

기본설계 단계에서 분산형 고속철도차량의 현가요소 최적화

Optimization of the Suspension Characteristics for a High Speed Electrical Multiple Train on the Stage of Basic Design

박찬경*
Park, Chankyong

목진용*
Mok, Jinyong

김기환*
Kim, Kiwhan

ABSTRACT

The High speed electrical multiple train having a distributed electrical motor system has just been developing to aim the experimental maximum speed at 400km/h since August, 2007. This project comes in stage of basic design and so, it needs to take some review and analysis the characteristics of suspensions on the view of basic design. The vehicle model for dynamic analysis is made from the concept design model that used for the preliminary design review with Vampire program and it is modeled with three linear secondary dampers and two shear springs separated from the bush elements in previous model. The optimization technique is applied to search the proper range of linear characteristics for the suspension elements to satisfy the stability performance at speed 130m/s (about 460km/h). The results shows there are some optimum points according to the variation of primary and secondary suspension characteristics and it would be useful to make a decision to select the proper suspension elements in the precision design that will be done by the manufacturing company.

1. 서 론

동력 분산형으로 설계되는 고속철도 차량은 차세대 고속철도 기술개발 사업으로 국토 해양부 정부주도 사업으로 한국 철도기술연구원과 관련 산. 학. 연이 연계되어 2007년 8월부터 개발에 착수하여, 현재 개발 모듈에 따라 개념설계 단계를 거쳐 기본 설계 단계와 상세설계를 추진 중에 있다. 차세대 고속열차는 이전에 개발하였던 집중식의 한국형 고속열차와는 달리 분산형 동력시스템으로 구성되며, 객차대차 역시 일반형의 동력장치가 있는 대차와 동력장치가 없는 일반대차로 구성되어 최고 시험속도 400km/h에 도전하며, 상용속도 350km/h로 주행 가능한 차량으로 개발되고 있다.

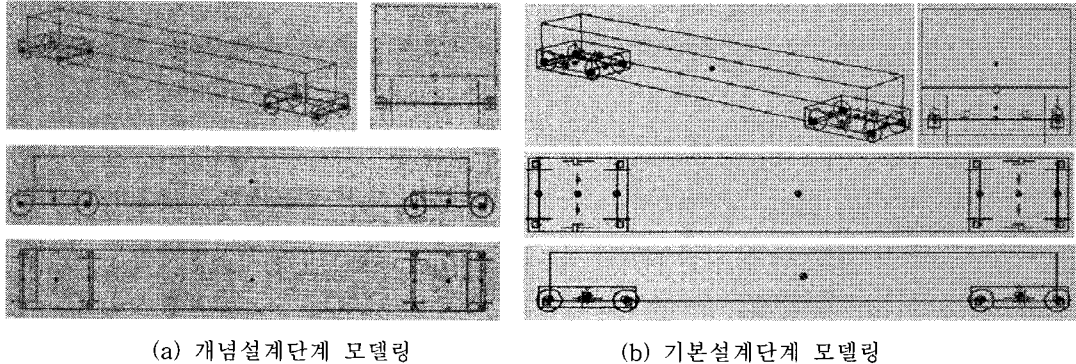
이러한 속도향상이 가능하기 위해서는 많은 고려사항이 있지만 주행 중에 발생하는 동적거동은 속도가 높아지면서 더욱 중요한 고려사항이 되고 있고 초기 차량 개념설계 단계부터 분석되어 성능 입증 시험평가까지 관리되어야 하는 위험요소로 간주되고 있으며, 국제규격인 UIC-513R⁽¹⁾ 또는 BS EN 14363⁽²⁾에서 동적거동 수렴성으로 판단되는 동적 안정성, 탈선계수, 윤중감소, 횡압 등으로 판단되는 안전성, 곡선주행 성능인 곡선 추종성 등으로 표현하고 있다. 400km/h급 동력 분산형 고속철도의 동적 안정성을 확보하기 위해 개념설계 단계에서는 단차와 시제열차 편성에 대한 동적 안정성을 성능지수로 하는 현가장치 특성을 분석한 바 있으며, 본 논문에서는 2008년에 발표하였던 개념설계 모델을 좀 더 현실적인 설계로 구체화하여 현가 특성치의 설계범위에 대한 최적화 분석을 수행코자 한다.

