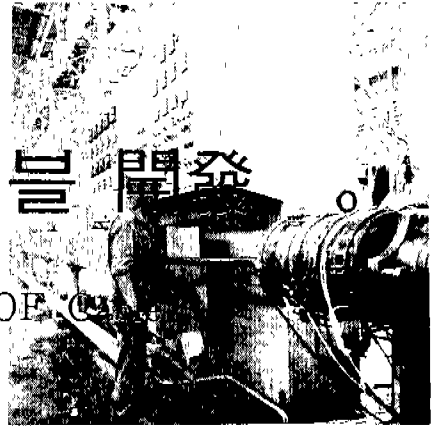


△압출기

OF 케이블 개발

Development of 345kV OF Cable



△침유장치

大韓電線株式會社 專務理事 俞 彩 濬
營業技術部長 金 正 勳

1. 序 論

最近 都市의 大型化에 따른 電力需要의 增加 및 올림픽의 開催, 2000年代의 福祉國家 建設을 위한 大容量의 送電線路의 地中化가 要求되고 있어 345kV級의 OF 케이블을 開發하게 되었다.

XLPE 絶緣 케이블은 絶緣材料의 優秀한 電氣的인 特性의 利點을 가지고 있으면서도 使用中 絶緣体 内部에 나타나는 水 Tree 現象 및 接屬部의 취약으로 超高压化의 進展에 커다란 장애가 되어 왔으나 最近 건식 가교방식의 開發과 接屬方式의 標準化 등으로 154kV級까지는 XLPE 絶緣 케이블의 採擇이 점진적으로 확대되어가고 있다.

그러나 아직 300kV 以上에서는 絶緣体 内部의 異常 및 이를 보완하기 위한 絶緣두께의 增加, Handling 등에 대한 많은 과제로 인하여 實用化되지 못하고 있는 실정이다.

또한 先進外國에서는 지금까지 OF 케이블에서 사용되어 온 一般絶緣紙보다 性能이 優秀한 絶緣材料인 플라스틱 필름 양면에 一般絶緣紙를 一体시킨 半合成紙를 開發하여 200kV級 以上の

OF 케이블에 적용, 충분한 試驗을 거쳐 實線路에 적용하고 있다.

當社에서는 1976年 國內最初로 154kV OF 케이블을 開發하여 實用化한 이래 1987年末 現在 總연장 950여km를 布設하여 運轉中에 있으며 Malaysia 電力廳(NEB)에서 발주한 132kV OF 케이블 Turn-Key 工事を 1984년에 수주, 1986年初에 성공리에 완료하는 등 이미 超高压 케이블面에서는 그 技術이 世界的 수준에 도달하였다.

금번 345kV OF 케이블에 지금까지 사용되고 있는 一般絶緣紙를 사용한 케이블과 新種 絶緣紙인 半合成紙로 絶緣体를 構成한 케이블 두 종류로 開發하였다.

2. 케이블의 設計

開發完了된 OF 케이블의 設計에 대하여 간단하게 紹介하면 다음과 같다.

2.1 導 体

導體는 一般的으로 OF 케이블에 적용되고 있

는 6分割 壓縮 圖形 撚線으로서 大容量을 受容 할 수 있도록 一般絶緣紙 絶緣 케이블 경우 2,000 mm²로 하였으며, 半合成紙 絶緣 케이블에서는 1,600mm² 및 2,000mm²로 하였다.

또한 給油 시스템 設計時 油의 抵抗을 줄여 給油區間(Oil Feeding Length)을 最大로 하기 위하여 油通路의 内徑을 18.0mm로 하였다.

2.2 絶緣体

케이블의 絶緣두께는 케이블에 要求되는 임펄스(Impulse)電压(BIL×1.2=1560kV_p)과 AC耐電压(520kV)을 基準으로 하여 決定하는 것이 一般의이다.

따라서 一般絶緣紙 絶緣 OF 케이블의 경우에는 AC 破壞强度 40kV/mm, 임펄스 破壞强度 100~110kV/mm를 고려하면 絶緣두께가 23.5mm정도로 되며, 이를 一般絶緣紙의 組合으로 絶緣 그레이딩(Grading)을 하여 絶緣紙의 種類를 정하였다.

한편 半合成紙 絶緣 OF 케이블에 사용되는 半合成紙는 一般絶緣紙에 比하여 AC 破壞强度는 20~30%, 임펄스 破壞强度는 30~40% 정도 그 性能이 우수하므로 이를 이용하여 絶緣두께를 21.5mm로 하였으며 一般絶緣紙와 마찬가지로 絶緣 그레이딩 하였다.

그러나 半合成紙 絶緣 케이블에서는 케이블 接續作業의 鉛工時 熱特性을 고려하여 數 mm의 一般絶緣紙를 半合成紙 外側에 감고 이를 絶緣体 두께에 包含시켰다.

絶緣 그레이딩은 絶緣体の 内側으로 부터 外側을 向하여 誘電率이 단계적으로 낮은 絶緣紙를 選擇하여 導體 表面에서의 最大 스트레스(Stress)를 緩和하는 方式을 채용하였다.

이상의 檢討結果에 따라 一般絶緣紙 絶緣 OF 케이블의 絶緣두께는 23.5mm로 定하였으며 半合成紙 絶緣 OF 케이블에서는 絶緣두께를 21.5mm로 定하였다.

한편 一般絶緣紙 및 半合成紙에 대하여 各各의 特性을 比較하면 표 1과 같다.

〈표 1〉 一般絶緣紙와 半合成紙 特性 比較表

항 목	일반절연지	반합성지
밀 도 (kg/cm ²)	0.70~0.90	0.88
인장강도 (kg/cm ²)	7.0~14.0	5.9~6.0
유 전 율	3.3~3.05	2.8
tan;20kV/mm (%) 100	0.29~0.35	0.09
Impulse 파괴강도 (kV/mm)	135~185	230~250
AC단시간파괴강도 (kV/mm)	85~120	120~135

2.3 金屬 쉬즈

케이블 遮蔽를 위한 金屬 쉬즈(Sheath)에는 一般적으로 鉛合金(Lead Alloy)과 알루미늄이 사용되고 있으나 금번 開發한 345kV OF 케이블에서는 鉛合金에 比하여 耐油压 特性 및 短絡電流의 特性이 우수하고 重量이 가벼워 運送 및 現場에서 핸들링이 容易한 알루미늄을 채택하였으며, 形象은 波形(Corrugation)을 주어 플렉시블(Flexible)하게 하였다.

알루미늄 두께는 低, 中油压 케이블에서는 일반적으로 機械的 特性에 의해 決定하고, 高油压 케이블에서는 機械的 特性 및 油压 特性을 고려하여 決定하며 이에 관한 관계식은 다음과 같다.

(1) 機械的 特性에 의한 두께

$$t_1 = \frac{D_1}{50} + 0.6 \text{ (mm)}$$

(2) 油压 特性에 의한 두께

$$t_2 = \frac{K \cdot P \cdot D_2}{2 \sigma} \text{ (mm)}$$

여기서,

D_1 : 알루미늄 쉬즈 内徑 (mm)

D_2 : 알루미늄 쉬즈 平均内徑 (mm)

K : 안전율

P : 常時 最大油压 (kg/cm²·G)

σ : 후프 스트레스 (kg/cm²)

(3) 短絡電流의 檢討

(1) 및 (2)에 의하여 決定된 알루미늄 쉬즈의 두께는 케이블의 地絡 및 短絡事故時 許容 短絡容량을 만족하는지의 여부를 검토하여야 하며

이에 관한 식은 다음과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{J \cdot Q \cdot A}{r_n \cdot t_s} L_n \frac{1/\alpha - 20 + T_s}{1/\alpha - 20 + T_i}}$$

여기서, I : 쉬즈短絡電流 (A)

J : 係數

Q : 金屬 쉬즈의 熱容量 (cal/°C·cm³)

A : 金屬 쉬즈의 断面積 (cm²)

α : 20°C에 對한 金屬 쉬즈 溫度係數

r_n : 20°C에 對한 金屬 쉬즈 抵抗

T_i : 短絡前 金屬 쉬즈의 溫度 (°C)

T_s : 短絡時 金屬 쉬즈의 溫度 (°C)

2. 4 防蝕層

防蝕層의 材質은 一般적으로 PE 및 PVC를 使用하고 있으나 電力口와 같이 急激한 溫度變化가 없으며 또한 345kV 케이블을 비롯한 많은 케이블이 同時에 運轉됨으로 인한 火災의 위험성을 내포하고 있어 難燃성이 우수한 PVC를 選定하였다.

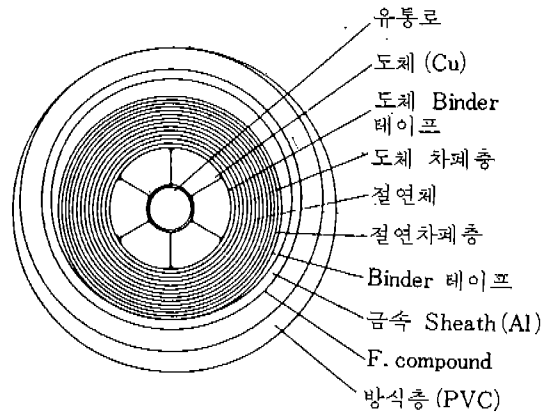
防蝕層의 두께는 雷 서지 및 開閉 서지에 의한 異常電壓 등에 의하여 決定되지만 防蝕層 保護裝置(C. C. P. U)를 使用하는 경우가 많으

로 制限電壓을 13~15kV로 하여 그 두께를 6.0 mm로 하였다.

이상과 같이 設計된 케이블의 構造 및 断面은 그림 1, 표 2와 같다.

3. 系統의 設計

超高压 OF 케이블의 系統(시스템) 設計는 一



〈그림 1〉 케이블 단면도

〈표 2〉 케이블 구조도

항 목	단 위	일반 절연지 절연 케이블	반합성지절연케이블		
도	공칭 단면적	SQmm	2,000	1,600	2,000
	유통로 내경	mm	18.0	18.0	
체	형 상		6분할 압축 원형 연선	6분할 압축원형연선	
	외 경	mm	58.8	53.3	58.0
절 연 체	절 연 두께	mm	23.5	21.5	
	차폐층 두께	mm	약 0.25	약 0.25	
	절 연 외 경	mm	약 111.0	약 101.4	약 107.0
동선 직입포 테이프 두께	mm	0.3	0.3		
금속 쉬즈	두께	mm	2.8	2.6	2.7
	외경	mm	약 131.0	약 120.5	약 126.5
방식층 두께	mm	6.0	6.0		
케이블 최대 외경	mm	147.5	136.0	142.5	
케이블 내 유량	l/km	4,990	3,410	3,720	
케이블 중량	kg/m	35.6	29.6	34.3	

般的으로 許容電流, 給油 시스템 및 알람 (Alarm) 관계에 대하여 行해져 왔으나 345kV 시스템에서는 이와 병행하여 充電電流의 低減對策과 冷却시스템에 관해서도 設計가 되어야 한다.

345kV 시스템의 設計에 대하여 기술하면 다음과 같다.

3.1 許容電流

케이블의 許容電流는 布設方式, 케이블配列 및 주위의 영향과 밀접한 관계를 가지며 이에 관한 관계식은 다음과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_a}{n \cdot r \cdot R_{th}}} \quad (A)$$

여기서,

T_1 : 導體 許容 最高溫度 (°C)

T_2 : 基底溫度 (°C)

T_a : 誘電體損失에 의한 溫度上昇 (°C)

n : 케이블 線心數

r : 交流 導體抵抗 (Ω/cm)

R_{th} : 全 熱抵抗 ($^{\circ}C \cdot cm/W$)

上記의 式에서 알 수 있듯이 許容電流는 誘電體損失에 의한 溫度上昇分(T_a)과 密接한 연관 관계가 있다. 誘電體損失은 케이블 絶緣體의 “誘電率(ϵ) \times 誘電正接($\tan \delta$)”에 起因한다. 半合成紙의 “ $\epsilon \times \tan \delta$ ”는 “ 2.8×0.0012 ”로서 一般絶緣紙의 “ 3.4×0.003 ”에 比하여 同一 導體사이즈의 경우 T_a 값이 약 30~40% 밖에 되지 않아 許容電流의 增加를 가져와 大容量 確保에 유리하다.

一般絶緣紙 OF 케이블과 半合成紙 OF 케이블의 許容電流는 표 3과 같다.

〈표 3〉

케이블種類 導體 Size 設置位置	一般絶緣紙 케이블	半合成紙 케이블	
	2,000mm ²	1,600mm ²	2,000mm ²
電力構內設置	1,390 (A)	1,390 (A)	1,520 (A)
管路內設置	1,210 (A)	1,350 (A)	1,410 (A)

* 電力構內에 設置하는 경우는 삼각배열로 防災 Traugh를 사용하지 않을 때의 電流이며, 管路內 設置하는 경우는 1孔1條式으로 冷却를 고려하지 않는 1回線 電流임.

3.2 給油 시스템

345kV OF 케이블의 給油 시스템은 케이블 및 部屬材의 基準油量이 200kV 以下 OF 케이블 및 附屬材에 比하여 월등하게 많아 지금까지 주로 使用하여온 PT (Pressure Tank) 로서는 수많은 油槽가 필요하게 되어 PT보다 壓力-油量特性이 優秀한 OPT (Outer Gar Type PT) 나 BPT (Bellows Type PT) 를 주로 使用하여 給油系統을 形成한다.

3.3 充電電流의 低減對策

超高压系統에서 無負荷運轉中에도 發生하는 無效電力이 無視할 수 없을 정도로 크며, 이 無效電力의 要因이 되는 充電電流 (I_c) 를 減少시키기 위하여 誘電率이 작은 絶緣材質을 선택하는 것이 가장 重要한 일이나 OF 케이블에서는 絶緣材質이 앞서 지적한 一般絶緣紙 또는 半合成紙를 사용하므로 이로 인한 無効電力을 줄이기 위하여 리액터 (Reactor) 를 使用한다.

3.4 冷却 시스템 設計

超高压 케이블의 경우는 케이블 各部分의 損失이 주위온도를 上昇시키는 要因으로 作用하여 許容電流의 低減을 초래한다. 따라서 주위온도의 上昇을 억제하기 위하여 冷却 시스템 設計가 요구된다.

冷却시스템에는 自然通風式과 強制冷却이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 半合成紙 絶緣 케이블이 一般絶緣紙 絶緣 케이블에 比하여 다음과 같은 利點이 있다.

첫째, 電流容量의 增大

同一한 導體規格의 경우 誘電體 損失이 35% 低減으로 電流容量이 약 20~30% 增加한다.

둘째, 케이블 外徑의 コンパクト化 및 重量의 減少
同一 送電容量의 경우 導體 사이즈 및 絶緣두께 減少로 인하여 케이블 外徑이 20~30%, 重量이 15~20% 정도 減少하여 工事時 케이블의 取扱이 容易하다.

세째, 給油區間의 擴張

케이블 外徑 및 重量의 減少에 의하여 布設길이 (運轉可能 길이의 擴張)의 擴大가 可能하며 케이블內 油量의 減少로 給油區間(Oil Feeding Length)이 늘어난다.

