

CAE를 이용한 철도차량의 안전성 및 안정성 분석을 위한 동역학적 해석

이 글에서는 철도차량의 안정성과 안전성을 확보하기 위한 대표적인 이슈들과 관련 철도차량 모델의 필요한 요소들을 설명한다. 그에 따른 동역학적 거동분석을 위한 절차들과 분석기법들을 설명한다.

박태원 아주대학교 기계공학부, 교수

e-mail : park@ajou.ac.kr

현재 우리나라에서는 동력집중식인 한국형 고속열차(KTX-II)를 개발하여 실용화에 성공한 이후, 차세대 고속열차(HEMU-400x)를 개발하기 위한 연구가 2007년부터 진행되고 있다. 차세대 고속열차 개발 방향의 세계적인 추세는 축중을 적게 가져가는 방향으로 진행되고 있으며, 이에 따라 동력분산식을 채용함으로써 동력집중식보다 가감속 성능을 높게 할 수 있고, 동력축의 증가로 더 높은 출력을 사용할 수 있다. 또한 에너지적인 측면에서 동력축의 증가는 전기제동의 사용을 늘려, 회생제동력으로 사용할 수 있는 장점이 있다.

고속열차의 속도 향상은 출력을 늘리고 저항을 줄이는 두 방향으로의 기술개발이 필요하지만, 출력을 높인다 하더라도 점착력의 한계를 극복할 수는 없다. 또한 동력집중식은 동력축의 수가 적기 때문에 열차의 점착력을 늘리는 데 한계가 있다. 따라서 프랑스 및 독일에서 운행속도를 시속 350km 이상으로 기술개발을 하면서 동력분산식으로 방향을 선회하고 있는 실정이다. 이에 따라서 최근 개발되는 고속열차들이 차량경량화를 위해 전장품이나 기기들의

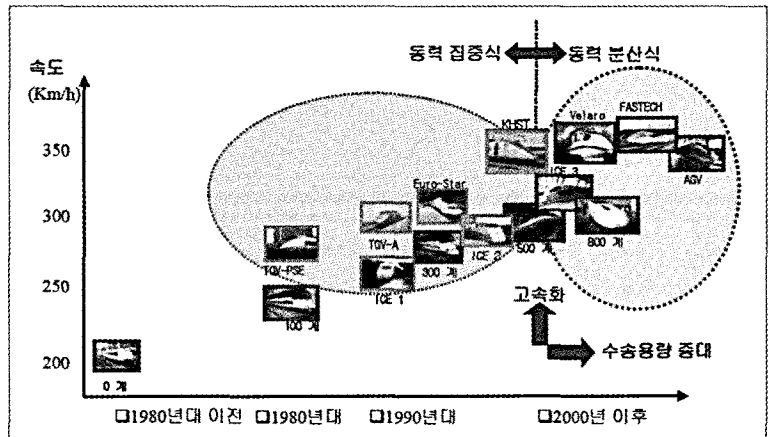


그림 1 고속열차의 발전 방향

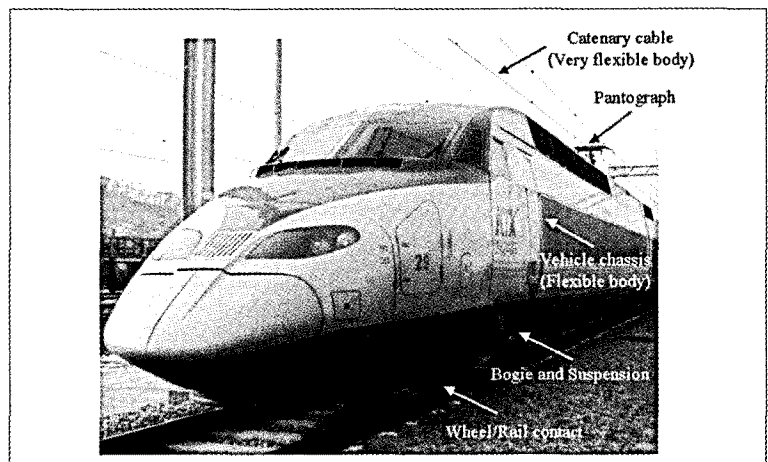


그림 2 KTX 차량의 일반적인 구조

소형화를 지속적으로 추진하고 있다.

