

高分子絶縁材料의 放電劣化

—차 례—

- 1. 서 론
- 2. 放電劣化의 發生
- 3. 放電劣化實態의 概觀
- 4. 放電劣化의 防止策과 問題點
- 5. 결 론

1. 서 론

近代産業의 에너지源으로서 電力需要의 급격한 증대에 수반하여, 電力系統의 超高電壓化, 관련機器의 小形化 및 長期間에 걸친 性能의 安定性, 信賴性이 絶對히 要望 하겠금 되었다. 이로 인하여 電氣絶縁材料에 要求되는 諸性能도 一般의 高度化되고 점점 加劇한 條件이 부가되고 있는 실정이라 하겠다. 近年 高分子化學의 迅速한 進歩와 高分子成形技術의 發達에 의하여 등장한 合成高分子材料는 그 物理, 化學의 性質, 특히 電氣의 性質에 많은 特徵을 가지고 있으며, 그 性能이 점점 높이 평가되고 있어, 高分子材料의 進出이 亞달로 電氣機器絶縁의 양상에 一大變化를 줄것이라 하여도 지나친 表現이 아니겠다. 이와같이 高分子가 電氣絶縁材料로서의 가치는 物價構造로 부터 期待되는 우수한 誘電性과 電氣絶縁性이 높이 評價되고 있는 점이라 하겠다.

특히 周邊效果(edge effect)등을 除去하였을 때 高分子材料가 本質의 劣化는 絶縁破壞세기는 常溫부근에서 數 MV/cm를 나타내고 있다. 그러나 일반적으로 高分子絶縁材料(以下高分子)가 가지고 있는 諸性能(電氣 및 機械的 性質등)은 周圍環境조건에 따라 經時變化를 하여 初期의 諸性能은 점차로 나쁘게 되어 가는 것이 常例이므로 電氣絶縁性能도 經時變化를 하는 소위 絶縁劣化現象을 나타낸다. 劣化의 程度가 使用되는 機器에 要求하는 性能보다 훨씬 낮아졌다고 判定될 때 그 時點이 그 機器의 壽命이라 한다. 電氣機器는 많은 素材로 構成되고 있으나 특히 絶縁劣化가 機器全體로써 壽命을 支配한다는 것을 명심해야 한다. 高分子의 劣化現象을 劣化形式으로 大別하면 (1) 物理的 劣화와 化學的 劣화로 나누어지고, 實際의 劣化形式은 이들을 複合한 形을 취하는 것이 많다. 한편 이들 劣化를 促進하는 要因으로는, (1) 熱的 要因 (2) 機械的 要

因(3) 電氣的 要因(傳導電流, 誘電體損, 電磁力, 靜電力, 部分放電) (4) 高에너지放射線 및 光의 要因 (5) 其他 微生物에 依한 浸食, 吸濕에 依한 加水分解등이 있으며, 材料의 劣化에는 上記要因에 따라 放電劣化, 振動과 같은 機械的 劣化, 紫外線劣化 및 腐食등으로 區分되나 實際의 劣化에는 이들이 중첩되어 일어나므로 劣化現象은 複雜하다.

上記 電氣的 要因으로 인한 電氣的 劣化에 屬하는 放電劣化는 高分子가 電氣絶縁部門에 進出, 특히 高電壓機器에의 適用으로 急速히 注目된 것이며 世界的 關心을 모아 耐코로나 劣화 및 트리잉劣化(最近耐電界性) 이란 過程로 연구가 행하여지고 있다. 放電劣化反應을 究明 한다는 것은 劣化進行度의 推定을 可能케하여 電力系統의 信賴性의 向上, 適材適所 즉 環境에 적합한 絶縁材料의 選擇法 및 耐劣化性物質의 開發등에 必要한 功業이라 하겠다.

