

논문 22-4-15

통전 중 산불에 노출된 가공송전선의 온도 및 장력 변화 거동

Temperature and Load Change behavior of Overhead Conductor under loading current due to Forest Fire

김병걸¹, 장용호^{1,a}, 김상수¹, 한세원¹
(Byung-geol Kim¹, Young-ho Jang^{1,a}, Shang-shu Kim¹, and Se-won Han¹)

Abstract

The authors have published several technical reports on the deterioration of conductor due to forest fire in series so far. This is because even we have been experiencing hundreds of forest fires every year, no systematic research on conductor which is very vulnerable to fire have been fulfilled. This paper describes the sag-tension behavior of conductor under loading current normally when only partial area of a long conductor is exposed to fire. Temperatures of Overhead Conductor were different with measurement position. When the partial area of conductor was heated up to 500 °C, 20 % of permanent tension loss was observed. This results in the increase of sag of 1.5 m when span is 300 m. The other results will be presented in the text.

Key Words : Temperature, Load, Forest fire, ACSR 410 mm² conductor, Tensile load

1. 서론

우리나라는 지형 특성상 많은 송전선로가 산에 매설되어 있다. 따라서 산불 발생 시 가공송전선은 직, 간접 적으로 산불에 의한 피해에 노출되어 있다. 통계결과에 따르면 한해 평균 산불은 약 6,000건이 발생하고 있고 이것은 송전설비 전체 고장의 약 25 %를 차지하고 있다. 이러한 수치는 결코 간과할 수 없는 수치이다.

산불이 발생하여 송전설비가 손상되는 것은 1차 피해이다. 이러한 1차 피해는 안정적인 전력공급을 저해하는 2차 피해를 유발한다. 2차 피해를 최소화시키기 위해서는 산불에 의한 송전설비 피해를 정확히 파악해야 한다. 하지만 현재까지 산불에 의해 송전설비가 받는 영향에 대한 체계적인 연구는 이루어 진적이 없다. 따라서 산불에 의한 송전설비의

정확한 피해정도 역시 체계적으로 확인된 바 없고 명확한 대처방안도 확립 되어진 적이 없다.

산불은 다양한 인자들에 의해 특성이 약간씩 달라진다. 이러한 특성 변화에 따라 송전설비 피해도 달라진다. 송전설비에 영향을 미치는 산불의 특성을 예로 들면 화염에 의한 열화, 진화를 위한 소화 약제에 의한 영향, 화염에 동반되는 분진 등이 있다. 이러한 각각의 인자에 의한 영향을 파악하는 것은 대단히 중요하다 할 수 있다.

본 연구에서는 국내 산불 환경에 대한 정확한 자료 조사를 토대로 실제 산불을 모의하여, 산불의 여러 인자 중 화염에 의해 가공송전선이 받는 온도 및 장력 변화를 확인하였다.

2. 실험

2.1 온도 및 시편

이전 실험 결과에서 국내 수목 지역 산불 환경에서 가공송전선이 화염에 노출될 경우 화염의 온도는 약 900~1200 °C이며, 이 때 가공송전선의 온도는 약 500 °C로 조사되었다[1]. 따라서 본 실험

1. 한국전기연구원 재료응용연구단

(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : jyh100402@keri.re.kr

접수일자 : 2009. 2. 18

1차 심사 : 2009. 3. 16

심사완료 : 2009. 3. 23

에서 국내 산불 환경을 최대한 모의하기 위해 전선의 온도는 최대 500 °C로 설정하였다.

열원은 안전적이며 지속적인 것이 적합하다고 판단하여 LPG를 사용하였다. 시편은 국내에서 많이 사용되고 있는 가공송전선인 ACSR(Aluminum Strand Conductors Steel Reinforced) 410 mm²를 사용하였다. 사용된 가공송전선의 길이는 약 10 ~ 13 m였다. 통전중인 상황을 가정하기 위한 전류는 상시허용전류 50 %, 70 %와 100 %인 430 A, 600 A, 850 A에서 실험하였다.

2.2 온도변화 측정

온도는 가공송전선의 수명에 직접적인 영향을 미치는 인자이다. 온도 측정은 K-type열전대를 이용하여 하였으며, 산불 노출 지점의 끝단을 기준으로 가공송전선의 온도 영향 구간을 확인하였다.

온도는 3가지 인자를 변화시키며 측정하였는데, 변화 되어진 인자 첫 번째는 화염에 노출된 지점과 측정 위치와의 거리, 두 번째는 통전중인 전류 세기, 세 번째는 인가되어진 장력 세기였다.

