

콘크리트궤도 장대레일의 휨 피로수명 평가

Estimation of Bending Fatigue Life of CWR in Concrete Track

성덕룡† 태성식* 박광화** 강윤석*** 박용걸****
Deok-Yong Sung Sung-Sik Tae Kwang-Hwa Park Sun-Yong Kong Yong-Gul Park

ABSTRACT

It is suggested that the service life of the continuous welded rail(CWR) is estimated by the relationship between the rail surface irregularity according to the accumulated passing tonnage and bending fatigue of welded part in CWR. In this study, based on the results of bending fatigue tests of rail and results of measuring tests in situ of rail bending stress, this study estimated the bending fatigue life of welded rail in concrete track, adopting a Haibach's rule. The bending fatigue life of CWR considered the rail surface irregularity, train speed and the S-N curve by types of rail welding. In addition, this study estimated it for the fracture probability 1%, 0.1%, 0.01%. Therefore, this study proposed bending fatigue life of CWR in concrete track.

key words : concrete track, continuous welded rail(CWR), bending stress, prediction equation, S-N curve, fatigue life

요 지

장대레일 교체주기는 자갈궤도 레일두부 표면요철과 레일 휨피로의 상관관계 분석을 통해 산정되었다. 본 연구에서는 실물 레일 휨 피로시험을 통한 레일의 S-N선도, 국내 도시철도(서울메트로) 콘크리트궤도에서 발생하는 레일 휨응력 예측식, Haibach's rule을 통해 콘크리트궤도 장대레일의 휨 피로수명을 평가하였다. 여기서, 레일용접방법별 S-N선도와 레일표면요철, 열차운행속도가 고려되었다. 또한, S-N선도 파괴확률 1%, 0.1%, 0.01%를 고려한 휨 피로수명을 비교하였다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트궤도 장대레일의 휨 피로수명을 제안하였다.

주요어 : 콘크리트궤도, 장대레일, 휨응력, 예측식, S-N선도, 피로수명

1. 서론

철도용 레일은 대량의 여객 및 화물을 수송하기 위한 수단으로 사용되고 있으며, 철도에 있어 매우 가치가 높은 시설물 중 하나이다. 또한, 승차감 확보 및 탈선방지를 위해 안전을 위한 신뢰성의 확보가 엄격히 요구되고 있다. 이러한 신뢰성 확보방안으로 일본에서는 공용중 갑작스런 레일의 파단을 예방하기 위해 누적통과톤수에 의한 레일교체주기를 설정하였으며, 국내 철도운영기관들에서도 이를 적용하고 있다[1].

† 정회원, 대원대학 철도건설과, 전임교수
E-mail : dysung@mail.daewon.ac.kr
TEL : (043)649-3268 FAX : (043)649-3137
* 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정
** 정회원, 한국화학시험연구원 신뢰성본부, 과장
*** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
**** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 정교수

JR west의 경우 레일 휨 피로에 의한 레일교체기준을 누적통과톤수로 적용하고 있으며, 휨 피로로 인한 레일교체는 전체 레일교체수량의 약 40%를 차지하고 있다. 이러한 레일교체주기 기준은 일반 모재부보다 표면요철이 크게 발생하여 레일저부 휨응력이 크게 발생하는 레일용접부의 휨 피로시험 및 해석을 통해 수립되었다[2, 3].

국내 철도운영기관들에서는 고속화, 고밀화, 중량화 철도운영 및 유지보수비용 저감을 위해 계속적으로 콘크리트궤도의 적용을 넓혀나가고 있는 추세이다. 누적통과톤수에 의한 레일교체기준은 많은 변수(레일표면요철, 뜯침목, 궤도지지강성, 온도 등)를 포함하고 있는 자갈궤도 장대레일에 대해 산정되었으며[4], 콘크리트궤도 장대레일의 피로수명은 아직까지 평가된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 점차 증가하고 있는 콘크리트궤도에서의 장대레일 피로수명을 평가하고자 하였다.

