

차세대 고속철도 차량 모델의 1.2차 현가요소의 고장 발생 시 안전성 해석

The Safety Analysis under failure of the 1st and 2nd Suspension Elements of the Next Generation High-speed Train model

김지영†
Ji-Young Kim

박태원*
Tae-Won Park

윤지원**
Ji-Won Yoon

조재익***
Jae-Ik Cho

ABSTRACT

In Korea, the next generation high-speed train, whose target is maximum speed of 400km/h and operating speed of 370km/h, has been developed since 2007. In this paper, the safety of the next generation high-speed train is compared UIC 518OR under the malfunctioning situation of the suspension system. The bogie of the next generation high-speed train has two suspensions. Two different vehicle models of the next generation high-speed train are created by using VAMPIRE and ADAMS/Rail, which are specialized to design railway vehicle. And Those models are showed same dynamic properties. First of all, the sensitivity analysis of ModelCenter is performed using model of VAMPIRE. One suspension element which has significant effects on the safety are selected by result of the sensitivity analysis. And then, the dynamic analysis when the suspension element is broken is performed using ADAMS/Rail. The 30km track between Pungseggyo and Biryong tunnel in Gyeongbu High-speed Line was used at the dynamic analysis. The estimated value is found by using the normal method of UIC 518OR. The estimated values on the normal/fault state and the limit values of UIC 518OR are compared. Finally, the safety of the next generation high-speed train is verified.

1. 서론

우리나라의 철도기술 연구는 보다 빠르고 고도의 기술을 개발하기 위하여 2007년부터 최고 시험속도 400km/h, 운영속도 370km/h급 차세대 고속열차 HEMU-400X(High-speed Electric Multiple Unit-400km/h eXperiment)의 개발에 시작하였다. 이 프로젝트는 국토해양부에서 추진하는 ‘차세대고속철도기술개발사업’이며, 국내외 기술개발 동향을 고려한 고속화, 대용량 고속차량의 개발을 목표로 하고 있다. 고속철도시스템은 차량, 기계부품, 전기, 전자, 제어, 통신 등이 종합적으로 적용되며 필요한 대형시스템으로써, 각 구성품의 사양부터 완성차의 시험까지 체계적으로 수행되어야만 하는 최초 요구사항에 적합한 시스템을 완성할 수 있다.[1] 이처럼 여러 가지로 구성되는 고속철도 차량 중 동특성 분야에 있어 특히 주목할 부분은 차량에서도 현가요소이다. 그동안의 고속철도 차량의 현가요소에 대한 연구를 살펴보면 차량의 주행성능에 큰 영향을 미치는 차량의 1·2차 현가요소의 성능 변화에 따른 차량의 주행안전성의 변화를 검토하거나, 차량의 동특성에 대한 현가요소의 영향이 크다는 것을 밝히고 있다.[2-3]

본 연구에서는 이런 1·2차 현가요소의 고장이 차량의 안전성에 어떤 변화를 주는지에 대해 살펴보았다. VAMPIRE와 ADAMS/Rail 프로그램을 이용하여, 각각의 차세대 고속철도 차량 모델을 생성하였

† 정회원, 아주대학교, 기계공학부 대학원
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965
* 정회원, 아주대학교, 기계공학부, 정교수
** 정회원, 아주대학교, 자동차부품혁신연구센터
*** 정회원, 아주대학교, 기계공학부 대학원

다. VAMPIRE에서 생성한 모델을 이용하여 횡방향 가속도에 대해서 민감도 분석을 수행하였고, 1·2차 현가요소 중 가장 성능에 대한 민감도가 높은 인자를 선정하였다. ADAMS/Rail에서 생성한 모델을 이용하여 고장 모델을 생성하고, 동역학 해석을 수행하였으며, 결과 데이터는 UIC 518OR의 안전성(Safety)과 비교, 분석하였다.

2. 동역학 모델링

2.1 차량 모델링

차세대 고속철도 차량은 최고속도 400km/h, 운영속도 370km/h에 도달하는 것을 목표로 하는 차량이다. 그림 1은 ADAMS/Rail을 이용한 차세대 고속철도 차량의 1량 모델을 나타낸다.

