

# 에폭시 절연의 전기적 트리잉에 관한 표면 개질된 나노알루미나의 영향

## The Influence of Surface Modified Nano Alumina for Electrical Treeing in Epoxy Insulation

박 재 준\*  
(Jae-Jun Park)

**Abstract** - This paper presents the results of a study on the effect of surface modified alumina nanocomposites on electrical tree growth in epoxy insulation. Treeing experiments were conducted at a fixed AC voltage (500kV/mm, 10kV/60Hz) on unfilled epoxy sample as well as epoxy nanocomposites of 4 types with different loading and surface modified GDE gram. Time for tree growth as well as tree propagation length were studied. The results show that there is a significant improvement tree propagation time compare unfilled epoxy to epoxy nano alumina composites. Different tree propagation shapes as well as slower tree growth with 4 types nano alumina composites were observed.

**Key Words** : GIS spacer, Epoxy nano alumina composites, Electrical tree, Surface modified nano alumina

### 1. 서 론

전기적 트리잉은 교번전계와 함께 연속적으로 스트레스를 인가할 때 일어나는 고분자절연의 장기간 열화 과정 중 하나이다. 그것은 정교한 침식채널이 부분방전 때문에 절연체 내 높은 전기적인 스트레스의 영역으로부터 성장하고 그리고 대향전극을 향하여 진전하는 파괴메카니즘 이다[1-2]. 일단 트리잉은 절연재료 내에서 발생되고 그것은 트리채널이 대향전극에 직면했을 때, 파괴로 이어지는 것이다. 그렇지만, 에폭시수지는 중전기 절연시스템의 절연재료로 잘 알려져 있다. 이유는 전기적 뿐만 아니라 기계적, 열적 특성이 우수하기 때문이다. 에폭시수지는 많은 전기설비의 절연재료로서 특히, GIS Spacer (Gas Insulated Switchgear Spacer), 발전기 고정자권선 시스템 그리고 몰드형 타입 변압기 등에 사용되어 지고 있다[3][4]. 지금까지 지난 20~30년 동안 수많은 연구자들은 전기응용을 위해 저가이면서 매우 높은 성능을 생각하면서 마이크로 입자의 충전함량이 생산 공정과정 과 활선상태에서 적용할 때 순수한 원형에폭시의 치수 안정성, 열적 그리고 기계적특성 향상과 최적의 상태를 얻기 위해 연구하여 왔다. 그러나 마이크로 실리카 및 알루미나 필러를 과량 충전한 이유는 열팽창계수, 기계적 강도특성의 향상을 위해서 필수 불가결한 소재이다. 그러나 전기적특성에는 특성향상 보다는 오히려 특성의 저하를 가져오는 것이다. 그렇지만 이런

중전기 절연물질 내 삽입된 알루미나와 구리의 열팽창계수와 거의 같은 열팽창계수를 맞추기 위해 과량의 마이크로 충전제를 충전하는 이유이다[5][6]. 만일 열팽창계수가 고분자와 삽입된 금속이 서로 다르면, 중전기에 적용되는 열사이클로 인하여 크랙이 발생하게 된다. 발생된 크랙으로 인하여 절연결함으로 작용되어 그곳에 부분방전이 시작되고, 그 결과 최종적으로 절연이 파괴되는 치명적 기기의 불능상태로 이어지게 된다. 마이크로만의 장점과 단점이 있지만, 단점을 극복하는 최근의 연구가 마이크로 필러에 소량의 나노입자를 혼합한 멀티-컴포지트의 제조 및 연구가 보고되고 있으며[7], 그 결과 조직의 치밀성으로 인한 기계적, 열적특성 그리고 전기적 절연내력향상 등을 극복하는 연구가 최근 보고되고 있다[8]. 순수한 나노입자를 분산시켜 최상의 균질 분산된 컴포지트 개발은 매우 어렵다. 그런 이유로, 나노입자의 표면을 개질하여 무기물인 나노입자의 계면과 유기물인 에폭시수지와 결합을 용이하게 하기 위해 화학적 표면개질제로서 실란커플링제를 이용한 연구가 진행되어 향상된 결과를 얻었다[8][9]. 또한 Tanaka[11], S.Alapati의 연구자[12][13]들이 나노입자가 트리진전 억제효과와 절연특성향상의 결과를 나노컴포지트 다중-코아모달 그리고 계면의 이중층모달 등을 보고하고 있다.

본 연구에서는 GIS Spacer의 절연소재를 개발하기 위해 나노알루미나 입자를 에폭시수지에 균질하게 분산시키기 위해 입자의 표면 개질제로서, Glycerol diglycidyl ether (이하 GDE라 부른다)를 이용하여, 나노알루미나 입자첨가량과 GDE 첨가량 변화에 따른 에폭시/나노알루미나 컴포지트를 제조하여, 트리잉 실험을 실시하였다. 실험결과 나노입자를 표면처리한 나노알루미나가 트리개시 및 진전억제에 큰 영향을 주고 있음을 확인하였다.

