

도시철도 궤도형식별 장기 사용레일의 피로수명 평가

The Fatigue Life Evaluation of Aged Continuous Welded Rail according to the Track Types on the Urban Railway성덕룡[†], 김상진*, 백찬호*, 남진근*, 이창현*, 공선용**Deok-Yong Sung[†], Sang-Jin Kim*, Chan-Ho Baik*, Jin-Geun Nam*, Chang-Hen Lee*, Sun-Young Kong**

Abstract In this study, we carried out fatigue tests on existing laid rails. Based on the test results, an S-N curve expressing the remaining life of laid rails at a fracture probability of 50% was obtained using weighted probit analysis suitable for small-sample fatigue data sets. As rails used for testing had different histories in terms of accumulated passing tonnage, the test data were corrected to average out the accumulated passing tonnage. We estimated the remaining service lives for laid rails according to the track types on the urban railway using the prediction equation for the bending stress of rail developed in the past to estimate rail base bending stress and that surface irregularities into consideration. Estimating the remaining service life of laid rails showed that the rail replacement period could be extended over 200MGT. Also, the concrete track compared to the ballast track, the fatigue life of rail is analyzed approximately 300MGT higher than.

Therefore, the rail replacement criteria need to distinguish between the ballast track and the concrete track, and not the standard needs to be managed as a target, although it is necessary to remove longitudinal rail surface irregularities at welds by grinding. Also, the fatigue test results under fatigue limit, Haibach's rule applying half slope of S-N curve under the fatigue limit was considered more reasonable than modified Miner's rule for estimating rail fatigue life.

Keywords : Concrete track, Ballast track, Laid rail, Fatigue life, Periodic replacement

초 록 본 연구에서는 궤도형식별 장기 사용레일에 대한 실내피로시험을 수행하였고, 궤도형식별 장기 사용레일의 잔존수명을 표현한 파괴확률 50% S-N 선도는 적은 실험데이터에 대한 가중치 확률 해석기법을 사용하여 도출하였다. 여기서 피로시험에 사용된 레일들이 누적통과톤수가 서로 다르기 때문에 누적통과톤수를 평균하여 반복횟수를 수정하였다. 또한, 레일표면요철 및 열차속도를 고려한 레일 저부 휨응력은 기존 연구결과 도출된 레일휨응력 예측식을 사용하여 장기 사용레일의 잔존수명을 평가하였다. 레일 피로수명 평가결과, 레일 피로수명이 기준치에 비해 약 2억톤이상 높았다. 또한, 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도 레일의 피로수명이 약 3억톤이상 높은 것으로 분석되었다.

따라서 도시철도에서 레일교체기준을 자갈궤도와 콘크리트궤도로 구분할 필요가 있으며, 레일연마를 통한 레일관리가 이루어진다면 기준치가 아닌 목표치로 관리할 필요가 있다. 또한, 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로시험결과를 바탕으로 레일의 피로수명을 평가하기 위해서는 수정마이너법칙보다는 피로한도 이상에서의 S-N선도 기울기의 1/2인 하이바크 법칙을 적용하는 것이 합리적이라 판단되었다.

주요어 : 콘크리트궤도, 자갈궤도, 사용레일, 피로수명, 교체주기

[†] 교신저자: 대원대학교 철도건설과(dysung@mail.daewon.ac.kr)

* 서울메트로 궤도신호처

** (주)삼표이엔씨

1. 서론

고속화, 고밀화 열차운행을 가능하게 하기 위해서는 안정적인 선로구축 및 과학적이고 체계적인 궤도유지보수가 동반되어야 한다. 특히, 도시철도 레일은 대량의 여객을 수송하기 위한 수단으로 매우 가치가 높은 궤도구성품 중 하나이며, 열차의 주행안정성 및 탈선방지를 위해 레일 피로파단에 대한 신뢰성 확보가 엄격히 요구되고 있다. 1999~2000년까지 영국(Railtrack)에서는 연간 300~600건의 레일 파단사례가 있었으며, 이 중 횡방향 파단이 39.5%, 테르밋용접부 파단이 22.4%를 차지하였고, 프랑스(SNCF)의 경우 전체 레일교체수량의 35.5%가 테르밋용접부의 파단에 의한 것이었다[1]. 이러한 레일의 갑작스런 피로파단을 예방하고 주행안전에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 각국에서는 누적통과톤수에 의한 레일교체주기를 설정하고 있으며, 레일교체기준에 의한 레일교체비용은 전체 궤도유지보수비용의 50%이상을 차지하고 있어 레일 피로수명에 대한 보다 정확한 분석 및 예측이 필요한 실정이다.

차륜이 레일용접부를 연속적으로 통과하면서 비정상적인 충격하중 및 용접부의 물리적 취약성으로 인해 레일표면에 요철이 발생하게 되고, 이러한 레일표면요철의 성장은 동적 윤증을 증가시켜 레일 저부의 휨응력을 증가시키는 요인으로 작용하게 되어 레일의 피로수명을 크게 단축시킨다. 즉, 누적통과톤수에 의한 레일교체주기는 동적 윤중에 의한 레일용접부의 휨 피로수명에 의해 결정된다[2]. 특히, 고속화, 고밀화 철도운영과 전세계적으로 증가하고 있는 콘크리트궤도의 사용 등 새로운 철도환경의 적용과 레일표면요철의 발생 및 진전, 궤도지지강성의 변화, 운행속도의 증가 등에 따른 레일 피로수명 예측을 통해 주행안전성을 확보할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 도시철도 자갈궤도와 콘크리트궤도에서 사용하던 누적통과톤수 8억톤 이상의 장기 사용레일에 대한 피로시험을 수행하였으며, 피로해석을 통해 궤도형식별 장기 사용레일의 잔존피로수명을 평가하고자 하였다.

