

# 궤도시스템 분석과 설계 방법의 고찰



서 사 범 (주)서현기술단 부사장  
공학박사 · 철도기술사  
(suh7484@hanmail.net)

## 1 머리말

자갈궤도는 주로 상부구조와 하부구조의 두 부분으로 구성된다. 강(鋼)레일, 여러 유형의 레일 체결장치, 목침목·철침목 또는 콘크리트침목 및 도상자갈, 보조도상과 노반재료는 궤도건설에 사용되는 주요 구성요소이다. 궤도구조 거동의 해석은 역사적으로 어려움에 직면하여 왔다. 이것은 한편으로 궤도 구성요소들의 각각 다른 기계적 성질과 다른 한편으로 궤도 구성요소들 간의 복잡한 상호작용에 기인한다.

다양한 궤도 요소구성형태(configurations)가 설계되고 건설될 수 있다. 이것은 궤도구조가 갖은 변화를 받게 만든다. 그 결과로서, 이론적 및 실험적 조사연구에 의거하여 때로는 상반되기도 하는 다수의 설계기준들이 철도당국들과 전문가들에게서 제안되어왔다. 설계기준의 그러한 다양성은 일반적으로 궤도설계 절차를 어려운 과업으로 만든다. 이것은 현용의 궤도분석과 설계방법에 대해 철저한 재검토가 필요함을 강조한다.

본고는 궤도의 분석과 설계에서 일반적으로 사용되는 광범위한 철도관련 설계코드와 최근의 기술연구 의견에 초점을 맞춘다. 또한, 현재의 궤도 분석과 설계에서 고려할 필요가 있는 개선에 관한 고찰결과를 제시하고 논의한다.

## 2 궤도시스템의 분석과 설계에 관한 기존방법의 개관

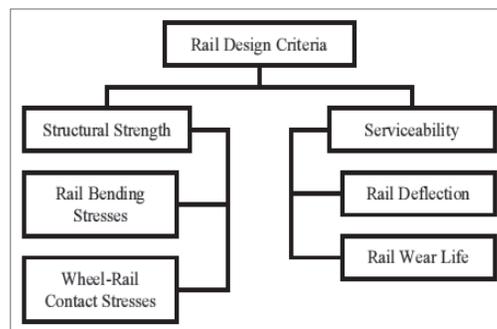
궤도시스템은 일반적으로 통과열차에게 원활하고 안전한 주행면을 제공하도록 설계된다. 또한 궤도시스템은 주로 열차통과와 온도변화의 결과로서 궤도구조에 가해지는 하중을 지탱하는 역할을 한다.

궤도시스템에 사용되는 구조적 구성요소들의 다양성으로 인해 통상적으로 각각의 구성요소에 대하여 단일 구조적 구성단위로서 분석과 설계절차를 수행하는 것이 보다 실용적이다. 그 결과로서, 그러한 접근법은 적합한 경계조건과 하중전달패턴의 정의를 통하여 궤도 구성요소들 간의 상호작용을 포함한다. 더욱이, 궤도의 동적응답 특성이 합리적 설계방법의 기반을 형성할 만큼 충분히 잘 해석되지 않고 있기 때문에 현재의 실행은 관측된 동적응답을 등가 정적응답에 관련시키는 것에 의존한다. 이것은 다양한 하중계수(load factors)를 이용하여 수행된다. 이 방법은 궤도시스템의 분석과 설계에서 널리 용인되고 있다.

궤도는 차륜의 집중하중이 시공기면에 전달될 때 구성요소들의 강도가 초과되지 않도록 보장하여야 하며 하중지지 접근법(load bearing approach)을 이용하여 설계된다. 이 목적을 확보하기 위하여 몇 가지 중요한 기준이 정의된다. 이들의 기준은 주로 레일과 레일체결장치 응력과 처짐, 침목강도, 침목-도상 접촉영역에 분포된 압력 및 궤도 아래 입상(粒狀) 지지층에 분포된 응력 등에 대한 제한을 포함한다.

### 3 레일의 분석과 설계 방법

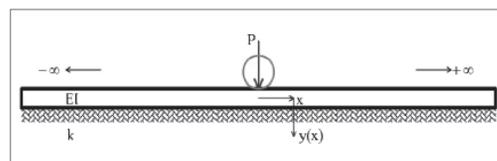
레일은 운하중들을 받는 가장 중요한 궤도 구성요소로서 수직, 횡 및 축 방향으로 가해진 이들의 하중을 단단히 지탱하고 하부 지지체로 전달할 수 있어야 한다. 레일은 차량과 직접 접촉하는 궤도 구성요소이다. 그러므로 특히 안전의 관점에서 궤도시스템의 적절한 기능을 보장하는 것이 대단히 필요하다.



[그림 1] 권고된 레일설계기준

중래의 레일 분석과 설계절차에서 사용되는 중요한 기준을 [그림 1]에 나타낸다. 이 그림에 도해된 것처럼 레일설계기준은 주로 두 가지 범주로 나누어진다. 구조적 강도기준은 차륜-레일 접촉 응력과 레일 휨응력을 포함한다. 구조적 강도기준들을 충족시키기 위해서는 적절한 구조적 및 운영적 성능을 보장하도록 특정한 레일단면에 대한 내구성 요구조건이 충분히 충족되어야한다. 사실, 레일응력의 계산과 컨트롤은 별개 문제로 하고, 설계엔지니어는 궤도가 겪을 수 있는 실제 운영조건에 관하여 깊이 이해하고 있는 것이 중요하다.

레일 휨모멘트와 수직처짐의 계산에서 현재의 실행은 주로 '탄성기초 위의 보(beam on elastic foundation)' 모델에 기반을 둔다. 이 모델은 잉클러(Winkler)가 1867년에 처음으로 제안하였고 그 후 짐머만(Zimmerman)이 1888년에 개발하였다. 잉클러 모델의 기본적인 가정은 임의의 지점에서 레일의 처짐이 레일 아래의 지지압력에 비례하는 것이다([그림 2] 참조).



