

알루미나 분말의 첨가에 따른 실리콘고무수지 함침 마이카시트의 특성

論 文
54C-12-9

Effects of Alumina Powder on the Properties of Mica Sheet Impregnated with Silicone Rubber Resin

朴孝烈[†] · 姜銅弼^{*} · 安明相^{**} · 明仁惠^{***}

(Hoy-Yul Park, Dong-Pil Kang, Myeong-Sang Ahn, In-Hye Myung)

Abstract - This paper describes electrical resistivity, dielectric strength, thermal conductivity, thermal stability and tensile strength of mica sheet impregnated with silicone rubber resin or silicone rubber resin containing alumina powder. The mica sheet impregnated with silicone rubber resin had higher electrical resistivity, dielectric strength and tensile strength than those of virgin mica sheet. Electrical resistivity of mica sheet impregnated with silicone rubber resin containing alumina increased with increasing the amount of alumina. However, dielectric strength and tensile strength of mica sheet impregnated with silicone rubber resin containing alumina decreased with increasing the amount of alumina. The mica sheet impregnated with silicone rubber resin had lower thermal conductivity than that of virgin mica sheet. However, thermal conductivity of mica sheet impregnated with silicone rubber resin containing alumina increased with increasing the amount of alumina. In the case of thermal stability, thermal degradation of virgin mica sheet and impregnated mica sheet with silicone rubber resin did not occur up to 1100 °C and 400 °C, respectively.

Key Words : Mica Sheet, Silicone Rubber Resin, Alumina, Impregnation

1. 서 론

복합재료는 물리·화학적 성질이 서로 다른 소재를 기재 중에 기계적으로 복합화 시켜 유효한 기능과 재료역학적 강도를 나타내게 하는 재료이다. 지금까지 기재나 필러(filler, 충전제)와 같은 복합소재의 개발이나 복합공정의 개발과 개선 또는 보강효과의 향상에 관한 많은 연구들이 이루어져 왔으며, 많은 분야에 걸쳐 실용화 되어 왔다[1-3]. 특히, 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic: GFRP)의 양산체제가 시작된 이후 발전기, 전동기, 가스 차단기, 전력용 변압기 등의 전기기기의 절연재료로써 복합재료가 본격적으로 활용되기 시작하였고 지금까지 필러(filler)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-8].

마이카는 전기 절연성과 내열성이 뛰어나 난연성의 전기 절연물로서 사용되어 왔다. 마이카와 같은 판상보강재를 사용했을 경우 복합재료의 내부 보이드 발생율을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 전기적으로 관측 절연파괴강도를 높일 수 있는 장점이 있다[9, 10]. 그러나 천연 마이카는 대형 판상이나 층간 보이드가 포함되지 않는 시트(sheet)상의 것을 얻기 어려울 뿐 아니라 유연성이 적어 자연산 그대로 이용할 수 있는 곳은 많지 않다. 그래서 소형의 판상 마이카에 접착 바니시

로 처리 후 시트상이나, 페이퍼(paper) 및 테이프(tape)상으로 이용되는 것이 일반적이다[11].

현재 난연성의 절연재료로써 다양하게 사용되고 있는 마이카시트의 전기적, 열적, 기계적 특성 향상을 위하여 본 연구에서는 내열용 절연코팅재료로써 많이 사용되고 있는 실리콘 고무수지와 내열용 절연재료인 알루미나 분말을 사용하여 복합마이카시트를 제조하여 특성평가를 하였다. 마이카분말로부터 얻은 강도와 유연성이 거의 없는 마이카시트의 유연성 및 강도를 향상시키기 위하여 마이카시트를 실리콘고무수지에 함침시키고, 함침된 마이카시트의 열전도율과 전기절연저항을 높이기 위해 알루미나 분말을 필러로 첨가하였다. 본 연구에서는 마이카시트의 수지 함침과 필러의 첨가에 따른 복합마이카시트의 전기적, 열적, 기계적 특성평가를 위하여 전기절연저항, 절연파괴강도, 열전도율, 열안정성 및 인장강도를 측정하였다.

