

TTX차량의 동역학적 거동의 안정성 평가

Safety evaluation of dynamic behavior of Korean tilting train

윤지원* 김남포** 김영국** 김석원** 박태원***
Yoon, Jiwon Kim Nampo Kim, Youngguk Kim, Seog-Won Park, Taewon

ABSTRACT

The tilting train is able to tilt its body towards the center of the turning radius, preventing roll-over of the train as it runs on a curved rail at high-speed. This train, widely accepted for commercial purpose internationally is very beneficial in that the operating time is shortened without much capital investment to the infrastructure where there are many curved rails. Over several years, the Korea Railroad Research Institute(KRRI) has developed such a train. In this paper, the safety of the Korean tilting train express(TTX) is investigated using a dynamic simulation model. Since, proper safety standards have not been established for the TTX, those for the Korean train express(KTX) is employed instead to analyze the safety and ride comfort of the TTX. This study will prove useful in predicting the behavior of the TTX and ride comfort, and conforming that designed TTX measures up to the safety standards. It would be useful to recommend proper normal operating speed and determine the maximum safety speed, according to the result. Furthermore, it would be possible to provide basic reference data when analyzing the dynamic effect of the catenary system and the fatigue of the bogie.

1. 서론

틸팅 열차는 열차가 철로의 곡선부를 주행할 때 발생하는 궤도 이탈력을 억제하여 고속 주행이 가능하도록 차체를 곡선 안쪽으로 기울게 하는 기술이 적용된 열차를 말한다. 이 열차를 이용하면 곡선궤도가 많은 기존선에서 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 단축시킬 수 있어 국외에서 점차적으로 그 사용을 확대하고 있다. 한국 철도 기술 연구원에서도 이와 같은 장점을 가진 틸팅 열차 개발을 위해 몇 년간 연구를 하고 있다. 개념설계 단계에서 국내 철도 환경에 적합한 틸팅 메카니즘과 대차장치, 그리고 틸팅 제어 시스템의 개념설계를 시행하여 틸팅차량의 개발목표와 성능 요구조건들 제시되었다[1]. 선진국은 기존선로 속도향상에 많은 연구를 하고 있고 기존선에 틸팅 차량을 운행하는 방법으로 투자비를 적게 들이면서 속도를 향상시켜 경제적으로 효과가 있는 것으로 조사되었다. 이를 바탕으로 사양 및 성능 등 차량 시스템에 대한 연구가 수행되어져 틸팅 차량의 개념설계와 기초 사양이 제안되었다[2]. 현장 상세조사에 의한 곡선부 완화곡선 연신 여부가 검토되었고 개발 틸팅 차량의 특성과 연신 전후의 선형을 토대로 곡선부 제한 속도가 평가되었다. 이에 따라곡선부 제한속도를 기존 차량에 비하여 평균 40% 이상 향상시킬 수 있음이 확인되었다[3]. 기존선의 선형조건에 대해서 고속 틸팅 차량으로 인한 캔트향상과 편기량에 대한 정량적 분석 및 이를 바탕으로 한 기존선 곡선부에서의 최고 주행속도 산정, 속도향상 효과 또한 평가되었다[4]. 틸팅 기구를 구성하는 설계 변수의 변화는 동적 성능지수에 다른 영향을 주고 때로는 상반된 영향을 주고 있기 때문에 국내의 궤도환경, 운행조건, 차량 조건에 따

