

철도차량 충돌 시뮬레이션 (Crash Simulation of Rolling Stock)

김필환, 이장욱, 김진태*, 김창수**
P. H. Kim, J. W. Lee, J. T. Kim, C. S. Kim

ABSTRACT

Recently, as the railway vehicles become speedy and massive, the collision is being regarded as an important factor for the assessment of safety for passenger. And the study of collision is being in progress more actively in advanced nations. In this study, the collision analysis is performed by using non-linear dynamic finite element program PAM-CRASH. The carbody used in analysis is made of Aluminum AL6005A to realize lightweight, and designed and manufactured by DHI (Daewoo Heavy Industry) lately. For the accuracy of the result in the practical collision, the experiment of material properties has been performed. The result of the analysis shows the underframe of rolling stock is the most important part as a collision energy absorbing structure. Further study is needed for optimal design which enables the carbody shell structure to disperse absorbing energy adequately.

1. 서론

철도는 대량수송, 정시운행 등의 장점이 있어 일반 도로 교통수단의 발달에도 불구하고 지속적으로 운영되고 있으며 향후 급증하는 교통인구에 대한 대안으로써 자리잡아가고 있다.

철도의 이러한 장점이 때론 그림1에서와 같은 철도차량간 충돌 또는 철도차량과 외부 장애물간의 충돌로 인해 도로 교통에 상당히 큰 인명손실 및 차량 파손 등을 가져오기도 한다.

최근 철도차량 충돌시 승객 및 운전자의 안전을 확보하기 위한 충돌안전성에 대한 연구가 고속철도 차량 및 경전철의 확대와 더불어 철도 선진국인 영국, 프랑스를 포함한 유럽 및 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

철도차량의 충돌해석은 크게 실제차량을 대상으로한 실차시험과 전산해석을 이용한 시뮬레이션으로 구분된다. 실제차량을 이용하는 시험이 실제 상황과 가장 부합되는 결과를 나타낼것으로 생각되나 많은 비용이 소요되어 전산해석 시뮬레이션과 같이 보다 경제적이면서도 효과적인 결과를 얻을 수 있는 방법을 찾게 되었다.

여기서는 전산해석을 통한 철도차량 충돌해석의 필요성 및 국내외의 연구동향과 함께 실제 알루미늄차체를 대상으로 수행된 철도차량 충돌 시뮬레이션에 대해 기술한다.

* 대우중공업 철차연*스

** 고등기술연구원 차체기술개발실

2. 철도차량 충돌해석

2.1 충돌해석의 필요성

철도차량의 충돌해석은 차량을 대상으로 직접적인 시험이 어려운 경우 수행되며 다음과 같은 자료편을 목적으로 수행되어진다.

- 차량간 충돌 또는 외부물체와의 충돌시 차량 변형으로부터 운전자 및 승객을 보호하기 위한 차체 구조 설계 및 보강 방안을 위한 자료
- 열차 교행시 상대 차량으로부터 튀어나온 물체와 충돌하는 경우 운전자를 보호하기 위한 자료
- 충돌차량을 복구하는 경우 육안으로 정확히 파악하기 어려운 차량의 손상부위 및 수리범위 산정을 위한 자료
- 충격흡수에너지 및 변형 거동에 근거하여 동적인 충돌시험을 대신할 수 있는 등가정하중을 산정하는 자료
- 차량 각 부분의 충돌가속도 등 충돌시 차량 내부에 탑승한 승객의 손상도 해석을 위한 자료

그림 2는 승객 및 운전자의 안전을 목적으로 미국 철도에서 운용되고 있는 200km/h 급 철도차량이 갖추어야 할 것으로 잠정규제되고 있는 충돌시 차량별 흡수에너지를 나타내고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 충돌시 차량의 특성에 따라 차량 각 구간별 충격흡수에너지의 양이 다르게 제시되고 있음을 알 수 있다.

이러한 차량을 제작하는 경우, 반드시 설계단계에서 충돌시 차량이 갖는 충격흡수에너지에 대한 검토가 이루어져야 하며 이러한 검토를 위해서는 기존의 해석방법으로는 원하는 수준의 결과를 얻기 어려우며 따라서 전산해석을 통한 충돌해석이 필요하다.

