

## 에폭시/마이크로실리카/나노실리카 혼합 콤포지트의 열적, 전기적 특성

강근배<sup>1</sup>, 권순석<sup>1</sup>, 박재준<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 중부대학교 전기전자공학과

### Thermal, Electrical Properties for Epoxy/Microsilica/Nanosilica Composites

Geun Bae Kang<sup>1</sup>, Soon-Seok Kwon<sup>1</sup>, and Jae-Jun Park<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Geumsan 312-702, Korea

(Received August 13, 2012; Revised August 20, 2012; Accepted September 4, 2012)

**Abstract:** The epoxy/micro- and nano-mixed silica composites (EMNC) systems were prepared and the AC insulation breakdown strength was evaluated. Glass transition temperature (T<sub>g</sub>) and crosslink density were also measured by dynamic mechanical analyzer (DMA) in order to correlate them with the electrical and mechanical properties, and the effect of silane coupling agent on the electrical properties was also studied. Electrical properties and crosslink density of epoxy/micro-silica composite were noticeably improved by addition of nano-silica and silane coupling agent, and the highest breakdown strength was obtained by addition of 0.5~5 phr of nano-silica and 2.5 phr of silane coupling agent, and the highest tensile and flexural strength were obtained by addition of 2.5 phr of nano-silica.

**Keywords:** Epoxy composite, Micro-silica, Nano-silica, Insulation breakdown, Crosslink density

#### 1. 서론

에폭시 수지 계는 전기적 성질이 탁월할 뿐만 아니라 기계적, 열적 특성이 우수하기 때문에 몰드 형태의 변압기, 변류기 (current transformers, CT), 변압기 (potential transformers, PT), 계기용 변성기 (metering out-fit, MOF), 가스 절연 개폐장치 (gas switching gears) 등과 같은 중전기용 절연재료로 사용되고 있다 [1-5]. 지난 20년 간 절연물 재료 분야에서는 가격적인 이점을 가지면서 고성능을 발휘할 수

있는 에폭시 수지 복합재료 개발이 급속도로 진전되어 왔다. 일반적으로 이것들은 60~80 wt% 정도의 마이크로 실리카 입자를 함유하는데, 이로 인해서 중전기 장치의 제조 공정이나 그것들이 사용되는 기간 동안에 재료의 치수 안정성, 열적, 기계적 성질, 수열 열화 특성, UV 저항성 등을 확보할 수 있기 때문이다. 그렇지만 성질이 다른 두 가지 종류의 재료가 혼합될 때 둘 사이의 친화성이 거의 없기 때문에 계면에서 재료의 약점이 나타나게 된다. 즉, 마이크로 실리카의 표면은 수산기를 많이 갖기 때문에 물과 친한 성질 (친수성)을 가지며, 에폭시 수지는 기름과 친한 성질 (친유성, 즉 소수성)을 갖기 때문에 계면의 특성

a. Corresponding author: [jjpark@joongbu.ac.kr](mailto:jjpark@joongbu.ac.kr)

이 약한 것이다. 따라서 이들 재료가 사용된 부품이 사용되는 동안에 대기 온도의 변화 및 자체 발열이 계속적으로 반복되게 되므로 열팽창 계수가 다른 이종 재료 사이의 계면에 주기적인 열 충격이 가해지게 된다. 결과적으로 마이크로 크랙 (균열)이 계면으로부터 시작되어 성장하여 최종적으로 부품 전체의 전기적 쇼크에까지 이르게 된다. 이것이 복합재료에서 계면 특성이 가장 중요하게 다루어져야 할 요소인 이유이다 [6-8]. 이와 같은 계면의 약점을 극복하기 위해서는 필러의 입자 크기가 작을수록 유리하고, 가능하면 나노 크기까지 만드는 것이 좋으며, 실리카와 에폭시 사이의 친화성을 높이기 위해서 실리카의 표면을 결합제 (coupling agent)로 처리하여 친유성을 부여한 후 에폭시 수지에 도입하는 것이 바람직하다 [9-13]. 그런데, 마이크로 또는 나노 입자가 고분자 매트릭스 내에서 혼합될 때 상호간에 작용하는 Van der Waals 인력이나 수소 결합력에 의해 응집되어 더 큰 입자로 존재하는 것이 일반적이다. 따라서 이것들을 균일하게 분산시키는 것은 매우 어려운 작업이다. 게다가 고분자 나노 복합재료에서는 강제적으로 분산된 나노 입자들이 제조 과정이나 그것들이 사용되는 과정에서 이동하여 재 응집하게 됨으로써 제품의 특성을 약화시키고 수명을 단축시킨다. 그러므로 제품 설계 단계에서부터 이들 나노 입자의 균일한 분산을 유지하기 위한 많은 방법들이 고려되고 있다. 이 방법들 중의 하나로 고려되는 것이 실란계 결합제에 의해 나노 입자의 표면을 코팅하는 것이다. 이 방법은 나노 무기물 입자와 에폭시 매트릭스 사이의 친화성을 향상시킬 뿐만 아니라 실란 결합제의 관능기가 에폭시 수지의 관능기와 반응하여 화학적으로 결합함으로써 무기 필러의 분산을 용이하게 하고, 고분자 내에서의 이동을 억제하게 된다 [14].

