

철도차량을 위한 동역학 해석 프로그램 개발

Development of a Dynamic Simulation Program for Railway Vehicles

조재익†
Cho, Jae-Ik

박태원*
Park, Tae-Won

윤지원**
Yoon, Ji-Won

김영국***
Kim, Young-Guk

ABSTRACT

Dynamic analysis is necessary for the High-Speed Railway vehicle which aims to run on max 400km/h. Especially, dynamic simulation using CAE(Computer Aided Engineering) can help to reduce the time of development of the High-Speed Railway vehicles. Also, it helps to reduce prices and improve the quality such as safety, stability and ride. There are many dynamic software for a railway vehicle, such as Vampire and ADAMS-Rail. There are limitations for each software and difficulties to analyze overall dynamics for entire railway system. To overcome these limitations, in this study, a program which can simulate entire railway vehicles was developed. This program is easy to use because it was developed using C++, which is object-oriented programming language. In addition, the basic platform for the development of dynamic solver is prepared using the nodal, modal coordinate system with a wheel-rail contact module. Rigid, flexible and large deformable body systems can be modeled by a user according to the characteristic of a desired system. Its reliability is verified by comparison with a commercial analysis program.

1. 서 론

철도 차량의 동역학 해석은 지속적으로 발전하고 있으며, 최근에는 컴퓨터의 발달로 소프트웨어를 사용한 해석이 주류를 이루고 있다.[1] 대표적인 차량 동역학 해석프로그램인 Vampire 와 ADAMS-Rail은 강체뿐만 아니라 유연체도 해석이 가능하다.[2] 유연체 해석은 모드의 선택에 따라 정확도에 차이가 있기 때문에 적절한 모드 선택이 매우 중요하다.[3] 또한 최근 미국의 샤바나 교수는 유한요소법(FEM, finite elements method)을 사용하는 절대절점좌표를 이용한 부품의 탄성 대변형을 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.[4] 이는 형상함수를 이용한 연속체개념의 도입과 유한요소법을 이용한 것으로 부품의 비선형적인 탄성변형을 표현할 수 있는 장점이 있다.[5] 따라서 이 프로그램들은 강체, 유연체 및 대변형체에 대한 각각의 해석은 일부 가능하며 신뢰성있는 해석결과 역시 가지고 있다. 철도차량은 일반적으로 판도, 가선, 대차, 휠-레일, 지면으로 구성되며, 이는 강체, 유연체 및 대변형체를 모두 포함하고 있다. 따라서 철도 차량의 통합적인 해석이 가능하다면, 정확한 모델링이 가능하고, 좀더 신뢰성 있는 해석 결과를 얻을 수 있다. 하지만 현재 프로그램들은 통합적인 해석이 어렵다는 한계점을 가지고 있다.[6]

본 연구에서는 객체지향언어인 C++를 이용하여 동역학 해석 프로그램을 만들었다. 이 프로그램은 객체지향언어 기반으로 제작되어 프로그램의 수정 및 개발이 용이하다는 장점을 가지고 있으며, 알고리즘의 분석을 통하여 프로그램의 구조를 파악하였다. 특히 이 프로그램은 강체, 유연체 및 대변형체에 대한 각각의 해석뿐만 아니라 통합적인 해석까지도 가능하도록 설계되어 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 강체, 유연체 및 대변형체에 대한 각각의 모델링은 상용프로그램인 ADAMS를 통하여 결과를 비교함으로써 신뢰성을 확보하였다.

† 책임저자 : 정희원, 아주대학교, 기계공학부 대학원, 석사과정
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965
* 정희원, 아주대학교, 기계공학부, 정교수
** 정희원, 아주대학교, 기계공학부 대학원, 박사과정
*** 정희원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

2. 객체지향 프로그래밍

2.1. 객체지향 프로그래밍의 소개

객체지향 모델링은 객체를 기본단위로 하여 프로그래밍 하는 기법이다. 컴퓨터 프로그램을 명령어의 목록으로 보는 시각에서 벗어나 여러 개의 독립된 단위, 즉 "객체"들의 모임으로 파악하고자 하는 것이다. 각각의 객체는 메시지를 주고받고, 데이터를 처리할 수 있다.

