

# 전동차 충돌해석을 위한 연결장치의 모델링

## Modeling of coupling device for crash analysis of an electric vehicle

김영훈 \*                      김기남 \*\*                      장현목\*                      박영일 \*  
Kim, Young-Hoon      Kim, Ki-nam                      Jang, Hyun-mog                      Park, Yeong-il

**Abstract** : In this thesis, the impact analysis for the shunting procedure using the dynamic buffer characteristics of the coupler was developed.

In this study, each car was modeled as one dimensional element by using the equivalent system. After the impact, the slip exists only between wheel and rail in the braked trainset. For this analysis the analysis code named the POTAS-MSM (Power Transmission Analysis Software-Multi Slip Mechanism) which was developed for the numerical analysis of dynamic system is developed. The validation of this analysis was proven by comparing the numerical results with the results of world-famous S company which is located in Europe.

**Key words** : rolling stock(철도차량), modeling(모델링), coupler (연결기), impact analysis (충돌해석)

### 1. 서론

한국형 고속전철의 확대사업과 도심과 부도심을 연결하는 전철화 사업으로 인해 앞으로의 철도 차량 설계분야에서의 차량의 능동적 및 수동적 안전도 향상을 위한 연구는 사회적으로 그 중요성이 매우 크게 인식되고 있다. 철도차량은 단순히 1개의 차량이 운행하는 것이 아니라 다수의 차량을 1개의 편성으로 연결하여 운행하므로 전체차량이 가지고 있는 운동에너지가 엄청난 양이므로 사고 시 에너지를 적절히 분산시킬 수 있는 차량의 구조설계와 장치가 필요하다. 연결장치 연결기와 완충기로 구성되며 단순히 차량과 차량을 연결해주는 기계적인 역할뿐만 아니라 운행 시에 발생하는 견인력과 제동력의 에너지를 흡수하는 부분이다.

본 연구에서는 고무의 동적 거동을 나타낼 수 있는 완충기 모델을 적용시켜 충돌해석을 수행하고 그 결과를 외국 S 사의 결과와 비교하여 모델링을 간접적으로 검증한다.

### 2. 고무 완충기 모델링

#### 2.1 관절형 고무 완충기

본 연구에 적용된 관절형 고무완충기는 밀폐된 케이싱 내에 특수모양의 고무와 피벗이 조합된 구조로 설계되어 충격에너지를 흡수하는 구조이다. 고무의 전단응력에 의한 완충작용을 수행하여 충격흡수가 우수하며 그림.2.1은 관절형 고무완충기의 중에서 2 (EFG2)의 작용도를 나타낸 것이다.

관절형 고무완충기의 완충특성은 완충고무의 수량, 드로우바(Drawbar)의 모양에 따라 다양하게 변화시킬 수 있다. 그림 2.2은 이 완충기의 정하중 특성과 동하중 특성을 나타내는 완충특성 선도이다.

---

\* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량공학과, 정회원

\*\* 유진기공주식회사 기술연구소, 정회원

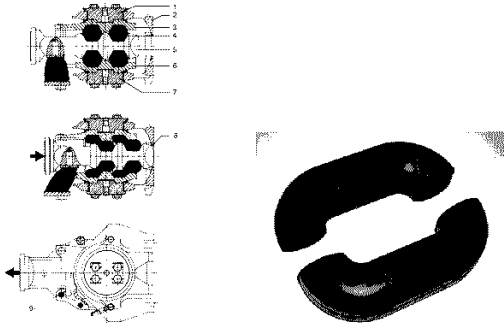


그림 2.1 권절형 고무완충기의 작용도(EFG2) 및 고무완충기

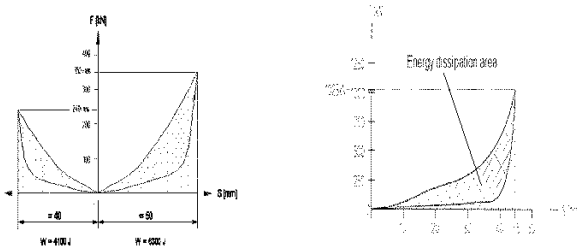


그림 2.2 정하중 특성 선도와 동하중 특성 선도( EFG2)

그림2.2은 완충특성 선도에서 세로축은 하중, 가로축은 하중에 대한 변위를 나타내고, 상승압축 선도와 하강압축선도로 이루어진 폐곡선 내의 빗금친 부분의 면적(완충기 에너지 소산면적)은 충격흡수에너지량을 의미한다.