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

Email: jjpark@joongbu.ac.kr

Received : May 13, 2016; Accepted : June 13, 2016

## 2. Experiments

### 2.1 재료

본 연구에 이용한 나노알루미나 입자는 Aluminium Oxide Power로서 국내 Sukgyung AT Co., LTD 제품으로 SG-ALO30의 제품을 이용하였다. 결정형태는 감마상(Gamma Phase)으로서, 입자크기는 약 30nm인 알루미나 나노입자이며, BET(비표면적:  $m^2/g$ )는  $100 \pm 20$ 으로서 1g당 표면적을 갖은 것이다.

상업적인 DGEBA(diglycidyl ether of bisphenol A)타입 에폭시는 상품명 Araldite CT-200을 사용하였다. 점도는 120°C에서 390-520mPa·s이며, 밀도는 25°C에서 1.15g/cm<sup>3</sup> 에폭시 함량(equip./kg)은 2.55~2.7이다. 경화제(Hardener)는 제품명으로 HT 903로서 실내온도에서는 고체상체의 냄새가 나지 않은 Carboxylic acid anhydride 기반 경화제이다. 융점범위(melting range)은 128~132°C이며, 밀도는 130°C에서 1.22~1.25 g/cm<sup>3</sup>이다. 산의 함량은 ≤3(%), 휘발성 함량은 0~0.2% 으로 외관상 백색의 파우더 형태를 갖는다.

경화제로서 사용된 Carboxylic acid type (anhydride)는 중진기기 절연소재인 GIS Spacer의 절연소재로서 광범위하게 사용되고 있으며, 감마상 나노알루미나의 표면개질을 위해 비실란계인 Glycerol diglycidyl ether (이하 GDE라 부른다.)를 사용하였다.

트리전극에 사용되는 침은 Ogura Jewelry Co., Japan에서 구입하였으며, 그 침의 지름과 길이는 각각 1mm, 60mm이었고 침의 선단 곡률반경(curvature radius)은 5 $\mu$ m로서 30°의 각도를 갖은 침을 사용하였다. 트리샘플의 크기는 45×45mm<sup>2</sup>로서 도전성 실버페이스트를 트리샘플의 하단부에 바르고 그 부위가 접지면이 되도록 하였으며, 80°C에서 24시간 건조 후 사용하였다.

### 2.2 교류트리밍 측정을 위한 시편제조

나노 알루미나의 표면 특성을 향상시키기 위해서 표면개질제로 비실란계 GDE를 에폭시수지 대비 10wt%에 1g, 2g의 함량을 사용하였다. 나노알루미나의 분산을 위하여 초음파 처리장치를 이용하여 30분 동안 분산시켰다.

표 1 샘플종류

Table 1 Types of Sample

Specimen	Epoxy Resin	Hardener	Glycerol diglycidyl ether	nano alumina
			gram	phr
Neat	100	40	0	0
nA1	100	40	1	1
nA2	100	40	1	3
nA3	100	40	2	1
nA4	100	40	2	3

Epoxy resin: Hardener=100:40, phr: part per hundred of epoxy, nA: nano alumina, gram: GDE gram for nano alumina 10wt%

측정샘플은 표 1에서 나타난 바와 같이 5종류의 샘플을 제조하였다.

샘플제조 과정에서 5가지 조성비 및 공정과정을 나타내어보면 다음과 같다.

- (1) Neat: 원형에폭시(Araldite CT-200),
- (2) nA1, nA2, nA3, nA4 : 에폭시수지에 나노알루미나 10wt%에 대한 표면개질제 1g 및 2g의 투입량과 에폭시수지100g에 개질된 나노알루미나 1g 및 3g이 들어가는 양을 의미한다. 본 연구에서는 상기한 바의 5종류의 시편을 트리실험에 사용하였다.

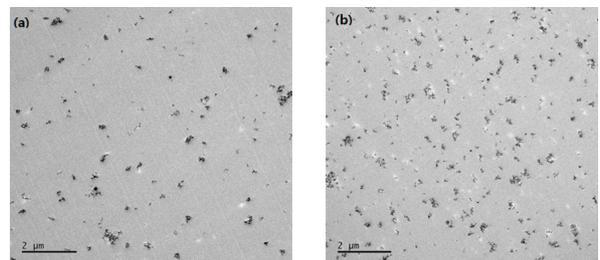
### 2.3 교류 트리밍 측정

트리 측정시스템은 온도제어장치를 이용하여, 트리시편이 절연유(실리콘유) 30°C로 일정하게 온도를 유지하였고, 전원주파수를 가변 할 수 있는 고전압장치를 이용하여 0.5kV/s로 승압하여 목표 전압인 10kV로 승압하여 파괴 시까지 일정한 전압을 인가하였다. 트리개시와 진전을 측정하기 위해 현미경(ICS-305B, SOMETECH Inc.)을 사용하였으며, 측정배율은 트리형상 및 트리진전을 측정하기에 적당한 40배로 고정하였다. 트리실험은 전원주파수를 60Hz로 일정하게 하였으며, 5 종류의 트리시편을 제조하여 각각의 트리개시, 진전길이 그리고 트리형상을 측정하였다.

