

# 레일응력을 고려한 레일패드강성 결정

## Evaluation of Rail pad Stiffness Considering Stress of Rail

박 대근\* · 김재학\*\* · 손기준\*\*\* · 김한중\*\*\*\*  
Park Dae Geun · Kim Jae Hak · Son Gi Jun · Kim Han Jong

### ABSTRACT

The track and rail surface geometry is of prime importance on the requirement for track dynamic stiffness, particularly for the speed of 350 km/h, for which both the requirement for fatigue and tensile strength limits require a lower stiffness than 100 kN/mm, which is near the value for ballasted track. However, the track quality has been considered as being the same for 350 km/h as that for 300 km/h, and based on ballasted track, and the track geometry may be kept in better condition with a slab track (probably more similar to the medium quality track geometry of ballasted track). In conclusion, under the condition that the track geometry quality provided by the concrete slab system is fairly good, and that the required maintenance is applied to the rail surface, there would be no safety risk if the fastening system point stiffness reaches 160 kN/mm for 300 km/h operation, and 110 N/mm at 350 km/h.

### 1. 서론

레일체결장치는 궤도구조의 필수적인 구성요소이고 궤도의 특성에 중대한 영향을 미친다. 이러한 영향은 자갈궤도 보다 콘크리트 궤도의 경우가 더 중대하며 그 이유는 콘크리트 궤도에서는 자갈 도상이 분담하는 몇몇 기계적 특성을 체결장치가 전적으로 책임져야 하기 때문이다.

유럽 CEN규격이나 한국철도시설공단(KR)규격등 비교적 상당히 최근에 제정된 성능 규격에 따르면 체결장치와 관련하여 제안된 특정한 궤도상에서 특정한 열차가 통과하는 경우에 충족되어야 하는 주요한 기술적인 특성이 명시되어 있다. 규정에서 언급된 요구조건만이 일반적인 궤도구조에 필요한 모든 조건은 아니다. 몇몇 기술적 특성은 체결장치의 생산자 혹은 수요자가 임의로 결정할 수 있도록 남겨져 있다.

체결시스템의 기계적 시험을 통해 추론한 기술적 특성을 상기 기준, 시방규정 및 일반적인 특성과 비교하고 운행시 궤도구조거동에 미치는 영향을 분석하였다.

### 2. 동적차륜하중 결정

#### 2.1. 궤도구조의 기계적 작용

궤도 구조는 '탄성 노반상 빔 (레일)의 변형'으로 보편적이며 간단하게 기술될 수 있다.

\*정회원 · 한국철도시설공단 부장, 고려대학교 건축사회환경공학과 · 박사과정 · E-mail:ktx2136@mate.com -발표자  
\*\*정회원 · 한국철도시설공사 전문  
\*\*\*정회원 · 한국철도시설공단 과장  
\*\*\*\*정회원 · 한국철도시설공사 부장

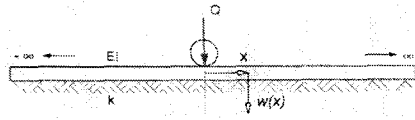


그림1 탄성 기초 위의 무한 보

● 차륜에 의하여 하중이 가하여진 레일과 관련한 정적인 공식을 도출하도록 하자, 레일에 가해지는 수직의 힘을  $Q$  그리고 수평의 힘을  $Y$  라고 하면

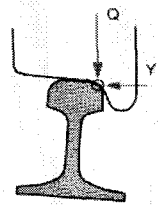


그림2 1점 접촉

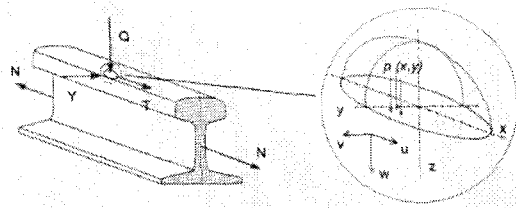


그림3 레일 힘과 변위

차륜-레일간의 힘에 대하여 수직 방향(상하 방향,  $z$  방향) 힘(윤중)을  $Q$ , 횡 방향(좌우 방향,  $y$  방향) 힘(횡력)을  $Y$ , 그리고 종 방향(길이 방향,  $x$  방향) 힘(축력)을  $T$ 로 나타낸다. 내부의 종 방향 온도 힘이 존재할 수 있으며 이 힘은 기호  $N$ 으로 나타낸다. 주어진  $xyz$ -좌표 시스템에서 레일 또는 궤도의 변위는 일반적으로  $u, v$  및  $w$ 로 나타낸다.

우리는 레일 빔에 대한 분석적 공식을 다음 4 단계의 자유도(degree of freedom)를 고려하여 도출한다.

- $z$  수직 이동,  $w$  수직변위
- $y$  수평 이동,  $v$  수평변위
- $x$  종방향 이동,  $u$  종방향 변위
- $\theta$  레일 단면상의 종 방향 축 주위의 비틀림 회전
- $\psi$  수직 축 주위의 회전
- $\varphi$  수평 축 주위의 회전

$\psi, \varphi$ 의 자유도(degree of freedom)는 영향이 적다. 하지만 하중이 없는 경우 즉 장대레일(CWR)의 안정성을 연구하는 것과 같은 경우에 있어서는 적어도  $\psi$ 가 고려된다. 그 이유는 체결장치의 비틀림 저항성이 궤도의 비틀림 저항에 있어서 중요한 부분이기 때문이다.

