

대기부식에 의한 가선재의 열화특성

Degradation Properties of Catenary Wires on the Atmospheric Corrosion

김용기* 장세기* 정우성* 이덕희**

Kim, Yong-Ki, Chang, Seky Jung, Woo-Sung Lee, Duck-Hee

ABSTRACT

Contact wires are made by metallic materials and exposed at atmosphere. We have investigated mechanical properties and the present condition of air pollution as to the messenger wires and ACSR wires of these contact wires. Mechanical properties between new contact wires and used, the used one's tensile strength and elongations was decreased by effect from corrosion.

We observed a fatigue properties which was investigated by fatigue test because contact wires were affected with amplitude vibration everytime the train passed through the railways. In the evaluation of fatigue test, it was also shown that fatigue life of the used wires was decreased 50~60% compared with that of new ones in average by effect from corrosion.

1. 서론

전차선로는 전기철도에서 전동차에 전기를 공급하는 카테나리시스템(Catenary system)의 핵심 구성품으로서 전철의 주행 및 안정적 운행 등에 절대적인 영향을 주고 있으며 전차선(Trolley wire)을 사용한다. 또한 전차선로를 구성하는 조가선은 전차선의 조가방식에 따라 여러 종류의 전선이 사용되고 있으나 일반적으로 열차운행 증가에 따른 전류의 증가와 대도시 및 공장지대에서 공해에 의한 부식방지를 위하여 카드뮴동연선(Cu-Cd)를 사용한다.

또한 가공지선은 단면적 58mm²의 강심알루미늄연선(Aluminum Conductors Steel Reinforced : ACSR)를 사용하고 있다 [1]. 가공지선의 주역할 중 하나는 가공송전선로에 유입되는 낙뢰서지 전압을 흡수하여 대지로 방출시키므로써 전력공급의 안정화와 신뢰성을 유지하는 것이다 [2, 3]. 뿐만 아니라 조가선과 가공지선은 재료의 경년과 기온, 강우등의 기상요소, 염화물, 아황산가스등의 대기환경에 의해 열화된다. 결국 가공지선 중 부식저항이 작은 부분이 극심하게 부식되어 강풍, 강우 직격되나 과전류에 의해 단선, 지락되는 경우가 발생한다. 가공지선의 외층은 직경 3.5mm의 경 알루미늄연선으로 구성하여 뇌전류나 이상전류의 대지방출을 용이하게 한다. 내층 강선은 용융아연도금 강선이며 인장을 담당한다. 대기 중에 노출되어 있는 전차선로 가선재는 증가하는 환경오염에 의해 대기 중에서 표면층 부터 부식열화를 일으키며 부식으로 인하여 거칠기의 증가 및 유효단면적의 감소는 미세균열의 개시점을 제공하여 결국에는 파손을 일으키는 요인이 될 수 있다. 가선재의 미세균열의 발생은 열차안전 운행의 커다란 장애요인으로 작용할 수 있어

* 한국철도기술연구원 궤도·토목연구본부 책임연구원

** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 주임연구원

가전재의 부식의 정도 및 특성 파악을 위해 장기간 사용으로 노출된 소재를 분석장비 (SEM&EDS, EPMA)를 활용하여 부식표면층을 분석하였다.

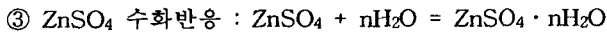
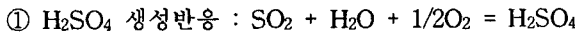
전차선로에서 열차의 주기적인 운행은 가선재의 진동과 반복되는 응력을 일으켜서 기계적 강도에 대한 열화를 증가시키므로 결과적으로 전차선로의 가선재의 수명을 단축시키는 결과를 초래할 수 있다. 전차선로 가선재는 빗과 부속설비에 장착되어 장력과 자중에 의한 하중조건에서 유기되는 인장-인장 피로 환경에 노출되어 있어 이런 하중 조건에서의 피로특성 확보가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 가선재의 장기간 옥외노출로 인해 부식 열화가 촉진되어 기계적 강도의 저하는 물론 미세균열을 제공하여 파손으로 인한 문제를 일으킬 수 있으므로 부식이 가선재의 피로거동에 미치는 영향을 피로시험을 통해 알아보았다

2. 대기부식기구

대기 부식은 금속 표면 위에 오염물질의 다양한 재료의 침적으로부터 생긴다. 동(銅) 부식 비율은 일반적으로 아연이나 또는 많은 강재에 대한 값보다는 적다. 다양한 환경에서 형성된 동(銅) 부식의 녹청은 Cu_2O 외에, posnjakite($Cu_4SO_4(OH)_6 \cdot H_2O$), brochantite($Cu_4SO_4(OH)_6$) 및 antlerite($Cu_3SO_4(OH)_4$)는 황산염이 풍부한 환경에서 발생하는 가장 자주 확인되는 상(phase)이다.

