한국철도학회 논문집
제13권 제1호 2010년 | pp. 16-22

휠-레일 접촉모듈을 포함한 동역학 해석 프로그램 개발

Development of a Dynamic Simulation Program Including a Wheel-Rail Contact Module

조재익† · 박태원* · 윤지원** · 이수호** · 정성필**
Jae-ik Cho · Tae-won Park · Ji-won Yoon · Soo-ho Lee · Sung-pil Jung

Abstract Various programs for dynamic simulation of the railway vehicle have advantages and disadvantages. These programs have limitation that cannot express a large deformable body for an wire of the railway vehicle. In this study, a program for dynamic simulation of the railway vehicle is developed. And the rigid, flexible and large deformable body can be simulated using this program. Its reliability is verified by comparison with a commercial program. Also, a wire is considered as the large deformable body and a sliding joint which connects the rigid body to the large deformable body is included. Moreover, as the wheel-rail contact module is added, the dynamic simulation of the railway vehicle can be analyzed using the developed program.

Keywords : rigid body, flexible body, large deformable body, wheel-rail contact module

요 지 다양한 철도차량 동역학 해석 프로그램들은 장단점을 가지고 있다. 이러한 프로그램들은 가선계를 표현할 수 있는 대변형체를 나타낼 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 철도차량의 동역학 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 강체, 유연체, 대변형체에 대한 해석을 수행하고 상용프로그램과의 비교를 통하여 신뢰성을 확보하였다. 또한 가선계를 대변형체로 고려하였고, 강체와 대변형체를 연결하는 미끄럼 조인트를 추가하였다. 여기에 휠-레일 접촉모듈을 추가하여 철도차량의 동역학 해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

주 요 어 : 강체, 유연체, 대변형체, 휠-레일 접촉모듈

1. 서 론

철도차량의 고속화 및 다양화에 따라 설계시 차량의 성능을 예측하는 것은 중요하다. 현재 유럽연합에서는 최고속도 350km/h를 목표로 고속열차(프랑스 AGV, 독일 Velaro-E)를 개발하였으며, 일본 또한 최고속도 400kn/h의 고속열차(FASTECH 360)를 개발했다[1]. 고속열차를 개발하는 과정에서 가선계 및 판토그래프의 접촉 이상 징후가 발견되어 왔지만 상용프로그램에서는 가선계를 포함하여 해석할 수가 없기 때문에 문제를 사전에 예측할 수가 없었다. 철도차량 해석 프로그램 중 VAMPIRE[2]는 실제와 잘 맞는 철도차량 해석 프로그램으로 널리 사용되고 있지만 강체로만 고려하기 때문에 유연체나 대변형체의 효과를 고려할 수 없다. 또한 ADAMS/Rail[3]과 SIMPACK[4] 등의 철도차량 해석 프로그램은 유연체의 효과를 고려할 수 있으나 여전히 대변형체인 가선계를 고려하지 못한다는 한계를 지니고 있다. 최근 동역학 해석기법에 관한 논문에서도 휠-레일 접촉모듈에 대한 연구[5-7]나 대변형체에 대한 연구[8-10]는 많이 진행되었지만, 휠-레일과 대변형체를 모두 해석할 수 있는 동역학 프로그램 개발에 대한 연구는 진행되지 않았다.

본 연구에서는 강체, 유연체 및 대변형체를 고려한 동역학 해석 프로그램을 개발하고, 여기에 휠-레일 접촉모듈을 추가하여 철도차량의 동역학 해석이 가능하도록 기초 플랫폼을 구축하였다. 강체, 유연체 및 대변형체에 대해서 간단한 예제를 통하여 검증하였으며, 휠-레일 접촉모듈은 ADAMS/Rail을 이용하여 접촉점 및 접촉력을 비교하여 검증하였다.

† 책임저자 : 정회원, 아주대학 기계공학과 대학원
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965
* 교신저자 : 정회원, 아주대학 기계공학부 교수
** 정회원, 아주대학 기계공학과

2. 동역학 해석 프로그램 개발

2.1 동역학 해석기

개발된 프로그램은 ODYN(Object oriented DYNamic solver)이라 명명하였다. ODYN의 동역학 해석 과정은 크게 데이터의 입력과 해석으로 나눌 수 있다. Fig. 1은 입력 파일의 구성을 보여준다.