본 연구에서는 중전기 장치에 사용되고 있는 SF<sub>6</sub> 가스 절연물을 대체할 수 있는 에폭시/마이크로와 나노 혼합 실리카 복합재료 (epoxy/micro-and nano-mixed silica composites, EMNC)를 개발하고, 이 재료의 교류 절연 파괴강도 및 부분방전 저항성을 평가하였고, 기계적 성질을 시험하였다. 실란 결합제가 전기적 물성에 미치는 영향도 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

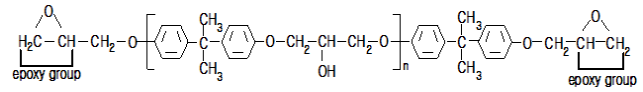


Fig. 1. Molecule structure of YD-128.

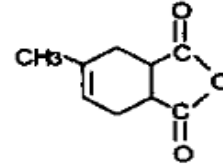


Fig. 2. Hardener structure of Me-THPA.

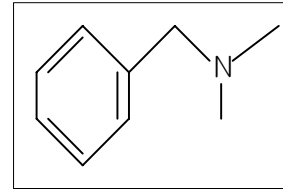


Fig. 3. Accelerant structure of BDMA.

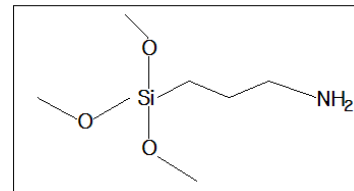


Fig. 4. Silane coupling agent structure (an amine, KBE-903).

에폭시 수지는 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A) 타입의 YD-128 (국도화학)을 사용하였다. 그 당량은 184~190 g/eq이고, 점도는 25℃에서 11,500~13,500 cps이며, 그 화학적 구조는 다음과 같다. 경화제는 Me-THPA (3-or 4-methyl-1,2,3,6-tetra hydrophthalic anhydride)이며, 그 구조는 다음과 같다. 촉매는 BDMA (benzyl dimethylamine, 국도화학)를 사용하였고, 아민계 실란 결합제는 ShinEtsu 사의 KBE-903을 사용하였다. 이들의 화학적 구조는 다음과 같다.

실리카 입자는 두 가지가 사용되었다. 하나는 Nanostructure & Amorphous Materials 사의 평균 입자 크기가 10 nm인 제품이고, 다른 하나는 Sibelco

Asia 사의 상품명 CA0020으로 평균 입자 크기가 2 μm인 제품이다. 이들은 사용하기 전에 80℃의 진공 오븐에서 24시간 건조 후에 사용하였다.

