

한국형 표준전동차 전체차량의 충돌안전도 해석 연구

Analysis on the Crashworthiness of the Full Rake Korean Electric Multiple Unit Train

구정서*, 김동성*, 조현직*, 권태수**, 최성규**
 Koo, Jeong-Seo*, Kim, Dong-Sung*, Cho, Hyun-Jik*
 Kwon, Tae-Soo**, Choi, Sung-Kyu**

Keywords : Collision Analysis(충돌해석), K-EMU(한국형 표준전동차), Crash-worthiness (충돌안전도), Impact Energy Absorption(충돌 에너지 흡수)

Abstract

In this paper, numerically evaluated is the crashworthiness of the new design of the standard Korea Electric Multiple Unit Train(K-EMU)[developed by the Korea Railway Research Institute]. The 4-car consist of K-EMU is analyzed under collision conditions such as normal coupling, heavy shunting, light collision and heavy collision to collide against another stationary one at 5 kph, 10 kph, 25 kph and 32 kph, respectively. Energy absorbing capacity of its draftgear commercially available in the market and to be equipped in K-EMU is evaluated under each collision condition. Analytical results show that draftgear only is not enough to provide necessary energy absorbing capacity. It is therefore concluded that additional energy absorbers like mechanical fuses should be adopted to improve the crashworthiness of K-EMU.

1. 서론

도시철도 차량은 도시교통체계 등 주변 여건으로 인하여 충돌사고의 위험이 상대적으로 높다. 최근에는 운송효율 제고를 위하여 구조의 경량화, 배차시간 단축, 운행속도 향상 등이 지속적으로 이루어지고 있으므로, 충돌 사고에 대비한 구조설계의 중요성이 커지고 있다. 도시 철도 차량은 열차 대 열차의 충돌뿐만 아니라, 건널목에서 대형 차량과 충돌하는 위험성도 상존하기 때문에, 이러한 운행 여건을 감안하여 충돌안전도해석 및 설계 기술을 개발하고, 현실에 맞는 충돌안전기준과 설계 가이드라인을 제정할 필요가 있다[1]. 이미 미국이나 유럽국가와 같은 철

도 선진국에서는 10여 년간의 체계적인 연구를 통하여 충돌안전도 설계기술을 개발하고, 각 나라마다 실정에 맞는 충돌안전기준과 설계 가이드라인의 제정하여 운용하고 있다[2,3]. 국내에서도 이러한 여건변화에 능동적으로 대처하기 위하여 충돌안전도기준을 제정할 준비를 하고 있다.

그 동안 국내에서도 고속전철에 대한 충돌안전도 연구는 어느 정도 이루어져 왔으나 도시철도 차량이나 일반 국철의 경우에는 국내 연구결과가 거의 없다. 그러나 조만간에 국내 도시철도 차량의 충돌안전도 규정이 도시철도 표준화법에 신설될 예정이므로 이를 뒷받침할 표준전동차의 충돌특성 자료가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 속도의 충돌조건에 대하여 표준전동차의 충

* 정회원, 한국기계연구원

**정회원, 한국철도연구원

돌특성을 해석하여 제공함으로써 도시 철도차량의 충돌안전도 설계 가이드라인 제정에 기여하고자 한다.

본 연구의 전체차량에 대한 1차원 충돌해석은 각 차량이 흡수하는 에너지량, 압괴하중, 탑승자의 생존공간 확보 여부, 탑승자에 부과되는 충격 가속도 등을 평균적인 개념에서 평가하기 위하여 사용되었다. 차체 구조의 압괴강도가 높으면 탑승자의 생존공간 확보에는 유리하지만 탑승자에게 부과되는 충격 가속도가 크게 된다. 이러한 압괴 특성과 충격 가속도 사이의 상관관계는 전체 차량의 1차원 해석을 이용하여 분석할 수 있다[4]. 그런데 열차의 실차 충돌시험에 의하여 해석결과를 검증하는 것은 현실적인 어려움이 있기 때문에, 충돌 특성이 알려져 있는 드래프트 기어의 정상연결(normal coupling) 특성과 수치해석결과를 비교하여 타당성을 검증하는 방법[4]을 사용하기도 한다.

