

180km/h급 한국형 틸팅차량의 대차 기본설계 연구

Basic design of Tilting Bogie for Korean Tilting Train(TTX) with the Speed of 180km/h

김남포* 고태환**
Kim, Nam-Po Ko, Taehwan

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 basic design and dynamic analysis of Bogie for 180 km/h Korean Tilting Train(TTX), which was done as a part of the Korean National R&D project.

1. 서론

틸팅차량은 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선궤도를 빠르게 주행할 수 있는 장점을 지닌 차량이다. 이 차량을 이용하면 곡선궤도가 많은 기존선에서 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 효과적으로 단축시킬 수 있어 국외 14개국에 적용되고 있고 점진적으로 확대되고 있는 실정이다. 국내에서도 고속철도 비 수혜지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량 도입을 적극적으로 검토하고 있으며, 철도청과 한국철도기술연구원은 철도기술개발사업을 통해 국내 기존선 환경에 맞는 틸팅차량의 개발을 추진하고 있다. 본 논문은 180 km/h급 한국형 틸팅 차량의 기본설계 연구내용 중에서 틸팅 메카니즘이 내장되어 있고, 차량의 동적 성능을 좌우하는 핵심 구성요소인 대차장치에 대한 것으로, 기본설계 결과와 해석 검증, 향후 추진계획에 대해 기술한다.

2. 대차의 성능 목표

본 사업에서 개발하고 있는 틸팅 차량(TTX)의 목적은 국내 최초로 180 km/h급 준 고속 전기 차량을 확보하고, 이 차량에 틸팅 기능을 부가함으로써 국내 기존선의 속도향상 효과를 극대화하는 것이다. 또한 틸팅 차량의 투입에 따른 기반시설에 대한 개량을 최소화함으로써 그 타당성을 확보토록 차량의 축중과 횡압의 목표치를 설정하였다. 즉 개발 틸팅 차량이 기존 차량보다 곡선부를 고속으로 주행을 하더라도 궤도에 미치는 부담력은 기존차량이 미치는 수준 이하가 되도록 한 것이다.

개발하고자 하는 틸팅 대차의 목표 성능은 다음과 같다.

- 최고 설계속도 200 km/h, 운행 최고속도 180 km/h

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 선임연구원, 비회원

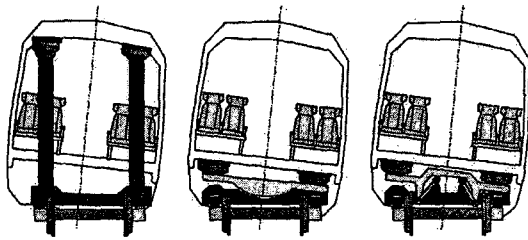
- 곡선주행속도 최고 $5.8\sqrt{R}$, 선형조건에 따라 상이(일반차량 $4.5\sqrt{R}$)
- 승차감 수준 상하 110 dB 이하, 좌우 108 dB 이하
- 정상 횡가속도 0.08g 이하, 차체 롤(roll) 각속도 5도/초 이하.
- 궤도 부가하중
최대 정적하중 15톤, 주행 횡압 $2.9 + 0.3P$ 이내 (여기서 P는 수직하중)

3. 대차 주요장치 개념설계

3.1 틸팅 메카니즘 개념설계

차체 회전운동을 안내하는 틸팅 메카니즘의 종류는 그림 1에 보는 바와 같다.

표 1. 틸팅 메카니즘 방식 비교



Talgo 방식 구면 안내 방식 링크 방식

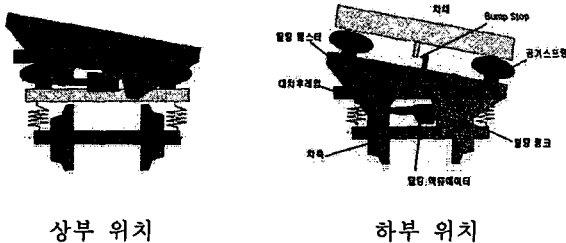
그림 1. 틸팅 메카니즘 형식

링크 방식	구면 안내 방식
-강건 구조	-강건 구조
-틸팅 궤적 제한적	-틸팅 궤적 자유도 높음
-틸팅 소비전력 높음 (차체 중심 상하이동)	-틸팅 소비전력 낮음 (차체 중심 상하이동 작음)
-구조 간단 ETR460, Acela, ICT, TGV-P	-구조 복잡 X2000, VT611, ICN, 일본 Series 283, 영국 Virgin train

