

# 한국형 고속전철 동력차 최종설계의 충돌안전도 분석

## Crashworthiness on the final design of the KHST power-car

노규석\*, 구정서\*, 송달호\*

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

---

### ABSTRACT

The most important technology to improve crashworthiness of high speed trains is to design their front structures to absorb crash energy easily. In this paper, crashworthy designs of the front structures in KTX and KHST are compared by numerical simulation under SNCF accident scenario. Furthermore, to evaluate their crashworthiness under a typical real situation, the power cars are simulated for the accident collided against a deformable dump truck of 15 tons at 110 kph. The front structure of KHST, finally designed, shows a good crashworthy characteristics. Finally, the impact strength of coupling components is evaluated by analyzing a consist of the front three KHST units under scenario of train-to-train collision at 30 kph.

---

### 1. 서론

고속전철의 충돌안전도 설계에 있어서 가장 중요한 핵심 기술은 전두부에서 충격에너지를 잘 흡수하도록 설계하는 것이다. 특히 건널목에서 비교적 높은 속도로 장애물과 충돌하는 사고의 경우, 충돌 에너지의 70 ~ 80 %를 동력차에서 흡수하여야 하므로 더욱 중요하다.<sup>[1-6]</sup> 최근 선진국에서 개발하는 고속전철(TGV-Duplex, TGV-NG, American Flyer 등)은 전두부에서 5 MJ 이상의 충격에너지를 흡수하도록 설계하고 있다.<sup>[7]</sup> 본 연구에서도 이러한 추세에 부응하여 한국형고속전철 KHST 전두부에서 5 MJ 이상의 에너지 흡수가 가능하도록 설계하였다. KHST 전두부는 경부고속전철 KTX 전두부에 비하여 충격에너지 흡수능력이 대폭 향상될 수 있도록 개념설계에서부터 완전히 상이하게 설계되었다. 본 논문에서는 KTX 전두부와, 초기설계된 KHST의 전두부, 상세설계를 통하여 확정된 KHST 전두부를 충돌안전도 관점에서 서로 비교하고, 동력차 전체 모델로 해석한 결과와 서로 일치하는지 검토하였다. 최종적으로 KHST 동력차가 실제 15 ton 트럭과 정면 및 off-set 충돌할 때 어떠한 거동을 보이는지 해석하여 타당성을 평가하였다. 또한, 30 kph 정면 충돌사고 시나리오 하에서 KHST의 동력차, 동력객차, 객차 등 3량을 편성에 대하여 3차원 셀 모델로 연쇄 충돌하는 해석을 수행하고 충돌 시 차량간 연결구조의 안전성을 평가하였다.

### 2. 전두부 구조 설계

---

\* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

Fig. 1은 KTX 전두부의 충격에너지 흡수구조와 압괴거동을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 충돌사고 시에는 헤드스톡과 알루미늄 하니컴에서 대부분의 충격에너지가 흡수되는 구조로 되어 있으나, 하니컴과 헤드스톡의 압괴 하중이 후방의 운전실 압괴하중(6,000 kN)보다 높아서 충격에너지 흡수에 불리하다.

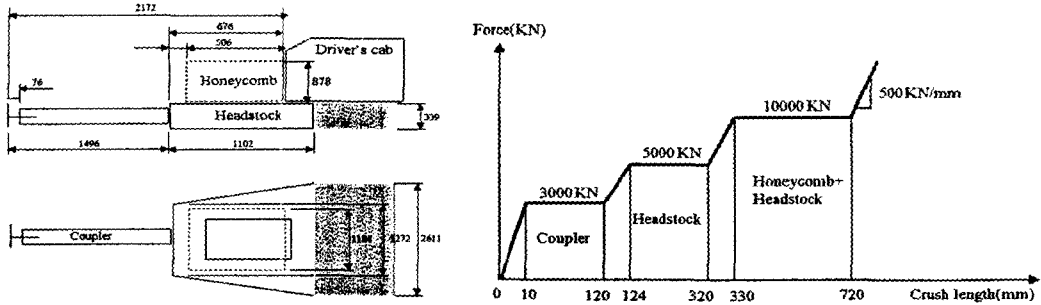


Fig. 1 Front structures and crush behavior of KTX

그러나 한국형고속전철(KHST)에서는 이러한 단점을 보완하여 충격에너지 흡수가 유리하도록 새로운 개념의 전두부를 설계하였다. 본 연구에서는 전두부의 에너지 흡수구조가 다음과 같이 4 단계로 순차적으로 압괴되도록 하였다.

