

LS-DYNA를 이용한 철도차량 연결 충돌해석에 관한 연구

A Study on Rolling Stock Shunting Impact Analysis using LS-DYNA

정현승* 권태수** 구정서***
Jung, Hyun Seung Kwon, Tae Soo Koo, Jeong Seo

ABSTRACT

In this paper, a simple LS-DYNA shunting impact analysis model for the rolling stocks is proposed. In this model, each vehicle is represented by a 3D solid element and each coupler is represented by a 1D beam element. To describe the dynamic behavior of buffers, a nonlinear material model(*MAT_GENERAL_NONLINEAR_1DOF_DISCRETE_BEAM) is used. Friction between the braked wheels and the rails is described by a Coulomb friction model. To verify the proposed LS-DYNA analysis model, a shunting impact simulation is performed and the results are compared with the previous research results.

1. 서론

최근 철도시스템은 고객의 편의성 증대를 위해 고속화, 경량화, 대용량화되는 추세인데 이러한 철도를 둘러싼 환경의 변화는 기존에는 없었던 새로운 위험 요소들에 대한 대처 방안과 높은 수준의 안전도를 확보하도록 요구하고 있다. 이미 철도선진국들에서는 충돌, 탈선, 화재 등 중대사고의 안전기술에 대한 과감한 투자와 기술개발로 체계적인 안전기술을 확보하여 적용하고 있으며, 우리나라에서도 철도 안전법을 제정하고 철도종합안전기술개발사업을 추진하는 등 철도환경의 변화에 능동적으로 대처하기 위해 노력하고 있다.

충돌사고가 빈번히 발생하는 자동차의 경우는 사고 발생 시 탑승자의 피해를 최소화하기 위한 구조와 장치들이 잘 개발되어 있으며, 이러한 충돌안전설계기술이 차량설계의 핵심기술로 자리 잡고 있다. 철도차량의 경우를 살펴보면 과거에는 자동차에 비해 충돌사고의 빈도가 훨씬 적다는 이유로 차량설계시 충돌안전성을 크게 고려하지 않았다. 그러나, 최근들어 철도시스템이 고속화, 경량화, 대용량화되면서 충돌사고 발생 시 대규모의 피해가 예상됨에 따라 충돌안전설계의 필요성이 널리 인식되고 있으며, 이에 따라 전세계적으로 철도차량의 충돌안전설계와 관련된 규정들이 신설되고 강화되는 추세이다. 국내의 경우 철도차량의 충돌안전과 관련된 규정은 “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙”과 “철도차량 안전기준에 관한 규칙”에서 찾아 볼 수 있다[1,2]. “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙”에는 제21조 승객 및 운전자 보호, 제23조 차체의 충돌안전성, 제33조 실내설비, 제37조 의자 및 선반, 제38조 창문, 제39조 운전실 등의 조항이 있고, “철도차량 안전기준에 관한 규칙”에는 제35조 철도차량의 충돌안전설계 등, 제36조 철도차량의 연결, 제42조 운전실, 제46조 창문, 제47조 실내설비 등, 제48조 의자 및 선반 등, 제88조 장애물제거기 등의 조항이 있다. 향후 발주되는 철도차량들은 이러한 충돌안전규정들을 만족해야 하고 차량제작업체 및 운영기관은 새로 개발된 철도차량이 이러한 규정들을 만족하고 있음을 입증해야 할 것이다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원
*** 서울산업대학교 교수, 정희원

본 연구에서는 철도차량의 충돌안전성능 평가항목 중 철도차량의 연결 시 발생하는 충격으로부터 철도차량이 안전한지 평가하는 것과 관련하여 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션 기법을 제시한다.

2. 철도차량 연결 충돌해석 개요

철도차량의 경우는 운행 장애 시 견인과 차량 편성을 위한 과정에서 연결기를 통한 충돌이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 통상적인 운용 조건에서 발생하는 충격에너지는 연결기의 완충장치에서 흡수하여야 하며, 차체나 연결부 브라켓 등에 어떠한 손상도 발생하지 않아야 한다[3]. 철도차량의 연결과 관련된 국내 충돌안전규정이 <표 1>에 정리되어 있다. 운전자의 실수에 의한 과도조차(heavy shunt)를 고려하여 도시철도의 경우는 시속 5킬로미터, 일반철도 및 고속철도의 경우는 시속 10킬로미터의 속도까지 안전하도록 요구하고 있다.

<표 1> 철도차량의 연결과 관련된 국내 충돌안전규정

도시철도차량 안전기준에 관한 규칙 제23조 차체의 충돌안전성	시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어 있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에는 손상이 발생하지 않아야 한다.
철도차량 안전기준에 관한 규칙 제36조 철도차량의 연결	공차중량 상태의 철도차량은 시속 10킬로미터의 속도에서 제동이 되어 있는 유사한 형태의 철도차량과 연결기를 통하여 충돌한 경우 차체 및 연결기 등에 손상이 발생하지 아니하여야 한다.

철도차량 연결 시 발생하는 충돌에너지는 연결기의 완충장치에 의해 분산 흡수되어야 하는데, 각각의 연결기 완충장치의 충돌 동적 거동은 철도차량의 편성, 완충기의 동적 특성, 제동 유무 등에 따라 달라지게 된다. 따라서, 차량편성, 완충기 동적특성, 제동 등의 효과를 고려하여 충돌해석을 수행하고 각 부위별 완충기의 하중이력곡선을 추출하여 차체의 손상여부를 판단하는 과정이 필요하다. 이러한 일련의 평가 과정은 LS-DYNA, PAM-CRASH 등과 같은 상용 충돌해석 소프트웨어를 활용하거나 자체 개발한 해석코드를 통해 이루어 질 수 있다. 전세계 철도차량 연결기 시장점유율 1위인 S사의 경우는 자체 개발한 해석코드를 사용해 연결 충돌해석을 수행하고 있고, 국내의 경우도 연결충돌해석을 위한 자체해석코드가 개발된 사례가 있다[4]. 또한 상용 충돌해석 소프트웨어를 사용해 1차원 충돌해석을 수행한 사례도 있다.

본 연구에서는 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용해 철도차량 연결 충돌해석 용 모델을 생성하고 충돌안전성능을 평가하는 과정을 다룬다. 기존 연구와의 차이점은 제동된 차륜과 레일의 마찰에 의한 에너지 소산을 보다 정확하게 모델링하기 위해서 3차원 모델을 함께 사용한 것이다.

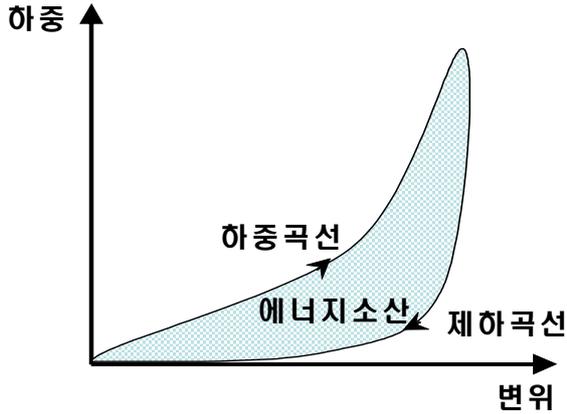
3. LS-DYNA를 이용한 연결 충돌해석 모델링

3.1 전체 모델 개요

전체차량 모델은 Solid 요소로 모델링된 각각의 차량과 Beam 요소로 모델링된 연결기로 구성된다. 차체의 재료특성은 강체(*MAT_RIGID)로 모델링하였고, 연결기의 재료특성은 완충기 동적특성을 표현하기 위해 LS-DYNA 비선형 재료모델 중 *MAT_GENERAL_NONLINEAR_1DOF_DISCRETE_BEAM을 사용하였다[5]. 제동된 차륜과 레일 사이에 Coulomb 마찰을 모델링하여 제동된 차량의 마찰에 의한 에너지 소산을 고려하였다. 이를 위해 정지된 차량 바닥에 강체벽(*RIGIDWALL_PLANAR_FINITE)을 생성하고, 정지해 있는 차량에 중력(*LOAD_BODY)을 부과하고, 차량과 강체벽 사이에 접촉조건과 마찰계수를 정의하였다.

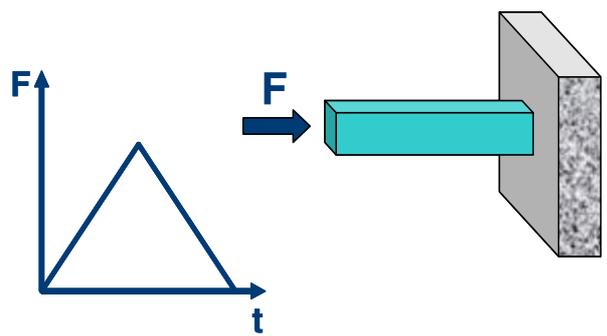
3.2 완충기 특성 모델

본 연구에서는 연결기 완충장치에 많이 사용되고 있는 고무완충기의 동적 거동을 고려하기 위해 비선형 재료 모델을 사용하였다. 일반적인 고무 완충기의 동하중 특성 선도는 <그림 1>과 같다. 하중이 가해지면 부하곡선(loading curve)을 따라 움직이다가 하중이 제거되면 제하곡선(unloading curve)을 따라 원위치로 돌아온다. 여기서, 부하곡선과 제하곡선으로 둘러싸인 면적은 고무완충기에 의해 소산된 충격에너지를 나타낸다. 이러한 고무 완충기의 에너지 소산 특성을 표현하기 위해 본 연구에서는 LS-DANA의 비선형 재료 모델 중 *MAT_GENERAL_NONLINEAR_1DOF_DISCRETE_BEAM을 사용하였다.

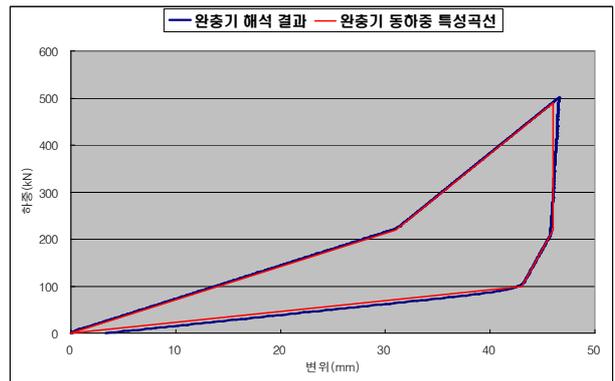


<그림 1> 고무 완충기의 동하중 특성 선도

고무완충기의 동적거동이 제대로 모델링 되었는지 검증하기 위해서, <그림 2>와 같이 한쪽 끝단이 고정된 보의 반대편에 삼각파형의 하중을 부과하여 부하특성과 제하특성이 제대로 시뮬레이션 되는지 확인하여 보았다. <그림 3>은 완충기 특성 검증 모델의 해석결과를 보여주는 것으로 입력된 하중곡선과 제하곡선을 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 2> 완충기 특성 검증 모델

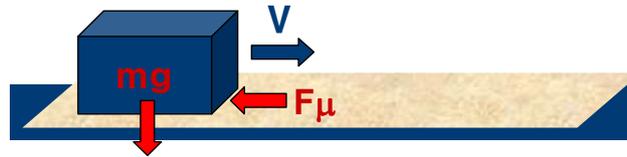


<그림 3> 완충기 해석 결과

3.3 제동된 차륜과 레일사이의 마찰소산 모델

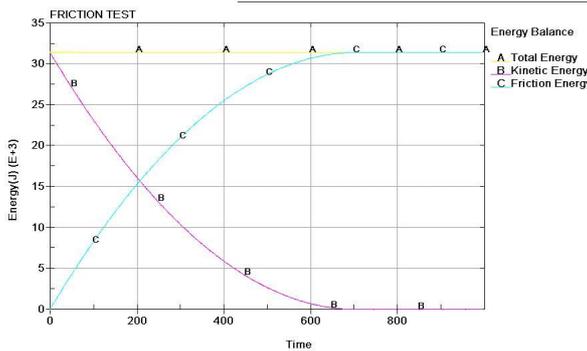
제동을 잡고 있는 정지해 있는 열차에 동일한 열차가 충돌하는 경우, 제동된 차륜과 레일 사이의 마찰에 의해 충돌에너지가 소산된다. 이러한 마찰에너지 소산을 고려하기 위해 Coulomb 마찰 모델을 사용하였다. 이를 위해 제동을 잡고 있는 열차의 바닥에 접촉과 마찰을 고려할 수 있는 강체벽을 LS-DYNA의 *RIGIDWALL_PLANAR_FINITE 카드를 사용해 생성하였다. 또한, 정지해 있는 차량에 *LOAD_BODY 카드를 사용해 중력을 부과하고 강체벽과의 접촉조건 및 마찰계수를 정의하였다.

제동된 차륜과 레일사이의 마찰소산 모델을 검증하기 위해서 <그림 4>와 같이 초기속도 5km/h로 운동하는 철도차량 한 량에 대하여 마찰계수를 0.2로 가정하고 해석을 수행하여 Coulomb 마찰 모델에 의한 이론적인 계산 값과 비교해 보았다. <그림 5>는 마찰소산 검증 모델의 해석 결과로 얻어진 에너지 선도를 보여주는 것으로 초기의 운동에너지가 모두 마찰 소산에너지로 변환되었음을 확인할 수 있다. <그림 6>은 시간에 따른 운동거리를 보여주는 것으로 시뮬레이션에 의한 운동거리(492.31mm)가 이론적인 운동거리(493mm)와 잘 부합하고 있음을 확인할 수 있다.

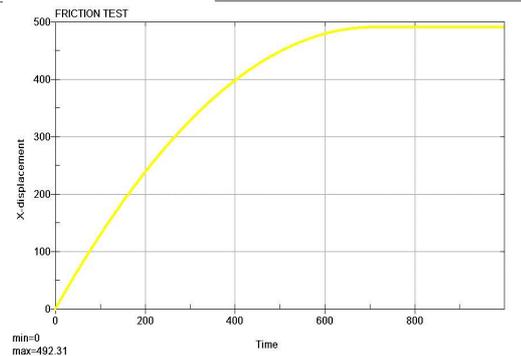


차량무게	초기속도	마찰계수	예상운동거리
32.7톤	5km/h	0.2	493mm

<그림 4> 제동된 차륜과 레일의 마찰소산 검증 모델



<그림 5> 마찰소산 검증 모델의 에너지선도



<그림 6> 마찰소산 검증 모델의 운동거리

4. 철도차량 연결 충돌해석

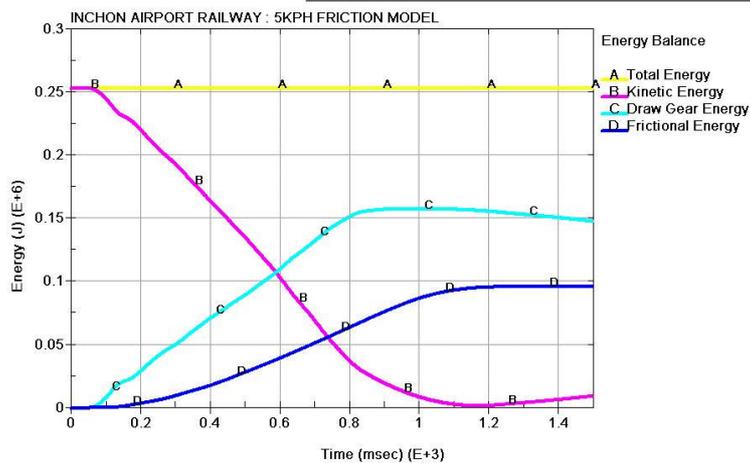
본 연구에서 제안된 철도차량 연결 충돌해석 모델을 검증하기 위해 참고문헌[4]에 나와 있는 도시 철도 예제에 대한 연결 충돌해석을 수행하여 보았다. <그림 7>은 차량편성과 해석조건을 보여주고 있다. 이 예제는 공차 중량 263.4톤인 전동차 1편성이 제동을 잡고 있는 동일한 열차와 5km/h의 속도로 연결기를 통해 충돌할 때 “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙” 제23조를 만족하는지 평가하는 것이다.



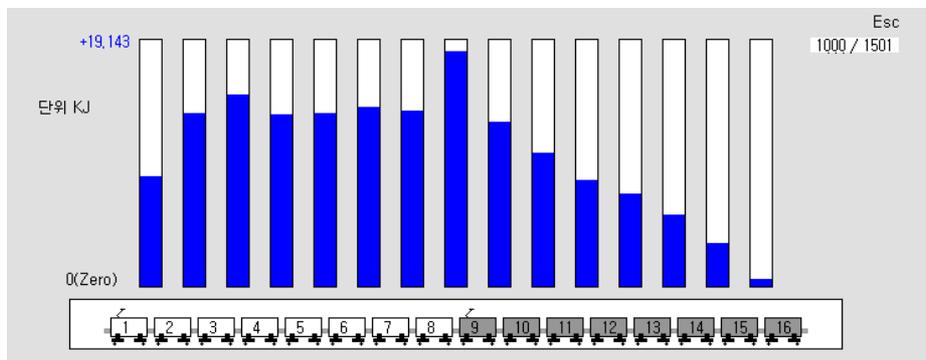
<그림 7> 도시철도차량 연결 충돌해석 예제(참고문헌[4])