* 아주대학교, 기계공학과 대학원, 정회원

E-mail : kelvin71yo@hotmail.com

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

** 한국철도기술연구원

*** 아주대학교 기계공학부

라 적절한 선택이 요구됨을 확인하였다. 이것은 또한 기하학적 분석방법에 의해 해석되었다[5]. 돌풍에 의한 탈선 여부 판단[6]이나 틸팅대차프레임에 대한 구조강도해석[7] 또한 필요한 설계과정 중 하나이다. 곡선부 제한속도에 대한 평가 및 고찰[8]등은 철도의 승차감의 측정 및 평가법의 표준화[9]도 연구가 이루어지고 있다. 하지만 이러한 연구들은 아직 모델의 상세 모델링이 완벽히 이루어지기전에 이루어진 자료를 토대로 연구된 것이 대부분이고 그것 또한 간결한 모델과 수학적 수식을 이용한 이론적인 해석인 경우가 많았다. MCP 차량에 대한 틸팅차량의 곡선부 틸팅동작 시 운중감소율 변화에 대한 연구에서는 실제 동역학 모델을 작성하여 시뮬레이션하여 실제에 가장 근접한 모델과 비교를 하였다[10]. 이 논문에서는 어느 정도 모델의 규격화가 이루어진 시점에서 동역학 해석을 통한 정적상태 비교분석 통해서 1차 모델을 검증하고 그것을 통한 주행 해석으로 실제 차량의 주행 시험에 앞서 각종 예측 자료를 생성하였다.

2. 동역학 모델링

2.1 개요

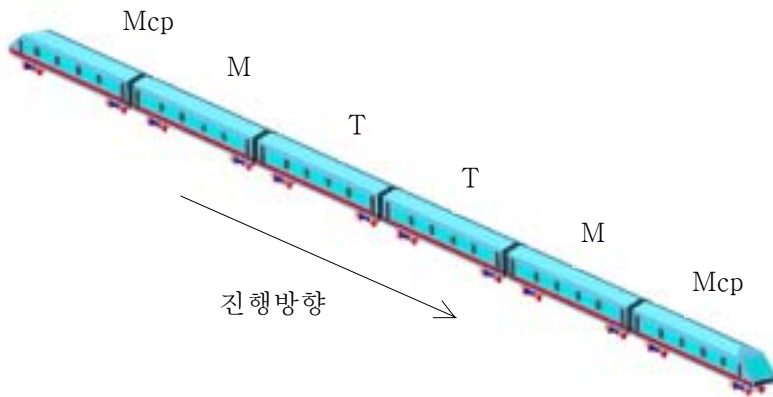


그림 1. ADAMS/Rail로 작성된 틸팅 차량의 6량 1편성 모습



그림2. 틸팅 방식

TTX차량은 최고 운행속도 180km/h로 6량 1편성의 전기동차 형식이다[10]. 곡선부에서 기존의 25%이상의 속도를 목표로 하며 안정적인 주행을 위해서 여러 가지 안정화 기술들이 설계되었다. 스티어링바를 이용한 자기 주향장치,안티롤바와 틸팅기구장치를 통한 차체 틸팅이 그것이다. 동역학모델은 그림 1에서 볼 수 있듯이 ADAMS/Rail을 이용하여 작성되었다. 차량은 모두 6개의 차체와 12개의 대차로 구성되어있다. 각 차량은 2개의 대차로 구성되어 있다. 모델링은 도면에 따라 가장 중요한 MCP차량의 앞쪽 대차를 기준으로 템플릿(Template)를 작성하고 그것을 기준으로 나머지 대차들에 대한 서브시스템(Subsystem)을 작성하여 각 대차별 값으로 입력하였다. 템플릿을 작성할 때 고정점(hard point)을 사용하여 모델링하였기 때문에 서브시스템에서 각 대차에 해당되는 고정점으로 이동하기 쉽고 그것을 사용하여 전체 차량구성도 용이하게 하였다.

레일은 기존선 중 하나인 충북선 오송공전구간 선로 일람 약도 42 km~ 49 km 선로를 이용하였다. 곡률 반경 400R, 500R, 600R, 900R이 모두 공존하는 구간으로 여러 가지 레일에 대한 완화곡선부, 캔트 정보를 이용하여 시험하기 좋은 구간을 택하였다. 선로 불규칙도는 실측 불규칙도를 적용하였고 그림 6에 표시하였다. 기존선의 곡률 정보, 구배 정보를 그대로 사용하면서 선로를 작성하였기 때문에 실제 차량과의 시험과 비교분석하기 용이할 것으로 보인다. 틸팅 차량 구성은 6량 틸팅 차량 Mcp-M-T-T-M-Mcp 순으로 구성되어 있다. 곡선 진입시에는 곡률반경에 대한 적정 완화곡선부를 먼저 통과후 곡선부를 진입하게 되고 차체의 틸팅은 2.3절에 설명하게 될 이상적인 알고리즘을 적용하였다.

2.2 대차 모델링

대차는 그림 3과 같이 모델링되었다.

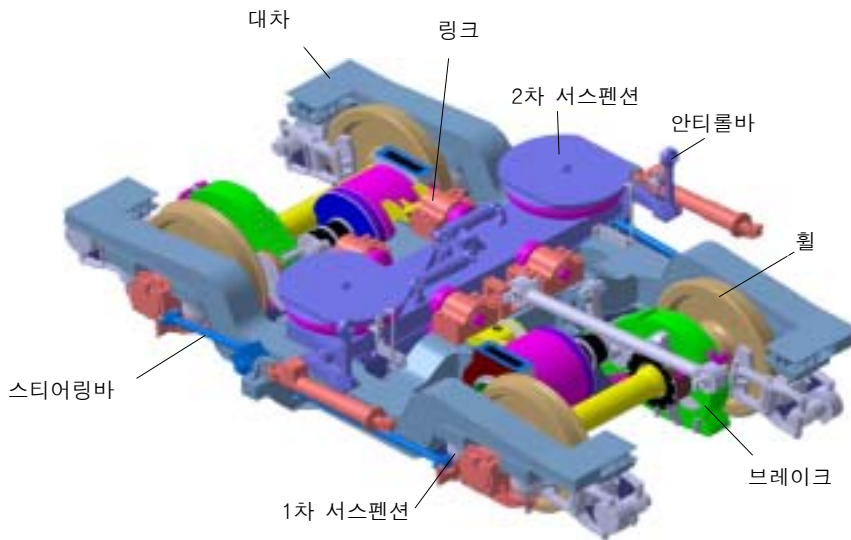


그림3. 구동대차(Mcp)

휠과 대차는 1차 서스펜션으로 연결되어 있고 틸팅 볼스타(bolster)와 대차는 링크로 연결되어 있다. 볼스타와 차량은 2차 서스펜션으로 연결되어 있다. 볼스타와 차량의 롤을 막기 위해서 안티롤바가 설치되어 있고 휠의 안정적 주행을 위해서 스티어링바가 설치되어 있다.

2.3. 차륜과 궤도의 모델링

차륜과 궤도의 모델링은 현재 제작되고 있는 틸팅 차량의 설계를 만족하는 단면형상을 갖도록 하였다. 이것을 이용하여 아래 그림 4와 5와 같이 차륜과 궤도의 모델링을 하였다. 차륜은 단면의 회전형상을 이용하고 궤도는 단면의 돌출형상을 이용하여 모델링하였다. 그림 4과 그림 5는 차륜과 궤도의 접촉 모델을 보여준다.

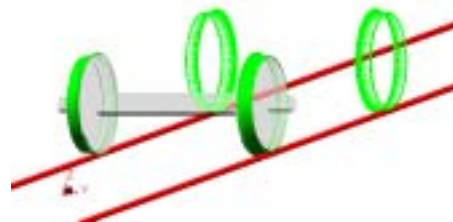
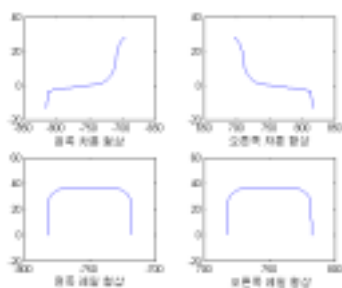


그림 4. 차륜과 궤도의 단면 형상 그림 5. 차륜과 궤도의 접촉 모델

2.4 곡선 궤도 모델링

본 연구에서는 실제로 측정된 궤도데이터로부터 얻은 불규칙도를 적용하여 모델링하였고 아래의 그림 6과 그림7은 수직방향과 횡방향의 불규칙도를 보여준다.

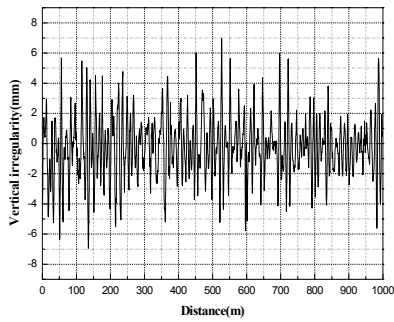


그림 6. 레일의 상하 불규칙도

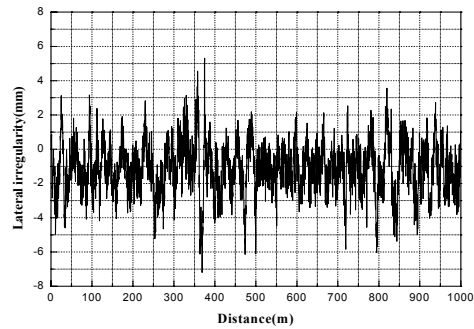


그림 7. 레일의 좌우 불규칙도

2.3. 틸팅 조건

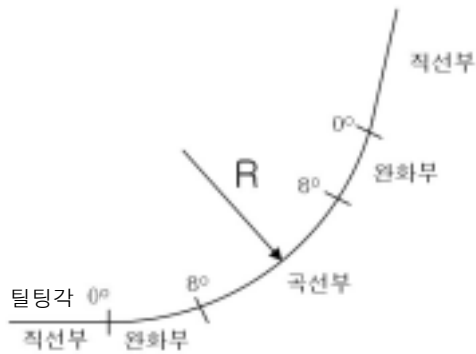


그림 8. 틸팅 알고리즘

표 1. 곡선부의 레일조건 조건

Curve Radius [m]	Length of transition curve [m]	Cant [mm]	operation speed	
			Non-tilting train	Target speed of Tilting train
300	75	100	70km/h	100km/h
400	80	110	85km/h	115km/h
600	90	110	105 km/h	140km/h
800	100	110	120 km/h	160km/h
1000	115	110	135 km/h	180km/h

틸팅은 그림8과 같은 궤도에 적용하였다. 표1은 레일의 곡률반경에 따른 완화곡분선부와 틸팅시 목표 속도를 선정한 것이다. 차체가 직선부에서는 기울이지 않은 상태를 유지하다가 완화부에 차체가 진입을 함과 동시에 완화부거리에 걸쳐 서서히 각도가 증가된다. 기존선 고속화 차량의 틸팅시스템 개념 설계 연구[12]에서 나타난 것처럼 곡선부에서는 최대 8도를 유지하도록 모델하였다. 최대 8도를 유지하기 위해서 기구학적 관계에 의해 액츄에이터 변위를 조절하였다. 원심력과, 중력, 기타 관성력에 의한 현가장치의 변위는 고려하지 않은 것으로 추후 실제 주행시험을 통해 조절할 것이다.

2.4 가속도 측정

가속도 측정은 다음 그림 9에서 표시된 바와 같이 대차의 가속도 측정 지점과 기울기 측정지점을 선정하였다.

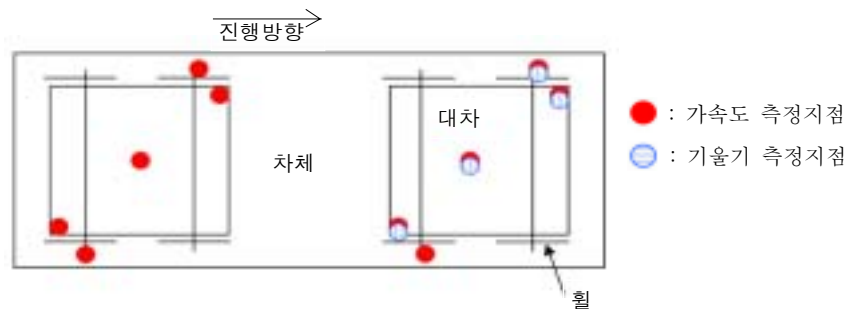


그림 9. 가속도, 기울기 측정점

3. 안전기준

틸팅차량의 해석결과를 효과하게 적용할 분야는 안전성에 대한 평가이다. UIC 518[11]을 기준으로 시운전 전 주행 목표 조건의 타당성 검증하고자 한다. 목표속도를 기존대비 25% 향상시 동역학 모델상 안전조건에 만족하는지 확인하려는 것이다. 다음 표 2는 UIC 518에 따른 안전기준을 나타낸 것이다. 실측값은 안전기준이하가 나와야 한다. 또한 윤중 변화율에 따른 탈선가능성에 대한 검토가 이루어졌다. 이것은 현재 시험단계에서 특별하게 정해져 있지 않은 안전기준에 대해서 하나의 기준을 잡고 평가하기 위해서 고속철도 KTX의 평가와 동일한 기준으로 틸팅열차를 평가하고자 하였다.

표2. UIC 518에 따른 안전기준 단위 : m/s^2

구분		평가항목	기준	비고	
주행 안정성	안정성 기준	대차 횡가속도	10.44	UIC 518	
		차체 횡가속도	3		
		차체 상하가속도	3		
	주행 거동 기준	차체 횡가속도	최대값		2.5
			RMS		0.5
		차체 상하가속도	최대값		2.5
RMS			0.75		
	차체 정상 횡가속도	1.5			

4. 정적 상태값 비교

먼저 시뮬레이션 모델과 실제 모델의 상호 비교를 통해서 실제와 비슷한 모델을 만들기 위해서 먼저 정적하중과 틸팅시 액츄에이터 변위에 따른 볼스타 틸팅각을 확인하였다. 정적 시험 결과 초기 길이 1050mm에서 1204.6mm로 그림 10의 스트로크를 증가시켰을 경우 0°에서 8.5°까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 11는 실제 시험과 시뮬레이션에서의 틸팅값을 비교한 것이다. 정적인 상태에서의 실험데이터는 모델과 정확히 일치하였다. 이 값들은 기구학적 관계에 의해 산출된 것으로 주행시뮬레이션에서는 원심력, 중력, 기타 관성력에 의한 현가장치의 변위를 고려해야하며 실제 주행시험을 통해 수정계수를 포함하여 실험되어야 할 것이다.

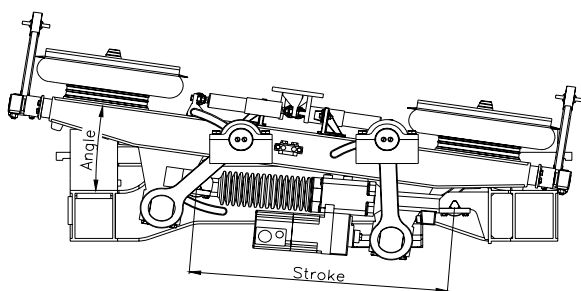


그림 10. 액츄에이터 푸쉬(push) 방향스트로크

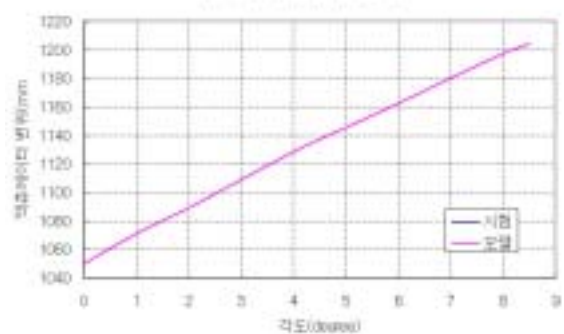


그림 11. 시험과 모델의 비교

다음으로 축중 하중의 비교를 하였다. 축중 하중은 차량의 안정성이나 동적거동에 영향을 주는 기본 인자로 휠의 접촉힘이나 하중배분에 의한 마찰력, 레일크립(creep)힘 등을 결정하는데 결정적인 값이다. 이것은 가속성, 제동성 해석에 있어 중요한 첫 번째 단계이다. 또한 이 값은 가속성, 등판능력, 최대 속력, 견인력에 영향을 미치게 된다. 이 값들은 각각의 휠에 따라 실제 시험 하중의 95%이내 수준으로 하중을 조절하였다. 표3은 실험에 의한 축중하중과 모델의 비교를 한 것이다.

표 3. Mcp 차량의 축하중 비교

단위 : ton

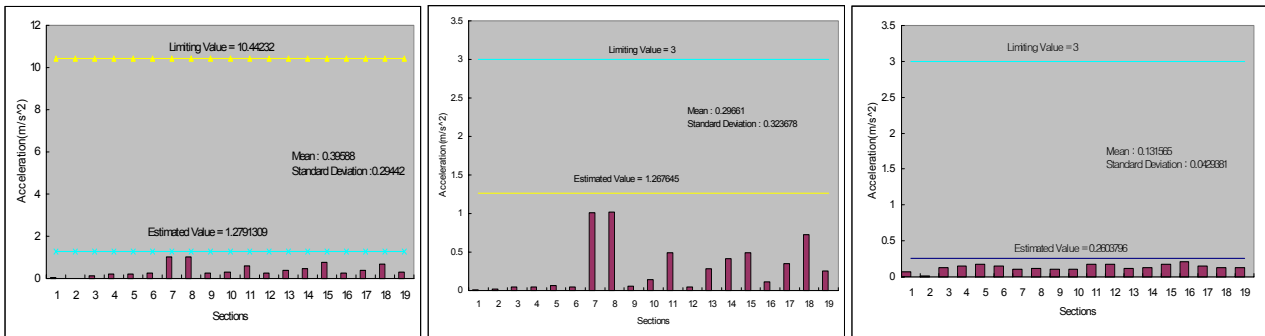
측위치	실험(A)	모델(B)	비율(B/A:%)
Right_Front	12.8	12.8	100
Left_Front	13.2	12.9	95
Right_Rear	14.6	14.161	97
Left_Rear	13.8	13.1	95

6. 주행 해석 결과

먼저 주행해석은 다음과 같은 목적을 가지고 시행하였다. 차량 거동과 승차감 정도를 예측하는 것이다. 해석을 기준으로 하여 UIC 518의 안전권고 기준과 비교하여 안정성과 승차감 정도를 예측하였다. 그리고 고속 선회시 안전 기준 부합하는지 판단하였다. 다음 표4와 같이 해석조건을 정의하였다. 이 해석 시나리오는 여러 곡선주로를 가지고 있는 기존선 구간에서 틸팅의 효과를 보기위한 것이다.

표 4. 해석 시나리오

	선로	속도	틸팅여부
Case 1	충북 오송 공전 구간	기존 속도	×
Case 2	충북 오송 공전 구간	향상 속도	×
Case 3	충북 오송 공전 구간	향상 속도	○



(1)대차 횡방향 가속도

(2)차체 횡방향 가속도

(3)차체 상하방향 가속도

그림 12. Case 1에 대한 분석도표

먼저 해석자료를 UIC 518의 권고 기준에 따라 구간별로 나누고 그것을 안전성과 주행거동기준에 따라 필터링을 하여서 원하는 자료만을 선택한다. 이것을 후처리를 거쳐 그림 12과 같이 구간별 가속도의 크기와 전체 구간에 대한 예상 가속도를 구할 수 있고 이것을 표 5와 같이 정리하였다.

표 5. 해석결과

단위 : m/s^2

항목		UIC기준		Case 1		Case 2		Case 3	
안전성	대차 횡 가속도	10.44232		1.2791		12.1964		4.1658	
	차체 횡 가속도	3.0		1.2676		5.2191		1.3719	
	차체 상하 가속도	3.0		0.2604		2.5698		0.8631	
주행거동	차체 횡 가속도	Max.	R.M.S.	Max.	R.M.S.	Max.	R.M.S.	Max.	R.M.S.
		2.5	0.5	0.65197	0.136233	4.3881	0.6465	1.9854	0.3976
	차체 상하 가속도	2.5	0.75	0.81432	0.176314	2.9321	0.4452	2.0134	0.4194

표5에서 볼 수 있듯이 UIC 기준에 적합한 것은 Case 1과 Case 3로서 기존선, 기존속도의 TTX차량은 문제없이 운행이 가능한 것을 보이며 Case 3 또한 Case 1에 비해서 불안정해지지만 운행이 가능한 것으로 보인다. Case 2는 틸팅을 하지 않았을 경우 탈선의 위험을 보인다. 향후 실험에 의한 모델 수정을 통해 좀더 신뢰성있는 동역학 모델을 생성하고 그것을 통한 여러 가지 시나리오해석을 통해 주행 안정

성, 동특성 분석이 이루어 질 것이다.

