

## 고분자 절연재료의 응용과 기대



**박대희**  
원광대학 교수



**김현후**  
두원공대 교수

### 1. 서 론

절연재료는 고분자재료, 물성공학과 전력기술등과 함께 어울어져 발전되고 있다. 우리나라의 절연재료의 연구는 1980년대를 전후로 하여 후반부터 대학에서 많은 연구가 진행되어 지난 몇 년동안은 활발한 연구의 전성기 였다고 보아도 과언이 아니다. 그러나, 현재에는 타 재료분야에 비해서 오히려 쇠퇴되어 가고 있는 느낌이 든다. 그렇지만 전기·전자공학이 존재하는 한 절대적으로 필요한 재료라고 생각되며, 꾸준하게 연구와 개선이 요구되는 기반기술이다. 이와같은 관점에서 2000년 특집으로 "고분자 절연재료와 설계기술"에 관한 주제는 대단히 큰 의미로 부여하고 싶다.

절연재료는 반도체나 많은 기능성을 갖는 재료에 비하여 새로운 재료들은 아니지만 꾸준하게 전기전도, 절연파괴, 유전특성등 같은 시험평가를 중심으로 많은 연구를 하여 왔으나, 아직도 해결하고, 개선 되어야할 과제들이 많이 남아 있는 실정이다. 특히, 최근에는 극저온, 초고온, 방사선, 우주공간등과 같은 환경에서도 절연성을 유지 할 수 있는 재료, 반도체 소자에서 박막절연과 초고주파대역에서 손실이 낮은 절연재료등에 관한 연구가 주목되고 있다.

지금까지 절연재료의 연구개발은 기존의 고분자재료를 가능한 활용하여 왔으며, 어떠한 면에서는 외국에서 사용하고 있는 재료를 시험평가로서 확인하고 사용하여 왔다고 해도 과언이 아니다. 이와같은 지난 연구들은 21세기에 요구되는 새로운 재료를 개발하는데 많은 기반이 되었으며, 준비기간들이었다고 위로를 해본다. 본 원고는 고분자 절연재료의 전기·전자에서의 응용분야와 기대되는 연구에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 절연재료의 전기·전자에 응용

절연재료는 전자절연과 전기절연으로 구분하여 볼 수 있으며, 전자는 박막의 절연상태이고, 후자는 벌크의 절연으로서 각각 구분되어 설명 할 수 있다. 여기에서는 주로 전력용 기기등의 절연재료등을 대상으로 하며, 재료의 형태에 따라서 기체, 액체, 고체등으로 구분되며, 고체절연 및 복합절연으로 구분된다. 많은 연구는 고체절연에 관한 정지상태의 상을 중심으로 진행이 되고 있으며, 최근에는 복합재료에 관한 구조적인 특성을 중심으로 진행이 되고 있다. 우선 전자절연은 전력기기의 분야는 아니지만 고전계하에서의 절연으로서 전력기기의 절연에서 일어나는 많은

현상을 지니고 있다.

## 2.1 전자절연

전자기기는 위성통신으로부터 반도체의 소자에 이르기 까지 폭넓게 사용되고 있으며, 고기능성화, 다기능화, 소형경량화, 다양화가 요구되고 있다. 따라서, 이들에 사용되는 전자절연은 고속 대용량, 수명의 다양화등에 만족되는 성능재료와 소자에 절연후 장기신뢰성에 있다. 공통된 과제를 요약해 보면, 절연박막의 고전계화, 기능성 박막재료 및 제조공정, 플라스틱봉입재료의 응력해석·신뢰성해석, 고밀도 다층 프린트기판재료(내열·저유전율), 회로형성기술, 대방전기구와 제어, 박막의 공간전하해석등이 있다. 전자소자의 절연기술은 박막으로서 정전용량의 제어와 사용전계가 수 MV/cm로 고전계에 견디는 재료의 개발이 필요하다. 따라서 이들의 박막의 전기전도와 절연파괴구에 관한 새로운 검토가 필요하다.

