

1차원 동역학 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌 안전도 평가

An Evaluation of Crashworthiness for the Full Rake KHST Using 1-D Dynamic Model

구정서¹, 조현직¹, 김동성¹, 윤영한²

Jeong-Seo Koo, Hyun-Jik Cho, Dong-Sung Kim, and Young-Han Youn

Keywords : KHST (한국형 고속전철), KTX (경부고속전철), Heavy Collision (중충돌), Light Collision (경충돌), Energy Absorbing Tube (에너지 흡수 튜브)

Abstract

One of the best methods to evaluate crashworthiness of a full rake trainset is to analyse 1-dimensional dynamic model using dampers, nonlinear springs and bars, and masses. In this study, the crashworthiness of KHST has been evaluated by analysing a nonlinear dynamic model made up of springs/bars-dampers-masses.

The numerical results show that the KHST can absorb more kinetic energy at lower impact forces and lower accelerations in case of heavy collisions, if compared with KTX. Also, the KHST can be protected from any damage in its car-body and electric components except the energy absorbing tube in case of light collisions, like train-to-train accidents at speed under 8 kph. On the other hand, the KTX may be more damaged in the light collisions because there is no energy absorbing tube.

1. 서론

철도차량은 자동차와 달리 여러 차량이 연결되어 있으므로, 충돌안전도 설계에서는 전체차량의 충돌에 대한 동력학적 분석이 매우 중요하다[1]. 이를 위해 다물체 동력학을 이용한 전체 차량의 충돌 거동해석과 각 차량의 3차원 유한요소 모델을 이용한 구간해석 기법을 축차적으로 적용하는 설계기법을 이용하게 되는데, 이러한 기법을 2단계 접근방법이라 하며, 철도차량의 충돌안전도설계를 평가하는 방법으로 이용된다[2]. 일반적으로 철도차량의 경우 차량 1량의 3차원 유한요소해석 모델에 사용되는 셀요소가 약 20 - 50 만개 정도이어서 모델 생성과 해석 측면에서의 많은 노력과 시간이 소요되므로, 전체차량을 이러한 방법으로 해석

하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 각 차량의 구간별 압괴특성은 유한요소 해석으로 구하고, 이를 이용하여 전체차량에 대하여 단순화하여 1차원적 충돌 동력학 해석을 수행하는 것이 가장 현실적이다.

본 연구에서는 동력차, 동력객차 그리고 객차의 각 구간별 압괴특성과 전장품 및 대차의 집중질량을 실제차량과 유사하게 모델링하여 한국형 고속전철의 1차원 충돌 동력학 모델을 개발하였다. 또한, 이를 이용한 각종 사고 시나리오 조건에 따른 충돌안전도와 승객안전도에 대한 평가를 하고, KTX와 KHST의 충돌에 따른 동특성을 비교하였다.

