

가설환경에 따른 조가선의 피로수명 특성

Fatigue Life Properties of Messenger Wire with Service Environments

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

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

Abstract

Environment-dependent fatigue life of Cu-Cd alloy wires used as messenger wires was investigated. Tensile test results showed the decrease of tensile strength and elongation of messenger wires by 3.7% and 16.8%, respectively, in used specimens when compared to new ones. Messenger wires used at industrial region for 26 years showed 35~50% decrease in fatigue life, which is partly due to the in stress concentrations by formation of corrosion products at the surface. Single wires showed better fatigue properties than stranded wires, especially at low cycle regions with higher stresses. Stranded wires showed shorter fatigue lives than single wires because of friction between wires by surface contact. Service life of messenger wires was dependent upon the environments which they were exposed to. SO₂ and humidity deteriorated the fatigue properties by environmental degradation.

1. 서론

전차선로 가선재에는 조가선, 급전선, 전차선 및 가공송전선(ACSR)등의 전선로가 있으며, 그의 피뢰기, 변압기, 절연애자 등의 장치와 부속설비로 구성되어 있다[1]. Fig. 1은 가선계의 구성도를 나타내는 것으로서 전차선(trolley wire)은 열차 위의 집전계(pantograph)와 직접적인 접촉을 하여 전기를 공급하는 부분이고, 조가선(messenger wire)은 전주에 직접 현수되어 가능한 한 전차선의 기울기가 작아지도록 지지하는 역할을 한다. 드로퍼(dropper)는 전차선과 조가선을 연결시키며, 전차선의 하중을 조가선에 전달하기 위해 설치되는 선밀도가 일정한 케이블이다.

곡선당김금구(steady arm)는 전차선과 접촉하는 집전계의 한 곳만 마모되는 것을 방지하기 위해 전차선에 편위를 주기 위한 것이며, 지지대는 조가선만을 지지하고 있다. 가공송전선은 일반적으로 전류를 수송하는 알루미늄도체와 송전선의 강도를 유지하기 위한 강선(steel wire)으로 구성되어 있으며, 강선은 고탄소강 선재를 아연도금처리하여 사용하고 있는데, 이는 해수 또는 자연환경에 의한 부식을 방지하기 위한 것이다[2].

전차선로 가선재들의 수명은 30~40년으로 알려져 있으나 단선에 의한 선로사고는 전력수송의 안전성을 위협할 수 있다. 이와 같은 원인으로는 1) 열차 주행시 집전계와 일부 가선의 주기적인 접촉에 의한 변동하중, 2) 공중에 설치되어 바람에 의한 진동피로, 3) 자중과 바람에 의한 인장-인장 피로환경 등이 주된 영향을 미치고 있다. 따라서 이에 따른 피로수명 특성 확보가 가선재료의 안정성 평가에 있어서 매우 중

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

요하다[2].

전차선로 가선재의 경우 수명에 영향을 주는 환경적 인자로는 1) 설치지역의 습도, 온도, 강우, 풍향, 풍속, 2) 대기오염원에 의한 부식피로(가스상오염물질 ; SO₂, NO₂ 가스 등), 3) 자동차, 주거시설, 공장 등의 배출물 등의 환경인자가 대기오염원과 복합적인 작용에 의해 장기간에 걸쳐 부식열화가 일어나고 있다 [3~5]. 특히 공해가 심한 수도권과 산업권 및 일부역에서는 타 지역에 비해 가선재가 부식피로를 심하게 받게되어, 이로 인한 열화 및 수명감소가 클 것으로 예상된다. 이들 가선재의 부식피로거동을 정확하게 파악하여 사전에 예방조치를 취함으로써 사고를 미연에 방지할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 전차선로 가선재 중 조가선에 대한 가설지역 환경에서의 사용환경에 따른 수명 특성을 파악하기 위하여 조가선의 부식표면 분석과 장기사용에서의 부식이 피로수명에 미치는 영향을 기계적시험과 피로시험으로 수명특성을 분석하였다.