## 2.2 고무 모델링

고무의 동적특성은 탄성력, 마찰력 그리고 점탄성력의 세 가지 힘의 중첩의 힘과 거동에 기초를 두고 있다. 고무가 가지는 또 하나의 성질은 점탄성을 가지는 것인데, 탄성과 점성이라는 두 가지 측면을 가지고 있는 고무에 가장 중요한 성질로서 고무로 구성된 물체의 동력학적 거동을 살펴보면 매우 중요한 성질이다. 또한 탄성으로 인하여 변형이 어느 정도 회복되나 점성으로 인하여 발생하는 열로써 에너지의 일부를 소산시키는 성질을 가지고 있는 점탄성은 비선형 특성을 보이는 응력-변형도 관계를 나타내며 타원 내부의 면적은 한 주기동안 열로써 소산되는 에너지를 의미하는 것이다.

점탄성 물체의 거동은 탄성과 점탄성 요소의 분리하여 모델을 구성하는 것으로부터 시작된다. 점탄성을 묘사하는데는 여러 가지 모델이 이용되지만 기본적인 요소는 스프링과 대시콧으로 이루어져 점성과 탄성을 나타낸다.

Kelvine 모델은 주로 물체에 하중을 가하였을 때 초기 거동을 표현하는데 주로 사용하는 모델로서, 충격해석은 충격순간부터 짧은 시간동안에 이루어지는 현상이 주 관심대상이므로 Kelvine 모델을 사용하였다. 이 모델에서는 스프링과 대쉬포트가 병렬로 연결되어 있으므로 외력이 부하된 경우 전체 변형률은 스프링에서 발생하는 변형률 및 대쉬포트에 발생하는 변형률과 동일한 것이다

### 3. 차량 편성 모델링

#### 3.1 완충기 고무 모델링

그림 3.1의 Kelvin 모델은 비선형적이다. 따라서 일반적으로 k, C를 사용하는 선형 모델링을 하면 시스템의 거동과 기리가 먼 모델링이 된다. 하지만 비선형을 너무 많이 고려하다 보면 모델링이 복잡해지고 이를 사용하기도 쉽지가 않기 때문에 가능한 단순한 모델링을 시도하였다. 그림 3.1과 같이 선형 전동이라는 가정하에 스프링 상수 k와 감쇠계수 C를 사용하여 크게 4구간으로 나누어 모델링을 하였다.

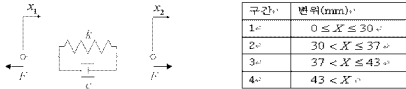


그림 3.1 모델링 및 구간변위

차세한 모델링은 그림 3.2 특성선도에서 힘 F를 조화가전력으로 가정하여 시간에 따른 힘의 값을 추출하였고 그에 따른 변위를 힘에 대응하는 꺾임으로 추출하였다. 이로써 수치적으로 속도 값을 얻는다.

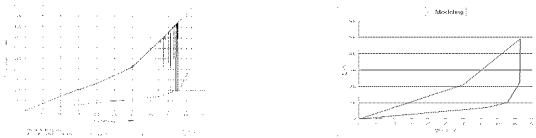


그림 3.2 관절형 완충기의 동하중 특성선도 및 모델링 선도

#### 3.2 충돌 차량 모델링

대상 차량의 모델링은 비슷한 유형의 차량이 연결 편성되어 있는 형상을 지니므로 차량 1량에 대한 모델링을 수행하고 연결하는 방법을 활용하였다.

차량 1량의 모델링은 차량의 구조적 특성을 고려하여 1차원 동력학적 모델링으로 하였으며, 차체는 선형스프링요소, 완충기는 비선형스프링 요소와 감쇠요소로, 차량 질량은 전후대차에 집중질량으로 절반씩 작용하는 것으로 그림 3.3과 같이 모델링하였다. 열차의 전두부와 각 차량의 연결부에는 그림 3.2의 특성을 갖는 관절형 고무완충기가 취부되어 있으며 정지된 차량의 차륜과 레일 사이에는 마찰력이 작용하며 바깥력은 동마찰계수와 정마찰계수를 고려하였다.

