

한국형 틸팅대차의 진동저감을 위한 최적현가장치 연구

The Study on the Optimal Suspension of a Tilting Bogie for Vibration Reduction

김남포† · 김정석* · 구동희*

Nam Po Kim, Jung Suk Kim, Dong Whe Koo

Key Words : Suspension System(현가장치), Tilting Bogie(틸팅대차), Vibration reduction(진동 저감)

ABSTRACT

Tilting bogie system allow the train to pass curve at higher speed without affecting passenger comfort. As the tilting trains offer the optimum means of providing faster and more comfortable rail service with minimum of environmental disturbance and capital investment, more than 14 countries have now adopted or are about to adopt tilting train technology. The Korean National Railroad is also planing to apply faster tilting train to the areas where the High speed rail service are not provided. This paper describes the parametric study to achieve the optimal suspension parameters of the Bogie for 180 km/h Korean Tilting Train(TTX) from the view point of the vertical and lateral vibration reduction.

1. 서 론

철도차량용 대차(bogie)는 차량을 지지하고 궤도를 안내하며 견인력과 제동력을 전달함은 물론 차량의 동역학적 성능, 주행안정성, 진동 승차감, 곡선추종 성능을 좌우하는 주행장치의 요체이다. 대차 구조는 이와 같은 기능을 수행할 수 있도록 운축 세트와 대차구조물, 1차 및 2차 현가장치로 구성한다. 틸팅차량은 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선궤도를 빠르게 주행할 수 있는 장점을 지닌 차량으로, 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 효과적으로 단축시킬 수 있어 국외 14개국에 적용되고 있고 점진적으로 확대되고 있는 실정이다. 국내에서도 고속철도 비수혜지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량 도입을 적극적으로 검토하고 있으며, 철

도청과 한국철도기술연구원은 철도기술개발사업을 통해 국내 기존선 환경에 맞는 한국형 틸팅차량의 개발을 추진하고 있다. 틸팅 대차는 차체의 롤 회전 운동을 원활하게 수행할 수 있는 링크나 로울러 가이드 등의 기구장치가 대차 내에 구성된 대차로서 일반대차에 비해 구성요소가 많고, 허용 자유도가 더 많은 다소 복잡한 구조를 하고 있다. 여객용 대차의 1차 현가장치는 주행 중 발생하는 진동을 일차적으로 완충하고, 각 차륜 하중이 균일하게 되도록 하는 역할을 하며, 2차 현가장치는 승객에게 보다 쾌적한 승차감을 제공하기 위해 진동전달을 최소화하도록 한 스프링, 댐퍼 시스템이다. 발생 또는 전달되는 진동을 저감하여 최적의 승차감을 확보하기 위한 현가장치 설계에 있어서 궤도의 특성, 차량의 질량요소와 강성요소, 차량의 각 고유진동 모드 등의 제반 인자를 고려하여야 한다.

본 논문은 철도기술개발사업에서 개발 중에 있는 180 km/h급 한국형 틸팅대차의 현가장치 설계 과정 중에서, 진동 승차감 측면에서의 1차 및 2차 현가장치 매개변수 분석 내용에 대해 기술한다. 본

† 책임저자, 한국철도기술연구원

E-mail : npkim@krri.re.kr

Tel.:(031)460-5665,Fax : (031)460-5699

* 한국철도기술연구원

연구에서는 180 km/h급 준고속에 따른 진동 저감 특성을 파악하고, 최선의 현가장치 변수를 설정하기 위해 철도차량 동역학 해석 전용 S/W인 VAMPIRE를 이용하여 매개변수 분석을 수행하였다. 궤도 조건은 국내 기존선 특정구간의 궤도 틀림 조건과 영국의 200km/h급 특정 궤도 틀림 조건을 병행 사용하였으며, 차량조건은 중량이 높은 구동차량(Mcp)의 정원 승객이 탑승한 영차중량을 적용하였다.