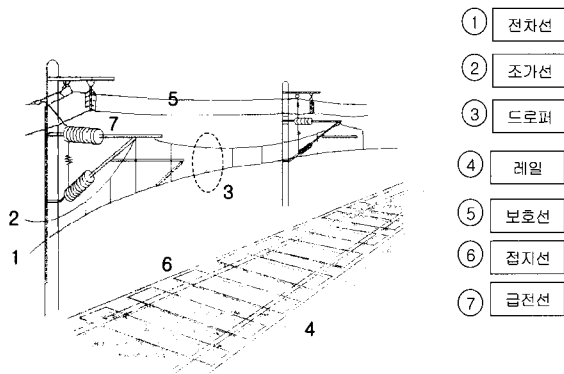


Fig. 1. Configuration of catenary system

2. 실험방법

2.1. 조가선 소선재

본 연구에 사용된 조가선(Cu-Cd 합금선)은 전철 가선재로 신품을 비롯하여 가설지역에서 26년간 사용된 것을 시험용 시료로 선정하였다. 시료를 수거한 가설지역의 환경을 살펴보면 산업지역(부천시역)에서의 환경은 SO₂ 농도 15~20ppb, 연중 평균습도 60~70%, 전원지대(구둔지역)의 환경은 SO₂ 5~10ppb, 연중습도 50~60%, 다습지대(양수리지역)의 환경은

SO₂ 10ppb내외로서 연중습도 80%이상 유지되는 지역이다. 다습지대는 남한강변에 위치하여 자동차의 통행이 많은 지역이다.

조가선의 소선에 대한 시험은 연선의 외측부에 있는 시험편을 선정하여 시험용 시험편으로 제작하였으며 표점거리는 100mm로 하였다. 인장시험 및 피로시험용 시험편은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 소선재의 양쪽 선단부 10~15mm를 스테인레스스틸 튜브와 결합하기 위해 특수본드를 주성분으로 하는 불포화성 수지 경화제와 충전제를 혼합하여 부은 다음, 24시간 경화시킨 후 사용하였다. 이 튜브는 시험기 물림쇠에서 유압식으로 양쪽을 잡아주기 때문에 변형에 견딜 수 있는 재질의 것이다. 소선재는 우선 선단부와 튜브를 수직으로 일치시키고 난 후 수지+충진제를 잘 혼합시킨다음 튜브에 부어넣고 24시간 경화시켰다.

이와 같은 고안에 의해 인장 및 피로시험 중 시험기 물림쇠 부분에서 시험편이 분리되거나 미끄러짐을 방지할 수 있도록 하였다. 조가선 소선의 경우 대기중에서 최소하중 60kgf를 가하면서 주파수 10Hz에서 피로시험을 실시하여 파단 때 까지의 사이클 수를 측정함으로써 S-N 곡선을 구하였다. 최대하중은 인장강도의 80%에서 시작하여 점차 감소시키면서 하중비 0.3~0.6의 범위 내에서 10⁷ 사이클 이상에서 파단되지 않는 하중까지 실시하였다. 인장시험은 Fig. 2와 같이 표점거리 100mm의 특성평가용 시험편을 제작하여 유압식 인장시험기를 이용하여 변형 속도 10 mm/min로 시험을 실시하여 인장곡선을 구하고, 이로부터 항복강도, 인장강도 및 연신률 등의 기계적 특성을 파악하였다. Fig. 3은 25톤 용량의 유압식 동적재료시험기(MTS 810)를 이용한 소선의 피로시험 과정을 보여준다. 피로시험은 상온에서 싸인파형의 응력제어 조건으로 주파수 10Hz에서 일축 인장-인장의 조건으로 실시하였다.

