

한국형 고속전철의 충돌안전도 설계 분석

Crashworthiness on the full rake of KHST

구정서*, 박성하**, 윤영한***, 김동성*

J. S. Koo, S. H. Park, Y. H. Youn, D. S. Kim

ABSTRACT

In this study, the crashworthy design of the full rake of KHST (Korean High Speed Train under development in G7-project) is numerically evaluated using 2-dimensional crash dynamics. The results of KHST are compared with those of TGV-K (TGV for Seoul-Pusan line). KHST shows better crashworthy behaviors after impact. Specifically, impact forces, decelerations and overriding displacements are much reduced in KHST. All the design guidelines under SNCF accident scenario (collision against a movable rigid mass of 15 ton at 110 km/h) are satisfied in KHST.

1. 서론

철도차량의 충돌안전도 분야는 비교적 최근 들어서 활발히 연구가 진행되고 있다[1]. 영국의 BR에서는 중저속의 기존 철도 차량 중심으로 연구가 진행되고 있고[2], 프랑스 SNCF에서는 고속전철과 도시형 통근 차량 중심으로 연구개발이 이루어지고 있다[3]. 이들 선진국 철도 운영사들은 차량 개발에 필요한 설계 기술, 해석기술, 시험평가 기술을 개발하여, 90년대 중반부터 차량설계에 적용하고 있으며, 최종 설계에 대하여 실차 충돌 시험도 수행하고 있다. 미국의 경우, 철도 차량의 대부분을 수입하여 사용하고 있으므로 발주자 입장에서 필요한 소극적 안전도(passive safety) 구매사양 확보를 위하여 많은 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구는 주로 FRA 주도로 이루어지고 있는데, 소극적 안전도 확보를 위한 차체구조의 설계 방법이나 시험 평가에 대한 연구보다는, 승객 보호를 위하여 필요한 설계 사양, 즉 차체의 에너지 흡수능력, 승객의 생존공간 확보, 외부 물체의 침투방지, 2차 충돌에 의한 상해, 사고 후 구난을 위한 설계 등이 주된 대상이다[4].

국내에서는 경부고속전철(TGV-K)의 도입과 함께 프랑스의 기술이 이전되고, 동시에 G7 과제로 한국형고속전철(KHST)개발사업이 진행되면서 충돌안전도 설계 및 해석기술이 개발되고 있는데, 본 연구는 G7 과제에서 초안 설계된 KHST 전체차량을 대상으로 2차원 충돌 동력학 해석을 수행하여 충돌 안전도를 평가하는 것이다. 이전에 연구된 전체차량의 1차원 충돌해석기술[5]은 각 차체구조의 에너지 흡수 능력, 탑승자의 생존공간 확보 여부 및 충격가속도 크기 등을 평가할 수 있었으나, 실제 충돌에서 발생하는 각 단위 차량간의 타고오름 현상과 각 차량의 차간연결기 부품 및 지지 구조에 발생하는 충격력의 크기 등은 분석할 수 없었다. 따라서, 이러한 현상을 분석하려면 전체차량 편성에 대하여 2차원 모델을 구성하여 해석하여야 한다. 그러나 KHST와 같이 20편성이나 되는 전체차량에 대하여 2차원 동력학적 모델을 구성하는 것은 매우 복잡하고, 많은 양의 동특성 자료를 필요하게 된다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정희원

** 충남대학교 기계공학과 박사과정

*** 한국기술교육대학교 생산공학과, 정희원

본 연구에서는 2차원 모델링의 복잡성을 완화하기 위하여 2차원 모델과 1차원 모델을 혼합한 하이브리드 모델을 사용하였는데, 주 사고 시나리오인 SNCF 시나리오(15ton 강재 장애물과 110km/h로 정면충돌)는 충돌 시 전방에 위치한 몇몇 차량은 큰 충격력을 받지만 후방의 차량은 크게 영향받지 않음에 착안한 것이다. 즉 KHST의 전방 동력차, 동력객차, 후속 객차 3량은 2차원 모델을 구성하고 나머지 차량들은 1차원 모델을 구성하여 충돌 해석하였다. 또한 같은 방법으로 TGV-K도 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 상호 비교 평가하였다.