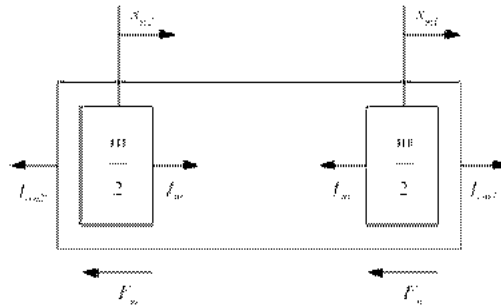


그림 3.3 Local model

$F_n$ 은 제동체결 차량의 마찰력,  $f_m$ 은 차체강성에 의해 차체에 발생하는 힘,  $f_{on}$ 은 연결기에 발생하는 힘이고  $x_{n1}, x_{n2}$ 는 각 대차의 변위를 나타낸다.  $k_i$ 는 차체 강성으로 S사의 해석에 사용된 값으로  $1.25 \times 10^8$  [N/m]을 적용하였으며,  $k_o$ 는 완충기 완충특성으로서 비선형성을 가진다. 차량의 질량  $m$ 은 앞뒤 대차에 동일하게 분산된 것으로 모델링하여 각 대차 부분에  $m/2$ 씩 분담하였다. 차량 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$F_n = \mu (m/2)$$

$$f_m = k_i (x_{n2} - x_{n1})$$

$$f_{on1} = k_o (x_{n+1.1} - x_{n2})$$

$$f_{on2} = k_o (x_{n-1.2} - x_{n1})$$

충돌해석 시뮬레이션의 수행을 위하여 앞에서의 1량 차량에 대한 모델링을 기초로 하여 편성열차에 대한 모델링을 수행하였다. .

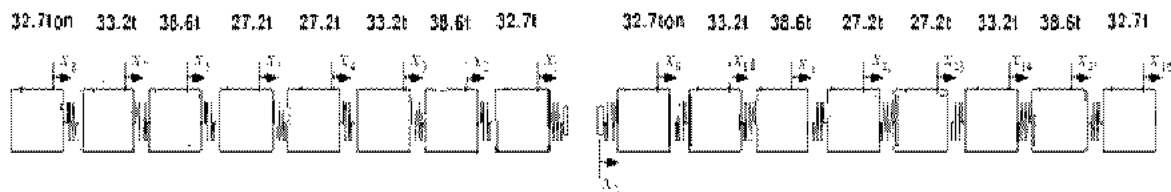


그림3.4 충돌 차량 모델링

### 3.3 충돌시뮬레이션

충돌시뮬레이션은 공차 중량 263.4톤인 전동차 1편성이 시속 5km/h의 속도로 달려와 제동을 체결한 상태로 정지되어 있는 동일 열차와 충돌하는 시나리오로 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 조건과 충돌해석 조건은 아래와 같다.

- 충돌 후 양 차량의 전두부 연결장치는 결합된 채로 유지한다.
- 충돌차량은 계속 제동을 체결하지 않는다.
- 정지 차량은 제동 체결 유지한다.
- 충돌시 정지차량 제동계에서는 미끄럼이 발생하지 않고 차륜과 레일사이에서 미끄럼 발생한다.

Simulation time = 1.50 [sec]

Friction coeff. wheel/rail(dynamic)  $\mu_{kd} = 0.20$

Friction coeff. wheel/rail(static)  $\mu_{ks} = 0.21$

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 프로그램

시뮬레이션 해석을 위하여 사용된 시뮬레이션 프로그램(POTAS-MSM)은 다수의 미끄럼 요소가 존재하는 경우 미끄럼 기작(Slip mechanism)을 해석하는 용이하도록 개발하였다. 미끄럼 기작을 해석하기 위해서는 시스템 상태를 계속 검사하여 미끄럼 요소(Slip element)의 스틱-슬립(Stick-slip) 상태를 판단하지 않고 그림 4.1에서 보인 자유도 자율판단 알고리즘을 통하여 자유도 변경 순간의 파도 상태를 정확히 해석할 수 있다.

또한 POTAS-MSM은 부시스템(Subsystem) 개념을 이용하여 차량편성, 차량중량, 충돌속도, 완충기특성, 구체강성, 마찰계수 등을 입력자료의 수정으로 시뮬레이션이 가능하였으며 적분시간 간격 자동조절 알고리즘을 이용하여 충격에 의한 파도응답 시에는 시간간격을 조절하여 오차를 최소화 되도록 하였다.

