

접속구간 궤도강성변화 기준에 관한 연구

The criteria for the change ratio of track stiffness along transition area

양신추*
Yang, Sin Chu

문계우**
Moon, Jae-Woo

유진영***
Yu, Jin-Young

Abstract

The transition zone between railway embankment and structures, or different track types is known to be an area in which problems often arise and where extra care needs to be taken with maintenance. Differences in track stiffness have dynamic effects and these increase the force in the track and the extent of deformation. In this study, the criteria for the change ratio of track stiffness along transition area, and proper transition length are presented through train/track interaction analyses. Those are derived on the basis of permissible limitations of train and track performances such as rail stress, uplift force of fastener, reduction of dynamic wheel force, and acceleration of car body. A feasible method of evaluation of track stiffness which is necessary when a designer reviews whether the criteria are satisfied or not is also presented.

1. 서론

철도에서 접속구간은 교량과 토공 또는 터널과 토공 사이의 노반상태가 변화하는 구간이나 유도상궤도와 무도상궤도 사이와 같이 궤도구조형식이 변화하는 구간을 말한다. 이들 구간에서는, 궤도지지강성이 갑작스럽게 변화함으로써 레일변위가 급하게 변화하여 차량의 이상 진동이 발생하고 따라서 충격운중이 발생한다. 열차의 진동은 차량의 주행안정성과 승차감을 저하시키고, 충격운중은 노반의 침하와 궤도재료의 열화 및 손상을 가속시키는 결과를 초래한다.

본 연구에서는 유도상궤도/콘크리트궤도, 토공/터널, 그리고 토공/교량구간 등의 접속구간에서 궤도 구성품 및 노반의 강성 차에 의하여 레일 면에서 발생하는 궤도강성의 변화율에 대한 제한기준을 정량적으로 제시하였다. 차량을 차체, 대차, 스프링하질량을 스프링 및 댐퍼로 연결된 강체질량으로 모형화하였다. 궤도구성품은 빔요소 및 스프링요소로 모형화하였으며, 차륜과/레일은 비선형 헤르쯔안 강성으로 모형화하였다. 레일응력, 윤중감소율, 차체가속도, 체결구 상압력등에 대한 기본기준을 적용하여 각각의 설계속도에 대한 강성변화율 한계 값을 제시하였다.

2. 접속구간 노반 및 궤도시스템 설계기준

교량과 토공구간의 접속구간에서 차량의 주행안전성을 보장하고, 궤도의 급격한 파손을 막기 위해서는 궤도가 일정한 성능을 유지할 수 있도록 관리기준을 정하는 것이 필요하다. 차량의 주행안정성 확보 및 궤도파괴를 방지하기 위한 설계기준은 다음과 같다.

2.1 차체상하진동가속도

주행안전을 고려한 차체진동 상하가속도(전진폭)의 한도값 이내에서 관리 목표값 $2.45\text{m/s}^2(0.25\text{g})$ 에 편진폭계수(3/4)를 곱한 1.8m/s^2 을 편진폭 한도값으로 한다. 접속부에서의 구조적인 변경은 상시 존재하기 때문

* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정회원
E-mail: scyang@krii.re.kr
Tel.:(031)460-5301, Fax: (031)460-5814

** 한국철도시설공단, KR기술연구소, 정회원

*** 한국철도시설공단, KR기술연구소, 정회원

에 케도틀립과의 경합을 고려하여 접속부에 의해 발생하는 것을 상기 한도치의 70%이하로 제한하여 1.3 m/s²을 평가기준치로 정한다.

2.2 윤증변동율

주행안전성을 고려한 윤증변동율(윤증변동/정지윤증)의 한도치 이내에서 관리목표치를 0.37로 한다.

2.3 레일응력

윤증변동 및 지지강성계수의 불균일에 의하여 발생하는 레일응력은, 장대레일축력, 잔류응력, 피로를 고려한 60kg장대레일의 한도치를 80MPa를 평가기준치로 정한다.

2.4 레일상압력

경계부에는 지지강성계수의 불균일에 의하여 레일체결장치에 부압(상향 압력)이 작용하는데, 이 부압은 레일 체결장치의 체결력을 초월하는 경우가 있으므로, 부압을 레일체결장치 체결력의 70%이하로 억제하도록 정한다.

