

## 유리섬유강화 복합절연재료의 열화특성에 관한 연구

박홍태 · 김경석 · 유근민 · 이규철  
전기공학과

### <요 약>

본 연구에서는 주위 환경 열화에 따른 복합절연재료의 절연특성과 수명을 향상시키기 위해 고온에서 흡습량을 변화시켰을 때와 탈습량을 변화시켰을 때 흡습시료와 탈습시료의 전기적 특성 및 기계적 특성을 조사하였다. 유리섬유 각층의 흡습상수는 각각 1층에서 0.0117, 2층에서 0.0123, 3층에서 0.0152를 나타냈다. 전기적 특성 및 기계적 특성은 복합재료의 흡습에 따라 크게 떨어졌다. 70°C에서 습기가 완전히 건조되어도 흡습전의 전기적 및 기계적 특성을 얻기가 어려운 것으로 나타났다. 수분에 의해 발생한 복합절연재료내에 존재하는 많은 결함들은 에폭시 매트릭스와 필라사이에 존재하였다.

---

## A Study on the Aging Characteristics of the Glass-Fiber Reinforced Composite Insulating Materials

Hong-Tae, Park · Kyeng-Suk, Kim · Gun-Min, Yu · Kyu-Chul, Lee  
Department of Electrical Engineering

### <Abstract>

The electrical and mechanical properties of moisture absorbed and moisture desorbed specimens were investigated to improve the insulating characteristics and the reliability of composite materials against environment aging. Moisture absorption constants with

the layers of glass fiber showed 0.0117 in 1 layer, 0.0123 in 2 layer and 0.0152 in 3 layer, respectively. Although moisture was removed at 70°C, it was impossible to obtain the initial electrical and mechanical properties. Many defects induced by moisture were observed at the interface between epoxy matrix and filler in composite materials.

## 1. 서 론

최근 복합재료를 사용한 전기기기의 사용환경이나 운전조건의 다양화, 가혹화, 소형경량화 등 극단적인 요구가 많아지고 있다. 이와 같은 경우 전기기기의 운전 및 수명에 결정적인 영향을 미치는 것이 절연재료분야이다.<sup>[1]</sup>

일반적으로 복합재료의 매트릭스(matrix)로는 유기고분자중에서도 점도, 경화시 수축, 경화의 용의성 및 경화후의 전기적, 열적 화학적 측면에서 가장 안정되고 접착력이 뛰어난 에폭시 수지가 널리 사용되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 그러나 이러한 에폭시 수지를 매트릭스로 사용한 복합재료에 있어, 에폭시 수지는 친수성 관능기를 가지고 있으므로 다습하에서 습기를 흡수하는 성질이 있고 특히, 고온에서의 열적 분해현상과 고온 다습하에서의 전기적 절연 특성 및 기계적 인장특성이 현저하게 변화한다고 알려져 있다.<sup>[1,3]</sup>

최근의 복합재료의 환경열화에 대한 연구로 夏目文夫, 赤堀秀夫 등<sup>[4~6]</sup>은 마이카/에폭시 복합재료에 열적·전기적 복합스트레스를 가한 후, 시간변화에 대한 전기적 절연특성 및 기계적 인장특성과 이들 시료의 중량감소에 관한 실험적 결과를 이론적 해석으로 그 상관관계를 보고하였으며, Mandel, Seymour 및 Fesko 등<sup>[7~9]</sup>은 습기량에 따른 기계적 인장특성 및 중량의 변화특성에 관한 연구를 하였다. 또한 Shen과 Springer 등<sup>[10~12]</sup>은 복합재료 내부의 수분이동 현상을 Fick's 법칙 및 복합법칙을 기초로한 이론적 해석결과와 실험적 결과가 아주 양호하게 일치한다고 보고하였다. 그리고 Whitney, Shirrell 등<sup>[13,14]</sup>은 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)의 물리적인 관점에서 흡수에 관한 연구를 행하였다. 그러나 이와 같은 연구는 흡습시료의 기계적 특성과 이론적인 해석에 관한 연구가 대부분을 이루고, 유전특성과 전기적 절연특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 복합재료의 주위환경 열화에 따른 절연평가와 신뢰성을 향상시키기 위한 목적으로 전기기기 및 극저온 기기의 절연재료로 사용되고 있는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)를 제작하여 고온에서 흡습량을 변화시켰을 때와 흡습시료를 탈습시켰을 때 즉, 탈습시료의 전기적 특성 및 기계적 특성을 측정하여 복합절연재료의 제반 특성변화를 명확하게 규명하고, 이러한 결과들을 분석, 검토하여 복합재료의 절연평가 및 흡습기구를 규명하고자 한다.

## 2. 시료제작 및 실험방법

### 2.1 복합재료 시료제작

본 연구에 사용되어진 Glass-cloth/Epoxy 복합재료의 필라로서 E종 평직 유리섬유(Plain weave glass cloth, WEA 116 E107, 原反社:Japan)를 사용하였으며, 유리섬유의 층간 조합형태는 각 층의 조직과 같은 방향으로 하였다. 이러한 유리섬유를 400℃로 유지된 전기로내에서 약 30분간 열처리하여 표면의 유기물질 및 이물질을 제거하고, 표면을 에폭시계 실란 결합제(epoxy silane coupling agent, S510, Chiso Co)로 처리한다. 유리섬유의 표면에 처리된 실란결합제는 알코올 용액의 무게에 대한 실란결합제의 무게비 0.3wt%를 용해시킨 용액이다. 즉, 전기로내에서 표면처리된 유리섬유를 0.3wt% 실란 결합제에 함침시킨 후, 진공 시스템( $10^{-3}$  torr, 주위온도:100℃)내에서 약 10분간 유지하여 건조시킨다. 표면처리가 끝난 유리섬유를 상온에서 1차적으로 보이드가 제거된 에폭시 수지(Stycast 1266:Japan)에 함침하여 진공 시스템내에서 약 30분간 2차적으로 보이드를 판상으로 몰드하여 본 연구실에서 제작한 시료제작장치<sup>[15]</sup>를 이용하여 에폭시 수지의 겹화점 부근에서 약 0.5[MPa]로 가압하여 상온에서 24시간 초기 경화를 행하였다. 초기 경화가 끝난 시료를 90℃에서 약 2시간 후기 경화를 행하였다. 이때, 제작된 시료의 크기는  $10\text{cm} \times 200\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$ 로 하였다. 그리고 복합재료내의 유리섬유 함유량은 1층일 때 45%, 2층일 때 55%, 그리고 3층일 때는 75%로 나타났다.

## 2.2 흡습 및 탈습시편 제작

초기 경화만 행한 시료와 후기 경화를 행한 시료를 본 연구실에서 제작한 그림 1과 같은 고온 다습장치(주위온도 70℃:상대습도 90%)를 이용하여 흡습시간에 따른 흡습시편을 만들었고, 이러한 흡습시편을 70℃로 유지된 전기로내에서 탈습시간에 따른 탈습시편을 만들었다.

## 2.3 실험방법

흡습 및 탈습시편을 이용하여 다음과 같은 실험을 행하였다.