[그림 2] 탄성기초 위의 보 모델

레일 처짐과 레일 휨모멘트의 계산에 상응하는 방정식은 다음과 같다.

$$y(x) = \frac{P\beta e^{-\beta x}}{2u} (\cos\beta x + \sin\beta x) \dots\dots\dots(1)$$

$$M(x) = \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos\beta x - \sin\beta x) \dots\dots\dots(2)$$

여기서,  $y(x)$ 와  $M(x)$ 는 각각 하중지점으로부터 거리  $x$ 에서의 레일 수직처짐과 휨모멘트이다.  $u$ 는 궤도계수( $N/mm^2$ )이다. 파라미터는 다음 식으로 정의된다.

$$\beta = \left( \frac{u}{4EI} \right)^{0.25} \dots\dots\dots(3)$$

윙클러 모델은 기본적으로 탄성기초 위에 연속해 지지된 보에 대해 개발됐다. 이 접근법은 궤도의 몇 가지 실제조건을 무시한다. 첫째, 레일 아래 연속지지의 가정은 횡침목이 제공하는 실제 단속(斷續, discrete)지지의 효과를 반영하지 않는다. 둘째, 이 모델은 지지재료들(즉, 도상, 보조도상 및 노반재료) 간의 상호작용을 포함하지 않으며 단순히 레일처짐과 휨모멘트를 계산하는 베르누이 오일러 보 이론(Bernoulli-Euler beam theory)을 이용한다. 게다가, 궤도지지는 여러 가지의 궤도지지층들이 명확히 구별되지 않고 한 층의 구성요소로 간주된다. 마지막으로, 레일에 단단히 체결된 지지침목들이 그들의 회전강성(rotational stiffness)을 통해 레일 휨에 대해 저항할 것이라고 가정한다. 후자는 또 다른 영역의 윙클러 모델의 결점이다.

몇몇의 연구자들은 윙클러 모델의 신뢰도에 의문을 제기했다. 그 결과로서 보다 현실적인 접근법이 제안되고, 기본적인 ‘탄성기초 위의 보’ 모델에서 약간의 개선이 이룩되었다. 예를 들어, 레일 아래 연속지지의 가정에 기인하는 오차를 보정하기 위해 현실적인 에너지 접근법을 사용하

는 ‘단속(斷續)지지 위의 보(beam on discrete support)’ 모델이 개발되어왔고 최근에 분석되었다. 각각 궤도지지층들 간의 상호작용과 궤도지지의 다층본질을 고려하기 위해 ‘파스테르나크 기초(Pasternak foundation)’와 ‘이중 보(double beam)’ 모델도 도입되고 있다. 커(Kerr)는 레일 처짐과 휨모멘트의 계산에서 침목 회전강성의 영향이 고려된 연구의 결과를 보고하였다.

[표 1] 동적 충격계수의 계산에 권장된 관계

개발자	방정식
AREMA	$\phi = 1 + 5.21 \frac{V}{D}$
Eisenmann	$\phi = 1 + \delta \cdot \eta \cdot t$
ORE	$\phi = 1 + \alpha' + \beta' + \gamma'$
BR	$\phi = \frac{8.784(\alpha_1 + \alpha_2)V}{P_s} \left[ \frac{D_j P_u}{g} \right]^{1/2}$
India	$\phi = 1 + \frac{V}{58.14u^{0.5}}$
South Africa	$\phi = 1 + 4.92 \frac{V}{D}$
Clarke	$\phi = 1 + \frac{19.65 V}{Du^{1/2}}$
WMMTA	$\phi = (1 + 3086 \cdot 10^{-5} V^2)^{0.67}$
Sadeghi	$\phi = 1 + 1.098 + 8 \times 10^{-4} V + 10^{-6} V^2$

특정 레일단면에 대한 설계절차는 항상 설계 운하중의 계산으로부터 시작된다. 이 하중은 정적 운하중과 교정계수(corrective factor)의 곱으로 정의되며, 동적 충격계수라고도 하는 교정계수는 동적뿐만 아니라 차륜과 레일표면 불규칙에 기인하는 운하중의 충격효과를 보정하기 위한 것이다. 몇몇의 연구자들은 철도당국과 함께 동적 충격계수를 평가하기 위해 이 파라미터의 크기에 영향을 미치는 다양한 파라미터를 고려하는 여러 가지의 관계를 제안하여왔다. 이들 방정식의 일부는 [표 1]에 요약되어있다.

식 (1)을 이용하여 계산된 레일 수직 처짐의 크기는 궤도계수(track modulus)에 크게 좌우된다. 궤도계수는 단위길이의 레일에 단위 수직처짐이 생기게 하는데 필요한 하중으로 정의된다. AREMA(American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association)는 경량 내지 중간의 레일을 가진 전형적인 궤도에 대하여 수직 레일처짐을 계산할 때 13.8 MPa의 값을 권장한다.

레일 휨응력은 적용 가능한 순수 휨 상태를 가정하여 일반적으로 레일바닥의 중심에 대해 계산된다. 차량이 곡선을 통과하는 동안 차륜플랜지와 레일두부 간에 높은 안내 힘을 가하는 경우에는 레일두부의 아래쪽 가장자리에서의 휨 응력도 중대해질 수 있다. 레일 휨 응력의 크기를 계산하여 이 응력과 허용한계 간을 비교해야 한다. AREMA는 피로 고려사항을 기반으로 몇몇 안전율(safety factor)의 결정을 통한 레일 휨 응력의 계산과 컨트롤을 위한 실용적인 방법을 권장하였다. 이 방법에 따르면, 허용 휨 응력은 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_y - \sigma_t}{(1+A)(1+B)(1+C)(1+D)} \dots\dots(4)$$

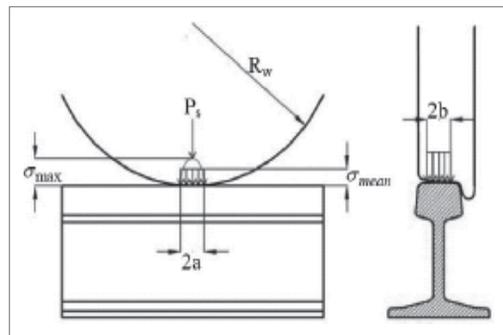
여기서,  $\sigma_y$ 는 레일강의 항복응력이고,  $\sigma_t$ 는 온도 변화로 인한 축 응력이며 다음의 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_t = E\alpha\Delta t \dots\dots\dots(5)$$

식 (4)에서의 파라미터 A, B, C 및 D는 각각 레일의 횡 휨, 궤도상태, 레일마모와 부식 및 궤도의 불균형 캔트(unbalanced superelevation)에 대한 안전율이다. 상기 안전율의 권장 값의 얼마간을 [표 2]에 나타낸다.

[표 2] 레일 휨 응력 안전율의 값

안전율	연구자		
	Hay	Clarke	Magee
A	15 %	15 %	20 %
B	25 %	25 %	25 %
C	10 %	10 %	35 %
D	15~20 %	25 %	15 %



[그림 3] 차륜-레일 접촉응력의 균일한 분포

차륜-레일 접촉응력은 주로 회전응력(rolling stress)과 전단응력을 포함한다. 이들 응력의 크기는 타원형 차륜-레일 접촉 부분(patch)의 기하구조에 크게 좌우된다. 이들의 응력을 계산하는 신뢰할 수 있는 공식을 개발하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 가장 적용 가능한 공식은 아이젠망(Eisenmann)이 제안한 것들이다. 그는 회전차륜-레일 접촉면적에 걸쳐 균일한 분포의 단순화 가정을 하여 회전응력과 전단응력 레벨의 분석을 다루었다. 이 분석에서는 또한 차륜과 레일 프로파일을 각각 원통형과 평면으로 나타내었다([그림 3] 참조).