2. 레일피로해석이론

2.1 선형누적피로해석이론

선형손상법칙은 Palmgren에 의해 최초로 제안되었고, Miner에 의해 발전하였다. 특히 Miner는 Miner's rule을 제안하였고, 이는 식 (1)로 표현된다.

$$\frac{n}{N} = \text{반복비 (cycle ratio)} \quad (1)$$

여기서, n : 일정한 응력범위(S)에서의 반복수, N : 일정한 응력범위(S)에서의 피로수명

$$\sum D_i \geq 1, D_i = \frac{n_i}{N_i}, \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2)$$

식 (2)에서 D 는 손상률(damage fraction)로 하나 또는 일련의 과정에 의하여 사용된 수명의 비율로 정의된다. 누적손상이론에서는 파괴 손상률의 합이 1이거나 1보다 클 때 발생한다.

일정한 응력범위(S_i)에서 손상률(D_i)은 반복비(n_i/N_i)와 같다. 따라서 하중 1 cycle에 대한 손상률 D 는 $1/N$ 이고, 이는 하중 1 cycle의 작용으로 피로수명의 $1/N$ 을 소모하는 것을 의미한다. 또한, Miner 법칙은 S-N선도상에서 도식적으로 나타낼 수 있다(Fig. 1 (a) 참조).

이 선도를 살펴보면 응력수준 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 피로수명을 N_1, N_2, N_3 라 하고, σ_1 인 응력수준이 n_1 , σ_2 인 응력수준이 n_2 및 σ_3 인 응력수준이 n_3 회 반복되어 피로파괴가 일어났다면 이 경우의 조건은 식 (3)과 같다.

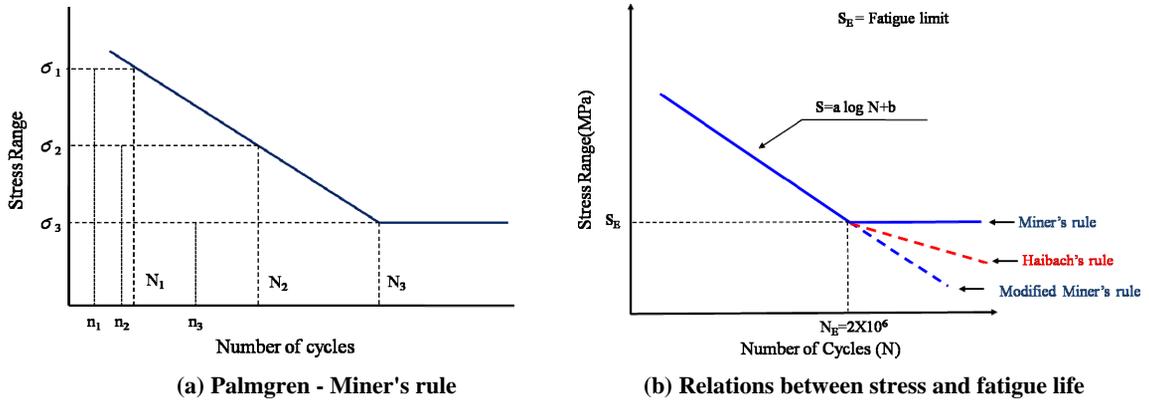


Fig.1 Linear elastic fatigue mechanics

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1.0, \quad \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (3)$$

실제 대부분의 대형구조물은 불규칙적인 외부 하중하에서 거동하기 때문에 발생응력이 불규칙적이다. 이러한 경우에 S-N곡선에 그대로 적용하기는 어렵기 때문에 Palmgren-Miner의 법칙을 적용하여 피로파괴 발생수명을 예측할 수 있다. 그러나 피로손상도가 크게 되면 $\Delta\sigma_i$ 가 일정 진폭응력하에서의 피로한계이하에도 피로손상의 진행에 기여한다. 이것은 피로손상이 진행함에 따라서 피로균열이 성장하게 되고 피로균열성장에 기여하는 $\Delta\sigma_i$ 한계값이 작더라도 이러한 사실은 분명하다. 이와 같은 피로한계 이하의 $\Delta\sigma_i$ 의 영향을 고려하는 방법으로 Modified Miner's rule와 Haibach's rule이 있다.

Modified Miner's rule에서는 피로한계 이하의 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 피로수명 N_i 를 ∞ 로 하지 않고, Fig. 1 (b)와 같이 피로한계 이상의 S-N선도를 피로한계 이하에서도 원 기울기를 연장해서 N_i 를 구하고, 식 (3)을 이용해서 피로수명을 구하는 방법이다. Haibach's rule에서는 Fig. 1 (b)에서 나타난 바와 같이 피로한계 이하에서 S-N선도의 기울기를 완만하게(Miner's rule과 Modified Miner's rule의 중간기울기 적용)하고 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 피로수명 N_i 를 구한다.

Modified Miner's rule과 Haibach's rule 중 어느 것을 적용하느냐는 철도운영자 또는 연구자에 따라 다를 수 있으며, 피로수명을 고려한 레일 교체주기를 제시한 일본에서는 Haibach's rule을 적용하였다[2].

2.2 응력확률밀도함수를 이용한 피로수명 산정방법

확률밀도함수를 이용하는 방법[2][4]은 차량/궤도 상호작용해석을 통해 도출한 최대응력값들에 대하여 정규분포도로 고려하는 방법이다. 확률밀도함수를 이용한 레일 피로수명 예측 방법은 다음과 같다.

