

# 차세대 고속철도 시스템해석을 위한 동역학 솔버 플랫폼 개발

## Development of a Dynamic Solver Platform for the Next Generation Railway Vehicle

윤지원\*\* 박태원\* 정성필\*\* 박성문\*\* 김영국\*\*\* 김영모\*\*\*

Yoon, Ji-Won Park, Tae-Won Jung, Sung-Pil Park, Sung-Moon Kim, Young-Guk Kim, Young-Mo

---

### ABSTRACT

When developing railway vehicle system, investigation of the dynamical stability is essential as a virtual prototyping process. Not only the verification using the commercial analysis tools, systematic analysis using customized tools is also necessary, because these can give other points of view in stability, which is sometimes unable to evaluate in the former one. As a solver platform for customization, it is important to derive basic theory about flexible bodies and build flexible structure, which enables easy module insertion of user-created functions. In the paper, a flexible dynamic analysis system is developed, using absolute cartesian coordinate, modal coordinate and absolute nodal coordinate. Each coordinate system is verified by respective examples for every system. This solver system will play an important role for building the basic platform for analysis system, keeping pace with the concurrent development of the modules, such as wheel-contact force, constraints and user-defined force modules. Using the information from the analysis, the evaluation of the dynamic behavior of the train and its stability analysis will be available.

---

### 1. 서 론

한국형 고속열차는 국내에서는 최초로 최고속도인 352.4km/h를 달성하고, 15만km 시험주행을 실시하고 있다. 이에 따라 다수의 원천 기술도 같이 확보된 상황이다. 이를 더욱 발전시키고 국가 철도 경쟁력 향상을 위해서 차세대 고속철도 기술의 개발과 확보가 필요하다 [1]. 이를 위해 현재 동력분산식 차량 기술을 가진 열차에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 동력분산식 차량의 개발을 위하여는 추진장치의 경량화와 소형화가 필요하고 소음과 진동을 최소화하기 위한 기술개발 등도 필요하다. 이를 위해 개발된 차량의 시스템 성능을 예측하고 그 안정성과 주행특성을 확인하는 차원에서 이는 프로토타입 제작에 앞서 종합적인 거동 분석을 하는 것이 필요하다. 또한 철도차량의 동역학적 주행안정성과 안전성, 승차감 해석은 객차 내 안전을 위한 것 뿐 아니라 쾌적한 주행조건을 위해서도 필수적인 것이다. 일반적으로 상용툴을 이용한 차량 해석 검증은 가장 일반적인 경우에 대해서 해석 가능한 경우가 많다. 하지만 상용툴에서 해석하기 어려운 시스템의 종합적인 거동해석을 위해서는 여전히 새로운 동역학 솔버 개발이 필요하다. 이를 위해서 기본적인 유연체 해석과 추후 여러 모듈 삽입이 가능한 솔버의 플랫폼 개발은 중요하다. 따라서 이 논문에서는 판도, 차체 등의 철도차량을 구성하는 전체 시스템 해석을 위해서 기존의 강체 해석을 위한 직각좌표계와 더불어 모달 좌표계와 절대절점좌표계를 도입하여 차량파트의 각 시스템에 적용될 수 있도록 기초예제 해석을 수행하였다. 이는 향후

---

\* 아주대학교, 기계공학부, 회원

E-mail : park@ajou.ac.kr

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

\*\* 아주대학교, 기계공학과

\*\*\* 한국철도기술연구원

휠-레일 접촉힘 개발과 더불어 철도차량 해석을 위한 여러 가지 모듈의 기본 플랫폼이 될 것이다. 이것을 통해 철도 차량의 동역학적 거동분석과 차량의 안정성 해석 또한 가능할 것이다.

