레일 피로수명 예측에 따른 레일 연마의 효용성 평가
Evaluation on Effectiveness of Rail Grinding by Prediction of Rail Fatigue Life

김만철[1)]
Kim, Man-Cheol

ABSTRACT

The importance of maintenance of rail surface defects is increasing according to the KTX operation. That is because during high speed operation of rolling stocks, rail surface defects shorten fatigue life of rail, accelerate track degradation and deteriorate ride comfort. Rail grinding has been applied for effective rail maintenance in Kyeong-Bu HS line. This paper evaluates the effectiveness of rail grinding in term of rail fatigue life. To this end, the stresses of the ground rail are measured under KTX running and the equivalent stress range is calculated by RMC after the frequency analysis done with Rainflow counting method. Also, Pamglen-Miner rule is applied to predict the fatigue life of ground rail. The result of the analysis shows that the fatigue life of ground rail is increased by 15%.

Keywords : *rail grinding, Fatigue life of rail, Rainflow counting method, Pamglen-Miner rule*

1. 서 론

레일 답면의 요철 즉 각종 레일 결함은 차량 주행시 큰 충격을 유발하고, 이로 인하여 레일의 내구성 감소, 궤도의 열화 촉진, 승차감 저하 및 소음을 증가시킨다. 이러한 현상은 차량이 고속화 되면서 더욱더 크게 증가하게 된다. 최근에는 레일 수명을 연장하고 소음 및 유지보수 비용을 절감하기 위하여 레일 연마가 적극 활용되고 있다.

국내 고속철도에서도 부설시에는 레일 표면의 탈탄층 제거, 레일 형상 또는 레일 부설 각도 일부 수정, 표면 부식, 녹제거, 불량 용접개소 제거 등을 목적으로 초기연마를 시행하고 있으며, 사용중에는 단면 변형에 따른 레일 형상 재생과 누적된 통과톤수에 의한 레일 표면 금속피로를 제거하고 소음발생 경감을 목적으로 일정 기간마다 레일 연마를 시행하고 있다.

JR West(일본)의 경우 레일 연마를 통한 과도한 축중을 감소시킴으로써 장대레일에 대한 신품 레일 갱환 주기를 다음과 같이 약 16~25%까지 연장하였다.

표 1. JR West(일본)의 신품 레일 연마시 갱환주기(누적통과톤수)

구 분	기존 갱환주기	연마시 갱환주기	비 고
50kg N	6억톤	7억톤	(↑)16.7%
60kg	8억톤	10억톤	(↑)25.0%

[1)] 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 궤도구조연구팀, 정회원
E-mail : kimmc@krri.re.kr
TEL : (031)460-5321 FAX : (031)460-5814

본 논문에서는 경부고속선에 있어서 레일 연마의 효용성을 평가하기 위하여 연마 전·후 측정된 저부응력을 통한 레일의 피로수명을 예측하였다.

2. 현장측정

레일 연마의 효용성을 평가하기 위하여 경부고속선 KP 86.108km(T1)를 측정개소로 하여 레일 요철과 저부응력을 측정하였다. 레일 요철은 우측 레일에 대해 측정지점을 중심으로 전·후 각각 150m씩, 총 300m 구간에 대해서 TecnoGamma사의 Techoline을 사용하여 측정하였다. 측정된 레일 요철은 EN13231-3 Part3(2003)에서 제시하고 있는 각 파장대역별(10~30mm, 30~100mm, 100~300mm, 300~1,000mm)로 이동평균실효치를 이용하여 정량화 하였다(그림 1). 각 파장대역 λ_i와 λ_{i+1}에 대한 이동평균실효치는 다음 식과 같이 파장대역에 해당하는 윈도우 길이 L에 대한 단면형상의 PSD(Power Spectral Density)인 $S(x,L,\lambda)$를 이용하여 구할 수 있다.

