

# 1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌 안전도 평가

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

구정서\*                      조현직\*                      김동성\*                      운영한\*\*  
Koo, Jeong Seo    Cho, Hyun Jik    Kim Dong Sung    Youn, Young Han

---

### ABSTRACT

The best method to evaluate crashworthiness of a trainset as a whole is to analyse one dimensional dynamic model composed of nonlinear dampers, springs and bars, and masses. In this study, crashworthiness of KHST was evaluated by analysing a nonlinear spring/bar-damper-mass model.

The numerical results show that the KHST can easily absorb kinetic energy at lower impact force and acceleration in a heavy collision, when compared with KTX. Also, the KHST can be protected from any damage in its carbody and components except the prepared energy absorbing tube in a light collision, like a traint-to-train accident at speed under 8 kph. However, the KTX can be much damaged in the a light collision because there is no energy absorbing tube.

---

### 1. 서 론

철도차량은 자동차와 달리 여러 차량이 연결되어 있으므로, 충돌안전도 측면의 설계에서는 전체 차량의 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 충돌 안전도설계를 평가하는 방법으로 이용된다[2]. 일반적으로 철도차량의 경우 3차원 유한요소해석 모델에 사용되는 셀요소는 약 20 - 50 만개 정도로 모델 생성과 해석 측면에서의 많은 노력과 시간이 소요되므로, 전체차량을 이러한 방법으로 해석하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 각 차량의 구간별 압괴특성은 유한요소법으로 해석하고, 이를 이용하여 전체차량에 대하여 단순화하여 1차원 적 충돌 동력학 해석을 수행하는 것이 가장 현실적이다.

본 연구에서는 동력차, 동력객차 그리고 객차의 각 구간별 압괴특성과 전장품 및 대차의 집중질량을 실제차량과 유사하게 적용하여 한국형 고속전철(이하 KHST\_DT라 칭함)의 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 충돌 동력학 모델

본 연구에 이용된 KHST\_DT의 차량 편성은 그림 1에 나타내었다. 1차원 충돌 해석 모델에 이용된 각 구간별 압괴특성은 표 1과 같으며, 각 구간은 그림 2와 같다. 그림 3은 전체 차량 중 동력차 부분의 1차원 동력학 모델의 개념도를 나타낸 것이며, 그림 4와 같이 각 구간별 집중질량을 분포하였다. 이하 동력객차와 객차의 모델링도 동력차와 같은 방식으로 구간을 분할하고, 집중질량을 분포시켰다.

---

\* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

\*\* 한국기술교육대 생산공학과, 정회원

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 층들에 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 층돌 동력학 모델은 프랑스 ESI사에서 개발한 PAM-CRASH 소프트웨어를 사용하여 해석하였다[3].

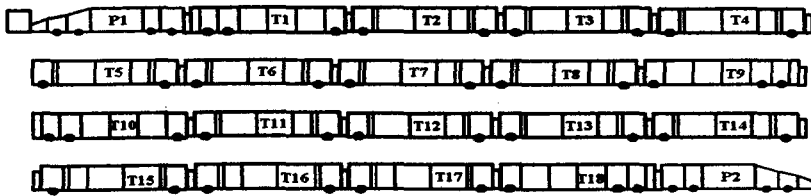


그림 1. KHST 전체 차량의 배열도

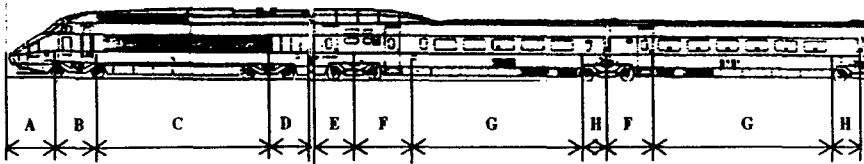


그림 2. KHST 각 차량별 압괴 구간 개념도

표 1. KHST와 KTX의 각 구간별 압괴특성

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-DT	평균압괴 하중(kN)	3260	6040	4500	4000	4291	4960	8811	5006
	압괴가능길이(mm)	2023			2060		2762		1712

