

사용환경에 따른 조가선의 피로수명 예측

Prediction on Fatigue Life of Messenger Wire with Service Environments

김용기* · 장세기*

Yong-Ki Kim · Seky Chang

Abstract

Fatigue life of catenary wires in various environments is reduced when stress is concentrated on some points, which are often found in corroded areas by surrounding pollutants. Therefore, the fatigue test were performed in order to investigate the effect of the surface corrosion on the destructive behavior in service environment and accelerated corrosion environment as well as to examine the corrosive property and mechanism of the catenary wires. In the fatigue test of the messenger stranded wire, the corrosion degraded materials showed 35~50% of fatigue life at a same stress amplitude compared to original material. Because the catenary wires have variable load by the interaction of periodic contacts with pantographs the maximum stresses of trolley wire and messenger wire calculated by simulation at the operative velocity, 80km/h, were 11.4kgf/mm² and 11.62kgf/mm², respectively. In conclusion, the life prediction of the messenger wire during operation was estimated through the corrosion behavior interpretation of variable stress and fatigue test.

Keywords : Catenary wires(전차선로 가선재), Messenger Wire(조가선), Corrosion(부식), Original material(건선재), Degraded material(부식열화재), Fatigue life(피로수명), Variable stress(변동응력)

1. 서론

1974년 지하철 1호선과 전기철도의 산업선 구간이 개통된 후 신선로의 증가와 전철의 복선화로 인하여 전차선로 설비는 계속적으로 증가하여 왔다. 전철설비의 구성품인 전차선로 가선재는 대부분 대기 중에 노출되어 있으며, 대기오염이 심한 공업지역, 도심지대, 해안인접 지역에 가설되어 있어서 그 지역의 환경인자와의 복합적인 작용으로 피해가 다양하게 발생하고 있다. 또한 부식으로 인한 가선의 단선 및 파손은 전철설비와 열차의 안전운행에 중대한 영향을 미치고 있다[1-4].

전차선로 가선재의 단선에 의한 선로사고는 전력수송의 안전성을 위협할 뿐 아니라 막대한 경제적 손실을 가져온다. 단선에 대한 주요 원인으로는 ① 표면부식으로 인한 유효 단면적 감소 ② 열차주행시 집전계와 일부 가선의 주기적인 접촉에 의한 변동하중과 반복응력이 높은 개소 ③ 공중에

설치되어 바람에 의한 진동피로 ④ 자중과 바람에 의한 인장-인장 피로환경 등을 들 수 있다[5].

전차선의 조가방식에 따라 여러 종류의 전선이 사용되고 있으나 일반적으로 열차운행 증가에 따른 전류의 증가와 대도시 및 공장지대에서의 공해에 의한 부식방지를 위하여 조가선은 카드뮴동연선(Cu-Cd)를 사용한다. 가선재의 수명에 영향을 주는 환경적 인자로는 ① 설치지역의 습도, 온도, 강우, 풍향, 풍속, ② 대기오염원에 의한 부식피로(가스상 오염물질: SO₂, NO₂ 가스 등), ③ 자동차, 주거시설, 공장 등의 배출물 등의 환경인자가 대기오염과의 복합적인 작용에 의해 장기간에 걸쳐 부식열화가 일어나고 있다.

일본의 경우 전기철도설비에 사용되는 각종 금속 및 지물 등에 대한 부식 및 방식연구, 부식환경에서의 피로 등 손상의 진단방법을 제안하고 있다[6]. 특히 Sumihisa Aoki, Tadashi Kohida[7] 등은 ACSR에 대한 단선사고 방지 및 부식열화 상태를 분석하여 수명을 진단할 수 있는 부식열화 감지장치 개발, 전기재료의 열화에 관한 전기재료의 열화특성 연구[8]와 전기설비의 부식과 진단[9] 등의 연구는 재료의 내식성에만 연구가 국한되어 전기철도 가선재의 피로에 나타날 수 있는 현상을 다루지 못하고 있다.

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 교통혁신연구팀
E-mail : ykkim@krti.re.kr

TEL : (031)460-5382 FAX : (031)460-5499

* 한국철도기술연구원

본 연구에서는 가선재의 부식특성과 부식메카니즘을 규명하고, 표면부식이 피로수명에 미치는 영향을 사용환경과 가속가스부식실험을 통한 부식열화재를 피로시험으로 수명주기 특성을 파악하고자 하였다. 가선재는 열차 주행시 집전계와 일부 가선의 주기적인 접촉에 의한 상호작용으로 인해 변동하중을 받고 있으므로 열차운행에 따른 가선계의 동적거동 해석을 통해 조가선에 대한 피로수명 예측이 중요하다. 따라서 가선재의 부식거동 특성과 가선계의 변동응력 해석 및 피로시험을 통해서 지역별 피로수명 예측에 따른 교체주기 방안을 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 표면부식 거동분석

본 연구에 사용된 조가선(Cu-Cd 합금선)은 전철 가선재로 건전재를 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. 시편 표면에 생성된 표면 부식층과 부식생성물은 주사전자현미경(SEM&EDS: Jeol, JSM 5600)을 이용하여 재료의 부식 표면층을 관찰하였다.

