

에폭시/층상실리케이트 나노복합체의 주파수 가속열화에 따른 부분방전 저항성

Partial Discharge Resistance According to Frequency Acceleration Deterioration of Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites

박재준*
(Park Jae-Jun)

Abstract - Frequency accelerated partial discharge resistance (PDR) aging of epoxy/layered silicate nanocomposite with 1.5wt % additions of layered silicate was investigated in comparison with that of epoxy without layered silicate in terms of PD(partial discharge) erosion depth. It was found that the change in the erosion depth is far smaller in specimens with layered silicate than those without layered silicate nano particles. Frequency acceleration can be done from 60Hz to 1000Hz. But the depth of erosion is less proportional to frequency. Acceleration factor is almost 2 times between 500Hz and 1000Hz, but it is much less than about 8.3 times between 60Hz and 500Hz. This superior PD resistance is caused by the presence of nanofillers, anano-effect due to closely packed nanofillers, and strong chemical bonds at layered silicate nanofillers /resin interfaces.

Key Words : Epoxy nanocomposites, Partial discharge resistance, Frequency acceleration, Surface degradation

1. 서 론

고분자 나노복합체는 나노미터 크기의 무기물입자 수 wt%를 고분자 내 균질하게 분산시켜 형성된 나노구조를 갖는 복합재료이다. 새로운 종류의 나노 구조화된 복합재료가 최근에 많은 관심을 받고 있다[1-7]. 이유는 그와 같은 나노 구조가 여러 가지 고분자 특성 가령, 기계적 특성[1], 내열성, 열전도, 난연성[2], 가스장벽[4]의 정도 등 놀랄만한 향상을 가져오기 때문이다.

고분자 나노복합체들은, 원형에폭시수지에 비교함으로써 무기물필러와 그들을 둘러싸고 있는 고분자 매트릭스 사이가 엄청나게 큰 표면적을 갖고 있기 때문에 즉, 고분자 매트릭스 내 마이크로미터크기의 무기물필러와 함께 복합화하는 고전적 고분자 복합체와 비교하여볼 때, 특별하게 구별되어진다. 고분자들 가령 폴리아미드(polyamide:PA)[8], 폴리에틸렌(polyethylene:PE), 폴리프로필렌(polypropylene:PP), 에틸렌비닐아세테이트(ethylene vinyl acetate : EVA), 불포화폴리에스테르[9], 에폭시수지(epoxy resins) 그리고 실리콘고무(silicone rubbers) 와 나노입자들 즉, 층상실리케이트(layered silicate :LS)[10], 실리카(silica: SiO₂)[11], 티타네이트(titania:TiO₂)[4], 알루미나(alumina : Al₂O₃)[12] 그리고 산화마그네슘(magnesia: MgO)[8],[13]와 같은 나노필러들과 결합된 것이다.

폴리아미드/층상실리케이트 나노복합체는 1990년대에 엔지니어링 플라스틱에 처음으로 상업화에 성공하였다. 그것은 기계적강도, 내열성(thermal endurance) 그리고 가스장

벽성능(gas barrier performance) 이 양호하였기 때문이었다. 또한 층상실리케이트나노필러들 중 하나로서 특히 흥미로운 것이었다. 이유는 그것이 큰 표면적 뿐만 아니라 역시 큰 종횡비(aspect ratio) 때문이다. 그것은 쌓여진 층들의 층상 두께가 1nm 그리고 길이 100nm 인 판형으로 구성된 것이다. 층상실리케이트는 유전체와 전기적 절연재료의 견해로 볼 때 매우 흥미로운 것이다. 에폭시 또한 전형적인 유전체와 절연재료 중 하나이다. 이런 두 가지에 대한 견지로 볼 때, 층상실리케이트를 함유한 에폭시수지의 복합체는 고성능을 갖는 신절연소재로서 목표가 되어져 왔다. 그것은 실리케이트 층이 분산되어지거나 박리되어져야할 층 과 층사이가 무질서하게 이루어질 필요가 있다. 이런 경우 매우 절연소재로서 특성의 향상에 크게 기여하게 된다.

