

한국형 고속전철의 충돌안전도 해석 및 평가기술 개발에 관한 연구  
A study on crashworthiness analysis and evaluation of Korea High Speed Train

구 정 서\*      조 현 직\*\*      권 태 수\*\*\*  
Koo. Jeong seo    Cho. Hyun Jik    Kwon. Tae soo

Abstract

An intensive study was conducted for crashworthiness structural design of recently developed Korean High Speed Train. Two main design concepts are setup to protect the both crews and passengers from serious injury at heavy collision accidents, and to reduce damages of the train itself at light collision accidents. For occupant protection, a collision against a movable 15 tons rigid obstacle at 110 kph and a train-to-train collision at 30 kph were selected as accident scenarios for the heavy collisions based on the train accident investigations. A train-to-train collision at 8 kph was used for the light collisions.

The crashworthiness behaviors of KHST have been evaluated numerically using the finite element method. Also, one-dimensional collision analyses show good crashworthy responses in a full rake consist, and 3-dimensional shell element analyses do in the front-end structures of the power car. Occupant analyses and sled tests demonstrated that KHST performs well enough to protect occupants under the considered accident scenarios.

1. 서 론

고속전철은 현재 운용중인 타 수송수단들에 비하여 쾌적성, 신속성, 정시성, 수송효율 등에 있어서 상당히 유리한 측면이 있으나, 예기치 못한 사고가 발생할 시에는 심각한 인적, 경제적 손실을 초래할 수 있다. 이러한 유형의 대표적인 사고 사례는 1998. 6. 4 독일 Eschede에서 발생한 ICE의 탈선에 의한 충돌사고이다. 이 사고로 인하여 200명 이상의 중상자가 발생하였으며, 그 중에서 90여명이 사망하였다. 따라서, 최근 철도선진국에서는 충돌안전도 측면에서의 설계와 평가를 필수적으로 실시하도록 하여 사고 발생시 차량 및 인명 피해가 최소로 될 수 있도록 하고 있다[1][2]. 미국에서는 1999년부터 200kph 급 급행열차에 충돌안전도 설계 및 평가를 의무화하고 있으며, 유럽에서도 2004년부터 UIC 규정에 충돌안전도 설계를 의무화할 예정이다.

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 한국형 고속전철(이하 KHST라 칭함)의 충돌 및 탈선 사고에 대한 안전도를 획기적으로 제고시키기 위하여, 전두부와 차체의 충돌 에너지 흡수 설계를 실시하고, 국내 실정에 알맞은 사고 시나리오를 설정하여, 충돌안전도 설계를 수치 해석적으로 평가하였다. 먼저 전체차량에 대한 1차원 충돌동역학 모델링 기법을 개발하여 상용 충돌해석 전문 소프트웨어인 PAMCRASH를 이용하여 전체 차량의 충돌 안전도(충돌 에너지 흡수 영역 설정, 생존공간 확보, 충격력 및 충격 가속도 등)를 평가하였다. 또 전체차량에 대한 2차원 충돌동역학 모델해석 기법을 개발하여 연쇄충돌에서 발생하는 차량간 타고오름 현상, 차량간 연결구조 및 대차 연결 구조의 파손강도 등을 평가하였다[3][4]. 3차원 셸 모델을 이용한 충돌안전도 평가에는 전두부 및 차체의 에너지 흡수능력, 운전자/승객의 상해치, 차간 연결 구조의 파손 강도 등 분석하였으며[5], 평가자료를 토대로 설계 보완 및 수정 방안을 마련하는데 활용되었다. 최종적으로 기존 열차의 객차를 이용하여 실차 충돌시험을 수행하고 수치 해석의 타당성을 평가하였다.

KHST의 충돌안전도 해석 결과는 프랑스 Alstom사로부터 국내에 도입한 KTX 차량의 해석결과와 충돌안전도 측면에서 비교 평가하였다.

\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

## 2. KHST 전두부의 충돌안전도 개념설계

본 연구에서는 KHST의 충돌안전도설계를 위하여 다음과 같은 설계가이드 라인을 설정하였다.