2. 전두부의 충격에너지 흡수설계

전두부의 충격 에너지 흡수 설계는 고속전철의 충돌안전도 설계에서 가장 중요한 핵심이라 할 수 있다. 건널목 사고와 같이 가벼운 장애물과 충돌하는 경우, 충돌 에너지의 70-80%가 동력차에 전달된다. 최근 선진국에서 개발하는 고속전철(TGV-NG, American Flyer 등)은 전두부에서 5MJ 이상의 충격 에너지를 흡수하도록 하고 있다. 본 연구에서도 이러한 추세에 부응하여 전두부에서 5MJ 이상의 에너지 흡수가 가능하도록 설계하는 것이 목표이다.

Fig. 1은 TGV-K 전두부 충격에너지 흡수구조의 개요를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 충돌사고 시에는 헤드스톡과 알루미늄 하니콕이 대부분의 충격 에너지를 흡수하도록 하는 구조로 되어 있다. Fig. 2는 TGV-K 전두부의 압괴거동을 나타낸 것이다. 하니콕과 헤드스톡의 압괴 하중이 후방의 운전실 압괴하중(6000kN)보다 높아서 전두부에서 에너지 흡수가 불리하다.

KHST 전두부에서는 평균 압괴하중을 낮게 하고, 압괴길이를 충분히 확보하는 방향으로 설계를 진행하였다. 또, 운전실의 압괴강도를 대폭 제고하여 전두부보다 먼저 압괴가 발생하는 일이 없도록 하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 도출된 KHST 전두부 구조설계와 압괴거동을 나타낸 것이다. 도출된 설계는 전두부 부분의 기기들 취부와 운전실 하부구조와의 조화를 최대한 고려하였다. 운전실 압괴하중이 6200kN 인데 반하여 전두부는 최대 4455kN 이하에서 압괴될 수 있도록 하여 운전자 생존공간 확보가 유리하도록 하였다.

