

일반철도 레일표면요철의 성장 경향 분석

The Growth Trend Analysis of Rail Surface Irregularity in the Conventional Railway

서종민*†, 박용걸*, 성덕룡**, 배호석**, 손의식***

Seo-Jong Min*, Yong-Gul Park*, Deok-Yong Sung**†, Ho-Seok Bae, Eui-Sik Son***

Abstract The periodic replacements criterion of rail is calculated on the basis of the research result of RTRI in Japan. 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 order to establish the periodic replacements criterion of CWR, this study measured the rail surface irregularity according to the accumulated passing tonnage, the types of welding. Therefore, it is analyzed that the gas pressure and thermite welding are the worst one of the others. In addition, it is analyzed that the rail surface irregularity growth rate in ballast track is about 0.05~0.08mm/100MGT. Finally, the growth rate of rail surface irregularity considering the safety factor 2 was suggested 0.16mm/100MGT. The result of this study is able to use the basis data to establishing the periodic replacements criterion of CWR considering rail grinding.

Keywords : rail surface irregularity, growth rate, accumulated passing tonnage, continuous welded rail, conventional railway

초 록 국내 철도레일의 교체기준은 일본 RTRI의 연구결과에 기초한다. 일본 RTRI에서는 누적통과톤수에 따른 레일표면요철 성장률과 장대레일 용접부의 휨피로와의 상관관계를 통해 레일교체기준을 산정하였다. 본 연구에서는 국내 일반철도의 열차 및 선로조건을 고려한 레일교체기준 설정을 위해 누적통과톤수별, 용접방법별 레일표면요철량을 측정하였으며, 레일표면요철 측정 데이터를 분석하였다. 분석결과, 테르밋용접부와 가스압접 레일표면요철 성장률이 동일하였고, 자갈궤도의 레일표면요철 성장률은 약 0.05 ~ 0.08mm/100MGT인 것으로 분석되었다. 최종적으로 안전율(S.F.=2)을 적용하여 0.16mm/100MGT를 일반철도 레일표면요철성장률로 제안하였다. 본 연구결과는 향후 일반철도 레일연마를 고려한 교체기준 설정을 위한 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

주요어 : 레일표면요철, 성장률, 누적통과톤수, 장대레일, 일반철도

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원(jongmin98@naver.com)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, ** 대원대학교 철도건설과

*** 한국철도공사

1. 서론

장대레일의 피로수명을 산정하기 위해서는 구름접촉피로(RCF, Rolling Contact Fatigue)로 인한 레일표면 결함과 레일용접부 열영향부(heat affected zone)에서 발생하는 표면요철에 의한 윤증변동에 의한 휨 피로(bending fatigue)에 의한 사용수명 산정이 필요하다. RCF에 의한 레일표면 결함에는 표면 미세균열(head check), 압좌(squats), 파상마모(corrugation), 표면경화(shelling) 등이 있으며, 최근 국내.외에서 이를 규명하기 위한 연구들이 진행 중에 있다. 본 연구에서는 국내 철도운영기관에서 사용중인 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 수립근거가 되는 레일용접부 열영향부에서 발생하는 표면요철의 성장률을 검토하고자 하였다.

2. 연구동향

2.1 레일용접부 손상유형[1]

장대레일의 누적통과톤수에 의한 레일교체주기 산정은 반복적인 피로하중에 의해 발생하는 레일용접부 저부의 피로강도 저하로 인한 갑작스런 절손을 막기 위해 산정되었다.

일본 철도종합연구소(RTRI)에서는 1985~2001년 동안의 통계자료를 바탕으로 레일용접부의 손상 유형 및 원인을 분석하였다. Fig 1은 레일용접부의 손상유형을 나타내며, 손상된 레일용접부의 형태는 대개 횡 방향 균열과 종 방향 균열 2가지로 나눌 수 있다. 횡 방향 균열은 균열의 시작 위치에 따라 레일두부, 복부, 저부 3가지로 나누어지며, 종 방향 균열은 오직 레일의 복부에서만 발생하는 것으로 조사되었다. Fig 1.에서 횡 방향 균열은 전체 레일용접부 손상의 약 90%를 차지하고, 손상된 레일용접부의 절반가량이 레일저부에서 시작된 횡 방향 균열인 것으로 조사되었다.

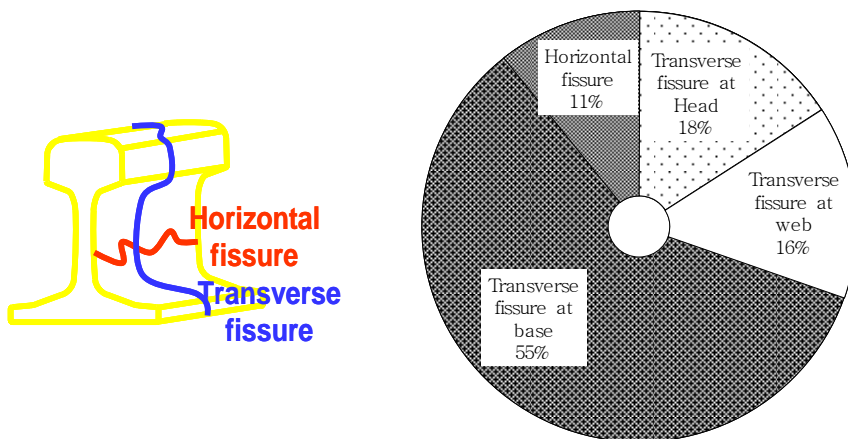


Fig. 1 레일용접부의 손상유형

Fig 2는 용접방법별 손상유형에 따른 손상수를 보여준다. 손상유형 및 손상수는 용접방법

에 따라 다르게 나타나며, 테르밋용접과 가스압접에서는 레일저부에서 시작된 횡 방향 균열의 비율이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그러나 레일저부에서 시작된 횡 방향 균열의 수는 엔크로즈드 아크 용접부의 레일저부에서 시작된 것 보다 더 많으며, 플래쉬 버트 용접부의 손상수 절반은 레일복부에서 시작된 종방향 균열이 대부분인 것을 알 수 있다. 또한, 테르밋용접의 레일두부에서의 횡 방향 균열과 엔크로즈드 아크 용접부의 레일복부 종방향 균열은 1건도 발생하지 않은 것으로 조사되었다.

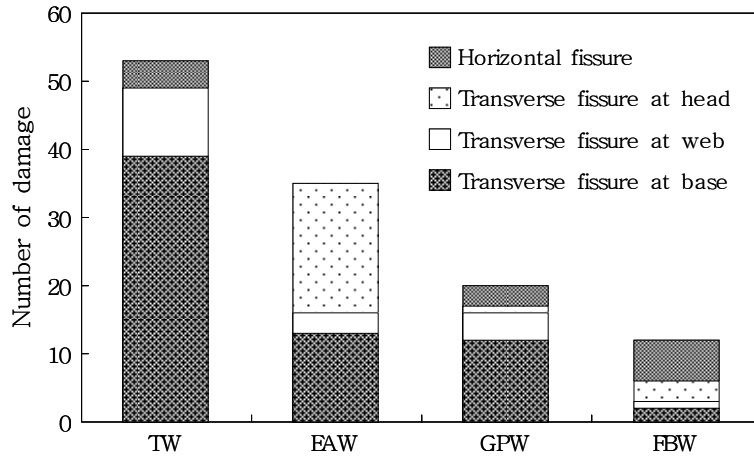


Fig. 2 레일용접방법에 따른 손상유형별 발생수

2.2 레일표면요철과 휨 피로의 상관관계[2]

일본 철도종합연구소(RTRI)에서는 레일용접부의 표면요철에 대하여 열영향부의 단과장 요철(V), 용접부를 중심으로 하는 1m 사이 요철(W), 열영향부 중심의 요철 바닥부터의 높이(X)를 임의로 가정하여 요철설정 모델을 만들어 객차(485 및 183계)와 기관차(EF65 및 EF81) 2종류에 대한 현장측정을 실시하였다. 측정된 결과에 대해서는 Table 1~3과 같이 레일저부응력(Y)과 표면요철(V, W, X), 열차속도(U)에 대한 다변량 분석을 수행하여 상관관계를 도출하였다.

Table 1. 수량화이론 제1류 분석결과

$$Y = -4.68*\delta_1 + 10.4*\delta_2 + 50*V + 21.52*W + 15.6*X + 55.01$$

Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철

δ_1 : 카테고리 변수 (전차특급의 경우 = 1, 기타 = 0)

δ_2 : 카테고리 변수 (기관차의 경우 = 1, 기타 = 0)

중상관계수 : 0.868, 추정치 표준오차 : 11.58, 데이터 수 : 5220

Table 2. 객차에 대한 중회귀 분석결과

$$Y = 49.84 \cdot V + 20.11 \cdot W + 14.92 \cdot X + 0.221 \cdot U + 30.09$$

Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철, U : 열차속도(km/h)

중상관계수 : 0.860, 추정치 표준오차 : 11.21, 데이터 수 : 3600

Table 3. 기관차에 대한 중회귀 분석결과

$$Y = 48.58 \cdot V + 23.30 \cdot W + 17.35 \cdot X + 0.265 \cdot U + 46.27$$

Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철, U : 열차속도(km/h)

중상관계수 : 0.867, 추정치 표준오차 : 11.44, 데이터 수 : 1620

중상관계수가 객차에서 0.860, 기관차에서 0.867이고, 이 분석을 이용한 변수로 레일응력을 잘 설명하고 있으며, 열차속도를 변수로 채택했기 때문에 보다 고속대역에 대한 추정을 가능하게 하고 있다.

요철에 관한 각종 변수의 편회귀계수를 이용하여 다음과 같은 요철지수(Z)를 정의하고, 레일응력과의 관계를 회귀분석하였다.(Fig 3 참조)

$$Z = 10 \cdot V + 4 \cdot W + 3 \cdot X \text{ (객차)}, \quad Z = 10 \cdot V + 5 \cdot W + 3 \cdot X \text{ (기관차)}$$

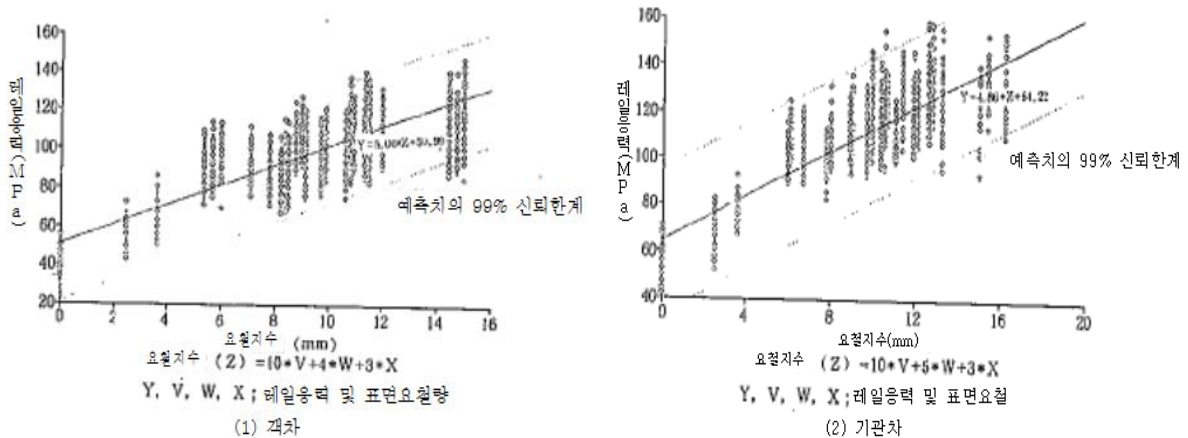


Fig. 3 요철지수(Z)와 레일저부응력(Y)의 관계

2.3 누적통과톤수와 표면요철의 상관관계[3]

Fig 4는 일본 철도종합연구소에서 측정한 용접부 열영향부(100mm) 표면요철 측정결과를 보여준다. 이는 협궤 레일에 대한 측정결과로서 누적통과톤수 1억 톤에 대한 표면요철의 성장률은 엔크로드드 아크용접의 경우 0.1mm로 가정하였고, 다른 용접방법들은 0.05mm로 가정하였다. 신칸센에서의 표면요철 성장률은 기존연구들에 기초하여 누적통과톤수 1억 톤당 0.2mm로 가정하였다.[3]

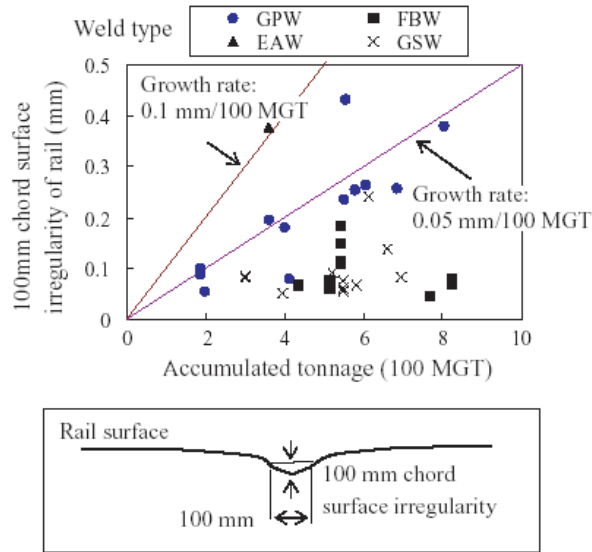


Fig. 4 누적통과톤수와 열영향부(100mm) 표면요철의 상관관계

3. 현장측정 - 레일용접부 표면요철 측정

3.1 현장측정 개요

레일용접부 표면요철 측정은 한국철도공사 운영구간 중 직선부에 해당하는 자갈궤도 구간에 대해 측정을 실시하였다. 레일용접부는 가스압접부, 테르밋용접부로 구분하였고, 모재부에 대해서도 측정을 수행하였다. 표면요철측정은 3개월 단위로 총 3차에 걸쳐 수행하였으며, 측정구간당 평균 10~20개소에 대해 측정하였다. 레일 표면요철 측정개소의 구체적인 사항은 Table 4, Fig 5와 같다.

Table 4. 레일용접부 표면요철 측정개소

궤도형식	구간	상세위치	누적통과톤수 (100MGT)	운행열차	열차속도 (km/h)	비고
자갈궤도 (50kg 레일 BM/TW/GPW)	충북선 (청주~오근장)	22K상선	2.06	무궁화, 화물	50~70	
		22k하선	0.93			
	호남선 (함평~무안)	222K상선	0.52	KTX, 새마을, 무궁화	50~150	
		222K하선	0.51			
	경부선 (가산~독산)	15K500 상2선	4.87	전동차, 화물	20~70	

레일표면 요철은 Fig 5와 같은 레일표면요철측정기(RAILPROF)를 이용하여 용접부를 중심으로 총 1m에 대한 요철량을 측정하였다.



Fig. 5 레일표면 요철측정 전경

3.2 현장측정 결과

표면요철측정은 누적통과톤수에 따른 레일용접부 열영향부(100 ~ 150mm)의 요철성장률을 확인하기 위한 목적에서 수행하였다. Fig 6은 일반철도 자갈궤도구간에서 측정한 결과 예이다. 여기서 N.V(1m)는 측정한 1m에 대해 중심선(0)을 기준으로 최하위점을 나타낸다. 또한, 기존연구결과를 토대로 측정한 1m 요철 중 용접부의 열영향부인 100mm에 대한 요철량을 검토하였으며, 이를 N.V(0.1m)로 나타내었다.

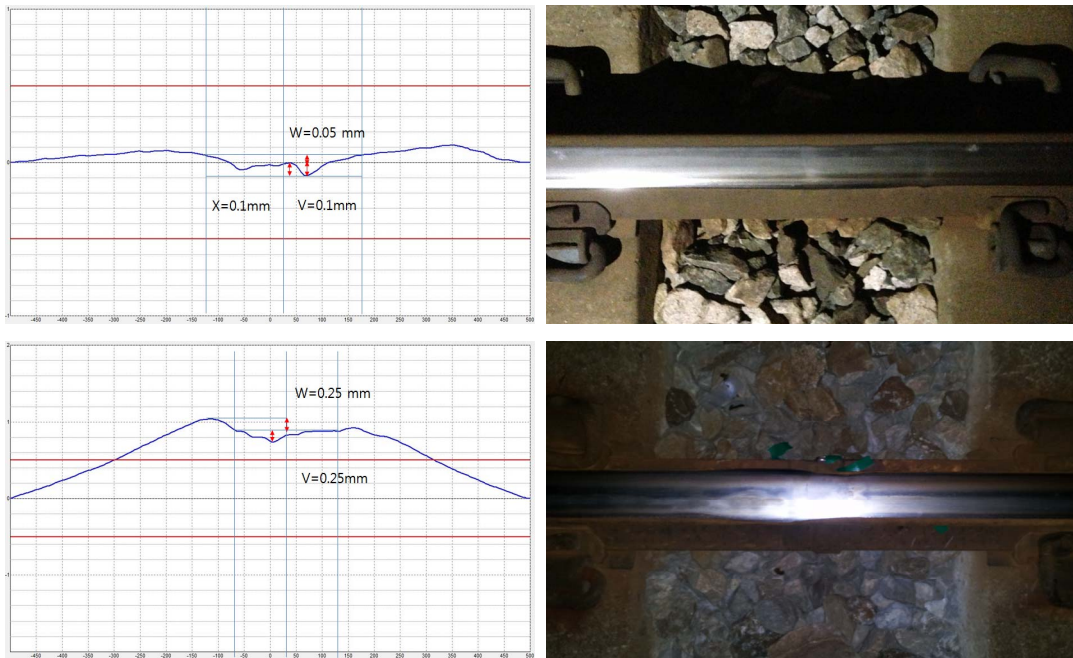


Fig. 6 일반철도 자갈궤도 레일용접부 요철측정 결과 예

4. 궤도구조별 요철성장률 분석

본 연구에서는 한국철도공사 일반철도구간에 대하여 자갈궤도 50kg/m 레일용접부(테르밋, 가스압접, 모재부)에서 발생하는 요철량을 측정하였다. 레일표면요철측정기의 특성상 양끝 점을 0점으로 하여 절대좌표의 값을 읽기 때문에 측정여건에 따라 N.V(1m)의 값이 달라질 수 있다. 따라서 피로강도가 낮고, 용접에 의한 표면요철발생 및 차륜과 레일표면의 마찰로 인한 요철진전이 심할 것으로 예상되는 용접부의 열영향부(100mm)에 대하여 비교 분석하였다.

Fig 7은 일반철도 레일용접방법별 요철성장률을 비교 분석한 결과이다. 용접방법별 열영향부의 1억톤당(100MGT) 요철성장률을 비교한 결과를 Table 5에 정리하였다.

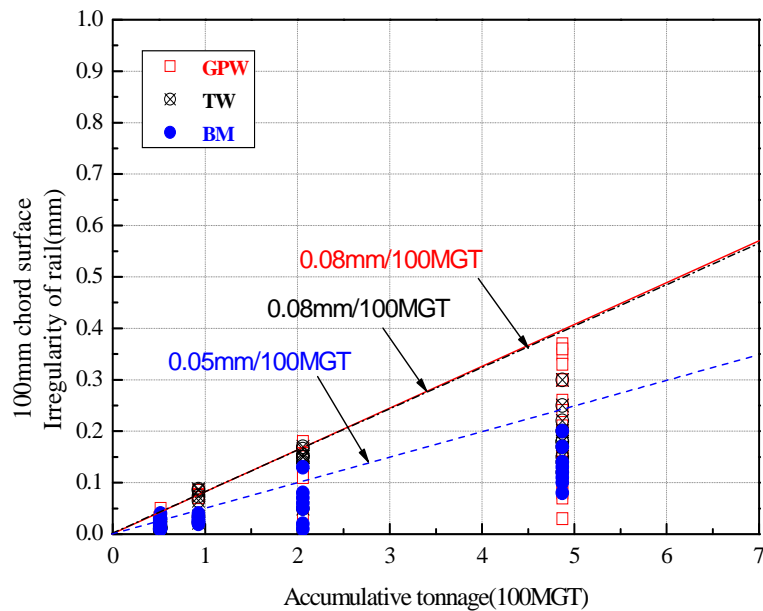


Fig. 7 일반철도 레일요철계측결과 및 요철성장률 분석

Table 5. 레일용접방법별 열영향부의 요철성장률 비교 (단위 : mm/100MGT)

