

# 가선재의 피로수명 예측

## Fatigue Life Prediction for Electric Railway Catenary wires

김용기\*      장세기\*

Kim, Yong Ki, Cnang, Seky

---

### ABSTRACT

The catenary wires are damaged by periodic running of train as well as repeated stress. The wires are also degraded by atmosphere corrosion at fields. Corrosion of wires increased surface roughness and deteriorated mechanical properties by providing fatigue crack initiation sited resulting in a bad effect on service life of the wires. Fatigue test of catenary wires performed to estimate service lifetime. Also, simulation to analyze stress on catenary wires was conducted through modelling the finite elements for dynamic behaviors of wires. Fatigue life of catenary wires was estimated with fatigue and simulation tests.

---

#### 1. 서론

1974년 지하철 1호선과 전기철도의 산업선 구간이 개통된 후 노선의 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<sup>1~4)</sup>

전차선로 가선재의 단선에 의한 선로사고는 전력수송의 안전성을 위협할 뿐만 아니라 막대한 경제적 손실을 가져온다. 단선에 대한 주요 원인으로는 1) 표면부식으로 인한 유효단면적 감소 2) 열차주행시 집전계와 일부 가선의 주기적인 접촉에 의한 변동하중과 반복응력이 높은 개소 3) 공중에 설치되어 바람에 의한 진동 피로 4) 자중과 바람에 의한 인장-인장 피로환경 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 가선재의 부식특성과 부식메카니즘을 규명하고, 표면부식이 피로수명에 미치는 영향을 사용환경과 가속부식환경에서의 표면부식이 피로 파괴거동에 대한 영향을 피로시험을 통해 비교 분석하여 수명 주기를 알아보고자 한다. 가선재는 열차 주행시 집전계와 일부 가선의 주기적인 접촉에 의한 상호작용으로 인해 변동하중을 받고 있으므로 열차운행에 따른 가선재의 동적거동 해석을 통해 조가선에 대한 피로수명을 예측하고자 한다. 가선재의 부식거동 특성과 피로 평가기법 개발을 통해서 지역별 피로수명 예측에 따른 교체주기 방안을 제시하고자 하였다.

#### 2. 피로시험

##### 2.1 피로시험

환경에 따른 가선재의 피로수명을 평가하기 위하여 본 시험에 사용된 조가선은 건전재를 비롯하여 가설 지역에서 26년간 사용된 것을 시험용 시료로 선정하였다. 또한 재료의 시료를 수거한 가설지역의 환경을 살펴보면 산업지대의 환경은 SO<sub>2</sub>농도 15~20 ppb 이상, 연중평균습도 60~70%, 전원지대의 환경은 SO<sub>2</sub>농도 5~10 ppb, 연중평균습도 50~60%, 다습지대의 환경은 SO<sub>2</sub> 10 ppb 내외, 연중평균습도는 80%이상으로 강변에

---

\* 한국철도기술연구원 교통핵심기술연구단 책임연구원

변에 위치하여 자동차의 통행이 많은 지역이다. 대기환경 오염에 따른 SO<sub>2</sub> 농도 별 가선재의 피로거동을 알아보기 위해 가스부식실험기(Model : GS-ISO-3CS, Suga)를 이용하여 SO<sub>2</sub> 농도를 10 ppm, 100 ppm, 300 ppm의 분위기에서 1~4주간 가속부식시켜 피로시험 시료로 하였다. 조가선의 소선재에 대한 시편은 연선의 외측부에 있는 시편을 선정하여 시험용 시편으로 제작하였으며 표점거리는 100 mm로 하였다. Fig. 2.1는 조가선 소선 시편의 제작을 위한 모식도이며, Fig. 2.2는 조가선의 연선에 대한 피로 시편이다. 단면적 70 mm<sup>2</sup>인 조가선 연선재의 피로 시험편 제작을 위해 연선 끝 부분의 물림식 부분에 소켓을 넣은 다음 아래 부분을 가는 철선으로 풀어지지 않게 결속하여 불포화성 수지 경화제와 충전제를 혼합하여 부은 후 24시간 경화시켜 피로시험용 시편으로 사용하였다.