이상의 기준을 정리하면 표 4.1과 같다.

표 1. 접속부의 설계 및 관리기준

항목	차체상하 진동가속도	윤증감소율	레일응력	레일상압력
기준값	1.3 m/sec ²	0.37	80Mpa	체결력의 70%

3. 차량/궤도 상호작용해석

3.1 차량운동방정식

차량의 1, 2차 현가장치(Suspension)와 대차(Bogie) 및 차체의 질량을 고려할 경우 조도로 인한 차량의 운동은 그림 1과 같이 모형화할 수 있고 이 때의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_t \ddot{y}_t + C_s (2\dot{y}_t - \dot{y}_{b1} - \dot{y}_{b2}) + K_s (2y_t - y_{b1} - y_{b2}) &= 0 \\
 I_t \ddot{\theta}_t + C_s d (2d\dot{\theta}_t - \dot{y}_{b1} + \dot{y}_{b2}) + K_s d (2d\theta_t - y_{b1} + y_{b2}) &= 0 \\
 M_{b1} \ddot{y}_{b1} + C_s (\dot{y}_{b1} - \dot{y}_t - d\dot{\theta}_t) + C_p (2\dot{y}_{b1} - \dot{y}_{w1} - \dot{y}_{w2}) + K_s (y_{b1} - y_t - d\theta_t) + K_p (2y_{b1} - y_{w1} - y_{w2}) &= 0 \\
 I_{b1} \ddot{\theta}_{b1} + C_p a (2a\dot{\theta}_{b1} - \dot{y}_{w1} + \dot{y}_{w2}) + K_p a (2a\theta_{b1} - y_{w1} + y_{w2}) &= 0 \\
 M_{b2} \ddot{y}_{b2} + C_s (\dot{y}_{b2} - \dot{y}_t + d\dot{\theta}_t) + C_p (2\dot{y}_{b2} - \dot{y}_{w3} - \dot{y}_{w4}) + K_s (y_{b2} - y_t + d\theta_t) + K_p (2y_{b2} - y_{w3} - y_{w4}) &= 0 \\
 I_{b2} \ddot{\theta}_{b2} + C_p a (2a\dot{\theta}_{b2} - \dot{y}_{w3} + \dot{y}_{w4}) + K_p a (2a\theta_{b2} - y_{w3} + y_{w4}) &= 0 \\
 M_{w1} \ddot{y}_{w1} + C_p (y_{w1} - (y_{b1} + a\theta_{b1})) + K_p ((y_{w1} - (y_{b1} + a\theta_{b1}))) &= F_{W1} \\
 M_{w2} \ddot{y}_{w2} + C_p (y_{w2} - (y_{b1} - a\theta_{b1})) + K_p ((y_{w2} - (y_{b1} - a\theta_{b1}))) &= F_{W2} \\
 M_{w3} \ddot{y}_{w3} + C_p (y_{w3} - (y_{b2} + a\theta_{b2})) + K_p ((y_{w3} - (y_{b2} + a\theta_{b2}))) &= F_{W3} \\
 M_{w4} \ddot{y}_{w4} + C_p (y_{w4} - (y_{b2} - a\theta_{b2})) + K_p ((y_{w4} - (y_{b2} - a\theta_{b2}))) &= F_{W4}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 M_t , M_b 는 차체 및 대차의 질량이며, M_w 는 차축 및 차륜을 포함한 현가되지 않은 스프링하질량(Unsprung mass)이다. 또한, K_p, K_s 는 1차 및 2차 현가장치의 스프링계수이며, C_p, C_s 는 1차 및 2차 현가장치의 감쇠계수이다.

