

고압중전기기용 절연신소재 EMNC와 EMNSC의 특성연구

Properties of EMNC and EMNSC for Insulation New Material as Apply to High Voltage Heavy Electric Machine

박재준*
(Jae-Jun Park)

Abstract - In order to develop an new electric insulation material for heavy electric equipments, epoxy/micro/nano composite (EMNC) was prepared by mixing micro-silica with nano layered silicate, where the nano layered silicate was synthesized by our electric field dispersion method, EMNSC was prepared by treating the EMNC with a silane coupling agent. Thermal properties such as glass transition temperature (T_g) and thermal expansion coefficient, and DMA characteristics were studied, and mechanical properties such as tensile and flexural tests were performed. AC electrical insulation strength was also tested. All properties of EMNSC were modified by treating EMNC with silane coupling agent and it was confirmed that our new developed composites could be used in the heavy electric equipments.

Key Words : High voltage heavy electric machine, Insulation materials, EMNC, EMNSC, Electric field dispersion

1. 서론

여러 가지 무기물 필러 가령, SiO_2 [1], Al_2O_3 [2], Mica [3], AIN [4], 그리고 TiO_2 [5] 등이 절연재료에 적용하기 위하여 고전적으로 광범위하게 사용되어져왔다. 마이크로 크기의 실리카 입자들을 갖는 에폭시 복합시스템들이 특히, 잘 알려진 고전압 전력기기 가령, 폴드타입 전력용변압기, 계기용 전류기(current transformers ; CT), 계기용 변압기(potential transformers ; PT), metering out-fit (MOF), gas switching gears [6,7], pin 또는 post 애자, 부싱 그리고 설비를 보호하고 변경시키기 위하여 전류와 전압을 측정하는 계기용 변압기[8,9] 등에 적용되어져 왔다. 보통, 이런 복합체는 에폭시가 함침된 부분과 금속부분사이에 박리가 일어나는 것을 보호하기위하여 동이나 알루미늄 부분과 같거나 또는 낮은 열팽창을 얻기 위하여 에폭시 매트릭스에 마이크로 실리카입자 즉, $1\mu m$ 이상 $100\mu m$ 이하의 입자를 65~80wt%까지 충전하여 사용되어지고 있다. 많은 전기설비들은 일반적으로 $40\sim 60^\circ C$ 에서 동작되고 그리고 외부환경온도로부터 다양한 열사이클에 노출되어졌다[10]. 게다가, 마이크로 실리카는 제조공정과정 또는 그들 전력기기로서 서비스 동안 열수(熱水)(작용)에 의한 열화 와 에폭시의 UV 저항, 열적 그리고 전기적특성이 약화되어진다. 최근에 많은 연구자들이 에폭시매트릭스 내에서 나노크기화된 필러의 응용에 관심을 가져왔다[11-13]. 우리의 연구에서도[11] 에폭시 나노 복합체는 삽입된 실리케이트의 첨가에 의해서 크게 향상된 것을 보여주었다. T. Tanaka 그리고 공동연구자들 [12]도 에폭시/층상실리케이트 나노복합체가 침대 평판 전

극구조에서 무충진 에폭시수지보다 더 절연과괴강도가 크게 향상 되었음을 보여 주었다. Zou 등의 연구자들 [13]은 실리카를 충전시킨 에폭시 나노복합체의 유전특성에 습도의 영향을 보고하였다. 더욱이, 에폭시기반하에서 마이크로-나노의 혼합에 대한 새로운 개념을 포함한 사실에 대해 많은 연구자들에 의해 고려되어져 왔다[14,15]. 그들은 나노실리카 또는 다층층상실리케이트가 에폭시수지/실리카 마이크로 복합체의 기계적, 전기적 특성이 향상되었다 보고하였다. 본 연구에서, 우리는 에폭시/마이크로 실리카/나노층상실리케이트 혼합복합체(EMNC)와 에폭시/마이크로 실리카/실란처리된 나노층상실리케이트 혼합 복합체(EMNSC)를 고전압 중전기기에 적용하기위한 절연재료로서 사용하기 위하여 제조하였다. 결과는 열적, 기계적, 전기적 특성을 실란 처리한 경우(EMNC) 와 실란처리한 경우(EMNSC)을 비교 검토하였다.

