

가선재의 기계적특성에 미치는 부식환경의 영향

Effects of Corrosion Environment on Mechanical Properties of Catenary Wires

김용기¹, 장세기², 조성일³,
Yong-Ki Kim, Seky Chang, Sung-Il Cho

KeyWords : Catenary Wires(전차선로 가선재), Corrosion(부식), Tensile Strength(인장강도),
Fatigue Life(피로수명),

Abstract

As most railways are gradually electrified with modernized electric cars, the demand for catenary wires and their facilities are also increased. Catenary Wires are exposed to the marine area with air-borne salt or severely polluted industrial area with much corrosive emission gases depending on the locations. Corrosion of catenary wires can make their actual lifetime shorter than that originally designed. Thus, the messenger and ACSR wires, kinds of catenary wire system, were investigated with respect to corrosion, which include new and used ones collected at the field. Tensile strengths and elongations appeared to decrease when the wires were exposed to corrosive environments. The amount of decrease was more prominent as environmental conditions became more corrosive. They are also vibrated with some amplitude everytime pantographs touch contact line. 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 50 to 60% compared with that of new one in average.

1. 서론

전차선로는 전기철도에서 전동차에 전기를 공급하는 카테나리시스템(Catenary system)의 핵심 구성품으로서 전철의 주행 및 안정적 운행 등에 절대적인 영향을 주고 있으며, 전차선로를 구성하는 조가선은 전차선의 조가방식에 따라 여러 종류의 전선이 사용되고 있으나 일반적으로 열차운행 증가에 따른 전류의 증가와 대도시 및 공장지대에서의 공해에 의한 부식방지를 위하여 단면적 70mm² 카드뮴동연선(Cu-Cd)

을 사용한다. 조가선에 제일 요구하는 성능은 인장하중이 큰 것이지만, 전차선용 전선은 단독으로 사용되는 기계적 진동, 마모특성, 이종금속과의 전기·화학적 접촉부식 특성을 고려할 필요가 있다. 또한 가공지선은 단면적 58mm²의 강심알루미늄연선(Aluminum Conductors Steel Reinforced : ACSR)을 사용하고 있다. 가공지선의 주역할 중 하나는 가공송전선로에 유입되는 낙뢰서지전압을 흡수하여 대지로 방출시키므로써 전력공급의 안정화와 신뢰성을 유지하는 것이다. 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 알루미늄연

*1 정회원 한국철도기술연구원 책임연구원
*2 정회원 한국철도기술연구원 책임연구원
*3 비회원 서울시립대학교 화학공학과 교수

선으로 구성되어 뇌전류나 이상전류의 대지방출을 용이하게 한다. 내층 강선은 용융아연도금 강선이며 인장을 담당한다 [1].

강선이 대기에 노출되면 부식이 급속하게 진행되므로 균열 공식과 같은 국부결함이 발생하고 따라서 인장특성을 이용하는 가공공동지선의 파선 또는 단선사고를 유발한다. 이와 같은 단선사고의 주요원인은 부식과 진동에 의한 피로파괴로 보고되고 있다 [2].

특히 강선의 파괴는 강선자체의 열악한 피로 특성으로 인한 것 뿐만 아니라 연선된(stranded) 알루미늄도체와 강선과의 마찰로 인해 아연도금층의 일부가 손상되어 그 부분에서 국부적으로 급속히 부식이 일어나 파괴가 발생하는 두가지 양상으로 구분된다 [3].

대기오염물질중 아황산가스(SO₂)와 질소산화물(NO_x)등은 태양광선에 위해서 황산기(SO₄²⁻)나 질산기(NO₃)의 에어로졸로 변환되고 이들은 공기 중에 수분(H₂O)이 있으면 황산(H₂SO₄)이나 질산(HNO₃)으로 되어 급속을 부식시킨다 [4, 5]. 대기중의 입자상 물질은 대기수증기의 응결핵 작용으로 구름이 형성되어 비나 오염물이 섞여내리게 되어 금속의 부식에 영향을 미친다 이와 같은 오염물질 중에 가선재를 장기간 노출시키면 부식 열화가 촉진되면서 기계적 강도를 저하시키고 미세균열을 발생시켜 파손을 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ACSR선과 조가선의 사용수명에 미치는 영향을 부식특성 및 기계적특성의 변화측면에서 조사·분석하였다.