$$RMS(x,L,\lambda_i,\lambda_{i+1}) = \left(\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} S(x,L,\lambda)dx \right)^{1/2} \quad (1)$$

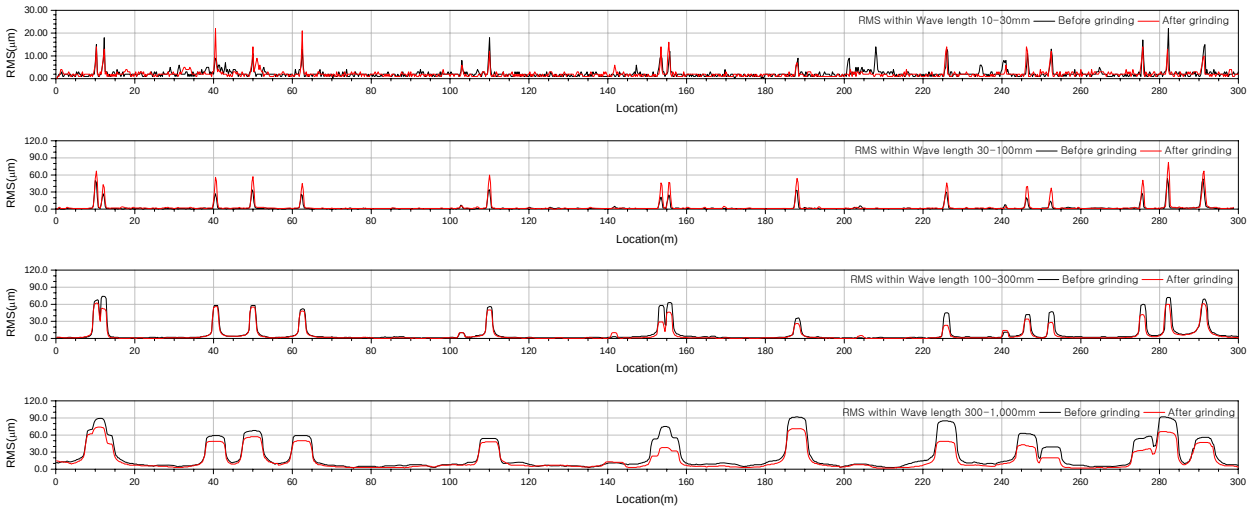


그림 1. 경부고속선 KP 86.108km(T1) 레일 연마 전·후 우측 레일 요철 이동평균실효치

각각의 파장대역에 해당하는 윈도우 길이 L에 대해서는 EN13231-3 Part3(2003)을 참조하기 바란다. 표 2는 위의 식에 의해서 구해진 이동평균실효치의 측정구간에 대한 평균값을 의미한다.

$$E(\lambda_i,\lambda_{i+1}) = \frac{1}{T}\int_0^T RMS(x,L,\lambda_i,\lambda_{i+1})dx \quad (2)$$

여기서 T는 측정구간의 길이를 의미한다. 또한 전체 파장대역(10~1,000mm)에 대한 이동평균실효치의 평균값은 다음과 같이 정의하여 측정구간의 대표값으로 정의하였다.

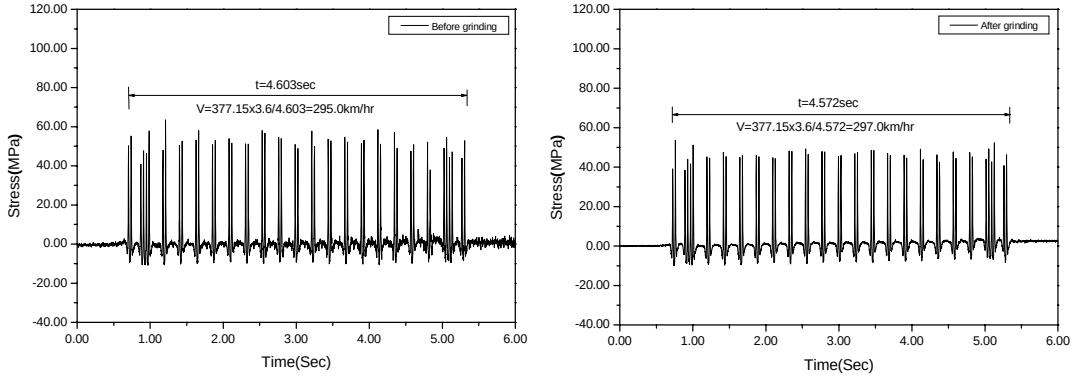
표 2. 연마 전·후 경부고속선(86.108km, T1, 우측) 레일 요철 이동평균실효치 구간 평균(μm)