2. 차량의 수치해석 모델

2.1 설계 모델

본 연구에서 개발 중에 있는 180 km/h급 틸팅열차는 6량 1편성의 전기동차(EMU) 형식이다. 고속화와 틸팅에 따른 기존선의 궤도부담력을 최소화하기 위해 4량의 구동차에 동력을 분산시켰으며, 차체도 복합소재를 적용하는 등 경량화에 주력하여 최대 축중을 15톤 이내로 설계하였다. Fig 1은 편성 선두의 Mcp 차량에 대한 설계모델 전경을 보여주고 있다. 차체는 2축 대차(bogie)가 2대로 지지되며, Fig 2는 구동대차의 설계 모델을 나타낸다. 윤축 세트(Wheelset)는 저널박스과 1차 현가장치에 의해 대차후래임에 연결되고, 차체는 틸팅볼스터에 설치되어 있는 공기스프링에 의해 지지되며 차체와 틸팅볼스터는 틸팅에 의한 롤 운동을 같이하는 구조이다. 차체와 틸팅 볼스터간에는 안티 롤 장치가 설치되어 있어 상대적 롤 변위를 억제시킨다. 차체와 대차간에 견인력과 제동력을 전달하기 위한 견인 링크가 차체와 대차 후래임 사이에 설치되어 있다. 틸팅 메카니즘은 2차 현가장치 하부에 틸팅 볼스터와 대차후래임 간에 구성하였으며, 차체와 틸팅 볼스터의 경사 회전을 안내하는 틸팅링크와 경사 동작원인 틸팅 액츄에이터를 틸팅 볼스터와 대차 후래임사이에 설치하였다. 또한 곡선 추종성을 양호하게 하기 위하여 전방 차축의 저널박스과 후방 차축의 저널박스를 조향링크(Steering Link)로 연결하는 조향 장치가 설치되어 임계속도를 높게 유지하면서도 곡선부를 고속으로 주행할 때 발생하는 횡압이 낮게 발생되도록 하였다.

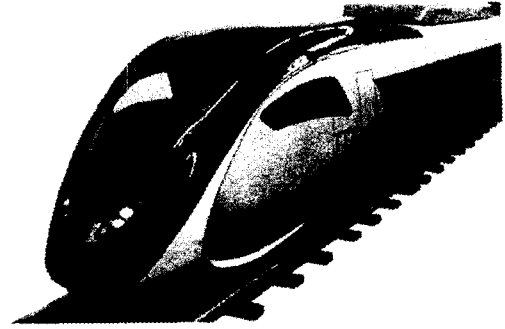


Fig. 1 Design model of TTX

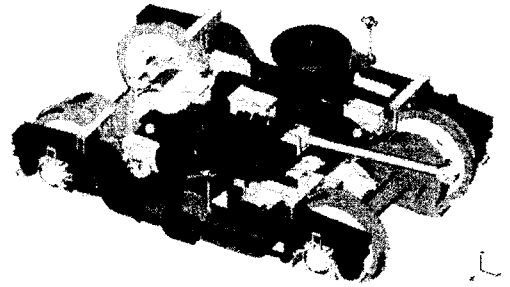


Fig. 2 Tilting Bogie Design

2.2 수치해석 모델 및 제원

틸팅차량 설계모델을 수치해석 모델로 변환하는 데 있어 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 차량과 차량간의 연성효과가 적기 때문에 1량만을 대상으로 하였음
- 2) 중량조건이 높은 구동차량, Mcp 차의 영차중 기준으로 하였음

3) 모든 질량요소를 강체로 간주하였음.

4) 차륜/ 레일의 접촉 크리이프 이론은 Non-linear creep law를 적용하였음

질량 요소는 차체 1개, 전·후위 대차 후래임 2개, 전·후위 틸팅 볼스터 2개, 조향 레버 4개, 윤축 세트 4개로 총 13개로 잡았고, 각 질량요소간을 적절한 현가장치 요소로서 모델링하였다. 질량 요소에 대한 제원은 Table 1과 같으며, 주요 치수와 현가장치 특성치에 대한 제원은 Table 2에 나타나 있다. Fig 3은 VAMPIRE에서 지원되는 요소를 사용하여 구성된 한국형 틸팅차량의 다물체 동역학 모델을 보여주고 있다.

