

고속전철 동력객차의 충돌안전도 설계 및 해석에 관한 연구

A Study on the Crashworthiness Design and Analysis on Motorized Trailer of High Speed Train

김상범, 김현영

Sang Bum Kim, Heon Young Kim*

ABSTRACT

Train crashes involve complex interaction between deformable bodies in multiple collisions. The purpose of this study is to suggest the effective analytical procedure using hybrid model for the crashworthiness of motorized trailer of high speed train. The hybrid approach, with very short modeling times and reduced computation times to extract the global behaviour and to perform a pre-optimization of the considered structure. Firstly, various types of crash events are investigated and the conditions for numerical simulation are defined. In this paper, the structural stiffness and crashworthiness of Korean High Speed Train trailer was examined through FE analysis. Crash analyses on energy absorbing part and safety zone were carried out to determine each section force.

1. 서 론

21세기 산업 경제적 발전, 교통체제 완비와 더불어 교통수단의 경제성, 신속성, 안전성, 쾌적성 등 첨단 기술화가 매우 중요하게 부각될 전망이다. 우리나라에서도 낙후된 교통체제를 고도화하기 위하여 경부고속전철 건설사업을 진행하고 있으며 추세를 감안하면 충돌시 승객의 안전을 제고하는 것은 대단히 중요한 일이다.

고속철도차량이 다른 철도차량이나 기타 장애물과 충돌할 경우 먼저 동력차에서 충돌에너지의 70~80%를 흡수하고, 동력객차에서 15% 정도를, 그리고 객차에서 나머지 충돌에너지를 흡수하는 것으로 분석된다. 각차량의 연결장치 및 에너지 흡수 구조를 합리적으로 설계함으로써 튀어오름(override)현상, 탈선(derailment) 및 전복(rollover)현상 등의 발생을 현저히 감소시킬 수 있고, 구조물의 압괴로부터 승객의 생존공간을 확보하고 2차적인 승객과 차량내부 구성품과의 충돌을 완화할 수 있어서 충돌사고시 인명 피해를 최소화 할 수 있다.

철도차량 제작은 초기의 목재차에서 현재의 고속전철 차량에 이르기까지 강도와 안전성 위주로 개발되어 왔다. 그러나, 유지 보수비용의 증가로 인해 차량의 경량화문제가 대두되어 일부분의 교체로서 시작하여 강제 차체 구조물을 알루미늄합금으로 교체하는 소재교체 방법이 취해졌다. 따라서 향후 고속전철의 개발에는 상기 문제를 해결하고 안정성이 보장되는 경량 차체의 개발이 필수적이라 할 수 있겠다.

열차의 충돌해석을 위한 유한요소 모델에는 자동차 충돌해석에서 개발되어진 셸요소, Solid요소,

* 강원대학교

보요소, 비선형 스프링 요소가 사용되며, 특히 열차 개발 초기단계, 또는 여러 가지 차체 부재에 대한 충돌특성 연구등을 수행하기 위하여는 정확도는 다소 떨어지나 빠른 시간내에 간단한 형태의 모델링만으로 충돌성향을 파악하여야 한다. Culière, P.는 3가지 간소화한 모델인 실험 모델, 국부적 유한요소 모델, 간소화한 운동학적인 모델을 사용하여 변형 모형과 수치적 해석 시간을 줄이는 연구 방법을 제시하였다. Sutton, A. 등은 열차를 수평 자유도만을 사용한 질량/스프링/댐퍼 시스템으로 모델화하여 충돌시에 다양한 변수들의 효과를 분석하였다. Markiewicz, E. 등은 셸요소 모델과 하이브리드 모델과의 비교를 통해 하이브리드 모델링 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 3차원 전체 모델을 사용하여 고속전철 동력객차의 구조강성 및 충돌성능 평가 해석을 수행하였다.

2. UIC 566 규정에 의거한 하중조건 및 경계조건

고속전철 차체의 강성해석은 UIC 566규정에 의거 수행하였으며, Modal 해석 이외의 해석에 대해서는 구조의 대칭성을 고려하여 1/2 모델을 사용하였으며, 이때 대차의 지지점이 되는 볼스터 지점과 링연결 부의 센터 피봇지점의 수직변위를 구속하였다. 유한요소 모델링은 동력객차 TM1에 대하여 수행하였다. 사용된 요소는 평균적으로 70mm 크기의 3절점/4절점 요소를 사용하였으며, 모델링을 수행한다. 이때 총 요소수는 대략 10만개 안팎 정도로 모델을 구성하였다.

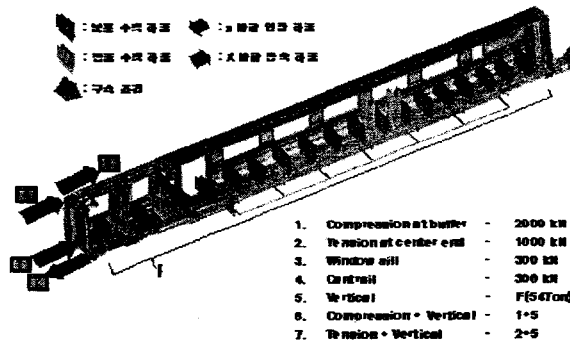


그림 1 Load and boundary condition

①인장하중조건(Tensile Load Condition)

차체의 구속위치 및 지지방법은 수평압축하중 조건과 동일하며, 하중은 차체끝판의 연결기 결합부위에 1,000KN의 인장하중을 가하였다.

②수평압축하중조건(Compressive Load Condition)

차체의 수직방향 지지는 공기스프링 시트(Air Spring Seat)위치의 볼스타 지점과 객차와 연결되는 링연결부를 지지하고 수평방향 지지는 링연결부의 피봇위치의 X방향을 구속하였다. 하중은 사이트 버퍼 위치에 2,000KN의 압축하중을 가하였다.

③수직하중조건(Vertical Load Condition)

차체의 수직방향 지지는 공기스프링 시트 위치와 링연결부를 지지하고 수평방향의 지지는 강체운동을 막기위해 링연결부의 피봇위치의 X방향을 구속하였다. 하중은 공차중량 및 기타 수직하중을 대부분 언더프레임 상면에 등분포로 부가하였으나, 동력실 장치와 에어컨등 일부 중량물은 각각의 위치에 집중하중으로 부가하였다.

③수직하중 + 인장하중조건 (Vertical + Tensile Load Condition)

차체의 구속위치 및 지지방법은 인장하중 조건과 동일하며 하중은 차체 끝단의 연결기 결합부위에 1000KN의 인장하중을 가하고 수직하중 조건에서와 같은 수직하중을 언더프레임상에 부가하였다.

④수직하중 + 압축하중조건 (Vertical + Compressive Load Condition)

차체의 구속위치 및 지지방법은 수평압축하중 조건과 동일하며 하중은 사이드 버퍼위치에 2000KN의 압축하중과 수직하중조건에서와 같은 수직하중을 언더프레임상에 부가하였다.

Table 1은 구조해석을 수행한 결과를 나타낸다. 이때 최대 처짐량은 수직하중과 순수인장에서 발생하며, 약 13.2mm로 나타났다.

Table 1 Structural stiffness analysis results

Analysis	Max Stress(Mpa)*	Deflection**
Pure compression	147.0	(+)6.53
Pure tension	89.6	(-)3.0
Window level compression	62.4	(+)0.775
Cantrall compression	65.7	(+)1.72
Vertical load	82.6	(-)10.3
Pure compression & Vertical	144.0	(-)4.88
Pure tension & Vertical	97.7	(-)13.2
Modal Analysis	12Hz	

* Stress is represented by Von-Mises stress

** Deflection where side-sill members. It may not be a exact max deflection value appeared on side-sill

** The minus sign means that deflection occurs at downward direction

2. 정면충돌해석

1. 사고유형정의 및 충돌모델

(1) 동력객차

동력객차의 구조는 승강대를 기준으로 앞부분은 자동차 엔진과 같이 동력을 전달하는 모터블럭, 모터 팬등 고가의 장비가 설치되어있는 동력실 부분이다. 그리고 승강대 뒷부분은 승객이 타고 있는 객실 부분과 객실끝단부터 차량 후미구간까지는 화장실과 같은 시설물로 구분할 수 있다. 이런 구조적인 이유로 차량 운행시 사람의 통행량이 가장 적은 승강대 부분을 압괴가능부로 설정하고 프랑스 국유철도(SNCF) 시나리오에 따른 충돌해석을 통하여 변형양상을 비교/분석하여 보았으며, 충돌성능을 만족시키기 위한 Re-modeling을 수행하였다. 그림 3은 최종 수정한 KHST-Final 모델을 나타낸 것이다. 특히 그림 3은 Section Force를 평가할 단면의 형상을 보인 것이고, 각 단면의 두께를 도시하였다. 해석에서 사용된 모델의 Aluminum Material은 A6005A재질의 알루미늄 합금소재로 인장강도 29.6 kgf/mm², 탄성계수 7.0×10³ kgf/mm², 밀도 2.85e-10 g/cm³의 값을 가지고 있다. KHST-DT 모델의 절점 및 요소 수는 각각 51,329 및 76,940개 이다.