2.2 피로실험

사용된 재료의 시료를 수거한 가설지역의 환경을 살펴보면 산업지대의 환경은 SO_2 농도 15~20ppb 이상, 연중평균 습도 60~70%, 전원지대의 환경은 SO_2 농도 5~10ppb, 연중평균습도 50~60%, 다습지대의 환경은 SO_2 10ppb 내외, 연중평균습도는 80%이상으로 강변에 위치하여 자동차의 통행이 많은 지역이다.

가선재는 장기간 대기 중에 노출되어 있기 때문에 시편을 채취하는데 시간적인 제약을 받는다. 따라서 시편채취 시간의 단축을 위해 대기환경 오염에 따른 SO_2 농도 별 가선재의 피로거동을 알아보기 위해 가스부식실험기(Model: GS-ISO-3CS, Suga)를 이용한 대기환경 모사와 챔버내의 SO_2 농도의 변화를 10ppm, 100ppm, 300ppm의 분위기에서 1~4주간 가속부식시켜 피로시험용 시편으로 하였다. 조가선의 소선재에 대한 시편은 연선의 외측부에 있는 시편을 선정하여 시험용 시편으로 제작하였으며 표점거리는 100mm로 하였다. Fig. 1은 조가선 소선 시편의 제작을 위한 모식도이며, Fig. 2는 조가선의 연선에 대한 피로 시편이다. 단면적 70mm²인 조가선 연선재의 피로 시편 제작을 위해 연선 끝 부분

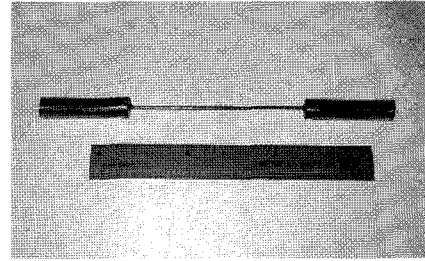


Fig. 1. Fatigue specimen of single wire

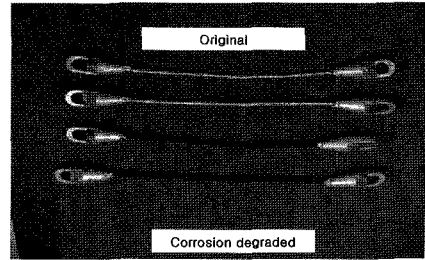


Fig. 2. Fatigue specimen of stranded wire

의 물림쇠 부분에 소켓을 넣은 다음 아래 부분을 가는 철선으로 풀어지지 않게 결속하여 불포화성 수지 경화제와 충전제를 혼합하여 부은 후 24시간 경화시켜 피로 시험용 시편으로 사용하였다.

2.3 가선계의 동적거동 해석

본 연구에서 고려한 가선계는 단순 카테너리이며 주요 제원은 Table 1과 같다. 전차선의 모델링은 TGV-K 가선계의 동적응답해석[10] 등의 가선계 모델링 고찰을 통해 대상 구간을 3경간 150m로 하였다. 전차선은 열차 위의 집전계와 직접적인 접촉을 하여 전기를 공급하는 부분이고, 조가선은 전주에 직접 현수되어 전차선의 기울기가 작아지도록 지지하는 역할을 한다. 이 두 가선재는 고주파 모드에 대한 타당성을 확보하기 위해 자체 강성을 갖으면서 장력을 받는 범요소로 모델링하였다.

Table 1. Main specification of catenary wires

Types	Simple catenary	Trolley wire	Cu 110mm ² , 10kN tensioned
Feeding system	2 × 25kV, AT	Messenger wire	Cd-Cu 70mm ² , 10kN tensioned
Span length	max. 60m	Dropper	Cable
Pre-sag	N/A	Dropper distribution	5m
Encumbrance	960mm	Contact height (slop)	5.20m(1/1000)

전차선로에는 자중에 의한 하중과 팬터그래프가 진행하면서 전차선에 가해지는 외부힘인 압상력이 존재하지만, 자중에 의한 하중은 정적상태에만 관계되므로 동적 해석에서는 이동하중을 팬터그래프에 의한 외력만을 고려하였다. 드로퍼는 전차선과 조가선을 연결시켜주며, 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 선밀도가 일정한 Cable로서 평형위치로부터 압축과 인장에 대해 다른 성질을 갖는 비선형 요소이다. 미소변형의 경우 드로퍼는 인장만을 받으므로 압축과 인장에 대해 동일한 성질을 갖는 선형 스프링 요소로 모델링하였다. 드로퍼의 질량은 1/2씩 나누어 전차선과 조가선에 대해 집중질량으로 고려하였다.