아연도금의 경우에는 표면이 Zn이 대기 중의 SO_2 로부터 생성된 H_2SO_4 와 반응하여 $ZnSO_4$ 가 되는 부식반응이 발생한다. 흡습성(hygroscopic property)을 갖는 $ZnSO_4$ 가 H_2O 를 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 [4].



3. 대기오염의 영향

황산화물(SO_2 및 SO_3)은 문제시되고 있는 대기오염물질중의 하나로서 금속의 부식에 가장 큰 영향을 미친다. 산업장이나 발전소, 난방용보일러등에서 사용하는 화석연료의 연소와 항공기, 열차, 자동차배출가스 등에서 배출된다. 배출가스는 태양광선에 위해서 황산기(SO_4^{2-})나 질산기(NO_3^-)의 에어로졸로 변환되고 이들은 공기중에 수분(H_2O)이 있으면 황산(H_2SO_4)이나 질산(HNO_3)으로 되어 금속을 부식시킨다. 대기중의 입자상물질은 대기수증기의 응결핵 작용으로 구름이 형성되어 비나 오염물이 섞여 내리게 되어 금속의 부식에 영향을 미친다 [5].

그림 1과 2는 서울시, 인천시, 원주시의 2001년도 SO_2 및 NO_2 의 월별 오염농도의 변화를 나타내었다. 그림 1과 2에 나타난 바와 같이 1월~4월에 높은 농도를 보이고 있고 하절기인 6월~9월 사이에 낮은 농도를 보이고 있다. 하절기에는 잦은 강우로 인해 대기의 정화작용으로 오염농도가 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 다시 건기의 계절인 화석연료의 사용이 증가하는 10월부터 오염농도가 점차적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 향후 대기부식은 대기오염에 의해 큰 영향을 받게 되므로 오염물질의 제어 및 부식에 대한 방식 관리의 검토가 필요하다.

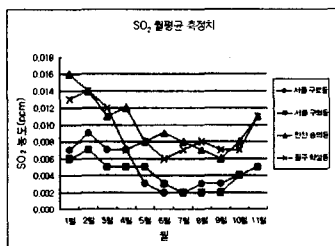


그림 1. 월별 SO_2 농도(ppm)

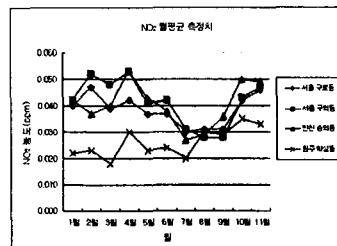


그림 2. 월별 NO_2 농도(ppm)

4. 실험방법

조가선의 표면부식 산화층을 분석하기 위해 시편을 에폭시 수지(epoxy resin)로 마운팅한 후 2000 grit 의 사포로 연마하고 산화알루미늄($0.3\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$)분말을 이용하여 연마천에서 마무리 연마를 하였다. 시편표면에 생성된 표면 부식층과 부식생성물은 주사전자현미경(SEM&EDS)를 이용하여 재료의 부식표면층을 관찰하였다.

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

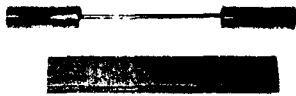


그림 1. 피로시험편

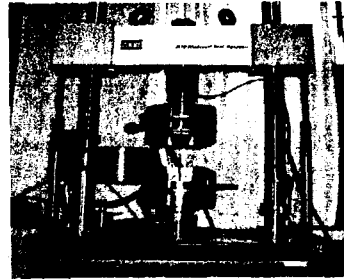


그림 2. 피로시험 장면

5. 실험결과 및 고찰

5.1 가선계의 표면 산화층 분석

그림 3(a)은 26년간 조가선의 사용품의 표면 산화층을 분석한 것으로서 산화층(흰색부분)은 전체 표면에 균일하게 생성하여 분포되어 있다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 부식층이 심한 부위를 관찰한 것으로 표면이 부풀어 올라 부식밀도가 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 부식층은 부동태 피막으로서 작용하지만 환경오염으로 인한 황화물의 영향으로 부동태피막을 취약화시켜 표면을 거칠게 하고 모재의 부식을 촉진시키면서 거칠기를 심화시키고 유효 단면적을 감소시켜 미세균열을 발생시킬 수 있다 [6].