2.2 연구동향

일반적으로 철도차량을 대상으로 하는 충돌해석은 크게 1차원 해석과 3차원 해석으로 구분할 수 있다.

1차원 해석은 질량과 스프링 요소를 이용하여 편성차량간 충돌시 차량의 흡수에너지를 해석 대상으로 하여 차량간의 거시적인 충격 흡수에너지변화 및 가속도 변화를 비교적 단시간에 찾을 수 있는 반면 충돌시 부재의 정확한 거동 및 그 정도를 알 수 없다는 단점이 있다. 이러한 해석은 설계초기단계에서 차량이 갖는 개략적인 충격흡수에너지 및 편성차량간 거동을 이해하는데 도움을 준다.

3차원 해석은 차량을 3차원적으로 모델링하고 충돌모형을 가정하여 수행되는 해석으로써 비교적 구체적인 변형에 대한 결과를 얻을 수 있어 충돌에 대한 차량 구조의 개선 방향 등을 찾는 데 활용된다. 그러나 모델링 및 해석 시간에 많은 시간이 소요되어 제한적으로 사용되었으나 최근의 전산장비와 해석프로그램의 향상과 더불어 널리 이용되고 있다.

또한 3차원 해석에는 충돌시 충돌 가속도가 차량 내부에 있는 인체에 미치는 영향을 연구하기 위하여 인체와 유사한 응답특성을 나타내는 더미(dummy) 모델을 이용한 인체 손상도해석이 있다.

1차원 및 3차원 충돌 해석에 주로 사용되는 비선형 동적 유한요소 프로그램으로는 PAM-CRASH 및 DYNA3D 등이 알려져 있다.

영국 BRR (British Rail Research)에서는 3차원 충돌해석을 통해 얻어진 결과를 토대로 차량구조 (Anti-climbing장치 등) 및 충돌에너지 흡수부재(buffing 장치)를 재설계하고 이를 실제 차량에 적용하여 시험한 결과 상당히 유용한 결과를 얻었다.

국내에서는 고속전철 도입을 계기로 철도차량 충돌안전성에 대한 연구가 활기를 띠고 있다.

한편 영국과 프랑스를 중심으로 철도차량 충돌과 관련된 분야에서 가장 앞서나가는 유럽에서는 유럽 철도차량을 대상으로 충돌에 대한 대책(충격흡수구조, 타옴방지구조 등)을 규정하기 위해 연구중여 있으며, 일본은 철도종합연구소(RTRI)를 중심으로 충돌시 승객의 거동을 대상으로 연구가 이루어 지고 있다.

미국의 경우 앞에서 기술한 바와 같이 200km/h급 철도차량에 대해 충격흡수에너지를 제시하고 있으며 경전철의 경우 35km/h로 충돌시 승객의 안전에 대한 검토를 요구하고 있다.

그러나 이러한 연구에도 불구하고 아직은 국제적인 범주에서 철도차량에 적용할 수 있는 충돌안전도 평가 기준이 없는 실정이다.

현재 차량의 강성은 JIS, UIC 및 AAR에서 제시하는 바에 따라 차량 각 부위가 영구변형 없이 견디는 압축하중(50~360톤)으로 평가하는 것이 보편적이다. 이러한 평가방법은 충돌시 차량이 갖는 흡수에너지 등을 적절히 고려하지 못한다는 단점이 있으나 해석 및 평가적용의 편의성 등으로 인해 사용되고 있다.



그림 1. 철도차량 충돌사고예 (영국)

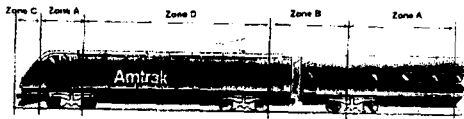


그림 2. 200km/h급 철도차량 충격흡수에너지⁽¹⁾ (미국, Amtrack)

- Zone A : 승객 및 승무원 공간
 - Zone B : 연결통로, 화장실 등 사용이 적은 공간
 - Zone C : 전두부
 - Zone D : 비교적 부서지지 않는 장비 공간
- 흡수에너지
- | | |
|---------------------|-----|
| 동력차 또는 운전차의 충격흡수에너지 | 8MJ |
| 동력차 운전자 앞부분 충격흡수에너지 | 5MJ |
| 동력차 인접 객차의 충격흡수에너지 | 5MJ |
| 다른 객차들에 의한 충격흡수에너지 | 2MJ |

3. 알루미늄 전동차 충돌해석

철도차량 경량화 및 재활용의 용이성 때문에 유럽 및 일본에서는 오래 전부터 알루미늄 압출소재를

이용하여 차체를 제작하여 왔다. 최근 국내에서도 알루미늄 압출소재를 이용한 전동차 차량을 일부 시제품 단계로 제작하였으며 및 차세대 고속 전철 객차를 알루미늄 차체로 개발이 진행되고 있는 단계이다.