2. 본론

2.1 실험 및 측정

2.1.1 재료

상업적인 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A)타입 에폭시 수지, YD-128 (Kukdo Chem. Co.) 이 사용되어졌다. 그 수지의 그램당량(equivalentweight)은 $184\sim 190$ 이고, 점도는 $25^\circ C$ 에서 $11,500\sim 13,500cps$ 이다. 경화제는 상품명으로 HN-2200(Hitachi Chem. Co.)인 Me-THPA (3-or 4-methyl-1,2,3,6-tetrahydrophthalic anhydride)이 사용 되었다. 그것은 중전기기분야에 광범위하게 사용되어진 것이다. 경화촉진제로서, BDMA(benzyl-dimethyl amine, Kukdo Chem. Co.)가 사용되었다. 실란처리를 위하여 실란커플링제로서 아미노실란 커플링제, 3-aminopropyl-triethoxysilane (KBE-903,

* 정 회 원 : 중부대학교 전기전자공학과

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

접수일자 : 2012년 8월 2일

최종일자 : 2012년 9월 21일

ShinEtsu Co.)가 이용되었다. 그리고 층상실리케이트로서, Cloisite 10 A (Southern Clay Products, Inc., USA)가 다층 실리케이트로서 이용되어졌고 그리고 일종의 4가 암모늄으로서 2MBHT (dimethyl-benzyl-hydrogenated tallow quaternary ammonium)를 자연적인 몬모릴로나이트 (montmorillonite)에 유기화 시킨 것이다. 그것은 사용하기 전 진공오븐에서 120°C×24hr 건조한 후 사용하였다.

2.1.2 에폭시-마이크로-나노-혼합 콤포지트 제조

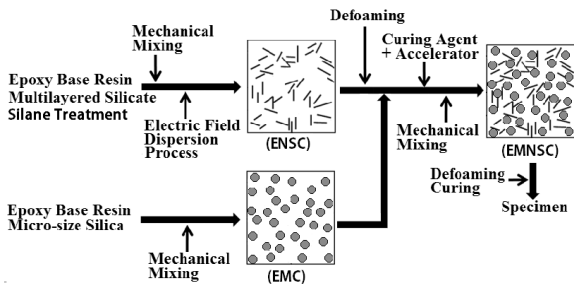


그림 1 EMNC와 EMNSC의 제조
Fig. 1 Preparation Process for EMNC and EMNSC

그림 1에서는 EMNC와 EMNSC의 제조과정을 나타내었다. EMNC 와 EMNSC를 제조하기 위하여 DGEBA(100 g)와 마이크로실리카(292.5 phr)을 충전시킨 후 30동안 500rpm으로 기계적교반기(agitator)를 이용하여 혼합되었고, 그때 THPA (80 g) 그리고 BDMA (0.9 g)이 첨가되어 5분 동안 200rpm으로 균질한 혼합이 되도록 하였다. 에폭시에 대한 마이크로 실리카의 중량비는 1.0 : 2.929이다. 그 혼합물이 금형내로 주입되고 그리고 진공 오븐 내에서 탈기포처리되었다. 1차 경화조건으로 120°C×2h, 완전경화를 위하여 2차 경화 조건으로 150°C×24hr로 후경화 하였다. EMNC와 EMNSC를 제조하기 위하여 에폭시 수지(100g)와 Cloisite 10 A (1.5 g)이 30분 동안 기계적교반기으로 혼합을 실시 하였으며 그리고 그 혼합물을 본 연구실에서 개발된 [16] 교류 전기장 분산시스템을 이용하여 분산처리 하였다. 실란처리를 위하여 실란소요량은

$$silane\ 처리소요량 = \frac{실리케이트중량(g) \times 실리케이트비표면적(m^2/g)}{silane\ 의\ 습윤면적(ws)}$$

으로 계산하여 결정하였다. 교류전기장은 다음과 같은 조건을 갖는 고전압 발생장치에 의하여 발생시켰다.

- (1) 전극간 거리 : 50mm
- (2) 적용고전압 : 11kV
- (3) 적용 전원주파수 : 1kHz
- (4) 적용시간 : 60min

그때 나노콤포지트는 충분히 탈기포 처리된 나노콤포지트에 마이크로 실리카 292.5g(60wt%)를 합하여 2마력 고속 교반기로 5000rpm의 속도로 합해진 콤포운드를 혼합시켰다. 그때, THPA (80g) and BDMA (0.9 g)이 5분 동안 혼합시켰으며 그리고 동일한 조건에서 1차 경화 및 후경화를 실시하였다.

2.1.3 측정

에폭시 매트릭스에서 층상실리케이트의 내부구조를 고해상도 TEM(transmission electron microscope : Hitachi S-4100; agency Korea, Seoul, Korea)를 이용하여 관찰 되어졌다. 나노콤포지트는 다이아몬드 칼이 설치된 Power TOME X 마이크로톰(microtome)을 이용하여 대략 70-90 nm의 초박막의 단면을 자르게 된다. 그리고 초박막의 단면은 200-매쉬 동(Cooper) 그릴 위에 놓여진다. 측정은 200kV의 가속전압을 이용하여 수행 되어졌다.

DSC (Dynamic differential scanning calorimetry)분석은 다음과 같이 수행되어졌다. 경화된 샘플 대략 2-3 mg이 알루미늄 펜(pan)위에서 정확하게 무게가 측정되어지고 그리고 DSC furnace (Instrument Specialists Incorporated, DSC Infinity Series, TA Instrument Ltd, USA)안으로 적재 된다. 그때 DSC 분석이 40 ml/min 질소환경 하에서 10°C/min의 승온율로서 수행되었다.

