

# 실란처리된 Epoxy/MICA 콤포지트의 열적, 기계적 전기적 특성연구

## A Study on Thermal, Mechanical and Electrical Properties as Silane Treated Epoxy/MICA Composites

박재준\*  
(Jae-Jun Park)

**Abstract** - In this study, epoxy/mica composite was prepared by mixing with mechanical stirrer together with homogenizer, and the effect of amino-type silane coupling agent was also studied. To reduce the viscosity without any decrement of other properties, 1,4-Butanediol diglycidyl ether (1,4-BDGE) as an aliphatic epoxy reactive diluent was introduced to the epoxy/mica composite in order to use as vanish for high voltage motor and generator stator winding. It was confirmed by scanning electron microscopy (SEM) observation that interfacial characteristics between organic epoxy and inorganic mica was modified by coupling agent treatment so that glass transition temperature increased, and tensile strength and electrical breakdown strength increased. The properties were estimated by Weibull statistical analysis and the ac electrical breakdown strength was 20.2% modified by treating silane coupling agent.

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

### 1. 서론

실리카(SiO<sub>2</sub>)[1], 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)[2], 마이카[3], 질화알루미늄(aluminum nitride : ALN)[4] 그리고 titanium dioxide(TiO<sub>2</sub>)[5]와 같은 여러종류의 무기물필러들이 절연용 고분자 복합체로서 사용되고 있다. 특히, 실리카나 마이카는 고전압 중전기기에 광범위하게 사용되고 있다. 에폭시/실리카 복합체는 몰드타입 변압기(mold-type transformers), CT(current transformers), PT(potential transformers), MOF(metering out-fit) 및 가스 스위치 기어(gas switching gears) [6],[7] 그리고 에폭시/마이카 복합체는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 고압전동기 및 발전기의 중요한 성분인 고정자권선의 절연에 적용되고 있다[8],[9].

고전압 회전기기의 고정자권선 절연내력 향상을 위하여 그리고 계속되는 사용조건하에서 안전하고 반영구적인 운전을 위하여 새로운 신소재가 개발되어야 한다. 초기에서는 자연 바니시와 함께 실크, 셀룰로오스, 섬유 그리고 석유에서 나온 파생품들이 절연을 위하여 이용되어졌다. 그 후 마이카, 석영 그리고 석면 등이 대체 되어졌다. 지난세기 중반에 이르러 에폭시수지와 폴리에스터 수지와 함께 마이카 테이프 복합체로서 주요한 고압회전기의 주절연으로 사용되어졌다[10]. 마이카 테이프는 소선이나 코일에 감겨 사용되었고 여러번 감아 에폭시수지로 진공함침(vacuum pressure impregnation : VPI) 하여 경화 후 절연을 보강시켰다 [8],[9]. 그렇지만 마이카의 테이프 열에 약하여 시간이 경과하면서 보이드가 자연적으로 발생하게 된다. 그런 결과 트

리발생과 더불어 부분방전원이 되어 최종적으로 절연과괴에 이르는 결과를 가져오게 된다. 또한 마이카 테이프 사이의 에폭시 바니시 점도가 높아 진공함침 하에서도 테이프사이로 침투되지 못한 부분과 불충분한 침투가 이루어진 부분이 절연결합의 원인으로 작용한다. 이러한 결함을 제거하기 위하여 에폭시수지에 첨가제로서 선형고분자를 첨가시켜 점도를 감소시켜 제조하였다.

본 논문에서는 저분자량을 갖는 지방족 에폭시를 첨가한 원형 에폭시(Neat Epoxy)와 원형에폭시수지에 마이카를 20wt% 충전한 복합체를 에폭시/마이카복합체(Epoxy/Mica Composites : EMC) 그리고 에폭시수지에 실란처리된 마이카를 충전시킨 복합체를 에폭시/실란처리된 복합체 (Epoxy.Mica Silane Treated Composites : EMSC)에 대한 SEM, 유리전이온도, DMA특성, 기계적 인장강도특성 그리고 절연과괴강도에 대한 특성을 연구하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 실험 및 측정

