

한국형 틸팅차량 설계의 비틀린 궤도상의 탈선안전도 검토

The review of safety against derailment on twisted track for Korean tilting train design

김남포* 김성식* 박태원**
Kim, Nam-Po Kim, Jung-Seok Park, Tae-Won

ABSTRACT

The 180 km/h Korean Tilting Train(TTX) which is now developing as a part of the Korean National R&D project, was elaborately designed. As the tilting trains run curve track with the 30% higher speed than normal trains, the higher centrifugal and dynamic force are expected. Furthermore the complex tilting system increase the probability of failure. Therefore it is very important for tilting train to ensure safety against derailment under the various kind of failed condition in the middle of running as well as normal operating condition.

The TTX train have the relatively high roll stiffness to improve the lateral ride comfort and to limit the roll displacement on the curve. But the higher roll stiffness increase the risk of derailment on the twisted track. This paper describes the study to review the safety against derailment caused by the wheel unloading on the severely twisted track. The worst combination of maximum cant change with maximum twist defect was established by numerical simulation. And also it was assumed that the air bag deflated and still the train run its speed limit. Those kind of assumption might be the worst case from the view point of wheel unloading derailment on the twisted track. The dynamic simulation was done by means of VAMPIRE S/W and non-linear transient analysis. We found that derailment quotients Q/P was only slightly influenced by track twist but the wheel unloading was greatly influenced. And we ascertained that the higher roll stiffness the higher wheel unloading. In case of air bag deflated situation, the wheel unloading reached up to 100% which means the wheel lift or jumped. Therefore it was concluded that the design need to be improved to ensure the safety against derailment on the maximum twisted track in case of air bag deflated and tilting train's speed limit.

1. 서론

틸팅차량은 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선궤도를 빠르게 주행할 수 있는 장점을 지닌 차량으로, 곡선부가 많은 개관철도에서 효과적으로 운행시간을 단축시킬 수 있다. 이와 같은 장점으로 틸팅차량은 유럽 전역과 미국, 일본, 중국, 호주 등에 기 적용되어 있고, 전 세계적으로 적용이 확대되고 있는 실정이다. 국내에서도 고속철도 비 수해지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존선에 틸팅차량 적용을 적극적으로 추진하고 있으며, 이에 국제 연구개발사업으로 철도기술훈구개발사업이 2002년 착수하여 국내 기존선 환경에 맞는 한국형 틸팅차량 TTX의 개발을 추진해 오고 있다. 본 TTX 차량은 차체상 전기계식 구동장치로 강제로 경사 시키는 강제 틸팅 방식이며, 틸팅 기구장치는 그림 1과

* 한국철도기술훈구연구 기술훈구개발사업단 선임연구원, 정회원

** 이주대학교 기계공학과 교수, 정회원

같이 맨들럼형 스윙 링크방식을 채택하고 있다. 이와 같은 틸팅 차량은 곡선부를 일반차량(캔트부족량 100 mm)에 비해 약 30% 높은 속도(캔트부족량 275 ~ 300 mm)로 주행하기 때문에 원심력이 크게 증가되고, 이 힘이 차륜과 레일이 전달되어 횡하중 증가와 운중의 증감율을 증가시키기 때문에 이에 대비하는 고도의 주행장치의 설계기술을 필요로 하게 된다. 본 TTX 차량의 설계에 있어서 횡하중을 감소시키기 위해 경량화를 도모하였고 국내에서는 처음으로 자기조향장치를 적용하였다. 운중 증감을 감소시키기 위해 하이브리드 차체와 기기의 하부 배치 등 저 중심화 설계를 실시하였다. 이차 현가장치에는 유연한 강성의 공기스프링과, 롤 강성을 증가를 위한 안티롤 바를 채택하여 상하방향 및 횡방향의 우수한 승차감을 확보할 수 있도록 하였다. 1차 현가장치 역시 곡선부 고속주행에 따른 롤 각 변위를 제한하기 위해 롤 강성을 확보할 수 있도록 다소 강한 상하방향 강성으로 설계하였다. 따라서 본 TTX 차량은 전체 롤 강성이 일반차량보다 다소 높게 설계되어 있는 데, 이 경우 비틀린 궤도를 주행 할 때의 운중감소율의 증가한다는 단점이 있다. 또한 공기스프링의 경우 공기가 빠졌을 경우 하부에 위치한 보조 또는 비상스프링이 차체를 지지하게 되기 때문에 롤 강성이 매우 커지게 된다. 본 논문은 TTX 차량의 설계 모델에 대해 국내 기존선의 최대 비틀림 조건의 선로를 주행 할 경우 운중감소에 의한 탈선 안전도를 검토한 내용에 대한 것이다. 차량모델은 운중감소를 관점에서 불리하다고 판단되는 T 차량의 공차조건을 적용하였고, 비교를 위해 공기스프링 정상조건과 공기스프링 파손조건의 두 종류의 모델을 수립 검토 하였다. 비틀린 궤도 조건은 국내 기존선의 최소 캔트체감과 선로보선 한도의 최대 평면성 롤링량을 운중감소가 가장 크게 발생하는 최악조건으로 중첩하여 인위적으로 생성하였다. 주행속도는 공기누설을 감지하지 못하고 틸팅차량의 곡선 제한속도로 주행한다는 시나리오에 의하였다.

