

# 철도차량 해석을 위한 동역학 해석 프로그램 개발 및 휠-레일 접촉 모듈 적용 Development of a Dynamic Simulation Program for Railway Vehicles and Application of a Wheel-Rail Contact Module

\*조제익<sup>1</sup>, #박태원<sup>2</sup>, 윤지현<sup>1</sup>, 김영국<sup>3</sup>

\*J. I. Cho<sup>1</sup>, #T. W. Park(park@ajou.ac.kr)<sup>2</sup>, J. W. Yoon<sup>3</sup>, Y. G. Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 아주대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 아주대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 한국철도기술연구원

Key words : Wheel-Rail, Hertz Theory, FASTSIM

## 1. 서론

철도차량은 판도, 가선, 대차, 휠-레일 등 여러 질량요소들과 각종 현가장치들로 연결된 복잡한 시스템으로 구성되어 있다. 때문에 철도 차량의 동특성 해석에 있어서 많은 시간과 노력이 요구되고 있다. 최근에는 컴퓨터의 발달로 소프트웨어를 통한 시뮬레이션을 통해서 시험 운행정시 발생하는 각종 예측자료를 생성하고 보완할 수 있으며, 상세모델링을 통한 직선부, 곡선부 동작시 속도에 따른 거동을 분석하고 문제점 파악할 수 있다. 특히 열차에서의 CAE(Computer Aided Engineering)를 이용한 동역학 해석기술은 기간 단축과 비용절감에 결정적 역할을 한다.[1] 철도차량의 동역학 해석툴로는 AEAT사에서 개발한 VAMPIRE를 수년간 성공적으로 사용하여 왔지만, 해석영역의 확대와 해석기법의 다양화를 위하여 최근에는 ADAMS/Rail을 도입하여 사용하고 있다. 하지만 판도, 가선계와 휠-레일을 포함한 철도차량의 해석은 여전히 어려운 과제로 남아있다. 따라서 새로운 해석기의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 동역학 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램은 강체, 유연체, 대변형체에 대한 해석이 가능하다. 특히 객체지향언어인 C++를 기반으로 제작되어 프로그램의 확장성이 매우 뛰어나다.[2,3] 이러한 플랫폼을 기반으로 휠-레일 모듈을 추가하였다. 먼저 휠-레일에 대한 정보를 프로그램에서 불러오게 되면, 프로그램에서는 형상 파라미터를 전처리기에 의하여 생성한다. 휠의 횡방향을 따라서 접촉점을 구하고, 수직하중과 크립계수를 구하게 된다. 이러한 정보를 이용하여 FASTSIM 방법으로 접평면의 힘을 구한다. 이는 상용프로그램인 ADAMS/Rail과의 비교를 통해서 신뢰성을 확보하였다.[4] 이를 통해 차량의 운동성능 파악, 커브주행, 차륜/레일의 마모예측을 위한 기본 프로세스를 확립하였다.

## 2. 프로그램의 구조

개발된 프로그램의 동역학 해석 과정은 크게 데이터의 입력과 해석으로 나눌 수 있다. 프로그램은 객체정보를 읽어올때 크게 환경변수와 객체정보의 두 부분으로 나눌 수 있다. 환경변수 정의는 적분기, 선형해석 방법, DAE(Differential Algebraic Equation) 해석 방법 및 분석방법이며, 사용자가 정의내린 방법으로 동역학 해석을 수행한다.[5]

객체정보는 바디의 위치, 글로벌 좌표에 대한 로컬좌표의 각도, 초기속도등의 많은 정보를 담고 있다. 조인트역시 위치와 종류에 대한 정의를 포함하고 있으며, 힘정의를 각 바디와 조인트에 걸리는 힘에 대한 정보를 나타낸다. 각각의 객체정보는 최상위 클래스에서부터 상속되어 구성되어 있다. 즉 하위클래스는 상위클래스의 성질을 공유하면서 각각의 특징적인 데이터를 가지기 때문에 프로그램의 확장성이 매우 좋다.

해석단계에서는 입력데이터의 오류를 검사한 후 동역학 해석을 실시한다. 구속식을 정의하고 자코비안의 특이성(singularity)이 발생하지 않으면 종료시간까지 변위, 속도, 가속도를 구하고 프로그램을 종료한다. 동역학 해석방법은 환경변수 정의 단계에서 사용자가 선택할 수 있도록 되어있다. Fig. 1은 동역학 해석의 과정을 보여주고 있다.

