

한국형 고속전철 동력차의 충돌안전도 설계에 관한 연구

A Study on Crashworthy Design for the Power-car of KHST

노규석*, 구정서*, 송달호*, 김동성*

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

ABSTRACT

This paper describes a crashworthy design for the front structure of KHST (Korean High Speed Train) under the SNCF accident scenario (collision against a movable rigid mass of 15 tons at 110 km/h). The front structure designed in a new concept shows good behaviours in crashworthy point of view. It collapses in a progressive and well-controlled fashion. To evaluate the design by considering real situations, the power-car is simulated for accidents collided against a dump truck of 15 tons at 110 km/h. The front end structure of it shows a good response on crashworthiness.

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]

현재까지 충돌안전도 설계에 대한 강제규정은 없으나, 선진국에서는 철도 운영사들이 발주차량 사양에 충돌안전도 설계를 요구하기 때문에 철도차량 제작사들이 충돌안전도 설계기술을 개발하여 실용화하고 있는 실정이다. 최근 동남아 등 개발도상국에서도 차량 발주시 충돌안전도 설계 항목을 요구하고 있으며, 유럽에서는 2004년부터 발효될 충돌안전도 설계기준을 제정하여 예고하고 있다. 이러한 환경변화는 향후 국내 차량제작사가 해외시장 개척과 수출을 위하여 충돌안전도 설계기술을 필수적으로 확보하여야 함을 의미한다. 따라서 본 기술개발은 이러한 환경변화에 능동적으로 대응할 수 있는 핵심기술을 확보한다는 측면에서 매우 중요한 의미가 있다.^[4-5]

본 논문에서는 충돌안전도 개념으로 설계된 한국형 고속전철(KHST) 전두부 구조가 SNCF 충돌사고 시나리오 하에서 충격에너지를 충분히 흡수하는지를 수치해석적으로 평가하였고, 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.

2. 개념설계

물체간의 충돌현상은 운동량 보존법칙과 에너지 보존법칙이라는 두 가지 중요한 물리적 법칙에

* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

의하여 결정된다. 질량 m_1, m_2 인 두 물체가 각각 속도 v_1, v_2 로 충돌하여 충돌 후 v_{f1}, v_{f2} 로 운동할 때, 두 물체의 운동량 보존법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2} \quad (1)$$

또한, 에너지 보존법칙은 충돌에 의한 운동에너지 손실량(E_d) 개념을 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{f1}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{f2}^2 + E_d \quad (2)$$

충돌 후, 두 물체가 결합(perfect plastic collision)되어 운동한다고 가정하면 최종 운동속도는 다음과 같다.

$$v_f = v_{f1} = v_{f2} \quad (3)$$

식(1)과 식(3)에 의하여 두 물체의 최종속도는 다음과 같이 구해진다.

$$v_f = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2) \quad (4)$$

식(2)와 식(4)로부터 충돌에 의하여 흡수되어야 할 변형에너지 E_d 는 식(5)와 같이 구해진다.

$$E_d = m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2 / 2(m_1 + m_2) \quad (5)$$

그림 1은 KHST 동력차(68 ton)가 15 ton의 장애물과 충돌(완전소성 충돌로 가정)할 때 동력차가 흡수하여야 하는 에너지 양을 식(5)를 사용하여 상이한 충돌속도에 대하여 구한 것이다. 110 kph 충돌속도에서는 약 5.4 MJ의 에너지 흡수가 필요하다. 이것은 후방의 차량 편성을 고려하지 않은 값이지만 충돌속도가 높은 경우에는 전체 차량이 충돌하는 경우와 비슷한 것으로 간주된다.

