강심알루미늄연선의 부식특성

Corrosion Characteristics of Aluminum Conductors Steel Rainforced wires

김용기* 장세기* 이덕희**

Kim, Yong-Ki, Chang, Seky, Lee, Duck-Hee

ABSTRACT

ACSR of the catenary wires is corrosion degradation progressed by the effect of atmospheric pollution. ACSR which consists of galvanized steel stranded aluminum. The inside of Steel Reinforced is hot-dipped zinc coating steel wire and it takes charge of tension. If ACSR is exposed in atmosphere, the galvanic corrosion is occurred because it is contacted with aluminum. It is occurred the chemical reaction rapidly so that the local a defect is also occurred. If the catenary wires are exposed in atmosphere of pollution conditions, it may cause to reduce the mechanical strength by corrosion degradation and may cause to damage the wires by micro cracks. Accordingly, this study presents the effects of mechanical properties through the corrosion of ACSR.

1. 서론

아연도금강선(galvanized steel)은 인장, 연성 및 내식성이 양호하여 스프링, 와이어로프, 송배전선, 통신선 및 현수용으로 사용된다. 그렇지만 강선재를 포함해서 모든 금속은 설치장소의 환경에 의한 대기부식과 다른 금속과의 접촉에 의한 전해부식 등 여러 형태의 부식이 발생된다. ACSR선은 전차선로 구간에서 카테나리시스템(Catenary system)의 구성품으로서 전철의 주행 및 안정적 운행 등에 절대적인 영향을 주고 있다. 전차선로 구간에서 가공지선은 단면적 58㎟의 강심알루미늄연선(Aluminum Conductors Steel Rainforced : ACSR)를 사용하고 있으며 [1] , 외층은 직경 3.5mm의 경 알루미늄연선으로 구성되어 있다. 내층 강선은 용융아연도금 강선이며(Hot-dip Galvanized steel)이며 인장을 담당한다. 이 경우의 강심은 도체로 사용하는 다른 규격의 ACSR의 내부강선보다 높은 인장강도를 갖도록 규정되어 있다. 가공지선 외층인 알루미늄은 대기중에 방치된 초기에는 부식이 급속하게 진행하다가 산화피막 및 부식생성물 등에 의해 부식속도는 점점 감소한다. 아연은 내식성이 우수하고 알루미늄과 접촉에 의한 전해부식 속도도 작을 뿐만 아니라 내부강선이 대기중에 산소나 수분과의 화학반응을 일정기간 차단하는 역할을 한다. 강선이 대기에 노출되면 부식이 급속하게 진행되므로 균열 공식과 같은 국부결함이 발생하고 따라서 인장특성을 이용하는 가공공동지선의 파손 또는 단선사고를 유발한다. 가공지선의 주역할 중 하나는 가공송전선로에 유입되는 낙뢰서지전압을 흡수하여 대지로 방출시키므로써 전력공급의 안정화와 신뢰성을 유지하는 것이다. 뿐만 아니라 가공지선은 재료의 경년과 기온, 강우등의 기상요소, 염화물, 아황산가스등의 대기환경에 의해 열화된다. 결국 가공지선 중 부식저항이 작은 부분이 극심하게 부식

* 한국철도기술연구원 궤도 · 토목연구본부 책임연구원

** 한국철도기술연구원 궤도 · 토목연구본부 주임연구원

되어 강풍, 강우 직격뢰나 과전류에 의해 단선, 지락되는 경우가 발생한다. 대기 중에 노출되어 있는 ACSR전선은 증가하는 환경오염에 의해 대기 중에서 표면층부터 부식열화를 일으키며 부식으로 인하여 거칠기의 증가 및 유효단면적의 감소는 미세균열의 개시점을 제공하여 결국에는 파손을 일으키는 요인이 될 수 있다 [2] . 강심 알루미늄연선은 중심부에 아연도금을 한 철연선의 주위에 알루미늄 꼬아 합친 구조로 되어 있다. 강심알루미늄연선에서 전류는 주로 알루미늄부를 통하여 흐르고 인장강도는 철연선부가 부담하고 있다. ACSR 전선에서 일어날 수 있는 부식의 형태로는 대기와 접촉하고 있는 전선이 대기중의 수분과 부식성 가스를 흡착하여 발생하는 대기부식, 전선내부 강심선에 도금된 아연층이 유실되고 철이 노출될 때 알루미늄전선과 철선사이에 수분(전해액)이 존재하는 경우 국부전지를 형성하여 이온화 경향이 큰 알루미늄이 양극으로 되어 부식되는 이종금속접촉부식, 전선 틈사이에 존재하는 수분중의 산소농도차에 의해서 발생하는 틈부식 등이다. 전선에 부식이 발생하면 전기적인 저항이 증가하여 손실이 커지고 인장강도가 저하하며 심한 경우 단선이 이르게 된다. 가선재의 미세균열 발생은 열차안전 운행의 커다란 장해요인으로 작용할 수 있어 가전재의 부식의 정도 및 특성 파악을 위해 장기간 사용으로 노출된 소재를 분석장비 (SEM) 활용하여 부식 표면층을 조사분석하였다. 따라서 본 연구에서는 가선재의 장기간 옥외노출로 인해 부식 열화가 촉진되어 기계적 강도의 저하는 물론 미세균열을 제공하여 파손으로 인한 문제를 일으킬 수 있으므로 부식이 ACSR전선에 미치는 영향을 알아보았다.