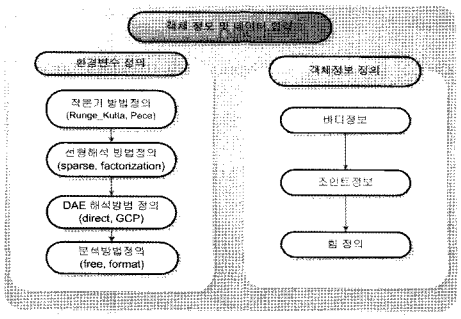


Fig. 1. 객체 정보 및 데이터 입력

개발된 프로그램은 객체정보을 읽어올때 크게 환경변수와 동역학 모델정보의 두 부분으로 나눌 수 있다. 환경변수는 적분기, 선형해석 방법, DAE(Differential Algebraic Equation) 해석 방법을 정의한다. 동역학 모델 정보는 바디의 위치, 글로벌 좌표에 대한 로컬좌표의 각도, 초기 속도 등의 정보를 담고 있다. 조인트 역시 위치와 종류에 대한 정의를 포함하고 있으며, 힘 정의는 각 바디와 조인트에 걸리는 힘에 대한 계산결과를 나타낸다. 각각의 객체정보는 최상위 클래스(class)에서부터 상속되어 구성되어 있다. 즉 하위 클래스(class)는 상위 클래스(class)의 성질을 공유하면서 각각의 특징적인 데이터를 가지기 때문에 프로그램의 확장성이 매우 좋다[11].

해석단계에서는 입력데이터의 오류를 검사한 후 동역학 해석을 실시한다. 동역학 해석 과정은 Fig. 2와 같다. 구속식이 정의 되면 자코비안을 계산한 후 변위, 속도, 가속도 해석을 진행한다[12]. 동역학 해석은 강체, 유연체 및 대변형체에 대한 해석을 할 수 있다. 강체는 직각 좌표(Cartesian Coordinate)를 사용하며, 유연체는 모드 좌표(Modal Coordinate), 대변형체는 절대 절점 좌표(Absolute Nodal Coordinate)를 이용하여 해석을 한다.

2.2 휠-레일 접촉 모듈

2.2.1 접촉점 검색 알고리즘

휠-레일 접촉점 검색 알고리즘은 Fig. 3에 나타나 있다. 먼저 접촉점은 진행방향에 수직한 면을 2D 상황으로 고려하였다. 프로그램은 휠과 레일의 프로파일을 읽어들이

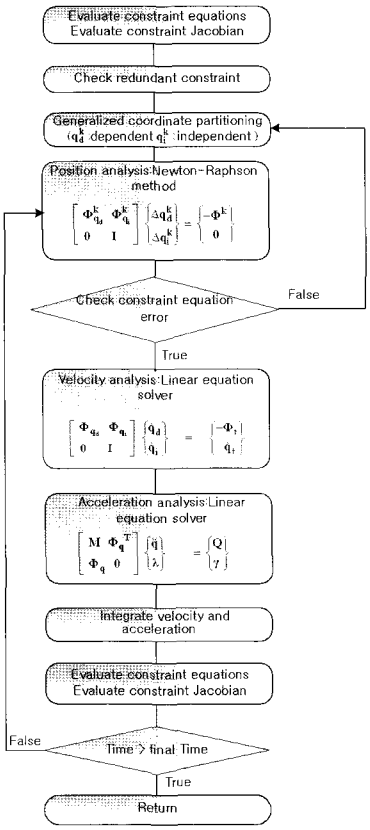


Fig. 2. 동역학 해석 과정

고 각 점들을 스플라인(Spline)을 이용하여 나타낸다. 휠의 반지름, 좌우 휠의 거리, 레일의 궤간 정보를 이용하여 휠과 레일의 초기 위치를 결정한다. 동역학 해석에 따라서 휠의 횡방향 이동량을 입력받게 되면 휠과 레일사이에 침투(penetration)가 발생하게 된다. 침투량은 Fig. 3의 휠셋 좌표계에서 계산된 휠의 접촉점과, 레일 좌표계에서 계산된 레일의 접촉점 위치를 글로벌(Global) 좌표계로 전환하여 두 점사이의 거리로 계산한다. 침투량 계산시에 적분 간격을 0.001초로 계산하고 침투가 예상되는 지점에서는 0.0001초로 세분화 하여 침투량을 계산하였다. 이때

