

電氣設備의 診斷技術

4

第3章 經年劣化와 劣化診斷 파라미터

3.1 高分子材料의 經年劣化

3.1.1 劣化要因

經時的인 機器性能의 低下 즉 劣化(Degradation)는 통상 機器構成材料의 變質에 의한 品質低下로 발생하게 된다. 특히 有機高分子材料의 우수한 電氣絶緣性이 주목받으면서 전기絶緣재료로서의 적용은 점차 확대되어 가고 있다. 有機高分子材料의 劣化 중에서 절연특성의 劣化를 絶緣劣化라고 말한다.

機器絶緣材料는 주목적인 電氣絶緣性 이외에 構造部材로서의 역할을 하는 경우가 많으며 機械的性能 등의 복합된 요구를 받게 됨으로써 이에 수반되는 종합적인 劣化現象은 매우 복잡하게 된다. 劣化를 촉진하는 스트레스 要因은 많이 있으나 그 주된 것을 들면 다음과 같다.

1. 熱스트레스劣化 要因

화학반응을 촉진하는 온도상승은 劣化의 속도를 증대하며 素材의 수명을 단축하는 가장 일반적인 劣化要因이 된다. 기기의 온도상승한계도 소재의 熱劣化의 관점에서 결정되는 경우가 많다. 이것들

에 의한 소재의 물리적, 화학적 변화에 의해서 전기적, 기계적인 성능이 저하된다.

2. 電氣스트레스劣化 要因

機器素材에 印加되는 電界에 起因하는 것으로서, 다음과 같은 각종 원인으로 발생하게 된다.

- a. 傳導電流：줄 熱로서 熱的效果를 나타내는 이외에 이온傳導에 있어서는 電氣化學效果를 일으킨다.
- b. 誘電體損：交流電界下에서 발생하며 열적효과를 일으킨다.
- c. 電磁力, 靜電力：短絡大電流라든가 高電壓에 의하여 발생하는 힘으로 기계적 효과를 나타낸다.
- d. 部分放電：高電界에서 기체, 액체의 부분방전이 일어나면 열적작용, 입자충격작용, 勵起分子라든가 이온에 의한 화학작용이 일어난다.

3. 機械스트레스劣化 要因

기계적 응력, 진동 등이 중심으로서 이들의 외래적인 기계력 이외에 열팽창계수의 相違에 의한 熱歪曲力, 短絡大電流에 의한 電磁應力 등으로부터 유발된다.

4. 環境스트레스劣化 要因

原子爐內, 放射性元素 또는 粒子加速器에 의한

고에너지방사선(중성자선, γ 선, X선, 전자선 등) 환경하에서는 물리적, 화학적 열화가 촉진된다. 또한 반응성 물질, 흡수에 의한加水分解 및 미생물에 의한 침식도 주목되고 있다. 더욱이 자연환경하에서도 강한紫外線의照射에 의한劣化가 촉진된다.

5. 複合스트레스劣化 要件

일반적으로 앞에서 설명한 각 요인이 단독으로 작용하는劣化에 비하여 이것들이 복합되어 작용하는 경우가 많다. 이때의 열화는 근사적으로 단독일 때 열화를 중첩시켜서 되는 경우와 단독일 때 단순한 중첩에 의해서 큰 열화가 촉진되는 경우가 있다. 특히 보다 큰 열화가 촉진되는 경우에는 複合劣化로서 특별히 취급한다.

3.1.2 熱스트레스 劣化

운전중 기기에 발생하는 銅損, 誘電體損, 鐵損, 機械損 등은 機器內的 發熱源이 되며 이것들이 외부로의 放熱과 熱平衡이 이루어지는 온도까지 기온도는 상승된다. 이때 素材는 온도상승 즉 熱스트레스에 의해서 經時的인 물리적, 화학적 변화를 일으켜劣化된다.

따라서 전력용 기기에는 15~20년의 장기에 걸친 수명의 보증을 전제로 하여 나중에 나타낸 것처럼 절연재료소재와 그 허용최고온도와의 구분이 결정된다.

