

# 한국형 고속전철 객차의 충돌해석 Crashworthiness Analysis of Korean High Speed Train Trailer

이화수\*      박신희\*\*      한동철\*\*\*  
Lee, Hwasu      Park, Shin-Hee      Han, Dong-Chul

## ABSTRACT

Though not very often, a train accident can cause large number of fatality. As a result, public concern about its safety is increasing nowadays. In this paper, the structural crashworthiness of Korean High Speed Train trailer was examined through FE analysis. Crash analyses on energy absorbing part and safety zone were carried out to determine each section force. Rollover analysis was performed to observe the amount of intrusion in the passenger's area in case of rollover accident.

## 1. 서론

철도 차량의 사고는 비록 자주 일어나지는 않지만, 큰 충돌 에너지로 인해 한 번의 사고로도 막대한 인명 및 재산 피해를 야기한다. 더욱이 세계적으로 시속 300km에 달하는 고속열차의 상용화와 더불어 최근에는, 열차사고도 점차 대형화 되어가는 추세에 있으며 안전도에 대한 관심이 나날이 높아지고 있는 실정이다. 우리 나라에서도 경부고속전철 계획에 따라 자체적으로 한국형 고속전철(Korean High Speed Train, 이하 KHST)의 개발에 착수하였으며, 본 연구에서는 현재 설계단계에 있는 KHST 객차의 충돌 안전도 해석을 수행하였다<sup>[1][2][3][4]</sup>.

우선 전방구조 및 후방구조로 분류되는 에너지 흡수 영역과 승객생존공간에 대해 충돌해석을 수행하여 각각의 평균압괴하중을 도출하였다. 또한, 연결장치를 포함하는 구조의 압괴해석을 통해 하중전달 형태를 살펴보았다. 열차의 전복사고시 승객이 탑승하고 있는 공간의 압괴형태를 알아보기 위해 전복해석(rollover analysis)을 수행하였다. 모든 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 PamCrash를 이용하여 수행하였다.

## 2. 본문

### 2.1 에너지 흡수 영역 및 승객 생존 공간에 대한 충돌 해석

객차의 충돌 안전도 설계에 있어서 일반적으로 크게 다음의 세 가지가 고려된다. 첫 번째는 충돌시에 대부분의 에너지를 흡수하게 되는 압괴영역(crush zone)에 대한 설계이다. 이는 부재의 형상이나 기계적 성질, 혹은 구조적인 배치로 적절한 변형을 유도하여 충돌시에 수반되는 운동에너지

\* 서울대학교 기계설계 석사과정, 비회원

\*\* 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 연구원, 비회원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부 교수, 비회원

지를 내부 변형 에너지로 변환하는 것이다. 두 번째는 승객이 탑승하고 있는 영역(safety zone)에 대한 설계이다. 이곳은 충돌시에 변형하지 않도록 하여 승객을 외부로부터의 충격에 대해 보호해야 하는 곳이다. 세 번째는 각종 보호 장비 및 내장 설개로 승객을 보호하는 것이다.

KHST 객차의 구조는 그림 1에서 제시된 바와 같이 크게 다음의 세 가지로 나눌 수 있다. 짐칸, 화장실 등이 위치하는 전방의 에너지 흡수 영역과, 승객이 탑승하고 있는 영역 그리고, 후방 에너지 흡수 영역이다.

전방 구조와 후방 구조는 압피영역으로서 객차의 충돌시 에너지를 흡수하게 되므로 가능한 붕괴를 유도하여 되도록 많은 에너지를 흡수할 수 있도록 하고, 승객이 탑승하고 있는 공간은 상대적으로 강한 구조를 갖는 것이 충돌 안전도 설계의 관점에서 바람직하다고 하겠다. 1차원 해석을 통해 목표값으로 정한 하중을 참조하면 에너지 흡수 영역에서는 3700kN, 승객 생존 공간에서는 4200kN으로 하고있다.

그러나, 충돌 안전도 설계 관점에서만 바라보았을 때 전방구조 혹은 후방 구조의 언더프레임(under-frame)이 과도한 붕괴 유도로 UIC 566 OR 강도 조건을 만족하지 못하는 경우가 있으므로, 충돌 설계는 반드시 강도설계와 병행되어야 한다. 따라서 기본적으로 강도 조건을 만족하는 상태에서 에너지 흡수 영역인 전후방 구조를 설계하고 승객이 탑승하고 있는 영역을 보다 충돌에 강하게 설계를 하는 것이 바람직하다.

