열차 승객상해평가를 위한 새마을호 의자의 해석모델링 방법에 대한 연구

A Study on Saemaeul-ho Seat's Simulation Model for Train Occupant Injury Evaluation

안인지* 정현승** 권태수***
Inji An Hyun-Seung Jung Taesoo Kwon

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a simulation model which substitutes a sled test of train seat. The occupants behaviors of Saemaeul-ho two passenger seats were simulated using MAYDMO(MAthematical DYnamical MOdel) and these results compared with those of sled test. To improve the simulation model which used in previous study[5], the plastic behaviors of the pedestal were considered and the rear seats are represented as ellipsoid multi-body model instead of finite element model.

Using the improved model, we could reduce the computer run time and get more accurate results.

1. 서 론

열차의 경우 충돌사고의 빈도수가 적으나 객차들이 서로 연결되어있는 복잡한 상관관계를 가지는 구조로서 그 특성상 사고가 발생한다면 대형 참사로 이어질 가능성이 매우 크다. 통계적으로 열차의 충돌사고 또는 탈선으로 인해 승객이 열차의 내부와 충돌하는 경우 약 7%가 사망하고 57%는 중상을 입게 된다는 분석이 있다.[1] 이와 같은 이유 때문에 선진국에서는 철도 충돌사고 시 승객의 안전 확보를 위한 실내안전규정에 대한 연구가 꾸준히 진행되었으며 이미 이를 고려하여 열차제작을 하고 있다. 이에 따라 국내에서도 충돌안전설계에 대한 규정이 이루어지고 있는 추세이지만 아직까지 설계에 반영할 수 있는 구체적인 기준이 마련되지 않고 있다.

열차충돌 시 탑승자가 부딪히는 의자 앞좌석의 등받이 및 테이블 또는 발판 등은 탑승자의 상해정도에 큰 영향을 주는 요소이기 때문에 국내에서도 철도차량의 객실 내부에 대한 안전성을 평가할 수 있는 기준이 필요하다. 본 연구에서는 유럽의 SAFETRAIN 프로젝트 연구보고서[2] 및 영국 철도차량 운영자협회의 AV/ST9001[3] 규정에서 제시된 감가속도 파형을 이용한 새마을호 의자의 sled test(충돌모의시험)의 결과[4]를 바탕으로 참고문헌 5)의 해석모델을 개선하여 좀 더 정밀한 해석 결과를 얻을 수 있는 모델링 방법에 대한 연구를 수행하였다.

* 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원
E-mail : ija@krri.re.kr
TEL : (031)460-5266 FAX : (031)460-5289
** 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
*** 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원

2. 최근 열차 승객 상해기준 동향 및 충돌모의시험

2.1 국내철도차량 승객 충돌안전기준

국내의 경우 국토해양부에서 2007년 7년에 철도차량안전기준에 관한 지침서[6]를 고시하였는데 내용을 살펴보면 표준충돌사고각본 상황에서 철도차량이 탑승자의 생존공간을 확보하고, 탑승자의 감속도 평균이 5g, 최대값이 7.5g 이하가 되어야 한다고 규정하고 있다. 이는 차체설계에 대한 규정이므로 실제 탑승자의 상해규정에 대해서는 아직 마련되지 않고 있다.

