

## 도시철도 장기 사용레일의 피로수명 평가

공선용\* · 성덕룡\*\* · 박용걸\*\*\*

Kong, Sun-Young\*, Sung, Deok-Yong\*\*, Park, Yong-Gul\*\*\*

### The Fatigue Life Evaluation of Aged Continuous Welded Rail on the Urban Railway

#### ABSTRACT

As a result of recent research, it is reported that the periodic replacements criterion of rails is able to extend as grinding rail surface and using the continuous welded rail (CWR). 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 tonnage, the test data were corrected to average out the accumulated tonnage. We estimated the remaining service lives for laid rails on the urban railway using equations developed in the past to estimate rail base bending stress and that surface irregularities into consideration. Therefore, estimating the remaining service life of laid rails showed that the rail replacement period could be extended over 200 MGT, 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 :** Laid rail, Fatigue life, Fatigue test, Periodic replacement, Haibach's rule

#### 초 록

최근 연구결과 레일연마 및 장대레일화를 통해 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 연장이 가능한 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 장기 사용레일에 대한 실내피로시험을 수행하였고, 파괴확률 50%에서의 장기 사용레일의 잔존수명을 표현한 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. 따라서 본 연구를 통해 도시철도에서 레일연마를 통한 레일관리가 이루어진다면 누적통과톤수에 의한 레일교체기준(약 8억톤)보다 약 2억톤이상 연장 사용이 가능하며, 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로시험결과를 바탕으로 레일의 피로수명을 평가하기 위해서는 수정마이너법칙보다는 피로한도 이상에서의 S-N선도 기울기의 1/2인 하이바크법칙을 적용하는 것이 합리적이라 판단되었다.

**검색어 :** 장기 사용레일, 피로수명, 피로시험, 교체주기, 하이바크법칙

\* 정희원 · 서울메트로 기술본부장 (kong54@empas.com)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 대원대학교 철도건설과 교수 (Corresponding Author · Daewon University College · dysung@mail.daewon.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수 (ygpark@seoultech.ac.kr)

Received January 16 2012, Revised May 17 2012, Accepted January 9 2013

### 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(Kumar, 2006).

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 충격 하중 및 용접부의 물리적 취약성으로 인해 레일표면에 요철이 발생하게 되고, 이러한 레일표면요철의 성장은 동적 운증을 증가시켜 레일저부의 휨응력을 증가시키는 요인으로 작용하게 되어 레일의 피로수명을 크게 단축시킨다. 즉, 누적통과톤수에 의한 레일교체주기는 동적 운중에 의한 레일용접부의 휨 피로수명에 의해 결정된다(Ishida, 1990). 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 누적통과톤수 8억톤 이상의 도시철도 장기 사용레일에 대한 피로시험을 수행하였으며, 잔존피로수명을 평가하고자 하였다. 또한, 피로한도 이하에 대한 피로시험을 통해 피로한도 이하 피로해석기법의 적정성을 평가하고자 하였다.

### 2. 레일피로해석이론

#### 2.1 선형누적피로해석이론

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

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

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

$$\sum D_i \geq 1, D_i = \frac{n_i}{N_i}, \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \tag{2}$$

식 (2)에서 D는 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<sub>i</sub>)에서 손상률(D<sub>i</sub>)은 반복비(n<sub>i</sub>/N<sub>i</sub>)와 같다. 따라서 하중 1 cycle에 대한 손상률 D는 1/N이고, 이는 하중 1 cycle의 작용으로 피로수명의 1/N을 소모하는 것을 의미한다. 또한, Miner 법칙은 S-N선도상에서 도식적으로 나타낼 수 있다(Figure 1(a) 참조).

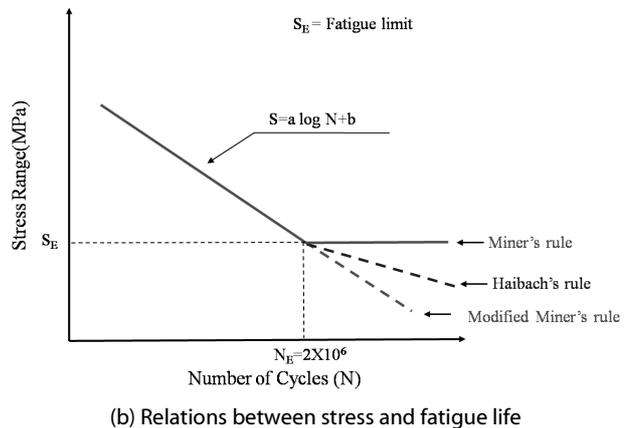
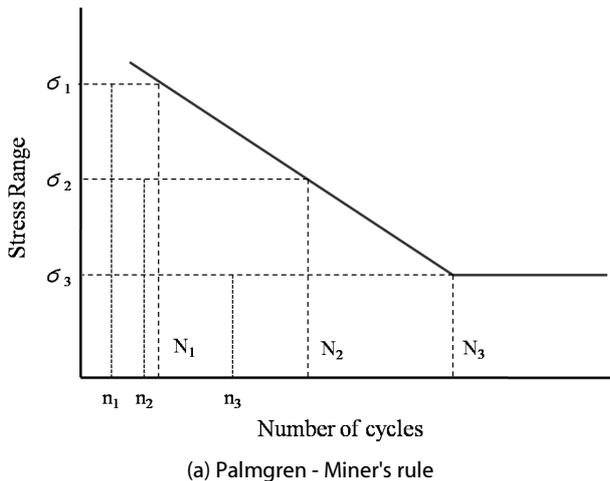


