

# 전력 케이블용 나노복합재료의 개발동향 및 전망

최영진 주임연구원, 민경대 선임연구원, 강승훈 선임연구원 (대한전선 기술연구소 소재팀)

## 1. 서론

전력 전송용 케이블은 산업제반시설의 확대 및 다변화 추세에 맞추어 전력의 장기적 공급 안정성과 전력수요 밀도 증대를 극복하기 위한 방향으로 전개되고 있으며, 이와 더불어 전 세계적인 환경오염 문제에 대응하여 환경 친화적인 절연재료를 개발하는 연구가 일본, 미국 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

전력용 케이블의 구성은 그림 1과 같이 크게 원형 금속 도체 (Stranded Copper or Aluminum Conductor)를 중심으로 내부 반도체층 (Inner

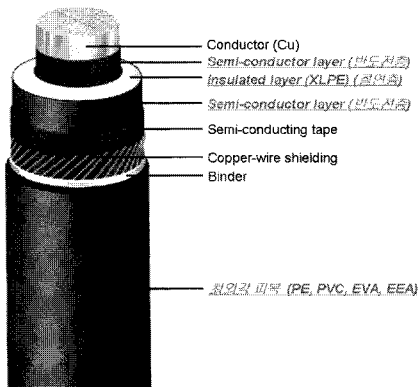


그림 1. 전력 케이블의 구성 및 나노복합재료 적용가능 부위.

Semiconductor Layer), 절연층 (Insulating Layer), 외부 반도체층 (Outer Semiconductor Layer), 금속 차폐층 (Wire or Tape Metallic Screen) 및 최외부 피복층 (Jacket) 등으로 구성되어 있으며, 절연층 재료나 케이블 보호 목적으로 사용되는 최외부 피복재료의 경우 사용자가 요구하는 물리적, 화학적, 기계적 특성에 따라 케이블 구조의 개질 및 다양한 첨가제들을 첨가함으로써 요구특성을 만족시켜왔다. 또한 최근 지중송전선로의 수요 증가와 신재생에너지원인 태양광발전, 풍력발전 및 대륙간/이도간을 연결하는 장거리 송전망 구축을 위해 요구되는 직류송전 (DC Electric Power Transmission) 케이블 수요 발생으로 인하여 차세대 절연재료의 초절연, 고열화산성, 내후성 등 새로운 모멘텀이 발생하는 시대에 대응하기 위하여 나노복합재료를 이용한 절연 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 그러나 이러한 나노재료 또는 나노기술이 적용된 케이블의 상용화는 아직까지 미미한 상태이다.

나노복합재료에 적용되는 나노물질은 구성요소들의 형태에 따라 나노입자 (Nanoparticle)와 같은 영차원 구조와 나노판 (Nanoplate or Nanosheet), 나노막 (Nanowall) 등의 이차원 구조 등으로 분류할 수 있으며, 고분자 수지와 함께 두 종류 이상의 유기 또는 무기재료들이 혼합되어 사용된다. 점토 (Clay)를 이용한 나노복합절연재료는 일본의 Toyota 연구소에서 가장 많은 연구가 이루어졌으며, 세계 최초로 점토 분산 고분자 나노복합재료의 개발 및 상용화에 성공한 바 있다. 미국 다우社は 합성 나노실리

카로 천연 나노점토 (Montmorillonate)를 대체하여 폴리올레핀과의 나노복합재료를 전선 및 케이블용 수지 컴파운드에 적용하므로써 난연성을 크게 향상시켰으며, 합성수지 나노복합재료 기술을 자동차 부품에도 확대 적용시키는 기술이 다우社를 중심으로 개발되고 있다. 일본의 JPS社는 고분자 수지 내에 산화마그네슘 (MgO) 나노 입자를 첨가하여 내수 트리성 케이블 (Water-treeing Resistant Electric Cable) [2] 및 절연 성능이 향상된  $\pm 500$  kV급 DC 초고압 XLPE (Cross Linked Polyethylene, XLPE) 해저케이블 개발을 완료했으며 최근 상용화를 계획하고 있다 [3, 4].

본고에서는 전력용 케이블에 적용된 나노복합절연재료에 대한 기존의 연구개발결과를 소개하고 향후 나노복합절연재료의 연구 분야에 대하여 전망하고자 한다. 특히 최근 HVDC (High Voltage Direct Current) 초고압 DC 케이블용 나노복합절연재료 연구 동향에 주지하여 DC XLPE 절연층, 내·외부 반도체층 및 최외부 피복층 등에 적용되는 나노절연재료에 대한 연구 결과를 중점적으로 소개하고자 한다.