곡선당김금구는 전차선과 접촉하는 팬터그래프의 국부적인 마모를 방지하기 위해 전차선에 편위를 주기 위한 것이다. 전차선에 수직하중을 가하지 않으면 강성의 효과는 무시할 수 있으므로 집중질량만을 고려하였다. 편위에 의한 영향은 수평력, 가선계의 지지조건은 각 경간의 전주 현수점에서는 조가선이 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 대상 가선계의 양쪽 끝단의 전차선 및 조가선은 3개의 질량이 없는 빔 요소로 결속되어 있는 것으로 하였으며, 장력을 도입하기 위하여 집중질량으로 모델링 하였다. 이와 같이 전차선, 조가선, 드로퍼 및 곡선당김금구 등을 모델링 하였으며, 지점조건을 도입하였다. 전차선, 조가선, 드로퍼의 물성치 및 각종 계수는 Table 2에 나타내었으며, Fig. 3은 가선계의 모델링을 나타내고 있다.

2.4 팬터그래프 모델링

팬터그래프는 상하로 신축하여도 압상력은 거의 같도록 되어있다. 그러나 최상부의 습동면은 상하로 움직일 때 각 부재에 관성력이 작용하므로 전차선과 접촉력은 일정하지

Table 2. Coefficients and physical properties of catenary wires

Types	Area(m ²)	moment of inertia(m ⁴)	Weight (t/m ³)	Young's Modulus (tf/m ²)	Shear Modulus (tf/m ²)
Trolley	110×10 ⁻⁶	1.1382×10 ⁻⁹	8.979	1.2×10 ⁷	4.6×10 ⁶
Messenger	70×10 ⁻⁶	5.9666×10 ⁻¹⁰	8.534	1.25×10 ⁷	4.8×10 ⁶
Dropper	Spring coefficient : 100,000 N/m				

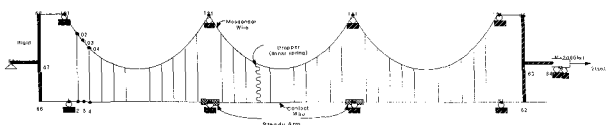


Fig. 3. Finite element model of catenary wires

않다. 전차선의 접촉력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 4는 팬터그래프 모델링을 나타내고 있다.

$$F = F_o - M \frac{d^2 Y}{dt^2} \quad (1)$$

여기서,

Y = Height of pantograph(m)

M = Equivalence mass of pantograph(kgf)

Fo = Uplift force(kgf)

F = Contact force(kgf)

T = Time(sec)

이다. 식 (1)에서 Y가 일정한 값을 유지하는 전차선을 구성할 수 있다면 질량의 항이 제거되어 F=Fo가 되며 매우 이상적인 집전이 된다.

최근 이와 같이 이선틀을 최소화하기 위한 방법으로 직접 조가방식에서 개선된 카테너리 방식은 조가선이 도입된 단순 카테너리 방법이다. 또한 이와 같은 단순 카테너리 방식에는 사전이도(Pre-sag)라 하여 경간 중앙부와 지점부의 압상량의 차이만큼 경간 중앙의 전차선을 미리 늘어지게 가선함으로써 팬터그래프의 상하운동을 방지하고, 수평으로 주행하게 함으로써 집전특성을 개선시키는 방법이 도입된다. 이와 같이 전차선-팬터그래프의 상호작용 해석이 매우 어려워 이선틀을 개선한 가선방식을 고려하여 접촉력과 압상력이 동일한 것으로 가정하였다. 압상력은 권[11], 창[12], 허[13,14] 등의 연구결과를 고찰한 결과 정지상태에서 6.12kgf 값을 갖으며, 속도에 따라 6.12~14.28kgf정도의 변동 값을

