

나노절연재료

중전기용 나노절연재료의 기술개발과제 및 발전 방향

| 안준호, 동향정보분석팀



미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/과급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로써 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 심진 부동산소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 충전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성항법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동·공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

Contents

1	서론	중전기기 산업 현황	05
		나노 절연재료의 기술 개요	06
		이슈 분석의 필요성	08
2	본론	국내외 연구 개발 동향	10
		국내외 산업 동향	14
3	이슈분석	나노절연재료의 개발 과제	19
		중전기기용 나노절연재료의 발전 방향	22
4	결론		27
	참고 문헌		28

서론

1

- | 중전기 산업 현황
- | 나노 절연재료의 기술 개요
- | 이슈 분석의 필요성

1 서론

- 중전기기는 기존의 전원용 기기인 발전기, 변압기, 차단기, 개폐기 등에서부터 산업용 전기기기, 전동력 운반설비, 전기부품소자 등에 이르기까지 다양하며, 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 발전하였음.
- 최근 중전기기에 사용되는 절연재료는 특고압, 대전류를 견뎌내야 하며, 급작스런 고장 발생시 또는 수명연한이 되었을 경우 일어나는 비용 손실이 높아 제품의 신뢰성이 높아야 함. 따라서 절연재료의 성능 및 수명의 향상이 절실히 필요한 실정임.
- 중전기기 관련 연구는 초고압 송전기기, 변압기, 변환기기, 차단기, 송배전 전력선, 송배전 운전기기 등 중전기기와 전기이용기기 등을 제작하는 기술을 포함함. 이 중 전력용 신소재 기술 로드맵 상의 중장기 기술 목표로 ①고효율, 장수명, 환경친화적 전력생산설비 및 재료 기술 개발, ②고효율, 저공해 대체 에너지 및 신재생 에너지 재료 기술 개발, ③ 초고압, 대용량, 저손실 송전 및 에너지 저장/변환 재료 기술 개발, ④인간 중심의 전기환경 개선 재료 기술 개발, ⑤절전, 절약 에너지 및 미래형 에너지 소재 기술 개발 등을 목표로 연구개발에 집중하고 있음.[1]
- 근래에는 나노기술의 발전과 더불어 중전기용 나노절연재료의 개발이 기대되고 있으며, 이미 몇몇 논문에서는 나노기술을 이용한 중전기용 재료의 성능향상이 보고되고 있음.
- 하지만 수입에 의존하는 국내 중전기기 시장의 현실을 볼 때, 신기술을 활용한 제품의 개발을 주도할 기술주도적 기업의 역할이 미미하며, 또한 선도적 기술개발이 뒤쳐질 경우, 중국이나 동남아시아 등 후발국에 추격 허용이 염려되는 상황임.
- 따라서 국내 중전기용 나노절연재료의 개발은 세계적으로 나노기술의 발전을 선도하고 있는 국내 연구개발 능력을 중전기기에 적용, 선진국과의 기술격차를 줄이면서 후발국들과의 기술격차를 벌이는데 중요한 역할을 수행할 것으로 예상됨.

1 서론

| 중전기기 산업 현황

- 세계 중전기기 제품의 무역 시장 규모는 2002년말 6,088억달러이며, 1998년 이후 연 평균 6.6%의 성장률을 기록하고 있음. 지역별로는 유럽시장이 2,150억달러, 아시아 시장이 2,096억달러, 아메리카 시장이 1,336억달러 규모의 시장을 형성하고 있음. 특히 아시아 지역은 2000년 이후 중국 시장의 전력난 심화로 인한 신규 발전설비의 증축과 동남아시아 지역의 경제성장에 힘입어 급격한 성장을 보이고 있음.[1]
- 중전기기는 국가 기간산업으로 산업분야의 동맥과 같은 역할을 함. 정부에서도 WTO의 자유무역협정(FTA), 기후변화협약 등 국내외 환경변화에 따라 전력의 생산에서부터 전송, 분배에까지 이르는 중전기기의 응용은 각 과정에서의 손실을 최소화하고, 효율을 극대화 하는 방향으로 진행하고 있으나, 기존의 기술로는 산업의 발전에 따른 기술의 추격이 한계에 다다른 상황임.
- 따라서 중전기기의 다양한 분야 중 중전기기용 나노절연재료 분야는 기존의 절연재료분야를 한 단계 업그레이드하여 나노절연재료에 관한 기초적인 물성 연구가 필요한 실정임. 이러한 기초적인 물성연구를 바탕으로 신소재 및 기존 재료의 재설계를 통해 보다 효율적인 전기기기를 제작할 수 있으며, 최근 추세의 연장선상에서 전기기기의 콤팩트화에도 큰 효과를 얻을 수 있음.
- 중전기기에는 높은 전류와 전압으로 인해 절연재료의 성능이 중요한 역할을 차지하며, 이에 따라 높은 성능의 절연재료의 제조를 위해 다양한 절연재료가 사용되고 있음. <표 1>에서는 중전기기에 사용되는 절연재료들을 정리하였음.

[표 1] 중전기기용 절연재료

기기명	부품명	재료명
변압기	고압 리드선	고점도 크래프트(KRAFT)지, 바니시 클로스, 펄프 몰드, 전계완화용 도전지
	코일 끝 부분	크래프트지, 펄프 몰드
	코일 사이	프레스 보드 접착 절연통, 프레스 보드
	코일	고밀도 크래프트지
	코일지지	점압축 프레스 보드, 점화 나무
	절연유	광유, alkyl-benzene
교류기용 회전기	고정자	코일절연(마이카 테이프, glass mica tape) 접착제, 함침제(Epoxy, 불포화 Polyester) 코일 끝 부분(실리콘 고무, 폴리우레탄) 코일지지, 고정재(유리 섬유 강화 플라스틱) 소형 코일간의 분리(polyester)

[표 1] 충전기기용 절연재료 (계속)

