

궤도의 온도좌굴에 미치는 체결재의 영향

Effect of Pad-fastener on Thermal Buckling of Track

배 준 현¹⁾ 임 남 형²⁾ 강 영 종³⁾
Bae, Jun-Hyun Lim, Nam-Hyoung Kang, Young-Jong

ABSTRACT

Continuous Welded rail(C.W.R.) tracks has many advantages over the conventional jointed rail track. Due to the elimination of rail joints for thermal expansion, however it may cause the track to be suddenly buckled by thermal loads. The present study investigates the influences of Pad-fastener on the Thermal buckling behavior of C.W.R. Parametric studies are performed to evaluate the effects of the individual parameters on the upper and lower critical buckling temperature.

1. 서 론

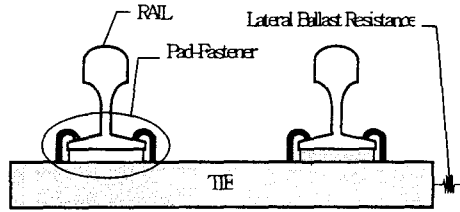
궤도 구조의 취약부는 이음매부, 분기부 및 곡선부이며, 이 중에서 최대 취약부는 이음매부이다. 이음매부에 의해 열차 주행시 차량의 진동과 궤도 재료의 손상이 야기되며, 수명이 짧고 승차감이 악화되고, 궤도 보수작업의 빈도가 증가한다. 이를 보완하기 위하여 레일을 연속적으로 용접하여 이음매부를 없애고 구조적 취약성 및 체결구의 손상과 같은 문제점을 원천적으로 해소하기 위한 방안이 레일의 장대화이다. 레일의 장대화는 유지관리비용을 절감하며, 궤도구조의 사용수명을 연장하는 한편 승차감을 향상시키는 장점이 있어서, 이러한 장대레일궤도(continuous welded rail track)의 사용이 전 세계적으로 급증하는 실정이며, 현재 국내에서도 기존 레일의 장대화 작업이 진행되고 있으며 그 결과로 경부선과 호남선의 경우에는 약 50% 정도의 장대화 작업이 완료되었다. 그러나 온도변화에 따른 레일의 팽창이 억제되고 이로인해 큰 인장과 압축력이 발생하여 레일 궤도의 좌굴 또는 레일의 절손등의 사고의 위험이 증대되며 열차의 탈선까지도 유발할 수 있다. 따라서, 장대레일의 여러 장점들을 충분히 활용하기 위해서는 장대레일궤도의 장출에 대한 정확한 이해와 역학적인 규명이 반드시 요구되어야 할 것이다.

본 논문에서는 장대레일 궤도의 안정성 확보를 위한 정확한 3차원 좌굴 거동 특성을 파악하기 위하여 3차원 프레임 형태의 모델을 개발하여 이것을 바탕으로 고려대학교에서 개발된 좌굴프로그램을 이용하여 레일궤도의 좌굴에 영향을 미치는 여러 가지 요소들중에 체결재의 강성값에 따른 좌굴 온도와 모드를 비교 고찰하였다.

2. 궤도의 3차원 모델

[그림 1]과 같이 장대레일 궤도의 해석모델에는 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.

1) 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, 학생회원
2) 고려대학교 토목환경공학과 연구조교수, 공학박사, 정회원
3) 고려대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사, 정회원

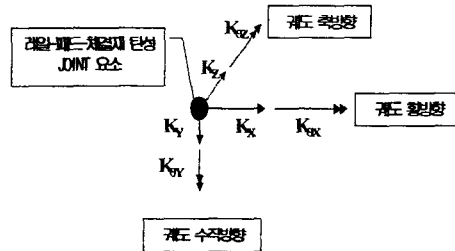


[그림 1] 장대레일 궤도의 해석모델

레일은 뒀을 고려하여 한 절점당 7개의 자유도를 가지는 보요소, 침목은 절점당 6개의 자유도를 가지는 Winkler 형태의 탄성 지지된 보요소를 사용하였다. 패드와 체결재에 의한 레일과 침목과의 연결 상태는 강결이 아니며 유한한 회전 변위를 허용하는 탄성 체결로 볼 수 있다. 그러므로 레일-패드-체결재 시스템은 3방향의 병진과 3방향의 회전변위를 갖는 스프링 요소로 모사하여, 장대레일 궤도의 침목, 체결재의 기하학적 영향을 모사하였다.

