1차원 충돌 동역학 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가

An Evaluation of Crashworthiness on the KHST using 1D collision dynamics

조현직*, 구정서**, 윤영한***
Cho, Hyun-Jik Koo, Jeong Seo Youn, Young Han

Abstract

In this study, the crashworthiness of KHST is evaluated by analysing a nonlinear spring/bar-damper-mass model using 1 dimensional collision dynamics. The numerical results show that KHST can easily absorb kinetic energy at lower impact force and acceleration in heavy collisions, when compared with KTX. Also, in a light collision like a traint-to-train accident at speed under 8 kph, the carbody and components of KHST can be protected without any damage except a energy absorbing tube to be replaced easily. However, KTX may be much damaged in the light collision because there is no energy absorbing tube. In conclusion, the crashworthy performance of KHST has been much improved than that of KTX, although there remains something to be improved for a better performance

1. 서 론

철도차량은 여러 차량이 연결되어 있어서 충돌 사고 발생시 연쇄적인 충돌에 의하여 각 단위 차량 사이의 충돌에 의하여 운동 에너지가 흡수되므오 충돌안전도 측면의 설계에서는 전체차량의 1차원적 충돌 거동에 대한 동력학적 분석이 매우 중요하다[1].

한국형 고속전철의 Under frame은 알루미늄 압출재로 제작되어 차량의 경량화에는 유리한 면이 있으나, 재료자체의 고유한 압괴 특성으로 인해 사고시 충돌 에너지를 흡수하는데 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 설계 단계에서 사용한 전체 차량의 1차원 충돌 동역학 모델[2]은 차량의 전체적인 충돌 거동을 개괄적으로 파악하는데는 큰 문제가 없었으나, 압괴시 알루미늄 재질의 파단 현상 등을 충분히 반영하지 못함으로써 해석결과의 정확도 면에서 다소 불만족스러운 면이 있었다. 그래서, 본 연구에서는 설계단계에서 개발한 전체차량의 1차원 모델에 알루미늄 압출재의 재료 특성인 파단 현상(3차원 쉘 요소로 만들어진 차체 모델에 알루미늄 재질의 파단 특성을 damage function으로 모델링한 유한요소모델을 충돌 해석하여 구한 압괴특성 값 사용)을 반영하여 최종모델(이하 KHST_Final라 함)을 생성하고, 이를 이용하여 각 사고 시나리오별, 섹션별 또는 차량별 충돌 특성을 분석하였다[2]. 또한, 이 KHST_Final 모델을 설계 사고 시나리오에 대하여 충돌해석 한 특성을 KTX와 비교 평가하였다[3].

* 한국기계연구원, 신교통시스템그룹, 연구원, 042-868-7874, hjcho@kimm.re.kr
** 한국기계연구원, 신교통시스템그룹, 책임연구원, 042-868-7872, koojs@kimm.re.kr
*** 한국기술교육대학교, 생산공학과 교수, 공학박사, 041-560-1136, yhyoun@kut.ac.kr

2. Damage function을 적용한 KHST의 압괴특성

알루미늄 압출재의 파단 특성을 적용한 최종모델(KHST_Final)의 차체 구간별 압괴특성과 에너지 흡수능력을 KTX와 비교하면 표 1과 같다. KHST는 KTX에 비하여 전두부의 압괴하중은 낮게 설정되고 압괴 길이는 증가되어, 전체적으로는 충격력을 저감시키면서 에너지 흡수능력을 재고시킨 설계가 되었다. 알루미늄의 파단 특성을 반영한 모델(KHST_Final)의 경우는 설계 단계에서 이용한 알루미늄의 파단 특성을 고려하지 않은 모델보다도 압괴 하중이 더 낮아지는 현상을 보였다[2].

