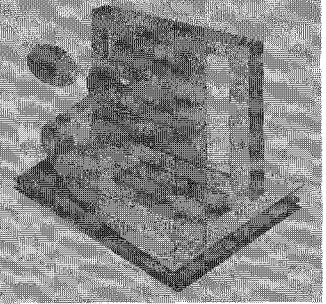


# HVDC용 나노복합 XLPE의 기술동향 및 절연성능 평가



윤재훈 박사과정, 임기조 교수 (충북대학교 전기공학부)

## 1. 서론

1951년 구소련에서 30 MW급 HVDC 송전을 위한 시험 기술이 완성된 후에 1954년 스웨덴에서 20 MV 직류송전방식이 상업적으로 처음 운전되었다. 이후 세계 각국에서는 국가 간의 전력망을 연결하거나 전력사용의 시차를 이용하여 계통을 연계하거나, 최종단의 변압기의 용량만을 키워 DC 계통을 연계하여 부하량을 늘리고 전체 계통에는 영향 없이 전력 계통을 연결하는 DC 송전에 관해서 많은 연구가 진행되고 있다. DC 송전은 AC 송전보다 모든 면에서 우수하다고는 말할 수 없으나 AC 송전에서 가지고 있는 단점을 보완할 수 있는 장점이 있다. HVDC 송전의 장점은 다음과 같다.

- ① 장거리 전력전송에 있어서 AC 전송에 비하여 가격이 저렴하다.
- ② AC 계통에 영향을 주지 않으며 대용량의 전력 전송이 가능하다.
- ③ 주파수가 다른 계통과도 연계가 가능하다.(일본의 경우 50 Hz와 60 Hz 연계)
- ④ 전력의 예비율을 낮출 수 있어 기존에 설치된 발전 용량을 줄인다.
- ⑤ 계절적 영향을 받는 수력과 화력발전소의 최적 설치를 용이하게 한다.
- ⑥ 개별적인 시스템의 부하 사이클이 다르기 때문에 상호 연계 시스템망의 최대 부하 값이 줄어

든다.

- ⑦ 발전계획을 보다 크고 경제적으로 할 수 있다. 예비율이 변하지 않는다면 상호 연계 시스템의 신뢰성을 향상시킨다.
- ⑧ 송전량과 수전량을 조절 할 수 있다.
- ⑨ 국가 간/지역 간 전력의 수출/입이 가능하다.
- ⑩ HVDC light는 유효전력과 무효전력의 발생이 자유롭다.
- ⑪ 추가적인 네트워크를 건설하지 않고 원하는 부하점에 전력전송이 가능하다.

이 같은 DC송전의 장점을 살리기 위해서는 HVDC용 케이블에 적합한 절연성능이 요구되나 국내에서는 연구가 미흡한 실정이다. 초고압용 DC 케이블 절연재는 Oil Filled Paper (저점도 함침 절연지), MI (고점도 함침 절연지), 가교 폴리에틸렌 (XLPE)으로 발전되어 왔다. OF cable의 경우 오일의 가압상태 유지를 고려하면 Span이 제한되는 문제점을 안고 있고, MI 케이블의 경우는 전류 용량이 상대적으로 적은 문제점이 있어서 최근 약 30여 년 전부터 AC 고압케이블 절연재인 XLPE를 개질하여 고압 직류케이블 절연재로 시도하려는 연구가 진행되어 왔다. XLPE는 열변형 특성을 개선하기 위해 LDPE를 기본수지로 하여 실란가교, Dicumyl peroxide와 같은 유기과산화물을 이용한 화학가교 및 전자선 조사와 같은 가교방식에 의해 가교시킨 것이다. XLPE는 절연성 및 기계적, 열적 특성이 양호하여 1980년

대부터 지중배선용 전력케이블의 절연재료로 사용되었다. 현재는 원재료의 성능 개선과 제조기술의 향상에 힘입어 초고압 교류 송배전 케이블용 절연재로 적용이 되고 있다. 고분자절연재료의 개질방식은 유기물첨가, 첨가제혼합, 고분자쇄에 적절한 단량체를 Graft 시키는 방법이 주류를 이루고 있다. 이들 방법 대부분은 제조공정에서 혼입되는 불순물, 가교시 발생하는 가교잔유물, 산화방등과 같은 첨가제의 변질 및 휘발에 기인한 체적저항율의 저하, 공간전하축적, 유전손실의 증가 등 절연열화를 가속시킨다. 이 같은 절연열화요인은 교류 또는 직류 절연케이블의 절연층 재료 설계 시 시급히 개선해야 할 과제로 지적되고 있다. 또한 DC 케이블에 사용되는 XLPE는 기존 AC에서 사용되는 재료를 그대로 사용할 경우 공간전하축적 문제로 인해 절연파괴강도가 저하하는 등의 문제점을 해결하기 위하여 공간전하의 축적을 억제하여 우수한 직류 절연 특성을 나타낼 수 있는 나노 폴리머 컴파운드가 주목받고 있다. 또한 일반적으로 전력용 케이블의 절연재 설계 시 교류 및 직류 고전압 하에서의 절연파괴강도는 절연재료의 초기 건전성을 결정하는 중요한 지표이다. 따라서 절연파괴강도에 대한 검토는 송전용량의 증대 및 초고압화가 가속됨에 따라 고전계하에서의 장기적인 절연성능을 좌우하는 중요한 요소이며 절연열화 현상을 진단하는 방법으로도 이용되고 있다.

## 2. 국내외 기술동향

### 2.1 관련 기술의 중요성

차세대 절연물 요구사항은 그림 1과 같다.

초고압용 DC 케이블은 가교 폴리에틸렌 (XLPE), MI (고점도 함침 절연지), Oil Filled Paper (저점도 함침 절연지)를 주 절연재료로 사용하고 있으며, XLPE가 포설 및 유지 관리의 장점이 있어 선호되고 있으나 공간전하 문제 등으로 AC 케이블용 절연재료 그대로 DC 케이블용 재료로 사용에는 문제가 된다. 아래 표에는 XLPE Cable과 Oil Filled Cable, 그리고 고점도유를 사용하는 MI Cable의 특징이다.

관련된 국제 케이블 규격은 CIGRE Working

Group에서 진행되어 DC용 MI 케이블에 대해서는 초기 ELECTRA 68에서 시작하여 2000년에 ELECTRA 189에 이르러서 DC로 800 kV까지 규정하고 있으며 2003년에 DC용 XLPE를 적용한 케이블에 대해 ELECTRA 219를 통해 압출 방식 250 kV까지 규정하여 현재에 이르고 있다.

고분자 복합재료를 이용한 초고압 전력기기의 고체절연은 절연재의 몰딩크기가 커져 무결점 성형의 난해성과 열 발산의 한계로 적용이 제한적이다. 나노복합소재의 초고압 절연재료분야 활용 연구가 다양하게 시도되어 왔지만 무기물 나노입자의 구조제어기술, 무기물 나노입자표면의 물리화학적 처리기술, 무결점 성형기술의 만족을 통해서 초절연성과 고열확산성을 가지면서 전력기구나 케이블의 구조

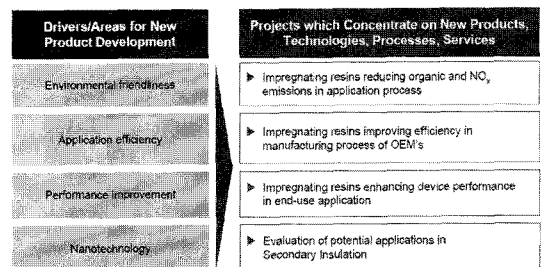


그림 1. 차세대 절연물 요구사항.

표 1. XLPE Cable, Oil Filled Cable 및 MI Cable 특징.

케이블 종류	XLPE Cable	Mass Impregnated (MI) Cable	Oil Filled (OF) Cable
절연체	XLPE with additives (organic or Inorganic)	Kraft Paper + 고점도유 (Polybutene)	Kraft Paper + 가압 저점도유 (알킬벤젠 or 팜유)
최고 도체 허용 온도	90℃	55℃	85℃
송전 한계 거리	무제한	무제한	50 km까지 (Oil 지속적 가압)
[ DC 180 kV 300 MW 송전하는 경우 비교 ]			
필요 도체 크기	500 SQ	800 SQ	비교
케이블 반경	85 mm	91 mm	
중량	20.1 kg/m	25.8 kg/m	



적 강도특성을 만족시키기가 대단히 어렵다. 일반적으로 나노입자가 분산된 고분자복합소재 연구는 재료의 기계적 및 열적 물성의 향상을 위한 연구에 집중되어 있으나 초고압 전기절연용 나노복합소재는 전기적 특성과 기계적 특성을 공히 향상시킬 수 있어 우수한 전기기기 및 부품을 개발하는데 사용이 가능하다. 유무기 나노복합 몰딩 및 코팅 소재, 직류 케이블용 나노복합 XLPE는 상기와 같은 문제점을 해결할 수 있는 원천소재로서 초절연성, 고열화상성, 내후성, 공간전하 감소, 내트래킹성 등을 혁신적으로 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 초고압 나노복합절연재료는 대규모 전력에너지의 안정적 공급이 갖는 국가적 중요성과 상품의 경제성을 감안할 때, 반드시 연구되어야 할 차세대 원천소재기술이기 때문이다. 중전기기는 기존의 전원용 기기인 발전기, 변압기, 차단기, 개폐기 등에서부터 산업용 전기기기, 전동력 운반설비, 전기부품소재 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 발전하였다. 최근 중전기기에 사용되는 절연재료는 특고압, 대전류를 견뎌내야 하며, 급작스런 고장 발생 시 또는 수명연한이 되었을 경우 일어나는 비용 손실이 높아 제품의 신뢰성이 높아야 한다. 따라서 절연재료의 성능 및 수명의 향상이 절실히 필요한 실정이다.

전력용 신소재 기술 로드맵 상의 중장기 기술 목표

- ① 고효율, 장수명, 환경 친화적 전력생산설비 및 재료 기술 개발
- ② 고효율, 저공해 대체 에너지 및 신재생 에너지 재료 기술 개발
- ③ 초고압, 대용량, 저손실 송전 및 에너지 저장/변환 재료 기술 개발
- ④ 인간 중심의 전기 환경 개선 재료 기술 개발
- ⑤ 절전, 절약 에너지 및 미래형 에너지 소재 기술 개발

표 2. Electra 219.

Electra No. 219 요지	
1.1 Background	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (1960) Polyethylene DC 케이블 생산 - 200 kV 그 당시 공간전하 문제로 극성 반전시험 어려움</li> <li>• 현재 기술의 발전으로 HVDC 케이블 시스템은 250 kV 가능</li> </ul>
1.2 Scope	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 205 kV용 DC 육상케이블 및 해저케이블, 접속재에 적용</li> <li>• 압출 절연 DC 케이블에 적용 (폴리에틸렌 [PE], 가교 폴리에틸렌 [XLPE])</li> </ul>
1.3 Summary of Tests	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개발 시험 (Development Tests), 장기 신뢰성 시험 (Prequalification Test), 형식시험 (Type Tests), 검수 시험 (Routine Tests), 샘플 시험 (Sample Tests), 준공 시험 (Test after Installation)</li> </ul>
1.4 Definitions	<p>1.4.1 General</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 케이블 시스템은 케이블과 액세서리로 구성</li> <li>• 귀환케이블 (Return cable)은 단극 HVDC 시스템에서 사고 전류의 귀환 목적으로 사용되는 저전압 DC 케이블임.</li> <li>• LCC (Line Commutated Converter)로서 극성 전환에 사용되는 컨버터임.</li> <li>• VSC (Voltage Source Converter)는 극성전환이 필요치 않을 때 사용되는 컨버터임.</li> </ul>

