

레일연마를 고려한 장대레일의 피로수명 평가

공선용* · 성덕룡** · 박용걸***

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

The Fatigue Life Evaluation of CWR based on the Rail Grinding

ABSTRACT

In this study, vehicle/track interaction analysis by the Saemaul powered vehicle was 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.

Key words : Conventional railway, Rail grinding, Fatigue life, Vehicle/Track interaction analysis, Continuous welded rail

초 록

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

검색어 : 일반철도, 레일연마, 피로수명, 차량/궤도상호작용해석, 장대레일

1. 서론

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 발생하는 압좌(squat), 유지보수작업 또는 열차풍 등에 의하여 미소 자갈입자가 레일표면에 놓인 경우 열차가 그 상부를 지나갈 때 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 레일표면결함에 대하여 주기적인 연마가 필요하고, 일정 크기 이상의 결함은 즉시 보수할 필요가 있다.

* 정희원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정 (Seoul National University of Technology · kong54@empas.com)

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

*** 정희원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수 (Seoul National University of Technology · ygpark@seoultech.ac.kr)

Received June 2, 2015/ revised July 27, 2015/ accepted September 2, 2015

Yang (2000)은 레일용접부의 요철깊이와 레일저부에서 발생하는 휨응력과는 일정한 상관관계가 있으며, 초기요철량이 있는 경우 레일 피로수명이 크게 단축되기 때문에 초기표면처리가 매우 중요함을 제시하였다. Kim (2001)은 국내 기존선 새마을 열차를 기준으로 평균 주행속도 120km/h를 적용하여 슬래브 궤도의 장대레일 용접부에서 발생하는 응력을 산정하고 수정 마이너법칙을 이용하여 궤도구조별 레일의 휨 피로수명을 분석하였으며, 자갈궤도에 비해 슬래브 궤도가 궤도유지보수 측면에서 유리함을 제시하였다. Sung (2014)은 도시철도 콘크리트궤도 장대레일에 대한 피로시험과 현장계측을 통한 레일휨응력예측식을 도출하였으며, 자갈궤도와 콘크리트궤도의 장대레일 피로수명을 평가하여 제시하였다. 기존 연구에서는 레일 휨 피로수명 평가 방법 및 피로수명에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구가 주로 진행되었다. 본 연구는 레일연마와 레일교체주기의 연동모델에 대한 연구로써, 국내 일반철도 선로 조건에 레일표면요철과 뜯침목을 함께 고려한 레일 휨응력예측식을 도출하고, 기존 연구결과를 바탕으로 레일 휨 피로수명 평가방법을 활용하여 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 최고속

도가 150km/h인 새마을호 동력차(Kim, 2013)를 모델링하였으며, 일반철도 속도증속을 고려하여 최고속도 200km/h까지 해석을 수행하였다. 궤도모델은 VI-Rail의 Flexible track system model (Bezin, 2009)을 이용하였고, 총 50m를 모델링하였다. 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 강결질량(rigid mass)으로 모형화하였다. 레일표면요철은 뜯침목이 존재하는 구간 중앙 침목과 침목사이 1m에 대하여 레일종방향 선형을 Cosine파형으로 모델링하였다. 차륜과 레일 사이의 접촉에 의한 상호작용은 비선형 헤르츠 스프링(nonlinear Hertzian spring)으로 모형화 하였다. 차륜 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 접촉하는 것으로 가정하였기 때문에 레일표면요철에 의해 차륜답면이 레일의 주행면과 접촉이 되어야 하는지 검토가 필요하다. 이때 차륜답면이 요철부 레일 표면과 접촉할 수 있는 임계요철깊이(critical depth, Hmax)는 요철 형상을 원형으로 가정할 때 차륜 반경(r)과 요철 폭(b)에 따라 구할 수 있다(Yang, 2011). 본 연구에

