Surface and Component Analysis of Deteriorated ACSR due to a Flame

김 영 달* · 심 재 명** · 박 근 석*** · 정 윤 미§ · 김 재 광§§ · 변 정 섭§§§ · 이 대 동†
(Young-Dal Kim · Jae-Myung Shim · Keun-Seok Park · Yun-Mi Jeong · Jae-Kwang Kim · Jeong-Seop Byun · Dae-Dong Lee)

Abstract - Generally, the characteristics of the conductor that was affected by forest fire can be analyzed only when the forest fire is accurately modeled and its effect is identified. Few studies have been conducted with a forest fire model for transmission lines, and no results of the examination of the actual test specimens that were exposed to forest fire have been reported. As the deterioration characteristics of a forest fire are difficult to analyze in the actual field, an environment that was similar to that in the field was used in this study. Deterioration was deposited on a wire using an artificial flame experiment device, to analysis the temperature, surface and component characteristics. It seems that this analysis data in this study can be used as the basic data for the database that can be utilized to analyze wires exposed to forest fire and deterioration and to predict the ACSR wire refurbishment life.

Key Words : ACSR, Artificial flame, Deterioration, EDX, Fire ageing, Forest fire, SEM

1. 서 론

우리나라의 대부분 산간지역에 가설되어져 있는 가공송전선로에는 강심알루미늄연선(Aluminum Conductors Steel Reinforced : ACSR)이 주로 사용되며 산불이 발생할 경우 산불화염이나 그 열에 의해 높은 온도에서 열화현상이 발생될 것이다. 통계에 따르면 국내에서 한해 발생하는 산불은 약 6천여 건이며 송전선로에서 산불로 인한 고장발생률은 약 25%이다[1].

ACSR의 구조는 외층이 알루미늄 연선이고 내부는 아연이 도금된 강선으로 구성되어 있고[2] 아연은 내식성이 우수하고 알루미늄의 접촉에 의한 전해부식 속도도 작을 뿐만 아니라 내부강선이 대기 중에 산소나 수분과의 화학반응을 일정기간 차단하는 역할을 한다[3].

일반적으로 금속은 산불화염에 재료 구조가 변하여 기계적 인장이 감소될 뿐만 아니라 전기적 성질을 변화시켜 전선의 교체수명이 감소되어 전력손실을 증가시킨다[4]. 특히, 국부부식에 의하여 도체의 직경이 감소되어 단선이 되므로 정전이나 결상사고를 유발하게 될 것이다.

아울러 송전설비의 파손이 발생되면 선간단락 또는 지락 고장 등으로 인하여 전력 공급의 문제가 발생하게 되므로 산불 발생 시 전력 공급을 최대한 빨리 정상화시키는 것이 피해를 가장 줄이는 방안이 될 것이다[5].

이러한 연구를 수행함에 있어 산불화염에 열화된 ACSR 전선의 열화상태 판정과 정확한 교체 기준 등의 연구 실적이 아직 미흡한 실정이므로 이에 대한 연구가 절실히 요구되어지고 있다.

따라서 본 논문에서는 가설현장에서 직접적인 방법으로 산불화염에 의한 열화특성을 분석하기 어려우므로 현장과 유사한 조건을 가정하여 열화된 ACSR 410mm²에 대한 표면특성 및 성분분석을 수행하였다.

2. ACSR의 구조 및 실험방법

2.1 ACSR의 구조와 부식

실험에 사용된 ACSR 410mm²의 구조는 그림 1에서처럼 외층에 직경 4.5mm의 알루미늄 연선 26개와 내층에 직경 3.5mm의 아연도금 강선 7가닥으로 구성되어져 있고[6] 알루미늄 연선은 도전율이 높은 도체로 전력을 공급하는 역할을 담당하고 아연도금 강선(galvanized steel wires)은 기계적인 인장을 담당하고 있다[7].

그림 1에서처럼 ST-1은 아연도금강선의 steel core 부분, ST-2는 아연도금강선의 steel strand 부분, AL-1은 내층 알루미늄 연선, AL-2는 외층 알루미늄 연선을 의미한다.

