

345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블의 기계적특성 고찰

남석현\*, 백주출, 허희덕, 이수현, 김철민, 이수길  
LG전선(주)전력연구소

The mechanical characteristics of 345kV XLPE cable

S.H. Nam\*, J.H. Baek, H.D. Heo, S.H. Lee, C.M. Kim, S.K. Lee.  
Electric Power Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

Abstract

The mechanical characteristics of XLPE cable is basic to the installation design. Especially, snake and offset design require accurate coefficient of linear expansion( $\alpha$ ), Young's modulus(E) and bending stiffness(EI) of the cable.

In this paper,  $\alpha$ , E and EI of 345kV XLPE cable was measured by experimental setup, and verified by measuring axial tension and lateral displacement in snake installation.

1. 서 론

최근 초고압 지중 송전선로의 대용량화 추세에 맞추어 케이블 및 부속재와 함께 시공이 포함된 전력시스템의 종합적인 평가와 신뢰성 증대가 요구되고 있다. 동일 자재를 사용한 선로라 해도 설치방법 또는 설치환경에 따라 케이블 및 부속재의 성능과 수명이 다르게 되므로 사용 환경에 적합한 포설설계 기준이 필요하다.

지금까지 초고압 전력 케이블의 포설 형태별 주요 설계항목 및 기계특성의 설계 자료는 해외에 의존하고 있어 연구의 시급성이 요구되어 오고 있었다. 특히 초고압 전력 케이블의 부하 변동에 따른 열 거동은 선로의 고장 요소로 작용할 수도 있다.

따라서 케이블의 수명기간 동안 안정적으로 전력을 공급하기 위해서는 제품별로 설치 환경에 따른 열거동 현상을 고려한 설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 345kV XLPE 케이블의 열신축 설계상 필요한 선팽창계수( $\alpha$ ), 영률(E), 곡강성(EI)에 대하여 검토 및 실험한 결과에 대하여 고찰하였다.

2. 기계정수 실험 및 고찰

2.1 선팽창 계수( $\alpha$ )

선팽창계수 측정방법에는 공중에 매다는 법, 지상설치법, 관로 내 설치법으로 구분되며(1), 본 실험에서는 지상설치법을 사용하였다. 선팽창계수는 도체 통전 가열에 의한 온도 변화에 대한 케이블 길이 변화량을 측정하여 식 (1)에 의하여 구할 수 있다(1-2).

일반적으로 측정방법 및 시료의 도체 사이즈, 차체구조별로 선팽창계수는 큰 차이가 없으며, 대체로  $\alpha = 20 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$  전, 후의 값으로 보고되고 있다(1).

본 실험에서 측정한 선팽창 계수 시험 데이터는 표 1과 같으며, 히트 사이클에 의한  $\alpha$ 의 특성은 초기 사이클과 이후 사이클에서 큰 변화가 없음을 나타냈다.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{\Delta T \times l} (1/^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$l$ : 시료길이(mm)  $\Delta T$ : 도체온도변화(°C)

[표 1] 선팽창 계수의 측정 데이터

시료	$\Delta T (^\circ\text{C})$	$l (\text{mm})$	$\Delta l (\text{mm})$	$\alpha (1/^\circ\text{C})$
1	53.0	1828	2.00	$20.06 \times 10^{-6}$
2	63.2	1850	2.42	$20.00 \times 10^{-6}$
3	66.3	1845	2.79	$20.00 \times 10^{-6}$

2.2 영률(E)

영률(E)의 측정방법은 크게 도체통전법과 기계력법으로 구분된다. 일반적으로 스네이크 포설, 오프셋 포설 등의 케이블 열신축에 관한 설계에서는 도체통전법에 의하여 측정된 영률을 사용하고, 외력에 의한 영향 등에는 기계력법에 의하여 측정된 영률을 사용한다.

본 실험에서는 도체통전법에 의한 식 (2)를 이용하여 영률을 측정하였다. 도체 통전법에 의한 345kV XLPE 케이블의 영률 실측치는 표 2와 같다. 온도특성에 따른 발생속력의 실측한 데이터를 그림 1에 나타내었다.

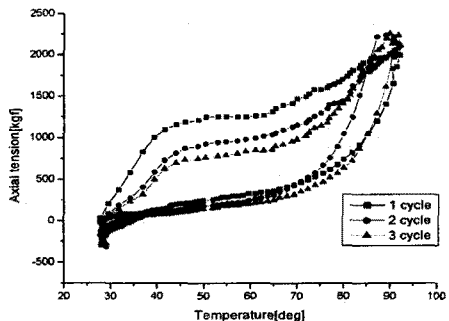
그림 1에서의 같이 발생 속력은 히스테리시스 특성을 그리며, 저온에서 고온으로 갈수록 영률은 작게 된다. 또한 고온으로 유지 시에도 속력은 저하하는 경향이 있다. 이는 케이블 절연체의 도체 고정 효과로 알려져 있다.[1]

$$E = \frac{\Delta F}{A \alpha \Delta T} (\text{kg/mm}^2) \quad (2)$$

A: 도체단면적(mm<sup>2</sup>)  $\Delta F$ : 축력(kgf)

[표 2] 영률의 측정 데이터

온도(°C)	영률(kgf/mm <sup>2</sup> )
상온	3480
60	1320
90	940



[그림 1] 345kV XLPE 케이블의 온도에 따른 발생속력

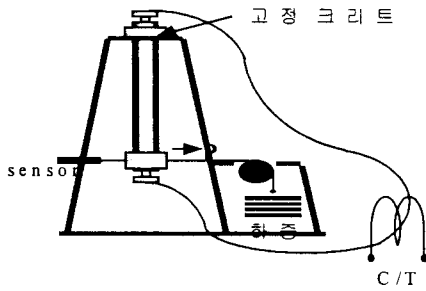
### 2.3 곡강성(EI)

곡강성(EI)치의 측정방법에는 일반적으로 하중법과 모멘트법을 사용하고 있지만[2], 본 실험에서는 편단지지 하중법에 의한 식 (3)으로 곡강성 값을 구하였으며, 측정방법을 그림 2에 나타내었다.

하중에 의한 변형곡선이 히스테리시스 특성을 보이기 때문에 변위 영역의 선택 방법에 의한 곡강성 값은 다르지만 일반적으로 곡강성은 케이블이 스네이크 상태로 포설한 경우의 열거동 현상의 설계에 사용되기 때문에 측정방법에 관계없이 스네이크 형상에 가까운 변위 영역을 선택하는 것이 합리적으로 보고 있다[1]. 본 실험에서는 345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블이 스네이크(스네이크 반피치 : 3m, 폭 : 0.16m) 형상으로 포설된 경우를 가정하여 알루미늄 시스 변형률의 이론 값, 1.842 με 을 구하였다. 따라서, 알루미늄 시스 변형률, 1.842 με 을 갖는 변위영역에서 측정된 곡강성 값은 표 3과 같고, 상온에서 하중에 따른 알루미늄 시스의 변형률과 곡강성 특성을 그림 3에 나타내었다.

$$EI = \frac{Wl^3}{3\Delta l} \text{ [kg}\cdot\text{mm}^2\text{]} \quad (3)$$

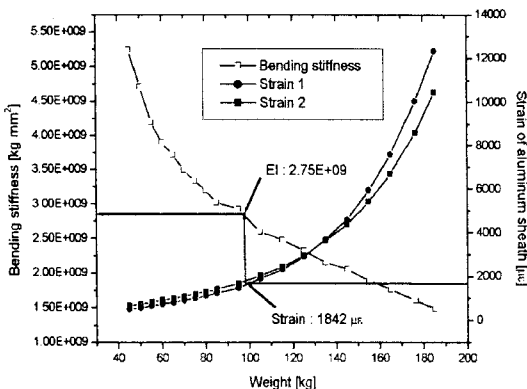
W : 하중(kg)    l : 시료의 길이(mm)    Δl : 변위(mm)



[그림2] 편단지지 하중법에 의한 곡강성 측정법

[표3] 곡강성 값의 실험 데이터

온도(°C)	곡강성치(×10 <sup>9</sup> kg·mm <sup>2</sup> )
실온	2.75
60	1.6
90	1.15



[그림3] 하중에 따른 알루미늄 시스의 변형률과 곡강성

345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블을 케이블의 구성요소의 곡강성치의 합으로 케이블 전체의 곡강성치를 구하면 3.05×10<sup>9</sup>으로 계산되며, 도체와 절연체를 하나의 강체로 보고 구하면 2.73×10<sup>9</sup>으로 계산된다[1]. 따라서, 345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 곡강성 치의 계산은 도체와 절연체를 하나의 강체로 본 계산이 실측한 Data와 일치하였다.

### 3. 모의 실선로의 이론 검토 및 검증 실험

#### 3.1 이론적 검토

345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블의 측정된 기계정수와 상수들을 구하여 식 (4), 식 (5)로 축력 및 스네이크 폭방향 변위를 검토하였다[3]. 계산에 사용된 정수는 표 4와 같다.

검토한 포설 선로의 형태(스네이크 6m×1D×2피치, D : 케이블 외경)는 수평지 모의실증시험의 선로와 동일하게 가정하여 실증시험 결과와 비교 검토를 하고자 하였다.

$$F = \frac{\beta L \Delta T - \frac{P}{EI} (a^3 C_4 + \frac{a^2}{2} L C_2)}{\frac{2a^3}{EI} (C_3 + C_1 C_2) + \frac{L}{EA}} \quad (4)$$

$$w = \frac{F a^3}{EI} (C_4 + C_1^2) - \frac{P}{EI} \left( \frac{a^2 L}{4} C_1 + \frac{a^3}{2} C_5 \right) \quad (5)$$

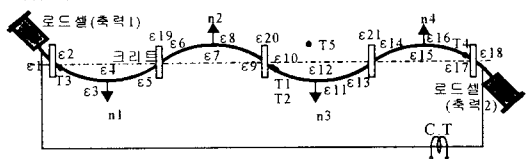
[표4] 계산에 사용된 정수

β (선팽창계수)	2×10 <sup>-5</sup>	마찰계수	0.7
ΔT(온도 변화)	65	P(마찰력)	21
L	3000	a(곡률반경)	15000
쉬스반경	62	C <sub>1</sub>	0.005012563
α(각도)	0.100167	C <sub>2</sub>	1.67×10 <sup>-4</sup>
EI(곡강성)	2.75×10 <sup>9</sup>	C <sub>3</sub>	5.0359×10 <sup>-1</sup>
E(영률)	3480	C <sub>4</sub>	1.26×10 <sup>-9</sup>
A(도체단면적)	2000	C <sub>5</sub>	3.34×10 <sup>-4</sup>

검토결과, 축력은 844kgf로, 스네이크 폭 방향 변위는 28mm로 계산되었다.

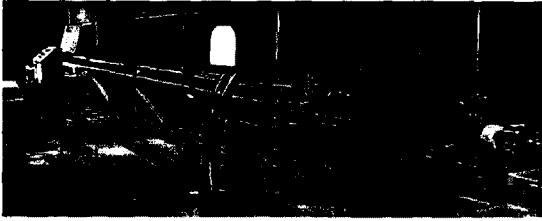
#### 3.2 모의 실선로 검증실험

345kV XLPE 2000mm<sup>2</sup> 케이블을 스네이크 6m×1D×2피치로 포설하여, 히트 사이클에 의한 열거동 현상을 파악하여 앞서 측정된 기계정수를 검증하는 동시에, 이론적 검토 결과를 실증 시험으로 검증하기 위하여 그림 4와 같이 수평 스네이크로 선로를 구성하여 실험을 실시하였다. 실증시험장면은 그림 5와 같다.



