

한국형 고속틸팅차량 구동차 설계초안의 충돌압괴특성 분석

Crush Analysis of Tilting Train Express M-Car Initial Design

정현승*
Jung, Hyun-Seung

구정서**
Koo, Jeong-Seo

권태수*
Kwon, Tae-soo

ABSTRACT

In this paper, the crush characteristic of the tilting train express M-car was estimated under a head-on collision scenario. The car body was divided into three parts - front, middle, and rear. For each part, crush-force relation was evaluated numerically using LS-DYNA 3-dimensional shell element analysis. This result will be used for one-dimensional collision analysis of the full train rake.

1. 서 론

최근 철도산업의 빠른 발전으로 그 편리성이 증가되고 있지만 이에 비례하여 고속화와 경량화에 따른 잠재적 위험 또한 증가하고 있고, 따라서 보다 높은 수준의 안전도가 요구되고 있다. 이러한 철도환경의 변화에 따라 철도선진국에서는 충돌, 탈선, 화재 등 중대사고의 안전기술에 대한 과감한 투자와 기술개발을 통하여 체계적인 안전기술을 제정 적용하고 있다. 유럽의 경우, 차량 납품 사양에 충돌안전도 항목을 필수항목으로 요구하고 있으며, 표준화된 충돌안전도 설계기준을 마련하기 위한 SAFETRAN 프로젝트를 1997년부터 2001년까지 수행하였다[1]. 또한 미국의 경우는 차량을 운행속도와 용도별로 분류하여 설계기준과 운영세칙을 마련하고 있다[2]. 이와 같이 충돌안전도에 대한 연구와 관련규정의 강화는 시대적 흐름이며 국내에서 제작된 차량의 해외수출 시에도 예외없이 적용 받게 될 것이다. 지난 4월 고속철도의 개통과 2008년 세계철도학술대회 개최확정 등으로 최근 철도 부흥기를 맞고 있는 우리나라도 철도차량 안전기준을 정비하고 철도종합안전기술개발사업을 추진하는 등 철도환경의 변화에 능동적으로 대처하기 위해 노력하고 있다.

철도사고의 원인은 지진, 기상조건 등 천재지변에 의한 자연재해와 차량결함, 유지보수 미비, 운영시스템상의 오류, 인적 오류 등과 같은 인위재해로 분류된다. 전자의 경우는 근본적으로 사고의 발생을 예방하기 어렵고, 후자의 경우에도 철저한 안전기준의 적용과 안전 관리에 의해 사고 발생을 최소화(active safety)할 수 있으나 완전히 방지할 수는 없다. 따라서, 충돌안전도 설계기술과 같이 사고발생을 전제로 하여 인적, 물적 피해를 최소화하려는 passive safety 기술이 중요하게 대두되고 있다[3,4,5].

본 연구는 기존선 속도향상을 위해 도입될 예정인 한국형 고속틸팅차량(TTX) 구동차(M-Car)의 설계초안에 대하여 상용충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용하여 충돌해석을 수행하고, 차량의 각 구간별 충돌압괴특성을 분석하여, 향후 충돌안전도 설계 및 평가에 필요한 자료들을 획득하는데 초점을 맞추고 있다.

*
**

열차의 충돌안전도 설계는 가정된 충돌사고 시나리오에 대하여 탑승자의 안전을 확보하는 방안을 마련하는 것을 말한다. 탑승자의 사상은 충돌시 차체구조의 과도한 압괴로 인한 생존공간의 손실에 의해 발생하거나 과도한 감속에 의해 야기되는 탑승자와 내장재 사이의 이차적 충돌에 의해 발생한다. 따라서, 충돌안전도 설계는 충돌시 차체구조의 과도한 변형으로부터 승객의 생존공간을 확보하기 위한 방안과 이차적 충돌로부터 승객을 보호하기 위한 방안을 다루어야 한다.