앞서 밝힌 바와 같이 승객 탑승 공간은 전방 구조에 비해 강하게 설계되므로 변형이 거의 발생하지 않는다. 그러므로, 객차 전체를 셸(shell)요소로 모델링 하는 것은 해석 시간이 많이 요구되는 충돌 해석에서는 비효율적이다. 본 연구에서는 전방 구조의 에너지 흡수 영역과 승객 탑승 공간의 일부를 셸 요소로 모델링 하였다. 사용된 요소수는 약 25,000개이며 대칭 조건을 이용하여 1/2만 모델링 하였다. 알루미늄 주물로 이루어진 캐리링(carrying ring)구조는 전방구조에 비해 두껍게 설계되어 있고, 충돌시 변형하는 구간이 아니기 때문에 강체로 구속하여 형상만 모델링하였다. 언더프레임에서는 집중적인 변형이 예상되는 길이 방향의 부재에 대해서는 상대적으로 보다 세밀하게 요소를 나누었다. 도어(door)에 해당되는 부분은 아직 상세한 설계가 이루어져 있지 않아 측면프레임과 같은 구조를 연장하여 모델링하되, 두께를 일정하게 유지하였다. 충돌 해석 조건은 모델의 끝단에 뒤에 연결된 객차의 무게에 해당하는 집중 질량 32톤을 달아서 시속 30km로 강체벽에 충돌하는 시나리오를 따랐다.

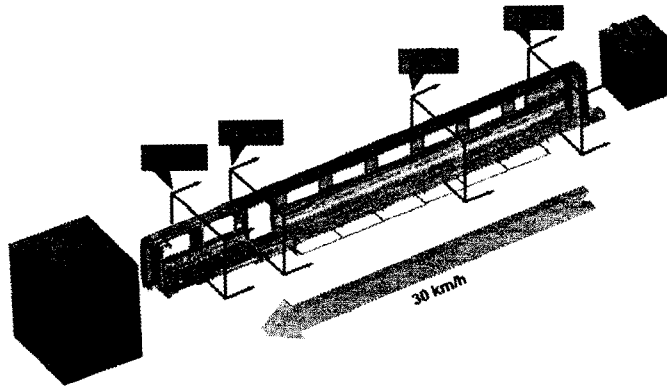


그림 3 충돌시 해석시 경계조건

3 충돌성능평가

충돌시 발생하는 최대 압축량은 496 mm이며, 그림 6의 강체 반력을 통해 평균 압괴하중은 5738 kN함을 알 수 있다. 그림 5는 동력객차의 변형양상을 보이는 것으로 변형이 전반부 및 승강대부에 많이 집중해 있음을 알 수 있다. 동력객차에 발생하는 주요 변형 모우드는 Joint부 및 Roof부의 좌굴에 의해 일어남을 알 수 있다.

