

3차원에서의 열차 충돌사고 시뮬레이션 연구

Simulation of Train Crashes in Three Dimensions

한형석¹, 구정서²

Hyung-Suk Han, Jeong-Seo Koo

Keywords : *Crash*(충돌), *Multibody Dynamics*(다물체 동역학), *Buckling*(좌굴)

Abstract

It is important to predict the crash behavior of trains to improve their crashworthiness. This paper investigates the simulation of high-speed train crashes in three dimensions using multibody dynamics. At present, little is known about three-dimensional crash simulations. This study shows that it is possible to simulate overriding and lateral buckling, including results from one- or two-dimensional simulations. Several parameters, however, such as computational time and large deformation of structures, need further investigation.

1. 서론

열차의 충돌 사고는 빈번하지 않으나 일단 발생하면 대형 참사를 야기할 수 있다. 철도 선진국들은 일찍부터 열차의 충돌 사고 시에 피해를 최소화하기 위한 연구를 수행해 오고 있다[1-8]. 충돌안전도 향상 대책으로는 선두차량의 전두부에 에너지 흡수장치를 설치하여 충돌 에너지를 흡수하도록 하거나 차간 타고 오름이나 좌굴의 발생이 적도록 차간 연결장치를 설계하는 것이다. 그러한 대비책을 설계하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션이 이용된다. 열차의 충돌 시험은 비용과 시간이 많이 소요되기 때문이다. 현재 주로 이용되는 시뮬레이션 방법은 유한요소법에 기초를 둔 1, 2차원적 열차 충돌 시뮬레이션이다. 이러한 시뮬레이션은 충돌안전도를 평가하는 주요한 결과를 제공한다. 유한요소법을 이용한 3차원적 충돌 사고 시뮬레이션은 일단 수행되면 다양한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있으나 현재 1량 또는 2량 정도만 현실적으로 시뮬레이션이 가능하다. 유한요소법을 이용한 열차의 3

차원적 시뮬레이션에 있어서는 아직 해석 모델의 크기로 인한 계산 시간의 문제를 갖고 있기 때문에 철도 선진국에서 3차원적 해석의 중요성을 인식하고 연구 중인 것으로 알고 있으나 아직 발표되지 않고 있다. 국내의 경우 G7사업을 중심으로 1,2차원적 충돌 안전도 연구가 시작되어 국산 고속열차의 개발에 적용되고 있다[9,10].

본 논문에서는 시작 연구로 유한요소법이 아닌 다물체 동역학을 이용한 충돌 사고 시뮬레이션 기법을 제시한다. 다물체 동역학은 유한요소법과 같이 각 부재의 충돌변형 응답을 제공하지 않으나 다량으로 편성된 열차의 전체적 거동을 예측할 수 있는 장점을 갖기 때문이다. 1, 2차원 해석에서 제공하지 않는 탈선이나 횡좌굴 현상을 얻을 수 있다. 제안된 방법을 한국형 고속열차 KHST에 적용하여 이용 가능성을 검토하고 향후 연구 방향을 제안한다.

2. 모델링

본 논문에서 대상으로 하는 열차 KHST의 차량편성은 20량으로 이루어진다. 본 논문에서는 이 열차의 충돌 시뮬레이션을 위하여 강제 다물체 동역학이 이

¹ 정회원, 한국기계연구원 선임연구원

² 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

용된다[11]. Fig. 1은 다물체 동역학 시스템을 보여주고 있다. 만일 이 시스템이 nb 개의 강체로 구성되어 있다면 공간에서 시스템의 운동을 표현하기 위해서는 $6 \times nb$ 개의 좌표가 필요하다. 이러한 일반좌표는 그러나 물체들간의 구속조건 때문에 모두 독립은 아니다. 각 물체들의 운동은 일반좌표들간의 기구적 구속에 의한 영향을 받는다. 다물체 시스템의 운동을 제어하고 이해하기 위해서는 공간에서의 물체, 조인트, 힘 요소의 정의가 필요하게 된다. nb 개의 강체로 구성된 시스템이 있다면 그 시스템의 일반좌표는 식(1)과 같이 정의된다.