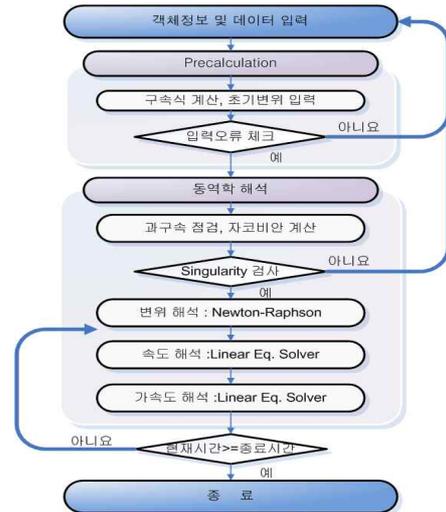


Fig. 1 동역학 해석 순서도

## 3. 휠-레일 접촉 이론

### 3.1 휠-레일의 상호작용

휠과 레일간의 접촉력은 철도 차량의 안정성 및 승차감과 같은 철도 차량의 동적 거동에 지대한 영향을 미치므로 접촉점의 정확한 위치와 정확한 접촉력의 계산을 위한 기술의 개발이 요구된다. 휠과 레일간의 접촉에 의한 상호작용은 철도 차량 운동에 큰 영향을 미치며, 이는 철도 차량에서만 발생하는 고유한 문제이기도 하다. 따라서 휠과 레일 상호작용을 정확하게 규정하는 것은 철도 차량 운동을 성공적으로 예측하는 관건이기도 하다. 휠과 레일 상호 작용은 크게 휠과 레일의 기하학적인 문제와 접촉면에서 발생하는 크립(creep) 역학 문제로 크게 나뉜다.[6]

철도 차량이 궤도상을 주행 할 때 대차와 저널박스를 통해 연결된 휠들은 그 기하학적 구조로 인해 순수 구름(pure rolling) 운동을 일으키지 못하며, 휠과 레일 사이에는 크립 또는 슬립(slip)이 일으키게 된다. 휠과 레일사이에 접촉시에는 조그만 수평 접촉면이 발생한다.

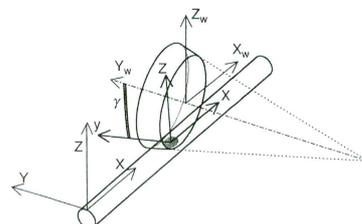


Fig. 2 휠-레일 접촉 좌표계

Fig. 2에서 보듯이 이런 조그만 표면의 접촉압력은 다른 물체보다 스트레스 집중이 생긴다. 이 힘들을 유도하기 위해서는 휠셋 평형방정식과 동역학 거동을 이해해야 알 수 있다. 이 힘들을 정의하기 위해서 가장 먼저 할 것은 접촉 계수(접촉면, 압력, 접촉힘) 들을 정하는 것이다. 일반적으로 수직방향은 Hertz이론, 수평방향은 Kalker이론을 이용한다.

### 3.2 Hertz Theory

Hertz이론은 2개의 탄성체가 탄성변형, 무한공간에서 만나며 접촉면적에 비해 큰 곡률을 지니는 반지름을 가진다. 곡률은 불변하다고 가정하였다. 따라서 접촉표면은 타원형이 되고 접촉면은 곡면이 아니라 평평하다. 두 반구의 주 곡률은 접촉면의 크기와 압력 분포의 계산을 위해 필요하다. 철로 차량의 경우, 네 개의 주 곡선이 수직 평면에서 고려된다. 주 곡선들의 방향은 프레임의 주축 x와 y가 일치한다. 두 개의 탄성체의 접촉은 수직 거리가 최소가 되는 하나의 점 O에서 만날 것이다.[7]

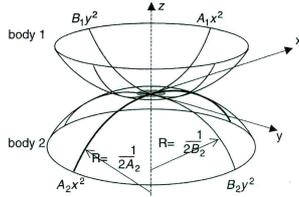


Fig. 3 일반적인 Hertz 접촉

### 3.2 FASTSIM Theory

FASTSIM이론은 Kelker의 Simplified 크립이론을 약간 수정해서 계산속도를 높인 알고리즘이다. Simplified이론은 접촉타원내의 분할된 각 점에서 비선형 미분방정식을 적분하면서 동시에 점착과 미끄럼조건까지 판별해야 하는 구조를 가지고 있다. 따라서 Exact이론에 대해 수치계산량을 줄였음에도 불구하고 그양은 많은 편이다. FASTSIM은 접촉타원내 한 점의 변형과 정지마찰에 대한 비선형미분방정식을 선형대수방정식으로 단순화시켜 수치계산속도를 대폭 향상시켰다.[7] Fig. 4는 FASTSIM을 이용한 타원의 분할방법을 보여준다. 그림에서 룰방향으로 평행하게 타원을 분할한다. 타원형상 때문에 각 요소가 모두 같은 길이의  $a_i/MX$ 를 가지지 못한다. 내부 크리피지는 각 요소별로 계산된다. 그때 접촉압력과 개개의 요소별 힘은 요소의 중심에서 발행한다고 가정하여 계산한다.

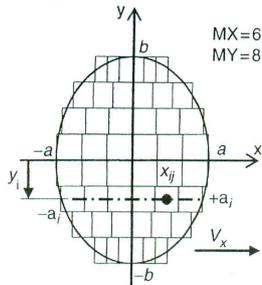


Fig. 4 FASTSIM 방법을 이용한 타원의 분할

### 4. 프로그램을 이용한 휠-레일 해석

프로그램의 휠-레일의 동역학 해석은 FASTSIM방법을 이용하였다. 휠-레일 프로파일을 입력하면, 접촉정보에 따라서 휠의 위치를 계산해 낸다. 이때 Hertz이론과 Kalker이론을 이용하여 수직, 수평방향의 힘을 계산한다. 이 정보를 다시 업데이트 하여 동역학 해석을 수행하는 단계로 구성되어 있다. Fig. 5는 동역학 해석과정을 보여준다.

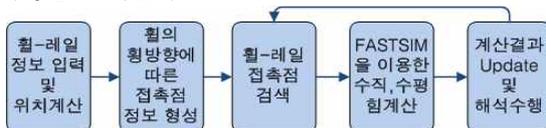


Fig. 5 휠-레일 프로그램 해석과정

FASTSIM을 이용한 해석예제로 킬링 차량의 휠-레일 프로파일을 선택하였다. 개발된 프로그램은 좌우 휠과 레일의 접촉점 위치, 회전 반경, 롤각도, 횡방향 변위에 대한 휠과 레일의 곡률, 접촉각을 계산한다. 휠과 레일의 접촉점을 찾기 위해서 Fig. 6과 같은 접촉점 검색 알고리즘을 사용하였다. 휠과 레일 프로파일

사이의 거리를 계산하고 횡방향으로 거리계산을 수행한다. 거리가 0보다 작거나 같다면 접촉이 일어난다고 가정하였다. Fig. 7은 휠과 레일의 접촉점을 나타낸 것이다. 추출한 정보는 상용프로그램인 ADAMS/Rail과 비교하여 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

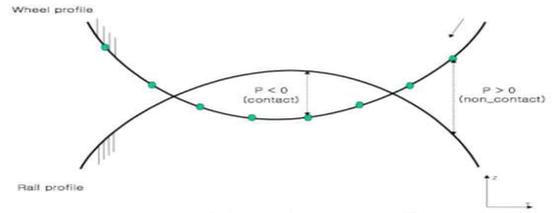


Fig. 6. 접촉점 검색 알고리즘

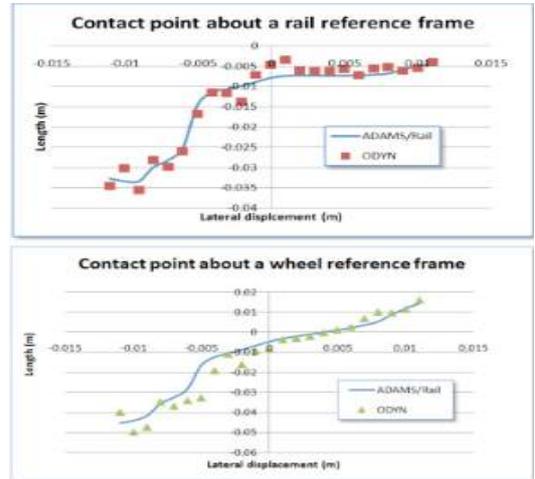


Fig. 7. 휠레일 접촉점 비교

### 4. 결론

본 논문에서는 철도차량을 위한 동역학 해석프로그램을 객체지향언어인 C++을 이용하여 개발하였다. 여기에 휠-레일 접촉모듈을 추가하였고 상용프로그램인 ADAMS/Rail과의 비교를 통하여 신뢰성을 검증하였다. 휠-레일 접촉력을 계산하기 위하여 FASTSIM방법을 프로그램에 삽입하였다. 철도차량을 해석하기 위하여 개발된 이 프로그램은 강체, 유연체, 대변형체의 질량요소의 분석과 휠-레일 접촉 알고리즘이 삽입되었다. 추후 미끄럼 조인트에 관한 구속식을 프로그램에 추가하여 가선계의 해석을 할 수 있을 것이며, 이는 철도차량의 통합적인 해석기반을 마련할 수 있을 것이다.

### 후기

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

### 참고문헌

1. 구병춘, "철도 분야의 신뢰성", 기계저널 Vol.2, pp.47-50, 2009
2. Stanley B. Lippman, "Essential C++", Addison Wesley, 2006
3. 윤성우, "C++ 프로그래밍", FreeLec, 2004
4. ADAMS/Rail Tutorial (2005), MSC.Software
5. J-W. Yoon, "Systematic analysis of flexible multibody system using object-oriented algorithm", The Fourth Asian Conference on Multibody Dynamics, 2008
6. 김창호, 황요하, "동역학적 설계 및 해석기술 개발(1차년도 연구차보고서)", 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, 1997
7. 김창호, 황요하, "동역학적 설계 및 해석기술 개발(2차년도 연구차보고서)", 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, 1998