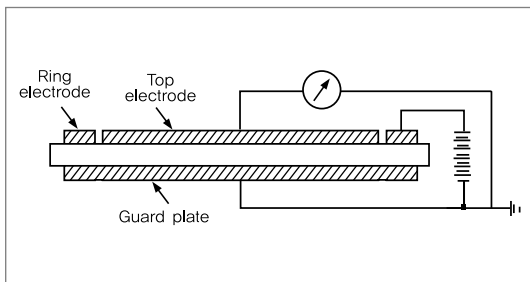
R_v : 체적저항(Ω)

A : 주전극의 유효면적($d \leq 1.0\text{mm} \rightarrow A = \pi r^2$)

$d > 1.0\text{mm} \rightarrow A = \pi d^2/4$)

d : 시편의 두께(mm)

3.2.2 표면저항률 (Surface Resistivity)



[그림 3.8] 표면저항 측정용 전극 및 회로

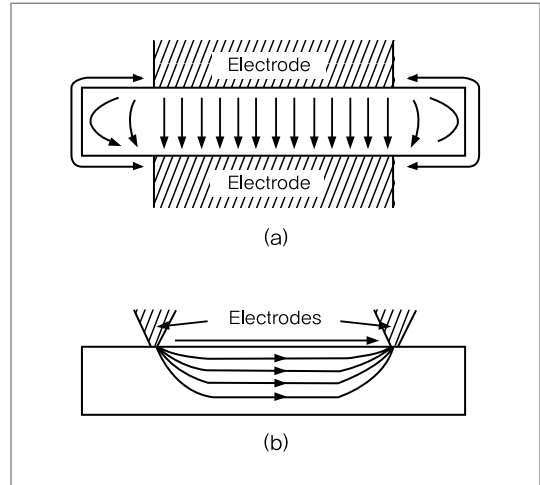
$$\rho_s = R_s \cdot P / g \quad \Omega$$

R_s : 표면저항(Ω)

P : 주전극의 유효원주($2\pi r_0$)

g : 내, 외부 전극간 거리($r_2 - r_1$)

체적저항과 표면저항 측정에 있어서 실제로는 “fringing” 효과가 나타나므로 순수한 값을 측정하기는 어려우나 표준에 의해 측정된 값은 비교 값으로서의 의미를 갖는다.



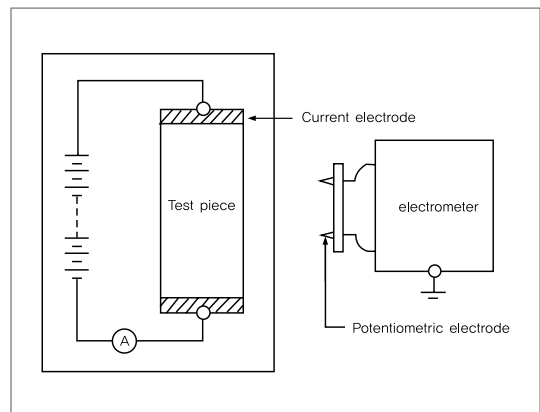
[그림 3.9] 체적저항과 표면저항의 fringing 효과

(a) 체적저항 (b) 표면저항

3.2.3 도전성 고분자 재료의 절연저항 측정

국제 표준규격은 ISO 1853(Conducting and antistatic rubbers - Measurement of resistivity)를 적용하며 다음과 같이 측정한다.

- 적용: $10^6 \Omega \cdot 5\text{m}$ 이하의 재료에 대한 측정
- 시료: W 10~150mm, L 70~150mm, T 2.4 or 6.3mm



[그림 3.10] 측정회로

- 계산
- $$\text{저항율} (\Omega \cdot \text{m}) = \frac{\text{저항치} (\Omega) \times \text{단면적} (\text{m}^2)}{\text{전극거리} (\text{m})}$$