등을 목표로 근래에는 나노기술의 발전과 더불어 송전급 HVDC 케이블용 나노절연재료의 개발이 기대되고 있으며, 이미 일부 논문에서는 나노기술을 이용한 재료의 성능향상이 보고되고 있다. 전 세계적으로 고신뢰 고품질의 장거리 전력 수송을 위한 해저 케이블 및 풍력 및 태양광 발전 등 분산전원의 전력 수송을 위한 직류 (DC) 케이블 수요가 증가되어 직류용 케이블을 위한 재료 연구가 필요하다. (해저 케이블의 수요증가, 송전선로의 남북, 해외 AC/DC 연계관련 분산전원 (풍력, 태양광 발전) 및 전력기기 IT화) 전 세계적으로 고신뢰 고품질의 장거리 전력 수송을 위한 해저 케이블 및 풍력 및 태양광 발전 등 분산전원의 전력 수송을 위한 직류 케이블 수요가 증가되어 직류용 케이블을 위한 재료 연구가 필요하다. DC 케이블에 사용되는 XLPE는 기존 AC에서 사용되는 재료를 그대로 사용할 경우 공간전하 축적 문제로 인해 사용이 제한되며 따라서 공간전하 축적을 제어하고 직류에 대한 우수한 전기적 특성을 나타낼 수 있는 나노 컴파운드의 사용이

필요하며, DC 케이블에 사용되는 재료는 유/무기 나노재료 선정과 컴파운드 가공 공정을 포함한 직류용 XLPE 나노 컴파운드 기술을 기반으로 하여 케이블 제조 기술과 HVDC용 케이블 평가기술까지 포함하여야 할 것이다.

그 중에서 나노절연재료는 태동기 기술이므로 국가의 지원 하에 세계 최고수준의 기술을 확보하여 국가 발전을 주도해야 할 것이다. 최근 우리나라의 학계, 연구계 그리고 산업계에서 IT, BT와 함께 NT (Nanotechnology)에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 나노기술이 21세기 국가의 성장 동력이 될 것으로 보고 세계 각 국가들은 나노기술 개발에 대폭적인 예산 지원을 하고 있으며, 나노기술에서 선두 자리를 차지하여 국가 경쟁력 우위를 확보하고자 범국가적인 전략으로 추진하고 있다. 수입에 의존하는 국내 초고압 중전기기 시장의 현실을 볼 때, 신기술을 활용한 제품의 개발을 주도할 기술주도적 기업의 역할이 미미하며, 또한 선도적 기술개발이 뒤쳐질 경우, 중국이나 동남아시아 등 후발국에 추격될 수 있다. 국내 중전기기용 나노절연재료의 개발은 세계적으로 나노기술의 발전을 선도하고 있는 국내 연구개발 능력을 중전기기에 적용하여 선진국과의 기술격차를 줄이면서 후발국들과의 기술격차를 벌이는데 중요한 역할을 수행하여야 한다. 산업에서 활용되는 중전기기는 현재 연간 약 18조원 (10,780백만 달러)의 생산량을 가지고 있고, 전선류

를 제외한 대부분의 기기를 수입에 의존하고 있는 실정이다. 기술수준은 선진국의 70~80% 수준으로 가공, 조리 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 실정이다. 특히 고용량의 중전기기의 경우 고가의 제품을 수입에 의존하여 산업 의존도가 높은 실정이며, 향후 기술의 속박에서 벗어나기 위해 많은 노력이 필요하다. 또한 중국 및 동남아 시장의 수출이 점차 기술격차가 좁아지면서 어려워지고 있으며, 이들 개발도상국의 저가의 역수입 효과마저 염려되는 상황이다. 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 있다. 세계적으로 송배전 시장은 활황을 맞고 있다. 특히 송전 시장은 수년전 미국에서의 대규모 정전 사태 이후 그동안 등한시 해왔던 송전 설비 투자에 대한 사회적 관심이 높아졌고, 중국을 중심으로 한 BRICs, 신흥개발 국가들의 활발한 기반시설 확충으로 송배전 분야의 제2 르네상스 시대가 시작되었다. 그림 2에 세계 GDP 증가율 대비 송배전 투자 시장의 그래프를 나타내었다. 1960년대 선진국들의 기반시설 확충으로 상당한 투자가 이루어진 이래, 완만한 진행을 보이다가 2005년 이후 중국발 과수요와 미국 등의 투자가 송배전 분야의 급격한 시장 성장을 요구하게 되었고, 이런 현상을 2020년까지는 계속될 것으로 예측되고 있다.

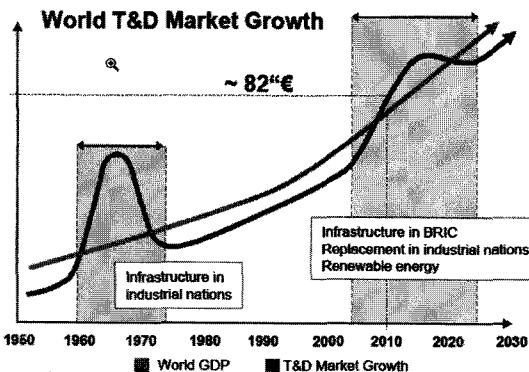


그림 2. 세계 GDP 성장률 대비 송배전 시장 성장률.

## 2.2 국내·외 관련기술 현황

### (1) 국외기술현황

나노복합재료의 기계적, 열적 특성 외에도 전기적 특성에 대한 연구는 Tanaka 그룹 등에 의해 진행되기 시작하였다. 이후 Imai나 Nelson 등에 의해 활발한 연구가 진행되면서 중전기기 및 전기기에 응용이 가능한 나노절연재료의 개발이 속속 이루어지고 있다.

① 유럽에서의 연구 동향 : 해저 DC 케이블용



XLPE를 상용화시킨 ABB와 원료 업체인 Borealis를 중심으로 연구가 진행 중이다. 나노 재료가 아닌 유기물 적용을 통한 XLPE 재료 기술은 상용화 또한 풍력 및 태양광 발전에서 Smart Grid에서 생산된 전기의 안정적 수송을 위한 DC용 케이블에 수요에 대응하려는 케이블 업체 (ABB, NEXANS, PRYSMIAN)를 중심으로 진행되고 있다.

- ② 일본의 연구 동향: 일본은 주로 케이블 업체 (JPS, VISCAS, EXYSM)를 중심으로 직류 케이블용 절연재료에 대한 연구가 진행되고 있으며 수지업체인 UBE社와 JPO와 NUC 등을 통해 폴리에틸렌이 공급된다 (XLPE). 일본 내에서 자국 내 기술 보호를 위한 장벽을 설치하여 기술 보안에 대해 철저히 진행하며 나노 유전체 재료에 대한 연구는 학계와 연계하여 진행되고 있다.
- ③ 미주 지역 동향: 미주 지역의 직류용 XLPE에 대한 연구는 Dow Chemical이나 학계를 통해 연구 진행 중이며 EPRI (Electrical Power Research Institute)를 중심으로 최근 연구 움직임이 포착되고 있다.

최근의 AC-DC 컨버터의 방식에 따라서 주로 유럽형과 일본형으로 양분할 수 있으며, 기술의 발전 측면에서는 일본식이 진행 가능성이 크나 시장 측면에서는 유럽형이 주도되고 있으며 국내는 일본이 주도하고 있는 실정이다. 유럽은 공간전하 저감을 위해 Organic Additive를 넣는 Borealis와 ABB를 중심으로 극성 반전이 필요하지 않은 VSC 방식에 맞는 재료를 중심으로 기술개발이 진전되고 있으며 ABB는 VSC용 컨버터 용량 증대로 단점을 극복하고 XLPE 케이블 시장을 확대하고 있다. 이에 대한 재료 기술은 Nano 유기 재료 첨가에 의한 공간전하 제어 기술을 사용하고 있다. 유기재료의 장점은 공간전하 축적을 획기적으로 감소시키지는 않지만 장기적으로 케이블 압출에서 양호한 장점을 가지고 있다. 일본은 MgO 등 Inorganic Nano Filler Loading에 의한 Space charge 저감 기술 확보로 극성 반전이 가능한 LCC 설비에 맞는 재료 개발이 완성 단계에 있으나

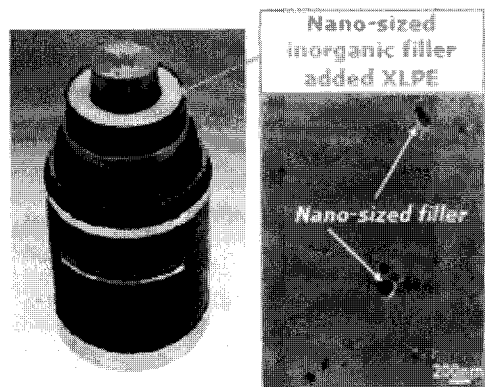
케이블의 장기압출 부분에서 여전히 문제점을 가지고 있는 실정이다.

\* DC용 Polyethylene 재료 기술

- ① 이중전하 (Hetero-charge\*) 억제 형성으로 극성 반전에 대한 전기적 특성 안정화
- ② 유/무기 나노재료 첨가를 통한 나노 계면 형성으로 공간전하 제어
- ③ 공간전하 억제 설계 기술: Nano 첨가제로 Impulse 파괴 전압의 저하를 가져올 수 있으나 나노 재료 종류 및 표면 처리 등의 기술로 DC 절연파괴 강도 및 체적저항 등 상승.



(a)



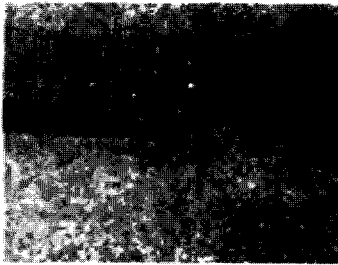
(b)

그림 3. 나노복합절연재를 이용한 일본 JPS의 500 kV Cable.

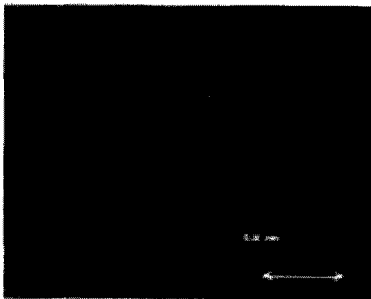
\* 나노 유전체 (Nano Dielectrics) 복합체 재료 기술

① 유/무기 나노 재료 선정 및 표면 처리 기술: 나노 재료합성, 나노 재료 크기, 입도 분포, 표면 처리에 따른 DC 절연특성 차이(MgO, SiC, Carbon 등)

② 직류용 나노 유전체 컴파운드/분산 기술  
 → Twin Screw Extruder 사용한 나노 재료 Distribution/Dispersion 개선  
 → 표면 형상 및 표면 처리에 따른 분산 기술



(a) 0 phr



(b) 1 phr

Micro-photographs of short circuit trees.

그림 4. 나노복합절연재의 전기 트리 발생의 길이 억제 효과.

\* 장기압출 재료 기술 (가교제, 산화방지제 종류 따른 차이 발생)

\* 첨가제 종류에 따른 공간전하 축적 특성 제어 기술

그림 3은 500 kV까지 제조하여 Type testkr 진행 중인 일본 JPS의 제품에 대한 설명이다. 수십 나노 크기의 무기 재료를 적용한 케이블에서 나노 크기 입자의 분포된 정도를 나타내고 있다. 나노 사이즈의 크기는 50~200 nm의 크기를 가지고 있으며 분산 특성도 양호한 상태이다.

나노 크기의 무기물이 복합재료로 적용된 경우 전기 트리의 성장 길이를 줄일 수 있다는 연구 논문도 보고되어 있다.

30 마이크론 두께의 Polyethylene Film에 Nano-MgO Filler의 함량에 따른 DC 절연파괴 강도의 관계를 나타낸 결과에서 일정 부분 이상 넣으면 특성이 포화되는 경향을 나타내며 10 phr이 넘으면 특성이 나빠지는 경향을 나타내고 있다. 이 그림을 통해 DC절연파괴 강도에서 최소의 함량에 대한 시작점을 찾을 수 있다.

그림 6에서 DC용으로 개발된 제품의 절연파괴 강도 및 체적저항 값이 AC용 재료에 비해 월등하게 높음을 알 수 있다. 이는 유/무기 나노 재료가 Base인 Polymer내에 존재하면서 전기 전도를 일으키는 전

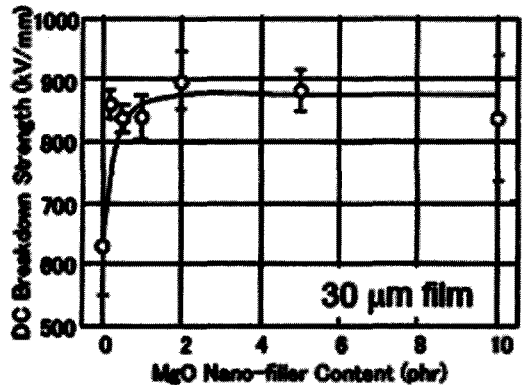


그림 5. 30 마이크론 두께의 Polyethylene Film에 Nano-MgO Filler의 함량에 따른 DC 절연파괴 강도의 관계.



하의 움직임을 방해하도록 Deep Trap site로 작용하여 체적저항 값이 높아지는 효과와 절연파괴 강도를 높인 것으로 설명하고 있다. 일반적으로 나노계면현

상으로 설명하는 부분에 대한 근본적인 연구를 통해 설명이 추가로 필요하다고 생각되며 국내에서도 최근 진행하고 있다.

DC용 재료 기술과 관련한 선진국의 R&D 프로그램 진행은 유럽 중심과 일본 중심으로 나눌 수 있다. 유럽은 수지업체인 Borealis에서 유기 나노재료를 첨가하는 방식으로 진행되어온 재료 기술에 ABB의 시스템적 접근 방식이 혼합되어 XLPE 개발 제품의 용도를 확대해 나가는 방식으로 진행되었으며 지속적으로 공간전하 축적을 감소시키는 재료에 대한 연구는 진행되고 있다. 주로 유럽의 영국, 독일 쪽의 학교와 연계하여 재료 개발에 대한 이론적 근거를 확립하고 있다. 일본에서는 이미 나노 재료를 통해 500 kV급까지 개발되었다고 보고되고 있으나 상용 제품의 사용 실적이 없는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위해 지속적으로 포설환경에 맞도록 또한 장기적으로 케이블을 생산할 수 있는 기술 확보에 지속적인 개발이 이루어지고 있다. 일본은 1980년대부터 재료 개발과 측정기술에 대한 연구를 지속 진행하여 30년 정도에 이르는 기반 기술이 축적되어 있으며 학계에서 연구되는 부분은 재료 기술보다는 측정기술 측면의 진행이 많이 이루어지고 있으며 철저한 네트워크 구조로서 외부로의 기술 유출을 막으면서 재료 및 측정기술을 개발하고 있다.

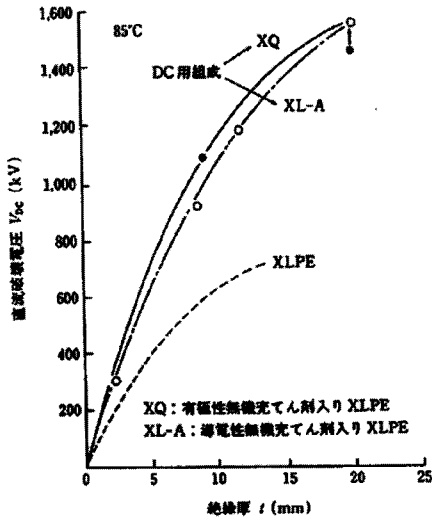


圖4.7 直流破壊電圧の絶縁厚依存性

(a)

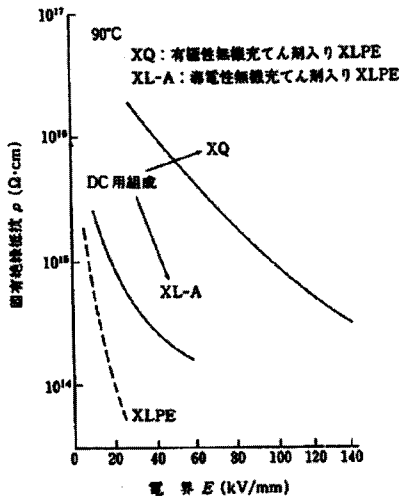


圖4.8 充てん剤入りXLPEケーブルのρ特性

(b)

그림 6. DC용으로 개발된 제품과 AC용으로 개발된 제품의 절연파괴 강도 및 체적저항 값 비교.

## (2) 국내기술현황

국내에는 제주-해남 간에 초고압 직류 케이블이 포설되어 있고 최근 제주-진도 간 케이블에 대한 수요가 있어서 관심이 증폭되고 있으며 향후 해저 케이블과 분산전원에 대한 수요가 예측되며 이를 위해 XLPE 재료에 대한 관심이 증가되고 있는 추세이다. 또한 나노 유전체 재료에 대한 연구도 다방면에서 진행되고 있으며 DC용 재료 개발에 적용하려는 계획도 있다. 국내 업체에서 HVDC관련 기술 동향은 최근 LS전선에서 개발된 Mass Impregnated (MI) 절연 케이블이 최초이며 해외 업체에서 국내 한전에 공급하는 형태로 케이블은 개발되었다. XLPE 방식의 DC에 적용할 수 있는 재료에 대한 연구는 1990년대부터 국내 학계에서 측정설비의 개발과 연계하여 진행되어 왔으나 재료 개발에 대한 연구인력 부족

및 업계의 요구 부족에 의해 현재 부진한 상태에 있다. XLPE의 국내 재료 수준은 AC용 XLPE의 경우 400 kV까지 상업화되어 있으며 향후 지속적 개발을 통해 500 kV까지 진행될 예정이다. DC용 XLPE 관련 제조기술은 현재 개발의 경험이 없으며 향후 개발이 필요한 실정이나 이와 관련된 재료 기술은 Polyethylene과 유/무기 나노복합재료에 대한 기술은 지속적으로 진행되어 왔다. 국내에서 나노입자의 합성 기술은 다양한 분야에서 진행되어 왔으며 주로 전자산업과 화장품 분야에서 주도적으로 진행되어 왔다. 따라서 유/무기 나노 분야의 기존재하는 기술을 접목하여 송전급 HVDC 케이블용 나노 복합 XLPE 개발에 적용하는 것이 개발의 방향이라 할 수 있다. 이에 나노 입자의 합성에서부터 나노입자의 고분자에의 분산기술, 컴파운드 가공기술 등이 포함되어야 하며 하나의 기술이 단독적으로 이루어지는 것이 아니라 유기적으로 연결되어 재료 개발과 이를 적용한 제품개발이 병행되어야 한다. 측정/평가 기술 관련해서는 1990년대부터 국내에 보급된 공간전하분포 측정 설비 기술이 확립되어 재료 상태에서 측정기술은 확립되어 있으며 다수의 전문가가 국내에 있다. 케이블의 전기물성을 측정하는 부분에 대해서는 2000년대에 국내에서는 처음으로 시도하여 진행하였고 모델케이블에서 측정 가능한 기술이 있다. 따라서 실제 케이블에서 측정할 수 있는 설비의 개발도 동시에 필요하다.

### 3. HVDC용 케이블의 절연성능 평가

#### 3.1 시험 장비

그림 7은 직류 절연 파괴강도를 측정하기 위한 실험 장치도이다. 크게 직류 고압 전압 발생기, 보호 저항, 측정 전극 계로 구성된다. 직류 고전압 발생기는 +100 ~ -100 kV의 전압을 발생시킬 수 있으며, 측정 전극계는 스테인리스 스틸 구 대 구 전극이며 시험 및 전극계 전체는 유에 함침 된다. 절연파괴 강도를 상온과 직류 고압 케이블의 최고 허용 온도에서 측정하였다. 구전극으로 진성 절연 파괴치에 가까운 절연파괴 전압을 측정하기 위해서는 이론적으로는

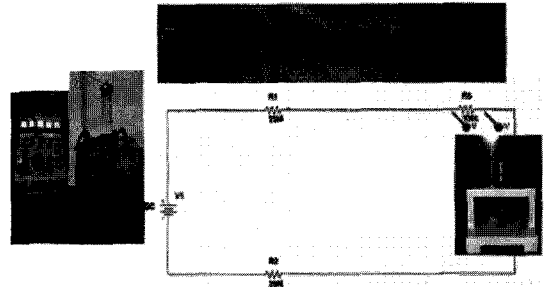
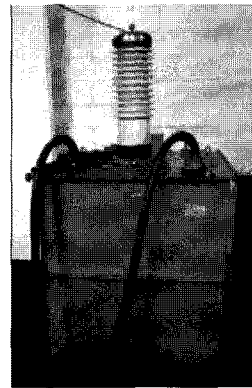
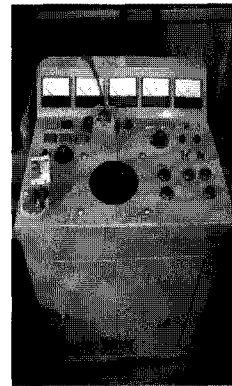


그림 7. HVDC 파괴 실험 장치.



(a)



(b)

그림 8. HVDC 발생기.



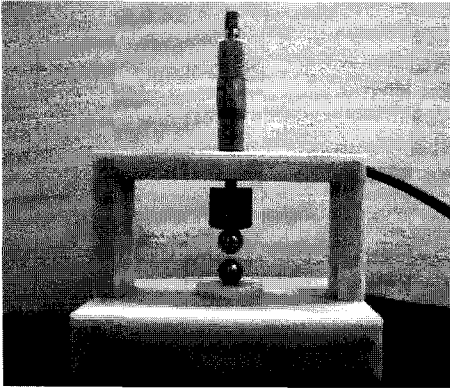


그림 9. 전극.