##### 2.1.1 재료

상업적인 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A)타입 에폭시수지, YD 128 (Kukdo Chem. Co.)이 사용되어졌다. 화학적인 그램당량(equivalent weight)은 184~190 그리고 점도는 25℃에서 11,500~13,500 cps이다. 경화제는 Me-THPA (3-or 4-methyl-1,2,3,6-tetra hydro phthalic anhydride)로서 상품명은 HN-2200 (Hitachi Chem. Co.)이다. 이것은 전기절연분야에 광범위하게 사용되고 있다. 촉진제로서 BDMA(benzyl-dimethylamine, Kukdo Chem. Co.)를 사용하였다. 첨가제로서 저분자량의 선형성에폭시수지인 BDGE(Kukdo Chem. Co. 제품)를 사용하였으며, 화학적인

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Korea

E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

Received : December 18, 2012; Accepted : January 15, 2013

그럼당량은 120~140 그리고 점도는 25℃에서 15~30 이다. 합성마이카는(synthetic sodium fluorohectorite : Somasif ME-100) 일본 Co-OP Ltd에서 구입하였으며, 평균입경은 5~7µm인 무기물을 사용하였다. 이것은 사용하기 전 110℃×24시간동안 진공오븐 건조하였다. 그리고 사용하기 전 테 시케이터에 보관하였다.

2.1.2 제조

에폭시/마이카 복합체를 제조하기 위하여 기계식과 초음파 분산법을 병행하여 분산하였다. 기계식 교반기로 DGEBA(100g)에 ME-100의 마이카(20wt%)를 혼합하고, 고속 기계식 교반기(5000rpm)와 초음파 기기(VC 505, Sonics & Materials .Inc, Connecticut ,USA, 주파수 20kHz)를 병행하여 동시에 혼합체에 30분 동안 분산시켰다. 그 후 분산체에 지방족 저분량의 에폭시(BDMA)를 첨가제로 첨가하여 기계식 교반으로 혼합하여 경화촉진제를 넣고 금형에 주입하여 경화하였다. 또한 실란처리된 복합체는 에폭시수지와 마이카에 아민계 실란( $\gamma$ -Aminopropylme thyl-di-ethoxysilane)을 처리하여 복합체를 제조하였다. 경화조건은 120℃×2시간 +150℃×24시간 이다.

2.1.3 측정

마이카의 분산과 에폭시와 마이카의 계면은 FE-SEM (FE-SEM, JMS-6701F, JEOL)을 이용하여 10kV가속 전압 하에서 관찰된 실란 미처리된 에폭시/마이카 복합체와 실란 처리된 에폭시/마이카복합체의 파단면의 내부조직 그리고 계면부분을 촬영하였다. 또한 EDS를 통한 원소분석된 맵을 나타내었다.

DSC (Dynamic differential scanning calorimetry)분석은 다음과 같이 수행되어졌다. 경화된 샘플 2-3 mg을 알루미늄 팬(pan)위에서 정확하게 무게가 측정하고 DSC furnace (Instrument Specialists Incorporated, DSC Infinity Series, TA Instrument Ltd, USA)내부에 적재 하였다. 그때 DSC 분석은 40 ml/min 질소환경 하에서 10℃/min의 승온율로써 수행되었다.

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

인장강도의 측정은 universal testing machine (SHM-C-500, Shamhan Tech, Korea)를 이용하여 수행하였다. 인장테스트를 위한 시편은 JIS B7502를 기준으로 제조 되어졌고 그리고 23℃ 및 50% 상대습도 하에서 10 mm/min의 크로스헤드 속도 (crosshead speed)로 측정되어졌다. 인장강도는 온도와 습도 하에서 크로스헤드속도 10 mm/min로 측정하였다.

교류절연파괴는 12mmφ: 스테인레스 재질의 구대구전극에서 수행하였다. 샘플은 100mmφ 원형으로 된 원판형 두께 1mm로 하였다. 이 시편은 절연유내에 설치되었다. 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