수직 힘에 대한 공식은

$$EI_v \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + K_v w = 0 \quad (1)$$

수평 힘에 대한 공식은

$$EI_t \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + K_t (v - h \cdot \theta) = 0 \quad (2)$$

비틀림과 왜곡 모멘트(moments in torsion and warping)에 대한 공식은

$$EJ_m \frac{\partial^4 \theta}{\partial x^4} - G \cdot K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_3 \cdot \theta - K_t h (v - h \cdot \theta) = 0 \quad (3)$$

종방향 하중에 대한 공식은

$$ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - K_1 u = 0 \quad (4)$$

여기서

- 재질 특성
  - $E, G$  : 레일 철강의 탄성계수
  - $\rho$  : 밀도 (부피 질량volumic mass)
- 기하학적 특성: 단면 및 레일 단면의 관성모멘트
  - $I_v, I_t$  : 수직 및 수평모멘트
  - $K$  : 종방향 축 (x) 주위의 비틀림
  - $J_m$  : 왜곡 관성 모멘트(warping inertia moment)
  - $S$  : 레일 단면적
  - $h$  : 레일저부의 비틀림 중심부 (torsion centre)의 높이
- 레일 beam이 연결된 외부 매개체의 특성(주로 탄성분야)
  - $K_v, K_t$  : 궤도 상 레일에서 보여지는 수직, 횡 방향 탄성 계수
  - $K_l$  : 종방향 탄성계수
  - $K_3$  : 레일(x축)의 비틀림 탄성

● 체결 시스템의 가장 중요한 특성들은 아래와 같다.

▶수직강성 : 자갈도상에서 탄성 요소들은 레일패드, 체결시스템의 구성요소, 자갈, 노반으로 구성되어 있다. 그리고 슬래브궤도의 체결시스템의 경우 거의 모든 탄성 요소들은 체결장치에 1 또는 2단계로 포함되어 있다. 결과적으로 체결시스템의 탄성 스프링상에서 수직 스프링정수는 동적차륜하중 (Dynamic load forces)을 수직방향으로 통제한다. 따라서 수직 스프링정수는 열차의 기계적 특성과 함께 레일의 응력, 체결시스템의 응력, 관련 요소들의 응력 (침목 또는 슬래브)을 결정한다.

▶체결시스템의 회전 (x-축의 비틀림) 강성 : 체결시스템의 레일 회전을 결정하며 횡방향 바퀴 하중하에서 탄성 클립의 수직 변위 (주로 굽곡선 부위에서 관측)를 결정한다. 본 탄성 클립의 수직 변위는 재질상 허용 가능한 응력 수준으로 제한되어야 한다. 또한 횡방향 바퀴 하중 하에서의 레일 회전이 초과할 경우 바퀴와 레일두부간 접촉점의 변위가 게이지 사이드 쪽으로 발생할 수 있다. 이는 차륜등가답면과 보기(Boggy)의 불안정한 움직임의 위험을 경미하게 증가시킬 수 있다.

▶체결시스템의 횡방향 강성 : 레일의 횡변위는 레일이 대부분 인서트 (침목 또는 슬라브축으로의 횡하중 전달)에 의해 차단되므로 보통 작게 발생한다. 그러나 동 탄성은 바퀴 접촉점의 변화에 영향을 줄 수 있다.

▶종방향 강성 : 본 특성은 2가지 관점으로 나눌 수 있다. 종방향 정지 마찰 또는 정지 하중 하에서 종방향 스프링정수는 레일의 최대 탄성 응력 및 변위를 통제한다. 레일의 최대 탄성과 변위는 종방향 응력 발생시 궤도구조내 레일의 영구변위의 위험성과 함께 변위가 플라스틱 단계로 되기 때문에 제한되어야 한다. 하중이 적용되지 않은 궤도에 다양한 종방향 응력 적용 시 동일한 영구적 레일 변위의 위험이 발생하여 응력변화(저하)를 일으키고 장래레일상에서 버클링(Buckling) 위험을 증가 시킬 수 있다.

▶수직축방향 주위 회전 강성(모멘트 저항) : 열차 하중을 고려시 레일변형은 탄성 영역내에서 잔존해야 하기 때문에 본 특성은 한정적인 움직임을 갖는다. 그러나 하중이 적용되지 않은 궤도의

경우 체결시스템의 레일좌면의 마찰력은 장대레일 안정성에 기여하는데 이는 궤도 구조물의 플라스틱 변형이 유사정현과 모양을 만들기 위해 레일을 수직축 기준으로 회전 (체결시스템 내에서) 시켜야 하기 때문이다.

● 이러한 특성들은 직·간접적으로 현 체결시스템 시방 기준에 의해 시험 측정된다.

▶탄성 요소들의 수직 강성은 반복피로시험내 하중 및 하중각도를 한정·적용하는 동적 스프링정수를 포함하여 측정된다.

▶레일의 종방향 축 주위의 회전 강성은 직접적으로 측정되지 않는다. 그러나 수직·횡 하중 적용하의 체결시스템 특성을 나타내는 반복하중시험을 진행하는 동안 레일롤(Rail roll)은 레일두부의 횡변위값과 레일좌면의 회전 측정값에 의해 제어된다. 본 시험은 또한 하중 적용시 횡방향 이전이 레일두부의 횡변위 증가에 영향을 주기 때문에 횡방향 스프링정수 특성을 제어하기 위해 사용된다.

▶종방향 강성은 특성상 장대레일의 안정성 조건 산출을 위해서만 사용되므로 직접적으로는 측정되지 않는다. 그러나 주요 시험은 체결시스템이 탄성 영역(종방향 레일 저항력)에서 잔존하는 지점 아래에서의 최대 종방향력을 측정하기 위해 실시된다.