아이젠망(Eisenmann)은 헤르츠(Hertz)의 이론에 기초하여 회전접촉 응력의 평균값을 계산하는 다음 식을 제안했다.

$$\sigma_{mean} = \frac{P_s \times 10^3}{2a \times 2b} \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $2b$  (mm)는 차륜-레일 접촉영역의 폭이다. 아이젠망(Eisenmann)은  $2b = 12$  mm의 값을 취하였다. 또한, 접촉 길이 ( $2a$ )는 다음의 식으로 계산된다.

$$2a = 3.04 \times \left[ \frac{P_s \cdot R_w \times 10^3}{2b \cdot E} \right]^{0.5} \dots(7)$$

접촉면적을 통하여 레일두부로 전달된 윤하중의 값은 종종 접촉재료의 항복한계를 초과한다. 이러한 상황에서, 마모 프로세스와 합하여 결과로서 생긴 표면 소성변형은 접촉면적을 평평하게 하는 역할을 한다. 따라서 접촉면은 평면(레일)과 원통형(차륜) 간 접촉의 가정에 기초하여  $2a$ 의 길이와  $w$ 의 폭의 직사각형으로 근사계산될 수 있다. 그러한 조건에 대하여 스미스(Smith)와 류(Liu)는 접촉길이를 계산하는 다음의 식을 제안했다.

$$2a = 3.19 \times \left[ \frac{P_s \cdot (1 - \nu^2) \cdot R_w \times 10^3}{w \cdot E} \right]^{0.5} \dots(8)$$

아이젠망(Eisenmann)은 레일강에 요구된 피로강도를 고려하여 레일강의 항복인장강도의 백분율로 평균 회전접촉응력에 대한 한계치를 제안하였다. 이 가정에 기초하여 다음의 기준이 제안된다.

$$\sigma_{all}(rdl) = 0.5\sigma_{ult} \dots\dots\dots(9)$$

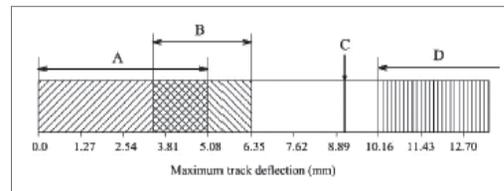
전단응력분포는 주로 레일두부영역에서 일어나며, 수직 주응력(normal principal stresses)의 크기와 밀접한 관계에 있다. 아이젠망(Eisenmann)은 메이저와 마이너 응력의 값이 레일두부표면으로부터 증가하는 깊이와 동일한 감소패턴을 따르지 않는 것을 관찰하였다. 그러한 불일치는 접촉길이의 절반에 해당하는 깊이에서 전단응력 최대치의 출현으로 귀착된다. 최대 전단응력 값은 단순히 평균 회전접촉응력 값에 밀접한 연관을 가지며 다음의 식으로 주어진다.

$$\tau_{max} = 0.3\sigma_{mean} \rightarrow \tau_{max} = 410 \sqrt{\frac{P_s}{R_w}} \dots(10)$$

앞서 나타낸 바와 같이, 전단응력과 회전접촉응력의 크기는 밀접한 연관을 갖는다. 전단응력 한계에 대한 후속기준은 두 주응력(principal stress)이 압축되는 상태에 적용된 전단변형(shear strain) 에너지의 이론을 사용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\tau_{all} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{mean} \rightarrow \tau_{all} = 0.3\sigma_{ult} \dots\dots\dots(11)$$

운영조건에서 레일의 성능에 관한 기준은 주로 레일 수직처짐과 레일 마모수명을 포함한다. 이들 기준을 이하에 나타낸다.



[그림 4] 내구성에 대한 궤도 처짐 기준

AREMA는 수직 레일처짐의 크기에 대한 제한 범위를 제안했다. 이 권고에 따르면, 극도의 수직 레일처짐은 3.175 내지 6.35 mm의 범위를 넘지 않아야 한다. 룬드그렌(Lundgren)과 그의 동료들은 이 권고를 구체화하여 수직 레일처짐의 한계치로서 [그림 4]에 나타낸 다이어그램을 제안했다. 궤도설계 과업을 수행하기 위한 이 다이어그램은 궤도의 성능에 기초한다.

- [그림 4]에 나타낸 범위는 다음의 특징을 말한다.
- A : 무기한으로 존속될 궤도에 대한 처짐 범위
  - B : 유연성과 강성의 필요한 조합을 제공하기 위하여 중량궤도에서 정상적인 최대의 바람직한 처짐

C : (레일중량 < 50 kg/m를 가진) 경량건설의  
궤도에서 바람직한 처짐의 한계

D : 빠르게 더 나빠지게 될 약하거나 불충분하  
게 유지된 궤도

또한, [그림 4]의 처짐값이 레일과 패드 또는 패  
드와 침목 간의 어떠한 느슨함이나 작용도 포함하  
지 않는 점에 유의하여야 한다. 게다가, 이들의 값  
은 윤하중 직하의 처짐을 나타낸다.

다른 내구성 기준은 레일 마모수명이다. 이 파  
라미터를 평가하는 합리적인 방법을 개발하기 위  
하여 많은 연구가 수행되었지만, 최상의 결과는  
여전히 경험에 의거하며 이론적인 뒷받침도 없다.

일리노이(Illinois) 대학교는 레일의 마모속도를  
조사하고 레일 마모수명의 추정방법을 개발하기  
위하여 몇몇의 미국철도 궤도에 관한 연구를 수행  
하고 있다. 다음의 수식은 연간 마멸되는 레일두  
부 마모면적(mm<sup>2</sup>/년)을 추정하기 위하여 이 대  
학의 연구자들이 제안하였다.

$$W_a = W_t(1 + K_w \cdot D_c) \cdot D_A \dots \dots \dots (12)$$

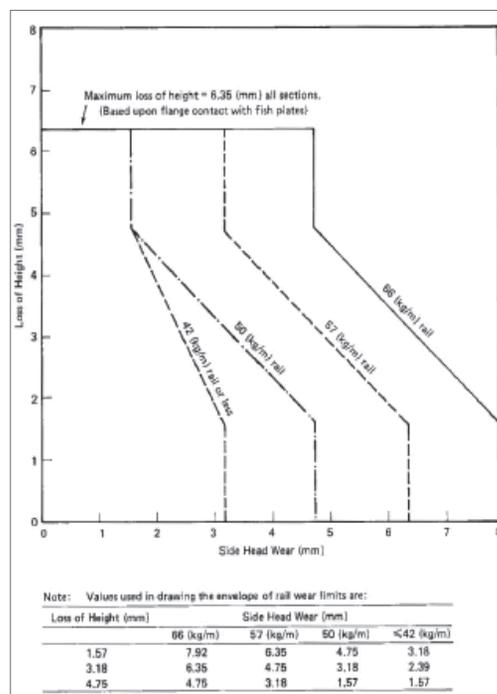
추산의 W<sub>a</sub>를 갖고 있다면 그리고 최대 레일두  
부 한계(θ<sub>A</sub>)를 고려하면 레일 마모수명은 다음 식  
으로 계산할 수 있다.

