

# 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용한 고속전철 승객안전도 해석 및 평가

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

윤영한<sup>1</sup>, 구정서<sup>2</sup>, 이재완<sup>3</sup>

Young-Han Youn, Jung-Suh Koo, Jae-Wan Lee

**Keywords** : KHST(Korea High Speed Train), Occupant Model(승객 거동 모델), Dummy(인체모형), Nij(목상해지수), HIC(머리상해지수), Femur(대퇴부), Sled Test(충돌모의실험), Seatback(좌석등받이)

### Abstract

The computer simulation techniques were adopted to evaluate the effects of seating positions of passenger under 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, The 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 안전규정에서 승객의 충돌안전도를 고려하여 설계하도록 법으로 규정하고 있다. 미국의 Tier II급은 열차의 운행속도가 200 km/h (125 mph)에서 240km/h (150 mph)이하의 열차로 정의하고 있다. 통계적으로 열차 사고 전체의 약 7%는 열차 충돌사고 또는 탈선으로 인해 승객이 열차의 내부와 충돌하여 일어나는 사고로 사망하고 또한 승객의 내부와 충돌사고의 57%는 중상을 입게 된다.[1] 고속전철은 그 특성상 만약 사고가 발생한다면 대형 참사로 이어질 가능성 때문에 선진국에서는 고속전철의 설계 단계에서부터 충돌 에너지를 각 차량의 끝단

부분들이 흡수하여 승객이 타고 있는 객실 부분은 안전하도록 설계하고 있다.[2,3] 미국의 경우 안전설계규정은 현재 300km/h급의 고속전철에는 적용하고 있지 않으나 현재 Tier III급인 고속전철에 대한 연구가 진행 중이므로 머지않아 Tier II과 유사한 형태의 승객안전 관련 법규가 제정되리라고 판단된다. 국내에서도 최근 G7과제로 한국형 고속전철 개발사업이 시작되면서 고속전철에서의 충돌 안전성 등이 연구되고 있다.[4,5,6]

본 연구는 350km/h급의 한국형 고속전철(KHST) 개발의 일환으로 사고 시나리오에서 승객의 충돌안전도에 대한 평가를 충돌모의실험(sled test)을 이용하여 실험적 결과를 바탕으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 TNO의 MADYMO (Mathematical Dynamical Models) [7]를 이용하여 각종 충돌 예상사고 시나리오에 대하여 평가하였다.

<sup>1</sup> 정회원, 한국기술교육대학교  
<sup>2</sup> 정회원, 한국철도기술연구원  
<sup>3</sup> 비회원, 자동차성능시험연구소

**2. 최근의 열차의 승객안전법규 및 동향**

**가. 열차 차체구조 설계 기준**

열차는 최소한의 요구조건으로 승객이 탑승하지 않은 상태에서 차량의 양끝 단에서 13MJ의 에너지를 충돌변형(crush)을 조절하여 흡수할 수 있어야 한다. 또한 승무원이 탑승하는 동력차에서는 최소 5MJ의 충격에너지를 흡수할 수 있어야 한다. 또한 3MJ의 충격에너지를 동력차 운전실과 첫 번째 편성의 객차사이의 구조가 흡수하여야 한다. 그리고 동력차로 연결되는 객차의 끝단은 최소한 충돌변형이 조절되며 5MJ의 에너지를 흡수할 수 있어야 한다.

**나. 열차 탑승 승객의 충돌안전 기준**

45 km/h (30mph)로 주행하는 열차와 정지된 동급의 열차와의 충돌에서는 객차 좌석의 어느 위치에서도 50th percentile 성인이 앞좌석의 등받이와 접촉 시 그 속도가 40 km/h (25mph)를 넘어서는 안 된다. 또한 50Hz의 low-pass filter를 사용하여 승객의 탑승공간에서는 감가속도가 8g를 초과하여서는 안 된다. 그리고 승객이 탑승한 객차가 열차 편성에서 동력차의 전방에 배치되어서는 안 된다.