이와 같은 산화층은 더 나아가 재료의 표면거칠기를 변화시켜 재료의 피로강도의 저하에 영향을 미치는 것을 피로시험을 통해 알 수 있었다.

그림 4(a)는 ACSR의 아연도금강심표면의 부식층을 분석한 것으로서 그림 4(b)를 보면 전반적으로 도금층이 부식진전이 심하게 일어나서 도금층의 손실로 이어져 모재인 강심까지 부식손상을 일으킬 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 조가선의 산화층 분석(SEM)

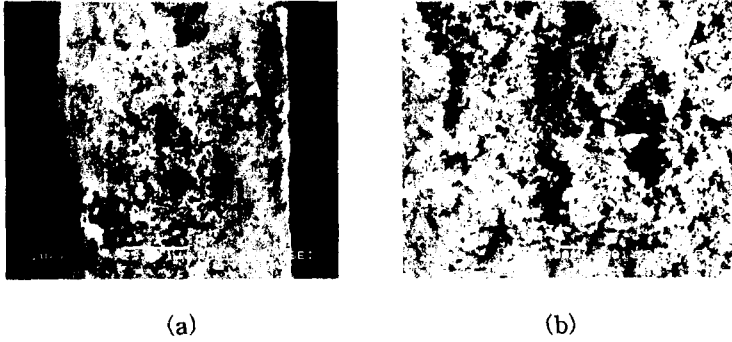


그림 4. ACSR의 부식산화층

그림 5(a)에서 부식이 진행된 조가선의 단면조직을 살펴보면 왼쪽의 검게 나타난 부분은 몰딩부이고, 분리된 회색부분은 산화층, 흰색부분은 모재를 나타낸다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 표층부에서 산화/황화된 부식층과 구리가 주성분인 모재가 관찰되며 이들의 경계선이 뚜렷이 구별이 되고 결합상태가 취약하게 나타난다. 그림 5(a, b)에서 조가선의 단면조직에 대한 원소별 mapping을 살펴보면 (a), (b)의 흰색부분은, 산소, 황원소의 분포를 나타낸다.

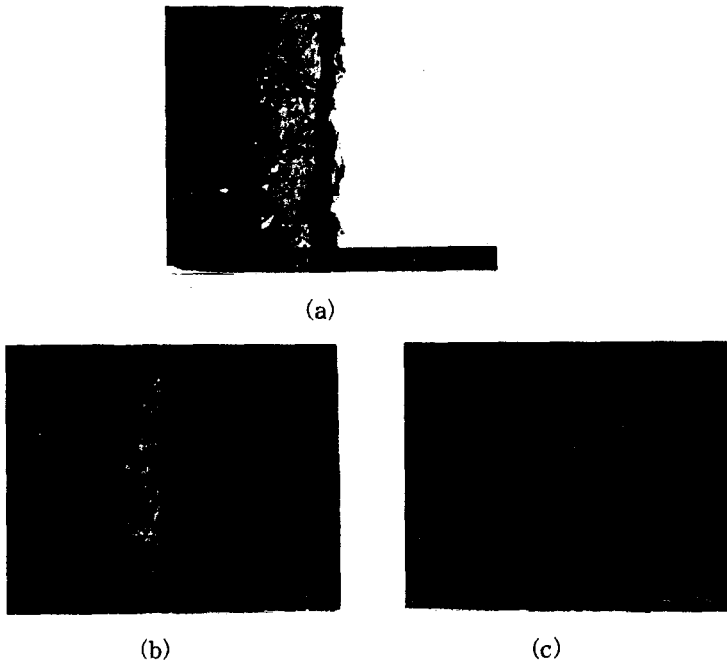
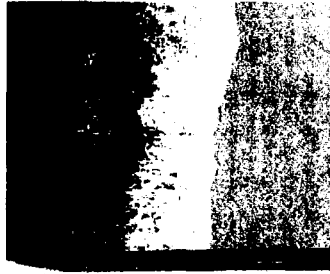


그림 5. 조가선의 단면조직분석 : (a) 조직분석 (b) 산소(O) Mapping (c) 황(S) Mapping

그림 6(a)를 관찰한 결과 표면에 약 $70\mu\text{m}$ 의 아연이 피복되어 있었으며 아연 피복층의 60~70% 깊이까지 산소와 황이 침투되어 화합물을 형성하고 있다.