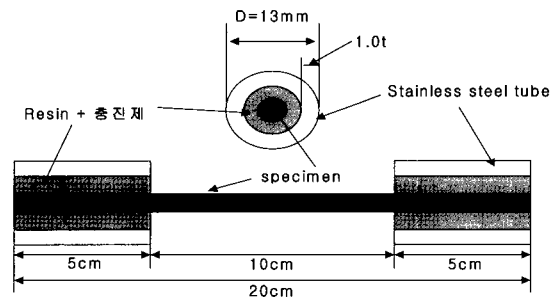


Fig. 2. Fatigue specimen of single wire

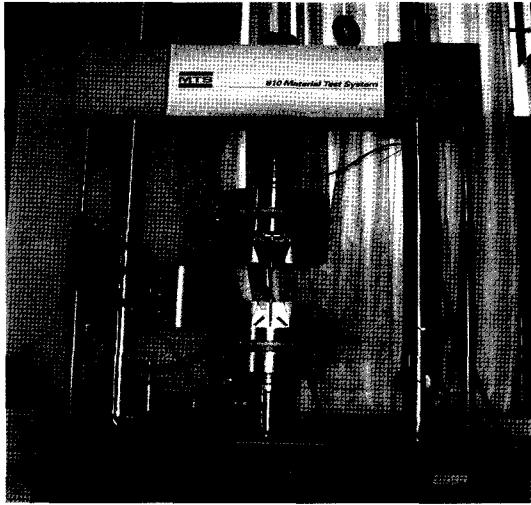


Fig. 3. Fatigue test for single wire

2.2. 조가선 연선제

단면적 70mm²인 조가선 연선의 피로시험 및 인장시험편 제작을 위해 연선의 끝 물림쇠 부분을 소켓에 넣은 다음 윗 부분과 아래 부분을 가는 철선으로 풀어지지 않게 결속한다. 그 후 윗 부분은 연장을 이용하여 선을 구부려 넣은 다음 한쪽을 벽면에 고정시켜 걸어 놓고 특수본드를 주성분으로 하는 불포화성 수지 경화제와 충전제를 혼합하여 부른다. 24시간 경과하면 경화되어 인장시험 및 피로시험용 시험편으로 사용할 수 있다.

Fig. 4은 피로시험편의 모식도이며, 피로 시험편의 길이는 800mm로 하였다. 또한 피로시험을 위해 사용된 조가선은 현장에서 실제 가설되어 26년동안 사용된 것이다.

Fig. 5은 시험기에 사용된 유압식 피로시험기 (Servo- Hydraulic Fatigue Testing Machine, 영국 ESH제작)로서 하중변위는 600N~500KN이며, Fig. 4에 따라 제작된 피로시험편을 장착한 상태를 보여준다. 시험방법은 응력 제어방식으로서 하중파형은 정현파(Sinewave), 일축 인장-인장에 의하여 응력비를 채택하였고, 하중주파수는 10Hz로 일정하게 하고 상온에서 습도 50±5%, 1,000kg의 예비하중을 가하였으며 최대 공칭응력(Pmax)을 인장강도의 80%로부터 시작하여 단계적으로 감소시키면서 하중비 0.3~0.6 범위내에서 피로한도는 10⁷사이클 에서도 파단되지 않

는 하중으로 하였다.