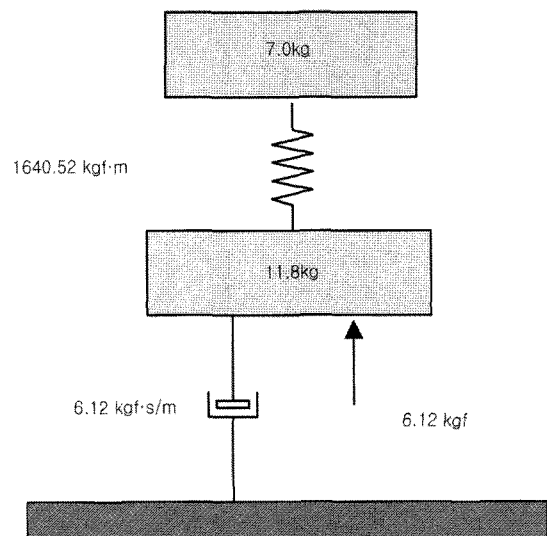


Fig. 4. Modelling of Pantograph

갖는 것으로 알 수 있었다. 본 해석에서는 열화의 최악조건으로 고려하기 위하여 14.28kgf의 압상력을 고려하였다. 열차의 속도를 80km/h로 해석을 수행하였다. 이와 같은 속도로 진행되는 이동하중을 모사하기 위하여 해석모델의 각 요소상에 탑재된 차륜의 하중을 임의의 시간에 대해서는 등가절점 하중으로 계산하고 열차통과에 필요한 모든 시간에 대하여 등가하중을 각 절점별로 조합하여 입력하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 조가선의 표면 부식

26년 사용된 조가선의 표층부는 구리의 산화물인 Cu₂O가 주를 이루고 있으며, 황화층이 검출되고 있다. 대기에 노출되어 있는 구리 및 그 합금의 부식은 SO₂와 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. 5(a), (b)는 건전재와 부식열화재의 단면을 비교 분석한 것이다. 검게 나타낸 부분은 몰딩부이고 회색부분은 모재이다. Fig. 5(a)에 건전재는 단면이 균일한 것으로 관찰되었고, Fig. 5(b)의 부식열화재는 건전재보다 부식층의 파손과 부식층이 모재

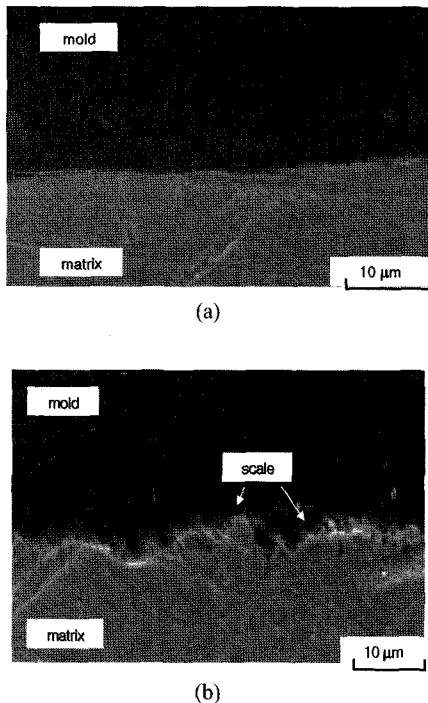


Fig. 5. Cross-section of surface roughness of messenger wire (SEM): (a) original (b) corrosion degraded

로부터 이탈되어 표면 거칠기가 크게 나타났다. 표면에서의 부식층은 부식생성물의 형성과 파손으로 인해 표면 거칠기가 커지면서 모재의 유효단면적을 감소시키고 결국 미세균열의 발생으로 단선 및 파손을 초래한다.

3.2 소선 및 연선의 피로파괴

Table 3과 Fig. 5는 소선재의 피로수명으로 전형적인 S-N 곡선을 나타내고 있다. 동일한 응력값이 적용된 건전재와 부식열화재의 경우를 비교하여 보면, 26년 이상 사용한 부식 열화재는 피로파단수명이 단축됨을 알 수 있다. 부식열화재의 경우 대기오염과 같은 부식환경에 노출되어 대기오염물질과 환경인자 등의 영향을 받아 모재 표면부에서 부식층이 형성되고 부식생성물의 부피가 점점 증가하여 표면의 거칠기를 증대시켜 진동 등에 의해 부식생성물이 분리되고 파손된다. 새로운 모재가 나타나면 다시 부식이 진행되는

Table 3. Fatigue life of Messenger wires(single wires)

Preload (kgf)	Pmax (kgf)	Pamp (kgf)	Nf (cycles)			
			Original	Corrosion degrade	Rular	Damp
60	200	140	273,258	163,571	232,335	95,438
	180	120	390,523	209,405	311,696	256,073
	160	100	587,175	351,853	447,351	381,714
	150	90	697,691	447,198	-	-
	140	80	992,148	454,283	862,315	750,632
	120	60	2,618,379	1,200,032	1,801,073	1,506,193
	115	55	3,529,410	1,688,140	2,000,000	1,800,000
	110	50	5,012,930	2,615,000	3,500,000	3,000,000
	100	40	8,719,400	4,359,000	-	-