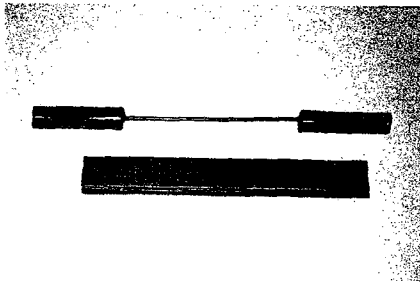


Fig. 2.1. Fatigue specimen of single wire

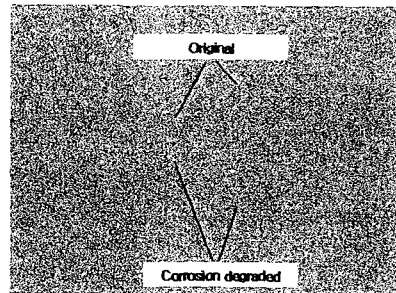


Fig. 2.2 . Fatigue specimen of stranded wire

## 2.2. 시험방법

피로시험은 상온에서 싸인파형의 응력제어 조건으로 주파수 10 Hz에서 일축 인장-인장의 조건으로 실시하였다. 대기중의 시험은 제습기를 사용하여 시험실 내의 상대습도를 50±5%로 유지하며 수행하였다. 소선 및 연선에 대한 피로시험은 예비하중 60 kgf, 1000 kgf를 가하면서 주파수 10 Hz에서 피로시험을 실시하여 파단될 때까지의 싸이클 수를 측정함으로써 S-N 곡선을 구하였다. 최대하중은 인장강도의 80%에서 시작하여 점차 감소시키면서 하중비 0.3~0.6의 범위 내에서 10<sup>7</sup> 싸이클에서 파단되지 않는 하중까지 실시하였다.

## 3. 가선계의 동적거동 해석

### 3.1. 유한요소 모델링

전차선로는 양단고정의 형태로 볼 수 있으나, 지지점이 있고 전기적 접속금구 등이 설치되어 있기 때문에 탄성이 비균일하다. Fig. 3.1은 전차선로에 대한 구성시스템으로 각 가선재별로 나타내고 있다. 이러한 전차선로를 팬터그래프가 밀어 올리면서 주행함으로써 전차선은 압상되고 이에 따라 파동이 발생하여 전후로 전파된다. 이로 인해 전차선과 팬터그래프 사이에는 비접촉(이선)이 유발될 수 있으며, 이로 인해 전력공급 장애, 아크 발생, 전차선 손상 등이 유발됨으로써 전차선의 열화는 가속된다. 특히 팬터그래프는 주행하는 열차에 부착되어 주행에 따른 진동의 영향과 공기의 양력에 의한 영향을 동시에 받는 것으로 그 거동이 매우 복잡하다. 열차의 주행에 따른 전차선의 동적거동 특성을 규명하고, 각 가선재에 발생하는 변동응력을 수치적으로 검증하기 위해서는 전차선과 팬터그래프와의 상호 작용에 의한 해석을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 전차선-팬터그래프와의 동적 상호거동 해석과 관련하여 ① 가선계의 역학적 모델, ② 열차의 각 속도에 따른 전차선의 압상력을 고려하여 결정하였다.

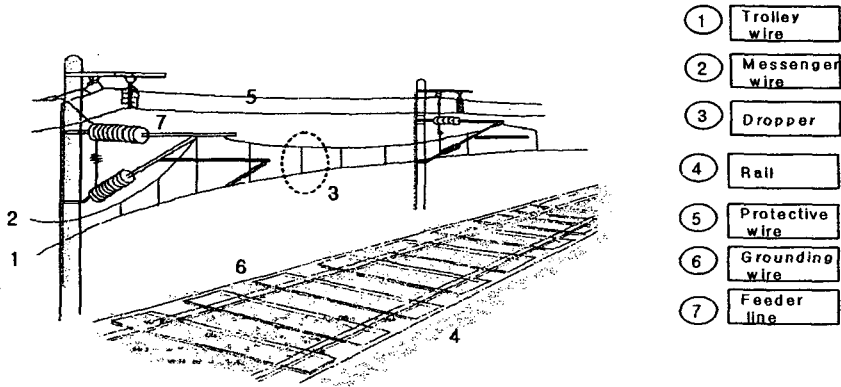


Fig. 3.1. Configuration of catenary system.