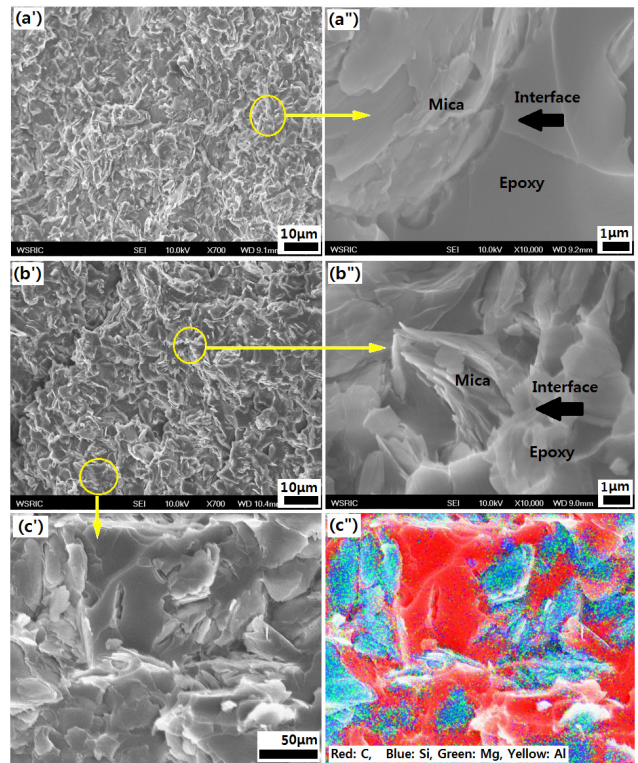


그림 1 아민타입 실란결합제로 처리된 영상(a,a'') 또는 미 처리된 영상(b,b''), (c')는 (b')의 영상을 확대한 영상 그리고 (c'')는 EDS분석을 걸쳐 기본적인 맵핑영상으로서 이는 에폭시와 마이카사이 계면을 인장실험 후 파단면을 통하여 본 SEM의 영상이다.

Fig. 1 SEM images for the fractured surface after tensile test and the interface between epoxy and mica (40 wt%) treated (a',a'') or untreated (b',b'') with amine-type silane coupling agent. (c') was magnified image of (b') and (c'') was the elemental mapping image via EDS analysis.

고분자와 무기 필러의 계면 특성을 강화시키는 방법은 실란결합제를 사용하는 것이다. 본 논문에서는 아민계 실란 결합제를 사용하였다. 파단면 형상 측면에서는 그림 1(a')과 1(b')에서 보는 바와 같이 실란 결합제 처리 여부에 관계없이 둘 다 매우 복잡한 양상을 보여주고 있기 때문에 이 사진들만을 봐서는 실란 처리에 의한 기계적 성질의 향상을 설명할 수 없다. 따라서 그림 1(a'')과 1(b'')에서 보는 바와 같이 에폭시와 마이카의 계면을 확대하여 살펴보았다. 실란 결합제가 처리되지 않은 경우에는 그림 1(a'')에서와 같이 에폭시와 마이카 사이가 서로 떨어져 있기 때문에 그 계면 특성이 매우 불량한 것을 볼 수 있으며, 실란 결합제가 처리된 경우에는 그림 1(a'')에서와 같이 그 계면이 완벽하게 결합되어 있어서 파단 시 계면이 쪼개지는 것이 아니라 마이카가

떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 이 때문에 그림 4 및 5에서와 같이 실란 결합제가 처리된 경우에 기계적 강도가 향상되었으며 특히 절연과피강도는 크게 향상되었다. 그림 1(c')과 1(c'')은 마이카가 에폭시 매트릭스 내에 분산된 상태를 관찰하기 위해서 고배율로 관찰한 후 EDS 분석한 결과를 원소 mapping 형태로 나타낸 것이다. 마이카의 구성원소인 청색 (Si), 녹색 (Mg) 및 노란색 (Al) 점들이 적색으로 나타낸 에폭시에 의해 전체적으로 덮여 있는 것을 볼 수 있으며, 마이카들이 어느 정도 균일하게 분산된 것을 볼 수 있다.

