

# 마이카/실리콘 복합재료의 전기, 기계적 특성과 마이카 아스펙 비의 상관관계의 관한 연구

## A Study on Dielectric and Mechanical Properties and Mica Aspect Ratio Interactions of Mica/Silicone Composites

曹井守\*, 金珣泰\*\*, 郭永淳\*, 朴正后\*

(Jung-soo Cho, Soon-tae Kim, Young-soon Kwak, Chung-hoo Park)

### 요 약

마이카/실리콘 복합재료의 필라로 사용되는 마이카 플레이크의 아스펙비가 복합재료의 전기적, 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 아스펙비가 각각 250, 500, 800인 세 종류의 마이카 플레이크로 마이카 페이프를 만들어 계면 결합제를 처리한 후 실리콘 수지에 함침, 경화시켜 복합재료를 제작하였다.

아스펙비 500인 시료에서 가장 양호한 전기, 기계적 특성이 얻어졌으며 필라와 매트릭스 사이의 계면 결합제 최적 적용량은 마이카 페이프에 대한 무게비 0.3%이며 마이카 함유량은 전체시료의 80%일때 유전 특성이 가장 우수 했으며 PET를 마이카/실리콘 복합재료 양면에 코팅하면 더욱 전기, 기계적 특성이 우수한 복합재료가 실현된다.

### Abstract

Mica/Si and Mica/Si/PET composites are prepared with mica paper, heat-resistant silicone and PET. Dielectric and mechanical properties are measured in order to study the interactions of physical properties of the composites and aspect ratio(AR) of mica flakes. The aspect ratio is divided into 3 grades, that is, 200~300, 450~550 and 750~850.

In the dielectric and mechanical points of view, the best composite is obtained from the sample fabricated under the following conditions.

1. The aspect ratio:450~550.
2. Weight % of coupling agent to mica paper is 0.3%.
3. Mica content is about 80wt% to the Mica/Si composite.

\* : 부산대 공대 전기공학과

\*\* : 부산대 공대 전기공학과

## I. 서 론

복합재료의 최근의 경향으로는 열가소성 및 열경화성 플라스틱 내에 유리섬유의 필라(filler)를 도입한 유리 섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic:GFRP)이 주로 이용되어 왔다. 그러나 GFRP는 강도는 크지만 탄성율이 비교적 적기 때문에 2차 강도 부재료로 주로 사용되어 왔다. 더우기 전기적으로는 유리섬유와 플라스틱의 계면을 따라 부분방전이 일어나 절연파괴에 이르기 때문에 전기적 수명이 낮은 것이 결점이었다.<sup>1,2)</sup> GFRP의 이러한 기계적 특성 및 전기적 절연 특성을 개선하기 위한 한 방안으로서 열가소성 및 열경화성 플라스틱 내에 판상의 형상을 가지는 보강성 필라를 이용한 복합재료의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-3)</sup>

현재 널리 이용되고 있는 섬유상 필라와 비교해 보면, 마이카 등의 판상보강재를 사용했을 경우에는 복합재료 제작시 내부 보이드(void)의 발생율을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 전기적으로 판상 절연 파괴강도를 높일 수 있는 장점이 있다.<sup>3)</sup> 또, 고분자를 2차원적으로 보강 할 수 있어 판상 복합재료의 물성, 예를 들면 탄성율, 강도, 열 팽창 계수 및 성형 수축율 등이 2차원적으로 등방성이 된다.

플라스틱의 보강재로 사용될 수 있는 판상 보강재료는 판상유리 및 마이카가 가장 잘 알려져 있으며, 특히 마이카는 판상유리의 약 2.5배의 탄성율을 가지며, 가격도 유리(E종)의 1/10 정도이므로 현재는 판상 마이카가 충전재로서 주로 연구되고 있다.<sup>1,3,4)</sup> 천연 마이카는 복잡한 규산 알루미늄계의 광물로서, 함유하는 성분에 따라 종류가 다양하다. 이 중에서 공업적으로 이용되는 것은 무스코바이트(muscovite, 칼리 운모)와 필로고파이트(phlogopite, 마그네슘 운모)의 두 종류가 있으며, 모두 얇게 층간 분리할 수 있는 것이 특징이다.

마이카는 전기 절연성과 내열성이 뛰어나 예로부터 전기 절연물로서 사용되어 왔다. 그러나 천연 마이카는 대형 판상이나 층간 보이드가 포함되지 않는 시-트(sheet)상의 것을 얻기 어려운 뿐 아니라 유연성이 적어 자연산 그대로 이용할 수 있는 곳은 많지 않다. 그래서 소형의 판상 마이카를 집성하여 접착 와니스로 처리한 후 시-트상이나, 페이프(paper)

및 테이프(tape)상으로 이용되는 것이 일반적이다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 유전특성 및 내열성이 뛰어나며, 발수성이 우수한 실리콘 수지를 매트릭스(matrix)로 하고, 마이카 플레이크(flake)를 필라로 하여 마이카 강화 복합재료를 제작하고, 이 복합재료의 유전특성 및 기계적 특성에 미치는 마이카 아스펙비(mica aspect ratio)의 영향을 주로 고찰하였다.

## II. 시료 제작 및 실험 방법

### 2-1. 복합재료의 제작 방법

#### 2-1-1. 마이카 페이프의 제작

실험에서 사용한 마이카의 일종의 무스코바이트의 물성은 표1과 같다.

일반적으로 자연산 마이카는 작은 편으로 분리시킨 마이카 플레이크의 형태로 이용하게 되며, 최종적으로 마이카 페이프나 마이카나이트(micanite)등의 절연재료로 제작되어왔다. 그러나 이러한 절연재료의 제작에는 많은 인력이 필요하며 제품에도 균질성이 결여되는 결점이 있다. 그후 제작공정을 개선하여 연속적이며 균질성이 보장되는 마이카 페이프의 제작에 대한 많은 연구가 행해진 결과 열화학적 공정, 고속 수류법 및 충격분쇄법 등과 같은 마이카 플레이크 제작법이 개발되었다.

