

마이카/에폭시 복합재료의 개발에 관한 연구(3)

A Study on the Development of Mica/Epoxy
Composite Materials (3)

박정후* · 곽영순* 정은식** · 신중홍**

(Chung-Hoo Park · Young-Soon Kwak · Eun-Shik Jeung · Joong-Hong Shin)

요 약

지금까지 발전기 전동기 및 전력용 변압기와 같은 중전기에 사용되고 있는 복합절연재료인 유리섬유 강화프라스틱(GFRP)은 단가가 높고, 기계적 특성이 비등방성이며, 기계적 응력이나 서어비스 중에 계면보이드(Void)의 발생으로 문제성이 제기되어 왔다. 이러한 결점을 해소하기 위하여 플레이크(flake)상의 필라(filler)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 대표적인 플레이크상 재료인 마이카를 이용하여, 현재 대형 발전기나 전동기의 고정자 권선 절연용으로 연구 개발되고 있는 마이카 페이퍼/에폭시(mica paper / epoxy)복합재료를 제작한 후, 이 재료의 전기적 및 기계적 특성과 최적 제작조건 등에 실험적으로 고찰하였다. 특히 아미노 실란 계면 결합제(amino-silane coupling agent)를 필라에 적용하여 시료의 전기적 및 기계적 특성에 미치는 효과를 검토 하였다.

ABSTRACT

Composite materials such as glass fiber reinforced plastics (GFRP) have been used for the insulation of generator, motor and power transformer. However, there are still to be left several problems such as high cost of the unit price, unisotropy of mechanical properties, and voids formed at the interface between matrix and filler under mechanical stress. In order to meet these problems, planar filler reinforced plastics have been studied by many authors.

In this paper, electrical and mechanical properties of mica paper/epoxy composite materials have been studied experimentally. The effect of the amino-silane coupling agent on the electrical and mechanical properties of the sample is also investigated.

* 부산대학교 전기공학과

** 동의공업전문대학 부교수

1. 서 론

복합재료가 전기기기의 절연재료로서 본격적으로 활용되기 시작한 것은 유리섬유강화 플라스틱 (GFRP)의 양산체제가 시작된 1940년대 이후라고 볼 수 있다. 이강화 플라스틱은 범용재료로서 많은 산업분야에 사용되고 있으며^{1,3)} 전기기기 특히, 발전기, 전동기, 가스 차단기, 전력용 변압기, 폐쇄 배전반 등의 중전기에도 대용량화 및 소형화 추세에 맞추어 여러곳에서 사용되고 있다. 그러나 GFRP는 단가가 높고, 기계적 특성이 비등방성이며, 기계적응력 하에서 계면보이드 (void) 발생으로 문제성이 제기되어 왔다.⁴⁾ 이러한 결점을 해소하기 위해 플레이크 (flake)상의 필라 (filler)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{5,6)}

현재 널리 이용되고 있는 섬유상 (의) 필라와 비교하면 플레이크상의 필라는 플라스틱을 2차원적으로 보강할 수 있어 플레이크 강화 플라스틱의 물성 예를 들면 탄성율, 강도, 열팽창계수, 성형수축율 등은 2차원적으로 등방성이 되는 장점이 있다. 현재 플라스틱 보강재로서 사용되고 있는 플레이크상 필라로서는 글라스 플레이크 (glass flake) 및 마이카 (mica)가 잘알려져 있으나 마이카는 글라스플레이크의 약 2.5 배나 큰 탄성율을 가지며, 더우기 단가가 1/10 정도이므로 흥미있는 플레이크상 필라로 주목되고 있다. 특히 1973년 J. Lulis⁷⁾ 등은 높은 아스펙비 (aspect ratio)의 마이카를 플라스틱의 필라로 사용할 수 있음을 시사 하였으며, 그후 저렴한 마이카의 안전공급이 가능하게 되어 유리섬유의 대체등을 목적으로 한 신규용도의 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.

현재 PBT, nylon, 불포화 polyester, p-phenol, Epoxy수지 등을 매트릭스 (matrix)로 하는 복합재료가 실용화 단계에 이르

고 있으며 polyurethane, ABS, PVC 등을 매트릭스로 하는 복합재료에 대해서도 용도개발이 진행중이다.⁸⁾ 그러나 마이카 강화 플라스틱의 경우 치수가 큰 마이카를 얻기 어려워 마이카 분쇄에 의해 마이카 페이프 (mica paper)를 형성해야 하는 어려움이 있으며, 마이카와 플라스틱과의 친화성을 개량하여 복합재료의 물성을 충분히 발휘하기 위해서는 마이카와 플라스틱 경계면을 잘 정착시키는 것이 필요하게 되어 이 방면의 계면결합제 (coupling agent)에 관한 연구도 활발해지고 있다.⁹⁾

본연구에서는 현재 대형 발전기나 전동기의 고정자 권선 절연용으로 연구 개발되고 있는^{10,11)} 마이카페이프 / 에폭시 복합재료를 제작하여 이재료의 전기적 및 기계적특성을 실험적으로 고찰하였으며 아미노 실랑 계면결합제 (amino-silane coupling agent)를 필라에 적용하여 시료의 전기적 및 기계적 특성에 미치는 계면결합제의 효과를 검토하였다.

