

부식에 의한 가선재 수명특성에 관한 연구

The Effect of Corrosion on the Fatigue Life of Catenary Wire

김용기* 장세기** 이덕희*** 정병철****

Kim, Yong-Ki Chang, Seky Lee, Duck-Hee Jung, Byung-Chul

ABSTRACT

Contact lines are necessary to supply electric locomotives with electric power. As most railways are gradually electrified with modernized electric cars, the demand for catenary wires and their facilities are also increased. Catenary wires made by metallic materials are generally used in the open air. They are exposed to the marine area with air-borne salt or severely polluted industrial area with much corrosive emission gases depending on the railway locations. In urban area, acid rain may cause a degradation of catenary wire system. Corrosion of catenary wires can make their actual lifetime shorter than that originally designed. Thus, the messenger wires, a kind of catenary wire system, were investigated with respect to corrosion, which include new and the used one collected at the field. They are also vibrated with some amplitude everytime the train passes through the railway. The frequent cyclic load on the wire may result in a fatigue damage. Surface damage by corrosion can make fatigue crack initiate with ease. In the present study, the fatigue life of the used wire was measured 40 to 50% shorter than that of new one in average.

1. 서론

전차선로는 전기철도 설비의 주체가 되는 것으로 전기차에 전력을 직접 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히 최근 전기차의 고속화 대용량화 운전시각의 단축으로 대량 운전화 됨에 따라 전차선로 성능의 신뢰도 향상이 요구되고 있다.

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.

금속이 대기 중에 노출될 때 금속표면은 어느 정도 부식되는 것이 일반적이다. 대기의 구성성분은 크게 질소, 산소 외에 수분, 염분, 인위적으로 발생하는 SO₂ 및 NO₂ 등이 있으며, 이중 금속의

* 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원

** 한국철도기술연구원 시설연구본부 책임연구원

*** 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원

**** 한국철도기술연구원 시설연구본부 연구원

부식반응에 직접 관여하는 성분은 산소와 수분이며 염소이온, SO₂, NO₂ 등은 그 농도와 금속의 종류에 따라 금속표면 피막의 성질과 연속성을 변화시킨다. 금속표면 피막에서 미세한 균열이 발생하면 그 틈에서 산소와 수분의 반응으로 부식이 진행되며, 특히 SO₂, NO₂ 등은 수분과 반응하면 산화성 산으로 작용하여 부식가속화 물질로 불리기 때문에 향후 전차선로 가선재의 폭넓은 적용과 향후 재질의 연구개발을 위해서는 이러한 환경에서의 부식특성 평가가 체계적으로 이루어져야 한다.

대기 중에 노출되어 있는 전차선로 가선재는 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. 가선재의 미세균열의 발생은 열차안전운행의 커다란 장애요인으로 작용할 수 있어 가선재의 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 빔과 부속설비에 장착되어 장력과 자중에 의한 하중조건에서 유지되는 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 피로 거동에 미치는 영향을 피로시험을 통해 알아보았다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 선재는 전차선로 가선재중 조가선으로 널리 사용되고 있는 카드뮴동연선 (Cu-Cd)으로 조가선의 화학적 성분은 ICP(Inductively coupled plasma)로 분석 후 그 성분을 중량비로 표 1에 나타내었다.

표 1. 조가선 화학적 조성 (wt%)

성분 종류	Cu	Fe	Mg	Al	Zn	Cd
조가선	98.659	0.0059	0.0009	0.02	0.1247	1.18

조가선의 표면부식 산화층을 분석하기 위해 시편을 에폭시 수지(epoxy resin)로 마운팅한 후 2000 grit 의 사포로 연마하고 산화알루미늄(0.3마이크론 Al₂O₃)분말을 이용하여 연마천에서 마무리 연마를 하였다. 시편표면에 생성된 표면 부식층과 부식생성물은 주사전자현미경, X선 광전자 분석법(Electron Probe X-ray Micro Analyzer)으로 화학조성 및 형상 등을 관찰하였다.