▶수직축 주위 회전 강성은 직접적으로 측정되지 않는다. 이는 회전 스프링정수가 장대레일 안정성에만 영향을 미치기 때문이다. 그러나 마찰력이 발생할수록 동 회전의 저항 모멘트는 패드 상부의 클립에 의해 적용된 수직 하중에 의해 결정된다. 체결력의 측정과 최소값 제한은 본 특성상 요구조건에 대해 수용 가능한 값으로 고려된다.

## 2.2 궤도구조물의 응력제한

### 가) 레일의 응력 제한

레일에서 주요 위험요소는 레일에서 발생하는 응력이다 (바퀴와 레일의 접촉부위 주변). 수용 가능한 레일두부의 응력 평가는 Hertzian 이론을 기반으로 하며, 레일두부의 전단응력을 고려한다.

차륜과 레일간의 접촉 하중은 그림4에 나타난 것처럼 레일 두부에 전단 응력 분포를 일으킨다. 이것은 일정한 깊이에서 최대치를 가지며, 이것이 레일 두부에 피로 파괴를 발생시킨다. 이 접촉 문제는 높은 윤하중 또는 비교적 작은 차륜 반경의 경우에는 중요한 문제로 된다. Hertz 이론에 따르면, 차륜과 레일 두부와 같은 두 개의 곡선을 가진 탄성체간의 접촉면은 일반적으로 타원 모양이며 접촉 응력 분포는 반-타원체 모양이다. Eisenmann은 다음의 고려에 기초한 차륜-레일의 접촉 문제에 관한 간이 계산 방법을 제시하였다.

측정에 의하면, 60과 120 cm간의 차륜 직경에서 간이 2-차원 계산이 충분한 것으로 판명되었다. 접촉 문제로서 취급하는 수식에서 곡선 반경은 차륜의 곡선 반경  $r$ 을 제외하고는 모두 무한대로 가정한다. 그때는 접촉면이 직사각형으로 되며 접촉 응력의 분포는 그림5에 나타난 것처럼 반-타원의 원통형으로 된다.

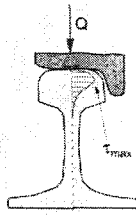


그림4 레일 두부의 전단 응력 분포

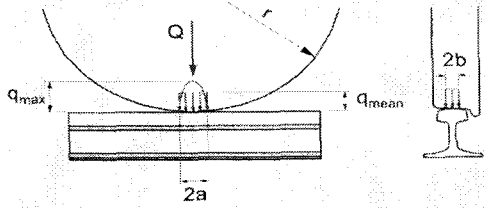


그림5 Eisenmann에 따른 차륜과 레일간에 가정된 접촉 분포

윤하중  $Q$ 가  $2b$ 의 폭으로 접촉면에 걸쳐 고르게 분포한다면, 평균 접촉 응력은 다음 식으로 도출할 수 있다.

$$q_{mean} = \sqrt{\frac{\pi E}{64(1-\nu^2)} \frac{Q}{rb}} \quad (5)$$

여기서,

$Q$  = 유효 윤하중

$r$  = 차륜 반경

$2b$  = 차륜/레일 접촉의 폭

$E$  = 레일 강의 탄성 계수

$\nu$  = 포아슨 비

$E = 210,000 \text{ N/mm}^2$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $b = 6 \text{ mm}$ 에 대하여 실용적인 공식은 다음과 같이 구한다.

$$q_{mean} = 1,374 \sqrt{\frac{Q}{r}} \quad (6)$$

여기서,  $Q$  [kN],  $r$  [mm] 및  $q_{mean}$  [ $\text{N/mm}^2$ ]

반복윤하중에 의한 허용 유효 윤하중은 다음과 같이 된다.

$$Q_{dyn}^{2\sigma} = 4,9 \cdot 10^{-7} r \sigma_t^2 \quad (7)$$

$Q$  = 바퀴 하중 (kN),  $r$  = 바퀴 반경 (mm),  $\sigma_t$  = 레일철강의 인장강도 ( $\text{N/mm}^2$ )

인장강도  $900 \text{ N/mm}^2$ 와  $450\text{mm}$ 의 바퀴 반경 (일반적으로 마모된 상태, 신규 바퀴 직경  $920\text{mm}$ ) 피로 영향의 최대 동적 바퀴 하중

$$Q_{dyn}^{2\sigma} = 178.6 \text{ kN}$$

드물게 생기는 유효 윤하중의 허용치는 다음과 같이 된다.

$$Q_{dyn}^{max} = 8,3 \cdot 10^{-7} r \sigma_t^2 \quad (8)$$

$Q$  = 차륜 하중 (kN),  $r$  = 차륜 반경 (mm),  $\sigma_t$  = 레일철강의 인장강도 ( $\text{N/mm}^2$ ).

최대 수용 가능한 동적 차륜 하중

$$Q_{dyn}^{max} = 302.5 \text{ kN}$$

나) 침목, 분기기, 슬래브 구조물에서의 응력 제한

궤도 구조물의 콘크리트 관련 구성요소들의 저항력에 대해 유럽 표준 (CEN EN 13230)은

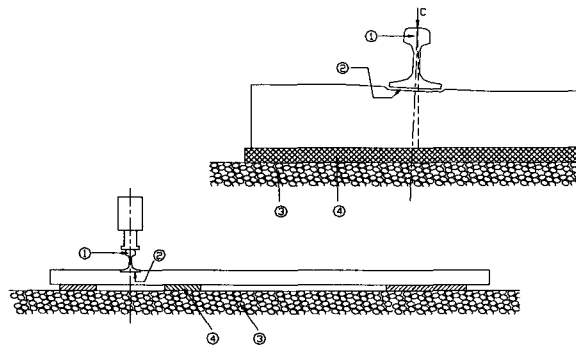
콘크리트 침목과 분기기의 표준을 마련하였다. 그러나 콘크리트 슬래브 궤도 설계에 대한 표준은 부재한 상태이며, 이는 제작사의 지식 소유와 기술로 남아있다.

그러나 슬래브판에 묻힌 구성요소 (RHEDA 설계)를 포함한 콘크리트 슬래브 설계에 대해 높은 바퀴 하중 하에서의 크랙 (Crack) 저항은 명백히 콘크리트 침목보다 높은 것이 사실이다. 이는 충격 하중 하에서 변형 발생 시 낭비되는 에너지가 침목보다 콘크리트가 더 많이 분산되기 때문이다.

그러므로 분기기와 슬래브의 제한 조건을 콘크리트 침목의 수용 가능 값으로부터 도출할 수 있다. 고속철도 조건하에서 가장 중요한 기준은 레일좌면 하부의 크랙 저항이다. 이는 침목 또는 분기기 인증 시험 진행 시 (하중 증가에서의 반복하중시험) 제어된다. 본 시험 방법은 1994에 제정된 KR시방 기준 (콘크리트 침목)에 명시되어 있다. 본 시험 절차에는 2개의 수직 하중 제한 값이 결정된다.

### (1) 시험 조건

이 시험은 발주자가 지정한 실험실에서 실시한다. 이 시험은 제작 후에 적어도 28 일, 최고 42 일 이내에 그림과 같이 배치에 따라 침목 2 개의 각 단부에 실시하는 반복 하중 하의 휨 시험 (bending test)이다.



$P$  : 250 회/분의 동 하중, ① UIC60 레일, ② 일반 레일패드, ③ 고정 지지대 (rigid support)

④ 시험 하에서 다음의 탄성을 가진 탄성매트 : 50 kN 하중 하에서 초기 변위가 3 mm이며 50 kN과 최대하중  $P$  kN간의 동 하중하에서 0.5~1 mm의 변위이어야 한다. 반복하중은 최저 50 kN에서 최고  $P$  kN 사이에서 작용하며 각 하중단계에서 5,000 회 반복한다.

그림6 레일 직하부 동 하중 시험의 배치

### (2) 시험 절차

아래 그림과 같이 연속한 하중단계에서는 충분한 관찰시간과 균열 측정을 통해 각 단계별로 나누어 시험한다. 하중의 각 단계 종료 시점에서는 그 하중을 유지한 상태로 시험단면을 관찰하여 균열 발생여부를 확인하며, 그 폭과 전개 상태를 기록한 후에 하중을 제거하고 균열의 잔류 폭을 측정하여 기록한다(균열 폭의 측정은 소요 정밀도를 갖는 기기를 사용한다). 이렇게 하여 다음 값을 결정한다.

- 1 단계 :  $R_1$ 은 하중 하에서 0.01 mm 이하의 최초 균열이 발생하는 단계
- 2 단계 :  $R_2$ 는 하중을 제거하였을 때 원상으로 폐합되지 않는 균열이 최소한 1 개 이상인 단계(하중을 제거할 때에 균열 폭이 0.05 mm를 초과하는 균열)

- 3 단계 :  $R_3$ 은 하중제거 시에 0.5 mm 이상인 개소가 1 개소 이상으로 되는 단계(균열 폭이 1 mm 이상으로 될 때까지 시험을 계속한다)

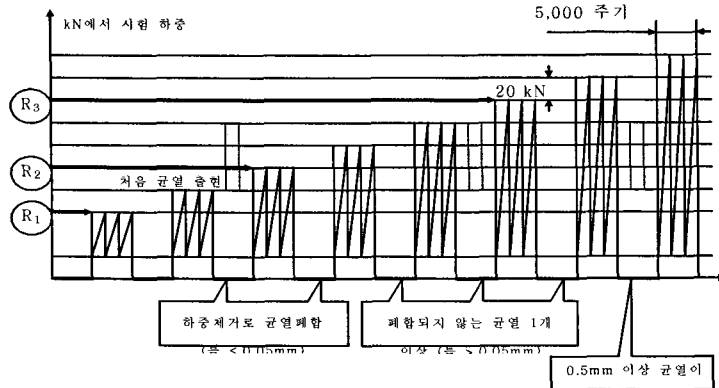


그림7 레일 직하부 동 하중 시험의 하중단계

- 레일 직하부 단면의 강도

-  $R_2$ 와  $R_3$  단계는 각각 200 kN과 320 kN의 값을 가져야 한다.

하중  $R_2$ 와  $R_3$ 는 동적 차륜하중 하에서의 동적 침묵 상호작용을 나타내며, 이는  $R_2$ 의 피로한계와  $R_3$ 의 불안정한 파손 제한과 동등한 것으로 고려된다.