파장대역(mm)	10~30	30~100	100~300	300~1,000	10~1,000
연마 전(①)	2.22	2.23	7.45	21.65	24.21
연마 후(②)	2.09	3.32	5.47	15.39	18.09
차(①-②)	0.13	-1.09	1.98	6.26	6.12

$$E(\lambda_1,\lambda_4)=\frac{1}{T}\int_0^T\left(\sum_{i=1}^{4}RMS^{\,2}(x,L,\lambda_i,\lambda_{i+1})\right)^{1/2}dx \tag{3}$$

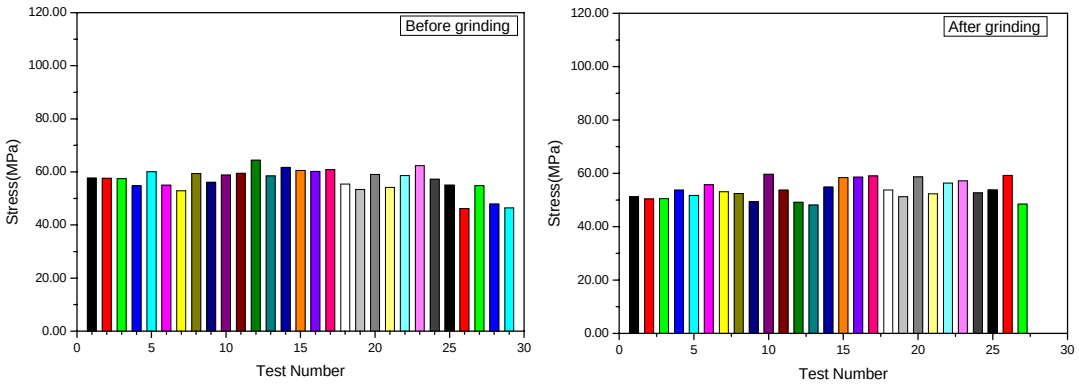
레일 연마 전·후에 요철이 이동평균실효치 구간 평균으로 하였을 경우 10~1,000mm 파장에 대해서 약 6.12μm 감소하는 것으로 분석되었다.

레일 저부응력은 레일 연마 전·후에 각각 KTX 주행시 측정하였다. 그림 2는 레일 저부응력의 측정 예를 보여주고 있으며, 그림 3은 각각의 저부응력 측정결과에서 최대값을 나타낸 것이다. 표 3은 레일 연마 전·후에 측정된 전체 레일 저부응력 최대값의 평균값을 비교한 것이다. 레일 연마에 따라 레일 저부응력은 2.94MPa로 약 5%정도 감소하는 것으로 분석되었다.



