

# 전력기기용 NANO 소재 현황

이승욱 연구원, 이종호 수석연구원, 오일성 연구위원 (LS산전 전력연구소)

## 1. 서론

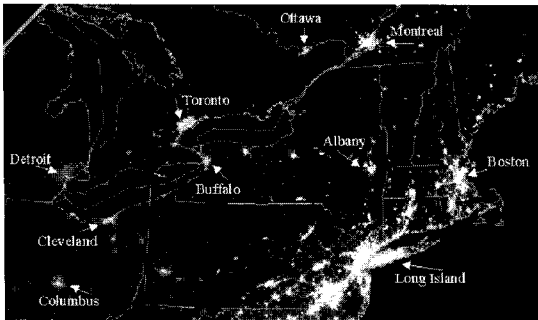
세계의 전력산업 동향을 살펴보면 노후설비의 교체와 전력사용량의 증가로 인하여 미국, 중국 시장을 중심으로 전력산업이 활성화되고 있는 추세이다. 세계 중전기 제품 무역 시장 규모는 2002년 말 6,088억 달러이고, 1998년 이후 연평균 6.6%의 성장률을 기록하고 있으며, 지역별로는 유럽 시장이 2,150억 달러, 아시아 시장이 2,096억 달러, 아메리카 시장이 1,336억 달러 규모의 시장을 형성하고 있다. 특히 아시아 지역은 중국 시장의 급속한 성장으로 인한 신규 발전 설비의 증축과 동남아시아 지역의 경제 성장에 힘입어 급격한 성장을 보이고 있다 [1].

미국의 발전설비 용량은 2003년 기준으로 우리나라 발전용량의 약 17배에 해당하는 1,022 GW이다. 이중 석탄 화력이 32%, 가스가 39%, 원자력이 10%를 각각 점유하고 있다. 또한 송전선로는 우리나라에 비해 28배에 달하는 56만 마일이며, 최대전압은 765 kV다. 막대한 전력설비를 운영하는 미국이지만 지난 2003년 8월 발생한 북미지역 대정전 사태로 인한 피해액만 무려 60억 달러, 우리나라 돈으로 6조 원에 달하는 막대한 경제적 손실을 입었다. 미국 대정전의 원인은 전력설비의 노후화 및 송변전 설비 부족에 따른 전력시스템의 구조적인 문제 때문에 발생한 것으로 알려졌다. 미국에 설치된 송전선로와 변압기의 70% 이상이 이미 25년 이상 사용된 노후 설비이며, 차당기의 60% 이상이 30년이 넘는 설비

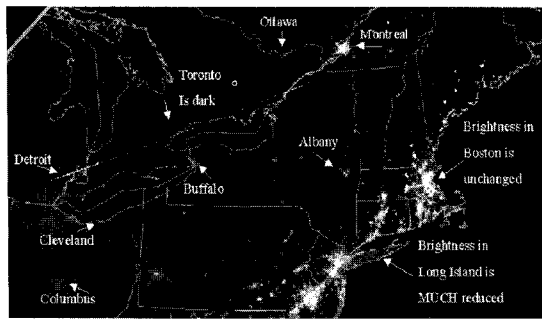
이다. 이에 따라 미국은 또 다시 2003년과 같은 대형 정전이 발생하지 않도록 하기 위해 설비보강 사업에 착수하였으나, 전기 분야 엔지니어링 회사나 주요 전력기계의 제조회사들은 이미 미국에 존재하지 않기 때문에 세계 중전기 업체들의 눈을 미국으로 돌리게 할 만큼 대규모 설비 보강 사업이 진행될 예정이다. 바로 이점이 전력산업에 풍부한 경험을 보유하고 있는 국내 중전기기업체에 큰 기회를 주고 있다. 그림 1은 2003년 8월 발생한 대정전 당시 위성 사진의 모습이며, 북동쪽 디트로이트(Detroit), 토론토(Toronto) 일대가 완전히 암흑으로 변하였다.