## 3. 결과 및 검토 고찰

### 3.1 TEM

에폭시수지에서 알루미나 나노입자가 분산된 내부 균질성 분석을 위해 2종류의 샘플을 TEM을 이용한 10k 배율의 영상을 얻었다. 2종류의 샘플은 그림 1에 나타난 바와 같이 (a) nA1 (b) nA2로 나노복합포지트에 대한 내부구조를 촬영한 영상이다. 나노알루미나 함량은 1phr, 3phr의 양에 표면처리된 나노복합포지트의 분산결과 대체로 양호한 균질성을 갖으며, 입자의 분산 결과를 나타낸 것이다.



(a) nA1

(b) nA2

그림 1 에폭시 매트릭스에서 분산된 나노알루미나의 TEM 영상.

Fig. 1 TEM image for the nano alumina particles dispersed in epoxy matrix. (a) nA1 (b) nA2

### 3.2 인가전압에 따른 트리잉 개시 및 진전 특성

#### 3.2.1 원형에폭시 수지

본 실험에서 인가된 전압과 트리침 형상으로, 에폭시 원형 및 나노복합지트에 인가된 트리침선단부분의 불평등전계강도는 다음과 같은 Mason식에 의해서 구하였다 [14].

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} [kV/mm] \quad (1)$$

여기서, r는 침선단 곡률반경 5 $\mu$ m, d는 침대평판 전극간거리 3.7[mm] 그리고 인가전압 10kV일 때 불평등전계강도는 E=500 kV/mm( 측정온도 :30 $^{\circ}$ C) 고전계가 적용된 것이다.

그림 2에서는 Neat(Araldite CT-200)으로서 GIS Spacer의 절연소재에 주로 사용하는 경화성 에폭시수지에, 500kV/mm(60Hz)의 조건을 인가하여 트리개시로부터 진전 그리고 최종 파괴에 이르는 축방향 트리진전과정을 나타내었다. 초기트리는 67시간 후에 개시 되었고 88시간부터 224시간동안 축방향의 진전은 거의 없었다. 299시간에 이르러 트리 진전된 상태는 15시간동안 급격한 진전(8.16배)이 진행되었다. 트리형상은 전형적인 가지형 트리로 진전하였으며, 파괴 말기(301시간)로 부터 5시간 후(306시간) 최종적인 파괴에 이르렀다. 전하 캐리어 발생지(교류 인가전원)으로부터 높은 발산전계의 교류사이클 동안 고분자 안으로 부극성과 정극성의 전하가 주입되면 고분자절연의 큰 에너지갭이 가전자상태로부터 높은 전도대 상태로의 전자는 열적 영향은 무시된다. 부극성시 전하가 주입되고 다음 정극성시 주입된 전하가 추출되는 과정이 반복되게 된다. 트리침선단과 고분자의 계면에 조그마한 전기적 트리잉이 희미하게 침선단으로 부터 개시 된다 [15]. 이전에 실험에 비하여 트리잡복기가 67시간 정도로 긴 시간을 갖고서 트리가 개시되었다. 이것은 탄화되는 도전성 트리침선단에서 발생한 것이며, 점차적으로 수많은 가지들이 새롭게 출현하고 성장하여 점차로 트리채널이 두꺼워지고, 어두워지게 된

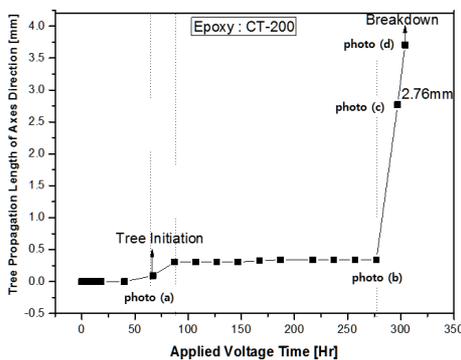


그림 2 500kV/mm (60Hz, 30 $^{\circ}$ C)의 침선단 전계강도에서 측정된 Neat의 축방향 트리 진전길이

Fig. 2 Tree growth length of axes direction for Neat according to 500kV/mm needle tip electric strength

다. 그런 가지들은 결국 트리채널 내부상태가 진공상태로서 스트리머현상[16]과 같은 기중방전이 지속되어 전자들의 운동과 내부 탄화에 의해 발생된 유해가스압이 점차로 증가되어 트리진전은 지속적으로 이루어진다. 트리가지의 벽면은 도전성인 상태로 되어 있기에 가지끝부분이 점차로 대향전극 가까이 진행하게 되면 결국 전계의 세기가 더욱 세어져서 최후에 트리가지가 대향전극 끝까지 가지 못하고 급격하게 파괴에 이르게 되는 과정을 통하여 절연이 파괴된다.