근래 개발되는 철도차량은 대부분 비슷한 구조

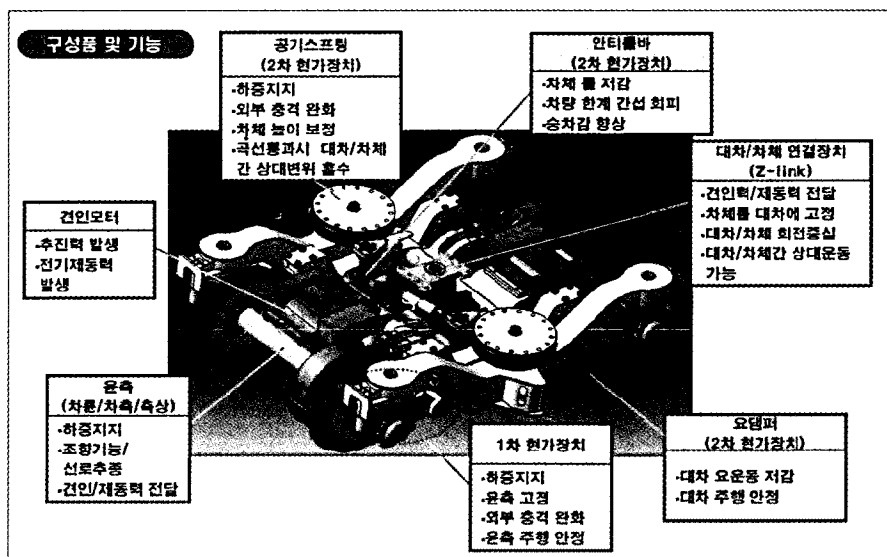


그림 3 철도차량의 대차시스템

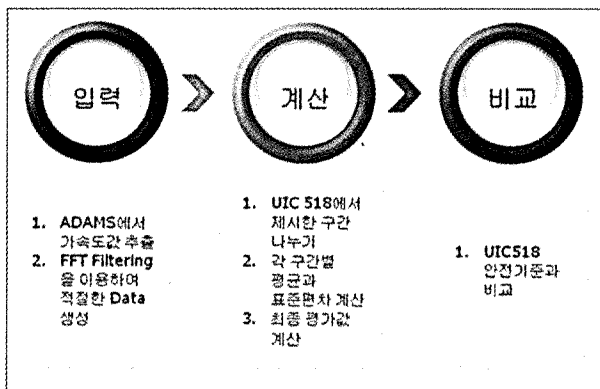


그림 4 UIC 518에 의한 측정 방법

를 취하고 있다. 개발 차량별 대차 구조나 성능, 차체의 물성 등은 다르겠지만 일반적으로 차륜과 1, 2차 서스펜션, 댐퍼, 구동장치 등을 포함한 대차, 차체 그리고 외부 전력과 연결을 위한 판토품으로 구성되어 있다. 초기 설계에서 동역학 해석은 차륜/레일 접촉을 이용하여 기초적인 동특성 분석을 진행한다. 그 중 대차 모델링은 동역학적 거동 분석에 가장 중요한 역할을 하는데 이는 차량이 직접 레일과 상호작용하는 부분이기 때문이다. 또한 대차는 윤축에 입력된 외부 가진을 1, 2차 현가장치를 통해서 차체에 전달하며 실제 차량의 견인과 감·가속이 일어나게 한다. 대차는 윤축과 지지 고정을 위한 축함(axlebox), 현가장치, 차체와의 연결을 위한 견인링크, 구동장치, 제동장치, 공기스프링, 댐퍼로 구성된다.

동역학 모델링을 위한 상용틀로는 DeltaRail

사의 Vampire, VI-grade 사의 VI/Rail, SIMPACK AG의 SIMPACK이 대표적이며 그 외에도 연구자의 목적에 따라 차륜레일 접촉프로그램을 개별적으로 개발하여 유연체효과를 고려한 레일을 개발하거나, 가선계의 거동을 위한 대변형체 해석을 진행한 사례들이 있다.

분산형 고속열차는 지하철 전동차와 유사하게 추진장치가 여러 차량에 분산 배치되어 있는 열차이다. 기존

의 KTX 객차와 비교해 볼 때 추진장치가 추가로 대차에 설치됨에 따라 기존의 선로조건에서의 운행을 위해 동하중을 최소화하고 에너지 소비율을 절감하기 위한 경량화 차량 개발이 필요하다. 이에 따라 KTX 차량이 현재 마일드 스틸 차체 프레임을 사용하고 있는데 비하여 차세대 고속열차에서는 알루미늄 합금 또는 복합재료 구조를 활용, 분산형 차량에 최적의 차체를 개발하여 차체 경량화와 함께 안전성, 안정성 및 내구성이 개선된 차량을 개발하고 있다.

이를 바탕으로 동역학 제어부문에서는 CAE를 이용한 동역학 해석 및 모델링 기법을 통해서 철도 차량의 동적 거동 특성을 분석하고 최고속도 400km/h에서도 국제기준에 따라 안정성과 안전성을 확보하는 것을 목표로 연구를 수행하고 있다.

그렇다면 왜 시뮬레이션이 필요한가? 차량 동역학은 안전하고 효율적인 차량운행에 있어서 아주 중요한 요소 중의 하나로 여겨져 왔다. 즉, 주행 시 접촉 피로, 차륜마모, 선로에의 충격 최소화 등 차륜과 레일의 상호작용에 직접적으로 관련이 있다. 이를 실제 차량을 이용해서 시험 및 개발 수정하는 것은 많은 비용과 시간이 필요하게 된다. 때문에 차량의 개발과정의 개발, 평가의 여러 단계에 있어서 철도차량 동역학의 해석적 검증이 필요하며, 또한 그 결과에 대해 신뢰성을 갖는 것은 중요하다.

동력집중식 고속철도차량인 KTX에서와 마찬가지로

가지로 동력분산식 고속철도차량인 HEMU-400X의 동특성 분석 및 평가를 위해 다음과 같은 여러 시뮬레이션 단계를 거친다.

- 개념설계 : 시뮬레이션을 통해서 여러 가지 시험차량을 만들어보고 운행조건에 따른 운동성능을 평가하여 개념적인 디자인을 만든다. 초기에 차량의 대략적인 성능을 규정짓는다.
- 상세설계 : 성능기준과 규제, 요구사항 등을 만족시키는 설계를 위해서 여러 요소들을 선택하고 동역학 모델링을 한다.
- 설계평가 및 반영 : 여러 가지 설계변수의 변화에 대한 동적 성능평가 및 구체적인 수치 등을 설계에 반영한다.
- 위험 분석 : 다양한 주행 시나리오를 통해서 상황별 주행 특성을 파악하고 위험을 분석한다. 예를 들어서 현가장치 고장에 따른 차량 동특성 변화분석이나 횡풍에 의한 차량 주행 안정성 평가 등이 그것이다.

CAE를 이용한 시뮬레이션은 여러 가지로 활용될 수 있다. 현재 운영 중인 차량이나 혹은 차량이 변경되거나 수리가 필요할 때의 동역학 문제를 해결하기 위해서 쓰일 수도 있고 차량의 감가속 능력을 극대화하면서 차륜의 마모를 최소화하기 위한 방안을 찾기 위해서 쓰일 수 있다. 차량의 안정성과 안전성뿐 아니라 탈선 방지에 대한 연구를 진행할 수 있다.

설계 단계별로 좀더 세부적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

초기 동역학 모델을 완성하면 그에 따라서 임계속도분석, 고유치 해석을 통해서 차량을 단순 질량, 스프링, 댐퍼 시스템으로 가정했을 때의 이론적인 주행가능 속도 즉, 임계속도와 고유 진동 주파수 등을 분석한다. 여기서 임계속도란 차륜과 레일의 형상에서 기인된 철도차량의 고유한 성질로서 주행속도가 임계속도에

표 1 UIC 518에 의한 평가기준 및 시험, 해석 결과

평가항목		안정성 기준	KTX시험시 (350km/h)	Prototype HEMU해석시 (440km/h)
안전성	대차 횡가속도	10.62 m/s ²	4.58	3.12
	차체 횡가속도	3 m/s ²	0.44	0.68
	차체 상하가속도	3 m/s ²	0.50	0.915
주행 안정성	차체 횡가속도	최대 2.5 m/s ²	0.53	-
		RMS 0.5 m/s ²	0.23	-
	차체 상하가속도	최대 2.5 m/s ²	0.67	-
	RMS 0.75 m/s ²	0.33	-	
	차체 정상상태 횡가속도	1.5 m/s ²	0.41	-

도달하게 되면 윤축은 횡방향으로 불안정하게 되어 진행방향으로 사행동(Snake Motion)을 시작하게 되고, 속도를 계속 증가시키면 사행동 진폭 또한 점차로 증가되어 결국 탈선하게 된다.

이를 바탕으로 스프링상수, 댐핑계수 등 각종 설계 인자들의 기본적인 수정을 완료하면 동역학 해석을 진행한다. 먼저 사용할 차륜과 레일의 프로파일 정보를 통해서 두 물체간의 구름 접촉힘 구현을 위한 접촉 정보를 생성하고 그에 따라 레일의 불규칙도를 부가하여 실제와 비슷한 선로 입력값을 생성한다. 레일은 직선구간, 천이구간, 곡선구간 등으로 이루어지며 캔트를 고려하여 선로를 모델링한다. 곡선상에서 열차가 주행할 때 원심력에 의한 차량의 전복을 막고 승차감을 향상시키기 위해 외측 레일을 내측레일보다 높게 부설하는데 이때 외측 레일과 내측 레일의 높이의 차이를 캔트라고 한다. 선로 모델링에 따라 적합한 주행속도가 주어지기 때문에 이에 상응하는 모델링이 필수적이다.

이를 통해서 감가속 시 및 고장발생 시 동특성 변화 검토가 가능하고, 견인 및 제동력 변화에 따른 동특성이 분석된다. 어느 정도 완성된 모델에 대해서는 단위부품 해석에 따른 모델의 성능 비교 또한 수행된다. 국제 기준으로는 UIC와 EN 기준이 대표적이다. 이 기준에는 여러 가지 세칙들이 존재하므로 관심 영역에 대한 정확한 지수 선택 및 적용이 중요하다. 예를 들어 UIC 518은 철도차량의 동적거동, 안전, 선로 피로, 승차감에 대한 시험과 인증에 관한 세칙이고 EN 12663은 철도차량의 구조적 요구조건에 관한 세칙이다. 실제 불규칙도를 입력한 선로에 대해서 동역학 해석 시

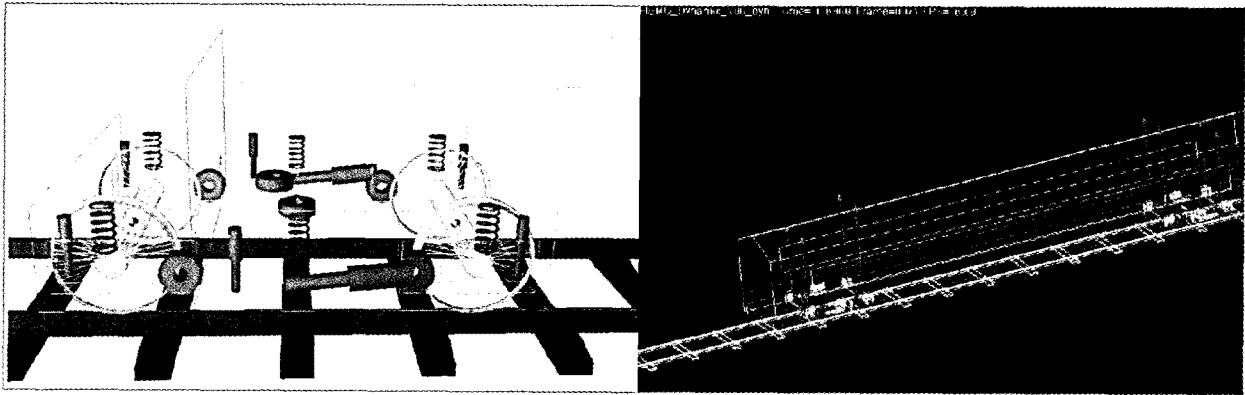


그림 5 상용프로그램을 이용한 철도차량 해석 I : Vampire(좌)와 VI/Rail(우)

