

장대레일 좌굴 변수: 체결재, 침목들림

Buckling Parameters of CWR Track: Fastner, Uplift of Tie

한상윤*·임남형**·한택희***·강영종****

Han, Sang-Yun·Lim, Nam-Hyung·Han, taek-Hee Kang, Young-Jong

ABSTRACT

CWR(Continuous Welded Rail) has many advantage over the conventional jointed rail track. The use of CWR track not only reduces the track maintenance cost, but increase the life cycle of track components. As the use of CWR increases in track structures, derailling disasters associating with track buckling also increase in great numbers due to high compressive thermal stress. Despite the importance, the number of studies relevant to the instability is quite limited.

In this paper, It considers the contribution of rail-pad-fastener resistance, uplift of tie and nonlinear analysis. Influence of various track components on CWR track temperature and mode shape were characterized.

1. 서론

주행성과 속도의 요구에 따라 현재 장대레일이 많이 사용되고 있으며 이로 인해서 이음매 판에서 발생하던 동적 충격에 의한 이음매판의 마모, 체결장치의 이완, 침목 파손 등의 기존 궤도의 문제점을 보완하여 유지 관리 비용 절감과 궤도 구조 사용의 사용 수명 연장, 승차감의 상승 등의 장점을 가지나 온도 변화에 따른 레일의 팽창이 억제되어 궤도의 장출(좌굴)이나 절손 등의 사고 위험이 존재하고 있다. 따라서 장대레일의 좌굴 안정성에 대한 연구가 필요하며 기존의 2차원적 해석과는 달리 3차원적으로 해석을 수행함으로써 좌굴로 인한 궤도의 거동과 궤도 구성요소들에 의한 안정성의 영향을 평가하고자 한다.

기존의 궤도의 안정성에 대한 연구는 상한 좌굴 온도와 하한 좌굴 온도에 대하여 각각의 평가를 한 것이 대부분이나 본 연구에서는 비선형 해석을 통해 두 좌굴 온도에 대해 모두 고려하고자 한다. 일반적으로 궤도는 아래 그림 1과 같이 Snap-through를 통해 좌굴이 발생하며 도상의 저항력의 크기에 따라 다음의 2가지 형태로 나타난다.

* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
** 정회원, 한국철도기술연구원 공학박사
*** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
**** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수공학박사

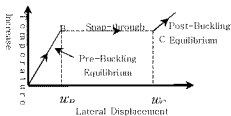
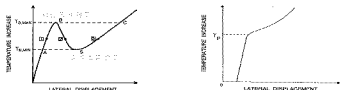


그림 1. 궤도의 일반적인 좌굴 형상

도상 저항력이 강한 경우에 상한 좌굴 온도(T_{max})와 하한 좌굴 온도(T_{min})의 구분이 명확히 나타나며 도상 저항력이 작은 경우에는 두 좌굴 온도의 구분이 없는 형태로 나타난다.



<Explosive Response>-strong ballast resistance <Progressive Response>-weak ballast resistance

그림 2. 도상 저항력에 따른 궤도의 좌굴 형태

유럽의 모고시(ERR)에 따르면 두 좌굴 온도의 차에 따라서 도상 저항력을 다음의 3가지로 구분하여 허용 좌굴 온도를 정해 놓고 있다.

1. $\Delta = (T_{max} - T_{min}) > 5.5^{\circ}C$: Strong resistance, $T_{all} = T_{min}$
2. $0 < \Delta < 5.5^{\circ}C$: Average to marginal resistance, $T_{all} = T_{max} - 5.5^{\circ}C$
3. $\Delta = 0 \sim C$: Weak resistance, $T_{all} = T_p - 5.5^{\circ}C$

Kish에 의해 처음 제안된 상한, 하한 좌굴 온도 중점연구는 이론이 복잡하고 PC해석시간과 용량의 문제가 있으나 모든 궤도 구성요소들에 대한 고려가 가능한 실제적인 장대레일에 대한 연구이다. 본 연구에서는 CWKRRI라는 3차원 비선형 장대레일 전용 프로그램(2003 인남명", Computer & Structure 발표 해석 프로그램)을 사용하여 상한과 하한 좌굴 온도를 모두 고려한 장대레일 구성요소들의 안정성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행 하였다.

2. 해석의 개요

2.1 궤도 길이의 선정

일반적으로 200m 이상의 레일 길이를 갖는 궤도를 장대레일이라 하며 장대레일의 평가를 위해서는 궤도의 길이의 결정을 통해서 적절한 길이의 모델을 통해 해석을 수행하여야 한다. 아래 그림 3은 궤도의 길이에 따른 상한 좌굴 온도와 하한 좌굴 온도의 변화이다. 그림에서 보듯이 상한 좌굴 온도의 경우 일정한 반면 하한 좌굴 온도는 일정한 값으로 수렴해 가며 200m이상에서 일정한 값으로 수렴해 갈 수 있다.

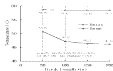


그림 3. 궤도 깊이에 따른 좌굴 온도 변화

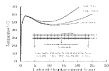


그림 4. 궤도 깊이에 따른 횡방향 변위

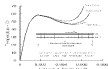


그림 5. 궤도 깊이에 따른 비틀림 변위

따라서 장대대일의 안정성의 평가는 200m이상의 궤도를 통해서 평가되어야 하나, 실제 200m 해석 모델의 경우에는 해석 시간과 PC용량이 많이 필요하기 때문에 다음과 같이 궤도의 양 끝단 요소를 Infinite Boundary Element(이하 IBE)를 사용하여 50m 해석 모델에 적용하였다. IBE 적용 모델은 탄성계수 E 와 열 팽창 계수 α 를 대체함으로써 200m 해석 모델과 동일한 결과를 볼 수 있다.



그림 6. Infinite Boundary Element



그림 7. IBE모델과 200m모델

횡방향 변위

비교(초기틀림=1.5cm)



그림 8. IBE모델과 200m모델

비틀림 변위

비교(초기틀림=1.5cm)



그림 9. IBE모델과 200m모델

횡방향 변위

비교(초기틀림=5cm)



그림 10. 중립심 크기에

따른 좌굴 온도 변화

그림 7~ 그림 9에서 보는 바와 같이 IBE해석 모델과 200m 해석 모델의 거동형상은 하한 좌굴 온도까지 동일하게 발생하며 초기 틀림값에 관계 수록 Post-Buckling이후의 거동 형상까지 동일

하게 발생함을 알 수 있다. 따라서 해석 모델은 50m폭도에 Infinite Boundary Element를 적용한 모델에 대해서 수행을 하였다.

3. 해석 내용

3.1 침목들림의 영향

침목들림에 대한 고려는 도상이 들린 경우에 대하여 행하여졌으며 도상이 들림으로 인하여 도상 횡 방향 저항력이 감소하는 것으로 고려하였다. 일반적으로 도상 횡 저항력은 아래의 그림 11과 같이 침목의 측면과 지면 그리고 단부에서 저항하며 그 저항하는 비율이 1/3씩 같은 것으로 알려져 있다.

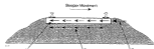


그림 11. 도상 저항력의 분배상태

도상이 들림으로 인한 좌굴 온도의 감소는 아래 그림 12와 같이 상판과 하판 좌굴 온도 모두에 영향을 주며 감소 비율에 따른 변위의 거동 현상은 그림 13 - 그림 17과 같이 나타난다.



그림 12. 좌굴 온도 변화



그림 13. 횡변위 변위 변화



그림 14. 비틀림 변위 변화



그림 15. 수직 변위 변화



(a) 상판좌굴 온도 변화



(b) 하판좌굴 온도 변화



(a) 상판좌굴 온도 변화



(b) 하판좌굴 온도 변화

그림 16. 침목들림의 변화에 따른 좌굴 온도변화 비율
 그림 17. 도상 저항력의 변화에 따른 좌굴 온도변화 비율
 초기침목들림이 거짐에 따라 좌굴 온도의 변화 비율이 그림 16에서 보듯이 상판 좌굴 온도의 경우 수렴해가는 반면 하판 좌굴 온도의 경우에는 수렴하지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 도상 지

막질의 저하와 좌굴 온도의 변화 비율을 동일값에 따라 나타낸 그림 17의 경우에는 상한 좌굴 온도에서 초기 틀림값이 작을수록 그 기울기가 더 커진 것을 볼 수 있는데 이는 구조물의 강성이 큰 구조일수록 결함에 대해서 더 민감하게 반응하는 것으로 볼 수 있다.

3.2 체결체의 영향

체결체는 레일에서 침목과 연결해 주는 부재로 크게 Pandrol type과 Vosloh type이 존재하며 그 종류에 따라 강성이 다르게 존재하고 틀림에 대한 보정할 수 있는 양이 다르게 존재한다. 현재 우리나라에 경우 대부분 Pandrol type을 채택하고 있으며 따라서 Pandrol e-clip의 값을 기준으로 강성 변화에 따라 좌굴 온도에 미치는 영향에 대하여 평가해 보았다. 체결체의 강성은 크게 6방향 강성이 존재하며 HTS(Horizontal Translational Stiffness), LTS(Longitudinal Translational Stiffness), VTS(Vertical Translational Stiffness), HRS(Horizontal Rotational Stiffness), LRS(Longitudinal Rotational Stiffness), VRS(Vertical Rotational Stiffness)중 횡 방향 좌굴 강성에 직접적으로 영향을 줄 것으로 보이는 LTS, HTS, VRS의 강성 변화에 대한 연구에 중점을 두었다.

먼저 체결체는 도상과 침목을 연결해 주기 때문에 파손이나 결손등의 사고등에 의해서 그 강성을 발휘하지 못하면 좌굴 강도에 지체적인 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서 체결체 종류에 따른 영향의 선형으로 체결체가 그 파손된 경우에 대해 먼저 평가해 보고, HTS의 경우 횡방향으로 좌굴 발생시에 침목을 통해 도상으로의 에너지 전달하는 과정에 영향을 주며 LTS의 경우 좌굴 발생후에 레일에 추가적인 하중이 발생함에 따라서 종방향 도상저항력이 하한 좌굴 온도에 영향을 주는데 이 때 침목과 레일의 LTS강성이 영향을 주게 된다. VRS의 경우에는 좌굴 발생함에 따라서 레일의 강도에 직접적인 영향을 주게 되므로 좌굴온도에 영향을 주게 된다. 다음의 그림은 각각의 경우의 좌굴 온도에 영향에 대한 그래프이다.



그림 18. 체결체 파손의 영향



그림 19. LTS의 영향



그림 20. HTS의 영향



그림 21. VRS의 영향

체결체의 파손의 경우 그 파손 개수에 따라 상한과 하한 좌굴 온도에 지극한 영향을 주며 따라서 시공 후 관리가 중요함을 알 수 있으며 체결체의 영향이 좌굴 온도에 큰 영향을 줄 수 있다. LTS의 경우 레일의 종방향 변위를 침목에 전달함으로써 침목의 종방향 변위가 발생하며 이로 인해서 좌굴 후 레일의 종방향 변위가 발생하는 하한 좌굴 온도에 영향을 주는 것을 알 수 있다. HTS의 경우 좌굴이 발생하는 상한 좌굴 온도에 영향을 주며 좌굴 발생 후 도상 저항력이 소성영역에 도달하는 하한 좌굴 온도에 영향이 없는 것을 알 수 있다. VRS의 경우 상한과 하한 좌굴 온도에 영향을 주는 것을 알 수 있다.



그림 22. 침목과 레일 상대변위 (LTS)



그림 23. 침목과 레일 상대변위 (HTS)



그림 24. 침목과 레일 상대변위 (VRS)

LTS의 경우 현재 사용되는 강성의 값이 적절한 값에 있으나 안전율을 고려할 때 그림 42의 범위 내에 있는 것이 적절할 것으로 예상되며 HTS의 경우 현재 사용되는 값이 과대 평가되어 있으며 더 작은 강성을 내는 값을 사용하여도 동일한 효과를 거둘 수 있는 것을 알 수 있다. VRS의 경우 현재 사용되고 있는 현재 사용되고 있는 값으로는 더 작은 값에 대해서 큰 효과를 거둘 수 없으며 레일과 침목의 일체거동 효과를 보기 위해서는 더 큰 강성 값을 사용하는 것이 유리할 것으로 보인다.

4. 결론

장대레일의 안정성에 대한 평가를 하기 위해서는 200m 이상의 모형을 통해서 수행을 하여야 하며 따라서 200m과 동일한 효과를 볼 수 있는 50m 1BE적용 모형을 통해서 장대레일 구성요소들의 좌굴 안정성에 미치는 영향을 평가할 수 있었다. 불림의 경우 일반적인 글물림 이외에 구간 불림과 침목불림 또한 영향이 있으며 따라서 불림에 대해 고로서 이 두 불림양도 고려되어야 한다. 체결재의 경우 현재 사용 중인 Pandrol e-clip을 다른 형식의 체결재로 바꿔 줌으로서 레일과 침목의 일체거동 효과를 볼 수 있다.

감사의 글

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

5. 참고문헌

1. Coenraad Esveld(2001), "Modern Railway Track 2nd edition".
2. Federal Railroad Administration Report(1995), "Wood tie track resistance characterization and correlations study".
3. 임남형(2001), "Three Dimensional Nonlinear Analysis of Continuous Welded Rail Track", 공학박사, 학위논문, 고려대학교.