2. 누적손상피로해석 이론 및 피로수명 산정절차

2.1 누적손상피로해석 이론[4]

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

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

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

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

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.(그림 1. 참조)

이 선도를 살펴보면 응력수준 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 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.

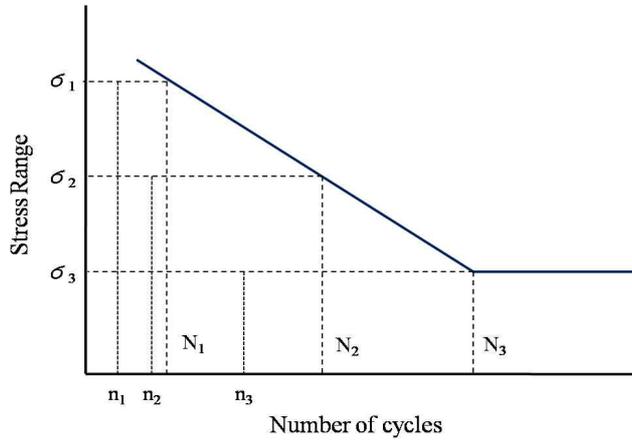


그림 1. Palmgren - Miner's rule (S-N 선도 적용)

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

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 $\Delta\sigma_i$ 가 일정진폭응력하에서의 피로한계 이하여도 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.

수정 Miner 법칙에서는 피로한계 이하의 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 피로수명 N_i 를 ∞ 로 하지 않고 그림 2.와 같이 피로한계 이상의 S-N선도를 피로한계 이하에서도 원 기울기를 연장해서 N_i 를 구하고, 식(3)을 이용해서 피로수명을 구하는 방법이다. Haibach 법칙에서는 그림 2.에서 나타낸 바와 같이 피로한계 이하에서 S-N선도의 기울기를 완만하게 하고 $\Delta\sigma_i$ 에 대한 피로수명 N_i 를 구한다. 일본강구조협회 지침(안)에서는 수정 Miner법칙, ECCS지침과 BS 5400에서는 Haibach 법칙이 주로 이용되고 있다.

선형누적피해법칙에 의해 식 (4)가 성립한다.

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

여기서, N_{total} : 총 피로수명(cycles)

$N = 10^{\frac{s-b}{\sigma}}$: 응력진폭 S 시의 반복수로 a는 계수, b는 정수

$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{s-m}{\sigma}\right)^2}$: 레일응력(응력진폭) S 시의 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.

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

한편 본 연구에서 실제 계산 시 적분구간(-∞, +∞)을 99.99%에 해당하는 (-4σ, +4σ)로 하였으며, 응력범위의 분할폭은 최대응력 대비 1/100 ~ 1/200에 해당하는 Δf = 1.5MPa를 적용하였다. 또한, 그림 2와 같이 현장측정을 통해 도출한 요철지수와 휨 응력과의 상관관계를 통해 확률밀도함수를 도출하고, 이를 그림 3과 같이 확률밀도함수의 (-4σ, +4σ)범위에 대하여 S-N선도에 적용함으로써 레일의 피로수명을 산정하였다. 그림 4는 본 연구에서 수행한 레일 피로수명 평가절차를 나타낸다.