3. 패드-체결재 (PAD-FASTENER)

패드-체결재 요소는 레일과 침목의 탄성 연결을 모사한다. 패드-체결재 요소는 레일과 침목의 상대 변위를 고려하기 위하여 두 개의 절점을 가지나 길이가 없는 요소로 형성되며 [그림 2]과 같이 절점당 6개의 자유도를 가진다.



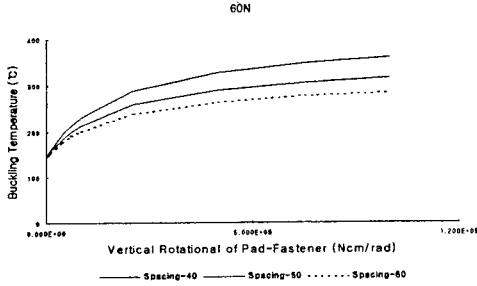
[그림 2] 패드-체결재 요소

체결재가 궤도의 온도좌굴에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기본적인 궤도의 제원은 다음과 같다. 레일= 50N. 60N 침목간격=40, 50, 60cm, 궤간=150cm, 횡방향 도상저항력= 80 N/cm, 종방향 도상저항력 =100 N/cm, 궤도계수 = 1800 N/cm/cm/rail, 패드-체결재의 종방향, 횡방향 그리고 수직방향 병진 강성은 각각 60,000 N/cm, 260,000 N/cm 그리고 회전 강성은 모두 6.0×10^6 N.cm.rad을 사용하였으며, 궤도 끝단은 힌지조건이다.

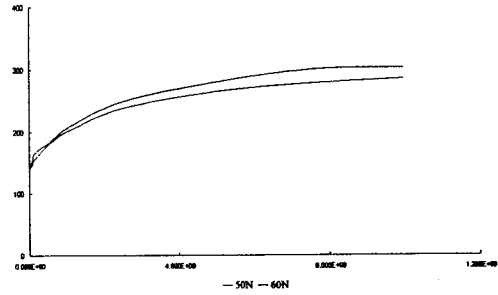
3.1 궤도 수직방향 회전강성

패드-체결재의 수직방향 회전 강성은 0 Ncm/rad에서 6×10^8 Ncm/rad까지 사용하였으며 나머지 다른 방향의 강성은 원래의 기본 제원값을 이용하였다.

[그림 3].는 패드-체결재의 수직방향 회전 강성과 좌굴 온도와의 관계로 수직방향 회전 강성이 50N 이 60N 일때보다 높은 좌굴온도가 나타나며, 6×10^6 Ncm/rad일 때 보다 2.5×10^7 Ncm/rad일때가 좌굴 온도가 20℃정도 상승하는 것을 알 수 있다.