- (1) 에폭시 수지와 복합재료의 흡습량 및 탈습량 변화특성
- (2) 흡습 및 탈습시의  $\tan \delta$  와  $\epsilon_r$  특성
- (3) 흡습 및 탈습시의 교류 및 직류 절연강도 특성
- (4) 흡습 및 탈습시의 기계적 인장강도 특성
- (5) 흡습시료의 내부구조 관찰
- (6) 절연파괴 및 인장파단면의 특성관찰

시료의 유전정접( $\tan \delta$ ) 및 비유전율( $\epsilon_r$ )측정은 Precision  $\tan \delta$  & C Bridge Meter(Tettx AG. Inst. Type 2821)를 사용하였다. 그리고 절연파괴 강도특성은 시험용 변압기(200V/100kV)를 이용하여 단계승압법으로 3[kV/sec]의 속도로 교류 및 직류전압을 인가하여 측정하였으며, 전극은 구-평판 전극으로 고압측의 전극은 직경이 5[mm]인 베어링 장구를 이용하였으며, 절연파괴시에 불규칙 파괴를 방지하기 위하여 전극주위에 에폭시 수지로 몰드한 전극을 사용하였다. 인장강도 특성은 Instron(model:6602, Japan)을 사용하였고, 인장시편의 표준거리는 25[mm], 중심폭은 6[mm]로서 크로스-헤드(cross-head)의 속도는 2[mm/min]으로 하였다. 이 경우 5개 시편의 결과치를 평균하여 인장강도 값으로

나타내었다. 그리고 복합재료의 파단면 관찰은 전자현미경(Scanning Electron Microscope, JEOL, JSM-826:Japan)으로 하였다. 그리고 복합재료에 있어 흡습재료의 내부구조 관찰은 편광 현미경(Polarized Microscopic, Nikon, LABOPH-OTPOL:Japan)과 광학현미경(Optical Microscope, Nikon, METPOT:Japan)을 사용해서 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 에폭시 수지와 복합재료의 흡습 및 탈습량 변화특성

그림 2는 초기 경화를 행한 에폭시 수지와 90℃에서 2시간 동안 후기 경화를 행한 에폭시 수지에 있어, 흡습 및 탈습시간에 따른 흡습량과 탈습량의 변화특성을 나타내고 있다. 이때 흡습 및 탈습시료에 대한 흡습량 측정은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$M[\%] = \frac{\text{흡습시료의무게} - \text{탈습시료의무게}}{\text{탈습시료의무게}} \times 100$$

이 그림에서 흡습결과는 시료의 종류에 상관없이 초기에는 흡습시간에 따라 흡습량이 서서히 증가한 다음, 일정시간후 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 이때, 초기 경화만 시킨 시료는 약 8시간, 후기 경화를 행한 열처리 시료는 약 11시간 이후부터 일정한 값에 도달하고, 초기 경화 시료가 후기 경화 시료보다 수분 흡습량이 적음을 알 수 있다.

한편 탈습결과에서 초기에는 시간에 따라 탈습량이 서서히 증가한 후, 일정한 값에 도달함을 알 수 있고, 초기 경화시료가 후기 경화시료보다 탈습량이 많음을 알 수 있다. 이러한 이유는 초기 경화시료가 탈습과정에서 흡습된 에폭시 수지내의 수분이 증발하는 동시에 시간반응이 일어나 매트릭스내 3차원적 망목상 가교구조가 증가하고 더불어 자유체적이 감소하므로써 밀도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

그림 3은 후기 경화를 행하지 않은 복합재료에 있어, 흡습 및 탈습 기간에 따른 흡습량과 탈습량의 변화특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 흡습량의 순서는 3층, 2층, 1층의 순으로 나타나며, 1층 시료는 약 5시간, 2층 시료는 약 12시간, 3층 시료는 약 15시간 이후부터 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 이러한 이유는 복합재료내의 유리섬유 함유량에 커다란 영향을 받고 있는 것으로 생각되며, 이는 수분이 유리섬유를 따라 침투하는 율이 에폭시 수지를 따라 침투하는 율의 100~400배 정도 빨리 침투하기 때문인 것으로 생각된다.[7.12] 한편 탈습량도 3층, 2층, 1층의 순으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 이러한 경향도 복합재료의 유리섬유 함유량에 커다란 영향을 받고 있음을 알 수 있고 매트릭스인 에폭시 수지의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.

일반적으로 습기가 있는 주위환경에 노출된 시료의 최대습기량은 다음과 같은 식에 의존한다.

$$M_m = a\phi^b$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 시료에 의존하는 상수이며, 일반적으로  $a$ 의 값은 시료의 최대습기량에 의존하고,  $b$ 의 값은 거의 1이다.<sup>[16]</sup>

표 1은 에폭시 수지 및 복합재료의 흡습시 최대 습기량에 따른 흡습상수  $a$ 의 값을 나타내고 있다. 이 표에서 에폭시수지를 후기 경화를 행함으로서 흡습상수  $a$ 의 값이 커짐을 알 수 있다.

그림 4는 복합재료내에 수분침투 형상을 나타내고 있다. 이 그림에서 (a)는 복합재료에 있어 에폭시 수지내에 수분이 침투된 형상을 나타내고, (b)는 복합재료에 있어, 에폭시 수지와 유리섬유사이의 계면에 수분이 침투된 형상을 나타내고 있다. 일반적으로 수분은 에폭시 수지와 유리섬유사이의 계면에 존재하는 결합 그리고 유리섬유와 매트릭스 사이의 계면을 통해서 침투된다. 그러므로 위의 이러한 결과는 McNeil[17]의 연구결과와 거의 일치함을 알 수 있고, 에폭시 수지 및 복합재료내에 침투된 수분이 전기적 및 기계적 특성에 결정적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

표 1. 시료의 종류에 따른 흡습상수

Table 1. Moisture absorption constants for various specimens.

| 시료의 종류 |      | $M_a = a\phi^b (b=1)$ |
|--------|------|-----------------------|
|        |      | $a$                   |
| 에폭시수지  | 초기경화 | 0.0275                |
|        | 후기경화 | 0.0333                |
| 복합재료   | 1층   | 0.0117                |
|        | 2층   | 0.0123                |
|        | 3층   | 0.0152                |

### 3.2 흡습 및 탈습시료의 $\tan \delta$ 와 $\epsilon_r$ 특성

그림 5와 그림 6은 후기 경화를 행하지 않은 복합재료에 있어 흡습시간 및 탈습시간에 따른  $\tan \delta$  특성을 나타내고 있다. 이때, 측정전압은 1.0kV, 주파수는 60[Hz]로 하였다. 흡습시간에 따른  $\tan \delta$  특성은 시료의 종류에 상관없이 초기에는 서서히 증가한 후, 각 시료에 따라 최대값을 나타낸 다음 서서히 감소하는 경향을 나타내고, 일정시간 이후부터 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 그리고 탈습시간에 따른  $\tan \delta$  특성은 시료의 종류에 상관없이 초기에는 서서히 감소한 후, 약12시간 이후부터 일정한 값으로 됨을 알 수 있다. 이 그림에서 흡습초기에 수분 함유량이 증가하므로써  $\tan \delta$  값이 증가하는 이유는 소량으로 흡습된 수분이 일정 전계하에서 복합재료 내부에 전도성을 높여 줌으로써  $\tan \delta$  값이 증가하는 것으로 생각되며, 장시간 이후에는 복합재료 내부에 흡습된 수분량이 고루 분포되어 인가되어지는 외부전계를 완화시켜 주는 역할을 함으로써  $\tan \delta$ 의 최대값 이후 서서히 감소하여 일정한 값에 도달하는 것으로 생각된다.

