

# 레일두부 표면요철에 의한 열차주행 시 진동발생에 대한 분석

## Vibration Analysis on Rolling Stock running in Rail Head Surface Irregularity

이상배†·공동 이성욱\*·공동 우병구\*\*

Lee, Sang-Bae, Lee, Sung-Uk and Woo, Byong-Ku

**Key Words** : vibration(진동), rail head surface(레일두부표면), grinding(연마), corrugation(파상마모), flaking(표면박리)

### ABSTRACT

Rolling Stock running are making Rail Head Surface damage(corrugation, flaking, shelling, etc). It's coming out Rail Head Surface Irregularity. It increases Rolling Stock and structure vibration. Therefore, this paper analyzes the influence of Rail Head Surface Irregularity to railway vibration. And, It introduces the management method of Rail Head Surface and proposes its R&D direction in railway-run organization.

### 1. 서 론

#### 기 호 설 명

$x$	레일 방향
$y$	레일 수직 방향 변이
$y_s$	레일표면의 초기변이
$\rho, EI$	레일 선형의 안정, 굴곡의 견고함
$l_s$	침목 간격
$M_s, k_1, k_2$	침목 질량, 패드의 안정성, 자갈 안정성
$z_r$	침목 변이( $r$ )
$w_j$	휠 변이( $j$ )
$M_j$	휠 질량( $j$ )
$N$	휠 수량
$D_j(t)$	휠 접촉력( $j$ )
$P_{0j}$	휠 고정력( $j$ )
$x_{pj}$	첫 휠에서의 휠( $j$ )까지의 거리
$V$	휠 속도
$t$	시간

철도차량과 레일의 접촉에 의해 철도진동이 발생한다. 레일의 선형상태, 각종 물리적 특성, 레일과 차량의 휠 단면상태, 차량의 완충기 성능, 레일의 체결장치 성능, 별도의 진동저감 장치 등의 많은 변수로 인해 진동의 정도가 결정된다. 이런 철도진동은 차량에서는 승객의 승차감에 영향을 미치며, 철도구조물에서는 인근주민의 주거 환경에 영향을 주고 있다. 또한, 진동은 소음 발생의 요인이다.

철도운영기관에서는 각종 현대화된 장비를 사용한 선형관리로 철도진동을 저감시켜 승차감을 개선하고 있다. 재료적인 관점에서는 레일과 휠의 마찰에 의해 발생하는 파상마모(corrugation), 균열(shelling), 표면박리(flaking), 용접부 패임(weld batter) 등 각종 레일표면결함이 기준이상으로 발생하거나 레일이 절단될 경우 교환하는 것으로 보수하여 왔다.

그러나 레일표면 관리가 진동저감 및 경제적인 효과가 있다는 연구 결과가 나오면서, 이에 대한 대책으로 연마가 도입되었다.

본 논문은 레일두부 표면요철과 휠사이의 진동특성 관계에 국한하여 논하려 하며, 기초적인 진동이론과 현재 철도 레일표면 결함 종류 및 레일표면 관리방법을 소개하고 향후 연구 추진방향에 대해 정리하고자 한다.

† 대전시 서구 선사로 139, 한국철도공사  
E-mail : kvictor@hanmail.net  
Tel : (042) 609-3743, Fax : (042) 609-4915

\* 한국철도공사 철도연구개발센터 탐장

\*\* 한국철도공사 철도연구개발센터 차장

## 2. 차량 휠/레일 진동관계

철도차량 휠과 레일의 동특성, 접촉력에 대한 연구<sup>(1)~(6)</sup>가 계속적으로 수행되었으며, 다중 유동 휠에 의한 레일/휠 진동과 관련한 기초연구가 최근 Katsushi에 의해 발표되어<sup>(7)</sup> 여기에 소개하려 한다.

### 2-1. 분석 모델

그림 1은 레일과 휠의 상호관계를 분석하기 위해 설정한 모델이다. 궤도는 탄성, 강성, 탄성의 형태가 연속적으로 된 긴 Euler 빔의 모형으로 되어있다. 레일의 접촉면의 요철이 여기에서 고려되어 진다.

