

틸팅차량의 곡선부 틸팅동작 시 율중감소율 변화에 대한 고찰

The study of wheel unloading change in case of tilting actuation

김남포* 김정석* 오일근**
Kim, Nam-Po Kim, Jung-Seok Oh, Il-Geun

ABSTRACT

Tilting train allow the train to pass curve at higher speed without affecting passenger comfort. As the tilting trains run curve track about 30% higher than non-tilting trains, the centrifugal force and dynamic force will be higher. Therefore it is very important for tilting train to ensure safety against derailment, and to reduce the lateral track forces by applying light-weight design, optimized suspension design and steering mechanism. The 180 km/h Korean Tilting Train(TTX) which is now developing as a part of the Korean National R&D project, was designed and analytically verified to meet these special requirements. This paper describes the analytic study to verify the safety against derailment, especially on the wheel unloading in case of tilting actuation. The severest curve geometry and curving speed was assumed, the tilting control pattern was also assumed as trapezoidal force function applied to tilting bolster and bogie frame. For the comparison, the operation with the speed of tilting train without tilting actuation was numerically simulated and the operation with the balanced speed without tilting actuation was also numerically simulated. Through the numerical simulation of various operating case, we found that derailment quotients, wheel unloading and Q/P was not affected by tilting actuation and that the bogie of TTX was nicely designed to satisfy the safety against the derailment.

1. 서 론

틸팅차량은 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선궤도를 빠르게 주행할 수 있는 장점을 지닌 차량으로, 하부구조의 큰 부차 없이 운행시간을 효과적으로 단축시킬 수 있어 국외의 14개국에 적용되고 있고 잠정적으로 확대되고 있는 실정이다. 국내에서도 고속철도 비 수혜 지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전민의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량 도입을 적극적으로 검토하고 있으며, 철도청과 한국철도기술연구원은 철도기술개발 사업을 통해 국내 기존선 환경에 맞는 한국형 틸팅차량 TTX의 개발을 추진하고 있다. 본 TTX 차량의 차체를 강제로 경사 시키는 강제틸팅 방식이며, 틸팅 기구장치는 그림 1과 같이 스윙 링크 방식을 채택하고 있다. 이와 같은 틸팅 차량은 곡선부를 일반차량에 비해 약 30% 높은 속도로 주행하기 때문에 원심력이 크게 증가되고, 이 힘이 차륜과 레일이 전달되어 곡선 외측부는 탈선계수가 곡선 내측부는 율중 감소율이 증가되게 된다. 또한 곡선부에서 틸팅 동작 시 그 기구학적 특성 때문에 좌우측 스윙 링크에 하중 불균형이 크게 발생하며, 이 불균형의 반력이 차륜에도 영향을 주어 율중 감소율을 증가시킬 수가 있다. 본 논문은 상세 설계가 완료된 TTX 차량의 곡선 주행 시 틸팅 동작에 의한 조향장치, 스윙링크의 힘의 발생 형태와 크기를 파악하고 300R의 급곡선 주행 시 탈선안전도, 특히 율중 감소에 의한 탈선안전도 검토 결과에 대해 기술한다.

* 한국철도기술연구원 >운송도기물개발사업단 선임연구원, 정호원

** 한국철도기술연구원 WCR부처기획단 수석연구원, 정희민

본 연구에서는 TTX 차량의 설계한도인 최대 뒤틀림각 8도, 최대 뒤틀림을 4도/초를 유도하기 위한 가상의 선로조건과 통과속도 조건을 선정하고, 차량조건은 중량이 높은 Mcp 구동차량의 열차조건을 적용하였다. 수치해석에는 철도차량 동역학 해석 전용 S/W인 VAMPIRE를 사용하였다. 궤도조건은 국내 기존선 특정구간의 궤도 틀림 조건을 상기에 언급한 가상의 압력선 선로조건과 중첩하여 사용하였다.

