

철도차량의 Crashworthiness에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and FEA on Crashworthiness of Rolling Stock

박경환[†] · 이정수* · 이장욱** · 박근수***
Kyoung-Huan Park[†] · Jung-Su Lee* · Jang-Uk Lee** · Geun-Su Park***

ABSTRACT

The priority of Crashworthiness concept for rolling stock is progressively increasing to reduce the damage of drivers and passengers as well as the car. For the first step of this research, the analysis of the crash elements have been performed. Also the longitudinal collapse force and mode is important point for whole carbody structure to guarantee the lower force at end part rather than the main passenger area. The carbody quasi-static collapse analysis and real test has been performed in the research. The crash elements FEA and test has been performed as well. After the initial Analysis and test, the correlation analysis between the FEA and test has been performed by FEA tuning. All this result will be used for real crashworthiness design for carbody structure.

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

1. 서론

1990년대 초기부터 CAE와 설계기술의 상당한 발전으로 ‘Crash Energy Management(CEM)’라는 개념이 생겨났고, 전 세계에서 철도차량에 CEM이라는 개념을 적용하기 시작하였다. CEM의 핵심은 충돌과 전복 시 충돌에너지를 효과적으로 분산시키는 것에 있다. 이 접근방법은 열차의 각 부분 중 승객에 탑승하지 않는 공간의 연속적인 붕괴를 이용하여 충돌에너지를 효과적으로 분산시켜 충돌 시 운전석 및 객실의 피해를 최소화 시키는 개념으로 철도차량의 설계에서 점차 중요한 개념으로 자리 잡고 있다.

하지만, 철도차량의 제작 시 차량의 목적에 따라 요구하는 차체 강도 사양이 존재해 충돌에너지 흡수 부재와 서로 상충되는 개념으로 자리 잡고 있다. 이를 위해서는 철도차량에 사용되는 충돌 흡수 부재의 정적, 동적인 압괴 거동의 분석을 통해 차체의 충돌에너지 흡수 부재와 차체 강도설계를 동시에 만족해야한다. 이러한 분석을 통해 승객 탑승공간의 확보 및 안전성을 높이고자 하는데 연구의 목적이라 할 수 있다. 이들 특성을 분석하기 위해 실험적 방법과 더불어 유한요소해석 방법을 이용하기로 한다. 먼저, CEM 개념으로 설계된 에너지 흡수부재에 대한 준정적 압축실험을 통해 변형 거리에 따른 압괴 하중과 에너지흡수 능력을 분석하고, 셸 요소를 이용하여 외연적 시간적분법을 적용한 준정적, 충돌 유한요소 해석을 수행하여 실험결과와 비교하기로 한다. 이를 통해 변형양상을 규명하고 철도차량에 대한 충돌에 적용될 수 있음을 보이고자 하는 것이 이 연구의 목적이다.

† 책임저자 : 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 주임연구원

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

TEL : (031)460-1305 FAX : (02)460-1780

* 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 연구원

** 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 선임연구원

*** 정회원, 현대로템 응용기술연구팀, 수석연구원

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.

그림. 1은 커플링부분의 모델을 제외한 충돌 시 압괴영역에서 각 구성품들이 각각에 기능에 충실할 수 있도록 설계된 구조물을 나타내었다. 아래그림에서 충돌 시 Honeycomb block은 초기에 충돌에너지를 흡수하면서 압괴하중을 전달할 수 있도록 설계 되었으며, Crash initiation element는 충돌 초기에 변형되면서 압괴양상에 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 tube와 충돌 시 자연스럽게 압괴가 일어날 수 있도록 도와주는 Crash initiation element 부재이다. 각각 구성품들의 요구된 사양에 맞게 Energy absorbing buckling tube는 충돌시험을 실시하고, Crash initiation element는 준정적 시험을 실시하였다.