7. 결론

틸팅 열차는 열차가 철로의 곡선부를 주행할 때 발생하는 궤도 이탈력을 억제하여 고속 주행이 가능하도록 차체를 곡선 안쪽으로 기울게 하는 기술이 적용된 열차를 말한다. 이 열차를 이용하면 곡선궤도가 많은 기존선에서 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 단축시킬 수 있다. 이것의 시뮬레이션 모델을 통한 안정성 확인을 위하여 도면에 의한 정확한 모델 개발을 하였다. 이것은 ADAMS/Rail을 이용하여 한 개의 대차를 통하여 여러개의 대차를 손쉽게 생성할 수 있었다. 모델을 바탕으로 정적해석을 통하여 축중하중의 시험대비 95%정도를 맞추고 틸팅기구의 기구적인 동작의 유사성을 확인하였다. 이것을 통하여 실제 충북선 42km~49km의 선로를 주행하는 주행 시뮬레이션을 수행하였고 UIC 518의 안전기준에 비교하여 안정성을 확인하였다. 확인 결과 틸팅없이 기존선을 기존속도를 통과할 때 특이 이상 가속도를 발견하지 못하였다. 하지만 틸팅없이 기존선을 향상된 속도를 통과할 때 기준치 이상의 가속도가 발생하였고 전복의 가능성을 나타내었다. 틸팅을 포함한 기존선 고속주행시 기존속도에서 주행할 때보다 약간의 가속도 수치가 증가하는 것을 볼수 있으나 설계상 큰 문제는 발견하지 못하였다. 향후 스트로크의 구속관계에 의한 틸팅이 아닌 액추에이터의 힘에 의한 틸팅 구동과 좀더 세분화된 모델링, 이상적인 틸팅 알고리즘이 아닌 좀더 현실적인 알고리즘 도입 등으로 보다 보완된 모델을 만들어서 주행시험에 실제적인 도움이 될 것이다.

참고문헌

1. 김남포, 유원희, 최성규, “기존선 고속화 차량의 틸팅 시스템 개념 설계 연구”, 한국철도학회 2002년도 춘계학술대회논문집, 2002. 5, pp. 351 ~ 358
2. 유원희, 한성호, 김남포, 김길동, 박광복, “기존선 틸팅차량 시스템 설계에 관한 연구”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 2002년도 춘계학술대회논문집, 2002. 5, pp. 317 ~ 329
3. 엄주환, 엄기영, 여인호, 유영화, “기존선 완화곡선부의 승차감을 고려한 틸팅차량의 곡선부 제한속도 평가”, 한국철도학회, 한국철도학회지 제7권 제4호, 2004. 12, pp. 146 ~ 152
4. 유영화, 엄주환, 엄기영, “기존선의 선형조건을 고려한 틸팅차량의 허용속도 평가”, 한국철도학회, 한국철도학회지 제6권 제4호, 2003. 12, pp. 105 ~ 110
5. 구동희, 김남포, 한형석, “대차 틸팅 기구의 동적 해석”, 한국철도학회, 한국철도학회지 제6권 제4호, 2003. 12, pp. 159 ~ 166
6. 박찬경, 김영국, 최강윤, “동적거동 관점에서의 돌풍에 대한 고속전철 운행속도 영향 연구”, 대한기계학회, 대한기계학회 춘추학술대회 춘추학술대회 제1권 제2호, 2001. 11, pp. 495 ~ 500
7. 김정석, 김남포, 구동희, “차체 틸팅효과를 고려한 틸팅대차 해석적 강도평가”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 2004년도 춘계학술대회논문집, 2004. 6, pp. 66 ~ 69
8. 엄기영, 엄주환, 여인호, 유영화, “틸팅특성과 승차감을 고려한 틸팅열차의 곡선부 제한속도 평가”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 2004년도 춘계학술대회논문집, 2004. 6, pp. 1 ~ 6
9. 김영국, 최강윤, “철도차량의 승차감 평가방법에 대한 고찰”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 1998년도 추계학술대회논문집, 1998. 11, pp. 405 ~ 412
10. 김남포, 김정석, 오일근, “틸팅차량의 곡선부 틸팅동작 시 윤중감소율 변화에 대한 고찰”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 2004년도 추계학술대회논문집, 2004. 10, pp. 79 ~ 86]
11. UIC code 518 OR 2003, “Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior-Safety-Track fatigue-Ride quality”.
12. 김남포, 유원희, 최성규, “기존선 고속화 차량의 틸팅시스템 개념설계 연구”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 한국철도학회 2002년도 춘계학술대회논문집, 2002. 5, pp. 351 ~ 358