### 2.2 실리카의 실란 커플링제 처리

소요되는 실란의 양은 다음 식에 의해서 구한다.

$$\text{실란처리소요량} = \frac{\text{나노실리카중량} \times \text{실리카비표면적} (m^2/g)}{\text{실란습윤면적} (ws)}$$

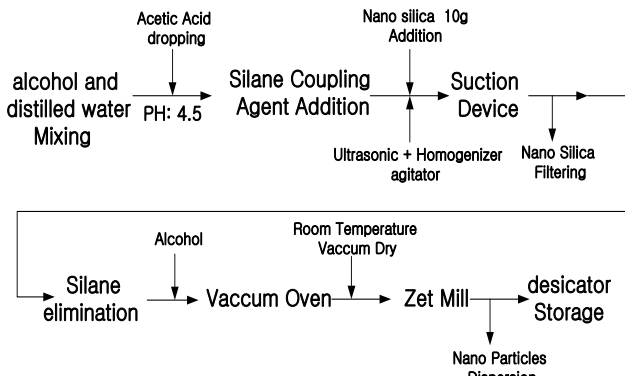


Fig. 5. Surface treatment procedure of silane coupling agent for silica.

Table 1. Humidity area of silane(ws).

Silane Types	Description	humidity area (ws)
Amine	gamma-Aminopropyltri-ethoxysilane	353
Amine	gamma-Aminopropyltri-methoxysilane	353
Epoxy	gamma-Glycidoxypropyltri-methoxysilane	330

Table 2. Specific surface area of fillers.

Filler Types	Specific surface area ( m <sup>2</sup> /g)
Silica powder	1~2
Kaolin	7
Fumed silica	150~300
Clay	7
Talc	7
Calcium silicate	2.6

그리고 실란의 습윤면적 및 실리카의 비표면적은 표 1와 2에 나타내었다. 실리카의 실란 커플링제 표면처리 순서를 그림 5에 나타내었다.

### 2.3 EMNC의 제조

표 3에 나타냈듯이 마이크로 입자가 도입된 에폭시계는 마이크로 복합재료 (EMC)라 명명하였고, 여기에 나노 입자를 도입한 계는 에폭시-마이크로-나노 복합재료 (EMNC)라 명명하였다. ENMC에서 나노 입자의 함량은 0.5, 1.0, 5.0 phr (part per one hundred epoxy resin, 에폭시 100 g 당 함량)에 대해 제조하였다. 또한, 경화제는 80 phr, 마이크로 실리카 입자는 50 phr로 고정하였다. 이들 각각의 계에 실란 결합제 2.5 phr을 도입한 경우에 대해서도 제조하였다.

Table 3. Epoxy and a component of EMNC.

Samples Types	Epoxy (phr)	Hardener (phr)	Accelerator (phr)	Silane Coupling Agent	Micro silica (phr)	Nano silica (phr)
EMC				0		0
EMC-s				2.5		0
EMNC-0.5				0		0.5
EMNC-0.5s	100	80	0.9	2.5	50	0.5
EMNC-1.0				0		1.0
EMNC-1.0s				2.5		1.0
EMNC-5.0				0		5.0
EMNC-5.0s				2.5		5.0

\* 시편 명명에서 E는 에폭시, M은 마이크로, N은 나노, C는 복합재료 그리고 s는 실란 결합제를 의미.

시편을 제조하는 순서는 그림 6 그리고 조직구성은 그림 7에 나타내었다. 에폭시 수지에 실란 결합제를 2.5 phr 넣은 후 homogenizer (T 25 digital ULTRA-TURRAX, ICA)를 사용하여 5,000 rpm으로 10분 간 혼합하였다. 그리고 여기에 마이크로 실리카 50 phr과 나노 실리카 0.5~5.0 phr을 넣고 homogenizer를 10,000 rpm으로 높인 상태에서 500 W급 probe-type의 초음파 분쇄기 (VC 505, Sonics & Materials Inc.)를 넣고 20 kHz 출력 조건으로 30분간 혼합하였다. 그 다음에 초음파 분쇄기는 제거하고, homogenizer의 교반속도를 5,000 rpm으로 낮춘 후, 경화제 80 phr과 촉매 0.9 phr을 넣고 10분 간 유지하였다. 이 혼합물을 몰드에 주입하고, 진공 오븐에서 기포를 제거한 후 120℃에서 2시간 경화시킨 후 150℃에서 2시간 더 경화시켜서 시편을 얻었다.

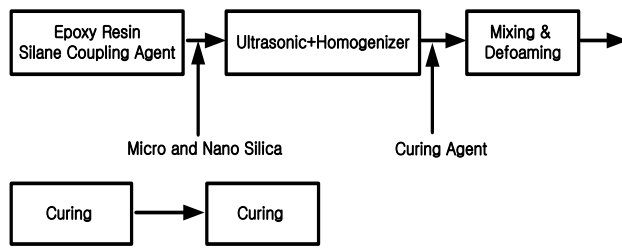


Fig. 6. Preparation sample.