2. TTX 차량의 동역학적 설계

TTX차량은 최고운행속도 180 km/h, 곡선주행속도는 캔트부족량 250 ~ 300 mm 를 목표로 하는 뒤틀림열차로서 6량 1편성의 전기동차(EMU) 형식이다. 고속화와 뒤틀림에 따른 기존선의 궤도부담력을 최소화하기 위해 4량의 구동차에 동력을 분산시켰으며, 차체도 복합소재를 사용하는 등 경량화에 주력하여 최대 속중을 15톤 이내로 설계하였다. 차체를 경사시키는 뒤틀림 기구장치(그림 4)와 전기기계식 액츄에이터를 대차 내에 간결하게 구성하였다.(그림 2) 뒤틀림 기구장치는 대차 당 4개의 스윙 링크를 이용하여 뒤틀림 볼스타와 차체가 같이 경사되도록 안내하는 구조이며, 뒤틀림 구동원은 뒤틀림 볼스타와 대차프레임간에 설치된 뒤틀림 액츄에이터이다. 뒤틀림 기구장치의 권 링크 위치는 대차 내 설치공간, 차체부계중심의 이동량 최소화,뒤틀림 실행 시 중력에 의한 자동 중심복원과 뒤틀림 구동력, 좌우 스윙링크간의 하중 불균형 최소화의 요구조건을 만족시킬 수 있도록 최적화되어 있다. 본 대차설계에서는 2차 현가장치를 뒤틀림 볼스타 상부에 위치시켜, 증가된 횡방향 원심력이 뒤틀림에 의해 상쇄되도록 함으로써 횡방향 중심복원 액츄에이터를 생략할 수 있었다. 차량주행시, 차체 뒤틀림 시 현가장치의 롤 운동을 최대한 억제하기 위해 차체와 뒤틀림 볼스타간에 안티롤 장치(Anti-roll bar)를 설치하였다. TTX차량은 200km/h 이상의 일계속도와 곡선부를 30% 높은 속도로 주행하도록 하는 고도의 곡선주행성능의 상반된 두 요구조건을 모두 만족시켜야 하는 기술적 난이도가 높은 차량이다. 이와 같은 이윤배반적 성능요구조건을 만족시키기 위해 유연한 요강성을 갖는 1차 현가장치와 자기 조향장치(그림 3)를 국내 최초로 적용하였다.

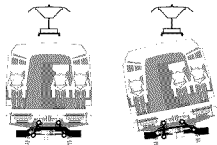


그림 1. TTX 차량의 차체뒤틀림 방식

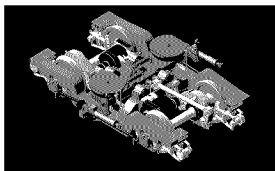


그림 2. 뒤틀림 대차(구동대차) 전경

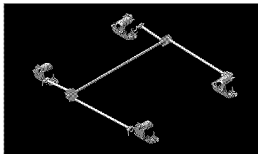


그림 3. 자기 조향장치

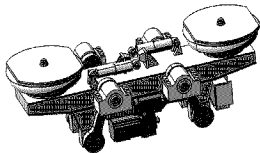


그림 4. 뒤틀림 기구장치
(스윙링크, 뒤틀림볼스타, 뒤틀림 액츄에이터)

3. 차량 및 선로의 수치해석 모델

TTX 차량의 상세설계를 동역학의 수치해석 모델로 변환하는 데 있어, 해석의 목적에 맞추어 단순화하고 가정을 하였다. 차량 간 구조적 특성 상 차량과 차량간에는 상하, 좌우 및 폭 방향의 동역학적 힘의 전달이 크지 않기 때문에, 1량만을 분리하여 모델링 하였다. 또한 차체의 탄성진동은 탈선안전도예의 영향이 미미하기 때문에 고려하지 않고, 차체를 포함한 모든 질량요소를 강체로 간주하였다. 차륜과 레일의 접촉 크라이프 이론은 곡선주행의 특성 상 차륜 후륜지 접촉은 고려할 수 있는 Non-linear creep law를 적용하였다.