* 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 정희원
E-mail : ckpark@krri.re.kr
TEL : (031)460-5613 FAX : (031)460-5649

2. 동적 해석 모델링

2008년 춘계와 추계 철도학회 학술대회에서 발표된 본 논문^{(3),(4)}에서는 현가 요소를 단순 bush 요소로 1,2차 현가장치를 모델링 하였으나 본 논문에서는 기본설계단계에서 수행될 수 있는 설계적으로 접근 가능할 수 있도록 그림 1.에서와 같이 더욱 구체화된 모델로 분리하여 모델링을 수행하였다.

그림 1.에서 볼 수 있듯이 기본설계단계 모델은 14개의 bush 요소로만 이루어진 개념설계단계 모델과는 달리 12개의 shear spring 요소, 20개의 damper 요소, 10개의 bush 요소로 구성하였다.



(a) 개념설계단계 모델링

(b) 기본설계단계 모델링

그림 1 차량 동적 모델링

1차 현가요소에서는 수평방향(x,y)으로는 고무 bush 요소를 사용하고, 수직방향(z)으로 코일스프링과 오일댐퍼, 2차 현가요소에서는 수직(z), 수평(x,y)방향으로 에어스프링을 대상으로 shear spring 요소를 사용하였고, yaw 댐퍼, 횡 댐퍼, 수직 오일댐퍼를 별도로 모델링하였다. 이렇게 사용된 모델은 실제 제작 시에 별도 부품으로 제작 또는 구매하여 적용 가능한 단위부품으로 취급할 수 있을 것이다.

차량 모델과 더불어 휠과 레일의 기하학적 접촉모델은 현재 특별한 휠 형상이 제시된 바 없어서 기존의 KTX 휠 형상을 이용하여 UIC 60 rail 형상과 같이 그림 2와 같이 기존에 사용하였던 모델을 동일하게 사용하였다.

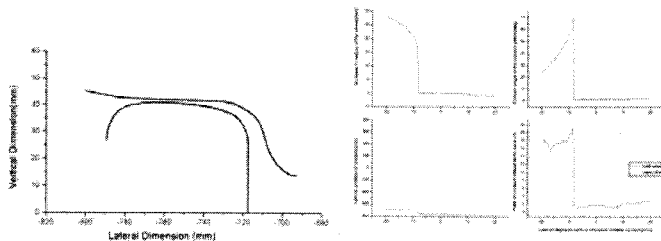


그림 2 휠과 레일 형상 및 그 접촉 특성치

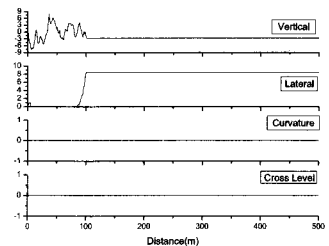


그림 3 궤도불규칙 특성치

또한 안정성 분석을 위한 궤도 특성은 직선 구간에서 횡 및 상하방향 궤도 불규칙만 초기에 존재하는 Vampire 프로그램에서 제공하는 모델을 그림 3과 같이 역시 동일하게 사용하였다.

3. 현가특성 변화에 따른 안정성 분석 및 최적화

2장에서 만들어진 모델을 이용하고, 개념설계단계에서 제시된 논문에서 도출된 최적 결과를 이용하여 1,2차 현가장치 특성치를 초기치로 각 질량체의 좌우방향 변위를 살펴보면 그림 4와 같다. 여기서

주행속도는 120m/s(432km/h)와 130m/s(468km/h)로서 주행하였으며, 개념설계의 최적치를 이용하였기 때문에 120m/s나 130m/s에서 안정성을 갖고는 있으나 수렴성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다.