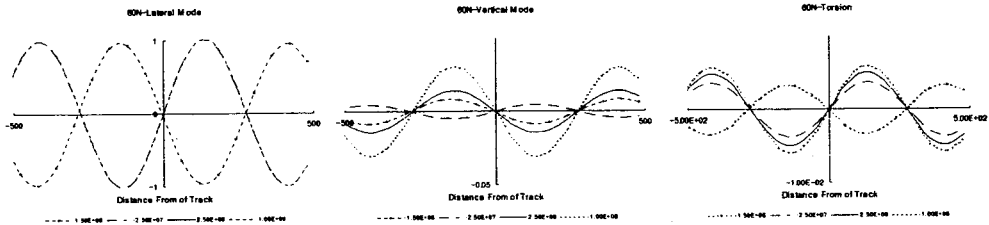


[그림 3] 수직방향 회전 강성 .vs. 좌굴온도

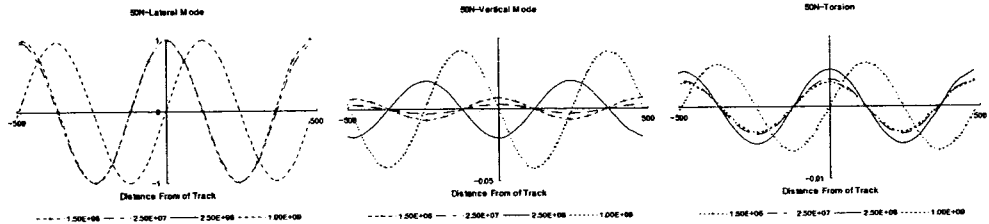


[그림 4] 침목간격 60 cm일 때 .vs. 좌굴온도

그림 5, 6, 7은 60N의 경우 그림 8, 9, 10은 50N의 경우이다. 패드-채결재의 수직방향 회전 강성에 따른 각 방향의 좌굴모드로 횡방향 모드에 대한 상대모드이다. 수직방향 회전 강성이 증가함에 따라 60N의 경우 모드의 파장에는 변화가 없고, 50N의 경우는 역대칭에서 대칭으로 변화됨을 볼 수 있고, 수직방향의 경우 횡방향에 비해 상대적인 값은 매우 작게 나타나나 수직방향 회전 강성에 따라 파장은 변화가 없으나 파고는 변화값에 상당히 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 수직방향 회전 강성이 증가함에 따라 횡방향 변위는 다소 작게 유발된다. 이에 따라 비틀림 모드의 파고가 상대적으로 다소 크게 나오고 있다.



[그림 5] 수직방향 회전 강성에 따른 횡방향 좌굴모드 [그림 6] 수직방향 회전 강성에 따른 수직방향 좌굴모드 [그림 7] 수직방향 회전 강성에 따른 비틀림 좌굴모드

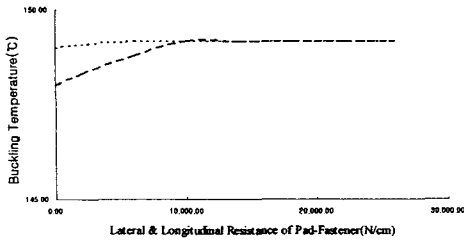


[그림 8] 수직방향 회전 강성에 따른 횡방향 좌굴모드 [그림 9] 수직방향 회전 강성에 따른 수직방향 좌굴모드 [그림 10] 수직방향 회전 강성에 따른 비틀림 좌굴모드

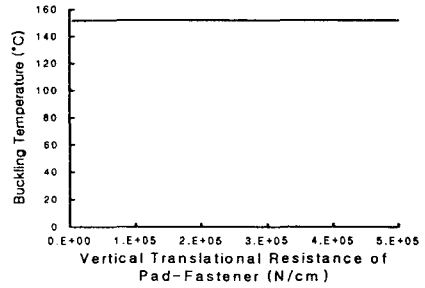
3.2 궤도 종방향, 횡방향 및 수직방향 병진 강성

패드-채결재의 횡방향 병진 강성은 0 N/cm에서 6×10^8 N/cm까지 사용하였으며 나머지 다른 방향의 강성은 기본 채원값을 적용하였다.

[그림 11]은 패드-채결재의 횡방향 및 종방향 병진 강성과 좌굴 온도와의 관계이다. 횡방향 및 종방향 병진 강성 100,000N/cm 까지 조금씩 좌굴온도가 오르지만 그 이후에는 변화가 없고 또한, 기본채원값과 비교했을 때 온도변화가 거의 없으므로 종방향 및 횡방향 병진강성은 좌굴온도에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. [그림 12]는 패드-채결재의 수직방향 병진 강성과 좌굴 온도와의 관계로 궤도의 좌굴온도 즉, 좌굴강성에는 무관함을 알 수 있다.



