

# 국내 일반철도 레일연마에 따른 레일피로수명 평가

## The Fatigue Life Evaluation of CWR according to the Rail Grinding in the Conventional Railway

성덕룡\*<sup>†</sup>, 박용걸\*\* , 서종민\*\* , 김만철\*\*\* , 배호석\*

Deok-Yong Sung\*<sup>†</sup>, Yong-Gul Park\*\* , Jong-Min Seo\*\* , Man-Cheol Kim\*\*\* , Ho-Seok Bae\*

**Abstract** In this study, vehicle/track interaction analysis by the Saemaul powered vehicle were carried out. The prediction equation for the bending stress of rail was estimated using the rail bending stress by the rail surface irregularities at welds. Also, the fatigue analysis using a S-N curve of welds in the conventional railway was carried out. We estimated the fatigue life of CWR by the fracture probability. By the rail grinding, the fatigue life of CWR was evaluated in consideration to reduce the rail bending stress through removing the rail surface irregularities. Therefore, it presented the fatigue life of CWR according to the rail grinding execution plan in the conventional railway.

**Keywords** : Conventional railway, Rail grinding, Fatigue life, Vehicle/Track interaction analysis

**초 록** 본 연구에서는 국내 일반철도 새마을호 동력차 및 궤도조건을 고려한 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였다. 레일표면요철에 따른 레일휨응력을 분석하였고, 레일 휨응력 예측식을 도출하였다. 또한, 일반철도 레일강의 S-N선도를 이용한 피로해석을 수행하였다. 파괴확률에 따른 레일피로수명을 산정하였고, 레일연마에 따른 레일표면요철 삭제 및 레일휨응력 저감효과를 고려한 레일피로수명 평가를 수행하였다. 따라서, 국내 일반철도에서 레일연마 시행방법에 따른 레일피로수명을 평가하여 제시하였다.

**주요어** : 일반철도, 레일연마, 피로수명, 차량/궤도상호작용해석

## 1. 서 론

장대레일은 정척레일을 용접하기 위해 열을 가하거나(가스압접) 용재를 사용하여 두 모재부를 연결한다. 정척레일을 연결하기 위해서 사용되는 열과 용재는 일반 모재의 재료적 특성을 변화시키고, 차륜과 레일의 마찰로 인해 마모가 쉽게 발생하며, 용접 후 적절한 연마가 시행되지 않을 경우 레일표면에 요철이 발생하여 열차 주행 시 충격하중을 발생시킨다. 또한, 차륜과 레일의 주행접촉(rolling contact)시 부등마모(differential wear)나 부등 소성변형(differential plastic deformation)에 의해 발행하는 압좌(squat), 유지보수작업 또는 열차풍 등에 의하여 미소 자갈입자가 레일표면에 놓인 경우 열차가 그 상부를 지나갈 때

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

\* 대원대학교 철도건설과

\*\* 서울과학기술대학교 철도전문대학원

\*\*\* 한국철도기술연구원

발생하는 자갈 임프린트(ballast imprint) 등과 같은 다양한 레일표면결함(rail surface defects)이 발생하고, 매우 높은 충격하중이 발생하여 레일 피로 진전 또는 레일파단에 이를 수 있기 때문에 일정 크기 이상의 결함은 즉시 보수하여야 한다.

Yang(2000)은 레일용접부의 요철깊이와 레일저부에서 발생하는 휨응력과는 일정한 상관관계가 있으며, 초기요철량이 있는 경우 레일 피로수명에 크게 단축되기 때문에 초기표면처리가 매우 중요함을 제시하였다[1]. Kim(2001)은 국내 기존선 새마을 열차를 기준으로 평균주행속도 120km/h를 적용하여 슬래브 궤도의 장대레일 용접부에서 발생하는 응력을 산정하고 수정 마이너법칙을 이용하여 궤도구조별 레일의 휨 피로수명을 분석하였으며, 슬래브 궤도가 궤도유지보수 측면에서 유리함을 제시하였다[2]. Sung(2014)은 도시철도 콘크리트궤도 장대레일에 대한 피로시험과 현장계측을 통한 레일휨응력예측식을 도출하였으며, 자갈궤도와 콘크리트궤도의 장대레일 피로수명을 평가하여 제시하였다[3].

