

노후 송전선로의 가공송전선 직선 슬리브 분석 연구

The Study on Aged Sleeves for Old Transmission Lines

김병걸¹, 김상수^{1,a}, 손홍관¹, 박인표¹, 장태인², 김진한³

(Byung-geol Kim¹, Shang-shu Kim^{1,a}, Hong-kwan Sohn¹, In-pyo Park¹, Tae-in Jang², and Jin-han Kim³)

Abstract

A detailed study on aged sleeves for old transmission lines was carried out to clarify the deterioration of sleeves and the condition of installation. A lot of removed aged sleeves from transmission lines were investigated. Many biased installed cases and corrosion of steel sleeve part were found. These defects can cause a serious accident such as blackout during operating. The temperature distribution within sleeve of ACSR conductor was precisely measured and examined, conducted as part of series of studies on large currents in transmission lines. According to measurements of the conductor temperature near a joint(sleeve and clamp), the electrical resistance of joint is lower than that of the same length conductor. The detailed results were presented in the text.

Key Words : Aged sleeve, Biased installation, Corrosion of steel sleeve

1. 서 론

전력소비의 증가에 따라 발전력의 증대 및 송전 능력의 확대가 절실히 요구되고 있으나 지역이거주의와 집단민원 등으로 인해 송전선로의 건설은 갈수록 어려워지고 있다. 송전선로 1회선 사고시의 안정성을 확보해 두지 않으면 사고의 파급범위가 확대되어, 광역정전으로 확대될 우려가 있고, 국가 기간선로에서 안정도가 붕괴되면 국가 전체의 전력망이 다운되는 혼란이 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 전선로의 송전능력은 연속허용온도에 대한 연속허용용량과 사고 시에 일시적으로 과부하운전을 하기 위한 단시간 허용용량으로 구분되는데, 단시간 허용용량은 전선의 수명에 영향을 미치므로 이에 대한 명확한 기준과 관리가 필요하다.

현재 건설한 지 오래된 노후선로의 경우 선로 중간에 접속개소(슬리브, 압축인류클램프, 점퍼소켓

등)의 취약점이 노출되고 있으며, 이들 취약개소에 의해 송전용량이 제약을 받고 있는 실정이므로 이에 대한 조사와 대책이 필요한 상태이다. 선로와 접속설비인 슬리브에서 전선의 탈락사고가 종종 발생하고 있고, 이는 슬리브의 시공 상의 불완전성으로 인해 발생하는 것으로 예측하고 있다. 이러한 슬리브의 불완전한 시공은 전선의 탈락에 의한 사고와 더불어 접촉저항이 기타 부위에 비해 높게 발생하여 열적 불안정성을 유발하여 계통의 사고를 유발한다.

본 연구에서는 선로에서 수거된 슬리브를 해체하여 슬리브의 시공조건을 파악하고, 시공유형을 분류하여 시공유형에 따른 Modelling을 고려한 송전용량 증대에 기여하고자 한다.

2. 실험

노후슬리브의 시공유형을 분석하기 위하여 본 연구에서는 현장에 가설되어 수십 년 동안 사용된 슬리브를 수거하여 시공유형을 분석하였다. 전선이 가설되어 사용된 지역은 울산화력과 신온산 지역의 ACSR 480 mm²가공전선이다. 송전선이 가설되어 있는 지역의 환경에 따라 전선의 부식, 도전율, 기계적 특성 및 전기적 특성이 서로 다르게 나타

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 한국전력연구원 송변전기술그룹
3. 부산울산지방방중소기업청 시험연구지원팀
a. Corresponding Author : shangshu@hanmail.net
접수일자 : 2007. 9. 21
1차 심사 : 2007. 10. 15
심사완료 : 2007. 10. 23

난다[1,2]. 청정지역인 산악지대에 위치한 신온산 지역과 울산 화력에서 수거한 슬리브이다. 울산화력에서 수거된 슬리브는 총 24개이며 32~35구간, 신온산에서 수거된 슬리브는 32~34구간에서 사용된 17개 슬리브로 구성되어 있다.