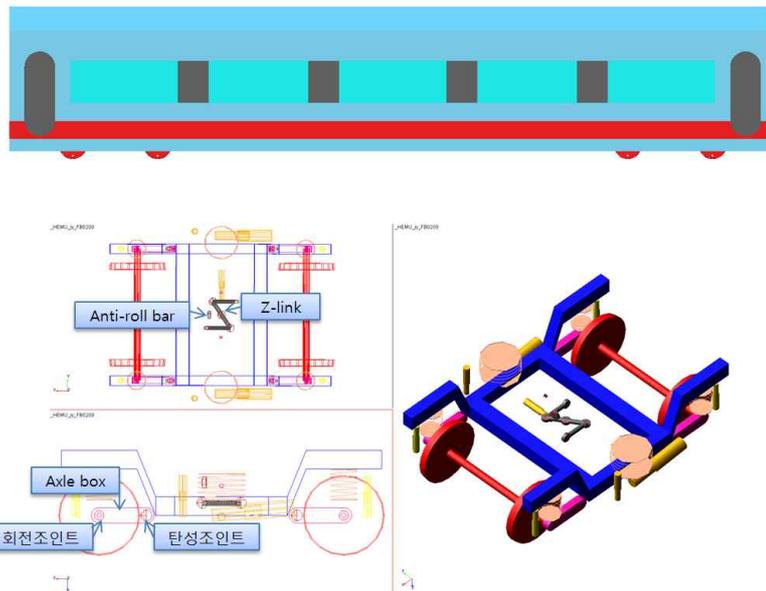
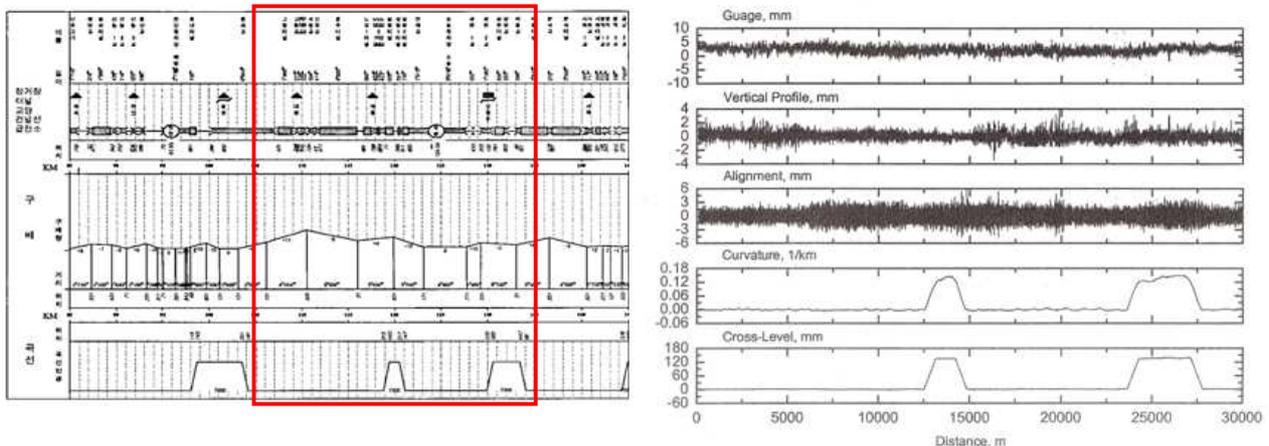


그림 1. ADAMS/Rail을 이용한 차세대 고속철도 차량 모델

2.2 해석 트랙(track)

실측 데이터를 이용한 해석 트랙을 생성하기 위하여 경부고속선 시험선 구간 중 풍세교 ~ 비룡터널 사이 30km 구간에 대한 불규칙도(irregularities)를 이용하여 ADAMS/Rail에서 사용가능한 해석 트랙(track)을 생성하였다. 그림 2은 경부고속선 시험선 구간에 대한 자료이다.



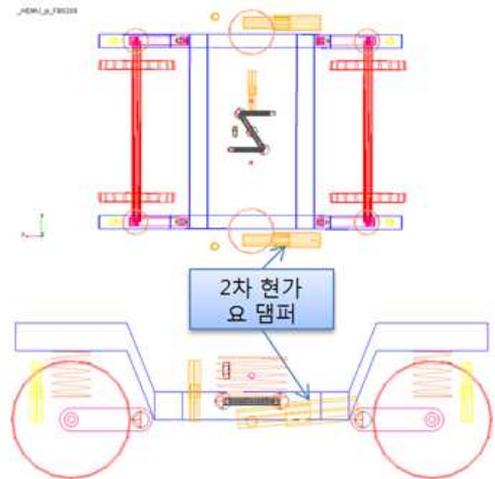
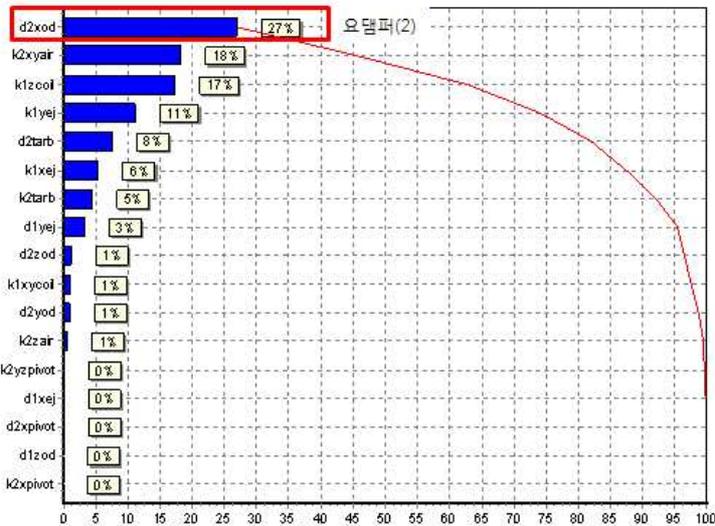
3. 안전성(Safety) 해석

그림 2. 경부고속선 시험선 구간

3.1 해석 시나리오

차세대 고속철도 차량의 안전성(Safety) 해석을 수행하기 위해 사용한 프로그램은 ADAMS/Rail이다. 해석 트랙은 실제 KTX의 주행구간인 경부고속선 풍세교~비룡 터널 사이 30km 구간 중 일부구간이며, 해석의 수행 속도는 440km/h이다.

고장 모델을 생성하기 위하여 VAMPIRE를 이용하여 생성한 차세대 고속철도 차량의 모델을 사용하여, 민감도 해석을 수행하였다. 1차와 2차 현가 요소 총 17가지에 대하여 민감도 해석을 수행하였으며, 목적함수는 대차, 차체 등의 횡방향 가진(Step input 가진)에 따른 횡방향 가속도의 R.M.S값의 합으로 하였다. 가중치는 동일하게 부여하였는데, 이는 설계동기이기 때문에 어느 값의 경중을 따질 수 없고, 실제작의 상황이 고려된 제한조건(constraint)으로 부여할 수 없는 상황이기 때문이다. 민감도 해석의 수행 속도는 400km/h이고, 민감도 해석의 수행 결과는 그림 3에 나타내었다. 민감도 해석의 수행 결과 400km/h로 주행할 때 가장 영향도가 큰 설계인자는 2차 현가장치의 요 댐퍼(yaw damper)로 나타났다.



(a) 17개 현가요소에 대한 111m/s에서의 민감도 해석 (b) 차량에서의 요 댐퍼(yaw damper)의 위치
 그림 3. 차세대 고속철도 차량의 현가요소에 대한 민감도 해석 결과

이러한 민감도 해석의 결과를 이용하여, 가장 민감한 요소인 요 댐퍼의 고장 발생 시에 안정성의 변화를 살펴보고자, 해석 시나리오를 작성했다. 해석 시나리오는 도표 1에 나타내었다. 요 댐퍼의 고장 상황은 성능이 100%인 정상 상태와 정상상태를 기준으로 50%의 성능이 발휘될 때와 20%의 성능이 발휘될 때로 가정하였으며, 3가지 시나리오에 대한 해석을 수행할 수 있도록 총 2개의 고장 모델과 1개의 정상 모델을 생성하였다.

도표 1. 차량의 요 댐퍼(yaw damper)의 고장 발생 시 해석 시나리오

시나리오 번호	차량의 상태	현가 요소의 성능(%)	해석 트랙(track)
1	정상 상태	100	직선
			곡선
2	2차 현가 요소	50	직선
			곡선
3	요 댐퍼 고장	20	직선
			곡선

3.2 주행안전성(Safety) 해석 결과

ADAMS/Rail에서 도표 1에 제시된 모든 해석 시나리오에 대하여 안전성 해석을 수행하였다. UIC 518OR의 시험영역은 시험 구간의 길이를 10km 이상으로 규정하고, 각 구간의 길이도 220km/h초과 범위에선 500m, 220km/h이하 범위에선 250m로 규정하고 있다. 본 연구에서는 해석속도 440km/h(123m/s), 시험 구간의 길이가 10km미만(직선 6km, 곡선 6km), 각 섹션의 길이를 500m로 하여 사용하였다.