Fig. 1. Linear elastic fatigue mechanics

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

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

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

Modified Miner's rule에서는 피로한계 이하의  $\Delta\alpha$ 에 대한 피로수명  $N_i$ 를  $\infty$ 로 하지 않고, Figure 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 Figure 1(b)에서 나타낸 바와 같이 피로한계 이하에서 S-N선도의 기울기를 완만하게(Miner's rule과 Modified Miner's rule의 중간기울기 적용)하고  $\Delta\alpha$ 에 대한 피로수명  $N_i$ 를 구한다.

Modified Miner's rule과 Haibach's rule 중 어느 것을 적용하는지는 철도운영자 또는 연구자에 따라 다를 수 있으며, 피로수명을 고려한 레일 교체주기를 산정한 일본에서는 Haibach's rule을 적용하였다(Ishida, 1990).

## 2.2 응력확률밀도함수를 이용한 피로수명 산정방법

확률밀도함수를 이용하는 방법(Ishida, 1990; Deshimaru et al., 2006)은 차량궤도 상호작용해석을 통해 도출한 최대응력값들에 대하여 정규분포도로 고려하는 방법이다. 확률밀도함수를 이용한 레일 피로수명 예측방법은 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

$\sigma$  : 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 1년차에 레일의 피로손상도  $d_i$ 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 1년차에 대응하는 하중에 의한 발생 횡 응력의 확률밀도함수 및 S-N선도상의 횡 응력에 대응하는 반복 횟수이다. 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, 1년차에 해당선로를 통과하는 축중의 종류가  $m$ 일 경우, 각 축중을  $P_j, j=1, 2, \dots, m$ , 각 축중의 연간 통과횟수를  $L_j$ , 레일저부에 발생하는 횡 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.

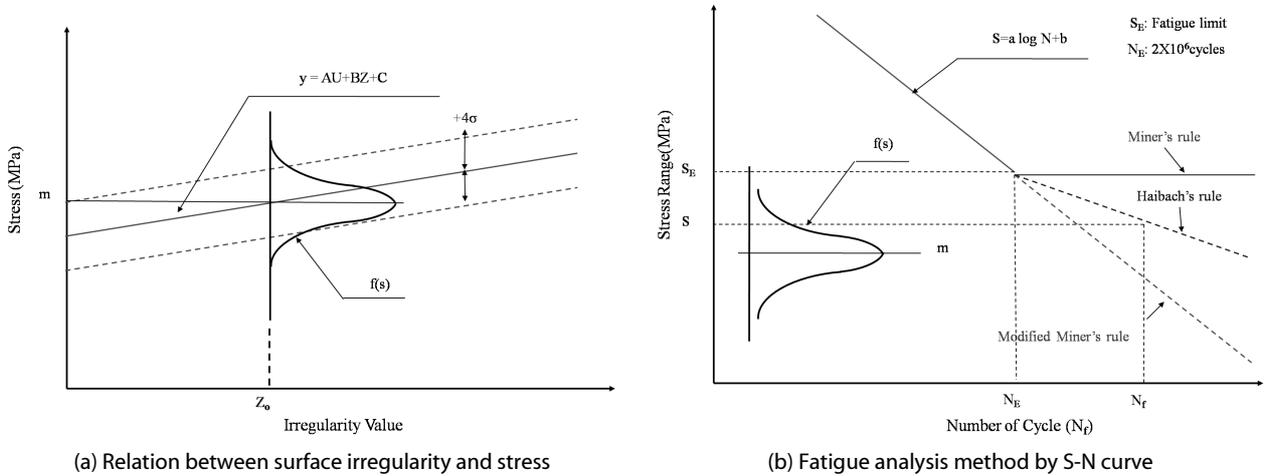


Fig. 2. Evaluation of fatigue life using probability density function for stress

Table 1. The prediction equation for the bending stress of rail on ballast track (Ishida, 1990)

	50 kgN rail on ballast track
Prediction equation	$Y=4.996Z+0.222U+30.00$
Irregularity value	$Z=10V+4W$
Correlation coefficient	0.86
Standard deviation	11.21
No. of data	3,600
Remark	Y : banding stress, Z : irregularity value, U : train speed

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

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

Figure 2(a)는 레일표면요철과 레일 휨응력의 상관관계 및 확률 밀도함수를 나타내며, Figure 2(b)는 레일 휨응력에 대한 확률밀도 함수를 레일 휨 피로강도(S-N선도)에 적용하여 피로수명을 예측하는 방법을 보여준다.

