

삼천포 화력발전소 3, 4호기 건설 345kV O.F. 케이블 지중 송전선로 공사

崔 昌 洙

大韓電線(株) 營業技術部長

金 泰 旭

大韓電線(株) 電力엔지니어링部長

국내에서도 345kV O.F. 지중케이블의 실용화의 문이 열렸다. 한국전력공사에서 건설하는 삼천포 화력 3, 4호기 증설공사에는 국내 최초로 최고전압계통인 345kV 1×2000mm² 및 1×1200mm² 알루미늄 피 Oil-Filled 케이블을 사용하였으며, 대한전선(주)에서 이를 설계, 제작납품 및 시공을 완료(Unit #3, #4 및 Tie Line)하였다. 본고에서는 케이블 및 부속재의 설계부터 현장 시공에 이르기까지를 소개한다.

1. 개 요

국내에서의 초고압 지중 송전케이블화는 1974년 일본 스미토모사에서 당인리-용산 154kV 1×630mm² O.F. 케이블 선로를 시작으로 해외 전선회사에서 수개의 선로를 시공하였으며, 이에 대한전선(주)에서는 1975년부터 154kV 급 O.F. 케이블의 개발에 착수하여 국내 최초로 1980년 개봉-오류 154kV 1×600mm² O.F. 케이블 선로를 완공한 이래 지금까지 국내외에서 약 1,500km의 선로를 시공한 경험을 바탕으로, 송전전압의 초초고압화에 따라 한국전력의 345kV 지중화 계획에 맞추어 1989년에 345kV O.F. 케이블을 개발완료하였으며 금번 국내 최초로 삼천포 화력발전소 인출용 345kV

지중 송전케이블 선로를 완성하게 되었다.

2. 케이블 및 부속재 설계

가. 케이블

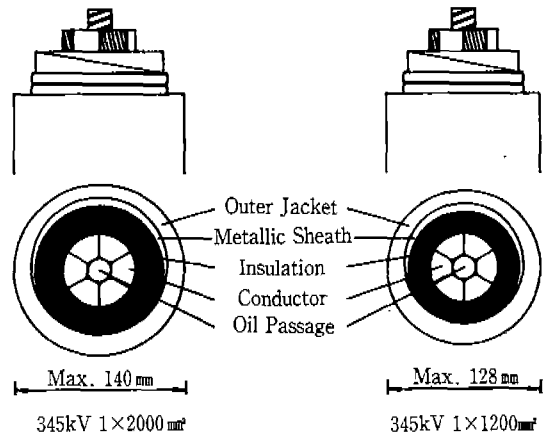
본 케이블의 주요 설계 조건을 표 1에, 설계 제작된 케이블의 구조를 표 2에 나타내었으며, 케이블의 장기성능 보장측면을 고려하여 설계 하였으며 그림 1에 케이블의 구조를 표시하였다.

(1) 도 체

도체 Size는 요구 송전용량에 충분히 견딜 수 있도록 Unit #3, #4호기(600MVA) 인출선로는 1C×2000mm²로, Tie Line은 1C×1200mm²(300

<표 1> 설계 기본 조건

No.	항 목	설 계 조 건
1	정격 전압	345kV
	-공칭 전압	362kV
2	주파수	60Hz
	기준 충격 절연강도(BIL)	1,300kV
4	접지 방식	중성점 직접접지
5	고장 용량	50kA/1sec
7	선로 손실률	1.0
8	최대 주위온도 변화	40°C ~ -20°C
9	케이블 최대허용유압	
	-상 시	8 kg/cm ² ·G
	-과도시	14 kg/cm ² ·G
10	도체 최고허용온도	
	-상시(연속)	85°C
	-단시간(10시간)	95°C