2. 본 론

2.1 실험

2.1.1 시약 및 재료

마이카 분말로부터 제조된 마이카시트는 유연성과 강도가 거의 없으므로 유연성과 강도를 향상시키기 위해 함침 바인더로써 내열성유제품의 표면코팅용으로 사용되는 KR2042 (ShinEtsu) 실리콘고무수지를 사용하였다. 열전도율을 증가시키기 위한 필러로써 알루미나 분말(Hanbo, WA 3000#)을 사용하였고, 함침바인더의 희석용매로써 methylethylketone (MEK, Samchun)과 경화촉매로써 D-4007(ShinEtsu)을 사용

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員 · 工博
E-mail : hypark@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

** 正會員 : 韓國電氣研究院 責任技士

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 研究員

接受日字 : 2005年 9月 30日

最終完了 : 2005년 11月 18日

하였다.

2.1.2 함침용액합성 및 함침마이카시트의 제작

마이카시트 함침용액을 합성하기 위해 실리콘고무수지 KR2042 100 wt%에 대해서 희석용매 MEK 300 wt%와 경화 촉매 D-4007 6 wt%를 첨가하여 상온에서 500 rpm으로 24시간동안 분산시켰다. KR2042/MEK 함침바인더 100 wt%에 대해서 알루미나 분말을 10, 30, 50 wt% 첨가하여 상온에서 500 rpm으로 24시간 동안 분산시켜 함침용액을 제조하였고, 함침용액에 따른 시편의 종류를 표 1에 나타내었다.

마이카시트는 가로 10 cm와 세로 10 cm 길이로 절단하고, KR2042/MEK 바인더 및 KR2042/MEK/Al₂O₃ 함침용액에 절단한 마이카시트를 1분 동안 함침시켰다. 함침된 마이카시트는 60 °C에서 6시간 동안 건조시키고, 200 °C에서 3시간 동안 경화시켰다.

표 1 함침용액에 따른 시편의 종류

Table 1 Kinds of samples according to synthetic conditions of solutions

Sample Name	Solution	Filler	Thickness of Sample
Virgin ^a	-	-	0.06 mm
Al ₂ O ₃ 0	KR2042/MEK 100 wt%	-	0.10 mm
Al ₂ O ₃ 10	KR2042/MEK 100 wt%	Al ₂ O ₃ 10 wt%	0.10 mm
Al ₂ O ₃ 30	KR2042/MEK 100 wt%	Al ₂ O ₃ 30 wt%	0.10 mm
Al ₂ O ₃ 50	KR2042/MEK 100 wt%	Al ₂ O ₃ 50 wt%	0.10 mm

^a: original mica sheet

2.2 함침마이카시트의 특성평가

2.2.1 절연저항 측정

인가된 전계를 E [V/m], 이때 흐르는 전류밀도를 i [A/m²] 라 하면 전도도(conductivity) σ 는

$$i = \sigma E \tag{1}$$

에 의해 결정되며 여기서 σ 의 역수를 고유저항 또는 저항률(resistivity)이라 하여 ρ 로 표시한다.

전기 절연 저항을 측정을 위한 시료는 필름 형태가 사용되었고, 전극은 3개로 이루어져 있으며, 이러한 전극의 구성은 그림 1과 같다.

체적저항을 ρ_v 과 표면저항을 ρ_s 은 (2)와 (3)의 식으로 정의된다.

$$\rho_v = \frac{A}{d} R_v \tag{2}$$

$$\rho_s = \frac{l}{g} R_s \tag{3}$$

여기서, R_v 및 R_s 는 그림 1에서 측정된 전류와 전압과의 비에서 얻어진 체적저항 및 표면저항, A 는 주전극의 단

면적, d 는 시편의 두께이다. l 은 주전극의 유효길이, g 는 전극간 거리이다. High Resistance Meter(HP사, HP 4339A)를 사용하여 500V의 전압을 인가하여 표면저항(R_s)과 체적저항(R_v)을 측정하여 체적저항율과 표면저항율을 계산하였다.

