

편중 시공된 직선 슬리브의 장력 및 열적 특성 분석 연구

안상현, 김병걸, 김상수, 손홍관, 박인표, 김성규\*  
한국전기연구원, 부경대학교\*

The Study on Tension and Thermal Properties of Biased Installed Sleeve

Sang-Hyun Ahn, Byung-Geol Kim, Sang-Shu Kim, Hong-Kwan Shon, In-Pyo Park, Sung-Kyu Kim\*  
KERI, PuKyong University\*

**Abstract** - According to previous report, aged sleeves for old transmission lines have variable defects such as biased installed case or corrosion of steel sleeve. Biased installed sleeve occupied 20 percent among the investigated aged sleeves. This defect must cause local heating of splice connector and limit power transmission capacity. It even inspire falling out of overhead conductor from sleeves. This paper studies thermal properties and tension for ACSR conductor in case of biased installed sleeve model. The detailed results were presented in the text.

1. 서 론

직선슬리브는 선로 시공 시 철탑과 철탑 간의 공간에서 가공송전선을 연결하기 위한 목적으로 가설한다. 슬리브는 현재 국내에 약 5만여 개가 설치되어 있으며 선로 중간에서 기계적 및 열적 취약점으로 작용해 송전용량이 제약받고 있는 실정이다. 실제 슬리브 개소의 탈락사고 및 보수 요청 사례가 매년 보고 되고 있으며 이에 대한 조사와 대책이 필요한 상태이다.

앞서 실시된 노후선로의 수거슬리브에 대한 조사에서는 슬리브의 불량 시공 및 노후화에 의한 문제점들을 보고한 바 있다. 이 중, 슬리브의 불량 시공으로 인한 알루미늄 슬리브 내 강 슬리브의 편중 현상은 조사된 노후 슬리브의 약 20%에 달한다. 이와 같은 불량모델은 슬리브에 한쪽 도체가 적정량 이하로 삽입되는 형태로 나타난다. 도체의 삽입량 미달은 슬리브-도체 간 접촉면적의 감소로 이어지며 슬리브와 전선간의 밀착성을 떨어뜨리므로 결과적으로 접촉저항의 과대한 상승을 야기한다. 이는 접속개소의 심각한 발열현상을 유발하거나 심한 경우 전선이 가설되어 운영되는 과정에서 슬리브로부터 전선이 탈락되는 사고를 유발할 수도 있다.

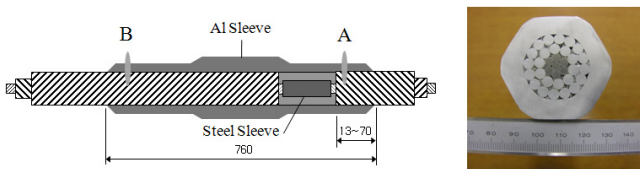
본 연구에서는 슬리브 내 전선의 편중도에 따른 접속개소의 열적 특성과 전선의 장력 거동을 추적하여 선로의 안정성을 도모하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험

가공송전선과 접속개소의 열적 특성 및 장력 특성은 ACSR 410mm<sup>2</sup>에 대하여 실시하였다. 전선의 길이는 약 10m이며 중심에 직선슬리브를 가설하였고 양 끝에 압축인류클램프로 고정하였다.

슬리브가 정상적으로 가설되면 강 슬리브는 알루미늄 슬리브의 중앙에 위치하며 슬리브 양쪽으로 도체의 삽입 깊이는 약 240mm가 된다. 본 실험에서는 슬리브의 편중 시공을 모의하기 위하여 그림 1과 같이 임의로 도체의 삽입이 편중되도록 시공하였으며 슬리브 압착 후 전선의 삽입량이 13mm, 40mm, 70mm가 되도록 가설하였다.



<그림 1> 슬리브 편중시공 모식도 및 압착 후 단면

장력 변화 및 온도 변화는 초기장력 3,100kgf에서 연속, 장시간, 단시간 허용전류를 인가하여 측정하였다. 슬리브 온도는 표면으로부터 내부 15mm 삽입된 지점에 대하여 약 50mm 간격으로 측정하였다. 도체는 약 500mm 간격으로 강심의 온도를 측정하였다. 각 지점의 온도는 열전대로 측정하였으며 HP 34970A에 의해 30초 간격으로 컴퓨터에 자동 저장되었다.

2.2 결과 및 고찰

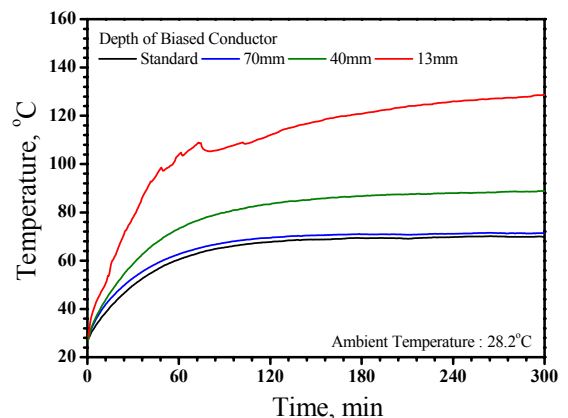
2.2.1 접속개소의 열적 거동

가공전선 및 접속개소는 전류가 인가되면 도체 고유 저항 및 단면적에 따른 Joule 열의 발생으로 온도가 상승한다. 온도는 전류 인가 시간에 비례하여 상승하며 도체의 열용량에 따른 임의의 값에서 포화되어 일정하게 유지된다. 즉, 일반적으로 저항 발열에 따른 열적 특성은 도체의 제질과 단면적에 지배적인 영향을 받는다. 한편, 편중모델 슬리브의 열적 특성은 상대적으로 표준모델보다 적은 통전 면적으로 인해 슬리브-전선 계면의 접촉저항이 추가적인 요인으로 작용한다. 편중모델 슬리브의 열적 거동은 다음과 같이 관찰되었다.

그림 2는 가공송전선에 연속허용전류가 인가되었을 때, 전선 삽입량에 따른 과대 발열부위(B 지점)의 온도 상승거동을 나타낸다. 슬리브에 도체가 70mm 삽입되면 A 지점의 온도는 71.4℃, B의 온도는 70℃로 나타났다. 이는 슬리브가 정상적으로 가설되었을 때의 온도와 거의 유사하며 편중에 의한 열적 특성 변화는 거의 관찰되지 않았다.

도체 삽입량이 40mm가 되면 A의 온도는 70mm 편중슬리브 보다 약 17℃ 상승한 88.8℃로 나타났다. 취약조건을 모의한 13mm 편중슬리브에서는 A 지점의 온도가 129.2℃로 급상승하였다. 전선의 온도는 외기온도 28.2℃에 대하여 일괄 보정하였다. 슬리브의 온도는 그림 1 A 지점에서 가장 높게 상승하며 B 지점에서 정상적인 거동을 나타내었다. A는 삽입된 전선의 끝부분이 위치하는 지점이다. 슬리브의 끝단을 'Zero'로 정의하였을 때 A 지점은 전선 삽입량에 따라 약 10~70mm로 가변한다. 전반적으로 국부발열부위 A의 온도는 도체 삽입량이 감소할수록 상승하며 일정 삽입량 이하에서는 급격히 상승하는 경향이 나타났다.

가공송전선과 슬리브는 약 100ton의 하중에 의해 기계적으로 압착되며 그림 1에 나타난 단면과 같이 선 접촉이 발생한다. 이 때, 접속개소에 부하가 인가되면 전류는 전선-슬리브-전선으로 흐르며 전선과 슬리브의 계면 접촉성과 접촉 면적에 따른 저항이 추가적으로 작용한다. 압착하중이 일정하면 전선-슬리브 접촉 저항은 압착면적에 비례하며 이에 따라 접속개소의 열특성이 좌우된다. 본 실험에서 모의한 편중모델은 도체의 삽입이 한쪽으로 편심되어 있으며 슬리브 한쪽 방향의 도체 삽입량은 상대적으로 작아진다. 이와 같이 슬리브와 도체의 압착면적이 줄어들면 계면 접촉성이 저하되며 접촉저항의 상승으로 인해 결과적으로 과대 발열이 야기된다.

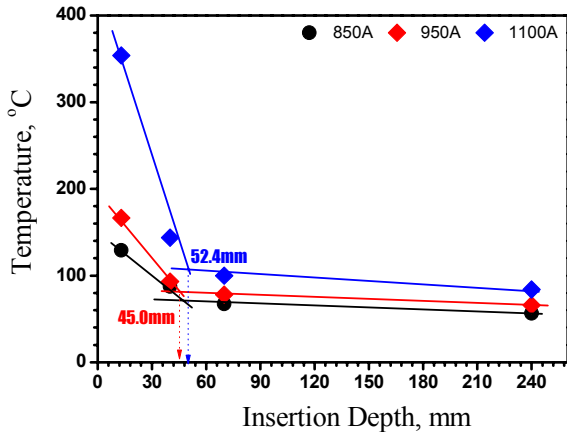


<그림 2> 전선 삽입깊이에 따른 접속개소 과대 발열부위 온도 상승거동[연속정적]

그림 3은 각 부하별 접속개소의 온도 변화 거동을 나타낸 것이다. 동일한 삽입 깊이에서 온도는 인가전류에 비례하여 상승하는 경향이 나타났다. 또한 전선 삽입깊이가 감소할수록 온도는 서서히 증가하다가 특정 구간에서 변곡점을 그리며 급격히 상승하였다. 도체 삽입 깊이가 약 45.0~52.4mm의 구간으로 나타나는 이 변곡점은 접속개소의 열적 특성이 급격하게 악화되기 시작하는 임계구간으로 판단된다.

이는 슬리브의 구조적인 형상과도 일맥상통하는 경향이 있다. 직선슬리브의 양 끝단에는 약 100mm의 단차 가공된 부분이 존재하는데 이 구간은 슬리브 시공과정 중에 완전하게 압착되지 못하고 끝단에서 약 35mm의 비압착구간이 남게 된다. 이 구간내의 슬리브와 도체는 기계적으로 완전하게 접촉되지 못하므로 접촉저항 상승의 요인이 된다.

즉, 슬리브 가설 시, 전선은 최소 52.4mm 이상 삽입되어야 통전 시 국부적인 발열현상을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.



〈그림 3〉 전선 삽입량에 따른 슬리브의 최대온도 변화 거동

### 2.2.2 가공송전선의 장력 거동

그림 4는 슬리브 편중모델의 삽입 깊이별 인가 전류에 따른 장력 변화거동을 나타낸다. 각 전선은 무부하일 때, 3,100kgf의 장력 하에서 인가전류가 상승할수록 장력이 감소하는 거동을 나타내었다. 연속허용전류 850A에서 정상적으로 슬리브가 가설된 전선은 약 1,020kgf의 장력을 나타내고 70mm 편중모델은 약 1,200kgf, 40mm 편중모델과 13mm 편중모델에서 각각 1,530kgf와 1720kgf를 나타내었다. 단시간허용전류 1,100A에서 표준모델의 장력은 약 480kgf로 나타났고 70mm 편중모델, 40mm 편중모델, 13mm 편중모델에서 각각 850kgf, 980kgf, 1,000kgf까지 감소하였다. 전반적으로 편중이 심해질수록 전체적인 잔존 장력은 높아지는 결과가 나타났다. 장력은 인가 전류의 상승에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 나타내지만 전선 삽입량이 감소할수록 직선에서 벗어나 parabolic 형태를 나타내고 있었다. 편중이 심해질수록 인가전류 1,100A의 장력은 약 1,000kgf에서 포화되었다. 이와 같은 장력 변화거동의 원인으로 다음과 같은 사실을 추측할 수 있다.

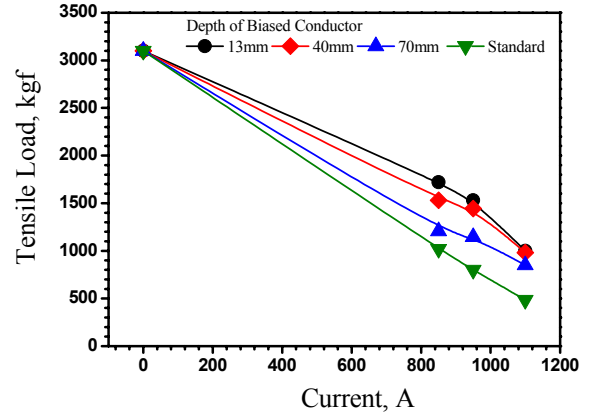
가공송전선을 구성하는 알루미늄 도체와 아연도금강선은 서로 다른 인장하중 및 선팽창계수를 가진다. 즉, ACSR 410mm<sup>2</sup>에서 가공송전선의 인장하중 13,890kgf에서 알루미늄 도체가 담당하는 하중은 약 5,600kgf, 아연도금강심이 담당하는 하중은 약 8,600kgf이다. 또한, 알루미늄 도체의 선팽창계수는 약 25.0~26.0μm/m°C인 반면, 아연도금강선의 선팽창계수는 약 11.5μm/m°C로 온도 상승에 대한 도체의 길이 변화율은 알루미늄 도체가 더 크다. 이와 같은 기계적 특성에 의해 아연도금강선과 알루미늄 도체는 약 65:35의 하중분담율을 가지는데, 이는 상온 조건에서 계산된 값이다. 한편, 가공송전선에 전류가 인가되어 전선의 온도가 상승하면 이와 같은 하중 분담율에 변화가 발생한다.