가선재의 피로특성에 대한 연구는 아직까지 전무한 실정이며, 시험표준조차 제대로 정립되어 있지 않은 현실이다. 가선재의 피로특성은 소재의 상태, 가공방법, 하중종류, 응력집중, 사용 환경 등에 따라 매우 크게 변화되며 실제 사용 중에는 반복하중에 의한 손상과 부식에 의한 손상을 입게 되므로 가선재(Catenary wire)에 대한 소재의 피로특성을 파악하기란 매우 어렵다. 본 연구에서는 처음으로 전차선로 구성품의 가선재 중 조가선의 피로특성을 파악하기 위한 피로시험을 수행하여 피로거동을 조사하였다.

그림 1은 피로시험을 위한 조가선의 시험편을 보여주며, 피로시험기에 사용된 시험기는 600N ~500KN(영 ESH)로서 유압식 피로시험기(Servo-Hydraulic Fatigue Testing Machine)이며 그림 2는 Grip의 형상으로 시험편을 시험기에 장착한 모습을 보여준다.

피로시험에 사용된 시험편은 연선으로 시험편의 제작은 1/2" 소켓에 시편을 넣어 특수본드로

합침시킨 후 몰당하여 경화시킨 다음 피로시험용 그립(grip)을 제작하여 시험편으로 하였다. 또한 피로시험을 위해 사용된 조가선의 시료는 현장에서 실제 가설되어 사용된 것으로 경년은 26년이 었다. 수거된 시료는 총 11개를 시험용 시편으로 하였는데 조가선은 제조일로부터 경년은 무시하 였고 제작회사를 고려하지 않았다.

시험방법은 응력 제어방식으로서 하중파형은 정현파(Sinewave), 일축 인장-인장에 의하여 응력 비를 채택하였고, 하중주파수는 10Hz로 일정하게 하고 상온에서 습도 $50 \pm 5\%$, 최대공칭응력 (P_{max})을 인장강도의 80%로부터 시작하여 단계적으로 감소시켜 피로한도는 10^7 cycles 이상에서 는 파단되지 않는 하중으로 하였다.

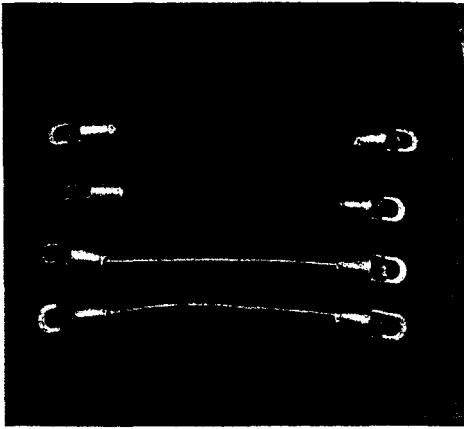


그림 1. 피로시험 시험편(신품, 사용품)