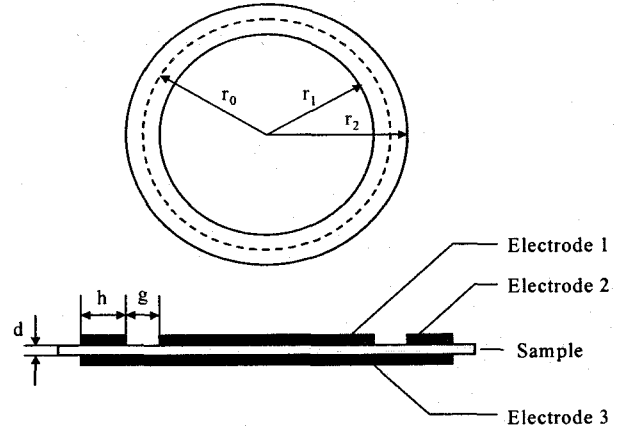


그림 1 전기절연 저항을 측정 장치의 전극 구성

Fig. 1 Schematic illustration showing the geometry of sample-electrode for measuring insulating resistance

2.2.2 절연파괴강도 측정

절연파괴는 절연재료의 성능을 지배하는 것으로서 실용상 매우 중요하다. 절연재료에 가해지는 전압이 증가함에 따라서 전류는 급격히 증가하게 되고 어느 한계를 넘으면 절연성을 잃고 도전성이 된다. 이렇게 되는 현상을 절연파괴라 하며 이때의 전압을 절연파괴전압이라고 한다. 절연파괴강도는 절연파괴전압을 시료의 두께로 나눈 값으로 나타낸다. 본 실험에서 절연파괴전압은 연면 방전을 방지하기 위하여 실리콘 오일 속에서 측정하였고, 직경이 12.5 mm인 구상과 관상의 전극을 사용하였으며 그림 2에 나타내었다. 교류전압을 500V/sec으로 상승시키면서 절연파괴전압을 측정하였다.

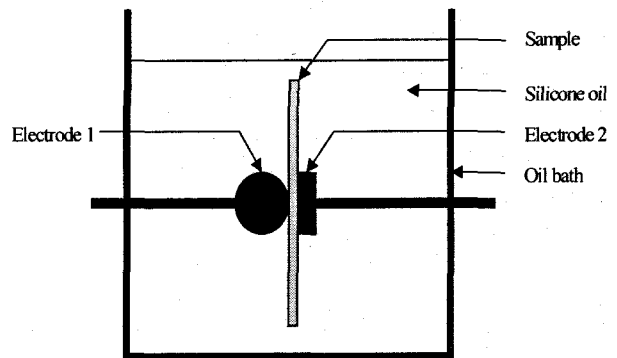


그림 2 절연파괴강도 측정실험의 전극 구성

Fig. 2 Electrode configuration of experiment for dielectric strength

2.2.3 열전도율 측정

물질의 이동을 수반하지 않고 열에너지가 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 현상을 열전도라고 한다. 단위 시간당, 단위 면적당 열전달량을 열유속(heat flux)이라 정의하면 열전달률은 면적에 수직한 방향의 온도구배에 비례하는데 그 비례상수를 열전도율(K)이라 하고 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_u = -K \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (4)$$

여기서, J_u 는 열유속, $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ 는 온도구배이다. 본 실험에서는 Quick Thermal Conductivity Meter(Kyoto Electronics사, QTM-500)를 사용하여 열전도율을 측정하였다.

2.2.4 열적 안정성 측정

열로 인한 시료의 화학적, 물리적 변화로 생기는 무게 변화를 시간과 온도에 따라 관찰하는 분석기기인 TGA를 사용하여 시편의 열적안정성을 측정하였다. TGA에는 시료의 무게 변화를 감지하는 micro balance가 장착되어 있으며 balance에는 위치를 일정하게 유지하는 flag가 있는데 만약 시료의 무게 증감이 발생하면 이 flag의 위치가 변하게 된다. 이 때 TGA는 그 원래 위치를 유지하기 위해 전류를 증가 또는 감소시키게 되는데 이 전류값이 무게로 환산되어 표시되는 것이다. 본 실험에서는 열적 안정성을 분석하기 위해 약 20 mg의 무게로 시료를 제조하고, TGA(TA사, SDT Q 600)를 사용하여 20°C/min으로 1200 °C까지 승온시키면서 각 시료의 분해온도를 측정하였다.