선형누적피해법칙에 의해 식 (4)가 성립한다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{N_{total} \cdot f(s)}{N} ds = 1 \quad (4)$$

여기서, N_{total} : 총 피로수명(cycles)

$N = 10^{\frac{s-b}{a}}$: 레일응력 s 의 반복수로 a 는 계수, b 는 정수

$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-m}{\sigma}\right)^2}$: 레일응력 s 의 확률밀도함수

σ : 확률밀도함수의 표준편차, m : 확률밀도함수의 평균

a : S-N선도의 기울기, b : S-N선도의 Y축 절편

구하고자 하는 수명 N_{total} 에 대해 정리하면 식 (5)와 같다.

$$N_{total} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-m}{\sigma}\right)^2} \cdot 10^{\frac{s-b}{a}} ds} \quad (5)$$

식 (5)는 레일에 작용하는 하중이 항상 변하지 않을 경우에 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 레일에 작용하는 하중은 레일표면요철에 따라 증가하게 되어 식 (5)를 사용하여 레일 피로수명을 예측할 때는 큰 오차를 유발할 수 있다. 레일표면요철은 누적통과톤수에 따라 변하기 때문에 누적통과톤수에 따라 하중조건이 변한다고 가정할 경우 I년차에 레일의 피로 손상도 d_i 는 식 (6)과 같다.

$$d_i = N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(s)}{N_i(s)} ds \quad (6)$$

여기서, $f_i(s)$, $N_i(s)$ 는 각각 I년차에 대응하는 하중에 의한 발생 힘 응력의 확률밀도함수 및 S-N선도상의 힘 응력에 대응하는 반복횟수이다. 레일 피로수명이 X년이라고 가정하면 식 (7)이 성립한다.

$$1 = \sum_{i=1}^X d_i = \sum_{i=1}^X N_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i(s)}{N_i(s)} ds \quad (7)$$

여기서, I년차에 해당선로를 통과하는 축중의 종류가 m 일 경우, 각 축중을 P_{ij} , $j=1, 2, \dots, m$, 각 축중의 연간 통과횟수를 L_{ij} , 레일저부에 발생하는 힘 응력의 분포를 $f_{ij}(s)$, $j=1, 2, \dots, m$ 라 하면 식 (7)은 식 (8)과 같다.

$$1 = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{N_{ij}(s)} ds \quad (8)$$

P년간의 하중을 받은 경우 식 (8)은 식 (9)와 같게 되며, 잔존수명은 (X-P)가 되고 잔존누적통과톤수 LT_i 는 식 (10)과 같게 된다.

$$1 = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{N_{ij}(s)} ds + \sum_{i=p+1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_{ij}(s)}{N_{ij}(s)} ds \quad (9)$$

$$LT_i = \sum_{i=p+1}^X \sum_{j=1}^m L_{ij} P_{ij} \quad (10)$$

Fig. 2 (a)는 레일표면요철과 레일 휨응력의 상관관계 및 확률밀도함수를 나타내며, Fig. 2 (b)는 레일 휨응력에 대한 확률밀도함수를 레일 휨 피로강도(S-N선도)에 적용하여 피로수명을 예측하는 방법을 보여준다.

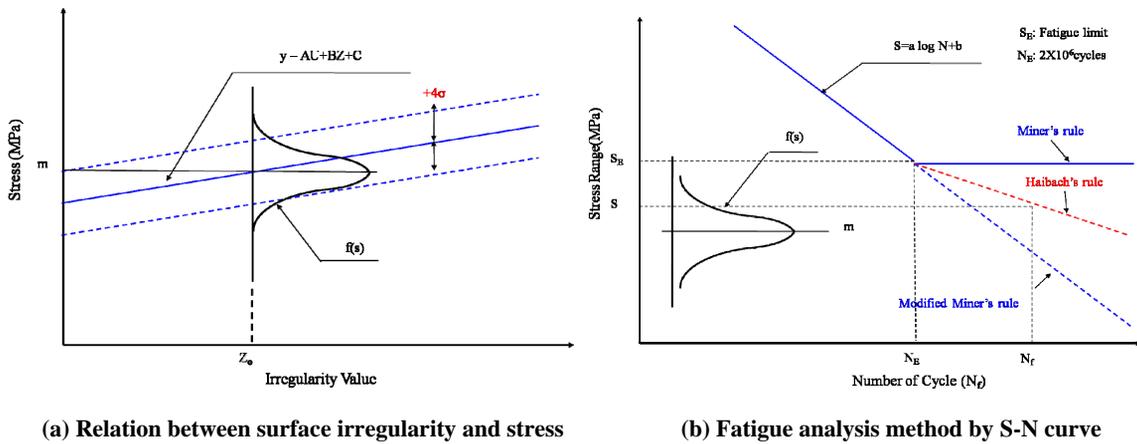


Fig. 2 Evaluation of fatigue life using probability density function for stress

Ishida(1990)[2]는 장대레일 교체주기를 산정하는데 있어 요철지수 7에 대한 응력확률밀도함수를 적용하였으며, 국내 도시철도에서는 요철지수 7, 열차속도 100km/h에 대한 피로수명 평가를 통해 레일교체주기(안)을 정한바 있다[5][6]. 따라서 본 연구에서는 Table 1에서 제시한 응력확률밀도함수를 적용하여 레일 피로수명을 평가하고자 하였으며, 요철지수 7, 열차속도 100km/h에 대한 응력확률밀도함수는 Fig. 3과 같다.

