

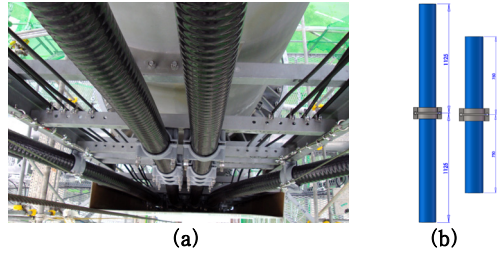
유한요소법을 이용한 초고압 케이블 수직구간 활락 안전성에 관한 연구

이지훈\*, 최성국\*, 임익순\*  
대전전선(주)\*

A Study on the Slipping Down Safety of Vertical Interval for High Voltage Cable using FEM

Ji-Hun Lee\*, Seong-kook Choi\*, IK-Soon Yim\*  
Taihan Electric Wire Co., Ltd\*

**Abstract** - 본 연구는 154 kV, 345 kV급 초고압 케이블의 수직구간 활락 안전성에 대한 평가를 진행하였다. 안전성에 대한 평가는 유한요소해석법을 이용하여 진행하였으며, 당사에서 제작한 케이블 및 클리트에 대하여 케이블의 자중과 발열에 따른 제품 내부의 응력과 케이블의 변형량에 초점을 맞추어 비교·분석하였다. 해석 결과, 하중 및 발열에 대해 재료의 인장강도 측면에서 충분한 안전율을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 변위 해석 또한 최대 변위 발생부가 최대 응력 발생부와 관계없는 케이블 끝단에서 나타나는 것으로 볼 때, 재료 건전성 측면에서 안전한 것으로 해석되었다. 본 연구는 향후 경사지나 수직구간의 포설 설계시 해석적 방법으로 포설 안전성을 확보하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.



<그림 1> 수직 구간 케이블 포설

1. 서 론

경제 성장에 따른 생활수준의 향상으로 산업 및 문화적 인프라 구축에 대한 요구가 크게 증가하고 있으며, 지상 공간의 제약성과 심미적 요인의 대두로 인해 최근에는 시설물들의 지중화에 대한 수요가 가속화되고 있다. 특히 굴착기술의 발달은 전력·통신 케이블, 상·하수도관, 가스관, 송유관 등과 같은 지하매설물 뿐만 아니라 지하 문화·산업 공간들의 증가에 따른 대심도화(大深度化)는 지중케이블에 있어서 수직포설 사례를 가증시키고 있다.

시대적 요구에 따라 지중케이블의 수직 구간 포설시 케이블 및 금구류 등의 구조 안전성과 전력설비 가동에 따른 지중케이블 운용 신뢰성에 대한 검토는 필수적 요소이며, 신뢰성 없는 설비의 구축과 운용은 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있다. 이에 따라 제품 품질의 신뢰성을 뒷받침하고 향상시키기 위한 실질적 실험들이 다양하게 진행되고 있으며, 제품 개발에 따른 시행착오(trial & error)적 방법은 경제적, 시간적으로 많은 투자를 필요로 한다. 하지만 최근에는 유한요소해석법(FEM)을 이용한 제품의 신뢰성 평가가 여러 분야에서 이루어지고 있으며, 특히 유한요소해석은 제품설계 단계에서부터 최종 제품에 이르기까지 물리적 모델에 대하여 이산화 방법으로 실험을 대신하므로 많은 시간과 비용을 절약할 수 있는 장점이 있다.

하지만 국내에서는 케이블의 활락과 관련하여 유한요소해석법을 이용한 검토 사례가 없는 실정이며, 금구류 등의 기계적 특성 또한 명확화하지 않은 채 많은 곳에서 현장 적용과 운용이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 실제 설치 및 운용 예정인 전력구 수직 구간의 설계 사항을 구조화시켜, 금구류에 장착된 지중케이블의 활락 안전성에 대한 평가를 실시하였으며, 또한 케이블 자중에 의한 금구류의 강도 안전성을 확인하여 그 결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소해석 모델(solid model)

해석에 사용된 모델은 154 kV 2000 SQ와 345 kV 2500 SQ 케이블 모델이며, 유한요소해석에 용이하도록 케이블 내부의 구조는 최대한 단순화하여 모델링하였다. 그러나 단순화한 모델의 자중에 의한 영향을 클리트 금구류에 반영할 수 있도록, 해석 시에는 생략한 자중의 영향을 해석 모델에 단위중량으로 계산하여 적용하였다.