2. 시료제작 및 실험방법

2.1 마이카 페이프 (mica paper) 제작

본실험에서 사용한 루비마이카의 물성은 표 1과 같다. 일반적으로 자연산 마이카판은 마이카를 쪼개어 작은편으로 한 마이카 플레이크 (mica flake)의 형태로 이용하게 되며 최종적으로 마이카 테이프나 마이카나이트 (mica nit) 등의 절연재료가 제작되어 왔다. 그러나 이방법에 의한 절연재료의 제작에는 많은 인력이 필요하며 제품에도 균질성이 결여되었다. 그후 제작공정을 개선하여 연속적이며 균질성이 있는 마이카페이프의 제작에 많은 연구가 행해진 결과¹²⁾ 다음과 같은 2가지의 마이카 플레이크 제작법이 개발되었다.

그 첫번째는 열화학적인 공정에 의한 것으로

<표 1>. 천연 루비 마이카의 물리적 특성
Table 1. Physical properties of mica

색 상	엷은호박색
비 중 g/cm^3	2.6-3.2
최대 팽창계수 $1^\circ C$	0.000036
결정수 함유량 %	약 4.5
열 분해 온도 $^\circ C$	600-800
인장강도 kg/mm^2	30-50

무스코사이트 (muscovite : 마이카의 일종) 에 적용되는 방법으로 이 마이카를 $600^\circ C$ 이상 가열하면 결정수를 잃고 마이카편으로 부풀게 되며 최종적으로 매우작은 마이카플레이크를 얻어 마이카 페이프로 제작하는 방법이다.

두번째 방법은 기계적인 방법으로 고속의 수류 (water jet) 를 마이카에 분사시켜 마이카를 얇은 편으로 분리시킨 후 이들을 재결합하여 마이카페이프로 제작하는 방법이다. 이 방법은 마이카 종류에 관계없이 적용이 가능하며 경제적이고 간편한 이점이 있다.

지금까지의 연구¹²⁾에 의해 고속수류에 의한 방법에서 얻어진 마이카 플레이크로 제작된 절연재료가 우수한 특성을 나타낸다는 것이 확실해지고 있다. 본 논문에서 고속수류법에 의해 마이카 플레이크를 얻을 수 있었으며 스텐레스제의 그물망을 적당히 선정하여 배치함으로써 마이카 플레이크의 치수를 조절할 수 있었다. 본 실험에서는 마이카 플레이크의 평균직경은 약 $2.8mm$, 평균두께는 약 $3.5 \mu m$ 였다.

일반적으로 마이카 플레이크의 두께에 대한 직경의 비를 아스펙비 (aspect ratio :AR) 라 부르며 다음식으로 표시할 수 있다.

$$AR = \frac{\text{마이카플레이크의 평균직경}}{\text{마이카플레이크의 평균두께}} \dots\dots (1)$$

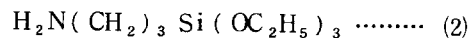
식 (1)로 표시되는 AR값이 증가하면 마이카 플레이크 입자간의 응력전달이 양호하게 되어 기계적강도가 향상되며^{7,13)} 절연특성이 개선된다고 알려져 있으며⁹⁾ 본실험에서 얻어진 마이카 플레이크의 AR값은 800이 됨을 알 수 있다.

이상의 방법으로 얻어진 마이카 플레이크로써 마이카 페이프를 형성하는 데는 일반적으로 초자법이 적용되고 있다. 이 방법은 한지를 뜨는 방식으로 뜨내게 된다. 속달되면 마이카편은 모두 수평방향으로 배치되며 마이카 플레이크의 농도를조정함으로써 두께를 조절할 수 있으며 평균 100 μm 두께의 마이카 페이프에서 그 오차 범위를 $\pm 5 \mu m$ 정도로 줄이는 것은 어렵지 않다.

그림 1은 짐성마이카 페이프 내의 마이카 플레이크의 분포모형을 나타내고 있다.

2.2 마이카 페이프/에폭시 복합재료의 제작

마이카는 일반적으로 $550^\circ C$ 에서 연속 사용 가능하므로 2.1절에서 얻어진 마이카 페이프는 표면의 유기물질이나 불순물을 제거하기 위하여 $550^\circ C$ 의 전기로에서 30분간 열처리하였다. 한편 복합재료 형성시 마이카와 플라스틱의 계면접착을 완전히 하여 시료가 가진 물성을 충분히 살리고, 경계면에서 보이드 (void) 의 형성을 줄이기 위하여 마이카 페이프 표면에 계면결합제 (amino-silane coupling agent) 를 처리하였으며 그 구조식은 (2)식과 같다.¹⁴⁾



이 계면결합제는 r-aminopropyltriethoxysilane으로 물리적 특성은 다음과 같다.

- 분자량 : 221.4
- 비 점 ($^\circ C$) : 217
- 비중 (g/ml) : 0.94
- 최소피복면적 (ml/g) : 353

필라에 계면결합제를 처리하는 방법은 건식법, 습식법 및 스프레이 (spray) 법 등이 잘 알려져 있으며 건식법은 믹서 (Mixer) 나 블렌드 (Blender) 등으로 필라를 강제로 각반

하고, 적량의 계면결합제를 직접 또는 유기용제에 희석해서 첨가하는 방법이다. 또 습식법은 필라를 물에 분산시키고 잘퍼진 상태에서 계면결합제 수용액을 첨가시키고 각반후 정치해서 필라를 침강분리 혹은 초지법에 의해 분리후 건조시키는 방식이며, 스프레이 법은 전기로에서 나온 고온의 필라에 계면결합제를 스프레이 하는 방법으로 건조의 필요가 없고, 공정이 간략화 되는 장점이 있다. 본 실험에서는 스프레이 법에 의해 마이카 페이프 표면에 계면결합제 처리를 행하였다.