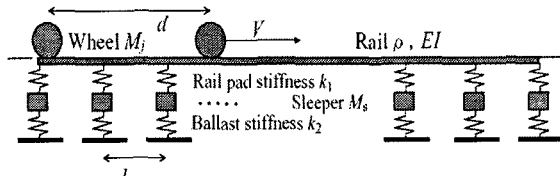


그림 1 휠/레일 동특성 분석 모델

### 2-2. 기본산식

레일과 휠의 수직 운동은 다음과 표시된다.

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \sum_{j=1}^N P_j(t) \delta(x + x_{0j} - Vt) \quad (1)$$

$$M_j \frac{d^2 w_j}{dt^2} = P_{0j} - P_j(t) \quad (2)$$

지지부의 경계상태들은 다음과 같이 표시된다.

$$y(r\Gamma_s^-, t) = y(r\Gamma_s^+, t)$$

$$y'(r\Gamma_s^-, t) = y'(r\Gamma_s^+, t)$$

$$y(r\Gamma_s^-, t) = y(r\Gamma_s^+, t)$$

$$EI \{ y'''(r\Gamma_s^-, t) - y'''(r\Gamma_s^+, t) \} = k_1 \{ y(r\Gamma_s^-, t) - z_r(t) \} \quad (3)$$

$$r = -\infty, \dots, -10, 12, \dots, \infty$$

여기서 (')는 위치별 다른 계수 값을 나타낸다. 등식 1에서 3가지를 구하려면 다음과 같은 조건이 전제되어야 한다.

①연접하는 2개의 침목사이 거리를 지나는 시간동안의 휠 변이와 접촉력은 정기적으로 작동하는 것으로 표시된다.

②레일구간에서는 초기 시간 지연을 가지고 동일한 변이가 계속된다.

최종 주기는 다음과 같이 표시된다.

$$y(x + n\Gamma_s, t + n\Gamma_s/V) = y(x, t) \quad (4)$$

주기 때문에 휠의 변이와 접촉력은 Fourier급수처럼 다음과 같이 전개되어질 수 있다.

$$W_j = \sum_k W_{jk} \exp(ik\omega_h t) \quad (5)$$

$$P_j(t) = \sum_{k \neq 0} P_{jk} \exp(ik\omega_h t) \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \omega_h = 2\pi V/\Gamma_s \quad (7)$$

등식 5, 6을 등식 2에 대입하면 접촉력은 다음과 같이 풀어질 수 있다.

$$P_j(t) = \sum_k Z_{jk} W_{jk} \exp(ik\omega_h t) \quad (8)$$

여기서  $Z_{jk}$ 은 휠의 동적안정을 나타낸다.

### 단일 유동 휠의 반응

사인 형태의 운동력에 대한 반응  $y_k$ 는 다양하게 알려진 다음 등식에 의해 구해진다.

$$\rho \frac{\partial^2 y_k}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y_k}{\partial x^4} = \exp(ik\omega_h t) \delta(x - Vt) \quad (9)$$

등식 9는 Fourier적분방법을 사용하여 운동좌표 안에서 정수 형태로 구해진다<sup>(4)</sup>. 단일 휠의 레일변위  $y(x, t)$ 는 등식 8을 등식1에 대입시켜 다음과 같이 나타낸다.

$$y(x, t) = P_{01} y_0(x, t) + \sum_{k \neq 0} Z_{1k} W_{1k} y_k(x, t) \quad (10)$$

휠이 레일표면에 계속 접촉하고 있다고 가정하면 다음과 같은 저항 상태는 계속될 것이다.

$$y(x, t)|_{x=Vt} + y_s(x)|_{x=Vt} = w_1(t) \quad (11)$$

도수 좌표에서 상태를 설명하기 위해서는 하중부와 요철의 위치가 Fourier급수에 다음과 같이 대입되어 진다.

$$y_0(Vt, t) = \sum_j Y_{0j} \exp(ij\omega_h t)$$

$$y_k(Vt, t) = \sum_j Y_{kj} \exp(ij\omega_h t)$$

$$y_s(Vt, t) = \sum_j Y_{sj} \exp(ij\omega_h t) \quad (12)$$

최종적으로 등식 12가 사용될 경우 등식 11은 무한 차원을 가진 대수학 등식에 의해 변환되어진다.

