

한국형 고속전철 동력차 최종설계의 충돌안전도 평가 연구

An Evaluation of Crashworthiness for the final design of the KHST power-car

노규석*, 구정서*

K. S. Rho, J. S. Koo

ABSTRACT

This paper evaluates crashworthiness of KHST carbodies under the SNCF accident scenario (collision against a movable rigid mass of 15 tons at 110 kph) and the scenario of train-to-train collision at 30 kph. The numerical results show that the final design of the KHST power-car doesn't have a good response on crashworthiness. So an improved design has been suggested for it. The improved design has shown good performances in the viewpoint of energy absorption and survival space at several numerical simulations, such as the accident collided against a deformable dump truck of 15 tons at 110 kph, the driver's dummy analysis, and the accident of train-to-train collision for the first three units at 30 kph.

1. 서론

철도 노선 및 수송량 증가는 불가피하게 각종 사고 발생을 증가시키게 되는데, 주요한 사고 유형으로는 건널목사고, 열차 대 열차 충돌 및 추돌사고, 선로위 장애물이나 선로 결함에 의한 탈선 전복사고 등을 들 수 있다. 이러한 안전문제에 대응하기 위하여 선진국에서는 사고 발생 시 피해를 저감할 수 있는 다양한 차량 설계 기술을 개발하여 적용하고 있다[1-3].

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[4-6].

이러한 특성에 맞추어 충돌안전도 관점에서 제시된 전두부 모델(KHST_DT)은 여러 가지 원인으로 최종 시제 제작과정에서 동력차 전두부(KHST_FNL)로 변경되었다. 이것의 충돌 에너지 흡수성능을 평가한 후, 문제점을 개선하여 제안한 동력차 전두부(KHST_IPV)에 대하여 충돌 에너지 흡수 성능을 평가하였다. 아울러 KTX 전두부와도 비교하고, 동력차 전체 모델을 사용하여 해석한 결과와 일치하는지도 검토하였다. 또한, KHST 동력차가 실제 15 ton 트럭과 정면 및 off-set 충돌할 때 어떠한 거동을 보이는지 해석하여 타당성을 평가하였고, 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 쉘 모델인 KHST 동력차, 동력차차, 객차 등 3량 편성에 대하여 연쇄 충돌하는 해석을 수행하고, 충돌 시 차량간 연결구조의 안전성을 평가하였다.

* 한국기계연구원 첨단산업기술연구부, 정회원

2. 전두부의 충돌에너지 흡수 설계

Fig. 1의 상세설계 단계에서 도출한 KHST_DT 모델은 (a)와 같은 압괴특성을 갖도록 설계되었는데 최종 시제품을 제작한 동력차 전두부(KHST_FNL)는 압괴 특성과 메카니즘이 일부 변경되었다. 특히 충돌시 커플러와 에너지 흡수튜브가 헤드스톡 지지구조 뒤로 탈착되지 못하게 되어 있기 때문에 헤드스톡과 하니킴이 순차적으로 압괴되지 못하고 운전실 하부가 압괴되는 특성이 있었다. 이를 개선하기 위해서 커플러와 에너지 흡수튜브가 뒤로 탈착될 수 있도록 수정한 모델(다른 구조는 동일함)이 KHST_IPV 전두부 구조인데 (c)는 이 모델이 설계에서 설정된 압괴거동이다. 전두부는 최대 4,455 kN 이하에서 압괴되므로 압괴하중이 6,100 kN인 운전실보다 먼저 압괴된다. 이러한 순차적 압괴는 운전자의 생존공간을 확보하는데 매우 바람직하다고 할 수 있다.

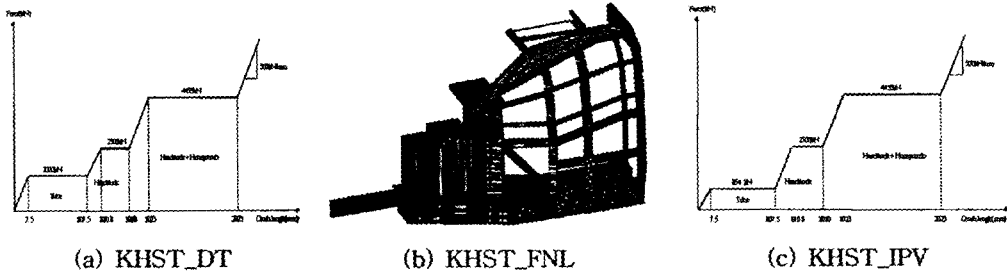


Fig. 1 Front structure and crush behavior of KHST

3. 전두부 구조의 압괴특성 해석

먼저 한국형 고속전철 KHST 전두부가 110 km/h 속도로 15 ton 장애물과 충돌하는 SNCF 충돌사고 시나리오를 적용하여 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 집중질량으로 처리하였다[8].

Fig. 2의 시제 제작한 KHST_FNL 모델은 커플러와 에너지 흡수튜브가 탈착되지 않아 헤드스톡과 하니킴이 압괴되지 않을 뿐만 아니라, 언더프레임의 center sill이 위로 꺾이어서 운전실이 침투되며 충돌에너지 흡수에도 불리하다. 반면에, KHST_IPV 모델은 전두부부터 순차적으로 압괴가 발생하고, 운전실에 생존공간이 확보된다. Fig. 3은 전두부에서 흡수된 충격에너지와 충격력을 KTX, KHST_DT, KHST_FNL, KHST_IPV와 상호 비교한 것이다. KTX의 경우에는 평균 압괴하중도 2,204 kN인 반면에 초기 붕괴하중이 15,000 kN 정도로 매우 높아 충격에너지 흡수에 불리하지만, KHST_IPV는 평균 압괴하중이 2,601 kN 이고 초기 헤드스톡 붕괴하중도 상대적으로 낮아 충격력을 흡수하는데 유리하다.

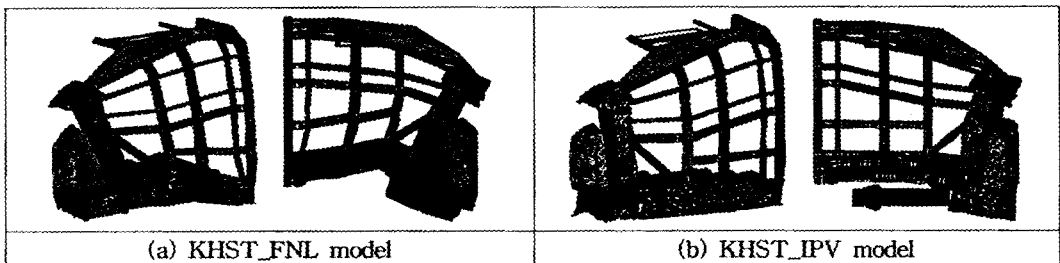


Fig. 2 Deformed shapes and plastic strain distributions of the KHST (110 km/h : half model)

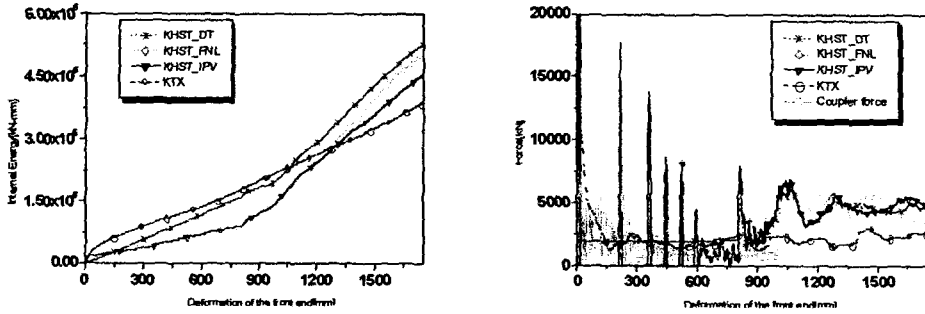


Fig. 3 Crash responses of the front structures (110 km/h : half model)

4. KHST 동력차 충돌해석

KHST 동력차 전체 모델을 충돌해석하여 전두부만을 해석한 결과와 비교하였다. 동력차 전체 모델은 10,147개의 솔리드 요소, 143,182개의 쉘 요소, 4개의 bar 요소로 구성되어 있으며, 전체 절점수는 150,205개이다. 또한, 기하학적인 형상, 경계조건, 하중 등이 대칭임을 고려한 유한요소 반쪽모델로서, 평균격자 크기는 35 mm이다.

Fig. 4는 KHST_FNL, KHST_IPV 모델에 SNCF 충돌사고 시나리오를 적용하여 압괴 양상과 상당 소성변형을 구한 것이다. KHST_IPV 모델은 헤드스톡과 하니점이 순차적으로 압괴되어 충격에너지를 흡수하는데 유리하나, KHST_FNL 모델은 커플러와 에너지 흡수튜브가 탈착되지 않아 헤드스톡과 하니점이 압괴되지 않는다. KHST_IPV 동력차가 흡수하는 충격에너지와 충격력은 Fig. 5에 나타내었다. 전두부 모델의 평균압괴하중은 2,601 kN이고, 전체 동력차 모델의 평균 압괴하중은 2,710 kN이었으며, 압괴거동 뿐만 아니라 충돌에너지 흡수, 충격력 등에 큰 차이가 없었다. 따라서, 초기 설계 단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌안전도 해석과 설계에 활용하면 시간을 단축할 수 있어서 설계가 반복적으로 수정 보완되는 경우에 유리하다.

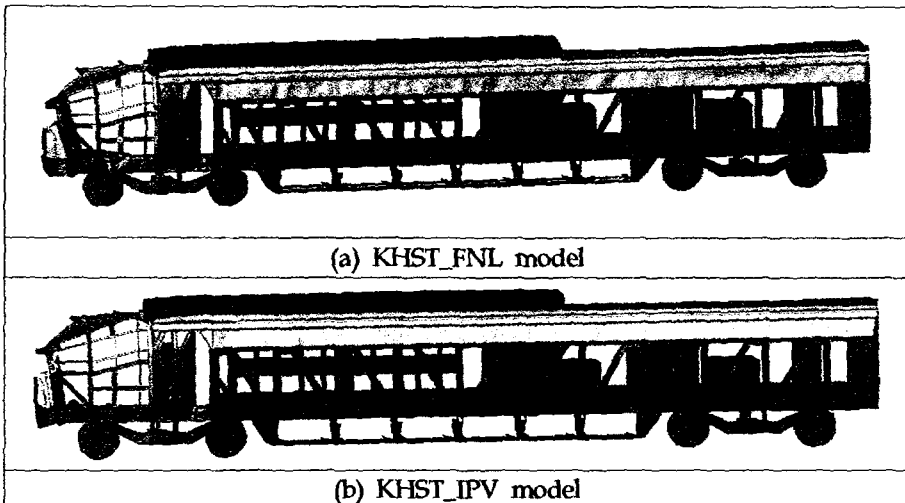


Fig. 4 Deformed shapes and plastic strain distribution of the KHST power car (110 km/h : half model)

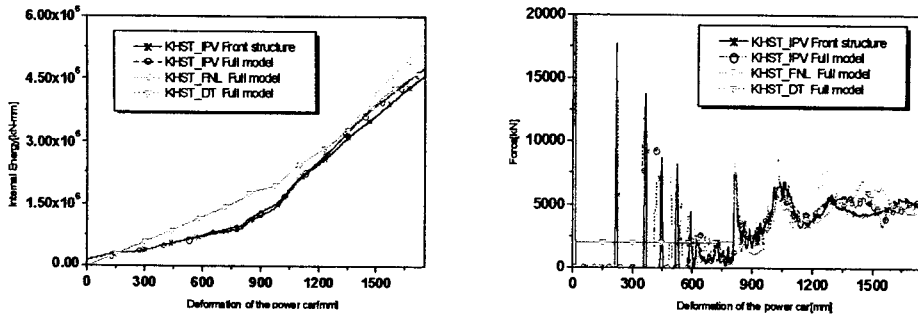
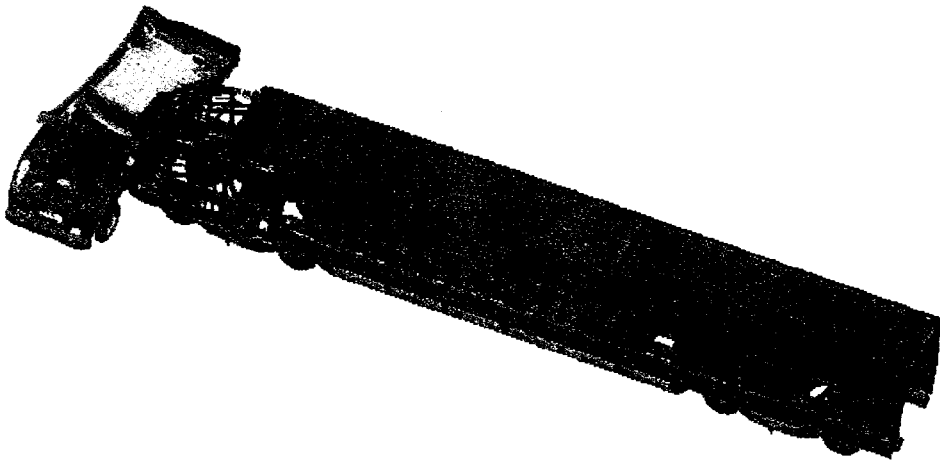


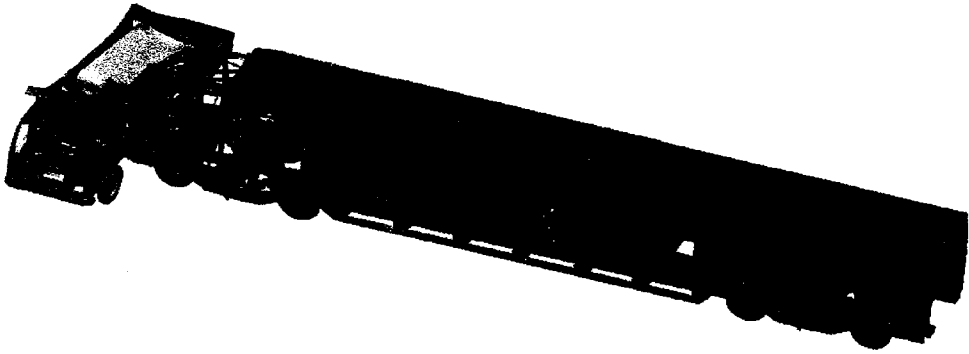
Fig. 5 Comparison for crash responses of the KHST power car and the front structures (110 km/h : half model)

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 20,694개의 솔리드 요소, 305,566개의 쉘 요소, 68개의 beam 요소 그리고, 8개의 bar 요소로 구성되어 있으며, 전체 절점수는 317,352개이다. Fig. 6은 KHST_FNL, KHST_IPV 모델의 15 ton 트럭과 충돌 후 압괴거동과 상당 소성변형도를 나타낸 것인데, 모델 모두 전두부부터 순차적으로 압괴된다. 그러나, 동력차 전방의 출입구가 일부 압괴되지만, 이는 전두부에서의 충격에너지 흡수와 운전실 보호 측면에서 매우 바람직하다고 할 수 있다. Fig. 7은 충격력과 충격 흡수 에너지를 KHST_DT, KHST_FNL, KHST_IPV를 상호 비교한 것이다. Fig. 8은 KHST 동력차가 15 ton 트럭과 SNCF 시나리오를 적용하여 off-set 충돌해석한 것을 압괴거동과 상당 소성변형도로 나타낸 것이다. 트럭의 뒷부분과 충돌하는 동력차 전두부가 부분적으로 압괴되고, 충격력에 의해서 트럭이 회전하지만 운전실은 압괴되지 않는다. 따라서, off-set 충돌에 있어서도 충돌안전도 설계가 잘 구현되었음을 알 수 있다. Fig. 9는 15 ton 트럭과 offset 충돌했을 때 KHST_DT, KHST_FNL, KHST_IPV의 충격력과 충격 흡수에너지를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 실제 15ton 트럭과의 충돌에서는 동력차 전두부의 헤드스톡이 트럭의 하부구조를 변형시키므로 KHST_FNL 모델에서도 운전실 압괴현상이 발생하지 않았다.



(a) KHST_FNL model



(b) KHST_IPV model

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

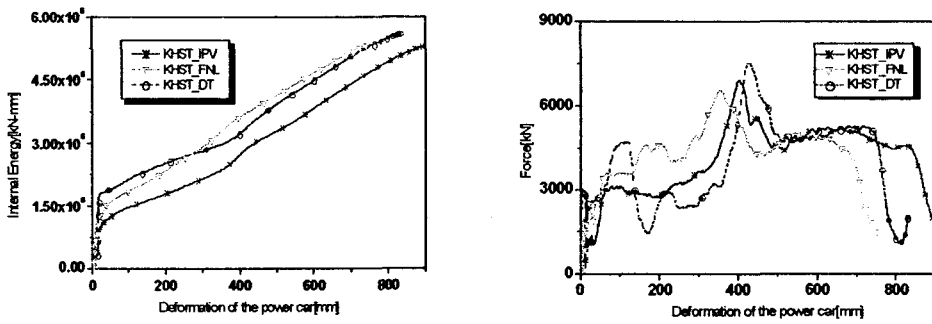
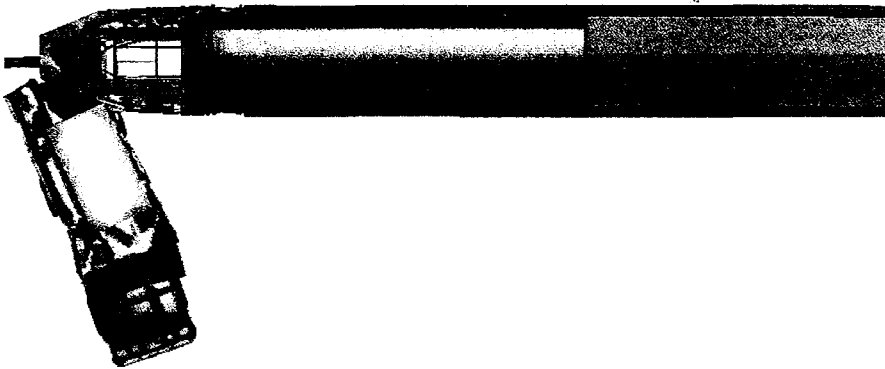
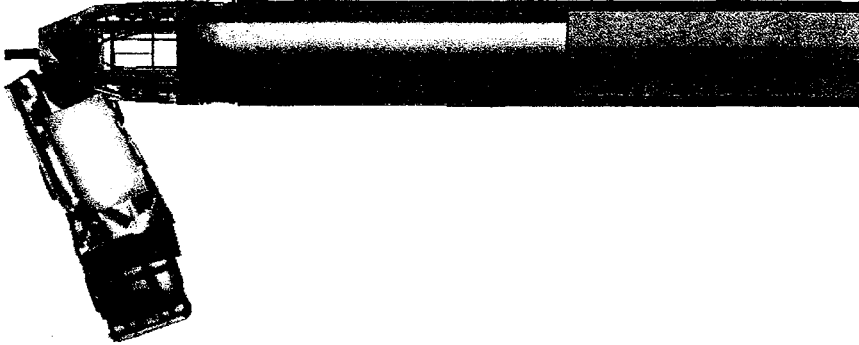


Fig. 7 Deformed shapes and plastic strain distribution for the offset collision of the 15 ton truck and KHST (110 km/h)



(a) KHST_FNL model



(b) KHST_IPV model

Fig. 8 Deformed shapes and plastic strain distribution for the offset collision of the 15 ton truck and KHST (110 km/h)

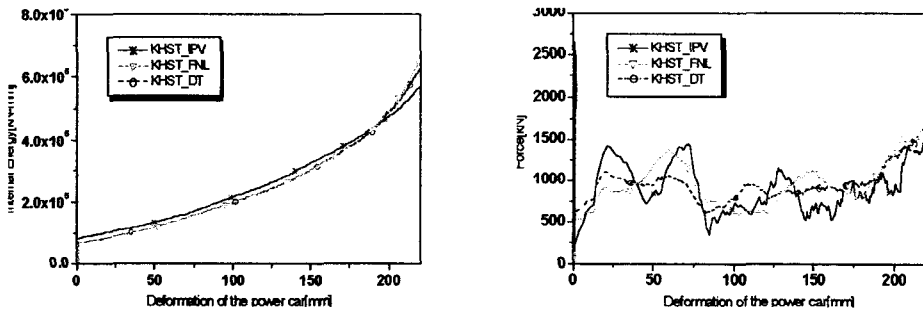


Fig. 9 Crash responses of the 15 ton truck and KHST

6. KHST의 운전자의 충돌특성 해석

KHST_FNL, KHST_IPV 전두부에 운전자인 dummy를 탑재하였을 때 어떠한 거동이 발생하는지 SNCF 충돌사고 시나리오 하에서 충돌해석하였다. Fig. 10은 해석에 사용된 유한요소 반쪽모델로, 솔리드 요소 10,147개, 쉘 요소 47,719개, bar 31개로 구성하였으며, 전체 절점수는 58,986개이다. 충돌 후 100 msec, 120 msec에서 압괴거동과 상당 소성변형도를 보면, KHST_IPV 모델은 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴가 되며 운전실이 보호되어 운전자에게 큰 부상을 입히지 않음을 알 수 있다. 그러나, KHST_FNL 모델의 경우 전두부가 충격력을 제대로 흡수하지 못하여 운전자의 다리가 상체로 올라가 위험을 초래할 수 있다. Table 1은 운전자 상해치를 나타낸 것으로 HIC, Chest 가속도, Femur에 걸리는 하중 모두 안전한 영역내에 있으나, KHST_FNL 모델 운전자의 경우에 chest의 가속도(52.3 g)가 매우 높아 기준치인 60 g에 가까움을 알 수 있다.

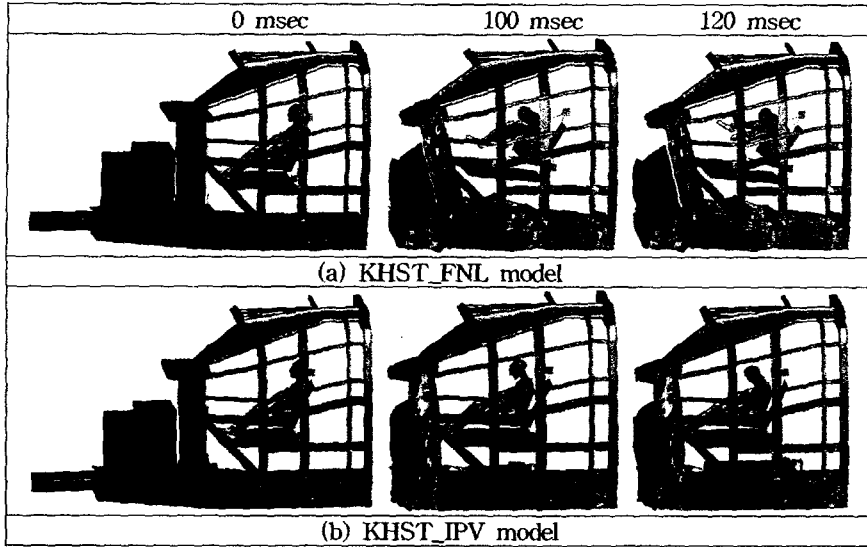


Fig. 10 Driver responses under the SNCF Scenario

Table 1 Injury indices under the SNCF Scenario

| | HIC | Chest(g) | Femur(kN) | 검토 |
|----------|-------|----------|-----------|----------------|
| 기준치 | 1000 | 60.0 | 10.0 | 중상기준 |
| KHST_DT | 101.5 | 22.0 | 4.0 | 안전벨트 착용시 안전 |
| KHST_FNL | 454.6 | 53.2 | 6.1 | Chest가 중상에 가까움 |
| KHST_IPV | 86.3 | 24.9 | 5.2 | 안전벨트 착용시 안전 |

7. 연쇄충돌 해석 및 설계평가

KHST_IPV의 동력차, 동력객차, 객차 등 3량을 편성하여 3차원 쉘 모델로 연쇄 충돌하는 해석을 수행하고, 충돌시 차량간 연결구조에 발생하는 충격 변형도를 평가하였다. 해석모델은 유한요소 반쪽 모델로 동력차, 동력객차, 객차의 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭입이 고려되어 생성되었는데, 평균격자크기 35 mm인 15,844개의 솔리드 요소, 341,486개의 쉘 요소로 구성되고, 전체 절점 수는 306,428개이다. Fig. 11은 연쇄충돌해석을 수행한 후의 압괴거동을 나타낸 것인데, 최대 상당 소성변형도가 6% 이하이므로 연결구조가 파단될 가능성은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. KHST_DT와 KHST_IPV가 흡수하는 충격에너지와 충격력은 Fig. 12에 나타내었다.