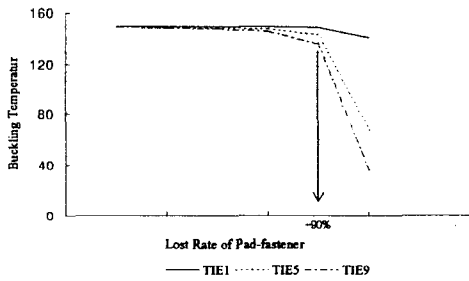
[그림 11] 횡방향 및 종방향 병진 강성 vs. 좌굴온도



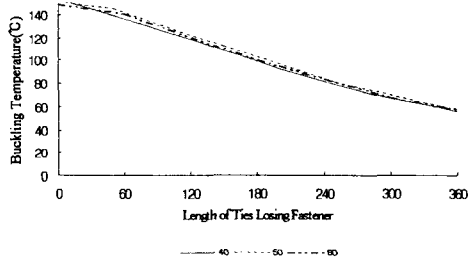
[그림 12]. 수직방향 병진강성 vs. 좌굴온도

3.4 패드-채결재 파손

수직방향 회전강성값을 변화시킨 상태에서 패드-채결재가 궤도 중앙부위에서 국부적으로 파손되었을 경우에 대한 특성을 고찰하여 보았다. [그림 13]은 패드-채결재가 파손된 중앙부위 침목 수와 좌굴온도와의 관계로 건전한 궤도인 경우의 좌굴온도에 비해 중앙부위 9개 침목에서 패드-채결재가 파손된 경우에는 좌굴강도가 30.2°C로 79%정도 낮게 평가되고 있다.[그림 14]는 패드-채결재가 파손된 중앙부위 침목 길이에 대한 좌굴온도와의 관계이며, 침목 간격에 따른 좌굴온도 변화는 거의없음을 알 수 있다.

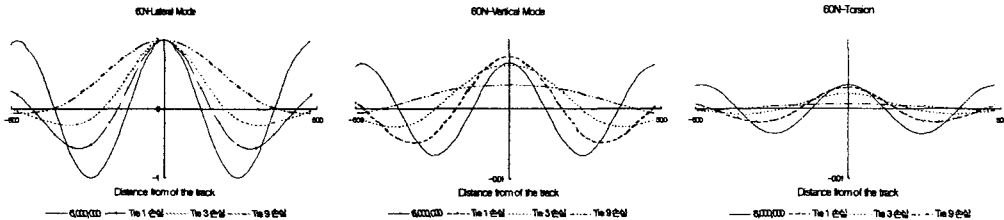


[그림 13]. 패드-채결재 감소율 vs. 좌굴온도



[그림 14] 패드-채결재가 파손된 중앙부위 침목 vs. 좌굴온도

그림 15, 16, 17은 패드-채결재가 파손된 중앙부위 침목 수에 따른 각방향의 좌굴모드로 횡방향 모드에 대한 상대모드이다. 여러 가지 경우를 비교해 보았을 때 좌굴온도가 가장 민감하게 나타나는 60N, 침목간격 60cm의 경우에 관하여 분석해 보았다. 패드-채결재가 파손된 침목이 많아 질수록 좌굴은 대칭모드로 중앙부위에서 집중되며 파장이 커지고 있음을 알 수 있으며, 이에 따른 과도한 횡방향 변위의 증가로 인해 수직방향과 비틀림 상대모드의 파고가 작게 나오고 있다

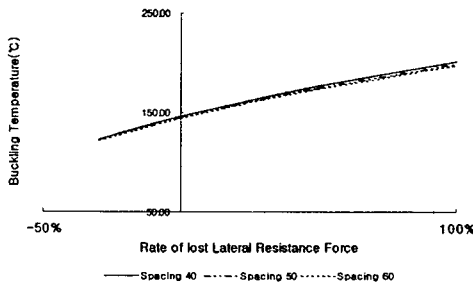


[그림 15] 중앙부위 침목 수에 따른 [그림 16] 중앙부위 침목 수에 따른 [그림 17] 중앙부위 침목 수에 따른
 횡방향 좌굴모드(패드-채결재 파손) 수직방향 좌굴모드(패드-채결재 파손) 비틀림 좌굴모드(패드-채결재 파손)