해석 결과를 비교하기 위해 연결기의 완충특성을 참고문헌[4]에서 사용한 관절형 고무완충기의 동하중 특성선도와 동일하게 사용하였고, 해석시간도 1500msec로 동일하게 설정하였다. <그림 8>은 충돌해석결과에 대한 에너지선도를 보여주는 것으로 초기의 운동에너지가 마찰소산에너지와 완충장치의 흡수

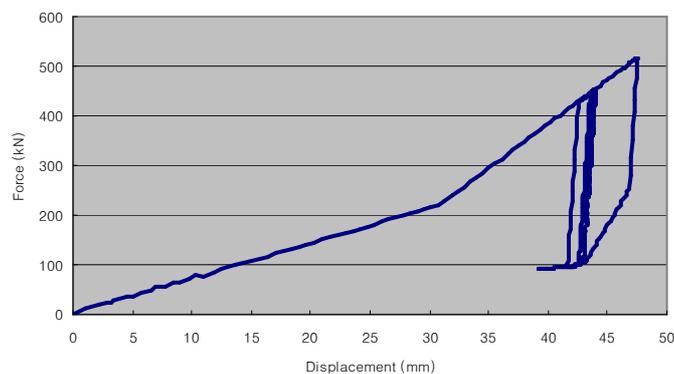
에너지로 변환되고 있음을 확인할 수 있다. 해석종료시점인 1500msec에서 마찰소산에너지는 96kJ로 초기운동에너지 254kJ의 약 38%가 마찰로 소산되었음을 확인할 수 있다. 또한 완충장치는 초기운동에너지의 약 58%인 148kJ를 흡수하고 있음을 확인할 수 있다. <그림 9>는 1000msec에서 연결기 완충장치의 위치별 흡수에너지 분포를 보여주는 것으로 제동을 잡지 않은 왼쪽 열차의 완충장치들은 뒤쪽까지 끌고 루 에너지를 흡수하고 있지만, 제동을 잡고 있는 오른쪽 열차는 충격에너지가 뒤쪽의 완충장치로 늦게 전달되고 있음을 확인할 수 있다. <그림 10>은 선두차 연결기 완충장치의 하중-변위 선도를 보여주고 있다. 충돌해석 결과 선두차 연결기에서 최대 충격하중이 발생하는데 그 값은 517.6kN으로 완충기 허용 충격력 1,025kN보다 작아 “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙” 제23조를 충족시킴을 확인할 수 있다.



<그림 8> 도시철도차량 연결 충돌해석 에너지선도



<그림 9> 연결기 완충장치의 위치별 흡수에너지 분포(1000msec)



<그림 10> 선두차 연결기 완충장치의 하중-변위 선도

<표 2>는 본 연구에서 제안한 LS-DYNA 해석 모델을 사용한 결과와 참고문헌[4]의 결과 및 참고문헌[4]에서 비교대상으로 제시된 S사 해석결과를 비교한 표이다. 본 연구에서 제안한 해석모델이 S사의 해석결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

<표 2> 도시철도차량 연결 충돌해석 결과 비교

에너지	해석결과		
	S Company	참고문헌[4]	본 연구
초기 운동에너지(kJ)	254	254	254
해석종료시 운동에너지(kJ)	9	17	9
총 소산에너지 (kJ)	243	236	244
- 완충기 흡수에너지(kJ)	148	132	148
- 마찰 소산에너지 (kJ)	95	83	96
변형에너지 (kJ)	-	21	-

5. 결론

본 연구에서는 상용 충돌해석 소프트웨어인 LS-DYNA를 사용한 철도차량 연결 충돌해석 용 모델을 제안하였다. 제안된 해석모델은 연결기의 완충장치의 비선형 동적거동과 제동을 잡고 있는 차량의 차륜과 레일 사이의 마찰에 의한 에너지 소산을 포함하고 있다. 도시철도차량의 연결 충돌해석 시뮬레이션 결과 본 연구에서 제안한 방법이 외국 S사가 자체 개발한 해석코드와 거의 유사한 결과를 주고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 모델을 사용하면 자체의 해석코드를 개발할 필요 없이 상용 소프트웨어를 이용하여 철도차량의 연결 시 요구되는 충돌안전성능을 손쉽게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- [1] 도시철도차량 안전기준에 관한 규칙, 건설교통부령 제231호, 2000.
- [2] 철도차량 안전기준에 관한 규칙, 건설교통부령 제455호, 2005.
- [3] 구정서 외 2인, “도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구”, 한국철도기술연구원, 1999
- [4] 김영훈 외 3인, “전동차 충돌해석을 위한 연결장치의 모델링“, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2004.
- [5] LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2003.