중국의 발전 설비 용량은 2000년 말 316 GW에 달하였으며, 매년 경제 성장률은 7~8%에 달하며, 2006년 지역간 연계 송전선로를 건설하여 전국적인 연계를 본격 착수하였다. 이를 위해 90.26억 위엔(약 110조원)을 들여 25개 프로젝트의 직류 및 교류 송전선로 4,110 km를 건설하고, 변전용량 450만 kVA, 조상 설비 190만 kVAR, 직·교류 변환설비 용량 600만 kW를 추가로 갖추었으며, 2015년까지 발전설비용량을 550 GW까지 늘릴 예정이다. 또한 “11.5 계획”(2006~2010)기간 동안 에너지 절약을 중요 국가 정책으로 정하여 적극 실시하고 있다. 발전설비의 지속적인 증가에 의해 송·변전 시스템 중 중요한 전력기기인 변압기의 수요 또한 증가하였다. 2008년 세계 변압기 시장 규모는 34,206 M USD이며, 2015년에는 62,603 M USD로 예상된다. 그림 2는 연도별 변압기 시장 규모를 보여 준다.

이와 같이 세계의 전력 산업이 미국, 중국 시장을



(a) 사고 발생 전



(b) 사고 발생 후

그림 1. 2003년 8월 미국 북부 대정전 사고.

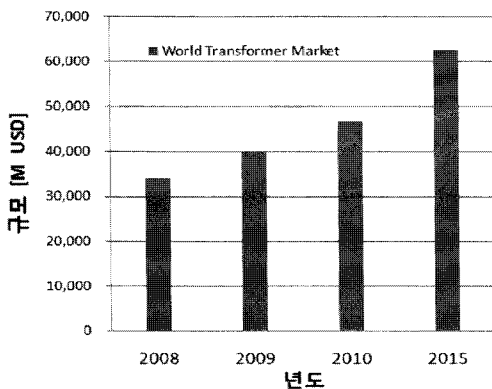


그림 2. 연도별 변압기 시장 규모.

중심으로 활성화 되면서 전력기기에 대한 수요 증가로 인한 국내 중전기 업체들의 세계시장을 확보할 수 있는 절호의 기회를 맞고 있다.

전력 산업에 사용되는 변압기, 회전기, 차단기와 같은 중전기기는 국가 기간 산업 분야의 동맥을 연결하는 중요한 역할을 담당한다. 전력기기는 전력사용량의 증대와 국가간 전력계통 연계를 위하여 특고압, 대전류 전송이 가능하여야 하며, 사고 발생 시 기기 파손 또는 교체에 따른 비용손실이 높기 때문에 높은 신뢰성과 안전성을 요구한다. 또한 세계무역기구 (World Trade Organization, WTO)의 자유무역협정 (Free Trade Agreement, FTA), 기후변화협약 등 세계 환경 규제에 따라 전력의 생산에서부터 전송, 분배에 까지 이르는 각 과정에서의 손실을 최소화하고, 설치면적을 줄이는 방향으로 연구가 진행 중이다. 하지만, 기존 기술 및 재료를 이용한 효율 상승, 설치면적의 최소화 및 신뢰성 향상은 한계에 다다른 상황이다.

최근 나노기술의 발전과 더불어 중전기용 나노 절연 재료의 개발이 개대되고 있다. 본 논문에서는 전력시장의 현황 및 전력기기에 요구되는 특성에 관해 고찰해 보고 중전기기의 성능 향상을 위한 나노 재료의 개발 가능성 및 필요성에 관해 알아보고자 한다.

## 2. 전력 시스템

발전소에서 생산하는 전기에너지의 전압은 2.3~34.5 kV이며, 이 에너지의 장거리 전송을 위하여 초고압 변압기 (Power Transformer)를 통해 고전압 (110, 138, 154, 230, 345, 765 kV)으로 승압 후 송전 케이블을 거쳐서 송전을 하게 된다. 송전된 에너지는 배전 변압기를 통하여 전압을 변환한 후 도심의 공장 및 수용가에 전력을 공급한다. 그림 3은 발전소에서부터 수용가까지의 전력시스템의 구성을 보여 준다. 전력계통에 사용되는 전력기기는 교류발전기, 변압기, 차단기 (GIS, GCB) 등이 있으며, 그 외에도 전력 전송을 위한 전력 케이블 및 시스템 보호를 위한 여러 가지 감시 장치들로 구성이 된다.