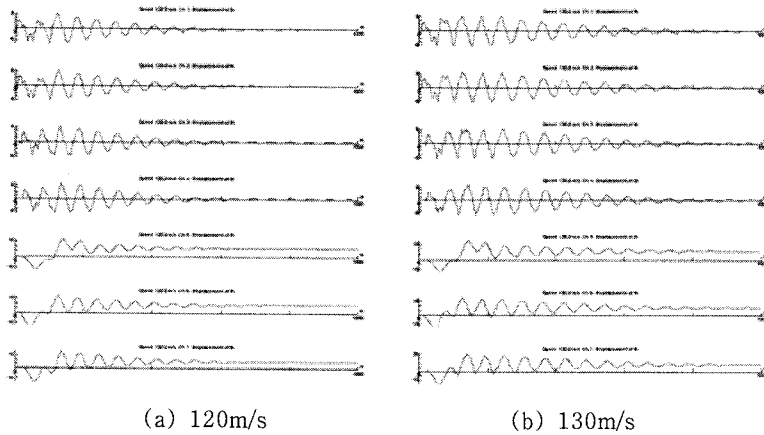


그림 4. 각 mass의 좌우방향 변위(초기치)

따라서 이를 개선할 필요성이 있으며 각 설계변수들을 재설정하여 주 효과를 살펴보고 이를 통하여 최적화를 수행하면 다음과 같다.

먼저 설계 민감도를 살펴보기 위하여 1,2차 현가 요소 중 1차 현가요소에서는 고무부위의 수평강성(x,y) 2개, 코일 스프링 수직강성(z), 수직방향 오일댐퍼의 댐핑 값, 2차 현가요소에서는 에어스프링의 수직강성, 수평강성(x,y), yaw 댐핑, 횡 댐핑, 수직 댐핑 값을 설계변수로 설정하였다. 여기서 에어 스프링의 수평강성은 x,y방향이 서로 동일하기 때문에 1개의 설계변수로 취급하였다. 따라서 총 설계변수는 9개가 되며, 성능지수는 각 mass의 횡 방향 변위의 rms 값으로 설정하였다. 성능지수에 대한 영향 정도를 판단하기 위하여 Box-Behnken DOE Table을 이용하였으며, 총 153회의 시뮬레이션 결과를 분석하여 현가요소의 주 효과를 살펴보면 그림5와 같다.

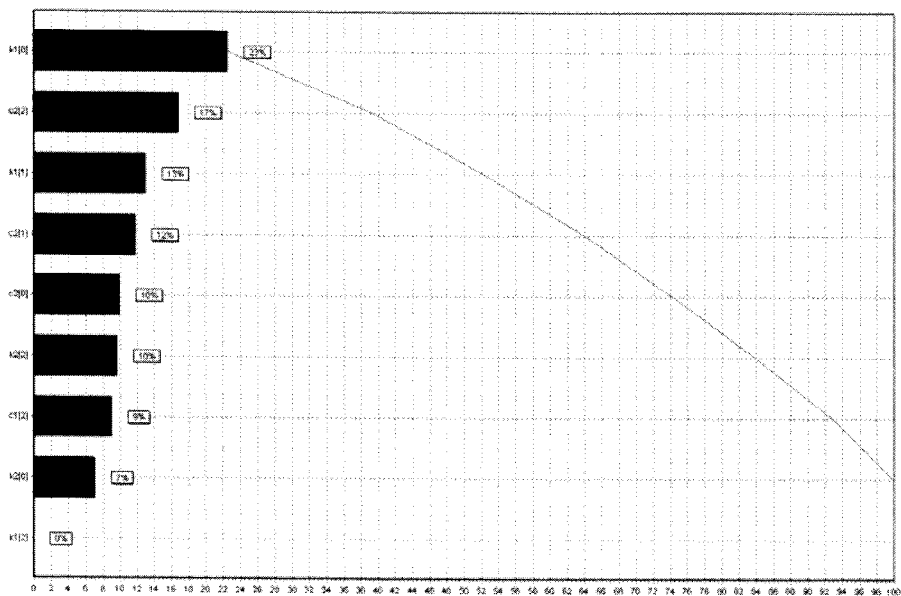


그림 5 설계변수들의 주 효과 분석 결과

그림 5에서 살펴보면 1차 진행강성, 2차 수직 뎀핑, 1차 횡 강성 순으로 영향이 큰 것으로 나타나며 각 특성치들에 대한 반응특성을 그림 6.의 예와 같이 살펴보고 이를 통하여 최적화를 수행하면 다음과 같다.

