

초고압 지중 송전선로 (O.F 케이블)의 개발현황 및 전망

박 중근* 이 응중**

(*대한전선 전력담당이사, ** 전력기술부장)

1. 서 론

당사의 초고압 전력케이블은 1978년 국내 최초로 154 KV O.F 케이블을 실용화한 이래, 해외로부터의 기술 도입과 이를 계량발전시킴으로써 현재는 초고압 케이블의 전문분야에 걸쳐 세계적, 최선진 기술수준에 이르게 되었다. 본 내용에서는 초고압 전력케이블의 주류인 O.F 케이블에 대하여 당사의 개발현황 및 향후 O.F 케이블 관련기술전망에 대하여 기술하고자 한다.

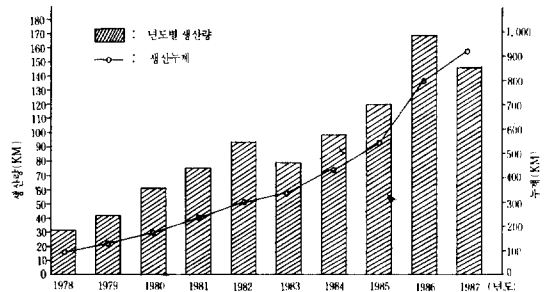


그림 1. O.F Cable 생산실적

2. 개발현황의 개요

당사는 1978년 KEPCO의 개봉-오류 변전소에 154 KV 1*600mm² 연피 O.F 케이블을 국내최초로 납품한 이래 현재까지 약 1000KM의 O.F 케이블을 국내 및 해외에 제조납품 및 포설완료하여 운전중에 있다. 납품실적을 년도별로 표시하면 그림1과 같다.

O.F 케이블은 매우 신뢰도가 높은 지중송전선으로 국내에서는 154KV 송전선에 사용되어 왔다. 그러나 송전계통의 고전압화과 도시의 대형화에 따른 전력수요의 증가 및 2000년대 복지국가건설을 위한 대용량 송전선로의 지중화가 요구됨에 따라, 345KV 계통의 실용화가 조만간 이루어질 전망이다. 이에따라 당사에서는 대도채 345KV QF 케이블을 개발완료하였으며, 품종의 다변화를 위해 AL 부식에 대처할 수 있는 지역 및 해저케

이블제조를 위해 연피케이블을 개발 중동 및 동남아시아에 약 60KM의 O.F 연피케이블을 수출하여, 일부는 포설중이며, 일부는 공사완료되어 운전중에 있다.

또한 산업기지내의 수전 인입선이나 대도시주변의 단독수전선에는 보안성, 안정성의 사유로 최적용량의 지중수전선로의 공급을 위해 3심케이블을 개발, 말레이시아 전력청에 약 120KM를 수출하여 운전중이고, 국내에는 포항제철 및 기타 민간기업에 약30KM를 납품, 운전중에 있다. 이와 더불어 그동안 전량 수입에 의존해왔던 접속기기도 국산화하였다. 이상은 국내 O.F 케이블제조의 선두에 이커로서 국내최초로 개발한 것으로서, 이하 그내용 및 주요특성에 대해서 기술하고자 한다.

2.1 345KV O.F케이블 개발

2.1.1 개발 개요

송전계통의 고전압화와 도시대형화에 따른 전력수요의 증가, 2000년대 복지국가건설을 위해서는 기존의 154KV 지중라인으로는 전력수요를 충족하기 어려우므로, 345KV의 지중화가 국가적으로 요구되어 당사에서는 1986년 개발에 착수하여 1987년 345KV O.F 케이블을 개발완료하였다.

개발 시제품은 일반 크라프트 절연지를 사용한 케이블 외에 현재 선진국에서 개발 실용화하고 있는 저손실 반합성지(이하 PPLP라함)로 절연한 케이블 두종류에 대하여 제조하였다. PPLP 절연지는 절연지 사이에 폴리프로필렌 필름을 넣어 융착한 것으로 크라프트절연지에 비하여 동일절연두께에서 전력손실이 20% 정도 감소하여 허용전류가 약 18% 정도 증가한다. 또 동일 허용전류에서는 케이블외경이 10% 정도 감소하여 콤팩트하고 경제적이다.

이와같은 PPLP 절연지의 특징때문에 선진국에서는 154KV급 이상의 초고압케이블에서는 PPLP 절연케이블을 사용하는 추세이다. 따라서 당사에서는 세계적인 추세에 발맞추어 크라프트절연뿐만 아니라 PPLP 절연 케이블도 개발하였다.

2.1.2 PPLP 절연지와 일반 크라프트지의 특성비교

(1) 절연지 자체의 특성비교

항 목	PPLP	크라프트지
밀 도(g/cm)	0.88	0.7~0.9
유전율(~)	2.8	3.3~3.05
TAN δ(100℃, %)	0.09	0.29~0.35
임펄스 파괴강도(KV/mm)	230~250	135~185
AC단시간파괴강도(KV/mm)	120~135	85~120

(2) 케이블특성으로서의 비교

i) 동일 절연두께일 때

항 목	PPLP지절연	크라프트지절연	크라프트지절연을 1로 볼 때 비율	
절 연 두 께(mm)	19.5	19.5	1	
유 전 율	2.8	3.4	0.82	
T A N δ (%)	0.1	0.22	0.45	
손 실	유전체손 Wd(w/cm)	0.0251	0.0671	0.37
	써스 손 Ws(w/cm)	0.1254	0.1254	1
	Wd + Ws(w/cm)	0.1555	0.1925	0.81
총 전 전 류(A/Km)	15.9	19.3	0.82	
허용전류(1공1포설시, A)	955	805	1.18	

ii) 동일 허용전류시 비교

항 목	PPLP지절연	크라프트지절연	크라프트지절연을 1로 볼 때의 비율
공 칭 단 면 적(mm ²)	1600	2000	1
유 통 로(mm)	19.6	19.6	1
절 연 두 께(mm)	19.5	23.5	0.83
절 연 외 경(mm)	약 98.5	약 111	0.88
금 속 써 스 외 경(mm)	약 116	약 131	0.88
방 식 층 외 경(mm)	약 127	약 142	0.89
케 이 블 내 유 량(l/Km)	3410	4990	0.68
케 이 블 중 량(Kg/Km)	27.6	35.6	0.77

2.1.3 345KV O.F케이블 개발시제품의 설계와 성능

(1) 설계(절연체두께 선정)

케이블의 절연두께는 케이블에 요구되는 임펄스전압

(BIL * 1.2 = 1560) 과 A.C내전압(520KV)를 기준하여 결정하는 것이 일반적이므로 일반절연지 사용 O.F 케이블인 경우 A.C 파괴강도 40Kv/mm, 임펄스 파괴강

도 100~110KV/mm를 고려하여 절연두께 23.5mm(차폐층 포함)로 결정하였으며, PPLP지 사용 케이블의 경우는 일반절연지에 비하여 A. C 파괴강도는 20~30%, 임펄스 파괴강도는 30~40% 정도 그 성능이 우수하므로 절연두께를 19.5mm(절연 최외층에 연공작업시 열보호용으로 일반절연지 수mm 포함)로 하여 절연설계하였다.

(2) 개발시제품의 주요성능

당사에서는 이런 수요자의 요구에 부합되는 O.F 연피 케이블을 1984년 개발에 착수 1985년 4월 시제품을 개발 완료하였다. 이후 아랍에미레이트공화국 두바이에 연피 O.F 132KV 1*960mm²를 약 20KM 수출하여 포설, 운전중이며 1987년 인도네시아 전력층에서 연피 O.F 150KV 1*800mm²를 약 50KM 수주하여 현재 생산중이다. 국내에서는 도저지방간의 해저케이블 포설계획에 따라 현재 해저케이블의 시제품 개발연구가 진행되고

항 목	PPLP지 절연		크라프트지 절연	
	규 격 치	측 정 치	규 격 치	측 정 치
굴곡시험 (20배 이하 왕복 2회 굴곡)	절연체에 이상이 없을 것	O, K	절연체에 이상이 없을 것	O, K
TAN δ 200 KV	0.12%	0.09%	0.28%	0.20%
345 KV	0.14%	0.11%	0.34%	0.23%
임펄스시험 및 파괴	1560KV - 3회 50KV씩 승압	양 호 1780KV 비파괴	1560KV - 3회 50KV씩 승압	양 호 1780KV 비파괴
A, C장시간내전압 및 파괴	520KV 6시간 20KV 3시간승압	양 호 780KV 파괴	520KV 6시간 20KV 3시간승압	양 호 780KV 파괴

주) 규격치 및 시험방법은 345KV 한전구매사양에 준함.

2.2 연피 O.F케이블 개발

2.2.1 개발 개요

도저지방의 전력수요증가에 따른 해저케이블의 필요성과 동남아 및 중동 등 토양에 염분이 많은 지역에 포설되는 케이블은 부식에 강한 연피케이블이 요구된다.

있다.

연피케이블에서의 중요항목은 합금연의 특성과 보강층에 대한 설계가 key point이다. 이하 당사가 사용한 합금연의 특성과 두바이에 수출한 연피케이블의 특성에 대하여 기술하고자 한다.

표1. 각 합금연의 특성비교

NO.	합금연 Type	함유 성분	장 점	단 점
1.	E 합금연	0.4% Sn 0.2% Sb	• 양호한 Fatigue 저항 • 좋은 Creep 유연성	• 열변화에 따른 조직의 불균열 • 열변화에 따른 합금성분의 편석 (가열후 저속신을 저하)
2.	B 합금연	0.8% Sb	• 심한 진동에 대한 우수한 저항특성 • 우수한 기계적 성질	• Creep 유연성이 나쁨
3.	1/2C 합금연	0.2% Sn 0.75% Cd	• 양호한 Fatigue 저항 • 좋은 Creep 유연성과 기계적	• 열변화에 민감함 • 조직성장이 불균일 • 진동강도가 E합금보다 나쁨
4.	Cu+Te 합금연	0.4% Cu 0.4% Te	• 양호한 Fatigue 저항 • 우수한 열저항력 • 조직의 안정성	
5.	F-3 합금연	0.15% As 0.1% Sn	• 우수한 Fatigue 저항 • 우수한 Bending 저항 • 우수한 기계적인 특성	• As독성으로 특별취급 요망 • 압출성이 나쁘다 • 조직의 열안정성이 나쁘다

2.2.2 합금연의 선정

연피케이블에 있어서의 가장 중요한 특성은 진동에 대한 저항력과 열적 Creep 특성이 양호하여야 한다. 각 합금연에 대한 비교표는 표 1과 같다.

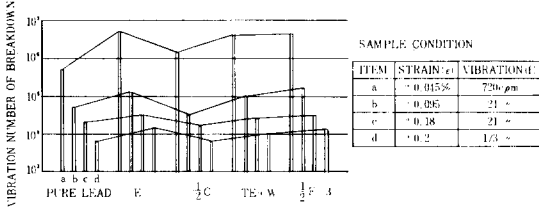


그림 2. 합금연의 진동특성비교

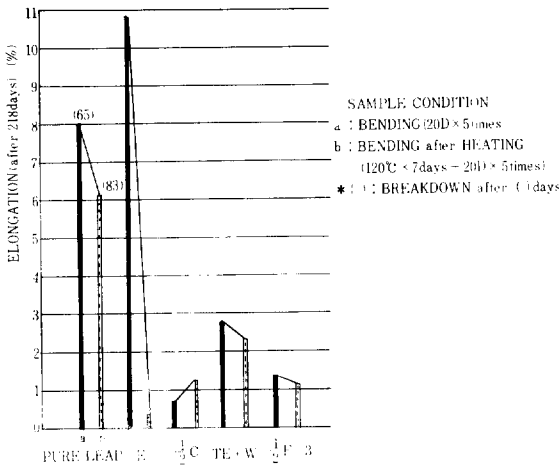


그림 3. 합금연의 Creep 특성 비교

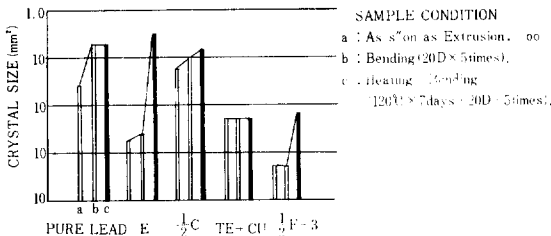


그림 4. 합금연의 조직특성 비교

이상과 같이 Cu+Te 합금연의 우수성과 최근 외국에서 O.F 케이블에 사용실적이 많은 점을 감안하여 당사에서는 Cu+Te 합금연을 선정하였다.

2.2.3 연피 O.F케이블 개발시제품의 설계와 성능

(1) 설계(절연체 두께 및 보강층 두께설정)

절연체 두께는 IEC규격에 준하여 고온 임펄스+10회, 시험전압 650KV를 기준하여 상용전압에 대한 전위경도 150KV/mm이하로서 설계하여 12.0mm로 하였으며, 연피두께는 일반적인 식 $t = (D/40) + 0.5$ 를 이용하였으며 보강층의 두께는 $t_1 = (KPD_1/2\alpha_1\alpha_2\sigma)$ 를 이용하여 두께를 설정하였다.

주) t : 연피두께, D : 연피 하경, D_1 : 보강대 하경
 t_1 : 보강층 두께, K : 안전율, ρ : 상시최대유압,
 α_1 : 접속효율, α_2 : 2매치의 효율, σ : 허용 후프스 트레스

(2) 개발시제품의 주요특성(132KV 연피 1*960mm²) 표2와 같다.

2.3 3심용 O.F케이블 개발

2.3.1 개발 개요

80년대 들어와 전력회사의 송전선로 이외에 단일산업 기지 및 대도시주변의 단독수전설비에도 전력수용량의 증가때문에 수전전압을 점차 초고압화하는 추세이다. 이런 추세에 부응하고자 1983년 O.F 3심케이블의 개발에 착수 1984년 5월 시제품을 개발완료하였다. 이후 1985년 말레이시아 전력청에 132KV O.F 3C*340mm²의 2종 약 120KM를 수출, 포설완료 운전중이며, 국내 대기업 수전선로에 154KV급 약 30KM를 포설완료 운전중에 있다.

2.3.2 O.F 3심케이블의 특징점

3심케이블은 단선3상을 동일한 금속씨스내에 집합시킨 것으로서 단선3상 송전계통에 비하여 케이블구조의 콤팩트화로 다음과 같은 특징점이 있다.

1. 3선에 비하여 3심 1선 구조로 재료비의 경감
2. 3심 집합간격부를 유통로로 이용함으로써 유통저항의 감소로 유압계통설비의 축소화
3. 단선케이블에 발생하는 금속씨스 유기전압이 발생하지 않으므로 Cross Bond의 불필요
4. 단선 3선에 비하여 포설접속 및 공사비 절감효과

2.3.3 3심 O.F 개발시제품의 설계와 성능

초고압 지중송전선로 (OF케이블)의 개발현황 및 전망

표 2. 개발시제품의 주요특성 (132KV 연피 1* 960mm²)

항 목		규 격 치	측 정 치
도 체 저 항 (20℃)		0.0189Ω/KM 이하	0.01864
정 전 용 량		0.49μF/KM 이하	0.438
유 전 정 접	76 KV	0.33% 이하	0.171
	152KV	0.45% 이하	0.193
단 시 간 내 전 압 (D/M)		163KV 15분 양호	양 호
굴 곡 시 험 (20배이하 왕복2회)		절연체에 이상이 없을 것	O . K
임 펄 스 시 험 및 파 괴		650KV ± 10회후 30KV ± 10회씩 승압	890KV /6회 단말 파괴
장 시 간 내 전 압 시 험 및 파 괴		191KV 24시간후 15KV 1시간씩 승압	311KV/30분 단말 파괴
연	피 로 시 험 (참고치)	10회에서 0.4Kg/mm 이상	1.1Kg/mm
	성 분 시 험 (Pipe)	Cu : 0.04 + 0.02% Te : 0.04 + 0.02%	0.025 % 0.027 %
피	Damping 시 험	내경의 1.5배시 균열이 없을 것	O . K
	편 석 시 험	pipe둘레 16곳의 분산상태가 Cu : 0.04 + 0.02% Te : 0.04 + 0.02%	Cu : 0.023~0.027% Te : 0.024~0.029%
험	조 직 시 험 (참고치)		2.5 * 10mm
	Creep시 험 (참고치)		내압 8.3Kg/cm에서 54시간후 파괴

(1) 설계(절연체 두께 및 금속싸스 두께 설정)

절연체두께는 국내 154KV 한전사양에 기준하여 임펄스시험전압에 견디고, 상용전압에 대한 전위경도가 15KV/mm이하가 되도록하여 12.5mm로 하였으며, 금속싸스두께는 $t = (D/50) + 0.6$ 식을 이용하였고 금속싸스 외경이 커짐에 따라 굴곡에 지장이 없도록 산고는 $\sigma = 2t + 1.0$ 을 적용하였다.

주) t : AL피 두께, D : AL피 하경, σ : 산고

(2) 개발 시제품의 주요특성(154KV 3C * 325mm²)

항 목		규 격 치	측 정 치
도 체 저 항 (20℃)		0.0563Ω/KM 이하	0.0549
정 전 용 량		0.028μF/KM 이하	0.268
절 연 저 항 (20℃)		27000MΩ · KM 이상	42000
유 전 정 접	89 KV	0.25% 이하	0.152
	178 KV	0.3 % 이하	0.207
단 시 간 내 전 압 (D/M)		200KV 10분 양호	양 호
굴 곡 시 험 (20배이하, 왕복2회)		절연체에 이상이 없을 것	O . K
임 펄 스 시 험 및 파 괴		-900KV 3회후 -10KV 3회씩 승압	-1210KV 단말파괴
장 시 간 내 전 압 시 험 및 파 괴		300KV 6시간후 -15KV 3시간씩 승압	435KV 5분 단말파괴
금 속 싸 스 유 압 파 괴 시 험		14Kg/cm 30분 견딜것	51Kg/cm 파괴

주) 규격치 및 시험방법은 한전사양에 준함

2.4 O.F케이블용 접속기기 개발

2.4.1 개발 개요

O.F케이블은 제조, 수송 및 포설작업상 케이블길이가 제약되어 시공현장에서 케이블 상호간 접속이 필요하며, 또한 케이블 양단에는 가공선 또는 전기기기와의 접속단말처리가 필요하다.

여기에 필요한 접속기기는 현재까지는 외국에서 수입하여 사용하였으나, 당사에서는 장기적 안정성, 경제성,

작성성등을 고려하여 1986년 개발에 착수 1987년 154KV 급 접속기기의 개발을 완료하였다. 본 내용에서는 실용화된 154KV 1*1200mm용의 접속기기에 대하여 종류, 설계 및 특성등에 대하여 기술한다.

2.4.2 개발 중요 접속기기의 종류

- 중간 접속함~보통접속함, 절연접속함, 유지접속함, 유지절연접속함
- 종단 접속함~기중종단접속함, 내오손용 종단접속함, 유중종단접속함, 가스중 종단접속함
- 급유장치~압력유조, 밸브판넬, 경보장치
- 케이블 방식층 보호장치

2.4.3 접속기기의 절연설계 및 성능

(1) 보강절연체계의 설계

$$R_x = r_s \cdot e(E/g_r \cdot r_s)$$

여기서, R_x : 보강절연체 반경(mm)

r_s : 접속슬리브 반경(mm)

E : 상정 전위(KV),

g_r : 도체슬리브상의 관측 최대전위경도(KV/mm)

전위경도값은 케이블 최대스트레스의 1/2이하에서 파

괴목표치를 상정해서 정하는데 상용화 Stress 값은 통상 15~25KV/mm로 한다.

(2) Stress Cone의 설계

일반적으로 다음 식을 이용하여 전체해석을 한다.

$$X = \frac{E}{g_x} \cdot \ln\left(\frac{\ln Y/r}{\ln R/r}\right)$$

여기서, g_x : 전위경도(KV/mm), E : 전압(KV)

R : 케이블 절연체 반경(mm)

r : 케이블 도체 반경(mm)

Y : 보강 절연체 반경(mm)

유침절연지의 파괴강도는 케이블측 방향과 직각방향과의 비를 종래에는 1/15~1/20으로 하였지만 케이블의 파괴목표치를 기준으로 하여 길이방향의 전위경도 g_x 를 1.0~2.0KV/mm로 한다.

(3) 기타 설계

- 도체슬리브의 설계
 - 기중종단접속함의 Stress Relief Cone의 설계
 - 외부절연설계
 - 외함의 내압설계
 - 방식층의 설계등이 중요한 설계사항들이 된다.
- (4) 개발 시제품의 주요특성(154KV 1*1200mm)

구 분	시 험 항 목	단 위	시 험 결 과
접 속 함	1. 교류 내전압 시험 및 파괴	KV	300KV 6시간 양호후 승압 465KV 3시간 양호후 시험중단
	2. 임펄스 시험 및 파괴	KV	-900KV 3회 양호후 승압 -1140KV 3회 양호후 시험중단
	3. 기밀 시험	Kg/cm ²	18Kg/cm ² 1시간 양호
	4. 절연통 인장내하중 시험	Kg	100Kg 10분 양호
	5. 절연통 냉열시험	℃	20℃ ⇄ 90℃ 5회 양호
	6. 에폭시 붓싱 냉열시험	℃	20℃ ⇄ 100℃ 5회 양호
	7. 에폭시 붓싱 부분방전시험	KV	110KV에서 50PC 이하
압 력 유 조	1. 쉘 기밀 시험	Kg/cm ²	0 ⇄ 0.2Kg/cm ² 10회 양호
	2. 동작 특성 시험	l	배유량 특성 양호
	3. 쉘 피로 시험	회	30000회
	4. 케이스 시험	Kg/cm ²	14Kg/cm ² 1시간 양호

주) 시험방법 및 규격치는 한전접속기기 규격사양서에 준함

3. O.F케이블 기술의 전망

도시의 대형화, 경제성장에 의한 산업의 발달에 따라 O.F케이블은 초고압 송전선으로 신뢰성, 안전성이 우

수하여, 현재까지 초고압지중송전선의 중추적인 역할을 하여왔다. 당사는 10여년간의 기술축적과 국내 최초 O.F케이블제조 선두메이커의 자부심으로 전력시스템의 개 전력수요의 증대로 송전전력량이 점차 증가하는 추세가

계속되고, 또 시가지의 유효이용, 환경미화 및 안정성 등의 사회적 요청으로 향후에도 지중송전선로는 계속 확장될 것이며, 더불어 기술개발도 진행될 것이다. 현재, 지중송전선의 기술개발과제는 대용량, 저손실, 대전류 케이블 및 시스템의 개발이다. 이런 케이블 및 시스템의 개발은 경제성, 신뢰성, 안정성이 기본이며, 현재 계획중인 345KV의 지중화의 경우 전기적인 특성, 송전용량, 포설조장, 저손실면에서 일반 크라프트지보다 매우 경제적이고 우수한 반합성지 절연 케이블의 실용화가 이루어져야 할 것이다.

또한 전국민의 전원사용의 평등화, 도서지방의 산업화에 따른 해저케이블이 요구되고 있으며, 이를 위한 해저 D.C 케이블 및 통신케이블과 연계되어 사용하는 복합케이블의 기술개발이 이루어져야 할 것이다.

이러한 케이블의 기술개발은 접속기기, 공사기술, 시스템의 기술개발과 병행하여 이루어져야 하며, 이것은 2000년대 복지국가건설, 기술의 선진국화에 부응하는 것으로 이를위해 관련업체, 연구기관의 상호협조뿐만 아니라, 정부의 적극적인 지원이 필요하다.

4. 결 론

O.F 케이블은 초고압 송전선으로 신뢰성, 안전성이 우수하여, 현재까지 초고압지중송전선의 중추적인 역할을 하여왔다. 당시는 10여년간의 기술축적과 국내 최초 O.F 케이블제조 선두메이커의 자부심으로 전력시스템의 개발, 신제품개발, 공사기술에 대한 연구에 더욱 박차를 가할 것이며, 지속적인 해외시장의 개척으로 국가경제에 이바지함은 물론 국내 기간산업의 역군이 되도록 계속적인 노력을 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 유채준, 김정훈, "345KV O.F 케이블 개발" 대한 전기협회지, 1988, 3
- 2) H.OASA의 2인, "O.F 케이블鉛被用合金鉛の諸特性," 住友電氣, VOL 97, 昭和 43, 2
- 3) 김종원 "154KV O.F 3심 케이블의 재특성" 전기학회 하계학술회의논문 85-7-5
- 4) 이희식 "154KV O.F 케이블용 접속기기의 개발" 전기학회 하계학술대회 87-7-3