

# 열차의 1차원 연결 해석 모델링 기법 연구

## A study on 1D modeling techniques for collision analysis of train coupling

김형준\*      구정서\*\*

Kim, Hyung Jun   Koo, Jeong Seo

---

### ABSTRACT

One dimensional collision analysis is often used to simulate a train-to-train coupling or collision accident. But there are various numerical modeling techniques utilized for dynamic models of rolling stocks such as a lumped-spring-mass model or a bar-mass model. In rolling stock industries, a lumped-spring-mass model is mainly applied without consideration of bogie attachments separately. In this case, a dynamic stiffness coefficient is introduced to compensate the overestimated car mass effects due to the linkage stiffness of bogies and seats. In this paper, the effects of dynamic stiffness coefficients and wheel-rail friction coefficients were studied by simulating a bar-mass model with bogie attachments separately.

---

### 1. 서론

현재 철도차량의 충돌안전도 설계에서는 먼저 차체설계를 구조강도 측면에서 도출하고, 도출된 차체구조 및 에너지 흡수부품의 정적 강도 및 압괴강도를 3차원 유한요소 해석<sup>[1,2]</sup>으로 구하여 하중 및 변형관계를 비선형 스프링 요소로 모델링한 1차원 동역학적 충돌해석모델을 해석하여 전체차량의 충돌안전도 평가를 하고 있다. 이러한 방식은 신규로 개발되는 차량의 경우에는 초기설계가 완성된 이후에 적용 가능하며, 유한요소해석 모델을 이용한 평가 및 보완 이후에도 안전기준에 만족하지 못한 결과를 얻는다면 동일한 방법을 반복적으로 수행하여야 한다. 따라서 전체 차량을 1차원 스프링-질량으로 단순화된 모델로 구성하는 경우<sup>[3]</sup>에는 가급적 실제현상을 잘 반영할 수 있는 모델링 기법을 사용하는 것이 매우 중요하다. 이러한 1차원적 모델링의 한계를 극복하기 위하여 3차원적 유연체 동역학 모델링을 적용하면 시간적 경제적으로 매우 효율적이지 못한 단점<sup>[4]</sup>이 있다.

따라서 본 논문에서는 차체 설계시 얻을 수 있는 정적강도해석 데이터를 이용하여 충돌시 연결부품의 에너지 흡수용량설계에 이용할 수 있는 신뢰성 있는 1차원 연결해석모델링 기법<sup>[5-8]</sup>을 개발하는데 목적이 있다. 본 연구에 이용된 충돌조건은 「도시철도 차량안전기준」 제 23조 (차체의 충돌안전성) 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어 있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에는 손상이 발생하지 아니하여야 한다'를 적용하였고, 여기서 충돌시 제동조건에 따른 연결기의 에너지 흡수특성과 차체의 질량에 의한 관성효과가 충격력에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 제동마찰계수와 동적강성계수를 상이하게 적용한 여러 가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 제동조건과 동적강성계수에 의한 충격력의 증감에 대한 상관관계를 예측 가능한 수준으로 분석할 수 있었다.

---

\* 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정

\*\* 정회원, 철도전문대학원 교수

## 2. 1차원 요소를 이용한 차량모델

본 연구에서는 기존의 철도차량업체에서 사용하는 대차 질량을 차체질량에 포함시킨 질량-스프링 모델과 달리, 그림 1과 같이 차체의 변형특성(정적강성, static stiffness)을 반영하기 위한 분포질량의 바(bar)요소, 대차와 차체 연결부의 길이방향 강성을 표현하기 위한 1자유도 비선형스프링(spring)요소, 휠과 레일의 제동을 표현하기 위해 1자유도 비선형 스프링요소, 그리고 대차 질량은 집중질량(mass)요소를 사용하여 모델링 하였다. 본 모델에 이용된 차량은 A사의 전동차이며 제동력은 스프링의 감쇠특성을 이용하여 속도 방향에 반대 반대방향으로 작용하는 반력으로 표현하였다.

