

도상이 장대 레일의 선형 온도 좌굴에 미치는 영향

Effect of Track Resistance on Linear Thermal Buckling Characteristics of CWR

강영종*¹
Kang, Young-Jong

임남형*²
Lim, Nam-Hyung

신정렬*³
Shin, Jeong-Ryol

양재성*⁴
Yang, Jae-Seong

ABSTRACT

For many decades, the railway was constructed using tracks with jointed rails of relatively short lengths in accordance with rolling and handling technology. The joints cause many drawbacks in the track and lead to significant maintenance cost. So, railroad engineers became interested in eliminating joints to increase service loads and speeds by improving rolling, welding, and fastening technology. Continuous welded rail(CWR) track has many advantages over the conventional jointed-rail track. But, in the case of the elimination of rail joints, it may cause the track to be suddenly buckled laterally by thermal and vehicle loads. Thermal loads are caused by an increase in the temperature of railway track. In this paper, CWR track model and CWRB program are developed for linear buckling analysis using finite element method(FEM). The finite element discretization is used with a total of 14 degrees of freedom for each rail element. The stiffness of the fastener, tie, and ballast bed are included by a set of spring elements. The investigation on the buckling modes and temperature of CWR track is presented in the paper.

Keyword : CWR, Track, Rail, Buckling, Thermal force, FEM

1. 연구 배경 및 연구 내용

기존의 일반 궤도 구조는 온도 팽창에 대비하여 레일과 레일 사이에 신축 이음(Expansion Joint)을 두고 서로 기하학적으로 연결되어 있다. 그러나 이런 연결 부분은 구조적으로 궤도 구조를 약하게 할 뿐 아니라 궤도 유지비를 증가시키고 열차 주행에 많은 에너지 소비를 가지고 온다. 현대의 고속 주행의 열차에 있어서는 열차가 궤도의 이런 이음매 부분을 통과할 때 열차의 속도 저하와 함께 많은 소음과 진동을 야기하는 등이 문제는 더 부각되고 있다. 그래서, 레일 사이의 신축 이음을 제거하고 대신 서로 연속적으로 용접·연결되어 있는 CWR(Continuous Welded Rail) 궤도 구조를 많이 사용하고 있다. 이 CWR궤도 구조의 사용으로 위 기술한 기존 레일의 단점들을 어느 정도 해소할 수 있었다. 하지만, 이 또한 온도로 인한 레일의 좌굴이라는 레일의 안정성 문제를 야기했다. 이 CWR 궤도의 안정성을 확보하기 위해서 많은 국가의 연구 센터에서 여러 해에 걸쳐 이론적인 연구와 실험들이 행해져 오고 있으나 국내에서는 아직 이 연구에 대해서는 미비한 상태에 있다. 그러므로, 본 연구에서는 장대 레일 좌굴시 휨-비틀림 거동을 정확히 모사하기 위하여 레

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과, 부교수(02-3290-3317)

*2 비회원, 고려대학교 토목환경공학과, 박사과정(02-953-1617)

*3 비회원, 고려대학교 토목환경공학과, 석사과정(02-953-1617)

*4 정회원, 한국철도기술연구원 시설연구부, 책임연구원(0343-61-8531)

일의 요소는 뒨(warping)을 고려하여 한 절점당 7개의 자유도를 가지며, 침목과 같은 경계를 스프링으로 모사하였다. 그리하여, 범용 프로그램으로는 모사할 수 없는 침목의 레일 단면내 위치를 정확히 모사하여 정확한 장대 레일의 좌굴 해석 및 좌굴 거동 특성을 파악할 수 있도록 레일의 삼차원 해석 모델을 개발하고, 유한 요소 정식화 과정을 거쳐 레일의 좌굴 해석 프로그램인 CWRB를 개발하였다. 이 CWRB 프로그램을 이용하여 본 논문에서는 침목, 도상, 체결구의 궤도 인자들이 레일의 안정성에 미치는 영향을 분석하고 좌굴 임계 온도를 산정하여 좌굴이 방지된 안전하고 경제적인 궤도의 설계 및 건설을 위한 기틀을 마련한다.