## 2. 전력 케이블용 나노절연재료

케이블 주요 구성요소 중 하나인 절연층은 주로 폴리에틸렌을 화학적 가교제로 가교시킨 가교폴리에틸렌 (XLPE) 또는 에틸렌프로필렌 공중합체 (Ethylene Propylene Diene M-class, EDPM or Ethylene Propylene Rubber, EPR)가 사용된다. 열가소성 고분자 수지인 폴리에틸렌은 우수한 전기 절연 특성을 가지고는 있으나 열가소성 성질로 인해 허용 운전온도가 70 °C로 제한되며, 이를 개선하기 위해 가교반응을 통해 화학구조가 변형된 XLPE가 주로 사용된다. XLPE는 우수한 절연저항 특성과 90 °C의 높은 허용운전온도로 인해 전력케이블의 절연재료로 각광받기 시작했으며, 제조기술의 진보 및 소재 기술 발달로 인하여 XLPE의 단점인 수트리 (Water Tree) 및 전기트리 (Electric Tree) 문제가 개선되어감에 따라 초고압 전력케이블로 적용이 확대되었다.

또한, 교류송전 (AC Electric Power Transmission)용 초고압 케이블의 발전과 더불어 해저케이블, 태양광 발전, 풍력발전 및 대륙간/이도간을 연결하는 장거리 송전망 구축을 위해 요구되는 DC XLPE 케이블에 대한 수요도 점차 증가 추세에 있다.

AC용 XLPE 케이블에 적용되는 절연재료의 개발은 이미 완료되어 상용화되고 있으나 향후 수요 증가가 예측되는 DC용의 경우 공간전하 축적문제 및 극성반전에 의한 케이블 파괴 등의 문제로 인해 이를 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 나노재료가 적용된 DC용 초고압 절연재료로 활용하려는 연구가 학계 및 산업계에서 꾸준히 시도되어 왔으나 무기물 나노입자의 구조제어기술, 나노입자 표면의 물리화학적 처리기술, 무결점 성형기술 등 나노입자를 이용한 절연재료의 연구개발은 아직까지 해결해야할 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한, AC에 사용되는 XLPE 절연재료를 DC 케이블에 적용할 경우 공간전하 (Space Charge) 축적 문제로 인하여 사용이 제한되고 있으며 (현재, VSC (Voltage Source Converter) 기술의 한계로 최고 150 kV, 300 MW까지의 지중/해저 케이블에 사용되고 있으며, 대표적으로 호주의 Murraylink 프로젝트에 사용됨 [5]), 공간전하 축적을 억제하고 DC 전기 절연 특성 향상시킬 수 있는 방안으로 XLPE 나노복합절연재료 개발이 절실히 요구된다.

공간전하 축적 억제 및 절연특성 향상을 위한 무기 필러로는  $TiO_2$ ,  $BaTiO_3$  등이 선행 연구되어 왔으나 필러 자체의 결정성 및 크기 변화로 인하여 체적 저항 및 절연파괴 강도가 감소되는 문제점이 확인되었다 [6-8]. M. Takaoka 등은 10~100 nm 크기의 카본블랙을 PE에 0.2~5.0 wt% 첨가하여 공간전하 축적을 억제에 관한 연구결과를 보고한 바 있다 [9]. 최근 일본의 케이블 제조업체인 JPS社와 Toyohashi 대학을 중심으로 공간전하 축적 억제 및 극성반전에 의한 파괴 저항성 등 우수한 장점을 가지고 있는 산화마그네슘 (MgO) 나노필러에 대한 연구가 진행 중에 있으며 [10-12], 현재 초고압 해저케이블 XLPE 절연층에 적용되어 상용화를 기획하고 있다. 그림 2에는 일본의 JPS社의 나노필러가 첨가된 500 kV급 해저케이블 사진 및 투과전자현미경 사진을 나타내었으

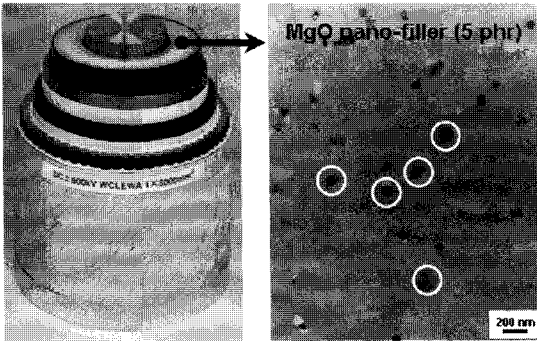


그림 2. MgO 나노필러가 적용된 DC XLPE 해저케이블 및 투과전자현미경 사진.

