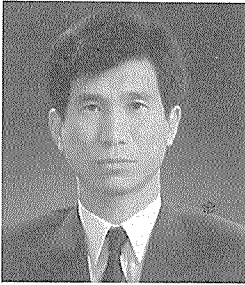


## 最近電力케이블의 新技術動向



圓光大學校  
教授 朴大熙

### 1. 序 論

都市의 過密化, 環境問題 등으로 配電電力系統은 地中線으로 每年 增加되어 가고 있는 趨勢에 있으며, 最近에는 都市中心部만이 아니고, 市外에도 地中化가 되어지고 있다. 또한 電力需要의 增加와 함께 送電容量의 增加가 必要하게 되고, 이것을 達成하기 위하여 高電壓化가 試圖되고 있으며, 또 電力設備의 增大와 함께 補修의 省力化가 要求되고 있다. 이와 같은 觀點에서 볼 때 電力케이블에 要求되는 性能은 점점 高性能化가 되어지고 있음을 알 수 있다.

그 동안에 케이블 및 電線의 主要技術은 착실하게 進步되어, 그의 結果로서 國內는 물론 海外의 市場에 꾸준히 進出하고 있다. 그러나, 아직도 우리가 克服해야 할 主要 技術이 있는 것으로 최근의 技術動向에 대하여 記述하고자 한다.

電力케이블 및 電線産業에 있어서도 最近에는 材料, 測定 및 評價에 關聯한 分野에도 尖端의 技術이 要求되고 있으며, 그의 接木이 品質과 信賴性의 向上에 寄與할 수 있을 것으로 본다. 즉 電線의 형태는 과거와는 다른 바가 없으나, 使用되어지는 材料나 評價, 測定, 시스템技術등은 과거에는 생각할 수 없

었던 尖端의 技術들이 Total적으로 應用되고 있는 狀況에 있다.

## 2. 絶緣材料의 新技術

케이블 및 電線에 使用되어 지는 絶緣材料는 用途에 따라서 크게 두가지로 區分 되어지는 것으로 시이즈用과 絶緣用이 있다. 그러나 흔히 電力케이블에서의 問題는 絶緣用으로 絶緣耐力的 向上으로서 研究의 目標가 모아지며 窮極적으로 케이블 및 電線의 絶緣두께의 低減과 信賴性 向上을 도모하게 된다. 물론 케이블의 區分도 OF와 CV로 구분하여 생각할 수 있으나, 흔히 문제가 되는 것은 XLPE(CV)電力케이블로서 많은 研究가 進行되고 있다. 그러나 XLPE는 과거와 다름없이 同一한 材料로, 주로 改良 및 改善에 관한 研究開發이 進行되어지고 있는 技術을 整理하면 다음과 같다.

한가지 종류의 PE材料를 사용치 않고 PE+PP를 混合시켜 絶緣性能을 向上시키는 方法과 PE자신의 結晶化도를 變化시킴으로서 絶緣破壞強度등의 絶緣性能을 向上시키는 方法이 있다. 이와 같은 研究는 進行되고 있는 段階로 지금까지의 結果에 의하면 絶緣破壞強度가 약 10%정도 높아지는 것으로 報告되고 있으나, 加工性이 어렵다는 結果가 報告되고 있다. 이와 같이 絶緣材料인 PE을 다른 絶緣材料와 混合시킴으로서 原價적인 저감도 가져올 수 있으나, 문제는 長時間 사용하는데에는 耐候性이 問題가 되어 絶緣表面에 Crack을 發生시킬 수도 있는 可能性이 있다. 또한 XLPE의 絶緣性能을 向上시키기 위하여 특히 絶緣破壞強度, 耐電氣 Treeing性을 改善하는 方法으로서 Ferrocene, 8-Hydroxyquinoline, Siloxane oligomer의 3次系添加劑를 使用하는 것도 檢討가 되어지고 있다. 지금까지의 報告에 의하면 현저하게 絶緣性能이 向上되어지고, 長期信賴性試驗과 浸水課電特性도 優秀하다는 것이 確認되고 있다. 絶緣材料내에서 水Tree의 發生은 絶緣破壞를 일으키는 致命的인 것으로 水Tree의 發生을 抑制시키는 方法에 대한 研究가 要求되고 있다. 이의 抑制를 시

키는 方法으로서 8-Hydroxyquinoline, Salicylaldehyde, Dimethylglyoxime, Bipyridyl 등의 Organic Ligands 添加劑가 有用한 것으로 報告되어지고 있다. 이상과 같이 純粹한 XLPE의 絶緣性能을 向上시키기 위한 技術에 대하여 要約 하였다.

다음에는 一般電線用的 絶緣材料의 研究動向을 살펴보면 주로 耐環境性에 맞도록 要求하고 있는 趨勢에 있다. 이들의 耐環境性 材料는 크게 고무계와 PVC계로 나눌수가 있다. 먼저 고무계의 絶緣電線은 移動用, 船舶用, 原子力發電所용등의 比較的 特殊環境下에서 使用되며, 이들의 要求物性은 煙塵, 耐오존성, 耐放射性能등이 있다. 이와 같은 高機能性중의 하나인 難燃性을 絶緣材料에 갖게 하기 위하여 Antimony-Trioxide가 煙氣 및 發火를 줄이는데 많이 使用하였으나, 여러가지 短點 때문에 그의 使用이 줄고 Non-Halogen의 材料가 使用되고 있다. 絶緣材料와 難燃化는 反應形과 添加形으로 區分하며 反應形은 난연성원소(F, Cl, Br)등을 含有한 중간체를 高分子에 反應시키는 方法이다. 添加形은 수산화 알루미늄, 수산화 마그네슘의 難燃劑를 使用하고 있다. 그러나, 이같은 난연제의 使用은 絶緣材料의 機械的, 電氣的인 特性이 低下되는 것으로 이에 대한 研究가 進行되고 있다. 原子力發電所用의 경우는 높은 耐放射線性외에 高難燃性, 低할로겐화, LOCA(냉각제 손실사고) 模擬試驗 및 MSLB(증기배관과파괴사고) 模擬試驗이 要求되고 있어, 주로 使用되어지는 材料는 EPR, CSP, CR 등의 고무가 使用되어 지고 있다. 産業用 移動케이블의 電力用과 制御用에는 EPR 絶緣에 CSP시이즈로서 널리 使用되어진다. 船舶用 電線의 경우는 海上人命安全規格(SOLAS 81)에서 難燃性과 特殊船舶에 대해서는 Non-Halogen難燃을 要求하고 있으며, DIN에서는 오존試驗이 苛酷하게 要求하고 있어서 特性의 滿足이 상당히 어렵다. 기타 配電用에 있어서는 耐候性, 耐트레킹性에 優秀한 EPR이 많이 使用되어 지고 있다. 플라스틱계의 絶緣電線은 需要의 形態가 小形化, 高機能化됨으로서 電線의 形態도 細線化, 小形化 耐熱化와 함께 安定性의 向上이라는 側面에서 難燃化, Non Halogen화 가 要求되고 있다.

### 3. 新絶縁設計의 技術

絶縁設計는 絶縁材料의 絶縁破壞強度를 기초로 하여 이루어진다. 예를들면 常用周波 및 雷 Impulse의 最低絶縁破壞強度와  $V^n \cdot t = \text{Const}$ 의 長期絶縁破壞時間特性的 結果로부터 얻어지는 기울기인  $n$ 등이 最終으로 絶縁두께의 決定을 하는데 使用이 되어지고 있다. 이들의 結果들은 단시간내에 얻어지는 것이 아니고, 장시간의 시험 및 經驗을 통하여 얻어지고 있다. 즉 國內에서 사용하고 있는 設計의 기초 Data가 거의 外國으로부터 건너온 것으로 케이블의 독자 設計技術을 갖기 위해서는 國內의 試驗結果가 必要하다고 생각된다. 이들의 結果는 向後에 開發해야할 345kV級 및 海低케이블등의 次세대 케이블에 應用될 것으로 전망되며, 여기에서는 XLPE전력케이블을 중심으로 기술한다.

케이블의 絶縁두께는 常用周波絶縁破壞強度로부터 얻어지는 絶縁두께와 雷 Impulse 絶縁破壞強度로부터 얻어지는 絶縁두께로 區分된다. 실제 두께의 決定은 낮은 쪽의 破壞強度를 採用하고 있다. 따라서 絶縁재료의 破壞強度가 絶縁두께를 決定하는데 결정적인 역할을 한다. 전력케이블에 사용되는 폴리 에틸렌은 지금까지 눈부신 絶縁特性的 向上과 제조 기술의 改善에 의해 絶縁破壞強度는 알 수 없을 만큼 높아졌을 것으로 보이나, 이에 대한 効果는 아직 설계상에 反映을 못하고 있는 실정이다. 絶縁破壞強度는 常用周波電壓, 雷Impulse하에서 얻어지는 결과를 Weibull分布의 統計的方法에 의해서 얻어지는 最低絶縁破壞強度(kV/mm)로서 絶縁設計에 가장 基礎가 된다. 이 값의 向上은 常用周波의 경우 15→20→30→40(kV/mm), Impulse의 경우 45→50→60→70→75(kV/mm)로 향상 되어지고 있다. 따라서 이와 같은 향상되어진 絶縁破壞強度를 設計에 反映하여 두께를 低減할 수 있는 品質管理 및 製造技術의 水準把握도 絶실히 必要하다.

케이블의 V-t 特性은 絶縁두께를 決定하는데 重要한 하나의 方法이다. 즉 인가電壓 V와 破壞時間 t의 사이에 關係式을 나타내며, 이때의 기울기  $n$ 은

壽命指數라 하는 것으로, 使用電壓下에서 壽命을 豫測한다. 이것을 흔히 9乘則이라 하나, 아직도 國內의 케이블에 대한 V-t curve의 結果가 없는 狀態이다. 壽命指數  $n$ 은 交流의 劣化係數와 밀접한 관계가 있다.  $n$ 이 크게되면 열화계수가 작게되어 結局 交流電壓下에서 장시간 사용하셔도 쉽게 絶縁破壞가 일어나지 않는 것으로 결국 絶縁두께의 저감도 가능하다. 현재 壽命指數  $n$ 은 9→12→15→20으로 높아지고 있으며, 劣化係數도 4.00→2.83→2.30으로 감소되므로써 絶縁두께에 低減의 기대가 크다.

이와 같이, 絶縁性能을 維持하면서 絶縁두께의 저감은 送電容量의 增大도 도모할 수 있다. 또한 XLPE 케이블의 絶縁破壞는, 반도체층과 絶縁층의 境界面에서 發生하는 微少의 돌기나 絶縁層의 結晶構造의 不均一로 인하여 일어난다. 그의 改善策으로 반도체층에 微量의 添加物을 첨가하는 界面擴散法이 開發되어지고 있다. 이와 같은 技術을 適用하면, 종래의 絶縁두께가 154kV의 경우 23mm에서 9mm로 顯著하게 低減되어진다. 이의 結果는 케이블의 許容電流도 1.3~1.4배 增大시키는 것도 가능하다고 推測하고 있다.

이와 같이 絶縁두께의 低減효과에 期待는 製造技術에 있어서 架橋方式과 3層同時押出등의 改善, 絶縁材料의 Superclean化, 内外部의 반도체층 改善등에 의한 것으로 要約할 수 있다.

### 4. 케이블의 構造改善

케이블의 構造改善는 絶縁性能의 向上에 直接的으로 도모하는 기술로 최근에 많은 研究가 進行되고 있으며, 일부는 實用化 되어지고 있다. XLPE電力케이블의 경우, 運轉電壓은 使用電壓의 上昇과 함께 높아지고 超高壓케이블이 될수록, 外部로부터의 水分浸入이 케이블의 事故에 致命的이 되어 防止技術이 要求되고 있다. 케이블의 絶縁體內的 異物 및 水分은 Bow-Tie의 發生 및 水Tree를 發生시켜 水明을 低下시키는 것으로 이미 잘 알려져 있다. 따라서 케이블內에 물이 浸透하지 못하도록 導體내에 Com-