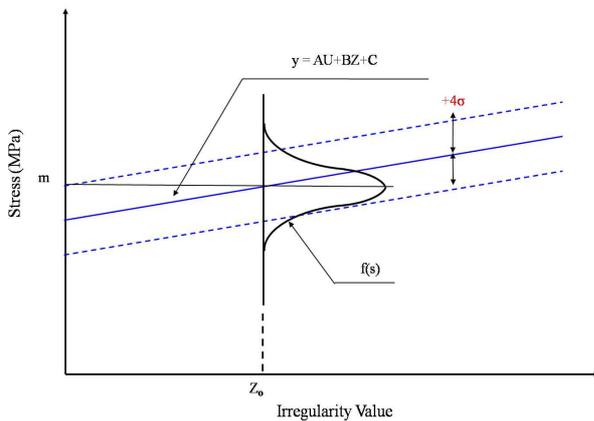


그림 2. 요철지수와 휨 응력의 상관관계

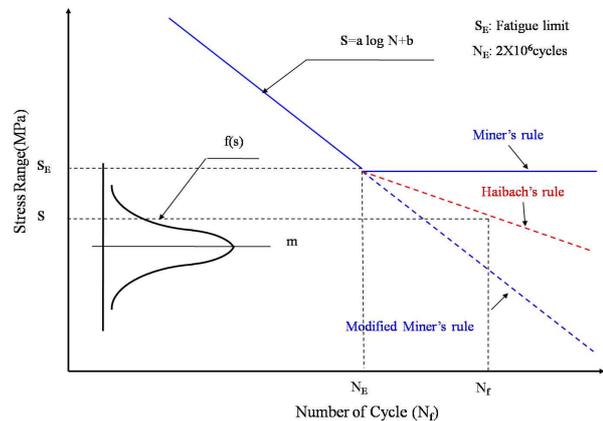


그림 3. S-N선도를 이용한 피로해석 방법

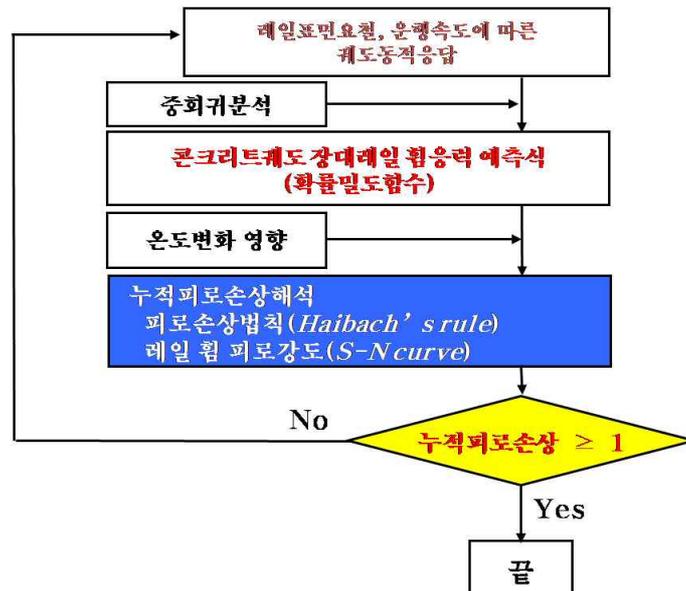


그림 4. 레일 피로수명 평가절차

3. 콘크리트궤도 장대레일 휨응력 예측식

시험대상구간은 서울메트로 1호선 본선 중 78.5%를 차지하고 온도변화에 대한 영향이 적으며 열차하

중에 대한 통과톤수를 직접적으로 받을 수 있는 지하 직선구간을 선정하였다. 또한, 본 연구에서는 도상 다짐정도, 뜬침목 등의 도상상태에 따른 영향을 받지 않는 콘크리트궤도(PTT)구간을 선정하였으며, 임의의 요철량을 설정하였고 측정된 운행열차의 속도는 표 1.과 같다.

1) 동적윤중 측정

윤중은 침목중심에서 각각 10cm 떨어진 위치에 레일북부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 스트레인게이지를 부착하여 측정하였고, 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 Low pass filtering과 High pass filtering 처리를 함으로써 데이터 신뢰성을 높였다.

2) 레일저부 휨응력 측정

실 열차하중에 대한 레일저부 휨응력을 측정하기 위해 변형률게이지를 휨응력이 가장 크게 발생하는 침목사이 중앙의 레일 저부에 부착하였다. 측정된 변형률게이지를 레일강의 탄성계수를 곱하여 응력으로 환산하였다.

