

환경열화에 의한 가선재의 피로거동

Fatigue Behavior of Catenary Wires by Environments Degradation

김용기¹ · 장세기¹

Yong-Ki Kim · Seky Chang

Abstract

The effect of surface damage on fatigue properties of catenary wires were investigated to estimate their service life. As surface defects of the wires caused by surface corrosion increase, surface roughness gets worse, and as roughness increases, it is easy for moisture coming from rain and dew to be condensed around uneven parts of the surface. The condensed moisture causes a locally severe corrosion which leads to damage of the wires. Corrosion of catenary wires can make their actual lifetime shorter than that originally designed. 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 fracture. Surface damage by corrosion can make formation of crack initiation at fatigue. In the present study, the fatigue life of the used wire was measured 35 to 50% compared with that of new one in average.

Keywords : Catenary Wires(전차선로 가선재), Corrosion(부식), Surface Roughness(표면거칠기), Fatigue Life(피로수명)

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 공장지대에서의 공해에 의한 부식방지를 위하여 카드뮴동연선(Cu-Cd)를 사용한다. 전차선로 가선재의 경우 수명에 영향을 주는 환경적 인자로는 1) 설치지역의 습도, 온도, 강우, 풍향, 풍속, 2) 대기 오염원에 의한 부식피로(가스상오염물질 ; SO₂, NO₂ 가스 등), 3) 자동차, 주거시설, 공장 등의 배출물 등의 환경 인자가 대기오염원과의 복합적인 작용에 의해 장기간에 걸쳐 부식열화가 일어나고 있다. 산업화에 따른 대기 중 오염가스의 급격한 증가로 인하여 대기환경에 의한 금속

의 대기부식 현상이 점점 심각해지고 있으며, 전차선로 가선재는 사용조건이 대기 중이기 때문에 환경적인 영향을 받는다[1].

대기오염물질중 아황산가스(SO₂)와 질소산화물(NO_x) 등은 태양광선에 의해서 황산기(SO₄²⁻)나 질산기(NO₃⁻)의 에어로졸로 변환되고 이들은 공기 중에 수분(H₂O)이 있으면 황산(H₂SO₄)이나 질산(HNO₃)으로 되어 금속을 부식시킨다[2,3]. 이와 같은 오염물질 중에 가선재를 장기간 노출시키면 부식 열화가 촉진되면서 기계적 강도를 저하시키고 미세균열을 발생시켜 파손을 일으킬 수 있다. 표면부식에 의한 가선재의 주요 손상원인은 가설지역에서의 환경열화가 주요 원인으로 작용하고 있으며, 또한 열차의 운행으로 발생하는 반복 하중에 의한 피로 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 환경열화로 인한 가선재의 표면부식이 피로거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표면거칠기의 측정과 피로시험을 통해 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 표면부식 거동 분석

본 연구에 사용된 조가선(Cu-Cd 합금선)은 전철 가선재로 신품을 비롯하여 가설지역에서 26년간 사용된 것을 시험용 시료로 선정하였다. 조가선의 표면부식층을 분석하기 위해 시편을 에폭시 수지(epoxy resin)로 마운팅한 후 2000 grit의 사포로 연마하고 산화알루미늄(0.3마이크론 Al_2O_3) 분말을 이용하여 연마천에서 마무리 연마를 하였다. 시편표면에 생성된 표면 부식층과 부식생성물은 주사전자현미경(SEM&EDS : Jeol, JSM 5600)을 이용하여 재료의 부식표면층을 관찰하였다. 단면적 $70mm^2$ 인 조가선 연선재의 피로 시험 제작을 위해 연선 끝 부분의 물림쇠 부분을 소켓을 넣은 다음 윗 부분과 아래 부분을 가는 철선으로 풀어지지 않게 결속한다. 그 후 윗 부분은 연장을 이용하여 선을 구부러 넣은 다음 한쪽을 벽면에 고정시켜 걸어 놓고 특수본드를 주성분으로 하는 불포화성 수지 경화제와 충전제를 혼합하여 부은 후 24시간 경경화시켜 시험편으로 사용하였다. Fig. 4는 피로시험편의 모식도이며, 시험편의 길이는 800mm로 하였다.

