

# 틸팅차량의 견인 및 제동 상황시의 동적 특성에 관한 연구

## A study on dynamic behavior in tractive and braking states of tilting train.

박지연\*·정일호\*·이진형\*·박태원\*\*\*·김석원\*\*\*·김영국\*\*

J. Y. Park, I.H. Jung, J.H. Lee, T.W. Park, S.W. Kim, Y.G. Kim

**Key Words** : Tractive force(견인력), Regenerative braking force(회생제동력), Disk braking force(공기제동력)

### ABSTRACT

Tilting train improves a traveling velocity through giving a tilt the car-body without ride comfort deterioration in curve. Dynamic behavior in acceleration or deceleration will show quite another feature in constant velocity. In this study, we see through the dynamic behavior due to a variation of tractive force and braking force in Korean Tilting Train. Hence we compose of 3D dynamic model, as well as we check upon the property in service tractive condition and unique tractive condition with a fault motor. Besides we check upon the property in service braking condition and unique braking condition with a fault system. This study has the meaning with reference data of developing Korean Tilting Train test traveling.

### 1. 서론

국가물류 수송의 경쟁력 향상과 증가되는 교통 수요에 부응하기 위해 경부 고속철도의 건설 등 철도의 고속화와 수송량 증대에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있다. 그러나 최근의 경제 상황은 최적의 투자를 요구하고 있으며, 이러한 환경 속에서 철도의 특수한 고속화 기술인 틸팅 차량을 적용한 기존간선 전반의 속도 향상과 수송량 증대가 무엇보다 중요하게 부각되고 있다. 따라서 틸팅 차량의 도입 또는 개발에 대비하기 위해서 여러 가지 설계 기술들의 개발이 요구되고 있으며 특히 틸팅 차량의 동역학 해석 기술은 이러한 독자적인 설계 기술 개발의 중요한 요체가 될 것이다.

틸팅 철도차량은 곡선부 주행구간에서 차체를 경사시켜 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시킴으로써 곡선부의 주행속도를 향상시킬 수 있게 한 것으로서 차체의 자세제어에 의해 승차감의 큰 저하 없이 일반 차량보다 곡선부를 빠른 속도를 주행할 수 있어 곡선부가 많은 노선에서의 운행 시간 단축효과가 큰 장점이다. 이러한 틸팅 철도차량의 개발을 위해서는 틸팅 대차의 동특성 모델링을 통한 곡선부에서의 동역학적 특성 해석 및 안정성을 평가할 수 있는 연구가 매우 중요하다. 특히 차량 운행 구간에서의 가속 또는 감속시의 차량의 동적 특성은 정속 주행일 때와는 상이한 특성을 나타낼

것이므로 이러한 상황하에서의 동적 응답 특성에 대한 연구가 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 동역학 해석 프로그램인 DADS<sup>(1)</sup>를 이용하여 견인 및 제동력의 변화에 기인한 틸팅 차량의 거동에 대한 동특성을 살펴보았다. 연구의 진행을 위해 차량의 3 차원 모델을 구성하고 대차 및 틸팅 메커니즘 모델을 구성하여 틸팅 차량의 견인 및 제동 상황을 구현할 수 있는 전체 차량 모델을 구현하였다. 그리하여 견인 및 제동 상황의 시뮬레이션을 통하여 동적 거동 특성을 살펴보았다.

### 2. 견인 및 제동모델 개요

#### 2.1 틸팅 차량의 동역학 모델링

틸팅 차량의 동역학 모델링 기본 개요는 Fig. 1에서와 같다. 기본 몸체에 해당되는 차체, 틸팅 볼스타, 대차프레임, 저널박스, 윤축 등으로 구성되어 있으며 각 구성 몸체를 링크, 현가장치, 감쇠장치 등으로 연결하고 있다.

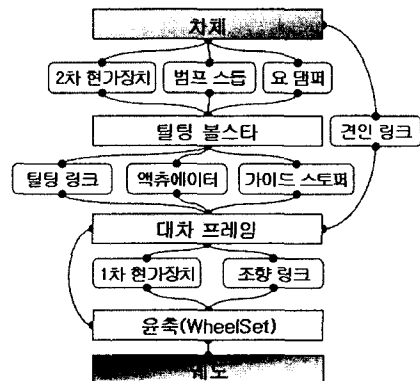


Fig. 1 Outline of tilting train modeling.

\* 아주대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : jeoney77@korea.com  
Tel : (031) 219-2952, Fax : (031) 219-1965

\*\*\* 아주대학교 기계공학과

\*\* 한국철도기술연구원

Table 1. Properties of tilting train model.

구분	항목	설정값
1차 현가장치	종방향 공기스프링 상수	2 MN/m
	횡방향 공기스프링 상수	2 MN/m
	수직방향 공기스프링 상수	0.8 MN/m
	감쇠기 감쇠 상수	0.03 MN/m/s
2차 현가장치	종방향 공기스프링 상수	0.1 MN/m
	횡방향 공기스프링 상수	0.1 MN/m
	수직방향 공기스프링 상수	0.4 MN/m
기타	안티롤 바	3 MN-m/rad
	요댐퍼 감쇠 상수	0.15 MN/m/s
	횡댐퍼 감쇠상수	0.04 MN/m/s

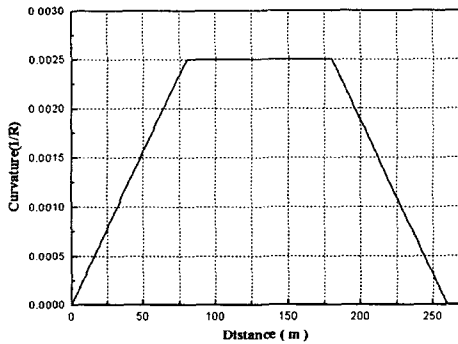


Fig. 2 Curvature in curve

Table 1.에서는 틸팅 열차의 몸체간의 현가장치 특성을 보여주고 있다. 1차 현가장치 및 2차 현가장치의 종방향 및 횡방향 감쇠 상수는 공기 스프링의 임계 감쇠값보다 낮은 값으로 산정하였다.

곡선주로의 선형조건은 Fig. 2 에서 보여지는 바와 같다. 곡선주로의 완화곡선장의 길이는 80m, 본곡선장의 길이는 100m, 본곡선 곡률 반경은 400R, 켄트는 100mm 로 모델링되었다. 직선주로와 곡선주로는 레일 불규칙도(Irregularity)는 부여되어 있지 않다.

## 2.2 견인 및 제동 모델 시나리오

틸팅 열차의 견인/제동 상황에서 동적 특성을 살펴보기 위해 실제 발생 가능성이 있는 여러 가지 상황을 재현하였다. 본 연구에서는 견인 상황과 제동상황으로 크게 구분하였으며 각각의 상황에 대한 세부 상황을 재현하고자 하였다. 견인력 선도와 제동력 선도를 토대로 차량 모델의 휠의 CG 점에 시간에 따라 변화하는 토크를 입력으로 각각의 상황을 재현 하였다.

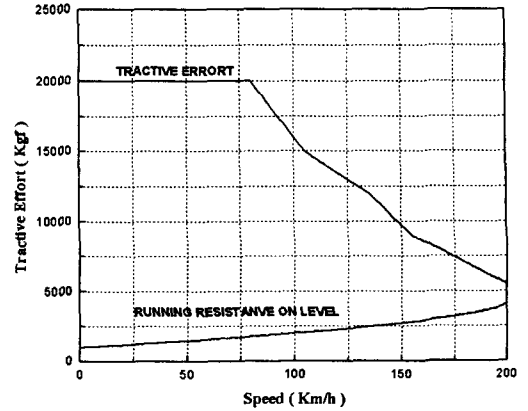


Fig. 3 Tractive force curve

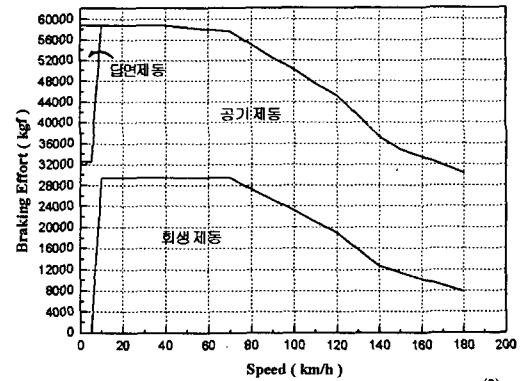


Fig. 4 Blending Curve for Service braking force<sup>(2)</sup>.

Fig. 3 에서는 견인 상황에서의 견인력과 주행저항 관련 그래프를 보여주고 있다. 차량의 속도가 80 km/h가 되었을 때 견인력은 감소하며 주행저항은 속도에 따라 증가하는 경향을 보여준다. Fig. 4 에서는 제동 상황에서의 회생제동력(Regenerative braking force)과 공기제동력(Disc braking force) 선도를 보여주고 있다. 차체의 속도가 최고속도로부터 감소하여 75 km/h가 되면 회생제동은 최대값을 가지며 5 km/h가 되면 0 값을 갖는다. 담면제동은 고속철도 제동선도를 참고한 값을 사용하였다<sup>(3)(6)</sup>.

Table. 2 는 견인 및 제동 모델의 시나리오를 구

Table. 2 Scenario of tractive and braking model.

	직선 선로	곡선 선로
견인 상황	① 정상 견인 토크 입력	⑤ 본 곡선 내에서 2 개 전동기 고장 시의 견인 토크 입력
	② 2 개 전동기 고장 시의 견인 토크 입력	
제동 상황	③ 정상 제동 토크 입력	⑥ 본 곡선 내에서 2 개 전동기 고장 시의 제동 토크 입력
	④ 2 개 전동기 고장 시의 제동 토크 입력	



Fig. 5 Formation of tilting train.

분하여 보여주고 있다. 시나리오 선정에 있어 구분된 항목으로는 틸팅 철도 차량이 주행하게 될 선로의 상황에 따라, 직선 선로와 곡선 선로로 구분하였다. 직선 선로와 곡선 선로, 견인 상황과 제동 상황을 각각 구분하여 총 6 가지의 시나리오를 선정하여 각 상황에서의 동적 거동 특성을 살펴보고 있다.

Fig. 5 에서는 틸팅 철도 차량의 편성에 대하여 나타내고 있다. 현재 개발중인 틸팅 철도 차량은 6 량 1 편성으로 되어 있으며, 이 중 견인 전동기는 Mcp 차체와 M2 차체에 각각 4 개씩 설치되어 있다. 따라서 총 16 개의 전동기가 구동되고 있는 것이다. 그러므로 Fig. 3, 4 에서 주어진 견인력과 회생제동력의 값을 16 으로 나누어 준 뒤 각각의 휠에 토크로 입력하여 주었다. 견인 상황에서 주행 저항은 실제 입력 견인력에 저감 효과를 끼치게 된다. 따라서 견인 상황에서의 견인력에서 주행 저항을 뺀 값을 최종 입력 토크로 사용하였다. 또한 제동 상황에서는 회생 제동, 디스크 제동, 담면 제동으로 제동력 배분이 이루어지며 이를 조합한 제동력이 사용되어야 한다.

### 3. 견인 및 제동 모델 해석 결과

#### 3.1 견인 모델의 해석 결과

견인 모델의 해석은 2.2 절에서 언급한 것과 같이 직선 선로와 곡선 선로 모델을 적용하였으며 고장 시의 상황도 재현하도록 하였다.

Fig. 5 에서는 견인 시의 정상 입력 토크와 고장 상황 시의 입력 토크선도를 보여주고 있다. 견인

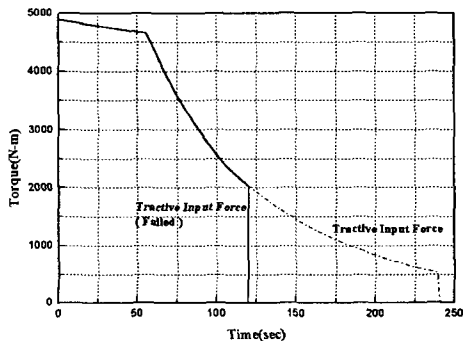


Fig. 5 Input tractive torque curve.

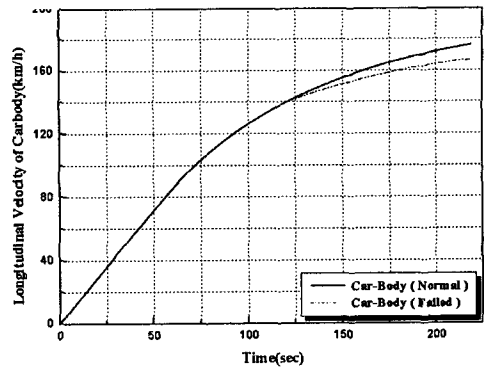


Fig. 6 Velocity of tractive model.

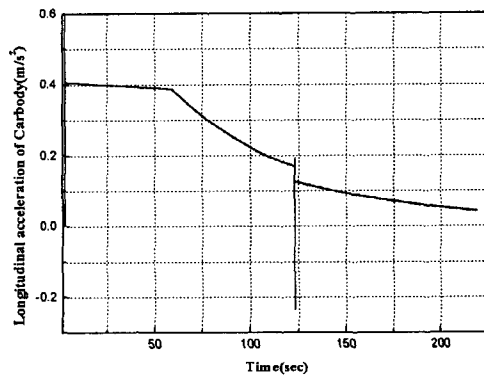


Fig. 7 Longitudinal acceleration of tractive model.

시의 고장 상황 재현을 위해 차량의 속도가  $130 \text{ km/h}$  가 되는 부근에서 선두부 M2 차체 후미 대차의 2 개 모터에 입력 토크를 끊어 주었다. 모터의 제어는 대차 단위로 이루어 지므로 2 개 모터의 고장 상황을 설정하였다. 이러한 상황 구현으로 인해 차량의 속도는 Fig. 6 에서와 같이 고장 상황 발생 후 차량 속도의 증가 폭이 변화함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 7 에서는 차체의 종방향 가속도 변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 2 개 모터 즉 1 개 대차의 견인 모터 고장 시, 종방향 가속도는  $0.04 \text{ m/s}^2$  의 감소를 보였으며 최고속도( $180 \text{ km/h}$ ) 도달 시간은 정상 견인 상황 시보다 89 초 지연되는 결과를 보였다.

Fig. 8 에서는 123 초 부근에서 발생한 1 개 대차의 고장으로 인한 차체의 수직 가속도 변화를 보여주고 있다. 고장이 발생한 M2 차체 뿐만 아니라 M2 차체와 연결되어있는 Mcp 차체와 T 차체에도 영향을 미치고 있다.

Fig. 9 에서는 곡선 선로 주행 시 고장 상황에 대한 차체의 횡방향 가속도 그래프이다. 본곡선장 내에서 선두부 M2 차체 후미 대차의 2 개 모터에 입력 토크를 끊어 주었다. 틸팅 철도 차량의 곡선

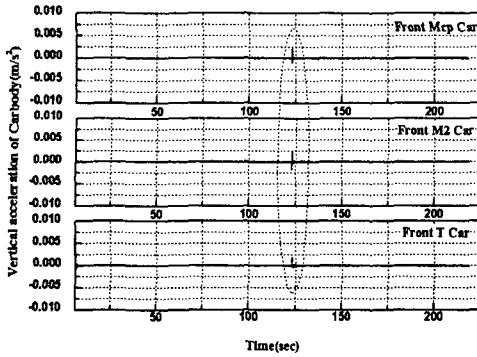


Fig. 8 Vertical acceleration of tractive model.

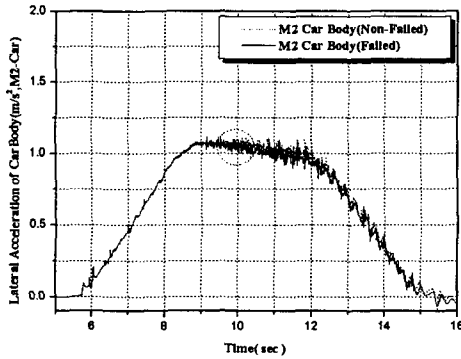


Fig. 9 Lateral acceleration of tractive model.

선로 주행 속도는 곡선 조건에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 400R 조건의 곡선 선로를 작성하였다. 정상 견인과 고장 상황시의 견인의 결과가 확인한 차이를 보이지는 않고 있다. 고장 발생 후 속도 저감으로 인하여 횡방향 가속도 값이 작아짐을 확인할 수 있다.

### 3.2 제동 모델의 해석 결과

틸팅 철도 차량의 제동 모델은 직선 선로와 곡선 선로에서 정상 제동 토크와 고장 상황 시의 제동 토크의 입력 시나리오를 적용하여 구현되었다.

직선 선로에서 정상 제동 상황시의 시뮬레이션은 최고 속도(180 km/h)에서 제동 토크를 입력하기 시작하여 완전히 정지할 때까지 수행되었다. Mcp 차체와 M2 차체에는 회생제동과 공기제동의 조합된 값이 입력되었으며, T 차체에는 공기제동 값만 입력되었다.

Fig. 10 에서는 정상 제동 토크와 고장 상황 시의 제동 토크 선도를 보여주고 있다. 1 점 쇄선은 정상 제동 시의 Mcp 차체와 M2 차체에 입력되는 제동 토크 값이며, 2 점 쇄선은 T 차체에 입력되는 제동 토크 값이다. 또한 실선은 차체의 속도가 130 km/h 에 이르렀을 때 고장이 발생하도록 하는 제동 토크 값이다.

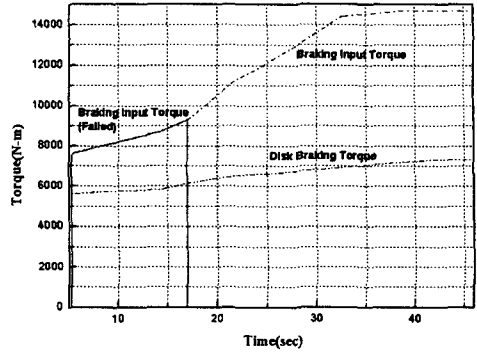


Fig. 10 Input braking torque curve.

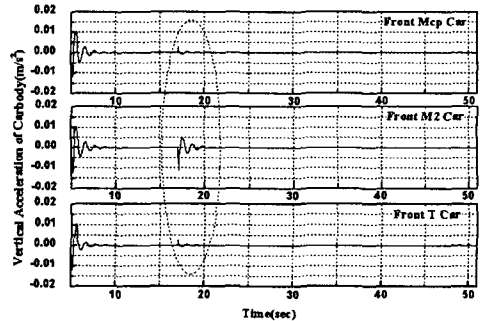


Fig. 11 Vertical acceleration of braking model.

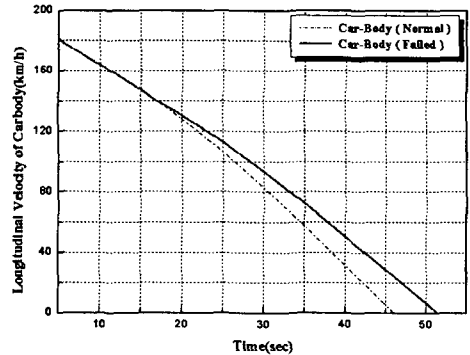


Fig. 12 Longitudinal acceleration of braking model.