정상 상태에 해당하는 시나리오 1의 경우, 직선 트랙(track)과 곡선 트랙(track) 모두 UIC 518OR의 안전성 기준 중 탈선계수의 제한값과 평가값을 만족하는 것을 알 수 있었지만, 고장상태에 해당하는 시나리오 2, 시나리오 3의 경우 주어진 해석 조건하에서 탈선계수의 평가값이 UIC 518OR기준의 탈선계수의 제한값을 넘어서는 것을 확인 할 수 있었다. UIC 518OR의 안전성 기준 중 탈선계수의 평가값을 계산하기 위해서 동역학 해석을 수행한 후, UIC 518OR의 통계처리 과정에 따라 탈선계수를 구한다. 이렇게 구한 탈선계수를 백분위수(percentile)로 정렬하여 백분위수 0.15%에 해당하는 값을 F1이라 정하고, 백분위수 99.85%에 해당하는 값을 F2라 정하여 F1과 F2의 절대값을 비교하여 큰 값을 취한다. 취한 값을 이용하여 평균값과 표준편차를 구하면 아래의 식 (1)에 대입하여 평가값을 구할 수 있다.

$$X_{max} = X_{mean} + k \times S \quad (X_{max} : \text{평가값}, X_{mean} : \text{평균값}, S : \text{표준편차}, k = 3) \quad \text{식 (1)}[6]$$

그림 4는 탈선계수의 평가값 추출 과정 중 F1과 F2를 그래프로 나타낸 것이고, 도표 2는 안전성(Safety)에 대한 해석 결과를 나타낸 표이다.