<그림 1> 345kV O.F. 케이블 구조도

<표 2> 케이블 구조표

항 목	단 위	Unit # 3, 4 (2000 mm ²)	Tie Line (1200 mm ²)
공칭 전압	kV	345	
유통로		Galvanized Steel	
-재 질	-	Galvanized Steel	
-내 경	mm	18.0	
도체		Copper	
-재 질	-	중공 6분할 원형압축	
-형 상	-	58.8 47.2	
-외 경	mm	58.8 47.2	
절연체		크라프트지	
-재 질	-	크라프트지	
-두 게	mm	23.5	
동선 직입포 두께	mm	0.3	
금속 차폐층		파부 알루미늄	
-재 질	-	파부 알루미늄	
-두 게	mm	2.7 2.5	
방식층		PVC	
-재 질	-	PVC	
-두 게	mm	6.0	
케이블 최대 외경	mm	140	128
최대 도체 저항(DC)	ohm/km	0.00915	0.0151
개산 유량	Lr/km	5,000	4,200
개산 중량	kg/km	37,000	26,000

MVA)로 선정하였으며, 구조는 중심에 유통로 스파이랄을 가지는 6분할 중공 원형 연선으로 3조에 Segment 절연지를 감아 표피 효과를 저

감시키는 구조로 하였다.

(2) 절연 설계

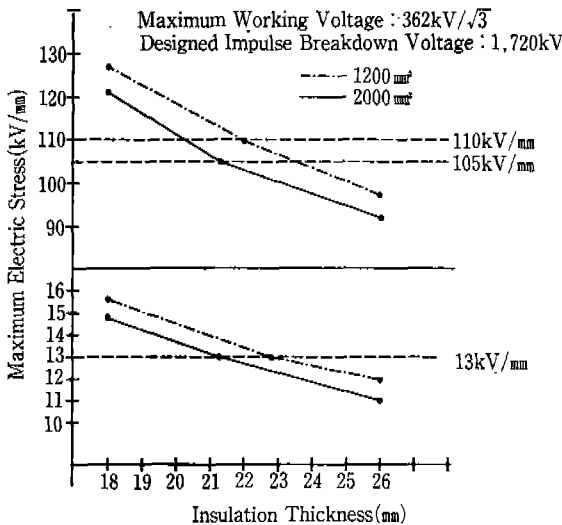
케이블 절연 설계상의 주 고려대상은 ① Impulse 및 AC 내전압에 견딜 수 있는 전기적 인 특성과 ②기계적 강도의 두 가지 측면에서 설계되었다.

(가) 절연체 두께

본 케이블 절연체 두께의 결정은 뇌 임펄스 전압강도와 상규 사용 대지전압 스트레스 강도 면에서 검토되었다. 뇌 임펄스 전압강도는 케이블의 파괴 목표치를 1,720kV 이상(소요 강도 1,300kV×1.2=내압 규격치 1,560kV, 파괴 목표치 1,560×1.1=1,720)으로 하였으며, 파괴 스트레스는 대한전선(주)의 과거 실험데이터에 의해 1,200mm²급은 110kV/mm, 2,000mm²는 105kV/mm로 설계하고, AC(상규 사용 대지전압) 스트레스에 대해서는 최대 13kV/mm가 되도록 설계하였으며 그 결과를 그림1 및 표3에 나타내었다. 그림2 및 표3의 결과에서 2,000mm²는 21.7mm, 1200mm²에서는 22.8mm로 되나 345kV급에서는 1000mm² 이상의 대도체로 되기 때문에 22.8mm로 일원화하였다.

<표 3> 345kV 절연두께 계산결과

Conductor Size	1,200 mm ²	2,000 mm ²
Impulse Breakdown Stress (V _{IMP} = 1,720kV)	t=22.0	t=21.7
max. Working Stress is 13kV/mm (at 362kV/√3)	t=22.8	t=21.3



<그림 2> Insulation Thickness and Max. Stress of 345kV Oil-Filled Cable

참고로 국내의 AC 스트레스의 적용 실적을 표 4에 나타내었다.

(나) 절연지 구성

345kV급 O.F. 케이블에서는 절연체중에 발새하는 유전체 손실이 커짐에 따라 저손실 크라프트지를 사용하였으며, 절연지의 구성은 도체 주위에는 대단히 큰 전계가 걸리므로 고밀도/고기밀도 절연지를 감아 내전압 향상을 기했으며, 절연지 외층에는 저밀도 절연지를 감아 기계적 강도의 증가 및 유전체 손실을 경감할 수 있도록 설계하였다. 종이 두께는 100~200μm의 절연지를 사용하여 전기적 특성과 기계적 특성의 향상을 기하였다.