3.3 절연파괴

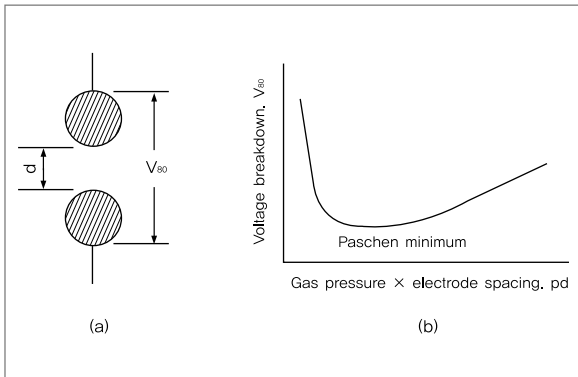
절연재료에 인가되는 전계가 크게 되어 어느 값에 도달하면 갑자기 대전류가 흘러 도체와 같이 되는 현상을 절연파괴라고 하며, 절연파괴를 일으키는 전압 V 를 절연파괴전압이라 하고 이 파괴전압을 시료의 두께 d 로 나눈 V/d 를 절연파괴 강도 또는 절연내력이라 한다.

절연파괴를 이해하기에는 뇌를 생각하는 것이 쉽다. 수분을 많이 함유한 공기가 상승기류를 따라 영하의 상공에 도달하면 수분이 얼기 시작하여 콜로이드상의 얼음입자가 된다. 이것이 서로 마찰하여 +의 전하를 대전한 얼음 입자와 -의 전하를 대전한 얼음의 입자로 분리된다. 즉, 번개구름과 지상에서의 방전현상이 대기의 절연내력(수만 V/m)을 넘어서는 현상이 번개이다. 즉, 낙뢰는 대기의 전로파괴이다.

3.3.1 기체의 절연파괴

기체나 액체는 파괴를 일으켜도 전압을 제거하면 절연이 회복된다. 전압이 인가되면 기체분자에 전자가 충돌하여 이온화되고 양이온과 전자가 생기며 전자는 전계에 의해 가속되어 많은 양의 전자군이 생기는 현상을 전자사태 파괴라고 한다.

기체의 밀도(압력) P 와 양 전극간의 거리 d 와 파괴전압 V 는 다음과 같은 현상을 나타내며 이를 Paschen의 법칙이라고 한다.



[그림 3.11] Paschen's law

3.3.2 액체의 절연파괴

액체중의 불순물(수분, 용해가스, 현탁 미립자 등)의 영향이 크다. 액체의 절연파괴는 기체와 유사한 것으로 알려져 있으나 절연파괴의 현상도 복잡하고 이론도 완전히 정립되지 않았다.

3.3.3 고체의 절연파괴

절연파괴 기구는 열적파괴와 전자적 파괴로 설명할 수 있다.

① 열적파괴

전류에 의한 Joule 열에 의해 온도가 상승하고 온도 상승에 따라 도전율이 커짐으로서 더욱 전자가 증가하여 파괴에 이른다. 도전율과 열전도율의 함수이며 재료의 크기와 모양, 표면의 열방산 등에 의존한다.

② 전자적 파괴

전자에 의해 가속된 전자가 결정격자와 충돌할 때 자유전자와 정공을 만들며, 이들 전자가 다시 가속되어 같은 현상을 반복하면 전자사태가 일어나 파괴에 이른다.

고체의 절연파괴는 전극의 크기와 형상에 크게 영향을 받는다.

① 전극의 면적이 작으면 절연내력 증가하지만

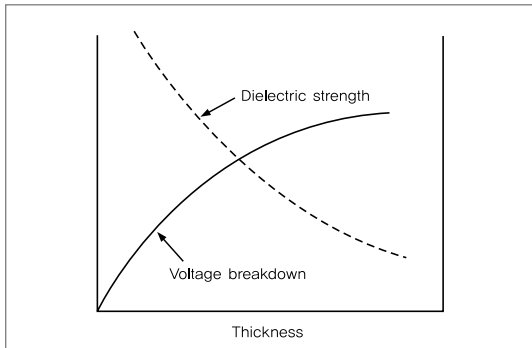
② 침단과 같이 작으면 전계가 집중되어 절연내력 감소

고체의 절연파괴를 실험할 때 두께에 따라 결과 값이 달라진다. 즉, 두께를 크게하면 절연내력은 증가하지만 절연파괴강도(V/d)는 감소하므로 결과를 보고할 때는 반드시 사용한 시료의 두께를 보고하여야 한다.