Fig. 11 에서는 정상 제동 토크의 입력 시 차체의 수직방향 가속도 그래프이다. 제동 토크의 입력 초기에  $0.01 \text{ m/s}^2$  의 가속도 변위를 갖는 것을 확인할 수 있다. 정상 제동 상황 시의 최고 속도에서 제동을 시작하여 완전히 정지할 때까지 소요된 시간은 41 초이며, 총 제동 거리는 1130m 가 되었다.

Fig. 12 에서는 정상 제동 상황과 고장 상황 발생 시의 차체 속도 선도이다. 고장 상황 발생 시의 결과가 정상적인 제동 상황의 결과에 비해 제동 종료 시까지 5.1 초 가량 지연되었으며 제동 거리 또한 112 m 더 소요되었다.

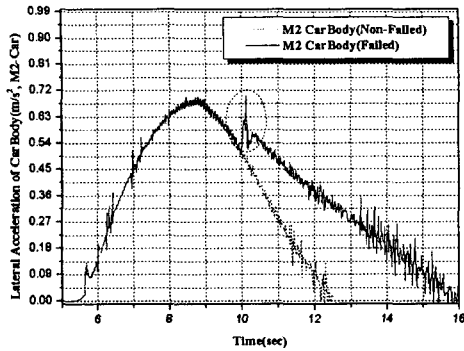


Fig. 13 Lateral acceleration of braking model.

Fig. 13에서는 틸팅 철도 차량의 400R 곡선 주로 주행에서 제동 상황 중 1개 대차 회생 제동 모터의 고장이 발생하는 시뮬레이션의 M2 차체에 서의 횡방향 가속도를 보여주고 있다. 완화 곡선 진입 전에 제동을 시작하여 본 곡선장 내에서 고장 발생 시의 결과이다. 10초 부근에서 가속도 최대값의 차이가 약  $0.27 m/s^2$  정도로 나타나고 있다. 견인 상황하에서 고장 시 결과보다는 명확한 차이를 보여주고 있다. 이는 입력토크의 변화값이 상대적으로 큰 값을 지니고 있기 때문이라고 판단된다.

#### 4. 결론

이상의 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 개발 중인 틸팅 철도 차량의 견인 및 제동력에 기인한 차량의 동적 거동 특성을 시뮬레이션을 통하여 추정하여 확인할 수 있었다.
- 2) 틸팅 철도 차량의 견인 모델에서 고장이 발생하는 견인 모델과 정상 견인 모델의 차이를 직선 선로와 곡선 선로에서 비교 평가할 수 있었다.
- 3) 틸팅 철도 차량의 제동 모델에서 회생 제동 모터의 고장으로 기인한 제동력 감소에 따른 차량의 특성과 인접 연결 차량의 특성에 대해 살펴볼 수 있었다.
- 4) 현재 틸팅 차량 시뮬레이션 모델의 정확한 구현을 위해서는 레일의 불규칙도에 대한 보완이 필요하며, 또한 개발 중인 틸팅 차량의 정확한 설계 및 물성 자료가 요구된다. 본 모델은 틸팅 차량의 시제 모델이 개발 완료된 후 시험 운행의 견인 및 제동 상황에 따른 차량의 평가에 유용하게 이용될 수 있다.

#### 후 기

본 내용은 한국철도기술연구원에서 시행하는 철도기술연구개발사업 기공선 속도향상 실용기술 개발의 결과임을 밝힌다.

#### 참고문헌

- (1) <http://www.lmsintl.com>.
- (2) 이남진 등, 2002, "동적 모델에 의한 고속전철의 제동력 시뮬레이션", 제어/자동화/시스템공학 논문지, Vol.8, No.1, pp.46~53.
- (3) 김석원 등, 2004, "시운전시험을 통한 고속철도 차량의 제동 특성에 관한 연구", 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp.212~217.
- (4) 김완두 등, 1944, "고속전철의 제동장치 기술개발" 대한기계학회지, Vol.34, No.6, p.446~453.
- (5) 백남옥 등, 2003, 철도기술총서.
- (6) ViJay K.Garg, 1984, Dynamics of Railway Vehicle System.