2.2 피로시험

Fig. 1은 실제시험에 사용한 조가선의 연선에 대한 시험편이다. 시험방법은 응력 제어방식으로서 하중파형은 정현파(sinewave), 일축 인장-인장에 의하여 응력비를 채택하였고, 하중주파수는 10Hz로 일정하게 하고 상온에서 습도 $50\pm 5\%$, 1,000kg의 예비하중을 가하였으며 최대 공칭응력(P_{max})을 인장강도의 80%로부터 시작하여 단계적으로 감소시키면서 하중비 0.3~0.6 범위내에서 피로한도는 10^7 cycles에서 과단되지 않는 하중으로 하였다.

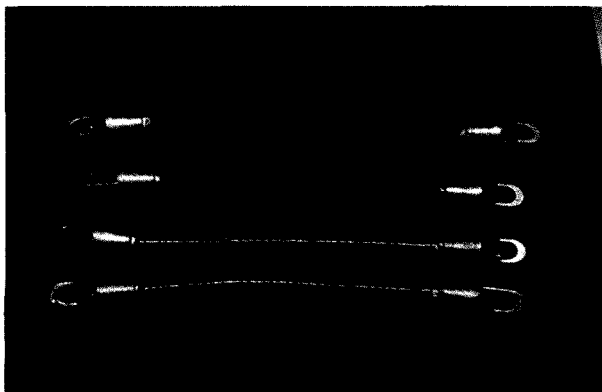
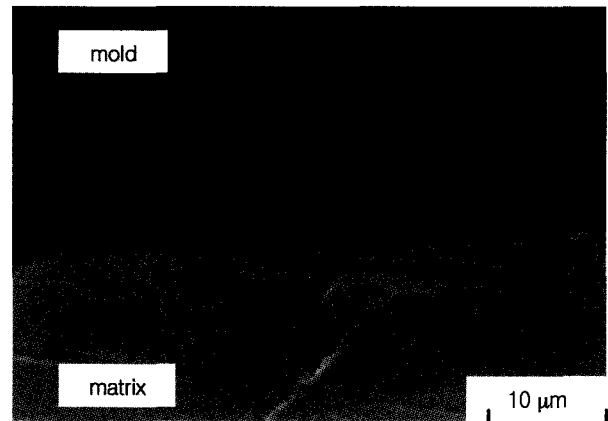


Fig. 1. Fatigue test for stranded wire

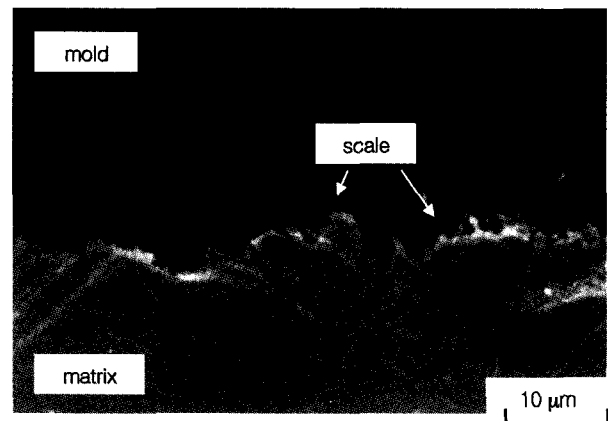
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가선재의 표면부식 거동