그림 7과 그림 8은 후기 경화를 행하지 않은 복합재료에 있어, 흡습 및 탈습시간에 따

른  $\epsilon_r$  특성을 나타내고 있다. 흡습시간에 따른  $\epsilon_r$  특성은 시료의 종류에 상관없이 서서히 증가하여 19시간 이후부터 일정한 값으로 나타나며, 그 범위는 6.0~8.0정도로 나타나고, 탈습시간에 따른  $\epsilon_r$  특성은 약 6시간 이후 거의 일정한 값으로 나타나며, 그 범위는 약 3.5~4.5 범위임을 알 수 있다. 또한 그림에서 흡습되기 전 시편의  $\epsilon_r$  값과 탈습 후의  $\epsilon_r$  값이 차이가 나타났으며 이러한 이유는 탈습 후 복합재료를 형성하는 에폭시 수지자체에 망목상 구조상의 결합 증가, 또는 계면상의 계면 분리 혹은 크랙 등이 증가함으로써<sup>[18,19]</sup> 시료자체의 상대 정전용량이 감소하여 나타나는 현상인 것으로 생각된다.

### 3.3 흡습 및 탈습시 전기적 절연특성

그림 9와 그림 10은 복합재료에 있어, 흡습시간에 따른 교류 및 직류 절연강도특성을 나타내고 있다. 이들 그림에서 절연강도특성은 흡습시간 초기에는 시료의 종류에 상관없이 일정시간까지 감소하는 경향을 나타내고, 이 시간 이후부터 서서히 증가하여 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 즉, 각 시료의 흡습시간에 따라 절연강도값이 최대로 나타나는 시간은 시료자체의 수분흡습 시간특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 복합재료의 층수가 증가할수록 계면상의 결합이 증가함으로 인가전압의 종류에 상관없이 절연강도값이 떨어짐을 알 수 있다. 특히, 복합재료의 직류 절연강도특성이 교류 절연강도특성보다 낮게 나타나는 특이한 현상을 볼 수 있는데, 이러한 이유는 복합재료내에 침투한 수분의 영향인 것으로 생각되며, 복합재료에 직류가 인가됨으로서 순간적으로 복합재료내에 분포되어 있는 미세수분들이 대전현상을 일으켜 전극주위로 모여들어 전도전자의 교량역할을 해줌으로서 직류 절연강도가 낮아지는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 그림 15의 직류전압 인가시의 절연과괴 형상에서 유추해 낼 수 있는 것으로 생각된다.

그림 11은 후기 경화를 행하지 않은 복합재료에 있어 탈습시간에 따른 교류 절연강도특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 시료에 상관없이 초기에는 탈습시간에 따라 약간 감소하다가 일정시간 이후부터 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 탈습과정과 더불어 2차 경화가 행해지므로서 복합재료내에 미반응기의 감소, 3차원적 망목상구조의 증가로 인하여 분자간 결합력이 흡습시 보다 증가하여 분자간 구조가 치밀해지고 또한 전자의 평균 자유행정거리를 짧게 하기 때문에 절연강도 특성이 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 이러한 절연강도특성은 복합재료가 수분이 흡습되기 전의 절연강도특성에 미치지 못함을 알 수 있다. 즉, 탈습이 되더라도 에폭시 수지자체에 열화의 척도를 나타내는 COOH기와 COH기가 증가하고, 탈흡습후 계면상의 결합증가등으로 인하여 흡습되기 전의 절연강도특성에 도달하지 못하는 것으로 생각된다.

그림 12는 후기 경화를 행하지 않은 복합재료에 있어 탈습시간에 따른 직류 절연강도특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 1층 시료는 초기에는 탈습시간에 따라 약 2시간까지는 약간 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있으며, 2층과 3층 시료에 대해서는 탈습시간과 더불어 절연강도가 증가한 후, 일정시간 이후부터는 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 결과에서도 마찬가지로 흡습전 복합재료의 직류절연강도특성에 이르지 못함을 알 수 있다.

그림 13은 후기 경화를 행한 복합재료에 있어 흡습시간에 따른 교류 및 직류 절연강도특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 교류나 직류 절연강도특성은 시료의 종류에 상관없이

초기에는 서서히 감소한 후, 일정시간 이후부터 서서히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 흡습초기에는 수분의 영향으로 절연강도 값이 서서히 감소한 후 일정 흡습시간 이후부터는 절연체내에 수분이 골고루 분포되어 이것이 전계에 영향을 미치게 되어 절연강도값이 증가하는 것으로 생각된다. 그리고 교류 절연강도값이 직류 절연강도값보다 높게 나타났으며, 이러한 결과는 그림 9와 그림 10에서 나타난 결과의 고찰과 같은 것으로 생각된다.

그림 14는 후기 경화를 행한 복합재료에 있어, 탈습시간에 따른 교류 및 직류 절연강도 특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 교류 절연강도는 시료에 상관없이 초기에는 약간 감소하다가 일정시간 이후부터는 다시 증가하고 있음을 알 수 있고, 직류 절연강도는 초기에는 탈습시간과 더불어 증가한 후, 12시간 이후부터는 거의 일정한 값으로 나타나고 있다. 그리고 직류 절연강도특성이 교류 절연강도특성보다 높은 절연강도값을 나타내고 있다. 이러한 이유는 후기 경화가 행해진 복합재료이므로 에폭시 수지 자체의 미반응기의 영향은 완전히 배제되고, 순수한 전극주위의 공간전하효과에 의한 것으로 생각된다. 그러나 직류 및 교류 절연강도값이 흡습된 복합재료의 직류 및 교류 절연강도값보다 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉 이러한 이유는 탈습이 완전히 되더라도 복합재료를 형성하고 있는 에폭시 수지의 구조상 변화 및 에폭시 수지와 유리 섬유사이의 계면상 결합등이 생겨났음을 의미하고 있다.

그림 15는 복합재료에 있어 절연파괴후의 절연파괴 형상을 보여주고 있다. 이 그림에서 직류 및 교류 절연파괴 형상에서 복합재료의 절연파괴는 전기적·열적파괴인 것으로 생각되며 특히, 흡습시의 직류 및 교류 파괴는 흡습된 수분이 절연파괴에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 파괴 흔적주위에 물방울이 응집된 형상으로 볼 수 있으며, 이는 직류 전압인가시 순간적으로 복합재료 내부에 분포되어 있는 수분이 전극주위로 응집되어 절연파괴에 어떠한 영향을 미치는 것으로 생각된다.

### 3.4 흡습 및 탈습시의 기계적 인장특성

그림 16과 17은 복합재료에 있어 흡습 및 탈습시간에 따른 인장강도 특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 흡습시간에 따른 인장강도 특성은 약 6시간 까지는 급격하게 감소한 후, 그 이후부터는 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 그리고 탈습시간에 따른 인장강도 특성은 탈습시간과 더불어 급격하게 증가하는 특성을 보인후 각 시료에 따라 일정시간 후에 최대값을 나타낸 후 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 그림에서 탈습에서의 인장특성은 전기적 특성과 유사한 특성을 나타내고 있으며, 완전히 탈습이 된 후에도 복합재료의 본래의 기계적 인장강도 특성에 도달하지 못함을 알 수 있다. 즉 이러한 이유는 흡습 후의 시료내부에 에폭시 수지자체의 열화현상, 에폭시 내부와 유리섬유 사이의 계면 결합력 약화 혹은 상실 등의 영향인 것으로 생각된다.