고전적으로 복합체의 경향은 전기적 절연분야 에서, 에폭시는 무기물로서 마이크로미터 크기의 필러와 함께 조합하여 이용하여왔다. 이를 에폭시-마이크로 복합체라고 부르고 또한 나노필러들이 고전적 마이크로필러 대신에 대체되어 훨씬 더 큰 이득을 가져왔다. 고분자 나노복합체는 1~10wt% 나노필러의 소량을 포함하고 그리고 경량화(light weight), 콤팩트화(compactness), 전력소비 그리고 시스템을 저비용에 기여할 수 있고 그리고 실제적으로 차세대 몰드절연 그리고 모든 고체 절연화된 변전소등에 유용하게 이용되어질 수 있다. 부분방전 저항성(partial discharge resistance:PDR) 이 전기적 절연으로서 광범위하게 사용되어왔던 에폭시수지 내에 소량의 나노필러를 첨가함으로써 현격한 PDR 향상되었다[8],[13],[14]. 나노효과에 의하여 가져온 이 향상은 나노필러의 분산에 기인한 것이다. 고전적 충전 에폭시는 마이크로필러가 고도로 충전 될 때만이 훌륭한 PDR를 나타내었다[15].

* Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Joongbu University, Korea
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr

본 연구에서는 에폭시수지에 충상 실리케이트를 완전한 박리를 위하여 자체 개발한 전기장분산법[16]을 이용하여 1.5wt% 충진된 나노복합피트를 제조하였다. 제조된 에폭시/충상실리케이트 나노복합피트와 원형에폭시수지 두 종류의 부분방전 저항성 샘플로서 이용하였다. 그리고 전원주파수가속열화 평가를 위하여 고전압전원주파수 60Hz, 500Hz, 1000Hz인 3종류의 주파수를 가속시켜, PDR 특성의 평가를 실시하였다. 그 결과 원형에폭시와 에폭시/나노복합피트의 주파수 변화에 따른 표면침식 깊이와 침식을 현미경으로 측정된 결과를 통하여 분석 검토 하였다.

2. 실험 및 측정

2.1 재료

상업적 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol A)는 YD 128 (Kukdo Chem. Co.)이 사용되어졌다. 등가당량은 184~190 그리고 점도는 25℃에서 11,500~13,500 cps이다. 경화제는 Me-THPA(3-or4-methyl-1,2,3,6-tetra hydro phthalic anhydride)이고 상품명은 HN-2200(Hitachi Chem. Co.)이었다. 그것은 절연분야에 광범위하게 이용되어져왔다. 촉진제(accelerator)는 BDMA(benzyl-dimethyl amine, Kukdo Chem. Co.)이었고 그리고 Cloisite®10A(Southern Clay Products, Inc., USA)가 멀티-다층 실리케이트로서 사용 되어 졌고 그것은 2MBHT (dimethyl- benzyl- hydrogenated tallow quaternary ammonium)인 유기적으로 변경된 자연적인 몬모리로나이트(montmorillonite)로서 이것은 일종의 4 가 암모늄염 인 것이다. 그것은 역시 110℃에서 24시간 진공 중에서 건조시켰으며 데시케이터에서 보관하여 사용 하였다.

2.2 에폭시/ 충상실리케이트 나노복합피트 샘플 제조

에폭시/충상실리케이트 나노복합피트를 제조하기 위하여 ,DGEBA(100g) 그리고 Cloisite 10A (2.74g)를 30분 동안 ultrasonic homogenizer (20 kHz)와 함께 혼합되어졌다. 그리고 그들은 전기장 분산처리장치로 이동되어졌다[17]. 교류전기장은 다음조건과 같이 고전압 발생장치에 의해 발생되어졌다. 즉, (1) 극간 거리 50mm, (2) 적용전압 11kV, (3) 주파수 :1kHz (4) 적용시간 : 60분. 교류전기장이 적용되는 동안, 에폭시수지가 충상실리케이트사이로 침투하여 부풀게 하여 박리화 시킨 것이다. 그때, 혼합물은 THPA(80g)과 BDMA (0.9g).를 혼합하였다. 에폭시/충상실리케이트 나노복합피트에서 충상실리케이트의 나노입자 증량 퍼센트는 1.5wt%로 하였다. 혼합물은 50mm×50mm×1mm의 몰드 틀에 주입하였고 그리고 120℃×2hr+150℃×24hr의 경화조건으로 샘플을 제조하였다.