객차에 부착된 좌석은 감가속도 파형이 0.25초 동안 지속하는 삼각형 파형에서 95th percentile 성인이 탑승하여 앞좌석과 충돌 시 앞좌석은 변형은 가능하지만 완전한 파손이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 또한 좌석의 등받이는 충격 에너지를 흡수할 수 있는 재료로 제작되어야 한다.

좌석은 95th percentile 성인의 무게를 포함하여 열차 진행방향으로 8g와 4g의 수직방향 가속도에 충분히 견뎌야 한다.

**3. 충돌모의 모델링 및 해석**

충돌모의실험은 고속전철 1등석과 같은 간격과 배열로 시트를 바닥에 장착하였으며 Sled 발사 파형은 0.25초를 한 주기로 하는 삼각형 파형을 사용하였다. 각 실험별 최대 감가속도 값은 표1과 같다. 충돌모의 실험 Sled #1의 경우는 시나리오 1 (SNCF 시나리오)을 모사한 것이고 Sled #3은 시나리오 2 (30km/h 충돌)를 예측한 것으로 상해치는 크게 높지 않다. 그러나 시나리오 2에서 50th percentile의 평균남성인 경우 상해치가 낮게 나타나나 동일조건인 Sled #5 (시

나리오 2)에서 보듯 5th percentile 여성 등 체형이 작거나 큰 경우 상해치가 높게 나타날 수 있다. Sled #5에서 중요한 상해 인자는 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

그러므로, 본 연구는 충돌시나리오 1, 2보다는 미국의 Tier II에 대한 열차의 안전기준 법규에 근거를 두고 승객의 상해치의 예측을 하며 좌석이 승객의 상해치 및 거동에 미치는 영향을 분석하고자 해석을 수행하였다. 그러므로 Sled #4의 경우 최대 감가속도가 5.2g에서 대퇴부 및 목상해치수인 Nij값이 크게 증가하는 경향을 보이므로 Sled #4의 감가속도 파형을 해석모델의 기준으로 해석을 수행하였다.

**가. Baseline Occupant Model**

1등석 1인용 좌석의 모델은 총 4개의 조인트로 구성되는데 seatback과 seat cushion의 경계와 seat back 하단과 상단의 경계에는 revolute 조인트를 이용하여 seatback이 승객의 무릎 및 머리와 접촉시 회전하는 현상을 구현하였다. 모델의 구성은 강체의 조인트와 변형 가능한 타원체로 구성되는데 인체모형에 대한 데이터는 TNO에서 제공하나 좌석에 대한 물성치는 실험을 통하여 구하였다. 아래의 그림은 1등석 1인용 50th percentile dummy가 착석한 모델 및 Sled에서의 초기 착석상태이다.



