

## 한국형 고속틸팅열차의 전두부 충돌특성 시뮬레이션

김승록\*(한국철도기술연구원), 권태수(한국철도기술연구원), 정현승(한국철도기술연구원),  
유원희(한국철도기술연구원), 구정서(서울산업대학교)

### Crash Simulation on the Front End Structure of Korean Tilting Train eXpress(TTX)

S. R. Kim(Rolling Stock, KRR), T. S. Kwon(Rolling Stock, KRR), H. S. Jung(Rolling Stock, KRR),  
W. H. You(Rolling Stock, KRR), J. S. Koo(Rolling Stock, Eng. Dept., SNUT)

#### ABSTRACT

TTX(Tilting Train eXpress) is being designed for improving the speed of conventional railway. The purpose of this study is to evaluate energy absorbing capacity and driver's survivability for a design candidate of the front end structure of TTX. A FE model with honeycomb block, under frame, and body frame is generated for crash simulation. Based on a level-crossing accident scenario, numerical simulation is performed using LS-DYNA. The results of crash analysis show that strength improvement of the current front end structure design candidate is needed to ensure driver safety.

**Key Words** : Tilting Train eXpress(고속틸팅열차), Crash Simulation(충돌 시뮬레이션), Finite Element Analysis(유한요소해석), FE model(유한요소 모델)

#### 1. 서론

보다 빠르고 안전하며 친환경적인 교통시스템에 대한 시대적 요구에 부응하기 위해 국내의 철도 중사자들은 철도시스템의 고속화, 경량화, 다양화에 주력하고 있다. 이러한 노력의 결과로 국내 기술로 개발된 한국형 고속전철이 시속 350km 주행을 성공적으로 마치게 되었고, 머지않은 미래에 상업운행에 투입되게 될 것이다. 전용노선을 달리는 고속전철의 개발과 더불어, 기존철도노선에서도 현재 운행되고 있는 열차보다 더 빠르게 운행될 수 있는 틸팅열차 시스템이 개발되고 있다. 한국형 TTX(고속틸팅열차)라 불리는 이 시스템은 고속전철과 달리 기존철도의 제반시설을 활용할 수 있으므로, 건설시간, 비용 및 철도제반시설 재활용 측면에서 매우 효율적이다. 최고 속도 180km/h[2]로 개발되고 있는 이 시스템이 상용화된다면 기존철도노선에서도 지금보다 1.5배 내지 2배 빠른 철도서비스를 제공할 수 있을 것이다.

철도시스템의 고속화, 경량화 및 다양화라는 세 계적 추세와 더불어 안전성의 문제가 대두되고 있다. 이미 철도선진국에서는 철도시스템의 안전을 확보하

기 위해 많은 연구들이 진행되고 있으며, 그러한 연구 결과들이 안전기준에 반영되고 있다. 철도시스템의 안전을 확보하기 위한 활동에는 철도시스템의 사고 위험요소를 찾아내서 사고를 미연에 방지하기 위한 사고방지(active safety)활동과 사고가 일어났을 때 그 피해의 규모를 줄이고 사고의 확대를 방지하기 위한 사고피해저감(passive safety)활동이 있다. 최근 100명 이상의 사망자와 450명 이상의 부상자가 발생한 일본 효고현 열차 탈선전복사고를 보면 운전자의 경험부족, 경직된 정시운영규정, 노후된 자동열차정지장치, 선로에 인접한 아파트 등 사고방지와 관련된 여러 가지 문제점들이 제기됨과 동시에 차체의 강도가 약해서 인명피해가 커졌다는 사고피해저감 관점에서의 문제점도 제기되고 있다. 이미 철도선진국에서는 충돌, 탈선, 화재와 같은 중대사고에 대한 피해저감기술을 차체 설계시 반영하도록 규정화하고 있으며, 국내에서도 최근 제정된 철도안전법에 사고피해저감에 대한 내용이 포함되어 있다.

현재 설계가 진행 중인 TTX에도 대표적인 피해저감기술인 충돌안전도 설계기술이 반영되고 있다. 본 논문은 TTX 전두부의 설계안에 대한 충돌안전도

성능평가를 다루고 있다. TTX 전두부 설계안에 대한 충돌특성을 평가하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서는 충돌안전도 평가를 위해 유럽의 국가들이 따르고 있는 충돌사고 시나리오[1]를 적용하였는데, 그 이유는 현재 국내에서는 고속열차의 역사가 1년밖에 되지 않아 고속으로 운행되는 열차에 대한 사고 통계자료가 없기 때문이다.