Table 1 The prediction equation for the bending stress of rail

	50kgN rail on ballast track[2]	50kgN rail on concrete track[9]
Prediction equation	$Y=4.996Z+0.222U+30.00$	$Y=4.75Z+0.151U+47.30$
Irregularity value	$Z=10V+4W$	$Z=10V+4.7W$
Correlation coefficient	0.86	0.85
Standard deviation	11.21	4.75
No. of data	3,600	2,040
Remark	Y : banding stress, Z : irregularity value, U : train speed	

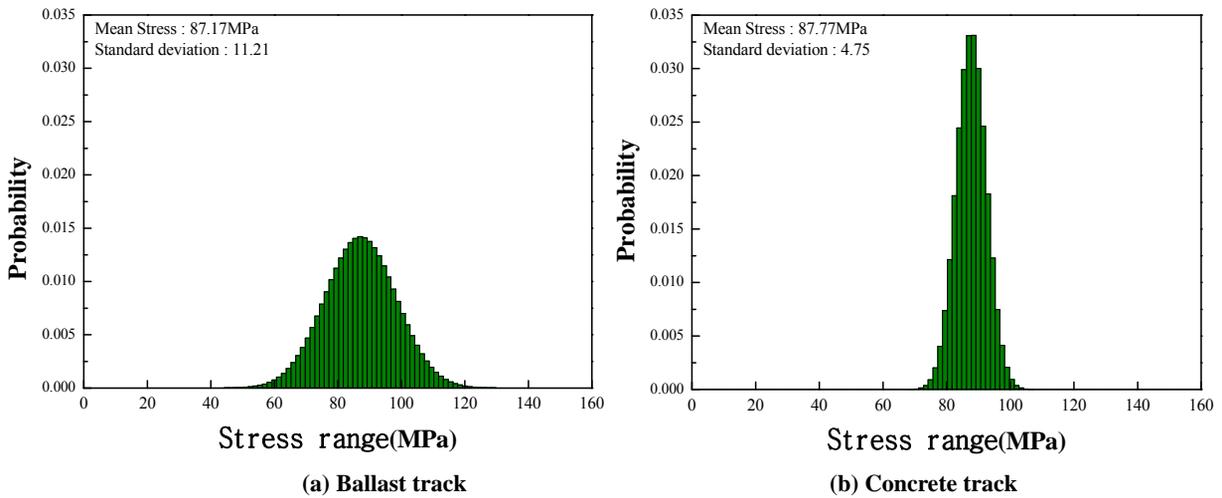


Fig. 3 Probability density function for stress(Irregularity value(z) 7, train speed 100km/h)

3. 장기 사용레일 피로시험

레일의 피로수명을 평가하기 위해서는 피로시험을 통해 파괴 시까지의 반복횟수와 응력사이의 관계를 규명하는 것은 필수적이다. 피로시험에 있어 가장 중요한 부분중에 하나가 피로시험용 지그의 완성도를 높이는 것이다. 피로시험의 특성상 하나의 시험편에 대하여 오랜 시간동안 하중을 반복해서 재하해야 하고, 시험편보다 먼저 피로파괴가 발생하는 것을 예방하기 위해 시험지그는 충분한 강도를 지니고 있어야 한다. 이에 도시철도 자갈궤도와 콘크리트궤도에서 사용한 장기 사용레일에 대한 실물 휨피로시험을 수행하였으며, 본 연구에서 수행한 실물 레일 휨 피로시험은 2,500kN 피로시험기(Saginomya, 일본)를 이용하였고, 4점 휨 피로시험방법을 사용하였다. 시험편 길이는 지점거리 1,300mm를 고려하여 1,500mm로 하였고, 용접부가 중앙에 위치하도록 제작하였다.

실내 피로시험을 하기 위한 시험편은 누적통과톤수 약 6.8~9.2억톤을 받은 자갈궤도 및 콘크리트궤도 50kgN 테르밋용접레일 20개이며, 실내 피로시험 전에 초음파탐상 및 자분탐상을 통한 균열이 존재하지 않음을 확인하였다. 또한, 모든 시험편은 주기적인 레일연마를 통해 레일관리가 이루어져 왔고, 시험편 발채전에 레일연마를 실시하여 동일한 표면상태를 가지도록 하였다.

레일 피로시험의 하중조건에서 적용하게 되는 최소응력은 본 시험이 인장반복하중시험으로 설정되었기 때문이며, 온도응력 등의 축응력을 전단면에 동일하게 작용시켜 피로강도특성에서 평균응력으로써 고려할 필요가 있기 때문이다. 온도응력은 지역에 따라서 다른 사계의 변화에 의해 변동하는 온도응력분포가 고려되는데, 평균적인 효과를 고려해 1년 중 발생하는 인장응력의 1/4을 고려하여 100MPa의 인장응력이 작용한다고 가정함으로써 레일 휨강도시험 시 최소응력 30MPa이 레일저부에 휨응력으로써 발생하도록 하중조건을 설정하였다 [2].

잔류응력에 대해서는 용접 시에 도입되는 것으로 본 연구에서 수행한 실물 레일 휨 피로

시험의 시험편이 이미 이것을 포함하고 있기 때문에 실제 잔류응력의 편차를 적절하게 반영하고 있다고 판단된다. 또한, 열차하중에 의해서 반복적으로 도입되는 휨응력에 대해서는 본 연구에서 수행한 실물 레일 휨 피로시험이 재하하중에 의해 레일저부에서 휨응력이 발생하기 때문에 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 잔류응력에 대해서는 특별히 고려하지 않는 것으로 하였다.