$$T_y = \frac{\theta_A}{W_a} \dots \dots \dots (13)$$

AREMA 협회의 단치히(Danzig)와 그의 동료  
들은 레일 마모수명을 추정하기에 적절한 체계적  
정리를 구하기 위해 광범위한 조사를 수행했다.  
그들은 얻어진 결과를 바탕으로 특정기간 동안 궤  
도를 통과한 MGT에 관하여 레일마모수명을 나  
타내는 다음 식을 제안하였다.

$$T = \frac{1.839K_C \cdot K_G \cdot K_R \cdot R_{Wt} \cdot (1.102D_A)^{1.565}}{\sum_i^n \left[ \frac{1.102D_i}{K_{V_i} \cdot K_{A_i} \cdot K_{S_i}} \right]} \quad (14)$$

허용 레일마모한계는 많은 연구자들이 제안해  
왔으며 대부분의 각 철도당국은 자체의 구체적인  
기준을 확립하였다. 예를 들어, [그림 5]에 나타낸  
각각 다른 철도구간에 대한 최대 레일마모 값의  
포락선(envelope)은 캐나다 국철이 제안하였다.  
이 그림의 다이어그램을 사용하여 최대 허용 레일  
두부 높이손실과 폭 손실을 결정할 수 있다.



[그림 5] 레일두부 높이와 폭의 손실에 대한 마모한계의 예

값은 대개 레일두부 면적감소의 20에서 50%까  
지의 범위에 이르는 허용 레일 마모수명을 나타낸  
다. 레일의 단위길이 당의 무게, 레일수명 동안 궤  
도를 통과한 MGT의 양 및 열차속도는 허용 레일마  
모 한계의 적절한 값이 선택되도록 결정하는 중요  
한 파라미터이다. 레일 단위길이 당의 더 큰 중량은  
더 많은 양의 레일두부 면적감소가 허용될 것이다.  
거꾸로, 더 많은 MGT 양과 더 높은 열차속도 값은  
더 제한된 레일두부 면적감소를 필요로 한다.

#### 4 침목의 분석과 설계 방법

침목은 궤도시스템에서 중요한 역할을 한다. 침목의 기본적인 기능은 수직, 횡 및 종 방향 레일좌면 하중을 도상, 보조도상 및 노반 층으로 전달하는 것이다. 침목은 또한 레일체결장치에 안정적인 지지를 제공함으로써 궤간과 선형을 유지하는데 기여한다.

[표 3] 레일좌면하중의 계산을 위한 관계

개발자	공식
Talbot	$q_r = S \cdot u \cdot y_{\max} \cdot F_1$
ORE	$q_r = \bar{\epsilon} \cdot C_1 \cdot P^*$
UIC (콘크리트침목)	$q_r = \frac{P_s}{2} (\chi + \gamma_p \times \gamma_d) \gamma_d \times \gamma_r$
Australia (콘크리트침목)	$q_r = j \times P_s \times \frac{D \cdot F}{100}$
Australia (강 침목)	$q_r = 0.5 \times F_2 \times P \times S \times \beta$
Sadeghi	$q_r = 0.474P \times (1.27S + 0.238)$

\*  $\bar{\epsilon}$ 는  $q_r$ 과  $P_s$ 가 각각 레일좌면하중의 평균값과 정적 율하중인  $\bar{q}_r/\bar{P}_s$ 의 비율로 정의된다.  $C_1$ 은 대개 1.34인 계수이다.

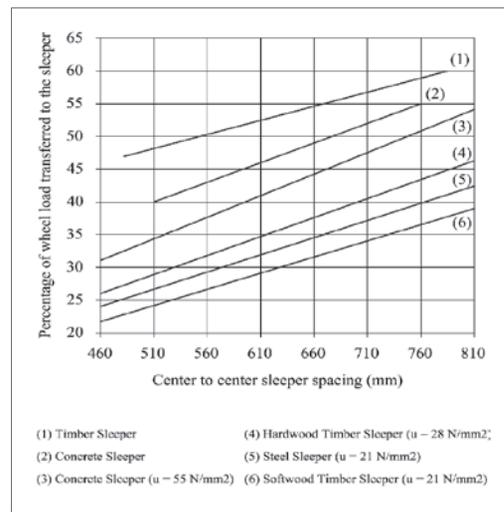
수직하중은 침목 아래 도상층 압밀의 정도와 품질에 좌우되어 침목의 휨모멘트를 유발한다. 게다가, 횡하중재하와 종하중재하에 견디어내는 침목의 성능은 침목의 크기, 형상, 표면 기하구조, 중량 및 간격에 좌우된다.

수직방향에 대한 침목의 분석과 설계에 관한 현재의 실행은 세 단계를 포함한다. 이들은 ① 수직 레일좌면하중의 평가, ② 침목 아래 응력분포패턴의 추정 및 ③ 침목의 구조모델에 대한 수직 정적 평형상태의 적용이다.

수직 율하중은 레일을 통해 전달되고 레일의 연속성 때문에 어떤 수의 침목으로 분포된다. 이것

은 일반적으로 수직 레일좌면하중이라고 한다. 각 레일좌면에 가해진 하중의 정확한 크기는 레일중량, 침목간격, 레일 당 궤도계수, 레일과 침목 간의 작용량(作用量, amount of play) 및 침목과 도상 간의 작용량을 포함하는 여러 가지 파라미터에 좌우된다. 이들의 고려에 기초하여 각종 관계가 제안되어 있으며 [표 3]에 요약했다.

그러나 단순화의 목적으로, 상기에 언급된 파라미터 일부의 영향만을 고려하고 예를 들어 침목의 유형과 간격의 함수로서 수직 레일좌면하중 값을 정의하는 것이 더 실용적일 것이다. 이 방법은 많은 철도당국이 널리 용인한다. 일례로서 AREMA는 [그림 6]에 도해한 것처럼 침목에 전달된 율하중의 비율이 침목간격에 대하여 도출되는 다이어그램을 권장한다. 침목유형과 궤도계수의 효과도 이들 다이어그램에 포함된다.