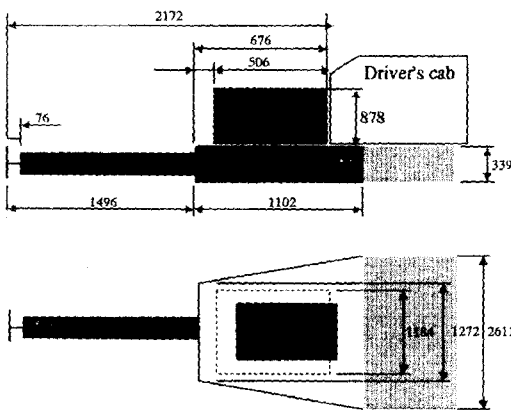


Fig. 1 Front structures of TGV-K

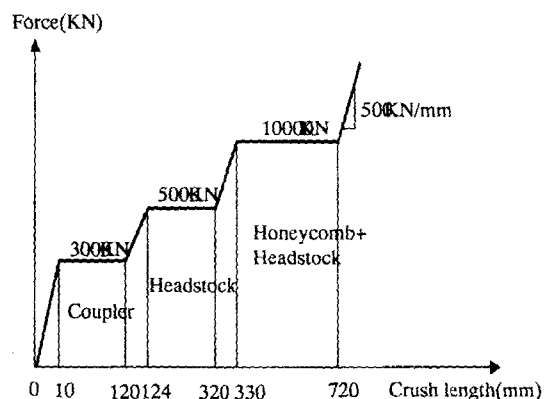


Fig. 2 Crush behavior of the TGV-K front end

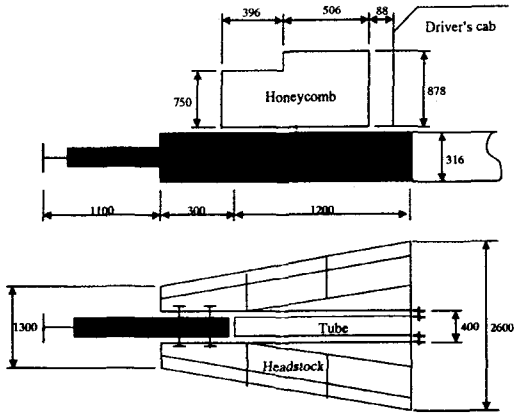


Fig. 3 Front structures of KHST

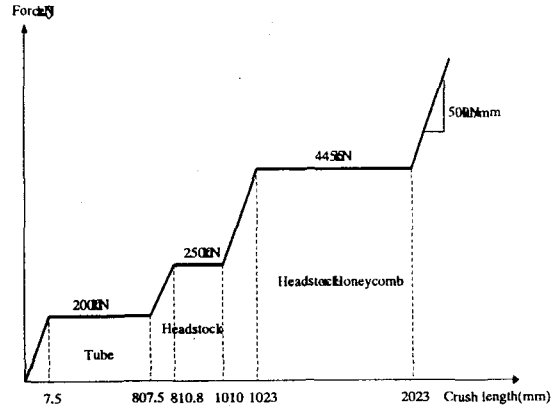


Fig. 4 Crush behavior of the KHST front end

3. 2차원 충돌해석 모델링

Fig. 5는 KHST의 전방 동력차를, Fig. 6은 후속하는 동력객차, 링구조, 객차를 강체와 비선형 특성의 스프링, 댐퍼 등으로 동력학적 해석 모델을 구성한 것이다. 여기서 차륜과 레일 사이의 접촉은 인장에 대해서는 매우 연성이고, 압축에 대해서는 강성인 스프링으로 처리하였다. Fig. 5의 주요 스프링, 댐퍼 요소는 1차, 2차 현가장치, 피봇, 하니콤 구조, 커플러 및 헤드스톡, 사이드 버퍼 등이며, Fig. 6의 주요 스프링 댐퍼 요소는 1차, 2차 현가장치, 피봇, ball & socket 조인트, 상부 2-댐퍼, 하부 2-댐퍼 등이다. KHST의 링 연결에서 특이한 것은 Fig. 8과 같이 TGV-K에서 사용되는 hooks, fingers, fins 등 연결 부품이 생략되고 구조적으로 직접 연결되었다는 점이다. 상세한 스프링, 댐퍼, 질량 자료는 생략하였으나 참고문헌 [6]을 참조할 수 있다.

충돌동력학의 주요 동력학적 요소인 대차 및 차간 연결부품 등에 사용된 스프링, 댐퍼의 비선형성을 고려하기 위하여 정상작동 영역에서는 일반 차량동역학에서 사용하는 값을 사용하고, 충돌에 의하여 정상영역을 벗어나는 구간에 대해서는 정상영역 값의 10배 이상 되는 매우 큰 값을 적용한다.

