

# 궤도 안정성에 대한 도상저항력과 궤도틀림의 민감도

## Sensitivity of the ballast resistance and track irregularity on the track stability

임 남 형<sup>1)</sup> · 최 상 현<sup>2)</sup> · 이 진 옥<sup>3)</sup> · 성 익 현<sup>4)</sup>  
*Lim, Nam Hyoung Choi, Sang Hyun Lee, Chin Ok Sung, Ik Hyun*

요 약 : 혹서기에 레일의 높은 온도 상승(최대 60°C)으로 인해 장대레일 궤도에는 매우 큰 압축력이 작용하게 된다. 이러한 압축력은 장대레일 궤도의 좌굴을 발생시키기도 한다. 본 연구에서는 장대레일 궤도의 좌굴에 영향을 미치는 많은 요소들 중에서 도상 횡저항력 그리고 도상 종저항력이 궤도 좌굴에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 또한 줄틀림과 궤간틀림의 민감도를 분석하였다.

ABSTRACT : During summer, very high compressive force occurs on the continuous welded rail (CWR) track because of the increase of rail temperature (max. 60°C). This extreme temperature stress can cause the CWR track to buckle. Among many CWR parameters affecting the track buckling, the influence of the lateral and longitudinal ballast resistance was investigated on the stability of the CWR track in this study. Also, the sensitivity of the track irregularity such as the alignment defect and the gauge irregularity was investigated.

핵심용어 : 도상저항력, 궤도틀림, 온도 좌굴, 장대레일, 민감도

KEYWORDS : Ballast resistance, Track irregularity, Thermal buckling, Continuous welded rail, Sensitivity

### 1. 서론

기존의 일반궤도 구조는 보수 및 유지관리에 과다한 비용이 요구되어 왔다. 이러한 기존 궤도구조의 많은 단점들을 보완하기 위하여 레일의 이음매 부분을 제거하고 서로 연속적으로 용접하여 수 백미터 또는 수 킬로미터까지 연결하는 장대레일 궤도(Continuous Welded Rail Track)의 사용이 전 세계적으로 급증하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 장대레일 궤도는 기존 궤도에 비해 많은 장점이 있으나 온도 변화에 따른 레일의 신장이 억제됨으로 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 문제를 야기 시킬 수 있다. 이러한 장출(좌굴)은 열차의 탈선과 직접적인 관계가 있으며 장대레일의 여러 장점들을 충분히 활용하기 위해서는 장대레일 궤도의 장출에 대한 정확한

이해와 궤도를 구성하는 각종 인자들의 민감도를 분석하는 것은 매우 중요하다 할 수 있다.

실질적인 궤도의 좌굴은 횡방향 거동, 수직방향 거동, 그리고 비틀 거동이 연계된 3차원적인 거동을 보이고 있음(Lim 등, 2003, 2004; 임남형 등 2003)에도 불구하고 과거에는 수직방향 거동과 비틀 거동에 비해 횡방향 거동이 지배적이고 또한 3차원 해석으로 인한 복잡성을 피하기 위해서 대부분의 연구가 2차원 모델을 사용하여 왔다. (Samavedam, 1979; Kerr, 1978; Kish 등, 1982; Ramesh, 1985; Jackson 등, 1988) 이와 같은 2차원 모델을 사용하여 양신추 등(2002)은 곡선부 궤도의 좌굴강도 추정식과 안정성 확보 방안에 대해 연구한 바 있다.

궤도의 좌굴에 영향을 미치는 인자들은 레일의 단면적과 단면2차모멘트, 침목의 단면2차모멘트, 체결구의 각 방향 강성, 그리고 도상 저항력 등이라 할 수 있다. 또한 각종 궤도틀림(줄틀림, 궤간틀림, 면틀림, 수평틀림)들은 궤도의 불안정한

1) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
(Tel: 042-821-7005, Fax: 042-825-0318, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)  
2) 정희원, 한국원자력 안전기술원, 공학박사(schoi@kins.re.kr)  
3) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수, 공학박사(colee@cnu.ac.kr)  
4) 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수, 공학박사(iksung@hanseo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

초기 결함을 유발시켜 궤도의 좌굴강도를 저하시키는 요인이 된다.