객체 지향 프로그램의 주요한 두 가지 특성은 상속성(inheritance)과 다형성(polymorphism)이다. 상속성은 클래스들을 공통된 연산과 데이터를 공유하는 관련된 타입들의 집합으로 그룹짓는 것을 말한다. 다형성은 이런 집합을 개별 클래스들이 아닌 하나의 단위로 프로그래밍 할 수 있게 한다. 그래서 어떤 특정 클래스를 추가하거나 제거하는데 더 큰 유연성을 부여한다. 상속성은 부모-자식 관계로 정의된다. 부모는 그 자식 모두에게 공통된 public 인터페이스와 private 구현을 정의한다. 각각의 자식은 자신의 고유한 함수를 구현하기 위해 상속한 것에 추가하거나, 상속한 것을 오버라이딩 한다.[7] 그림1에서는 객체지향 프로그래밍의 특징을 볼 수 있다. 먼저 다형성이란 "동질이상"이라는 특성을 말한다. 즉 하나의 객체는 다른 여러 객체에 공유 되지만 각각 다른 형태로 공유될 수 있다는 것이다. 예를들어 객체3을 객체4가 호출했을때 결과는 "AAA"가 되지만, 객체1이 호출하게 되면 결과는 "AAA BBB"가 될 수 있다는 것이다. 상속성은 레볼루트 조인트를 예로 설명하였다. 구속조건 클래스는 여러 조인트에서 모두 필요한 과정이다. 이 클래스의 성질을 레볼루트 조인트에서 그대로 받아서 사용하는 것이다. 인터페이스의 경우는 클래스의 특징을 정의한다. 그림에서는 바디의 정보를 하나의 그룹으로 묶어서 관리하게 되는 것이다. 클래스에서는 크게 private와 public으로 나눌수 있는데 private는 클래스의 내부접근만 허용하겠다는 것이다. 예를들면 질량을 private로 받게 되면 연산과정에서 질량의 값은 클래스 내부에서가 아니면 바꿀수 없게 된다. public은 클래스의 외부접근까지 허용하겠다는 의미로 연산과정에서도 그 값을 쉽게 바꿀 수 있다.[8]

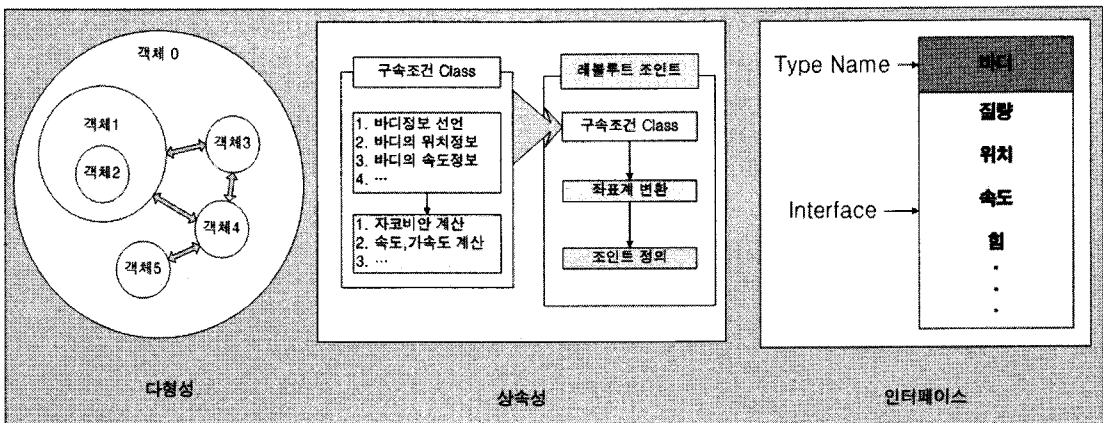


그림1. 객체지향 프로그래밍의 특징

객체지향 언어인 C++을 이용한 다물체 동역학 해석프로그램을 ODDYN(Object-oriented DYNAMics program)이라고 명명했다. ODDYN의 객체부분은 최상위 클래스와 주클래스, 그리고 다수의 일반적인 클래스로 구성되어 있다. 최상위 클래스는 PObject라고 명명하며 이를 이용하여 BODY, CONSTRAINT, FORCE, ENVIRONMENT와 같은 주 클래스를 파생시킨다. 클래스의 파생에는 객체지향의 특징인 상속성, 다형성이 그대로 적용되어 쉽게 새로운 클래스를 정의할 수 있게 된다.[6]

2.2 프로그램 구조

개발된 프로그램의 동역학 해석 과정은 크게 데이터의 입력과 해석으로 나눌수 있다. 그림2는 입력과 일의 구성을 보여준다. 프로그램은 객체정보를 읽어올때 크게 환경변수와 객체정보의 두 부분으로 나눌

수 있다. 환경변수 정의는 적분기, 선형해석 방법, DAE(Differential Algebraic Equation) 해석 방법 및 분석방법 이며, 사용자가 정의내린 방법으로 동역학 해석을 수행한다.