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_{nb \times 6}]^T \quad (1)$$

만일 시스템에 m 개의 구속조건이 있다면 식(2)와 같이 표시되고 구속된 다물체 시스템의 운동방정식은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\Phi(q, t) = [\Phi_1(q, t), \dots, \Phi_m(q, t)]^T = 0 \quad (2)$$

$$Mq + \Phi_q^T \lambda = Q \quad (3)$$

식(3)을 유용하게 이용하기 위하여 식(2)의 1,2차 미분이 필요하며 식(4), 식(5)와 같이 정의된다.

$$\Phi_q q + \Phi_t = 0 \quad (4)$$

$$\Phi_q q = -(\Phi_q q)_q q - 2\Phi_{qt} q - \Phi_{tt} \equiv \gamma \quad (5)$$

식(3),식(5)를 이용하여 행렬형태의 구속 다물체 시스템 운동방정식을 식(6)과 같이 정의하게 된다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

M : system mass matrix

q : acceleration

Q : applied force

Φ_q : Jacobian matrix

λ : Lagrange multiplier

γ : RHS of acceleration of constraints

다물체 동역학 이론과 그의 해법은 참고문헌 [11]를 참조 바란다. 본 논문에서는 다물체 동역학 모델링 및 시뮬레이션을 위하여 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어 DADS[12]를 이용한다. 다물체 동역학적 접근의 장점은 동적 기계시스템의 전체적인 거동을 예측하기에 적합하다는 것이다. 그러나 유한요소법과 같이 부재의 소성 변형을 고려하는 것은 아직 난제이다. 다물체 동역학을 이용하여 열차를 모델하기 위해서는 열차를 구성하는 주요 부품을 6자유도 물체로 표현하고 물체들 간의 상대 구속을 조인트를 이용하여 정의하게 된다. 또한 물체들 간의 힘 요소도 3차원적으로 모델하게 된다. 본 연구에서 다루는 KHST를 구성하는 차체, 대차, 현가 요소, 연결장치 등을 20량에 대하여 모두 모델하는 것이 최종 목표이나 본 논문에서는 시작 연구이고 충돌 거동에 큰 영향을 주는 것은 전방 차량들이므로 Fig. 2와 같이 선두 5차량은 대차, 현가 요소, 연결장치, 차체를 모두 포함하는 상세 다물체 동역학 모델을 이용하고 나머지 차량은 단순 집중 질량 모델을 사용하였다. Fig. 3은 선두 5차량에 대한 상세 DADS 해석 모델을 보여주고 있다.

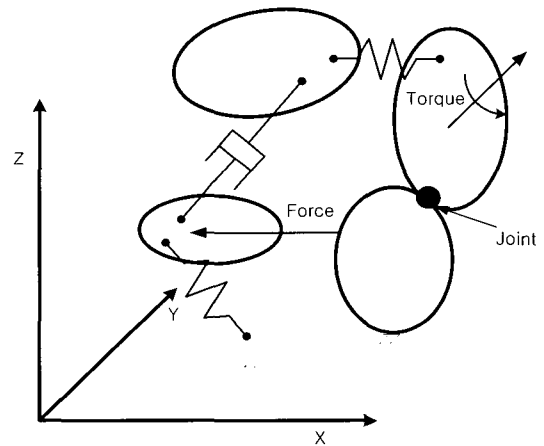


Fig. 1 Multibody dynamic system



Fig. 2 DADS dynamic model of KHST consisting of 20 cars

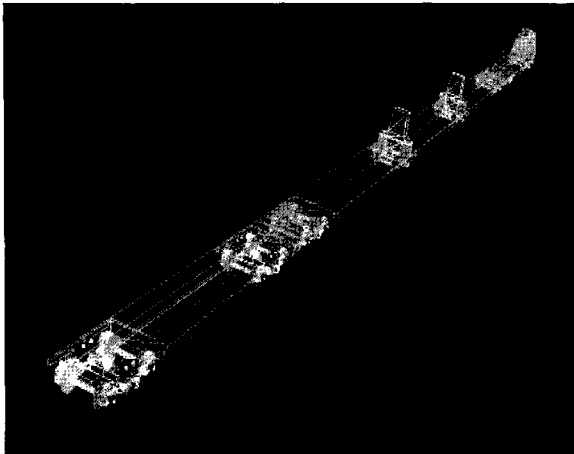


Fig. 3 Multibody dynamic model of frontal 5 cars of KHST

2.1 대차모델

KHST는 3종류의 대차로 구성된다. Fig. 4는 동력차용 대차, Fig. 5는 동력 객차용 대차, Fig. 6은 객차용 대차에 대한 DADS 해석 모델을 보여주고 있다. 1차, 2차 현가에 이용되는 탄성 스프링(coil spring)의 모델링은 6방향 강성을 갖는 DADS의 BEAM 요소를 응용하여 모델한다[12]. DADS의 BEAM 요소는 식(7)을 이용하여 두 물체간의 6방향 힘 $[F]$ 을 계산한다.

$$[F]_{6 \times 1} = [K]_{6 \times 6} [X]_{6 \times 1} + [C]_{6 \times 6} [\dot{X}]_{6 \times 1} \quad (7)$$