2.2.2 열적 특성

(a) 유리전이온도

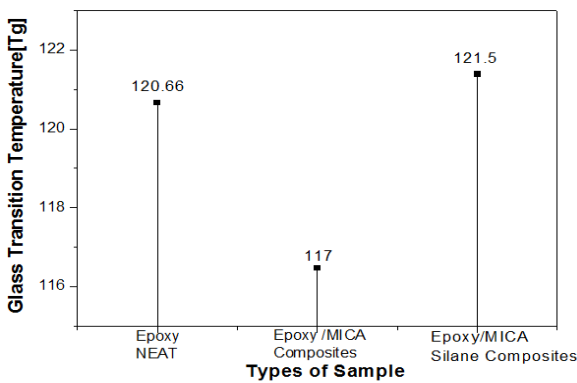


그림 2 Neat, EMC 그리고 EMSC 에 대한 유리전이온도  
Fig. 2 Glass Transition Temperature for Neat, EMC and EMSC

그림 2에서는 DGEBA에 BDGE를 첨가한 Epoxy Neat, 실란 처리되지 않은 EMC 그리고 실란처리된 EMSC에 대한 유리전이온도특성을 나타낸 것이다.

EMC보다 EMSC의 경우 4.5°C 향상된 결과를 가져왔다. 이는 실란처리로 수지에서 마이카입자의 젖음성을 향상시킨 결과로서, 입자의 표면에너지 감소로 인하여 수지와 입자사이 결합력이 증가된 결과이다. 측정시 외부의 열적인 영향에도 수지의 이동도가 낮아져서 유리전이온도가 향상된 결과를 가져온 것이다. 반면에 실란을 처리하지 않은 복합체에서는 젖음성이 약하여 수지와 입자사이 계면결합력이 약화되어 외부온도에 영향을 받아 수지의 측쇄가 이동되었기 때문에 사료된다.

(b) DMA특성

그림 3과 표 1은 Epoxy Neat, EMC 그리고 EMSC의 온도변화에 따른 DMA 특성곡선과 특성표를 나타낸다.

40°C(유리상태)에서 Epoxy Neat의 저장탄성계수는 2740MPa, EMC에서는 3445MPa 그리고 EMSC에서는 3538MPa로서 Neat Epoxy에 비하여 EMC는 704MPa, EMSC는 798MPa가 향상된 결과를 얻었으며, EMC보다

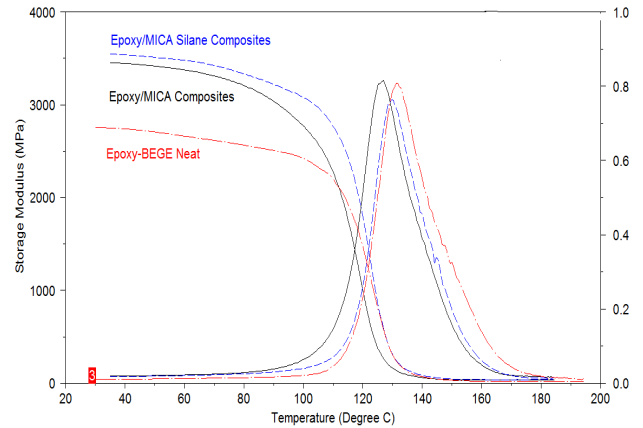


그림 3 Neat, EMC 와 EMSC 대한 DMA 특성  
Fig. 3 DMA Properties for Neat, EMC and EMSC

표 1 Neat, EMC 그리고 EMSC에 대한 DMA의 특성  
Table 1 Characteristics Table of DMA for Neat, EMC and EMSC

Types of Sample	Storage Modulus (MPa)		Tanδ peak Temperature (°C)
	40°C	130°C	
NEAT Epoxy	2740	310	131.95
Epoxy/MICA Composites	3445	164.3	126.4
Epoxy/Silane MICA Composites	3538	314.0	130.0

EMSC가 93MPa 향상되었다.

측정대기온도가 증가함으로서, 저장탄성계수(G')는 감소하였고 급격히 강해되었다. 유리전이온도의 경계부인 130°C(고무상태)에서는 Neat Epoxy 저장탄성계수는 310MPa이었고, EMC의 경우 164.3MPa 그리고 EMSC의 경우 314MPa로서 EMC보다 EMSC가 약 150MPa의 향상을 가져왔다.