네째, 所要附屬材의 減少

布設길이의 擴張 및 給油區間의 擴大로 케이블 接屬材를 비롯한 附屬材의 減少를 가져온다.

다섯째, 冷却設備의 縮少

低誘電體 損失에 따라 冷却設備의 規模가 縮少된다.

여섯째, 土木工事 費用의 減少

케이블 外徑의 縮少 및 重量의 減少, 附屬材의 減少로 인하여 土木工事의 規模가 縮少되어 費用이 節約된다.

4. 케이블의 製造

케이블의 製造에 대하여 간단히 記述하면 다음과 같다.

직경 3.0mm 내외의 軟銅線을 撚線하여 Pre-forming하며 이것을 油通路 주위에 6개의 Segment를 集合하여 規定된 導體를 構成한다. 이렇게 構成된 導體위에 絶緣體를 形成하기 위하여 抗溫, 抗濕된 紙捲室에서 絶緣 Grading에 의해 設計된 絶緣紙 構成에 따라 수심매를 同時에 감아 絶緣體를 構成한다. 이때 絶緣紙의 張力, 접침, 층첩에 특히 주의하여야 하며 絶緣強度를 弱化시킬 수 있는 異物質이나 絶緣紙의 不均一 등이 없어야 한다.

半合成紙의 경우에는 絶緣體의 膨潤現像을 고려한 濕度 및 溫度調節에 유의해야 한다.

絶緣作業이 完了되면 絶緣紙가 함유하고 있는 水分을 除去하기 위하여 超大型 眞空 加熱 탱크에서 電氣 및 蒸氣加熱과 高眞空 排氣로 수백분의 1%까지 水分을 제거시킨다.

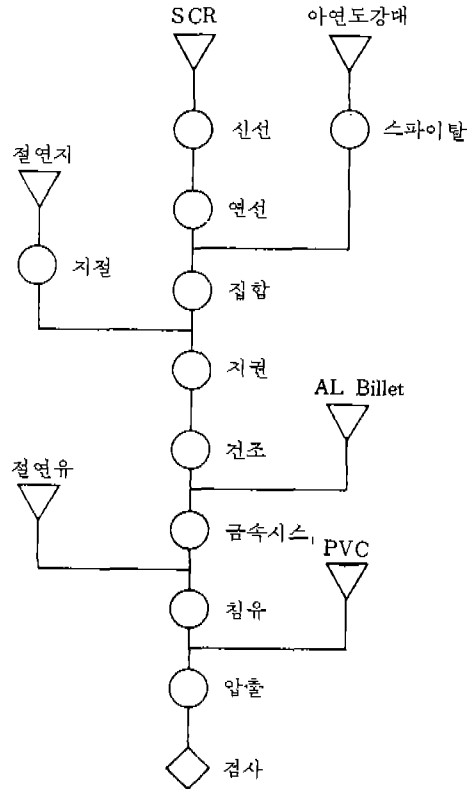
이렇게 水分이 제거되면 外部에서 다시 수분이 浸透하지 않도록 해야 하기 때문에 眞空狀態

에서 金屬 쉬즈를 하여 完全히 밀폐시킨다. 金屬 쉬즈를 할 때 쉬즈에 波形(Corrugation)을 주어 屈曲이 용이하게 한다. 金屬 쉬즈는 非常時 最大油壓에 견디어야 하기 때문에 두께 및 波形이 一定해야 하며 異物 등이 없어야 한다.

金屬 쉬즈가 完了된 케이블은 수 PPM까지 脫濕, 정제 처리된 알킬벤젠계(Hard Alkyle Benzen) 絶緣油를 수백분의 1 Torr의 眞空狀態에서 舍浸, 加壓시켜 絶緣油內의 電氣의 特性을 저하시킬 수 있는 水分이나 異物 등이 포함되지 않도록 한다.