식(7)에서 강성행렬 $[K]$ 와 감쇠행렬 $[C]$ 를 이용하여 탄성 스프링을 모델한다. 범프스톱(Bump stop), 감쇠기들은 비선형 병진 스프링 요소인 TSDA 요소[12]를 이용한다. TSDA 요소는 두 물체간의 거리 l , 상대속도 \dot{l} , 시간을 이용하여 식(8)과 같이 힘을 계산한다.

$$Force_{TSDA} = F(l, \dot{l}, time) \quad (8)$$

식(8)에서 함수 $F(l, \dot{l}, time)$ 는 선형, 비선형 함수로 정의하게 되며 범프스톱은 비선형 함수로 모델하게 된다. 가이드 스프링, 조인트 고무 등은 BUSH 요소[12]를 이용하여 모델한다. BUSH 요소는 BEAM과 유사하나 강성행렬과 감쇠행렬에 있어서 계수가 대각선 방향만 존재하는 요소이다. 그리고 공기 스프링은

BEAM 요소를 이용하여 선형으로 모델한다. 롤방지바(anti-roll bar)는 BUSH 요소로 모델한다. 대차와 차량간의 연결은 링크, 고무, 핀 등으로 구성되나 본 논문에서는 비선형 BUSH 요소를 이용하여 연결장치의 기능과 같도록 한다. 객차와 객차의 연결은 Fig. 6과 같이 감쇠기, 링으로 이루어지는데 감쇠기는 TSDA, 링 연결은 역시 BUSH 요소를 응용하여 모델한다. 여기서 현가 행정을 제한하기 위한 비선형 TSDA가 모든 1,2차 현가 요소에 추가된다.

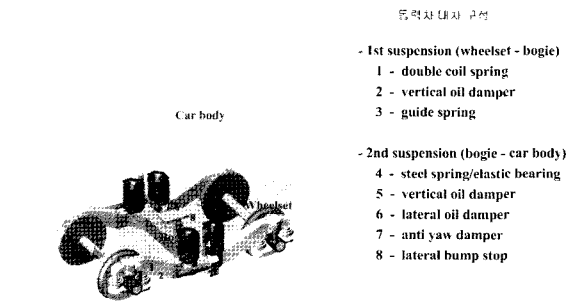


Fig. 4 Dynamic model of the power car bogie

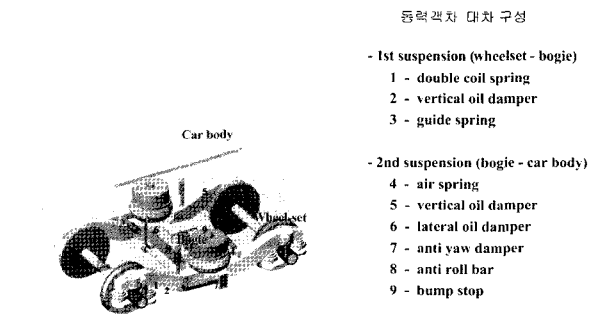


Fig. 5 Dynamic model of the motorized trailer bogie

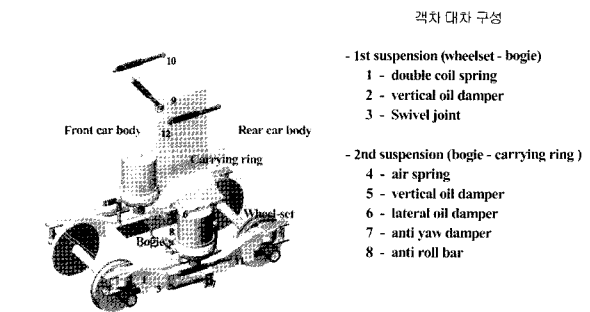


Fig. 6 Dynamic model of the passenger car bogie

2.2 부재의 대 변형 모델

충돌 해석 모델에 있어서 부재의 대 변형을 고려해야 한다. 본 논문에서는 강체로 부재를 모델하기 때문에 강체와 강체 사이에 대 변형 스프링이 이용된다. 부재의 대 변형 힘-변형 특성은 Fig. 7과 같은 히스테리시스 특성을 갖는다. KHST 전체차량 모델에서 6~20량의 차체, 연결장치, 대차들은 집중질량으로 표현하고 질량사이에는 모두 히스테리시스 스프링으로 연결하여 모델한다. 그리고 1~5량은 차체를 2개의 강체로 모델한 후 강체간에는 이 히스테리시스 스프링을 이용하여 대 변형을 고려한다. 그러나 DADS에는 이러한 히스테리시스 스프링 요소가 없으므로 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 히스테리시스 스프링 요소를 개발하여 이용한다[9]. 실제로 충돌해석에 적용한 결과 오실레이션이 많이 생겨 차후 이 스프링에 대한 보완 연구가 요구되었다.