산불에 노출된 상황에서, 가공송전선 내 온도 구배를 확인하기 위하여, 그림 1과 같이 가공송전선의 Bottom, Middle, Top의 온도 차이를 확인하였다.

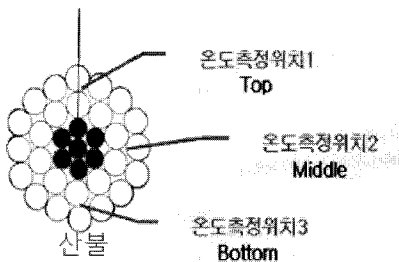


그림 1. 온도 측정 위치.

Fig. 1. Temperature measurement positions.

2.3 장력변화 측정

산불에 노출된 가공송전선의 장력 변화는 이도와 직접적인 연관성을 가지고 있으므로 전선의 관리 면에서 큰 의미를 가진다. 장력 변화는 전류 인가 단계, 산불 노출 단계, 산불 제거 후 회복 단계, 전류 재인가 단계로 크게 4단계로 나누어 측정하였다. 이 4가지 단계가 산불에 노출된 가공송전선의 가장 일반적인 변화라 판단하였다. 물론 4번째 단계인 전류 재인가 단계는 산불 노출 후 가공송

전선의 상태가 건전할 때만 적용하였다. ACSR 410 mm²의 가공송전선에 인가된 초기장력은 3100 kgf와 5000 kgf로 하였다. 이는 가설장력과 최대허용장력이다.

2.4 인장하중 측정

산불에 의한 가공송전선의 기계적 특성을 분석하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 그림 2에 나타난 바와 같이 IEC 1089 시험규정에 준하였다. 사용된 전선의 길이는 약 10 m이며, 전선의 양 끝단은 압축 인류클램프로 압착하였다. 시험편의 설치 하중은 인장하중의 약 8 %이며, 인장 속도는 1,000 kgf/min으로 하였다.

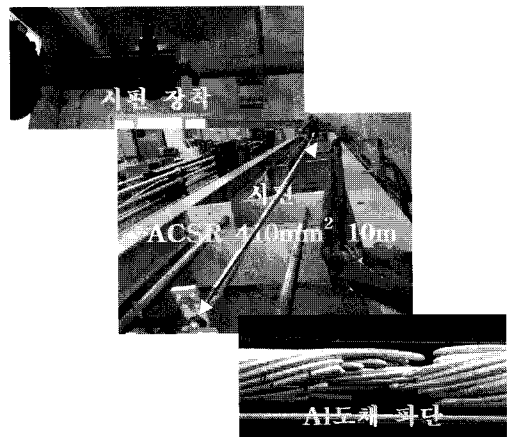


그림 2. 인장하중 측정 전경.

Fig. 2. Measurement of tensile load.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 거동 결과

그림 3은 화염에 노출된 지점과 측정 위치와의 거리에 따른 온도 거동 결과이다. 온도변화는 실험 과정에 따라 3가지 거동으로 나타났다. 첫 번째 거동은 가공송전선에 연속허용전류를 인가하면 나타나는 약간의 온도 상승이다. 전류에 의한 온도 상승은 측정 위치에 무관하게 거의 동일하게 나타났다. 두 번째 거동은 산불에 노출된 후 나타나는 급격한 온도 상승이다. 산불에 노출된 시기는 전류에 의한 온도 상승이 충분한 시간이 경과 한 후 포화되었을 때로 설정하였다. 세 번째 거동은 산불이 제거 된 후 나타나는 급격한 온도 감소 구간이다.

화염 노출 지점을 기준으로 온도측정 거리가 멀어짐에 따라 최대 온도는 급격히 감소하였으며 최대 온도까지 도달하는 시간은 증가하였다. 산불에 의한 열은 화염 접촉점을 기준으로 약 150 cm까지 영향을 미쳤으며 그 이상의 거리에는 온도 변화가 발생하지 않았다. 따라서 산불에 노출된 후 전선의 온도가 약 500 °C까지 증가한다면 화염에 노출된 끝단을 기준으로 약 150 cm까지 산불에 의해 영향을 받는다고 판단된다.