- 110 kph 에서 15 ton 강제 장애물 충돌에서 운전실의 압피가 없고 승객 가속도가 5g 이하
- 30 kph 의 정면충돌(60 kph 추돌)에서 객실의 압피 발생이 없고 승객의 가속도가 5g 이하
- 8 kph 의 정면충돌(16 kph 추돌)에서 차체구조에 영구 변형이 발생하지 않을 것(가속도 3g 이하)
- 타고오름 및 탈선 발생의 최소화와 사고 후 승객의 탈출에 대한 고려

첫 번째 가이드라인은 프랑스 SNCF에서 사용하는 충돌설계 가이드라인이고, 두 번째 가이드라인은 경부고속전철에서 적용된 것이다. 세 번째 가이드라인은 경충돌 사고에서 차체를 보호하기 위하여 적용된 것이며, 네 번째 가이드라인은 정량적인 목표치는 설정하지 않았지만 정성적으로 열차 충돌 거동을 평가하여 차체 구조설계를 변경하지 위한 것이다.

이상의 설계 가이드 라인을 만족시키기 위하여 다양한 개념설계 분석을 한 결과, 전두부에서부터 순차적으로 압피되면서 5MJ 이상의 충격 에너지를 흡수할 수 있는 전두부를 설계하는 것이 우선 필요하였다. 이러한 분석의 결과로 그림 1, 2와 같은 구조적 특성을 가지는 전두부를 개념설계하였다. 여기서 그림 2에 나타낸 면적 I은 커플러에서, II는 Energy absorber에서, III은 헤드스톡에서, 그리고 IV는 헤드스톡 위에 설치된 알루미늄 하니컴에서 흡수하는 에너지 흡수량을 나타낸다.

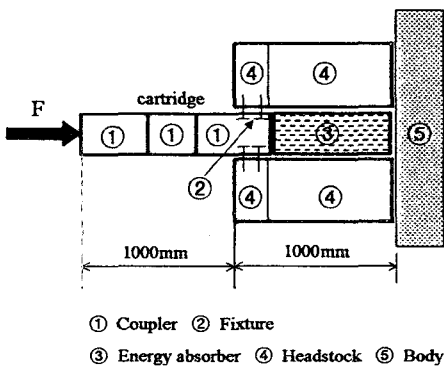


그림 1. 전두부 에너지 흡수구조 개념도

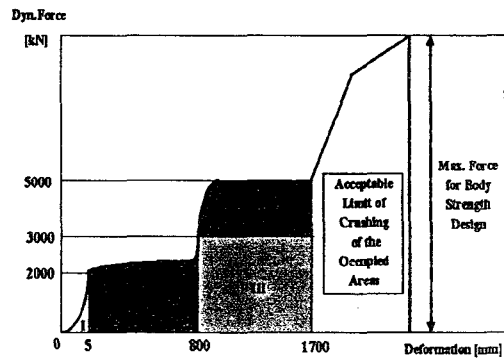


그림 2. 전두부 에너지 흡수특성

## 3. 동력차 충돌안전도 분석

### 3.1 전두부 에너지 흡수구조의 상세설계

그림 1과 같이 도출된 개념설계를 수 차례의 시행착오를 거쳐서 그림 3과 같은 상세설계를 도출하였다. 상세설계 과정에서 에너지 흡수 튜브, 헤드스톡, 알루미늄 하니컴 등 개별 구조 부품에 대하여 충돌해석을 수행하여 압피 특성을 구하였는데, 이들을 단순화하여 나타낸 에너지 흡수 특성 곡선은 그림 3과 같다. KTX의 경우에도 구조 부품별 충돌 해석을 수행하여 전두부의 압피 특성을 나타내면 그림 4와 같다.

### 3.2 전두부 충돌특성 분석

동력차의 전두부 에너지 흡수구조가 충격에 의하여 순차적으로 압피되면서 에너지를 흡수하는 특성을 분석하기 위해 110 kph 속도로 정지상태의 15 ton 장애물과 충돌해석을 수행하였다. 해석

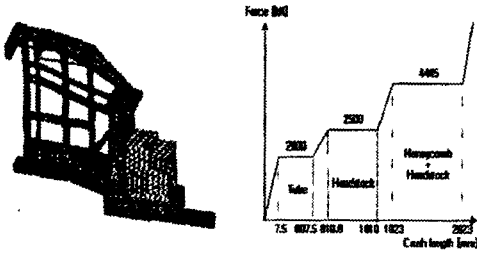


그림 3. 에너지 흡수구조 상세 설계(KHST)