객체정보는 바디의 위치, 글로벌 좌표에 대한 로컬좌표의 각도, 초기속도등의 많은 정보를 담고 있다. 조인트역시 위치와 종류에 대한 정의를 포함하고 있으며, 힘정의는 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. 예를들어 유니버설 조인트를 프로그램에 추가할때는 조인트 정보는 그대로 공유하면서 유니버설 조인트의 특징에 대한 부분만을 하위클래스로 만들면 되는 것이다. 그림3에서는 객체정보에 대한 클래스의 구성을 보여주고 있다.

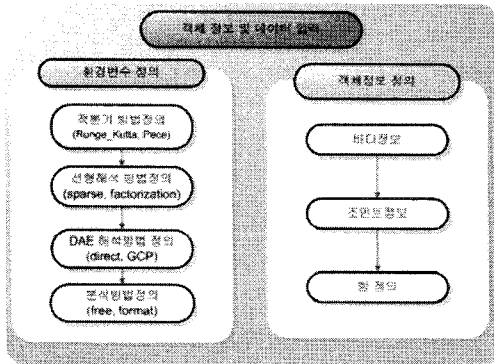


그림2. 입력파일의 구성

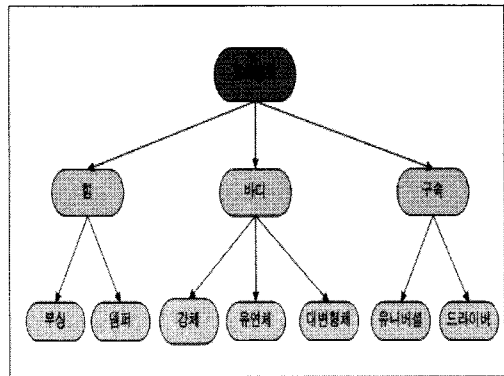


그림3. 객체정보 클래스의 구성

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. 그림4은 동역학 해석의 과정을 보여주고 있다.

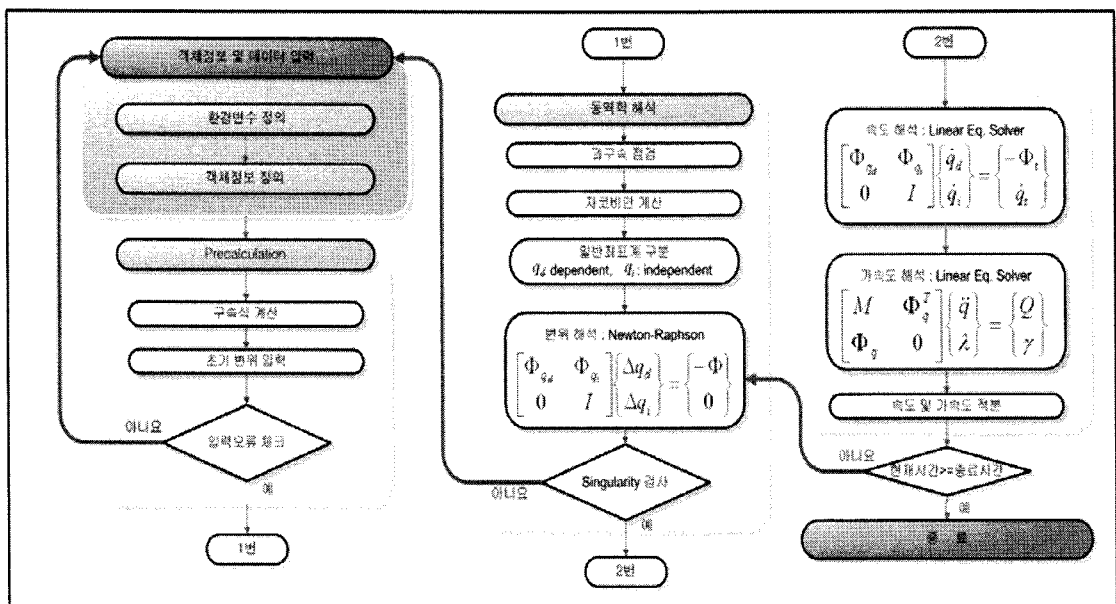


그림4. 동역학 해석 순서도

3. 모달 좌표를 이용한 유연체 해석

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

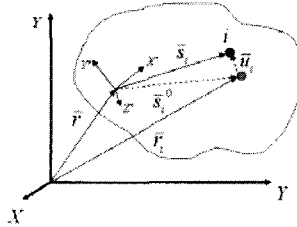


그림5. 유연체

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

여기서 A 는 좌표계 변환행렬(Transpose matrix), \bar{S}_i^0 는 변형전의 위치벡터, \bar{u}_i^0 는 변형에 의한 점 i 의 병진노드 변위이다.

4. 절대절점좌표를 이용한 대변형 해석

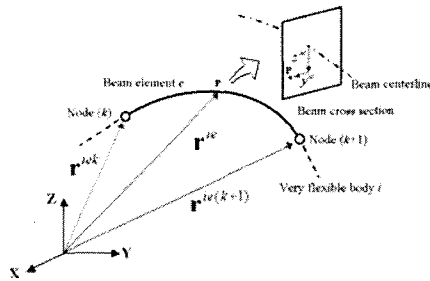


그림6. 절점좌표계를 이용한 변위표현

최근, Shabana[4] 등은 절대절점좌표계를 이용하여 매우 유연한 탄성체의 비선형 대변형 현상을 고려할 수 있는 방법을 제안하였다. 절대절점좌표계는 연속체 이론과 유한요소법로부터 유도되었다. 그림6에서는 매우 유연한 탄성체 i 를 구성하는 빔 요소 e 의 임의의 위치에 대한 전역변위벡터(global position vector)를 나타내고 있다[4]. 한 개의 빔 요소는 두 개의 노드로 구성이 되며, 각각의 노드는 절점에서의 전역변위와 기울기(slope)를 나타내는 절대절점좌표로 구성이 되며 식(2)과 같이 쓸 수 있다. 각각의 노드는 3차원에서 12개의 독립좌표로 구성이 된다.

$$e^{ie} = [e^{ia^T}, e^{ia^T}]^T, \quad e^{ia} = \left[r^{ia^T}, \left(\frac{\partial r^{ia}}{\partial x^{ie}} \right)^T, \left(\frac{\partial r^{ia}}{\partial y^{ie}} \right)^T, \left(\frac{\partial r^{ia}}{\partial z^{ie}} \right)^T \right]^T \quad (2)$$

여기서 r^{iek} 는 노드 k 의 위치를 나타내는 전역변위벡터이고 $\frac{\partial r^{iek}}{\partial x^{ie}}, \frac{\partial r^{iek}}{\partial y^{ie}}$ 과 $\frac{\partial r^{iek}}{\partial z^{ie}}$ 은 노드 k 에서의 기울기를 정의하는 전역 변위 벡터 구배(global position vector gradients)이다. 빔 요소는 회전관성(rotary inertia)효과나 비틀림(torsion)이 고려된다. 빔 요소내의 임의의 위치에 대한 전역변위벡터는 빔 요소의 형상함수와 절대절점좌표를 이용하여 식(3)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 S^{ie} 는 빔 요소의 강체 모드(rigid body mode)까지 표현이 가능한 전역형상함수(global shape function)이다.

$$r^{ie} = S^{ie}(x^{ie}, y^{ie}, z^{ie})e^{ie}(t) \quad (3)$$

5. 수치해석

5.1 강체운동

강체운동의 해석을 위해서 그림7과 같은 4-Bar 모델을 선택하였다. 4개의 강체로 구성되어 있으며 크랭크(crank)는 회전조인트(revolute joint)로 연결되어 있고, 크랭크와 커넥팅로드(connecting Rod)는 편조인트(spherical joint)로 연결되어 있다. 끝으로 커넥팅로드와 실린더는 유니버설조인트(universal joint)로, 그리고 실린더는 지면과 트랜스조인트(translational joint)로 연결되어 있다. 4-Bar 모델은 1자유도를 가지고 있으며, 동역학(dynamic) 해석을 하였다. 그림8에서는 실린더의 변위를 나타낸 것이다. ADAMS의 결과와 ODYN의 결과는 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.[9]