3) 레일표면요철 측정

레일표면요철 측정은 레일요철시험기(Railprof)를 이용하여 용접부를 중심으로 총 1m에 대한 요철량을 측정하였다. 측정한 1m 요철량(N.V. for 1m)에 대해서는 용접부 열영향부(100mm)를 고려하여 0.1m 요철량(N.V. for 0.1m)을 산정하여 v값으로 정하였으며, N.V for 1m-N.V. for 0.1m를 w값으로 정하였다.

표 2. 요철량 V, W 및 속도 U

| NO. | V(mm) | W(mm) | U(km/h) |
|-----|-------|-------|----------------------------|
| 1 | 0.18 | 0.24 | 36, 37, 39 |
| 2 | 0.03 | 0.31 | 30, 32, 34 |
| 3 | 0.42 | 0.04 | 42, 45, 49 |
| 4 | 0.01 | 0.14 | 30, 32 |
| 5 | 0.13 | 0.29 | 39, 45, 50 |
| 6 | 0.00 | 0.11 | 42, 45, 49 |
| 7 | 0.03 | 0.14 | 30, 32, 35 |
| 8 | 0.11 | 0.12 | 48, 52, 57, 60, 65, 68, 73 |
| 9 | 0.40 | 0.13 | 44, 47, 50 |
| 10 | 0.48 | 0.27 | 37, 41 |
| 11 | 0.02 | 0.31 | 32, 35 |
| 12 | 0.03 | 0.33 | 30, 33 |
| 13 | 0.07 | 0.35 | 31, 33 |
| 14 | 0.04 | 0.38 | 32, 35 |
| 15 | 0.20 | 0.36 | 52, 57, 60, 61 |
| 16 | 0.40 | 0.22 | 37, 49 |

본 연구에서 수행한 콘크리트궤도구간의 요철량과 운행속도를 정리한 표 2.에 대하여 측정된 레일 휨응력DATA를 중회귀분석[6]을 수행하여 레일 휨응력 예측식을 도출하고자 하였다. 중회귀분석에는 통계 분석을 위해 일반적으로 사용되고 있는 SPSS ver. 12 프로그램을 사용하였다.

표 3.은 중회귀분석을 통해 도출된 도시철도 콘크리트궤도(PTT)에서 레일표면요철량(v, w)과 운행속도(U)에 대한 레일 휨응력(Y)의 상관관계식을 보여준다.

표 3. 콘크리트궤도(PTT) 레일 휨응력 중회귀분석 결과(1)

| |
|---|
| $Y = 47.5V + 22.325W + 0.151U + 39.42$ <p>V, W, U : 그림 1., 표 2. 참고 Y : 레일저부 휨응력 - 현장시험결과 적용 중상관계수 : 0.853 , 추정치 표준오차 : 4.75 , 데이터수 : 2040</p> |
|---|

표 3.의 레일 휨응력 예측식 $Y = 47.5V + 22.325W + 0.151U + 39.42$ 에 대하여 편회계수를 이용하여 요철지수 $Z = 10V + 4.7W$ 로 정의하고, 요철지수 Z와 운행속도 U에 대한 휨응력 Y의 함수식으로 변환하면 표 5.와 같게 된다. 본 연구에서 분석된 레일 휨응력 예측식의 중상관계수가 0.8이상으로 상당히 좋은 만족도를 보이고 있어 요철지수, 운행속도와 레일저부 휨응력의 상관관계를 잘 설명하고 있다고 판단된다.

표 5. 콘크리트궤도(PTT) 레일 휨응력 중회귀분석 결과(2)

| |
|---|
| $Y = 4.75Z + 0.151U + 39.42$ <p>V, W, U : 그림 1., 표 2. 참고 Y : 레일저부 휨응력 - 현장시험결과 적용 중상관계수 : 0.853 , 추정치 표준오차 : 4.75 , 데이터수 : 2040</p> |
|---|

4. 레일용접부 S-N선도[7]