그러나 유리상태인 그 시점에 손실계수(G'')는 급격하게 증가되어져 유리전이온도(Tg)를 tanδ = G''/G'로 추정할 수 있다. 이런 tanδ의 증가는 점성(G'')과 탄성력(G') 비로서 점성의 성질이 강해진 반면 탄성력이 급격히 저하된 결과이다. Neat Epoxy의 tanδ 피크는 131.95°C이고 실란처리되지 않은 EMC의 경우 126.4°C 그리고 실란처리된 EMSC의 경우 130°C를 나타내었다. 역시 피크온도가 EMSC가 EMC보다 3.6°C 향상되었다. 이처럼 실란처리된 경우가 DMA특성의 향상을 가져온 것은 실란은 에폭시수지와 마이카입자사이 기(Radical)들이 이중 반응에 기인하여 입자분산성을 높이고 표면에너지를 감소시키는 역할을 하게 된다. 이처럼 마이카와 수지사이 실란커플링제 사이수소결합에 의해 그들 간의 극성요소가 계면결합력의 증가로 이어져 유리상태에서 뿐만아니라 고무상태에서 향상된 결과를 가져온 것이다. 앞서 서술한 바처럼 유리전이온도의 향상을 가져오게 된 것이다.

2.2.3 기계적인 특성

(a) 인장강도

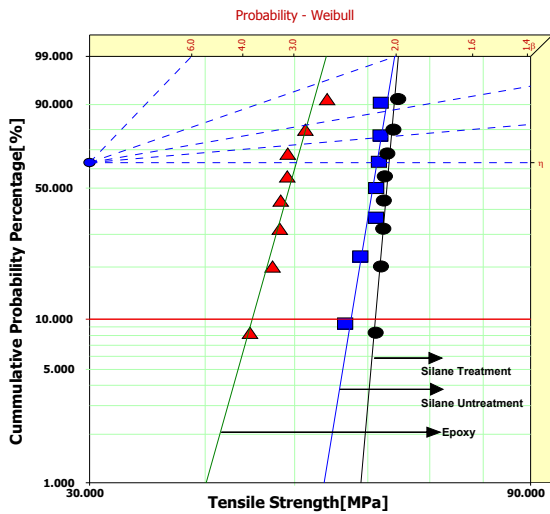


그림 4 Neat, EMC 그리고 EMSC에 대한 인장강도의 와이블플롯

Fig. 4 Weibull Plot of Tensile Strength for Neat, EMC and EMSC

표 2 Neat, EMC 그리고 EMSC에 대한 인장강도의 특성표

Table 2 Characteristics Table of Weibull Plot for Tensile Strength of Neat, EMC and EMSC

Tensile Strength			
Types	shape parameter	scale parameter (MPa)	B10 (MPa)
Epoxy NEAT	20.45	50.22	44.99
Epoxy/MICA Composites	34.83	61.39	57.60
Epoxy/MICA Silane Composites	65.50	63.27	61.20

그림 4와 표 2에서는 Neat Epoxy 수지, EMC 그리고 EMSC에 대한 기계적 특성중 인장강도의 Weibull Plot 특성곡선과 특성 표를 나타낸 것이다. 그림 4의 인장강도에 대한 와이블플롯 특성곡선, 가령 형상파라미터, 스케일파라미터 그리고 B10수명의 값을 얻었다. 형상파라미터는 측정자료의 기울기를 의미하고 스케일파라미터는 63.2% 누적분포 확률을 의미한 것이다. 또한 B10수명은 하위 10%누적확률 분포 지점으로 사고는 하위 10%지점에서 발생할 확률이 매우 높기 때문에 상위값의 견전도가 높다 하더라도 매우 중요한 자료로 인식되고 있다.

Neat Epoxy 수지의 스케일파라미터는 50.22MPa, EMC의 경우는 61.39MPa 그리고 EMSC의 경우는 63.27MPa를 얻었다. Neat Epoxy수지에 비하여 EMC는 11.17MPa, EMSC는 13.05MPa의 향상을 가져왔고 또한 실란처리된 경우 EMSC가 실란처리되지 않은 EMC보다 1.9MPa의 향상을 가져왔

다. 형상파라미터의 경우 EMSC가 EMC보다 균질성면에서 높은 값을 얻었으며, B10수명 역시 매우 높은 결과를 얻었다. 이로서 앞서 서술된 DMA의 경우와 마찬가지로 실란처리된 경우 복합체가 실란처리 되지 않은 복합체에 비하여 특성의 향상을 가져온 이유는 실란커플링제의 영향으로 수지와 입자사이 호환성을 높이고 입자와 수지사이 결합력이 증가된 결과로 사료된다[13],[14].