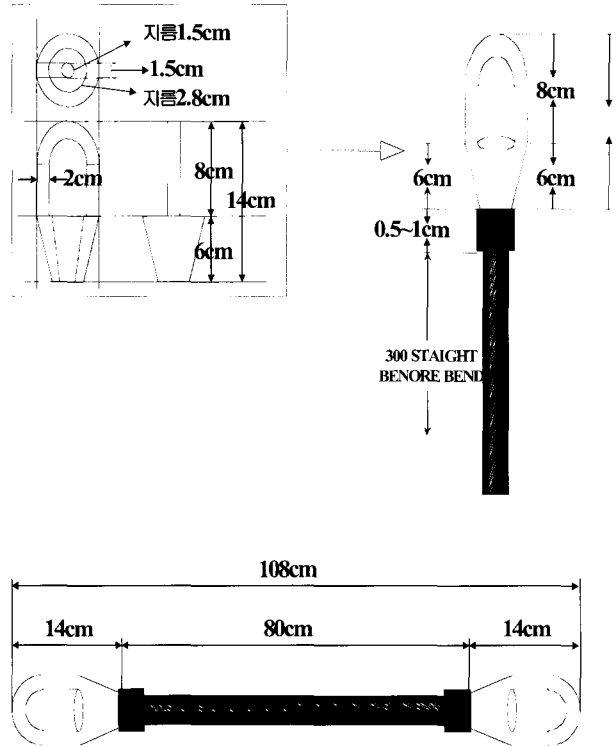


Fig. 4. Fatigue specimen of stranded wire

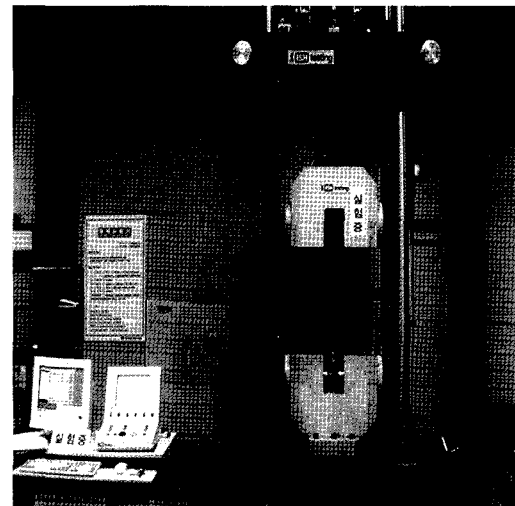


Fig. 5. Fatigue test for stranded wire

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 가선재 표면분석

산업지역인 부천에서 26년 사용 후 철거한 조가선 사용품의 단면을 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)로 분석한 결과를 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 Cu, S, O 등이 검출되었으며, Fig. 7(a~d)에서 보듯이 산화 구리 층과 황화 구리 층이 상당히 관찰되었다. 표면부식층의 두께를 관찰한 결과 조가선의 표면에 형성된 부식층의 두께는 25~28 μm 정도이며 부식층에는 산소 및 구리를 비롯하여 황 등의 성분이 함유되어 부식을 촉진시키며 조가선의 부식은 구리산화물인 Cu_2O 가 주를 이루고 있다. 대기 중의 수분과 유해 원소가 조가선 표면에 흡착되면 가선재는 이들과 반응하여 표면에 산화물과 황화물을 형성하게 된다. 이들 부식층은 사용중 진동에 의하여 표면부에서 떨어져 나가 하중을 지탱하는 가선재의 단면적이 감소되고 국부적인 결함 등에 의해서도 파손의 가능성이 증대하게 되어 전체적인 수명이 감소하게 된다.

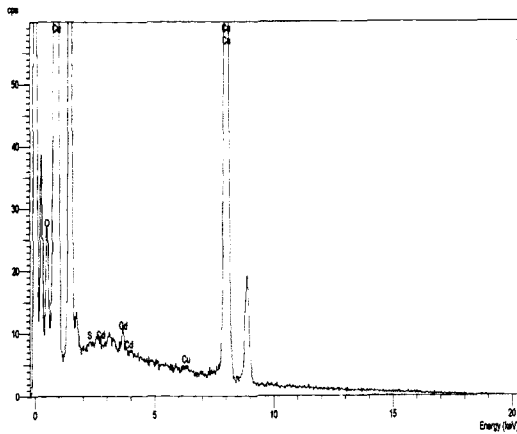
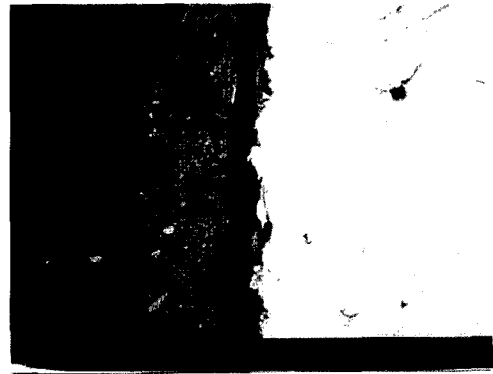
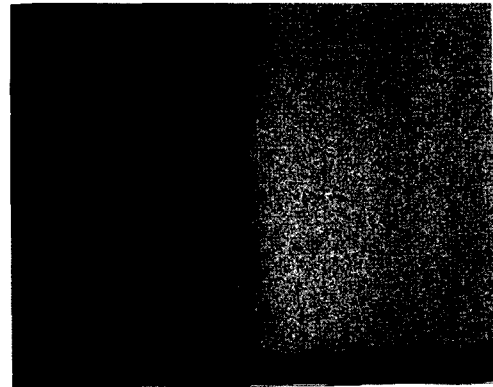


