

산불에 의한 가공 송전선로의 열화와 그 대책

김성덕 · 심재명 <한밭대학교 전기·전자공학부 교수>
 김영달 <한밭대학교 전기·전자공학부>
 김지환 <전력연구원 전력계통연구실 선임연구원>
 장태인 <전력연구원 전력계통연구실 일반연구원>
 박인욱 <한국전력공사 송변전처 송전운동팀 부장>

1. 서 론

국내 송전선로의 대부분 가공전선으로, 전선의 제조, 제조방법 및 가설상태와 노출환경 등 다양한 요소들의 상호작용에 의하여 도체의 열화(deterioration)가 진행된다[1,2]. 가공전선은 장기간 대기 중에 노출되어 있으므로 주로 대기부식(atmospheric corrosion)에 의하여 열화되나, 연선 사이에 습기가 체류하므로써 발생하는 간극부식(crevice corrosion), 도체의 장력과 진동에 의해 진행되는 피로부식(fatigue corrosion) 등에 의해서도 열화된다[3,4]. 전력선은 ACSR(Aluminum Stranded Conductors Steel Reinforced), ACSR-OC(ACSR Outdoor Cross-linked Polyethylene Insulated Wires), 알루미늄 연선 또는 동연선 등 여러 가지 종류들이 사용되나, 송전선로에는 주로 ACSR이 사용된다. ACSR은 동 및 알루미늄 연선에 비하여 아연도금 강연선과 경알루미늄 연선을 꼬아 조합하므로 대기부식뿐만 아니라 서로 다른 금속의 접촉에 의한 전해부식(galvanic corrosion)[5]이 문제가 된다. 이 때, 도체의 열화는 경년에 의해 평균적으로 나타나는 전면부식(global corrosion)과 재질의 일부분이 취약해지는 국부부식(local corrosion)으로 구분된다.

가공 송전선은 산간지역에 가설되어 있는 경우가 많아 산불이 발생할 경우, 화염에 직접 노출되었거나 인근에 있었던 도체는 높은 열과 습도, 연기와 분진 등에 의하여 기계적 특성이 변화된다. 또한, 도체는 재료 구조와 전기적 성질도 변화된다. 화염 온도가 높으면 강선 표면의 방식재료인 아연도금 층이 녹아 내리므로써 강선의 대기부식을 촉진시킬 뿐만 아니라 아연 층이 소실된 후 강과 알루미늄 소선이 맞닿아 전해부식이 발생되어 알루미늄 소선이 부식된다. 결과적으로, 화염에 의해 파생될 각종 부식형태가 전선의 전체 인장강도를 감소시킬 수 있기 때문에 전선의 유효수명(useful life)을 단축시키게 된다. 따라서, 산불 발생 빈도가 증가하고 산업발전과 더불어 송전망이 증설될 것이므로, 선로의 안정적인 운영을 위하여 산불에 의한 전력설비의 열화 상태를 분석하여 대책을 수립할 필요가 있다.

송전선의 교체수명(refurbishment life)은 경년(elapsed year)으로 정하거나, 초기인장하중이나 정격인장하중(rated tension load)에 대한 인장감소율로서 정하는 것이 일반적이다[6,7]. 그러나, 가설지역의 환경요인이나 전선 규격, 공급전력 등에 의하여 열화상태가 복잡하게 진행되므로 경년만으로 도체수명을 산정하기에는 불충분할 뿐만 아니라, 산불과 같은 화

재에 의하여 도체의 기계적 특성이 변화될 경우에는 도체수명은 현저하게 감소될 것으로 추측된다. 선로는 정기 또는 수시점검 시, 육안검사로 극심한 열화 상태를 진단할 수 있으나 검사결과와 정확도나 객관성을 확보할 수 없다. 이와 같은 문제의 대안으로서 10 수년 전부터 비파괴검사법(nondestructive test: NDT)[8,9]을 적용하는 방안이 연구되기 시작하였다. 그러나, 산불의 영향을 받은 도체에 대하여 재료 및 인장특성의 분석이나 탐상은 국내는 물론 국외에서조차 연구된 바가 없다. 따라서, 안정한 전력을 공급하기 위해서는 산불로 인하여 변화되는 ACSR 도체의 특성을 규명할 필요가 있다.

일반적으로 산불의 정확한 모델을 알 수 있어야 산불도체(blazed conductor)의 특성을 해석할 수 있다. 그렇지만, 송전선로에 적용하는 산불모형이 구현된 바 없으며 또한, 산불에 노출되었던 시료의 특성이 분석된 적이 없다. 따라서, 직접적인 방법으로는 산불에 의한 열화특성을 분석하기 불가능하므로 본 연구에서는 건전전선에 개스 램프로 일정 시간 간격으로 화염을 가하는 인공화염(artificial fire) 실험을 토대로 ACSR 도체의 기계적인 특성을 고찰하는 간접적인 분석방법을 이용하였다[10]. 이 때 얻은 결과를 토대로 송전선에 미치는 산불 영향을 추정하였다. 또한, 산불에 의한 정전사고 사례를 소개하고 향후에 열화특성 해석, 탐상법 개발방향, 선로운용 및 교체 기준 등에 대한 방안을 검토하였다.

2. ACSR의 열화

2.1 ACSR의 구조와 부식

ACSR 도체는 그림 1에서와 같이 기계적 인장을 담당하는 아연도금 강연선과 전류를 공급하는 알루미늄 연선 층으로 조합되어 있다. 공기 중에 노출되어 있는 금속 대부분에는 대기부식이 발생된다. 대기 환경이 금속의 부식에 영향을 주는 것은 주로 습도와 산소성분이며, 아황산가스, 염분 및 질소 등도 부

식의 원인이다. 이러한 대기 중의 습기나 공기 중의 산소와 금속사이에 화학반응을 일으켜 황산화합물, 염화합물 및 질소화합물 등을 생성한다. 염분이나 아황산가스 등에 의한 부식생성물은 대기중의 먼지와 함께 ACSR의 연선 사이에 부착되기 때문에 이들이 도전성 물질로 작용하여 부식속도를 증가시킨다.