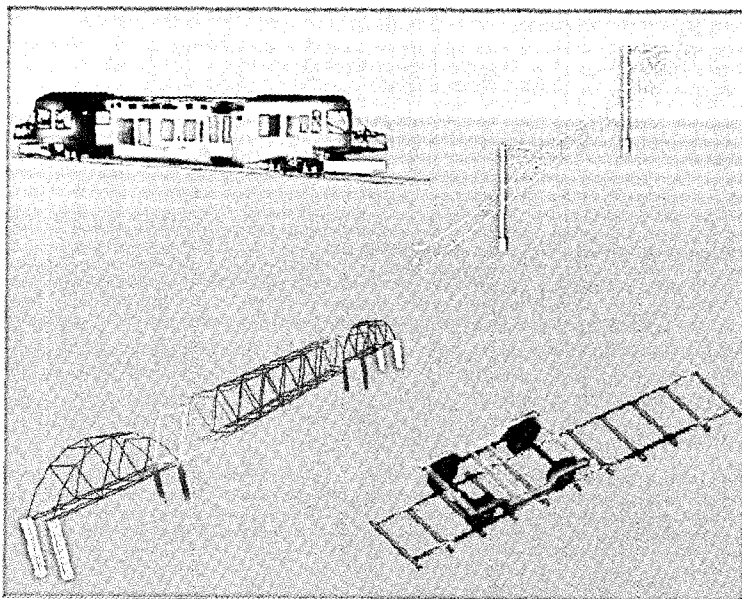


그림 6 상용프로그램을 이용한 철도 차량 해석 II : 왼쪽 위부터 시계방향으로 유연체 차체, 가선계, 유연체 레일, 교량에 의한 동역학적 거동 분석

따라 어떤 요소에 대한 연구진행에 대한 필요가 있을 때 진행하게 되고 그것에 따라 연구 방향도 정해지게 된다. 대차와 차체의 연결장치에 관한 해석이나 비선형 서스펜션 해석, 2차 서스펜션 공기스프링 모델이 바로 그 예이다. 선형 댐퍼를 비선형으로 교체해서 모델링하거나 반능동/능동 제어가 가능한 댐퍼 설계를 통해서 거동특성의 변화를 살펴보기도 한다. 모델에 대한 검증은 위해서 실차실험 자료와의 비교를 통하여 1량모델에서는 살펴볼 수 없었던 다량 모델의 통합시스템의 문제를 발견하고 그 문제를 해결하여 대차 내 부품 설계에 대한 보완 또한 이루어진다. 이를 통해서 국제기준을 만족하면서도 최고속도 400km/h를 만족하는 우수한 동특성을 지

닌 철도차량을 개발한다.

닌 철도차량을 개발한다.

UIC518 기준을 통해서 자료를 통계적으로 분석하고 이에 따라 안정성, 안전성을 파악하게 된다. 이로써 동역학적으로 일반적인 거동특성을 해석하고 이에 따라 차량의 안전성과 안정성을 판단하면 설계 목표에 따라 설계된 인자에 대한 최적화 설계를 진행한다. 안정성과 안전성을 극대화 하면서도 가격, 제조성의 제한조건 속에서도 스프링상수와 댐퍼계수, 하드포인트 위치 등의 최적조합을 찾는다. 이로써 기초설계를 마무리하게 된다.

최근에는 컴퓨터를 이용한 대용량 계산 기술이 급속하게 발전하고 있기 때문에 철도차량의 교량이나 역사, 지상구조물 등과 같은 대형 구조물에서도 주어진 설계조건(응력, 변위치수, 내구성, 안정성, 시공성, 기능, 미관 등)을 모두 만족하면서 제조 경비를 최소화하는 최적설계에 대한 연구들이 진행 중이다. 특히 철도차량의 안전성은 인명피해와 직접 관련이 있기 때문에 설계 시 가장 중요한 요소가 되며, 승객들의 수송수단에 대한 눈높이 향상으로 소음/진동 또한 중요한 설계변수가 되고 있다.

상세설계에서는 차량과 대차 내 거시적 거동보다는 세부적인 요소 모델링을 진행한다. 이는 특별하게 어떤 연구 주제가 정해져 있다기보다는 차량의 특성에