며 수십 나노미터 크기의 MgO 입자들이 고분자 수지 내에 균일하게 분포된 것을 확인할 수 있다. 이러한 나노필러 첨가에 따른 증강된 특성들을 그림 3~5에 나타내었다. 먼저 PE 필름에 수십 나노미터 크기의 MgO 필러 첨가량에 따른 나노복합절연재료의 체적저항 변화를 그림 3에 나타내었다. 체적저항 (Volume Resistivity)은 MgO 나노필러가 첨가된 경우가 그렇지 않은 경우보다 큰값을 나타내었으며, 1 phr (Parts Per Hundred Parts of Resin) 이상 나노필러가 첨가된 경우 급격하게 증가하다 안정화되는 것을 알 수 있다. 체적저항의 증가는 전기를 전달하는 전하의 움직임과 상관관계가 있으며 수십 나노크기

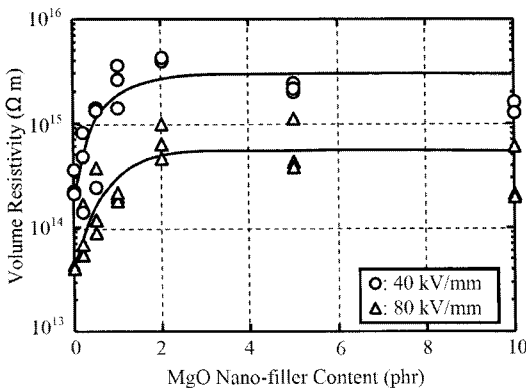


그림 3. MgO 나노필러 함량에 따른 체적저항 특성.

의 필러 첨가에 의해 기본 수지 내에 전하의 이동을 제한하는 역할로 인해 체적저항이 높아진다고 보고하고 있다.

나노필러의 첨가는 체적저항의 증가와 더불어 절연파괴 강도도 증가시킨다. 그림 4에는 30 마이크로미터 두께의 PE 필름에 MgO 나노필러가 첨가된 나노복합절연재료의 절연파괴 강도 특성을 나타내었다. MgO 나노필러가 2 phr 이하로 소량 첨가 시 절연파괴 특성이 향상되는 것을 알 수 있으며, 2 phr 이상 첨가 시 특성이 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다.

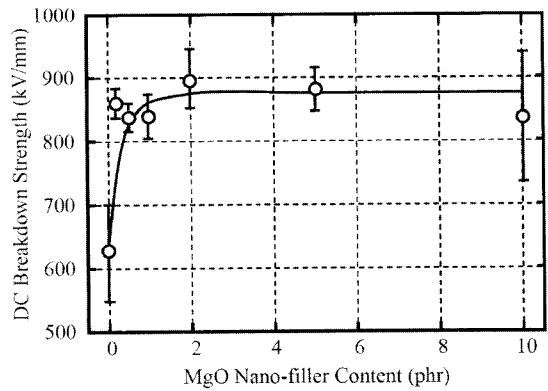


그림 4. MgO 나노필러 함량에 따른 DC 절연파괴 강도 특성.

MgO 나노필러 첨가에 따른 평균전계 (Average Field)와 최대전계 (Maximum Electric Field)의 관계를 그림 5에 나타내었다. 나노필러가 첨가되지 않은 경우 85 kV/mm 평균전계에 대하여 급격한 최대전계 값의 증가를 보였으며, 0.2 phr의 나노필러가 첨가된 경우에는 평균전계가 증가된 약 100 kV/mm에서, 0.5 phr 이상에서의 최대전계 값은 평균적으로 선형적 증가 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 나노필러가 없을 때의 공간전하가 DC 평균전계 하에서 나노필러가 첨가된 경우와 비교하여 쉽게 형성되었기 때문이다.

XLPE 케이블 절연층에서 발생하는 가장 치명적인 절연 열화요인 중의 하나는 절연층 내에 존재하는 이물질 및 반도체층과 절연층 사이 계면의 돌기

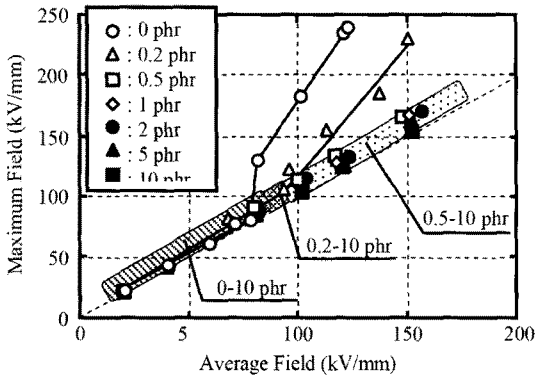
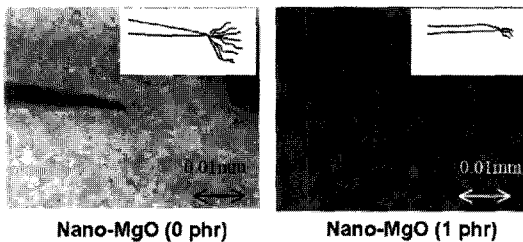


그림 5. MgO 나노필러 함량에 따른 평균전계와 최대전계 특성 관계.