기기명	부품명	재료명
교류기 용 회전 기	회전자	코일 절연 (마이카, 아스베스트, 에폭시 수지 유리 성형품) 슬롯 절연(유리 기재 에폭시) 턴 절연(반경화 에폭시 함침 유리 클로스)
	소형 교 류기	E종(120℃) B종(130℃)(polyester-enalmel), 알키드 바니시, 불포화 폴리 에스테르 함침, polyester film) F종(155℃)(polyamide-imide, polyester-imide, 불포화폴리에스테르, 에폭시, 폴리에스테르 이미드, 바니시 함침, 아라미드(슬롯), 밀폐 압축기용(우레탄, 에폭시, 멜라민 변성, 폴리이미드, 폴리에스트르 이미드 이중 피복선), 수중용(가교 폴레에틸렌)
직류기 용 회전 기	전기자	코일절연(glass mica, polyimide, polyethylene 에폭시, 폴리사불화 에틸 렌) 바니시 처리(에폭시, 용제계 바니시, 코일 에나멜) 코일 끝 부분(glass mica) 슬롯 절연(폴리에스테르, 폴리이미드)
	계자 코 일	유리 테이프, 실리콘 바니시
	철심	glass mica
	정류자판	mica
전철용 기기	주전동기	코일 절연(폴리아미드, 폴리이미드) 턴 사이(폴리아미드) 대지(폴리이미드) 바니시 처리(F종 무용제계 에폭시)
	변압기	절연유(실리콘유), 폴리아미드지
기체 절 연기기	기체 절 연	SF ₆ , N ₂ + CO ₂
	스페이서	알루미나 충전 에폭시
애자	애자, 부 싱	장석자기, 알루미나 함유 자기, 유리, 결정화 유리, 고분자 애자(유리기재 에폭시, 폴리사불화 에틸렌)
	차 단 기 소호판	특수 자기(실리콘)
	배 전 용 스페이서	유리 세라믹

[표 1] 중전기용 절연재료 (계속)

기기명	부품명	재료명
콘덴서	절연지	크래프트지, 아세틸렌화지, 포르말화지, 아민 첨가지
	올레핀계 필름	폴리에틸렌, 폴리프로필렌
	스티렌계 필름	폴리스티렌
	에스테르계 필름	폴리에틸렌 테레프탈레이트, 폴리카보네이트, 폴리부틸렌 테레프탈레이트
	에틸계 필름	폴리술폰, 폴리에틸술폰
	염소함침계 필름	폴리염화비닐, 폴리염화비닐리덴
	불소함침계 필름	폴리염화비닐, 폴리염화비닐리덴
	질소함침계 필름	폴리아미드, 폴리아미드이미드
	기타	마이카, 유리, 산화티탄, 티탄산바륨
	함침계	광유, 알킬벤젠, 알킬나프탈렌, 실리콘유, 에스테르유, 파라핀
반도체 부품	기판	고분자(페놀, 나일론, 폴리에스테르, 폴리사불화에틸렌, 에폭시) 유리 세라믹(알루미나, 베릴리아, 스테아타이트, 스피넬) 단결정(사파이어, 수정)
	passivation (불활성화)	실리콘 산화막, 질소 실리콘, 산화알루미늄
	isolation	이산화실리콘, 실리콘 카바이드
	packaging	고분자(에폭시, 실리콘, 페놀, 아크릴) 유리(경/연질 유리, 유리 세라믹, 저융점 유리) 세라믹(알루미나, 베릴리아, 스테아타이트)

자료 : 전기전자 및 정보통신 재료공학, 이준웅 등 공저. 2002년, p.167.

1 서론

| 나노 절연재료의 기술 개요

- 21세기에 들어 나노과학은 원자나 분자 단위의 활용에서 벗어나 나노 크기에서 발생하는 새로운 물성을 연구, 개발하여 종래와는 전혀 다른 특성을 이용하는 새로운 영역이 되었음. 나노 기술은 단지 신기술이 아닌 산업의 흐름을 바꾸는 새로운 패러다임으로 등장했다고 할 만큼 우리의 생활에 다가오고 있음.
- 그 중에서 나노절연재료는 아직 많은 연구자들의 관심이 미치지 않은 미개척 분야임. 특히 중전기기용 절연재료는 중전기기가 갖는 사회적 기여나 기기에 사용되는 절연재료의 중요성을 감안할 때, 반드시 연구되어야 하고, 그 연구 개발의 목적이 뚜렷한 분야임.
- 나노절연재료는 넓게는 단분자에서 고분자까지 절연체를 이용한 응용분야를 나타내며, 좁게는 절연 성능이 뛰어난 고분자 계열에 여러 나노 재료를 혼합한 복합재료를 일컫음.
- 중전기기용 절연재료는 기계적, 전기적, 열적으로 우수한 특성을 가져야 하는데, 기계적으로 인장강도, 굴곡강도, 역률, 경도, 내마모성, 가역성 및 가공성 등이 우수한 재료를 사용하여야 함.
- 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 인식되어야 함. 전기적으로는 절연내력, 내트리잉성, 내아크성, 내트레킹성, 부분방전 특성, 유전 특성 등을 파악하는 것이 매우 중요함.
- 현재 중전기기용 절연재료는 기체, 액체, 고체 상태의 다양한 절연재료를 사용하는데, 그 중 대표적인 몇몇을 소개하고, 그에 대한 문제점을 살펴보는 것이 필요함.
 - 현재 사용되고 있는 기체 절연재료를 살펴보면, 공기, 수소, 질소, SF₆, 프레온 가스 등이 있으며, 이들은 각각 특성에 맞게 사용되지만, 절연 성능이 우수한 SF₆나 프레온 가스를 많이 사용함. 그러나 이들이 분해되면 유독가스를 방출하기 때문에 사용이 제한적이고, 친환경적인 경향에 역행하는 이유로 최근 대체 재료의 개발이 추진되고 있음.
 - 액체 절연재료는 광유(Mineral Oil), 합성유, 실리콘유 등이 사용되며, 광유는 보통 C, H를 주성분으로 소량의 S, O, N를 포함하는 파라핀계와 나프탈렌계로 구분함. 이 중 실리콘유는 높은 전계강도와 내열성으로 H중 절연용으로 사용되어, 주로 차량용 변압기 절연유로 많이 사용됨. 그러나 액체 절연유는 독성 및 여러 가지 환경적 제약으로 사용에 문제점이 도출되고 있음.
 - 고체 절연재료는 유기질 고분자 재료와 무기재료를 주로 이용하고 있음. 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 됨.