Dynamic mechanical analysis (DMA2980, TA Instrument Ltd.)는 주파수 1.0 Hz 와 10 °C/min 승온율로서 전단방식으로 수행하였다. 샘플의 치수는 12.5×7.0 ×3.0 mm이고 그리고 공기의 제거율은 110 ml/min이었다.

인장과 굴곡강도의 측정은 universal testing machine (SHM-C-500, Shamhan Tech, Korea)를 이용하여 수행되어졌다. 인장테스트를 위한 시편은 JIS B7502를 기준으로 제조 되어졌고 그리고 23°C 및 50% 상대습도 하에서 10 mm/min의 크로스헤드 속도(crosshead speed)로 측정되어졌다. 굴곡강도의 시편은 three point bending 방법으로 JIS B7507 기준으로, 크기 70×10×4 mm로 제조하였다. 스팬길이 (span length)은 50mm로 하였으며, 인장강도와 같은 온도와 습도 하에서 크로스헤드속도 10 mm/min로 측정하였다.

교류절연과피는 구전극(7.4mmφ: 동 재질)을 이용하여 전극의 배치는 구대구에서 수행하였다[17]. 그때 전극간 거리는 0.25mm 절연거리를 두었다. 시편은 절연유내에서 잠겨진 상태이었고 그리고 교류절연내력 측정장치 (Haefely, Germany)로서 승압속도는 1 kV/s 이었고 절연이 파괴에 이를 때 까지 일정하게 승압하였다.

2.2 결과 및 검토

2.2.1 구조적 특성

(a) TEM

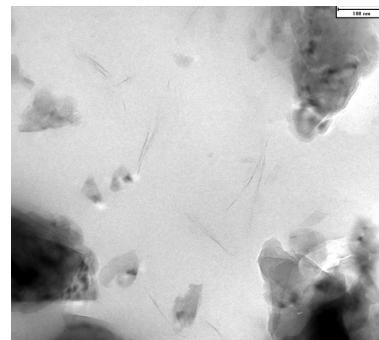


그림 2 EMNC와 EMNSC의 내부구조
Fig. 2 Inner Morphology of EMNC and EMNSC

그림 2에서는 나노입자인 층상실리케이트와 마이크로실리카입자인 필러가 혼합된 EMNC와 EMNSC의 내부구조배열을 확인하기위해 전자현미경으로 직접 관찰된 ENMC의 내부구조구조를 보이고 있다. 조성비는 위에서 언급한 경우처럼 나노층상실리케이트 1.5phr와 마이크로실리카 60wt%가 혼합한 복합체로서 저배율인 100nm에서 관찰하였다. 층상실리케이트 나노입자의 완전한 박리로 인하여 개개의 나노입자로 분산되어진 경우를 볼 수가 있다. 또한 마이크로 입자와 나노입자가 균질한 분산이 이루어졌음을 알 수 있었다. 이런 내부구조는 전기적, 기계적, 열적특성의 향상을 가져오게 되어, 산업재료로서 이용 가능한 절연재료로 평가할 수가 있다[17].

2.2.2 유리전이온도(T_g)

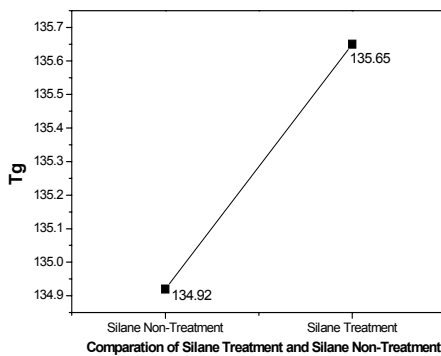


그림 3 EMNC와 EMNSC의 유리전이온도
Fig. 3 Glass Transition Temperature for EMNC and EMNSC

그림 3에서는 에폭시/마이크로실리카/나노층상실리케이트 혼합 콤포지트(EMNC, EMNSC)에 대한 유리전이온도를 나타내었다. 실란이 처리된 경우, 미처리된 경우에 비하여 0.73°C 향상되었다. 이는 실란커플링제에 의해 유기물과 무기물의 계면사이 강한 결합에 의해 유리전이온도의 향상된 결과이다. 또한 마이크로입자 또는 나노입자의 단독에 의한 영향보다는 마이크로입자사이 나노입자가 충전되어 나노입자자체가 고분자의 이동성을 억제하는 효과에 기인하는 경우로 보여진다. 이는 상용화 측면을 고려할 때 마이크로와 나노입자의 적절한 혼합은 고분자의 이동성을 크게 억제되어 유리전이온도가 상승된 것으로 보여진다.

