

Special  
Thema

# | 열전도성 유무기 나노 하이브리드 절연기술

한세원 책임연구원  
(한국전기연구원 재료응용연구단)

## 1. 서론

전력, 전자, 통신용 부품의 집적화(Integrate)에 따라 에너지의 효율과 설계능력의 향상을 위해 열특성(Thermal Properties)을 관리하는 절연기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 다양한 형태의 절연수지가 사용되는 현실에서 코팅 또는 몰딩형태의 절연 바니쉬의 경우 효과적으로 열을 전달하여 외부로 해소시키는 기능이 요구된다. 부품의 온도가 높아지면 성능저하는 물론 열적 스트레스의 증가로 불량률의 직접적인 원인으로 작용한다. 일반적으로 사용되는 코팅 또는 몰드용 에폭시(Epoxy)수지의 경우 열전도율은 약 0.2-0.3 W/mK, 열특성이 우수한 PE(Polyethylene)의 경우 약 0.5 W/mK, 그리고 ACA(Anisotropic Conductive Adhesive) 접착제의 경우 약 0.2 W/mK로 앞에서 언급한 부품의 집적화, 고성능화에 대처하기에는 부족한 열전도성으로 한계를 가지고 있다[1, 2]. 다행히 최근 신소재 절연기술의 발달로 전도성 절연수지에 대한 많은 연구가 이루어지면서 상당한 열적특성을 갖는 제품이 소개되고 있으며, 특히 유무기 하이브리드 기술을 이용한 전도성 절연 바니쉬의 개발은 이러한 한계를 극복하는 적절한 기술로 각광받고 있다[3]. 여기서는 열전도성 절연수지와 관련된 유무기 나노 하이브리드 기술에 대해 간단히 소개하고자 한다.

## 2. 유무기 나노 하이브리드

유무기 복합기술(Composite Technology)은 최근 나노크기의 필러를 사용하면서 열적, 전기적, 기계적 특성을 한단계 향상시킬 수 있는 기회를 가지게 되었지만 원활한 강화효과를 얻기 위해서는 신개념의 제조방법이 요구된다. 전형적인 혼합방식으로 유무기를 복합하는 것은 균일성, 결합성에서 한계를 갖기 때문에 졸-겔(Sol-gel)공법을 이용한 하이브리드 개념

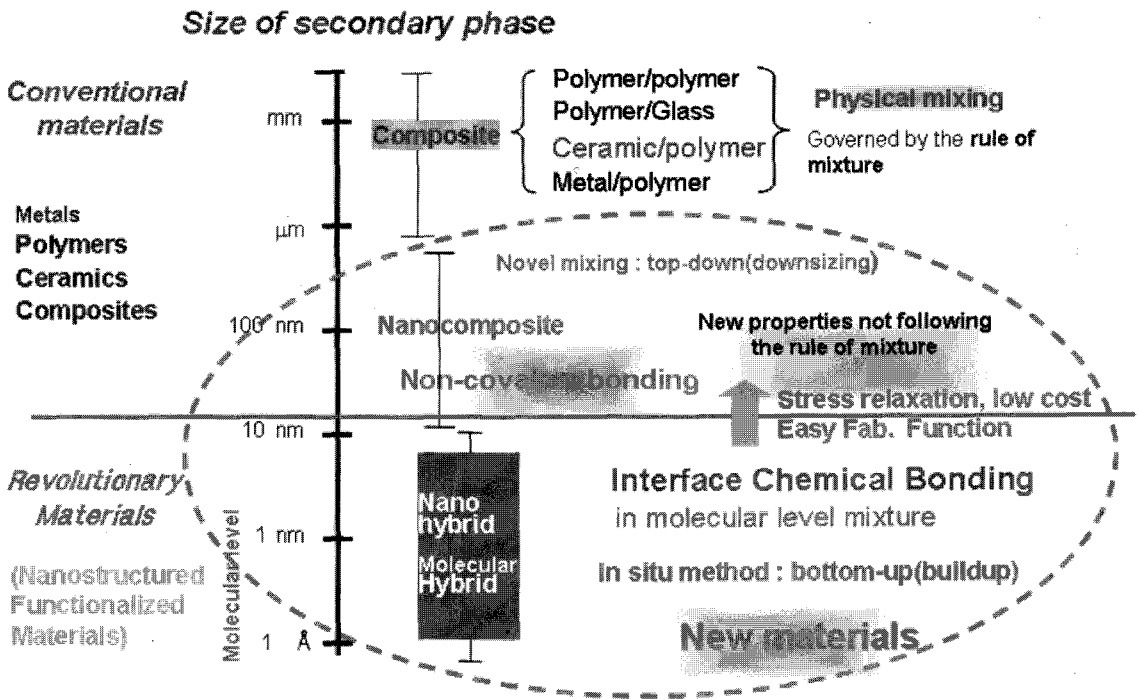


그림 1. 유기 나노 하이브리드 기술의 개념.

이 도입되어 사용되고 있다. 그림 1은 유기 나노 하이브리드 기술(Organic-inorganic Nano Hybrid Technology)의 개념을 요약한 것이다[4].

주의를 필요하다.

### 3. 절연수지의 고전도성

전형적으로 전기, 전자 부품산업용으로 사용되는 절연수지와 필러용 소재의 열적특성은 표 1과 같다. 혼합(Mixing) 방법으로 CB(Carbon Fiber)를 이용한 경우 20 vol%를 첨가하는 경우 그림 2의 필러 조성에 따른 열전도율의 증가특성과 같이 약 5배의 열전도율의 증가가 가능하다[5, 6]. 문제는 그림 3에서 알 수 있듯이 전기전도율의 변화이다. 15-20 vol% 조성범위에서 급격한 비저항의 감소가 초래하므로 절연특성에 큰 영향을 주게 되므로 선택에

표 1. 절연수지와 필러용 소재의 열적특성.

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	1.0
Epoxy (dielectric)	1500	1090	0.23	9.6
Epoxy (conductive)	10500	1195	0.35	14.6
Polyimide	1413	1100	0.33	13.8
FR-4	1500	1000	0.30	12.5
Water	1000	4200	0.59	24.6
Thermal grease			1.10	46.0
Silica	2200		1.5	62.5
Alumina	3864	834	22	9.17 × 10 <sup>2</sup>
Silicon	2330	770	120	5.00 × 10 <sup>3</sup>
Aluminum	2700	900	150	6.25 × 10 <sup>3</sup>
Aluminum nitride, silica coated	3260		220	9.17 × 10 <sup>3</sup>
Boron nitride	2250		300	1.25 × 10 <sup>4</sup>
Gold	19300	129	300	1.25 × 10 <sup>4</sup>
Copper	8800	380	390	1.63 × 10 <sup>4</sup>
Carbon fiber, high thermally conductive	2150-2250		800	3.33 × 10 <sup>4</sup>
Diamond	3500	51	2000	8.33 × 10 <sup>4</sup>

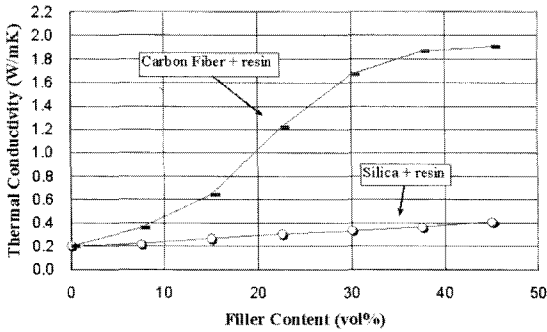


그림 2. 필러조성에 따른 열전도율의 증가.

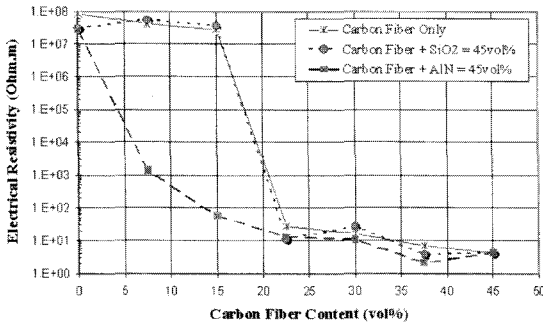
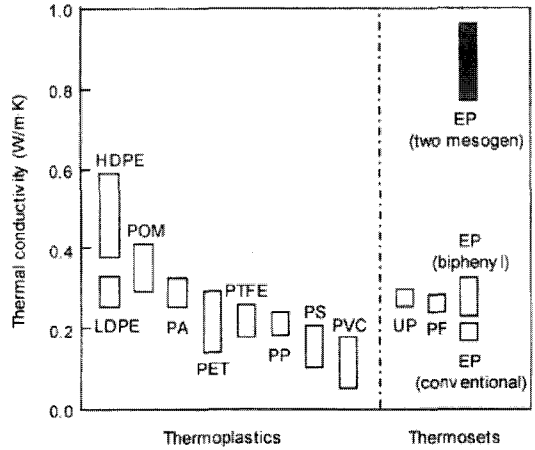


그림 3. CB 필러조성에 따른 전기전도율의 변화.

#### 4. 절연 바니쉬 열전도특성

그림 4와 같이 전기, 전자산업용 폴리머수지의 열전도율은 대부분 약 0.6 W/mK 이하로 열가소성 에폭시의 경우 약 0.2 W/mK로 상당히 낮다. 기존 혼합-성형방법으로 제조하는 경우 어느 정도의 열전도성 향상을 얻을 수 있으나 전기적 절연내력에서 문제가 발생할 가능성이 높다[7].

최근 일본 히다찌사에서 개발한 유무기 나노 하이브리드 방법으로 EP수지의 결정화(그림 6)를 제어하여 나노필러(Nano Filler)를 하이브리드화한 연구 결과 보면 그림 5과 같다[8]. 나노필러 30 vol% 조성



- HDPE: high density poly ethylene
- LDPE: Low density poly ethylene
- POM: Poly (oxy methylene)
- PA: Poly amide
- PET: Poly (ethylene telephthalate)
- PTFE: Poly tetra fluoroethylene
- PP: Poly propylene
- PS: Polystyrene
- PVC: Poly (vinyl chloride)
- UP: Unsaturated poly ester
- PF: Phenol resin
- EP: Epoxy resin

그림 4. 폴리머수지의 열전도율.

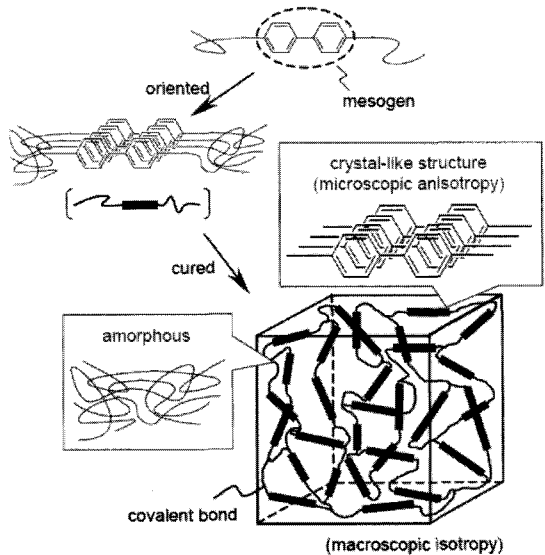


그림 5. EP수지의 결정화 제어 모델.

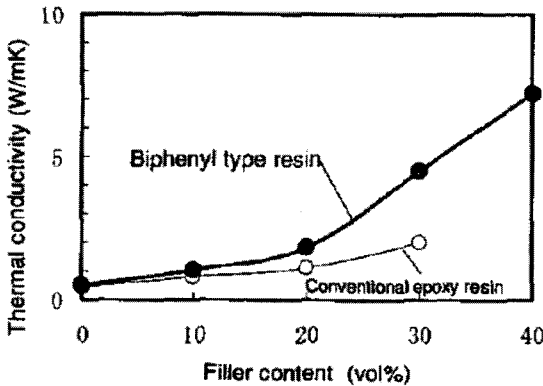


그림 6. 나노필러 조성에 따른 열전도율.

에서 약 5 W/mK의 열전도율로 이 값은 차세대 전력, 전자, 통신용 부품의 집적화(Integrated)에 따른 에너지의 효율과 설계능력의 향상을 위해 열특성(Thermal Properties)을 관리에 중요한 의미를 갖는 것으로 판단된다. 한편 절연 및 기계적특성은 개선되거나 안정한 값은 유지하는 것으로 나타났다.

이 소재 개발의 핵심은 열전도성이 높은 무기필러의 양이 지나치게 높아지면 전기적 특성 외에 성형성 등의 기계적 특성이 저하되기 때문에 가능하면 적은양의 무기필러를 가지고 열전도율을 높이기 위해 EP수지의 결정화를 높여 그 특성을 획기적으로 높이고 있다. 한편 이러한 개념은 나노 무기필러를

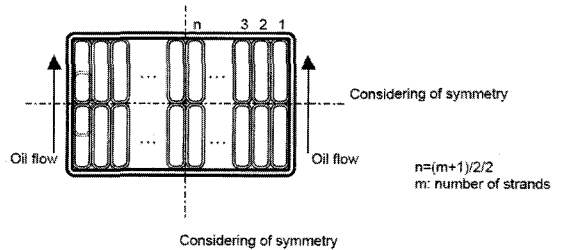
표 2. 실제품 적용 물성.

Press Temperature	175 ℃	205 ℃
Base Material Used	Glass Fabric	Glass Fabric
Coefficient of Thermal Conductivity[W/m · K]	49	5.2
Coefficient of Thermal Expansion[ppm/K]	15.5	15.7
Copper-foil Peel Strength[kN/ml]	0.23	0.25
Tg[℃] by DMA Method	172	192
Storage Modulus[MPa] by DMA Method	2130	3425

졸-겔(Sol-gel)법에 하이브리드로 합성하면 적은 첨가조성에서 높은 분산효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. TR 실모델 적용 시뮬레이션

앞에서 소개한 고전도성 절연 바니쉬를 실제 유입 변압기용으로 적용하는 경우 그림 7과 같이 모델을 설정하여 열전도율의 개선효과를 확인하는 차원에서 기초적인 모의해석을 실시하였다.



- Axial Direction Radiation is Ignored.(Only Radial Direction Radiation)
- Enamel Thickness is 0.1mm(Both Side)
- Original Thermal Conductivity of Enamel is Supposed 0.1 W/m/K
- Copper Conductivity is Supposed Infinity

그림 7. 해석용 TR 기본모델과 적용조건.

에나멜수지의 열전도율을 0.1에서 1.0 W/mK까지 기본수지 대비 10배로 높이면서 도체 수에 따른 변압기 오일의 온도 상승률을 모의 해석한 결과를 그림 8에 나타내었다. 도체수가 많아지면 오일의 온도는 상승하고 수지의 열전도율이 높아지면 온도상승이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

특히 도체수가 많아질수록 오일의 온도 상승률은 더욱 감소하는 것으로 나타났다. 그림 9은 도체수가 10 이상, 수지의 열전도율이 5배 이상 높아지면 주변온도의 감소율은 20%에 달하고 있음을 보여준다.

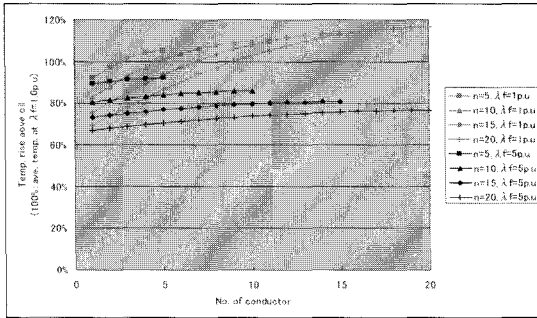


그림 8. 열전도율과 도체수에 따른 변압기 오일의 온도 상승률.

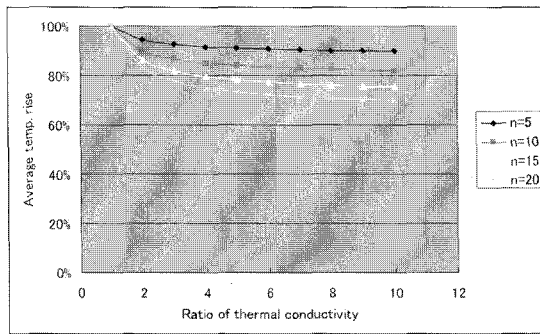


그림 9. 열전도율과 도체 수에 따른 변압기의 평균 온도 상승률.

## 6. 결론

여기서는 열전도성 절연수지와 관련된 유무기 나노 하이브리드 기술에 대해 간단히 소개하였다. 기존 유무기를 복합기술에서는 균일성 및 결합성에서 한계를 갖기 때문에 졸-겔(Sol-gel)공법을 이용한 유무기 나노 하이브리드 기술(Organic-inorganic Nano Hybride Technology)의 도입이 중요하다. 필러조성에 따른 열전도율은 약 5배의 증가가 가능하지만 비저항의 감소 등 절연특성에 큰 영향을 주게

되므로 선택에 주의를 필요하다. 최근 일본 히다찌사에서 개발한 유무기 나노 하이브리드 방법으로 EP수지의 결정화를 제어하여 나노 필러(Nano Filler)를 하이브리드화한 연구결과에서 약 5 W/mK의 높은 열전도율의 제품이 개발되었다. 이 값은 차세대 전력, 전자, 통신용 부품의 집적화(Integrated)에 따른 에너지의 효율과 설계능력의 향상을 위해 열특성(Thermal Properties)을 관리에 중요한 의미를 갖는 것으로 판단된다. 고전도성 절연 바니쉬를 실제 유입 변압기용으로 적용하는 경우 모델을 설정하여 열전도율의 개선효과를 확인하는 차원에서 기초적인 모의해석을 실시하였다. 에나멜수지의 열전도율을 0.1에서 0.5 W/mK까지 수지의 열전도율이 5배 이상 높아지고 도체수가 10 이상이면 기본수지 대비 TR 주변온도의 감소율은 20%에 달하는 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

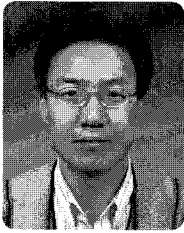
- [1] B. Gornicka, J. Zawadzka, B. Mazurek, "Nanofiller-modified varnishes for electrical insulation", *Materials Science*, Vol.20, No.4, pp87-91, 2002
- [2] E. S. Choi, J. S. Brooks, and D. L. Eaton, "Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing", *Journal of Applied Physics*, Vol.94, No. 9, PP6034-6039, 2003
- [3] D. P. Kang, H. Y. Park, M. S. Ahn, I. H. Myung, J. H. Choi, and H. J. Kim, "Properties of sol-gel materials synthesized from colloidal silica and alkoxy silane containing epoxy silane", *J. Korea Ind. Eng. Chem.*, Vol.16, No.6, pp822-826, 2005.
- [4] L. Ekstrand, H. Kristiansen, and J. Liu, "Characterization of thermally conductive epoxy nano composites", *IEEE, 28th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, pp19-23, 2005
- [5] M. T. Hung, O. Choi, Y. S. Ju, and H. T. Hahn, "Heat conduction in graphite nanoplatelet reinforced polymer nano composite", *Applied Physics Letters* 89, 023117, 2006.
- [6] G. Abraham, S. Packirisamy, K. Adhinarayanan, A. G. Reby, and R. Ramaswamy, "Epoxy-imide resins

from N-(4- and 3-carboxyphenyl)trimellitimides", Journal of Applied Polymer Science, Vol.78, pp1792-1736, 2000.

[7] T. Tanaka, et al, "Polymer nano composites as dielectrics and electrical insulation perspectives for processing technologies, material characterization and future applications", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation", Vol.11, No.5, pp763-783, 2004.

[8] K. Fukushima, H. Takahasi, Y. Takemawa, M. Hattori, and M. Yonekura, "High thermal conductive epoxy resins with controlled high order structures", 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomina, pp340-343, 2004.

#### 저|자|약|력



성 명 : 한세원

◆ 학 력

- 1984년  
한양대 전기공학과 공학사
- 1986년  
한양대 대학원 전기공학과 공학 석사
- 1999년  
한양대 대학원 전기공학과 공학 박사

◆ 경 력

- 1986년 - 현 재  
한국전기연구원 재료응용연구단 현 책임연구원
- 2002년 - 2004년  
동서대 정보전자공학과 겸임교수