2. ACSR의 대기부식기구

2.1 알루미늄의 부식

대기 부식은 금속 표면 위에 오염물질의 다양한 재료의 침적으로부터 생긴다. 대기에 노출된 알루미늄의 부식층은 산화물과 수산화물로서 γ-알루미나 [산화알루미늄(Ⅲ)] 은 대기중에 노출되었을 때 가장먼저 형성되는 요소이다. 초기의 깊이는 2~3㎛이다. 습기나 공기 중에 잠깐 노출된 경우 산화물은 [γ-AlOOH] 의 얇은 층으로 덮이게 된다. 이어서 Bayerite [$Al(OH)_3$, 또한 $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$라고도 함] 로 감싸이게 된다. 산화물과 수산화물의 변형체인 Akdalaite [$Al_2O_3 \cdot 1/4H_2O$] 와 tucanite [$Al(OH)_3 \cdot 1/2H_2O$] 이 때때로 나타나기도 한다 [3] . 알루미늄은 노출된 시점부터 수분이 존재시에 형성되는 산화층은 수산화알루미늄과 산화알루미늄 그리고 수산화염화물로 구성된다. pH 〈4와 pH〉 9에서는 산화층의 불안정성으로 인해 이것은 대기오염물질 누적으로 인하여 국부적으로 파괴될 수 있다. 염화물이 존재할 때 pitting은 균일하지만 국부적으로는 부식으로 인한 공격이 이산황과 입자상물질의 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 염화물이 존재할 때의 pitting은 염화알루미늄의 형성 때문인 것으로 여겨진다. 이것은 수산화알루미늄이나 산화알루미늄에 비하여 안정성이 떨어져 더욱 많이 반응하여 염화물을 유리시켜 부식과정이 진행된다. 또한 염화물은 수산화알루미늄이나 산화알루미늄의 안정성이 떨어지므로 황산알루미늄으로 변형될 수 있다. 대기환경에서 노출된 부식비율은 시골지역 0.1㎛/yr, 도시 1㎛/yr, 해상지역 0.4~0.6㎛/yr 정도 이다.

2.2 아연의 부식

실제 옥외 노출 전 표면은 적어도 수 나노미터의 두께를 가진 산화 아연(ZnO)의 부식생성물로 덮힌다. 가습된(humidified) 분위기에서는 나노미터 두께의 수산화 아연($Zn(OH)_2$)층이 매우 빠르게 생성될 수 있다. 수산화 아연은 아연이 노출되는 유체 층(liquid layer)의 산도(acidity) 또는 염도(basicity)에 따라서 다양한 무정형 또는 결정 형태로 나타난다 [4] . 실내 또는 옥외 분위기에서 노출이 계속되면 수 시간 내에 수산화아연(hydroxylated) 표면은 일반적으로 얇은 아연인 hydrozincite($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$)층으로 변하게 된다. 일반적으로 아연 표면은 옥외 노출의 되기전 적

어도 수일간의 시간 지연이 있기 때문에 보통 hydrozincite($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$가 환경에 노출되기 전 아연 표면을 덮는 상(相)이 된다. 아연도금의 경우에는 표면이 Zn이 대기 중의 SO_2로부터 생성된 H_2SO_4와 반응하여 $ZnSO_4$가 되는 부식반응이 발생한다. 흡습성(hygroscopic property)을 갖는 $ZnSO_4$가 H_2O를 흡수하여 $ZnSO_4 \cdot nH_2O$(n= 1, 6, 7)로 변환하고, 이로 인한 표면의 수분증기가 부식진행을 더욱 촉진시키는 가속화 cycle을 지니는 것으로 알려지고 있다