- 고분자 열가소성 재료는 PE(고주파 케이블, 고전압 케이블), PP(콘덴서), PS(콘덴서), PMMA(실험용 절연지지물), PVC(전선, 코드), PVF(에나멜선용 바니시), PTFE(고주파용 절연, 내열절연), PET(콘덴서용 유전체, 회전기 코일절연), PC 및 Polyimide(일명 나일론, 전선 서스용) 등이 있음.
- 열경화성재료는 페놀수지(Phenol Resin-통신용 부품), 요소수지(Urea Resin-가전제품, 배선기구), 멜라민수지(Melamin-도료, 가전제품외장), 불포화 폴리에스테르수지(3.3~33kV급 옥내 전선로용), 에폭시수지(Epoxy Resin-몰드형 변압기 및 적층형, 주형 함침형지지 애자), 실리콘수지(Silicone Resin-H형 절연재료에 적합) 등이 사용되고 있음.
- 또 무기 고체재료로는 마이카(콘덴서, 회전기 코일이나 슬롯절연), 석영(고주파 절연물, 압전소자), 유리섬유(B종 이상의 기기절연에 사용), 자기(애자, 부상 등 전력용 기기)가 있고, 특수 자기로 알루미늄 자기(애자, 내열기기용 대형 애자), 벨릴리아 자기(금속의 열전도율과 같은 뛰어난 열전도도), 질화물 자기(고주파용, 내열용 절연재료)가 있음.

1 서론

| 이슈 분석의 필요성

- 산업에서 활용되는 중전기기는 현재 연간 약 18조원(10,780백만달러)의 생산량을 가지고 있고, 전선류를 제외한 대부분의 기기를 수입에 의존하고 있음. 기술수준은 선진국의 70~80% 수준으로 가공, 조립 기술은 선진국과 대등한 수준이고 극히 일부 부품을 제외한 대부분의 경우 국내 조달이 가능하지만 설계기술, 절연기술 및 소재기술 그리고 시험기술 등은 선진국의 50~70%에 불과한 실정임.
- 특히 고용량의 중전기기의 경우 고가의 제품을 수입에 의존하여 산업 의존도가 높은 실정이며, 향후 기술의 속박에서 벗어나기 위해 많은 노력이 필요함.
- 또한 중국 및 동남아 시장의 수출이 점차 기술격차가 좁아지면서 어려워지고 있으며, 이들 개발도상국의 저가의 역수입 효과마저 염려되는 상황임.
- 이에 대한 타개책으로 중전기기용 첨단 소재 기술의 도입으로 후발국가와의 기술격차를 벌이고, 나노기술에 대한 기술격차가 적은 상황에서 중전기기용으로 개발이 진행된다면 선진국과의 기술격차도 줄이는 효과를 얻을 수 있음.

본론

2

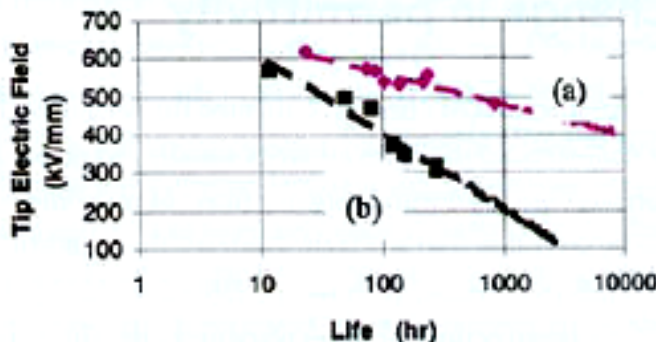
- | 국내외 연구 개발 동향
- | 국내외 산업 동향

2 본론

| 국내외 연구 개발 동향

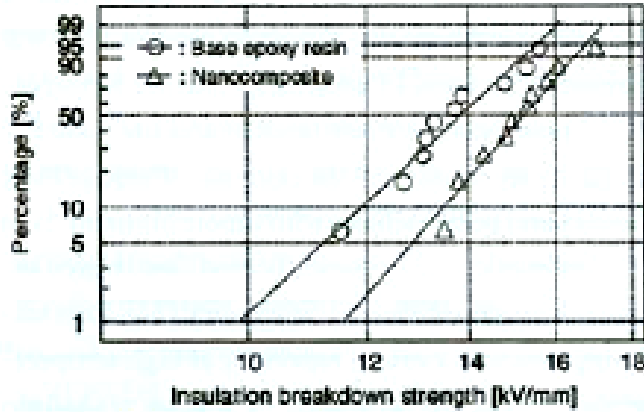
(1) 해외 연구개발 동향

- 1990년대 Okada에 의한 폴리이미드6/점토(Clay) 나노절연재료의 개발은 연구자들의 관심을 촉발시키며 나노재료를 이용한 다양한 충전기기용 절연재료의 개발이 시작되었음.[2] 초기 연구는 주로 나노복합재료를 이용하여 시료의 기계적, 열적 특성 향상을 보고하는 등 기초 물성연구에 집중되었음.
- 2000년에 접어들면서 PP, PE, Epoxy 등 다양한 고분자 기지에 SiO₂, TiO₂, Al₂O₃나 Layered Silicate, 점토(Clay), 마이카(Mica) 등 다양한 무기 재료를 이용한 나노복합재료가 개발되었음.
- 또 이전까지는 나노복합재료의 기계적 / 열적 특성에 대한 연구가 주를 이루었으나, Tanaka 그룹 등에 의해 나노복합재료의 기계적, 열적 특성 외에도 전기적 특성에 대한 연구가 진행되기 시작하였음. 이후 Imai나 Nelson 등에 의해 활발한 연구가 진행되면서 충전기기 및 전기기기에 응용이 가능한 나노절연재료의 개발이 속속 이루어지고 있음.
- <그림 2-1>과 <그림 2-2>는 에폭시/TiO₂의 AC 절연내력 특성과 절연과괴강도를 살펴본 결과로서, 기존 사용되던 마이크로 크기의 충전제보다 월등히 향상된 수명 향상과 절연과괴강도를 가져오는 것을 확인할 수 있음. 이는 기존의 마이크로 크기의 충전제를 사용한 절연재료에 비해 장수명, 고절연강도를 가지는 절연재료의 개발을 기대할 수 있음.
- 또한 Nelson[3]은 내전압성과 수명에 대한 나노 충전제와 마이크로 충전제의 비교를 통해 나노절연재료의 수명이 크게 향상됨을 보고하였음. Imai[4] 등은 기존 무충진 에폭시 수지와 나노복합재료의 절연내력을 연구를 통해 절연내력의 향상을 보고하였고, 이는 나노충진제가 기존의 무충진 에폭시보다 기계적, 열적 특성의 향상 뿐만 아니라 전기적 특성의 향상에도 기여한다는 것을 보여주었음.



