

# 지중송전케이블 송전용량 증대 공법



석광현  
KEPCO 송변전개발처 송전사업팀 차장

## 1. 개 황

인구 집중화 현상에 따라 대도시 지역의 전력수요가 급격히 증가하고 있어 초고압 송전선로 건설의 필요성이 절실하다. 그러나 가공으로 건설 시 철탑부지 확보의 어려움, 각종 민원, 환경보존에 대한 사회적 요구 등 제약요건이 많아 지중송전선로 건설의 필요

성은 점차 증대되고 있는 추세이다.

이러한 시대의 요청에 맞추어 지중송전선로 건설을 확대하기 위해서는 우선, 가공선로에 비해 상대적으로 많은 비용이 드는 지중송전선로 건설 원가를 절감하는 것이 필요하며, 이에 한전에서는 신기술·신공법 및 신기자재 개발 등 많은 노력을 아끼지 않고 있다.

## 2. 현 황

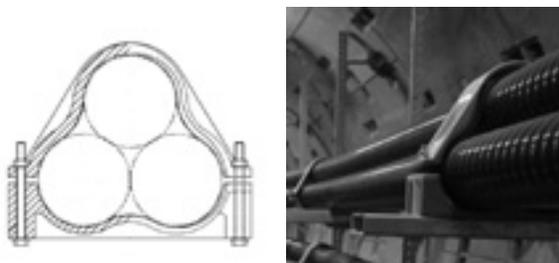
지중송전선로 건설 시에도 공사비 증가, 도심 교통 혼잡에 따른 민원발생 등으로 지중화의 속도가 늦어지고 있으며, 이에 따라 새로운 공법개발이 요구되고 있다. 특히, 제한된 공간 내에서 케이블의 송전용량을 증대시킬 수 있는 공법개발이 최근 중요한 이슈가 되고 있다.

이를 위해 한전에서는 최근 케이블의 용량증대 방안으로 ▲표피효과 최소화 ▲케이블 상간·회선 간 이격거리 증대 ▲냉각설비 설치 ▲도체규격 증대 등의 방안을 다각도로 추진하고 있다.

## 3. 송전용량 증대 금구류 개발

지중송전 케이블은 도체, 절연체, 시스, 방식층으로 구성되어 있다. 시스는 절연층에 침입하는 습기를 방지하며 케이블을 기계적 외상으로부터 보호하고, 지락전류와 순환전류의 귀환경로를 제공하는 역할을 한다. 전력케이블에 전류가 흐르면 전류의 크기에 비례하여 시스에 전압이 유기되며, 이 시스의 유기전압은 도체에 흐르는 전류, 케이블 배열과 간격, 케이블 길이 등에 따라 달라진다.

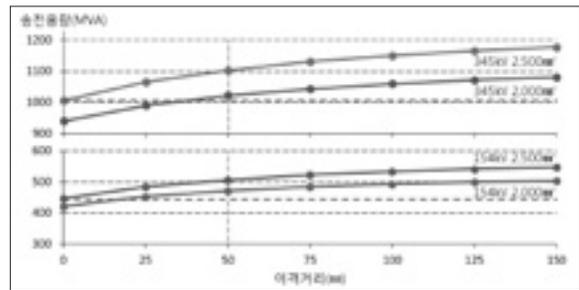
일반적으로 시스 와전류 손실을 저감하는 방법으로 Trefoil 포설방식을 채택하고 있다(그림 1 참조).



[그림 1] 일반적인 케이블 배열

### 가. 케이블 상 이격으로 송전용량 증대

케이블을 전력구내에 일반적으로 포설하는 Trefoil 방식에서 나아가 케이블 상(相)간 간격을 이격하는 정도에 따라 그림 2에서와 같이 송전용량은 증가한다.