그림 2의 첫번째 방식은 자연 틸팅 방식에 적용되는 것으로 본 사업에서 개발코자 하는 강제 틸팅 방식에는 적합하지 않다. 두 번째와 세 번째 방식은 강제 틸팅방식의 차량에 가장 많이 적용되는 방식이다. 본 연구에서는 이 두 방식을 표 1에 나타난 바와 같이 비교 평가하였으며, 지적소유권 기간이 만료되고 적용 사례가 많은 링크 방식으로 설계 개념을 잡았다.

틸팅 메카니즘은 그림 3과 같이 2차 현가장치 상부 또는 하부에 위치 하느냐에 따라 그 특성에 큰 차이를 보이게 된다. 표 2는 틸팅 메카니즘 위치별 특성을 비교 분석한 것이다. 본 연구에서는 실용화 차량의 개발이라는 관점에서 구조가 간단하여 유지보수에 유리하고, 기술 개발의 위험도가 상대적으로 낮은 방식인 2차 현가장치 하부 위치를 설계 개념으로 잡았다.

표 2. 틸팅 위치별 특성 비교



상부 위치

하부 위치

그림 3. 틸팅 메카니즘의 위치

상부 위치	하부 위치
-비 상쇠 원심력에 의한 2차현가 횡변위 증가	-2차 현가장치 횡변위 증가 안됨
-능동형 횡방향 현가장치 필요	-능동형 횡방향 현가장치 불필요
-구조 복잡	-구조 단순
-승차감 우수	X2000, Acela, Series283, VT611, TGV-P
ETR460, ICT, ICT-VT	

3.2 조향 장치 개념설계

틸팅차량은 곡선을 일반차량 보다 높은 속도로 주행하기 때문에 궤도에 미치는 원심력에 의한 횡압 증가가 불가피하다. 이는 궤도 보강이나 유지보수 비용 증가를 초래하기 때문에 틸팅 차량

투입의 타당성을 저하시키게 된다. 따라서 본 대차설계에서는 2장의 대차의 설계목표에서 언급된 바와 같이 개발 차량의 횡압 수준이 일반차량 또는 이차가 되도록 경량구조와 조향 장치를 채택하였다.

조향장치에는 cross anchor 방식과, 전후강성 비대칭 조합 방식, 차체/대차 선회각을 이용한 Z 링크 방식 등이 있다. 조향 방식 중에서 곡선 상에 차체와 대차간에 발생하는 선회각을 이용하여 반 강제적으로 차축을 곡선방향으로 정렬시키는 방법이 그 효과가 가장 큰 것으로 나타나 있으나, 구조가 너무 복잡해지고 완화곡선상의 횡압이 증가한다는 단점도 있다.

따라서 본 연구에서는 구조의 단순화를 통한 유지보수성 향상을 위해 그림 4와 그림 5의 두 가지 방식으로 설계 개념을 수립하였다. 그림 4는 댐퍼를 포함하는 좌우 독립형 링크 구조로서, 전후위 축상을 링크로 중간부의 레버에 연결하고, 레버 피봇부를 대차후레임에 고정하는 방식이며 레버 단부 댐퍼를 설치하는 방식이다. 이는 곡선부에서 발생하는 크리이프 힘에 의해 차축이 곡선 방향으로 정렬하는 데 저항을 적게 함으로써 정상상태 곡선부의 횡압을 저감하는 원리인 데, 이로 인한 직선부 고속 주행안정성의 저하를 막기 위해 댐퍼로서 사행동에 감쇄를 부가한다. 그림 5는 댐퍼가 필요 없는 좌우 torsion bar 연결형 링크 구조로서 전후위 축상을 링크로 연결하는 데 대차 좌우측을 상호 엇갈리도록 함으로써, 곡선부에서 크리이프 힘에 의해 차축이 곡선방향으로 정렬하게 하는 데에는 저항을 하지 않고 좌우측의 동일한 방향 힘에 대해서는 토션 바의 스프링 강성 만큼 저항하도록 하는 원리이다.

