

# 에폭시/마이크로/나노알루미나 혼합된 멀티-컴포지트의 유전 특성

박재준<sup>a</sup>

중부대학교 전기전자공학과

## Dielectric Properties of Epoxy/Micro/Nano Alumina Multi-Composites

Jae-Jun Park<sup>a</sup>

Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Goyang 10279, Korea

(Received August 17, 2016, Revised August 23, 2016, Accepted August 24, 2016)

**Abstract:** In this work, the complex permittivity of epoxy resins is measured. Epoxy resins, epoxy with micro size fillers and epoxy with micro+nano alumina composites have been evaluated for dielectric properties according to frequency variation. The dielectric spectroscopy measurement and analyses are carried out in the frequency range of  $10^{-2}$  Hz to 1MHz and constant to room temperature. The results of dielectric loss suggest that significant improvement in the electrical performance can be expected by using samples containing nano and micro fillers mixture when compared to materials containing only microfillers. As the result, we verified the specific characteristics of dielectric permittivity and dielectric loss namely, relative permittivity become low with improving dispersibility of nano+micro mixture composites and become rise with agglomerate of nano particles.

**Keywords:** Epoxy/micro/nano/alumina composites, Dielectric properties, Epoxy/micro alumina composites, GIS spacer

### 1. 서 론

무기필러가 유기고분자에 분산된 고분자 콤포지트가 광범위하게 연구되어 졌다 [1]. 최근에 나노 크기화된 필러가 고분자내로 첨가되어지는 새로운 기술의 발달에 감사하고, 고분자 나노콤포지트는 새로운 절연재료로 탄생된 것이다. 그들 특성들은 유전과 전기절연 분야를 포함하여 고전압 중전기기 즉, GIS spacer, mold transformer, CT/PT의 많은 분야에 연구되어져 왔다 [2,3]. 더욱이 나노크기와 마이크로 크기의 필러들이 복합화되는 콤포지트에서는 시너지의 효과를 가져와 더욱더 많은 관심을 갖게 된 것이다 [4]. 결국,

원형에폭시 자체만으로는 거의 산업에 사용되지 못하고, 낮은 열전도도를 향상시키고자 할 때, 열적 팽창계수를 낮게 하고자 할 때 또는 가격을 낮추고자 할 때 등 마이크로 실리카 또는 알루미나를 보강하여 접근하는 것이 일반적이다. 또한 낮은 유전율값 [5] 그리고 교류 및 직류 전계 하에서 절연파괴 강도를 높이고자 할 때 [6,7] 역시 사용하고 있다.

본 연구에서는 에폭시수지에 마이크로알루미나 충전 함량 40, 50, 60, 70 w%의 콤포지트, 그리고 나노알루미나를 첨가한 콤포지트의 주파수 변화에 따른 유전 특성의 연구를 실시하였다.

### 2. 실험 방법

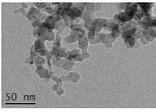
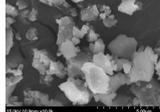
#### 2.1 재료

본 연구에 이용한 나노알루미나 입자는 aluminium

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

Copyright ©2016 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** Properties of fillers for the specimens.

Property	NA	$\mu$ A
Mean particle size	30 nm	1 ~ 2 $\mu$ m
Crystal form	Gamma phase	Alpha phase
Particle shape		

oxide power로서 국내 Sukgyung AT Co., Ltd.산으로 SG-ALO30의 제품을 이용하였다. 나노입자와 마이크로 입자의 특성은 표 1에서 나타내었다. 상업적인 DGEBA (diglycidyl ether of bisphenol A)타입 에폭시는 상품명 Araldite CT-200을 사용하였다. 점도는 120°C에서 390 ~ 520 mPs이며, 밀도는 25°C에서 1.15 g/cm<sup>3</sup> 에폭시 함량(equip./kg)은 2.55 ~ 2.7이다. 경화제(hardener)는 제품명으로 HT 903로서 실내용도에서는 고체상체의 냄새가 나지 않은 carboxylic acid anhydride 기반 경화제이다. 용점 범위(melting range)은 128 ~ 132°C이며, 밀도는 130°C에서 1.22 ~ 1.25 g/cm<sup>3</sup>이다. 산의 함량은  $\leq$ 3%, 휘발성 함량은 0 ~ 0.2%로 외관상 백색의 파우더 형태를 갖는다. 경화제로서 사용된 carboxylic acid type (anhydride)는 충전기 절연소재인 GIS spacer의 절연소재로서 광범위하게 사용되고 있으며, 감마상 나노알루미나의 표면개질을 위해 비실란계(glycerol diglycidyl ether, GDE)를 사용하였다.

## 2.2 유전 특성 측정 샘플을 위한 에폭시-마이크로알루미나 - 나노알루미나 콤포지트의 제조 과정

GIS Spacer 절연소재 개발을 위해 그림 1에서 나타난 과정을 통하여 에폭시/마이크로알루미나/나노알루미나 콤포지트의 제조 방법을 나타내었다.

제조된 샘플은 표 3에 나타난 바처럼 에폭시 원형, 에폭시/마이크로알루미나 콤포지트 (40, 50, 60, 70 wt%) 4종류, 에폭시/멀티-알루미나 콤포지트 즉, 에폭시/마이크로알루미나\_40 wt%/나노알루미나\_1 phr/GDE(1 g)콤포지트 1종류, 에폭시/마이크로알루미나\_50 wt%/나노알루미나\_1 phr/GDE(1 g)콤포지트 1종류 그리고 에폭시/마이크로알루미나\_60 wt%/나노알루미나\_1 phr/GDE(1 g) 콤포지트 1종류를 제조하였다.

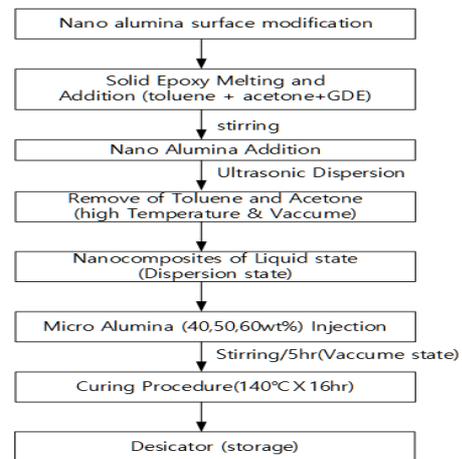
본 연구에 사용한 샘플 종류는 8종류로서 유전 특성 측정 결과를 나타내었다.

**Table 2.** Definitions of terms.

Abbreviation	The original terms
GDE	Glycerol diglycidyl ether
ER	Epoxy resins
$\mu$ A	Micro alumina
NA	Nano alumina
E $\mu$ AC	Epoxy micro alumina composites
E $\mu$ NAC	Epoxy micro nano alumina composites
E $\mu$ SC	Epoxy micro silica composites

**Table 3.** Type of sample.

Number	Specimen	ER	Hardener	GDE	NA	MA
				gram	phr	wt%
1	ER	100	40	0	0	0
2	E $\mu$ AC_40 wt%	100	40	0	0	40
3	E $\mu$ AC_50 wt%	100	40	0	0	50
4	E $\mu$ AC_60 wt%	100	40	0	0	60
5	E $\mu$ AC_70 wt%	100	40	0	0	70
6	E $\mu$ NAC_40 wt%	100	40	1	1	40
7	E $\mu$ NAC_50 wt%	100	40	1	1	50
8	E $\mu$ NAC_60 wt%	100	40	1	1	60

**Fig. 1.** Preparation procedure for epoxy/micro alumina/nano alumina mixture composites.

## 2.3 유전 특성 측정

유전 특성 측정은 주파수 범위 10<sup>-2</sup> Hz ~ 10<sup>7</sup> Hz인 universal dielectric spectrometer로서 제조사 Novocontrol GmbH이며, BDS 20모델을 사용하였다. 측정을 위해 사용된 샘플은 두께 1 mm, 실제 지름 30 mm $\phi$  (평판형 크기로서 50 mm $\times$ 50 mm)을 사용하였다. 실버페이스트를 도포하여 80°C $\times$ 8 h 건조 후

측정에 사용하였다. 우리의 BDS 시스템은 ZGS 활성 샘플 셀을 갖는 Novocontrol ALPHA-A Analyzer를 사용한 제어 장치가 없는 impedance spectroscopy와 conductivity 그리고 유전에 대한 일괄 공급된 시스템이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 EμAC (epoxy/micro alumina composites)

##### 충진 함량에 대한 유전 특성

나노, 마이크로 그리고 나노+마이크로 콤포지트 유전 특성 변화의 메커니즘을 이해하기 위해 많은 관심이 주파수 및 온도함수로서 복소 유전을  $\epsilon_r^*$ 에 초점이 되어졌다. 복소 유전율은 실수부( $\epsilon_r'$ )와 허수부( $\epsilon_r''$ )로서 관계된다.

$$\epsilon_r^* = \frac{G}{j\omega C_0} + \frac{C}{C_0} = \frac{C}{C_0} - j\frac{G}{\omega C_0} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{2\pi fCR}, \quad \epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan\delta$$

$\epsilon_r''$ 를 허수부분(영상부분)을 유전재료 내의 유전 손율 (dielectric loss factor)을 나타낸다.  $\tan\delta$ 를 유전 정접이라 하며,  $\delta$ 가 적으면  $\tan\delta \approx \cos\theta$ 로 되어 유전체 역률(dielectric power factor)이라 한다.

그림 2에서는 에폭시수지에  $\mu$ A 입자를 충진시켜 제조된 EμAC의 유전 특성을 나타낸 것이다. 일반적으로 저주파에서는 계면분극과 전도 과정, 그리고 고주파에서는 쌍극자분극의 영향으로 추론된 것이 실수부와 허수부의 값으로 나타난 것이다. 계면분극은 필러와 에폭시수지사이 표면에 관계되고 반면에 쌍극자 분극은 벌크타입 고분자가 어떻게 영향을 받고 있는지에 관한 정보를 주고 있다. 그림 2(a)에서는 복소 유전율의 실수부인  $\epsilon_r'$ 값의 주파수 의존성의 특성을 그리고 그림 2(b)에서는 복소 유전율의 허수부( $\epsilon_r''$ )와 같은 유전 손실 정보로  $\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$ 에 대한 주파수 의존성에 대한 유전 손실 특성을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 주파수 감소에 따라  $\epsilon_r'$ 의 크기가 증가하는 경향을 나타내었고, (a)에서는 극저주파(0.014~1.2 Hz)에 대한  $\epsilon_r'$ 변화 특성으로서 극저주파의 경우 비유전율이 상대적으로 매우 크게 증가되었다.

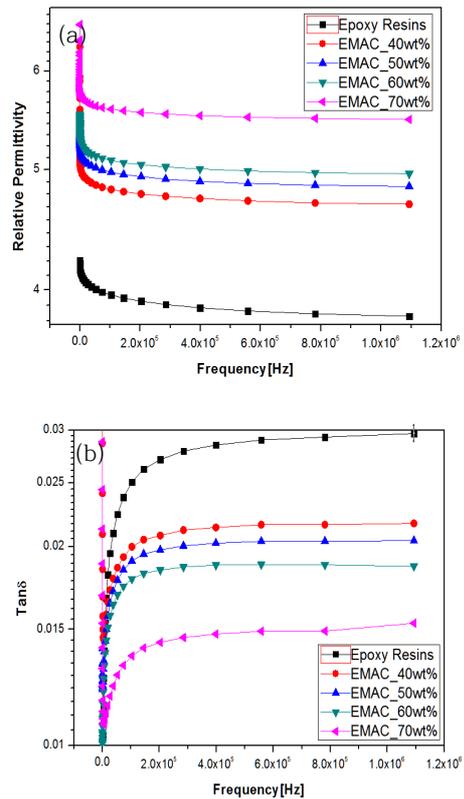


Fig. 2. Dielectric properties for contents of  $\mu$ A filler according to frequency variation. (a) 0.01 Hz~1.09 MHz and (b) 0.01 Hz~1.09 MHz.

ER 샘플은 EμAC과 비교하기 위하여 사용되어 졌다. 주파수 감소에 따라 모든 샘플의 비유전율이 증가되는 것은 원형에폭시 매트릭스의 쌍극자기(dipolar group)에 의해 원인이 되는 분극의 감소에 기인한다. Roman Kochetov는 EμSC의 경우 실리카 충진 함량 증가에 따라 비유전율이 감소하는 특성을 보고하였다. 이런 거동의 가능한 설명은 고분자 체인이 움직이지 않은 것이며, 충진 함량이 더욱 더 많아지면 체인의 이동도가 제한이 될 수 있어서 실제적인 비유전율이 낮아지는 원인이 된다 [8]. ER, EμAC\_40, 50, 60, 70 wt%의 비유전율의 크기를 비교하여볼 때, ER는 가장 낮고 그리고  $\mu$ A 충진 함량 증가에 따라 비유전율이 증가되는 경향을 얻었다. 그러나 40, 50, 60 wt%의 경우는 근사한 차이의 비유전율을 나타내었지만 70 wt%의 경우 상대적으로 큰 유전율을 기록하였다.

근본적으로 알루미늄 유전율이 ER (에폭시수지 비유전율: 3.8~4.22 :1 MHz~1 Hz)에 비하여 훨씬 높다.

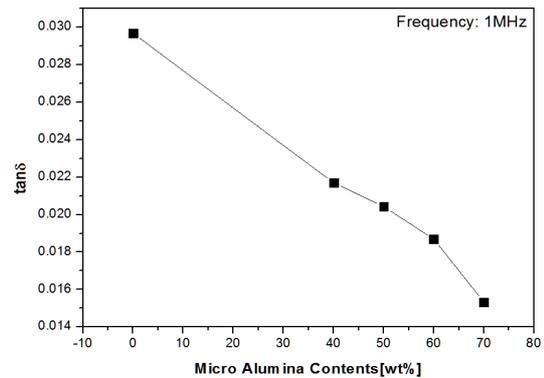
**Table 4.** Relative permittivity value properties according to filler contents of E $\mu$ AC.

Sample	1 Hz	1 MHz	Note
ER	4.22	3.8	Relative permittivity ( $\epsilon_r'$ )
E $\mu$ AC_40	5.94	4.69	
E $\mu$ AC_50	5.43	4.84	
E $\mu$ AC_60	5.52	4.96	
E $\mu$ AC_70	6.35	5.48	

알루미나 필러의 진성유전율(알루미나 비유전율:9) 기여로 인하여 에폭시수지의 분자구조 변화보다 비유전율에 중요한 역할을 한 것으로 사료된다 [8,9]. 또한 Yu Chen [9,11]은 고주파에서 쌍극자들은 인가전계에 따르는 것이 너무 빨라 반응하지 못하여, 그래서 쌍극자의 분극이 감소되어져서 더욱 더 작은 비유전율 값을 나타낸 것이다. 유전율 크기를 비교하면 ER<E $\mu$ AC\_40<E $\mu$ AC\_50<E $\mu$ AC\_60<E $\mu$ AC\_70의 순서로 비유전율값을 기록하였다. 그 값의 결과는 표 4에서 나타내었다. 그림 2(b) 주파수 감소에 따라 유전 손실  $\tan\delta$ 의 크기는 감소하였다. 그러나 극저주파로 갈수록 역전되어 매우 큰 유전 손실을 나타내었다. 인가된 AC전계의 주파수에 관한 절연시스템의 유전 손실 변화는 마이크로 필러와 에폭시 사이 진성 전기적 분극거동과 그리고 역시 측정 주파수에 의존하는 계면분극에 의해 지배될 수 있다 [9,10]. ER, E $\mu$ AC\_40, 50, 60, 70 wt%의 유전 손실의 경우 크기를 비교하여볼 때, ER이 가장 큰 유전 손실을 나타내었고, E $\mu$ AC의 경우 충전함량의 증가(40, 50, 60, 70 wt%)에 따라 오히려 감소하는 유전 손실을 나타내었다. 이는  $\mu$ A 충전 함량 증가에 따라 비유전율은 증가되었지만 유전 손실은 정반대의 경향을 나타내었다.

그림 2에서는 E $\mu$ AC 충전 함량 변화에 따른 유전 손실 특성으로서 충전 함량이 감소할수록 오히려 유전 손실이 증가되는 경향은 비유전율의 특성과는 정반대의 특성을 나타내고 있다. 이는 Veena [11,12]의 경우와 일치하였고, 전원 주파수가 증가함으로써 더욱 더 큰 쌍극자 기는 교번전계와 같은 보조로 배향하기가 어렵기 때문에  $\epsilon_r'$ 에는 이들 쌍극자기가 기여는 정도가 계속 줄어들게 된다. 이것은 순차적으로 전기적 전도의 증가는 전하 캐리어 수와 그들 완화시간에 의존하게 된다.

나노입자의 경우와 같이 입자 수가 증가하면 (충전함량이 증가하면) 전하 캐리어 발생원이 증가되어 비유전율( $\epsilon_r'$ )과 유전 손실( $\tan\delta$ )에 기여하게 된다.

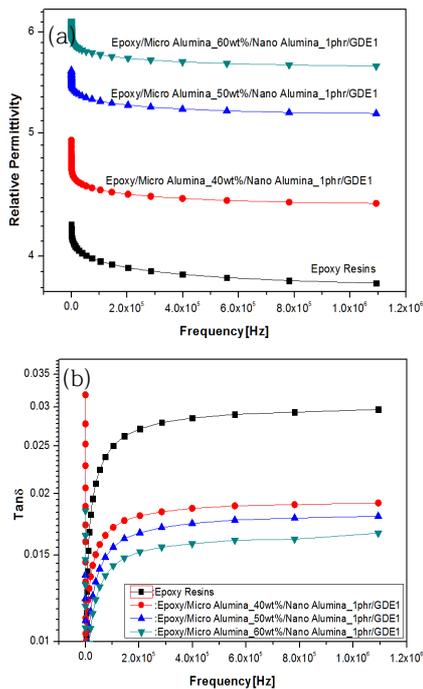
**Fig. 3.** Properties for Tan $\delta$  according to contents of E $\mu$ AC.

즉, 손실이 감소하는 것은 계면영역에서 복잡하게 되는 전기 전도를 향하여 계면의 장벽과 에폭시 체인과의 뒤섞임에 기인하여 감소된다. Santanu Singha [12]는 나노복합재료에서 유전 손실 값이 더욱 낮아지는 것은 그들 주파수에서 입자들에 전기적 전도가 낮게 되는 것에 기인한다. 고주파에서는 우선적으로 전기전도에 기여하는 전하 캐리어의 운동은 고분자 체인에 따라 일어난다 [13]. 고분자 내 전하 전송의 장벽은 결함, 체인 상호간 전하 전송 그리고 계면을 통한 전송에 기인하여 일어난다. 아마도, 나노복합재료에서 많은 수의 계면이 존재함과 고분자 체인의 영킹은 시스템 내 전하 이동을 억제하고 그리고 순차적으로 전기적 전도의 감소를 가져오게 된다. 즉, 유전 손실이 감소되는 결과를 가져오는 것이다.

### 3.2 E $\mu$ NAC (epoxy/micro/nano alumina composites) 충전 함량에 대한 유전 특성

ER에 NA을 GDE 1 g 첨가로 표면 처리된 NA\_1 phr를 분산시킨 상태에  $\mu$ A 필러 40, 50, 60 wt%를 충전 분산시킨 멀티-복합재료로 제조된 샘플을 주파수 변화에 따라 유전 특성의 결과를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 전원 주파수 감소에 따라  $\epsilon_r'$ 의 크기가 증가하는 경향을 나타내었고, (a')에서는 극저주파(0.014~1.2 Hz)에 대한  $\epsilon_r'$ 변화 특성으로서, 극저주파의 경우 비유전율이 상대적으로 크게 증가되었다. ER에 비하여 E $\mu$ NAC의 경우 충전 함량에 관계없이 모든 비유전율의 결과 증가된 결과이다.

표 4에서는 E $\mu$ AC와 E $\mu$ NAC의 비유전율에 대한 특성을 비교하기 위하여 작성하였다.



**Fig. 4.** Dielectric properties for E $\mu$ NAC according to frequency variation. (a) 0.01 Hz~1.09 MHz and (b) 0.01 Hz~1.09 MHz.

Castellon [14]의 연구 결과를 종합하여 볼 때, ENAC의 경우 E $\mu$ NAC보다 낮은 비유전율을 나타내었다. 이는 NA보다는  $\mu$ A 필러의 영향을 크게 받은 결과이다. 그리고  $\mu$ A의 충전 함량과 매우 큰 관계를 갖고 있다. 이는 NA의 분산 능력에 따른 유전을 연구에서, 입자의 분산이 양호한 샘플의 경우 ER보다 낮은 전율의 크기를 나타내었고, 반대로 응집되거나 분산이 양호하지 못한 경우 비유전율이 ER보다 큰 결과를 나타내었다. NA 분산이 양호한 경우 이중층 모델 [16]과 멀티-코아모델 [4] 즉, 나노입자의 독특한 특성으로 고분자운동에 제약의 결과로 보고하였다 [15]. 결국,  $\mu$ A와 NA의 혼합에 의한 멀티-코아모델 내부 조직에 NA입자의 응집된 미분산된 일부가 존재할 것으로 사료된다.

ER, E $\mu$ NAC\_40, 50, 60 wt%의 비유전율의 크기를 비교하여 볼 때, ER는 가장 낮고, 그리고  $\mu$ A 충전 함량 증가에 따라 비유전율이 증가되는 유사한 경향을 얻었다. 그리고 그 결과는 40<50<60 wt%로 충전 함량이 증가할수록 일정한 크기로 증가되는 결과를 나타내었다. 이는 낮은 주파수에서 수많은 계면을 갖는 콤포지트에 기인하여 아마도 극성재료에 의해 나타나는 것

과 일치하는  $\mu$ A를 포함한 재료로 인한 비유전을 증가이다. NA 입자와  $\mu$ A 입자가 과도하게 충전될 때 NA 입자 주위 계면영역에 중첩에 기인되어, 전하 전송의 경로가 연속적으로 제공되는 것으로 사료된다. 그림 4(b) 주파수 감소에 따라 유전 손실  $\tan\delta$ 의 크기는 감소하였다. 그러나 극저주파로 갈수록 역전되어 매우 큰 유전 손실을 나타내었다.

ER, E $\mu$ NAC\_40, 50, 60 wt%의 유전 손실의 경우 크기를 비교하여 볼 때, ER이 가장 큰 유전 손실을 나타내었고, E $\mu$ NAC의 경우 충전 함량의 증가(40, 50, 60 wt%)에 따라 오히려 감소하는 유전 손실을 나타내었다. 이는  $\mu$ A 충전 함량 증가에 따라 비유전율은 증가되었지만 유전 손실은 정반대의 경향을 나타내었다.

실제 자료의 결과를 볼 때, 60 Hz의 경우  $\mu$ A\_50 wt%보다  $\mu$ NAC\_50 wt%의 유전 손실은 3.5배 적었고,  $\mu$ A\_60 wt%보다  $\mu$ NAC\_60 wt%의 유전 손실 2배 적은 유전 손실의 결과 값을 나타내었다. 그리고  $\mu$ A50 wt%의 경우보다 1 kHz에서 2배, 10 kHz에서 1.55배  $\mu$ NAC\_50 wt%가 낮은 유전 손실을 얻었다. 또한  $\mu$ A60 wt%의 경우보다 1 kHz에서 2배, 10 kHz에서 1.44배  $\mu$ NAC\_60 wt%가 낮은 유전 손실을 얻었다.

원인은  $\mu$ A 충전 함량이 증가할수록 유전 손실이 감소하는 것은 나노코어구조와 같이 저주파수에서 전기전도가 낮기 때문이며, 고주파수에서 전하캐리어 이동이 고분자 체인에 따라 주로 일어나는 전도에 기여하기 때문이다 [13]. 고분자 내에 전하 전송의 장벽은 결함, 체인 상호간 전하 전송, 그리고 계면을 통한 전송이 원인이다. 아마도  $\mu$ A의 경우 과량의 입자 충전으로 나노코어구조처럼 많은 계면의 수와 고분자 체인의 엉킴이 시스템의 전하운동을 억제하고 그리하여 전기전도가 감소하는 원인으로 손실이 적어진다 [12].

#### 4. 결론

본 연구에서는 GIS spacer 절연소재를 개발하기 위하여 에폭시수지, 에폭시 마이크로코어구조(40, 50, 60, 70 wt%), 에폭시/나노/마이크로 알루미늄 코어구조를 제조하였다. 그리고 주파수 변화에 따른  $\epsilon_r$ 와  $\tan\delta$ 의 특성연구를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

##### 4.1 E $\mu$ AC 충전 함량 변화에 따른 유전 특성

ER, E $\mu$ AC\_40, 50, 60, 70 wt%의 비유전율의 크기

를 비교하여 볼 때, ER은 가장 낮고, 그리고  $\mu\text{A}$  충전 함량 증가에 따라 비유전율이 증가되는 경향을 얻었다. 알루미늄 필러의 진성유전율(알루미나 비유전율:9) 기여로 인하여 에폭시수지의 분자구조 변화보다 비유전율에 중요한 역할을 한 것으로 사료된다.

ER, E $\mu\text{AC}$ \_40, 50, 60, 70 wt%의 유전 손실의 경우 크기를 비교하여 볼 때, ER이 가장 큰 유전 손실을 나타내었고, E $\mu\text{AC}$ 의 경우 충전 함량의 증가(40, 50, 60, 70 wt%)에 따라 오히려 감소하는 유전 손실을 나타내었다. 이는  $\mu\text{A}$  충전 함량 증가에 따라 비유전율은 증가되었지만 유전 손실은 정반대의 경향을 나타내었다.

#### 4.2 E $\mu\text{NAC}$ 충전 함량 변화에 따른 유전 특성

ER, E $\mu\text{NAC}$ \_40, 50, 60 wt%의 비유전율의 크기를 비교하여 볼 때, ER은 가장 낮고, 그리고  $\mu\text{A}$  충전 함량 증가에 따라 비유전율이 증가되는 유사한 경향을 얻었다. 그리고 그 결과는 40<50<60 wt%로 충전 함량이 증가할수록 일정한 크기로 증가되는 결과를 나타내었다. 이는 낮은 주파수에서 수많은 계면을 갖는 콤포지트에 기인하여 아마도 극성재료에 의해 나타나는 것과 일치하는  $\mu\text{A}$ 을 포함한 재료로 인한 비유전율 증가의 원인으로 사료된다.

E $\mu\text{NAC}$  유전 손실의 경우,  $\mu\text{A}$  충전 함량이 증가할수록 유전 손실이 감소하는 것은 나노콤포지트와 같이 저주파수에서 전기전도가 낮기 때문이며, 고주파수에서 전하 캐리어 이동이 고분자 체인에 따라 주로 일어나는 전도에 기여하기 때문으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] K. Kadotani, *Composites*, **11**, 199-204 (1980).  
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361\(80\)90425-5](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361(80)90425-5)]
- [2] J. C. Fothergill, J. K. Nelson, and M. Fu, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP '04* (2004 Annual Report Conference, 2004) p. 406-409.
- [3] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse, and Y. Ohki, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, **12**, 669-681 (2005).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2005.1511092>]
- [4] T. Imai, G. Komiya, and K. Murayama, *Electrical Insulation* (Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium, 2008) p. 201-204.
- [5] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P.H.F. Morshuis, and J. J. Smit, *J. Mater. Sci.*, **50**, 1175-1186 (2015).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-014-8674-5>]
- [6] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P.H.F. Morshuis, and J. J. Smit (IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2015) p. 446-449. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICACACT.2014.7223609>]
- [7] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P.H.F. Morshuis, and J. J. Smit, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (IEEE Conference, 2015) p. 479-482.
- [8] R. Kochetov, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, and J. J. Smit, *Electrical Insulation (ISEI)* (IEEE International Symposium, 2010) p. 1-5.
- [9] Y. Chen, J. Guo, Z. Shao, Y. Cheng, J. Wu, and T. Tanaka, *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM, 2015)* p. 297-300.
- [10] S. Singha, M. J. Thomas, and A. Kulkarni, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **17**, 1249-1258 (2010).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2010.5539697>]
- [11] M. G. Veena, N. M. Renukappa, K. N. Shivakumar, and S. Seetharamu, *Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* (IEEE 10th International Conference, 2012) p. 1-4.
- [12] S. Singha and M. J. Thomas, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**, 2-11 (2008).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-DEI.2008.4446731>]
- [13] F. W. Star, T. B. Schroder, and S. C. Glotzer, *Phys. Rev. E*, **64**, 021802-021802 (2001).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.64.021802>]
- [14] J. Castellon, H. N. Nguyen, S. Agnel, A. Tourelle, M. Frechette, S. Savoie, and A. Krivda, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **18**, 651-658 2011
- [15] M. Kurimoto, H. Watanabe, K. Kato, N. Hayakawa, M. Hanai, Y. Hoshina, M. Takei, and H. Okubo, *Properties and Applications of Dielectric Materials, ICPADM 2009* (IEEE 9th International Conference, 2009) p. 749-752.  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPADM.2009.5252320>]
- [16] S. Singha and M. J. Thomas, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**, 12-13 (2008).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-DEI.2008.4446732>]