수치해석에는 철도차량 동역학 해석 전용 S/W인 VAMPIRE를 사용하였고, 수치해석 방법은 차량과 궤도의 비선형성을 모두 고려할 수 있는 비선형 시간적분 방법을 적용하였다.

2. TTX 차량의 동역학적 설계 특성

TTX차량은 최고운행속도 180 km/h, 곡선주행속도는 캔트부족량 275 ~ 300 mm 를 목표로 하는 틸팅열차로서 6량 1편성의 전기동차(EMU) 형식이다. 고속화와 틸팅에 따른 기존선의 궤도 부담력을 최소화하기 위해 4량의 구동차에 동력을 분산시켰으며, 차체도 복합소재를 적용하는 등 경량화에 주력하여 최대 축중을 15톤 이내로 설계하였다. 틸팅 기구장치와 틸팅 구동장치는 대차장치(주행장치)내에 간결, 강건 구조로 설치함으로써 차량 하부나 실내공간을 최대한 확보할 수 있도록 하였다. 틸팅 대차장치의 기본 형식은 볼스타레스형이나, 차체 틸팅을 위한 롤 자유도 1개를 더 부여하기 위해 동역학적으로 롤 운동만이 허용되고 나머지는 구속되는 틸팅 볼스타를 추가 하였다. 틸팅 기구장치는 대차 당 4개의 스윙 링크를 이용하여 틸팅 볼스타와 차체가 같이 경사 되도록 안내하는 구조이며, 틸팅 구동원은 틸팅 볼스타와 대차프레임간에 설치된 대차 당 1개의 틸팅 액츄에이터이다.(그림 4) 틸팅 기구장치의 편 링크 위치는 대차 내 설치공간, 차체 무게중심의 이동량 최소화, 틸팅 실패 시 중력에 의한 자동 중심복원과 틸팅 구동력, 좌우 스윙링크간의 하중 불균형 최소화의 요구조건을 적절하게 충족시킬 수 있도록 최적화되어 있다. 본 대차설계에서는 2차 현가장치를 틸팅 볼스타 상부에 위치시켜, 증가된 횡방향 원심력이 틸팅에 의해 상쇄되도록 함으로써 횡방향 중심복원 액츄에이터를 생략함으로써 구조의 단순화와 이에 따른 유지보수성 향상을 도모하였다. 차체 틸팅 시 현가장치의 롤 운동을 억제하고, 유연한 공기스프링과 공기스프링 간격이 적어 저하되는 롤 강성을 증가시키기 위해 차체와 틸팅 볼스타간에 안티 롤 바(Anti-roll bar)를 설치하였다. TTX차량은 200km/h 이상의 고속주행안정성과 틸팅 차량으로서의 고도의 곡선주행성능이라는 상호 이율배반적인 두 요구조건을 모두 충족시켜야 하는 기술적 난이도가 높은 차량이다. 이와 같은 상반적인 성능요구조건을 만족시키기 위해 새롭게 고안된 자기조향장치(그림 3)를 적용하였다. 이는 곡선주행성을 향상하기 위해 1차 현가장치의 요 강성을 낮게 설계하고, 이로 인해 저하되는 고속 주행안정성을 이 조향장치의 기능에 의해 향상시키는 원리이다.