(a) 연마 전 레일 저부응력 (b) 연마 후 레일 저부응력

그림 2. 연마 전·후 경부고속선(86.108km, T1, 우측) 레일 저부응력



(a) 연마 전 레일 저부응력 최대값 (b) 연마 후 레일 저부응력 최대값

그림 3. 연마 전·후 경부고속선(86.108km, T1, 우측) 레일 저부응력 최대값

표 3. 연마 전·후 경부고속선(86.108km, T1, 우측) 레일 저부응력 최대값 평균 및 변동계수

항 목	평균(MPa)	표준편차(MPa)	변동계수(%)
연마 전(①)	56.75	4.41	7.77
연마 후(②)	53.81	3.56	6.61
차(①-②)	2.94(5.18%)	-	-

3. 피로수명

3.1 Rainflow Counting Method

응력범위빈도분포의 계산은 가장 보편적인 Rainflow Counting Method를 이용하였다. 이 방법은 계속

해서 나타나는 4개의 변동응력치 f_1, f_2, f_3, f_4가 $f_1 \geq f_3 \geq f_2 \geq f_4$ 또는 $f_1 \leq f_3 \leq f_2 \leq f_4$라고 하는 조건을 만족하는 경우에 $|f_2 - f_3|$을 응력범위로서 계산하는 것이다. 따라서 f_2와 f_3을 변동응력파형에서 제외한다. 이 과정을 반복하면 아래의 그림과 같은 점증, 점감하는 변동응력파형이 남으며, 이로부터 최대의 극대값과 최소의 극소값의 차, 두 번째의 극대값과 극소값의 차, … 를 응력범위로 하여 계산한다. 이 방법은 변동응력의 극치수열을 단축하게 되고, 계산기의 기억용량과 계산시간을 간략화시키는 효과가 있고, 동시에 변동진폭응력하에서의 피로수명평가에 있어서 가장 적절하다고 알려져 있다. 또한, 이 방법은 BS5400, ECCS 등에서 이용되고 있으며, JSSC지침에서도 이를 권장하고 있다.

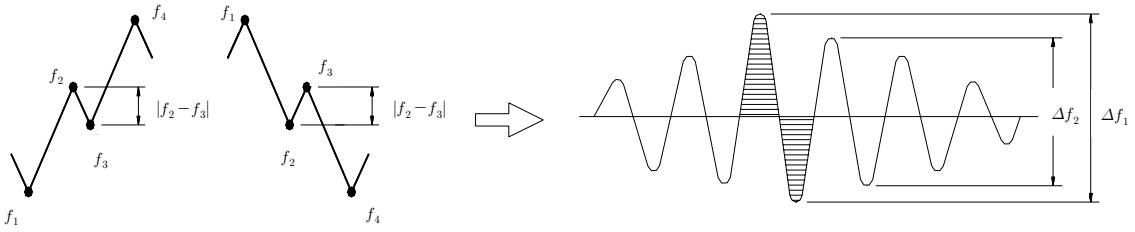


그림 4. Rainflow Counting Method

한편 응력범위빈도분포를 작성할 때 그 응력범위의 분할폭을 설정할 필요가 있다. JSSC 지침에서는 분할폭을 최대응력범위의 20등분 이상으로 하는 것을 추천하고 있다. 본 해석에서 적용한 응력범위의 분할폭은 최대응력 대비 1/100~1/120에 해당하는 $\Delta f = 5$ MPa을 적용하였다.

3.2 피로수명 평가방법

선형누적피로피해를 이용한 피로수명 평가방법은 Pamglen-Miner 법칙에 기초하며, 다음과 같은 가정에 근거한다.

- 임의의 응력수준에서의 피로손상의 진행은 그 응력만에 의해 일의적으로 결정되며, 선형으로 누적된다.
- 각 응력수준에 있어서 피로손상의 총합이 일정 값에 도달하면 피로파괴된다.