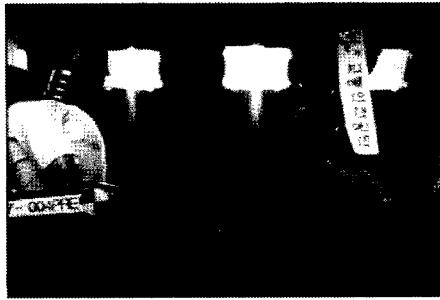
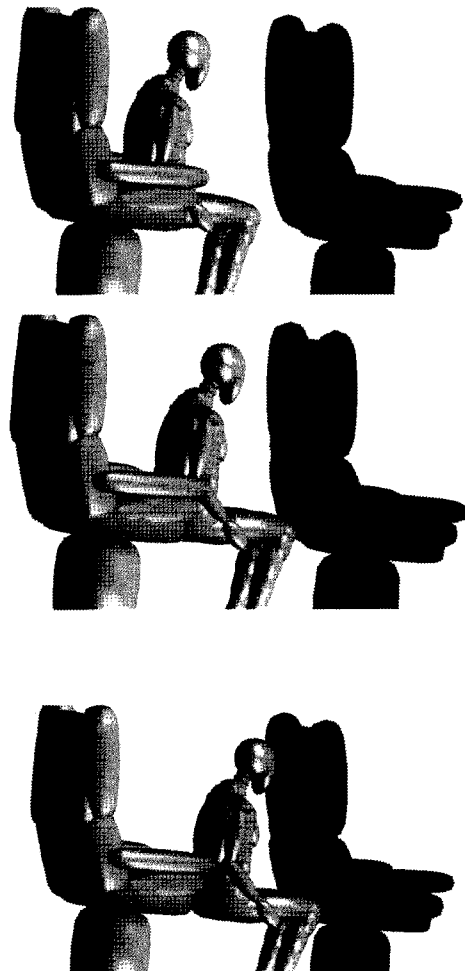
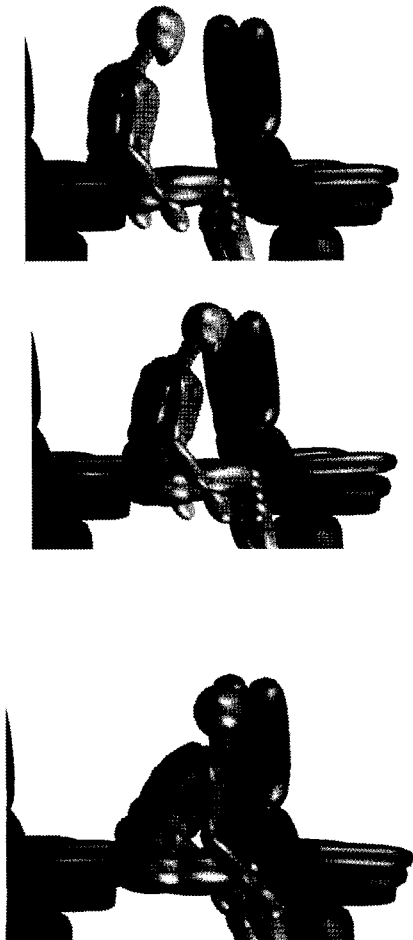


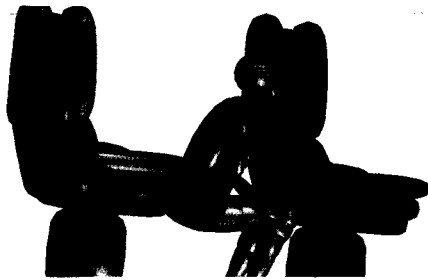
Fig. 1 MADYMO Model and Sled Test Initial Stage



Fig. 2 MADYMO Simulation with 50% Male Occupant Motions

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. 3 MADYMO Simulation with 5% female Occupant Motions**

해석의 결과 승객의 동적거동은 충돌모의 실험과 유사하나 seatback의 Joint 강성 등에 대한 정확한 실험적 데이터의 부족으로 승객의 무릎 및 머리의 거동은 실험과 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% 성인의 경우 NCE가 크게 차이가 나며 5% 여성인 경우 NCF의 값이 차이가 난다.

**Table 2 Simulation Results with Sled Tests**

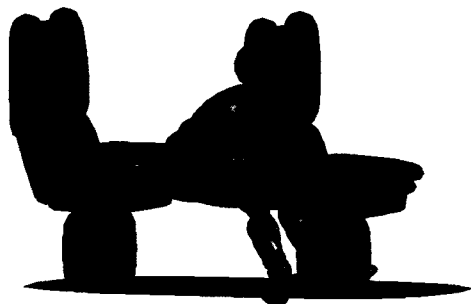
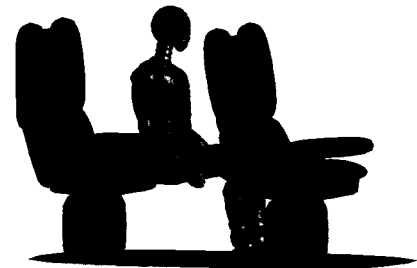
	상해치	Sled Test	MADYMO 해석
50% Dummy Sled #4	HIC	80.9	69.2
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	115.4	117.9
	Femur (N)	4691	5478
5% Dummy Sled #5	HIC	26.8	25.0
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	135.9	69.2
	Femur (N)	1608	2077