Table 4. Fatigue life Messenger wires(stranded wires)

Preload (kgf)	Pmax (kgf)	Pamp (kgf)	Nf(cycles)	
			Original	Corrosion degrade
1000	2910	1910	87,234	55,807
	2751	1751	175,943	88,096
	2620	1620	380,487	205,832
	2473	1473	500,345	270,788
	2297	1297	820,570	466,366
	2148	1148	2,015,200	1,317,069
	2005	1005	5,200,300	2,800,000
	1911	911	7,008,235	3,890,000
	1855	855	8,110,546	4,789,948
	1771	771	10,532,546	5,782,231
	1735	735	11,945,235	6,873,331

반복과정을 거치게 됨에 따라 표면부식의 효과에 의해 소재의 유효 단면적을 감소시켜 결국 시간이 지나면 국부적인 결함에 의해 응력 집중점으로 작용하므로써 내부적으로 인장강도 하중이 임계점 이하로 낮아져 단선된다[15]. 부식열화재는 부식환경에 노출되어 표면부식 효과에 의해 국부적인 응력 집중점으로 작용하여 건전재 대비 피로수명은 35~50%의 수준을 나타내었다. Table 4와 Fig. 7은 연선의 건전재와 부식열화재에 대한 피로수명을 보여주는 S-N도이다. 동일한 응력값이 적용된 건전재와 부식열화재의 경우를 비교하여 보면 26년 이상 사용한 부식열화재는 건전재에 보다 파단수명이 단축되는 현상을 보여주고 있다. 부식열화재들의 피로파괴 수명은 건전재와 비교할 때 35~50% 정도의 수준을 나타내고 있다. 이는 부식환경에 노출된 조가선의 표면에 부식층이 발달하면서 피로균열의 개시점으로 용하였기 때문이다.

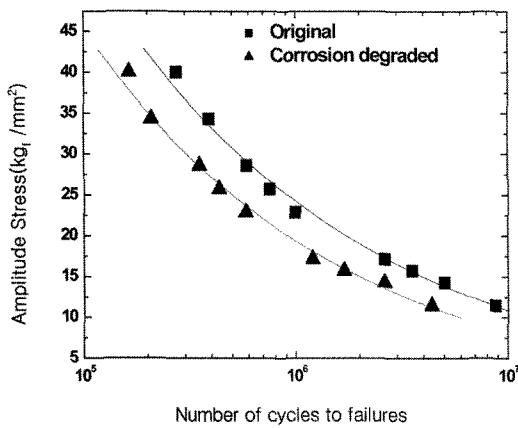


Fig 6. S-N diagram of messenger wires(single wire)

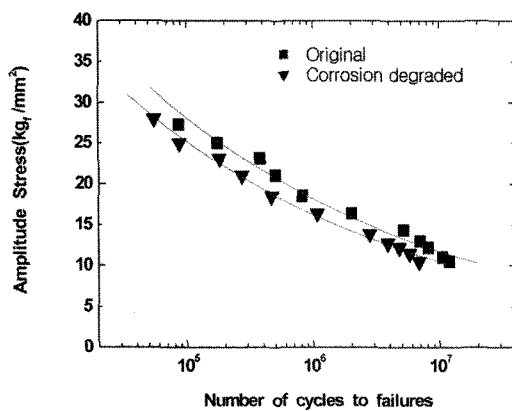


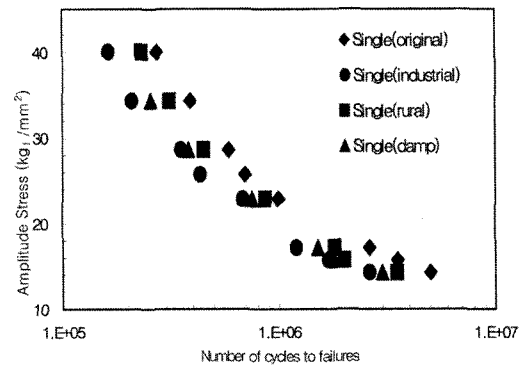
Fig 7. S-N diagram of messenger wires(stranded wire)