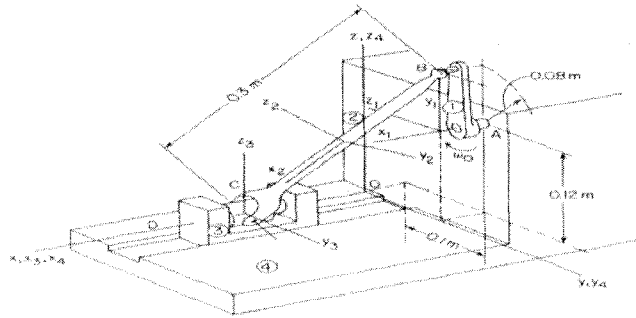


그림7. 4-Bar 모델

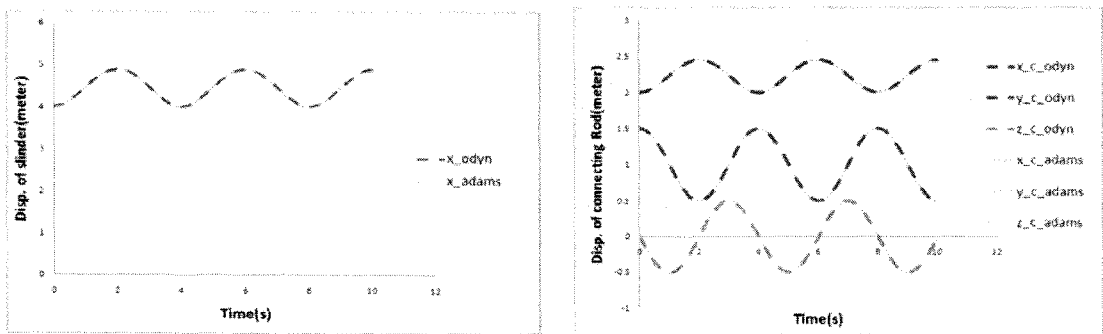


그림8. ODYN과 ADAMS의 결과비교

5.2 유연체 운동

그림9와 같은 Shell 모델로 유연체 해석을 하였다. Shell의 물성치는 도표1과 같다. Shell에는 중력이 작용하는 상태이며, 이때 node 36의 변화를 관찰하였다.

도표 1. Shell 모델의 물성치

항 목	값
영 계수	207e9 Pa
밀도	7700 kg/m ³
두께	0.01 m
중력	(0,0,-9.80665)N

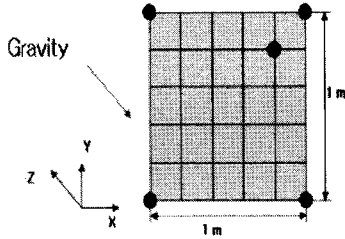


그림9. 유연체 모델

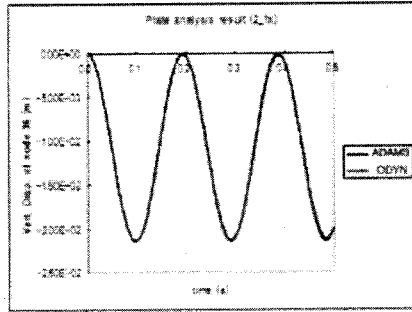


그림10. Shell의 처짐량

그림10의 결과에서 ADAMS의 해석결과와 OLYN의 해석결과가 정확하게 일치함을 확인할 수 있다.