한편 계면결합제가 그 기능을 가장 잘 나타내기 위해서는 마이카 표면에 단일 분자층의 계면결합제가 도포되어야 하며 14) 이 경우 계면결합제의 필요량 (M) 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$M = \frac{\text{필라사용량}(g) \times \text{필라의 비표면적}(m^2/g)}{\text{계면결합제의 최소피복면적}(m^2/g)} \dots\dots\dots (3)$$

실제는 이 값보다 다소 변동이 있을 경우가 많다.

이상의 방법에 의해 계면결합제 처리가 끝난 마이카 페이프는 에폭시에 함침하였다. 사용된 에폭시는 비스페놀 A형 이었고 산무수물계 경화제 (MNA type) 를 사용한 내열성 에폭시이다. 이 에폭시의 특성에 관해서는 앞서 보고한 바 있다. 15) 이 에폭시수지는 경화제와 혼입한 후 약 60℃로 유지된 진공내에서 함침을 약 30분간 행하였다. 함침이 끝난 시료는 즉시 80℃로 유지된 전기로에 넣고 2시간동안 초기 경화를 행하였으며 1차경화중에 폭시의 겔화 시작점 (gelling start point) 에서 압축을 하는 가압 겔화법을 16) 적용하였다. 가압 겔화법에 의하면 일반적으로 매트릭스 및 매트릭스와 필라사이의 경계면에 기포생

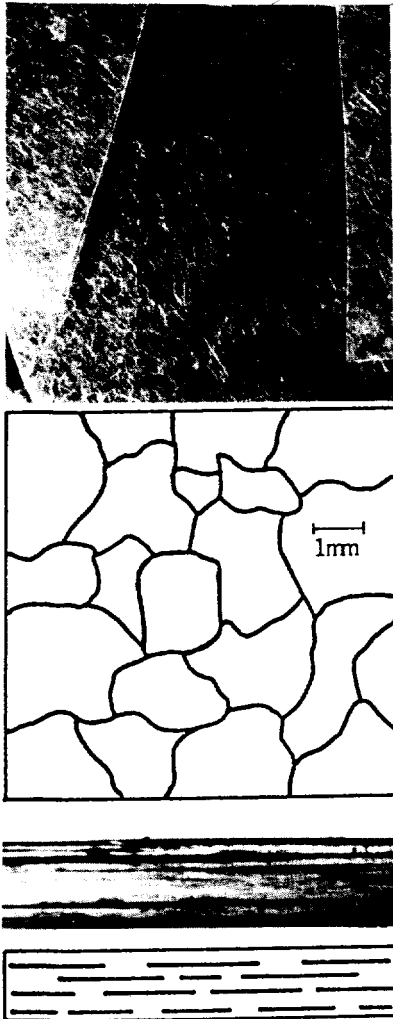


그림 1. 마이카 페이프 내의 마이카플레이크 분포
(a) 시료표면사진 (두께 100 μm , 3장) 과 모델
(b) 시료 단면사진과 모델

Fig 1. Mica flake distribution in mica paper
(a) Surface photo and modeling
(b) Cross-sectional view (photo and model)

성이 억제 될 뿐만 아니라, 복합재료가 치밀하게 된다고 알려져 있다.¹⁶⁾ 1차경화가 끝난 시료는 곧 주어진 시간과 온도에서 2차경화를 행하였으며 2차경화가 끝난 시료는 서냉하여 시료제작과정을 종료하였다. 제작이 완료된 시료의 두께는 $100 \pm 5 (\mu m)$, 직경은 약 $110 mm \times 110 mm$ 였다. 이 시료제작과정을 플로우차트로 나타낸 것이 그림 2이다.

2.3 실험방법

2.1절 및 2.2절의 방법에 의해 제작된 마이카 페이프/에폭시 복합재료의 전기적, 기계

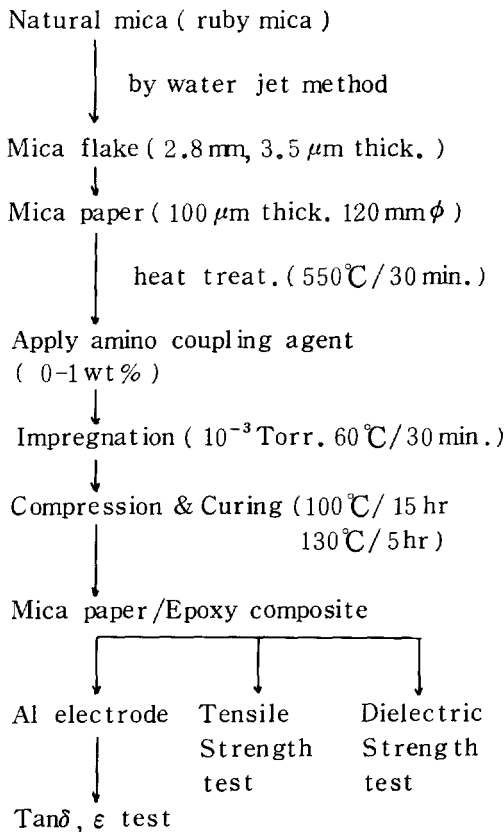


그림 2. 시료제작과정의 플로우 차트
Fig 2. Flow chart of sample preparation

적 특성을 알아보기 위하여 다음과 같은 특성 실험을 행하였다.

1) Tanδ 및 ε' 특성

시료의 Tanδ 및 ε' 특성을 구하기 위하여 마이카 페이프/에폭시 복합재료의 양표면에 10^{-5} Torr 하에서 텅스텐 저항선에 알루미늄 선을 감은 후 60 A를 흘려서 알루미늄진공증착을 행하였으며 전극형상은 그림 3과 같다.

Tanδ 및 ε'의 측정에 사용된 장치는 Precision Tanδ 및 C Bridge meter (Tettex AG Instrument, Type 2812HB) 로써 Tanδ 및 C값을 직접 읽을 수 있으며 C값에서 ε'의 값을 구할 수 있도록 돼 있다. 또 이 장치에는 정밀온도 제어 장치가 부착되어 있으며 150°C에 이르기까지의 각 온도에서 Tanδ, C값을 읽을 수 있다.

2) 절연강도 특성

계면결합제의 처리량이 다르도록 제작된 마이카 페이프/에폭시 복합재료에 대하여 교류 및 직류 정극성 절연강도특성을 구하여 절연

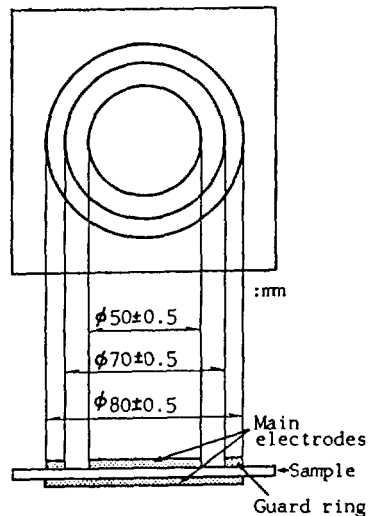


그림 3. 알루미늄 진공증착된 전극 형상
Fig 3. Al evaporated electrode

강도에 미치는 계면결합제의 영향에 대한 검토를 행하였다. 황동제의 구대구의 전극배치로써 한쪽 구전극이 이동가능한 유절연시험기를 이용하였으며 전극과 시료는 모두 실리콘 유중에 함침시킨 후 상온에서 3 kv / s 의 속도로 승압하여 절연파괴 실험을 행하였다. 7 회 시험에서 비정상파괴 (abnormal break-down) 17) 및 최저 측정값을 제외시킨 나머지 약 4 회의 측정값을 평균하여 시료의 절연강도값으로 간주하였다. 교류의 경우는 실효값으로 하였다.

3) 인장강도 특성

그림 4 는 마이카페이프 / 에폭시 복합재료의 인장시험편 8) 을 나타내고 있다. 이 시험편은 인장시 그림 (grip) 부분의 파단을 방지하기 위해 보강한 것으로 동일한 재료를 순간접착제로 양편에 붙인 것이다. 시험중 그림 부분에 파단이 생기는 것을 제외하고 3 개의 시험편 값에 대한 평균값을 시료의 인장강도로 하였다. 인장시험에서는 인스트롱 인장 (압축) 장치 (Instron U.T.I 1,000) 를 사용하였으며, 크로스 헤드 속도 (Cross head speed) 는 10 (mm / min) 로 하였다. 이 장치에서는 인장시의 최

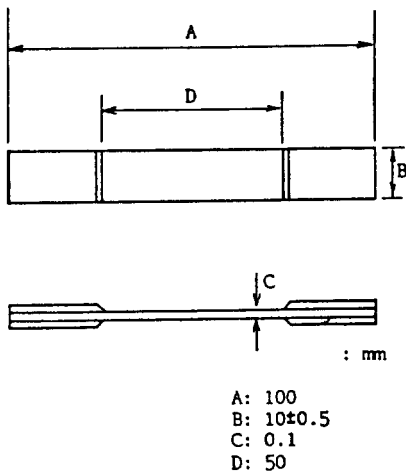


그림 4 . 인장 시험편
Fig 4 . Test sample for tensile strength

대하중 (peak load) 및 파단시의 인장 (break extension) 을 자동적으로 홀딩 (holding) 하여 지시하도록 되어 있다. 인장시험에서는 마이카 함유량이 각각 다르지만 전체두께는 일정한 마이카 페이프 / 에폭시 복합재료를 그 대상으로 하여 인장강도에 미치는 마이카 함유량의 영향을 고찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