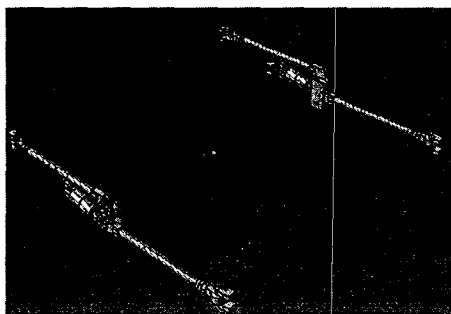


그림 4. 조향장치 설계대안 1

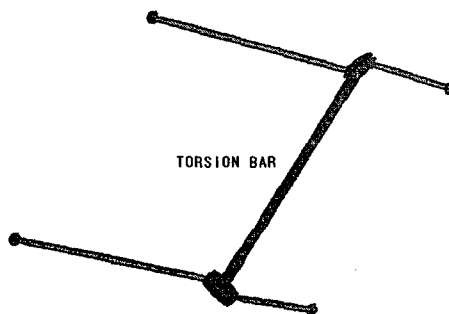


그림 5. 조향장치 설계 대안 2

4. 대차 기본설계

대차는 차량을 지지하며 견인력과 제동력을 전달함은 물론 차량의 동역학적 성능, 즉 양호한 승차감, 헨팅, 탈선 및 전복에 대한 안전성 유지, 원활한 곡선통행 성능을 좌우하는 주행장치의 요체이다. 대차 구조는 이와 같은 기능을 수행할 수 있도록 차륜, 차 축 세트와 후레임을 1차 현가장치로 연결하고 볼스타 대차인 경우 대차후레임과 볼스타를, 볼스타레스 대차인 경우 대차후레임과 차체를 2차 현가장치로 연결 구성한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 대차는 톨팅 메카니즘이 대차 내에 포함되는 즉 자유도 1개를 더 부여하는 복잡한 구조를 하고있다. 본 톨팅 대차의 구조는 상기의 기능을 수행할 수 있도록 4장에서의 수립된 설계 개념을 토대로 하였으며, 대차 장치 최적의 솔루션을 확보하기 위해 철도연구원의 독자적 기본설계(설계 대안 1)와 기 개발경험이 있는 중국 서남교통대학교에 의해 대안 설계(설계 대안 2)가 병행 추진되었다.

대차는 궤도 및 차체로부터 오는 각종 하중을 원활하게 전달 또는 감쇄시켜야 한다. 그림 7에 기본설계 대안 1의 대차 구성과 하중 전달 경로를 나타내고 있다.