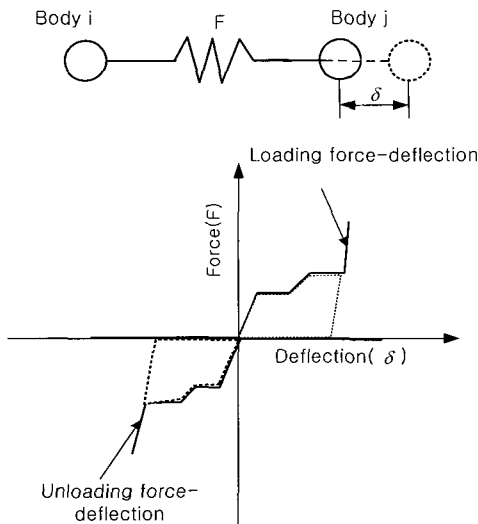


Fig. 7 Hysteresis spring model for large deformable bodies

2.3 차량-장애물 충돌 모델

열차와 장애물 강체와의 충돌을 모델하기 위하여 접촉요소를 이용한다. 이용된 접촉 요소는 DADS의 CONTACT 요소[12]로 면과 구 접촉을 응용하여 사용한다. 즉 KHST와 충돌하는 물체는 접촉 요소의 면이 되고 전두부는 구로 정의된다. 전두부의 형상 및 헤드 스톱의 구조를 고려하여 이 CONTACT 요소를 전두

부에 4개 이용한다. 강체 질량과의 접촉력의 계산은 침투량에 따라 강성, 감쇠, 마찰계수 특성을 이용하여 식(9), 식(10)과 같이 계산한다. 여기서 접촉에 이용된 상수들은 충돌력에 영향을 주기 때문에 단순 모델에 대한 시행착오법을 이용하여 결정하였다.

$$Force_{normal} = k\delta + c\dot{\delta} \quad (9)$$

$$Force_{tangential} = \mu Force_{normal} \quad (10)$$

여기서,

k : stiffness

c : damping coefficient

μ : friction coefficient

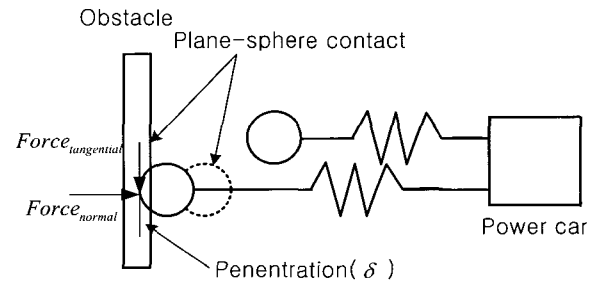


Fig. 8 Contact between obstacle and power car(side view)

2.4 차륜/레일 접촉

차륜과 레일의 접촉은 이미 알려진 이론을 응용하여 개발한 모듈을 DADS에 추가하여 모델한다. 차륜/레일의 접촉은 주어진 형상 및 마찰계수, 상대속도, 차륜위치 등의 함수로 정의된다. 여기서 개발한 차륜/레일 접촉의 특징은 기존의 것과 다르게 차륜과 레일 사이의 분리가 가능하다는 것이다. 즉, 탈선현상을 고려할 수 있는 특징을 가진다. 이것은 경사면 충돌시 차량의 탈선을 예측하는데 이용된다[13].

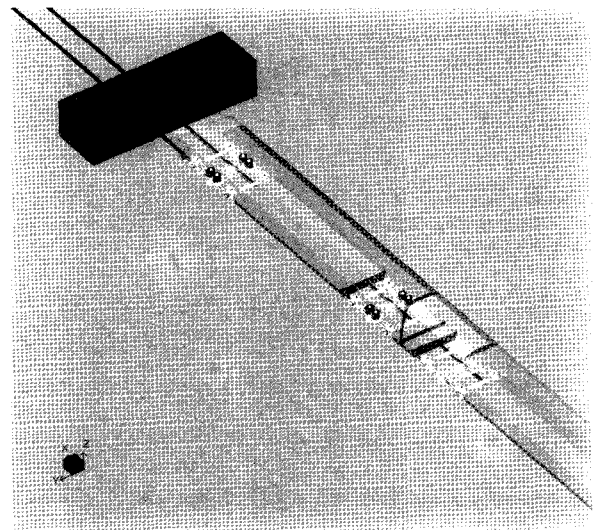
3. 시뮬레이션

3.1 KHST 정면충돌

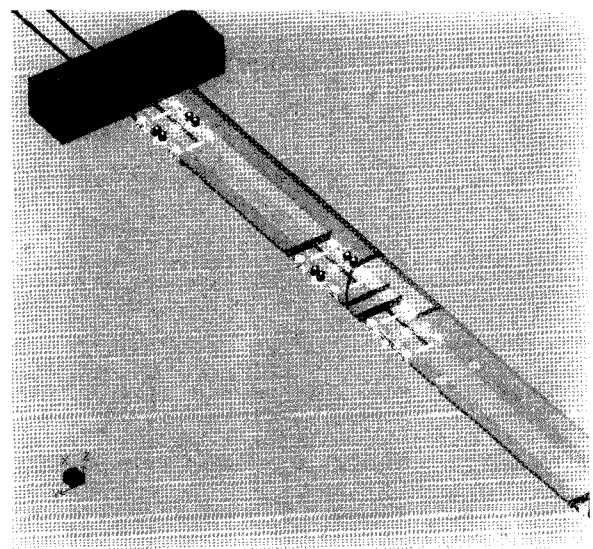
전 절에서 개발한 3차원 동적 모델을 이용하여 KHST의 정면 충돌 사고에 대한 시뮬레이션을 수행하

었다. Fig. 9(a)는 정면 충돌 해석 모델을 보여주고 있으며 KHST와 충돌하는 강체의 질량은 15ton고 차량의 속도는 110km/h이다. 3차원적 시뮬레이션의 검증을 위하여 1차원적 시뮬레이션도 수행하였다. 1차원적 시뮬레이션은 충돌전용 해석 프로그램 PAM-CRASH를 이용하였다[14]. Fig. 9(b)는 정면충돌에 의한 충돌 거동 결과 중 Time=160ms 일 때의 결과를 보여주고 있다. Fig. 9(b)에서와 같이 전두부 즉 헤드스톡 부분이 압괴를 일으키는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 헤드스톡의 압괴량을 보여주고 있다. 1차원 해석의 경우 최대 압괴량(Headstock(detail))은 약 1800mm, 3차원에서는 약 1950mm로 3차원에서의 결과가 큰 값을 나타내고 있다. 이 차이는 3차원 해석 모델에서는 강체 요소가 많기 때문이다. 그러므로 이 차이를 줄이기 위하여는 강체를 유연체로 모델해야 할 필요성을 찾을 수 있다. Fig. 11은 압괴력을 보여주고 있다. 압괴력은 주어진 전두부 힘-변형 곡선을 추종하고 1차원의 결과(Front end(detail))와 비교하여 큰 거동은 유사함을 볼 수 있다. 그러나 3차원의 결과는 상대적으로 오실레이션이 많고 히스테리시스 스프링 복원시 힘-변위 곡선에서의 기울기가 크게 나타났다. 이러한 차이는 적용된 수치해법에서도 기인한다. DADS는 수치적분은 유한요소법을 이용한 1차원적 해석에서 이용하는 방법에 비하여 오차제어를 엄격하게 수행하는 미분대수방정식 해법에 기초를 두고 있으며 상미분방정식의 적분에는 다단계 적분기 PECE를 이용한다. 이 방법은 그러나 강성계에는 고주파수 결과를 나타내는 특징이 있다. 그러므로 수치해법을 비롯하여 히스테리시스 스프링에 대한 보완 연구가 필요하다고 사료된다. Fig. 12는 동력차의 가속도 응답으로 3차원 해석에서는 최고치가 약 7g, 1차원은 약 6g를 보여주고 있다. Fig. 12는 모두 필터링이 된 값이다. 그러나 필터링 방법이 동일하지는 않다. 1차원 해석에서의 필터링 방법은 PAM-CRASH가 제공하나 명확히 필터링 방법을 알 수 없기 때문이다. Fig. 12(a)는 3차원에서의 결과로 강체 부분이 많기 때문에 최고치가 큰 것으로 사료되며 동일한 이유로 응답속도가 빠른 것을 알 수 있다. 가속도 응답은 상대적으로 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 3차원에서는 1차원에 비하여 강체요소가 많고, 해석 결과의 필터링 방법의 차이 및 적용된 수치해법의 차이로 기인한다고 평가된다. 그러므로 충돌에 의한 에너지 흡수, 압괴등을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 모델의 보완이 필요하다는 것을

알 수 있다. 그러나 여기서 3차원 해석의 주목적이 전체적인 거동이기에 때문에 현 결과의 차이를 수용할 수 있다고 사료된다.