이 마이카 플레이크의 두께에 대한 직경의 비를 아스펙비(aspect ratio:AR)라 부르며 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$AR = \frac{\text{마이카 플레이크의 평균 직경}}{\text{마이카 플레이크의 평균 두께}} \dots (2-1)$$

지금까지의 마이카 필라로서는 대략 10~30 정도의 낮은 아스펙비의 플레이크가 사용되었으나 식(2-1)로 표시되는 AR값이 증가하면 이론상으로 마이카 플레이크 입자 간의 응력 전달이 양호하게 되어, 기계적 강도(인장 및 굽힘강도 등)가 향상될 뿐 아니라 절연 특성도 개선된다고 알려져 있어, 최근에는 높은 아스펙비를 가진 마이카(HAR: higher aspect ratio mica)의 사용이 시되어 좋은 성과를 얻고 있다.<sup>4)</sup> 본 실험에서 얻어진 마이카 플레이크의 AR 값은 200~850의 범위였다.

본 실험에서는 고속 수류법에 의해 얻어진 높은 아스펙비를 가진 마이카 플레이크를 침

표 1. 마이카의 물리적 성질  
Table 1. Physical properties of mica (muscovite)

색 상	엷은 호박색
비중 g/cm <sup>3</sup>	2.6 - 3.2
최대팽창계수 /℃	0.000036
결정수 함유량 %	약 4.5
열 분해온도 ℃	600 - 800
인장 강도 kg/mm <sup>2</sup>	30 - 50

전법으로 회수하여 초지법으로 마이카 페이프를 제작하였다. 이 방법은 스테인레스의 그물망 메시(mesh)를 적당히 선정하면 플레이크의 아스펙비를 여러가지 얻을 수 있으며 마이카의 물성도 잘 보존된다고 알려져 있다. 이상의 방법에 의해 얻어진 마이카 플레이크는 그 크기에 따라 분류되며 그 후 초지법에 의해 마이카 페이프로 구성된다. 이때 150 $\mu$ m 두께의 마이카 페이프에서 오차의 범위를  $\pm 5 \mu$ m 이하로 줄이는 것은 어렵지 않다.

초지법으로 얻어진 마이카 페이프는 30~150 $^{\circ}$ C의 전기로에서 건조한 후 실리콘 수지에 함침하는 공정을 거치게 된다. 그림 1은 마이카 페이프의 표면과 단면의 마이카 플레이크 분포 모델을 나타내고 있다.

이 마이카 페이프는 결정수에 의해 재결합하게 되므로 요구되는 크기의 형상을 충분히 유지할 수 있는 정도가 되며, 계면 결합제로 처리하면 절단을 해도 분리되지 않게 된다. 본 실험에서는 실리콘 수지와 마이카의 계면 접착을 향상시키기 위하여 실란 계면 결합제(silane coupling agent : S330, Chiso co.)를 사용하였다.

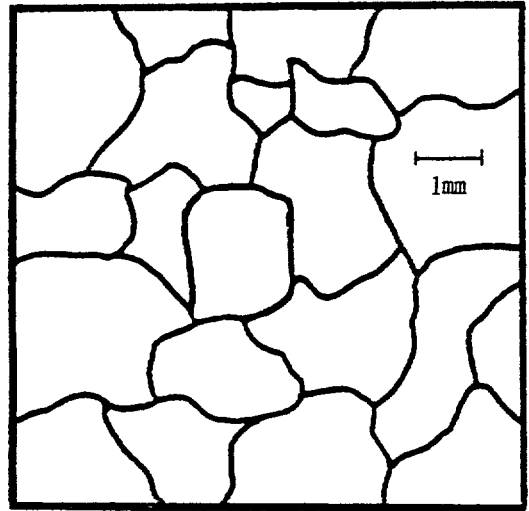
2-1-2. Mica/Si 및 Mica/Si/PET 복합재료의 제작

앞서 얻어진 마이카 페이프를 10<sup>-3</sup>torr의 진공 중에서 액체상의 마이카 함침용 실리콘 와니스(TSR 117, Toshiba co.)에 함침하였다.

5.61

충분히 함침 시키기 위해서는 진공조 내의 온도와 진공도를 적당히 가감하여 조정하여야 한다. 너무 오랜 시간 동안 함침을 행하면 마이카편이 분리되어 복합재료를 구성할 수 없다.

함침후 상온에서 24시간 동안 방치한 후 전기로 내에서 10 $^{\circ}$ C 간격으로 온도를 상승하면서 1시간씩 경화를 행하였다. 특히 50~60 $^{\circ}$ C 부근에서 너무 급격히 온도를 상승하면 경화



(a)



(b)

그림 1. 마이카 플레이크 분포 모델

(a) 표면 (b) 단면

Fig.1. Mica flake distribution model

(a) surface (b) cross-section

중의 실리콘 수지 내부에 기포가 발생되어 복합재료의 전기적 특성이 크게 저하하므로 주의를 요한다.<sup>7)</sup>

본 실험에서는 상기 조건으로, 압력을 가하지 않고 온도를 상승하여 200 $^{\circ}$ C에서 1시간 경화를 끝낸 경우를 1차 경화라고 하였으며, 그 이후의 온도에서 가압하면서 경화한 것을 2차 경화라 하였다. 제작된 Mica/Si 복합재료의 크기는 직경이 12cm 정도의 원판상이며 두께는 150 $\mu$ m  $\pm$  5 $\mu$ m로 하였다.

기계적 인장특성 및 유연성을 증가시키기 위하여 본 실험에서 Mica/Si 복합재료 양면에 PET(polyethylene terephthalate)로 코팅하여 Mica/Si/PET 복합재료도 함께 제작하여 이 시료의 전기적 유전특성, 절연강도특성 및 아스펙비의 영향 등에 관해 실험적 고찰을 행하였다.

