

산불에 의한 가공송전선의 열화거동

The Aging Behavior of Overhead Conductor due to Forest Fire

김병걸¹, 김상수^{1,a}, 한세원¹, 김진한²

(Byung-geol Kim¹, Shang-shu Kim^{1,a}, Se-won Han¹, and Jin-han Kim²)

Abstract

Because forest fire can give a serious damage to overhead conductors, the thorough understanding about aging behavior of burned conductor is very important in maintaining the transmission line safely. Therefore, a systematic investigation was carried out by heating method. As the heating temperature increases, drastic change of tensile strength of Al wire due to the softening of Al wire occurred. When Al wire is exposed to the flame(about 800 °C) during only 13 seconds, the remained tensile strength of Al wire showed under 90 %. The detailed results will be given in the text.

Key Words : Forest fire, Aging, ACSR, Conductor temperature

1. 서론

우리나라의 송전선로 위치는 국토의 65 %에 이르는 산지에 대부분 포설되어 있어, 산불과 같은 화재가 발생하여 전선이나 예자 등의 부착물이 파손되는 사고가 발생하게 되면 송전선로가 운영되지 못하여 발생하는 여파는 산업전반에 걸쳐 엄청난 파급효과를 미치게 될 것이다.

최근 10년간 산불로 인한 송전선로 고장이 연평균 11건 발생 보고되고 있으며 전체 송전설비 사고 건수의 8 %의 사고 원인을 제공하고 있다.

일반적으로 금속은 고온의 화염에 노출되면 구조특성이 변화되므로 가공선로에 이용되는 강심알루미늄선 즉, ACSR(Aluminum Strand Conductors Steel Reinforced) 도체의 기계적, 전기적 특성이 변화되어 전선의 교체수명이 감소된다. 특히 ACSR 전선의 강심에 피막으로 덮여 있던 아연도금층이 산불에 의한 화염에 녹아내림으로써 강선의 대기부식을 촉진시키게 되며, 아연층이 용융된 후 강선과 알루미늄선이 맞닿아 이중금속의 접촉에 의한 전해부

식의 원인으로 알루미늄선도 부식이 촉진된다[8,9].

이와 같이 산불화염에 열화된 가공송전선의 기계적, 전기적 특성이 변화되어 전선의 교체, 보강 등 대책이 요구되지만 열화상태의 판정과 관련한 연구 실적이 국내외적으로 보고된바가 거의 없으며 정확한 교체기준 또한 없는 실정이다.

본 연구에서는 모의 선로와 인위적인 열화시험을 통하여 화염에 의한 ACSR전선의 기계적, 전기적 특성의 변화를 분석하였다.

2. 실험

산불에 의한 가공송전선의 전기적, 기계적 특성을 분석하기 위하여 산불 온도가 전선에 미치는 영향을 우선적으로 조사하여 이와 유사한 현상을 모의할 필요가 있다. 산불화재로 인한 ACSR 410 mm² 가공송전선의 기계적 열화특성시험을 위하여 사용되지 않은 신전선을 이용하였다. 열화특성 시험은 그림 1에 나타난 챔버를 이용하였으며 내부는 직경 1 m, 길이 2 m로 균일 가열하였다.

산불 최대온도는 불꽃이 약 1200 °C이며, 대기 온도는 약 800 °C까지 상승한 실험결과를 이용하였다. 산불열화 시험은 300 °C에서 800 °C까지 온도를 변화시켰으며 각 온도에 최대 60분을 유지하였다. 열화시간은 인장강도의 10 %가 감소하면 시험을

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 부산울산지방중소기업청 시험연구지원팀
a. Corresponding Author : shangshu@hanmail.net
접수일자 : 2007. 10. 1
1차 심사 : 2007. 11. 16
심사완료 : 2007. 11. 23

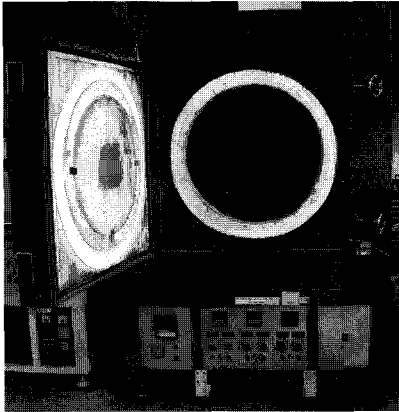


그림 1. 인공열화 챔버.
Fig. 1. Chamber of aging.