Fig. 6. EDS analysis of messenger wire



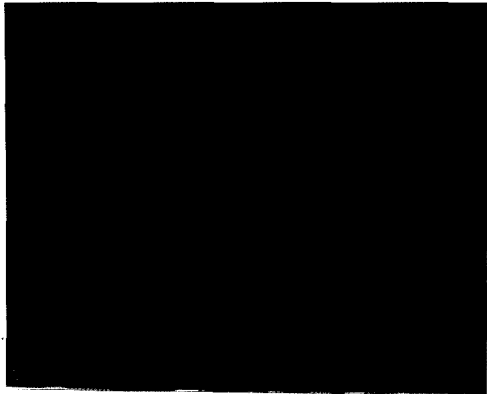
(a)



(b)



(c)

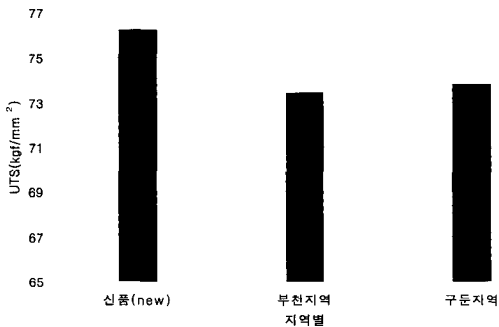


(d)

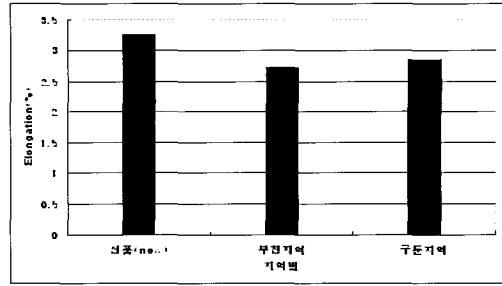
Fig. 7. Cross section of messenger wire used at the field : (a) SEM image (b) Copper mapping (c) Oxygen mapping (d) Sulfur mapping

3.2. 조가선 인장시험

조가선에 대해 인장시험을 실시한 결과 약간의 편차는 있으나 소선의 경우 신문에 비해 산업지역(부천지역) 사용품에서 인장강도와 연신률이 각각 3.7%와 16.8% 감소하였다. Fig. 8은 가선재의 가설지역 환경에 따른 인장강도와 연신률의 변화를 보여주고 있다. 지역에 따라 인장강도와 연신률은 큰 차이를 보였다.



(a) Tensile strength

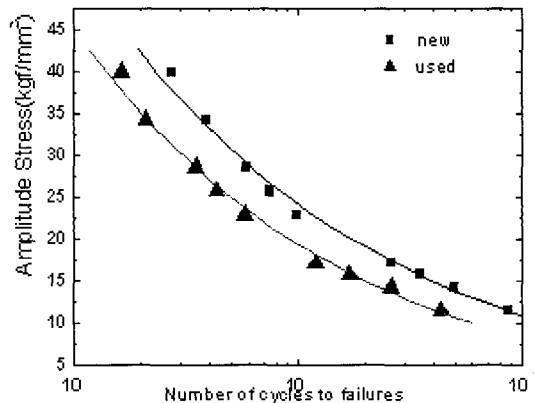


(b) Elongation

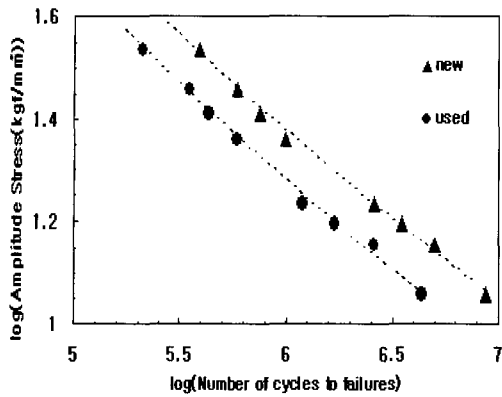
Fig. 8. Tensile properties of messenger wires with service environments