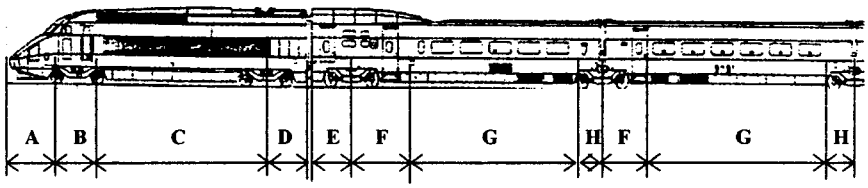

그림 1. KHST의 압괴 특성 분석을 위한 구간 개념도

표 1. KHST의 각 구간별 압괴 특성

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)	2820	6040	4500	4000	2970	6927	5673	5321
_Final	압괴가능길이(mm)	2025			2060		2762		1712

3. 1차원 충돌동역학 모델을 이용한 해석

충돌동역학 해석에 사용된 사고 시나리오는 초기 설정된 설계 가이드 라인(110kph의 속도로 15ton 장애물과 충돌, 30kph의 속도로 동일한 열차와 정면 충돌, 8kph의 속도로 동일한 열차와 정면 충돌)에 따랐으며, 해석 결과는 KTX와 비교하여 평가하였다. 본 연구의 1차원 충돌 동역학 모델은 충돌에 의한 압괴거동을 잘 표현할 수 있는 탄소성 특성의 막대 요소로 모델링 하였다. 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. 1차원 충돌 해석 모델링에 관한 상세한 개요는 참고문헌 2, 3에 설명된 것과 동일하다. 본 1차원 충돌 동역학 해석에는 프랑스 ESI사에서 개발한 PAM-CRASH 소프트웨어 시스템을 사용하였다[4].

3.1 SNCF 사고 시나리오 조건에서의 충돌 동력학 해석

SNCF 사고 시나리오(110 kph의 속도로 15 ton의 강체 장애물과 충돌) 조건하에서의 알루미늄 파단 현상을 고려한 최종모델(KHST_Final)의 충돌해석결과를 KTX와 비교하였다. 그림 2는 충돌

시 전두부(커플러 후방 에너지 흡수튜브, 헤드스톡, 하니컴 등)에 작용하는 충격력을 나타낸 것인데, 결과에서 보는 바와 같이 당초 설계에서 의도한 전두부 압괴특성을 잘 반영하고 있다. 여기서 KHST_Final은 KTX에 비해서는 전두부의 최대 충격력이 절반 수준(KHST_Final의 경우 약 5,164 kN, KTX의 경우 약 10,000 kN)으로 낮아진다.

전두부와 운전실 구조의 에너지 흡수량 및 압괴량 결과를 보면, KHST_Final은 전두부에서 약 5.4 MJ의 충격에너지를 흡수하며 운전실의 압괴는 발생하지 않으나, KTX의 경우 전두부에서 3.2 MJ, 운전실에서 2.4 MJ 정도의 에너지를 흡수하여 운전실에 압괴가 발생되는데 이는 운전자 보호 측면에서 바람직하지 못한 현상이다. 또 이때 발생하는 운전실의 충돌가속도를 살펴보면, KHST_Final은 최대 8.2 g, KTX는 약 1.5배 이상인 13 g 정도로 KHST 전두부가 KTX의 전두부보다 운전자의 2차 충돌 상해 유발 가능성에 있어서도 유리하다.

동력차 중앙부, 후미구조, 사이드 버퍼의 변형량을 살펴보면, 동력차 중앙부의 경우 KHST_Final은 20 mm 정도의 탄소성 변형이 발생하였으나, KTX에서는 60 mm 정도의 압괴가 발생하였다. 이러한 현상은 동력차의 전두부에 충돌안전도 설계로 인해 전두부외 다른 부분의 손상을 줄일 수 있음을 나타낸다. 후미구조에서는 모든 경우에 압괴가 발생하지 않았지만, 사이드 버퍼에서는 KHST_Final에서 260 mm 정도, KTX에서는 300 mm 정도의 변형으로 사이드버퍼의 최대 압괴 한계용량인 400 mm 이내에서 변형하였다. 그림 7은 첫번째 동력객차의 객실에서 발생하는 충격가속도의 결과로 KHST_Final은 약 3.6 g로 5 g의 KTX와 비슷한 결과를 나타내었으며, 결과로부터 KHST는 SNCF 사고 시나리오 조건에서 설계규정인 충돌에 의한 승객 가속도 5 g 이하의 조건을 만족한다.