$$W_{1j} = \sum_{k \neq 0} Z_{1k} Y_{kj} W_{1k} + P_{0j} Y_{0j} + Y_{sj} \quad (13)$$

등식 13에서  $W_{1j}$ 를 제외한 모든 값들이 알려져 있다. 무한 벡터인  $W_{1j}$ 가 절산된 유한 벡터 값에 가까워짐으로 인해 등식 13은 휠 위치의 Fourier 계수를 얻는 것이 수학적으로 쉬워진다. 부가적으로 접촉력과 레일 변위는 등식 8과 등식 10에 의해 얻어진다.

### 다중 유동 휠의 반응

다중 휠에 의해 발생하는 레일반응은 각각의 휠에 의해 발생하는 반응의 합산으로 표시될 수 있다는 선형적인 중복 관계가 기본적으로 이루어질 때 유지한다고 가정되어진다. N개의 유동 휠의 경우로 등식 13은 다음과 같이 변환된다.

$$W_{mj} = \sum_{l=1}^N \left( \sum_{k \neq 0} Z_{lk} Y_{kj}^{lm} W_{lk} + P_{0l} Y_{0j}^{lm} \right) + Y_{smj} \quad (14)$$

여기서  $W_{mj}$ 은  $m$ 의 Fourier계수이다.  $Y_{kj}^m$ 는  $m$ 의 위치에서의  $k$ 번째 불규칙 운동에 의한  $m$  위치에서  $j$ 번째 변위 Fourier계수이며,  $Y_{smj}$ 는  $m$  위치에서  $j$ 번째 레일 표면요철 Fourier계수이다. 앞에서 언급한 방법에서, 만약 순서가 한계 값에 가까워지면 등식 14는 연립방정식이 되며,  $W_{mj}$ 가 실제 얻어진다.

### 2-3. 다중 유동 휠에서의 레일/휠 진동특성

다중 유동 휠에 의한 레일/휠의 진동에 대한 연구에서는 두개의 진동 특성이 고려되었으며, 하나는 레일과 침목의 다양한 안정성과 나머지는 레일두부의 요철이다. 침목간격의 파장이나 이것의 파편에 의한 사인파형 요철이 레일두부에서 존재하는 것으로 가정되어진다. 그 결과 다음과 같이 정리된다.

- ① 유동 휠에 의한 Doppler 효과 때문에 레일진동은 두개의 휠사이에 강한 충격을 준다. 분산된 체결장치로 고정된 궤도의 경우 진동충격은 휠이 지나가는 사이 뿐만 아니라 전후에도 영향을 미친다.
- ② 단일 유동 휠에 의한 레일 진동 범위는 요철의 범위에 비해 다양하지 않지만 두 개의 연속 휠의 경우는 요철의 파장에 비해 증가하거나 줄어든다.
- ③ 차축거리가 요철파장의 요철 반파장에서의 홀수 다중과 부합한다면, 레일진동은 파장 간섭특성에 의해 증대한다.

## 3. 레일두부표면 결함 종류

철도차량 운행에 의한 반복된 하중은 파상마모, 표면 균열, 엔진화손, 표면박리, 용접부 패임, 후로우, 압연피막 등의 레일두부 표면결함을 발생시킨다. 압연결합과 압연피막(신규 레일의 제조 시 발생하며 0.2~0.3mm깊이로 분포되어 퍼일라이트 조직을 제거하기 위해 레일연마 실시)을 제외한 나머지는 운행 중에 발생하며 그 형태별 특성은 다음과 같다.

### 3-1. 파상마모(Corrugation)

레일길이 방향으로 표면에 수 cm에서 수십 cm간격의 파형(물결부늬)으로 마모되는 현상

### 3-2. 표면 균열(Shelling)

차륜의 반복 충격하중으로 레일표면이 경화되며, 조개 껍질표면과 같이 미세한 균열이 레일 표면에 발생하는 현상으로 표면균열이 내부로 성장하는 현상

### 3-3. 엔진화손(Engine Burns)

차륜의 가감속시 차륜과 레일 접촉부에 발생하는 큰 압력에 의하여 쪽이 묻어나 내부에 큰 균열을 발생시키는 현상

### 3-4. 표면박리(Flaking)

레일표면 경화층과 기존 재질과의 경계부가 분리되어 떨어지는 현상

### 3-5. 용접부 패임(Weld Batter)

레일용접에 의한 경도차이로 마모량이 달라 퍼짐이 발생하는 현상

## 4. 레일표면관리를 통한 진동저감

철도진동 발생의 한 원인인 레일표면에 대한 관리는 국내의 경우 과거에는 관리되지 않았지만 연마장비의 도입으로 현재 지하철 및 고속선에서는 시행되고 있으며, 일반철도에서도 시행 예정이다.

### 4-1. 레일표면관리

레일표면은 검측차 및 지상에서 검사하고 레일표면결함을 제거하여 관리하고 있다.

#### 레일표면 검사

레일표면을 관리하기 위해 가장 기본적으로 필요한 사항이 레일표면 검사이다. 국내의 경우 지상측정 및 검측차를 활용하고 있다.

경부고속선의 경우 종합검측차에 레일표면을 화상으로 관리하는 시스템이 있으나, 아직 상용화되지는 않았다. 이외에 외국에서는 차량의 수직가속도와 파상마모의 알고리즘을 분석하여 파상마모의 위치를 추적하는 기법연구 및 레일표면과 휠의 마찰음측정을 통한 위치 추적 기법연구가 수행되고 있다.

지상에 설치하여 레일두부 단면을 측정하는 장비가 일부 사용되고, 향후 검측차 및 지상 검측장비에 대한 연구가 계속적으로 시행되어 국산화를 통한 기술향상이 필요하다.

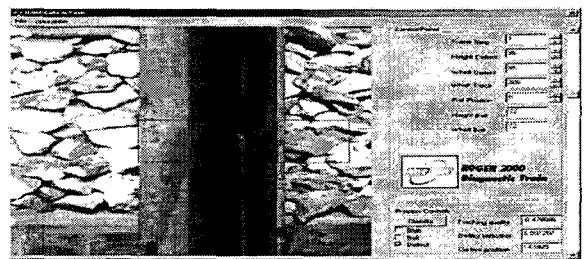


그림 2 종합검측차 레일표면 관리시스템

#### 레일표면 결함 제거

레일표면관리는 연마차를 이용하고 있으며, 최초에는 레일형상의 유지가 주목적인 유지보수연마가 시행되었으나 유지보수 기준이전에 보수를 시행하는 예방보수가 도입시행되어 레일의 금속량을 최소로 하고 최대한 빠르게 연마하는 것을 주목적으로 하고 있다. 장비의 동작원리에 따라 회전 슷돌형(Grinding), 왕복 슷돌형(Sliding), 삭정형(Milling)으로 분류할 수 있으며, 그 특징은 다음 표와 같다.

표 1 연마차 종류별 특징

구분	종류	Grinding	Sliding	Milling
연마형식		연마석을 회전하여 레일단면 연마	4각형 블록 모양의 연마석이 장착된 플레임을 레일 면 앞뒤로 이동하며 연마	밀링인서트와 장작된 기구가 레일 길 방향으로 회전하며 레일두부 절삭
규격분류		8석, 16석, 24석, 32석, 48석	Unit 1개, 2개, 5개	밀링tool 2개+ 연마휠
제조업체		SPENO LORAM	PLASSER	LINSINGER
국내보유		부산지하철 서울메트로 삼표E&C	서울도시철도공사 대구지하철공사	
주행속도		100km/h	100km/h	100km/h

