

유럽 충돌기준 적용 충돌안전도 차체 구조물 개발에 관한 연구

A study for develop of European carbody structure according to EN15227

정지호*†, 이장욱*, 조현직*

Ji-Ho Jeong *†, Jang-Wook Lee*, Hyun-Jik Cho*

Abstract Recently the government and the railway operators requires crashworthiness design for the trains as the new standard EN15227 has been released on 2008. Accordingly the manufacturers need to design the vehicles which complies with the technical requirements of the standard. From the technical requirements, the vehicle needs to design special energy absorbing elements to control the collapse force to get a deceleration target. The energy absorption elements are designed at the end of the vehicles to guarantee the safety area for driver and passengers which is also one of the criteria. From these reason, we have developed the energy absorbing elements. This paper describes the development process(design, analysis and test) to be applied on European cars according to the technical requirement of EN15227.

Keywords : EN15227, Energy Absorption, Multiple Units, Crash Analysis, Overriding, Survival Space

초 록 철도차량과 충돌안전도와 관련하여 최근 유럽 시장에 이와 관련된 신규 standard인 EN15227이 발효 되면서 대부분의 철도차량 운행사들이 차량 발주 시 신규 standard를 만족하는 설계 디자인을 요구하고 있다. EN15227의 충돌안전도 요구 조건을 충족 시키기 위해 관련된 에너지 흡수 장치들을 유럽의 몇 개 업체에서 독점으로 공급되어 있고, 이는 차량의 제작 단가를 상승시키는 원인이 되고 있다. 이에 입찰경쟁력 강화와 자체 기술력 확보를 위해 차량 전두부에 에너지 흡수를 담당할 수 있는 유럽형 전동차 차체 구조물을 개발하였으며, 유한요소 충돌 해석과 실제 충돌 시험을 통해 차체의 에너지 흡수 성능을 검증하였다.

주요어 : 유럽충돌 안전기준, 편성열차, 타고오름, 생존공간

1. 서 론

철도차량은 항공기와 같이 비록 사고의 빈도는 낮지만 일단 사고 시 많은 인명과 재산의 손실을 입는 대형사고의 형태이고, 그 여파로 인해 국가적, 사회적인 후유증이 심각하다. 이러한 철도시스템 설계의 근본적인 원칙은 적극적(active) 안정성, 즉 충돌사고가 발생하지 않게 철로, 열차의 관리 및 전체 시스템의 관리를 잘 함으로써 사고를 최소화하는데 있

† 교신저자: 현대로템 주식회사(crash94@hyundai-rotem.co.kr)

* 현대로템 주식회사

다. 하지만 철도시스템에 의해 완전히 통제하기 어려운 상황들에 기인해서 충돌이 있을 경우 발생하는 승객과 승무원의 상해를 최소화시키기 위해 차량 자체의 소극적(passive) 안정성을 고려함으로써 철도의 안전성을 상당히 향상시킬 수 있다. 이러한 목적을 충족시키기 위해 충돌 안전에 대한 종합적이며 집중적인 연구가 필요하게 되었고, 철도차량 선진국들은 충돌사고 시 승객의 안전도를 확보하기 위한 연구가 지난 수십 년 전부터 꾸준히 진행되어 왔고, 최근 몇 년간 상당한 양의 연구들이 진행 되어져 오고 있다. 특히 슈퍼컴 등 하드웨어의 급진적인 발달로 인해 철도차량에서 충돌을 비롯한 CAE 분야에 최근 많은 연구들이 진전을 보이고 있는 상황이다. 유럽 연합에서는 이런 연구 결과들을 기반으로 철도차량시장에 적합한 충돌안전도와 관련한 신규 규격 제정을 위한 연구가 진행되었고 2008년 EN15227 충돌안전도 규격⁽¹⁾을 제정하게 되었다. 이에 철도차량 제작사로서 가장 큰 판매 시장을 형성하는 유럽 시장에서 수주 경쟁력을 갖기 위해 유럽연합이 공용으로 규정하고 있는 EN15227규격의 시험 및 해석 규격을 충족시키는 차량의 개발은 필수불가결 하다고 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 연구배경

현재 북미를 제외한 유럽을 포함 전세계 철도 차량 시장이 최근 제정된 EN15227 규격을 철도차량의 충돌안전도 규격으로 강력하게 요구하고 있어 철도차량 제작사에서의 발 빠른 대응이 필요한 현실이다.