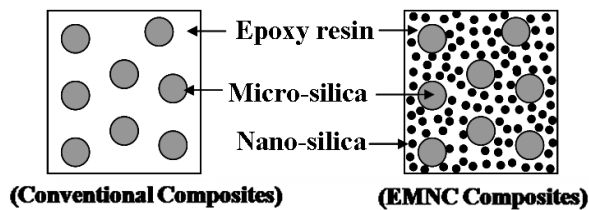


Fig. 7. Inner structure of EMNC.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 EMNC 계의 유리전이 온도

고분자의 유리전이 온도 ( $T_g$ )는 고분자의 주사슬, 가지, 가교도 등과 같은 고분자 사슬의 구조와 밀접하게 관련되어 있기 때문에 고분자 재료의 기계적, 열적, 전기적 특성 등을 연구하기 위해서는 반드시 고려해야 할 특성값이다. 그림 8은 에폭시 매트릭스만의 DSC 결과와 EMC 및 EMNC의 DSC 결과를 나타내고 있다. 모든 곡선이  $T_g$  이상의 온도에서 발열 특성을 나타내지 않고 있으며, 이는 마이크로 및 나노 실리카 입자의 도입에 관계없이 본 경화조건에서는 거의 모든 에폭시 수지가 반응에 참여했다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 발열반응을 일으킬 만큼의 미반응 에폭시 그룹이 남아있지 않다는 것이다.

에폭시 수지 매트릭스만의  $T_g$ 값은  $128.2^\circ\text{C}$ 이고, 여기에 마이크로 실리카가 50 phr 도입된 EMC 계의  $T_g$ 값은  $94.9^\circ\text{C}$ 로  $33.3^\circ\text{C}$  낮아진 것을 알 수 있다. 에폭시 수지에서 소량의 마이크로 실리카가 도입된 경우에는 에폭시 수지의 수산기와 실리카 표면의 수산기 사이에 수소결합이 작용해서 고분자 사슬들의 운동성이 제약을 받게 되기 때문에  $T_g$ 가 상승하게 된다. 그렇지만, 본 계에서와 같이 실리카가 다량으로 도입된 경우에는 경화반응이 진행되는 과정에서 실리

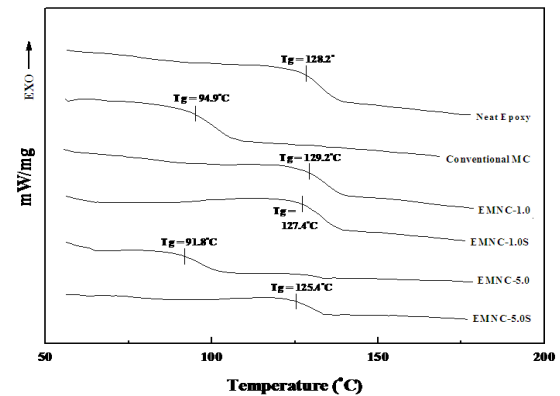


Fig. 8. Analysis of DSC for epoxy composites.

카 입자들이 에폭시 수지 반응물들의 유동성을 방해하기 때문에 경화반응이 치밀하게 진행되지 못하고, 사슬들이 많이 끊긴 상태로 반응이 종결되기 때문에  $T_g$ 값이 크게 감소한 것으로 여겨진다. 50 phr의 마이크로 실리카 입자가 도입된 EMC계에 1.0 phr의 나노 실리카 입자가 추가로 도입된 EMNC-1.0계의  $T_g$ 값은  $129.2^\circ\text{C}$ 에서 나타났으며, 이 값은 에폭시 수지 매트릭스만의  $T_g$ 값과 유사한 값을 나타내었다. 반면에, 50 phr의 마이크로 실리카 입자가 도입된 EMC계에 5.0 phr의 나노 실리카 입자가 추가로 도입된 EMNC-5.0계의  $T_g$ 값은  $91.8^\circ\text{C}$ 로 에폭시 수지 매트릭스만의  $T_g$ 값에 비해  $36.4^\circ\text{C}$  낮고, EMC와는 유사한 값을 나타내었다. 이는 1.0 phr의 나노실리카가 도입된 경우에는 나노 실리카 입자들이 마이크로 입자들 사이에 충전되어 들어감으로써 수소결합에 의한 물리적 결합력을 증진시키기 때문에  $T_g$ 값이 증가하게 된다. 그렇지만, 5.0 phr의 나노 실리카가 충전된 경우에는 나노 입자들 사이에 응집이 많이 일어나게 되므로 마이크로 입자들 사이에 충전되어 들어가기 어렵게 되기 때문에  $T_g$ 값이 EMC계의  $T_g$ 값과 비슷하게 된 것으로 판단된다.