장기 사용레일 표본 피로시험용 시험편 및 하중조건과 피로시험결과는 Table 2와 같다. 피로시험을 위한 하중파형은 싸인파(sine wave)로 일정한 응력이 반복되어 작용하도록 하였으며, 하중재하속도는 2~4Hz, 인장반복하중(응력비 $R>0$)으로 하였다. 실물 레일용접부 휨 파괴강도시험을 통해 50kgN 레일용접부의 항복강도는 약 690MPa이었으며[8], 본 연구에서는 레일용접부가 항복하지 않는 범위에서 하중을 재하하도록 하였다.

Table 2 Results of bending fatigue test for 50kgN rail

	Rail	Track	Accumulated passing tonnage (100MGT)	Min. stress (MPa)	Max. stress (MPa)	Stress range (MPa)	Hz	Fracture cycles (cycles)	Remark
#1	50kgN TW	Ballast	8.63	30(29kN)	380(362kN)	350	3	301,846	Failure
#2			8.63	30(29kN)	330(314kN)	300	3	508,184	Failure
#3			8.63	30(29kN)	280(267kN)	250	4	1,011,461	Failure
#4			8.63	30(29kN)	260(248kN)	230	4	1,001,606	Failure
#5			8.63	30(29kN)	180(171kN)	150	4	7,000,000	N.F
#6			8.63	30(29kN)	126(120kN)	96	4	10,000,000	N.F
#7			6.81	30(29kN)	480(457kN)	450	2	57,311	Failure
#8			6.87	30(29kN)	330(314kN)	300	3	248,589	Failure
#9			6.81	30(29kN)	280(267kN)	250	4	605,562	Failure
#10			6.87	30(29kN)	230(219kN)	200	4	1,899,590	Failure
#11			8.10	30(29kN)	260(248kN)	230	4	1,269,253	Failure
#12			8.10	30(29kN)	126(120kN)	96	4	10,000,000	N.F
#13		Concrete	9.20	30(29kN)	330(314kN)	300	3	706,650	Failure
#14			9.20	30(29kN)	330(314kN)	300	3	495,830	Failure
#15			8.90	30(29kN)	280(267kN)	250	4	956,679	Failure
#16			8.90	30(29kN)	280(267kN)	250	4	742,857	Failure
#17			8.90	30(29kN)	270(257kN)	240	4	1,287,254	Failure
#18			8.90	30(29kN)	270(257kN)	240	4	1,045,682	Failure
#19			8.90	30(29kN)	126(120kN)	96	4	10,000,000	N.F
#20			8.90	30(29kN)	126(120kN)	96	4	10,000,000	N.F

시험편 #1~4, #7~11, #13~18은 장기 사용 테르밋용접레일 S-N선도를 도출하고, 장기 사용레일의 잔존 피로수명을 피로해석이론에 기초하여 산정하기 위해 피로한도 이상의 응력범위를 적용하였다. 시험편 #5, #6, #12, #19, #20은 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로해석기법 (Modified Miner's rule 또는 Haibach's rule)을 선정하기 위해 700만회 또는 1,000만회까지 피로시험을 진행하였다.

피로시험 결과 200만회 미과단 시험편을 제외한 모든 시험편에서 하중재하점사이에서 발생한 휨피로파단이 발생하였고, 전단피로파단은 발생하지 않았다. 휨피로파단은 전단력을 받지 않고 휨모멘트만 받아 하중재하점 사이 용접부 열영향부에서 파단이 시작한 것을 말한다. 피로한도 이하 응력범위를 재하한 시험편 #5, #6, #12, #19, #20의 경우, 7백만회와 1천만회까지 미과단되었으며, 1천만회를 도시철도 열차하중(축중)인 16톤을 적용할 경우 1.6억톤이 된다. 즉, 도시철도 실 열차하중에 동적증폭효과를 고려한 응력범위 96MPa(최대하중 120kN : 정적하중 60kN+동적증폭효과40kN)의 경우 1천만회까지 미과단되었다. 이러한 결과는 도시철도 열차하중(축중) 160kN에 대하여 통과톤수로 환산 시 1.6억톤에 해당하기 때문에 표본 장기 사용레일에 대한 피로시험결과 약 1.6억톤까지는 추가 사용이 가능함을 의미한다. 하지만 실제 현장에서는 차륜과 레일의 마찰로 인해 레일표면에 요철이 발생하게 되고, 이는 레일저부 휨응력을 증가시켜 레일 피로수명을 감소시키기 때문에 이에 대한 결과를 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

4. 장기 사용레일 피로수명 평가

4.1 장기 사용레일 S-N선도 보정

서로 다른 누적통과톤수를 가진 시험편에 대한 S-N선도는 동일한 수준의 통과톤수에 대한 파단횟수를 적용해야 하기 때문에 보정이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 방법으로 피로시험결과(파단횟수)를 보정하고자 하였다. Table 3은 S-N선도 보정 전 50%과괴확률에 대한 잔존수명 평가결과이며, Table 4는 보정된 파단횟수 산정결과를 나타낸다. 보정된 파단횟수에 따라 S-N선도를 수정하였고, Table 4에서 보정된 파단횟수(N_i^*)를 이용하여 보정한 S-N선도를 Fig. 5에 나타내었다.