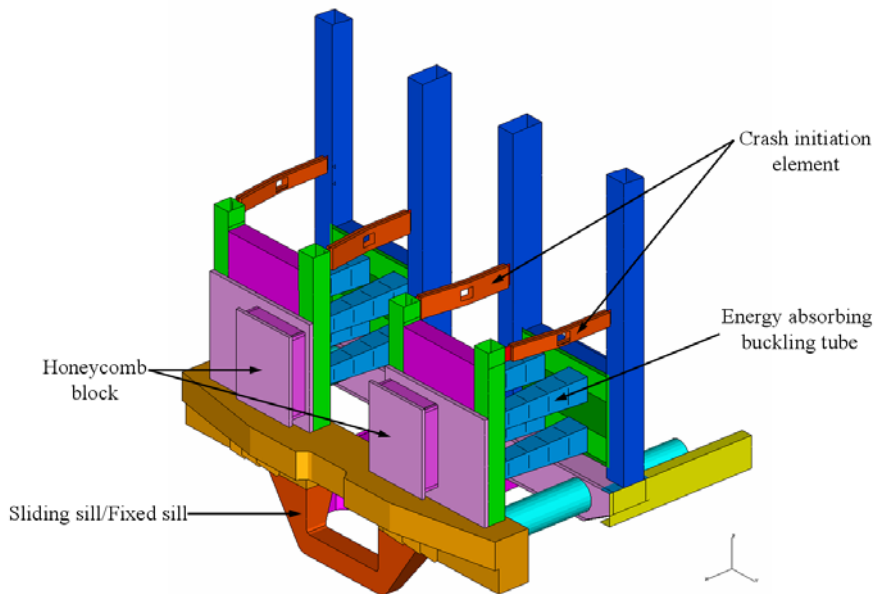


그림 1. 차량 전두부 압괴영역의 구조

3. 각 부재의 시험방법

3.1 Energy absorbing buckling tube의 사양 및 시험방법

시험 Energy absorbing buckling tube 시편은 사각형의 단면적에 기울어진 사각관 4개의 조합으로 구성되어있다. 길이는 1000mm이고 평균단면적은 140x140x3mm이다. 재질은 SPA-H이며 시편의 형상은

미세하게 초기 좌굴을 발생시켜 압괴 시 자연스럽게 좌굴이 발생되도록 유도한 형상으로 제작 하였다.

이 시편에서 요구되는 사양은 압괴 시 약 660mm 압괴가 발생되고, 최대압괴하중은 145tonf 이내에서 발생되어야 한다. 이 시편에서 요구되는 충돌에너지 흡수량은 0.53MJ 정도 요구된다.

시험장치는 그림. 3에서 보는 바와 같이 고정벽(mass>200tonf)위에 두꺼운 철판을 취부하고, 그 위에 로드셀을 부착하였다. 시편은 그림에서 보는 바와 같이 로드셀 위에 어댑터를 설치하고 시편을 취부하였다. 시험편 양쪽으로 시편 충돌 후 충돌차량을 완충할 수 있는 버퍼를 설치하였다. 충돌차량은 12톤의 자중으로 35±2km/h의 속도로 충돌한다.

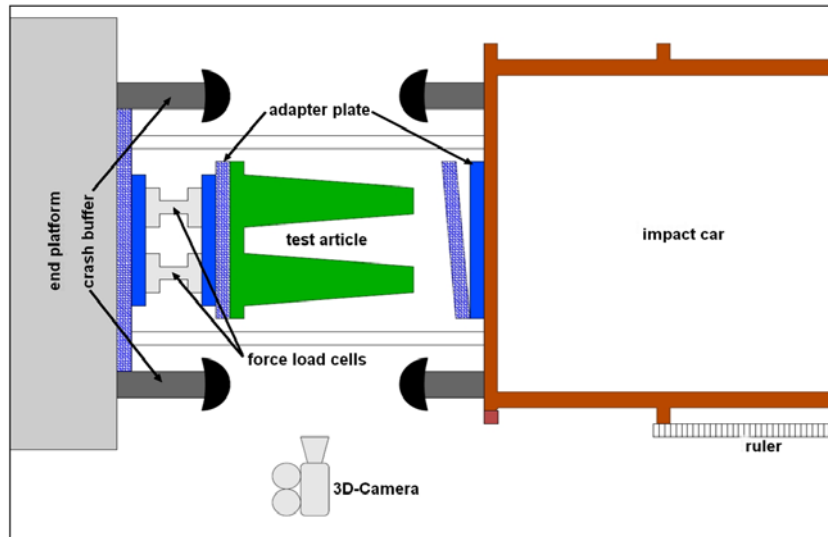


그림 2. Energy absorbing buckling tube의 시험 개략도



그림 3. 고정벽과 충돌차량

3.2 Crash initiation element의 사양 및 시험방법

Crash initiation element의 단면은 길이방향으로 길고, 모서리가 둥근 직사각형의 튜브로서, 자연스럽게 굽힘붕괴가 일어나 목표하는 하중을 도달하도록 가운데가 구부러진 4개의 튜브로 이루어졌다. 길이는 대략 910mm이며 재질은 A588로 두께는 7.1t 이다. 최대굽힘붕괴하중은 100tonf이내 이며 오차는 ±15% 이내에 들어와야 된다. 시험은 좌우대칭이므로 1/2모델로 시험을 실시하였다. 그림. 4는 Crash initiation element의 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.

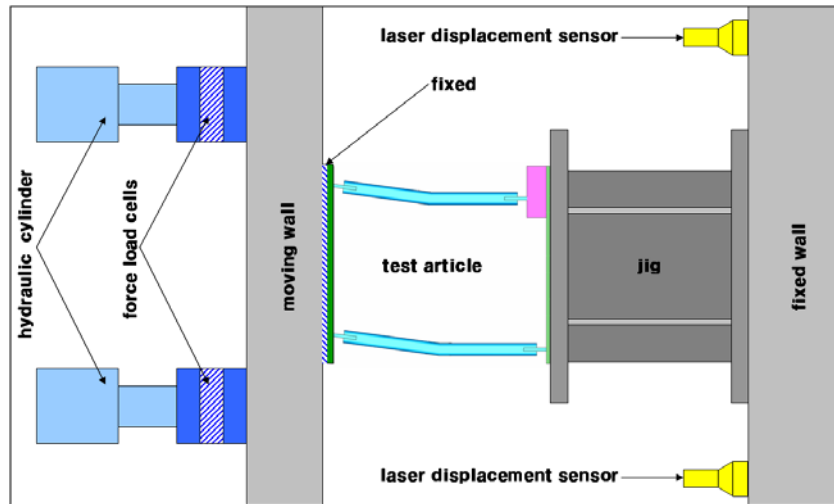


그림 4. Crash initiation element 시험의 개략도

4. 시험결과

그림. 5의 왼쪽은 시험하기 전 설치된 Energy absorbing buckling tube의 형상이며, 오른쪽은 시험 뒤 Energy absorbing buckling tube의 형상이다. 그림. 5의 오른쪽 사진에서 보듯이 일정하게 좌굴을 발생시켜 충돌 시 일정한 좌굴하중 값을 얻을 수 있었다.

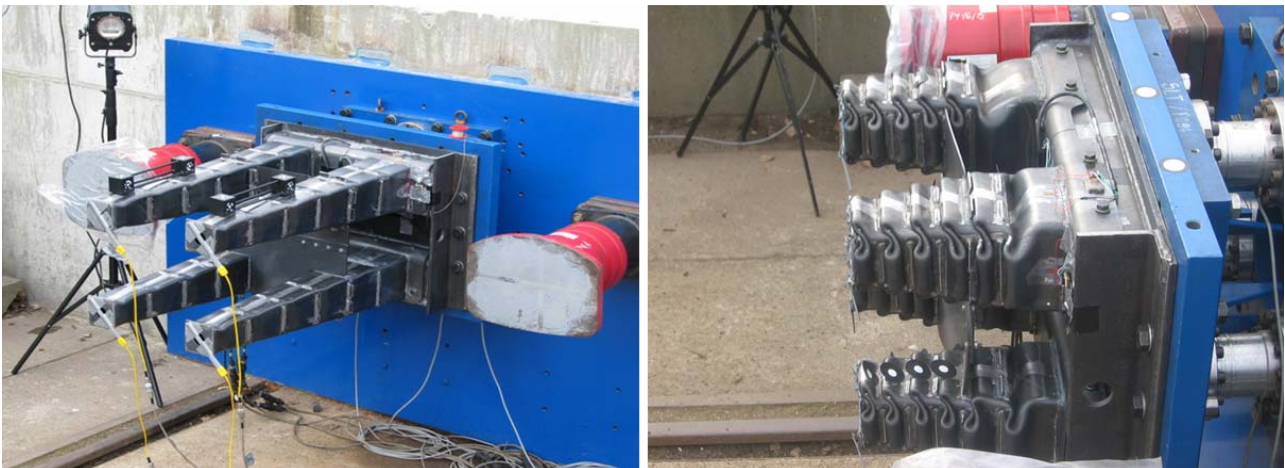


그림 5. Energy absorbing buckling tube의 시험 전, 후 모습



그림 6. Crash initiation element의 시험 전, 후 모습

그림. 6의 왼쪽은 시험하기 전 설치된 Crash initiation element의 형상이며, 오른쪽은 시험 뒤 Crash initiation element의 형상이다. 목표하는 최대하중 값 이내에 들어오기 위하여 초기에 설정해 놓은 굽힘 형상 대로 굽힘 붕괴가 발생하였다.

그림. 7은 Crash initiation element의 준정적 시험 결과를 정리한 것이다. 시험 시작 후 약 6mm 근처에서 굽힘붕괴가 발생되었고 이때 최대값은 43tonf로 측정되었다. 1/2모델이므로 최대 값에 두 배인 86tonf가 최대굽힘붕괴하중이며, 기준치인 100tonf에서 오차허용범위가 15%이내에 존재하므로 사양에 만족한다. 최대 변형거리는 280mm까지 변형되었고, 최대 굽힘붕괴하중이 발생한 후 하중 값이 급격히 떨어져 50mm변형된 이후에는 하중변동이 미미했다.

그림. 8은 Energy absorbing buckling tube의 충돌시험 결과를 정리하였다. 4번째 Peak에서 최대 하중이 발생하였고, 사양에서 규정한 최대 하중 값 145tonf이내인 126tonf로 나타났으며 사양에 규정된 에너지흡수 값 0.53MJ과 근사한 0.5MJ의 에너지를 흡수하는 것으로 나타났다. 최대 변형거리는 630mm까지 변형이 발생되었다.

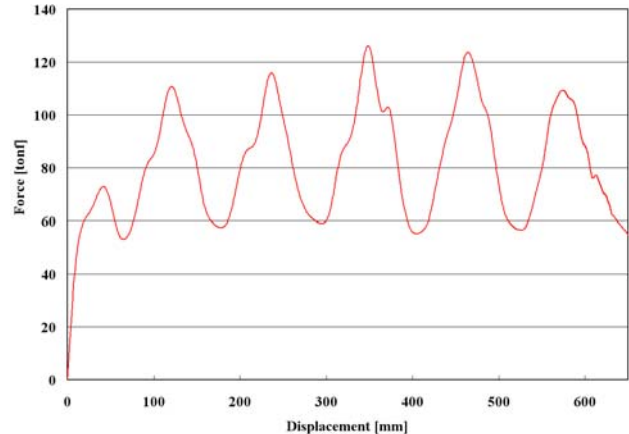
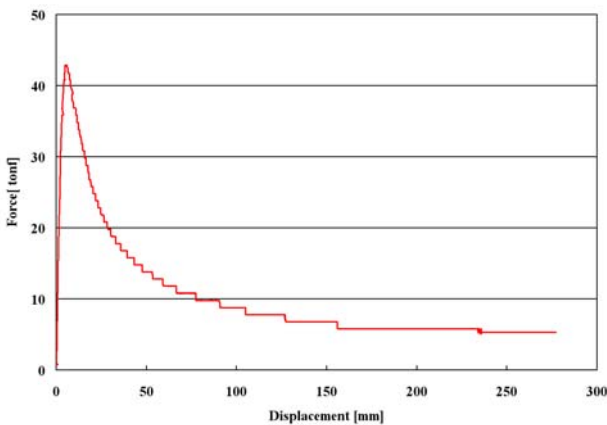


그림 7. Crash initiation element의 시험결과

그림 8. Energy absorbing buckling tube 시험결과

5. 유한요소해석 및 시험결과 비교

그림. 9은 유한요소해석 결과 그림이다. Crash initiation element는 100mm까지 변형된 결과를 나타내었고 Energy absorbing buckling tube는 630mm까지 변형 후 결과를 나타내었다.

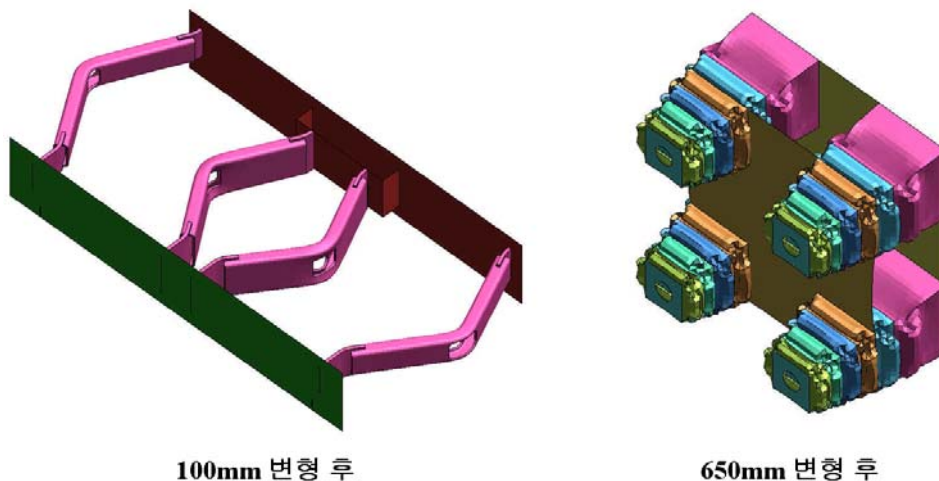


그림 9. 변형 후 해석결과

그림. 10의 왼쪽 그림은 Crash initiation element의 해석결과와 시험결과를 비교하였다. 비교 그래프는 100mm변형까지의 값을 기준으로 하였고, 시험결과는 1/2모델이므로 시험결과 값에 2배를 하여 도시하였다. Crash initiation element의 목표는 최대하중이 100tonf 이내이며, 해석 시 약 102tonf정도가 나왔고 시험 시에는 86tonf로 측정되었다. 이는 목표 값 100tonf의 $\pm 15\%$ 값 이내에 만족하는 것으로