3.3. 조가선 피로시험

가설지역에서 연선에 1톤의 정적하중이 가해지는 것을 고려하여 소선에는 최소 60kgf의 정적하중을 가하면서 0.3~0.6의 하중비의 범위에서 10Hz의 주파수로 하중을 제어하여 인장-인장 피로시험을 실시하였다. Fig. 9(a)는 소선에 대한 피로수명을 보여주는 전형적인 S-N 곡선을 나타내고 있으며, 10⁷ 사이클에서 파단되지 않는 하중을 피로한도로 간주하였다. Fig. 9(b)는 log-log plot으로 직선관계를 보여주며, 신문과 사용품 사이의 차이는 26년간의 사용 년수에 따른 차이를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 사용품의 경우 대생성물이 형성되어 응력집중이 증가함으로써 신문에 비해 35~50%의 수명감소를 보였다.



(a) S-N Curve



(b) log-log plot of S-N curve on the messenger wire

Fig. 9. S-N diagram of messenger wires (single wire)

조가선 연선의 경우 1톤의 정적 하중을 가하면서 하중제어 조건으로 피로시험을 실시한 결과 사용품의 경우 신품에 비해 약 35~50%의 수명감소를 보였다. Fig. 10은 조가선 연선에 대한 피로수명을 나타내는 S-N 곡선이며 사용품은 신품과 비교할 때 사용품은 35~50%정도의 피로수명을 나타내고 있다. 연선은 여러 가닥 중에서 한 가닥이라도 파단이 일어나면 그때의 사이클 수를 전체의 수명으로 간주하였다.

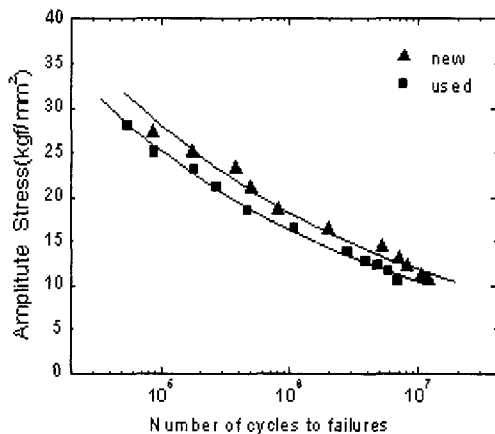


Fig. 10. S-N diagram of messenger wires (stranded wire)

소선과 연선의 경우를 종합하여 피로수명을 나타내는 S-N 곡선을 Fig. 11(a)에 나타내었다. 주어진 응력 범위 내에서 관찰한 결과 소선의 경우에 연선보다 피로성질이 우수한 것으로 나타났으며, 응력이 높은 저사이클의 경우에 더 큰 차이를 보였다. 연선의 경우에는 여러 가닥의 선들이 접촉하고 있으므로 피로시험시 표면부 접촉으로 인한 마찰에 의해 소선보다는 수명이 감소하여 나타난 것으로 보여진다.

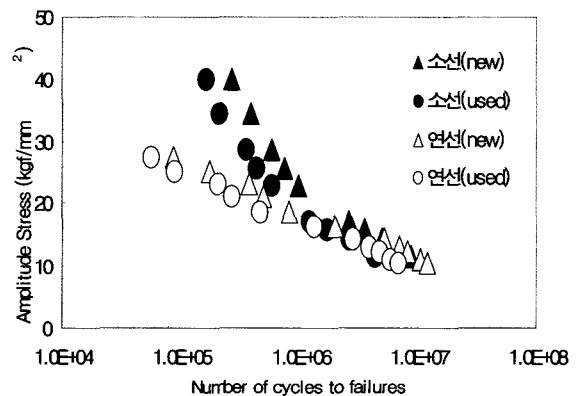
조가선의 피로수명을 Fig. 11(b)와 같이 log-log plot 하면 직선으로 curve fitting을 할 수 있다. 이는 피로수명과 응력사이에서 지수관계를 갖고 있으며, S-N 곡선으로부터 다음과 같이 표시할 수 있다[6,7].

$$\log S_{amp} = a + b \log N_f \quad (1)$$

여기서 a 는 $\log N_f = 0$ 일 때의 절편이며, b 는 직선의 기울기이다. N_f 는 피로시험 중 시편이 파단되는 파괴사이클 수(Number of cycles to failures)이며, S_{amp} 는 응력진폭(Amplitude stress)을 나타낸다.

$$S_{amp} = 10^a \cdot N_f^b \quad (2)$$

가 된다.