SNCF 경험을 토대로 볼때 열차속도 200~300km/h에서의 침묵 저항은 최대 동적 바퀴 하중이 다음과 같이 제한될 때 수용 가능하다고 고려된다.

$$Q_{dyn}^{2g} < 1.1 R_2, \quad Q_{dyn}^{max} < 1.7 R_3 \quad (9)$$

1994년 KHRC 시방서의 요구조건은  $R_2 \geq 200$  kN and  $R_3 \geq 320$  kN로 나타난다. 이는 SNCF에서 도입된 것으로 향후 속도 350km/h의 고속철도를 위해 설정된 값이다. 그러므로 침묵, 분기기, 슬래브 구조물에 대한 동적 바퀴 하중 제한은 다음과 같다.

$$Q_{dyn}^{2g} < 220 \text{ kN}, \quad Q_{dyn}^{max} < 544 \text{ kN} \quad (10)$$

상기 제한 값은 레일에 대한 제한 값보다 매우 높으나 침묵 또는 슬래브판의 크랙 발견이 유지보수 절차상에서 어려운 점을 감안할 때 본 제안 값은 적절하다고 판단된다. 실적으로 동적 바퀴 하중에 의해 손상된 콘크리트 침묵 또는 슬래브판은 항상 손상된 레일 표면과 관련된다.

### 3. 레일체결장치의 성능시험

#### 3.1 기계적 성능시험

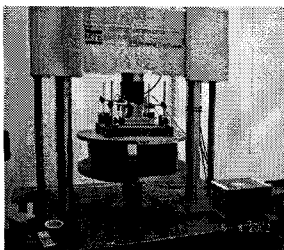


그림8 레일패드 정적수직스프링계수 시험장치

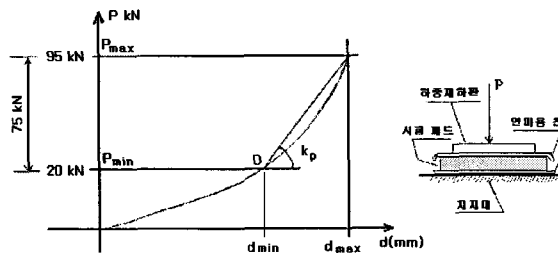


그림9 하중재하곡선 및 시험편위치

레일체결장치는 한국철도시설공단(KR) 규격에 따라 다음과 같이 두 곳의 실험실에서 시험되었다.  
 -2005년 5월 한국기계연구원(KIMM)에서 시행되었으며 번호가 N° 2005183832-3인 5월 31일자 시험인증서와 이에 첨부된 번호 N° BS765-1180.M의 보고서  
 -2006년 6월, SNCF의 궤도 연구부의 시험센터에서 시행되었으며 번호가 N° L2430-2006-02 인 2006년 7월 7일 자 보고서  
 이 두 보고서 모두 체결장치의 기계적 성능을 판단하는 데에 충분한 대부분의 정보를 제공하고 있다.

**가. 수직 동적 차륜 하중 하에서의 성능**

레일체결장치가 부설된 궤도에서 발생할 수 있는 동적차륜 하중을 측정하기 위해서는 실 운행조건인 동적 탄성계수 예상수치를 결정해야 한다.

**▶ 패드 정적 탄성계수**

이 시험 항목은 한국철도시설공단(KR) 시험 규정에 따라 시험한 결과는 다음과 같다.

표 1

|        | 측정범위(kN) | 패드 수직 탄성 계수 (kN/mm) |         |
|--------|----------|---------------------|---------|
|        |          | SNCF 테스트            | 요구 값    |
| 피로시험 전 | 20 ~ 95  | 40.5                | 20 ~ 50 |
| 피로시험 후 | 20 ~ 95  | 43.4 (+ 7.2%)       | ± 25 %  |

**▶ 패드 동적 탄성계수**

이 시험 항목은 피로시험의 하중과 기울임 각도를 정하는 데에만 필요하므로 요구되는 성능 값은 없다.

표 2

|        | 측정범위(kN) | 패드 동적 수직 스프링 계수 (kN/mm) |
|--------|----------|-------------------------|
|        |          | SNCF 테스트                |
| 피로시험 전 | 20 ~ 95  | 54.3                    |

**▶ 레일체결장치의 수직 정적 탄성계수**

이 시험 항목의 측정은 KR규격에는 요구되지 않고 있다. SNCF 시험에서는 패드 스프링 정수를 측정했을 때와 같은 수직하중으로 피로 시험을 시행하여 피로 시험 전 그리고 피로시험 각 단계 별로 시스템의 탄성치를 측정하였다.

표 3

|                   | 측정범위(kN)         | 시스템 정적 수직 탄성계수 (kN/mm) |        |
|-------------------|------------------|------------------------|--------|
|                   |                  | SNCF 테스트               |        |
| 피로시험 전            | 20 - 95          | 50.4                   |        |
| 피로시험 후            | 20 - 95          | 51.7                   |        |
| 경사 피로 시험 중간의 측정결과 | Number of cycles |                        |        |
|                   | 10               | 0.5 - 58.42            | 52.182 |
|                   | 50,000           | 0.5 - 58.42            | 53.631 |
|                   | 500,000          | 0.5 - 58.42            | 56.235 |
|                   | 1,000,000        | 0.5 - 58.42            | 60.335 |
|                   | 1,500,000        | 0.5 - 58.42            | 56.786 |
|                   | 2,000,000        | 0.5 - 58.42            | 57.348 |
|                   | 2,500,000        | 0.5 - 58.42            | 57.922 |
|                   | 3,000,000        | 0.5 - 58.42            | 60.970 |



|  |      |             |        |
|--|------|-------------|--------|
|  | 평균값  | 0.5 - 58.42 | 56.801 |
|  | 표준편차 |             | 3.237  |

▶ 레일체결장치의 수직 동적 탄성계수

이 시험 항목의 측정은 패드 수직 동적 탄성 계수를 기초로 한 대응 값이 측정되기 때문에 KR규격에는 요구되지 않고 있다. 하지만 SNCF 시험에서는 아래 표 4와 같이 측정하였다.