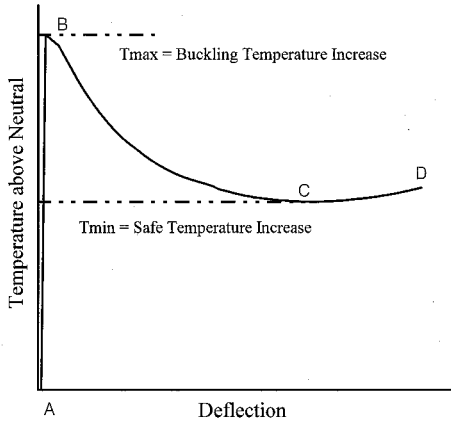


그림 1. 궤도의 전형적인 온도-변위 곡선

그림 1은 장대레일 궤도의 전형적인 온도와 변위와의 관계 곡선을 나타내는 것으로 온도하중에 의한 궤도의 좌굴은 스냅-스루(Snap-Through) 거동을 보이고 있다. AB 구간과 CD 구간은 궤도의 안정한 평형 상태(Stable Equilibrium Configuration)를 나타내며 BC 구간은 불안정한 평형 상태(Unstable Equilibrium Configuration)를 나타낸다. B점(상한 좌굴 온도)은 궤도가 불안정한 상태로 되는 천이점으로 궤도의 온도가 B점에 도달하면 실질적인 궤도는 안정한 평형상태 구간인 CD 구간으로 옮겨지는 스냅-스루 거동을 보인다. C점은 하한 좌굴 온도로 궤도의 온도가 C점 이하인 경우, 주행하는 열차에 의해 횡방향 변위가 발생하여도 열차가 모두 통과하게 되면 궤도는 원래의 위치로 복귀하게 된다. 궤도의 온도가 하한 온도(C)에서 상한 온도(B)로 상승하고 주행하는 열차에 의한 하중이 부가되면 궤도에는 좌굴 위험성이 발생되므로 상한온도와 하한온도를 결정하는 것은 궤도의 좌굴 위험성을 평가하는 데 매우 중요한 사항이 된다.

본 논문에서는 Lim 등(2003, 2004)에 의해 개발된 궤도의 3차원 비선형 모델과 프로그램을 사용하여 각종 인자와 궤도틀림이 궤도 좌굴의 상한온도와 하한온도에 미치는 민감도를 분석하였다. 고려된 인자는 도상 횡저항력(Lateral Ballast Resistance)을 나타내는 횡방향 침목 저항력(Lateral Tie Resisting Force)-횡방향 탄성한계변위(Lateral Elastic Limit Displacement), 도상 종저항력(Longitudinal Ballast Resistance)을 나타내는 종방향 침목 저항력(Longitudinal Tie Resisting Force)-종방향 탄성한계변위(Longitudinal Elastic Limit Displacement), 줄틀림(Alignment Defect) 그리고 궤간틀림(Gauge Irregularity) 등이다.

## 2. 해석 모델

궤도 좌굴에 대한 민감도를 분석하기 위한 해석 모델은 그림 2와 같이 KS60 레일과 고속철도 P.C. 침목 그리고 Pandrol 체결구로 구성된다.

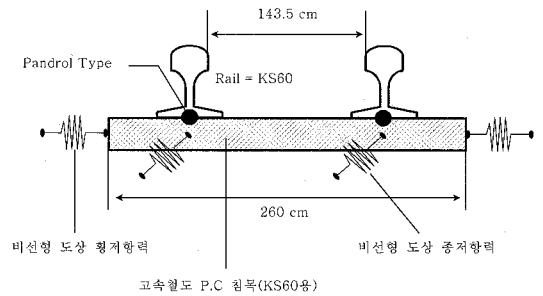


그림 2. 궤도 해석 모델(단면도)

해석 모델의 길이를 합리적으로 결정하기 위하여 궤도의 양 끝단에 무한한 길이의 궤도와 같은 효과를 구현할 수 있는 무한경계요소(Infinite Boundary Element)를 적용한다. 무한경계요소(ERRI D202/RP4, 1999)의 탄성계수( $E_{boundary}$ )와 온도팽창계수( $\alpha_{boundary}$ )는 다음과 같다.

$$E_{boundary} = E \cdot \sqrt{\frac{k \cdot L_{boundary}^2}{E \cdot A}} \quad (1)$$

$$\alpha_{boundary} = \frac{\alpha}{\sqrt{k \cdot \frac{L_{boundary}^2}{E \cdot A}}} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서  $E$ 와  $A$ 는 레일의 탄성계수와 단면적을 나타내며  $L_{boundary}$ 는 무한경계요소의 길이를 나타낸다. 또한  $k$ 는 도상 종저항력을 나타낸다.

모델 길이 산정을 위한 침목 횡저항력은 2,500N/Rail, 침목 종저항력은 3,000N/Rail, 횡방향 탄성한계변위는 0.2cm, 종방향 탄성한계변위는 0.3cm를 적용하였다. 또한 궤도계수는 1,800N/cm/cm/Rail를 적용하였다(Lim 등, 2003). Pandrol 체결구의 각 방향 회전강성은 6.0E+06 Ncm/rad이며 종방향, 횡방향 및 연직방향 병진강성은 각각 6.0E+04N/cm, 2.6E+05N/cm, 그리고 3.5E+05N/cm를 적용하였다.

KS60 레일의 단면적은 77.5cm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.1E+07 N/cm<sup>2</sup>, 온도팽창계수는 1.15E-06/°C이므로 무한경계요소(길이 1cm)의 탄성계수는 6,720N/cm<sup>2</sup> 그리고 온도팽창계수는 35.94E-03/°C이다.

해석 모델의 측면도는 그림 3과 같으며 적절한 궤도 길이를 산정하기 위하여 무한경계요소를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교하였다.

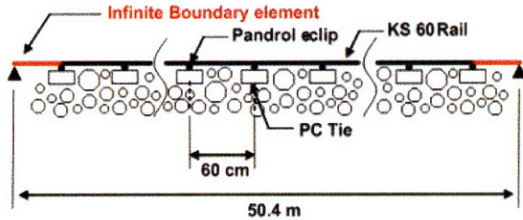


그림 3. 궤도 해석 모델(측면도)

그림 4는 무한경계요소를 적용하지 않고 궤도의 길이를 변화시키며 상한온도( $T_{max}$ )와 하한온도( $T_{min}$ )을 비교한 것이다. 상한온도는 궤도 길이에 무관하게 거의 일정한 양상을 나타내고 있으나 하한온도는 궤도의 해석 길이가 약 200m 이상이 요구됨을 알 수 있다. 그림 5는 궤도 길이에 따른 온도와 레일의 횡변위 관계 곡선을 나타낸다.

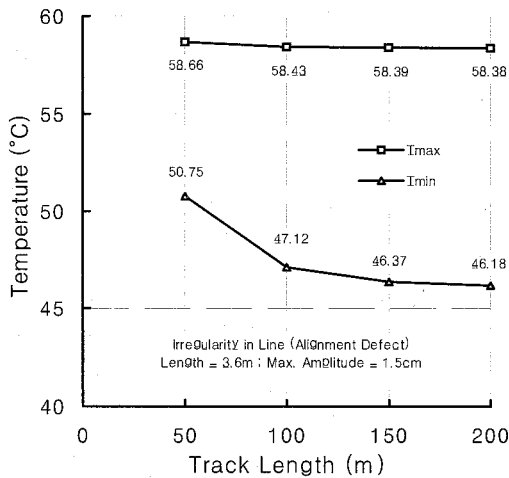


그림 4. 궤도길이에 따른 상하한온도 변화

그림 6은 무한경계요소(1cm)를 적용한 50m 궤도 모델(50m-IBE)의 해석 결과와 무한경계요소를 적용하지 않은 200m 궤도 모델의 해석 결과를 비교한 것이다. 두 가지 모델의 상한온도와 하한온도가 거의 일치하고 있으며 횡방향 거동도 유사한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 민감도 분석을 위한 궤도의 해석모델 길이는 50m로 정하였으며 무한경계요소를 양 궤도 끝단에 사용한다.

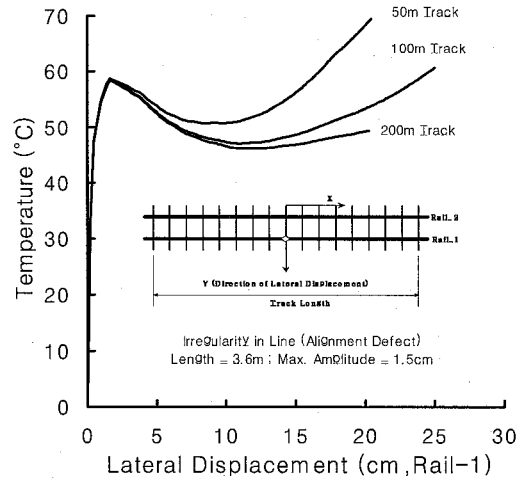


그림 5. 온도.vs. 횡변위(무한경계요소 미적용)

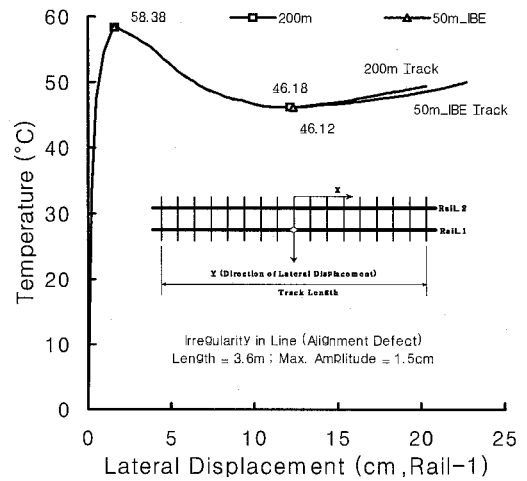


그림 6. 온도.vs. 횡변위(200m .vs. 50m-IBE Model)

### 3. 도상 저항력

#### 3.1 도상 횡저항력

횡방향 침목 저항력(Lateral Tie Resisting Force, LTRF)과 횡방향 탄성한계변위(Lateral Elastic Limit Displacement, ELDL)의 변화에 따른 좌굴강도의 민감도를 분석하였다.

그림 7은 횡방향 침목 저항력의 변화에 따른 상한온도와 하한온도의 변화 양상을 나타내고 있다. 횡방향 침목 저항력이 증가하면서 상한온도와 하한온도 모두 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 횡방향 침목 저항력이 2,500N/rail인 경우(Basic LTRF)를 기준으로 상한온도와 하한온도의 민감도를 나타낸 그래프이다. 상한온도가 하한온도보다 횡방향 침목 저항력의 변화에 대해 더욱 민감하게 반

응하고 있음을 알 수 있다.

그림 7과 8에서, 줄들림의 파장은 3.6m이며 최대파고는 1.5cm로 가정하였으며 횡방향 탄성한계변위는 0.2cm로 가정하였다.

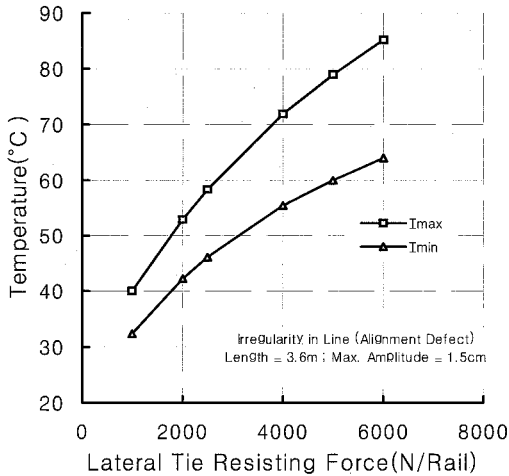


그림 7. 상하한 온도 vs. 횡방향 침목 저항력

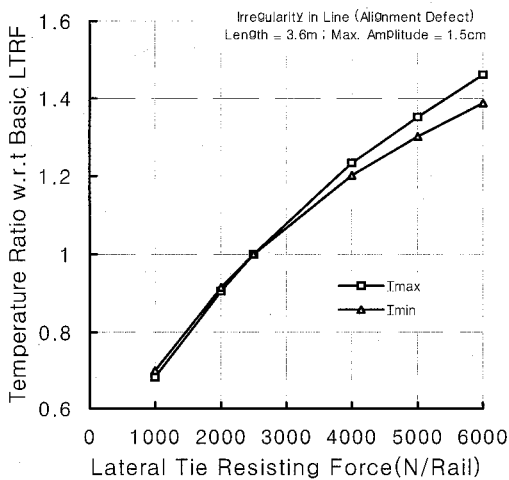


그림 8. 상하한 온도의 민감도(횡방향 침목 저항력)

그림 9는 횡방향 탄성한계변위의 변화에 따른 상하온도와 하하온도의 변화 양상을 나타내고 있다. 횡방향 탄성한계변위가 증가하면서 상하온도와 하하온도 모두 감소하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 횡방향 탄성한계변위가 0.2cm인 경우(Basic ELDL)를 기준으로 상하온도와 하하온도의 민감도를 나타낸 것이다. 횡방향 탄성한계변위가 0.1에서 0.3cm까지는 상하온도와 하하온도의 민감도가 비슷하게 평가되고 있으며 이 외의 경우에는 상하온도의 민감도가 하하온도의 민감도보다 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 9와 10에서, 줄들림의 파장은 3.6m이며 최대파고는

1.5cm로 가정하였으며 횡방향 침목 저항력은 2,500N/rail로 가정하였다.

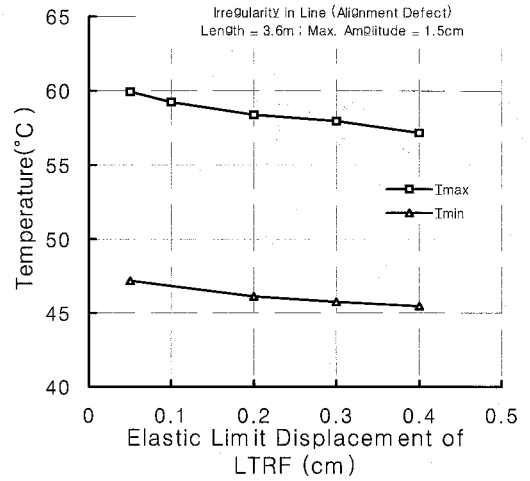


그림 9. 상하한 온도 vs. 횡방향 탄성한계변위

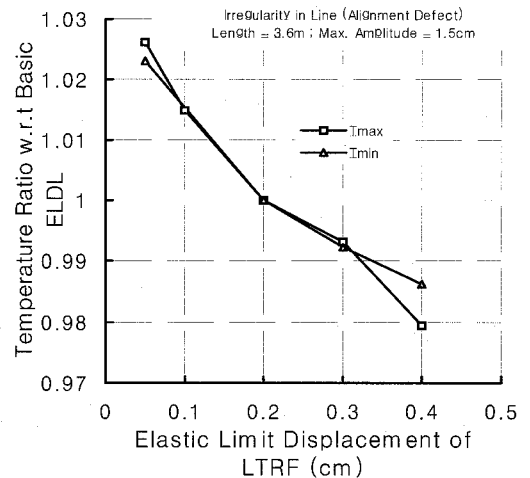


그림 10. 상하한 온도의 민감도(횡방향 탄성한계변위)

### 3.2 도상 종저항력

종방향 침목 저항력(Longitudinal Tie Resisting Force, LOTRF)과 종방향 탄성한계변위(Longitudinal Elastic Limit Displacement, ELDLO)의 변화에 따른 좌굴강도의 민감도를 분석하였다.

그림 11은 종방향 침목 저항력의 변화에 따른 상하온도와 하하온도의 변화 양상을 나타내고 있다. 종방향 침목 저항력의 증가에 따른 상하온도의 변화는 미미하나 하하온도는 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 종방향 침목 저항력이 3,000N/rail인 경우(Basic LOTRF)를 기준으로 상하온도와 하하온도의 민감도를 나타낸 그래프이다. 하

한온도가 상한온도보다 종방향 침목 저항력의 변화에 대해 더욱 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

그림 11과 12에서, 줄틀림의 파장은 3.6m이며 최대파고는 1.5cm로 가정하였으며 종방향 탄성한계변위는 0.3cm로 가정하였다.

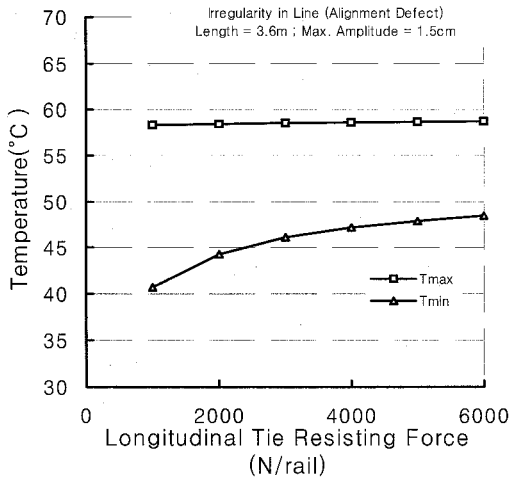


그림 11. 상하한 온도 vs. 종방향 침목 저항력

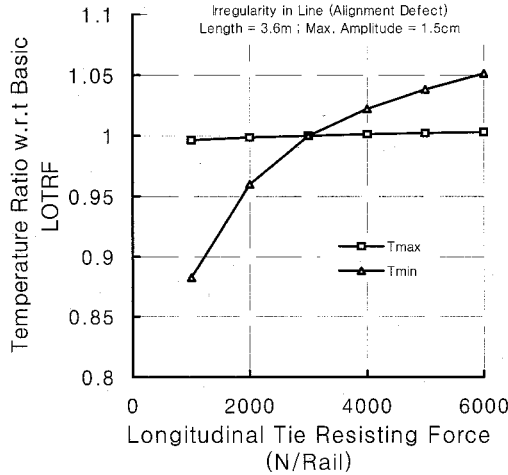


그림 12. 상하한 온도의 민감도(종방향 침목 저항력)

그림 13은 종방향 탄성한계변위의 변화에 따른 상한온도 하한온도의 변화 양상을 나타내고 있다. 종방향 탄성한계변위가 증가하면서 상한온도의 감소는 미미하나 하한온도의 감소량은 크게 나타나고 있다. 그림 14는 종방향 탄성한계변위가 0.3cm인 경우(Basic ELDLO)를 기준으로 상한온도와 하한온도의 민감도를 나타낸 것이다. 상한온도의 종방향 탄성한계변위에 대한 민감도는 매우 미미하며 하한온도의 민감도는 상한온도에 비해 매우 크게 평가되고 있음을 알 수 있다.

그림 13과 14에서, 줄틀림의 파장은 3.6m이며 최대파고

는 1.5cm로 가정하였으며 종방향 침목 저항력은 3,000 N/rail로 가정하였다.

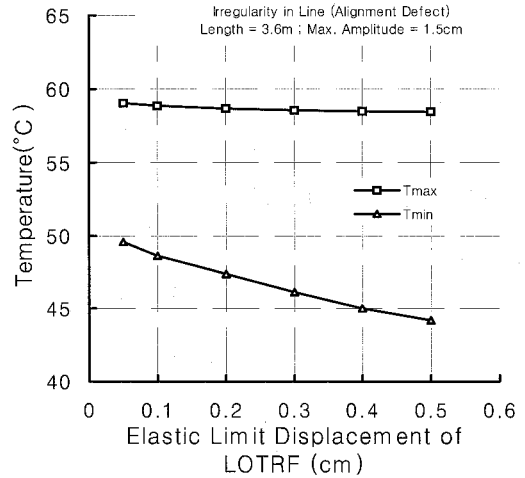


그림 13. 상하한 온도 vs. 종방향 탄성한계변위

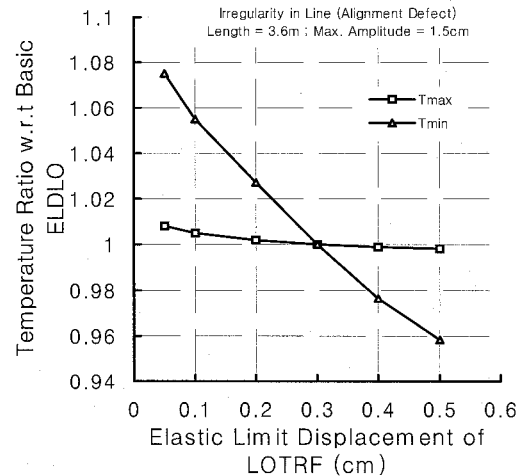


그림 14. 상하한 온도의 민감도(종방향 탄성한계변위)

#### 4. 궤도틀림

##### 4.1 줄틀림

그림 15와 같은 줄틀림(Alignment Defect, Irregularity in Line)의 최대파고가 장대레일 궤도의 좌굴강도에 미치는 영향을 분석하였다. 줄틀림의 파장은 3.6m로 가정하였으며 최대파고를 0.7cm에서 3.1cm까지 변화시켰다.

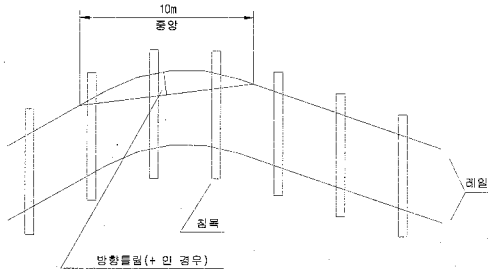


그림 15. 줄틀림

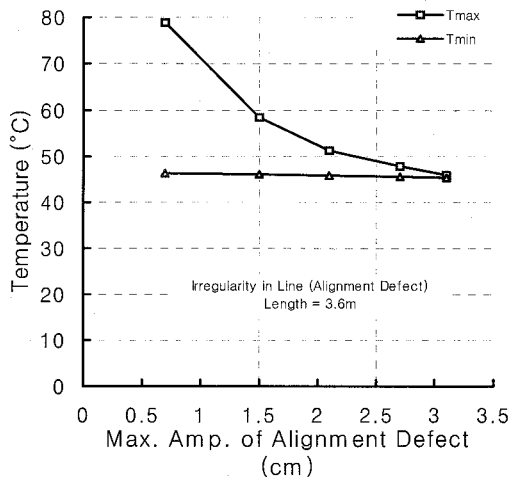


그림 16. 상하한 온도 vs. 줄틀림 최대파고

그림 16은 줄틀림의 최대파고 변화에 따른 상하온도와 하한온도의 변화 양상을 나타낸다. 줄틀림의 최대 파고가 증가하면서 하한온도는 거의 영향을 받고 있지 않으나 상하온도는 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 궤간틀림

그림 17과 같은 궤간틀림(Gauge Irregularity)의 최대파고가 장대레일 궤도의 좌굴강도에 미치는 영향을 분석하였다. 궤간틀림의 파장은 3.6m로 가정하였으며 최대파고를 0.7cm에서 2.1cm까지 변화시켰으며 Rail-1에 발생한 것으로 가정하였다.

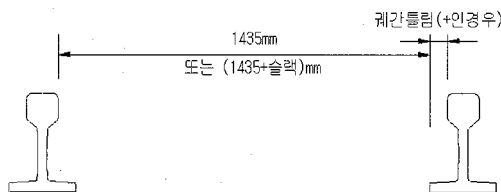


그림 17. 궤간틀림

그림 18은 궤간틀림의 최대파고 변화에 따른 상하온도와 하한온도의 변화 양상을 나타낸다. 궤간틀림의 최대 파고가 증가하면서 하한온도는 거의 영향을 받고 있지 않으나 상하온도는 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다.

그림 19는 틀림의 파장이 3.6m로 동일한 경우, 줄틀림과 궤간틀림 최대파고의 영향을 정량적으로 비교한 것이다. 하한온도는 틀림의 종류에 거의 영향을 받지 않으나 상하온도에 대해서는 줄틀림에 대한 영향이 궤간틀림보다 크게 평가되고 있음을 알 수 있다.

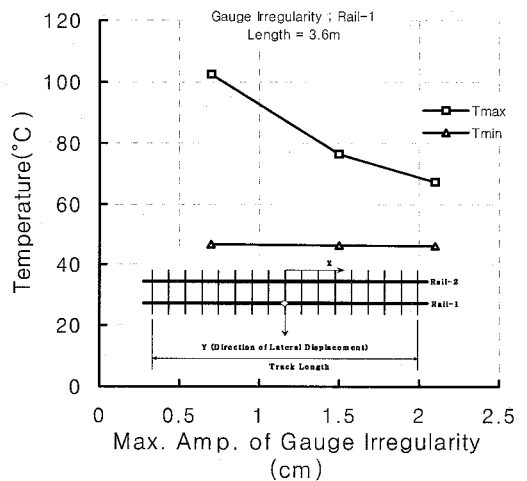


그림 18. 상하한 온도 vs. 궤간틀림 최대파고

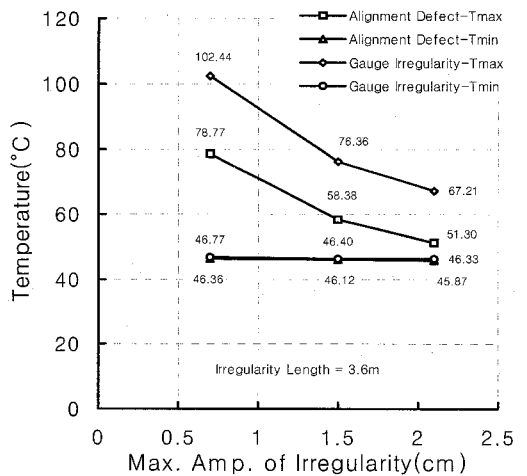


그림 19. 상하한 온도 vs. 틀림 최대파고 (줄틀림, 궤간틀림)

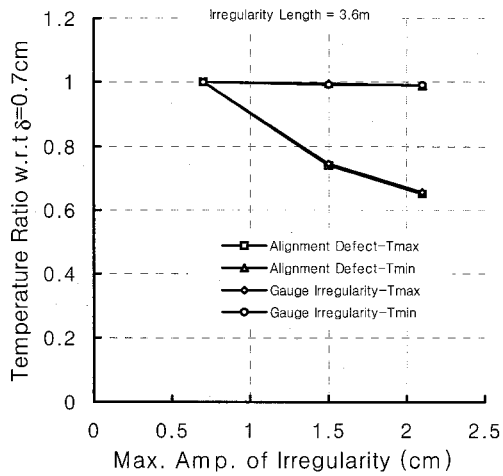


그림 20. 상한 온도의 민감도(틀림 최대파고)

그림 20은 틀림의 최대파고가 0.7cm인 경우를 기준으로 상한온도와 하한온도의 민감도를 틀림의 종류에 따라 비교한 것이다. 상한온도와 하한온도 모두 틀림의 종류와 관계없이 거의 동일한 민감도를 보이고 있다.

#### 4.3 줄틀림과 궤간틀림의 경합(Interaction)

줄틀림과 궤간틀림이 동시에 발생된 경우, 틀림의 최대파고가 장대레일 궤도의 좌굴강도에 미치는 영향을 파악하였다. 틀림의 파장은 3.6m이며 궤간틀림은 Rail-1에 발생한 것으로 가정하였다.

그림 21은 줄틀림의 최대파고가 0.7cm인 경우에 궤간틀림 최대파고의 변화에 따른 상한온도와 하한온도의 변화 양상을 나타낸다. 실질적인 궤도의 틀림은 항상 경합하여 발생되므로 장대레일 궤도의 좌굴 강도를 평가하기 위해서는 줄틀림과 궤간틀림을 동시에 고려하여야 한다는 것을 알 수 있다.

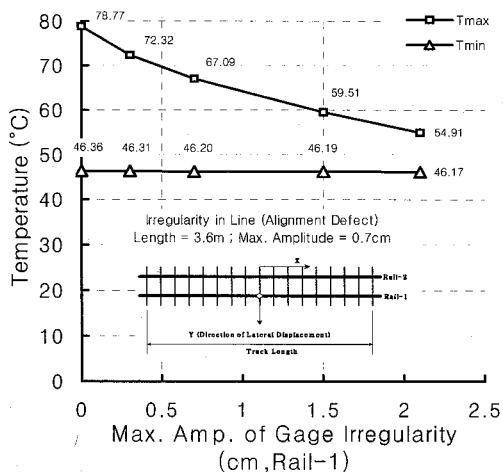


그림 21. 상한 온도 vs. 궤간틀림 최대파고(줄틀림 경합)

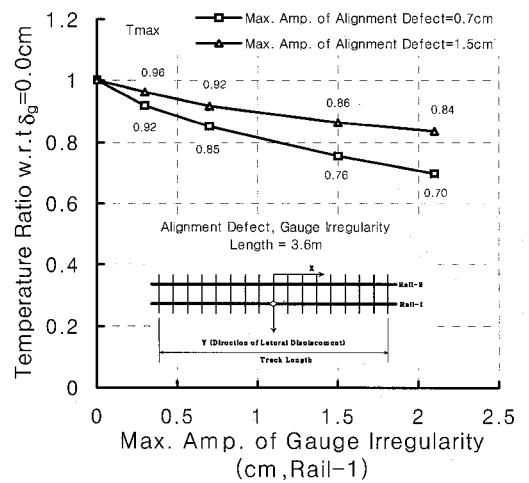


그림 22. 상한 온도의 민감도(궤간틀림과 줄틀림 경합)

그림 22는 줄틀림만 발생된 경우( $\delta_g = 0.0cm$ )를 기준으로 궤간틀림의 상한온도에 대한 민감도를 나타낸 것이다. 궤간틀림의 민감도는 줄틀림의 최대 파고가 작을수록 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 22에서  $\delta_g$ 는 궤간틀림의 최대파고를 나타낸다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 궤도 좌굴에 영향을 미치는 많은 인자들 중에서 도상 저항력과 궤도틀림이 장대레일 궤도의 좌굴에 미치는 영향을 분석하였다.

- (1) 횡방향 침목 저항력이 증가하면서 상·하한온도 모두 비선형적으로 크게 증가하며 상한온도에 대한 민감도가 하한온도에 비해 크게 평가되었다. 횡방향 탄성한계변위(0.1cm~0.3cm)가 증가하면서 상·하한온도 모두 다소 감소하며 민감도는 유사하게 평가되었다.
- (2) 종방향 침목 저항력의 증가에 따른 상한온도의 변화는 미미하나 하한온도는 비선형적으로 증가한다. 또한 종방향 탄성한계변위의 변화에는 하한온도만이 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.
- (3) 줄틀림과 궤간틀림의 최대 파고의 변화에 따라 상한온도만이 민감하게 반응하고 있으며 그 민감도는 두 종류의 틀림이 거의 비슷하게 평가되었다. 줄틀림과 궤간틀림이 동시에 발생하였을 때, 줄틀림의 최대 파고가 작을수록 궤간틀림의 상한온도에 대한 민감도가 크게 평가되고 있다.

### 감사의 글

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R08-2003-000-10168-0).

### 참고 문헌

양신추, 김은(2002) 곡선부 궤도의 최소좌굴강도 추정식의 개발, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권, 제 5-D호, pp. 957-967.

양신추, 김은, 서사범(2002) 기존선 급곡선부 장대레일 좌굴의 신뢰성 평가 및 안정성 확보방안 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4-D호, pp. 721-731.

임남형, 강영중, 성익현(2003) 온도하중에 의한 궤도구조의 거동, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제23권, 제 1-D호, pp. 97-105.

ERRI Specialist's Committee D202, and Van, M.A. (1999) Stability of continuous welded rail track, ERRI D202/RP4, European Rail Research Institute.

Jackson, J.E., Bauld, N.R., Ramesh, M.S., and Menon, S.C.(1988) A superelement for lateral track deformation, *Appl. Mech. Rail Transport*

*Symp.*, pp. 7-18.

Kerr, A.D.(1978) *Thermal buckling of straight tracks: fundamentals, analyses, and preventive measures*, FRA/ORD-78/49, Washington, D.C., USA.

Kish, A. Samavedam, G., and Jeong, D.(1982) *Analysis of thermal buckling tests on U.S. Railroads*, FRA/ORD-82/45, Washington, D.C., USA.

Lim, N.H., and Sung, I.H.(2004) *Thermal buckling behavior of continuous welded rail track*, Int. J. Steel Structures, Korea Society of Steel Construction, Vol.4, No.2, pp. 111-119.

Lim, N.H., Park, N.H., and Kang, Y.J.(2003) *Stability of continuous welded rail track*, Computers & Structures, Vol.81, No.22/23, pp. 2219-2236.

Ramesh, M.S.(1985) A nonlinear finite element approach to the analysis of lateral thermal and mechanical buckling of railroad tracks, Master Thesis, Clemson University, USA.

Samavedam,G.(1979) *Buckling and post buckling analysis of CWR in the lateral plane*, Technical Note TN-TS-34, British Railways Board.

(접수일자 : 2005. 8. 3 / 심사일 2005. 9. 2 / 심사완료일 2005. 10. 10)