

# 고속전철 전체차량의 충돌 거동 해석 연구

## Study on Crash Behaviour Analysis of KHST

한형식\*                      구정서\*                      김대진\*\*  
Han, Hyung-Suk      Koo, Jeong-Seo      Kim, Dae-Jin

---

### ABSTRACT

The crash behaviour analysis of KHST is studied. KHST is modeled in 3D using the multibody dynamic analysis program DADS. The forward and side crash behaviour is predicted by the dynamic analysis model and compared with those of another dynamic model. This study shows that it is possible to predict the crash behaviour of the trains in three dimension.

---

## 1. 서론

충돌사고에 대한 고속전철의 안전성 향상을 위한 연구가 1,2차원적 충돌거동 해석을 포함하여 종합적으로 한국기계연구원을 중심으로 수행되어 설계에 반영되고 있다[1]. 1, 2차원 충돌거동 해석에서는 가장 기본적이고 중요한 진행방향에 대한 에너지 흡수능력, 가속도 응답, 압괴, 차량간 타고오름 등을 예측한다. 그러나 충돌사고 유형에 따른 전체차량의 거동을 예측하기 위해서는 3차원적 해석이 요구된다. 철도선진국에서는 3차원적 해석의 필요성을 인식하여 연구중인 것으로 알려져 있으나 발표된 논문은 적다. 현실적으로 전체차량의 충돌거동을 3차원적으로 해석하는 것에는 아직 기술적인 난제들이 많기 때문에 이 분야에 대한 연구가 요구된다.

본 논문은 시작연구로써 고속전철 전체차량의 3차원 충돌거동 해석방법을 제시하고 제시된 방법의 적용 가능성 검토, 향후 연구방향을 제시하는데 목표를 둔다. KHST에 대한 동적 모델을 위하여 다물체동역학을 이용하는 것이 제시되고 정면, 경사면 충돌거동 해석이 수행된다. 해석 결과 중 일부는 1차원적 PAM CRASH 모델 해석 결과와 비교된다. 더 나아가 향후 연구방향이 검토된다.

## 2. 충돌해석 모델링

KHST의 차량편성은 20 량으로 이루어진다. 본 논문에서는 기본적으로 강체를 이용하며 이용되는 S/W는 다물체동역학 해석 프로그램인 DADS[2]이다. 전체차량을 구성하는 차체, 대차, 현가 요소, 연결장치 등을 20량에 대하여 모두 모델하는 것은 자유도를 매우 크게 하여 해석 시간을 증가시킨다. 또한 충돌 거동에 큰 영향을 주는 것은 전방 차량들이므로 본 논문에서는 그림 1과 같이 선두 5차량은 대차, 현가 요소, 연결장치, 차체를 모두 포함하는 3차원 다물체동역학 모델을 이용하고 나머지 차량은 1차원적 모델(PAM CRASH)을 DADS 모델화 하여 20량을 구성한다. 전방 5차량에 대한 3차원 동적 해석 모델은 그림 2와 같고 좀더 상세한 모델 법은 다음과 같다.

---

\* 한국기계연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국기계연구원 인턴연구원, 비회원

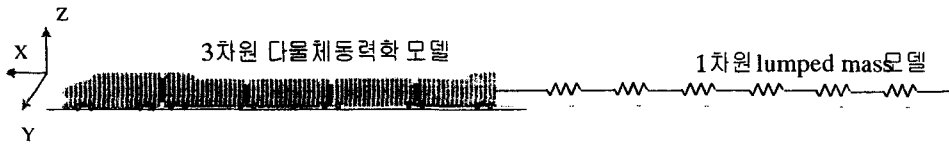


그림 1. KHST 전체차량 동적 해석 모델의 구조 (1-20량)



그림 2. KHST의 3차원 동적 해석 모델(1-5차량)