갭이 직경보다 적으면 되나 실제로는 전극의 지경이 갭의 10배 정도 이상을 권장하고 있다. 본 연구에서는 시편의 두께를 고려한 직경을 갖는 구전극을 이용하였다. 그림 8과 그림 9는 각 실험에 사용한 고압 직류전압 발생기, 전극 등이다.

직류 절연파괴 전압 측정은 두께 150~250  $\mu\text{m}$ 의 시편에 1 kV/sec의 승압속도로 승압시키면서 파괴시의 전압을 측정하였고, 각 경우 10개의 시편을 시험한 후, 절연파괴 강도로 산출하여 산술평균치와 편차 그리고 와이블 플롯에 의한 스케일 파라미터를 구하여 각 경우를 비교하였다.

### 3.2 상온에서 LDPE 케이블 절연재의 직류 파괴강도

그림 10은 실험을 통해 측정된 파괴강도이다. 각 시편마다 총 10회의 파괴실험을 진행하였다. Weibull plot법으로 Scale parameter를 이용한 평균 파괴강도를 도출하였다. 측정결과 순수 LDPE-1의 평균파괴강도는 약 358 [kV/mm]이었으며 첨가물을 섞지 않은 순수 LDPE-2는 평균파괴강도가 약 489 [kV/mm]로 측정되었다. 순수 LDPE만을 비교해 보면 LDPE-1보다 LDPE-2의 평균파괴강도가 약 30% 정도 높음을 알 수 있다. LDPE-1시편에 산화방지제가 첨가된 시편의 경우 순수 LDPE-1에 비하여 평균 파괴강도 약 4%정도 미미하게 상승하는 것을 확인하였다. 통상 5% 미만의 시험결과는 오차의 범위라 보면 LDPE-1시편의 경우 첨가제에 따른 영향이 극

히 미미하거나 영향이 없다고 판단 할 수 있다. LDPE-2시편에 산화방지제가 첨가된 시편은 상온에서 오히려 파괴강도가 6%정도 소폭 하강하였다. LDPE-1과 LDPE-2의 시편을 검토한 결과 첨가제에 따른 파괴강도의 영향은 있지만 상온에서는 그 효과가 미미하다.

### 3.3 상온에서 XLPE 케이블 절연재의 직류 파괴강도

그림 11은 실험을 통해 측정된 XLPE시편의 종류에 따른 직류 평균파괴강도를 나타내고 있다. LDPE와 마찬가지로 각각의 시편마다 총 10회의 파괴실험을 진행하였다. Weibull plot법으로 Scale parameter를 이용한 평균파괴강도를 도출하였다. 측정결과 LDPE-1을 Base로 하여 가교시킨 시편은 약 478

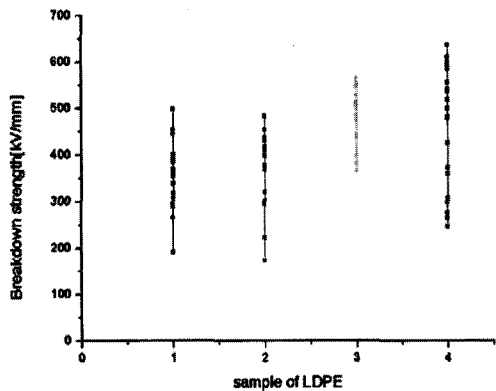


그림 10. DC 파괴강도 (상온).

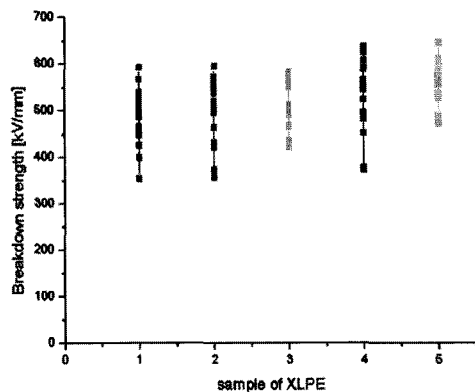


그림 11. XLPE의 DC 파괴강도 (상온).

[kV/mm]의 평균파괴강도를 갖는 것을 확인하였다. LDPE-2를 Base로 하여 가교시킨 시편의 평균파괴강도는 약 487 [kV/mm]이다. 각 시편은 국내에서 사용되고 있는 초고압 AC용 XLPE 재료이다. 두 시편 간 평균파괴강도의 차이는 약 2%로 상온에서는 거의 비슷한 성능을 갖고 있는 것으로 확인된다. B사 LE4253은 국외에서 생산한 DC전용 XLPE로 상온에서의 평균파괴강도는 약 498 [kV/mm]이다. 이것은 국내제품과 비교하면 거의 비슷한 파괴강도를 갖고 있으나 DC전용 XLPE 절연재라는 것에서 주목할 필요가 있다. 앞에서 언급한바와 같이 AC용 XLPE를 DC용으로 그대로 적용하기에는 공간전하 등 여러 가지 문제점이 있다. B사 LS4201S시편은 국외 초고압 AC XLPE이다. LS4201S시편의 평균파괴강도는 약 533 [kV/mm]이다. B社 LE4201S시편의 평균파괴강도는 약 561 [kV/mm]로 가장 높게 나타났다. XLPE는 시편종류에 따라 파괴강도가 많은 차이를 보였으며 국내제품에 비하여 최대 약 20% 정도 비싼 값이 측정되었다.

### 3.4 국내외 재료의 직류 절연파괴 강도 비교

표 3은 국내 XLPE 시편 2종과 국외 B사의 XLPE 시편 2종의 직류절연파괴강도 측정결과와 상용화된 외산 재료 (ABB 및 JA)의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. ABB社와 비교하여 다소 높은 절연내력을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 일본의 HVDC용 LDPE+MgO의 절연파괴강도에 비하여 매우 낮

표 3. DC 파괴강도 비교.