그림2는 Mica/Si 복합재료의 제작 순서를 나타내고 있으며 그림 3은 고속 수류법에 의한 마이카 플레이크의 제작 부분을 나타내고 있다. 그림 4는 그림 3에서 얻어진 마이카 플레이크를 분류한, 아스펙비가 다른 세 종류의 마이카 플레이크를 나타내고 있으며 그림 5는 초지법으로 제작하여 건조시킨 마이카 페이퍼의 형상을 나타내고 있다. 그리고 그림 6은 최종적으로 제작된 Mica/Si/PET 복합 절연재료의 형상을 나타내고 있다.

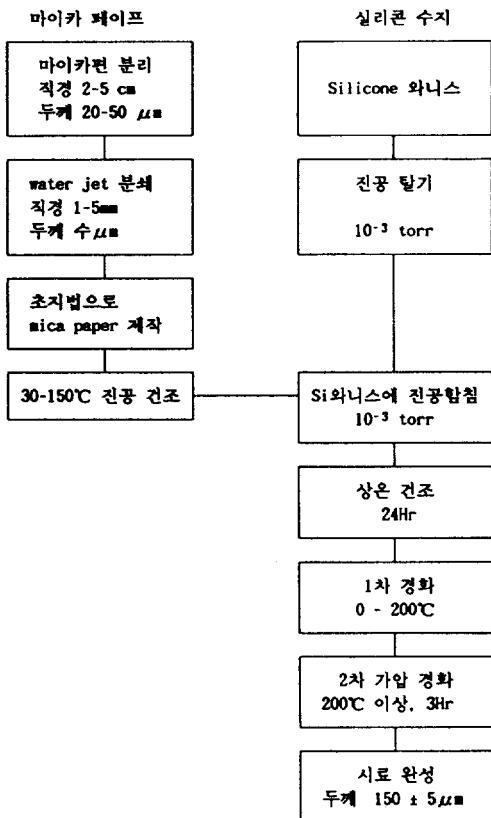


그림 2. 복합재료 제작 공정도  
Fig. 2. Flow chart of composite preparation

2-2. 실험방법

시료의 유전정접( $\tan \delta$ ) 및 비유전율( $\epsilon_r$ ) 측정은 Precision  $\tan \delta$  and C bridge meter

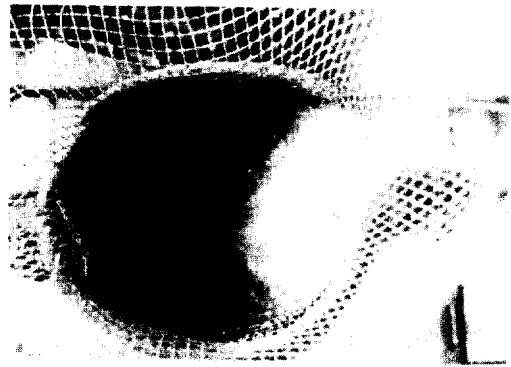
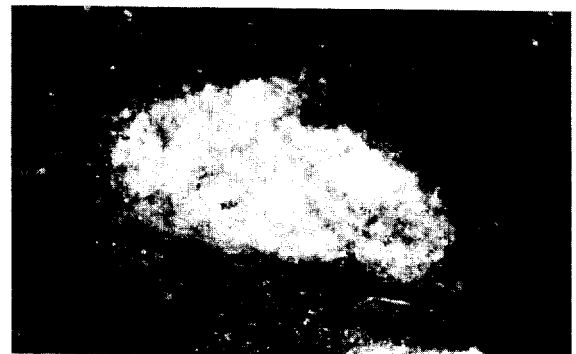


그림 3. 고속 수류법에 의한 마이카 플레이크 제작

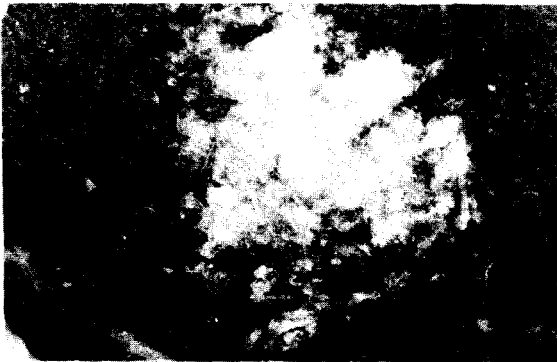
Fig. 3. Mica flake preparation by water jet method



(c) AR:800



(b) AR:500



(a) AR:250

그림 4. 마이카 플레이크의 형상  
Fig. 4. Mica flake

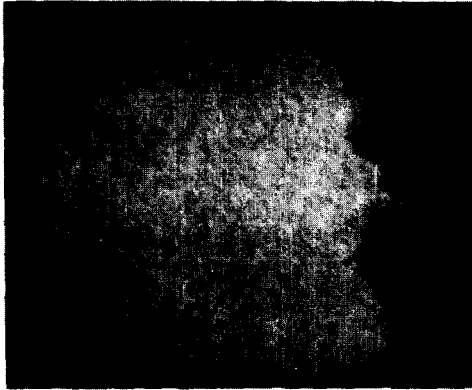


그림 5. 마이카 페이퍼의 형상  
Fig. 5. Mica paper



그림 6. 마이카/실리콘/PET 복합재료 형상  
Fig. 6. Mica/silicone/PET composite

(Tettex AG Instrument, Type 2812HB)를 이용하였으며 유전정접 및 C의 값은 bridge의 평형조건에서 직접 읽을 수 있고, 비유전율 값은 얻어진 C값에서 계산하여 구하였다. 이 장치는 시료에 인가전압을 0-2kV 범위로 가변할 수 있으며, 정밀 온도 제어장치가 부착되어 있어 시료의 온도를 150℃까지 변화시키면서 유전정접 및 비유전율 값을 측정할 수 있다. 측정 주파수는 60Hz이고 온도 상승시는 온도 변경 후 10분 뒤에 측정을 행하였다.

시료의 유전정접 및 비유전율의 고주파 특성은 Q-meter(Meguro, MQ161)로 측정하였다. 이때 전극으로 상기의 Precision  $\tan \delta$  and C bridge meter에 가이드링이 부착된 전극 시스템을 이용하였다.