열특성 시험은 ACSR 410 mm²가공송전선에 대하여 실시하였다. 전선길이는 10 m이며 전선의 중심부에 슬리브를 가설하였다. 슬리브의 가설은 표준슬리브와 70 mm, 40 mm, 13 mm 압착구간 sample을 제작하였다. 전류는 연속허용전류 및 순시, 단시간허용전류에 대하여 시험하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 슬리브의 재질 및 시험

슬리브의 형상과 치수는 그림 1과 표 1에 나타내었으며 재질은 다음과 같다.

알루미늄슬리브의 재질은 KS D 6761의 1050 또는 이와 동등 이상이어야 한다. 강슬리브의 재질은 KS D 3752의 SM 10C 또는 이와 동등 이상이어야 한다. 다만 J-5용 강슬리브의 재질은 별도로 지정하지 않는 한 KS D 3752의 SM 10C로 한다. 알루미늄 라이나 튜브의 재질은 KS D 2315로 한다. 슬리브에 충전 하는 컴파운드는 ES 241-300~303에 적합한 것으로 한다.

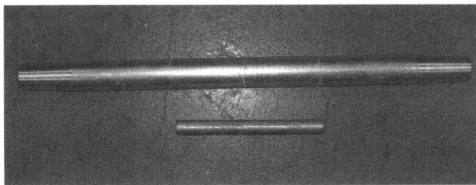


그림 1. ACSR 410 mm² 가공전선용 알루미늄슬리브와 강슬리브.

Fig. 1. Al sleeve and steel sleeve for ACSR 410 mm² conductor.

표 1. 슬리브(Sleeve)의 치수.

Table 1. Size of sleeve.

기호	적용전선 (mm ²)	치 수					
		Al 슬리브			ST 슬리브		
		L	D	d	L _i	D _i	d _i
I-4	97	600	38	24.0	200	22	10.2
I-5	160	566	29	20.2	219	17.9	9.1
I-7	240	600	38	24.0	200	22	10.2
I-8	330	640	42	26.6	200	22	9.9
I-9	410	740	48	29.9	240	24	11.1
I-10	520	800	52	32.9	240	24	11.1

※사용공구난의 ()내 숫자는 편측의 압축회수임.

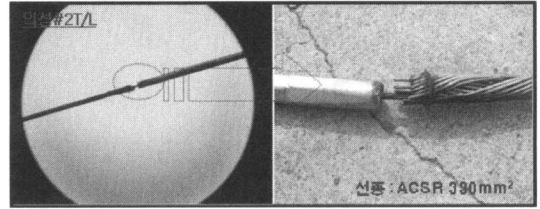


그림 2. 전선의 탈락사고 사진.

Fig. 2. Conductor fall away from Al sleeve.

3.2 노후 슬리브의 분석

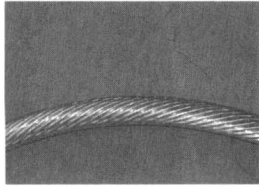
3.2.1 노후 슬리브의 외관

그림 2는 현재 의성 #2 T/L에 가설되어 사용하고 있는 ACSR 330 mm² 가공송전선을 찍은 현장사진이다. 그림에서 Al 도체는 슬리브에서 완전히 탈락되어 강심이 외부로 노출되어 있다. 가설초기에는 외관상 특이한 문제점이 발견되지 않았지만 가설되어 장시간 사용되는 과정에서 Al도체의 creep과 장력 등으로 인해 슬리브로부터 도체가 탈락한 경우이다[1,2]. 슬리브에서 알루미늄도체의 탈락은 기계적 강도뿐 만 아니라 열적으로 접촉저항이 기타 부위에 비해 높게 발생하여 열적 불안정성을 유발하여 계통의 사고를 유발한다[3,5].

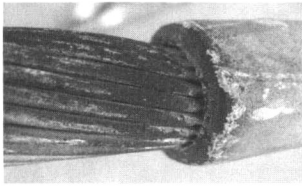
전선과 노후 슬리브의 외관형상을 그림 3에 나타내었다. 신전선에서는 알루미늄 도체와 아연도금강선의 표면에 광택과 함께 매끄럽고 균일한 형태를 유지하였으며 아연도금상태도 양호하게 나타났다. 아연도금강선에는 부식방지를 위하여 윤활제가 도포되어 있었다. 노후화된 전선의 경우 전반적으로 전선의 표면부에는 비, 눈, 먼지 등으로 인하여 전류의 통전 시에 반응을 하여 표면층이 겹겹이 변화하였다. 부분적으로는 대기와 수분, 오염원에 직접 노출됨으로 인하여 국부부식으로 인하여 약간의 침식현상이 발견되었다.

내층은 외층과는 달리 겹겹이 반응한 흔적은 크게 나타나지 않았으며, 전체적인 외관상으로는 큰 특정을 발견할 수 없었다. 강심의 경우, 노후화가 진행될수록 윤활제의 소실이 나타났으며, 부분적으로 아연도금 층의 박리현상이 발견되었다.

본 연구에 사용된 ACSR 480 mm² 가공송전선은 중심부에 직경 2.47φ 아연도금강선 주위에 직경 3.7φ 알루미늄 도체를 3층으로 연선했던 구조로 되어 있다. 따라서 외층도체는 대기 중에 노출되어 있고 오염원과 같은 부식원에 직접 접촉되어 있다. 내층도체는 수분과 같은 부식원으로 부터 어느 정도 보호를 받고 있다. 그러나 부식원이 내부로 침투하게



(a) 신전선



(b) 노후 전선 및 슬리브표면

그림 3. 신전선과 노후전선.
Fig. 3. New and aged conductor.

표 2. 슬리브의 치수변화.

Table 2. The change of size in sleeve.

선종	압축 전 (mm)		압축 후 (mm)		압축 전/후 외경 (mm)	
	Al	St	Al	St	Al	St
ACSR 410	740	240	792-829	283-295	48/41.6	24/20.07
ACSR 480	710	240	760-795	283-295	47.6/41.2	19.2/16.6

되면 습윤 기간이 외부에 비해 길어서 부식진행을 촉진하기도 한다. 또한 내부의 경우 강선/아연도금/알루미늄이 접촉되어 있으므로 성분이 다른 이종 금속간의 접촉에 의하여 부식이 진행되기도 한다. 송전선에서 발생하는 부식은 대기부식(Atmospheric Corrosion)과 전해부식(Galvanic Corrosion)이 있다[7].

3.2.2 노후 슬리브의 개봉

표 2는 정상적인 슬리브의 가설 전후의 치수변화를 나타낸 것이다. 표 2에서 사용된 압착기의 용량은 약 100 ton이며, 압착으로 인하여 전체적인 길이변화는 알루미늄슬리브가 약 7~12%, 강슬리브가 18~23%이다.

본 연구에서는 슬리브의 작업이력과 가설된 슬리브의 모델링을 분석을 우선적으로 고려하였으며, 이를 위하여 연구 및 조사 비교되는 인자는 다음과 같다.

표 3. 노후 슬리브의 분석결과.

Table 3. The inspection result of aged sleeve.

분석 인자	Mean	Min	Max
슬리브의 길이	750		790
슬리브의 압착구간	209	130	270
강슬리브와 도체간의 Gap	22	0	50

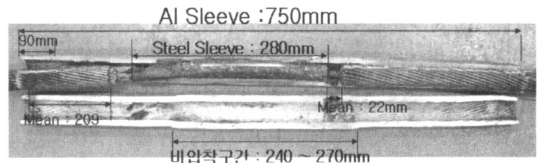


그림 4. 노후 슬리브의 치수.
Fig. 4. Size of aged sleeve.

- 알루미늄 슬리브의 전체길이.
- 강슬리브의 길이.
- 알루미늄 슬리브내 비압착구간 길이.
- 알루미늄 슬리브내 전선의 압착구간 변화[편중현상].
- 전선과 강슬리브간의 gap.

