

1. 서론

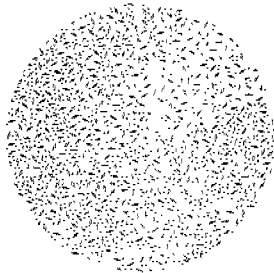
最近 架橋 폴리에틸렌 絶緣電線(XLPE Cable)의 高电压化가 급진되어 154KV級 XLPE Cable이 우리나라뿐만 아니라 全世界적으로 實用化되었고 日本의 경우 500kV級 까지도 開發이 되었다(표1 참조).

〈표-1〉 XLPE의 역사

년 도	역 사
1957	XLPE의 제조법에 대한 G.E 발표
1960	600V XLPE Cable 사용 개시
1961	6.6KV "
1964	22,33KV "
1965	66,77KV "
1967	Triplex type 22KV XLPE Cable 사용 개시
1970	6.6KV급에 압출형 type 적용
1971	154KV XLPE Cable의 사용 개시
1978	275KV XLPE Cable의 사용 개시
1983	500KV XLPE Cable의 개발

플라스틱電力케이블 技術의 最近動向

Recent Technical Trend
of Plastic Insulated
Power Cable



李 鍾 國

金星電線(株)

安養工場 製品設計室 部長

XLPE電力케이블은 취급이 용이하고 接續이 간단할뿐만 아니라 유지보수의 면에서 볼때도 경제적이며 특히 電氣의 特性이 우수하다는 점에서 最近 量的으로 급속한 使用신장을 나타내고 있다. 또한 使用電压面에 있어서도 高电压化의 傾向에 있다. 그러나 XLPE에도 몇가지 문제가 없는 것은 아니다.

- (1) 導體와 絶緣體·境界면의 接觸 및 요철
- (2) 絶緣체內的 異物
- (3) 絶緣체中에 존재하는 水分
- (4) 絶緣체內的 Void

그러나 이러한 문제점에 대한 여러가지 대책이 취해져서 도체와 절연체사이의 境界면처리는 종전의 반도체 테이프를 使用한 2工程을 3層同時 押出方式의 單-工程 開發로 완전히 해결이 되었고 異物質混入에 대해서는 Clear Room의 설치로 큰改善을 보았다. 또한 종래의 수증기架橋方式에서는水分 및 Void의 완전한 제거가 어려워 이것이 큰 문제로 되어 있었으나 이의 改善을 위하여 Gas 架橋方式의 채택과함께 XLPE電力케이블의 超高压化가 이루어졌고 最近 급속한 使用신장이 이루어졌다. 그러나 現今 絶緣두께의 감소 장기신뢰성의 向上을 위한 開發연구가 美國, 프랑스를 위시해서 여러 선진국에서 활발하게 進行되고 있다(표2 참조).

이에 플라스틱電力케이블의 발전과정 및 現況에

(표-2) 외국에 있어서 XLPE Cable의 고압화

국명	전압	절연	완공년	비고
프랑스	225KV 400KV	PE PE	1969-1980 개발중	
스웨덴	145KV 245KV	XLPE "	1976 1980	Wire shield
미국	138KV 345KV	XLPE "	1970-1977 1981	EPRI, Waltz Mill
독일	110KV 220KV	PE "	1978 개발중	Wire shield 수밀구조

대해서 소개하고자 한다.

2. 絶緣材料의 開發변천

고무, 플라스틱電力케이블이 넓게 사용되어지기 시작한 것은 1965년대 부터이다. 1960년대에는 저압Cable의 絶緣체로 비닐(PVC)이 사용되었으나 1962년경에 부틸렌고무, 폴리에틸렌(PE)이 電力케이블의 絶緣체로 채용되어 고무, 플라스틱電力케이블의 高壓化가 시작되었다. 1960년경에 폴리에틸렌을 化學架橋(Chemical Cross-linked)시키는 기술이 개발되어 우리나라에서는 1970년 중반부터 高電壓 플라스틱電力케이블이 주종을 이루게 되었다. 부틸렌고무 電力케이블은 經濟性 電流容量, 電氣의 特性 耐水性 등의 점에서 또 폴리에틸렌電力케이블은 耐熱性 電流容量의 점에서 各各 架橋폴리에틸렌(XLPE)케이블보다 뛰어나기 때문에 점차로 사용되어지지 않고 있다. 1964년경 에틸렌프로필렌 고무(EPR)電力케이블이 開發되었으나 經濟的인 면 때문에 耐Corona性 耐Tracking性 耐放射線性을 必要로 하는 특수한 用途에 限하여 사용되어지고 있다.

架橋폴리에틸렌(이하 XLPE라함)은 耐Corona性 耐Treeing性이 뛰어나는 것으로 알려지고 있어서 XLPE Cable의 高壓化와 함께 XLPE에 첨가제나 충전제등을 배합하여 耐Corona性, 耐Treeing性, 耐熱變形性의 向上을 도모하고 Cable의 장기수명의 安定性을 改善하는 연구가 또한 進行되고 있다.

이외에 絶緣체 材料自體의 開發뿐만 아니고 N₂ gas나 SF₆ gas같은 電氣的 負性gas를 XLPE에 합침시켜서 絶緣특성의 向上을 꾀하는 것도 현재 研究가 되고 있다.

3. 製造技術의 開發

플라스틱電力케이블의제조기술의 면에서는 Cable의 長期수명의 安定性에 중요한 영향을 미치는 Corona劣化의 要因을 제거하는 技術이 必要하다.

絶緣體中の 異物에 對해서는 폴리에틸렌수지 架橋劑 산화방지제, 충전제 등을 Mix하고 이를 Pellet 狀으로 절단해서 압출기에 공급하는 全工程에서 방지대책을 設定하여 異物의 低減에 노력하고 效果를 도모토록 해야한다.

그러나 異物의 管理에 對해서는 단순히 電線Maker만의 문제가 아니며 樹脂Maker를 포함한 각종 첨가재료 Maker와 함께 關聯되기 때문에 어려운 문제가 있다.

絶緣體中の 異物은 Cable의 장기수명에 큰 영향을 미치는 것으로 有害異物의 크기에 對해서는 尙後 계속검토 되어야할 과제이다.

현재 11kV~77kV XLPE를 대상으로 허용 最大異物을 250 μ m로 하고 있지만 66kV, 77kV級에 대한 異物의 規格値를 100 μ m로 하기위한 검토가 進行중이다. 美國의 AEIC 規格에서는 5~69kV XLP E Cable을 대상으로 250 μ m을 最大許容異物로 하고 있다.

한편 内部 및 外部 半導電層(Inner & Outer Semi-Conducting Layer)의 들기에 對해서는 製造條件의 확실한 Control을 기해야 하고 半導電層과 絶緣層間의 接觸技術이 必要하다. 또 外部로부터 異物의 混入이나 半導電層의 들기가 原因이 되는 기계적 손상을 피하기 위하여 内部 및 外部半導電層과 上絶緣層의 3層을 同時工程으로 押出(Extruded)하는 架橋方式이 開發되어 高電壓XLPE 絶緣Cable의 絶緣體押出에 채용되어 XLPE Cable의 電氣的 特性 장기수명의 安定性이 向上되었다.

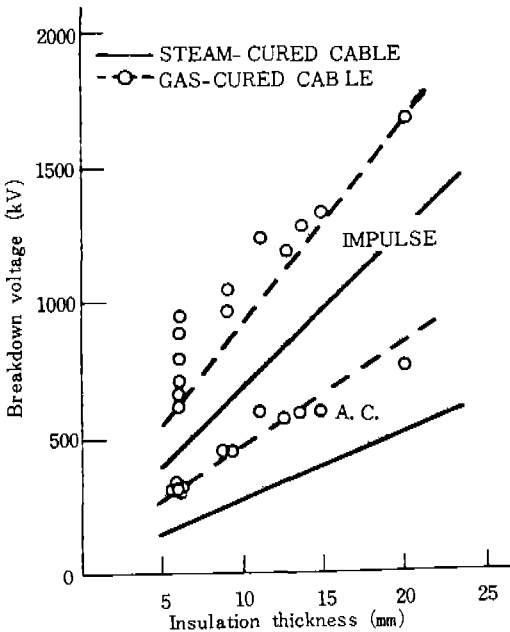
한편 絶緣體層의 微小Void에 對해서는 絶緣體 架橋時 加熱加壓매체로 不活性gas를 使用하는gas架橋方式이 開發되어 微小Void의 제거에 큰 效果를 도모하고 있다. 종래의 수증기 架橋方式에서는 加熱加壓 매체로 200 $^{\circ}$ C 15~20kg/cm² 정도의 高温高壓의 수증기를 사용하기 때문에 絶緣體의 架橋反應時 수증기가 絶緣體내에 확산 침투하여 냉각시에 포화수증기의 응축에 의해 微小 Void가 형성되는 결함이 있었다.

이 微小Void는 높은 電位경도에서 使用되는 Cable 에서는 Cable의 장기수명에 영향을 미칠 우려가 있다.

gas架橋方式은 加熱加壓 매체로서 수증기 대신에 N_2 gas와 같은 不活性gas를 使用하여 絶緣체를 架橋하는 것으로 絶緣体中에 微小 Void도 없고 수분 함유량도 대단히 작다. 絶緣体의 微細조직도 수증기 架橋方式에서는 絶緣体内層과 外層 사이에 差異가 있으나 gas架橋方式에서는 全絶緣体 두께에 均一하다.

그림 1은 수증기 架橋方式과 gas架橋方式에 의한 XLPE Cable의 初期電氣의 특성을 나타냈다.

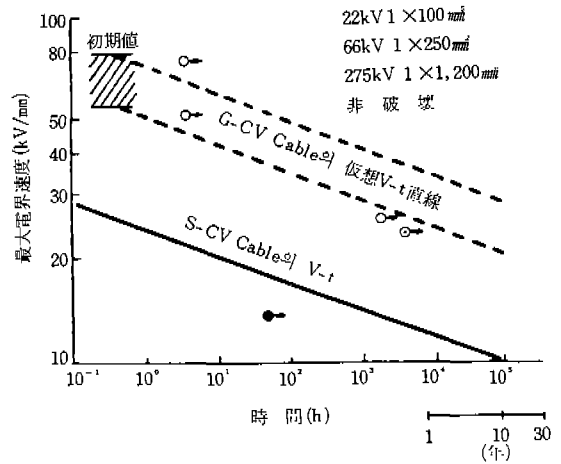
架橋方式에 의한 Cable의 전기적특성이 수증기 架橋方式보다 雷Impulse耐電壓 교류장시간耐電壓 모두 다 현저하게 向上되었음을 알 수 있다.



〈그림 - 1〉 초기전기적특성

그림 2는 22kV 이상의 XLPE Cable의 장시간 交流通課電시험의 結果이다.

Cable의 장기수명에 對하여 과전전압(E)와 絶緣 파괴까지의 時間(T)와의 사이에는 $E^n \cdot T = \text{一定}$ 하다는 關係식이 成立되며 플라스틱 電力케이블에서는 $n=9$ 라는 것이 과거부터 확인되었고 最近의 data에 의하면 $n=9$ 이상의 特性을 나타내어 特性의 長期安定性을 나타낸다.



〈그림 - 2〉 장기 교류과전 특성

4. Cable의 絶緣設計

고무, 플라스틱 電力케이블의 絶緣設計는 使用電壓에 의한 經年劣化 사고시등의 過電壓 雷Impulse 및 개폐 Surge의 크기 그發生回數에 의한 絶緣耐力의 低下등을 고려하고 있다.

그래서 絶緣두께는 雷Impulse電壓 및 交流電壓에 對한 絶緣두께 가운데 큰 쪽의 값이 채용되고 있다.

XLPE의 絶緣두께는 종래의 data에서 絶緣体에 미치는 영향은 使用電壓에 의한 經年劣化 보다도 異狀電壓에 의한 劣化의 쪽이 가혹하다고 생각되므로 雷Impulse電壓에 의해서 결정되어진다.

또 종래 고무, 플라스틱 電力Cable의 絶緣設計는 파괴 Stress의 分布가 正規分布에 적합하다고 가정되어 왔으나 파괴 Stress의 分布는 正規分布보다도 오히려 Weibull 分布에 더욱 적합한 것으로 알려지고 있으며 最近에는 Weibull 分布를 使用한 絶緣設計가 이루어지고 있다. 또한 고무 플라스틱 電力케이블의 絶緣設計상의 重要한 문제의 하나는 半導電層과 絶緣体와의 사이의 境界面에 관한 문제이다.

絶緣体 材料의 開發研究과 더불어 半導電層 材料로서

(1) Carbon Black이 均一하게 잘 분산되어야 하고 Cable의 길이方向으로 均一하게 安定된 성능을 가져야 한다.

(2) 半導電層의 表面이 平行으로 굴곡없이 押出되 복되어 絶緣体와의 接着이 良好해야 되고

(3) 使用中의 팽창수축에 따라 半導電層의 제적저

항율이 변하거나 Crack이 생기거나 發熱이 없어야 되고

(4) $\tan \delta$ 가 작을것

(5) 雷Impulse電壓의 電壓이 걸릴때 半導層電의 파괴가 먼저 일어나지 않을 것 등의 조건을 만족하는 材料이어야 하며 이러한 材料開發研究가 부단히 進行되고 있다.

現在 22kV級 以上の XLPE Cable은 2層同時 또는 3層同時 押出한 架橋方式로 製造되어지고 있고 終端 및 中間接續의 省力化라는 면에서 22kV~33kV級 XLPE Cable의 外部半導電層의 탈피가 實際 Field에서의 作業時 용이해야만 된다. 또 6kV級 XLPE Cable에서는 종래 内部 半導電層에 半導電性 테이프를 使用해 왔으나 Water-tree대책, 경제면에서의 성능向上등의 면에서 押出Type로 대치되고 있다.

5. 154kV 級 XLPE 電力케이블의 開發

앞절에서의 기술을 기초로 하여 이미 開發된 154kV級의 XLPE電力케이블을 소개한다.

Cable의 絶緣두께는 劣化계수, 온도보정 등을 고려한 初期요구성능을 設定하여 종래data를 기초로한 許用Stress에서 決定되어진다.

5.1 요구성능

XLPE의 實績으로부터 最低要求値를 고려하여 모두 OF Cable의 성능을 상회하는 것을 目標로 하였다.

(1) 交流長時間 파괴치

Cable의 수명을 30년으로 하여 30年後에 使用電壓에서 견디는 것을 조건으로 하여 使用電壓(154kV/ $\sqrt{3}$)으로 劣化계수 4.5를 곱한 400kV를 요구성능으로 하였다. 劣化계수 4.5는 주로 内外部半導電層을 Tape를 使用한 Cable의 劣化곡선에서 얻어진 값이다.

V-t 곡선의 9승원칙이 성립하는 것으로 본 계수는 4.0으로 된다.

(2) 충격전압파괴치

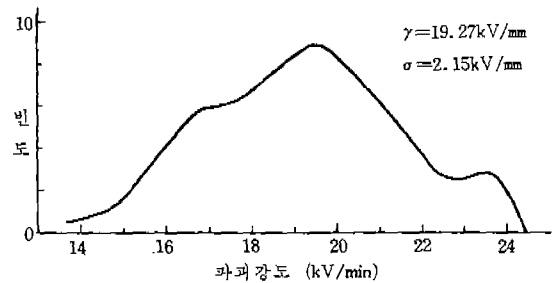
이 요구치는 기준충격 절연장도(BIL: 750kV)에

대해 어느정도의 安全率을 두어 決定한다. 현재 반복과전 劣化등을 포함한 여유를 20%로 둔다. 또 使用온도(상시최고허용온도)에서 파괴치저하에 대하여 보정은 20%로 한다. 이것은 종래의 data에서 決定된 것으로 이 結果에서 요구성능을 1,080kV로 하였다.

5-2 交流特性에 의한 設計

(1) 平均電位경도

그림 3은 最近의 22kV級 Cable을 主로한 内部반도전층과 절연체의 2層同時押出한 제품의 파괴평균 전위경도의 分布를 나타낸 것이다.



〈그림-3〉 파괴강도의 분포

3層同時押出한 제품에 대해서는 data가 좀 작지만 파괴전압이 向上되고 편차가 작은 것으로 나타나고 있다.