- ▶ 스네이크 형태 : 6m X 1D X 2피치
- ▶ Heat Cycle : 도체온도 (상온) + (90°C) 5Cycle
- ▶ 측정항목
  - 스네이크 폭방향 이동량 n1 ~ n4
  - 열성축력 : 좌, 우단 F
  - 알루미늄 스트레인 : ε1 ~ ε18
  - 케이블 온도 : T1 ~ T5(T1, T3, T4 : 도체온도), (T2 : 절연체표면 온도), (T5 : 상온)

[그림 4] 수 평 스네이크 모의 실증시험



[그림 5] 수평 스네이크 모의 실증시험 장면

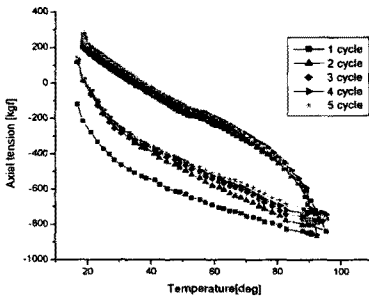
온도의 증가로 인하여 발생하는 도체의 선팅장에 의하여 구속된 시료 양단에 축력이 발생한다. 이때의 히트 사이클에 의한 축력 특성은 압축하중으로 나타나고, 역 히스테리시스 특성을 갖는다.

초기 사이클의 승온 이후 상온으로 냉각하게 되면 인장하중으로 힘이 작용하며, 두 번째 사이클부터 축력 패턴은 거의 동일하다. 히트 사이클의 축력 특성을 그림 6에 나타내었다.

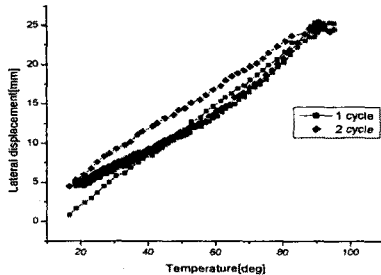
그림 4에서와 같이 스네이크 곡부에 스트레인 게이지 식 변위센서를 이용하여 열 거동에 의한 폭 방향의 변위를 측정하였다. 그림 7에서와 같이 초기 사이클 승온 이후 상온으로 냉각하게 되면, 완전히 원래의 스네이크 형상으로 돌아오지 않으며, 이후 사이클부터 폭방향 변위 패턴은 거의 동일한 것으로 나타났다.

실증시험결과, 도체 온도가 90℃에 도달하면 축력 F는 860kgf이며, 폭 방향의 변위는 25mm인 것을 확인하였다. 이론값과 실측치의 약간의 차이는 이상적으로 포설한 선로(계산에 의한 포설선로)와 실제 포설선로(시험선로)의 포설 조건 차에서 생긴 것으로 생각된다.

이로써, 실험을 통해 얻은 각 기계 정수 및 계산 방법은 실증시험을 통하여 검증되었다.



[그림6] 히트 사이클에 의한 축력



[그림7] 히트 사이클에 의한 스네이크 폭방향 변위

#### 4. 결 론

345kV XLPE 2000mm 케이블의 기계특성(기계정수) 및 실증시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세 개의 시료에서 도체온도가 90℃ 일 때 선팅장계수( $\alpha$ )는  $20 \times 10^{-6}$  (1/℃)이었고, 이 값은 일반적으로 포설설계에서 이용하는 수치와 일치한다.
2. 도체온도가 상승하면 영률은 저하하고, 온도 상승에 따른 히스테리시스 특성을 갖는 것으로 나타났다.
3. 곡강성 또한 도체온도가 상승하면 작아지는 특성을 보였고, 도체와 절연체를 하나의 강체로 가정한 계산의 결과가 실험의 결과와 일치하였다.
4. XLPE 케이블 포설 설계에 적용되는 기계정수를 실험을 통하여 얻었고, 각 기계정수는 수평지 모의 실증시험을 통하여 검증되었다.
5. 이로서, 국내 최초로 적용되는 345kV XLPE 2000mm 케이블의 포설 설계에서 검증된 케이블 기계정수의 적용을 제안한다.

#### [참고문헌]

- [1] CV케이블 線路의布設設計と施工, 日本電氣協同研究 47卷 第3号, pp. 4-40, 1991.
- [2] 笠原敏夫, “電力케이블의 物理定數について”, 昭和電線レビュー, Vol. 22, No. 3, pp. 36-45, 1972
- [3] 神永建二, “500kV CV케이블의 開發”, 電氣學會全國大會, No. 1350, 1986