또한 기존에 사용하고 있는 대차 질량을 차체 질량에 포함시킨 질량-스프링 모델과 비교하기 위하여 대차 질량을 차체 부착부위에 집중질량으로 부과하고 차체의 정적강성에 동적강성계수(dynamic stiffness coefficient)를 반영하여 모델링 하였다.

해석에 이용된 충돌조건은 「도시철도 차량안전기준」 ‘제 23조 (차체의 충돌안전성) 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어 있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에는 손상이 발생하지 아니하여야 한다.’에 근거하여 동일차량과 시속 5킬로미터의 속도로 연결기를 통한 정면충돌을 설정하였다.

차량의 제원은 생략하며 편성은 8량 1편성이고, 모델에 이용한 전두연결기와 중간연결기 특성은 B사와 C사의 것을 이용하였다. 그림 2와 그림3은 본 모델에 이용한 연결기의 특성곡선이다.

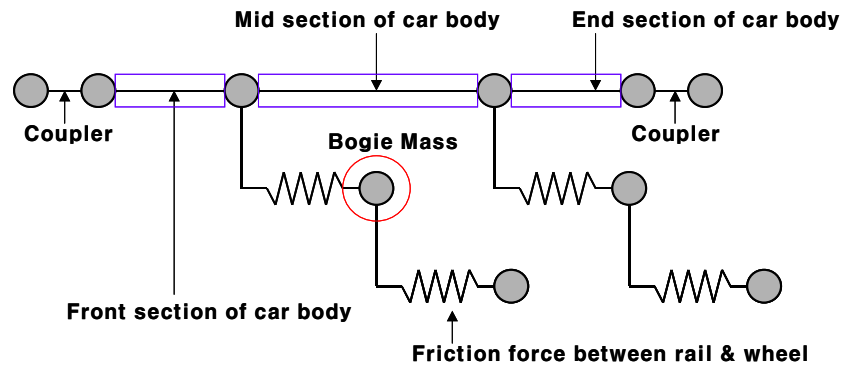


그림 1 1차원 요소를 이용한 차량모델개요(1량기준)