Table 1. Mass property

구분	항목	특성치
차체	중량 (ton, Mg)	38.8
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	66
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2241
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	2241
	무게중심고(m)	1.34
대차 후레임	중량 (ton, Mg)	3.755
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	1.8
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	3.8
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	4.2
	무게중심고(m)	0.55
틸팅 볼스타	중량 (ton, Mg)	1.113
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	0.42
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	0.03
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	0.43
	무게중심고(m)	0.6
차축 세트	중량 (ton, Mg)	2.103
	롤 및 요 관성모멘트	1.3
	무게중심고	0.43

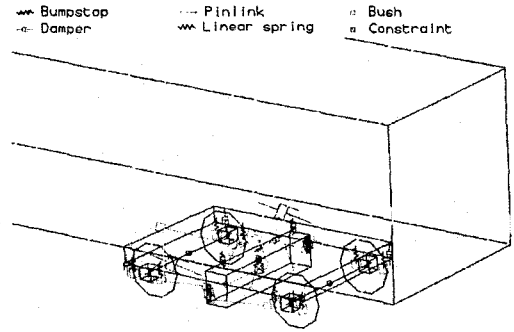


Fig 3. VAMPIRE model of TTX

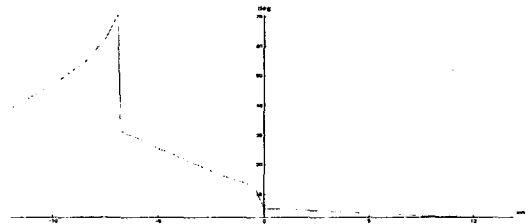


Fig 4. Wheel/ rail contact angle model

Table 2. suspension property

구분	항목	특성치
주요 치수	대차간 거리 (mm)	15,900
	고정축거 (mm)	2600
	차륜 반경 (mm)	430
1차 현가장치	Kx (MN/m) /EA	2.0
	Ky (MN/m) /EA	4.0
	Kz (MN/m) /EA	0.1 ~ 2.0
	Cz (MN/m/s)	0.02
	조향장치 torsion bar 스프링 계수 (MN-m/rad)	4.0
	설치 폭(횡방향) (mm)	2050
2차 현가장치	공기스프링 Kx (MN/m)	0.18
	공기스프링 Ky (MN/m)	0.18
	공기스프링 Kz (MN/m)	0.2 ~ 1.0
	공기스프링 설치 폭(mm)	1750
	공기스프링 상면 높이(mm)	1000
	안티롤 바 (MN-m/rad)	4.0
	요댐퍼 Cyaw (MN/m/s)	0.15~0.25
	요댐퍼 설치 폭 (mm)	2730
	횡댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.03
	Bumpstop 설치 높이	875
	Bumpstop clearance(mm)	10 ~ 30
Traction-rod 설치높이	759 / 889	
틸팅 메카니즘	틸팅 회전중심(초기)	1527
	링크 상부 높이	750
	링크 상부 폭	680
	링크 하부 폭	1080
	액츄에이터 설치 높이	420

2.3 고유진동수 해석 결과

상기와 같이 수립된 수치해석 모델을 사용하여 고유치 해석을 수행하였으며, 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. 차체 하중심 롤 모드는 틸팅 기구를 free 하게 둔 조건과 전기적 입력에 의해 holding 하는 두 조건을 구분하여 계산하였다.

Table 3. Natural frequencies of various mode (K1z :0.5, K2z: 0.45)

No.	고유진동 모드		고유진동수 [Hz]	감쇄비 [%]
	차체 하중심 ROLL	틸팅기구 free / hold		
1	차체 하중심 ROLL	틸팅기구 free	0.28	16
		틸팅기구 hold	0.6	28
2	차체 상중심 ROLL		0.66	22
3	차체 YAW		0.69	36
4	차체 BOUNCING(상하)		0.98	14
5	차체 PITCH		1.03	14
6	대차 YAW (대차 사행동)	속도 130 km/h	2.3	25
		속도 250 km/h	3.6	9
		속도 370 km/h	4.4	-3
8	대차 BOUNCING	동일위상	6.0	33
		반대위상	6.3	27
9	대차후레임 PITCHING		7.2	7
10	틸팅볼스타 LATERAL		8.5	52
13	대차후레임 ROLL		9.9	21
14	대차후레임 LATERAL		15.5	32