아연도금 강선에 피막으로 덮여있던 아연 층이 열로 인해 녹아내리면 강선의 대기부식을 촉진시킬 뿐만 아니라 강선

* 정 회 원 : 한밭대학교 전기공학과 교수 · 공박
** 정 회 원 : 한밭대학교 전기공학과 교수 · 공박
*** 정 회 원 : 한국기계연구원 위촉기술원
§ 정 회 원 : 한밭대학교 전기공학과
§§ 준 회 원 : 한밭대학교 전기공학과 석사과정
§§§ 준 회 원 : 한밭대학교 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 정회원 : 한양대학교 전기공학과 박사과정

E-mail : ldd77@hanbat.ac.kr

접수일자 : 2011년 8월 4일

최종완료 : 2011년 9월 15일

과 알루미늄 소선이 맞닿은 부분에 전해부식이 발생하여 알루미늄 소선도 부식된다. 이와 같은 전해부식은 ACSR 도체의 내부에서 이루어지기 때문에 도체를 육안으로 검사하더라도 외형상 결함을 검출할 수 없다. 그렇지만, 내부에서 발생하는 전해부식으로 인하여 알루미늄 소선의 단면적이 점차 감소하게 될 것이다.

알루미늄과 아연이 접촉되어 있는 부분의 금속전위차에 의한 전위부식에 의해 아연이 1차적으로 소실되고 강선도 대기에 노출되는 형태가 있어 지수 함수적인 부식현상을 나타내게 된다. 결국 여러 가지 형태의 부식에 의해 전도율이 저하되어 단선에 의한 사고의 유발 가능성이 높아지게 된다[8].

결과적으로, 화염에 의해 파생된 각종 부식형태가 ACSR 전선을 구성하는 소선의 단면적의 감소 및 인장강도가 떨어지게 되어 전선의 수명이 단축되는 직접적인 원인으로 작용하며, 국부부식으로 인한 단선사고에 의해 전력손실이 증가하는 결과를 초래하게 된다[9].

그림 1 ACSR 410mm² 전선의 구조

Fig. 1 Structure of the ACSR 410mm²

2.2 실험 방법

산불 화재로 인한 ACSR 410mm² 도체의 특성을 확인하기 위하여 가설되어 일정기간 사용되었던 도체들을 수거하여 실험에 이용할 경우에 복합적인 열화가 어느 정도 진행되었을 것이므로 정확한 기준 데이터로 이용하기에는 부적절하다. 따라서 사용되지 않은 건전한 ACSR 전선을 50cm의 크기로 가공하고 그림 2와 같이 인공화염실험장치를 이용하여 한국의 대표적인 나무 종류인 참나무를 화염 원으로 사용하였다.

실제 산불화염이 도체에 접촉이 되면 빠른 시간 내에 알루미늄의 용융이 예상되어지므로 본 실험에서는 인공화염 불꽃에 대한 시료와의 이격거리를 20cm, 40cm, 60cm, 80cm로 각각 설정하였고 인공화염장치의 대기온도를 약 500℃ 이상으로 15분간 지속적으로 유지시켰다. 각 시료의 표면온도의 측정을 위하여 그림 3과 같이 ST-2와 AL-1 사이, AL-1과 AL-2 사이, AL-2에 3개의 열전대를 연결하여 온도데이터를 측정하였고 그림 4와 같이 화염에 열화 된 시료들을 상온에서 냉각시켰다. 온도데이터를 취득하기 위하여 Data Acquisition Switch Unit (HP/Agilent, 34970A)를 이용하여 노트북으로 실시간으로 측정하였고 시료의 표면사진촬영을 위해 SEM (Scanning Electronic Microscope : Jeol, JSM 6300)을 사용하였다. 아울러 시료의 성분분석을 위해 EDX(Energy Dispersion X-Ray Analysis : X/MAX, OXFORD)를 사용하였다.

그림 2 인공화염 실험장치

Fig. 2 Artificial flame experiment device

그림 3 온도측정용 열전대

Fig. 3 Thermocouple for temperature measurement

그림 4 인공화염에 열화된 ACSR

Fig. 4 Deteriorated ACSR by Artificial flame

3. 실험결과 및 분석

3.1 온도데이터 분석

아래의 그림 5~그림 8은 인공화염실험장치에 참나무를 대기온도 약 500℃ 이상으로 15분간 연소시켜 화염과 시료와의 이격거리에 따른 온도데이터를 나타내었다. 그림의 범례에서 20, 40, 60, 80은 각각 20, 40, 60, 80cm로 화염으로부터 각각 이격거리를 나타낸 것이고 Air Temp.는 인공화염실험장치의 대기온도를 나타내었다.