그림 6(b, c)는 ACSR선의 단면을 EPMA에 의해서 조직 및 성분 Mapping을 한 결과이다. 단면조직에 대한 성분분석을 보면, 철심소재와 아연층, 아연산화층의 3 구역으로 크게 구분된다. 아연층의 하단부는 확산에 의해서 철이 아연층이 깊숙이 침투를 하였고 상단부는 산소와 황에 의해서 부식이 많이 진행되었다. 그러나, 아연으로 피복된 철심소재는 아직 산소 및 황과의 반응이 진

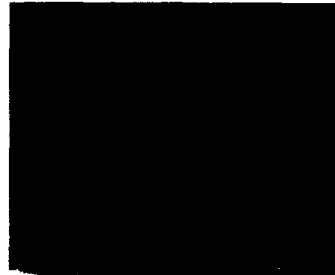
행되지 않고 아연에 의해서 보호받고 있음을 알 수 있다 [7].



(a)



(b)



(c)

그림 6. ACSR 선의 단면조직분석 : (a) 단면조직 (b) 산소(O) Mapping (c) 황(S) Mapping

5.2 기계적 특성에 미치는 영향

5.2.1 인장특성

조가선 소선에 대해 인장시험을 실시한 결과는 다음과 같다. 그림 7은 신품과 사용품의 대표적 인장곡선을 서로 비교하여 나타낸 것이다.

데이터에 약간의 편차가 있으나 소선의 경우 신품에 비해 사용품에서 인장강도와 연신률이 각각 3.75%와 16.82% 감소한 것으로 나타났다. 사용품의 경우 대기오염이 심한 부식환경 속에서 사용되어 표면에서 부터 부식이 일어나서 응력을 지탱하는 구리선의 실제 단면적이 감소하여, 인장강도와 연신률이 감소한 것으로 보인다. 그림 8의 경우는 사용품은 연선된 AI 도체와의 마찰 또는 연선된 강선간의 마찰로 인해 아연 도금층의 일부가 손상되어 그 부분에서 부식이 일어나 신품에 비해 강도와 연신률이 10%정도 감소한 것으로 나타났다.

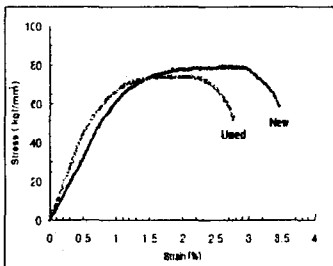


그림 7. 조가선의 인장곡선 비교

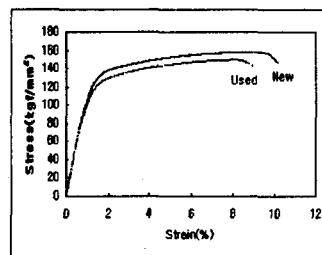


그림 8. ACSR의 인장곡선

5.2.2 피로거동 특성

조가선에 대한 피로시험 그림 9에서 신품과 사용품 모두 유사한 추세를 나타내었다. 신품과 사용품 모두 동일한 응력조건에서 파괴까지의 사이클수를 비교하면서 응력을 변화시켜 나갔다. 이에 따라 하중비 0.3에서 10Hz의 주파수로 하중을 제어하면서 인장-인장 피로시험을 실시하였다. 사용품들의 피로파괴수명은 신품과 비교할 때 50~60% 정도의 피로수명을 나타내고 있다. 이는 부식 환경에 노출된 조가선의 표면에 부식 산화층이 발달하면서 피로균열의 시작이 보다 용이해 졌기 때문이다. 도심 및 공장지역 또는 해안지역을 따라 설치된 전차선 가선재들은 초기의 설계기준에 의해 설정된 사용수명보다 조기에 파손될 가능성이 훨씬 높아진다. 그림을 보면 신품은 800만회를 상회하여도 파괴가 일어나지 않았으나 공장지역에 노출되어 사용된 조가선은 400만회 전후하여 파괴가 일어났음은 이러한 부식의 영향을 잘 보여주고 있다.

