

철도차량의 Crashworthiness 적용에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and FEA on Crashworthiness Application of Rolling Stock

이정수† · 박경환* · 이장욱** · 박근수*** · 우관제***
Jungsu Lee† · Kyounghuan Park* · Janguk Lee** · Geunsu Park*** · Kwanje Woo***

ABSTRACT

The CEM (Crash Energy Management) concept is getting important in rail vehicle design to minimize injury on passengers and drivers on crash event. In this paper, the accuracy of the FEA analysis result was verified through the crush test on the front part of a non-CEM based carbody. Using the verified FEA analysis method, the energy absorbing capability of the CEM based carbody was estimated.

Keywords : Crashworthiness, Crash Energy Management(CEM), Crush zone, Crash energy absorption

1. 서론

철도차량의 설계에서 CEM(Crash energy Management)은 충돌 시 운전석/기관사 및 객실/승객의 피해를 최소화 시키는 개념으로 철도차량의 설계에서 점차 중요한 개념으로 자리 잡고 있다. 본 논문에서는 CEM 개념이 적용되지 않은 완성 차의 전두부 압괴 시험결과와 해석결과를 비교하여 해석의 신뢰도를 확보하였다. 이렇게 검증된 해석기법을 이용하여 현재 개발중인 CEM개념이 적용된 차량이 충돌 시 가지는 에너지 흡수율의 우수성을 규명하였다.

2. 충돌에너지 흡수 부재의 개념과 구조

CEM은 차량 대 차량의 충돌 시를 가정하여 발전해왔다. CEM의 각 부분은 차량에서 승객이 탑승하지 않은 공간을 압괴영역으로 설계되었다. 압괴영역에서는 초기의 압괴 하중은 낮게 설계되고 압괴 시 Peak 값은 균일하게 설계되어 많은 충돌에너지를 흡수하도록 설계되었다. 그렇게 설계된 압괴영역은 충돌로부터 발생하는 에너지를 흡수하여 승객 및 운전자의 점유공간을 안전하게 보존한다.

압괴영역은 압괴 힘과 특성에 대한 목표를 설정하고, 운동학적으로 자연스럽게 붕괴될 수 있는 특성을 가지고 있어야 한다. 압괴영역은 이러한 특성을 기구적으로 뒷받침 할 수 있는 3가지의 구조적 창치를 가지고 있다. 이 3가지 구조적 창치는 커플링 부분을 이용하여 충돌에너지를 흡수할 수 있는 구성품과 충돌 시 하중전달이 잘 이루어 질수 있도록 설계된 구성품, 그리고 충돌에너지를 흡수할 수 있는 구성품 등으로 구성되어 있다. 이들 구성품들은 각각 맡고 있는 기능에 대하여 적합한 판정기준을 가지고 있어야 한다. 따라서 이에 대한 준정적, 동적해석이 필요하고 각 기구에 대한 시험이 필요하다.

† 책임저자 : 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 연구원

E-mail : tntjs459@hyundai-rottem.co.kr

TEL : (031)596-9509 FAX : (031)596-9747

* 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 연구원

** 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 선임연구원

*** 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 수석연구원

그림. 1은 커플링부분의 모델을 제외한 충돌 시 압피영역에서 각 구성품들이 각각에 기능에 충실할 수 있도록 설계된 구조물을 나타내었다. 아래그림에서 충돌 시 Honeycomb block은 초기에 충돌에너지를 흡수하면서 압피하중을 전달할 수 있도록 설계 되었으며, Crash initiation element는 충돌 초기에 변형되면서 압피양상에 도움을 주는 구성품이고, Sliding sill/Fixed sill은 커플러 부분이 충돌 시 커플러를 고정시키는 볼트가 전단되면서 안으로 밀려들어가는 형태의 충돌에너지 흡수 부재이고, Energy absorbing buckling tube는 충돌에너지를 흡수하는 주요부재이다.