2.2.5 인장강도 측정

강도가 약한 마이카시트에 실리콘고무수지의 함침과 알루미늄 분말의 첨가에 따른 강도의 변화를 관찰하기 위하여 인장강도를 측정하였다. 인장강도(σ)는 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

여기서, F는 파괴시의 힘, A는 단위면적을 나타낸다. 본 실험에서는 인장시험기(Zwick사, Z 030)를 사용하여 1 mm/min의 인장속도로써 인장강도를 측정하였다.

2.3 결과 및 토론

2.3.1 절연저항

그림 3과 4에 마이카시트 원재료와 실리콘고무수지 함침바인더의 알루미늄 분말의 첨가량에 따른 마이카시트의 표면저항률과 체적저항률을 나타내었다. 마이카시트 원재료인 virgin 시편과 비교하여 실리콘고무수지에 마이카시트를 함침시킨 시편의 표면저항률과 체적저항률이 증가하였다. 실리콘고무수지에 첨가된 알루미늄 분말의 함량이 증가할수록 여기에 함침시킨 마이카시트 복합재료의 표면저항률과 체적저항

률도 증가하였다. 함침바인더의 절연저항률이 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상이므로 마이카시트 원재료에 비하여 높고, 알루미늄 분말의 절연저항률이 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상이므로 함침된 마이카시트에 비하여 높다. 따라서 마이카시트를 실리콘고무수지 및 알루미늄 분말이 첨가된 실리콘고무수지에 함침시키면 절연저항률이 증가함을 알 수 있다.

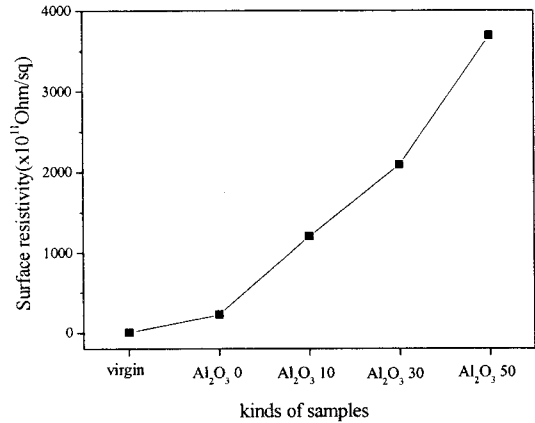


그림 3 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 표면저항

Fig. 3 Surface resistivity of mica sheet according to kinds of solutions

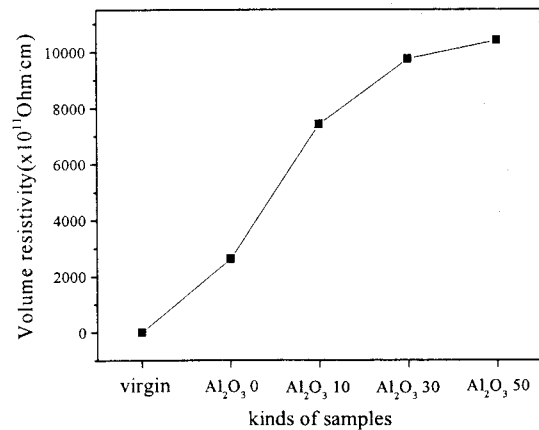


그림 4 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 체적저항

Fig. 4 Volume resistivity of mica sheet according to kinds of solutions

2.3.2 절연파괴강도

그림 5에 마이카시트 원재료와 실리콘고무수지 함침바인더의 알루미늄 분말의 첨가량에 따른 마이카시트의 절연파괴강도를 나타내었다. 마이카시트 원재료인 virgin 시편과 비교하여 실리콘고무수지에 함침시킨 마이카시트의 절연파괴강도는

증가하였다. 이것과 비교하여 알루미늄분말을 점차적으로 10 wt%, 30 wt%, 50 wt%로 첨가한 실리콘고무수지에 함침한 마이카시트의 절연파괴강도는 점차 감소하였다. 강도가 약하고 기공이 존재할 수 있는 마이카시트 원재료를 바인더에 함침시킴으로서 절연파괴강도가 증가하였지만 함침바인더에 첨가된 알루미늄 분말의 함량이 증가함에 따라서 분말과 함침바인더의 계면현상에 의하여 절연파괴강도는 오히려 감소함을 알 수 있다. 이러한 이유는 실리콘고무수지와 알루미늄 분말 사이의 계면이 많아짐으로서 계면에서의 전계집중 효과와 함께 입자의 계면이 전기적인 약점으로 작용하여 전자사태가 성장하기 쉽기 때문이다[12, 13].