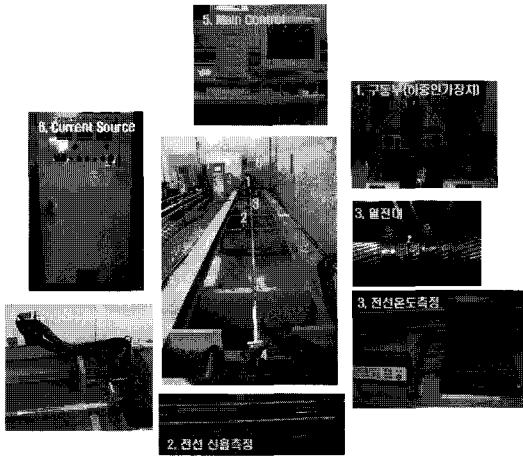


그림 2. 가공송전선 고온인장시험현경.
Fig. 2. Outline of high temperature tensile test of ACSR 410 mm² conductor.

중요하였다. 인공열화 시험이 끝난 시료들은 상온까지 공냉하였으며 기계적 특성시험과 전기적 특성시험을 실시하였다.

ACSR 410 mm²가공송전선의 고온 인장하중시험은 그림 2에 나타난 바와 같이 IEC 1089 시험규정에 준하여 시험하였다. 사용된 전선의 길이는 약 10 m이며 전선의 양 끝단은 압축인류클램프로 압착하였다. 시험편의 설치하중은 인장강도의 약 8%(1,111 kgf)이며, 전선의 연선과정 및 압축인류클램프 작업 중에 발생할 수 있는 구조적인 꼬임현

상을 완화시키기 위하여 설치하중에서 약 24시간 유지하였다. 가공송전선의 온도상승을 위하여 전선의 양 끝단인 압축인류클램프에 전류를 인가하여 전선온도를 최대 500 ℃까지 상승하였다. 전선의 온도는 전선의 중심부에 열전대를 부착하여 측정하였다.

3. 결과 및 검토

산림이 울창하고 가연성 낙엽이 많이 쌓인 지역에서 산불에 의한 불기둥의 높이는 약 20~30 m에 이르며 화염 중심부의 온도는 약 1200 ℃ 정도이고 주변 연기의 온도도 약 600 ℃에 이르는 것으로 추정되고 있다. 따라서 일단 전력선 주위에 산불이 발생하게 되면 전선이 화염에 접촉하는 것은 피할 수 없을 것이다. 산불에 의한 전력선의 피해를 조사하기 위하여 인위적으로 열화온도를 최대 800 ℃까지 상승시켜 열화시간에 따라 ACSR 410 mm² 전선의 구성소재인 알루미늄도체[4.5 ϕ]와 아연도금강선[3.5 ϕ]의 특성을 조사하였다.

3.1 소선의 기계적 특성

ACSR 410 mm² 가공송전선을 구성하고 있는 알루미늄도체(4.5 ϕ)와 아연도금강선(3.5 ϕ)의 인장강도는 17.0 kgf/mm²과 140.2 kgf/mm²로 한전규정 16.2 kgf/mm²와 130.0 kgf/mm²을 만족하였다. 그림 3은 300 ℃에서 800 ℃ 구간에서 산불 노출시간에 대한 알루미늄 도체의 인장강도 변화를 나타낸 것이다.

각 열화온도에서 열화시간에 따라 알루미늄도체의 인장강도는 민감하게 반응하여 급격하게 감소하기 시작하였다. 800 ℃에서 1분 노출된 알루미늄도체의 인장강도는 약 7.8 kgf/mm²으로 신전선 알루미늄도체의 최소 인장강도(16.2 kgf/mm²)의 40%수준이다. 산불에 노출된 알루미늄도체는 노출온도에 따라 인장강도 감소는 급격하게 변화하였으며 장시간 노출하게 되면 약 7 kgf/mm²으로 포화되었다.