1. 熱스트레스 劣化의 物理化學

有機高分子가 고온에 노출되면 분자의 절단이나 각종 遊離基를 발생하며 분자구조가 변화한다. 이들의 과정은 산소의 유무에 의해서 현저하게 영향을 받으며 결과가 달라진다. 이 경우 분해반응에 대해서 산소가 없는 상태의 반응을 熱分解라고 말하고 산소가 있는 상태의 반응을 熱酸化分解로 구별하는 경우도 있다.

a. 산소가 존재하지 않는 열분해반응 : 고분자등이 진공중이나 불활성가스 중에서 가열되면 고

<표 3.1> 多原子分子에 있어서 평균결합에너지

결 합	평균결합에너지(kcal/mol)	평균결합거리(A)
C-H	98.8	1.10
O-H	110.6	0.97
C-C	82.6	1.54
C=C	145.8	1.34
C≡C	199.6	1.20
C-N	72.8	1.47
C-O	85.5	1.43
C=O	178	1.22
C=Cl	81	1.77
C-F	116	1.38
N-O	53	1.36

<표 3.2> (R-R')의 C-C결합에너지(kcal/mol)

R	R'	-CH ₃	-C ₂ H ₅	-C ₃ H ₇	-C ₆ H ₅	CH ₂ =CH-	-CHO
-CH ₃		84.4	82.2	80.6	90.0	89.4	71.2
-C ₂ H ₅		82.2	80.4	79.0	88.0	87.5	70.9
-C ₃ H ₇		80.6	79.2	77.4	59.4	86.2	70.9
-C ₆ H ₅		90.0	88.0	86.6	102.4	101.2	80.0
CH ₂ =CH-		89.7	87.5	86.2	101.2	102.4	82.1
-CHO		71.5	70.9	70.9	80.6	82.1	

[註] 1eV(일렉트론볼트)=23.0kcal/mol

분자를 구성하는 원자간의 결합이 熱에너지에 의해서 解離되어 低分子가 生成된다.

이것이 기체가 되어서 확산되고 증량감소가 일어난다. 원자간의 결합의 세기는 결합을 解離하는데 필요로 하는 에너지(結合에너지)로서 나타난다. 원자간의 결합에너지는 인접하는 결합의 종류에 의해서 변화한다.

多原子分子에 있어서 이들의 평균결합에너지와 평균결합거리의 한가지 예를 나타내면 표 3.1과 같다. 똑같은 炭素同志의 組合에도 一重結合→二重結合→三重結合으로 되는데 따라서 평균결합에너지는 증가하며 이 순서로서 열분해도 일어나기 어렵게 된다.

또한 동일한 一重結合에도 인접하는 原子群의 결합 종류에 의해서 解離에너지가 크게 변화하는 것이 있어 그 한예를 표 3.2에 나타내었다. 이 표

에 의하면 일반적으로 脂肪族炭火水素에 있어서 C-C結合에너지는 체인(鎖)이 길어지면 적어지는 경향이 있으며 또한 제 1 급, 제 2 급, 제 3 급으로 갈수록 감소한다.

결합에너지에 대한 二重結合의 영향은 큰데 예를 들면 다음과 같은 二重結合에 가까운 α位の C에 결합하고 있는 C-C결합의 에너지는 매우 약하게 되어있다.

비닐基(CH ₂ =CH-)와 메틸基(-CH ₃)	: 89.7(kcal/mol)
메틸基와 메틸基	: 84.4(kcal/mol)
아릴基(CH ₂ =CH-CH ₂)와 메틸基(-CH ₃)	: 62.7(kcal/mol)

따라서, 分子鎖는 이 부분에서 절단되기 쉽다. -CH-CH₂형의 비닐高分子의 熱分解는 다음과 같이 진행하며 각종 低分子 分解生成物이 생성된다.

