

電氣設備의 트러블 對策

3

제 1 장 劣化와 트러블(Trouble)의 프로세스(Process)

Ⅲ. 몰드(Mold) 機器의 劣化 프로세스

몰드기기는 배전설비, 수전설비에 이용되고 그 우수한 성능에 의하여 신뢰성을 높여왔다. 몰드 絶緣方式은 앞으로는 전기기기의 大容量化, 高電壓化, 小型輕量化를 지향하는 동향에 따라 더욱더 널리 이용하게 될 것이다. 그것은 몰드 樹脂의 전기적, 기계적 특성이 뛰어나고 절연상으로 볼 때 보다 고도의 요구에 충분히 대응하게 되는 材料라고 보기 때문이다.

현재 몰드절연에 이용되고 있는 材料는 부틸 고무, 不飽和폴리에스테르樹脂, 에폭시樹脂, 폴리우레탄樹脂 등이다. 그중에서 가장 중요한 것은 에폭시樹脂이다. 표 1에서 보는 바와 같이 몰드절연을 이용하는 기종은 다양해지고 발전해 왔으나 初期의 不飽和폴리에스테르樹脂製의 變成器가 에폭시수지로 교체된 이래 몰드技術의 진보는 주로 에폭시樹脂에 관한 配合, 注型, 製造 등 기술의 진보에 따라 가능하게 된 것이다.

몰드기술의 진보를 유지한 또 하나의 큰 支柱는 절연재료의 劣化나 파괴의 현상에 관한 활발한 연구활동이다. 특히 최근에는 에폭시樹脂를 대상으로 한 시험결과가 많이 발표되고 있다.

이상의 기초 위에 몰드기기의 각종 劣化요인이나 프로세스, 그에 대한 대책 등이 밝혀지게 되고 기기의 신뢰성을 높이는 일이 가능하게 된 것이다.

여기서는 먼저 에폭시樹脂에 의한 몰드절연의 기초적 사항에 관하여 기술하고 계속해서 주요한 劣化 프로세스와 연구방법, 대책 등에 관하여 설명하기로 한다.

1. 몰드 絶緣方式

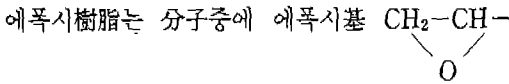
가. 몰드(Mold)

電氣機器의 主絶緣을 구성하는 樹脂材料를 注型 또는 침전으로 導電部와 一體로 成形固體化한 것을 몰드기이라고 한다. 침전타입은 F種 이상의

<표 1> 몰드機器 開發의 歷史

연 도	몰 드 기 기
'55~'60	計器用 變成器
'60~'65	애자, 부상, 자기遮斷器
'65~'70	水中, 固體絶緣에 의한 縮小形 變電所
'70~'75	SF ₆ 가스 絶緣縮小形 變電所 메탈크래드에의 固體絶緣의 導入 몰드 變壓器

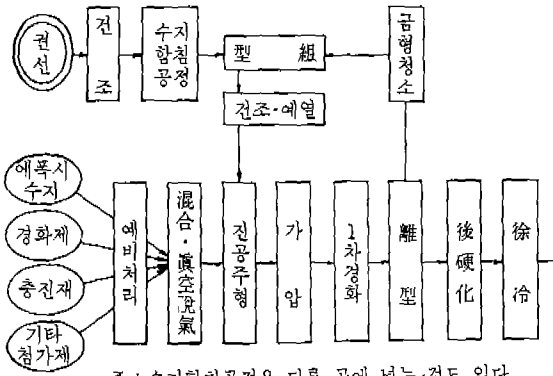
몰드변압기에 많이 이용되고 있는데 몰드란 본래 “鑄型” 또는 “형틀에 넣어 만든 것”이라는 의미이며 일반적으로는 注型成形한 기기를 지칭한다.



을 2개 이상 가진 化合物로 高電壓機器의 몰드에 이용되는 樹脂는 分子量이 300~1,000 정도의 常溫에서 液狀 내지 半固形인 것이다. 樹脂 단독으

로는 가열하여도 硬化되지 않고 硬化劑 등의 첨가에 의하여 附加重合反應이 진행되며 3차원의 架橋構造가 구성되어 不融不溶의 物質이 된다. 표 2는 몰드기기의 제조에 잘 이용되는 材料와 종류 및 각기의 특징에 관하여 나타낸 것이다.

고전압용의 몰드機器는 導體構造의 간단한 것 중 小形의 量產品을 제외하고 일반적으로 眞空注導法으로 제작된다. 그림 1은 몰드변압기의 고압 코일의 제조를 예로 하여 진공주형법의 플로(Flow)를 나타낸 것이다. 각 工程마다 온도, 압력, 처리시간 등이 적절히 관리되어 高電壓下에서도 견디는 高品質의 產品이 만들어진다.



