

電氣絶縁材料의 最近의動向

朴 昌 燁

〈延世大電氣科教授〉

電氣機器, 케이블, 컨덴서에 사용되는 絶縁材料는 그 用途가 多樣하고 種類도 많으며 이의 역할도 또한 대단히 重要하다. 따라서 電氣機器, 電氣系統의 小形化, 安全性, 効率改善을 기하고 기계의 수명을 길게 하기 위하여 絶縁材料의 開發이 꾸준히 계속되고 있다. 그 動向을 살펴보면 다음과 같다.

1. 液體 難燃性 材料

컨덴서용 絶縁油는 從來의 鑛油系絶縁油나 誘電強度가 높은 多環油알킬나프타린을 利用하며, 鑛油보다 誘電率이 큰 에스테르(ester)油, 其他 各種의 合成油가 研究되고 있으나 그 어느것도 현재는 사용 금지된 PCB(Poly Chlorinated Biphenyle)와 같이 實用化 안되고 있다.

變壓器에 對해서는 不燃性 變壓器로서, 乾式 變壓器, 消火設備付 變壓器로 移行되고 있으나 이는 變壓器의 形이 커지고, 車輛用 變壓器와 같은 設備空間이 限定되어 輕量소형화가 요망되는 경우에는 적당치 않다. 이 경우에는 PCB 以外의 不燃性油가 特히 요망된다.

現在로서는 有機鹽化物 以外 經濟的이며 安定된 不燃性油의 開發은 곤란하여, 車輛用 變壓器

의 絶縁油로서는 不燃性은 아니지만 難燃性인 실리콘油가 利用되게 되었다.

1) 有機 에스테르

難燃性은 아니지만 高誘電率인 液體로서 有機 에스테르(ester)가 광범위 하게 사용되는 실정이다. 有機 에스테르 중에 鑛油의 倍程度인 誘電率을 갖는 液體는 많다. 이는 流動點, 蒸氣壓, 粘度가 낮고, 引火點이 높아서 컨덴서油로서 使用할 수 있는 性質을 갖고 있다.

一般的으로 有機에스테르는 물의 溶解量이 鑛油 및 PCB보다 많고, 酸化나 加水分解 되기 쉽다. 따라서 油의 精製 및 精製된 狀態를 機器의 製造中 또는 使用中에서는 보존하기가 어렵다. 有機에스테르의 誘電的 性質은 精製狀態에 따르며 機器에 넣을 경우 共用材料에 포함된 不純物에 의해서도 영향을 받는다. 加水分解가 되면 酸價가 높아지고 體積抵抗率이 低下하며 誘電正接이 커진다. 不純物의 存在는 商用周波나 直流電壓에서는 영향이 크지만 高周波에서는 별로 영향을 미치지 않는다. 또한 高電界가 되면 化學的으로 不安定하여 잘 사용치 않는다.

2) 실리콘油

실리콘油가 絶縁油로서 우수한 性質을 갖고있

는 것은 알고 있지만 鑛油나 PCB에 비해 값이 비싸므로 지금까지 絶緣油로서는 사용되지 않았다. 그러나 PCB가 사용禁止됨으로서 經濟的인 不燃性油가 없기 때문에 車輛用的 變壓器油로서 難燃性인 실리콘油를 사용하게 되었다. 실리콘油는 $[-Si(CH_3)_2-O-]_n$ 인 分子構造를 갖는 디메틸폴리시록산(Dimethylpolyisloxane) 또는 메틸基의 一部가 페놀基로 置換된 메틸페닐폴리시록산이다. 粘度는 重合度에 依해 여러종류가 있으나 鑛油에 비해 溫度에 依한 粘度의 變化가 적은利點이 있다. 室溫에서 鑛油와 같은 程度의 粘度인 실리콘油는 鑛油보다 流動點이 낮고, 蒸發量이 적으며, 引火點이 높고, 安定性이 우수 하므로 넓은 溫度範圍에서 사용된다. 熱傳導率은 약간 크고, 表面張力은 대단히 작으므로 含浸性이 좋다. 溫度에 依한 體積變化, 氣와 水分의 溶解性이 약간 큰점에 注意해야한다.

