

# 충돌사고 유형에 따른 KHST의 승객거동에 관한 연구

## A Study of Occupant Responses in KHST Crashworthiness

윤영한\*                      구정서\*\*  
Youn, Young-Han              Koo, Jeong-Seo

### ABSTRACT

Safety of passengers in the Korean High Speed Train, KHST, was evaluated under the different accident scenarios. Preliminary occupant analysis has been performed based on the TGV-K train seat characteristics. The influence of the vehicle deceleration and passenger type, seating positions, effectiveness of compartmentalization have been evaluated in terms of occupant injury criteria. This study is the final result of the occupant analysis of KHST project at 1st stage 3rd year.

### 1. 서 론

고속전철은 21세기의 새로운 교통수단으로 한국을 비롯한 몇몇 선진국에서 국가의 주요 전략사업으로 추진중이다. 열차는 자동차에 비해 사고 발생 빈도수가 적지만 피해의 정도는 더 클 수가 있다. 특히 고속전철의 경우 고속의 속도가 가미된 사고는 항공기의 사고와 같이 대형참사로 이어질 가능성 때문에 최근 선진국에서는 고속전철의 설계단계에서부터 충돌에너지를 각 차량의 부분들이 흡수하여 승객이 타고 있는 객실 부분은 안전하도록 설계를 하고 있다. 그러나 국·내외를 막론하고 아직까지 열차의 승객이 외부의 충돌 사고로 인하여 객실내부와 충돌하는 2차 충돌에 대한 보호 규정이 거의 전무한 상태이다. 국내에서는 최근까지 열차의 충돌관련 안전도에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않았으나 G7과제로 한국형 고속전철(KHST) 사업이 시작되면서 열차의 충돌 안전성이 연구되고 있다. 고속전철의 충돌설계 및 승객 보호 기술개발은 향후 가장 빈번하게 일어날 것으로 예상되는 사고 시나리오의 설정으로 시작된다. 설정된 사고 시나리오 하에서 전량 편성 열차의 동력학적 거동, 각 차량의 충돌강성 및 붕괴특성 등과 승객이 탑승하고 있는 객실공간의 내부구조 등에 대해 최대한으로 승객을 보호할 수 있는 설계 및 해석기술의 확보를 그 목표로 삼고 있다.

현재 고속전철 충돌 안전도연구에서 설정한 시나리오는 1)열차가 110km/h의 속도로 15톤의 움직일 수 있는 물체(예를 들면 화물차와 건널목에서의 충돌사고 등)와 충돌하는 경우를 시나리오1로 선정하였고 2) 동급 열차가 서로 30kph의 속도로 정면 충돌사고를 가상하여 30kph로 고정 벽에 충돌하는 경우를 시나리오2로 정하였다. 또한 승객거동을 위해서는 열차의 객실이 5g를 경험하는 충돌 시나리오3을 추가로 설정하여 열차의 여러 가지 감가속도에 대한 승객의 거동을 연구하였다.

본 논문은 한국형 고속전철 개발 사업의 1단계 3차 연도 충돌안전도 해석기술 개발 과제중 승객거동해석에 대한 연구결과로 각각의 시나리오에 대한 객실에 탑승하고 있는 승객에 대해 기도입된 TGV-K와 개발목표인 KHST의 상해치를 비교한 것으로 한국형 고속전철의 안전도를 승객의 상해치라는 관점에서 확보하고자한 것이다.