표 3과 그림 4는 신온산과 산화화력 32~35구간에 설치된 슬리브의 중심선을 따라 개봉하여 각 부위에 따라 치수를 나타내었다. 전체적으로 살펴보면 알루미늄슬리브 내에 강슬리브의 편중이 다소 발생되었으며 강슬리브의 부식이 발생되었다. 그러나 외관상으로는 알루미늄 슬리브와 강슬리브에서 치명적인 문제점은 발견되지 않았다.

3.2.3 슬리브의 길이변화

압착에 의한 Al슬리브 길이는 평균적으로 약 750 mm로 압착 전후로 5.6~11.3% 늘어났다. 강슬리브 길이는 약 280 mm로 16.6% 길이변화를 나타내었다. 정상적인 가설에 의한 길이 변화에 비하여 다소 낮은 수치를 보이고 있다. 정상적인 가설로 인한 알루미늄 슬리브의 전체길이는 760~795로 10~40 정도 낮은 수치이다. 이는 슬리브의 중심부를 압착하지 않는 비압착 구간의 크기와 연관이 있다. 비 압착구간의 길이는 분석슬리브에서 다소 차이는 있지만 240~270으로 이 구간의 길이에 따라 슬리브의 전체길이가 변화하였다. 또한 동일한 길이의 비압착 구간에서도 전체 슬리브의 길이가

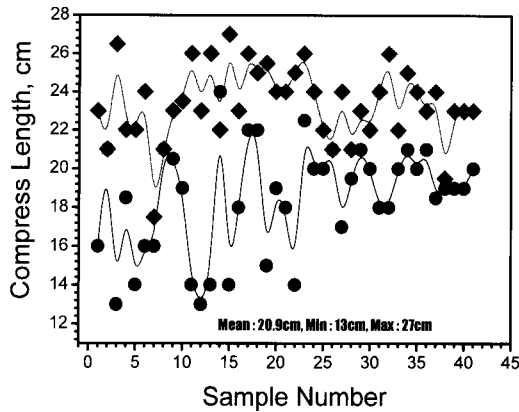


그림 5. 슬리브내 전선의 압착구간 거리.
Fig. 5. Compress length of conductor in Al sleeve.

차이를 나타낸 경우도 있었다. 이는 압착하중의 미달로 발생한 것으로 사료된다. 슬리브의 압착하중은 약 100 ton으로 압착하중이 충분하지 않으면 슬리브의 길이는 표준길이에서 미달하게 된다. 즉 Al슬리브를 압착할 때 압착기의 압력이 표준이하일 경우 Al슬리브는 다소 적게 팽창하게 되며 이로 인해 슬리브의 전체길이는 표준길이보다 작아진다.

강슬리브의 길이는 분석샘플에서 편차를 거의 나타내지 않았으며 동일한 길이가 나타났다. 표준작업에 비하여 약 3~15 정도 적은 수치이다. 이는 알루미늄슬리브와 같은 원인으로 압착하중의 미달로 인하여 발생한 것으로 사료된다.

3.2.4 알루미늄 슬리브내 비압착 구간(편중현상)

그림 5는 노후 Al슬리브 내에서 전선이 압착된 길이를 나타낸 것이다. 노후 Al슬리브 내에서 전선이 압착되는 길이는 평균적으로 약 209 mm, 최소 130 mm에서 최대 270 mm로 나타났다. 정상적인 가설에서 전선압착 길이는 약 240 mm이다. 노후 슬리브 경우 전선압착이 다소 편중되는 경향이 있다. 즉 Al슬리브의 양 구간 중 한구간은 Al슬리브와 전선이 270 mm 압착된 반면 반대구간은 상대적으로 작은 130 mm 정도 압착이 되어 있다. 이는 Al슬리브 내에서 강슬리브의 위치가 다소 한쪽으로 편중되므로 인해 나타나는 현상으로 슬리브와 전선간의 밀착성을 방해하여 열적거동을 저해하며, 심각한 발열현상을 유발하거나 심한 경우 전선이 가설되어 운영되는 과정에서 슬리브에서 전선이 탈락되는 사고를 유발할 수도 있다. Al슬리브