본 논문에서 다루는 구성품은 충돌에너지를 흡수하는 주요 부재인 Energy absorbing buckling tube를 적용 완성차량이 가지는 충돌의 우수성을 규명하기 위하여 시험 및 해석을 수행하였다.

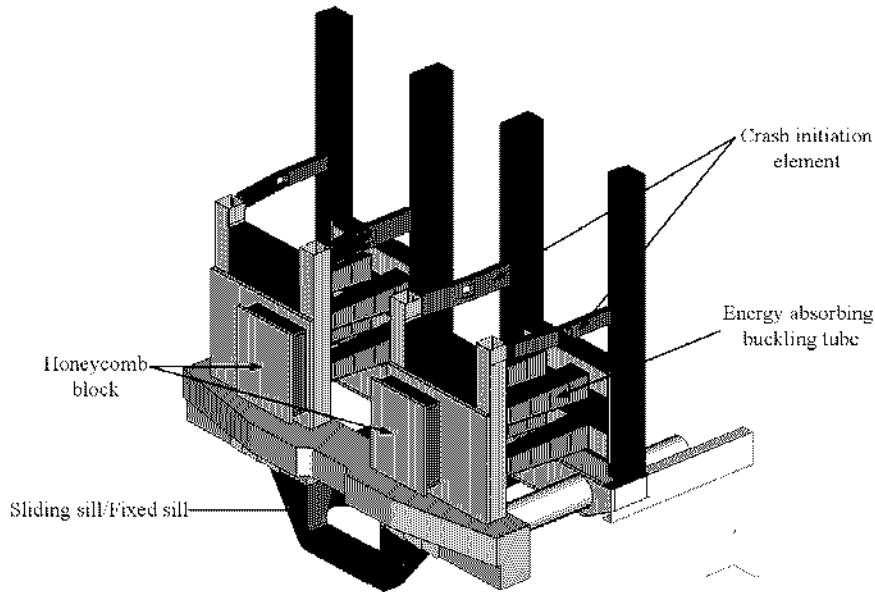


그림 2. 차량 전두부 압피영역의 구조

3. 완성차량 압피시험 방법

본 논문에서 사용한 시험차량은 SUS재질로 만들어진 전동차 완성차량의 전두부를 일정부분 잘라서 시험을 실시하였다. 길이는 대략 5000mm이며 차량제작에 사용된 재질의 기계적 성질은 표 1과 같이 정리하였다. 그림. 2는 완성차량 압피시험의 시험 개략도 이다. 위와 아래에 각각 500tonf의 유압실린더로 압축을 가하고, 하중을 측정하기 위하여 유압실린더 끝단에 로드셀을 설치하였다. 이동벽의 이동시간은 50mm/min으로 압축하였고, 굽힘붕괴 거리를 측정하기 위하여 상하좌우로 4개의 레이저변위 센서를 설치하여 각 측정값의 평균으로 굽힘붕괴 거리를 측정하였다.

표 1. 재질의 기계적 성질

번호	재질	항복강도 [kgf/mm ²]	연신율 [%]	인장강도 [kgf/mm ²]	비 고
1	301L-LT	22.45 이상	45	56.1 이상	
2	301L-DLT	35.20 이상	40	70.4 이상	
3	301L-ST	42.35 이상	35	77.6 이상	
4	SS400	24.5 이상	21	40.0 이상	
5	SMA490B	37.21 이상	15	49.9 이상	