표 4

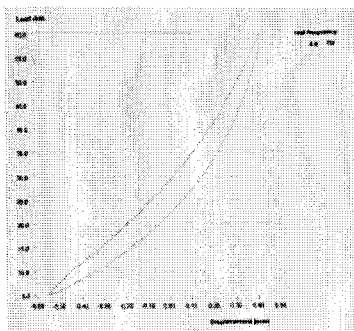
|        | 측정범위(kN)            | 시스템 수직 동적 탄성계수(kN/mm) |  |
|--------|---------------------|-----------------------|--|
|        |                     | SNCF 테스트              |  |
| 피로시험 전 | 5 - 60<br>(25 - 80) | 56.6                  |  |

3.2 궤도에서 실제 운행 조건하의 동적 탄성계수의 예상

상기의 모든 정적 그리고 동적 탄성계수의 측정치들은 체결장치의 성능 평가를 위한 일반적인 수치들이다. 이 수치들의 측정은 궤도상에서 예상되는 일반적인 침목의 동적 반응과 비교하면 매우 높은 수준의 하중조건 하에서 이루어진다. 체결장치에 실제로 전달되는 힘은 동적 차륜하중의 절반 이하이다.

실제 궤도 조건하에서의 동적 차륜 하중을 평가하기 위해서는 이러한 조건에 대응하는 동적 탄성계수 예상치를 결정하는 것이 필요하다. 이 평가는 SNCF의 동적 탄성계수 측정치를 기초로 행하여 졌고 SNCF 시험 보고서의 그래프에서 예상치를 계산했다.

다음 공식에 의하여 SNCF시험결과(시스템 동적시험 그래프)의 곡선의 회귀를 구하였다. 하중 P가 36 에서 67 kN 이면



$$P_{\max} : 59.9kN \quad d_{\max} : 0.420mm \quad K_{dyn} = 56.6kN/mm$$

$$P_{\min} : 5.0kN \quad d_{\min} : -0.549mm$$

$$P = a \cdot d^2 + b \cdot d + c \quad a = 79.26965$$

$$(d, P) = A, B, C \quad \therefore b = 46.14762$$

$$c = 29.644$$

그림10 체결시스템의 수직동적스프링정수 그래프

$$P = 72.538 d^2 + 41.913 d + 29.644 \quad (11)$$

여기에서 d 는 그래프에서 보여진 바와 같이 범위(최소 하중 5 kN에서 -0.549 mm)이고, 상관계수는 0.9999 이다. 체결장치의 탄성계수는 다음과 같이 추정된다.

$$K_{rs} = \frac{P-5}{d+0.549} \quad (12)$$

표준편차 2 에서 동적 차륜하중의 변동은 궤도의 탄성계수의 함수이며 거의 선형이다. 변동은 상기에 기술된 공식에 의하여 측정될 수 있다. 예를 들어 중간 품질의 궤도에서 속도가 300 km/h 이고 캔트(cant deficiency)가 150 mm 일 때,

$$Q_{dyn}^{2\sigma} = 0.1244k_{dyn} + 130.16 \quad (13)$$

여기에서  $k_{dyn}$ 은 체결장치 전체의 동적 탄성계수임.

그리고 Zimmermann 공식에 의한 차륜 하중 Q에 대한 체결장치의 반응 P의 예상 비율은 다음과 같다.

$$\frac{P}{Q} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\lambda^3 K_R}{EI}} \quad (14)$$

위와 같은 4개의 공식을 조합하면 다른 궤도 조건하에서의 d, P,  $Q_{dyn}$ , P/Q 값을 계산할 수 있다. 이 모든 계산에 대하여 궤도 특성과 궤도 배치(Geometry) 품질은 다음 표5와 같다.

표 5

| 궤도 특성   |        |                 |                  |     |
|---|--------|-----------------|------------------|-----|
| 최대 속도 (km/h)  | 300    |                 |                  | 350 |
| 최대 캔트 (cant deficiency) (mm)<br>(유럽 TSI 기준)                       | 100    | 130<br>(예외적인 값) | 150<br>(콘크리트 궤도) | 80  |
| 레일  | UIC 60 |                 |                  |     |
| 체결구 간격 (m)  | 0.65   |                 |                  |     |
| 궤도 배치 (geometry)  | 좋은 품질  | 중간 품질           | 나쁜 품질            |     |
| 종방향 평탄성의 표준편차<br>(3-30 m 주기) mm 단위                                | 0.6    | 0.9             | 1.2              |     |
| 레일 표면의 거친 정도의 품질<br>상관계수 (0.3-3 m 주기) 레일 표면의<br>최고점과 최저점의 차이 mm단위 | 0.15   | 0.175           | 0.25             |     |
| 레일 표면의 결함 각도 최대치<br>(milli-radians)                               | 13     | 15              | 18               |     |

운행 열차는 아래와 같이 TGV를 기초로 하여 고속열차로 고려하였다.

표 6

| 차량 특성                     |      |
|---------------------------|------|
| 축하중 (최대치) (kN)            | 170  |
| 차륜당 Unsprung mass (톤)     | 1    |
| 차륜당 Suspended mass (tons) | 7.5  |
| 완충장치(suspension) Roll 계수  | 0.25 |
| 차륜 직경 (새제품) mm            | 920  |

위와 같은 궤도와 차량 특성 하에서 궤도/차량간의 상호 작용에 대한 계산이 가능하다.