3. 현가장치 매개변수 분석

3.1 궤도 비틀림(track irregularity)

차량의 진동은 궤도 비틀림 입력에 대한 응답으로 나타나기 때문에, 차량의 현가장치 설계에 있어 궤도 비틀림 조건설정은 매우 중요한 과정이다. 본 연구의 수직진동 승차감 측면의 현가장치 최적화를 위해서는 직선 궤도만을 고려하였다. 궤도 비틀림 조건은 국내 140 km/h급 기존선의 특정 구간 데이터를 적용하였고, 국내에 180 km/h급 궤도조건이 없어 영국의 200 km/h급 조건을 병용하였다.

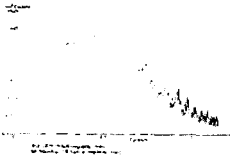


Fig 5. Spectrum of Vertical Irregularity

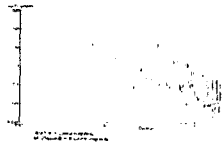


Fig 6. Spectrum of Lateral Irregularity

3.2 상하진동 매개변수 분석

상기에서 수립된 궤도 비틀림 모델을 적용하고 차량 모델의 1차 및 2차 현가장치 상하방향 강성치를 매개변수로 하여 시간적분방법에 의한 수치 해석을 수행하였다. 1차 및 2차 강성치의 조합에 따른 해석 구간의 차체 진동가속도 r.m.s값이 Fig 7에 나타내었고, 대차 후레임 진동가속도의 실효치를 Fig 8에 나타내었다.

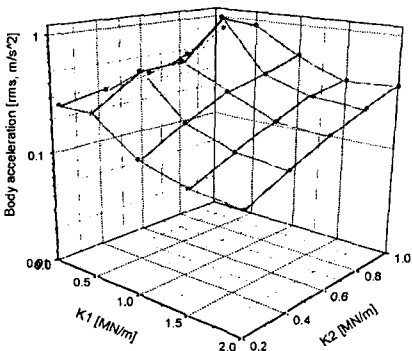


Fig 7. Acceleration of Carbody versus K1 & K2

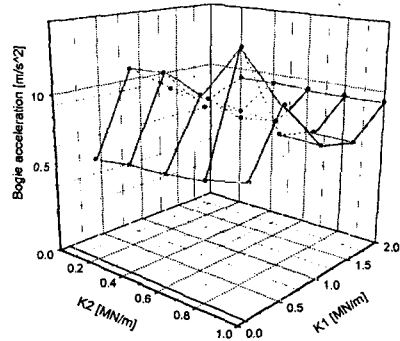


Fig 8. Acceleration of Bogie-frame versus K1 & K2

매개변수 분석 결과에서 보는 바와 같이, 2차 강성치는 유연할수록 승객이 느끼는 차체진동가속도는 낮아지나, 구조적 변위 제한 측면에서 한정되어야 한다. 따라서 2차 강성치는 0.4~0.5 부근에서 차량의 변위 제한을 고려하여 선정해야 할 것으로 판단된다. 1차 강성치는 수치가 증가 할수록 차체가 속도는 낮아지나, 대차후레임의 가속도가 0.5 MN/m 부근에서 커지기 때문에 1.0~1.5 수준이 적합할 것으로 판단된다.

본 개발차량의 2차 현가장치는 공기스프링으로 orifice를 이용한 내부 감쇄를 이용하기 때문에 별도의 오일댐퍼를 사용하고 있지 않다. 따라서 1차 상하댐퍼의 감쇄계수만을 매개변수로 하여 분석하였으며, 그 결과가 Fig 9 및 Fig 10에 나타나 있다. 1차 댐퍼의 감쇄계수는 차체 및 대차 가속도를 최소화하는 0.02~0.04 MN/m/s가 적당할 것으로 판단된다.