따라서 본 연구에서는 일반철도 선로 및 운행조건에 레일표면요철 및 뜯침목을 고려한 레일 피로수명을 평가하고자 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였으며, 레일연마 시행방안에 따른 레일교체주기 연장효과에 대하여 정량적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 차량/궤도 상호작용해석

### 2.1 차량 및 궤도의 기본해석모델

본 연구에서는 철도차량 동특성 해석을 위해 상용 소프트웨어인 VI-Rail를 이용하였다. 일반철도 운행열차 중 축중이 크고 최고속도가 150km/h인 새마을호 동력차를 모델링하였으며, 기존선 속도증속을 고려하여 최고속도 200km/h로 해석을 수행하였다. 궤도모델은 VI-Rail의 Flexible track system model[4]을 이용하였고, 자갈궤도의 레일, 레일체결장치, 침목, 도상자갈(ballast), 그리고 노반이 다층(multi-layers)으로 배열된 것으로 하고 최상부층을 구성하는 레일은 Timoshenko 연속보로 모형화하였으며, 하부의 레일체결장치 및 도상은 질점, 선형스프링(linear spring) 및 댐퍼(damper)로, 침목은 3자유도를 가지는 강결 질량(rigid mass)으로 모형화하였다. 차량과 레일 사이의 접촉에 의한 상호작용은 비선형 헤르츠 스프링(nonlinear Hertzian spring)으로 모형화 하였다. 차량 모델은 새마을호 열차에 적용된 차륜답면구배 1/40인 KNR 40을, 레일모델은 KS50N, KS60레일을 사용하였다.

### 2.2 레일표면요철 및 뜯침목 모델

본 연구에서 적용한 해석기법에서는 레일의 주행면(rail running surface)과 차륜답면(wheel tread)이 헤르츠 스프링(Hertzian)에 의해 1점 접촉하는 것으로 가정하기 때문에 차륜답면이 레일의 요철 깊이까지 접촉하는 경우에만 유효하다. 이때 차륜답면이 요철부 레일 표면과 접촉할 수 있는 임계요철깊이(critical depth)는 요철 형상을 원형으로 가정할 때 차륜 반경과 요철 폭에 따라 구할 수 있다[5]. 모든 요철깊이가 차륜반경 508mm와 450mm에 대한 임계요철깊이 이내에 있어 레일면은 차륜답면과 접촉한다는 가정이 유효함을 확인하였다. 또한, 레일표면요철에 따라 차량과 레일의 접촉패치(patch) 면적이 달라지므로 정상구

간과는 헤르츠 상수(Hertzian constant)가 달라지게 되지만, 헤르츠 상수는 궤도 강성에 비하여 매우 크므로 헤르츠 상수의 변화가 전체 차량과 궤도의 상호작용에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상되어 레일표면요철에서도 정상구간과 동일한 값으로 가정하였다.

뜯침목 모델은 MTT(Multiple Tie Temper)작업 등 궤도정정작업 직후 도상다짐 불량으로 발생할 수 있는 단순 뜯 침목 유형[4]으로 궤도틀림은 발생하지 않고 다만 침목만 도상과 분리된 경우에 대해 해석하였으며, 뜯침목 개수는 1, 3, 5개, 뜯침목량은 0, 0.5, 1, 3mm로 가정하여 해석을 수행하였다.

### 2.3 차량/궤도 상호작용 해석결과 검증

현장계측을 통해 계측된 레일휨응력[6]과 차량/궤도 상호작용 해석모델을 통한 해석결과를 비교하여 해석모델에 대한 검증을 하였다. Fig. 1에 현장계측 결과와 해석결과를 비교하였으며, Table 1에 정리하였고, 5%내외의 오차를 보임에 따라 차량/궤도 상호작용해석모델의 적정성을 확인하였다.