그림 18은 복합재료의 유리섬유층을 단층으로 제작하여 섬유축 방향으로 하였을 때, 흡습전 그리고 흡습후 복합재료의 파단면의 형상을 나타내고 있다. 이들 파단면의 형상에서 알 수 있듯이 흡습전과 흡습후의 유리섬유에 입혀진 에폭시 수지의 형상이 현저하게 차이가 남을 알 수 있고, 이러한 차이가 기계적 인장특성 및 전기적 절연특성에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

미열처리 및 열처리한 유리섬유 강화 복합재료를 흡습 및 탈습 시킨 후, 전기적 특성 및 기계적 특성 시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1. 복합재료의 전기적 및 기계적 특성에 결정적인 인자로 나타나는 흡수상수  $a$ 는 에폭시 수지를 열처리하므로써 높게 나타남을 알 수 있고, 복합재료에 있어서는 유리섬유의 층수가 증가할수록 높게 나타났다.
2. 복합재료내 흡습량이 증가할수록  $\tan \delta$ 의 값은 낮아지고 반면 탈습량이 증가할수록  $\tan \delta$ 의 값은 높아짐을 알 수 있었다. 흡습시  $\epsilon_r$ 특성은 대략 6.0~8.0정도의 범위이고, 탈습시  $\epsilon_r$ 특성은 대략 3.5~4.5정도이다. 그러나 탈습시  $\epsilon_r$ 특성은 흡습되기 전의  $\epsilon_r$ 특성보다 약 12%정도 낮은 것으로 나타났다.
3. 흡습시 복합재료의 절연강도특성은 교류 절연강도가 직류 절연강도보다 약 17%정도 높게 나타남을 알 수 있었고, 흡습된 시료를 탈습시켜도 흡습되기 전 절연강도 값의 약 80%정도에 도달함을 알 수 있었다.
4. 흡습시 복합재료의 인장강도 특성은 수분 흡습과 더불어 급격하게 떨어짐을 알 수 있었고 탈습시 인장강도 특성은 탈습시간과 더불어 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 흡습전 복합 재료의 인장강도특성의 약 75%정도 도달함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. E. Pink and J. D. Campbell, "Deformation Characteristics of Reinforced Epoxy Resin", J. Master, Sci. Vol.9, pp.658-664, 1974.
2. J. W. Johnson, "Resin Matrices and their Contribution to Composite Properties" Phil. Trans. Roy. Soc., London, A294, pp.487-494, 1980.
3. H. Lee and K. Nevile, "Epoxy Resin" McgrowHill Co., 1957.
4. 夏目文夫, 前田孝人, "マイカ絶縁の熱 および 電壓ストレスに複合劣化" EMI-78, (41), pp. 1-8, 1987.
5. 赤堀秀夫, 三井久安, "エホキツマイカ絶縁の熱と電氣による複合劣化の 解析" EMI-78, (42), 1-10, 1978.
6. 高倉康一, "高壓回轉機コイル絶縁組織の 複合劣化 要因解析" EMI-78, 43, 1-10, 1978.
7. J. F. Mandwell, "Origin of Moisture Effect on Crack Propagation in Composite" Poly. Eng, and Sci. Vol. 19. No.5, pp. 353-358, 1079.
8. A. B. Seymour, "The Role of Reinforcement in Plastic Technology" Roly. Eng. 70(1), pp.49-79, 1976.
9. D. G. Fesko, "Flexural Fatigue of Unidirectional Fiber-Glass Reinforced Polyester" Roly. Eng. & Sci. Vol. 11, pp.107-122, 1971.
10. G. S. Springer, Journal of Composite Materials, Vol.11, pp.107-122, 1971.
11. C. H. Shen and G. C. Springer, Journal of Composite Materials, Vol.10, pp.2-20, 1976.



12. C. D. Shirrell, "Diffusion of Water Vapor in Graphite/Epoxy Composites" Advanced Composite Materials-Environmental Effect, ASTM STP, JR. Vinson, Ed., American Soc. for Testing and Materials, pp.21, 1978.
13. J. M. Whitney and C. E. Browning, "Advanced Composite-Materials Environmental Effect", ASTM STP, JR. Vinson, Ed., American Soc., for Testing and Materials, pp.43-60, 1978.
14. C. D. Shirrell, "Advanced Composite-Materials Environmental Effect", ASTM STP 658, AM. Soc., for Testing and Materials, pp.21-42, 1978.
15. J. H. Lee, "A Study on the Dielectric Properties of Mica/Epoxy Composite Insulating Materials", ph. D. Thesis, PNU, 1987.
16. C. D. Shirrell, "Diffusion of Water Vapor in Graphite/Epoxy Composites" Advanced Composite Materials-Environmental Effect, ASTM STP, JR. Vinson, Ed., American Soc. for Testing and Materials, pp.21, 1978.
17. W. D. McNeil, B. Bennett and R. I. Leininger, Proc. 19th Ann. Tech. Conf. Reinforced Plast. Div., SPI, Sec. 11-B, 1964.
18. D. Hull, "An Introduction to Composite Materials" Cambridge Univ. Press, 1982.
19. 久保輝外, "複合材料の界面" 統合技術出版, 1986.

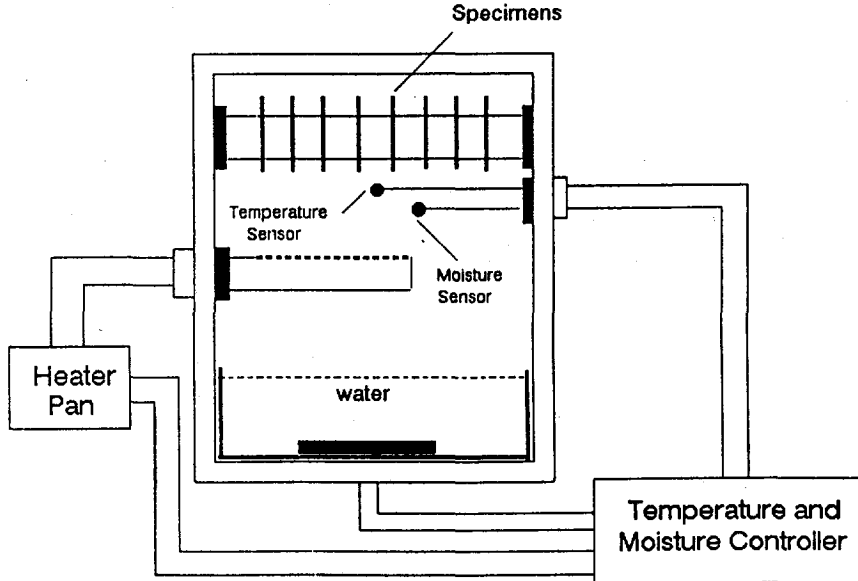


그림 1. 고온·다습장치

Fig. 1. Apparatus of high-temperature and high-moisture.

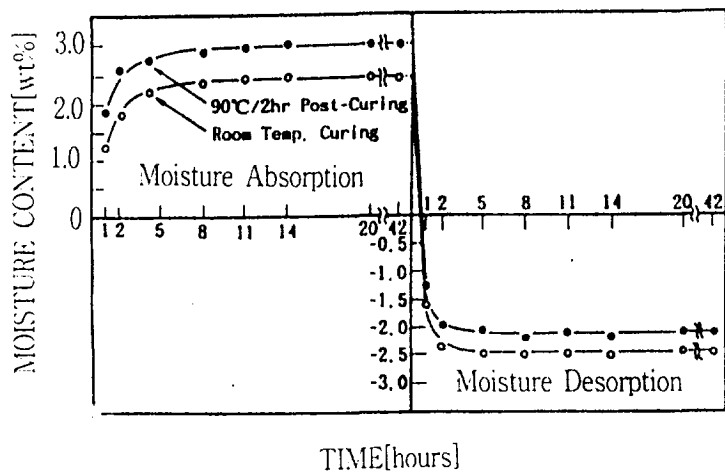


그림 2. 에폭시수지에 있어, 시간-흡습량 및 탈습량 특성

Fig. 2. The effect of moisture absorption and desorption wt% on time in epoxy resin.

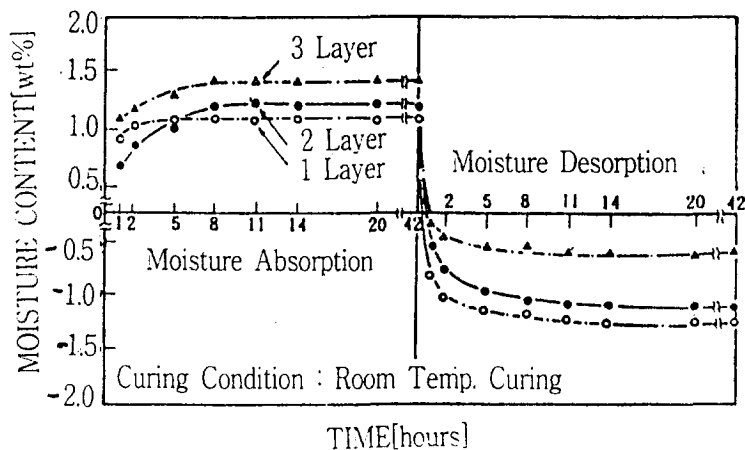
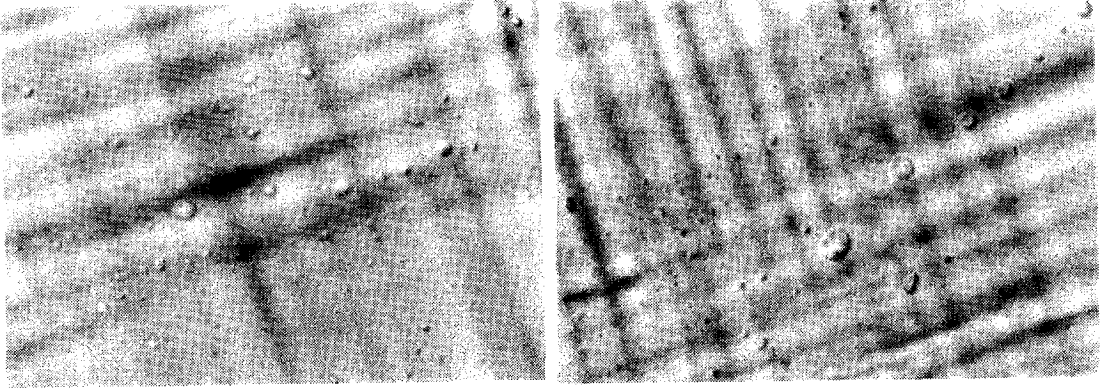
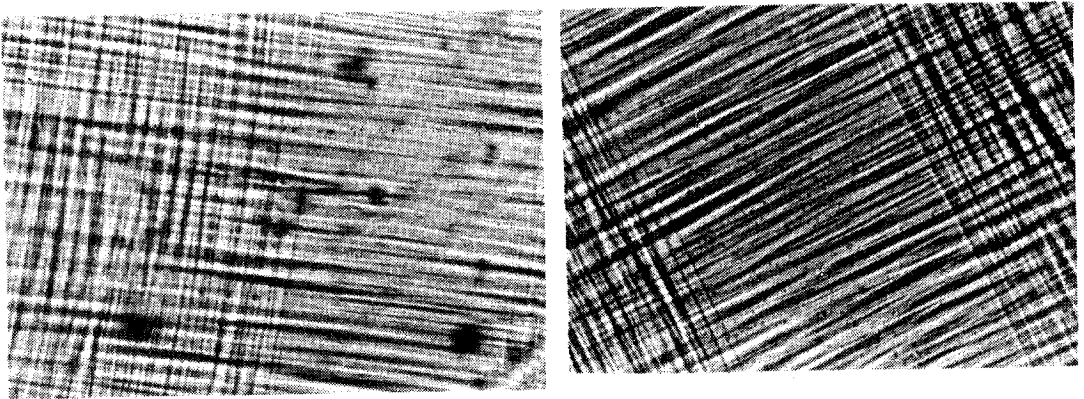


그림 3. 복합재료에 있어, 시간-흡습량 및 탈습량 특성

Fig. 3. The effect of moisture absorption and desorption wt% on time in composite materials.



(a) 에폭시수지 자체



(b) 에폭시수지와 유리섬유사이의 계면

그림 4. 복합재료에 수분이 침투된 형상

Fig. 4. Configuration of penetrated moisture in composite materials.

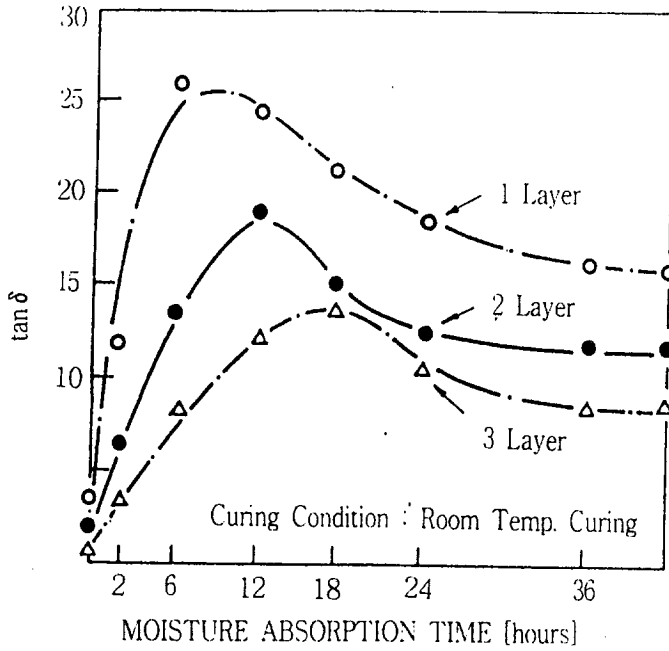


그림 5. 복합재료에 있어, 흡습시간-  $\tan \delta$  특성

Fig. 5. Moisture absorption time -  $\tan \delta$  characteristics of composite materials.