2. 충돌 해석 모델링

Fig. 1은 한국형 표준전동차의 차량편성을 보여주는 그림이다. 한국형 표준 전동차는 2량의 TC차와 2량의 M차로 구성된 총 4량 편성이며, 전후좌우 대칭이다. TC 차량의 전두부에 연결기가 취부되어 있고, 후방의 M 차량, TC 차량 등도 연결기에 의하여 결합되어 있다. 이 연결기에 취부되어 있는 드래프트 기어는 차량에 충격력이 가해질 때에 완충작용을 한다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 한국형 표준전동차의 구조적 특성을 고려하여 탄소성 막대 요소, 스프링 요소, 감쇠요소, 집중질량 등으로 1차원 동역학적 모델(반쪽모델)을 구성한 것이다. 열차의 전두부 및 후두부와 각 차량의 연결부에는 Fig. 4의 스프링 특성을 가진 드래프트 기어가 취부되어 있다. 또, 각 차량은 볼스터 전방차체, 차체 중앙부, 볼스터 후방 차체 등으로 나누어져 모델링 되었다. Fig. 5와 Fig. 6은 차체의 압괴 특성을 나타내는 하중-변위 선도인데, 3차원 쉘 모델 충돌해석으로 구한 값이다[5]. 대차는 집중질량

으로 단순화되었으며, 차체와의 연결장치는 Fig. 7과 같이 비선형 스프링 요소로 모델링되었다. 이렇게 구성된 1차원 충돌 해석모델은 프랑스 ESI사의 Pam-Crash[6]를 사용하여 해석하였다. Pam-Crash는 동역학적 유한요소 지배방정식을 외연적 방법(explicit method)으로 계산하는데, 이미 자동차 및 철도 차량분야의 충돌해석에서 세계적으로 신뢰성을 인정받고 있다. 프랑스의 알스톰 사, 독일의 지멘스 사 등에서 Pam-Crash를 사용하여 충돌안전도 설계 및 해석을 수행하고 있다[3,7].

3. 충격력 및 변형특성 분석

한국형 표준전동차의 충돌특성을 분석하기 위하여 정상 연결(normal coupling)속도인 5 kph, 빠른 조차(heavy shunt) 속도인 10 kph, 경충돌(light collision) 속도인 25 kph, 중충돌(heavy collision) 속도인 36 kph 등에 대하여 충돌해석을 수행하였다. 이 때 충돌 차량은 정지한 동일 종류의 차량과 충돌하는 것으로 가정하였다.

앞에서 생성한 1차원 동역학 모델에 대하여 위의 4가지 속도를 적용하여 충돌해석을 수행하고 결과를 분석한다. 본 수치해석에서 구해진 충격력은 반쪽 모델에 대한 것이므로 2배를 하여야 전체 모델에 대한 값으로 환산된다.

Fig. 8은 정지된 동일 열차와 5, 10, 25, 36 kph의 속도로 충돌할 때 전두부 연결기의 드래프트 기어에 발생하는 충격력을 나타낸 것이다. 5 kph의 경우에는 드래프트 기어의 허용 충격력인 500 kN 이하인 280 kN 정도의 충격력이 발생한다. 이것은 정상운용 상태에서 허용되는 충격력 수준이므로 차량에 아무런 손상이나 하자가 발생하지 않는다. 그러나 10 kph 이상의 충돌에서는 1000 kN 이상의 큰 충격력이 발생하여 설계 허용충격력인 500kN을 초과하므로 연결기와 차체에 손상이 발생할 수 있다. Fig. 9는 충돌시 전두부 드래프트 기어에 발생하는 변형량을 나타낸 것인데, 5 kph 충돌의 경우만 정상운용 상태에서 허용되는 변형량인 45 mm 이하