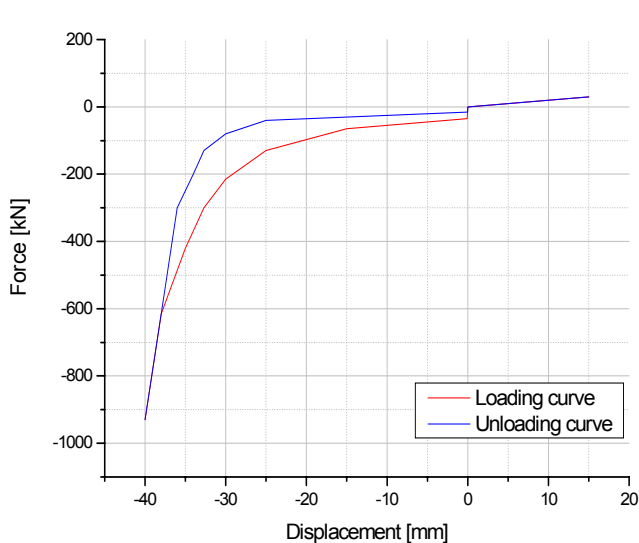


그림 2 전두부 연결기 특성곡선

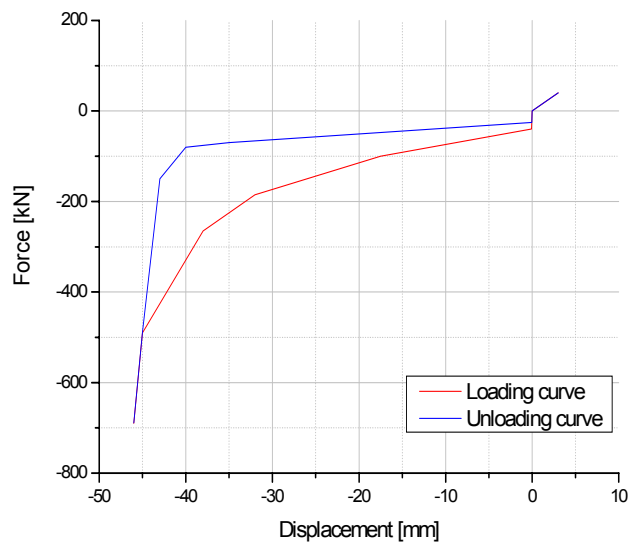


그림 3 중간연결기 특성곡선

### 3. 제동조건과 동적강성계수 적용에 따른 연결해석 결과 분석

#### 3.1 제동조건에 따른 연결해석

연결조건은 앞 절에서 언급한 바와 같이 정지상태의 동일한 편성으로 구성된 차량과 연결기를 통해 시속 5킬로미터로 정면충돌을 하도록 하였으며, 이때 정지상태 차량의 제동조건을 제동하지 않은 상태에서 서부터 마찰제동계수를 0.1씩 증가 적용하여 해석을 수행하였다. 최대 마찰제동계수는 0.3까지 수행하였다.

그림 4-6의 해석결과를 분석해보면 1차 충돌 이후 2차 충돌에 의해 전두부 연결기에서는 높은 충격력이 발생하였고, 중간연결기는 이후에 발생하는 충격에 의한 에너지를 흡수하는 역할을 수행함을 알 수 있다. 결과 데이터를 분석해 보면 마찰에 의한 제동조건이 0.1씩 증가함에 따라 전두연결기에 발생하는 충격력이 약 10~15% 가량 증가되었다. 명확한 상관관계는 여러 가지 해석을 더 수행한 이후에 고찰할 필요가 있다. 2차 충격에 의해 전두연결기에 흡수되는 충격력과 변위 그리고 충돌에너지 결과는 표 1에 정리하였다.

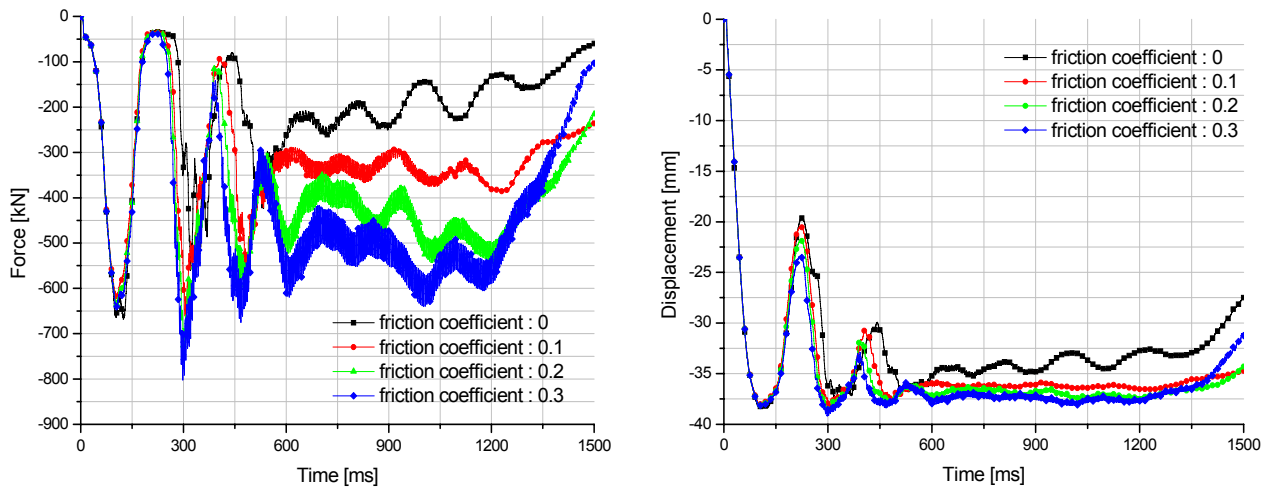


그림 4 마찰조건에 따른 정지차량 전두연결기의 충격력과 변위결과

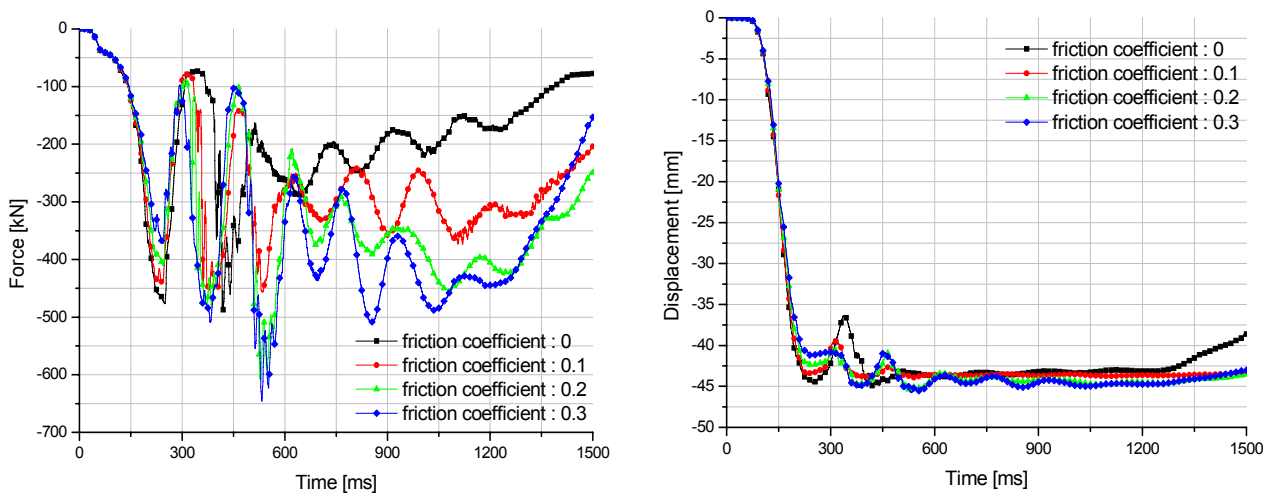


그림 5 마찰조건에 따른 정지차량 중간연결기의 충격력과 변위결과

표 1 제동 조건에 따른 충돌해석 시 연결부의 주요 결과정리

제동마찰계수 [ratio]	최대충격력 [kN]		최대변위 [mm]		최대 흡수에너지 [J]	
	전두연결기	중간연결기	전두연결기	중간연결기	전두연결기	
					1차 충돌	2차 충돌
0	668.27	487.92	37.65	44.93	5845.5	5458.3
0.1	660.95	455.86	38.29	43.94	5687.4	5847.1
0.2	739.78	608.71	38.79	45.59	5764.7	6187.6
0.3	802.05	645.78	39.18	45.67	5789.6	6502.4

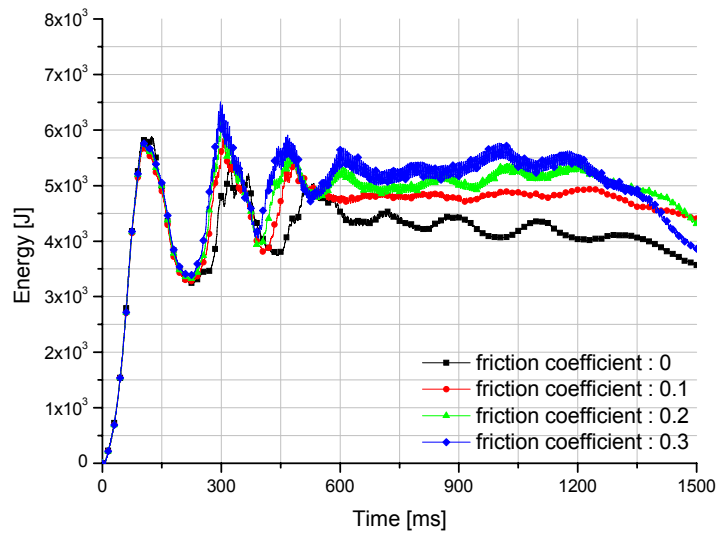


그림 6 마찰조건에 따른 정지차량 전두연결기의 충돌에너지 발생곡선

### 3.2 동적강성계수의 적용에 따른 연결해석

언급한 바와 같이 정적강성의 특성만 적용하고 차체와 대차 질량을 개별적으로 적용한 모델과 차체에 대차 질량을 부가하여 동적강성계수를 반영한 모델을 이용하여 연결시 연결기 취부에 전달되는 충격력이 어떻게 변하는지를 비교분석하였다. 차량모델은 차체의 무게와 연결기의 사양은 3.1절에서 사용한 모델과 동일하며, 대차는 집중질량으로 고려하였다.

본 연결해석은 ‘정지상태의 동일한 편성으로 구성된 차량과 연결기를 통해 시속 5킬로미터로 정면충돌하는 조건’을 적용하였다. 차체와 대차 질량을 일체화한 모델의 경우, 동적강성계수는  $\alpha=1, 0.5$ , 그리고  $0.25$ 로 분류하여 적용하였으며, 정지상태인 차량의 마찰제동조건은 0(zero)으로 설정하였다.

그림 7-9의 해석결과를 분석해보면 전두연결기는 초기충격발생시 충돌에너지를 많이 흡수하였으며, 중간연결기는 초기 충격보다는 2차 충격시 에너지를 많이 흡수하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 결과로부터 전두부 연결기의 경우 동적강성계수가 0.5배 낮아짐에 따라 충격력은 약 75% 수준으로 낮아지는 경향을 나타내었다.

또한 차체와 대차를 별도로 고려한 모델과 차체와 대차를 일체로 고려한 모델을 비교하면 그림10과 같다. 차체와 대차를 별도로 고려한 모델의 연결시 충격특성은 차체와 대차를 일체로 고려한 모델에서 동적강성계수 0.5를 적용한 경우와 유사한 응답을 보여주고 있다. 이러한 현상은 충돌시 대차의 질량효과가 차체와 대차연결 스프링에 의하여 시차를 두고 작용되므로 발생한다. 이결과는 prEN15227에서 제시하는 동적질량효과에 대한 수정계수<sup>[8]</sup>와 잘 일치한다. 만약 도시철도가 아닌 일반열차의 경우 충돌시 좌석의 동적질량효과에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

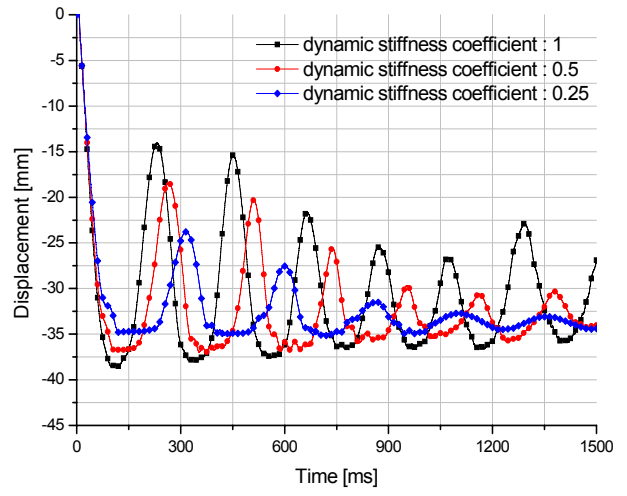
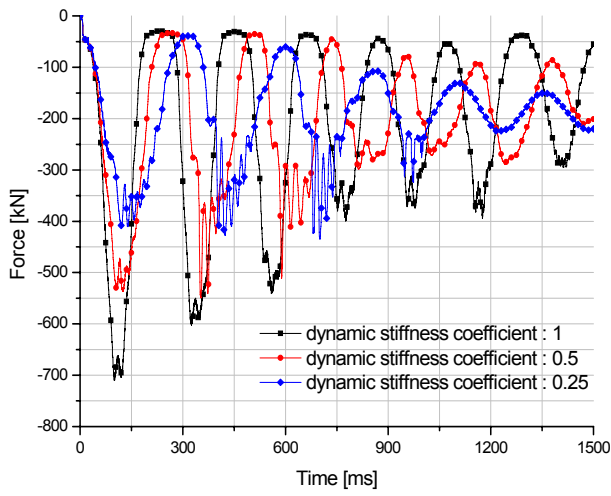


그림 7 동적강성계수에 따른 정지차량 전두연결기의 충격력과 변위결과

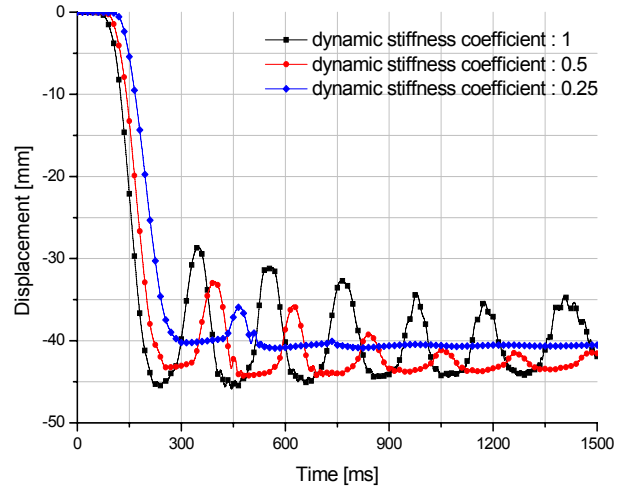
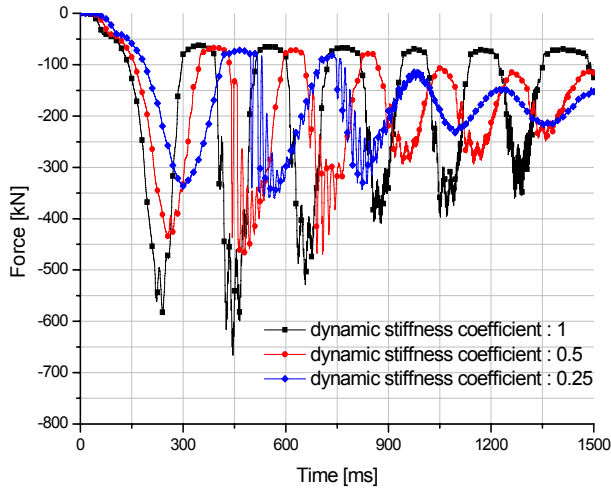


그림 8 동적강성계수에 따른 정지차량 중간연결기의 충격력과 변위결과

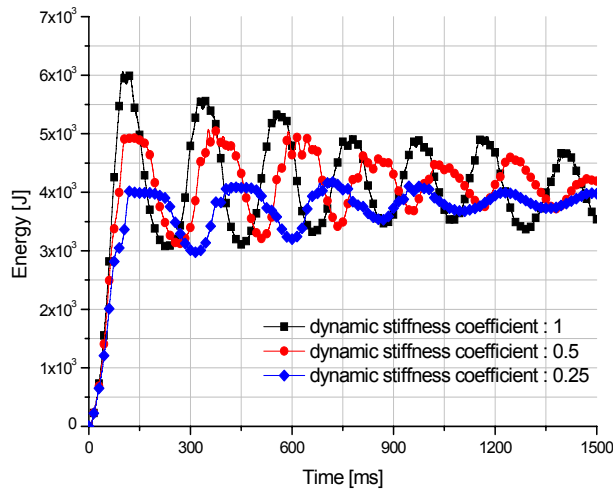
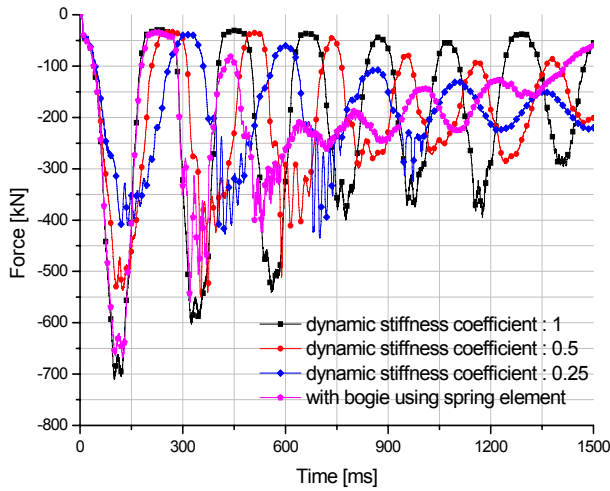