2.3 부분방전 저항성 측정시스템

그림 1에서 나타난 바와 같이 부분방전 저항성을 측정하기 위하여 사용된 봉 전극은 곡률반경 5mm을 갖는 텅스텐 전극으로 상부와 하부의 공기 갭 길이는 0.2mm로 구성하였

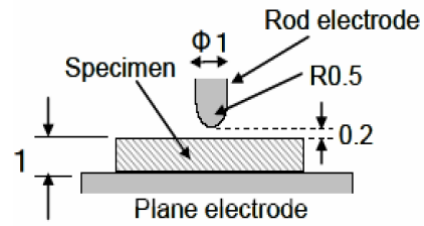


그림 1 부분방전 저항성 전극 구성
Fig. 1 Electrode Arrangement of Partial Discharge Resistance

다. 그림 2에서는 부분방전저항성의 측정을 위해 자체개발한 전극을 나타낸 것이다. 방출된 빛은 부분방전 저항성의 봉 대 평판 전극에서 발생된 빛으로서, 같은 시간동안 서로 다른 8개 샘플을 동시에 측정할 수 있는 부분방전 저항성의 전극장치이다. 이 측정 장치를 이용하여 동시에 8개의 샘플을 측정하였고, 측정전압은 교류 5kV을 초당 0.5kV/s로 인가하였고 그리고 인가전압 위상각 60Hz, 500Hz, 1000Hz를 각각의 샘플에 지속적으로 96시간동안 인가하였다. 그 결과 Surface Profiler (Dektak-150)을 이용하여 침식된 깊이를 측정하였고, 측정장치는 사진 1에서 나타내었다.



그림 2 부분방전 광방출
Fig. 2 Light Emission of Partial Discharge

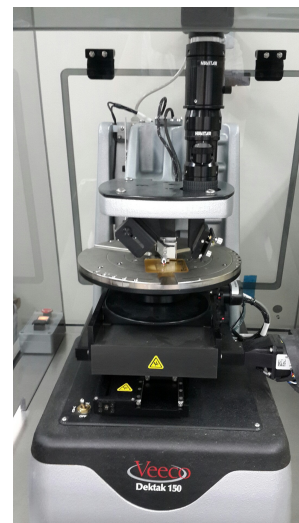


사진 1 표면 프로파일 측정장치
Pho. 1 Surface Profiler (Dektak-150) by Veeco

3. 결과 및 검토 고찰

3.1 에폭시원형수지의 PD 저항성

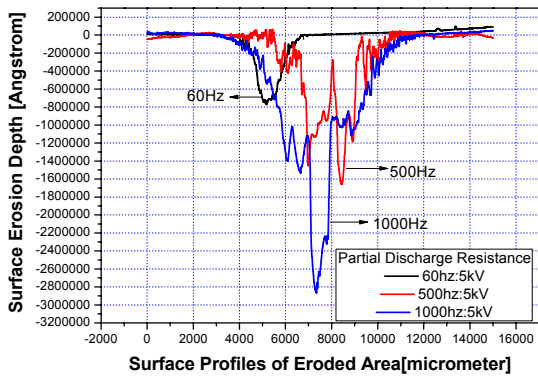


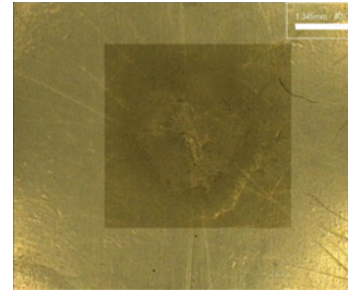
그림 3 에폭시원형수지에 대한 주파수가속에 따른 부분방전 저항성의 표면침식 깊이와 폭

Fig. 3 Surface Erosion Depth and Width of Partial Discharge Resistance according to Frequency Acceleration for Epoxy Resin

