

한국형 고속틸팅열차의 충돌안전도 평가기법 소개

정현승*(한국철도기술연구원), 권태수(한국철도기술연구원), 구정서(서울산업대)

Introduction to an Evaluation Method for Crashworthiness of Korean Tilting Train Express

H. S. Jung(KRRI), T. S. Kwon(KRRI), J. S. Koo(SNUT)

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, an evaluation method for crashworthiness of Korean tilting train express is introduced. Crush characteristics for each part of tilting train express are evaluated numerically through 3-dimensional shell element analysis with LS-DYNA. Based on a head-on collision and a level crossing collision scenarios, the crash behaviors of tilting train express are evaluated numerically using full-rake collision simulations.

Key Words : Crashworthiness(충돌안전도), Tilting train express(한국형 고속틸팅열차), Collision scenario(충돌사고 시나리오), Full-rake collision simulation(전체차량 충돌해석)

1. 서론

최근 우리나라는 KTX 개통 1주년, 한국형 고속 전철의 350km/h 돌파, 한국형 경량전철 시험운행, 2008년 세계철도학술대회 개최확정 등으로 새로운 철도부흥기를 맞고 있다. 또한, 최근 교토의정서가 발효됨에 따라 온실가스 배출량이 적은 친환경 교통수단에 대한 관심이 고조되고 있으며, 연료전지 자동차와 함께 다양한 소형 철도 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 철도 시스템의 고속화, 경량화 및 다양화로 인해 철도산업은 기존에는 없었던 새로운 위험 요소들에 대한 대처 방안과 높은 수준의 안전도 확보방안이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이미 철도선진국들에서는 충돌, 탈선, 화재 등 중대사고의 안전기술에 대한 과감한 투자와 기술개발로 체계적인 안전기술을 확보하여 적용하고 있으며, 우리나라에서도 철도안전법을 제정하고 철도종합안전기술개발사업을 추진하는 등 철도환경의 변화에 능동적으로 대처하기 위해 노력하고 있다.

열차의 충돌안전도 설계는 충돌사고의 통계분석으로부터 표준화된 사고 시나리오에 대하여 탑승자

의 안전을 확보하는 방법으로 이루어진다. 탑승자의 사상은 충돌시 차체구조의 과도한 압괴로 인한 생존 공간의 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]. 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 커져서 동일한 에너지를 흡수하는데 필요한 압괴량이 작아지면, 승객이 받는 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 감속으로 인한 탑승자 부상

우려된다면, 충돌안전도를 확보하기 위한 설계변경이 이루어져야 하고, 변경된 설계는 전체차량 충돌 해석을 통해 충돌안전도가 검증되어야 한다.

본 논문에서는 기존선 속도향상을 위해 현재 개발 중인 한국형 고속틸팅열차(TTX) 설계안에 대한 충돌안전도 평가기법을 소개한다.

2. 충돌에너지 분배 전략

충돌사고시 발생하는 충돌에너지는 운전자 및 승객이 탑승하지 않은 공간에서 우선적으로 흡수되어야 한다. 따라서, 운전자 및 승객이 탑승하고 있는 구간의 압괴강도는 비 탑승구간의 압괴강도보다 더 크게 설계되어야 한다. Fig. 1은 한국형 고속틸팅열차의 충돌에너지 분배 전략을 보여주고 있다. 한국형 고속틸팅열차의 전두부 영역은 충돌시 우선적으로 변형이 일어나서 많은 양의 충돌에너지를 흡수하는 고에너지 흡수영역(HE[High Energy] zone)으로 설정되었고, 차량간 연결기 및 탑승구 영역은 고에너지 흡수영역에서 흡수하지 못한 나머지 충돌에너지를 담당하는 저에너지 흡수영역(LE[Low Energy] zone)으로 설정되었다. 한편, 운전자와 승객이 탑승하고 있는 영역은 충돌시 변형이 발생하지 않는 승객보호구역(Passenger zone)으로 설정되었다. 설정된 영역별로 충돌에너지 분배특성 및 가속도 특성을 분석하기 위해서는 구간별 압괴특성 분석과 전체차량 충돌해석이 수행되어야 한다.