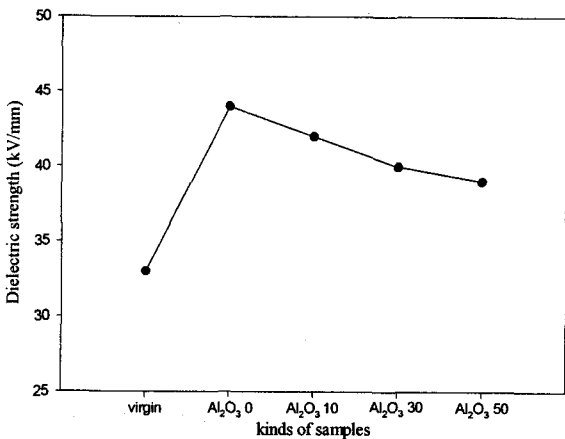


그림 5 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 절연파괴강도
 Fig. 5 Dielectric strength of mica sheet according to kinds of solutions

2.3.3 열전도율

그림 6에 마이카시트 원재료와 알루미늄 분말의 첨가량에 따른 마이카시트의 열전도율을 나타내었다.

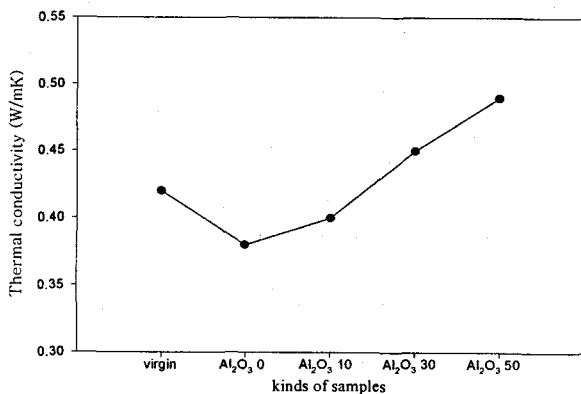


그림 6 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 열전도율
 Fig. 6 Thermal conductivity of mica sheet according to kinds of solutions

마이카시트 원재료인 virgin 시편과 비교하여 실리콘고무수지에 마이카시트를 함침시킨 시편의 열전도율은 감소하였지만 알루미늄 분말의 첨가량이 10 wt%, 30 wt%, 50 wt%로 증가함에 따라서 열전도율은 상승하였다. 무기재료인 마이카시트를 열전도율이 낮은 실리콘고무수지에 함침시킴으로서 열전도율이 감소하였고, 열전도율이 우수한 알루미늄 분말을 함침바인더에 첨가함에 따라서 복합마이카시트의 열전도율이 증가됨을 알 수 있다.

2.3.4 열분해 특성

복합마이카시트의 사용 가능 온도를 알기 위하여 마이카시트 원재료와 함침바인더에 대한 알루미늄 분말의 첨가량에 따른 마이카시트의 TGA 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 마이카시트 원재료는 1100 °C까지 열분해가 발생하지 않았으며, 실리콘고무수지에 함침시킨 마이카시트 시편은 400 °C부근에서 분해가 발생하였고 알루미늄 분말의 함량이 증가할수록 무게감소비는 줄어들었다. 마이카시트 원재료와 알루미늄 분말은 1100 °C까지 열분해가 발생되지 않으므로 400 °C 부근에서의 열분해는 실리콘고무수지의 열분해에 의한 것을 알 수 있다.