임의의 응력범위 Δf_1이 반복적으로 작용하여 반복회수 N_1에서 파괴되는 구조상세가 있다고 하면, 이 구조상세는 각 하중사이클(cycle)마다 $1/N_1$의 피로피해를 받는 것이 되고 그 응력범위가 n_1번 반복될 경우에는 n_1/N_1의 피로피해를 입는다. 이 피로피해의 총합이 1이 되면 피로파괴되며, 이를 식으로 나타내면 식 (4)와 같고, 그림으로 도시하면 그림 5와 같다.

$$D = \Sigma\,(n_1/N_1) = 1 \tag{4}$$

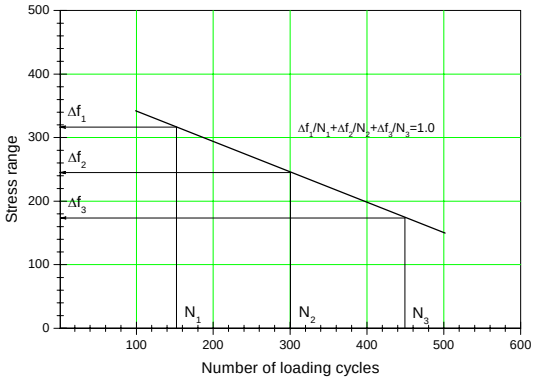


그림 5. S-N 선도

이 법칙을 기존구조물의 피로수명 평가에 적용하는 경우에는 구조물의 피로손상정도를 현재까지 누적된

피로손상 D_{pT}와 장래에 받게 될 피로손상 D_{aT}로 구분하여 식 (5)와 같이 표현한다.

$$D_{pT} + D_{aT} = 1 \tag{5}$$

식 (6)에 나타낸 피로손상도는 k개의 응력범위에 대한 각각의 반복회수와 각 응력범위에 대한 피로수명을 n_i, N_i로써 표시한 것이다. 이것을 다루기 용이하도록 대상으로 하는 응력범위를 일의적으로 정한 1종류의 응력범위로 환산하며, 이 경우에 기준이 되는 응력범위는 일반적으로 검토대상 구조상세의 $N_0 = 2\times10^6$회의 피로강도이다. 피로손상정도가 등가로 되는 반복회수 N_{0eq}는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{N_{0eq}}{N_0} \tag{6}$$

$$N_{0eq} = \sum_{i=1}^{k} n_i \left(\frac{\Delta f_i \, \alpha}{\Delta f_{f0}} \right)^m \tag{7}$$

여기서 N_0 : 2×10^6회
Δf_i, n_i : 변동응력을 응력범위에 대해 빈도해석한 i번째 응력범위와 그 반복회수
Δf_{f0} : 2×10^6회에 대한 피로강도
k : 빈도해석한 응력범위의 종류 수
m : S-N선도의 기울기를 결정하는 계수
α : 실응력비(특별히 정하지 않은 경우에는 α=1.0로 한다)

식 (5)에 나타낸 관계식과 잔존수명 T_r을 이용하면 장래에 받을 피로손상정도는 다음과 같이 표현된다.

D_{aT}=(장래에 받을 피로손상정도의 연간 누적)$\times$ T_r (8)

즉,

$$D_{aT} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{ka} \left\{ n_{aeq(i)} \left[\frac{\Delta f_{a(l+i)\max(i)} \cdot \alpha}{\Delta f_{f0}} \right]^m \right\} \cdot T_r \tag{9}$$

여기서 $\Delta f_{a(l+i)\max(i)}$: 장래에 주행하는 각 열차에 의해서 발생하는 최대응력범위
$n_{aeq(i)}$: 통과하는 각 열차의 최대응력범위에 대한 1년간 등가반복회수
k_a : 장래에 주행할 것으로 예상되는 열차의 종류 수

$$n_{aeq(i)} = \sum_{i=1}^{nn} \left\{ n_{(i)} \left[\frac{\Delta f_{(i)}}{\Delta f_{a(l+i)\max}} \right]^m \right\} \cdot N_y \tag{10}$$

여기서 nn : 1대의 열차가 통과할 때의 응력범위의 수
N_y : 1년간 통과한 열차대수, 불명확한 경우는 $N_y = 365\times n_{ad}$
n_{ad} : 1일 통과대수

따라서 구조물의 잔존수명은 다음 식에 의해 계산된다.

$$T_r = \frac{N_0(1-D_{pT})}{\sum_{i=1}^{ka}\left\{n_{aeq(i)}\left[\frac{\Delta f_{a(l+i)\max(i)}\cdot\alpha}{\Delta f_{f0}}\right]^m\right\}} \tag{11}$$

즉, 잔존수명 T_r은 현재까지 받은 피로손상정도의 누적 D_{pT}와 장래 통행할 열차에 의한 최대응력범위 및 열차 1대당 등가반복회수에 의해 결정된다.