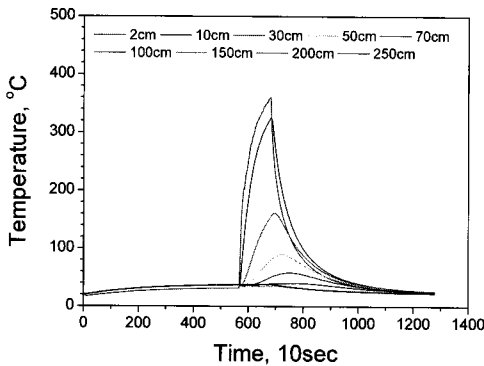


그림 3. 거리에 따른 온도 거동.
Fig. 3. Temperature behavior according to distance.

그림 4는 운영중인 전류 세기에 차별성을 두어 온도 변화를 살펴본 결과이다. 적용되어진 전류 세기는 연속허용전류의 0%, 50%, 70%에 해당하는 0 A, 430 A, 600 A였다.

최대 온도 거동은 화염 접촉 지점에서 약 100 cm를 기준으로 상당히 다른 양상을 나타내었다. 일반적으로 화염을 가하지 않은 상태의 가공송전선에 전류를 인가하게 되면 인가 전류의 세기에 따라 온도가 변하게 된다. 즉 인가 전류가 증가하면 온도 역시 증가하는 경향을 보이게 된다. 하지만 화염 접촉점과의 거리가 100 cm 이내인 경우, 산불에 노출되었을 때 산불에 의한 영향 때문에 전류에 의한 영향은 발견되지 않았다. 따라서 세기가 다른 3가지 전류에 대한 온도는 거의 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 화염 접촉점과의 거리가 100 cm이내에서는 전선에서 전류에 의한 발생하는 열이 산불에 노출되었을 때 화염에 의해 발생하는 열에 비해 거의 무시될 정도로 적다는 의미로 판단된다.

화염 접촉점과의 거리가 100 cm를 넘어서게 되면, 산불에 의한 영향이 급격하게 약해진다. 따라서 전류에 의한 온도 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

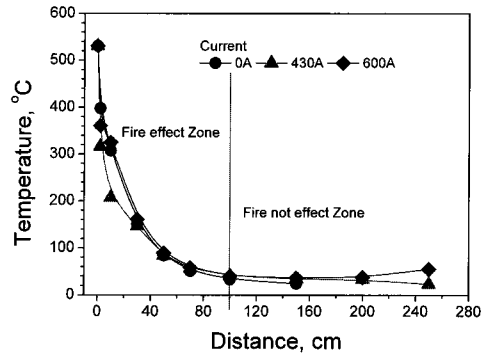


그림 4. 거리에 따른 최고 온도 거동(전류비교).
Fig. 4. Maximum temperature behavior according to distance(different currents).

그림 5는 거리에 인가장력에 차별성을 두었을 때, 화염과의 거리에 따른 최고 온도를 비교한 것이다.

같은 운영조건에서 장력만을 다르게 하여 실험했을 때 모든 측정지점에서 온도는 장력에 상관없이 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 따라서 산불에 노출되었을 때 장력은 온도에 영향을 미치는 요인이 아니라는 결과를 얻을 수 있었다.

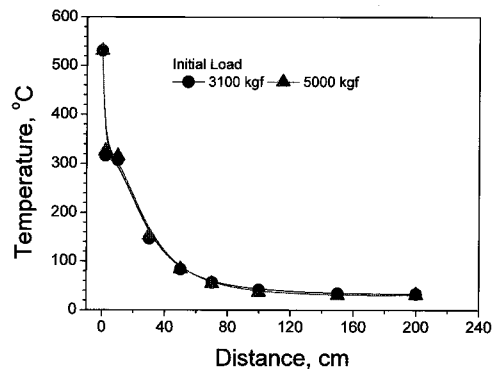


그림 5. 거리에 따른 최고 온도 거동(장력비교).
Fig. 5. Maximum temperature behavior according to distance(different load).

그림 6은 운영중인 상태에서 산불에 노출되었던 ACSR 가공송전선 내부의 온도 구배 결과이다. 측정위치는 화염에서 2 cm 이격되어진 지점이었다.

온도측정 위치는 산불에 노출되는 방향을 하단(bottom), 그 반대 쪽을 상단(Top), 그리고 중간을 옆(middle)으로 가정하였다.

이 때 온도는 불꽃과 접촉하는 아래 부분이 가장 높게 나왔고 그 다음이 위 부분, 그리고 옆 부분이 가장 온도로 차등적으로 나타났다.