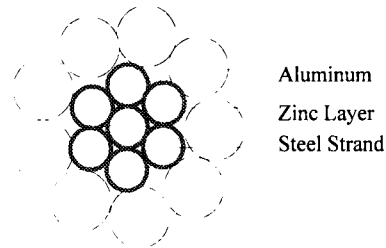
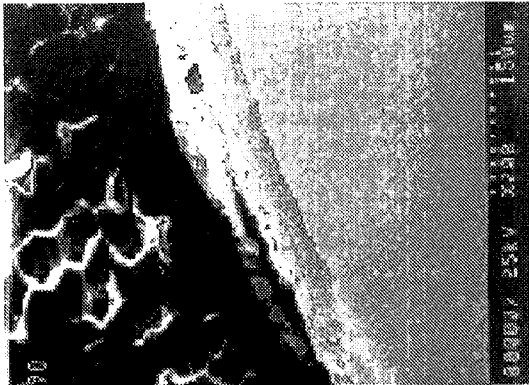


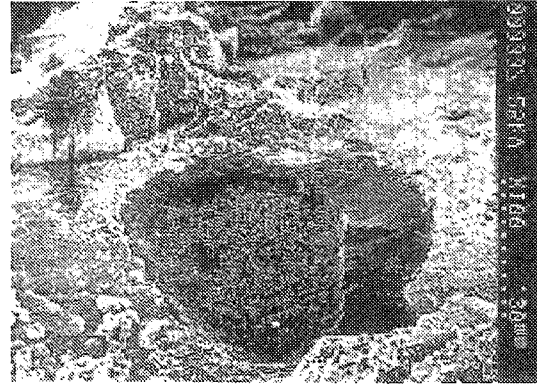
그림 1. ACSR 도체의 구조

청정지역(rural area)에서 ACSR의 부식은 서서히 진행되지만, 해안지역(marine area)에서는 염분이, 공업지역(industrial area)에서는 아황산 및 질소가스 등이 부식을 촉진한다. 공업지역에서는 주로 알루미늄 소선이, 해안지역에서는 강선 부식이 문제이나, ACSR의 구조상 부식구조를 구분하여 해석하기 곤란하다. 공업지역의 대기 중에는 아황산가스, 질소산화물 및 분진 등이 다량으로 포함되어 있어서, 이러한 지역에서 ACSR 부식은 대기부식이 지배적이다. 산불이 난 지역의 도체는 탄화물이 다량 부착되어 이것이 습기와 결합하여 전해질이 형성될 것으로 추측되므로 열화가 급속하게 진행될 것이다.

아연도금 강선과 알루미늄 소선이 닿아 있는 부분은 3종의 금속 즉, 철, 아연 그리고 알루미늄이 접촉되어 있다. 이러한 부분에 염분이나 아황산가스 등에 의한 부식생성물과 먼지 등이 쌓이게 된다. 이 부착물 사이에 수분이 침투되면 이것이 전해질 용액으로 작용하게 되어 국부전지를 형성한다. 따라서, 서로 다른 금속 사이에 이온화 현상이 발생하고 이온화 경향이 큰 Zn, Al, Fe의 순서로 전해부식이 진행된다. 알루미늄과 아연이 접촉되어 있는 부분의 금속 전위차에 의한 전해부식에 의해 아연이 1차적으로

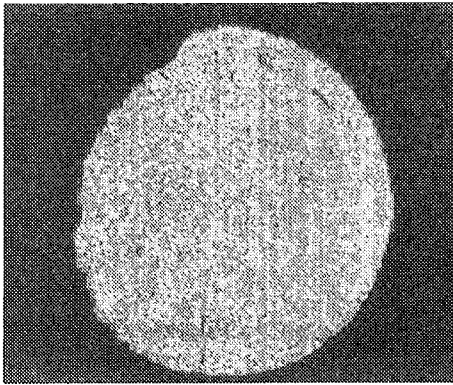


(a) Zinc loss

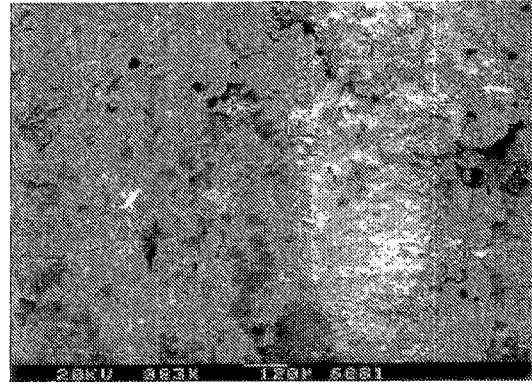


(b) Surface

그림 2. 강 소선의 전해부식



(a) Galvanic corrosion



(b) Surface

그림 3. 알루미늄 연선 내층의 전해부식

부식된다. 알루미늄과 강심이 접촉되면 알루미늄이 부식되고 강심도 대기에 노출되는 형태가 되어 녹이 발생하기도 한다. 전해부식이 어느 정도 진행되면 간선과 접촉되어 있는 알루미늄 소선 부분의 단면적이 감소하므로 선로의 전력손실이 증가하게 된다.