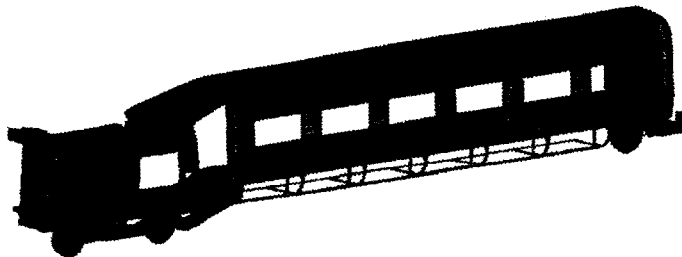


그림 4 Deformed shapes

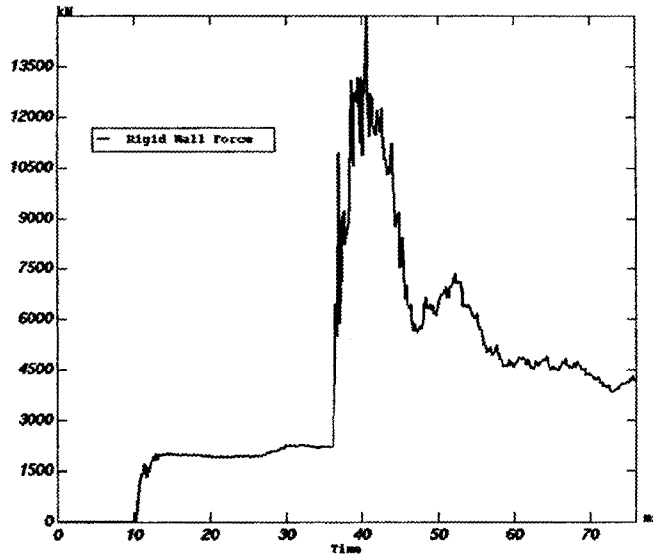


그림 5 Rigid wall reaction force

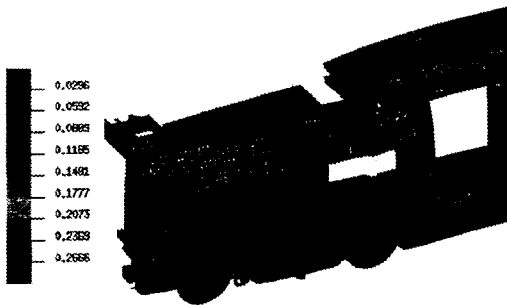


그림 6 Stress distributions

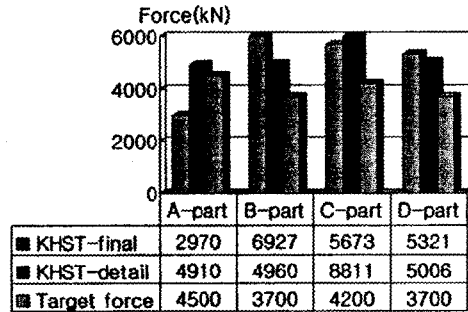


그림 7 Comparison of sectional mean force

4. Conclusion

한국형 고속전철(KHST) 동력객차 및 객차 설계 최종모델인 KHST-FINAL의 모델링을 수행하여 구조강성 및 강체벽의 반력, 내부에너지 및 변형양상을 KTX 및 KHST-BS와 비교 분석하였다.

- ①차체에 발생하는 최대 응력은 TM1 모델에서는 압축하중조건에서 발생하였으며 TM5 모델에서는 인장하중 조건에서 발생하였다. 두 모델 모두 알루미늄 합금의 항복강도인 260MPa 보다 작다.
- ②사이드 실의 최대 처짐량은 TM1 모델인 경우 수직+인장하중 조건에서 13.2mm로 발생하였고, TM5 모델인 경우도 수직+인장하중 조건에 13.4mm로 발생하였다. 평가기준인 대차중심간 거리의

1/1000보다 작게 처진다.

③SNCF 시나리오에 의한 충돌 결과 평균 압괴하중은 동력객차 객차에서 각각 5,738 kN과 5,000 kN정도로 발생하였으며, 압괴하중해석 결과와 비슷한 압괴하중을 보임으로 적절한 crushable zone의 설계가 이루어졌음을 확인하였다.

④객차부분의 전방 충돌의 경우에 언더프레임의 변형으로 주로 에너지를 흡수하였고 측면구조와 지붕 구조가 언더프레임 과 같이 변형하면서 충돌 에너지를 흡수하였다. 후방 충돌의 경우에는 평균 압괴하중이 전방 충돌의 경우보다 다소 낮게 나타났다. 이는 창문의 위치가 전방 구조보다 충돌 지점에 가깝게 위치해서 측면구조의 강성을 저하시켰기 때문으로 판단되었다.

⑤ 승객 탑승 공간의 충돌해석에서는 전방 구조보다 높은 평균 압괴하중을 나타내어 충돌 설계가 적절히 이루어졌음을 알 수 있었다. 전체적으로 하중이 높게 나온 것은 보다 경량화가 이루어질 수 있는 가능성을 가지고 있음을 의미한다.

REFERENCES

- [1] Culière, P. (1996), "PAM-CRASH Train Crashworthiness Applications", PUCA '96 PAM Users Conference, pp. 129~131.
- [2] Sutton, A. and Lewis, J. H. (1982) "Elastic/Plastic Interaction of Rakes of Rail Vehicles", Structural Impact and Crashworthiness Eds. J/Morton, pp. 783~797, Elsevier, London.
- [3] Markiewicz, E. , Milcent, G. and Drazetic, P. , Ravalard, Y. (1994) "Shock Behavior of Rolling Stock Vehicles - A Hybrid Approach", PUCA '96 PAM Users Conference, pp.115~122
- [4] Johnson, W. (1984) "Structural damage in airship and rolling stock collisions",
-Ch.15 in Structural crashworthiness edited by Jones, N. and Wierzbicki, T., pp. 417~439
- [5] Tong, P.(1984) "Rail vehicle structural crashworthiness-Ch.15 in Structural crashworthiness edited by Jones, N. and Wierzbicki, T., Elsevier, London, pp. 397~416.
- [6] Lewis, J. H. (1994) "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways", British Rail Research Structures Group.
- [7] Kisielwicz, L. T. and Ando, K. (1993) "Crashworthy Rolling Stocks",PUCA'93 PAM Users Conference, pp. 219~229.
- [8] 김현영, 한재형 (1997) "3차원 보모델을 이용한 고속전철 동력객차의 충돌특성 연구", 추계대한기계학회 97', pp.