2.2.4 전기적인 특성

그림 5에서는 Neat Epoxy, EMC 그리고 EMSC의 교류절연파괴 연파괴 강도에 대한 와이블 플롯을 나타내었으며, 표 3에서는 와이블 플롯에 대한 특성표를 나타내었다. 교류절연파괴는 환경온도 30°C에서 100mmΦ 원판형인 두께가 1mm로 성형된 측정샘플 6개를 구대구 전극배치로 측정한 결과를 나타낸 것이다.

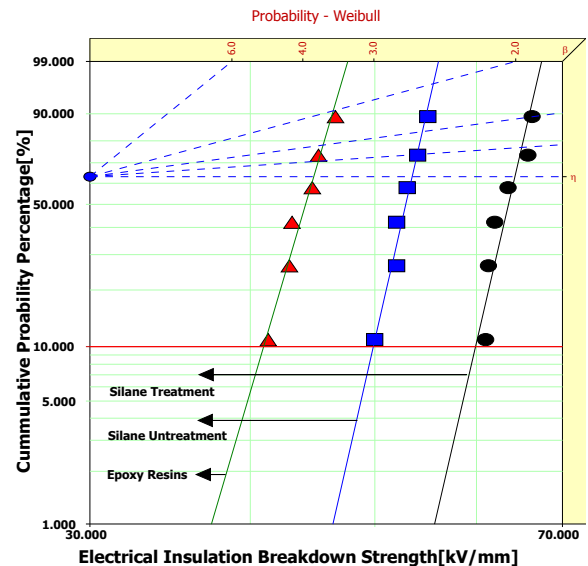


그림 5 Neat, EMC 그리고 EMSC에 대한 교류절연파괴 강도의 와이블 플롯

Fig. 5 Weibull Plot of AC Insulation Breakdown Strength for Neat, EMC and EMSC

표 3 Neat, EMC 그리고 EMSC에 대한 교류절연파괴 강도에 대한 와이블 플롯의 특성표

Table 3 Characteristics Table of Weibull Plot for AC Insulation Breakdown Strength of Neat, EMC and EMSC

AC Insulation Breakdown Strength			
Types	shape parameter	scale parameter (kV/mm)	B10 Life (kV/mm)
Epoxy NEAT	25.03	44.82	40.93
Epoxy/MICA Composites	37.40	53.46	49.88
Epoxy/MICA Silane	31.90	64.28	59.92

그림 5과 표 3에서 나타난 바와 같이 스케일파라미터에서 Neat Epoxy보다 EMC의 경우 19.2%, EMSC의 경우 43.2% 향상된 결과를 얻었다. 또한 EMC보다 EMSC의 경우 20.2% 향상되었다. 또한 B10수명의 경우 EMC보다 EMSC의 경우 형상파라미터의 기울기가 매우 높게 나타나 균질한 특성을 가지면서 20% 향상되었음을 알 수 있다.

결과적으로 에폭시수지에 마이카입자의 충전함량이 일정한 복합체에 실란커플링제를 처리한경우가 미처리된 경우에 비하여 20.2% 향상된 결과를 얻었으며, B10 수명의 경우도 거의 동일한 20%의 향상된 결과이다. 또한 교류절연과괴강도에서 B10의 수명은 중전기기의 절연성능에 주요한 요소로 작용하고 있는 파라미터이다. 이유는 교류전압이 상시로 인가된 전력기기에 절연과괴의 대부분은 가장 약점이 되는 부분에서 파괴가 일어난다. 그런 이유로 한번의 절연과괴가 발생되면 대정전 사태 및 전력공급에 큰 차질을 가져오기 때문에 가장 약한 부분의 절연성능을 나타낸 지표로 대단히 중요한 요소로 보여 진다. 이런 특성 값이 산업현장에 매우 중요하게 다루어져야할 것으로 본다.