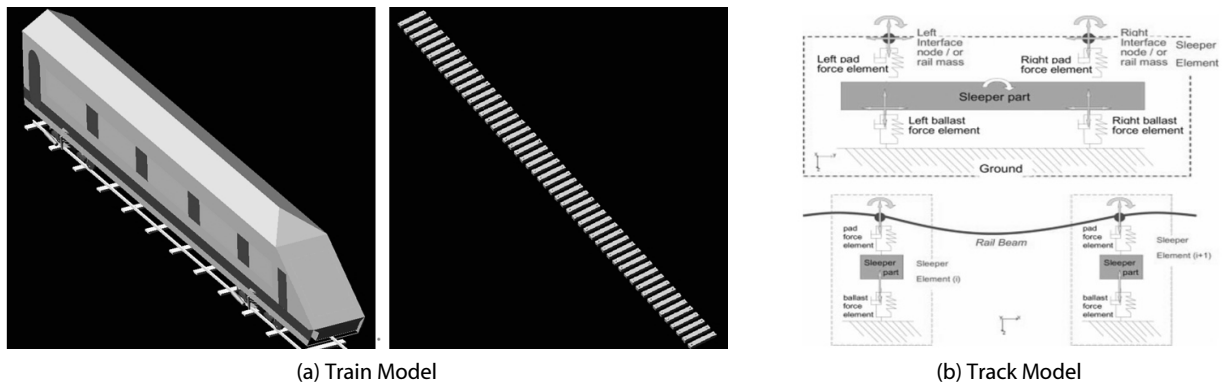


Fig. 1. Model for the Train/Track Interaction

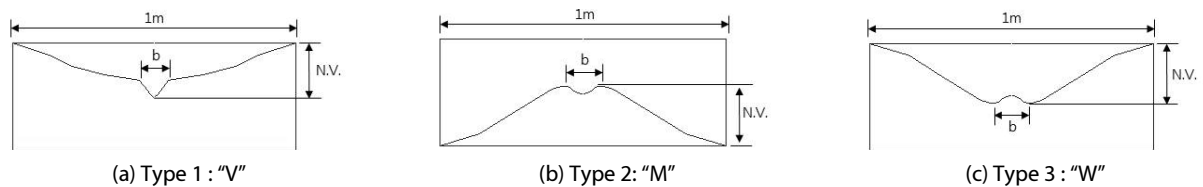


Fig. 2. Types of Defects According to Rail Surface Irregularity Profile

Table 1. Estimated Critical Depth by Depth and Width of Rail Surface Defect

Type	N.V.(negative value) for 1m (mm)	Width of surface defect(b) (mm)	Critical depth of surface defect (h_{max}) (mm)	
			$h_{max}=r-(r^2-(b/2)^2)^{1/2}$	
			Wheel radius of Diesel (r=508mm)	Wheel radius of KTX (r=450mm)
V	0.56	100	2.467	2.786
V	0.95	200	9.940	11.252
V	0.19	350	31.094	35.422
V	0.85	440	50.109	57.444
M	0.84	220	12.052	13.652
M	0.82	320	25.855	29.405
M	0.50	320	25.855	29.405
M	0.52	280	19.672	22.332
M	0.37	190	8.962	10.142
W	0.40	300	22.651	25.736
W	1.00	190	8.962	10.142
W	0.45	200	9.940	11.252
W	0.65	300	22.651	25.736
W	0.50	290	21.133	24.001
W	1.10	300	22.651	25.736
W	1.07	300	22.651	25.736