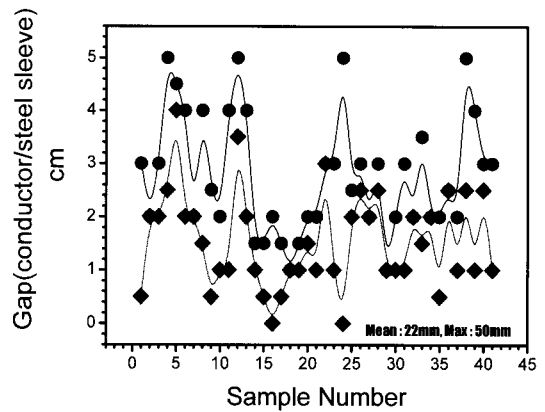


그림 6. 전선과강슬리브간의 간극길이.
Fig. 6. Gap length between steel sleeve and conductor.

에서 전선 압착거리가 140 mm 이하인 경우가 약 20 %를 이루고 있으며 반면에 압착거리가 260 mm이상인 경우도 20 %정도를 나타내었다.

Al슬리브 양 끝단의 90 mm부터는 직경이 감소하기 때문에 이 부위는 압착을 하여도 큰 압착력을 가지지 못하는 부위이다. 따라서 노후 슬리브의 약 20 %는 전선과 Al슬리브간의 압착은 최소 부위에서는 약 40 mm 정도에 지나지 않는다.

3.2.5 전선과 강슬리브간의 gap

그림 6은 강슬리브와 전선간의 간극길이를 나타낸 것이다. 표준슬리브에서 간극의 길이는 10 mm 이나 노후 슬리브의 평균 간극은 22 mm이며, 최대 50 mm 간극을 나타낸 경우도 있었다. 간극이 40 mm이상인 샘플이 약 25 % 정도를 나타내고 있으며 슬리브 내에서 양 끝단이 동시에 40 mm 이상의 간극을 나타내 경우도 5 %를 나타내고 있다. 간극은 Al슬리브와 전선과 압착되는 면적을 감소시키며, 열적 특성과 더불어 기계적 특성을 저하시킬 수 있다.

3.2.6 강슬리브의 부식 및 파단

슬리브 내에서 나타난 현상으로는 그림 7의 강슬리브 부식과 더불어 강 슬리브의 파단현상이 조사 되었다. Al슬리브가 가설되어 운영되는 과정에서 외관상으로는 문제점이 발견되지 않았지만 강슬리브에 심각한 부식이 존재하는 경우도 전체 노후 슬리브 중에 약 25 %를 나타내고 있었다. 이러한 강슬리브의 부식은 Al슬리브와 강 슬리브사이

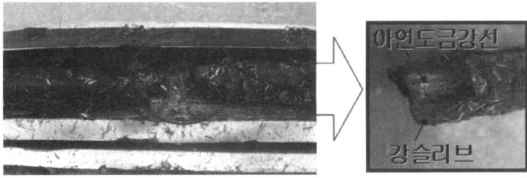


그림 7. 부식에 의한 강슬리브의 파단.
Fig. 7. Corrosion and failure of aged steel sleeve.

에는 압착하지 않는 구간이 있다. 이 구간은 그리스와 같은 윤활제를 투입하여 부식을 방지하게 되어 있다. 그러나 전선이 가설되어 장시간 고온에서 사용되면 윤활제가 소실되며 비와 눈 등에 의한 습기로 매워질 가능성이 있다. 이러한 경우 강 슬리브의 부식은 급격하게 진행하게 된다. 부식이 발생된 노후 슬리브를 조사하여 보면 알루미늄도체나 아연도금강선에서는 심각한 부식의 흔적을 발견할 수 없는 반면에 강 클램프에서만 부식이 발견되었다.