### 3.2. 가선계 모델링

본 연구에서 고려한 가선계는 단순 카테너리이며 주요 재원은 Table 3.1과 같다. 전차선의 모델링은 TGV-K 가선계의 동적응답해석<sup>5)</sup> 등의 가선계 모델링 고찰을 통해 대상 구간을 3경간 150 m로 하였다. 전차선은 열차 위의 집전계와 직접적인 접촉을 하여 전기를 공급하는 부분이고, 조가선은 전주에 직접 현수되어 전차선의 기술기가 작아지도록 지지하는 역할을 한다. 이 두 가선재는 고주파 모드에 대한 타당성을 확보하기 위해 자체 강성을 갖으면서 장력을 받는 빔요소로 모델링하였다.

전차선로에는 자중에 의한 하중과 팬티그래프가 진행하면서 전차선에 가해지는 외부인인 압상력이 존재하지만, 자중에 의한 하중은 정적상태에만 관계되므로 동적 해석에서는 이동하중을 팬티그래프에 의한 외력만을 고려하였다. 드로퍼는 전차선과 조가선을 연결시켜주며, 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 선 밀도가 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.

Table 3.1. Main specification of catenary wires.

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

곡선당김금구는 전차선과 접촉하는 팬티그래프의 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 연속되어 있는 것으로 하였으며, 장력을 도입하기 위하여 집중질량으로 모델링 하였다. 이와 같이 전차선, 조가선, 드로퍼 및 곡선당김금구 등을 모델링 하였으며, 지점조건을 도입하였다. Fig. 3.1은 가선계의 모델링을 나타내고 있다. 전차선, 조가선, 드로퍼의 물성치 및 각종 계수는 Table 3.2에 나타내었다.

Table 3.2. Coefficients and physical properties of catenary wires.

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

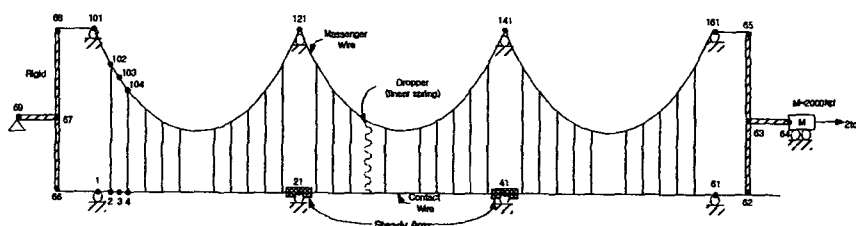


Fig. 3.1. Finite element model of catenary wires.

### 3.3. 팬터그래프 모델링

팬터그래프는 상하로 신축하여도 압상력은 거의 같도록 되어있다. 그러나 최상부의 습동면은 상하로 움직일 때 각 부재에 관성력이 작용하므로 전차선과 접촉력은 일정하지 않다. 전차선의 접촉력은 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 3.2은 가선/팬터그래프의 접촉력을 나타내고 있다.

$$F = F_0 - M \frac{d^2 Y}{dt^2} \quad (2.1)$$

여기서,

- Y = Height of pantograph (m)
- M = Equivalence mass of pantograph (N)
- F<sub>0</sub> = Uplift force (N)
- F = Contact force (N)
- T = Time (sec)

이다. 식 (2.1)에서 Y가 일정한 값을 유지하는 전차선을 구성할 수 있다면 질량의 항이 제거되어 F=F<sub>0</sub>가 되며 매우 이상적인 집전이 된다. 최근 이와 같이 이선률을 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 가선헬으로써 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<sup>6</sup>, 창<sup>7</sup>, 러<sup>8</sup>등의 연구결과를 고찰한 결과 정지 상태에서 60 N 값을 갖으며, 속도에 따라 60~140 N 정도의 변동 값을 갖는 것으로 알 수 있었다. 본 해석에서는 열화의 최악조건으로 고려하기 위하여 140 N의 압상력을 고려하였다. 열차의 속도를 80 km/h 및 120 km/h로 조정하여 해석을 수행하였다. 이와 같은 속도로 진행되는 이동하중을 모사하기 위하여 해석모델의 각 요소상에 탑재된 차륜의 하중을 임의의 시간에 대해서는 등가 절점 하중으로 계산하고 열차통과에 필요한 모든 시간에 대하여 등가하중을 각 절점별로 조합하여 입력하였다.