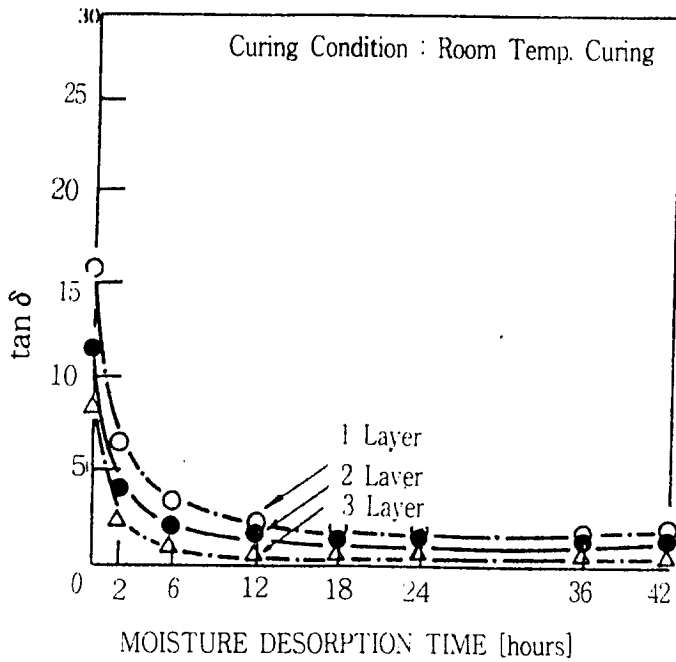


그림 6. 복합재료에 있어, 탈습시간-  $\tan \delta$  특성

Fig. 6. Moisture desorption time -  $\tan \delta$  characteristics of composite materials

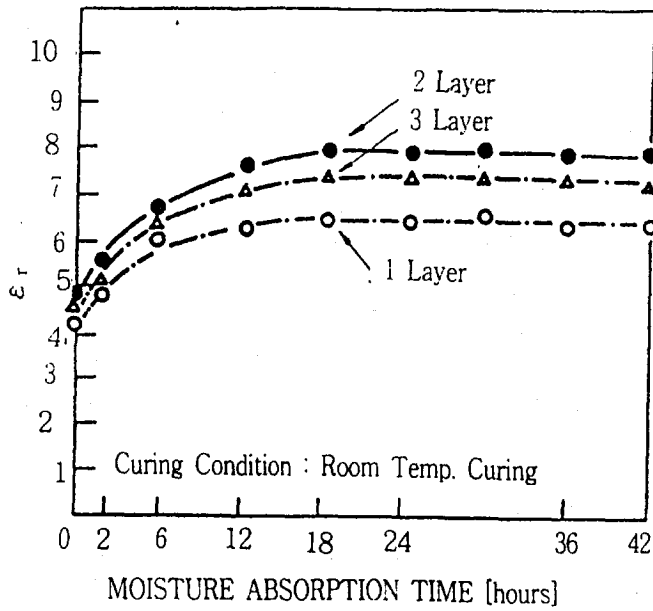


그림 7. 복합재료에 있어, 흡습시간- $\epsilon_r$  특성

Fig. 7. Moisture absorption time -  $\epsilon_r$  characteristics of composite materials

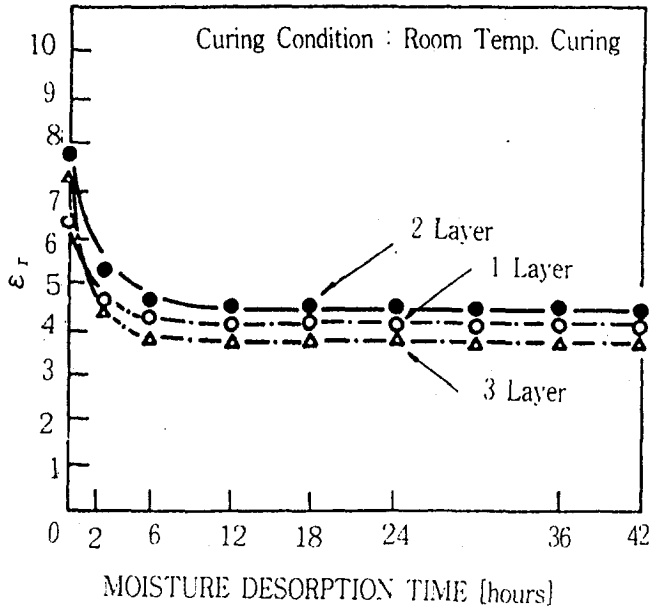


그림 8. 복합재료에 있어, 탈습시간- $\epsilon_r$  특성

Fig. 8. Moisture desorption time -  $\epsilon_r$  characteristics of composite materials

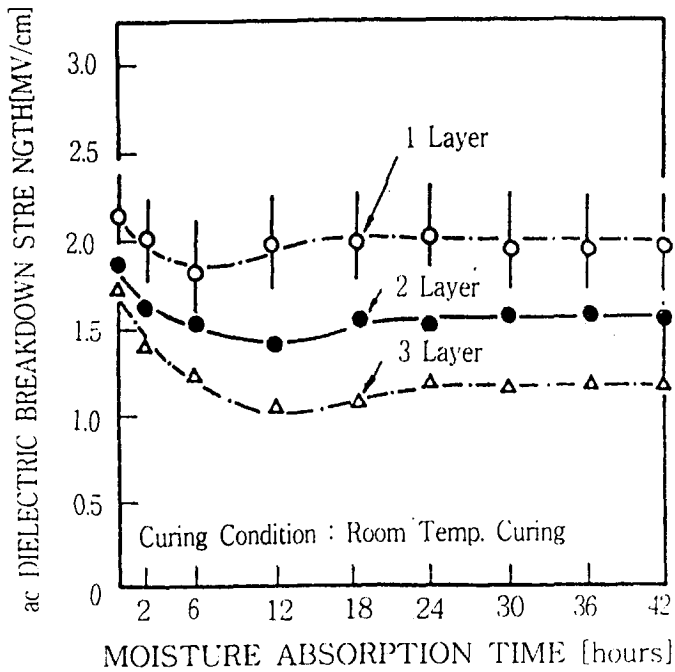


그림 9. 복합재료에 있어, 흡습시간-교류 절연강도특성

Fig. 9. Moisture absorption time - ac dielectric breakdown strength characteristics of composite materials

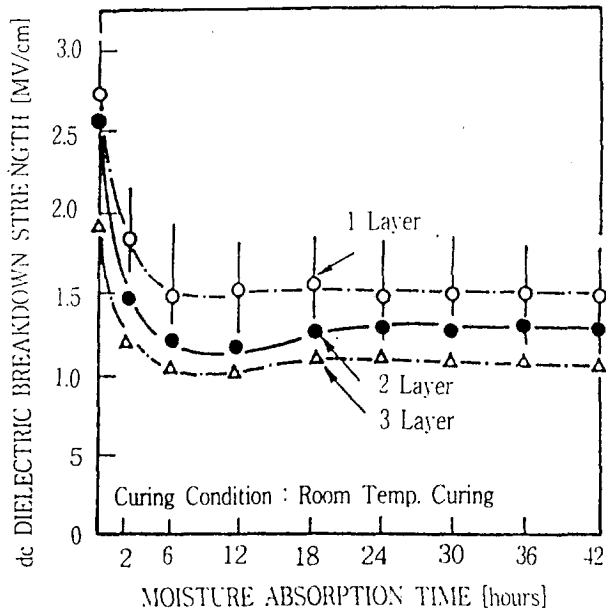


그림 10. 복합재료에 있어, 흡습시간-직류 절연강도특성

Fig. 10. Moisture absorption time - dc dielectric breakdown strength characteristics of composite materials

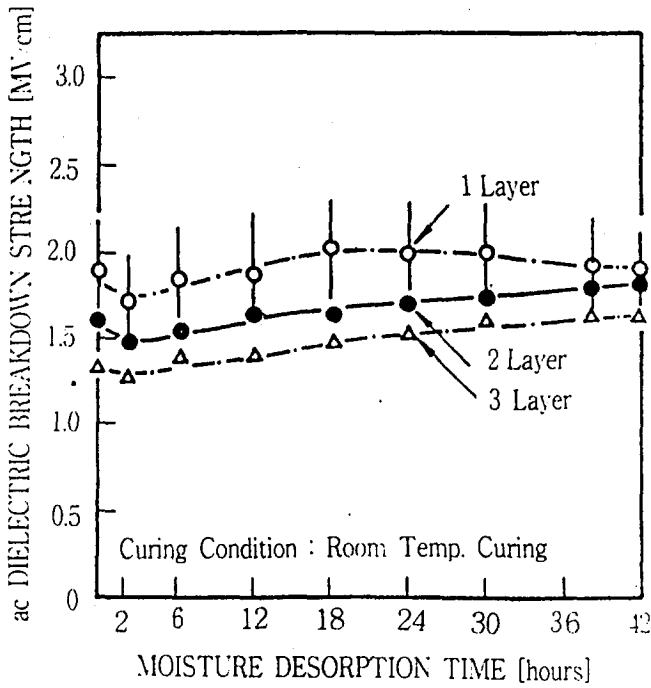


그림 11. 복합재료에 있어, 탈습시간-교류 절연강도특성

Fig. 11. Moisture desorption time - ac dielectric breakdown strength characteristics of composite materials

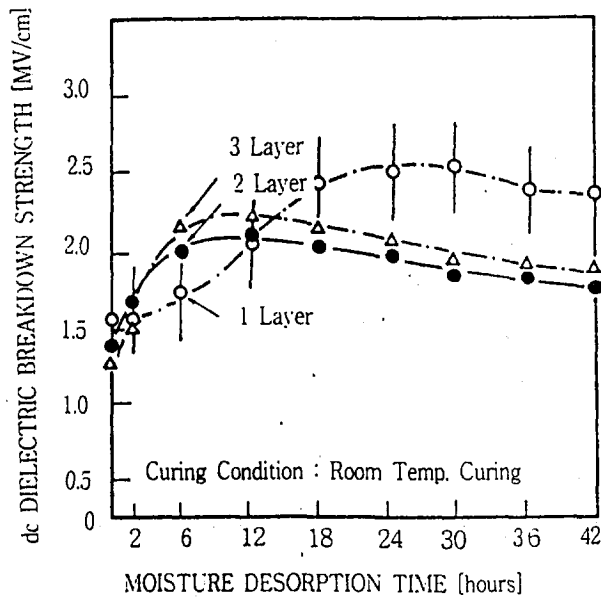


그림 12. 복합재료에 있어, 탈습시간-직류 절연강도특성

Fig. 12. Moisture desorption time - dc dielectric breakdown strength characteristics of composite materials

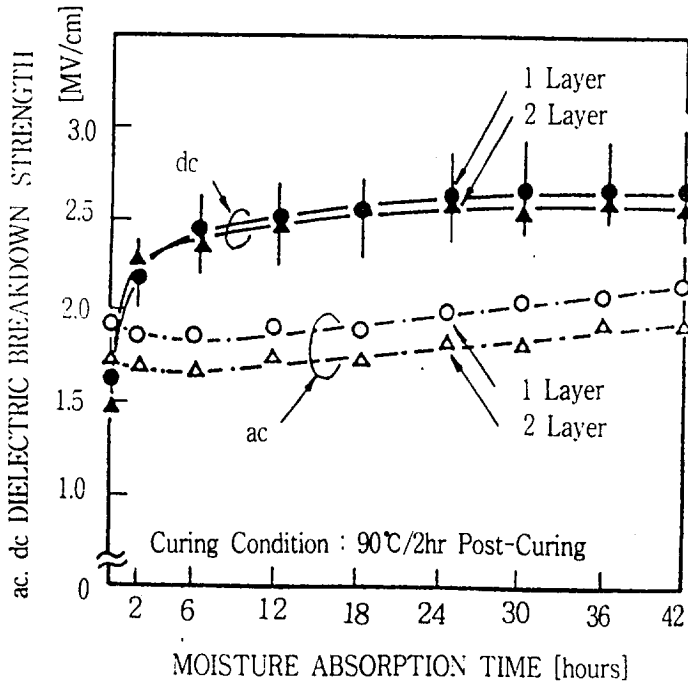


그림 13. 복합재료에 있어, 흡습시간-교류 및 직류 절연강도특성  
 Fig. 13. Moisture absorption time - ac and dc dielectric breakdown strength characteristics of composite materials

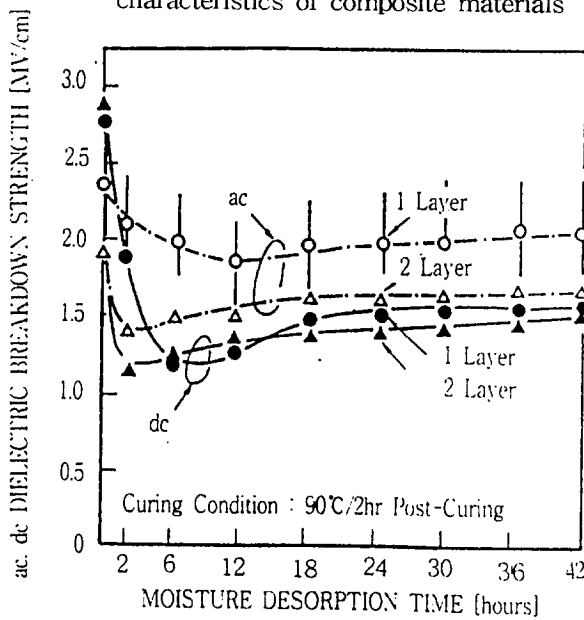
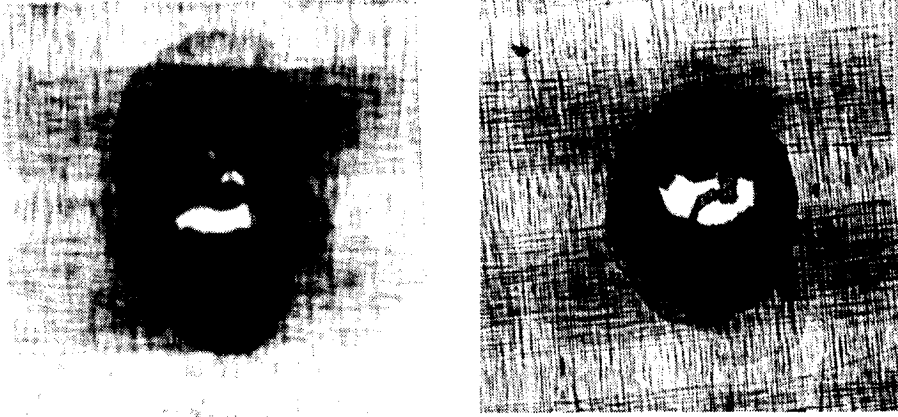
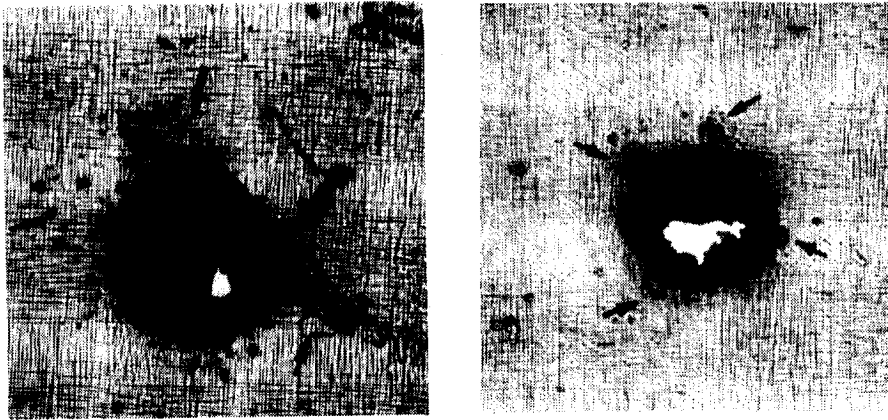