본 연구에서는 “성덕룡, 박용걸 외 3인, 실물 휨 피로시험을 통한 철도레일의 휨 피로거동 분석, 한국철도학회 제13권, 제2호, 2010”에 수행한 레일 휨 파괴강도(S-N선도)를 인용하였으며, 피로강도가 가장 낮은 것으로 분석된 테르밋용접부의 S-N선도식을 적용하였다.(표 6. 참조)

표 6. 파괴확률에 따른 60kg/m 테르밋용접레일의 S-N선도(Haibach's rule)

| 구 분 | 1% 파괴확률 | | 0.1% 파괴확률 | |
|------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|
| | S-N선도식 | 피로한도 (MPa) | S-N선도식 | 피로한도 (MPa) |
| 6N-T | $S = -64.99 * \text{Log}N + 563.00$ | 153.5 | $S = -64.99 * \text{Log}N + 545.46$ | 136.0 |

5. 콘크리트궤도 장대레일의 휨 피로수명 평가

본 연구에서는 콘크리트궤도의 요철량에 따른 응력예측식과 일본 RTRI 연구결과에서 제시된 자갈궤도의 응력예측식[2]을 국내 60Kg/m 테르밋용접부 S-N선도에 적용하여 피로수명을 평가하였다. 피로해석에 적용한 열차 및 궤도조건은 아래와 같고, 표 7.은 요철지수에 따른 레일의 피로수명을 파괴확률 1%, 0.1%, 0.01%에 대하여 평가한 결과이다.

- 속도 100km/h, 설계축중 16톤

- 신품 60kg/m 테르밋용접부의 S-N선도 이용
- 파괴확률 : 1%, 0.1%, 0.01%
- 피로해석기법 : 마이너법칙과 수정마이너법칙의 중간식 적용(Haibach's rule)
피로한도이상에서는 Miner's rule 적용

표 7. 요철지수에 따른 레일의 피로수명 평가 결과(단위 : 억톤)

| 궤도형식 요철지수(z) | 자갈궤도, 60kg/m | | | 콘크리트궤도, 60kg/m | | |
|-----------------|--------------|------|------|----------------|------|------|
| | 파괴확률(%) 1 | 0.1 | 0.01 | 1 | 0.1 | 0.01 |
| 3 | 25.6 | 14.3 | 10.5 | 27.5 | 16.0 | 11.2 |
| 7 | 13.9 | 8.0 | 6.2 | 15.7 | 9.5 | 6.8 |
| 11 | 7.7 | 4.7 | 3.4 | 9.6 | 5.6 | 4.0 |
| 15 | 4.4 | 2.9 | 2.0 | 6.1 | 3.7 | 2.5 |

표 7.에서 요철지수(z) 7일 때 파괴확률 1%, 0.1%, 0.01%에 대한 레일 피로수명만을 정리한 결과는 그림 5.와 같고, 표 8.에 파괴확률에 따른 레일의 피로수명을 정리하였다. 파괴확률은 실내피로시험결과로 도출된 S-N곡선의 표준편차에 따라 상당한 차이를 보일 수 있으며, 파괴확률이 낮을수록 안전율이 높아지는 결과를 보인다. 따라서 레일의 피로수명 산정을 위해 적용되는 파괴확률은 철도운영기관별 정책적인 결정에 의해 이루어지기 때문에 본 연구에서는 파괴확률 1%, 0.1%, 0.01%에 대해 검토한 결과를 함께 제시하였다.

