

전기전자재료



8 유전체

8.5 절연파괴

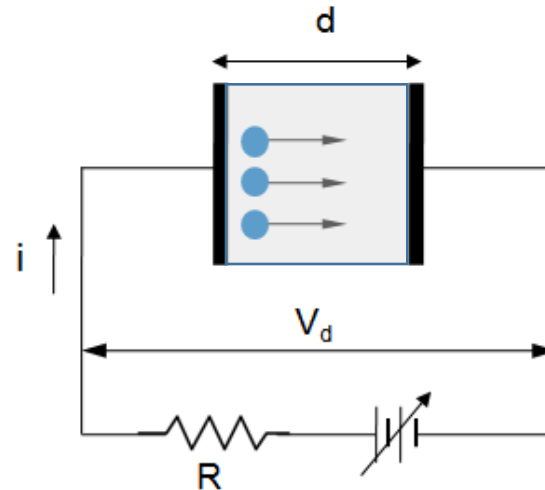
(1) 파괴전압

절연파괴 : 절연체에 고전압을 가한 경우 순간 큰 전류가 흘러 절연성이 상실되는 현상을 말한다.

절연파괴강도(절연파괴전압)

$$E_b = \frac{V_b}{d}$$

여기서, V_b : 절연파괴전압
 d : 절연체의 두께



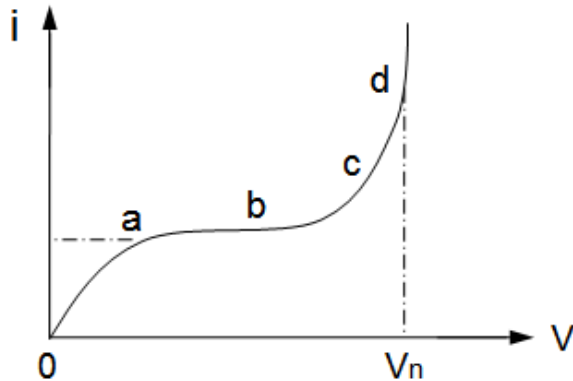
평행전극의 전압-전류 측정회로

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

평행전극의 전압-전류특성



0-a 영역 : 전압의 상승과 더불어 하전 입자는 구동속도를 증대시키면서 전류가 점차로 증대된다.

a-b 영역 : 대부분의 하전 입자는 전극에 달하게 되고 전류는 간극 중의 하전 입자 생성비율에 의해서 결정되는 포화 전류 값에 도달한다.

b-c 영역 : 더욱 전압을 상승시키면 중성기체분자의 전리, 충기를 일으킴과 동시에 음극에서의 전자방출과 기체의 광전리 등 2차 구조가 나타나게 되어 전류가 급격하게 증가한다.

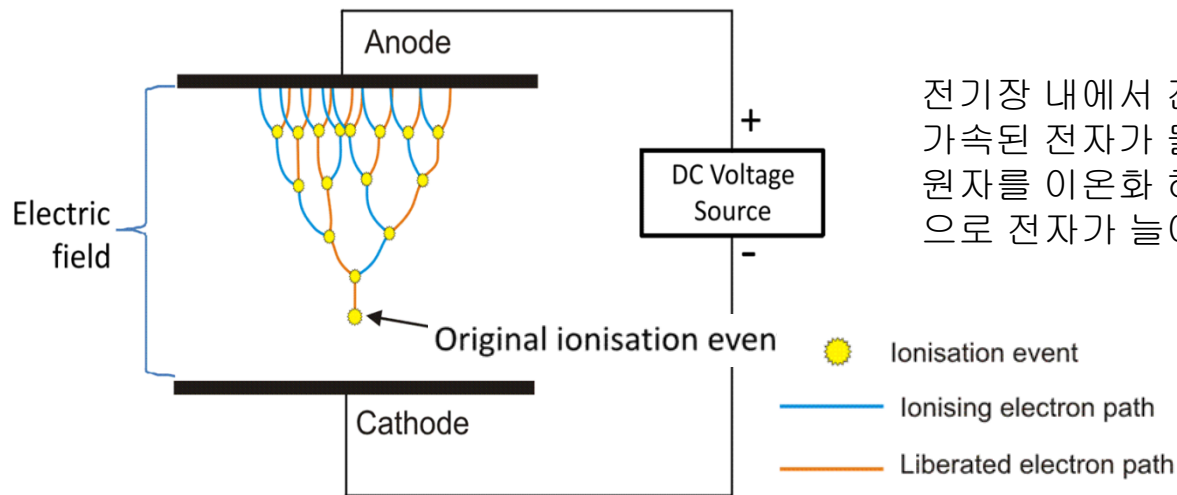
d 영역 : 전류가 급격하게 증가되는 영역으로 서 기체의 절연파괴가 나타난다(전자사태).

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

두 전극 사이의 전자사태



전기장 내에서 전계에 의해서 가속된 전자가 물질 중의 분자나 원자를 이온화 하면서 기하급수적으로 전자가 늘어나게 된다.

그림 2.9 Townsend 방전특성

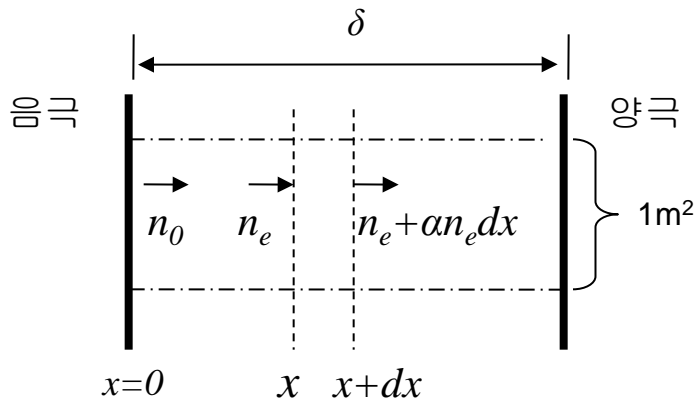
8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

α 작용과 γ 작용을 고려한 경우

α 작용 - 전자의 충돌전리작용
 γ 작용 - 충돌에 의한 전자방출작용



전자에 의한 충돌전리

1) α 작용

음극에서 단위시간당 n_0 개의 전자가 방출되어 x 에 도달했을 때, n_e 개가 되었다고 하면, n_e 개의 전자가 x 에서 $x+dx$ 까지 진행하는 사이에 증가하는 전자의 수 dn_e 는

$$dn_e = \alpha n_e dx \quad (1.75)$$

여기서, α 는 충돌전리계수

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

n_e 를 구하기 위하여, 식 (1.75)을 변수분리 하고 적분하면

$$\frac{1}{n_e} dn_e = \alpha dx \quad \rightarrow \quad \int \frac{1}{n_e} dn_e = \int \alpha dx$$

따라서

$$\log_e n_e = \alpha x + c$$

그러므로

$$n_e = e^{\alpha x + c} = e^{\alpha x} e^c = ce^{\alpha x} \quad (c \text{ 는 적분상수})$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

그런데 $x = 0$ 에서 $n_e = n_0$ 이므로(경계조건)

$$n_e = c e^{\alpha x} \Big|_{x=0} = n_0$$

$$\therefore c = n_0$$

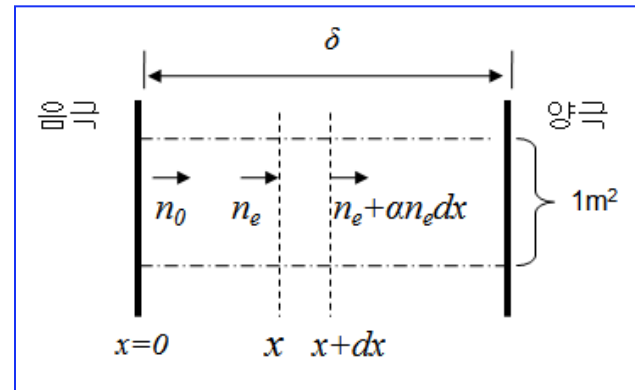
따라서

$$n_e = n_0 e^{\alpha x}$$

→ 이러한 일련의 전리 증식과정을 일컬어 전자사태(electron avalanche)라 한다.

양극에 단위시간당 유입하는 전자의 수는, $x = \delta$ 로 놓으면

$$n_e = n_0 e^{\alpha \delta} \quad (1.76)$$



8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

$$n_e = n_0 e^{\alpha d}$$

이로 인한 전자전류 I_e 는

$$I_e = n_e e = (n_0 e) e^{\alpha d} = I_0 e^{\alpha d}$$

α 작용(충돌전리작용)에 의해서 전자와의 충돌로 정 이온이 발생하고, 이 정 이온은 음극으로 이동한다.

이때 음극에 유입하는 정 이온의 수는

$$n_+ = n_0 (e^{\alpha d} - 1)$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

2) γ 작용

양이온은 전기의 작용으로 음극에 도달하고 음극과의 충돌로 2차 전자를 방출한다. 이때 방출되는 2차 전자의 방사율을 γ 라 하면, 음극에서 방출된 2차 전자수는

$$n_0\gamma(e^{\alpha\delta} - 1)$$

로 된다.

전자는 재차, α 작용에 의해서 다음의 전자를 증식되어 양극으로 유입된다.

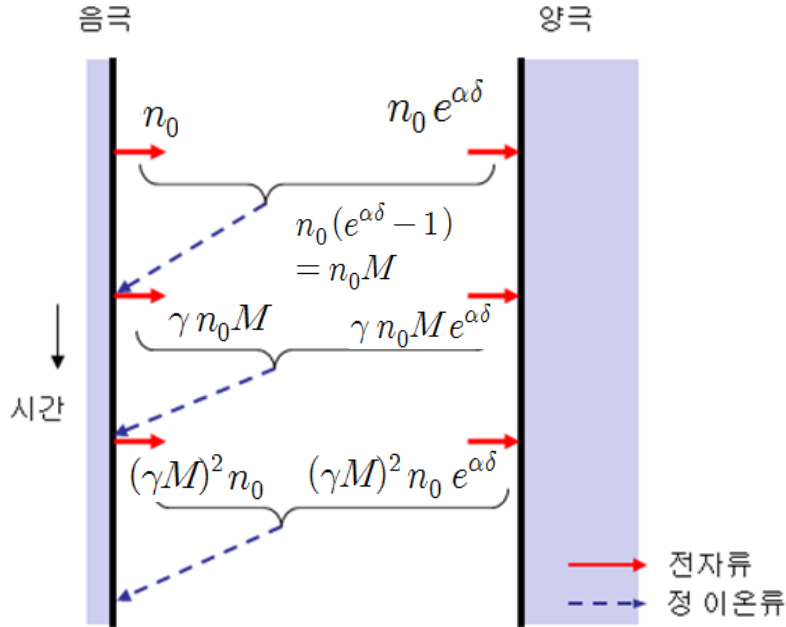
$$n_0\gamma(e^{\alpha\delta} - 1)e^{\alpha\delta}$$

이와 같은 과정이 계속해서 반복적으로 일어난다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴



α, γ 작용에 의한 방전전류

결국 단위시간당 양극에 유입하는 전자 총 개수 N 은 각 과정별로 양극에 유입하는 전자의 합이 된다.

$$N = n_0 e^{\alpha \delta} + n_0 e^{\alpha \delta} \gamma M + n_0 e^{\alpha \delta} (\gamma M)^2 + \dots$$

여기서 $M = e^{\alpha \delta} - 1$

이와 같이 N 은 무한급수로 된다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

$\gamma M < 1$ 일 때, 무한급수는 다음 식으로 나타낸다.

$$N = \frac{n_0 e^{\alpha\delta}}{1 - \gamma M} = \frac{n_0 e^{\alpha\delta}}{1 - \gamma(e^{\alpha\delta} - 1)} \quad (1.78)$$

이 값은 음극에 유입하는 정이온의 개수와 n_0 의 합, 또는 x 점을 통과하는 정 이온과 전자 개수와의 합과도 같게 된다.

따라서 간극을 흐르는 전류 I 는 다음 식으로 된다.

$$I = Ne = \frac{n_0 e^{\alpha\delta}}{1 - \gamma(e^{\alpha\delta} - 1)} e = I_0 \frac{e^{\alpha\delta}}{1 - \gamma(e^{\alpha\delta} - 1)} \quad (I_0 = n_0 e)$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

이 식에서, 분모가 0에 가까워지면 간극을 흐르는 전류는 식에서 무한대가 되지만 실제로는 회로에 직렬저항이 들어있으므로 어떤 값에 이르게 된다.

이 조건을 스파아크 임계조건(**Sparking criterion condition**)이라 하며 다음 식으로 된다.

$$1 - \gamma(e^{\alpha\delta} - 1) = 0$$

이 식을 변형하면,

$$\gamma(e^{\alpha\delta} - 1) = 1 \quad (1.79)$$

여기서, $(e^{\alpha\delta} - 1)$ 은 음극에서 1개의 초기전자가 방출되어서 양극에 도달하는 사이에 만들어지는 정이온의 수와 같고, 이의 γ 배는 정이온이 음극에서 충돌할 때 방출하는 2차 전자수가 된다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

Paschen의 법칙

$\gamma(e^{\alpha\delta} - 1) = 1$ 에서, 양변을 γ 로 나누고 $\ln(\log_e)$ 을 취하면,

$$\log_e e^{\alpha\delta} = \log_e \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

따라서

$$\alpha\delta = \log_e \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.80)$$

일반적으로 α 는 E/p 의 함수이므로 상수 A, B 를 써서 다음 식으로 나타낸다.

$$\alpha = pA \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (1.81)$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

그리고 방전전압 V_d 와 전계 E_d 의 관계 식

$$E_d = \frac{V_d}{\delta} \quad (1.82)$$

식 (1.80), (1.81), (1.82)을 연립해서 풀면,

$$V_d = \frac{Bp\delta}{\ln A - \ln \left\{ \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right\} + \ln p\delta} \quad (1.83)$$

여기서, γ 는 이온의 에너지에 관여하지 않으면서 대수를 2번 취하게 되므로 변화가 적게 되므로 상수 C로 취급될 수 있다.

$$C = \ln A - \ln \left\{ \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right\}$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

따라서

$$V_d = \frac{Bp\delta}{C + \ln p\delta} \quad (1.84)$$

즉, 기체의 방전전압 V_d 는 기체압력 p 와 전극 간격 δ 의 곱에 의존한다.
이 관계를 파센의 법칙이라 한다.

여기서 V_d 는 방전에 의해 불꽃을 발생하는 전압이 되기 때문에 불꽃전압이라고 불린다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

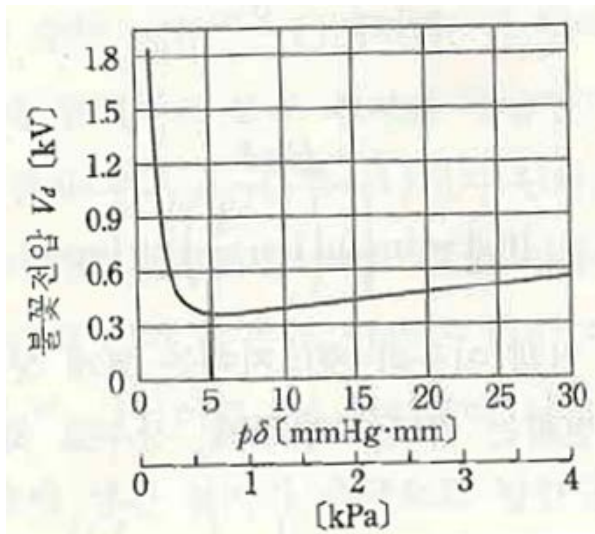


그림 1.56 공기의 불꽃전압

V_p 가 p 와 함께 증가하는 현상

: 보통 압력 p 가 커지면 기체 중 전자의 평균자유행정이 작아지기 때문에(밀도가 커지므로) 전자가 전리에 필요한 에너지를 얻기 위해서 보다 높은 전계를 필요로 하기 때문이다.

저기압에서 V_p 가 크게 증가하는 현상

: 기체의 밀도가 적으므로 전자의 평균자유행정이 전극길이 이상으로 길어지므로 전극 사이에서 기체분자와의 충돌 확률이 줄어들기 때문이다.

- 이와 같은 현상은 p 를 일정하게 유지하고, 전극거리 δ 를 변화시킨 경우에도 같다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(2) 기체절연체의 파괴

부분방전

전계가 불평등할 때, 전계가 강한 부분에서 절연이 파괴되어 방전이 일어나는 것을 말한다. 이 상태에서 인가전압을 더 증가시키면 방전로가 생기면서 불꽃이 발생하여 완전 절연파괴에 이른다.

연면방전

고체 또는 액체와 접촉하고 있는 부분의 기체에서 절연파괴가 일어나는 현상이다. 연면방전은 전극의 형태, 거리, 주파수, 유전체 표면의 성질, 기체의 압력 및 습도 등에 의해 영향을 받으며 파괴전계는 작다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

1) 전기적 파괴기구

전기적 파괴는 전자의 충돌전리에 의한 결정 내 전자사태로 인해 전도로 형성함으로써 일어나게 된다.

즉, 외부 전계로부터 에너지를 받은 가전자대의 전자가 전도대로 대량 이동함으로써 전기적 파괴가 일어나게 된다.

① 전극 두께의 영향

절연체의 단위 두께당의 파괴전압(절연내력)은 두께의 증가에 따라 감소한다.

대체로 시료가 얇은 경우에는 직선적인 관계를 나타내지만, 시료가 어느 이하로 더욱 얇아져서 결정 내 자유전자의 평균자유행정에 가까워지면 두께와 더불어 절연내력이 급증하게 된다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

② 전계 종류의 영향

$$\text{절연내력비} = \frac{\text{직류파괴전압}}{\text{교류파괴전압(최대값)}}$$

보통 직류파괴전압은 상용주파수 교류전압(최대값) 보다 크다.

일반 케이블의 경우 절연내력 비는 1~2 정도가 된다. 습기를 포함하는 경우에는 1에 접근한다.

직류일 경우에는, 전극과 같은 극성의 전하가 잔류하여 전계를 약화시켜 전리를 억제하게 된다.

교류의 경우에는, 극성이 변하므로 잔류전하가 중화되어 전리의 억제효과가 없어지므로 직류보다 낮은 값에서 절연파괴가 일어난다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

2) 열적 파괴기구

고체절연체(유기고분자, 유리판 등)에 교류전압을 인가하면서 온도를 상승하면 어느 온도 이상에서 파괴전압이 현저하게 감소한다.

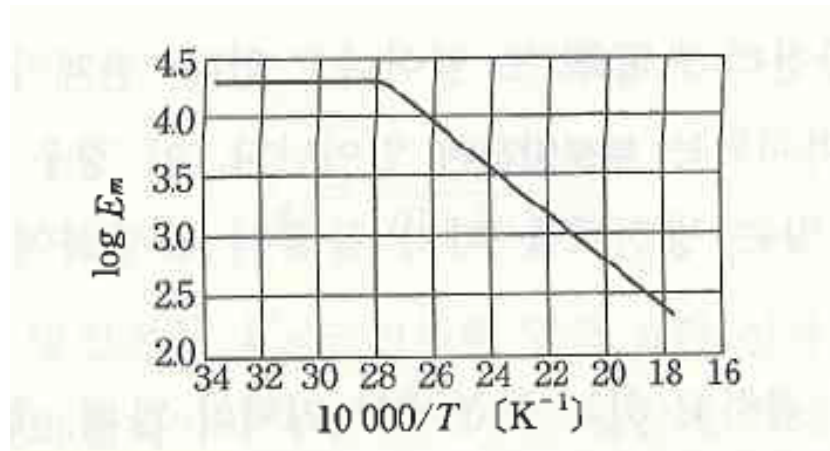


그림 1.57 유리의 절연파괴 세기와 온도와의 관계(50Hz)

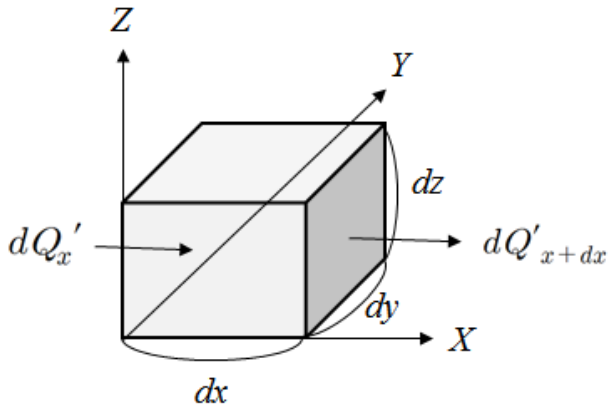
8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

열적 파괴는 인가전계에 의해서 생기는 주울열과 시료에서의 방열량의 불평형에 의해서 시료가 어느 일정 온도 이상으로 가열되어서 열적으로 파괴되는 현상이다.
즉, 축적열 = 주울열 - 방사열에 의한 절연파괴를 의미한다.

열전도 기본식



X 방향으로 dt 시간에 시료에 유입하는 열량 dQ'_x 는

$$dQ'_x = -K(dydz)dt \frac{\partial T}{\partial x}$$

X 방향으로 유출하는 열량 dQ'_{x+dx} 는

$$dQ'_{x+dx} = -K(dydz)dt \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right)$$

여기서 K 는 열전도율

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

그러므로 x 방향의 증가된 열량 dQ '는

$$dQ_x = dQ'_x - dQ'_{x+dx} = K(dx dy dz) dt \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

마찬가지로 y 및 z 방향의 증가열량도 같은 모양의 식으로 된다.
따라서 입체절연체의 증가 열량은 다음 식으로 나타낸다.

$$dQ_1 = K(dx dy dz) dt \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

한편 동일 시간 dt 간에 입방체가 열량을 받고, 이로 인해 $(\partial T/\partial t)dt$ 만큼 온도가 상승한다면 여기에 필요한 열량 dQ_2 는 다음 식으로 된다.

$$dQ_2 = C_v(dx dy dz) dt \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

여기서, C_v 는 단위 체적당의 비열이다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

또 인가전압에 의한 단위 시간, 단위 체적당의 발열량을 q 라고 하면 dt 시간 내에 입방체에 있어서의 전 발열량 dQ_3 는

$$dQ_3 = q(dx dy dz) dt$$

에너지보존법칙에 의해서

$$dQ_1 + dQ_3 = dQ_2$$

이므로, 앞의 식들을 대입하고 정리하면,

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - K \nabla^2 T = q$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

전계 E , 도전율 σ 의 유전체 내의 주울열 q (발열량)

$$q = iE = \sigma E^2$$

따라서

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - K \nabla^2 T = \sigma E^2$$

K 가 상수가 아닌 경우에는 앞의 식을 일반화하여 다음 식으로 나타낸다.

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \operatorname{div}(K \operatorname{grad} T) = \sigma E^2 \quad (1.85)$$

→ 이 식이 유전체 내의 열전도에 관한 기본식이 된다.

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

① 전압이 천천히 상승하는 경우(직류전압 인가)

고체 내 온도변화가 극히 완만하여 발열과 방열의 균형이 서서히 붕괴될 때에는 우변 첫째 항을 무시할 수 있다. 이러한 파괴를 정상열파괴라 한다.

$$\sigma E^2 = -div(K grad T) \quad (1.86)$$

② 전압이 급격하게 상승하는 경우(임펄스전압 인가)

고체 내에서의 방열을 무시할 수 있으므로 우변 둘째 항을 무시할 수 있다.

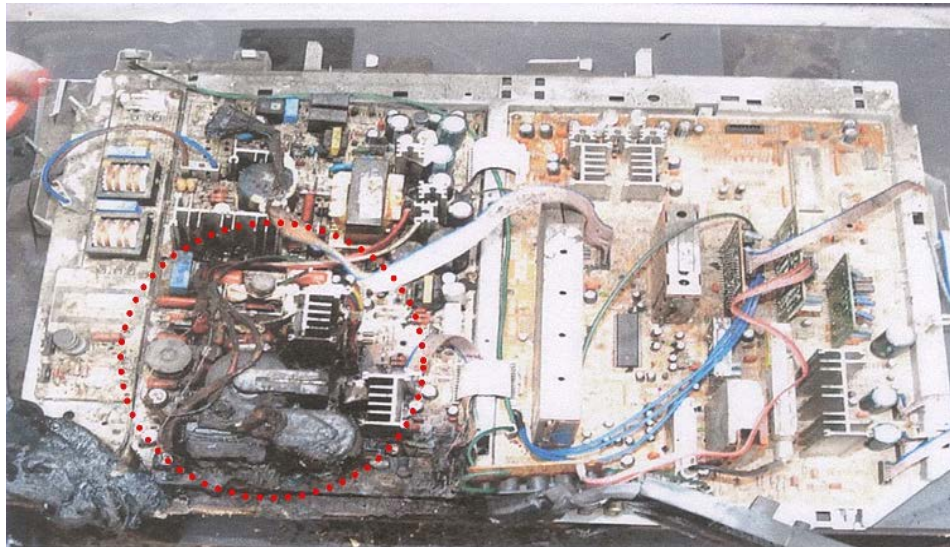
$$\sigma E^2 = C_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.87)$$

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

트래킹 현상(Tracking 現象) 전자제품에 묻어 있는 수분이 섞인 먼지 등에 전류가 흘러 주변의 절연물질을 탄화(炭化)시키는 것.오랜 시간 탄화가 계속되면 이 부분에 약한 전류가 흐르게 되고 잘못하면 불이 날 수도 있다.



트래킹 현상의 진행과정

- 1단계 : 절연재료 표면의 오염 등에 의한 도전로 형성
- 2단계 : 도전로에 미소 방전발생
- 3단계 : 방전에 의한 탄화현상진행

8 유전체

8.5 절연파괴

(3) 고체절연체의 파괴

트리현상(Treenig) 유기고분자 고체 절연체 내부에서 수지상의 부분파괴를 일으키는 현상을 말한다. 이때 발생된 수지상 열화흔적을 전기트리라고 한다.