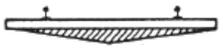
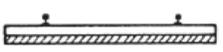


[그림 6] 레일좌면하중의 평가를 위한 다이어그램

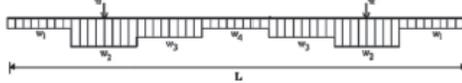
침목과 도상 간의 정확한 접촉압력분포와 시간의 흐름에 따른 그것의 변화는 침목의 구조설계에서 중요하게 될 것이다. 궤도가 새롭게 탬핑되었을 때 각 레일좌면 아래에 침목과 도상 간의 접

축부분이 발생된다. 궤도는 사용된 후에 침목과 도상 간의 접촉압력분포가 균일한 압력분포를 향하는 경향이 있다. 이 조건은 레일좌면 아래 침목과 도상표면 간의 틈과 관련된다. 가장 일반적으로 인정된 침목과 도상 간의 접촉압력분포 패턴을 [표 4]에 나타낸다.

[표 4] 약간의 접촉압력분포 패턴

Pressure Distribution	Remarks
	Laboratory test
	Principal bearing on rails
	Tamped either side of rails
	Maximum in tensile in middle
	Uniform pressure

[표 5] 궤도에서의 침목 하중재하 패턴

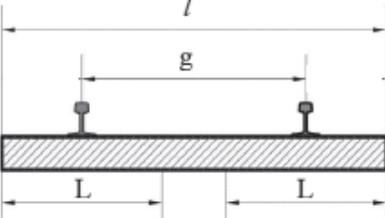
	
Pressure distribution pattern beneath sleeper	
After Tamping	$w_1=1.267q_r/L$ $w_2=2.957q_r/L$ $w_3=1.967q_r/L$ $w_4=1.447q_r/L$
After Accumulative Loading	$w_1=1.596q_r/L$ $w_2=2.436q_r/L$ $w_3=1.974q_r/L$ $w_4=1.687q_r/L$

몇몇 연구는 사데기(Sadeghi)가 권고한 것과 같이 설계목적으로 침목 아래의 궤도압력분포를 결

정하기 위해 수행되었지만([표 5] 참조), 그럼에도 불구하고 그 결과는 필요한 만큼 실용적이지 않다.

침목지지상태를 가능한 한 실제처럼 고려하기 위하여 [표 6]에 나타낸 것처럼 일반적으로 침목 길이(면적)의 특정부분에서 침목 아래에 균일한 압력이 분포되는 것으로 간주된다. 이 길이(면적)를 '유효길이(면적)'라 하며 문헌에서 일반적으로 ' $L(A_e)$ '로 나타낸다. 이 가정은 설계계산의 절차를 용이하게 한다. 그때 침목 아래 접촉압력의 크기를 알기 위해 수직방향의 정적평형이 적용된다. 또한, 침목지지의 변동을 고려하기 위하여 안전율이 포함된다. 따라서 침목과 도상 간의 평균 접촉압력  $P_a$ [kPa]는 다음 식으로 구할 수 있다.

[표 6] 레일좌면에서 침목지지의 유효길이(면적)

	
개발자	기술
AMERA	$A_e = \text{침목바닥면적의 } 2/3$
UIC	$A_e = 6,000\text{cm}^2, l=2.5\text{m}$ 에 대하여 $A_e = 7,000\text{cm}^2, l=2.6\text{m}$ 에 대하여
Australia	$L = (l-g)^{(1)}, L = 0.9 \times (l-g)^{(2)}$
Schramm	$L = (l-g)/2$
Clarke	$L = (l-g) \left( 1 - \frac{l-g}{1.25l^{0.75}} \right)^{(4)}$
Clarke (단순화)	$L = l/3$

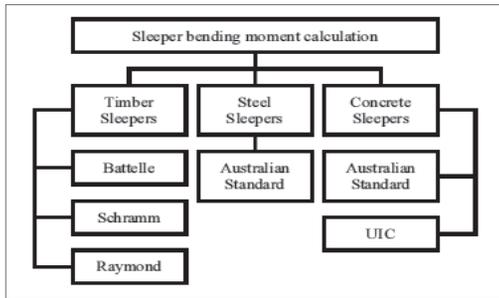
- (1) 레일좌면에서의 휨모멘트 계산용
- (2) 침목중앙에서의 휨모멘트 계산용
- (3) 파라미터 'l'는 침목높이이다.

$$P_a = \left( \frac{q_r}{B \cdot L} \right) \cdot F_3 \dots \dots \dots (15)$$

침목하중재하패턴을 결정하였다면 침목 휨모멘트의 계산을 위하여 침목의 구조모델이 정의될

수 있다. 이 주제는 많은 철도 연구자들의 특별한 관심을 받고 있으며 따라서 문헌에서 여러 가지의 계통적 서술이 제안되었다. 이들의 제안된 식과 방법들은 [그림 7]에 나타낸 것처럼 침목유형에 따라 분류될 수 있다. 이들 방법의 계통적 서술은 [표 7]에도 요약되어 있다.

[표 7]에 나타낸 각 침목유형에서 휨모멘트의 계산에 사용된 침목구조모델(즉, 침목하중재하패턴) 간에는 약간의 차이가 있음에 유의하여야 한다. 기타 추가기준에 따른 이들 차이의 완전한 설명은 UIC 등의 문헌에서 구할 수 있다.



[그림 7] 침목 휨모멘트 계산에 권장된 방법

[표 7] 침목 휨모멘트의 계산에 추천된 여러 방법의 비교

침목유형	개발자	레일좌면 모멘트		중앙 모멘트	
		$M_r^+$ (kN·m)	$M_r^-$ (kN·m)	$M_c^+$ (kN·m)	$M_c^-$ (kN·m)
목	Battelle	$q_r \left( \frac{l-g}{2} \right)^{(1)}$	-	-	$q_r \left( \frac{g}{2} \right)$
	Schramm	$q_r \left( \frac{l-g-n}{8} \right)$	-	-	-
	Raymond	-	-	-	$q_r \left( \frac{2g-l}{4} \right)$
강	Australia표준	$q_r \left( \frac{l-g}{8} \right)$	-	$0.05 \times q_r \times (l-g)$	$q_r \left( \frac{2g-l}{4} \right)$
콘크리트	UIC	$r_r \cdot q_r \cdot \frac{\lambda}{2}^{(2)}$	$0.5M_r^+$	$1.2M_{dr+} \times \frac{I_c}{I_r}$	$0.7M_r^+$
	Australia표준	$q_r \left( \frac{l-g}{8} \right)$	$Max\{0.67M_r^+, 14\}$	$0.05 \times q_r \times (l-g)$	$q_r \left( \frac{2g-l}{4} \right)$

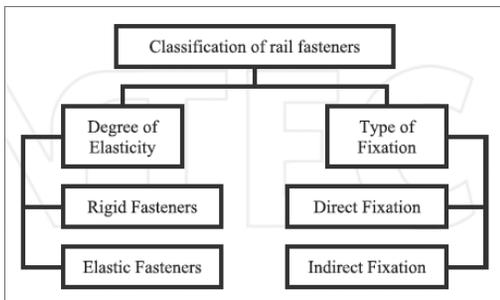
(1) Battelle은  $q_r \left( \frac{l-g}{8} \right)$ 과 같이 덜 보수적이고 더 현실적인 공식도 제안한다.