이는 1.0 phr의 나노실리카가 도입된 경우에는 나노 실리카 입자들이 마이크로 입자들 사이에 충전되어 들어감으로써 수소결합에 의한 물리적 결합력을 증진시키기 때문에  $T_g$ 값이 증가하게 된다. 그렇지만, 5.0 phr의 나노 실리카가 충전된 경우에는 나노 입자들 사이에 응집이 많이 일어나게 되므로 마이크로 입자들 사이에 충전되어 들어가기 어렵게 되기 때문에  $T_g$ 값이 EMC계의  $T_g$ 값과 비슷하게 된 것으로 판단된다. 실란 결합제가 2.5 phr 도입된 것 외에는 모

든 조성이 EMNC계와 같은 EMNC-1.0S의 Tg값은 127.4°C이고, EMNC-5.0s계의 Tg값은 125.4°C이다. 이 결과로부터 실란 결합제가 마이크로 실리카 및 나노 실리카 입자들에 결합함으로써 표면을 친수성 분위기에서 친유성 분위기로 바꾸어 줌으로써 입자들 간의 응집을 억제해서 고르게 분산되도록 하고, 또한 이들 입자가 에폭시 수지와 화학적 결합으로 연결되도록 한다는 것을 알 수 있다 [14].

### 3.2 EMNC계의 가교밀도

에폭시 수지의 가교도가 증가함에 따라 Tg가 증가한다는 것은 잘 알려진 사실이며, 본 연구에서도 가교도의 측면에서 Tg 변화를 설명하기 위해서 Kaji 등 [16]이 제안한 아래의 식을 사용하였다.

$$\rho = \frac{E'}{3RT} \tag{1}$$

여기서,  $\rho$ 는 가교도 ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )이고,  $E'$ 은 DMA 곡선의  $\tan\delta$  피크로부터 구한 Tg에서의 저장 탄성계수 ( $\text{J}/\text{cm}^3$ ), R은 기체상수 ( $8.314 \text{ J}/\text{K} \cdot \text{mol}$ ), 그리고 T (K)는 Tg의 절대온도이다.

그림 9은 유리상에서 에폭시 수지 매트릭스만의 저장 탄성율은 마이크로 실리카 50 phr이 도입됨에 의해서 크게 높아졌으며, 1 phr의 나노 실리카가 추가됨에 의해 훨씬 더 높아진 것을 나타내고 있다. 여기에 나타내지는 않았지만, 5 phr의 나노 실리카가 EMC에 도입된 경우에도 유리상에서의 저장 탄성율이 훨씬 더 높은 위치에서 나타나는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 마이크로 실리카가 에폭시에 도입됨에 의해 이들 두 재료 사이의 계면 접촉 면적이 크게 증가하게 되고, 이로 인해서 에폭시 수지 사슬 말단의 유동성이 크게 제약을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 에폭시 수지 사슬 중에 존재하는 수많은 수산기와 마이크로 실리카 표면의 수산기 사이에 강한 수소 결합이 작용하기 때문에 사슬이 Tg 이하의 유리상 영역에서는 운동성 및 유동성이 크게 제약을 받게 되며, 이 현상은 EMC계에 나노 실리카가 추가되면 더 심화되게 된다는 것이다. 이들 계의 가교도를 계산하기 위해서  $\tan\delta$  피크로부터 구한 Tg값을 식 (1)에 대입하고, 그 결과 값들을 그림 10에 나타내었다. 그림 8에서 설명했듯이 가교도는 Tg와 밀접한

관계를 갖는 것을 알 수 있다.