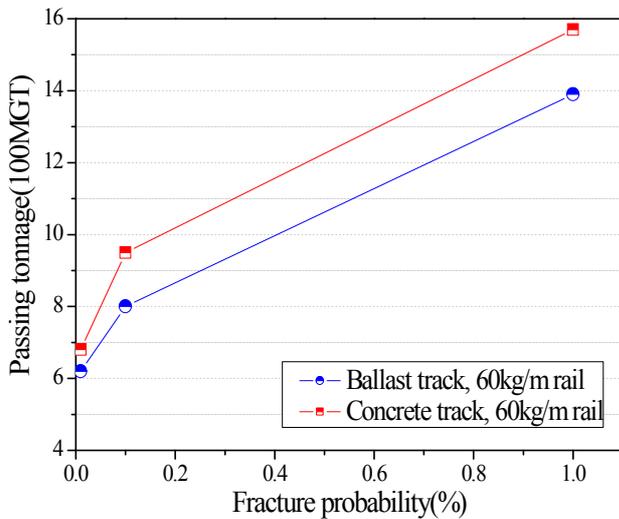


그림 5. 파괴확률에 따른 레일의 피로수명 평가결과

표 8. 파괴확률에 따른 레일의 피로수명 비교 (단위 : 억톤)

| 궤도형식 파괴확률 | 자갈궤도, 60kg/m | 콘크리트 궤도, 60kg/m | 증가율 (%) |
|--------------|-----------------|-----------------------|------------|
| 1% | 13.9 | 15.7 | 12.95 |
| 0.1% | 8.0 | 9.5 | 18.75 |
| 0.01% | 6.2 | 6.8 | 9.68 |

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 장대레일의 피로수명을 산정하기 도시철도 콘크리트궤도(PTT)에서 레일표면 요철량 및 운행속도에 따른 레일 휨응력을 측정하여 중회귀분석을 수행하였으며, 이를 레일 휨 파괴강도(S-N선도)에 적용함으로써 콘크리트 장대레일 피로수명을 평가하고자 하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

콘크리트궤도 장대레일의 휨 피로수명은 레일표면요철 및 S-N선도의 파괴확률에 따라 상당한 차이를 보이는 것으로 분석되었으며, 일본의 레일교체기준(60kg/m rail=8억톤) 산정 시 적용한 요철지수(Z=7)에 대한 피로수명을 비교해본 결과 S-N선도의 파괴확률 0.1%에 대한 결과와 동일하였다. 또한, 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도의 경우 파괴확률에 따라 다소 차이가 있었으나 약 9~19% 피로수명이 큰 것으로 분석되었다.

S-N선도 파괴확률의 적용은 철도운영기관의 정책적인 결정에 의해 이루어지기 때문에 이에 대한 결정은 본 논문에서 언급하지 않았으며, 1%, 0.1%, 0.01% 파괴확률에 대한 콘크리트궤도 장대레일의 피로수명 평가결과를 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 도시철도 콘크리트궤도(PTT) 장대레일의 피로수명을 제시하였으며, 향후 궤도 지지강성, 온도변화, 열차종류, 운행속도 등에 대한 해석적인 변수연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 “차세대고속철도기술개발사업”에 의해 수행되었으며, 관련자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 박용걸 외 3인, 누적통과톤수에 의한 국내 레일교체기준의 타당성 평가, 한국철도학회논문집, Vol 11, No 3, pp.326-333, 2008.
2. Makoto ISHIDA, Noritsugi ABE, Relationship between Rail Surface Irregularity and Bending Fatigue of Welded Part in Long Rails, RTRI REPORT Vol. 4, No. 7, 1990.
3. Tadashi DESHIMARU, Hiroo KATAOKA, "Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail", QR of RTRI, Vol. 47, No. 4, pp.211-215, 2006.
4. 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소, 노후레일 피로손상평가 및 유지관리방안 연구, 서울메트로, 2009.
5. 박용걸, 성덕룡 외 2인, 현장측정을 통한 노후레일의 휨 피로수명 평가, 한국철도학회논문집, Vol 11, No 3, pp.317-325, 2008.
6. 노형진, 다변량분석 이론과 실제, 형설출판사
7. 성덕룡, 박용걸 외 3인, 실물 휨 피로시험을 통한 철도레일의 휨 피로거동 분석, 한국철도학회논문집, 제13권 제2호, pp.160-166, 2010.
8. 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소, 고속선 선로구축물 성능향상 및 유지보수기술개발, 차세대고속철도기술개발사업 1단계(1, 2차년도) 보고서, pp.136-141, 2009.