3.3 전선의 편중에 의한 열특성

Al 슬리브 내에서 전선과 슬리브간의 압착 길이에 따른 슬리브의 열특성을 조사한 결과를 그림 8에 나타내었다. 전선과 슬리브간의 압착 길이는 표준슬리브 시공인 240 mm와 전선이 슬리브 내에서 한쪽 방향으로 편중되어 압착되는 70 mm, 40 mm, 13 mm 슬리브 내에서 실시하였다.

전류는 ACSR 410 mm² 가공송전선의 연속허용 전류 850 A, 단시간허용전류 950 A, 순시허용전류 1100 A를 인가하였다.

전선의 압착 길이가 240 mm로 시공된 표준슬리브 온도는 연속허용전류 850 A에서 56.6 °C, 단시간허용전류 950 A에서 66 °C, 순시허용전류 1100 A에서 84 °C로 가공송전선 온도 78 °C, 94 °C, 123 °C 보다 상당히 낮은 온도를 나타내고 있다. 송전선의 온도는 도체의 전기저항에 의한 발열, 대류에 의한 발열 및 일사량으로부터의 흡열과 도체로부터의 방열이 평행이 된 상태에서 결정된다. 이 경우 도체의 온도는 도체의 주울 열(Joule)과 태양의 흡수열의 합이 대류열과 방사열의 합과 등가인 열평형 방정식으로부터 구해진다.

$$I^2 R_{dc}(T_c) \times 10^{-3} + Q_s = Q_r + Q_e$$

위 식에서 도체의 주울열은 부하전류와 도체의 교류 저항으로 계산되며, 교류저항은 도체의 온도 함수로 주어진다.

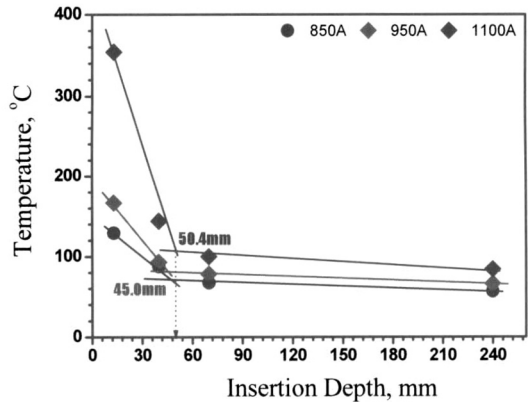


그림 8. 전선의 압착 길이에 따른 전선온도.
Fig. 8. Conductor temperature by insertion length.

전선과 슬리브간의 20~30 °C의 온도차가 발생되는 원인으로서는 Al슬리브의 단면적이 전선의 단면적 보다 2배 이상 크기 때문에 전류에 의한 주울 열 발생이 낮기 때문이다[1,3]. 따라서 동일한 전류에서는 슬리브의 온도가 전선보다는 상당히 낮은 온도분포를 나타낸다. 또한 열전달에 의해 낮은 온도영역을 나타내는 슬리브로부터 멀어질수록 전선의 온도는 증가하였다.

그러나 전선과 슬리브간의 압착 길이가 짧은 40 mm에서의 슬리브 온도는 각 전류에 대해 87.5 °C, 93.1 °C, 143 °C로 증가하였다. 압착 길이가 13 mm에서는 129 °C, 166 °C, 353 °C로 급격하게 증가하였다. 이와 같이 압착 길이가 작아질수록 슬리브의 온도는 증가하다가 임계점을 기준으로 급격하게 증가하는 현상이 나타났다. 슬리브의 온도가 급격하게 증가하는 임계점은 약 45~50.4 mm로 나타났다[5-7].

그림 1에서 언급한바와 같이 슬리브끝단으로부터 약 90 mm까지는 직경이 감소하기 시작하는 부분으로 압착 시에도 전선과 슬리브간의 밀착성 떨어지게 된다. 이러한 임계점이하로 압착을 하게 되면 전선의 접촉저항이 증가하여 슬리브의 온도는 급격하게 증가와 더불어 기계적 강도도 급격하게 감소하게 된다. 표준슬리브의 인장하중은 약 15,400 kgf이며, 70 mm삽입된 슬리브의 인장하중은 9320 kgf로 감소하였다. 표준슬리브에서는 전선의 인장하중이 강심과 알루미늄도체가 각각 65:35로 하중을 분담하게 되지만 90 mm이하로 삽입된 슬리브에서는 알루미늄도체는 하중을 분담하지 못하고 강심만이 하중을 담당하기 때문이다[1,2].