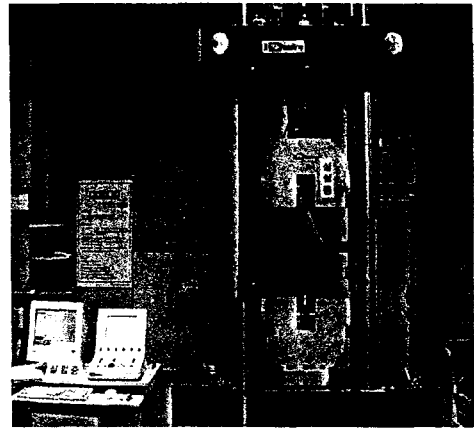


그림 2. 피로시험장면)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가선재의 표면 산화층 분석

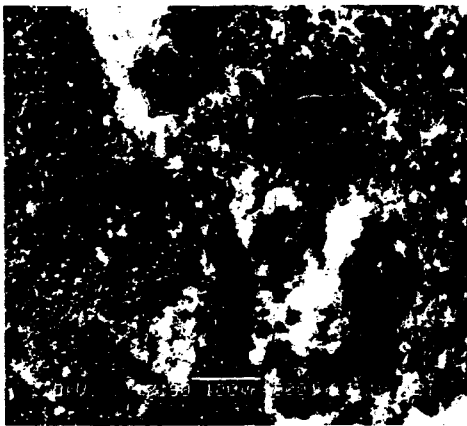
그림 3(a)은 20년 사용된 조가선 표면 산화층을 분석한 것으로서 산화층(흰색부분)은 전체 표면 에 균일하게 생성하여 분포되어 있고, 그림 3(b)의 부식층이 심한 부위를 살펴보면 표면이 부풀어 올라 부식밀도가 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 부식층은 부동태 피막으로서 작용하지만 환경오 염으로 인한 황화물의 영향으로 산화층을 형성하여 거칠기를 심화시키고 유효 단면적을 감소시켜 미세균열을 발생시킬 수 있다. 산화층은 더 나아가 재료의 표면거칠기를 변화시켜 재료의 피로강 도의 저하에 영향을 미치는 것을 피로시험을 통해 알 수 있었다.

그림 4는 조가선의 단면조직에 대해서 EPMA에 의한 선 분석을 한 결과이다. 조가선의 표면에 형성된 부식층은 두께가 약 $28\mu\text{m}$ 이며 부식층에는 산소 및 구리를 비롯하여 황, 철, 규소, 알루미늄, 아연 등의 성분이 함유되어 있었다. 조가선의 부식은 구리의 산화물인 Cu_2O 가 주를 이루고 있 으나 EPMA 분석으로부터 황화층 역시 상당히 검출되었다. 구리의 황화물은 산화물과 달리 구조 적으로 취약하고 구리 모재와의 결합력이 약하여, 진동과 마찰이 심한 경우에는 부식 산화층이 모재로 부터 떨어져 나갈 수가 있다. 조가선에는 황화 구리층 외에도 많은 이물질들이 표면에 흡착되어 있었는데 환경오염 성분(가스상 및 분진)이 대기중의 수분과 작용하여 표면에 부착되면 건·습의 반복에 의하여 부식을 가속시키는 요인으로 작용할 수 있다.

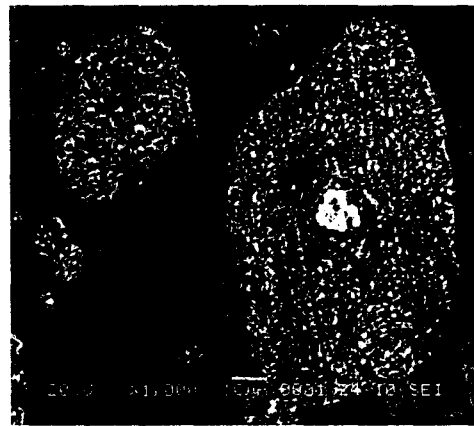
그림 5(a)에서 부식이 진행된 조가선의 단면조직을 살펴보면 왼쪽의 검게 나타난 부분은 몰당부 이고, 분리된 회색부분은 산화층, 흰색부분은 모재를 나타낸다. 표층부에서 산화/황화된 부식층과 구리가 주성분인 모재가 관찰되며 이들의 경계선이 뚜렷이 구별이 되고 결합상태가 취약하게 나

타난다. 부식층과 모재는 시편의 준비과정에서 약간의 분리가 되었는데 이는 모재가 산화 및 황화 과정을 거치면서 결합력이 약해지고 결국은 모재로부터 분리되어 시간이 지남에 따라 조가선의 두께가 감소되어 질 수 있음을 보여준다. 그림을 좀더 자세히 살펴보면 부식층의 주성분은 구리와 산소, 즉 산화구리이지만 황 성분도 전체적으로 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 산화구리 자체는 안정된 산화막을 형성시키지만 황화물과 혼재하게 되면 부식층의 조밀도가 떨어지고 부식 환경 하에서 모재의 열화는 계속적으로 진행이 일어나게 된다.