## 2. 해석시스템 구성

### 2.1 철도 차량의 일반적 구성 및 해석

철도차량은 선로인 레일 위를 운행하도록 만들어졌기 때문에, 차량의 종류가 달라도 그 기본구조는 모두 같으며 차륜부 · 차대부 · 차체부 및 부속장치로 되어 있다. 차륜부의 차륜은 특수강으로 되어 있으며 하나의 축에 고정되는데 이 고정차륜이 두 쌍 또는 세 쌍이 모여서 하나의 차륜대차를 이룬다. 보통 차량은 1량에 2대의 대차가 있으며 각 대차는 가운데에서 차대부와 1개의 핀으로 결합되어 회전성을 유지하고 있다. 차륜은 차량에서 기본적인면서도 중요한 부분으로 안전운행과 속도에 결정적 역할을 한다. 또한 레일과 역학적 관계로 탈선을 방지할 수 있는 구조로 되어 있다. 주행 성능 해석 및 관련 기술에 대해서는 전체 시스템 해석을 위해서 국제 철도 안정성 기준인 UIC 518을 통해서 주행 안정성, 안전성, 주행거동에 대해서 좌우, 상하 진동을 점검하고 통계 후처리 값이 기준에 부합하는 지 확인하는 작업을 한다. 또한 선형해석을 통한 차량 진동 모드에 따른 공진 여부 확인, 임계 속도 해석을 통해 최대 주행 가능 속도 계산도 가능하다. 세부적으로 차륜의 피로현상, 마모, 판토틀레프 운동성 파악 등이 있다.

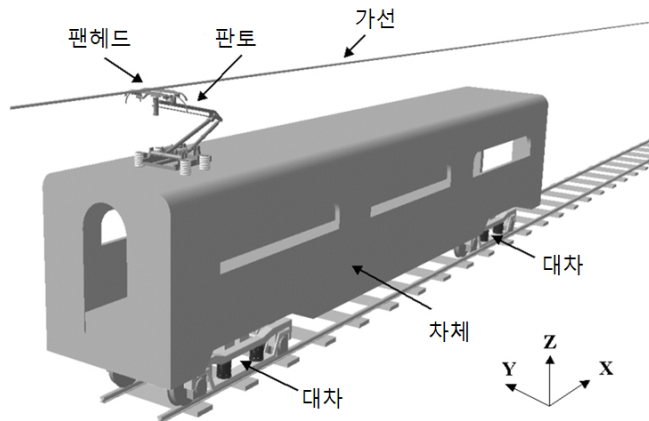


그림 1. 일반적인 철도차량 구성

### 2.2 철도차량 해석 플랫폼을 위한 좌표계 시스템 선택

철도차량 개발을 위해서는 철도차량의 동역학적 주행안정성 해석은 중요하다. 이를 위해서는 각 파트를 잘 표현해 줄 수 있는 최적의 좌표계 시스템을 선택하는 것이 필요하다. 예를 들어 가장 간단하게 판토틀레프와 가선을 제외한 전체 차량은 강체로 표현할 수 있다. 이것은 이미 오래전부터 해석되어져온 방법이다. 하지만 차체와 대차의 유연체 효과가 주행거동에 어떤 영향을 미치는지 보기 위해서 일반적 모달 좌표계가 사용되어져 왔다. 이는 유한요소법을 이용하여 모델의 모달 정보를 이용하여 물체의 작은 변형에 대한 유연체 효과를 확인할 수 있다. 하지만 이 역시도 가선계를 표현할 수 있는 것은 아니다. 이에 가선계를 표현하기 위해 대변형을 표현할 수 있는 절대 절점 좌표계를 도입하였다. 이렇듯 각각의 시스템에 걸맞는 동특성 분석을 위해서는 각기 다른 좌표계 시스템의 적절한 선택, 그리고 그에 따른 모델링이 필요하다 [2].

### 2.3 해석시스템의 구성

동역학 해석 시스템은 다음과 같이 구성하였다. 객체지향언어인 C++를 이용하여 유연한 구조를 가지는 프로그램 구조를 생성하였다. 또한 모듈의 삽입이 쉽고, 쉽게 다른 모듈을 개발할 수 있는 프로그램을 만들었다. 더불어 동역학 해석에 필요한 여러 가지 좌표계를 혼용한 동역학 해석 시스템을 개발함으로써 향후 다양한 분야의 시스템을 설계하고 해석하여 거동을 예측하거나 최적화를 하기 위한 시스템의 기초를 만들었다. 그림 2는 동역학 해석을 하기 위한 순서도를 나타낸다.

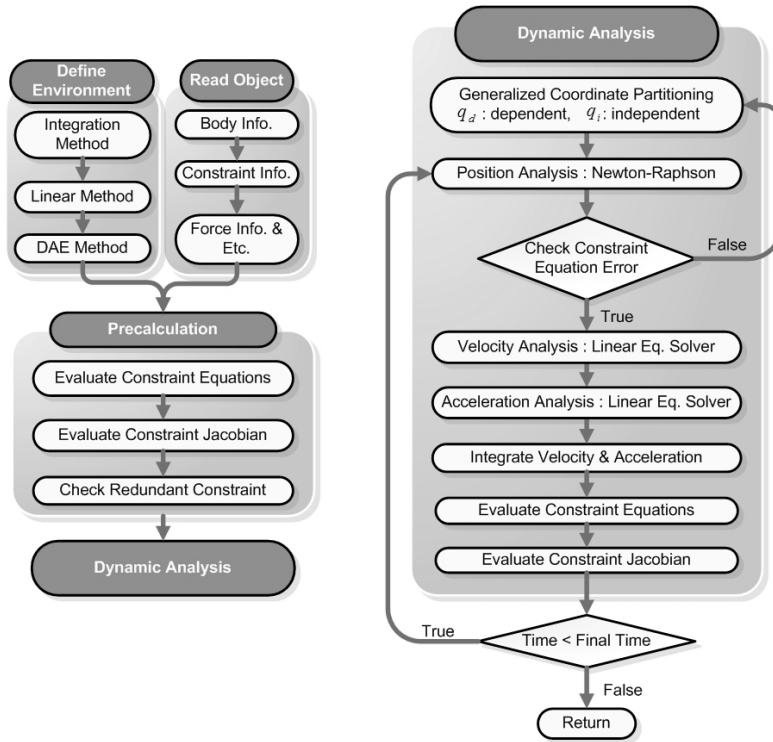


그림 2. 동역학 해석 순서

## 3. 해석 시스템 구성

### 3.1 모달 좌표계 (Modal coordinate system)

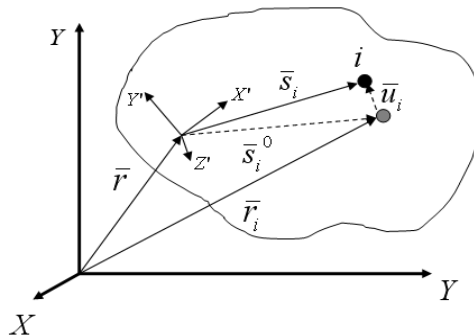


그림 3. 모달좌표계를 이용한 변위표현

3차원 공간에서 운동하는 유연체 내부의 임의의 점  $i$ 는 식(1)과 같이 표현된다 [3].

$$\bar{r} = \bar{r} + A \bar{S}' = \bar{r} + A(\bar{S}^0 + \bar{u}') \quad (1)$$

여기서  $A$  는 좌표계 변환행렬(Transpose matrix),  $\bar{S}_i^0$ 는 변형전의 위치벡터,  $\bar{u}_i$ 는 변형에 의한 점  $i$ 의 병진노드 변위이다. 점  $i$ 에 대응하는 병진 및 회전 자유도의 변형 모달 행렬은 다음과 같이 표시한다.

$$\psi^i = [\psi_t^{iT} \quad \psi_r^{iT}] \quad (2)$$

모달행렬을 이용한 병진 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i^i = \psi_t^{i'} \bar{a} \quad (3)$$

여기서  $\bar{a}$ 는 모달 위치 벡터이다. 식(1)을 식(3)을 이용하여 다시 쓰면 식(4)와 같다.

$$\bar{r}_i = \bar{r} + A(\bar{S}_i^0 + \psi_t^{i'} \bar{a}) \quad (4)$$

### 3.2 절대절점좌표계 (Absolute nodal coordinate system)

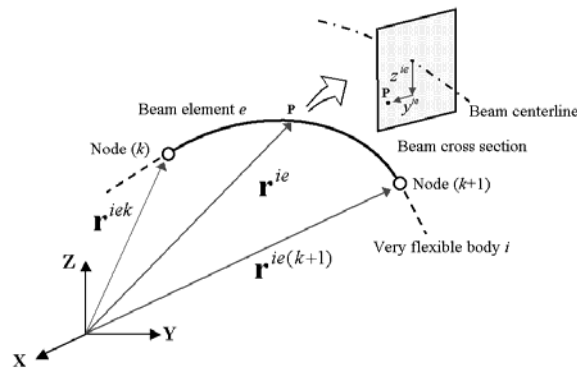


그림 4. 절점좌표계를 이용한 변위표현

빔요소 내의 임의의 위치에 대한 전역변위벡터는 요소의 형상함수와 절대절점좌표를 이용하여 식과 같이 쓸 수 있다 [4].

$$r^{ie} = S^{ie}(x^{ie}, y^{ie}, z^{ie})e^{ie}(t) \quad (5)$$

여기서,  $S^{ie}$ 는 빔 요소의 강체모드 (Rigid Body Modes)까지 표현이 가능한 전역형상함수(Global Shape Function)이고,  $e^{ie}$ 는 빔 요소  $e$ 를 정의하기 위한 절대절점좌표이다.

## 4. 수치해석

### 4.1 직각좌표계 (Absolute cartesian coordinate system)

강체운동의 해석을 위해서 그림 4와 같은 거버너회전체를 선택하여 모델하였다. 5개의 강체로 구성되어 있는 거버너모델이다. 지면과 회전축이 되는 스피들(Spindle), 실제 회전체가 되는 암1(Arm1), 암2(Arm2), 거리구속인 Dist1, Dist2에 구속된 슬라이더로 이루어져 있다. 총 2자유도 시스템에 대한 동역학 해석을 하였다. 그림5는 암의 상하위치를 나타낸 것이다. 상용툴인 ADAMS의 결과와 개발된 해석 프로그램의 결과는 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

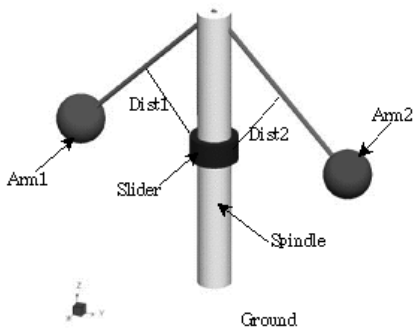


그림 5. 거버너 모델

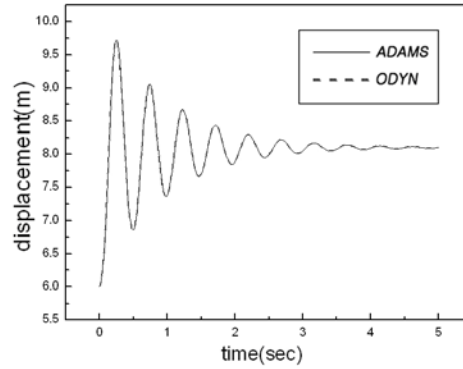


그림 6 결과 정리

#### 4.2 모달 좌표계 (Modal coordinate system)

보의 양쪽이 모두 상하구속된 핀-핀 지지보에 대해서 해석을 수행하였다. 보의 물성치는 표 1 과 같다. 보의 가운데 지점에  $100\sin(20t)$ 의 힘을 줬을 때 그 처짐량을 확인할 수 있다. 그림 7에서 확인해 볼 수 있듯이 유연체에서 노말모드만 사용해도 ADAMS와 아주 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

표 1 빔의 물성치

Mass density	$\rho$	$kg/m^3$	7700
Young's Modulus	E	$kgf/m^2$	207e9
Length	L	m	2
Area	A	$m^2$	0.1x0.01