그림 14. 복합재료에 있어, 탈습시간-교류 및 직류 절연강도특성  
 Fig. 14. Moisture desorption time - ac and dc dielectric breakdown strength characteristics of composite materials





(a) ac전압



(b) dc전압

그림 15. 복합재료의 절연파괴 형상

Fig. 15. Dielectric breakdown configuration of composite materials.

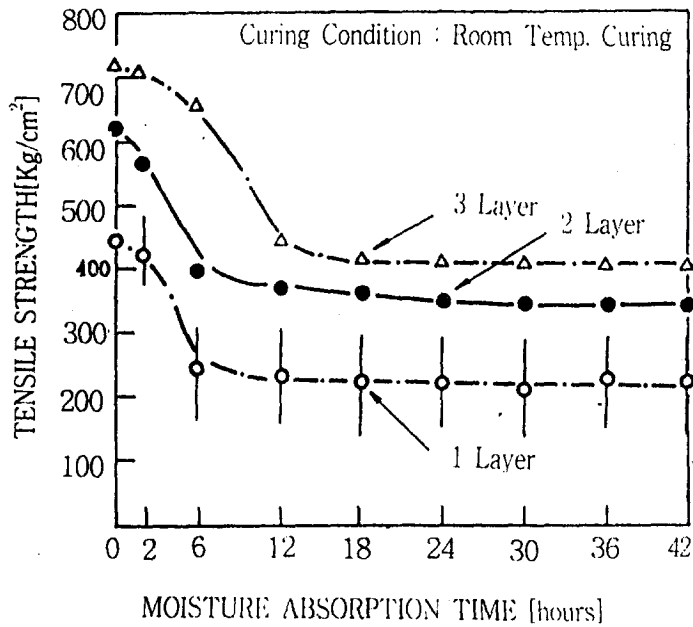


그림 16. 복합재료에 있어, 흡습시간-인장강도 특성

Fig. 16. Moisture absorption time - tensile strength characteristics of composite materials

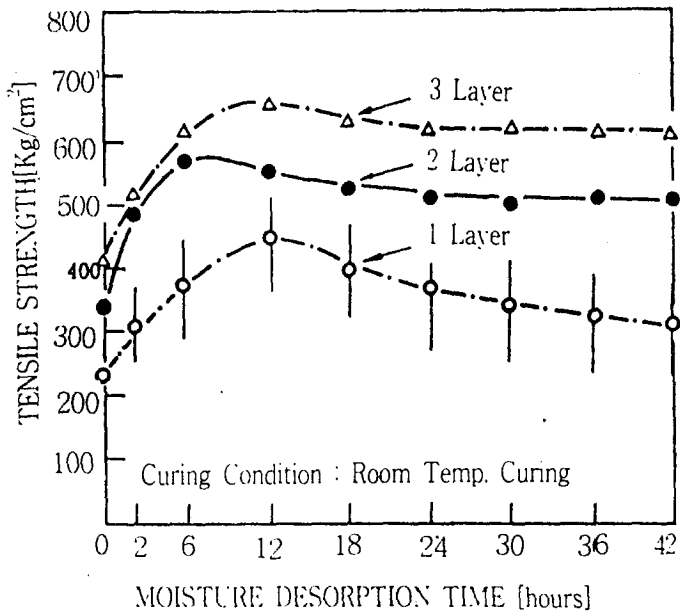
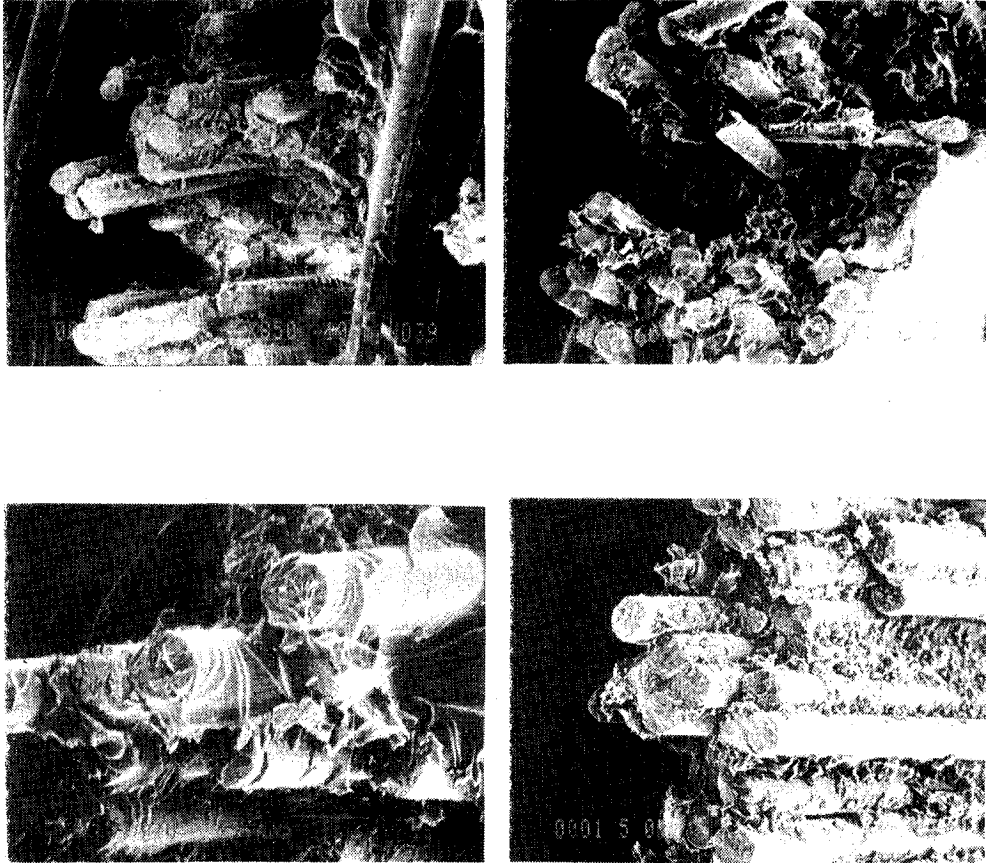


그림 17. 복합재료에 있어, 탈습시간-인장강도 특성

Fig. 17. Moisture desorption time - tensile strength characteristics of composite materials



(a) 흡습전

(b) 흡습후

그림 18. 복합재료의 인장파단면 형상

Fig. 18. Tensile breakdown surface configurations of composite materials