한편, 시료의 절연강도 측정에서는 시험용 변압기(100V/100kV용)를 이용한 교류 고전압 전원을 사용하여 3kV/sec의 속도로 시료가 절연파괴 될 때 까지 연속으로 상승하여 측정 하였으며, 주파수는 60Hz였다. 사용 전극은 고압 및 어스(earth) 전극 모두 구( $\Phi$ : 10mm) 전극을 이용하였고, 기중 방전을 방지하기 위하여 실리콘 유중에서 측정하였다. 시료의 절연강도(kV/mm)는 7회 측정하여 최대, 최소값을 제외한 5개의 시료의 평균값으로 하였으며 그림에는 평균값과 편차는 평균값에 수직선으로 그 범위를 나타내었다. 평균값은 교류 실효치로서 나타내었다.

시료의 기계적 특성을 구하기 위한 인장 시험에서는 인스트롱 인장(압축) 장치(Instron, UTI 1000)를 사용하였으며, 크로스 헤드 속도(cross head speed)는 10mm/min.로 하였다. 이 장치에서는 인장시의 최대하중(peak load) 및 파단시의 인장(break extension)을 자동적으로 홀딩(holding)하여 지시하도록 되어 있다.

### III. 실험결과 및 고찰

그림 7은 Mica/Si 복합재료의 유전정접 및 비유전율의 온도 의존성을 나타내고 있다. 이 경우 복합재료는 고속 수류로서 마이카를 분리한 마이카 플레이크로 마이카 페이퍼를 만든 후 진공조 내에서 실리콘 와니스에 함침시켜 경화하여 제작한 것이다. 이 그림에서 A,

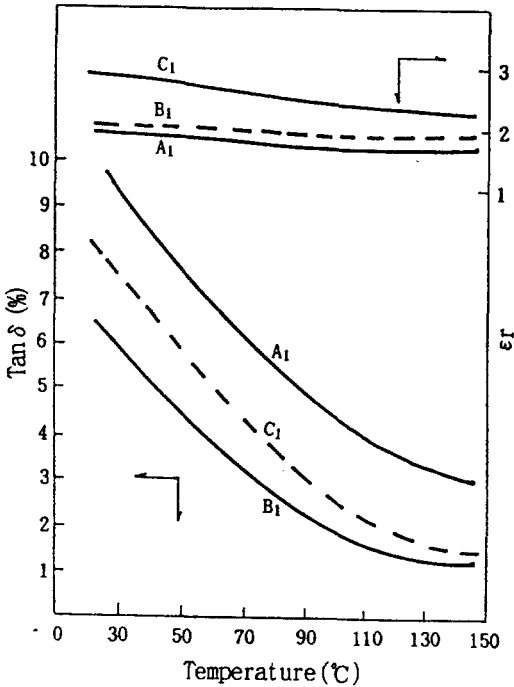


그림 7. 마이카/실리콘 복합재료의  $\tan \delta$ ,  $\epsilon r$ -온도 관계

Fig. 7.  $\tan \delta$ ,  $\epsilon r$ -temperature characteristics of mica/si composite

B, C시료는 각각 아스펙비가 약 250, 500, 800인 마이카 플레이크로, 복합재료 형성시 마이카의 무게 함유율을 80%로 하여 제작한 시료를 나타내고 있다. 본 실험에서 시료의 종류는 다음과 같이 나타내기로 한다.

- A<sub>1</sub>:Mica/Si 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR200-300)
- B<sub>1</sub>:Mica/Si 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR450-550)
- C<sub>1</sub>:Mica/Si 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR750-850)
- A<sub>2</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR200-300)
- B<sub>2</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR450-550)
- C<sub>2</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리 아니함, AR750-850)
- A<sub>3</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리 함, AR200-300)
- B<sub>3</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리

함, AR450-550)

C<sub>3</sub>:Mica/Si/PET 복합재료(계면결합제 처리 함, AR750-850)

그림 7에서 각시료는 1차 경화 후 주어진 2차 경화조건에 따라 300°C에서 3시간 동안 2차 경화를 끝낸 것으로, 전체적인 경향으로는 온도가 상승하면 유전정접 값이 감소함을 알 수 있으며, 이러한 경향은 순수한 실리콘 수지의 유전정접 특성에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나 복합재료의 유전정접의 값이 실리콘 수지나 마이카의 유전정접 값(그림 9 참조)보다 크게 나타나는 이유는 마이카와 실리콘 수지 계면에서의 미세 보이드의 함유 등으로 인한 계면결합이 불완전 할 뿐만 아니라, 시료 표면이 복합재료 속성상 거칠기 때문에 전극과의 접촉이 불완전하기 때문이라고 생각된다. 그러나 100°C 이상이 되면 실리콘 수지가 다소 연화되어 전극과의 접촉이 양호해지므로 어느 정도 낮은 유전정접 값을 나타내게 된다고 생각된다.

아스펙비의 입장에서 보면 아스펙비(AR)가 450-550 범위의 시료인 B<sub>1</sub>시료가 가장 양호한 유전정접 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 그러나 비유전율은 2-3 정도로 시료에 따른 변화가 적었다.

한편 Mica/Si/PET 복합재료는 Mica/Si 복합재료의 양면에 50 $\mu$ m두께의 PET를 코팅한 것으로, 복합재료 표면이 더욱 평활하게 될 뿐만 아니라, 기계적 특성이 개선되며 유연성을 갖게 된다. Mica/Si 복합재료 만으로는 유연성이 없어 몇번 굽혀보면 표면에 미소 크랙이 발생하는 수가 많다.

그림 8은 Mica/Si/PET 복합재료의 유전정접 및 비유전율의 온도 의존성을 나타내고 있다. 이 경우는 마이카 표면에 계면결합제 처리를 하지 않고 시료를 제작한 것으로, 그림 7과 비교하면 PET의 코팅만으로도 상온에서 유전정접 값은 1/2 정도로 감소하는 좋은 결과를 나타낸다. 이의 이유는 PET의 영향 및 표면이 평활하게 되어 전극과의 접촉이 양호할 뿐만 아니라, 표면의 미세 결합 등이 코팅으로 제거되었기 때문으로 생각된다. 아스펙비가 450-550인 B<sub>2</sub> 시료의 유전정접 값이 가장 낮고 그 값은 상온에서 약 0.03을 나타내었으며 비유전율은 2-3 정도로 거의 일정하게 나타난다.

그림 9는 계면결합제로 마이카 페이퍼의 표

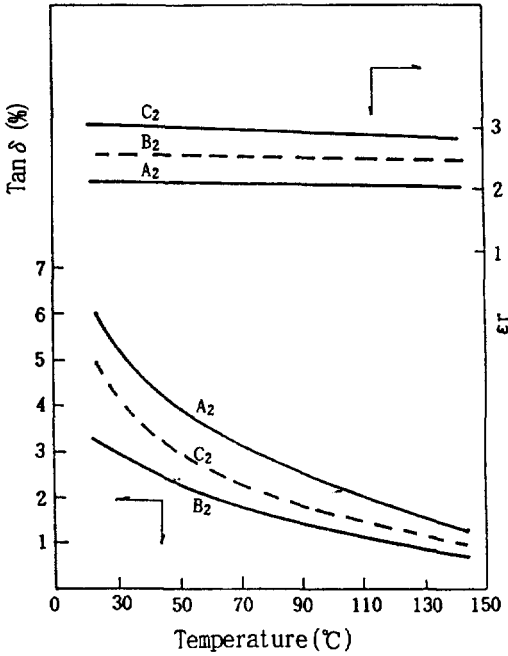


그림 8. 마이카/실리콘/PET복합재료의  $\tan \delta$   $\epsilon r$ -온도 관계  
 Fig. 8.  $\tan \delta$ ,  $\epsilon r$ -temperature characteristics of mica/si/PET composite

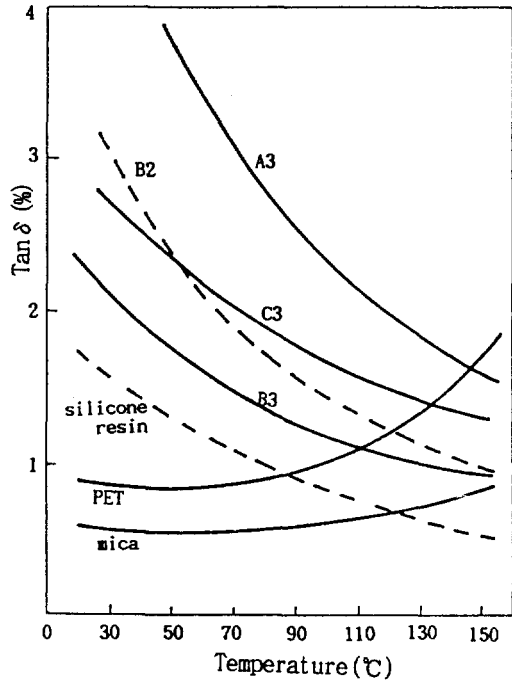


그림 9. 각 소재와 계면 결합제를 처리한 마이카/실리콘/PET복합재료의  $\tan \delta$ -온도 관계  
 Fig. 9.  $\tan \delta$ -temperature characteristics of mica, silicone resin, PET and coupling agent treated mica/si/PET composite

면을 처리하여 제작한<sup>7-10)</sup> Mica/Si/PET 복합재료 및 소재인 마이카, 실리콘 수지 및 PET의 유전정점과 온도의 상관관계를 나타낸 것이다.

그림에서 A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub> 및 C<sub>3</sub>의 Mica/Si/PET 복합재료 중에서 유전정점 특성이 가장 양호한 B<sub>3</sub> 시료와 그림 8에서 B<sub>3</sub>시료와 같은 아스펙비를 가진 B<sub>2</sub>시료와 비교해 보면 계면결합제 처리 효과를 알 수 있다. 즉, 그림 7, 8 및 9에서 같은 아스펙비를 가지며 가장 양호한 유전정점 특성을 가지고 있는 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> 및 B<sub>3</sub> 시료의 30°C에서의 유전정점 값을 비교하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tan \delta_{B_1} &= 6.5 \times 10^{-2} \\ \tan \delta_{B_2} &= 3.0 \times 10^{-2} \\ \tan \delta_{B_3} &= 2.2 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

여기서  $\tan \delta_{B_3}$ 의 값이  $\tan \delta_{B_2}$  보다 낮게 나타난 것은 계면결합제 처리효과로 간주할 수 있다. 즉, 마이카 페이프 표면을 계면결합제로 처리함으로써 마이카와 실리콘 수지의 결합을 양호하게 하며, 복합재료의 결합을 개선

하여 복합재료의 유전특성을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 특성이 가장 양호한 B<sub>3</sub>시료에 대하여 계면결합제 처리량을 변수로 하여 유전정점의 인가전압 의존성을 구한 것이 그림 10이다.

본 실험에서는 시료 내부의 미소 기포가 유전정점에 미치는 영향을 알아보기 위하여 인가전압에 대한 유전정점 특성을 구하였다. 일반적으로 복합재료 내부에 미소 기포가 분산되어 있을 경우는 인가전압이 증가하면 기포의 크기에 따라 순차로 부분방전을 일으켜서 유전정점이 증가하게 되므로, 유전정점 값이 크게 증가하는 재료는 내부 미소 보이드나 기포가 내재해 있다고 볼 수 있기 때문이다.<sup>11)</sup> 이 실험에서 계면결합제의 처리는 마이카 페이프 표면에 계면결합제 0.5% 수용액을 스프레이로서 분무한 후 약 100°C의 진공조 내에서 건조시킨 것으로, 건조 후 마이카 페이프

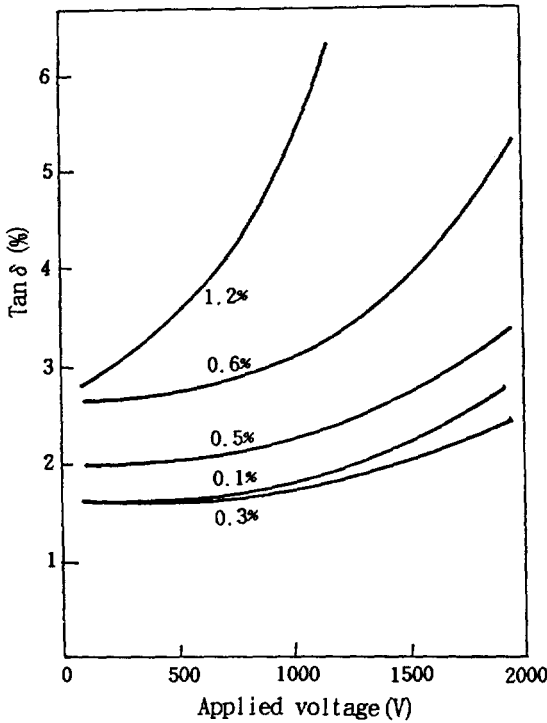


그림 10. 계면 결합제 처리량에 따른 B3 시료의  $\tan \delta$ -인가전압 관계

Fig. 10.  $\tan \delta$ -applied voltage characteristics of B3 sample with the coupling agent wt%

에 잔존하는 계면결합제의 양을 무게비(wt%)로서 그림 10에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 계면결합제 처리량이 마이카 페이프로 대한 무게비로 0.3wt%인 시료의 유전정접이 가장 낮고, 인가전압 증가에 대한 상승율도 가장 낮게 나타나므로, 이 경우가 최적 계면처리라고 볼 수 있다. 그러므로 이후의 실험에서 0.3wt%가 되도록 계면결합제를 처리하여 시료를 제작하여 실험하였다.

그림 11은 B<sub>3</sub>시료의 유전정접 및 비유전율의 온도특성에 미치는 마이카 함량의 영향을 나타내고 있다. 일반적으로 마이카의 함량이 증가하면 마이카의 우수한 전기적특성 때문에 복합재료의 관측 절연강도 및 내트랙킹성이 증가되고 인장 및 압축강도가 증가한다.<sup>7,11)</sup> 이 그림에서 Mica/Si 복합재료에 대한 마이

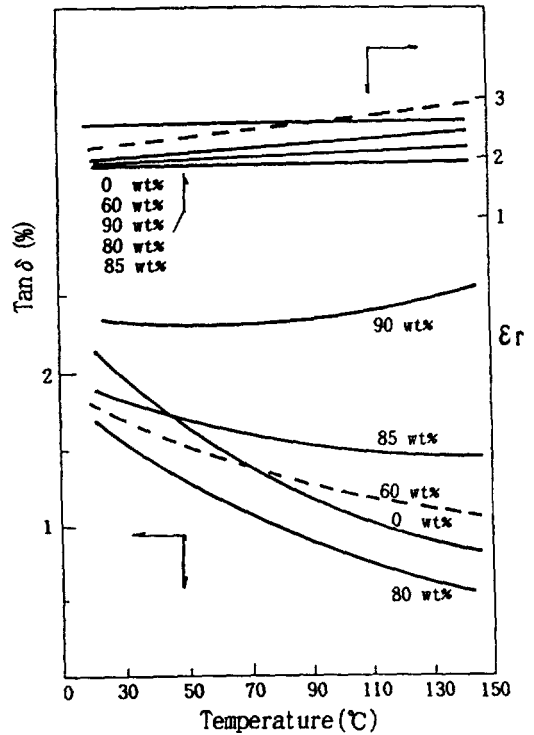


그림 11. 마이카 함량에 따른 B3시료의  $\tan \delta$ ,  $\epsilon_r$ -온도 관계

Fig. 11.  $\tan \delta$ ,  $\epsilon_r$ -temperature characteristics of B3 sample with the parameter of mica wt%

카 함량의 무게를 wt%로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 약 80wt%의 함량에서 유전정접이 가장 낮게 나타났다. 그러므로 본 연구에서 Mica/Si 복합재료는 마이카를 80wt% 함량으로 하여 제작한 것이다.

만일 마이카 함량을 50wt% 이하로 유전정접 값은 더욱 낮아질 수도 있으나 기계적 및 전기적 특성의 개선이 적으며, 90wt% 정도로 마이카 함량이 증가하면 마이카와 실리콘 수지의 계면에 미소 보이드나 기포 등이 많아지게 되어 전기적 특성이 저하된다.

그림 12는 A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub> 및 C<sub>3</sub> 복합재료의 체적저항-온도 특성을 나타내고 있다. 이 그림에서 아스펙비가 증가할수록 체적저항이 높게 나타남을 알 수 있으며, 그 값은 약  $10^{15}(\Omega \text{cm})$ 이다. 그림 13은 B<sub>3</sub>시료의 유전정접 및 비유전율의 주파수 및 온도 관계를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 전체적인 경향으로는 Mica/Si/PET 복합재료는 고주파가 되면 유전손실은 저하하며 50KHz 이후에서는 유전 정접 값이 1%이하이다. 그러나 A<sub>3</sub>나 C<sub>3</sub>시료의 유전정접 값은 약 2% 정도이다.

이상의 특성으로 보아 유전특성이 가장 양호한 B<sub>3</sub>시료는 고주파 특성도 양호한 것으로 나타남을 알 수 있다. 그러나 비유전율은 주파수 변화에 따라 변화가 적었으며 상용 주파수의 경우 약 3이었고 고주파인 경우 3~4 범위를 나타내었다.