수직구간에서의 케이블은 케이블의 종류 및 구조, 수직구간의 심도 등에 따라 케이블을 고정하는 클리트의 설치 간격을 조정하고 있다. 대개 국내의 경우 보통 154 kV 케이블은 클리트간 1.5 [m]의 간격을 주고 있으며, 345 kV의 경우 2.25 [m]의 간격으로 클리트를 설치한다. 클리트의 설계와 설치는 케이블 온도변화에 따른 열신축 또는 고장전류에 의한 충격 등에 견딜 수 있도록 견고하게 제작 및 고정되어야 하며, 특히 발열에 의한 케이블의 열팽창 및 열신축은 클리트 변형이나 열피로파괴 뿐만 아니라 신축에 의한 케이블의 활락을 초래할 수 있으므로 포설 설계 시 이러한 점들을 반드시 고려해야 한다.

<그림 1>의 (a)에서는 수직구간에 설치된 345 kV 초고압 케이블과 클리트 구조물을 나타내었으며, (b)에서는 1.5 [m]와 2.25 [m] 간격으로 설치하였을 경우, 해석하게 될 케이블 형상모델에 대하여 나타냈다.

2.2 요소망 작업(Pre-processing; mesh modeling)

본 연구에서 유한요소 해석을 위한 요소망은 원형 구조물의 특성을 반영하여 요소를 세분화하였다. 케이블의 경우 육면체 요소로 분할하였고, 클리트의 경우에는 사면체 요소(parabolic tetrahedron)로 작업하였다. 요소망 작업은 해석하고자 하는 구조물의 기하학적 특징을 위상학을 이용하여 표현하며, 되도록 실제 현상에 대한 왜곡이 없도록 표현해야 한다. 해의 정확도는 주로 요소망의 품질에 따라 좌우되나 유한요소 모델 자체가 하나 이상의 연속체를 유한개의 요소로 분할하기 때문에 실제 모델의 형상을 항상 어느 정도는 이상화시킨다. 연속체를 여러 개의 요소로 나누어 해석하기 때문에 요소가 많아질수록 결과는 정확해질 수 있다.

2.3 해석 경계 조건(analysis condition)

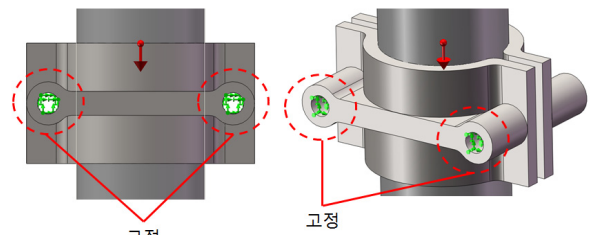
해석을 위한 경계조건은 부품과 부품사이의 영향을 최대한 반영하고, 실제 현상에 대한 역학적 이해를 가지고 모델에 적용하여야 한다. 즉, 모델에 표현되지 않은 부품 및 환경적 영향을 확실하게 시뮬레이션화하고, 이에 대한 2차적 영향을 최소화 시켜야한다. 경계 조건은 구속(constraint)과 하중(load)으로 하기 절에 나타냈다.

2.3.1 하중 경계 조건

모델에 적용된 하중 조건은 케이블 자중에 의한 하중과 케이블 운용에 따른 발열상태를 모사하여 해석하였다. 케이블의 자중은 케이블 제작에 사용된 자재들의 비중에 따라 수직 하중으로 적용되었으며, 발열 조건은 케이블의 운용상 최대 90 ℃의 온도가 도체에서 발열하였을 경우를 가정하여 해석하였다.

2.3.2 구속 경계 조건

구속 경계 조건은 볼트가 고정된 클리트의 나사 체결부를 <그림 2>에서와 같이 완전 고정하여 자유도를 제한하였고, 케이블과 클리트 사이의 경계에는 억지끼워맞춤 조건과 마찰 조건을 부여하여 접촉 상태를 설정하였다.



<그림 2> 클리트 구속 위치

### 2.3.3 재료 물성

해석에 사용된 재료 물성값을 <표 1>에 나타냈다. 탄성계수와 푸아송비(Poisson's ratio)는 응력 및 변형 해석을 위한 가장 기본적인 재질 데이터이며, 탄성계수(E)는 응력( $\sigma$ )과 변형률( $\epsilon$ )의 비례상수이고, 푸아송비는 수직방향의 변형률( $\epsilon_{trans}$ )과 수평방향의 변형률( $\epsilon_{axial}$ )의 비이다.

$$\sigma = E\epsilon, \quad \nu(\text{Poisson's ratio}) = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{axial}} \quad (1)$$

<표 1> 재료 물성

물성	재료	클리트 (AC-7A)	케이블 도체	절연체 등 기타
탄성계수 [MPa]		70,000	110,000	-
푸아송비(Poisson's ratio)		0.33	0.48	-
인장강도 [MPa]		460	480	-

### 2.4 해석 내용 및 이론

본 해석에서는 케이블의 자중 및 발열 조건에 따라 케이블 및 클리트에 발생하는 von Mises stress와 케이블의 변위 정도에 대하여 해석하였다. Von Mises stress는 케이블 발열 조건 및 자중에 따라 클리트가 받게 되는 내부응력을 나타낸다. 이 내부응력이 해석에 사용된 재료 물성의 항복강도보다 크게 되면, 해당 모델은 탄성영역을 벗어나 소성변형으로 이어진 것으로 판단하고, 이는 클리트 및 케이블의 영구 변형을 초래하게 된다. 또한 인장강도(극한강도)를 넘게 되면 물체는 파괴상태에 이르는 것으로 판단한다. 클리트의 영구 변형은 케이블을 지탱할 수 없는 충분한 강도를 갖지 않은 것으로서, 충분한 강도부재의 선정이나 클리트의 형상을 변경하여 소성변형이나 파괴가 일어나지 않도록 설계해야 한다. 또한 변위 해석 결과는 자중에 따라 케이블이 이동한 정도를 표현한다. 이 변위해석 결과에서는 큰 내부응력과 변형이 해당되는 부위에 동시에 발생할 경우에는 문제가 될 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 탄성영역이내의 거동으로써 자중이나 열하중이 제거되면 원래의 상태로 탄성 복원되므로 문제의 요소가 없다. 따라서 설계의 변경이 필요 없으며 재료 선정 측면에서 안전성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

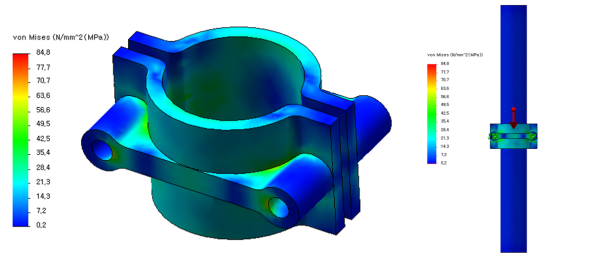
### 2.5 해석 결과

해석에 따른 von Mises stress 및 안전율과 케이블 변위를 <표 2>에 나타냈다. 해석 결과, 케이블 자중과 발열에 따른 응력은 세 가지 해석 모델의 경우에서 동일하게 클리트 볼트 체결부에서 가장 크게 나타났으며, 해당되는 응력은 모든 경우에서 클리트의 인장강도 대비 안전율 5 이상의 값을 가지므로 케이블 및 클리트 안전성에는 큰 문제가 없다고 사료된다. 응력의 차이가 보이는 이유는 먼저, 154 kV 케이블과 345 kV 케이블에 사용되는 클리트의 구조적 차이와 크기가 다른데 원인이 있다. 또한, 동일 간격의 클리트를 비교하여 보았을 때에는 154 kV용 클리트보다 345 kV용 클리트에서 작은 응력이 나타났는데 이는 345 kV용 클리트가 더 안전한 설계가 되었다고 할 수 있다. 그리고 345 kV용 클리트에서는 클리트간 간격차로부터 단일 클리트가 지지하는 케이블 하중의 양이 더 크기 때문에 클리트 사이의 거리가 먼 2.25[m]의 클리트에서 더 큰 응력이 발생한 것으로 사료된다.