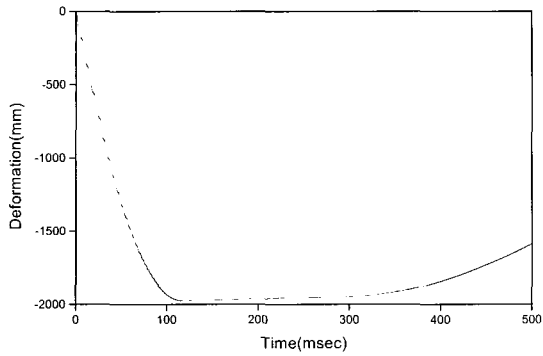


(a) Time=0.0s

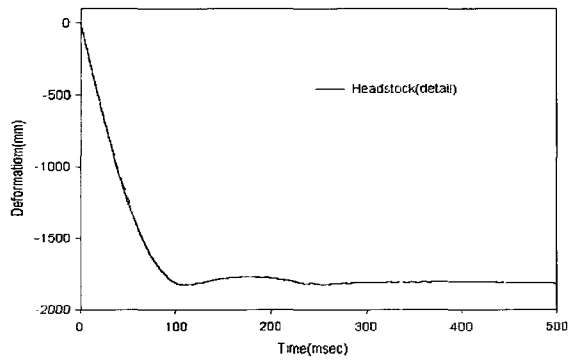


(b) Time=160ms

Fig. 9 Frontal crash accident simulation

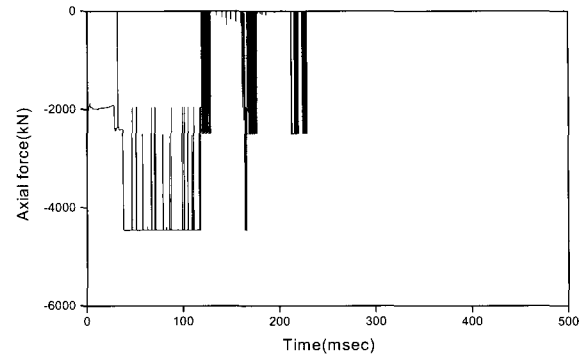


(a) 3D

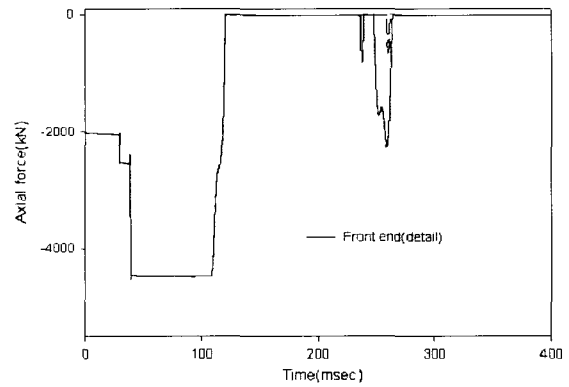


(b) 1D

Fig. 10 Axial deflection of head stock



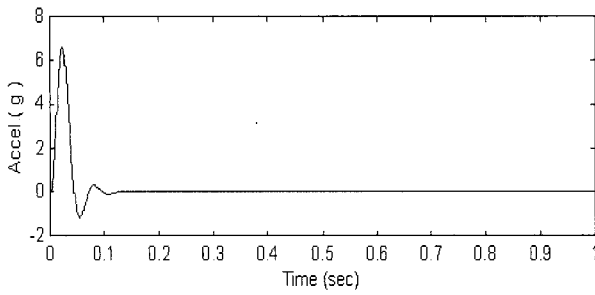
(a) 3D



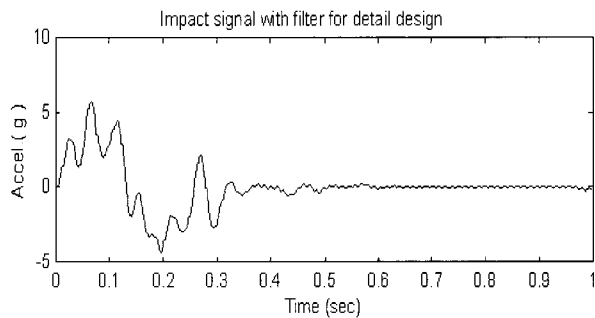
(b) 1D

Fig. 11 Axial force of head stock

Fig. 13은 차간 타고오름을 검토하기 위한 결과로 동력객차-객차, 객차-객차의 연결부에 작용하는 수직방향 힘을 보여주고 있다. 이 힘은 차의 타고오름에 직접적으로 영향을 준다. Fig. 13에서 보면 객차-객차에서의 수직방향 최고 값(+방향)은 약 1500kN을 보이고 있다. Fig. 13 결과의 주요 값에 해당하는 변위양상을 구하면 Fig. 14와 같은 현상을 나타낸다. 이와 같이 3차원적 해석을 통하여 타고오름을 예측하고 타고오름 방지를 위한 차간 연결부 설계를 수행할 수 있다.