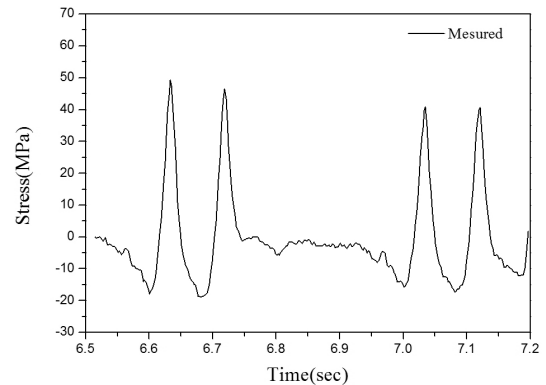
서는 레일표면요철의 유형을 Fig. 1과 같이 Yang (2011)을 참고하여 “V”형, “M”형과 실제 현장에서 많이 발생하는 “W”형 3가지로 구분하고, 현장계측을 통해 16개 레일표면요철 형상에 대해 검토하였으며, 검토한 결과는 Table 1과 같다. 여기서, N.V. for 1m는 레일직진도검사를 통해 도출되는 1m단위의 레일표면요철깊이를 나타낸다.

모든 요철깊이가 국내 일반철도를 운행하는 디젤기관차와 KTX에 대한 임계요철깊이 이내에 있어 레일면은 차륜담면과 접촉한다는 가정이 유효함을 확인하였다. 또한, 레일표면요철에 따라 차륜과 레일의 접촉패치(Patch) 면적이 달라지므로 정상구간과는 헤르츠 상수(Hertzian constant)가 달라지게 되지만, 헤르츠 상수는 궤도 강성에 비하여 매우 크므로 헤르츠 상수의 변화가 전체 차륜과 궤도의 상호작용에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상되어 레일표면요철에서도 정상구간과 동일한 값으로 가정하였다.

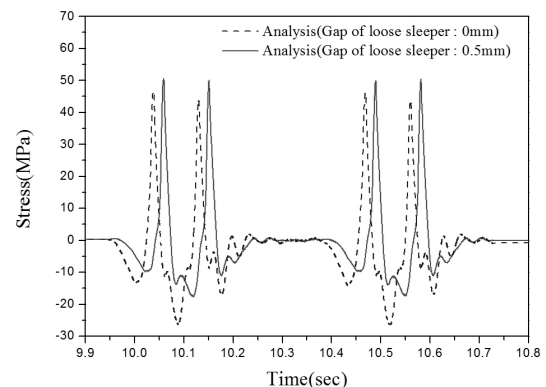
튼침목 모델은 MTT (Multiple Tie Temper)작업 등 궤도정정작업 직후 도상다짐 불량으로 발생할 수 있는 단순 튼 침목 유형(Bezin, 2009)으로 궤도틀림은 발생하지 않고 다만 침목만 도상과 분리된 경우에 대해 해석하였으며, 튼침목 개수는 1, 3, 5개, 튼침목량은 0, 0.5, 1, 2, 3mm로 가정하여 해석을 수행하였다.

2.3 차량/궤도 상호작용 해석결과 검증

현장계측을 통해 계측된 레일휨응력(KAIA, 2014)과 차량궤도 상호작용 해석모델을 통한 해석결과를 비교하여 해석모델에 대한



(a) Measured Result



(b) Analysis Result (No. : 3ea, Gap : 0.5mm)

Fig. 3. Comparison of the Measured Results and the Analysis Results (N.V. for 1m : 0.19mm, V type)

Table 2. Comparison of the Measured Results and the Analysis Results

Train speed	Measured Results (KAIA, 2014)		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 %

검증을 하였다. 현장계측은 열차통과시 침목처짐을 육안으로 확인하여 뜯침목이 발생한 개소(V=105km/h)와 발생하지 않은 개소(V=93km/h)에 대해서 1축 변형률계이지를 레일저부에 부착하여 측정한 결과이다. 해석결과는 현장계측과 같이 침목과 침목사이 레일저부에서 발생하는 응력으로 Fig. 3에 현장계측결과와 해석결과를 비교하였으며, Table 2에 정리하였고, 5%범위의 오차를 보임에 따라 차량궤도 상호작용해석모델의 적정성을 확인하였다. 현장계측에서는 뜯침목에 대한 정량적인 분석이 어렵기 때문에 본 연구에서는 뜯침목 개수와 뜯침목량에 대한 해석을 진행하였다. Fig. 3과 Table 2에 제시한 해석결과는 뜯침목개수 3개, 레일표면요철 형상 V, 깊이 0.19mm, 폭 350mm (Table 1 참조)에 대한 해석결과를 나타낸다.