3.3 환경열화에 따른 피로파괴

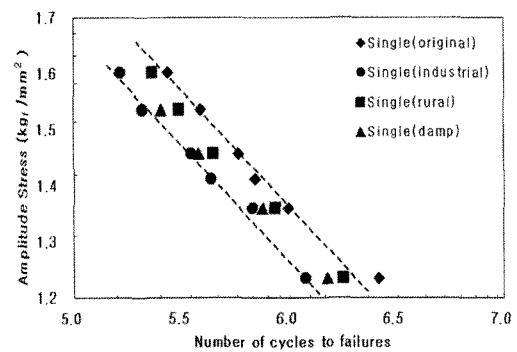
조가선이 사용된 지역의 환경열화에 따른 피로특성 차이를 살펴보기 위해 세 지역에서 수거된 시편을 건전재와 비교하여 피로시험한 결과를 Fig. 8(a), (b)와 같이 나타냈다. 산업지역은 산업체가 밀집해 있어 대기환경오염이 심한 지역이며, 다습지역은 강변에 위치하여 습도가 80% 정도로 높은 곳이다. 전원지역은 대기오염 등의 영향이 적으므로 생각할 수 있다. 피로수명은 산업지역이 가장 단축되었고, 그 다음으로는 다습지역, 전원지역의 순서로 나타나 SO₂ 및 습도의 영향이 조가선의 부식에 미치는 영향이 현저함을 알 수 있다. Table 5와 Fig. 9는 가속부식에 따른 조가선의

Table 5. Fatigue life of Messenger wires(single wires)

Preload (kgf)	Pmax (kgf)	Pamp (kgf)	Weeks	Nf (cycles)		
				SO ₂ (10ppm)	SO ₂ (100ppm)	SO ₂ (300ppm)
60	160	100	1	41,500	38,500	36,500
			2	40,365	37,800	35,500
			3	39,500	37,482	34,500
			4	39,200	37,000	34,000



(a)



(b)

Fig. 8. Fatigue life of messenger wires(single): (a) S-N curve (b) log-log plot of S-N curve

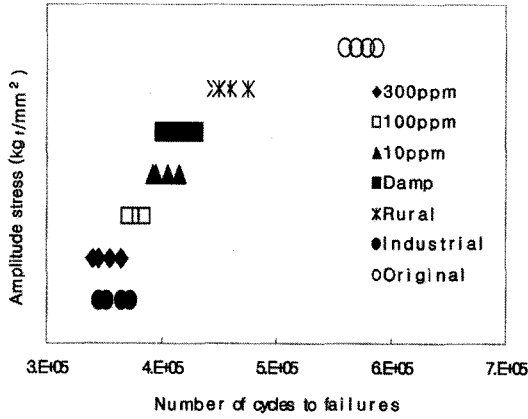


Fig. 9. Fatigue life of single wires(preload: 60kgf, maximum load: 160kgf)

피로수명을 비교 분석한 것으로서 가속부식 조건에 따른 시편을 예비하중 60kgf, 최대 160kgf의 일정한 응력범위에서 피로시험을 실시하여 피로거동을 나타내었다. 건전지역을 기준으로 전원지역, 다습지역, 산업지역으로 갈수록 피로수명이 감소하였으며, 가속부식시킨 경우 SO₂농도가 높을수록 그 수명도 감소하였다[14]. 최저 수명을 나타낸 조건을 기준으로 살펴보면 전원지역에 비해 다습지역은 90%, 산업지역은 80%의 수명을 나타내었다.

3.4 피로파단면 분석

Fig. 10은 피로실험 중에 시험기를 정지시킨 후 시편을 분리하여 표면저칠기를 관찰한 결과로서 시편의 표면 균열부위에 형성된 부식층이 분리된 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[16].

일정하중에서 피로시험 정지 후 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. 11에서 시편의 균열 뒷면부를 보면 표면 부식부의 거친부위를 따라 균열이 진전되어 가는 과정을 나타내고 있으며, 부식층의 이탈과 층상구조를 관찰할 수 있다.

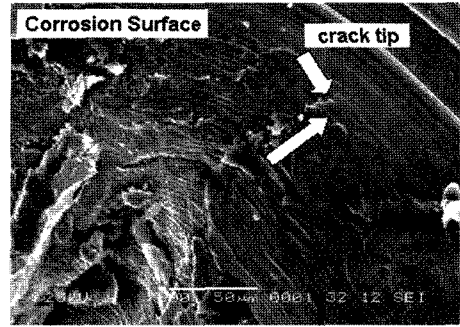


Fig. 10. Fatigue crack tip of messenger wire(SEM)

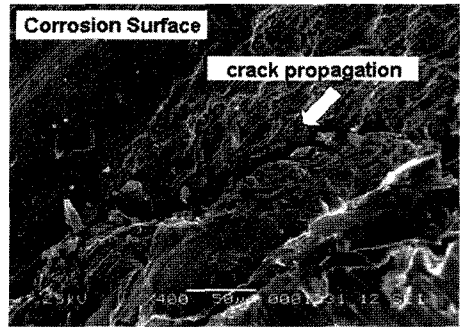


Fig. 11. Fatigue crack propagation of messenger wire(SEM)

