

탈선열차의 충돌거동을 모사하기 위한 해석모델

FE Analysis Model for Simulation of Collision Behavior of Derailed Train

배현웅*, 김동성**, 박병주***, 이용희***, 임남형†

Hyun-Ung Bae*, Dong-Sung Kim**, Byung-Ju Park***, Yong-Hee Lee***, Nam-Hyoung Lim†

Abstract The train derailment accident occurs with a low incidence, but the damage due to train derailment can become quite big disaster. Recently, the derailment accident has often been occurring at home and abroad. The derailment protection facilities are being applied to minimize expansion of damage by train derailment in various countries operating railway of the world. In this paper, 3D finite element analysis model is developed to simulate collision behavior of derailed train. And numerical verification of the developed model is carried out about train derailment-collision behavior.

Keywords : Derailed train, Train Collision, FEA model, Model verification

초 록 최근 열차사고로 인한 인명피해가 종종 발생되어오고 있다. 인명피해로 이어지는 열차사고는 대부분 탈선 또는 충돌에 의한 사고이며, 이러한 탈선/충돌사고는 발생빈도는 낮으나 발생되면 그 피해정도가 상당히 크므로 이에 대한 피해를 최소화하기 위한 대비로 방호시설을 설치하게 된다. 원천적으로 탈선이 발생되지 않도록 예방하는 것이 가장 이상적인 대비이나, 인적·자연적 재해 등 예기치 못한 사고에 대비하여 그 피해를 경감/최소화하기 위한 물리적 수단을 강구할 필요성이 있으며 이를 탈선열차에 대한 방호 개념으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 탈선열차의 충돌거동을 모사하기 위하여 3차원 유한요소해석 모델을 개발하였으며, 탈선-충돌거동에 대한 모델 검증은 수행하였다.

주요어 : 탈선열차, 열차충돌, 해석모델, 모델검증

1. 서 론

탈선사고는 그 발생빈도는 낮으나 피해 정도가 상당히 큰 재난사고이다. 그러나 최근 들어 전 세계적으로 선진철도기술 보유국인 유럽, 미국, 일본, 중국 그리고 국내에서 열차 탈선에 의한 사고가 종종 발생되었다. 사회적 요구 및 속도 경쟁에 따른 고속화에 의해 세계 각국의 철도운영기관에서는 안전성 향상을 위한 노력에 만전을 기하고 있음에도 불구하고, 열차 탈선에 의한 인근 구조물과의 충돌, 인근 선로 또는 타 교통시스템으로의 침범 등의 사고가 이어지고 있다[1,2]. 인명피해로 이어지는 열차사고는 대부분 탈선 또는 충돌에 의한

† 교신저자: 충남대학교 공과대학 토목공학과(nhrimim@cnu.ac.kr)

* 충남대학교 공과대학 토목공학과

** (주)로드키네마틱스 연구개발부

*** 한국철도시설공단 KR연구원 기술연구처

사고이며, 이에 대한 피해를 최소화하기 위한 대비로 방호시설을 설치하게 된다. 원천적으로 탈선이 발생되지 않도록 예방하는 것이 가장 이상적인 대비이나, 인적, 자연적 재해 등 예기치 못한 사고에 대비하여 그 피해를 경감/최소화하기 위한 물리적 수단을 강구할 필요성이 있으며 이를 탈선열차에 대한 방호 개념으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 탈선된 열차의 충돌거동을 모사하기 위하여 3차원 유한요소해석 모델을 개발하였으며, 탈선-충돌거동에 대한 모델 검증을 수행하였다.