이와 같이 산불과 같은 화염에 의해 열화된 재료의 경우 외관상 검사로는 어떠한 결함이 나타나지 않지만 실질적으로 상당한 인장강도의 저하가 발생하여 수명을 다하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 알루미늄도체가 산불에 노출될 경우 급격한 가열열화가 발생하여 강도적으로 취약해질 가능성이 있음을 나타낸다. 알루미늄의 급격한 열화는 아연

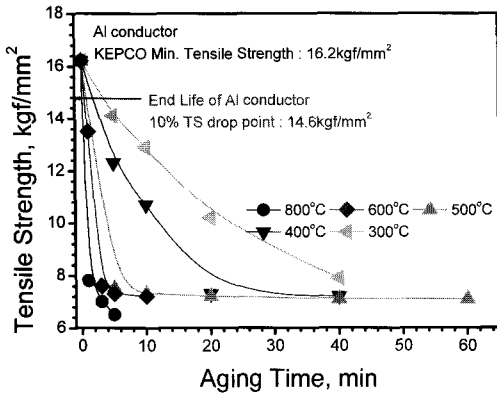


그림 3. 열화에 의한 알루미늄도체 인장강도 변화.
Fig. 3. Tensile strength of Al conductor by aging.

도금강선의 하중부담이 증가한다. ACSR 410 mm² 가공전선의 하중분담은 일반적으로 65 : 35정도로 강심과 알루미늄 도체가 분담하지만 산불로 인하여 알루미늄도체가 급격하게 열화하면 알루미늄도체의 하중분담이 감소하고 강심의 하중분담이 증가하여 전체적으로 전선의 단선 및 수명을 감소시킬 요지가 있다[1,2].

그림 4는 300 °C에서 800 °C의 각 온도에서 노출시간에 대한 아연도금강선의 인장강도변화를 나타낸 것이다. 300 °C와 400 °C에서는 노출시간에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하였으며 최대 60 분간의 노출에도 강도의 감소는 거의 나타나지 않았다. 반면에 500 °C 이상의 노출에서는 시간에 따라 인장강도는 노출시간에 따라 감소하기 시작하였다. 500 °C에서는 약 10분까지는 강도의 변화가 거의 나타나지 않았지만 이후부터는 강도가 감소하기 시작하여 약 60분간 노출하였을 때의 인장강도는 초기에 비하여 약 83 %의 강도잔존율을 나타내었다.

600 °C이상의 노출에서 인장강도는 알루미늄도체와 유사한 거동을 나타내었다. 약 10분간 노출된 아연도금강선의 인장강도는 600 °C에서 120 kgf/mm², 800 °C에서 75 kgf/mm²으로 강도잔존율은 약 85.7 %와 53.5 %로 감소하였다.

그림 5는 그림 3에서 인장강도의 10 %가 감소하는 시간을 나타낸 것이다. 인공열화온도가 증가하면 알루미늄의 10 % 인장강도 저하시간이 급격하게 빨라지게 된다. 약 800 °C에 약 13초 정도만

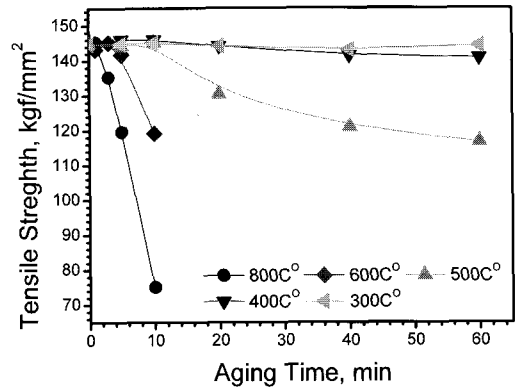


그림 4. 열화에 의한 아연도금강선의 인장강도 변화.
Fig. 4. Tensile strength of core by aging.

노출되어도 알루미늄도체의 인장강도는 최소인장강도의 10 %가 저하하게 된다. 대기온도와 전선온도의 관계에서 900 °C 화염에 노출된 경우 전선의 최대온도는 510 °C로, 이 온도에서 인장강도가 10 % 감소하는데 걸리는 시간은 약 46.2초 미만이다.