26년 사용된 조가선의 표층부는 구리의 산화물인 Cu_2O 가 주를 이루고 있으며, 황화층이 검출되고 있다. 대기에 노출되어 있는 구리 및 그 합금의 부식은 SO_2 와 수분과의 반응에 의한 표면부식이다[4]. 표면부식에서 일어나는 구리의 황화물은 산화물과 달리 구조적으로 취약하고 구리 모재와의 결합력이 약하여, 진동과 마찰이 심한 전차선의 경우에는 발생되었다가도 이내 떨어져 나갈 수가 있다. Fig. 2(a), (b)는 건전재와 부식열화재의 단면을 비교 분석한 것이다. 검게 나타낸 부분은 물딩부이고 회색부분은 모재이다. Fig. 2(a)에 건전재는 단면이 균일한 것으로 관찰되었고, Fig. 2(b)의 부식열화재는 건전재보다 부식층의 파손과 부식층이 모재로부터 이탈되어 표면 거칠기가 높게 나타났다. 표면에서의 부식층은 부식생성물의 형성과 파손



(a) original

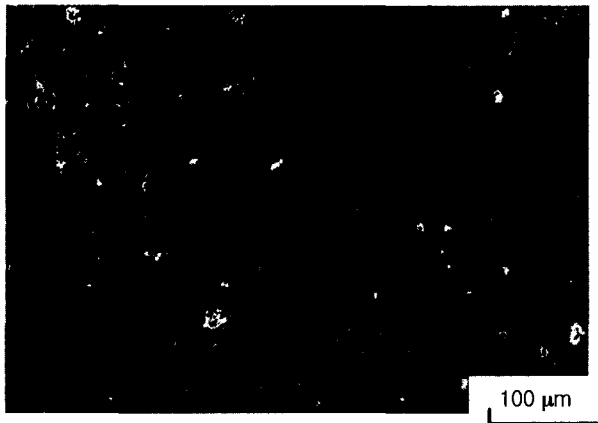


(b) corrosion degraded

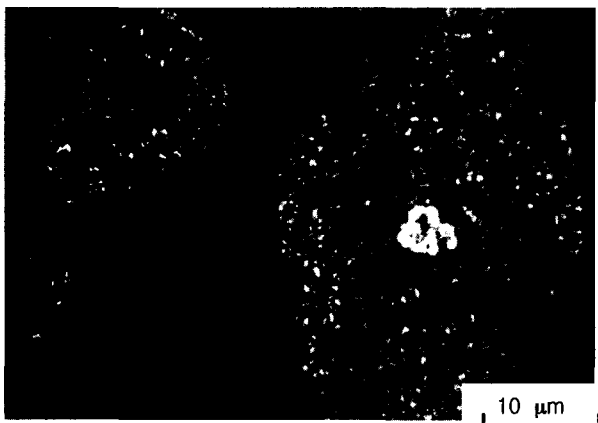
Fig. 2. Cross-section of surface roughness of messenger wire (SEM)

으로 인해 표면 거칠기가 커지면서 모재의 유효단면적을 감소시키고 결국 미세 균열의 발생으로 단선 및 파손을 초래한다.

Fig. 3(a)은 조가선 표면부식층을 분석한 것으로서 부식층(흰색부분)은 전체 표면에 균일하게 생성하여 분포되어 있다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 부식표면 중 일부분을 확대한 사진이다. 사진을 좀더 살펴보면 부식으로 인해 표면의 부피가 증가하는 것으로 관찰 되었다. 이러한 부식층은 부동태 피막으로서 작용하지만 환경오염으로 인한 황화물의 영향으로 부식층을 형성하여 거칠기를 심화시키고 유효단면적을 감소시켜 미세균열을 발생시켜 단선사고를 일으킬 수 있다[5]. 선재의 인장강도는 단면적과 직접관계가 있으며 일반적으로 강선 등은 표면이 부식되면 유효단면적이 감소된다[6]. 이와 같은 부식층은 더 나아가 재료의 표면거칠기를 변화시켜 재료의 피로강도의 저하에 영향을 미치는 것을 피로시험을 통해 알 수 있었다.



(a) corrosion surface



(b) magnified image of (a)

Fig. 3. SEM image of surface corrosion of messenger wire

3.2 조가선 피로파괴 거동

Fig. 4는 조가선 연선재의 건전재와 부식열화재에 대한 피로수명을 보여주는 S-N도이며, 10^7 사이클 이상에서 파단되지 않는 하중을 피로한도로 간주하였다. 동일한 응력값이 적용된 건전재와 부식열화재의 경우를 비교하여 보면 26년 이상 사용한 부식열화재는 건전재에 보다 파단수명이 단축되는 현상을 보여주고 있다. 동일한 응력값이 적용된 건전재와 부식열화재의 경우, Fig. 4의 S-N 곡선에 나타낸 바와 같이 부식열화재들의 피로파괴 수명은 건전재와 비교할 때 35~50% 정도의 수준을 나타내고 있다. 이는 부식환경에 노출된 조가선의 표면에 부식층이 발달하면서 피로균열의 개시점으로 작용하였기 때문이다. 대기 중에 장기간 노출되면 가설지역에서의 대기오염물질인 SO_2 , 분진, 수분 등이 흡착하여 부식매질로 작용하므로써 표면에서 부식되면서 산화물 같은 보호피막이 형성된다[7].

그러나 보호피막은 황화합물이 침투되기 쉬운 경로를 제공하기 때문에 부식이 촉진되고 또한 부식생성물의 성장속도를 가속시킨다. 부식층은 반복하중이 가해지면 부식층은 모재에서 분리되거나 이탈하기 쉬우므로 결국 모재의 유효 단면적을 감소시켜 피로균열 생성이 일어나게 된다. 표면부식은 단면적 감소를 일으키면서 표면을 더욱 거칠게 하여 피로수명을 단축시키는 요인으로 작용한다. 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.

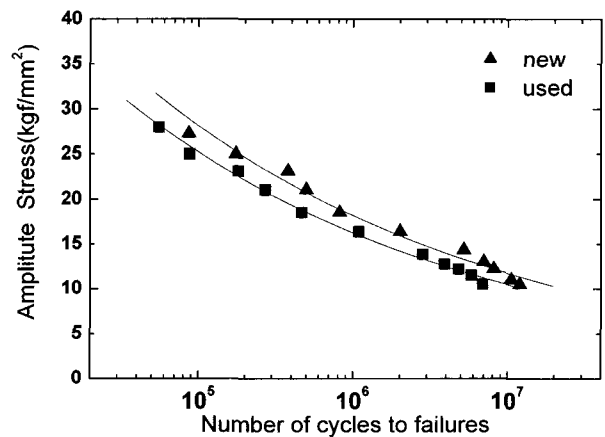


Fig. 4. S-N diagram of messenger(stranded wire)

3.3 피로 파단면 분석

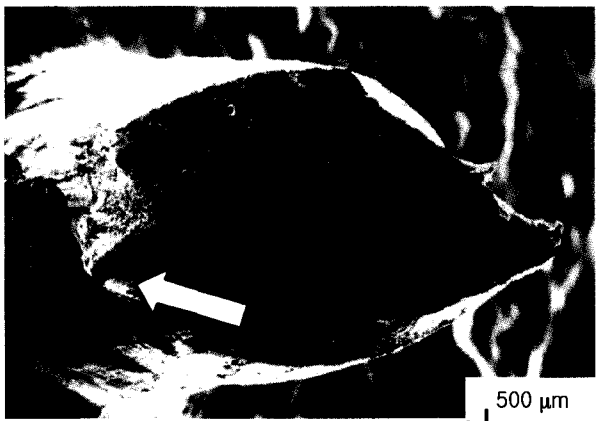
재료의 파단면은 파괴의 진행상황을 나타내는 특징적 형태가 남아 있으며 이것을 조사하므로써 파괴원인과 파괴기구에 관한 정보를 얻을 수 있다. 파단면은 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 관찰방법은 먼저 매크로 관찰에 의해 기점 및 전과경로를 결정하고, 이것을 다시 주사전자현미경에 의해 특징적 형태를 마이크로 관찰하였다. 파면의 특징적 형태를 대별하면 결정립의 횡단파괴가 일어나는 입내파괴와 결정립계를 따라서 파괴하는 입계파괴로 나뉘어진다. 이들은 다시 연성파괴와 취성파괴 및 피로파괴로 분류할 수 있다[8].

연성파면은 소성변형에 의해서 재료중에 존재하는 비금속 개재물, 석출물 등의 미세한 입자로부터 기공이 형성되어 성장, 합체되어 일어나며 덩풀이 형성되는 것이 그 특징이다. 일반적인 취성파괴의 전형적인 형태는 벽개파괴이며 결정립의 파면단 위에 벽개 패스트가 관찰된다. 다결정체의 벽개파면은 거시적으로 입상파면을 나타내며, 그 패스트내

에서는 물결 패턴 모양이 관찰된다. 연성파면은 피로크랙이 진전함에 따라 연성에 의한 줄무늬 모양을 나타낸다. 한편 입계파면은 편석과 석출물이 많고 재료의 취화 영향을 받아 무늬가 거의 없는 입상파면이 된다.

Fig. 5(a), (b)는 반복응력비 0.3에서 피로 실험한 조가선 부식열화재의 피로파단면의 양상을 보여주고 있다. 표면부식이 심한 부위의 응력집중점에서 피로파괴가 시작되어 점차 우측으로 진행되면서 시편 전체로 전파되어 최종파단에 이르는 과정을 보여준다. 입자가 거칠게 보이는데 이것은 피로파괴 진전속도가 점점 커지기 때문인 것으로 판단된다.

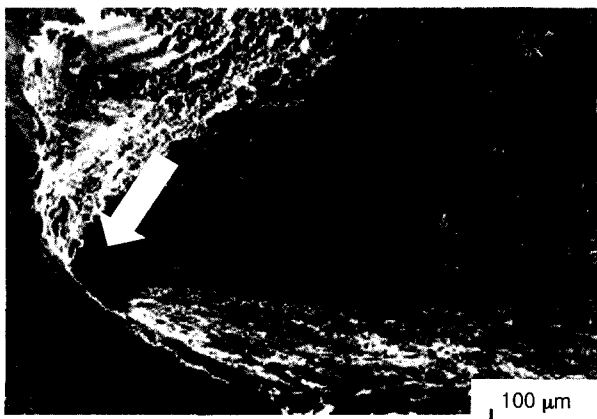
Fig. 6(a), (b)의 사진을 관찰하면 조가선의 중심부에서는 취성파괴와 연성파괴의 형태가 혼재되어 줄무늬를 잘 나타내고 있다. 국부적으로 파형무늬가 존재하지만 대부분 취성에 의한 파괴가 넓은 면적을 차지하고 있으며, 조가선의 중심부에서는 거의 취성파괴에 의해 파단되는 형태를 보여주고 있다. 본 실험에 사용된 조가선은 구리가 98 wt.% 이상



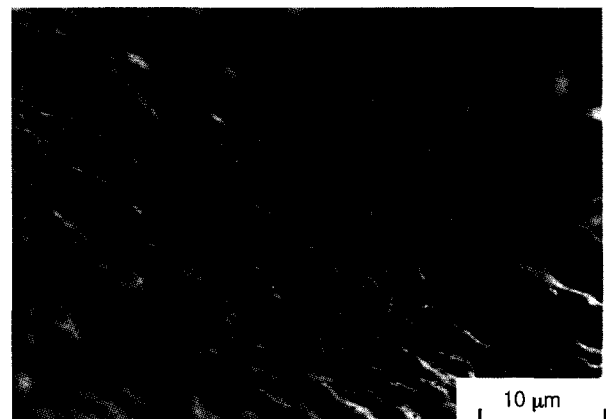
(a) fracture mode



(a) initiation site



(b) fatigue crack initiation



(b) striation

Fig. 5. Fatigue fracture surface of messenger wire(SEM)

Fig. 6. SEM fractographs of messenger wire

의 조성을 갖는 구리선이다. 일반적으로 결정립내에 큰 개재물이 존재하면 응력의 집중화에 의해서 피로파괴시 균열의 생성원이 될 수 있다. 그러나, 본 실험에 사용된 조가선의 경우, 초기균열의 시작은 표면부식이 잘 발달한 위치에서 시작되었다. 표면부에서 부식생성물이 성장하여 부식층이 분리되고 새로운 모재가 나타나는 이러한 반복과정에 의해 부식이 진행되어 반복응력을 받게되면 재료표면에서 전단력에 의해 슬립밴드가 형성되고 이는 초기 균열의 시작점으로 작용할 수 있는데, 표면의 거칠기에 따라 큰 영향을 받게된다. 표면에 부식층 등이 발달하면 표면이 매우 거칠어지고 동시에 취성의 부식 산화물들이 결정립계를 따라 형성되면서 피로에 의한 반복응력이 작용할 때 초기균열의 시작 및 전파는 더욱 용이해지면서 피로수명이 단축되게 된다.

3.4 표면거칠기

Fig. 7은 피로실험 중에 실험기를 정지시킨 후 시편을 분리하여 표면거칠기를 관찰한 결과로서 시편의 표면 균열부위

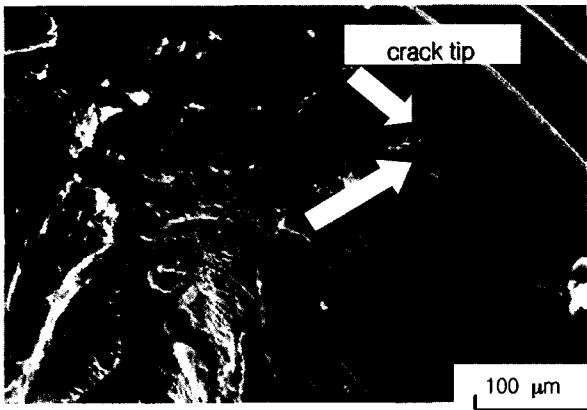


Fig. 7. Fatigue crack tip of messenger wire(SEM)

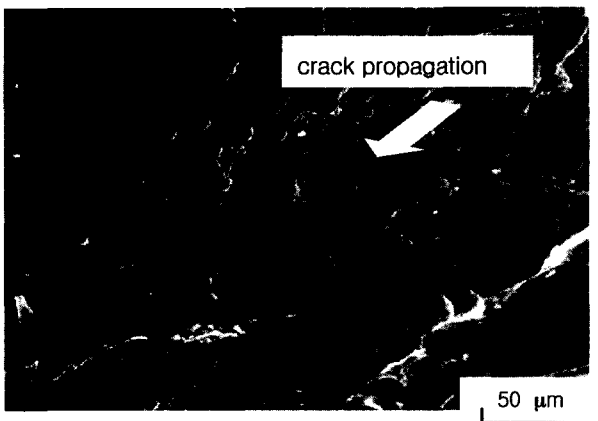


Fig. 8. Fatigue crack propagation of messenger wire(SEM)

에 형성된 부식층이 분리 된 것을 볼 수 있다. 부식층이 분리되면 새로운 모재가 나타나는데 이 모재에서 다시 부식층이 형성되어 부식층의 조밀도가 증가되어 부피가 커짐에 따라 진동 등에 의해 분리가 일어나는 반복과정을 거치게 된다[9].

일정하중에서 피로시험 정지후 균열성장 경로를 파악하기 위하여 시편을 분리시킨 후 주사전자현미경으로 피로균열의 단면을 관찰하였다. 균열면은 층상구조를 이루고 있고 균열면 인접표면부에는 부식층이 형성되어있으며 일부분 부식층이 이탈된 것을 관찰할 수 있다. 균열면 주변은 부식생성물이 성장하고 부식에 의한 표면의 거친부위를 따라 균열이 선택적으로 진전되어 감을 보여주고 있다. 또한 균열면 인접 표면부에는 부식층이 층상구조를 이루고 있고, 부식층이 이탈되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 8에서 시편의 균열 뒷면부를 보면 표면 부식부의 거친부위를 따라 균열이 진전되어 가는 과정을 나타내고 있으며, 부식층의 이탈과 층상구조를 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 2차원 표면조도계(Model : UBM, UBM)로 측정 한 조가선 균열 선단부 표면거칠기를 나타내며, 깊게 파인 골은 미세 균열이 위치한 부위이다. 미세 균열이 좌우로 거칠기가 크게 나타난 것은 부식층의 파손에 의해 산처럼 솟아 났기 때문이다. 표면 거칠기를 정량적으로 표시하면 최

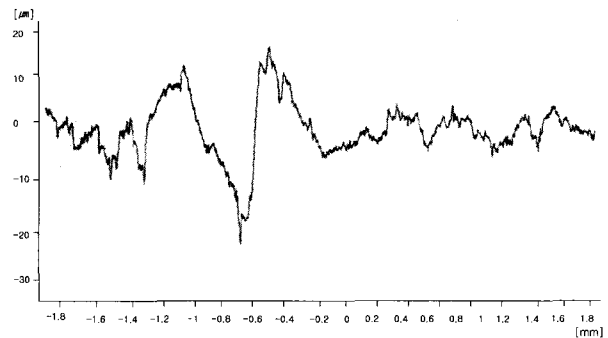


Fig. 9. Surface roughness of messenger wire(crack tip)

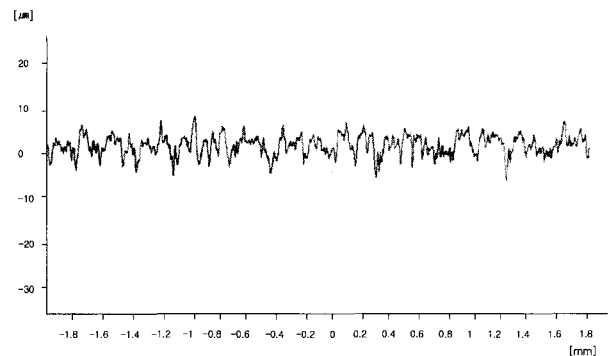


Fig. 10. Surface roughness of messenger wire

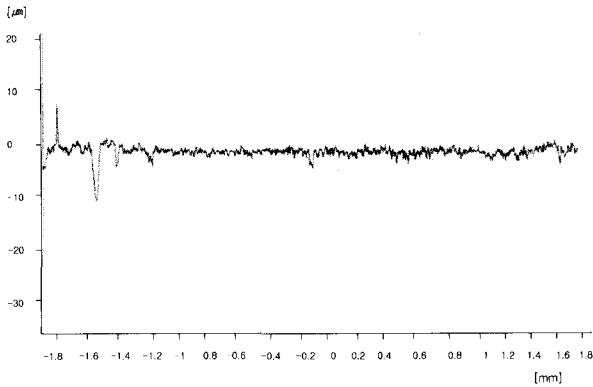


Fig. 11. Original roughness of messenger wire

대 거칠기(R_{max})는 $25\mu m$ 이며, 평균 거칠기(R_a)는 $2.8\mu m$ 로 측정되었다. Fig. 10 균열면에서 멀리 떨어져 있으며 부식층이 심하지 않는 부위에 대한 표면 거칠기로서 정량적으로 표시하면 최대 거칠기는 $9.4\mu m$, 평균 거칠기는 $1.1\mu m$ 로 측정되었다. 부식이 육안으로 관찰되지 않은 건전재의 표면 거칠기를 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 산과 골의 분포가 완만함을 관찰할 수 있다. 표면의 평균 거칠기는 $0.6\mu m$ 으로 측정되었다. 표면에 존재하는 부식층은 유해성 가스와 수분 등의 통로를 제공할 수 있으며 산소, SO_2 등은 수분과 반응하여 생성된 부식생성물은 진동, 반복하중에 의해 분리 및 이탈된다. 이때 다시 노출된 표면에서 하중의 반복에 따라 부식생성물의 파괴가 발생되어 모재의 유효 단면적을 감소시킨다. 부식열화재의 단면의 거칠기 정도는 시편부위마다 차이를 나타내고 있지만 균열 선단 부에서 표면 거칠기가 가장 높게 나타나고 있다.

표면 거칠기의 차이가 피로균열의 전파경로를 좌우하는 요인이 될 수 있으며, 또한 다른 조건들이 유사한 상태에서도 부식에 의한 표면결합의 증가는 균열의 시작 및 전파를 용이하게 만들 수 있다. 따라서 표면부식에 의한 표면 거칠기의 골과 산이 깊을 수록 피로 파단의 초기 개시점을 쉽게 제공할 수 있으며 표면 거칠기에 따라 가선재의 피로성질에 매우 민감하게 작용하여 피로수명을 단축[10,11]시킬 것으로 판단된다.

4. 결론

환경열화로 인한 가선재의 부식거동과 피로시험을 통해 표면부식이 피로거동에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 환경이 열악한 가설지역에 장기간 조가선이 노출되면 표면부위에 부식생성물이 형성되어, 표면부식 효과에

의한 결함을 일으키고 기계적 강도를 저하시켜 피로의 응력 집중점으로 작용하여 피로 파단 수명을 단축시키는 가능성을 확인하였다.

- (2) 표면부에서의 부식층은 시간의 경과에 따라 부피가 증가하게 되고, 부식생성물들은 피로에 의해 이탈되면서 새로운 모재가 노출된다. 표면부식이 진전되는 반복 과정에서 부식 거칠기의 골과 산을 성장시켜 표면결합을 일으킨다.
- (3) 부식에 의하여 표면이 손상된 조가선의 피로수명은 부식열화재의 경우 건전재에 비해 35~50%의 수명이 단축되어, 결국 표면에 형성된 부식층이 가선재의 기계적 강도를 저하키는 요인이 된다.
- (4) 초기 피로균열은 표면의 부식 생성물 발달이 심한 곳에서 시작하는 경향을 보였다. 균열 선단부를 따라 측정된 표면부의 최대 거칠기(R_{max})는 $25\mu m$ 를 나타내었으며, 평균값은 $2.8\mu m$ 로서 주변의 평균값인 $1.1\mu m$ 보다 높게 측정되었다. 또한 초기피로 균열은 표면의 부식 생성물 발달이 심한 곳에서 시작하는 경향을 보였으며, 표면거칠기가 피로균열의 원인을 제공하여 피로수명을 단축시키는데 기여하는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 정경우, 김강범, 한국부식학회지, Vol.27, No.4, 1998.
2. 高明地哲人, 大氣汚染による腐食, 金屬, 1992.
3. 桐村勝也, 工場環境における加線材料の耐蝕性, RT RI, Vol.3, No.12, 1989.
4. K.S.Yoshi-Gavelsins, and H. Leung Identification of corrosion products and corrosion of ACSR conductors, Ontario Hydro Research Devisio Report No.90-113-K, 1991.
5. 김용기, 장세기, 조성일, 가선재의 기계적특성에 미치는 부식환경의 영향, Vol.5, No.1, pp.32-39, 한국철도학회, 3. 2002.
6. R. Koterazawa, M. Mori, T. Matsui and D. Shimo, Fractographic Study of Fatigue Crack Propagation Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, pp.2002-2012, October, 1973.
7. 高原 寛, 金屬破斷面寫眞(含金屬分子材料, セラミックノクス, 木材など非金屬 複合材料), 株式会社 テクノアイ出版部, 1985.
9. E. Sirbel and M. Gaier, VDIZ., Vol.98, pp.1715-1723, 1956.
10. T. B. Cameron, D. E. Diesburg and C. Kim, Fatigue Durability of Carburized Steel, J. Metals, pp.37-41, July 1983.