2. 放電劣化의 發生

高電界에서 氣體나 液體가 部分放電을 일으키면 熱的作用, 粒子衝合作用, 勵起分子 및 이온에 依한 化學作用이 일어난다. 高分子가 實用電氣機器絶縁에 적용될 때 단지 電氣絶縁性 以外 여러 要求가 중복이 되어서 그 形狀도 多樣化하고, 構造缺陷등을 포함하여 일반적으로 絶縁構成은 複合系로 되며, 綜合絶縁性能은 單體인 高分子와는 대단히 다르다. 또한 機器構造에 따라 理想的인 平等電界狀態에서 電壓이 印加 된다고는 할수없으며 이같은 狀況에서 電壓을 印加하면 複合絶縁系內에서는 破壞電壓이 낮은 氣體 혹은 液體中에서 部分破壞가 일어나며 이것은 高分子를 공격하게 되고 이로 말미암아 劣化되는 過程을 放電劣化라 한다.

最近 超高電化機器絶縁方式과 合成高分子의 進出로 인하여 放電劣化에 대한 관심이 높아지고 있다. 有機高分子材料의 部分放電劣化過程에 대해서는 電氣的 特性 특히 絶縁破壞特性的의 比較나 經時變化的의 關係에서

* 正會員: 檀國大 工大 電氣工學科 副教授(工博)

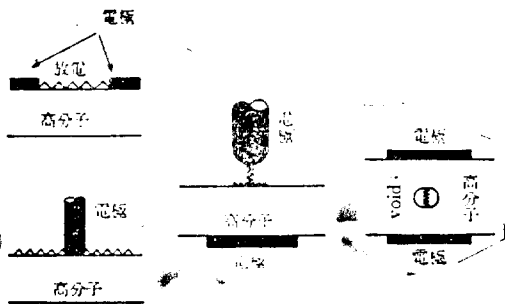
表 1. 固體絕緣材料的 絕緣破壞⁽¹⁾

(A) 短時間破壞	(1) 電子의 破壞	Intrinsic破壞 ($\partial E/\partial d=0$)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{單一電子近似} \left\{ \begin{array}{l} \text{高에너지規準(Fröhlich)} \\ \text{低에너지規準(Hippel)} \end{array} \right. \\ \text{集合電子近似} \left\{ \begin{array}{l} \text{單結晶(Fröhlich-paran Jape)} \\ \text{無定形(Fröhlich)} \end{array} \right. \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \partial E/\partial T < 0 \\ \partial E/\partial T < 0 \end{array} \right.$	
				電子雪崩破壞 電子衝突電離電子電崩破壞(Seitz) ($\partial E/\partial d < 0$) ($\partial E/\partial T < 0$)
				Zener破壞 ($\partial E/\partial d=0$ $\partial E/\partial T=0$)
	(2) 純熱的 過程—格子系熱不平衡(定常熱破壞, Impulse熱破壞) ($\partial E/\partial T < 0$)			
	(3) 機械的 過程—電氣機械破壞(Maxwell應力) ($\partial E/\partial T < 0$)			
	破壞의 2次的 效果: 空間電荷, 局部加熱, Maxwell應力.			
(B) 長時間破壞	(1) 放電劣化(部分放電劣化, 트리잉劣化, (트랙킹, 아크)			
	(2) 電氣化學劣化			

검토가 행하여졌고, 固體의 絕緣破壞는 表 1에 나타낸 바 같이 短時間破壞와 長時間破壞로 大別되고 실제로 사용되는 絕緣材料의 破壞電壓은 經時的으로 降下하고 이때문에 時間이 지나면 갑자기 絕緣破壞를 일으키는 長時間破壞중에 放電劣化와 電氣化學劣化로 區分되고 있으나 엄밀한 區別은 어려운듯하다. 이들 放電劣化를 放電의 形式으로 整하여 보면

(1) 部分放電(partial discharge, 코로나放電)

固體를 中心으로한 複合絕緣構成에서 絕緣破壞電壓이 낮은 氣體 혹은 液體에 印加되는 局部電界가 一定 限界(코로나開始電界)에 到達하면 이 部分이 먼저 破壞하여 部分放電을 形成하고 主絕緣 특히 固體絕緣을 劣化시키고 결국 全路破壞에 이른다. 이들의 劣化要因인 部分放電의 現象을 fig에 圖示한바 같이 發生의 位置로 부터 沿面放電, 空隙放電, Void放電등 3가지로 區分된다.



(a) 沿面放電 (b) 空隙放電 (c) Void放電

Fig 1. 部分放電形態

(2) glow放電 및 arc放電

高分子의 表面 혹은 그 근처의 媒質(氣體 또는 液體)에 高電壓이 加하여지면 이 電極間은 spark放電을 經由해서 全路破壞로 進展하게 되고, 이때의 條件(電源容量, 電極構成등)에 依하여 放電形式은 glow放電, 다시 arc放電으로 移行한다. 이들 放電은 熱的作用,

化學作用 등을 通하여 直接 혹은 間接으로 部分의 誘電體를 損傷시킨다. 實際의 電氣機器絕緣에서는 上記 各種의 放電이 중첩이 되어 복잡하게 작용하면서 劣化하게 된다.

3. 放電劣化實態의 概觀

(1) 部分放電劣化: 內外導體와 絕緣體와의 接觸部라든가, 表面霧圍氣, 絕緣體內微小 void(미크론程度以上)가 存在하는 狀態에서 高電壓이 印加되면 void內의 氣體中에서 部分的으로 放電이 일어나고, 그 部分에 풍부한 電子, 이온 및 勵起原子등이 發生하여 여러가지 劣化作用으로 絕緣體에 나쁜 影響을 준다. 일반적으로 高分子는 無機物質에 比하여 劣化가 일어나기 쉽기 때문에 그 損傷이 注目된다. 部分放電劣化에서 問題로 되는것은 주로 코로나劣화와 內部(void)放電劣化이다. 有機高分子材料의 코로나劣化⁽²⁾에 대한 劣化進行機構는 상세히 검토되고 있으며, 實際의 劣化과정은 材料表面의 赤外線吸收스펙트럼이나 發生가스의 質量分析 및 化學分析등으로 조사되고 있으며 補助的 수단으로 重量變化를 조사하기도 하고 현미경 관찰도 행하여지고 있다. 그림 2은 비교적 廣範圍하게 放電을 일으켜서 固體試料의 劣化에 수반하는 重量變化를 나타낸 한 예이다.

일반적으로 部分放電에서는 固體誘電體가 直列로 存在하는 形을 취하므로 특히 air gap放電이나 void放電에서 放電에 依하여 단들어진 同極性的 空間電荷(Homo space charge)때문에 逆電界가 形成되어 放電을 停止시킨다. 그러나 電壓이 上昇하든가, Homo space charge가 어떤 方法으로 감쇠하게 되면 放電空間에 충분한 電界가 再次 形成되어 放電은 再發하게 된다. 그리하여 放電은 pulse的으로 되고 이와같은 部分放電 pulse는 電壓, void形狀, void內 氣體의 種類, 壓力, 固體의 種類나 表面狀態 및 周圍조건(溫度, 濕

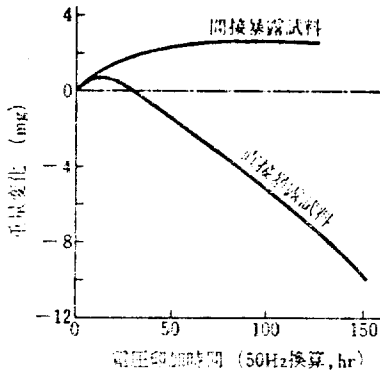


Fig 2. 폴리에틸렌의 部分放電에 의한 劣化(重量變化) 度) 등 多數의 因子에 依하여 變化한다. 따라서 궁극적인 劣化狀況을 左右하는 放電 pulse의 狀況을 감시해야 하고, 또한 劣化要因인 部分放電의 電氣의 諸性質(放電形式, 크로나開始電壓, 放電電荷量, 放電에너지, 發生 빈도 등)이라든가 그 微觀的性質(電子에너지, gas 溫度, 反應生成物의 種類와 量 등)에 關한 情報를 얻을 必要가 있다.

일반적으로 部電放電에 依한 材料의 劣化는 現象의 으로 보면 우선 試料全面에 浸食이 일어나고 차차 放電이 局部的으로 集中하여 그 部分에 浸食作用이 급히 上昇하여 결국 貫通破壞까지 이르게 된다.

(2) 트리잉(treeing)劣化: 固體絶緣物의 電氣絶緣破壞의 한 形態로써 트리잉破壞가 注目되어 各方面에서 檢討되어지고 있다. 絶緣構成이 比較的 두꺼운 경우, 部分放電에 의하여 全面浸食이 일어난 다음, 放電이 集中的으로 發生하면 破壞는 樹木의 枝狀과 같이 되면서 局部的으로 進展하여 가고, 이들에 依한 放電劣化形式을 그 破壞의 形狀으로 부터 트리잉劣化⁽⁴⁾라 한다. 트리는 固體가 電子雪崩破壞라든가 部分放電에 依하여 分解되고 氣化하여 脫出한 흔적이며 보통 直徑數 μm 이하의 中間細管이며 그속은 대개 分解가스로 充滿되어 있다. 그림 3은 treeing의 進展現象⁽⁴⁾ 및 形式을 보인한 예이다.

일단 void가 형성되면 그 部分이 放電하여 트리狀으로 進展하기 쉽게되며, 電力케블 이라든가 注形品인 電極部의 高電界部分 혹은 電極部의 空隙, 固體內에 銳利한 形狀을 한 異物, 微小 void로 부터 트리가 생겨 固體內로 進入하게 된다.

電壓印加後의 트리의 發達狀況은 그림 4에 圖示한바 같이 T_1 라고 하는 트리發生까지의 潛伏期와 그後 T_2 라고 하는 트리進展期로 구성되고 있다. 潛伏期에 影響을 주는 가장 큰 因子는 插入針電極의 근방에 void



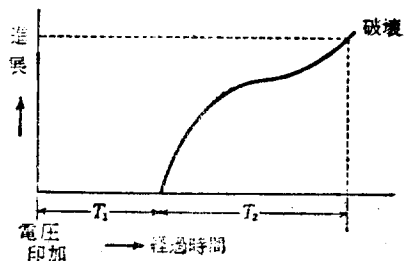
Fig 3. (a) Treeing의 進展現象(常壓密封電極)



(i) (ii)
Fig 3. (b) Treeing形式

가 存在하는가의 여부이다.

Void가 없어도 針先端의 電界가 높고, 電界自身에 依하여 固體의 局部破壞가 생기면 그 部分이 氣化하고, 트리로 轉移한다. 또한 高電界로 因한 機械的應力의 반복발생으로 Creck가 생겨 트리로 轉換할 수도 있다. 트리劣化의 進展은 前記 部分放電劣化의 대부분이 活性酸素類의 酸化反應에 依存하는 것과는 다르게 반드시 酸素를 必要하지 않는다. 이는 트리進展과정에서 추출한 가스의 分析結果로써 분명히 알 수 있다⁽⁵⁾. 그리고 트리管內 氣中放電이 停止하면 그 進展도 停止한다는 事實은 트리進展의 原動力이 트리管內 放電으로 因한 것이 明白하다 하겠다. 이때 트리管內 放電의 作用은, 放電에 依하여 생긴 電子, 이온의 衝擊, 局部的 溫度上昇 및 트리先端에서 高電界의 生成, 등을 들 수