그림 5(b, c, d)조가선의 단면조직에 대한 원소별 mapping을 살펴보면 (b), (c), (d)의 흰색부분은 구리, 산소, 황원소의 분포를 나타낸다. 모재의 부식층에는 구리, 산소, 황 이외에 철, 알루미늄, 규소 및 아연성분 등도 함께 검출이 되었는데 이들은 열차의 운행 중에 발생하는 차륜과 레일의 금속마모분과 토양성분 등이 와류에 의해 발생하는 먼지 등이 주위 환경으로부터 유입된 것으로 판단된다. 먼지 및 수분 등과 함께 공기 중에 부유하는 이들 물질이 조가선의 표면에 흡착을 하고 다시 이들은 산소 및 아황산가스등과 반응을 하여 화합물을 형성하면서 조가선 모재의 부식층에 분포하고 부식의 상승작용을 일으킨다. 이들은 그림에서 살펴보면 불연속적이고 불균일하게 모재의 부식층 전반에 걸쳐 존재하는데 이러한 일종의 이물질들이 부식층에 존재를 하면 대기중의 아황산가스와 같은 유해성 성분이 농도 차이에 의해서 부식층의 표면으로부터 모재와 부식층의 계면으로 유입되는 통로를 제공하여 새로운 모재의 부식을 촉진시킬 수 있는 가능성을 높이게 된다. 위와 같은 부식과정을 계속적으로 거치면서 새롭게 생성된 부식층은 외부의 진동에 의해서 쉽게 떨어져나가고 동시에 모재와 부식층의 계면에서 지속적으로 진행되는 산화/황화반응은 새로운 모재를 부식시키면서 모재인 조가선의 두께는 서서히 감소하게 된다. 조가선의 두께가 원래의 설계 값보다 얇아지게 되면 국부적인 결합발생에 의해서도 파손의 가능성이 매우 높아지게 되면서 전체 수명이 단축된다.



(a) 가선재 표면 부식층



(b) 부식이 심한 부위

그림 3. 조가선의 표면부식 산화층

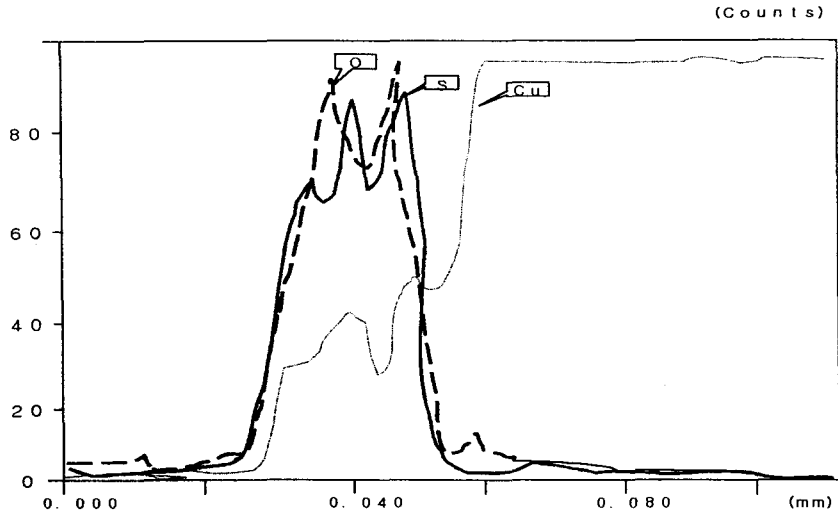
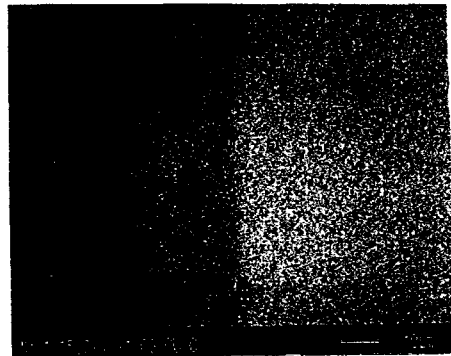