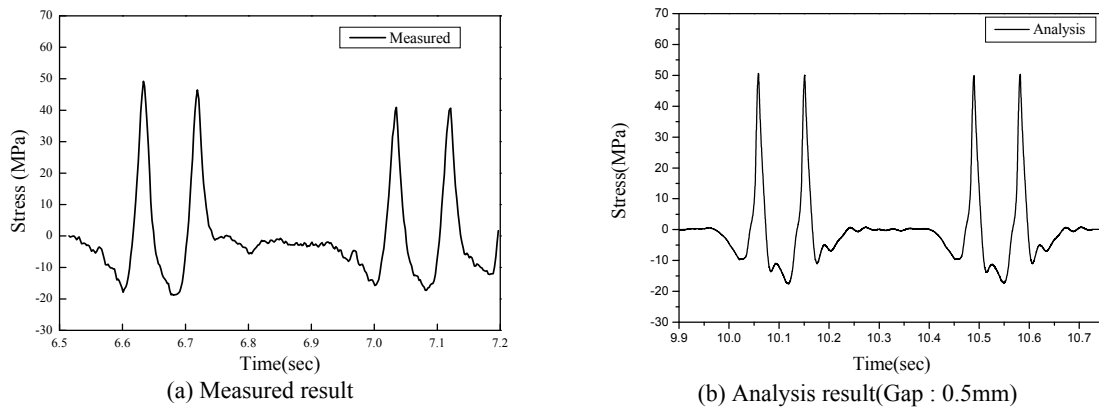


Fig. 1 Comparison of the measured results and the analysis results

Table 1 Comparison of the measured results and the analysis results

	Measured results[6]		Analysis results			
	93 km/h	105 km/h	93 km/h		105 km/h	
N.V. for 1m	0 mm	0.19 mm, V type	0 mm		0.19 mm, V type	
Gap of loose sleeper	-	-	0 mm	0.5 mm	0 mm	0.5 mm
Max. Stress	44.50 MPa	49.60 MPa	46.81 MPa	49.26 MPa	47.09 MPa	50.57 MPa
Relative error	-	-	5.19 %	10.69 %	5.06 %	1.95 %

### 3. 레일표면요철에 따른 궤도동적응답 분석

레일표면요철량은 동적운중 및 레일휨응력과 선형적인 상관관계가 있다[5]. 하지만 현장 계측의 경우 열차종류, 열차속도, 도상상태 등이 서로 달라 정확하고 정량적인 분석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 향후 속도증속을 고려하여 최고속도 200km/h로 주행하는 새마을

열차(PMC)를 대상으로 현장계측을 통해 도출된 레일표면요철 모델을 적용하여 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였다.

Fig. 2는 레일표면요철에 따른 레일휨응력 해석결과를 나타낸다. 레일표면요철에 따른 레일휨응력에 대한 회귀분석을 수행하였으며, 요철형상에 관계없이 결정계수가 95%이상으로 선형회귀식으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 또한, 레일휨응력은 레일표면요철의 형상에 따라 변동폭이 크지 않았었다.

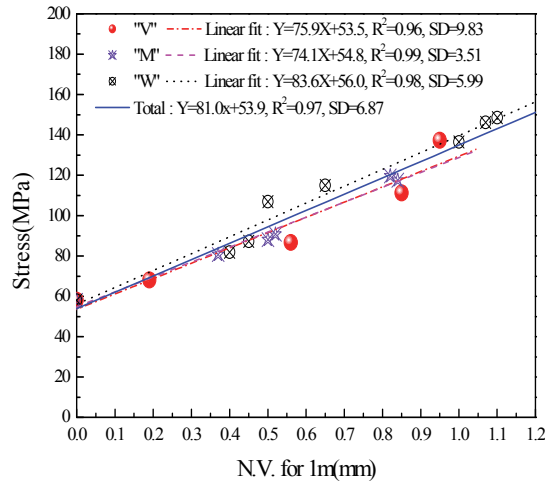


Fig. 2 Rail bending stress according to depth of rail surface defect

#### 4. 국내 일반철도 레일연마에 따른 피로수명 평가

##### 4.1 궤도조건을 고려한 레일 피로수명 평가

레일요철성장률 50kg/m레일 0.16mm/100MGT, 60kg/m레일 0.12mm/100MGT, 레일 초기요철량 0.4mm, 뜯침목개수 3개, 뜯침목량 3mm, 열차속도 200km/h에 대한 응력확률밀도함수는 표 45, 그림 83과 같다

Table 1 The prediction equation for the bending stress of rail

	50kgN rail on ballast track	60kg rail on ballast track
Prediction equation	$Y=92.9V+9.7L+0.157U+19.95$	$Y=82.7V+7.8L+0.141U+16.16$
Correlation coefficient	0.893	0.906
Standard deviation	5.75	5.21
No. of data	960	960
Remark	Y : banding stress, V : rail surface depth, U : train speed	

일반철도 레일 응력확률밀도함수를 파괴확률에 따른 S-N선도[6]에 적용하여 선형누적피로

손상법칙[7]에 의해 일반철도 사용 레일의 잔존 피로수명을 산정하였다(Table 2 참조).