### 3.3 EMNC계의 교류 절연 파괴강도

교류 절연 파괴강도는 유전물질의 절연성능을 평가하는데 중요한 인자로 여겨지고 있으며, 이것은 절연재료의 결정화도, 가교도, 무기물 필러 종류 및 함량, 계면 특성 및 자유공간 같은 미시적 관점에서의 재료 특성은 물론 온도, 습도, UV 등과 같은 환경적 요인에 의해서 크게 영향을 받는다 [15]. 본 연구에서는 가교도 및 실리카와 에폭시의 계면특성이 고려되어야 한다. 그림 11은 30°C의 절연오일 중에서 구-평판 전극에 의해 파괴된 에폭시 매트릭스, EMC 및 EMNC-0.5s, 1.0s, 5.0s의 절연파괴 강도를 Weibull 통계 분석법에 의해 해석한 결과를 나타내고 있고, 이 직선들로부터 shape parameter, scale parameter 및 B10 value를 표 4에 나타내었다. 여기에서 shape parameter는 data의 증가율을 의미하며, scale parameter는 63.2% 확률에서의 data 크기를 의미한다. 그리고 B10 value는 파괴가 일어날 확률이 10%일 때의 절연 파괴강도를 나타낸다. 즉, scale parameter가 클수록 재료의 절연 파괴강도가 높다는 뜻이며, shape parameter가 클수록 같은 종류의 시편들 사이에 절연 파괴강도 값 차이가 적다는 것을 의미한다.

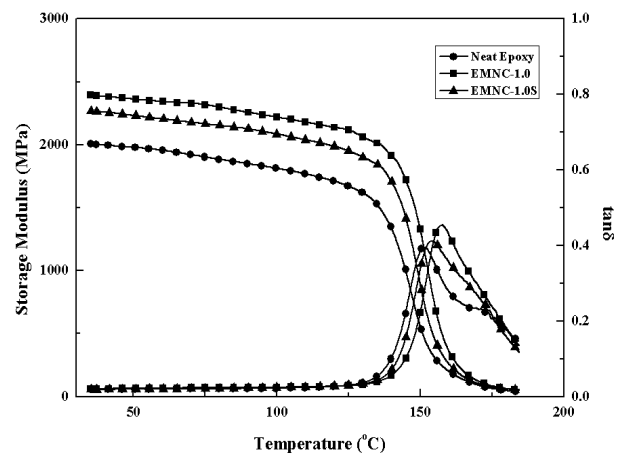


Fig. 9. Analysis of DMA for epoxy composites.

그리고, B10 값이 높을수록 재료를 실질적으로 선정할 때 safety factor를 고려하는 것과 같은 의미로 사용될 수 있다.

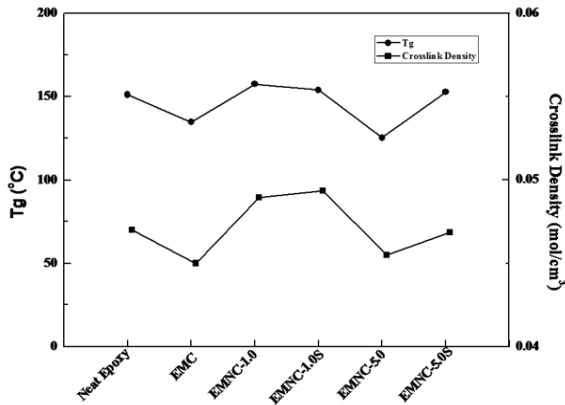


Fig. 10. Tg of EMNC and degree of cross-linking.

에폭시 매트릭스만의 scale parameter는 47.3 kV/0.25 mm이고, 50 phr의 마이크로 실리카가 도입된 EMC는 43.6kV/0.25 mm이다. 그리고 EMNC-0.5S, EMNC-1.0S 및 EMNC-5.0S의 값은 각각 58.2, 52.9 및 51.8 kV/0.25 mm이다.