2.2 유럽철도차량 승객 충돌안전 기준 및 상해기준

유럽의 열차충돌안전연구는 1990년대부터 본격적으로 수행되기 시작했으며, 초기에는 자동차 탑승자에 대한 충돌안전규제를 적용하여 열차의 승객에 대한 안전성 평가가 이루어졌지만, 실제 열차의 충돌은 자동차의 충돌과는 매우 다른 요소들이 작용하므로 열차에 적합한 기준의 필요성이 대두되었다. 따라서 현재 철도차량의 경우도 충돌안전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이미 선진국 에서는 유럽연합의 지원으로 1997년부터 2001년까지 수행된 SAFETRAIN 프로젝트에서는 철도차량의 구조적 관점에서 충돌안전과 더불어 승객의 충돌안전에 대한 연구 및 철도차량 승객의 인체상해 평가에 대한 기준이 제시되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 영국 철도운영자협회에서는 철도차량 실내의 충돌안전에 대한 규격인 AV/ST9001을 제안하였다. 현재 유럽에서는 차량 실내의 충돌안전을 향상시키기 위한 SAFEINTERIOS - Train Interior Passive Safety for Europe 프로젝트에서는 열차내부의 피해저감기술, 상해기준과 측정 및 시험, 내장설계 검증 규격제안 등에 대한연구가 2006년 7월에 시작되어 현재 수행 중에 있다.

탑승자 상해평가방법 및 기준은 자동차의 경우 많이 개발되어 있지만 열차승객에 대한 상해기준은 많지 않다. Table 1은 SAFETRAIN 과 AV/ST9001에서 제시하고 있는 열차승객에 대한 상해기준이다. 두 기준은 각각 평가 항목에 약간 차이가 있으나 상해기준 값은 거의 유사하게 규정짓고 있다. 그러나 다리상해기준의 경우는 SAFETRAIN보다 AV/ST9001기준이 좀 더 높음을 알 수 있다.

도표 1. Injury Criteria – SAFETRAIN & AV/ST9001

Body segment	Injury Criteria	SAFETRAIN	AV/ST9001
Head	HIC	500	500
	Head 3 ms exceedance	80g	80g
Neck	flexion bending moment	190 Nm	190 Nm
	extention bending moment	57 Nm	57 Nm
	compressive force	1100N	
	tensile force	2900N	
	shear force	1100N	
Thorax	thorax compression	50 mm	
	viscous compression	1.0m/s	
Leg	femur compression force	7.58KN	7.58KN
	tibia compression force	8KN	
	tibia index	1.0	0.75
	knee sliding joint displacement	15mm	12mm

2.3 새마을호 의자 모델링 및 해석

2.3.1 새마을호 의자 모델링

본 연구에서는 승객상해평가용 해석모델개발의 일환으로 실제 충돌시험의 대체용 모델을 만들기 위해 참고문헌 5)에서 사용하였던 모델을 수정하여 좀 더 향상된 해석 결과를 얻을 수 있는 모델링 방법을 적용하였다.

먼저 효율적인 해석수행을 위하여 시험을 통해 확인한 바에 따라 그림 1과 같이 실제승객의 거동에 거의 영향을 미치지 않는 solid요소로 이루어진 쿠션 부를 제거한 골조 구조만 사용하고 더미가 착좌해 있는 뒷좌석의자는 ellipsoid로 모델링하였다. 이로써 전체 유한요소모델로 해석한 시간의 절반정도로 해석시간을 단축할 수 있었다. 앞좌석에 대한 모델링은 뒷좌석의 승객이 충돌 할 때 앞좌석 등받이가 회전하는 현상을 재현하기 위하여 seat back과 side 고정부는 revolute_joint로 모델링 하였으나 조인트의 강성자료가 확보되지 않았고 충돌 시험의 거동장면에서 의자 전체가 앞으로 기울어질 뿐 등받이 자체가 회전되는 형상은 크게 관찰되지 않아 LOCK상태로 구속시켰다. 또한 앞좌석 변형에 대한 좀 더 정밀한 해석을 위하여 충돌 시 변형이 많이 일어나는 부위의 재료물성에 대해 소성 물성 값을 적용하였다. 그림 2와 그림3은 각각 해석에 사용된 새마을호 의자의 3D CAD 및 FE 모델 및 감가속도 파형이다.

그림 1. MADYMO Model and Sled test initial configuration

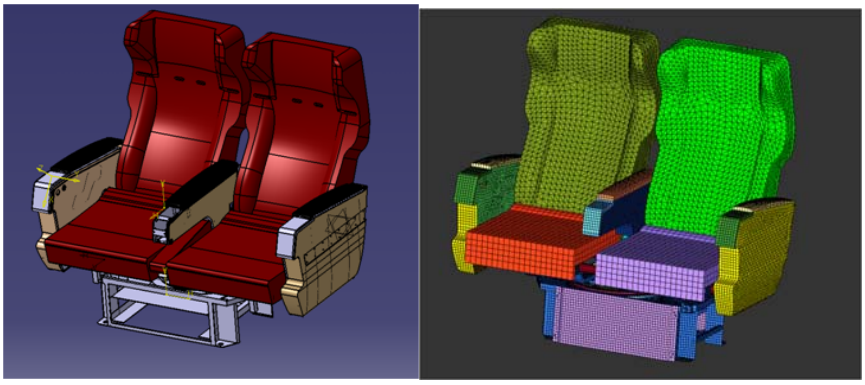


그림 2. Saemaeul-ho seat CAD and FE model

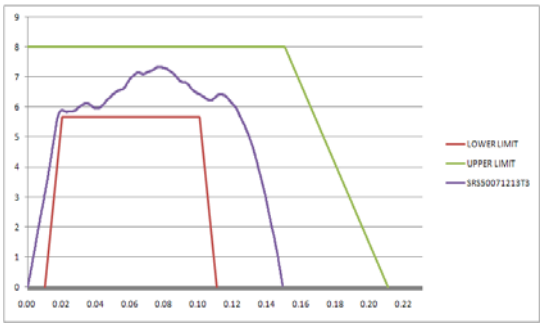


그림 3. Test Pulse (SAFETRAIN & AV/ST9001)

2.3.2 MADYMO 해석결과

실제시험에서는 더미가 앞좌석에 부딪힌 후 뒤로 튕겨 나오면서 제 위치에 안착하기까지의 충돌시간이 약 900ms 이지만 해석모델이 일부 유한요소 모델인 관계로 전체 ellipsoid모델보다 해석시간이 오래 걸린다. 따라서 최대한 해석시간을 줄이기 위하여 rebounding까지의 더미거동은 생략하고 더미가 앞좌석에 부딪힐 때까지인 300ms까지만 해석하여 상해치를 측정하였다. 그림 4는 각 시간별로 승객거동을 비교한 그림이다.

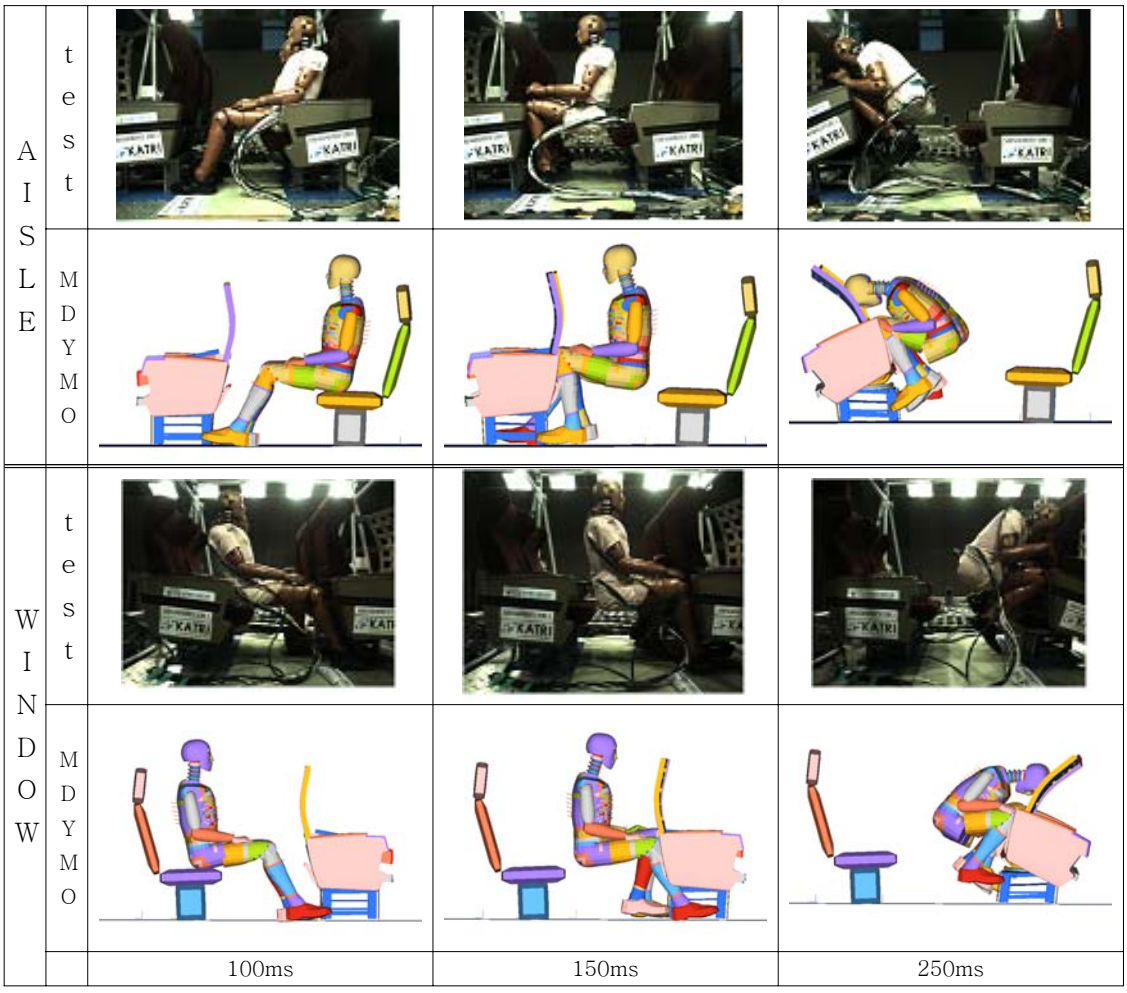


그림 4. Comparison of sled test with MADYMO model

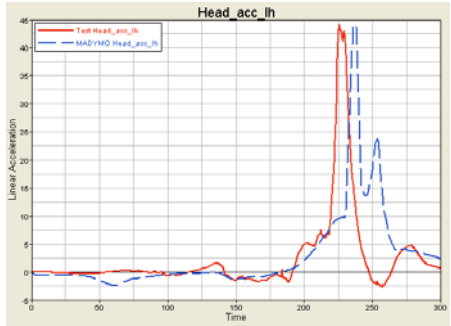
그림 4에서 보여 지듯이 실제 sled test와 컴퓨터 시뮬레이션결과에서 나타나는 더미의 거동이 거의 유사하고 앞좌석에 충돌하는 위치도 비슷함을 알 수 있다. 특히 새마을호 의자의 받침대는 중앙에 있

지 않고 통로 쪽으로 치우쳐있는데 이로 인해 양쪽 더미의 거동이 달라진다. 통로 측 더미의 경우 발끝이 모두 앞 의자 받침대에 부딪혀서 정강이가 직접 부딪히지 않지만 창 측의 경우 더미의 오른쪽 발끝이 의자 밑으로 들어가면서 정강이가 부딪히는 거동이 관찰된다. 상해결과에서 정강이의 상해치가 이로 인해 영향을 받음을 볼 수 있다. 또한 전체적인 거동을 살펴보면 뒷좌석의 더미가 앞좌석의 등받이 부분에 충돌할 때 적절히 의자가 기울어지면서 충격을 완충해 준다. 이 때 앞좌석의 회전판을 덮는 부분이 들리면서 구조적 변형을 일으키는데 시뮬레이션결과에서도 이를 확인 할 수 있다. 또한 의자 받침대 부분이 영구변형을 일으키며 앞으로 약간 기울어지는 형상도 시험과 유사하게 나옴을 관찰 할 수 있다.

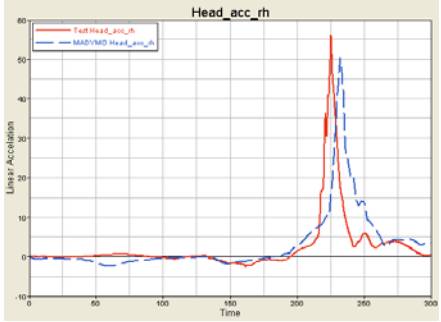
도표 2는 각각 충돌 시험과 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션의 상해해석 결과를 보여주고 있다. 대체적으로 두 값이 비슷한 경향을 보여주고 있는데 생명과 연관된 주요부위인 머리와 목의 상해치는 약간의 차이를 보이고 있지만 모두 기준치보다 크게 나오지 않았다. 하체부분도 대부분 비슷한 경향을 보여주고 있지만 복도 측 더미의 오른쪽 대퇴부의 상해치가 시험 값과 기준치를 모두 넘었다. 이는 무릎이 앞좌석 등받이에 부딪히면서 허벅지와 골반 쪽에 상해를 입히는데 등받이의 재료 물성 값이 정확하지 않아 소성변형이 반영되지 않은데 원인이 있는 것으로 보인다. 또한 승객상해는 앞좌석의 충돌에너지 흡수력에 의해 크게 좌우 되는데 등받이 회전부의 강성에 대한 실험 데이터 부족으로 실제 시험에서 나타난 하중 값과 다르게 나타났다고 판단된다.

도표 2. Test and MADYMO Simulation Injury Criteria

Injury Criteria			Sled Test		MADYMO Simulation	
			Aisle	Window	Aisle	Window
HIC36		500	106.3	161.2	123.72	141.15
Head 3ms exceedance (g)		80	42.7	52.4	45.6	47.4
Neck flexion bending moment (Nm)		190	67.2	34.9	31.1	20.4
Neck extension moment(Nm)		57	31.3	24.4	16.2	37.7
Femur compression force (KN)	LH	4	4.8	3.6	6.2	3.9
	RH	4	2.9	6.3	4.2	7.9
Knee displacement (mm)	LH	12	11.2	4.1	5.0	5.4
	RH	12	4.1	15.1	6.6	21.1
Tibia index	LH Upper	0.75	0.52	0.46	0.46	0.37
	LH Lower	0.75	0.47	0.27	0.38	0.38
	RH Upper	0.75	0.40	1.27	0.44	1.3
	RH Lower	0.75	0.45	0.59	0.38	0.45



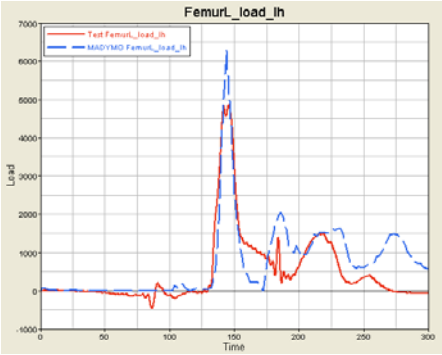
(a)



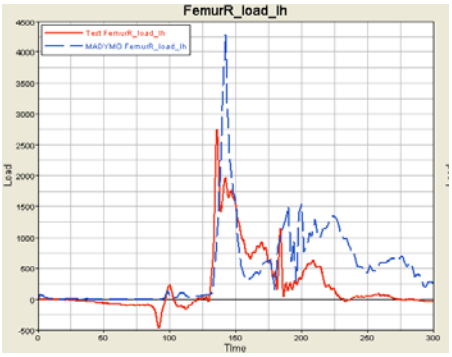
(b)

(c)

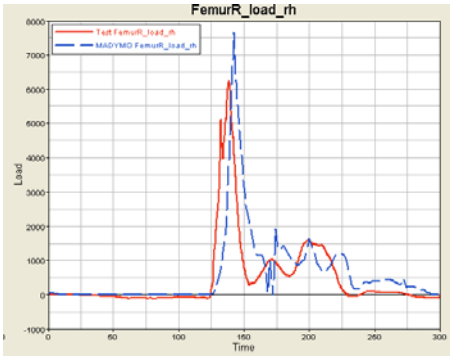
(d)



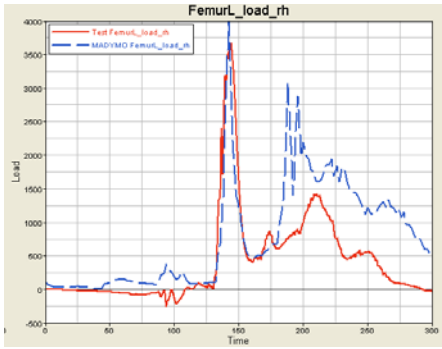
(e)



(f)



(g)



(h)

그림 5. Sled test and MADYMO Simulation result graph

그림 5는 sled test와 MADYMO해석의 더미 거동을 평가 하기위하여 신체 주요 부위별 가속도 및 충격하중에 대해 비교한 그래프이다. (a)~(d)그래프는 더미의 머리와 가슴에 장착 되어있는 가속도계에서 측정된 가속도를 나타내는데 그림에서 보여 지듯이 가속도의 형태가 비슷하므로 더미의 거동은 시험과 거의 일치한다고 판단할 수 있다. 하지만 그래프 (e)~(h)의 femur에 가해지는 하중 그래프에서는 최대하중을 받는 시점은 비슷하나 상해해석 결과에서 보여 지듯이 하중의 크기에서는 차이를 보이고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 실제 충돌모의시험을 대체할 수 있는 해석용 모델을 만들기 위해 기존의 모델을 수정하고 이를 이용하여 승객상해해석 및 승객거동에 대해 비교분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개선된 모델을 사용하여 해석한 결과 해석시간을 단축 할 수 있었고, 더미의 거동 및 상해치, 의자의 변형 면에서 모두 시험결과와 좀 더 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
2) 상해치 측면에서는 시험 값에 비해 오차범위가 크진 않지만 여전히 값이 다르게 나오는 부분들이 있다.
3) 열차충돌 시 충격에너지를 흡수할 수 있는 앞좌석의 동적거동에 대한 좀 더 정밀한평가를 위해서는 등받이 joint강성 및 의자의 회전판 부분에 대한 자세한 모델링이 필요하고 영구변형이 발생하는 부분들에 대해서는 좀 더 정확한 재료의 물성 데이터가 필요하다.

본 연구에서 사용된 방법들은 향 후 열차승객안전의자를 개발하는데 있어서 시간과 비용절감을 위하여 sled test를 대체할 수 있는 시뮬레이션 모델을 만드는데 활용 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Tyrell, D., Severson, K., and Marquis, B.,(1998) Crashworthiness of Passenger Trains - Safety of High-Speed Ground Transportation Systems
2. SAFETRAIN(2001) - Train Crashworthiness for Europe Final Report, EU
3. AV/ST9001(2002) - Vehicle Interior Crashworthiness, ATOC Vehicle Standard
4. Joon-ho Jeon, Yeong-Sig Yoon, Young-Han Youn(2008) "An Occupant Safety Test for Korea rail Seats Based on Europe Train Interior Safety Standard", Proceedings of Korean Society of Automotive Safety Engineers
5 .Inji An, Hyun-Seung Jung, Taesoo Kwon(2008) "An Evaluation of Occupant Safety Test and Simulation for Saemaeul-ho Seats based on Europe Train Interior Safety Standard by Computer Simulation Techniques", Proceedings of Korean Society of Automotive Safety Engineers
6. 철도차량 충돌안전에 관한 지침(2007), 국토해양부