V : 파괴전압, v : 1mm 두께의 파괴전압, t : 두께,

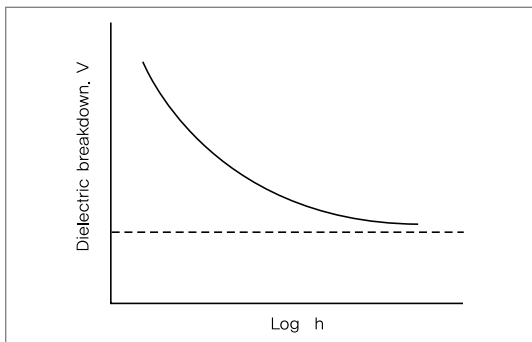
E : 파괴전압, k : 상수

- ① Kinzbrunner 식 $V = v t^{\frac{1}{2}}$
- ② Baur 식 $E = k t^{\frac{2}{3}}$



[그림 3.12] 절연파괴 강도의 두께 의존성

가압시간도 절연파괴에 영향을 미친다. 극히 고압이라도 짧은 시간이면 견디지만 장시간이 되면 훨씬 낮은 시간에도 파괴하는데, 이는 유전체를 파괴시키는 데는 일정량의 최소 에너지가 필요하기 때문이다.



[그림 3.13] 가압시간의 영향

고체의 절연파괴에 영향을 미치는 기타 효과로 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 직류전원인 경우 교류전원보다 파괴전압이 높다.
- ② 인가전압의 주파수를 높게 하면 절연내력이 저하한다.
- ③ 표면에 습기가 있으면 누설전류로 인해 절연내력이 저하한다.

- ④ 측정온도가 높아지면 전류전하의 이동이 쉬우므로 절연내력이 저하한다.

3.4 절연파괴강도 측정 방법

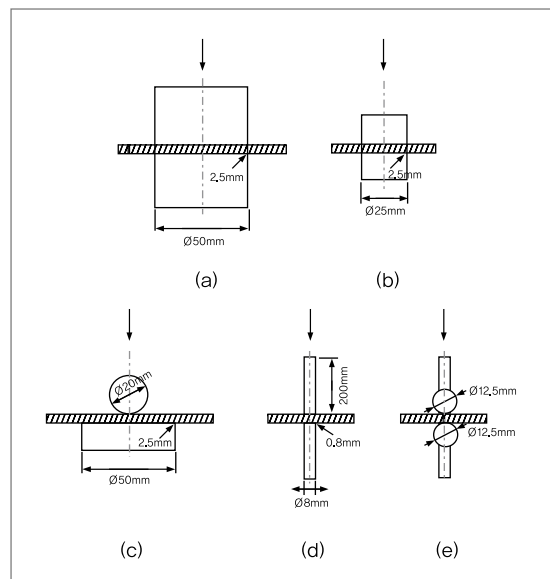
3.4.1 표준규격

- IEC 60243 : Recommended test methods for electric strength of solid insulating materials at power frequencies
- ASTM D 149 : Dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating at commercial power frequencies

3.4.2 시험편 및 시료수

- 두께 : 1~2mm
- 시료수 : IEC 60243 : 5개 시료(측정 값이 15% 이상이면 10개)로 중앙 값을 구함
- ASTMD149 : 5개 시료로 산술평균 값을 구함

3.4.3 시험전극



[그림 3.14] 절연파괴 강도 시험용 전극

3.4.4 전압인가

- 단시간법 (short time) : 절연파괴가 10~20초 사이에 일어나도록 일정한 속도로 전압인가(0.5~1.0 kV/sec)
- 계단법 (step-by-step) : 각 전압별로 20초 인가하여 절연파괴가 일어나는 전압을 구한다.

4. 방전열화

절연재료 내부의 결함이나 표면에 국부적으로 전계가 집중하여 국부적인 방전이 발생하며 절연재료의 침식이나 변질 또는 도전성을 띄며 열화하여 절연파괴에 이른다. 이를 방전열화라고 하고 방전열화는 방전의 형식에 따라 부분방전, 트래킹, 트링, 아크열화 등으로 분류된다.