표 7

| 체결장치의 동적 탄성계수와 동적 차륜 하중   |        |         |         |         |
|---------------------------|--------|---------|---------|---------|
| 궤도배치<br>(Geometry)        | 좋은     | 중간      | 중간      | 나쁨      |
| 속도 (km/h)                 | 300    | 300     | 300     | 300     |
| 캔트 Cant<br>Deficiency(mm) | 100    | 130     | 150     | 150     |
| 궤도변위(mm)                  | 0.8880 | 0.94908 | 0.95989 | 1.02059 |
| $P_{dyn}$ (kN)            | 52.191 | 58.023  | 59.112  | 65.542  |
| $Q_{dyn}^{\sigma}$ (kN)   | 120.12 | 131.891 | 134.06  | 146.77  |
| P/Q                       | 0.434  | 0.440   | 0.441   | 0.447   |
| 동적 스프링 계수<br>예상치(kN/mm)   | 50.678 | 55.868  | 56.373  | 59.321  |

상기 값들은 SNCF 시험에서 측정된 값과 대체로 일치한다.

체결장치의 변위가 동적 차륜하중 하에서 0.9 에서 1.1 mm 이며 이는 피로시험에서의 레일 하부의 수직변위( $D_{RF}$ )와 대응한다는 점을 주목해야 한다. 이것은 표준편차가 2일 때 예상 동적 차륜하중으로 인한 영향을 파악하는데 있어서 피로시험이 적합한 방법임을 보여준다.

동적 차륜하중의 결정을 위해서 고려된 각각의 상황 하에서의 동적 탄성계수 예상치가 계산되었다.

|                  |                                       | 체결장치에 대한 예상 동적 하중과 대응 변위 |              |       |              |       |       |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------|-------|--------------|-------|-------|
|                  |                                       | 300                      |              |       |              | 350   |       |
| 궤도 배치 (geometry) | 속도 (km/h)<br>켄트(Cant deficiency) (mm) | 0                        | 100          | 130   | 150          | 0     | 80    |
| 좋은               | $P_{dyn}$ (kN)                        | 46.93                    | 52.19        | 53.79 | 54.87        | 48.93 | 53.18 |
|                  | Deflection (mm)                       | 0.827                    | 0.888        | 0.905 | 0.917        | 0.851 | 0.899 |
| 보통               | $P_{dyn}$ (kN)                        | 51.05                    | 56.40        | 58.02 | <u>59.11</u> | 53.80 | 58.12 |
|                  | Deflection (mm)                       | 0.875                    | 0.933        | 0.949 | 0.960        | 0.905 | 0.950 |
| 나쁨               | $P_{dyn}$ (kN)                        | 57.24                    | <u>62.76</u> | 64.42 | 65.54        | 61.15 | 65.62 |
|                  | Deflection (mm)                       | 0.941                    | 0.995        | 1.010 | 1.021        | 0.980 | 1.021 |

#### 나) 동적 차륜 하중

예상된 동적 차륜하중의 결과는 아래 표 8과 같다.

표 8

|                  |                                      | 동적 차량 하중 예상치(kN) |       |       |              |       |              |
|------------------|--------------------------------------|------------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|
|                  |                                      | 300              |       |       |              | 350   |              |
| 궤도 배치 (geometry) | 속도 (km/h)<br>켄트 cant deficiency (mm) | 0                | 100   | 130   | 150          | 0     | 80           |
| 좋은               | $Q_{dyn}^{2\sigma}$                  | 109.3            | 120.1 | 123.4 | 125.6        | 113.4 | 122.1        |
|                  | $Q_{dyn}^{max}$                      | 200.6            | 213.2 | 217.1 | 219.6        | 220.7 | 231.2        |
| 중간               | $Q_{dyn}^{2\sigma}$                  | 117.8            | 128.6 | 131.9 | 134.1        | 123.4 | 132.1        |
|                  | $Q_{dyn}^{max}$                      | 220.2            | 233.2 | 237.1 | 239.7        | 244.2 | 254.9        |
| 나쁨               | $Q_{dyn}^{2\sigma}$                  | 130.3            | 141.3 | 144.6 | <u>146.8</u> | 138.1 | <u>146.9</u> |
|                  | $Q_{dyn}^{max}$                      | 250.6            | 264.0 | 268.0 | <u>270.7</u> | 280.5 | <u>291.6</u> |

| 차륜 하중 한계치 (kN)                  |       |                   |
|---------------------------------|-------|-------------------|
|                                 | 레일    | 슬래브 상판(Slab deck) |
| $Q_{dyn}^{2\sigma}$ (피로fatigue) | 178.6 | 220               |
| $Q_{dyn}^{max}$ (파단failure)     | 302.5 | 544               |

표8에 있는 모든 동적 차륜 하중 값들과 이에 대응하는 한계치들은 시속 300과 350km 모두에 대한 것이다. 예상할 수 있듯이 최악의 경우는 궤도의 배치품질(track geometry) 이 나쁘고

캔트(cant deficiency) 값이 가장 높은 경우와 대응한다.

동적 차륜 하중과 관련한 레일과 콘크리트 슬래브 상판(Concrete slab deck)의 피로도와 파단 저항과 관련하여 레일 체결장치는 TGV방식의 고속 차량이 시속 350km로 운행하는 데에 적합하다.