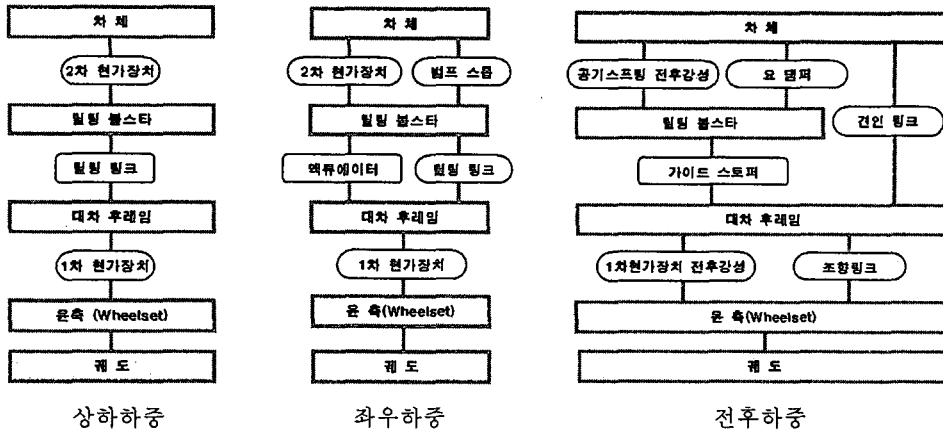


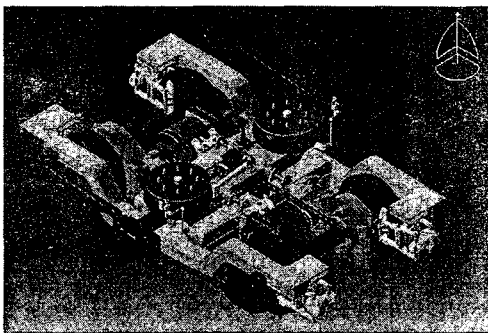
그림 6. 대차 구성 및 하중전달 경로

차축 세트는 저널박스와 1차 현가장치에 의해 대차후레임에 연결되고, 차체는 틸팅볼스타에 설치되어 있는 공기스프링에 의해 지지되며 차체와 틸팅볼스타는 틸팅에 의한 롤 운동을 같이하는 구조로 설계되었다. 차체와 틸팅 볼스타간에는 안티 롤 장치가 설치되어 있어 상대적 롤 변위를 억제시킨다. 차체와 대차간에 견인력과 제동력을 전달키 위한 견인 링크가 차체와 대차 후레임 사이에 설치되어 있다. 이 견인 링크는 곡선궤도에서의 차체와 대차의 선회각, 틸팅 시 차체의 롤 각을 흡수할 수 있도록 충분한 길이와 양단부에 고무 부시를 장착하고 있다. 이 견인 링크에 의해 틸팅 볼스타에는 견인력과 제동력이 전달되지 않도록 함으로써 대차 구조를 단순화 시켰다.

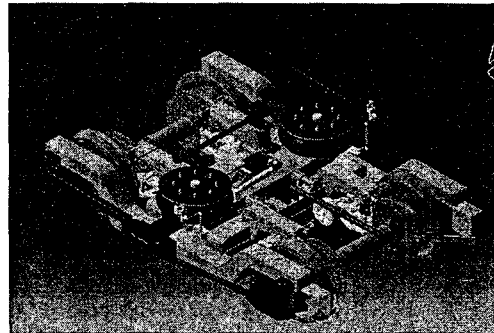
틸팅 메카니즘은 2차 현가장치 하부에 틸팅 볼스타와 대차후레임 간에 구성하였으며, 차체와 틸팅 볼스타의 경사 회전을 안내하는 틸팅 링크와 경사 동작원인 틸팅액츄에이터를 틸팅 볼스타와 대차 후레임사이에 설치하였다.

곡선 추종성을 양호하게 하기 위하여 전방 차축의 저널박스와 후방 차축의 저널박스를 조향링크(Steering Link)로 연결하는 조향 장치가 설치되어 임계속도를 높게 유지하면서도 곡선부를 고속으로 주행할 때 발생하는 횡압이 낮게 발생되도록 하였다.

철도연 독자적으로 수행된 기본설계는 CATIA S/W를 이용하여 3차원으로 설계되었고, 구동 및 부수 대차의 전경이 그림 7에 나타나 있다.



구동 대차



부수 대차

그림 7. 설계 대안1

중국에서 수행된 대안설계 2는 그림 8에 나타난 바와 같다. 구동 대차와 부수 대차, 구동 대차의 하면에서 본 그림과 최대 8도로 경사된 상태의 틸팅 메카니즘 그림을 각각 나타낸다.