또한 최근에 LB법으로 수Å정도의 초박막이 가능한 것으로 내열성과 기계적인 특성등을 확인하고, 전자소자의 보호막이나 층간절연으로서 응용이 기대되고 있다. 전자절연의 프린트 기판에서 특히 요구되는 내열성과 저열팽창성이 있다. 또한 신호의 고속화와 함께 프린트 기반의 배전길이의 단축과 절연층의 저유전율화가 필요하고, 이를 위한 프린트 기반의 고밀도화와 다층화 및 고주파 유전율이 낮은 고분자 재료들이 개발되고 있다. 이와같은 전자재료는 박막화와 유기고분자로 재료가 바뀔에 따라서 장기적인 신뢰성이 문제로 되고 있다. 수 MV/cm 정도의 높은 전계강도하에서 사용되어지는 박막은 당연히 열화가 되는 것으로 이와같은 원인과 현상을 규명하고자, 계면하에서의 공간전하의 형성과 거동을 측정하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 전자절연의 사용조건은 가혹화 되어져 방사선, 고온, 다습, 고온도차등과 같은 악조건하에서 대응하는 박막재료의 개발도 요구되고 있다. 그외에도 유기분자가 갖는 기능을 이용하여 새로운 분자전자소자의 실현을 위하여, 분자소자의 구조, 유기분자 재료설계 및 유기 박막기술 등에 관한 연구가 주목이 되고 있다.

## 2.2 전기절연

전기절연은 전력기기와 케이블을 대표하는 것으로 전력계통의 고전압화와 대용량화와 함께 절연재료의 선택이 중요하다. 전기 절연재료의 추세는 이미 무기계에서 유기계로 변하고 있는 추세로서 이를 위한

많은 신뢰성의 연구가 진행 되어지고 있다. 여기에서는 전기절연에 대하여 특히 고체절연을 사용하는 대형회전기, 대형변압기, 전력케이블, 전력용 콘덴서, 옥외용 애자등에 관한 절연종류와 과제등에 대하여 소개를 한다.

### 2.2.1 전력케이블 절연

케이블의 구분은 통신, 전력, 제어등으로, 재료는 도체, 절연체, 보호층으로 구분되고 있다. 최근에 전력케이블의 절연재료에 다양하게 요구되어지는 기능은 고전계성 절연, 내흡습성재료, 난연성, 내열성등이 있다. 고전계성 절연은 저유전특성과 함께 전력케이블의 compact화 즉 절연두께의 저감화, 내흡습성 재료는 전력케이블의 지중화에 따른 신뢰성을 향상할 목적, 난연화는 전력케이블의 안전성을 강화하기 위하여 내화, 저독성, 저연화, 비할로젠 재료를 요구하고 있다. 뿐만아니라, 특수 사용환경에 대응하기 위한 내열성, 내한성, 극저온재료, 내방사능 재료 등이 개발이 되고 있다. 이와같이 전력케이블에 절연특성은 다기능화가 되어지고 있으나, 실제 케이블에 적용하기까지는 압출 가공기술이 더욱 중요하다.

전력케이블의 주요 당면과제로서 절연층과 반도체층간의 계면현상으로 초고압화 됨에 따라서 더욱 중요한 문제로 언급되고 있다. 뿐만아니라, 이종의 절연재료를 이용하여 절연성능을 향상시키는 장점도 있으나, 반면에 이들의 계면에서 많은 절연사고가 예측되는 것으로 이를위한 많은 개선기술이 제안되고 있다.

### 2.2.2 회전기기 절연

회전기기는 극저온, 300℃이상의 고온, 기타 각종의 특수한 환경하에서 운전하는 기기가 개발되고 있다. 이와함께 각각의 사용조건에 적합한 절연재료의 개발이 요구되고, 종래의 절연보다 성능을 향상시킨 절연, 소요기능에 적합한 합리적인 절연, 생산성이 높고, 공해에 문제가 되지 않는 절연재료로서 에폭시를 중심으로 개발이 되고 있다. 또한, 초전도 발전기의 개발과 함께 제자권선의 절연을 향상시키기 위한 냉각성능이 우수하고, 큰 전자력·원시력을 받아도 견고한 지지력을 갖는 구조적 절연이 요구되어, 극저온특성이 우수한 냉각용 고강도 FRP와 고강도 절연테이프등이 사용되고 있다. 이와같은 제자권선은 에나멜권선에 에폭시 수지를 함침시키는 방식이 채용되고 있다.

