

# 궤도구조별 레일두부 표면요철의 성장 경향 분석

## The Growth Trend Analysis of Rail Surface Irregularity according to the Types of Track

성덕룡†                      공선용\*                      김박진\*\*                      신효정\*\*\*                      박용걸\*\*\*\*  
Sung, Deok-Yong              Kong, Sun-Yong              Kim, Bag-Jin              Shin, Hyo-Jeong              Park, Yong-Gul

### 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 track system and welding. Therefore, it is analyzed that the gas pressure welding is the worst one of the others. In addition, it is analyzed that the rail surface irregularity growth rate in ballast track is about 0.02~0.03mm/100MGT and its in concrete track is about 0.005~0.02mm/100MGT. Finally, the result of this study is able to use the basis data to establishing the periodic replacements criterion of CWR considering rail grinding.

key words : rail surface irregularity(레일표면요철), growth rate(성장률), accumulated passing tonnage(누적통과톤수), periodic replacements criterion(교체주기기준), continuous welded rail(장대레일)

### 1. 서 론

장대레일의 피로수명을 산정하기 위해서는 구름접촉피로(RCF, Rolling Contact Fatigue)에 의한 레일 표면 결함에 의한 피로수명 산정과 레일용접부 열영향부(heat affected zone)에서 발생하는 표면요철에 의한 윤증변동에 의한 휨 피로(bending fatigue)에 의한 사용수명 산정이 필요하다. RCF에 의한 레일 표면 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 자갈궤도와 콘크리트궤도로 구분하여 검토하고자 하였다.

2009년 현재 국내 고속선에는 일부 터널구간을 제외하고 자갈궤도로 부설되어 있으나, 향후 경부고속철도 2단계(동대구~부산간) 및 호남고속철도에는 콘크리트궤도가 부설될 예정이기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트궤도가 부설되어 있는 서울메트로의 운영구간을 대상으로 자갈궤도와 콘크리트궤도의 레일용접부에서 발생하는 표면요철을 측정하였으며, 열영향부에서의 표면요철 성장률을 분석하고자 하였다.

† 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 박사수료  
E-mail : duckcar@naver.com

TEL : (02)970-6890 FAX : (02)978-6575

\* 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 박사과정  
(서울메트로 철도토목팀, 팀장)

\*\* 정희원, 서울메트로 철도토목팀, 차장, 공학석사

\*\*\* 정희원, 서울메트로 철도토목팀, 선임, 공학석사

\*\*\*\* 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 교수

## 2. 연구동향

### 2.1 레일용접부 손상유형[1]

장대레일의 누적통과횟수에 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 레일 두부, 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.

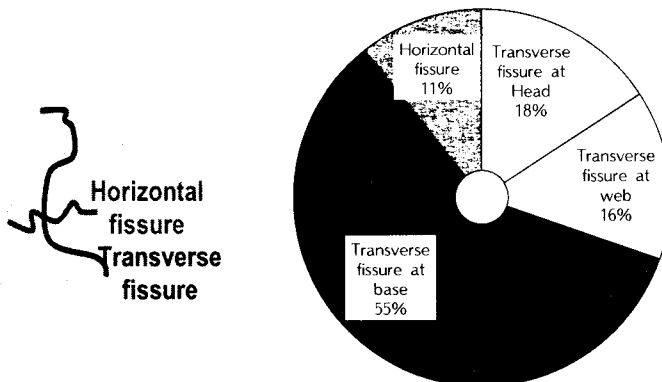


Fig 1. 레일용접부의 손상유형

Fig 2는 용접방법별 손상유형에 따른 손상수를 보여준다. 손상유형 및 손상수는 용접방법에 따라 다르게 나타나며, 테르밋용접과 가스압접에서는 레일저부에서 시작된 횡 방향 균열의 비율이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그러나 레일저부에서 시작된 횡 방향 균열의 수는 엔크로드드 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 엔크로드드 아크 용접부의 레일복부 종방향 균열은 1건도 발생하지 않은 것으로 조사되었다.

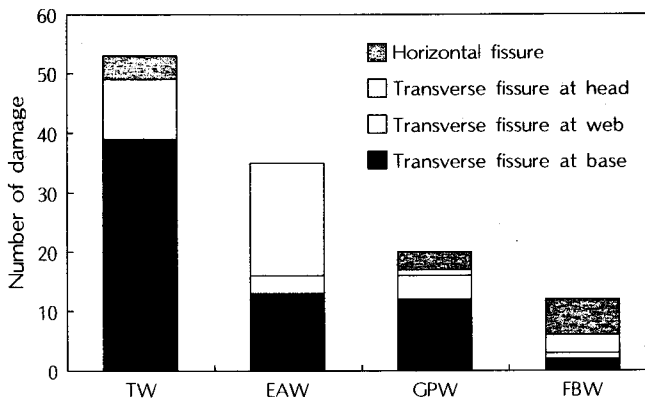


Fig 2. 레일용접방법에 따른 손상유형별 발생수

## 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

$Y = -4.68*\delta_1 + 10.4*\delta_2 + 50*V + 21.52*W + 15.6*X + 55.01$ <p>Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철  <math>\delta_1</math> : 카테고리 변수(전차특급의 경우 = 1, 기타 = 0)  <math>\delta_2</math> : 카테고리 변수(기관차의 경우 = 1, 기타 = 0)                  중상관계수 : 0.868, 추정치 표준오차 : 11.58, 데이터 수 : 5220</p>
---

Table 2. 객차에 대한 중회귀 분석결과

$Y = 49.84*V + 20.11*W + 14.92*X + 0.221*U + 30.09$ <p>Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철, U : 열차속도(km/h)                  중상관계수 : 0.860, 추정치 표준오차 : 11.21, 데이터 수 : 3600</p>
---

Table 3. 기관차에 대한 중회귀 분석결과

$Y = 48.58*V + 23.30*W + 17.35*X + 0.265*U + 46.27$ <p>Y : 레일응력(MPa), V, W, X : 레일표면요철, U : 열차속도(km/h)                  중상관계수 : 0.867, 추정치 표준오차 : 11.44, 데이터 수 : 1620</p>
---

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)

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

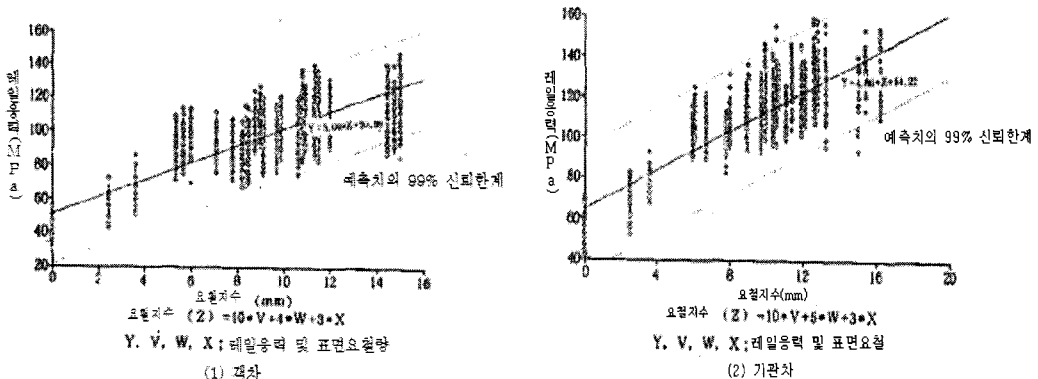


Fig 3. 요철지수(Z)와 레일저부응력(Y)의 관계

### 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.[4]

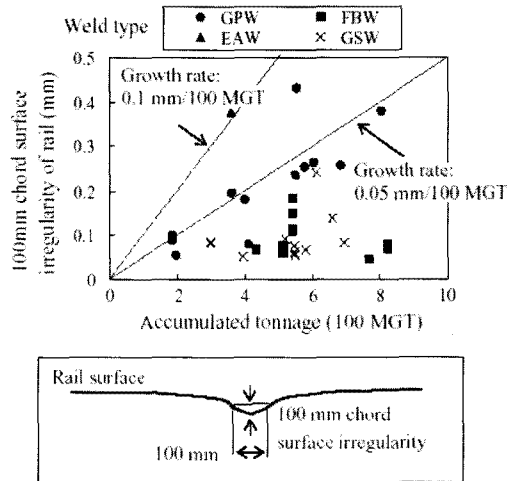


Fig 4. 누적통과톤수와 열영향부(100mm) 표면요철의 상관관계

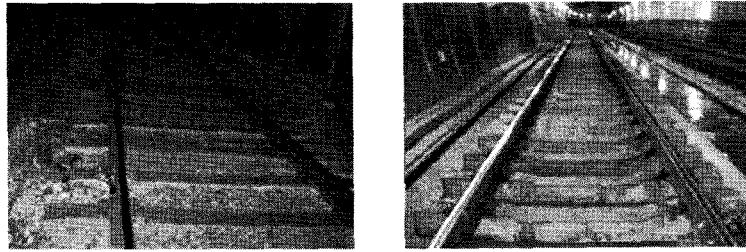
### 3. 현장측정 - 레일용접부 표면요철 측정

#### 3.1 현장측정 개요

레일용접부 표면요철 측정은 서울메트로 운영구간 중 직선부에 해당하는 구간에 대해 측정을 실시하였으며, 자갈궤도구간과 콘크리트궤도구간으로 구분하였다. 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

궤도 구조	레일종별 (kg/m)	호선	구간	누적통과톤수 (억톤)	연마 후 누적통과톤수 (억톤)
자갈	50	1	시청역~종각역	3.71	-
	50	4	사당역~남태령역	3.26	0.41
	50	2	삼성역~선릉역	6.35	0.27
				6.43	0.05
	50	4	창동출고선~창동역	5.23	0.30
				5.43	0.50
50	4	동대문운동장역~충무로역	5.34	1.44	
			6.46	2.56	
콘크리트 (PTT)	60	1	서울역~시청역	3.48	1.55
				3.53	1.60
				3.60	1.67
	60	1	삼성역~선릉역	6.35	0.27



(a) Ballast track (b) Concrete track(PTT)

Fig 5. 현장측정개소 전경

레일표면 요철은 Fig 6과 같은 레일표면요철측정기(RAILPROF)를 이용하여 용접부를 중심으로 총 1m에 대한 요철량을 측정하였다.

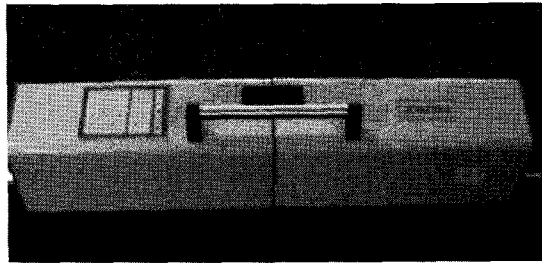
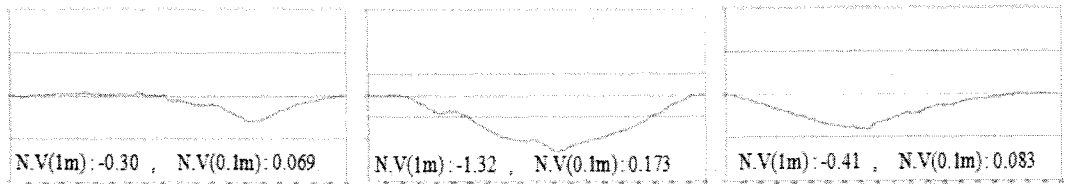


Fig 6. 레일표면 요철측정 전경

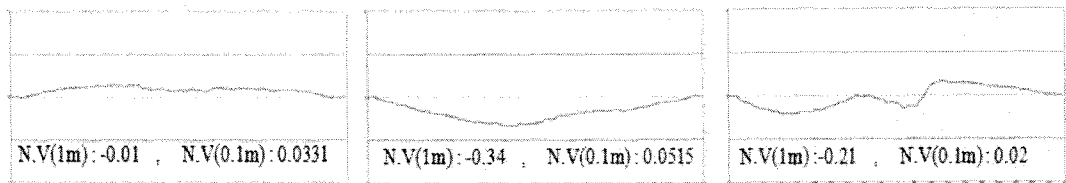
### 3.2 현장측정 결과

표면요철측정은 누적통과톤수에 따른 레일용접부 열영향부(100~150mm)의 요철성장률을 확인하기 위한 목적에서 수행하였다. Fig 7은 자갈래도구간에서 측정된 결과이며, Fig 8은 콘크리트궤도구간에서 측정된 1m 요철측정 결과 예이다. 여기서 N.V(1m)는 측정된 1m에 대해 중심선(0)을 기준으로 최하위점을 나타낸다. 또한, 기존연구결과를 토대로 측정된 1m 요철 중 용접부의 열영향부인 100mm에 대한 요철량을 검토하였으며, 이를 N.V(0.1m)로 나타내었다.



