

# TTX 구동차 설계안의 충돌압괴특성 분석

## Crush Analysis of a TTX M-Car Design

정현승\*  
Jung, Hyun-Seung

권태수\*  
Kwon, Tae-soo

구정서\*\*  
Koo, Jeong-Seo

조태민\*\*\*  
Cho, Tae-Min

### ABSTRACT

In this paper, the crush characteristics of a tilting train express (TTX) M-car design are evaluated with a head-on collision scenario. Its body shell is divided into three parts - front end, middle section, and rear end. For each part, crush-force relation is evaluated numerically through 3-dimensional shell element analysis with LS-DYNA. TTX's carbody structure is a hybrid type structure made of steel and composite materials. Composite sandwich panels are modeled as layered shells whose layers have different material properties. And a damage material model is used to consider the effect of stiffness degradation during deformation. The crush characteristics obtained from these calculations will be used as material modeling data of full-rake collision analyses.

### 1. 서 론

열차의 충돌안전도 설계와 같은 passive safety 기술은 사고발생을 전체로 하여 인적, 물적 피해를 최소화하는 방안을 마련하는 것이다[1,2,3]. 여기에는 전제차량 충돌에너지 흡수 분배 전략수립, 전두부 에너지 흡수구조 설계, 차량간 연결기 및 승객 비탈승구역의 충돌에너지 흡수 구조 설계 등 다양한 설계 기술들이 포함되어 있다. 일단 열차의 충돌안전도 설계가 이루어지면, 실험이나 수치 시뮬레이션을 통해 그 성능이 검증되어야 한다. 충돌안전도 평가를 위해 사용되는 수치 시뮬레이션에는 전제차량의 충돌에너지 분배특성, 생존공간 확보 여부, 각 구간별 감속도 정보 등을 추정하는데 사용되는 전제차량의 1차원 충돌동역학해석과 충돌시 타고 오름을 평가하는데 사용되는 2차원 충돌동역학해석, 차량의 구간별 충돌압괴특성 및 파괴모드를 평가하는데 사용되는 3차원 쉘 모델의 충돌해석, 충돌에 의한 탈선을 평가하는 3차원 충돌동역학해석 등이 있다.

본 논문에서는 강재와 복합재를 적용한 하이브리드 차체로 개발되고 있는 TTX의 구동차 설계안에 대하여 충돌압괴특성을 분석하였다. 전체의 차체는 전방영역, 중간영역, 후방영역의 세 부분으로 분할되었다. 각 구간별 충돌압괴특성을 분석하기 위해 상용 소프트웨어인 LS-DYNA3D가 사용되었다. 수치해석 시 탄소/에폭시 페브릭 면재와 알루미늄 하니콤 실재로 이루어진 복합재 샌드위치 구조는 각각의 층마다 다른 물성치를 가진 적층 셸로 모델링되었고, 복합재 손상에 의한 강성저하를 고려하기 위해 재료모델로 damage model을 사용하였다. 또한, damage model을 적용한 충돌해석 결과를 손상을 고려하지 않는 perfect plastic model의 결과와 비교하였다. 본 연구에

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정희원

\*\*\* 한국철도기술연구원 연구원

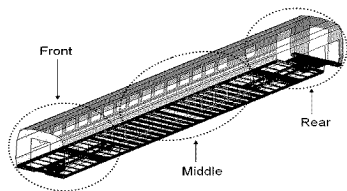
서 구현 충돌압괴특성은 TTX 전체차량 충돌해석[4]의 구간별 압괴특성 자료로 사용되었다.

## 2. 유한요소 및 재료 모델링

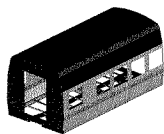
그림 1은 TTX 구동차 설계안의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 이 차량의 충돌해석용 유한요소망 생성시 고려된 사항들은 다음과 같다.

- 전체차량을 되도록 균일한 크기의 요소로 분할한다.
- 요소의 크기는 짧은 모서리가 최소 20mm 이상이 되도록 한다.
- 쉘요소(주로 4절점 요소, 불가피한 경우만 3절점 요소)를 사용한다.

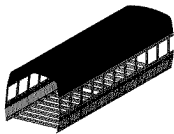
이상의 사항들을 고려하여 87748개의 사각형 쉘요소와 432개의 삼각형 쉘요소로 이루어진 충돌해석용 유한요소모델이 생성되었다. 각 구간별 충돌압괴특성을 구하기 위해 전체 모델은 전방영역(그림 1 (b) 참조), 중간영역(그림 1 (c) 참조) 그리고 후방영역(그림 1 (d) 참조)으로 세분화되었다.