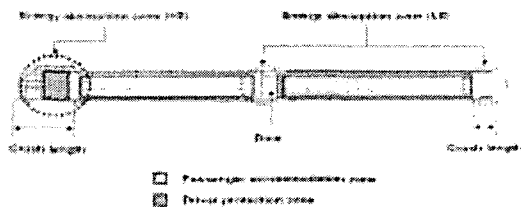


Fig. 1 Crash energy distribution strategy

3. 구간별 압괴특성 분석

3.1 개요

설계된 열차의 구간별 압괴특성 및 붕괴모드를 예측하기 위해 3차원 쉘모델의 충돌해석이 사용된다. Fig. 2는 구간별 압괴특성을 분석하기 위해 생성된 한국형 고속틸팅열차 구동차(M-car)의 유한요소 모델을 보여주는 것으로 하나의 차량은 차체 볼스터를 기준으로 전방영역, 중간영역, 그리고 후방영역으로 구분되었다. 구간별 충돌압괴특성을 분석하기 위해 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA가 사용되었다. 사고 시나리오는 유럽의 SAFETRAN 프로젝트

트에서 사용된 상대속도 55km/h의 동일 열차 정면충돌 시나리오[4]가 사용되었다. 이러한 충돌 시나리오를 구현하기 위해 각각의 영역에 대한 해석은 모델의 끝단에 집중질량 50 ton을 달아서 속도 27.5km/h로 강체벽에 충돌하는 조건을 부여하였다.

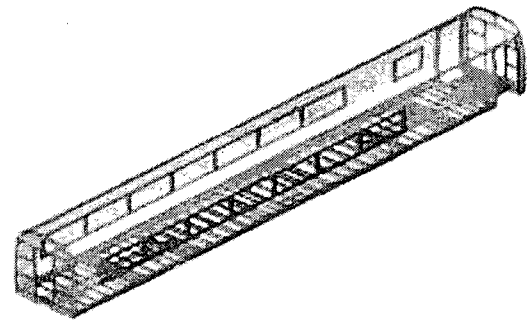


Fig. 2 Finite element model of TTX M-car

3.2 TTX 구동차의 충돌압괴특성 분석

한국형 고속틸팅차량 구동차의 충돌압괴특성을 분석하기 위해 전방영역, 중간영역, 및 후방영역에 대한 충돌해석을 수행하였다. Fig. 3은 후방영역의 변형 형상과 응력분포를 보여주고 있다. 저에너지 흡수영역을 포함하고 있는 후방영역의 경우, 변형이 승객의 비 탑승구역인 출입문 영역에 집중되고 승객 탑승구역이 잘 보존되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 4는 후방영역의 압괴량에 따른 압괴하중 특성을 보여주고 있는데 이러한 압괴특성 자료는 전체차량 충돌해석의 모델링에 사용된다.

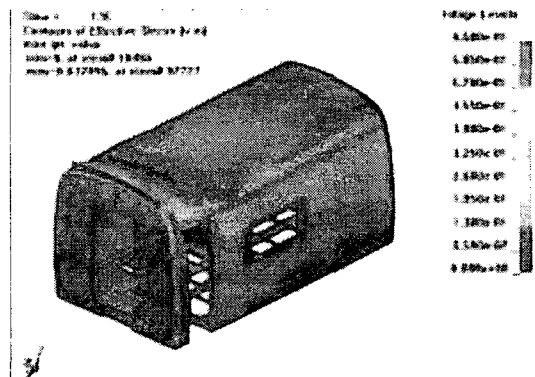


Fig. 3 Deformed shape and von Mises stress contour

Table 1은 각 구간별 충돌압괴특성을 정리한 것으로, 전방영역의 경우 평균압괴하중은 4,513kN, 압괴량은 318mm, 중간영역의 경우 평균압괴하중은 4,671kN, 압괴량은 316mm, 그리고 후방영역의 경우 평균압괴하중은 2,218kN, 압괴량은 649mm로 예측된다. 승객이 탑승하고 있는 전방영역과 중간영역에

비해 후방영역의 압괴하중이 훨씬 작으므로 충돌사고 발생시 저에너지 흡수구조로 설계된 출입문영역에서 우선적으로 충돌에너지를 흡수할 것으로 예상된다.