**Table 2** Results of estimated service life of CWR on the convention railway

50kgN rail	Probability density function for stress(f(s))				S-N curve <sup>2)</sup> (cycles)	Remaining Life <sup>3)</sup> (cycles)	Total life (Tonnage)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ)	Stress range(s) <sup>1)</sup> (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})}$	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})} \times 22$
F.P.							
50%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	5.087E+08	3.801E+07	8.362E+08
1%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	5.671E+07	4.237E+06	9.321E+07
0.1%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	2.798E+07	2.090E+06	4.599E+07
0.01%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	1.714E+07	1.281E+06	2.818E+07
60kg rail	Probability density function for stress(f(s))				S-N curve <sup>2)</sup> (cycles)	Remaining Life <sup>3)</sup> (cycles)	Total life (Tonnage)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ)	Stress range(s) <sup>1)</sup> (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})}$	$\sum \frac{1}{(\frac{f(s)}{N(s)})} \times 22$
F.P.							
50%	117.38	5.21	97~138	2.659E-01	3.158E+08	4.111E+07	9.045E+08
1%	117.38	5.21	97~138	2.659E-01	8.490E+07	9.753E+06	2.146E+08
0.1%	117.38	5.21	97~138	2.659E-01	3.996E+07	5.181E+06	1.140E+08
0.01%	117.38	5.21	97~138	2.659E-01	2.805E+07	3.652E+06	8.034E+07

1) : 응력확률밀도함수의  $\pm 4\sigma$ 에 해당하는 범위( $\sigma$  : 응력확률밀도함수의 표준편차)

2) : 사용 50kg/m & 60kg/m 레일(TW) S-N선도

3) : 피로수명 산정식[9]에 의한 잔존 피로수명 산정

현재 일반철도 레일교체기준은 50kg/m레일 5억톤, 60kg/m레일 6억톤이며, 레일시험편의 평균통과톤수를 합산한 전체수명(파괴확률 1% 적용 시)은 50kg/m레일 약 5.63억톤, 60kg/m 레일 약 6.01억톤으로 현 레일교체기준과 근사한 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 일본 RTRI연구결과[7]에서 60kg/m 레일 S-N선도 파괴확률 1%에 대한 피로수명평가를 통해 60kg/m 레일의 피로수명을 6억톤으로 제시한 바 있다. 여기서 레일요철성장률 0.05mm/100MGT, 전동차 160km/h 주행 시 레일표면요철을 고려한 결과이다. 본 연구에서는 축중, 속도, 궤도조건(요철성장률, 레일표면요철량, 뜯침목 영향) 등을 추가로 고려함에 따라 일반철도 레일 S-N 선도 파괴확률 1%를 적용하는데 있어 충분한 안전율을 가지고 있다고 판단된다.

따라서 일반철도 파괴확률 1%에 대한 피로수명 평가결과를 바탕으로 레일연마에 따른 레일 피로수명을 평가하고자 한다.

#### 4.2 레일연마를 고려한 레일 피로수명 평가

레일 피로수명은 레일표면요철에 큰 영향을 받게 된다. 국내외 문헌에서는 레일연마를 통

해 레일표면요철을 삭정함으로써 레일 피로수명을 증가시킬 수 있음을 제시한 바 있다[1-3, 6-9]. 본 연구에서는 일반철도 50kg/m, 60kg/m 레일을 연마하지 않은 경우, 4억톤 시점에서 총 1회 연마하는 경우, 5천만톤 당 1회씩 연마하는 경우, 1억톤 당 1회씩 연마하는 예방연마의 경우에 대하여 레일피로수명을 평가하였다. 여기서 고려한 레일요철성장률은 50kg레일의 경우 0.16mm/억톤, 60kg레일의 경우 0.12mm/억톤으로 하였다[6]. 레일연마를 고려한 레일 피로수명 평가결과는 Fig. 3과 같다.