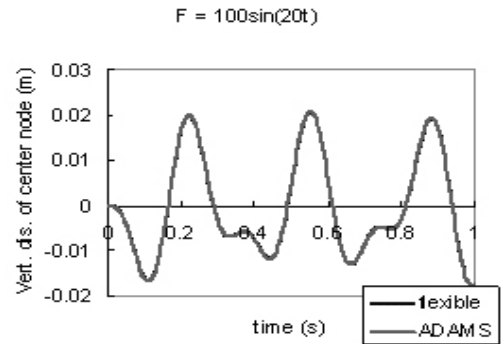


그림 7 결과 정리

#### 4.3 절대절점좌표계 (Absolute nodal coordinate system)

외팔보 모델의 빔의 물성은 표2와 같이 하였다. 그리고 빔을 3개의 요소로 나눠주고 끝단에 0.1kg원형볼을 달았다. Nastran time transient 해석과 절대절점 좌표계의 해석이 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 빔의 물성치와 크기

Mass density	$\rho$	$kg/m^3$	4200
Young's Modulus	E	$kgf/m^2$	207e6
Length	L	m	0.3
Area	A	$m^2$	0.02x0.02
Ball	M	Kg	0.1
	$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$	$Kg/m^3$	0.001

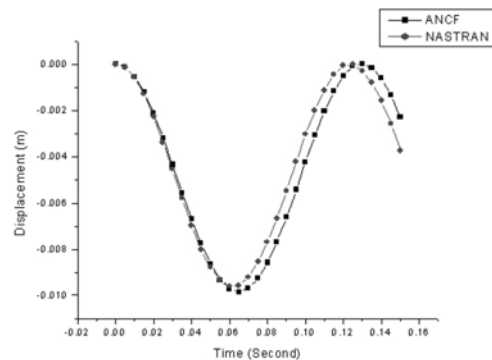


그림 8 결과 정리

## 5. 결론

본 연구에서는 차세대 고속철도 개발 주행성능 해석과 관련하여 동역학해석시 철도차량 각 시스템에 알맞은 좌표계 선택을 통해서 유연체 해석과 대변형 해석의 세계적인 연구동향을 파악하였다. 그리고 그에 따라 동역학 해석기를 개발하였다. 먼저 강체 동역학 해석기를 객체지향 프로그래밍 기법에 따라 작성하였다. 객체지향 프로그래밍 기법을 위해 사용한 프로그래밍 언어는 C++이다. 그리고 유연체 해석에 관련된 이론을 정리하여 모달 좌표계를 이용한 해석기를 개발하였다. 또한 대변형 해석에 관련된 이론을 정리하여 노달좌표계를 이용한 해석기를 개발하였다. 이것을 통해서 상용프로그램에서 지원하는 프로그램에서는 찾기 어려운 세부정보와 질량 행렬, 강성 행렬 등을 자유롭게 조직하고 변경가능하다. 또한 새로운 모듈의 추가도 쉬운 프로그램구조를 작성하였다. 개발된 3가지 좌표계 시스템에 의해서 사용자가 원하는 시스템의 성격에 따라 강체, 유연체, 대변형체를 모델링할 수 있으며 그것에 따른 결과도 상용프로그램을 이용하여 검증하였다. 추후 좌표계간 구속조건 개발, 힘요소 개발 및 해석기 효율 향상을 통해서 보다 통합적인 해석이 가능한 해석기 개발이 가능할 것이다. 이는 상용프로그램에서 구현하기 힘든 철도 시스템의 판도와 가선, 휠-레일 접촉시스템을 통합 해석할 때 유용하게 이용할 수 있는 기초 해석 플랫폼으로 역할을 할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김기환, 박찬경, 김석원 저 (2006), “차세대 고속철도기술개발사업 추진방향” , 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 7~12
2. Ahmed A. Shabana (1997), "Flexible Multibody Dynamics: Review of Past and Recent Developments", *Multibody System Dynamics*, Volume 1, Number 2
3. W.S.Yoo, E.J.Haug, ‘Dynamics of Articulated Structures. Part 1. Theory’, *J.Struct.Mech.*, 14(1), pp.105~126, 1986.
4. Ahmed. A. Shabana, 1998, " Computer implementation of the absolute nodal coordinate formulation for flexible multibody dynamics", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 16, pp.293~306