(a) S-N curve

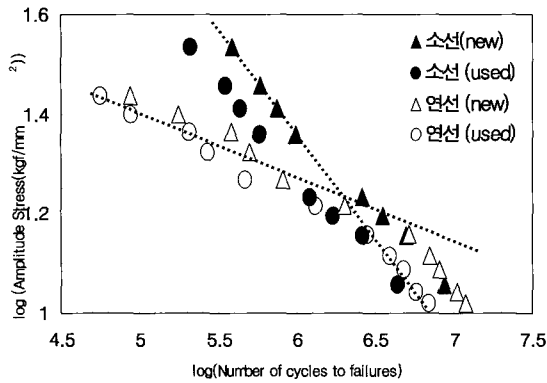


Fig. 11. Comparison of fatigue properties for the messenger wires (stranded, single)

이에 따라 소선과 연선의 신제품과 사용품에 대한 절편 a 와 기울기 b 를 구해보면 Table 1과 같다.

신제품과 사용품의 경우 소선과 연선에서 유사한 관계를 보여주고 있으며, Table 2에서 보듯이 모두 소선보다 연선에서 그 비율이 높게 나타났으며, 평균적으로 사용품은 신제품의 98% 정도로 나타났다. 106 싸이클 이하의 저 싸이클 범위에서 소선과 연선은 뚜렷한 차이를 나타내었으며, 사용품의 경우 신제품보다 그 비율이 약간 크게 나타났다(Table 3).

위의 식에 따라서 S-N 곡선으로부터 피로시험을 실시한 조가선 신제품 및 사용품에 대해 응력범위와 피로수명과의 관계식으로부터 주어진 응력범위에 대한 피로수명은 다음과 같이 구할 수다.

$$N_f = 10^{-a/b} \cdot S^{1/b} \tag{3}$$

따라서 소선 신제품에 대한 피로시험을 실시하여 얻은 S-N 곡선으로부터 두 지수 a 와 b 를 구하면 위의 관계로부터 주어진 응력범위 내에서 연선 사용품에 대한 지수 a 와 b 를 유추하여 피로수명을 예측할 수 있다(Table 4).

$$N_{f4} = N_{f1} 10^{-0.284a_1/b_1 \cdot S_1^{0.891/b_1}} \tag{4}$$

조가선이 사용된 지역의 환경에 따른 차이를 살펴 보기 위해 세 지역에서 철거된 시편을 신제품과 비교하

여 피로시험을 실시한 결과 아래의 Fig. 12와 같이 나타났다. 부천은 공해가 심한 산업지역이고, 남한강 유역의 양수리 부근은 다습지역으로서 습도가 80% 정도로 높은 곳이다. 전원지역이라 할 수 있는 구둔지역은 대기오염 등의 영향이 적은 것으로 생각할 수 있다. 지역별 피로수명을 비교해 보면 부천(산업지역)에서 가장 단축되었으며, 그 다음으로는 양수리(다습지역), 구둔지역(전원지역)순으로 나타나 SO_2 및 습도의 영향이 조가선의 부식에 미치는 영향이 현저함을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of indices a and b on S-N diagram

Types		a	b
Single wire	① new	3.51	-0.37
	② used	3.47	-0.35
Stranded wire	③ new	2.44	-0.20
	④ used	2.38	-0.20

Table 2. Comparison of indices a and b [Used/new]

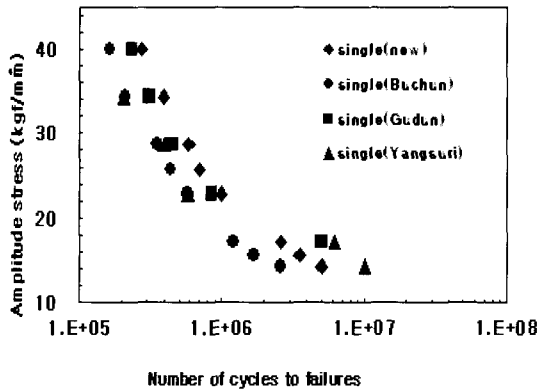
Types	single	stranded	avg.
a -ratio	97.72%	99.04%	98.38%
b -ratio	94.12%	99.34%	96.73%