## 2. 유한요소 모델링 및 해석조건

TTX 전두부는 하부 프레임과 상부의 차체 프레임 및 운전실 앞의 충격흡수 및 침투방지를 위한 알루미늄 허니콤 구조로 이루어져 있다. 대부분의 프레임 구조들은 얇은 판재들이므로 쉘요소로 모델링하였고, 알루미늄 허니콤은 솔리드요소로 모델링하였다.

Fig. 1은 충돌해석 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델의 생성과정을 보여주고 있다. TTX의 설계안은 2차원 AutoCAD도면으로 생성되었고, 2차원 도면을 바탕으로 3차원 CATIA 형상모델이 생성되었다. 3차원 형상모델에서 유한요소모델을 생성하기 위해 상용 유한요소망 생성프로그램인 HyperMesh가 사용되었다. TTX 전두부는 대부분 얇은 판재들로 구성되어 있다. 이러한 얇은 판재들을 솔리드 요소로 모델링하여 해석하는 것은 비효율적이므로 쉘요소로 유한요소 모델링하였다. 솔리드 기반의 3차원 형상모델로부터 쉘요소를 생성하기 위해 솔리드 형상모델은 Fig. 2와 같은 surface 형상모델로 변환되었다. 솔리드 형상모델로부터 surface 형상모델을 재생성하는 과정에 많은 시간이 소요되었는데, 그 이유는 복잡하게 연결되어 있는 부재의 surface들이 만나는 점에서 연결성에 문제가 생겨 이를 수정하는데 많은 수작업이 필요했기 때문이다. 얇은 판재들을 Surface 형상모델로 변환한 후, 유한요소 모델을 생성하였고, 재료에 따라 부품들은 분류하여 물성치를 부여한 후 충돌해석을 위한 LS-DYNA 입력파일을 생성하였다.

충돌해석용 소프트웨어인 LS-DYNA는 explicit 시간적분법을 채택하고 있다. Explicit 코드에서는 해가 수렴하기 위해서 시간증분량을 임계 시간증분 이하로 유지해야 한다. 임계 시간증분 값은 생성된 유한요소 모델의 최소 mesh 길이에 영향을 받으므로, 유한요소 모델 생성시 mesh 크기를 되도록이면 균등하게 유지하는 것이 좋다.[3] TTX 전두부 유한요소 모델은 mesh 크기를 평균 50mm, 최소 15mm 이상이 되도록 하였다. 이러한 방식으로 Fig. 3과 같이 22386개의 절점과 22086개의 유한요소로 이루어진 충돌해석 유한요소 모델이 생성되었다.

본 논문에서는 정지해 있는 20ton의 강체장애물

과 열차가 97km/h로 충돌하는 견널목 사고시나리오를 사용하였다. 정지해 있는 20ton의 강체장애물은 LS-DYNA의 moving rigid wall로 모델링 되었고, 전두부 뒤쪽의 질량을 고려하기 위해 50ton의 집중질량 요소가 사용되었다.

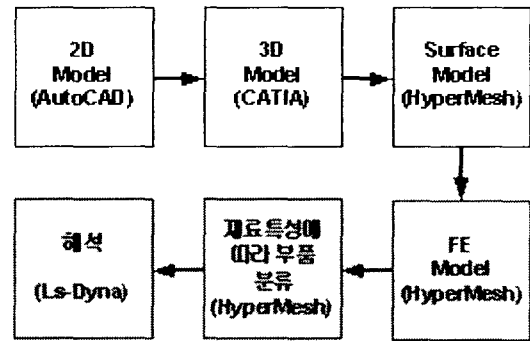


Fig. 1 FE model generation for crash simulation

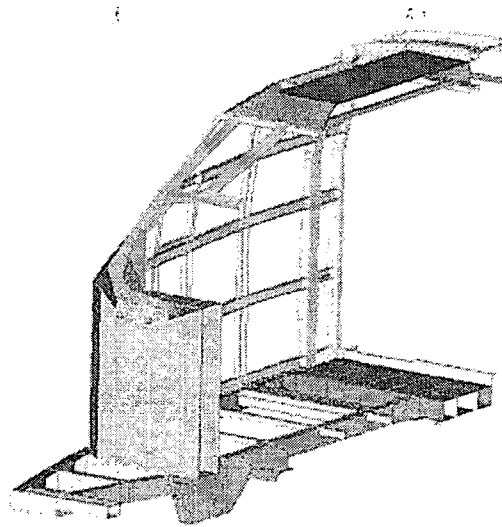


Fig. 2 Surface Model of TTX Front-End Structure

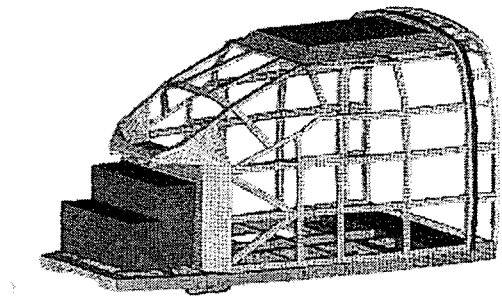


Fig. 3 FE Model of TTX Front-End Structure

### 3. 충돌해석 결과

건널목 사고시나리오에 대한 충돌해석 결과를 살펴보자. Fig. 4는 충돌해석 시 시간에 따른 전체 에너지, 운동에너지 및 내부에너지의 변화를 보여주고 있다. 전체에너지가 일정하게 유지되는 것으로 보아 본 해석이 수치적으로 불안정하지 않음을 알 수 있다. Fig. 5에서 Fig. 10까지는 시간에 따른 전두부의 변형 및 von Mises 응력분포를 보여주고 있다. 변형 형상을 살펴보면 충돌 후 앞부분부터 순차적으로 붕괴가 일어나고 있고, 알루미늄 허니콤도 순차적으로 붕괴되어 강제장애물이 운전석으로 침투하지 못하게 하고 있다. 그러나, 붕괴하중이 낮아서 운전석 앞부분의 붕괴만으로 전체의 충돌에너지를 흡수하지 못하고, 이로 인해 운전석의 붕괴가 발생하였다. 따라서 본 설계안은 운전자의 생존공간을 확보하는데 실패하였고, 충돌안전설계 관점에서 충돌에너지 흡수 성능이 개선되어야 할 것으로 판단된다.

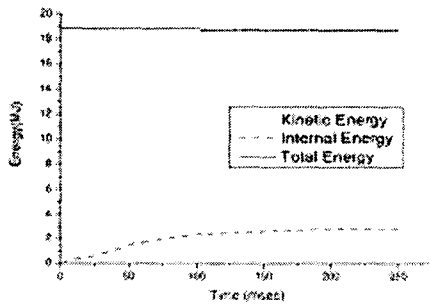


Fig. 4 Energy absorption of the front end structure (97kph)

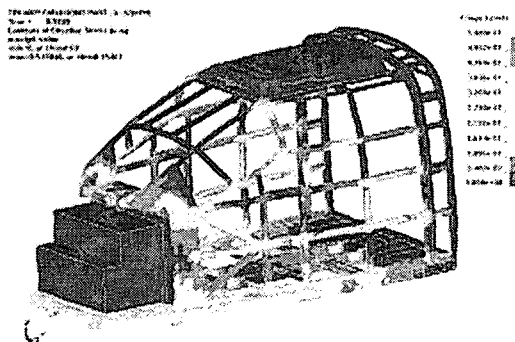


Fig. 5. Deformation and stress distribution at 10 msec

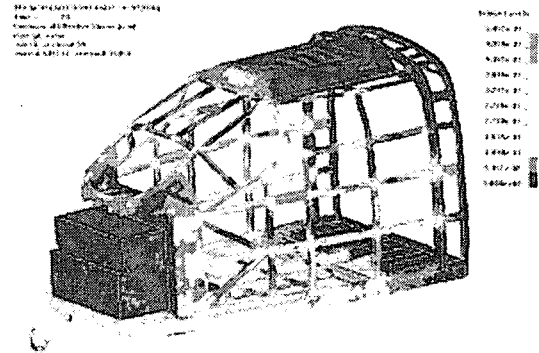


Fig. 6. Deformation and stress distribution at 20 msec

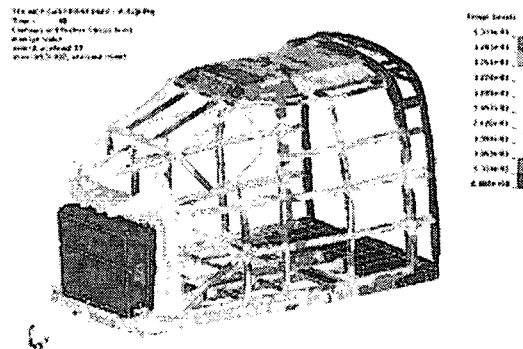


Fig. 7. Deformation and stress distribution at 40 msec

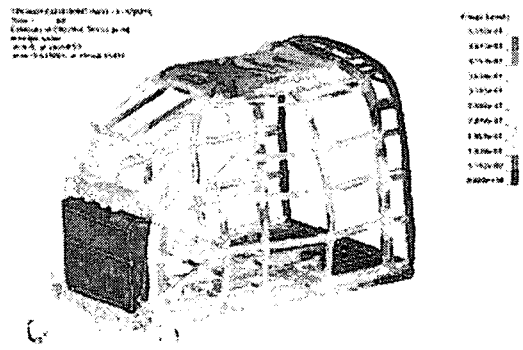


Fig. 8. Deformation and stress distribution at 60 msec

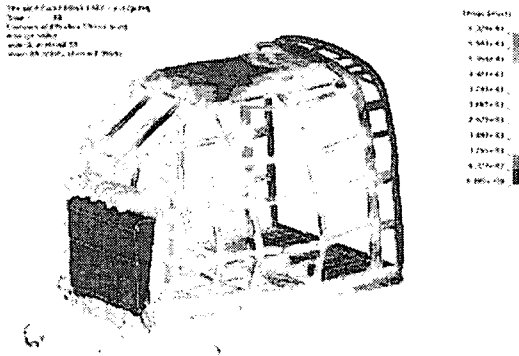


Fig. 9. Deformation and stress distribution at 80 msec

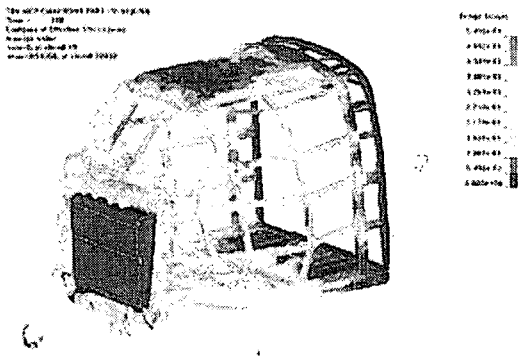


Fig. 10. Deformation and stress distribution at 100 msec

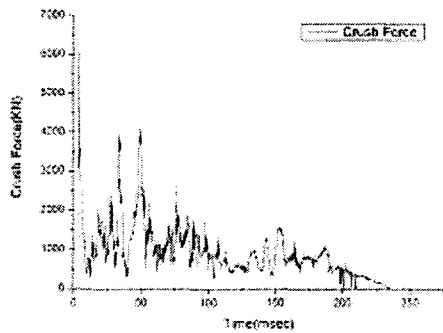


Fig. 11. Crush force of the front end structure(97kph)

Fig. 11은 시간에 따른 충돌압괴하중의 변화를 보여주고 있다. 평균 압괴하중은 851.65KN으로 예측되는데 평균압괴하중을 너무 낮은 것으로 보인다. 평균 압괴하중이 커지면 같은 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴거리가 짧아지게 되므로, 평균압괴하중을 키면 운전실영역의 붕괴를 방지할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 현재 설계가 진행중인 TTX 전두부의 설계안에 대하여 충돌안전도 성능평가를 위한 충돌해석 시뮬레이션을 수행하였다. 충돌해석 결과 본 논문에서 해석한 설계안의 경우 충돌사고 발생시 운전실구역이 붕괴되어 운전자의 사상이 우려된다. 따라서 운전자의 사상을 방지하기 위해 운전실 구역의 프레임을 강화해야 하고, 운전실 영역 앞쪽에서 더 많은 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 충돌압괴하중을 높이는 방향으로 설계변경이 필요하다. 향후, 운전자의 생존공간 확보를 위한 보완설계가 이루어질 예정이며, 충돌에너지 흡수기능을 가진 연결기에 대한 연구와 충돌안전도설계를 위한 전두부 골조구조의 수정·보완이 지속적으로 이루어질 것이다.

#### 참고문헌

1. ADT/SOR, "SAFETRAIN Train Crashworthiness for Europe," Final Report (2001).
2. (주)한국화이바, "차체형상/실내디자인 및 차량 설비 기술개발," 철도청, pp8, 2004.
3. 권태수, 정현승, 구정서, "기존선 탈량차량 Mp Car 차체 설계초안의 충돌에너지 흡수특성 고찰," 한국철도학회, 춘계학술대회논문집, pp276-276, 2004.