- 단계 1 : 2,000 kN 이하에서 유압식 카트리지에 의하여 충격에너지를 흡수, 변형길이는 120 mm, 충돌속도에 따라 에너지 흡수량이 변함
- 단계 2 : 2,000 kN의 충격하중에서 커플러의 고정핀 절단
- 단계 3 : 2,000 kN의 충격하중에서 금속 튜브의 팽창 또는 압괴에 의해 에너지를 흡수(1.6 MJ), 튜브의 압괴길이는 800 mm
- 단계 4 : 5,000 kN의 충격하중에서 알루미늄 하니컴과 헤드스톡이 동시에 압괴(4.5 MJ), 헤드스톡의 압괴하중 3,000 kN, 하니컴의 압괴 하중 2,000 kN, 압괴길이 900 mm

Fig. 2는 앞에서 정의한 순차적 압괴 시나리오를 만족시킬 수 있도록 개념설계한 KHST의 전두부와 이에 상응하는 압괴거동을 나타낸 것이다. 하니컴과 헤드스톡의 압괴하중이 5,000 kN 정도로 설계되어서 후방의 운전실 압괴하중(6,000 kN)보다 낮으므로 운전실의 압괴발생 없이 전두부의 압괴에 의하여 충격에너지가 흡수될 수 있다.

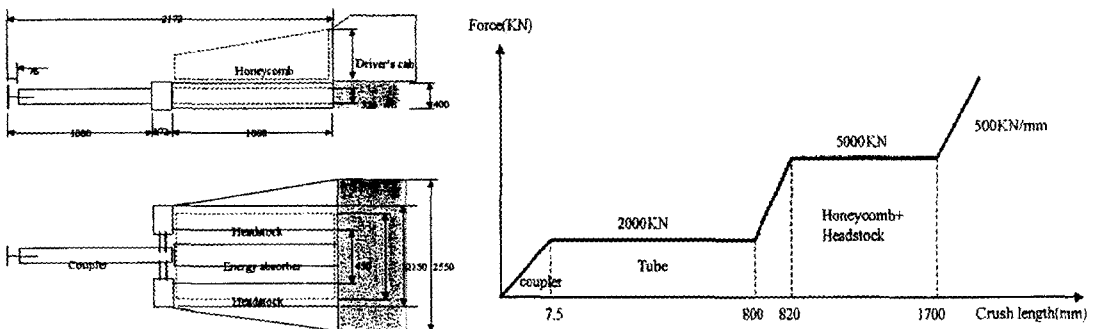


Fig. 2 Front structures and crush behavior of KHST designed conceptually

Fig. 2와 같이 개념설계 된 KHST의 전두부는 상세설계를 진행하는 과정에서 다른 설계분야와의 인터페이스 조건들로 인하여 일부 변경되었다. 그러나 순차적 압괴를 고려한 에너지 흡수 메카니즘은 개념설계와 동일하다. Fig. 3은 최종적으로 설계 확정된 KHST의 전두부 구조와 압괴거동을 나타낸 것이다. 확정된 전두부 설계는 기기들의 외부와 운전실 하부구조와의 조화를 최대한 고려하였다. 운전실 압괴하중이 6,100 kN 인데 반하여 전두부는 최대 4,455 kN 이하에서 압괴되도록 설계하여 사고 발생시 운전실이 보호되도록 하였다.