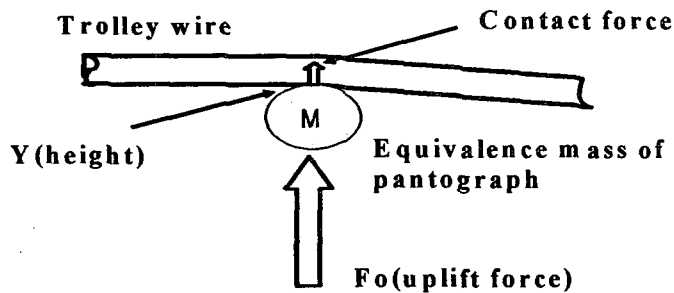


Fig. 3.2. Contact force between trolley wire and pantograph.

#### 4. 시험결과 및 고찰

##### 4.1. 조가선의 표면부식

Fig. 4.1 (a)은 조가선의 건전재로 원형 단면이 균일한 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4.1 (b)의 부식열화재의 단면은 부식으로 인해 손상되어 표면거칠기가 크게 나타난 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4.2 (a)에 건전재는 단면이 균일한 것으로 관찰되었고, Fig. 4.2 (b)의 부식열화재는 건전재보다 부식층의 파손과 부식층이 모재로부터 이탈되어 표면 거칠기가 높게 나타났다. 표면에서의 부식층은 부식생성물의 형성과 파손으로 인해 표면 거칠기가 커지면서 모재의 유효단면적을 감소시키고 결국 미세 균열의 발생으로 단선 및 파손을 초래한다.

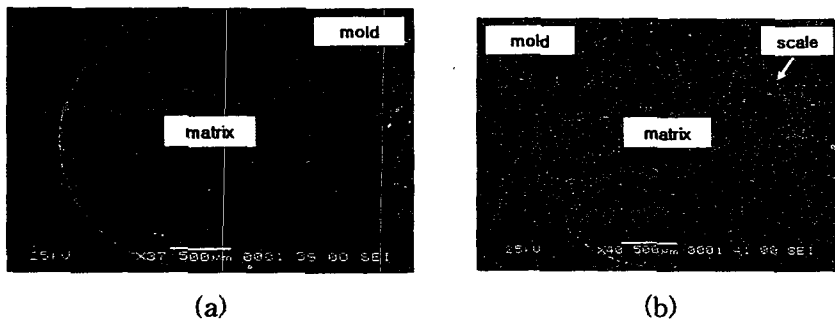


Fig. 4.1. SEM image of cross section of messenger wire : (a) original  
(b) corrosion degraded.

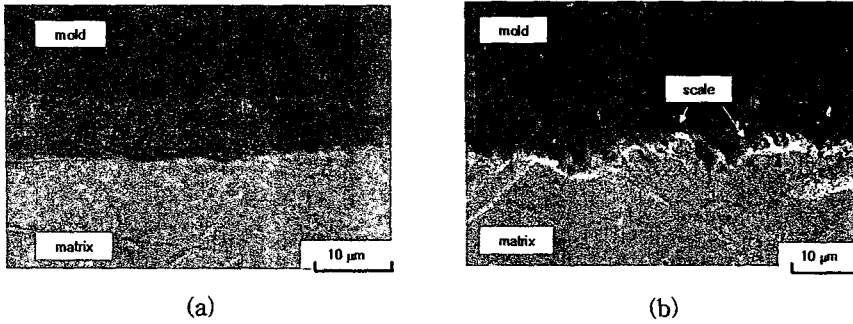


Fig. 4.2. Cross-section of surface roughness of messenger wire (SEM) :  
 (a) original (b) corrosion degraded.