EN15227 충돌안전도 규격의 에너지 요구 조건을 충족 시키기 위해서는 차량에 대용량의 에너지 흡수 장치(연결기, 사이드 버퍼 등)를 부착하거나, 에너지 흡수 구조물을 개발하여 적용하는 방법 등이 있다. 현재 에너지 흡수 장치들은 유럽의 몇 개 업체에서 독점으로 생산/공급되어 차량의 제작 단가를 상승시키는 원인이 되고 있다. 이에 입찰경쟁력 강화와 자체 기술력 확보를 위해 차량 전두부에 에너지 흡수를 담당할 수 있는 구조물의 개발이 필수 불가결한 상황이다.

최근에는 컴퓨터 등의 하드웨어 및 수치기법의 급속한 발달에 따라, 많은 시간과 경비가 필요한 시험횟수를 감소시키며, 또한 시험으로 얻기 어려운 구조물의 국소적인 에너지 흡수 및 변형 메커니즘 현상을 자세히 제공함으로써 구조물의 충돌 특성을 파악하는 데 큰 도움이 되고 있다.

본 연구에서는 범용 전산 프로그램인 LS-DYNA⁽²⁾를 이용하여, EN15227 충돌안전도 규격에서 요구하는 에너지 흡수 구조물에 대해서 수치 해석을 수행하였고, 동일한 에너지 흡수 구조물에 대한 충돌시험을 수행하여 그 결과를 비교함으로써 에너지 흡수 성능을 검증하였으며, 자체적인 설계기술을 확보하고 그 노하우를 축적하고자 하였다. 또한, 이러한 비교 검증결과로부터 수치 해석의 신뢰도를 검토함으로써, 향후 다양한 구조물 설계 개발 시 충돌해석의 유용성을 확인하고자 하였다.

2.2 EN15227

2.2.1 검증 시나리오

EN15227에서는 하기와 같이 총 3가지의 순서에 따라 충돌 안전도에 대해 검증이 이루어진다. step 1은 차량편성 충돌 시 에너지 흡수를 담당하는 장치 및 구조에 대해 설계와 1대1 스케일을 가지는 시험체를 이용하여 충돌 시험을 실시 하며, step 2는 검증 1단계에서 실시된 결과를 가지고 유한요소 해석 모델을 개발하여 시험치와 에너지량에서 10% 오차내로 모델의 교정을 실시 한다. 마지막 step 3에서는 검증 2단계에서 교정된 모델을 포함 3차원 전체 차량 모델을 개발하여 충돌 시뮬레이션을 통해 충돌 안전도를 최종 검증한다.

2.3 에너지 흡수 구조 개념 모델

본 연구의 충돌 흡수 구조물의 개발 배경은 EN15227에 정의된 충돌 시나리오에 따른 차량편성 충돌 시 특정한 에너지 흡수장치 없이 차체의 메인 프레임에 소성변형이 발생하지 않고 에너지 흡수 구조물에서 모든 에너지흡수를 담당하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 개발 전 충돌 흡수 구조물이 전체 편성 차량충돌 시 발생하는 에너지 중 얼마를 담당하는지의 선정이 중요하다.

EN15227규격에서 충돌 시스템의 운동 에너지가 가장 큰 시나리오 1을 기준으로 전체 충돌 시 차량편성에서 흡수되어야 하는 에너지를 산출하면 다음 식 (1)과 같다.

$$3 \text{ cars unit} \rightarrow E_{\text{Required}} = \frac{1}{2} \times \underbrace{128,790 \text{Kg}}_{\text{Mass of 3 cars train unit with half seated passenger mass}} \times \left(\underbrace{18.0 \text{Km/h}}_{\substack{\text{Travelling speed of each units} \\ \text{for a 18Km/h closing speed}}} \right)^2 \approx 1.61 \text{MJ} \quad (1)$$

1편성 당 2개의 에너지 흡수 구조물이 취부됨으로 1개의 에너지 흡수 구조물은 최소한 전체 운동에너지의 1/2에 해당하는 0.805MJ의 에너지 흡수 성능을 가져야 한다고 계산된다.

초기 설계 개념 모델의 에너지 흡수 성능을 예상하기 위해 Fig. 1과 같은 유한요소 모델을 개발하여 압괴해석을 실시 하였다. 해석 모델의 적용 재질은 SPA-H이며 시험 시편 제작 전 단계이므로, 재질의 물성치는 일반적인 철강의 참고 문헌으로 쓰이는 일본 금속 규격서인 JIS⁽³⁾에 명시된 최소치를 사용하였다.

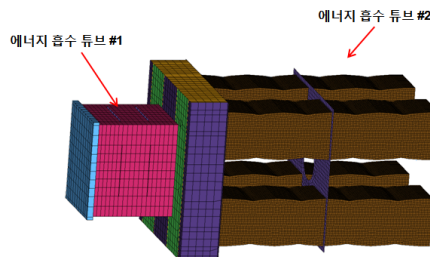


Fig. 1 Concept FE model

개념해석 결과 아래 Fig. 2와 3에서 볼 수 있듯이 전체 길이 1,100mm 기준으로 압괴 평균하중 1,070kN 에서 최소 735mm 이상 압괴 발생 시 0.8MJ 이상의 에너지를 흡수 하는 것으로 나타났다.

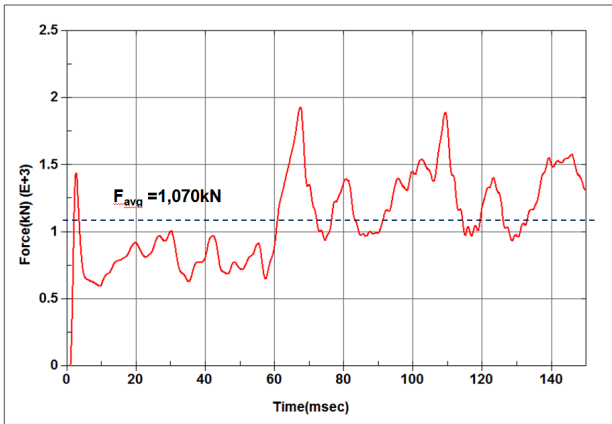


Fig. 2 Reaction force curve of crush tube

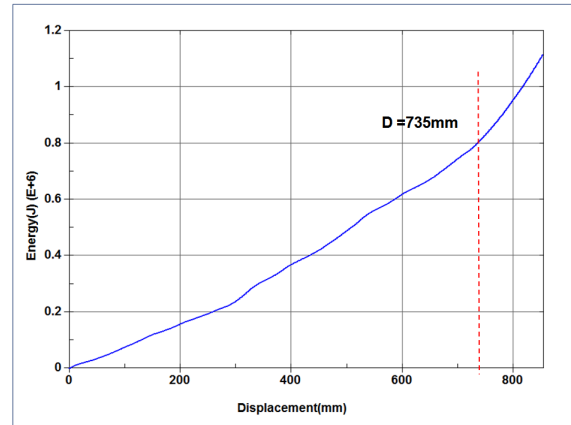


Fig. 3 E-D curve of crush tube

2.4 에너지 흡수 구조물의 충돌 시험

EN15227의 충돌안전도 1단계 검증을 하기 위하여 충북 영동 소재의 철도기술연구원 충돌 시험장에서 Fig. 4의 개념도와 같이 에너지 흡수 구조물의 충돌 시험을 실시 하였다.

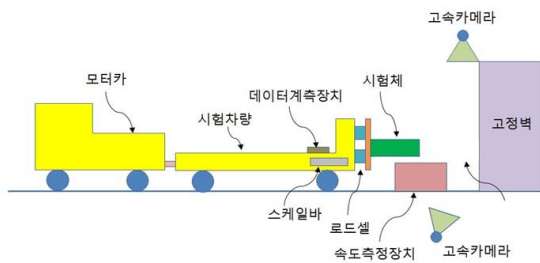


Fig. 4 Schematic crash test concept

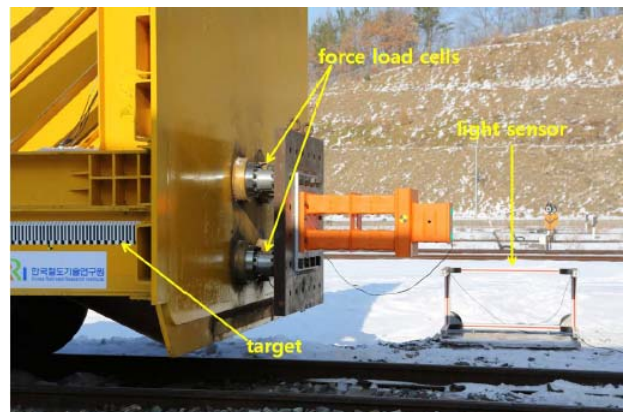


Fig. 5 Installation of test specimen

Fig. 5는 시험 전 흡수 구조물이 충돌 차량에 설치 및 계측 장비의 구성 사진이다.

시험의 충돌 속도는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$E = \sqrt{\frac{2 \times \text{Energy}}{\text{Mass}}} = \sqrt{\frac{2 \times \text{최대 충돌에너지 흡수량의 80\%}}{\text{시험체 총 질량}}} \quad (2)$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 640,000}{40,000}} \leq 20.84 \text{ km/h}$$

시험체의 총 질량 = 충돌차량 + 시험체 + 로드셀 + 지그

실제 시험 시 측정된 최종 속도는 20.7km/h로 계산 값과 오차 0.1% 이내이다. .

Fig. 5는 시험 전/후 에너지 흡수 구조물의 변형 양상을 보여주면, Fig. 6은 시간 별 에너지 흡수 구조물의 변형 거동을 보여준다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 구조물의 전위 튜브에서 최초 변형이 시작되며, 최대 변형 발생 후 순차적으로 후위 튜브가 변형되는 것을 알 수 있다.

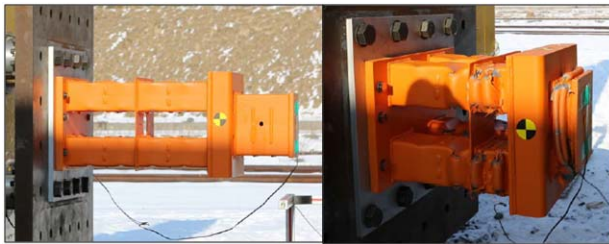


Fig. 6 Configuration of crash energy tube before/after test

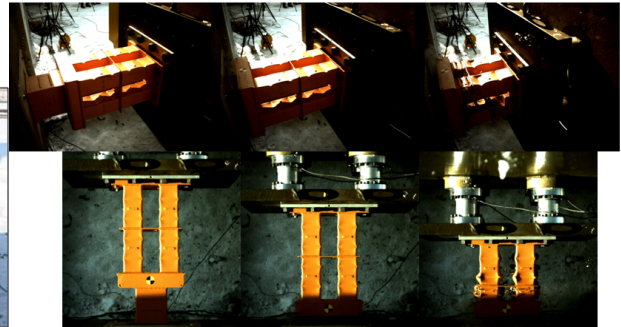


Fig. 7 Sequential behavior of crash energy tube by time state

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 충돌 후 최대 변형량은 약611mm이며, 이때 에너지 흡수 구조물에서 흡수된 총 에너지량은 약 0.724MJ로써 개념설계 단계에서 계산된 에너지 0.8MJ의 약 91%의 에너지 흡수 성능이 입증되었다. 최대 하중은 2283.5kN이며, 평균 하중은 1185.8kN로써 설계 개념 단계의 예상치 보다 높은 값이 측정 되었다.

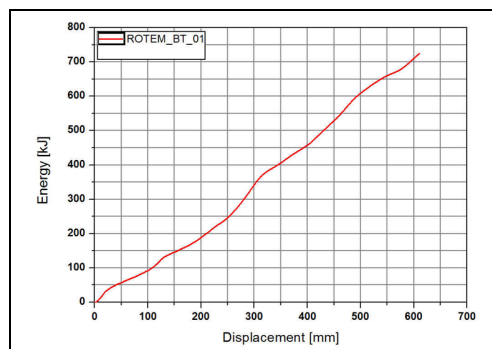


Fig. 8 E-D measuring curve of crush tube by test

2.5 Correlation

최종 검증 시뮬레이션을 실시 하기 위하여 해석 모델을 시험을 통해 검증 된 에너지 흡수 구조물과의 교정(correlation) 과정이 필요하다.

2.5.1 해석 모델 및 경계 조건

Fig. 9 와 같이 유한요소모델의 기준 격자 크기는 초기 10mm 를 기본 하여 분할하였다. 에너지 흡수 구조물의 끝 단을 충돌 진행 방향인 Y 축(길이 방향) 방향을 제외한 나머지 방향에 대해서 전부 구속하였다. 사용재질의 기계적 물성치는 시험편 제작에 소요된 강재의 공급 업체에서 제공된 시편을 Fig. 10 과 같이 속도에 따른 strain rate effect 를 반영한 시험을 통해 얻어진 비선형 특성 곡선을 해석에 적용하였다.

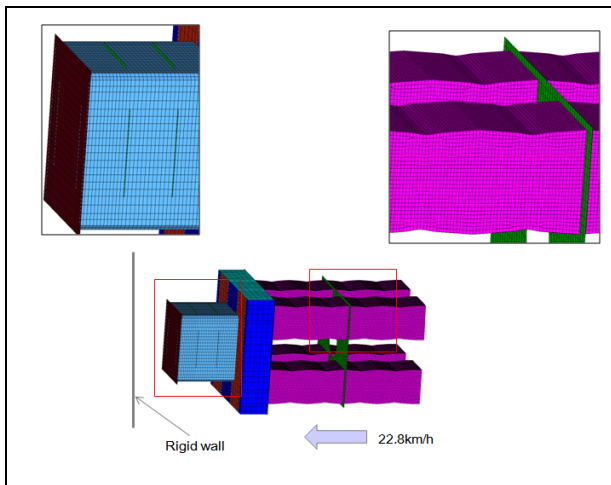


Fig. 9 FE model and Boundary condition

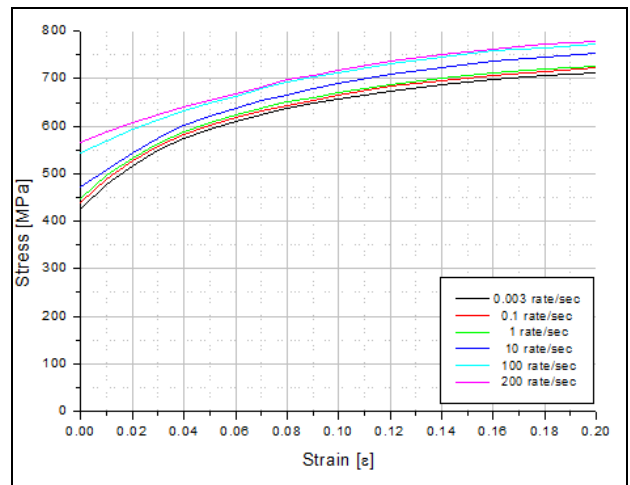


Fig. 10 σ - ϵ curve as strain rate of SPA-H

2.5.2 해석 모델과 시험치의 correlation

기본 개념 모델을 사용하여 시험과 동일 조건을 적용하여 해석한 결과 시험 대비 에너지 측면에서 13%의 오차율을 보였다. 이는 EN15227 의 검증 2 단계에서 요구하는 기준인 10% 를 초과한다. 본 연구에서는 10% correlation 을 확보하기 위하여 고려할 수 있는 factor 중에 요소의 크기변화를 구간별로 선정하여 해석 수행 하였다. 요소 크기의 교정 후 해석 결과의 경우 에너지-변형 선도는 Fig. 11 과 같으며, Table. 1 에서 볼 수 있듯이 변위, 하중, 에너지 측면에서 모두 10% 오차 내 기준을 만족하고 있다.