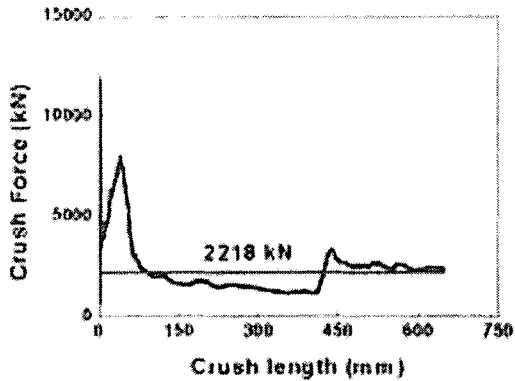


Fig. 4 Crush length - crush force curve

Table 1 Comparison of measured roughness data

	평균압괴하중(kN)	압괴량(mm)
전방영역	4,513	318
중간영역	4,671	316
후방영역	2,218	649

4. 전체차량 충돌안전도 해석

4.1 개요

충돌사고시 충돌에너지 분배특성 및 구간별 가속도를 평가하기 위해서 전체차량 충돌해석을 수행한다. Fig. 5는 한국형 고속틸팅열차의 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. 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. Fig. 6은 전체차량 충돌 해석에 사용된 차량별 해석 모델을 보여주고 있다. T2, M2 및 Mcp2 차량은 각각 T1, M1 및 Mcp1 해석모델의 좌우 대칭모델을 사용하였다.

본 논문에서는 설계사양에서 요구한 정면충돌사

고 시나리오와 건널목사고 시나리오 두 가지 경우에 대하여 전체차량 충돌해석을 수행하였다. 정면충돌 사고 시나리오는 상대속도 55km/h로 동일한 열차와 충돌하는 것을 가정하여[4], 강체벽에 27.5km/h로 충돌하는 조건을 부여하였다. 건널목사고 시나리오는 20ton의 강체장애물과 97km/h로 충돌하는 조건을 부여하였다. 수치 시뮬레이션에는 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA가 사용되었다.

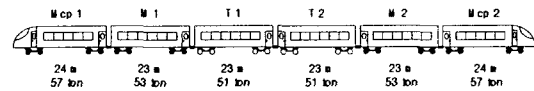


Fig. 5 Configuration of TTX

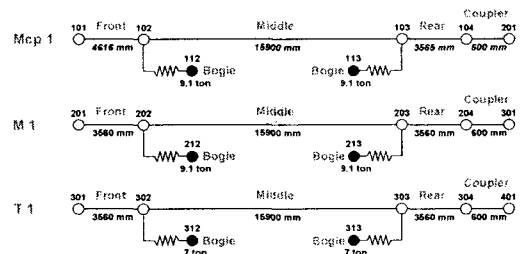


Fig. 6 Numerical model for full-rake collision dynamics analysis

4.2 한국형 고속틸팅열차의 전체차량 충돌해석

Fig. 7은 한국형 고속틸팅열차 설계안의 충돌에너지 흡수영역을 보여주고 있다. Table 2는 한국형 고속틸팅열차 설계안의 전체차량 충돌 해석에 사용된 각 영역별 충돌압괴특성을 보여주고 있다. Fig. 8은 전두부 연결기의 특성 곡선이고, Fig. 9는 중간부 연결기의 특성곡선이다.

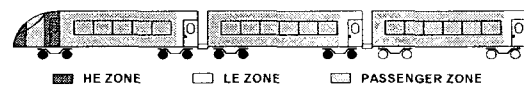


Fig. 7 Energy absorbing zone of TTX

Table 2 Crush characteristics of TTX

	HE ZONE		LE ZONE		PASSENGER ZONE	
	연결기	전두부	연결기	Rear Part	Front Part	Middle Section
평균 압괴하중 (kN)	Fig. 8 참조	2,700	Fig. 9 참조	2,200	4,500	4,600
최대 압괴량 (mm)	150	2,355	200	1,000		