실리콘油中에서 아아크가 發生하면 油가 分解되어 氣를 發生하고 機器의 內壓을 上昇시킨다. 아아크에 의한 油로부터의 氣發生量을 알아 두면, 事故時의 탱크強度와 放壓膜과의 協調를 設計할때, 중요한 資料가 된다.

2. 固體 難燃性 絶緣材料

固體 絶緣材料는 有機 및 無機材料로 區別한다. 現在 사용되는 絶緣材料의 대부분은 有機高分子材料이다. 安全性, 特히 火災事故防止에 큰 關心을 두게 되어 難燃性 材料가 요구되고 있다. 유리, 磁器 등의 無機材料는 不燃성이기 때문에 燃燒性은 問題되지 않지만 有機固分子 材料는 本質의 可燃性이므로 難燃化가 問題된다.

現在 一般的으로 사용되고 있는 高分子材料中에도 폴리염화비닐과 같이 難燃性이 높은 材料가 있고, 電線被覆 등 絶緣材料로서의 使用量도 많지만 軟化點이 낮아 問題點이 많다. 難燃性 高分子材料의 開發은, 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 폴

리에스테르, 에폭시樹脂와 같이 現在 大規模로 生産되고 있는 素材를 이용하여 難燃性을 갖도록 主력하고 있다. 이를 위해 難燃劑를 添加, 또는 配合하고 있다.

한편 材料 그 自體가 難燃性인 것도 開發하고 있다. 이 중 耐熱性 高分子라는것은 150~350°C인 高溫에서 長時間 安定하게 사용되는 材料를 意味한다.

이에 속하는 것은 폴리카보네이트(Carbonat), 브롬화비스페놀(Bisphenol) 등이 있다.

耐熱性 高分子材料에는 全芳香族 폴리아미드(Polyamide), 폴리이미드(Polyimide), 폴리아미드이미드가 耐熱性섬유, 필름, 紙, 바아니시, 積層板 등에 사용되고 있으며, 모두 難燃性, 및 自己消火性이 있다.

3. 氣 絶緣

高電壓의 開閉機器나 母線 등을 接地容器內에 넣고, 絶緣耐力이 높은 SF₆가스를 사용하여 絶緣하는, 氣絶緣 變電所(GIS)는 小形化, 信賴性, 美觀 등의 要請에 부응하여 急速히 實用化되고 있다.

送電線에 對해서도 오염될 염려가 없고 用地難, 誘導障害, 환경 등의 問題를 解決하여 大電力의 輸送이 可能한 送電方式으로 SF₆ 氣絶緣을 利用한 管路氣中送電(CGI)의 開發이 이루어지고 있다.

4. 回轉機 絶緣

高分子化學의 發達로 지금까지 많은 새로운 絶緣材料가 開發되어 電氣機器의 各方面에 사용되고 있지만, 回轉機에서도 絶緣材料에 加해지는 溫度, 機械的 應用 및 電壓 등의 使用條件이 엄격하므로 필름 材料 등 一部의 熱可塑性樹脂를 除外하면 熱硬化性樹脂를 사용한 材料가 많다. 機

器別 絶緣材料의 이용을 보면 다음과 같다.

1) 發電機, 高壓交流電動機의 固定子

7) 高壓이므로 主絶緣物로서 마이카가 사용되지만 集成마이카가 均質이어서 작업하기에 편하므로 마이카 대신 사용된다. 集成마이카는 燒成다이카와 無燒成다이카가 있다. 코일의 절연 처리는 大別하면 眞空加壓含浸方式과 레진리치 방식이 있다. 前者에 사용하는 마이카테이프는 접착제와 합침용수지의 적합성이 중요하다. 한편 후자에 사용하는 마이카 테이프는 이에 포함되는 溶劑의 量을 작게하는 경향이 있다.

마이카 테이프의 뒷면은 주로 그래스크로즈가 사용된다. 그래스마이카 테이프를 使用할때 코일 絶緣은 特히 冷熱주기에 의한 劣化가 작으므로 大形機에 사용된다. 高壓交流電動機에 使用하는 마이카 테이프의 뒷면은 그래스크로즈(Glass Cloth) 외에 폴리에스테르 필름이 사용된다. 필름을 使用하면 耐濕性이 좋은 絶緣이 되지만 最近 開發된 폴리파라바닉(Polyparabanic) 酸필름은 F種으로 사용될 것이다. 마이카 테이프의 接着劑 및 코일絶緣의 含浸劑는 주로 에폭시樹脂가 사용되지만 一部에서는 不飽和 폴리에스테르樹脂가 사용된다.

