

# 선형온도좌굴에 대한 궤도 구성요소의 민감도 Sensitivity of Track Components on the Linear Thermal Buckling

임 남 형<sup>1)</sup>      강 영 중<sup>2)</sup>      성 익 현<sup>3)</sup>  
Lim, Nam Hyoung · Kang, Young Jong · Sung, Ik Hyun

## ABSTRACT

The actual buckling of the railroad track structure is suspected to be a complex interaction between the vertical, lateral and torsional modes. To make the analysis tractable, however, most studies restrict themselves to either the vertical or the horizontal plane. Based on a comprehensive and realistic three-dimensional track model developed in the previous study, three dimensional buckling analysis of CWR track subjected to temperature load was performed. Using the study on buckling temperature and mode, sensitivity of track components such as tie spacing, ballast resistance, stiffness of pad-fastening system, and rail size were investigated.

## 1. 서 론

기존 궤도구조의 레일 이음매 부분에서는 열차 주행에 따른 많은 동적인 충격이 발생되며 이러한 동적 충격은 이음매 판의 마모, 체결장치의 이완, 침목의 파손, 그리고 노반 배수의 불량 등 궤도 파괴의 주요인이라 할 수 있다. 이러한 궤도 파괴는 다시 레일 이음매 부분에서의 동적 충격을 가중시키는 악순환을 계속하게 되며 중국에는 궤도의 과도한 틀림이 발생하게 되어 열차 주행의 안전성을 위협하게 된다. 그러므로 기존의 일반궤도 구조는 과도한 보수 및 유지관리 비용이 요구된다고 할 수 있다. 이러한 기존 궤도구조의 많은 단점들을 보완하기 위하여 레일의 이음매 부분을 제거하고 서로 연속적으로 용접하여 수백미터 또는 수킬로미터까지 연결되는 장대레일궤도(continuous welded rail track)의 사용이 전 세계적으로 급증하고 있는 실정이다. 현재 국내에서도 기존 레일의 장대화 작업이 진행되고 있으며 그 결과로 경부선과 호남선의 경우에는 약 50% 정도의 장대화 작업이 완료되었다. 그러나 이러한 장대레일 궤도는 기존 궤도에 비해 많은 장점이 있으나 온도 변화에 따른 레일의 팽창이 억제되고 이로 인해 높은 온도 응력이 유발되는 단점이 있다. 이러한 높은 온도 응력은 궤도의 틀림과 도상 저항력들의 저감 등의 문제들과 상호 작용에 의해 궤도 횡 방향으로의 장출이 발생하는 심각한 문제점이 야기되고 있다. 이러한 장출은 열차의 탈선과 직접적인 관계가 있으며 장대레일의 여러 장점들을 충분히 활용하기 위해서는 장대레일 궤도의 장출에 대한 정확한 이해와 역학적인 규명이 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 개발된 3차원 궤도 모델을 바탕으로 여러가지 궤도 구성요소들의 좌굴에 대한 민감도를 좌굴 온도와 모드의 비교를 통해 고찰한다.

1 고려대학교 토목환경공학과 연구조교수, 정회원

2 고려대학교 토목환경공학과 교수, 정회원

3 한서대학교 토목공학과 교수, 정회원

## 2. 궤도의 3차원 모델

그림 1.과 같이 장대레일 궤도의 해석 모델에는 크게 4가지의 요소로 구분된다. 레일을 모사하기 위한 보요소, 패드-체결재를 모사하기 위한 탄성연결 스프링요소, 침목을 모사하기 위한 탄성지반 위에 존재하는 탄성지지된 보요소, 그리고 도상과 침목의 횡방향 저항력을 모사하기 위한 스프링 요소로 구성된다.

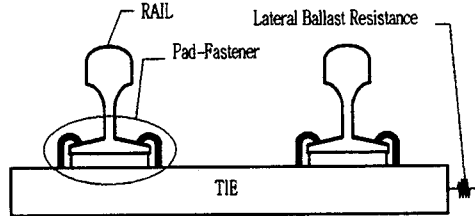


그림 1. 장대레일 궤도의 해석 모델

레일의 보요소는 뒨을 고려하여 절점당 7개의 자유도를 갖게되며 패드-체결재 요소는 레일과 침목의 탄성 연결을 모사하며 절점당 6개의 자유도를 갖는다. 그리고 침목의 보요소는 Winkler Foundation 이론을 기본으로 하며 절점당 6개의 자유도를 갖는다.

민감도 분석을 위한 기본적인 궤도의 제원은 다음과 같다. 레일=60N, 침목간격=50cm, 궤간=143.5cm, 횡방향 도상 저항력=10, 25, 50, 80N/cm, 종방향 도상 저항력=100N/cm, 궤도계수=1,800N/cm/cm/rail, 패드-체결재의 종방향, 횡방향 그리고 수직방향 병진 강성은 각각 60,000N/cm, 260,000N/cm, 그리고 350,000N/cm이며 회전 강성은 모두  $6.0 \times 10^6$  Ncm/rad을 사용하였으며 궤도 끝단은 힌지조건이다.

## 3. 침목간격

침목 간격에 대한 좌굴 특성을 고찰하기 위해 궤도길이는 50m, 침목 간격은 50, 55, 60cm, 그리고 횡방향 침목 저항력은 3,000~7,000N을 사용하였다. 그림 2.는 횡방향 침목 저항력과 좌굴온도와의 관계를 나타내는 그래프로 횡방향 침목 저항력이 증가함에 따라 궤도의 좌굴 강성이 증가하며 그 관계가 선형이 아닌 비선형 관계임을 알 수 있다. 그림 3.과 4.는 침목 간격이 60cm일 때, 횡방향 침목 저항력에 따른 각 방향의 좌굴모드로 횡방향 모드에 대한 상대모드이다. 횡방향 저항력이 증가함에 따라 좌굴 모드가 대칭 모드에서 역대칭 모드로 변하며 횡방향 침목 저항력이 7,000N일 때 파장은 500N일때 파장의 1/2배임을 알 수 있다.

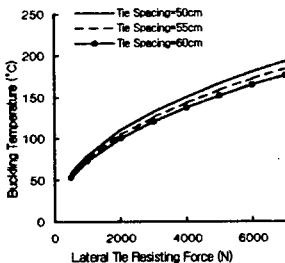


그림 2. 횡방향침목저항력 vs. 좌굴온도

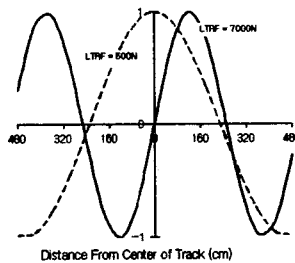


그림 3. 횡방향침목저항력에 따른 횡방향 좌굴모드

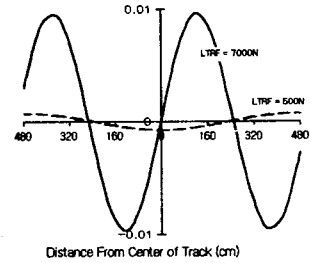


그림 4. 횡방향침목저항력에 따른 수직방향 좌굴모드

#### 4. 횡방향 침목 저항력의 분포

횡방향 침목 저항력이 궤도 중앙부위에서 국부적으로 저감되었을 경우에 대한 좌굴 특성을 고찰하기 위해 궤도 길이는 50m, 침목 간격은 60cm, 그리고 기본적인 횡방향 침목 저항력은 5,000N을 사용하였다. 그림 5.는 횡방향 침목 저항력의 감소율에 따라서 감소된 중앙부위 침목수와 좌굴온도와의 관계이다. 5,000N의 횡방향 침목 저항력이 궤도 전체에 걸쳐 균일하게 분포된 경우의 좌굴온도는 151.9℃ 이나 중앙부위 3개의 침목에서 횡방향 침목 저항력이 90% 저감되면 그 좌굴온도는 113.1℃로 38.8℃가 하락한다.

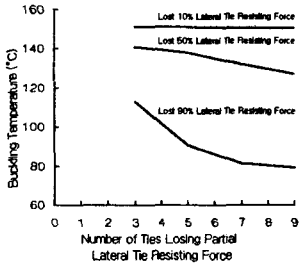


그림 5. 침목 횡저항력이 감소된 중앙부위 침목 수 .vs. 좌굴온도

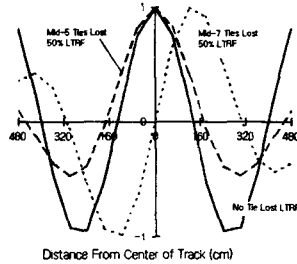


그림 6. 중앙부위 침목수에 따른 횡방향 좌굴모드(50%)

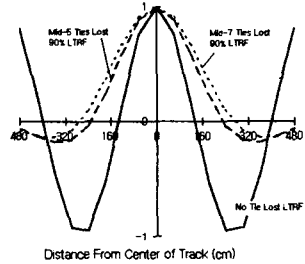


그림 7. 중앙부위 침목수에 따른 횡방향 좌굴모드(90%)

그림 6.과 7.은 횡방향 침목 저항력의 감소율이 50%와 90%일 때, 저감된 침목 수에 따른 횡방향 좌굴모드이다. 횡방향 침목 저항력이 50% 저감된 중앙부위 침목이 7개에서는 좌굴모드가 역대칭 모드를 나타내고 있다. 저감율이 90%일 경우에는 저감율이 50%인 경우와 달리 좌굴모드의 변환은 발생하지 않으나 궤도 중앙부위에서 좌굴모드가 집중적으로 크게 발생하게 된다.

그림 8.은 횡방향 침목 저항력이 감소된 중앙부위 침목 수(3개, 9개) 별로, 저감된 횡방향 침목 저항력과 좌굴온도와의 관계이다. 저감되지 않은 다른 침목의 횡방향 저항력이 5,000N이지만 중앙부위 3개의 침목에서 횡방향 저항력이 급격하게 저감되면 오히려 3,000N의 횡방향 침목 저항력이 균일하게 분포된 궤도보다 더 작은 좌굴강도를 나타낼 수 있다. 그러므로 침목의 횡방향 저항력은 그 크기도 중요하지만 얼마나 궤도 전체에 걸쳐 균일하게 분포되는지가 매우 중요하다.

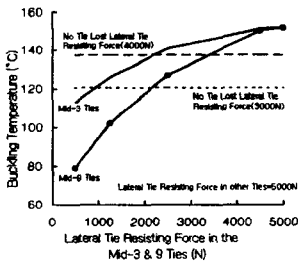


그림 8. 중앙부위 침목의 횡방향 저항력 .vs. 좌굴온도

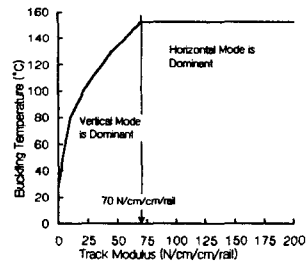


그림 9. 궤도계수 .vs. 좌굴온도

#### 5. 궤도 계수

궤도 계수(track modulus)에 따른 좌굴 특성을 고찰하기 위해 궤도 길이는 50m, 침목 간격은 60cm, 그리고 횡방향 침목 저항력은 5,000N을 사용하였다.

그림 9.는 궤도 계수와 좌굴 온도와의 관계이다. 궤도 계수가 0~69N/cm/cm/rail에서는 궤도의 수직방향 좌굴모드가 지배적이며 70N/cm/cm/rail 이상부터는 횡방향 좌굴모드가 지배적으로 좌굴 강도는 궤도 계수에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

## 6. 패드-체결재 강성

패드-체결재의 각 방향 강성의 영향을 고찰하기 위해 궤도 길이는 50m, 침목 간격은 60cm, 횡방향 침목 저항력은 5,000N을 사용하였다.

그림 10.은 패드-체결재의 횡방향 병진 강성과 좌굴 온도와의 관계이다. 패드-체결재의 횡방향 병진 강성만을 1,000N/cm에서 500,000N/cm까지 변화시켰다. 횡방향 병진 강성이 200,000N/cm 이상부터는 그 영향이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 11.은 패드-체결재의 수직방향 병진 강성과 좌굴 온도와의 관계이다. 패드-체결재의 수직방향 병진 강성만을 5,000N/cm에서 500,000N/cm까지 변화시켰다. 수직방향 병진 강성은 궤도의 좌굴온도 즉, 좌굴강성에는 무관함을 알 수 있다.

그림 12.는 패드-체결재의 종방향 및 횡방향 회전 강성과 좌굴 온도와의 관계로 종방향 과 횡방향 회전 강성만을  $6 \times 10^3$  Ncm/rad에서  $6 \times 10^8$  Ncm/rad까지 사용하였다. 횡방향 회전 강성은 좌굴온도에 영향을 없는 것을 알 수 있다.

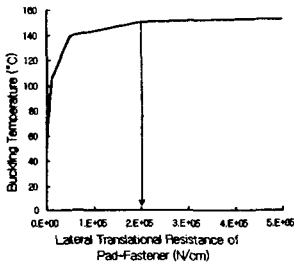


그림 10. 횡방향 병진강성 .vs. 좌굴온도

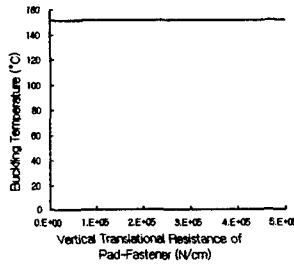


그림 11. 수직방향 병진강성 .vs. 좌굴온도

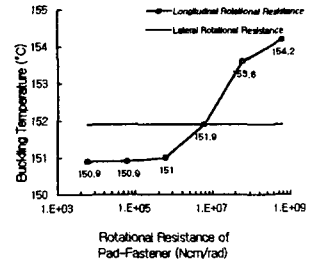


그림 12. 종, 횡방향 회전강성 .vs. 좌굴온도

그림 13.은 패드-체결재의 수직방향 회전 강성과 좌굴 온도와의 관계로 수직방향 회전 강성만을  $6 \times 10^3$  Ncm/rad에서  $6 \times 10^8$  Ncm/rad까지 사용하였다. 수직방향 회전 강성이  $6 \times 10^6$  Ncm/rad일 때 보다  $6 \times 10^7$  Ncm/rad일 때가 좌굴 온도가 33.9°C 급상승하는 것을 알 수 있다.

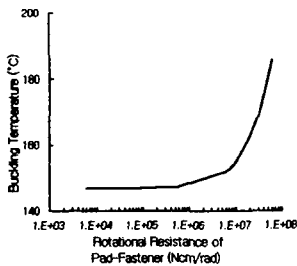


그림 13. 수직방향 회전강성 .vs. 좌굴온도

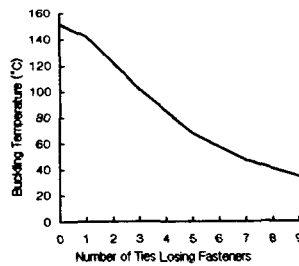


그림 14. 패드-체결재가 파손된 중앙부위 침목수 .vs. 좌굴온도

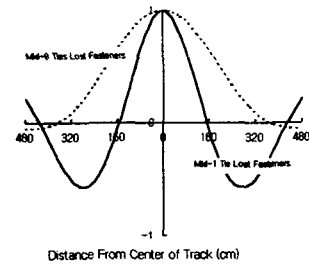


그림 15. 횡방향 좌굴모드 (패드-체결재 파손)

패드-체결재가 궤도 중앙부위에서 국부적으로 파손되었을 경우에 대한 특성을 고찰하기 위해 기본적인 패드-체결재 강성을 사용하였다. 그림 14.는 패드-체결재가 파손된 중앙부위 침묵 수와 좌굴온도와의 관계로 건전한 궤도인 경우의 좌굴온도에 비해 중앙부위 9개 침묵에서 패드-체결재가 파손된 경우에는 117.25℃ 낮게 평가되고 있다. 그림 15.는 패드-체결재가 파손된 중앙부위 침묵 수에 따른 횡방향의 좌굴모드이다. 패드-체결재가 파손된 침묵이 많아질수록 좌굴은 중앙부위에서 집중되며 파장이 커지고 있음을 알 수 있다.

## 7. 레일

레일의 제원이 궤도의 좌굴 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 침묵 간격은 60cm, 궤도 길이는 50m, 그리고 횡방향 침묵 저항력은 5,000N을 사용하였다. 레일의 제원 중에서 단면적과 단면 2차모멘트에 대한 영향을 고찰하기 위하여 60N 레일을 기본으로 10~90%까지 증가시키며 좌굴 해석을 수행하였다. 단면적과 단면2차모멘트의 증가율에 대한 좌굴 온도 비는 그림 16.과 같다. 좌굴온도는 단면적에 반비례하며 레일의 약축에 대한 단면2차모멘트에 비례하고 있음을 알 수 있다. 그리고 레일의 강축에 대한 단면2차모멘트는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

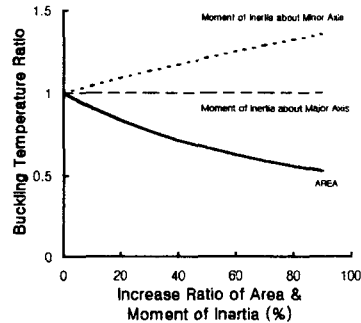


그림 16. 단면적과 단면2차모멘트 증가율 .vs. 좌굴온도 비

## 8. 결 론

본 논문에서는 3차원 궤도 모델을 사용하여 궤도의 좌굴에 영향을 미치는 궤도 구성요소들의 좌굴에 대한 민감도 특성을 고찰하였다. 수행한 구성요소로는 침묵 간격, 도상 저항력, 패드-체결재 강성 그리고 레일의 제원을 사용하였으며 각각 좌굴 온도와 좌굴 모드의 비교를 통해 좌굴 민감도를 고찰하였다.

장대레일 궤도의 좌굴은 다분히 3차원적인 거동을 보이고 있으며 매우 복잡하게 거동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 궤도를 구성하는 각각의 구성요소들의 상태와 강성에 따라 횡방향 또는 수직방향의 거동이 지배적으로 나타날 뿐 어느 한 방향 만으로의 거동 특성 규명은 한계가 있음을 알 수 있다. 궤도 계수, 패드-체결재의 횡방향 병진 강성, 패드-체결재의 종방향 회전 강성 등은 궤도의 장출 해석에 고려되지 않는 경우가 많으나 궤도의 상태와 다른 변수들의 상태에 따라 다분히 크게 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 임남형(2001), "Three Dimensional Nonlinear Analysis of Continuous Welded Rail Tracks", 공학박사 학위논문, 고려대학교
2. Kerr A.D. (1975), "Lateral Buckling of Railroad Tracks Due to Constrained Thermal Expansion-A Critical Survey", Railroad Track Mechanics & Technology, Proceedings of a Symposium, pp. 141-170
3. Kish A. (1982), "Analysis of Thermal Buckling Tests on U.S. Railroads", FRA/ORD-82/45
4. Samavedam G.(1979), "Buckling and Post Buckling Analysis of CWR in the Lateral Plane", Technical Note TN-TS-34, British Railways Board, R&D Division