2. 열차 모델링

3차원 열차 및 궤도의 해석모델링을 위해 동적 거동 해석(Explicit)을 위한 비선형 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA를 사용하였다. 열차는 KTX(Korea Train eXpress)를 기준으로 하였다. 차륜과 대차(Wheel-Bogie frame)의 연결시스템인 1차 현가장치(Primary suspension system) 및 대차와 차체(Bogie frame-Car body)의 연결시스템인 2차 현가장치(Secondary suspension system)를 6자유도 Spring과 Damper 요소로 모사하였다(Fig. 1). 차량과 차량(Car body-Car body)의 연결시스템 또한 Spring과 Damper 요소로 모사할 수 있으나 본 논문에서는 동력차 1량만 고려하여 모델검증을 수행하였다.

차륜과 차축박스는 실제 형상을 준용하여 Shell 요소로 모델링하였으며, 차축과 대차는 원형 봉 단면으로 가정하여 Beam 요소로 모델링하였다. 열차 차체는 실제 형상을 최대한 준용하여 Shell 요소로 모델링하였으며, 차체 프레임은 종방향, 횡방향, 대각선 3방향의 프레임을 고려하여 Beam 요소로 모델링하였다(Fig 2).

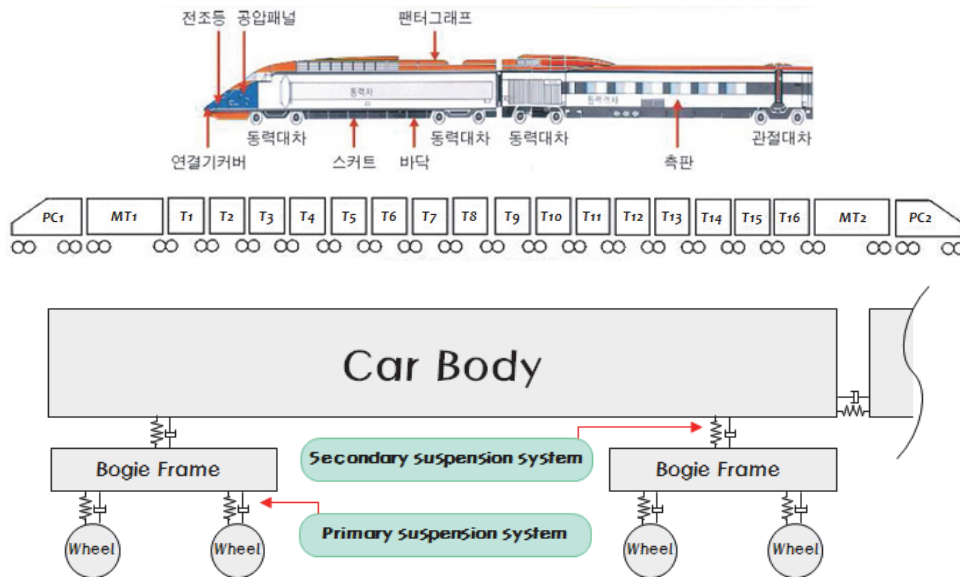


Fig. 1 Model concept of KTX

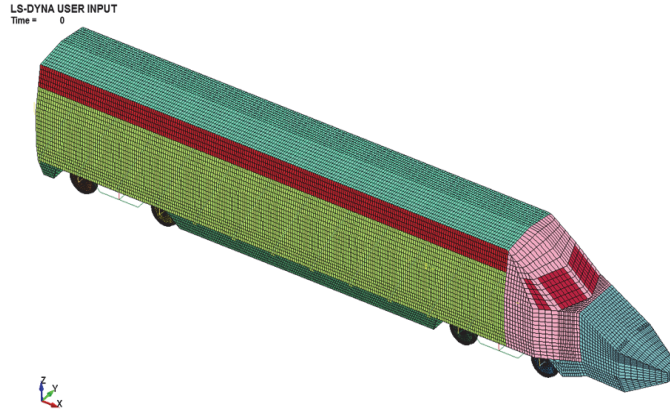


Fig. 2 3D model of power car of KTX

3. 모델검증

3.1 에너지 평형

본 논문에서 개발된 열차 모델의 수치적 검증을 위하여 철도안전법에 의한 철도차량의 표준충돌사고각본 1, 정면충돌사고 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시나리오는 정지상태의 동일열차와 36 km/h로 정면충돌하는 조건으로, 해석 시에는 에너지 증가성을 고려하여 강체벽에 18 km/h로 충돌하는 조건을 적용하였다. 이때 충돌에 대한 차량설계의 관점에서는 충돌 후 차량의 충격 에너지 흡수구조 및 부품설계에 초점이 맞추어 있으므로 열차모델의 재료적 특성이 중요하게 된다. 그러나 본 연구의 경우 열차 탈선 후 방호시설과의 충돌거동 파악(차축/차륜) 및 벽체 설계에 초점이 맞추어 있으므로 열차 전두부의 흡수구조 등 상세한 모델링은 생략되었다.