2. KHST의 1차원 충돌동력학 모델

본 연구에 이용된 KHST의 차량 편성을 Fig 1에 나타내었다. 1차원 충돌 해석 모델에 이용된 각 구간

1 정회원, 한국기계연구원 신교통 기술연구부, 수송기계그룹

2 정회원, 한국기술교육대학교, 생산공학과, 교수

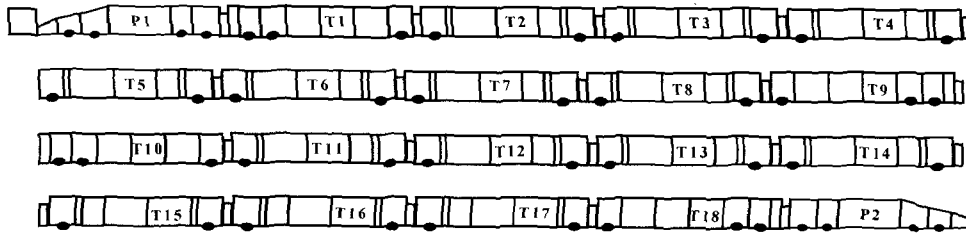


Fig 1. Configuration of the full rake KHST

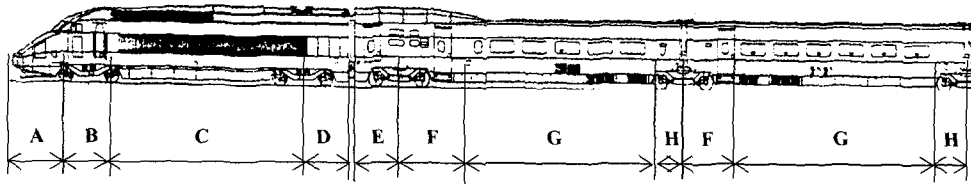


Fig 2. Sectional part definition for crashworthy design

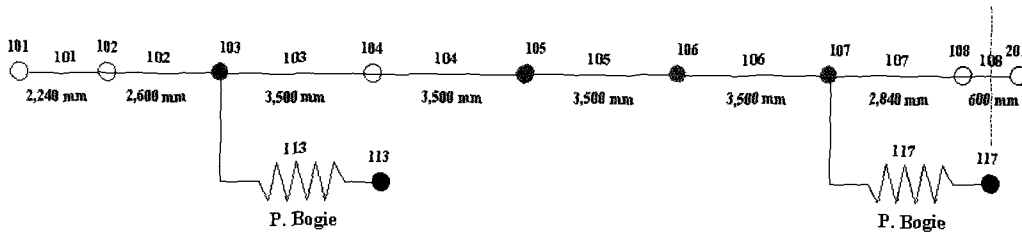


Fig 3. One-dimensional model of the full rake KHST

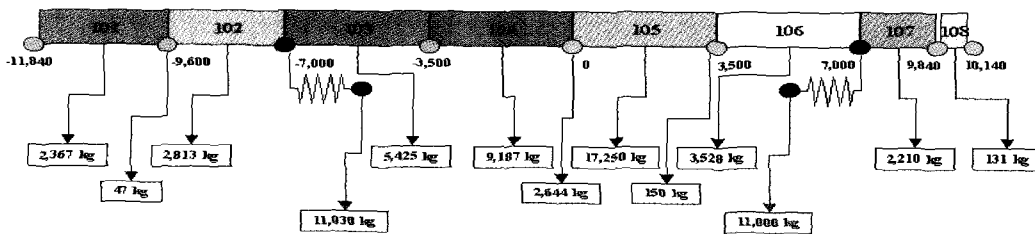


Fig 4. Mass distribution of the KHST

Table 1. Crashworthy characteristics of each section

차량종류 및 차체 단면		A	B	C	D	E	F	G	H
KTX	평균압괴 하중(kN)	7380	6000	4500	4000	4500	4000	4000	4000
	압괴가능길이(mm)	720			2060		2762		1712
KHST	평균압괴 하중(kN)	3260	6040	4500	4000	4291	4960	8811	5006
	압괴가능길이(mm)	2023			2060		2762		1712