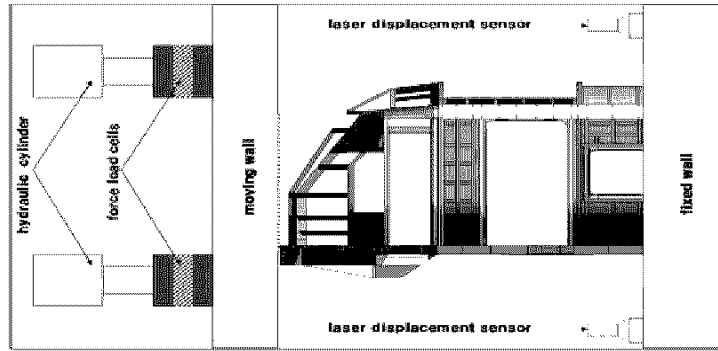


그림 3. 완성차량 전두부 압괴시험 설치도

4. 완성차량의 압괴 시험결과

그림. 3의 왼쪽은 시험하기 전 설치된 완성차량의 전두부 형상이며, 오른쪽은 시험 뒤 완성차량의 전두부 형상이다. 그림. 3의 오른쪽 사진에서 보듯이 일정하게 좌굴을 발생시켜 압괴시 일정한 좌굴하중값을 얻을 수 있었다.



그림 4. 완성차량 전두부 압괴시험 전후

그림. 4는 시험시 발생하는 반력그래프이다. 시험 시작 후 약 30mm 근처에서 첫 번째 급힘붕괴가 발생되었고 이때 반력은 약 280ton으로 측정되었으며 두 번째 급힘붕괴가 발생한 지점은 약 350mm 부근이며 이때 반력은 약 150ton으로 측정되었으며 세 번째 급힘 붕괴가 발생한 지점은 약 682mm 부근이며 이때 반력은 405ton으로 측정되었다. 압괴시험 결과 발생한 총 에너지량은 약 1.65MJ로 나타났다.

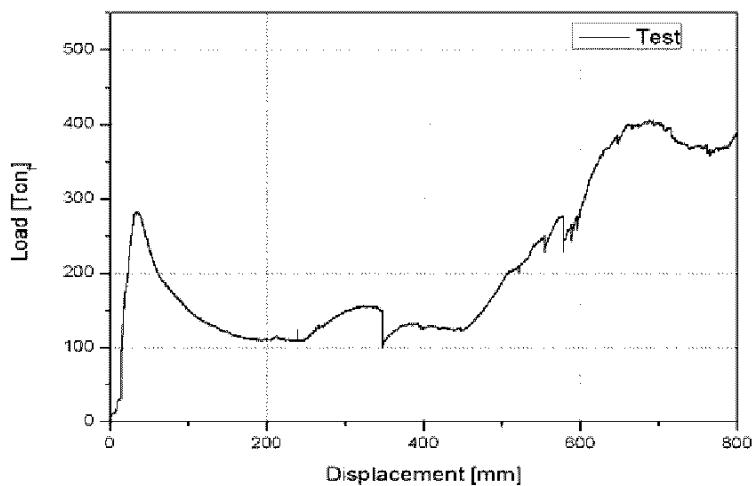


그림 4. 완성차량 시험결과

5. 완성차량 유한요소해석 및 시험결과 비교

5.1 완성차량 압피 해석 및 시험결과 비교

그림. 5의 왼쪽은 해석이 진행되기 전 완성차량의 전두부 형상이며, 오른쪽은 해석이 완료된 뒤 완성차량의 전두부 형상이다.

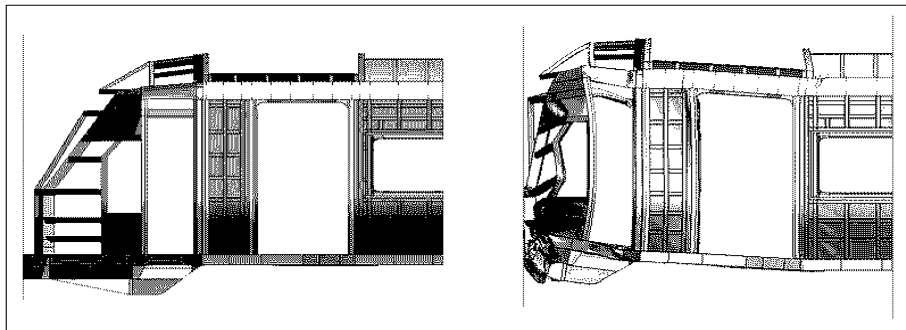


그림 5. 완성차량 압피 해석결과

해석 시작 후 약 20mm 근처에서 첫 번째 굽힘붕괴가 발생되었고 이때 반력은 약 266ton으로 측정되었으며 두 번째 굽힘붕괴가 발생한 지점은 약 305mm 부근이며 이때 반력은 약 184ton으로 측정되었으며 세 번째 굽힘 붕괴가 발생한 지점은 약 664mm 부근이며 이때 반력은 390ton으로 측정되었다. 압피시험 결과 발생한 총 에너지량은 약 1.69MJ로 나타났다.