[그림 1] 에폭시-TiO₂ 나노복합재료의 AC 절연내력 특성
(a) 나노충진제, (b) 마이크로 충전제

자료 출처 : T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006. p.27.



[그림 2] 에폭시 수지와 나노복합재료의 AC 절연파괴강도의 와이블 분포

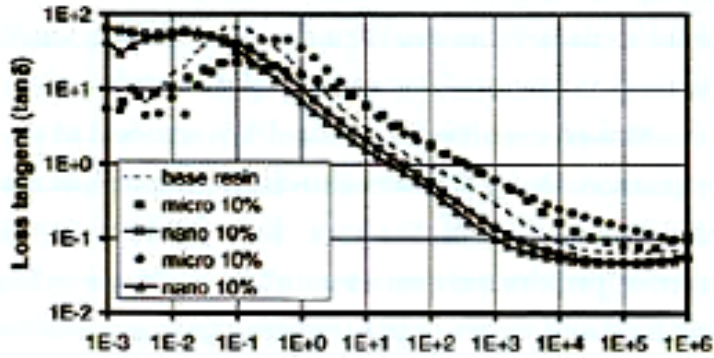
자료 : T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006. p.27.

- 그리고 <표 2-1>와 같이 에폭시 수지에 다양한 무기재료를 혼합한 나노절연재료에 대한 유전율을 측정하여 유전율이 비슷하거나 더 낮아지는 것을 발표하였음.
- 또한 Fothergill 등은 무충진 에폭시 수지와 마이크로 및 나노 크기의 나노절연재료를 제조하여 유전손실을 측정하여 그 결과를 <그림 2-3>과 같이 발표하였음.
- 또한 케이블의 절연에 활용하기 위한 다심코어 계면모델에 대한 개념이 등장하였고[9], 고분자(에폭시, XLPE, PP 등) 구조 내의 다양한 특성으로 절연내력, 코로나 저항, 기계적 강도 및 기존 충전제와 나노충진제의 비교를 통해 나노절연재료의 응용 가능성을 살펴보았음.

[표 2] 유전율에 대한 나노 충전제의 효과

	Epoxy-Silicate 20-100℃, 60Hz[5]	Epoxy-TiO2 23℃, 1kHz[6]	Epoxy-TiO2 200℃, >1kHz[7]	Silicate RT 50Hz[8]
Base Resin	4.1 6.1	5.68	>8.49	4.36
Nano	3.7 3.8	4.50	8.49	4.07
Micro	-	6.01	>Base Resin	-

자료 : T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006. p.28.



[그림 3] 293K에서 주파수에 대한 무충진, 마이크로 및 나노 크기 충전제의 유전손실

자료 : T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006. p.28.

[표 3] 나노절연재료의 응용

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

자료 : T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006. p.28.

- 현재 충전기기에 이용되는 고분자 재료를 이용한 나노절연재료의 개발은 초기 단계로서 기존 나노재료의 기반 기술을 활용하여 충전기기에 응용하고 있는 실정임.
- 하지만 충전기이용 나노절연재료에 필요한 여러 물성은 여타 다른 재료와 차이가 나고, 고용량, 대전류 등 높은 절연성을 요구하며, 이와 함께 연성, 내마모성, 내열성 등 기계적, 열적 특성이 우수해야 하는 까다로운 물성을 요구하고 있음.
- 고분자 기지에 나노충진제를 혼합한 나노절연재료의 경우, 향상된 절연강도와 수명으로 충전기이용 절연재료로서 활용가치가 높고 <표 2-2>에서처럼 발전기, 변압기, 케이블 등 고전압기기의 주절연재료로의 활용이 크게 기대됨.

(2) 국내 연구 동향

- 국내 나노절연재료의 연구 동향은 단적으로 이야기하자면 태동 단계라고 할 수 있음. 고분자공학, 화학공학 및 재료공학 등을 중심으로 나노복합재료의 물성 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 해외 연구에 비하면 아직 많은 숙제를 안고 있는 상황임.
- 특히 연구에 필요한 나노재료의 구입이 국내의 수요 부족으로 충분히 구하지 못해 높은 가격으로 외국에서 수입하는 실정으로 이에 대한 개선책이 필요하며, 국내 시장의 활성화가 필요함.
- 나노절연재료 또한 한전 전력연구원 및 전기연구원을 중심으로 하이브리드 절연재료 개발 및 나노절연유 개발에 박차를 가하고 있으나, 아직 연구 초기 단계로서 개발에 따른 응용 사례는 아직 미흡한 실정임.
- 또 학계에서는 중부대의 박재준 교수가 현재 연구 개발사업에 유일하게 참여하고 있는 실정이고, 기타 대학 연구실 차원에서 소규모의 연구 개발이 이루어지고 있는 실정임.
- 기업에서는 이제 겨우 나노절연재료의 개발에 관심을 가지고 있는 상황으로, 직접적인 연구개발의 참여나 기술개발로 이어지지는 않고 있음.
- 그러나 연구 초기 단계에서 상기 언급한 자료에서 보듯이 상당한 물성의 향상을 나타낸 연구결과가 발표되면서 기존의 중전기용 절연재료의 연구자들의 관심을 끌고 있으며, 기존의 연구 성과를 바탕으로 나노절연재료의 기술개발이 매우 활성화될 것으로 판단됨.

