

실측을 통한 궤도설계 파라메타의 검증

Experimental Verification of Design Parameters of Track

이지하* 황성호* 나성훈* 김정환** 서사범***
Lee,Jee-Ha Hwang,Sung-Ho Na,Sung-Hoon Kim,Jung-Hwan Suh,Sa-Bum

ABSTRACT

When the track designer analyze the track structure uses many known & unknown parameters. Unknown parameters, equivalent rail support spring factor, unit rail support spring factor, track damping coefficient, should be assumed. Known parameters are section properties (area, section factor, etc.), material properties(modulus of elasticity, mass, etc) and track conditions(wheel load, loading conditions, gauge, etc.).

In the assumption of track design parameters, some parameters can be overestimated or under estimated. The purpose of this study is to verify design parameters used in track design, in the way of experimental measurements. Data of displacements, banding stresses, loads, accelerations are measurable at track site. From these data, unknown parameters are derived.

Compare these assumed and derived parameters, estimate the entire track stability.

1. 서론

궤도의 설계시 구조검토과정을 보면 우선 등가레일지지스프링계수, 궤도진동감쇠계수 등을 가정한 다음 궤도진동감쇠계수를 이용하여 열차속도충격력의 영향을 고려한 동적확대계수(Dynamic Magnification Factor)를 산정하고, 동적확대계수를 이용하여 윤중변동분의 표준편차를 산정한 다음 정적 축중과 조합하여 최고속도로 주행할 때 열차의 동적 하중을 구한다.

궤도에서 발생하는 응력과 변위들은 차륜별 하중이 중첩되어 발생하므로, 동적 하중을 차륜별 환산하중으로 환산한 다음, 궤도에서 발생 가능한 최대응력과 레일압력, 최대레일변위 등을 계산하여 허용한도의 초과여부를 확인한다.

여기서 설계시 가정된 궤도의 파라메타로는 등가레일지지스프링계수와 이로부터 구한 단위 길이당의 레일스프링계수, 궤도진동감쇠계수 등이 있고, 기지(既知)의 값으로는 레일의 단면값(크기, 단면계수 등)과 레일의 물성값(탄성계수, 질량 등), 윤중 등의 하중조건, 궤간을 비롯한 궤도의 조건 등이 있다.

열차가 운행되는 중에 궤도의 실측을 통하여 측정 가능한 물리량은 크게 변위, 응력, 하중, 가속도로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 궤도구조 설계시 사용된 재료의 물성치들 이외에 가정된 값들을 실제 측정시 얻은 값으로 구조계산을 하여, 가정한 설계파라메타들의 적절성 여부와 과대 혹은 과소 설정된 값들을 검증하고, 궤도전체의 안전성 여부를 판단할 수 있는 방법에 대하여 논의하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 궤도유지관리연구그룹 연구원, 정회원

** 유신코퍼레이션 철도구조부 과장, 비회원

*** 한국철도시설공단 궤도처장, 정회원

2. 본론

궤도설계시 이론적 바탕이 되는 궤도의 해석법은 궤도를 연속 탄성지지 모델로 이상화하여 해석한다. 일정한 단면을 갖는 연속보가 탄성적 기초상에 지지되어 있는 경우, 그 보(레일)위에 열차가 주행하면 변위(처짐)가 발생하며, 각 단면에서 받은 반력은 연속적으로 분포하고 그 크기는 각 처짐에 비례하여 발생하는 것으로 간주한다.

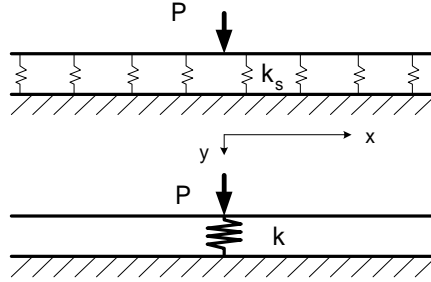


그림 1. 궤도 탄성지지 모델

연속 탄성지지모델에서 레일의 스프링 계수는 설계시 단자유도계 모델의 등가 레일스프링계수로 간주하여 가정되었다. 등가 레일스프링계수(k)는 경부고속철도 설계시 47,000 kg/cm으로 가정하여 설계검토 된 바 있다.

일반적으로 등가 레일스프링계수(k)와 단위길이당 레일스프링계수(k_s)와는 다음의 관계가 있다.

$$k^4 = 64EI k_s^3 \quad (1)$$

연속 탄성지지 모델에서 등가 레일스프링계수(k)와 레일스프링계수(k_s)는 위의 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다.

<그림 1>에서 미분평형 방정식을 세우면,

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (2)$$

$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{k_s}{EI} y = 0 \quad (3)$$

이 되고, $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_s}{4EI}}$ 라고 놓고 미분방정식의 해(레일의 수직변위)를 구하면 다음과 같다.

$$y = \frac{P}{4\sqrt{64EI \cdot k_s^3}} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (4)$$

(4)식에서 윤중의 작용점(x=0)에서 등가 레일스프링계수(k)를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{P}{y} = 4\sqrt{64EI \cdot k_s^3} \quad (5)$$

$\frac{P}{y} = k$ 이라고 놓으면,

$$k_s = \sqrt[3]{\frac{k^4}{64EI}} \quad (6)$$

이 된다.

여기서, k_s 를 레일스프링계수라고 하고 레일에 작용하는 윤중과 레일의 수직변위를 구하면 실제 궤도의 등가 레일스프링계수라고 할 수 있다.

<그림 2>는 실제 계측값을 궤도설계시 반영된 값과의 검토 방법을 정리한 그림이다. 실측값으로는 윤중과 레일변위가 있고 검증가능한 설계 가정변수로는 등가레일지지스프링계수, 레일스프링계수, 궤도진동 감쇠계수, 동적하중 등이 실측한 데이터들과 비교 검증이 가능하다.

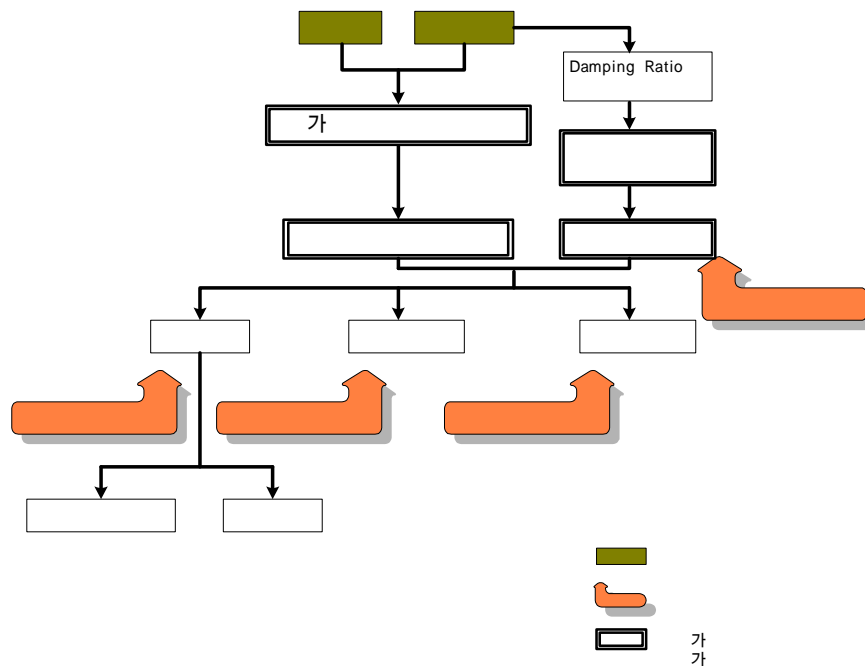


그림 2. 궤도설계변수 검토과정

<그림 2>에서 보는 바와 같이 먼저 윤중과 레일변위의 실측을 통해 등가레일지지스프링계수를 구하여 설계시 가정한 등가레일지지스프링계수와 비교하고 레일변위로부터 감쇠계수를 실측하여 동적하중을 구하고 실측된 윤중과 이중의 검증과정을 거친다. 이렇게 평가된 레일스프링계수와 윤중으로 레일압력, 레일 최대 침하량, 최대 휨응력 등을 계산하여 실측한 값들과 다시 비교함으로써 평가된 레일스프링계수의 신뢰성을 검증한다.

<표 1>은 궤도 설계변수들의 검증방법과 계산과정을 정리한 표이다.

<표 1>을 보면, 고속철도 구조계산서에서 등가레일지지스프링계수를 47,000 kgf/cm 으로 가정하고 있음을 알 수 있다. 가정한 등가 레일지지 스프링 계수에 의한 레일의 발생 최대응력은 1,157 kgf/cm²이다. 실제 궤도에서 레일응력을 측정한 결과 최고속도 주행시 약 450kgf/cm² ~ 600 kgf/cm²이 측정된 바 있다. 실측한 레일 휨응력과 레일변위는 실측한 윤중과 레일변위로부터 평가된 레일스프링계수로부터 구한 휨응력과 레일변위와 거의 일치하는 값을 보이고 있다. <그림 3>은 실측한 윤중과 레일변위으로써 궤도의 여러 가지 설계결과들을 계산한 프로그램의 결과이다. 동일한 열차의 축에서 발생한 윤중, 레일변위, 레일휨응력을 입력하면, 레일스프링계

수를 비롯한 궤도 파라미터 들이 계산되고, 다시 실측값과 비교하여 결과를 나타낸다.