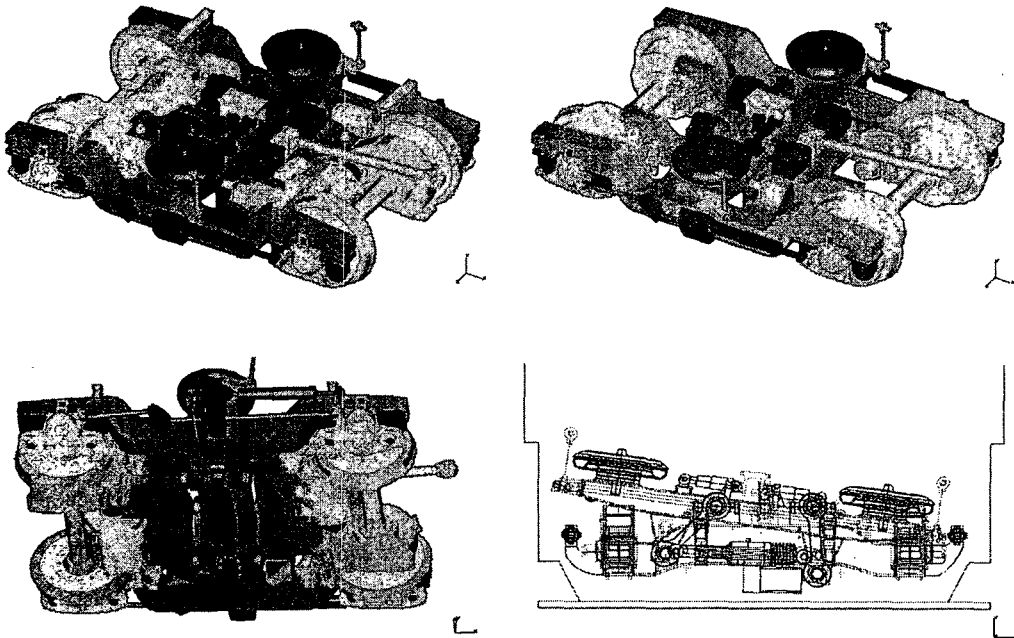


그림 8. 설계 대안 2

이와 같은 기본설계 2개안의 특징과 주요 치수를 나타내면 표 3과 같다.

표 3. 대차 기본설계(안) 주요제원

구 분		기본설계 대안 1	기본설계 대안 2
1차 현가장치		코일 스프링, 원통가이드 안내 오일 댐퍼	고무 스프링, 오일 댐퍼
조향 장치		댐퍼를 포함하는 좌우 독립형 링크 구조	댐퍼가 필요 없는 좌우 torsion bar 연결형 링크 구조
2차 현가장치		공기 스프링, 좌우 댐퍼, Bump stop, 안티 롤 바, 요 댐퍼	공기 스프링, 좌우 댐퍼, Bump stop, 안티 롤 바, 요 댐퍼
틸팅 메카니즘		4개의 링크에 의한 방식	4개의 링크에 의한 방식
대차/ 차체 연결		견인 링크 방식	견인 링크 방식
기초 제동장치	구동 대차	차륜 디스크 제동	차륜 디스크 제동
	부수 대차	차축 디스크 제동(2개/축)	차축 디스크 제동(2개/축)
주요 치수	고정 축거	2600 mm	2600 mm
	차륜 직경	860 mm	860 mm
	1차 현가장치 간격	2050 mm	2050 mm
	2차 현가장치 간격	1600 mm	1900 mm
	공기스프링 상면높이	985 mm	1000 mm
틸팅 회전중심고		1500 mm	1558 mm

기본설계 대안 두 개는 기본적으로 동일한 컨셉과 구조로 되어있으나, 1차 현가장치와 조향장치 그리고 틸팅 메카니즘의 치수가 차이를 보이고 있다. 두 대안 모두 틸팅차량의 개발사양을 만족시키고 차량 시스템 전체와 인터페이스에 문제가 없도록 설계되어 있다. 향후 두 대안에 대해 시뮬레이션을 통한 성능 분석과 최적화 과정을 통해 한 개의 통합된 안으로 상세설계를 진행 할 계획이다.

5. 대차 동역학적 성능 해석

대차 기본설계 1안의 동역학적 성능을 검증해 보기 위해 VAMPIRE S/W를 이용한 동역학 해석이 수행되었다. 차량은 구동차량의 만차조건을 적용하였으며, 주요 제원은 표 4에 나타난 바와 같다.

표 4. 해석차량 모델 제원 (구동차, 만차조건)

구분	항목	수치	구분	항목	수치
차체	중량 (ton, Mg)	43.0	주요 치수	대차간 거리 (m)	15.9
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	73		고정축거 (m)	2.6
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2484		차륜 반경 (m)	0.43
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	2484	1차 현가 장치	Kx (MN/m)	2.0
무게중심고(m)	1.5	Ky (MN/m)		2.0	
대차 후레임	중량 (ton, Mg)	3.618		Kz (MN/m)	0.8
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)	1.196		Cz (MN/m/s)	0.03
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)	2.462		Csteer (MN/m/s)	0.01
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)	2.737		설치 폭(횡방향) (m)	2.05
무게중심고(m)	0.48	2차 현가 장치	공기스프링 Kx (MN/m)	0.1	
틸팅 볼스터	중량 (ton, Mg)		0.5	공기스프링 Ky (MN/m)	0.1
	롤 관성모멘트(Mg-m ²)		0.42	공기스프링 Kz (MN/m)	0.4
	피치 관성모멘트(Mg-m ²)		0.03	안티롤 바 (MN-m/rad)	3.0
	요 관성 모멘트(Mg-m ²)		0.43	요댐퍼 Cyaw (MN/m/s)	0.15
무게중심고(m)	0.6		횡댐퍼 Cy (MN/m/s)	0.04	
차축 세트	중량 (ton, Mg)	1.9	공기스프링 설치 폭	1.6	
	롤 및 요 관성모멘트	1.2	요 댐퍼 설치 폭	2.874	
	무게중심고	0.43	Bump stop 설치높이	0.73	