3.3 레일의 피로수명 평가결과

본 논문에서 대상으로 하고 있는 경부고속철도 선로의 레일은 UIC260(900A)급으로서 이에 대한 허용피로응력범위는 그림 6의 Smith diagram에 의해 표 4와 같이 주어진다. 표 4에 나타낸 허용피로응력범위는 레일 모재에 대한 것인데, 피로가 모재부 보다는 용접부에서 문제가 되는 현상임을 고려하면 표 4의 허용피로응력범위를 이용하여 피로수명을 평가하는 경우에 피로수명이 과대평가되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 UIC260급 레일과 물리적 성질이 유사한 50N급 레일의 용접부에 대한 피로실험을 통해 얻어진 S-N선도(Makoto ISHIDA)를 이용하여 레일 용접부의 피로수명을 평가하였다(그림 7). 이러한 가정에 의한 평가는 다소 안전측의 결과를 나타내므로 공학적인 측면에서 무리가 없다고 판단된다.

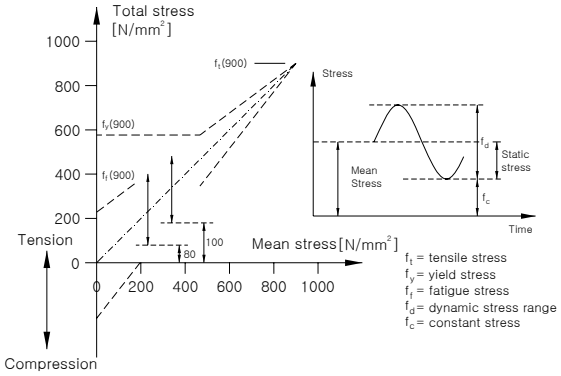


그림 6. UIC260급 레일에 대한 Smith diagram

표 4. UIC260급 레일의 허용피로응력범위(MPa)

항 목		응 력
인장강도(f_t)		900
항복강도(f_y)		580
레일에 도입되는 일정응력	잔류응력	220
	온도응력	100
허용피로응력범위		220

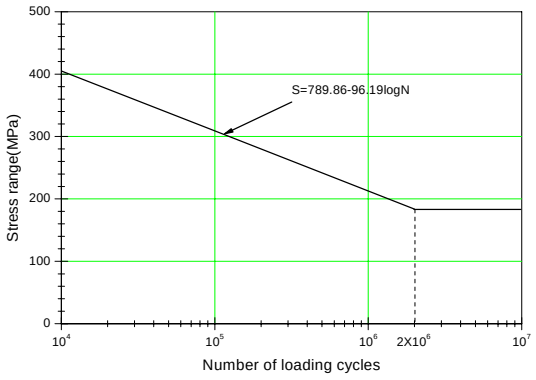


그림 7. 50N급 레일 용접부의 S-N선도
(파괴확률 5%)

열차 통과시 레일 저부에서 발생하는 응력범위를 산정하기 위하여 경부고속철도 KP 86.108km(T1)에서 레일 연마 전·후 현장계측을 통해 얻어진 레일 저부응력 시간이력곡선(그림 2)에 대해 Rainflow counting method를 적용하여 빈도해석을 실시하고 RMC(Root mean cube)법에 의해 등가응력범위를 계산하였다. 레일 저부응력 시간이력곡선에 대한 빈도해석결과 및 등가응력범위는 그림 8과 같다. 한편, 레일 용접부의 피로수명을 산정하기 위한 기초자료인 일평균 교통량은 광명-대전구간의 일평균 교통량인 70(회/일)을 적용하였다.