표 1. 궤도설계변수와 실측값 비교

가	()		
가	k	47,000kg/cm	210,000 kg/cm
		$\frac{47,000}{210,000}$	$=210,000\text{kg/cm}$
ks		$k_s = \sqrt[3]{\frac{k^4}{64EI}}$ $= \sqrt[3]{\frac{47000^4}{64 \times 2.1E6 \times 3055}}$ $= 228 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$	$k_s = \sqrt[3]{\frac{k^4}{64EI}}$ $= \sqrt[3]{\frac{210000^4}{64 \times 2.1E6 \times 3055}}$ $= 1679 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$
()		$y_0 = \frac{Q_d}{4\sqrt[4]{64 EI k_s^3}} y_0$ $= \frac{15,408}{4\sqrt[4]{64 \times 6.416E9 \times 228^3}}$ $= 0.328\text{cm} = 3.28\text{mm}$	$y_0 = \frac{Q_d}{4\sqrt[4]{64 EI k_s^3}} y_0$ $= \frac{10,500}{4\sqrt[4]{64 \times 6.416E9 \times 1679^3}}$ $= 0.05\text{cm} = 0.5\text{mm}$
		$M_0 = Q_m \times \sqrt[4]{\frac{EI}{64 \times k_s}}$ $= 15,072 \times \sqrt[4]{\frac{6.416E9}{64 \times 228}}$ $= 388,113 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}$	$M_0 = Q_m \times \sqrt[4]{\frac{EI}{64 \times k_s}}$ $= 10500 \times \sqrt[4]{\frac{6.416E9}{64 \times 1679}}$ $= 164,133 \text{ kg}_f \cdot \text{cm}$
		$\sigma = \frac{M}{z} = \frac{388,113}{335.5}$ $= 1,157 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$	$\sigma = \frac{M}{z} = \frac{164,133}{335.5}$ $= 489 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$
			450 kg _f /cm ²

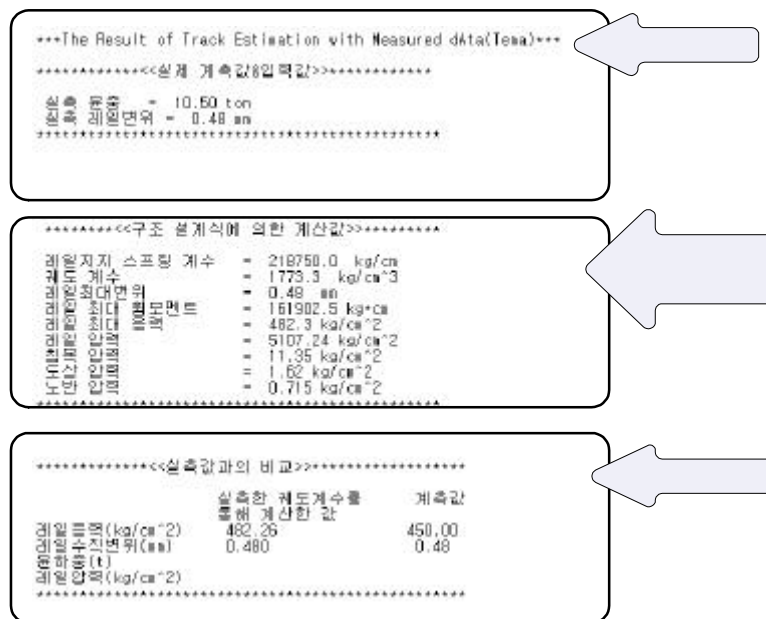


그림 3. 운중, 변위 측정에 의한 궤도지수의 계산 프로그램 결과

계산결과를 실측한 레일응력과 비교하면 다음 <그림 4>와 같다. 가정한 레일지지 스프링 계수에 의한 레일의 최대 발생응력은 $1,157 \text{ kg/cm}^2$ 으로 계산하고 있으나, 실제 계측한 레일의 최대 응력은 $300 \sim 600 \text{ kg/cm}^2$ 이 측정되었다. 실측한 윤중과 레일변위로부터 평가된 레일스프링계수로부터 계산한 레일휨응력은 $420 \sim 680 \text{ kg/cm}^2$ 이 계산되었다.