그림 3의 경우는 트리진전에 대한 트리형상을 나타낸 것으로,

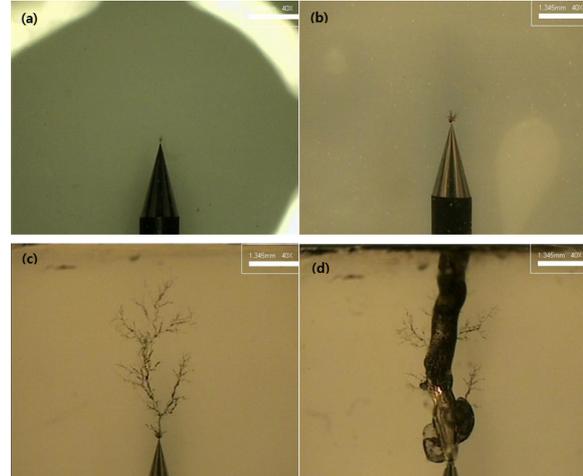


그림 3 500kV/mm (60Hz, 30 $^{\circ}$ C)의 전계강도 하에서 측정된 Neat에 대한 전기적 트리형상. (a) 트리개시(67시간 후), (b) 트리진전 (284시간 후), (c) 트리파괴 직전 (304시간 후) 그리고 (d) 트리파괴 (306시간)

Fig. 3 Morphology of electrical tree for Neat sample tested in electric strength 500kV/mm at 60Hz, 30 $^{\circ}$ C for (a) tree initiation (after 67hour), (b) tree propagation (after 284hour), (c) just before tree breakdown (after 304 hour) and tree breakdown( after 306 hour)

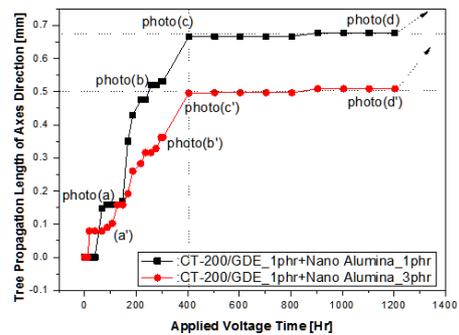


그림 4 500 kV/mm (60Hz, 30 $^{\circ}$ C)의 트리 침선단 전계 강도에서 측정된 nA1와 nA2에 대한 축방향 트리 진전 길이

Fig. 4 Tree growth length of axes direction for measured nA1 and nA2 nano composites according to 500kV/mm needle tip electric strength

이전 연구결과와 비교할 때 [19], 원형에폭시에 비하여 상대적으로 23배 긴수명을 나타낸 것이다.

### 3.2.2 표면처리된 나노알루미나 콤포지트의 트리개시 및 진전 (nA1, nA2)

그림 4에서는 nA1과 nA2 나노콤포지트에 대한 트리현상을 측정된 결과이다. 그림 5에서는 nA1의 트리개시 및 진전에 대한 트리현상을 나타내었다. nA1의 경우 56시간 후 초기트리가 발생하였고, 384시간 후 트리진전길이는 불과 0.667mm 진전되었다. 1199시간 후(49.95일 후) 트리진전 길이는 0.678mm로서 815시간 동안 0.011mm 극히 미약한 진전만을 나타내었고, 축방양의 진전이 거의 없고 축방향 (옆방향)으로 트리현상 크기 커져가는 현상을 나타내었다.

nA2의 경우 36시간 후에 초기트리가 발생하였으며, 299시간 후 축방향 트리진전이 0.509mm로 진전되었다. 트리개시로 부터 1199시간 후, 트리진전길이는 거의 없었고 축방향을 트리발생 면적만이 넓어지는 양상을 나타내었다. 이와 같은 현상은 나노입자의 표면개질의 효과로서, GDE의 경우는 양쪽 말단에 epoxide ring과 친수성기가 달려 있는 OH기가 존재하는 분자량이 작은 GDE 역할이 계면의 강화와 나노입자의 상호작용력 강화를 가져온 결과로 사료된다. 나노알루미나 경우 GDE 효과는 부분방전 저항성에대한 침식깊이를 낮게 한 결과를 설명하였다 [12][13]. Toshikatsu Tanaka의 나노필러주변에 형성된 멀티-코어(multi-core) 이론 [11]과 그림 6에서 나타낸 P. Preetha [11][12] 계면의 이중층구조에 기여하기 때문으로 사료된다.