또한, 영구변형을 하는 두 물체 간 충돌의 경우, 각 물체에서 흡수하여야 하는 변형에너지의 양은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_d = E_{d1} + E_{d2} \quad (6)$$

여기서 E_{d1}, E_{d2} 는 각각 물체 1, 2에서 흡수된 에너지 양을 나타내는데, 철도차량의 경우 압피길이(L)와 평균 압피하중(F)을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{d1} = F_1 L_1 \quad (7a)$$

$$E_{d2} = F_2 L_2 \quad (7b)$$

식(7)의 평균 압피하중은 차량의 평균가속도(a)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F_1 = m_1 a_1 \quad (8a)$$

$$F_2 = m_2 a_2 \quad (8b)$$

식(8)에서 $F_1 = F_2$ 이어야 하므로,

$$a_1 = m_2 a_2 / m_1 \quad (9)$$

철도차량(m_2)이 정지한 장애물(m_1)과 충돌하는 경우, 식(5)-(9)로부터 차량의 압피길이(L)는 평균가속도(a)와 충돌속도(v)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$L = (m_1/2a(m_1+m_2))v^2 \quad (10)$$

그림 1에서 충돌속도가 110 kph인 경우에는 철도차량의 충격가속도 제한 조건인 5 g의 평균가속도를 유지하기 위하여 적어도 1.72 m의 압괴길이가 필요함을 알 수 있다. 이상과 같은 이론적 접근방법은 충돌현상을 단순화하기 위한 여러가지 가정을 사용하고, 차량 편성간의 동적 상호작용을 무시하였기 때문에 설계 결과를 정량적으로 평가하는데는 많은 한계가 있다. 그러나 전두부 및 차체의 압괴하중과 압괴길이를 설정하기 위한 개념설계 단계에서는 유용하게 사용되고 있다. 앞절의 이론해석 결과와 전체 차량의 1차원 충돌해석을 이용하여 KHST 전두부의 개념설계를 에너지 흡수 5.95 MJ과 압괴길이 1.7 m로 설정하였다.

3. 전두부의 충돌안전도 설계

KHST 전두부의 상세설계에 있어서 상부구조의 경우 외부형상이 TGV-K와 다르게 대폭 변경되었으므로 구조의 배열과 치수설계가 새로 이루어졌고, 하부구조의 경우 헤드스톡은 에너지 흡수능력을 제고시킨 격벽구조로 운전실 하부구조는 일부 보강이 이루어졌다. 즉, KHST 전두부의 하부구조는 그림 2와 같이 TGV-K의 channel형 side-sill에 두께 5 mm인 판을 첨가하여 사각형 폐단면으로 변경하고, center-sill의 판 두께도 4 mm에서 6 mm로 변경하여 압괴강도를 높였다. 또 운전실 상부구조는 그림 3에 나타난바와 같이 새로운 배열설계를 하여 하니컴에서 전달되는 충격력이 운전실 후방 구조에 잘 전달할 수 있도록 하였다. 전두부 구조는 매쉬 크기가 평균 35 mm인 9,877개의 솔리드 요소와 19,828개의 쉘 요소로 모델링 되었으며, 총 30,406개의 절점으로 구성된다. 전두부를 제외한 동력차 차체 질량은 운전실 후방에 부착하였다. 충돌해석에는 충돌 전용 소프트웨어인 PAMCRASH를 사용된다.^[6] 그림 3에 SNCF 충돌사고 시나리오를 적용하여 충돌해석한 후에 20 ms, 100 ms에서의 압괴거동과 상당 소성변형도를 나타냈는데, 운전실이 압괴되지 않고 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴가 되어 충돌안전도 설계가 타당함을 나타내고 있다. 그림 4는 충돌에 의하여 전두부에 증가된 내부에너지의 변화와 강체 장애물의 반력을 나타낸 것인데, TGV-K에 비하여 충격 흡수에너지가 크게 향상 되었을 뿐만 아니라 초기 붕괴하중이 3,300 kN(반쪽 모델)으로 낮아져서 충격력을 흡수하는데 유리하고, 평균 압괴하중도 2,200 kN(반쪽 모델)으로 증가하여 설계 가이드라인인 2,500 kN(반쪽 모델)에 근접한 결과라고 할 수 있다.^[7]

또한, 동력차 전체를 쉘 모델로 해석한 결과와 그림 3의 KHST 전두부만을 쉘 모델로 구성하여 해석한 결과가 서로 일치하는지 검토하였다. 그림 5는 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 대칭임을 고려한 유한요소 반쪽 모델이고, 솔리드 요소 9,877개, 쉘 요소 91,396개 그리고, 절점수 98,355개로 구성되었다. SNCF의 충돌 사고시나리오에 대하여 해석하여 100 ms에서의 압괴거동을 보면, 전두부만을 충돌해석한 경우와 압괴양상이 비슷하나 출입문에 약간의 압괴가 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 KHST 동력차의 내부에너지와 강체 장애물의 반력을 나타낸 것인데, 전두부만을 충돌해석한 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 설계단계에서는 전두부 모델만을 사용하여 충돌해석을 하는 것이 효율적임을 나타내고 있다.

4. 트럭과의 충돌 해석

본 절에서는 KHST 동력차가 SNCF 사고 시나리오의 15 ton 강체장애물 충돌과 달리, 15 ton의 실제 트럭과 정면충돌 할 때 어떠한 거동을 보이는지 해석하였다. 그림 7은 15 ton 덤프 트럭과 KHST 동력차의 전체 유한요소 모델인데, 솔리드 요소 19,830개, 쉘 요소 201,709개 그리고, 전

체 절점수는 213,858개로 구성되었으며 메쉬 크기는 평균 35 mm이다. 충돌 후 100 ms에서의 압괴거동을 볼 때 동력차 출입구 쪽이 약간 압괴되는 것을 관찰할 수 있으나 충돌안전도 관점에서 볼 때 오히려 유리하며, 설계단계에서 의도한 대로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되고 운전실이 보호된다.

그림 8은 KHST 동력차가 110 km/h로 15 ton 트럭과 off-set 충돌한 후 140 ms에서의 압괴거동을 나타낸 것인데, 정면충돌 할 때와 마찬가지로 트럭의 뒤쪽 끝 부분과 충돌하는 동력차 전두부의 하니컴, 헤드스톡 부위가 순차적으로 압괴가 되며 충격력에 의해서 트럭이 회전함을 알 수 있다.

5. 결론

충돌안전도를 고려한 KHST 전두부는 6 MJ 정도의 에너지를 흡수할 뿐만 아니라, 운전실이 보호되며 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되어 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

전두부만을 충돌해석한 결과와 셸 요소로 모델링한 동력차 전체모델의 해석결과를 비교할 때, 충돌 후 압괴거동 뿐만아니라 내부에너지 흡수, 강체벽의 반력에 큰 차이가 없으므로 설계단계에서는 전두부만을 모델링하여 충돌안전도 해석을 하여도 충분한 것으로 사료되고 시간을 단축할 수 있는 큰 잇점이 있다.

15 ton 트럭과 정면 및 off-set 충돌해석을 수행한 후 동력차 전두부 설계를 평가하였는데, 강체벽에 충돌할 때와 마찬가지로 하니컴과 헤드스톡이 순차적으로 압괴되므로 충돌안전도 설계에 적합하다고 할 수 있다. 그러나, 도출된 설계는 추후 연구에서 경량화와 에너지 흡수 측면의 최적화가 계속 이루어질 것이다.

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," *FUCA'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. 김동성, 송달호, 박용환(1997), "고속철도 안전기술 개발을 위한 조사사업", 한국기계연구원.
5. T. Ohnishi(1994), N. Kawakami, and A. Sano, "Crashworthiness of train", WCCR, pp.482-487.
6. ESI(1999), "PAM-System Manual"
7. 노규석, 구정서, 김유일, 송달호(1998), "고속전철 전두부의 개선된 충돌안전도 설계", 한국 ESI '98 conference 논문집, pp.117-127

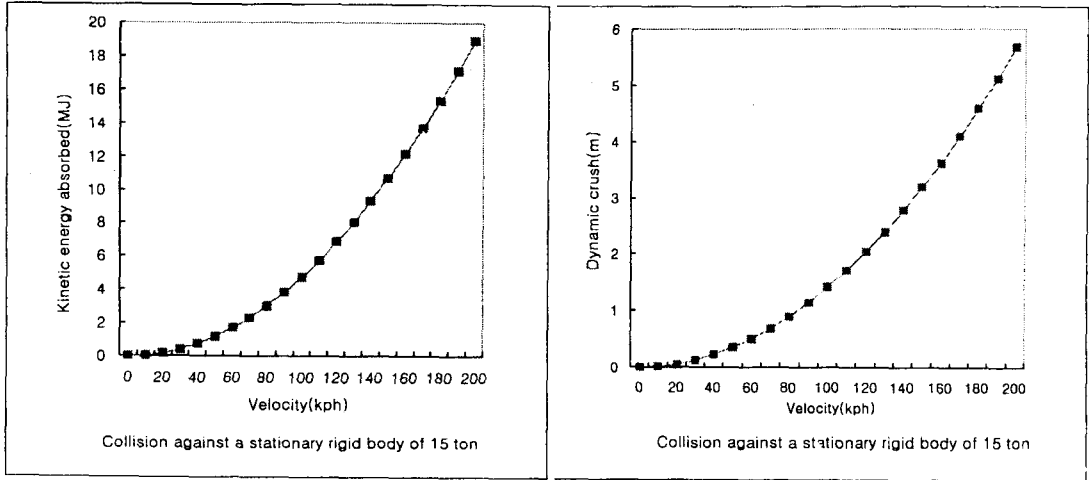


그림 1. 15 ton 장애물과 110 km/h로 충돌할 때의 흡수된 충격에너지 및 압피길이

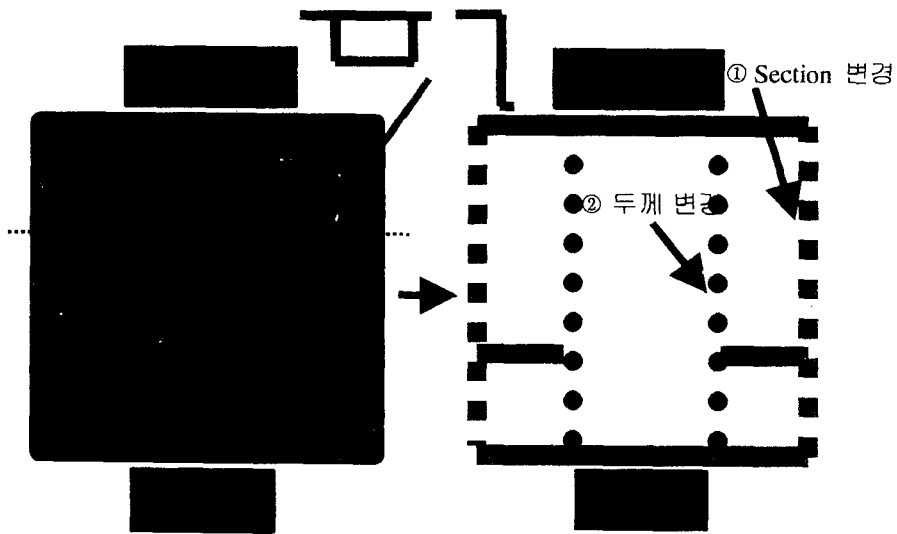


그림 2. Underframe의 보강대책(Layout)

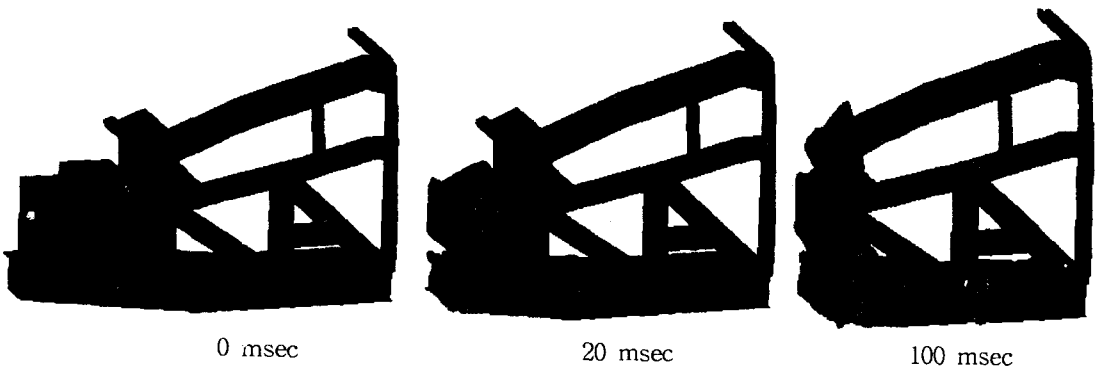


그림 3. KHST 전두부의 충돌변형거동 (반쪽 모델)

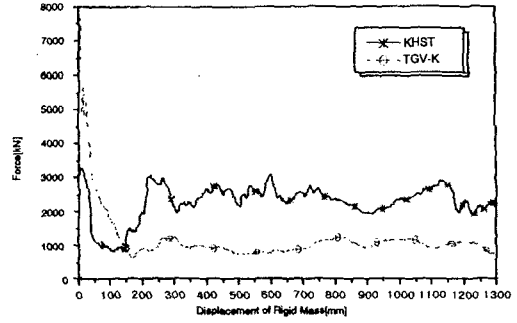
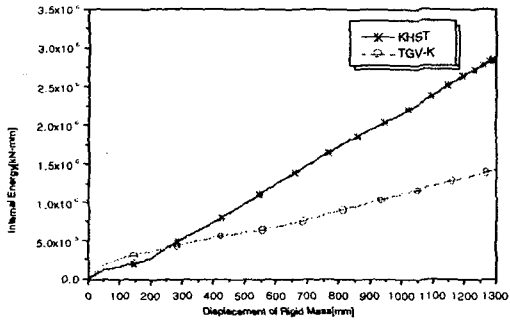


그림 4. KHST 전두부의 내부에너지 및 강체벽 반력 (반쪽 모델)



0 msec



100 msec

그림 5. KHST 동력차의 충돌변형거동 (반쪽 모델)

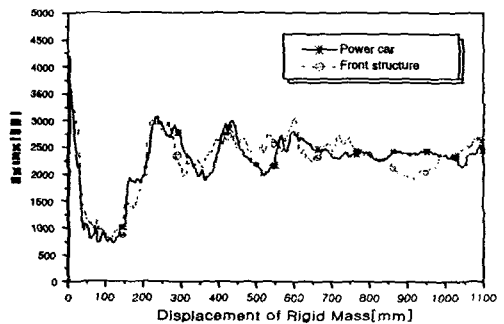
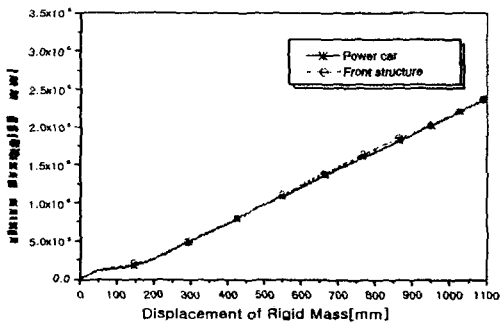


그림 6. KHST 동력차의 내부에너지 및 강체벽 반력 (반쪽 모델)

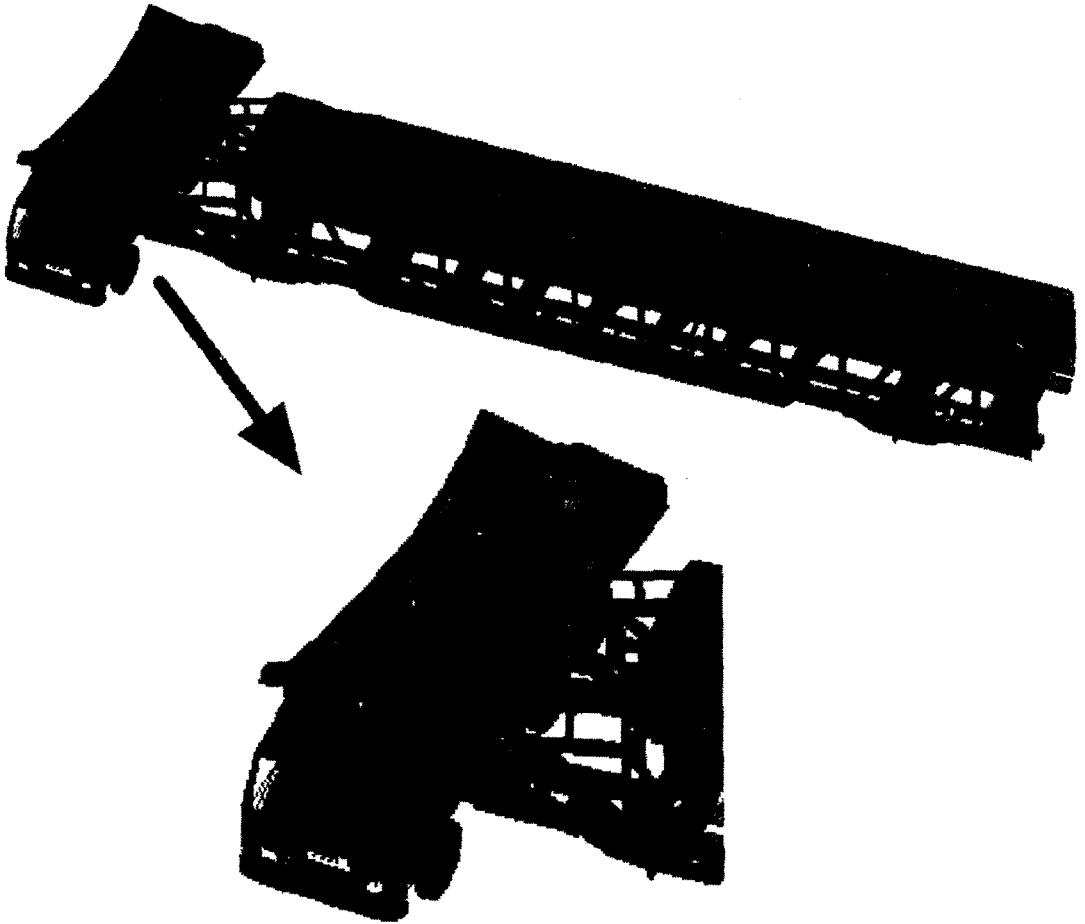


그림 7. 15 ton 트럭과 KHST 동력차의 정면 충돌변형거동

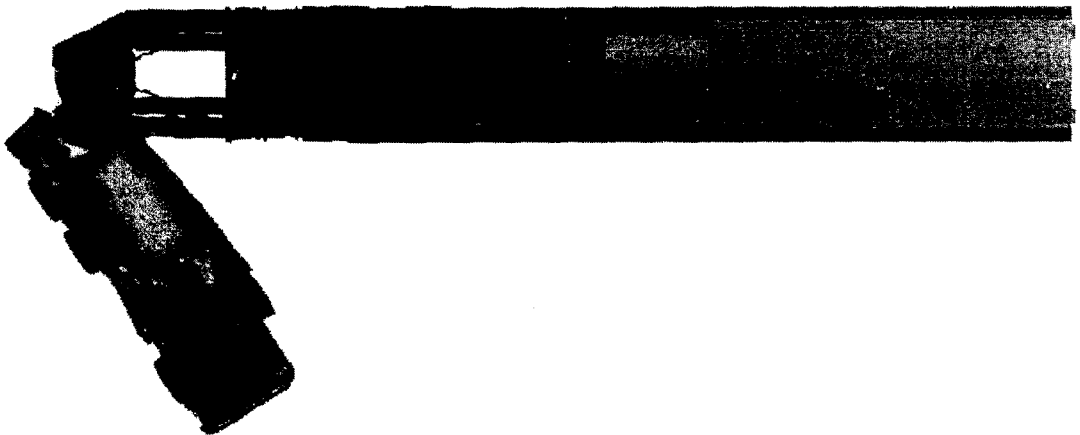


그림 8. 15 ton 트럭과 KHST 동력차의 off-set 충돌변형거동