

최신 절연시스템과 耐熱特性에 대한 小考

李 福 熙* · 金 廷 燮**
(仁荷大 大學院* · 豊山金屬(株) 工務部長**)

■ 차 례 ■

- 1. 서론
- 2. 재료의 熱劣化
 - 2·1 박막재료
 - 2·2 합침재료
- 3. 절연시스템의 熱劣化
 - 3·1 Motorette시험에 의한 수명 추정
 - 3·2 열열화 機構
- 4. 결론
- 참고문헌

1 서론

최근 고분자재료의 눈부신 발전은 전기기기의 절연에도 많은 향상을 가져왔다. 전기기기의 절연재료로는 운모와 바니쉬가 많이 쓰이어 왔으나 현재는 기계적, 전기적, 화학적 성능이 우수한 合成樹脂材料가 많이 쓰이고 있다. 전기절연 재료를 대별하여 보면 薄膜材料와 含浸材料로 나눌 수 있으며, 박막재료에는 운모, 실리콘 고무, 폴리아미드필름, 폴리아미드클로즈 등이 있으며, 바니쉬류에는 내열성이 우수한 실리콘계 바니쉬와 無溶劑含浸材料가 많이 사용된다. 전기기기의 기본 구성재료이며 기기의 성능 향상과 소형화, 경량화에 중요한 인자로 작용하는 전기절연재료인 박막재료와 합침재료의 조화로 구성되는 절연시스템의 熱劣化와 耐熱壽命에 영향을 미치는 절연의 신뢰성에 대하여 알아본다.

2 재료의 熱劣化

2.1 薄膜材料

운모는 珪酸鹽化合物이므로 열이나 산에 강하기

때문에 유리운모, 운모지 등의 운모제품이 절연 재료로서 가장 많이 쓰이고 있다. 그림 1은 박막재료의 두께와 절연파괴전압과의 관계를 나타낸 것이다.

유리운모는 평면상태에서 350℃로 40시간이상 가열처리한 후에도 절연파괴전압은 변함이 없으나 積層상태에서는 접착제가 熱劣化되어 형상이 변화되고 절연성능이 저하되는 경우가 많다. 따

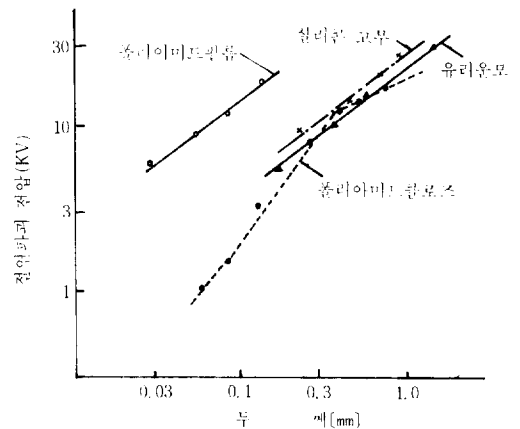


그림 1. Breakdown voltage vs thickness of thin films.

라서 운모제품의 내열성은 접착제 등 운모이외의 재료에 의하여 결정된다. 운모이외에 F종이상의 박막재료로서 실리콘고무와 폴리아미드필름, 폴리아미드클로즈 등이 실용되고 있다. 이들 각각의 내열성의 파라미터인 고온에서의 抗張力의 經時變化는 그림 2 에, 에이징과정에서의 중량변화를 그림 3 에 나타내었다.

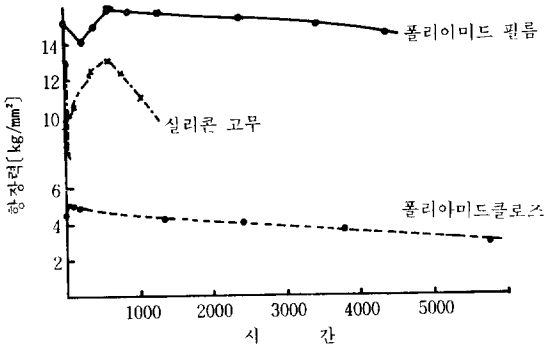


그림 2. Thermal aging characteristics of tensile strength.

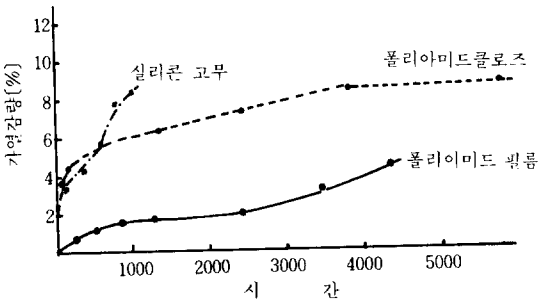


그림 3. A loss in weight of thin films in oven aging at 250°C.