## 2.1 대차모델

KHST는 3종류의 대차로 구성된다. 그림 3은 동력차용 대차, 그림 4는 동력 객차용 대차, 그림 5는 객차용 대차에 대한 동적 해석 모델을 보여주고 있다. 1차, 2차 현가에 이용되는 탄성스프링의 모델링은 6방향 강성을 갖는 DADS의 BEAM 요소를 이용한다. Bump stop, 댐퍼 들은 비선형 TSDA 요소를 이용하고 가이드 스프링, 조인트 고무 등은 BUSH 요소, 그리고 공기 스프링은 BEAM 요소를 응용하여 모델한다. Anti-roll bar는 BUSH 요소 하나로 모델한다. 대차와 차량간의 연결은 링크, 고무, 핀 등으로 구성되나 본 논문에서는 비선형 BUSH 요소를 이용하여 연결장치의 기능과 같도록 한다. 객차와 객차의 연결은 그림 5와 같이 댐퍼, 링으로 이루어지는데 댐퍼는 TSDA, 링 연결은 역시 BUSH 요소를 응용하여 모델한다. 여기서 현가 행정을 제한하기 위한 비선형 TSDA가 모든 1,2차 현가 요소에 추가된다.

## 2.2 히스테리시스 스프링

충돌사고시 충돌에 의한 차체 구조물의 힘-변형 특성은 히스테리시스 특성을 가진다. KHST 전체

차량 모델에서 6-20 차량의 차체, 연결장치, 대차들은 집중질량으로, 질량사이에는 모두 히스테리시스 스프링으로 연결하여 만든다. 그러나 DADS에는 이러한 히스테리시스 스프링 요소가 없으므로 사용자 정의 Subroutine을 이용하여 히스테리시스 스프링 요소를 개발하여 이용한다. 개발된 히스테리시스 스프링의 메뉴는 그림 6과 같다. 그림 6에서와 같이 입력 데이터는 연결되는 강체 2개의 이름, Loading curve, Unloading curve, Shape factor, 자유장이다. Shape factor는 히스테리시스 거동에서 복원되는 기울기를 정의하는 상수이다. Loading, Unloading 곡선은 제한 없이 임의로 입력할 수 있다. 그림 7은 개발된 히스테리시스 스프링을 시험하기 위하여 단품에 적용한 결과이다. 그림 7에서와 같이 Loading, Unloading 곡선에 따라 거동하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제로 충돌해석에 적용한 결과 오실레이션이 많이 생겨 차후 이 스프링에 대한 연구가 요구되었다.