pound를 充進시키는 方法과 外部에 遮水層을 갖도록 하는 構造로서 이미 實用化 되어지고 있다. 이와 같은 効果는 絶緣體內에 물의 浸透에 의한 水Tree 發生을 抑制할 수 있으며, 尙後 海底케이블의 開發에 있어서도 要求되는 應用技術이다. 또한 簡易遮水層이라는 構造를 갖는 케이블은 海底케이블등에 연피등의 金屬을 2~3mm 두께로 押出 被服한 곳에 50 μm 정도의 두께로 金屬簿을 遮水層으로서 이용한 것이다. 이 차수층의 構造는 두께가 250 μm로 Laminated tape로서 兩面에 플라스틱의 支持層이 붙어 있다. 여기에서 金屬簿을 연피로한 것은 열수축이 케이블보다 크고, 다른 금속에 비교하여 耐腐蝕성이 優秀하기 때문에 使用되어지고 있다. 이같은 차수층의 設치는 지중배전용케이블에 적용이 기대되고 있다.

초고압케이블에서 部分放電開始電壓을 上昇시키기 위하여 SF<sub>6</sub> Gas를 충전시키는 方法이 검토되어져, Gas충진 構造의 케이블이 提案되고 있다. 送電容量의 增大를 위하여 導體의 大Size化가 檢討되어지고 있으며, XLPE케이블에 있어서 大Size化가 要求되고 있다. 또한 大Size化는 交流導體抵抗이 크게 되어져 導體의 素線에 酸化第2銅被膜등으로 絶緣한 素線絶緣導體가 採用되어지고 있다. 이같은 結果는 各素線 電流가 均一하게 되어 가장 表皮效果의 低減效果가 크게 된다.

케이블의 構造改善에 의한 效果는 絶緣性能의 向上과 送電容量의 증대로서 要約할 수 있으며, 그외에도 電力케이블의 絶緣性能과 送電容量의 增大를 위하여 各々적인 研究가 進行되고 있다.

## 5. 電力 Cable의 接續資材

超高壓電力케이블의 接續資材는 終端接續部와 中間接續部로서 區分되며, 電力케이블의 適用의 擴大와 함께 要求되어지는 接續部의 數는 점점 增加되고 있다. 또한 同一의 接續部라 해도, 內部的 絶緣方式이 組立式, 몰드식, 테이프方式, 油浸紙式으로 區分이 되어 있다. 接續部의 絶緣性能은 케이블과 비교

해서 同等以上을 滿足하여야 한다. 그러나, 接續부에 構成되어지는 部品은 수십가지로서 各 部品의 性能 및 組立技術은 接續部의 性能을 左右한다.

기술하고자 하는 사항은 使用電壓이 높아짐에 따라 나타나는 接續부의 部分들에서 나타나는 現狀을 간단히 要約 소개한다. 앞에서 기술한 바와 같이 接續部에는 여러 種類의 部品들로 構成이 되기 때문에 組立후에 보면 다른 種類의 絶緣材料와의 界面이 수없이 갖게 된다. 즉 異種間의 界面이 接續部 內部에서 가장 취약한 部分으로 가장 많은 絶緣破壞의 事故를 일으킨다. 예를들면, 에폭시-고무, 에폭시-Oil, 미가코테이프-케이블絶緣表面, 케이블 絶緣表面-고무, 에폭시-절연지, 금속-에폭시 등과 같은 部分이 있다. 이와 같은 界面은 高電界下에서 部分放電을 일으키거나, 誘電損失을 增加시키므로 接續部의 全體 特性을 低下시킨다. 즉 케이블 導體로부터 가까운 部分에 있는 界面은 특별하게 界面管理를 해야하고, 密着性의 管理와 材料의 硬度, 특히 未架橋테이프의 架橋도가 케이블의 架橋도와 同一한가 등을 별도로 管理할 필요가 있다. 界面에서의 絶緣破壞는 常用電壓보다 雷Impulse電壓에 의해서 나타나는 경우가 많으며 엄청난 絶緣破壞力을 가지고 있다. 또한 雷Impulse의 試驗에 있어서 波形은 絶緣破壞強度의 影響을 미치는 것으로 특별하게 波頭長과 波尾長의 파형관리가 要求된다. 또한 接續부의 평가를 위하여 Corona測定은 理論的인 觀點에서는 대단히 완전한 시험이라고 볼 수 있으나, 실제 測定에 있어서 좀처럼 측정이 순조롭지 못한 것으로 測定方法에 관한 많은 연구가 필요하다.