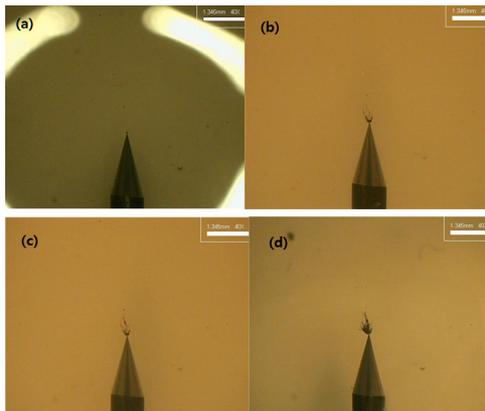


그림 5 500kV/mm (60Hz, 30°C)의 전계강도 하에서 측정된 nA1에 대한 (a)~(d) 전기적 트리의 형상. (a) 트리개시 (56시간 후), (b) 트리진전 초기(299시간 후), (c) 트리진전 (324시간 후) 그리고 (d) 트리진전(1199시간 후)

Fig 5 Morphology of electrical treeing (a)~(d) for nA1 nanocomposites tested in electric strength 500kV/mm at 60Hz, 30°C for (a) tree initiation (after 56hour), (b)tree propagation beginning(after 299hour), (c) tree propagation stage(after 324 hour) and (d) tree propagation stage(after 1199 hour)

### 3.2.3 표면처리된 나노알루미나 콤포지트의 트리개시 및 진전 (nA3, nA4)

그림 7에서는 nA3과 nA4 나노콤포지트에 대한 트리개시 및 진전에 관한 트리현상을 관측한 결과이다. 그림 8에서는 nA3의 트리개시 및 진전에 대한 트리현상을 나타내었다.

nA3는 6시간 후 초기트리가 발생하였고, 360시간 후 트리진전 길이는 0.124mm 진전되었다. 1199시간 후 (49.95일 후) 트리진전 길이는 0.836mm로서 645시간 동안 0.226mm 미약한 정도 축방양의 진전이 이루어졌으며, 대신 축방향 (옆방향)으로 부피가 커져가는 현상을 나타내었다. 이것은 nA1, nA2의 경우와 유사하다. nA4는 404시간 후 축방향 트리진전이 0.802mm 진전되었다. 1199시간 후 역시 트리진전길이는 0.825mm로 795시간 동안 0.04mm 진전된 결과로서 축방향을의 진전이 거의 없는 결과를 가져온 것이다. 다른 트리와 마찬가지로 축방향을의 트리발생 면적만이 넓어지는 양상을 나타내었다. GDE2 첨가제를 일정하게 알루미늄 나노입자를 1, 3phr를 첨가한 경우 3phr의 경우 1phr보다 약간의 트리진전이 더욱더 억제되는 경향을 1199시간 현재까지 보이고 있다.

이유는 균질한 알루미늄입자가 분산된 상태에서 Tanaka [25] 그리고 P. Preetha [12][13] 등의 연구자들도 나노입자가 1phr보다 3phr 경우 계면 2중층 하에서 입자수가 상대적으로 많은 수가 한정된 수치 내에서 분산되면, 트리진전시 나노입자가 진전되

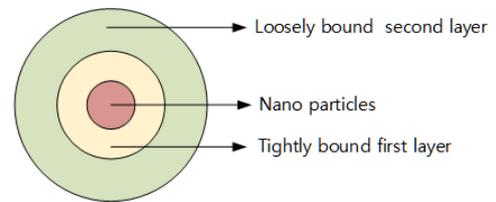


그림 6 계면에서 2중층 모델

Fig. 6 Dual layer model of the interface

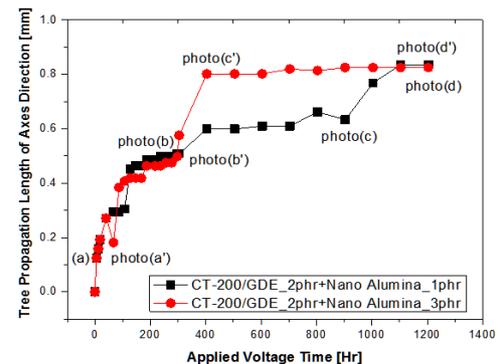


그림 7 500 kV/mm (60Hz, 30°C)의 트리 침식단 전계강도 에서 측정된 nA3, nA4에 대한 축방향 트리진전 길이

Fig. 7 Tree growth length of axes direction for measured nA3 and nA4 nanocomposites according to 500kV/mm needle tip electric strength

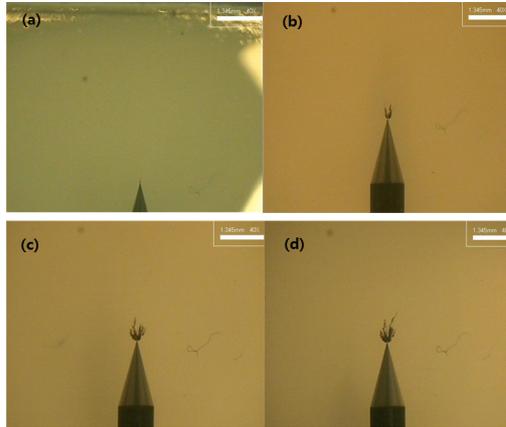


그림 8 500kV/mm(60Hz,30℃)의 전계강도하에서 측정된 nA3에 대한 (a)~(d) 전기적 트리형상. (a) 트리개시(6시간 후), (b) 트리진전 초기(297시간 후), (c) 트리진전(794 시간 후) 그리고 (d) 트리진전 (1199시간 후)

Fig. 8 Tree growth length of axes direction for measured nA3 nanocomposites according to 500kV/mm needle tip electric strength

표 2 Neat, nA1, nA2, nA3 그리고 nA4의 트리개시 시간, 길이 그리고 진전

Table 2 Tree Initiation time, Length and Propagation for Neat, nA1, nA2, nA3 and nA4

Sample	Tree Initiation time[Hr]	Tree Initiation Length[mm]	Tree Propagation Length after 1199 hour [Hr]
Neat	81.5	0.157	Breakdown
nA1	56	0.531	0.678
nA2	36	0.362	0.509
nA3	6	0.509	0.838
nA4	42	0.068	0.825

는 것을 방해하여, 진전시 더욱더 지그재그 형태로 도전로가 형성되기 때문에 트리에 나노알루미늄입자가 크게 방해하는 역할로 인해 지연되는 결과이다.

### 3.2.4 에폭시/나노알루미늄 복합체의 초기트리 발생 길이 및 시간 그리고 트리진전 특성

표 2에서는 Neat, nA1, nA2, nA3, nA4 5종류의 샘플에 대한 초기트리개시 시간과 개시된 길이를 측정하였고, 장시간 동안 10kV/60Hz(500kV/mm:침전 전계강도)를 일정하게 인가된 상태로 1199시간 후 트리진전 길이를 나타내었다.

Neat의 경우 306시간 후에 가지형트리로 진전되어 파괴에 이르렀고 나머지 4종류의 나노 알루미늄복합체 실험에서 1199시간 후 트리진전 길이 및 형상을 볼 때, 트리개시 길이로부터 1199시간 후까지 진전길이는 nA1, nA2, nA3 그리고 nA4 (0.147, 0.147, 0.329 그리고 0.757mm)진전되었다. 이 모두는 전

반적으로 트리진전 길이 매우 작은 나노알루미늄 입자가 트리의 진전을 크게 억제하고 있는 결과이다.

이상의 결과로부터

#### (1) Neat, 나노알루미늄 복합체 경우 초기트리 개시시간의 결과:

트리현상은 절연파괴를 이끄는 일련의 전자사태의 전구현상(pre-breakdown)이다. 일반적으로 전기적트리 진전은 3가지의 영역으로 나뉘어질 수 있다. (i)트리잠복기(tree incubation period) (ii) 트리개시기(tree initiation period) (iii) 트리성장기(tree growth period) 트리잠복기는 주입된 고에너지 전자, 산화 그리고 맥스웰 응력 때문에 발생된 크랙(보이드)형성에 의하여 고분자체인의 절단과 같은 서로 다른 단계를 포함하게 된다 [14],[15]. 트리개시는 잠복기의 과정을 걸쳐 시작된다. 교류 전기적 응력에 의해 연속적으로 고분자로 정극성일 때 추출되고 부극성일 때 주입되는 과정으로 본다. 이런 과정을 통하여 전자는 수 eV 에너지를 얻어서 분자결합을 깰수도 있고 그리고 트리개시를 이끌 수도 있는 것이다[2].

Ieda[17]는 트리개시는 교류고전압에 의해 트리침 선단에 유도된 전기·기계적인스트레스 반복에 의해 개시될 수 있다. 그리고 고분자의 절연파괴강도를 능가한 침전단주위로 부터 어느 정도 거리를 걸쳐 전기적 스트레스가 주어질 때 개시될 수 있다. 그 결과 트리 개시시간을 빠르게 그리고 지연을 시킬 수 있는 것이다.

#### (2) 트리진전시 나노알루미늄 복합체의 트리 억제 효과

그림 6의 계면이중층에서, Toshikatsu Tanaka의 나노필러주변에 형성된 멀티-코어(multi-core)이론[11]과 P. Preetha[12][13] 계면의 이중층구조에 근거하여 볼 때, 에폭시고분자내로 나노알루미늄 및 실리카와 같은 입자를 충전 분산시키는 이유는 단위체 적당 계면의 면적이 대단히 크기 때문이다. 그리고 에폭시 나노 복합체의 전기적, 기계적 특성을 제어할 수 있는 계면이 있다는 것이다. 처음 나노입자 표면 가장 가까운 나노 층이 대개 움직일 수 없는 고분자체인에 의해 입자표면에 단단한 결합인 수소 결합으로 국한 되어졌다고 추측하는 바이다. 이런 나노입자의 표면개질을 위해 본 연구에서는 비실란계 GDE 사용하여 처리하였다. GDE는 나노입자의 표면개질제로서 양쪽 말단에 epoxide ring과 친수성기가 달려 있는 OH기가 존재하는 분자량이 작은 GDE의 역할이 계면의 강화와 나노입자의 상호작용력의 강화를 가져오게 되는 이유이다. 2차 층은 처음 나노입자에 단단하게 형성된 층위에 처음보다 더 두터운 층이 형성되고 그리고 에폭시 고분자체인을 포함하게 된다. 형태론적인 변화 즉, 케리어가 트랩될 수 있는 장소로서, 에폭시와 나노알루미늄입자의 상호작용 때문에 계면영역의 변화를 주게 된 것이다. Alapati [2][3]로부터 고전압이 인가될 때, 트리 전극 침전단으로 부터 주입된 전자와 Neat, 에폭시 나노알루미늄 복합체에서도 자유전자가 존재하여 일부는 트랩 될 수 있고 그리고 또 다른 일부는 나노알루미늄 입자 주위에 존재하게 된다. 이런 트랩된 전하가 어떤 한 측면에서 또 다른 측면으로 이동하기 위해서는 더욱더 높은 에너지가 필요

하게 된다. 이런 상황에서 쉽게 트랩된 전하가 탈트랩 되면, 초기 트리 개시전압이 낮아지는 원인이 되어 진다. 더욱더 고에너지가 주입되어야만 탈트랩 되어 전하 및 전자가 에너지를 얻게 되어 트리가 개시되는 경우 개시전압이 높게 나타난 것이다. 이런 트리개시의 원인은 에폭시 수지와 경화제의 미반응기 영역, 에폭시 수지와 나노알루미나입자의 계면영역에서 전자의 반복된 충돌에 의해 약한 부분에 열화가 시작되어 트리개시되는 것으로 사료된다.

나노복합재료에 트리개시로부터 주입된 전자가 원형수지를 관통하여 나노입자를 향하여 이동하게 된다. 나노알루미나의 경우 더욱더 높은 방전저항성을 갖고 있기 때문에 트리는 나노 입자근방 원형 에폭시 수지 층으로 진전하게 된다. 그래서 트리진전에 많은 시간이 걸리게 되고, 에폭시 나노복합재료는 Neat수지보다 트리진전에 큰 저항성을 갖게 된다. 트리진전현상에서 볼 수 있는 것은 축방향의 진전은 극히 미미하거나 또는 전무하였다. 그러나 중요한 것은 측면으로 극히 작은 가지가 무수하게 많아져 탄화된 정도가 점차로 진한색으로 나타나게 된다. 그림 5과 그림 8에서 보여준 것처럼, 어느 일정시간이 되면 포화되는 현상을 볼 수가 있다. 이는 트리진전시 부시형 타입의 트리개시되고 진전되는 전형적인 현상으로 사료 된다. Densley등[18]의 연구자도 Neat와 나노복합재료의 실험에서 Neat에 비하여 주 가지로부터 잔가지가 무수하게 많이 발생된다. 그러나 가지형트리의 경우 가지가 많지 않았음을 나타내었다. 이것은 트리채널의 벽에 트랩된 전하의 형성 때문에 나타난 것으로 설명하였다. 본 연구에서도 Neat의 경우는 전형적인 가지형트리의 개시 및 진전 그리고 파괴에 이른 것이다. 나노알루미나입자의 충전함량에 따른 트리진전에 영향을 주게 된다. 나노입자의 응집현상 그리고 미분산영역이 존재하게 되면 위에서 설명한 모든 것이 무의미하게 되어 트리개시 및 진전이 급격하게 결함부분으로 개시되어 파괴에 이르게 된다.

### 3. 결 론

전기적 트리현상을 연구하기 위해 Neat, nA1, nA2, nA3 그리고 nA4 5종류의 샘플 제조하였고 트리링 시스템을 통하여 침전단 전계강도 500kV/mm(60Hz)에서 Neat의 경우 트리개시로부터 파괴까지 그러나 nA 복합재료의 경우 1199시간(49.95일)동안 진전된 결과 논문을 발표하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 트리개시시간에 있어 Neat가 모든 nA에 비하여 가장 늦은 트리개시를 나타내었다. 그러나 트리 진전 및 파괴의 경우, Neat 샘플에서 306시간 후 트리는 파괴되었다. 그러나 nA 샘플 모두 1199시간 후 트리진전정도를 볼 때, 0.5mm~0.8mm범위의 진전이 이루어진 것이다. 전체 트리 절연거리와 비교하여 볼 때 극히 미미한 진전정도이었다. 이는 트리채널 내 전자의 이동을 극히 제한하는 저항성이 큰 경우의 결과이며, 나노알루미나와 수지의 계면강화 그리고 나노입자의 분산이 양호한 결과이다. 트리현상을 볼 때 나노알루미나 복합재료의 경우는 수초형 트리로의 개시와 진전이 이루어짐을 알 수 있었다.

### References

- [1] S. Alapati and M. J. Thomas, "Electrical treeing in polyethylene : Effect of nano filler on tree inception and growth: 2010 Int. Conf. High Volt Eng. Appl. ICHVE 2010, pp. 576~579, 2010
- [2] S. Alapati, M. J. Thomas, "Influence of nano-fillers on electrical treeing in epoxy insulation", The Institute of Engineering and Technology, Vol. 6, Iss. 1, pp. 21~28, 2012
- [3] T. W. Dakin, "Application of Epoxy Resins in Electrical Apparatus", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. EI-9, No. 4, pp. 121-128, 1974
- [4] Sato, et al, "New Technology for Medium Voltage Solid Insulated Switchgear", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 3, pp. 1791-1796, 2002
- [5] T. Imai, F. Sawa, T. Nakano, T. Ozaki, T. Shimizu, M. Kozako and T. Tanaka, "Effects of Nano-and Micro- filler Mixture on Electrical Insulation Properties of Epoxy Based Composites", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Vol. 13, pp. 319-326, 2006.
- [6] T. Imai, F. Sawa, T. Yoshimitsu, T. Ozaki and T. Shimizu, "Preparation and Insulation Properties of Epoxy-Layered Silicate Nanocomposite", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena(CEIDP), pp. 402-405, 2004.
- [7] D. Fabiani, G. C. Montanari, A. Krivda, L. E. Schmidt and R. Hollertz, "Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics", IEEE Int'l. Conf. Solid Dielectr. (ICSD). Potsdam, Germany, pp. 212-215, 2010.
- [8] Jae-Jun Park, Chang-Hoon Lee, Jae-Young Lee and Hee-Dong Kim, "Preparation of Epoxy/Micro-and Nano-Composites by Electric Field Dispersion Process and Its Mechanical and Electrical Properties", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 3, pp. 667~674, 2011
- [9] P. Maity, S. Kasisomayajula, V. Parameswaran, S. Basu, N. Gupta, "Improvement in surface degradation properties of polymer composites due to pre-processed nanometric alumina fillers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume:15, Issue. 1, pp. 63-72, 2008
- [10] Ram A. Sharma, Sarojini Swain, Subhendu Bhattacharya, "Effect of coupling agent on PD resistivity of unsaturated polyester-alumina nano-composites", Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 2012 IEEE 10th International Conference on the Date 24-28 July 2012, pp. 1-5, 24-28 July 2012
- [11] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse and Y. Ohki, "Proposal of

a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 12, pp. 669-681, 2005.

- [12] Santanu Singha, M. Joy Thomas, “Dielectric properties of epoxy nanocomposites”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume:15, Issue: 1, pp. 12~23, February 2008
- [13] P. Preetha, M. Joy Thomas, “Partial discharge resistant characteristics of epoxy nanocomposites”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume:18, Issue: 1, pp. 264-274, February 2011
- [14] K. Theodosiou and I. Gialas, J. Electr. Eng., 59, 248 (2008)
- [15] K. Wu, L. A. Dissado, “Model for electrical tree initiation in epoxy resin”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume 12, Issue 4, pp. 655-668, Aug. 2005
- [16] A. A. Al-Sulaiman, M. I. Qureshi, “Comparison of streamers in mineral and synthetic insulating oils with electrical treeing in solids”, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005, pp. 107-110, 26 June-1 July 2005
- [17] Idea, M. : Dielectric breakdown process of polymers”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 15, No. 3, pp. 206~224, 1980
- [18] Densley, R. J, : An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 14, No. 5, pp. 148~158, 1979
- [19] Jae-jun park, “AC Electrical treeing phenomena in an epoxy system with Low-Chlorine BDGE at various electric field frequency”, Transaction on electrical and electronic materials, Vol. 14, No. 6, pp. 324-328, 2013

---

<b>저 자 소 개</b>
----------------

**박 재 준(Jae-Jun Park)**

전기학회 논문지 62권 12호 참조