3. 레일표면요철에 따른 궤도동적응답 분석

레일표면요철량은 동적응중 및 레일휨응력과 선형적인 상관관계가 있다(Yang, 2011). 하지만 현장계측의 경우 열차종류, 열차속도, 도상상태 등이 서로 달라 정확하고 정량적인 분석이 어렵다.

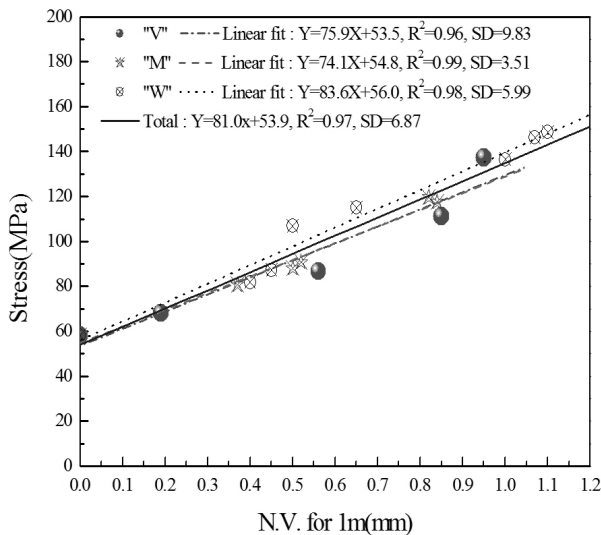


Fig. 4. Rail Bending Stress According to Depth of Rail Surface Defect

따라서 본 연구에서는 향후 증속을 고려하여 최고속도 200km/h로 주행하는 새마을열차(PMC)를 대상으로 현장계측을 통해 도출된 레일표면요철 모델을 적용하여 차량궤도 상호작용해석을 수행하였다.

Fig. 4는 레일표면요철에 따른 레일휨응력 해석결과를 나타낸다. 3가지 레일표면요철 유형에 따른 레일휨응력을 회귀분석하였으며, 요철형상에 관계없이 결정계수가 95%이상으로 선형회귀식으로 나타낼 수 있음을 확인하였다. 또한, 레일표면요철 유형에 따라 레일휨응력 선형회귀식의 변동폭이 크지 않아 종합된 하나의 선형회귀식(Total)으로 나타내었다. 즉, 레일표면요철 형상(V, M, W)은 레일휨응력에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

4. 국내 일반철도 레일연마에 따른 피로수명 평가

4.1 궤도조건을 고려한 레일 휨응력예측식 도출

Ishida (1990, 1999)는 레일표면요철, 뜯침목에 대한 중회귀분석을 통해 레일휨응력예측식을 도출하였고, 이를 레일용접부 S-N 선도에 적용하여 레일피로수명을 평가하였다. 본 연구에서는 국내 일반철도에서 운행되는 새마을호를 고려하여 레일표면요철과 뜯침목을 함께 적용한 모델을 통해 레일휨응력예측식을 도출하고자 하였다. 이렇게 레일표면요철과 뜯침목 및 열차속도를 고려하게 되면 국내 일반철도 레일의 피로수명을 평가할 수 있으며, 레일연마를 통해 레일표면요철이 관리됨에 따라 레일휨응력을 계산할 수 있다.

다변량분석의 한 종류인 중회귀분석을 통해 도출하는 회귀분석식은 각각의 독립변수와 종속변수에 대해 계측된 데이터를 이용하게 된다. 차량궤도 상호작용해석을 통해 임의의 요철량(V)과 뜯침목량(L)을 정하고, 열차속도(U)에 따라 발생한 레일휨응력(Y)을 정리하고, 그런 다음 요철량 V, 뜯침목량 L, 열차속도 U를 독립변수로 하며, 레일휨응력 Y를 종속변수로 중회귀분석을 실시한다. 중회귀분석을 통해서 레일휨응력 Y를 종속변수로 하는 중회귀분석식을 산출한다. 수치해석데이터의 평균운행속도에 대하여 요철지수 Z에 관한 레일휨응력 Y 그래프를 작성하고, 이에 대한 선형회귀분석을 실시함으로써 요철량 및 뜯침목량과 레일 휨응력의 상관관계를

Table 3. 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 : Bending Stress, V : Rail Surface Depth, L : Loose Sleeper Depth, U : Train Speed	

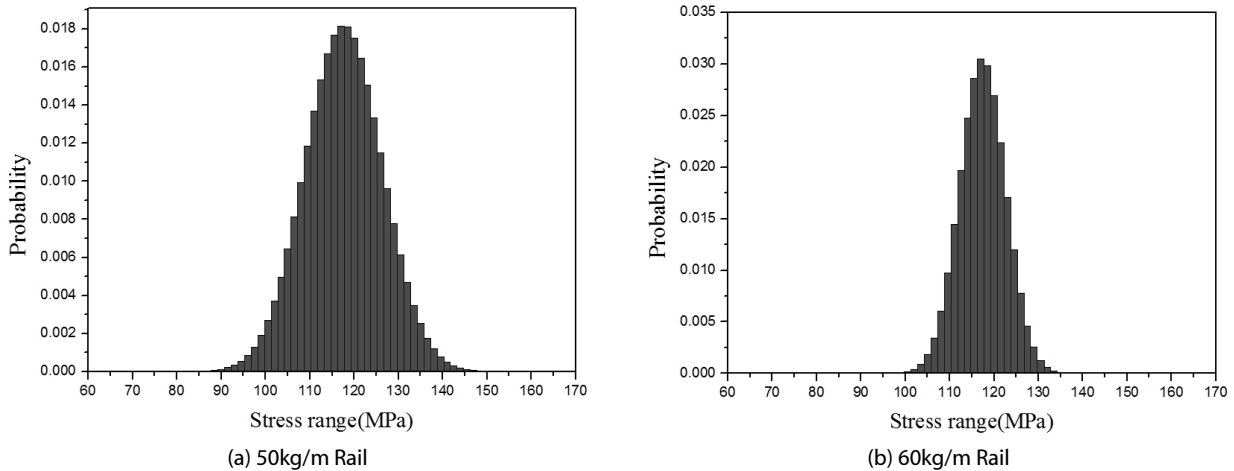


Fig. 5. Probability Density Function for Stress of CWR on the Convention Railway

확인한다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 중회귀분석을 통한 레일휨응력에 측식 도출을 위해서 차량궤도 상호작용해석을 수행하였다. 해석에 적용한 요철량은 현장에서 계측한 16개 유형(Table 1참조)이며, 뜯침목은 연속으로 뜯침목이 1, 3, 5개 발생한 경우에 대해 뜯침목량이 0, 0.5, 1, 2, 3mm인 경우를 해석하였고, 열차속도는 새마을호 50, 100, 150, 200km/h에 대해 해석하였다. 총 960개 모델에 대해 차량궤도 상호작용해석을 수행하였으며, 요철량(V), 뜯침목(L) 및 열차속도(U)에서 발생한 최대 레일휨응력(Y)을 도출하였고, 이를 통계분석 전용프로그램인 SPSS 10.0을 통한 중회귀분석을 수행하여 Table 3과 같은 레일휨응력에측식을 도출하였다. 본 연구에서 도출된 레일휨응력에측식은 결정계수가 0.85이상으로 매우 높은 만족도를 보이고 있음을 알 수 있다.

궤도조건에 따라 레일저부에서 발생하는 응력의 크기가 달라지고, 레일 피로수명을 평가하는데 있어서는 가장 위험한 경우에 대한 해석이 요구되기 때문에 본 연구에서는 피로파괴에 대한 안전측 해석을 위해 누적통과톤수에 의한 레일교체주기를 제시한 기존연구결과(Ishida, 1990; Kong, 2013)를 참조하였다. Table 3의 레일휨응력에측식에 레일교체주기 산정시 적용한 초기레일표면요철량 0.4mm를 대입하고, 새마을호 운행 시 레일휨응력이 가장

크게 발생하는 뜯침목개수 3개, 뜯침목량 3mm, 열차속도 200km/h를 대입하여 응력확률밀도함수를 도출하였다(Fig. 5 참조).

4.2 궤도조건을 고려한 레일 피로수명 평가

Fig. 5의 응력확률밀도함수를 파괴확률에 따른 S-N선도(Table 4 참조)(KAIA, 2014)에 적용하여 선형누적피로손상법칙(Deshimaru, 2006; Ishida, 1990; Ishida, 1999; Kong, 2013; Sung, 2010)에 의해 일반철도 사용 레일의 잔존 피로수명을 산정하였다(Table 5 참조). Table 4에 제시된 S-N선도는 테르밋용접(TW)레일에 대한 피로시험결과이며, 이는 장대레일에 사용되는 용접방법 중 가장 강도가 낮은 방법이 테르밋용접레일이기 때문이다.

현재 일반철도 레일교체기준은 50kg/m레일 5억톤, 60kg/m레일 6억톤이며, 레일시험편의 평균통과톤수(50kg/m 사용레일 4.36억톤, 60kg/m 사용레일 3.86억톤)를 합산한 전체수명(파괴확률 1% 적용 시)은 50kg/m레일 약 5.63억톤, 60kg/m레일 약 6.01억톤으로 현 레일교체기준과 근사한 결과를 보이는 것으로 분석되었다. Ishida (1990)는 레일요철성장률 0.05mm/억톤, 전동차 160km/h 주행 시 레일표면요철을 고려하여 레일휨응력에 대한 응력확률밀도함수를 도출하였고, 60kg/m 레일 S-N선도 파괴확률 1%에 대한 피로수명평가를 통해 60kg/m레일의 피로수명을 6억톤으로 제시

Table 4. S-N Curve & Fatigue Limit According to Probability of Failure (KAIA, 2014)

50kgN rail P.F. ¹⁾	Modified Miner's rule	Haibach's rule	Fatigue limit	60kg rail P.F. ¹⁾	Modified Miner's rule	Haibach's rule	Fatigue limit
	50%	S=1303.72-178.53LogN	S=741.26-89.27LogN		178.8	50%	S=882.64-108.68LogN
1%	S=1218.66-178.53LogN	S=656.20-89.27LogN	93.74	1%	S=808.69-108.68LogN	S=466.29-54.34LogN	123.90
0.1%	S=1191.27-178.53LogN	S=628.81-89.27LogN	66.35	0.1%	S=784.88-108.68LogN	S=442.48-54.34LogN	100.08
0.01%	S=1172.28-178.53LogN	S=609.82-89.27LogN	47.36	0.01%	S=768.37-108.68LogN	S=425.98-54.34LogN	83.58

¹⁾Probability of Failure

Table 5. Results of Estimated Fatigue Life of CWR on the Convention Railway

50kgN rail P.F. ¹⁾	Probability density function for stress (f(s))				S-N curve ³⁾ (cycles)	Remaining life ⁴⁾ (cycles)	Remaining life (Tonnage)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ) (MPa)	Stress range (s) ²⁾ (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{\left(\frac{f(s)}{N(s)}\right)}$	$\sum \frac{1}{\left(\frac{f(s)}{N(s)}\right)} \times 22$
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	7.175E+07	5.798E+06	1.276E+08
0.1%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	4.964E+07	4.072E+06	8.958E+07
0.01%	117.61	8.75	83~153	2.659E-01	3.886E+07	3.187E+06	7.012E+07

60kg rail P.F. ¹⁾	Probability density function for stress (f(s))				S-N curve ³⁾ (cycles)	Remaining life ⁴⁾ (cycles)	Remaining life (Tonnage)
	Average (m) (MPa)	Standard deviation (σ) (MPa)	Stress range(s) ²⁾ (MPa)	∑f(s)	∑N(s)	$\sum \frac{1}{\left(\frac{f(s)}{N(s)}\right)}$	$\sum \frac{1}{\left(\frac{f(s)}{N(s)}\right)} \times 22$
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⁾Probability of Failure

²⁾the prediction equation for the bending stress of rail in the corresponding the range of $\pm 4\sigma$ (σ : standard deviation) (Ishida, 1990)

³⁾Modified S-N curve for laid 50kg/m & 60kg/m rail (TW) (KAIA, 2014)

⁴⁾Remaining life by the evaluation equation of fatigue life (Sung, 2010)

한 바 있다. 본 연구에서는 Ishida (1990) 연구와 비교하여 축중이 큰 국내 일반철도 새마을호 축중 및 속도를 고려하였고, 초기레일표면요철량과 요철성장률을 고려한 것에 비해 궤도조건(초기레일표면요철량, 레일표면요철량, 뜯침목 영향)을 추가로 고려함에 따라 일반철도 레일 S-N선도 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.

4.3 레일연마를 고려한 레일 피로수명 평가

레일 피로수명은 레일표면요철에 큰 영향을 받게 된다. 국내의

문헌에서는 레일연마를 통해 레일표면요철을 제거함으로써 레일 피로수명을 증가시킬 수 있음을 제시한 바 있다(Deshimaru, 2006; Kim, 2001; Yang, 2011).

본 연구에서는 응력확률밀도함수를 이용한 피로수명 산정방법 (Yang 2000; Sung, 2014)을 이용하여 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 다음 식을 이용하여 평가하였다. 여기서 초기레일표면요철량 0.4mm, 뜯침목개수 3개, 뜯침목량 3mm, 새마을호 동력차 200km/h 주행시, S-N선도 파괴 확률 1%를 적용하였다. 또한, 레일요철성장률은 KAIA (2014)에

