

# 3차원 유한요소법을 이용한 일반철도차량의 충돌해석 연구 및 평가

## The study on the crashworthiness analysis and assessment for the conventional train by the 3D FEM analysis

최원목\*      정현승\*\*      권태수\*\*\*

Choi, Won Mog    Jung, Hyun Sung    Kwon, Tae Su

---

### ABSTRACT

In order to design safety trains, it is important to predict the collision characteristic of train. There are two models to predict the behavior of train at various train accidents. First model is that a Motorized Cap Passenger car is collided against rigid wall at overspeed and composed of Motorized Cap Passenger car with another parts modeled as concentrated mass attached to the end. Second model is that a whole train is collided against rigid wall as TSI scenario and composed of three cars with other parts modeled as concentrated mass coupled by coupler. This study is conducted by using Finite Element Method to estimate the ability of absorbing crush energy.

---

### 1. 서론

열차충돌시험은 많은 비용과 시간이 소비되기 때문에 현재 주로 유한요소법을 이용한 1, 2차원 충돌해석으로 충돌안전도평가를 수행하고 있다. 1, 2차원 충돌해석은 시간과 비용 면에서 설계에 필요한 중요 데이터를 획득하는데 매우 유리하나 차량의 전체거동 및 국부적인 이상거동을 예측하지 못 하는 단점을 가지고 있다. 또한, 철도차량은 일반차량과 달리 여러 차량이 한 편성을 구성하고 각 차량은 연결기와 대차로 구성되어 서로간의 복잡한 동적거동을 보이므로 3차원 충돌해석을 수행하기 위해서는 유한요소법(Finite Element Method)뿐만 아니라 다물체동역학(Multi Body Dynamics)에 대한 이해가 필요하다.

현재 한국형고속전철(KHST)의 충돌해석 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 2차원 충돌모델해석 기법을 이용한 KHST의 차량간 타고오름 현상, 차량간 연결구조 및 대차연결 구조의 강도평가에 대한 연구가 진행되고 있다. 일반철도차량에 대한 충돌해석은 차량설계를 위한 1, 2차원 충돌해석연구만 진행되고 있고 아직 3차원 충돌해석은 진행되지 않고 있다. 충돌 시 일반철도차량에 발생할 수 있는 국부적 이상거동 및 전체차량거동에 대한 예측뿐만 아니라 차량간 타고오름 및 연결기의 에너지흡수능력에 대한 평가를 하기위해서 3차원 충돌해석기법의 다양한 연구가 이루어 져야한다.

본 연구는 일반철도의 전체차량에 대한 충돌해석을 수행하기 위해 KISTI(한국과학기술정보연구원)의 슈퍼컴퓨팅센터에 설치되어 있는 충돌해석전문 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA 970을 이용하여 충돌해석을 수행하였으며, 충돌해석을 위해 3차원 쉘요소, Solid요소, 선형·비선형 스프링요소를 사용하였다. 선두동력객차(Motorized Cap Passenger, 이하 Mcp라고 칭함)에 대한 3차원 충돌해석을 수행하여 충돌에너지흡수 능력 및 차량의 이상거동을 확인하였으며, 전체차량에 대해서는 TSI규정에 따른 정면 충돌시나리오를 수행하여 전체차량의 에너지흡수 능력과 차량의 붕괴특성을 확인하였다.

---

\* 한국과학기술연합대학원 박사과정, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

## 2. 모델링

### 2.1 경계조건

본 연구에서 수행한 충돌해석모델은 크게 두 가지로 나뉘며 다음과 같다. (1) 일반철도차량의 선두동력객차(Mcp)가 150km/h의 속도로 강체벽에 정면충돌 (2) 전체차량이 35.25km/h의 속도로 강체벽에 정면충돌. (1)은 열차충돌사고 중 예외 사항을 적용하기 위해 일반적인 충돌사고 시나리오보다 더 큰 속도를 적용하였고, (2)는 유럽철도상호운영협약(AEIF)에서 만든 TSI(Technical Specification for Interoperability)에서 제시한 충돌사고 시나리오를 적용한 것이다. Mcp에 대한 해석조건은 그림 1과 같으며, Mcp를 제외한 나머지 차량은 집중질량으로 모델링하여 후면에 부착하였다. 일반철도차량의 차량편성은 6량이 기본이므로 전체차량의 충돌해석을 수행할 때 그림 2의 차량편성과 같이 6량을 모두 모델링하는 것이 정확하나 여러 논문에서 나온 충돌실험이나 충돌해석 결과를 보면 대부분의 충돌에너지는 선두 3량에서 흡수하므로 해석시간과 모델링 시간을 고려하여 선두 3량만 모델링하고 나머지 3량은 하나의 질점으로 모델링하였다. 또한 각 질점과 차량은 연결기를 표현한 비선형 스프링요소로 연결된다. 선두연결기는 선형스프링요소를 이용하여 표현되었다. 그림 3은 전체차량에 대한 충돌해석조건을 보여준다.