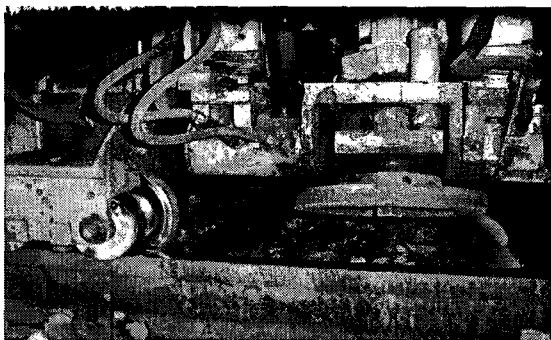


그림 3 레일표면 회전숫돌형 연마차

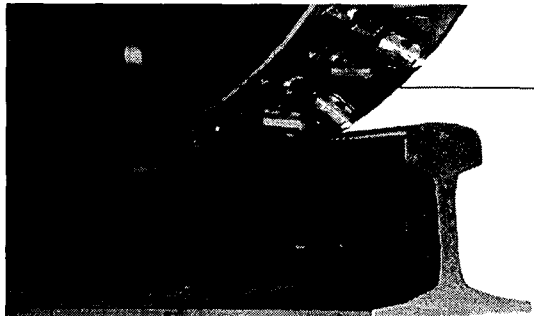


그림 4 레일표면 삭정형 연마차

국내 예방연마의 주기 기준은 다음 표와 같다.

표 2 예방연마 주기 기준(국내)

구분	년간통과 톤수	연마주기		비고		
		기간	누적톤과톤수			
서울지하철	역구내	50	0.5년(연2회)	25		
			교량부	0.5년(연2회)	25	
	곡선부		R=300m미만	0.25년(연4회)	12.5	
			R=300m이상~ R=500m미만	0.5년(연2회)	25	
			R=500m이상~ 직선부	1년(연1회)	50	
인천	R=500m미만 곡선	30	1년(연1회)	25		
	R=500m이상~ 직선		2년(연0.5회)	50		

#### 4-2. 레일표면 관리 효과 분석

레일표면 관리는 진동이외에 다음과 같은 다양한 효과가 있다고 분석된다.

#### 진동저감

국내에서 연마 시행전후의 진동을 측정 결과 8dB이상의 저감 효과가 있었다. 그 결과는 다음과 같다.

- 분당선 수내-정자간 레일연마 전후진동 측정(2003.8) 결과 다음 표와 같은 진동저감 확인

표 3 분당선 연마 전후 진동측정 결과

구분	연마전	연마후		저감효과			
		열차바닥	열차벽체	열차바닥	열차벽체		
진동 가속도 레벨측정 (dB)	열차속도	열차바닥	열차벽체	열차바닥	열차벽체		
	40km/h	92.6	81.7	84.1	73.2	-8.5	-8.5
	60km/h	95.5	82.8	87.3	75.2	-8.2	-7.6

- 인천지하철에서는 레일연마 시행 후 진동측정(2003.12) 결과 9dB(98dB→89dB)의 진동저감 확인

#### 기타<sup>(9)</sup>

- 레일절손 및 균열 발생예방 : 접촉에 의한 충격 완화로 누적피로에 의한 레일 균열 감소  
[0.43건/km,년 → 0.16건/km,년(0.17건/km,년 감소)]
- 레일수명 연장 : 접촉의 원활한 유지로 레일수명 연장으로 교환주기가 50%정도로 연장
- 차륜수명 연장 : 차륜수명 400%연장
- 차량연료 소모량 감소 : 20%절감
- 차량소음 저감 : 4dB 차량실내소음 저감
- 궤도변형 억제 : 1.3배
- 차량 흔들림 개선 : 좌우 상하 흔들림 10%정도 개선
- 유지보수비용절감 : 15~30%절감(선형작업 저감)

#### 5. 결 론

레일표면 요철은 차량의 진동에 직접적인 영향을 미치며 그 변화의 폭이 다양하게 나타난다. 레일표면 요철을 잘 관리함으로써 소음 및 진동 저감을 통한 철도환경 개선과 레일 및 차량 유지보수 비용절감을 통한 경제적인 이익을 가져온다.

현재 시행하는 레일표면관리를 보다 효과적으로 시행하기 위해서는 다음과 같은 운영방법의 개선이 필요하다.

- 결함이 발생하기 전 연마를 시행할 수 있도록 하는 예방연마의 확대가 필요하다.
- 장기간의 정보 수집을 통하여 각 선구별로 적합한 연마주기 산출하여 기준을 마련하는 것이 필요하다.