<표 4> List of Maximum Working Stress of Super High Voltage Oil-Filled Cable Above 154kV

Nominal Voltage (kV)	Type of Cable	Conductor Size (mm ²)	Maximum Stress (kV/mm)	Remarks
154	O.F.	1,200 2,000	9.5 9.2	Korea
154	O.F.	800	9.5	Japan
275	O.F.	250 1,200	13.0 11.5	Japan
345	P.O.F.	1,000	12.0	U.S.A.
400	O.F.	1,900	13.5	England
500	O.F.	1,030	16.0	U.S.A.
500	O.F.	2,000	15.4	Japan

O.F. : Low Pressure Self-contained Oil-Filled Cable
P.O.F. : High Pressure Pipe Type Oil-Filled Cable

(다) 절연유

절연유로는 현재까지의 사용실적에서 성능이 충분히 확인된 저점도 Hard-Alkylbenzene계 합성유를 사용하였다.

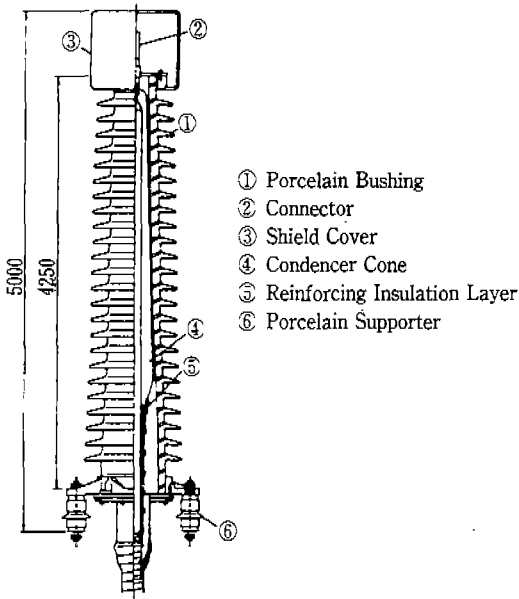
(3) 금속 쉬스 및 방식층

본 선로의 상시 최대허용유압(P=8kg/cm²G)에 3배의 안전율을 고려한 약 25 kg/cm²의 내유압에 견딜 수 있는 두께로 하였으며, 케이블의 열신축 및 허용곡률 변경, 축압 등에 의한 쉬스 피로 왜를 경감시키기 위하여 파상형(Sine Wave Corrugation) 구조로 하였다. 또한 금속 쉬스 장기수명 보장확인을 위해 표 5와 같은 조

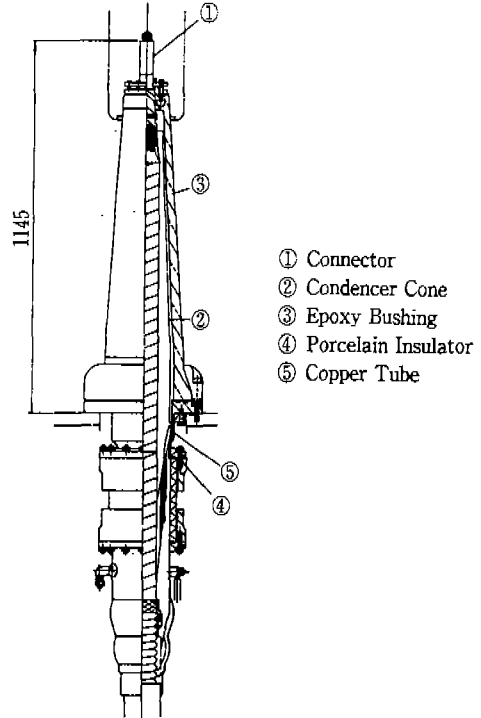
<표 5> AL 쉬스 굴곡시험 조건 및 결과

항 목	특 성
온 도 조 건	-10°C×2시간
시 험 주 위 온 도	27°C
케 이 블 외 경	137/125
시 험 곡 률 반 경	1,870/1,680
곡 률 배 수(쉬스 외경비)	15Ds
굴 곡 회 수	양복 3회
시 험 결 과	양 호