고온기기에 있어서 유기절연재료에서는 얻을 수 없

는 300℃이상의 고온에서 사용되어지는 회전기기가 개발되어져, 내열성을 지니는 절연시스템으로서 실리 콘수지, 합성불소수지, 내열성 글라스섬유등이 사용되고 있다. 특수한 환경으로서 전압, 열, 방사선, 수압등의 스트레스가 단독 혹은 복합적으로 가해져서 열화를 일으킨다. 이를 위한 폴리에칠렌 절연권선에 의한 신절연시스템이 채용되고, 심해특수절연, 고진공절연등 점점 더 가혹해 지는 환경에 대응한 절연시스템의 연구와 각 조건에 대응되는 절연재료의 선택도 중요한 과제이다.

### 2.2.3 변압기 절연

변압기는 송전계통의 격상에 따른 변압기 절연의 대응, 대도시의 지하 변전소용 대용량 고전압 불연변압기, 신뢰성을 갖는 소형경량화를 위한 절연기술, 절연파괴에 의한 정전사고를 막기 위한 진단기술등이 요구되고 있다. 이와같은 필요성에 대응한 절연재료 기술은 다음과 같다. 변압기의 코일간에 프레소보드와 절연유로 채워져, 각각의 유전율의 차에 의해서 절연내력의 부담이 달라져 국부적인 절연파괴가 복합적으로 전체의 내력을 결정하게 되므로, 이같은 문제점을 보완하기 위하여 프레소보드의 비유전율을 대폭적으로 저감시키면, 전절연시스템의 절연내력을 향상시킬 수 있어, 저유전율화의 연구가 시도되고 있다.

불연과 난연은 절연재료기술의 분야에서는 엄밀하게 구분되고 있으며, 전자는 어떠한 경우에도 타지 않는 것을 말하며, 난연은 타기는 하나 타기가 어려운 것을 나타내며, 인구 밀집지역 대도시에서는 안전성의 점에서 불연성 절연을 갖는 변압기는 PBT, PPS 필름을 갖는 불연절연이 이용되고 있으며, 특히 불연성 변압기 절연은 합성절연재료를 전면적으로 사용하는 새로운 절연 시스템분야로서 이를 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

### 2.2.4 절연 개폐장치

개폐장치의 절연기술은 SF<sub>6</sub> 가스와 도체를 지지하기 위하여 에폭시 스페이서 혹은 FRP등으로 구성되어져 본질적인 재료의 변화는 없었다. 그러나 절연구조면에서는 전해해석을 이용한 절연설계로 인하여 절연구조적인 합리화가 현저하게 이루어졌다. 이같은 결과는 초고압에서도 도체를 3상일괄형으로 설계가 되어지고 있다. 개폐장치에 있어서 새롭게 요구되는 것은 변압기와 마찬가지로 초고압화에 대응하는 절연설계와 기존에 사용되고 있는 고가의 SF<sub>6</sub> 가스

를 대체하는 저렴한 고절연성 새로운 가스절연 매체의 개발, 또한 시스템의 기기이기 때문에 사고를 사전에 정확하게 예측하는 기술이 주목되고 있다.

또한, 절연재료 기술면에서 고체절연재료의 연구는 장치내에 입자가 혼입하여도 절연내력저하를 일으키지 않는 신기술과, 절연진단으로 사고를 정확히 사전에 예방하는 기술이다. 또한 대용량·초고압용 차단기를 위한 에폭시 스페이서의 내열온도를 향상기술이 주목되고 있다.