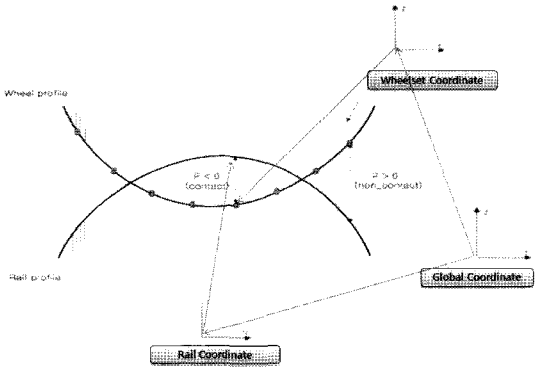


Fig. 3. 접촉점 검색 알고리즘

침투량이 0.001mm보다 크면 침투가 발생한 것으로 가정하고, 침투량의 최대값만큼 휠의 위치정보에 더하여 중심점의 위치를 수정하고, 다시 휠 프로파일을 스플라인(Spline)을 사용하여 나타낸다. 접촉점은 수정된 휠과 레일의 프로파일의 거리가 0.001mm보다 작은 지점으로 판단하였다.

2.2.2 접촉력 계산 알고리즘

Hertz 접촉 이론에 의하면 휠-레일 접촉점은 타원형으로 접촉한다. 타원형의 접촉면은 점착(adhesion)영역과 미끄럼(slip) 영역으로 나누어져있기 때문에 휠의 구름 속도와 차량의 실제 속도는 차이가 나게 된다. 이러한 현상을 크리프(creep)라 하며 크리프현상으로 크리피지(creepage)가 발생하게 되는데 크리피지는 트랙과 휠의 상대속도로 정의된다. 식 (1)은 일반적인 크리피지의 정의이다.

$$\zeta_x = \frac{(v^w - v^r)^T t_1^r}{V}$$
$$\zeta_y = \frac{(v^w - v^r)^T t_2^r}{V}$$
$$\zeta_s = \frac{(w^w - w^r)^T n^r}{V} \quad (1)$$

식 (1)에서 위첨자 w는 휠, r은 레일을 나타낸다. t_1^r과 t_2^r는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 레일에서의 진행방향과 횡방향의 단위벡터이다. V는 철도차량의 진행방향의 속도로 식 (2)와 같이 정의된다[13].

$$V = v^{w^T} t_1^r \quad (2)$$

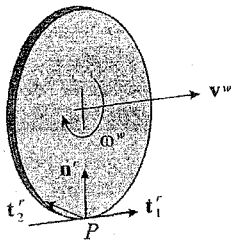


Fig. 4. 접촉점에서의 벡터

접촉력 계산을 위한 방법으로 FASTSIM[13]을 이용하였다. FASTSIM이론은 Kalker의 Simplified 크리프이론을 약간 수정해서 계산속도를 높인 알고리즘이다. FASTSIM이론에 따라 진행방향과 횡방향의 힘을 구하면 차량의 이동에 따라서 다시 접촉점을 계산하고 정보를 업데이트 하게 된다.

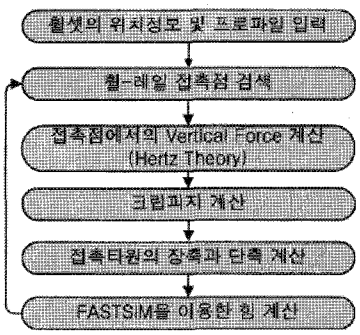


Fig. 5. 휠-레일 프로그램 해석과정

3. 개발 프로그램 검증

3.1 강체 해석모듈 검증

강체운동의 해석을 위해서 Fig. 6과 같은 4-Bar 모델을 선택하였다. 3개의 강체와 지면으로 구성되어 있으며 크랭크는 지면과 회전 조인트로 연결되어 있고, 크랭크와 커넥팅로드는 핀 조인트로 연결되어 있다. 끝으로 커넥팅로드와 실린더는 유니버셜 조인트로, 그리고 실린더는 지면과 병진 조인트로 연결되어 있다[14-15].