含浸用 에폭시樹脂로서는 비스페놀系, 비스페놀系와 에폭시 노보락(Novalak)의 混合系樹脂등이 사용되며, 最近 常溫에서 低粘度인 樹脂가 채용되고 있다. 또 含浸用樹脂의 硬化劑로는 酸無水物系가 使用된다. 耐熱性を 要求하는 機器에서는 마이카 테이프의 接着劑, 코일絶緣의 含浸劑로는 실리콘 및 폴리아미드系의 樹脂가 사용된다.

2) 發電機, 高壓交流電動機의 回轉子

回轉子 코일의 絶緣에는 마이카 또는 아스베스터가 사용되었으나, 이 材料는 機器의 大容量化가 됨에 따라 사용치 않고, 最近에는 機械의 强度가 우수한 에폭시樹脂그래스 成形品등이 사

용된다. 이중 스톱트 絶緣物에는 平行으로 配列된 그래스系를 基材로한 特殊한 에폭시樹脂成形品이 使用된다.

水車發電機와 同期電動機의 回轉子 코일 턴 絶緣에는 從來 아스베스터紙를 剝락 또는 다른 樹脂로 接着하였으나 最近에는 半硬化 에폭시樹脂 含浸그래스 크로즈 또는 아라미트(Aramite)를 사용한다.

捲線形 誘導電動機의 回轉子코일의 絶緣에는 固定子코일의 絶緣과 대략 같은 재료가 使用되거나 코일 接續部 絶緣에 一部 電着塗料를 채택하고 있다.

3) 小形交流電動機

이의 標準 絶緣은 현재 日本에서는 E種, 美國에서는 B種이며, 유럽에서는 IEC規格에 依해 E種이다. 最近 耐熱性 絶緣物을 채용한 F種絶緣이 發表되었으나 유럽에서도 B種과 F種을 만들고 있다.

4) 直流機의 電機子

最近 各種耐熱性絶緣物, 그래스 파이버테이프 및 粉末塗料등의 새로운 材料가 채용되고 있다. 大形機에서 斷面이 크므로 導體로는 에나멜線을 사용치 않고 그래스捲線이 사용되어 왔으나, 最近아라미트捲線 및 폴리이미드 필름 捲線이 채용되고 있다. 中小形機에서는 이 이외에 폴리이미드線, 폴리아미드이미드線, 폴리히 단토인(Polhydantoin) 線 및 폴리에스테리이미드線등의 耐熱性인 에나멜線이 사용된다.

코일 絶緣에는 從來 그래스 마이카가 많이 사용되었으나. 最近 耐熱性的 良質 아라미트나 폴리이미드 필름이 채용되기 시작하여 라이저部の 絶緣에는 一部 粉末塗料에 依한 靜電塗裝을 한다,

코일의 바아니시 처리는 大形機에서는 코일 하나 하나에 대해서 하고 中小形機에서는 電機子에 코일을 조립한 후에 電機子 全體에 對해 바

아니시 처리하는 것이 一般的이지만, 最近에는 溶劑系바아니시 대신 에폭시 樹脂로 처리하는 傾向이 있다. 直流機의 絶緣은 카본 브라시의 粉末에 의한 오염이 문제이므로 청소하기 좋도록 손질 할 수 있는 바아니시에 顔料를 넣은 코일이나 벨을 많이 사용한다.

코일 端部の 上下 코일間, 또는 프렌지와 코일간의 絶緣에는 그래스 마이카, 그 外 시드 및 필름 材料가 사용되고, 스로트 絶緣이 필요할때는 폴리에스테르와 폴리이미드 필름등을 사용한다.