### 2.2.5 전력용콘덴서

고전압에 콘덴서는 박막전극과 합침되는 절연지간의 절연기술에 의해서 가능하였다. 콘덴서에 있어서 절연재료에 요구되는 사항은 유전체손실에 의한 발열을 저감시키고, 소형경량화, 불연 및 건식화에 있다. 이같은 필요에 의해서 유전체가 종이로부터 합성 플라스틱필름화가 되고, PP 필름을 사용함으로써 수 kVA의 초소형화가 달성되어졌다. 또한 콘덴서의 층간에 국부적인 절연파괴가 일어나도 자기회복이 이루어지는 알미늄 증착 전극이 활발하게 사용되고 있다. 건식화 및 불연화는 안전성이나 무보수의 점에서 큰 주류를 이루고 있으며, 플라스틱필름과 박막세라믹과 같은 신재료가 콘덴서의 새로운 기능을 발휘에 영향을 미치고 있다.

### 2.2.6 옥외용애자

애자로서의 전기적절연, 기계적 지지기능을 지니며, 내후성, 경제성을 만족하는 일반적인 재료는 자기이다. 자기재료의 미세 구조를 이용하여 애자의 고강도화, 고신뢰도화에 크게 이바지하고 있다. 또한 자기재료는 고주파절연, 고온도절연등의 특수용도에도 이용되고 있다. 최근에는 고분자재료로서 옥내용만이 아니라 옥외용 애자에 응용이 되고 있다. 옥내용애자, 붓싱, 가스절연기기용 절연스페이서등 전력기기용 각종 부품에 고분자재료가 사용되며, 특히 비스페놀계 에폭시, 고무계가 넓게 사용되고 있으며, 고분자애자에 관련된 국제규격화가 제정되어지고, 미국, 유럽등에서는 일부 사용이 되고 있다.

한편 배전용, 송전용 피뢰기용 외함용 애자등, 전기적, 기계적문제가 적은 부분에 EP 고무가 사용되고 있으며, 실리콘, 에폭시등이 사용되고 있다. 일반적으로 실리콘고무의 우수성은 이미 잘 알려져 있으나 EP고무에 비하여 경제성이 낮아, 일부 특수한 경우를 제외하고는 아직 상용화가 이루어지지 않고 있다. 이

같은 고분자 재료가 자기애자와 같이 옥외용으로 사용되기 위하여 재료의 평가는 ASTM의 전기적, 기계적, 물리적, 화학 및 환경특성의 평가와 함께 바람직한 재료를 선택하기 위하여 UV, 표면의 흡습 및 젖음, 트래킹 및 침식, 곰팡이특성등을 검토한다. 아직도 옥외용 애자의 재료로서 고분자를 사용함에 있어서 장기 신뢰성을 확보하는데 많은 노력이 필요하다.

### 3. 요구성능과 절연설계

절연재료에는 많은 성능은 전기적인 성능이외에도 기계적, 열적, 화학적등이 있다. 또한 실용상 전기적인 특성보다도 다른 물리적, 기계적인 특성이 요구되는 경우도 있다. 절연재료의 일반적인 특성은 체적저항, 유전율, 유전체손, 내전압, 기계적 강도, 내열성, 비중, 탄성계수, 열팽창계수, 가공성, 내구성, 무독성, 경제성등으로 구분 할 수 있으나, 측정기술의 진보와 함께 전하의 거동을 추적하는 열자극전류, 공간전하등과 같은 평가하는 항목이 제안되고 있다. 또한 고분자 절연재료를 옥외용으로 사용하기 위하여 표면의 절연상태를 평가하는 아크특성, 내트래킹성 시험법이 많이 이용되고 있으며, 장시간 내후성을 평가하기 위한 시험조건 및 방법등에 관한 많은 방법이 제안되고 있다. 그외에도 전력케이블의 절연재료의 트리 시험법등이 ASTM에 제안되고 있으나, 참고시험용으로 이용되고 있다.