그림 14는 Mica/Si 및 Mica/Si/PET 복합재료중 특성이 양호한 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> 시료에 대한 교류 절연강도와 아스펙비와의 상관관계를 구한 것이다. 일반적으로 아스펙비가 증가하면 절연강도가 상승하는 경향을 나타내며 양면에 PET를 코팅한 복합재료가 Mica/Si 복합재료보다 2배 정도의 높은 절연강도를 나타내고 있음을 알 수 있다.<sup>(12)~(15)</sup>

그림 15는 A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub> 및 C<sub>3</sub> 시료의 인장 스트레스-스트레인 곡선을 나타내고 있다. 스트레인 축의 임의의 시작점에서 인장이 시작한 것으로 하여 2mm 스트레인 일때의 크기를 나타내었다. 크로스 헤드 진행 속도는 10mm/min로 하여 상온에서 측정한 결과, 전체적인 경향은 아스펙비가 클수록 인장강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. B<sub>3</sub> 시료를 예를 들면 1차 항복점으로 보이는 10kg/mm<sup>2</sup>의 점에서 격입이 나타나지만 이점은 인장시 관찰에 의하면 복합재료의 내부 마이카 페이프의 파단점에 상당함을 알 수 있었다. 이후 PET가 마이카 페이프의 분리되는 점에서 최대 약 14kg/mm<sup>2</sup>을 나타낸 후 약 70~80%이상 PET 만의 연신이 계속되게 된다. A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>의 1차 항복점이 나타나는 스트레스는 각각 8, 10, 12.5kg/mm<sup>2</sup> 점에 나타남을 알 수 있다.

IV. 결 론

내열성이 우수한 실리콘 수지, 절연강도가 우수한 마이카 및 PET로서 Mica/Si 복합재료와 Mica/Si/PET 복합재료를 제작하여 이들 시료의 전기적 및 기계적 특성과 마이카의 함량등을 변수로하여 실험 및 검토를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마이카 페이프의 형성시 마이카 플레이크

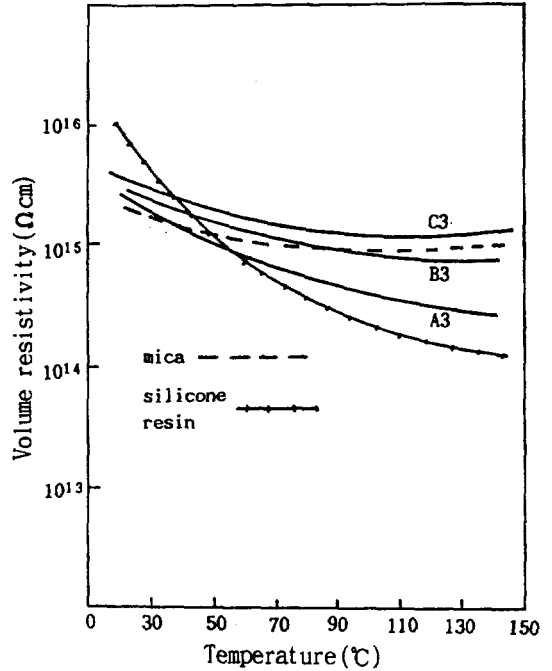


그림 12. A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> 시료의 체적 저항률-온도 관계  
Fig. 12. Volume resistivity-temperature characteristics of A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> sample

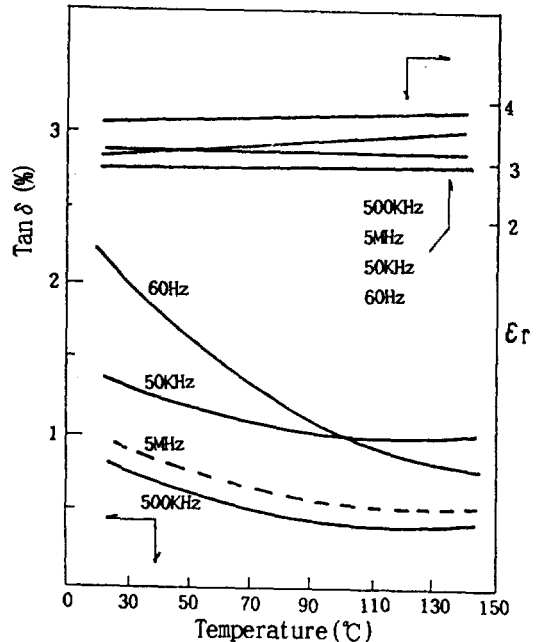


그림 13. 주파수 변화에 따른 B<sub>3</sub> 시료의 tan δ ε<sub>r</sub>-온도 관계  
Fig. 13. Tan δ, ε<sub>r</sub>-temperature characteristics of B<sub>3</sub> sample with the parameter of frequency

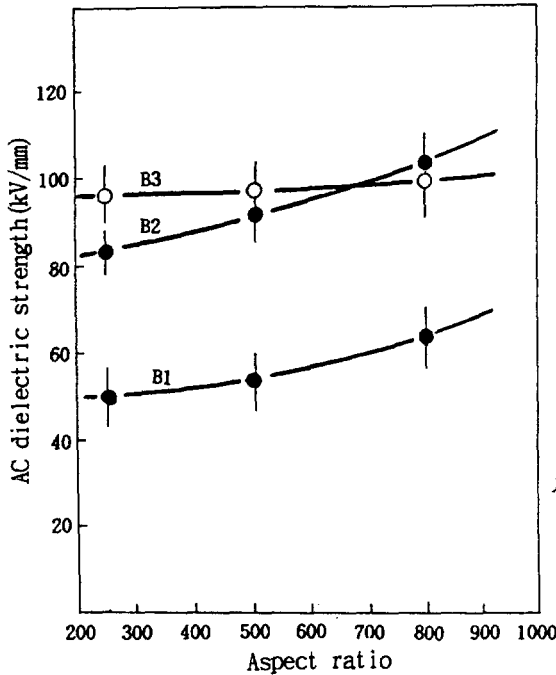


그림 14. B1, B2, B3 시료의 교류 절연강도-아스펙 비 관계

Fig. 14. AC dielectric strength-aspect ratio characteristics of B1, B2, B3 sample

의 아스펙비 450~550으로 제작한 복합재료의 유전특성이 가장 양호하였다.