## 4.2 피로파괴 거동

### 4.2.1 소선 및 연선의 피로파괴

Fig. 4.3은 소선에 대한 피로수명을 보여주는 전형적인 S-N곡선을 나타내며, 동일한 응력값이 적용된 건전재와 부식열화재의 경우를 비교하여 보면, 26년 이상 사용한 부식 열화재는 피로파단 수명이 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<sup>9)</sup>. 새로운 모재가 나타나면 다시 부식이 진행되는 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<sup>72)</sup>. 부식열화재는 부식환경에 노출되어 표면부식 효과에 의해 국부적인 응력 집중점으로 작용하여 건전재 대비 피로수명은 35~50%의 수준을 나타내었다. Fig. 4.4는 연선의 건전재와 부식열화재에 대한 피로수명을 보여주는 S-N도이며, 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 작용하였기 때문이다

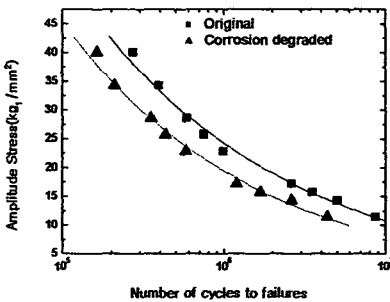


Fig. 4.3. S-N diagram of messenger wire (single wire).

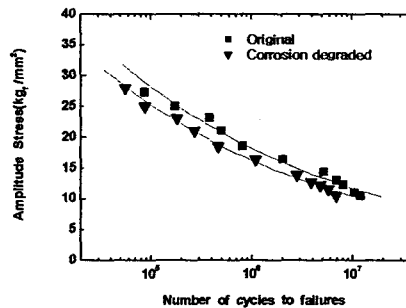


Fig. 4.4. S-N diagram of messenger wire (stranded wire).

### 4.2.2 지역별 피로

조가선이 사용된 지역의 환경에 따른 차이를 살펴보기 위해 세 지역에서 수거된 시편을 건전재와 비교하여 피로시험 결과를 Fig. 4.5 (a), (b)와 같이 나타냈다. 산업지역은 산업체가 밀집해 있어 대기환경오염이 심한 지역이며, 다습지역은 강변에 위치하여 습도가 80% 정도로 높은 곳이다. 전원지역은 대기오염 등의 영향이 적은 곳으로 생각할 수 있다. 피로수명은 산업지역이 가장 단축되었고, 그 다음으로는 다습지역, 전원지역의 순서로 나타나 SO<sub>2</sub> 및 습도의 영향이 조가선의 부식에 미치는 영향이 현저함을 알 수 있다. Fig. 4.6은 가속부식에 따른 조가선의 피로수명을 비교 분석한 것으로서 가속부식 조건에 따른 시편을 예비하중 60 kgf, 최대 160 kgf의 일정한 응력범위에서 피로시험을 실시하여 피로거동을 나타내었다. 건전재를 기준으로 전원지역, 다습지역, 산업지역으로 갈수록 피로수명이 감소하였으며, 가속부식시킨 경우 SO<sub>2</sub>농도가 높을수록 그 수명도 감소한다<sup>10)</sup>. 최저 수명을 나타낸 조건을 기준으로 살펴보면 전원지역에 비해 다습지역은 90%, 산업지역은 80%의 수명을 나타내었다.

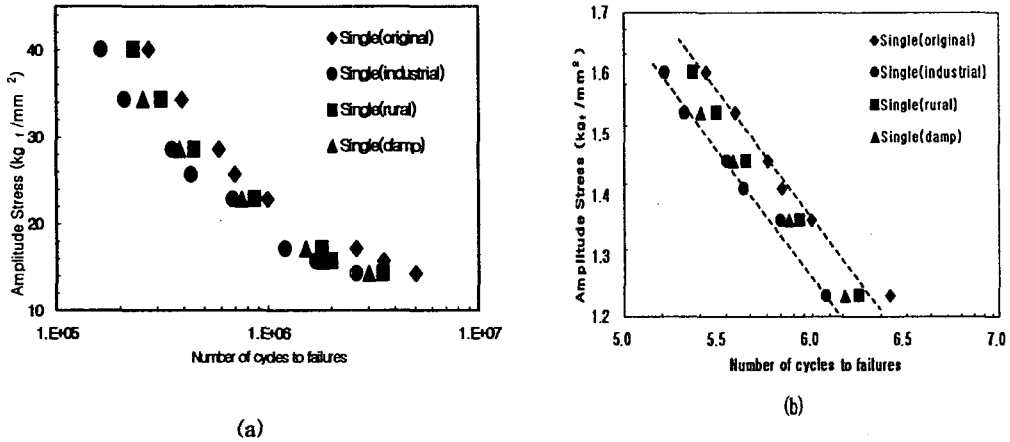


Fig. 4.5. Fatigue life of messenger wires (single) :  
(a) S-N curve (b) log-log plot of S-N curve.