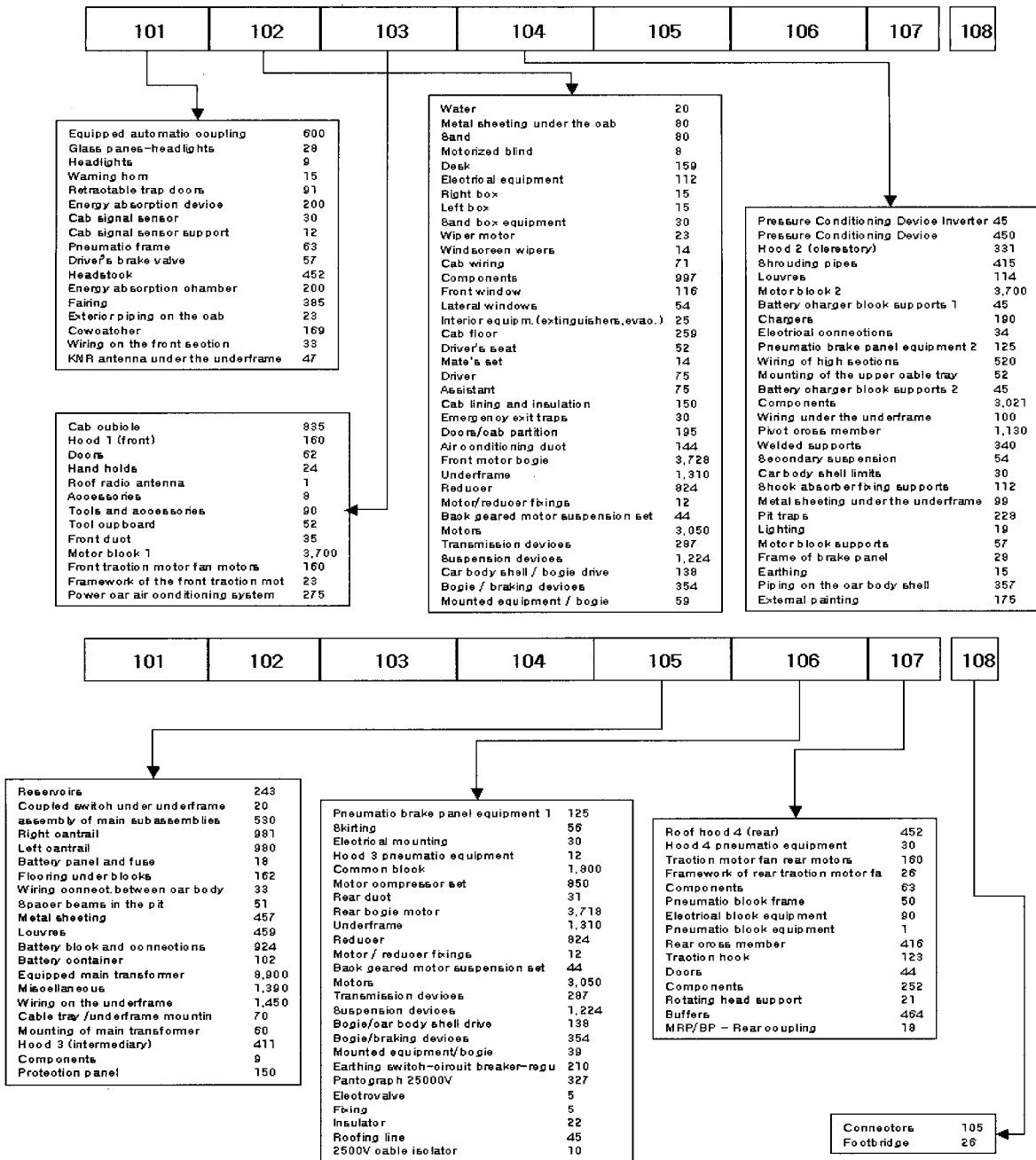


Fig 5. Mass distribution data of the KHST's power car

별 압괴특성은 Table 1과 같으며, 각 구간은 Fig 2와 같다. Fig 3은 전체 차량 중 동력차 부분의 1차원 동력학 모델의 개념도를 나타낸 것인데, 각 구간별 집중질량은 Fig 4와 같이 분포되었다. 여기서 질량데이터는 실제제작 차량의 전장품 및 기기 배치에 따라

Fig 5와 같이 각 구간별로 분류하여 질량중심의 위치데이터를 구하였다.

KHST는 각 차량별로 시트배열 및 전장품들의 위치와 수량이 각각 다르므로 실제에 가까운 질량분포를 구하는 것은 차량의 구간별 동적 특성을 분석함에

있어서 무엇보다 중요하며, 해석결과에 직접적인 영향을 주는 요인이다. 이하 동력객차와 객차의 모델링도 동력차와 같은 방식으로 구간을 분할하고, 집중질량을 분포시켰다.

동력차는 전두부, 운전실, 4부분으로 상세 분할된 차체 중앙부, 차체후미 부분, 사이드 버퍼 등을, 동력객차는 모터블록, 출입문, 객실 및 차체 후미 부분 등을, 그리고 객차는 차량 전방부, 객실 부분, 차체후미 부분 등을 충돌에 의한 압괴거동을 잘 표현할 수 있는 탄소성 특성의 막대 요소로 모델링 하였다[3]. 또한, 차체에 부착된 대차, 링 구조와 같이 무거운 구조물들은 집중 질량으로 표현하였고, 이것들과 결합되어 있는 연결장치, 스프링, 댐퍼 등은 비선형 스프링-감쇠요소로 동력학적 모델을 구성하였다. 이렇게 구성된 1차원 충돌 동역학 모델은 프랑스 ESI사에서 개발한 PAM-CRASH 소프트웨어를 사용하여 해석하였다[3].