Fig. 7에서는 실린더의 변위를 나타낸 것이다. ADAMS와 ODYN의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

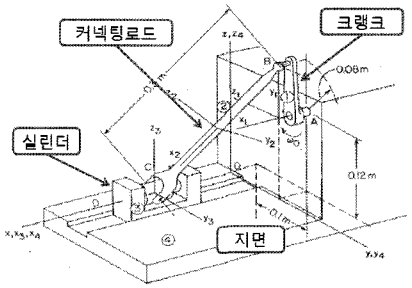


Fig. 6. 4-Bar 모델

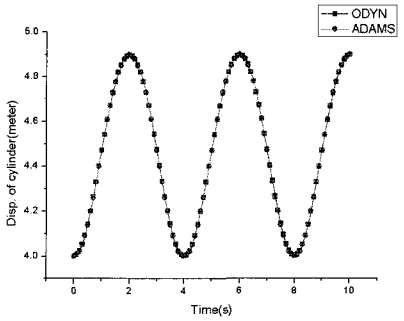


Fig. 7. 실린더의 X방향 변위

3.2 유연체 해석 모듈 검증

유연체 해석을 하기 위하여 ANSYS를 이용하여 유연한

쉘(Shell)을 생성하였다. 유연한 쉘은 36개의 절점(node)과 절점을 연결하는 요소로 구성된다. 쉘에는 절점번호, 요소 종류, 영계수(Young's modulus), 푸아송비(Poisson's ratio) 등의 정보가 포함되어 있다. 이 정보를 이용하여 ANSYS에서 노말 모드(Normal mode)와 구속 모드(Constraint mode)가 결합된 직교 모드(Orthogonalized Mode)를 추출하고 시스템의 강성 매트릭스와 질량 매트릭스를 구한다. 위와 같은 정보가 포함된 유연한 쉘을 ADAMS와 ODYN에서 불러들여 각 모서리의 4개의 절점을 지면에 구속하고 자중에 의한 변형을 해석하였다. 쉘의 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 9는 ADAMS와 ODYN을 이용하여 절점 36에서 Z방향 변위를 계산한 것이다. 결과값이 정확하게 일치함을 확인할 수 있다[16].

Table 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

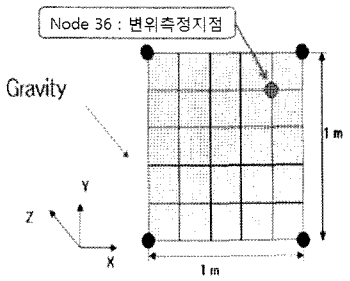


Fig. 8. 유연체 모델

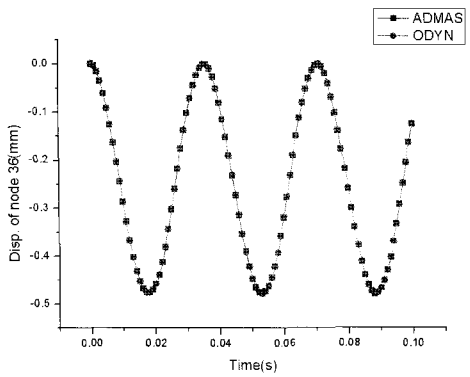


Fig. 9. Shell의 Z방향 변위

3.3 대변형체 해석 모듈 검증

Fig. 10과 같이 Y축 방향으로 대변형빔을 생성한 후 그 끝단에서 X축 방향으로 강체 빔을 연결하였다. 여기에 Z축 방향으로 중력을 받는 구를 매달아 비틀림 현상을 구현하였다. 각 바디의 물성치는 Table 2와 같다. Fig. 11은 빔 끝단의 z축 방향의 변화량을 나타낸 것이다. 결과값은 NASTRAN Transient 해석과 ODYN을 비교한 것이며 값이 상당히 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다.[10]

Table 2. 대변형체 모델의 물성치

항 목	값	비 고
Base	Ground Fix	강 체
대변형빔	길이 : 0.3 m 넓이 : 0.02 × 0.02 m^2 밀도 : 4200 kg/m^3 E : 400 MN/m^2 G : 200 MN/m^2 요소수 : 3	대변형체
강체 빔	길이 : 0.1 m	강 체
구	질량 : 0.1 kg I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} : 0.001kg·m^2	강체