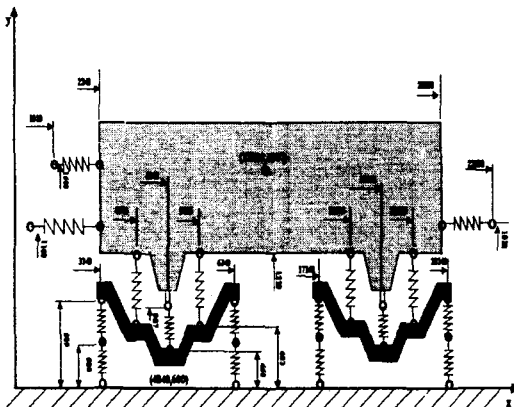


Fig. 5 2D model of the KHST power car

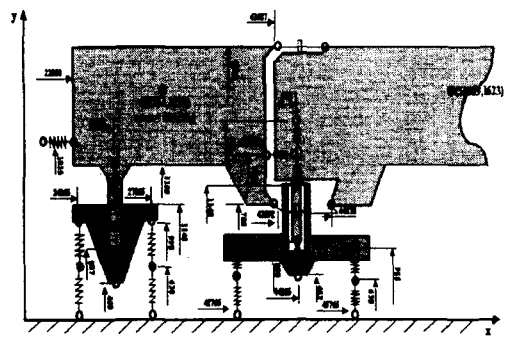


Fig. 6 2D model of KHST trailers

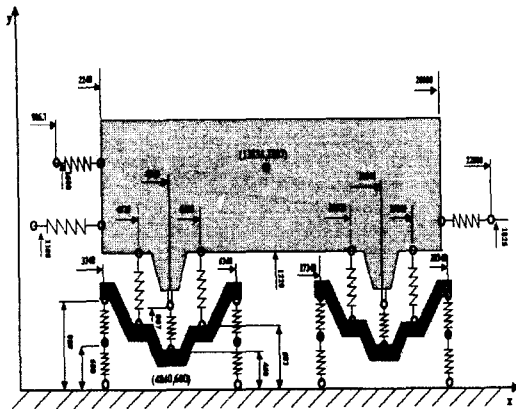


Fig. 7 2D model of the TGV-K power car

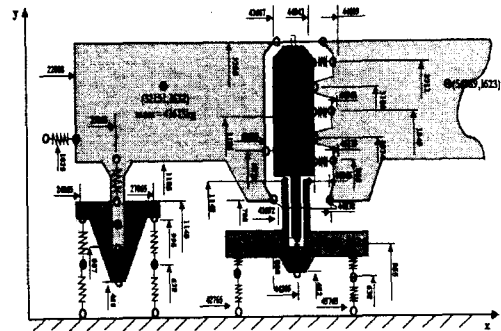


Fig. 8 2D model of TGV-K trailers

4. KHST의 충돌안전도 설계 평가

Fig. 5 ~ Fig. 8과 같이 구성된 동력학적 모델을 해석하면 대차와 차체의 상하운동, 연결장치나 지지구조에 부과되는 상하방향의 충격력 등 1차원 해석[5]에서 얻을 수 없었던 결과를 얻을 수 있다. Fig. 9는 SNCF 사고 시나리오 하에서 KHST와 TGV-K에 대하여 강체 장애물의 충격력을 해석하여 비교한 것이다. TGV-K에서는 10,000 kN 이상의 큰 충격력이 작용하지만, KHST에서는 운전실의 압과하중 6,200 kN 보다 낮은 4,455 kN의 충격력이 발생한다. Fig. 10은 충돌에 의하여 흡수된 변형 에너지를 보여주는 것으로, TGV-K에서는 충돌 초기의 짧은 시간에 많은 에너지를 흡수하지만 KHST에서는 서서히 충격 에너지를 흡수하고, 시간이 경과하면 전체적으로 두 설계가 거의 동일한 량의 에너지를 흡수하게 된다. Fig. 11은 TGV-K와 KHST에 대하여 헤드스톡과 하니콤의 압과를 비교한 것이다. KHST는 헤드스톡과 하니콤의 압과량이 각각 1,827 mm, 813 mm으로 TGV-K의 450 mm, 750 mm보다 거의 2배나 되는 좋은 특성을 보여주고 있다. 이때 헤드스톡과 하니콤에 부과되는 각각의 축방향 충격하중을 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. TGV-K에서는 헤드스톡과 하니콤이 각각 5,000 kN 이상의 큰 충격력이 발생하였으나 KHST에서는 헤드스톡에 2,500 kN, 하니콤에 2,000 kN 정도의 충격력이 발생하여 설계 제한조건을 만족시킨다.