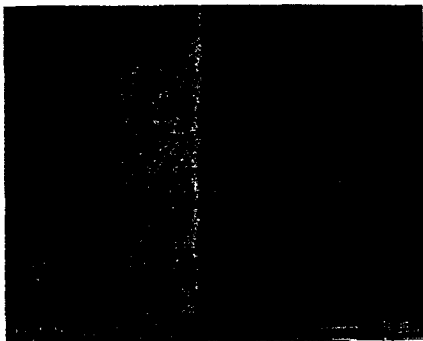
그림 4. 조가선의 선 분석



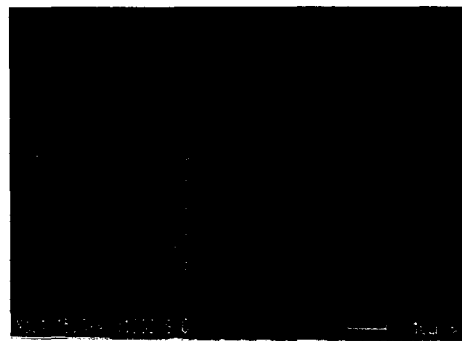
(a) 단면조직



(b) 구리(Cu)원소 mapping



(c) 산소(O)원소 mapping



(d) 황(S)원소 mapping

그림 5. 조가선 단면조직 및 원소별 mapping

3.2 피로파괴 거동

조가선에 대한 피로시험 결과를 그림 6에서 살펴보면 신품과 사용품 모두 유사한 추세를 나타내었다. 신품과 사용품 모두 동일한 응력에서 파괴까지의 사이클수를 비교하면서 11개 조건에 대해 응력을 변화시켜 나갔다. 시험을 하면서 시험편이 하나라도 파단되는 사이클 수를 감지하여 이를 파손으로 간주하였다. 조가선의 피로시험은 인장-인장 방식으로 하였다. 피로시험을 위한 응력값이 높은 상태에서는 두 조건의 조가선들이 수십만 회의 사이클 이내에서 파괴되었으나 응력값이 감소됨에 따라 파괴까지 이르는 사이클수는 증가하였고, 따라서 1000만회를 전후하여 시험을 정지하였다. 동일한 응력값이 적용된 신품과 사용품의 경우, S-N 곡선에 나타난 가장 낮은 응력값에서 신품은 1000만회까지 파단이 안되었으나 사용품은 1000만회 이전에 파단이 되었다. 그러나, 신품을 기준하여 이 이하의 응력값에서는 더 이상 시험을 진행하지 않았다.

사용품들의 피로파괴수명은 신품과 비교할 때 50~60% 정도의 피로수명을 나타내고 있다. 이는 부식환경에 노출된 조가선의 표면에 부식 산화층이 발달하면서 피로균열의 시작이 보다 용이해졌기 때문이다. 부식층의 두께는 앞서 살펴본 바와 같이 약 28 μ m이며 이러한 부식층의 형성은 조가선의 단면적 감소를 야기시키는 물론 표면을 더욱 거칠게 한다. 피로파괴는 일반적으로 재료의 파괴응력보다 낮은 응력에서 진전되기 때문에 표면의 거칠기가 심해지면 피로균열의 초기발달이 보다 쉽게 형성된다. 조가선의 표면 부식층에서는 황화물도 검출되었으며 이들 황화물은 조가선의 모재 깊숙이 국부적으로 침투하여 재료를 더욱 취약화시킬 수 있다.

따라서 도심 및 공장지역 또는 해안지역을 따라 설치된 전차선 가선재들은 초기의 설계기준에 의해 설정된 사용수명보다 조기에 파손될 가능성이 훨씬 높아진다. 그림 6에서 보면 10.5 kg/mm²의 응력에서 신품은 1000만회를 상회하여도 파괴가 일어나지 않았으나 공장지역에 노출되어 사용된 조가선은 700만회 전후하여 파괴가 일어났음은 이러한 부식의 영향을 잘 보여주고 있다. 부식이 심한 지역에서 사용되는 가선재에 대해서는 파잉 소재설계를 하거나 유지보수 또는 교체주기를 일반적인 환경에서보다 단축시킬 필요가 있다.