3.5 동적거동 해석결과

해석에 사용된 범용구조해석 프로그램은 ABAQUS 5.7-7 [17]을 사용하였다. 동적거동 해석은 직접 적분법을 사용하여 해석을 수행하였다. 열차의 속도별 주행에 따른 가선계의 동적거동의 최대 발생응력은 팬티그래프 3개일 경우 전차선과 조가선의 최대응력은 11.43, 11.62kgf/mm²를 나타내었다. 따라서 동적거동해석 응력의 결과 값을 적용하여 전

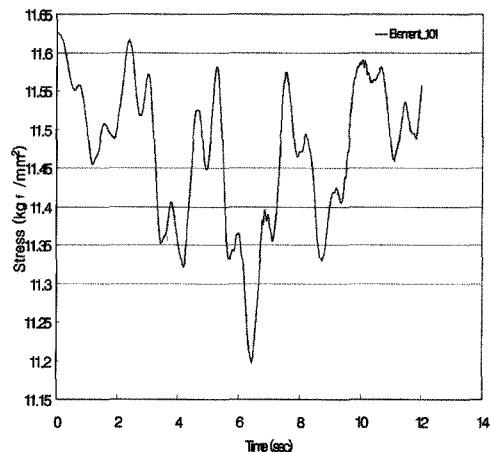


Fig. 12. Stress of trolley wire with time(velocity: 80km/h, pantograph: 6 Ea)

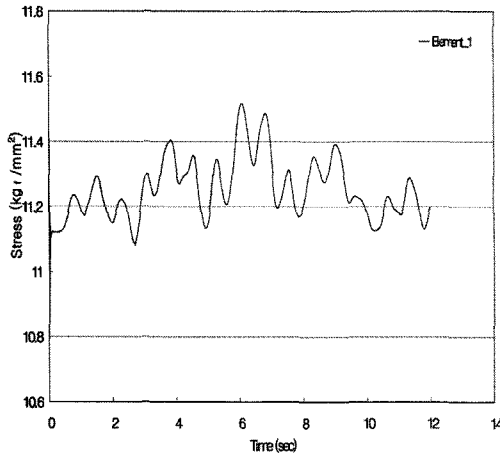


Fig. 13. Stress of messenger wire with time(velocity: 80km/h, pantograph: 6 Ea)

차선로 가선재에 대한 피로시험 결과를 토대로 피로수명을 추정할 수 있었다.

4. 수명특성 평가

본 연구에서 조가선의 건전재 및 부식열화재의 S-N 곡선 결과와 본 해석결과를 토대로 수명평가를 수행하였다. 응력 해석 데이터 분석은 Rainflow counting 방법을 사용하였다 [18]. 조가선 연선에 실험결과 변동응력이 11.65kgf/mm² 일 경우 이에 해당하는 응력 level의 반복횟수는 건전재의 경우 8,110,546 회, 부식열화재의 경우 4,789,948 회이다. 1년간 팬터그래프의 통과횟수는 658,095 회/년이며, 1회 차량 통과시 6개의 팬터그래프를 가정한다면, 약 100,000 회/년이다. 조가선 연선에 대한 실험결과 변동응력이 11.62kgf/mm² 일 경우 이에 해당하는 건전재의 피로수명은 8,110,546회이므로 수명은 8,110,546/100,000 = 81년으로 산출된다. 공해 지역에서 사용한 부식열화재의 경우 피로수명이 4,789,948 회이므로 수명은 4,789,948/100,000 = 47년으로 추정된다.

환경적인 영향에 의한 표면부식 등의 문제가 발생하여 가선재의 내구성에 영향을 미치므로 보수적인 관점에서 사용 수명 주기는 최대 45년 미만으로 표면부식 및 피로거동을 고려하여 설정하는 것이 안정성 측면에서 바람직하다고 판단된다. 이를 토대로 전원지역의 교체주기를 40년으로 설정하고 이 보다 습도가 높은 다습지역과 오염정도가 큰 지역인 공해지역의 교체주기를 산정한다. 조가선에 대한 피로시험결과(Fig. 9)에 따르면 다습지역의 경우 수명은 전원지역의 90%이므로 40×90% = 36년, 공해지역의 경우 수명은 전원지역의 80%이므로 40년×80% = 32년으로 추정된다.

5. 결론

본 논문에서 사용환경지역에서의 수명주기를 평가하기 위하여 건전재, 열화재, 가속부식 실험재의 피로시험과 응력 해석을 통해 가선재에 대한 수명을 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가속가스부식시험기에서 습도와 SO₂ 농도 만을 고려한 대기부식에 대한 환경모시를 통해 부식열화재의 피로수명 평가의 가능성을 확인하였다.
- (2) 대기 중의 황성분은 안정된 피막을 파괴하여 금속의 부식속도를 촉진시켜 사용수명의 단축을 유발시키는 것을 알 수 있었다. 지역별 피로수명은 공해지역에서 가장 단축되었으며, 그 다음으로는 다습지역, 전원지역 순으로 나타났다.
- (3) 조가선 연선의 피로시험에서는 부식열화재의 경우 건전재에 비하여 동일 응력진폭에서 파단수명의 35~50% 정도로 나타났다. 또한 소선의 경우에도 전형적인 S-N 피로거동을 보여주고 있으며, 부식열화재의 경우 건전재에 비해 35~50%의 수명이 단축되었다. 사용환경에서 조가선이 노출되면서 표면부위에 부식생성물이 형성되어 표면부식 효과에 의한 결함을 일으키게 되고, 기계적 강도를 저하시켜 피로의 응력 집중점으로 작용하여 피로수명을 단축시키는 것으로 판단된다.
- (4) 수명특성은 전원지역 40년, 다습지역은 36년, 전원지역은 32년으로 추정되며 사용환경에 따라 주기에 대한 재설정의 도입이 필요하다.
- (5) 열차의 주행속도(80km/h)에 대한 가선의 최대응력은 시물레이션을 통해 전차선과 조가선의 변동응력은 각각 11.4kgf/mm², 11.62kgf/mm² 값을 얻었다. 따라서 동적거동 해석 응력의 값으로 조가선의 수명추정 가능성을 확인하였다.

또한 전기철도 가선시스템의 사고 및 장애를 예방하기 위해서는 가설환경에 적합한 안전기준의 재정립과 부식방식 등 보호대책에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 국가교통핵심기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김용기, 장세기, 조성일, 이재봉 (2001). “전차선로 가선재의 수용액 부식 특성”, 한국철도학회지, Vol.4, No.2, pp.62-70.
2. 電線とパンタグラフの特性, 鐵道總合技術研究所, 平成5年, 研友社.
3. 김양수, 유혜출 (1999, 平成 6년 2월25일). “전기철도공학”, 통일출판사, pp.217-287.
4. (私) 日本鐵道電氣協會, 鐵道技術者のための電氣概論, 電線, JR教本研究會編,
5. 이창순, 박인규, 김용기, 장세기 (2002.11). “Cu-Cd함금선의 사용환경에 따른 피로수명평가”, PROC. of 16th Conference on Mechanical Behaviors of Metals, pp.291-300.
6. 鈴木陽愛, 電線路部在の損傷特徴, 鐵道電氣技術, Vol.20, No.13, pp.40-60, 1986.
7. Sumihisa Aoki, Tadashi Kohida, 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 Report Vol.14, NO.10, pp.39-44, 1999.
8. 橋本純一, 電氣材料の劣化, 電氣現場技術, Vol.20, pp.68-73, 3 1989.
9. 佐川權, 本政治, 電氣設備の腐食と診斷, pp.25-29, 9, 1989.
10. 허신, 경진호, 송달호외 2인 (2002). “고속집전계의 동적 수치모의 해석 프로그램 연구”, 한국철도학회지, Vol.5, No.1, pp.10-17, 한국철도학회지.
11. 김정수 (1998). “TGV-K가선계의 동적응답해석”, 한국소음진동공학회 추계학술대회, 한국소음진동공학회.
12. 관삼영, 이기원 (1999). “전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구 (III)-전차선로와 팬타그래프 사이 동력학시뮬레이션프로그램 보고서”, 한국철도기술연구원.
13. 창상훈 (2001). “가선시스템 설계요소기술 최적화방안”, 한국철도기술연구원.
14. 허신, 경진호 외 2인 (1998). “한국형 고속전철 집전시스템의 동적설계에 관한 연구”, 한국철도학회 추계학술대회논문집.
15. 西山貞義 (1992). “裸電線の腐食と防食の實態”, 電氣計算, Vol.39, No.11, pp.50-70.
16. F. P. Ford and M. Silverman (1979). “Mechanistic Aspects of Environment Controlled Crack Propagation in Steel/Aqueous Environment Systems”, General Electric Company, Report No. HTGE-451-8-12.
17. ABAQUS/ Standard user's manual version 5.7-7. HKS. INC, (1996)
18. David Brock (1989), “The Practical use of Fatigue Mechanics”, Kluwer Academic publishers, pp.232-236.