

# 온도에 의한 궤도의 후좌굴 거동 Post-Buckling Behavior of the Track due to Temperature

임남형\*  
Lim, Nam-Hyounge

이지하\*  
Lee, Jee-Ha

강윤석\*  
Kang, Yun-Suk

양신추\*\*  
Yang, Shin-Chu

---

## ABSTRACT

The actual behavior of the railroad track structure is suspected to be a complex interaction between the vertical, lateral, longitudinal, and torsional behaviors. A FE program are developed in the present study to be used for extensive nonlinear analysis of the track structures subjected to thermal load. Using the rigorous study on the deformed shape of the rail and tie, and stress resultants, characteristics of the three dimensional behavior are investigated. It is found that the flexural rigidity of the tie and the rotational stiffness of pad-fastener can be affect the behavior of the track structure and the postbuckling behavior in each rail, except lateral behavior, is not same.

---

## 1. 서론

장대레일 궤도는 기존 궤도에 비해 많은 장점이 있으나 온도 변화에 따른 레일의 신장이 억제되고 이로 인해 높은 온도 응력이 유발되는 단점이 있다. 이러한 높은 온도 응력은 궤도의 틀림과 도상 저항력들의 저감 등의 문제들과 상호 작용에 의해 궤도 횡방향 및 수직방향으로의 장출(좌굴)이 발생하는 심각한 문제점이 야기되고 있다. 이러한 장출(좌굴)은 열차의 탈선과 직접적인 관계가 있으며 장대레일의 여러 장점들을 충분히 활용하기 위해서는 장대레일 궤도의 장출에 대한 정확한 이해와 역학적 인 규명이 필수적이라 할 수 있다.

실질적인 궤도의 좌굴은 횡방향 거동, 수직방향 거동, 그리고 비틀 거동이 연계된 3차원적인 거동을 보이고 있으나 수직방향 거동과 비틀 거동에 비해 횡방향 거동이 지배적이고 또한 3차원 해석으로 인한 복잡성을 피하기 위해서 대부분의 연구가 2차원 모델을 사용하여 연구되고 있는 실정이다. 장대레일 궤도에 대한 연구는 1960년대 이후에 본격적으로 수행되었다. Bijl(1969), Kerr(1975), Samavedam(1979), 그리고 Kish 등(1982)의 연구자들은 궤도 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 도입하고 침목의 영향을 무시하여 탄성지반에 존재하는 한 개의 보로서 궤도를 모사하여 해석적으로 접근하였다. 레일과 침목의 영향을 고려한 프레임-모델은 보 모델이 가지는 많은 제약성을 보완할 수 있어 장대레일 궤도의 정확한 거동특성 파악에 보다 더 근접할 수 있다. Ramesh(1985)와 Jackson 등(1988)은 유한요소법을 사용하여 궤도의 평면상에서 두 개의 레일과 침목을 통합된 하나의 요소로 모사 하여 궤도의 거동특성을 파악하였다. 이러한 기존의 연구들은 도상과 침목의 수직 저항 미고려, 레일-패드-체결계의 종방향과 수직방향 저항 무시, 그리고 두 레일의 온도차와 단면 성질의 상이성 고려 불가능 등의 단점과 제약 조건을 포함하고 있다. 임남형 등(2002, 2003)은 이러한 보-모델과 평면 프레임-모델의 단점을 극복한 3차원 프레임-모델을 개발하였다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

본 연구에서는 임남형 등(2002, 2003)에 의해 개발된 3차원 프레임-모델을 기본으로 궤도 해석을 위한 비선형 해석 프로그램을 개발하여 온도 하중을 받는 궤도 구조의 거동 특성을 파악하였다. 궤도 구조의 거동은 다분히 3차원 거동을 보이고 있음을 알 수 있으며 침목의 종방향과 수직방향 휨 거동이 발생되고 각각의 레일에 작용하는 단면력들의 차이에 의해 매우 복잡한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 2. 궤도 모델

그림 1과 같이 장대레일 궤도의 해석 모델에는 크게 4가지의 요소로 구분된다. 레일을 모사하기 위한 비선형 보요소, 패드-체결구조를 모사하기 위한 탄성연결 스프링요소, 침목과 도상 수직방향 저항력을 모사하기 위한 탄성지반 위에 존재하는 탄성지지된 보요소, 그리고 도상과 침목의 횡방향과 종방향 저항력을 모사하기 위한 비탄성 스프링 요소(그림 2)로 구성된다.

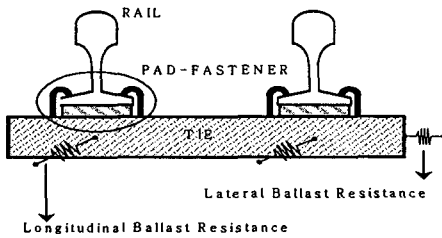


그림 1. 궤도 모델

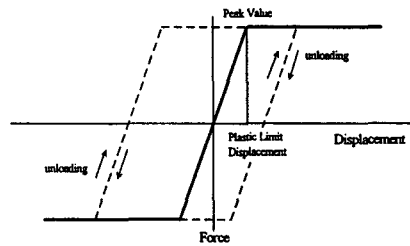


그림 2. 도상 횡방향과 종방향 저항력 모델

레일의 보요소는 뒀을 고려하여 절점당 7개의 자유도를 갖게되며 패드-체결구조 요소는 레일과 침목의 탄성 연결을 모사하며 절점당 6개의 자유도를 갖는다. 그리고 침목의 보요소는 윙클러 기초(Winkler Foundation) 이론을 기본으로 하며 절점당 6개의 자유도를 갖는다.

## 3. 궤도의 후좌굴 거동

온도 하중에 의한 궤도 구조의 비선형 거동 특성을 파악하기 위한 궤도의 단면은 그림 3과 같다. 궤도는 199.92m의 유한한 길이를 가지며 궤도 끝단의 강성은  $9.8 \times 10^5$  N/cm (Kish 등, 1982)를 적용한 유한한 궤도이다. 궤간은 143.5cm의 표준 궤간을 사용하였으며 침목 간격은 51cm를 사용하였다. 레일은 RE132(탄성계수= $2.1 \times 10^7$  N/cm<sup>2</sup>, 전단탄성계수= $8.1 \times 10^6$  N/cm<sup>2</sup>, 온도팽창계수= $11.5 \times 10^{-6}$ /°C)를 사용하였으며 침목은 미국의 AREA Size-4(17.8×20.3×259cm, 탄성계수= $0.123 \times 10^7$  N/cm<sup>2</sup>, 전단탄성계수= $0.347 \times 10^6$  N/cm<sup>2</sup>)의 목침목을 사용하였다.

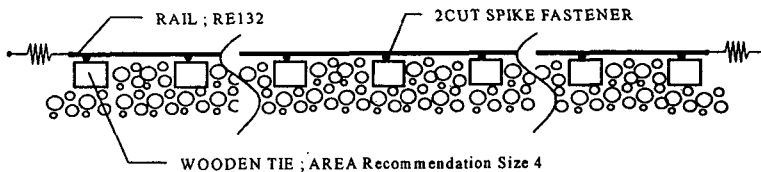


그림 3. 199.92m의 유한한 궤도

패드-체결구조의 물성치는 RE132 레일과 목침목에 사용되는 2-Cut Spike(궤도 종방향 병진강성

=52,600 N/cm, 횡방향 병진강성=263,020 N/cm, 수직방향 병진강성=350,690 N/cm, 각 방향 회전강성=166.3×10<sup>5</sup> Ncm/rad)의 실험결과(Choros 등, 1982)를 적용하였다. 도상과 침목의 횡방향 및 종방향 저항력과 소성분기점은 Kish 등(1982)의 자료를 사용하여 95.2 N/cm-0.3175 cm 와 121.5 N/cm-0.3 cm를 각각 적용하였다. 도상과 침목의 수직방향 저항력을 나타내는 궤도계수는 3516.15 N/cm<sup>2</sup>을 적용하였다. 궤도의 횡방향 초기결합의 크기는 중앙부에서 최대 4.604cm 이며 결합의 길이는 11.22m를 적용하였으며 결합의 형태는 사인(sine) 파형을 적용하였다.

그림 4는 온도와 레일 중앙부에서의 각 방향의 변위와의 관계를 나타낸다. 각 방향 모두 Snap-through 형태의 거동을 보이고 있으며 T<sub>max</sub> = 69.7°C 이고 T<sub>min</sub> = 53.02°C임을 알 수 있다. 또한 횡방향 변위를 제외한 수직방향 변위와 비틀림에 대해서는 각각의 레일이 상이하게 거동함을 알 수 있다. 특히 수직방향의 거동은 레일-1은 상(上) 방향으로 레일-2는 하(下) 방향으로 거동함을 알 수 있다.

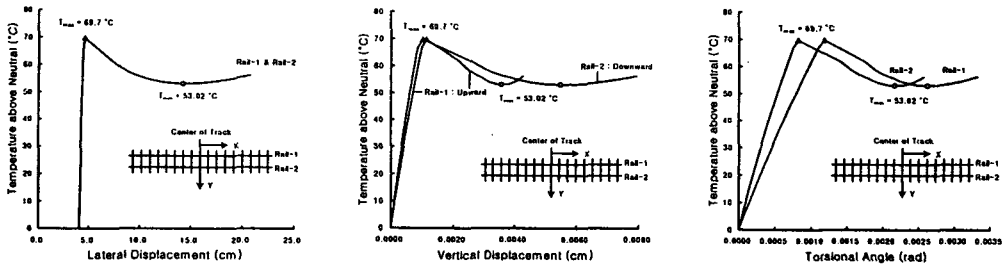
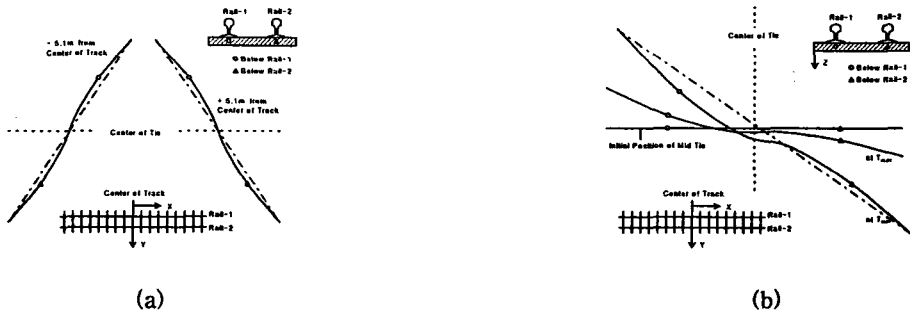


그림 4. 온도 .vs. 레일 중앙부 변위: (a)횡방향 변위, (b)수직방향 변위, (c)비틀림 각

그림 5는 침목의 변형 형상을 도시 한 것이다. 침목은 X-Y 평면이나 Y-Z 평면에 대해 모두 역의 곡률이 발생하는 휨 거동을 하게되며 각 레일의 비틀림 거동과 수직방향 거동의 상이함에 의해 Y-Z 평면상의 침목의 거동은 비대칭 역의 곡률을 발생시키고 있음을 알 수 있다. 또한 궤도 단면 전체의 횡방향 거동의 중심은 궤도 단면의 중앙이지만 비틀림 중심은 궤도 단면 중앙에 위치하지 않음을 알 수 있다.



(a) (b)  
그림 5. 침목의 거동 형상: (a)X-Y 평면, (b)Y-Z 평면

그림 6은 궤도 길이에 따른 각 방향의 변위를 나타낸다. 변위 형상의 최대 파고는 궤도의 중앙에서 발생되며 변위의 파형은 궤도 중앙부위 약 30m 구간에서 발생되고 있다. 또한 전 파형에 걸쳐 횡방향 거동을 제외하고는 모두 각 레일의 거동이 상이함을 알 수 있다.

그림 7은 온도와 레일 중앙 단면의 단면력과의 관계이다. 온도의 상승이 T<sub>max</sub>(69.7°C)에 도달하기 전까지는 축력이 지배적으로 발생하게 되며 T<sub>max</sub> 이후에는 궤도의 횡방향, 수직방향, 그리고 비틀림 거동이 발생함에 따라 모멘트와 뒹(warping)에 의한 바이모멘트(bimoment)가 발생됨을 알 수 있다. 레일의 약축에 대한 모멘트를 제외하고는 모든 단면력들이 레일에 따라 달리 발생되고 있음을 알 수

있다. 또한 궤도의 횡방향 변위가 발생됨에 따라 온도 상승에 의해 레일에 발생하는 축력 이외에 궤도 단면의 휨에 의해 발생하는 추가적인 축력이 각각의 레일에 발생된다. 즉, 중앙 단면에 있어서 레일-1은 온도 상승에 의한 압축력과 휨에 의한 추가적인 압축력이 발생되며 레일-2는 온도 상승에 의한 압축력과 휨에 의한 인장력이 발생하게 되어 서로 상이한 축력분포를 나타내고 있다. 침목은 레일의 하부 플랜지에 위치하므로 온도 상승에 의한 레일의 신장이 발생하면서 축력 이외에 레일의 강축에 대한 모멘트가 발생하게 된다. 이러한 레일 강축에 대한 모멘트는 궤도의 수직방향 변위가 발생되면서 발생하는 모멘트와 상충 효과를 일으키게 된다.

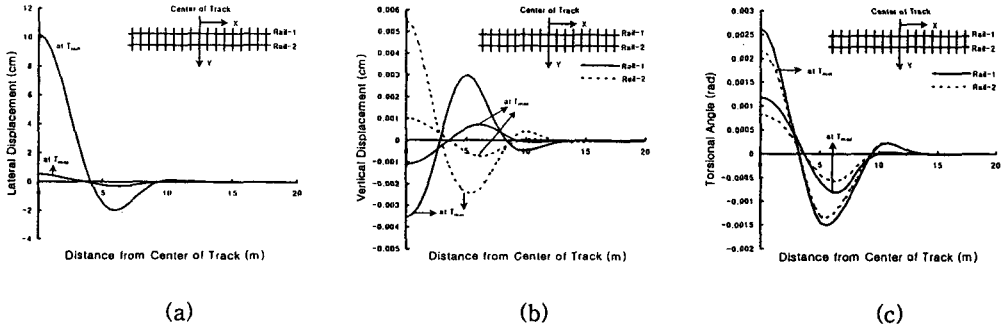


그림 6. 레일의 거동 형상: (a) 횡방향, (b) 수직방향, (c) 비틀림 각

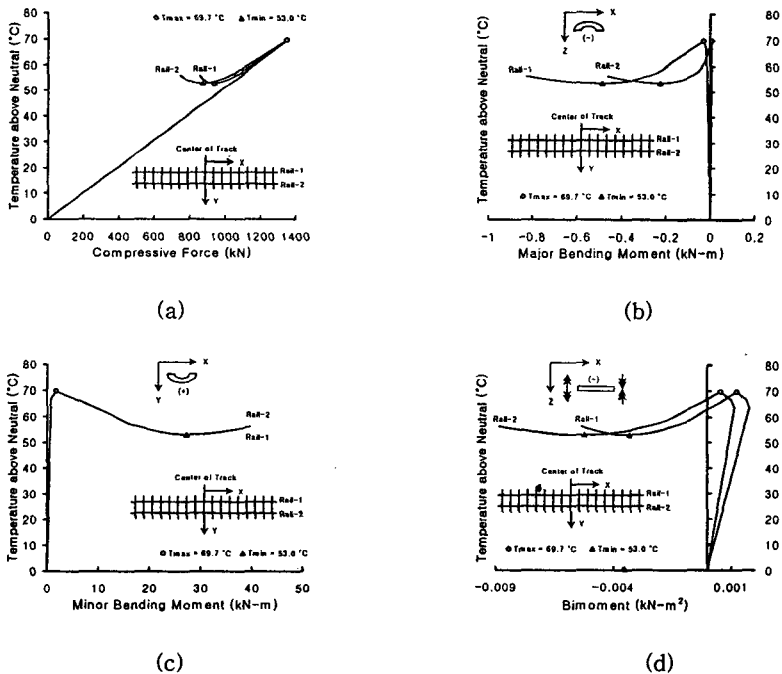


그림 7. 온도 .vs. 단면력: (a)축력, (b)휨모멘트-강축, (c)휨-모멘트-약축, (d)바이모멘트

그림 8은 궤도 길이에 따른 레일 축방향 변위를 나타내며 그림 9는 궤도 길이에 따른 축력의 분포 형상이다. 무한한 궤도와 달리 유한한 궤도는 궤도 끝단에서 축방향 변위가 많이 발생하게 된다. 온도가  $T_{max}$ 에 도달하기 전에는 축방향 변위가 발생하지 않는 궤도 중앙부위에서 최대의 축력을 나타내며 레일-1과 레일-2는 거의 같은 축력을 유발하고 있다. 또한 축력의 분포는 궤도 전체에 걸쳐 축방향

변위에 따라 분포되고 있음을 알 수 있다.  $T_{max}$  이후, 궤도 중앙부위와 끝단에서 축방향 변위가 발생되고 이로 인해 축력이 최대인 위치는 축방향 변위가 발생하지 않는 중앙으로부터 31.62m 위치에서 발생된다. 또한 궤도의 횡방향 변위가 발생하는 궤도의 중앙부에서는 각 레일에 작용하는 축력이 다르게 발생되고 있으며 이로 인해 궤도 중앙부 약 30m 구간에서는 온도 상승에 의한 축력과 궤도 단면의 휨에 의한 추가적인 축력이 복합적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 궤도의 이 구간을 제외한 구간에서의 축력은 모두 축방향 신장에 따라 축력이 분포하게 된다.

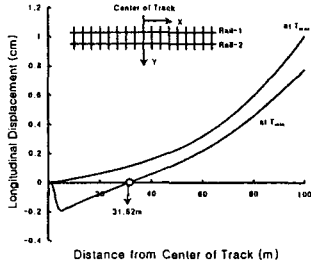


그림 8. 레일의 축방향 변위

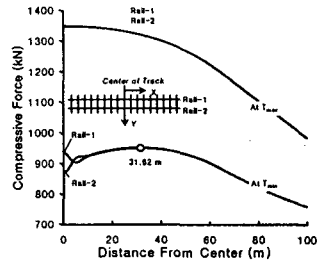


그림 9. 레일의 축력 분포

#### 4. 결론

- 1) 궤도 횡방향과 축방향 변위를 제외한 각 레일에서 발생하는 변위는 레일에 따라 상이하게 발생되며 이로 인해 궤도의 거동은 레일과 침목 그리고 패드-체결구조의 상관 관계에 따라 매우 복잡하게 거동함을 알 수 있다.
- 2) 침목은 궤도의 횡방향 거동과 수직방향 그리고 비틀림 거동에 의해 역의 곡률이 발생하는 휨 거동을 보이고 있으며 침목의 횡방향 휨 거동은 대칭 거동을 보이고 있으나 침목의 비틀림 거동과 수직 휨 거동은 비대칭 거동을 보이고 있다. 이러한 침목의 거동은 침목의 휨 강성과 패드-체결구조의 강성 차이에 영향을 받게되며 전체 궤도의 강성에 영향을 미치게 된다. 그러므로 궤도의 강성에는 침목의 각 방향 휨 강성과 패드-체결구조의 회전 강성이 포함되어야 한다.
- 3) 온도가 좌굴온도( $T_{max}$ )에 도달하기 전에는 축방향 신장만이 지배적으로 발생되어 온도 상승에 의한 축력만이 발생되나  $T_{max}$  이후에는 축력과 더불어 강축과 약축에 의한 모멘트, 휨에 의한 바이모멘트 등이 추가로 발생한다.
- 4) 레일의 강축에 대한 휨 모멘트는 약축에 대한 휨 모멘트에 비해 그 크기가 작게 발생되나 온도하중과 운중 하중을 동시에 고려하는 경우에는 상당히 중요한 단면력으로 취급되어야 한다.
- 5) 레일에 발생하는 축력은  $T_{max}$  까지는 전 길이에 걸쳐 온도에 의한 신장에 따라 분포되지만  $T_{max}$  이후, 궤도 중앙부에서는 궤도 단면의 횡방향 거동에 의한 레일의 추가적인 축력의 영향을 받게되어 각 레일에 발생하는 축력 분포가 상이하게 분포된다.
- 6) 레일에 발생하는 모든 단면력들은 레일의 약축에 대한 휨 모멘트를 제외하고는 모두 레일에 따라 달리 분포하므로 궤도의 정확한 거동을 파악하기 위해서는 각각의 레일을 분리하여 고려하여야 한다.

#### 감사의글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R08-2003-000-10168-0)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 임남형, 강영중 (2002), "장대레일 궤도의 3차원 좌굴 변수 I -궤도 모델-", 대한토목학회논문집, 제 22권 3-D호, pp. 497-506.
2. Lim, N.H., Park, N.H., Kang, Y.J. (2003), "Stability of continuous welded rail track", computers & structures, Vol.81.Issue22-23, pp.2219-2236
3. Bijl F. (1964), "Buckling Force in Gapless Track Calculated in a Nonlinear Manner", Delngenieur, pp. 119-123
4. Choros J. and Gitlin I. (1982), "Track Component Property Test, Vol. II : Rails, Ties, Joint Bars and Fastener", AAR Technical Center, Chicago
5. Jackson J.E., Bauld N.R., Ramesh M.S. and Menon S.C. (1988), "A Superelement for Lateral Track Deformation", Applied Mechanics Rail Transportation Symposium, pp. 7-18
6. 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
7. Kish A. (1982), "Analysis of Thermal Buckling Tests on U.S. Railroads", FRA/ORD-82/45
8. Ramesh M. S.(1985), "A Nonlinear Finite Element Approach to the Analysis of Lateral Thermal and Mechanical Buckling of Railroad Tracks", Master Thesis, Clemon University
9. 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