[그림 2] 상 이격에 따른 송전용량 변화

전압별로 약간의 차이는 있으나 케이블 간격을 50mm 이격하면 약 8~10% 송전용량을 높일 수 있다. 이것은 다시 말하면 케이블 도체 단면적을 높인 경우의 송전용량 증가와 동일한 효과를 가져 오게 된다.

케이블 상간 간격을 크게하면 송전용량은 증가하지만 케이블 설치간격이 넓어져 구조물의 크기가 늘어나야 하는 단점이 있다. 그림 2에서와 같이 케이블 상(相)간을 50mm 이격할 경우 송전용량 증가의 효과는 크지만, 50mm를 넘을 경우에는 포화특성을 보이고 있다.

### 나. 금구류 설계·제작

상 이격 포설을 위해 별도의 케이블 고정금구 개발이 필요하게 되었다. 전력구내 케이블 고정을 위해서 필요한 단말고정형, 중간구속형, 진동방지형 등 3가지의 고정금구를 개발하였다.

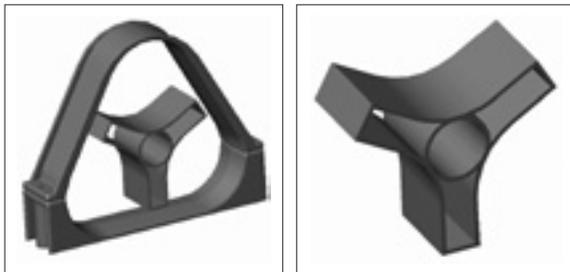
케이블 고정금구의 재질은 단락전자력에 의한 충격을 견딜 수 있는 비자성체의 내식성이 큰 알루미늄 합금(AL Alloy) AC7A로 제작하였으며, 고정금구의 두께는 현재 사용 중인 고정금구를 참조하여 12mm로 설계하였다.

또한 기존 고정금구를 참조하여 상 이격이 가능한 구조인 3가지 Type으로 스페이서를 설계하였으며, 그 중 구조적으로 안정적인 이미지의 A Type 스페이서를 적용하여 상 이격 고정금구의 형상을 제작하였다. 전기연구원 시험결과 화학적 성분분석, 기계적 특성, 고무판 특성 등 시험품질을 만족하였다.



단말고정형

중간구속형



진동방지형

스페이서

[그림 3] 케이블 고정금구



A Type

B Type

C Type

[그림 4] 케이블 스페이서

표 1은 개발된 상 이격 금구류와 현재 사용 중인 상 일괄형 금구류를 비교한 값을 나타낸 것이며, 상 이격에 따라 여유 공간 및 회선 간 거리가 다소 축소되지만, 전력구 규격은 변경이 없음을 알 수 있다.

[표 1] 전력구 적용 공간 (단위:mm)

구 분	삼상일괄 수직스네이크		상 이격(50mm) 수직스네이크		
	단말 고정형	중간 구속형	단말 고정형	중간 구속형	진동 방지형
금구 높이	376	348	391	391	385
행거~행거	131	160.5	116	117.5	128
회선간	260	288	245	245	245
바닥~최하단	204.6		204.6		

### 다. 금구류 시험

#### 1) 본체 특성시험

본체 특성 시험은 KS M 6008에 의거 시험하였고, 본체의 인장강도, 연신율, 경도, 열처리 시험과 고무판 특성시험, 인장강도 및 신장률 시험은 KS M 6518에 의거, 시행하였다. 또한 고정 볼트 및 너트시험은 KS B 0241에 의거 시행하였다.

[표 2] 특성시험 결과

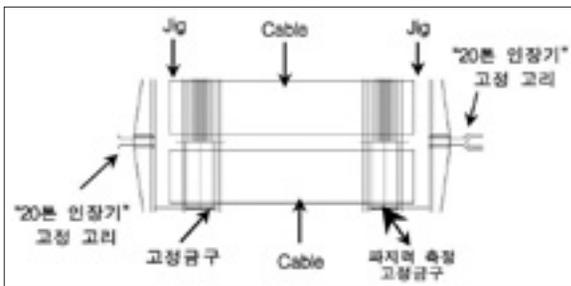
AL-Alloy(AC7A)	볼트	고무판
시험 결과	시험 결과	시험 결과
<ul style="list-style-type: none"> <li>• KS D 6008의 AC7A에 해당</li> <li>• 인장강도, 화학 조성, 연신율, 경도 이상 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화학적 조성 및 기계적성질이 나이트게의 등급 A1 급에 해당</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내연성, 경도, 상온 시험, 성분시험 인장강도, 신장율 이상 없음</li> </ul>

#### 2) 파지력 시험

파지력 시험은 케이블 열신 축에 의한 케이블 거동을 억제하는 고정금구의 힘을 파악하기 위한 시험으로 설계기준의 파지력 만족여부에 대한 시험을 시행하였다.

파지력 시험을 위해 제작된(상 이격 금구) 단말고정형 및 중간구속형 고정금구를 활용해 실제 케이블을 구속하고 별도의 인장기를 제작, 일정한 힘으로 인장하여 케이블의 이동 여부를 측정하였다.

현재 케이블 제조사에서 납품하고 있는 케이블 2 종류의 고무판(3.2mm, 6.4mm)에 대하여 모두 시험을 진행하였다.



[그림 5] Jig 조립



단말고정형                      중간구속형

[그림 6] 시험 기기

시험결과 케이블 고정금구의 파지력은 표 3에서와 같이 기준 값인 단말고정형 300kgf, 중간구속형 200kgf 파지력 보다 3배 이상 높은 결과가 나왔다.

[표 3] 시험 결과 (단위 : kgf)

고무 두께	단말고정형		중간구속형	
	기준 값	측정 값	기준 값	측정 값
3.2(mm)	300	1,000이상	200	850
6.4(mm)	300	1,000이상	200	600

따라서 케이블의 장시간 운전 또는 사용 상태에서 발생하는 케이블 거동을 억제하기에는 충분할 것으로 판단된다.

### 3) 단락전자력 강도

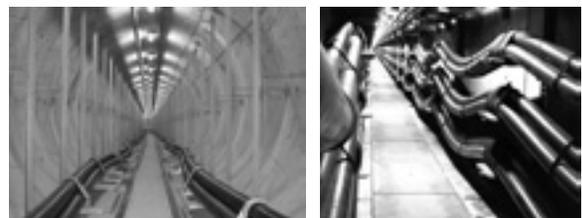
케이블에 발생하는 가장 가혹한 조건의 상태로 선로 운전 중 3상 단락이 발생할 경우 케이블에 반발력이 발생하며, 이때 케이블 고정금구는 이 힘을 견뎌야 한다.

단락전자력의 크기는 케이블 상간 간격에 반비례한다. 따라서 상 이격의 경우 단락전자력은 기존보다 감소하게 된다. 기존의 금구류가 단락전자력에 충분히 견디도록 설계되었으므로 단락전자력에 대한 강도시험은 생략하였다.

## 4. 상 이격 금구 시공기술 개발

전력구내 케이블을 포설할 경우 부하전류에 따른 열신축 흡수를 위해 케이블을 스네이크(Snake) 포설한다. 스네이크 포설의 종류에는 수평 스네이크와 수직 스네이크 방법이 있으나, 현재 한전에서는 수평 스네이크 포설방식을 채택하고 있다.

수평 스네이크의 경우 상 이격 금구를 전력구내에 설치할 경우 통로 폭이 좁아지게 되어 전력구 크기를 넓게 하여야 하는 단점이 있다. 따라서 케이블 열신축



수평 스네이크                      수직 스네이크

[그림 7] 스네이크 시공사진

이 위아래로 이루어지는 수직 스네이크 포설공법을 적용하여 전력구 단면적 증가의 문제를 해결하였다.

**가. 케이블 스네이크**

1) 스네이크 폭/피치

수직 스네이크 설계를 위해서는 스네이크 폭과 피치를 결정하여야 하며, 아래 사항들을 검토하여야 한다.

- 스네이크 축력(F)
- 케이블 폭방향 이동량(n)
- 금속시스 변형율(ε)

이론적인 검토결과 스네이크 폭은 1.5 Ds(Ds : 케이블 금속시스 평균외경), 피치는 4.5m가 가장 이상적인 것으로 검토되었다.

2) 고정금구 구속력

▷ 스네이크 단말부

스네이크 단말부에서는 축력을 구속하기 위하여 고정금구를 설치하여야 하며, 축력(F)을 구속하는데 필요한 고정금구 1개당의 구속력을 Fc라 할 때 고정금구 수량은 아래와 같이 산출한다.

$$N = \frac{FS_F}{F_c}$$

- N : 고정금구 수량
- F : 케이블 축력
- S<sub>F</sub> : 곡강성에 대한 안전율
- F<sub>c</sub> : 고정금구 파지력(300kgf)

고정금구 개수와 구속력의 관계에서 5개까지의 실험결과에서는 고정금구의 구속력은 개수에 비례하여

증가한다. 또 고정금구를 복수로 설치하는 경우 200~600mm 간격으로 고정금구 간격을 변화해도 구속력에는 영향이 없다는 것이 확인되었다. 표준으로서 고정금구 개수는 5개를 최대로 하고, 간격은 작업성 등을 고려하여 300mm정도로 결정하였다.

▷ 스네이크 변곡점

스네이크 변곡점에서는 이론적으로는 좌우의 축력이 같게 되어 축력차가 없지만 스네이크 포설 작업오차 및 현장 작업성을 고려하여 정점부 마다 구속형 고정받침을 설치하도록 하였다.

▷ 로프 결속

스네이크의 정부(頂部)점간에는 선형유지 및 단락전자력 대책으로 스네이크 변곡점 및 정부에 놓인 케이블을 삼상 일괄 Rope로 구속한다. 결속권수는 아래와 같이 산출한다.

$$\text{단락전자력}(F_a) = 2.04 \times 10^{-8} \times k \times \frac{i_s^2}{S} \times LS$$

- i<sub>s</sub> : 단락전류
- S : 케이블 중심 간격
- k : 0.866(상수)
- L : 지지간격

$$\text{결속권수}(N) = (F_a \times S_f) / F$$

- F<sub>a</sub> : 단락전자력(kgf)
- S<sub>f</sub> : 안전율 (1.5 이상)
- F : 로프의 파단장력

3) 수직 스네이크 이론에 대한 검증

표 4는 스네이크 축력, 케이블 이동량 및 금속시스 변형량 등을 수평 스네이크와 비교한 것이다.

[표 4] 스네이크 공법 비교

구 분	수평 Snake		수직 Snake	
	154kV	345kV	154kV	345kV
피 치	6m	9m	4.5m	4.5m
폭	1~1.2Ds	1~1.5Ds	1.5Ds	1.5Ds
지지만격	1.5m	1.5m	4.5m	4.5m
전력구폭	2.2m	2.4m	1.9m	2.1m

※ Ds : 케이블 금속시스 평균 외경

[표 5] 케이블 이동량(mm) 이론값

XLPE	154kV			345kV		
	B	n	계	B	n	계
2000mm <sup>2</sup>	166	29	195	200	25	225
2500mm <sup>2</sup>	180	27	207	223	22	245

주) B : 스네이크 폭, n : 열신축 이동량

스네이크 축력(F), 케이블 폭방향 이동량(n) 및 금속시스 변형율( $\epsilon$ ) 등 수직 스네이크 이론 값에 대한 현장 적용성 검증을 위해 실증시험을 시행하였다.