	Nij 상해치	Sled Test	MADYMO 해석
50% Dummy Sled #4	Nij-TF	0.14	0.127
	Nij-TE	0.33	0.340
	Nij-CF	0.20	0.165
	Nij-CE	1.02	0.396
5% Dummy Sled #5	Nij-TF	0.12	0.039
	Nij-TE	0.24	0.135
	Nij-CF	0.67	0.092
	Nij-CE	0.38	0.144

**나. Reclined Seat에 대한 Occupant Model 해석**

Baseline에 대한 해석으로 Sled와 일치될 이론 다음 진행된 승객에 대한 모델링은 seatback을 recline된 위치에서의 승객의 거동 및 상해치 대한 해석을 수행하

였다. 수행한 해석결과 비록 승객의 거동은 약간씩 상이하나 전반적으로 upright 위치나 크게 차이가 없음을 알 수 있었다. 좌석의 recline 상태에 따른 승객 거동은 아래의 그림과 같다.



**Fig. 4 Evaluation of Effects of Upright Rear Seated Occupant on Reclined Front Seat**

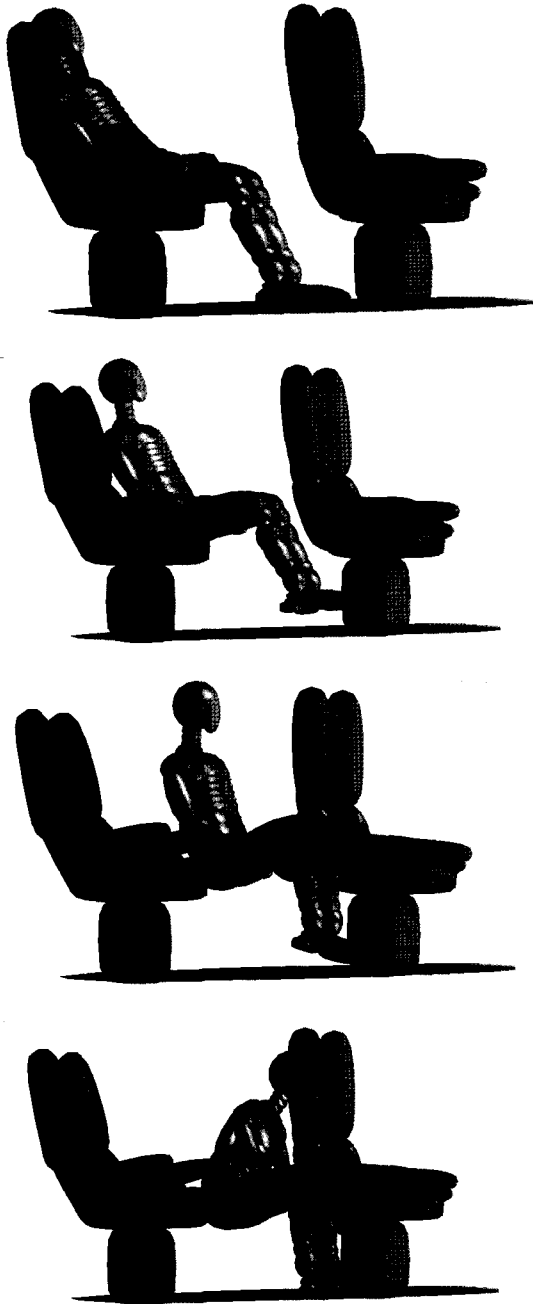


Fig. 5 Evaluation of Effects of Reclined Seated Occupant on Upright Front Seat

좌석의 recline된 형태에 대한 상해값은 아래의 표에 나타나 있다. 표에서 보는 바와 같이 뒷좌석이 recline된 경우 머리상해지수인 HIC가 약 3배정도 증가하는 경향이 있다. 그러나 한계값인 HIC 1,000보다는 크게 작은값으로 상해에는 큰 영향이 없다고 본

다. 목상해지수 Nij 및 대퇴부 하중 또한 정상좌석상태와 비교시 크게 차이가 나지 않는다.