### 2.1 요소망

그림 4는 일반철도차량의 충돌에너지 흡수전략을 나타낸 그림이다. 열차충돌 시 충돌에너지는 장애물과 직접 충돌하는 Aluminum Honeycomb와 전두부영역(High Energy Absorption Area)에서 대부분의 에너지를 흡수하고 나머지 에너지는 Door, 화장실과 같은 승객이 탑승하지 않는 부분(Low Energy Absorption Area)에서 흡수한다. 그러므로 전두부, Door, 화장실부분은 30mm크기의 Solid요소와 Shell요소로 모델링하였으며, 거의 붕괴가 발생하지 않는 승객탑승구역은 150mm의 크기를 가지는 shell요소로 모델링하였다. 그림 5는 전두부와 전체차량에 대한 요소망을 나타낸 그림이다.

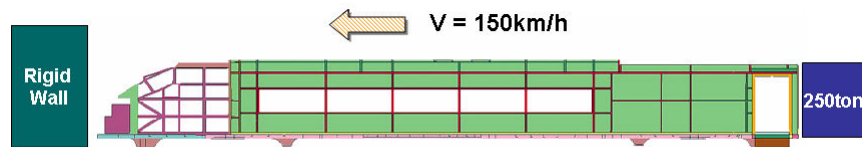


그림 1 Boundary condition

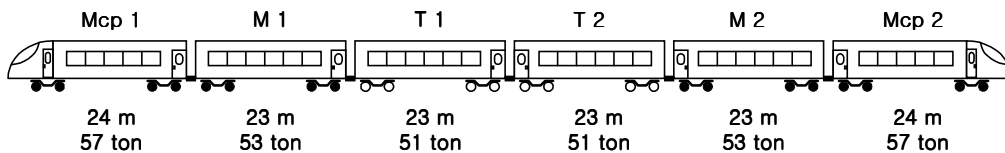


그림 2 Composition of conventional train

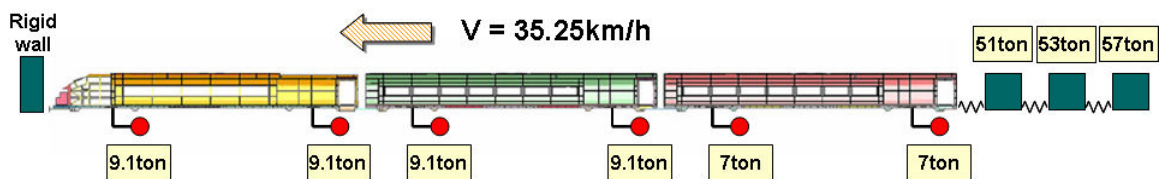


그림 3 Boundary condition

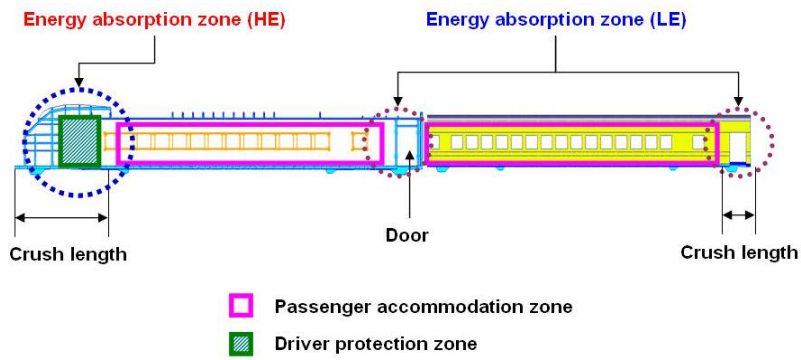


그림 4 Strategy of crush energy absorption

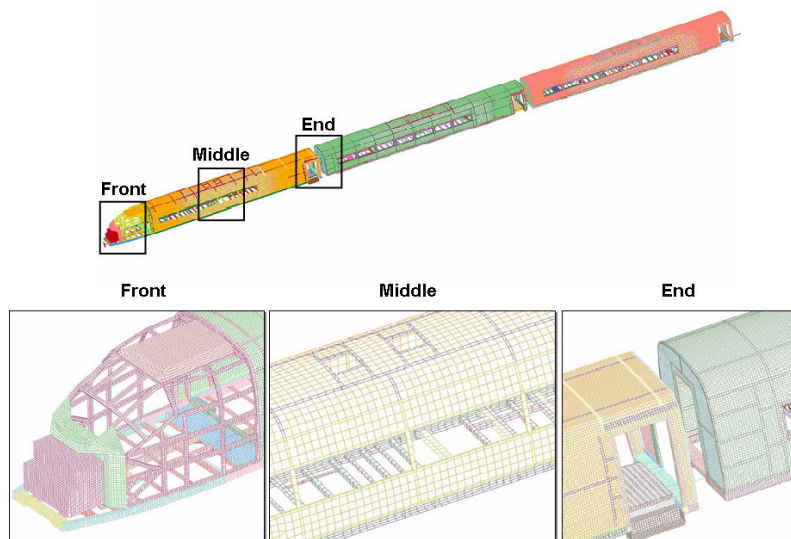


그림 5 Mesh system

열차사이를 연결하는 연결기는 그림 6과 같은 특성을 가지는 General Nonlinear Spring요소로 모델링 하였다. 전두부와 전체차량의 요소와 절점의 개수는 표1과 같다.

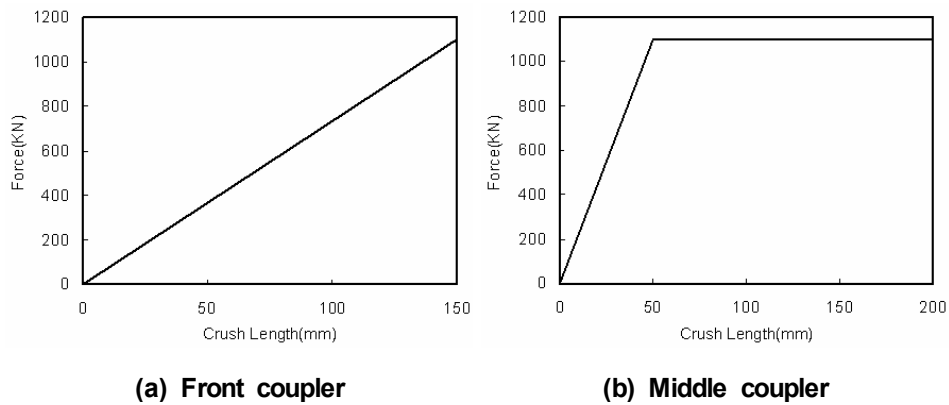


그림 6 Load-displacement curve of coupler

표 1. The number of nodes and elements

	Nodes	Elements
전두부	123,534	126,567
전체차량	211,507	223,429

### 3. 결과

#### 3.1 선두동력객차(Mcp) 충돌해석

Mcp에 대한 충돌해석결과 약 2100mm가 붕괴 되었으나 승객탑승구간에서 좌굴이 발생하는 이상거동을 보였다. 그림 7은 좌굴 발생부위를 확대한 그림으로 Under Frame의 Center sill과 Side sill이 만나는 부분에서 좌굴이 발생하였음을 알 수 있다.

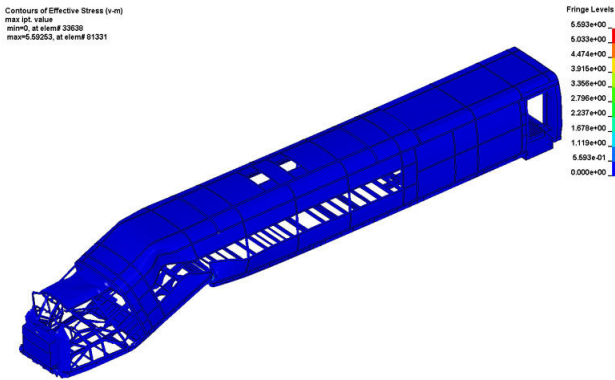


그림 7 Result of analysis

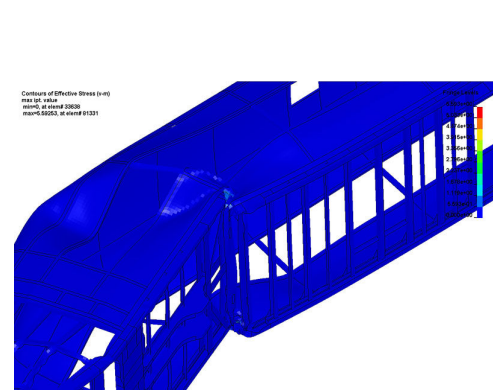


그림 8 Enlarged under frame

#### 3.2 전체차량 충돌해석

그림 9는 전체차량 충돌해석의 에너지 선도를 보여주는 것으로 전체에너지가 잘 보존되고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 전체차량에 대한 충돌압괴특성을 보여주는 그래프로, 약 400mm까지는 선두 연결기의 특성에 따라 변하고 있으나 강체벽에 충돌하는 순간 붕괴력이 크게 상승함을 알 수 있다.

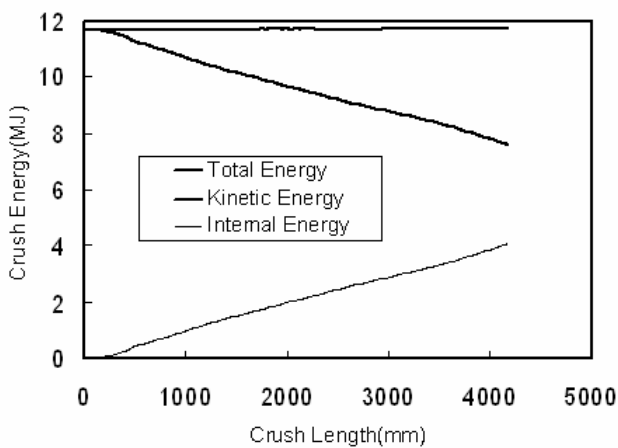


그림 9 Energy

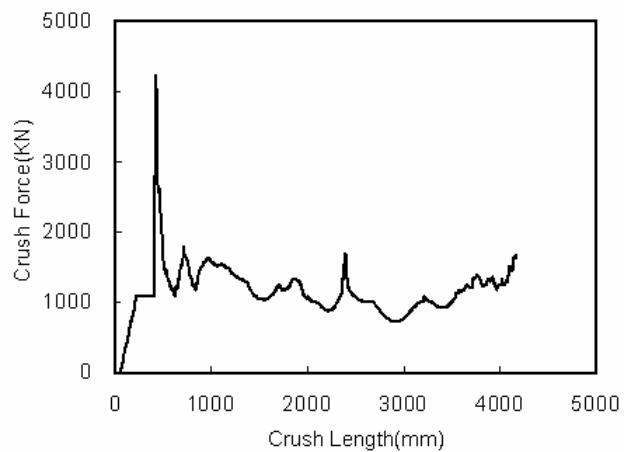


그림 10 Crush Force

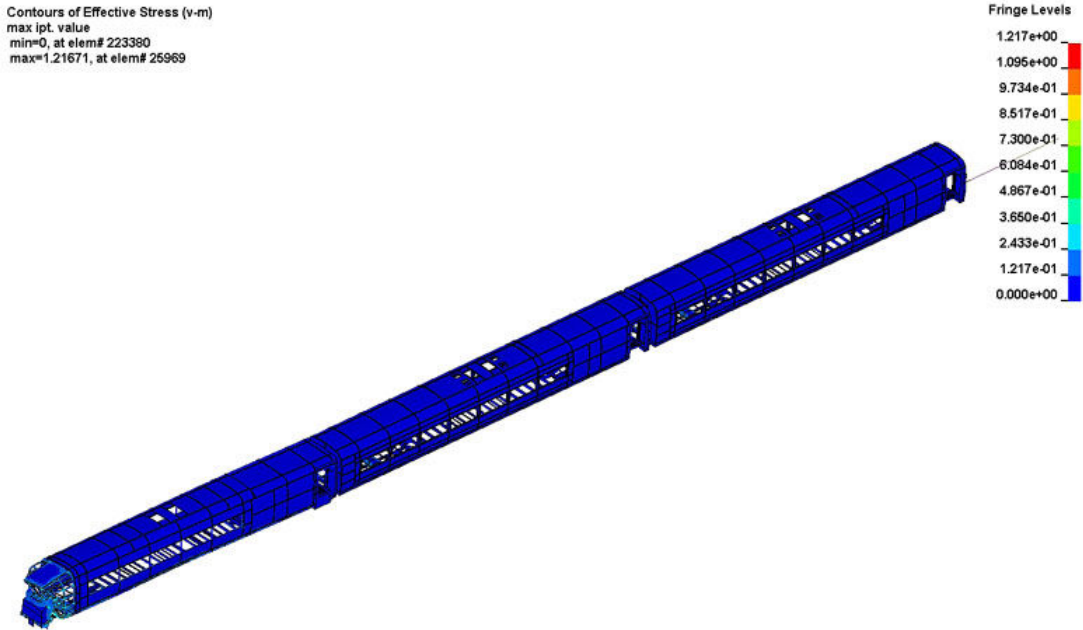


그림 11 Result of analysis

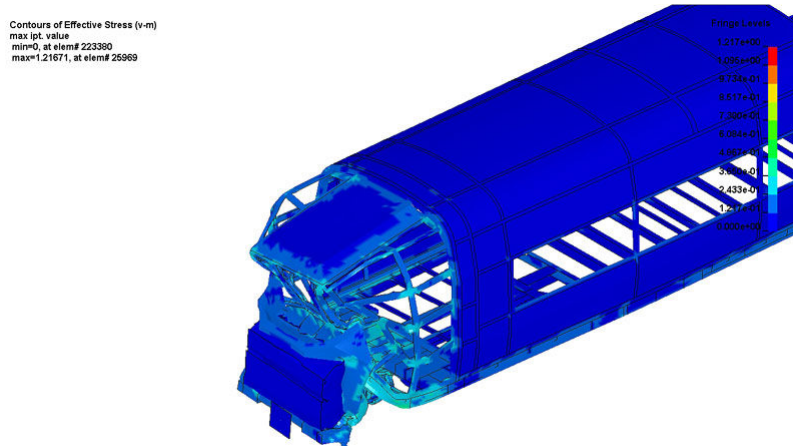


그림 12 Enlarged front

그림 11은 전체차량의 충돌해석결과를 보여주는 그림으로 충돌 후 대부분의 충돌에너지가 전두부와 연결기에 흡수되어 Door, 화장실, 승객탑승구역은 붕괴되지 않았다. 그림 12를 보면 전두부의 운전자 보호구역이 약 2600mm가 붕괴되어 생존공간을 확보하지 못 하였음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 두 가지 열차충돌시나리오를 적용하여 일반철도차량의 선두동력객차와 전체차량에 대한 충돌해석을 각각 수행하였다. 또한 일반철도차량에 대한 3차원 충돌해석을 수행하여 3차원 충돌해석기법을 마련하였다. 주요결과를 간단히 요약하면 다음과 같다

- ① 열차 충돌사고 중 예외사항을 적용한 전두부의 해석결과, 승객탑승구역의 center sill과 side sill이 만나는 부분에서 좌굴이 발생하였다. 열차충돌 시 이 부분에 하중이 집중되므로 차후 center sill과 side sill의 보강 또는 설계변경이 필요할 것으로 사료된다.
- ② TSI규정에 따른 전체차량에 대한 충돌해석 결과 전두부의 운전자보호구역이 붕괴되어 생존공간을 확보하지 못 하였다. 이는 압괴하중이 너무 낮아서 충돌 시 발생하는 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴거리가 크기 때문인 것으로 분석된다.

## 참고문헌

1. J. H. Lewis, "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Rail ways", WCRR '94, pp.893~900, 1994
2. "REPORT SAFETRAN", 2001
3. LS-DYNA THEORETICAL MANUAL
4. 한형석, 구정서, "3차원에서의 열차 충돌사고 시뮬레이션 연구", 한국철도학회논문집, pp.187~195, 2002
5. 구정서, 조현직, 김동성, 윤영환, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 217-222, 2001