① H_2SO_4 생성반응 : $SO_2 + H_2O + 1/2O_2 = H_2SO_4$

② Zn 용해반응 : $H_2SO_4 + Zn = ZnSO_4 + H_2$

③ $ZnSO_4$ 수화반응 : $ZnSO_4 + nH_2O = ZnSO_4 \cdot nH_2O$

대기에 노출된 아연의 부식정도는 보통 다른 강철보다 작다. Mattson [5] 은 부식비율 범위를 시골지역 0.2~3㎛/yr, 도심지역 2~16㎛/yr, 공업지역 2~16㎛, 해안지역 0.5~8㎛/yr 정도라고 보고하였다. 아연의 대기부식에 의해 나타나는 표면막의 구성은 일정하지 않다 [6] . ZnO와 일관된 O/Zn비는 표면층에 15㎚ 외부로 나타나고 $ZnCO_3$ 또는 $Zn(OH)_2$와 일관된 농도비율에서는 부식층보다 깊게 나타난다.

3. 실험방법

ACSR선의 산화층을 분석하기 위해 시편을 불포화성수지로 마운팅한 후 2000 grit 의 사포로 연마하고 산화알루미늄(0.3마이크론 Al_2O_3)분말을 이용하여 연마천에서 마무리 연마를 하였다. 시편표면에 생성된 표면 부식층과 부식생성물은 주사전자현미경(SEM)를 이용하여 재료의 부식표면층을 관찰하였다.

ACSR의 소선에 대한 인장시험시편은 stainless steel tube 속에 특수본드를 이용하여 시편의 물림부위를 방지하기 위해 표점거리 100㎜의 시편을 제작하였다. 인장시험시 인장속도를 10㎜/min의 속도로 유압식 인장시험기(MTS 810)를 이용하여 시험하였다.

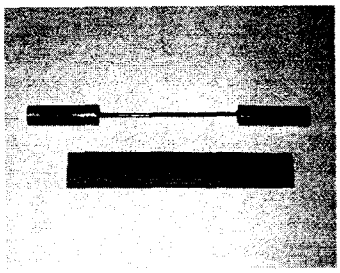


그림 3.1. 인장시험편

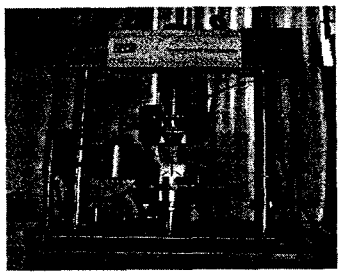


그림 3.2 인장시험 장면

4. 실험결과 및 고찰

4.1 가선재의 표면 산화층 분석

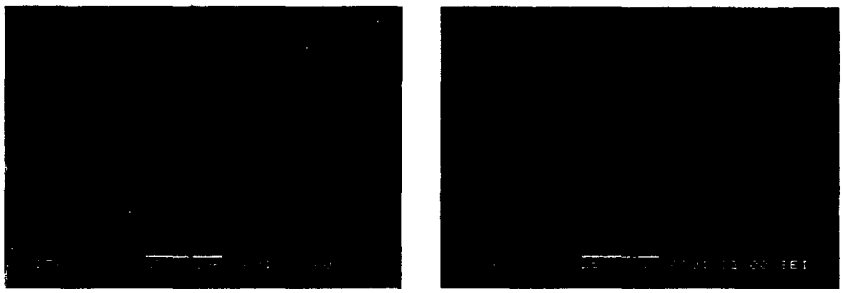
ACSR은 아연이 도금된 강심재가 강도를 유지하여 주며, 주변에 알루미늄 선재가 도전체 역할을 한다. 알루미늄은 강재보다 강도는 떨어지지만 내식성은 우수하다. 그림 4.1(a)는 건전한 알루미늄소선의 단면으로 원모양이 흐트러짐이 없으나 그림 4.1(b)에서는 아연부식이 왕성하게 진행된

아연도금 강심표면의 부식층을 분석한 것으로서 표면은 아연도금의 일부가 상실되어 철이 노출되어 있고 이 부분에서 녹이 심하게 발생하였음을 볼 수 있다.