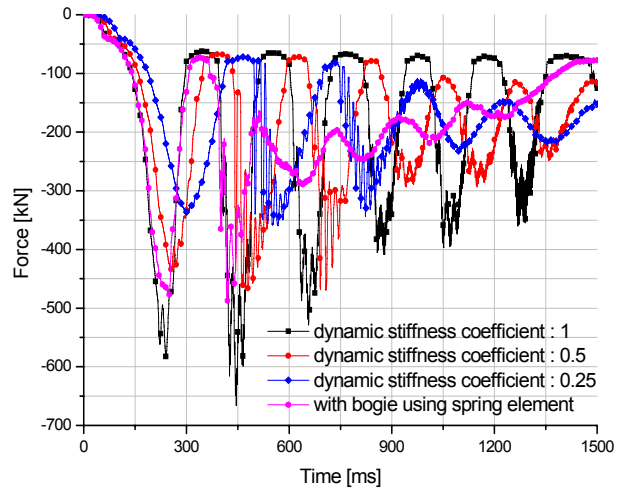
그림 9 동적강성계수에 따른 정지차량 전두연결기의 충돌에너지 발생곡선

표 2 동적강성계수에 따른 충돌해석 시 연결부의 주요 결과정리

동적강성계수 [ratio]	최대충격력 [kN]		최대변위 [mm]		최대 흡수에너지 [J]	
	전두연결기	중간연결기	전두연결기	중간연결기	전두연결기	
					1차 충돌	2차 충돌
1	701.6	665.5	38.6	45.8	6034.2	5558.1
0.5	536.2	466.5	36.8	44.2	4967.5	5097.6
0.25	409.4	358.7	34.8	40.9	4024.3	4141.0



(a) 전두연결기



(b) 중간연결기

그림 10 동적강성계수 적용모델과 대차스프링 적용모델의 연결기 해석결과 비교곡선

#### 4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 마찰제동조건을 고려한 해석을 수행한 결과 전두부 연결기에서는 1차 충돌시 보다 2차 충돌시 보다 높은 충격력이 발생하였으며, 2차 충돌에 의한 충격에너지를 흡수하는 역할을 중간연결기에서 담당하였다.
- 2) 마찰에 의한 제동조건이 0.1씩 증가함에 따라 전두연결기에 발생하는 충격력이 약 10~15% 가량 증가되는 경향을 나타내었다.
- 3) 전두부 연결기의 경우 동적강성계수가 0.5배 낮아짐에 따라 충격력은 약 75% 수준으로 낮아지는 경향을 나타내었고, 차체와 대차를 별도로 고려한 모델의 해석 결과와 비교하면 전두연결기의 초기충격력을 제외하면 동적강성계수가 0.5배일 때 유사한 결과를 보였다. 이때 대차를 별도로 고려한 모델의 초기 충격력은 동적강성계수 1인 경우보다 5% 정도 낮은 값을 나타내었다.

#### 참고문헌

1. J. H. Lewis, "Development of crashworthy vehicle structures for railways," WCCR, pp.893-900, 1994.
2. L. T. Kisielewicz and K. Ando, "Crashworthy rolling stocks," PUCA '93, pp.73-81, 1993.
3. 구정서, 조현직, 김동성, 윤영한, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가," 한국철

도학회 추계학술대회논문집, pp.217-222, 2001.

4. D. Tyrell, "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability," ASME, AMD Vo. 210/BED Vol 30, 1995.
5. AEIF, The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, TSI, May 30, 2002.
6. ADT/SOR, Train Crashworthiness for Europe, SAFETRAIN/final report, October, 2001.
7. BT/P, Passive Safety of Tramways for Europe, SAFETRAM/Management report, February, 2002.
8. FCD, Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, prEN15227, 2005.
9. FRA, Effectiveness of Alternative Rail Passenger Equipment Crashworthiness Strategies, research report, RR06-06, June 2006