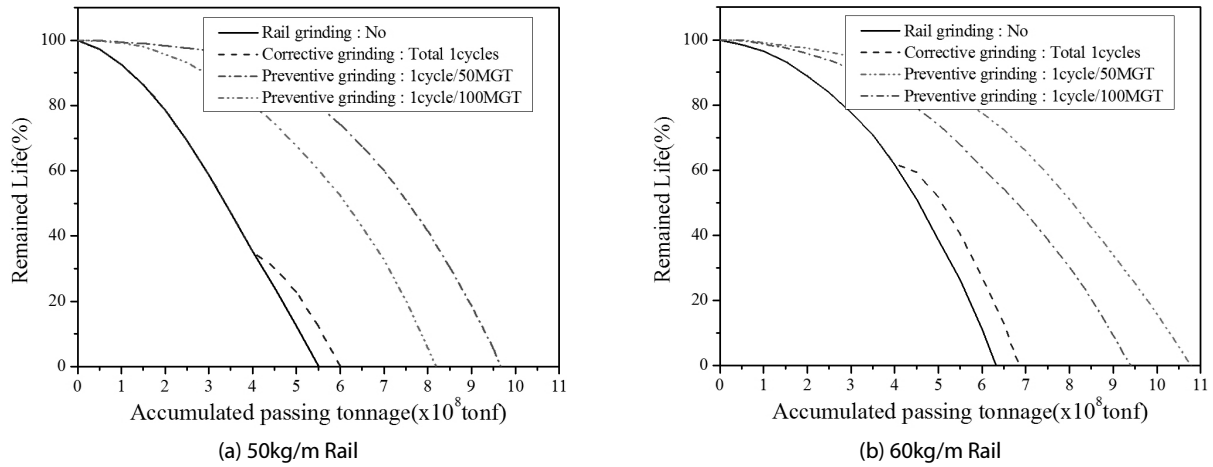


Fig. 6. Results of Estimated Fatigue Life of CWR by Rail Grinding Period

Table 6. Results of Estimated Fatigue Life of CWR by Rail Grinding Period

50kgN rail	Non rail grinding	Rail grinding			60kg rail	Non rail grinding	Rail grinding		
		Total 1 Cycles	1Cycle/ 50MGT	1Cycle/ 100MGT			Total 1 Cycles	1Cycle/ 50MGT	1Cycle/ 100MGT
Fatigue life (x10 ⁸ tonnage)	5.6	6.0	9.7	8.2	Fatigue life (x10 ⁸ tonnage)	6.3	6.8	10.8	9.4
%	-	7.14	73.21	46.43	%	-	7.94	71.43	49.21

서 수행한 현장계측결과를 인용하여 50kg레일의 경우 0.16mm/억톤, 60kg레일의 경우 0.12mm/억톤으로 하였고, 레일연마 시 이를 제거하는 것으로 가정하였다. 레일연마를 고려한 레일 피로수명 평가결과는 Fig. 6, Table 6과 같다.

Fig. 6는 누적통과톤수에 따른 잔존수명의 변화를 나타내며, 레일연마를 하지 않는 경우, 4억톤에서 1회 레일연마 시, 예방연마 시에 대한 그래프에서 잔존수명 0%일 때의 x축값이 레일피로수명이 된다.

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 교체주기 에 따라 반드시 교체하는 기준치가 아닌 사용 목표치로써 개정한다면 지속적인 유지관리(연마 및 밀링, 탐상, 검측 등)를 통한 레일관리가 가능해질 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 국내 일반철도 장대레일을 대상으로 레일요철성장률

(50kg/m레일 0.16mm/억톤, 60kg/m레일 0.12mm/억톤), 초기 레일요철깊이 0.4mm, 뜯침목개수 3개, 뜯침목량 3mm, 새마을호 동력차 200km/h에 대한 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 국내 일반철도 궤도에서 새마을호 운행 시 레일표면요철깊이, 뜯침목량, 통과열차속도를 알 경우 레일휨응력을 산정할 수 있는 레일휨응력예측식을 제시하였다. 이를 통해 현장에서 레일저부에 변형율게이지를 부착하여 데이터로거를 통해 계측하는 번거로움 없이 레일휨응력을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 국내 일반철도 레일의 파괴확률에 따른 피로수명을 제시하였으며, 파괴확률 1%에 대한 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 교체주기 에 따라 반드시 교체하는 기준치가 아닌 사용 목표치로써 개정한다면 지속적인 유지관리(연마 및 밀링, 탐상, 검측 등)를 통한 레일관리가 가능해질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진연구사업에 의해 수행되었으며, 관련자 분들께 감사드립니다.

References

- Deshimaru, T. and Kataoka, H. (2006). "Estimation of service life of aged continuous welded rail." *QR of RTRI*, Vol. 47, No.4.
- Sung, D. Y. (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 (in Korean).
- Sung, D. Y. and Kong, S. Y. (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).
- 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.
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) (2014). *Development on the Criteria for Maintenance and Periodic Replacement of Rail in Conventional Railway* (in Korean).
- Kim, M. C. and Kim, J. S. (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).
- Kim, M. K., Eom, B. G. and Lee, H. S. (2013). "Running safety analysis of railway vehicle passing through curve depending on rail inclination change." *The Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 199-208 (in Korean).
- Yang, S. C., Kim, M. C. and Kim, J. S. (2000). "Prediction of bending fatigue lifes of rail welded parts." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 1-D, pp. 97-105 (in Korean).
- Yang, S. C. and Jang, S. Y. (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).
- Kong, S. Y., Sung, D. Y. and Park, Y. G. (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).
- Bezin, Y. and Iwnicki, S. D. 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.