3.2 30 kph 정면충돌 조건에서의 충돌 동력학 해석

30 kph 정면충돌 사고 시나리오를 적용하여 해석하면 그림 8과 같이 KHST_Final은 KTX에 비하여 최대 충격력이 절반 이하로 낮아지는 결과를 나타내고 있다. 또 KHST_Final의 경우 전두부에서 약 1,670 mm 정도 압괴변형이 발생하였으나, 운전실에는 압괴변형이 거의 발생하지 않았다. 그러나 KTX의 경우, 전두부에서 350 mm 정도, 운전실에서는 250 mm 정도의 압괴가 발생하였다. 그림 8은 운전실에서의 충격가속도를 나타낸 결과인데, KHST_Final의 경우 약 10.2 g 정도로 7.7 g가 발생한 KTX와 비교하면 약 30 % 이상 충격가속도가 증가되었다. 이것은 최종 시제품 설계 제작단계에서 에너지 흡수튜브가 당초 설계에서 제시한 사양과 다르게 제작되어서 발생하는 현상이다. 따라서 KHST_Final의 전두부는 KTX에 비교하면 운전실의 충격 가속도 측면에서 불리하므로, 에너지 흡수튜브가 후방으로 탈착될 수 있도록 하고 에너지 흡수 튜브의 평균압괴하중을 높이

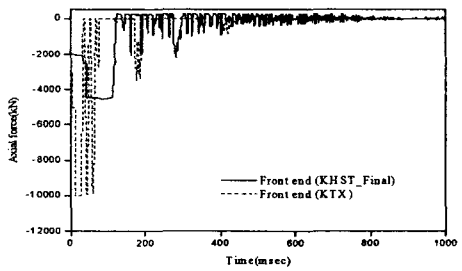

그림 2. 전두부 충격력(110 kph)

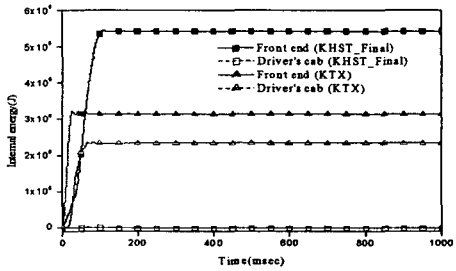

그림 3. 전두부 내부에너지(110 kph)

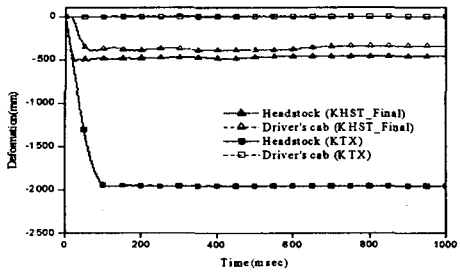

그림 4. 전두부 변형량(110 kph)

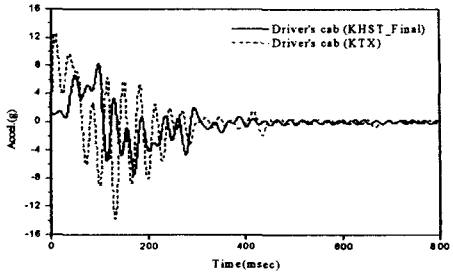

그림 5. 운전실 충돌가속도(110 kph)

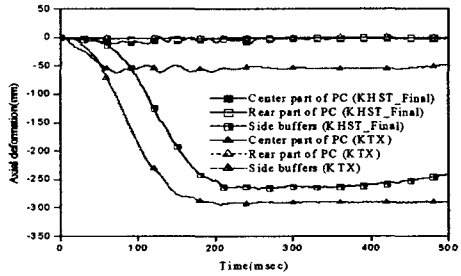

그림 6. 동력차 압괴량(110 kph)

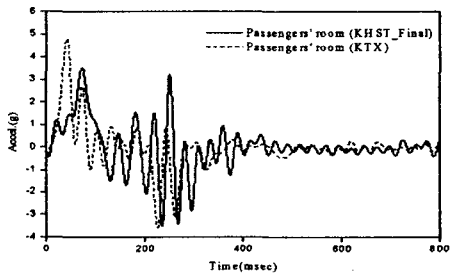

그림 7. 객실부 충돌가속도(110 kph)

는 등의 설계 개선이 필요하다.

한편, 동력객차 객실부의 압괴량을 비교하면, KHST_Final의 경우 최대 23 mm 정도의 압괴 변형이 발생하였으나, 승객의 생존 공간을 확보하지 못할 정도는 아니어서 승객의 안전에 심각한 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그러나, KTX는 3,450 mm정도의 압괴로 경우에 따라서 승객의 안전에 큰 문제를 야기할 수도 있다. 또 동력객차 객실에 발생하는 충격가속도를 살펴보면, KHST_Final은 최대 3.8 g, KTX는 최대 5.0 g로 나타났다. 결과로부터 KHST_Final와 KTX는 30 km/h의 정면충돌(60 km/h의 추돌)에서 객실의 승객 가속도가 5 g 이하인 규정을 만족한다.

3.3 8 kph 정면충돌 조건에서의 충돌 동력학 해석

KHST_Final이 경충돌 사고에서 어떠한 거동을 보이는 지를 알기 위하여 8 kph 정면충돌 사고 시나리오에 대하여 수치해석을 수행하고 KTX와 비교하였다. 충돌시 전두부와 동력차 후미구조에 발생하는 충격력을 살펴보면, KHST_Final과 KTX에서는 각각 2,600 kN 및 5,000 kN 정도의 큰 하중이 발생된다. 따라서 경충돌 사고에서도 KHST_Final과 KTX는 차량에 손상을 입게된다. KHST_Final의 경우 이러한 손상은 에너지 흡수튜브의 평균 압괴하중을 높이고, 후방으로 탈착될 수 있도록 하면 쉽게 해결된다. 또 후미구조 충격력의 경우 KHST_Final은 2,000 kN 이하이지만 KTX의 경우는 3,500 kN 정도나 된다. 따라서 KTX는 경충돌 사고에서도 차체의 후미에 손상을 입을 우려가 있으나, KHST_Final 차체의 후미가 손상되지 않는다.

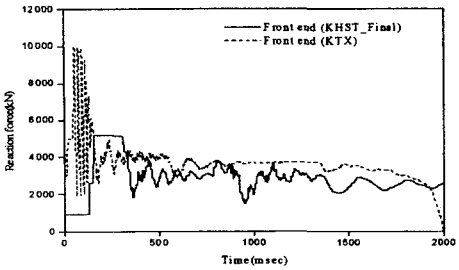

그림 8. 전두부 충격력(30 kph)

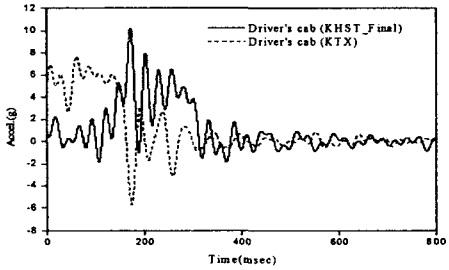

그림 9. 운전실 충돌가속도(30 kph)

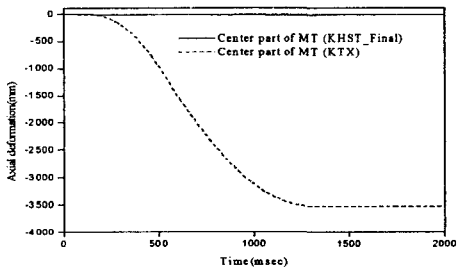

그림 10. 승객 탑승부 압괴량(30 kph)

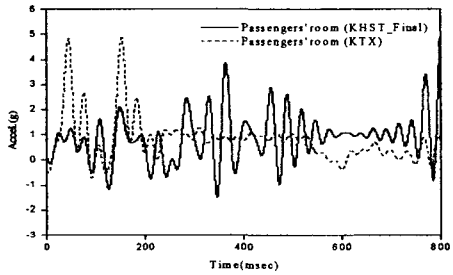

그림 11. 승객 탑승부 충돌가속도(30 kph)

한편 동력차 중앙부에 발생하는 충격가속도는 KHST_Final의 경우는 약 2.3 g 이나, KTX의 경우는 5.2 g 정도로 상당히 크다. UIC 규정에 의해 전장품 등 주요 부품들은 3 g 이하의 충격력에서 견디도록 설계되어 있으므로 KHST_Final의 경우에는 이들 부품이 손상될 우려가 없다[5].

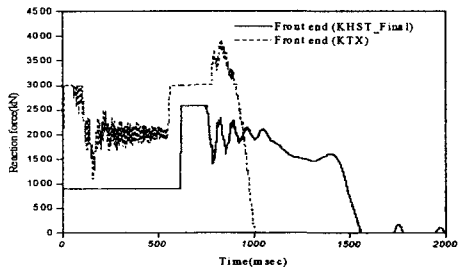

그림 12. 전두부 충격력(8 kph)

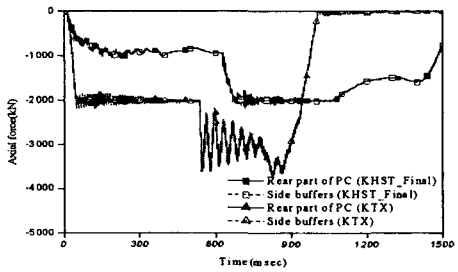

그림 13. 동력차 후미부 충격력(8 kph)

4. KHST의 충돌안전도 평가

첫 번째인 SNCF 사고 시나리오(사고 시나리오 1)에 의한 충돌 해석에서 KHST_Final의 경우 전두부만 압괴 되었으며, 운전실의 충격가속도는 최대 7 g 정도이다. 그러나 KTX의 경우에는 전두부와 운전실이 압괴 되며, 운전실의 충격 가속도도 13 g 정도로 KHST_ Final에 비해 36 % 가량 높게 나타났다.

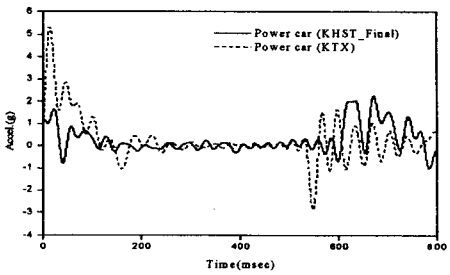

그림 14. 동력차 충돌가속도(8 kph)

두번째 30 km/h 고정벽 충돌 사고 시나리오(사고 시나리오 2)에서는 KHST_Final의 경우 차량의 전두부의 대부분이 압괴나 파손상태에 도달함에도 불구하고 운전실과 객실 부분은 거의 압괴 되지 않았다. 그러나 운전자에 전달되는 충격가속도는 10.2 g 정도로 운전자의 부상 위험이 크다. 그러나 KTX의 경우, 충격 가속도 분만 아니라 운전실과 동력객차 객실의 압괴로 인해 생존 공간 확보에 문제가 있음을 알 수 있다. 동력객차의 객실가속도는 KHST_ Final은 약 3.8 g로 초기에 설정한 최대 승객가속도 5 g보다 낮은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 승객이 2차 충돌에서 큰 부상을 당하지 않음을 나타내고 있다.