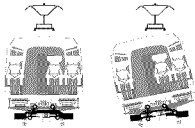


그림 1. TTX 차량의 차체틀링 방식

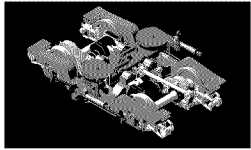


그림 2. 톨링 대차 전경

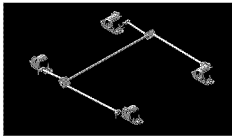


그림 3. 자기 조향장치

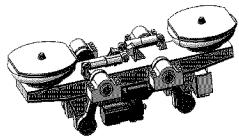


그림 4. 톨링 기구장치

3. TTX 차량의 탈선안전도 해석 모델

TTX 차량 설계를 동역학적 수치해석 모델로 변환하는 데 있어, 해석의 목적에 맞도록 단순화하고 가정을 하였다. 차량 간 구조적 특성 상 차량과 차량 간에는 상하, 좌우 및 앞 뒤 등의 동역학적 힘의 전달이 크지 않기 때문에, 1량만을 분리하여 모델링 하였다. 윤중감소에 의한 탈선안전도 측면에서는 가벼운 차량인 T차가 분리하고, 반차 보다는 공차조건이 더 위험한 상황이다. 따라서 본 해석에서는 T 차는 공차조건을 모델로 하였다. 연구의 목적 상 공기크리프가 정상인 조건과 공기가 빠진 조건의 두 종류로 차량을 모델링 하였다. 차체의 탈선전동은 탈선안전도에의 영향이 미미하기 때문에 고려하지 않고, 차체를 포함한 모든 질량요소를 강체로 간주하였다. 차륜과 레일의 접촉 크라이프 이론은 복선궤도 주행의 특성 상 차륜 후렌지 접촉을 고려할 수 있는 Non-linear creep law를 적용하였다.

TTX 차량의 톨링 제어는 차상 내 곡선검지 및 제어방식을 기본으로 하고 있다. 선두 대차 프레임에 설치된 가속도와 자이로 센서 신호를 열차톨링제어장치(TTP)가 받아 톨링 제어패턴을 연산해 내고, 이를 차량톨링제어장치(CTE)에 명령하여 각 차량의 차체틀링 액츄에이터를 구동하도록 하는 방식으로, 센서가 제어부근 밖에 위치하여 제어의 안정성을 높인 방식이다. 피드백 제어는 CTE와 액츄에이터간에만 구성되며, 피드백 량이 톨링 제어패턴을 변화시키지 않는다. 따라서 복선궤도와 톨링차량 전체적 제어제로 보면 open loop 제어로 간주할 수 있기 때문에 본 동역학 해석에서는 톨링 제어 패턴을 사전에 액츄에이터 힘의 함수로 계산하여 해당 질량요소간에 의의 함수로서 입력하는 방식을 취하였다.

결량 요소는 차체 1개, 전·후위 대차 후래임 2개, 전·후위 톨링 볼스터 2개, 조향 레버 4개, 윤중세트 4개로 총 13개로 잡았고, 각 질량요소간을 적절한 연가장치 요소와 기하학적 구속조건으로 연결하여 모델링하였다. 결량 요소와 연가장치 특성지에 대한 제원은 표 1과 표2에 나타나 있다. 그림 5는 VAMPIRE에서 지원되는 요소를 사용하여 구성된 TTX 차량의 다물체 동역학 모델

음, 그림 6에서 그림 8은 차륜/ 레일간 비선형 접촉 모델을 보여주고 있다.

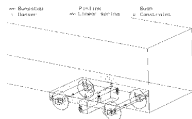


그림 5. TTX 차량의 동역학 모델



그림 6. 차속회변위-차륜/레일 접촉과

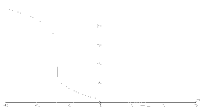


그림 7. 차속회변위-차륜 구름반경차이



그림 8. 차속회변위-contact patch 면적

표 1. 해석차량 모델 제한 (T, 공차조건, 공기스프링 정상조건)