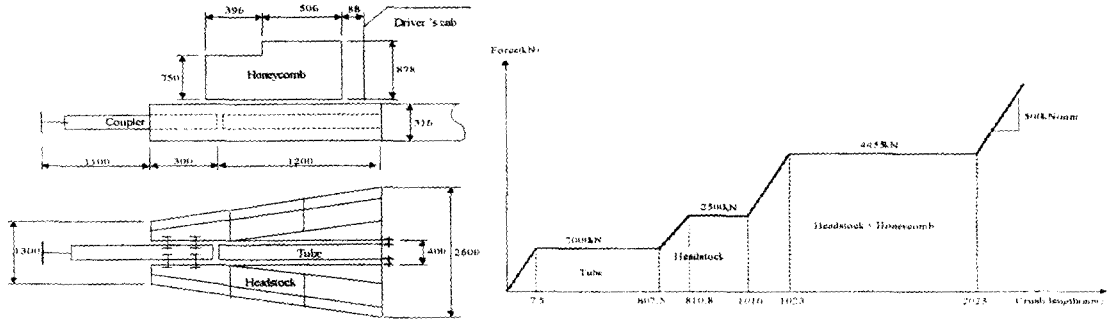


Fig. 3 Front structures and crush behavior of KHST designed in details

### 3. 전두부의 충돌안전도 설계

KHST 전두부 설계의 타당성을 평가하기 위하여 SNCF 충돌사고 시나리오(110 kph 속도에서 15 ton 장애물과 충돌) 하에서 유한요소해석을 수행하여 충격에너지 흡수와 운전실 압괴 거동을 KTX와 비교 평가하였다. 충돌해석에는 충돌전용 소프트웨어인 PAMCRASH<sup>[8]</sup>를 사용하였는데, 요소의 평균 격자 크기는 35 mm 정도이고, 전두부를 제외한 동력차의 차체 질량은 충돌부위 반대쪽 끝 부분에 부착하였다.

Fig. 4-6은 각 전두부 설계의 압괴 거동을 나타낸 것이다. KHST 설계의 경우는 KTX와 달리 전두부부터 순차적인 압괴가 발생하고 운전실의 생존공간도 온전히 보호된다. 이러한 해석결과는 충격에너지 흡수 측면과 운전자 보호 측면에서 매우 유리한 것이다. Fig. 5의 KHST 초기설계도 충돌안전도 관점에서는 매우 훌륭하지만 공력설계 및 외관설계와의 인터페이스 때문에 변경되어 Fig. 6의 최종설계로 변경되었다. Fig. 7은 전두부에서 흡수된 충격에너지와 충격력을 KTX와 KHST의 초기설계 및 최종설계를 상호 비교하여 나타낸 것이다. KTX의 경우에는 초기 붕괴하중은 10,000 kN 이상으로 매우 크지만 일단 압괴가 발생하면 압괴하중이 2,000 kN 정도로 대폭 떨어져서 전체적인 평균 압괴하중이 2,200 kN 정도에 불과하게 된다. 따라서, 전두부에서 흡수할 수 있는 충격에너지도 겨우 2.5 MJ 정도이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 설계된 KHST의 초기설계에서는 초기 붕괴하중이 7,000 kN 이하로 대폭 저하되고 평균 압괴하중은 4,350 kN 정도로 크게 향상되었다. 최종설계에서도 초기 붕괴하중은 7,000 kN 이하이고 평균 압괴하중은 4,200 kN 수준이며, 흡수되는 충격에너지는 4.5 MJ 정도이다. 만약 본 해석에서는 고려하지 않은 커플러(0.084 MJ 흡수) 및 커플러 후방에 부착된 에너지 흡수용 튜브(1.6 MJ 흡수)까지 고려하면, 전체적으로 6.18 MJ 정도의 에너지 흡수가 가능하다.

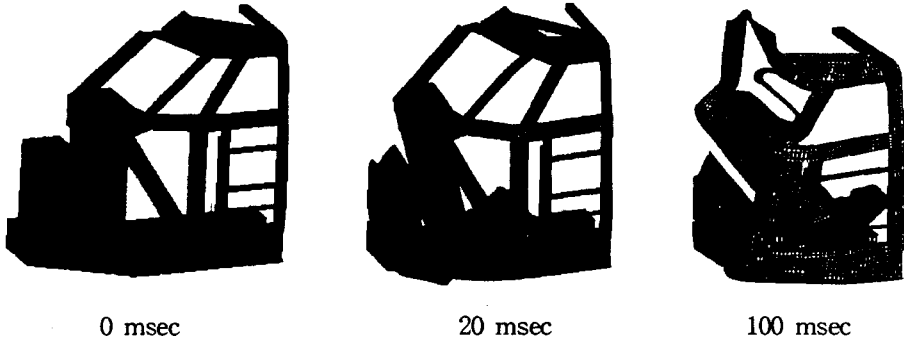


Fig. 4 Deformed shapes of the KTX front structure(110 km/h : half model)