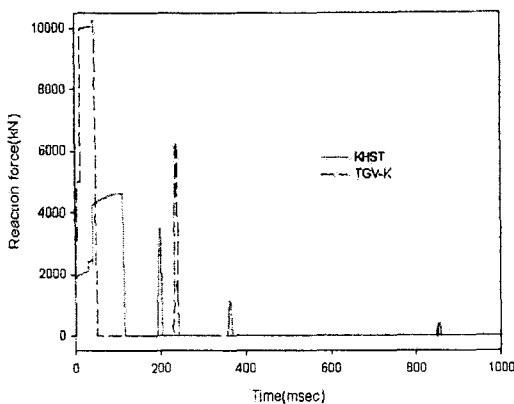


Fig. 9 Reaction force of the rigid mass

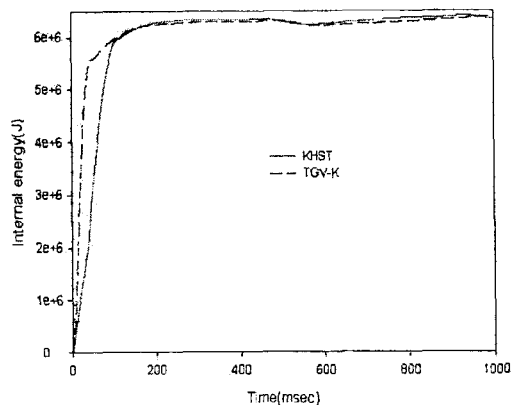


Fig. 10 Internal energy absorbed

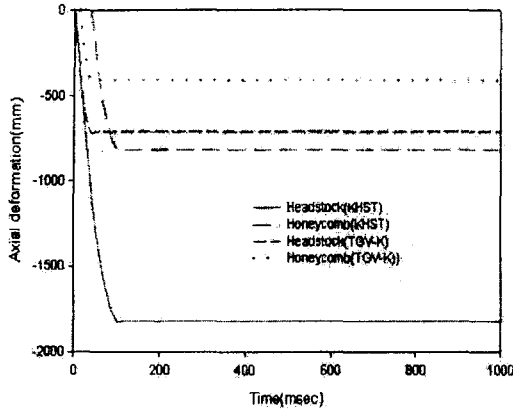


Fig. 11 Axial deformations of the front end

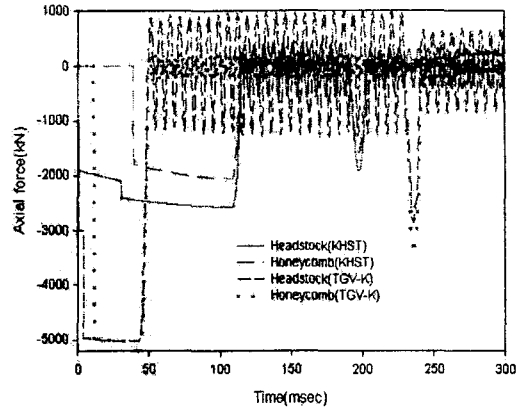


Fig. 12 Axial forces of the front end

Fig. 13은 동력차와 동력객차 사이에 취부되어 있는 사이드 버퍼의 수직 상대변위를 구한 것인데, 열차 사고에서 가장 위험한 사고 유형인 타고오름에 의한 압괴의 발생 여부를 예측할 수 있다. TGV-K의 경우 45mm 이하, KHST의 경우 25 mm 이하의 수직 상대변위를 나타내고 있는데, 이것은 anticlimbing grip에서 수직방향으로 허용되는 상대변위의 여유공차인 80 mm 이하이다. 따라서 사이드 버퍼에는 수직하중이 거의 발생하지 않고 타고오름 현상도 발생하지 않는다. 여기서 주목할 중요한 결과는 KHST의 링 연결구조 설계에서 TGV-K 링 연결 구조 요소인 pins, fingers, hook 등을 생략하고 차체에 직접 용접하는 설계로 변경하였는데 이것이 타고오름 현상을 오히려 완화시키는 역할을 한다는 것이다.

Fig. 14 ~ Fig. 16은 동력차, 동력객차 및 후속 객차에 발생하는 충격 가속도를 TGV-K와 KHST에 대하여 비교한 것이다. 동력차의 경우 TGV-K에서는 17g 정도의 큰 가속도가 발생하지만 KHST에서는 5g 정도로 작은 충격 가속도가 발생한다. 이 가속도는 동력차를 강체로 가정했을 때 구해지는 동력차 전체에 대한 평균 값이라고 할 수 있다. 한편, 제 1 동력객차와 제 1 객차의 충격가속도도 TGV-K보다 KHST에서 30% 정도 감소하는 양호한 결과를 나타내고 있다.