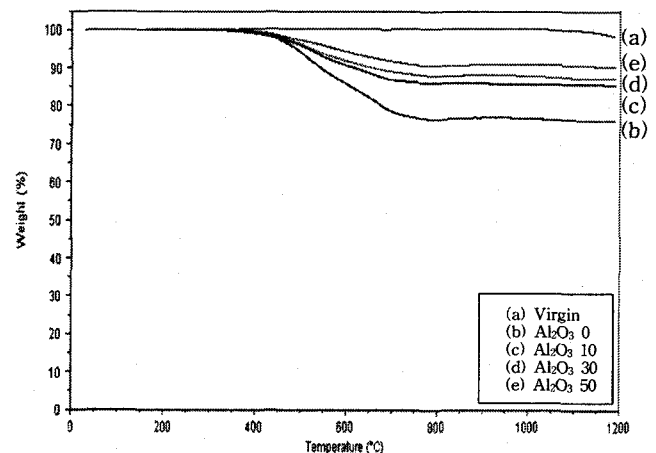


그림 7 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 TGA 곡선
 Fig. 7 TGA graph of mica sheet according to kinds of solution

2.3.5 인장강도

그림 8에 마이카시트 원재료와 함침바인더에 대한 알루미늄 분말의 첨가량에 따른 마이카시트의 인장강도를 나타내었다. 마이카분말을 시트로 제조한 virgin 시편의 인장강도는 매우 낮게 나타났다. 실리콘고무수지만을 함침시킨 시편의 마이카시트의 인장강도는 급격하게 증가하였고, 실리콘고무수지에 첨가한 알루미늄 분말의 함량이 증가할수록 복합마이카시트의 강도는 감소하였다. 실리콘고무수지에 첨가된 알루미늄 분말은 강도의 향상에 기여하지는 못하고 오히려 알루미늄 분말과 실리콘고무수지 사이의 계면효과에 의하여 강도가 감소하는 모습을 나타내었다.

참 고 문 헌

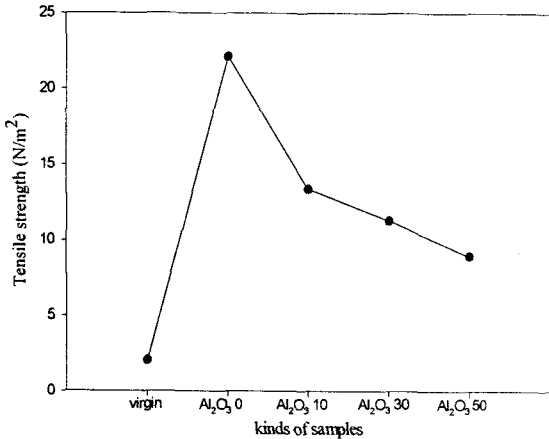


그림 8 함침바인더의 종류에 따른 마이카시트의 인장 강도

Fig. 8 Tensile strength of mica sheet according to kinds of solution

3. 결 론

마이카시트의 전기적, 열적, 기계적 특성 향상을 위하여 내열용 절연코팅재료인 실리콘고무수지와 내열용 절연재료인 알루미늄나 분말을 사용하여 복합마이카시트를 제조하여 특성 평가를 하였다.

- (1) 절연저항 : 실리콘고무수지에 함침시킨 마이카시트는 마이카시트 원재료보다 절연저항률이 증가하였고, 실리콘고무수지에 첨가한 알루미늄의 양이 증가할수록 함침시킨 마이카시트의 절연저항률은 증가하였다.
- (2) 절연파괴강도 : 실리콘고무수지에 함침시킨 마이카시트는 마이카시트 원재료보다 절연파괴강도가 증가하였고, 실리콘고무수지에 첨가한 알루미늄의 양이 증가할수록 함침시킨 마이카시트의 절연파괴강도는 감소하였다.
- (3) 열전도율 : 실리콘고무수지에 함침시킨 마이카시트는 마이카시트 원재료보다 열전도율이 감소하였고, 실리콘고무수지에 첨가한 알루미늄의 양이 증가할수록 함침시킨 마이카시트의 열전도율은 증가하였다.
- (4) 열적 안정성 : 마이카시트 원재료의 내열온도는 1100 °C였고, 실리콘고무수지에 함침한 마이카시트의 내열온도는 400 °C였다. 실리콘고무수지에 대해 알루미늄나 분말의 함량이 증가할수록 무게감소비가 줄어들었다.
- (5) 인장강도 : 실리콘고무수지에 함침한 마이카시트는 마이카시트 원재료보다 인장강도가 급격하게 증가하였고, 실리콘고무수지에 첨가한 알루미늄나 분말의 양이 증가할수록 함침시킨 마이카시트의 강도는 감소하였다.

