

# 電氣設備의 診斷技術

5

## 4. 트래킹劣化와 아크劣化

트래킹이란 고체절연물 표면에 沿面方向으로 電界가 존재하는데 炭化導電路를 형성하는 現象으로서, 沿面方向의 절연성을 저하시키는 현상이다. 炭化導電路는 局部加熱에 의해서 형성된다. 그 加熱源은 전류가 흐름으로서 발생하는 熱이나 드라이벤드형성에 의하여 발생하는 部分放電 또는 아크放電에 의한 熱 등이 있다.

분자구조상 導電性 炭化트래킹이 생기지 않는 것에서도 방전에 의하여 점차적으로 侵蝕된다. 고체표면이 건조상태에서 전극간의 아크방전에 노출될 때도 트래킹이 발생하나 이것은 통상 아크劣化라고 한다.

크래킹劣化機構는 다음과 같다. 導電性트래킹의 形成은 고체로부터의 遊離炭素의 生成과 그 표면에서의 堆積이다. 炭化의 原因은 방전이라든가 導電電流에 있으나, 放電은 보통 生成炭素를 系外로 없애는 효과도 있다. 방전에 의한 탄소의 생성은 固體分子構造내에 포함된 炭素原子와 기타 原子의 比 및 이들의 결합상태에 관계한다. 이것이 열분해할 때 遊離炭素가 되는데 휘발성 炭素化合物로서 系外로 消散할 수 있을 것인가가 주요하다.

지금 문제가 되고 있는 화합물이 열분해하여 遊離炭素분과 揮發性 炭素化合物이 되는 경우 여기에 요하는 총에너지  $\Delta H$ 는

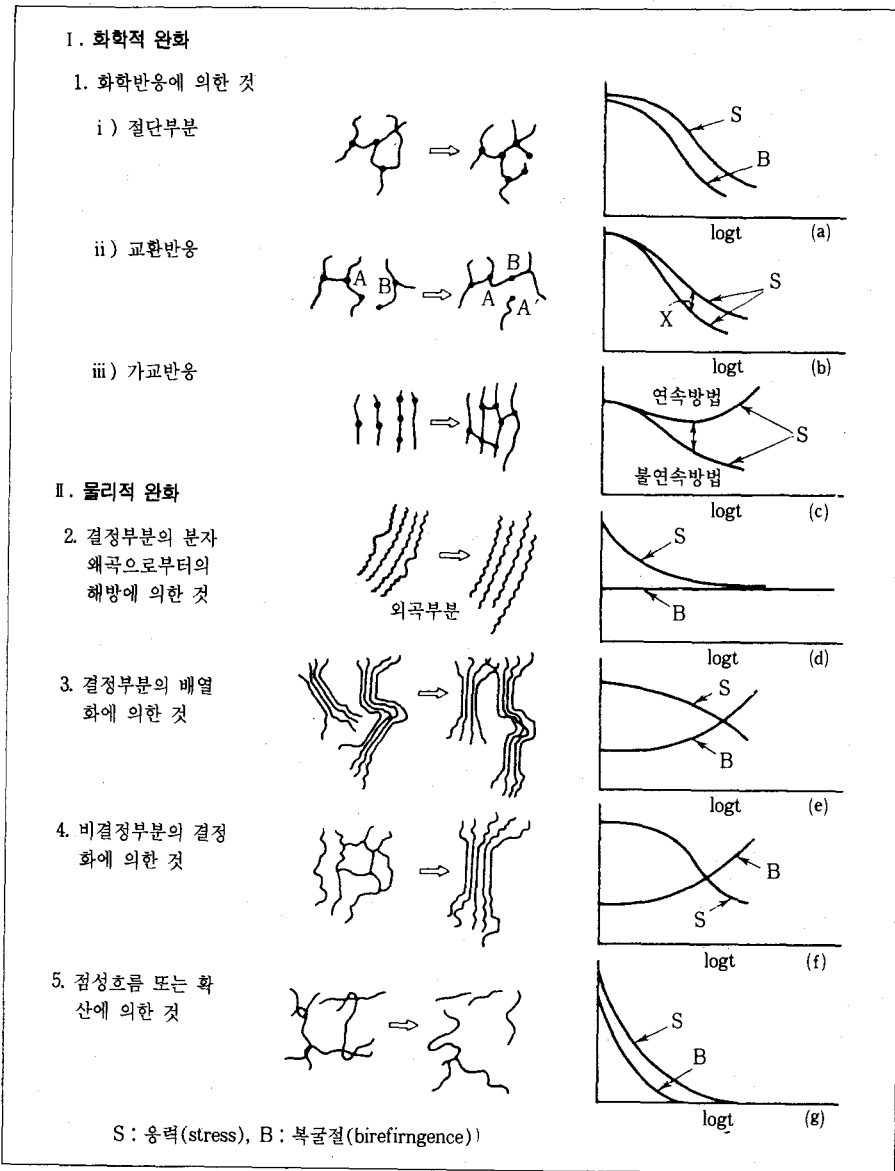
$$\Delta H = \Delta H_c + \Delta H_v \quad (3.8)$$