판상필라를 사용하는 관통절연파괴는 그림

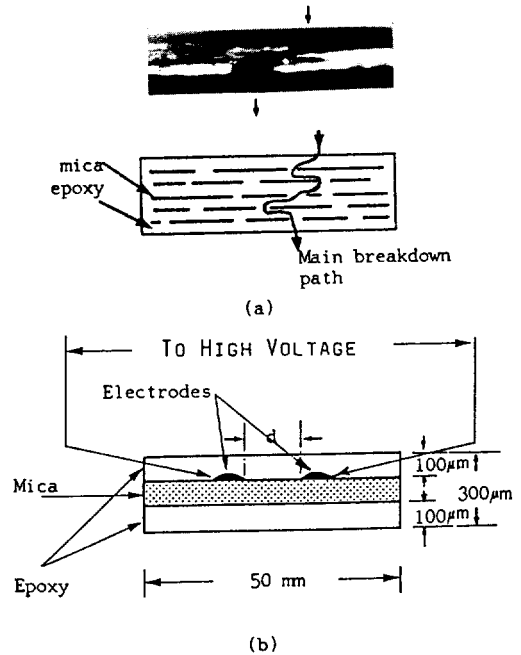


그림 5 . 복합재료의 절연파괴 경로와 계면 절연파괴 시험용 시료

- (a) 복합재료의 절연파괴 경로 (사진과 모델)
- (b) 계면 절연파괴 시험용 시료

Fig 5 . main dielectric breakdown path in mica paper / epoxy composite material and test sample for surface dielectric breakdown

- (a) main breakdown path (photo and model)
- (b) Test sample of mica sheet / epoxy composite material

5(a)에서 나타낸 바와같이 계면절연파괴 전압의 영향이 클것으로 생각되므로¹⁴⁾, 마이카 페이프/에폭시 복합재료에 대한 특성 고찰에 앞서 계면절연파괴 전압특성에 미치는 계면결합제의 영향을 알아보기 위하여 판상마이카상에 아미노 실랑 계면결합제 및 실버페이스트 (silver paste)로서 전극을 설치한 후 그림 5(b)와 같이 판상마이카/에폭시 복합재료를 제작하였다.

그림 6은 이 시료에 대한 교류계면 절연파괴 전압과 계면결합제 처리량과의 상관관계를 나타내고 있다. 전극간격은 1 (mm)였고, 계면결합제 처리량은 식(3)으로 표시되는 량 M 을 1로 했을 때의 M값에 대한 비(n)로서 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 계면결합제의 처리량에 따라 계면절연파괴전압은 크

게 변화하며 n = 1.3 부근에서 최대계면 절연파괴전압을 나타낸다.

그림 7은 계면결합제를 처리하지 않은 시료와 처리한 시료 (n = 1.3)에 대하여 교류계면절연파괴전압의 온도 의존성을 나타내고 있다. 계면절연파괴전압은 온도에 따라 거의 변화하지 않으며 계면결합제를 처리한 시료의 계면절연파괴전압이 처리하지 않은 시료보다 25% 이상 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편 마이카 페이프/에폭시 복합절연재료인 경우 계면결합제 처리는 스프레이법에 의하므로 n값 대신에 마이카페이프에 대한 중량비 (wt %)로써 계면결합제의 처리량을 표시할 수 있다. 그림 8은 마이카의 함유량이 50%인 마이카페이프/에폭시 복합재료의 계면결합제의 처리량에 대한 비유전율 ϵ' 및 손실율 (loss factor)의 변화를 나타내고 있다.

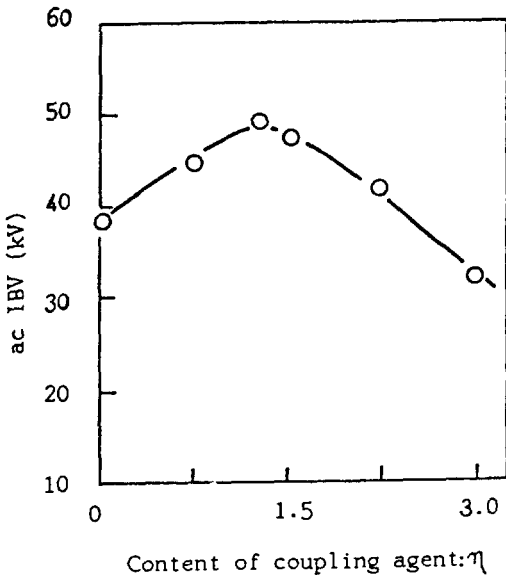


Fig 6. The relationship between ac IBV and the content of amino-silane coupling agent as the ration (IBV: Interface Dielectric Breakdown Voltage)

