

관로곡률반경과 케이블 포설장력에 관한 연구

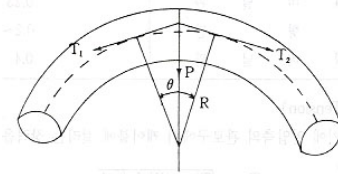
이후영, 선상진
한국전력공사 중앙교육원

A Study of Relation Between Bending Radius and Pulling Tension

Hu-Young Lee, Sang-Jin Sun
Korean Electric Power Corporation Central Education Institute

Abstract - 관로에 케이블을 포설할 때에는 최대포설장력(Maximum Pulling Tension Factors)과 허용측압(Sidewall Bearing Pressure)이 고려되어야 한다. 최대포설장력은 케이블의 무게와 관로의 마찰계수에 의해 계산이 되고 관로의 공간에 의해 변화하게 된다. 측압은 관로의 곡률반경, 포설장력, 케이블 무게 등과 직접 관련이 있다. 관로의 곡률반경은 현장에서 도로의 길이와 현의길이, 호의 높이 등을 측정하여 구하기도 하고 도면상에서 계산에 의해 구하기도 한다. 곡률반경과 포설장력, 측압의 관계성을 비교해 보면 포설장력은 곡률반경의 영향을 거의 받지 않지만 측압은 곡률반경의 영향을 크게 받는다. 허용측압이상의 측압이 굴곡부에서 관로와 케이블사이에 발생하면 관로와 케이블이 손상되기 때문에 관로 설계시에는 측압을 반드시 고려하여야 된다.

위 식은 <그림2>와 같이 배열상태별로 최대 마찰력이 생기는 도체에 적용된다. 요람배열에서는 가운데도체이고 사각배열은 최하단 도체, 삼각배열은 바닥에 있는 도체에 최대 마찰력이 생긴다.



<그림 1> 굴곡부 측압도

1. 서 론

과거에는 지중배전선로를 구성할 때 전력케이블을 직접 지중에 매설하는 직매식 공사방식이 적용되었다. 이 방식은 공사기간의 단축의 장점이 있지만 케이블 교체시 도로굴착이 수반되고 케이블이 직접 땅에 매설되어 있어 습기에 의한 수트리 발생으로 절연불량 고장이 발생하는 등 케이블 유지보수에 취약점이 있었다. 그래서 현재는 지중배전공사에는 전력구건설을 제외하고는 대부분 관로식으로 선로를 구성하고 있다. 관로식은 케이블을 관로안에 포설하는 방식으로 케이블교체를 용이하게 할 수 있고 전력케이블이 관로 안에 포설되기 때문에 수분침투를 막아 케이블 수명을 오래동안 유지할 수 있는 방식이다. 이런 장점 때문에 관로식이 일반화 되어 있지만 케이블 포설중 관로의 손상과 케이블 외피의 손상으로 케이블 고장이 끊이지 않고 있다. 이에 본고에서는 관로의 곡률반경과 케이블 포설장력의 관계를 분석하여 케이블 포설 중 발생할 수 있는 고장요인을 줄일 수 있는 방법을 제시 하고자 한다.



<그림 2> 관로내 케이블 배열상태

위식에서 보면 곡률반경이 클수록 케이블이 받는 측압은 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 아래<표 2>에 명시된 측압 한계치를 초과하면 케이블이 손상받을 위험이 있으므로 설계자는 곡률반경을 증가시켜야 한다.

2. 본 론

2.1 케이블포설작업과 관로의 손상

관로에 케이블을 포설할 때에는 최대포설장력(Maximum Pulling Tension Factors)과 허용측압(Sidewall Bearing Pressure)이 고려되어야 한다. 최대포설장력은 케이블의 무게와 관로의 마찰계수에 의해 계산이 되는데 관로의 공간에 의해 변화하게 된다. 포설장력 과다로 케이블 인입장력이 케이블 최대포설장력을 초과하게 되면 케이블 도체와 절연체의 변형으로 이어져 케이블 고장의 원인이 된다. 그렇지만 이 장력은 케이블에만 손상을 줄뿐 관로에는 영향을 주지 않는다. 측압은 케이블이 굴곡부나 활차를 통과할 때 케이블과 굴곡부 사이에 압력이 발생하는데 이것을 측압이라고 한다. 측압은 관로의 곡률반경, 포설장력, 케이블 무게 등과 직접 관련이 있다. 측압은 관로와 케이블 사이의 압력이기 때문에 허용측압이상의 물리적 힘이 발생할 경우 관로와 케이블에 손상을 준다.

<표 2> 허용측압

| | | |
|--------|---------|-------------|
| 외 피 종류 | PVC 외 피 | 클로로프렌 외피 |
| 허용 측압 | 250kg/m | 300~500kg/m |

2.2 곡률반경

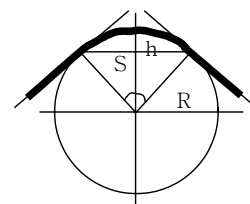
관로와 케이블의 손상을 방지하기 위해서는 측압이 케이블의 허용측압이내가 되도록 곡률반경을 조정하여야 한다. 곡률반경은 관로의 굴곡이 시작 되는 점에서 외접선과 끝나는 점에서 외접선과의 수직선이 서로 교차하는점을 중심으로한 원의 반지름이다.

2.2.1 현과 호의 높이로 곡률반경 구하기

현과 호의 높이로 곡률반경을 구하는 방법은 현장에서 유용하게 사용된다. <그림3>에서와 같이 굴곡이 시작되는 점에서 굴곡이 끝나는 점까지의 직선거리를 측정할 수 있는데 이것은 현의 길이 S가 된다. 그리고 현의 중앙에서 굴곡점까지의 거리를 측정하여 호의 높이 h를 알 수 있는데 이 두 측정값을 가지고 곡률반경을 구하면 다음과 같다.

2.2.1 측압 (Sidewall Bearing Pressure)

측압은 곡률반경(R), 곡률부의 인입장력(T), 중량보정계수(K)에 의해 산출된다. 대부분의 경우 케이블 무게는 포설장력에 비하여 상대적으로 작기 때문에 측압계산시 생략된다. 측압산출식은 <표1>과 같다.



<그림 3> 현과 호의 높이를 이용한 곡률반경 계산

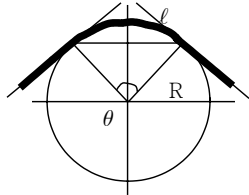
<표 1> 배열방식별 측압계산식

| 케이블수 | 배열상태 | 측 압 식(kg/m) |
|------|------|--------------------------|
| 1 | 단심배열 | $P=T/R$ |
| 3 | 요람배열 | $P=[(3K-2) \times T]/3R$ |
| 3 | 삼각배열 | $P=KT/2R$ |
| 4 | 사각배열 | $P=(K-1) \times T/R$ |

$S = 2R \sin \frac{\theta}{2}$, $h = (1 - \cos \frac{\theta}{2})$ 이고 $\cos^2 \frac{\theta}{2} = 1 - \sin^2 \frac{\theta}{2}$ 이므로 3식을 가지고 $\frac{\theta}{2}$ 를 소개하면 $S^2 - 8h \cdot R + 4h^2 = 0$ 이 되어 곡률반경 $R = \frac{S^2}{8h} + \frac{h}{2}$ 이 된다. 이와 같이 현의 길이와 호의 높이를 측정하여 현장에서 손쉽게 곡률반경을 구할 수 있다.

2.2.2 굴곡각도와 호의 길이로 곡률반경 구하기

만약 현의 길이와 호의 높이를 구할 수 없으면 <그림4>에서와 같이 현장에서 호의 길이 l 즉 굴곡의 시점에서 종점까지 실제 도로의 길이를 측정하고 굴곡각도 θ 를 알면 다음과 같이 호도법을 이용하여 곡률반경 R 을 구할 수 있다.

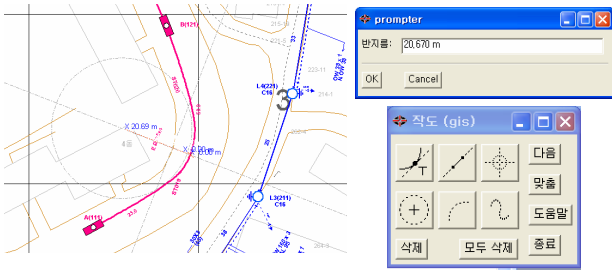


<그림 4> 호의 길이와 굴곡각도를 이용한 곡률반경 계산

$$2\pi R \times \frac{\theta}{360} = l \text{ 이므로 곡률반경 } R = \frac{180 \cdot l}{\pi \cdot \theta} \text{ 이다.}$$

2.2.3 도면에서 곡률반경 구하기

도면을 이용하여도 곡률반경을 손쉽게 구할 수 있다. 현장에서는 여러 지형지물로 인해 쉽게 현의 길이와 호의 높이, 굴곡각도, 호의 길이를 구하지 못하는 경우가 발생한다. 이럴 땐 <그림5>에서 보듯이 도면과 축척을 이용하면 현과 호의 길이를 손쉽게 구할 수 있다. 현재 한국전력에서는 NDIS(New Distribution Information System) 설계프로그램을 사용하고 있는데 이 프로그램에는 실제길이와 반지름을 쉽게 구할 수 있는 Tool이 있어 이를 이용하면 손쉽게 곡률반경을 구할 수 있다.

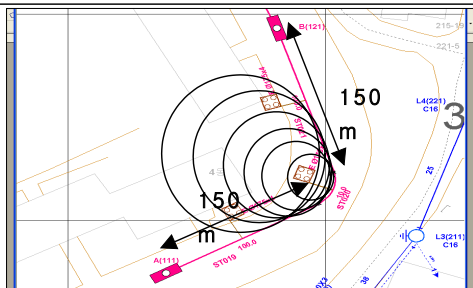


<그림 5> 호의 길이와 굴곡각도를 이용한 곡률반경 계산

2.3 곡률반경과 케이블 포설장력

곡률반경과 케이블 포설장력과의 관계를 알기 위해 곡률반경변화에 따른 포설장력과 축압을 구하여 비교하여 보았다.

- 케이블 : 22.9kV CNCV 325mm²×3조 (단위중량 : 5.27kg/m)
- 파형관 ϕ 175mm(마찰계수0.3)
- 케이블 외경 : 54mm
- 굴곡부 : 수평굴곡각도 90°



<그림 6> 굴곡부에서 포설장력계산

2.3.1 곡률반경과 케이블 포설장력

<그림6>에서 A맨홀에서 굴곡부를 통과하는 인입장력과 통과후의 장력을 계산하면 다음과 같다.

◎ 맨홀A에서 굴곡부까지 장력계산

수평직선부 포설장력계산식을 적용하면

$$T_1 = 3K\mu wL = 3 \times 1.27 \times 0.3 \times 5.27 \times 150 = 900.4 \text{ kg}$$

(K:중량보정계수, μ : 마찰계수, w:단위중량, L:경간)

◎ 굴곡부통과 포설장력계산

위에서 계산된 직선부의 포설장력이 굴곡부를 통과할때는 장력이 증가하게 되는데 Buller 공식을 사용하여 곡률반경변화에 따른 포설장력 증가를 계산하면 <표3>과 같다.

$$T_2 = WR \sinh(\mu\theta + \sinh^{-1} \frac{T_1}{WR}) \text{ [Buller공식]}$$

<표 3> 곡률반경에 따른 포설장력

| 곡률반경 (m) | 인입장력 (kg) | 굴곡각도 (도) | 통과장력 (kg) | 장력증가율 (%) |
|----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 900.4 | 90 | 1634.3 | 181.5 |
| 2 | 900.4 | 90 | 1634.5 | 181.5 |
| 3 | 900.4 | 90 | 1635.0 | 181.6 |
| 4 | 900.4 | 90 | 1635.6 | 181.7 |
| 5 | 900.4 | 90 | 1636.4 | 181.7 |
| 6 | 900.4 | 90 | 1637.3 | 181.8 |

위 계산에서 보면 곡률반경은 굴곡부 통과시에 포설장력변화와 큰 연관성이 없다.

2.3.2 곡률반경과 케이블 허용축압

<그림6>에서 곡률반경 변화에 따른 굴곡부의 축압을 아래식을 이용해 구하면 <표4>와 같다.

$$P = \frac{(3K-2) \times T_1}{3R} = \frac{(3 \times 1.27 - 2) \times 900.4}{3 \times R}$$

<표 4> 곡률반경에 따른 축압

| 곡률반경 (m) | 인입장력 (kg) | 굴곡각도 (도) | 축압 (kg/m) | 비고 |
|----------|-----------|----------|-----------|------|
| 1 | 900.4 | 90 | 539.2 | 포설불가 |
| 2 | 900.4 | 90 | 271.6 | 포설불가 |
| 3 | 900.4 | 90 | 181.1 | |
| 4 | 900.4 | 90 | 135.8 | |
| 5 | 900.4 | 90 | 108.6 | |
| 6 | 900.4 | 90 | 90.5 | |

<표4> 곡률반경변화에 따른 축압계산값을 보면 굴곡부를 통과하며 발생하는 케이블과 관로사이의 축압은 곡률반경변화에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

케이블 포설장력과 축압을 고려하지 않고 케이블을 포설하면 케이블과 관로가 손상되어 케이블 고장발생의 원인이 된다. 특히 굴곡부 축압에 의한 관로손상은 관로와 맨홀내부에 물이 차는 주원인 중에 하나이다. 손상된 관로로 가압된 케이블에 수분이 침투하게 되면 수트리현상이 심화되어 케이블의 수명이 단축되고 케이블 절연불량고장으로 이어지기도 한다.

곡률반경과 포설장력의 관계분석결과 관로 굴곡부에서 곡률반경이 작아지더라도 케이블을 당기는 힘인 포설장력에는 변화가 없어 관로 곡률반경에 상관없이 케이블의 최대포설장력만 초과하지 않으면 무리없이 포설되는 것을 알 수 있다. 하지만 관로내부에서는 허용축압의 초과로 관로와 케이블이 심각한 손상을 입게 된다. 설계자는 지중배전관로를 구성할 때 케이블 포설장력과 축압을 동시에 고려하여 설계하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력, 지중배전설계기준, 부록
- [2] 중앙교육원, 배전기술검토능력향상반, 2008.03