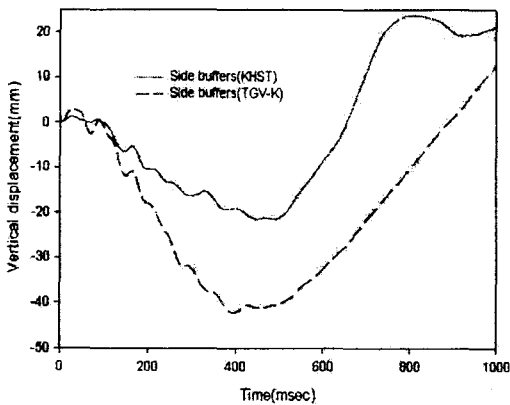


Fig. 13 Overriding displacements at the side buffers

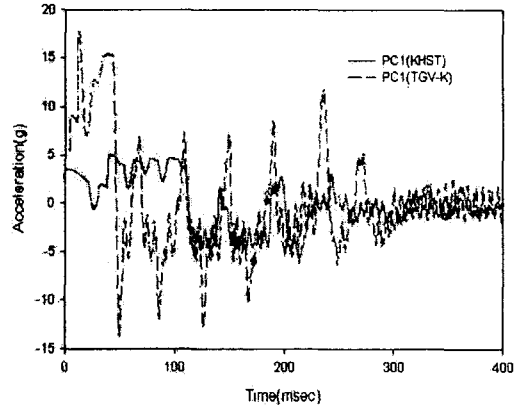


Fig. 14 Accelerations of the first power car

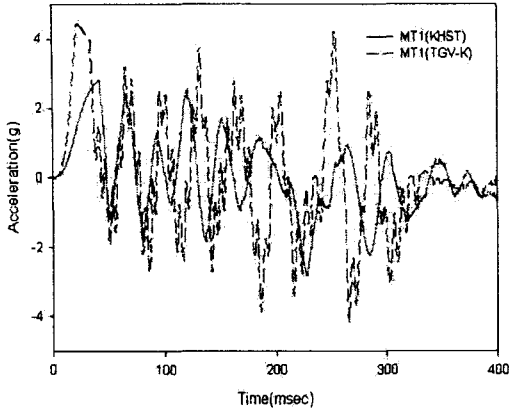


Fig. 15 Accelerations of the MT1

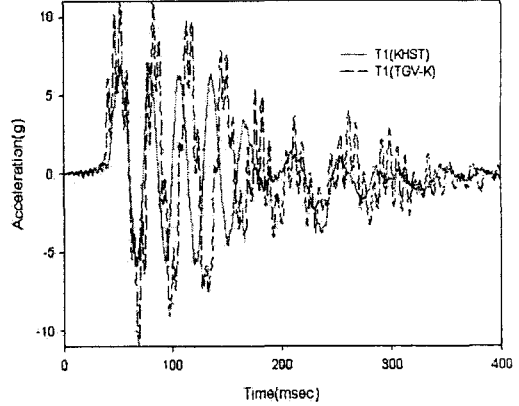


Fig. 16 Accelerations of the T1

전체차량의 1차원 해석으로는 차간 연결부품들의 취부 위치를 고려하여 해석할 수 없으므로 이들 부품에 발생하는 충격력을 평가할 수 없다. 그러나 전체차량을 2차원으로 모델링하여 해석하면 각 차간 연결장치들에 발생하는 수직, 수평 충격력을 예측할 수 있고, 충돌 사고 발생 후 연결장치의 파손에 의한 차간 분리현상을 예측할 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 18은 각각 SNCF 사고 시나리오 하에서 객차간 연결 ball & socket 조인트에 작용하는 축방향 충격하중과 수직방향 충격하중을 나타낸다. TGV-K와 KHST에 대한 해석 모두 수직방향 충격력의 경우 최대 400kN 정도로 비슷한 결과가 얻어졌다. 그러나, 축방향 충격력의 경우 KHST는 최대 2700kN 정도로 최대 3,200 kN인 TGV-K에 비하여 개선된 결과를 나타낸다. 이러한 현상은 KHST 객실 승강대 부분의 압괴강도가 지나치게 낮아서 발생하는 것으로서 현재 이 부분의 압괴강도 설계가 변경되고 있으므로 추후 다시 평가하여야 한다.

Fig. 19는 동력차 전방 대차의 충격 가속도를 나타낸 것이다. 충돌 사고에 의하여 동력차 전방 대차 피봇이 파손되어 열차가 탈선한 사례도 있으며 선진국 차량업체에서는 차체와 대차간의 연결 강도설계에 큰 관심을 가지고 있다. KHST의 경우, 동력차 전방 대차에 최대 4g 정도의 충격 가속도가 가해지지만, TGV-K의 경우 최대 15g 이상의 큰 충격 가속도가 발생한다. 따라서 KHST는 링 구조, 대차구조 등의 주요 연결부위에 발생하는 충격력을 줄일 수 있다.