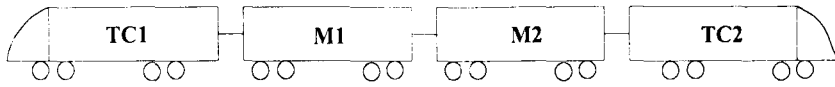


Fig. 1 Configuration of the full rake city-train



Fig. 2 One-dimensional model of the TC-car

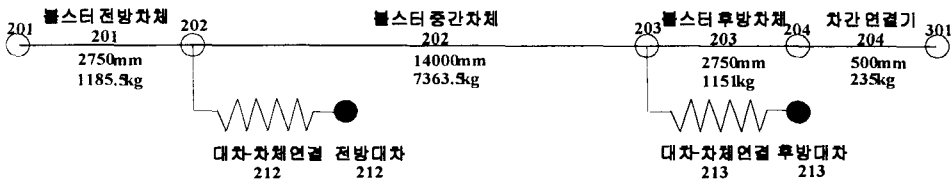


Fig. 3 One-dimensional model of the M-car

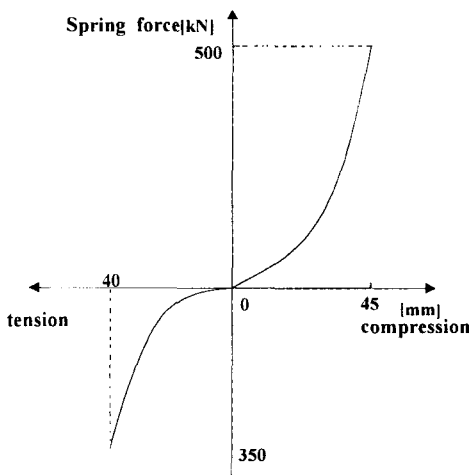


Fig. 4 Spring behavior of the draft gear

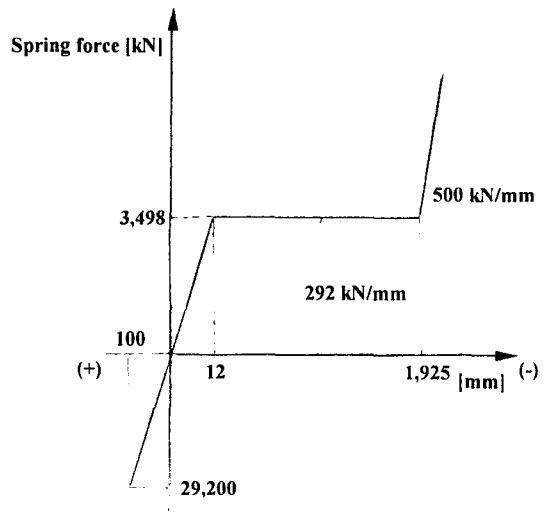


Fig. 5 Spring behavior of the end section

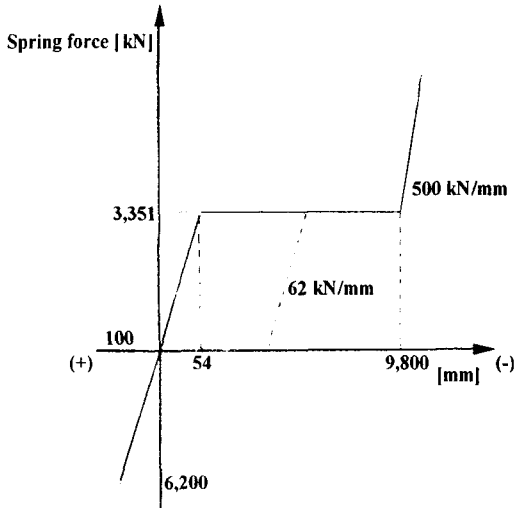


Fig. 6 Spring behavior of the center section

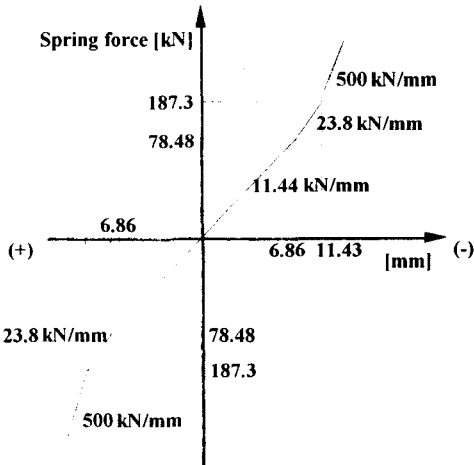


Fig. 7 Spring behavior of bogie-underframe link

이고 그 외의 경우는 허용 변형량을 초과한다. 이것은 한국형 경전철의 초기설계 가이드라인을 잘 만족시키는 결과로서, 수치해석 모델의 타당성을 입증하는 것이라고 할 수 있다.