<그림 1> 몰드變壓器 高壓코일의 製造工程

나. 몰드 絶緣의 特徵

에폭시樹脂 몰드材料는 구조재료적으로도 충분한 강도가 있고 金型에 의하여 자유로운 형상으로 成形이 가능한 우수한 絶緣재료로서 配合材料의 선택이 상당히 큰 品質의 차이를 낼 수도 있고 각종 제법에도 對應이 가능하다. 에폭시 몰드기기의 特徵은 일반적으로 아래와 같다.

(i) 小形縮小化 가능

<표 2> 에폭시 몰드用 材料의 種類와 特徵

재 료	종 류	특 징
에폭시수지	비스페놀A계	가장 일반적인 樹脂, 耐熱劣化性 양호
	脂環族系	내트래킹성, 내열성 양호, 클럭이 들어가기 쉬운 것도 있다.
	기 타	노보라크제, 히든트인제 등이 있고, 내열성, 내클럭성 등의 개선에 사용
경 화 제	아민계 방향족아민계	法型에는 대부분 이용되지 않음.
	酸無水物系	전기기기의 몰드에 많이 이용된다. 脂環族系와 방향족계인 것이 있고 耐候性, 내트래킹성은 前者가 좋다.
충진제	실리카, 알루미늄드라이드, 탄소와 알루미늄 등	팽창계수의 인하, 不燃性化, 내클럭성, 過熱電導率의 개량을 위하여 쓰여진다. 같은 종류라도 粒度分布, 불순물 함유율, 溶融品인가 아닌가, 粉碎方法 등으로 특성에 차이가 생긴다.
그밖의 첨가제	촉진제	산화반응을 촉진한다.
	시랑케플링제	충진제를 함유하여 배합의 耐水性 개선에 역할
	可燒性 附與劑	伸張性, 유연성을 크게 하고 내클럭성을 개선한다. 내열성 등 다른 특성을 인하한다.
	착색용	착색용

- (ii) 不燃性이며 油入機器에 비하여 安全性이 뛰어난.
- (iii) 耐油性, 耐藥品性, 내진 내습성이 우수
- (iv) 유지보수·점검이 용이

2. 絶緣材料의 劣化 프로세스

絶緣열화란 絶緣재료가 熱, 光, 濕氣, 化學物質 그리고 전기적 또는 기계적 작용을 받는데 따라서, 또는 이러한 스트레스의 복합적인 작용에 의하여 장시간 絶緣특성이 저하되고 결국은 絶緣과괴에 다다른 현상이다. 여기서는 가장 일반적인 熱 또는 電氣的作用에 의한 劣化 프로세스에 관하여 설명함과 동시에 수명에 대한 연구에 관하여 기술한다.

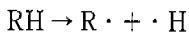
가. 熱劣化와 耐熱性의 評價

熱劣化는 그 絶緣재료가 사용되는 조건, 환경 등에 의하여 劣化機構가 다르기 때문에 一義的으로 정하기는 어렵다. 그렇지만 보통은 산소의 개체에 따른 自動酸化反應이 熱에 의하여 촉진되는 熱酸化反應을 熱劣化라고 한다.

(1) 熱劣化反應

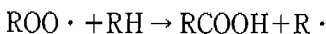
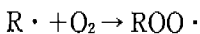
열열화반응은 다음의 一般式에 의하여 표현되고 있다(여기에서 R- : Alcyl基).

- (i) 開始反應: 光, 熱 등의 作用에 의한 프리 라지칼 生成

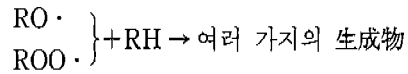
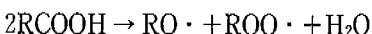


- (ii) 生成反應

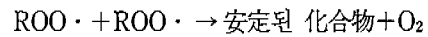
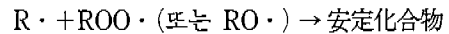
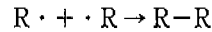
-히드로벨 옥시드(Hydrobell Oxide)의 生成



-히드로벨 옥시드의 分解



- (iii) 停止反應



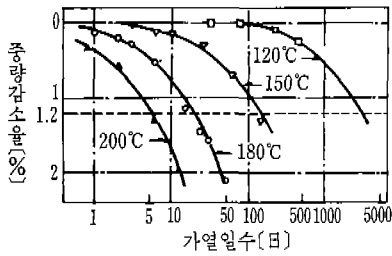
앞서 기술한 바와 같이 絶緣재료가 많이 이용되고 있는 에폭시樹脂 硬化物은 용도에 따라 매우 다른 구성을 가지고 있다. 이것은 여기에서 보여준 反應式중의 알킬基 R가 제각기 다른 것을 의미한다. 이 때문에 一般式 (i)~(iii)에서 보여준 劣化反應의 反應速度도 絶緣재료 種類에 따라 크게 달라지고 있다. 어느 경우에 있어서나 熱劣化에 관한 화학변화의 속도는 아레니우스(Arrhenius: 스웨덴의 화학자)의 反應速度論에 따른다.