전선의 최저점과 산림과의 이격거리는 약 3.2 m이다. 송전선 주위에서 산불이 발생할 경우 화염의 높이가 20~30 m로 상당히 높기 때문에 전선은 화염에 노출되게 된다. 이처럼 화염에 노출될 경우 노출시간을 측정하게 되면 전선의 전선정 유무를 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

화염으로부터 10 cm 이격거리에서 전선의 온도는 약 300 °C로 10 % 인장강도 감소시간은 3.5분으로 나타났다. 그림 3으로부터 열화온도와 10 % 최소인장강도저하에 소요되는 시간을 실험식으로 도출하면 다음과 같다.

$$Time_{Al} = 1600 \times e^{-\frac{T_{Al}}{148.8}} - 0.263 \text{ (Sec)} \quad (1)$$

3.2 ACSR 410 mm² 가공송전선의 기계적 특성

그림 6은 그림 3과 그림 4을 근거로 하여 전선의 인장하중을 나타낸 것이다. 각 소선으로부터 합성연선의 인장하중 계산은 알루미늄소선의 인장하중에 그 소선수를 곱한 것과 강심소선의 인장하중에 그 소선수를 곱한 것과의 합에 대하여 90 %를 적용하였으며 다음 식으로 계산한다.

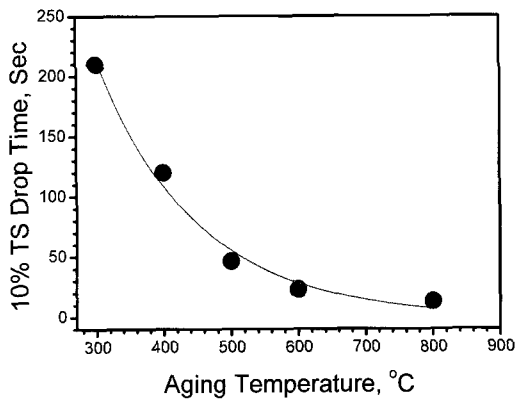


그림 5. 열화온도에서 인장강도의 10% 이하에 소요되는 시간.

Fig. 5. 10% TS drop time in aging temperature.

$$T = 0.9 \times (T_a \cdot A_a \cdot N_a + T_s \cdot A_s \cdot N_s) [kgf] \quad (2)$$

- T_a : 알루미늄 소선의 인장강도(kgf/mm²)
- A_a : 알루미늄 소선의 단면적(mm²)
- N_a : 알루미늄 소선의 가닥수
- T_s : 강심 소선의 인장강도(kgf/mm²)
- A_s : 강심 소선의 단면적(mm²)
- N_s : 강심 소선의 가닥수

신전선 ACSR 410 mm²의 인장하중은 약 14,805 kgf로 한전의 최소인장하중 13,890 kgf을 약 100 kgf 정도 높게 나타냈다. 이러한 신전선이 산불에 의해 열화가 되면 인장하중은 각 온도에서 열화시간에 대해 급격하게 감소하게 하였다. 약 800 °C에서 1분 노출된 가공전선의 인장하중은 약 11,709 kgf로 신전선의 약 79 %수준으로 저하하였으며, 300 °C에서 10분 노출된 전선의 인장하중은 약 13,601 kgf로 전선의 최소인장하중과 유사한 값을 나타내었다.

인장하중의 감소 경향을 조사하여보면 앞서 살펴본 알루미늄 소선과 거의 유사한 경향성을 나타내었다. 이는 400 °C이하의 낮은 온도에서 가공송전선의 열화는 알루미늄도체가 열화의 지배인자인 것으로 사료된다[4-7].