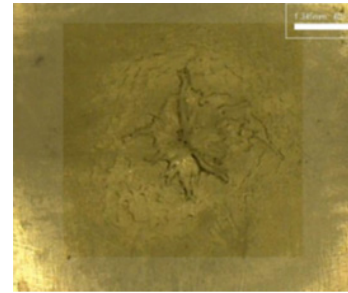
그림 3에서는 에폭시 원형수지에 대한 주파수 가속 즉, 60Hz, 500Hz, 1000Hz의 전원주파수를 곡률반경이 0.5mm인 전극간 갭 길이 0.2mm 간극에 적용하였다. 방사된 부분방전 에너지에 의해 발생된 부분방전 저항성의 결과 즉, 표면침식 깊이 및 폭 등의 형상을 Surface Profiler로 측정된 결과를 나타내었다. 주파수 가속에 따라 침식된 에폭시원형수지의 표면 침식깊이는 74.1, 138.4, 275.4[μm]을 나타내었다. 그리고 침식 폭의 경우, 5000, 8900, 11000[μm] 즉, cm로 환산하면 0.5, 0.89, 1.1cm 침식된 폭의 직경을 나타내었다. 그림 4에서는 침식된 표면의 프로파일을 40배 광학현미경을 이용하여 측정하기 위하여 초음파 세척기에서 세척 후, 24시간 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조한 후 표면을 현미경으로 측정된 영상을 나타내었다. 봉(Rod) 전극 직하에서 발생된 고전압/주파수, 즉, 5kV/60Hz, 5kV/500Hz, 5kV/1000Hz가 96시간동안 연속적으로 표면에 주파수 가속시험을 실시하였고, 그 결과 전극 직하에서는 침식깊이가 깊고, 중심에서 벗어날수록 침식깊이가 낮은 침식의 결과를 나타내었다. 인가된 전원주파수 가속이 크면 클수록 침식깊이가 깊고, 반대로 주파수가 낮은 경우 침식깊이가 얇은 침식 결과를 얻을 수 있었다. 또한 60Hz의 경우는 침식된 표면이 매끄럽고 반면에 500Hz에서 1000Hz로 주파수 가속이 증가 할수록 표면의 침식요철이 더욱더 많아지며 깊숙하게 침식된 요철이 점점 증가되는 결과를 가져온 것이다.

3.2 에폭시/층상실리케이트 나노복합체의 PD저항성

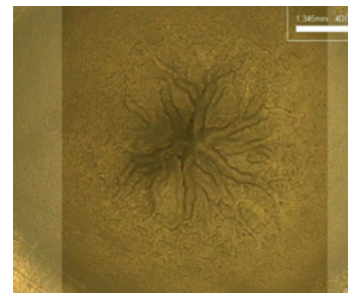
그림 5에서는 마이크로 층상실리케이트를 전기장 분산기법을 통하여 층상실리케이트 입자를 나노화시킨 복합체를 제조하였다. 에폭시/층상실리케이트 나노복합체를 원형 에폭시 수지와 같은 조건의 주파수 가속을 실시하였다. 그 결과 표면 프로파일측정을 사용하여 측정된 표면침식깊이와



(a) 60Hz



(b) 500Hz



(c) 1000Hz

그림 4 주파수 가속에따른 원형 에폭시수지의 표면 침식 및 폭에 대한 현미경사진

Fig. 4 A Photomicrograph for Surface Erosion Depth and Width for Epoxy Resin as Frequency Variation

폭의 형상을 그래프로 나타내었다. 그림 5의 결과 에폭시/층상실리케이트 나노복합체 침식깊이는 주파수 가속 즉, 5kV/60Hz, 5kV/500Hz, 5kV/1000Hz에서 54.8 μm , 44.4 μm 그리고 119.6 μm 의 침식 깊이를 나타내었다. 그리고 침식 폭은 주파수 가속에 따라 0.5cm, 0.89cm 그리고 1.1cm로서 주파수 가속이 크면 클수록 원형에폭시수지의 경우와 같은 부분방전 저항성 침식 폭과 같은 결과를 나타내었다.

그리고 침식된 표면의 형상은 주파수가 낮을수록 침식된 요철부위가 적고, 주파수 가속이 점차로 증가되어 갈수록 침식된 표면의 요철 부분이 매우심하고 그리고 날카로운 형상을 나타내었다. 원형 에폭시수지에 비하여 침식깊이는 얇지만 반대로 작은 침식된 요철은 상대적으로 많은 결과를 가져온 것이다.

이는 강력한 가속주파수가 표면의 침식을 가속 시키면서 떨어져 나아간 나노입자의 자국이 요철의 결과를 가져온 것이다. 그리고 주파수 가속이 큰 1000Hz은 특정부분 나노입자가 완전 분산되지 못하고 분산이 미약한 부분에 입자가 존재한 자국의 결과로 사료된다.

그림 6에서는 그림 5의 주파수 가속에 의해 부분방전 저항성 실험의 침식된 형상을 현미경 40배로 관찰한 영상을 나타내었다. 그림 6의 영상에서처럼 가속주파수가 낮은 60Hz에서는 침식폭이 상대적으로 좁은 상태임을 알 수 있고 이에 반하여 가속 주파수가 높아질수록 넓은 반경에서 침식이 진행되고 있음을 확인 할 수 있었다.

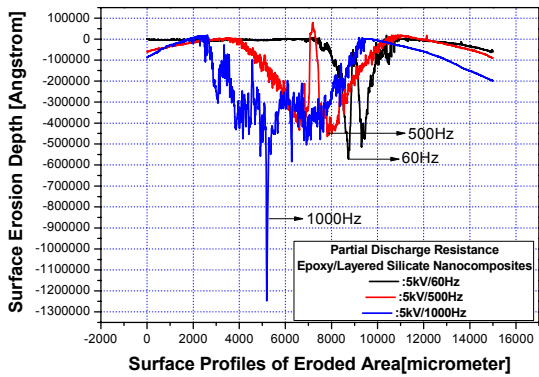


그림 5 주파수 변화의 에폭시/층상실리케이트 나노복합체에 대한 표면 침식 깊이와 폭

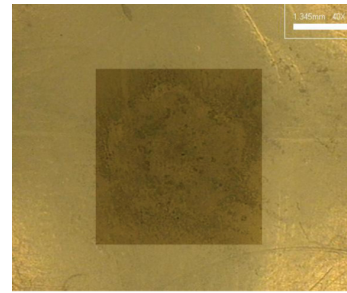
Fig. 5 Surface Erosion Depth and Width for Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites as Frequency Variation

3.3 에폭시원형과 나노복합체의 부분방전 저항성 침식깊이의 비교 특성

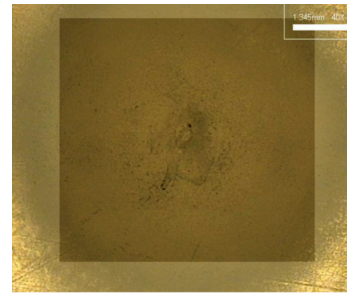
그림 7에서는 앞서 기술한 PDR에 대한 주파수 가속열화에 의하여 원형 에폭시수지와 에폭시/층상실리케이트 나노복합체와의 표면침식 깊이와 폭에 대한비교 특성을 그림 7(a) 60Hz, (b) 500Hz, (c) 1000Hz의 결과를 나타내었다. 그림 7(a)의 60Hz 경우, 원형에폭시수지의 침식은 74.1 μ m 그리고 나노복합체의 경우 54.8 μ m를 나타내었다. 나노복합체가 원형에폭시에 비하여 PDR에 강인한 결과로서 침식깊이의 경우 26.0% 침식이 잘 이루어지지 못한 결과를 나타낸 것이다. 그림 7(b)의 경우 500Hz 경우, 원형에폭시수지의 침식은 138.4 μ m 그리고 나노복합체의 경우 44.4 μ m를 나타내었다. 나노복합체가 원형에폭시에 비하여 부분방전성에 역시 강인한 결과로서 침식깊이의 경우 67.9% 침식이 잘 이루어지지 못한 결과를 나타낸 것이다.