Table 3 Simulation Results of Injury Values on Various Occupant Seating Positions

Upright Position	HIC	80.9
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	115.4
	Femur (N)	4691
전방 Reclined	HIC	111.5
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	121.5
	Femur (N)	4102
후방 Reclined	HIC	363.3
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	113.1
	Femur (N)	5135
전후방 Reclined	HIC	346.9
	Chest (m/s <sup>2</sup> )	144.6
	Femur (N)	5284

Nij 상해치	Upright Positions	전방 Reclined	후방 Reclined	전후방 Reclined
Nij-TF	0.13	0.09	0.08	0.04
Nij-TE	0.34	0.39	0.26	0.25
Nij-CF	0.17	0.05	0.25	0.17
Nij-CE	0.40	0.41	0.27	0.33

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% dummy를 조합하여 탑승하여 해석을 수행하였다.

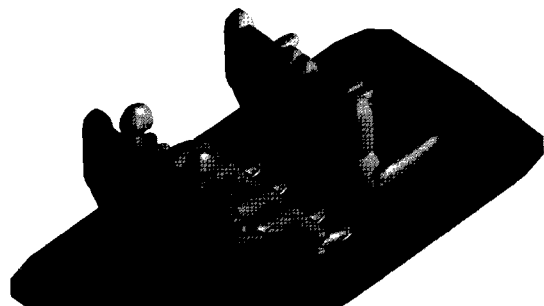




Fig. 6 Evaluation of Effects of 2 seated seats

#### 4. 결론

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

1. 충돌사고 시나리오 1, 2에 대한 실험 및 해석의 결과 한국형 고속전철의 승객 안전도는 충분히 확보 되었다. 그러나 승객과 전방 seat와 충돌속도가 7 m/s이상의 경우 승객은 대퇴부 및 목에 상해를 입을 가능성이 높다. 특히 체구가 작은 여성의 경우는 충돌속도가 5 m/s에서도 목에 상해를 입을 가능성이 높다.

2. Sled Test #3 및 #5를 Baseline으로 설정하여 MADYMO를 이용하여 50% 및 5% dummy를 이용한 1등석 단독좌석에 대한 해석은 승객의 거동 및 상해 치인 HIC, Chest G's 및 대퇴부 하중값은 시험과 잘 일치함을 보여 준다.

3. 그러나 seatback의 동적인 거동인 조인트에 대한 특성을 실험적으로 확보하지 못하여 목상해 치인 Nij의 경우 일부 큰 차이를 보여준다. 실험의 경우 50% 남성 dummy의 경우 Nij-CE가 1.02로 가장 크게 나타나나 해석에서는 0.4정도로 그 차이가 크다. 그리고 실험에서 5%여성 dummy의 경우 Nij-CF가 0.67로 가장 큰 상해요인이나 해석에서는 Nij-CE가 가장 크게 나타났다. seatback 조인트에 대한 동적특 성이 승객의 거동 및 상해치에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 보다 다양한 Seat의 배열 과 dummy의 종류에 대한 해석을 수행하여 향후 진행될 충돌모의실험과 비교 분석하면 고속전철에서 충돌사고로부터 승객을 효과적으로 보호 할 수 있다고 본다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부의 고속전 철기술개발사업의 “고속전철 기반기술 개발” 과제의 지원으 로 수행되었으며 Sled시험을 수행한 자동차성능시험연구소 관계자에게 감사드립니다.

#### 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 Materials 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. 규정서, 노규석, 송달호, 2001, “고속전철 충돌안전도 해 석 기술 개발”, 한국기계연구원
5. 운영한, 2001, “한국형 고속전철 충돌에서 승객거동에 대한 연구”, 한국기술교육대학교
6. 한국기계연구원, 2002. 9, 충돌안전도 해석기술개발(II) Workshop 발표
7. MADYMO User's Guide, TNO, 2002