이 된다. 이 식에서 遊離炭素를 生成하는 에너지  $\Delta H_c$ 가 揮發分生成의 에너지  $\Delta H_v$ 에 비해서 크면, 즉  $\Delta H_c/\Delta H$ 의 比가 클 때 (0.4 이상)에는 트래킹이 발생하기 쉽다. 표 3.3에 각종 고분자에 대한  $\Delta H_c/\Delta H$ 의 比를 나타낸다. 이것과 耐트래킹性간에는 좋은 상관관계가 존재한다. 에폭시 樹脂의 硬化劑 선택에 의해서  $\Delta H_c/\Delta H$ 을 변화시켜 耐트래킹性을 改良할 수가 있다.

또한 적절한 充填劑로서 耐트래킹性의 개선도

<표 3.3> 각종 고분자의  $\Delta H_c/\Delta H$

고 분 자	$\Delta H_c/\Delta H$
페놀樹脂	0.66
폴리스티롤	0.55
폴리카보네이트	0.53
폴리에틸렌	0.29
폴리 4-불화에틸렌	0.28
히스페놀계 에폭시수지	0.53



<그림 3.7> 應力緩和機構와 分子構造의 變化

행하고 있으며 보통 아크劣化는 건조고체표면에서 발생된 아크放電 또는 글로우放電에 의한 炭化導電路의 형성에 起因하여 劣化되는데 이 機構는 앞에서 설명한 트래킹劣화와 원리적으로 동일하다.