2. 실험방법

조가선과 ACSR 강심의 표면부식층을 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(SEM&EDS : Jeol, JSM 5600)을 이용하여 재료의 부식표면층을 관찰하였다.

조가선의 소선 및 ACSR의 강심에 대한 인장시험시편은 stainless steel tube 속에 특수본드를 이용하여 제작하였고, 표점거리는 100mm로 하였다. 인장시험시 인장속도를 10mm/min의 속도로 유압식 인장시험기(MTS 810)를 이용하여 시험하였다. 강심은 27년간 공해지역에서 철거된 사용품을 사용하여 시편을 제작하였다.

인장시험에 사용된 조가선 시편은 신품을 사용하여 제작하였으며, 부식조건에 따른 인장특성을 비교하기 위해 SO₂ 10, 20ppm에서 1~4주간 가속부식(Suga, GS-ISO-3CS)시킨 후 시료를 신품과 비교하여 평가하였다. 본 실험에 사용된 가스는 SO₂+N₂ 혼합가스(3% SO₂)와 공기를 혼합하여 10, 20ppm의 SO₂농도를 가지도록 혼합가스를 용기내에 유입시켜 시험기내에 장착된 자동팬을 회전시켜 시험기 내부에서 농도를 균일하게 유지토록 하였다.

장기간 옥외의 노출로 인한 부식의 영향을 고려한 조가선의 피로특성을 파악하기 위한 피로시험을 수행하여 피로거동을 조사하였다. 피로 시험기에 사용된 시험기의 하중은 600N~500KN으로서 유압식 피로시험기(ESH)를 이용하였다.

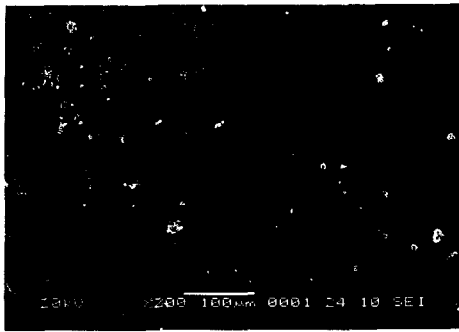
3. 실험결과 및 고찰

3.1 가선재의 표면 산화층 분석

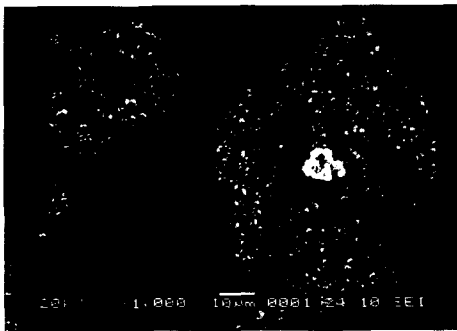
Fig. 1(a)은 26년간 사용된 조가선의 사용품에 대한 표면 부식층을 분석한 것으로서 부식층(흰색부분)은 전체 표면에 균일하게 생성하여 분포되어 있다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 부식층이 심한 부위를 관찰한 것으로 표면이 부풀어 올라 부식밀도가 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 부식층은 부동태 피막으로서 작용하지만 환경오염으로 인한 황화물의 영향으로 부동태피막을 취약화시켜 표면을 거칠게 하고 모재의 부식을 촉진시키면서 거칠기를 심화시키고 유효 단면적을 감소시켜 미세균열을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 산화층은 더 나아가 재료의 표면거칠기를 변화시켜 재료의 피로강도 저하에 영향을 미치는 것을 피로시험을 통해 알 수 있었다.

Fig. 2(a)는 26년간 사용된 ACSR의 아연도금 강심 표면 부식층을 분석한 것이다. Fig. 2(b)를 살펴 보면 전반적으로 도금층의 부식이 심하게 일어났으며, 또한 국부적으로 미세균열이 발생하였는데 이러한 결함 부위를 따라 부식의 진전이 심하게 일어나서 강심까지 부식손상을 일으킬 수 있다.

Fig. 3은 조가선을 아황산가스 10ppm의 분위기에서 1일, 3일, 5일, 7일 동안 가속 부식시킨 결과에 대한 단면조직이다. 사진에서 우측 밝은부위는 조가선 단면이며 좌측 어두운 부위는 몰딩부이다. 이는 인위적으로 부식층을 형성시켜서 부식층 형성에 소요되는



(a)



(b)

Fig. 1 SEM images of surface corrosion layer of messenger wire

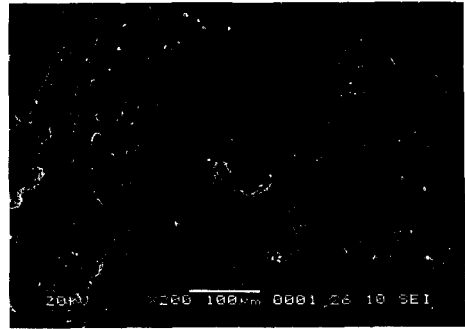
시간을 단축시킴으로써 부식층의 형성에 관련된 정보들을 다양하게 얻기 위함이다.

아황산가스 10ppm의 분위기에서 5일까지 노출시킨 조가선의 표면에서는 산화층의 발달이 뚜렷히 관찰되지 않았다. 그러나 7일 동안 노출시킨 조가선의 표면에는 약 10 μ m 내외의 부식층이 발달되어 있다. 향후, 다양한 부식분위기에서 형성된 부식층의 두께로부터 기존의 가선재들에 대한 수명을 예측하는데 활용가능한 자료로 사용될 수 있다.

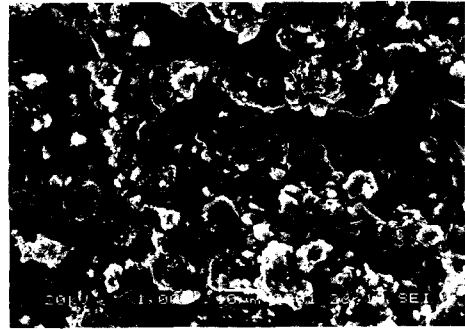
Table 1은 Fig. 4와 Fig. 5의 산화층에 대한 정성분석결과를 각각의 검출된 원소에 대해서 정성적 peak의 측정값과 초기 설정값의 비로 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 부식이 진행된 조가선의 단면조직을 살펴보면 왼쪽의 검게 나타난 부분은 몰딩부이고, 분리된 회색부분은 산화층, 흰색부분은 모재를 나타낸다.

Table 1에 나타난 바와 같이 표층부의 산화/황화된 부식층과 구리가 주성분인 모재가 관찰되며 이들의 경계선이 뚜렷이 구별이 되고 결합상태가 취약하게 나타난다.



(a)



(b)

Fig. 2. SEM images of surface corrosion layer of ACSR wire

Fig. 4(a)를 살펴보면 부식층과 모재는 시편의 준비 과정에서 약간 분리가 되었는데 이는 모재가 산화 및 황화과정을 거치면서 결합력이 약해지고 결국은 모재로 부터 분리되며 시간이 지남에 따라 이러한 과정이 계속적으로 발생되면서 조가선의 두께가 감소되어 질 수 있음을 보여준다. 그림을 좀더 자세히 살펴보면 부식층의 주성분은 구리와 산소, 즉 산화구리이지만 황성분도 전체적으로 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 산화구리 자체는 안정된 산화막을 형성시키지만 황화물과 혼재하게 되면 부식층의 조밀도가 떨어지고 부식환경 하에서 모재의 열화는 계속적으로 진행되게 된다.

Fig. 4에서 조가선의 단면조직에 대한 원소별 mapping을 살펴보면 (b), (c)의 흰색부분은 각각 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 먼지등이 주위 환경으로부터

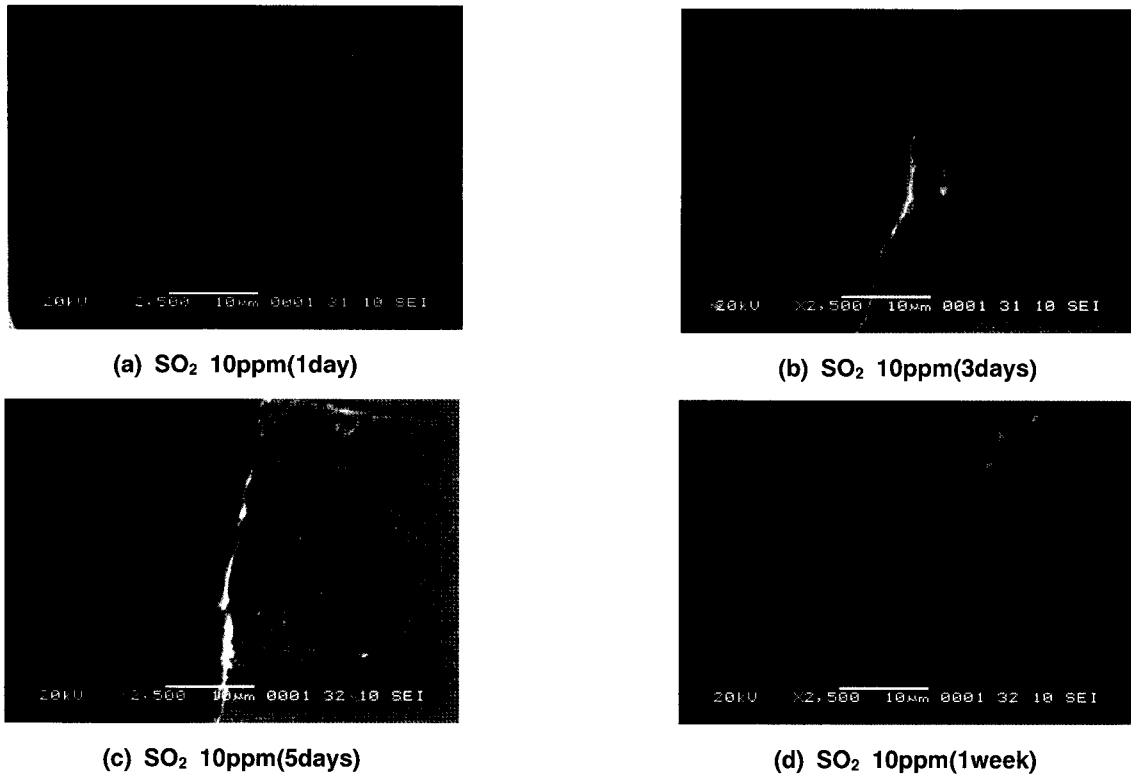


Fig 3. Cross sections of messenger wires exposed to corrosive environments

유입된 것으로 판단된다. 먼지 및 수분 등과 함께 공기중에 부유하는 이들 물질이 조가선의 표면에 흡착을 하고 있다.

다시 이들은 산소 및 아황산가스등과 반응을 하여 화합물을 형성하면서 조가선 모재의 부식층에 분포하고 부식의 상승작용을 일으킨다.

Fig. 5(a)를 관찰한 결과 표면에 약 70 μ m의 아연이 피복되어 있었으며 아연 피복층의 60~70% 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.

Fig. 5(b, c)는 ACSR선의 단면을 EPMA에 의해서 조직 및 성분 Mapping을 한 결과이다. 단면조직에 대한 성분분석을 보면, 철심소재와 아연층, 아연산화층의 3 구역으로 크게 구분되며 부식층은 35~40 μ m

정도였다. 아연층의 하단부는 확산에 의해서 철이 아연층 깊숙이 침투를 하였고 상단부는 산소와 황에 의해서 부식이 많이 진행되었다. 그러나, 아연으로 피복된 철심소재는 아직 산소 및 황과의 반응이 진행되지 않고 아연에 의해서 보호받고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Peak ratios of surface scale formed on messenger and ACSR Wire(measured/set value)

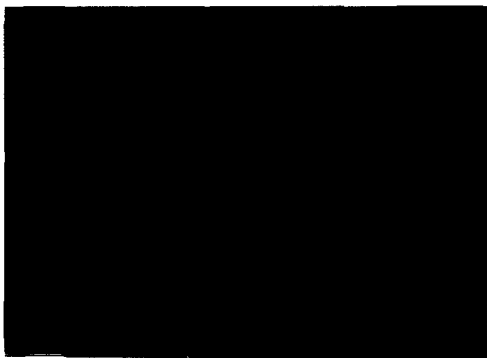
Component	Messenger wire	ACSR wire
	Peak Ratio	Peak Ratio
Fe-Ka	190/1000	5716/15500
O-Ka	1232/7000	1394/5000
S-Ka	246/1500	184/900
Zn-Ka	117/500	2281/7000
Al-Ka	196/2500	-
Cu-Ka	5032/10000	-
Si-Ka	62/1000	-



(a)

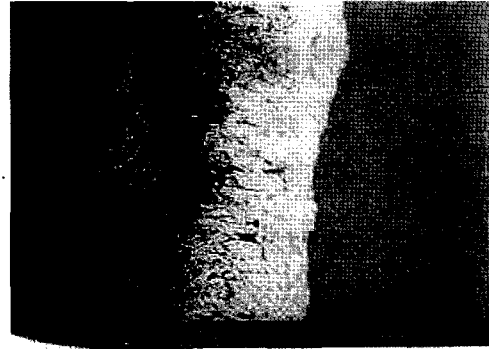


(b)

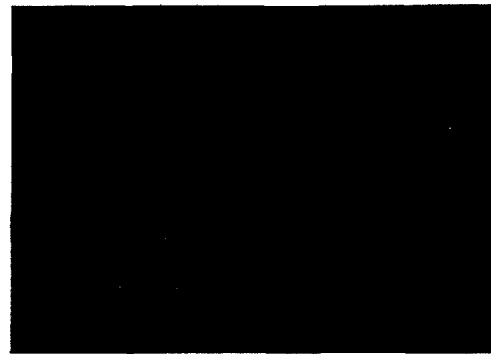


(c)

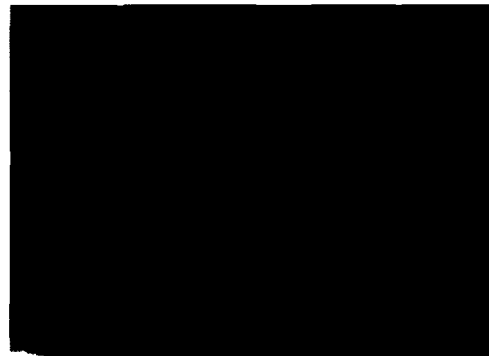
Fig 4. Cross section of messenger wire used at the field : (a) SEM image, (b) Oxygen mapping, (c) Sulfur mapping



(a)



(b)



(c)

Fig 5. Cross section of ACSR wire used at the field: (a) SEM image, (b) Oxygen mapping, (c) Sulfur mapping

3.2 인장특성

각 부식조건에 대해서 인장시험을 실시하였으며, 그 평균값으로 인장강도를 구하였다. Fig. 6은 부식환

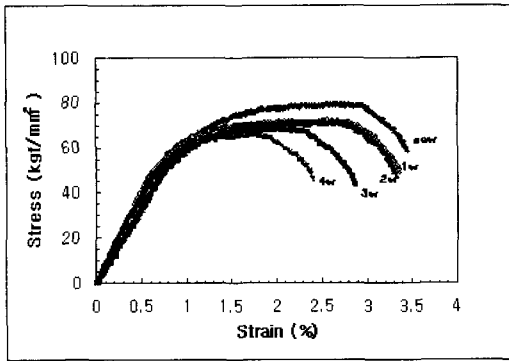


Fig 6. Tensile strength of messenger wires exposed to the corrosive environments of SO₂ 10ppm(1, 2, 3, 4 weeks)

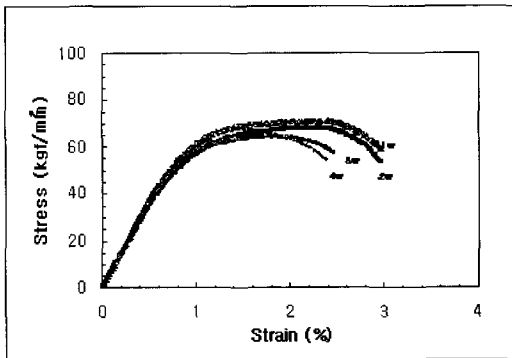


Fig 7. Tensile strength of messenger wires exposed to the corrosive environments of SO₂ 20ppm(1, 2, 3, 4 weeks)

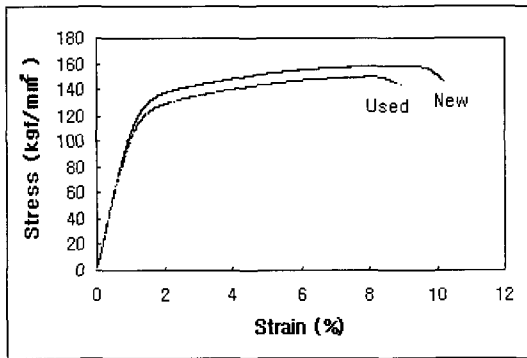


Fig 8. Tensile strength of new and used ACSR wires, respectively

경 노출시간을 다르게한 인장시험 결과를 보여주고 있다. 임의로 1~4주간 가속부식시킨 시편에 대해 인

장시험을 실시한 결과 SO₂ 10ppm의 농도조건하에서는 노출시간에 따라 인장강도는 신품(76.29kgf/mm²)에 비하여 6~31% 감소를 나타내었다.

Fig. 7 역시 각 부식시간에 따른 인장시험 결과를 보여주고 있는데 1~4주간 가속부식시킨 시편에 대해 인장시험을 실시한 결과 SO₂ 20ppm의 농도조건하에서도 부식시간에 따라 인장강도는 신품에 비하여 8~37%의 큰 감소를 보였다.

가공지선의 강도를 유지해 주는 강선의 기계적 거동을 살펴보기 위해 강선의 신품과 사용품에 대해 인장시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 평균 인장강도는 158.3kg/mm², 연신율이 10.0%로서 신품에 비해 인장강도와 연신률은 약 5%씩 감소하였다.

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

3.3 피로거동 특성

조가선에 대한 피로시험 Fig. 9를 살펴보면 신품과 사용품 모두 유사한 추세를 나타내었다. 신품과 사용품 모두 동일한 응력조건에서 파괴까지의 사이클수를 비교하면서 응력을 변화시켜 나갔다. 시험을 하면서 연선중의 한 개의 소선이라도 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 증가하였다. 동일한 응력값이 적용된 신품과 사용품의 경우,

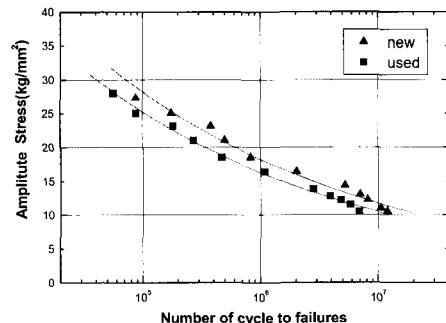


Fig. 9 S-N diagram of messenger wires

S-N 곡선에 나타난 가장 낮은 응력값에서 신품은 1000만회까지 파단이 안되었으나 사용품은 1000만회 이전에 파단이 되었다.

사용품들의 피로파괴 수명은 Fig. 9에서 신품과 비교할 때 약 50~60%의 피로수명을 나타내고 있다. 이는 부식환경에 노출된 조가선의 표면에 부식 산화층이 발달하면서 피로균열의 시작이 보다 용이해졌기 때문이다. 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.

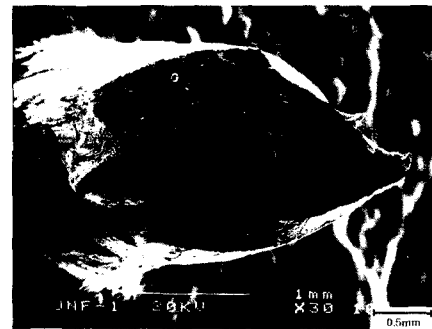
따라서 도심 및 공장지역 또는 해안지역을 따라 설치된 전차선 가선재들은 초기의 설계기준에 의해 설정된 사용수명보다 조기에 파손될 가능성이 훨씬 높아진다. 공장지역에 노출되어 사용된 조가선은 700만회 전후하여 파괴가 일어났는데 이는 부식의 영향을 잘 보여주고 있다. 부식이 심한 지역에서 사용되는 가선재에 대해서는 파인 소재설계를 하거나 유지보수 또는 교체주기를 일반적인 환경에서보다 단축시킬 필요가 있다 [6].