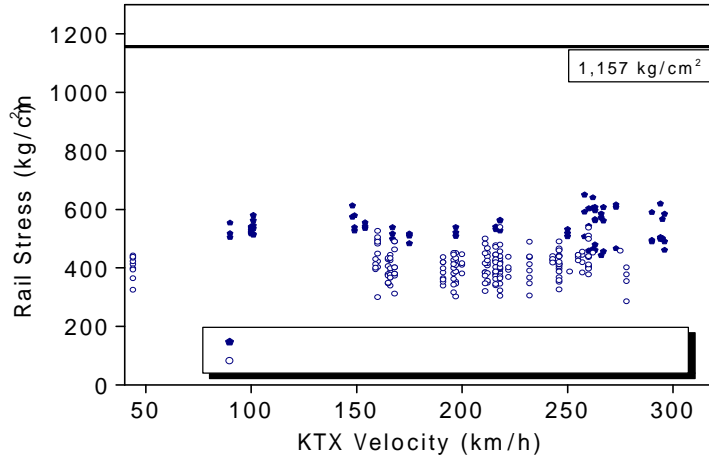


그림 4. 레일휨응력 비교

가정한 레일스프링계수에 의해 발생 가능한 최대 레일휨응력과 실측한 레일휨응력은 550 kg/cm^2 이상 차이를 보이고 있으며, 이런 차이는 설계시 가정된 레일스프링계수가 보수적으로 즉 안전측으로 가정되었음에 기인한 것으로 판단된다.

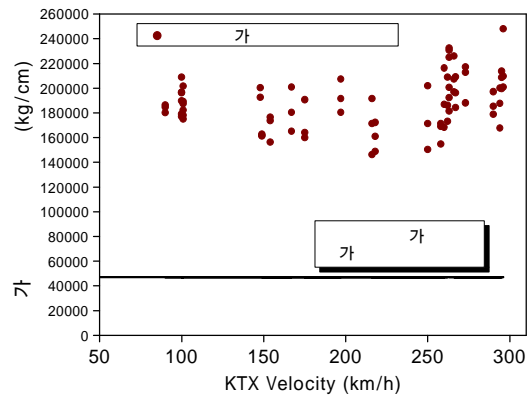


그림 5. 등가 레일스프링계수 비교

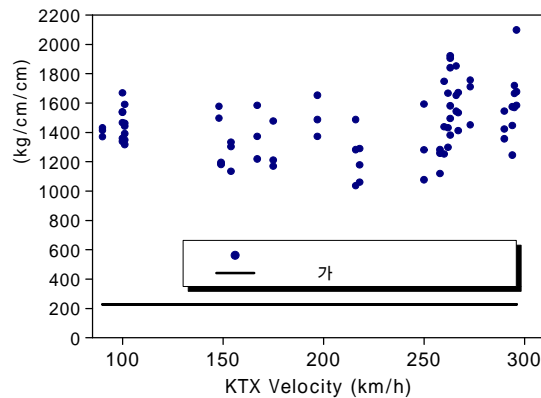


그림 6. 레일스프링계수 비교

<그림 5>과 <그림 6>은 각각 실측으로 평가된 등가레일지지스프링계수와 레일스프링계수를 설계시 가정값과 비교하여 속도에 따라 함께 도시한 그림이다. 그래프에서도 알 수 있듯이 설계 검토시 가정된 레일의 강성보다 약 400%이상 크게 레일의 강성이 실측되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

궤도계측의 목적은 주로 궤도의 성능을 파악하기 위한 것이다. 그러나, 본 논문에서는 경부고속철도의 부설 초기에 계측된 윤중과 레일변위 등의 값을 이용하여, 궤도구조 설계시 가정된 값들 즉, 등가레일지지스프링계수, 레일스프링계수 등을 산출하여 비교하였다. 이를 통하여 가정한 설계파라메타들의 적절성 여부와 과대 혹은 과소 설정된 값들을 검증하고, 궤도전체의 안전성 여부를 판단할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

윤중과 레일변위의 실측을 통해 등가레일지지스프링계수를 구하여 설계시 가정한 등가레일지지스프링계수와 비교하고 레일변위로부터 감쇠계수를 실측하여 동적하중을 구하고 실측된 윤중과 이중의 검증과정을 거친다. 이렇게 평가된 레일스프링계수와 윤중으로 레일압력, 레일 최대 침하량, 최대 레일 휨응력 등을 계산하여 실측한 값들과 다시 비교함으로써 평가된 레일스프링계수의 신뢰성을 검증하였다.

궤도의 계측은 일부구간에서만 수행되며, 여건상 충분한 데이터를 얻을 수 없는 제한이 있다. 따라서, 계측 대상궤도의 상태를 단언할 수는 없겠지만 그 신뢰성의 경향은 파악할 수 있을 것이다.

향후 보다 많은 실측데이터를 획득하여 다각적인 궤도의 해석방법을 통한 분석시스템을 구성하게 된다면 궤도의 신뢰성을 보다 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이지하 외, “ 시운전시 궤도노반시설물의 성능검증” , 한국철도기술연구원, 2003.12
2. “東海道 新幹線の 保線”, 日本鐵道施設協會, 1998. 12
3. 右藤吉彦, “線路工學”, 1987