

# 한국형 고속틸팅열차의 중간부 충돌에너지 흡수구조에 대한 연구

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

A study on crash energy absorption design of passenger-car extreme structure of tilting train prototype

T. S. Kwon(Rolling Stock, KRRI), H. S. Jung(Rolling Stock, KRRI), J. S. Koo(Rolling Stock. Eng. Dept., SNUT)

### ABSTRACT

Crashworthy design of trains is now indispensable procedure in modern railway vehicle design for ensuring the safety of passengers and crew. It is now widely recognized that a more strategic approach is needed in order to absorb higher level energy in a controlled manner and minimize passenger injuries effectively. The first design step in this strategic approach is the design of the front end structure(so called HE extremities) to absorb a large part of total impact energy and then the structure of passengers non-accommodation zones(so called LE extremities) is designed to absorb the rest of impact energy. In this paper, the passengers entrance door area is selected as the LE(low energy) extremities and the design of the LEE was carried out. The main part of LEE design procedures is the design of energy absorbing tubes. For this purpose, the several tube candidates are introduced and compared to each others with numerical crash simulation.

**Key Words :** English Key Word: Times New Roman 9pt (한글 바탕채9pt), Carbon fiber (탄소섬유), Cutting force (절삭력), Carbon fiber (탄소섬유), Cutting force (절삭력) ???????

### 1. 서론

본 논문에서는 기존선 고속화를 위해서 개발중인 틸팅열차(이하 TTX)에서 수행중인 충돌안전설계 연구의 일부를 소개한다. TTX는 국내 기존선 열차 중 최초로 충돌안전설계 개념이 본격적으로 적용된 경우라고 할 수 있다.

Fig. 1은 TTX 차량의 기본편성을 나타낸 것이다. 그림에서 TTX 차량은 6량으로 편성되어 있으며, 설계속도는 200km/h 이며, 최대주행속도는 180km/h 이다.

그림 Fig. 2는 TTX 차량의 충돌에너지 흡수전략을 나타낸 것으로써, 차량의 전두부 영역에서 고에너지(high energy)를 흡수하며, M car 영역에서 저에너지(low energy)를 흡수하게 된다. 한편, 운전자 보

호구역과 승객 탑승구역은 충돌 시 변형이 일어나지 않도록 하여 운전사와 승객의 안전을 확보할 수 있는 구조를 지녀야 한다. 충돌 시 변형이 일어나는 압괴구간은 전두부에서 운전자 보호구역을 제외한 구간과 M car 영역에서 출입문이 위치한 구간으로 선정하였다.

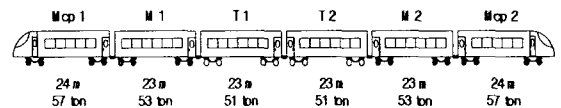


Fig. 1 Train configuration of TTX

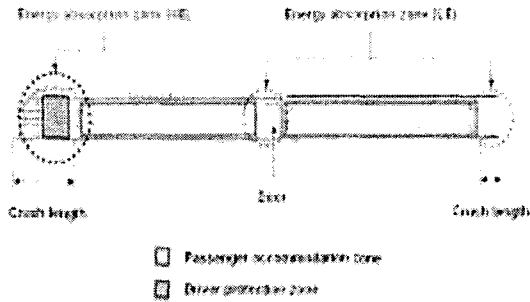


Fig. 2 Crash energy absorbing strategy of TTX

## 2. 제목

### 2.1 출입문 영역의 충돌해석

출입문영역의 충돌 해석에 사용된 모델은 Fig. 3 과 같다. Fig. 4는 압괴량에 따른 압괴하중을 나타낸다. Table 1은 후방영역의 충돌압괴특성을 정리한 것이고, Fig. 5은 damage model을 적용한 경우에 대한 충돌 후 변형 및 응력분포를 보여주고 있다.

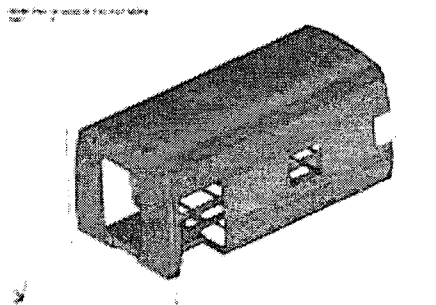


Fig. 3 Design modification of rear area

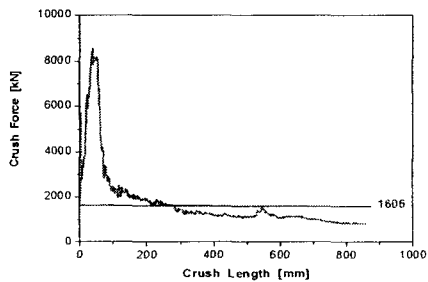


Fig. 4 Crash characteristic curve of design modification

Table 1 Crash characteristic curve of design modification

| 재료모델         | 평균압괴 하중 (kN) | 최대압괴 하중 (kN) | 압괴량 (mm) | 흡수에너지 (MJ) |
|--------------|--------------|--------------|----------|------------|
| Damage model | 1,606        | 8,563        | 859      | 1.38       |

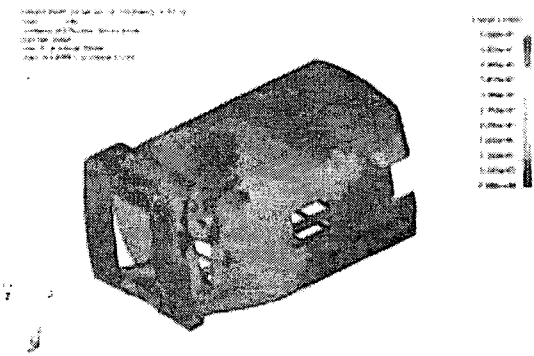


Fig. 5 Crash deformation of rear area- Damage model(after collision 240msec)

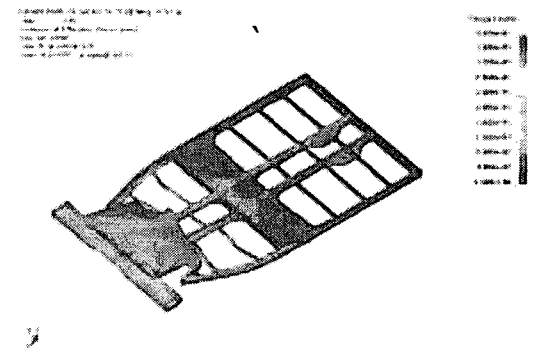


Fig. 6 Stress distribution of rear area - Damage model(after collision 240msec)

## 2.2 LEE 구조 설계

### 2.2.1 저에너지 흡수튜브의 설치 및 역할

M car 후방지역의 압괴형상을 검토한 결과, 서비스 공간과 side sill의 변형이 많이 발생하며 압괴하중이 부족한 문제점이 발생하였다. 따라서 Fig. 7 과 같이 M car 후방지역에 저에너지 흡수튜브를 설치하여 설계개선을 하였다.

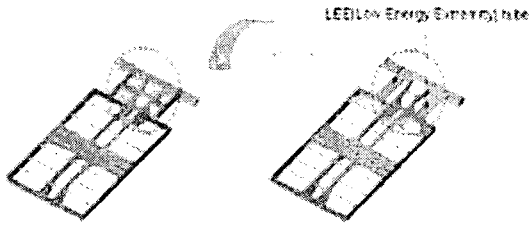


Fig. 7 Energy absorbing tube of M car extremity

저에너지 흡수튜브의 역할은 서비스 공간의 붕괴를 최소화시키고 side sill을 보호하며 출입문이 있는 부분에서 변형이 최대화 되도록 적절한 변형 모드를 제어하는데 있다. 또한 압괴하중이 일정이상으로 유지되도록 하는 역할을 수행한다.

### 2.1.2 저에너지 흡수튜브의 후보모델

저에너지 흡수튜브를 설치하기 위하여 Fig. 8의 A, B, C, D와 같이 4가지의 후보모델을 선정하여 해석을 수행하였다. 그림에서 치수는 가로\*세로\*길이 형식이며 단위는 mm이다.

각각의 후보모델의 형상을 살펴보면 순차적인 압괴를 유도하기 위하여 앞쪽에는 큰 구멍을 만들었고, 뒤로 갈수록 작은 구멍을 뚫었다. 설계된 저에너지 흡수구조의 성능을 평가하기 위하여 LS-DYNA를 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 재질은 스테인리스강의 일종인 SUS301L-LT를 이용하였으며 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 9는 M car 후방지역의 각 부품별 흡수에너지를 나타낸 것이다. 대부분의 에너지는 측면과 지붕의 복합재 구조물이 흡수하며, 언더프레임과 흡수튜브의 흡수에너지는 적은 것으로 나타났다.