\* 한국기술교육대학교 교수, 정회원

\*\* 한국기계연구원, 정회원

## 2. TGV-K와 KHST의 승객 안전도 해석

### 2.1 충돌 시나리오1에 대한 상해치 비교

TGV-K와 KHST 모두 고속전철이 110 kph의 속도로 15톤 강체 장애물과 충돌하는 사고 시나리오이다. 충돌시 동력차의 전두부 등에서 많은 충격 에너지를 흡수하여 실제로 객실내 좌석에 앉아 있는 승객에게 미치는 상해치는 극히 미미하다고 판단된다. 동력차의 다음 편성에 연결된 동력 객차인 T1과 승객이 탑승하는 마지막 편성 열차인 T18 모두 승객은 앞좌석과는 직접적인 접촉이 없다(그림1과 그림2 참조). 그러므로 인체의 상해치를 규정하는 HIC, Chest 가속도, Chest 압착량 그리고 Femur에 걸리는 하중 모두 안전 영역 내에 충분히 들어가며 통계학적으로 승객이 상해를 입을 가능성은 1% 미만이다. 시나리오1에 대한 TGV-K와 KHST에 대한 상해치는 도표1에 나타나 있다.

도표1. 시나리오1에 대한 TGV-K와 KHST에 대한 상해치

시나리오	상해치	TGV-K	KHST
T1 Passenger	HIC	0.1	0.1
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	14	15.8
	Chest (mm)	0.25	0.239
	Femur (N)	213	261
T18 Passenger	HIC	0.2	0.1
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	27.6	12.9
	Chest (mm)	0.45	0.2
	Femur (N)	315	218

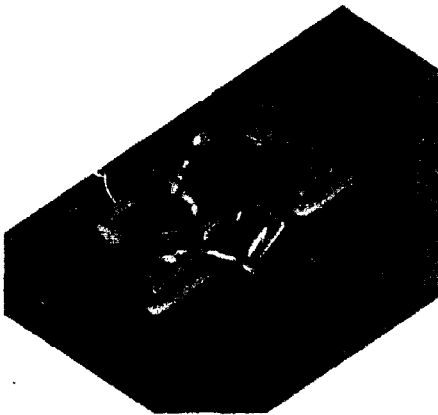


그림1. TGV-K의 T1 동력객차의 승객거동

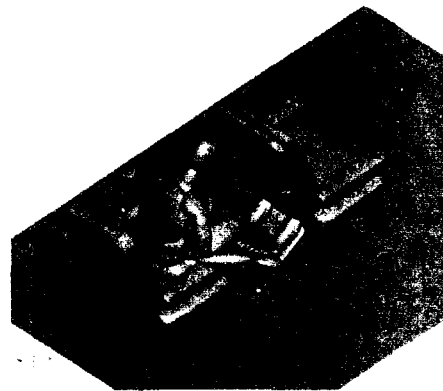


그림2. KHST의 T1 동력객차의 승객거동

### 2.2 충돌 시나리오2에 대한 상해치 비교

두 번째의 충돌 시나리오는 30kph의 속도로 고정벽에 정면 충돌하는 사고를 가정한 것이다. TGV-K와는 달리 KHST의 경우는 충돌 안전도를 고려하여 동력차의 전두부의 충돌 에너지 흡수력을 향상시킬 목적으로 설계 개선을 시도하였다. 동력차의 전두부는 Coupler와 연결되어 충돌 시 압축되면서 에너지를 흡수할 수 있는 Tube와 알루미늄 하니콤을 사용하여 운전자 쪽으로의 침입을 방지하고 모든 에너지를 동력차와 동력 객차가 흡수할 수 있도록 충돌을 고려한 설계가 시도

된 것이다. 또한 승객을 외부로부터의 충격에 대해 보호하는 개념으로 전방 도어구조와 후방 도어 구조는 crush zone으로서 각각 2600kN과 4600kN, 승객 생존 공간에서는 6100kN의 외력에 견디도록 하고 있다.