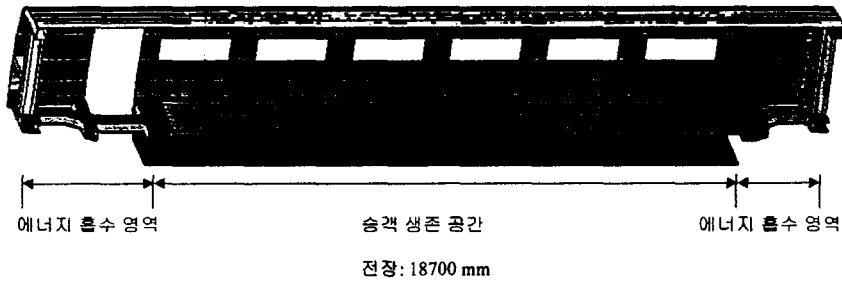


그림 1. KHST 객차의 구조

앞서 밝힌 바와 같이 승객 탑승 공간은 전방 구조에 비해 강하게 설계되므로 변형이 거의 발생하지 않는다. 그러므로, 객차 전체를 셸(shell)요소로 모델링 하는 것은 해석 시간이 많이 요구되는 충돌 해석에서는 비효율적이다. 본 연구에서는 전방 구조의 에너지 흡수 영역과 승객 탑승 공간의 일부를 셸 요소로 모델링 하였다(그림 2). 사용된 요소수는 약 25,000개이며 대칭 조건을 이용하여 1/2만 모델링 하였다. 알루미늄 주물로 이루어진 캐리링(carrying ring)구조는 전방구조에 비해 두껍게 설계되어 있고, 충돌시 변형하는 구간이 아니기 때문에 강체로 구속하여 형상만 모델링하였다. 언더프레임에서는 집중적인 변형이 예상되는 길이 방향의 부재에 대해서는 상대적으로 보다 세밀하게 요소를 나누었다. 도어(door)에 해당되는 부분은 아직 상세한 설계가 이루어져 있지 않아 측면프레임과 같은 구조를 연장하여 모델링하되, 두께를 일정하게 유지하였다.

충돌 해석 조건은 모델의 끝단에 뒤에 연결된 객차의 무게에 해당하는 집중 질량 32톤을 달아서 시속 30km로 강체벽에 충돌하는 시나리오를 따랐다.

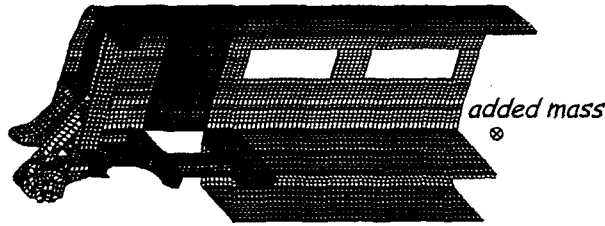


그림 2. KHST 객차의 전방구조 충돌해석 FE 모델

해석결과로서 그림 3을 살펴보면 대부분의 변형이 언더프레임에서 유도되고 있음을 알 수 있다. 이는 앞차로부터 전달되는 하중이 언더프레임의 길이 방향의 부재를 타고 이어지는 가운데 전후의 높낮이 단차로 인하여 굽힘 붕괴가 일어났다. 전체 에너지 가운데 약 34%를 언더프레임에서 흡수하였으며 승객이 탑승하고 있는 부분에서 변형이 거의 일어나지 않았다. 이는 플로어(floor) 부분이 상대적으로 강하게 설계되었기 때문이다.

강체벽의 반력을 살펴보면 평균압괴하중은 4769kN으로 나타났다. 이는 목표 하중으로 설정한 3700kN보다 다소 높은 값이다. 그러므로, 언더프레임의 두께를 좀 더 감소시켜 경량화 측면을 고려해야 하지만, UIC 566 OR에서 규정하고 있는 강도조건을 만족해야 하므로, 더 이상의 두께 감소는 어려운 것으로 판단된다.