산불에 의하여 아연 층이 용융되어 이탈되면 전해 부식은 가속화될 것이며, 특히, 철이 공기 중의 수분과 결합하기 쉬운 구조가 되기 때문에, 경우에 따라 내부 강선이 극심하게 부식될 수도 있다. 이러한 부분은 육안으로 확인할 수 없으므로 산불도체는 인장이 서서히 감소되어 허용장력의 최저치에 이르러 단선되므로써 전력공급의 치명적인 장애를 이룰 수

있다.

2.2 알루미늄과 강 연선의 부식

ACSR 외층의 알루미늄 연선은 대기 중에 직접 노출되어 있다. 알루미늄은 산소와 친화력이 강한 금속이지만, 소선 표면에 산화알루미늄 피막이 형성되기 때문에 공기 중에서는 높은 부식저항을 갖는다. 따라서, ACSR 도체가 가설될 초기에는 알루미늄 연선이 급속하게 부식된다. 그렇지만, 산화 알루미늄이 표면에 형성된 후에는 부식속도는 시간에 따라 감소하므로 알루미늄 소선은 부식에 대하여 강하다[5].

강선 표면의 아연 도금층은, 공기나 습기에 직접

노출되어 산소 이온과 화학적으로 결합되므로 ACSR 알루미늄 연선 층의 부식속도를 완화시키는 역할을 한다. 그림 2(a)나 (b)처럼 아연층이 부식되기 시작하면, 내층의 알루미늄 소선은 강연선과 직접 접촉하여 전해부식이 진행된다. 특히, 해안가에서는 염분에 의하여 강선 표면에 녹이 발생하기도 한다. 이러한 녹은 산불에 의해 강선이 열화된 후에는 급속하게 진행될 것으로 추측된다. 그 결과, 그림 3(a)와 같이 내층의 알루미늄 소선의 단면적이 감소되기도 한다. 이때, 도체의 전기적 저항이 증가되어 이 부분에 높은 열이 발생한다. 따라서, 도체 부식은 더욱 가속되어 기계적 인장도 현저하게 감소된다. 이러한 국부부식은 결국 전력선의 고장이나 단선을 유발하기도 한다.

3. 산불과 도체의 수명

3.1 산불과 그 성질

산불은 낙엽, 초류 및 임목 등이 연소되는 화재로써 사람에게 의한 실화, 방화 및 낙뢰 등으로 인하여 발생된 불씨가 산림내의 가연 물질을 연소시키는 것이다. 열이 착화점 또는 인화점에 달하면 연료에 불이 붙어 연소되면서 보다 높은 열을 생성하기도 한다. 공기 중에는 약 20%의 산소가 포함되어 있어 산소의 작용으로 연료와 열을 결합시켜 산화작용을 촉진시킨다. 이러한 산불의 연소작용은 연료, 지형 및 기상 등의 환경인자에 영향을 받는데 이 인자들은 자연상태에서 산불의 강도, 진행방향 및 진행속도 등을 결정한다.

도체의 열화 상태는, 산불이 진행되는 동안과 진화된 직후를 1차 시기, 그 이후부터 도체가 교체될 때까지를 2차 시기로 나누어 고찰할 필요가 있다. 1차 시기에 산불은 주로 습기, 먼지, 연기와 화염을 동반하고 높은 열을 수반한다. 물론, 산불은 산림상태, 수목종류, 지층구조, 기후와 지형 등 요소들의 상호작용에 의하여 복잡한 비선형시스템 특성을 나타낸다. 따라서, 구현하기 간단한 산불 모델을 얻을 수

없고 특성들을 객관화하기가 쉽지 않다. 그렇지만, 산불은 항상 고온을 수반하기 때문에 산 등성으로 진행하면서 이 지역을 지나는 송전선 도체들 사이의 공기절연을 파괴시켜 섬락이나 지락을 초래할 수 있다. 특히, 산 등성이에는 수목과 도체 사이의 높이가 10[m] 이하인 경우도 있어, 이런 지역에서는 모든 상도체가 화염에 상당기간 감싸져 있을 수도 있다. 이때, 도체 내부의 그리스 층은 모두 연소해 버릴 뿐만 아니라 용융점이 비교적 낮은 아연 도금층이 녹아 버리기도 한다. 또한, 공기 절연층의 파괴로 인하여 외층 알루미늄 연선이 상도체 사이의 섬락에 의하여 국부적으로 손상되기도 한다.

한편, 화염도체는 1차적인 열화도 중요하나 부식의 가속성이 나타나는 2차 시기의 관찰이 더욱 중요할 수 있다. 1차 시기에 그리스 소멸, 아연 층의 소손은 도체의 수명을 적어도 5~10년 정도 단축시키는 원인이 된다[8]. 그러나, 2차 시기에는 도체 표면에 부착된 탄화물이 공기 중에 수분과 결합하여 전해질을 형성하므로써 부식을 촉진하게 된다. 물론, ACSR의 소성변화, 재질변형, 기계적 열화나 전기적 특성도 변화되기 때문에 도체수명은 급속하게 저하될 것으로 추측된다.

3.2 도체수명과 산불

일반적으로 송전선로에서 도체수명이란 가설년도로부터 전력공급의 안정성이 저하되었다고 판정되는 시점까지의 기간으로 정의하며, 유효수명(useful life) 또는 교체수명[6,7]이라 한다. 따라서, 도체수명은 기계적 인장손실과 밀접한 관계가 있다. 도체의 인장 특성은 경년에 따라 그림 4와 같이 전형적인 지수적 감쇠곡선으로 나타난다[5~7]. 이 때, y_u 를 교체수명이라 하고 T_u 를 교체 시 최저인장하중을 나타낸다. 수명을 판단하는 기준은 전력회사마다 다르지만 경년 y_u 로 정하는 경우와 T_u 로 정하여 교체하는 2가지 유형이 있다.