이와같이 고분자 절연재료의 성능을 평가하기 위한 시험방법 및 평가항목이 있으나, 실제적으로 절연 설계에 응용되는 항목은 절연파괴강도(상용전압과 충격전압)과 내열성이다. 절연파괴강도를 이용한 절연설계는 절연파괴강도(E)와 일정전압하에서 절연파괴시간(t)을 각각 측정하여, 각각의 E, t를 통계적으로 최저 절연파괴강도와 수명계수를 구하여 절연두께를 산정 결정을 한다. 절연재료의 내열성을 이용한 절연설계는 고분자의 열열화를 화학반응 속도론을 이용하여 연속사용 온도하에서 수명을 각각 결정한다. 그외에 절연설계는 절연물의 구조적인 즉 기계적인 특성과 열팽창등을 고려하여 절연물의 크기 및 구조등을 결정한다.

절연재료의 유전특성은 장기 신뢰성을 고려한 시험항목이며, 절연파괴강도로서 이와같은 특성이 직접적으로 평가되며, 열(온도)적인 변화에 크게 영향을 받는다. 유전특성의 평가에 있어서 사용되는 전극(반도전층)의 종류에 따라서 많은 결과의 차를 나타내며, 절연설계에 직접적으로는 이용을 되지 않는다. 그러나, 통신기기에 이용되는 절연재료에는 유전특성은 주

파수에 직접적으로 관련되기 때문에 특히 유전손실의 주파수 의존성에 중점적인 평가를 한다. 또한 고분자 절연재료에 대한 신뢰성 평가(신뢰성-수명)는 내열특성(T)-수명(t)과 전기적인 스트레스(E)-수명(t)로서 상대 평가에 의해서 비교하여 각각을 추정한다.

### 4. 신 절연재료의 가능성

절연파괴강도가 높은 고분자 절연재료를 생각해 보면, 전자적 절연파괴에 있어서 절연파괴 현상은 절연재료중에 자유전자(혹은 자유정공)수의 급속한 증대로 이루어진다. 전자수의 증대를 갖는 것은 고속전자의 격자(재료를 구성하고 있는 원자)와의 충돌에 의한 전리이고, 전리의 비율은 전자에너지의 증대와 함께 급속하게 증대한다. 따라서 전자수의 증대를 억제하기 위해서는 주행중의 전자의 산란을 증가시키고, 전자가 전계에서 얻은 에너지를 보다 효과적으로 감쇄시키면 좋다. 전자가 전도대(혹은 정공이 가진 자대)에서 산란되어지는 원인으로서는 주기포텐셜장의 산란, 격자진동, 불순물등이 주된 것으로, 극성기를 포함하는 재료나 결정화도가 낮은 재료의 파괴치가 높아질 것으로 기대된다. 이와같은 예로서 극성기를 갖는 고분자는 산란기로서 역할을 하여 캐리어수를 억제함으로써 절연파괴강도가 증가하며, 유극성 고분자에 있어서 결정화도가 파괴강도에 미치는 것으로 결정화도가 높은 재료가 파괴치가 높아지는 결과는 전자(혹은 정공)이 파괴의 주역을 담당하는 경우로 설명을 할 수 있다. 또한 절연파괴강도를 향상시키기 위하여 계면 활성제에 의한 폴리에틸렌의 라멜라 배향의 제어, 에틸렌-스틸렌공중합체, 직류케이블용 고밀도폴리에틸렌, TiO<sub>2</sub>등을 첨가한 저밀도 폴리에틸렌등을 열거 할 수 있다.

다음에는 고분자의 내방사선성은 분자구조에 의존하는 것으로, 즉 분자구조와 내방사선성과의 관계는 ①분자중에 -CH<sub>2</sub>-CRR'-CH<sub>2</sub>-(R, R' : 탄화수소, F, Cl등)로 되는 구조를 갖는 고분자는 붕괴하기 쉽다. ②중합열이 작은 고분자는 열분해하기 쉬우며, 방사선에도 붕괴하기 쉽다. ③분기를 갖는 쇠산탄화수소는 붕괴하기 쉽다. ④주쇄-C-O-의 반복을 하는 고분자는 붕괴하기 쉽고, ⑤분자중에 벤젠환을 갖는 고분자, 특히 주쇄를 구성하는 것이 아니고, 주쇄에 매달린 벤젠환을 갖는 고분자는 내방사선성이 강하다. ⑥카이본블랙이나 글라스섬유등의 첨가제를 넣으면 내방사선성이 향상된다. 내방사선성의 향상에 대하여 분자중의 벤젠의 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 내열성을 위하여 벤젠환이나 복소환, 이