그리고 그림 7(c)에서, 1000Hz 경우 원형에폭시수지의 침식은 275.4 μ m 그리고 나노복합체의 경우 119.6 μ m를 나타내었다. 나노복합체가 원형에폭시에 비하여 PDR에 역시 강인한 결과로서 침식깊이의 경우 56.6% 침식이 잘 이루어지지 못한 결과를 나타낸 것이다. 이로서, 본 연구에서는 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

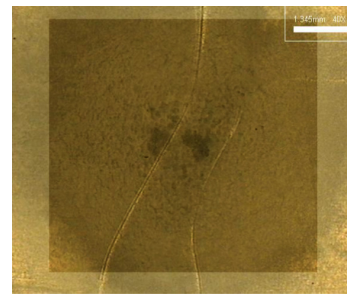
이상의 결과로부터 M.Kozako등[14]의 경우 폴리아미드/층상실리케이트 나노복합체의 경우 역시 기본 폴리아미드에비하여 PDR에서 강한 특성을 확인 하였다. 또한 T.Tanaka씨[8]의 경우도 LDPE에서 PDR에서 MgO 나노필러 충전 나노복합체에서 향상된 결과를 나타내었다. 충전함량 변화의 경우, 본 연구에서도 1.5wt%를 충전한 경우 절연파괴강도 및 기계적강도 등의 특성향상을 얻을 수 있었



(a) 60Hz



(b) 500Hz



(c) 1000Hz

그림 6 주파수 변화에 대한 에폭시/층상실리케이트 나노복합체의 표면 침식깊이와 폭에 대한 현미경 영상

Fig. 6 A Photomicrograph for Surface Erosion Depth and Width for Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites as Frequency Variation

지만[16], 여러 연구자들도 1wt%에서 오히려 PDR이 효과적이었음을 알 수 있었다[13]. PDR의 영향은 실란커플링제의 경우 PDR의 형성에 영향을 주고 있으며, 입자크기에도 영향을 주고 있음을 보고 하고 있다[13]. 또한 유전율과의 관계에서 무기필러의 경우가 유기고분자보다 유전율이 훨씬 크다. 더욱이 PD의 경우 그런 복합체에서 무기필러에 집중되어지는 경향을 나타내었다[12]. 이유는 전기력선은 낮은 유전율보다 더욱더 높은 유전율을 갖는 무기필러에 조밀하게 집중하기 때문이다. 역시 나노층상실리케이트의 경우는 가스 및 습도와 같은 장벽효과가 오히려 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 PDR에 영향을 주는 요인으로 필러의 분산정도 그리고 필러와 필러사이 상호작용에 PDR에 영향을 주고 있음도 확인 할 수 있었다[12].

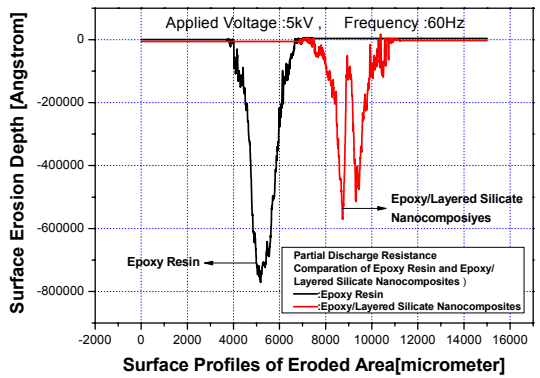
여러 연구자들의 결과로 볼 때, 나노입자가 포함된 나노복합체의 경우 전반적으로 침식저항이 증가하는 결과를

나타내었고 그리고 복합체의 평균 거칠기가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한 에폭시 나노복합체의 침식저항을 연구한 결과 침식저항은 나노입자들의 농도에 비례하고 입자의 형상과는 무관함을 보여주고 있다[12],[17],[18].