Fig. 10은 두 번째 연결기의 드래프트 기어에 발생하는 충격력을 충돌 속도 5, 10, 25, 36 kph에 대하여 나타낸 것이다. 충격력의 크기는 전두

부 연결기 드래프트 기어와 비슷한 수준이지만, peak의 수가 4개에서 3개로 줄어든 것(부수 차량이 3량)이 차이점이다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 5 kph, 10 kph 충돌에서 각 차간연결기 드래프트 기어에 발생하는 충격력을 나타낸 것이다. 5 kph 충돌에서는 모든 드래프트 기어의 충격력이 허용 범위 내에 있지만 10 kph의 경우에는 모든 드래프트 기어에서 설계 허용충격력을 초과하므로 드래프트 기어와 차체의 일부가 파손될 수 있다.

4. 충격 가속도 특성 분석

전체차량에 대하여 1차원 충돌해석으로 구한 충격가속도는 탑승자 공간의 평균값이므로 실제로 승객이 받는 가속도와 어느 정도 차이가 있을 수 있다. 또한 수치해석으로 구한 가속도 값에는 복잡한 고주파 응답이 포함되어 있으므로, 이 고주파 응답을 적절히 제거하여 탑승자 2차 충돌 거동에 직접 영향을 미치는 응답만 추출해내는 것이 필요하다. 철도 차량 충돌분야에서는 수치해석으로 구한 가속도 응답을 40 Hz Low pass filter로 필터링 하여 사용한다. 이것은 철도 차량 주요 구조의 강체 운동 주파수가 대체로 40Hz 이하인 것을 고려한 것이다. 이 cut-off 주파수 40Hz는 실차 충돌시험을 수행한 경험이 있는 외국에서 수행한 다른 해석[2,4,7]에서도 일반적으로 사용하고 있다. 앞에서 적용한 4가지 충돌 속도에 대하여 각 차량의 객실중앙부에 발생하는 충격가속도를 구하여 40 Hz cut-off 저주파 필터로 처리하여 Fig. 13 - Fig. 17에 나타내었다.

Fig. 13은 5, 10, 25, 36 kph 속도의 충돌에 대하여 TC1 차량의 충격 가속도를 구한 것이다. 5 kph 충돌에서는 1.8 g 정도의 작은 충격 가속도가 발생하지만 10 kph 이상의 충돌에서는 8 g 이상의 큰 충격 가속도가 발생한다. 이런 충격 가속도는 철도분야에서 제한하는 5 g 보다 상당히 높은 수준이므로 승객에게 심한 부상을 유발할 수 있는 수준이다[3,4].

Fig. 14는 5 kph 충돌 시나리오에서 각 차체 구조에 발생하는 충격 가속도를 구한 것인데, TC1의 충격 가속도가 1.8 g 정도로 제일 크고, 나머지 M1, M2, TC2 차량 순서로 감소한다. 자동차 충돌과 달리 열차 충돌은 연쇄충돌이므로 Fig. 14와 같이 전후 방향으로 충격가속도가 교대로 발생하는 특징이 있다. 앞 차량의 충격가속도가 앞 방향이면 뒤 차량의 충격가속도는 뒤 방향이 되어서 상호 전후방 충돌을 하게 된다. 그러나 이러한 현상은 후방에 위치하는 차량일 수록 감소한다.

Fig. 15 - Fig. 17은 각각 10, 25, 36 kph 속도로 충돌하는 경우에 대하여 각 차량의 충격 가속도를 구한 것이다. 10 kph 충돌의 경우, 맨 후방 차량인 TC2의 충격가속도가 최대 6 g 정도이며, 나머지 차량은 최대 8 g - 10 g 정도를 나타내고 있다. 6 g 이상의 충격가속도는 철도분야에서 제한하는 5g보다 약간 높은 수준이다[34]. 25 kph 이상의 충돌속도에서는 15 g 이상의 높은 충격가속도가 발생되므로 승객의 부상 위험이 매우 크다.