(a) 모재부 (b) 가스압접 (c) 테르밋용접

Fig 7. 자갈래도구간



(a) 모재부 (b) 가스압접 (c) 테르밋용접

Fig 8. 콘크리트궤도구간

#### 4. 궤도구조별 요철성장률 분석

본 연구에서는 서울메트로 운행구간에 대하여 자갈궤도 및 콘크리트궤도 레일용접부에서 발생하는 요철량을 측정하였다. 레일표면요철측정기의 특성상 양끝점을 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 10은 궤도구조별 요철성장률을 비교·분석한 결과이다. 궤도구조별·용접방법별 열영향부의 1억 톤당(100MGT) 요철성장률을 비교한 결과를 Table 5에 정리하였다.

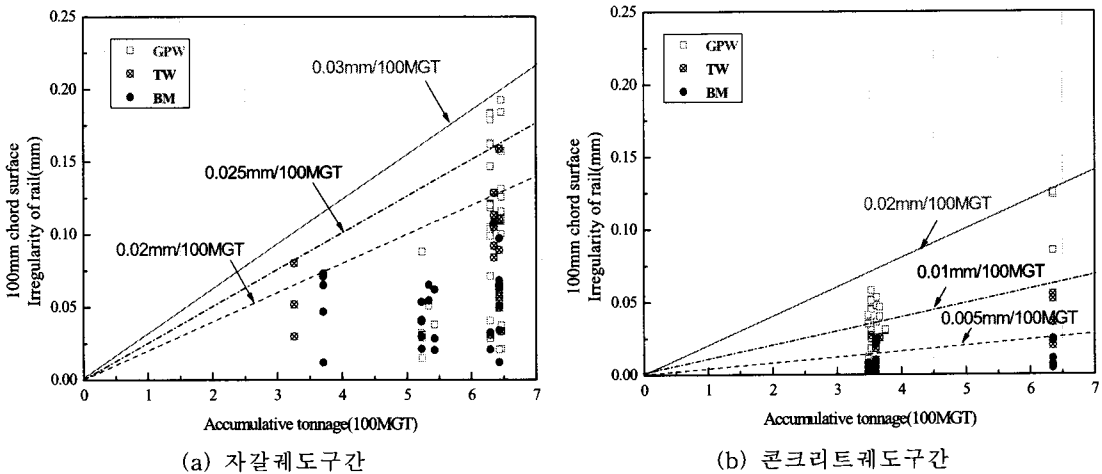


Fig 10. 궤도구조별 요철성장률 비교

Table 5. 궤도구조별·용접방법별 열영향부의 요철성장률 비교

(단위 : mm/100MGT)

구 분	본 연구 (서울메트로-표준궤간)		RTRI (일반궤도-협궤)
	자갈궤도	콘크리트궤도	자갈궤도
모재부(BM)	0.02	0.005	-
가스압접(GPW)	0.03	0.02	0.05
테르밋(TW)	0.025	0.01	0.05

용접방법별 표면요철 성장률을 비교·분석한 결과, 모재부에 비해 용접부의 표면요철 성장률이 크다는 것을 확인하였으며, 테르밋용접부보다 가스압접부 표면요철 성장률이 큰 것으로 분석되었다. 또한, 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도의 표면요철 성장률이 작은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 일반궤도(협궤) 자갈궤도의 가스압접부에서 측정된 일본 RTRI 연구결과와 비교해볼 때 도시궤도(표준궤간) 자갈궤도 및 콘크리트궤도에서 측정된 본 연구의 표면요철 성장률이 약 30% 작은 것으로 분석되었다.

#### 5. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 누적통과톤수에 의한 레일교체기준의 수립배경을 근간으로 국내 철도환경(도시궤도 및 고속궤도)에 적합한 레일교체수명을 제시하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해 1차적으로 레일용접부에 대한 표면요철 성장률을 자갈궤도 및 콘크리트궤도로 구분하여 현장측정을 통해 검토하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.