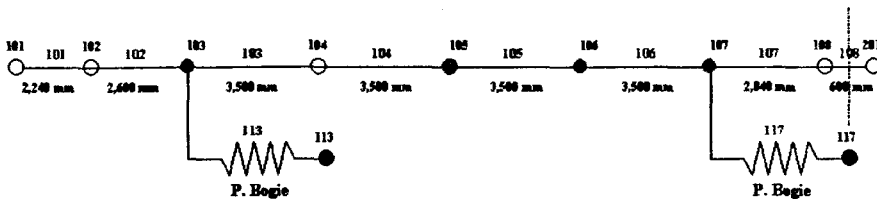


그림 3. 동력차의 1차원 층돌 동력학 모델

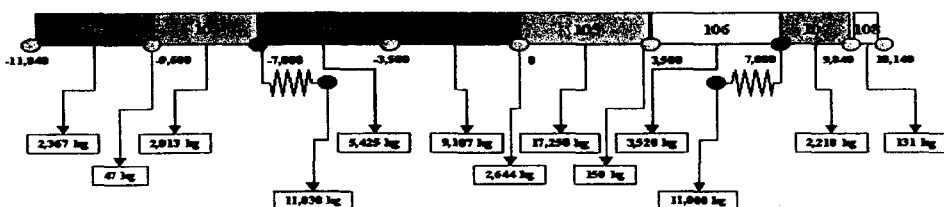


그림 4. 동력차의 집중질량 분포도

### 3. 1차원 충돌 동력학 모델을 이용한 해석

#### 3.1 SNCF 사고 시나리오 조건에서의 충돌 동력학 해석

SNCF 사고 시나리오(110 kph의 속도로 15 ton의 강체 장애물과 충돌) 조건하에서의 해석에서 KHST 전두부(커플러 후방 에너지 흡수 튜브, 헤드스톡, 하니킵)에 발생하는 충격력은 4,473 kN으로, 10,000 kN이 발생한 KTX에 비해 절반이하로 저감된다. 이는 KHST 전두부가 에너지 흡수 측면에서 KTX보다 유리하다고 평가되며, 실제로 KHST 전두부는 약 5.5 MJ의 에너지를 흡수하나, KTX는 전두부에서 3.2 MJ, 운전실에서 2.4 MJ의 에너지 흡수 형태를 나타내었다. 결과로부터 KHST는 운전자 보호측면에서 KTX보다 유리하다.

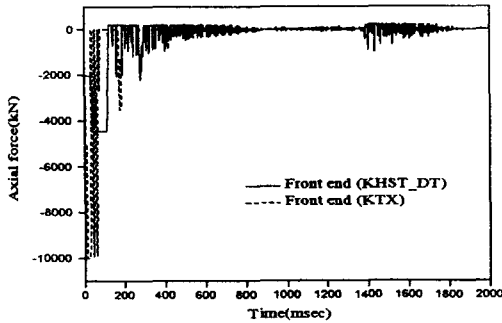


그림 6. SNCF 사고시 전두부 충격력

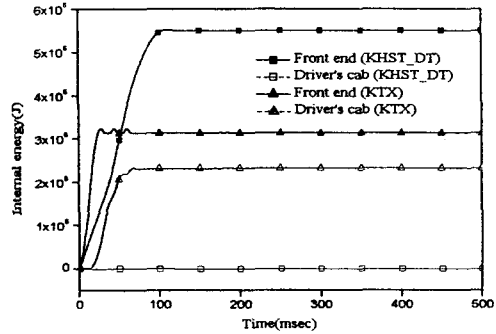


그림 7. SNCF 사고시 전두부 에너지 흡수

한편, SNCF 충돌조건에서 동력차의 운전실과 동력객차의 승객탑승부에서의 충돌가속도를 비교하면, KHST는 동력차 운전실에서 약 7g, 동력객차의 승객 탑승부에서는 약 3.5g 정도의 충돌가속도가 발생하였고, KTX는 운전실에서 13g, 승객 탑승부에서 5g 정도의 상대적으로 높은 충격가속도가 발생하였다. 결과로부터 KHST는 KTX 보다 승객의 안전도 면에서 좋은 특성을 나타내었으며, 가속도 수준은 SNCF의 충돌안전도에서 권장하고 있는 5g 이하의 가속도조건[4]을 만족시켰다.

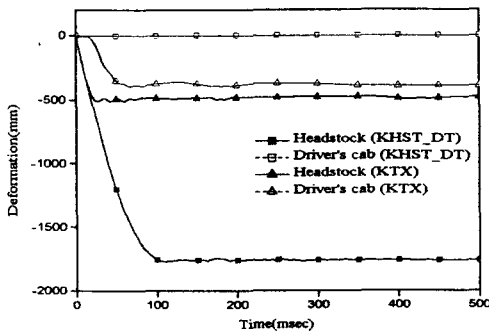


그림 8. SNCF 사고시 전두부 압괴특성

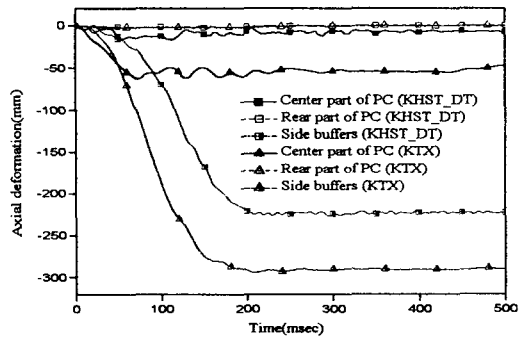


그림 9. SNCF 사고시 동력차 압괴특성

#### 3.2 30 kph 정면충돌 조건에서의 충돌 동력학 해석

30 kph 정면충돌 해석의 경우, 그림 12, 그림 13과 같이 KHST는 KTX에 비하여 최대 충격력이 절반 이하로 저감되고, 전두부에서 약 1,700 mm 정도 압괴변형이 발생하였으나, KTX와 달리 운전실은 압괴되지 않는다. 또한 운전실에서의 충격가속도는 KHST가 약 5g 정도로 KTX의 7.7g와 비교하면 약 35 % 이상 충격가속도가 저감된다. 따라서 KHST의 전두부와 운전실은 KTX에

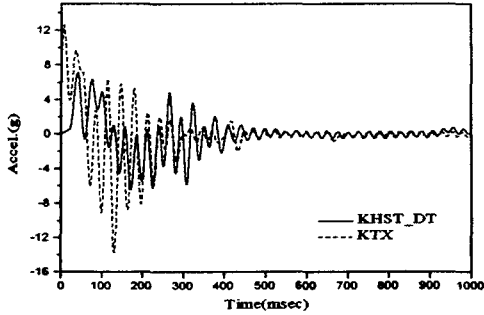


그림 10. SNCF 사고시 운전실 충돌가속도

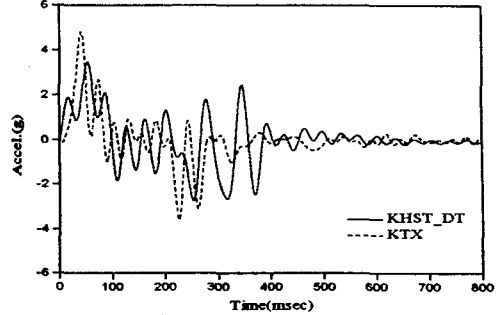


그림 11. SNCF 사고시 객실부 충돌가속도

비하여 충돌안전도 측면에서 우수하다.

한편 동력객차 객실부의 압괴량을 비교하면, KHST는 최대 35 mm 정도의 압괴변형을 일으켰으나, KTX의 경우에는 동력객차의 객실부가 3,450 mm정도 압괴되었는데, 이는 경우에 따라서 승객의 안전에 큰 문제를 야기할 수도 있다.

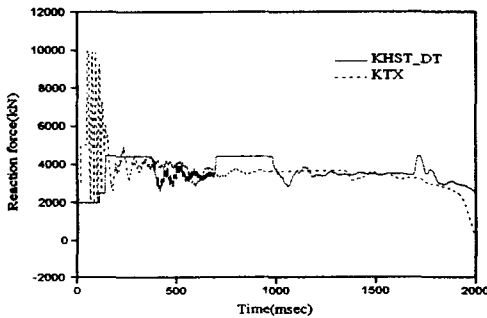


그림 12. 30 kph 충돌시 전두부 충격력

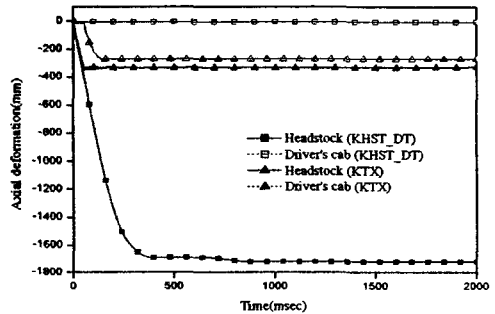


그림 13. 30 kph 충돌시 전두부 압괴량

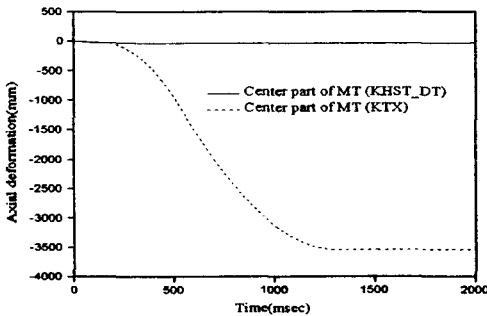


그림 14. 30 kph 충돌시 객실부 압괴량

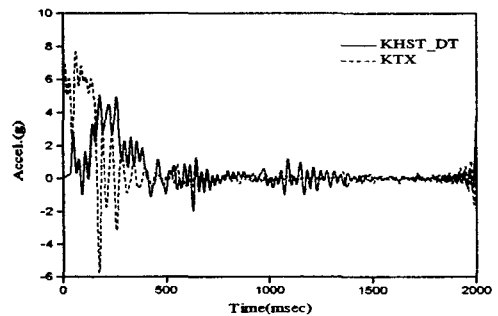


그림 15. 30 kph 충돌시 운전실 충돌가속도

동력객차 객실에 발생하는 충격가속도를 비교하면, KHST는 최대 4.5g 이고, KTX는 최대 4.8g 이었다. 이것은 KHST 설계시 피로 내구강도 보완설계 과정에서 KHST의 동력객차와 객차의 압괴강도가 KTX 경우보다도 상향 설계 된 것이 주된 원인이다.

### 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 KHST는 UIC 정격강도 제한 규정인 2,000 kN 이하이지만, KTX에서는 5,000 kN 정도의 큰 하중이 발생된다. 또, KHST의 경우 후미구조의 충격력도 2,000 kN 이하이지만 KTX의 경우는 3,500 kN 정도나 된다. 이것은 KTX는 경충돌 사고에서도 차체에 손상을 입을 우려가 있으나, KHST는 차체가 손상되지 않음을 의미한다.

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

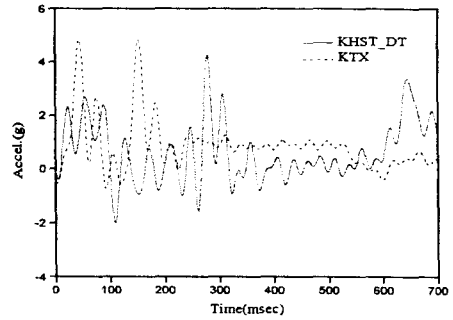


그림 16. 30 kph 충돌시 객실부 충돌가속도

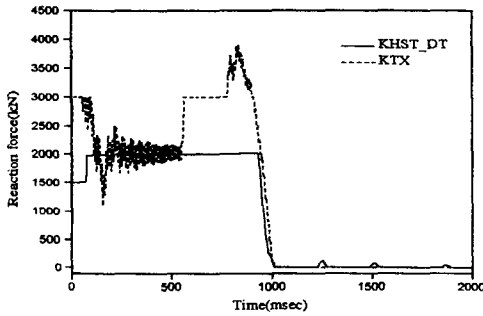


그림 17. 8 kph 충돌시 전두부 충격력

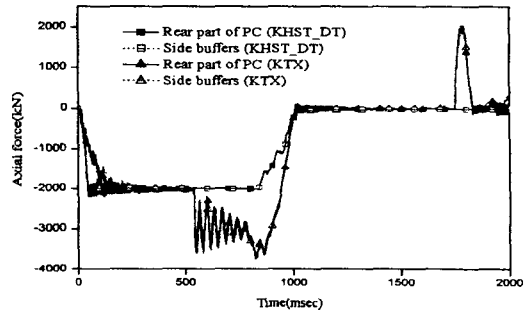


그림 19. 8 kph 충돌시 동력차 후미부 충격력

### 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 7g 정도였다. 그러나, KTX의 경우에는 전두부와 운전실이 압괴되며, 운전실의 충격 가속도도 13g 정도로 KHST에 비해 45% 가량 높게 나타났다.

두번째 30 km/h 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 5g 정도로 나타났다. 그러나 KTX의 경우, 운전실과 동력객차 객실의 압괴로 인해 생존 공간 확보에 문제가 있음을 알 수 있다. 한편, 동력객차 승객탑승부에서의 충돌가속도는 KHST(4.3g)가 KTX(5g)보다 약 20% 가량 낮은 결과를 보였다.

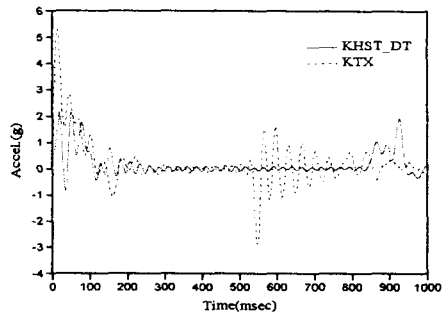


그림 18. 8 kph 충돌시 운전실 충돌가속도

세번째인 고정벽과 8 km/h 속도로 충돌하는 경충돌 시나리오(사고 시나리오 3)를 적용한 해석

에서는 탑승자의 거동보다는 차량의 물적피해 저감 여부를 평가하는 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.

표 2. KHST와 KTX의 충돌조건에 따른 결과 비교

	시나리오 1		시나리오 2		시나리오 3	
	KHST_DT	KTX	KHST_DT	KTX	KHST_DT	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 차체중앙부 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/중앙부	5.4/중앙부
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

#### 4. 결 론

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 최소화 할 수 있었다. 이러한 충돌 안전도 성능은 KTX와 비교하여도 상당히 우수한 특성이었다.

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

#### 5. 참 고 문 헌

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