Table 3. Comparison of indices a and b [stranded/single wire]

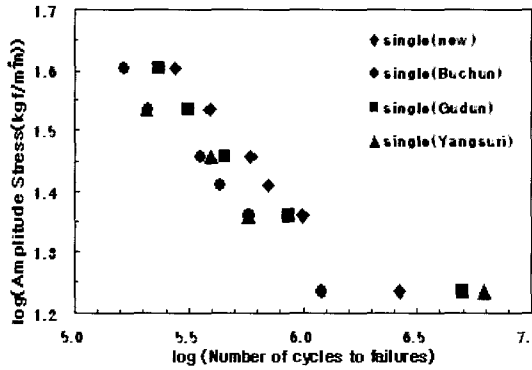
Types	new	used	avg.
a -ratio	69.71%	69.48%	69.60%
b -ratio	56.56%	54.0%	55.28%

Table 4. Prediction of fatigue life indices a and b

Types		a	b
Single wire	① new	100%	97.72%
	② used	100%	94.12%
Stranded wire	③ new	69.71%	67.90%
	④ used	56.56%	52.97%



(a) S-N curve



(b) log-log plot of S-N curve

Fig. 12. Fatigue life of messenger wires (single wires)

4. 결론

조가선의 가설지역에서 사용된 시편의 표면부식층 분석과 기계적 특성 및 피로시험을 통해 피로수명에 미치는 영향을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대기오염이 심한 부식환경에서 사용된 조가선 사용품의 경우 표면부식에 의해 응력을 지탱하는 구리선의 단면적이 감소하였으며, 따라서 인장강도 및 연신률도 감소하였다.

2. 산업지역인 부천에서 26년 사용된 조가선의 피

로수명은 신품대비 45%, 다습지역인 양수리는 34%, 전원지대인 구둔지역은 23%정도 단축되었다. 이는 사용환경에 의한 조가선의 표면부식이 기계적성질을 열화시켰기 때문이다.

3. 조가선의 사용수명은 가설환경에 따라 차이가 뚜렷하였다. 유독성가스의 배출이 심한 산업지역이나 습도가 높은 다습지역에서는 사용수명의 단축이 예상되므로 교체주기에 특별한 주의를 필요로 한다.

4. 주어진 응력범위 내에서 관찰한 결과 소선은 연선보다 높은 피로수명을 나타내었으며, 연선의 피로수명과 소선의 피로수명사이에는 다음의 상관식으로 나타낼 수 있다.

$$N_{FD} = N_{FD} 10^{-0.284a/b_1} \cdot S^{0.891/b_1}$$

5. 조가선 소선 신품에 대한 피로시험을 실시하여 얻은 S-N 곡선으로부터 지수 a와 b를 구하면 주어진 응력범위내에서 연선 사용품에 대한 지수 a와 b를 유추하여 피로수명을 예측할 수 있다.

5. References

[1] 전철구조물의 수명예측기법에 관한 연구, 한국철도기술연구원 연구보고서, 2000.
 [2] 한국철도기술연구원, 철도환경기술개발-전차선로가선재의 환경부식열화에 의한 피로특성 평가, 2002
 [3] 정재기, 김성득, 심재명, 양해원 : 강심 알루미늄연선의 가공지선에 대한 부식검출과 수명예측, 전기학회논문지, 45(7), pp. 1039-1044, 1996
 [4] 大氣汚染と 金屬の 腐食, 大氣汚染ち 材料, 金屬, 5, pp. 33~37, 1994
 [5] J. Tidblad and Leygraf, Atmospheric corrosion Effects of SO2 AND O3 on Laboratory-Exposed Copper, J. Electrochem. SOC., Vol. 142, No. 3, March 1995
 [6] J.A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice-Hall Inc, New Jersey, pp. 83~114, 1990
 [7] 이창순, 박인규, 김용기, 장세기, Cu-Cd 합금선의 사용환경에 따른 피로 수명평가, PROC. OF 16th Conference on Mechanical Behaviors of Metals, pp. 291~300, November 2002