가공송전선의 수명은 알루미늄소선의 인장하중이 10%감소하면 전선을 교체하는 것으로 알려져 있다. 만약 산불에 의해 가공송전선내에 존재하는

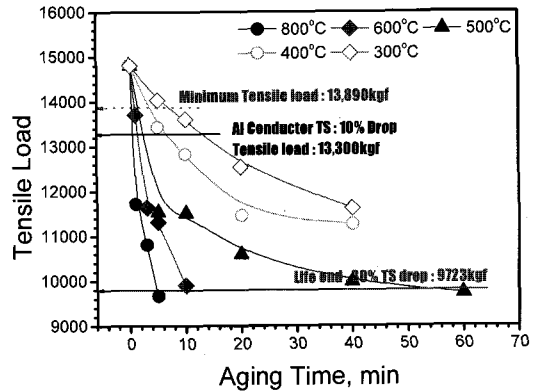


그림 6. 열화에 의한 ACSR 410 mm² 가공전선 인장하중.

Fig. 6. Tensile load of ACSR 410 mm² conductor by aging.

강심은 열화되지 않고 알루미늄도체만 열화가 발생되었다고 가정하면 전선의 교체시기[알루미늄 소선의 인장하중 10%감소 시점]는 전선의 하중으로 판단할 수 있다. 신전선 ACSR 410 mm²의 최소인장하중 13,890 kgf에서 알루미늄도체의 10%인장하중감소분을 고려하면 인공화염에 의해 열화된 전선의 인장하중이 약 13,300 kgf가 되면 전선은 교체하여야 한다. 이러한 방법에 의해서 각 온도에서 인공열화된 가공전선 교체시기는 표 1과 같다.

화염과 이격거리에 따른 가공송전선의 온도와 대기온도 시험 결과에서 전선이 900 °C 이상의 화염에 직접 노출한 전선의 최대온도는 약 510 °C로 나타났다. 이 시험 결과로부터 산불에 의해 가공전선이 화염에 직접 노출되어 있어도 전선온도는 약 510 °C로 예상할 수 있다. 500 °C에서 전선은 약 2.17분까지 화염에 노출되어도 어느 정도 건전상태를 유지할 수 있을 것으로 예상된다. 화염에 의한 잔존수명과 교체시기에 대한 관계는 더욱 조사 필요성이 있다[9,10].

표 1. 열화에 의한 전선의 교체시기.

Table 1. Change time of conductor by aging.

가공송전선 온도(°C)	전선 수명
800	27.6초
600	1.31분
500	2.17분
400	6.23분
300	12.64분

표 2. 열화에 의한 전선의 교체시기[영국].

Table 2. Change time of conductor by aging [England].

온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)
800	4.8	500	54
600	11	400	

가공전선의 교체시기에 대하여 외국의 사례를 살펴보면 캐나다와 영국의 경우 신전선 초기인장하중의 기준으로 하여 각각 20 %와 30 % 감소된 경우를 교체시기[수명한계]로 하였다. 영국의 교체시기에 근거한 전선의 수명한계에 대한 인장하중은 약 9,723 kgf이다. 그림 5의 각 열화온도에서 영국에 근거한 수명한계를 표 2에 나타내었다.

3.3 ACSR 410 mm² 가공송전선의 고온인장하중

ACSR 가공송전선은 운전 중에 통전전류에 의한 저항열과 철탑사이에서의 복합응력에 동시에 노출되어 있다. 산불에 의한 가공송전선의 고온인장하중 변화를 조사하는 것은 가공송전선의 건전성 도모와 산불 환경을 모사하기 위한 가장 적합한 시험방법 중의 하나이다.

그림 7은 각 산불온도에서의 고온인장하중을 나타낸 것이다. 온도에 대한 가공송전선의 인장하중 거동은 200 ℃을 경계로 하여 서로 다른 두 거동을 나타낸다. 약 200 ℃까지는 온도 증가에 대한 인장하중은 서서히 감소하지만 200 ℃이상의 고온에서 인장하중은 급격하게 감소하였다. 온도에 대한 가공송전선의 인장하중거동을 식으로 나타내면 다음과 같다. 200 ℃ 이하 저온에서는 식(3)의 거동을 따르며 200 ℃이상의 고온에서는 식(4)을 따라 인장하중은 감소한다. 산불온도가 1 ℃씩 증가하면 전선의 인장하중은 200 ℃을 경계로 이하에서는 5.52 kgf, 이상에서는 45 kgf 씩 감소한다[4,5].

$$TL[kgf] = 15280 - 5.52 \times T \quad (3)$$

$$TL[kgf] = 22834 - 45 \times T \quad (4)$$

3.4 전기적 특성

산불에 노출된 가공송전선은 알루미늄도체의 산화, 아연도금강선에서 아연도금의 용융 등으로 인하여 전기적특성이 변화할 것으로 예상된다.

