

# 장대레일궤도의 좌굴안정성 이론



서사범 (주)서현기술단 부사장  
공학박사 · 철도기술사  
(suh7484@hanmail.net)

## 1 머리말

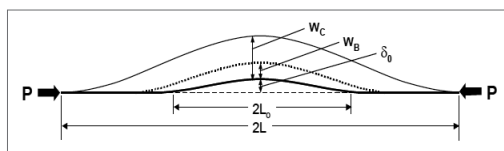
이음매레일을 대체하는 장대레일의 사용증가로 지난 수십 년간에 걸쳐 장대레일의 안전성과 성능의 분야에서 주목할 만한 연구가 수행되었다. 개선된 승차감, 늘어난 레일 피로수명과 철도차량 피로수명, 감소된 선로보수비용은 이음매레일을 장대레일로 바꾸게 된 주요한 동기였다. 그러나 이음매의 제거로 인해 억제된 열팽창과 수축에 따른 압축력과 인장력이 여름철의 궤도좌굴과 겨울철의 인장절단파손 가능성을 야기하며, 심각한 탈선을 초래하는 경우도 있다. 이 때문에 분석모델의 개발, 시험·조사, 파라미터 특성화연구, 측정 기술개발 및 궤도보수실행의 개선을 통해 장대레일의 안전성과 성능을 향상시키기 위한 본질적인 연구가 수행되어왔다.

본고에서는 궤도좌굴 메커니즘, 정적과 동적좌굴의 이론 및 지배적인 파라미터를 기술한다. 또한, 본고에서는 좌굴에너지의 개념, 좌굴안전기준 및 좌굴 안전평가를 수행하기 위한 분석방법론을 기술한다.

## 2 좌굴메커니즘

직선궤도이지만 진폭  $\delta_0$ 와 파장  $2L_0$ 로 묘사되는 작은 사인곡선모양의 초기 줄틀림(방향틀림)이 있는 [그림 1]의 장대레일궤도를 고려해보자. 레일온도가 상승됨에 따라 압축력  $P$ 가 증가될 것이며, 이것은 초기 줄틀림에서 약간의 성장을 초래할 것이다. 실험과 현장관찰은 온도(와 대응하는 레일힘)가 최대(임계)레벨로 상승됨에 따라 초기 줄틀림이 불안정 평형상태  $\omega_b$ 로 증가될 것이라는 점을 나타내었다. 이 상태에서는 궤도가  $2L$ 의 길이에 걸쳐 새로운 횡방향 위치  $\omega_c$ 로 갑자기 좌굴

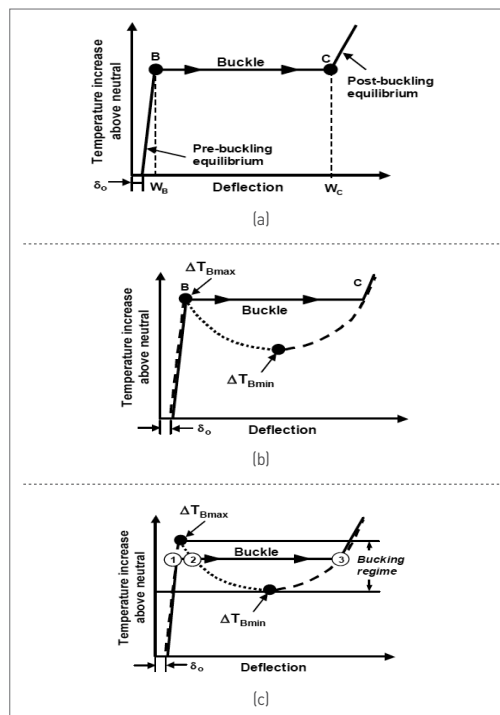
될 수 있다.  $\omega_c$ 의 크기는 일반적으로 대략 15~76 cm의 크기인 반면에 그 파장은 대략 12~24 m일 수 있다. 증위온도 이상의 온도상승 대 최대 변위의 관점에서 이 프로세스를 [그림 2(a)]에 그래픽으로 나타낸다. (중축에 나타낸 증위온도는 '레일의 실(實, net) 축력이 제로인 온도'이며, 레일에 생긴 힘에 대한 기준조건이다. 이것은 좌굴을 방지하는데 중요한 파라미터이다.  $\omega_B$ 는 좌굴 전(pre-buckling) 변위라고 하며, 좌굴이 일어나는, B로부터의 온도상승은 좌굴온도이고,  $\omega_C$ 는 좌굴 후(post buckling) 변위이다.



[그림 1] 좌굴되기 전과 좌굴된 후의 궤도형태

[그림 2(b)]는 안정이론으로 주어진 모든 가능한 좌굴상태들(평형형태들)을 파선으로 덮어씌워 나타내어 유사한 프로세스를 보여준다. 복수의 평형 상태들 간에는 별개의 두 온도상승값  $\Delta T_{Bmax}$  (때때로 분기점 온도(bifurcation temperature)라고 한다)와  $\Delta T_{Bmin}$ 가 존재할 수 있다. 좌굴이나 평형 상태들의 독특한 특성은 그들 안정성의 본질(즉, 안정되어있거나 안정되어있지 않음)이다. 따라서  $\Delta T_{Bmax}$ 까지 파선의 좌굴 전 분파(分派, branch)는 안정,  $\Delta T_{Bmin}$ 에 이르기까지의 점선의 분파는 불안정, 그리고 C에 이르기까지와 C 너머로 증가하는 파선의 분파는 안정되어있다고 볼 수 있다. 실제의 물리적 조건에서는 안정상태들만 알아차릴 수 있다. 분기점 B는 안정된 형태와 궤도가 저 너머 C의 안정상태로 날래게 움직이는(snaps over) 불안정한 형태(때때로 미소한 안정이라 한다)에 공

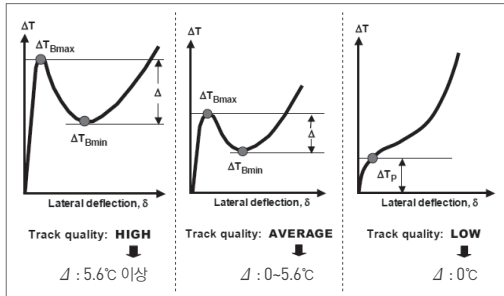
통되는 형태를 나타낸다. 연구는 (열차작용과 같은) 충분한 외부에너지가 공급되면 [그림 (c)]에서 ①, ②, ③으로 나타낸 것처럼  $\Delta T_{Bmax}$  아래의 온도에서 궤도가 좌굴 전 형태로부터 (불안정 형태를 거쳐) 좌굴 후 안정된 형태로 건너뛰(jump) 수 있음을 또한 나타내었다. 따라서  $\Delta T_{Bmin}$ 과  $\Delta T_{Bmax}$  간의 범위는 장대레일 궤도의 좌굴체제를 나타낸다.  $\Delta T_{Bmax}$ 에서는 외부에너지가 없어도 궤도가 좌굴될 것인 반면에, 만약 충분한 외부에너지가 궤도에 가해지면  $\Delta T_{Bmin}$ 에서도 좌굴된다.  $\Delta T_{Bmin}$  아래에서는 궤도가 단 하나의 안정된 평형형태만 가지기 때문에 좌굴되지 않을 것이다.



[그림 2] 좌굴응답곡선

좌굴응답곡선의 모양은 특정한 궤도파라미터와 상태(즉, 궤도품질)에 따라 달라진다. 좋은 품질의 궤도는 [그림 3(a)]에 나타낸 것처럼 최대좌

굴온도( $\Delta T_{Bmax}$ )와 최소좌굴온도( $\Delta T_{Bmin}$ ) 간에 큰 차이가 있을 것이다. 궤도품질이 저하됨에 따라  $\Delta T_{Bmax}$ 와  $\Delta T_{Bmin}$  값이 감소되며, 마찬가지로 그들 간의  $\Delta$ 도 감소된다. 사실, 품질이 낮거나 열등한 궤도에서는 이들 온도 간의 차이가 [그림 3(c)]처럼 ( $\Delta T_{Bmax}$ 와  $\Delta T_{Bmin}$ 이 하나의 값  $\Delta T_p$ 로 합칠 때) 제로로 될 수 있다. 그러한 궤도는 레일온도상승과 함께 천천히 또는 점진적으로 좌굴될 것이다(즉, 갑작스런 스냅-스루(snap through) 좌굴이 없다).

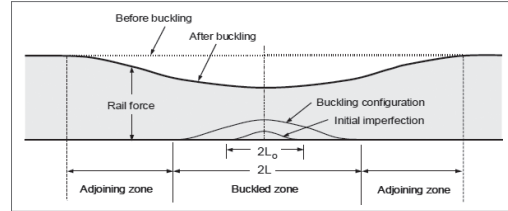


[그림 3] 좌굴응답특성에 대한 궤도품질의 영향

### 3 힘 감소/좌굴영향영역

갑작스런 폭발적 좌굴의 특징은 좌굴 전 힘 값과 비교하여 좌굴영역에서 수반되는 레일힘 감소(에너지 방출)이다. 이것은 압축하중의 일부를 해방하도록 레일신장에 기여하는 큰 횡 변위에 기인한다. 좌굴영역의 횡 변위는 레일을 좌굴영역에 넣는 바깥쪽 영역의 길이방향 이동을 수반한다. 길이방향 이동은 장대레일 궤도의 상당히 긴 구간을 통하여 영향을 받을 것이다. 따라서 좌굴영역과 인접영역의 레일힘 분포는 [그림 4]에 나타난 것처럼 상당히 변한다. 이것은 장대레일 중위온도가 좌굴 후에 상당히 변할 것이며, 궤도의 긴 구간이 수리되고 재설정(restressed)되어야만 한다는 것을 의미

한다. 그것은 좌굴메커니즘을 정확하게 모델링하기 위해서 궤도좌굴이론으로 이 에너지방출과 힘 감소를 예측하여야 하는 것을 의미한다.

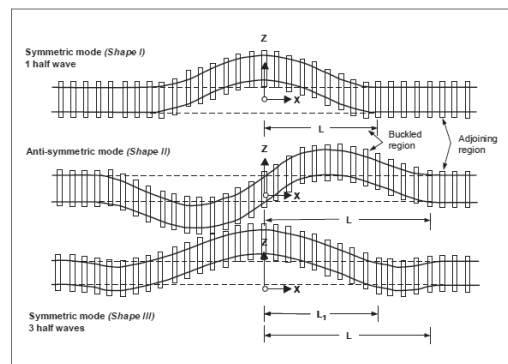


[그림 4] 좌굴 후 레일 힘 분포

### 4 좌굴모드 형상

[그림 1]은 형상 I이라 부르는 대칭의 반 사인파형으로 모드형상을 묘사한다. 모드형상은 형상 II라 부르는 비대칭 파형을 반영하는 완전한 사인파형일 수도 있는가 하면, 대칭형상 III과 같은 보다 높은 모드도 일어날 수 있다. [그림 5]는 이들을 도식적으로 보여준다. 궤도에서 일어나는 실제의 좌굴모드형상은 주로 초기 줄틀림 형상의 영향을 받는다.

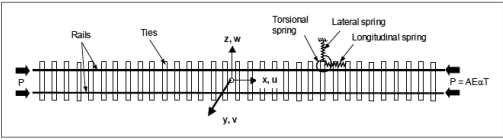
직선궤도는 일반적으로 형상 III으로 좌굴되는 반면에 곡선궤도는 형상 I로 좌굴되며, 적절한 경계조건의 관점에서 이론으로 그들에 관하여 적절히 밝히어야 한다.



[그림 5] 장대레일 궤도 횡 좌굴 모드

### 5 궤도좌굴 이론

좌굴이론은 [그림 6]에 나타난 것처럼 기계적인 궤도모델에 기반을 둔다. 좌굴 힘은 두 레일의 결합된 압축하중이며, 레일단면적과 온도상승에 좌우된다. 침목과 도상 간에 발생하는 횡 저항력뿐만 아니라 레일체결장치에서 발생된 종 저항력과 비틀림 저항력도 좌굴 힘에 저항하는 힘을 제공한다.



[그림 6] 궤도모델

침목이 도상을 통하여 횡 방향으로 변위되기 때문에 횡 저항력은 비선형 침목-도상 스프링 특성에 좌우된다. 종 저항력은 레일/침목/레일체결장치/도상의 종 방향 스프링 특성에 좌우된다. 침목들 간의 낮은 도상높이와 같이 불충분한 도상상태에서는 레일-침목구조(궤광)가 종 방향으로 이동될 수 있다. 그 밖의 경우에, 레일은 침목의 없거나 무시할 수 있는 종 방향 이동과 함께 레일체결장치를 통하여 복진(匍進, creep)된다. 레일과 침목의 체결은 (비틀림 스프링으로 모델링된) 회전강성도 제공하며, 이것은 좌굴변형 동안에 회전에 대한 레일의 성향(tendency)에 반작용한다.

궤도좌굴에 관한 문헌들에서는 다수의 이론들이 상정되었다. FRA 연구에서 개발된 이론은 결정론과 확률이란 두 가지 기본 카테고리로 구분된다.

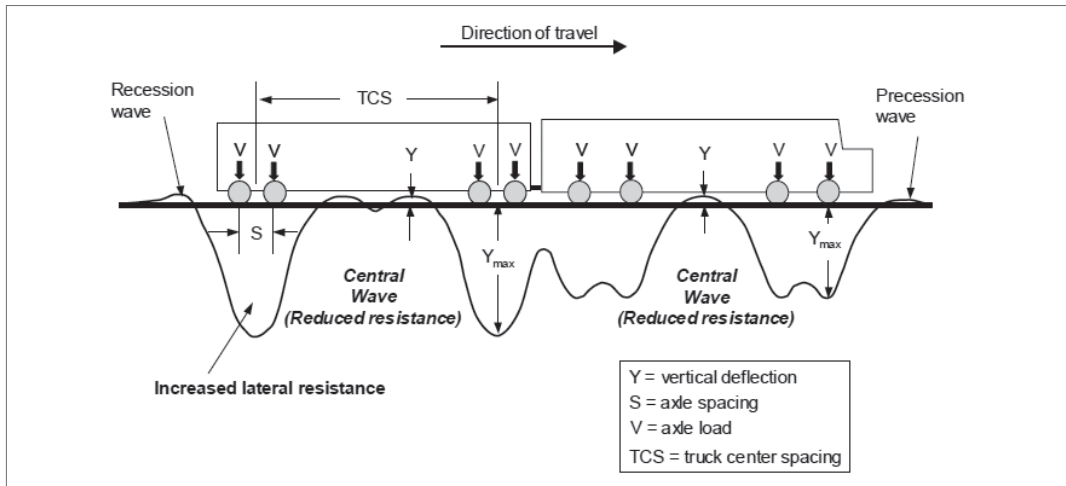
결정론적 방법은 고전역학(classical mechanics)에서처럼 파라미터가 확실하게 명시되어야 한다. 장대레일궤도의 좌굴강도는 고전적 공식을 사용하여 평가되고 중위온도 위에서의 온도상승(즉, [그림 3]의 좌굴응답곡선)의 관점에서 표현

된다. 이 방법은 일련의 입력파라미터들에 대하여 궤도가 특정온도에서 좌굴되거나 좌굴되지 않을 것임을 나타낸다.

확률적 방법은 특정 레일온도에서 좌굴발생의 백분율 가능성을 제공하지만, 입력파라미터의 통계적분포를 필요로 한다. 예를 들어, 확률이론은 좌굴잠재력을 관리하기 위하여 차량운영과 유지보수절차에 대한 위험기반 접근을 용이하게 할 수 있다. 결정론적 방법과 확률적 방법은 다음의 장에서 논의하는 것처럼 직선궤도와 곡선궤도에 대한 정적과 동적좌굴분석에 사용될 수 있다.

### 6 정적좌굴모델 대 동적좌굴모델

정적좌굴모델은 차량하중의 영향을 무시하고 오직 종 방향 압축하중만으로 생기는 궤도좌굴을 고려한다. 좌굴영역에서, 횡 방향 좌굴에 대한 저항력은 차량 수직하중의 영향이 없는 침목-도상 구조에 의해 제공된다. 문헌과 시험연구에서 좌굴의 모드가 광범위하게 다루어지기는 했지만, 이들의 결과를 사용하여 열차의 이동과 함께 발생하는 좌굴을 설명하기에는 부정확하다. 정확한 모델링은 차량 수직하중과 그들이 횡 저항력에 미치는 영향을 포함하는 것을 필요로 한다. 수직하중은 차량의 차축과 대차중심 간격에 좌우되어 궤도를 따라 분포된다. 비록 차륜 직하에서는 횡 저항력이 증가될지라도, 대차들 간의 궤도부분은 부분적인 들림(uplift) 파형 때문에 횡 저항력이 감소될 수 있다. 이 들림 파형은 중앙파형이라 불리며, [그림 7]에 개략적으로 나타낸다. (그림에서 두 차량에 대하여 나타난 것처럼) 열차의 뒤쪽과 앞쪽에는 횡 저항력이 감소될 수 있는 후퇴파형과 전진파형이 존재한다(또는 발생된다). 중앙파형은



[그림 7] 들림 파형의 정의

일반적으로 횡 저항력의 최대감소를 나타내며, 따라서 좌굴에 대하여 크리티컬하다. 이것은 차량 아래의 궤도구간이 횡 저항력의 손실에 기인하여 좌굴에 가장 취약할 수 있다는 점을 시사하며, 실제로 열차 아래에서 좌굴이 일어나기도 한다.

중앙파형 들림으로 인한 좌굴은 차량이 곡선과 줄틀림을 통과하는 동안 높은 횡 하중이 수반되는 경우에 발생할 수 있는 잠재적 궤도시프트(track shift)와 구별해야 한다. 곡선을 횡으로 옮기는(move) 경향이 있는 힘은 실(實, net) 차축 힘(차축의 2 차량에서의 횡력의 합)이다. 실(實) 차축 힘은 횡력 대 수직력 비율(L/V)로 나타낸다. 이 L/V 비가 허용한계(threshold limit,)를 초과하지 않는 한, 차량 아래에서는 궤도시프트나 횡 이동(lateral movement)이 일어나지 않을 것이다. 궤도시프트는 차량통과 중에 서서히 발생하는 반면에 차량의 두 대차 간의 횡 좌굴은 얼마간 갑자기 발생될 수 있다. NAL(net axle load) 하중으로부터의 횡 변위가 설사 있다손 치더라도 횡 저항력이 가장 큰 차량 아래의 작은 영역으로 한정되기 때문에 중앙파형 들림에 기인하는 궤도좌굴은 일

반적으로 NAL 힘에 의존하지 않는다.

요약하면, 동적좌굴이론은 보다 정확한 좌굴예측을 위해 필요하다. 이것은 감소된 저항력과 그에 따른 좌굴강도의 감소를 명확하게 고려하기 위한 모델에서는 동적 들림을 초래하는 차량하중의 영향이 본질적이라는 것을 의미한다.

## 7 직선궤도 대 곡선궤도

현장시험과 실제좌굴관측은 곡선궤도의 좌굴 거동이 직선궤도와 다를 수 있다는 점을 나타내었다. 직선궤도는 일반적으로 갑작스런 폭발적 유형의 좌굴이 생기며 초기 줄틀림의 방향이나 횡 저항력의 약한 쪽에 좌우되어 어느 한 쪽으로 변위될 수 있다. 직선궤도에서의 형상 III의 궤도좌굴은 일반적으로 두 단부파형에 비해 상대적으로 큰 중간파형의 진폭을 갖는다.

곡선궤도는 일반적으로 형상 I로 외측으로 좌굴된다. 곡률의 반대방향으로(즉, 형상 III의 양단 파형이 생기도록 안쪽으로) 레일을 구부리기 위해서는 초기의 곡률 때문에 상당한 에너지가 필요하

다. 곡선궤도 좌굴의 또 하나의 중요한 특징은 특히 횡 저항력이 약한 곡선과 곡률이 큰 곡선에서의 점진적인 좌굴의 경향이다.

곡선궤도는 하루 동안에 그리고 계절적으로 큰 레일온도변화가 존재할 때 특히 횡 저항력이 약한 상태 하에서 방사상의 이동(부동)도 나타난다. 중위 온도 이상의 온도상승은 방사상으로 외측으로 향한 이동을 초래할 수 있으며, 중위온도로부터의 온도하강은 방사상으로 안쪽으로 향한 이동을 초래할 수 있다. 이 방사상의 부동(浮動, breathing)은 횡 저항력을 더욱 줄이고 좌굴을 촉발시킬 수 있는 국지적 줄뜸을 발생시킬 수 있기 때문에 궤도에 해로울 수 있다. 방사상의 이동은 몇 센티미터 이상의 오더일 수 있으며, 중위온도를 감소시킴, 횡 저항력을 약화시킴 및 국지적 줄뜸을 발생시킴으로써 좌굴되기 쉬운 상태를 일으킬 수 있다.

**8 미분방정식 정립**

좌굴이론들은 직선궤도와 곡선궤도의 평형미분 방정식들(문헌 [15] 참조)에 기초를 둔다. 이 방정식들은 궤도시스템의 잠재적 에너지를 최소화하는 변분원리들을 이용하여 유도된다. 첫 번째 미분방정식은 좌굴영역의 가로 또는 횡 방향 변위에 대한 것이다. 두 번째의 것은 인접한 영역의 종 방향 또는 접선방향의 변위이다. 이 방정식들은 그 다음에 좌굴영역과 인접영역 간의 연속성 요건을 이용하여 유도되는 온도에 대한 또 하나의 식을 통해 결합된다. 이 방정식들은 (비선형 변형률-변위 관계를 필요로 하는) 큰 횡 좌굴변위를 감안하는 고전적 보 이론에 기초를 둔다. 좌굴이론에서 다음과 같은 핵심적인 가정들이 만들어진다.

- 두 레일은 결합된 관성모멘트와 결합된 단면

적을 가진 보로 표현된다. 보의 종 방향 힘은 두 레일 힘의 합이다. 좌굴 전의 레일횡단면은 좌굴 후에 여전히 평면에 있다.

- 침목이 제공하는 횡 저항력은 측정을 밀접하게 근사시킨 비선형(스프링) 이상화로 표현된다.
- 레일체결장치와 도상이 제공하는 레일에 대한 종 저항력은 일반적으로 좌굴시험으로 구한 종 방향 변위(1.27 cm)의 범위에 대하여 선형으로 이상화하여 나타낼 수 있다.
- 침목은 변형되거나 회전되지 않으며, 레일체결장치로 형성된 레일에 대한 연결은 비틀림 스프링으로 표현된다. 침목-레일체결장치의 비틀림 저항력은 좌굴시험과 시험실에서 수행된 시험에서 관찰된 작은 각도( $< 5^\circ$ )에 대한 레일회전에 비례한다.
- 종 저항력에 좌우되어 힘이 어느 정도 변화되는 인접영역과 비교하여 좌굴영역은 전(全)길이에 걸쳐서 레일힘이 일정하다.
- 레일온도는 (레일의 길이방향으로와 가로로) 전체에 걸쳐서 균일하다.
- 직선궤도에서의 인접영역은 횡 이동이 없이 종 방향 변위만을 경험한다. 곡선궤도에서의 인접영역은 접선방향의 변위에 더하여 균일한 방사상의 이동을 경험한다.
- 궤광은 자체무게를 가지며, 현저한 종단선형 불규칙이 없다.
- 궤도 줄뜸은 기지의 파장과 진폭을 갖고 있으며, 형상은 다항함수로 수학적으로 근사된다.

**9 좌굴응답 계산**

좌굴응답을 결정하기 위해서는 온도상승과 횡 변위 간의 관계(그림 2(b))가 평가되어야 한다.

이 목적으로 여러 가지의 파장을 가진 각각 다른 평형형태가 고려된다. 각각의 좌굴형태는 [그림 2(b)]와 같은 특징이 있다.

좌굴영역의 미분방정식은 레일 힘과 횡 변위를 관련짓는다. 미분방정식의  $\omega = \omega(x)$ 는 좌굴파형 형상을 나타낸다. 형상 I과 같은 특정파형의 해는 좌굴영역의 파장  $L$ , 좌굴진폭  $\omega$  및 레일 힘  $\bar{P}$ 의 관계를 제공한다. 좌굴영역과 인접영역 간의 종 방향 변위(및 그 기울기)에 관한 연속성조건을 이용하여 좌굴영역의 레일 힘  $\bar{P}$ , 레일온도  $T$ , 및 파장  $L$ 에 관련된 온도방정식이 유도된다. 범위에 걸쳐서  $L$ 을 변화시키므로써 좌굴 힘  $\bar{P}$ , 진폭  $\omega$  및 레일온도  $T$ 의 상응하는 값을 결정할 수 있다. 이 데이터로부터, 레일온도와 좌굴진폭을 관련짓는 좌굴반응곡선을 그릴 수 있다.

반응곡선을 결정함의 복잡성은 채택된 수치계에 좌우된다. 가장 편리한 접근법은 미분방정식의 해에 대한 푸리에급수(Fourier series)의 적용이다(문헌 [15] 참조). 급수(series) 접근법의 장점은 다음을 포함한다.

- 윤하중 하에서의 횡 저항력과 저항력변화의 어떠한 비선형성이라도 수용할 수 있다.
- 방법은 직선과 줄뜸의 곡선궤도에서의 폭발적 응답이나 점진적인 응답을 예측할 수 있다.
- 방법은 초기 줄뜸이 없는 완전히 똑바른 궤도에 대해 사용된다.
- 계산시간이 매우 적으며(수 분 이내), 방법은 PC에서의 손쉬운 프로그래밍을 가능하게 한다.

앞서 말한 방법에 대한 대안의 접근법은 유한요소(FE)법이다. 비선형 FE법은 증분분석법을 사용한다(즉, 방정식은 온도상승과 횡 변위의 증가에 관하여 공식화된다). 온도나 하중증가가 선택되고, 관계는 제로온도의 초기상태에서 시작하여 결

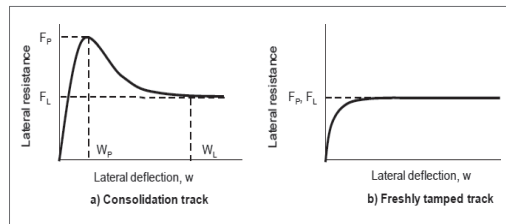
정된다. 이 접근법은 연역적으로 미리 정해진 약간의 줄뜸을 필요로 하며  $\Delta T_{Bmax}$ 에서의 불안정 때문에 수치적 어려움에 직면할지도 모른다. FE법은 상당한 계산시간을 필요로 하며, 그 정확도는 일반적으로 푸리에급수보다 좋지 않다.

## 10 좌굴응답에 영향을 미치는 파라미터

### 기초계수(수직)

궤도기초계수(foundation modulus)는 궤도기초의 수직강성의 척도이다. 이것은 수직하중분포를 결정하는데 사용되며, 그것에서 동적 횡 저항력이 평가된다.

### 횡 저항력(최대와 한계)



[그림 8] 전형적인 횡 저항력 특성

횡 방향으로 좌굴되는 궤도의 경향은 도상이 침묵들에게 가하는 반력으로 저항된다. 도상 횡 저항력은 일반적으로 [그림 8]에 나타난 것과 같은 특성을 보인다. 압밀된 궤도는 최대치 후에 저항력의 뚜렷한 저하를 나타내는 반면에 새로이 다져진 궤도는 그렇지 않으며 최대치에서 계속 이어진다. [그림 8(a)]는 다음을 포함하여 압밀된 궤도의 횡 저항력 특성을 밝히는데 사용되는 서브파라미터들도 나타낸다.

- 최대(peak) 횡 저항력  $F_p$  및 대응하는 변위  $\omega_p$
- 한계(limiting) 횡 저항력  $F_L$ , 및 대응하는 변위  $\omega_L$

약하거나 최근에 보수된 궤도에 대한 시험은  $F_p = F_L$  및  $\omega_p = \omega_L$ 을 나타내었다.

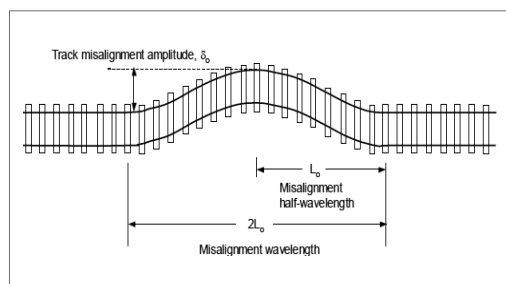
횡 저항력의 측정에서 횡 방향으로 불과 1.27 cm만큼 침묵에 하중을 가하여  $F_p$ 과  $\omega_p$ 를 사정하는 것은 일반적으로 용이하다.  $F_L$ 과  $\omega_L$ 를 알아내기 위해서는 7.62~12.7 cm의 침묵이동이 필요할 수도 있으며, 그것은 궤도에 더 해로운 것으로 간주된다. 따라서 광범위한 시험을 통하여  $F_p$ ,  $\omega_L$  및  $F_L$ 을 관련시키기 위한 상관관계가 개발되었으며, 그래서 대다수의 경우에  $F_p$ 는 저항력특성을 정의하는데 적절하다.

### 종 저항력

궤도 종 저항력은 침묵과 도상이 레일에 대해 제공하는 저항력이며, 열적 힘이 종 방향 이동을 유발할 때나 열차제동과 가속작용에 응하여 좌굴되는 경우에 레일이 종 방향으로 이동하는 경향 때문에 생긴다. 저항력특성은 일반적으로 쌍(雙)선형이며, 좌굴사건에서 레일의 종 방향 변위가 작기 때문에 대부분의 경우에 초기선형부분만 필요할 것이다.

### 줄틀림(방향틀림) 진폭

줄틀림 진폭( $\delta_0$ )은 [그림 9]와 같이 좌굴이 발생되기 전의 궤도 줄틀림의 크기다.



[그림 9] 궤도 줄틀림

### 줄틀림(방향틀림) 파장

줄틀림 파장( $2L_0$ )은 [그림 9]에 나타난 것처럼 좌굴이 발생되기 전의 궤도 줄틀림의 총 길이이다. 줄틀림 파형의 단부에 진폭과 기울기의 0 값이 주어지면, 줄틀림 형상은 간단한 다항식으로 수학적으로 근사시킬 수 있다(문헌 [15] 참조).

### 중위온도(TN)

중위온도는 레일에 존재하는 종 방향 힘(축력)이 제로일 때의 레일온도이다. 좌굴분석에서 온도 상승은 중위온도에 관해 측정된다. 이 파라미터가 결정론적 모델의 안전성분석에서만 필요할지라도, 이 파라미터의 통계적 분포는 확률적 좌굴강도 평가에서 가장 중요한 입력이다.

### 레일크기

[그림 10]은 레일 보의 축 좌표와 UIC60 레일의 레일특성(면적과 관성모멘트)을 나타낸다.

레일	UIC60
단면적	7686 mm <sup>2</sup>
관성모멘트 (수평 축에 대하여, $I_{yy}$ )	3055 cm <sup>4</sup>
관성모멘트 (수직 축에 대하여, $I_{zz}$ )	512 cm <sup>4</sup>

[그림 10] 레일 보 단면특성

### 레일온도(TR)

레일온도는 분석되고 있는 궤도구간에서 구한 레일의 최대예상온도다. 이것은 분석의 안전성평가에서 레일중위온도와 함께 필요하다.



### 침목-도상 마찰계수

침목-도상 마찰계수는 궤도가 수직으로 재하될 때 횡 저항력에 대한 침목저면 영향의 척도이다. 이것은 동적 궤도 횡 저항력의 평가와 들림 (uplift) 계산에서 필요하다.

### 비틀림 저항

레일체결장치는 레일의 횡 휨에 대한 회전구속을 제공한다. 저항력은 레일회전에 관하여 선형화되며, 비틀림 강성은 레일체결장치 당으로 명시된다. 필요한 입력 비틀림 저항력은 궤도의 단위길이 당 킬로그램이다.

### 궤도자체중량

궤도자체중량은 레일, 레일체결장치 및 침목을 포함하는 궤광의 단위길이 당 중량이다.

### 차량특성

동적좌굴이론에 필요한 차량특성들은 대차중심 간격, 차축간격 및 각 차량에 대한 차축하중이다. 이들은 좌굴이 발생할 개연성이 있는 중앙영역의 들림(uplift)특성을 결정한다.

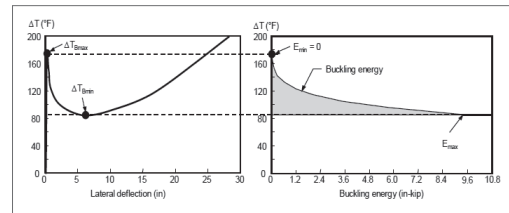
## 11 좌굴 안전기준

### 11.1 배경

[그림 2(b)]를 참조하여, 만약에 레일이 점 B에 해당되는 상부임계온도  $\Delta T_{Bmax}$  까지 가열된다면 장대레일궤도는 궤도에 공급되는 외부에너지가 없어도 점 C에 해당되는 형태까지 궤도가 급격히 이동(jump)될 것임을 의미하는 불안정한 평형 상태에 있을 것이다. [그림 2(c)]에 나타난 것처럼

좌굴영역의 낮은 점까지 가열되는 경우에, (좌굴 후 안정된 분파 상의 점까지) 궤도를 횡으로 좌굴시키기 위해서는 얼마간의 유한 외부에너지가 횡 평면에 공급되어야 한다.

선로속도로 주행하는 열차는 윤축 횡 이동 때문에 분명히 횡 평면에 에너지를 공급한다. 이 차량 에너지는 줄 틀림을 통과하는 경우나 곡선을 통과할 때 두드러진다. 궤도에 전달된 에너지는 대체로 열차속도의 제곱에 비례한다. 더 높은 속도에서는 일반적으로 열차 하의  $\Delta T_{Bmax}$  보다 낮은 온도에서 좌굴을 초래하는 더 높은 레벨의 에너지가 궤도에 전달될 수 있다. 이  $\Delta T_{Bmax}$  온도를 허용 온도나 안전온도로 사용하는 것은 이 가변성(뿐만 아니라 그 밖의 민감성) 때문에 허용될 수 없다.



[그림 11] 좌굴에 필요한 에너지

(※  $\Delta T(^{\circ}C) = \Delta T(^{\circ}F) \times 5/9$ , 1 in = 2.54 cm, 1 in-kip = 1,152 cm · kg)

레일온도가 좌굴체제( $\Delta T_{Bmax} \geq \Delta T \geq \Delta T_{Bmin}$ ) 내에서 상승되고 있을 때 궤도를 횡으로 좌굴시키는데 필요한 에너지는 장대레일 좌굴의 수학적 공식(문헌 [15] 참조)을 사용하여 계산할 수 있다. 중위온도 위에서의 온도상승의 함수로서 가정된 특정 파라미터에 대해 궤도를 좌굴시키는데 필요한 에너지를 나타내는 [그림 11]은 그러한 에너지 계산의 결과를 나타낸다. 이것은 불안정한 평형의 상태에서 예상대로  $\Delta T_{Bmax}$  에서 제로에너지,  $\Delta T_{Bmin}$  에서 최대에너지, 및  $\Delta T_{Bmin}$  바로 위에서 좌굴에 필요한 에너지의 매우 급격한 감소를 보여준다.

좌굴에너지계산은 좌굴체제( $\Delta T_{Bmax} - \Delta T_{Bmin}$ )가 증가됨에 따라  $\Delta T_{Bmin}$ 에서의 최대에너지(에너지장벽이라 한다)의 크기가 증가되는 것을 나타내었다. 이것은 큰 좌굴체제를 나타내는 궤도상태에서 외부(열차)에너지가 이 최대보다 크지 않을 것이며, 그러므로  $\Delta T_{Bmin}$ 에서 그 궤도를 좌굴시키기 충분하지 않다는(분석으로 부분적으로 확인된) 기대로 이어진다. 그러나 열차통과 때문에 있음직한 급속히 감소되는 에너지레벨에 기인하여  $\Delta T_{Bmin}$  위에서의 좌굴이 가능할 것이다.

이 양상은 다음의 절에 나타내는 안전기준의 개발에 포함되며, 이 기준은 좌굴방지를 위한 안전온도레벨이  $\Delta T_{Bmin}$ 에 기초할 수 있다는 사실에 입각한다.

11.2 좌굴안전기준

좌굴안전기준은 다음의 조건에 기초하여 상정된다.

- 허용레일온도상승은 하부좌굴온도  $\Delta T_{Bmin}$  나 더 높은 레일온도에서의 좌굴가능성 때문에 이  $\Delta T_{Bmin}$ 보다 클 수 없다.
- 만약에  $\Delta T_{Bmin}$ 가 레일온도의 허용치로서 사용된다면, 적절한 에너지장벽  $\Delta T_{Bmin}$ 가 존재할 것이다.  $\Delta T_{Bmax}$ 과  $\Delta T_{Bmin}$  간의 5.6 °C 차이는 일반적으로 그러한 장벽을 보장한다.
- 만약에  $\Delta T_{Bmax}$ 과  $\Delta T_{Bmin}$  간의 차이가 5.6 °C 미만이라면(즉, 좌굴에너지가 작을 때) 좌굴잠재력이 없도록  $\Delta T_{Bmin}$ 에 관한 안전율(SF)이 사용되어야 한다(오직 좌굴 전에만 안정된 평형형태가 존재할 수 있다). 점진적인 좌굴의 경우는 아래에 나타난 것처럼 특별한 취급이 필요하다.
- $\Delta T_{Bmax}$ 과  $\Delta T_{Bmin}$ 의 결정은 상기에 언급된 모든 필수적 파라미터를 올바르게 고려하는 이론상 건전하고 유효한 동적좌굴이론에 근거해야 한다.

허용온도상승에 대한 안전기준은 이들의 요구에 맞추어 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta T_{all} = \Delta T_{Bmin}$$

$$(\Delta T_{Bmax} - \Delta T_{Bmin}) > 5.6^{\circ}\text{C} \text{에 대하여}$$

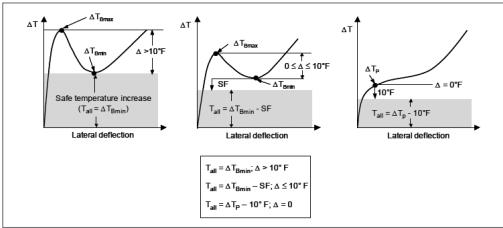
$$\Delta T_{all} = \Delta T_{Bmax} - SF$$

$$(\Delta T_{Bmax} - \Delta T_{Bmin}) > 5.6^{\circ}\text{C} \text{에 대하여,}$$

그리고 SF는 0과 5.6°C 사이에 있다.

$\Delta T_{Bmax} = \Delta T_{Bmin} = \Delta T_p$ 인 점진적 좌굴(그림 3)의 특별한 경우에 대한  $\Delta T_{all}$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta T_{all} = \Delta T_p - 5.6^{\circ}\text{C}$$



[그림 12] 안전기준의 도해 (\* 10 °F = 5.6 °C)

(약한 궤도와 급곡선 궤도에서 전형적인) 점진적인 좌굴의 경우에 대한 고유의 가정은 저속에서 열차탈선을 일으킬 정도로 상응의 힘에서  $\Delta T_p$ 가 충분히 크지 않다는 점이다. [그림 12]는 안전기준을 도해한다. UIC는 이 작업에 기초하여 유사한 안전기준을 채택하였다.

좌굴안전성평가에서 유용한 안전개념은 좌굴안전여유(BSM)이며, 이것은 궤도와 차량파라미터의 주어진 세트에 대한 예비좌굴강도의 척도이다. BSM은 궤도가 특유의 중위온도와 최대레일온도 조건에 대한 안전기준의  $\Delta T_{all}$ 에 얼마나 가까운지(즉, 허용온도상승( $\Delta T_{all}$ )과 레일온도( $T_R$ )·중위온도( $T_N$ )차 간의 차이)에 기초한다.

$$BSM = \Delta T_{all} - (T_R - T_N)$$

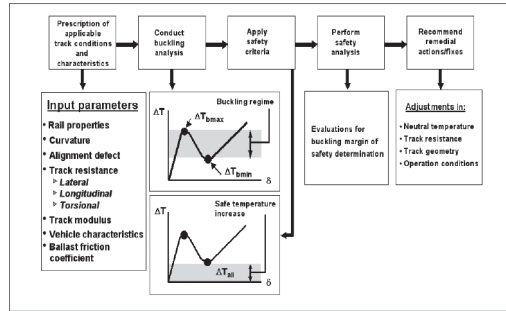
예비좌굴강도의 실제적 평가를 위해 확인된 BSM의 네 범위가 존재하며, 이상적으로 가장 큰 좌굴안전성의 여유를 마련하기 위해서는 BSM이 가능한 한 커야 한다. BSM의 평가는 다음을 포함한다(본고에 나타낸 수치는 미국문헌의 값으로 우리나라와는 다소 다를 수도 있다).

- 여유 없음(No Margin) - 이 경우에 상기 식으로 계산된 BSM은 제로보다 작다. 이것은 주어진 파라미터 세트, 레일온도, 중위온도에 관해서는 안전여유가 존재하지 않으며, 좌굴잠재력이 높음을 시사한다.
- 최소요구범위(Minimum Required Range) - 이 경우에 BSM은 0 °C와 11.1°C 사이에 있다. 이것은 당해 궤도에 작은 안전여유만 존재함을 시사한다.
- 적절한 범위(Adequate Range) - 이 경우에 BSM은 당해 궤도에 적절한 안전여유가 존재함을 시사하는 11.1°C와 22.2°C 사이에 있다.
- 바람직한 범위(Desired Range) - 이 경우에 BSM은 22.2°C보다 크다. 이것은 주어진 궤도에 가장 큰 안전여유를 제공하기 때문에 바람직한 높은 범위로 간주된다.

예로서, [그림 11]에 나타낸 좌굴응답을 참조하면, 허용온도상승  $\Delta T_{all} = 45.6^{\circ}\text{C}$ . 만약에 그 영역의 최대레일온도가  $77.8^{\circ}\text{C}$ 이고 만약에 장대레일 중위온도가  $41.7^{\circ}\text{C}$ 이라면, BSM은 최소요구범위를 만족하는  $9.5^{\circ}\text{C}$ 이다. 이것은 또한 중위온도가  $32.2^{\circ}\text{C}$ 로 떨어지면 궤도가 제로 BSM을 가질 것이고 좌굴하기가 대단히 쉬울 것임을 의미한다.

### 11.3 좌굴안전성 평가방법론

장대레일궤도의 좌굴안전성을 평가하는 방법론은 [그림 13]에 도해된 5단계 프로세스로 구성된다.



[그림 13] 장대레일궤도 좌굴안전성 평가방법론

- 고려중인 특정궤도에 대해 제10장에서 기술한 적용 가능한 궤도입력파라미터를 결정한다.
- 임계온도들  $\Delta T_{Bmax}$ ,  $\Delta T_{Bmin}$ , 또는  $\Delta T_P$ 를 결정하기 위하여 좌굴분석을 한다.
- $\Delta T_{all}$ 을 결정하기 위하여 제11.2절에 기술한 것처럼 안전기준을 적용한다.
- 레일중위온도와 최대레일온도의 입력을 사용하여 BSM을 결정하기 위해 안전성분석을 수행한다.
- 안전범위(즉, 여유 없음, 최소, 적절한, 바람직한 범위에 있는지의 여부)를 알아낸다.
- 관련된 특정응용이나 위험에 좌우되어 안전의 좌굴여유가 적절한지 아닌지를 결정한다.
- 만약에 BSM이 제로나 그 이하로 구해진다면, 좌굴위험을 줄이기 위하여 궤도에 대한 조정이 이루어져야 한다.

BSM을 바람직한 레벨까지 증가시키기 위해서는 궤도파라미터특성들의 일부를 바꿀 필요가 있다. 다음의 절은 BSM을 증가시키는데 효과적인 방법을 제공하는 핵심파라미터를 기술한다.

### 11.4 핵심적인 컨트롤 파라미터

#### 궤도 횡 저항력

궤도 횡 저항력은 교통이나 동적강화 또는 다른 압밀 수단으로 증가시킬 수 있다. 도상단면은 넓은 도

상어깨와 침목들 간의 충분한 도상레벨을 통해 횡 저항력을 향상시킬 수 있다. 대안의 침목설계(다른 침목재료, 큰 침목단부 단면, 무거운 질량, 및 더 나은 침목바닥과 측면 마찰저항)는 새로운 궤도나 개량궤도에 대해 고려될 수 있다.

### 줄맞춤(방향맞춤)

품질이 저하된 줄맞춤 상태는  $\Delta T_{all}$ 이 감소되므로 BSM을 줄일 수 있다. 향상된 줄맞춤은  $\Delta T_{all}$ 을 증가시킬 것이다. 따라서 적절한 줄틀림(방향틀림) 보수를 통하여 궤도의 좋은 줄맞춤 선형을 유지함과 횡 이동에 대하여 곡선을 모니터링하는 좌굴 안전성을 증가시킬 것이다.

### 장대레일 중위온도

각 철도들은 지역의 온도변화에 따라 높은 중위 온도를 유지하도록 노력한다. 장대레일은 차량 횡 하중과 레일온도변동으로 인하여 길이방향으로 그리고 곡선궤도의 경우에는 횡 방향으로도 이동하는 것으로 알려져 있다. 중위온도는 많은 시험들로부터 알려진 것처럼 레일과 궤도이동 및 유지보수 작업(곡선선형정정이나 레일보수) 때문에 떨어질 수 있다. 따라서 중위온도강하만으로 BSM가 17℃ 만큼 감소될 수 있다. 현재는 레일중위온도를 측정하는 편리한 방법이 비록 존재하지 않을지라도, 중위온도의 변화는 기본적인 힘 측정 스트레인게이지를 사용하여 모니터링할 수 있다. 초기중위온도 손실을 복구하기 위한 시기적절한 장대레일 응력해방(destressing)은 매우 바람직한 목표중위온도를 보장하기 위하여 높은 BSM을 유지함에 있어 뿐만 아니라, 실질적인 쏠손레일 수리를 행함에 있어, 그리고 장대레일 설치와 개량 프로세스에서의 품질관리를 수행함에 있어 도움이 될 것이다.

## 12 맺음말

본고에서는 궤도좌굴의 이론을 기술하였다. 이 이론은 줄 틀림(방향틀림)과 비선형 횡 저항력특성을 가진 직선 장대레일궤도나 곡선 장대레일궤도에 대하여 차량하중과 열(熱)하중을 고려한다. (실제의 수학공식은 문헌 [15] 참조). 본고에서는 좌굴메커니즘, 이론개발의 가정, 그리고 좌굴예방을 위한 근본적인 안전기준과 좌굴에 영향을 주는 핵심파라미터와 함께 (임계 힘과 온도의 관점에서) 좌굴강도를 결정하는데 사용되는 절차를 논의하였다.

- (1) 열 하중 하의 장대레일궤도 횡 좌굴에서 대단히 중요한 메커니즘은 차량대차 간의 레일 휨 파형(들림)이다. 들림(uplift)파형은 궤도 수직 강성, 대차중심 간격, 침목-도상 마찰계수 및 차축하중을 포함하는 몇 개의 파라미터들로 컨트롤된다. 차량 하에서의 좌굴은 정적인 경우(즉, 차량영향이 없는 경우)와는 대조적으로 더 빈번히 발생된다.
- (2) 좌굴은 폭발적이거나 점진적일 수 있다. 폭발적인 좌굴(때때로 스냅스루(snap-through)라고 부른다)은 온도상승과 횡 변위 간의 관계를 정의하는 좌굴응답곡선 상의 두 임계온도 ( $\Delta T_{Bmax}$ 와  $\Delta T_{Bmin}$ ) 간에서 평형의 급격한 변화(equilibrium jump)로 특징지어진다. 상부 임계온도  $\Delta T_{Bmax}$ 에서의 궤도는 어떠한 외부에너지도 없이 자동적으로 좌굴된다. 대조적으로, 하부임계온도에서 좌굴을 촉발시키기 위해서는 이동하는 차량으로 공급되는 얼마간의 유한에너지가 필요하다. 때때로 느린 좌굴이라 부르는 점진적인 좌굴은 뚜렷한  $\Delta T_{Bmax}$ 와  $\Delta T_{Bmin}$ 이 존재하지 않을 때 온도를 상승시킴과 함께 횡 변위를 증가시킴으로써 나타난다. 이것은 일반적으로 약한 궤도상태에서 발생된다.

(3) 동적좌굴이론은 큰 횡 변위들과 저항력파라미터들의 비선형성을 고려하는 들림(uptlift) 메커니즘에 기초하여 체계적으로 나타낸다. 이 이론은 차량 하의 폭발적인 좌굴과 점진적인 좌굴특성들을 시뮬레이트하는 실험크기 현장 시험들로 입증되었다. 이론과 시험들은 궤도 좌굴을 지배하는 크리티컬한 궤도와 차량파라

미터들을 확인하였으며, 그들을 결정하기 위하여 전문적인 측정기술들이 개발되었다.

(4) 장대레일 좌굴에 영향을 미치는 주요한 궤도 파라미터들은 궤도 횡 저항력과 비틀림 저항력, 줄 들림(방향 들림), 장대레일 중위온도, 레일단면특성들, 침목-도상 마찰특성 및 궤도 기초 강성을 포함한다.

#### 참고문헌

1. Kish, A., & Samavedam, G. (1991). Dynamic buckling of continuous welded rail track: Theory, tests, and safety concepts. Transportation Research Record,
2. Kish, A., & Samavedam, G. (2001). Risk analysis based CWR track buckling safety evaluations.
3. Esveld, C. (1998, December). Improved knowledge of CWR track. In Interactive Conference on Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track, UIC/ERRI, Paris.
4. Sussmann, T., Kish, A., & Trosino, M. (2003). Influence of track maintenance on lateral resistance of concrete-tie track. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,
5. Kish, A., Samavedam, G., & Wormley, D. N. (2007). New track shift safety limits for high-speed rail applications. John A. Volpe National Transportation Systems Center.
6. Read, D. M., Kish, A., & Clark, D. W. (2007, September). Optimized readjustment length requirements for improved CWR neutral temperature management. In AREMA Conference.
7. Koob, M. J. (2005). The development of a vibration technique for estimation of neutral temperature in continuously welded railroad rail (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
8. Ahmad, S. S., Mandal, N. K., Chattopadhyay, G., & Powell, J. (2013). Development of a unified railway track stability management tool to enhance track safety. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of rail and rapid transit,
10. Gräbe, P. J., Freyer, R. V., & Furno, R. F. (2007). An intelligent condition monitoring system for the management of continuously welded rails. In Proceedings International Heavy Haul Conference.
11. Ahmad, S. S. N., Mandal, N. K., Chattopadhyay, G., Powell, J., & Micenko, P. (2011). Improvement of rail creep data to measure the stress state of a tangent continuously welded rail (CWR) track. In The International Heavy Haul Association conference.
12. Kish, A., & Aten, J. P. (2012). A "smart systems" approach for better managing CWR thermal forces at extreme temperatures. In CORE 2012, Rail-the core of integrated transport, conference on railway engineering, Perth, Western Australia,
13. Nucera, C., Phillips, R., di Scalea, F. L., Fateh, M., & Carr, G. (2012, October). A Wayside System for In-Situ Measurement of Rail Neutral Temperature by Nonlinear Ultrasonic Guided Waves. In ASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference (pp. 11-15). American Society of Mechanical Engineers.
14. Kish, A., Samavedam, G., & Wormley, D. (2004). Fundamentals of track lateral shift for high-speed rail applications. National Technical Information Service.
15. 徐士範, (2002), 急曲線과 鉸桁橋梁의 레일 長大化를 위한 레일 軸力 解釋, 忠北大學校 大學院 工學博士 學位論文.
16. 서사범, (2003), 최신 철도선로(Modern Railway Track), 도서출판(주) 열과 알, (ISBN 89-5529-067-5)
17. 서사범, (2012). 개정3판 선로공학(궤도역학, 궤도재료, 궤도의 설계와 관리, 보안·운전·소음·진동), 도서출판BG 북 갤러리, (ISBN 978-89-6945-037-1 93530)