범례에서 ST-2/AL-1는 아연도금 강선과 내측 알루미늄 연선 사이의 표면온도를, AL-1/AL-2는 내측 알루미늄 연선과 외측 알루미늄 연선 사이의 표면온도를, AL-2는 외측

알루미늄 연선의 표면온도를 나타낸다.

이 온도데이터를 분석해 보면 이격거리에 따른 대기온도는 약 500℃ 이상으로 약 15분(400초~1,300초) 정도로 잘 유지가 되었으며 시료표면의 최고온도는 화염과의 이격거리가 20cm일 때는 AL-1/AL-2가 559℃, 40cm일 때는 AL-1/AL-2가 502℃, 60cm일 때는 AL-1/AL-2가 480℃, 80cm일 때는 AL-1/AL-2가 456℃로 가장 높게 측정되었다.

화염과의 이격거리가 멀어질수록 전선표면의 온도는 낮아지는 것을 확인하였고 AL-2의 표면온도보다 AL-1/AL-2의 표면온도가 더 높게 측정된 것은 AL-2가 최외측의 소선으로 화염의 열이 인공화염실험장치 내에서 대류 및 자연냉각이 미세하게 이루어졌다고 판단된다.

그림 5 20cm 이격시 온도데이터
Fig. 5 Temperature data by 20cm distance

그림 6 40cm 이격시 온도데이터
Fig. 6 Temperature data by 40cm distance

그림 7 60cm 이격시 온도데이터
Fig. 7 Temperature data by 60cm distance

그림 8 80cm 이격시 온도데이터
Fig. 8 Temperature data by 80cm distance

3.2 표면사진 분석

그림 9는 아연도금 강선(ST-2)을 SEM으로 촬영한 표면 사진으로 그림 9(a)의 미사용재 건전전선의 경우 강선의 광

(a) 건전전선

(b) 20cm 이격

(c) 40cm 이격

(d) 60cm 이격

(e) 80cm 이격

그림 9 아연도금 강선의 SEM 사진
Fig. 9 SEM pictures of galvanized steel strand

택과 더불어 아연도금 층은 비교적 균일하게 도금이 되어 있어 도금상태가 완전하다는 것을 보여주고 있다. 하지만 그림 9(b)~(e)는 화염에 노출된 시료표면의 형상변화를 나타낸 사진으로서 그림 9(b)는 아연이 피복되어 있으며 열에 의해 소실되어 뭉친 상태로 도금 층의 손실은 거칠기를 증가시키고 모재인 아연도금 강선(core)까지 부식손상을 일으킬 것으로 판단된다. 그림 9(c)~(e)는 아연이 열에 의해 국부적으로 소실되어 표면이 갈라지는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 현상으로 인하여 인장을 담당하는 아연도금 강선은 인장력이 급격히 감소하게 되므로 전선의 수명이 빠르게 감소될 것으로 예측된다.

그림 10은 알루미늄 연선(AL-2)을 SEM으로 촬영한 표면 사진으로 그림 10(a)의 미사용재 건전전선의 알루미늄은 표면이 매끄럽고 균일한 형태 보이고 있으며, 줄무늬 모양은 도체 제조 시 사출기의 홈집이 그대로 나타나고 있다. 그림 10(b)~(e)는 화염에 노출된 시료의 표면을 나타낸 사진으로서 그림 10(b)과 (c)는 열에 의해 소선 표면이 녹은 것을 알 수 있고 용융현상이 나타났다. 이러한 현상에 의해 전선 내

(a) 건전전선 (b) 20cm 이격

(c) 40cm 이격 (d) 60cm 이격

(e) 80cm 이격

그림 10 알루미늄 연선의 SEM 사진

Fig. 10 SEM pictures of aluminum strand

부로 수분이나 유해 가스들이 침투하여 간극부식이 발생하기가 용이할 뿐만 아니라 아연도금이 벗어진 금속부분과 알루미늄 부분이 맞닿아 이종금속 간에 발생되어지는 전해부식 현상을 초래하게 될 것이며 부분적으로 알루미늄의 단면적이 감소될 수 있는 상황으로 진행될 것으로 추측된다. 하지만 그림 10(d)과 (e)는 인공화염에 의한 손상이 그림 10(b)과 (c)보다는 적으나 건전전선과 비교하여 볼 때 매끄럽고 균일한 형태가 소실된 것으로 보아 열화가 진행되어졌다고 판단된다.