그림 8은 각 온도에 노출된 아연도금강선과 알루미늄도체의 노출시간에 대한 전기전도도 변화를 나타낸 것이다. 노출이전의 알루미늄 도체와 아연

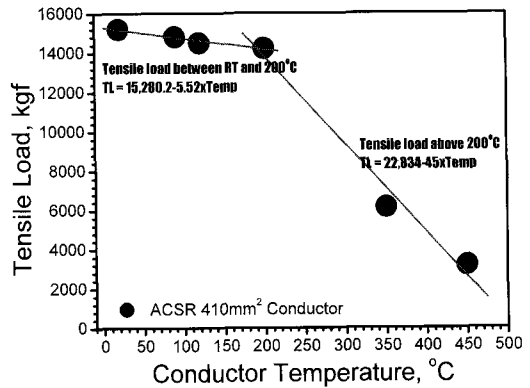


그림 7. ACSR 410 mm² 가공송전선의 고온인장하중.

Fig. 7. High temperature tensile load of ACSR 410 mm² conductor.

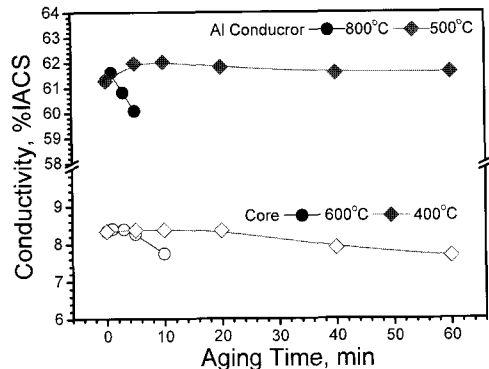
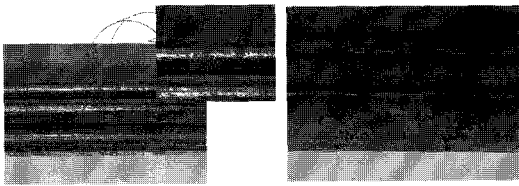


그림 8. 열화에 의한 알루미늄도체와 아연도금강선의 전기전도도 변화.

Fig. 8. Conductivity of Al conductor and core by aging.

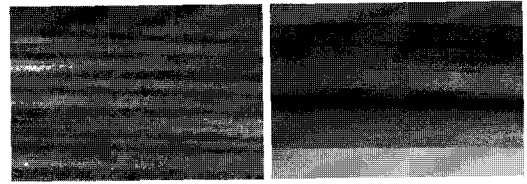
도금강선의 전기전도도는 약 61.3 %과 8.3 %IACS를 나타내었다. 전기전도도는 노출온도에 따라 전기전도도는 확연히 구분된다. 알루미늄도체의 전기전도도는 약 500 ℃ 이하로 노출되면 전기전도도는 다소 증가하지만 500 ℃이상의 온도에서는 노출시간에 따라 감소하였다. 알루미늄도체는 신선과 연선과 같은 기계적인 가공에 의하여 재료 내부에 전위(dislocation)와 같은 결함이 축적된다. 이를 500 ℃ 이하 저온에서 짧은 시간동안 노출하게 되면 전위 등의 소멸과 내부 에너지의 감소로 인하여 전기전도도는 다소 증가하게 된다. 반대로 재료의



(a) 400 °C, 20분 (b) 400 °C, 40분 열화

그림 9. 열화시간에 따른 강심의 표면사진.

Fig. 9. Surface of core after 400 °C aging.



(a) 500 °C, 5분 열화 (b) 500 °C, 10분 열화

그림 10. 열화시간에 따른 강심의 표면사진.

Fig. 10. Surface of core after 500 °C aging.