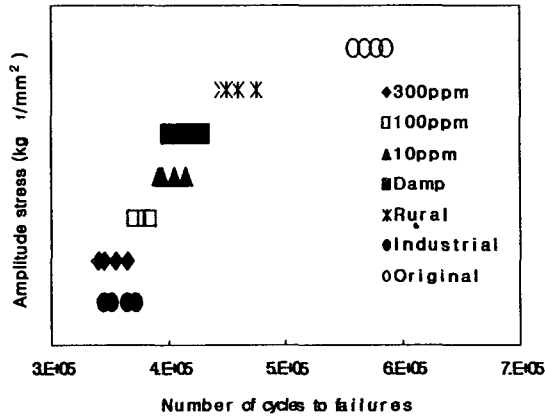


Fig. 4.6. Fatigue life of single wires (preload : 60kgf, maximum load : 160kgf).

### 4.2.3 동적거동 해석결과

해석에 사용된 범용구조해석 프로그램은 ABAQUS 5.7-7<sup>11)</sup>을 사용하였다. 동적거동 해석은 직접 적분법을 사용하여 해석을 수행하였다. 본 해석에 사용된 변수는 Table 4.1과 같다. 열차의 속도별 주행에 따른 가선계의 동적거동의 최대 발생응력은 Table 4.2과 같다. 팬터그래프 6개, 속도 120 (km/hr) 일 때 전차선과 조가선의 최대응력은 각각 12.09 (kgf/mm<sup>2</sup>), 12.05 였다. 속도 80일 경우 전차선과 조가선의 최대응력은 각각 11.5, 11.65를 나타내었다. 팬터그래프 3개일 경우 전차선과 조가선의 최대응력은 11.43, 11.62를 나타내었다. 따라서 동적거동해석 응력의 결과 값을 적용하여 전차선로 가선재에 대한 피로시험 결과를 토대로 피로수명을 추정할 수 있었다.

Table 4.1. Analysis of variables (pantograph : 6Ea, 3Ea).

Pantograph	6 Ea		3 Ea	
Velocity	120 km/hr	80 km/hr	120 km/hr	80 km/hr

Table 4.2. Maximum stress of catenary wires with rolling stock velocity : (a) pantograph 6 Ea (b) pantograph 3 Ea.

(a) pantograph 6 Ea.

Types	120 km/hr		80 km/hr	
	maximum. axial force (kgf)	maximum stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	maximum. axial force (kgf)	maximum. stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
Messenger wire	844.80	12.05	844.80	11.65
Trolley wire	1332.24	12.09	1274.69	11.5

(b) pantograph 3 Ea

Types	120 km/hr		80 km/hr	
	maximum. axial force (kgf)	maximum. stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	maximum. axial force (kgf)	maximum. stress (kgf/mm <sup>2</sup> )
Messenger wire	816.73	11.72	844.80	11.62
Trolley wire	1259.49	11.43	1251.43	11.43

### 4.2.4 수치해석 결과 분석

해석결과는 시간에 따른 각 절점에서의 처짐과 각 요소에서 발생하는 축력, 전단력, 모멘트 등을 고찰하였으며, 이를 실험결과와 비교하여 본 모델링의 적합성을 검토하였다. 본장에서는 동적 해석결과를 응력수준



과 반복횟수로 정리하여 가선계 중 조가선에 대한 구조적 수명을 예측하고자 하였다. Rainflow Counting 방법은 변동 피로 하중을 몇 개의 일정 피로 하중으로 나누는 방법으로 피로시험 결과의 분석 및 랜덤한 데이터의 처리에 주로 사용된다. 산출 결과 최대응력수준에 해당하는 응력이 열차주행시간동안 1회 발생하는 것으로 나타났으며, 이외의 응력수준은 0.5 이하로, 횟수는 1500회 이상인 것으로 분석되었다. 그러나 0.5 이하의 응력은 부재의 피로파괴 및 수명에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 본 연구에서는 제외하였다.