3. 1차원 충돌 동역학 모델을 이용한 해석

3.1 SNCF 사고 시나리오에서의 충돌 동역학 해석

SNCF 사고 시나리오(110 kph의 속도로 15 ton의 강체 장애물과 충돌) 조건하에서의 해석에서 KHST 전두부(키플러 후방 에너지 흡수 튜브, 헤드스톡, 하니컴)에 발생하는 충격력은 4,473 kN 으로, 10,000 kN이 발생한 KTX에 비해 절반이하로 저감된다. 이는 KHST 전두부가 충격력 면에서 KTX보다 좋은 특성을 갖게 됨을 알 수 있으며, KHST 전두부는 약 5.5 MJ의 에너지를 흡수하고, KTX는 전두부에서 3.2 MJ, 운전실에서 2.4 MJ의 에너지 흡수 형태를 나타낸다. 즉, 전두부에서 KTX는 KHST의 60 % 정도의 에너지 흡수하며, 운전실에서 나머지 40 %의 에너지를 흡수하게 되므로 운전자 보호측면에서도 KHST는 KTX보다 유리하다.

SNCF 사고 시 전두부 압괴특성을 보면, KHST는 전두부(Energy absorber & Honey-comb 구조)에서 1,753 mm, 운전실에서 4 mm의 압괴특성을 나타낸다. 반면에 KTX는 전두부에서 500 mm, 운전실에서 390 mm의 압괴가 발생한다.

또, 동력차 중앙부, 후미구조, 사이드 버퍼의 변형량의 결과를 살펴보면, 동력차 중앙부의 경우 KHST는 20 mm 정도, KTX는 60 mm 정도로 압괴가 발생하

지만, 후미구조에서는 모두 압괴가 발생하지 않는다. 또 사이드 버퍼의 변형량은 KHST는 약 225 mm, KTX의 경우에는 최대 300 mm 정도의 변형이 발생하였으나, 사이드버퍼의 최대 압괴한계인 400 mm 이내의 변형으로 KHST와 KTX 공히 설계상의 문제는 발생하지 않았다. 따라서 동력차의 경우 KHST 중앙부에서 발생하는 약간의 압괴를 제외하고는 설계상 문제점은 없는 것으로 평가된다.

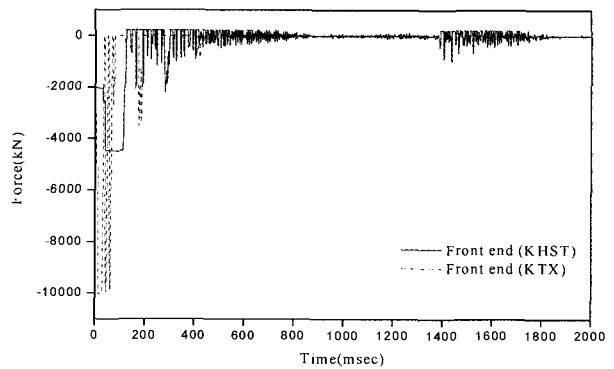


Fig 6. Axial force of the front-end structure at SNCF accident scenario

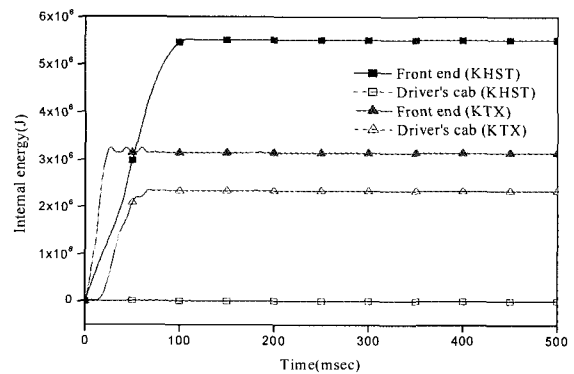


Fig 7. Energy absorption of front-end structure at SNCF accident scenario

한편, SNCF 충돌조건에서 동력차의 운전실과 동력

객차의 승객 탑승부에서의 충돌가속도를 비교하면, KHST는 동력차 운전실에서는 약 7 g, 동력객차의 승객 탑승부에서는 약 3.5 g 정도의 충돌가속도가 발생하였고, KTX는 운전실에서 13 g, 승객 탑승부에서 5 g 정도의 상대적으로 높은 충격가속도가 발생하였다. 결과로부터 KHST는 KTX 보다 승객의 안전도 면에서도 좋은 특성을 나타내었으며, 가속도 수준은 SNCF의 충돌안전도에서 권장하고 있는 5 g 이하의 가속도조건[4]도 만족시켰다.

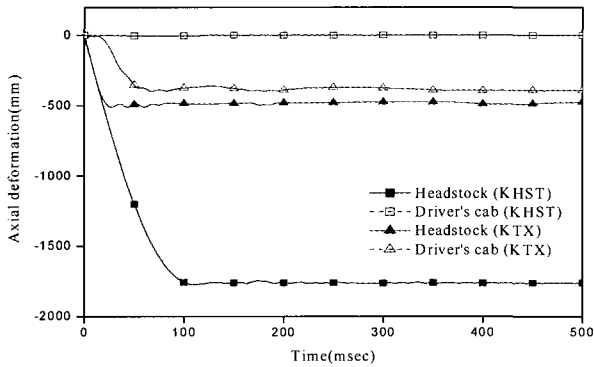


Fig 8. Axial deformation of front-end structure at SNCF accident scenario

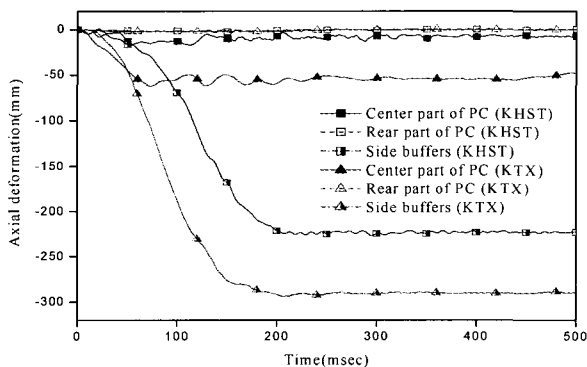


Fig 9. Axial deformation of the power car body at SNCF accident scenario

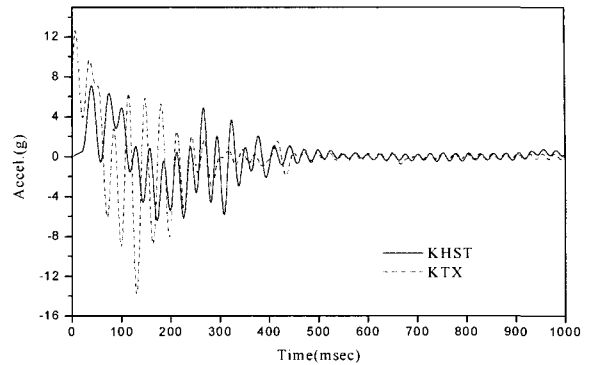


Fig 10. Crash acceleration of the power car at SNCF accident scenario

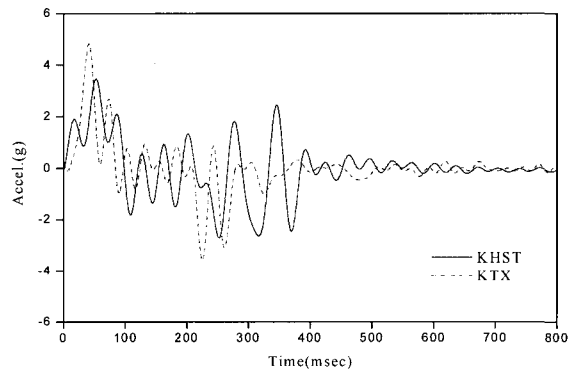


Fig 11. Crash acceleration of the passenger's area at SNCF accident scenario

3.2 30 kph 정면충돌 조건에서의 충돌 동역학 해석

30 kph 정면충돌 해석의 경우, KHST는 KTX에 비하여 최대 충격력이 절반 이하로 저감되고, 전두부에서 약 1,700 mm 정도의 압괴변형이 발생하였으나, KTX와 달리 운전실은 압괴 되지 않는다.

한편 동력객차 객실부의 압괴량을 비교하면, KHST는 최대 35 mm 정도의 적은 압괴변형을 일으켰으나, KTX의 경우에는 동력객차의 객실부가 3,450 mm정도 압괴 되었다. 이것은 경우에 따라서 승객의 안전에 큰

문제를 야기할 수도 있다.

운전실에서의 충격가속도 결과는 KHST의 경우 약 5 g 정도로 KTX의 7.7 g와 비교하면 약 35 % 이상의 충격가속도가 저감된다. 따라서 KHST의 전두부와 운전실은 KTX에 비하여 충돌안전도 측면에서 우수하다.

동력객차 객실에 발생하는 충격가속도를 비교하면, KHST는 최대 4.3 g 이고, KTX는 최대 5 g 이었다. 이것은 KHST 설계시 피로 내구강도 보완설계 과정에서 KHST의 동력객차와 객차의 압괴강도가 KTX 경우보다도 상향 설계되어 전두부에서의 충돌에너지 흡수 설계에도 불구하고 비슷한 수준을 나타내고 있다.

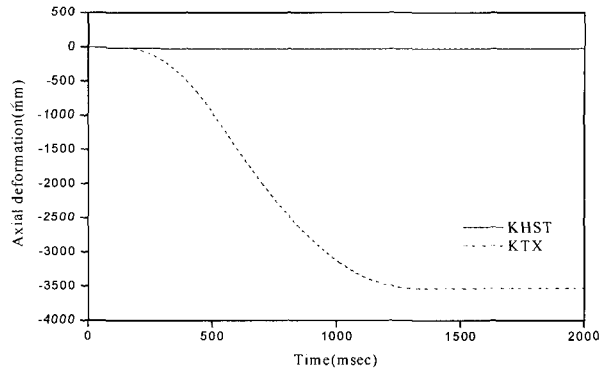


Fig 14. Axial deformation of the passenger's area at 30 kph accident scenario

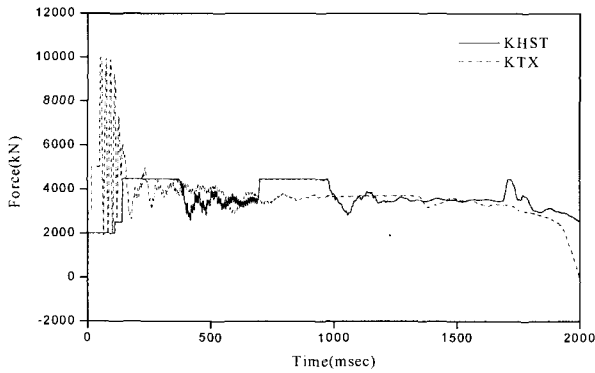


Fig 12. Axial force of the front-end structure at 30 kph accident scenario

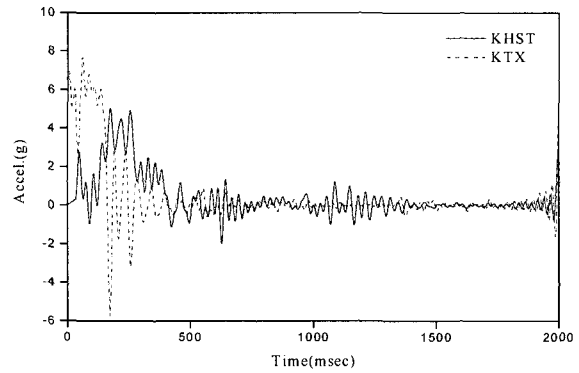


Fig 15. Crash acceleration of the driver's cab at 30 kph accident scenario

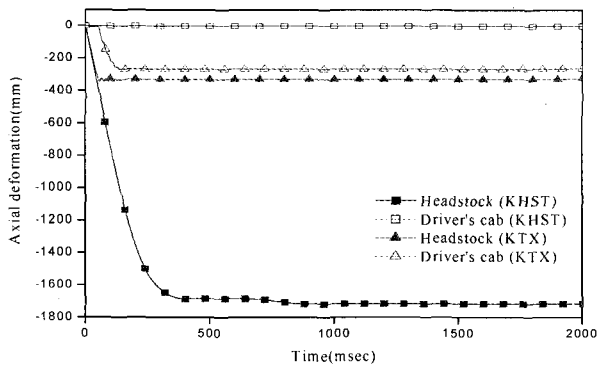


Fig 13. Axial deformation of the front-end structure at 30 kph accident scenario

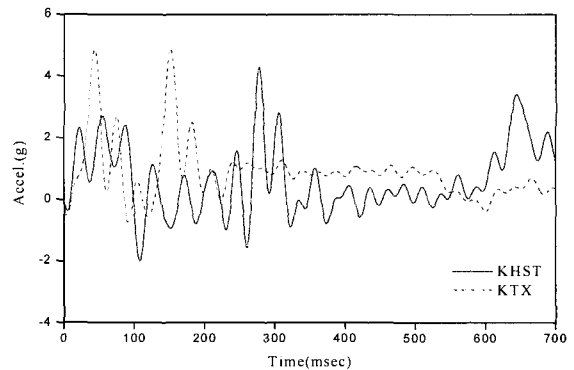


Fig 16. Crash acceleration of the passenger's area at 30 kph accident scenario

3.3 8 kph 정면충돌 조건에서의 충돌 동역학 해석

KHST가 경충돌 사고에서 어떠한 거동을 보이는지를 알기 위하여 8 kph 정면충돌 사고 시나리오에 대하여 수치해석을 수행하고 KTX와 비교하였다. 충돌시 전두부와 동력차 후미구조에 발생하는 충격력은 KHST의 경우 UIC 정적강도 제한 규정인 2,000 kN 이하이지만, KTX에서는 5,000 kN 정도의 큰 하중이 발생된다.

KHST의 경우 후미구조의 충격력도 2,000 kN 이하이지만 KTX는 3,500 kN 정도나 된다. 이것은 KTX가 경충돌 사고에서도 차체에 손상을 입을 우려가 있으나, KHST는 차체가 손상되지 않음을 의미한다.

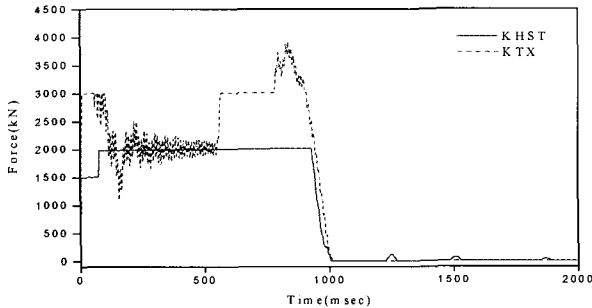


Fig 17. Axial force of the front-end structure at 8 kph accident scenario

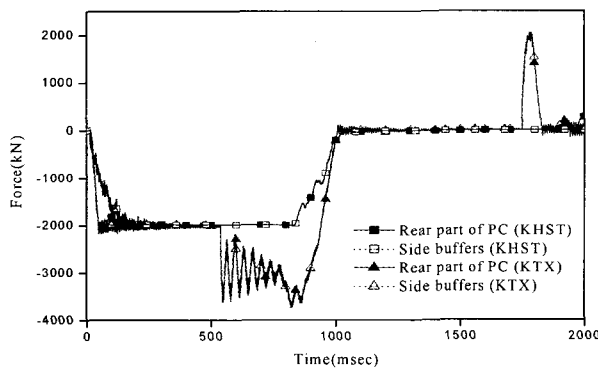


Fig 18. Axial force of the power car's rear part at 8 kph accident scenario

동력차 중앙부에 발생하는 충격가속도는 KHST의 경우는 약 2.2 g 이나, KTX는 5.2 g 정도로 상당히 크다. UIC 규정에 의하면 전장품 등 주요 부품들은 3 g 이하의 충격력에서 견디도록 설계되어 있으므로 KHST의 경우에는 이들 전장품이 손상될 우려가 없다.

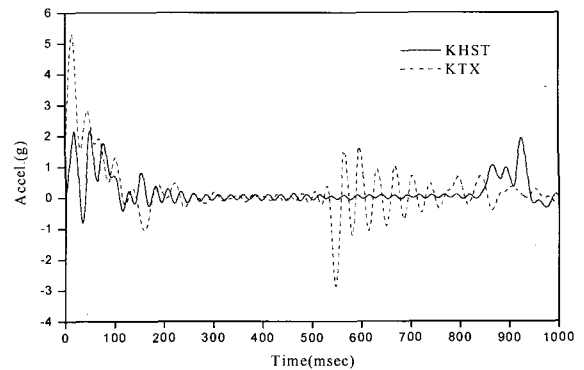


Fig 19. Crash acceleration of the driver's area at 8 kph accident scenario

3.4 충돌 안전도의 종합 평가

첫번째 SNCF 사고 시나리오(사고 시나리오 1)에 의한 충돌 해석에서 KHST의 경우 전두부만 압괴 되었으며, 운전실의 충돌가속도는 KHST는 최대 7 g 정도였다. 그러나, KTX의 경우에는 전두부와 운전실이 압괴 되고, 운전실의 충격 가속도도 13 g 정도로 KHST에 비해 45 % 가량 높게 나타났다.