(2) 유효 레버 암(effective lever arm)은  $\lambda = \frac{I_r - e}{2}$ 로부터 얻을 수 있다.

침목 휨모멘트를 계산하기 위해서는 침목의 휨 강도가 시험되고 컨트롤되어야 한다. AREMA는 침목의 극한 휨 수용력(capacity)을 평가하는 실제적인 방법을 개발했다. 이 방법에서는 침목길이, 휨모멘트의 유형(즉, 양 또는 음), 침목 휨모멘트 계산의 위치(즉, 레일좌면 또는 침목의 중앙스팬)에 기초하여 한계치를 결정한다.

## 5 레일체결장치의 분석과 설계 방법

레일체결시스템으로도 알려진 레일체결장치는 레일을 침목에 체결하며, 허용할 수 없는 레일의 수직, 횡 및 종 방향 이동뿐만 아니라 레일전도를 막기 위해 궤도구조에 사용된다. 또한, 이들의 구성요소는 궤간유지, 윤하중 충격 감소, 궤도탄성 증가 등을 위한 툴(tool)로서의 역할을 한다. 레일 체결장치는 [그림 8]에 나타낸 것처럼 주로 두 가지 중요한 양상을 기초로 하여 분류되며 각각 서로 다른 많은 유형이 있다.



[그림 8] 레일체결장치의 분류

레일체결장치가 궤도시스템에서 중요한 역할을 함에도 불구하고, 이 궤도 구성요소의 분석과 설계에 관한 현재의 실행은 문헌에서 광범위하게 설명되지 않고 있다. 많은 철도관련 설계코드에 언급된 설계기준은 실험실 성능검증시험(qualification tests)의 허용기준(acceptance criteria)을 다루는 것들로 제한된다. AREMA 매뉴얼, 오스트레일리아 표준(Australian Standard) 및 유럽표준(European Standards)은 그러한 기준을 포함하는 중요한 설계규정이다. 이들 표준 간의 비교를 [표 8]에 나타낸다.

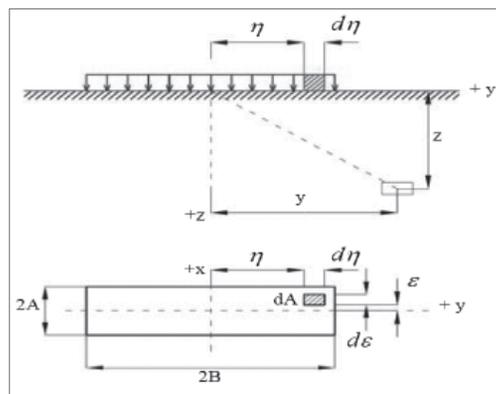
[표 8] 레일체결장치 성능검증시험을 고려한 여러 철도 설계코드의 비교

성능검증시험	설계규정		
	AREMA	AS 1085.19	EN 13146
들림(Uplift) 제한	○	○	○
종 방향 구속	○	○	○
반복하중	○	○	
비틀림 구속	○		○
횡 방향 구속		○	
클립 탄성률		○	
피로강도		○	
충격 감쇠		○	○

## 6 도상과 보조도상 층의 분석과 설계 방법

도상과 보조도상 층은 입상(粒狀, granular)재료로 구성되며, 주로 침목에서 전달되는 하중을 지탱하도록 궤도구조에 사용된다. 그 외로, 이들 층의 중요한 기능은 다음을 포함한다. ① 노반 층에 대하여 허용될 정도까지 응력세기를 줄인다, ② 차륜에서 유발된 충격, 소음 및 진동을 흡수한다, ③ 궤도의 과도한 침하를 제한한다, ④ 궤도 유지보수작업, 특히 궤도선형틀림의 보수에 관련된 것들을 용이하게 한다, ⑤ 궤도구조에 대한 충분한 배수를 마련하며, 그것에 의하여 궤도침하뿐만 아니라 식물성장이 제한될 것이다. 보조도상은 전술한 기능 이외에 도상과 노반재료가 함께 혼합되려는 것을 방지하는 필터 층으로서 작용하도록 사용된다.

도상과 보조도상의 구조분석과 설계의 현재 실행은 이들의 입상 층에 대한 최소한의 필요깊이의 결정으로 다루어진다. 이론적, 반(半)경험적 및 경험적 방법이 개발되어 이 설계기준을 충족시키기 위하여 사용되고 있다.

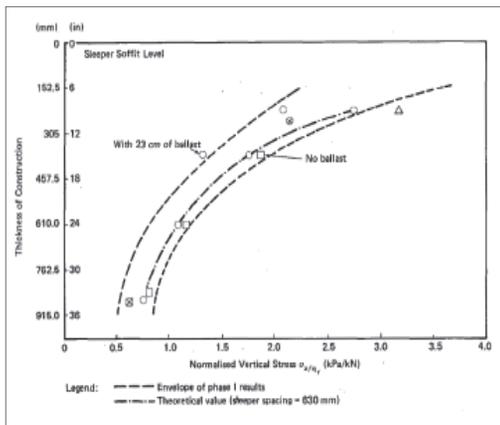


[그림 9] 균등하게 재하된 직사각형 지지면적 위에 Boussinesq 요소의 단일 수직 집중하중의 적용

균일한 직사각형 재하면적에 적용된 부시네스크(Boussinesq) 탄성이론([그림 9] 참조)의 결과에 의거한 최소한의 필요깊이의 이론적 결정은 다음 식의 수치해법을 이용하여 수행된다.

$$\sigma_z = \frac{3P_a}{2\pi} \int_{\epsilon=-A}^{\epsilon=+A} \int_{\eta=-B}^{\eta=+B} \frac{d\epsilon \cdot d\eta}{\{(x-\epsilon)^2 + (y-\eta)^2 + z^2\}^{5/2}} \quad (16)$$

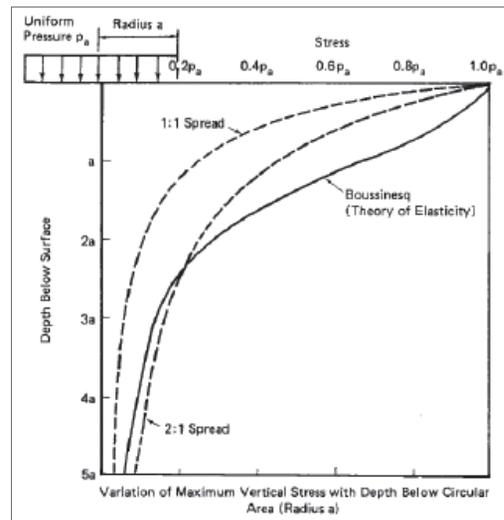
도상과 보조도상 층은 부시네스크 탄성이론의 단일균질과 등방성 층으로 상정되는 점에 유의해야 한다. 그러한 가정은 충분히 정확한 것으로는 보이지 않지만, 상기 ORE 조사연구는 이용할 수 있는 현장시험 결과의 비교에 기초하여 부시네스크(Boussinesq) 탄성이론의 유효성을 입증하였다. 이 비교를 [그림 10]에 나타낸다. 부시네스크(Boussinesq) 방법에서 얻은 결과는 실험연구로부터 얻은 포락선 이내에 합리적으로 유지되고 있음을 이 그림에서 알 수 있다.