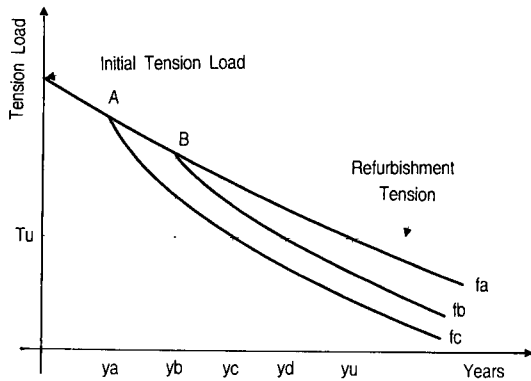


그림 4. 도체의 유효수명곡선

도체의 일반적인 수명곡선이 f_a 와 같이 주어지고 시점 y_a (A) 및 y_b (B)에서 산불이 발생하였다면, 산불 발생 후의 도체는 곡선 f_b 및 f_c 와 같이 인장감소율이 증가될 것으로 추정된다. 결국, 도체의 유효수명은 y_c 와 y_d 가 되어 정상적인 교체수명 y_u 보다 현저하게 감소된다.

국내 송전선로는 과거 수십 년 동안 수많은 산불에 노출되어 왔고 2000년 대에 이르러서는 대부분의 송전선로들이 한계수명인 50년 정도의 선로들이 증가되므로써, 과거 대수롭지 않게 생각했던 산불의 영향이 도체수명에 심각한 결과로 나타날 것이 우려된다. 그렇지만, 현재까지 산불로 인한 도체의 열화나 인장감소율 또는 수명곡선에 대한 연구가 국내는 물론 국외에서도 체계적으로 이루어진 바가 없다. 따라서, 선로를 안정하게 운용하기 위하여 이 분야에 대한 연구가 절실히 요구된다.

4. 고장 발생 사례

4.1 산불발생 선로

국내의 송전선로에는 크고 작은 산불이 매년 수십 건씩 발생한다. 이러한 산불 중 일부는 섬락이나 정전사고 등을 초래하여 전력설비의 운용에 지장을 주고 있다. 산불 모델에 대한 객관적인 기준이 없기 때

문에 분석 결과들은 일반적인 성질을 추측하는데 유용하다. 물론, 산불 후의 도체들에 대한 관측결과나 분석 데이터도 없기 때문에, 이 장에서의 분석결과는 추후 산불에 의한 도체 열화를 규명하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 따라서, 여기에서는 산불이 발생한 선로의 분석결과만을 간단히 소개하였다. 2000년 4월, 신포항전력소 관내 345[kV] 선로 중 일부 지역에 산불이 발생하여 도체 상간의 섬락에 의한 선로 고장이 발생하였다. 산불지역의 송전선로는 ACSR 480[mm²] 도체이고 4도체 2회선이며 1981년 1월에 가설된 것이었다.

4.2 선로 및 도체검사

도체가 가설된 곳은 청정지역으로 수십 년된 잡목으로 우거져 있어 산등성이에는 수목과 C 상 도체 사이의 거리가 20 [m] 미만인 지역의 도체가 산불에 심하게 영향을 받았다. 도체의 경년은 20년으로 외층 알루미늄 연선은 이미 회백색으로 변해 있었으며, 산불의 영향을 직접 받은 전선은 그을림 흔적이 많이 나타나고 있었고 탄화물은 도체 하단부에 집중되어 있었다. 이와 같은 현상은 산불이 발화되어 산등성으로 진행되는 동안에 낙엽, 수목 등이 연소한 재가 상승하여 도체에 부착되었다가 빗물에 의해 상당은 씻겨나가고 하단에 모인 것으로 추정된다.

도체 중 빗살무늬처럼 생긴 국부결함이 발견되었는데, 산불 발생 중 습기에 의해 상하도체 사이의 공기 절연이 파괴되면서 나타난 아크 흔적으로 보인다. 이 부분은 외층 알루미늄 소선 중 일부가 용융되었으며, 이는 강한 열에 의한 영향을 받은 것으로 추정된다. 화염의 영향을 상대적으로 적게 받은 철탑 부근의 도체는 외관상 산불 흔적을 발견할 수 없었다.

4.3 부식탐상기의 이용

전력연구원에서 개발되어 현장에서 시험 중인 부식탐상기(corrosion detector)[11]를 산불도체를 검사하는데 이용하였다. 이 탐상기는 실제 가설 상태에서

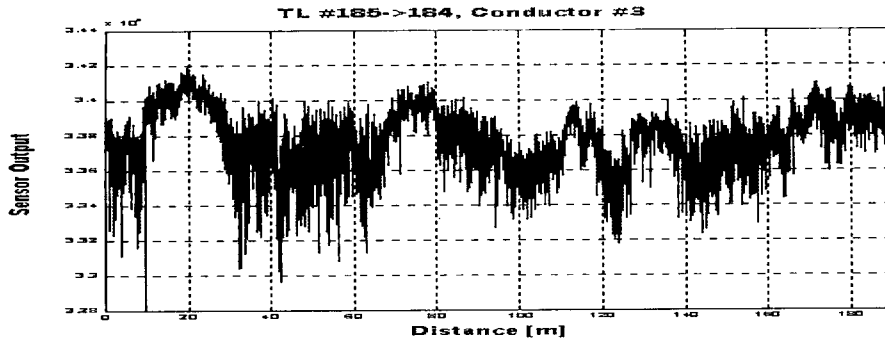


그림 5. 산불도체의 탐상 결과 예

도체 상을 주행하면서 국부부식과 같은 결함을 연속적으로 측정한다. 이것은 교체대상, 극심한 부식선로 및 단선사고 선로에 대한 현장 검사 용도로 개발된 것이다. 이 측정시스템으로 산불도체를 시험할 당시는 ACSR 480[mm]는 물론, 산불도체에 대한 기초적인 연구조차 이루어지지 않았으므로 측정결과로부터 산불도체의 열화상태를 판정하는 것은 불가능하였다. 그러나, 산불도체와 다른 도체 사이의 특성 변화는 비교할 가치가 있다고 판단되었다.