구분	항목	수치	구분	항목	수치
차체	중량 (ton, Mg)	30	주요 치수	대차간 거리 (m)	15.0
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	50.7		고정축거 (m)	2.6
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	1733	차륜 반경 (m)	0.43	
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	1733	Kx (MN/m)	3.4	
	부계중심고(m)	1.7	Ky (MN/m)	3.6	
대차 후대임	중량 (ton, Mg)	2.437	1차 현가 장치	Kz (MN/m)	1.0
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	1.2		Cz (MN/m/s)	0.02
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2.4		조향장치트션바 (MN-m/rad)	4.0
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	3.6		설치 폭(횡방향) (m)	2.05
	부계중심고(m)	0.55		공기스프링 Kx (MN/m)	0.17
틸팅 플랫폼	중량 (ton, Mg)	1.113	2차 현가 장치	공기스프링 Ky (MN/m)	0.17
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	0.42		공기스프링 Kz (MN/m)	0.40
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	0.03		안티롤 바 (MN-m/rad)	2.8
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	0.43		요댐퍼 Cyaw (MN/m/s)	0.15
	부계중심고(m)	0.6		횡댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.03
완속 세트	중량 (ton, Mg)	1.716	공기스프링 설치 폭	1.75	
	롤 및 요 관성모멘트	1.2	요 댐퍼 설치 폭	2.90	
	부계중심고	0.43	Bump stop 설치높이	0.875	

표 2. 해석차량 모델 제원 (T, 공차조건, 공기스프링 파손조건)

구분	항목	수치	구분	항목	수치
차체	중량 (ton, Mg)	30	주요치수	대차간 거리 (m)	15.9
	롤 관성모멘트(Mg·m ²)	50.7		고정축거 (m)	2.6
	피치 관성모멘트(Mg·m ²)	1733	차륜 반경 (m)	0.43	
	요 관성 모멘트(Mg·m ²)	1733	Kx (MN/m)	1.4	
	부계중심고(m)	1.7	Ky (MN/m)	3.6	
대차우레일	중량 (ton, Mg)	2.437	1차현가장치	Kz (MN/m)	1.0
	롤 관성모멘트(Mg·m ²)	1.2		Cz (MN/m/s)	0.02
	피치 관성모멘트(Mg·m ²)	2.4		조향장치도전바 (MN·m/rad)	4.0
	요 관성 모멘트(Mg·m ²)	3.6		설치 폭(평방향) (m)	2.05
	부계중심고(m)	0.55		견마찰 (차체/팅팅볼스타)요소의 정적 하중 [kN]	75
팅팅볼스타	중량 (ton, Mg)	1.113	2차현가장치	견마찰 (차체/팅팅볼스타) 요소의 마찰계수	0.3
	롤 관성모멘트(Mg·m ²)	0.42		비상 스프링 Kz (MN/m)	11.7
	피치 관성모멘트(Mg·m ²)	0.03		엔티볼 바 (MN·m/rad)	2.8
	요 관성 모멘트(Mg·m ²)	0.43		요댐퍼 Cyaw (MN/m/s)	0.15
	부계중심고(m)	0.6		광댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.03
윤축세트	중량 (ton, Mg)	1.716	요댐퍼 설치 폭	비상 스프링 설치 폭	1.75
	롤 및 요 관성모멘트	1.2		요 댐퍼 설치 폭	2.90
	부계중심고	0.43		Bump stop 설치높이	0.875

4. 비틀린 궤도의 가상모델 생성

윤중심소에 의한 탈선 위험이 가장 크게 나타나는 비틀린 궤도 조건은 일반적으로 궤도의 평면성 틀림이 최대로 발생하는 곡선 궤도의 진입 또는 출입부로 알려져 있다. 유럽의 ERI B55에서도 비틀린 궤도에서의 화차의 탈선방지를 위한 계산에서 궤도의 비틀림 수준은 아래의 g^* 과 g^+ 의 조합으로 적용하고 있다.

$$g^* = 15 / \text{대차중심간 거리} + 2.0 \quad [\%]$$

$$g^+ = 7 - 5 / \text{축간거리} \quad [\%]$$

여기에서 g^* 는 대차 간에 적용되는 램프제각 등 강차영의 평면성 틀림이고, g^+ 는 대차 내에 적용되는 단차영의 평면성 틀림이다.