그림 6. 계면절연파괴전압과 계면결합제 처리량과의 상관관계

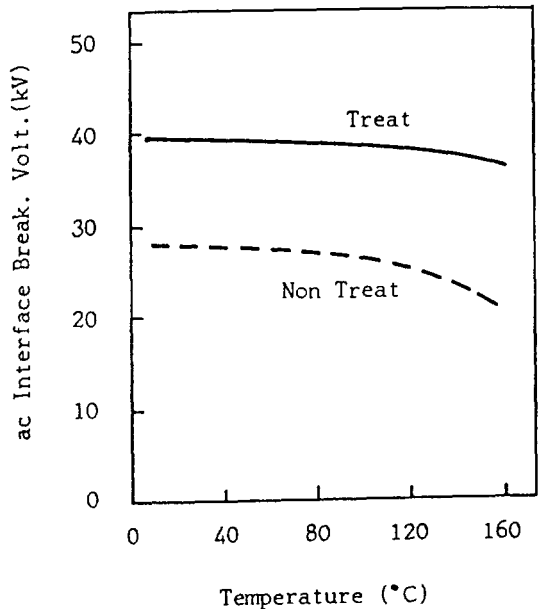


그림 7. 교류계면 절연파괴 전압의 온도 의존성

Fig 7. Temperature dependency of ac interface dielectric breakdown voltage

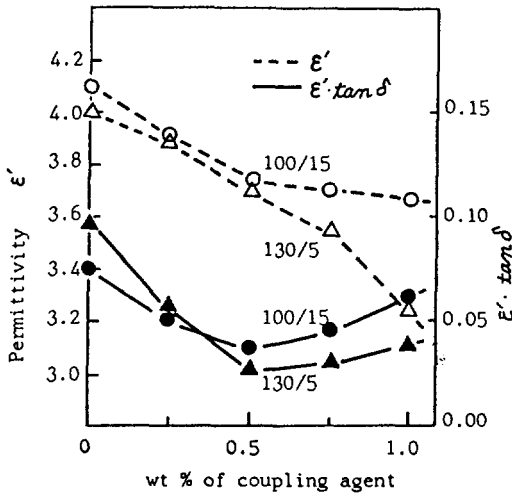


그림 8. 마이카 함유량이 50%인 마이카페이프/에폭시 복합재료의 계면결합제 처리량과 ϵ' 및 $\epsilon' \cdot \tan \delta$ 의 상관관계
Fig 8. Relationships between wt % of coupling agent and ϵ' , $\epsilon' \cdot \tan \delta$ as a parameter of cure condition

그림에서 100/15 및 130/5는 100°C 및 130°C에서 15시간 및 5시간 후기경화한 시료를 나타내고 있다. 일반적으로 유전체 내의 전력손실 W는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = wcv^2 \tan \delta = wco \cdot v^2 \epsilon' \tan \delta \dots (4)$$

유전체의 전력손실을 감소시키기 위해서는 주파수 및 인가전압이 일정할 경우 비유전율 ϵ' 및 유전체역율 $\tan \delta$ 값이 적을수록 유리하다. 이러한 의미에서 $\epsilon' \cdot \tan \delta$ 의 값을 손실계수 (loss factor)라고 부르고 있음은 잘 알려진 사실이다.

그림 8에서 시료 3개의 측정값에 대한 평균값 (편차 5% 이내) 으로서 손실계수가 최소인 경우의 계면결합제 처리량은 0.5 wt %임을 알 수 있다. 한편 그림 9는 2차경화조건이 130/5로써 계면결합제의 처리량을 0%, 0.5%, 1%로 변화시킨 시료에 대해 ϵ' 및 $\epsilon' \cdot T$ -

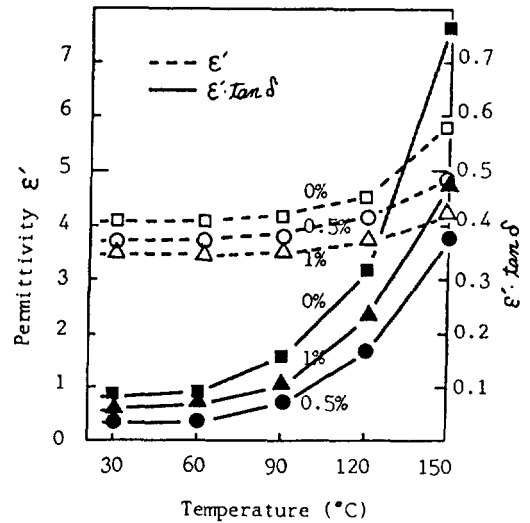


그림 9. 계면결합제 처리량을 0%, 0.5%, 1%로 했을 경우 ϵ' 및 $\epsilon' \cdot \tan \delta$ 의 온도의존성
Fig 9. Temperature dependency of ϵ' and $\epsilon' \cdot \tan \delta$ as a parameter of the content of coupling agency

and δ 값의 온도 의존성을 나타내고 있다. 고온하에서도 그림 8에서와 같이 $\epsilon' \cdot \tan \delta$ 값은 계면결합제 처리량이 0.5 wt %인 경우 최저값을 나타내며 고온이 되면 쌍극자간의 운동이 활발해져서 이 손실은 증가하지만 150°C에 이르기까지 0.4 이하가 됨을 알 수 있다.

그림 10은 마이카 페이프/에폭시 복합재료의 계면결합제 처리량에 대한 교류 및 직류 절연강도 특성을 나타내고 있다. 교류의 경우 에폭시 전체의 절연강도가 대략 1.7 (MV/cm) 임을 고려하면 계면결합제 처리량이 0.5wt%인 경우 약 2 (MV/cm)로 에폭시 자체보다 다소 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 마이카 자체의 절연강도가 약 5 (MV/cm) 임으로 이 복합재료의 절연강도는 더욱 증가할 가능성이 있을 것으로 생각된다. 이 가능성을 실현시킬 수 있는 방안으로는 마이카 표면의 불순물 및 흡착수의 제거와 결합제 처리에 관한 물