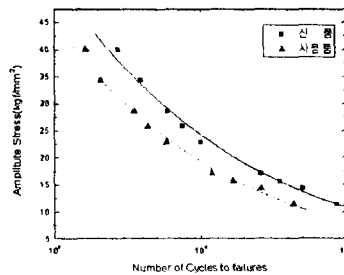


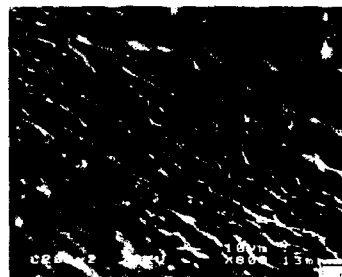
그림 9. 조가선의 S-N 선도

5.2.3 피로 파단면 분석

그림 10은 조가선 신품의 피로파단면의 양상을 보여주고 있다. 표면부의 응력집중점에서 피로파괴가 시작되어 시편전체로 퍼져나갔으며, 피로파괴의 전형적인 물결무늬를 보여주고 있다. 피로파괴의 초기현상인 파형무늬(beach mark)의 발달은 조가선의 표면부위에서 시작하여 파단 경사면을 따라 진행되어 가고 있음을 사진을 통해 알 수 있었다. 국부적으로 파형무늬가 존재하지만 대부분 취성에 의한 파괴가 피로응력의 증가와 함께 지배적이 되어간다. 초기에 약간의 연성파괴가 발달하다가 조가선의 중심부에서는 거의 취성파괴에 의해 파단되어 짐을 알 수 있다. 표면에 부식층 등이 발달하여 표면이 거칠어지고 동시에 취성의 부식 산화물들이 결정립계를 따라 형성되면서 피로에 의한 반복응력이 작용할 때 초기균열의 시작 및 전파는 더욱 용이해진다.



(a) 파단 개시점



(b) striation(개시점 부근)

그림 10. 조가선의 파단현상

6. 결론

옥외에 노출된 가선재의 대기부식환경의 특성과 대기부식이 가선재의 인장 및 피로특성에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대기오염 환경에 노출되어 사용한 조가선과 강심의 표층부를 EPMA 분석한 결과 산화구리층과 산화아연층이 검출되었으며 황화물층도 상당히 검출되었다. 대기중의 수분과 유해원소가 조가선, 강심 표면에 흡착되면 선재는 이들과 반응하여 표면에 산화물과 황화물을 형성하게 되고, 이들 부식층은 진동에 의하여 표면부에서 떨어져 나감으로 해서 하중을 지탱하는 단면적을 감소시켜 국부적인 결함등에 의해서도 파손의 가능성이 증가하게 되어 전체적인 수명이 감소될 수 있다.
3. 조가선의 소선과 강심 대해서 기계적 시험을 실시한 결과, 신품에 비해 사용품에서 인장강도와 연신률이 각각 3.75%, 10%와 16.82%, 10% 감소한 것으로 나타났다. 사용품의 경우 대기오염이 심한 부식환경 속에서 사용되어 표면에서부터 부식이 일어나 응력을 지탱하는 구리선, 강심의 단면적이 감소되어 이에 따라 파단을 일으키는 인장강도 및 연신률이 감소하는 것으로 사료된다.
4. 조가선 소선의 경우는 전형적인 S-N피로 거동을 보여주고 있으며, 사용품의 경우 대기오염과 같은 부식환경에 노출되어 표면부위에 부식생성물이 형성되어 응력집중점으로 작용함으로써 신품에 비해 50~60%의 수명감소를 나타내었다.
5. 조가선의 피로파단면 조사결과 표면부의 응력집중점에서 피로파괴가 시작되어 시편전체로 파져 나갔으며 응력집중점에 의한 피로파괴의 특징인 beach mark를 잘 나타내고 있다. 또한 연성파괴와 취성파괴가 혼재되어 나타났으며 계재물에 의한 영향은 발견되지 않았다. 부식환경에서 형성된 산화/황화층은 표면을 거칠게 하여 피로균열의 초기발달을 용이하게 하고 지속적인 반복응력을 받게되면 정상적인 상태일 때 보다 사용수명이 단축될 수 있다.

5. 참고문헌

1. 김양수, 유해출 공저, 전기철도공학, 동일출판사(1999)
2. 電力概論(電車線), 社團法人 鐵道電化協會(1971)
3. JR教本研究会編, 電車線一般(1996)
4. Christopher Leygraf, Atmospheric Corrosion, A John Wiley & Sons. Inc., Publication(2000)
5. S.Oesch and M. Faller, Environmental effects on Materials : The Effect of the Air pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the Corrosion of Copper, Zinc and Aluminium : Corrosion Science, Vol. 39, No.9(1997)
6. 김용기, 장세기, 이덕희, 부식에 의한 가선재의 수명특성에 관한 연구, 2001년도 철도학회 추계 학술대회논문집 (2001)
7. 한국철도기술연구원(2001), 전철구조물의 수명예측기법에 관한 연구