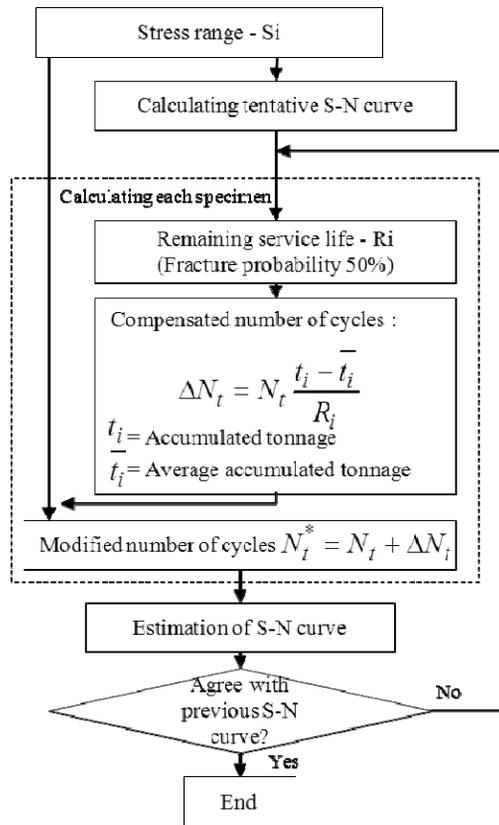


Fig. 4 Flow chart for estimating S-N curve based on averaged accumulated tonnage[4]

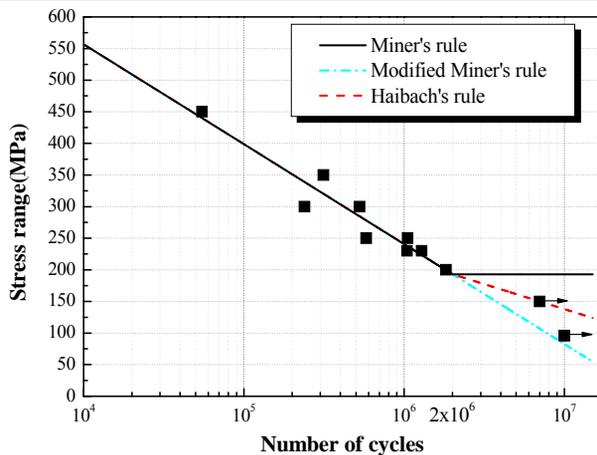
Table 3 Results of estimated remaining life for revision of S-N curve(at 50% fracture probability)

	Probability density function for stress				S-N curve $\sum N(s)$	$\sum \frac{1}{\frac{f(s)}{N(s)}}$	Remaining life (100MGT)	Remark
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (SD)	Stress range (s) (MPa)	$\sum f(s)$				
50% fracture probability	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	3.168E+09	1.408E+08	22.53	Ballast Track
	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	1.366E+09	1.853E+08	29.65	Concrete Track

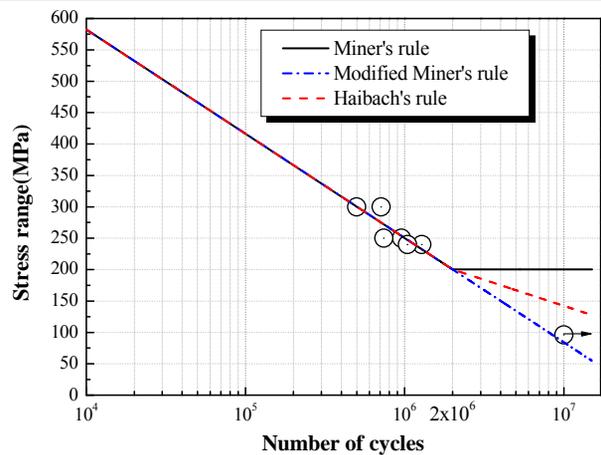
Table 4 The result of fracture cycles based on averaged accumulated tonnage

No.	Stress range (MPa)	Accumulated passing tonnage (t_i) (100MGT)	Averaged accumulated passing tonnage (\bar{t}_i) (100MGT)	$1 + \frac{t_i - \bar{t}_i}{R_i}$	Fracture cycles (N_t) (cycles)	Modified fracture cycles (N_t^*) (cycles)	Remark
#1	350	8.63	7.77	1.0379	301,846	313,293	Failure
#2	300			1.0379	508,184	527,457	Failure
#3	250			1.0379	1,011,461	1,049,820	Failure

#4	230			1.0379	1,001,606	1,039,592	Failure
#5	150			-	7,000,000	7,000,000	N.F
#6	96			-	10,000,000	10,000,000	N.F
#7	450	6.81		0.9571	57,311	54,855	Failure
#8	300	6.87		0.9598	248,589	238,597	Failure
#9	250	6.81		0.9571	605,562	579,610	Failure
#10	200	6.87		0.9598	1,899,590	1,823,239	Failure
#11	230	8.10		1.0144	1,269,253	1,287,531	Failure
#12	96	8.10		-	10,000,000	10,000,000	N.F
#13	300	9.2		1.0067	706,650	711,417	Failure
#14	300			1.0067	495,830	499,175	Failure
#15	250	8.9	9.0	0.9966	956,679	953,452	Failure
#16	250			0.9966	742,857	740,352	Failure
#17	240			0.9966	1,287,254	1,282,913	Failure
#18	240			0.9966	1,045,682	1,042,155	Failure
#19	96			-	10,000,000	10,000,000	N.F
#20	96			-	10,000,000	10,000,000	N.F



(a) Ballast track



(b) Concrete track

Fig. 5 Modified S-N curve for laid 50kgN rail(at 50% fracture probability)

보정된 S-N선도에 대하여 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로해석기법을 선정하기 위해 Miner's rule, Modified Miner's rule, Haibach's rule을 적용한 S-N선도를 Fig. 5에 나타내었다. 시험편 #5, #6, #12, #19, #20에 대한 피로시험결과를 통해 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로수명을 평가하는데 있어 Modified miner's rule에 의한 피로수명 평가치보다 실제 피로수명이 높은 것으로 평가되었다. 또한, Miner's rule에 의한 피로수명 평가의 경우 무한수명으로 평가되기 때문에 장대레일에 대한 안전관리 목표치를 제시할 수 없으므로 Haibach's rule에 의한 피로수명을 평가하는 것이 합리적인 것으로 분석되었다.