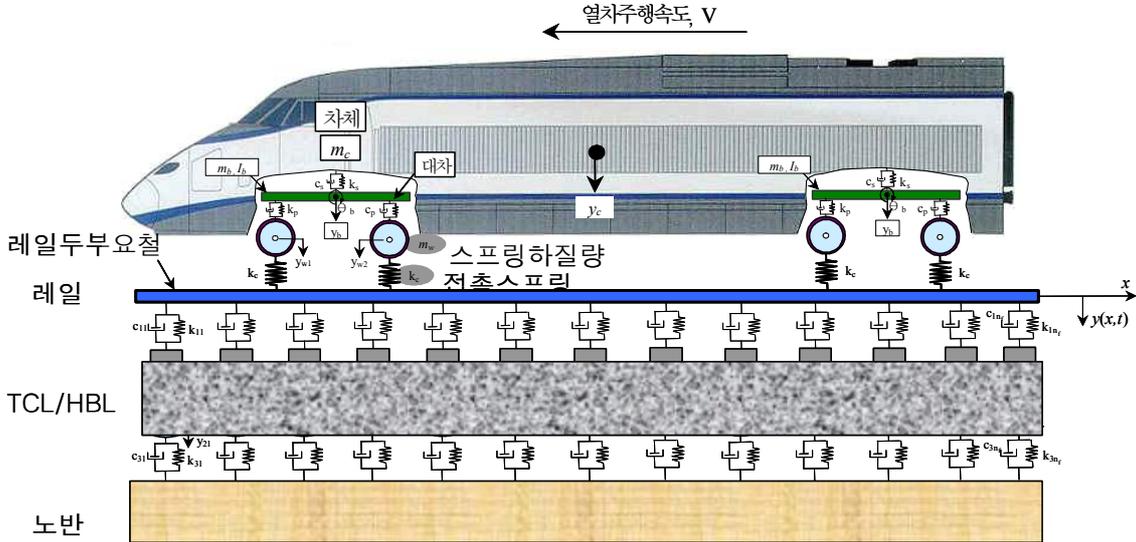


그림 1. 차량/궤도 상호작용 해석모형

3.2 궤도의 운동방정식

그림 3의 모델에 있어서 주행하중에 의한 레일변형의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + R_k(t) \delta(x - x_k) = P(t) \delta(x - x_w) \quad (2)$$

여기서 EI : 레일의 굽곡강성, ρ, A : 레일의 밀도 및 단면적, $R_k(t)$: 제 k 체결구에 있어서 레일지점 반력, $P(t)$: 차륜동하중, $\delta(x)$: 드랙델타함수, x_k : 제 k 체결의 x 좌표, x_w : 차륜위치의 x 좌표 = $x - x_0 - vt$, x_0 : 차륜의 초기위치, v : 열차속도이다.

또한 i 층 k 번째 질량체의 운동방정식은 다음과 같이 나타내진다.

$$m_{2k} \frac{d^2 y_{2k}}{dt^2} + (k_{3k} + c_{3k} \frac{d}{dt})(y_{2k} - y_{3k}) - (k_{2k} + c_{2k} \frac{d}{dt})(y_{1k} - y_{2k}) = 0 \quad (3)$$

여기서 y_{ik} : 제 k 체결에서 제 i 층 도상의 상하변위, m_{ik} : 제 k 체결에서 제 i 층도상의 질량(레일편측당), k_{ik} : 제 k 체결에서 제 $i-1$ 층도상과 제 i 층도상 사이 강성계수, c_{ik} : 제 k 체결에서 제 $i-1$ 층도상과 제 i 층도상 사이 감쇠계수이다

3.3 차륜/레일 접촉강성

k_c 는 차륜과 레일의 접촉강성으로서 차륜(y_w)과 레일변위(y_r)의 상대변위(Δ)의 함수로 다음과 같이 비선형 방정식으로 주어진다.

$$k_c = \frac{3}{2} c_H \Delta^{1/2} \quad \Delta \geq 0 \quad (4)$$

$$k_c = 0 \quad \Delta < 0$$

여기서 c_H 는 헤르쯔안 스프링계수이고, Δ : 차륜-레일의 상대변위로서 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta = y_w - y(x_w) - y_{w/r}(x_w) \quad (5)$$

3.4 계산 제원

궤도강성변화는 레일지지강성 즉 레일패드 강성이 변화하는 것으로 가정하였으며, 레일패드 감쇠계수는 여러 문헌[1~4]에서 제시한 실내 또는 현장에서 측정된 값들 중에서 비교적 적은 값으로 평가되는 5.0 kN/(m·sec)을 사용하였다. 본 연구에서 적용한 차량과 콘크리트궤도의 계산 제원은 표2와 같다.