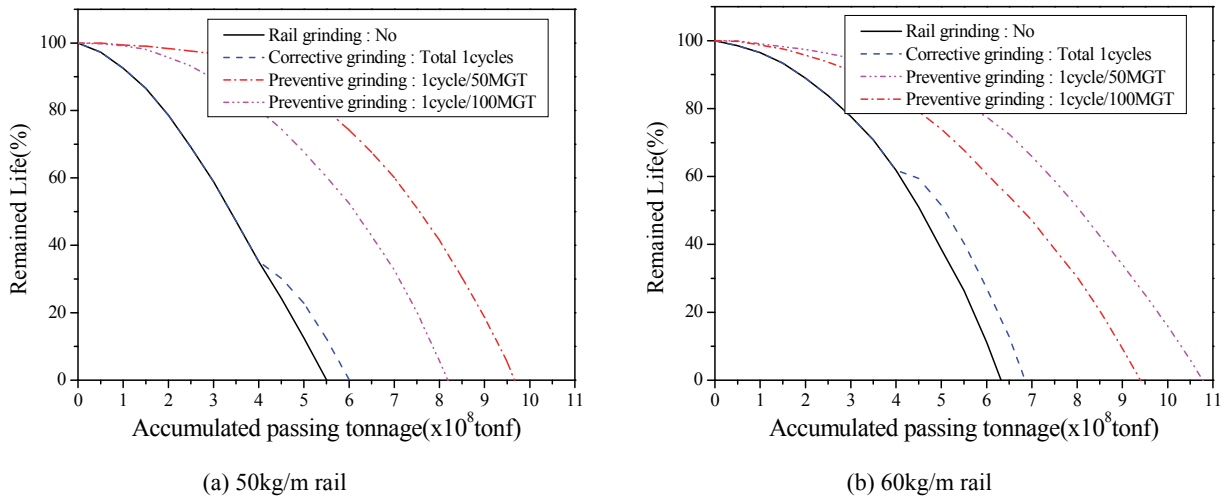


Fig. 3 Results of estimated service life of CWR by rail grinding period

레일연마 방법에 따른 레일피로수명 평가결과, 레일연마를 시행하지 않을 경우에 비해 4억톤 시점에서 1회 연마하는 경우 약 7%이상, 5천만톤 당 1회 예방연마할 경우 약 70%이상, 1억톤 당 1회 예방연마할 경우 약 45%이상 레일피로수명이 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 누적통과톤수에 의한 레일교체기준에 있어 건전한 레일을 교체주기에 따라 반드시 교체하는 기준치가 아닌 사용 목표치로써 지속적인 유지관리(연마 및 밀링, 탐상, 검측 등)를 통한 레일관리가 가능해질 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구는 국내 일반철도 장대레일을 대상으로 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 국내 일반철도 새마을호 운행 시 레일표면요철, 뜯침목량, 열차속도에 대한 레일 휨응력예측식을 제시하였다.

2) 국내 일반철도 레일의 파괴확률에 따른 피로수명을 제시하였으며, 레일연마를 시행하지 않을 경우에 비해 4억톤 시점에서 1회 연마하는 경우 약 7%이상, 5천만톤 당 1회 예방연마할 경우 약 70%이상, 1억톤 당 1회 예방연마할 경우 약 45%이상 레일피로수명이 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 누적통과톤수에 의한 레일교체기준에 있어 건전한 레일을 교체주기에 따라 반드시 교체하는 기준치가 아닌 사용 목표치로써 지속적인 유지관리(연마 및

밀링, 탐상, 검측 등)를 통한 레일관리가 가능해질 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진연구사업에 의해 수행되었으며, 관련자 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 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(in Korean).
- [2] M.C.Kim, J.S.Kim (2001) Prediction of Bending Fatigue Life under Welding Line of Rail with the Slab Track, *The Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 4, No. 4, pp.62-70(in Korean).
- [3] D.Y.Sung, S.Y.Kong (2014) The Fatigue Life Evaluation of Continuous Welded Rail on a Concrete Track in an Urban Railway, *The Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No. 3, pp.1-8(in Korean).
- [4] Y. Bezin, S.D.Iwnicki, et. al. (2009) An investigation of sleeper voids using a flexible track model integrated with railway multi-body dynamics, *Proc. IMechE Vol.223 Part F: J. Rail and Rapid Transit*, pp.597-607.
- [5] S.C.Yang, S.Y.Jang (2011) Investigation of the Maintenance Criteria for the Rail Surface Defects in High-Speed Railways, *The Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 6, pp.535-544(in Korean).
- [6] Y.G.Park (2014) Development on the Criteria for Maintenance and Periodic Replacement of Rail in Conventional Railway, Research Report, Seoul National University of Science and Technology, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(in Korean).
- [7] Ishida, M. (1990) Relationship between rail surface irregularity and bending fatigue of welded part in long rails, RTRI report, Vol.4, No.7.
- [8] Deshimaru, T., Kataoka, H. (2006) Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail, QR of RTRI, Vol.47, No.4.
- [9] D.Y.Sung (2010) The Fatigue Life Evaluation of Rail by Analysis of the Vehicle/Track Interaction, PhD Thesis, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Korea(in Korean).