세번째인 고정벽과 8 km/h 속도로 충돌하는 경충돌 시나리오(사고 시나리오 3)를 적용한 해석에서는 탑승자의 거동보다는 차량의 물적 피해 여부를 평가하는 것이 중요하다. KHST_Final의 경우, 전두부 부품 중에서도 수리가 용이한 부품인 센터 커플러와 에너지 흡수용 튜브만 파손되고 그 외에는 손상이 없다. 특히 동력차에 탑재된 전장품에 부과되는 충격가속도도 3 g 이하이므로 전장품이 손상될 우려도 없다.

표 2. KHST와 KTX의 충돌조건에 따른 결과 비교

	시나리오 1		시나리오 2		시나리오 3	
	KHST_Final	KTX	KHST_Final	KTX	KHST_Final	KTX
차량의 최대충격력 (kN)	5164	10000	5164	10000	2600	5000
전두부 변형량(mm)	1955/압괴	500/압괴	1600/압괴	350/압괴	1080/압괴	120/압괴
운전실 변형량(mm)	4/탄성	390/압괴	4/탄성	250/압괴	2/탄성	5/탄성
동력차 차체중앙부 변형량(mm)	10/탄소성	60/압괴	44/압괴	80/압괴	5.3/탄성	55/압괴
동력객차 객실변형량(mm)	18/탄성	12/탄성	25/탄성	3450/압괴	16.6/탄성	18/탄성
사이드 버퍼 변형량(mm)	260/정상	285/정상	403/파손	404/파손	276/정상	290/정상
동력차 최대가속도(g)	8.2/운전실	13/운전실	10.2/운전실	7.7/운전실	2.2/중앙부	5.4/중앙부
동력객차 객실 최대가속도(g)	3.6	5	3.8	5	2.4	4.4
평가	운전자부상/ 승객보호	운전실 파손	운전자부상/ 승객보호	동력객차 객실파손	전두부 하부구조변형	동력차파손/ 전장품파손

5. 결 론

본 연구를 통해 KHST_Final의 충돌안전도 특성을 평가하였다. 첫 번째 사고시나리오인 15ton 장애물과 110kph로 충돌하는 사고에서는 운전실의 충격 가속도가 8.2g로 다소 크게 나왔으나 전반적인 충돌 거동은 양호한 편이었다. 두 번째 사고 시나리오인 30kph 정면 충돌 사고에서는 승객이 탑승한 객실의 압괴량이나 충격 가속도의 크기는 양호한 수준이었으나 운전실의 충격 가속도가 10.2g로 높은 편이어서 전두부 구조의 개선이 필요하였다. 마지막으로 8kph로 정면충돌하는 사고에서는 커플러 및 에너지 흡수 튜브 외에는 영구변형이 발생하지 않아야 하는데, 차량에 발생하는 충격력이 UIC 규정에서 영구변형이 유발하지 않을 한도인 2000kN을 초과하는 2600kN이었다. 두 번째 및 세 번째 사고 시나리오에서 발생하는 문제는 에너지 흡수튜브의 용량을 증대시키고, 압괴 후 후방으로 탈착되도록 구조를 개선하면 해결될 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 시제제작된 KHST_Final의 충돌안전도는 KTX와 비교하여 객실 승객의 안전도 확보 측면에서 대폭 개선된 결과를 나타내었다.

후기 : 본 연구는 2000년도 건설교통부/산업자원부/과학기술부 G7 고속전철 기술개발 사업의 일환으로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. L. T. Kisielewicz and K. Ando, Crashworthy rolling stocks, PUCA '93, pp.73~81, 1993
2. 구정서, 조현직, 김동성, 윤영한, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.217-222, 2001. 10.
3. 구정서 외 13인(2000), 설계기반기술 세부분야: 충돌안전도 해석기술 개발 5차년도 보고서,
4. ESI(2000), PAM-System Manual
5. UIC CODE 617-5 OR, Special safety regulations for the driver's cabs of tractive units, ,International Union of Railways
6. D. Tyrell etc, Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability, ASME, AMD Vo. 210/BED Vol 30, 1995