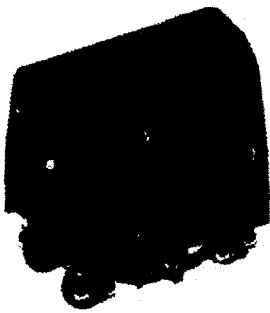


그림 3. 동력차용 대차 모델

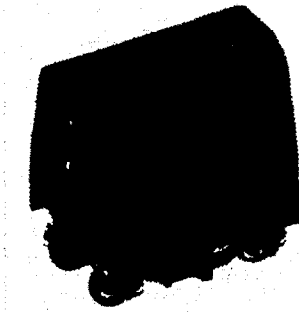


그림 4. 동력객차용 대차 모델

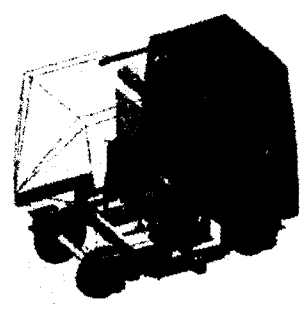


그림 5. 객차용 대차 모델



그림 6. 히스테리시스 스프링 메뉴

- Body i
- Body j
- Shape factor
- Loading curve
- Unloading curve
- Frelength

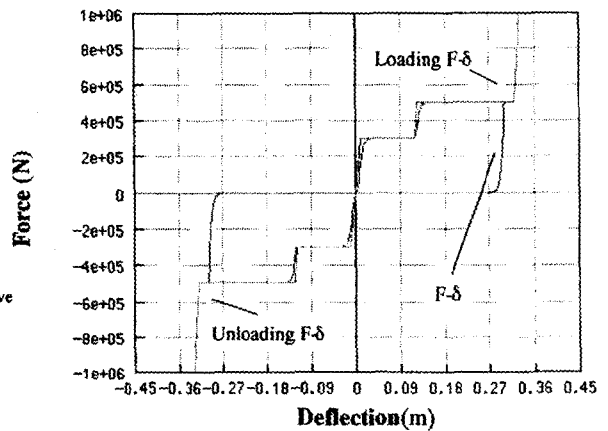


그림 7. 히스테리시스 스프링의 F-δ 거동

## 2.3 충돌 모델

전체차량과 장애물 강체와의 충돌을 모델하기 위하여 접촉요소를 이용한다. 이용된 접촉 요소는 DADS의 CONTACT 요소로 면과 구 접촉을 응용하여 모델한다. 즉 KHST와 충돌하는 물체는 접촉 요소의 면이 되고 전두부는 구로 정의된다. 전두부의 형상 및 헤드스톡의 구조를 고려하여 이 CONTACT 요소를 전두부에 4개 이용한다. 강체 질량과의 접촉력의 계산은 칩투량에 따라 강성, 감쇠, 반발계수 특성을 이용하여 계산한다. 여기서 접촉에 이용된 상수는 충돌력에 영향을 주기 때문에 단순 모델에 대한 시행착오 법을 이용하여 결정하였다.

## 2.4 차륜/레일 접촉

차륜과 레일의 접촉은 이미 알려진 이론을 이용하여 개발한 모듈을 DADS에 추가하여 모델한다. 차륜/레일의 접촉은 주어진 형상 및 마찰계수, 상대속도, 차륜위치 등의 함수로 복잡한 현상이다. 여기서 개발한 차륜/레일 접촉의 특징은 기존의 것과 다르게 차륜과 레일 사이의 분리가 가능하다는 것이다. 즉 탈선현상을 고려할 수 있는 특징을 가진다. 이것은 경사면 충돌시 차량의 탈선을 예측하는데 이용된다[3].

# 3. 해석

## 3.1 KHST 정면충돌

전 절에서 개발한 3차원 동적 모델을 이용하여 KHST의 정면충돌을 해석하였다. 그림 8은 정면 충돌 해석 모델을 보여주고 있으며 KHST와 충돌하는 강체의 질량은 15 ton고 차량의 속도는 110km/h이다. 그림 9는 정면충돌에 의한 충돌거동 결과 중 Time=160ms 일 때의 결과를 보여주고 있다. 그림 9에서와 같이 전두부 즉 헤드스톡 부분이 압괴를 일으키는 것을 볼 수 있다. 그림 10은 헤드스톡의 압괴량을 보여주고 있으며 그림 11은 1차원 해석에서의 결과이다. 1차원 해석의 경우 최대 압괴량(headstock(detail))은 약 1800mm, 3차원에서는 약 1950mm로 3차원에서의 결과가 큰 값을 나타내고 있다. 이 차이는 3차원 해석 모델에서는 선두 5차량이 강체로 모델되었기 때문으로 사료된다. 그러므로 이 차이를 줄이기 위하여는 선두 차량에 대한 해석 모델에서 강체를 유연체로 모델해야할 필요성을 찾을 수 있다. 그림 12, 그림 13은 압괴력을 보여주고 있다. 압괴력은 주어진 전두부 F- $\delta$  곡선을 추종하고 1차원의 결과와 비교하여 큰 거동은 유사함을 볼 수 있다. 그러나 3차원의 결과는 상대적으로 오실레이션이 크고 히스테리시스 스프링 복원시 F- $\delta$  곡선에서의 기울기가 크게 나타났다. 그러므로 히스테리시스 스프링에 대한 보완 연구가 필요하다고 사료된다. 그림 14, 그림 15는 동력차의 가속도 응답으로 3차원 해석에서는 최고치가 약 7g, 1차원은 약 6g를 보여주고 있다. 3차원은 5차량까지 강체이기 때문에 최고치가 큰 것으로 사료되며 동일한 이유로 응답속도도 빠른 것을 알 수 있다. 그러므로 충돌에 의한 에너지 흡수, 압괴등을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 모델에 보완이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 여기서 3차원 해석의 주목적이 전체적인 거동이기 때문에 현 결과의 차이를 수용할 수 있다고 사료된다.