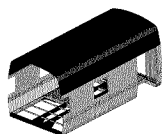
(a) 전체 모델



(b) 전방영역



(c) 중간영역



(d) 후방영역

그림 1 TTX 구동차의 유한요소모델

TTX는 차체 경량화를 위해 강재와 복합재를 적용한 하이브리드 차체로 개발되고 있다. 차체의 언더프레임은 강재 및 스테인레스강으로 이루어져 있고, 언더프레임을 제외한 나머지 부분은 탄소/에폭시 페브릭 면재와 알루미늄 하니컴 심재로 구성된 샌드위치 구조의 복합재로 이루어져 있다. 차체 언더프레임을 구성하고 있는 강재 및 스테인레스강의 재료 물성치는 표 1과 같다. 복합재 면재와 심재의 재료 물성치는 표 2와 같다. 본 연구에서는 복합재를 직층형로 모델링하였고, 각각의 층은 사용된 재료에 따라 서로 다른 물성치를 갖도록 하였다. 각 층의 재료모델은 perfect plastic

model 혹은 복합재의 손상에 따른 강성저하를 고려하기 위한 damage model을 사용하였다. 그림 2는 perfect plastic model과 damage model의 개념을 보여주고 있다. Damage model의 경우, 손상이 발생하면 70%의 강성이 저하되는 것으로 가정하였는데, 손상에 따른 강성저하 비율 추정은 향후 실험을 통한 검증이 요구된다.

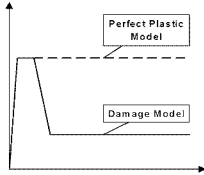


그림 2 Perfect plastic model 및 damage model

표 1 강재 및 스테인레스강의 물성치

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/cm <sup>3</sup> )	Yield Stress (MPa)	Strength (MPa)
SMA400B	210	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$	370	514
SPH A	200	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$	345	480
SS400	200	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$	245	402
SUS304	200	0.3	$7.8 \times 10^{-6}$	305	520
SUS301L LT	183	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$	220	550
SUS301L-HT	183	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$	690	940

표 2 탄소/에폭시 래브릭 및 알루미늄 한니콤의 물성치

Material	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio	Density(kg/cm <sup>3</sup> )	Strength(MPa)
CF3327/Epoxy	56.5	0.1	$1.6 \times 10^{-6}$	548.9
Aluminum Honeycomb	0.41	0.3	$5.5 \times 10^{-8}$	2.24

### 3. TTX 구동차의 충돌압괴특성 분석

TTX 구동차 설계안에 대한 구간별 충돌압괴특성을 분석해 보자. 충돌 시나리오는 상대속도 55km/h로 정면충돌하는 것으로 설정하였고, 이러한 충돌 시나리오를 구현하기 위해 각각의 영역에 대한 해석은 모델의 끝단에 집중질량 50 ton을 달아서 속도 27.5km/h로 강체벽에 충돌하는 조건을 부여하였다. 본 연구에서는 복합재의 각 층별 재료모델로 perfect plastic model과 damage model을 사용하여 충돌해석을 수행하였고, 두 가지 모델에 대한 해석결과를 비교하여 보았다.

#### 3.1 전방영역

그림 3은 전방영역의 충돌 후 변형 및 응력분포를 보여주고 있다. Perfect plastic model을 사용한 경우와 damage model을 사용한 경우를 비교해 보면, 전자의 경우 전체적으로 많은 변형이 발

생하는 반면, 후자는 변형이 충전부의 쪽에 국부적으로 집중되어 나타날 수 있다. 이는 복합재의 손상은 고려하면, 손상부위의 강성이 저하되어 그 부위에 변형이 집중되기 때문이다. 그림 4는 압괴량에 따른 압괴하중을 나타낸다. 표 3은 전방영역의 충전압괴특성을 정리한 것으로, perfect plastic model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 4,693kN, 최대 압괴하중은 14,006kN, 압괴량은 309mm이고, damage model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 3,166kN, 최대 압괴하중은 14,951kN, 압괴량은 458mm이다.