Ishida(1990)는 장대레일 교체주기를 산정하는데 있어 요철지수 7에 대한 응력확률밀도함수를 적용하였으며, 국내에서도 요철지수 7, 열차속도 100km/h에 대한 피로수명 평가를 통해 레일교체주기(안)를 정한바 있다(서울메트로, 2009). 따라서 본 연구에서는 Table 1에서 제시한 응력확률밀도함수를 적용하여 레일 피로수명

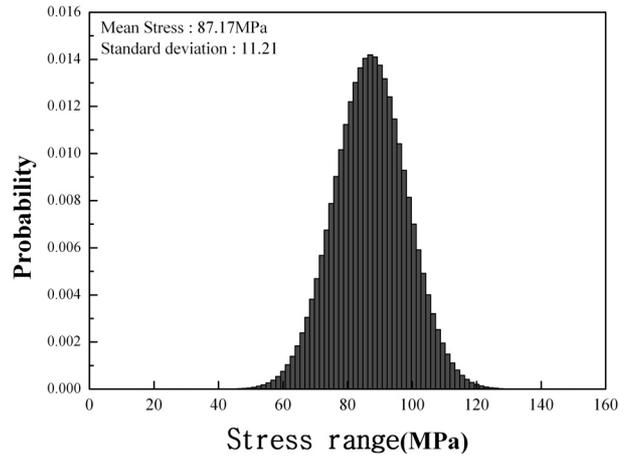


Fig. 3. Probability density function for stress (Irregularity value (z), train speed 100 km/h)

을 평가하고자 하였으며, 요철지수 7, 열차속도 100km/h에 대한 응력확률밀도함수는 Figure 3과 같다.

### 3. 장기 사용레일 피로시험

#### 3.1 피로시험 방법

레일의 피로수명 예측은 실제 작용하는 하중으로 실내피로시험을 수행하여 수명을 예측하는 것이 가장 이상적인 방법이지만 실제 레일에 작용하는 하중은 복잡하고, 실제의 상황과 동일하게 시험방법을 재현하는 것은 불가능하다. 또한, 발생 응력범위가 피로한도 이하일 경우, 실제하중을 실제 피로수명동안 시험하는 것은 오랜 시간과 엄청난 비용이 소요되므로 비경제적이다. 실제 레일에 단순 반복하중을 가하여 얻은 수명데이터(S-N선도)로부터

피로해석을 수행하여 수명을 예측하거나, 노치(Notch)가 있는 CT 시험편 시험으로부터 얻은 데이터로부터 레일의 수명을 예측한다. 하지만 CT시험편 시험으로부터 피로수명을 예측하는 방법은 하중 효과, 치수효과, 표면처리효과 등 여러 가지 사항에 대하여 고려하여야 하며, 이상화된 시험편을 이용하기 때문에 실제 피로수명과는 다르게 평가될 수 있다.

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 재해해야 하고, 시험편보다 먼저 피로파괴가 발생하는 것을 예방하기 위해 시험지그는 충분한 강도를 지니고 있어야 한다. 이에 도시철도 장기 사용레일에 대한 실물 휨피로시험을 수행하였으며, 본 연구에서 수행한 실물 레일 휨 피로시험은 2,500kN 피로시험기(Saginomya, 일본)에

Figure 4와 같은 지그를 이용하였고, 4점 휨 피로시험방법을 사용하였다. 시험편은 지점거리 1,300mm를 고려하여 1,500mm로 하였고, 용접부가 중앙에 위치하도록 제작하였다.

실내 피로시험을 하기 위한 시험편은 누적통과톤수 약 8.6억톤을 받은 자갈도상 50kgN 테르밋용접레일 12개이며, 실내 피로시험 전에 초음파탐상 및 자분탐상을 통한 균열이 존재하지 않음을 확인하였다. 또한, 모든 시험편은 주기적인 레일연마를 통해 레일관리가 이루어져 왔고, 시험편 발철전에 레일연마를 실시하여 동일한 표면상태를 가지도록 하였다.

장기 사용레일 표본 피로시험용 시험편 및 하중조건은 Table 2와 같다. 피로시험을 위한 하중파형은 싸인파(sine wave)로 일정한 응력이 반복되어 작용하도록 하였으며, 하중재하속도는 2~4Hz, 인장반복하중(응력비  $R > 0$ )으로 하였다. 피로시험을 위한 하중파형은 Figure 5와 같다. 실물 레일용접부 휨 파괴강도시험을 통해 50kgN 레일용접부의 항복강도는 약 690MPa이었으며(Sung,