設計許用値로서 2層同時押出한 제품의치를 取하여 $\bar{x}-\sigma=17.2\text{kV/mm}$ 로서 初期요구 특성 400kV를 만족하는 絶緣두께는 内部반도전층을 포함한 23.3mm로 된다.

더우기 3層同時 押出한 제품에 있어서 \bar{x} 는 26kV/mm이상이며 2層同時 押出한 제품과 同--의 편차로서 $\bar{x}-\sigma=24\text{kV/mm}$ ($\bar{x}-3\sigma$ 로 약 20kV/mm)로되어 앞의 絶緣두께는 충분한 성능을 만족하는 것으로 생각된다.

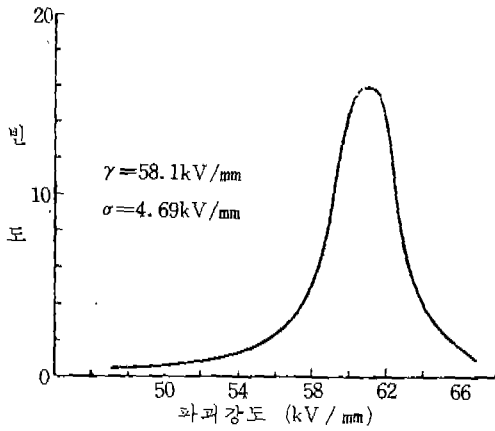
(2) 최대전위경도

폴리에틸렌 Cable의 수명은 앞의 3절의 그림 2에 나타나 있듯이 30년후의 허용치는 8kV/mm 이상으로 추정할 수 있다.

内部반도전층을 포함해서 8kV/mm로 되는 부분의 절연두께는 16.2mm로 상당히 良好한 것으로 된다.

5-3 충격전압에 의한 設計

고무 플라스틱절연 Cable의 충격전압파괴치는 평균전위경도에 의한 것으로 보여진다. 그림 4는 2層同時압출한 제품에서의 파괴Stress의 분포를 나타낸 것이다.



〈그림- 4〉 Impulse 파괴 Stress 분포

3層동시압출한 제품의 경우는 파괴평균치 (\bar{x}) 는 대략 동등하며 편차가 작게되는 경향이 있다. 設計値로서는 2層제품의 $x-\sigma=53.4 \text{ kV/mm}$ 를 동시에 46 kV/mm 를 채용하여 이것으로부터 절연두께는 内部반도전층을 포함한 24 mm 로 된다.

이상의 검토결과가 절연두께는 23 mm 로 내부반도전층을 포함한 24 mm 로 된다.

내부반도전층상의 교류최대전위경도는 6.5 kV/mm 이다.

Cable구조는 표 3 과 같으며 제조는 높이 70 m 의 연속가교탑을 利用하여 3層동시 압출gas架橋方式에 의해서 제조된다.

〈표- 3〉 Cable 의 구조

항 목	단 위	사 양
공 칭 전 압	KV	154
도 체	단면적	mm^2
	외 경	mm
절 연 두께	mm	24.0
AL 차 례	mm	2.4
비닐시이즈	mm	4.5
Cable 외경	mm	111

6. 결론

이상과 같이 플라스틱 전력케이블은 빠른 속도로 넓게 使用되어져 高壓化되는 電線路에 充分하게 만족시킬 수 있을 것으로 보며 앞으로 계속 검토되어야 할 과제는 절연체中에 (1) 異物 Void의 有害관계 (2) Water tree의 방지대책 (3) 부분방전劣化의 檢査法 (4) 절연劣化진단法 (5) XLPE外 高電圧用 절연材料의 開發등이 있다.

그리고 앞으로 점점 省力化의 面이 重視되어질 것이 예상되어 보수점검의 용이성 부속품(접속자재 단 말처리資材)의 간이화동의 점에서 한층 플라스틱電力케이블의 수요가 급증할 것이 예상되며 특히 超 高壓 154kV級은 長期間의 安定性 신뢰성등의 面에서 3層同時押出 gas가교方式에 의한 XLPE케이블이 Power Line의 대중을 이룰 것으로 전망되어진다.

*