TTX 차량의 뒤틀림 제어는 차상 내 곡선감지 및 제어방식을 기본으로 하고 있다. 선두 대차 프레임에 설치된 가속도와 자이로 센서 신호를 열차뒤틀림제어장치(TTP)가 받아 뒤틀림 제어패턴을 연산해 내고, 이를 차량뒤틀림제어장치(CTE)에 명령하여 각 차량의 차체뒤틀림 액츄에이터를 구동하도록 하는 방식으로, 선서가 제어루프 밖에 위치하여 제어의 안정성을 높인 방식이다. 피드백 제어는 CTE와 액츄에이터간에만 구성되며, 피드백 향이 뒤틀림 제어패턴을 변화시키지 않는다. 따라서 곡선궤도와 뒤틀림차량 전체적 제어제로 보면 open loop 제어로 간주할 수 있기 때문에 본 동역학 해석에서는 뒤틀림 제어 패턴을 사진에 액츄에이터 힘의 함수로 계산하여 해당 질량요소간에 외력 함수로서 입력하는 방식을 취하였다. 실제적 뒤틀림 제어에는 곡선 판단과 연산에 따른 시간지연이 불가피하게 발생되기 때문에 본 해석에서는 뒤틀림 제어에 관련된 외력 함수를 시간지연이 없는 경우와 0.5초 시간지연을 둘 두 가지 CASE로 고려하여 두 CASE 모두 탈선안전도를 확보하는 지점도하였다.

전량 요소는 차체 1개, 전·후위 대차 후레인 2개, 전·후위 뒤틀림 볼스타 2개, 조향 레버 4개, 유속세트 4개로 총 13개로 짚었고, 각 질량요소간을 적절한 현가장치 요소로서 모델링하였다. 전량 요소와 현가장치 특징치에 대한 세원은 표 2에 나타나 있다. 그림 5는 VAMPIRE에서 지원되는 요소를 사용하여 구성된 TTX 차량의 다물체 동역학 모델을 보여주고 있다.

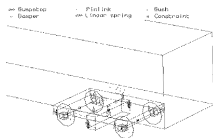


그림 5. TTX 차량의 동역학 모델

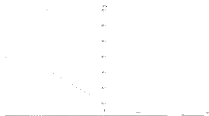


그림 6. 차륜/ 레일간 접촉자 모델

기존선의 곡선반경, 센터, 완화곡선거리 등의 곡선선로조건이 매우 다양하기 때문에 본 연구에서는 일차적으로 300R의 급곡선을 목표최대 통과속도인 100 km/h로 수행할 경우 차량의 실제한 도인 최대 뒤틀림과 8도, 최대 뒤틀림속 4도/초, 최대 정상항가속도 0.8 m/s²가 발생될 수 있는 최악의 가상 선로조건을 표 1과 같이 설정하였다. 궤도 틀림조건은 국내 기존선 특정구간의 조건을 사용하였으며, 그림 7에 본 해석에 적용된 곡선 선형과 상하틀림(민들림), 좌우틀림(뚝뚝림), 레간틀림의 3종류 궤도틀림에 대해 나타나 있다.

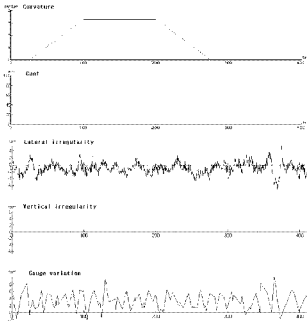


그림 7. 곡선선로 조건

표 1. 곡선선로 및 속도조건

곡선반경	300 m
캔트	100 mm
완화곡선장	75 m
본 곡선장	100 m
균형 속도	51 km/h
틸팅차량 속도	100 km/h

표 2. 해석차량 모델 세위 (Mcp, 영차조건)

구분	항목	수치	구분	항목	수치
차체	중량 (ton, Mg)	38.8	주요 치수	대차간 거리 (m)	15.9
	둘 관성모멘트(Mg-m ²)	66		고경축거 (m)	2.6
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2241		차륜 반경 (m)	0.43
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	2241		Kx (MN/m)	1.4
	무게중심고(m)	1.7		Ky (MN/m)	3.6
대차 후레임	중량 (ton, Mg)	3.755	1차 현가 장치	Kz (MN/m)	1.0
	둘 관성모멘트(Mg-m ²)	1.8		Cz (MN/m/s)	0.02
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	3.8		조향강치도선바 (MN-m/rad)	4.0
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	4.2		설치 폭(횡방향) (m)	2.05
	무게중심고(m)	0.55		공기스프링 Kx (MN/m)	0.18
틸팅 볼스터	중량 (ton, Mg)	1.113	2차 현가 장치	공기스프링 Ky (MN/m)	0.18
	둘 관성모멘트(Mg-m ²)	0.6		공기스프링 Kz (MN/m)	0.45
	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
	무게중심고(m)	0.6		횡댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.03
윤축 세트	중량 (ton, Mg)	2.103		공기스프링 설치 폭	1.75
	둘 관성모멘트	1.3		요 댐퍼 설치 폭	2.90
	무게중심고	0.43		Bump stop 설치높이	0.875