나. 나노절연재료 기술의 파급 효과

- 중전기용 나노절연재료는 다른 IT 및 디스플레이 등과 같이 나노기술을 활용한 첨단 실용화 제품에 비해 대규모 시장을 형성하지 않지만, 산업계에서 차지하는 비중은 무시할 수 없음. 국가 기간산업으로서 중요성을 감안한다면, 향후 산업의 균형적인 발전 및 자원의 낭비를 줄이고, 효율적인 사용에 기여할 중요한 분야임.
- 중전기기의 절연재료는 재료의 성능을 향상시키는 직접적인 요소기술로서, 선발 기술보유국과의 기술격차를 줄이고, 후발 기술개발국들과의 기술적 차이는 더욱 확대시킬 수 있는 일거양득의 기술임.
- 그리고 국내의 나노소재개발의 수요 창출을 유도, 국내 나노산업의 안정적 성장에도 기여함.

다. 국내외 기술 비교 개발

- 중전기기에 필요한 나노절연재료의 물성은 전기적, 기계적, 열적 특성으로 나누어 이야기 할 수 있음.
- 먼저 전기적 특성은 절연강도, 유전특성, 표면저항, 부분방전특성, 내트레킹성 등이 요구되며, 기계적 강도는 인장강도, 휨강도 등 다양한 특성이 필요함. 또한 열적 특성은 내열성뿐만 아니라 내기후성 등이 요구되어 다양하고 높은 성능이 요구되는 까다로운 기술 분야임.
- 나노절연재료의 제조는 현재 국내외적으로 세계 4위권의 기술을 가지고 있는 것으로 알려져 있음. 하지만 아직 재료에 적합한 활용을 위한 기초적인 설계 차원에서의 접근은 외국에 비해 상당히 미흡한 실정임.
- 또한 복합재료의 개발 기술은 일본이 주도하고 있고, 국내의 기술 개발 정도는 보통임. 중전기 분야에서는 시장 규모나 기업 규모로 비교하였을 때는 상대적으로 빈약한 실정임.
- <표 2-3>에서 보는 바와 같이 나노소재의 특성 평가 기술은 타분야에 비해 뒤떨어지지 않으나, 응용 가공기술의 경우 상당히 낮은 수준임.
- 전체적으로는 나노소재기술은 국가 주도로 집중 양성하여 세계적인 수준으로 평가될 수 있으나, 그에 비해 분야별 응용 기술이나 제품화는 상당히 뒤떨어졌다고 할 수 있음. 특히 중전기기의 경우, 절연재료의 개발에 필요한 자금이나 인력, 기업의 개발 능력의 부족으로 말미암아 선진국과의 격차가 더욱 벌어지고 있는 실정임.

[표 4] 고분자 나노복합체의 국내외 기술 수준 비교

분야	국내수준	외국수준
층상실리케이트 (정제, 합성)	매우 낮음	미국이 주도
유기화 반응	낮음	미국, 일본이 주도
나노복합체 제조 (혼합기술)	보통 (대학 및 연구소에서 활발)	일본, 미국이 주도
평가 기술	보통 (XRD, TEM, 기계적/열적 특성)	대학 등을 중심으로 활발히 연구
가공 기술	낮음	일본, 미국 등에서 가공 특성 규명
제품화 기술	매우 낮음	일본, 미국 등에서 자동차, 식품 포장재 등의 제품개발

자료 : 소대섭, 공업화학 전망, 제 6권, 제 2호, 2003. p.80.

2 본론

| 국내외 산업 동향

- 국내외 중전기용 나노절연재료의 개발은 활발한 개발이 진행되고 있지 못하고 있음. 이는 아직 나노기술의 메커니즘에 대한 연구가 완전히 이루어지지 않은 상황이라는 점과 중전기 시장에서 나노절연재료의 신뢰성 확보에 필요한 개발기간이 짧지 않다는데 그 원인이 있는 것으로 생각됨.
- 그러나 나노절연재료의 개발 및 산업의 활용은 이미 시작되어 2~3년 내로 국내외에 활발히 적용되어 사용될 것으로 예측되며, 이러한 활용을 위해 국내 산업체도 활발한 연구 개발에 적극적으로 참여해야 할 것으로 판단됨.

이슈 분석

- 3 | 나노절연재료의 개발 과제
- 3 | 중전기용 나노절연재료의 발전 방향

3 이슈분석

| 나노절연재료의 개발 과제

가. 나노절연재료의 제조(설계) 기술

- 나노절연재료는 나노 기술에 바탕을 둔 절연재료를 뜻함. 기존에 제조되고 있는 고분자 기지에 나노크기의 무기재료를 혼합하여 제조된 중전기용 주절연재료는 열적, 기계적, 전기적 특성의 향상으로 장수명, 고효율의 절연성능을 보일 것으로 예상.
- 나노절연재료 개발은 고분자와 나노재료와의 결합이 중요한 요소로 작용함. 여기에는 고분자 구조와 충전제와의 결합력, 충전제 간의 거리, 충전제 간의 모폴로지, 계면에서의 상호작용 등이 중요한 요소로 작용하는데[10], 나노 재료의 크기에 따른 크기 효과(Size Effect), 형태에 따른 효과에 따라 재료의 특성이 상당히 변화하게 됨.
- <표 3-1>에서는 나노복합재료의 입자 크기에 따른 물성 영향을 나타내었음. <표 3-1>에 따르면 입자의 크기가 작을수록 고분자 체인과 입자 계면의 결합력 증가로 강도의 증가를 보이고 있으며, 100nm 이하의 크기에서는 균일한 분산이 이루어진 재료의 경우, 광학 특성 향상이 이루어지며, 유전특성의 향상은 100~1,000nm 크기에서 일어나는 것으로 나타났음.
- 나노재료의 크기와 함께 중요한 요소로 작용하는 것은 바로 나노재료의 형태적인 측면이 있음. 나노기술이 발달함에 따라 점차 입자에서 층상 구조로 바뀌어 가고 있는 실정임. 나노입자에서 나노층상 구조로 바뀌게 되면 입자에서보다 층상구조에서 더 넓은 비표면적을 가지게 되어 고분자 체인과 무기재료의 결합력의 증가를 가져오게 됨.
- <그림 3-1>은 나노 크기의 층상 실리케이트가 고분자 기지에서 혼합되는 모양을 보여주고 있음. <그림 3-1>에서처럼 층상 실리케이트가 고분자 기지와 함께 섞여 있고 이는 재료의 절연성능 향상에 크게 기여함.