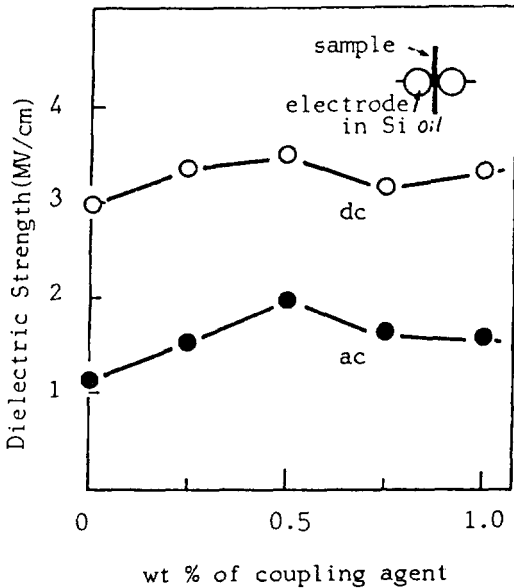


그림 10. 마이카페이프/에폭시 복합재료의 절연강도에 미치는 계면결합제 처리량의 영향
 Fig 10. Effect of coupling agent on the dielectric strength of mica paper/epoxy composite

리 화학적 연구 및 마이카 함침시의 고진공도 입등의 기술적 문제가 포함될 것으로 사료되어 필자들은 이 분야의 연구를 진행중에 있다.

이상에서 논한바와 같이 복합재료의 제작시 계면결합제의 처리로 시료의 유전적 특성이 개선될 수 있음을 알 수 있으며 유전적 특성이 개선되는 이유는 이 계면결합제의 다음과 같은 기능에서 찾아볼 수 있다.⁹⁾

본 실험에서 사용한 아미노 실란 계면결합제의 구조식인 (2)식에서 (OC₂H₅)₃는 Si에 대한 가수성기 (hydrolyzable group)이며, H₂N은 유기관능기 (organofunctional group)으로써 에폭시 수지와 반응하는 부분이 된다. 이 계면 결합제의 수용액을 만들면 (OC₂H₅)₃는 가수분해 하여 실란올 (Silanol)과 3H(O

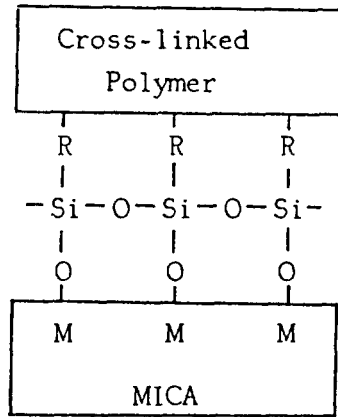
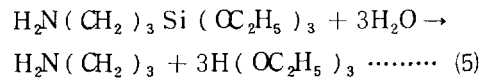


그림 11. 계면 결합제의 기능
 Fig 11. The function of coupling agent

C₂H₅)로 된다. 즉



이 식에서 Si(OH)₃ 부분이 무기질인 마이카와 결합하는 부분이 된다.

그림 11은 이들 관계를 나타낸 모델이다. 결국 이 계면 결합제는 실험적으로 입증되지는 않았으나 에폭시와 마이카를 결합시켜 에폭시와 마이카의 경계면에 존재할 수 있는 보이드(void)나 흡착수를 제거할 수 있어 유전적 특성이 개선된다고 생각된다. 그러나 다량의 계면결합제로 처리하였을 경우는 계면결합제의 층을 형성하여 계면결합작용이 둔해지므로 최적의 계면결합제의 처리량이 존재함을 알 수 있다.

그림 12는 마이카 함유량을 변화시켰을 경우의 마이카 페이프/에폭시 복합재료의 인장강도 특성을 나타내고 있다. 이 경우 시료의 2차경화조건은 130/5였다. 이 시료의 인장강도는 마이카 함유량이 증가할수록 증가하여 예로서 0.5 wt%의 계면결합제를 사용하고 마이카 함유량이 50%인 경우, 복합재료의 인장강도는 에

폭시 자체의 인장강도보다 약 50 % 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 마이카 플레이크에 의한 강화 복합재료의 인장강도 H_c 는 복합재료의 역학적 물성에 대한 복합법칙으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.²⁰⁾

$$H_c = H_f \left(1 - \frac{L_c}{2L} V_f \right) + H_m (1 - V_f)$$

..... (6)

- 여기서 H_f : 플레이크의 인장강도
- L : 플레이크의 길이
- L_c : 인장방향의 한계 플레이크장
- V_f : 플레이크의 함유율 (%)

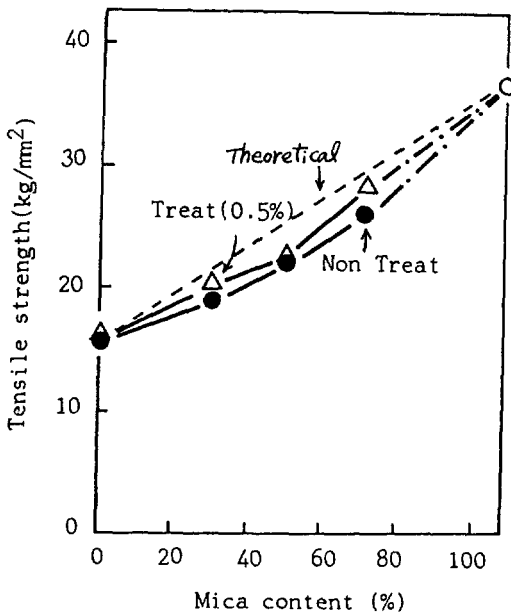


그림 12. 마이카페이프/에폭시 복합재료의 인장강도 특성에 미치는 마이카 함유량의 영향 (경화조건 : 130℃/5hr)

Fig 12. Effect of mica content on the tensile strength of mica paper/epoxy composite (cure condition 130℃/5hr)