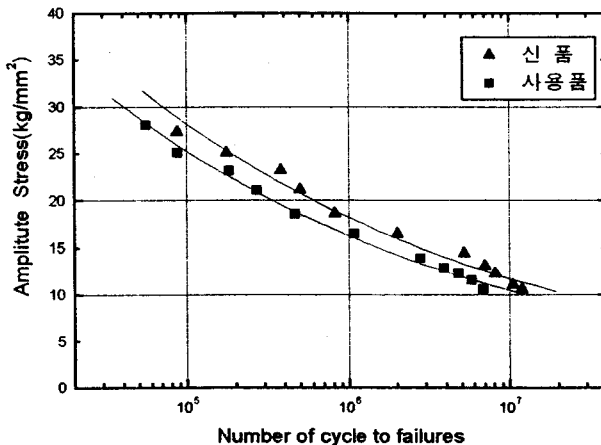


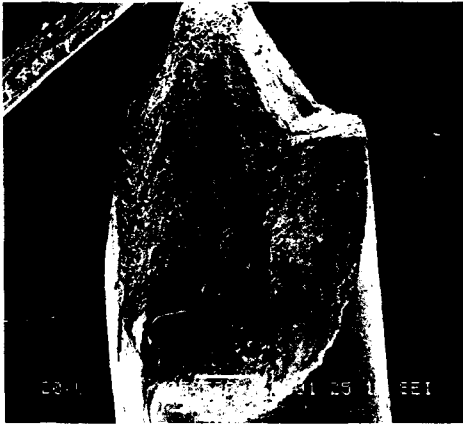
그림 6. 조가선의 S-N선도

3.4 피로 파단면 분석

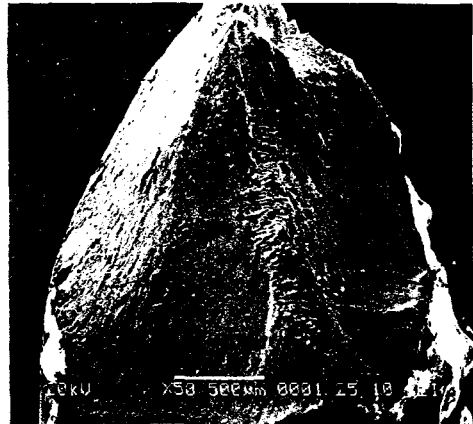
그림 7은 피로시험에 의해서 파단된 조가선들의 파괴양상을 보여준다. 시험편에 주어진 하중의 차이에 따라 파단면의 형태가 약간씩 달라지고 있음을 알 수 있다. 피로에 의한 균열은 하중이 가

해진 축에 대해서 50도 내외의 각을 이루며 전파되어 파괴에 이르렀다. 피로파괴의 초기현상인 파형무늬(beach mark)의 발달은 조가선의 표면부위에서 시작하여 파단 경사면을 따라 진행되어 가고 있음이 사진에서 나타난다. 조가선의 중심부에서는 연성파괴와 취성파괴의 형태가 혼재되어 나타난다. 국부적으로 파형무늬가 존재하지만 대부분 취성에 의한 파괴가 피로응력의 증가와 함께 지배적이 되어간다. 최대하중이 200 kg/mm^2 에 이르러서는 초기에 약간의 연성파괴가 발달하다가 조가선의 중심부에서는 거의 취성파괴에 의해 파단되어 짐을 알 수 있다.

본 실험에 사용된 조가선은 99%에 가까운 구리선이며 계재물(including) 등의 존재는 관찰되지 않았다. 일반적으로 결정립내에 큰 계재물이 존재하면 응력의 집중화에 의해서 피로파괴 시 균열의 제공원이 될 수 있다. 그러나, 본 실험에 사용된 조가선의 경우, 초기균열의 시작은 표면에서 발달하였다. 피로에 의한 반복응력을 받게되면 재료표면에서 전단력에 의해 슬립밴드가 형성되고 이는 초기 균열의 시작점으로 작용할 수 있는데, 표면의 조직 거칠기에 따라 영향을 받게된다. 표면에 부식층 등이 발달하여 표면이 거칠어지고 동시에 취성의 부식 산화물들이 결정립계를 따라 형성되면서 피로에 의한 반복응력이 작용할 때 초기균열의 시작 및 전파는 더욱 용이해진다.