나타났다. 그림. 11의 오른쪽 그림은 Energy absorbing buckling tube의 해석결과와 시험결과를 그래프로 작성하였다. Energy absorbing buckling tube의 목표하중은 좌굴 시 최대하중이 145tonf 이내에 존재하며, 충돌에너지 흡수량은 약 0.53MJ로 사양에 규정되어 있는데, 시험에서는 최대하중이 125tonf이며, 충돌에너지 흡수량은 0.5MJ로 나타났고, 해석 시에 최대하중이 136tonf이며, 충돌에너지 흡수량은 0.53MJ로 규정된 사양에 만족하는 것으로 나타났다.

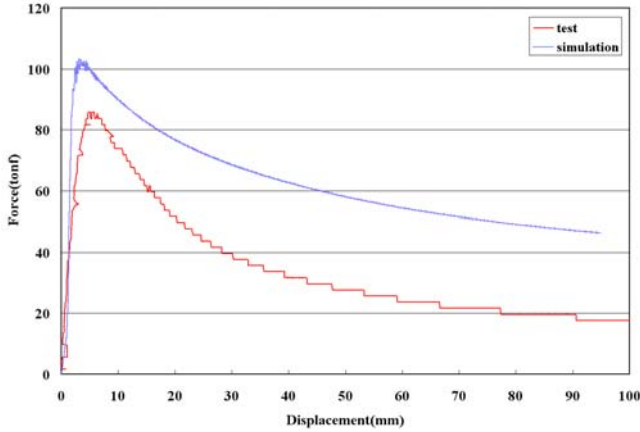


그림 10. Crash initiation element의 시험결과 및 준정적해석결과 비교

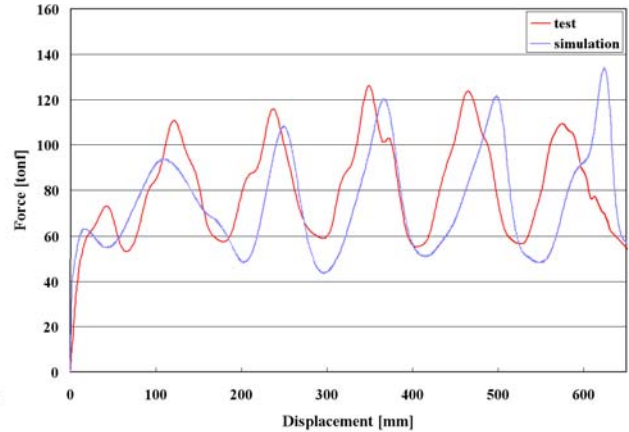


그림 11. Energy absorbing buckling tube의 시험결과 및 충돌해석결과 비교

6. 결론

Crash initiation element와 Energy absorbing buckling tube의 준정적 및 충돌시험과 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Crash initiation element의 설계상 규정된 사양은 최대굽힘붕괴하중이 100tonf으로 오차가 $\pm 15\%$ 이내에 들어와야 한다. 준정적시험은 86tonf이며, 유한요소해석에서는 102tonf가 발생하여 사양에 만족하는 것을 알 수 있다.
2. Energy absorbing buckling tube의 설계상 규정된 사양은 최대변형거리 660mm에 충돌흡수에너지는 0.53MJ를 흡수하며, 최대좌굴하중은 145tonf이내에 들어와야 한다. 충돌시험에서는 630mm변형에 0.5MJ의 충돌에너지를 흡수하고 최대좌굴하중은 125tonf로 발생하였으며, 유한요소해석에서는 640mm 변형에 0.53MJ의 충돌에너지를 흡수하고 최대좌굴하중은 136tonf로 사양에 만족하는 것을 알 수 있다.
3. 이와 같이 시험 및 유한요소해석결과 사양을 만족시킨 구성품을 직접 차량 설계에 적용하여 차체의 충돌 시 설계 상 원하는 변형을 유도하여 충분한 충돌에너지를 흡수시켜 운전자 및 승객의 점유공간을 안전하게 확보하고 탈선 및 전복예방에 도움을 줄 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, Eloy 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, E., 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.