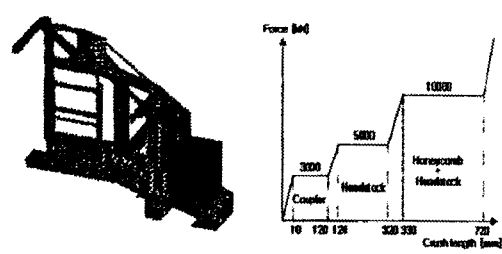


그림 4. 에너지 흡수구조 상세 설계(KTX)

결과 충돌 후의 KHST 전두부 구조의 압괴 모드는 KTX의 전두부 구조에 비해 순차적으로 압괴되었으며, 운전자의 생존공간 확보 면에서도 유리한 결과를 나타내었다. 그림 7은 전두부 에너지 흡수특성과 초기 붕괴하중 결과곡선을 나타낸 것인데, KTX는 초기붕괴 하중이 16,000 kN 정도로 매우 높고, 평균하중은 2,204 kN으로 낮아서 충격에너지 흡수에 불리하다. 그러나, KHST는 평균압괴 하중이 3,016 kN 정도로 상대적으로 높으며, 초기 헤드스톡의 붕괴하중은 7,000 kN 정도로 낮아서 충격력을 흡수하는데 매우 유리하다.

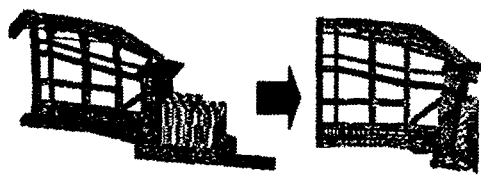


그림 5. KHST의 전두부 압괴모드



그림 6. KTX의 전두부 압괴모드

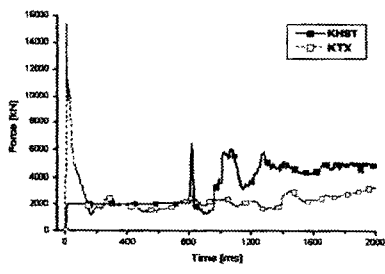
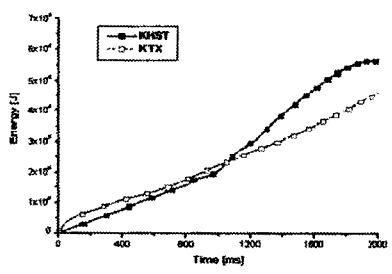


그림 7. 에너지 흡수와 붕괴하중 결과 곡선(110 kph)

### 3.3 운전자 상해치 예측평가

건널목 충돌 사고시 운전자가 받게 되는 충격의 분석을 위해 동력차의 운전실에 인체모형 (dummy)을 탑재하고, 110 kph로 정지상태의 15 ton 장애물과 충돌하는 사고 시나리오를 적용하여 충돌해석을 수행하였다. KHST는 철도차량의 설계에서 요구하는 상해치 기준 값에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 운전자의 충돌에 의한 거동은 그림 8에 나타내었으며, 각 부위별 상해치 데이터 결과는 표 1과 같다.

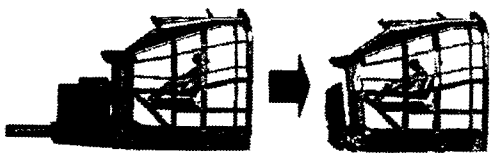


그림 8. 충돌직후 운전자 거동(KHST)

표 1. 운전자 상해치 평가(110kph)

	HIC	Chest [g]	Femur [kN]	평가
자동차 기준	1000	60.0	10.0	안전법규
철도차량 기준	500	30.0	5.0	권장사항
KHST 상해치	101.5	22.0	4.0	안전도확보

#### 4 동력차 충돌특성 분석

전널목에서 트럭과 충돌하는 실제 상황을 가정하여 동력차의 충돌특성을 분석하기 위해 앞에서 도출된 전두부 에너지 흡수 구조를 반영하여 3차원 동력차모델을 생성하였으며, 110 kph의 속도로 15 ton 트럭과 측면충돌 및 off-set 충돌조건에 대한 해석을 수행하였다. 측면 충돌조건 시 해석결과는 그림 9와 같고, Off-set 충돌조건 시 해석결과는 그림 10과 같으며, 변형형상은 설계에서 의도한 전두부 압괴특성과 유사하며, 운전실이 침범되는 현상은 발생하지 않았다.

