

한국형 고속전철 차체의 충돌안전도 평가 연구

An Evaluation of Crashworthiness for the car-bodies of KHST

노규석*, 구정서*, 송달호*

K. S. Rho, J. S. Koo, D. H. Song

ABSTRACT

In this paper, crashworthiness of the KHST car-bodies is evaluated by numerical simulation under the SNCF accident scenario (collision against a movable rigid mass of 15 ton at 110 kph) and the scenario of train-to-train collision at 30 kph. The numerical results of the several simulations, such as the accident collided against a deformable dump truck of 15 tons at 110 kph, the driver's dummy analysis using the integrated analysis method, and the accident of train-to-train collision for the first three units at 30 kph, show good performances in the viewpoint of energy absorption and survival space.

1. 서론

한국형 고속전철 KHST는 충돌 또는 탈선사고가 발생했을 때, 운전실과 객실의 안전을 최대한 확보할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 전두부에서 충격에너지를 충분히 흡수하여 승객피해를 최소화하고, 충돌 에너지의 70 ~ 80 %를 동력차에서 흡수하도록 설계하여야 한다[1-6]. 최종설계된 KHST의 전두부는 이러한 특성에 맞추어 6 MJ 이상의 에너지 흡수가 가능하도록, Coupler 및 에너지 흡수 튜브(energy absorbing tube)의 특성을 적용했으며, 기기들의 취부와 운전실 하부구조와의 조화를 최대한 고려하여 설계하였다. 최종 설계 확정된 동력차 전두부(KHST)의 충돌에너지 흡수 설계를 평가하기 위하여 KTX 전두부와 비교하고, 동력차 전체 모델을 해석한 결과와 일치하는지 검토하였다. 또한, KHST 동력차가 실제 15 ton 트럭과 정면 및 off-set 충돌할 때 어떠한 거동을 보이는지 해석하여 타당성을 평가하였다. 그리고, KHST 전두부에 운전자인 dummy를 탑재하였을 때 어떠한 거동을 보이는지를 충돌 해석하여 최종 설계에 대한 운전자의 안전도를 평가하였다. 최종적으로, 30 kph 정면 충돌사고 시나리오 하에서 3차원 셀 모델인 KHST 동력차, 동력객차, 객차 등 3량 편성에 대하여 연쇄 충돌하는 해석을 수행하고, 충돌 시 차량간 연결구조의 안전성을 평가하였다.

2. 전두부의 충돌에너지 흡수 설계

Fig. 1은 최종적으로 설계 확정된 KHST 동력차 전두부와 압괴거동을 나타낸 것이다. 충돌 사고 발생시 전두부 구조는 압괴하중이 6,100 kN인 운전실보다 먼저 압괴되도록 최대 4,455 kN 이하에서 압괴될 수 있게 설계되었다. 이러한 순차적 압괴는 운전자의 생존공간을 확보하는데 매우 바람직한 설계 방법이다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

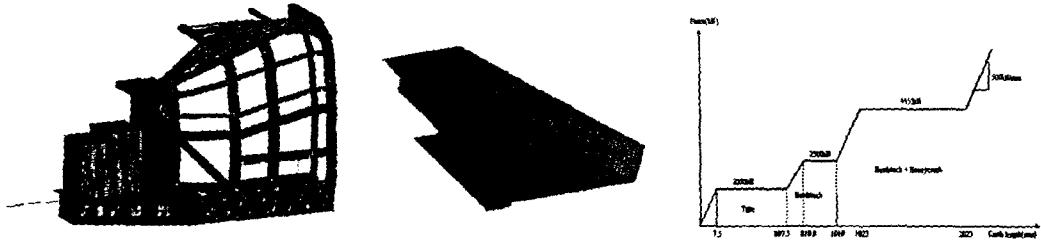


Fig. 1 Front structure and crush behavior of KHST

3. 전두부 구조의 압괴특성 해석

본 절에서는 KHST 전두부가 110 km/h 속도에서 15 ton 장애물과 충돌[SNCF 충돌사고 시나리오]하는 경우에 대하여 충돌해석을 수행하여 충격에너지 흡수와 운전실 압괴 거동을 평가하였다. 충돌해석에는 충돌전용 소프트웨어인 PAMCRASH[7]를 사용하였는데, 요소의 평균 격자 크기는 35 mm 정도이고, 전두부 자체 질량을 제외한 동력차의 나머지 질량을 전두부 후반부에 집중 질량으로 처리하였다[8].

Fig. 2는 Coupler 및 에너지 흡수 튜브의 특성을 고려한 KHST 전두부의 변형양상을 40 msec, 120 msec에서 나타낸 것이다. 그림과 같이 헤드스톡과 하니컴이 순차적으로 압괴되면서 운전실의 생존공간이 확보되었다. 이는 전두부가 충격에너지 흡수 측면에서 매우 효과적이고, 운전자 보호 측면에서도 설계가 잘 되었음을 알 수 있다. Fig. 3은 전두부의 충격 흡수에너지와 충격력을 KTX와 KHST로 상호 비교하여 나타낸 것인데, KTX의 경우에는 초기 붕괴하중이 15,000 kN 정도로 매우 높고 평균 압괴하중도 2,204 kN으로 충격에너지 흡수에 불리하지만, KHST는 헤드스톡의 초기 붕괴하중이 7,000 kN 정도인 반면에 평균 압괴하중이 3,016 kN으로 높아서, 충격력을 흡수하는데 매우 유리하다.

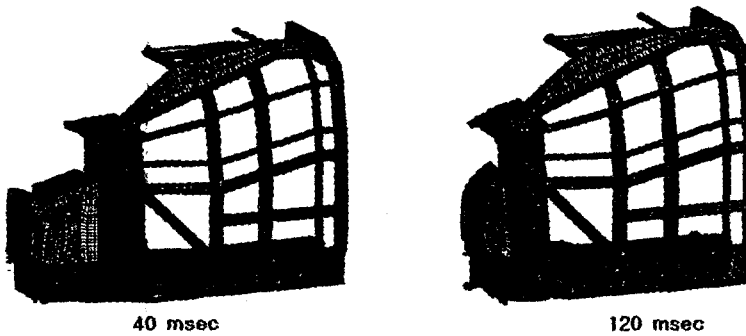


Fig. 2 Deformed shapes and plastic strain distributions of the KHST (110 km/h : half model)

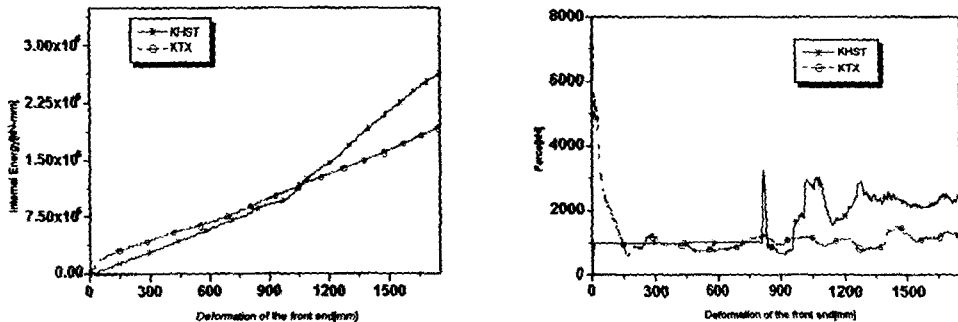


Fig. 3 Crash responses of the front structures (110 km/h : half model)

4. KHST 동력차 충돌해석

KHST 동력차 전체 모델과 전두부만을 사용한 모델의 해석 결과를 비교하였다. 동력차 전체 모델은 9,877개의 솔리드 요소, 141,831개의 쉘 요소, 5개의 bar 요소로 구성되어 있으며, 전체 절점수는 148,372개이다. 또한, 기하학적인 형상, 경계조건, 하중등이 대칭임을 고려한 유한요소 반쪽 모델로서, 평균격자 크기는 35 mm이다.

Fig. 4는 KHST 동력차에 SNCF 충돌사고 시나리오를 적용하여 해석한 압괴양상과 상당 소성 변형을 나타낸 것이다. 압괴형상은 동력차 전두부만을 충돌해석한 결과와 유사한데, 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되고 운전실이 보호된다. 또한, 동력차 전방 출입문의 압괴가 심하게 발생하지만, 이는 운전실 보호측면에서 바람직한 현상이라고 할 수 있다. Fig. 5는 KHST 동력차와 전두부를 충돌해석한 후 충격에너지와 충격력을 비교하여 나타낸 것이다. 전두부의 평균압괴하중은 3,016 kN이고 전체 동력차의 평균 압괴하중은 2,696 kN으로 나타났는데, 압괴거동 뿐만 아니라 충돌에너지 흡수, 충격력 등에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 초기 설계 단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌안전도 해석과 설계에 활용하는 것이 시간을 단축할 수 있고 반복적으로 수정되는 설계 보완에 용이하게 대처할 수 있다.

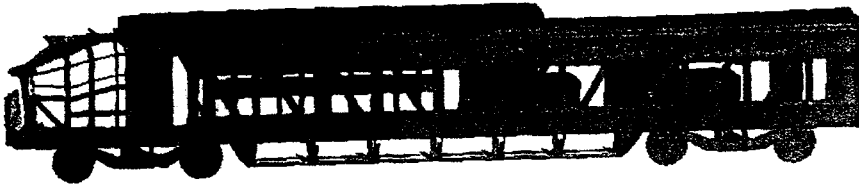


Fig. 4 Deformed shapes and plastic strain distribution of the KHST power car (110 km/h : half model)

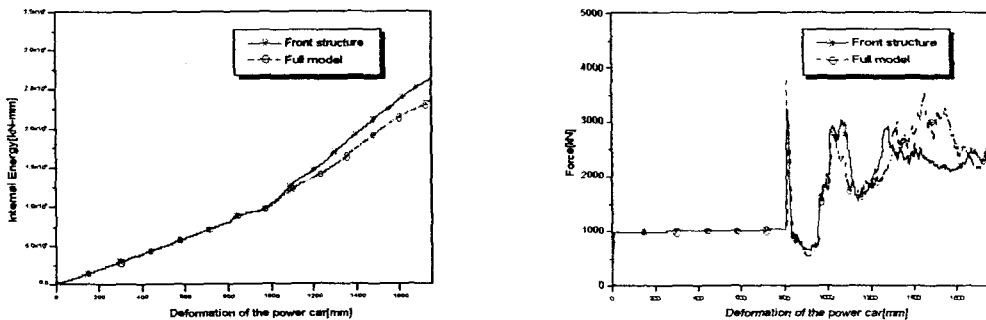


Fig. 5 Comparison for crash responses of the KHST power car and the front structures (110 km/h : half model)

5. KHST 동력차와 15 ton 트럭의 충돌해석

본 절에서는 KHST 동력차가 110 km/h로 15 ton 트럭과 정면충돌 및 off-set 충돌을 하였을 때 어떠한 거동을 보이는지 수치해석적으로 평가하였다. 유한요소모델은 19,830개의 솔리드 요소, 302,954개의 쉘 요소, 68개의 beam 요소 그리고, 17개의 bar 요소로 구성되어 있으며, 전체 절점수는 313,755개이다. Fig. 6은 15 ton 트럭과 충돌 후 120 ms에서의 압괴거동과 상당 소성변형도를 나타낸 것인데, 전두부가 순차적으로 압괴된다. 그러나, 동력차 전방의 출입구가 일부 압괴되지만, 이는 전두부에서의 충격에너지 흡수와 운전실 보호 측면에서 바람직하다고 할 수 있다. Fig. 7은 140 ms에서 15 ton 트럭과 off-set 충돌해석한 후 압괴거동과 상당 소성변형도로 나타낸 것이다. 트럭의 뒷 부분과 충돌하는 동력차 전두부가 부분적으로 압괴되고, 충격력에 의해서 트럭이 회전

하지만 운전실은 압괴되지 않는다. 따라서, KHST의 최종 설계는 off-set 충돌에 있어서도 충돌안전도에 잘 부합된 모델임을 알 수 있다. Fig. 8은 15 ton 트럭과 KHST 동력차가 충돌했을 때 충격력과 충격 흡수에너지를 나타낸 것이다. 동력차를 강제벽에 충돌하였을 때와 마찬가지로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되어, 충돌안전도 관점에서 바람직한 결과라고 할 수 있다.

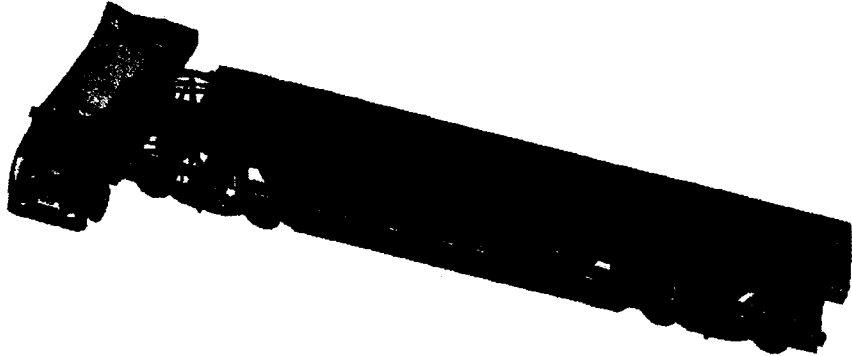


Fig. 6 Deformed shapes and plastic strain distribution for the front collision of 15 ton truck and KHST (110 km/h)

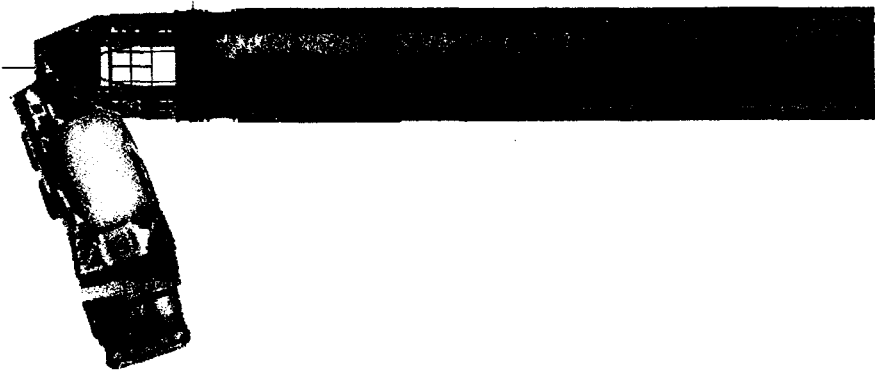


Fig. 7 Deformed shapes and plastic strain distribution for the offset collision of 15 ton truck and KHST (110 km/h)

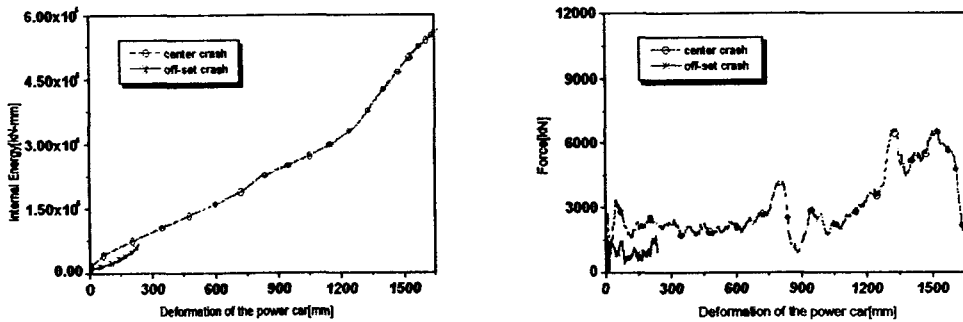


Fig. 8 Crash responses of 15 ton truck and KHST

6. KHST의 운전자의 충돌특성 해석

KHST 전두부에 운전자인 dummy를 탑재하였을 때 어떠한 거동이 발생하는지 SNCF 시나리

오 하에서 충돌해석하였다. Fig. 9는 해석에 사용된 유한요소 반쪽모델로, 솔리드 요소 9,877개, 셸 요소 46,172개, bar 32개로 구성되었으며, 전체 절점수는 56,980개이다. 충돌 후 100 ms, 120 ms에서 압괴거동과 상당 소성변형도를 보면, 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴가 되며 운전실이 보호되어 운전자에게 큰 부상을 입히지 않음을 알 수 있다. Table 1은 운전자의 상해치를 나타낸 것으로 HIC, Chest 가속도, Femur에 걸리는 하중 모두 안전한 영역 내에 있다.

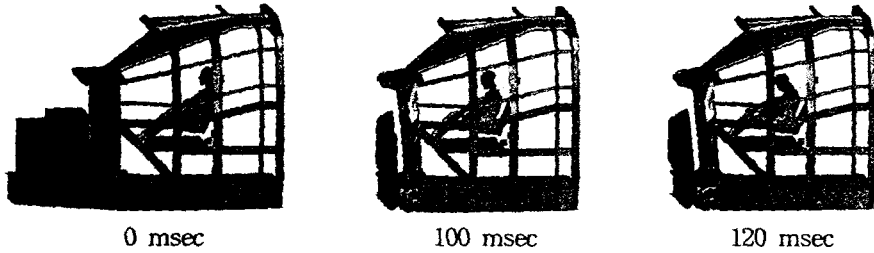


Fig. 9 Driver responses under the SNCF Scenario

Table 1 Injury indices under the SNCF Scenario

	HIC	Chest(g)	Femur(kN)	검토
기준치	1000	60.0	10.0	
KHST	101.5	22.0	4.0	안전벨트 착용시 안전

7. 연쇄충돌 해석 및 설계평가

KHST의 동력차, 동력객차, 객차 등 3량을 편성하여 3차원 셸 모델로 연쇄 충돌하는 해석을 수행하고, 충돌시 차량간 연결구조에 발생하는 충격변형도를 평가하였다. 해석모델은 유한요소 반쪽 모델로 동력차, 동력객차, 객차의 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭임이 고려되어 생성되었는데, 평균격자크기 35 mm인 15,805개의 솔리드 요소, 340,078개의 셸 요소로 구성되고, 전체 절점수는 305,652개이다.

연결부위에 작용하는 충격력이 상대적으로 심한 경우를 대상으로 하기 위하여 동일한 열차와 30 km/h로 정면 충돌하는 사고 시나리오를 사용하여 연쇄충돌 해석을 수행하였다. Fig. 10은 250 ms에서의 압괴거동과 상당 소성변형도를 나타낸 것인데, 최대 상당 소성변형도가 6% 이하이므로 연결구조가 파단될 가능성은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

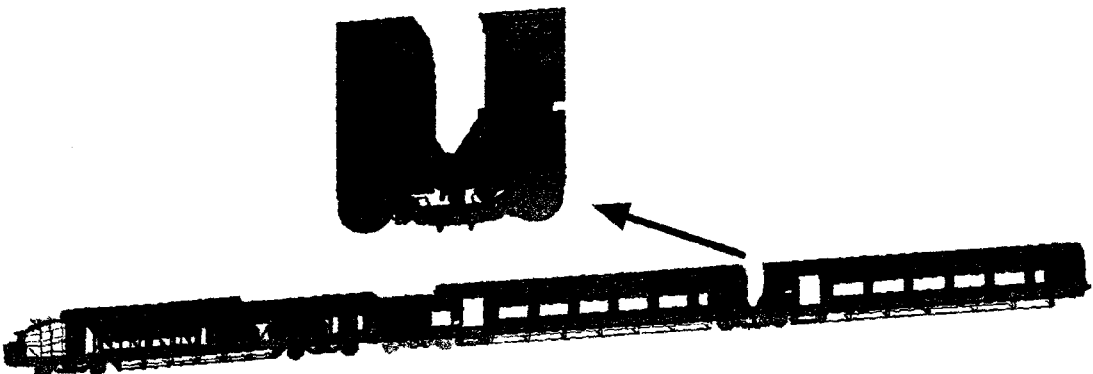


Fig. 10 Deformed shapes and plastic strain distribution of the front three units in KHST (30 kph : half model)

8. 결과

최종적으로 설계 확정된 KHST의 전두부에 대하여 충돌안전도 해석을 수행하여 KTX의 전두부와 비교하였다. KHST는 6 MJ 이상의 충격에너지를 흡수할 수 있었으며 SNCF 충돌사고 시나리오에서 운전실이 압괴되지 않았다. 또한, 전두부만의 유한요소모델을 사용하여 충돌해석한 결과와 동력차 전체 모델의 해석결과를 비교해 보면, 충돌 시 압괴거동 뿐만 아니라 충격력, 내부에너지 등에 큰 차이가 없었다. 그러므로, 초기 설계단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌해석한 결과를 활용하여도 무난한 것으로 판단되며, 이렇게 하면 해석시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라, 계속적인 설계 수정작업을 용이하게 할 수 있다.

15 ton 트럭과의 정면 및 off-set 충돌 조건을 해석하여 충돌시 실제 상황의 안전도를 평가하였는데, 설계 생성시 가이드 라인으로 사용한 동력차를 강체벽에 충돌시켰을 때와 비슷한 거동을 나타내며, 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되고 운전자 생존공간이 확보되어 충돌안전도 관점에서 양호한 특성을 보여주었다. 또한, 운전자인 더미 모델을 탑재하여 충돌해석을 수행하였는데, 운전자가 시트벨트와 같은 방법으로 시트에 고정되어 있는 경우에는 상해치의 크기가 충분히 작아서 부상의 위험은 별로 없었다.

동력차, 동력객차, 객차 등 3량 편성 모델을 사용하여 연쇄 충돌해석을 수행하였는데, 30 km/h로 정면충돌하는 경우에 당초 설계에서 의도한 대로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴가 되고 연결부위에 구조적 파손은 생기지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. L. M. Cleon, J. Legait, D. Leveque(1997), "Passive safety concepts applied to TER X7250 Diesel railcar ", WCCR, Vol. D, pp. 861-867
2. H. Waldeck, "Crashworthiness simulations of the ICE power unit ", KRUPP notes, pp. 975-983.
3. L. M. Cleon(1994), "Tolerances a la collision des materiels ferroviaires optimisation de la securite passive des structures de vehicule ", WCCR '94, pp. 885-891.
4. J. H. Lewis(1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCCR '94, pp. 893-900.
5. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy rolling stocks," *PUCA '93*, pp.73-81.
6. A. Marissal, B. Marguet, P. Drazetic, and Y. Ravauld(1992), "Comportement au choc de vehicules guides", *Revue Technique Gec Alsthom*, No.9, pp. 55-62.
7. ESI(1999), "PAM-System Manual".
8. 규정서 외 13인(1999), "설계기반기술 세부분야: 충돌안전도 해석기술 개발 4차년도 연차보고서".