미드결합을 지니면 향상이 되며, 대칭성이 큰 벤젠환 등이 주쇄에 연결되면, 고융점, 고강도의 특성을 나타내고, 이와같은 구조를 갖는 고분자를 흔히 엔지니어링 플라스틱이라 하며, 최근에 응용되는 분야는 우주선 및 우주공간내의 정지위성에 복합 절연재료로서 응용되고 있다. 또한, 고분자의 결정구조를 분자배열을 제어함으로써 새로운 기능의 부여는 고내열성, 기계적인 강도, 치수의 안정성, 유동성등이 있으며, 주쇄중에 벤젠환과 비스페놀을 포함하는 고분자에서 흔히 얻을 수 있다.

이와같이 고분자절연재료의 새로운 가능성은 분자구조적인 관점에서 접근을 하였으나, 무기재료에 비하여 내열성, 난연성, 내방사선성, 내후성, 기계적인 특성이 뒤진다. 따라서 고분자에서 얻을 수 없는 기능은 고분자와 무기재료를 복합재료화하여 얻는다. 이와같은 고분자/무기복합재료는 전력기기등의 절연재료로서 많이 응용이 확대되어가고 있다. 예를 들면, 에폭시수지, 혹은 불포화폴리에스테르수지를 이용하여 열팽창율, 기계적강도, 난연성의 개선 뿐만 아니고 주변의 환경과 조화를 이룰수 있는 착색등, 다양한 목적을 위하여 무기계충진제, 첨가제등이 이용되고 있다. 많은 분야에서 사용되고 있는 무기섬유강화플라스틱은 글라스섬유의 종류, 함유량, 수지의 종류, 성형방법에 따라서 다양한 절연구조물을 개발할 수 있으며, 송배전용 플라스틱폴, 초전도·극저온기기용 고강도저수축 고체절연재료의 개발이 되어 사용되고 있다.

## 5. 맺는말

전기·전자절연재료에 요구되는 다양한 성능은 다음과 같은 조건을 만족시키고, 고분자 절연재료의 개

발과 응용을 능동적으로 이루어 나가야 할 것으로 생각한다.

① 전기에너지의 수요의 확대와 함께 관련기기의 고전압화·대용량화, ② 전자부품의 고밀도집적화에 의한 고전계절연 설계가 요구되어지고 있다.

③ 사용환경의 복잡, 가혹화 ④ 신뢰성의 향상 및 환경친화형등의 제문제가 제시되고 있다. 특히 고분자 재료는 전기·전자 절연시스템내에서 사용이 확대되어 지고 있는 추세로 이를 위한 분야별 공동연구가 필요하게 될 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. W. Tillar Shungg "Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials" IEEE Press, Second Edition, pp. 13-22, (1995).
2. 大木 義路 "新絶縁材料의 要求性能과 新材料의 開發" 日本電氣學會雜誌, pp. 354-359. Vol. 110, No. 5(1990).
3. Robert Ross "Dealing with Interface Problems in Polymer Cable Terminations" IEEE EI Magazine, pp. 5-9, Vol. 15, No. 4(1999).
4. John H. Moran "High Voltage Bushings" Hodgins Printing Co., Inc pp. 47-57, (1989).
5. D. Kind, H. Karner "High-Voltage Insulation Technology" Friedr. Vieweg & Sohn, pp. 97-158, (1985).
6. Ravi S. Gorur "Outdoor Insulators" Ravi S. Gorur, Inc pp. 179-194, (1999).
7. D. McAllister "Electric Cables Handbook" Granada, pp. 495-524, (1981).