현재 개발이 진행 중인 알루미늄 차체는 재질의 인장 및 항복강도가 기존 스테인레스 및 강재에 비해 다소 떨어지므로 이러한 재질의 단점을 보완하기 위하여 중량을 최소화하면서도 강성을 유지하는 격자구조 (web형태) 언더프레임을 사용하는 등 여러가지 노력을 통해, 기존 스테인레스 및 강재 차체 중량보다 약25정도 경량화를 이룰수가 있었다.

이러한 장점이 있는 알루미늄 차체가 충돌시 주요 부재가 어떠한 거동을 보이는지 알아보고자, 운전실이 있는 알루미늄 전동차를 대상으로 충돌해석을 수행하였다.

3.1 알루미늄 압출재 물성치

알루미늄 차체는 언더프레임 및 차량전반에 걸쳐 압출소재 AL6005A-T6 (또는 6N01-T6)를 사용하여 제작한다.

충돌해석은 재질의 소성에 의한 과대변형을 고려한 비선형 해석을 의미하며 재질의 소성역을 다루는 충돌해석을 위해서는 탄성계수 만을 입력자료로하는 일반적인 탄성해석과 달리 재질의 탄성계수, 항복강도, 인장강도 및 연신률에 대한 정보가 필수적이다.

압출소재 AL6005A-T6의 재료물성치를 알아보기 위하여 그림 3과 같이 차체의 언더프레임으로 사용되는 압출재로 부터 인장시편을 압출방향으로 채취하였으며 인장시험편 형상은 그림 4와 같다. 인장시험 결과는 표1에서와 같다.

표 1. AL6005A-T6 재료 물성치 시험 결과

구 분	측정값
항복강도	210 (MPa)
인장강도	260 (MPa)
연신률	8 (%)
탄성계수	70 (GPa)

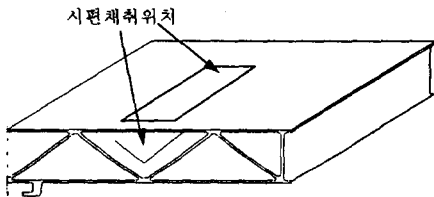


그림 3. 인장시편 채취 위치 및 방향

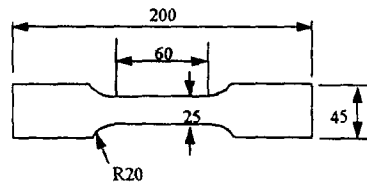


그림4. 인장시험편(JIS Z2201 5호, 두께 약3mm)

3.2 충돌 해석

열차 충돌은 대부분의 경우 상호 추돌 또는 건널목 등에서 일반 차량과의 충돌이 있다.

본 해석에서는 일정속도로 주행하는 그림5와 같은 철도차량의 충돌시 차량의 파손정도가 가장 심각할 것으로 생각되는 강체벽(Rigid Wall)과 충돌하는 경우를 가정하여 충돌해석을 수행하였다.

본 해석은 상용화된 비선형 동적 유한요소해석 프로그램인 PAM-CRASH를 이용하였고 해석에 사용된 WorkStation 기종은 SGI/INDIGO2이다.

차체 전두부 골조 및 언더프레임에 대한 변형량 및 변형 형상을 보기 위하여 대차, 연결기, 전장품, 의장품, 에어컨 및 충돌에 직접 관여하지 않는 간단한 브라켓트 류 등은 그림 5에서와 같이 각 부품위치에 부가질량(Added Mass)으로 처리하였으며 실제 중량과 동등한 조건으로 해석을 수행하였다.