[표 5] 나노 복합체에서 분산 상 입자 크기별 물성에의 영향

입자 크기(nm)	영향
5 ~ 10	고온 강도
8 ~ 50	인장 강도
50 ~ 100	광학 특성 및 자성
100 ~ 1,000	유전 특성

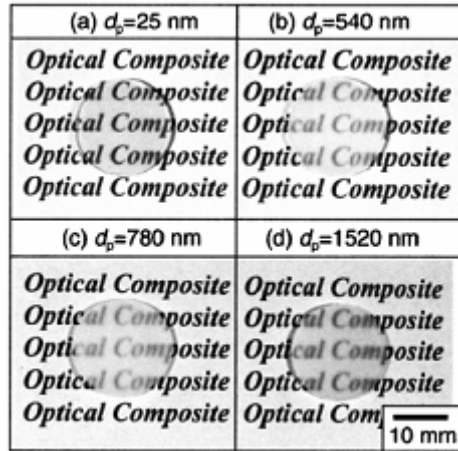
자료 출처: KISTI, 복합화 응용 신 기능수지, 2004. p.7.



[그림 4] 나노복합재료 준비방법

자료 : T. Imai, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002, p.379.

- 층상 구조의 나노재료는 고분자와의 결합력을 증가시켜 기계적 강도의 향상을 가져오는 효과가 있음. 따라서 층상 구조의 나노재료를 활용한 절연재료의 개발이 요구됨.
- 나노절연재료가 가지는 열 특성 향상은 열전달계수가 높은 재료를 활용하는 것이 유리하며, 대전류를 견뎌야 하는 중전기기의 특성 상 열을 외부로 빨리 방출시켜야 장비의 고수명을 보장할 수 있음.
- 현재 널리 알려진 재료 중에는 Al₂O₃의 열전도가 가장 뛰어나. 하지만 빠른 열전도로 인하여 제조 시 쉽게 경화가 일어나 기포의 발생 등 재료의 응용에 어려움이 있음.
- 와세다대 및 Toshiba와 같은 기업의 공동연구 결과 먼저 고분자 기지에 나노기술을 활용하여 기존에 사용되던 마이크로 크기보다 월등히 작아진 나노 크기의 충전제를 제조하여 기존의 재료와 비교하였더니 많은 전기적, 기계적, 열적 성능향상을 보고하였음.
- 또한 중전기기는 고장 시나 운전 중 정지 시 큰 금전적 손해뿐만 아니라 안전 상의 문제가 크게 나타나기 때문에 주절연재료의 열화나 그 진행여부를 자주 확인해 주어야 하는데 나노재료의 투광도의 향상은 이러한 문제점을 해결해 줄 수 있는 방법이 될 수 있음.
- 그림 5는 SiO₂ 입자가 분산된 복합재료의 투명도를 보여주고 있음. 나노재료의 크기가 작을수록 향상된 투명도를 보여주고 있고, 이는 중전기기 내부의 주절연재료의 열화정도를 파악하는데 많은 도움이 됨.



[그림 5] SiO₂ 입자 분산된 복합재료의 투명도.

자료 : Naganuma, Composites Sci. and Tech. Vol. 62, 2002.

- 크기가 작아진 충전체가 고분자의 체인에 폭넓게 결합하는 크기효과(size effect)를 통해 고분자와의 결합력을 상승시켜 기계적 강도 향상에 기여하는 것으로 알려져 있음.
- 또한 충전체는 체인과의 유기적인 결합을 통해 굴곡강도 역시 향상시키는 것을 알 수 있음. 열경화성 및 열가소성 수지에 나노 충전체를 섞은 재료의 강도가 개선된 연구 결과가 나타났음. 특히 굴곡 강도의 감소 없이 굴곡 역률의 강화가 나타났음.[11]
- 이러한 나노절연재료의 개발에는 필요한 나노절연재료의 제조에는 ①중합법, ②용액법, ③용융법 등 여러 방법이 사용되고 있음. 이 방법 중 용융법이 기존의 컴파운드 제조법과 동일한 가공 설비를 이용하여 제조가 가능하므로 상업적인 면에서 가장 바람직하다고 할 수 있으나, 나노재료의 고른 분산, 기포 제거 등의 여러 가지 기술적 문제점 해결이 필요함.
- 나노절연재료는 시장 개발 초기 단계에서는 고분자와 나노재료의 합성(혼합) 기술의 개발로 특성 및 기능의 향상을 꾀함으로써 당분간은 전혀 다른 종류의 제품의 개발보다는 기존 제품과의 경쟁을 통해 수익을 낼 것으로 보임.
- 하지만 향후에는 필요한 특성에 맞는 고분자의 개발과 크기 및 형태적인 면을 고려한 나노소재 개발이 중요한 요소기술(key technology)이 될 것으로 보임.
 - 또한 마이크로 크기의 충전체보다 큰 비표면적을 가지게 되는 나노 크기의 충전체에 대한 고분자 기지 내에서의 역할에 대한 해석은 아직 미흡한 실정임.
- 나노크기의 충전체가 작을수록 좋은 것인지, 아니면 적당한 크기가 필요한 것인지, 또 형태적인 면에서 구형이 좋은 것인지, 판상이 좋은 것인지, 다양한 고분자의 혼합 및 충전체의 혼합을 통해 더욱 발전된 재료의 개발이 가능한 것인지에 대한 검토가 반드시 이루어져야 할 것임.