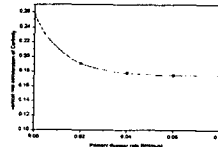


Fig 9. Carbody accel. versus C_{1z}

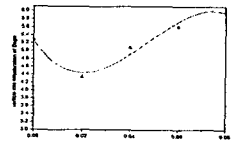


Fig 10. Bogie-frame accel. versus C_{1z}

3.3 속도별 진동가속도 해석결과

3.2절에서 선정한 현가요소를 적용하여 차량의 속도를 60에서 180 km/h까지 증가시켜가며 해석을 수행하였고, 그 결과 Fig 11에서 Fig 16에 나타나 있다.

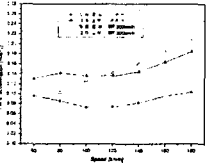


Fig 11. Vertical r.m.s accel. versus speed

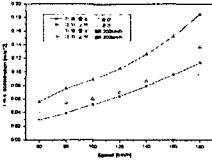


Fig 12. Lateral r.m.s accel. versus speed

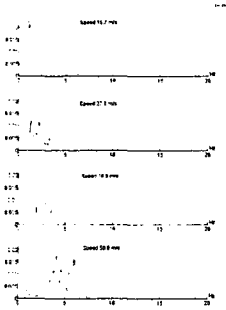


Fig 13. Vertical accel. (Korean typical track)

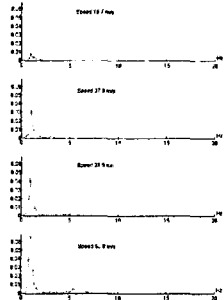


Fig 14. Vertical accel. (BR 200km/h track)

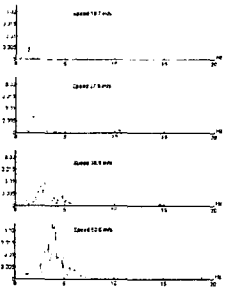


Fig 15. Lateral accel. (Korean typical track)

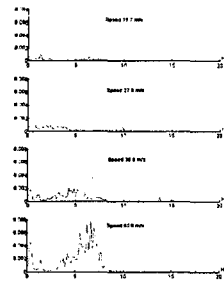


Fig 16. Lateral accel. (BR 200km/h track)

Fig 11은 속도에 따른 차체 중앙위치 및 대차상부위치의 상하진동가속도의 r.m.s 값을 나타낸다. 대차상부 위치가 전반적으로 크게 나타나는 데 이는 차체의 피칭 운동에 의한 것이다. Fig 12는 속도에 따른 차체 중앙위치 및 대차상부위치의 좌우진동가속도의 r.m.s 값을 나타낸다. 해석 결과에서 보듯이 특정 속도역에서 공진에 의한 과도진동이 발생하는 경향은 없으며, 속도증가에 따라 상하방향보다 좌우방향 진동이 더 민감하게 증가됨을 알 수 있다.

3.4 2차 현가장치 좌우진동 분석

1차 현가장치의 좌우 및 길이방향 강성은 진동저감 측면보다는 차량의 주행 안정성과 곡선 추종성 측면에서 설정되어야 한다. 차량의 좌우방향 진동 승차감은 2차 현가장치의 강성과 감쇄, 변위 제한 요소인 스토퍼 간격의 적절한 설계에 관계된다. 본 연구에서 개발하는 틸팅 대차의 경우, 틸팅을 하지 않을 경우 틸팅 기구부가 진자스프링의 역할을 하기 때문에 한 단계의 현가장치가 더 있는 것과 같다. 틸팅을 하지 않고 직선궤도를 고속 주행하는 경우 틸팅 액츄에이터는 운동에 반대되는 기계적 저항을 하는 건마찰 요소와 유사하게 작용한다. 본 논문에서는 직선궤도 최고속도 주행조건인 좌우운동 해석을 통해 좌우 스토퍼 간격과 액츄에이터 저항력의 적정수준을 파악코자 하였으며, 그 결과 Fig 17과 Fig 18에 나타나 있다.