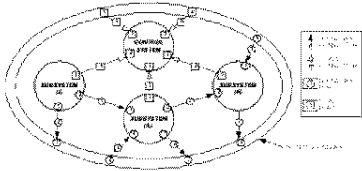


그림4.1 Connectivity among the subsystems and system boundaries

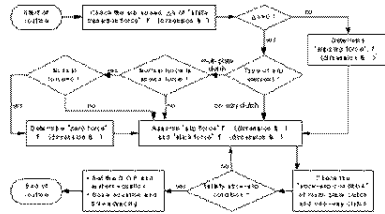


그림4.2 Process of the stick-slip conditions and the state transition forces

### 4.2 시뮬레이션 해석결과

충돌열차는 충돌직후 선두차는 속도가 급격히 낮아졌다가 충돌반력에 의해 속도가 상승한 후 완충기와 인접 차량들의 영향을 받아 그림 4.3과 같이 맥동하며 되돌아가는 것으로 나타났다. 정지열차는 충돌직후 선두차는 속도가 급격히 높아졌다가 인접 차량들의 영향을 받아 그림 4.4와 같이 맥동을 하며 거의 정지되며, 후미차량들은 일정한 시간 간격 후 충돌이 발생하여 비슷한 현상을 보인다.

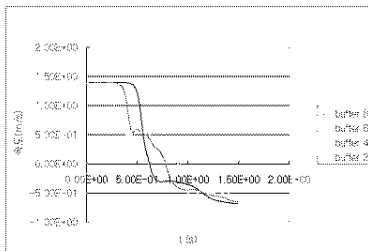


그림 4.3 속도-시간 그래프(충돌차량)

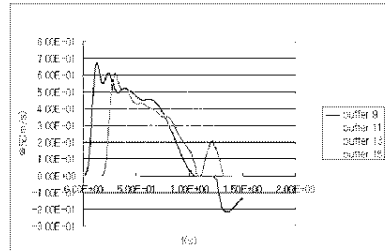


그림 4.4 속도-시간 그래프(정지차량)

충돌해석 결과 최대 충격력이 발생 연결기는 직접 충돌이 발생한 차량이며 충격력은 717[kN]로서

완충기 허용충격력 1,025[kN] 보다 작은 것으로 나타났다.

본 연구에서 나타난 해석결과와 S 사의 해석결과를 비교하면, 충돌후 소산되는 에너지는 표 4.1 과 같이 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 차체의 스트레인 에너지를 고려하였으며 전체 소실 에너지는 유사한 결과를 나타내었다. 다만 S 사의 결과 역시 시뮬레이션에 의한 값으로서 실차에 의한 검증이 필요하다 할 수 있다.

표 4.1 Comparison of two different simulation results

Energy	Result	
	POTAS-MSMS	company
Start energy(kJ)	254	254
Energy after simulation(kJ)	17	9
Energy dissipation, total(kJ)	236	243
- Energy dissipation, buffer(kJ)	132	148
- Energy dissipation, brake(kJ)	83	95
- Total strain energy (linear stiffness)(kJ)	21	-
Energy balance deviation(%)	0.03	0.04

## 5. 결 론

본 연구는 “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙” 제23조에 의한 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차 상태의 열차가 제동이 되어 있는 동일한 열차와 연결기를 통한 충돌해석에 관한 것이며, 전동차의 모델링과 시뮬레이션 과정을 통한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 관절형 고무 완충기의 모델링을 Kelvine 모델을 이용하여 고무 모델링을 수행하였다.
- 1개 차량의 모델을 이용하여 편성 열차의 모델링을 수행하였다.
- 충돌 시뮬레이션을 미끄럼 기작을 해석할 수 있는 POTAS-MSM 을 개발하여 수행하였다.
- 시뮬레이션 결과는 충돌 거동을 잘 구현하였다.
- 에너지 용량 해석 결과, S사의 결과와 유사한 결과를 도출하였다.
- 본 연구결과는 실차실험에 의한 검증이 필요하다.

## 6. 참고자료

- [1] 구정서 외 2인, “도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구” , pp. 28-29, 1999.
- [2] 문용철, “전동차용 Double형 완충기의 국산화 개발에 관한연구” , p. 23, 2000.
- [3] Y.I.Park, etc, “Purposed Program Based on Assembly for the Analysis of Dyanamic Characteristics of a Power transmission System” , Proc Instn Mech Engrs, Part D, pp.545-559, 200.
- [4] “Inchon Airport EFG2 with rubber 40-3538.07-8 revised simulation” SCHAKU Co., 2003.