(2) 絶緣材料의 耐熱性 評價

熱劣化는 비교적 낮은 온도에서도 장기간에 걸쳐 조금씩 진행하고 온도가 높으면 한층 더 촉진된다. 몰드기기는 보통 수 10년의 수명이 요구된다. 그러므로 絶緣재료는 이 장기간 동안 실제 운전되는 溫度域에 있어서 熱劣化에 따라 필요한 특성을 잃어버려서는 안된다. 그러므로 몰드機器에 사용하는 絶緣재료를 선택할 때는 그 耐熱性의 評價가 불가피하게 된다.

絶緣재료의 내열성 평가는 시험에 장시간이 필요하기 때문에 實使用溫度域에서 시험하는 것은 불가능하다. 이때문에 고온에서 促進劣化試驗을 하고 그 시험결과에서 보다 低溫側에서의 耐熱壽命을 추정한다. 촉진열화 시험방법에 관해서는 ISO₂₅₇₈, IEC Pub₂₁₆, ASTM D₂₃₀₄ 또는 DIN₁₆₉₄₆ 등에 규격화되어 있다.

絶緣재료를 高溫下에서 熱劣化시키면 折曲強度 혹은 重量 등의 物理量이 변화한다. 이 物理量이 어느 一定値로 저하될 때까지 요하는 시간을 수명 t_e 로 정의하면 아레니우스의 反應速度論에 의하여 다음 (1)식이 성립한다.



<그림 2> 각 加熱溫度에서의 重量減少

$$I_{nte} = a + E/RT \dots\dots\dots(1)$$

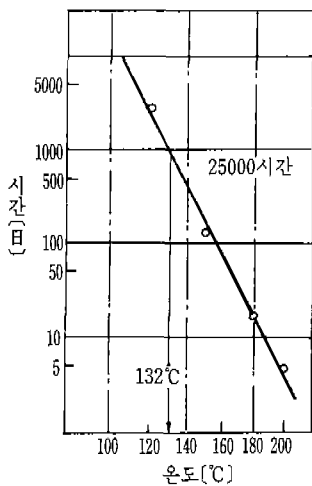
여기에서 t_e : 수명, a : 정수

E : 熱劣化의 活性化 에너지,

R : 氣體定數,

T : 절대온도

절연재료로서 에폭시수지 硬化物을 예로 든 것처럼 熱劣化에 의한 重量減少로부터 耐熱性を 評價한 예에 관하여 설명한다. 試驗値를 120, 150, 180 및 200°C로 가열하고 時間이 경과함에 따라 重量이 감소하는 상태를 그림 2에 나타내었다. DIN₁₆₉₄₆에 의하면 無機質 充電材를 포함할 경우에는 重量감소 1.2%를 規定限界値로 하고 있다. 그림 2에서 각 온도의 重量감소 1.2%에 필요한



<그림 3> 重量減少에서 구한 耐熱壽命直線

<표 3> 絶緣材料의 耐熱性 評價

K S C 4004		M I L E -917D	
허용최고온도 (°C)	절연의 종류	허용최고온도 (°C)	절연의 종류
90	Y종	90	-
105	A종	105	A종
120	E종	130	B종
130	B종	155	F종
155	F종	180	H종
180	H종	200	N종
180 초과	C종	220	R종
		220 초과	S종
		240 초과	C종

시간 t_e 를 판독하고, (1)식에 의하여 I_{nte} 値를 $1/T$ 에 플롯하였다. 그림 3에 그 결과를 나타내었다. DIN에서는 耐熱性 평가, 즉 許容最高溫度의 기준을 25,000시간을 클리어하는 熱劣化溫度로 정하고 있다. 이에 의하면 그림 3에서 본 바와 같이 이 材料의 허용최고온도는 132°C이다. 표 3에 의하면 이 材料의 耐熱性評價는 B種인 것을 알 수 있다.

나. 電壓劣化에 의한 壽命特性

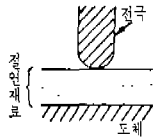
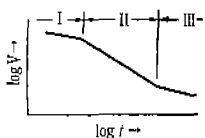
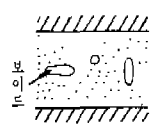
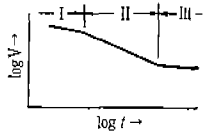
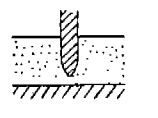
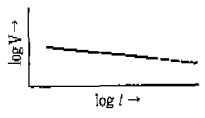
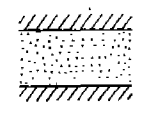
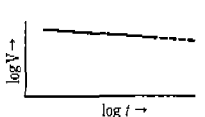
절연재료의 電壓劣化는 물드機器의 注型時에 생긴 보이드, 균열 혹은 樹脂와 材料의 異物質間의 剝離 등 이외에 埋入 金具, 導體表面 등의 針狀空起部 不平等電界에 기인하는 것이 많다. 여기에서는 주된 전압열화기구에 관하여 分類하고 수명특성의 相異에 관하여 說明한다.

(1) 電壓劣化機構의 種類

전압열화기구는 열화의 要因이 되는 결함의 상태에 따라서 3種類로 分類할 수 있다. 그 種類와 결함의 상태를 정리하여 표 4에 나타내었다.

(i) 部分放電劣化 — 부분방전열화는 다시 表面放電劣化와 內部放電劣化로 나뉘어진다. 어떤 경우에도 다음과 같은 劣化 현상으로 반복한다.

<표 4> 電壓劣化의 種類와 V-t 特性

전압열화의 종류		형 상	V-t의 패턴	특 징
부분방전 열화	표면방전			<ul style="list-style-type: none"> 제 I, III영역 → 열화고장패턴은 우발형 제 II영역 → 열화고장패턴은 누적열화형 $n=2\sim3$
	내부방전			<ul style="list-style-type: none"> 표면방전의 경우와 유사 제 III영역 → $n=4$ 전후
트링 열화				<ul style="list-style-type: none"> 패턴은 하나의 직선으로 근사 n은 6~29와 같이 차이가 많다.
공극이나 현저한 電界集中이 없는 경우				<ul style="list-style-type: none"> 電界의 절대치가 크다. 패턴은 하나의 직선으로 근사 $n=10\sim15$ 정도

高電壓 引加



固體보다 破壞電壓이 낮은 氣體部分으로 放電



電子, 이온 또는 勵起原子를 발생



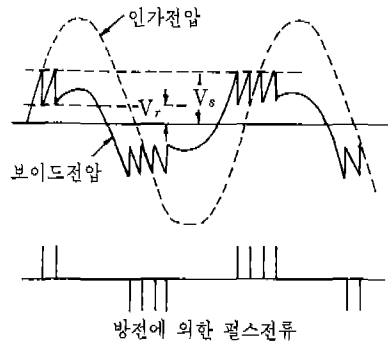
固體部分에 침투하여 損傷을 준다.

放電은 絶합부분(예: 보이드)의 전압이 一定值 이상인 경우에 생긴다. 또 絶합부분의 전압은 放電에 의하여 저하된다. 放電開始電壓은 絶합부분을 구성하는 고체의 표면상태, 기체의 종류, 압력 등 이외에도 많은 因子에 의하여 변화한다. 이 때문에 전압열화수명은 絶합의 상태에 따라 크게 달라진다(그림 4 참조).

그림 4에서 알 수 있듯이 방전발생 빈도는 주파수 혹은 전압의 증가에 따라 증대되며 이것은 전압열화에 의한 수명특성시험을 행할 때 周波數 加速, 電壓加速에 의하여 試驗을 촉진시키는 기초

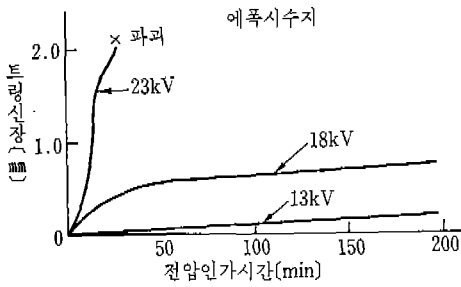
가 되고 있다.

(ii) 트링 劣化 — 絶합부분의 불평등 電界 때문에 부분적으로 高電界가 생기는 일이 있다. 이것이 絶연재료의 絶연파괴 強度를 지나치면 局部



V_r : 보이드방전 잔류전압
 V_s : 보이드방전 개시전압

<그림 4> 放電펄스의 發生狀況



<그림 5> 트링의 伸張과 印加電壓과의 關係
(針-針電極式, 間隙 2mm, 50Hz)

破壞가 일어난다. 이 局部破壞가 樹脂狀에 伸張하여 머지 않아서 全路破壞로 이어지는 일이 있는데 이것을 트링 劣化라고 한다.

트링 劣化의 伸張을 지배하는 要因으로서 引加電壓, 波形, 高周波 등 이외에 生成한 트리管內的 氣壓, 溫度 등이 있음을 생각할 수 있다. 그림 5에 트링의 伸張과 引加電壓의 關係를 나타내었다. 트링의 신장은 引加電壓이 높을수록 빠르고, 또 直流보다도 交流가 압도적으로 빠르다. 또한 周波數가 클수록 빠르다는 것을 알 수가 있다.

(iii) 결함이나 현저한 電界集中이 없는 경우의 電壓劣化 — 部分放電이나 트링이 생기지 않는 경우에 있어서도 劣化는 진행된다. 그러나 그 속도는 매우 완만해진다. 예를 들어, 이 경우 장시간의 耐電壓을 표시한 데이터로서 10~20kV/mm의 引加電界에 있어서 10⁵ 시간(약 12년)이라는 보고가 있다. 이것은 에폭시몰드 絶緣의 통상 사용전계보다도 한 단위 높일 경우의 壽命 데이터이며 이상적인 사용상태에 있어서는 壽命이 한층 더 길어진다는 것을 示唆하는 것이다.

(2) V-t 特性

절연재료의 劣化는 전압의 印加에 의하여 時間과 함께 진행된다. 그 進行速度, 즉 수명이 다할 때까지의 시간은 劣化機構가 다르면 크게 달라진다. 여기에서는 印加電壓 V와 파괴까지 경과한

시간 t와의 關係에 대하여 설명한다.

印加電壓 V와 수명 t의 사이에는 다음의 關係(逆 n 乘則)가 성립하는 것을 경험적으로 알게 되며, 이것을 V-t 特性이라고 한다.

$$t = C \cdot V^{-n} \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 t : 파괴까지의 시간, C, n : 정수, V : 인가전압

(2)식을 기본으로, log t를 log V에 대하여 플롯하면 그 傾斜는 -n을 나타낸다. 이 플롯圖는 (1)항에서 기술한 電壓劣化의 종류나 狀況을 반영하여 특징적인 패턴을 보였다. 또 n의 값도 規則性を 나타낸다. 전압열화의 종류와 V-t 특성의 關係에 관하여 표 4에 나타내었다.

다. 實用機器의 壽命 연구

절연재료 劣化의 要因이 되는 熱, 전압의 스트레스에 관한 연구를 기술하였다. 실제의 몰드機器 劣化는 보다 복잡한 경우가 많다. 이것은 이들 스트레스 이외에도 기계적 스트레스 등 개개의 사용환경에 적응한 다른 要因 혹은 이들 스트레스가 복합작용하기 때문이다.

몰드變壓器는 負荷變動, 外氣溫度의 변화에 따라서도 수명이 달라진다. 그렇지만 에폭시몰드 絶緣은 제작시에 발생하는 결함을 제거하는데 따라 수십년의 機器壽命을 보증하는 것이 가능하다고 생각하고 있다. 이것은 단적으로 말해서 에폭시樹脂의 뛰어난 전기적, 기계적 특성에 힘입은 바 크다.

어떻든 實機器의 수명추정을 위해서는 그 사용되는 狀況을 충분히 파악할 필요가 있다.

3. 機器 製造의 문제점과 劣化 프로세스

몰드機器에는 절연재료의 熱劣化나 電壓劣化와는 별도로 機器의 설계, 재료의 선정, 제조설비와 작업공정 등을 포함한 몰드기기 제조기술 전체로서 대처해야 할 문제점이 있다. 예를 들면 몰드변

압기에는 **耐클릭性**, **捲線**의 수지**습浸性**, 보이드나 **異物** 등의 문제가 있다.

가. 耐클릭性

(1) 클릭의 原因과 劣化進展의 프로세스

몰드절연은 **流體絶緣**에 비하여 **物性上** 뛰어난 절연능력을 가지고 있으나 유체절연과 같은 절연회복성이 없는 것이 결점이다. 따라서 몰드품에 일단 클릭이 발생하면 중대사고로 발전할 가능성이 크다. 표 5에 몰드樹脂의 클릭 要因과 對策을 정리하였다. 몰드變壓器도 500kVA급 이상의 大形이 되면 殘留應力이나 應力集中이 발생하기 쉽고 더욱이 사용중에는 自己發熱에 의한 히트사이

<표 5> 몰드樹脂의 클릭(CLICK) 要因과 對策

要 因	對 策
變形의 自由度가 적고, 彈性率이 크기 때문에 外部로부터의 충격력이나 熱應力을 스스로의 變形으로 吸收하지 못하고 클릭이 된다.	수지에 可燒性을 준다. (1) 수지·硬化劑의 分子量이 큰 것을 사용 (2) 可燒性付與劑를 첨가한다.
매입기구나 導體와 수지의 팽창계수의 差가 크기 때문에 사용시의 히트사이클로 큰 熱應力을 발생한 클릭이 된다.	(1) 팽창계수가 적은 수지를 쓴다(架橋密度가 높은 것이 좋다). (2) 充填材를 많이 넣는다. (3) 매입기구의 材質을 검토하여 수지의 팽창계수와의 差를 적게 한다.
몰드樹脂가 硬化할 때 (1) 발열온도가 부분적으로 높아진다. (2) 硬化收縮이 크다. 때문에 전체적으로 不均一한 內部應力이 남고 클릭의 要因이 된다.	(1) 反應基의 密度를 적게 한다(分子量이 큰 수지, 硬化劑를 比를 적게 한다). (2) 反應의 進行을 완만하게 하고 硬化 종료후, 徐冷한다. (3) 充填材比를 많게 하여 熱傳導率을 크게 한다.
몰드金型, 매입기구 형상 등에 起因하는 應力集中에 따른 클릭이 발생한다.	(1) 全體의 形狀, 埋入기구의 曲率, 수지의 두께 등의 검토 (2) 쿠션층, 점착층 등의 이용 (3) 補強材料의 이용

클에 노출되므로 특별한 주의를 요한다.

몰드樹脂는 經時的인 열화에 의해서 딱딱하게 변질된다. 이 과정에서 표 5와 같은 要因이 현저하게 나타나 클릭이 발생하게 된다. 어떤 要因에 대한 대책은 다른 클릭 要因을 반대로 크게 하는 경우도 있으므로 단순한 해결은 바람직하지 못하다.

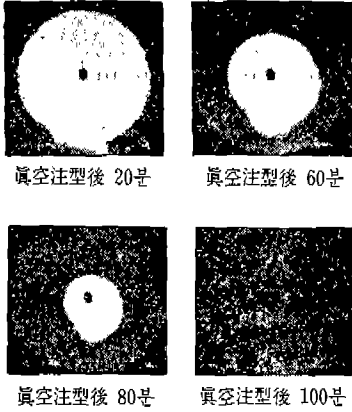
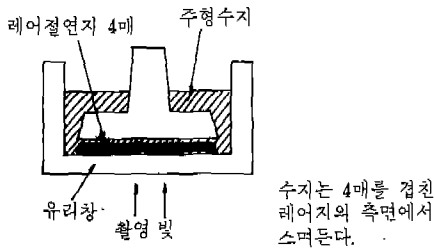
(2) 耐클릭性的의 保證과 試驗

몰드변압기의 使用壽命이 20년 이상으로 길다는 점에서 볼 때 초기의 耐클릭性 시험은 상당히 엄격하게 함이 마땅하다 하겠다.

材料의 耐클릭性을 평가하는 방법으로는 (i) 올리판트위셔法, (ii) 埋入볼트法, (iii) 스프링위셔法 등이 있다. 이들 모두 樹脂硬化時에 정해진 形狀의 鑄製위셔나 볼트形의 시험용을 埋入하여 이것을 低溫과 高溫의 冷熱 사이클에 걸어 클릭 發生까지의 경과를 보는 방법이다. 그러나 이상의 재료평가시험은 시험결과와 실용기기와의 적용 여부를 실제 경험으로 낸 데이터는 확실한 것이 없다. 거기에 신제품의 개발에 있어서는 實器의 몰드코일을 利用한 冷熱試驗(0~5℃의 冷水와 90~100℃의 溫수중에서 각각 그 時間을 1사이클로 하고 3사이클 이상) 및 冷凍試驗 등을 실시한다. 이러한 시험은 단순히 클릭 發生의 有無를 알 수 있을 뿐만 아니라 매우 심한 히트쇼크가 걸려 그 전후의 諸特性도 동시에 시험하고 개발제품의 약점이나 결함의 유무를 체크하고 있는 것이다.

나. 습浸의 重要性和 습浸의 확인

몰드코일의 제조에 있어서는 捲線의 內部(레이어間, 턴間)에 간격을 남기지 않고 절연수지가 충분히 습浸된 상태에서 硬化하는 것이 중요하다. 捲線內에 未습浸部分을 남기면 그곳은 부분방전전압이 매우 낮은 결함장소가 된다. 그리하여 방전 열화가 진행되고 헤어쇼트 등의 치명적인 사고가 일어날 확률이 크다.



<그림 6> 습浸 過程

捲線內部에의 습浸方法에는 대별하여 두 가지가 있다. 그 하나는 전체 몰드 앞에 별도 工程으로 습浸시키는 방법으로 이 경우 습浸은 완전히 가능하나 몰드수지와 의 界面에 剝離나 클릭이 발생하기 쉽다. 또 다른 方法은 捲線을 몰드할 때에 동시에 습浸을 시키는 방법으로 수지와 권선 사이에 剝離가 생기지 않고 工程도 적어 이상적이다. 그러나 注型同時습浸을 가능하게 하기 위하여는 수지의 反應性, 粘度時間特性, 硬化溫度, 眞空과 加壓에 관한 검토가 필요하게 된다.

그림 6은 몰드변압기의 注型時 동시에 注型하게 되는 습浸 모니터에 수지가 습浸해가는 상황을 一定時間마다 촬영한 것이다. 注型前의 眞空脫氣가 불충분하면 수지는 거의 습浸되지 않는다. 이 관찰로부터 수지권선의 습浸은 단순히 레어紙의 모세관 현상으로 진행되지 않고 진공상태가 된 捲線의 레어 사이에 그 外側의 수지가 장시간

걸려 압박되는 현상을 알게 된다. 제품의 습浸不良은 임펄스(Impulse)波形을 조사하면 발견할 수 있다. 그러므로 全數檢査에 의하여 제품의 품질보증이 가능하다.

(1) 보이드·異物은 混入對策

몰드機器의 事故는 매우 적으나 극히 드물게는 미리 예상할 수 없는 상황의 사고가 일어날 수도 있다. 파괴된 부분을 잘 조사해 보면 금속 이물질이 硬化收縮될 때 발생한 무목한 형태의 보이드가 존재하는 것을 알 수 있었다. 그 어느 쪽도 電界方向에 에치(Etch Pit: 전해연마, 부식공)를 가지고 있는 것이 유해하고 그 端部로부터 트리가 발생하여 파괴에 이르는 것이다. 이러한 보이드나 異物은 사용전압 근처에서는 부분방전에 이르지 않는 것이 많으나 사용전압 數倍의 전압에서 급격하게 큰(500pc 이상) 부분방전을 일으키는 경향이 있다.