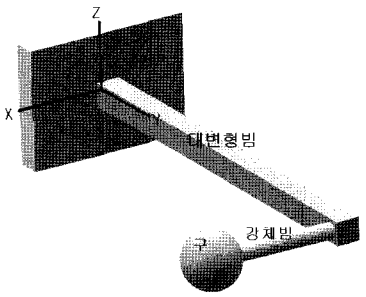


Fig. 10. 대변형체 모델

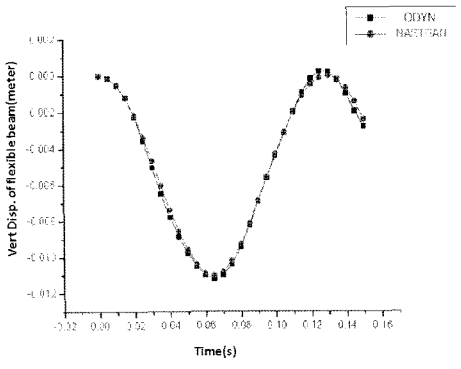


Fig. 11. 대변형 빔 끝단의 Z방향 변위

두 번째 예제로 Fig. 12는 철도차량의 가선을 대변형체의 빔으로, 판토그래프를 강체구로 묘사한 것이다. 그리고 미끄럼 조인트를 이용하여 대변형체 빔과 강체구를 구속하였다. 빔의 양끝은 구 조인트로 구속하였고, 강체구의 초기

위치는 0.2m 지점에 두었다. 빔과 구의 물성치는 Table 3과 같다.

Table 3. 대변형빔 과 강체구의 물성치

항 목	값	비 고
빔	길이 : 1 m 넓이 : 0.015 × 0.015 m^2 밀도 : 500 kg/m^3 E : 0.45 MN/m^2 ν : 0.3 요소수 : 1	대변형체
구	질량 : 0.005 kg I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} : 0.01kg·m^2	강체

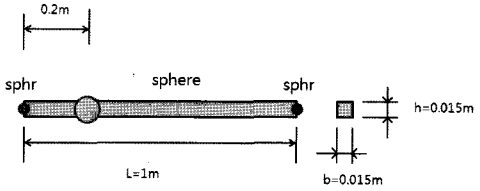
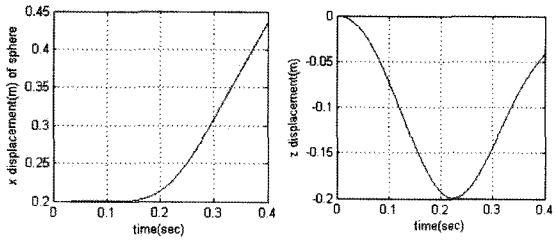


Fig. 12. 대변형빔과 강체구의 모델링

강체구는 0.2m 지점에서부터 자중에 의해서 미끄러진다. 이때 대변형빔의 중심점의 처짐을 Fig. 13에 나타내었다.

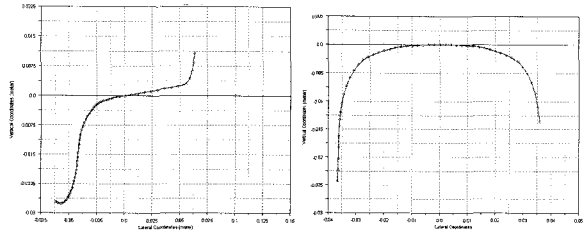


(a) 강체구의 X방향 변위 (b)대변형 빔의 Z방향 변위

Fig. 13. 강체구와 대변형 빔의 변위

3.4 휠-레일 접촉점 검증

접촉점 검색모듈 검증을 위하여 틸팅차량에서 사용하고 있는 휠-레일 프로파일을 선택하였다. 휠-레일의 형상은 Fig. 14와 같다.