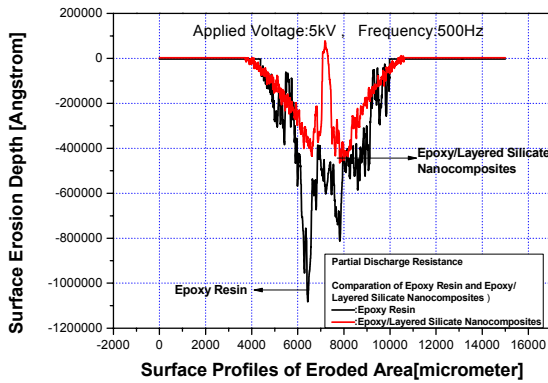
4. 결 론

본 연구에서는 원형에폭시수지와 전기장 분산기법을 이용한 층상실리케이트 나노입자를 분산시켜 제조된 에폭시/층상실리케이트 나노복합체를 제조하여, 교류 5kV의 전원 주파수를 가속시켜 60, 500, 1000Hz변화에 대한 부분방전 저항성의 특성을 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론에 이르렀다.

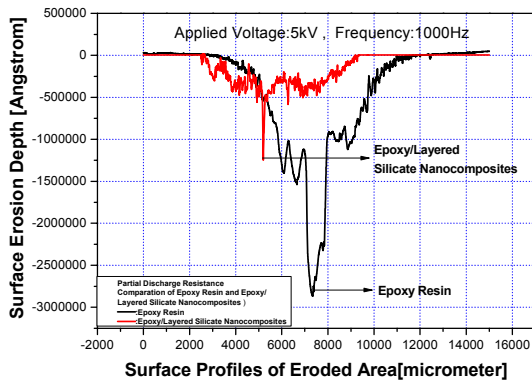
1. 고전압 전원주파수의 가속열화에 따른 부분방전 저항의 결과에 대한 표면침식깊이와 폭의 관계는 비례성은 있지만 비례하지 않음을 알 수 있었다. 즉, 주파수가속이 클수록 깊은 침식이 이루어졌으며, 반대로 낮은 주파수에서는 얇은 침식이 이루어진 결과이다. 즉, 60Hz에 대한 500Hz의 비 8.31배를 갖지만 또한 1000Hz는 16.6배 이지만 그만큼 저항성이 비례하지 않았음을 알 수 있다.
2. 원형에폭시 수지와 나노복합체(층상실리케이트나 노입자 충전함량:1.5phr)의 부분방전 저항성에대한 침식특성으로서 주파수 가속열화는 60Hz의 경우 26.0%, 500Hz의 경우 67.9% 그리고 1000Hz에서는 56.6% 나노복합체가 부분방전 저항성에 더욱더 강한 침식특성을 갖고 있다.
3. 부분방전 저항성에대한 연구결과는 코로나저항성과 같이 표면의 전기적인 스트레스를 주었을 때 나타나는 현상으로서 표면의 침식정도를 정량화하여 얻을 수 있는 측정기법으로서 향후 에나멜코팅 신뢰성연구와 같은 뇌서지 표면절연층 시험평가와 같은 다양한 분야의 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 전기장 분산법에의해 완전박리된 층상실리케이트 나노입자와 에폭시 수지사이의 수소결합 또는 공유결합 중 어느 하나에 의해 강한 결합의 존재는 입자자신뿐만 아니라 에워싸고 있는 에폭시수지 역시 침식을 막을 수 있어서 표면 침식저항을 증가 시킬 수 있다[11].



(a) 60Hz



(b) 500Hz



(c) 1000Hz

그림 7 주파수 가속열화의 표면침식깊이와 폭에 대한 에폭시 원형과 나노복합체 사이 비교

Fig. 7 A comparison between Epoxy Resin and Epoxy/Layered Silicate Nanocomposites for Surface Erosion Depth and Width as Frequency Variation

References

- [1] M. Kozako, N. Fuse, K. Shibata, N. Hirai, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Surface Change of Polyamide Nanocomposite Caused by partial Discharges", 2003 Annual Report CEIDP, No.2B-3, pp.75-78, 2003.
- [2] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, "Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharges Using IEC (b) Electrodes", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, No.5, pp.833-839, 2004.
- [3] M. Kozako, R. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Difference in Surface Degradation due to Partial Discharges between Polyamide Nanocomposites and Microcomposites", 2004 Annual Report CEIDP, No.5A-15, pp.398401, 2004.
- [4] M. Kozako, R. Kido, T. Imai, T. Ozaki, T. Shimizu, and T. Tanaka, "Surface Roughness Change of