이와 같은 경향을 확인한 다음에 부분방전 시험전압을 정하면 有害 보이드나 金屬異物을 가진 不良機器를 체크하여 제거할 수가 있다.

4. 使用環境에서의 劣化 프로세스

몰드機器는 온도나 먼지가 많아 열화하여 나쁜 설치환경에서 사용되는 경우도 많다. 몰드변압기는 지하철이나 터널, 상하수도의 전원으로서 이용되고 固體絶緣式 超小形 開閉裝置(미니 클래드)는 종종 옥외에 설치된다. 최근에는 몰드 Y分岐 接續部는 케이블 피트內에서 이용되고 있다.

이와 같은 경우에 몰드기기는 降雨, 多濕의 영향이나 먼지·鹽分의 영향, 外氣溫度的 급변에 의한 히트 사이클이나 結露의 영향 등을 정면으로 받아 절연성능의 저하, 트래킹의 발생과 플래시오버(Flash Over)를 일으킬 위험이 있다. 이와 같은 사용환경에 있어서 중요한 것은 몰드수지의 吸濕劣化特性和 耐트래킹性이다.

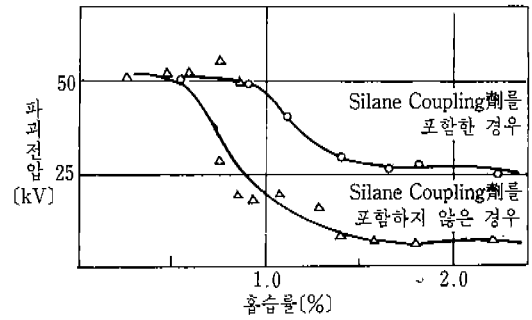
가. 吸濕・水分에 의한 劣化

(1) 몰드樹脂의 吸濕劣化現象

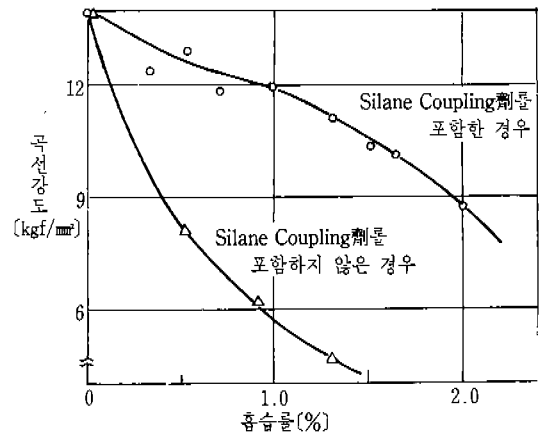
그림 7 과 그림 8 은 몰드수지의 흡습률과 曲線強度 및 파괴전압의 관계를 나타낸 것이다. 사일렌 커플링(Silane Coupling)劑를 첨가하지 않은 配合에 있어서 이러한 強度는 吸濕率 0.5%~1% 사이에서 급속히 저하한다. 그 외에 저항률의 저하, 誘電率이나 $\tan \delta$ 증가 등의 현상도 吸濕量 0.5% 이상으로 나타난다. 사일렌 커플링劑를 첨가한 경우에는 동일한 흡습이 있어도 특성의 저하는 매우 적다. 몰드수지의 흡습시 특성을 저하시키는 주요 要因은 수지와 充填材의 界面에 吸着된 水分이다. 이 吸濕에 의하여 불순물의 이온解離가 촉진되고 吸着水分子의 이온化도 더해지며 어떤 경우에는 이온 移動度도 증대되어 上記의 특성 저하가 되는 것이다. 사일렌 커플링劑는 수지와 充填材의 결합을 強化하고 그 界面에의 물의 흡착을 방해한다고 생각된다.

(2) 吸濕과 몰드機器의 性能低下傾向

흡습에 의하여 낮아진 物性値는 乾燥하면 다시 回復된다. 이 점이 吸濕劣化의 特徵이다. 그림 9 는 高壓捲線을 온도 20°C, 습도 100%의 상태에서 48시간 방치하고 충분히 습기에 젖게 한 후 온도 20°C, 습도 65%의 상태로 방치하여 절연저항, 부분방전 개시전압의 회복특성을 측정한 결과이다. 이때 걸리는 시간은 약 5시간으로 절연저항, 부분방전 개시전압은 어느 것이나 初期의 값까지 회복한다.