(a) 휠의 형상 (b) 레일의 형상

Fig. 14. 휠-레일 형상

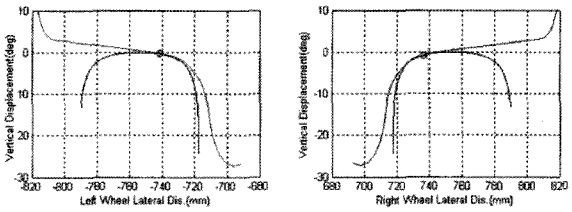
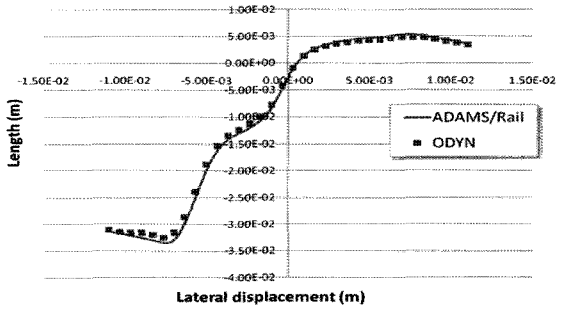
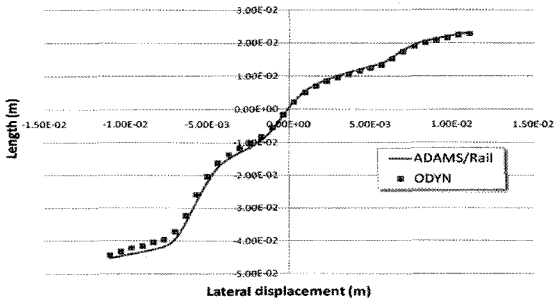


Fig. 15. 휠-레일 접촉점

개발된 프로그램은 좌우 휠과 레일의 접촉점 위치, 회전반경, 롤(Roll)각도, 횡방향 변위에 대한 휠과 레일의 곡률, 접촉각을 계산한다. Fig. 15는 개발한 프로그램의 접촉점에 대한 결과를 MATLAB 프로그램을 이용하여 먼저 확인해 본 결과이다. 좌우 움직임에 따라서 접촉점이 잘 표현되는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 ADAMS/Rail과 비교하였다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 결과 값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.



(a) Rail의 접촉점



(b) Wheel의 접촉점

Fig. 16. ODYN과 ADAMS/Rail의 접촉점 비교

3.5 휠-레일 접촉력 검증

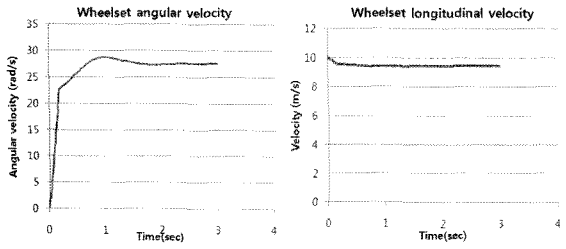
접촉점 해석결과를 통해 크리피지와 타원형 접촉면의 장축과 단축에 대한 값을 계산하고, 계산된 값을 이용하여 진행방향과 횡방향에 대한 힘을 구하였다. 계산된 결과의 신뢰성 확보를 위하여 ADAMS/Rail로 모델링을 하여 비교하였다. 휠-레일 접촉 모듈만의 비교를 위해 차량의 휠셋과 대차만 강체로 모델링 하였고, 데이터는 틸팅 차량의 값을 사용하였다. 기본적인 차량의 데이터는

Table 4와 같다.

Table 4. 틸팅 차량의 정보

구분	질량	축길이	반지름
휠셋	1650kg	2m	0.46m
대차	3600kg	-	-

먼저 직선트랙에서 10m/s의 저속으로 운행하여 Fig. 17과 같은 휠셋의 각속도, 전진속도를 계산하였다. 각속도는 약 27rad/s, 전진속도는 9.5m/s로 차량의 슬립을 고려했을 때 잘 수렴하는 것을 확인하였다.



