

Special

# Thema | 중전기용 나노 절연재료 연구 현황

안준호 연구원  
(홍익대 과학기술연구소)

최근 나노기술의 발달로 다양한 분야에서 나노기술을 이용한 재료의 개발이 이어지고 있다. 이제 나노기술은 초기 기술개발 단계에서 응용분야로의 확대로 이어지고 있다. 본고에서는 고전압 절연재료에 이용 가능한 나노 유전 및 절연재료의 해외 연구현황에 관한 내용을 중심으로 살펴 보았다.

## 1. 개요

중전기기는 기존의 전원용 기기인 발전기, 변압기, 차단기, 개폐기 등에서부터 산업용 전기기기, 전동력 운반설비, 전기부품소자 등에 이르기까지 다양하였으나, 최근에는 이에 더해 자기부상열차, 전기자동차, 고속전철, 2차 전지, 전력용 반도체, 전력 제어시스템, 초전도 응용, 의료용 전기기기, 환경 산업용 기기, 디지털 기기 등에 이르기까지 더욱 다양하게 발전하여 왔다.

최근 중전기기에 사용되는 절연재료는 특고압, 대전류를 견뎌내야 하며, 급작스런 고장 발생 시 또는 수명연한이 되었을 경우 일어나는 비용 손실이 높아 제품의 신뢰성이 높아야 한다. 따라서 절연재료의 성능 및 수명의 향상이 절실히 필요한 실정이다.

근래에는 나노기술의 발전과 더불어 중전기용 나노절연재료의 개발이 기대되고 있으며, 이미 몇몇 논문에서는 나노기술을 이용한 중전기용 절연재료의 성능향상이 보고되고 있다.

하지만 수입에 의존하는 국내 중전기 시장 현실을 볼 때, 신기술을 활용한 제품의 개발을 주도할 기술주도적 기업의 역할이 미미하며, 또한 선도적 기술개발이 뒤쳐질 경우, 중국이나 동남아시아 등 후발국에 추격을 허용이 염려되는 상황이다.

따라서 국내 중전기용 나노절연재료의 개발은 나노기술의 발전을 선도하고 있는 국내 연구개발 능력을 활용하여 이를 중전기기에 적용, 선진국과의 기술격차를 줄이면서 후발국들과의 기술격차를 벌이는데 중요

한 역할을 수행할 것으로 예상된다.

## 2. 배경

21세기에 들어 나노과학은 나노크기에서 발생하는 새로운 물성을 연구, 개발하여 종래와는 다른 특성을 이용하는 새로운 영역이 되었다. 나노기술은 단지 신기술이 아닌 산업의 흐름을 바꾸는 새로운 패러다임으로 등장했다고 할 만큼 우리의 생활에 다가오고 있다.

그 중에서 나노절연재료는 아직 많은 연구자들의 관심이 미치지 않은 미개척 분야이다. 특히 충전기 기용 절연재료는 충전기기가 갖는 사회적 기여나 기기에 사용되는 절연재료의 중요성을 감안할 때, 반드시 연구되어야 하고, 그 연구 개발의 목적이 뚜렷한 분야이다.

그렇다면 무엇이 나노절연인가? 나노절연재료는 넓게는 단분자에서 고분자까지 절연체를 이용한 응용분야를 나타내며, 좁게는 절연 성능이 뛰어난 고분자 계열에 여러 나노재료를 혼합한 복합재료를 일컫는다. 즉 몇 나노미터의 크기를 갖는 재료의 중요한 특성들을 묶는 절연능력이 될 것이다. 예를 들자면 나노크기의 입자, 나노두께를 가진 마이카와 같은 시트나 나노직경의 섬유와 같은 것을 들 수 있다. 또한 LB막막(Langmuir-Blodgett Film)과 같이 형성된 나노미터 두께의 절연도 포함될 것이다. 나노크기로 채워진 재료의 종류는 어떤 의미로는 등가의 마이크로로 채워진 재료와는 매우 다르게 유전(誘電)적으로 반응한다. 재료의 함량이 10%, 10nm 직경을 가진 하나의 입방미터 내에서 전체 계면 면적은 대략 60km<sup>2</sup>가 된다. 대략 여의도의 7.5배 정도나 된다.

충전기기용 절연재료는[1] 기계적, 전기적, 열적으로 우수한 특성을 가져야 하는데, 기계적으로 인장강도, 굴곡강도, 역률, 경도, 내마모성, 가역성 및 가공성 등이 우수한 재료를 사용하여야 한다. 또 열적, 물리화학적으로는 열전도도, 열팽창계수, 가역성 및 열적 전이온도, 흡습성, 내산성, 내알칼리성, 내유성, 내약품성, 부식성, 용해성 등이 사용 목적에

따라 우수해야 하며, 기타 내방사성, 밀도, 굴절률, 내후성 및 색채 등도 경우에 따라 중요하게 인식된다. 전기적으로는 절연내력, 내트리잉성, 내아크성, 부분방전 특성, 유전 특성 등을 파악하는 것이 매우 중요하다.

현재 사용되고 있는 기체 절연재료를 살펴보면, 공기, 수소, 질소, SF<sub>6</sub>, 프레온 가스 등이 있으며, 각각 특성에 맞게 사용되지만, 절연 성능이 우수한 SF<sub>6</sub>나 프레온 가스를 많이 사용한다. 그러나 이들이 분해되면 유독가스를 방출하기 때문에 사용이 제한적이다.

액체 절연재료는 광유(Mineral Oil), 합성유, 실리콘유 등이 사용되며, 광유는 보통 C, H를 주성분으로 소량의 S, O, N을 포함하는 파라핀계와 나프탈렌계로 구분한다. 이 중 실리콘유가 높은 전계강도와 내열성으로 H중 절연용으로 사용되어, 주로 변압기 절연유로 많이 사용된다. 하지만 액체 절연유 역시 독성 및 여러 가지 환경적 제약으로 사용에 문제점이 도출되고 있다.

고체 절연재료는 유기질 고분자 재료와 무기재료를 주로 이용하고 있다. 고분자는 주로 분자량이 10,000 이상의 것을 말하는데, 분자 사이의 힘이 커서 실온에서는 고체지만, 배열에 따라 다양한 분자 운동모드를 지녀 열경화성, 열가소성과 같은 고분자 특유의 성질을 지니게 된다.

고분자 열가소성 재료는 PE(고주파 케이블, 고전압 케이블), PP(콘덴서), PS(콘덴서), PMMA(실험용 절연지질물), PVC(전선, 코드), PVF(에나멜선용 바니시), PTTE(고주파용 절연, 내열절연), PET(콘덴서용 유전체, 회전기 코일절연), PC 및 Polyimide(일명 나일론, 전선서스용) 등이 있다.

열경화성재료는 페놀수지(Phenol Resin-통신용 부품), 요소수지(Urea Resin-가전품, 배선기구), 멜라민수지(Melamin-도료, 가전품외장), 불포화 폴리에스테르수지(3.3~33 kV급 옥내 전선로용), 에폭시수지(Epoxy Resin-몰드형 변압기 및 적층형, 주형 합침형 지지 애자), 실리콘수지(Silicone Resin-H형 절연재료에 적합) 등이 사용되고 있다.

또 무기 고체재료로는 마이카(콘덴서, 회전기 코일이나 슬롯절연), 석영(고주파 절연물, 압전소자),

유리섬유(B종 이상의 기기절연에 사용), 자기(애자, 부싱 등 전력용 기기)가 있고, 특수 자기로 알루미늄자기(애자, 내열기기용 대형 애자), 벨릴리아 자기(금속의 열전도율과 같은 뛰어난 열전도도), 질화물 자기(고주파용, 내열용 절연재료)가 있다.

### 3. 나노 유전 및 절연재료연구의 배경

1990년 A. Okada 의해 고분자 기지에 나노입자를 혼합한 Nylon 6/Clay 나노복합재료(또는 하이브리드 재료)가 처음 발표되었다[2]. 이후 전기절연 분야에서도 1994년 "Nanometric Dielectrics"라는 제목으로 Lewis에 의해 나노물성에 관한 논문이 발표되어 "나노 유전 및 절연" 분야의 이론적 위치를 세웠다[3].

절연재료분야의 1세대로 불리는 고분자 기지에 마이크로 크기의 무기재료를 수십 wt% 혼합한 복합재료는[4], 나노입자 제조기술을 바탕으로 수십 nm 크기의 입자를 수 wt% 정도로 복합재료에 혼합하여 무기재료의 입자의 비표면적을 마이크로 크기의 복합재료보다 크게 증가시켰다. 이러한 효과로 기존의 열경화성(에폭시), 열가소성(폴리프로필렌), Crosslinked Polymer(XLPE) 등 고분자 기지에 나노입자들의 결합력이 증가하여 절연파괴 강도, 내전압성, 내코로나성, 기계적 강도 등 다양한 절연 및 전기적 특성 향상을 기대하고 있다.

새로운 밀레니엄 시대가 되면서 Fréchette는 2001년 다시 나노 유전 및 절연재료에 관한 연구를 재개하였다[5]. 그러나 이 시간 동안 연구된 것이 논문으로 발표된 것은 적었다. Nelson 등은 2002년 CEIDP에서 실제로 마이크로복합재료와는 다르게 나타난 나노복합재료의 절연(나노크기의 세라믹 입자를 함유한 에폭시)에 관한 데이터를 발표하였다. 실제로 전기절연 특성은 매우 개선되었다(좀 더 자세한 결과는 참고문헌[6]을 참조). 이후 CEIDP에서 "나노 유전 및 절연"에 관한 다섯편 정도의 논문이 발표되었다.

Lewis, Fréchette, Tanaka 등과 같은 이들의 결과는 매우 인상적이다. 그들은 "유전 및 절연 기술에

서 고분자 나노복합재료는 매우 혁신적으로" 개선된 절연 특성과 신뢰성을 보여주었다. 예를 들자면 부분방전에 의한 표면 열화는 Kozako 등의 의해 논문에서 방전-저항 나노판의 결합에 의해 크게 감소되는 것을 보여주었다. Montanari 등은 EVA와 PP의 공간전하 분산, 전도도와 절연파괴전압이 합성된 나노-층들로 채워졌을 때, 개선된다는 것을 확인하였다.

### 4. 나노복합재료의 제조

나노복합재료는 1~100 nm 크기를 갖고 1~10 wt% 정도의 함량으로 고분자 기지에 고르게 분산되어 있는 재료를 말한다. 나노복합재료의 제조는 고분자 기지에 나노 크기의 무기재료를 혼합하는 과정이다. 나노복합재료의 제조 방법은 잘 알려진 바대로 용액법, 중합법, 용융법(컴파운드법) 등이 있다. 중합법은 고분자의 원료인 단량체를 혼합하여 단량체의 일부를 층 사이로 침투시키고, 이를 중합법으로 얻는 방법으로 고분자 나노복합재료에서 가장 널리 사용하는 방법이다. 용액법은 고분자를 용매로 녹여 용액을 만들고 이를 유기화물질과 혼합하는 방법으로 용액상태에서 고분자량의 큰 고분자를 층 사이로 침투시키기 어렵고, 최종제품을 얻기 위해서는 고형분을 용제와 분리시켜야 하는 단점이 있다[7]. 용융법은 유기화물질을 직접 고분자 수지와 용융상태에서 혼합하는 것으로 기존의 고분자 컴파운드 제조법과 동일하게 가공설비를 이용할 수 있기 때문에 상업적인 면에서 가장 바람직하다고 볼 수 있으나, 나노스케일로 물질을 박리시키기 위해서는 고도의 기술이 필요하다.

사용되는 고분자는 주로 폴리아미드(PA), 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 에틸렌비닐아세트산염(EVA), 에폭시 수지와 실리콘고무 등이 사용되고, 충전제(Filler)는 층상 실리케이트(Layered Silicate), 실리카(SiO<sub>2</sub>), 타이타니아(TiO<sub>2</sub>), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등이 많이 사용된다.

## 5. 나노복합재료의 제 특성

### 5.1 전기전도도 Conductivity

나노복합재료에서 높은 전계의 전도도는 기존의 복합재료와 다르지 않게 열적으로 이온 호핑 전류에 의해 나타나거나 공간전하제한전류(SCLC-Space Charge Limited Current)에 의해 나타난다. 폴리이미드 / 실리카 10 wt%의 나노복합재료의 경우, 0.68 eV의 활성화 에너지를 가지고 있고, 호핑거리는 4.3 nm로 나타났다. 나노충진제가 혼합되었을 경우, 함량에 따른 전도도의존성은 아직 명확하지 않다. 충전제 함량 10 wt%의 시료가 명확히 다른 점이 나타나지 않은데 비해, 2 wt%의 나노충진제를 함유한 시료는 100 ℃와 150 ℃에서 전도도의 충분한 감소를 보여줬다. 나노 크기의 재료로 인해 트랩깊이가 감소하고, 문턱전계강도는 공간전하주입과 음 전도영역에서 공간전하 전도영역까지의 전이로 측정되었다. 이러한 결과는 높은 전계에서 SCLC 흐름에 대한 증거이다. 이것은 순수 고분자에서 기존의 트랩밴드가 드러나 더 얇은 트랩깊이를 가지게 된다. 결과적으로 나노구조의 복합재료는 순수 고분자보다 높은 이동도를 가져 캐리어는 얇은 밴드에서 이동하게 된다. 이것은 얇은 트랩밴드가 적은 공간 축적전하로 인해 캐리어를 발생시키고 더 높은 이동도를 갖게 한다. SCLC에 대한 문턱전계는 실험적으로 감소되는 것으로 나타났다. 이것은 금속전극에서 전위장벽이 감소함을 의미한다.

### 5.2 공간전하 특성

나노복합재료에서 공간전하의 감소는 고분자에 충전제를 혼합하면 일어나는 두드러진 효과이다. 공간전하는 PEA 법(Pulsed Electro-acoustic Method)을 이용하여 측정되고, 이를 이용하여 최대 전계를 산출할 수 있다. 벌크에서의 전하 축적은 충전제의 함량이 2~6 wt% 사이에서 감소되는 경향을 보이고 있다[8]. 그림 1은 순수 PP와 2~6 wt%의 충전제를 혼합한 재료에 전계를 인가하였을 때, 주입된 전하의존성을 보여주고 있다. 나노충진제로 인해 전하가 낮은 전계에서 증가하다가 높은 전계에서 감소하는 것

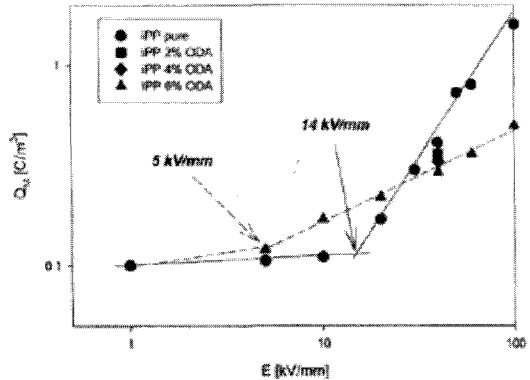


그림 1. Space Charge Threshold Characteristics for Base PP and Nano-Filled PP ODA : Synthetic Fluoro-hectorite Modified by Octadecylamine.

이 일반적이다. 결과적으로 공간전하의 문턱값은 나노충진제로 인하여 더 낮은 값으로 이동하는 것을 알 수 있다. 낮은 전계에서의 전하는 재료 내 충전제의 이온성 불순물에 의한 것으로 판단되고, 나노충진제의 정제과정을 통해 이를 제거할 수 있다. 에폭시 / 타이타니아의 경우, 마이크로 크기의 복합재료는 최대 전계가 평균 인가전계 정도로 나왔으나, 나노충진제를 사용한 경우, 평균보다 약간 높게 나타났다[9].

### 5.3 부분방전 저항

외부환경에서의 수행능력을 평가하는 항목 중에 하나로 부분방전 저항을 들 수 있다. 표 1은 부분방전에 의한 폴리이미드, 폴리이미드, 에폭시와 실리콘고무의 특성을 보여주고 있다.

나노크기의 입자들이 침투깊이에서 많은 향상을 보이는 것을 알 수 있고, 에폭시 / 실리카처럼 같은 종류의 충전제라도 크기에 따라 침투깊이가 달라지는 현상을 볼 수 있다는 것은 흥미로운 현상이 아닐 수 없다. 이러한 원인이 어떤 것인가에 대해서는 여러 가지 해석이 있을 수 있지만, 그 중에서 CH<sub>3</sub>나 CH<sub>3</sub>-Si-CH<sub>3</sub> 그룹에서 CH기처럼 Si-O-Si 그룹에서 관찰된 결과를 살펴보면[10], 다음 네 가지 요소가 고려되어야 한다.

표 1. Depth of Erosion in Polymer Nanocomposites Caused by Partial Discharges.

Material	Erosion Depth( $\mu\text{m}$ )	Remarks
Base Polyamide(PA)	14	ac 6 kV, 60 Hz, 48 hrs IEC(b) Electrode
PA/LS Nanocomposite(NC)	2.5	
Base Epoxy	54	ac 6 kV, 60 Hz, 90 hrs IEC(b) Electrode
Epoxy/Titanate(NC)	15	
Base Epoxy	180	ac 4 kV, 720 Hz, 120 hrs 60 Hz equiv. Tim 1440 hrs Rod-gap-plane Electrode
Epoxy/ Alumina NC	60	
Base Epoxy	110	ac 4 kV, 720 Hz, 60 hrs 60 Hz equiv. Time 720 hrs Rod-gap-plane Electrode
Epoxy/LS NC	50	
Epoxy/Titanate(15 nm) NC	32	
Epoxy/Silica(40 nm) NC	27	
Epoxy/Silica(15 nm) NC	19	

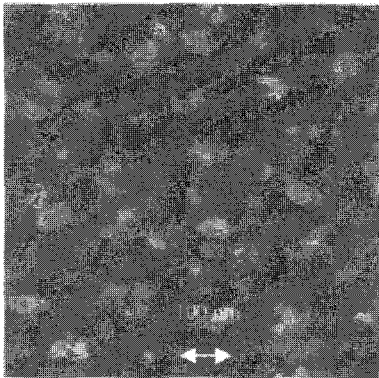


그림 2. SEM Surface Photo of Silica Nano-fillers Dispersed in Epoxy as an Example.

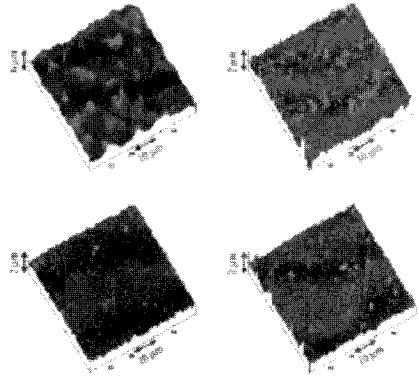


그림 3. AFM Images of Areas Degraded by Partial Discharges for 48 h at AC Voltage of 6 kV of Specimens PA(a), NC-2(b), NC-4(c), NC-5(d).

- (1) 충전제와 매트릭스 사이의 결합력
- (2) 충전제 간의 거리 또는 이웃한 충전제 간의 매트릭스 체적
- (3) 충전제 간 공간의 모폴로지
- (4) 미세한 상호작용

그림 2와 그림 3은 SEM을 이용해 부분방전에 따른 열화를 보여주는 그림이다. 교류전압을 6 kV, 48 시간을 인가하였을 때, 폴리아미드와 나노 충전제 함량에 따른 결과이다.

#### 5.4 열자격전류(TSC)

폴리이미드 / 실리카 나노복합재료[11, 12]와 에폭시 / 타이타니아 나노복합재료[5]에 대한 열자격전류(TSC : Thermal Stimulated Current)를 측정하였다. TSC 피크는 순수 폴리이미드의 185 °C보다 상승된 폴리이미드/실리카 나노복합재료가 대략 200 °C에서 나타난다. 게다가 2~10 wt%의 충전제 함량은 200 °C에서 220 °C의 범위에서 이동하여 TSC 피

크를 나타낸다.

깊은 트랩의 발생은 나노구조로 인해 TSC의 이동과 측정된 전기전도도의 감소에서 예상할 수 있다고 저자는 이야기하고 있는데, TSC 피크는 공간 전하와 연계되어 에폭시/타이타니아에 대해 대략 130 °C에서 나타난다. 이것은 70 °C에서의 완화피크는 90 °C에서 피크(주체인완화)와는 명확하게 다르게 나타난다. 하지만 이는 전도도에서의 결과와는 다른 결론으로 앞으로 계속 이에 관한 검토가 이루어져야 할 것이다.

### 5.5 장시간 트리잉과 내전압 수행

수명은 나노구조에 의해 알맞은 전계 하에서 트리잉 실험(침-평판 구조)에 대한 극도로 확장된 개념이다. 그림 4는 침전극에서 전계를 가해 절연 파괴 전압을 측정된 것으로 에폭시/타이타니아 나노복합재료는 무충진에서 마이크로 크기 충전제 함량의 증가와 함께 크게 감소되는 것을 보여주는데 반해, 적어도 10 wt% 정도까지 첨가된 나노충진제에 대하여 DC 단시간 절연 파괴 강도에서 변화를 보이지 않는다. 이러한 결과는 나노복합재료가 마이크로복합재료에 비해 파괴강도에 대해 긍정적인 효과를 가졌다는 것을 의미한다.

트리잉 실험은 항상 물드형 절연에 대한 파괴강

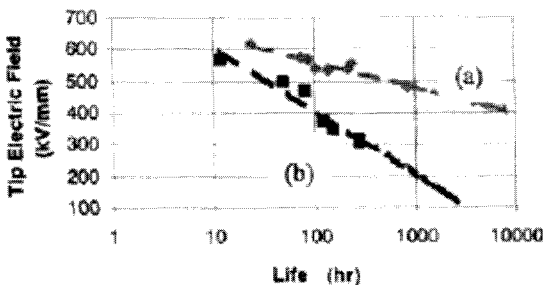


그림 4. AC Voltage Endurance Characteristics for Epoxy-TiO<sub>2</sub> Nanocomposites (a) Nanofilled, (b) Microfilled Evaluated by Needle-Plane Arrangement.

도의 평가를 수행한다. 에폭시/타이타니아 나노복합재료는 전계 약 145 kV/mm(무충진), 10 wt%에서 170과 175 kV/mm 정도의 값을 얻었다[15]. 100 kV/mm의 침전극 전계에서 통계적 수명은 기존 마이크로 복합재료에 비해 약 10,000배 더 길게 나타났다. 에폭시 / 층상 실리케이트 나노복합재료는 AC 절연 파괴강도에서 훨씬 나은 결과를 보여주고 있다 [13]. 이것은 에폭시 수지에서 ZnO 나노입자의 매우 작은 양의 함량(0.5~1 wt%) 첨가가 충분히 절연 파괴 시간을 개선시킨다는 것을 보여준다.

### 5.6 유전율의 변화

유전율은 고분자에 수십 wt%의 마이크로 크기의 무기재료가 채워지면 항상 증가한다. 반대로 유전율은 표 2에서와 같이 나노구조화가 적당히 이루어지면 감소하는 경향이 있다.

유전율에서 이런 놀라운 감소는 나노충진제와 그 주변의 고분자 매트릭스 사이에 형성된 상호작용 영역의 특성에서 나타난다. 상호작용 영역에서 나타나는 현상은 다음 두가지로 나타낼 수 있다.

- (1) 나노 입자들에 의해 고분자 체인 운동의 제한
- (2) 체적 증가나 밀도 감소

### 5.7 낮은 전계 전도도와 손실 탄젠트 $\delta$

낮은 전계 전도도는 에폭시에서 감소[6]하는 것과 달리 폴리프로필렌(PP)에서 나노구조화에 의해 증가한다[17]. 나노충진제 입자들은 낮은 전계 전도도에서 이온 캐리어의 원인이 되는 이온 수집자의 역할이 고려된다. 이온은 화학적 정제에 의해 제거된다. 낮은 주파수 손실탄젠트와 낮은 전계 DC전도도는 이동 이온 불순물의 존재와 쌍극자운동의 극성에 민감하다. 손실  $\tan \delta$ 는 순수 에폭시보다 에폭시-유기적으로 변형된 층상실리케이트 나노복합재료에서 더 낮다. 주목할 만한 것은 유리전이온도의 상승으로 인해 높은 온도에서 명백히  $\tan \delta$ 가 감소하는 것이 나타난다.  $\tan \delta$ 의 감소는 낮은 주파수와 높은 온도조건 하의 에폭시-타이타니아 나노복합재료에서도 찾을 수 있다. 나노TiO<sub>2</sub> 충전된 에폭시의 좋은

표 2. Effect of Nanofiller Loadings on Permittivity

	Epoxy-Silicate 20 °C ~ 100 °C, 60 Hz[14]	Epoxy-TiO <sub>2</sub> 23 °C, 1 kHz[15]	Epoxy-TiO <sub>2</sub> 200 °C, > 1 kHz[16]	PA-Silicate RT 50 Hz[6]
Base Resin	4.1 6.1	5.68	> 8.49	4.36
Nano	3.7 3.8	4.5	8.49	4.07
Micro	-	6.01	> Base Resin	-
Calculated	-	6.19	9.99-13.8	-

에는 그림 5에서 볼 수 있다. 이것은  $\tan \delta$ 가 나노구조화로 인해 0.1에서 1 Hz 이상의 높은 주파수 영역에서 감소되고 더 낮은 주파수 영역에서 증가되는 것을 명백히 보여준다. 에폭시 실리카 나노복합재료는 순수 수지보다 전력 주파수에서  $\tan \delta$ 의 더 낮은 값을 보여주고, 100 kHz 이상의 더 높은 주파수 영역에서 그와 반대인 것을 보여준다. 완화현상은 0.1에서 100 kHz의 주파수 영역의 폴리프로필렌(i-PP와 s-PP)의 절연손실에서 관찰된다. 이것은 유리전이온도와 연계된 완화과정으로 생각된다. 비슷한 과정은 폴리이미드 실리카 나노복합재료에서도 확인된다.

5.8 유리전이온도 변화

유리전이온도는 층상 실리케이트의 나노구조화에 의한 에폭시에 대해 증가하는데 비해 TiO<sub>2</sub> 나노구조화된 에폭시에서 감소되거나 변화하지 않고 유지된다. 유리전이온도의 개선은 형성된 모폴로지로부터 기인한다. 이것은 충전제와 구조체가 오히려 단단하게 결합된 것을 가리킨다. 열전도는 실리카의 나노구조화에 의해 폴리이미드에서 강화된다[18].

5.9 고분자 나노복합재료의 응용

나노복합재료는 아직 시기상조의 무대이다. 그러나 몇몇 응용분야는 더 먼 미래를 위해 나아가고 있다. 다양한 종류의 고분자 나노복합재료는 높은 내열성과 함께 HV나 EHV 견식 변압기, AC와 DC 압출 케이블, HV 커패시터, 고분자 옥외 절연체, PCB(Printed Circuit Board)와 같이 전기적 장치 및 전자장치에 대해 개발 중이다. 높은 유리전이온도를 가진 재생 가능한 열저항 열가소성재료는 이 기술로 개발될 수 있다. 표 3은 가까운 미래에 낮은 가격, 콤팩트화되고, 신뢰성과 환경적으로 좋은 전력 장치와 케이블의 고급설계기술과 더 높은 효율적 전력산업을 만들기 위해 전력산업에서의 응용기술개발을 강하게 필요로 한다는 것을 보여준다.

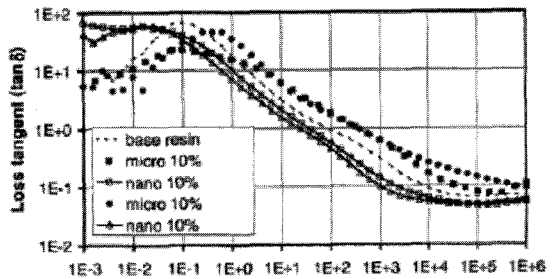


그림 5. Loss Tangent of Unfilled and 10 % Micro and Nano-Filled Epoxy at 293 K vs. Frequency in Hz.

폴리에스테르/실리카 나노복합재료의 PD 저항을 컨덕터에 응용하기 위해서는 충분한 두께에서 직접적으로 유연하고 접착성이 있어야 한다. 에나멜 와이어 나노복합재료는 기계적 부서짐으로 인해 세 개의 층이 필요한 마이크로 복합재료에 비해 두 개의 층으로 구성된다.

몰드 변압기는 기존의 충전된 에폭시 절연이 나노복합재료로 대체된다면 기존 엘리베이터에서처럼 콤팩트하게 되어 제한된 구역에 설치할 수 있다. 진공스위치인 콤팩트한 24 kV 작은 스위치박스가 개발되었다. 이들은 나노복합재료로 인하여 좀 더 콤팩트하고 신뢰성 있게 되었다. 이 아이디어는 좀

표 3. 나노재료의 응용현황

Potential Applications	Materials	Advantage
Motor Windings	Polyamideimide	PD Resistance
HV Rotating Machine Windings	Epoxy	PD Resistance
HV Mold Transformers	Epoxy	PD Resistance Heat Resistance
AC Extruded Cables	PE, XLPE	Voltage(Tree)
Capacitors	PP	Endurance
DC Extruded Cables	PE, XLPE	Space Charge Reduction
Outdoor Insulators	Silicone Rubber	Tracking Resistance
Cubicle Switchgears	Epoxy	Multi-factors
All Solid Substation	PE	Compactness

더 환경 친화적이고 화재위험을 줄이는 고체 상태 변압기로 확장되어 SF<sub>6</sub>와 절연유 변압기를 대체할 것이다.

주목할 만한 응용분야 중 하나는 내전압이 충분히 개선된 프리미엄 상업용 XLPE의 나노-SiO<sub>2</sub> 사용이다. 줄어든 절연두께를 가진 고전압과 초고전압 XLPE 케이블이 기대된다. 현재는 수트리저항에 대해서는 이용할 데이터가 없다. 하지만 나노구조화로 인한 침습은 억제되어, 나노충진제가 첨가된 XLPE의 수트리저항 특성 개선이 기대되어 전력산업에서 막대한 이익을 줄 것으로 기대된다. XLPE DC케이블도 타켓이 될 수 있다. 충분한 공간전하 형성의 감소가 기대되기 때문이다. 만약 PP 나노복합재료가 사용된다면 PP필름으로 만든 커패시터는 순수 PP에 비해 더 높은 절연파괴강도로 인해 좀 더 콤팩트(고에너지밀도)와 신뢰성있는 제품을 제작하게 될 수 있을 것이다. 실리콘 고무는 옥외용 절연재료로 이미 상업적으로 사용되고 있다. 나노복합재료 형태의 트래킹저항에서 개선을 보였고 더 많이 사용되고 넓게 사용될 것을 기대하고 있다. 고분자 나노복합재료는 기술혁명의 변화에 전력산업이 부가적인 전기절연기술처럼 충분한 응용범위를 제공할 것이다.

## 6. 결론

고분자 나노복합재료는 유전 및 전기절연에 대한 탁월한 특성을 기대하게 한다. 자기와이어에 대한 폴리에스테르이미드 나노복합재료의 예처럼 몇몇은 이미 상업화되었다. 그러나 무엇보다도 실험실 규모뿐만 아니라 고분자 나노복합재료 제조의 산업적 방법까지 적당한 개발이 필요하다. 이것은 필요에 의해 재현할 수 있고, 신뢰성 있는 데이터를 만드는 것이 무엇보다 필요하다는 것을 이야기 한다. 현재 나노 절연재료 개발의 필요한 연구는 어떻게 상호작용영역이라 불리는 나노복합재료와 고분자 매트릭스 사이에 계면을 어떻게 명확하게 하는가가 선행될 과제일 것이다. 계면이나 상호작용영역과 같이 나노입자 재료의 종류와 표면의 물리적 화학적 조건, 물리화학적 유-무기재료간의 가교인 계면활성제의 종류, 친화성과 분산성의 함량과 종류, 고분자 매트릭스의 종류에 의존한다. 발전된 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 바탕으로 한 분자운동은 계면에서의 특성화에 유용하다. 나아가 실험과정 대부분 재료구조와 그에 추가된 나노크기의 충진제 재료 사이의 비교에 대해 이루어졌다. 충진제 재료의 나노구조화로 인한 부분적인 효과는 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 하지만 이러한 나노화에 대한 복



잡합 메커니즘과 제조상의 어려움이 나노 절연재료의 개발에 대한 연구 활성화를 막지는 못할 것으로 생각된다. 향후 나노 절연재료의 개발로 보다 콤팩트하고 경쟁력있는 재료 및 기기의 개발을 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] 이준웅, 전기전자통신 재료공학, 동일출판사.
- [2] A. Okada, M. Kawakami, Y. Kojima, T. Kurauchi, and O. Kamigaito, "Synthesis and Properties of Nylon6/Clay Hybrids", Proc. MRS Symp. Vol. 171, pp.45-50, 1990.
- [3] T. J. Lewis, "Nanometric Dielectrics", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 1, No. 5, pp.812-825, 1994.
- [4] T. Tanaka et. al. "Emerging Nanocomposite Dielectrics", Electra, No. 226, 2006.
- [5] M. F. Fréchette, M. Trudeau, H. D. Alamdari, and S. Boily, "Introductory Remarks on NanoDielectrics", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 14-17, 2001.
- [6] J. K. Nelson and J. C. Fothergill, "Internal Charge Behavior of Nanocomposites", Nanotechnology, Vol. 15, pp. 586-595, 2004.
- [7] 소대섭, 김경호, 이일형, 반응병, "나노복합재료", KISTI 심층정보분석보고서, 2002.
- [8] J. K. Nelson and Y. Hu, "The Impact of Nanocomposite Formulations on Electrical Voltage Endurance", Proc. IEEE-ICSD, No. 7P-10, pp.832-835, 2004.
- [9] J. C. Fothergill, J. K. Nelson and M. Fu, "Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites Containing TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO Fillers", Annu. Report IEEE-CEIDP, No. 5A. 17, pp. 406-409, 2004.
- [10] M. Kozako, R. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Difference in Surface Degradation due to Partial Discharge between Polyamide Nanocomposites and Microcomposites", Annu. Report IEEE-CEIDP, No. 5A-15, pp.398-401, 2004.
- [11] Y. Cao and P. C. Irwin, "The Electrical Conduction in Polyimide Nanocomposites", Annu. Report IEEE-CEIDP 2003, No. 2B-13, pp. 116-119. 2003.
- [12] Y. Cao, P. C. Irwin and K. Younsi, "The Future of Nanodielectrics in the Electrical Power Industry", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 11, pp. 797-807, 2004.
- [13] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Nakan, T. Shimizu and Y. Yoshimitsu, "Preparation and Insulation Properties of Epoxy-Layered Silicate Nanocomposite", IEEE Trans. A, Vol. A-124, No. 11, pp.1064-1072, 2004.
- [14] T. Imai, Y. Hirano, H. Hirai, S. Kojima and T. Shimizu, "Preparation and Properties of Epoxy-ORganically Modified Layered Silicate Nanocomposites", Conf. Rec. IEEE ISEL, pp. 379-383, 2002.
- [15] J. K. Nelson, L. A. Utracki, R. K. MacCrone and C. W. Reed, "Role of the Interface in Determining the Dielectric Properties of Nanocomposites", Annu. Report IEEE-CEIDP, No. 4-2, pp.314-317, 2004.
- [16] J. Sato, O. Sakaguchi, N. Kubota, S. Makishima, S. Kinoshita and E. Kaneko, "New Technology for Medium Voltage Solid Insulated Switchgear", IEEE-PES Transmission and Distribution Conf. and Exhibition 2002, Asia Pacific, Vol. 3, pp.1791-1796, 2002.
- [17] C. Zilg, D. Kaempfer, R. M?lhaupt and G. C. Montanari, "Electrical Properties of Polymer Nanocomposites Based upon Organophilic Layered Silicates", Annu. Report IEEE-CEIDP 2003, No. 6-5, pp.546-550, 2003.
- [18] P. C. Irwin, Y. Cao, A. Bansal and L. Schadler, "Thermal and Mechanical Properties of Polyimide Nanocomposites", Annu. Report IEEE-CEIDP, No. 2B-14, pp. 120-123, 2003.

## 저|자|약|력



성 명 : 안준호

◆ 학 력

- 1992년 광운대 공대 전기공학과 공학사
- 1996년 광운대 산업정보대학원 전기공학과 공학석사
- 2005년 광운대 대학원 전기공학과 공학 박사

◆ 경 력

- 현 재 흥익대 과학기술연구소 연구원