운모와 바니쉬의 구성에서 운모는 설계상 필요한 절연특성을 얻기 위한 주재료이고, 바니쉬는 부재료로서 운모의 접착, 철심과의 접착 등의 작용으로 운모를 진동이나 흡습에 대한 劣化를 막아준다. 즉 絶緣耐力는 운모에 의해, 耐熱壽命은 바니쉬에 의해 결정된다. 바니쉬는 수지를 有機溶劑에 녹인 것으로 사용시 휘발되고 남은 수지인데 근래 注形用에폭시수지와 같은 無溶劑形의 재료도 사용되고 있다. 용제형(V

형)은 가열에 의해 용제가 휘발되고 점도가 커져 박막재료 등에 부착작용이 생긴다. 또 산소의 흡수 등 약간의 화학반응에 의해서 보다 절연성이 향상된다. 즉 절연재료로 사용되기 전후에서 주성분인 수지의 분자구조는 비교적 변화가 적으며 취급이 간편하다. 이에 반해 무용제형(R형)은 가열이나 촉매 등에 의해서 硬化反應을 일으켜 분자구조의 변화가 많다. 경화반응이 활발해지면 발열되고 점도가 낮아져 V형과 같은 부착작용은 일어나지 않는다. 금형 등에 의해 수지의 유출을 막는 공정법이 필요하고 사용시 정확한 혼합, 면밀한 조작 등 상당한 화학적 지식이 필요하다. 反應系에 있어서 온도 T에 대한 점도 μ 와 경화시간 τ 를 측정하여 μ/τ -T의 관계를 구하면 재료의 선택이 용이하다. 이것이 바니쉬의 粘度管理圖로서 μ/τ 가 T의 함수라 하면

$$\log(\mu/\tau) = \frac{A}{T} + B \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 그림 4 에 실리콘알키드바니쉬, 그림 5 에 에폭시수지의 예를 나타내었다.

그림 4 에서는 바니쉬피막의 두께가 점점 얇아져서 절연과피전압이 낮아지므로 열화가 어느 정도 진행된 후에 바니쉬함침을 하면 절연성능이 상당히 회복된다. R형에서는 절연물의 두께나 중량의 변화는 V형과 비교가 안될 정도로 변화가 적다. R형의 경우는 기기의 사용시에도 화학반응이 계속 진행될 것으로 생각된다. 이형의 모든 재료는 고온에서 오랜 동안 노출시키면 서서히 경화되어 수축된다. 이것이 재료내부에 응

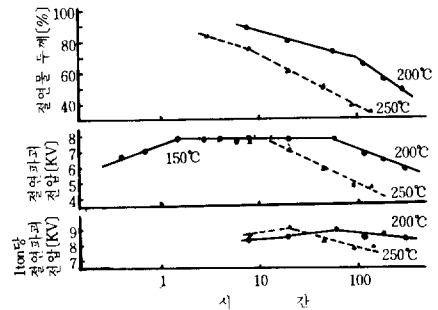


그림 4. Thermal deterioration of insulating film by a varnish.

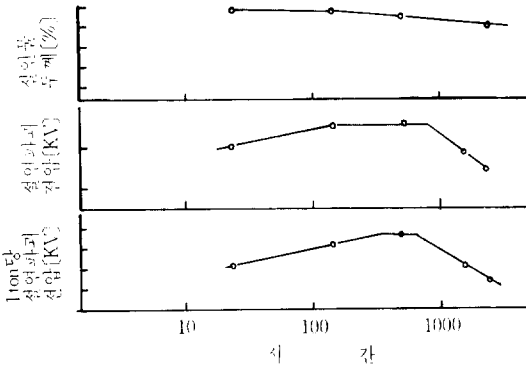


그림 5. Thermal deterioration of insulating film by a potting-type resin at 225°C.

력을 주어 미세한 균열이 생기고 기계적 결함을 일으켜 전기적 열화를 가져오게 된다. 따라서 형상이나 진동 등 기계적 조건이 절연수명에 대단히 영향을 미친다. 이와같이 V형과 R형의劣化機構는 다르다.

3] 絶緣시스템의 熱劣化

3.1 Motorette시험에 의한 壽命推定

절연재료의 구성이 표1과 같을 때 절연시스템의 신뢰성 추정은 대단히 어려우며 어떠한 방법이 타당하다고 일률적으로 나타낼 수 없지만 여기에서는 Motorette시험에 의한 수명추정의 예를 나타내기로 한다.

회전기기와 같이 가동부분이 있는 것은 열화요인이 복잡하므로 제품과 모델과의 관련성을 높이기 위해서는 여러번의 반복실험이 필요하다. 기기의 사용조건, 재료의 열화기구가 각각 복잡한 문제점을 가지고 있지만 열화의 요인은

표 1. Insulation construction.