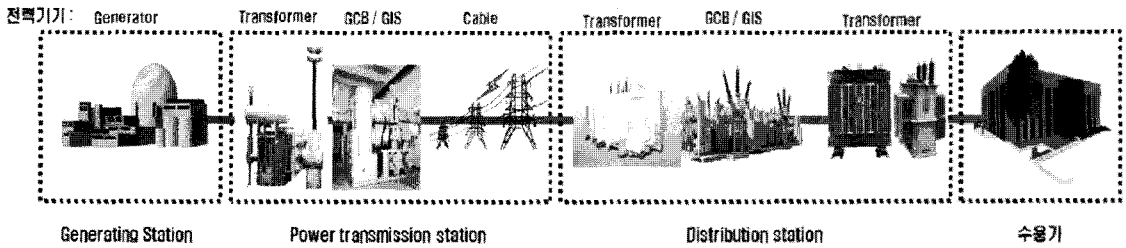


그림 3. 전력 시스템 구성.

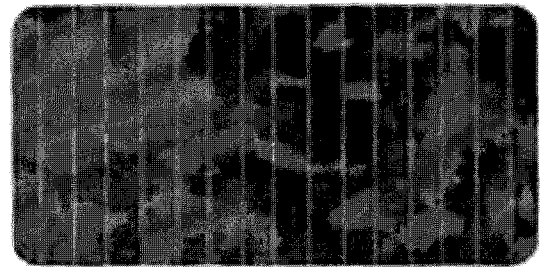
최근 전력계통의 전압 및 용량이 초고압/초대형화로 구성됨으로써 계통에 적용되는 전력기기의 신뢰성과 안정성에 대한 요구가 증대되었으며, 환경규제 및 발전에너지의 효율을 높일 수 있는 친환경, 고효율 전력기기의 개발을 요구하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

그 예로서 전력기기 중 변압기에 대한 연구개발 현황을 살펴보면, 재료의 특성 개선을 통한 변압기의 성능 향상 연구가 활발히 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 기존의 설계 및 최적화 기술을 이용한 전력기기의 성능 향상은 한계에 다다른 상황이며, 이를 타개하기 위해서는 전력기기 재료의 특성 개선이 필요하다는 것을 의미한다.

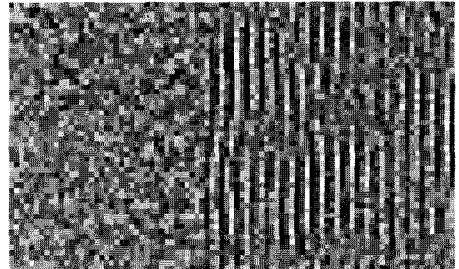
- 효율 개선을 위한 자구미세화 강판 및 아몰퍼스 코어 적용 (그림4)
- 환경오염 및 화재 위험 개선을 위한 바이오 오일 (Bio-Oil) 및 SF<sub>6</sub> 가스 적용 (그림5)
- 유지보수 문제 해결을 위한 초고압 몰드 변압기 (그림6)
- 과부하/사고 시 안정성을 확보하기 위한 절연 소재 연구 (그림7)

### 3. 전력기기용 나노복합 절연기술

나노 복합 소재를 이용한 절연물 개발은 무기물 나노입자의 구조 제어 및 표면처리기술, 고분자와의 무결점 복합 절연재 기술 및 성형기술 등에서 문제점을 해결해야 되기 때문에 IT 및 디스플레이 등의



(a) 자구 미세화 강판



(b) 아몰퍼스 강판

그림 4. 자구 미세화 강판 및 아몰퍼스 강판.

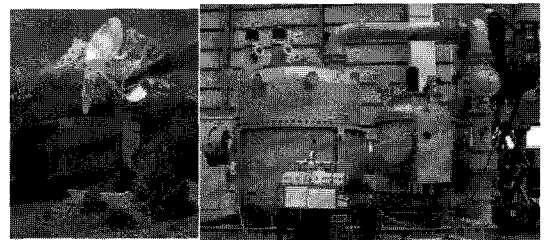


그림 5. 바이오 오일 및 SF<sub>6</sub>가스를 적용한 변압기.

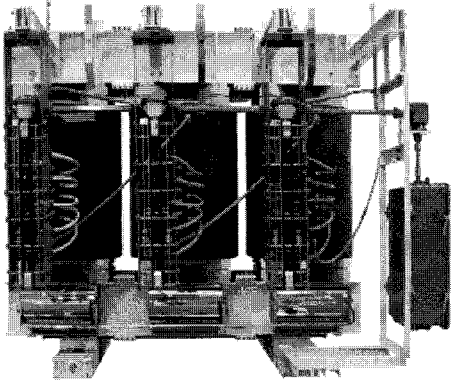


그림 6. 110 kV, 20 MVA급 초고압 몰드 변압기.

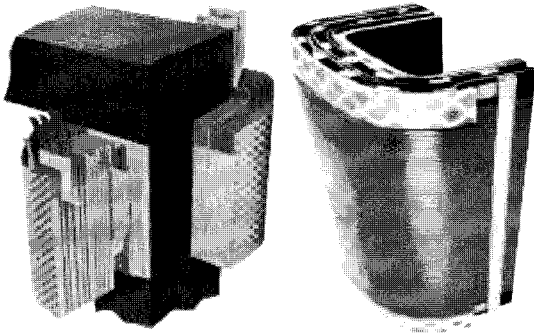


그림 7. Insuldur/DuraBIL 절연물.

분야를 중심으로 연구가 진행되었다. 최근 나노기술의 발전과 더불어 전력기기용 나노복합 절연 재료의 개발이 개대되고 있다.

국내 나노절연 재료의 연구 동향은 태동 단계라고 할 수 있으며, 물성연구는 많이 진행되고 있으나, 소재 및 제품 적용에 관한 연구는 초기 단계로 개발에 따른 응용 사례는 아직 미흡하다고 보고되고 있다 [2].

### 3.1 나노 복합 절연 재료

초고압 절연재료는 전기적인 성능뿐만 아니라 열적, 기계적으로도 우수한 특성을 가져야 하며, 각각 중요한 요소는 다음과 같다. 전기적으로는 절연 내력, 내트레킹성, 내아크성, 부분방전 특성 및 유전 특

성 등이 매우 중요하며, 열적으로는 열전도도, 열팽창계수 등이 사용 목적에 맞아야 한다. 또한 기계적으로는 인장강도, 굴곡강도, 경도, 내마모성, 가공성 등이 우수해야 한다. 따라서 일반적으로 나노 관련 연구는 나노입자가 분산된 고분자 복합재료의 기계적 열적 물성의 향상을 위한 연구가 집중되었으나, 초고압 전기절연용 나노복합 소재는 전기적 특성과 기계적 특성을 공히 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다.

전력기기용 나노절연 재료는 기존의 절연재료 특성을 한 단계 업그레이드하여 보다 효율적인 기기를 제작할 수 있을 것으로 예상되며, 최근 전력기기의 연구 개발 추세에 맞추어 전기기기의 콤팩트화, 고신뢰성, 고효율의 특성을 얻을 수 있을 것이다. 다음은 나노 복합 절연재료를 적용한 전력기기의 예상 효과이다.

- 고성능 Compact Size 구현
  - 절연 부피 감소를 통한 원재료 감소, 경량화, 소형화
- 절연재 열전도성 향상
  - 발열 도체 부 열 방출 능력 향상을 통한 효율 상승 및 가속 열화 방지
- 절연재 내열성 향상
  - 높은 온도에 대한 절연 특성 유지를 통한 전력 기기 수명 연장
- 친환경 제품
  - 전력기기의 주 절연물로 사용되고 있는 광유 및 SF<sub>6</sub> 대체를 통한 환경오염 방지
- 기계적 강도 증가
  - 전자력에 의한 충분한 기계적 강도 유지

### 3.2 연구/개발 현황

나노 기술을 이용한 전력기기용 절연 재료의 성능향상에 대한 연구 및 적용 사례를 정리하였다.

#### 3.2.1 절연 내력 향상

에폭시 수지에 TiO<sub>2</sub> 나노입자와 마이크로 입자 필러를 충전한 결과 그림 8과 같이 기존 마이크로 입자와 비교하여 나노 입자의 경우 크게 향상된 절연

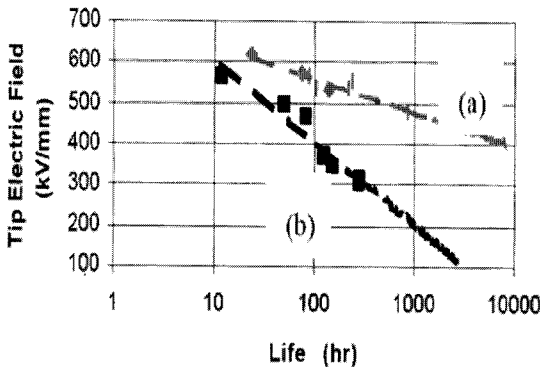


그림 8. 에폭시-TiO<sub>2</sub> 나노복합절연재료의 교류 절연내력특성 (a) 나노입자, (b) 마이크로 입자 충전

수명 특성과 절연내력을 확인할 수 있다. 이는 기존 절연물의 내전압 특성을 개선한 나노복합소재의 한 예이며, 특히 나노복합 재료로 구성된 절연물의 서지, 아크, 트래킹 등의 성능을 개선하는 부분에 많은 연구 개발과 관심이 모아지고 있다 [3].

### 3.2.2 열전도성 향상

절연물의 열전도성 향상은 변압기 및 전력기기의 수명 및 효율상승에 크게 도움이 된다. 일본, 미국의 선진 기업의 경우 변압기 절연에 높은 열전도성 절연재료를 적용하여 효율과 성능 향상 연구를 수행하고 있는 실정이다. 표 1은 에폭시 등의 절연물과 나노 충전제 그리고 금속 등에 대한 열전도성을 간단히 정리한 표이다. 에폭시는 약 0.2~0.35 W/mK의 열전도성을 갖는다. 따라서 나노분산이 가능한 실리카나 알루미늄 등은 훨씬 높은 열전도성을 가지고 있어 적절한 분산이 이루어지면 열전도특성의 개선을 기대할 수 있다. 그림 9는 최근 에폭시 수지에 대한 나노복합기술의 열전도성 제어기술로 Hitachi社에서 개발한 고열전도성 에폭시 복합소재를 나타내고 있다. 이 제품의 핵심은 에폭시 수지의 나노수준의 결정배열을 크게 증가시킨 새로운 에폭시 수지를 중심으로 열전도성 나노 무기물을 충전한 기술이다. 이 제품의 경우 절연성능의 저하 없이 최대 10 W/m·K 이상의 열전도성을 갖는 것으로 보고되고 있다.

표 1. 기초 소재의 열전도 특성

Material	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg · K)	Thermal Conductivity (W/m · K)	Ratio to Air
Air	1.16	1005	0.024	1
Epoxy (Dielectric)	1500	1000	0.23	9.6
Epoxy (Conductive)	10500	1195	0.35	14.6
Polyimide	1413	1100	0.33	13.8
Silica	2200	745	1.5	62.5
Alumina	3864	834	22	9.2×10 <sup>2</sup>
Silicon	2330	770	120	5.0×10 <sup>3</sup>
Aluminum	2700	900	150	6.3×10 <sup>3</sup>
Copper	8800	380	390	1.6×10 <sup>4</sup>
Carbon Filber	2150	-	800	3.3×10 <sup>4</sup>

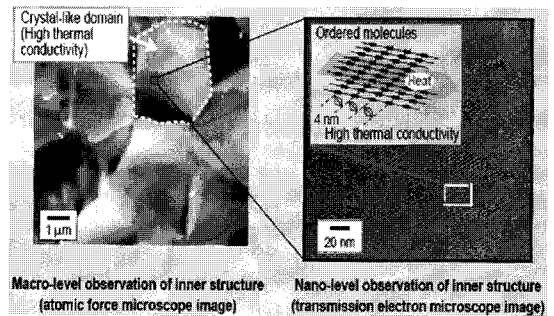


그림 9. 고전도성 에폭시 복합재료 (Hitachi 제품).

### 3.2.3 적용 사례

#### (1) Insuldur

Westinghouse社 제품으로 기존 Kraft Paper 대체 복합절연 소재이며, 열적특성 향상에 주안점을 두고 개선한 고압, 저압측 충전절연 나노복합소재로 유입변압기의 열적전달 특성이 향상되도록 절연표면을 화학적으로 개질하여 변압기의 부하 용량을 12% 향상시켰다고 보고되고 있다. [4]

#### (2) DuraBIL

ABB社에서 사용 중인 충전 절연 소재로 고압측 고체권선에 적용되고 있다. 기존 사용되는



Aramid Paper 계열 (NOMEX)의 절연재를 대체함으로써 도체 권선 시 절연재료의 터프니스 (Toughness), 유연성 (Flexibility)을 강화시켜 변압기 권선간 절연사고를 대폭 감소시킨 제품으로 소개하고 있다 [5].

### (3) Nanomer

Nanocor社에서 개발한 제품으로 전형적인 나노 복합재료 기술을 이용하여 주로 판상의 무기물 강화입자를 사용하는 것을 특징으로 하며 초고압용 하우징 절연에 적합한 것으로 알려져 있다. 표 2는 Nanomer 함량에 따른 기계적 특성을 나타낸 것이다. Nanomer 함량이 증가함에 따라 기계적 특성이 크게 개선된 것을 알 수 있으며, 그림 10과 같이 습도환경에 대한 내구성도 높은 것으로 나타났다 [6].

표 2. Nanomer를 적용한 복합재의 기계적 특성.

Nanomer (wt. %)	Flexural Modulus (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	HDT (°C)
0	3404	3117	56
2	4374 (+35 %)	4220 (+28 %)	125 (+123 %)
4	4578 (+61 %)	4897 (+65 %)	131 (+134 %)
6	5388 (+90 %)	5875 (+98 %)	136 (+143 %)

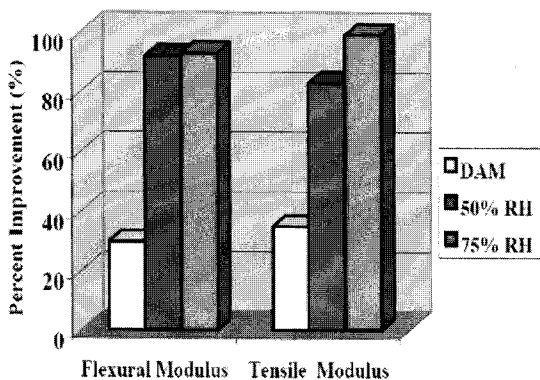


그림 10. Nanomer를 적용한 나노복합재의 기계적 특성 (습도환경).

### (4) NAMLITE

Wood & Lathlaen社는 NAMLITE라는 변압기

철심 표면 코팅제를 개발하였다. 이 제품의 물질 정보는 공개되지 않았으며, 관련 특허가 출원된 것으로 조사되었다. 주파수에 대한 철손을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으며, 절연성능도 가지고 있다. 그림 11은 NAMLITE 적용 시 주파수에 따른 변압기 무부하손의 감소를 보여준다 [7].

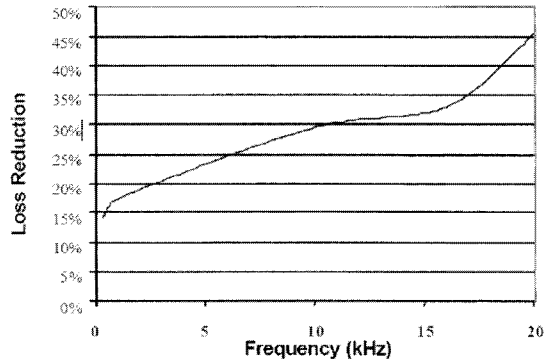


그림 11. 주파수에 따른 변압기 무부하손.

### (5) PUCARO-DDP

덴마크의 PUCARO ELEKTRO ISOLIERSTOFFE GMBH社의 PUCARO-DDP는 전형적인 전력기기의 절연용으로 개발된 코팅물질로 변압기의 권선간 절연 및 도체 절연에 사용가능하다 [8].

## 4. 결론

최근 나노기술의 발전과 더불어 전력기기용 나노 절연재료의 개발이 기대되고 있으며, 이미 몇몇 중전기 업체 및 논문에서 나노기술을 적용한 절연재료를 이용하여 전력기기의 성능 향상 결과를 보고하고 있다. 하지만 우리나라의 나노절연 재료에 대한 기술적 위상은 높은 편이지만 기초적인 소재의 제조와 적용 차원에서는 선진국과 비교하면 상당한 기술적 차이가 있다. 따라서 나노 소재의 전력기기 적용 방안에 관한 연구가 필요하다. 특히 중전기용 나노절연 재료는 기존 절연재료의 전기적, 열적, 기계적 특성을 개선하여 보다 효율적이며 신뢰성 있는

전력기기를 제작 할 수 있을 것으로 예상되며, 선진국과의 기술격차를 줄이고 후진국과의 기술 격차를 더욱 늘리는 대안 중 하나로 판단된다.

## 참고 문헌

- [1] 전기연감 2006, 대한 전기협회.
- [2] 안준호, "나노절연재료, 중전기기용 나노절연재료의 기술개발과제 및 발전 방향", 미래선도기술 이슈 보고서 2006.
- [3] T. Tanaka, Electra No.226, June, 2006, pp. 28.
- [4] Ford, J. G. et al., "Insuldur; Another Milestone in Transformer Insulation Development", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 77, pp. 804-808.
- [5] Adam M. et al., "Potential of near infrared spectroscopy to assess hot-water-soluble extractive content and decay resistance of a tropical hardwood", Springer-Verlag, 2007.
- [6] Toshio Ogasawara et al., " Helium gas permeability of montmorillonite/epoxy nanocomposites", Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, Issue 12, pp. 2236-2240, 2006.
- [7] Wood, R.H. and Lathlaen, R., "Exciting new coatings for amorphous glass pulse cores", Digest of Technical Papers. 12th IEEE International, Vol. 1, pp. 393-396, 1999.
- [8] "Technical data\_insulation material, coated with Backlack", Pucaro.com

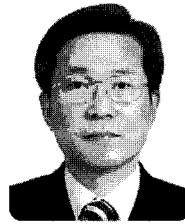
## 저자약력



성 명 : 이승욱

- ◆ 학 력
  - 1999년 순천향대 전기공학과 공학사
  - 2001년 동 대학원 전기공학과 공학석사
  - 2004년 동 대학원 전기공학과 공학박사

- ◆ 경 력
  - 2004년 - 2007년 기초전력 연구원
  - 2007년 - 현재 LS산전 전력연구소 연구원



성 명 : 이종호

- ◆ 학 력
  - 1980년 서강대 화학공학과 공학사
  - 1983년 동 대학원 화학공학과 공학석사
  - 1991년 동 대학원 화학공학과 공학박사

- ◆ 경 력
  - 1984년 - 2007년 LS전선 연구소 수석연구원
  - 1996년 - 1997년 Univ. of Texas at Austin
  - 2008년 - 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원



성 명 : 오일성

- ◆ 학 력
  - 1986년 연세대 금속공학과 공학사
  - 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 공학석사
  - 1995년 동 대학원 재료공학과 공학박사

- ◆ 경 력
  - 1995년 - 현재 LS산전 전력연구소 연구위원