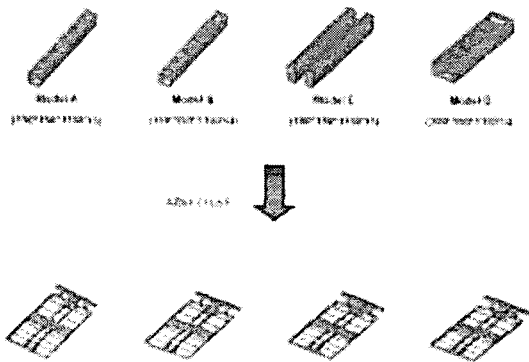


Fig. 8 Candidate models of LEE tube

Table 2 material properties of stainless steel

| Material   | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio | Density (kg/mm <sup>3</sup> ) | Yield stress (MPa) | Strength (MPa) |
|------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|----------------|
| SUS301L-LT | 183                   | 0.3             | 7.9 × 10 <sup>-6</sup>        | 220                | 550            |

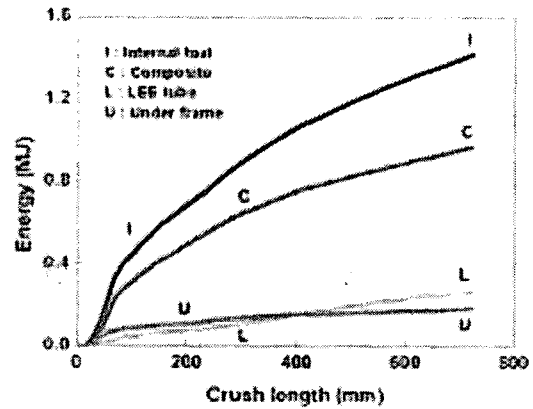


Fig. 9 Energy absorbing characteristics by components with LEE tube installed

### 2.1.3 최종 저에너지 흡수튜브 모델의 선정

위에서 살펴본 저에너지 흡수튜브 후보모델들의 압괴특성과 에너지흡수량을 표 2.3에 정리하였다. Table 3에서 M car 후방지역의 전체 흡수에너지는 후보모델의 종류와 관계없이 동일한 것으로 나타났다. 또한 대부분의 에너지는 측면과 지붕의 복합재 구조물이 흡수하는 것으로 나타났다. 후보모델들의 해석결과를 검토한 결과, 후보모델 D의 압괴형상이 양호하며 압괴하중이 가장 좋은 것으로 나타났다. 따라서 후보모델 D를 저에너지 흡수튜브로 선정하였다.

### 2.1.4 승강대 발판구조의 개선

위에서는 흡수튜브만을 살펴보았으나, 실제 차량의 출입문 영역에서는 에너지 흡수튜브위에 발판이 놓이게 된다. 이 발판은 필요이상으로 두께 치수와 강성이 큰 사각형의 플레이트이다. 충돌이 발생할 때 이 플레이트는 좀처럼 붕괴되지 않아 서비스공간의 언더프레임을 뚫고 들어오게 된다.

Table 3 crash characteristics of LEE tube candidates

| Model | Dimension (mm)       | Thickness (mm) | Number of tube | Total absorption energy (MJ) | LEE tube absorption energy (MJ) | Crush force (kN) |
|-------|----------------------|----------------|----------------|------------------------------|---------------------------------|------------------|
| A     | 150<br>*150<br>*1150 | 3              | 2              | 1.42                         | 0.16                            | 1,580            |
| B     | 150<br>*150<br>*1150 | 4              | 2              | 1.42                         | 0.23                            | 1,880            |
| C     | 100<br>*150<br>*1150 | 3              | 4              | 1.42                         | 0.23                            | 1,800            |
| D     | 300<br>*150<br>*1150 | 4              | 2              | 1.42                         | 0.26                            | 2,000            |

max=D:148436, at strain# 12532

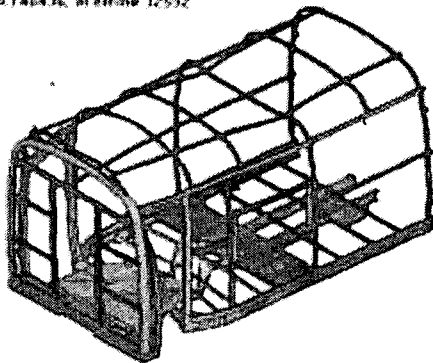


Fig. 10 uncontrolled crush mode of foot-step

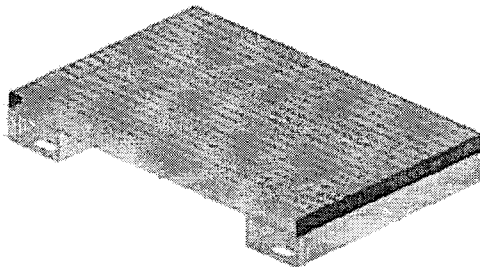


Fig. 11 design modification of foot-step

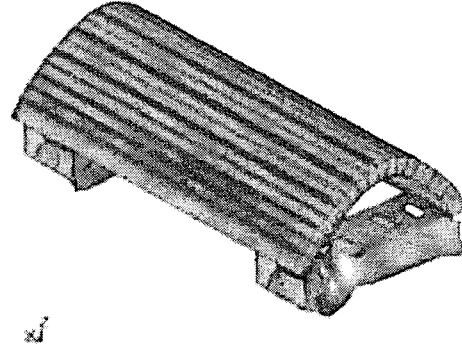


Fig. 13 crush mode of foot-step

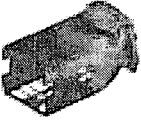
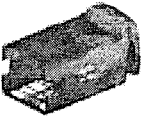
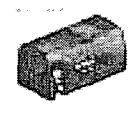
따라서, 이를 개선하기 위해 승강대 발판을 아래 그림과 같이 개선하였다. 충돌 시 붕괴가 쉽게 유도 되도록 하면서도 정적압축강도 조건을 만족하도록 하는 설계되었다.

튜브당 36개소의 점용접을 하도록 하였으며, 용접 부위는 직경 6~8mm 이며 용접부위는 정적하중에서는 파손되지 않도록 적절히 조절하며 설계되었다. 아래 그림은 부분적인 상세한 그림과 이렇게 설계되었을 때 적절한 붕괴모드를 나타낸다.

### 2.1.5 기존모델과 저에너지 흡수튜브 설치 모델의 비교

기존모델과 저에너지 흡수튜브 설치 모델의 충돌 시 압괴특성을 Table 4에 나타내었다. 표 2.4에서 저에너지 흡수튜브가 설치된 수정된 모델의 경우 평균 압괴하중이 기존모델보다 25% 증가하였다. 또한 압괴형상도 서비스 공간과 side sill의 변형이 최소화되며, 출입문이 있는 부분에서 붕괴가 순차적으로 발생하여 적절한 변형모드의 제어가 됨을 알 수 있다. 따라서 저에너지 흡수튜브 설치목적은 충분히 달성한 것을 확인 할 수 있다. 또한, 차체의 전체 압축강성이 증대되는 설계를 유도하고 이를 기반으로 저에너지 흡수부의 충돌에너지 흡수성능을 향상시켰다. 붕괴강도를 2,650kN 정도까지 끌어올릴 수 있었다.

Table 4 energy absorbing capacity comparison between original and modified model

|                 | Original model  | Modified model<br>(저에너지 흡수튜브 설치)  | 2nd Modified model<br>(승강대 발판수정)  |
|-----------------|---|---|---|
| Crush force(kN) | 1,606   | 2,000   | 2,650   |
| Crush shape     |  |  |  |
| Description     | 서비스 공간과 side sill 압괴량이 많음   | 서비스 공간과 side sill이 거의 압괴되지 않으며 에너지흡수 성능향상   | 승강대 발판의 붕괴모드가 우수하면서 에너지 흡수 능력 향상  |

### 3. 결론

차량의 충돌안전도 설계에서 충돌에너지 분배전략을 수립하여 승객보호지역이 아닌 부분을 고에너지 흡수부와 저에너지 흡수부로 흡수지역을 분류하였다. 고 에너지 흡수부(HEE)는 대부분 차량의 전두부에 해당하며, 상당량의 에너지가 이 부분에서 흡수된다. 전두부에서만 충분히 에너지를 흡수하지 못할 경우를 대비하여 선두차가 아닌 차량에도 에너지 흡수를 위한 붕괴지역을 설정하여 에너지 흡수량을 충분하도록 설계하는 것이 현재의 추세이다. 본 논문에서는 이러한 LEE 부분에서의 구조를 설계하였다. LEE구조의 중요부재인 튜브설계에서 다수의 후보를 설정하여 충돌해석하고 이를 서로 비교하여 최종적으로 우수한 부재를 선정하였다. 또한, 다소 부족한 차체의 정적압축강도를 강화시키도록 유도하여, 붕괴지역에서의 붕괴하중을 끌어올려, 에너지 흡수성능을 향상시켰다. 이때 LEE 부분의 승강대 발판이 필요이상의 강성을 가진 관계로 붕괴모드가 적절하지 못한 점을 개선하여, 원하는 목적을 달성하였다.

### 후기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. ADT/SOR, "SAFETRAIN Train Crashworthiness for Europe" Final Report (2001).
2. R. A. Smith, "Crashworthiness Moves from Art to Science," Railway Gazette International, pp.227-230 (1995).
3. 송달호 외, "고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 연구보고서", 건설교통부 (1998).
4. 구정서 외, "기존선 고속화 틸팅차량의 충돌안전도 해석 및 설계지원", 한국철도기술연구원(2003).
5. 정현승 외, "한국형 고속틸팅차량 구동차 설계초안의 충돌압괴특성", 철도학회 춘계학술대회(2004).
6. 권태수 외, "TTX 출입문영역의 충돌에너지 흡수구조 설계에 대한 연구", 철도학회 춘계학술대회(2004).
7. 권태수 외, "기존선 고속화 틸팅차량의 충돌안전도 해석 및 설계지원", 한국철도기술연구원(2004).