5.3 대변형 운동

그림11과 같이 X축 방향으로 유연한 빔을 설계한 후 그 끝단에서 Y축 방향으로 강체 빔 연결하였다. 여기에 Z축 방향으로 중력을 받는 구를 매달아 비틀림 현상을 구현하였다. 각 바디의 물성치는 도표2와 같다. 그림12은 빔 끝단의 z축 방향의 변화량을 나타낸 것이다. 결과값은 NASTRAN과 OLYN을 비교한 것이며 상당히 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

도표 2. 대변형 운동 모델의 물성치

항 목	값	비 고
Base	Ground Fix	강 체
유연한 빔	길이 : 0.3 m 넓이 : 0.02 X 0.02 m ² 밀도 : 4200 kg/m ³ E : 400 MN/m ² G : 200 MN/m ²	3 Beam Elements (4 Nodes)
강체 빔	길이 : 0.1 m	강 체
구	질량 : 0.1 kg I _{xx} , I _{yy} , I _{zz} : 0.001kg/m ³	강 체

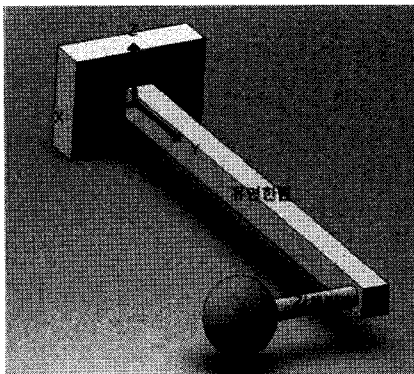


그림11. 대변형체 모델

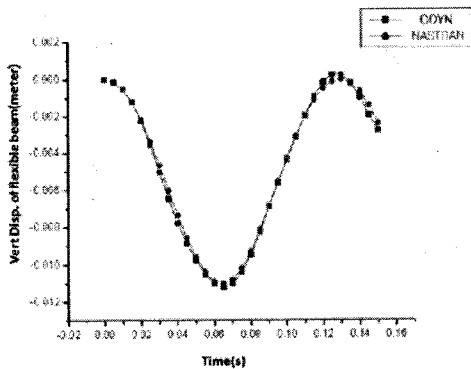


그림12. 빔 끝단의 수직변위량

6. 결 론

본 연구에서는 OOP언어인 C++을 이용하여 동역학 해석 프로그램을 완성하였다. 객체지향 프로그래밍 언어는 상속성, 다형성의 특징을 가지고 있어 프로그램의 확장 및 개발에 매우 유리하다. 개발된 3가지 좌표계 시스템에 의해서 강체, 유연체, 대변형체를 모델링 할 수 있으며, 미리 정의된 구속식 및 힘을 물체에 자유롭게 적용시킬 수 있다. 동역학 해석 순서도는 이 프로그램의 구성을 잘 보여주고 있다. 먼저 객체의 정보를 입력하고 나면, 첫 번째 단계로 해석기는 초기변위, 속도, 가속도등을 입력변수로 받고, 오류를 체크한다. 이 과정에서 오류가 발견되면 초기 객체정보를 재입력하도록 프로그램을 종료하고 에러파일을 출력하여 오류점검을 확인할 수 있다. 해석이 완료되면 결과 파일로 변위, 속도 및 가속도등 여러 가지 데이터가 정렬되어 출력된다. 개발된 해석기를 이용하여 강체와 유연체에 해석을 실시하였고, 그 결과를 상용 동역학 프로그램인 ADAMS, NASTRAN과 비교함으로써 해석의 신뢰성을 검증하였다. 추후 미끄럼 조인트 및 휠-레일 접촉에 관한 구속식을 추가할 것이며, 이와같은 구속식의 추가는 철도차량의 판도, 가선, 대차, 휠-레일, 지면으로 이루어진 철도차량 시스템을 통합적으로 해석할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 구병춘 (2009), “철도 분야의 신뢰성”, 기계저널 Vol.2, pp.47-50
2. ADAMS/Rail Tutorial (2005), MSC.Software
3. R-R CRAIG (1981), “Structural Dynamics, An Introduction to Computer Methods”, John Wiley & Sons.
4. Ahmed. A. Shabana (1998), “Computer implementation of the absolute nodal coordinate formulation for flexible multibody dynamics”, Nonlinear Dynamics, Vol. 16
5. 서종휘 (2005), “탄성 대변형 다물체시스템의 동역학 해석방법 및 응용”, 박사학위논문, 아주대학교
6. J-W. Yoon (2008), “Systematic analysis of flexible multibody system using object-oriented algorithm”, The Fourth Asian Conference on Multibody Dynamics 2008
7. Stanley B. Lippman (2006), “Essential C++”, Addison Wesley
8. 윤성우 (2004), “C++ 프로그래밍”, FreeLec