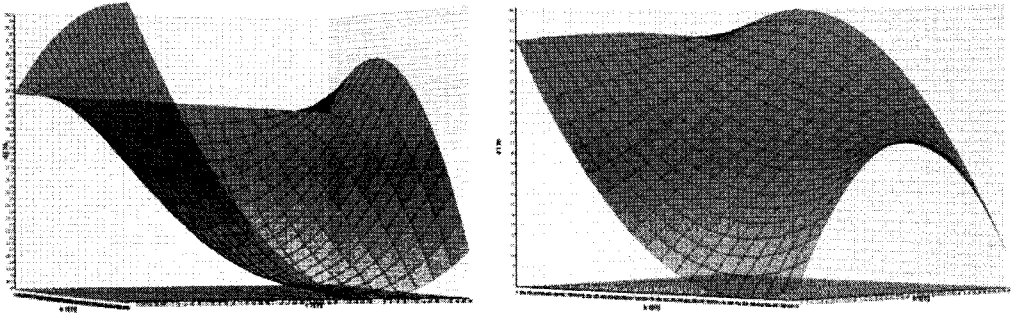
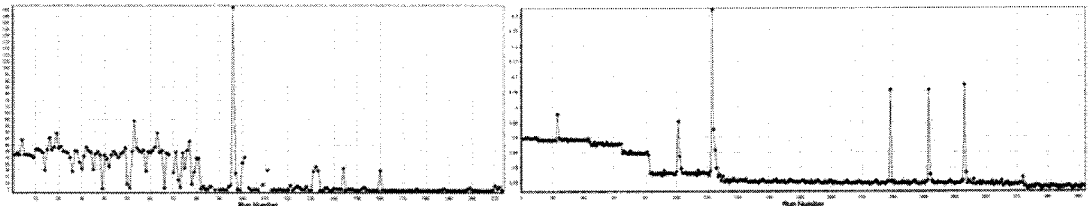


그림 6. 1차 진행강성과 2차 수직뎀핑, 1차 진행강성과 횡강성의 반응 특성

각 설계변수들의 설계 범위는 기본 설계단계에서는 영역을 크게 설정하여 선택의 폭을 넓혀 사용하였으며, 목적함수는 성능지수의 합이 최소화 될 수 있도록 설정하였다.

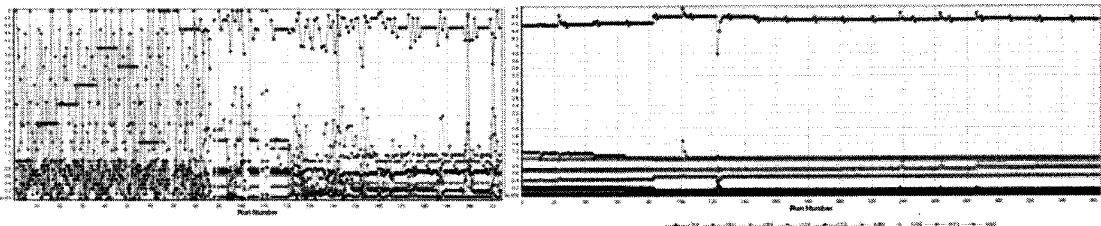
최적화 과정은 우선 최소의 시뮬레이션을 이용하는 방법인 Explorer optimization method를 사용하고 이를 통하여 Gradient optimization을 이용하여 세부 최적화를 수행하였다. Explorer optimization method는 설계 전역에 걸쳐 DOE 탐색을 실시하여 Surrogate model을 만들고 이를 통하여 개선된 최적화를 수행하며, 여기서 도출된 최적 설계변수를 Gradient optimization 방법에 초기치로 활용하여 2단계 최적화를 수행토록 하였다. 최적화를 위한 시뮬레이션 수행은 Explorer의 경우 213회를 수행하였고 Gradient 는 363회를 수행하였으며, 총 576회를 통하여 최적화를 수행하였다.