4. 탈선안전도 수치해석 결과

상기와 같이 수립된 동역학 해석 모델을 이용하여, TTX 차량이 급곡선 주행 시 틸팅 및 비틸팅 시 탈선안전도 해석을 실시하였다. 사용된 S/W는 VAMPIRE Version 4.3이었으며, 해석 CASE는 운행 시 발생 가능한 상황을 아래와 같이 5개로 선정하였다.

- CASE I. 100km/h로 300R 곡선주행 시 정상적인 틸팅 동작을 하는 경우
시간지연이 없는 이상적인 틸팅 제어 패턴 가정
- CASE II. 100km/h로 300R 곡선주행 시 정상적인 틸팅 동작을 하는 경우
틸팅 제어패턴의 시간지연을 0.5초로 가정
- CASE III. 100km/h로 틸팅 동작 없이 300R 곡선을 주행하는 경우
액츄에이터가 전기적 힘으로 고정되어 있는 경우
- CASE IV. 100km/h로 틸팅 동작 없이 300R 곡선을 주행하는 경우
액츄에이터에 전기공급 없이 기계적 마찰저항만 있는 경우
- CASE V. 51km/h의 한계속도로 틸팅 동작 없이 300R 곡선을 주행하는 경우 (참고치)
액츄에이터에 전기공급 없이 기계적 마찰저항만 있는 경우

그림 8은 CASE I과 CASE II의 차체 롤 각(틸팅 각)과 2차 현가장치 롤 각을 같이 나타낸 것이다. 틸팅 각은 원외곡선 시점부터 선형적으로 증가하나 본 곡선에서 약 7.5 - 8도로 유지되는 것으로 나타났고, 시간지연이 있는 경우에는 약 20 m 지연되어 틸팅 각이 형성되는 것으로 나타났다. 이를 통해 사전에 계산해 입력한 외박 함수에 의해 틸팅 제어를 구사하는 방법의 타당성을 확인할 수 있었다. 2차 현가장치의 롤 각은 0.5도 수준으로 낮게 나타났는데 이는 원심력의 많은 부분이 중력에 의해 상쇄되고, 안티롤 장치의 적용으로 롤 강성이 크기 때문이다.

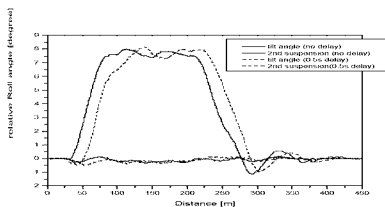


그림 8. 차체 롤 각 해석결과(CASE I, CASE II)

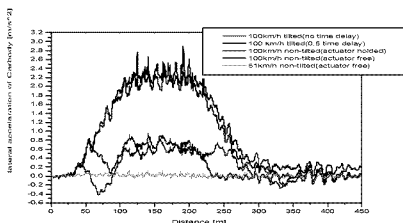


그림 9. 각 CASE에 대한 차체 횡가속도 해석결과

그림 9는 각 CASE별로 승객이 느끼는 횡가속도를 해석한 결과이다. 캔트와 균형을 이룬 CASE V의 경우에는 횡가속도 정상성분이 거의 0으로 나타나고 있음을 알 수 있고, 틸팅 동작을 한 경우는 정상 횡가속도가 0.8 m/s^2 으로 예상했던 기준치로 나타났다. 틸팅을 안한 경우는 2.1m/s^2 로 매우 높게 나왔다. 이는 틸팅차량의 속도로 곡선을 진입했는데 틸팅이 실패한 경우로써 승객이 옆으로 크게 쏠리며 불편함을 느낄 수 있는 수준이다.

그림 10과 그림 11은 틸팅 동작을 할 경우와 안할 경우의 좌우 스윙링크의 반력 형태를 보여주고 있다.