4.1 부분방전 (partial discharge) 열화

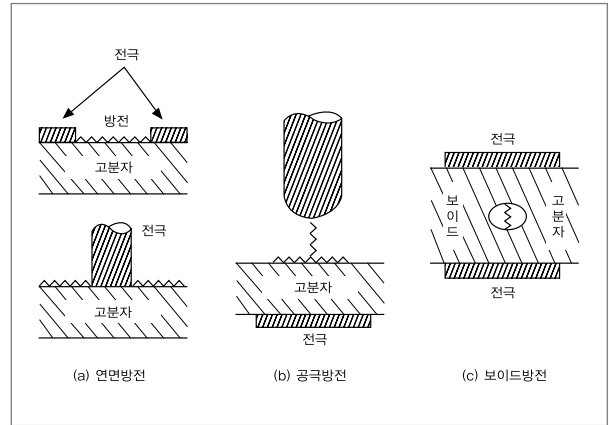
4.1.1 부분방전(코로나) 열화

고체 절연재료의 방전열화는 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 절연재료 내부의 void, 전극과 절연재료 사이의 gap 또는 절연재료 표면에 전계가 집중하여 부분방전이 발생
- ② 열화진행 : 방전에 의한 부분적인 침식 → 방전이 국부적으로 집중 → 방전에너지 밀도 증가 → 침식 깊이가 깊어짐
- ③ 방전공간에서 발생한 하전입자 (전자, +, - 이온)의 절연재료 표면에서의 충격효과, 열효과 (열적 용해나 화학적 분해), 방전으로 여기된 분자 및 그 2차 생성물과 절연재료와의 화학반응 등으로 절연재료의 침식을 일으킨다.

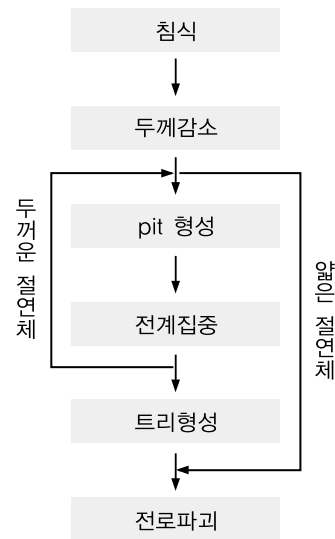
방전형태는 전극의 위치에 따라 다음 그림과 같이 다양하게 나타난다.

절연재료 표면을 타고 생성하는 방전을 연면방전이라 하는데 옆면방전이라고 쓰지 않도록 주의하여야 한다.

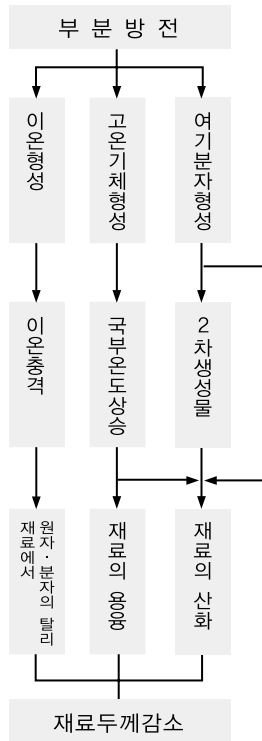


[그림 4.1] 방전형태

- 부분방전에 의한 열화 · 침식과정



(a) 부분방전에 의한 두꺼운 절연재료의 노화과정



(b) 부분방전에 의한 절연재료의 침식과정

[그림 4.2] 부분방전에 의한 열화 · 침식과정

4.1.2 기기에 대한 부분방전

부분방전 중에는 전로파괴가 발생하지 않으며 기체중의 도체표면에 발생하는 부분방전을 코로나 방전이라 한다.

부분방전 시험방법은 다음과 같다.

- ① 소정의 전압에 대한 부분방전 발생 확인
- ② 부분방전의 개시전압 (inception voltage) 및 소멸 전압 (extinction voltage)
- ③ 시험전압의 변화에 따른 부분방전의 강도 측정