그림 5는 부식탐상기로 산불도체를 측정한 데이터의 한 예이다. 이 구간은 산등성이에 선로가 위치하고 도체가 산불과 가장 가까이 접한 곳이었다. 측정 결과, 0~10, 30~60 및 140~160[m] 사이는 심한 클릭성 파형이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 중에서 30~60과 140~160[m] 사이는 육안으로도 도체의 그을림이 많이 붙어 있었다. 이것은 산불 발생 시 화염에 강한 영향을 받은 결과로 추정된다.

일반적으로 약한 화염에 대해서는 기계적인 인장이 증가될 수 있으나 화염지속시간이 길거나 고온이면 내부 아연도금 층이 용융되고 외층 알루미늄도 산화되어 인장 저하가 급격하게 나타날 것으로 추정된다. 탐상기는 인장을 측정하는 것은 아니지만 출력과 인장 사이에는 약한 상관성이 있으므로 이들 구간에서는 산불로 인하여 도체의 평균인장은 증가된 것으로 판단된다. 또한, 그림 5와 같은 심한 클릭성

파형은 산불도체에서만 검출되었으며, 이 부분은 장기적으로 국부결함이 급속하게 진행될 것으로 보였다. 따라서, 도체 기계적인 국부 결함이 나타날 징후가 클 것으로 추측되므로 정기적인 검사가 필요하다고 판단되었다.

4.4 금속 특성의 열화[10]

산불에 직접적으로 노출되었던 ACSR 도체의 금속적, 기계적 또는 전기적 특성의 열화를 규명해야 향후 산불도체의 운용이나 교체에 대한 정보를 예측할 수 있다. 그렇지만, 산불에 대한 객관적인 모델이 없고 산불에 의한 ACSR 도체의 열화 분야를 연구한 적이 없다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이, 산불은 매우 복잡한 속성을 갖고 있다. 따라서, 본 연구진은 객관적인 결과를 추론하기 위하여 가스램프를 사용하여 3분 단위로 도체를 가열하는 인공화염 실험을 수행하였다.

그림 6은 사용되었던 도체와 9분 동안 가열된 시료에 대한 EDX(Energy Dispersion X-ray) 분석결과를 나타낸다. 노화도체(aged conductor)는 산화 알루미늄이 표면에 보이고 약간의 균열이 나타나고 있다. 가열도체의 표면에는 균열이 더욱 증가된 것을 확인할 수 있다. 따라서, 산불 진화 후에 도체는 수분이나 산소를 체류하기 좋은 구조가 되므로 부식은 더욱 촉진될 것으로 추측되었다.

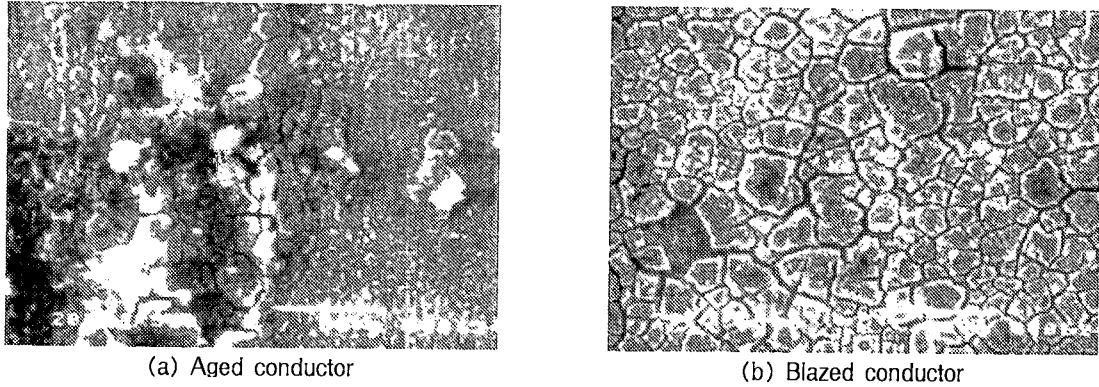


그림 6. 알루미늄 소선의 표면

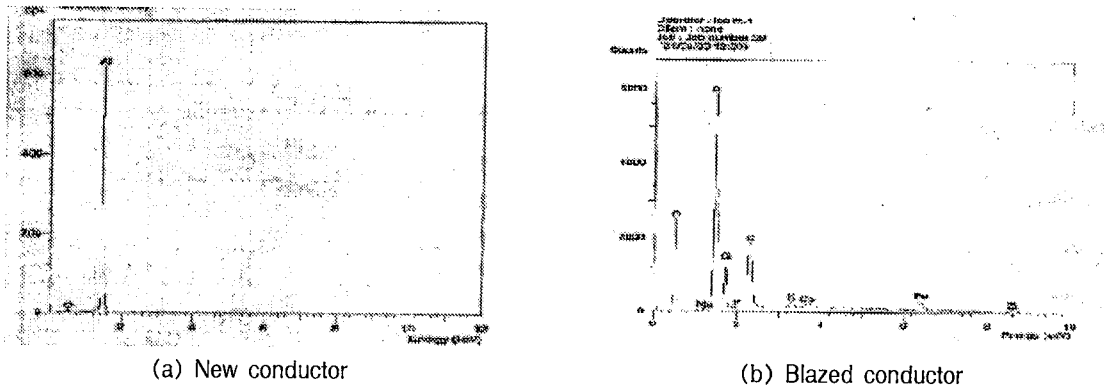


그림 7. 알루미늄 소선의 EDX 결과

그림 7은 가열도체의 알루미늄 소선의 EDX 결과를 나타낸다. 건전도체는 순수한 알루미늄으로 구성되어 있으나, 화염도체는 산화 알루미늄 이외에 Si, S, Fe 및 Zn이 표면에 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 도체 내부의 아연도금 층이 고온에 의하여 용융되면서 도체 표면으로 이탈된 것을 나타낸다. 결국, 화염에 의해서는 알루미늄 소선의 결보기 단면적이 변화되지 않은 것처럼 보이나 전기적 특성은 저하될 것으로 추측된다.

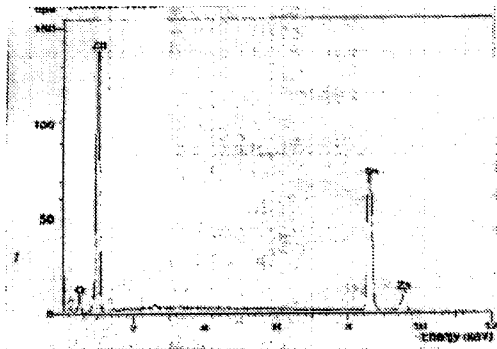
그림 8은 강선의 EDX 결과로 Zn 이외에 Al, C, Fe 및 S가 강선 표면에서 검출되었다. 강선의 순수 아연도금층은 20~30[μ m]이고 20[μ m] 정도의 아연합금 층이 형성된다. 가열된 아연도금 강선은 아연층 두께가 새 소선에 비하여 현저하게 증가된 것처럼 나타나기도 한다. 이것은 산소와 아연이 결합하여 산

화아연 층이 구성된 것이며 강선에서 이탈하기 쉬운 구조가 되기 때문이다. 이러한 산화아연도 전기적 특성과 부식저항을 저하시키는 원인일 수 있다. 더구나, 고열에 의하여 내층 알루미늄 소선의 일부가 용융될 것을 알 수 있으며 산화아연의 일부는 강선에서 이탈하여 외층 알루미늄으로 빠져 나간 것으로 추정된다.

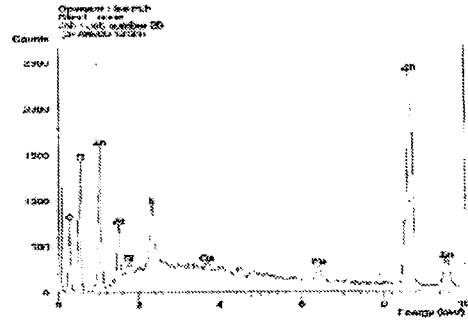
4.5 인장 특성의 열화[11]

ACSR 도체는 높은 열로 가열하면 기계적인 특성이나 전기적 성질이 변화될 수 있다. 4.4절에서와 건전도체에 대해 인공화염 실험을 수행한 후에 동일한 시료에 대하여 기계적 특성을 측정된 결과가 그림 9이다.

인장하중(tension load), 연신율(extension rate)과

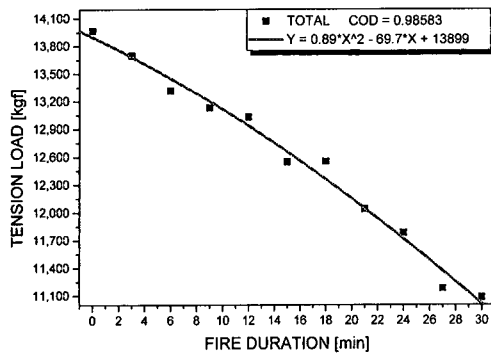


(a) New conductor

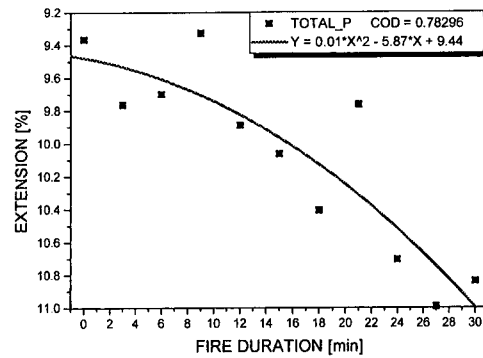


(b) Blazed conductor

그림 8. 강 소선의 EDX 결과



(a) Tension load



(b) Extension rate

그림 9. ACSR 480[mm] 도체의 기계적 특성

화염 지속시간 사이에는 결정계수(coefficient of determinant : COD)가 0.99 및 0.78으로 기계적 특성이 화염 지속시간과 사이에 아주 밀접한 상관성을 나타내고 있다. 가열특성 분석결과로부터 실험한 가열시간으로는 아연도 강선의 기계적인 인장은 거의 변화되지 않았으나, 알루미늄 소선은 가열시간의 증가에 따라 인장 특성이 현저하게 감소되는 것을 알 수 있었다. 특히 알루미늄 소선의 최외각 층은 화염이 직접 닿은 부분으로써 인장특성 변화가 뚜렷하게 나타났다.