**다) 레일지지스프링 강성**

피로에 대한 동적 윤중 한계치를 2개의 표준편차  $Q_{dyn}^{3\sigma}$  (즉 궤도상에서 초과되는 동적 윤중이 단지 2.25%인 경우)와 비교하였다. 이 동적 윤중 값은 통상적으로 체결시스템과 콘크리트 침목에 대한 피로 시험 하중을 결정할 때 사용된다. 이러한 종류의 시험에서는 최대 사인파 하중(Sinusoidal force)을 가진 반복 하중이 궤도상의 실제하중분포보다 더 심하기 때문이다. 반대로 레일에 작용하는 충격  $Q_{dyn}^{max}$  하에서 동적 윤중은 통계적인 수치로 추정되지 않지만 주어진 레일 표면 각도에 대한 궤도 강도에 작용되는 스프링 하 질량의 실제적인 반응에 근거한다. 궤도의 강도 한계치를 결정하기 위하여 2개의 표준편차로 계산된 추정치는 매우 낮으며, 500kN/mm이상의 매우 높은 강도 값을 야기할 것이다. 이는 궤도상에서 이 값을 초과할 가능성이 2.25%로 너무 높기 때문이다. 3개의 표준편차에서 동적 윤중 추정치는 실제 궤도조건에서 더 실제적인데 이는 운행시 초과가능성이 0.135%에 불과하기 때문이다.

캔트부족량이 85mm(300km/h), 65mm(350km/h)인 경우 동적 윤중  $Q_{dyn}^{3\sigma}$  과  $Q_{dyn}^{max}$  이 레일의 피로 및 인장강도 한계치에 도달하는 경우, 동적강도를 제한하는 변수를 구하면 다음과 같다..

| 레일 피로와 인장강도 한계치가 주어진 조건에서 동적 강도를 제한하는 변수 (kN/mm)   |         |             |     |     |
|--|---------|-------------|-----|-----|
|  |         | 속도 (km/h)   | 300 | 350 |
|  |         | 캔트 부족량 (mm) | 85  | 65  |
| 레일 피로 한계<br>$Q_{dyn}^{3\sigma} = 178.6 \text{ kN}$ | 저 품질 궤도 | 165         | 91  |     |
|  | 중 품질 궤도 | 582         | 370 |     |
| 레일 인장강도 한계<br>$Q_{dyn}^{max} = 302.5 \text{ kN}$   | 저 품질 궤도 | 102         | 70  |     |
|  | 중 품질 궤도 | 167         | 113 |     |

**3. 결 론**

궤도와 레일표면 형상은 궤도의 동적 강도 요구조건에서 가장 중요하며 특히 350km/h 속도에서 더욱 중요하다. 이 경우 피로한계와 인장강도한계 요구조건은 100kN/mm 미만의 강도를 요구한다(이 값은 자갈궤도와 근접). 그러나 궤도품질은 300km/h와 350km/h가 동등한 것으로 고려되고 자갈궤도와 비교하여 슬래브 궤도는 궤도상태가 더 양호하다.(자갈궤도의 중품질 궤도 상태와 유사). 레일의 인장강도 한계치의 경우에 최악의 조건에 도달하며 이는 주로 레일 표면 결함에 좌우된다. 이러한 레일 결함은 자갈궤도(레일 용접부 형상)와 슬래브 궤도가 거의 동일하다. 하지만 이런 결함은 국부적인 결함이며 궤도열화는 특정 지점으로 제한된다.

결론적으로 본 조건하에서 콘크리트 슬래브 시스템이 제공하는 궤도상태 품질은 비교적 양호하며 레일 표면의 유지보수가 요구된다. 레일지지강성이 300km/h->160kN/mm, 350km/h->

110N/mm에 도달하여도 안전에 대한 위험성은 없을 것이다.

상기 값들은 TSI기준(콘크리트궤도 150 kN/mm, 자갈궤도 600 kN/mm)에도 만족한다.

본 내용은 경부고속철도 2단계 구간(대구~경주~부산)의 궤도실시설계시 국내외 자료와 SNCF 및 KIMM시험결과 및 Systra 검토보고서입니다.

#### 참고문헌

1. KHRC “체결구 성능시방서(2002. 4. 19)” 2554/APA/KR/164-02/FL
2. KIMM(한국기계기술연구원)이 발행한 No. BS1765-1180에 대한 시험결과 보고서(2005.5.)
3. KHRC “체결구 성능시방서(2002. 4. 19)” 2554/APA/KR/164-02/FL에 따른 Pandrol 시스템 No. 12408의 인증시험에 관한 SNCF 보고서(2006년 7월 7일자)
4. SYSTRA의 보고서(2006년 8월 21일자) “고속철도 슬래브궤도용 체결시스템 분석”  
무도상궤도 RHEDA 2000에서 UM 71 궤도회로의 효율성 (무도상궤도 Rheda 2000에서 UM 궤도회로의 효율성 조사, Pfleiderer AG와 Ansaldo Signal - CSEE Transport)
5. UIC Infrastructure Commission 2002년 3월의 "무도상궤도"의 적용성연구
6. KHRC의 2002년 4월 19일자 "체결장치 성능 시방서" 2554/APA/KR/164-02/FL 참조
7. RFI(이탈리아 FS 그룹) “무도상궤도의 이용에 대한 지침서”, 2006년 1월 30일
8. ITALCERTIFER(Italian Institute of railway research an certification)의  
체결시스템 Pandrol Fastclip FC 1507에 관한 시험보고서
9. 유럽기준 EN 13146-4-2002  
레일체결시스템의 장기 성능을 평가하는 실험실 시험방법에 대한 규정
10. 유럽기준 EN 13481-5-2002  
무도상궤도에 적용되는 체결시스템의 성능시방규정