구분	본 연구 (국내 일반철도)	국내 도시철도	일본 RTRI
	자갈궤도 50kg/m	자갈궤도 50kg/m	자갈궤도 50kg/m
모재부(BM)	0.05	0.04	-
가스압접(GPW)	<i>0.08</i>	<i>0.06</i>	<i>0.05</i>
테르밋(TW)	0.08	0.05	-
S.F. = 2.0	<i>0.16</i>	<i>0.12</i>	<i>0.1</i>

일반철도 레일용접방법별 요철성장률을 비교 분석한 결과, 모재부에 비해 용접부의 요철 성장률이 크다는 것을 확인하였으며, 테르밋용접부와 가스압접부 요철성장률이 동일한 것으로 분석되었다. 자갈궤도에서 측정한 일본 RTRI 연구결과에 비해 본 연구에서 측정한 요철 성장률이 약 37% 큰 것으로 분석되었고, 국내 도시철도에 비해서는 약 25% 큰 것으로 분석되었다. 국내 일반철도의 경우 고속주행을 하는 KTX, 축중이 큰 화물열차, 무궁화, 새마을호가 혼용하여 사용되는 구간이 많기 때문에 국내 도시철도 및 일본의 연구결과보다 레일표면요철성장률이 큰 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 분석한 일반철도 레일표면요철성장률에 대하여 안전율(S.F=2)을 적용하여 레일표면요철성장률을 0.16mm/100MGT로 정하고, 레일피로수명 및 레일연마주기에 따른 레일피로수명을 평가하고자 한다.

5. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 수립배경을 근간으로 국내 일반철도 환경에 적합한 레일교체수명을 제시하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해 1차적으로 일반철도 레일용접부에 대한 표면요철 성장률을 현장측정을 통해 검토하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 일반철도(축중 16~22tonf, 표준궤간) 운행조건을 고려할 경우, 자갈궤도 50kg/m 레일에서는 0.05~0.08mm/100MGT의 표면요철 성장률을 보였으며, 일본 RTRI연구결과인 일반철도(축중 15~22tonf, 협궤) 자갈궤도에서 발생하는 레일표면요철성장률(0.05mm/100MGT)보다 약 30% 낮았고, 국내 도시철도 레일표면요철성장률(0.06mm/100MGT)보다 25% 낮은 것으로 분석되었다.

2) 누적통과톤수에 따른 일반철도 레일의 피로수명을 산정하기 위해서는 본 연구결과를 기초로 하여 국내 일반철도 운행조건을 고려한 레일요철량과 레일저부 휨응력의 상관관계식을 도출하고, 실물 레일강의 S-N선도에 적용함으로써 레일의 휨 피로수명을 산정하여야 한다.

3) 향후 레일요철지수와 레일 휨 피로수명의 상관관계를 도출할 경우, 임의의 조건하에서 표면요철의 관리 목표치 설정이 가능할 것으로 판단되며, 이는 최적 레일연마주기 및 연마량을 결정하는데 이용이 가능할 것이다. 또한, 장대레일의 축력 및 횡압, 잔류응력 및 부식의 영향을 고려한다면 더욱 현실에 가까운 수명 추정이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 건설교통기술촉진연구사업 철도분야 자유공모과제로 이루어진 것으로 국토교통과학기술진흥원과 한국철도공사에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Deshimaru, T., Kataoka, H. (2006) Estimation of Service Life of Aged Continuous Welded Rail, QR of RTRI, Vol.47, No.4.
- [2] Ishida, M. (1990) Relationship between rail surface irregularity and bending fatigue of welded part in long rails, RTRI report, Vol.4, No.7.
- [3] Ishida, M. (1999) Influence of loose sleeper on track dynamics and bending fatigue of rail welds, QR of RTRI, Vol.40, No.2.
- [4] D.Y.Sung (2010) The Fatigue Life Evaluation of Rail by Analysis of the Vehicle/Track Interaction, Doctoral Thesis, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology, Korea.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. 1,3 No. 2, pp.160-166.