본 해석에 사용된 알루미늄 전동차 차체 모델은 전두부를 포함하는 1량만을 모델링하였으며 그림 5에서와 같다. 알루미늄 차체의 구조적 특성 및 해석결과의 적합성을 확보하기 위하여 보(Beam)요소는 모델링에서 사용하지 않았으며 모두 셸(Shell)요소로만 모델링 하였다. 셸요소의 크기는 계산의 정확도와 차체 형태를 비교적 정확히 구현하기 위하여 다소 요소의 크기는 작지만 거의 동일한 크기의 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 총 요소의 개수는 약 75,000개이며 절점은 약 49,000개이다.

해석에 사용된 차량의 중량은 표2와 같으며 물성치는 앞에서 수행한 물성치 시험 결과에서 나온 탄성계수(70GPa), 항복강도(210Mpa), 인장강도(260Mpa) 및 연신율 (8%)를 적용하였다.

본 해석에서는 실제 충돌에서 일어날 수 있는 차량간 타오름(Over Riding)에 의한 영향 및 탈선(Derailment)의 효과는 배제하였다.

충돌조건은 차체가 강제벽에 부딪히는 속도로 하였으며 본 해석에서는 저속조건(15km/hr)과 고속조건(50km/hr) 두가지에 대하여 수행하였다.

50km/h속도 충돌 해석 결과, 시간에 따른 차체변형모양은 그림6-10에서와 같다. 그림6-10에서 볼 수 있듯이 초기 9msec까지는 운전실 전두부 골조는 충격흡수를 거의 하지 못하고 언더프레임 앞부분까지 변형이 발생하게됨을 알 수 있다. 9msec 이후의 충격흡수는 차체 측골조 및 천정 부분에서는 거의 이루어지지 않고 언더프레임의 변형 형태에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 충돌속도가 큰 경우 저속충돌과는 달리 대차(bogie) 센터 피봇(Center Pivot)부 앞부분 언더프레임 부위에서 버클링 현상이 일어나는 것을 알 수 있다.

또한 대차 피봇 앞부분에서의 변위가 뒷부분에서의 변위에 비해 상당히 크므로 대부분의 에너지를 대차피봇 앞부분에서 흡수하는 것을 알 수 있다.

저속조건과 고속조건에 대해 차량 중앙부의 가속도 결과는 그림11-12 같이 나타난다. 차량이 저속으로 충돌하는 경우 차량에 가해지는 가속도도 적어짐을 알 수 있다. 가속도는 향후 승객의 거동을 예측하는 자료로 활용할 수 있다.

변형된 형상은 차종은 다르지만 그림 1에서의 실제 사고사례에서 보여진 변형형상 및 다른 전동차 충돌 해석결과⁽³⁾ 매우 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

알루미늄 전동차 차체를 대상으로한 압출재 물성치 시험 및 충돌해석의 결과는 다음과 같다.

1) 알루미늄 압출재 AL6005A는 인장강도 260 MPa, 항복강도 210MPa, 연신율 8%, 탄성계수 70 GPa을 나타내었다.

2) 저속충돌(15km/h)에서는 차체 전두부의 영구변형이 발생하나 언더프레임의 변형은 거의 없었고 고속충돌(50km/h)에서는 전두부의 손상 뿐아니라 대차 센터피봇부 언더프레임의 버클링이 발생하였다.

3) 충돌해석을 통해 충돌시 충격흡수 및 강성부재로써 차체 언더프레임의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 설계시 충격흡수에너지를 증가시키려면 언더프레임부분의 구조 변경이 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 알루미늄 압출재로 제작되어진 차체가 충돌시 어떠한 거동을 보일 것인지 그리고 보강이 필요하다면 어느 부분이 될 것인가에 대한 정보를 얻을 수 있었으며, 향후 기존 스테인레스 전동차의 충돌 특성과 비교하여 충돌에 대해 보다 안전한 차체를 개발하고자 한다.

참고문헌

- (1) E.J.Lombardi (1995), "Amtrak's High Speed Trainset Program", 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp.1-7
- (2) H. Hüsken, P. Oloff and C. Schindler (October 1996), Railway Gazette International, pp. 659-662
- (3) Ohashi Eichiro and Omori Kiyoshi (1993), PAM Users Conference in Asia, pp.83-92

표2. 알루미늄 차체 전동차 차량 각부위의 중량

순번	항 목	중 량(kg)
1	차체	7000
2	대차	10478
3	연결기	726
4	실내외 설비	5401
5	하부기기	7050
6	전기	2474
소 계		28268

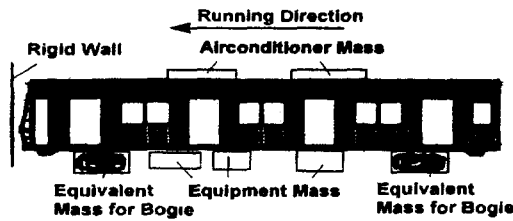


그림 5. 알루미늄 전동차 차체 모델 및 경계조건

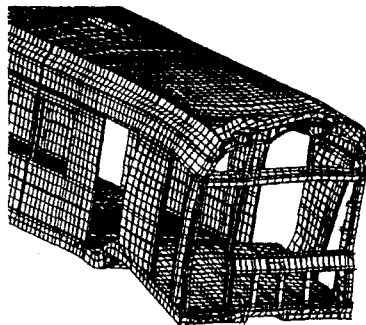


그림 6. 90msec 경과 후 변형형상 (50km/h충돌)

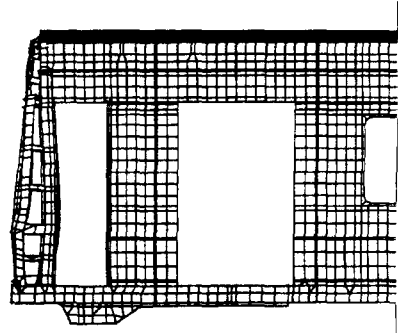
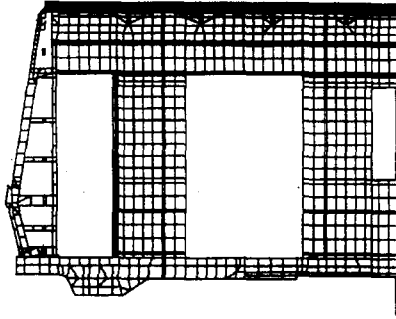


그림 7. 초기상태의 차량전두부 형상 (측면형상) 그림 8. 9msec 경과 후 변형형상 (50km/h충돌)

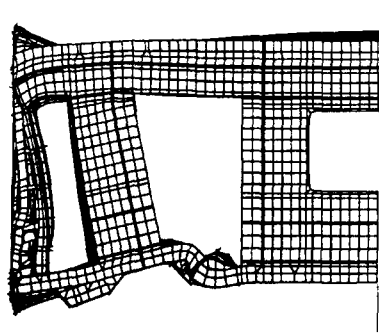
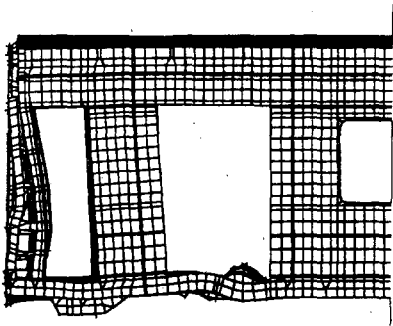


그림 9. 27msec 경과 후 변형형상 (50km/h충돌) 그림 10. 90msec 경과 후 변형형상 (50km/h충돌)

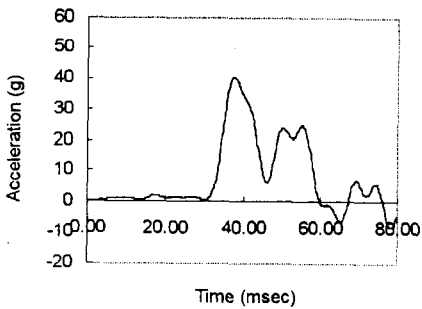


그림 11. 차량 상부 가속도변화 (15km/h충돌)

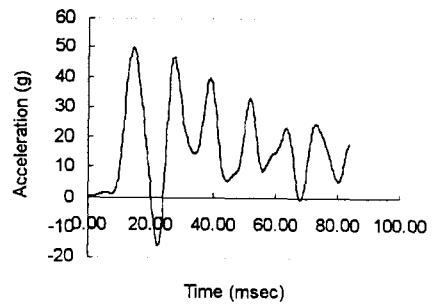


그림 12. 차량 상부 가속도변화 (50km/h충돌)