4.2 장기 사용레일 S-N선도 분석

본 연구에서는 보정된 장기 사용레일 S-N선도에 대하여 파괴확률에 따른 S-N선도식을 Fig. 6과 같이 도출하였고, Table 5, 6에 이를 정리하여 나타내었다.

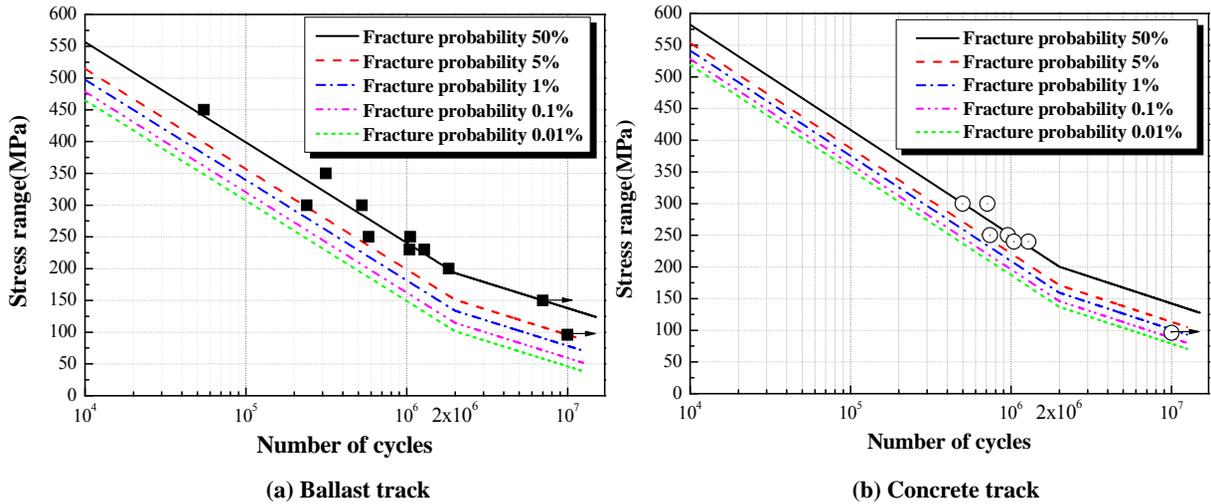


Fig. 6 S-N curve for specimens according to the fracture probability(Haibach's rule)

Table 5 S-N curve & fatigue limit for specimens according to the fracture probability(Ballast track)

F.P.	S-N curve		Fatigue limit (MPa)
	Miner's rule (over fatigue limit)	Haibach's rule (under fatigue limit)	
50%	S=1189.28-157.39LogN	S=690.99-78.69LogN	197.6
5%	S=1157.30-157.39LogN	S=661.44-78.69LogN	165.5
1%	S=1144.12-157.39LogN	S=648.27-78.69LogN	152.4
0.1%	S=1129.59-157.39LogN	S=633.73-78.69LogN	137.8
0.01%	S=1119.51-157.39LogN	S=623.65-78.69LogN	127.7

Table 6 S-N curve & fatigue limit for specimens according to the fracture probability(Concrete track)

F.P.	S-N curve		Fatigue limit (MPa)
	Miner's rule (over fatigue limit)	Haibach's rule (under fatigue limit)	
50%	S=1246.55-166.05LogN	S=723.40-83.03LogN	200.3
5%	S=1217.47-166.05LogN	S=694.33-83.03LogN	171.2
1%	S=1205.49-166.05LogN	S=682.36-83.03LogN	159.2
0.1%	S=1192.28-166.05LogN	S=669.14-83.03LogN	146.0
0.01%	S=1097.27-158.05LogN	S=659.97-83.03LogN	136.8

본 연구에서 도출된 S-N선도식은 총 데이터수 20개(파단 데이터 15개, 미파단 데이터 5개)이며, 결정계수가 0.85이상으로 매우 높은 신뢰도를 보이고 있다. 자갈궤도와 콘크리트궤도에서 사용한 장기 사용레일의 S-N선도 분석결과, 콘크리트궤도에서 사용한 레일이 자갈궤도에서 사용한 레일에 비해 피로한도가 높은 것으로 분석되었으며, 이는 동일한 응력이 레일에 발생할 경우 콘크리트궤도에서 레일 피로수명이 증가함을 나타낸다. 또한, 실제 철도현장에서 발생하는 레일 휨응력이 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도가 약 10~20%정도 작기 때문에 콘크리트궤도 레일의 피로수명은 자갈궤도에 비해 더 크게 증가할 것으로 판단된다.

4.3 장기 사용레일 피로수명 평가

Ishida(1990)[2]이 제시한 요철지수 7, 열차속도 100km/h에 대한 응력확률밀도함수를 장기 사용레일 피로시험을 통해 보정된 S-N선도에 적용함으로써 선형누적피로손상법칙에 의한 장기 사용레일의 잔존 피로수명을 산정하였다. Table 7, 8과 같이 파괴확률에 따른 장기 사용레일의 잔존 피로수명과 전체 피로수명이 평가되었다.