마이카시트를 실리콘고무수지에 함침시킴에 따라서 전기적 특성과 기계적 특성이 향상되었고, 실리콘고무수지에 알루미늄나 분말을 첨가함에 따라서 절연저항 및 열전도율은 향상되었지만 절연파괴강도 및 인장강도는 감소하는 결과를 나타내었다. 복합마이카시트의 사용 분야 및 용도에 따라서 알루미늄나 분말의 첨가량이 결정되어야 함을 알 수 있었다.

- [1] B. M. Badran, A. Galeski and M. Kryszewski, "High-Density Polyethylene Filled with Modified Chalk", J. Appl. Polym. Sci., vol. 27, no. 10, pp. 3669-3681, 1982.
- [2] R. Kalinski and A. Galeski, "Low-Density Polyethylene Filled with Chalk and Liquid Modifier", J. Appl. Polym. Sci., vol. 26, no. 12, pp. 4047-4058, 1981.
- [3] W. J. McGill and J. Fourie, "The Effects of Fillers, Crosslinking Agents, and Domain Size on the Physical Properties of PE-PCV Blends", J. Appl. Polym. Sci., vol. 19, no. 3, pp. 879-886, 1975.
- [4] B. R. Norton, "Engineering Applications of Composites", Academic Press, 1974.
- [5] Morita M, "Status of FRP in Electric Industries", Extended Abstract Bulletin, 11th FRP-Symposium, pp. 67-75, 1982.
- [6] C. H. Park, "A Study of the Dielectric and Mechanical Property Interactions of Glass Cloth / Epoxy Composite", IEEE, vol. EI-22, pp. 389-395, 1987.
- [7] R. W. Staley, "New Comfortable Mica Paper Tapes 2", IEEE, vol. CH 1717, pp. 65-68, 1981.
- [8] H. M. Tsu, "Improvement of Rotation Machinery Insulation Characteristics by Using Paper Containing Aramid Fibril", IEEE, vol. EI-18, pp. 651-656, 1983.
- [9] 조정수, 김순태, 광영순, 박정후, "마이카/실리콘 복합재료의 전기, 기계적 특성과 마이카 아스펙 비의 상관관계의 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, 4호, 제 5권, pp. 374-384, 1992.
- [10] A. Futagawa and S. Yamasaki, "Dynamic deformation and strength of stator end winding sudden short circuits", IEEE, vol. EI-16, pp. 31-36, 1981.
- [11] J. Lusic, R. T. Woodhams and M. Xanthos, "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.
- [12] 吉村 昇, "エポキシ樹脂の 直流破壊電壓に 及ぼす 充てん劑の 効果", 日本電氣學會誌, A, 102卷, pp. 30-50, 1987.
- [13] Edwin P. Plueddemann, "Silane Coupling Agents", Additives for Plastics, Volume 1, State of the Art, Academic Press, pp. 123-167, 1980

저 자 소 개



박 효 열 (朴 孝 烈)

1962년 3월 8일생. 1986년 부산대 무기재료공학과 졸업. 2004년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학) 1988년~현재 한국전기연구원 선임연구원

Tel : 055-280-1611

Fax : 055-280-1590

E-mail : hypark@keri.re.kr



강 동 필 (姜 銅 弼)

1955년 11월 15일생. 1982년 부산대 대학원 고분자공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 고분자공학과 졸업(공학). 1986년~현재 한국전기연구원 책임연구원

Tel : 055-280-1610

Fax : 055-280-1590

E-mail : dpkang@keri.re.kr



안 명 상 (安 明 相)

1962년 2월 7일생. 1983년 부산전문대학 졸업. 1987년~현재 한국전기연구원 책임기사

Tel : 055-280-1612

Fax : 055-280-1590

E-mail : msahn@keri.re.kr



명 인 혜 (明 仁 惠)

1979년 3월 12일생. 2002년 부경대학교 화상정보공학부 졸업. 2004년 동 대학원 화상정보공학부 졸업(석사). 2003년~현재 한국전기연구원 연구원

Tel : 055-280-1614

Fax : 055-280-1590

E-mail : ihmyung@keri.re.kr