이 부분은 전선이 장기간에 걸쳐 대기중에 노출되므로 아연도금층 및 강선 부분과의 전극차이에 의해 전해부식이 진행된 결과라고 추측된다. 철은 염분등에 매우 취약하므로 염분이 이부분에서 체류하는 시간이 길면 부식은 매우 급속하게 진행된다. 특히 해안 지역에서는 염분이 작용하므로 알루미늄뿐만 아니라 내부 강선의 열화가 심하게 진행되지만 부식성 가스가 적은 청정지역에서는 아황산가스(SO_2), 질소산화물(NOx)등의 매체에 의한 부식현상은 적으나 앞으로 경년변화 이외의 현재 동북 아시아의 공업화에 따른 산성우의 영향이 나타나고 있다 [7] .

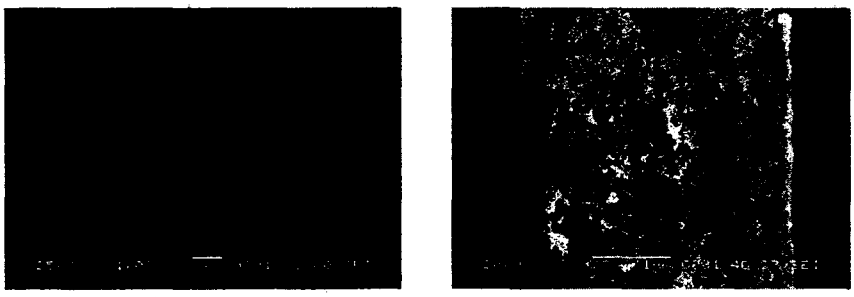
외부에 노출된 부위는 부식 생성물들이 조대하게 성장하고 전체적으로 매우 거친 표면을 보여준다. 강심 표면은 약 70㎛의 아연이 피복되어 있으며 아연 피복층이 부식으로 소실되어 그 깊이까지 산소와 황이 침투되어 화합물을 형성하고 있다. 아연은 수산화물을 형성하여 자체적으로 안정된 산화피막을 형성시켜서 모재를 보호하기도 하며 동시에 희생양극으로 작용하여 모재인 철선을 외부의 유해성분으로부터 보호하기도 한다. 아연의 산화 부식층은 안정된 피막을 형성하지만 황화물과 공존을 하게되면 부식층의 치밀도가 낮아져서 유해한 원소들이 소재 깊숙이 침투를 하여 부식을 촉진시키는 결과를 가져온다.

그림 4.2(a), (b)를 살펴보면 전반적으로 도금층의 부식 진전이 심하게 일어난 가선에서의 대기부식 현상을 볼 수 있으며 도금층의 손실은 거칠기를 증가시키고 모재인 강심까지 부식손상을 일으킬 것으로 판단된다.



(a) 건전 강심 소선 (b) 부식 강심소선

그림 4.1 강심 소선의 부식상태



(a) 부식단면 (b) 소선의 부식표면

그림 4.2. ACSR의 부식단면

4.2 기계적 특성

그림 4.3에서 강선신품의 평균 인장강도는 158kg/㎟, 연신률은 10.7%였다. 이에 반해 강선 사용품의 경우는 평균 인장강도가 150kg/㎟, 연신률이 9.97%로서 신품에 비해 인장강도와 연신률이 각각 5.0% 및 6.7%정도 감소하였다.

사용품의 경우는 연선된 Al 도체와의 마찰 또는 연선된 강선간의 마찰로 인해 아연 도금층의 일부가 손상되어 그 부분에서 부식이 모재에서 일어나 거칠기를 증가시켜 신품에 비해 강도와 연신률이 감소한 것으로 보인다.

그림 4.4의 시편을 보면 균일한 necking이 일어나면서 강선의 중심부에서는 연성파괴와 취성파괴의 형태가 혼재되어 나타난다. 대부분 취성에 의한 파괴가 지배적이며 초기에 약간의 연성파괴가 초기에 발달하다가 ACSR의 중심부에서는 거의 취성파괴에 의해 파단되어 짐을 알 수 있다.

일반적으로 금속소재는 반복응력을 받게되면 표면에서 전단력에 의해 슬립밴드가 형성되고 이는 초기 균열의 시작점으로 작용할 수 있는데, 표면의 조직 거칠기에 따라 영향을 받게된다. 표면에 부식층 등이 발달하면 표면이 거칠어지고 동시에 취성의 부식 산화물들이 결정립계를 따라 형성되면서 반복응력이 작용할 때 초기균열의 시작 및 전파는 더욱 용이해질 수 있다.