이처럼 EMSC가 EMC 보다 스케일파라미터가 20.2% 향상된 이유는 여러 연구자들의 연구결과를 살펴볼 때 Nelson [15,16]와 Vaughan[17]는 원형수지에 MMT를 혼합하여 미분산된 경우 즉, 응집된 부분이 약점과괴로서 절연과괴 강도가 낮아지는 결과를 가져왔다. Santanu Singha and M Joy Thomas[18]는 나노복합체에서 가장 높은 파괴 강도는 분산이 가장 잘 되었을 때 높은 향상을 가져온다 보고하였다. 그런 이유로, 에폭시수지에 실란을 처리하여 마이카입자를 충전시켜 분산할 때, 실란의 효과는 Dow Corning[13]회사에서 발표한 결과에서, 고분자에 의하여 광물질의 젖음성이 향상되었고, 필러/고분자 혼합시 점도를 감소시키며, 고분자에서 광물질의 분산성을 향상시키며, 광물질과 고분자 사이 접착력 향상이 향상되어 그 결과 전기적 특성과 기계적 특성 향상을 가져온다 보고 하고 있다.

일반적으로 교번전계 하에서는 부극성시 금속전극으로부터 전자의 주입이 발생하게 된다. 절연과괴 메커니즘에서 교번전계 하에서 주입된 전자는 가장 약한 부분인 에폭시수지 충전 마이카입자의 계면을 따라 진전하게 될 것이다. 그러나 실란미 처리된 복합체에서는 분산성이 약하게 되어 응집된 경우가 존재하게 되며, 수지와 마이카 입자사이 계면의 결합력이 약하여 이 부분에서 결합으로 작용되어 전자의 이동을 쉽게 하는 경향을 갖게 될 것이다. 그러나 실란처리된 경우 복합체는 균질분산이 이루어져 뭉침의 형상이 약하여 균질분산이 이루어져 있으며, 계면의 결합력이 강하게 작용하여 전자의 이동을 방해하는 요인으로 작용되어 절연의 향상을 가져오게 된다.

### 3. 결 론

고압전동기 고정자권선의 절연소재 개발을 위하여 에폭시/마이카테입을 사용하여 소선 및 코일에 감아 VPI방식으로 에폭시를 함침하여 사용되게 된다. 그러나 그런 테이핑 된 경우 바니시로서 에폭시의 함침이 불충분한 또한 함침되지 못한 경우 절연결합을 유발하게 된다. 이런 바니시로서 BDGE를 첨가제로 사용하여 마이카입자를 충전시켜 실란처리된

경우와 미처리된 경우 에폭시/마이카 복합체를 제조하여 다음과 같이 열적, 기계적, 전기적 특성 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

#### (1) 구조적 특성(SEM분석)

에폭시/BDGE/마이카 콤포지트를 20wt% 충전된 경우 실란처리된 경우 와 미처리된 경우 SEM을 관찰한 결과 실란 미처리된 콤포지트 경우 보다 실란처리 된 경우 계면의 결합력이 강화된 경우 SEM의 결과로부터 확인 할수 있었다. 계면이 완벽하게 결합되어 기계적 인장으로 파단시 파단면이 쪼개지는 것이 아니고 마이카가 뜯겨나가는 경우를 볼 수 있었다. 이런 계면의 강화를 유리전이온도, 인장강도 그리고 절연과괴의 결과로부터 확인 할수 있었다. 그림 1의 c'로부터 에폭시 매트릭스에 균질한 분산이 이루어져있음을 EDS의 분포를 통하여 또한 확인 할 수 있었다.

#### (2) 열적특성(유리전이온도)

EMC보다 EMSC의 경우 4.5℃ 향상된 결과를 가져왔다. 이는 수지에 아민계 실란처리로 인하여 수지에서 마이카입자의 젖음성이 향상된 것이며, 입자의 표면에너지 감소로 인하여 수지와 입자사이 결합력이 증가하게 된 결과이다. SEM의 결과에서 실란처리와 미처리된 계면의 결합력의 강화와 균질분산의 결과로 수지의 이동도를 억제하는 결과로 인하여 유리전이온도의 향상을 가져온 것으로 사료된다. 일반적으로 수지에 마이크로필러의 충전으로 계면의 결합력이 약하게 되면 오히려 유리전이온도의 감소로 나타나게 된다.