ACSR의 인장하중은 주로 아연도 강선이 담당하고는 있지만 알루미늄의 인장강도가 현저히 떨어진다면 전체 인장하중도 감소하게 될 것이다. 또한 화염에 의하여 알루미늄 연선이 열화되어 장력이 떨어

지고 전선의 잔존수명도 감소될 것이다. 또한, 연선율이 가열시간에 따라 증가하고 있으므로 경간이 길어질수록 전선이 늘어짐이 증가되어 외층 알루미늄 연선과 내부 아연도 강연선 사이의 결합상태도 변화될 것이다. 이러한 결과도 수명을 단축시키는 원인이라 판단된다.

5. 열화상태의 검사와 도체의 교체기준

5.1 열화상태의 비파괴 검사

대부분의 전력회사들은 ACSR 전선을 일정기간 사용 후에 일괄적으로 교체하는 방법을 사용하고 있다. 그러나, 교체시기가 빠르면 안정성에 여유가 있는 선로를 교체하므로써 드는 경제적인 손실이 수반

표 1. 선로교체 시정 환산표

평가항목	배점	우 선 순 위 환 산 점 수					비 고
		50년초과	41~50년	31~40년	21~30년	11~20년	
노 후 도	50	50년초과	41~50년	31~40년	21~30년	11~20년	사용기간 1년당 1점
		50	40	30	20	10	
부 하 율	20	50%초과	41~50%	31~40%	21~30%	11~20%	부하율 1%당 0.4점
		20	16	12	8	4	
송전전압	10	345kV	154kV	66kV			
		10	8	6			
공급능력	5	4도체	2도체	단도체			
		5	3	1			
정전요인	15	단일계통	환상계통				
		15	10				
합 계	100						

되고, 교체시기가 너무 늦어 단선사고가 발생되면 전력회사는 물론 수용가에 더욱 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다[8]. 따라서 전선이력, 공급전력 및 전압 조건 등을 고려하여 적합한 전선교체시기를 결정해야 한다. 적정한 교체시기를 결정한다는 것은 선로의 특성 상, 기계적 안전을 여유를 판정하는 것과 같으며, 가장 좋은 방법이 운용되고 있는 도체의 열화상태를 직접 측정하는 것이다. 그 한 방법이 점퍼선(jumper wire)을 채취하여 4.4~4.5절과 유사한 재료 성분을 분석하거나 인장특성을 측정하여 관련도체의 기계적인 열화상태를 추정하는 것이다. 그렇지만, 일부 경간에 대하여만 샘플을 채취할 수밖에 없고, 분석결과 역시 전체 경간의 특성으로 대체하기에는 객관성을 갖기 곤란할 경우가 많다. 특히, 산불의 영향은 철탑의 점퍼선보다 도체경간의 최대이도 부근에서 가장 크기 때문에 점퍼선 채취시험은 효과적이지 못하다.

산불도체든 아니든 도체상태를 직접 검사하는 방법 중 한 예가, 비파괴검사법을 이용한 탐상기이다. 도체열화에 의해 발생한 결함은 비파괴검사인 와류 검사법[8]이나 적외선 카메라를 이용하여 검출할 수 있다. 이 때, 부식상태를 정량화하는 방법으로는 알

루미늄 소선의 단면적 변화를 검출하거나, 아연도금 강선의 아연부착량 측정하는 방식 또는 이들 2개 요소들을 동시에 검출하는 방법을 사용할 수 있다.

영국의 CERL(Central Electricity Research Laboratory)의 경우, 아연층의 손실이 전선수명에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 판단하여 아연손실 정도를 측정하는 검출기를 개발한 예가 있다[8], 일본은 동북전력과 후지쿠라 전선이 공동으로 알루미늄 소선의 부식을 검사하는 검출기를 개발하였다[9]. 한편, 캐나다의 Ontario Hydro 연구소는 사용 전선의 기계적 특성과 환경적 요인을 분석하고, 실험실과 현장 분석법을 개발함과 동시에 전선교체 위원회를 구성하여 전선로 관리, 보수, 교체에 관한 합리적인 운용을 도모하고 있다[6,7]. 우리나라에서도 5~6년 전부터 전력연구원을 주축으로 부식탐상기의 개발 및 도체 수명진단 방법을 연구한 바가 있다[11].

5.2 가공송전선 교체기준

송전선로의 교체기준은 각국이나 각 전력회사마다 다른 규정을 갖고 있다. 예컨대, 영국의 경우는 초기 인장하중의 30[%] 이하되는 때를 교체시기로 정하였고[8], 캐나다 Ontario Hydro에서는 정격인장하중의

20[%] 감소된 시기로 정하고 있다[7]. 이들 국가들은 인장하중 감소율로서 교체시기를 판정하지만, 우리나라나 일본은 주로 경년으로 정하여 사용하고 있다. 일본의 판서전력과 같은 회사에서는 가설 후, 35년을 교체주기로 사용하였다. 그렇지만, 전력회사나 국가간의 통일된 기준은 없다.

국내는 교체수명이 대략 30년으로 정해져 있었으나 급속한 산업화로 인한 선로 증설 등으로 이러한 기준이 엄격하게 적용되어 전선을 교체하거나 신설한 경우는 드물었다. 90년 대에 이르러 노후 선로가 증가되고 단선 사고들이 발생되면서 선로의 탐상, 유효수명 등에 대한 검토가 이루어졌다. 그 결과, 1999년 3월에 노후 전선의 교체기준이 한국전력공사의 송변전처에서 마련되었다[12]. 표 1은 교체를 위한 환산표를 나타낸다. 이 표에 따르면, ACSR의 한계수명을 50년으로 하여 경년과 부하율, 정전요인, 송전전압, 공급능력 등을 일정한 비율로 고려하여 기준점수 이상의 선로에 대하여 교체하도록 하였다.