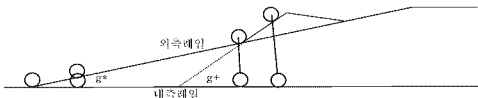


그림 9. 궤도의 평면성 틀림량

ERRI B55에 의거하여 g^* 과 g^+ 를 구해보면 각각 2.94%, 5.08%가 되는 데, 이는 매우 보수적

인 수치로 국내 기준선의 환경에 그대로 적용하기엔 부리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 국내 기준선의 간섭규칙에 의거한 최소 캔트제감규정인 캔트의 400매와 선도보선 한도의 최대 평면성 틀림량으로 18 mm/ 5m를 적용하였다.

$$g^* = 1/400 \times 1000 = 2.5 \%$$

$$g^+ = 18/5000 \times 1000 = 3.6 \%$$

실제로는 같은 양의 g^* 와 g^+ 라 하나라도 배치에 따라 융중감소가 크거나 적게 발생될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 10에서 그림 14의 4가지 case 조합에 대해 해석적으로 융중감소를 예측해 보고 가장 크게 발생하는 case를 선정하여 최악의 비틀린 궤도조건으로 인위적으로 생성하였다.

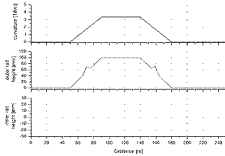


그림 10. CASE 1 궤도조건

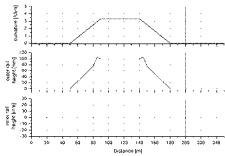


그림 11. CASE 2 궤도조건

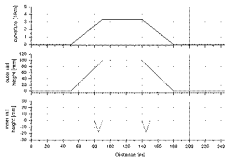


그림 12. CASE 3 궤도조건

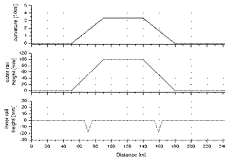


그림 13. CASE 4 궤도조건

표 3. 궤도선형 및 속도조건

곡선반경	300 m	본 곡선상	50 m
캔트	100 mm	주행 속도	100 km/h
완화곡선장	40 m	캔트부족량	293 mm

5. 비틀린 궤도의 탈선안전도 수치해석 결과

상기와 같이 수립된 동역학 해석 모델과 4가지 CASE의 궤도 모델을 이용하여 탈선안전도 해석을 수행하였다. 그림 14에 각 CASE별 궤도조건에 공기스프링 정상조건에 자량을 주행시켰을 경우의 융중감소를 결과값 보여주고 있다.

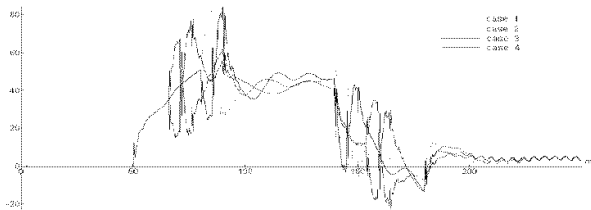


그림 14. 각 CASE별 윽중갑소을 비교(공기스프링 정상조건)

그림 14에서 보는 바와 같이 캔트부족량 293mm 조건의 인위적 평면성 틀림의 조합의 경우 CASE 3, CASE 2, CASE 4, CASE 1의 순으로 탈선위험도가 높은 것으로 나타났으며, 곡선 진입부가 곡선 진출부보다 더 위험한 것으로 나타났다. 그러나 캔트 초과와 지속 주행인 경우에는 곡선 진출부가 더 위험한 것으로 나타났다. 상기의 결과를 근거로 탈선안전도에 가장 취약한 비틀린 궤도조건이 CASE 3임을 파악하였고, 이 CASE 3인 조건에 공기스프링 정상조건 및 공기스프링 파손조건에 대한 차량 모델을 적용 탈선안전도 해석을 수행하였다.

공기스프링 파손조건의 각 차축별 윽중갑소을 결과가 그림 15에 보여주고 있다. 윽중갑소을의 크기는 1위 차축, 3위 차축, 4위 차축의 순으로 나타났고 그 크기는 1위와 3위 차축에서 일반적으로 허용한도인 80%를 초과하는 것으로 나타났다.