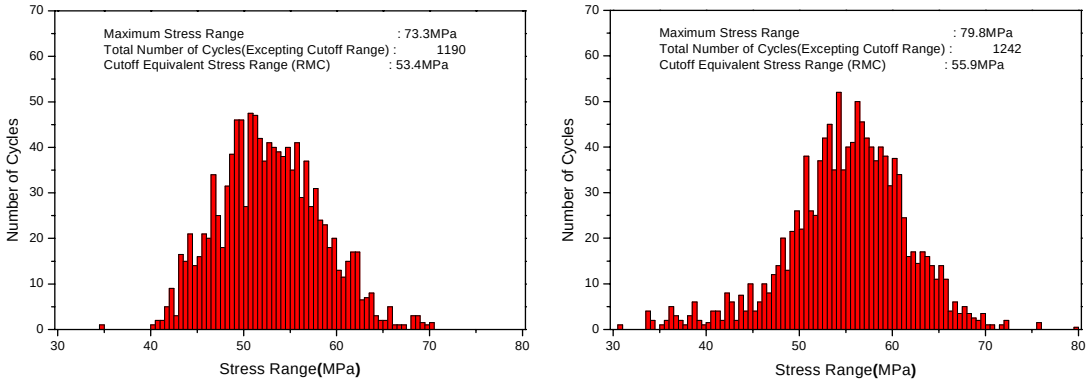


그림 8. 빈도해석결과 및 등가응력범위

50N급 레일의 S-N선도, 레일 저부의 실측 등가응력범위 및 광명~대전구간의 일평균 교통량을 앞서 언급한 피로수명 평가방법에 적용하여 레일 용접부의 피로수명을 산출하였으며, 그 결과는 다음 표 5와 같다. 표 5에 의하면 레일 답면의 연마에 의해 약 15%의 피로수명이 연장되는 것으로 나타났다.

표 5. 레일 용접부의 피로수명(누적통과톤수)

구 분	레일 연마 전	레일 연마 후	비 고
피로수명(년)	9.2억톤	10.6억톤	(↑)15.2%

4. 결 론

본 논문에서는 경부고속선에 대해서 피로수명 측면에서 레일 연마의 효용성을 검토하였다. 50N급 레일의 용접부에 대한 피로실험을 통해 얻어진 S-N선도에 레일 연마 전·후에 측정된 레일 저부응력을 이용하여 피로수명을 예측한 결과 9억톤에서 10억톤으로 약 15% 피로수명이 연장되는 것으로 나타났다. 이는 현재 JR West(일본)에서 레일 연마 전의 피로수명 8억톤을 연마 후 10억톤으로 연장한 것과 유사하게 나타났다.

위에서 검토한 경부고속선에서의 피로수명 검토 결과는 매우 지엽적인 것이므로, 정확한 레일 연마에 따른 피로수명 산정을 위해서는 다양한 궤도상태 및 용접부에서 계측된 결과와 UIC60 레일 용접부에 대한 S-N 선도를 기초로 좀 더 심도 깊은 연구가 수행되어야 할 것이다. 또한 레일 피로에 따른 갱환주기는 궤도 상태에 따른 레일의 충격량과 밀접한 관련이 있으므로 분석된 결과를 기초로 하여 현장에서 발생되는 레일 파단 등의 데이터를 고려하여 수정·보완되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 坂 宏二, 楠田 將之, 前田 洋明, レホル壽命延伸について, 日本鐵道施設協會枝, pp.17-20, 2002.3
2. EN13231-3 Part3(CEN, 2003) : Acceptance of rail grinding, milling and planning work in track
3. Makoto ISHIDA, Noritsugi ABE, Relationship between Rail Surface Irregularity and Bending Fatigue of Welded Part in Long Rails, RTRI Report Vol. 4, No.7, pp.8-15, 1990.7