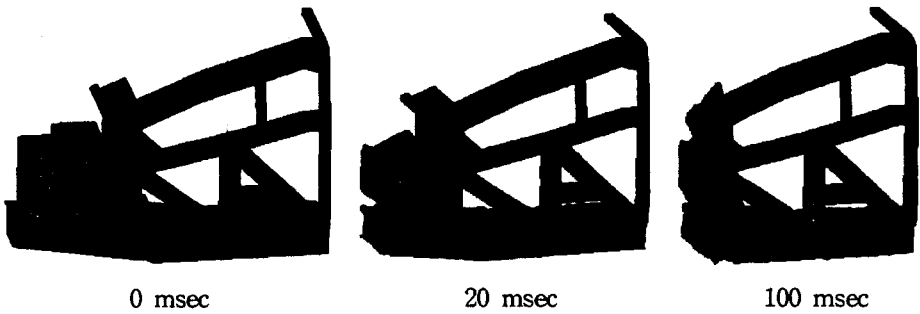


Fig. 5 Deformed shapes of the KHST front structure initially designed(110 km/h : half model)

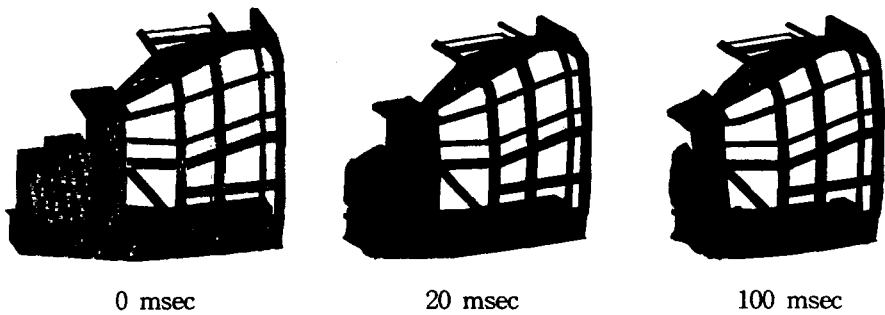


Fig. 6 Deformed shapes of the KHST front structure finally designed (110 km/h : half model)

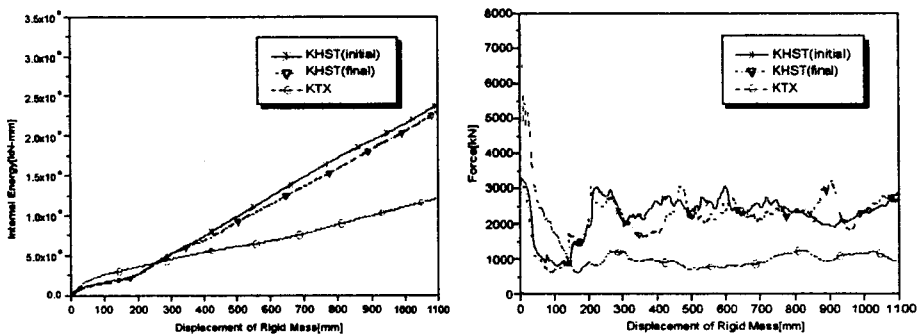


Fig. 7 Crash responses of the KHST front structure (110 km/h : half model)

#### 4. 동력차의 충돌해석

KHST 동력차에 대하여 Fig. 6의 전두부 모델과 동력차 전체모델을 해석한 결과가 서로 일치하는지를 검토하였다. Fig. 8의 해석모델은 솔리드 요소 9,877개, 쉘 요소 91,396개와 질점수 98,355개로 구성하였는데, 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭이며, SNCF의 충돌 사고시나리오에 대하여 해석하여 100 ms에서의 압괴거동을 나타낸 것이다. 전두부만을 충돌해석한 경우와 압괴양상이 비슷하지만, 운전실 후방 출입문에도 약간의 압괴가 발생한다. Fig. 9는 KHST 동력차가 흡수하는 충격에너지와 충격력을 나타낸 것이다. 전두부만을 충돌 해석한 결과와 유사한 결과(전두부모델의 평균압괴하중: 2,101 kN, 전체 동력차모델의 경우: 2,300 kN)를 나타내고 있다.