충돌시 구조물은 변형을 통해 에너지를 흡수하게 되는데, 생존공간을 확보하기 위해서는 승객이 탑승하지 않은 영역에서 대부분의 충돌에너지를 흡수하여야 한다. 따라서, 충돌에너지 흡수 영역을 설정하고 그 영역에서 지정된 양의 충돌에너지가 흡수될 수 있도록 차량의 구조가 설계되어야 한다. 충돌에너지 흡수구조 설계는 전두부와 같이 많은 충격에너지를 흡수해야 하는 고에너지 흡수구조(HEE[High Energy Extremity]) 설계와 열차와 열차의 연결부위와 같은 저에너지 흡수구조(LEE[Low Energy Extremity]) 설계로 분류된다. HEE 설계는 에너지 흡수 연결기 설계, 충돌후 연결기가 탈착되는 메카니즘 설계, 배장기 설계, 운전실 생존공간 확보 설계 등을 포함한다. LEE 설계는 차량연결부위의 에너지 흡수 연결기 설계, 타고오름 방지장치 설계, 승객탑승공간의 생존공간 확보 설계 등을 포함하고 있다. 이차적 충돌로부터 승객을 보호하기 위한 방안은 승객의 감속도 경감 방안 및 이차 충돌시 승객의 상해치를 최소화할 수 있는 좌석 설계 등을 포함하고 있다.

충돌안전도 설계에는 다양한 수치 해석 모델들이 사용된다(그림 1). 1차원 해석 모델은 전체차량의 충돌에너지 분배 특성, 생존공간 확보 여부, 각 구간별 감속도 정보를 추정하는데 사용된다. 2차원 해석 모델을 충돌시 타고오름을 평가하는데 사용된다. 3차원 해석 모델은 차량의 구간별 압괴특성 및 붕괴모드를 평가하는데 사용된다. 3차원 해석 모델에서 구한 구간별 압괴-하중 곡선은 1차원 해석 모델의 구간별 압괴특성으로 사용된다. 승객상해치 평가모델은 승객과 의자의 이차적 충돌에 의한 상해치를 평가하는데 사용된다. 1차원 해석에서 구한 구간별 감속 특성이 승객상해치 모델의 입력으로 사용된다.

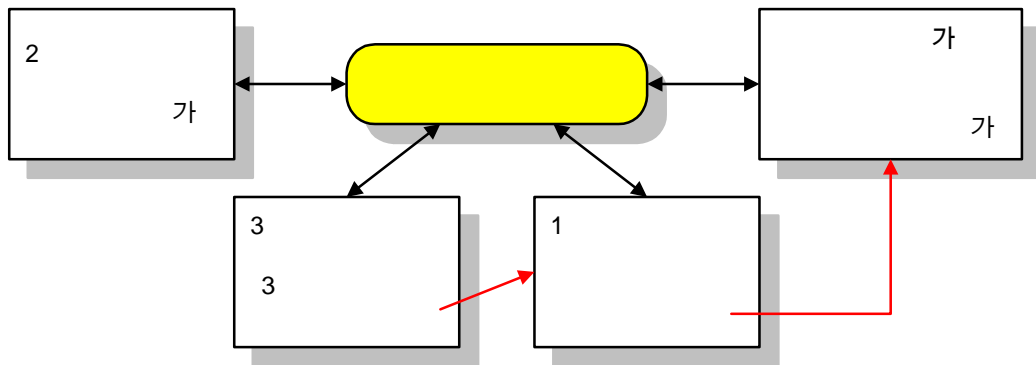


그림 1 충돌안전도 설계에 필요한 해석모델

본 연구는 3차원 해석 모델을 이용하여 한국형 고속틸팅차량의 충돌안전도 설계에 필요한 M-Car 차체의 구간별 충돌압괴특성을 구하는데 초점을 맞추고 있다.

3. 유한요소 모델링

그림 2는 현재 설계가 진행중인 한국형 고속틸팅차량 M-Car 차체의 기하학적 형상을 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.
- 셀요소(주로 4절점 요소, 불가피한 경우만 3절점 요소)를 사용한다.

이상의 사항들을 고려하여 88140개의 셀요소로 이루어진 충돌해석용 유한요소모델이 생성되었다.

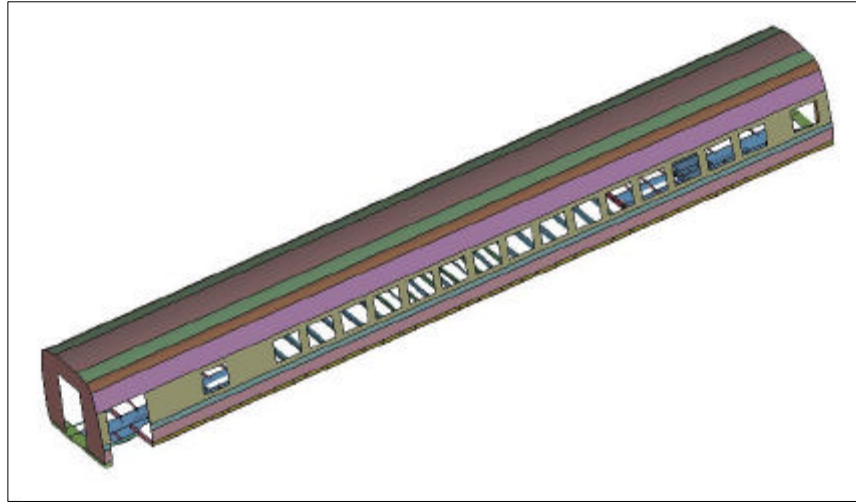


그림 2 한국형 고속틸팅열차 M-Car 차체의 설계초안

한국형 고속틸팅차량은 차체 경량화를 위해 강재와 복합재를 적용한 하이브리드 차체로 개발되고 있다. 차체의 언더프레임은 강재 및 스테인레스강으로 이루어져 있으며, 사용된 재료의 특성은 표 1과 같다. 차체의 나머지 부분은 탄소/에폭시 패브릭 면재와 알루미늄 하니콤 심재로 구성된 샌드위치 구조의 복합재로 이루어져 있으며, 재료의 특성은 표 2와 같다.

표 2 강재 및 스테인레스강의 물성치

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/mm ³)	Yield Stress (MPa)	Strength (MPa)
SMA490B	210	0.3	7.9×10 ⁻⁶	370	514
SPH-A	200	0.3	7.9×10 ⁻⁶	325	480
SS400	200	0.3	7.9×10 ⁻⁶	245	402
SUS301L-LT	183	0.3	7.9×10 ⁻⁶	220	550

표 3 탄소/에폭시 패브릭 및 알루미늄 하니콤의 물성치

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/mm ³)	Strength (MPa)
CF3327/Epoxy	55.5	0.1	1.6×10 ⁻⁶	548.9
Aluminum Honeycomb	183	0.3	5.5×10 ⁻⁸	2.24

4. 구간별 충돌압괴특성 분석

한국형 고속틸팅열차 구동차의 구간별 충돌압괴특성을 분석하기 위해, 출입문이 있는 전방영역과 승객의 탑승공간인 중간영역, 그리고 후방영역으로 구간을 나누었다. 충돌 시나리오는 상대속

도 60km/h로 정면충돌하는 것으로 설정하였고, 이러한 충돌 시나리오를 구현하기 위해 각각의 영역에 대한 해석은 모델의 끝단에 집중질량 50 ton을 달아서 속도 30km/h로 강체벽에 충돌하는 조건을 부여하였다.

4.1 전방영역

전방영역의 충돌해석에 사용된 모델은 그림 3과 같다. 그림 4는 충돌 후 200msec에서의 변형 및 응력분포를 보여주고 있다. 전방영역의 경우, 대부분의 변형이 출입문근처에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 압괴량에 따른 압괴하중을 나타내며, 평균 압괴하중은 1240kN이고 최대 압괴하중은 7472kN이다. 전방영역은 200msec동안 1092mm 압괴되며 이때 흡수되는 충돌에너지는 1.35MJ이다.

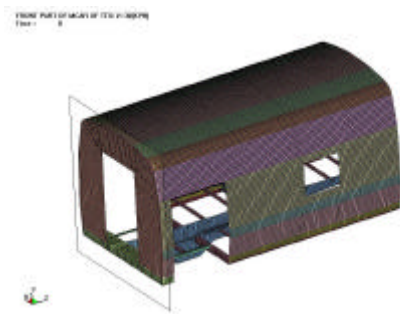


그림 3 전방영역 충돌해석 모델

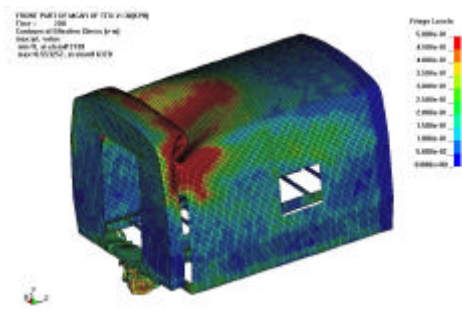


그림 4 충돌 후 변형 및 응력분포

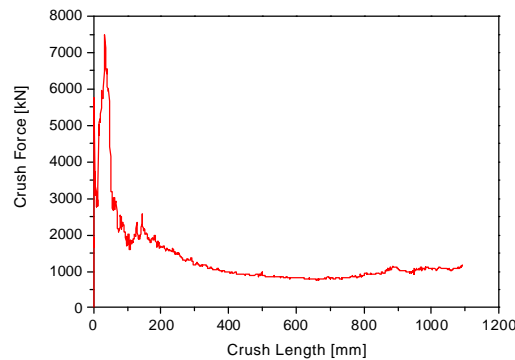


그림 5 압괴량에 따른 압괴하중 - 전방영역

4.2 중간영역

중간영역의 충돌해석에 사용된 모델은 그림 6과 같다. 그림 7은 충돌 후 200msec에서의 변형 및 응력분포를 보여주고 있다. 그림 8은 압괴량에 따른 압괴하중을 나타내며, 평균 압괴하중은 2185kN, 최대 압괴하중은 9612kN으로, 출입구가 있는 전방영역보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 충돌발생시 승객이 탑승하고 있는 중간영역이 붕괴되기 전에 전방영역의 붕괴가 먼저 일어나게 되므로 충돌안전도 관점에서 매우 바람직하다. 중간영역은 200msec 동안 772mm 압괴되며, 이때 흡수되는 충돌에너지는 1.69MJ이다.