### 3.1.4 機械스트레스 劣化

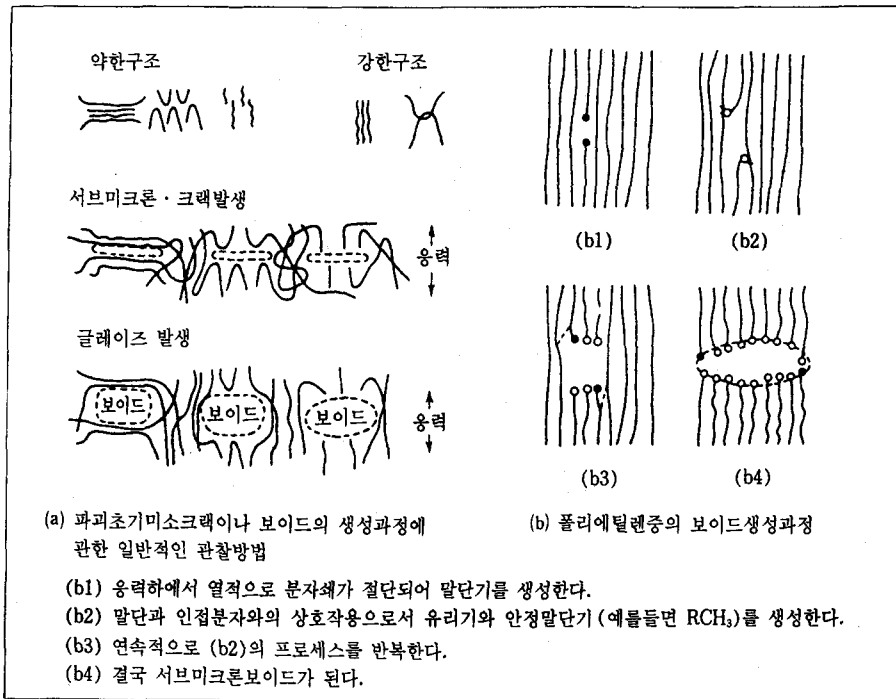
절연재료는 耐電壓材料임과 동시에 대부분의 경

우 構造材料이기 때문에 기계적 스트레스를 받는다. 따라서 高分子主銷의 절단 등에 起因하는 기계적 특성의 저하가 발생되는데 이것을 機械的劣化라고 말한다. 기계적 열화의 프로세스로서

(I) 크립 應力緩和

(II) 반복응력에 의한 疲勞

의 2종류를 생각할 수 있다. 고분자는 기계적 성질로서 粘彈性體이기 때문에 일정 荷重이 걸리면



<그림 3.8> 메커노케미컬·프로세스에 의한 보이드 생성

레올로지컬의 변형(크립)을 일으키며 이어서 파괴가 된다든지 일정한 변형이 지속되면 내부응력이緩和(應力緩和)되어 反發力이 없어지게 된다.

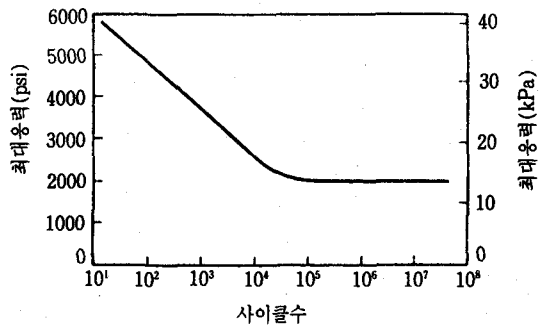
이들의 속도는 速度過程論에 따라서 熱劣化와 동일한 아레니우스(Arrhenius)식이 성립하는 경우가 많다.

高分子의 應力緩和는 그림 3.7 과 같이 대별해서 物理的緩和와 化學的緩和가 있다. 전자는 分子鎖의 再配列에 대응한다. 후자는 메커노케미컬한 반응이 관여한 것이며 화학반응으로서 主鎖와 側鎖의 切斷反應, 交換反應 및 架橋反應이 있다.

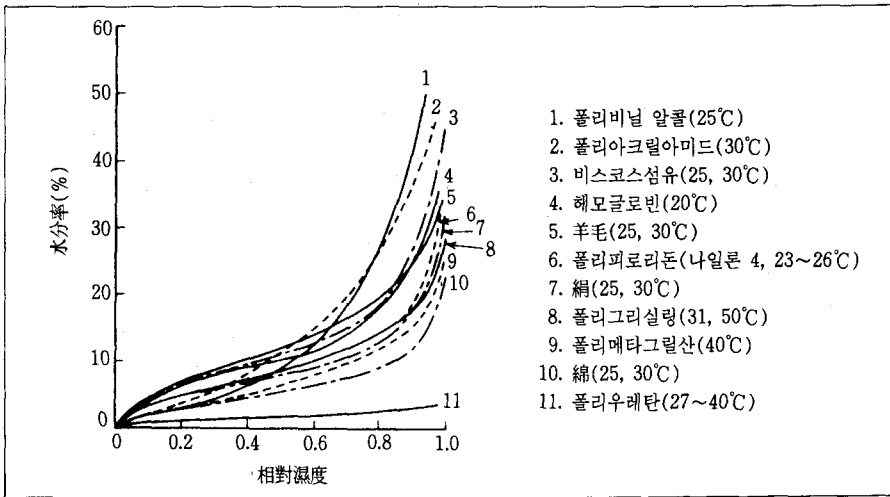
예로서 高分子 메커노케미컬반응으로 미소한 크랙이나 보이드가 형성되는 프로세스의 설명을 그림 3.8 에 나타내었다. 이것은 폴리에틸렌 등으로 확인되었으나 應力下의 巨大分子가 처음에는 熱的 흔들림으로 끊어져 2개의 末端遊離基와 安定末端 그룹을 만든다. 内部遊離基의 切斷에 의해서 安定原子力그룹과 末端基를 생성한다. 巨大分子의 鎖劣化의 결과, 서브미크로보이드를 만들 수 있는데

이것은 스트레스, 크래킹의 일종으로서 표면에서 발생될 때는 산소 이외에 화학약품 등으로 촉진되는 것이 확인되었다.

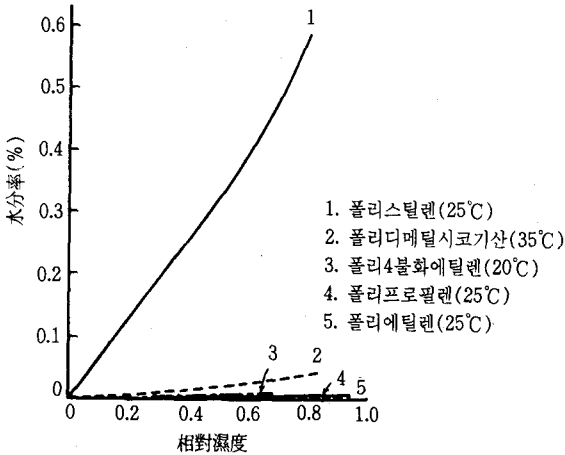
보통 반복반응에 의한 高分子의 파괴를 疲勞破壞 또는 간단히 疲勞라고 말한다. 回轉振動이나 電磁振動을 받는 전기기기의 절연에 대해서는 중요한 프로세스가 된다. 그림 3.9 에 고분자의 전형



<그림 3.9> 사이클수를 最大周期應力の 函數로 표시한 전형적인 피로수명곡선



<그림 3.10> 친수성 고분자의 등온흡수곡선



<그림 3.11> 소수성 고분자의 등온흡수곡선

적인 데이터를 나타내는데 疲勞限界는 일반적으로 靜的 引張強度의 20~30% 사이에 있다.

### 3.1.5 環境스트레스 劣化

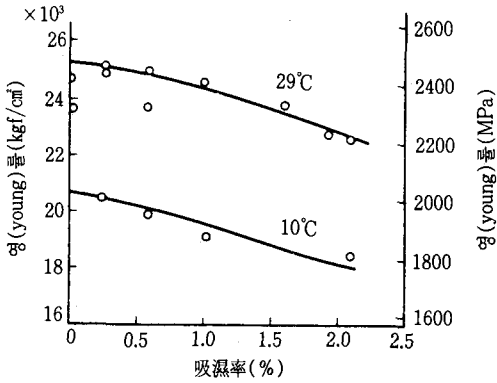
#### 1. 吸濕, 吸水에 의한 劣化

水分子는 큰 雙極子모멘트(1.83[DU])와 水素結合의 能力을 가지며 極性基를 갖는 高分子, 특히 OH基나 NH基 등을 갖는 高分子과 강한 親和力을 가진다. 이 때문에 이러한 高分子은 吸濕性이 높아 親水性 高分子이라고 부른다.

한편 폴리에틸렌이나 폴리四弗化에틸렌과 같은 無極性 高分子은 일반적으로 吸濕性이 낮아 疎水性 高分子이라고 부른다. 吸濕된 水는 高체표면에 흡착된 吸着水와 固體內部로 침투한 吸收水로 대별되기도 하지만 高분자와 같이 복잡한 高체표면에는 이러한 구별은 그다지 의미가 없다. 親水性과 疎水性 高分子의 等溫吸濕曲線을 그림 3.10과 그림 3.11에 나타내었다. 親水性 高分子은 逆 S字形이 되나 親水性의 정도가 감소하는데 따라서 서서히 단조롭게 급상승하는 곡선 또는 직선으로 표시되는 소위 溶解形 曲線으로 移行한다.

이와 같은 흡수에 의해서 高分子材料는 그 밀도라든가 기계적, 전기적 성질 등의 물리적 변화를 만드는 이외에 加水分解 등에 의한 화학적변화가 일어나는데 일반적으로 이들의 종합적 성능이 劣化가 된다. 더욱이 앞서 말한 바와 같이 浸水課電에 의하여 水트리現象과 같은 劣化도 생긴다. 다음에는 흡수에 의한 주요 材料特性變化에 대하여 설명한다.

a. 吸濕에 의한 密度變化: 일반적으로 高분자는 흡수에 의하여 팽창하며 밀도가 변화한다. 乾燥 高分子密度가 1g/cm<sup>3</sup> 이상인 재료에서는 흡수율이 적을 때에는 흡수에 의해서 밀도의 증가를 초래하나 곧 극대값을 나타내고 감소하는 경향을 보인다



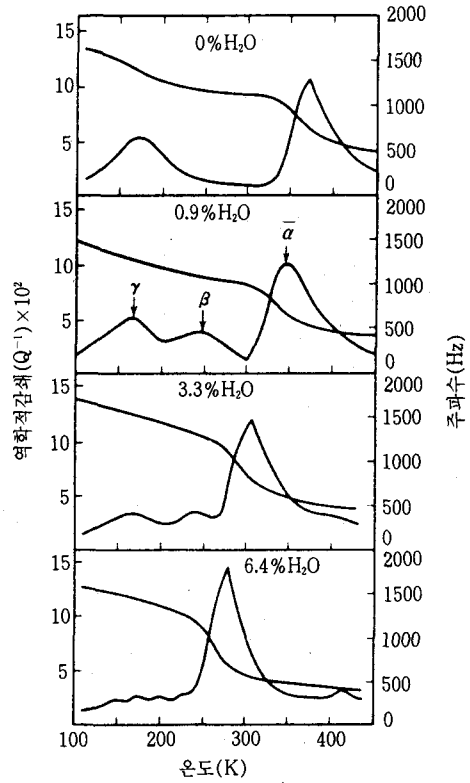
<그림 3.12> PMMA의 흡수에 의한 Young率의 변화

다. 이것은 적은 흡습률에서는 水가 고분자에 포함되는 자유체적을 메움으로써 밀도의 상승을 가져오나 큰 흡습률에서는 高分子鎖間을 널리 퍼뜨려서 밀도가 적은 水가 들어오도록 밀도저하를 일으키기 때문이다.

b. 흡습과 기계적 성질의 변화 : 아크릴(PMMA)의 Young率 흡수에 의한 저하를 그림 3.12에 나타내었다. 이것은 低分子의 水가 高分子鎖間에 들어가 분자간격을 넓히고 分子間 相互作用을 감소시키는 것에 의한다. 흡습에 의한 기계적 특성의 저하는 일반적인 것이겠으나 상세한 영향의 검토에는 고분자의 機械的 緩和現象을 조사하는 것이 유효하다.

그림 3.13은 나일론 66의 기계적 완화의 흡습률에 의한 변화를 나타내었다. 고온측으로부터  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ 의 피크가 있고  $\alpha$  피크는 분산(主分散)에 대한 피크에는 존재하나 흡습에 의해서 크기는 변하지 않고 저온측으로 시프트하고 있다. 이것은 흡습한 水가 分子鎖間을 널리 퍼뜨려서 들어가는 可塑劑的인 동작을 나타내고 있다. 흡습에 의해서  $\beta$ 와  $\delta$  피크도 변화한다.

c. 흡습에 의한 전기적 성질의 변화 : 水의 比誘電率은 약 80(25°C)으로 크며 또한 水分子는 1.83 DU의 雙極子모멘트를 가지므로 흡습은 전기적 성질에 큰 영향을 준다. 흡습에 의한 전기적 성질에의 영향은 일반적으로



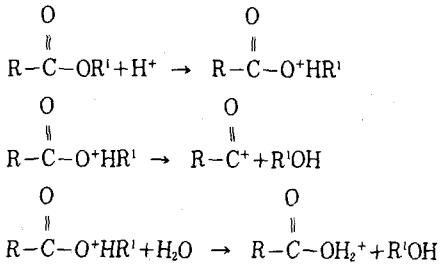
<그림 3.13> 나일론 66의 공률주파수와 역학적 감쇄의 흡습률에 의한 변화

- (1) 誘電率  $\epsilon'$ , 誘電損率  $\epsilon'' (= \epsilon' \cdot \tan \delta)$ 의 증대
  - (2) 水分子에 의한 可塑化효과에 의한 誘電損失의 極大值를 나타내는 주파수의 저주파측으로의 이동
  - (3) 이온 傳導의 증대에 의한 표면 및 체적저항률의 저하
  - (4) 절연파괴의 세기 저하
- 등을 들 수 있다.

