



관로구간 지중송전케이블 접속간격 확대



석 광 현
KEPCO 송변전개발처 송전사업팀 차장

1. 개황

최근 대규모 신도시 개발과 더불어 도심지의 급속한 확장으로 지중송전선로의 건설수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 지중송전선로의 확충은 더

욱 증가하고 있다.

이러한 수요에 대응하기 위해 한전은 저비용 고품질 지중송전선로 건설을 위한 신기술·신공법을 지속적으로 개발하여 안정적인 전력공급과 건설원가 절감을 추구하고 있다.

2. 현황

지중송전 케이블은 제작 및 운반의 제약때문에 단 위조장(약 350m)으로 생산·운반하여 현장에서 조립하는 공법을 채택하고 있다. 케이블 접속개소가 많을수록 건설비용과 고장의 개연성이 높아져 케이블 접속간격이 길수록 비용과 설비관리 측면에서 유리하게 된다.

관로 내 케이블포설은 여러 가지 사항을 종합적으로 판단하여 결정하며, 특히, 최대 포설장력과 허용측압이 고려되어야 한다. 포설장력은 케이블의 무게와 관로 경간, 그리고 관로와 케이블 사이의 마찰계수에 의해 변화되고, 포설장력의 증가로 인해 포설시 측압이 커지게 되면, 케이블 도체와 절연체의 변형과 방식 층의 손상으로 이어져 케이블 고장의 원인이 되므로 포설 전 정확한 검토가 필요하다.

특히, 측압은 케이블 포설시 장력과 곡률반경에 따라서 케이블에 직접적인 영향을 미치므로, 현재의 허용측압에 대한 정확한 검토와 안전율을 고려한 재평가가 필요하다. 하지만 국내에서는 허용측압에 대한 구체적인 검토가 이루어지지 않았기 때문에 측압작용에 따른 케이블의 건전성 평가와 함께 케이블 포설시 유효한 허용측압 기준을 재정립하게 되었다.

3. 관로 경간의 결정요소

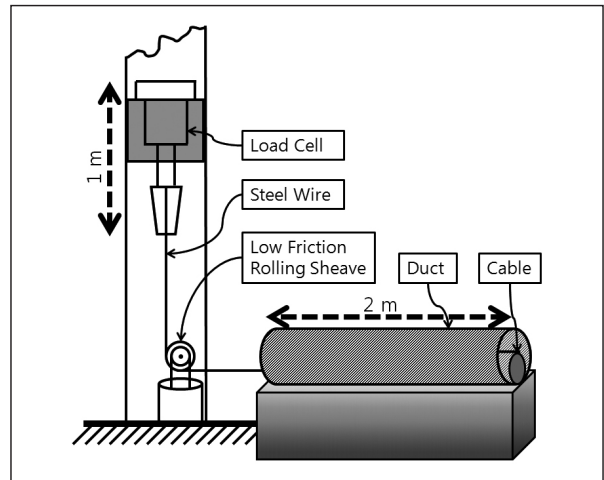
앞서 언급하였듯이 관로 내 케이블 포설길이(접속간격)를 결정하는 주된 요소는 ▲관로 내 케이블 마찰계수 ▲케이블 허용측압 ▲케이블 포설장력 등 크게 3가지로 나누어진다. 특히, 유효한 허용측압의 증가는 장경 간 포설을 가능하게 하여 케이블 접속개소를 줄일 수 있는 중요한 요소로 작용한다.

가. 케이블 마찰계수

관로 내 케이블 마찰계수 실측을 위해 ASTM¹⁾ 및 ISO²⁾ Standard에 따라 2m의 PVC 직관과 PE 파형관 내부에 1m의 PVC/PE 외피 XLPE 케이블을 통과시켜 얻어지는 마찰계수를 측정하여 한전 설계기준의 마찰계수가 적정함을 확인하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

[표 1] 마찰계수 실측 값

구분	외피재질	PVC 외피 (평균값)	PE 외피 (평균값)	설계 기준
	포설속도			
파형관		0.1045	0.2870	0.3
직 관		0.3755	0.2715	0.4



[그림 1] 측정 개념도

나. 케이블 허용측압

케이블 포설시 발생하는 측압(側壓, Sidewall Pressure)은 포설장력에 의해 관로의 굴곡부에서 관로내면과 케이블 사이에 발생하는 압력을 의미한다. 케이블이 관로인입 시 관로 굴곡부에서는 포설장력에 의하여 케이블이 관로 벽에 눌리는 힘을 받게 되는데, 이 힘을 측압(P)이라고 하며, 케이블포설 설계시 주된 인자로서 고려된다. 일반적으로 굴곡부에서

1) ASTM 1894 : American Society for Testing Materials
2) ISO 8295, 15113 : International Organization for Standardization

의 측압은 포설시의 제한요인으로 크게 작용하기 때문에 측압에 대한 고려가 중요하다. 단심배열의 경우 측압 식은 아래와 같다.

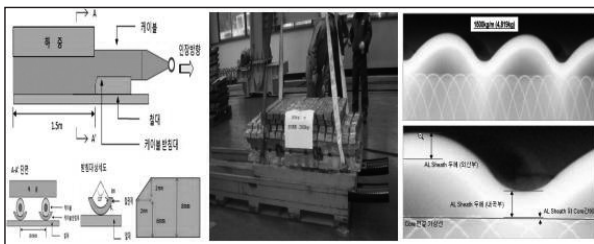
$$P = \frac{T}{R}$$

(P = 측압 [kgf/m], T = 장력 [kgf], R = 곡률반경[m])

(1) 케이블 방식층 강도시험

국내에서는 최근까지 허용측압 기준에 대한 구체적인 검토가 없었지만 근래에 최신 포설 공법 개발 및 건설 원가절감 노력의 일환으로 그 필요성이 대두되어 기준에 대한 검토 및 케이블의 건전성 평가가 이루어지고 있다.

그림 2에서와 같이 국내에서 생산되는 154kV 지중 송전케이블 방식층에 대한 강도시험을 시행하였다. 이 시험의 경우는 이론적 수식을 바탕으로 장력 및 곡률반경에 따른 측압 시험이 아닌 직선상태의 케이블에 수직 하중을 인가시키고, 요철을 만든 후 그 위를 케이블이 이동하면서 발생하는 케이블의 변형 및 손상 유무를 평가하였다.



[그림 2] 방식 층 강도시험

시험방법은 약 1.6m 정도의 케이블을 40℃로 2시간 가열 후 케이블에 균등하게 하중이 걸리도록 한 다음 10m/분의 속도로 케이블 받침을 통과하도록 하면서 방식층 및 금속시스의 손상 또는 변형 여부를 확인하였다. 이때 케이블에 인가한 하중은 500~900kgf까지는 100kgf 단위로 설정 후 시험하였으며, 1,500~2,700kgf에서는 300kgf 단위로 시험하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

[표 2] 방식 층 강도시험 결과 값

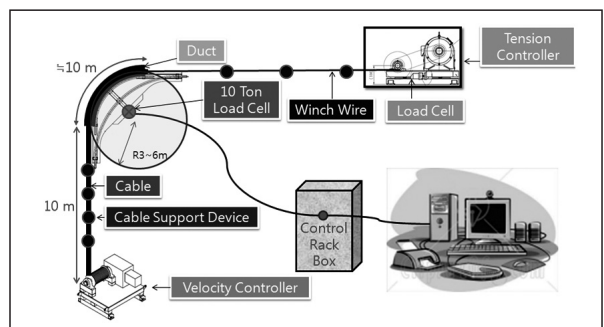
시료	하중 (kgf/m)	인가하중 (kgf)	내전압	X-ray
PE,PVC 2000mm ²	1,500	4,800	이상 없음	이상 없음
	1,800	5,760	이상 없음	절연체눌림

(2) 케이블 허용측압 실측

케이블 포설 설계 시에 적용되는 측압 식은 간략화된 식에 의해 계산된 값이므로, 이 값이 어느 정도 실제 케이블에 작용하는 힘과 근사한지에 대한 검토가 필요하다. 따라서 실제 케이블에 작용하는 측압을 측정하기 위한 측압 측정 장치를 구성하여 시험을 하였으며, 이 시험결과에서 도출된 실제측압과 식으로부터 도출된 이론식을 비교함으로써 측압에 의한 케이블 신뢰성을 평가해 보고자 하였다.

(가) 측압 측정 장치

측압 측정을 위한 시험기기의 구성은 크게 4가지로 구분된다. 먼저 곡률과 장력에 의해 발생한 측압을 측정하게 되는 측압 측정 장치, 백텐션(Back Tension)을 작용시키면서 케이블에 입력한 시험 속도를 유지시켜주는 속도 제어장치 그리고 케이블에 걸리는 장력을 측정하고, 입력된 장력을 유지할 수 있도록 조절하는 장력 제어장치와 모든 장치들을 제어하며 원하는 시험 조건을 입력하고, 모니터링 할 수 있는 측압 측정 제어반으로 구성된다.



[그림 3] 측압 측정시험 구성도

(나) 시험용 케이블 및 관로

국내에 사용되는 154kV XLPE 2000mm², 알루미늄

시스와 PVC 외피로 제작된 케이블을 20m의 길이로 각각 절단하고, 양단에는 장력 및 백텐션 인가에 용이하도록 풀링아이(Pulling Eye)를 장착하였다. 그림 4에 실증시험을 위해 제작된 케이블 사진을 나타내었으며, 시험에는 총 12개의 케이블 시편이 사용되었다. 또한 관로는 그림 5와 같이 관로 포설시 일반적으로 사용되는 ELP 파형관(내경 200mm)을 사용하였다.



[그림 4] 케이블



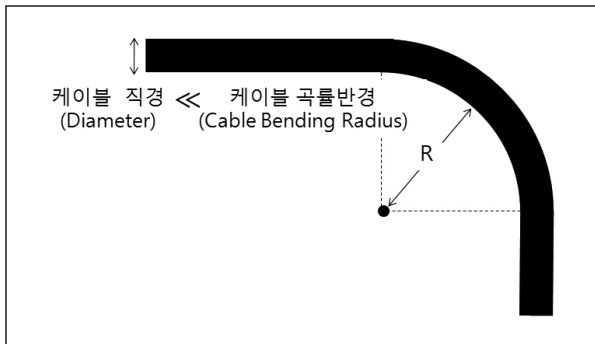
[그림 5] 파형관

(다) 측압 측정시험 및 건전성 평가

■ 시험 곡률반경

한전의 지중송전 설계기준에서는 154kV XLPE 케이블의 경우 케이블 공사 시 허용곡률반경을 20Ds (Ds=케이블 시스의 평균외경)로 설정하고 있다. 따라서 2000mm² 케이블의 경우, 금속 시스 외경이 최대 130mm 정도인 점을 고려할 허용 최소 곡률반경은 약 3m가 된다.

보통 관로 포설시 관로의 허용 최소 곡률을 6m로 제한하고 있는 점과, 한전에서 정하고 있는 케이블의 허용 최소곡률을 고려한다면 시험을 위한 곡률은 3~6m까지는 시험이 가능하다. 따라서 시험 곡률반경



[그림 6] 허용곡률반경 개념도

을 케이블의 최소 허용 곡률반경인 3m부터 관로 포설 최소 곡률반경 6m로 설정한 후 1m 단위로 시험을 진행하였다.

■ 시험 장력

본 시험에서는 5Ton의 장력을 적용하였다. 장경간 케이블 포설의 경우를 가정해 포설길이를 550m, 케이블 단위 길이 당 중량을 30kgf, 그리고 관로 포설시 마찰계수를 0.3으로 설정하여 계산하였다 (550m×30kgf/m×0.3=4950kgf≒5Ton).

■ 시험 속도

한전의 관로포설시 실제 적용하고 있는 속도 중 가장 빠른 속도인 10m/min의 속도를 적용하여 시험하였다.

■ 케이블 건전성 평가

측압 시험 후에는 케이블의 변형이나 손상유무를 판단하기 위하여 케이블 건전성에 대한 평가를 실시하였다. 건전성 평가에는 육안 검사와 DC 내전압시험, X-Ray 검사를 진행하였다.

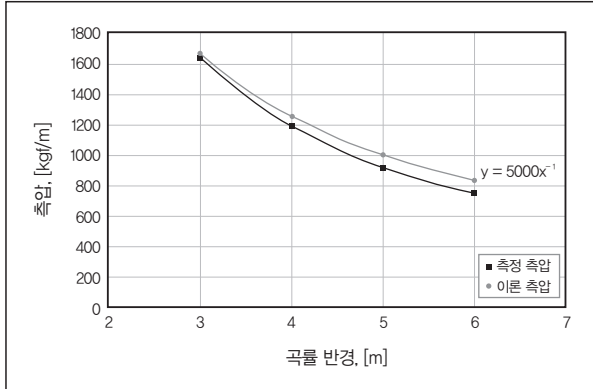
■ 측압 시험 결과

곡률반경별 측압 시험 결과 표 3과 같이 시험에 의

[표 3] 측압 측정시험 결과

곡률반경 [m]	횟수	측면하중 [kgf]	측정측압 [kgf/m]	이론측압 [kgf/m]
3	1	4,986	1,662	1,667
	2	4,949	1,650	
	3	4,915	1,638	
4	1	4,767	1,192	1,250
	2	4,900	1,225	
	3	4,803	1,201	
5	1	4,414	883	1,000
	2	4,475	895	
	3	4,626	925	
6	1	4,581	763	833
	2	4,447	741	
	3	4,392	732	

해 측정된 측면하중과 이를 곡률반경으로 나눈 측정 측압, 작용한 장력에 의해 도출된 이론측압으로 나타낼 수 있다.



[그림 7] 측압 측정시험 결과 그래프(측압)

■ 건전성 평가 시험 결과

시험이 종료된 케이블에 대한 육안검사 결과, 대부분의 케이블 시편에서는 유의할 만한 외피의 손상이나 케이블 자체의 변형은 발견되지 않았다. 다만 곡률반경 3m 측정시험에서 측면 하중을 받는 케이블 측면 외피에 보풀과 같이 PVC 조직이 일어나는 현상이 나타났으며, 이밖에 X-Ray 검사나 DC 내전압 시험에서는 특이한 사항이 발견되지 않았다.

(3) 케이블 실측 결과 종합

초고압 케이블 방식층 강도시험을 통해서도 단차(段差)에 의한 영향으로 케이블 외피에서 급한 흔적의 외상은 일부 발견되었으나, 1,800kgf/m의 측압 하중에서는 알루미늄 시스의 두께 감소나 동선직입포의 변형이 없는 것으로 확인되었으며, DC 내전압 시험에서 또한 특별한 이상이 발견되지 않았다.

또한 초고압 케이블 측압시험에서도 이론 측압하중 1,667kgf/m 이하의 시험에서 케이블 표면에 발생한 보풀 이외에 특이한 사항이 발견되지 않았으며, 시험 결과와 같이 이론측압 보다 실제 작용되고 있는 실제측압이 작게 작용되고 있으므로 이론상의 측압 설계 과정에서도 상당부분 여유가 발생되고 있음을

확인할 수 있었다.

이러한 시험의 결과는 단차에 영향 및 케이블 표면 보풀발생을 제외하고는 전기적, 물리적으로 케이블 건전성에 직접적으로 미치는 영향이 없다는 것을 의미한다. 이는 한전의 허용측압 설계기준이 300kgf/m인 점을 감안하면, 안전율 5 이상이 적용되고 있음을 의미한다.

따라서 안전율을 고려한 허용측압의 설계기준 재정립은 케이블의 보풀이나 단차의 영향이 발생하지 않은 500kgf/m로의 상향조정이 가능할 것으로 판단되며, 이러한 측압 기준은 물리적, 전기적 영향을 받지 않은 1500kgf/m 이하 및 안전율 3 이상으로 충분히 여유 있는 설계치로 보여진다.

[표 4] 케이블 허용측압(kgf/m) 개정

케이블종별	당초	개정
PE, PVC 외장케이블	300	500
파이프형 케이블	700	700

4. 관로 표준경간 확대

과거 지중 송전관로 시공현황 분석결과 최소 15m 이상의 곡률이 발생함을 감안할 때 케이블 최대 포설 가능길이는 측압을 고려할 경우 약 557m이나, 접속 맨홀 경간오차 등을 감안하여 500m를 표준으로 산정하게 되었다.

최근 장조장 케이블 운반공법이 개발되었고 또한 케이블 허용측압의 상향으로 관로 내 케이블 접속간격을 확대할 수 있게 되었다. 이로 인해 경제적인 건

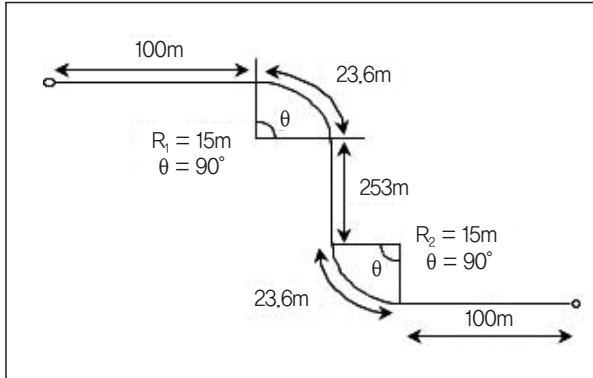
〈장력 및 측압검토〉

- 선종 : 154kV XLPE 2000mm² 기준
- 포설장력 : 14,000kgf
- 허용측압 : 500kgf/m
- 포설장력 및 측압을 고려한 최대길이
 - 최소 곡률반경 15m(90°), 2개소 기준

설이 가능하게 되었고, 접속개소가 줄어들어 케이블 고장요인이 상대적으로 줄어드는 효과 또한 가져 오게 되었다.

[표 5] 계산결과

포설길이(m)	포설장력(kgf)	최대축압(kgf/m)
557	8,147	483



[그림 8] 관로 선형도

5. 향후 계획

1970년대 초 최초 154kV 지중송전선로 건설 이후 우리나라는 경제발전과 함께 지중선로 건설물량이 폭발적으로 확대되어 왔다. 그러나 지중송전케이블 기술도입 당시의 설계기준을 현재까지 적용함으로써, 초고압 전력시장의 빠른 변화에 발맞추지 못하고 있는 점도 없지 않다. 본 실증시험에서와 같이, 한전은 지중송전분야의 기술개발과 병행하여 과거 설정 하였던 모든 설계기준들에 대해 다시한번 검증하는 작업을 지속적으로 추진할 계획이다.

그동안 건설수요를 충족시키기 위해 숨 가쁘게 달려왔지만, 이제는 양적인 성장에서 한걸음 더 나아가 질적인 성장으로의 전환이 절실히 필요한 시점이다. KEA