차량 모델에서 범프 스톱, 건마찰 요소와 같은 비선형 요소를 선형화하여 Eigen value/ Eigen

표 5 차량의 고유진동수

No.	고유진동 모드	고유진동 수 [Hz]	감쇄비 [%]
1	차체 하부중심 ROLL	0.165	36
2	차체 YAW	0.504	36
3	차체 상부중심 ROLL	0.63	11
4	차체 BOUNCING(상하)	0.92	17
5	차체 PITCH	0.96	18
6	대차 YAW(대차 사행동)	2.3	22
7	대차 SHUNTING(전후)	5.8	51
8	전위대차 BOUNCING	7.9	15
9	후위대차 BOUNCING	8.0	13
10	전위 볼스터 LATERAL	9.5	52
11	후위 볼스터 LATERAL	9.8	57
12	대차후레임 PITCHING	10.0	4
13	대차후레임 LATERAL	12.0	32
14	대차후레임 ROLL	12.0	7

Vector 해석을 수행하였다. 속도를 변화시키며 해석을 수행하였는데, 대차와 차축 YAW(사행동) 만이 속도의 함수이고 나머지 고유진동 모드는 속도에 무관한 결과를 나타냈다. 아래의 표 5는 130 km/h, 유효담면구배 0.1 조건에서의 각 고유진동 모드에 대한 고유진동수와 감쇄비를 나타낸다.

그림 9는 조향장치를 부착한 경우와(좌측) 하지 않은 경우(우측)의 선형 고유치 해석에 의한 임계속도 예측결과이다. 등고선에서 보듯이 유효담면 구배 (conicity)가 증가함에 따라 임계속도가 급격히 저하됨을 알 수 있으며, 조향장치를 부착한 상태가 훨씬 더 안정하다는 것을 알 수 있다.

임계속도 예측 결과를 정리하면 표 6과 같다.

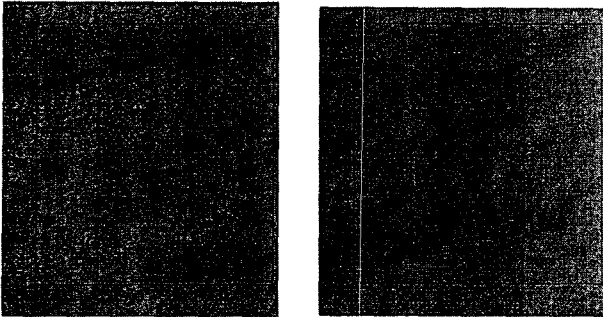
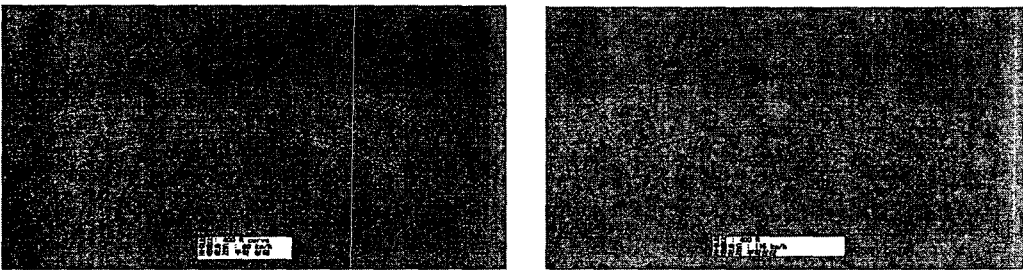


표 6 임계속도 예측 결과

유효답 면구배	조향장치 부착상태	조향장치 미부착상태
0.1	340 km/h	280 km/h
0.2	250 km/h	190 km/h
0.3	220 km/h	160 km/h