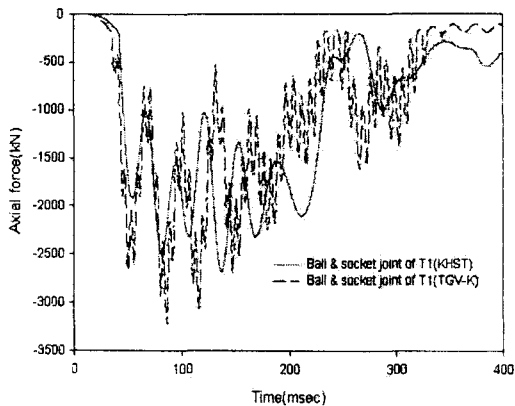


Fig. 17 Axial forces of the B & S joint

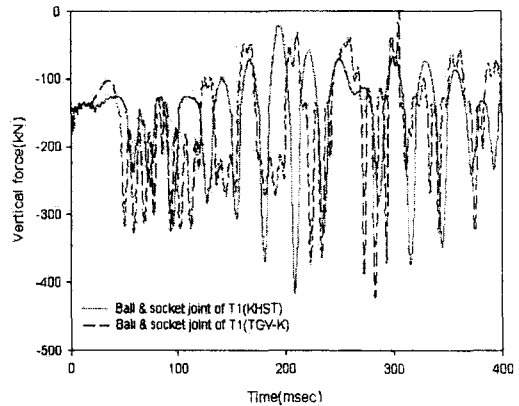


Fig. 18 Vertical forces of the B & S joint

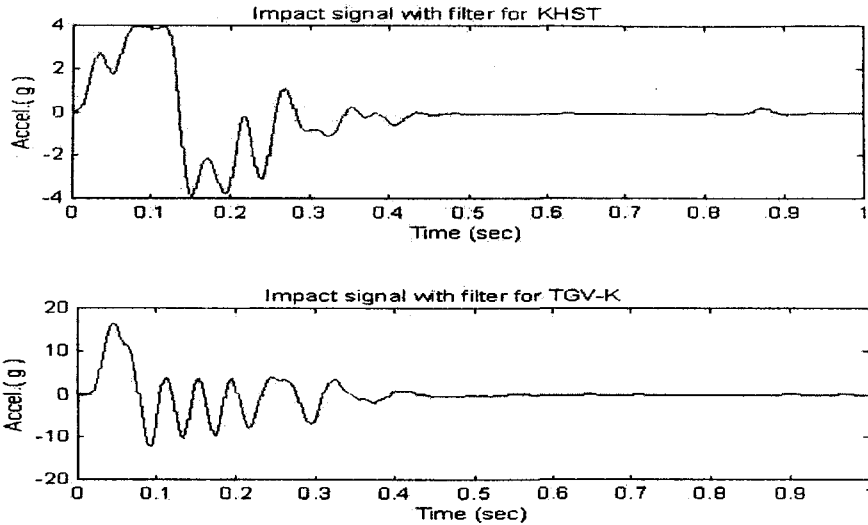


Fig. 19 Accelerations of the front power bogie in the first power car

5. 결론

한국형 고속전철의 충돌안전도 설계를 평가하기 위하여 KHST 및 TGV-K 차량에 SNCF 사고 시나리오를 적용하여 2차원 충돌 동역학 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) KHST 전두부의 에너지 흡수설계는 전두부의 충격력을 운전실 압괴하중인 6200kN보다 낮은 4455kN 수준으로 유지할 수 있었다.
- 2) KHST의 경우, 전두 동력차, 동력객차의 충격 가속도 크기를 최대 5g 이하로 유지할 수 있었으며, 이것은 TGV-K의 경우보다 현저히 낮은 수준이다.
- 3) KHST 동력차-동력객차의 타고오름 변위를 분석한 결과, 타고오름 허용 공차인 80mm보다 상당히 낮은 20mm 수준이었으며 TGV-K의 40mm보다도 낮았다.
- 4) 주요 연결장치인 Ball & Socket joint의 충격하중은 TGV-K 수준(수직충격력)이거나 20%정도 개선(수평충격력)된 결과를 나타내며, 대차에 가해지는 충격가속도도 KHST는 4g 수준으로서 TGV-K에 비하여 300% 정도 개선되었다.

참고문헌

1. R. A. Smith, Crashworthiness moves from art to science, Railway Gazette International, April, pp.227-230, 1995.
2. A. Scholes and J. H. Lewis, Development of crashworthiness for railway vehicle structures, IMechE, Proc Instn Mech Engrs, Vol. 207, pp.1-16, 1993.
3. L. M. Cleon, Tolerance a la collision des materials ferroviaires: optimisation de la securite passive des structures de vehicule, WCCR'94, pp.885-891, 1994.

4. E. J. Lombard, Amtrak's high speed trainset program, 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp.1-7, 1995.
5. 구정서, 송달호, '한국형 고속전철의 전체 차량에 대한 충돌안전도 설계 연구,' 대한기계학회 1998년도 추계학술대회논문집, pp.545-552, 1998. 11.
6. 구정서 외, '충돌안전도 해석기술개발 연구보고서', 한국기계연구원, 1999. 10.