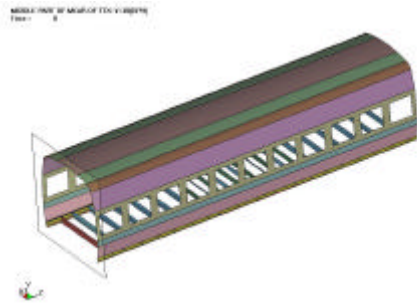


그림 6 중간영역 충돌해석 모델

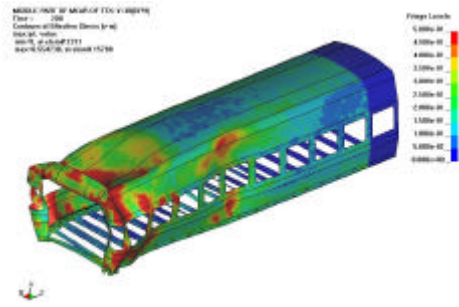


그림 7 충돌 후 변형 및 응력분포

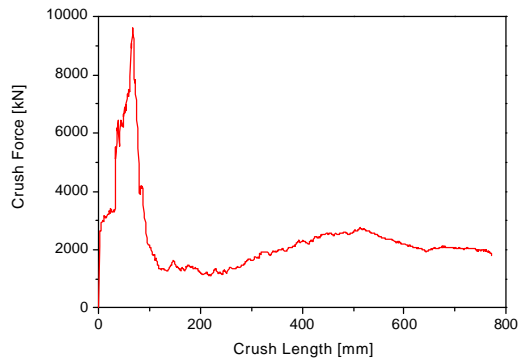


그림 8 압괴량에 따른 압괴하중 - 중간영역

4.3 후방영역

중간영역의 충돌해석에 사용된 모델은 그림 9와 같다. 그림 10은 충돌 후 200msec에서의 변형 및 응력분포를 보여주고 있다. 그림 11은 압괴량에 따른 압괴하중을 나타내며, 평균 압괴하중 1639kN, 최대 압괴하중은 10879kN이다. 후방영역은 200msec 동안 889mm 압괴되며, 이 때 흡수되는 충돌에너지는 1.46MJ이다.

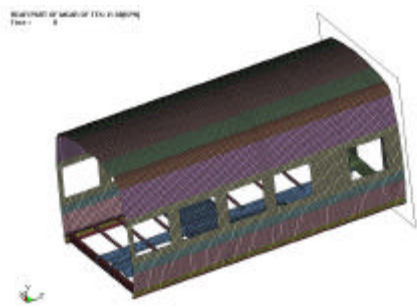


그림 9 후방영역 충돌해석 모델

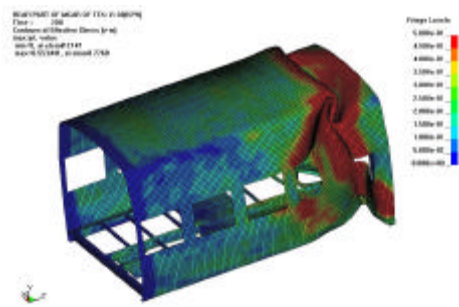


그림 10 충돌 후 변형 및 응력분포

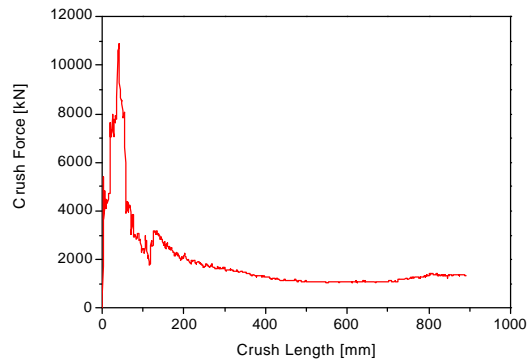


그림 11 압괴량에 따른 압괴하중 - 후방영역

5. 결 론

본 연구에서는 한국형 고속틸팅차량 구동차의 구간별 충돌압괴특성을 상용 소프트웨어인 LS-DYNA를 이용해서 구해보았다. 전방영역의 평균압괴하중은 1240kN으로 중간영역(2185kN)이나 후방영역(1639kN)에 비해 작게 예측되었다. 이는 차량 충돌시 출입구가 있는 전방영역이 승객이 탑승하고 있는 중간이나 후방 영역보다 먼저 붕괴됨을 의미하는 것으로 충돌안전도 관점에서 매우 바람직하다고 볼 수 있다. 본 연구에서 구한 구간별 충돌압괴특성은 차후 전체차량의 1차원 동역학 해석의 모델링 자료로 사용될 예정이며, 이를 통해 각 차량별 충돌에너지 흡수 분배 특성 및 감속도가 산정될 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. ADT/SOR (2001), "Safetrain Final Report "
2. CFR (2000), "FRA Regulations Title 49 - Transportation Chapter "
3. R. A. Smith (1995), "Crashworthiness Moves from Art to Science," Railway Gazette International, pp.227-230.
4. (1998), " "
5. (1999), " "