

# 컴퓨터 시뮬레이션기법을 이용한 고속전철 승객안전도 해석및 평가

## A Study of KHST Passenger Safety During Accidents by Computer Simulation Techniques

윤영한\*  
Younghan Youn

구정서\*\*  
Jungsuh Koo

이재완\*\*\*  
Jaewan Lee

---

### ABSTRACT

The computer simulation techniques were adopted to evaluate effects of seating positions of passenger under the various accident scenarios. The baseline of computer simulation model was tuned by the sled impact tests which conducted under the upright and standard seating positions. This study shows the effect of relative velocity between occupant and struck vehicle while occupant is impacted to a front seat's seatback. Although, base on the current accident scenarios, KHST is performed well enough to protect average adult male occupants. However, Results from the tests indicate small size occupant or higher impact speed may cause sever neck and femur injuries.

---

### 1. 서 론

1999년 9월 9일부터 적용되고 있는 미국의 Tier II 급 열차에 대한 안전규정은 충돌을 설계의 큰 기준으로 하고 있고 승객의 안전도를 고려하여 설계하도록 법으로 규정하고 있다. Tier II급은 열차의 운행속도가 125 mph를 이상하며 최고 150 mph를 넘지 않는 열차의 종류로 정의하고 있다. 통계적으로 열차 충돌사고 또는 탈선으로 인해 승객의 열차의 내부와 충돌하여 열차 사고 전체의 약 7%가 사망에 이르게 되고 전체 사고의 57%는 중상을 입게 된다<sup>1)</sup>. 고속전철은 그 특성상 만약 사고가 발생한다면 대형 참사로 이어질 가능성 때문에 선진국에서는 고속전철의 설계 단계에서부터 충돌 에너지를 각 차량의 부분들이 흡수하여 승객이 타고있는 객실 부분은 안전하도록 설계하고 있다.<sup>(2,3)</sup> 미국의 경우 현재 300kph급의 고속전철에 대한 안전설계 규정은 없으나 Tier II으로 적용할 수 있고 향후 Tier III급인 고속전철에 대한 연구가 진행중이며 미래에는 법규가 제정되리라고 판단된다. 국내에서도 최근 G7과제로 한국형 고속전철 개발사업이 시작되면서 고속전철에서의 충돌 안전성 등이 연구되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

본 연구는 350km/h급의 한국형 고속전철(KHST) 개발의 일환으로 사고 시나리오에서 승객의 안전도에 대한 평가를 sled를 이용하여 실험적결과를 바탕으로하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 TNO의 MADYMO를 이용하여 각종 예상 사고 시나리오에 대하여 평가하였다.

---

\* 한국기술교육대학교, 정회원

\*\* 한국기계연구원, 정회원

\*\*\*자동차성능시험연구소, 비회원

## 2. 최근의 열차의 승객안전법규 및 동향

### 가. 열차 차체구조 설계 기준

열차는 최소한의 요구조건으로 13MJ의 에너지를 차량의 승객이 탑승하지 않은 양끝단에서 충돌변형(crush)는 조절하여 흡수할 수 있어야 한다. 또한 승무원이 탑승하는 동력차에서는 cab 전방에서 최소 5MJ의 충격에너지를 흡수할 수 있어야 한다. 또한 3MJ의 충격에너지는 동력차의 cab과 첫 번째 편승의 객차사이의 구조가 흡수하여야 한다. 그리고 동력차로 연결되는 객차의 끝단은 최소한 충돌변형이 조절되며 5MJ의 에너지를 흡수할 수 있어야 한다.

### 나. 열차 탑승 승객의 안전 기준

30mph의 정지된 동급의 열차와의 충돌에서는 객차 좌석의 어느 위치에서도 50th-percentile 성인이 앞 좌석의 등받이와 접촉시 그 속도가 25mph를 넘어서는 않된다. 또한 50Hz의 low-pass filter를 사용하여 승객의 탑승공간에서는 감가속도가 8g를 초과하여서는 않된다. 그리고 승객이 탑승한 객차가 열차 편승에서 전방으로 배치되어서는 않된다.

객차에 부착된 좌석은 감가속도 파형이 250 milliseconds 동안 지속하는 삼각형 파형에서 95th-percentile 성인이 탑승하여 앞좌석과 충돌시 앞좌석은 변형은 가능하지만 완전한 failure가 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 또한 좌석의 등받이는 충격 에너지를 흡수할 수 있는 재료로 제작되어야 한다.

좌석은 95th-percentile 성인의 무게를 포함하여 각각 8g의 종방향 가속도와 4g의 수직방향 가속도에 충분히 견뎌야 한다.

## 3. 충돌모의 모델링 및 해석

아래표의 Sled #1의 경우는 시나리오 1 (SNCF 시나리오)을 모사한 것이고 Sled #3는 시나리오 2 (30kph 충돌)를 예측한 것으로 상해치는 크게 높지 않다. 그러나 시나리오 2에서 50%tile의 평균남성인 경우 상해치가 낮게 나타나나 Sled #5 (시나리오 2)에서 보듯 5%tile 여성 등 체형이 작거나 큰 경우 상해치가 높게 나타날 수 있다. Sled #5에서 중요한 상해인자는 Nij로 지칭되는 목상해치로 규명할 수 있었다.

Table 1 Sled Test Results

시험조건 Test #	Sled G's	Impact Speed	Dummy Type	비고
Sled #1	1.5g	2.2m/sec	Hybrid III 50%tile	시나리오 1
Sled #2	3.2g	7.0m/sec	Hybrid III 50%tile	
Sled #3	2.5g	5.2m/sec	Hybrid III 50%tile	시나리오 2
Sled #4	5.2g	8.0m/sec	Hybrid III 50%tile	
Sled #5	2.5g	5.2m/sec	Hybrid III 5%tile	시나리오 2

상해지	Sled #1	Sled #2	Sled #3	Sled #4	Sled #5	법규 (기준)
HIC	3.2	58.8	24.3	80.9	25.8	1,000
Chest(g)	3.8	9.7	4.3	11.8	13.9	60
Nij	0.12	0.88	0.12	1.02	0.67	1.0
Femur (N)	1,732	4,312	1,855	4,691	1,608	10,000

그러므로, 본 연구는 충돌시나리오 1, 2보다는 미국의 Tier II에 대한 열차의 안전기준 법규에 근거를 두고 승객의 상해치의 예측을 하며 앞좌석이 승객의 상해치 및 거동에 미치는 영향을 분석하고자 해석 모델링을 하였다. 또한 Sled #4의 경우 가속도를 크게 가하였을 경우 성인 남자라고 대퇴부 및 목상해치수인 Nij값이 크게 증가하는 경향을 보이므로 가속도

를 증가하여 8g로 승객이 앞좌석과 충돌한다고 가정하여 해석을 수행하였다.

#### 가. Baseline Occupant Model

MADYMO를 이용한 모델의 검증은 우선 2차년도의 Sled 시험중 가장 감가속도가 컸던 Sled Test #4를 기준으로 설정되었다. 1등석 1인용 Seat는 총 4개의 Joint로 seatback과 seat cushion의 경계와 seat back 하단과 상단의 경계에는 revolute로 구성되어 seatback이 승객의 무릎및 머리와 접촉시 회전하는 현상을 재현하기위해 모델링하였다. 아래의 그림은 1등석 1인용 50th-percentile male dummy가 착석한 모델이다.

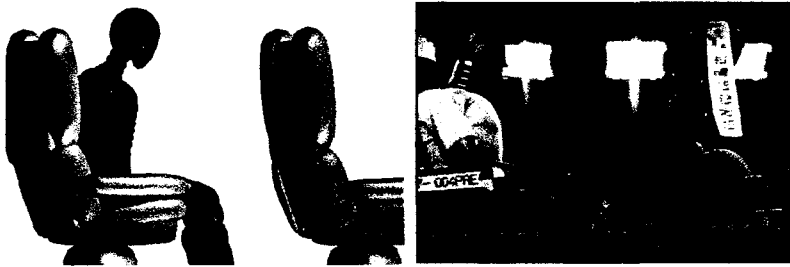


Fig. 1 MADYMO Model and Sled Test Initial Stage

해석의 결과는 우선 승객 거동의 경우 아래의 그림과 같다. Sled Test 와 같이 무릎이 앞좌석의 등받이 상단에 부딪히면서 seat가 앞으로 회전하며 이때 dummy의 머리가 seatback의 상단에 접촉하는 현상을 보여준다.

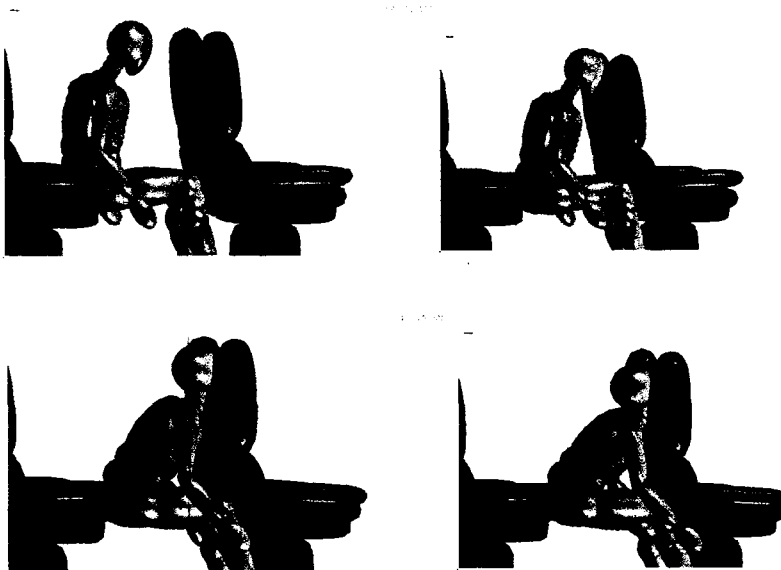


Fig. 2 MADYMO Simulation with 50% Male Occupant Motions

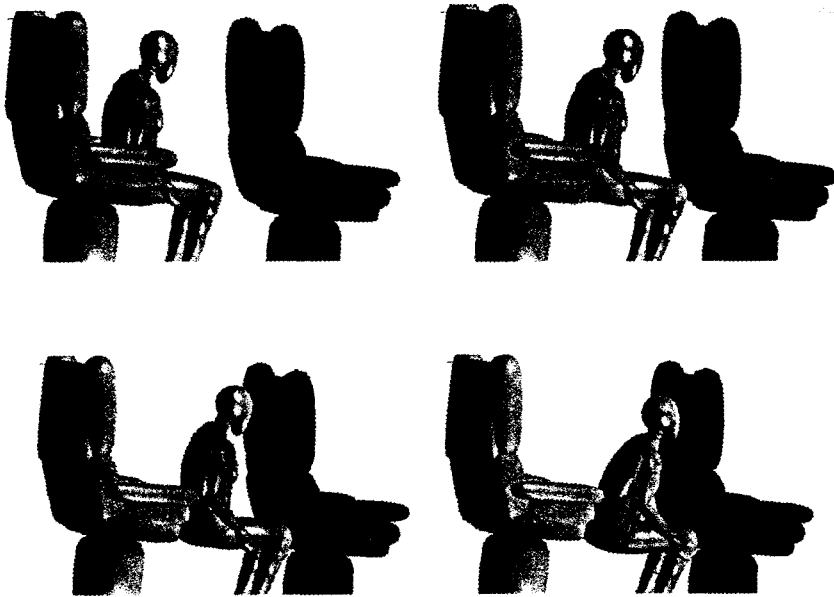


Fig. 3 MADYMO Simulation with 5% female Occupant Motions

해석과 Sled 실험은 전체적인 거동은 유사하나 seatback의 Joint 강성등에 대한 정확한 데이터의 부족으로 seat의 동적거동에 대한 정확한 재현이 가능하지 않아 dummy중 무릎 및 머리의 거동에 약간씩 차이가 난다. 그러나 아래의 표 2에서 보는바와 같이 상해치는 아주 잘 일치하고 있다. 목 상해지수인 Nij 또한 전체적으로 잘 일치하나 seatback의 충돌거동의 상이점으로 인해 50% 성인인 경우 NCE가 크게 차이가 나며 5% 여성인 경우 NCF의 값이 차이가 난다.

Table 2 Simulation Results with Sled Tests

	상해치	Sled Test	MADYMO 해석		Nij 상해치	Sled Test	MADYMO 해석
50% Dummy Sled #4	HIC	80.9	89.2	50% Dummy Sled #4	Nij-TF	0.14	0.127
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	115.4	117.9		Nij-TE	0.33	0.340
	Femur (N)	4691	5478		Nij-CF	0.20	0.185
5% Dummy Sled #5	HIC	26.8	25.0	5% Dummy Sled #5	Nij-CE	1.02	0.398
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	135.9	69.2		Nij-TF	0.12	0.039
	Femur (N)	1608	2077		Nij-TE	0.24	0.135
					Nij-CF	0.67	0.092
					Nij-CE	0.39	0.144

나. Reclined Seat에 대한 Occupant Model 해석

Baseline에 대한 해석으로 Sled와 일치를 이룬다음 진행된 승객에 대한 모델링은 seatback을 recline된 위치에서의 승객의 거동 및 상해치 대한 해석을 수행하였다. 수행한 해석결과 비록 승객의 거동은 약간씩 상이하나 상해치의 측면에서는 전반적으로 upright 위치나 크게 차이가 없음을 알 수 있었다.

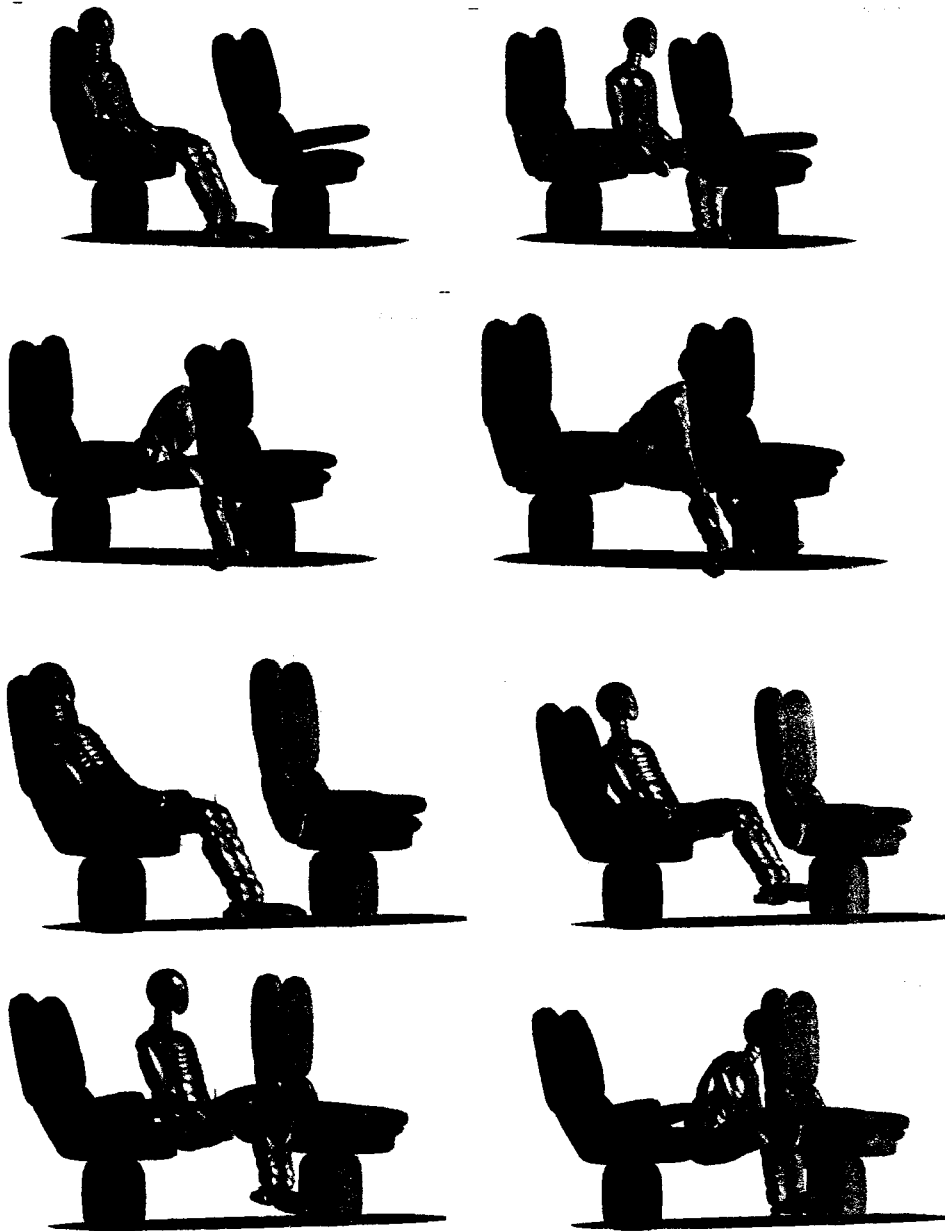


Fig. 5 Evaluation of Effects of Reclined Front Seat

다. 1등석 2인용 Seat에 대한 Occupant Model 해석

1등석 2인용 seat의 경우 대부분 1인용과 같은 부품을 공유하지고 특히 seat가 차량의 바닥과 부착되는 Base는 1인용에 비해 크기도 크지만 상대적으로 2명의 승객이 전면의 seatback에 부딪치므로 취약할 것으로 예상되어 그 해석을 수행하였다. 아래의 해석은 8G의 감가속도로 충돌하는 경우를 가정하여 해석한 결과이다. 승객은 50%과 5%을 조합하여 탑승하여 해석을 수행하였다.

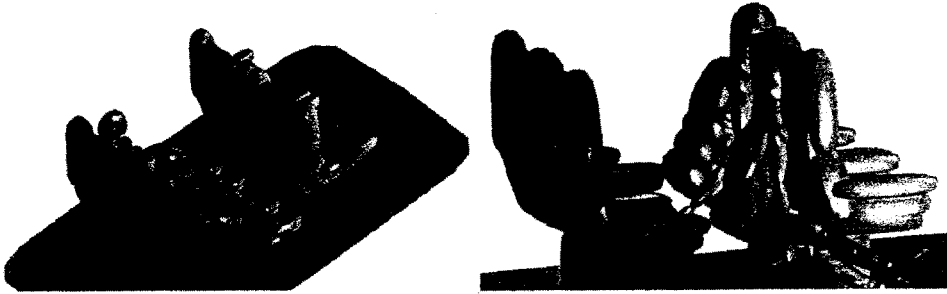


Fig. 6 Evaluation of Effects of 2 seated seats

### 3. 결 론

컴퓨터 시뮬레이션기법을 이용한 고속전철 승객안전도 해석 및 평가에 대한 결론은 다음과 같다.

1. Sled Test #3 및 #5를 Baseline으로 설정하여 MADYMO를 이용하여 50% 및 5% dummy를 이용한 1등석 단독좌석에 대한 해석은 시험과 잘 일치함을 보여 준다.
2. 그러나, seatback의 동적인 거동에 대한 특성 규명이 명확하지 못하여서 목상해치인 Nij의 경우 일부 큰 차이를 보여준다. 즉 seat의 동적거동이 승객의 상해치에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.
3. Seat의 배열 및 dummy의 종류에 대한 해석을 수행하여 향후 진행될 sled test과 비교 분석하면 승객의 보호에 효과적으로 대처할 수 있다고 본다.

### 후 기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부의 고속전철기술개발사업의 “고속전철 기반 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며 Sled시험을 수행한 자동차성능시험연구소 관계자에게 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Tyrell D., Severson K and Marquis B, 1998, Crashworthiness of Passenger Trains - Safety of High-Speed Ground Transportation Systems
- (2) Cleon L.M, 1994, Tolerances a la Collision des Materiels Ferroviaries: Optimisation de la Securite Passive des Structures de Vehicle, World Railway Research Conference
- (3) Scholes A., 1985, Passenger Vehicle Design Loads and Structural Crashworthiness, I Mech E. Conference on Railway Vehicle Body Structure, paper C284
- (4) 구정서, 노규석, 송달호, 2001, “고속전철 충돌안전도 해석 기술 개발”, 한국기계연구원
- (5) 윤영환, 2001, “한국형 고속전철 충돌에서 승객거동에 대한 연구”, 한국기술교육대학교
- (6) 한국기계연구원, 2002. 9, 충돌안전도 해석기술개발(II) Workshop 발표