나. 나노 충전제의 분산기술

- 상전이(phase transition)를 보이는 물질이나 모델의 상전이 과정에 사이즈 효과(size effects)가 어떤 식으로 영향을 미치는가라는 주제는 이론과 실험 양 측면에서 매우 활발히 연구되어온 영역임.
- 어떤 물질이 매우 좁은 공간 내에 갇혀 있는 경우에는 온도가 물질의 상전이 온도에 근접하면 물질 내 질서도 요동의 상관거리가 매우 커지게 되는데, 이 경우 상관거리가 물질을 가지고 있는 공간의 거리보다 커지게 될 경우 소위 사이즈 효과가 나타나게 됨. 이러한 사이즈 효과를 통해 고르게 분산된 소재는 그 효과를 극대화시키게 됨.[10]
- 나노절연재료의 개발은 나노입자의 고른 분산이 필수적인데, 현재 나노입자의 분산에 관련된 기술 개발이 상당히 미흡한 상태임. 따라서 나노입자의 분산을 위한 장비의 개발이나 용제의 개발 등이 반드시 필요한 상황임.
- 분산기술에는 몇 가지가 소개되고 있는데, 물리적인 방법과 화학적인 방법으로 나눌 수 있음. 물리적인 방법은 전단력(Shearing force)이나 Ultra sonic을 이용한 방법 등이 있으며, 화학적인 방법은 입자의 표면 처리나 계면활성제 등을 통한 화학적 처리를 통하여 이루어짐.
- 전단력을 이용한 방법이나 소닉을 이용한 방법은 나노입자의 크기가 수 nm 크기로 작아 질수록 분자 간의 결합력이 커져 분산에 한계를 나타내게 됨. 또 물리적인 힘을 가하는 전단력의 경우, 나노재료의 손상으로 인한 결합이 발생하는 문제 또한 발생하여 실제 상업화에 적용하기에는 여러 문제점을 나타냄.
- 그러나 최근 일본의 산업기술 종합 연구소(AIST) 나노테크놀로지 연구부문 나노 구조 제어 물질 그룹 Shimizu Hiroshi 연구그룹장 등이 개발한 고전단 성형 가공법을 개발하는 등 한계 극복을 위해 다양한 시도를 행하고 있음.
- 또 외국에서와 같이 산업에 활용하기 위한 기초 데이터의 확보도 절실히 필요함. 이미 외국의 연구기관 및 산업체에서는 응용 제품화에 필요한 기초 연구가 많이 행해졌지만, 국내에서는 연구개발이 신제품 및 신기술에만 집중되어 기초 연구 및 데이터 확보에는 미흡한 실정임. 이는 학계 및 연구소 등 연구기관만의 연구가 이루어진 결과로 생각되며, 산업계의 적극적인 참여가 필요한 실정임.
- 그리고 현재 나노절연재료의 특성 분석 기법들은 과거 마이크로 크기의 분석 기법을 활용하여 제반 물성을 연구하고 있으나, 나노기술의 접목과 함께 관련 분석기법의 개발도 필요한 과제라 생각됨.

[표 6] 나노복합재료의 나노입자 분산효과에 대한 특성

Epoxy resin/TiO ₂ (g/g)	Treatment methods	Tensile strength(MPa)	Tensile modulus(GPa)	Impact strength(kJ.m ⁻²)
100/0	-	35.33	3.17	10.2
100/3	1	38.33	3.21	11.2
100/3	2	45.88	3.43	12.68
100/3	3	75.68	3.57	15.94

자료 : Yaping Zheng et. al., Materials Letters, Vol. 57, 2003. p.2942.

다. 기포 억제 및 제거 기술

- 나노절연재료를 제조하는 방법은 여러 가지이지만 중전기용 나노절연재료를 개발하는 데는 열경화성 수지를 주로 사용함.
- 이 시료의 제조과정 중 경화성 수지의 제조시, 수지와 충전제의 혼합 시, 혼합재료에 경화제를 혼합할 때 등 각 과정마다 기포 발생을 억제하거나 제거시켜야 하는데, 가장 좋은 방법은 진공 상태에서 혼합하는 것이 가장 좋지만 산업적으로 이용하는 데는 문제가 있음.
- 기포의 발생은 제품의 수명에 큰 영향을 미치게 되므로 반드시 탈포 과정을 거쳐야 하지만, 나노 크기의 재료가 가지는 기포의 함유가 제품의 개발에 큰 걸림돌로 작용하고 있음. 따라서 적절한 탈포 기법 및 장비의 개발이 반드시 필요함.

라. 나노절연 진단기술

- 중전기기의 특성 상, 가동 조건이 열악하여 손상을 일으키기 쉬움. 따라서 고장이 발생하기 전 열화의 진단을 통하여 수리/교체를 해 주어야 하는 특징을 가지고 있음.
- 하지만 기존의 분석을 통해 나노절연재료의 분석을 하고 있으나 기존의 결과와는 다른, 많은 성능향상으로 인해 여러 가지 차이를 보일 것으로 예상됨. 특히 고분자에 포함되어 분산되어 있는 충전제의 역할이나 그 특성을 측정하기 위해서는 새로운 진단 장비와 기법의 도입이 필요할 것으로 보임.