Table 7 Results of estimated service life of laid CWRs for 50kgN(Ballast track)

F.P.	Probability density function for stress(f(s))				S-N curve (cycles)	Remaining life (cycles)	Remaining life (100MGT)	Total life (100MGT)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ)	Stress range(s) (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})}$	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})} \times 16$	Remaining life+777MGT
50%	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	3.545E+09	1.227E+08	24.92	32.69
5%	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	1.042E+09	3.731E+07	7.33	15.1
1%	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	6.295E+08	2.284E+07	4.43	12.2
0.1%	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	3.608E+08	1.329E+07	2.54	10.31
0.01%	87.17	11.21	42~132	2.659E-01	2.454E+08	9.135E+06	1.73	9.5

Table 8 Results of estimated service life of laid CWRs for 50kgN(Concrete track)

F.P.	Probability density function for stress(f(s))				S-N curve (cycles)	Remaining life (cycles)	Remaining life (100MGT)	Total life (100MGT)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ)	Stress range(s) (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})}$	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})} \times 16$	Remaining life+900MGT
50%	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	1.365E+09	1.852E+08	29.63	38.63
5%	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	5.355E+08	7.265E+07	11.62	20.62
1%	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	3.642E+08	4.942E+07	7.90	16.90
0.1%	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	2.380E+08	3.229E+07	5.16	14.16
0.01%	87.77	4.75	69~107	2.660E-01	1.772E+08	2.404E+07	3.84	12.84

파괴확률 0.01~50%에 대한 장기 사용레일의 피로수명을 평가한 결과, 레일교체주기(자갈레도 50kg/m레일 : 8억톤, 목표치)[5]를 상회하는 것으로 분석되었다. 또한, 자갈레도에서 누적통과톤수 약 8.6억톤을 받은 장기 사용레일의 경우 파괴확률 0.01%에 대하여 잔존 피로수명이 약 1.73억톤, 파괴확률 0.1%에 대하여 잔존 피로수명이 약 2.54억톤으로 평가되었고, 콘크리트레도에서 누적통과톤수 약 9.0억톤을 받은 장기 사용레일의 경우 파괴확률 0.01%에

대하여 잔존 피로수명이 약 3.84억톤, 파괴확률 0.1%에 대하여 잔존 피로수명이 약 5.16억톤으로 평가되었다. 즉, 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도에서 사용되는 레일의 경우 약 3억톤 이상 피로수명이 증가하는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 장기 사용레일의 피로수명을 평가하기 위해 레일 피로시험을 3가지 목적(S-N선도 도출, 동적증폭효과 고려, 피로한도 이하 피로해석기법 선정)에 대해 수행하였고, 파괴확률에 따른 S-N선도를 분석하여 장기 사용레일에 대한 피로수명을 평가하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 장기 사용레일(누적통과톤수 약 8~9억톤)에 대한 피로시험결과, 피로한도 이하의 응력 범위에 대한 피로수명을 평가하는데 있어 Modified miner's rule에 의한 피로수명 평가치보다 실제 피로수명이 높은 것으로 평가되어 레일 피로수명 산정 시 Modified miner's rule을 적용할 경우 과도한 안전측 결과가 발생할 수 있으며, Miner's rule에 의한 피로수명 평가의 경우 무한수명으로 평가되기 때문에 장대레일에 대한 안전관리 목표치를 제시할 수 없으므로 Haibach's rule에 의한 피로수명을 평가하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

2. 도시철도 궤도형식별 장기 사용레일에 대한 피로수명을 파괴확률에 따라 평가한 결과, 파괴확률 0.1%에 대한 잔존수명은 자갈궤도의 경우 약 2.5억톤, 콘크리트궤도의 경우 약 5.1억톤인 것으로 분석되었으며, 전체 피로수명은 자갈궤도의 경우 약 10.3억톤, 콘크리트궤도의 경우 약 14.16억톤인 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 도시철도 50kg/m레일의 교체주기(안)인 8억톤[5]을 상회하는 것이며, 자갈궤도와 콘크리트궤도 레일의 교체기준을 다르게 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 또한, 운영자 측면에서 결정되는 파괴확률에 따라 사용가능 통과톤수가 달라진다는 점을 고려한다면 누적통과톤수에 의한 레일교체주기(안)을 유지관리를 위한 목표치로써 관리하는 것이 적정하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통기술촉진연구사업 철도분야 자유공모과제로 이루어진 것으로 국토교통과학기술진흥원과 서울메트로에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Kumar, S. (2006) A study of the rail degradation process to predict rail breaks, PhDThesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- [2] Ishida, M. (1990) Relationship between rail surface irregularity and bending fatigue of welded part in long rails, RTRI report, Vol.4, No.7.

- [3] Ishida, M. (1999) Influence of loose sleeper on track dynamics and bending fatigue of rail welds, QR of RTRI, Vol.40, No.2.
- [4] Deshimaru, T., Kataoka, H. (2006) Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail, QR of RTRI, Vol.47, No.4.
- [5] Seoulmetro (2009) The Rule of Track Maintenance.
- [6] Y.G.Park, D.Y.Sung, H.K.Park, S.Y.Kong (2008) Bending Fatigue Life Assessment of Aged CWR using the Field Test, The Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 3, pp.317-325.
- [7] D.Y.Sung, Y.G.Park, D.C.Go, S.Y.Lee, R.K.Min (2010) The Bending Fatigue Behavior Analysis of Rail by Bending Fatigue Test, The Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 1,3 No. 2, pp.160-166.
- [8] D.Y.Sung (2010) The Fatigue Life Evaluation of Rail by Analysis of the Vehicle/Track Interaction, Doctoral Thesis, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Korea.
- [9] Seoulmetro (2012) The Fatigue Test and Fatigue Life Evaluation for the Aged Continuous Welded Rail on the Urban Railway.
- [10] S.Y.Kong, D.Y.Sung, Y.G.Park (2013) The Fatigue Life Evaluation OF Aged Continuous Welded Rail on the Urban Railway, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 2, pp. 821-831.