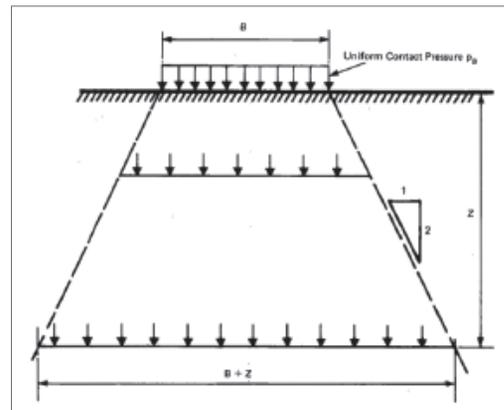
[그림 10] 깊이와 함께 실험적 수직응력 분포와 부시네스크(Boussinesq)해법의 비교

하중이 1 수직 대 1 수평의 하중 퍼짐 기울기 또는 2 수직 대 1 수평의 기울기로 수직으로 분포된다고 추정하는 단순화된 반(半)경험적 방법이 또한 사용된다. 또한, 이 방법에서는 표면 아래의 어떤 주어진 깊이에서 응력분포가 균일한 것으로

가정한다. 부시네스크(Boussinesq) 방법은 재하면 아래의 깊이에서 최대 수직압력을 계산하지만 이 방법은 깊이에서의 평균 수직압력만 계산한다. 이론적 부시네스크(Boussinesq) 해법으로 1 : 1 과 2 : 1 하중퍼짐 가정 양쪽에 대해 계산된 수직 응력 분포의 비교를 [그림 11]에 나타낸다. 수직 압력의 가정된 2 : 1 하중퍼짐 분포가 1 : 1 하중 퍼짐 분포보다 부시네스크(Boussinesq) 압력분포에 더 가깝게 근사됨을 알 수 있다.



[그림 11] Boussinesq 방정식에 기초하여 균일하게 재하된 원형 면적 아래 수직응력 분포와 1 : 1과 2 : 1 분포의 비교



[그림 12] 궤도지지 입상 층의 추천된 반(半)경험적 압력분포

[그림 12]에 나타난 것처럼 2 : 1 하중퍼짐 분포를 고려하면, 최소한의 필요 도상과 보조도상 깊이는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_z = P_a \frac{BL}{(B+z)(L+z)} \dots\dots\dots(17)$$

허용 노반지력을 결정하고 그것을 식 (16)이나 (17)에 대입하면 최소한의 필요 도상과 보조도상 깊이를 계산할 수 있다.

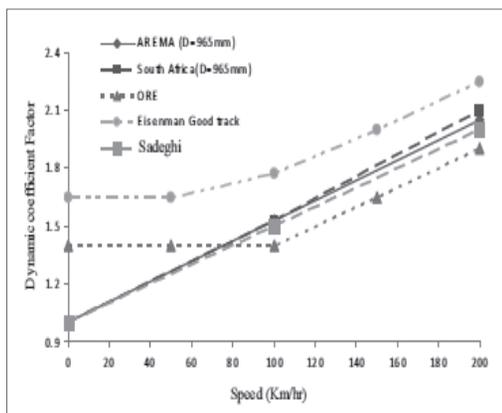
### 7 논의 및 맺음말

궤도시스템의 분석과 설계에 관한 현재의 실행은 모든 궤도 구성요소가 환경부하와 교통하중을 지탱하는데 충분한 강도를 확보하도록 따로따로 평가하는 하중지지 접근법에 전적으로 기반을 둔다. 본고에서는 여러 가지의 분석방법과 설계기준을 고찰하였다. 이용가능한 철도 설계방법의 비교에 근거하여 몇 가지의 단점을 이 장에서 논의한다.

이 결과는 동적 충격계수의 추정에 사용된 서로 다른 방법들의 적절한 이용에 관해 제안하는 데에 사용될 수 있다. AREMA 권고는 기본적으로 열차가 대개 낮은 속도로 궤도를 통과하는 중량운행에 준거하기 때문에 AREMA 수식을 철도수송운행에 대해 사용하는 것은 실용적이지 않을 것이다. 따라서 동적 충격계수에 대한 AREMA 권고의 사용은 80 km/h 이하의 열차속도를 가진 중량운반철도에 대해 권고된다. 한편, 아이젠만(Eisenmann)이 제안한 식의 사용은 고속철도 궤도의 동적 충격계수의 계산에서 더 타당하다. 동적 충격계수의 고려가 어떻게든 하중의 동적충격 영향을 보정하지만, 현재의 철도설계방식은 윤하중의 순간적인 특성을 고려하는 추가의 개선이 여전히 필요하다. 또한, 현재의 접근법에 관한 상기의 리뷰는 더 높은 열차속도의 효과가 레일 마모수명의 산정에 포함되지 않고 있는 점을 나타낸다. 이것은 고속열차 운행에 따른 현재의 레일설계기준의 변경을 촉구한다.

침목과 도상 간의 제안된 접촉압력은 [표 4]에 나타내었다. 전 장에서 나타난 것처럼 침목과 도상 간의 균일한 접촉압력분포가 가정된다. 이것은 현재의 설계기준이 도상-침목 압력분포패턴에 관한 도상재료 열화의 영향을 명확히 포함하지 않고 있는 것을 의미한다. 다시 말해서, 침목설계 접근법은 하중의 장기적인 효과를 결합함으로써, 그리고 결과적으로 도상열화를 고려함으로써 추가의 개선이 기대된다.

궤도의 분석과 설계에 관한 현재의 실행은 레일 체결장치의 분석과 설계에 대한 명확한 접근법으로 이어지지 않는다. 본고의 결과는 오스트레일리아 표준에서 제시한 제한된 컨트롤기준을 제외하고, 레일체결장치의 피로강도에 관하여 제안된 명



[그림 13] 동적 충격계수의 평가에 추천된 일부 방법의 비교

[표 1]에 나타난 동적 충격계수의 결과를 열차 속도에 대해 [그림 13]에 나타낸다. 열차속도가 여러 수식들로 구한 동적 충격계수의 값에 상당히 영향을 미칠 수 있다는 점이 이 그림으로부터 명

확한 다른 기준이 없다는 것을 나타낸다. 그러므로 레일체결장치의 분석과 설계의 절차를 추가로 개발할 필요가 있다. 궤도시스템의 건설에 현재 사용되는 여러 가지 레일체결장치의 큰 다양성을 고려할 때 이 중요성은 더욱 실감될 것이다.