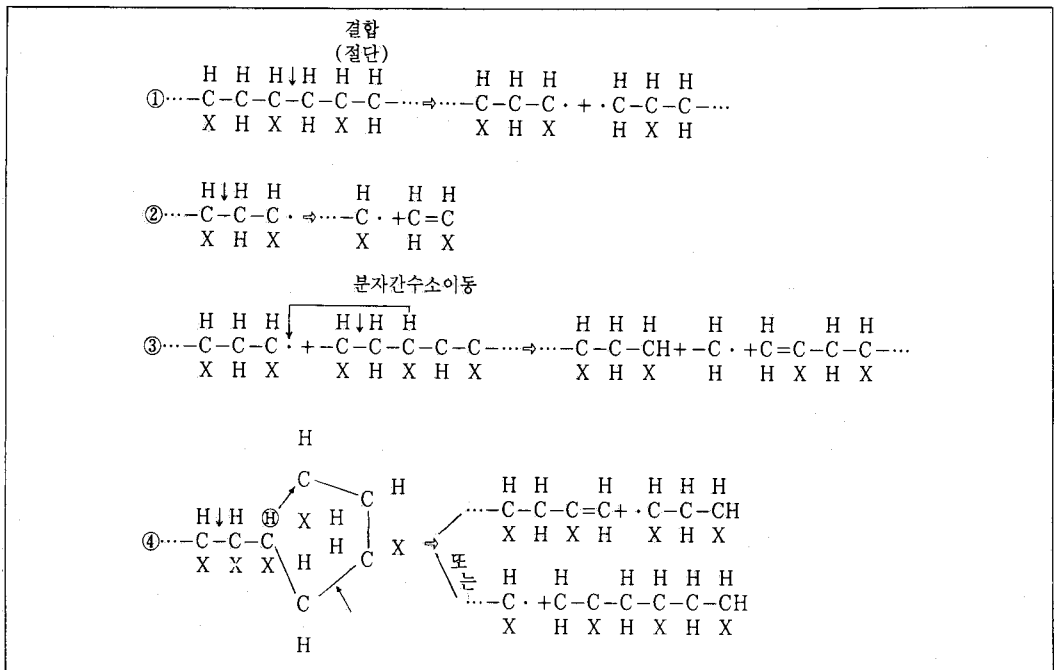
예를 들면, 폴리스틸렌의 열분해는 먼저 고분자 고리(鎖) 내의 머리-머리결합, 분枝, 불포화결합 등의 弱點에서 무질서한 開裂로 시작하고 짧은 고리가 풀려 重合하여 單量體와 低重合體(Oligomer)로 구성되는 휘발성 생성물을 만드는데 이때 重量減少가 나타난다.

폴리염화비닐의 열분해는 脫鹽化水素를 주체로 한 제 1 차 열분해과정(150~350°)에 이어서 減량이 적은 중간의 熱分解領域(350~410°)을 거쳐 主鎖의 절단, 炭火에 이르는 제 2 차 열분해과정(410~550°C 이상)으로 이동한다. 또한 폴리프로필렌에서는 立體規則性和 같은 固體構造의 차이에 의해서 열분해과정에 영향을 준다.

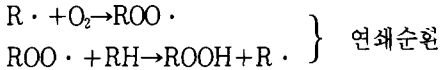
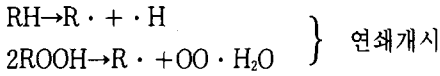
b. 酸素가 存在하는 熱酸化分解反應: 공기중에서와 같이 산소가 존재하는 분위기에서의 열산화 분해는 산소가 존재하지 않는 경우에 비하여 매우 낮은 온도에서도 용이하게 진행된다. 이 때 高分子內의 머리-머리결합, 분枝, 불포화基, 카보닐基 등의 弱點과 미량의 금속 및 그 화합물이 劣化過程에 중요한 역할을 한다.

熱酸化過程은 복잡하나 熱分解로서 생긴 遊離基에 酸素分子가 작용하고 分解反應이 촉진됨과 동시에 連鎖反應에 의하여 酸化가 자동적으로 급속히 진행된다.

즉, 고분자내의 약한 결합 RH가 解離해서 R· + ·H가 되어 R·을 생성한다든지, 산화반응에 의해서 생성된 過酸化水素物 ROOH가 분해하여 R· 또는 ROO·을 생성하며 다음과 같은 連鎖反

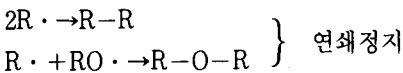


應을 일으킨다.



이와 같이 하여 생성된 $\text{RO}\cdot$ 중에 있는 活性酸素 $\text{O}\cdot$ 에 의해서

$\text{RO}\cdot \rightarrow \text{R}'\text{O}-\text{R}''$ 의 반응을 하고 分子鎖의 절단을 일으킨다. 자동산화반응에는 상기 분해반응의 진행과 동시에



등의 반응에 의해서 遊離基를 잃고 分子間의 架橋를 만드는 것도 있다.

2. 熱스트레스劣化의 反應速度

熱劣化反應이 진행하고 高分子素材에 대한 최저 요구성능으로 저하한다면 그 이상의 사용은 불가능하게 된다. 따라서 이들 열화의 진행속도는 素材의 實用壽命을 지배하는 중요한 因子가 된다.