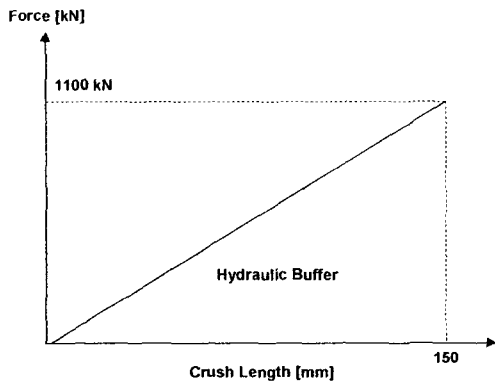


Fig. 8 Force-displacement curve for front coupler

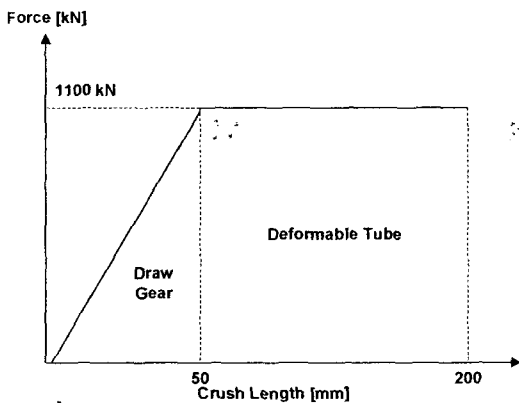


Fig. 9 Force-displacement curve for intermediate coupler

전체차량 충돌 해석결과가 Table 3에 정리되어 있다. 정면충돌사고 시나리오의 경우 에너지 흡수영역의 영역별 충돌에너지 분배특성을 살펴보자. 고에너지 흡수영역의 에너지 흡수량은 6.35MJ이고, 저에너지 흡수영역의 에너지 흡수량은 2.92MJ로 예상된다. 승객보호공간인 passenger zone의 에너지 흡수량은 0MJ인데 이로부터 승객보호공간에서는 압피가 발생하지 않음을 알 수 있다. 건널목사고 시나리오의 경우 에너지 흡수영역의 영역별 충돌에너지 분배특성을 살펴보자. 고에너지 흡수영역의 에너지 흡수량은 4.49MJ이고, 저에너지 흡수영역의 에너지 흡수량은 0.91MJ로 예상된다. 승객보호공간인 passenger zone에서 흡수되는 충돌에너지는 0MJ로 이 영역에서는 압피가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 한국형 고속틸팅열차의 설계안은 정면충돌 시나리오 및 건널목사고 시나리오에 대한 승객의 생존공간 확보 요구를 만족하고 있다.

Table 3 Absorbed crash energy(MJ)

	HE ZONE	LE ZONE	PASSENGER ZONE
정면충돌 시나리오	6.35	2.92	0.0
건널목사고 시나리오	4.49	0.91	0.0

5. 결론

본 논문에서는 현재 개발중인 한국형 고속틸팅열차의 설계안에 대하여 충돌안전도를 평가하는 기법을 소개하였다. 충돌안전도 평가를 위해 3차원 셀모델을 이용한 충돌해석을 통해 각 구간별 압피형상 및 압피특성을 분석하였고, 정면충돌사고 시나리오 및 건널목사고 시나리오에 대한 전체차량 충돌해석을 수행하였다. 그 결과, 현재의 설계안은 정면충돌사고 시나리오와 건널목사고 시나리오에 대하여 탑승자 공간의 압피가 발생하지 않음을 확인하였다.

충돌안전도의 평가를 위해서는 사고 시 생존공간의 확보 여부와 더불어 탑승자와 내장재의 2차 충돌에 의한 상해 가능성을 살펴보아야 한다. 탑승자의 상해치에 대한 평가는 전체차량 충돌해석으로부터 얻어진 구간별 가속도 자료와 인체 모델을 이용한 인체 상해치 시뮬레이션을 통해 이루어질 수 있다. 이러한 탑승자 상해치 평가에 대한 연구는 향후 추진될 예정이다.

후기

본 연구는 건교부 철도기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Smith R. A., *Unrashworthiness Moves from Art to Science?* Railway Gazette International, pp. 227-230, 1995.
2. 송달호 외, *고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 연구보고서*, 1998.
3. 구정서 외, *도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구보고서*, 1999.
4. Safetrain Final Report. ADT/SOR 2001.