T_1 : tree潛伏時間 T_2 : tree進展時期

Fig 4. tree의 進展

있다. 이 중 어느 것이 支配의 인가에 대하여는 아주 정확한 結論을 정립 못하고 있으나, 트리進展이 트리先端에서 高電界의 生成으로 因하여 絶緣體의 局部破壞가 일어난다는 實驗事實⁽⁵⁾이 많이 提示되고 있는 편이다. 또 特殊環境狀態, 즉 浸水狀態에서 課電하면 트리는 현저하게 促進되며 200~700V 程度인 극히 低電壓에서도 트리의 痕跡이 나타난다. 이를 水中트리 라 부르며, 水中電動機 絶緣事故의 要因이기도 하다. 電壓의 印加가 없는 狀態라도 腐蝕性가스가 内部로 擴散하면 導體인 銅과 反應하여 銅化合物의 析出이 絶緣層에 生成하게 되며 이것도 絶緣事故를 일으킬 수 있다. 이를 化學트리라 부르고 있다.

(3) **트랙킹(Tracking)劣化**: 트랙킹現象이라는 것은 絶緣物表面上 沿面方向으로 電界가 存在할때 炭灰導電路(track)가 形成되는 現象이며 絶緣物沿面方向의 絶緣性能에 나쁜 영향을 준다. 絶緣物 특히 磚子和 같이 表面이 外氣와 접촉하고 있는 경우 먼지나 鹽分, 水 등이 附着하기 쉽고, 附着量이나 附着의 分布에 따라 表面에 電氣가 흐를 수 있다. 그 결과 주로 珠露熱에 依하여 dry spot나 dry band라고 하는 局部的인 乾燥地帶가 발생한다.

Billings⁽⁶⁾에 依하면 有機高分子材料의 表面에서는 이들 dry spot가 成長하여 가는 과정에서 絶緣體自體의 部分的인 分解로 因한 영향도 시사하였다. Douglas⁽⁷⁾는 트랙크形成에 영향을 주는 因子를 (1)表面의 汚損, (2)汚染한 雰圍氣, (3)有機材料의 劣化生成物, (4)材料의 成分, (5)表面에서 炭素의 形成, 등을 열거하였다. 또한 그의 生成에는 表面電界의 強弱, 電流의 大小 및 이들로 因하여 發生하는 放電狀況에 依하여 變化한다. 放電狀況은 表面의 濕潤狀態 및 汚損程度 등이 關係하며, 트랙킹을 誘引하는 汚損에는 鹽分, 먼지, 濕氣 및 化學藥品과 분위기 등이 關係한다고 생각된다. 위의 放電狀況에서 電壓이 加하여지면 沿面으로 導電電流가 흘러서 이때 發光放電을 일으킬수도 있으며 트랙킹을 일으키는 直接的인 原因으로 된다. 이로 인하여 電氣機器의 故障도 흔히 일어나고 있다. 트랙킹現象에는 固體表面의 분위기가 最低破壞電壓보다 낮은 電壓에서 氣中放電을 수반하지 않고 汚損에 依한 導電電流로 일어나는 現象과 導電電流의 Joule熱에 依하여 表面의 水分이 증발하고 導電路가 分斷되어 여기서 氣中放電이 발생하여 炭化生成物의 形成으로 因하여 일어나는 現象으로 분류되었으며, 炭素狀트랙크를 形成하지 않는 固體라도 이들 放電에 依하여 점차로 浸食되어 결국 絶緣破壞의 原因으로 된다. 트랙킹성은 材料의 分子構造와 밀접한 關係를 가지며, 트랙킹形成

에는 材料로 부터 遊離炭素의 生成과 그 表面上의 측적에 관계하나 동시에 放電은 生成炭素를 없이하는 効果도 있음으로 炭素의 生成과 消滅이 되는 比例 決定하여야 한다.