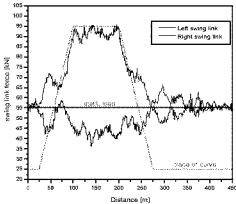


그림 10. 틸팅 동작시 스윙링크 반력

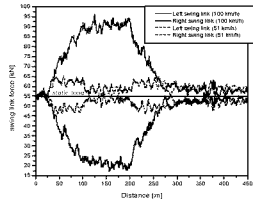


그림 11. 틸팅 무동작시 스윙링크 반력

그림 12와 13은 틸팅 동작을 할 경우와 안할 경우의 조향장치 링크에 유기되는 힘을 나타낸 것이다. 조향장치의 힘은 틸팅 유무에는 거의 영향을 받지 않고, 곡률과 통과속도 등의 차를 안내 힘(Guiding force)에 영향을 받는 것임을 확인할 수 있었다. 조향장치 링크의 반력은 300R을 100km/h로 주행할 경우 틸팅 유무에 관계없이 최대치가 8 kN 수준으로 나타났고, 균형속도인 51 km/h로 주행할 경우 4.5 kN 수준으로 나타났다.

탈선계수와 윤증감소율이 기술되는 탈선안전도 또한 틸팅의 유무에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. (그림 15, 그림 16) 탈선계수는 틸팅 작동을 할 경우가 안 할 경우보다 미소하게 증가되는 것으로 나타났지만 윤증감소율은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 각 CASE 모두 탈선안전도는 허용기준 이내로서, TTX 틸팅 대차의 설계는 적절하게 이루어 졌다고 평가된다.

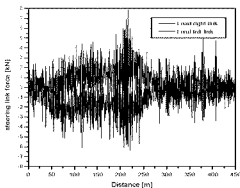


그림 12. 조향링크 반력 (CASE I)

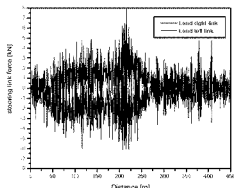


그림 13. 조향링크 반력 (CASE IV)

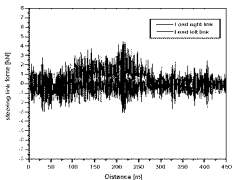


그림 14. 조향링크 반력 (CASE V)

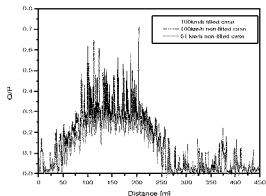


그림 15. Q/P 탈선계수

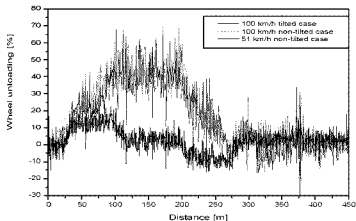


그림 16. 윤중감소율 해석결과

5. 결론

본 연구를 통해 상세설계가 완료된 TTX 차량의 틸팅 거동이 윤중감소율과 탈선계수에 미치는 영향과 틸팅 기구장치, 조향 기구장치에 미치는 영향을 파악할 수 있었고, 아울러 급곡선부 탈선 안전도 측면에서 틸팅 대차 설계의 적정성을 검증할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 차륜/ 레일간 경계면에서 발생하는 횡압, 윤중감소율, 탈선계수 등은 차량의 틸팅 작동 유무에는 크게 영향을 받지 않고, 차체에서 승객이 느끼는 횡가속도는 틸팅 작동 유무에 크게 영향을 받는다. 이로써 스윙링크 방식의 틸팅 기구장치의 틸팅 동작 힘(틸팅 액츄에이터 힘)은 차량제 내에서 작용과 반작용으로 상쇄가 되고 차륜/ 레일에는 크게 영향을 미치지 못한다.
- (2) 틸팅 제어의 시간지연이 커지면 곡선진입 초기에 발생한 횡가속도를 보상해 주지 못하기 때문에 승객이 느끼는 횡가속도와 가속도 변화율이 증가되 승차감을 저해하는 요소로 작용하게 된다.
- (3) 급곡선 주행 시 자기 조향장치의 링크에 발생하는 반력을 예측할 수 있었으며, 이 힘의 크기를 토대로 조향장치의 설계강도를 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 김남포 등, 2003, "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 운영을 위한 기술·경제적 타당성 연구" 한국철도기술연구원, 2001

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 "틸팅 시스템 실용기술 개발"과제의 연구결과와 일부입니다.