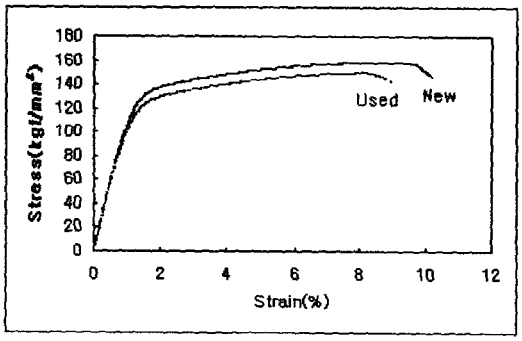
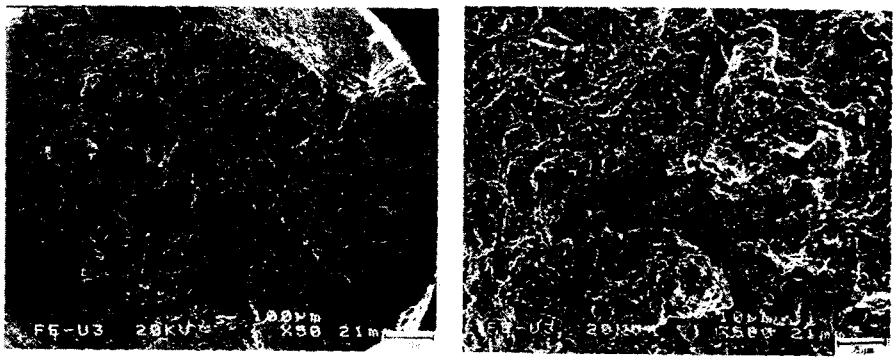


그림 4.3 ACSR의 인장곡선(건전재-부식재)



(a) 전반적인 양상 (b) 내부 확대

그림 4.4 ACSR 강선(부식재)의 인장파단면

5. 결론

옥외에 노출된 ACSR 가공지선의 조사 분석을 통해 대기부식이 가선재의 특성에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ACSR선은 장기간에 걸쳐 대기중에 노출되므로 아연도금층 및 강선 부분과의 전극차이에 의해 전해부식이 진행되는 것으로 판단되어진다.

2. 대기중의 수분과 유해원소가 강심 표면에 흡착되면 선재는 이들과 반응하여 표면에 산화물과 황화물을 형성하게 되고, 이들 부식층은 Al도체와 연선된 강선간의 마찰로 인해 도금층의 손상이 일어나 표면부에서 떨어져 나감으로 하중을 지탱하는 단면적을 감소시켜 국부적인 결함등에 의해서도 파손의 가능성을 증대시킬 것으로 사료된다.

3. ACSR선의 인장파단면 조사결과 necking이 일어나면서 중심부에서 연성파괴와 취성파괴가 혼재되어 나타났다. 부식환경에서 형성된 산화층은 표면을 거칠게 하여 균열의 초기발달을 용이하게 되고 부식열화재의 경우 기계적 특성의 저하는 부식의 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 가공지선의 부식열화로 인한 파손이 일어날 경우 기능에 대한 신뢰성을 감소시키므로 전선의 교체시기나 부식상태를 판단하는 기준 마련이 필요하다.

6. 참고문헌

1. 김용기, 장세기. 조성일, 가선재의 기계적특성에 미치는 부식환경의 영향, 한국철도학회 Vol. 5 , No. 1(2002)
2 대기부식에 의한 가선재의 열화특성, 2002년도 철도학회 춘계학술대회논문집 (2002)
3. T. E. Graedel, Corrosion Mechanims for Aluminum Exposed to the Atmosphere, J. Electrochem. Soc., Vol. 136, No. 4, April 1989
4. T. E. Graedel, Corrosion Mechanims for Zinc Exposed to the Atmosphere, J. Electrochem. Soc., Vol. 136, No. 4, April 1989
5. E. Mattsson, Chemtech, 15, 234(1985)
6. D. R. Flinn, S. D. Cramer, J. P. Carter, D.M. Hurwitz, and P. J. Linstrom, in Materials Degradation Caused by Acid Rain, R. Baboian, Editor, pp. 119-151, ACS Symposium Series, 318, ACS, Washington, DC(1986)
7. 西山貞義, 裸電線の腐食と防蝕の實態, 電氣計算, Vol. 39, No. 11(1992)