(4) **아-크(arc)劣化**: 乾燥固體表面에서 發生하는 아크放電으로 因하여 炭素導電路가 生成함에 따라 劣化하는 現象을 말하며 그 機構는 前記의 트랙킹과 原理의 以로 同一하다.

4. 放電劣化의 防止策과 問題點

放電劣化는 高電壓印加絶緣構成에서 高分子가 本眞의 以로 가진 우수한 性질을 충분히 발휘못하게 하는 最大의 要因이 되는 點으로, 放電劣化反應에 대한 연구는 殊히 必要한 과제라 하겠다. 部分放電의 發生이 絶緣構成의 劣化 및 트리잉破壞로 轉換하는 지기등, 放電劣化의 實體로 부터 알 수 있는바 처럼 그 防止에는 絶緣層內의 異物 및 void除去, void內에서 放電發生의 抑制 및 放電에 依한 劣化의 低減, 동시에 耐크로나성이 큰 材料, 이를 助力하는 添加劑등의 開發등이 생각된다. 耐트랙킹성의 向上에 최근 無機充填劑(Al₂O₃·3H₂O)가 등장하여 트랙크發生 防止에 큰 效果를 보고 있는 예가 있다.

그리고 絶緣構成에 期待되는 長期壽命을 保證하는 面에서 특히 部分放電이 發生치 않도록 하는것이 바람직한 일인면서 그의 實現可能性은 극히 희박하므로 근래에는 有害크로나 限界設定에 注目하여 放電劣化防止對策의 한가지 方法으로 示唆를 하고 있다. 현재까지 部分放電劣化 및 트리잉劣化를 防止하는 定性的인 基本對策은 아직 완성되지 않고 있을뿐 아니라 放電劣化를 促進한다고 생각되는 要因의 解明에는 많은 문제점이 남아 있는듯 하다.

그러기에 高分子가 가지는 絶緣性能을 충분히 발휘할 수 있는 理想的인 조건에 도달하기에는 해결하여야 할 사항이 많겠으나 以下 이들에 關連하여 現實的인 面에서 解決方法을 記述하여 보겠다.

(1) **高分子內欠陥의 除去**: 高分子合成, 成形加工工程에 있어서 各種不統物 특히 導電性異物의 混入을 피하고 아울러 除去法에도 주의할 것이며, 重合觸媒, 酸化防止劑 기타 添加劑의 選擇에 注意를 期하고 그 物價이 高分子內에서 分散狀態가 分子狀分散이 되도록 할 것. 그리고 微小 void의 生成과 高分子內에서 殘留치 않도록 하는 것이 바람직 하다.

(2) **電極—高分子間의 完全한 接觸**: 半導電層의 物理的特性에 留意하고 界面 void의 完全除去와 針狀突起物과 같은 電極不整이 없도록 하는것이 必要하다.

(3) 電壓安定劑(Voltage stabilizer)의 開發: 전혀 欠陷이 없는 케이블絶緣構成은 期待하기 어려움으로, Void가 存在하여도 實價的으로 Void內에 생기는 電界를 輕減시키고, 氣體放電을 抑制 할 수 있는 添加劑를 開發할것. 물론 이들 混入에는 分散狀態에 注意하지 않으면 逆으로 이들 物價이 異物로써의 作用을 하여 트리發生의 原因이 됨을 알아야 한다.

(4) 充填劑: 部分放電이 생겨도 容易하게 高分子가 劣化하지 않도록 充填劑를 探求할것. 最近 高分子中에 電氣的負性가스 SF₆를 壓入擴散시켜서 微小 Void를 메꾸는 방법이 고안되어 部分放電의 發生을 防止하는 수단으로 되고 있다. 한편 欠陷이 發生하기 쉬운 電極界面을 常時 高分子와 親和性이 좋은 液體를 넣어 그 欠陷을 없게하는 方法도 開發되어가고 있다. 이것은 500KV級의 押出폴리에틸렌케이블의 實現에 注目되는 기술이라 하겠다.