5. 超高壓 케이블 絶緣

電力需要의 增加, 都市로 人口가 集中됨에 따라 發電所의 遠隔化, 集中化가 이루어지고 長距離大容量送電이 必要하게 되었다. 국내에서는 345[KV]送電이 可能케 됨으로서 케이블의 絶緣도 改善이 필요하게 되었다. 油浸絶緣體의 改良에 따라 外國에서는 1100[KV], 5[GW]送電이 可能한 케이블의 제작이 될 단계에 있다. 케이블에 사용하는 크라프트紙 대신에 새로운 合成絶緣紙의 開發이 進행되어 $\epsilon \cdot \tan \delta$ 가 작고 高耐電壓을 目標로 여러 가지 優秀한 材料가 개발되었다.

케이블에 사용되는 絶緣材料는 옛부터 크라프트紙가 사용 되었으나 使用電壓의 上昇에 따라 량되었다. 예를들면 低密度脫이온紙를 사용하여 誘電特性을 改善하고 氣密度를 높여 耐電壓特性을 向上시키고 있다. 이의 PE混抄紙, 마이카混抄紙, 래스후릭紙 DN紙 크라프트紙등이 사용되지만 언제나 세루로스를 主體로 하기 때문에 ϵ 를 3.0, $\tan \delta$ 를 0.1%以下로 하기는 대단히 곤란하다.

1958년 Vermeer등에 依한 低損失 프라스틱 필름 OF 케이블이 제안된 이래 프라스틱 필름을 사용한 絶緣材料의 研究가 注目되고 있다. 필름의 耐油性, 油의 舍浸性, 積層에 依한 破壞電壓의 低下現象등의 難點이 많아 아직 實用化 되지는 못하고 있다.

最近 外國에서는 프라스틱 필름 대신 여러 가지 合成絶緣紙가 製造技術의 發展에 따라 開發되고 있다. 이는 크라프트紙에 비해 여러가지 優秀한 特性을 갖고 있지만 耐油性, 耐電壓은 충분치 못하다. 合成紙는 크라프트紙에 비해 油浸狀態에서의 長期安定性이 확립된다면 케이블에 적용될 것으로 본다.

각종 絶緣 재료의 特性은 표와 같다.

第3表 絶緣材料의 一般特性(電氣特性·絶緣油舍浸)

特 性	種 類	Kraft Paper	Tenax	PP	PPLP	PPL	PAP	SSP	POD (필름)	FHCP
두께(mm)		0.125	0.092	0.164	0.121	0.100	0.125	0.090	0.025	0.128
密度(g/cm ³)		0.65	0.77	0.74	0.90	0.90	0.75	0.64	1.38	0.69
氣密度(s/100cc)		1800	1100	3200	—	—	3,000	1,600	—	—
引張強度(kg/mm ²)		5.6	2.3	4.0	5.0	9.4	6.9	7	9	(1) 37.8
伸張率(%)		2.6	2.9	15.4	6.2	2.7	25	15	30	10.8
誘電率(ϵ)		3.3	2.4	2.2	2.7	2.7	2.65	2.5	3.2	2.3
tan g(%)	80°C	0.14	0.026	0.02	0.06	0.08	0.045	0.04	0.05	0.024
	100°C	0.15	0.042	0.04	0.073	—	—	0.10	0.12	0.049
破膜強度(kv/mm)	AC	74	72	60	—	55	(2) 41	70	210	104
	Imp.	156	120	160	172	170	100	125	430	229
$\epsilon \cdot \tan g \times 10^{-3}$ (80°C)		4.62	0.63	0.44	1.62	2.16	1.1	1.0	1.6	0.55
耐油性(溶解量%)(DDB)*		0.0	0.0	8 (120°C)	2~3 (100°C)	—	—	—	0.0	0.5~0.8 (100°C)

(1) kg/15mm幅 (2) 케이블에서의 測定值

*(DDB:Dodecyl Benzen)

6. 高電壓 프라스티크 케이블 絶緣

高電壓 프라스티크 電力 케이블의 絶緣材料를 世界的으로 보면, 架橋 폴리 에틸렌 (Crosslinked Polyethylene 또는 약칭으로 XLPE) 폴리 에틸렌 및 에틸렌 프로피렌 고무 등이 사용되고 있으나 한국이나 일본등지에서는 架橋 폴리 에틸렌을 사용하고 있다.

架橋 폴리 에틸렌 絶緣 電力 케이블(以下 CV 케이블)은 日本에서 먼저 개발되어 實用化된 것으로 현재 3[KV], 6[KV], 22[KV], 33[KV]용 電力.케이블로서 사용되고 있다. 最近에는 OF 케이블 대신 그 사용도가 증가하고 있으며 154 [KV]系統에 시험할 단계에 이르고 있다.

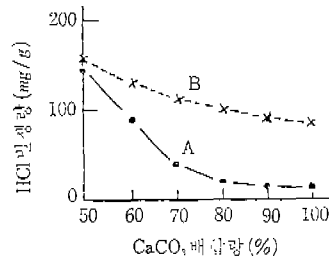
7. 難燃, 耐熱性 配電用 케이블 絶緣材料

요즘 火災에 의한 큰 事故, 고층건물 火災의 경우 유독가스에 의한 人命의 피해가 社會문제로 관심을 끌고 있다. 昨래 配電 케이블用 材料는 鹽化비닐(PVC)등의 難燃性 材料가 사용되었으나 火災事故에 대비하여 새로운 耐熱, 難燃性 材料 및 配電線, 케이블類가 製造되게 되었다 이들 材料에 關해 살펴 보면 다음과 같다.

1) 鹽化水素가스의 發生이 없는 鹽化비닐

有機物은 溫度가 40°C 以上이 되면 分解되어 可燃性가스를 내고 이것이 空氣中の 酸素에 의해 引火한다. 이와같은 有機材料를 難燃性으로 만들려면 보통, 鹽素와 같은 할로젠 元素를 分子內에 갖는 合成樹脂를 사용하든가 아니면 할로젠 元素를 分子內에 갖는 藥品을 混合하는 方法을 사용한다. 할로젠이 들어 있는 材料가 難燃性인 理由는 燃焼에 의한 熱로 發生하는 할로젠化合物 즉, PVC인 경우 鹽化水素 가스가 燃焼物體表面 附近에서 휘발되어 酸素를 차폐하게

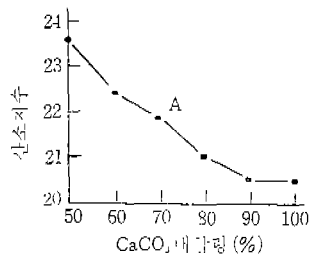
나, 燃焼하는데 必要한 레디칼의 捕促作用이 있기 때문이라 생각한다. 低壓配電用 케이블은 一般的으로 絶緣層및 시즈層에 PVC가 使用되고, 高壓 케이블에서도 PVC시즈가 一般的으로 難燃性으로 되어 있으나 燃焼防止 作用을 하는 鹽化水素 가스는 人體에 有毒하므로 큰 문제이다 鹽化水素가 發生 않도록 하는 方法은 一般的으로 알칼리성 충전제, 특히 탄산 칼슘을 混合하는것이 보통이다. 火災에 의해 發生한 鹽化水素는 탄산칼슘과 中和되어 부식성 가스가 放出된다. 이 反應은 탄산 칼슘의 表面에서만 생기므로 粒子直徑이 작은, 즉 表面積이 큰 탄산 칼슘 일수록 效果가 크다. 그림은 粒子直徑이 다른 탄산 칼슘을 PVC中에 混合시킨 경우 添加量과 燃焼時



에 發生하는 鹽化水素量과의 關係이다. 충전제의 量이 많아지면, 發生되는 鹽化水素量은 점점 감소

하나 飽和되어 雫이 되지 않는다. 그림에서 탄산 칼슘은 현재 市販되고 있는 것으로 A는 粒子直徑이 가장 작은것이고, B는 PVC에 가장 많이 사용하는 등급이다.

따라서 鹽化水素의 發生量을 最小로 억제하는 限度가 있고, 또 粒子直徑이 작은 탄산 칼슘을 配合하면 PVC의 物理特性이 低下하는 傾向이 있으므로 特性低下를 防止하려면 特殊한 材料를 사용해야 하나 價格이 높아지는 原因이 된다.



또 鹽化水素가 적게 發生되면 同時에 難燃性이 低下하는 傾向이 그림과 같이 된다.