3 이슈분석

충전기기용 나노절연재료의 발전 방향

- 충전기기 산업은 국가의 기간산업으로 고전압, 대전류라는 특성을 가지고 있기 때문에 고도의 기술과 안정성이 요구되는 산업분야임. 따라서 제품에 대한 안정성과 신뢰성에 대한 검증과 이에 대한 국제적인 인증이 요구되는 까다로운 분야이기도 함.
- 또한 주요 수요처가 전력회사 또는 산업 현장이라는 특수성이 존재하여 일반 상품과는 다르게 ①제품의 수명이 대개 20~30여년 정도로 길고 기술변화 속도가 느리며, ②막대한 시설투자 및 경기변동의 영향이 크고, 설계 및 제작에 장기간 소요, ③관납, 내수 위주의 성격에 따라 국내 전반적인 경기변화 및 정부 차원의 사회 간접자본 투자 동향에 따라 영향, 특히 한전의 발주 물량에 따라 민감한 영향, ④수요변화의 기복이 크지 않아 점진적인 설비투자가 가능해 금융비용 부담이 낮음.[1]
- 현재 연구개발 초기 단계의 나노절연재료 개발은 크게 연구개발, 제품화, 신뢰성 평가 등의 단계별 개발 로드맵을 기획, 발전시켜야 할 것으로 보임.
 - 대학 및 연구소에서는 나노절연재료의 기초 물성을 통해 나노설계기술과 대량 생산에 필요한 요소 기술을 확보하고,
 - 기업체에서 제품화에 필요한 기술개발과 대학 및 연구소와의 협력을 통해 장벽 기술을 확보하여 독보적인 기술을 확보해야 할 것임.
 - 또한 전기연구원 등 관련 기관의 신뢰성 평가를 통해 충전기기 시장의 특성 상 한전의 독점적 수요로 인한 비중을 적극 활용하여 개발된 기술의 안정적 공급을 보장해 준다면 산업의 안정적 성장에 크게 기여할 것으로 보임.
- 이를 위해서는 대학/연구소는 기술개발자금확보 및 장비 개발/확보가 반드시 필요하고 기업체와의 긴밀한 협조로 인적교류 및 기술이전 등이 원활히 이루어져야 할 것으로 보임.
- 기업 또한 현 대학 등에서 필요한 전문인력의 확보를 용이하게 하기 위해 대학/연구소와의 긴밀한 인적교류가 필요하고, 제품의 개발 자금 확보 및 장비의 개발이 필요함. 그리고 제품 개발과 동시에 한전 및 대기업이 중심이 된 컨소시엄을 통해 자금 확보 및 신뢰성 평가를 통해 제품의 공급처를 확보하는 것이 중요함.
- 한전 및 대기업은 신뢰성 평가 시스템을 통해 국내 생산된 중소기업체의 신제품 인증 및 신뢰성을 확보해 줌으로써, 안정적 공급을 이끌고, 컨소시엄 구성을 통해 자금을 확보하여 대학 및 연구소, 중소기업 등에 자금을 투자하여, 개발에 따른 이익을 창출하고 제품 개발에 안정적 제품의 공급을 이룰 수 있음. 또한 생산기업의 기술 확보와 안정적 운영으로 인해 수출에도 큰 효과를 줄 것으로 예상됨.
- 생산업체의 영세성이 연구개발 후 제품개발로 이어지는데 어려움을 가지고 있음. 따라서 연구개발이 제품개발로 이어지는 산학연 시스템을 확보할 필요성이 있으며, 현재 대기업 및 한전 등에서도 관심을 표명하고 있으나, 이것이 연구개발 및 교류로 이어지지 않고 있는 실정임.
- 또한 국내 제품에 대한 고신뢰성의 제품이 요구되는 산업의 특성 상 기업체의 단독 개발이 관련 산업의 발전에 크게 영향을 미치지 못하는 현실을 고려하여 주 수요자인 한전 및 대기업과 중소기업 등이 대학 및 연구소 등과의 유기적인 연구 및 기술개발에 참여하여 집중적인 개발 인프라를 구축하는 것이 반드시 필요함.

결론

4

4 결론

- 정부는 2008년 세계 시장 점유율 3%, 세계 5위의 전기기기 산업국을 목표로 전력산업의 구조개편, 고도화 및 수출 산업화의 전환을 촉진, 부품 및 소재 산업의 기술개발을 전략적 선택과 집중방식으로 특화 육성하여 기술 경쟁력을 확보, 초전도 기술의 산업화를 통해 전력산업의 고부가가치화 및 고품질화 추구, 투자 및 인프라의 확충을 통해 전력산업을 선진화시키는데 역점을 두고 있음.
- 전력산업은 국가 기간산업으로 기술자립의 중요도가 어떤 분야보다 중요한 요소라 할 수 있음. 또한 중전기 분야의 선진화는 무역수지 개선에도 긍정적인 효과를 줄 것으로 생각됨.
- 향상된 기능을 가진 중전기용 나노절연재료의 개발은 발전기, 변압기, 케이블 등 사용처에 따라 사용할 수 있도록 나노절연재료의 설계단계부터 검토해야 함. 따라서 다양한 나노절연재료의 크기 및 형태에 따른 특성에 대한 연구가 반드시 필요.
- 전력산업의 선진화는 최근 다양한 분야에 활용되고 있는 나노기술을 적극 활용하여 높은 기계적 강도와 열적, 전기적 특성을 갖는 나노절연재료의 개발이 반드시 필요하며, 아직 개발 초기 단계에 있는 나노절연재료의 개발로 선진국과의 기술 격차를 좁힐 수 있는 중요한 계기가 될 것으로 생각됨.
- 특히 한전을 중심으로 하는 수요기업인 한전과 기업체의 개발 투자와 대학 및 연구소의 기술개발 및 확보, 중소기업의 개발 의지 등이 산업의 육성 및 발전에 반드시 필요한 요소이며, 각 그룹간, 학제간의 인적, 기술적 교류는 산업의 생존에 가장 중요한 요소가 될 것임.

참고문헌

1. 전기연감 2006, 전기협회
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. J. K. Nelson and Y. Hu, Proc. IEEE-ICSD, No. 7P-10, 2004.
- 4 T. Imai et. al., IEEJ Trans. A, Vol. A 124, No. 11, 2004.
5. T. Imai et. al. Conf. Rec., IEEE ISEI, 2002.
6. J. Sato et. al., IEEE-PES, Trans. and Distribution Conf. and Exh, 2002; Asia Pacific Vol.3, 2002.
7. J. Sato et. al., IEEE-PES, Trans. and Distribution Conf. and Exh, 2002; Asia Pacific Vol.3, 2002.
8. J. C. Fothergill et. al., Annu, Rept. IEEE-CEIDP, No.5A, 17, 2004.
9. T. Tanaka et. al., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.12, No.4, 2005.
10. T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006.
11. Sirgh, J. Mater. Sci. 2002.

저자소개

▶안 준 호

- 공학 박사
- 현, 홍익대학교 과학기술연구소 연구원

▶ 한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