d. 加水分解 : 가수분해가 최초로 찾아낸 고분자는 단백질과 셀룰로즈이나 최근 많은 合成高分子, 예를들면 폴리아미드, 폴리아크릴, 폴리우레탄 등으로 확장되었다. 加水分解速度는 高分子中의 水量에 比例하는데 이와 같은 상황은 고분자의 결합이나 配向性 등의 고체상태, 유전율 및 水의 PH 등에 의해서 좌우된다.

中性 또는 酸性水에 의한 單純에스텔의 加水分

解는 다음과 같다.



## 2. 化學藥品에 의한 劣化

高分子材料는 金屬材料 등에 비하여 耐藥品性이 풍부한 재료이다. 그러나 고분자재료도 그 종류가 매우 많고 간단히 물에 녹는다는가 酸이나 알칼리에 쉽게 침식되는 것으로부터 거의 모든 藥品에 耐性을 갖는 것도 있다. 종류에 따라서는 耐藥品性이 크게 달라진다.

고분자재료의 환경열화는 금속과 똑같이 화학적 환경하에서 생기는데 그 부식의 양상은 금속과는 크게 다르다. 고분자재료의 화학적 열화(부식)의 기본이 되는 것은 環境劑(가스, 증기, 액체)가 高分子材料中에 浸透, 擴散되는 것이다.

약품과 고분자물질과의 화학적 반응에 의해서 化學分解하는 경우도 있으며 또한 화학반응은 그다지 현저하지 않아도 주위의 媒質의 침입이 크고 溶媒和의 상태에서 膨潤과 熔解로 진행되는 경우도 있다.

또한 應力이 존재하는데 따라서 局部的인 分子配向이 일어나며 외관적으로는 미세한 균열과 같은 크레이즈(Craze)가 생기고 재차 이것이 진행되는 크랙(Crack)이 발생하는 경우가 있다.

또한 재료 외관의 변화(핀홀, 脫色, 變色, 溶解, 균열, 크레이즈, 틈이 벌어짐), 기계적 성질의 저하, 물리적 성질의 저하도 劣化를 나타내는 한가지 방법이다. 화학적 공격은 먼저 재료표면에서 일어나 순차적으로 내부에 침입하는데 이 침입의 모양은 물론 환경조건과 재료조건에 의해서 변화하며 약품의 농도, 침투속도, 平衡吸液量 등 浸透

擴散現象이 중요한 要因이 되고 있다. 표 3.4와 표 3.5에 대표적인 熱可塑性樹脂와 熱硬化性樹脂에 대한 耐藥品性의 예를 각각 나타내었다.

## 3.1.6 複合스트레스 劣化

2종류 이상의 스트레스로서 절연물의 성능이 저하되는 것을 複合要因劣化라고 한다. 실제로 대부분의 劣化過程은 複合要因劣化이다.

앞에서 설명한 熱스트레스劣化, 電壓스트레스劣化, 機械스트레스劣化 및 環境스트레스劣化는 일단 單一스트레스劣化로 생각된다. 여기서 예를 든 劣化는 複合스트레스열화 중에서도 비교적 연구가 진전되고 있는 것으로서 水트리劣化, 放射線·熱劣化, 電壓·機械·熱劣化이다.

XLPE케이블 절연체에 발생하는 水트리는 電壓과 水의 2가지 요인이 원인이 되는 劣化過程이며 원자력발전소용 케이블의 放射線·熱劣化 및 回轉機捲線絶緣의 전압·기계·熱劣化는 2~3가지 요인이 원인이 되는 劣化過程이다. 水트리는 2가지 요인이 갖추어 지지 않으면 일어나지 않는 현상이지만 기타는 독립적이라도 劣化한다.