그림 6은 해석결과와 시험결과를 비교한 그래프이다. 이 그래프에서 나타난 값을 비교하여 표 2와 같이 정리하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용하는 해석기법이 95%이상의 신뢰성을 가짐을 입증하였다.

표 2. 완성차량 압피해석 및 시험결과

항 목	최대하중 (tonf)	흡수에너지 (MJ)	최대하중일 때 압피길이 (mm)	비 고
시험	405	1.65	682	
해석	390	1.69	664	
오차	3.7%	2.4%	2.6%	

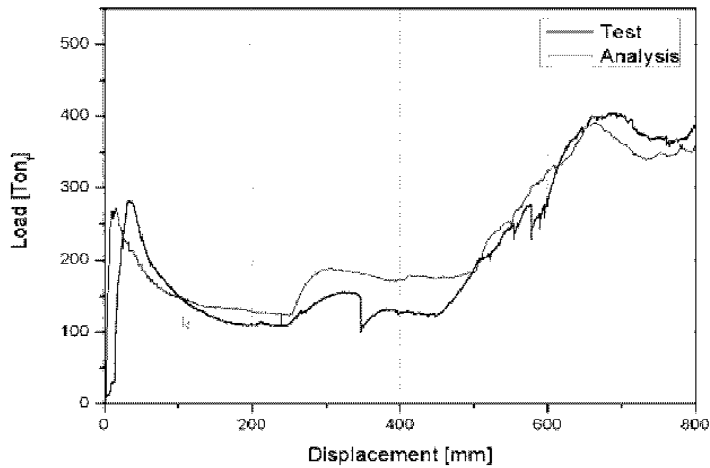


그림 5. 완성차량 압괴 해석 및 시험결과 비교그래프

5.2 Energy absorbing buckling tube를 적용한 차량의 충돌해석결과

본 논문의 최종목적인 Energy absorbing buckling tube가 적용된 차량의 충돌시 가지는 에너지 흡수율의 우수성을 규명하기 위해 현재 개발중인 전동차 차량을 본 시험으로 검증된 해석기법을 이용하여 충돌해석을 진행하였다. 충돌에 사용된 해석모델은 그림 6과 같고 해석조건은 승객이 탑승한 상태에서 상대속도 20km/h로 고정벽에 충돌하는 조건이다. 그림 7에서 충돌 전후 차량의 변형양상을 볼 수 있다. 해석결과 충돌 후 운전석 생존공간은 1210mm으로 철도안전법 규정인 750mm이상을 확보함을 알 수 있다. 또한 충돌시 발생하는 가속도 규정을 충분히 만족함 표 4에서 볼 수 있다.