5. 결론

한국형 표준전동차에 대하여 5, 10, 25, 36 kph의 속도로 동일차량과 추돌하는 사고 시나리오를 사용하여 전체 차량의 1차원 충돌해석을 하여 다음 결론을 얻었다.

- 1) 연결기의 충격에너지 흡수능력은 5 kph 충돌 조건을 만족시킨다.
- 2) 10 kph 이상의 충돌에서는 연결기 드래프트 기어의 에너지 흡수 능력이 부족하다.
- 3) 10 kph 이상의 충돌에 대하여 충격력과 충격가속도를 저감하기 위해서는 부가적인 에너지 흡수 장치를 도입할 필요가 있다.

참고문헌

1. 구정서, 송달호 외 7인(1998), "고속전철의 충돌안전

도 해석 기술 개발에 관한 연구보고서", 한국기계연구원.

2. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA'93, pp.73-81.
3. J. H. Lewis(1994), "Development of Crash Vehicle Structures for Railways", WCRR'94, pp.893-900.
4. C. Oyan(1998), "Dynamic Simulation of Taipei EMU Train", Vehicle System Dynamics, Vol. 30, pp.143-167.
5. 구정서, 노규석, 박성하(1999), "도시철도차량 충돌 안전기준 제정에 관한 연구", 한국기계연구원
6. ESI(1999), "PAM-Crash Manual".
7. L. T. Kisielewicz(1992), "French Design Practice and Applications for the Crsahworthiness of Rolling Stocks", PUCA'92, pp.17-23.

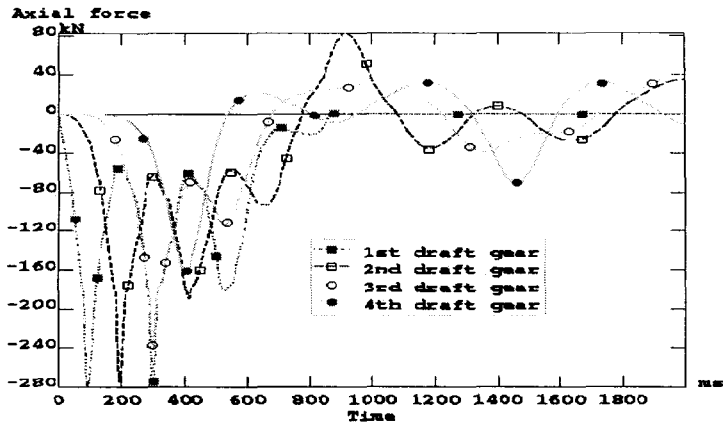


Fig. 11. Axial forces of the draftgears when collided at 5 kph

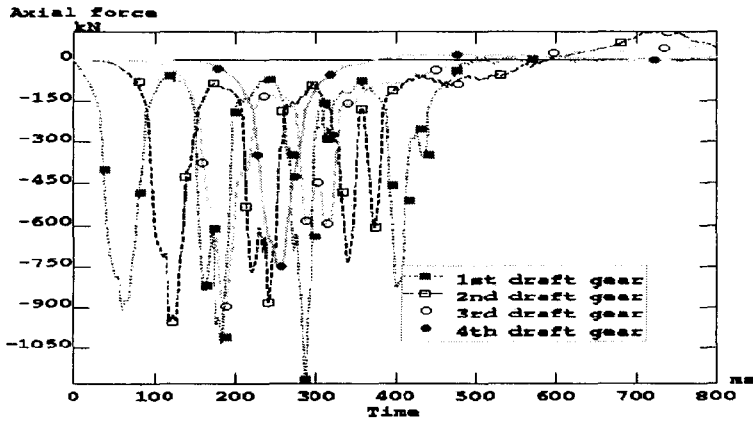


Fig. 12. Axial forces of the draftgears when collided at 10 kph

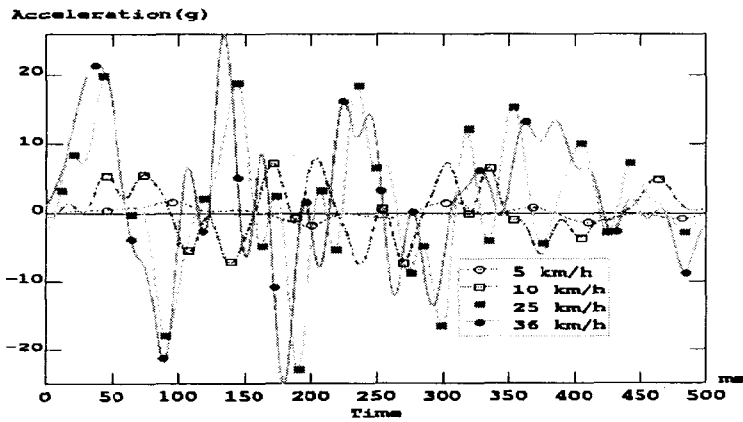


Fig. 13. Axial acceleration of the TCI

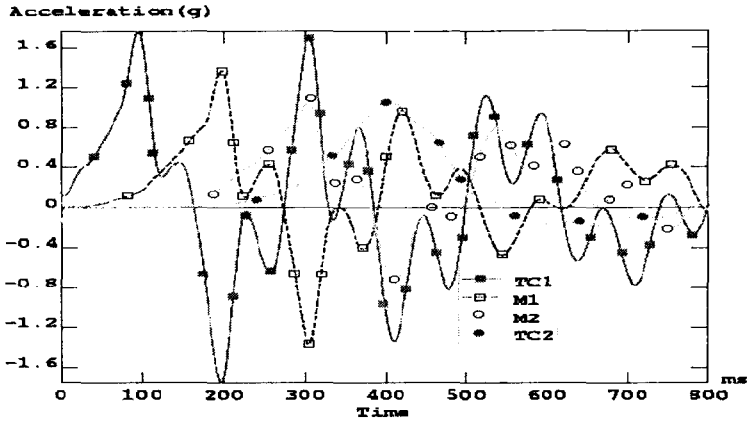


Fig. 14. Axial acceleration of the unit under 5 kph scenario

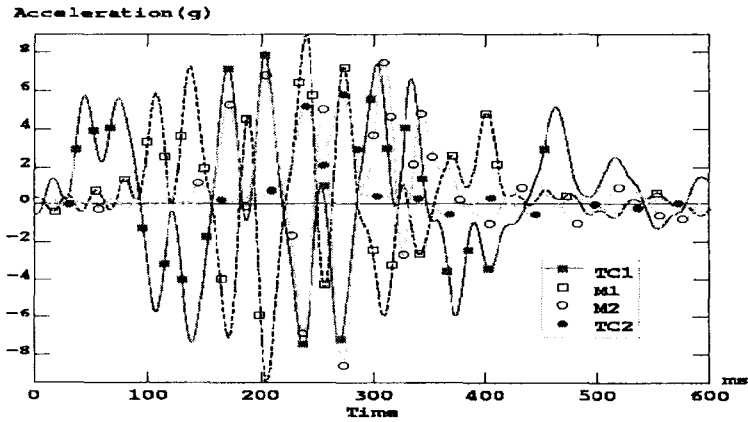


Fig. 15. Axial accelerations of the unit under 10 kph scenario

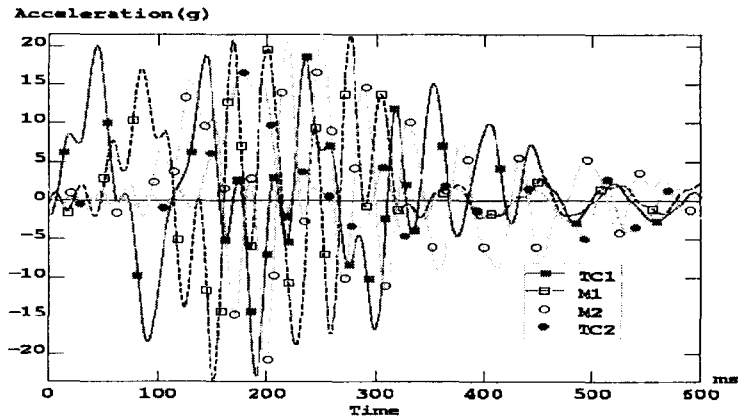


Fig. 16. Axial accelerations of the unit under 25 kph scenario