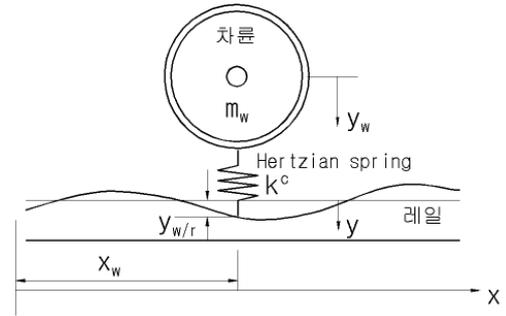


그림 2 /차륜/궤도 접촉모델

표2. 차량/궤도모델의 물성치(궤도 편측당)

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도(km/h)	350	차체회전관성모멘트($\text{ton}\cdot\text{m}^2$)	565.95
차체질량(ton)	27.48	차륜반경(mm)	430
2차 현가장치 스프링(kN/m)	1.26E3	레일	UIC60kg
2차 현가장치 댐핑(kN·s/m)	28.5	레일표면반경(mm)	300
대차질량(kg)	1.21	레일질량(kg/m)	60.3
1차 현가장치 스프링계수(kN·s/m)	1.252E3	레일강성도($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	6.42×10^3
1차 현가장치 댐핑계수(kN·s/m)	16.0	대차간 거리(m)	14.0
축간거리(m)	3.0	궤도패드 댐핑계수(kN·s/m)	5.0
스프링하중(ton)	1.024	침목간격(m)	0.625

4. 해석결과

콘크리트궤도의 노반지지강성은 레일패드의 지지강성보다 매우 크다고 가정하고, 레일패드강성이 적은 k_1 구간과 강성이 큰 k_2 구간(그림 3) 사이를 열차가 350km/h 속도로 통과할 때, 차체가속도, 운중변동, 레일저부응력, 체결구압상력을 평가하였다. 저장성구간의 레일패드지지강성 k_1 를 20kN/m에서 60kN/m까지 변화하였으며, 고강성구간은 저장성 k_1 의 3배까지 큰 경우들에 대하여 검토하였다.

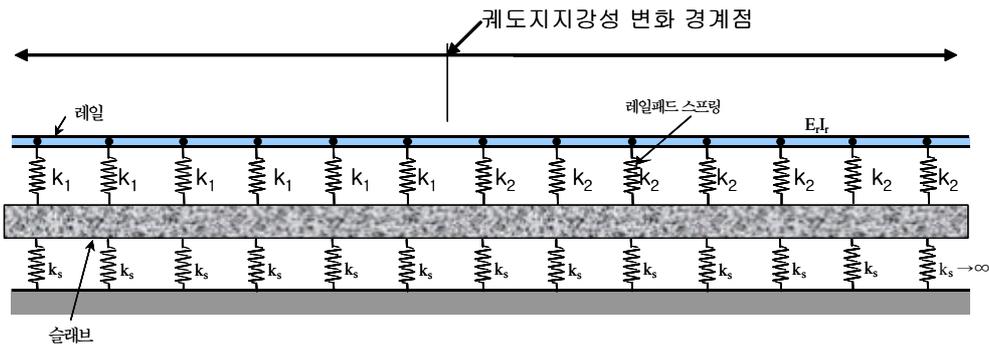
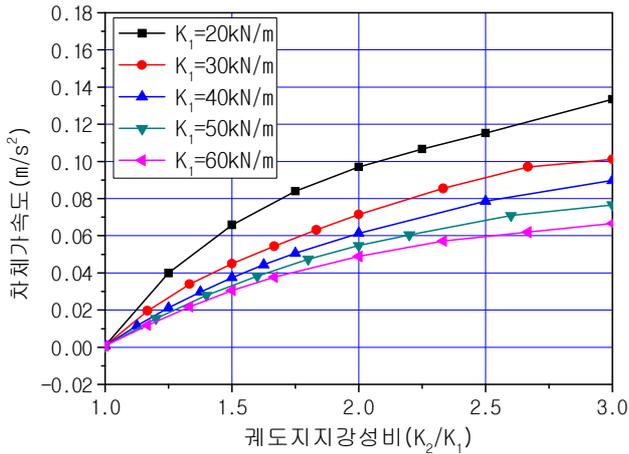