	박 막 재 료	함 침 재 료
No.1	유 리 운 모	실 리 콘 바 니 쉬
No.2	유 리 운 모	에 폭 시 계 바 니 쉬
No.3	유 리 운 모	비스 케놀계 바니쉬
No.4	실 리 콘 고 무	비스 케놀계 바니쉬
No.5	폴 리 이 미 드 필름	실 리 콘 수 지

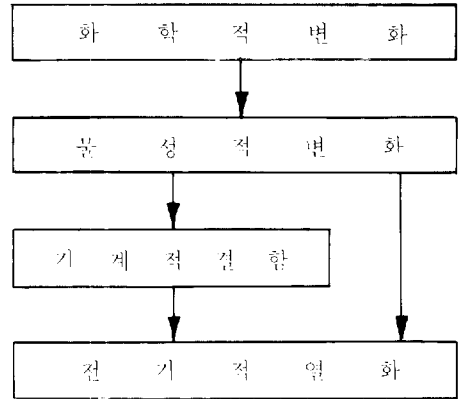


그림 6. Process of thermal deterioration.

기계적응력, 열, 외력, 전압, 방사성 물질 등이 있으며 열화과정은 그림6과 같다.

절연성능의 대표적인 특성으로 절연과괴전압과 열화의 요인으로서 열만을 고려하면 그림7과 같은 耐熱壽命曲面을 생각할 수 있다.

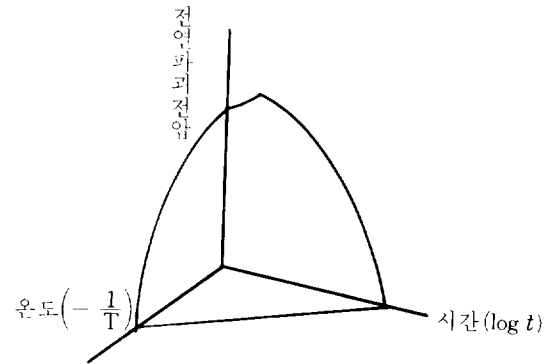


그림 7. A curved surface showing thermal durability.

즉, 이곡면의 내면측은 안전한 조건을, 외면측은 위험조건을 의미한다. 제품의 성능에 적용되는 수명곡면을 알게 되면 기기의 절연설계에 대단히 유용하다. Motorette시험법은 가열, 진동, 흡습을 주기로 하여 회전기기와 유사한 조건 상태에서 수명-온도의 관계를 구하는 것으로 주로 가열에 의한 열화와 진동, 흡습에 의한 열화를 분리하기 쉬우며 수명의 추정도가 높다.

열열화가 화학적 반응에 기인된다면 반응속도

의 온도변화에 대한 관계식인 알레니우스식(Arrhenius Equation)을 적용할 수 있다.

반응속도정수 k 와 온도 T 와의 관계는

$$\frac{d \log k}{dT} = \frac{\Delta H_a}{RT^2} \quad (2)$$

R : 기체정수, ΔH_a : 반응의 활성화 에너지로 된다.

절연수명 t 가 반응속도정수 k 에 반비례 한다면

$$\log t = \frac{a}{T} + b \quad (3)$$

이 된다.

식(2), (3)에서 a 와 ΔH_a 를 산출할 수 있다. 가열조건을 변화시켜 측정하고 外插法으로 어느 온도에서의 수명 혹은 내열시간을 결정하면 상온에서의 수명을 추정할 수 있다. 측정결과에는 그림 8과 같으며, 에폭시와 실리콘으로 구분되어 박막재료의 耐熱性和 수명은 습浸材料에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 수명곡면에서 온

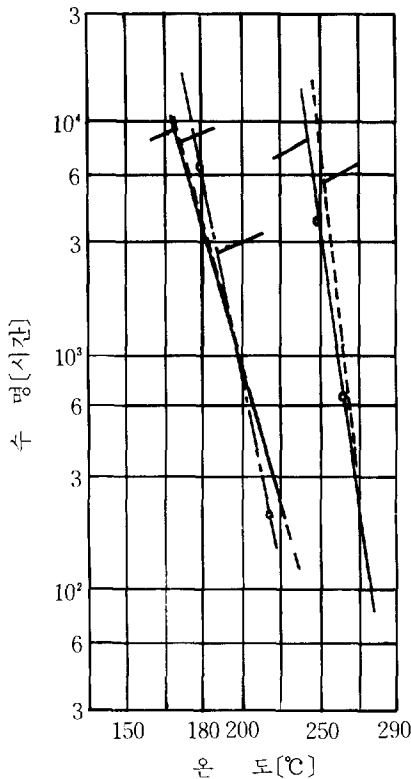


그림 8. Life-temperature relationships.