이는 酸素를 차폐시키는 鹽化水素 가스가 발생되지 않기 때문이

다. 따라서 三酸化 안티몬등의 難燃性助劑를 多量添加시켜야 함으로 값이 비싸진다.

8. 컨덴서

石油化學의 兪저한 進歩에 따라 各種誘電體材料가 開發되어, 通信用 컨덴서에는 폴리 카보넬트, 폴리 스티렌등의 프라스틱 필름이 사용되고 있다. 電力用 컨덴서에서는 從來 油浸紙가 대부분 사용되었으며, 高周波 컨덴서에 폴리에틸렌 필름의 誘電正接이 낮은 特徵을 살려서 사용되는 程度였으나, 最近 耐熱성과 低損失을 特徵으로 하는 二軸延伸 폴리 프로피렌 필름이 實用化되고 있다.

한편 絶緣油에 對해서 살펴보면 從來는 鑛油 또는 PCB가 사용되었으나 환경오염 關係로 사용 금지됨에 따라 PCB에 대신할 수 있는 여러 가지 材料가 開發되어 그중 몇가지는 實用化되고 있다.

1) 絶緣紙. 極性基를 갖는 세루로즈를 主體로 하는 絶緣紙의 誘電正接의 改善은 이제 限界點이 到達한 값이 있다.

또 耐熱性改善을 目的으로 아세틸(Acetyl) 化紙, 시아노에틸(Cyanoethyle) 化紙, 폴말(Formal) 化紙, 아민 添加紙등이 開發되었으나 컨덴서 用으로서는 아직 부족한 점이 많다. 電力用 컨덴서에는 아직 從來의 絶緣紙가 대부분 사용된다.

2) 올레핀(olefin) 系 필름誘電正接은 周波數에 依해 거의 變치 않으며 油浸紙에 비해 작다. 폴리 에틸렌은 高周波 컨덴서에 사용되고 있으며, 폴리프로피렌(Polypropylene)은 최근 高壓 컨덴서에 사용되고 있다.

3) 스티렌(Styrene)系 필름. 폴리 스티렌은 폴리 올레핀系와 같이 옛부터 通信用 컨덴서에 사용되고 있다. 最近스틸렌과 부타디엔(Butadiene)의 프렌트필름이 誘電體로서 흥미 있는 材料이다.

4) 에스테르系 필름. 폴리 에틸렌 테레프타레트(Terephthalate), 폴리 카보넬트는 옛부터 低壓 컨덴서에 사용되어 왔으나 폴리 부틸렌 테레프타레트 誘電體필름의 사용이 기대된다.

이상에서 보는 바와 같이, 變壓器나 컨덴서용 絶緣油로는 PCB를 主成分으로 하는 것을 主로 사용하였으나 最近, 그 蓄積性 蝕性때문에 使用이 禁止된 후로는 有機에스테르나 실리콘油를 사용하고 있으며, 回轉機에 主로 사용되는 固體 絶緣材料로는 마이카, 아스베스터, 그래스마이카가 많이 사용되었으나, 요즘은 集成다이카, 에폭시樹脂그래스成形品, 그래스파이버, 알라미트나 폴리이미드필름 등이 사용되고 있고, 또 高壓케이블 絶緣材料로는 크랍트紙 代身에 低密度 脫이온紙, PE混抄紙, 마이카混抄紙, 그래스후렉紙 등이 많이 사용되고 최근에는 프라스틱도 사용되며, 配電用 케이블 絶緣材料로는 종래 PVC가 主로 사용되었으나 火災 發生時 有毒가스가 發生하므로 거기에 탄산칼슘을 混合하고 또 三酸化안티몬 등은 難燃性助劑를 첨가하여 사용하거나, 할로젠元素를 갖는 藥品을 혼합한 有機材料나 할로젠元素를 分子內에 갖는 有機材料를 사용하고, 通信用 컨덴서에는 폴리카보넬트, 폴리스티렌 등의 필름이 사용되고 있다. 또 最近에는 小形化, 信賴性, 誘導障害 등의 문제를 解決하기 위한 가스 絶緣材料로서 SF₆의 開發이 이루어지고 있다.

기름으로 만든 전기 절약하여 애국하자