항목	파괴강도[kV/mm]		
	RT	HT	TDC
#6	517	79	-1.03
#3	502	158	-1.05
#7	529	125	-1.17
#9	583	136	-1.18
JA	810	650	-0.33
ABB	451		
U <sub>0</sub> /th		19	
1.85U <sub>0</sub> /th		36	
BIL/th		58	

은 수준이다. 파괴강도의 온도의존 계수(TDC) 또한 3배 이상의 차이를 갖고 있다. 250 kV cable에서 절연층 두께를 13 mm로 하였을 때 즉, 운전전계 ( $U_0$ /thickness), 직류내전압 전계 ( $1.85 U_0$ /thickness), BIL/th가 각각 19, 36, 58 kV/mm인 점을 고려한다면 L사의 XLPE 2종의 고온 절연 파괴 강도는 최소 136 %이상으로 직류 절연파괴 강도 특성은 만족한다고 볼 수 있다.

그러나 공간전하의 축적의 영향이 그대로 파괴강도에 영향을 주는 경우인 직류와 임펄스 전압의 중첩의 경우, 직류전압의 극성반전의 경우에 대한 파괴 강도는 크게 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 앞으로 필요할 것으로 보인다.

## 4. 결론

HVDC 송전을 위한 나노 컴포지트 절연재의 기술적 동향과 국내·외의 기술 수준을 나열하였다. 직류고압케이블 절연재용으로써 최적의 나노 컴포지트를 선정하기 위한 연구의 일환으로 국내의 LDPE 수지와 XLPE, 국외의 XLPE 수지의 절연특성을 검토하였으며 선진사의 HVDC용 케이블 절연재의 특성도 검토하였다.

상온에서 직류 절연파괴특성을 파악하기 위하여 각 시편에 대하여 파괴실험을 하였다. 상온에서 LDPE-2는 LDPE-1보다 절연파괴강도가 30% 이상 높으며 XLPE와 유사하다는 것을 확인하였다. 또한 각 시편에서 측정된 결과를 기반으로 LDPE에 산화방지제의 첨가에 따른 파괴강도의 변화를 분석한 결과 상온에서 산화방지제의 첨가에 의한 영향은 수% 이하로 미미하다는 것을 알 수 있다. (LDPE-1+산화방지제~LDPE-1, LDPE-2+산화방지제~LDPE-2) 가 교시편간의 파괴강도차이는 미미하였으며 XLPE의 경우 국외 B사 시편의 파괴강도가 국내 XLPE에 비해 최대 13% 정도 높게 나타났다.

각 시편에서 측정된 파괴강도를 외산 상용 재료의 측정값과 비교하였다. 일부 국내 XLPE제품은 ABB사와 비교하여 다소 높은 절연내력을 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 일본의 HVDC용



LDPE+MgO의 절연파괴강도에 비하여 매우 낮은 수준으로 평가되었다. 그러나 250 kV Cable에서 절연층 두께를 13 mm로 하였을 때 즉, 운전전계 ( $U_0$ /thickness), 직류내전압 전계 ( $1.85 U_0$ /thickness), BIL/th가 각각 19, 36, 58 kV/mm인 점을 고려한다면 국내의 XLPE 2종의 고온 절연 파괴 강도는 최소 136% 이상으로 직류 절연파괴 강도 특성은 만족한다고 볼 수 있다.

그러나 공간전하의 축적의 영향이 그대로 파괴강도에 영향을 주는 경우인 직류와 임펄스 전압의 중첩의 경우, 직류전압의 극성반전의 경우에 대한 파괴 강도는 크게 달라질 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.

### 참고 문헌

[1] J-Power system corporation "DC conduction and Electrical Breakdown of MgO/LDPE Nanocomposite" (Proc. Suguru Masuda. 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena)

[2] M.Salah Khalil "On the use of doped polyethylene as an insulating material for HVDC cable", conference record of the 1996 IEEE International symposium on Electrical insulation montreal, Quebec, Canada, June 16-17, 1996

[3] S.Kohalmy, GBanheyyi, T.Tanaka, "Polyolefins as Candidates for HVDC Cable Insulation Materials", The Furukara electric coporation

[4] N.Zebouchi, ABB power technologies AB, "Electric Charaterization of Films Pelled form the Insulation of Extruded HVDC Cables"

[5] T. J. Lewis ""Nanometric Dielectrics"" (IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.1, No.5, 1994, pages 812-823)

[6] T. Tanaka, G. C. Montanari, and R. Mulhaupt ""Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation-perspectives Processing Technologies"" (IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.11, No.5, 2004, pages 763-784)

[7] "Communication from the commission - Towards a European Strategy for Nanotechnology",

Commission of the European Communities, 2004

[8] "Nanostructure Science and Technology, R&D status and trends in nanoparticles, nanostructured materials, and nanodevices" - Appendix B. site reports-Europe", edited by R.W. Siegel, M.C. Roco, 1999.

### 저자|약력



성 명 : 윤재훈

- ◆ 학 력
- 2007년  
충북대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 2009년  
충북대학교 대학원 전기공학과 공학석사
- 현재  
충북대학교 대학원 전기공학과 박사과정



성 명 : 임기조

- ◆ 학 력
- 1973년  
한양대학교 공대 전기공학과 공학사
- 1980년  
한양대학교 대학원 전기공학과 공학 석사
- 1986년  
한양대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 1977년 - 1981년 국방과학연구소
- 1981년 - 현재 충북대학교 전자정보대학 전기공학부 교수
- 1994년 - 2000년 한국전기전자재료학회 평의원, 이사
- 2009년 한국전기전자재료학회 차기회장
- 현재 한국전기전자재료학회 학회장