50 phr의 마이크로 실리카가 에폭시 매트릭스에 도입될 때 scale parameter가 낮아지는데 반해, 나노 실리카를 추가로 더 도입하게 되면 오히려 그 값이 20~30 정도 이상 증가한 것을 알 수 있으며, EMNC-0.5S계의 경우가 최댓값을 갖는 것을 알 수 있다. 더 중요하게 고려해야 할 파라미터로 B10 값을 들 수 있다. 즉, scale parameter가 아무리 높다 하더라도, 제품 중에 극소수가 매우 낮은 수명을 갖고 파괴가 일어난다면, 실질적인 적용 측면에 있어서는 매우 심각한 문제가 될 수 있다. 즉, B10 값은 그 제품의 신뢰성을 나타내는 것으로, 이 값도 EMNC-0.5S계의 경우가 최댓값을 갖는 것을 알 수 있다.

이 Weibull 결과들이 그림 10의 가교도와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 이것은 나노 실리카 및 실란 결합제가 균일하게 분산되었으며, 계면 특성이 크게 향상되었다는 것을 의미한다. 따라서 에폭시 경화 반응에 의해 생성된 수산기가 나노 실리카 표면의 수산기와 수소결합을 형성함으로써 물리적으로 가교되게 된다. 따라서, 고온에서는 이 수소결합이 끊어지게 되지만, 저온에서는 충분한 강도를 갖는 결합으로 작용하는 것이다.

130°C의 절연오일 중에서 구-평판 전극에 의해 파괴된 에폭시 매트릭스, EMC 및 EMNC-0.5s, 1.0s, 5.0s의 절연파괴 강도를 Weibull 통계 분석법에 의해 해석한 결과를 표 5에 나타내었다. B10 value가 30°C

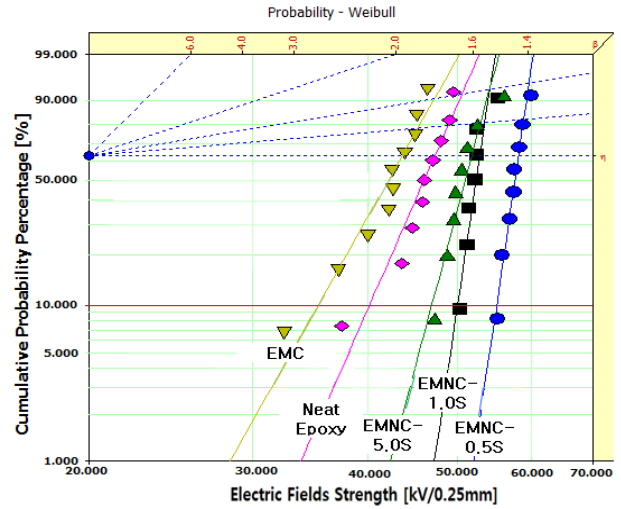


Fig. 11. Insulation breakdown strength for EMNC due to Weibull plot.

Table 4. Weibull properties value of insulation breakdown strength for epoxy composites (ambient temperature: 30°C.)

Samples Types	Scale Parameter (kV/0.25mm)	Shape Parameter	B10 (kV/0.25mm)
Epoxy	47.3	13.8	40.2
EMC	43.6	10.7	35.3
EMNC-0.5s	58.2	41.4	55.0
EMNC-1.0s	52.9	40.4	49.9
EMNC-5.0s	51.8	22.6	46.9

Table 5. Weibull properties value of insulation breakdown strength for epoxy composites (ambient temperature: 130°C).

Samples Types	Scale Parameter at 63.2% (kV/0.25mm)	Shape Parameter	B10 (kV/0.25mm)
Epoxy	40.2	3.0	19.0
EMC	36.9	2.8	16.5
EMNC-0.5s	45.0	7.5	33.2
EMNC-1.0s	54.3	12.7	45.6
EMNC-5.0s	47.1	7.1	34.5

에서 시험한 값에 비해 약간 낮았고, 실리카 함량 및 실란 결합제 처리의 경향은 거의 비슷하였다. 여기서, Tg 정도의 고온에서 절연 파괴강도를 측정했는데도