〈 실증시험 조건 〉

- 시험선종 : 345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup>, 6피치
- 시험내용 : Heating Cycle 시험(20Cycle)
- 측정내용 : 케이블축력, 이동량, 시스변형 등
  - ※ 뇌충격, 상용주파내전압 시험 병행



[그림 8] 실증시험

실 선로를 모의하여 도체온도를 허용 온도(90℃)까지 가열과 냉각을 반복하는 20회의 Heating Cycle

실측 결과 이론값 이내로 실측됨에 따라 수직 스네이크의 현장적용이 가능한 것으로 검증되었다.

[표 6] 현장 실증시험 결과

항 목	$\Delta t$ 65℃	
	계산치	실측치
축 력(kgf)	520	535
이동량(mm)	25	11
시스변형(%)	0.17	0.14

※ 이동량 오차원인 : 금속시스 공간에서 다소의 이동량이 흡수된 것으로 판단됨

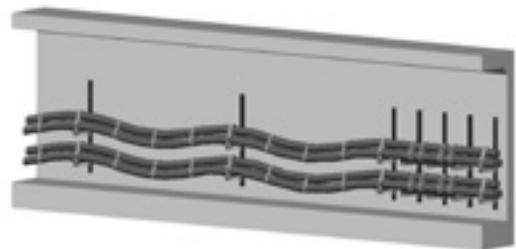
4) 상 이격 포설공법 시공기준

이상과 같이 검토, 실증시험 완료한 포설공법을 정리하면 표 7과 같다.

[표 7] 345kV 스네이크 및 케이블 간격

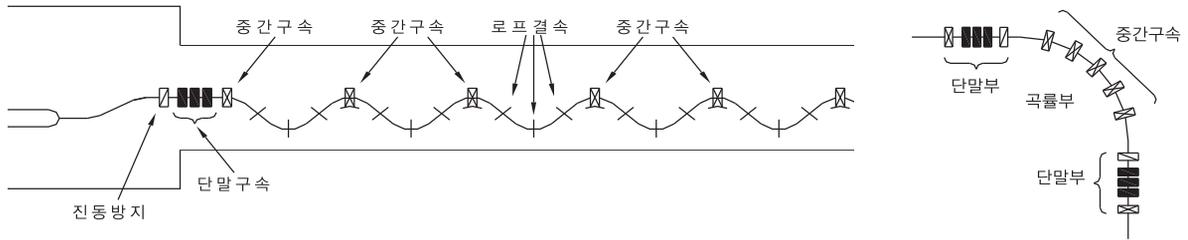
구 분	스네이크			행거 간격	
	피치	폭	지지만격	최하단 행거~ 바닥	행거 상하간
기 준	4.5m	1.5Ds	4.5m	450mm	600mm

또한 케이블 고정금구 설치방법은 다음과 같다.



[그림 9] 스네이크 시공도

- 케이블 고정금구는 지지만격(4.5m) 마다 케이블 받침대, 중간구속형 고정금구 및 스페이서 설치
- 전력구내 접속부, 곡률부 등 스네이크 단말부는 단말고정형 3~5조 및 진동방지형과 중간구속형



[그림 10] 금구류 설치 개요도

고정금구 설치 (설치간격 : 300mm)

- 지지간격내 케이블은 스페이서와 삼상 로프 설치 (약 1.125m 간격으로 3개소 설치, 로프는 PP로프를 3회/개소 이상 결속)

신울산~신온산 지중선로 등의 건설 사업에 시범적용 중에 있으며, 시공현장에서 개선의견을 반영하여 내년부터는 본격 사용할 계획이다.

## 5. 향후 계획

본 개발공법의 신뢰성을 확인하고자 우선 345kV

또한 한전은 지중화 활성화를 위해 지중송전선로 건설원가 절감을 위한 중장기 로드맵을 수립하여 운영 중에 있다. 또한 가공선로 건설에 비해 상대적으로 많은 비용이 소요되는 단점을 해소하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 