3.4 피로 파단면 분석

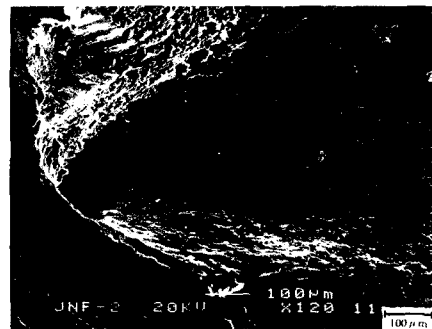
Fig. 10은 반복응력비 0.3에서 최대하중 200kgf로 피로시험한 조가선 신품의 피로파단면의 양상을 보여주고 있다. 표면부의 응력집중점에서 피로파괴가 시작되어 시편전체로 퍼져나갔으며, 피로파괴의 전형적인 물결무늬를 보여주고 있다. 피로파괴의 초기현상인 파형무늬(beach mark)의 발달은 조가선의 표면부위에서 시작하여 파단 경사면을 따라 진행되어 가고 있음을 사진을 통해 알 수 있었다. 조가선의 중심부에서는 연성파괴와 취성파괴의 형태가 혼재되어 나타난다. 국부적으로 파형무늬가 존재하지만 대부분 취성에 의한 파괴가 피로균열의 증가와 함께 지배적이 되어간다. 초기에 약간의 연성파괴가 발달하다가 조가선의 중심부에서는 거의 취성파괴에 의해 파단되어 짐을 알 수 있다.

일반적으로 금속소재가 피로에 의한 반복응력을 받게되면 표면에서 전단력에 의해 슬립밴드가 형성되

고 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) Fracture mode



(b) Fracture crack initiation

Fig 10. Fatigue fracture surface of messenger wire

4. 결론

전차선로 가선재의 표면부식층 분석을 통해서 부식환경이 기계적성질에 미치는 영향을 연구조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 대기오염 환경에 노출된 조가선의 표층부를 분석한 결과 산화구리층과 함께 황화물층도 상당히 검출되었다. 산화물과 황화물은 부식층의 밀도를 증가시키고 모재의 단면적을 감소시켜 국부적인 결함등에 의해서도 파손의 가능성을 증가시키고, 전체적인 수명을 감소시키는 주 요인으로 작용하는 것을 알 수

있었다.

2) 부식열화된 조가선은 약 28 μ m 두께의 부식층이 형성되어 있었다. 부식층은 구조적으로 취약하고 모재와의 결합력이 약하여 진동과 마찰에 의해 이탈되면서 모재의 두께를 감소시키는 물론 표면의 거칠기를 심화시키므로 외부응력에 의한 예기치 않은 파손의 가능성을 높여 준다.

3) 가속부식환경에서 노출시간 및 SO₂ 10, 20ppm 농도에 따라 조가선의 인장강도는 신품에 비하여 각각 6~31%, 8~37%씩 감소하였다. SO₂ 농도 증가에 따라 ACSR의 경우에는 사용품이 신품대비 5%의 인장강도 감소를 나타내었다.

4) 조가선의 피로파단면 조사결과 표면부의 응력집중점에서 피로파괴가 시작되어 시편전체로 퍼져 나갔으며, 또한 연성파괴와 취성파괴가 혼재되어 나타났으나 개재물에 의한 영향은 발견되지 않았다.

5) 조가선 사용품의 피로수명은 S-N선도에서 신품대비 약 50~60%로 나타났으며 이는 부식에 의한 것으로 판단된다. 따라서 도심 및 공장지대 또는 환경이 열악한 지역에 설치된 조가선의 사용수명은 설계상의 사용수명보다 단축될 수 있으므로 안전기준에 대한 상향조정 검토가 필요하다.

5. 참고문헌

1. 김양수, 유해출 공저, 전기철도공학, 통일출판사(1999)
2. 김병길, 김상수 외 2인, 가공송전용 고탄소강선의 Tension-tension 피로특성, 대한금속·재료학회지, Vol. 39, No.6(2001)
3. 정계기, 김성덕 외 2인, 강심 알루미늄연선의 가공지선에 대한 부식검출과 수명예측, Transs, KIEE. Vol. 45, No. 7, Jul(1996)
4. 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)
5. T.E. Graedel, Corrosion Mechanisms for Aluminum Exposed to the Atmosphere : J. Electrochem. Soc., Vol. 136, No. 4, April 1989
6. 김용기, 장세기 외 2인, 전철구조물의 수명예측기법에 관한 연구, 한국철도기술연구원(2001)