그림 8. KHST의 정면출돌 거동해석  
(Time=0.0s)

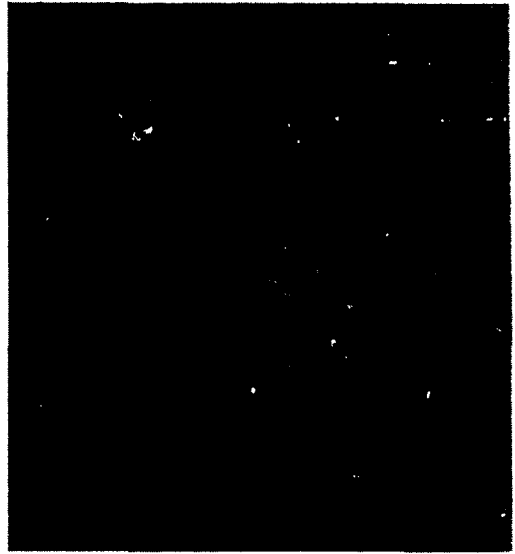


그림 9. KHST의 정면출돌 거동해석  
( Time=160ms)

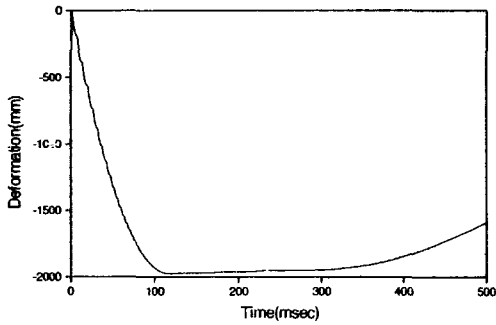


그림 10. 전두부의 축방향 압괴량(3D)

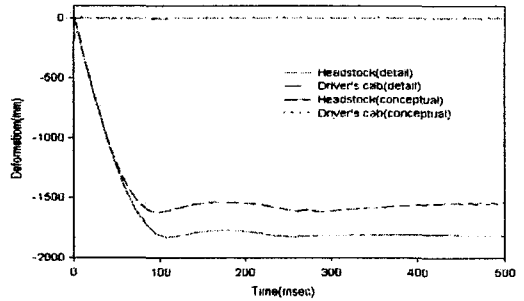


그림 11. 전두부의 축방향 압괴량(1D)

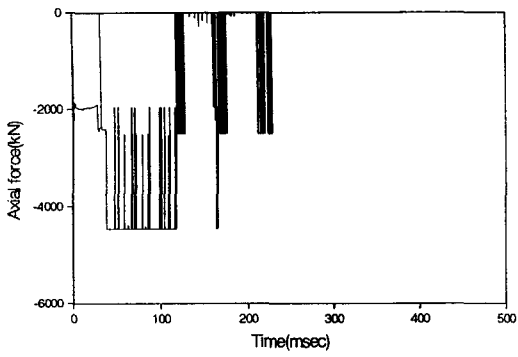


그림 12. 전두부의 축방향 압괴력(3D)

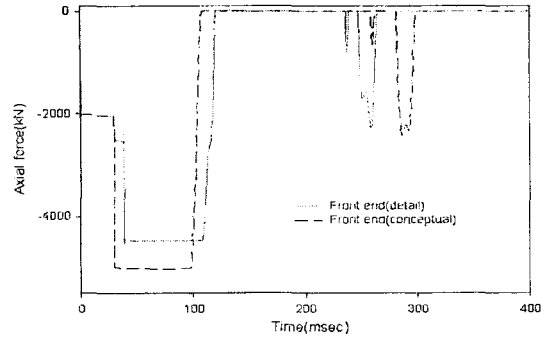


그림 13. 전두부의 축방향 압괴력(1D)

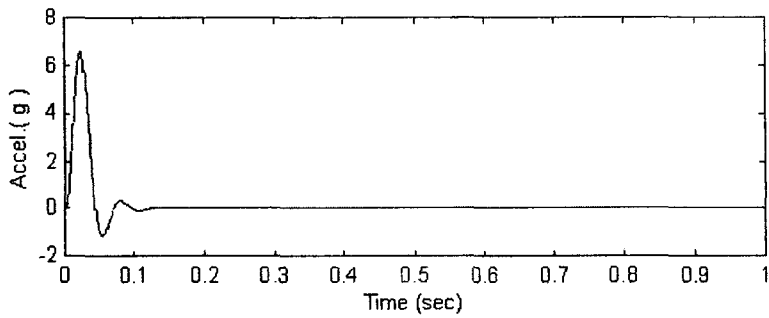


그림 14. 동력차의 가속도 응답(3D)

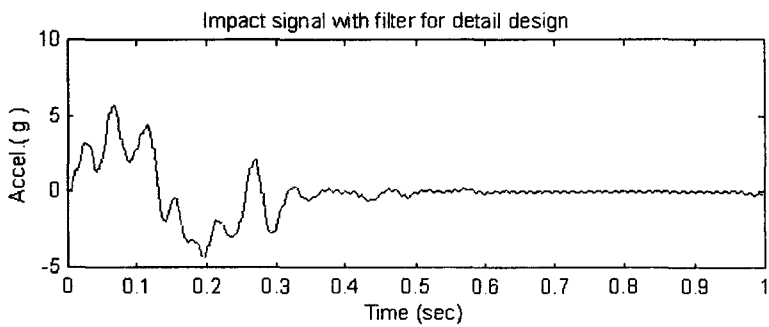


그림 15. 동력차의 가속도 응답(1D)

### 3.2. KHST 경사면 충돌해석

본 논문의 주 목적인 전체차량의 거동, 탈선거동을 예측하기 위하여 정면충돌에 이용된 해석 모델을 수정하여 장애물이 경사진 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델은 그림 16과 같다. 그림 16에서와 같이 강체 장애물이 30도 기울어진 상태로 110km/h로 주행중인 KHST와 충돌하게 된다. 강체의 질량은 15 ton이고 질량관성모멘트는 정해진 것이 없어 임의로 입력하였다. 본 해석의 주목적은 탈선거동에 대한 해석 가능성을 보는 것이라 할 수 있다. 해석 가능성이 입증되면 좀더 정확한 데이터 및 해석 모델을 이용하여 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다. 그림 16, 그림 17, 그림 18에서 보듯이 Time=64ms 이면 이미 탈선이 일어난 것을 볼 수 있다. 즉 차륜이 레일로부터 벗어난 것을 볼 수 있다. 그림 18에서는 탈선이 일어난 후 차량들이 zigzag 형태를 띠는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 본 해석 기술을 이용하면 철도차량의 충돌에 의한 탈선, 타고오름을 포함한 전체적인 거동을 예측할 수 있음을 알 수 있다.



그림 16. KHST의 경사면 충돌거동 해석  
(Time=0.0s)

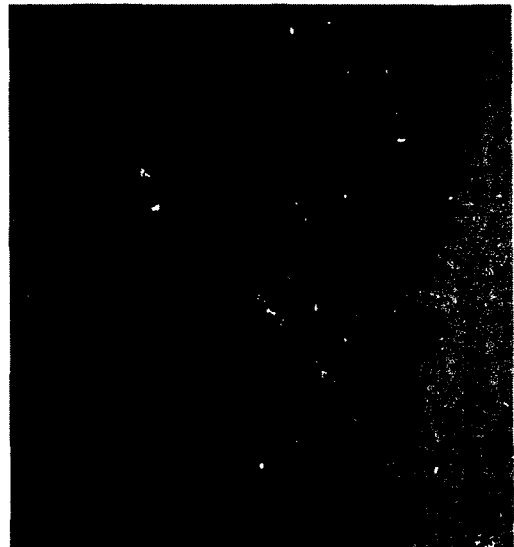


그림 17. KHST의 경사면 충돌거동 해석  
(Time =64ms)



그림 18. KHST의 경사면 충돌 거동해석  
(Time=144ms)

#### 4. 결론

이상과 같이 고속전철의 충돌시 충돌에 의한 전체차량의 거동해석 방법을 제시하고 KHST에 적용하였다. 연구 결과 본 논문에서 제시하는 3차원적 충돌거동해석 방법이 고속전철 및 기타 철도차량에 적용 가능함을 알 수 있었다. 이러한 기술을 이용하면 다양한 충돌사고 유형에 대하여 전체차량의 거동 및 탈선을 예측할 수 있다고 평가된다. 그러나 강체에 기초를 두기 때문에 발생하는 문제와 전두부 충돌 모델의 단순성으로 인한 오차를 줄이기 위한 연구가 추후 이루어져야 함을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행된 것임을 밝힙니다.

#### 참고문헌

1. 구정서 외(1999), “충돌안전도 해석기술개발 연구보고서”, 한국기계연구원
2. DADS User's Manual, LMS CADSI, USA
3. 한형석, 허 신, 하성도(1998), “철도차량 동역학 해석을 위한 DADS 차륜/레일 접촉모델 개발”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 706-711.