에서 발생하는 전기트리 (Electric Tree)로 인한 케이블의 수명단축이다. 이를 해결하기 위해 S. Masuda 등은 나노필러 첨가에 의해 전기 트리의 발생 길이를 크게 개선시킬 수 있다고 보고한 바 있다 [11]. MgO 나노필러를 1 phr 첨가하였을 때 그림 6과 같이 평균 전기 트리의 길이가 크게 감소했으며, 이러한 원인으로서는 나노필러가 첨가되므로써 절연체 내부의 공간전하 이동을 억제한다고 보고하고 있다.

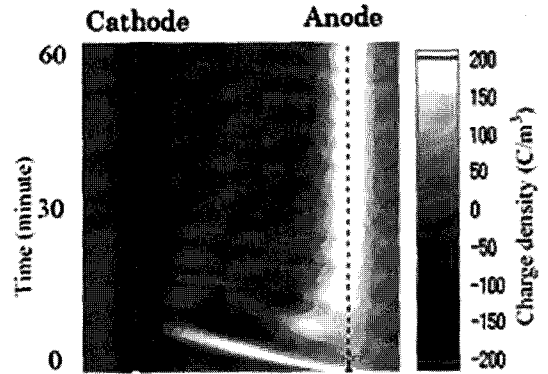
이와 같이 나노크기의 필러 첨가에 의한 체적저항 증가 및 절연파괴 강도 특성의 향상은 공간전하의 억제와 관계되며 최근 수년 동안 꾸준히 보고되



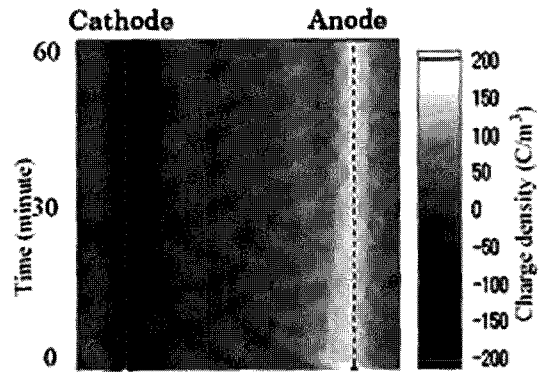
Film	Sample Number	Event Probability (%)	Average of Apparatus Tree Length (μm)
0 phr	5	100	7.38
1 phr	6	50	3.15

그림 6. MgO 나노필러 첨가에 따른 전기 트리 발생의 길이.

고 있다 [13, 14]. 그림 7에는 150 kV/mm 전계하에서 측정된 시간 변화에 따른 공간전하 분포도를 나타내었다 [15]. MgO 나노필러가 첨가된 그림 7(b)의 경우가 그렇지 않은 경우보다 공간전하의 축적억제 현상이 우수하다는 것을 분포의 균질함을 통하여 확인할 수 있다.



(a) XLPE



(b) XLPE/MgO

그림 7. 150 kV/mm 전계하에서 측정된 시간변화에 따른 공간전하 분포도.

### 3. 전력 케이블용 나노피복재료

전력 케이블 구성요소 중 최외각에 위치한 피복재료는 외부 환경에 노출되어 있어 가공성, 난연성,

친환경성 등의 고기능이 요구된다. 주로 고분자 수지로는 EVA (Ethylene-vinyl Acetate), EEA (Ethylene-ethyl Acrylate), PVC (Poly-vinyl Chloride), PE (Polyethylene) 등이 사용되며 난연제, 산화방지제, 가공조제, 활제 등이 첨가된다. 일반적으로 난연제로는 금속 수산화물계, 인계, 브롬계, 안티몬계 화합물이 사용되며 최근 유럽 등 선진국을 중심으로 환경 문제에 대한 대응의 필요성이 대두되면서 비할로겐계 난연제인 수산화마그네슘 (Mg(OH)<sub>2</sub>), 수산화알루미늄 (Al(OH)<sub>3</sub>) 등의 무기입자가 적용된 케이블이 상용화되어 있다. 또한 난연특성을 개선시키기 위해 난연보조제로 점토 광물인 층상 실리케이트 (Layered Silicate)를 고분자 수지 내 첨가된 케이블 개발 연구가 활발히 전개되고 있다.

최근 나노입자 크기의 난연 무기물을 케이블 표면에 분사시키므로써 기존 난연제와 결합되어 개선된 특성이 발현되는 결과를 보고하였다. 이러한 나노재료를 이용한 케이블의 제조 기술은 난연 특성 저하 없이 난연제의 함량을 30% 이상 줄일 수 있으며 비할로겐계 친환경 난연제의 단점인 강도 저하 현상까지 개선시킬 수 있다고 한다.

난연제의 나노재료 적용 기술과 더불어 난연보조제에 나노입자를 첨가하므로써 새로운 특성을 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 초기 난연보조제는 이차원 형상의 고비표면적을 가지는 알루미늄 실리케이트 쉬트를 이용한 복합체가 일부 연구되기도 하였으나, 1987년 일본의 Toyota社에 의하여 연구된 층상 실리케이트와 폴리아미드 복합체 제조 기술의 개발로 인하여 층상 실리케이트의 난연보조제 적용에 대한 연구가 활발해졌다.

난연보조제로 사용되는 층상 실리케이트는 이차원 나노판 (Nanoplate or Nanosheet) 형상을 가지고 있다. 기본 결정구조는 그림 8과 같이 Pyrophyllite 구조에서의 Tetrahedral의 실리카 층 사이에 Octahedral의 알루미늄 층으로 구성되어 있으며, 두 층이 2:1로 이루어져 있는 결정구조를 Montmorillonite (Smectite 그룹)라 한다 [16].

층상 구조의 나노실리케이트 무기 입자와 고분자 복합화 제조 방법은 동시 중합법 (In-situ

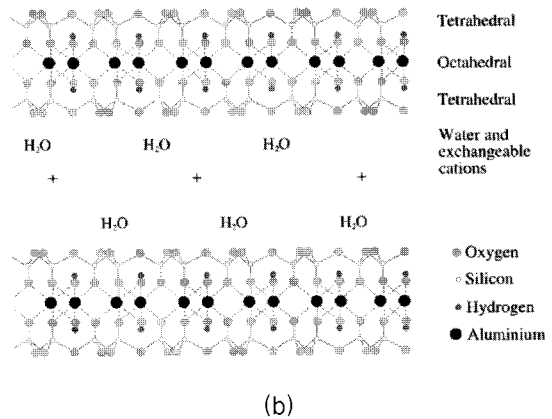
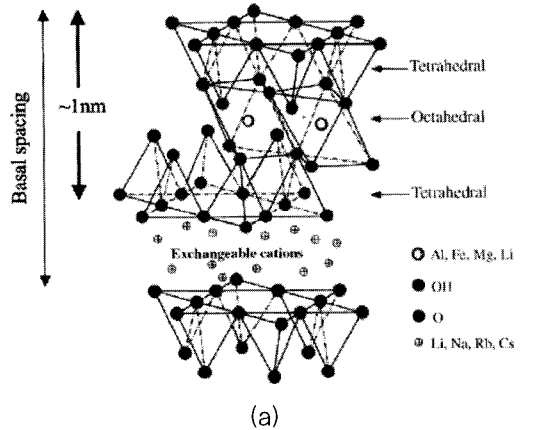


그림 8. Montmorillonite 결정구조.

Polymerization), 용제혼합법 (Solvent Intercalation), 용융혼합법 (Melt Intercalation) 등이 있으며, 제조된 복합체는 점토 (Clay)의 분산 또는 박리의 정도에 따라 완전 박리 (Exfoliated), 층간 삽입 (Intercalated), 덩어리 (Aggregate) 혹은 이들이 혼재하는 상태로 고분자 기지에 존재한다 (그림 9).

일반적으로 전력 케이블용 최외각 피복재료는 점토 광물인 층상 실리케이트를 필러로 폴리에틸렌과 같은 고분자 수지 내에 첨가 분산하여 제조된다. 최근 미국의 다우社は 새로운 하이브리드 나노재료에 대한 연구를 보고하였다 [17]. 다우社에서 개발된 새로운 하이브리드 나노재료는 자연에서 얻어진 나노

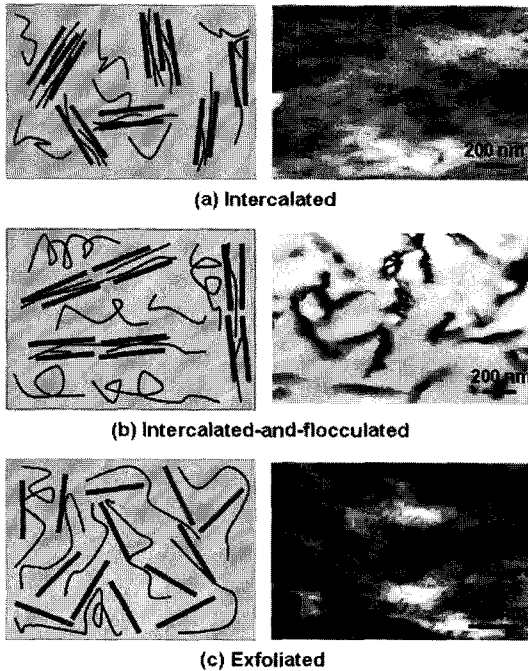
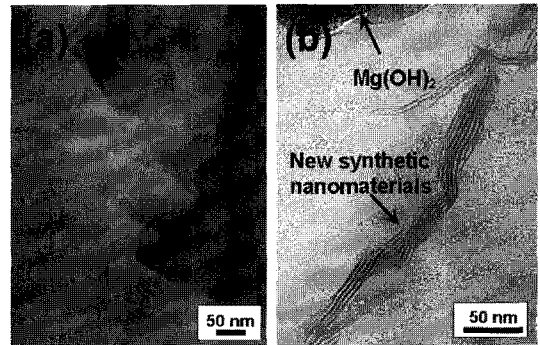


그림 9. 층상 실리케이트와 고분자 나노 복합체의 세가지 형태. (a) Intercalated, (b) Intercalated-and-flocculated, (c) Exfoliated.

실리케이트인 Montmorillonite-based EVA에 비하여 초고순도이면서 재현성 있게 대량 제조가 가능하다. 그림 10(a)은 다우사에서 제조된 합성 나노재료의 투과전자현미경 사진이며, 그림 10(b)에는 EVA 수지 내에 합성 나노재료와 비할로겐계 난연제인  $Mg(OH)_2$ 가 첨가 분산된 사진으로 X-선 회절분석 결과로부터 Montmorillonite-based EVA에 비하여 신 합성된 나노재료가 더 넓은 *d-spacing* 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 전력 케이블용 반도체층 재료

초고압 전력 케이블에는 도체의 전계차이 완화와 도체와 절연체간 계면에서 발생하는 부분방전 및 절연체와 도체의 직접 접촉에 따른 열화반응을 방지하기 위해 절연체의 내외부에 반도체층을 둔다. 반도체



(c)	XRD Data (Å)			
	d-spacing in unmodified layered material	d-spacing in organo-modified layered material	d-spacing in nano-composite	d-spacing change in nano-composite versus organo modified layered material
Montmorillonite	~ 12	25.01	37.72	12.71
Synthetic nano-material	15.55	50.10	41.88	-8.22

그림 10. Montmorillonite와 다우사 합성 나노재료의 투과전자현미경 사진 및 X-선 회절분석 결과 (a) 합성 나노실리케이트, (b) New Synthetic nanomaterials// $Mg(OH)_2$  composite, (c) X-선 회절분석에 의한 *d-spacing*.

층은 중심 도체를 차폐하는 내부 반도체층 (Inner Semiconducting Layer or Conductor Shield)과 절연층 차폐 역할을 하는 외부 반도체층 (Outer Semiconducting Layer or Insulator Shield)으로 구분된다. 기존의 반도체층 재료는 카본블랙 또는 Graphite가 첨가된 면테이프 (Cotton Tape) 형태이거나 반도체고무가 충전된 직물테이프 (Skim Tape)였으나 테이프 면이 헤지거나 박리되는 문제로 인한 전계 집중 현상으로 절연층이 파괴되는 문제점이 있었다. 최근에는 EVA, EEA, EPDM, LDPE (Low Density Polyethylene) 등의 열가소성 수지 및 열적, 기계적 성질을 보완하기 위해 열경화성 수지가 절연 재료로 사용된다.

반도체층 재료에서 전도성을 부여하기 위한 목적으로 첨가되는 카본블랙은 구상 형태로 입자크기는 대략 수십 나노미터 정도이며 입자크기가 미세할수



록 단위부피당 카본블랙의 수가 증가하므로 입자간 근접효과 (Proximity Effect)에 의해 전도성이 향상된다고 알려져 있다. 반도체층 재료에 첨가되는 카본블랙은 고분자 수지 내 무게비로 30~40 % 정도 첨가되며 임계함량 이상이 되면 충격강도가 저하된다. 최근 밀도가 높은 카본블랙에 비해 낮은 밀도를 가지며 큰 비표면적을 가지는 일차원 구조의 탄소나노튜브 (Carbon Nanotube, CNT)를 반도체층 재료에 적용하려는 연구 결과가 보고되었다 [18]. 그림 11은 EEA 수지에 분포하는 탄소나노튜브의 함량에 따른 주사전자현미경 사진으로 EEA 수지 내에 첨가된 탄소나노튜브는 전체적으로 양호한 분산성으로 나타내고 있으며, 함량 증가에 따라 표면에 노출되는 탄소나노튜브의 양이 증가하는 것을 알 수 있다. 카본블랙에 비해 상대적으로 적은 양이 첨가되었음에도 불구하고 탄소나노튜브가 가지는 큰 중형비와 네트워크 분포로 인하여 전자 호핑에 의해 이루어지는 자유전자의 이동을 원활히 할 수 있어 전기 전도성의 향상을 가져올 수 있는 장점을 가지고 있다.