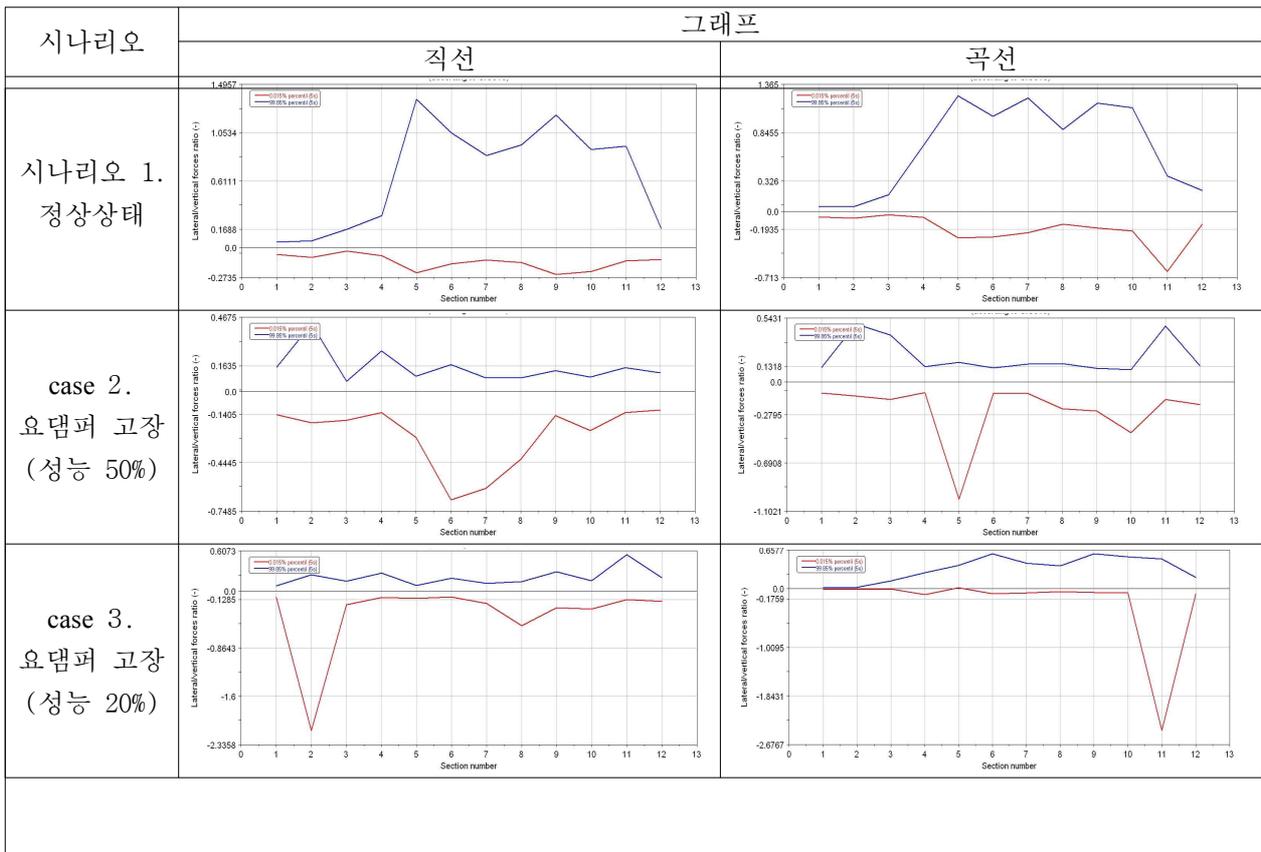


그림 4. UIC 518OR의 탈선계수 통계처리 중 F1, F2의 그래프

도표 2. 안전성(Safety) 해석 결과

case	차량의 상태	현가 요소의 성능(%)	항목	기준	결과	
1	정상 상태	100	탈선계수	0.8	0.3406	직선
					0.6922	곡선
2	2차 현가 요소 요댐퍼 고장	50	탈선계수	0.8	0.8557	직선
					1.0176	곡선
3	요댐퍼 고장	20	탈선계수	0.8	2.0653	직선
					2.3154	곡선

4. 결론

본 연구에서는 차세대 고속철도 차량 모델의 1차, 2차 현가요소 중에 가장 민감한 요소인 요 댐퍼에 고장이 발생한 상황에 대하여 차량의 안전성(Safety)을 확인해 보았다. 안전성 해석을 위하여, 경부고속선 풍세교에서 비룡터널 사이 30km구간에 대한 트랙(track)을 생성하였다. 그 트랙 중에 직선 트랙과 곡선 트랙으로 나누어 440km/h로 주행하는 상황에 대한 해석을 수행하였다. 안전성의 확인을 위해 UIC 518OR의 안전성 항목 중 탈선계수를 사용하였다. 해석 결과를 통하여, 요 댐퍼의 성능이 전체의 50% 수준으로 떨어졌을 때와 전체의 20% 수준으로 떨어졌을 때에 UIC 518OR의 탈선계수의 제한값을 넘는 평가값이 도출되어 열차의 주행 중 탈선이 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히 요 댐퍼의 성능이 떨어지는 것에 비례하여 평가값도 비례적으로 상승하는 것을 확인 할 수 있었으며, 직선 트랙보다 곡선 트랙에서 평가값이 좀더 높은 경향을 보이는 것도 확인 할 수 있었다. 위와 같은 결과를 토대로 차세대 고속철도 모델의 현가장치를 설치함에 있어서, 100%의 성능을 가지는 하나의 요 댐퍼를 설치하는 것보다는 60%의 성능을 가지는 두 개의 요 댐퍼로 나누어 설치함으로써 고장 발생 시에 보다 안정적인 성능을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 그 밖에 현재에는 실차 모델이 존재하지 않아 실측 데이터와의 비교는 할 수 없지만, 추후 실차모델을 통해 동일한 실험을 반복하여 같은 결과를 얻는다면 보다 신뢰성 있는 자료로 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

감사의 말

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김상수, 이태형, 최성훈, 박춘수, 한인수, "차세대고속열차 차량 시스템 성능예측 및 성능 검증 체계 개발," 한국철도학회 2008년도 추계학술대회논문집, pp. 555-560, 2008.
2. 박찬경, 김영국, 김기환, "개념적 관점에서 차세대고속철도차량의 현가요소 특성 분석," 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp.824-829, 2008.
3. 박찬경, 김영국, 김기환, 김영모, "개념단계에서 차세대고속철도 6량 편성차량의 현가요소 특성 분석," 한국철도학회 2008년도 추계학술대회논문집, pp.387-392, 2008.
4. 박찬경, 김기환, 김영국, 김석원, 목진용, "UIC 518의 진동 가속도 계측을 통한 한국형 고속전철의 350km/h 주행 동적 거동 평가," 한국철도학회논문집, 제9권, 제1호, pp.544-549, 2006.
5. 이강운, 박길배, 양희주, "철도차량 동적 주행성능 시험 및 인증관련 국제규격(UIC 518) 고찰 및 적용," 한국철도학회 2005년도 추계학술대회논문집, pp.38-43, 2005.
6. UIC code 518 OR, 2003, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality."