

장대레일궤도의 온도좌굴에 영향을 미치는 매개변수 연구

Parametric Study on Thermal Buckling of CWR Tracks

최동호*
Choi, Dong-Ho

김호배**
Kim, Ho-Bae

ABSTRACT

The lateral stability of curved continuous welded rail (CWR) is studied for buckling prevention. This study includes the influences of vehicle induced loads on the thermal buckling behavior of straight and curved CWR tracks. Quasi-static loads model is assumed to determine the uplift region, which occurs due to the vertical track deformation induced by wheel loads of vehicle. Parametric numerical analyses are performed to calculate the upper and lower critical buckling temperatures of CWR tracks. The parameters include track lateral resistance, track curvature, longitudinal stiffness, tie-ballast friction coefficient, axle load, truck center spacing, and the ratio of lateral to vertical vehicle load. This study provides a guideline for the improvement of stability for dynamic buckling in CWR tracks

1. 서론

일반 궤도구조의 신축이음은 소음 및 진동을 발생시키고 구조적인 약점으로 작용한다. 이런 단점으로 인해 신축이음을 서로 연속적으로 용접한 장대레일은 사용성, 경제성 및 유지관리 측면에서 많은 이점을 가지고 있어 지속적으로 사용이 증가하고 있다. 그러나 장대레일에서는 온도 증가에 따른 큰 압축력이 장대레일에 작용함에 따라 궤도의 횡방향 좌굴 발생위험이 크다. 1980년대 후반까지 호주 퀸즈랜드 철도의 경우, 궤도 좌굴에 의한 사고가 연간 90-150건 정도에 달하며, 미국연방철도국 자료에 의하면 궤도좌굴에 따른 탈선사고가 연간 40-174건 정도로 보고되었다. 따라서 이러한 탈선사고의 방지 및 주행안정성 측면에서 궤도의 횡적 안정성을 평가하는 것은 매우 중요한 사항이다.

여러 연구결과에 따르면 궤도 도상의 비선형적 거동을 보여주며 이는 레일의 온도변화와 더불어 레일의 축력에 영향을 미친다. 또한 궤도는 레일, 침목, 체결재가 결합하여 지반위에 연속적으로 배치되므로 경계조건을 규정하기 어려우며, 궤도의 초기배치 상태 및 열차하중의 유무는 좌굴에 영향을 미치므로 좌굴온도 결과의 정확도 및 신뢰도를 높이기 위해서는 도상의 비선형적 특성, 궤도의 곡률 및 열차하중 효과등을 고려하여 해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 열차하중하에 있는 직선 및 곡선 장대레일의 온도좌굴 해석을 위해 좌굴 매카니즘을 기초로 하여, 유사정적 하중 모델을 적용 수치적 방법을 이용하여 해석하였다. 또한 차량하중이 좌굴온도에 미치는 영향을 평가하기 위해 좌굴해석에 사용되는 주요변수들에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 고려된 변수들은 궤도의 횡방향 저항, 궤도의 곡률, 종방향 강성, 침목과 도상의 마찰계수, 대차 중심간 거리, 수직하중에 대한 수평하중비(L/V)등이다. 매개변수 해석은 각 변

* 한양대학교 도시건설환경공학과군 토목공학과 조교수, 정회원

** 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

수의 정량적 효과를 알기 위해 연구변수 이외의 다른 변수는 고정하고 연구변수만을 변화시켜 수행하였으며, 해석 결과는 기존의 정적 좌굴 해석 결과와 비교 분석하였다

2. 온도좌굴 이론

그림 1은 레일의 전형적인 좌굴온도 곡선으로 상부좌굴온도($T_{b,max}$)는 외부의 하중이나 에너지의 도입 없이 좌굴이 발생하는 온도증가를 의미하며, 하부좌굴온도($T_{b,min}$)는 외부의 하중이나 에너지의 도입시에 좌굴이 발생할 수 있는 최소의 온도증가를 의미한다. 만약 두 개의 좌굴온도가 한점에서 일치하는 경우 점진적 좌굴이라 한다(Samavedam et al., 1993; Choi et al., 1999). 그림 2는 침목의 강성을 체결재에 포함시켜 두 레일과 일치 거동한다는 가정하에(Van, 1998) 궤도의 장대 레일 궤도의 좌굴 전과 좌굴 후의 형상을 보인 것이다. 본 해석에서는 두 영역, 좌굴영역(buckled zone)과 인접영역(adjoining zone)으로 나누어 미분방정식을 구성하고, 좌굴영역에서는 종방향 변위는 무시하고, 인접영역에서는 횡방향 변위는 무시한다고 가정하였다.

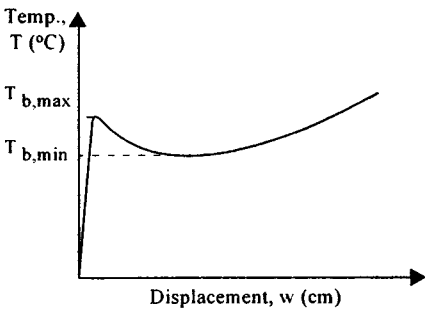


그림 1. 좌굴온도 곡선

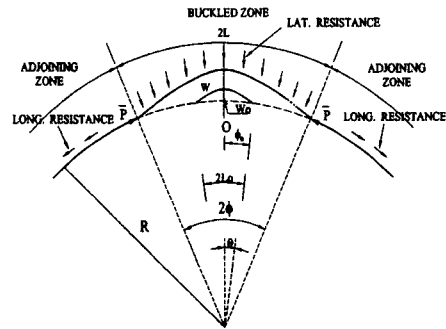


그림 2. 곡선 CWR 궤도의 좌굴전과 좌굴후의 형상

좌굴영역 ($0 \leq \theta \leq \phi$) 및 인접영역 ($\theta > \phi$)의 지배 방정식은 연속성 및 평형상태로부터 다음과 같이 표현될 수 있다(Samavedam et al., 1993; Choi et al., 2000).

$$\text{좌굴영역: } \frac{EI_{zz}}{R^4} \frac{d^4 w}{d\theta^4} + \frac{(\bar{P} - \tau_o)}{R^2} \frac{d^2 w}{d\theta^2} = -F[w(\theta)] + \frac{\bar{P}}{R} - \frac{\bar{P}}{R^2} \frac{d^2 w_o}{d\theta^2} \quad (\text{횡방향 평형}) \quad (1)$$

$$U(\phi) = -\frac{\bar{P}R\phi}{AE} - Z + \alpha TR\phi \quad (\text{종방향 평형}) \quad (2)$$

$$\text{인접영역: } \frac{AE}{R^2} \frac{d^2 u}{d\theta^2} = k_f u \quad (\text{종방향 평형}) \quad (3)$$

여기서, w 는 횡방향 변위, R 은 궤도의 곡선반경, I_{zz} 는 횡방향 휨에 대한 레일의 단면 2차모멘트, $F[w(\theta)]$ 는 횡방향 저항분포 함수, τ_o 는 체결재의 단위길이당 선형 비틀림강성, \bar{P} 는 레일의 압축력이고, w_o 는 횡방향 초기변형 결함, U 는 좌굴영역에서의 종방향 변위, u 는 인접영역에서의 종방향 변위, T 는 온도변화, Z 는 걸보기 변형길이로 초기변형과 곡률이 있을 경우 아래식과 같다(Allen, 1980).

$$Z = \int_0^\phi \left(\frac{w'^2}{2R^2} + \frac{w'_o w}{R^2} - \frac{w'\theta}{R} \right) R d\theta \quad (4)$$

(1)~(3)에 경계조건 ($\theta=0$ 에서 $w'=0$, $U=0$ $\theta=\pm\phi$ 에서 $w=w'=w''=0$, 좌굴영역에서 무한이

떨어져있을 때 $u = u' \rightarrow 0$)과 연속 조건 ($\theta = \pm \phi$ 일 때 $u = U, u' = U'$)을 적용하면(Kerr, 1976) 다음과 같은 좌굴온도식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{\bar{P}}{AE\alpha} + \frac{Z\psi}{\alpha(1+\psi L)} \quad (5)$$

여기서, $\psi = \sqrt{k_f/AE\alpha}$ 이다.

궤도 좌굴에 대한 열차하중의 효과는 크게 궤도의 수직처짐에 의한 도상 반력의 변화와 열차이동에 따른 횡하중의 발생으로 궤도의 횡방향 저항에 영향을 준다. 이러한 열차하중이 좌굴온도에 미치는 효과를 고려하기위해 유사정적 하중 모델을 가정하여 궤도의 수직방향의 처짐에 대한 미분방정식을 유도하였다.

$$EI_Y v'' + k_r v = \sum \delta_i(\theta - \theta_i) Q_v + W \quad (6)$$

여기서, EI_Y 는 휨강성, k_r 는 도상의 강성, Q_v 는 수직 바퀴 하중, δ_i 는 dirac delta funtion, W 는 단위길이당 선로자중이다. 식 (6)을 풀고 수직처짐에 의한 도상의 반력과 열차의 수평하중을 고려하면 궤도의 횡방향 저항은 F_v 은 다음과 같이 구분되어 진다.

$$F_v = \begin{pmatrix} F - \mu W + Q_H(\theta) & \text{상향처짐 지역} \\ F + \mu k_r v(\theta) + Q_H(\theta) & \text{그 외 지역} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 F 는 윤하중 부재시의 횡방향저항이고, μ 는 도상과 침목바닥과의 마찰계수이며, $Q_H(\theta)$ 는 열차의 횡방향 하중 분배함수이다.

3. 매개변수 해석

레일의 좌굴온도에 영향을 주는 주요변수의 정량적 효과를 평가하기 위해 수치적 방법을 이용하여 매개변수 해석을 수행하였다. 연구변수를 제외한 다른 변수들은 특정값으로 고정하고, 연구변수만 변화시켜 좌굴온도에 대한 민감성을 살펴보는 방식을 선택하였다. 연구변수가 아닌 다른 변수들의 고정값들은 레일크기 60kg, 궤도의 곡률은 5° , 탄성계수 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 열팽창계수 $\alpha = 1.15 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 궤도의 정적 횡방향 저항 F 는 700 kg/m , 종방향 저항 강성계수 k_f 는 40 kg/cm/cm , 체결재의 비틀림강성 $\bar{r}_o = 0$, 궤도의 초기변형 결함폭 δ_o 는 2.5 cm , 초기 변형길이 L_o 는 600 cm , 궤도의 마찰계수 $\mu = 0.6$, 바퀴 수직하중 $Q_v = 17 \text{ ton}$, 도상의 수직저항계수 $k_r = 200 \text{ kg/cm/cm}$, 대차 중심간 거리 $D_1 = 10 \text{ m}$, 축간거리 $D_2 = 180 \text{ cm}$ 이고 자중은 콘크리트 침목을 사용하였을 때를 고려하였다. 해석은 열차하중을 재하한 후 상향처짐이 생기는 구간에 대하여 수행하였으며, 해석절차는 식 (1)을 Fourier 급수방법을 적용하여 각 변수의 해를 구하며, 온도변화 T 와 최대 횡방향변위 w_{\max} 의 관계를 통해 좌굴온도곡선을 나타내었다.

3.1 횡방향 저항 F 의 영향

횡방향 저항은 크게 침목 바닥과 도상의 마찰력 F_b , 침목의 긴 옆면과 도상의 마찰력 F , 침목 끝에서의 도상의 지지력 F_r 로 구성되며, 이 3가지의 저항력 비율은 실제 도상 및 침목상태에 따라 변한다. 많은 실험결과로 좌굴시의 횡방향 저항은 매우 복잡한 성격을 가지며 비선형 거동을

보여주나 본 연구에서는 세부분의 합 저항값 F 를 일정한 상수로 가정하였다. 이 횡방향 저항 F 의 크기에 따라 좌굴온도의 변화를 알기 위해 일정한 상수 값으로 가정하여 해석하였다. 그림 3과 그림 4는 F 의 값을 500, 600, 700, 800, 900, 1000 kg/m 으로 변화시킬 때의 좌굴온도 곡선의 변화를 보여주고 있다. 횡방향 저항이 증가함에 따라 상부 및 하부좌굴온도가 증가하였으며, 상부좌굴온도가 횡방향저항에 더 민감함을 보여주고 있다. 이러한 결과들은 궤도의 저항성을 결정하는 도상자갈의 종류 및 다짐정도가 궤도의 좌굴온도에 영향을 주는 변수임을 보여주고 있다.

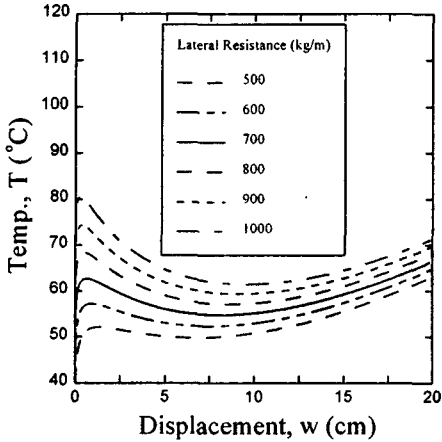


그림 3. 횡방향 저항에 따른 좌굴온도 곡선

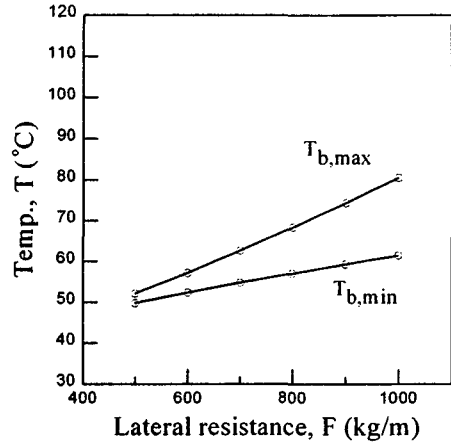


그림 4. 횡방향 저항의 영향

3.2 궤도곡률의 영향

궤도곡률의 영향을 알고자 궤도를 직선에서 9° 까지 변화시켜 해석결과를 그림 5, 6에 나타내었다. 좌굴에서의 곡률의 영향은 매우 크며 상부좌굴온도와 하부좌굴온도 모두 곡률이 커질수록 낮아지며 상부좌굴온도가 더 민감함을 보인다. 또한 좌굴해석시 궤도곡률이 어느정도 커지면 상부와 하부 좌굴온도 한 점에서 일치하는 점진적인 좌굴이 발생함을 보였다.

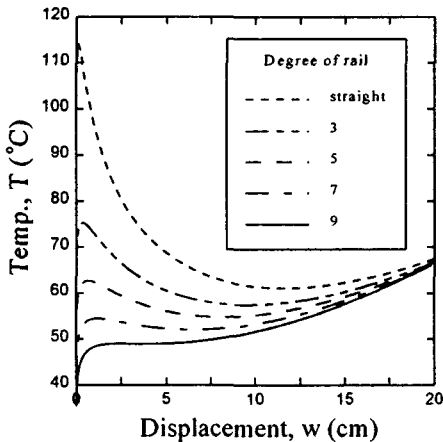


그림 5. 궤도곡률에 따른 좌굴온도 곡선

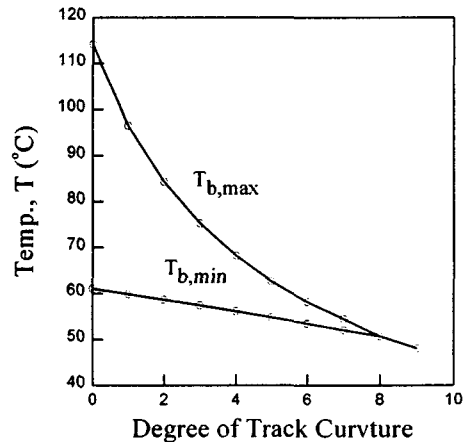


그림 6. 궤도 곡률의 영향

3.3 비선형 종방향 저항의 영향

궤도의 종방향저항은 하중에 따른 변위 관계가 비선형거동을 따르고 있다. 그림 7는 궤도의 종방향 저항의 비선형성이 궤도 횡방향 좌굴에 미치는 정량적 효과를 평가하기 위해 저항특성을 일정한 상수, 선형, 비선형으로 가정하여 각 경우에 대한 해석결과를 나타내었다. 해석결과는 종방향저항을 상수로 가정시 선형 또는 비선형 경우보다 상부 및 하부 좌굴온도가 약간 큰 값을 나타내고, 선형 해석시 상부 및 하부 좌굴온도가 비선형 해석결과와 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 궤도 좌굴이 선형부분에서 발생함을 나타내 주고 있다. 따라서, 본 연구에서 수행한 변수연구는 궤도의 종방향 저항이 선형거동한다는 가정하에 종방향 강성계수 k 를 이용 선형해석하였다.

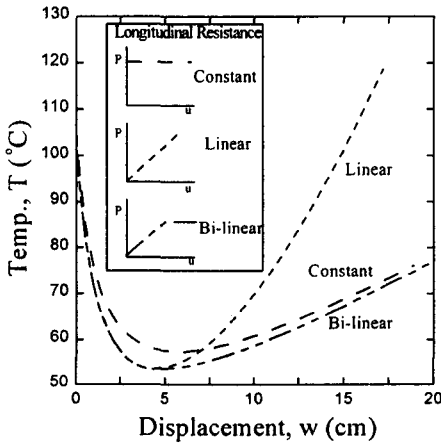


그림 7. 종방향저항 특성에 따른 좌굴온도

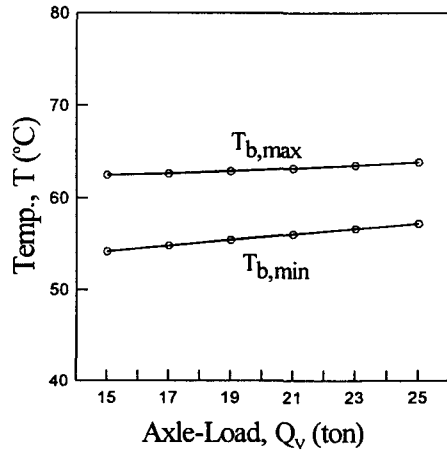


그림 8. 운하중 크기의 영향

3.4 운하중 Q_v 의 영향

운하중의 영향을 살펴보기위해 운하중을 15에서 23 ton까지 변화시켜 해석한 결과를 그림 8에 나타내었다. 운하중이 증가함에 따라 상부 및 하부좌굴온도가 약간 상승함을 보여주었다. 본 해석 결과에서는 운하중 변화에 대한 좌굴온도의 민감성은 크지 않았으나 운하중이 좌굴온도에 영향을 미칠때는 차량종류 및 궤도의 자중에 따라 다르게 작용될 수 있다.

3.5 침목바닥과 도상의 마찰계수 μ 의 영향

횡방향 저항에서 침목 바닥의 마찰력은 침목바닥과 도상의 마찰계수에 지배를 받는다. 또한 마찰계수는 침목 및 도상자갈의 종류, 침목의 사용기간, 다짐정도에 의해 결정된다. 좌굴거동에 대한 마찰계수의 영향은 0.4에서 0.8까지 변화시켜 해석하여 그림 9에 나타내었다. 예상했던 대로 마찰계수가 증가할수록 상부와 하부좌굴온도 모두 증가하였다. 본 연구에서 수행한 범위에서 좌굴온도의 증가폭은 5°C 내외였다. 이는 본 해석에서 마찰계수에 대한 변수 해석을 수행할 때 횡방향저항력은 700 kg/m²이고 이중 침목바닥의 마찰력 비율은 25%정도로 다른 2개의 저항력보다 상대적으로 적어서 마찰계수의 영향이 작게 나타났다. 한편, 전체 횡방향 저항력을 작게 택하였을 때는 침목 바닥의 마찰력 비율이 높아서 마찰계수의 영향은 커질것입니다.

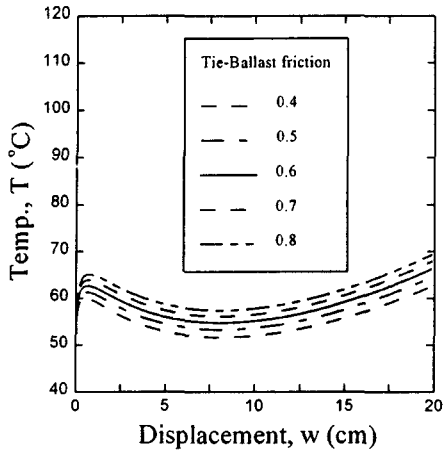


그림 9. 침목 바닥고 도상 마찰계수에 따른 좌굴온도 곡선

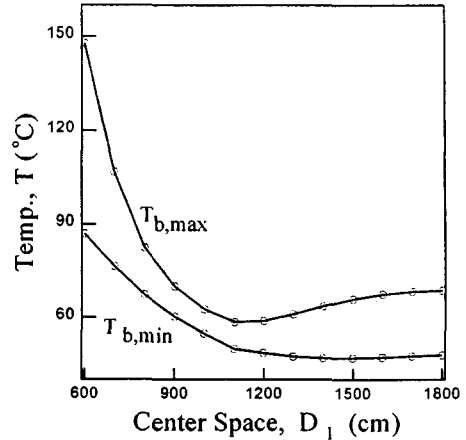


그림 10. 대차 중심간 거리변화에 따른 좌굴온도

3.6 대차 중심간 거리 D_1 의 영향

대차 중심간 거리를 600 cm에서 1800 cm로 변화시키며 좌굴온도에 미치는 영향을 평가하였다. 각 차량은 축간거리가 180 cm이고 4개의 운중하중이 작용할 때 해석결과를 그림 10에 나타내었다. 상부좌굴온도가 하부좌굴온도보다 민감하며 하부좌굴온도는 대차 중심간 간격이 클수록 감소한다. 반면에 상부좌굴온도는 중심간 간격이 커짐에 따라 급격히 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 처음에 하중간격이 작을 때는 상향처짐이 발생하지 않아 열차하중이 레일의 좌굴 강도를 증대시켜주나, 점차 간격이 증가함에 따라 상향처짐 지역이 커져 횡방향 저항을 약화시키는 것이다. 그러나 어느정도 이상의 대차 중심간 거리가 되면 하중 작용점이 좌굴영역에서 매우 멀어지므로 그 영향이 감소하여 점차 좌굴온도가 증가한다.

3.7 수직하중에 대한 수평하중 비 Q_H/Q_V 의 영향

Q_H/Q_V 비의 좌굴온도에 미치는 영향을 평가하기 위해 0.25에서 0.5까지 변화시켜 해석하였다. 동시에 수직하중에 대한 수평하중비는 대차 중심간 거리와 좌굴길이에 따라 영향을 받으므로 대차 중심간 거리를 같이 변화시키면서 해석을 수행하였다. 상부좌굴온도의 결과와 하부좌굴온도 결과를 그림 11와 그림 12에 각각 나타내었다. 상부좌굴온도는 Q_H/Q_V 비의 변화에 무관하며, 하부좌굴온도는 대차 중심간 거리가 1200 cm 미만에서는 Q_H/Q_V 비가 증가함에 따라 약간씩 감소함을 보여주며, 1200 cm이상인 경우는 상부좌굴온도와 같이 Q_H/Q_V 비의 변화에 무관하였다. 이러한 결과는 상향처짐지역에서 좌굴이 발생하기 때문에 하중 재하점이 좌굴영역에서 다소 멀어져 수평하중의 영향이 감소한 것으로 판단된다.

3.8 동적 좌굴해석과 정적 좌굴해석의 결과 비교

좌굴온도에 미치는 전반적인 열차하중의 영향을 평가하기 위해 온도만을 고려한 정적 좌굴해석 결과와 비교 연구하였다. 비교대상은 T.G.V. 고속열차의 운행시 받을 수 있는 2개의 하중조건을 적용하였다. 열차의 하중조건은 표 1에 나타내었고 그 외의 조건은 정적 좌굴해석 시와 동일한 조건을 적용하였다. 해석 결과는 그림 13에 나타내었다. 하중조건 2에서 상부좌굴온도가 가장 낮은

것으로 나타났다. 또한 모든 경우에서 하부좌굴온도는 거의 비슷한 값을 나타내고 있었으며, 하중 조건 1의 상부좌굴온도는 오히려 정적 좌굴해석 결과보다 높게 나타났으며 하부좌굴온도는 약간 낮게 나타났다. 이는 열차하중으로 인해 반드시 레일의 좌굴강도가 약해지는 것이 아니라, 여러 조건들의 복합적인 작용이 이루어지므로 좌굴거동의 안정성을 해석하기 위해서는 정적과 동적 좌굴해석이 동시에 이루어져야 함을 나타낸다.

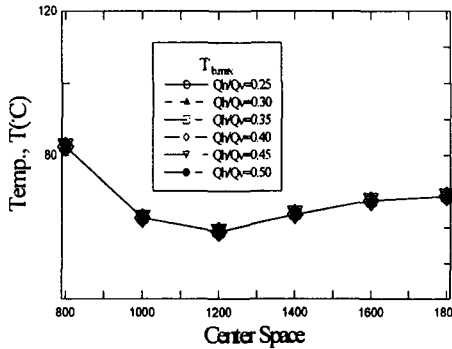


그림 11. 상부좌굴온도에 미치는 Q_H/Q_V 비의 영향

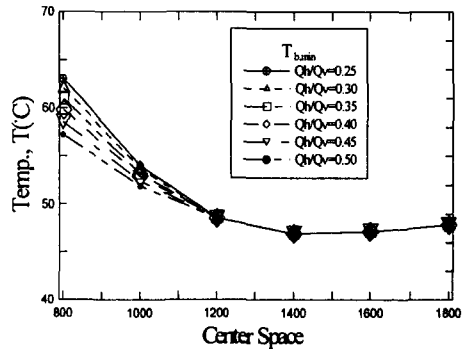


그림 12. 하부좌굴온도에 미치는 Q_H/Q_V 비의 영향

표 1. 하중조건

Load Case	Axle Load (kg)	D1 (cm)	D2 (cm)
1	17,000	1,870	300
2	17,000	1,400	300

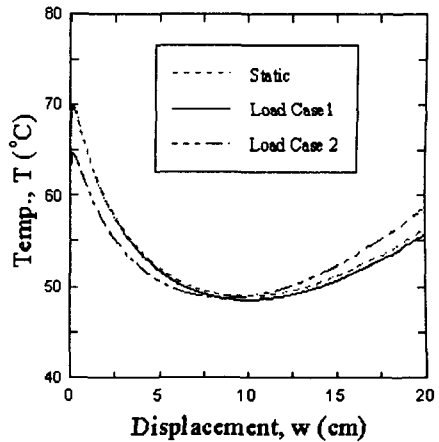


그림 13. 정적과 동적좌굴 비교

4. 결론

본 연구에서는 온도변화에 따른 장대레일의 좌굴 안정문제에 있어 열차하중의 영향을 연구하기 위해 기존의 정적 온도 좌굴이론을 기초로 하여 유사정적 하중모델을 적용하여 레일궤도의 좌굴 해석을 수행하였다. 해석결과들을 이용하여 장대레일 좌굴에 영향을 주는 변수들의 정량적 효과를 평가하기 위한 매개변수해석을 하였으며, 열차를 고려하지 않은 정적 좌굴해석 결과와 비교하는 연구를 수행하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 횡방향 저항은 좌굴에 중요한 변수로 저항이 증가할수록 좌굴온도도 증가하였다. 특히, 상부좌굴온도는 횡방향 저항의 변화에 매우 민감한 반응을 보였다.
- 2) 궤도의 종방향 저항의 비선형성은 후좌굴 거동에는 영향을 미치지만 상부와 하부좌굴온도를 해석하는데 있어서는 선형해석과 차이가 없음을 알 수 있었다.
- 3) 궤도의 곡률이 커지면 상부 및 하부좌굴온도가 낮아져 좌굴에 불리함을 보여주었다. 또 어느

정도 곡률이 커지면 상부 및 하부좌굴온도가 일치하는 점진적 좌굴경향을 띤다. 따라서 궤도는 가능한 직선에 가까운 배치가 좌굴방지에 유리하다.

- 4) 궤도 횡방향저항에 영향을 주는 도상과 침목의 마찰계수는 도상자갈과 침목의 종류, 침목의 사용기간, 도상의 다짐정도에 따라 결정되며, 이 마찰계수가 커질수록 상부 및 하부좌굴온도가 증가함을 알 수 있었다.
- 5) 윤하중이 증가할수록 상부 및 하부좌굴온도는 증가하였다. 그러나 윤하중 변화에 따른 좌굴 온도의 민감성은 크지 않았다.
- 6) 대차 중심간 거리에 따른 좌굴온도의 변화는 일정하지 않다. 하부좌굴온도보다는 상부좌굴온도가 큰 영향을 받았으며 본 연구범위에서는 11 m의 대차 중심간 거리에서 상부좌굴온도가 가장 낮은 것으로 나타났다.
- 7) 수직하중에 대한 수평하중 비의 영향은 대차 중심간 거리의 따라 다르게 나타났다. 하부좌굴온도는 짧은 대차 중심간 거리를 가진 열차에 대해서만 영향을 받았으며, 상부좌굴온도는 영향을 받지않았다.

참고문헌

1. 김호배, 최동호(1999), "곡선 장대레일 궤도의 온도좌굴 해석", 한국강구조학회 학술발표논문집, pp. 199-206.
2. 최동호, 이종득, 김호배(1998), "직선 장대레일 궤도의 좌굴온도", 대한토목학회 학술 발표회의, Vol. 4, pp. 253-256.
3. 최동호, 김호배(2000), "곡선 장대레일 궤도의 온도좌굴해석", 대한토목학회논문집, 제20권, 제2-A호, pp. 283-291.
4. 최동호, 김호배(2000), "장대레일 궤도의 온도좌굴 거동에 미치는 열차하중의 영향", 한국강구조학회논문집 제12권, 6호, pp. 727-736
5. D. H. Choi, D. I. Chang, J. D. Lee, and H. B. Kim(1998), "On the Thermal Buckling Temperature of Continuous of Welded Rail", *Proceedings of Fifth Pacific Structural Steel Conference*, Vol.1, pp. 253-258.
6. Choi, Dong Ho and Kim Ho Bae(1999), "Dynamic Buckling analysis of Curved Continuous Welded Rail under vehicle Load", 5th Korea-Japan Joint Seminar on Steel Bridge, Pusan, Korea, October 14-15.
7. A. D. Kerr(1975), "Lateral buckling of railroad tracks due to constrained thermal expansions - a critical survey, in *Railroad Track Mechanics and Technology*", Proceedings of Symposium held at Princeton University, 21-23.
8. A. D. Kerr(1976), "On the Derivation of Well Posed Boundary Value Problems in Structural Mechanics", *Int. J. Solid Structures*, Vol. 12, pp. 1-11.
9. A. D. Kerr(1976), *An analysis of thermal track buckling in lateral plane*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Report No. FRA/DOSD-76-285.
10. A. D. Kerr(1980), "An improved analysis for thermal track buckling", *Int. J. Non-Linear Mech.*, Vol., 15, pp. 99-104.
11. G. Samavedam, A. Kish, and D. Jeong(1985), *Influence of Vehicle Induced Loads on the Lateral Stability of CWR Track*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Dot/FRA/ORD-85-3.
12. G. Samavedam, A. Kish, A. Purple, and J. Schoengant(1993), *Parametric Analysis and Safety Concepts of CWR Track Buckling*, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Dot/FRA/ORD-93/26.