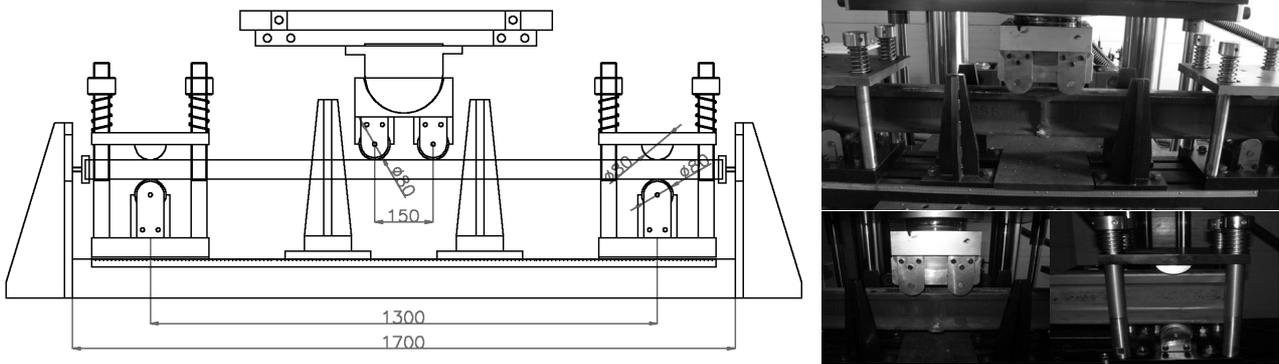


Fig. 4. The development of bending fatigue test-jig

Table 2. The specimens for bending fatigue test

	Track	Rail	Accumulated tonnage (100 MGT)	Min. stress (MPa)	Max. stress (MPa)	Stress range (MPa)	Hz
#1	Ballast	50 kgN TW	8.63	30 (29kN)	380 (362kN)	350	3
#2			8.63	30 (29kN)	330 (314kN)	300	3
#3			8.63	30 (29kN)	280 (267kN)	250	4
#4			8.63	30 (29kN)	260 (248kN)	230	4
#5			8.63	30 (29kN)	180 (171kN)	150	4
#6			8.63	30 (29kN)	126 (120kN)	96	4
#7			6.81	30 (29kN)	480 (457kN)	450	2
#8			6.87	30 (29kN)	330 (314kN)	300	3
#9			6.81	30 (29kN)	280 (267kN)	250	4
#10			6.87	30 (29kN)	230 (219kN)	200	4
#11			8.10	30 (29kN)	260 (248kN)	230	4
#12			8.10	30 (29kN)	126 (120kN)	96	4

2010), 본 연구에서는 레일용접부가 항복하지 않는 범위에서 하중을 재하하도록 하였다.

시험편 #1~#4, #7~#11은 장기 사용 테르밋용접레일 S-N선도를 도출하고, 장기 사용레일의 잔존 피로수명을 피로해석이론에 기초하여 산정하기 위해 피로한도 이상의 응력범위를 적용하였다. 시험편 #5, #6, #12은 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로해석기법(Modified Miner's rule 또는 Haibach's rule)을 선정하는데 근거자료가 필요하다고 판단되어 피로한도 이하의 응력범위에 대하여 700만회 또는 1000만회까지 피로시험을 진행하였다.

레일 피로시험의 하중조건에서 적용하게 되는 최소응력은 본 시험이 인장반복하중시험으로 설정되었기 때문이며, 온도응력 등의 축응력을 전단면에 동일하게 작용시켜 피로강도특성에서 평균

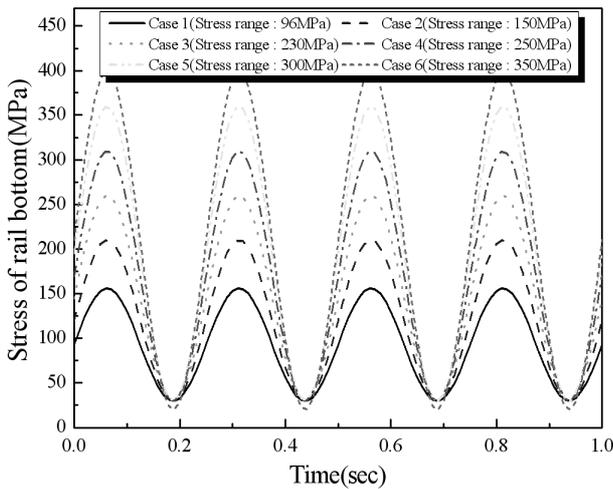


Fig. 5. Example of fatigue loads

응력으로써 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(Ishida, 1990).

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

### 3.2 피로시험 결과 및 분석

본 연구에서 수행한 피로시험결과는 Table 3과 같으며, Figure 6은 파단된 시험편의 예를 보여준다.

피로한도 이하 응력범위를 재하한 시험편 #5, #6, #12의 경우, 7백만회와 1천만회까지 미파단되었으며, 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 미파단되었다. 이러한 결과는 도시철도 열차하중(축중) 160kN에 대하여 통과톤수로 환산 시 1.6억톤에 해당하기 때문에 표본 장기 사용레일에 대한 피로시험결과 약 1.6억톤까지는 추가 사용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 실제 현장에서는 차륜과 레일의

Table 3. Results of bending fatigue test for 50 kgN rail

	Track	Rail	Accumulated tonnage (100 MGT)	Min. stress (MPa)	Max. stress (MPa)	Stress range (MPa)	Facture cycles (cycles)	Remark
#1	Ballast	50 kgN TW	8.63	30 (29kN)	380 (362kN)	350	301,846	Failure
#2			8.63	30 (29kN)	330 (314kN)	300	508,184	Failure
#3			8.63	30 (29kN)	280 (267kN)	250	1,011,461	Failure
#4			8.63	30 (29kN)	260 (248kN)	230	1,001,606	Failure
#5			8.63	30 (29kN)	180 (171kN)	150	7,000,000	N.F
#6			8.63	30 (29kN)	126 (120kN)	96	10,000,000	N.F
#7			6.81	30 (29kN)	480 (457kN)	450	57,311	Failure
#8			6.87	30 (29kN)	330 (314kN)	300	248,589	Failure
#9			6.81	30 (29kN)	280 (267kN)	250	605,562	Failure
#10			6.87	30 (29kN)	230 (219kN)	200	1,899,590	Failure
#11			8.10	30 (29kN)	260 (248kN)	230	1,269,253	Failure
#12			8.10	30 (29kN)	126 (120kN)	96	10,000,000	N.F