두번째 30 kph 고정벽 충돌 사고 시나리오(사고 시나리오 2)에서는 KHST의 경우 차량의 전두부의 대부분이 압괴나 파손상태에 도달함에도 불구하고 운전실과 객실 부분은 압괴 되지 않았으며, 운전자에 전달되는 충격가속도는 5 g 정도로 나타났다. 그러나 KTX의 경우, 운전실과 동력객차 객실의 압괴로 인해 생존 공간 확보에 문제가 있음을 알 수 있다. 한편, 동력객차 승객탑승부에서의 충돌가속도는 KHST(4.3 g)가 KTX(5 g)보다 약 20 % 가량 낮은 결과를 보였다.

세번째 시나리오는 고정벽과 8 kph 속도로 충돌하는 경충돌 사고를 적용한 조건이며, 본 조건에서는 탑승자의 거동보다는 차량의 물적 피해 저감 여부를 평

Table 2. Results comparison between KHST and KTX for three accident scenarios

	시나리오 1		시나리오 2		시나리오 3	
	KHST	KTX	KHST	KTX	KHST	KTX
차량의 최대충격력 (kN)	4473	10000	4465	10000	2000	5000
전두부 변형량(mm)	1753/압괴	500/압괴	1710/압괴	350/압괴	800/압괴	120/압괴
운전실 변형량(mm)	4/탄성	390/압괴	3/탄성	250/압괴	1.9/탄성	5/탄성
동력차 차체중양부 변형량(mm)	16/탄소성	60/압괴	19/압괴	80/압괴	5.5/탄성	55/압괴
동력객차 객실변형량(mm)	19/탄성	12/탄성	28/탄성	3450/압괴	17.2/탄성	18/탄성
사이드 버퍼 변형량(mm)	225/정상	285/정상	404/파손	404/파손	120/정상	290/정상
동력차 최대가속도(g)	7/운전실	13/운전실	5/운전실	7.7/운전실	2.4/중양부	5.4/중양부
동력객차 객실 최대가속도(g)	2.9	5	4.3	5	2.4	4.4
평가	운전자/ 승객보호	운전실 파손	운전자/ 승객보호	동력객차 객실파손	커플러/후방 튜브만 파손	동력차파손/ 전장품파손

가하는 것이 중요하다. KHST의 경우 전두부 부품 중에서도 수리가 용이한 부품인 센터 커플러와 에너지 흡수용 튜브만 파손되고 그 외에는 손상이 없다. 특히 동력차에 탑재된 전장품에 부과되는 충격가속도가 3g 이하이므로 전장품이 손상될 우려도 없다.

Table 2는 각 사고 시나리오별 해석결과를 종합하였다.

4. 결론

한국형 고속전철인 KHST의 충돌안전도 설계를 평가하기 위하여, 1차원 충돌 동역학 모델을 이용하여 당초 설계 가이드라인으로 제시되었던 충돌 사고 시나리오에 대하여 해석한 결과, 당초 설계에서 목표로 하였던 성능을 얻을 수 있었다. 즉, KHST는 110 kph 장애물 충돌이나 30 kph 열차 대 열차 충돌과 같은 심한 충돌 사고에서는 운전자와 승객의 안전을 확보할 수 있는 수준의 성능을 보였으며, 8 kph 정면 충돌과 같은 가벼운 충돌 사고에서는 차량의 파손을 교체 수리가 용이한 일부 부품에 국한시켜서 피해를 최소화할 수 있었다. 이러한 충돌안전도 성능은 KTX와 비교하여도 상당히 우수한 특성이다.

후기 : 본 논문은 한국철도연구원에서 주관하는 G7 한국형 고속전철 사업의 일부로 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. A. Marissal, B. Marguet, P. Drazetic, and Y. Ravalrd, "Comportement au Choc de Vehicules Guides", Revue Technique Gec Alsthom, No. 9, pp.55~62, 1992
2. L. T. Kisielewicz and K. Ando, Crashworthy rolling stocks, PUCA '93, pp.73~81, 1993
3. ESI(2000), "PAM-System Manual"
4. 규정서 외 13인(1999), "설계기반기술 세부분야: 충돌안전도 해석기술 개발 4차년도 보고서"
5. D. Tyrell etc, "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability", ASME, AMD Vo. 210/BED Vol 30, 1995