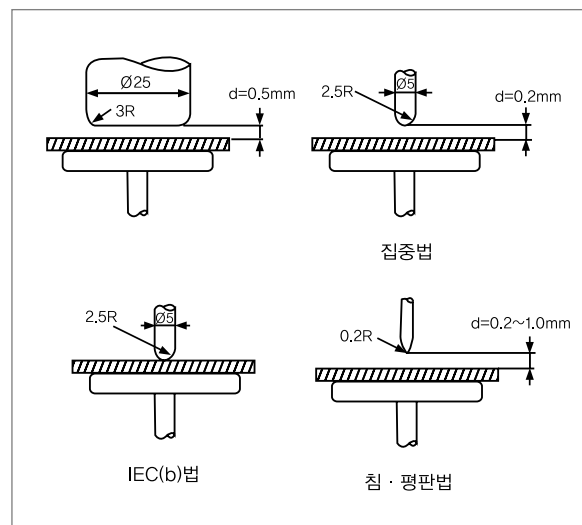
부분방전을 측정하는 것은 다음과 같은 의미를 갖는다.

- ① 국소의 방전을 정확히 측정하므로 절연 진단의 유력한 수단
- ② 시험전압이 낮으므로 피시험체에 영향을 미치지 않는 비파괴 시험

- ③ 기본적으로 운전전압 하에서의 장기신뢰성 검증

4.1.3 재료에 대한 부분방전 평가

- ① 평행평판법 : 열화의 판정으로 시료의 중량감소, 잔존 파괴전압, $\tan\delta$, 기계적 강도 등 측정
- ② 표면방전법 : 전극 사이에 시료를 삽입시켜 절연파괴 될 때까지의 시간을 구한다.
- ③ Void 방전법 : 절연체 내부에 void를 만들어 놓고 모의 시험한다.



[그림 4.3] 부분방전 열화시험용 전극

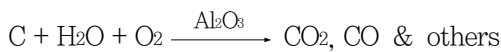
4.2 트래킹 (tracking) 열화

트래킹이란 절연물의 표면에 발생하는 누설전류나 방전전류에 의해 절연물에 탄화 도전로가 발생하여 표면절연이 파괴되는 현상을 말하며, 부식(erosion)은 누설전류나 불꽃방전의 영향으로 절연물이 침식되는 현상이다.

- 트래킹 발생기구



내트래킹성 향상 첨가제로는 $Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$, $CaCO_3$ 등이 있으며 다음과 같이 작용하여 고분자 절연 재료의 내트래킹성을 향상시킨다.



4.2.1 경사평면법 (Inclined plane test, IEC 587, ASTM D2303)

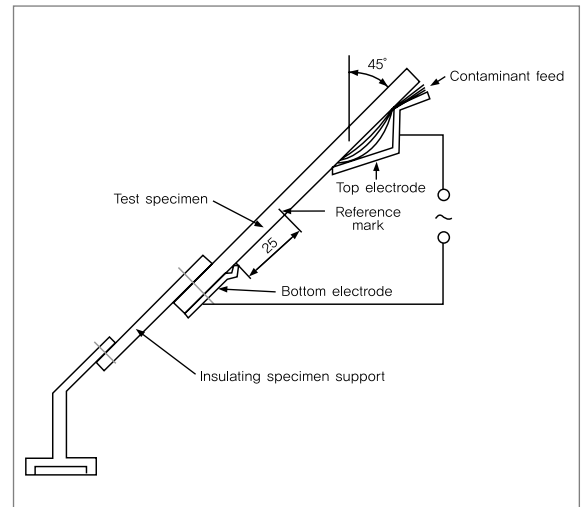
- 개요 : 1.0~6.0 kV의 전압을 전극간격 50mm, 경사각 45°로 취부한 시료에 오손액을 흘리면서 인가하여 60mA 이상의 전류가 2초 동안 흐르거나 하부 전극으로부터 25 mm 이상 트랙이 생기면 안된다.

- ① Method 1 : 일정전압 인가 (6시간)
- ② Method 2 : 250V 단위로 1시간씩 인가하여 파괴 전압을 구함

- 오손액 : $0.1 \pm 0.002\%$ NH_4Cl
 $0.02 \pm 0.002\%$ Triton X-100
- 오손액 유량은 표 4.1에 따른다.