도표2. 시나리오2에 대한 TGV-K와 KHST에 대한 상해치

시나리오 2	상해치	TGV-K	KHST
T1 Passenger	HIC	32.5	143.6
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	125.6	128.7
	Chest (mm)	1.39	2.04
	Femur (N)	2312	4111
T2 Passenger	HIC	0.2	82
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	12.9	123.8
	Chest (mm)	0.29	1.84
	Femur (N)	294	3449
T9 Passenger	HIC	2.3	0.1
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	31.3	12.9
	Chest (mm)	0.44	0.23
	Femur (N)	730	256
T18 Passenger	HIC	245	6.3
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	115.1	57.1
	Chest (mm)	2.0	0.73
	Femur (N)	3510	1370

TGV-K의 경우 T1차량의 객실의 승객 상해치는 HIC가 245, Chest 가속도가 115m/sec<sup>2</sup>, Femur 하중이 3510N인데 비해 KHST의 차량의 T1 객실의 승객의 경우 HIC가 143.6, Chest 가속도가 128.7m/sec<sup>2</sup> 그리고 Femur 하중이 가장 크게 나타나서 4111N이다. T2 객실의 승객이 경험하는 HIC는 82, Chest 가속도가 123.8m/sec<sup>2</sup> 그리고 Femur 하중이 3449N이다. 그러나, T18 객실의 승객은 상해치가 거의 없다. TGV-K와 KHST 모두 인체의 상해치를 규정하는 HIC, Chest 가속도, Chest 압착량은 안전하며 단지 Femur에 걸리는 하중은 4111N 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 시나리오2에 대한 TGV-K와 KHST에 대한 상해치는 도표2에 나타나 있다. 그림3과 4는 시나리오2에서의 승객거동 모습을 보여준다.

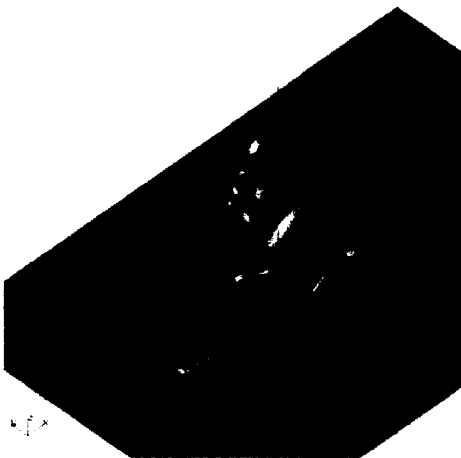


그림3. TGV-K의 T1 동력객차의 승객거동

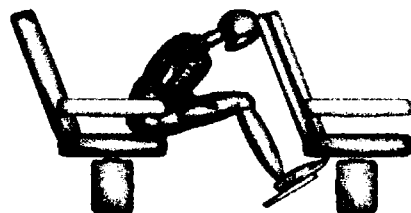


그림4. KHST의 T1 동력객차의 승객거동

또한 객실의 위치에 따른 승객의 상해도는 아래의 도표3과 같이 나타나 있다. 동력객차와 가까이 위치한 동력객차에 탑승한 승객인 T1의 경우가 상대적으로 뒤쪽으로 탑승한 승객보다 상해치가 높게 나타난다. 이는 고속전철이 충돌시 대부분의 충돌 에너지를 전두부를 포함한 동력객차가 흡수하기에 뒤쪽의 객차에는 큰 영향이 없음을 보여 준다.

도표3. 시나리오2에서 객실의 위치에 따른 KHST의 상해치

상해치	T1	T2	T9	T18
HIC	143.6	82	0.1	6.3
Chest (m/sec <sup>2</sup> )	128.7	123.8	12.9	57.1
Chest Def (mm)	2.04	1.84	0.23	0.73
Femur (N)	4111	3449	256	1370

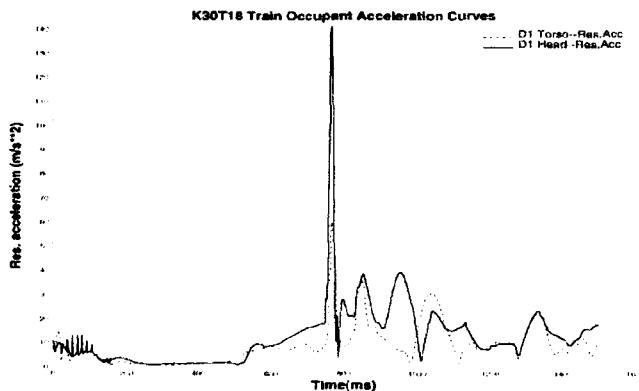
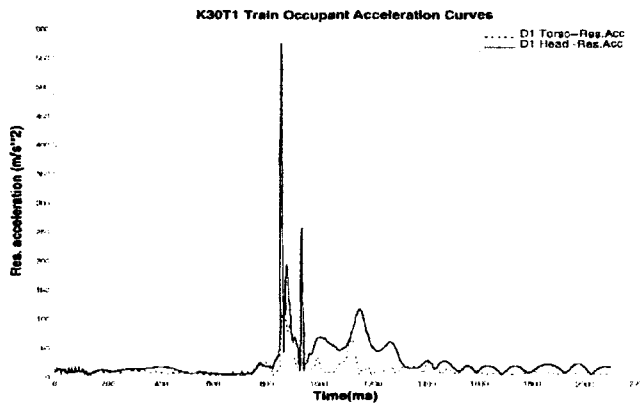


그림 5. 객실의 위치 (T1, T18)에 따른 승객의 Head, Chest의 가속도

### 2.3 충돌속도의 차이에 의한 KHST 승객안전도 해석

#### 가) 시나리오1에서 장애물의 크기 및 충돌속도 변화에 대한 영향

KHST에 대한 분석의 방편으로 장애물과 충돌하는 경우 2가지의 경우에 대하여 승객 안전도 해석을 수행하였다. 첫 번째는 110Km/h의 동일한 충돌속도를 유지하면서 강체 장애물의 크기가 15톤에서 80톤으로 증가 시 객실의 감가속도 파형의 변화 및 승객 상해치를 비교하여 보았다. 이때, 승객의 상해치는 15톤의 경우와 비교 시 HIC 등은 차이가 없었다. 그러므로 장애물의 크기와는 큰 관계가 없음을 알 수 있었다.

또한 미국 등에서 FRA법규로 시행되고 있는 건널목에서 제한 최고속도인 177km/h를 이용하여 110km/h의 열차 충돌 속도 대신 177km/h로 충돌속도가 증가할 때 그 영향에 대한 해석을 수행하였다. 승객의 상해치는 HIC의 경우 0.1에서 21.3으로 Chest 가속도는 14에서 68.2로 Femur 하중은 213N에서 936N으로 증가하나 역시 상해치에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

#### 나) 시나리오2에서 열차 충돌속도의 변화에 대한 영향

상대적으로 상해치가 크게 나타나는 시나리오2의 경우에 대하여 고정 벽에 충돌하는 속도를 증가 시 승객의 상해치에 미치는 영향을 분석하여 보았다. 시나리오2의 기준이 되는 30km/h의 충돌속도를 35km/h와 50km/h로 증가할 경우를 해석하였다. 고정 벽에 충돌하는 속도를 5km/h만 증가시키면 HIC는 상대적으로 큰 변화가 있음을 알 수 있다. 50km/h의 충돌속도에서는 HIC는 35km/h 보다 작게 나타나는데 이는 충격이 Femur의 하중 증가로 나타났기 때문이다. 50km/h의 경우 Femur의 하중은 6700N으로 아주 크게 나타남을 보여준다 (도표 4 참조).

도표4. 시나리오2에서 충돌 속도 증가에 따른 KHST에 대한 상해치

KHST	상해치	30Km/h	35Km/h	50Km/h
T1	HIC	143.6	826.1	238.7
	Chest (m/sec <sup>2</sup> )	128.7	230	223.9
	Chest (mm)	2.04	2.87	3.37
	Femur (N)	4111	4129	6669

### 2.4 KHST의 객실이 감가속도 5g를 경험하는 충돌 시나리오

사고 시나리오3에 대한 승객 상해치 해석의 예측이다. 시나리오3은 최소 가속도를 5g로 규정하면서 승객이 접근할 수 있는 위치에 대하여서는 안전계수를 2.0까지 요구하고 있다. 즉 10g까지 견딜 수 있어야 한다. 만약 차체가 5g 감가속도를 받는다고 할 때, 승객은 머리의 크기를 고려하면 좌석의 등받이에서 앞좌석의 등받이까지 약 730mm정도 떨어져있다. 승객이 앞좌석의 등받이와 부딪칠 때의 속도는 27km/h로 예측된다. 차량의 감가속도의 크기는 비록 5g이지만 시나리오 1, 2와 비교시 서로 비슷하나 감가속도가 지속되는 시간이 상대적으로 길게 나는 특징이 있다.

시나리오1, 2에서는 감가속도 지속기간이 길어야 0.1초이지만 이 경우는 5g의 최고치가 0.125초에서 발생하고 0.25초에서 영으로 되는 삼각형 형태의 파형이다. 이를 MADYMO를 이용하여 상해치를 해석한 결과를 KHST의 시나리오2와 비교하면 도표5와 같다. 시나리오3에서는 상해치중 특히 HIC가 크게 나타남을 알 수 있다. T1의 경우 시나리오2에 의한 HIC는 약 128정도이나 시나리오3의 경우 602로 나타나고 또한 Femur의 하중 또한 5113N으로 시나리오2의 4111N보다 크게 나타난다. 이는 비록 가속도 크기는 같지만 가속도가 지속되는 시간이 길수록 상해치의 변화가 큼

을 알 수 있다.

도표5. T1객실의 시나리오2와 시나리오3의 KHST 상해치 비교

KHST	상해치	시나리오2	시나리오3
T1 Passenger	HIC	143.6	602
	Chest (m/sec <sup>4</sup> )	128.7	208.7
	Chest (mm)	2.04	2.92
	Femur (N)	4111	5113

### 2.5 승객의 종류 및 크기에 따른 KHST 승객안전도 해석

TGV-K와 KHST에 대한 승객 안전도 연구는 50th percentile male Hybrid III dummy에 대하여 해석을 수행하였다. 그러나 열차에 탑승하는 승객은 전체 국민이 다 이용하는 대중 교통 수단 이므로 다양한 체격의 승객에 대한 안전 또한 고려가 되어야 할 것이다. 본 연구에서는 여자승객 인 5th percentile female Hybrid III 와 95th percentile male Hybrid III 그리고 어린이 더미를 이용하여 이들의 상해치를 분석하였다. 모델링에 사용된 사고 시나리오는 가장 치명적인 상해를 입히는 시나리오3의 감가속도 파형을 중심으로 해석을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다. 여자승객의 경우가 상대적으로 가장 큰 상해를 입는 것으로 분석되었다. 특히 HIC는 877로 아주 높게 나타났고 Femur 하중 또한 4310.9N으로 크게 나타났다. Femur하중이 가장 높게 나타난 승객은 95th percentile male로 약 5260N의 하중이 각각의 대퇴부에 작용됨을 알 수 있었다. 특히 어린이와 95th% 성인의 경우 Chest의 압착량이 표준성인 남녀와 비교 시 상당히 큰 값으로 나타남을 알 수 있다.

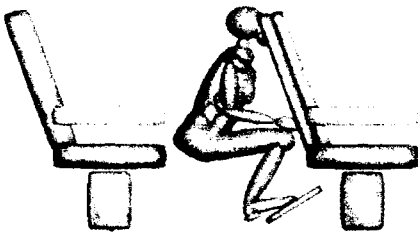


그림6. 5% 여자 승객 Dummy의 거동

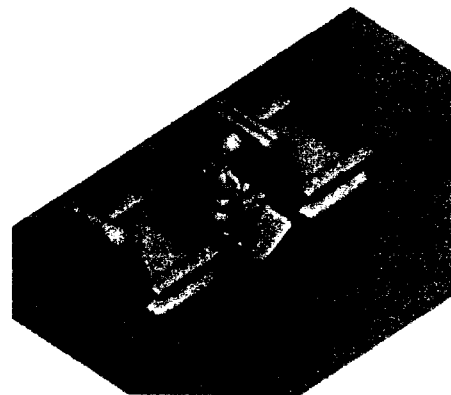


그림7. 6세 어린이 Dummy의 거동

### 3. 결 론

본 연구는 한국형 고속전철에서 충돌안전도 해석기술개발 과제중 승객안전도에 관한 연구로 1단계 3차년도 의 최종 연구 결과이다. 본 연구를 통하여 한국형 고속전철 개발의 초기단계에서부터 승객의 안전성 확보하고자 하였다. 승객의 거동 및 상해를 예측하기 위해서 KHST의 충돌 시나리오로 제안된 여러 가지 시나리오에 대하여 안전성의 확보 여부를 승객거동 해석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) SNCF의 시나리오인 15톤의 강체 장애물을 110km/h의 속도로 충돌하는 시나리오1의 경우 객실의 승객에게 미치는 영향은 미미한 것으로 예상된다.
- 2) 고정 벽에 30km/h로 충돌하는 시나리오2의 경우 승객의 상해치는 낮으나 Femur에 가해지는 하중은 상대적으로 크게 나타난다. KHST의 경우 TGV-K와는 달리 T1, T2의 객실에 탑승한 승객의 상해치가 높게 나타났다. 이는 충돌의 특성상 전두부와 가까이 위치한 객실에서 상대적으로 큰 감가속도를 경험하게 되므로 위험도가 크게 나타난다.
- 3) 전장품 등의 Mounting 기준인 5g 허용가속도를 이용하여 해석한 시나리오3의 경우 승객이 받는 상해는 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 경우에 따라서는 상당히 치명적이다. 그러므로 동력차, 동력객차, 객차 등 충돌관련 차체구조 설계 시 충분히 충돌 에너지를 흡수할 수 있는 공간의 확보와 계획적인 충돌 에너지 흡수구조가 요구된다.
- 4) 시나리오1에서는 충돌속도 또는 장애물의 크기에 따른 상해치의 변화는 거의 없다. 그러나, 시나리오2의 경우 충돌속도에 따른 상해치의 영향은 크게 나타난다.
- 5) 승객의 크기에 따른 변화는 상당히 큼을 알 수 있다. 특히 여성, 어린이 또는 95%의 성인의 경우 표준성인과는 달리 시트와 접촉하는 각도, 세기가 크게 차이가 남을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. Cleon L.M.(1994년), Tolerances a la Collision des Matériels Ferroviaires: Optimisation de la Sécurité Passive des Structures de Véhicule, World Railway Research Conference.
2. Scholes A.(1985년), Passenger Vehicle Design Loads and Structural Crashworthiness, I Mech E. Conference on Railway Vehicle Body Structure, paper C284
3. Scholes A. and Lewis J. H.(1993년), Development of Crashworthiness for Railway Vehicle Structure, Proceeding of I Mech E.
4. 김동성, 노규석, 김유일, 구정서, 송달호(1997년), “고속전철 충돌안전도 해석기술 개발”, 한국기계연구원
5. 김현영, 한재형(1997년), “3차원 보모델을 이용한 고속전철 동력객차에 대한 충돌특성연구”. 강원대학교
6. 강신유, 김홍욱, 박신희, 한동철(1997년), “객차의 충돌해석 기술개발에 관한 연구”, 서울대학교
7. 윤영한(1997년), “한국형 고속전철 충돌에서 승객거동에 대한 연구”, 한국기술교육대학교
8. 허승진, 조성도성(1997년), “충격에너지 흡수구조 요소의 경량화 설계연구”, 국민대학교
9. Tyrell D., Severson K and Marquis B.(1998년), “Crashworthiness of Passenger Trains Safety of High Speed Ground Transportation Systems”.