그림 9. conicity-속도별 감쇄비 등고선

곡선 궤도 주행 시 탈선에 대한 안전도 및 궤도에 부가되는 횡압을 예측하기 위해서는 궤도선형 및 궤도 틀림, 주행속도 조건이 필요하게 된다. 본 연구에서는 기존선의 많은 곡선 중에서 일차적으로 기본설계 차량의 성능 검증 측면에서 400 R 반경의 임의의 곡선 선형과 특정구간 궤도 틀림 데이터를 적용하였다. 궤도틀림이 없는 이상적 선형조건을 일반차량 조건인 90 km/h와 킬팅차량 조건인 116 km/h의 두 조건으로 궤도 횡압을 예측한 결과가 그림 10에 나타나 있다. 궤도틀림을 고려하고, 400 R 곡선의 116 km/h 주행조건으로 곡선 주행안전성의 척도인 탈선계수와 운중감소율을 예측한 결과가 그림 11과 그림 12에 나타나 있다.



90 km/h 주행조건

116 km/h 주행조건

그림 10. 곡선궤도 상 횡압 분포

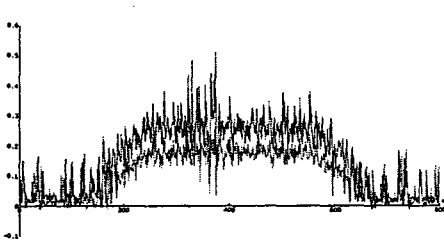


그림 11. 탈선계수

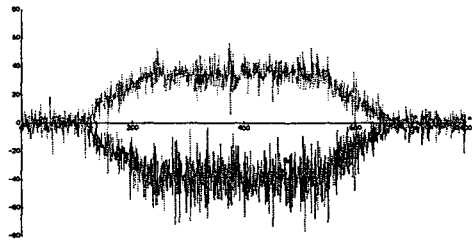


그림 12. 운중감소율

해석결과 기본설계된 킬팅차량은 일반차량보다 약 30% 향상된 곡선통과속도로 곡선을 주행하더라도 궤도에 부가되는 횡압이나 탈선계수, 운중감소율 등이 허용 기준 이내인 것으로 평가되었다. 그러나 대차 설계변수의 최적화를 통해 보다 개선할 여지는 남아있다고 볼 수 있으며, 기존선의 보다 다양한 궤도조건과 궤도오차를 감안한 해석이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

6. 결론 및 향후 연구계획

본 연구를 통해 180 km/h급 틸팅전기동차의 대차 기본설계에 대한 두 가지 설계(안)을 확보하였다. 틸팅 메카니즘을 성공적으로 대차 내에 구성하였고, 곡선부 횡압 저감을 위한 조향 장치 또한 성공적으로 대차에 부착할 수 있었다. 일차적인 동역학적 성능 해석을 통해 주행안정성, 곡선 추종성, 승차감 등의 목표성능을 만족시키는 것으로 평가되었으나, 향후 현가장치 변수 최적화를 통해 개선할 여지는 남아있다고 판단되었다. 주요 대차 구조물의 구조강도는 다소 부족한 것으로 평가되었으나, 향후 상세 설계 연구와 proto type 강도 및 피로시험을 통해 충분한 강도를 확보한 대차를 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 앞으로는 두 가지 기본설계(안)에 대한 동적성능 시뮬레이션 및 기술자문 평가를 통해 보다 우수한 기본설계 조합이 되도록 할 것이며, 아울러 주요 대차 설계 변수에 대한 최적화 과정을 통해 기본설계(안)을 보완 할 것이다. 이후에는 상세 설계와 Proto type 제작 및 시험이 수행될 예정이다.

참고문헌

1. 김남포, "틸팅차량 운행을 위한 기술·경제적 타당성 연구" 한국철도기술연구원, 2001
2. "대차 시스템 개발-철도기술개발사업 1차년도 보고서" 한국철도기술연구원, 2002. 3
3. 김남포, "곡선부 고속주행용 대차설계기술개발" 한국철도기술연구원, 2000. 12
4. "틸팅 시스템 실용기술개발-철도기술개발사업 2차년도 보고서", 한국철도기술연구원, 2003.7

후 기

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