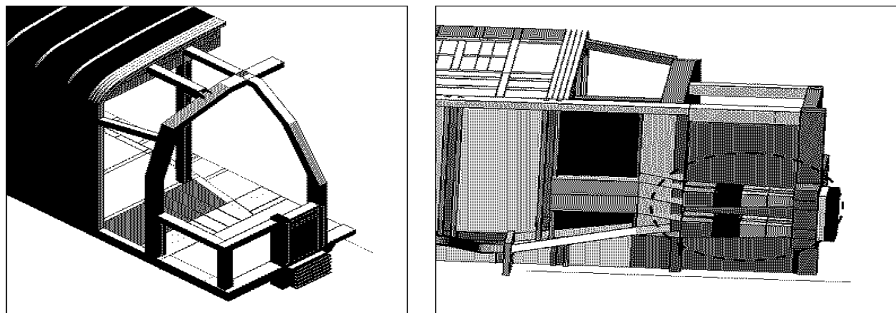


그림 6. Energy absorbing buckling tube가 적용된 완성차량 해석모델

표 3. 충돌해석 가속도 결과

항 목	평균가속도(g)	최대가속도(g)	비 고
운전석	2.7	5.7	
카센터	2.9	2.4	
차량끝	2.5	7.4	
규정	5이하	7.5이하	

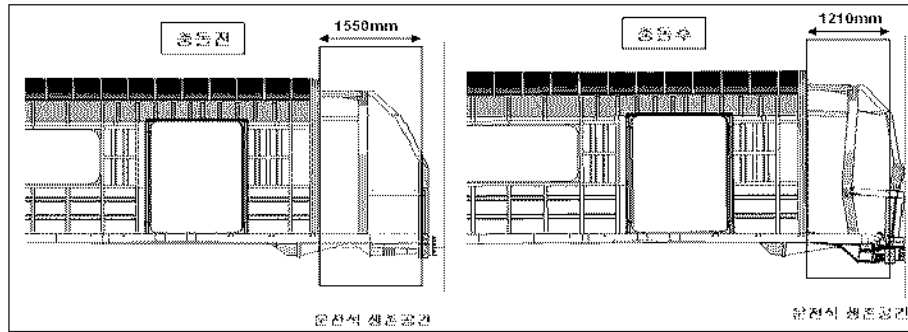


그림 7. 상대속도 20km/h 고정벽 충돌해석 결과

6. 결론

본 논문에서는 완성차량의 압피시험 및 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 완성차량의 압피 시험결과 변위 682mm일 때 최대하중 405ton의 반력이 측정되었으며 총 흡수 에너지는 1.65MJ이 발생하였고 해석결과 변위 664mm에서 최대하중 390ton의 반력이 발생하였으며 총 흡수 에너지는 1.69MJ이 발생하였다. 시험과 해석의 값을 비교했을 때 최대오차율이 3.7%임을 알 수 있다. 이는 해석과 시험의 오차기준인 $\pm 15\%$ 를 만족하는 수준이므로 해석의 신뢰도가 높은 수준임을 입증하는 결과이다.

2. 위 결과를 통해 확보된 해석의 신뢰도를 바탕으로 Energy absorbing buckling tube가 적용된 완성차량의 충돌해석을 수행한 결과 운전석 생존 공간은 약 1210mm정도가 확보되었고 이는 철도안전법 규정인 750mm 이상을 초과하는 값이다. 또한 각 부분에서 가속도 측정결과 평균가속도는 규정값인 5(g)이하로 나타났으며 최대 가속도는 규정값인 7.5(g)이하로 나타났다.

3. 이와 같이 시험 및 유한요소해석결과 사양을 만족시킨 Energy absorbing buckling tube를 직접 차량에 적용하여 차체의 충돌시 설계 상 원하는 변형을 유도하여 충분한 충돌에너지를 흡수시켜 운전자 및 승객의 점유공간을 안전하게 확보할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

1. Jacobsen, K., Tyrell, D., Perlman, A.B., "Impact Tests of Crash Energy Management Passenger Rail Cars: Analysis and Structural Measurements," American Society of Mechanical Engineers, Paper No. IMECE2004-61252, November 2004.
2. David Tyrell, Bloy Martinez, Kristine Severson, A. Benjamin Perlman "Overview of a crash energy management specification for passenger rail equipment" Paper No. JRC2006 -94044, April 2006
3. Kirstine j. Severson, David Tyrell, A. Benjamin Perlman. "Collision safety comparison of conventional and crash energy management passenger rail car designs." Paper No. JRC2003 -1657, April 2003
4. Martinez, B., Tyrell, D., Perlman, A.B., "Development of Crash Energy Management Designs for Existing Passenger Rail Vehicles," American Society of Mechanical Engineers, Paper No. IMECE2004-61601, November 2004.
5. 박경환, 이정수, 이장욱, 박근수 (2008) "철도차량의 Crashworthiness에 관한 실험 및 해석적 연구" 한국철도학회