일반적으로 가공송전선은 온도가 상승하면 선팽창에 의해 길이가 증가하면서 장력은 감소한다. 전선에 부과되는 부하가 증가하면 전선 온도 또한 지속적으로 상승하는데 이에 따라 알루미늄 도체가 분담할 수 있는 외부 하중도 점차 감소한다. 이는 온도상승에 따른 알루미늄의 연화에 기인한 것으로 전선의 온도가 전이온도 이상을 넘어서면 알루미늄 도체는 더 이상 하중분담의 역할을 수행하지 못하고 아연도금강선이 모든 하중을 담당하는 현상이 나타난다. 여기서 전선의 전이온도는 아연도금강선이 전 하중을 담당하기 시작하는 임계온도를 의미하며 선종과 구간, 가공송전선의 꼬임 형태에 따라 고유한 값을 갖는다.

가공송전선에 슬리브가 가설되면 인장하중은 전선과 슬리브 간의 기계적인 압착에 의존한다. 편중모델 전선은 슬리브 한쪽 방향의 도체 삽입 깊이가 표준모델 보다 얕으므로 편중이 심해질수록, 즉 슬리브와 전선 간의 압착 면적이 적을수록 온도 상승에 의해 아연도금강선으로 하

중분담이 전이되는 시점이 앞당겨진다. 잔존장력은 정상적인 경우보다 높아지지만 실상 알루미늄 도체는 외부 하중을 거의 분담하지 못하고 있는 상태가 지속된다.

이는 이미 가공송전선이 슬리브 외부로 빠져나오고 아연도금강심만이 하중을 지탱하고 있는 상태로써 실 선로에 이런 현상이 발생한다면 열 특성 악화로 인한 송전용량 제한뿐만 아니라 전선의 탈락 가능성이 급격히 증가한다. 슬리브의 편중시공은 결과적으로 갑작스러운 정전사고를 야기할 가능성이 농후하므로 사고 발생 전에 파악하여 신속히 재시공 할 것이 요구된다.



〈그림 4〉 인가전류에 따른 편중모델 전선의 장력 변화거동

### 3. 결 론

본 연구에서 편중모델에 대한 전선 및 접속개소의 열특성과 장력거동을 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 슬리브에 도체의 편중이 발생하면 슬리브-도체 간 접촉면적 감소로 인해 국부적인 접촉저항의 상승을 야기한다. 결과적으로 도체의 편중 현상이 심해질수록 접촉저항은 비례하여 증가하며 이는 접속부의 과대한 발열을 수반한다. 슬리브의 최대온도는 도체가 편중된 방향의 슬리브 끝단 10mm 지점에서 발견되었다. 이와 같은 최대온도는 도체 삽입 깊이가 일정량 이하로 감소하면 급격히 상승하는 거동을 나타내었다. 갑작스러운 온도 상승이 발생하기 시작하는 이 구간은 도체 삽입량 45.0~52.4mm이며 접속개소의 과대 발열을 막기 위한 최소 삽입량은 약 52.4mm 이상으로 정의된다.

3) 편중모델 전선의 잔존장력은 정상모델보다 높게 나타났으며 편중이 심해질수록 상승하는 거동을 보였다. 편중모델 전선은 정상모델에 비해 슬리브-전선 간 압착면적이 작으므로 온도의 상승에 따라 아연도금강선으로 하중이 전이되는 시점이 앞당겨진다. 또한 일정 삽입량 이하가 되면 아연도금강선이 전 하중을 담당하게 된다. 즉, 알루미늄 도체는 하중분담의 역할을 수행하지 못하고 심지어 슬리브 외부로 탈락되는 현상이 나타난다. 이는 접속개소의 열특성을 크게 악화시키고 탈락사고의 위험을 높이는 결과를 불러일으키므로 즉시 재시공 할 것이 요구된다.

### 〔참 고 문 헌〕

[1] 김병걸 외, “노후 송전선로의 가공송전선 직선 슬리브 분석 연구”, 한국전기전자재료학회 2007 하계학술대회 논문집, Vol. 8, p. 538, 2007  
 [2] 김병걸 외, “정상시공된 가공송전선 접속개소에서 전류에 따른 온도변화”, 한국전기전자재료학회 2007 추계학술대회 논문집, Vol. 20, p. 518, 2007  
 [3] IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship for bare overhead conductors, IEEE Standard 738, 1993  
 [4] The thermal behavior of overhead conductor, CIGRE Wg22-12 Electra, No. 144, 1992