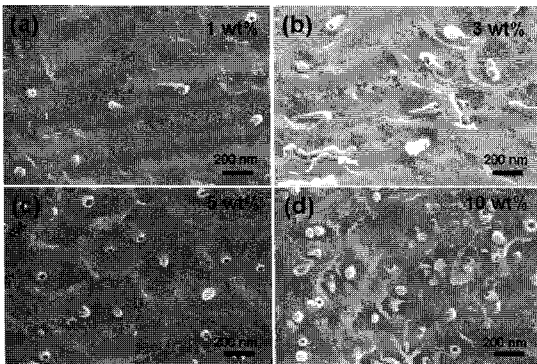


그림 11. CNT-based 반도체층의 전자주사현미경 사진 (a) CNT 1 wt%, (b) CNT 3 wt%, (c) CNT 5 wt%, (d) CNT 10 wt%.

## 5. 국내·외 기술개발 현황

차세대 절연재료의 기술개발 방향은 환경 친화적이고 우수한 전송능력이 확보되어야 하며 기존 상용

화된 케이블에 비해 초절연 특성을 요구하므로 현재 완성형 케이블 제조업체인 일본의 JPS社 (Japan Power System, Hitachi + Sumitomo)를 중심으로 넥상스, 프리즈미안, LS전선, 대한전선 등과 합성수지 제조업체인 미국의 다우社, EPRI (Electrical Power Research Institute), 유럽의 Borealis 등이 나노복합재료기술을 이용한 케이블용 절연 재료의 성능 향상을 위한 연구를 진행 중에 있다.

특히 일본의 경우 초고압케이블 업체인 JPS와 JHV (Japan High Voltage, Fujikura + Furukawa + Nexans), EXIM (Mitsubishi + Showa)를 중심으로 석유화학 회사인 UBE (Ube Kosan Kabushiki-gaisha)로부터 LDPE를 공급받아 나노입자가 적용된 DC XLPE 케이블을 개발 중에 있으며, 나노재료의 경우 일본기초과학연구소와 연계하여 연구가 진행 중에 있다. JPS社에서 Type Test가 완료된 500 kV 급 DC XLPE 케이블은 50~200 nm 크기를 가지는 산화마그네슘 나노입자가 기본 수지 내에 매우 균일하게 분산된 것으로 확인되고 있다.

미주 지역의 경우 다우社와 EPRI가 학계를 중심으로 DC XLPE 절연재료에 대한 연구가 진행되고 있다. 미국 다우社의 합성수지의 경우 신합성 나노실리카로 천연 나노점도를 대체하여 폴리올레핀과의 나노복합재료를 개발하였으며 이 제품은 전선 및 케이블용 수지 컴파운드의 난연성을 개선시키면서 다른 물성은 종전대로 유지된다고 알려져 있다. 또한 나노복합재료 합성 기술을 자동차 부품에도 확대 적용시키는 연구가 수행 중에 있으며, 차량 용도 외에도 각종 구조재, 배관재 및 내구재 부품에 널리 쓰일 것으로 예상된다.

국내의 경우 석유화학 업체인 한화석유화학을 중심으로 XLPE용 LDPE의 고품위, 가교 부산물 최소화를 통한 첨가제 최적화 기술을 통해 DC용 XLPE 절연재료 개발을 준비하고 있으며 케이블 내부로 주입되는 공간전하를 억제하기 위해 탄소나노튜브가 적용된 반도체 컴파운드에 대한 연구가 진행되고 있다.

## 6. 향후 케이블용 나노복합재료의 연구 전망

전력 케이블용 나노복합절연재료에 대한 연구는 향상된 절연 특성을 가지기 위해 나노크기의 무기물 필러를 고분자 수지 내에 분산시켜 고분자 수지가 본래 가지고 있는 물리적, 화학적, 기계적 특성을 향상시키는 연구가 주로 진행되어 왔다. 절연재료의 경우 주로 DC용 XLPE의 절연층에 MgO 나노입자 첨가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 피복층의 경우 판상적층 나노실리케이트의 분산 및 구조 개량에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. 또한 내외부 방도전층은 고비표면적을 가지는 일차원 탄소나노튜브를 고분자 매트릭스에 첨가 분산하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내 케이블용 절연재료에 대한 연구개발은 아직까지 미미하며 원천나노재료가 적용된 제품의 개발 속도도 매우 미흡한 실정이다. 이러한 기술적 배경 및 원천재료의 기술개발의 미확보는 선진국뿐만 아니라 후발 국가들의 추격 허용이 염려되는 상황이다. 따라서 전력 케이블용 나노복합절연재료는 대규모 전력에너지의 안정적인 공급이 갖는 국가적 중요성과 상품의 경제성을 감안할 때 반드시 연구되어야 할 차세대 원천재료 기술이라고 생각되어진다.