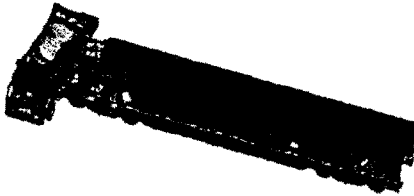


그림 9. 정면충돌 시 동력차 압괴형상

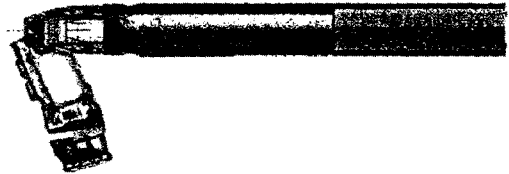


그림 10. Offset 충돌사고 시 동력차 압괴형상

#### 4. 연쇄충돌에 의한 연결부의 충돌안전도 해석

당초 설계에서 의도한 대로 에너지 흡수튜브, 하니킴, 헤드스톡이 순차적으로 압괴 되고 차량간 연결부 구조에 파손이 발생하는지를 평가하기 위해 동력차, 동력객차, 그리고 객차로 편성한 모델을 이용하여 차량간의 연쇄충돌해석을 수행하였다. 충돌조건은 다음과 같은 두 가지 사고 시나리오를 적용하였다.

- Scenario 1. 110 kph 속도로 정지상태의 15 ton 장애물과 충돌
- Scenario 2. 30 kph의 속도로 고정벽에 정면충돌

해석결과 모든 충돌조건에서 연결기의 최대 상대 변형도가 6 % 이하 수준 이었으며, 연결부 구조에서 파손은 발생하지 않았다. 그림 11과 그림 12는 연쇄충돌에 의한 연결부의 해석결과 이다.

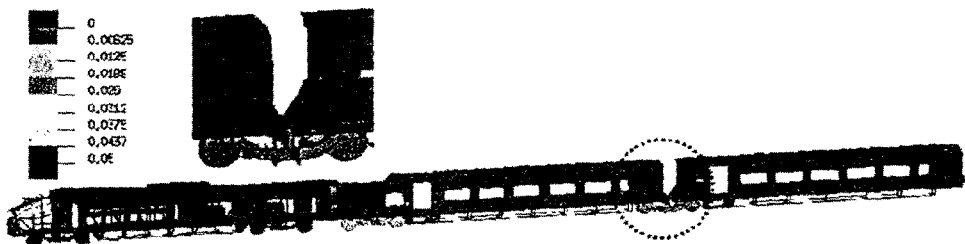


그림 11. KHST 차량간 연결부의 소성변형도(110 kph)

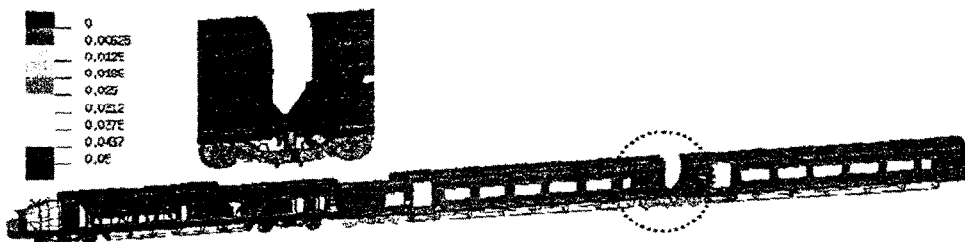


그림 12. KHST 차량간 연결부의 소성변형도(30 kph)

## 5. 전체 차량의 충돌 동력학 해석

### 5.1 1차원 동력학 모델을 이용한 충돌안전도 해석

KHST의 3차원 쉘 모델을 이용하여 구간별 하중-변위 데이터를 구하고, 각 구간별로 전장품 및 대차의 질량데이터를 실제차량과 가깝게 분포시켜 총 20량 편성의 1차원 충돌동력학 모델을 생성하였다. 본 모델을 이용하여 설정한 사고 시나리오별 충돌해석을 수행한 결과로부터 설계 가이드라인을 만족시키는지 여부를 평가하였다.

충돌특성 분석을 위한 사고 시나리오는 표 3과 같이 설정하였으며, 해석결과 KHST는 전반적으로 충돌안전도와 승객안전도 측면에서 KTX보다 우수한 성능을 나타내었으며, 운전자 보호측면에서도 유리하다.

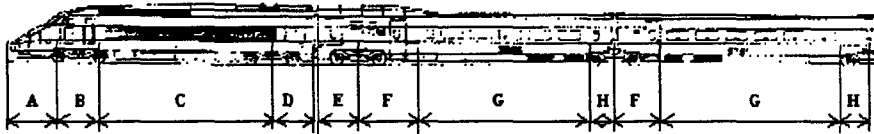


그림 13. KHST의 압괴특성 구간 설정 개념도

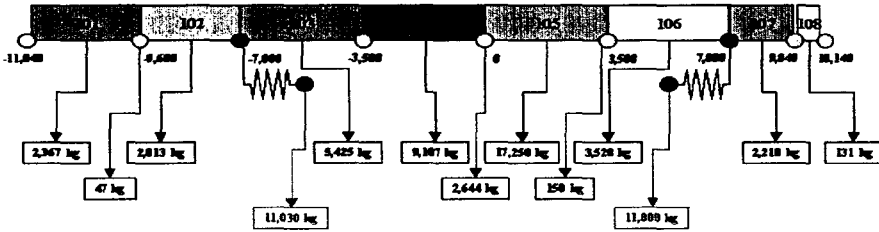


그림 14. 동력차의 질량분포 예

표 2. KHST의 각 구간별 평균 압괴하중

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

표 3. 전체차량 충돌해석을 위한 사고 시나리오

Scenario No	충돌 조건
Scenario 1	110 kph의 속도로 15 ton의 강체 장애물과 충돌(SNCF 사고 시나리오)
Scenario 2	30 kph의 속도로 동일한 차량과 정면충돌
Scenario 3	8 kph의 속도로 동일한 차량과 정면충돌

### 5.2 2차원 동력학 모델을 이용한 충돌안전도 분석

1차원 해석은 전체적인 충돌안전도 설계 사양 만족 여부의 평가에 적합하지만, 실제 충돌에서 발생하는 각 단위 차량간의 타고오름 현상과 각 차량의 차간 연결기 부품 및 지지 구조에서 발생하는 충격력의 크기는 표현 할 수 없다. 이러한 현상을 분석하기 위해 전체차량 편성에 대한 2차원 충돌동력학 모델을 생성하였으며, 마찬가지로 KTX와 비교평가 하였다.

표 4. 사고 시나리오에 대한 해석결과

	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 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	운전실파손	운전자/ 승객보호	동력객차 객실파손	커플러/후방 튜브만 파손	동력차파손/ 전장품파손

사고 시나리오는 110 kph의 속도로 15 ton 강제 장애물과 정면충돌하는 조건이며, 해석결과 동력차와 객차 사이에서 완충역할을 담당하는 사이드버퍼의 수직 변위는 KTX와 비슷한 결과(그림 15)를 나타내었으나, 대차와 차체의 주 연결부품인 ball & socket joint의 충격력(그림 16)은 KHST가 KTX에 비해 약 500 kN 정도 낮은 결과를 나타냈다.

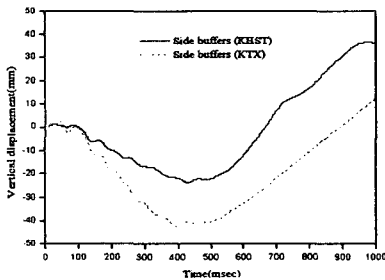


그림 15. 사이드버퍼의 수직변위

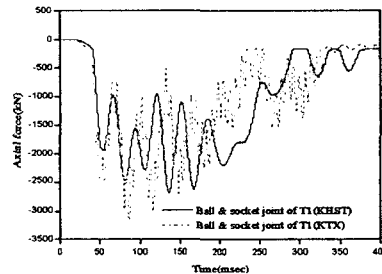


그림 16. ball & socket joint의 충격력

## 6. Sled를 이용한 승객 안전도 평가

승객안전도에 대한 평가는 소프트웨어를 이용한 기법으로 손쉽게 이루어질 수 있으나, 실제로 충돌사고 직후 불확실한 요인들에 의한 승객상해를 예측하는 것은 불가능하다. 따라서 인체모형을 이용한 충돌도미 실험(Sled test)을 통한 승객 상해치 평가는 좀더 구체적이고 현실적인 대안이다. 그림 17은 승객 상해치 평가를 위해 사용된 HYG E Sled test 시험장비와 모식도를 나타낸 것이다.

시험 조건은 1차원 충돌 동력학 모델을 이용하여 얻은 승객 탑승부의 충돌가속도 데이터를 근거로 결정하였으며, 시험결과 목부위의 상해치가 각 조건에 대한 상해치 결과는 표 5와 같다.

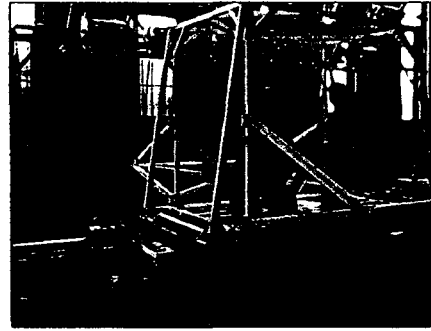
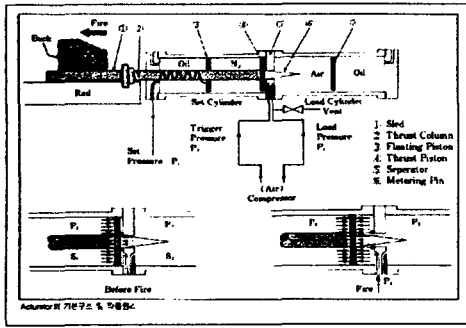


그림 17. Sled 시험장비 및 모식도

표 5. Sled 시험결과 (250ms의 삼각파형, Hybrid III(50%), KTX 1 등석 의자 적용 시험)

상해치 시험조건	HIC	Chest [g]	Femur [kN]	Neck	평가
3.2 g	58.8	9.7	4.3	0.89	목 상해치가 다소 높음(KHST의 승객가속도 3.8g와 유사한 조건)
5 g	80.9	11.8	4.7	1.02	목 상해치 중상수준(승객의 제한가속도인 5g 조건)
8 g	96.2	12.24	5.4	0.41	대퇴부 중상/시트 파손(FRA 조건)
자동차범규	1000.0	60.0	10.0	1.0	중상 이상 수준(사망 약 20% 추정)
철도권장기준	500.0	30.0	5.0	-	철도차량 특성상 보수적인 규정

## 7. 결론

한국형 고속철도의 충돌안전도 및 평가기술 개발 연구를 통하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

- 고속전철의 동력차는 15ton 장애물과 110kph 충돌 및 고정벽과 30kph 충돌 사고 시나리오에서 운전실에 압피가 발생하지 않았다.
- 동력차-동력객차-객차의 연쇄 충돌해석에서는 연결부위의 변형도가 6% 이하로 나타나므로 파손의 가능성이 낮은 것으로 판단된다.
- 1차원 충돌해석 결과, KHST는 운전자 보호 및 승객안전도 측면에서 KTX 보다 유리한 결과를 얻었으며, 전장품 및 각종 기기의 보호측면에서도 유리하다.
- 2차원 동력학 해석을 통하여 주요 연결 구조부품의 충격력을 평가한 결과, KHST는 KTX에 있는 pins, finger, hook과 같은 링 구조 연결 요소들을 없애고 일체화한 것이 타고오름 현상이나 충격력 저감에 이로운 역할을 한다.
- Sled test를 통하여 승객의 상해치를 평가한 결과, 5 g의 시험조건에서는 목 부위에 상해가 발생하였고, 8 g의 시험조건에서는 대퇴부에 높은 상해치를 나타내었다.

## 참고문헌

1. E. J. Lombard, "Amtrak's high speed trainset program", 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp.1-7, 1995.
2. L. M. Cleon, J. Legait, and D. Leveque, "Passive safety concepts applied to TER X7250 Diesel railcar", WCRR Vol. D, pp.861-867, 1997
3. A. Marissal, B. Marguet, P. Drazetic, and Y. Ravalard, "Crash Behavior of Guided Vehicle",

GEC Alstom Technical Review No. 9, 1992

4. Tokio Ohnishi, Koji Wada, Mitsuji Yoshino, and Sano, "Crashworthiness of Taipei Electric Multiple Unit Train", 川崎重工技報 111号, 1991. 10

5. B. Marguet, J. C. Dumas, "Crashworthiness of Double Level Rolling Stocks"