시험중에 케이블에서 絶緣破壞가 發生되었을 때 破壞의 現象을 把握하기 위해서는 放電, 高電壓工學의 基礎的인 知識이 必要하며, 특히 Streamer放電, Townsend放電과 沿面 Flash-over등의 理論的인 知識은 問題의 解決에 많이 도움이 된다. 接續資材의 設計 및 製造에 있어서 중요한 것은 각각의 絶緣부품의 誤差관리를 各別히 하므로 界面의 問題點을 줄일 수 있으며, 신뢰성 높은 接續部의 組立을 할 수 있다.

## 6. 케이블 監視診斷의 技術

電力케이블의 效率인 運用과 高信賴性의 確保를 위하여, 상태감시와 異常豫知시스템 構築의 要請이 되고 있다. 地中送電케이블에 光Fiber應用技術을 導入하는 움직임이 이미 높아지고 있으며, 일부에 현장적용을 시도되면서 활발하게 개발검토가 進行되고 있다. 전력 케이블이 포설되어져 있는 同道내, 貫路內에 광Fiber를 設置하고, 各種 情報 전송용으로서 適用되기 시작하였다. 또, 최근에는 光磁界센서를 應用한 思考區間檢出시스템이나 光Fiber에 의한 Line 溫度分布센서 등도 現場適用이 되어지고 있다. 地中送電케이블 分野에 電氣信號를 光으로 交替化 이외에 광의 특징을 활용한 새로운 케이블의 導入이 可能하다고 볼 수 있다. 예를 들면, 光Line溫度分布센서는, 케이블의 길이 方向의 溫度分布를 한가닥의 광Fiber로 정밀하게 연속적으로 측정 가능하기 때문에 常時線路運轉狀況의 把握이외에 效率인 冷却設備運用이나 電力케이블의 設置形態別 溫度分布의 把握에 의한 設計改善등이 可能하게 된다. 또한 광Fiber는 絶緣性, 無誘導性이라는 큰 長點이 있기 때문에 電力機器의 絶緣計測이나, 劣化診斷, 保守監視 시스템에 利用이 擴大되고 있다.

전력케이블의 絶緣診斷은 非電氣式試驗과 電氣式試驗으로 區分되어진다. 비진기식의 方式은 事故케이블을 撤去하여 케이블을 해체하여 水Tree, 電氣Tree등을 調查하기 위하여 試料를 採取한다. 電氣的

인 시험은 交流電壓, 雷Impulse電壓에 의해서 破壞試驗이다. 그러나 電氣試驗은 비파괴시험과 破壞試驗으로 區分되며, 주로 劣化診斷은 非破壞試驗으로 漏泄電流測定, 誘電正接測定, 部分放電試驗을 택하고 있다. 診斷技術은 앞으로 劣化評價基準등과 같은 많은 研究가 要求된다.

## 7. 結 論

케이블, 電線의 最近 主要技術에 대하여 要約해 보면 다음과 같다.

- 1) 絶緣材料의 研究는 分子構造의 側面에서 性能의 向上을 도모해 가고 있으며, 耐環境性에 맞는 材料의 高機能化가 要求되고 있다.
- 2) 絶緣의 最適設計는 絶緣두께를 低減시키며, 絶緣層과 반도전층간의 界面改善으로 絶緣두께를 顯著하게 低減할 수 있으며, 送電容量의 增大도 가능하다.
- 3) 케이블의 構造改善은 絶緣性能의 向上과 送電容量의 增大를 시킬 수 있다.
- 4) 接續資材에 있어서 특히 超高壓의 경우 異種絶緣間의 界面에 많은 絶緣破壞를 일으키고 있어 이에 대한 研究가 必要하다.
- 5) 地中送電케이블에 있어서 監視를 위한 光Fiber와 各種 센서技術의 應用이 擴大 되고 있으며, 向後 電力케이블의 活線絶緣劣化診斷에도 應用이 기대된다.

**세계속의 한국은 세계속의 기술로부터**