- Epoxy/TiO₂ Nanocomposites due to Partial Discharges”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, No.P2-34,pp.661-664,2005.
- [5] M. Kozako, S. Yamano, R. Kido, Y. Ohki, M. Kohtoh, S. Okabe, and T. Tanaka, "Preparation and Preliminary Characteristic Evaluation of Epoxy/Alumina Nanocomposites", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, No.A4-3, pp.231-234, 2005.
- [6] T. Tanaka, S. Kuge, M. Kozako, T. Imai, T. Ozaki and, T. Shimizu, "Nano Effects on PD Endurance of Epoxy Nanocomposites", Proc. ICEE, No. ME1-01, pp.4, 2006.
- [7] Takahiro Imai, Fumio Sawa, Tamon Ozaki, Toshio Shimizu, Shin-ichi Kuge, Masahiro Kozako and Toshikatsu Tanaka, "Approach by Nano- and Micro-filler Mixture toward Epoxy-based Nanocomposites as Industrial Insulating Materials", IEEJ Trans. FM, Vol 126, No11, 2006.
- [8] T. Tanaka, A. Nose, Y. Ohki and Y. Murata, "PD Resistance Evaluation of LDPE/MgO Nanocomposite by a Rod-to-Plane Electrode System", IEEE ICPADM 2006, pp.319-322, 2006.
- [9] Kanchan Nehete, Ram A. Sharma, Lokesh Chaudhari, Subhendu Bhattacharya, Vivek Singal and Dawid D'Melo, "Study of Erosion Resistance and Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Based Nano-composites", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 2; pp.373-382, April 2012*
- [10] Toshikatsu Tanaka, Yoshimichi Ohki, Mitsukazu Ochi, Miyuki Harada and Takahiro Imai, "Enhanced Partial Discharge Resistance of Epoxy/Clay Nanocomposite Prepared by Newly Developed Organic Modification and Solubilization Methods", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1; pp. 81-89, February 2008*
- [11] Chang-Hoon Lee and Jae-Jun Park, "The Partial Discharge Resistance of Epoxy-Nano- and -Micro Composites", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol.11, No.2, pp.89-91, 2011
- [12] Parimal Maity¹, Subramanyam V Kasisomayajula², Venkitanarayanan Parameswaran¹, Sumit Basu¹, Nandini Gupta², "Improvement in Surface Degradation Properties of Polymer Composites due to Pre-processed Nanometric Alumina Fillers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1; pp. 63-72, February 2008*
- [13] T. Tanaka, S. Kuge, M. Kozako, T. Imai, T. Ozaki and T. Shimizu, "Nano Effects on PD Endurance of Epoxy Nanocomposites", Proc. ICEE, No. ME1-01, pp.4, 2006.
- [14] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharges Using IEC (b) Electrodes", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, No. 5 (2004) 833-839.
- [15] T. Imai, F. Sawa, T. Nakano, T. Ozaki, T. Shimizu, S. Kuge, M. Kozako and T. Tanaka, "Insulation Properties of Nano- and Micro-filler Mixture Composite", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp.171-174, 2005.
- [16] Jae-Jun Park and Jae-Young Lee, "A New Dispersion Method for the Preparation of Polymer/Organoclay Nanocomposite in the Electric Fields", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 5; October 2010*
- [17] Z. Li, K. Okamoto, Y. Okhi and T. Tanaka, "Effects on nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro-Al₂O₃ epoxy nano-composites", IEEE Trans Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, pp. 653-661, 2010.
- [18] P. Maity, S. Basu, V. Parameswaran and N. Gupta, "Degradation of polymer dielectrics with nanometric metal-oxide fillers due to surface discharges", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 52-62, 2008.

저 자 소 개



박재준 (朴 材 俊)

1985년 광운대학교 전기공학과 학사, 1987년 광운대학교 전기공학과 석사, 1993년 광운대학교 전기공학과 박사, 1997년 ~ 현재 중부대학교 전기전자공학과 교수
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr