

지중송전케이블 허용측압에 관한 연구 및 기술정립

김두진, 이지열, 석광현, 김재승, 김태영, 민병욱
한국전력공사

A Study on Maximum Sidewall Pressure for Underground Transmission Cables

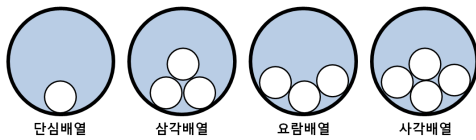
Du-Jin Kim, Ji-Yeol Lee, Kwang-Hyun Suk, Jae-Seung Kim, Tai-Young Kim, Byeong-wook Min
Korea Electric Power Corporation

Abstract - 도심지간 대용량 전력수송을 담당하는 지중송전케이블의 설비 신뢰성 향상과 공사원가 절감을 위해 적정 포설깊이의 결정과 접속함의 최적 배치가 중요하며, 이러한 시스템 설계에 있어서 허용 포설장력과 측압은 여러 중요 요소 중 하나가 된다. 특히, 허용측압 계산과 정에서 적용중인 최대 측압값에 대한 실증적 검증과 건정성 확인시험을 통해 케이블 특성에 가장 적절한 값을 도출하고, 실 계통에 적용함으로써 최적 시스템 설계가 구현될 것이다. 따라서 본 연구에서는 지중송전케이블을 관로에 포설시 곡률부에서 발생하는 측압을 여러 case별로 모의할 수 있도록 실증설비를 구축하였고, 실제 작용되는 측면하중을 로드셀을 이용하여 측정하였다. 본 연구결과로 안전율을 고려한 최적의 허용측압이 결정되었으며, 이러한 허용측압의 확대를 통해 장경간 케이블 포설의 이론 정립이 가능하게 되었다.

1. 서 론

최근 경기회복에 따른 산업용 전력 수요와 냉난방용 전력 수요의 증가로 해마다 전력사용량이 사상 최대치를 경신하고 있다. 이러한 전력수요의 증가와 더불어 도심지의 확대 및 개발로 인해 지중송전선로 설비의 지속적인 증가추세가 이어지고 있다.

지중송전선로의 케이블 포설방식은 도목형식에 따라 전력구, 관로, 직매포설로 구분되며, 그 방식에 따라 공법 및 경제성에 차이가 있다. 특히 관로 포설방식은 최대 포설 깊이에 따라 접속함 및 접속맨홀의 수량이 결정되어지며, 관로내 케이블 배열방법은 <그림 1>과 같이 구분되어진다.



<그림 1> 측압 계산 유도 도식도

이러한 관로포설을 위해서는 최대 포설깊이 결정을 위한 포설장력 및 허용측압이 계산되어지며, 포설장력은 케이블의 무게와 관로 경간, 그리고 관로와 케이블 사이의 마찰계수에 의해 변화하게 된다. 여기서 포설깊이 증가에 따른 장력증가시 케이블이 받게 되는 측압이 커지게 되며, 케이블 도체와 절연체의 변형 및 방식층 손상으로 이어져 케이블 고장의 원인이 될 수 있다. 따라서 안정적인 지중송전 케이블 구축을 위해서는 관로포설시 케이블 장력과 측압의 관계를 정립하고, 케이블의 변형이나 손상여부를 확인하는 것이 반드시 필요할 것이다.

2. 본 론

2.1 측압

측압(側壓, Sidewall Pressure)은 보통 어떤 용기나 물체 내부 측면에 작용하는 물체간의 압력을 의미한다. 케이블 포설시 발생하는 측압은 포설장력에 의해 활차와 활차 접촉간이나 관로의 굴곡부에서 관로 내면과 케이블 사이에 발생하는 압력을 의미하는데, 케이블이 관로에 인입시 관로의 굴곡부에서는 포설장력에 의하여 케이블이 관로벽에 눌리는 힘을 받게 된다. 이 힘을 주로 케이블에서의 측압(P)이라고 하며, 케이블 포설 설계 시 주된 인자로서 고려된다. 일반적으로 굴곡부에서의 측압은 포설시의 제한요인으로 크게 작용하기 때문에 측압에 대한 고려가 중요하다.

단심배열의 경우에는 관로의 곡률반경(R)과 케이블 포설장력(T)에 의존하며, 포설장력에 큰 영향을 미치는 인자로서는 케이블 조장에 따른 무게(W) 및 마찰계수(μ)가 있다. 식 (1)에 단심배열의 경우 이용되는 측압식을 나타냈다.

$$P=T/R \quad (P=\text{측압}[\text{kgf/m}], T=\text{장력}[\text{kgf}], R=\text{곡률반경}[\text{m}]) \quad (1)$$

2.1.1 측압식 검토

<그림 2> (a)와 같이 포설될 때, 케이블의 측압은 식 (1)과 같이 장력 및 곡률반경에 의해서 계산되며, 이러한 측압 계산식은 다음과 같은 과정에 의하여 도출된다. <그림 2>의 (b)에서 나타낸 바와 같이 단심케이블 포설 시 작용하는 곡률반경 및 장력에 대하여 풀이하면 다음과 같다.

θ가 0으로 수렴 할 때,

- ① 장력[T]에 의해 접점이 원 중심으로 가하는 힘(F)은 2Tsinθ이고,
- ② 케이블이 닿는 길이(호)는 2Rsinθ이다.

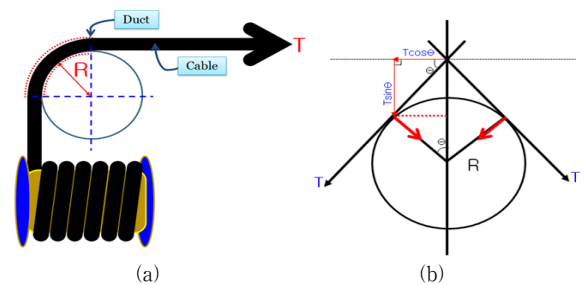
만약 θ가 0일 때는 호와 일치한다.

- ③ 케이블이 닿는 두께(너비)가 d이면 원과 케이블이 닿는 면적(A)은 2Rdsinθ
- ④ 압력은 F/A에서, $\{2Tsin\theta\}/\{2Rdsin\theta\}=T/Rd$ (d는 미소길이 l)

$$P=T/R \quad [\text{kgf/m}]$$

식 (1)의 측압식은 식 자체의 간편함과 용이성으로 인해 국내의 케이블 포설 현장에서 기준식으로 주로 사용하고 있지만, 간략식의 도출을 위해 θ가 0으로 수렴한다는 전제조건을 내포함으로써 실제 측압과의 오차가 발생할 수 있다. 실제적으로, (1)의 식이 성립되기 위해서는 <그림 2> (b)의 θ가 0으로 수렴한다는 가정이 존재한다. 이러한 전제조건 하에서만 <그림 2> (b)의 접선 부분의 길이와 실제 케이블이 관로와 맞닿는 호의 길이가 같게 되며, 한편으로는 θ가 0으로 수렴하게 되면 케이블은 곡률상태가 아닌 직선상태가 되므로, 케이블에 작용하는 측압은 "0"이 된다.

이렇듯 현재까지 케이블 포설시 적용되고 있는 측압식은 θ가 0으로 수렴한다는 전제조건하에 만들어진 식이므로, 실제 포설시 θ가 45° 가량 되는 시공 조건에서는 계산식에 의한 측압과 실제 작용하는 측압이 다소 상이할 수 있게 된다.



<그림 2> 측압 계산 유도 도식도

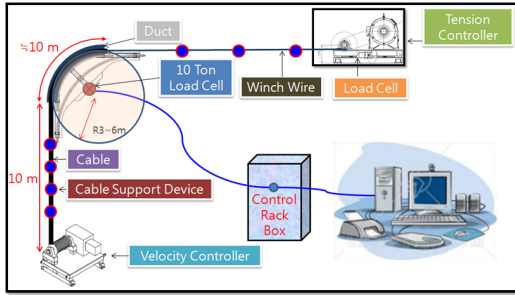
2.1.2 실제 측압

케이블 포설 설계시에 적용되는 측압식은 간략식에 의해 계산된 값으로, 이 값이 어느 정도 실제 케이블에 작용하는 힘과 근사한지에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 실제 케이블에 작용하는 측압을 측정하기 위한 측압 측정장치를 구성하여 시험을 하였다. 이 시험결과에서 도출된 실제 측압과 계산식으로부터 도출된 이론식을 비교함으로써 측압에 의한 케이블 신뢰성을 평가해 보고자 하였다. 또한 시험 후에는 측압에 따른 케이블의 변형이나 손상유무를 X-Ray 촬영과 DC 내전압 시험을 통해 건전성 평가를 실시하였다.

2.2 측압 측정장치

측압 측정을 위한 시험기기의 구성은 크게 4가지로 구분된다. 먼저 곡률과 장력에 의해 발생한 측압을 측정하게 되는 측압 측정장치, 백텐션(Back Tension)을 작용시키면서 케이블에 입력한 시험 속도를 유지시켜주는 속도 제어 장치 그리고 케이블에 걸

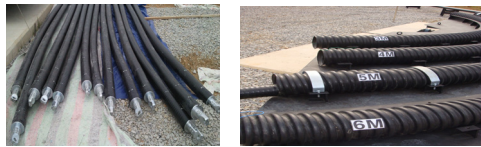
리는 장력을 측정하고, 입력된 장력을 유지할 수 있도록 조절하는 장력 제어장치와 모든 장치들을 제어하며 원하는 시험 조건을 입력하고, 모니터링할 수 있는 측압 측정 제어반으로 구성된다. <그림 3>에 측압 시험 구성도를 나타내었다.



<그림 3> 측압 측정시험 구성도

2.3 시험용 케이블 및 관로

본 연구에 사용된 케이블은 국내에 사용되는 154kV XLPE(가교폴리에틸렌) 2000 mm²이며, Al 시스와 PVC 외피로 제작된 케이블 시편이다. 케이블은 약 20m의 길이로 각각 절단하였으며, 양단에는 장력 및 백텐션 인가에 용이하도록 풀링아이(Pulling Eye)를 장착하였다. <그림 4>와 같이 본 연구를 위해 제작된 총 12개의 케이블 시편과 지중송전 관로 포설시 일반적으로 사용되는 ELP 파형관(내경 200mm)을 사용하였다.



<그림 4> 케이블 및 ELP 파형관

2.4 측압 측정 실증시험

2.4.1 시험 곡률반경

KEPCO 지중송전설계기준(DS-6230)에서는 154kV XLPE 케이블의 경우 케이블 공사 시 허용곡률반경을 20 D_s (케이블 시스의 평균외경)로 설정하고 있다. 따라서 2000 mm² 케이블의 경우 금속 시스 외경이 최대 130 mm 정도인 점을 고려할 때, 허용 최소 곡률반경은 약 3m가 된다.

보통 관로 포설시 관로의 허용 최소 곡률을 6m로 제한하고 있는 점과, KEPCO에서 정하고 있는 케이블의 허용 최소곡률을 고려할 때, 시험을 위한 곡률은 3~6m까지는 시험이 가능하다.

따라서 본 용역에서는 시험 곡률반경을 케이블의 최소 허용 곡률반경인 3m부터 관로 포설 최소 곡률반경 6m로 설정한 후 1m 단위로 시험을 진행하였다.

2.4.2 시험 장력

본 시험에서는 5 [Ton]의 장력을 적용하였다. 5 [Ton]의 장력을 설정한 배경은 식(2)와 같이 장경간 케이블 포설의 경우를 가정해 포설길이를 550m, 케이블 단위 길이 당 중량을 30 [kgf], 그리고 관로 포설시 마찰계수를 0.3으로 설정하여 계산하였다.