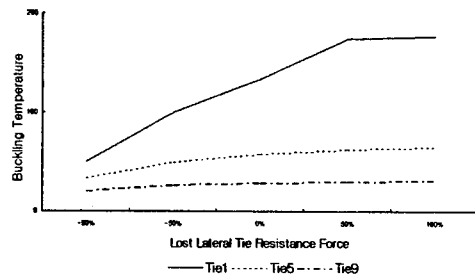
3.4-1 횡방향 도상저항력에 따른 영향

횡방향 침목 저항력은 텀핑 작업 후에는 대략 70%정도 감소하게 되며 이러한 횡방향 침목 저항력의 감소는 궤도의 좌굴 강도에 상당한 영향을 미친다. 횡방향 침목 저항력이 궤도 전체에 걸쳐 균일하게 분포된 경우의 횡방향 침목 저항력과 좌굴 온도와의 관계는 [그림 18]과 같다. 횡방향 침목 저항력이 궤도 중앙부위에서 국부적으로 저감되었을 경우에 대한 좌굴 특성을 고찰하기 위한 궤도는 앞에서 제시한 제원과 같으며 다만, 궤도는 좌굴온도에 민감하게 나타나는 60N의 경우를 살펴보았다.

[그림 19]는 궤도60N, 침목간격 60cm 인 경우 횡방향 침목 저항력의 변화에 따라서 감소된 중앙부위 침목수와 좌굴온도와의 관계이다. 그림 18, 19를 살펴보면 횡방향 저항력을 변화시켰을 때 침목간격간에는 좌굴온도의 차이가 거의 없음을 알수 있었고, 2400N의 횡방향 침목 저항력이 궤도 전체에 걸쳐 균일하게 분포된 경우의 좌굴강도는 139.1 ℃이나 중앙부위 5개의 침목에서 횡방향 침목 저항력이 90% 저감되면 그 좌굴온도는 34.8 ℃로 75%가 하락하고, 중앙부위 1개의 침목에서 횡방향 침목 저항력이 90% 저감되면 그 좌굴온도는 50.17℃로 71.12%가 하락한다. 또한 횡방향 침목 저항력이 100% 증가되었다 하더라도 침목이 5개 손실되었을 때 그 좌굴온도는 60.61℃로 47.2% 정도가 하락한다.

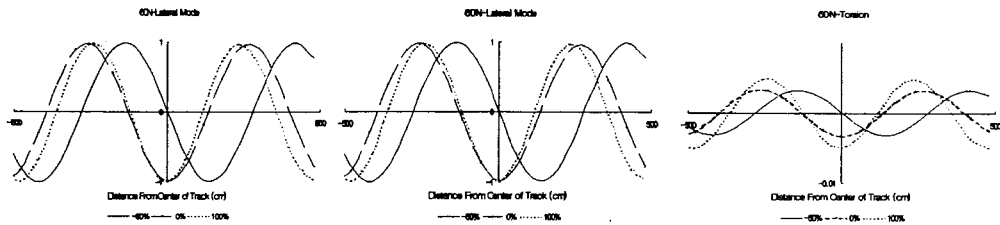


[그림 18] 횡방향 도상저항력 vs. 좌굴온도



[그림 19]. 중앙부위 침목의 횡방향 저항력 vs. 좌굴온도

그림 20, 21, 그리고 22은 횡방향 침목 저항력의 감소율에 따른 각 방향의 좌굴모드로 횡방향 모드에 대한 상대 모드이다. 횡방향 침목 저항력이 30% 저감된 좌굴모드는 역대칭 모드를 나타내고 있다. 횡방향 저항력이 감소될수록 수직방향 좌굴모드에서는 파괴의 변화는 없으나, 파괴가 커지고 있음을 알 수 있다. 비틀림의 경우 횡방향 저항력이 작을수록 모드가 역대칭으로 나타나며 횡방향으로 저항력이 생기므로 종방향 회전강성의 영향으로 파괴에 변화가 나타나고 있음을 알 수 있다.



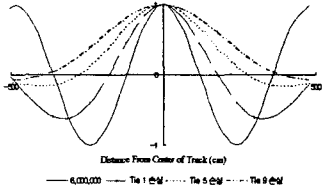
[그림 20] 횡방향 도상저항력 강성에 따른 횡방향 좌굴모드

[그림 21] 횡방향 도상저항력 강성에 따른 수직방향 좌굴모드

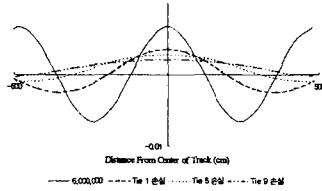
[그림 22] 횡방향 도상저항력 강성에 따른 비틀림 좌굴모드

그림 23, 24, 그리고 25은 횡방향 침목 저항력의 감소율이 50%일 때, 저감된 침목 수에 따른 각 방향의 좌굴모드로 횡방향 모드에 대한 상대 모드이다. 횡방향 침목 저항력이 50% 저감된 중앙부위 침목이 1,3,5개에서는 좌굴모드가 대칭 모드를 나타내고 있다. 패드-체결계가 파손된 침목이 많아질수록 파손정도에 관계없이 대칭모드가 나타나며 좌굴강도 횡방향의 경우 중앙부위에 집중되며 파괴가 커지

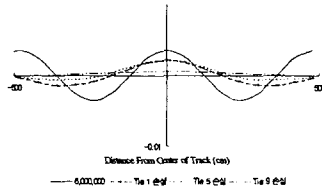
고 있음을 알 수 있으며, 수직방향 좌굴모드는 패드-채결재가 손실될수록 파고가 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있으며, 비틀림의 경우는 수직방향 좌굴강도가 상대적으로 크므로 파고는 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.



[그림 23] 중앙부위 침목 수에 따른 횡방향 좌굴모드(50% 감소)



[그림 24] 중앙부위 침목 수에 따른 수직방향 좌굴모드(50% 감소)



[그림 25] 중앙부위 침목 수에 따른 비틀림 좌굴모드(50% 감소)

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 궤도 모델을 사용하여 궤도의 좌굴에 영향을 미치는 궤도 구성요소 중 패드-채결재의 강성에 따른 좌굴에 대한 특성을 고찰하였다. 수행한 요소들로는 침목간격, 도상저항력, 레일 제원을 바탕으로 패드-채결재를 변화시켜 각각의 좌굴 온도와 좌굴 모드의 비교를 통해 좌굴 민감도를 고찰하였다.

지금까지의 결과들을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 궤도수직방향 회전강성을 기본값에서 $2.5 \times 10^7 \text{ Ncm/rad}$ 로 증가시킨 시점까지 좌굴강도가 13%정도 증가하며 그 이후부터 완만하게 증가함을 알 수 있다.
- (2) 종방향과 횡방향 수직강성의 경우 100,000N/cm까지 좌굴강도가 3%정도 증가하지만, 그 이후부터는 강성값에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.
- (3) 패드-채결재 파손의 경우 건전한 궤도에 비해 중앙부위 9개의 침목에서 패드-채결재가 파손된 경우 좌굴강도가 77%정도 낮게 평가되고 있다. 동일한 파손으로 횡방향 저항력을 50% 정도 감소되었을 때는 79% 정도 낮게 평가됨을 알 수 있다. 또한 횡방향 도상저항력을 100% 증가하였다하더라도 패드-채결재가 파손되었을 경우 기본 좌굴강도보다 낮게 나타남을 보아 횡방향 도상저항력이 좌굴강도에 그다지 큰 영향을 끼치고 있지는 않음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 임남형(2001), "Three Dimensional Nonlinear Analysis of Continuous Welded Rail Tracks", 공학박사 학위논문, 고려대학교
2. Kree S.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 Railway Board, R&D Division
5. 강영중, 임남형, 신정렬, 양재성 (1999), 온도하중을 고려한 장대레일 궤도의 안정성 해석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제11권 3호 281-290.