또한 이들 온도에 대한 관계가 분명한다면 고온에 있어서 加速化試驗으로부터 사용온도에 있어서의 수명을 추정할 수 있다. 反應物質의 濃度를 C , 反應速度定數를 K , 反應의 活性化에너지를 E 라고 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot \phi(C) \quad (3.1)$$

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

여기서 R : 가스定數, A : 定數, T : 絶對溫度이다. 또한 $\phi(C)$ 는 반응형식에 의해서 정하는 농도의 함수로서 n 次반응에 대해서는 $\phi(C) = C^n$ 이 된다. 劣化反應의 진행에 의한 반응물질의 농도변화에 따르는 素材의 物性的 性能 變化와의 사이에 존재하는 程度의 대응이 되는 경우에는 素材性能을 지배하는 物理量 P (예를 들면 절연과괴전압이라든가 引張의 세기 등)도 또한 상기의 식을 만족하는 것이라고 생각된다. 따라서

$$\frac{dP}{dt} = -A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot \phi(P) \quad (3.2)$$

가 된다. 이 식을 P 에 대해서 풀면

$$P(t) = P_0 - f \left[\ln \left\{ A \cdot \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{RT(t)}\right) dt \right\} \right] \quad (3.3)$$

가 된다. P_0 는 $t=0$, 즉 P 의 초기치, f 는 반응형식을 알면 그 함수형은 결정된다.

지금 熱劣化의 진행에 의해 P 가 저하하고 일정한 한계치 P_e 에 이를 때까지의 시간 t 를 수명 t_e 로 정의하면 수명의 종점에 있어서 식 (3.3)의 우변은 일정한 값 P_e 가 성립되므로

$$\Theta_e = \ln \left\{ A \cdot \int_0^{t_e} \exp\left(-\frac{E}{RT(t)}\right) dt \right\} = \text{一定} \quad (3.4)$$

이 된다.

이 식은 온도 T 와 수명 t_e 와의 관계를 부여하고 온도가 시간적으로 어떻게 변화하여도 수명의 종점에 있어서 Θ_e 는 변화하지 않는다는 것을 나타낸다. 즉 E 가 판명된다면 시간적으로 변화하는 온도조건을 기초로 하여 t_e 를 추정할 수 있다.

지금 定溫劣化를 하였을 때는 T 를 시간 t 에 대해서 일정하게 하여 식 (3.4)을 풀면, A' 를 정수로 하여

$$\Theta_e = \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) t_e \quad (3.5)$$

$$\text{또는 } \ln[t_e] = A' + \frac{E}{RT} \quad (3.3)$$

를 얻는다. 즉 $(\ln[t_e]) : (1/T)$ 는 직선이 되고 기울기로부터 活性化에너지 E 를 평가할 수 있다. 反應의 活性化에너지는 대부분의 고분자에서 20~25kcal/mol 정도가 되므로 이것을 식 (3.5)에 대입하면 약 8~10K의 온도상승으로 수명이 반감된다. 이것은 넓은 온도범위에서는 엄밀하게 성립되지 않으나, 8도~10도를 기준으로 하여 경험적으로 알려져 있다.

3.1.3 電壓스트레스 劣化

1. 劣化要因으로서 放電의 發生

電力用 機器中에 사용되고 있는 高分子材料층에서 전압스트레스를 받는 것은 전기절연에 적용될

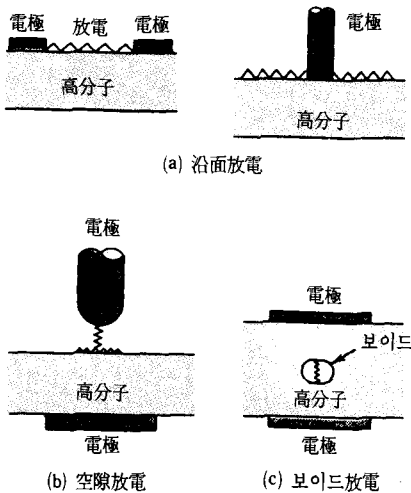
때이다.

전압스트레스에 의해서 각종 劣化가 발생되나 熱, 機械, 化學的인 劣化에 대해서는 기타 절에서 설명되어 있으므로 여기서는 방전에 의한 열화에 대하여 설명한다.

기기구조에 따라서는 이상적인 평등전계의 상태에서 전압을 印加하는 것에 반드시 가능한 것이 아니고 부분적으로 전계강도가 커지는 부분이 생기는 것이 보통이다. 이와 같은 경우 전압을 인가하면 파괴전압이 낮은 기체 또는 액체중에서 부분 파괴가 일어나고 이들의 방전에 고분자를 공격해서 열화를 발생시킨다. 이 현상을 放電劣化라고 말하는 電壓스트레스劣化의 主要因이다.

放電劣化要因으로서의 氣中放電, 液中放電 및 보이드放電 등이 있다. 沿面放電에서 兩電極間이 全路破壞되는 형식의 것은 電源容量에 의해서는 글로우放電에 그치지 않고 에너지가 재차 큰 아크 방전으로 移行하며, 방전에 의한 열작용이 劣化의 主體를 占하게 된다. 이것을 아크劣化라고 한다.

이것에 비하여 그림 3.1의 다른 방전형태에서는 방전이 없어질 때까지 절연계의 일부에 그치고 직렬로 건전한 절연부분이 들어가 있는 형태를 취하므로 방전은 억압되어 글로우방전형식을 취하는 것이 많다.



<그림 3.1> 여러가지 방전형태

이것은 絶緣系의 일부 파괴이므로 部分放電이라고 하며 이에 의한 劣化를 部分放電劣化라고 말한다. 이외에 高分子表面이 水力, 電解質 등으로 오손된 상태에서는 トラッキング劣化가 발생된다.

2. 部分放電劣化

고체절연에 수반되는 표면분위기라든가 내부의 미소한 보이드존재를 완전히 제거하는 것은 기술상 항상 가능한 것은 아니다. 이 상태에서 고전압을 인가하면 고체에 비하여 파괴전압이 낮은 기체중에서 방전이 생기며 여기에서 풍부한 自由電子, 이온, 勵起原子 등이 生成되고 光·熱作用에 따라서 각종 劣化作用이 고체에 미치게 된다. 이때 有機高分子은 無機物質에 비하여 劣化를 받기 쉽다.

보이드내에 발생한 기체방전의 중심은 紫色의 發光柱로서 이것이 고체표면에 충돌해서 횡방향으로 퍼지게 된다. 放電柱의 直徑은 0.1mm 이하의 가느다란 것이다. 내부 보이드가 전계와 직각방향으로 퍼진 형상인 것은 보이드내의 1箇所에서 발생한 방전이 기타부분의 방전을 誘發하여 集團의 이 되는 경우도 있다.

劣化要因으로서의 氣中放電은 방전에 의한 同極性 空間電荷의 보이드내 고체표면으로의 퇴적에 의한 逆電界때문에 지속될 수 없고 필스성이 된다.

그 放電持續時間은 0.1 μ s 정도로서 각 필스의 방전전하는 조건에 의해서 변화되나 $10^{-12} \sim 10^{-8}$ C, 방전에너지는 $10^{-9} \sim 10^{-5}$ J 정도가 된다. 이들의 방전필스형태는 印加電壓, 보이드形狀, 보이드내 기체의 종류와 압력, 고체의 종류와 표면상태, 주위조건(온도, 습도) 등 많은 因子에 의해서 변화한다.

部分放電의 電氣的 諸量에 대해서는 기타 다른 책을 참고하길 바라고 여기서는 劣化現象에 대하여 기술한다. 부분방전에 의한 劣化를 現象的으로 보면 먼저 방전 발생에 의한 방전부분의 固體에 대하여 전면적인 侵蝕이 일어나고 이어서 방전이 局部로 집중하여 이 부분의 방전에너지밀도가 증가하게 되고 侵蝕된 천공속도의 상승을 야기함으로써 결국 全路貫通破壞에 이르게 된다.

아주 간단히 생각해 보자. 예를 들면 집중전극 등에 있어서 一發의 部分放電에 의한 재료의 侵蝕깊이를 Δd 로 하고 두께 d 의 시료를 d_0 까지 侵蝕시켜서 얇게 한다. 이 전압으로 고체파괴가 생기며 나머지 부분은 한번 파괴된 시료가 貫通破壞된다면 두께 $(d-d_0)$ 를 침식하는데 요하는 시간 t_d 는 방전전압을 V_s , 교류半사이클當 방전펄스數를 n , 電源周波數를 f 라고 하면 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$t_d = \frac{d-d_0}{2fn\Delta d} = \frac{d-d_0}{2f\Delta d(2V/V_s-1)} \quad (3.6)$$

t_d 는 $(d-d_0)$ 에 비례하고 f 에 반비례하는데 더욱이 전압에 대해서는 $(2V-V_s)$ 에 반비례하여 감소한다. 이와 같은 결과는 定性的으로 現象을 설명할 수 있으나 定量的으로는 성립이 안된다. 일반적으로 印加電壓 V 와 수명 t_d 와의 사이에는 경험적으로 어떤 범위내에서

$$t_d = \text{const} \cdot V^{-n} \quad (3.7)$$

의 관계가 성립한다. 이것은 放電諸量과 侵蝕量 Δd 가 간단히 표시되지 않는다는 것을 나타낸다. 방전침식 Δd 의 미시적 과정으로서의 다음과 같은 기초과정이 補完되어 있다고 생각된다.

a. 電荷粒子的 直接 衝擊: 大氣中 部分放電은 형식적으로는 고기압 글로우방전으로 생각된다. 방전중에는 풍부한 電荷粒子(電子, 正·負이온)가 존재하는데 이것은 固體表面에 충격을 준다. 이 충격에너지의 實測은 곤란하나 대기중의 평균자유행과 방전시의 電位傾度로부터 추정하면 약 3.2 eV 정도가 된다.

이것이 맥스웰分布를 이룬다고 생각하면 전체의 약 4.2%는 10eV 이상의 에너지를 갖는 전자가 존재하는 것이 된다. 따라서 直鎖狀 파라핀에 대해서 이들 전자에 의한 衝突電離라든가 主鎖, 側鎖의 結合切斷이 발생한다.

b. 局部的 溫度上昇: 一發의 방전펄스에 의해서 방전에 노출된 재료표면 근처의 5×10^{-11} cm 부분이 0.1 μ s 사이에 평균 170°C, 최대로 10,000°C에 미치는 온도상승이 있다고 추정되고 있어 이것에 의한 熱的 溶解라든가 化學的 分解가 발생한다.

c. 化學反應: 放電으로 생긴 電荷粒子, 勵起原子·分子, 래디컬 및 이들의 2차 생성물이 고체재료와 반응하여 이것을 侵蝕하는데 이 효과는 앞에서 설명한 a, b에 비하여 방전분위기에 의해서 큰 영향을 갖고 있다. 예를 들면 폴리에틸렌에 대해서

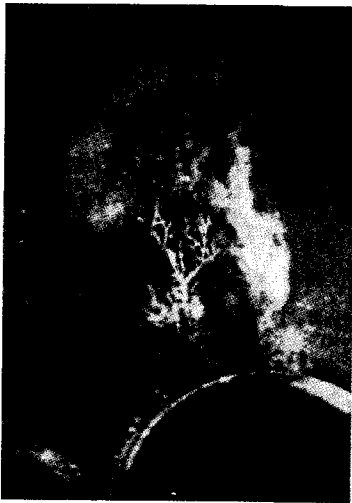
- (1) 공기중 또는 산소의 존재하에서는 방전에 의한 카보닐基(>CO)를 포함한 酸化層이 생기는데 이것이 시료표면으로부터 내부로 향해서 진행한다.
- (2) 分解生成物로서 H₂O, CO, CO₂ 등을 만든다.
- (3) 습기가 존재하면 硝酸(COOH)₂가 된다.
- (4) 분해, 휘발의 속도는 방전전하에 비례한다.
- (5) 순수한 질소, 아르곤 중에서는 대부분 化學劣化가 진행되지 않는다.

는 등의 사실이 있다. 결과적으로 방전으로 생긴 산소이온, 勵起酸素分子, 酸素原子가 직접 暴露表面과 작용하고 산소반응을 일으키며 계속해서 H₂O와 CO로 분해되어 電荷粒子的 직접 충격과 더불어 재료의 중량이 감소하는 경향을 이룬다. 이들 活性酸素의 수명은 짧아서 그 반응은 직접 放電下의 暴露面으로 결정되는데 2차적으로 생성된 오존, 산화질소에 의한 반응이 주위의 간접 폭로부분에 생기고 카보닐화합물이나 硝酸에스테를 만들어 재료의 중량이 증가하게 된다.

3. 트리잉劣化

절연구성이 비교적 두꺼운 경우 부분방전에 의한 전면적 고체표면의 침식에 이어서 방전의 집중이 일어나면 여기에 비트狀의 침식이 생기며, 이것이 고체절연의 내부를 樹木의 枝狀과 같이 되어 진전하고 계속해서 貫通破壞를 일으킨다. 그림 3.2는 架橋폴리에틸렌에서 발견된 것으로서 內側의 絶緣導體層에서 발달한 樹枝狀의 侵蝕을 나타낸다.

이와 같은 放電劣化形式을 破壞路의 形狀으로부터 트리잉劣化라고 말한다. 이와 같은 트리狀破壞는 이온結晶의 전기적 파괴에 있어서 方向性을 갖는 破壞路로서 또한 電子線이 照射된 고분자 시료의 한 끝을 접지하였을 때도 試料내에서 관찰되는데 이 경우 소위 고체의 局部破壞가 반드시 放電



<그림 3.2> 架橋폴리에틸렌 電力케이블에 발생된 트리狀 劣化

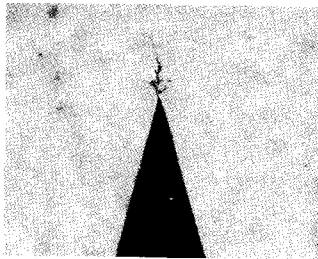
劣化에 의한 것은 아니다.

어느 것이나 트리는 고체가 電子눈사태 파괴라든가 부분 방전열화에 의해서 분해되며 氣化하여

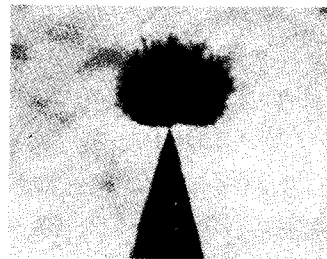
탈출한 흔적이 존재한다. 이 트리관의 직경은 數 μm 이하의 中空파이프로서 가운데는 분해가스로 충만되어 있다. 보이드가 고체절연물내에 존재하면 거기서 방전이 발생되어 트리狀으로 진전하기 쉽게 되는데 전력케이블이라든가 注形品の 電極部를 위한 不整 또는 내부에 존재하는 날카로운 형상을 갖는 도전성 異物質 등에 의한 高電計 部分에 국부적인 고체파괴가 일어나고 이것이 氣化하여 보이드가 되며 그 후에 트리狀으로 진전하는 것도 있다. 트리의 형상에는 그림 3.3 과 같이 트리狀트리, 붓슈狀트리 등이 있다.

트리狀의 劣化는 200~700V의 극히 저전압에서 氣中 部分放電이 발생하지 않도록 한 전압에도 고체내에 수분이 존재하면 쉽게 진행할 수가 있다. 이와 같이 電界와 水의 존재하에서 발생한 트리를 水트리(Tree)라고 한다.

그림 3.4 는 고체내부에서 나비넥타이狀으로 발달한 水트리의 한 예를 나타낸다. 또한 전혀 전압

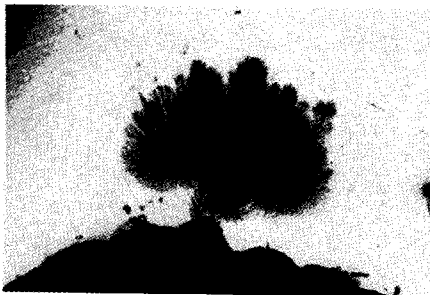


(a) 나무모양의 트리

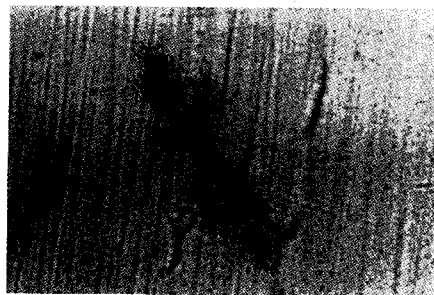


(b) 붓슈狀 트리

<그림 3.3> 전기트리의 형상(폴리에틸렌 中)



(a) 통상의 水트리



(b) 나비모양의 트리

<그림 3.4> 水트리의 形狀

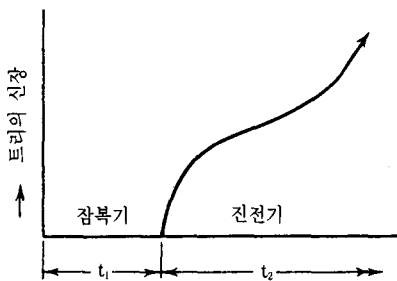
이 印加되어 있지 않을 때에도 腐食性가스의 분위기
 기에 있는 케이블은 트리가 外側에서 內側導體에
 까지 확산되어 도체의 銅과 반응하는 것이 原因이
 되는 化學트리라고 하는 것도 관찰되고 있다. 또
 한 트리는 여러 箇所에서 발생하게 되는데 다음에
 는 교류고전압인가에 따르는 部分放電을 토대로
 하여 發展하는 電氣트리의 發現과 進展에 대하여
 설명하기로 한다.

전압인가후 트리의 발달상황은 그림 3.5와 같이
 t_1 이라는 트리발생까지의 잠복기와 그후 t_2 라고 하
 는 트리進展期로 되어 있다. 潛伏期에 많은 영향
 을 주는 因子는 針電極先端과 같은 局部的 高電計
 의 集中部에 보이드가 있는지 없는지에 달려 있
 다. 보이드가 존재하면 氣體放電이 생성되고 단시
 간에 이것은 비트를 형성하여 트리로 이행된다.

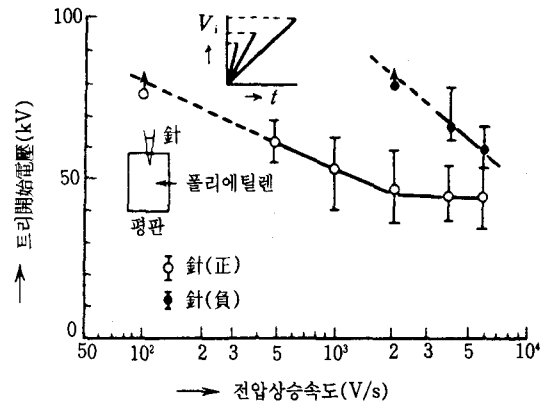
또한 보이드가 없어도 針先端의 전계가 충분히
 높고 이것이 고체의 眞性破壞電界를 초과한다면
 이 부분에 고체파괴가 일어나며 이것이 가스화하
 며 미소한 보이드를 형성, 트리로 진전된다. 또한
 교류전계에 의한 기계적 응력의 반복에 따라 疲勞
 破壞로서 크랙이 생기며 트리로 轉移하는 것도 있다.

트리의 진전에 대한 원동력은 트리관내에 발생
 하는 펄스狀 氣體放電이며 트리관내는 분해가스에
 의해서 고전압이 되고 방전전압이 상승해서 放電
 點火에 이르지 못하면 트리의 진전은 정지된다.

이와 같이 되면 트리는 재차 高電界의 전극에
 의하여 앞의 트리관과는 다른 방향으로 발달하며
 많은 分岐를 만든다. 이것이 그림 3.3에 나타낸 붓
 슈狀트리의 生成原因이다. 이 상태에서 실질상 트



<그림 3.5> 電氣트리의 발생과 진전



<그림 3.6> 직류트리의 개시전압과 극성에 따르는 전압 상승속도의 효과

리길이의 늘어남은 거의 생기지 않는다. 이에 반
 하여 인가전압이 낮아도 트리狀트리가 된 것은 시
 간이 지나면 트리는 점차 진전되어 간다.

직류전압인가에 따르는 針電極先端으로부터의
 트리발생은 그림 3.6과 같으며 針電極의 電壓極性
 과 上昇速度에 의해 큰 영향을 받는다. 이것은 針
 電極으로부터 주입되고 同符號캐리어에 의한 均質
 化 空間電荷의 형성에 따르는 針先端의 電界緩和
 效果에 의한 것이다.

그러나 직류송전계통의 운용에서 본 바와 같이
 전압극성이 반전되면 주입된 均質化 空間電荷는
 異方性 空間電荷로 작용하며 역으로 針端電計를
 강조하게 되어 트리의 발생은 쉽게 된다. 극성을
 반전하지 않아도 간단히 高電壓 針電極을 接地만
 하여도 트리가 발생하는 것도 있다(短絡트리). 이
 와 같은 현상은 직류고전계에 의한 空間電荷의 형
 성으로 설명되며 캐리어의 주입과 트랩 등에 대하
 서는 그 機構가 다음과 같이 명확해지고 있다.

直流트리의 진전은 교류전압과 같은 전압값의
 시간변화가 아니므로 한번 발생된 방전에 의한 逆
 電界가 正負電荷의 보이드내면에 따른 이동의 中
 和로 시작하여 소멸하는 것이고 이 時定數에 의해
 서 放電펄스發生頻도가 결정되는데 교류전압일수
 록 진전속도가 빠르지 않는 것이 일반적이다.

(다음호에 계속)