<그림 7> 吸水率과 破壞電壓의 관계 (2mm 板)

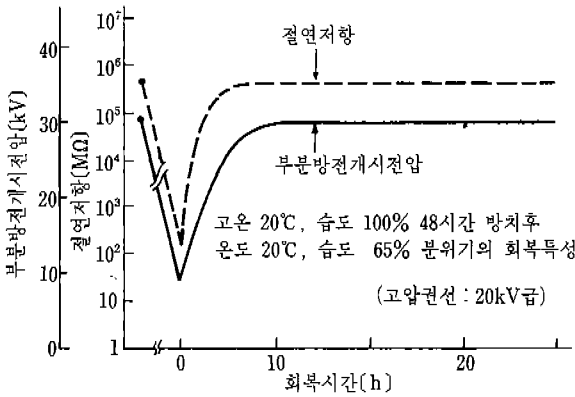


<그림 8> 吸水率과 곡선강도의 관계

또 두께 2mm의 각종 에폭시樹脂板 試驗을 해 본 결과 1년 동안 옥외에 방치한 후의 흡수량은 0.3~0.5% 정도이다. 그러므로 일반적인 氣中使用에서는 실제 吸濕劣化의 문제는 없다. 터널 등 常溫多濕의 조건에서도 변압기의 경우는 운전이

겨울철 실내적정 난방온도 기준은 18~20°C

☞ 난방온도 1°C를 낮추면 약 1,200억원의 에너지 절약!

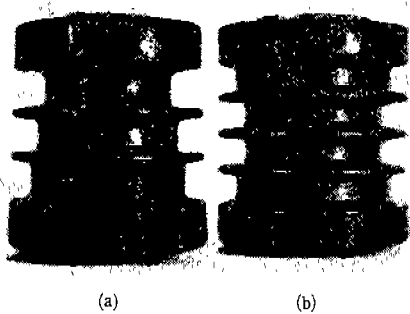


<그림 9> 吸濕에 의한 特性低下와 그 回復特性

개시되면 몰드 表面은 반드시 高溫이 된다. 그래서 몰드 表面의 相對濕度는 매우 낮은 상태가 되고 반대로 건조과정에 들어가는 것으로 생각된다. 그러나 Y分岐接續部 등과 같이 發熱이 적은 機器의 경우는 사일렌 커플링劑를 사용하여 耐濕性을 改善하는 것이 바람직하다.

나. 트래킹에 의한 劣化

그림 10은 6kV용의 레진 애자에 4kV를 印加한 대로 鹽水噴霧試驗을 한 후의 外觀이다. 분무 사이클은 10초 분무, 20초 休止 間격으로 101회 시험했으나 어느 쪽도 플래시오버되지 않고 그 직



<그림 10> 鹽水噴霧試驗 後의 外觀比較

후 電壓이 0.4kV 올라가는 것과 10초 분무, 60초 休止를 반복하는 시험으로 (a)는 9kV로, (b)는 14kV로 각각 플래시오버된다.

(a)는 가장 일반적으로 사용되고 있는 비스페놀 A (Bisphenol "A": $C_{15}H_{16}O_2$)系 에폭시樹脂를 이용한 것이며 表面에 多數의 트래킹 흔적을 남기고 있다. (b)는 脂環族系 에폭시樹脂를 사용함으로써 表面의 손상은 전혀 보이지 않는다.

屋內用에 일반적으로 사용되고 있는 비스페놀 A系 에폭시樹脂와 放香族系 酸無水物配合의 耐트래킹성은 상기 분무시험의 예에서 나타난 바와 같이 결코 좋다고는 할 수 없다. 그러나 일반적인 屋內使用으로 トラブル을 생기게 하는 예도 거의 볼 수 없다. 다만 사용환경이 나쁜 경우에는 당연히 대책을 취할 필요가 있다.

耐트래킹성의 改善方式은 잘 알려져 있는 바와 같이 樹脂를 교체할 뿐만 아니라 硬化劑를 脂環族系로 한다면 充填材를 水和알루미나로 하는 등의 수단이 여러 가지로 효과가 있다. 다만 耐트래킹성과 교환으로 다른 수명특성, 耐클러킹性, 耐水性 등이 손실되지 않도록 하는 것이 중요하다.

耐트래킹성의 評價試驗法으로는 IEC法, Dip法, Dust & Fog法 등이 있으며 트래킹은 汚損, 濕潤의 조건으로 진행하고 그 정도는 눈으로 볼 수 있어 몰드 表面의 청소에 유의하면 그 진행을 방지할 수 있게 된다.

몰드機器가 信賴性을 높이는 屋內用 變配電機器나, 가스절연 개폐장치의 個體絕緣部品으로서 널리 이용되고 있는 것은 에폭시樹脂 몰드 材料의 뛰어난 특성에 힘입은 바 크다. 그러나 반면에 이 절연방식의 결점이나 예상되는 劣化 프로세스에 대한 對策을 세워 克服해 온 것도 크게 기여하고 있다.

이리하여 현재는 몰드기기에 기인하는 事故例는 매우 적어졌다. 절연열화의 프로세스를 잘 이해하고 절연진단 기술을 연구해 가면 事故를 더욱더 감소시킬 수 있을 것이다.

☛ 다음 호에 계속