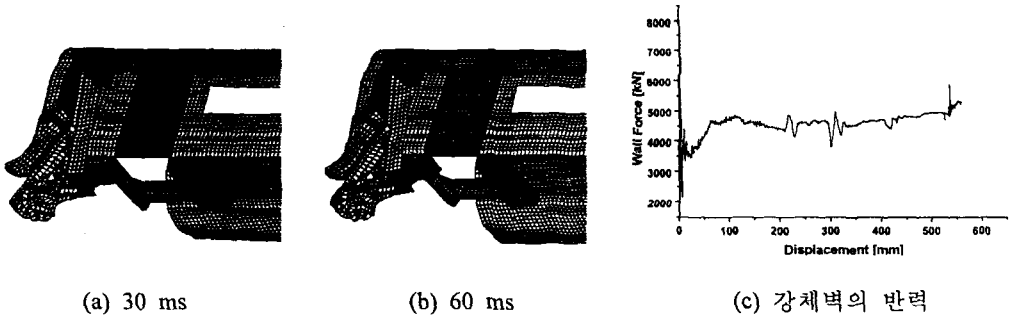


그림 3. 전방충돌 해석결과 - 변형 형상 및 강체벽의 반력

그림 4는 KHST 객차의 후방 충돌해석에 사용된 유한 요소 모델이다. 전방 구조와는 달리 도어를 포함하고 있지 않으며, 언더프레임의 길이도 상대적으로 짧다. 후방 충돌 조건은 기본적으로 전방 충돌해석 때와 동일하되 집중질량을 조금 더 많이 고려하여 40.5톤(1/2 모델에 대하여)으로 하였다. 이는 객차의 전방 구조가 연결되는 동력객차의 무게를 고려한 것이다.

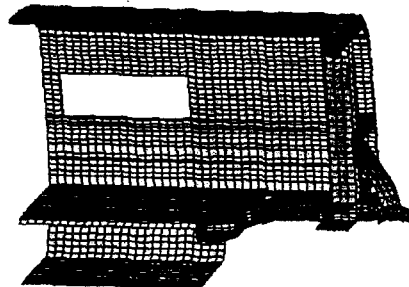


그림 4. KHST 객차의 후방구조 충돌해석 FE 모델

그림 5에서 볼 수 있듯이 후방 구조의 충돌에서도 언더프레임에서의 굽힘 붕괴가 주된 변형을 유도하고 있으며 플로어와 연결된 횡 방향의 쉬어플레이트(shear-plate)에서도 뒤틀림이 발생하고 있다. 강체벽의 반력 곡선에서 구한 평균압피하중은 3534kN으로서 전방 구조보다는 다소 낮다. 이는 전방 구조에서는 창문이 시작되는 부분이 충돌 변형을 하는 구간에서 멀리 떨어져 있지만 후방 구조에서는 전방 부분보다 충돌 지점에 가까이 있기 때문에 상대적으로 하중을 지지하지 못한 것으로 판단된다.

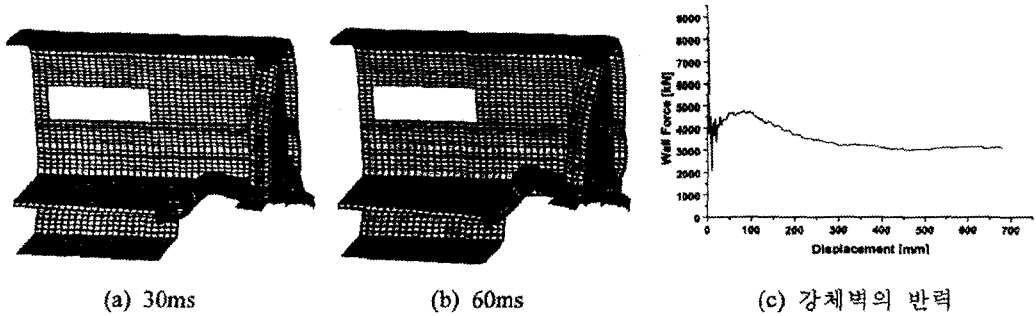


그림 5. 후방구조 충돌해석결과 - 변형 형상 및 강체벽의 반력

KHST 객차에서 승객이 탑승하고 있는 공간은 기본적으로 알루미늄 압출부재로 구성되어 있다. 그림 6의 단면 형상에서 볼 수 있듯이 지붕, 플로어, 측면구조가 샌드위치 패널의 형태로 되어 있다. 지붕과 측면구조를 연결하는 캔트레일(cantrail)이나, 측면구조와 플로어가 만나는 사이드실(side sill)의 경우 다른 데에 비해 보다 두께가 강화되었음을 알 수 있다. 유한요소 모델은 전방 충돌해석에 사용했던 모델의 뒷 부분과 일치하며 창문은 2개가 모델링에 포함되도록 하였다.

앞서 수행한 전방 구조의 충돌해석 결과를 보면 차량간 연결부위의 캐어링 구조물로 인하여 충돌시의 하중이 단면에 대하여 수직으로 전달되기보다는 언더프레임과 연결되는 플로어부분에 집중적으로 전달됨을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 현상을 구현하기 위하여 그림 7에서와 같이 모델을 기울인 강체벽에 시속 30km/h의 속력으로 압피해석을 수행하였다. 강체벽을 기울이는 각도는 전방 충돌해석 결과를 참조하였다.

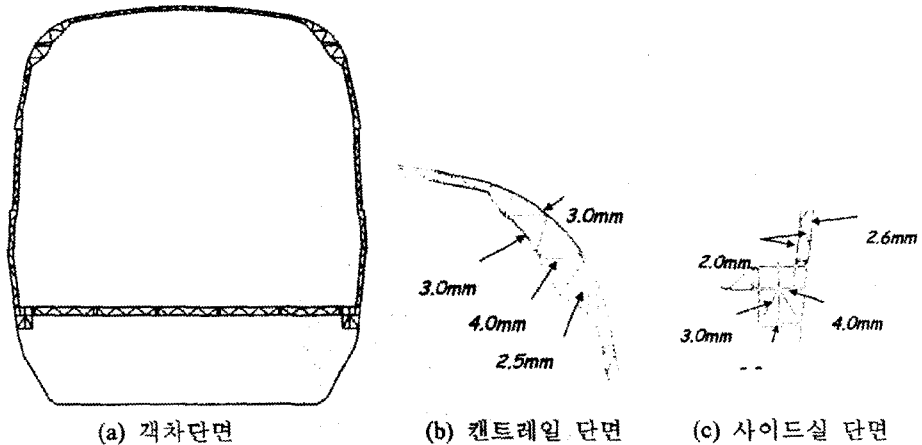


그림 6. 알루미늄 압출부재의 단면 형상

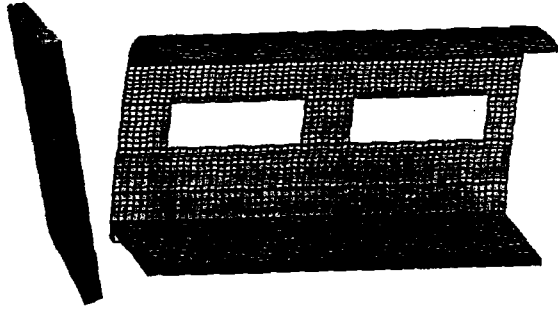


그림 7. 승객탑승 공간의 충돌해석 FE모델

그림 8은 충돌해석에서의 변형 형상과 강체벽의 반력을 나타낸다. 평균압력 하중은 6121kN이며 이는 전방 및 후방의 에너지 흡수 영역보다 높은 값이다.

그러므로, 승객 탑승공간은 전방 및 후방 구조의 충돌해석에도 나타났듯이 객차가 정면으로 충돌하는 과정에서 그다지 변형이 나타나지 않고, 충분한 강성을 가질 것으로 보여진다. 그러나, 이는 어디까지 충돌 안전도 설계의 관점에서 본 것이며, 객차 구조에 있어서 강성의 평가는 기본적으로 UIC 566 OR 규정에 따른 강도조건에 부합할 때 이루어질 수 있다.

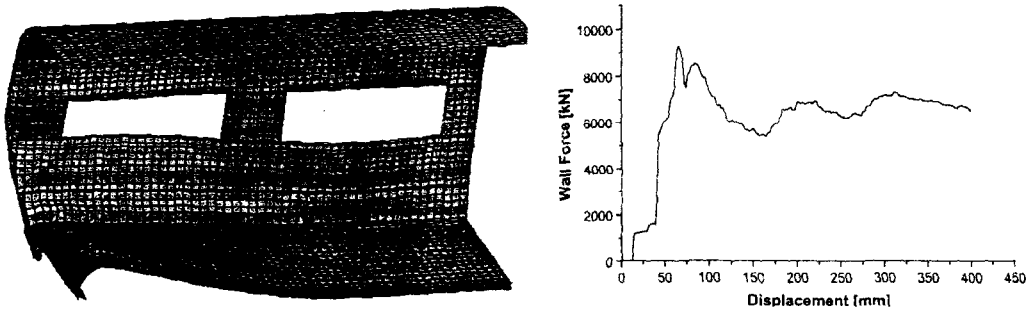


그림 8. 승객 생존공간의 충돌해석결과 - 변형 형상 및 강체벽의 반력

## 2.2 객차간 링 연결을 고려한 충돌해석

철도 차량에서 차량과 차량의 연결은 두 가지 방식이 있다. 각 차량이 대차(bogie)를 따로 가지고 있는 형태와 대차를 공유하고 있는 형태인데, KHST는 후자에 해당한다. 그림 9에는 연결부위의 형상을 제시하였다. 뒷 차량의 캐어링(carrying ring)위에 앞 차량의 픽스드링(fixed ring)이 없으며, 이를 편과 함께 대차에 고정시키는 방법을 사용하며, 그 밖에도 각종 현가장치 및 댐퍼로 복잡하게 구성이 되어있다. 링 구조물은 알루미늄 주조물로 제작된다.

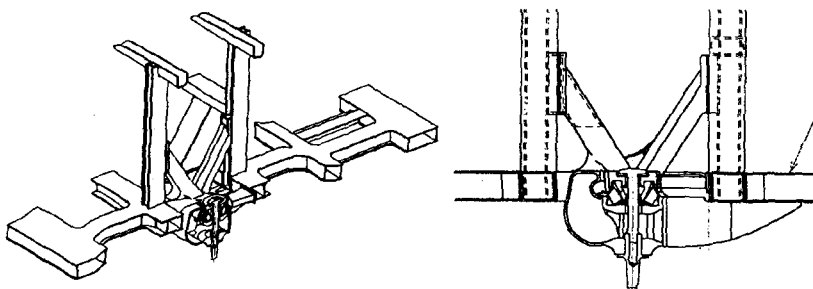


그림 9. 객차간 링 연결부위의 형상

링 구조를 이루고 있는 알루미늄 주조물은 형상이 매우 복잡하고, 단면도 일정하지 않아 일부는 3차원 솔리드(solid)요소로 모델링이 되어있다. 이는 다른 부분에 비해 상대적으로 큰 강성을 갖고 있으며 충돌시에 파괴되지 않도록 설계되어있다. 한편 대차와 연결된 시스템은 차량을 지지하고 견인력과 제동력을 전달하며 고속으로 주행시 안락한 승차감과 주행안전성을 확보해야 하므로 각종 현가장치와 댐퍼 등이 복합적으로 구성되어있다.

충돌해석시에 타고오름이나 전복의 가능성을 살펴보기 위해서는 이러한 모든 상황들을 고려하여야 할뿐만 아니라 객차 자체의 질량의 분포도 맞추어야 한다. 그러나 본 충돌해석에서는 이보다는 단지 하중이 전달 형태를 살펴보는 데에 초점을 맞추었으므로 픽스드링을 포함하는 객차의 후방구조와 캐링링을 포함하는 전방구조, 그리고 대차 프레임에 모델링하되 링과 대차의 연결부위를 강체로 구속하여 압괴해석을 수행하였다(그림 10). 대차 프레임은 (주)현대정공에서 제공받은 객차용 대차 모델을 사용하였다.



그림 10. 객차간 연결부위의 FE 모델

그림 11의 변형형상을 살펴보면 먼저 전·후방 구조의 언더프레임에서 굽힘붕괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 수행한 전·후방구조의 충돌해석에서 보아온 양상과 유사하며 아래의 대차와 링 연결부위가 구속되어있는 상태에서 대차의 높이로 인해 언더프레임에 단차가 생긴 구조에서 나타나는 결과로 여겨진다. 48ms 이후에 정면의 프레임이 급격히 휘는 모습을 볼 수 있는데, 링과 연결하는 부재의 강성이 강체구속 조건으로 인해 변형을 하지 않아 생긴 결과이다.

강체벽의 반력을 살펴보면 평균 압괴하중은 약 5000kN 정도로서 전·후방 구조의 압괴하중보다 조금 큰 값을 나타내고 있는데, 이 또한 대차와 함께 연결부위가 강체로 구속되는 상황으로 인해 나타난 현상으로 판단된다.

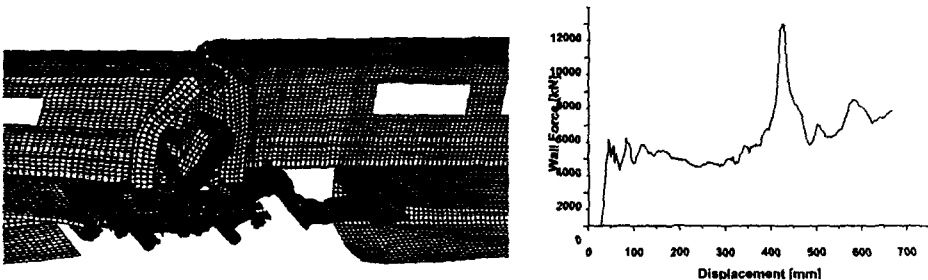


그림 11. 연결장치를 고려한 압괴해석결과 - 변형형상 및 강체벽의 반력

### 2.3 객차의 전복해석

철도차량의 사고 유형에는 충돌에 의한 타고오름, 이에 수반된 탈선(derailment), 또는 차량의 수직좌굴, 회전시 측면힘에 의한 수평좌굴과 전복사고(rollover) 등이 있다. 추돌사고는 가장 많은 사상자가 발생시키며, 대부분 60km/h 미만에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 추돌사고 중에서도 타고오름이 발생하는 경우 빈도수는 적지만 상대적으로 큰 인명피해를 가져오고 있다. 따라서

인명피해를 최소화하기 위해서는 철도차량의 충돌시 타고오름과 전복사고를 방지할 수 있는 설계가 요구된다. 타고오름이나 전복사고의 경우 승객 탑승공간이 직접 지면 혹은 다른 외부의 물체와 충돌하게 되어 승객의 생존공간이 위협받게 되므로 상당히 위험하다고 할 수 있다.

열차의 전복의 경우 시험 또는 해석에 대하여 정해진 규정이나 시나리오가 없는 상황이어서 일반적으로 버스 등 대형차량에 대하여 주로 시행되는 시험을 참고하여 수행하였다. 해석 결과로는 측면구조 혹은 지붕의 변형양상과 이로 인한 승객공간의 침투정도가 중요한 평가 사항이다.

객차의 전체 구조를 3차원 쉘요소로 모델링 하게되면 요소수가 지나치게 많아지고 해석 시간도 많이 걸리게 되므로 편의상 전방과 후방구조가 가운데를 중심으로 대칭임을 가정하여 전방구조를 포함하는 1/2만을 모델링 하였다. 정확한 해석을 위해서는 모델과 실제 객차의 회전관성을 되도록 일치시키는 것이 중요하다. 따라서 KHST 객차의 질량 중심에 대한 정보밖에 없는 상황에서 객차의 1/2에 해당되는 질량을 객차의 질량중심에 따라 측면구조에 가능한 고루 분포시키는 방법을 택하였다.

객차 모델은 초기에 질량중심이 평형 상태보다 약간 치우치도록 하여 증력가속도를 받아 자유낙하하도록 하였다. 그러나, 객차가 회전하여 지면에 닿기 전까지는 사실상 거의 변형이 없으므로 해석 시간의 단축을 위해 이 때까지 변형을 하지 않는 강체운동(rigid body motion)을 하도록 하고, 지면에 닿는 순간부터 변형을 하도록 해석 조건을 주었다 (그림 12).

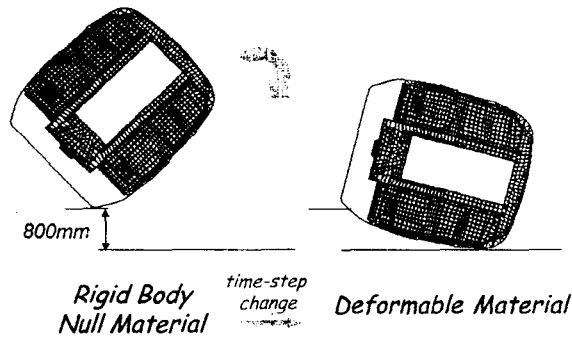


그림 12. 전복해석의 수행과정

그림 13을 살펴보면 가장 심한 변형이 1.92sec 때 측면구조의 창문 부근에서 일어나고 있음을 알 수 있다. 변형 정도를 살펴보면 승객에게 다소 위험할 정도로 많이 나타나고 있는데, 이는 모델에서 질량의 분포가 그 부근에 다소 집중되어서 나타난 결과로 판단된다.

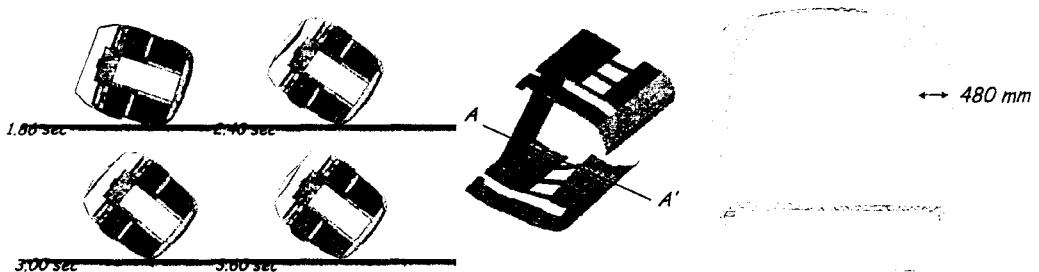


그림 13. 전복해석 결과 및 1.92초 때의 변형형상

### 3. 결론

KHST 객차에 대하여 전방구조와 후방구조 그리고 승객 탑승 공간의 충돌해석을 수행하였고, 전복해석 및 연결 구조를 고려한 압괴해석을 수행하였다. KHST 객차는 지붕, 플로어 및 측면구조가 알루미늄 압출재를 이용한 샌드위치 패널 구조를 가지기 때문에 설정한 목표 하중보다 다소 높은 평균압괴하중을 나타내었다.

전방 충돌의 경우에 언더프레임의 변형으로 주로 에너지를 흡수하였고 측면구조와 지붕 구조가 언더프레임 과 같이 변형하면서 충돌 에너지를 흡수하였다. 후방 충돌의 경우에는 평균 압괴하중이 전방 충돌의 경우보다 다소 낮게 나타났다. 이는 창문의 위치가 전방 구조보다 충돌 지점에 가깝게 위치해서 측면구조의 강성을 저하시켰기 때문으로 판단되었다. 승객 탑승 공간의 충돌해석에서는 전방 구조보다 높은 평균 압괴하중을 나타내어 충돌 설계가 적절히 이루어졌음을 알 수 있었다. 전체적으로 하중이 높게 나온 것은 보다 경량화가 이루어질 수 있는 가능성을 가지고 있음을 의미한다. 그러나, 차체 설계는 충돌뿐만 아니라 UIC 566 OR에 나타난 강도설계가 중요하기 때문에 두 경우를 모두 고려하여 설계하는 것이 필요하다.

보다 정확한 붕괴를 구현하기 위하여 차간 연결장치인 링 구조물을 모델링하고, 대차 프레임을 포함한 충돌해석을 수행하였다. 링 구조물은 상대적으로 큰 강성을 가지고 있고, 충돌시에 파괴되지 않는 것을 목표로 설계되기 때문에 연결부위를 강체로 모델링하고 정확한 하중의 전달만을 고려하고 해석을 수행하였다. 변형 양상은 언더프레임의 단차가 발생하는 부위부터 큰 붕괴가 발생하여 전방 구조만을 해석했을 때와 유사하게 나타났으며 평균 압괴하중에서 전방구조만을 해석했을 때보다 약 7%정도 높게 나타났는데, 이는 연결 부위가 전방구조의 변형을 억제시켰기 때문으로 판단된다.

전복해석을 수행한 결과로 창문 부근에서 다소 큰 변형이 발생하였지만 승객 공간의 완전한 붕괴는 발생하지 않았다.

### 4. 참고문헌

- (1) 규정서, 송달호 (1998년) "충돌안전도 해석기술개발 연차보고서", 한국기계연구원
- (2) P.Tong, "Rail Vehicle Structural Crashworthiness", 1983. Structural Crashworthiness. Butterworths. pp. 397~416
- (3) L.T.Kisielewicz, K.Ando, "Crashworthy Rolling Stocks", 1993. PUCA'93 PAM user Conference in Asia. pp. 73~81
- (4) O.Eichiro, O.Kiyoshi, " On the Modeling of Trains in Crashworthiness Studies", 1993. PUCA'93 PAM user Conference in Asia. pp. 85~92