(a) 1단계 Explorer Optimization 과정

(b) 2단계 Gradient Optimization 과정

- 목적함수 수렴 과정 -



(c) 1단계 Explorer Optimization 과정

(d) 2단계 Gradient Optimization 과정

- 설계변수 수렴과정 -

그림 7. 목적함수 및 설계변수 최적화 수렴과정

그림 7에서 2단계 최적화 에서는 목적함수가 4.5 이하에서 모두 수렴하는 것으로 나타나고 있으며 실제적으로 130m/s에서의 안정성은 그림 8.에서 보듯이 1단계에서 실시한 최적화 값인 3.9로도 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

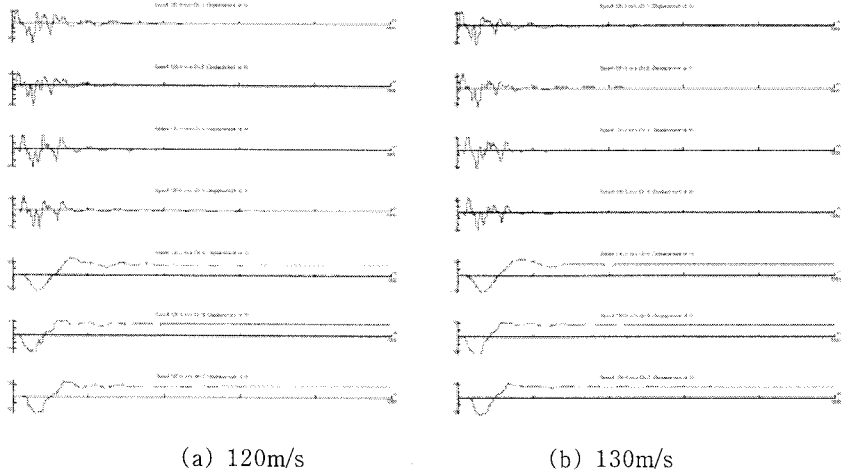


그림 8. 1단계 Explorer Optimization 수행 결과 안정성

또한 그림 7.에서 설계변수의 경우 2단계 완료 후 1차 진행강성과 횡 강성의 경우 최대범위인 5.0과 최소인 1.0 근처에 위치하고 있으며, 설계변수 값의 범위가 최적화 과정에서 제한조건으로 작용할 가능성이 있다. 따라서 이를 해소하고 최적화 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 설계범위를 10.0과 0.1로 좀 더 확장하여 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였으며 그 결과 그림 9.와 같다.