* 2000 mm²/1200 mm²



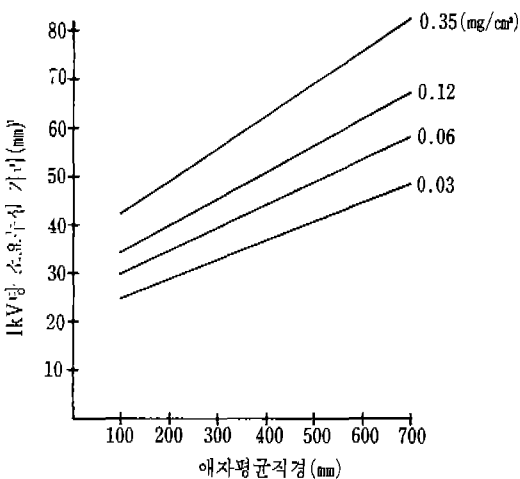
<그림 3 > Construction of 345kV Outdoor Sealing End



<그림 5 > Construction of 345kV SF₆ Gas Sealing End

건으로 굽곡시험을 행한 후 이상유무를 확인하였다.

방식층으로서는 기계적 강도 및 난연성 등을 고려하여 두께 6mm의 PVC 방식층을 채용하였다.



<그림 4 > 애자 설계 기준 곡선도

나. 부속재 설계

(1) 종단 접속부

본 선로의 종단 접속부로는 기중 종단 접속함(EB-A)과 가스중 종단 접속함(EB-G)이 사용되었으며 그림3, 그림5에 이들의 구조를 나타내었다. 전기 및 기계적 강도는 케이블과 동등 이상으로 주변기기와 잘 조화될 수 있도록 설계하였으며, 기중 종단부의 오손시 및 세정시 내전압에 대해서는 발전소 지역을 감안하여 표 6

<표 6 > 오손 지구별 염분 부착 밀도

구 분	염분 부착 밀도 (mg/cm ²)	비 고
경오손지구	0.03 이하	절연 강화
중오손지구	0.03~0.06	절연 강화
초중오손지구	0.06~0.35	세정 및 은폐화
특수지구	0.35 이상	은폐강구(옥내화)

에의 중요손 지구에 해당하는 염분 부착밀도 0.06mg/cm²의 오손 상태에서 1선 지락시 건전상의 대지전압 260kV에 견딜 수 있도록 그림 4의 산출에 의해 총표면 누설거리는 최소 12,220mm 이상이 되도록 표 7의 애자를 선정하였다.

내부 절연설계는 전계(Stress) 제어 및 경감 방식으로 154kV급에서 널리 사용되어 온 Bell-Mouth 형에서는 전계가 한 곳으로 집중되므로 345kV급 중단 접속함에서 EB-A/EB-G 모두 콘덴서 분압방식(Condenser-Cone)으로 설계하였으며, 전계강도는 AC에서는 15kV/mm (Radial Stress), 뇌 충격 내전압에서는 60kV/mm (Radial Stress)/3.0kV/mm (Longitudinal Stress) 이하가 되도록 설계하였다.

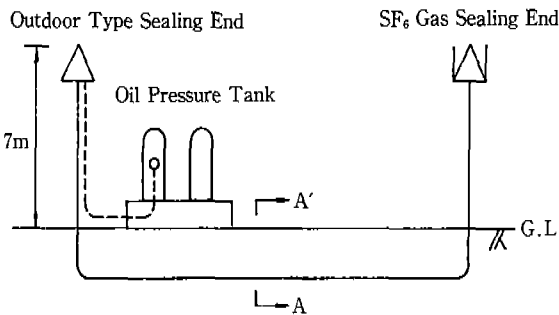
(2) 급유 설비

급유조로서는 압력유조(PT : pressure Tank)

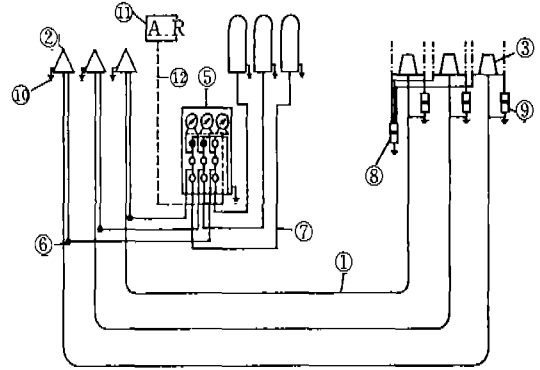
<표 7> 선정 애자 재원

총표면누설거리	12,900mm
유 효 섬 락 장	3,975mm
전 자 두께	4,250mm
애 자 두께	50mm
내 유 압	14 kg/cm ²
개 락 중 량	1,200kg

주) 오손 내전압 목표치 : V_{el} (1선 지락시 건전상의 대지전압)
 $V_{el} = \text{상규 대지 전압} \times 1.25$
 $= 345 \times 1.15 / 1.1 \times 1/\sqrt{3} \times 1.25$



<그림 7> Cable Route Profile



- ① 345kV Oil Filled Cable
- ② Out Door Sealing End
- ③ SF₆ Gas Sealing End
- ④ Oil Pressure Tank
- ⑤ Valve Panel
- ⑥ Insulating Coupling
- ⑦ Oil Feeding Pipe
- ⑧ Earthing Link Box
- ⑨ Gap-Less Arrester
- ⑩ Earthing Wire
- ⑪ Alarm Receiver
- ⑫ Alarm Cable

<그림 8> Schematic Line Diagram

를 사용하여 상시 및 과도시의 유량변화에 대해 자동적으로 수급조절이 가능하도록 하였으며, 유압 게이지 패널에 경보접점을 부착하여 사고시 등에 이상유압이 발생할 경우에는 즉시 경보수신장치가 작동하도록 하였다(그림 8의 선로 계통도 참조).

(3) 기타 부속재

기타 본 선로에서 채용한 부속재료는 방식층 보호장치 등이 있으며, 새로이 적용된 기술의 하나로서 345kV GIS 개폐 서지로부터 EB-G 절연통(Porcelain 애관)을 보호하기 위해 Gapless Arrester를 절연통에 부착하였다. 저항 소자로는 급준 서지파에 대한 응답성이 양호한 산화아연(ZnO)을 사용하였으며 표 8에 ZnO Gapless Arrester의 특성을 나타내었다.

3. 제조 및 검사

한국전력공사의 구매규격에 의거 공장에서 실시한 시험결과는 표 9에서 보는 바와 같이 만족할만한 결과를 얻었다. 즉 드림 시험 및 구조

<표 8 > ZnO Gapless Arrester 특성

No.	항 목	특 성
1	동 작 개 시 전 압	5±0.5kV Peak
2	동 작 책 무 특 성	2.8kV(대지), 23kA
3	내 전 압 특 성	IMP. -50kV : 3회
4	절 연 저 항 특 성	100MΩ (1000V) 이상
5	반복 노 IMP. 전류에 의 한 반복 특성	21kA-100회 반복하 여 이상 없을 것

시험에서는 이상개소가 없었으며, 교류 장시간 전압시험에서는 680kV 비파괴, 뇌충격 전압시험에서는 1,800kV까지 견디었고 또한 tan δ의 온도/전압 특성시험에서는 고온시(80°C)에 대 지전압에서는 그림 6에서와 같이 0.2% 이하로 서 케이블 장거리 선로에의 적용도 문제가 없는 것으로 판명되었다.

<표 9 > Result of Factory Tests

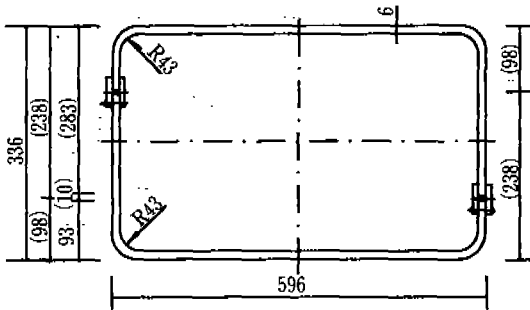
Item	Unit	Specified	Mesured			
			2000 mm ²	1200 mm ²		
Drum Test	Conductor Resistance (at 20°C)	Ω/km	max. 0.00915 max. 0.0151	0.00875~0.00879	0.00146~0.00149	
	Capacitance	μF/km	max. 0.37 max. 0.32	0.325	0.283	
	Insulation Resistance (at 20°C)	MΩ·km	min. 27,000 min. 31,300	71,000	67,000	
	High Voltage Test	kV-min.	460-10 min	Satisfactory		
	tan δ	20kV	%	max. 0.28	0.156	0.152
		334kV		max. 0.34	0.197	0.192
	Bending Test	20D _s	-	Satisfactory	Satisfactory	
15D _s		Satisfactory		Satisfactory		
Sample Test	High Voltage Test	kV/Hr.	530/6 Hours	Satisfactory		
	High Voltage Break-Down Test	kV	Above 530	680 NO B/D	680 NO B/D	
	Impulse Voltage Test	kV/Times	1560/3 Times	Satisfactory		
	Impulse Voltage Break-Down Test	kV/Times	Above 1560/3 Times	-1860 NO B/D + 1830 1회 B/D	-1860 NO B/D + 1800 2회 B/D	
	tan δ (Temperature & Voltage Characteristics)					

<그림 6 > tan δ vs Temperature Variation Curve

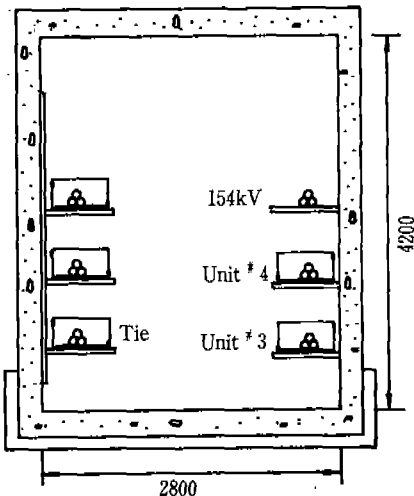
4. 계통 설계(System Design)

가. 접지 및 급유/경보 System

본 선로의 Route Profile 및 선로 계통도를 그림 7, 8에 나타내었으며, 금번 계통설계의 특징은 선로의 중요성을 감안하여 지하 전력구내에 기중 포설되는 케이블의 방재대책으로서 아크나 연소가스에 의한 연소방지와 지락사고 등에 의한 자기 케이블 및 인접 케이블로부터의 연소 및 외상 방지의 목적으로 케이블을 FRP제 방재 트러프내에 설치하였다. 방재 트러프는 산소의 공급을 억제하기 위해 완전 밀폐형으로 하였으며 열신축에 의한 케이블 스페이크 효과를 높이기 위해(금속 쉬스 피로 방지) 모래를



<그림 9> 방재 트러프 표준단면



<그림 10> 전력구내 케이블 배치 표준단면도(A-A')

충진하지 않는 구조로 하였다.

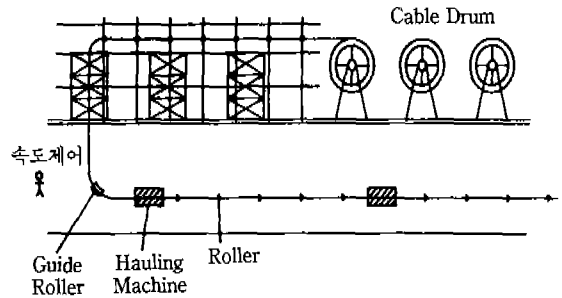
나. 방재 트러프 규격 선정

표 9의 스페이크 계산 결과에서 그림 9와 같은 트러프를 선정하였으며, 그림 10에 전력구내 케이블설치 표준단면과 현장 설치상태를 나타내었다.

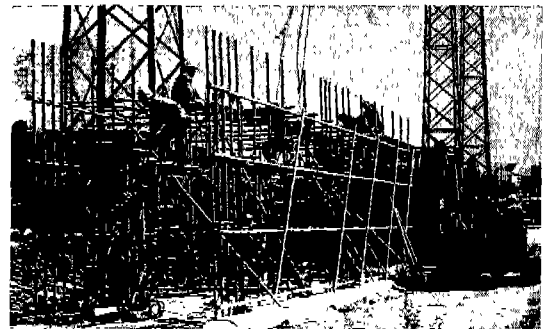
5. 시 공

가. 케이블 포설

케이블은 전력구 벽면에 약 1m 높이에 설치된 600형 FRP제 트러프내에 3상 Trefoil로 설치되며 전력구는 ①포설 케이블은 중량 약 40kg, 외경 약 140mm로 대형이고 ②최대 경간이 약 500mm로 장거리이며 경간중에는 상하, 수직 및 3차원 굴곡부가 있는 등의 현장조건을 검토



<그림 11> 케이블 전력구 진입 개요도



<사진 1> 케이블 포설 작업

한 결과 인입력 약 1000kg의 Hauling Machine 및 특수 가이드 롤러를 사용하여 포설하여 공법을 채택하였다. 그림 11에 케이블 포설작업 개요도를 나타내었다(사진 1 참조).

나. 스네이크 포설

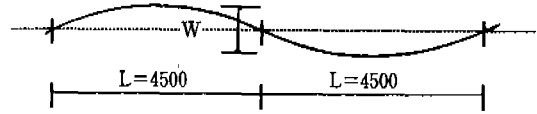
케이블의 스네이크 포설은 표 10의 스네이크 계산 결과에 의거 방재 트러프내에서 작업이 가능하도록 특수 제작된 Bending Machine을 사용하여 실시하였으며, 또한 스네이크 취부후 복원 및 비틀림 등을 방지하기 위해 케이블을 스

네이크 형상으로 일정시간 구속하여 형상의 안정을 도모하였다. 최종적으로 스네이크 형상 치수가 규정범위내에 들어가는가를 확인하였다(사진 2 참조).

-스네이크 반 피치 : $L=4500 \pm 200 \text{ mm}$

-초기 폭 : $W=125 \pm 10\% (2000 \text{ mm}^2)$

$W=160 \pm 10\% (1200 \text{ mm}^2)$



<표 10> 케이블 스네이크 계산(2000mm² 기준)

계산 조건	케이블곡강성	EI	kg·cm ²	23.0×10^6
	케이블중강성	EA	kg	20.0×10^6
	선 팽창 계수	C	1/°C	16.5×10^{-6}
	케이블중량	W	kg/m	37.0
	케이블외경	D	mm	140
	쉬스평균외경	Ds	mm	125
	허용쉬스왜	ϵ	%	0.3
	케이블마찰계수	μ	-	0.3
	연간온도변화	dT _v	°C	60
	일간온도변화	dT _a	°C	30
계산 결과	스네이크반피치	L	cm	450
	초기 폭	W	cm	12.5
	이동량	m	cm	8.56
	최종 폭	W+m	cm	21.06
	축력	P	mm	944.3
	쉬스 왜	ϵ	%	0.0677



<사진 2> 트러프 내 케이블 Snake

다. 케이블 열거동 대책

케이블이 트러프내에서의 열신축은 전술한 스네이크 포설에 의해 흡수되지만 스네이크 단부 및 경사부 등에서는 열신축과 더불어 열거동에 의한 활락 등도 고려하여야 하며 본 선로에서는 다음의 3부분으로 나누어 시공하였다.

-전력구 표준부

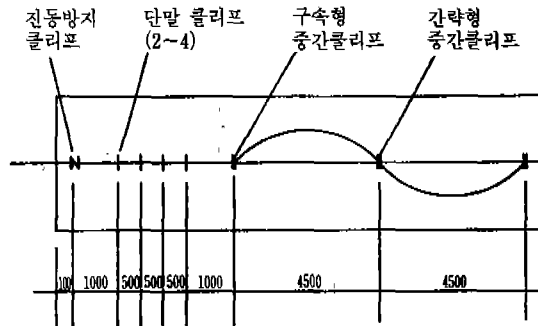
-경사부

-임상부

(1) 전력구 표준부

전력구 표준부에는 그림 12에 나타난 스네이크 형상을 균일하게 유지하였으며, 스네이크 단부에는 단말 클리트를, 스네이크 변곡점에는 간략형 중간 클리트를 설치하였으며 단말부 구속력은 스네이크 계산 결과에 의해 다음과 같다.

-단말 클리트 구속력 : 300kg/개



<그림 12> 전력구내 표준부 케이블 배치도

-소요 구축력 :

P=944.3kg(2000mm)→4개 설치

P=415.7kg(1200mm)→2개 설치

(2) 경사부

경사부는 기본적으로는 수평부와 같으나, 중간클립트에 대해서는 이 부분에 스네이크 축력차 약 300kg과 케이블의 자중에 의해 약 400kg의 하중이 가해지기 때문에 전부 구속형 클립트를 사용하여 Heat Cycle에 의한 케이블의 활락을 방지하도록 하였으며, 또 굴곡부 전후에는 표준부 스네이크 단부와 같이 단말클립트를 사용하였다(그림 13, 사진 3 참조).

(3) 입상부

입상부 지지는 코어의 활락에 의한 돌출력을 검토한 결과 큰 문제가 없어 자중 및 열신축에 의한 축력만 지지할 수 있도록 전려구 상면을

이용하여 현수지지장치를 사용하여 지지하도록 하였다.

라. 단말 접속

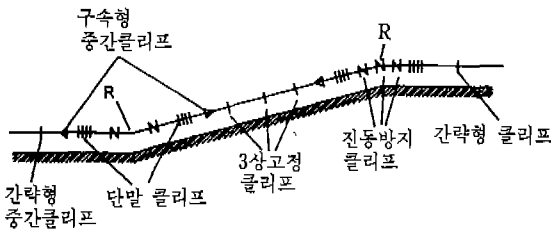
단말 접속함의 조립은 도면에 의거 철저한 품질관리 체계를 확립하여 시공되었으며, 특히 접속부에는 공조 하우스를 설치하여 온도 및 습도 관리에 철저를 기했고, 각 작업 공정별로 품질 기능 관리표를 작성하여 관리 항목/관리 포인트를 설정한 후 작업을 진행하였다.

6. 준공 검사

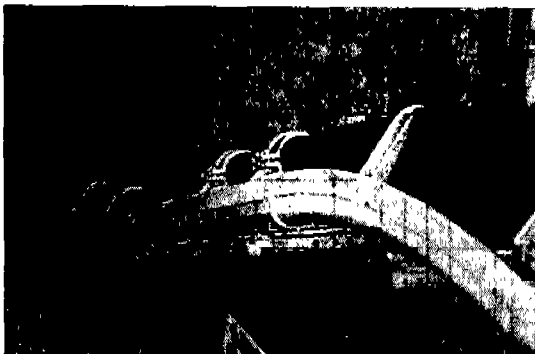
케이블의 포설 및 접속을 완료한 후 현장 시공이 끝난 후의 품질 확인을 위해 DC 462kV를 10분간 가한 결과 이상이 없었으며 최종적으로 쉬스 전위, 접지 설비 및 급유/경보 시스템 등에 이상이 없음을 확인하고 1992년 11월 17일 Tie Line을 시작으로 상용운전에 돌입하였다.

7. 맺음말

급변 삼촌포화력 345kV 지중 송전선로공사를 무사히 완료함에 따라, 금후 건설 예정인 345kV 장거리 지중 선로에서는 이번 공사를 계기로 더욱더 기술 개발 및 품질 관리에 박차를 가하는 계기가 될 수 있도록 노력할 것을 다짐하며 마지막으로 본 삼촌포화력 345kV 지중 송전선로공사의 완성을 위해 지도 및 협조를 해주신 한국전력공사 관계자 및 사내의 여러분들께 심심한 감사를 드린다.



<그림 13> 전력구내 경사부 케이블 배치 일반도



<사진 3> 전력구내 경사부 트러프 설치

..... <참고문헌>

1. Korea Electric Power Corporation "Specification for 345kV Oil-Filled Cables"
2. D. McAllister "Electric Cables Hand Book" 1982, Granada Technical Books Ltd.
3. "Underground Systems Reference Book". Edison Electric Institute
4. 電力 케이블 技術 Hand Book, 電氣 書院(日本)
5. 日本 電氣協同研究 第35-3號
6. 飯場 他: SNAKE 布設에 관한 研究, 昭和 電線 REVIEW 21.3(1971)