(a) 휠셋의 각속도 (b) 휠셋의 전진속도

Fig. 17. 휠셋의 각속도 및 전진속도 (ODYN)

Fig. 18에서는 크리피지(Creepage) 값을 구하여 ADAMS/Rail의 결과값과 비교하였다. 크리피지 값을 구하기 위해서 휠과 레일의 속도 값을 5차 PECE적분을 통하여 계산하였다. 5차 PECE적분은 주어진 5개의 정보를 이용하여 6번째 값을 유추하여 계산하고, 계산된 6번째 값을 포함한 5개의 정보를 통해서 계산된 값을 다시 수정하여 최종 값을 구하는 절차로 진행된다. 계산된 크리피지 값을 ADAMS/Rail의 결과값과 비교하였다. 차량의 진행방향과 횡방향에 대한 크리피지 값이 0에 수렴하였으며, 스핀(Spin) 크리피지 값은 ADAMS/Rail에서는 0.0604, ODYN에서는 0.0592로 거의 일치함을 확인하였다.

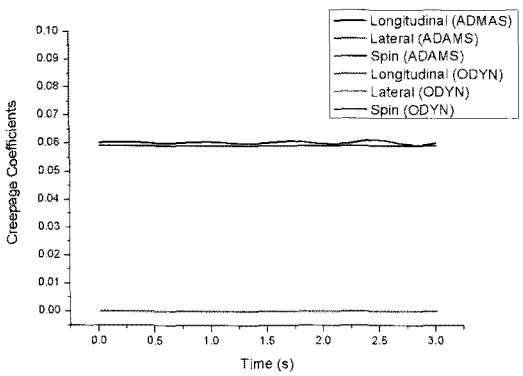
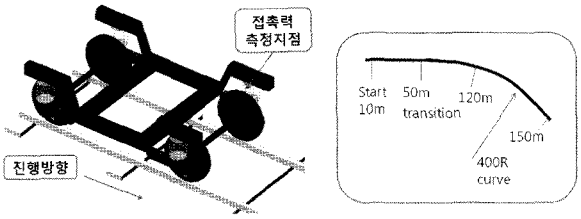


Fig. 18. 크리피지(Creepage) 값 비교



(a) 차량 모델링 (b) 트랙

Fig. 19. 동역학 해석을 위한 모델과 트랙

다음으로 차량의 수직력과 횡력을 구하기 위하여 Fig. 19와 같은 차량 모델과 트랙에서 동역학 해석을 수행하였다. Fig. 20과 Fig. 21은 차량 진방향향 휠셋의 왼쪽 휠에서 수직력과 횡력을 측정한 것이다. 약 5초가 지나면서 차량은 직선구간에서 곡선구간으로 진입하게 된다. 수직력은 약 20000N에서 곡선구간에 진입하면서 24000N까지 증가한 후 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 횡력은 곡선구간으로 진입할 때 증가하기 시작하여 10초 이후부터는 ADAMS/Rail에서는 6700N, ODYN에서는 6900N으로 수렴함을 확인하였다. ADAMS/Rail의 결과와 ODYN에서의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