도가 일정할 때 절연파괴전압-시간특성을 V형 열화기구와 R형 열화기구를 대표하는 No.2와 No.3에 대하여 진동과 흡습이 없을 때의 것은 그림 9와 같다.

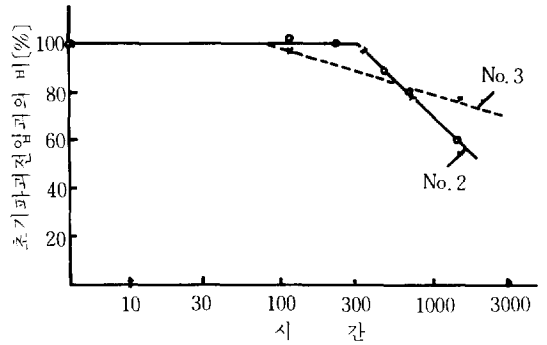


그림 9. An example of thermal aging characteristics of Motorettes' breakdown voltage.

No. 2는 그림 8과 그림 9의 결과가 거의 일치하는 값을 나타내는데 No.3는 상당한 차이를 나타낸다. 즉 熱分解揮散形劣化를 하는 No.2는 振動條件이 변해도 내열수명에 영향이 없지만 고온에이징에 의해 분자구조가 대단히 치밀해지는 R형과는 차이가 크다. 따라서 R형 열화기구는 단순하지 않으며 사용조건 등의 여러 요인이 내열수명에 영향을 끼치므로 정량적으로 수명을 추정하기는 어렵다.

3.2 熱劣化의 형태

V형, R형의 전기절연 열화기구는 다르지만 근원은 화학적 변화에 있으므로 고온으로 되면 열화는 가속화될 것이다. 그림 8은 수명의 평균치와 온도사이의 관계인데 수명시험의 경과를 Weibull分布로 해석해 보자.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^m}{t_0^m}\right) \quad (4)$$

$F(t)$: 故障累積函數

t_0 : 평균수명, m : 정수

Weibull분포는 신뢰성 관리에 중요하며 $m < 1$ 은 초기불량, $m = 1$ 은 우발고장, $m \geq 2$ 일 때는 식(4)의 정규분포를 나타내는 마모수명을 나타내는데 매우 유용하다. 그림 10은 No.4 절연시스템

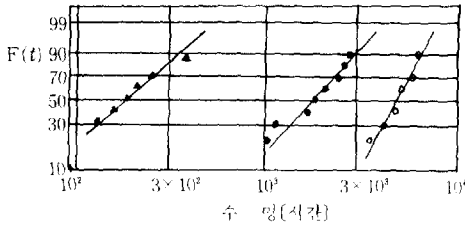


그림10. An example of proceedings of life test by weibull chart.

의 시험결과를 나타낸 것이다.

따라서 V형 열화기구는 고온에서 함침재료가 熱分解揮散하여 수명이 결정되고, R형 열화기구는 저온에서 기계적 피로가 나타나며 고온으로 되면 화학적 변화와 기계적 조건의 상승적 작용에 의해서 확률적으로 수명이 결정된다고 볼 수 있다.

4 結 論

1) 전기기기의 절연설계는 사용조건에 따라 硬化性 材料和 軟化性 材料의 선택이 중요하다.

2) 절연시스템의 연구중에서도 수명곡면을 구하는 것은 대단히 어려우나 기기의 효율, 신뢰성 향상을 위해 필요하고, 재료 및 시스템의 열화요인의 규명과 비파괴 시험으로 정확히 추정할 수 있는 기술도 연구되어야겠다.

3) 열적 열화요인은 여러가지가 있으며, 이들의 종합적인 고려에 의한 내열수명의 판정은 곤란하지만 각각의 기본 구성재료 특성의 해석을 위한 기초연구가 필요하다.

4) 전기기기의 절연설계에서 재료의 구성은 대단히 중요하므로 특히 함침재료에 대한 고려가 필요하며, 본 자료는 기기나 각종 부품의 合成樹脂絶緣材料의 절연설계에 많은 참고가 될 것이다.

參考文獻

- 1) AIEE No. 511 : Prospected Sest Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for A.C Electric Machinery Empolozing Form-wound Pre-insulated Stator Coil. 10. (1956)
- 2) T. W. Dakins ; AIEE Trans Part. I. 67, 113 (1948).
- 3) L. Simoni ; IEEE Trans. EI-8, No.3. 76~86, (1973)
- 4) E. M. Forst et el ; IEEE 1975 E/EIC, 143-146, (1975)
- 5) Nelson, W ; IEEE Trans. on Reliability, vol. R-21, P. 2, (1972)
- 6) 田中, 内尾, 荻久保 : "絶緣モラルの 耐熱壽命" 生産と電気 vol. 20, No.9, P. 33.
- 7) 井關, 他 : 第4回絶緣材料 シンポジウム, III-4 (1971)