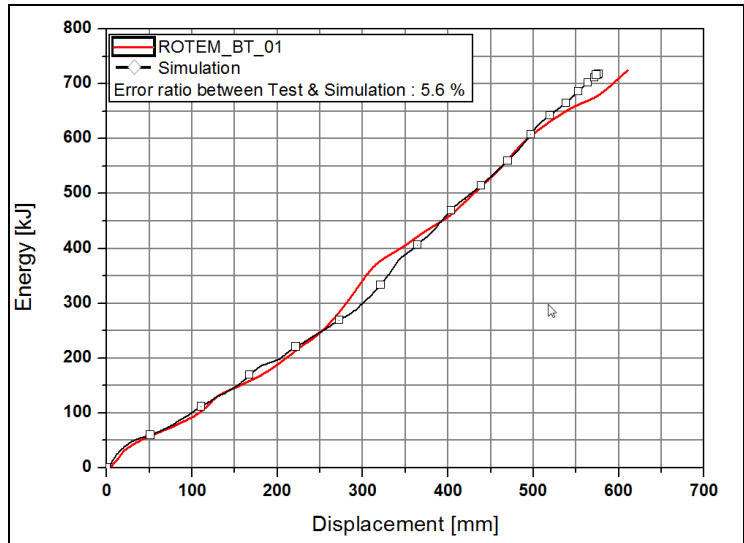


Fig. 11 Compared E-D curve for correlation test & simulation

Table. 1 Correlation summary table between test & simulations

| | Displacement (mm) /Ratio(simulation/Test) | Force (kN) /Ratio(* /Test) | Energy (MJ) /Ratio(* /Test) | Remark |
|----------------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------|
| Simulation #1 | 735 / 1.20 | 1,070 / 0.86 | 0.80 / 1.13 | Initial simulation |
| Simulation #2 | 570 / 0.93 | 1,246 / 1.05 | 0.71 / 0.99(*) | Correlation |
| Test | 611 / 1.00 | 1,186 / 1.00 | 0.72 / 1.00 | |

(*) 최종 해석의 변위를 시험 값 수준으로 보상해 주면 에너지는 약 5.6% 오차가 발생.

3. 결 론

본 연구에서는 EN15227 규격에서 요구하는 충돌안전도 조건을 충족 시키기 위해 개발된 에너지 흡수 구조물에 대해서 3단계의 검증 절차 중 2단계 까지 검증 평가를 실시하였다. 해석 모델과 동일하게 제작된 에너지 흡수 구조물에 대해서 시험을 수행하여 그 결과를 기준으로 해석 모델을 교정하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 개발된 충돌 에너지 흡수 부재는 1단계 검증인 시험을 통해 에너지 흡수 성능이 검증 되었다.

(2) 시험 결과를 기준으로 EN15227규격에 명시된 2단계 검증절차인 오차 10% 이내의 해석 모델을 개발 하였다.

상기의 결과로부터, EN15227충돌안전도 규격을 고려한 단부 에너지 흡수 구조물 개발 및 에너지 흡수 성능을 검증하였고, 향후 다양한 수주 프로젝트에 적용될 수 있는 기본 모델을 확보 하였다는데 그 의의가 있다고 본다.

참고문헌

- [1] EN15227; "Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies".
- [2] Livermore Software Technology Corporation., 2012, LS-DYNA Theory Manual.
- [3] JIS; "Ferrous Materials & Metallurgy", 1998, Japanese Standards Association.