2. 레일의 삼차원 해석 모델

2.1 해석모델

레일 단면 요소의 개발시 전체 포텐셜 에너지의 최소 법칙을 이용하고 레일의 단면은 원래의 형상을 유지한다는 것과 Euler-Bernoulli의 기본적인 가정을 이용하였다. 단면의 특성을 나타내는 단면 정수값은 서로 일치하도록 하면서 레일의 단면을 일축 대칭 I형 단면으로 이상화시키고, Fig. 1에서 보는 것과 같이 x, y, z방향 변위와 회전 변위 즉, 6개의 자유도에 좌굴을 고려하여 절점당 7개의 자유도를 가지는 레일 요소를 개발한다.

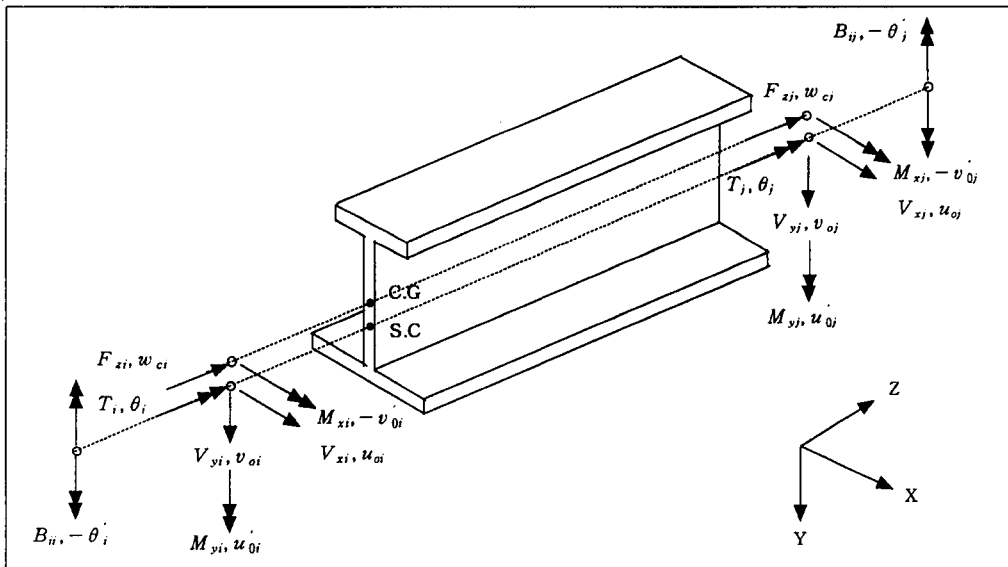


Fig. 1 Nodal Displacement and Force Components

2.1.1 레일의 지배 미분 방정식

전체 포텐셜 에너지는 변형된 구체에 저장된 변형 에너지와 작용하중에 의한 포텐셜 에너지 감소량의 합으로 정의된다. 또한 전체 포텐셜 에너지의 1차 변분을 취하고 그것을 0으로 놓으면 식(1)과 같은 전체 포텐셜 에너지 최소 법칙의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\delta\Pi = \delta U + \delta V = 0 \quad (1)$$

δU 는 변분 변형 에너지로서 다음 식(2)와 같이 표현된다

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_V \sigma_x \delta \epsilon_x dV + \int_V \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} dV + \int_V \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} dV \\ &= \int_V \sigma_x \delta \epsilon_x^L dV + \int_V \tau_{xy} \delta \gamma_{xy}^L dV + \int_V \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}^L dV \end{aligned}$$

$$= \int_V \sigma_x \delta \varepsilon_x^N dV + \int_V \tau_{xy} \delta \gamma_{xy}^N dV + \int_V \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}^N dV \quad (2)$$

δV 는 작용 하중에 의한 포텐셜 에너지의 감소를 나타내는 것으로 다음 식(3)과 같이 표현된다.

$$\delta V = - \int_L q_i \delta u_i dz \quad (3)$$

여기에서 q_i 와 u_i 는 각각 표면력과 변위장을 나타낸다.

이를 이용하여 레일의 지배 미분 방정식을 구하면 다음 식(4)와 같다.

$$-F_x = q_x \quad (4-1)$$

$$-M_x'' - (F_x v_0 - M_y \theta') = q_y + m_x \quad (4-2)$$

$$M_y'' - (F_x u_0 - M_x \theta' + F_x y_0 \theta') = q_x - m_y \quad (4-3)$$

$$-B_i' - T_w' - (-M_y v_0 - M_x u_0 + F_x y_0 u_0 + \omega_a \theta') = m_x + m_w \quad (4-4)$$

여기에서 q_x, q_y, m_x 는 전단 중심축에 작용하는 등분포 하중과 등분포 비틀림 모멘트이며 q_x, m_x, m_y 는 도심 축에 작용하는 등분포 하중과 등분포 모멘트이다.

2.1.2 레일 단면의 유한 요소 정식화

(1) 형상 함수

식(4)의 지배 미분 방정식중에서 선형 지배 미분 방정식의 재차해를 사용하여 x, y, z방향 과 회전방향에 대한 형상 함수를 구하였다.

1) x방향 기준 변위, u_0

$$u_0 = [N_1 \ N_5 \ N_8 \ N_{12}] d^{u_0} = N_u d^{u_0} \quad (5)$$

$$N_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, \quad N_5 = L(\xi^3 + \xi - 2\xi^2), \quad N_8 = 3\xi^2 - 2\xi^3, \quad N_{12} = L(\xi^3 - \xi^2)$$

여기서, ξ 는 $\frac{z}{L}$ 을 나타내고 L은 요소의 길이를 의미한다.

2) y방향 기준 변위, v_0

$$v_0 = [N_2 \ N_4 \ N_9 \ N_{11}] d^{v_0} = N_v d^{v_0} \quad (6)$$

$$N_2 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3, \quad N_4 = L(-\xi^3 - \xi + 2\xi^2), \quad N_9 = 3\xi^2 - 2\xi^3, \quad N_{11} = L(-\xi^3 + \xi^2)$$

3) z방향 기준 변위, w_c

$$w_c = [N_3 \ N_{10}] d^{w_c} = N_w d^{w_c} \quad (7)$$

$$N_3 = 1 - \xi, \quad N_{10} = \xi$$

4) 단면의 회전 변위, θ

$$\theta = [N_6 \ N_7 \ N_{13} \ N_{14}] d^\theta = N_\theta d^\theta \quad (8)$$

$$N_6 = \frac{1}{D} [\alpha + \alpha k \sinh k - \alpha \cosh k - \alpha^2 x \sinh k + \alpha \sinh k \sinh(\alpha z) - \alpha \cosh k \cosh(\alpha z) + \alpha \cosh(\alpha z)]$$

$$N_7 = \frac{1}{D} [-\alpha z + \sinh k - k \cosh k + \alpha z \cosh k - k \sinh k \sinh(\alpha z) + \cosh k \sinh(\alpha z) \\ - \sinh(\alpha z) + k \cosh k \cosh(\alpha z) - \sinh k \cosh(\alpha z)]$$

$$N_{13} = \frac{1}{D} [\alpha - \alpha \cosh k + \alpha^2 z \sinh k - \alpha \sinh k \sinh(\alpha z) + \alpha \cosh k \cosh(\alpha z) - \alpha \cosh(\alpha z)]$$

$$N_{14} = \frac{1}{D} [k - \sinh k + \alpha z \cosh k - \alpha z + \sinh(\alpha z) - \cosh k \sinh(\alpha z) + \sinh k \cosh(\alpha z) - k \cosh(\alpha z)]$$

여기에서, $D=2\alpha-2\alpha \text{Cosh}(\alpha L)+\alpha^2 L \text{Sinh}(\alpha L)$ 이고, $k=\alpha L$ 이다.

(2) 레일의 선형 강성 행렬과 기하 강성 행렬

변형 에너지 U 는 레일의 단면을 선형 탄성체로 가정하면 식(9)와 같이 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V [D] (\epsilon)^2 dV = \frac{1}{2} \int_V [D] [(\epsilon^L) + (\epsilon^M)]^2 dV \quad (9)$$

여기에서 $[D]$ 는 응력과 변형을 관계의 물성치 행렬(Elasticity Matrix)이고 (ϵ) 는 변형을 행렬을 나타낸다.

식(9)를 전개하고 1차 변분을 취하면 식(10)과 같이 선형강성행렬(Linear Stiffness Matix), 좌굴해석시 필요한 기하강성행렬(Geometric Stiffness Matrix)을 얻을 수 있다.

$$\delta U = \delta(d_i)^T \left[\int_V [B_L]^T [D] [B_L] dV + \int_V [B_N]^T [\sigma_x^L] [B_N] dV \right] \quad (10)$$

여기에서 (d_i) 행렬은 변위 행렬이고, $[B]$ 행렬은 변형률을 절점 변위로 변환 시켜주는 행렬이다.

1) 선형 강성 행렬

선형 강성 행렬은 다음 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_L] = \int_V [B_L]^T [D] [B_L] dV = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $k_1 = EI_y \int_L N_u''^T N_u'' dz$, $k_2 = EI_x \int_L N_v''^T N_v'' dz$

$$k_3 = EA \int_L N_w'^T N_w' dz, \quad k_4 = EI_w \int_L N_\theta''^T N_\theta'' dz + GK_T \int_L N_\theta'^T N_\theta' dz$$

2) 기하 강성 행렬

기하 강성 행렬은 다음 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_G] = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & B \\ 0 & C & 0 & D \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & D & 0 & E \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A = -F \int_L N_u'^T N_u' dz$$

$$B = (-y_0 F_x + M_x) \int_L N_u'^T N_\theta' dz + (V_y) \int_L z N_u'^T N_\theta' dz$$

$$C = -F \int_L N_v'^T N_v' dz$$

$$D = (M_y) \int_L N_v'^T N_\theta' dz - (V_x) \int_L z N_v'^T N_\theta' dz$$

$$E = (-\gamma \int_L F_x - \beta_x M_x) \int_L N_\theta'^T N_\theta' dz - (\beta_x V_y) \int_L z N_\theta'^T N_\theta' dz$$

여기에서, γ_0^2 와 β_x 는 각각 전단중심에 대한 회전반경, 전단 중심축의 x축에 대한 일축 대칭 변수를 나타내는 것이다.

(3) 스프링 강성 행렬

Fig. 2와 같이 도상과 침목 사이의 상호작용으로 인한 탄성 지지 조건은 도상의 영향을 나타내는 종방향, 횡방향, 수직방향 스프링 요소와 체결구의 영향을 나타내는 z 방향에 대한 회전 스프링 요소를 합해 총 4개의 스프링 요소를 사용한다. 4개의 스프링 요소는 실제 궤도에서와 같이 레일의 하부 플랜지에 위치하는 것으로 모사되므로, 레일 요소의 절점 변위와 스프링 요소의 절점 변위가 일치하도록 다음 식(14)의 변환 행렬

을 이용해 식(13)의 스프링 요소의 변위를 레일 요소의 전단중심과 도심에 대한 변위로 환산하여 사용한다.

$$[\bar{k}_{sp}] = \begin{bmatrix} k_L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_V & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_H & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\{D_{sp}\} = [T_{sp}]\{D\}$$

$$\begin{bmatrix} u_{sp} \\ v_{sp} \\ w_{sp} \\ -v_{sp}' \\ u_{sp}' \\ \theta_{sp} \\ -\theta_{sp}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & YC & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -YS & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ -v_0' \\ u_0' \\ \theta_0 \\ -\theta_0' \end{bmatrix} \quad (14)$$

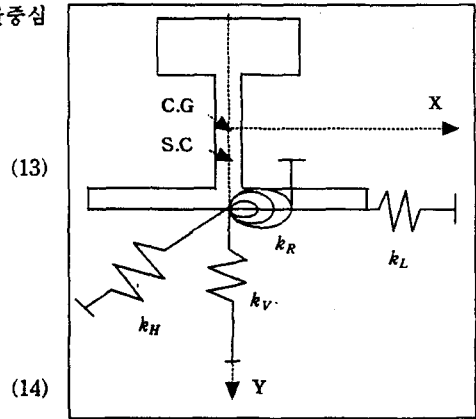


Fig. 2 Spring Element

여기서, YC, YS는 각각 레일 저부에서 레일 단면 중심까지의 거리와 전단 중심까지의 거리를 나타낸다. 식(13)의 강성 행렬은 식(14)의 변환행렬을 이용하여 식(15)와 같이 레일 요소의 강성 행렬과 결합시킬 수 있는 스프링 강성 행렬을 구할 수 있다.

$$[K_{sp}] = [T_{sp}]^T [\bar{k}_{sp}] [T_{sp}] \quad (15)$$

2.2 좌굴 해석

Gupta 방법으로 다음 식(16)의 고유치(Eigenvalue)문제를 풀어 레일의 좌굴값을 구한다.

$$Aq = \lambda \cdot Bq \quad (16)$$

여기서, A행렬은 기하 강성 행렬인 K_G 를 나타내는 행렬이고, B행렬은 선형강성 행렬과 스프링 강성 행렬을 합한 레일의 전체 강성 행렬인 $(K_L + K_{sp})$ 를 나타내는 행렬이다. 식(17)과 같이 좌굴값은 구한 고유치의 역수 즉, $\frac{1}{\lambda}$ 의 값을 초기 하중값에 곱함으로써 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{1}{\lambda} \cdot P \quad (17)$$

3. 수치 해석 결과

본 논문의 수치 해석에 이용된 레일의 길이는 200m이고, 침목 간격은 현재 레도에서 많이 사용중인 50.8 cm와 62.5 cm를 이용하였다. KS 60Kg 레일의 단면 정수는 다음과 같다. 레일의 높이는 174mm, 저부폭은 145mm, 두부폭은 65mm, 복부 두께는 16.5mm, 두부 높이는 49mm, 저부 높이는 30mm, 저부 두께는 12mm, 단면적은 7750mm², 단면 이차 모멘트는 3090cm⁴이다. 그리고, 사용한 레일의 탄성계수는 0.21×10^8 N/cm²이고 전단 탄성 계수는 0.81×10^7 이며 온도 팽창 계수는 1 °C에 대하여 0.115×10^{-4} 이다. Fig. 2에서의 침목과 도상간의 마찰 저항력을 나타내는 세 방향의 스프링 강성값과 레일 체결구의 스프링 강성값은 외국 실험 자료로부터 얻은 값들이며 그 강성 값들은 다음과 같다. 도상의 종방향

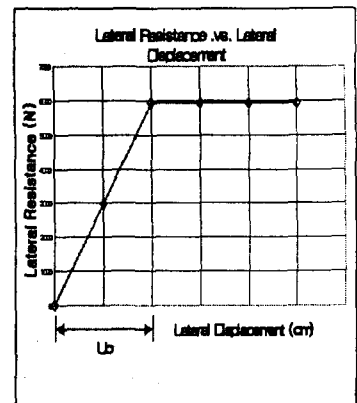


Fig. 5 The Lateral Resistance of Track

저항력은 30352.8 N/cm, 수직방향 저항력은 357660 N/cm, 횡방향 저항력은 Fig. 3에서와 같이 소성 영역 분기점인 u_0 가 0.2cm, 0.25cm, 0.5cm, 1cm일 때 선형 탄성 영역에서 소성 영역으로 바뀐다고 가정하면 다음 4개의 값 즉, 29720 N/cm, 23776 N/cm, 11888 N/cm, 5944 N/cm이며, 레일 체결구의 회전 강성은 166.3×10^5 N*cm/rad 이다. 위 값을 기준으로 도상의 횡방향 저항력과 체결구의 회전 강성값을 변화시켜가면서 좌굴 해석을 수행하여 그 영향에 대해 분석하였다. Fig. 6은 장대 레일에 1 °C의 온도 변화로 인해 발생하는 축력 분포를 나타낸 그림으로 레일의 온도 팽창이 어느 정도 가능한 양쪽 끝부분은 압축력을 작게 받으며 거의 온도 팽창을 하지 못하는 레일의 중앙부는 압축력을 온도 하중만큼 받고 있는 것을 볼 수 있다.

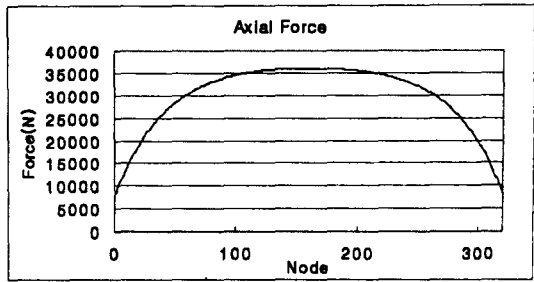


Fig. 6 The Axial Force of CWR due to The Change of Rail Temperature

3.1 침목 간격과 도상 횡방향 강성의 레일 좌굴에 대한 영향

Fig. 7은 초기 결함이 존재하지 않고 완벽한 아주 이상적인 궤도에서 횡방향 저항력값과 침목 간격(50.8cm, 62.5cm)을 변화시켜가면서 그 때의 장대 레일의 좌굴 온도를 그래프로 나타낸 것으로, 횡방향 저항력이 커질수록 좌굴 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 같은 횡방향 저항력을 갖는 도상에서 침목 간격이 50.8cm일 때의 좌굴 온도가 62.5cm일 때의 좌굴 온도보다 10%정도 더 큰 좌굴 온도를 가진다.

3.2 침목의 손상시 레일의 좌굴에 대한 영향

Fig. 8은 도상의 횡방향 저항력이 11888 N/cm이고 침목 간격이 62.5cm인 궤도에서, 레일과 침목을 연결하는 체결구가 파손되어 침목이 제 역할을 못하여 레일을 지지해주지 못하는 상황일 때 레일의 좌굴 온도와 좌굴 모드를 그래프로 나타낸 것이다. 그리고, 레일 중앙의 침목 1개, 침목 3개, 그리고 침목 5개가 위 경우에 있을 때 각각의 좌굴 형상을 나타낸 것으로, 체결구가 파손된 침목의 횡방향 저항력은 완전 손실된 것으로 가정하였다. 좌굴 모드 형상과 좌굴 온도에서 볼 수 있듯이 체결구의 파손으로 인한 침목의 손상은 좌굴 온도의 저감에 상당한 영향을 미쳐, 침목 5개가 손상되었을 때 정상 궤도의 좌굴 온도값인 117도의 54%값인 63도의 좌굴 온도값을 가지며, 또한 손상된 부분에서 레일의 손상이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

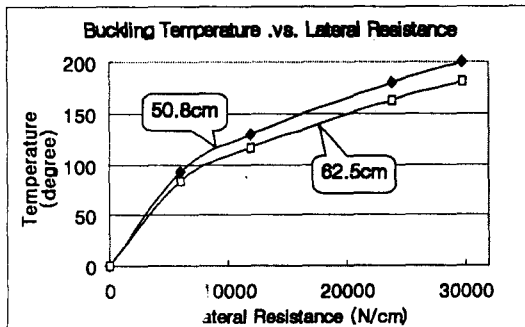


Fig. 7 The Buckling Temperature of Track in accordance with The Lateral Resistance of Track and The Distance between Each Sleeper

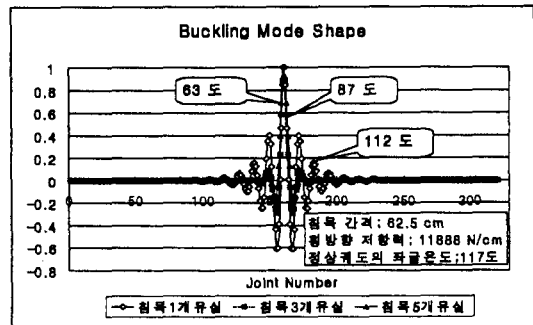


Fig. 8 The Buckling Mode Shape and Buckling Temperature of Track with Damaged Fasteners (No Act between Rail and Sleepers)

3.3 초기 결함 궤도 구간이 좌굴 온도에 미치는 영향

초기 결함 궤도 구간이란 도상 시공시의 오차로 인하여 궤도 전구간에 일률적인 횡방향 저항력 즉, 일률적인 소성 영역 분기점을 확보하지 못한 경우를 일컫는다. 초기 궤도 중앙 부분에 2.5cm, 3cm, 4cm의 소성 영역 분기점을 가지는 결함 구간이 발생하고 그 결함부를 기준으로 양쪽으로 총 1250cm 구간에 걸쳐 결함이 발생하였다면 그때의 좌굴 해석은, 결함으로 인한 소성 영역 분기점, U_i 를 식(18)의 Sine함수로 가정하고 결함 구간의 각 절점의 초기 횡방향 소성 영역 분기점, U_i 를 구한 다음, Fig. 5의 그래프를 이용하여 결함 구간의 각 절점의 횡방향 저항력을 산출하여 수행하였다. Fig. 9는 각각의 4개의 횡방향 저항력(5944 N/cm, 11888 N/cm, 23776 N/cm, 29720 N/cm)을 갖는 정상 궤도에서, 손상 궤도 중앙 부분은 2.5cm의 소성 영역 분기점을 가지며 궤도 중앙에 총 1250cm의 결함 구간을 가질 때의 좌굴 모드를 보여 주는 그림이고, Fig. 10은 위와 동일한 상황에 손상 궤도 중앙 부분의 소성 영역 분기점이 2.5cm, 3cm, 4cm일 때의 좌굴 온도를 나타낸 그림이다. Fig. 9에서 정상 궤도의 횡방향 저항력이 11888N/cm인 경우C를 보면 정상 궤도에서는 117도의 좌굴 온도값을 가지나, 초기 궤도 손상을 가질 때는 현저하게 낮아져 손상 궤도 중앙부의 소성 영역 분기점이 2.5cm일 때는 원래 값의 56%, 3cm일 때는 52%, 4cm일 때는 48%로 손상 궤도 중앙부의 소성 영역 분기점이 커질수록 즉, 횡방향 저항력이 작아 궤도 결함이 커질수록 더 낮은 좌굴 온도값을 가지는 것을 볼 수 있으며, Fig. 10과 같이 손상 궤도 구간에서 쉽게 좌굴이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 경우A, B, C에서도 비슷한 경향을 보이고 있다.

$$U_i = U_0 \cdot \sin(\pi x/L_0) \tag{18}$$

여기서, U_0 (초기 궤도 중앙부의 소성 영역 분기점) ; 2.5cm, 3cm, 4cm

L_0 (초기 결함 궤도 구간 길이) ; 1250cm

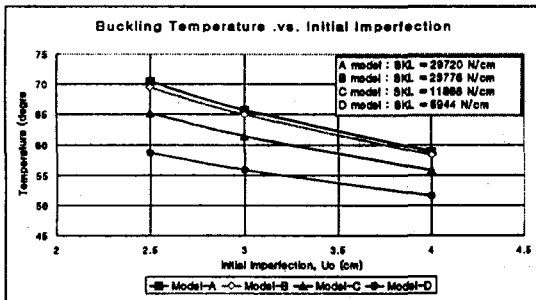


Fig. 9 The Buckling Temperature in accordance with Initial Imperfection of Track

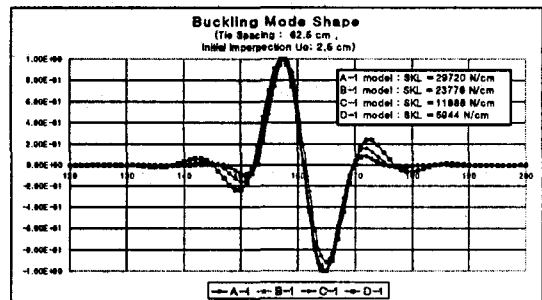


Fig. 10 The Buckling Mode Shape of Track with Initial Imperfection

4. 결론

장대 레일의 좌굴시 휨-비틀림 거동을 정확히 모사할 수 있고, 침목과 같은 경계의 레일 단면내 위치를 정확히 모사할 수 있어 정확한 장대 레일의 좌굴 해석 및 좌굴 거동 특성을 파악할 수 있는 레일의 삼차원 해석 모델을 개발하였다. 그리고 유한 요소 정식화 과정을 통해 레일의 좌굴 해석 프로그램인 CWRB를 개발하였다. 이 CWRB 프로그램을 이용하여 단시간내에 침목, 도상, 체결구등과 같은 여러 궤도 인자들이 레일의 안정성에 미치는 영향을 분석하고 좌굴 임계 온도를 산정할 수 있다. CWRB 프로그램에 의한 수치해석의 결과는 다음과 같다.

(1) 장대 레일의 횡방향 좌굴에 영향을 주는 주된 요인으로 도상의 횡방향 저항력, 침목의 간격, 체결구 파손으로 인한 침목의 손상, 그리고 초기 궤도 결함을 들 수 있다.

(2) 도상의 횡방향 저항력이 커질수록, 그리고 침목 간격이 좁을수록 큰 좌굴 온도값을 가진다.

(3) 도상의 횡방향 강성이 좌굴 임계 온도 값에 큰 영향을 미치므로, 레일과 침목을 체결하는 체결구가 제 기능을 하여 침목이 손상되는 일이 없도록, 그리고 초기 궤도 결함과 같이 도상의 횡방향 강성이 취약한 부분이 생기지 않도록 도상 시공시 주의를 요하며 하자 발생시 즉각적인 유지·보수가 필요하다.

****감사의 글****

본 논문은 한국 철도 기술 연구원에서 수행한 고속철도 사업의 차량/선로 구축물 상호작용 관련 기술 개발(I-0-4) 과제의 위탁 연구 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Sritawat Kitipornchai & Siu Lai Chan, "Nonlinear Finite Element Analysis of Angle and Tee Beam-Columns", Journal of Structural Engineerin, ASCE, Vol.113, No.4, pp721~739, 1987
2. Chai Hong Yoo, "Bimoment Contribution to Stability of Thin-Walled Assemblages", Computer & Structures, Vol.11, pp465~471, 1980
3. David W. Murray & Sundaramoorthy Rajasekaran, "Technique for Formulating Beam Equations", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.101, No.5, pp561~573, 1975
4. M. Sekulovic, "Geometrically Nonlinear Analysis of Thin-Walled Members"
5. Freydoon Arbabi & Fang Li, "Effect of Nonlinear Parameters on Stresses in Railroad Tracks", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.1, pp165~183, 1988
6. Dusan Krajcinovics, "A Consistent Discrete Elements Technique for Thin walled Assemblages", Int. J. Solid Structures, Vol.5, pp639~662, 1969
7. H.A.El-Ghazaly & A.N.Aherbourne & F.Arbabi, "Strength and Stability of Railway Tracks-II , Deterministic Finite element Stability Analysis", Computer & Structures, Vol-39 , No.1/2 , pp23~45, 1991
8. 이종득, "철도 공학", 노혜 출판사, 1994
9. 한국고속철도건설공단, "고속철도 핸드북", 1993
10. C. Esvel, "Modern Railway Track", Graphics Department of Thyssen Stahl AG, 1989
11. 강기동, 궤도 역학

기호 정의

A, L : 레일의 단면적, 레일의 침목과 침목 사이의 거리

k_V, k_H, k_L, k_R : 도상의 수직방향, 종방향, 횡방향 저항력, 그리고 체결구의 회전 강성

E, G : 탄성계수와 전단 탄성 계수

C, G, S, C, YC, YS : 도심, 전단 중심, 레일 저부에서 도심까지 높이, 레일 저부에서 전단 중심까지 높이

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$: x, y, z 좌표계의 법선 변형률 성분과 전단 변형률 성분

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: x, y, z 좌표계의 법선 응력과 전단 응력

$\delta\Pi, \delta U, \delta V$: 변분 토털 포텐셜 에너지, 변분 변형 에너지, 작용하중에 의한 변분 포텐셜 에너지 감소

$V_x, V_y, F_x, M_x, M_y, T, B_f$: 도심 및 전단 중심에서의 x, y 방향 전단력, z 방향 축력, x, y 방향 모멘트, z 방향 비틀림, bimoment

$u_0, v_0, w_c, v_0, u_0, \theta, \theta'$: 도심 및 전단 중심에서의 x, y, z 방향 기준변위 및 회전변위