(a) 3D



(b) 1D

Fig. 12 Axial acceleration of power car

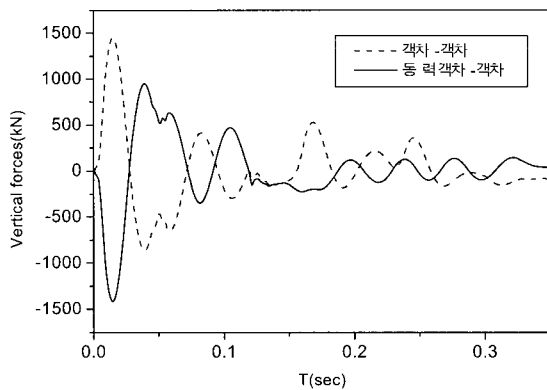


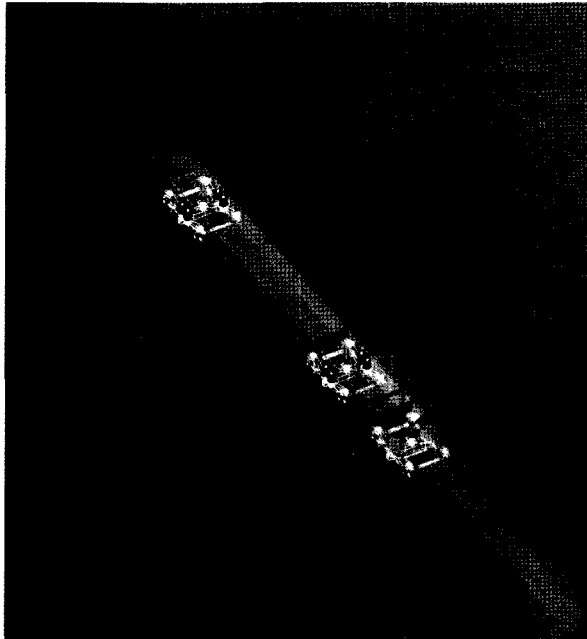
Fig. 13 Vertical forces on ball&socket joint to connect cars



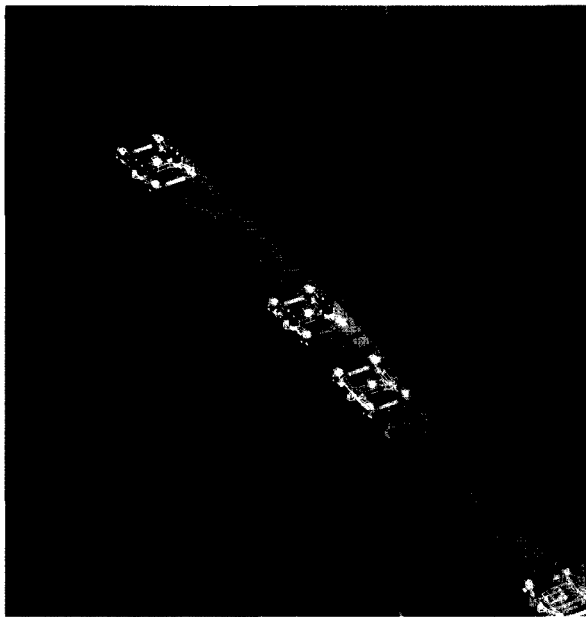
Fig. 14 Climbing of cars(side view)

3.2. KHST 경사면 충돌해석

본 논문의 주 목적인 전체차량의 거동, 탈선거동을 예측하기 위하여 정면충돌에 이용된 해석 모델을 수정하여 장애물이 경사진 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 15와 같다. Fig. 15(a)에서와 같이 강체 장애물이 30도 기울어진 상태로 110km/h로 주행 중인 KHST와 충돌하게 된다. 강체의 질량은 15ton이고 질량관성모멘트는 정해진 것이 없어 임의로 입력하였다. 본 해석의 주목적은 경사면 충돌에 대한 시뮬레이션에 대한 가능성을 보는 것이라 할 수 있다. 해석 가능성이 입증되면 좀더 정확한 데이터 및 해석 모델을 이용하여 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다. Fig. 15(b)는 경사면 충돌 해석에 대한 거동을 보여주고 있다. Time=144ms에서 보면 전체적인 거동이 횡좌굴 모드가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 좀더 분명히 보기 위하여 Fig. 16과 같이 차간 연결장치의 토크를 검토하였다. Fig. 16은 동력 객차-객차, 객차-객차의 연결장치에서 발생하는 수직 방향 토크반력을 보여주고 있다. 이 토크의 방향을 이용하여 차량들의 거동을 그리면 Fig. 17과 같은 횡 좌굴 거동을 보인다. 그러나 정량적인 수치는 현재 의미를 부여하기 힘들다. 이와 같이 사고 시나리오가 정해지면 대 변형의 거동을 예측할 수 있어 횡 좌굴을 줄이기 위한 연결기의 설계에 응용이 가능하다.