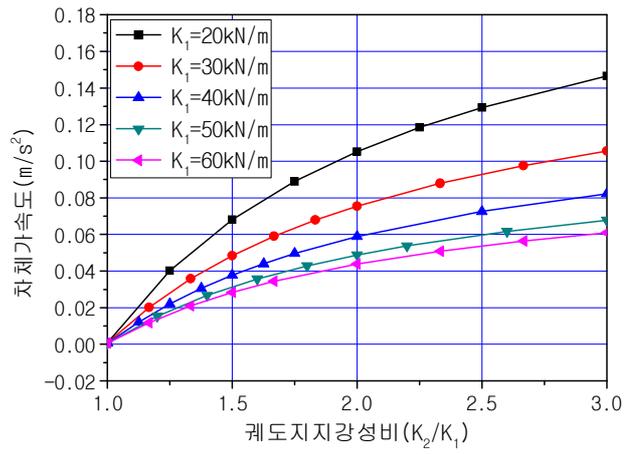
그림 3. 강성변화구간 궤도모형

4.1 차체가속도

그림 4는 강성변화구간에서 발생하는 차량가속도(편진폭)의 최대값을 궤도지지강성비에 따라 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 접속구간에서 차량가속도는 저장성 구간의 강성이 작을수록 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 또한 열차가 고강성 구간에서 저장성 구간으로 통과할 때가 반대 방향으로 통과할 때보다 다소 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 모든 경우에 대하여 차체상하가속도 기준인 1.3m/s^2 보다는 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 차체가속도는 접속구간에서 지지강성 변화율을 제한하는 조건으로 작용하지 않음을 알 수 있다.



(a) 열차 통과방향: 저강성(k_1) → 고강성(k_2)

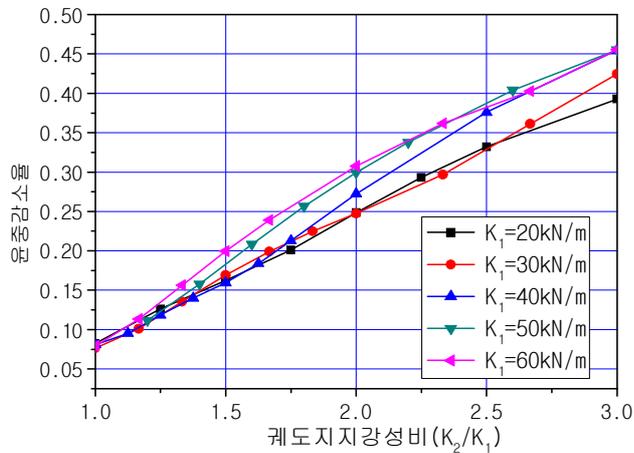


(b) 열차 통과방향: 저강성(k_1) ← 고강성(k_2)

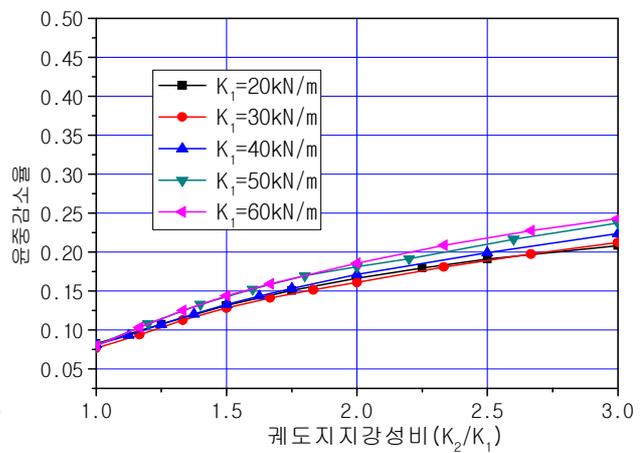
그림 4. 궤도지지강성변화구간에서의 차체가속도

4.2 윤증변동율

그림 5는 강성변화구간에서 발생하는 윤증감소율의 최대값을 궤도지지강성비에 따라 나타낸 것이다. 이들 결과로부터, 접속구간에서 윤증감소율은 저강성 구간의 강성의 크기에 따라 그다지 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, 또한 열차가 저강성구간에서 고강성구간으로 통과할 때가 반대 방향으로 통과할 때보다 매우 크게 발생하고 지지강성변화율에 따라 증가율도 큰 것을 알 수 있다. 윤증감소율 기준값 0.37를 적용하면 지지강성변화율 한계 값은 2.5정도인 것을 알 수 있다.