강도는 감소하게 된다. 500 °C 이상의 고온에서는 재료에 재결정립이 형성되어 결정립의 성장으로 인해 기계적 강도와 도전율은 감소하게 된다 [1,2,5,7]. ACSR 가공송전선용 알루미늄도체의 재결정온도는 약 360 °C 정도이다.

아연도금강선의 전기전도도는 노출시간에 대해 전반적으로 감소하다가 7.5 %IACS로 포화되는 경향을 나타내었다. 온도가 높으면 감소하는 시점이 짧아지고 낮은 온도에서는 서서히 감소한다. 강선의 전기전도도는 아연도금층에 의해 좌우된다. 아연의 용융점인 약 410 °C를 경계로 아연도금의 용융 및 산화피막의 생성과 성장 등으로 인하여 전기전도도가 감소된다.

3.5 표면 특성

산불과 같은 화재가 발생할 경우 가장 우선적인 조사 방법으로는 전선의 외관을 육안으로 검사하여 피해 유무를 조사하는 것이다. 이러한 방법으로 알루미늄도체의 용융과 아연도금강심내 아연도금층의 용융 등의 피해가 발생한 전선은 교체하는 것이 필수적이다. 그러나 전선은 연선되어 있는 형태이기 때문에 외형상 검사는 알루미늄도체만을 검사되므로 산불로 인한 그을음 이외에는 어떠한 특징을 발견할 수가 없다. 알루미늄도체는 용융되기 이전에는 산불로 인한 외관상특징이 거의 나타나지 않았지만 연선된 가공송전선을 분해하여 아연도금강선을 조사한 결과 노출온도와 시간에 따라 다양한 변화를 나타내었다.

그림 9는 400 °C에서 20분과 40분 노출 후 아연도금강선의 표면을 나타낸 것이다. 400 °C 열화에서는 약 20분 정도에서 아연도금층의 일부가 부풀어 오르기 시작하는 현상이 관찰되었다. 약 40분 경과하면 아연도금층의 70~80 %가 소실되며 산화피막층이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 그림 8의 약 20분 후부터 전기전도도가 감소하기 시작한 결과와 일치하였다. 이러한 아연도금층의

소실에도 불구하고 그림 4의 인장강도는 거의 거의 변화가 없었다. 즉 아연도금층은 강심의 인장강도에 거의 영향을 미치지 않고 부식방지 역할을 한다.

그림 10은 아연도금강심에 대하여 500 °C 인공 열화온도에서 열화시간에 따라 표면형상을 나타내었다. 500 °C 인공열화에서 약 5분 정도까지는 어느 정도 건전한 상태를 유지하나 약 10분이 경과하면 아연도금층이 완전히 소실되어 산화피막층이 형성되었다.

일반적으로 ACSR 가공전선은 대기 중에서 아연도금층이 먼저 부식되고 철과 알루미늄사이의 접촉부식이 진행된다[3,8,9,10]. 이때 알루미늄 도체는 아연도금 강심과 접촉되어 있는 부분의 단면적이 부식에 의해 감소한다. 부식에 의해 단면적이 감소되어 있는 부분은 내부의 강심과 접촉되어 있기 때문에 전선의 외부에서 육안 검사로는 식별하기 곤란하다. 따라서 이러한 결함 상태를 비파괴 검사방식으로 검출하는 것이 필요하다.

아연도금층의 소실은 기계적 강도의 손실이 없다 할지라도 전선의 부식을 촉진시켜 잔존수명을 감소시킨다. 따라서 해외에서는 아연도금층의 손실량에 따라 전선의 잔존수명을 규정하고 있다.

4. 결론

산불에 의한 화염의 높이(20~30 m), 전선의 이도가 처짐에 의해 전선이 직접 수목에 접촉한 경우 등을 고려하여 인공열화의 온도를 최대 800 °C 까지 설정하여 인공열화시간을 최대 60분 동안 시험하였다. 열화 전선을 대상으로 인장강도, 전기전도도 등의 특성을 조사하였다.

1) 알루미늄도체의 특성변화

300 °C부터 800 °C까지 각 100 °C단위로 인공열화한 시험편에 대하여 상온 인장시험을 실시한 결과 각 열화온도에서 열화시간에 따라 인장강도는

민감하게 반응하여 급격하게 감소하였다. 800 ℃에서 1분 인공열화한 경우 인장강도는 약 7.8 kgf/mm²으로 신전선 알루미늄도체의 최소 인장강도(16.2 kgf/mm²)의 40 %수준이며, 약 13초 정도만 노출되어도 알루미늄도체의 인장강도는 최소인장강도의 10 %가 저하하게 된다.

2) 아연도금강심의 특성변화

아연도금강심의 인공열화의 경우 알루미늄도체와 달리 강도적인 측면에서는 심각성을 초래하지는 않았지만 열화온도가 높을수록 아연도금층의 용융 등에 의해 아연층의 소실로 인한 부식측면에서의 심각성을 초래할 것이다.

3) ACSR 전선의 특성변화

전선이 인공열화가 되면 인장하중은 각 온도에서 열화시간에 대해 급격하게 감소하였다. 약 800 ℃에서 1분 인공열화된 가공전선의 인장하중은 약 11,709 kgf로 신전선의 약 79 %수준으로 저하하였으며, 300 ℃에서 10분 인공열화된 전선의 인장하중은 약 13,601 kgf로 전선의 최소인장하중과 유사한 값을 나타내었다. ACSR전선의 강도적인 측면에서는 인공열화의 경향은 알루미늄 소선과 거의 유사한 경향성을 나타낸다.

4) 표면 및 내부조직 검사

아연도금강심 인공열화에서 400 ℃ 미만에서는 아연도금층의 소실 등의 외관상 변화는 관측할 수 없었으며 열화시간에 무관하게 건전한 상태를 유지하였다.

400 ℃ 인공열화에서는 약 20분 정도에서 아연도금층의 일부가 부풀어 오르기 시작하는 현상이 관찰되었다. 약 40분이 경과하면 아연도금층의 70~80 %가 소실되며 산화피막층이 형성되었다.

500 ℃ 인공열화에서 약 5분 정도까지는 어느 정도 건전한 상태를 유지하나 약 10분이 경과하면 아연도금층이 완전히 소실되어 산화피막층이 형성되었다.

5) 고온강도

온도에 대한 가공송전선의 인장하중거동은 200 ℃을 경계로 하여 서로 다른 두 거동을 나타냈다.

산불온도가 1 ℃씩 증가하면 전선의 인장하중은 200 ℃을 경계로 이하에서는 5.52 kgf, 이상에서는 45 kgf 씩 감소한다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 박수동, 김상수, "STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에 따른 기계적 물성 변화", 한국전기전자재료학회 2004학계학술대회논문집, p. 1258, 2004.
- [2] 김병걸, 김상수, "냉간 신선된 고탄소강선의 굽힘피로특성", 대한금속·재료학회지, 39권, 1호, p. 1212, 2001.
- [3] 박창기, 이광식, 강지원, 김영달, "화염으로 인한 ACSR의 기계적 열화 특성", 전기전자재료학회논문지, 17권, 6호, p. 160, 2003.
- [4] 김상수, 김병걸, 장태인, 강지원, 이동일, 민병욱, "환경적 요인에 의한 노후 가공송전선의 특성 변화", 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 287, 2006.
- [5] 김상수, 김병걸, 신구용, 이동일, 민병욱, "경년 열화가 중용량 저압도 송전선의 기계적특성에 미치는 영향(II)", 전기전자재료학회논문지, 19권, 1호, p. 100, 2006.
- [6] 김상수, 김병걸, 박주환, "고강도저손실 가공송전선 개발(I) -기계적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1152, 2005.
- [7] 김상수, 김병걸, 박주환, "고강도저손실 가공송전선 개발(I) -전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1159, 2005.
- [8] 김영달, "화염에 의한 ACSR 송전선의 표면 특성에 관한 연구", 조명·전기설비학회지, 17권, 6호, p. 173, 2003.
- [9] P. H. Schwabe and D. Pike, "The Measurement of Corrosion in Overhead Power lines", ANTI-Corrosion, 1988.