Table 1. Analysis conditions for energy balance verification

Mass	Velocity	Ground Material	Ground Friction
68.17 ton	5 m/s (18 km/h)	Rigid	0

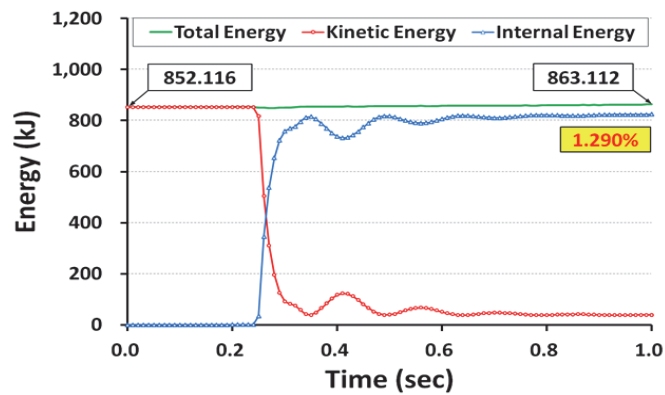


Fig. 3 Simulation outcome for energy balance of train collision model

이론적으로 운동에너지를 산정할 수 있으며(852.113 kJ), Fig. 3의 에너지 평형 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 초기 운동에너지가 852.116 kJ로 거의 유사하게 나타났다. 충돌 후 열차의 운동에너지(Kinetic Energy)는 감소하게 되며 동시에 내부에너지(Internal Energy)는 증가하게 된다. 앞서 언급했듯이 본 열차 모델은 동력차 전두부의 흡수구조의 상세를 생략하였기 때문에 급격한 에너지 변화율을 보인다. 그러나 에너지 평형 측면에서 전체에너지(Total energy)의 변화량은 초기 에너지 852.116 kJ에서 863.112 kJ로 1.290%의 변화율을 나타냈다. 일반적으로 5%이내의 변화율을 신뢰할 수 있는 수준으로 본다.

또한, Koo 와 Cho [3]의 연구에서 수행한 열차의 정면충돌 시뮬레이션에서는 벽체에 작용하는 최대 충돌하중이 6,036 kN로 나타났으며, 본 모델의 동일한 조건에서 벽체에 작용하는 최대 충돌하중은 6,118 kN으로 열차 종류 및 전두부의 특성은 다르나 충돌하중 크기는 유사하게 나타났다.

3.2 탈선 거동 모사

열차 탈선은 차량결합, 윤중감소 등으로 인한 차륜의 레일 타고오름(Wheel-climbing) 탈선, 그리고 궤도틀림, 체결구 이상 등의 궤도결합에 의해 차륜이 떨어지는 탈선 등이 있다. 본 연구는 열차의 탈선이 발생된 이후 방호시설 등의 구조체에 충돌하는 것에 그 목적이 있으므로 타고오름에 의한 탈선 거동을 모사하고자 하였다. 타고오름 탈선 거동의 검증은 위해 Koo 와 Cho [3]의 연구에서 모사한 타고오름 탈선거동의 조건과 동일하게 모사하였으며, 그 조건은 레일 길이방향을 기준 축으로하여 60° 기울어진 강체벽과 72 km/h로 충돌하는 조건이다

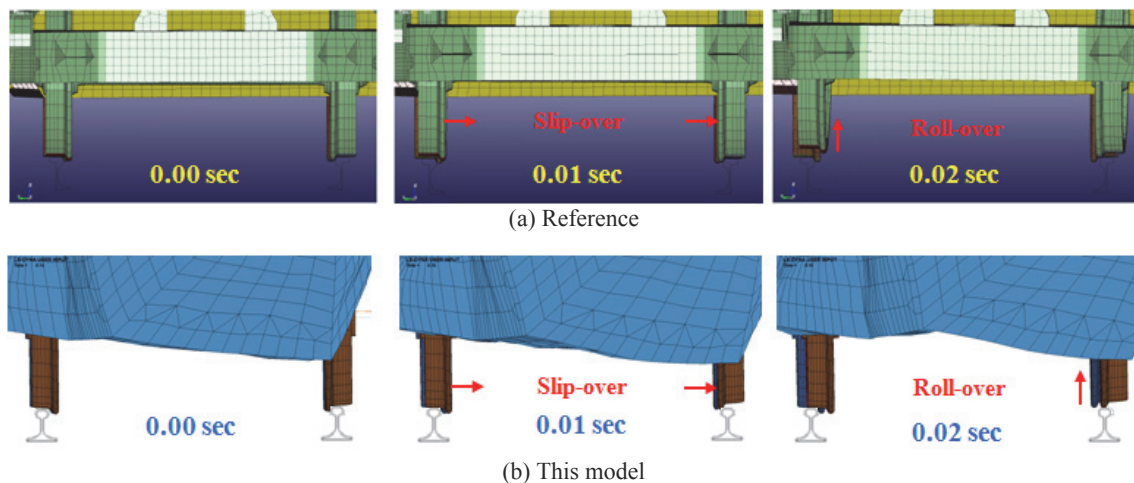


Fig. 4 Simulation outcome for slip and roll-over derailment

Fig. 4 와 같이 60° 기울어진 강체벽과 열차가 충돌하면서 차륜이 레일상에서 횡방향으로 미끄러져 오름(Slip-over)이 발생되고, 이후 차륜이 한쪽 레일에만 접촉이 이루어지고 반대쪽 레일에서의 차륜은 수직방향으로 들러 오르는(Roll-over) 현상이 발생된다. 이를 Slip & Roll-over 상태라 한다. 본 모델 또한 이러한 탈선 거동을 잘 모사하고 있음을 검증하였다.

3.3 충돌 거동 모사

탈선된 열차가 방호벽 등의 구조체와 충돌하였을 때의 거동의 적절성을 검증하기 위하여, Jin 과 Yoshimi [4]의 연구결과를 참고로 하여 시뮬레이션 검토를 수행하였다. Jin 과 Yoshimi 는 레일상에서의 거동을 고려하지 않고, 이미 탈선한 열차차량이 예상되는 입사각도와 속도를 갖고 벽과 충돌하는 조건을 모사하였다. 이와 비교하기 위해 본 모델도 동일한 조건에서 충돌 거동 시뮬레이션을 수행하였다.

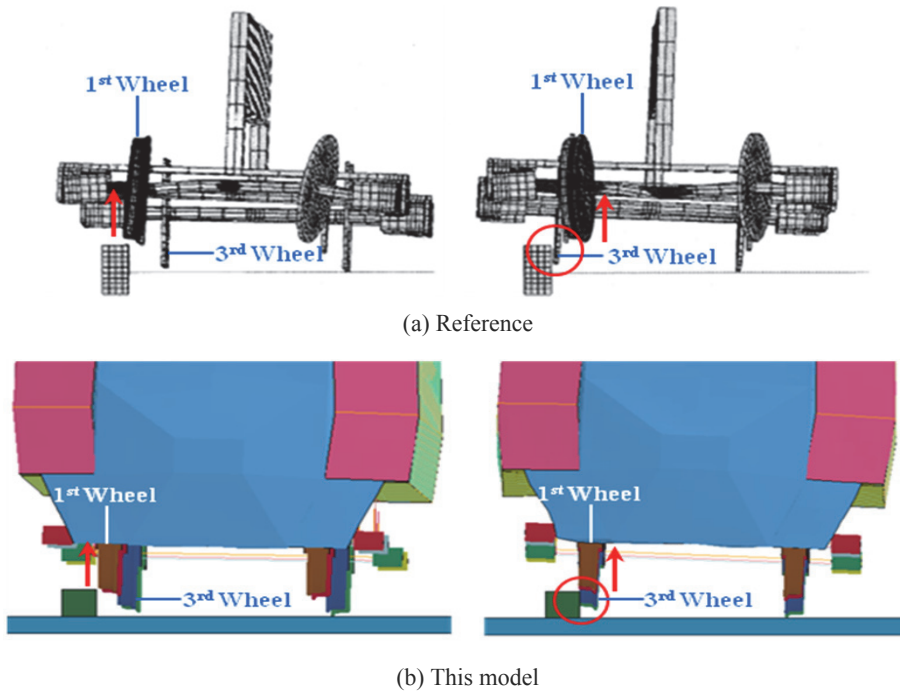


Fig. 5 Simulation verification for collision behavior by incidence angle and velocity

Fig. 5 는 열차속도 270 km/h, 입사각도 0.8° (좌)와 0.1° (우)일 때 벽과 차륜이 충돌하는 조건에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 충돌 입사각도가 0.8° 일 경우, 첫 번째 차륜(1st Wheel)이 벽에 충돌 후 수직방향으로 점핑(Jumping)되는 현상이 나타났으며, 충돌 입사각도가 0.1° 일 경우는 첫 번째 차륜이 벽에 충돌 후 수직방향으로 점핑되고 두 번째 대차의 세 번째 차륜(3rd Wheel) 또한 벽에 충돌하게 된다. 이러한 충돌 거동이 유사하게 나타남에 따라 본 연구에서 개발된 열차 모델의 충돌 거동 또한 적절히 모사되고 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 탈선된 열차의 충돌거동을 모사하기 위한 3차원 유한요소해석 모델의 검증을 수행하여, 차량의 질량분포 및 강성이 유효적절하게 구성되어 충돌하중을 결정하는데 충분하고, 탈선 시작 후의 거동이 유효적절하게 표현되며, 설계에 필요한

탈선-충돌 시뮬레이션 결과의 타당성이 유효한 것으로 판단되었다. 추후 탈선열차에 대한 구조물과의 충돌 시 거동 특성 파악 및 방호시설 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] H.U. Bae, A.R. Kim, D.S. Kim, W.I. Choi and N.H. Lim (2013) Review on the Height of Derailment Barrier on the Railway Bridge, *Proceedings of the Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Daegu, Korea, KSR2013A168 (in Korean).
- [2] H.U. Bae, B.J. Park, H.S. Back and N.H. Lim (2014) Consideration on the Concept of DCP by Foreign Case Study, *Proceedings of the Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, KSR2014A382 (in Korean).
- [3] J. S. Koo and H. J. Cho (2012) A Method to Predict the Derailment of Rolling Stock due to Collision using a Theoretical Wheelset Derailment Model", *Multibody Syst Dyn*, 22, pp.403-422, DOI 10.1007/s11044-011-9270-y.
- [4] Jin Fukazawa and Yoshimi Sonoda (2008) 鉄道車両用逸脱防止壁の性能評価に関する研究(A study on the crashworthiness estimation of the derailment barrier), *応用力学論文集*, 11, pp.459-466.