4. 결론

본 연구에서 수거된 슬리브를 해체하여 슬리브의 시공조건을 파악하고, 시공조건을 분류한 결과는 다음과 같다.

1) 압착에 의한 Al슬리브 길이는 평균적으로 약 750 mm로 압착 전후로 5.6~11.3 % 늘어났다. 강슬리브 길이는 약 280 mm로 16.6 % 길이변화를 나타내었다. 표준 슬리브에 비해 10~40 mm 정도 낮은 수치이다. 이는 압착하지 않는 구간의 크기와 압착하중의 미달로 발생된 것으로 사료된다.

2) 노후 슬리브 내에서 열적특성이나 기계적 특성을 감소시킬 우려가 있는 전선의 편중현상이 다소 발견되었다. Al 슬리브에서 전선 압착거리가 140 mm 이하인 경우가 약 20 %를 이루고 있으며 반면에 압착거리가 260 mm 이상인 경우는 20 %정도로 나타났다. 즉 Al슬리브 내에서 전선이 한 부분으로 편중되어 있어 전선/슬리브간의 밀착성을 방해하여 열적 거동을 저해하므로 심각한 발열현상을 유발하거나 심한 경우 전선이 가설되어 운영되는 과정에서 슬리브에서 전선이 탈락되는 사고를 유발할 수도 있다.

3) 운영상에 심각한 문제를 유발할 소지가 있는 강슬리브 부식과 강슬리브 파단이 나타났다. 강슬리브의 심각한 부식은 약 25 %를 나타내고 있었다. 강슬리브의 부식은 Al슬리브와 강 슬리브사이에는 압착하지 않는 구간에서 집중적으로 발견되었다. 이 부위는 전선의 장시간 사용으로 인한 비와 눈 등에 의한 수분 침투로 부식이 급격하게 진행하게 되어 강슬리브파단이 발생된 것으로 사료된다. 수분침투에 의한 강슬리브의 부식 및 부식파단을 방지하기 위해서는 Al 슬리브에서 비압착구간을 없애고 슬리브전체를 압착하는 것이 바람직하다.

4) 슬리브 내에서 전선이 편중되므로 인하여 전선의 열적, 기계적 특성에 심각한 문제점이 발생되

었다. 압착 길이가 작아질수록 슬리브의 온도는 서서히 증가하다가 임계점 45~50 mm을 기준으로 급격하게 증가하는 현상이 나타났다. 임계점이하로 압착을 하면 전선의 접촉저항이 증가하여 슬리브의 온도는 급격하게 증가와 더불어 기계적 강도도 급격하게 감소하게 된다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 박수동, 김상수, "STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에서 따른 기계적 물성 변화", 한국전기전자재료학회 2004학계학술대회논문집, p. 1258, 2004.
- [2] 김병걸, 김상수, "냉간 신선된 고탄소강선의 굽힘피로특성", 대한금속·재료학회지, 39권, 1호, p. 1212, 2001.
- [3] 김상수, 김병걸, 장태인, 강지원, 이동일, 민병욱, "환경적 요인에 의한 노후 가공송전선의 특성 변화", 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 287, 2006.
- [4] 김상수, 김병걸, 신구용, 이동일, 민병욱, "경년 열화가 증용량 저이도 송전선의 기계적특성에 미치는 영향(II)", 전기전자재료학회논문지, 19권, 1호, p. 100, 2006.
- [5] 김상수, 김병걸, 박주환, "고강도저손실 가공송전선 개발(I) -기계적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1152, 2005.
- [6] 김상수, 김병걸, 박주환, "고강도저손실 가공송전선 개발(II) -전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1159, 2005.
- [7] P. H. Schwabe and D. Pike, "The Measurement of Corrosion in Overhead Power lines", ANTI-Corrosion, 1988.