불구하고 절연 파괴강도가 아주 적게 낮아진 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 일반적인 고분자의 경우 Tg 부근에서 절연 파괴시험을 할 경우 그 파괴강도 값이 크게 감소하기 때문이다. 그러므로 본계는 고온에서 작동하는 고전압 충전기용 절연재료로 사용될 수 있다는 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 고전압 전력기기의 절연소재로 적합한 에폭시 기반 나노입자와 마이크로 입자의 혼합을 통하여 최적 상태의 교류 절연파괴 강도, 부분 방전 저항성 특성 평가 및 인장, 굴곡 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 에폭시 수지 매트릭스만의 Tg값은 128.2°C이고, 여기에 마이크로 실리카가 50 phr 도입된 EMC계의 Tg값은 94.9°C로 33.3°C 낮아진 것을 알 수 있다. 50 phr의 마이크로 실리카 입자가 도입된 EMC계에 1.0 phr의 나노 실리카 입자가 추가로 도입된 EMNC-1.0계의 Tg값은 129.2°C에서 나타났으며, 반면에, 5.0 phr의 나노 실리카 입자가 추가로 도입된 EMNC-5.0계의 Tg값은 91.8°C로 에폭시 수지 매트릭스만의 Tg값에 비해 36.4°C 낮고, EMC와는 유사한 값을 나타내었다.

둘째, EMNC계의 가교밀도는 Tg와 매우 밀접한 관계를 가지고 변한다는 것을 알 수 있었다.

셋째, 에폭시 매트릭스만의 scale parameter는 47.3 kV/0.25 mm이고, 50 phr의 마이크로 실리카가 도입된 EMC는 43.6 kV/0.25 mm이다. 그리고 EMNC-0.5S, EMNC-1.0S 및 EMNC-5.0S의 값은 각각 58.2, 52.9 및 51.8 kV/0.25 mm이다. 50 phr의 마이크로 실리카가 에폭시 매트릭스에 도입될 때 scale parameter가 낮아지는데 반해, 나노 실리카를 추가로 더 도입하게 되면 오히려 그 값이 20~30 정도 증가한 것을 알 수 있으며, EMNC-0.5S계의 경우가 최대값을 갖는 것을 알 수 있다.

#### REFERENCES

- [1] Y. S. Cho, M. J. Shim, and S. W. Kim, *Mater. Chem. Phys.*, **66**, 70 (2000).
- [2] R. Sarathi, R. K. Sahu, and P. Rajeshkumar, *Mater. Sci. Eng.*, **445**, 567 (2007).
- [3] N. Hayakawa, H. Maeda, S. Chigusa, and H. Okubo, *Cryogenics*, **40**, 167 (2000).
- [4] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **11**, 833 (2004).
- [5] T. Tanaka, S. Kuge, M. Kozako, T. Imai, T. Ozaki, and T. Shimizu, *Proc. ICEE*, **ME1-01**, 4 (2006).
- [6] P. L. The, M. Mariatti, H. M. Akil, C. K. Yeoh, K. N. Seetharamu, A. N. R. Wagiman, and K. S. Beh, *Mater. Lett.*, **61**, 2156 (2007).
- [7] S. Kang, S. I. Hong, C. R. Choe, M. Park, S. Rim, and J. Kim, *Polymer*, **42**, 879 (2001).
- [8] Y. Nakamura, M. Yamaguchi, M. Okubo, and T. Matsumoto, *J. Appl. Polym. Sci.*, **45**, 1281 (1992).
- [9] S. Barus, M. Zanetti, M. Lazzari, and L. Costa, *Polymer*, **50**, 2595 (2009).
- [10] W. E. Dondero and R. E. Gorga, *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, **44**, 864 (2006).
- [11] S. Sinha Ray and M. Okamoto, *Prog. Polym. Sci.*, **28**, 1539 (2003).
- [12] T. Tanaka, G. C. Montanari, and R. Mülhaupt, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **11**, 763 (2004).
- [13] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako, and T. Tanaka, *Proc. 2005 Int. Symp. on Electr. Insul.*, (Kitakyushu, 2005) p. 239.
- [14] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse, and Y. Ohki, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 669 (2005).
- [15] L. M. Sun, T. Sakamoto, S. Ueta, K. Koga, and M. Takayanagi, *Polym. J.*, **26**, 939 (1994).
- [16] T. Tanaka, Y. Ohki, M. Ochi, M. Harada, and T. Imai, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 81 (2008).