2.2.3 열팽창 계수

그림 4에서는 EMNC와 EMNSC에 대한 열팽창계수를 나타내었다. 실란미처리된 EMNC의 경우는 38 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, 실란처리된 EMNSC의 경우 37.3 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 를 나타내었다. 즉, 실란처리된 경우가 미처리된 경우에 비하여 0.7 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 감소된 결과를 얻었다. 일반적으로 huntsman spec의 몰드변압기에서는 34~40 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 을 상용화의 열팽창 계수로 사용하고 있다. 이 경우에 기준한다면 안전한 열팽창계수를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

충전기기에 이용되고 있는 알루미늄 열적 팽창 계수는 24 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 이다. EMNC와 EMNSC의 경우 열팽창 계수는 이보다 약간 높은 결과이다. 그러나 원형 에폭시 수지와 에폭

시나노콤포지트의 경우는 이보다 훨씬 높은 열팽창계수를 나타내고 있었다. 이는 순수한 에폭시 자체만 으로 또는 나노콤포지트 만으로는 상용화에 어려움이 있음을 의미하는 것이다.

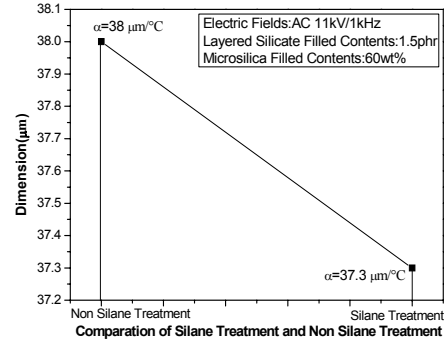


그림 4 EMNC와 EMNSC의 열팽창계수
Fig. 4 coefficient of expansion for EMNC and EMNSC

금속 도체로서 낮은 열 팽창 계수를 갖는 것은 고압충전 기기에서 에폭시 절연재료로서 매우 중요한 특성중 하나다. 에폭시 수지는 보통 몰드 알루미늄이나 또는 동 도체가 일반적으로 이용되어진다. 열팽창 계수 차이가 크게 되면 도체와 에폭시 계면에서 열 사이클에 기인하여 박리가 만들어 질수 있다. 그리하여 에폭시 수지는 도체처럼 낮은 열 팽창 계수를 얻기 위하여 마이크로 필러의 많은 양을 충전하게 된다. 알루미늄과 같이 EMNC와 EMNSC 둘 다의 경우 낮은 열 팽창 계수는 절연재료가 바라는 중요한 특성 중 하나이다[18,19].

2.2.4 DMA특성

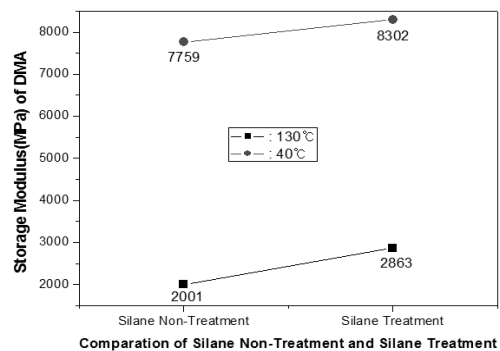


그림 5 EMNC 와 EMNSC 대한 DMA Storage Modulus
Fig. 5 DMA Storage Modulus for EMNC and EMNSC

그림 5에서는 EMNC와 EMNSC에 대한 온도변화에 따른 DMA Storage Modulus(저장 탄성율)의 특성을 나타내고 있다. 40°C 유리상(glass state)에서 저장탄성율은 EMNC의 경우 7759MPa, EMNSC의 경우 9663MPa로서 1904MPa향상된 결과를 얻었으며, 고온부인 고무상(rubbery state)인 130°C에서 EMNC의 경우 2001MPa, EMNSC의 경우 2863MPa로서 863MPa 향상된 결과이다.

이처럼 전기장으로 분산시킨 층상실리케이트 나노입자의 완전한 박리의 결과는 고분자체인의 완화이동도가 에폭시층상실리케이트 계면에서 이동을 제한하는 효과에 기인되어 지고, 마이크로실리카 자체보다 또는 나노층상 실리 케이트 자체보다 나노와 마이크로가 혼합된 경우 유리상태 및 고무상태 저장탄성율의 증가는 유리전이온도의 향상으로 설명된다. 또한 마이크로입자사이로 나노입자의 원활한 침투가 이루어져 에폭시사슬의 유동성이 크게 제약을 받은 경우로 판단되어진다. 그리고 실란커플링제의 영향을 조사하기위해 실란처리된 경우와 미처리된 경우 비교하여 볼 때 실란처리된 경우가 향상된 결과를 얻었다. 이는 에폭시 수지와 층상 실리케이트 또는 실리카표면의 계면에서 강한 공유결합을 형성하기 때문에 실란처리된 마이크로실리카와 와 나노가 혼합된 콤포지트가 유리상태 및 고무상태에서 향상된 결과를 가져온 것으로 사료된다. 이처럼 나노층상 실리케이트의 경우 적절한 실란처리는 계면의 향상을 가져온 것으로 계면 처리가 필요하다고 사료 된다.

2.2.5. 기계적 특성

(a) 인장강도

그림 6에서는 EMNC 와 EMNSC 대한 인장강도 Weibull Plot을 나타내고 있다. EMNC와 EMNSC의 경우 인장강도에 대한 Weibull Plot의 특성 값을 표 1에서 나타내었다. Weibull Plot의 특성값으로 형상파라미터(Shape Parameter)와 스케일파라미터(Scale Parameter) 그리고 B₁₀ Life을 나타내었다. 형상파라미터는 기울기를 의미하는 것으로, 기울기의 경사에따라 데이터분포의 집중도를 나타내는 것으로 인장강도의 균질성을 의미하는 것이다. 또한 스케일파라미터는 63.2%의 누적확률(%)에서 인장강도를 나타낸 값이다. 그리고 B₁₀수명은 기울기의 최하위 10% 교점에서 인장강도 값을 의미하는 것이다.

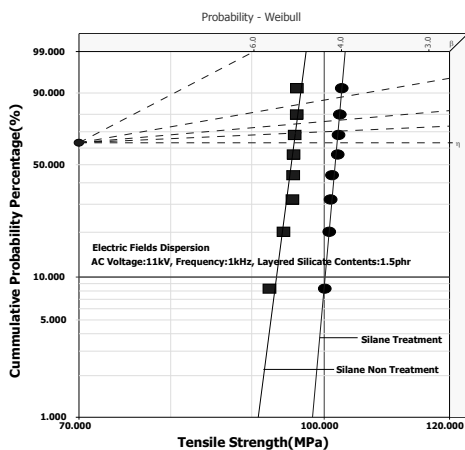


그림 6 EMNC와 EMNSC 대한 인장강도 Weibull Plot
Fig. 6 Weibull Plot of Tensile Strength for EMNC and EMNSC

표 1에서는 그림 6에 대한 Weibull Plot의 특성표를 나타낸 것이다. 형상파라미터의 경우 EMNC보다 EMNSC의 경우 기울기가 높은 특성을 나타내었다. 이는 인장강도의 경

우 EMNSC가 EMNC보다 균질성이 높은 결과를 나타내었고, 스케일 파라미터의 경우 실제적인 최대 인장강도가 EMNC보다 EMNSC가 9.18MPa 높은 결과를 가져왔다. 또한 B₁₀의 경우 EMNSC가 EMNC보다 6.8MPa 높은 인장강도를 가지고 있음을 보였다. 측정자료는 8개의 인장시편을 가지고 실험한 결과를 나타낸 것이다.

표 1 EMNC와 EMNSC 대한 인장강도 Weibull Plot 특성표
Table 1 Weibull Plot Table of Tensile Strength for EMNC EMNSC

Types	Tensile Strength		
	shape parameter	scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
EMNC	87.99	95.72	93.30
EMNSC	128.86	101.90	100.1

나노클레이가 에폭시메트릭스 계면에서 층상구조로 쌓여져 있을때면 쌓여져있는 그 부분이 스트레스의 집중효과로 기인하여 인장강도가 낮아지는 것이 일반적이다[20].

이런 경우는 층상실리케이트 나노입자가 완전한 나노화가 이루어지지 못하여(미분산) 약점으로 작용되는 경우이다. 또한 충전함량이 일정수준 이상이 되면 인장강도가 낮아지는 경우는 미분산된 층상실리케이트 내 기포문제와 더불어 응집된 부분의 영향으로 인하여 계면이 약점으로 작용하는 것이다 [21]. 그러나 본 연구에서는 앞서 보았던 TEM의 영상으로부터 확인 한 바처럼 전기장분산을 통하여 층상실리케이트가 에폭시 매트릭스 내에서 완전한 박리가 일어난 경우를 보였다. 이처럼 EMNSC가 EMNC보다 향상된 이유로서, 나노층상실리케이트 입자가 에폭시 수지의 계면 면적이 엄청 크기 때문에 계면의 결합력을 강화하게 되면 인장강도의 향상을 크게 가져올 수가 있다. 마이크로 실리카 입자사이로 나노 층상실리케이트가 치밀하게 분포하게 된다. 즉, 나노 콤포지트의 Nearest neighbor spacing는 매우 작고 그리고 실란 커플링제는 에폭시-나노화된 층상실리케이트 계면에서 공유 결합이 형성 된다. 또한 실란커플링 층이 에폭시 수지와 연결 시켜 주고 층상실리케이트 입자와 강하게 연결시켜 주기 때문에 인장강도가 증가하게 된다. 반대로 실란커플링제 처리하지 않은 EMNC의 인장강도는 감소된다. 이유는 실란 커플링제 층이 없는 많은 에폭시 층상실리케이트의 계면이 약점으로 작용 되어 지기 때문이다.

(b) 굴곡강도

그림 7에서는 EMNC와 EMNSC의 경우 굴곡강도에 대한 Weibull Plot을 나타내었으며, 표 2에서는 Weibull Plot에 대한 특성 값을 나타내었다.

형상파라미터는 EMNC와 EMNSC의 경우 균질성이 높은 경우로 거의 비슷한 값을 나타내었다. 또한 스케일파라미터의 경우 EMNC에 비하여 EMNSC의 경우 8.01MPa가 향상되었으며, B₁₀의 경우 EMNC에 비하여 EMNSC가 7.1MPa 향상되었다. 굴곡강도의 경우 인장강도와 같이 8개의 샘플의 측정값을 나타내었다.

EMNC에 비하여 EMNSC의 굴곡강도의 Weibull 특성이 향상된 경우는 인장강도의 경우처럼 에폭시와 나노화된 층

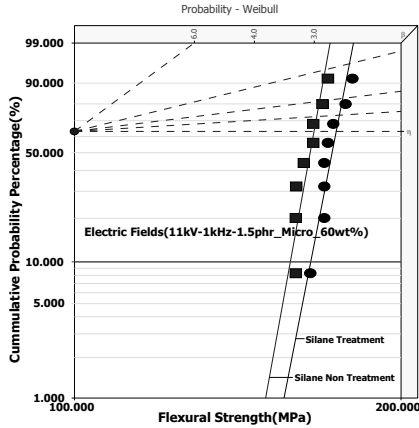


그림 7 EMNC와 EMNSC 대한 굴곡강도 Weibull Plot
Fig. 7 Weibull Plot of Flexural Strength for EMNC and EMNSC

표 2 EMNC와 EMNSC 대한 굴곡강도 Weibull Plot 특성 표

Table 2 Weibull Plot Table of Flexural Strength for EMNC EMNSC

Types	Flexural Strength		
	shape parameter	scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
EMNC	44.70	166.29	158.0
EMNSC	45.90	174.30	165.1

상실리케이트 계면에 공유 결합이 형성되고 그리고 실란커플링 층이 에폭시 수지와 연결 시켜 주어 층상실리케이트 입자와 강하게 연결되기 때문에 굴곡강도가 향상된 것으로 보여 진다. 반대로 EMNC가 EMNSC보다 굴곡강도가 낮은 이유는 실란 커플링제 층이 존재하지 않아 에폭시와 층상실리케이트사이 계면의 약점으로 작용 되어 지기 때문으로 설명할 수 있다.

2.2.6 전기적인 특성

(a) 교류절연파괴 특성

그림 8에서는 EMNC와 EMNSC의 교류절연파괴 강도에 대한 와이بل 플롯을 나타내었으며, 표 3에서는 와이بل 플롯에 대한 특성표를 나타내었다. 교류절연파괴는 환경온도 30℃에서 측정된 샘플 12개를 구대구 전극배치로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 앞서 서술한 바처럼 전극간거리는 0.25mm로 일정하게 하였다.

그림 8과 표 3에서 나타낸 바와 같이 스케일파라미터에서 EMNC보다 EMNSC의 경우 절연파괴 강도가 14.9kV/0.25mm 향상된 결과를 나타내었다. EMNSC는 EMNC보다 22.4% 향상된 결과를 나타내었다. 또한 B10수명의 경우 7.5kV/0.25mm향상 되었다. 역시 실란처리된 경우가 미처리한 경우에 비하여 13.5% 향상된 것이다. 교류절연파괴강도에서 B10의 수명은 충전기기의 절연능에 주요한 요소로 작용하고 있는 파라미터이다. 이유는 교류전압이 상시로 인가된 전력기에 절연파괴의 대부분은 가장 약점이 되는 부분에서 파괴가 일어난다. 그런 이유로 한번의 절연파괴가

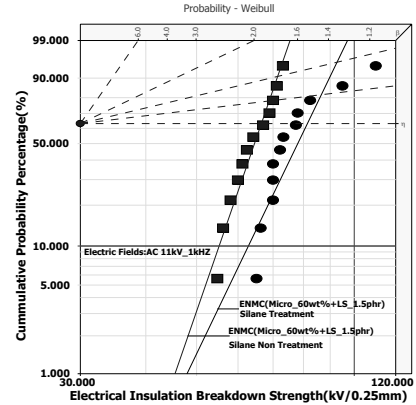


그림 8 EMNC와 EMNSC 대한 교류절연파괴 강도에 대한 Weibull Plot

Fig. 8 Weibull Plot of AC Insulation Breakdown Strength for EMNC and EMNSC

표 3 EMNC와 EMNSC 대한 교류절연파괴 강도에 대한 Weibull Plot

Table 3 Weibull Plot of AC Insulation Breakdown Strength for EMNC and EMNSC

Types	AC Insulation Breakdown Strength		
	shape parameter	scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
EMNC	12.10	66.50	55.40
EMNSC	8.68	81.41	62.90

발생되면 대정전사태 및 전력공급에 큰 차질을 가져오기 때문에 가장 약한 부분의 절연능을 나타낸 지표로 대반히 중요한 요소로 보여 진다. 이런 특성 값이 산업현장에 매우 중요하게 다루어져야할 것으로 본다.

EMNSC가 EMNC 보다 스케일파라미터가 22.4% 향상된 이유는 여러 연구자들의 연구결과를 살펴볼 때 Nelson [22,23]와 Vaughan[24]는 원형수지에 MMT를 혼합하여 미분산된 경우 즉, 응집된 부분이 약점파괴로서 절연파괴 강도가 낮아지는 결과를 가져왔다. Santanu Singha and M Joy Thomas[25]는 나노컴포지트에서 가장 높은 파괴 강도는 분산이 가장 잘 되었을 때 높은 향상을 가져온다 보고하였다. 일반적으로 교번전계 하에서는 부극성시 금속전극으로부터 전자의 주입이 발생하게 된다. 절연파괴 메커니즘에서 교번전계하에서 주입된 전자는 가장 약한 부분인 에폭시수지 층인 마이크로실리카입자의 계면을 따라 진전하게 될 것이다. 그러나 마이크로 복합체 자체만으로 구성된 내부구조보다는 층상실리케이트나노입자가 충전된 조밀한 구조 하에서는 전자의 이동에 방해하는 무기물이 방해의 요인이 되고 있다. 그런 이유로 더욱더 많은 양의 마이크로실리카의 충전으로 미분산된 경우가 존재할 때 그 부분이 절연의 결함으로 작용하게 된다. 충분한 분산이 이루어진 상태에서는 더욱더 파괴 값이 향상된 결과를 가져오게 될 것이다. 이런 내부구조 하에서 실란커플링제의 처리는 에폭시와 완전히 박리된 나노층상실리케이트와 공유결합을 형성하게 된다. 실란 커플링제를 포함한 층상나노실리케이트는 실란커플링

층이 에폭시 수지와 연결 시켜 주고 층상실리케이트 입자를 강하게 연결 시켜 주기 때문에 파괴 강도가 높게 된다. 반대로 실란커플링제 처리가 없는 층상나노 실리케이트의 파괴 강도는 감소하게 된다. 이유는 실란 커플링제 층이 없는 많은 에폭시와 나노층상 실리케이트 계면이 약점으로 작용되어 지기 때문으로 사료된다.

3. 결 론

전기장 분산법을 이용한 에폭시 기반 마이크로실리카 / 층상나노실리케이트의 실란처리 및 미처리된 경우 콤포지트 절연소재를 개발하였다. 그 결과 구조적, 열적, 기계적, 전기적 특성은 다음과 같다.

(1) 구조적 특성(TEM분석)

나노층상실리케이트 1.5phr와 마이크로실리카 60wt%을 혼합한 복합체로서 저배율인 100nm에서 관찰하였다. 층상실리케이트 나노입자의 완전한 박리로 인하여 개개의 나노입자로 분산되어진 경우를 볼 수가 있다. 또한 마이크로 입자와 나노입자가 균질한 분산이 이루어졌음을 알 수 있었다. ENMC에서 나노와 마이크로가 조밀하게 분산된 경우로, 이런 내부구조는 전기적, 기계적, 열적 특성의 향상을 가져오게 된 것으로 판단된다. 그 결과 산업 재료로 이용 가능한 절연재료로 평가된다.

(2) 열적 특성

EMNC보다 EMNSC의 경우 유리전이온도가 0.73°C가 향상된 결과를 얻었으며, 열팽창계수의 경우 0.7 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 감소하는 결과를 얻게 되었다. 이는 상업화 하는 고압물드변압기 열팽창계수의 범위 내에 존재하는 경우로서 열적 특성이 상업화에 가능성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

(3) 기계적 특성

원형에폭시수지의 경우 80~85 MPa 범위에서 나타나며, 스케일파라미터가 82.3 MPa이었다. 이는 인장강도의 경우 EMNSC가 EMNC보다 균질성이 높은 결과를 나타내었고, 스케일 파라미터의 경우 인장강도가 EMNC(95.72MPa)보다 EMNSC(101.90 MPa)가 9.18MPa (9.5%)향상된 결과를 가져왔다. 또한 굴곡강도의 경우 실란처리된 EMNSC(174.3MPa)가 실란미처리된 EMNC (166.29MPa)보다 8.01MPa (4.8%) 향상된 결과를 가져왔다.

(4) 전기적 특성

실란처리된 EMNSC가 미처리된 EMNC보다 Weibul Plot의 스케일 파라미터(누적분포가 63.2%) 절연과파괴강도에서 측정된 결과, ENMC에서는 66.5kV/0.25mm를 얻었으며, EMNSC의 경우 81.41kV/0.25mm로서 실란미처리된 경우 보다 실란이 처리된 EMNSC가 22.42% 향상된 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

[1] P. O. Henk, T. W. Kortszen and T. Kvarsts, High Perform. Polym., **11**, 281 (1999) [DOI: 10. 1088

/0954-0083/11/3/304].

- [2] M. Ehsani, Z. Farhadinejad, S. Moemen-bellah, S.M. Bagheralavi, M. M. S. Shrazi and H. Borsi, 26th Internal Power System Conference, Tehran, Iran, 11-E-CAM-2359 (2011).
- [3] P. Bajaj, N. K. Jha and A. Kumar, J. Appl. Polym. Sci., **56**, 1339(1995) [DOI: 10.1002/app.1995.070561015].
- [4] Y. Xu, D. D. L. Chung and C. Mroz, Composites: Part A, **32**, 1749 (2001) [DOI:http:// dx.doi.org/ 10.1016/S1359-835X(01)00023-9].
- [5] A. A. Wazzan, H. A. Al-Turaif and A. F. Abdelkader, Polymer-Plastics Technology and Engineering, **45**, 1155 (2006) [DOI:10.1080/03602550600887285].
- [6] R. Sarathi, R. K. Sahu and P. Rajeshkumar, Mater. Sci. Eng.: A, **445**, 567 (2007) [DOI:10.1016/j.msea.2006.09.077].
- [7] N. Hayakawa, H. Maeda, S. Chigusa and H. Okubo, Cryogenics, **40**, 167 (2000) [DOI:10.1016/s0011-2275(00)00024-2].
- [8] G. Iyer, R. S. Gorur, R. Richert, A. Krivda and L. E. Schmidt, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **18**, 659 (2011) [DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931050].
- [9] D. A. Bolon,, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **11**, 10 (1995) [DOI: 10.1109/57.400759].
- [10] J. J. Park, K. G. Yoon and J. Y. Lee, Trans. Electr. Electron. Mater. **12**, 98 (2011) [DOI: 10.4313/TEEM.2011.12.3.98].
- [11] J. J. Park, S. S. Kwon and J. Y. Lee, Trans. Electr. Electron. Mater. **12**, 135 (2011) [DOI:http://dx.doi.org/ 10.4313/TEEM.2011.12.4.135].
- [12] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako, and T. Tanaka, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **13**, 445 (2006)[DOI:10.1109/TDEI.2006.1624291].
- [13] C. Zou, J.C. Fothergill and S. W. Rowe, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **15**, 106 (2008) [DOI: 10.1109/T-DEI.2008.4446741].
- [14] J. Castellon, H. N. Nguyen, S. Agnel, A. Tourelle, M. Fr?chette, S. Savoie, A. Krivda and L. E. Schmidt,, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **18**, 651 (2011) [DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931049].
- [15] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, S. Kuge, M. Kozako, and Tanaka, IEEJ Trans. Fund. Mater., **126**, 1136 (2006) [DOI:10.1541/ieejfms.126.1136].
- [16] J. J. Park and J. Y. Lee, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **17**, 1516(2010) [DOI: 10.1109/TDEI.2010.5595553].
- [17] J. J. Park, C. H. Lee, J. Y. Lee and H. D. Kim, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. **18**, 667 (2011) [DOI: 10.1109/TDEI.2011.5931051].
- [18] R. Sarathi, R.K. Sahu, P. Rajeshkumar, "Understanding the thermal, mechanical and electrical properties of epoxy nanocomposites" Material Science

and Engineering A 445-446 (2007) pp. 567~578

- [19] Takahiro Imai, Fumio Sawa, Toshiyuki Nakano, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu, Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, "Effects of Nano- and Micro-filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 1; February 2006
- [20] Farzana Hussain, Jihua Chen, Mehdi Hojjati, "Epoxy-silicate nanocomposites: Cure monitoring and characterization", Materials Science and Engineering A 445~446 (2007) 467~476
- [21] L. E. Nielsen, Particulate-filled Materials "Mechanical Properties of Polymers and Composites", vol. 2, Marcel Dekker, New York, 1974, 379~452.
- [22] T. N. Matheson, A. S. Vaughan, S. J. Sutton and A. Minigher, "Electrical Characteristics of Epoxy/nanoclay Nanodielectric Systems", 2007 International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, July 8~13, 2007
- [23] J. K. Nelson, J. C. Fothergill, "Internal charge behaviour of nanocomposites", Nanotechnology vol. 15(2004) pp. 586-595
- [24] A. S. Vaughan, S. G. Swingler, Y. Zhang, "Polyethylene Nanodielectrics: The Influence of Nanoclays on Structure Formation and Dielectric Breakdown", IEEJ Trans. FM, vol. 126 no. 11
- [25] Santanu Singha and M. Joy Thomas, "Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1; February 2008

저 자 소 개



박재준 (朴材俊)

1985년 광운대학교 전기공학과 학사,
1987년 광운대학교 전기공학과 석사,
1993년 광운대학교 전기공학과 박사, 현
중부대학교 전기전자공학과 교수
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr