

TTX 전체차량 충돌안전도 설계방안에 관한 연구

A Study on Full-rake Crashworthy Design of Tilting Train Express

정현승*
Jung, Hyun-Seung

권태수*
Kwon, Tac-soo

구정서**
Koo, Jeong-seo

ABSTRACT

Crashworthy design of a train is a systematic approach to ensure the safety of passengers and crews in railway transportation for the prescribed accident scenarios. This approach needs new structural arrangements and designs to absorb higher levels of impact energy in a controlled manner and interior designs to minimize passenger injuries.

In this paper, crashworthy design approach is applied to the tilting train express (TTX) design which is newly being developed. Based on a head-on collision and a level crossing collision scenarios, the crash behaviors of a TTX design candidate are evaluated numerically using the finite element method. Finally, design alternatives which show better crashworthy performances are proposed and verified through the full-rake collision simulations.

1. 서 론

열차의 충돌안전도 설계는 충돌사고의 물계분석으로부터 표준화된 사고 시나리오에 대하여 탑승자의 안전을 확보하는 방법으로 이루어진다. 탑승자의 사상은 충돌시 차체구조의 과도한 압괴로 인한 생존공간의 손실에 의해 발생하거나 과도한 감속에 의해 야기되는 탑승자와 내장재 사이의 이차 충돌에 의해 발생한다. 따라서, 충돌안전도 설계는 충돌시 차체구조의 과도한 변형으로부터 승객의 생존공간을 확보하기 위한 방안과 이차 충돌로부터 승객을 보호하기 위한 방안을 다루어야 한다[1,2,3].

본 논문에서는 현재 개발중인 TTX 차량의 설계안에 대하여 정면충돌사고 시나리오 및 건널목 사고 시나리오에 따른 전체차량 충돌 해석을 수행하고 충돌안전도 관점에서 장단점을 분석하였다. 또한 TTX 차량의 충돌안전도 향상을 위한 설계대안을 제시하고, 전체차량 충돌해석을 통해 충돌안전도 개선여부를 검증하였다.

2. 충돌에너지 분배전략

충돌사고 발생 시 충돌에너지는 차량의 변형을 통해 흡수되는데, 차량의 압괴강도를 증가시키면 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지게 되므로 더 많은 생존공간을 확보할 수 있다. 반면, 압괴강도가 커지면 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지면, 승객이 받는

* 한국철도기술연구원 신기술연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정희원

가속도가 증가되어 탑승자의 부상 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 사고 발생시 생존공간이 확보되고 과도한 가속도를 받지 않으면서 전체 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 충돌에너지 흡수영역을 설정하고 영역별로 적절한 압괴강도를 확보해야 한다. 만일, 설계된 열차가 지정된 영역에서 충분한 충돌에너지를 흡수하지 못해 탑승자 영역이 붕괴되거나, 과도한 가속으로 인한 탑승자 부상이 우려된다면, 충돌안전도를 확보하기 위한 설계변경이 이루어져야 하고, 변경된 설계는 전체 차량 충돌해석을 통해 충돌안전도가 검증되어야 한다.

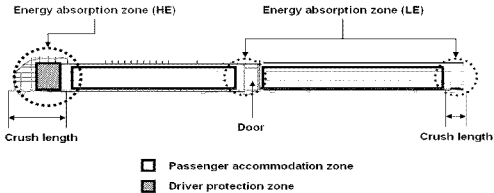


그림 1 TTX 차량의 충돌에너지 흡수영역 설정

그림 1은 TTX 차량의 충돌에너지 흡수영역 설정을 보여주고 있다. TTX의 전두부 영역은 충돌시 우선적으로 변형이 일어나서 많은 양의 충돌에너지를 흡수하는 고에너지 흡수영역(HE[High Energy] zone)으로 설정하였고, 차량간 연결기 및 탑승구 영역은 HE zone에서 흡수하지 못한 나머지 충돌에너지를 담당하는 저에너지 흡수영역(LE[Low Energy] zone)으로 설정하였다. 한편, 운전자와 승객이 탑승하고 있는 영역은 충돌시 변형이 발생하지 않는 승객보호구역(Passenger zone)으로 설정하였다. 설정된 영역별로 충돌에너지 분배특성 및 가속도 특성을 분석하기 위해서는 전체차량 충돌해석이 수행되어야 한다.

3. 전체차량 충돌해석 모델링 및 해석조건

그림 2는 TTX 차량의 6량 편성 배열과 각 차량의 길이 및 질량을 보여주고 있다. 전체차량 충돌해석을 위해 모든 차량은 전방영역, 중간영역 및 후방영역으로 분할되었고, 각 구간은 비선형 탄소성 beam 요소로 모델링되었다. Beam 요소의 비선형 재료특성은 3차원 충돌 해석으로부터 구해진 충돌압괴특성이 사용되었다[4]. 위치별 질량분포가 아직 정확하게 결정되지 않았으므로, 대차의 질량을 제외한 나머지 질량을 차량에 고르게 분포시켰다. 대차는 설계된 위치에 집중질량으로 모델링하였고, 대차와 차체를 연결하는 스프링은 비선형 스프링 감쇠요소로 모델링하였다. 차량과 차량을 연결하는 연결기는 비선형 탄소성 beam 요소로 모델링하였다. 그림 3은 전체차량 충돌 해석에 사용된 차량별 해석모델을 보여주고 있다. T2, M2 및 Mcp2 차량은 각각 T1, M1 및 Mcp1 해석모델의 좌우 대칭모델을 사용하였다.

본 논문에서는 설계사양에서 요구한 정면충돌사고 시나리오와 건널목사고 시나리오 두 가지 경우에 대하여 전체차량 충돌해석을 수행하였다. 정면충돌사고 시나리오는 상대속도 56km/h로 동일한 열차와 충돌하는 것을 가정하여[5], 강제제에 27.5km/h로 충돌하는 조건을 부여하였다. 건널목 사고 시나리오 경우는 20ton의 강제장애물과 97km/h로 충돌하는 조건을 부여하였다. 수치 시뮬레

이전에는 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA3D가 사용되었다.

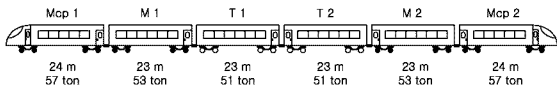


그림 2 TTX 6량 편성 배열도

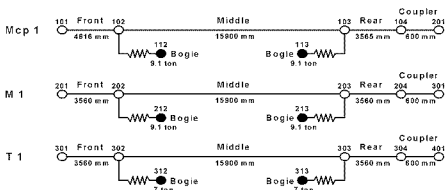


그림 3 전체차량 충돌 해석에 사용된 차량별 해석 모델

4 TTX 설계안의 전체차량 충돌해석

그림 4는 TTX 설계안의 충돌에너지 흡수영역을 보여주고 있다. 표 1은 TTX 설계안의 전체차량 충돌 해석에 사용된 각 영역별 충돌압괴특성을 보여주고 있다. TTX 설계안의 경우 HE zone에서 흡수할 수 있는 최대 에너지는 4.7MJ이고, LE zone에서 흡수할 수 있는 최대 에너지는 2.2MJ이다.

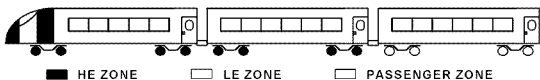


그림 4 TTX 설계안의 충돌에너지 흡수영역

표 1 TTX 설계안의 영역별 충돌압괴특성

| | HE ZONE | | | LE ZONE | | PASSENGER ZONE | |
|-------------|---------|-------|----------------------------------|---------|-----------|----------------|----------------|
| | Coupler | Tube | Headstock Honeycomb 유전석빔보강 | Coupler | Rear Part | Front Part | Middle Section |
| 평균압괴하중 (kN) | 1,000 | 1,500 | 2,000 | 1,000 | 2,000 | 3,000 | 2,500 |
| 최대압괴량 (mm) | 120 | 265 | 2,100 | 240 | 1,000 | | |

TTX 설계안에 대한 전체차량 충돌 해석결과가 표 2에 정리되어 있다. 정면충돌사고 시나리오의 경우 에너지 흡수영역의 영역별 충돌에너지 분배특성을 살펴보자. HE zone의 에너지 흡수량은 4.7MJ로 전체 충돌에너지의 약 50%를 차지한다. LE zone의 에너지 흡수량은 3.39MJ로 전체 충돌에너지의 약 37%를 차지한다. 승객보호공간인 passenger zone의 에너지 흡수량은 1.18MJ로 전체 충돌에너지의 약 13%이다. Passenger zone에서 충돌에너지를 흡수한다는 것은 이 영역에서 압괴가 발생함을 의미한다. 따라서, 승객보호를 위한 설계보완이 요구된다. 전널목사고 시나리오의 경우 에너지 흡수영역의 영역별 충돌에너지 분배특성을 살펴보자. HE zone의 에너지 흡수량은 4.7MJ로 전체 충돌에너지의 약 87%를 차지한다. LE zone의 에너지 흡수량은 0.69MJ로 전체 충돌에너지의 약 13%를 차지한다. 승객보호공간인 passenger zone에서 흡수되는 충돌에너지는 0MJ로 이 영역에서는 압괴가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, TTX 설계수정안은 전널목사고 시나리오에 대한 승객의 생존공간확보 요구를 만족하고 있다.

표 2 TTX 설계안의 영역별 충돌에너지 흡수량 (단위: MJ)

| | Mcp1 | | | M1 | | T1 | | T2, M2, Mcp2 | | Total |
|------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|-------|
| | HE ZONE | PASSENGER ZONE | LE ZONE | PASSENGER ZONE | LE ZONE | PASSENGER ZONE | LE ZONE | PASSENGER ZONE | LE ZONE | |
| 정면충돌 시나리오 | 4.7 | 1.18 | 2.2 | 0.0 | 0.54 | 0.0 | 0.37 | 0.0 | 0.28 | 9.27 |
| 전널목사고 시나리오 | 4.7 | 0.0 | 0.55 | 0.0 | 0.14 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.39 |

5. 충돌안전도 향상을 위한 설계대안

TTX 설계안의 전체차량 충돌 해석결과 정면충돌 시나리오의 경우, Mcp1의 passenger zone에서 압괴가 발생할 것으로 예상되었다. 이러한 압괴가 발생하는 원인으로서는 HE zone의 충돌에너지 흡수능력 부족, passenger zone 중간영역의 낮은 압괴하중 등이 있다. 따라서, TTX의 충돌안전도 향상을 위해서 다음과 같은 설계대안들이 가능하다.

- 설계대안 1 : M1, T1의 출입문영역이 앞쪽으로 오도록 편성 조정
- 설계대안 2 : Mcp1 앞쪽 passenger zone에 출입문 추가
- 설계대안 3 : Passenger zone 및 HE zone의 압괴강도 강화

설계대안 1은 그림 5와 같이 M1, T1의 출입문이 앞쪽으로 오도록 편성 방향을 조절하여 첫 번째 차량과 두 번째 차량 사이의 LE zone에서 좀더 많은 충돌에너지를 흡수하도록 하는 것이다. 이 방법의 장점은 설계변경 없이 단지 편성만 변경하여 충돌안전도를 향상시키는 것이다. 하지만, T1과 T2 차량 사이에 출입문이 없어지게 되므로 이에 대한 보완이 요구된다.

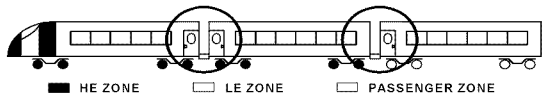


그림 5 설계대안 1의 충돌에너지 흡수영역

설계대안 2는 Mcp 차량의 passenger zone 앞쪽에 출입문을 하나 더 추가해서, HE zone에서 좀

더 많은 충돌에너지를 흡수하도록 하는 것이다. 이 경우 HE zone에서 흡수할 수 있는 최대 에너지는 6.7MJ로 기존의 설계안에 비해 크게 향상될 수 있다.

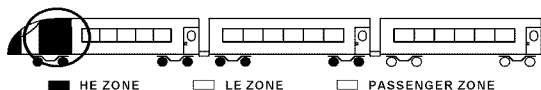


그림 6 설계대안 2의 충돌에너지 흡수영역

설계대안 3은 차량의 전체적인 압괴강도를 향상시키는 방안이다. 표 3은 설계대안 3의 영역별 충돌압괴특성을 보여주고 있는데, passenger zone의 압괴를 제한하기 위해 압괴하중을 4,000kN으로 증가시켰고, HE zone의 에너지 흡수능력을 증가시키기 위해 헤드스톡, 허니콤 및 운전석 뒷공간간의 압괴하중을 2,500kN으로 증가시켰다. 이 경우 HE zone에서 흡수 가능한 최대 에너지는 5.75MJ이다.

표 3 설계대안 3의 영역별 충돌압괴특성

| | HE ZONE | | | LE ZONE | | PASSENGER ZONE | |
|-------------|---------|-------|----------------------------|---------|-----------|----------------|----------------|
| | Coupler | Tube | Headstock Honeycomb 운전석뒷공간 | Coupler | Rear Part | Front Part | Middle Section |
| 평균압괴하중 (kN) | 1,000 | 1,500 | 2,500 | 1,000 | 2,000 | 4,000 | 4,000 |
| 최대압괴량 (mm) | 120 | 265 | 2,100 | 240 | 1,000 | | |

표 4는 설계대안들에 대한 전체차량 충돌 해석결과를 보여주고 있다. 정면충돌사고 시나리오의 경우 에너지 흡수영역의 영역별 충돌에너지 분배특성을 살펴보자. 설계대안 1과 기존의 설계안을 비교해보면, HE zone의 성능은 그대로이므로 4.7MJ의 충돌에너지를 흡수하고 있고, LE zone에서는 설계대안 1이 기존 설계안보다 0.11MJ를 더 흡수하고 passenger zone에서는 0.11MJ 덜 흡수한다. 따라서, 설계대안 1은 기존 설계안보다 충돌안전도가 약간 향상되었다고 할 수 있다. 그러나 Mcp1의 passenger zone에서 여전히 압괴가 발생하고 있으므로, 차량 권장의 방향을 조정하는 것만으로 정면충돌사고 시나리오에 대한 승객의 생존공간 확보 요구를 만족시킬 수 없다. 설계대안 2의 충돌에너지 분배특성을 살펴보면, HE zone의 에너지 흡수량은 6.7MJ로 전체 충돌에너지의 약 72%를 차지한다. LE zone의 에너지 흡수량은 2.15MJ로 전체 충돌에너지의 약 23%를 차지한다. 승객보호공간인 passenger zone의 에너지 흡수량은 0.42MJ로 전체 충돌에너지의 약 5%이다. 설계대안 2는 기존 설계안 및 설계대안 1에 비해 HE zone의 에너지 흡수량이 많이 증가하였고, passenger zone의 안전도도 많이 향상되었다. 그러나 Mcp1의 passenger zone에서 여전히 압괴가 발생하고 있으므로, 정면충돌사고 시나리오에 대한 승객의 생존공간 확보 요구를 만족시키지 못하고 있다. 설계대안 3의 충돌에너지 분배특성을 살펴보면, HE zone의 에너지 흡수량은 4.45MJ로 전체 충돌에너지의 약 48%를 차지한다. LE zone의 에너지 흡수량은 4.82MJ로 전체 충돌에너지의 약 52%를 차지한다. 승객보호공간인 passenger zone의 에너지 흡수량은 0MJ로 승객의 생존공간 확보 요구를 만족시키고 있다. 전복돌사 사고 시나리오의 경우 설계대안들은 모두 승객의 생존공간 확보 요구를 만족하고 있다.

기존 설계안과 설계대안들 중에서 승객의 생존공간 확보 요구를 만족하는 것은 설계대안 3이다.

설계대안 3의 최대 충돌가속도는 정면충돌사고 시나리오의 경우 6.2g, 건널목사고 시나리오의 경우 8.3g로 예측되는데, 이는 G7차량의 최대 충돌가속도 13g 보다 훨씬 작은 값이다. 그러나, 이차충돌에 대한 충돌안전도의 평가는 최대 충돌가속도의 단순비교로 이루어지는 것이 아니라, 이차충돌이 발생하기 전까지의 평균가속도, 의자의 배치, 형상 및 강성, 탑승자의 특성 등에 좌우되므로, 최종적으로는 dummy 모델을 사용한 이차충돌해석으로 평가되어야 할 것이다.

표 4 설계대안의 영역별 충돌에너지 흡수량 (단위: MJ)

| | | Mcp1 | | MI | | TI | | T2, M2, Mcp2 | | Total | |
|--------|-------|----------|----------------|-----------|----------------|-------------|----------------|--------------|----------------|-------|------|
| | | IHF ZONE | PASSENGER ZONE | I.F. ZONE | PASSENGER ZONE | I.F. ZONE | PASSENGER ZONE | I.F. ZONE | PASSENGER ZONE | | |
| 설계대안 1 | 정면충돌 | 4.7 | 1.07 | 2.2 | 0.0 | 0.48 | 0.0 | 0.56 | 0.0 | 0.26 | 9.27 |
| | 건널목사고 | 4.7 | 0.0 | 0.47 | 0.0 | 0.22 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.39 |
| 설계대안 2 | 정면충돌 | 6.7 | 0.42 | 1.13 | 0.0 | 0.53 | 0.0 | 0.34 | 0.0 | 0.15 | 9.27 |
| | 건널목사고 | 4.7 | 0.0 | 0.55 | 0.0 | 0.14 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.39 |
| 설계대안 3 | 정면충돌 | 4.45 | 0.0 | 2.2 | 0.0 | 1.87 | 0.0 | 0.42 | 0.0 | 0.33 | 9.27 |
| | 건널목사고 | 4.52 | 0.0 | 0.69 | 0.0 | 0.18 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.39 |

6. 결 론

본 논문에서는 현재 개발중인 TTX 차량의 설계안에 대하여 충돌안전도를 평가하고, 이를 향상시키기 위한 설계대안을 제시하였다. 기존 설계안의 충돌안전도를 평가하기 위해서, 정면충돌사고 시나리오 및 건널목사고 시나리오에 대한 전제차량 충돌해석을 수행하였다. 그 결과, 기존 설계안은 정면충돌사고 시나리오의 경우 선두차의 승객탑승구간에서 압괴변형이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 방안으로 차량 편성을 조정하는 방법, 선두차에 흡입문을 추가하는 방법, 압괴강도를 향상시키는 방법 등의 설계대안들이 제시되었다. 제시된 설계대안들에 대한 전제차량 충돌해석 결과 IIC zone의 충돌에너지 흡수능력을 향상시키고, passenger zone의 압괴강도를 향상시키면 정해진 사고시나리오에 대하여 승객보호구역의 압괴가 발생하지 않고, 적절한 수준의 충돌가속도가 발생함을 확인하였다. 이러한 연구결과는 현재 TTX 차량 설계에 반영되어 충돌안전도 향상을 위한 설계 수정 작업이 이루어지고 있다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. R. A. Smith (1995), "Crashworthiness Moves from Art to Science," Railway Gazette International, pp.227-230.
2. 송달호 외 (1998), "고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 연구보고서"
3. 구경서 외 (1999), "도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구보고서"
4. 정현승 외 (2004), "TTX 구동차 설계안의 충돌압괴특성 분석", 한국철도학회 추계학술대회
5. ADT/SOR (2001), "Safetrain Final Report"