(5) 油浸 프라스틱케이블: 從來의 油浸紙 OF cable 과 같은 形式으로 프라스틱紙를 積層하고, 그 사이에 油層을 만들어 複合構成으로써 完全히 欠陷을 除去한 것이며 750KV以上의 超高壓케이블 絶緣構成으로써 특히 開發이 期待되겠다. 여기에는 프라스틱의 耐油性 및 油와의 親和性의 向上을 도모하여야 하고 紙와 같은 섬유상형식으로 해야하는등 많은 困難한 點이 있다고 생각된다. 直接的인 放電劣化防止대책 以外에 間接的인 대책도 고려하여야 될줄로 안다. 즉 高分子가 劣化하는 과정에는 반드시 放電劣化만에 局限되고 있지 않고 몇가지 要因이 중첩되고 있는 결과라 생각되며 이에 대두되고 있는 문제점으로

(1) 熱劣化: 케이블이나 PCT등에서는 多量의 熱이 發生하여 熱應力이 發生하기도 하고, 絶緣材料가 部分的으로 變質하기도 한다. 이로 인하여 Void나 Crack가 形成되어진다고 생각되며, 그 結果 部分放電에서 트리破壞로 이르기 쉽다고 豫想된다.

(2) 水의 浸透: 케이블, 海底케이블에서는 물의 침투를 무시할수 없다. 그러나 固體絶緣物中에 침투한 물의 量과 事故와의 關係는 검토되고 있지 않는 듯하다. 더욱이 熱劣화와 組合하면 發生한 Crack중에 물

이 침투할것도 豫想되며, 이경우 특히 直流送電에 있어서는 電氣化學反應으로 活性生成物이 發生하는 것이 문제로 생각된다.

(3) 天候劣化: 固體絶緣物이 屋外에 사용되어지는 경우 문제로 되는 것은 耐候性이다. 지금까지 各種 高分子材料의 力學的特性的의 變化와 色の 變化등이 주로 검토 되어진듯하나 放電劣化와의 關係는 아직 연구도 상에 있는 문제점이라 하겠다.

(4) 高分子의 分解: 熱, 光, 放射線, 化學藥品 및 微生物등의 作用으로 일어나는 高分子의 分解와 劣化에 대한 研究는 高分子의 耐候性에 관한 情報를 提供할뿐 아니라 환경오염문제로써 최근 주목되고 있는 폐기 프라스틱類의 處理와 資源化라고 하는 實用的인 과제로써 흥미있는 문제점이라 하겠다.

5. 결 론

本質的으로 우수한 特性을 가진 高分子絶緣材料가 超高電壓化, 小形化 및 安定化의 추세인 電力系統에 重要한 絶緣方式으로 등장될 것이 豫想할수 있으며 合成高分子材料를 使用한 固體絶緣이 好評으로 實現되기 위하여는 放電劣化反應을 研究하고, 그 結果 解析的으로 材料를 開發하여야 할 것이며, 또한 固體絶緣이 實用化 시키기 위하여는 放電劣化 뿐만이 아니라 高分子의 分解와 劣化의 究明이 耐候성과 관련하여 綜合的인 放電劣化 대책의 研究가 필요하다고 고려한다.

참 고 문 헌

- (1) 家田正之: (日本)電氣絶緣技術會資料 170(1970)
- (2) 岡本, 池田: (日)電學法 85, 916.(1965)
- (3) 安井, 山田: 高分子材料 data book p. 29(1969)
- (4) 繩田, 河村: (日)電學誌 88, 961.(1968)
- (5) 松葉, 鳳: (日)電學誌 89, 985.(1969)
- (6) M.J. Billings, etc: IEEE Trans EI-2, 3. (1967)
- (7) Douglas, J.L. etc: proc. 7th Elect. Insulation conf. 118~122. (1967)