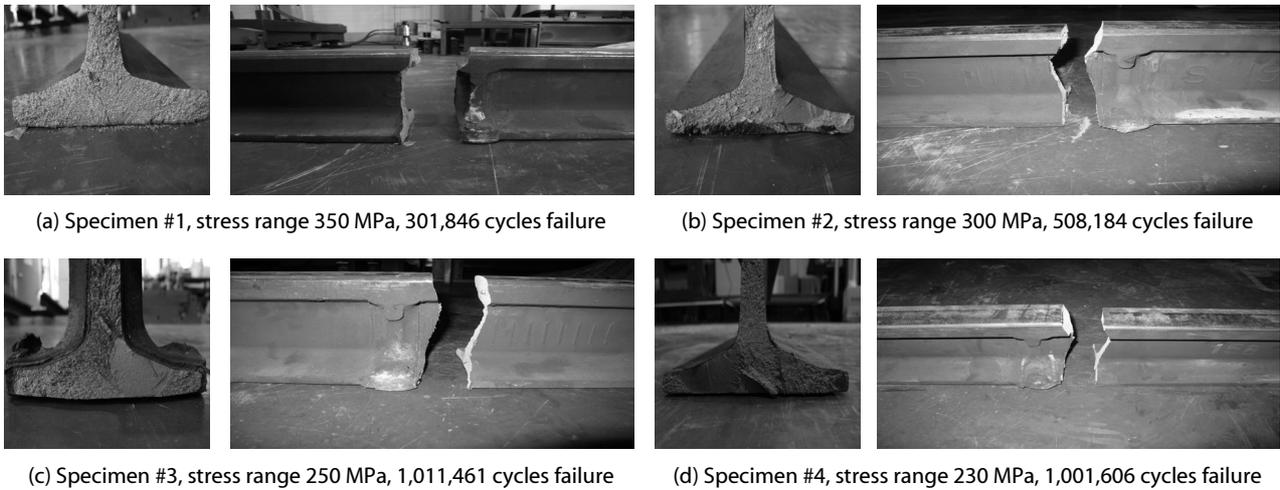


Fig. 6. Example of bending fatigue test results for 50 kgN rail

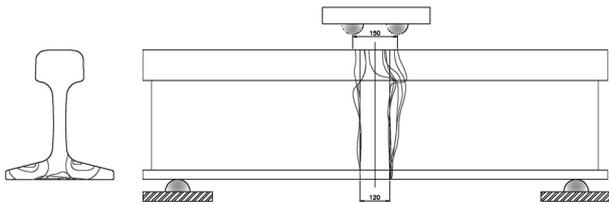


Fig. 7. The result of bending fatigue test - failure types

마찰로 인해 레일표면에 요철이 발생하게 되고, 이는 레일저부 휨응력을 증가시켜 레일 피로수명을 감소시키기 때문에 이에 대한 결과를 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

장기 사용 50kgN 테르밋용접레일 시험편 #1~#4의 경우에는 피로한도이상의 응력이 적용되었으며, 모두 200만회미만에서 파단되었다. 파단된 장기 사용레일 시험편에 대한 파단유형은 Figure 7과 같다. 시험편 총 12개에서 미파단 시험편을 제외하고 모든 시험편이 하중재하점사이에서 파단되었다. 이러한 경향은 신폴레일용접부에 대한 피로시험결과(Sung, 2010)와 동일한 결과이며, 실제 현장에서 발생하는 레일용접부 파단경향(KRRI, 1998)과도 동일하다 할 수 있다.

200만회 미파단 시험편을 제외한 모든 시험편에서 하중재하점 사이에서 발생한 휨피로파단이 발생하였고, 전단피로파단은 발생하지 않았다. 휨피로파단은 전단력을 받지 않고 휨모멘트만 받아 하중재하점 사이 용접부 열영향부에서 파단이 시작한 것을 말한다.

실내 피로시험 후 파단유형을 분석한 결과는 Figure 8과 같다. 파단유형 분석 결과, 총 12개 시험편 중 200만회 미파단 3개, 휨피로파단 9개가 발생하였다. 이러한 파단유형은 실제 현장에서 파단된 유형들과 유사한 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구에서는 피로하중을 받은 레일의 파단면을 검토하여 피로하중에 의한 초기