이후 金屬 쉬즈의 防蝕과 外部衝擊으로 부터의 保護를 위하여 塗料을 塗布함과 동시에 PVC를 壓出하면 케이블 製造가 完了된다.

以上에서 說明한 製造工程을 요약하면 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 제조공정도

5. 試驗

케이블에 對한 試驗은 당사에서 制定한 사양 및 IEC 141-1에 依據하여 시행하였으며 그 주요항목 및 試驗結果는 다음과 같다.

5.1 屈曲試驗

試驗條件 및 結果는 표 4와 같으며 케이블 金屬 屬 쉬즈 및 絶緣体에서도 어떠한 결함이 발견되지 않았다.

5.2 誘電正接/電圧特性試驗

誘電正接/電圧特性은 當社 사양에 따라 시행하였으며 그 結果는 표 5와 같다.

5.3 交流 耐電圧試驗

交流 耐電圧試驗은 당사 사양에 의거하여 시행한 결과 표 6과 같다.

5.4 임펄스 耐電圧試驗

임펄스 耐電圧試驗은 當社에서 制定한 사양에 따라 시행, 표 7과 같은 試驗結果를 얻었다.

〈표 4〉

항 목	일반 절연지 절연 케이블		반합성지 절연 케이블	
	2,000SQMM	1,600SQMM	2,000SQMM	
케이블외경 (mm)	142.0	131.0	137.5	
굴곡시험경 (mm)	2,840	2,620	2,750	
굴곡 배율	20배	20배		
굴곡 회수	왕복 2회	왕복 2회		
AC 내압시험 (kV)	520	520		
해체 조사 결과	이상없음	이상없음		

〈표 5〉

항 목	일반 절연지 절연 케이블		반합성지 절연 케이블		
	200	350	200	350	
시험전압 (kV)	200	350	200	350	
유전정접	목표치	0.25이하	0.30이하	0.12이하	0.15이하
	측정치	0.20	0.23	0.09	0.11

〈표 6〉

시험항목	방 법	일반 절연지 절연 케이블	반합성지 절연 케이블
AC 장시간 내전압	520kV 6시간	양 호	양 호
AC 장시간 내전압 파괴	20kV씩 승압	780kV 비파괴	780kV 비파괴

〈표 7〉

시험항목	방 법	일반 절연지 절연 케이블	반합성지 절연 케이블
Imp. 내전압	1,560kV 3회	양 호	양 호
Imp. 내전압 파괴	50kV씩 승압	1,780kV 비파괴	1,780kV 비파괴

6. 結論

345kV OF 케이블을 開發함으로써 종래의 154kV 케이블에 比하여 都心地까지의 大容量 送電을 가능케함과 아울러 地中送電 시스템의 高度 技術化에 따른 系統의 신뢰성 向上과 安定에 기여하게 되었다.

또한 순수 국내 기술로서의 開發에 따라 막대한 外貨節約 效果를 가져옴과 더불어 세계시장에서의 競争力 向上을 가져왔으며 尖端技術 集約體라 할 수 있는 半合成紙 絶緣 OF 케이블의 개발에 成功함으로써 送電 로스의 減少와 시스템 費用의 節減을 可能하게 하였다.

그러나 345kV 系統과 관련된 附屬材의 대부분을 收入에 의존하고 있는 關係로 이에 대한 國產化 開發이 要請되고 있으며 주요 送電設備의 設置 및 運轉時 發生할 수 있는 火災의 위험성 등 기타 제반문제가 研究과제로 남아 있다.

따라서 當社에서는 345kV OF 케이블의 附屬材 開發과 병행하여 이러한 問題點 등에 대해 研究, 檢討를 게을리하지 않을 계획이며 더 나아가 500kV 以上の 케이블 및 시스템 전반에 관한 開發에 박차를 가할 예정이다.