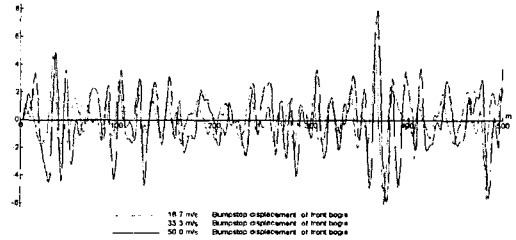


Fig 17. Bump-stop displacement

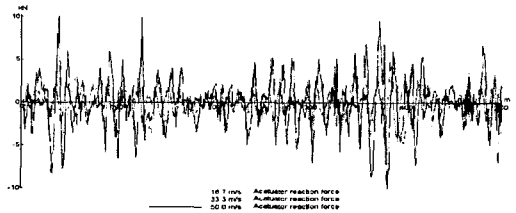


Fig 18. Actuator reaction force

2차 현가장치 횡방향 스토퍼는 곡선궤도에서 차량의 진복안전도 및 건축한계와의 간섭 방지 측면에서 차량의 변위를 제한하는 역할을 한다. 스토퍼 간격은 상기의 이유로 적절하게 제한되어야 한지만 너무 제한을 할 경우 주행 중에 수시로 접촉하여 좌우진동 승차감을 악화시키게 된다. Fig 17에서 보듯이 최고운행속도에서 스토퍼 최대 변위가 8 mm 수준으로 나타났다. 따라서 스토퍼 간격은 10 ~ 20 mm 범위로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig 18은 틸팅 액츄에이터를 건마찰 요소로 breakout force를 10 kN으로 모델링하여 해석한 결과이다. 속도가 증가됨에 따라 액츄에이터에 작용하는 힘이 증가되고 이것이 10 kN을 넘게되면 액츄에이터에 변위가 발생되는 데 170 km/h 이상에서 이 힘이 10 kN을 초과하는 것으로 나타났다. 물론 궤도 비틀림량이 큰 궤도를 주행 할 경우에는 이보다 낮은 속도에서 액츄에이터가 밀리거나 끌리는 현상이 발생 할 것이다. 따라서 어느 속도에서 틸팅 액츄에이터를 전기적으로 holding 시킬 것인지에 대해서는 심도있는 연구를 통해 결정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 진동 승차감 측면에서의 현가장치 최적 설계 파라미터를 도출하기 위한 동역학 해석을 통한 매개변수 분석을 실시하였으며 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 차체 및 대차의 상하 진동가속도를 최소화하기 위한 1차 및 2차 현가장치 강성치의 범위를 파악할 수 있었다. 현가장치의 실 강성치는 이 범위에서 현가장치의 구조강도, 조달 가능성을 고려하여 설정될 것이다.

(2) 차량의 운행속도 영역에서 상하 및 좌우 진동가속도를 예측하였고, 특정 속도에서 공진 등의

과대진동이 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다. 그러나 본 해석이 차체를 강체로 간주 한 것이기 때문에 실제 유연차체의 구조고유진동을 고려하여 검증 할 필요가 있다.

(3) 궤도 비틀림 특성에 따라 차량 진동가속도의 특성이 달라진다. 상하진동의 경우 국내 기존선은 상대적으로 단과장 틀림이 높아 차체의 피칭운동을 증가시키고, 이 주파수는 속도에 비례하여 증가 되는 경향을 나타내었다.

(4) 2차 현가장치의 중요한 설계변수인 스토퍼 간격의 적정치를 파악할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Vijay K. Grag and Rao V. Dukkipati, 1984, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", ACADEMIC PRESS

(2) 김남포 등, 2003, "틸팅 시스템 실용기술개발-연구 보고서", 한국철도기술연구원

(3) B. Eickhoff, G. Scott, 1933, "Vehicle Dynamic Training Course", British Rail.

(4) 김남포 등, 2000, "곡선부 고속주행용 대차 설계기술개발 연구보고서", 한국철도기술연구원

(5) 유원희 등, 2001, "대차 메카니즘 설계 최적화 연구 보고서", 한국철도기술연구원