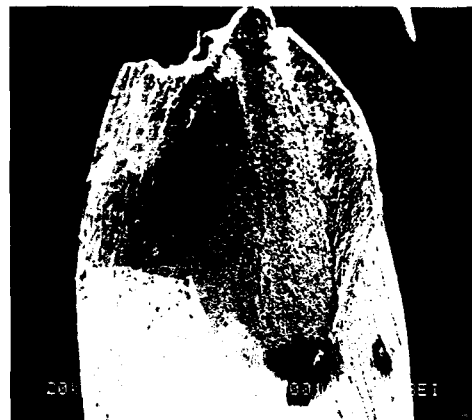
(a) $P_{max} 120\text{kg/mm}^2$



(b) $P_{max} 150\text{kg/mm}^2$



(c) $P_{max} 180\text{kg/mm}^2$



(d) $P_{max} 200\text{kg/mm}^2$

그림 7. 피로파괴 하중별 파단면

4. 결론

옥외에 노출되어 전차선로 가선재로 사용되고 있는 조가선의 산화층분석 및 단면조직의 결합과 부식층의 두께를 측정하였다. 부식이 가선재의 피로특성에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전차선로 가선재의 설비노후화 및 부식열화는 열차운행에 장애를 일으킬 수 있는 요인으로 작용될 수 있으므로 가선재의 보수유지 관리를 극대화시키기 위해 피로 수명특성 확보가 필요하다.

2. 부식열화된 조가선은 약 28 μ m 두께의 산화층이 형성되어 있었다. 산화층은 구조적으로 취약하고 모재와의 결합력이 약하여 진동과 마찰에 의해 이탈되면서 모재의 두께를 감소시키는 물론 표면의 거칠기를 심화시키므로 피로균열의 개시점을 제공하여 외부응력에 의한 예기치않은 파손의 가능성을 높여 준다.

3. 조가선 신품의 경우 피로한도는 10.5kg/mm²에서 1,100만회 이상의 피로 수명을 나타내었으며 사용품은 동일 응력에서 신품대비 50~60%정도로 나타났다. 따라서 도심 및 공장지대 또는 환경이 열악한 지역에 설치된 조가선은 부식에 의한 열화, 전기적 방전, 기계적 충격 및 진동 등의 내외적인 요인으로 실제 사용수명은 설계상의 사용수명보다 단축될 수 있고 따라서 이러한 환경에서 사용되는 경우에는 안전기준의 상향조정을 검토 할 필요가 있다.

4. 가선재의 피로 파단면을 조사한 결과 전형적인 입내파단 양상을 보였으며 초기균열은 표면에서 발달하였다. 조가선의 중심부에서는 연성과파괴와 취성과파괴가 혼재되어 나타났으며, 개재물에 의한 영향은 발견되지 않았다. 부식환경에서 형성된 산화/황화층은 표면을 거칠게하여 피로균열의 초기 발달을 용이하게 하므로 지속적인 반복응력을 받게되면 정상적인 상태일 때보다 사용수명이 단축될 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 高明地哲人, 大氣汚染による腐食, 金屬, 1992. 2
2. 김용기, 전철구조물의 수명측기법에 관한 연구, 한국철도기술연구원(2000)
3. 青木純久, 金屬の損傷とその對策, 鐵道と電氣技術, Vol. 4, No. 5(1993)
4. Christofer Leygraf, The Atmospheric Corrosion of Copper, A John Wiley&Sons, INC., Publication(2000)
5. 김병걸 외 2인, 가공송전용 고탄소강선의 Tension-tension 피로특성, 대한금속·재료학회지, Vol. 39, No. 6(2001)
6. 桐村勝也, 工場環境における加線材料の耐蝕性, RTRI, Vol. 3, No. 12(1989)
7. 青木純久, トロリ線材料としての析出強化型銅合金の耐久性評價, RTRI, Vol. 12, No. 19(1998)
8. 서창민, 구조물의 피로파괴와 인간의 병사, 대한기계학회지 제32권 제11호(1992)
9. 국정환 외 3인, 신편 재료파괴강도학, 원창출판사(2000)