8. 결과

로템에서 최종적으로 설계하여 시제 제작한 동력차(KHST_FNL)는 충돌시 커플러와 에너지 흡수 튜브가 헤드스톡 지지구조 뒤로 탈락되지 않는 구조로 되어 있기 때문에 헤드스톡과 하나됨이

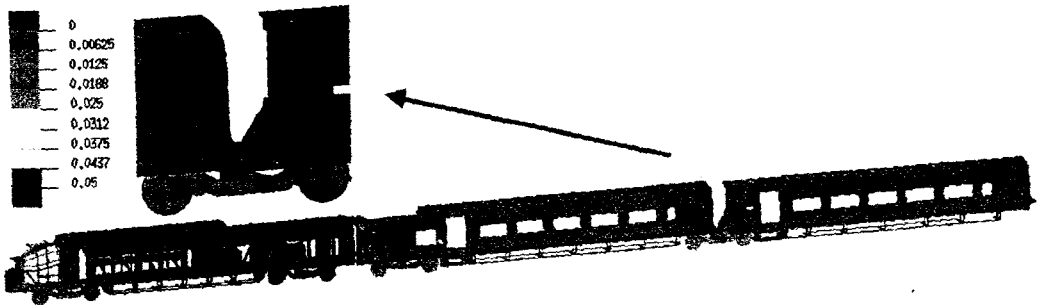


Fig. 11 Deformed shapes and plastic strain distribution of the front three units of KHST (30 kph : half model)

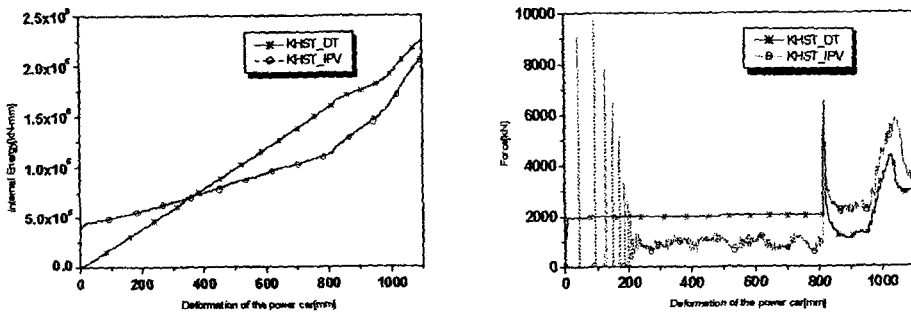


Fig. 12 Crash responses of the front three units of KHST (30 kph)

순차적으로 압피되지 못하고 운전실 하부가 압피되어 충격에너지를 흡수하는데 바람직하지 못하였다. 이를 개선하기 위해서 커플러와 에너지 흡수튜브가 뒤로 탈착될 수 있도록 개선한 모델 (KHST_IPV)은 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압피되고, 운전자의 생존공간을 확보하여 충격에너지를 흡수하는데 매우 유리하였다.

전두부만의 유한요소모델을 사용하여 충돌해석한 결과와 동력차 전체 유한요소 모델의 해석결과를 비교해 보면, 충돌 시 압피거동 뿐만 아니라 충격력, 내부에너지 량 등에 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러므로, 초기 설계단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌해석 한 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 압피되고 운전자 생존공간이 확보되어 충돌안전도 관점에서 양호한 특성을 보여주었다.

더미 모델을 이용하여 운전자가 탑승한 상태로 충돌하였을 때의 거동을 해석하였는데, KHST_DT 모델과 KHST_IPV 모델의 운전자가 시트벨트와 같은 방법으로 시트에 고정되어 있는 경우에는 상해치의 크기가 충분히 작아서 부상의 위험은 별로 없었다. 그러나, KHST_FNL 모델 운전자의 경우에 chest의 가속도(52.3 g)가 매우 높아 기준치인 60 g에 가까워서 부상의 위험을 초래할 수 있다.

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

참고문헌

1. J. H. Lewis(1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCCR, pp.893-900.
2. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy rolling stocks," *PUCA'93*, pp.73-81.
3. 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.
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. ESI(1999), "PAM-System Manual".
8. 구정서 외 13인(1999), "설계기반기술 세부분야: 충돌안전도 해석기술 개발 4차년도 연차보고서".