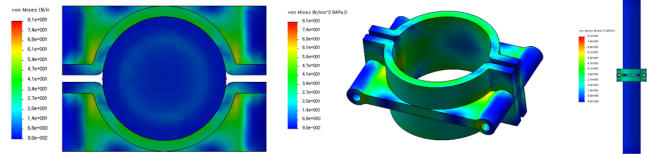
케이블의 발열과 자중에 따른 변위는 케이블과 클리트가 접촉하는 부위와 가장 멀리 있는 케이블의 끝단에서 나타났다. <표 2>와 <그림 4>에서와 같이 154kV 1.5[m] 간격의 클리트에서는 0.6205 [mm]가 345kV 1.5[m] 간격의 케이블에서는 1.162 [mm], 그리고 2.25 [m]간격에서는 1.739 [mm]의 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 최대 변위 발생부위는 <그림 4>에서와 같이 케이블의 끝단에서 발생하였으며, <그림 3>의 결과와 같이 재료 건전성에 영향을 줄 수 있는 큰 응력을 변형과 동시에 수반하고 있지 않기 때문에 케이블 안전성 측면에서는 재료 파손에 영향을 미치지 않는 변형량으로 사료된다. 또한, 한전 설계기준(DS-6330)에 의하면 활락 방지대책 수립 기준이 10 [mm]이므로 해석에서 나타난 변형량은 안전한 상태로 사료된다.

<표 2> 해석결과

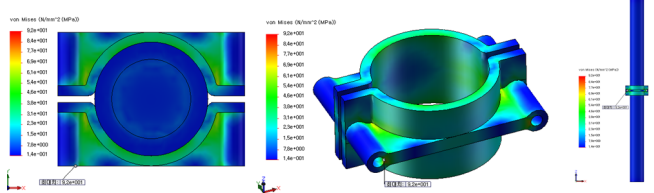
해석 대상	결과	Von Mises stress [MPa]	안전율 ( $\frac{\text{인장강도}}{\text{von Mises stress}}$ )	변위 [mm]
154kV 케이블 1.5 m 간격		84.8	5.424	0.6205
345kV 케이블 1.5 m 간격		81	5.679	1.162
345kV 케이블 2.25 m 간격		92	5	1.739



(a) 154kV 2000SQ (1.5m 간격)

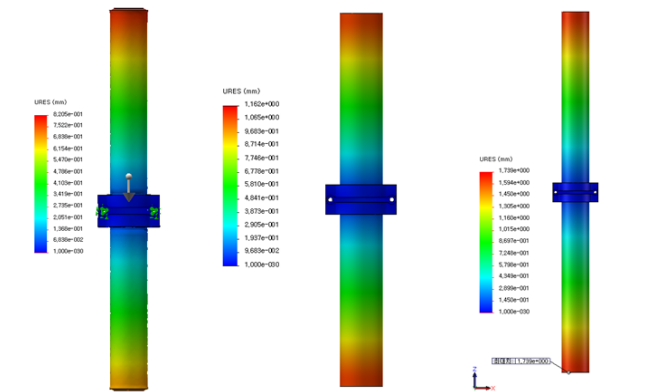


(b) 345kV 2500SQ (1.5m 간격)



(c) 345kV 2500SQ (2.25m 간격)

<그림 3> 케이블 및 클리트의 von Mises stress



(a) 154kV 2000SQ(1.5) (b) 345kV 2500SQ(1.5) (c) 345kV 2500SQ(2.25)

<그림 4> 케이블 및 클리트의 변위

## 3. 결론

유한요소법을 이용하여 154 kV, 345 kV급 케이블에 대하여 수직구간에서의 활락 안전성에 대한 유한요소해석을 진행한 결과, 당사에서 제작한 케이블 및 클리트의 자중과 발열에 따른 응력 발생에서는 재료의 인장강도 내에서 충분한 안전율을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 변위 해석 결과에서 최대 변위 발생부가 최대 응력 발생부와 관계없는 케이블 끝단에서 나타나는 것으로 볼 때, 재료 건전성 측면에서 안전한 것으로 사료된다.

본 해석은 케이블의 코어 활락에 관해서는 해석의 복잡성으로 동시에 검토하지 않았으므로, 향후 코어 활락에 관한 추가적인 해석을 진행해야 할 것으로 사료된다. 또한 실제 실험을 통한 해석 결과와의 비교 연구를 통해 해석의 신뢰성 입증 및 복합적 비교 또한 수반되어야 할 것으로 사료된다.

### [참고 문헌]

- [1] 전기협동연구 제 61권 제 1호, "CV 케이블 선로에 대한 공사기술 현황과 향후 전망", 2005. 04
- [2] 한국전력기술주식회사, "지중관자재 적정규격 제정을 위한 기술용역 (최종보고서)" 1986. 03