(a) 열차 통과방향: 저강성(k_1) → 고강성(k_2)

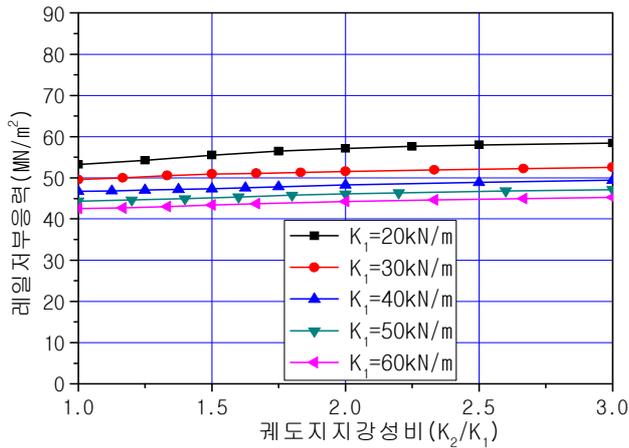


(b) 열차 통과방향: 저강성(k_1) ← 고강성(k_2)

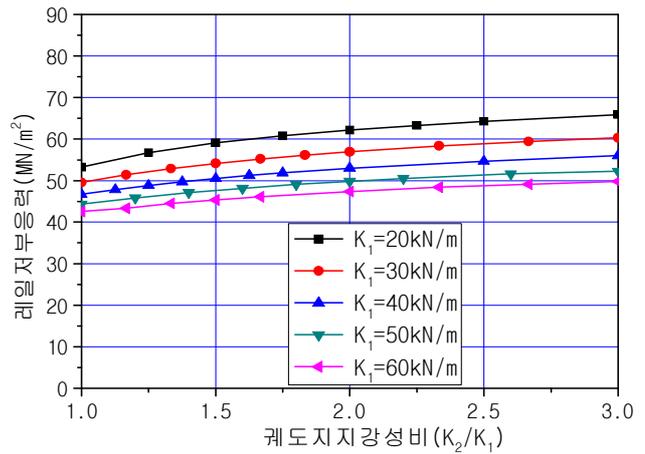
그림 5. 궤도지지강성변화구간에서의 윤증감소율

4.3 레일저부응력

그림 6은 강성변화구간에서 발생하는 레일저부응력의 최대값을 궤도지지강성비에 따라 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 접속구간에서 레일저부응력은 저강성 구간의 강성이 작을수록 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 또한 열차가 고강성 구간에서 저강성 구간으로 통과할 때가 반대 방향으로 통과할 때보다 다소 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 모든 경우에 대하여 레일저부응력 기준인 80MN/m^2 보다는 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 레일저부응력은 접속구간에서 지지강성변화율을 제한하는 조건으로 작용하지 않음을 알 수 있다.



(a) 열차 통과방향: 저강성(k_1) → 고강성(k_2)

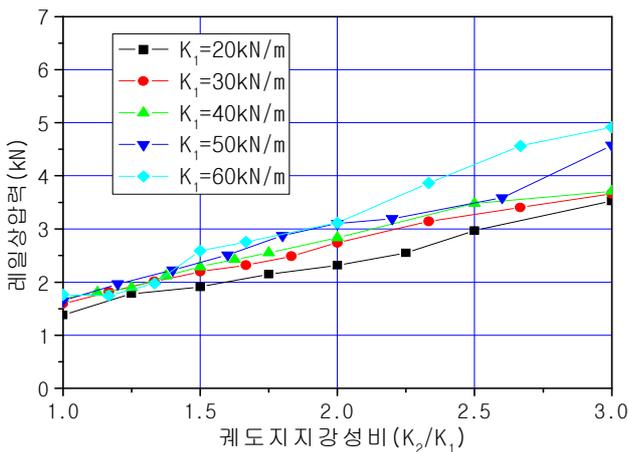


(b) 열차 통과방향: 저강성(k_1) ← 고강성(k_2)