또한, 향후 나노복합재료의 연구개발 방향은 기존 절연재료에서 탈피하여 기존에 발견하지 못했던 새로운 초절연 특성을 가지는 나노 필러 소재와 고분자 매트릭스의 개질을 고려하여, 시너지를 극대화할 수 있는 기술개발이 필요하다고 사료되며, 계속되는 나노재료의 새로운 특성을 발견하고 규명하는 연구가 선행되어야 한다고 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] T. L. Hanley et al, "A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables", IEEE Electrical insulation magazine, Vol. 19, No. 1, pp. 13-24 (2003).
- [2] Y. Murata, "Water-treeing resistant insulating composition and water-treeing resistant electric wire/cable", PCT Patents, WO07/040275 (2007).
- [3] Y. Maekawa et al, "500 kV XLPE insulated DC submarine cable", The Hitachi Densen, No. 21, pp. 65-72 (2002).
- [4] Y. Maekawa et al, "Development of 500 kV XLPE insulated DC cable", Trans. IEE of Japan, Vol. 121-B, No. 3, pp. 390-398 (2001).
- [5] Penwell Corp., "Network interconnection: Murraylink: The underground connection", Power Engineering International Magazine, Vol. 9(5), pp. 59-63 (2001).
- [6] M. S. Khalil et al, "On the use of doped polyethylene as an insulating material for HVDC cables," Conference Record 1996 IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 650-653 (1996).
- [7] M. S. Khalil et al, "Influence of BaTiO<sub>3</sub> additive and electrode material on space charge formation in polyethylene," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 3, pp. 743-746 (1996).
- [8] M. S. Khalil et al, "The role of BaTiO<sub>3</sub> in modifying the dc breakdown strength of LDPE," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 7, pp. 261-268 (2000).
- [9] M. Takaoka et al, "DC electric power cable", United State Patent, US4626618 (1986).
- [10] S. Masuda et al, "DC conduction and electrical breakdown of MgO/LDPE nanocomposite", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 1, pp. 33-39 (2008).
- [11] S. Masuda et al, "DC conduction and electrical breakdown of MgO/LDPE nanocomposite", 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 290-293 (2007).
- [12] Y. Murata, "絶縁組成物および電線・ケーブル並びに絶縁組成物の製造方法", Japanese Patent, JP2006291022 (2006).
- [13] Y. Hayase et al, "Space charge formation in LDPE/MgO nano-composite film under ultra-high DC electric stress", IEEE Trans. FM, Vol. 126, No. 11, pp. 1084-1089 (2006).
- [14] Y. Murakami et al, "DC conductor and electric breakdown of MgO/LDPE nanocomposite", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 1, pp. 33-39 (2008).
- [15] Y. Murata et al, "Investigation of space charge distribution and volume resistivity of XLPE/MgO nanocomposite material under DC



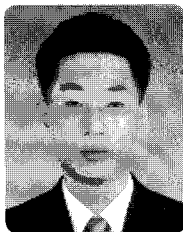


voltage application", Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Japan, September 7-11, pp. 502-505 (2008).

[16] M. Alexandre and P. Dubois, "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties, and use of a new class of materials", Materials Science and Engineering: R: Reports, No. 28, pp. 1-63 (2000).

[17] J. M. Cogen, "Novel synthetic nanocomposite materials and their application in polyolefin-based wire and cable compounds", LOES Form number 311-01101.

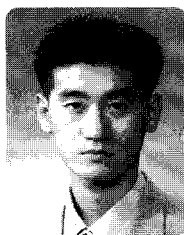
[18] J. S. Yang et al, "A study on the properties of semiconductive shield materials for power cables in accordance with content of multi-walled carbon nanotubes", International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, July 8-13, pp. 322-325 (2007).



성 명 : 민경대

◆ 학 력  
 · 2003년  
 충남대 대학원 고분자공학과  
 공학석사

◆ 경 력  
 · 2004년 - 2007년 한국화학연구원 화학소재연구단  
 연구원  
 · 2007년 - 현재 대한전선 기술연구소 소재팀  
 선임연구원

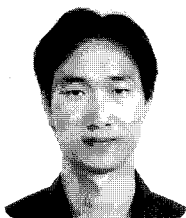


성 명 : 강승훈

◆ 학 력  
 · 2001년  
 일본 Kyushu 대학원 물질프로  
 세스공학전공 공학석사  
 · 2005년  
 일본 Kyushu 대학원 물질프로  
 세스공학전공 공학박사

◆ 경 력  
 · 2005년 - 2007년 한국기계연구원 경량재료연구그룹  
 연구원  
 · 2007년 - 2008년 부경대 신소재공학 연구원  
 · 2008년 - 현재 대한전선 기술연구소 소재팀  
 선임연구원

저|자|약|력



성 명 : 최영진

◆ 학 력  
 · 2003년  
 고려대 대학원 재료공학과  
 공학석사  
 · 2007년  
 고려대 대학원 재료공학과  
 공학박사

◆ 경 력  
 · 2007년 - 2008년 한국과학기술연구원 나노과학연구  
 본부 연구원  
 · 2008년 - 현재 대한전선 기술연구소 소재팀  
 주임연구원