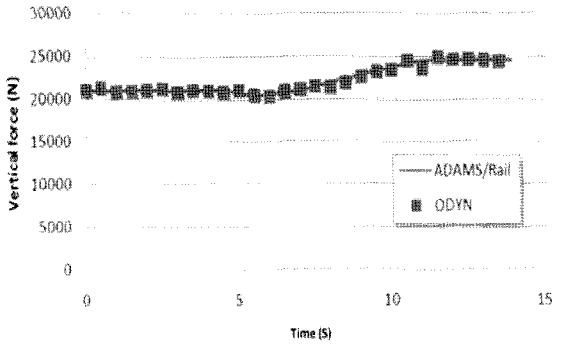


Fig. 20. 왼쪽 휠의 수직력

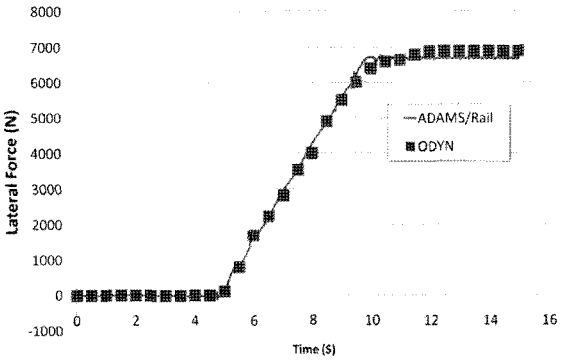


Fig. 21. 왼쪽 휠의 횡력

4. 결 론

본 연구에서는 철도 차량의 통합적인 해석을 위한 연구의 일환으로 동역학 해석 프로그램인 ODYN을 개발하였다. 가장 널리 사용되고 있는 VAMPIRE는 철도차량을 강체로만 모델링을 하기 때문에 고속에서 문제가 되는 유연체나 대변형체의 효과가 고려된 해석을 할 수 없다. 또한 ADAMS/Rail은 유연체의 효과를 고려할 수 있지만 역시 가선계의 해석을 고려하지 못한다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 ODYN은 강체와 유연체, 대변형체의 해석이 가능하도록 설계하였다. 또한 휠-레일 접촉모듈의 삽입으로 철도차량의 해석을 가능하게 하였다. 특히 대변형체를 이용한 가선계의 모델링은 다른 상용프로그램에서는 할 수 없는 기법으로, 최근 고속 철도 차량에서 문제가 되고 있는 가선계의 해석을 가능하게 한다.

ODYN에 삽입된 강체, 유연체 모듈은 상용프로그램인 ADAMS와 비교 검증하였고, 대변형체는 강체구를 미끄럼 조인트로 구속시켜 변위를 확인하였다. 휠-레일 접촉모듈은 ADAMS/Rail과 접촉점, 접촉력 등을 비교하였다. 향후에는 각각의 검증된 모듈을 이용하여 가선계를 포함한 철도차량을 모델링 하고 기존 상용프로그램을 이용한 해석 결과와 비교할 것이다. 따라서 가선계의 해석 결과에 따라 차량에 발생할 수 있는 문제점을 발견하고 이를 해결할 수 있는 방법을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호07 차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김기환, 박찬경, 김석원 (2006), "차세대 고속철도기술개발사업 추진방향," 한국철도학회, 추계학술대회 논문집, pp. 7-12.
2. http://www.vampire-dynamics.com
3. ADAMS/Rail Tutorial (2005), MSC.Software.
4. http://www.simpack.com
5. C. Rathod, R. Chamorro, J. L. Escalona, M. El-Sibaie, and A. A. Shabana (2009), "Validation of three-dimensional multi-body system approach for modelling track flexibility," Proc. IMechE, Vol. 223, No. 4, pp. 269-282.
6. 박찬경, 배대성, 조희제, 조영걸 (2003), "일반적인 접촉특성을 이용한 휠/레일 접촉모듈 프로그램 개발에 관한 연구," 한국철도학회, 추계학술대회 논문집, pp. 204-209.
7. 장종기, 이승일, 최연선 (2004), "차륜답면 형상변화에 따른 KTX의 동특성," 한국철도학회논문집, 제 7권, 제 3호, pp. 259-263.
8. A. L. Schwab and J. P. Meijaard (2010), "Comparison of three-dimensional flexible beam elements for dynamic analysis: Classical finite element formulation and absolute nodal coordinate formulation," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol. 5, Issue 1, Article No. 011010.
9. 손정현, 유완석 (2003), "모드좌표와 절대절점좌표를 혼용한 동역학 해석기법에 관한 연구," 한국철도학회, 추계학술대회 논문집, pp. 1730-1735.
10. 서종휘, 정일호, 박태원 (2004), "절대절점좌표를 이용한 탄성 다물체동역학 해석에서의 동응력 이력 계산에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 21권, 제 5호, pp. 114-121.
11. S. B. Lippman (2006), "Essential C++," Addison Wesley, pp. 192-228.
12. 한형석, 이재경, 서종휘, 송현석, 박태원 (2003), "객체지향 개념을 이용한 다물체 동역학 해석 시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제20권, 제8호, pp. 115-125.
13. A. A. Shabana (2008), "Railroad vehicle dynamics," CRC Press, pp. 127-186.
14. P. E. Nikravesh (1988), "Computer-aided analysis of mechanical systems," Prentice-Hall, Inc.
15. E. J. Haug (1989), "Computer aided kinematics and dynamics of mechanical system," Vol. 1: Basic Method, Prentice-Hall, Inc.
16. 정성필 (2008), "MATLAB을 이용한 유연 다물체 시스템의 해석 및 제어," 대한기계학회논문집, A권, 제 32권, 제 5호, pp. 437-443.

접수일(2009년 6월 15일), 수정일(2009년 10월 7일),
게재확정일(2010년 2월 5일)