H_m : 플레이크의 항복변위 (ϵ) 과 같은 ϵ 에 대한 매트릭스의 인장응력

일반적인 경우 $1 \gg \frac{L_c}{2L}$ 로 주어지므로 (6) 식은 (7)식과 같이 쓸 수 있다.

$$H_c = H_f V_f + H_m (1 - V_f) \dots\dots\dots (7)$$

마이카 페이프 / 에폭시 복합재료의 경우 $H_f = 37 (kg / mm^2)$, $H_m = 16 (kg / mm^2)$ 이고 V_f 를 증가하면 그림 12의 점선과 같이 증가함을 알 수 있다. 그러나 실측치는 이 점선값에 조금 미치지 못하고 있으며, 시료제작공정이 개선되면 이 복합재료의 인장강도 특성이 더욱 양호해질 것으로 기대된다.

4. 결 론

(1) 판상마이카 / 에폭시 복합재료의 계면결연 파괴 전압특성은 계면결합제의 처리량이 존재하였다. 본연구에서는 $n = 1.3$ 인 경우에 가장 좋은 특성이 얻어졌다.

(2) 마이카 페이프 / 에폭시 복합재료의 경우, 상온 및 고온 하에서 최저 유전손실은 계면결합제의 처리량이 마이카 페이프에 대한 중량비로 0.5% (즉 0.5wt%)인 시료에서 얻어졌으며 상온에서 이 재료의 손실계수는 0.05 이하였다.

(3) 마이카 페이프 / 에폭시 복합재료의 인장강도 특성은 에폭시 자체의 인장강도보다 우수하며, 마이카 함유량이 증가할수록 증가하였다. 이 인장강도특성은 복합재료의 물성에 관한 복합법칙으로 해석할 수 있다.

마이카 페이프 / 에폭시 복합재료의 물성은 마이카 표면의 불순물 및 흡착된 수분의 제거와 계면결합제 처리등에 관한 물리화학적 연구 및 마이카를 에폭시에 함침시 고전공의 도입등 기술적 문제를 개선하면 더욱 향상된 것으로 사료된다.

끝으로 본연구의 일부는 1986년도 한국과학재단연구 조성비로 이루어진 것임을 부연하며 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

- 1) B. R. Norton: "Engineering Applications of Composites," Academic Press, 1974.
- 2) Morita M, et. al., "Status of FRP in Electlic Industries "Extended Abstract Bulletin, 11th FRP-Symposium, 67-75, 1982.
- 3) Morita M, et, al., "FRP의 전자기기에 응용" 강화플라스틱(Japan)28, 11, 1-8, 1982
- 4) C,H, Park: "A Study of the Dielectric and Mechanical property Interactions of glass cloth / epoxy Composite," *IEEE, EI -22* 389-395, 1987".
- 5) R, W, Staley, et. al: "New comformable mica paper Tapes 2," *IEEE CH 1717* 65-68, 1981."
- 6) H.M, tsu :, et, ali "Improvement of Rotation Machinery Insulation characteristics by Using Mica Paper Containing Aramid Fibrid," *IEEE, EI -18*, 651-656, 1983.
- 7) J, Lusic, et,al: "The effect of flake aspect ratio on the blexural properies of mica reinforced plastics," *polym, Eng, Sic*, 13, 1973.
- 8) J. Rexen: "Composites with planar Reinforcements (Flake, Ribbons)," *ploym, Eug, Sci*, 19, 1, 1-11, 1979.
- 9) E. P, Plueddmann: "Interfaces in polymer Matrix Composites," Academic press, 6, 1974.
- 10) K. Matsunobu, et, al.: "A New High Strength Mica Insulation for Large Rotating Machinery", *IEEE. CH 1717*, 72-76, 1981.
- 11) H, Mitsui, et. al.: "Influence of Mica tape Application on Insulation Characteris Characteristics of Higs Voltage Rotating Machinery coils," *IEEE EI-20*, 619-624, 1985.
- 12) A, Dubois, et. al.: "New Trends in Mica Paper," *IEEE. CH1717*, 60-64, 1981.
- 13) C. E. Padawer, et. al.:" On the Strenght and Stiffness of Planar Reinforced Plastic Resin," *polym. Eng. Sci*, 10. 3, 185-192, 1970.
- 14) Chiso Co. Ltd," Silo-Ace" Sp Technical note p. 16(Japan) 1984.
- 15) 박정후, 양재후, 이종호, 김기범: "마이카 / 에폭시 복합재료의 개발에 관한 연구(1)"-내열성 에폭시 수지의 특성- 대한 전기학회 논문지 30-37, 1987.
- 16) J. Hognat: "Dynamic thermomechanical Analysis of a Prepreg Applications to Industrial Curing" *Fibre Sct. and Technology*, 18, 108-118, 1983.
- 17) C. Narayana, et. al.: "Anormolous Breakdown in synthetic Insulating Materials Subjected to Inpulse Voltages," *ETZ-Bd* 94, 289-293, 1973
- 18) 일본규격협회, "JIS Handbook(plastic)", 329-330, 1981.
- 19) T. Hasegawa, et. al.: "The effect of Mica on partia lischarge existance of Mica-Epoxy Composite Insulations" *IEEJ*. 104, 262-268, 1984
- 20) T. Hayashi: "복합재료공학" 일과기연 (Japan), 41-42, 1982.