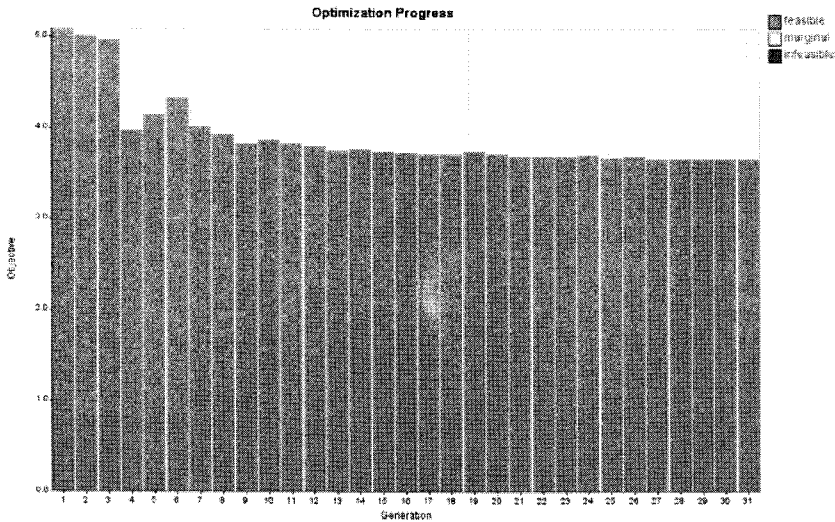
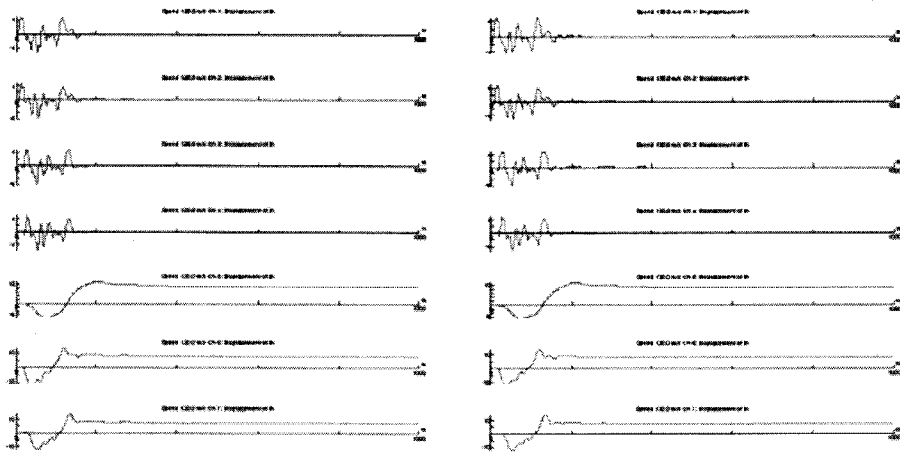


그림 9. 유전자알고리즘에 의한 최적화 수렴 과정

그림 9.에서 보듯이 최적화 수렴성이 확보되어 최적화를 31회의 generation을 통하여 수행되었으며 설계변수의 최적점도 설계범위 boundary에 걸쳐 있지 않은 위치에 존재함을 알 수 있었다. 또한 최적화 수행된 설계변수에 의한 안정성도 그림 10.과 같이 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 유전자 알고리즘의 경우 좋은 결과를 얻는 대신 매우 많은 반복 시뮬레이션 횟수를 요구하며 본 연구의 경우 Explorer optimization 보다 20배가 넘는 횟수를 기록하고 있다.



(a) 120m/s

(b) 130m/s

그림 9. 유전자 알고리즘에 의한 최적화 결과 안정성

4. 결론

본 연구에서는 동력 분산형 고속열차 기본설계를 고려하여 400km/h로 시험 주행가능하기 위한 안정성 확보를 위하여 130m/s 속도 대역에서의 동적거동 안정성을 분석하였다. 또한 현가장치 설계 특성 변화에 따라 영향인자를 고찰하였으며, 그 결과 1,2차 현가요소의 특성치를 최적화 하여 제시할 수 있었다.

향후 본 연구에서 도출된 모델은 상세설계에 따라 구체화 될 수 있으며, 상세설계 시의 현가요소 특성을 결정할 때 중요한 자료가 될 수 있을 것이다. 또한 대차 설계에서 요구하는 현가요소의 설계범위를 결정할 수 있을 것이며, 시제차량 편성에 응용하여 최고속도 시험 위험요소를 사전에 제거할 수 있는 연구로 확장 가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 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."
2. BS EN 14363, 2005, "Railway applications-Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles-Testing of running behaviour and stationary tests."
3. 박찬경 외 2인, 2008, 개념적 관점에서 차세대고속철도차량의 현가요소 특성 분석, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
4. 박찬경 외 3인, 2008, 개념단계에서 차세대고속철도 6량 편성차량의 현가요소 특성 분석, 한국철도학회 추계학술대회 논문집