2. 마이카 페이프 형성 후, 최적의 계면 결합제 사용량은 마이카 페이프 무게의 약 0.3wt%인 경우에 얻어졌다. 이 경우 계면결합제 처리 후 진공내에서 건조하지 않으면 상당량의 기포가 마이카 플레이트 사이에 존재하게 되어 전기적 및 기계적 성질을 저하시키므로 주의를 요한다.
3. 계면 결합제 처리를 끝낸 마이카 페이프는 진공 중에서 실리콘 수지에 함침하여야 기포없는 균일한 함침이 가능하며, Mica/Si 복합재료 형성시 마이카의 무게 함유율은 전체 복합재료 무게의 80wt%인 경우 최적의 전기, 기계적특성이 얻어졌다.
4. Mica/Si 복합재료의 양면에 PET로 코팅하여 Mica/Si/PET 복합재료를 제작함으로써 복합재료의 굽힘특성, 유전특성 특히 절연강도 특성, 고주파 특성 및 기계적 특성을 개선할 수 있다.

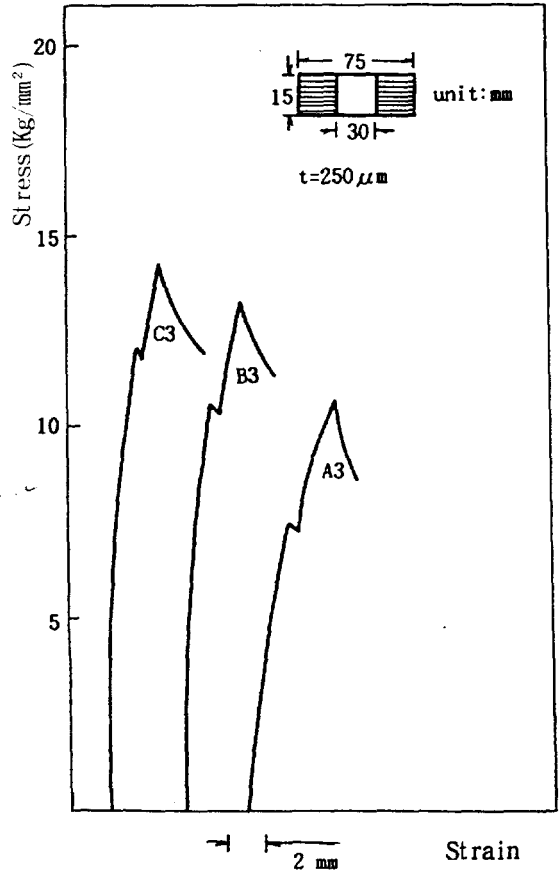


그림 15. A3, B3, C3시료의 스트레스-스트레인 관계

Fig. 15. Stress-strain characteristics of A3, B3, C3 sample

5. 본 연구에서 제작된 Mica/Si/PET 복합 절연재료는 높은 절연강도 및 기계적 강도를 가지며, 유전특성이 양호하고 유전손실이 적으므로 전기기기의 절연재료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 1990년도 교육부 학술연구조성비(신소재 분야)의 재정 지원으로 수행된 것으로 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

#### 참고 문헌

1. J. Rexer and E. Anderson, "Composite with planar reinforcement" Poly. Eng.

& Sci. Vol. 9, No.1, 1979.

2. J. W. Jhonson, "Matrices and their contribution to composite properties" Phil. Trans. Roy. Sci. London A294, pp.487-494, 1980.
3. Akemi Futagawa and S. Yamasaki, "Dynamic deformation and strength of stator end winding sudden short circuits" IEEE, Vol.EI-16, pp.31-36, 1981
4. J. Lulis et al., "The effect of flake aspect ratio on the flexural properties of mica reinforced plastics" Poly. Eng. & Sci. Vol.13, No.2, pp.139-145, 1973
5. R. R. Mcgregor "Silicone and their uses" Mcgrow-Hill Inc. N.Y. 1954.
6. Eugene G. Rochow "Silicon and silicones" Springer-verlag, 1987
7. E. Pink and J. D. Campbell, "Deformation characteristics of reinforced epoxy resin" J. Mater. Sci. Vol.9, pp.658-664, 1974
8. "Silo Ace" Chiso Co. Technical note No.001-84. 6, 1984
9. B. D. Favis et al., "The interaction of a cationic silane coupling agent with mica". J. of appl. polym. Sci., Vol.28, pp.1235-1244, 1983
10. M. S. Boaira and C. E. chaffery, "Effects of coupling agents on the mechanical and rheological properties of mica-reinforced poly-propylene" Poly. Eng. & Sci. Vol. 17, No.10, pp.715-718, 1977
11. C. H. Park, "Effect of mechanical stresses on the dielectric strength of polymer and composites". Ph. D. Thesis, Kyushu Univ., 1984
12. K. Kimura and S. Hirabayashi, "Dielectric breakdown of mica/epoxy composite". JIEE, Vol.97, No.5, pp.230-236, 1977
13. A. Wichmann and P. Grunewald, "Influence of dielectric stress concentration on voltage endurance of epoxy-mica generator insulation" IEEE, Vol. EI-12, No.6, pp.428-434, 1977
14. A. Wichmann and P.Grunewald, "Statistical evaluation of accelerated voltage endurance tests on mica insulation for rotating electrical machines" IEEE, Vol. EI-25, No.2, pp.319-323, 1990
15. H. Hara, C. H. Park and M. Akazaki, "Effect of heat treatment and mechanical stress on the dielectric strength of uniaxially drawn PET film" IEEE, Vol. EI-19, No.4, pp.237-280, 1984

(1992년 2월 25일 접수)

**조정수**

1935년 12월 21일생. 1961년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1976년 2월 부산대 전기공학과(공박). 1983년 8월 미국 Oregon Univ. 교환교수. 1992년 현재 부산대 전기공학과 교수.



**김순태**

1955년 4월 19일생. 1982년 부산대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 및 한국전력공사 입사. 현재 부산대 대학원 전기공학과 박사과정.



**곽영순**

1928년 12월 12일생. 1956년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 2월 부산대 전기공학과 공학석사 1992년 현재 부산대 전기공학과 교수.



**박정후**

1935년 12월 21일생. 1961년 2월 서울대 전기공학과 졸업. 1976년 2월 부산대 전기공학과(공박). 1983년 8월 미국 Oregon Univ. 교환교수. 1992년 현재 부산대 전기공학과 교수.