[표 4.1] 인가전압에 따른 오손액 유량

인 가 전 압 (kV)	오손액량 (ml/min)
1.0 ~ 1.75	0.075
2.0 ~ 2.75	0.15
3.0 ~ 3.75	0.30
4.0 ~ 4.75	0.60
5.0 ~ 6.0	0.90



[그림 4.4] 경사평면법의 전극 구성도

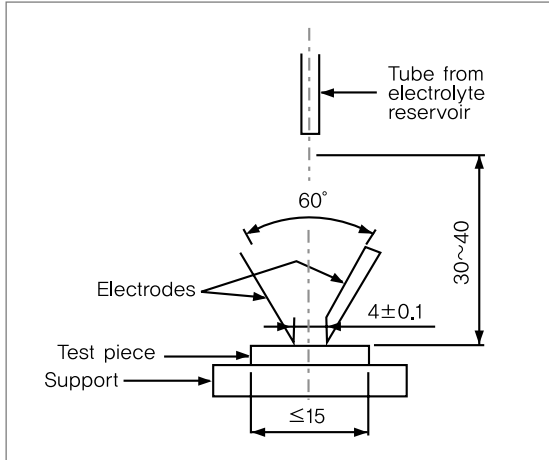
4.2.2 비교트래킹 지수 (Comparative tracking index, IEC 112)

옥내용 절연재료의 평가에 사용되는 저압시험법이다.

- 실험방법

- ① 오손액 : A액 0.1% NH_4Cl
B액 0.1% NH_4Cl + 0.5% 음이온 계면활성제
30초마다 20mm³의 오손액을 흘려줌
- ② 인가전압 : 100~600V의 전압을 25V 단위로 인가

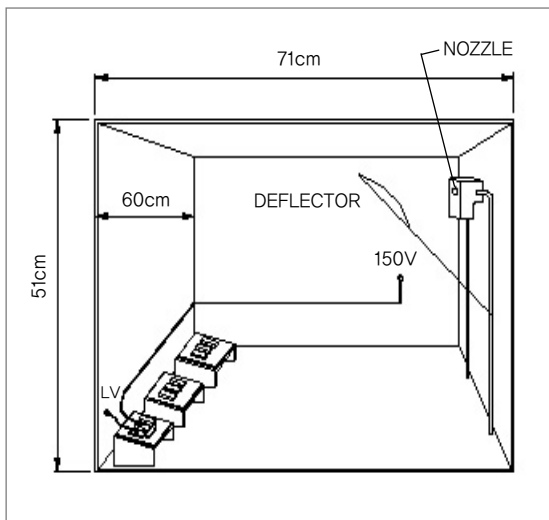
- ③ 트래킹 판정 : 오손액이 50방울에서 0.5A의 전류가 2초 이상 흐르는 트래킹 파괴에 이르지 않는 최대의 전압을 구함



[그림 4.5] CTI의 전극구성도

4.2.3 염무시험법 (Dust and fog, ASTM D2132)

실험방법은 오손물을 시료에 발라 놓고 물을 분무 (fog)하면서 1,500V 전압을 인가하여 절연 파괴될 때 까지의 시간을 측정한다.



[그림 4.6] Dust and fog 시험장치

4.2.4 Rotating Wheel Dip Test (RWDT, CEA LWVG-01, 5.6항)

폴리머 애자 제품에 대한 대표적인 시험이다.

- 시험방법

- ① 오손액 : $1.40 \pm 0.06 \text{ g/l}$
- ② 인가전압 : 누설거리(mm)당 35V
- ③ 시험 : 폴리머 애자 시료를 90° 간격으로 wheel에 4개를 장치하여 90° 씩 회전시간 8초, 정지시간 40초로 하고 360° 회전하는 것을 1cycle로 하여 30,000 cycle 실시한다.
- ④ 시험기간은 총 약 67일이 사용된다.
- ⑤ 판정 : 트래킹이 없을 것, 상용주파 건조섬락, 급준파 충격, 상용주파 내전압

4.2.5 Salt fog test (IEC 61109, 5.3)

폴리머 애자 제품에 대한 시험이다.

- 시험방법

- ① 시험기간 : 1,000h
- ② 염수농도 : 10 kg/m^3 ($16,000 \mu\text{S/cm}$)
- ③ 시료수 : 2개
- ④ 전압인가 : creepage 20mm/kV
- ⑤ Chamber : max. 10 m^3

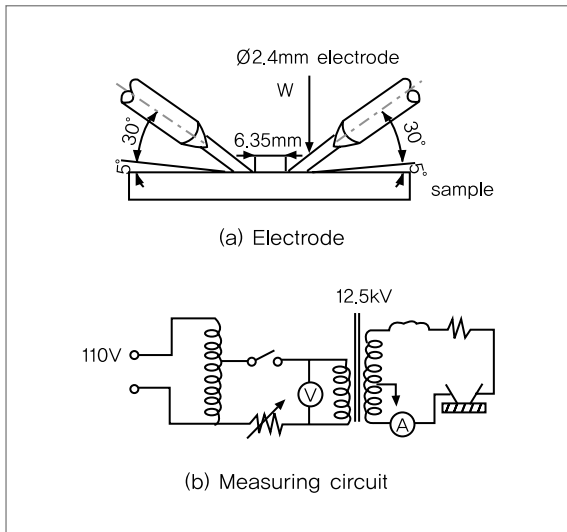
- 판정

- ① 트래킹이 없으며 erosion이 코아까지 미치지 않을 것
- ② 섬락이 4회 발생하지 않을 것

4.3 내아크성 (Arc resistance)

고분자재료가 고전압 전기 arc에 견디는 능력을 보는 시험이며, 표면이 카본화되어 도전성으로 변하는데 까지의 소요시간을 측정한다.

- 표준규격 (ASTM D 495)



[그림 4.7] 내아크성 측정용 전극 및 회로도

4.4 Treeing 열화

4.4.1 전기 tree

고체상 절연체 중에 발생하는 수지상의 절연파괴 부분을 말하고, 트리 발생 및 진전 현상을 포함하여 treeing 이라 한다.

주로 두꺼운 절연물에서 발견되고 국부 고전계에 의해 절연층에 형성된 수 μm 의 미세한 구멍으로 나타난다. 트리의 발생원인은 다음과 같이 2개의 설이 있다.

- ① 국부적인 고전계에 의한 진성파괴에 기인한다는 설
- ② 국부방전에 의한 이온 충격을 발생원인으로 한다는 설

4.4.2 수 tree

물이 충전되어 있는 각종 수지상의 미세한 통로 또는 void로 나타나며 수트리가 발생하면 $\tan\delta$ 는 증가한다. 수트리 발생이론은 다음과 같다.

- ① 미소방전에 의해 물이 분해되어 $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$ 로 되기 때문에 생기는 압력 증가에 따라 절연체가 물리적으로 파괴된다.

② 전계가 집중되는 부분에 물이 집중하고, 물의 응집에 의한 체적팽창에 따라 절연체가 물리적으로 파괴된다.

③ 전계가 집중하는 부분에 응집한 물이 젯트분류로 되어 물리적으로 절연체를 파괴한다.

4.4.3 화학 tree

XLPE 케이블의 도체에 동이 사용되는 경우 H_2S 와 반응하여 황화동을 만들고, 이 황화동은 도체 표면에서 절연체중에 돌출하는 형태로 되고 이것을 화학트리라 한다. 알루미늄 도체에는 화학트리가 발생하지 않는다.

4.4.4 내트리성 평가

절연재료에 연마침을 삽입하여 고전계부를 설치하는 "Needle test"를 주로 사용하여 인가전압의 종류에 따른 tree의 형태와 변화를 측정한다.

트리 발생전압은 직류 > Impulse > 교류 순으로 측정되며, 직류 및 impulse 전압은 침전극 선단에 발생하는 공간전하에 의해 전계가 완화되기 때문에 트리발생 전압이 높다. KEA

참고문헌

1. R. P. Brown, "Handbook of Plastics Test Methods", 1988
2. 일본 전기학회, "절연시험법 핸드북", 1971
3. J. S. T. Looms, "Insulators for High Voltages", 1988
4. 박창연, "전기재료", 1987
5. W. T. Shugg, "Handbook of Electrical and Electronic Materials", 1995
6. R. P. Brown, "Physical Testing of Rubber", 1986
7. 大澤善次郎, "高分子の劣化と安定化", 1992
8. A. Davis and D. Sims, "Weathering of Polymers", 1983
9. R. Bartnikas et al., IEEE Trans. Power App. Systems, PAS-99, 1575, 1980
10. R. M. Eichhorn, IEEE Trans. Electr. Insul. EI-16, 478, 1981