### 1. 水트리

폴리에틸렌을 水中에 浸漬해서 교류전압을 장시간 인가하면 폴리에틸렌층에 생긴 白濁한 링은 直徑數( $\mu\text{m}$ )의 微小보이드에 모여 그 안에 물이 들어 가게 된다. 폴리에틸렌에 있어서 水트리의 발생 상황은 그림 3.4 나비넥타이모양의 트리 이외에 內側導體에서 발달한 것도 볼 수가 있다. 이와 같이 水트리는 전극과 고분자의 경계에 있어서 不整部나 高分子內의 異物, 보이드 등의 不整部를 起點으로 해서 발생된다.

그 進展機構로서 보이드나 크랙 중에 水가 침입해서 局部高電界를 발생하여, 이것에 의해서 電氣-熱破壞, 水의 氣化에 따르는 應力破壞 혹은 반복된 靜電應力에 의한 기계적인 파괴로 생긴다고 생각하고 있다. 水트리는 폴리에틸렌 이외에도 실

<표 3.4> 열가소성 수지의 耐蝕性能

環境條件 熱可塑性樹脂	耐熱性(°C)	耐寒性(°C)	耐酸性	耐알칼리성	耐有機溶劑性	耐侯性
폴리에틸렌	80~100	-50	◎ (除濃硝酸)	◎ (除高溫)	◎ (除二硫化炭素, 四塩化炭素)	小
폴리프로필렌	120~1400	-30	○ (除酸化性酸)	◎	○ (除四塩化炭素)	小
硬質 P V C	70	-20	○	◎	×	中
弗素樹脂	250	<-250	◎	◎	◎ (除四塩化炭素)	大
나일론	65~120	-	△ (除強酸)	○ (除高溫)	◎ (除四塩化炭素, 트리클렌)	中
폴리카보네이트	120	-130	△ (除強酸)	×	×	大

【註】◎ 매우 우수하다 ○ 우수하다 △ 떨어진다 × 매우 떨어지므로 사용불가

<표 3.5> 熱硬化性樹脂의 耐蝕性能

環境條件 熱硬化性樹脂	耐熱溫度(°C)		耐酸性	耐酸化性物質	耐알칼리성	耐有機溶劑性
	가스體	液體				
올소계폴리에스테르수지	70	50	○	△	×	×
이소계폴리에스테르수지	100	80	○	○	△	△
비즈계폴리에스테르수지	120	100	◎	◎	◎	△
핵산계폴리에스테르수지	120	100	◎	◎	△	△
비닐에스테르수지	120	100	◎	◎	○	○
페놀수지	150	130	◎	×	×	◎
프란수지	150	130	◎	×	◎	○
에폭시수지	90	70	○	×	◎	△

【註】◎ 매우 우수하다 ○ 우수하다 × 떨어진다 △ 매우 떨어지므로 사용불가

리콘樹脂, 에폭시樹脂, 폴리프로필렌, 폴리염화비닐, 에틸렌 酢酸비닐共重合體 등에서도 관측되고 있다.

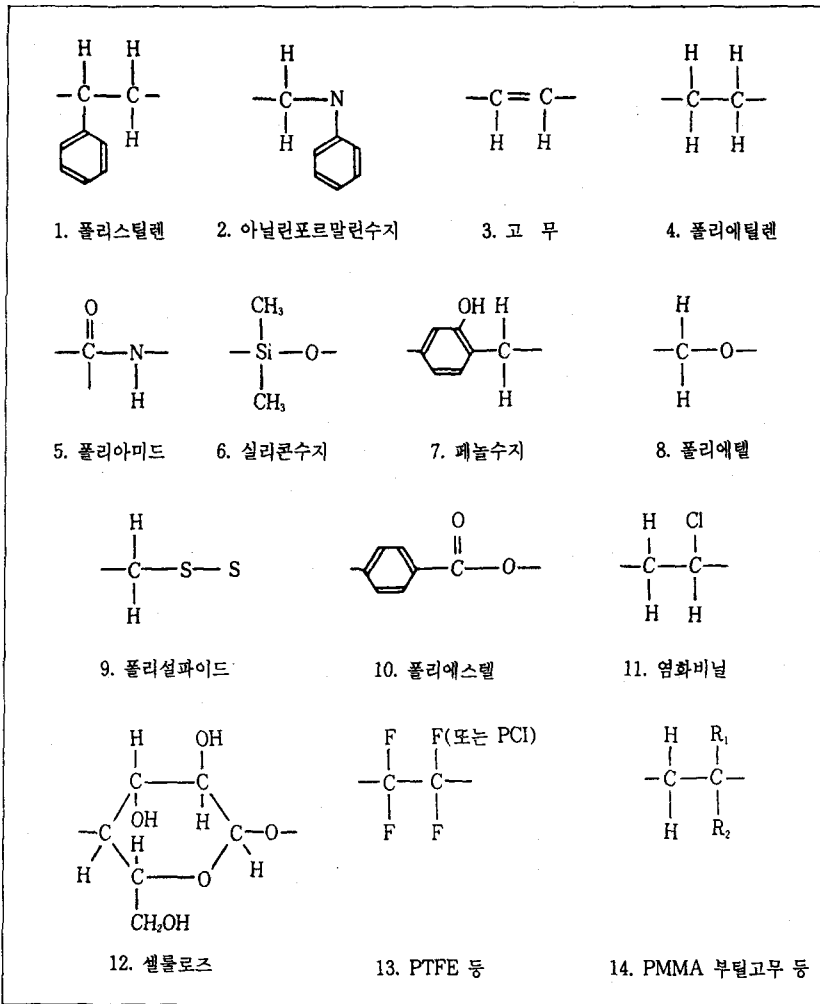
## 2. 放射線·熱劣化

원자력발전소에 사용되는 전선·케이블은 통상의 조건 이외에 특수한 환경에 노출된다. 특히 放射線으로 因하여 재료의 耐放射線성이 중요하게 된다. 그러나 내방사선성에 대해서 실제로는 放射線뿐만 아니라 동시에 열, 습기 또는 화학약품에 노출되는 複合要因으로서 劣化가 발생된다. 放射線劣化의 기초프로세스는 고분자에 방사선이 照射

되면 래디컬이 발생하고 架橋나 酸化反應이 일어나게 된다. 따라서 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 폴리아미드, 천연고무, 실리콘수지 등은 架橋, 폴리소프틸렌, PMMA, PTFE, 셀룰로즈 등은 切斷形이 된다. 그림 3.14는 耐放射線성이 큰 것 순으로 나타낸 것이다. 폴리스틸렌 등은 10°rad까지 기계특성은 변하지 않는다.

## 3. 電壓·機械·熱劣化

高電壓 回轉機捲線絶緣은 마이카箔을 主絶緣으로 하고 에폭시樹脂 등을 含浸·重合시킨 것이나 여기에 高電壓, 機械力, 熱 등의 스트레스가 동시



<그림 3.14> 高分子의 耐放射線의 順位

에 걸리면 複合要因으로 劣化가 일어난다. 各 劣化要因에는 직접상호작용과 간접상호작용이 있고  $V \cdot t = C(\text{一定})$ 를 일반화한 Lift Capacity의 방법도 있다.

直接相互作用이란 영향요인이 동시에 작용한 경우에만 나타나는 相互作用으로서, 예를들면(電壓 + 熱) 複合要因劣化로서 熱劣化가 실질적으로 일어나지 않는 온도와 시간의 범위에도  $V-t$ 특성이 온도상승과 더불어 短壽命側으로 평행이동하는 현상과 같이 하나의 요인(여기서는 온도)이 단독으로 劣化를 촉진하지 않음에도 불구하고 다른 劣化에 직접 영향을 미치는 것이다.

間接相互作用이란 영향요인이 동시에 작용한 경우에도, 逐次的으로 작용한 경우에도 본질적으로 변화하지 않는 상호작용으로, 예를들면(기계 + 열) 複合要因열화에 있어서 기계적 열화에 의한 절연 내부로 層剝離가 일어나면 實效적인 熱傳導率의 저하에 의해서 局部溫度는 상승하고, 더욱이 산소의 공급속도도 증대해서 熱劣化가 촉진되는 현상과 같이 제 1의 열화요인이 제 2의 열화요인에 직접작용하는 것이 아니고 제 1요인에 의해서 劣化가 일어나 이것이 제 2요인 열화에 영향을 미치는 것과 같은 과정으로 대응하는 것이다.

(다음호에 계속)