3.3 성분분석

그림 11 및 표 1은 아연도금 강선(ST-2) 시료에 대한 EDX 성분분석 결과를 나타내었다. 그림 11(a)은 건전전선의

(a) 건전전선

(b) 20cm 이격

(c) 40cm 이격

(d) 60cm 이격

(e) 80cm 이격

그림 11 아연도금 강선의 EDX 분석 결과

Fig. 11 EDX analysis results of galvanized steel strand

표 1 아연도금 강선의 성분분석 결과

Table 1 Component analysis results of galvanized steel strand

시료	Element / Weight %						합계
	Zn	Fe	O	S	Si	Mn	
건전	96.42		3.58				100
20cm	77.66	6.64	13.64	0.69	0.33	1.03	100
40cm	81.90	7.29	9.46	0.36	0.31	0.68	100
60cm	79.56	6.70	12.12	0.76	0.39	0.47	100
80cm	77.84	4.33	16.22	1.21	0.39		100

성분분석 결과로 Zn(96.42%), O(3.58%)가 주성분인 것으로 분석된 것으로 볼 때 아연도금이 잘 되어져 있으며 시료를 상온에서 냉각시킬 때 산소가 일부 흡착된 것으로 판단되었다.

그림 11(b)~(e)의 성분분석 결과 Zn, Fe, O 성분이 주를 이루고 있으며 Zn이 약 77%~81%로 검출이 되고, Fe가 약 4%~7% 정도로 상대적으로 많이 검출된 점에 미루어 볼 때 화염이 아연도금 강선까지 직접 영향을 미쳐 아연도금 층이 용융이 되어 부식이 진행된 것으로 판단된다.

그림 12 및 표 2는 알루미늄 연선(AL-2) 시료에 대한 EDX 성분분석 결과를 나타내었다. 그림 12(a)는 건전전선에 대한 성분분석 결과로 Al(94.73%), O(5.04%)가 주성분인 것으로 분석되었다.

그림 12(b)~(e)의 성분분석 결과 Al이 약 89%~92%로 Al 성분이 조금 감소되었고 이에 반해 O 성분이 약 7%~9%로 증가된 것으로 미루어 볼 때 화염에 노출된 알루미늄

그림 12 알루미늄 연선의 EDX 분석 결과

Fig. 12 EDX analysis results of aluminum strand

표 2 알루미늄 연선의 성분분석 결과

Table 2 Component analysis results of aluminum strand

시료	Element / Weight %					합계
	Al	O	S	Ca	Mo	
건전	94.73	5.04	0.23			100
20cm	92.28	7.72				100
40cm	93.30	6.70				100
60cm	90.11	9.44	0.25	0.20		100
80cm	89.71	9.38			0.91	100

연선은 산화피막이 없어진 상태에서 대기 중에 노출될 경우보다 부식이 촉진될 것으로 추정되며 그 결과로 전선의 수명도 단축될 것으로 추측된다.

전체적으로 볼 때 아연도금 강선과 알루미늄 연선이 닿아 있는 부분은 철, 아연 및 알루미늄이 접촉되어 있어 이러한 부분에 아황산가스 등에 의한 부식생성물과 먼지 등이 쌓이고 이 부착물 사이에 수분이 침투되면 이것이 전해질 용액으로 작용하게 되어 국부전지를 형성하게 된다. 이에 따라 이종금속사이에 이온화 현상이 발생하고 이온화 경향이 큰 Zn, Al, Fe의 순서로 전해부식이 진행되면 알루미늄 부분의 단면적이 감소하므로 전로의 전력손실이 증가하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 가공송전선으로 주로 이용되는 ACSR 410mm² 전선을 대상으로 건전전선과 인공화염에 의해 열화된 아연도금 강선 및 알루미늄 연선을 SEM 사진으로 표면을 촬영하였으며 EDX로 성분을 분석하였다.