입상(粒狀) 도상과 보조도상 지지 층의 구조분석과 설계에 대해 결정된 유일한 기준은 이들 궤도 구성요소의 최소한의 필요깊이의 평가이다. 이 기준은 밑에 있는 노반 층에 허용될 수 있는 수직 압력강도의 감소량에 기초한다. 그러나 최적의 도상과 보조도상 층 두께 결정에 관한 재료 등급 매김의 효과에 대한 구체적인 제안은 없다. 궤도 유지보수작업뿐만 아니라 토목섬유 적용과 같은 새

로운 건설 기술과 설비의 영향은 명확하게 포함되어 있지 않다. 누적 하중재하와 이에 따른 궤도 소성변형 거동의 영향은 특히 침묵에 대해서뿐만 아니라, 도상과 보조도상 층에 관한 궤도 구성요소 분석과 설계에 명확하게 포함되지 않고 있다.

본고의 고찰에서 얻어진 결과는 실험실과 현장 시험에서 얻은 결과에 특별한 관심을 갖고 궤도의 단기와 장기 거동을 더욱 조사 연구하여 현재의 궤도설계방법의 추가 개발에 대한 필요성을 명확하게 나타낸다. 목적은 현재의 설계접근법에서 생략된 궤도 파라미터와 하중재하상태를 포함하는 새로운 기준을 정하는 것이다.

기호목록

$B$	침묵 폭, m
$C$	바닥으로부터 레일 중립축의 높이, mm
$D$	차륜직경, mm
$D_A$	연간 통과톤수, MGT/년
$D_c$	곡선도, 도
$D_l$	서브 통과톤수, MGT/년
$D_j$	이음매에서의 궤도강성, kN/mm
$D.F.$	하중분포계수
$e$	침묵두께를 따른 레일좌면하중분포의 폭
$E$	레일탄성계수, N/mm <sup>2</sup>
$F_1$	궤도지지변동 안전율
$F_2$	인접차륜 상호작용을 고려하는 계수
$F_3$	침묵유형과 궤도보수의 표준에 좌우되는 계수
$G$	중력상수, m/s <sup>2</sup>
$I$	레일 단면2차 모멘트, mm <sup>4</sup>
$I_c$	침묵단면 중심의 수평 단면2차 모멘트, mm <sup>4</sup>
$I_y$	레일좌면위치에서 침묵단면의 수평 단면2차 모멘트, mm <sup>4</sup>
$j$	하중확대계수

$K_C$	궤도곡률과 도유계수
$K_G$	궤도구배계수
$K_R$	레일계수
$K_S$	서비스유형 계수
$K_V$	속도부류계수
$K_W$	곡선도와 함께 변화하는 마모계수
$l$	침묵길이, m
$L_p$	레일좌면 축과 침묵단부 간의 거리
$n$	강 레일 플레이트의 길이
$P$	윤하중, kN
$P_S$	정적 윤하중, kN
$P_u$	차륜의 스프링 하 중량, kN
$R_\omega$	차륜 반지름, mm
$R_{\omega t}$	단위길이 당 레일중량, kg/m
$S$	침묵간격, mm
$T$	레일마모수명, MGT
$T_y$	레일마모수명, 년
$u$	궤도계수, N/mm <sup>2</sup>

$V$	열차속도, km/h
$W_t$	평균 레일두부 마모기간, mm <sup>2</sup> /MGT
$\alpha$	팽창계수
$\alpha'$	속도계수
$\beta'$	속도계수
$\delta$	궤도상태에 관련된 계수
$\Delta T$	온도변화
$r'$	속도계수

$\gamma_d$	하중분포계수
$\gamma_i$	침목지지 불규칙에 기인한 힘모멘트의 동적 증가
$\gamma_p$	레일체결장치의 충격감쇠계수
$\gamma_o$	확대율에 관련된 속도
$\gamma_r$	침목지지상태계수
$\lambda$	유효 레버 암, m
$\nu$	포아슨 비

참고문헌

1. 서사범, (2003), 최신 철도선로(Modern Railway Track), 도서출판(주) 열과 알, (ISBN 89-5529-067-5)
2. Sadeghi, J., and Yoldashkhan, M., (2005), "Investigation on the accuracy of current practices in analysis of railway track sleepers", International Journal of Civil Engineering, Vol. 3, No. 1.
3. Romero, M. J. G., Edwards, J. R., Barkan, C. P., Wilson, B., & Mediavilla, J. (2010). Advancements in Fastening System Design for North American Concrete Crossties in Heavy-Haul Service. In Proceedings of the AREMA 2010 Annual Conference & Exposition.
4. Sadeghi, J. M., & Babaeae, A. (2006). Structural optimization of B70 railway prestressed concrete sleepers. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering.
5. Kaewunruen, S., & Remennikov, A. (2008). Dynamic properties of railway track and its components: a state-of-the-art review.
6. Kaewunruen, S., & Remennikov, A. M. (2008). Dynamic effect on vibration signatures of cracks in railway prestressed concrete sleepers. In Advanced Materials Research (Vol. 41). Trans Tech Publications.
7. Rapp, C. T., Edwards, J. R., Dersch, M. S., Barkan, C. P., Mediavilla, J., & Wilson, B. M. (2012, April). Measuring concrete crosstie rail seat pressure distribution with matrix based tactile surface sensors. In 2012 Joint Rail Conference. American Society of Mechanical Engineers.
8. Taherinezhad, J., Sofi, M., Mendis, P. A., & Ngo, T. (2013). A review of behaviour of prestressed concrete sleepers. Electronic Journal of Structural Engineering.
9. Remennikov, A., Murray, M. H., & Kaewunruen, S. (2008). Conversion of AS1085. 14 for prestressed concrete sleepers to limit states design format.
10. Wettschureck, R. G., & Diehl, R. J. (2000). The dynamic stiffness as an indicator of the effectiveness of a resilient rail fastening system applied as a noise mitigation measure: laboratory tests and field application. Rail Engineering International, Edition.
11. Sadeghi, J. (2010). Field investigation on vibration behavior of railway track systems. International Journal of Civil Engineering.
12. 서사범, (2012). 개정3판 선로공학(궤도역학, 궤도재료, 궤도의 설계와 관리, 보안·운전, 소음·진동), 도서출판BG 북 갤러리, (ISBN 978-89-6945-037-1 93530)
13. 서사범, (2010). 선로의 설계와 관리(Track Compendium)-궤도-시공기면-전차선-기계화 유지관리-경제성, 삼표이앤씨(주)
14. 서사범, (2009). 궤도역학 1(Fundamentals of Track Dynamics, 자갈궤도의 역학), 도서출판 BG 북 갤러리, (ISBN 978-89-91177-79-6 93530)