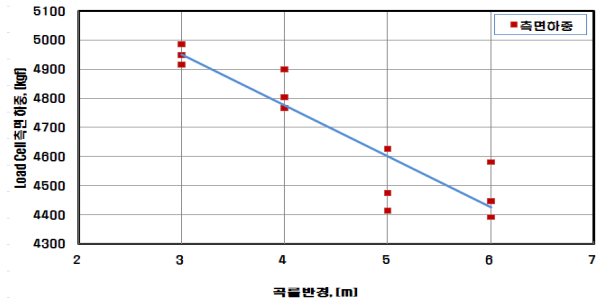
$$550 \text{ [m]} \times 30 \text{ [kgf/m]} \times 0.3 = 4950 \text{ [kgf]} \approx 5 \text{ [Ton]} \quad (2)$$

2.4.3 시험 속도

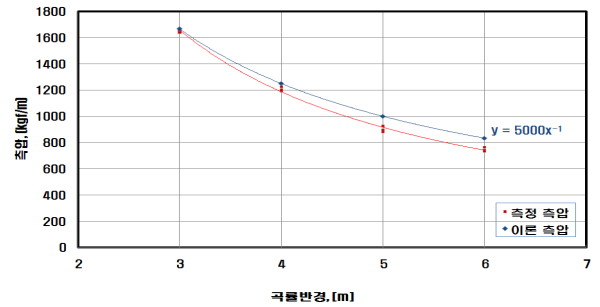
본 시험에서는 KEPCO 관로 포설 시 실제 적용하고 있는 속도 중 가장 빠른 속도인 10 [m/min]의 속도를 적용하여 시험하였다.

2.5 측압 시험 결과

곡률반경별 측압 시험 결과 <그림 5>와 <그림 6>과 같이 시험에 의해 측정된 측면하중과 이를 곡률반경으로 나눈 측압측압, 작용한 장력에 의해 도출된 이론측압으로 나타낼 수 있다.



<그림 5> 측압 측정시험결과(측면하중)



<그림 6> 측압 측정시험결과

2.6 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.

대부분의 케이블 시편에서는 유의할 만한 외피의 손상이나 케이블 자체의 변형은 발견되지 않았다. 다만 곡률반경 3[m] 측정 시험에서 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. 결 론

지중송전케이블 측압 측정시험 결과, 실측압은 이론 측압보다 모든 경우에서 낮게 측정되었으며, 이는 이론으로 계산한 값이 다소 안전율을 내포하고 있음을 의미한다. 또한 측압 작용에 따라 대부분의 케이블에서 변형이나 손상 등의 유의점이 발견되지 않은 점으로 볼 때, 곡률반경 3m에서의 이론측압 1,667[kgf/m] 이하에서는 케이블 안전성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 이는 현재 측압 기준 300 [kgf/m]에 대비하여 5 이상의 안전율을 가지고 있다고 볼 수 있다.

따라서 향후 장경간 포설 시 안전율을 고려할 때 현재의 허용 측압 기준보다는 다소 완화된 측압 조건에서 포설할 수 있음을 본 연구를 통해 확인하였고, 또한 본 실측 연구를 통하여 케이블의 안전성을 확인할 수 있는 장비의 마련과 자체 실측 기술을 확보하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pirelli Cable Corporation, "Determination of Maximum Safe Pulling Lengths for Solid Dielectric Insulated Cables", IEEE, Vol. PAS-103, No. 11, November 1984
- [2] IEEE Std 576-2000, "IEEE Recommended Practice for Installation, Termination, and Testing of Insulated Power Cable as Used in Industrial and Commercial Applications", IEEE, September 2000
- [3] Okonite, "Recommended Practice for Installation, Termination and Testing of Insulated Power Cable as Used in th Petroleum and Chemical Industry", IEEE Material, No. PCIC-89-01, 1989
- [4] 한국전력공사, 지중송전 설계기준, 2009