SEM 사진 분석 결과로 아연도금 강선의 경우 표면이 매끄럽고 광택이 나던 건전전선에 비해 화염에 의해 열화된 아연도금 강선은 아연의 피복에 의한 도금 층의 손실이 발생하였다. 알루미늄 연선의 경우 건전전선은 표면이 매끄럽고 균일한 형태를 보이고 있지만 열화된 알루미늄 연선은 열에 의해 소선 표면이 녹은 용융현상과 층이 갈라지는 현상이 나타났다.

EDX 성분분석 결과 건전전선의 경우 고유의 성분을 가지고 있는 반면 열화된 전선은 화염이 아연도금 강선까지 직접 영향을 미쳐 Zn 성분이 20% 내외로 소실되었으며 알루미늄 연선은 Al 성분이 10% 내외로 소실되었다.

만약 이러한 도체가 대기 중에서 계속 운용될 경우에는 잔존수명이 감소될 것으로 판단되고 위의 분석 자료를 이용하면 열화에 의한 ACSR 도체의 교체수명 진단에 필요한 자료로 활용할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

- [1] 이원교, 이정원, 김병걸, “산불에 노출된 강심알루미늄 연선 송전선 알루미늄 선재의 기계적 및 전기적 특성 거동”, 전기전자재료학회논문지, 제23권, 9호, pp. 730-735, 2010. 9.
- [2] 장태인, 강지원, 이동일, 장인출, “해안지역 ACSR 가공지선의 기계적 특성”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1709-1711, 2001. 7.
- [3] 김용기, 장세기, 이덕희, “강심알루미늄연선의 부식특성”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 981-986, 2002. 10.

- [4] 김성덕, “가공 배전선의 열화를 검출하기 위한 솔레노이드 와전류 센서의 실험적 연구”, 조명·전기설비학회 논문지, 제13권, 1호, pp. 77-85, 1999. 2.
- [5] 장용호, 김병걸, 김상수, 한세원, 김진한, “소화약제 및 산불에 노출된 가공송전선의 전기적, 기계적 거동 변화”, 전기학회논문지, 제58권, 2호, pp. 242-247, 2009. 2.
- [6] 김영한, 방향권, 조대성, “345KV 송전선로의 송전용량 증대를 위한 STACIR 전선교체기술”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1103-1105, 1998. 7.
- [7] 정재기, 강지원, 강연옥, 심응보, 김정부, “강심알루미늄 가공지선에서 알루미늄 손상의 실증적 검출”, 전기학회 논문지, 제46권, 7호, pp. 1102-1108, 1997. 7.
- [8] 강연옥, 강지원, 양병모, 정재기, “와전류 센서를 이용한 ACSR 전선의 배부부식 검출”, 조명·전기설비학회논문지, 제12권, 1호, pp. 12-19, 1998. 2.
- [9] 강지원, 장태인, 민병욱, 김복규, “비파괴 탐상에 의한 ACSR 전선의 결함 검출”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1712-1714, 2001. 7.

저 자 소 개

김 영 달 (金 榮 達)

1957년 11월 5일생. 1986년 대전공업대학 전기공학과 졸업. 1990년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한밭대학교 전기공학과 교수.

심 재 명 (沈 在 明)

1951년 11월 13일생. 1976년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동대학교 대학원 졸업(석사), 1992년 동대학원 졸업(박사). 1979 ~ 현재 한밭대학교 전기공학과 교수.

박 근 석 (朴 根 碩)

1982년 4월 24일생. 2009년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2011년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 한국기계연구원 위촉기술원.

정 윤 미 (鄭 潤 漢)

1986년 8월 9일생. 2009년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2011년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).

김 재 광 (金 在 廣)

1983년 6월 27일생. 2010년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2010년~현재 한밭대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

변 정 섭 (邊 正 燮)

1986년 5월 29일생. 2011년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2011년~현재 한밭대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

이 대 동 (李 大 東)

1976년 12월 26일생. 2002년 우송대학교 전자공학과 졸업. 2004년 한밭대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.