#### (3) 기계적 특성

인장강도에 대한 와이블 플롯의 결과 Neat Epoxy수지에 비하여 인장강도의 경우 EMC보다 EMSC가 향상된 결과를 얻었다. 또한 형상파라미터의 경우도 EMC보다 EMSC의 경우 높은 기울기를 갖게 된 결과는 기계적 인장 강도의 파단시 양호한 결합력을 갖기 때문이다. 이는 마이크로입자의 충전으로 인하여 젖음성이 약하면 미분산된 경우 마이크로 및 나노 보이드가 존재 하게 된다. 이런 경우 절연의 결합으로 인하여 형상파라미터의 값이 낮게 나타나게 된다. 그러나 실란이 처리된 경우 기계적 인장강도의 향상은 계면의 결합력이 향상된 결과로 인하여 특성의 강화를 가져온 것이다.

#### (4) 전기적 특성

Neat Epoxy보다 EMC의 경우 19.2%, EMSC의 경우 43.2% 향상된 결과를 얻었다. 또한 EMC보다 EMSC의 경우 20.2% 향상되었다. 또한 B10수명의 경우 EMC보다 EMSC의 경우 형상파라미터의 기울기가 매우 높다. 즉, 균질한 특성을 가지면서 20% 향상되었다.

결론적으로 에폭시수지에 마이카입자의 충전함량이 일정한 복합체에 실란커플링제를 처리한 경우가 미처리된 경우에 비하여 20.2% 향상된 결과를 얻었으며, B10 수명의 경우도 거의 동일한 20%의 향상의 결과를 가져온 것이다. 실란



처리의 효과를 전기적인 절연과피괴강도에서 더욱 확실하게 보여주고 있다. 일반적으로 마이크로입자의 절연과피괴의 경우 파괴메커니즘에서는 계면이 약하여 약점과피괴로서, 계면을 타고 파괴되는 경우가 일반적이다. 그렇지만 계면의 강화로 인하여 절연내력이 크게 강화되는 양호한 결과를 얻게 되었다. 실란처리의 경우 기계적 특성의 경우보다 상대적으로 전기적 특성인 절연과피괴강도에 큰 영향을 준 것이다. 이로써 향후 고압전동기 및 발전기 고정자권선의 절연을 위한 몰드형타입의 제조기법 및 마이크로와 나노를 혼합한 절연소재의 개발에 초석이 될것으로 향후 기대된다.

**References**

[1] P. O. Henk, T. W. Kortsen and T. Kvarst, High Perform. Polym., **11**,281(1999).  
 [2] M. Ehsani, Z. Farhadinejad, S. Moemen-bellah, S. M. Bagher alavi, M. M. S. Shrazi and H. Borsi, 26thInternalPowerSystemConference,Tehran,Iran,11-E-CAM-2359(2011).  
 [3] P. Bajaj, N. K. Jha and A. Kumar, J. Appl. Polym. Sci., **56**,1339(1995).  
 [4] Y. Xu, D. D. L. Chung and C. Mroz, Composites: Part A, **32**,1749(2001).  
 [5] A. A. Wazzan, H. A. Al-Turaif and A. F. Abdelkader, Polymer-Plastics Technology and Engineering, **45**,1155(2006).  
 [6] R. Sarathi, R. K. Sahu and P. Rajeshkumar, Mater. Sci. Eng.: A, **445**,567(2007).  
 [7] N. Hayakawa, H. Maeda, S. Chigusa and H. Okubo, Cryogenics, **40**,167(2000).  
 [8] P. Gröpper, T. Hildinger, F. Pohlmann and J. R. Weidner, 2012 CIGRE Session, Paris, A1-103 (2012).  
 [9] R. Bruetsch, M. Tari, K. Froehlich, T. Weiers and R. Vogelsang, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, p.162 (2008).  
 [10] P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik and W. Ladstätter, Energize, **11**,51(2007).  
 [11] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako and Tanaka, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials p.1136(2006).  
 [12] G. Chen, J. Zhao, S. Li and L. Zhong, Appl. Phys. Lett., **100**, 222904(2012).  
 [13] Dow Corning:www.dowcorning.com/content/silanes/siscmain.asp  
 [14] Farzana Hussain, Jihua Chen, Mehdi Hojjati, "Epoxy-silicate nanocomposites: Cure monitoring and characterization", Materials Science and Engineering A 445~446 (2007) 467~476  
 [15] 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  
 [16] J. K. Nelson, J. C. Fothergill, "Internal charge behaviour of nanocomposites", Nanotechnology vol. 15(2004) pp 586-595  
 [17] 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  
 [18] 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