이러한 결과에 따른다면, 가공송전선은 산불에 노출되는 방향에 따라 그 피해 정도가 달라지므로 산불에 노출된 가공송전선의 건전성을 확인하기 위해서는 아래부분, 위 부분, 옆부분의 순서로 건전성을 따로 확인해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

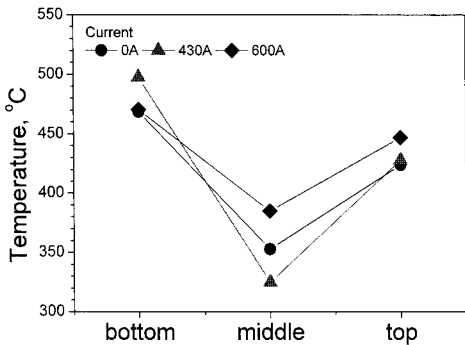


그림 6. ACSR 내부 온도 구배.
Fig. 6. Temperature behavior of inner ACSR.

그림 6의 내부 온도 구배 결과의 첫 번째 원인은 열의 이동 방향이다. 산불에 의한 열은 바닥에서 위로 이동한다. 따라서 직접적으로 옆에 영향을 받는 아래 부분이 가장 온도가 높아진다.

두 번째 원인으로 가공송전선 내부의 그리스 연소가 있다. 그림 7에서 나타낸 것과 같이 약 500 °C의 산불에 가공송전선이 노출되게 되면 내부의 그리스가 연소 하면서 위(top)부분에 산불과는 별도의 불꽃이 형성된다. 따라서 위 부분은 산불에 의한 열과 그리스 연소에 의한 열에 의해 복합적인 열화가 발생하게 된다. 따라서 단지 산불에 의해서 간접적으로 영향을 받는 옆(middle) 부분보다 더 높은 온도가 발생하는 것으로 판단되었다.

그림 7은 이러한 2가지 원인인 열의 이동방향과 그리스 연소를 나타낸 것이다.

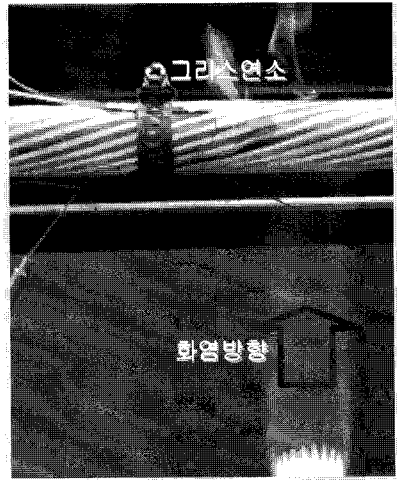


그림 7. 인가 전류에 따른 인장하중 변화.
Fig. 7. Tensile load according to current.

3.2 장력 거동 결과

그림 8은 초기장력 5000 kgf가 걸려있는 가공송전선이 산불에 노출되었을 때 나타나는 장력 변화를 전류 인가 단계, 산불 노출 단계, 산불 제거 후 장력 회복 단계 그리고 전류 재인가 단계에 따라 나타낸 결과이다.

초기 장력을 100 %로 가정하였을 때, 장력 변화는 연속허용전류의 70 %인 600 A 전류 인가 후 74.2 %까지 감소하였고, 전류가 유지되는 상태에서 산불에 노출된 후 43.2 %까지 감소하였다. 산불과 전류가 제거 된 후 냉각 거동에서 장력은 80.6 %까지 회복되었다. 따라서 산불에 노출됨으로 인해, 약 20 %의 영구 장력 감소가 발생하는 결과를 얻을 수 있었다. 산불에 노출된 가공송전선에 다시 동일 전류를 인가하였을 때 초기 장력의 57.6 %까지 감소하였다. 이 수치는 산불에 노출되기 전 전류 인가에 의한 장력 감소 수치인 74.2 %와 비교 할 때, 산불 노출 후 발생되어진 20 %의 장력 영구 손실과 거의 유사한 약 18 %의 추가적인 장력 저하로 볼 수 있다.

따라서 산불에 노출된 후 발생한 장력 감소는 산불 제거 후 충분한 회복을 거치고 나서 재사용을 하더라도 그대로 유지된다는 결론을 얻을 수 있었다. 이러한 장력 거동 결과는 가공송전선의 이도에 직접적인 영향을 미치지 되므로, 산불에 노출되어진 후 이도는 물론 경간이나 가공송전선의 종류에 따라 차이는 있겠지만 초기 설계되어진 이도와 상당한 차이를 가지게 된다고 판단된다.

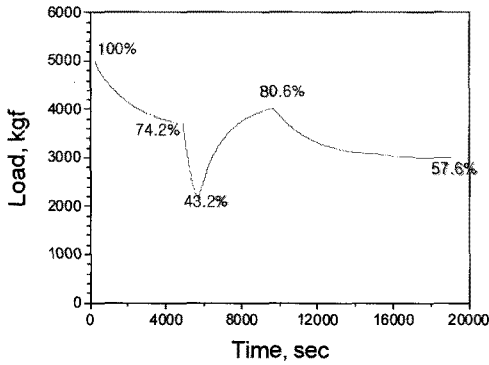


그림 8. 장력 변화 거동.
Fig. 8. Temperature behavior of inner ACSR.

3.3 이도 거동 결과

그림 9는 그림 8의 장력 변화를 이도로 계산한 것이다. 경간은 300 m로 가정하였다.

이도는 가공송전선의 지상고와 직접적인 관련이 있는 항목으로 가공송전선 관리의 아주 중요한 항목이다. 산불에 노출되기 전과 산불에 노출된 후 이도는 약 1.5 m의 차이를 나타내었다. 즉 산불 노출에 의해 발생한 약 20 %의 영구장력감소에 의해 땅과 가공송전선의 거리가 1.5 m 더 가까워진다는 의미이다. 따라서 지상의 다른 이물질과의 접촉에 의한 합선이나 손상에 더욱 쉽게 노출될 수 있다.

이것은 가공송전선이 산불에 노출될 경우, 이도가 최초 설계와 달라져 그 관리가 기준이하에서 유지될 수도 있다는 것을 의미한다.

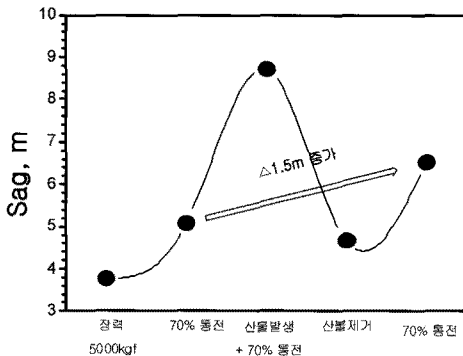


그림 9. 이도 변화 거동.
Fig. 9. Sag behavior of inner ACSR.

3.4 인장하중 거동 결과

그림 10은 약 500 °C의 산불에 노출되어진 가공송전선의 인장하중 변화를 인가전류에 따라 확인한 것이다. 인장하중은 전선이 파단될 때까지의 하중변화 중 최대하중을 말한다.

장력이 3100 kgf 인 경우 인가전류 0 ~ 600 A에 대해 인장하중은 전선전선 인장 하중의 약 61.6 ~ 63.4 %로 나타났다. 그리고 장력이 5000 kgf인 경우 인장하중은 전선 전선 인장하중의 약 75.2 ~ 78.4 %로 나타났다.

인가전류에 따라서는 인장하중은 약 3 % 정도의 차이를 보이기는 했지만, 이러한 결과는 실험의 오차범위를 고려한다면 거의 차이가 없는 것으로 판단된다.

하지만 장력이 3100 kgf인 경우와 5000 kgf인 경우를 비교하면, 인장하중은 약 15 %정도 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 초기 장력이 약 2000 kgf 정도 높은 경우 인장하중은 약 15 %정도 더 높다고 볼 수 있다.

결과적으로 초기장력은 산불에 노출될 경우 인장하중에 정비례적인 영향을 미치며 이러한 변화는 가공송전선의 교체시기에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

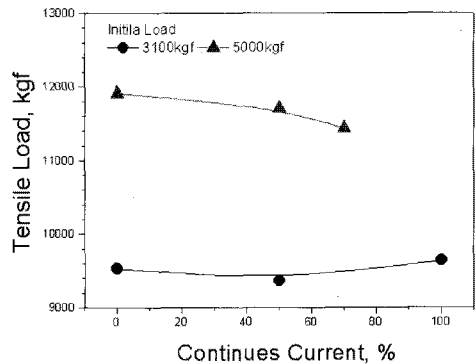


그림 10. 인가 전류에 따른 인장하중 변화.
Fig. 10. Tensile load according to current.

앞의 인장하중에 대한 결과를 이용하여 산불에 노출되어진 가공송전선의 교체시기에 대해서 살펴보면 초기하중에 따라 상당히 다른 결과를 얻을 수 있다.

가공송전선의 교체관련 내용 중 인장하중에 대한 국내 규정이 없으므로, 외국의 사례를 찾아보면

캐나다와 영국의 경우 건전 전선 인장하중의 20%와 30%가 감소한 시점을 교체시기로 규정하고 있다.

인장하중 30%를 기준으로 하는 영국의 경우를 예로 들어 산불에 노출되어진 가공송전선의 교체 시기를 판단한다면, 초기장력 3100 kgf에서 산불에 노출된 경우의 인장하중은 건전 전선 인장하중의 약 37 ~ 39%가 감소하였으므로 수명이 다하여 교체해야하는 상태로 판단된다. 하지만 초기하중 5000 kgf에서 산불에 노출된 경우는, 인장하중 감소율이 약 22 ~ 25%이므로 30%보다 적다. 따라서 아직 건전한 상태를 유지하고 있으며 교체할 필요성이 없다는 결론을 얻을 수 있다.

가공송전선이 산불에 노출될 경우, 경간의 하중이 다르다면 동일한 조건의 산불에 노출되더라도 그 피해는 경간에 따라 모두 달라질 것이라 예상되어진다. 그러므로 산불에 의한 피해를 복구하기 위해 가공송전선의 건전성을 판단하는 조사도 각 경간마다 따로 시행되어야 한다고 판단된다.

4. 결 론

1. 산불에 노출되어진 가공송전선의 끝단과의 거리 100 cm를 기준으로 산불에 의한 영향 구간과 산불에 의해 영향을 받지 않는 구간으로 나뉘어졌다. 산불에 의한 영향 구간에서는 산불 열량이 너무 많아 인가 전류에 의한 온도 영향은 나타나지 않았었다. 또한 온도거동은 가설장력에 대해 영향은 받지 않았었다.

전선 내부 온도 구배는 화염과 접촉하는 바닥부분이 가장 온도가 높았고, 그 다음 그리스 연소에 의해 추가적인 화염이 발생하는 위 부분이 높았으며, 옆 부분이 가장 온도가 낮았다.

2. 장력은 전체적으로 4단계의 변화거동으로 구분되었으며, 약 500 °C의 산불 노출에 인해 초기장력의 20%정도가 영구 손실되는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 장력 손실은 산불이 제거된 후 재사용 시에도 유지되었다.

장력 손실에 따라 이도 역시 경간 300 m 구간에서 약 1.5 m 정도 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 산불에 노출된 경우, 인가전류는 인장하중에 별다른 영향을 미치지 않았지만, 초기 장력은 인장하중에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 예

를 들어, 초기 장력이 약 2000 kgf 차이가 낮을 때 인장하중은 약 15%정도 차이가 발생하였다. 이러한 결과는 산불에 노출되어진 가공송전선의 교체 시기에 직접적인 영향을 미치므로 실제 산불에 노출된 경우, 가공송전선의 건전성은 초기하중이 다른 각 경간마다 각각 확인해야 한다는 의미를 가진다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 김상수, 한세원, 김진한, "산불에 의한 가공송전선의 열화거동", 전기전자재료학회논문지, 20권, 12호, p. 1105, 2007.
- [2] 김상수, 김병걸, 장태인, 장지원, 이동일, 민병욱, "환경적 요인에 의한 노후 가공송전선의 특성변화", 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 287, 2006.
- [3] 김병걸, 김상수, 박주환, "고강도 저손실 가공송전선 개발-기계적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1152, 2005.
- [4] 김병걸, 김상수, 박주환, "고강도 저손실 가공송전선 개발-전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 12호, p. 1159, 2005.
- [5] 김상수, 김병걸, 현석규, 이동일, 민병욱, "가공송전선의 열적거동과 전류 및 외기온도의 영향", 전기전자재료학회논문지, 19권, 5호, p. 486, 2006.
- [6] 김병걸, 김상수, "STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에 따른 기계적 물성 변화", 한국전기전자재료학회 2004학계학술대회논문집, p. 1258, 2004.
- [7] P. H. Schwabe and D. Pike, "The Measurement of Corrosion in Overhead Power line", ANTI-Corrosion, 1988.
- [8] 김영달, "화염에 의한 ACSR 송전선의 표면 특성에 관한 연구", 조명·전기설비학회지, 17권, 6호, p. 173, 2003.
- [9] 한국전기공사협회, "산악지 송전선로의 지상고 유지관리공법 연구", 전기설비기술기준 143조, 148조, 2003.
- [10] 김병걸, 김상수, 한세원, 김진한, "산불에 의한 가공송전선의 열화거동", 전기전자재료학회논문지, 20권, 12호, p. 1105, 2007.