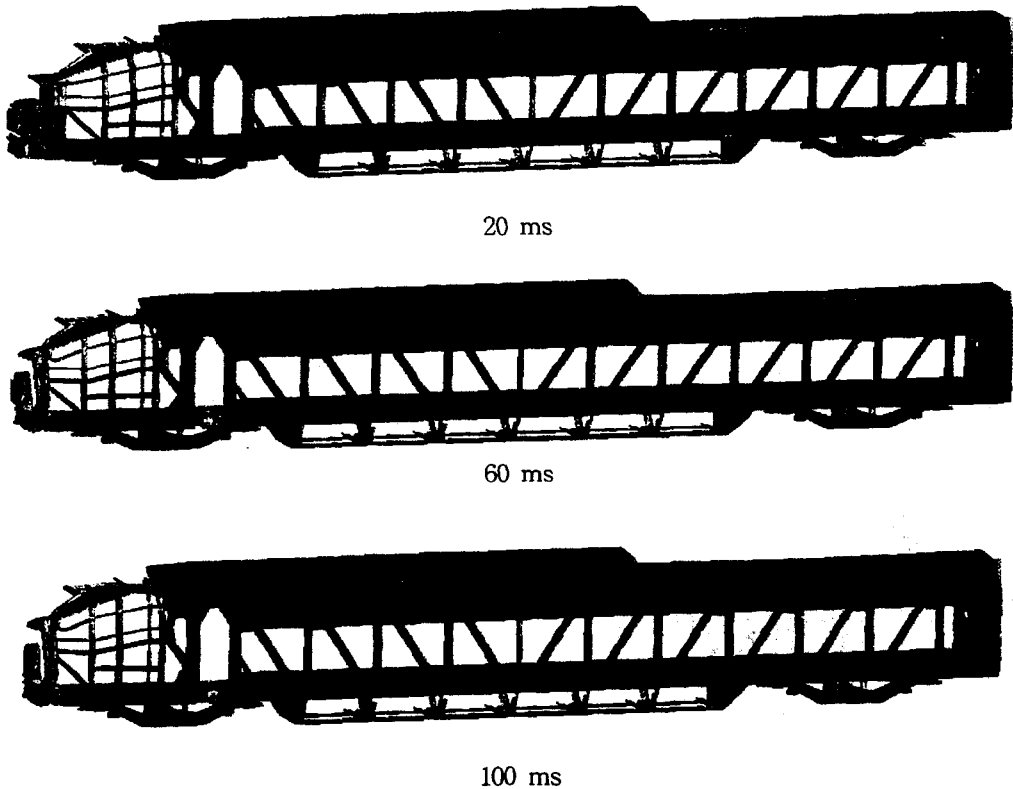


Fig. 7 Deformed shapes of the KHST power car (110 km/h : half model)

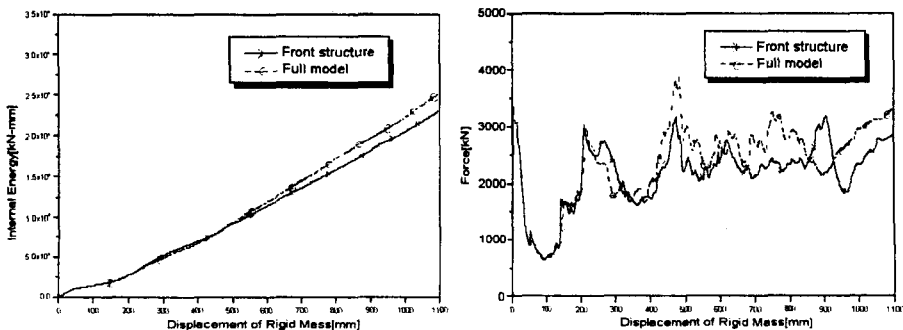


Fig. 8 Crash responses of the KHST power car (110 km/h : half model)

## 5. 트럭과의 충돌해석

본 절에서는 KHST 동력차가 SNCF 충돌사고 시나리오에서 실제 트럭과 충돌할 때 어떠한 거동을 보이는지 수치해석적으로 평가하였다. Fig. 10의 유한요소 모델은 15 ton 트럭과 KHST 동력차의 전체 유한요소 모델인데, 솔리드 요소 19,830개, 쉘 요소 247,804개 그리고 전체 절점수는 258,694개로 구성하였으며 격자 크기는 평균 35 mm이다. 충돌 후 100 ms에서의 압괴거동을 살펴 보면 당초 설계에서 의도한 대로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴가 되고, 운전실은 압괴되지 않는다. 또 운전실 후방의 동력차 출입구 부분이 약간 압괴가 되는데, 이것은 운전실 보호 측면에서 바람직한 현상이라고 할 수 있다.

Fig. 11은 KHST 동력차가 110 km/h로 15 ton 트럭과 off-set 충돌한 후 140 ms에서의 압괴거동을 나타낸 것이다. 트럭과 정면충돌 할 때와 마찬가지로 트럭의 뒤쪽 끝 부분과 충돌하는 동력차 전두부의 하니컴, 헤드스톡 부위가 부분적으로 압괴되지만 이 경우 역시 운전실은 침투되지 않는다. 따라서 Fig. 10과 Fig. 11의 결과로 볼 때, KHST의 최종설계는 당초의 설계목표를 잘 만족시키고 있다고 할 수 있다.

## 6. 동력차-동력객차-객차의 연쇄충돌해석

Fig. 12의 유한요소 반쪽 모델은 동력차, 동력객차, 객차의 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭임이 고려되어 생성되었는데, 평균 격자크기 35 mm인 14,789개의 솔리드 요소, 296,191개의 쉘 요소로 구성되고, 전체 절점수는 259,494개이다. Fig. 12는 차간연결구조에 큰 충격하중이

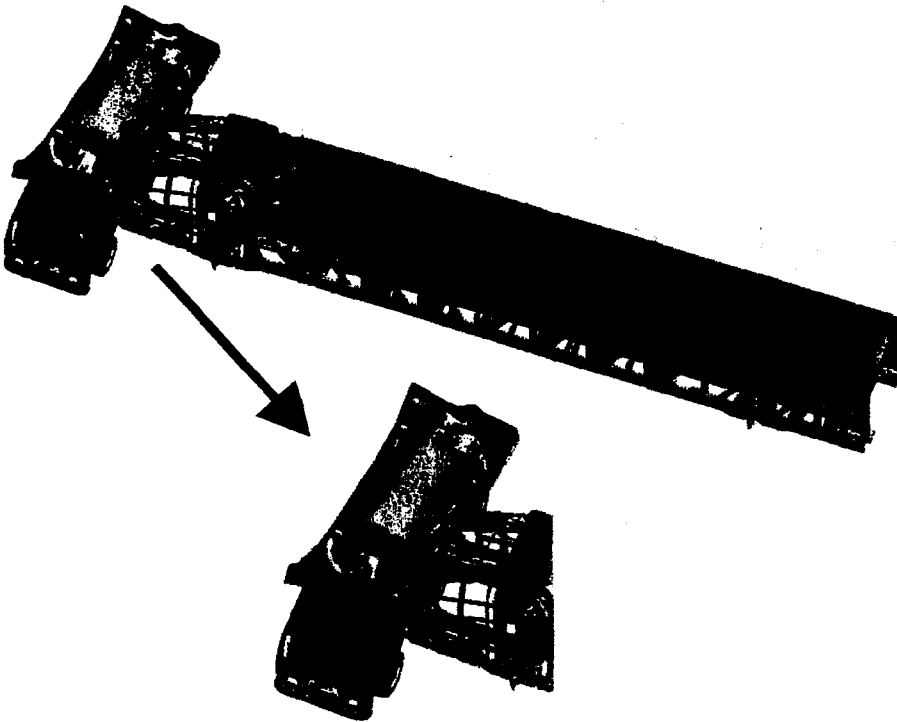


Fig. 10 Deformed shapes for the collision of truck and KHST power-car 110 km/h)

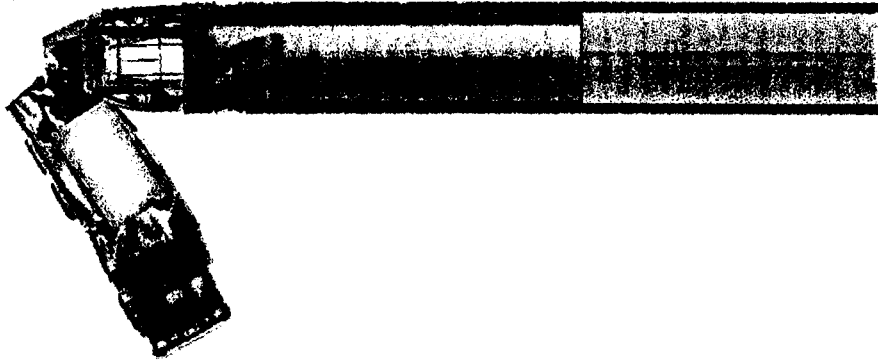


Fig. 11 Deformed shapes for the offset collision of truck and KHST power-car 110 km/h)

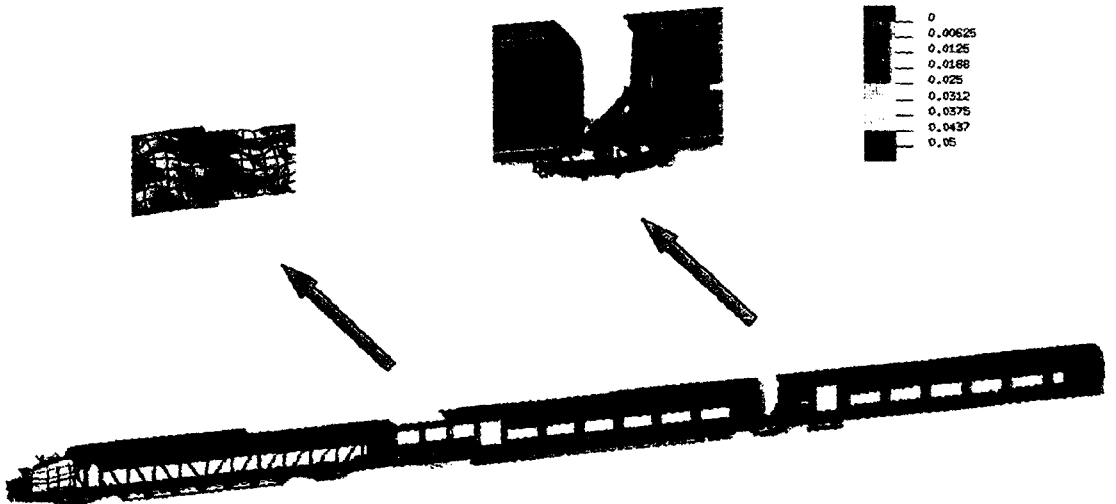


Fig. 12 Deformed shapes of the front three units in KHST (110 kph : half model)

발생하는 30kph 정면충돌 시나리오를 적용하여 연쇄충돌해석을 수행한 후 100 ms에서의 압피거동과 상당 소성변형도를 나타낸 것이다. 차량간 연결구조에 발생하는 최대 상당소성변형도가 5% 이하이므로 재료에 심각한 파단이 발생될 징후는 없다고 판단된다.

## 7. 결과

KHST 동력차의 초기설계 및 최종설계에 대하여 충돌안전도 해석을 수행하여 KTX와 비교·평가하였다. KHST 최종설계는 전두부에서 6.18 MJ의 충격에너지를 흡수하여 KTX의 2.5 MJ보다 147% 이상의 향상이 이루어 졌다. 또한, KHST의 경우 충돌사고 발생시에도 운전실이 보호되며 하니캡과 헤드스톡이 순차적으로 압피되어서 양호한 충돌특성을 보여주었지만, KTX의 경우는 운전실에 압피가 발생하여 운전자 보호에 미흡한 것으로 판단된다.

흔히 설계단계에서 사용하는 전두부만의 유한요소모델을 사용하여 충돌해석한 결과와, 설계 후 해석 및 평가 단계에서 사용하는 동력차 전체 유한요소 모델의 해석결과를 비교해 볼 때, 충돌 후

의 압괴거동 뿐만 아니라 충돌에너지 흡수, 충격력 등에도 큰 차이가 없다. 따라서, 초기 설계단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌안전도 해석과 설계에 활용하여도 무난한 것으로 판단되며, 반복적으로 수정되는 설계 보완 단계에 용이하게 대처할 수 있는 장점이 있다.

실제 충돌사고와 유사하게 동력차 전두부 설계를 평가하기 위하여 15 ton 트럭과의 정면 및 off-set 충돌해석을 수행하였는데, 설계 생성단계에서 사용한 사고 시나리오와 마찬가지로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되고 운전실에 압괴가 발생하지 않아서 충돌안전도 설계 목표에 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.

30 km/h 정면충돌 조건을 사용하여 KHST 동력차-동력객차-객차의 연쇄충돌 해석을 수행하여 연결부위 구조의 파단 가능성을 평가하였는데 충돌에 의하여 최대 5% 이하의 상당소성변형도가 발생하였으므로 파단의 위험이 크지 않는 것으로 분석되었다.

### 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 opimisation 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. Ravalrd(1992), "Comportement au choc de vehicules guides", *Revue Technique Gec Alsthom*, No.9, pp. 55-62.
7. L. M. Cleon, "Nouvelle conception des vehicules ferroviaires vis a vis de la resistance au choc", SNCF notes, pp. 960-971.
8. ESI(2000), "PAM-System Manual"