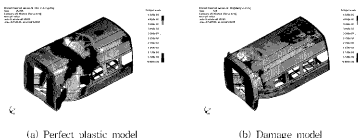


그림 3 전방영역의 충전 후 변형 및 응력분포

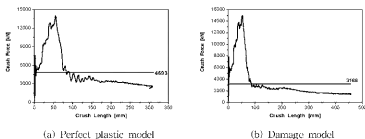


그림 4 전방영역의 압괴량에 따른 압괴하중 특성곡선

표 3 전방영역의 충전압괴특성

재료모델	평균압괴하중(kN)	최대압괴하중(kN)	압괴량(mm)
Perfect plastic model	4,693	14,006	309
Damage model	3,166	14,951	458

### 3.2 중간영역

그림 5는 중간영역의 충전 후 변형 및 응력분포를 보여주어 있는데, damage model을 사용한 경우에 더 큰 변형이 발생하고 있다. 그림 6은 압괴량에 따른 압괴하중을 나타낸다. 표 4는 중간영역의 충전압괴특성을 정리한 것으로, perfect plastic model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 2,990kN, 최대 압괴하중은 11,278kN, 압괴량은 453mm이고, damage model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 2,411kN, 최대 압괴하중은 11,736kN, 압괴량은 564mm이다.

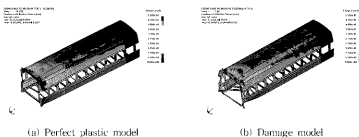


그림 5 중간영역의 충돌 후 변형 및 응력분포

표 4 중간영역의 충돌압괴특성

재료모델	평균압괴하중(kN)	최대압괴하중(kN)	압괴량(mm)
Perfect plastic model	2,980	11,278	453
Damage model	2,411	11,736	564

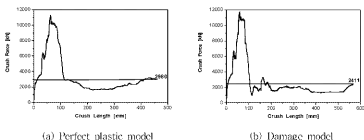


그림 6 중간영역의 압괴량에 따른 압괴하중 특성곡선

### 3.3 후방영역

그림 7은 후방영역의 충돌 후 변형 및 응력분포를 보여주고 있는데, damage model을 사용한 경우에 더 큰 변형이 발생하고 있다. 그림 8은 압괴량에 따른 압괴하중을 나타낸다. 표 5는 후방영역의 충돌압괴특성을 정리한 것으로, perfect plastic model을 사용한 경우, perfect plastic model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 2,500kN, 최대 압괴하중은 7,981kN, 압괴량은 568mm이고, damage model을 사용한 경우, 평균 압괴하중은 1,606kN, 최대 압괴하중은 8,563kN, 압괴량은 859mm이다.

표 5 후방영역의 충돌압괴특성

재료모델	평균압괴하중(kN)	최대압괴하중(kN)	압괴량(mm)
Perfect plastic model	2,500	7,981	568
Damage model	1,606	8,563	859

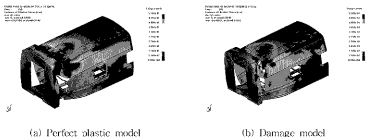


그림 7 후방영역의 충돌 후 변형 및 응력분포

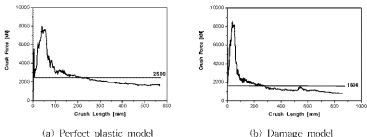


그림 8 후방영역의 압괴량에 따른 압괴하중 특성곡선

#### 4. 결 론

본 연구에서는 TTX 구동차 선계열의 구간별 충돌압괴특성을 상용 소프트웨어인 LS-DYNA3D를 이용해서 분석하였다. 구간별 충돌압괴하중은 비교해보면, 승객이 탑승하고 있는 전방영역 및 중간영역의 압괴하중이 비탑승구역인 후방영역보다 높게 나타나므로 충돌시 후방영역이 먼저 붕괴될 것으로 예측되어 충돌안전도 관점에서 바람직하다고 할 수 있다. 복합재 손상을 고려하기 위한 damage model을 사용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 충돌하중은 작게 나타났고 붕괴형상은 국부적으로 보다 많은 변형이 생길 것으로 예측되었는데, 본 연구에서는 손상이 발생하면 70%의 강성이 저하되는 것으로 가정하였는데, 좀 더 정확한 해석을 위해서는 실험을 통한 손상에 따른 강성저하 비유 추정이 요구된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. ADT/SOR (2001), "Safetrain Final Report"
2. 송남호 외 (1998), "고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 연구보고서"
3. 구경서 외 (1998), "도시전차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구보고서"
4. 정희승 외 (2004), "TTX 전차차량 충돌안전도 선계열안에 관한 연구", 한국전도학회 추계학술대회