#### 4.2.5 수명특성 평가

본 연구에서 조가선의 건전재 및 부식열화재의 S-N 곡선 결과와 본 해석결과를 토대로 수명평가를 수행하였다. 해석결과 조가선에서 발생하는 변동응력은 11.96 으로 차량 1회 주행시 1회 발생하는 것으로 나타났으며, 피로시험결과 해당하는 응력 level의 반복횟수는 건전재의 경우 8,110,546회, 부식열화재의 경우 4,789,948회이다. 1년간 팬터그래프의 통과횟수는 658,095 회/년이며, 1회 차량 통과시 6개의 팬터그래프를 가정한다면, 약 100,000 회/년이다. 조가선 연선에 대한 실험결과 변동응력이 11.96 일 경우 이에 해당하는 건전재의 피로수명은 8,110,546회이므로 수명은  $(8,110,546)/100,000 = 81$ 년으로 산출된다. 공해지역에서 사용한 부식열화재의 경우 피로수명이 4,789,948회이므로 수명은  $(4,789,948)/100,000 = 47$ 년으로 산출된다.

환경적인 영향에 의한 표면부식 등의 문제가 발생하여 가선계의 내구성에 영향을 미치므로 보수적인 관점에서 사용수명 주기는 최대 45년 미만으로 표면부식 및 피로거동을 고려하여 설정하는 것이 안전성 측면에서 바람직하다고 판단된다. 이를 토대로 전원지역의 교체주기를 40년으로 설정하고 이 보다 습도가 높은 다습지역과 오염정도가 큰 지역인 공해지역의 교체주기를 산정한다. 조가선에 대한 피로시험결과 (Fig. 2.3)에 따르면 다습지역의 경우 수명은 전원지역의 90%이므로  $40 \times 90\% = 36$ 년, 공해지역의 경우 수명은 전원지역의 80%이므로  $40 \times 80\% = 32$ 년으로 산출된다. 따라서 안전성 측면에서 지역별 조가선의 교체주기를 설정하였다.

### 5. 결론

본 연구결과 통해 전차선로 가선계에 대한 수명예측을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 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.

(2) 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 단축시킨다.

(3) 수명특성은 전원지역 40년, 다습지역은 36년, 전원지역은 32년으로 산출되어 지역별로 주기에 대한 재설정의 도입이 필요하다.

(4) 열차의 주행속도에 대한 가선의 최대응력은 시뮬레이션을 통해 전차선과 조가선의 변동응력은 각각 12.1(kg/mm<sup>2</sup>), 12.05(kg/mm<sup>2</sup>) 산출할 수 있었다. 따라서 동적거동 해석 응력의 값을 적용하여 조가선의 피로시험 S-N커브로부터 수명예측평가의 가능성을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 김용기, 장세기, 조성일, 이재봉, 전차선로 가선계의 수용액 부식 특성, Vol. 4, No. 2, pp. 62~70, 한국철도학회지, 2001.
2. 電車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, 유해출, 전기철도공학, 동일출판사, pp. 217~287, 1999.
4. (私) 日本鐵道電氣協會, 鐵道技術者のための電氣概論, 電車線, JR教本研究會編, 平成 6년 2月25日.

5. 김정수, TGV-K가선계의 동적응답해석, 한국소음진동공학회 추계학술대회, 한국소음진동공학회, 1998.
6. 권삼영, 이기원, 전차선로 설계기술 및 인터페이스 연구(Ⅲ)-전차선로와 팬터그래프 사이 동력학시뮬레이션프로그램 보고서, 한국철도기술연구원, 1999.
7. 창상훈, 가선시스템 설계요소기술 최적화방안, 한국철도기술연구원, 2001.
8. 허신, 경진호 외 2인, 한국형 고속전철 집전시스템의 동적설계에 관한 연구, 한국철도학회 추계학술대회논문집, 1998.
9. 허신, 경진호, 송달호외 2인, 고속집전계의 동적 수치모의 해석 프로그램 연구, Vol. 5, No. 1, pp. 10~17, 한국철도학회지, 2002.
10. 西山貞義, 裸電線の腐食と防食の實態, 電氣計算, Vol. 39, No. 11, pp. 50~70. 1992.
11. F. P. Ford and M. Silverman, Mechanistic Aspects of Environment Controlled Crack Propagation in Steel/Aqueous Environment Systems, Report No. HTGE-451-8-12, General Electric Company, 1979.