표 1에서 전선의 교체수명을 결정하는 척도의 50[%]의 기중치를 두었다. 이 때, 부하율은 2회선 중 1회선 고장 시 부하 전체 한계점인 부하율 50[%] 기준으로 하고, 정전요인 지표는 환상계통과 단일계통에 따른 정전 가능성을 수치화 하였다. 또한, 전력계통의 중요도에 따라 송전전압도 고려하고, 4도체, 2도체, 단도체에 따라 전력수송능력도 한 요소로 선택하였다. 이 기준에 따르면, 일정 점수 이상인 경우에 교체가능 선로로 권장하고 있다. 또한, 한국전력공사에서는 국부부식을 측정하는 탐상기의 결과를 위의 사정안의 주요 척도로 적용할 예정이다. 이러한 기준들은 지금까지 경년 방식이나 인장감소를 등으로 교체시기를 결정하였던 기준안에 비하여 합리적인 기준으로 생각되며 근간 실용화할 수 있을 것으로 추측된다. 추후, 산불도체인 경우에 열화 특성을 분석하여 사정 지표로 이용할 수 있어야 하고 염해나 공해지역 등의 환경적인 지표가 보장되어야 한다.

6. 결 론

본 연구에서는 가공송전선으로 주로 이용되는 ACSR 도체의 산불열화에 대한 분석의 필요성과 기술적인 문제와 연구동향 등을 기술하였다. 노화된 ACSR의 부식현상을 규명하거나 국부부식 등을 탐상에 관한 연구는 물론, 우리나라와 같이 산불이 자주 발생되며 송전선로망 분포가 밀집된 형태로 되어 있어 이에 대한 분석 평가가 요구된다.

산불도체의 열화상태는 주로 2 시기로 나누어 분석되어야 한다. 1차 시기에는 불이 진행되는 동안의 섬락이나 고장 발생의 원인, 예방책과 산불 직후에 도체의 상태를 검사해야 하고, 2차 시기에는 진화된 직후로부터 산불도체의 유효수명 진단과 예측이 필요하다. 현재 산불에 대한 도체 열화에 대하여 연구된 바가 없기 때문에, 본 기사에서는 산불이 나서 섬락과 정전사고가 발생되었던 국내 송전선로를 검사 분석한 결과 일부를 제시하였다. 또한, 인공발화시험에 의한 재질분석 및 인장특성의 변화를 분석하였다. 여기서 다루었던 대부분의 결과들은 주로 산불의 1차시기의 진화 후의 열화도체들을 대상으로 하였다. 이 결과를 토대로 산불이 도체의 열화에 미치는 영향을 추정하였으며, 산불에 직접 노출되었던 경간의 도체에 대한 비파괴 검사의 필요성을 제시하였다. 특히, 산불과 도체의 유효수명과의 관계를 추정하였다. 다만, 여기서 주장한 일부 가설과 결과들의 객관성을 증명하려면 구체적인 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 배전관리과제 연구선집, 전력연구원, KRC-92D-001, 1992.
- [2] 대기오염이 전력설비에 미치는 영향 연구, 전력연구원, KRC-92C-S05, 1993.

- [3] T.E. Graedel, "Corrosion mechanism for zinc exposed to the atmosphere", J. of Electrochemical Society, Vol. 136, No. 4, pp. 193c~203c, 1989.
- [4] T.E. Graedel, "Corrosion mechanism for aluminum exposed to the atmosphere", J. of Electrochemical Society, Vol. 136, No. 4, pp. 204c~212c, 1989.
- [5] S. Sawada, "Corrosion & overhead aluminum conductors and the prevention of it", Smitomo Electric Technical Review, No.11, pp. 22~32, 1968.
- [6] D.G. Harvard et al., "Aged ACSR conductors-Part I : Testing procedures for conductors and line items", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 581~587, 1992.
- [7] D.G. Harvard et. al., "Aged ACSR conductors-Part II : Prediction of remaining life", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 588~595, 1992.
- [8] J. Sutton and K.G. Lewis, "The detection of internal corrosion in steel reinforced aluminum overhead power line conductors", U.K. Corrosion, pp.343~359, 1986.
- [9] J. Iinuma, et al., " Corrosion detector robot for overhead transmission lines", Fujikura Technical Review, No. 21, pp. 74~83, 1992.
- [10] 김영달, 김성덕, 심재명, 감지원, 정동화, "산불에 의한 가공송전선의 기계적 열화특성", 한국조명·전기설비 학회 논문집, Vol. 14, No. 6, pp. 26~34, 2000.
- [11] ACSR 전선 수명예측시스템 개발, 전력연구원, KTRP, TR.97 J02J, 2000.
- [12] 송전운용업무기준, 한국전력공사 송변전처, 1999.



심재명(沈在明)
1951년 11월 13일 생. 1976년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1979년 명지대학교 대학원 졸업(석사), 1992년 명지대학교 대학원 졸업(박사). 현재 한밭대학교 전기·전자공학부 교수.



김영달(金榮達)
1957년 11월 5일생. 1986년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 1990년. 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한밭대학교 전기·전자공학부.



강지원(姜地原)
1965년 1월 6일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1992년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



장태민(張太因)
1968년 12월 5일생. 1990년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1994년 한양대학교 대학원 졸업(석사). 1994년~1995년 (주)삼성SDS 공공개발팀 근무. 현재, 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 연구원.



민병욱(閔丙旭)
1955년 3월 3일생. 1988년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 1994년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한국전력공사 송변전처 송전운영팀 부장.

◇ 著者紹介 ◇



김성덕(金成德)
1951년 10월 1일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1990년~1991년 Australia National University 객원교수. 2000년 12월~현재 Kansas State University 객원교수, 현재 한밭대학교 전기·전자공학부 교수.