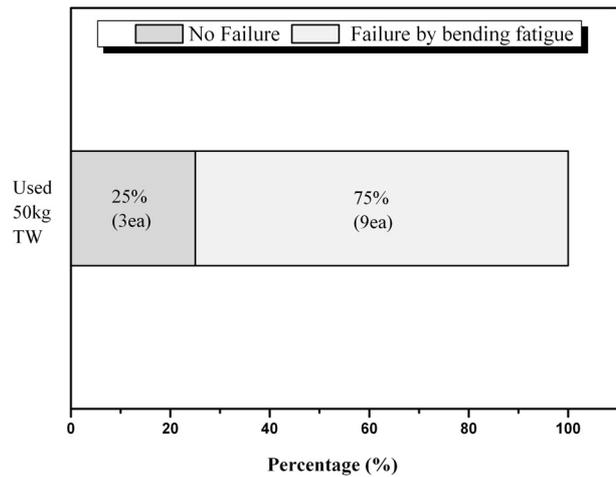


Fig. 8. The analysis of failure type for specimens

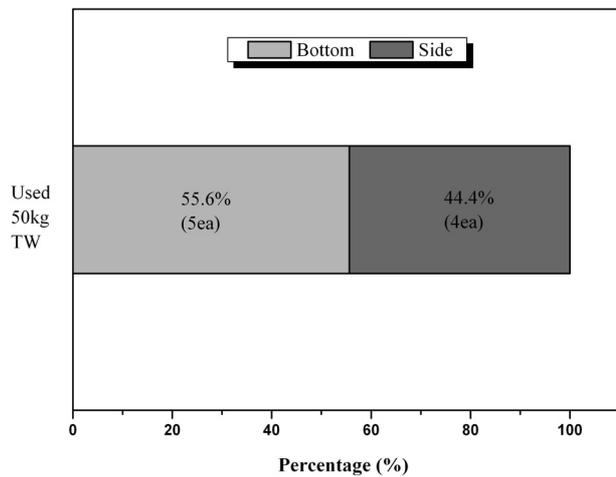


Fig. 9. The analysis of initial crack for specimens

균열 발생위치를 파악하고자 하였다. 초기균열 발생위치를 분석한 결과는 Figure 9와 같다.

레일저부 중앙을 벗어난 저면 및 레일저부 윗면의 경우에는 레일탐상차를 통해 검출이 불가능한 유형이며, 휴대용 초음파탐상기를 이용하여 2탐촉자법에 의해 검출이 가능하다. 레일 피로시험 결과, 초기균열 발생위치는 레일저부 중앙과 중앙을 벗어난 저면에서 5개(약 55.6%), 레일저부 윗면에서 4개(약 44.4%) 발생하였다.

따라서 레일탐상차로는 반복적인 하중에 의한 레일피로로 인해 레일저부에서 발생하는 초기균열을 검출하는데 한계가 있는 것으로 분석되었으며, 레일저부 중앙을 벗어난 균열을 검출할 수 있는 기법이 필요한 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 누적통과톤수에 의한 레일교체주기 설정이 타당함을 입증하는 자료라 할 수 있다. 또한, 레일용접부 결함을 예방하기 위한 방법으로는 테르밋용접레일의 표준 설치방법 수립, 용접공의 기술능력 향상을 위한 교육 실시, 레일용접기준 강화 등이 필요하며, 레일 사용수명에 대한 신뢰성을 확보하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

### 4. 장기 사용레일 피로수명 평가

#### 4.1 장기 사용레일 S-N선도 보정

서로 다른 누적통과톤수를 가진 시험편에 대한 S-N선도는 동일

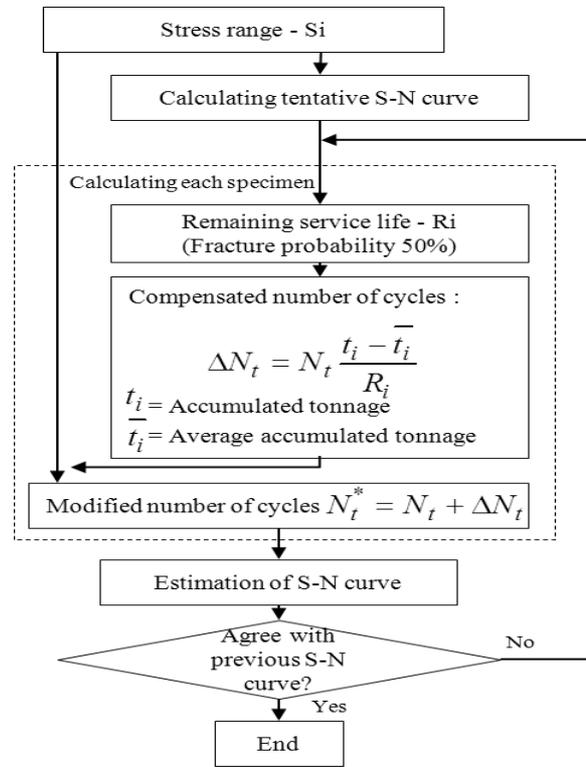


Fig. 10. Flow chart for estimating S-N curve based on averaged accumulated tonnage (Tadashi, 2006)

Table 4. 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 (100 MGT)	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	50 kgN TW

Table 5. The result of fracture cycles based on averaged accumulated tonnage

No.	Stress range (MPa)	Accumulated tonnage ( $t_i$ ) (100 MGT)	Averaged accumulated tonnage ( $\bar{t}_i$ ) (100 MGT)	$1 + \frac{t_i - \bar{t}_i}{R_i}$	Fracture cycles ( $N_i$ ) (cycles)	Modified fracture cycles ( $N_i^*$ ) (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

한 수준의 통과횟수에 대한 파단횟수를 적용해야하기 때문에 보정이 필요하다. 본 연구에서는 Figure 10(Tadashi, 2006)와 같은 방법으로 피로시험결과(파단횟수)를 보정하고자 하였다. Table 4는 S-N선도 보정 전 50%파괴확률에 대한 진존수명 평가결과이며, Table 5는 보정된 파단횟수 산정결과를 나타낸다. 보정된 파단횟수에 따라 Figure 11과 같이 S-N선도를 수정하였다.

Table 5에서 보정된 파단횟수( $N_f^*$ )를 이용하여 S-N선도를 보정하여 Figure 11에 나타내었다. 보정된 S-N선도에 대하여 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로해석기법을 선정하기 위해 Miner's rule, Modified Miner's rule, Haibach's rule에 대하여 Figure 12에 나타내었다. 시험편 #5, #6, #12에 대한 피로시험결과를

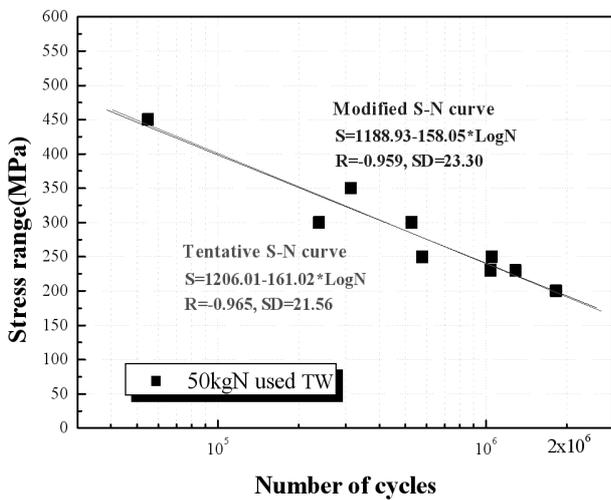


Fig. 11. Comparison of tentative S-N curve between modified S-N curve (at 50% fracture probability)

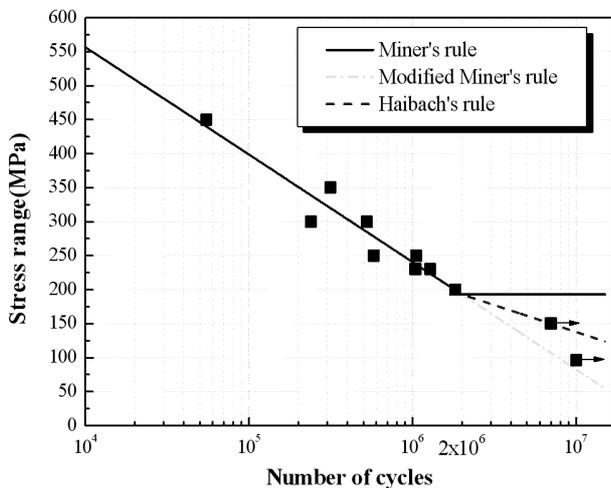


Fig. 12. Modified S-N curve for laid 50 kgN rail (at 50% fracture probability)

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 판단된다.

#### 4.2 장기 사용레일 S-N선도 분석

본 연구에서는 보정된 장기 사용레일 S-N선도에 대하여 파괴확률에 따른 S-N선도식을 Figure 13과 같이 도출하였고, Table 6에 이를 정리하여 나타내었다.

본 연구에서 도출된 S-N선도식은 총 데이터수 12개(파단 데이터 9개, 미파단 데이터 3개)이며, 결정계수가 0.85이상으로 매우 높은 신뢰도를 보이고 있다.

Figure 13에서와 같이 Haibach's rule적용 시 파괴확률 5%이하의 경우에는 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로시험 데이터

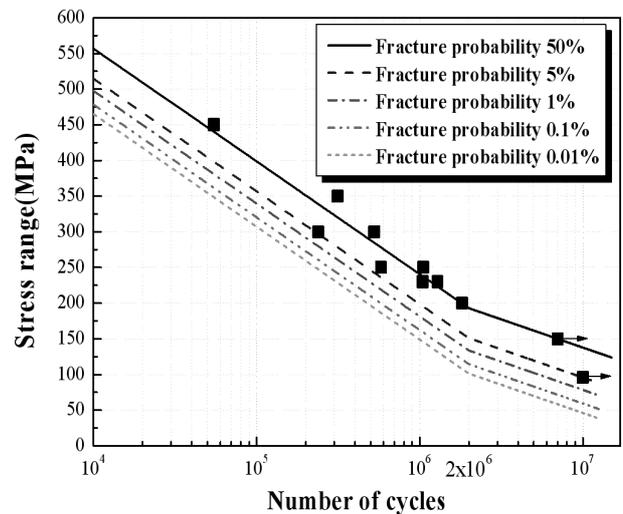


Fig. 13. S-N curve for specimens according to the fracture probability (Haibach's rule)

Table 6. S-N curve & fatigue limit for specimens according to the fracture probability

F.P.	S-N curve		Fatigue limit (MPa)
	Miner's rule (over fatigue limit)	Haibach's rule (under fatigue limit)	
50%	S=1183.12-158.05LogN	S=690.99-79.03LogN	193.1
5%	S=1142.92-158.05LogN	S=648.98-79.03LogN	151.04
1%	S=1129.61-158.05LogN	S=631.67-79.03LogN	133.74
0.1%	S=1110.51-158.05LogN	S=612.57-79.03LogN	114.64
0.01%	S=1097.27-158.05LogN	S=599.34-79.03LogN	101.40

를 포함할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 피로시험편에 대한 다양한 변수들이 존재하기 때문에 안전측 레일 피로수명을 평가하기 위해서는 파괴확률을 1%이하로 평가하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 파괴확률 1%이하에 대한 장기 사용레일의 잔존수명을 평가하고자 하였다.

### 4.3 장기 사용레일 피로수명 평가

Ishida(1990)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 7과 같이 파괴확률에 따른 장기 사용레일의 잔존 피로수명과 전체 피로수명이 평가되었다.

파괴확률 0.01~50%에 대한 장기 사용레일의 피로수명을 평가한 결과, 레일교체주기(자갈케도 50kg/m레일 : 8억톤, 목표치)(Seoulmetro, 2009)를 상회하는 것으로 분석되었다. 또한, 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 평가되었다.

## 5. 결론

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 8억톤)에 대한 피로시험결과, 피로한도 이하의 응력범위에 대한 피로수명을 평가하는데 있어 Modified miner's rule에 의한 피로수명 평가치보다 실제 피로

수명이 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. 또한, 실 열차하중의 동적증폭효과를 고려한 응력을 적용한 경우 1천만회까지 미파단되었으며, 이러한 결과는 도시철도 열차하중(축중) 적용 시 약 1.6억톤(총 9.6억톤)까지 사용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 표본 장기 사용레일이 이와 같은 결과를 대표하기에는 시험편 수가 다소 부족하고, 실제 현장에서는 레일표면요철로 인한 레일휨응력 증가현상이 발생할 수 있기 때문에 계속적으로 표본 장기 사용레일에 대하여 실 열차하중과 동적증폭효과를 고려한 피로시험이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

- (2) 장기 사용레일에 대한 피로수명을 파괴확률에 따라 평가한 결과, 파괴확률 0.1%에 대한 잔존수명은 약 2.5억톤인 것으로 분석되었으며, 전체 피로수명은 약 10.3억톤인 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 자갈케도 50kg/m레일의 교체주기(안)인 8억톤을 상회하는 것이며, 운영자 측면에서 결정되는 파괴확률에 따라 사용가능 통과톤수가 달라진다는 점을 고려한다면 누적통과톤수에 의한 레일교체주기(안)을 유지관리를 위한 목표치로써 관리하는 것은 적절하다고 판단된다.
- (3) 본 연구에서 평가된 장기 사용레일의 피로수명은 실제 철도운 영조건에 비해 열차속도 100km/h, 요철지수 7에 대한 응력확률밀도함수와 S-N선도의 파괴확률 0.1% 등 충분한 안전율이 적용된 결과값이기 때문에 레일용접부 결함관리와 주기적인 레일연마를 통한 레일표면요철 및 손상관리, 레일마모에 의한 단면적 감소에 대한 관리가 이루어진다면 지속적인 사용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 7. Results of estimated service life of laid CWRs for 50 kgN

F.P.	Probability density function for stress (f(s))				S-N curve (cycles)	Remaining life (cycles)	Remaining life (100 MGT)	Total life (100 MGT)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ)	Stress range (s) (MPa)	Σf (s)	ΣN(s)	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})}$	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})} \times 16$	Remaining life+777 MGT
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

## References

- 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 (in Korean).
- Seoulmetro (2009) The Rule of Track Maintenance (in Korean).
- 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. 13 No. 2, pp. 160-166 (in Korean).
- D.Y.Sung (2010) *The Fatigue Life Evaluation of Rail by Analysis of the Vehicle/Track Interaction*, PH. D. Dissertation, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Korea.
- S.C.Yang, M.C.Kim, J.S.Kim (2000) Prediction of Bending Fatigue Lifes of Rail Welded Parts, *The Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 1-D, pp. 97-105 (in Korean).
- Korail (1998) *The Study on the Characteristic of Welded Rail*, Research Paper, Korea Railroad Research Institute, Korea (in Korean).
- Aiken, Leona S., et al.(1996) *Multiple regression: Testing and interpreting interactions*, Sage Publications.
- Bryman, Alan, Cramer, Duncan (2005) *Quantitative data analysis with SPSS 12 and 13*, Taylor & Francis.
- Deshimaru, T., Kataoka, H. (2006) Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail, *QR of RTRI*, Vol. 47, No. 4.
- Ishida, M. (1990) Relationship between rail surface irregularity and bending fatigue of welded part in long rails, *RTRI report*, Vol. 4, No. 7.
- Ishida, M. (1999) Influence of loose sleeper on track dynamics and bending fatigue of rail welds, *QR of RTRI*, Vol. 40, No. 2.
- Kumar, S. (2006) *A study of the rail degradation process to predict rail breaks*, PH. D. Dissertation, Lulea University of Technology, Sweden.