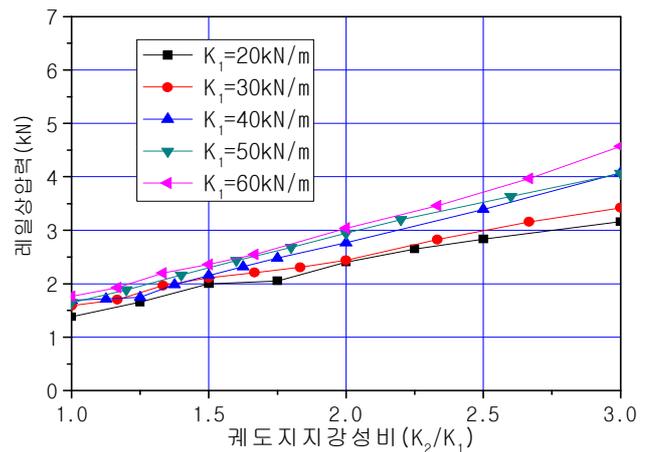
그림 6. 궤도지지강성변화구간에서의 레일저부응력

4.4 체결구 압상력(Uplift force)

그림 7는 강성변화구간에서 발생하는 체결구압상력의 최대값을 궤도지지강성비에 따라 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 접속구간에서 체결구압상력은 저강성 구간의 강성이 클수록 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 열차가 고강성 구간에서 저강성 구간으로 통과할 때와 반대 방향으로 통과할 때가 거의 비슷한 정도의 압상력이 발생하는 것을 알 수 있다. 콘크리트궤도에 사용되는 체결구의 경우 Pandrol SFC인 경우 초기 체결력이 17.2kN, Vossloh system 300-1인 경우 29.0 kN로서 이중 적은 값을 적용하여 70%를 취하면 12kN 정도이다. 따라서 이 값을 기준 값으로 정하면 체결구압상력은 모든 경우에 대하여 기준값 보다 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 체결구압상력은 접속구간에서 지지강성변화율을 제한하는 조건으로 작용하지 않음을 알 수 있다.



(a) 열차 통과방향: 저강성(k_1) → 고강성(k_2)



(b) 열차 통과방향: 저강성(k_1) ← 고강성(k_2)

그림 7. 궤도지지강성변화구간에서의 체결구압상력

5. 결 론

궤도지지강성 변화구간에서 저강성구간의 강성이 20, 30, 40, 50, 60kN/m인 경우에 대하여, 강성변화율(k_2/k_1)이 1~3까지 변화할 때 차체가속도, 운중감소율, 레일저부응력, 체결구압상력을 평가하여본 결과 차체가속도, 레일저부응력, 체결구압상력은 접속구간에서 지지강성변화율을 제한하는 조건으로 작용하지 않음을 알 수 있었으며, 운중감소율만이 제한요소로 작용하며 열차속도 350km/h에 대하여 2.5정도인 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 三浦重 (1995) 軌道構造の動特性モデルの構築. 鐵道總研報告, Vol.9 No.12, 鐵道總合技術研究所, 日本, pp. 7-12.
2. 石田誠, 三浦重, 河野昭子 (1997) 軌道動的應答モデルとこの解析結果. 鐵道總研報告, Vol.11 No.2, 鐵道總合技術研究所, 日本, pp. 19-26.
3. ERRI D71 (1970) Deformation properties of ballast. *Stresses in the rails, the ballast and in the formation resulting from traffic loads*, RP No.10 Vol.1, European Rail Research Institute, The Netherlands, pp. 27-31.
4. Grassie, S., Gregory, R., Harrison, D. and Johnson, K. (1982) The dynamic response of railway track to high frequency vertical excitation, *Journal Mechanical Engineering and Science*, Vol.24, ASME, New York, pp. 103-111.