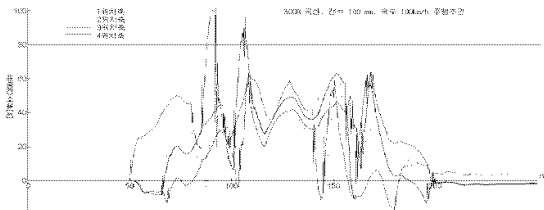


그림 15 . 공기스프링 파손조건의 각 차축별 윽중갑소

그림 16 및 17에 두 차량조건에 대한 각 차륜별 횡방향 및 길이방향 하중의 크기와 변위를 나타내고 있다. 본 결과는 해석 기점에서 120 m 지점인 원곡선에서의 결과로서 두 차량조건에 대한 횡방향 및 길이방향 하중에는 큰 차이가 없음을 알 수 있고 이는 2차 현가장치의 상하방향 강성 변화가 횡방향 및 길이방향 결과에는 크게 영향이 미치지 않기 때문이다.

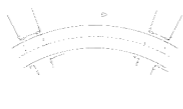


그림 16 공기스프링 정상조건의 각 차분하중



그림 17 공기스프링 비순조건의 각 차분하중

그림 18과 그림 19에 차량조건별 1위 차축에서의 율중감소율과 달선계수의 결과를 비교해 나타내고 있다. 이 결과를 분석해 보면, 공기스프링의 비순 시에 미들턴 관선제도를 수행한 경우 달선계수는 큰 크기변화가 없지만 율중감소율은 약 20% 정도 증가됨을 알 수 있고 이는 달선계수보다는 율중감소에 의한 달선가능성이 크게 증가된다는 것을 의미한다. 그림 18에서 율중감소율이 100%를 상회하는 것으로 나타났는데 이는 순간적으로 율중이 0. 즉 차축이 레일에서 벗음을 의미하는 매우 위험한 상황임을 의미한다.

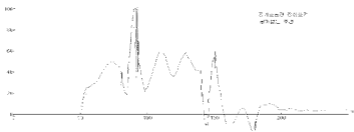


그림 18 차량조건별 율중감소율 비교

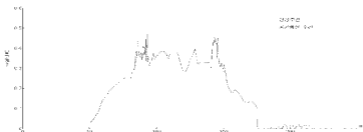


그림 19 차량조건별 달선계수 비교

6. 결론

본 연구를 통해 개발 중인 TTX 차량의 기존선 주행 시 발생할 수 있는 최악의 시나리오에서 윤중감소에 의한 탈선 가능성을 검토해 보고, 설계 개선의 방향을 파악해 보았다. 국내 기존선의 평면성 틀림의 최고한도가 최악의 조합으로 형성되었다고 가정된 조건을 공기스프링의 공기가 모두 빠진 fail 조건 하에서 운전자의 fail에 대한 인지 없이 틸팅차량의 곡선 최고속도로 주행하는 시나리오였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 윤중감소에 의한 탈선위험도가 높은 궤도조건은 완화곡선부 또는 캔트 체감부와 원곡선이 접하는 부분의 곡선 내측 레일이 하강하는 평면성 틀림이 조합되는 경우임을 확인할 수 있었다.
- (2) 이상의 궤도와 주행조건에서 TTX 차량의 정상조건 주행 시 탈선계수, 윤중감소율 모두 허용한도 이내로 적절하게 설계되었음을 알 수 있었다. 그러나 공기스프링 파손조건에 있어서는 탈선계수는 안전하나, 윤중감소율이 허용한도를 초과함을 알 수 있었다.
- (3) 따라서 공기스프링의 공기가 빠지는 fail에 대해서도 안전성을 확보하기 위해서는 설계의 개선이 필요한 것으로 파악되었고, 개선 방향은 공기스프링 하부의 비상스프링의 강성을 유연하게 하거나, fail 상태를 감지하여 속도를 낮추어 운행할 수 있도록 하는 것이다.

참고문헌

1. 김남포 등, 2004, "틸팅 시스템 실용기술개발-연구 보고서", 한국철도기술연구원
2. B. Eickhoff, G. Scott, 1933, "Vehicle Dynamic Training Course", British Rail.
3. 김남포 등, 2000, "곡선부 고속주행용 대차 설계기술개발 연구보고서", 한국철도기술연구원
4. 유원희 등, 2001, "대차 메카니즘 설계 최적화 연구 보고서", 한국철도기술연구원
5. 김남포, "틸팅차량 운행을 위한 기술경제적 타당성 연구" 한국철도기술연구원, 2001

후 기

본 연구는 건설교통부 철도기술연구개발사업으로 지원된 "틸팅 시스템 실용기술 개발"과제의 연구결과 중 일부입니다.