(a) Time=0.0s



(b) Time=144ms

Fig. 15 Side crash accident simulation

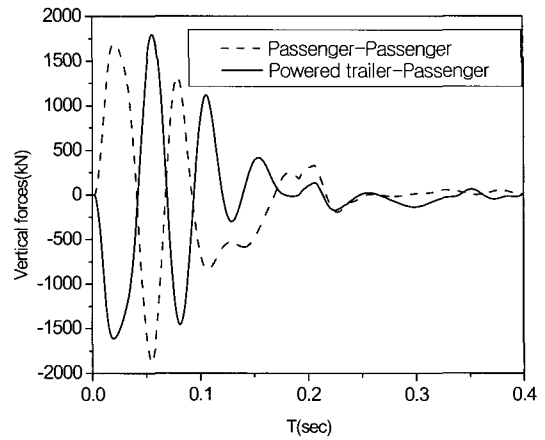


Fig. 16 Yaw torques on ball&socket joints to connect cars

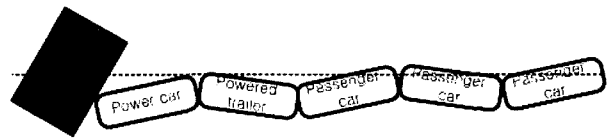


Fig. 17 Lateral buckling mode of KHST

4. 결론

이상과 같이 고속전철의 충돌 사고 시 충돌에 의한 열차의 3차원적 거동 시뮬레이션 방법을 제시하고 KHST에 적용하였다. 연구 결과 본 논문에서 제시하는 다물체 동역학을 이용한 3차원적 충돌거동해석 방법이 고속전철 및 기타 철도차량 충돌 시뮬레이션에 적용 가능함을 알 수 있었다. 이러한 기술을 이용하면 다양한 충돌사고 유형에 대하여 전체차량의 거동을 예측할 수 있다고 평가된다. 그러나 강체에 기초를 두기 때문에 발생하는 문제와 전두부 충돌 모델의 단순성으로 인한 오차를 줄이는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행된 것임을 밝힙니다.

참고문헌

1. L. M. Cleon, J. Legait, D. Leveque, "Passive Safety Concepts Applied to TER X7250 Diesel Railcar", WCCR, Vol. D, pp. 861-867, 1997
2. J. S. Koo, Z. G. Feng, M. Domaszewski and F. Renaudin, "Theoretical and Numerical Study of a Coupler for Crashworthy Design of a TGV Power Car", 2nd International Conference on Intergrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, pp.1-7, 1998
3. L. M. Cleon, "Tolerances a La Collision Des Materiels Ferroviaires Opimisation de La Securite Passive des Structures de Vehicule", WCCR '94, pp. 885-891, 1994.
4. J. H. Lewis, "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways", WCCR '94, pp. 893-900, 1994.
5. A. Scholes, "Developing Crashworthiness Technology in Europe", WCCR '96, 1996.
6. R. A. Smith, "Crashworthiness Moves from Art to Science", Railway Gazette International, pp. 227-230, 1995.
7. P. Drazetic, R. Tassin and Y. Ravalard, "Experimentation and Modeling of Climbing Phenomena of Guided Transport Vehicles", Proc instn Mech Engrs, Vol 209, IMechE, 11-17, 1995.
8. L. T. Kisielewicz and K. Ando, "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA '93, pp. 73-81, 1993.
9. 구정서 외 13, "고속전철 기반기술 개발 연구보고서", 한국기계연구원, 2002.
10. 구정서, 조현직, 김동성, 윤영환, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 217-222, 2001.
11. E. J. Haug, "Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System", Allyn and Bacon, USA, 1989.
12. DADS: <http://www.lmsintl.com>
13. 한형석, 허 신, 하성도, "철도차량 동력학 해석을 위한 DADS 차량/레일 접촉모델 개발", 한국 소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 706-711, 1998.
14. PAM-CRASH: <http://www.esi.co.kr/>