

최적화 툴을 이용한 동특성 해석 모델 검증

Validation of vehicle dynamic model by using the optimization tool

박길배* 성재호** 우관제***
Park, Kil-Bae Seung, Jae-ho Woo, Kwan-Je

ABSTRACT

According to the GM/RT2141, to assess the safety of vehicle, the validated the vehicle dynamic model should be applied. The validation of the vehicle model is against the static test, some kind of vehicle type test results have been used to determine the suspension characteristics and the vehicle dynamic characteristics. To validate the vehicle model and the test results, first the test results has been analysed as to specified the suspension characteristics and than the parameters to related with the test result has to be adjusted to show the same results of the test. In this process the parameters of vehicle model have been determined to show the coherence of the two results of the simulation and the test by trial & error. In this report, the optimization tool has been introduced in this model validation process and shows the efficient and well validated model.

1. 서 론

현재 유럽의 경우 새로 설계 및 제작된 철도 차량이 본선에서 운행하기 위한 허가를 받기 위해서는 해석 모델을 통한 차량의 안전성 검증 과정을 거쳐야 한다. 이러한 해석을 통한 차량의 안전성 평가를 위하여 해석 모델이 실제 차량의 성능을 제대로 반영한 모델임을 검증하는 작업이 필요하다. 또한 해석을 통한 parameter study를 통한 차량의 특성 연구를 위하여 실제 차량의 특성을 제대로 반영하는 검증된 모델이 필수적이다.

해석 모델의 검증을 위해서 실제 차량 시험을 통하여 확인한 차량의 특성과 동일한 결과를 보이도록 해석 모델의 주요 설계 인자들을 수정하는 작업을 수행해야 하며, 이러한 작업은 경우에 따라서 많은 시행착오로 인하여 시간과 노력이 요구되기도 한다.

본 논문에서는 최적화 툴을 이용하여 시험결과를 목적함수로 하고, 이러한 목적함수를 만족하는 해석 모델의 최적화된 설계 인자들을 찾는 문제로 정의함으로써 해석 모델의 검증 작업을 보다 효율적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

* 비회원, (주)현대로템, 기술연구소 응용기술연구팀, 책임연구원
E-mail : gbpark@hyundai-rotem.co.kr
TEL : (031)596-9496 FAX : (031)596-9747
** 비회원, (주)현대로템, 기술연구소 응용기술연구팀, 주임연구원
*** 정회원, (주)현대로템, 기술연구소 응용기술연구팀, 수석연구원

2. 차량 모델의 검증 절차

차량 모델을 검증하기 위하여 적용하는 시험은 정차 상태에서의 차량 성능 시험과 본선에서 실시하는 동적 시험이 있다. 단차 상태 시험은 wheel-unloading 시험, Sway test, 회전저항 시험이 있고, 동적 시험은 본선에서 실차 주행 시 측정된 차체 및 대차프레임 등에서 측정된 진동가속도 및 변위 측정 시험이 있다.

본 논문에서는 정적시험 항목중에서 휠 unloading 시험 결과를 이용하여 해석 모델을 검증하는 방법에 대하여 서술하였다.

3. 동역학 해석 모델

설계초기 단계에서 사양에서 정의되어있는 동특성 요구조건을 만족하는 현가장치 특성치를 구하기 위하여 여러 가지 설계 변수에 대한 많은 해석을 실시하여 완성한 모델이 있다.

차량의 동역학 해석을 위해서는 실제의 복잡한 차량 구조를 질량, 스프링 및 댐퍼의 Lumped parameter로 이루어진 수학적 모델로 단순화 시켜야 한다. 본 해석에서는 차체와 2개의 대차 프레임, 4개의 차륜 세트를 질량 요소로 하여 그 사이에 적절한 스프링과 댐퍼를 연결시켜 모델링하였다. 1차 현수장치인 롤 고무 타입의 스프링은 Bush 요소로 모델링하였으며, 2차 현수장치인 공기스프링은 스프링 요소와 댐퍼 요소로 모델링하였다. 특히 공기스프링의 공기가 빠진 상태를 모델링하기 위해서는 공기스프링의 내부에 있는 마찰판을 Bumpstop 요소와 Friction 요소로 모델링하였다.

또한 Traction rod 부분은 전후 방향으로 강성이 큰 PINLINK요소로서 표현하였으며, 좌우방향의 STOPPER는 BUMPSTOP 요소로 모델링하였다. 그림 1은 차량의 수학적 모델을 표시한 것이다.

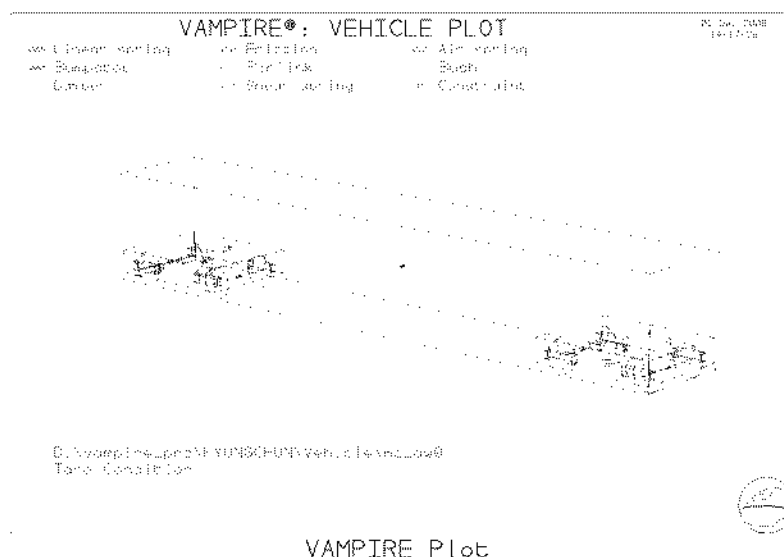


그림1. VAMPIRE 해석 모델

4. 실차 시험항목 및 데이터

4.1 차량중량 및 축중 측정 시험

차량이 제작되어 영업운전에 들어가기 전에 가장 먼저 확인해야할 시험으로 차량의 중량 및 각 휠의 하중을 측정하여 차량의 중량을 확인하고 축중의 분포와 최대치가 기준을 만족하는지를 확인해야한다. 또한 이러한 데이터는 해석 모델의 검증 작업의 기본이 되는 데이터로서 해석 모델의 중량 및 축중 분포가 실제 차량의 상태와 일치하는지 확인하고 맞추어 주어야 한다.

차량의 축중 데이터는 휠 unloading 시험을 실시하기 위하여 평탄선로에 놓여진 상태에서 측정한 각 휠에서 측정한 값이 차량의 정상상태에서의 휠 하중 및 축중 데이터로 사용되었다.

4.2 휠 unloading 시험

휠 Unloading 시험은 궤도의 비틀림에 의하여 발생하는 휠 하중의 변화량을 측정하는 시험으로 차량의 안전성을 검증하기 위한 시험이다. 차량의 모델을 검증하는 측면에서는 현가장치의 상하방향 스프링 상수 및 일차 스프링의 톨 강성 및 비틀림 강성이 적절하게 모델링 되었는지 확인할 수 있는 시험이다.

시험방법은 그림 과 같이 차량의 센터피봇간 거리에 대한 궤도 비틀림량과 차륜간 거리에 대한 궤도의 비틀림량에 의하여 발생하는 각 휠에서의 상하방향 변위에 해당하는 만큼 휠을 들어올린 후 각 휠하중을 측정한다. 이때 각 휠에 작용하는 수직하중은 비틀림정도에 따라 달라지며 평탄선로에 놓여있을때의 휠 하중에 대하여 변화된 휠 하중의 비로서 차량의 성능을 평가하게 된다.

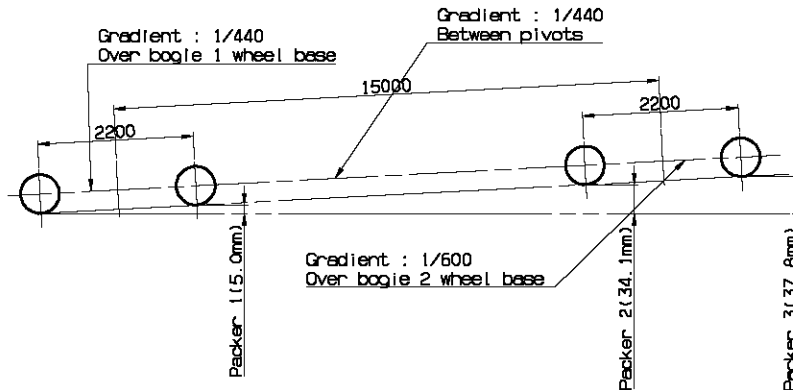
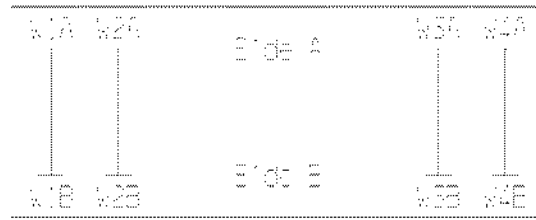


그림2. 궤도 비틀림 조건

4.3 휠 unloading 시험결과

레도 비틀림에 의한 휠 unloading 시험 결과는 다음과 같다.

| | | | | |
|--------------|--------------|-------------------------|----------|----------|
| 0.409 | 0.252 | Delta Q/Static Q | - | - |
| 3240 | 3930 | Measuring Load | 5985 | 7035 |
| 5481 | 5255 | Static Wheel Load | 5361 | 5249 |
| 0 | 5 | Packer Height | 34.1 | 37.8 |



| | | | | |
|------|------|-------------------------|--------------|--------------|
| 0 | 0 | Packer Height | 0 | 0 |
| 5146 | 4994 | Static Wheel Load | 5019 | 4940 |
| 6850 | 6330 | Measuring Load | 4310 | 3745 |
| - | - | Delta Q/Static Q | 0.141 | 0.242 |

그림3. 휠 unloading 시험결과

4.4 휠 unloading 해석 모델

시험과 동일한 해석을 위하여 VAMPIRE의 static analysis module을 이용하여 레도비틀림에 의한 휠 unloading값을 계산하였다. 시험조건과 동일한 조건에서의 해석을 위하여 각 휠에서 발생하는 상하변위와 롤 각을 각각 적용하였다.

VMAPIRE 해석을 위한 레도 입력 모델은 다음과 같다.

```

Static, DT_Tare_def
UNITS VAMPIRE
DT-tare-deflated
*STATIC
STEPS          1000
STAGE 01
T W001 Z      -18.900
T W001 T       25.116
T W002 Z      -17.050
T W002 T       22.658
T W003 Z      -2.5000
T W003 T       3.3222
    
```

5. 최적화 모델

이상의 시험조건과 시험결과를 이용하여 해석모델을 검증하는 과정을 시험결과와 해석결과의 오차를 최소화 하는 것을 목적함수로 두고, 해석 모델의 주요 설계 parameter들을 설계 변수로 정의하여 제한된 조건 내에서 만족하는 설계 변수들의 값을 찾는 최적화 모델로 정리하였다.

설계변수 : 차체, 대차 및 휠 셋 중량, 차체의 무게중심위치, 일차/이차 현가장치 특성치

목적함수 : 시험결과와 해석 결과의 차이 최소화 및 허용오차이내

제한조건 : 차량 중량이 실측한 값과 일치하여야함

최적화 툴인 iSIGHT에서 VAMPIRE의 해석 모델을 불러들여서 최적화의 변수로 정의한 것과 iSIGHT에서 VAMPIRE의 static analysis module을 구동하기 위한 command 창의 관계는 다음 그림과 같다.

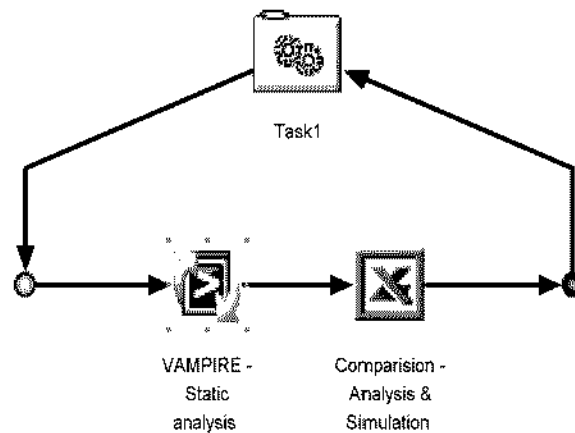


그림4. 최적화 모델

최적화 모델의 구성은 비교적 간단하다. MS Windows의 command 창에서 실행이 가능한 VAMPIRE의 static analysis 실행 모듈을 iSIGHT의 Simcode의 command 파일로 정의하고, VAMPIRE의 vehicle model이 input 파일이 되고, 해석결과가 저장되는 lis화일을 output화일로 설정하였다. Input 파일인 vehicle model 파일 내에서 차량의 중량과 무게중심 위치 데이터, 현가장치의 특성치 들이 최적화의 variable로 정의가 되고, output 파일인 LIS화일에서 각 휠에서의 unloading 값이 output parameter로 정의되었다.

6. 최적화 전략

최적화 모델로부터 휠 unloading 에 대한 현가장치 특성치들의 기여도를 iSIGHT의 DOE기법을 적용하여 평가하였다.

6.1 DOE해석

설계 변수의 휠 unloading 에 대한 민감도 분석을 위하여 주요 설계변수에 대한 DOE 분석을 실시하였다. 설계변수는 다음과 같다.

중량데이터 : 차체 중량, 차체의 무게중심 위치, 전후 대차 중량 및 무게중심, 휠셋 중량

현가장치특성 : 일차 현가장치 - 상하방향, 좌우 방향 및 횡방향 스프링 상수

이차 현가장치 - 상하방향 스프링 상수

민감도 해석 결과는 다음 그림과 같다.

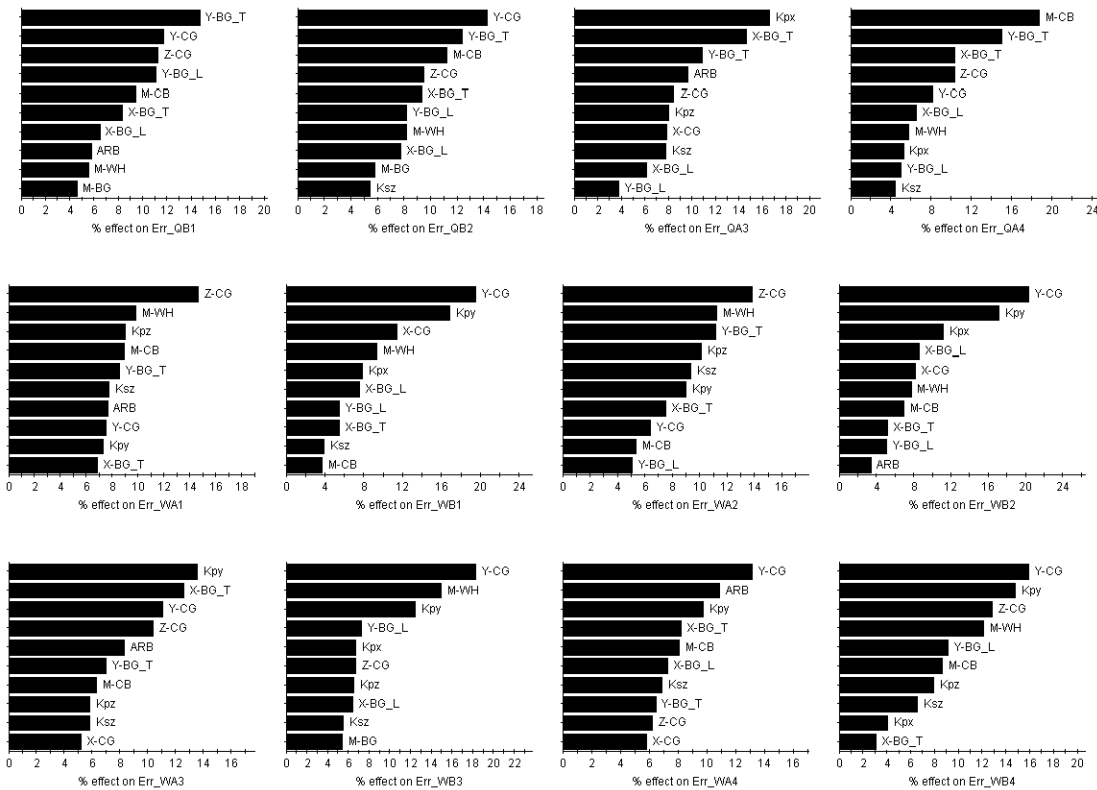


그림5. 민감도 해석 결과

이상의 민감도 해석으로부터 휠 하중에 미치는 영향도가 가장 큰 것은 차체의 무게중심 위치이며 경험상 당연한 결과로 판단되며, 이차적으로 영향을 미치는 설계변수로서 일차 스프링의 횡방향 스프링 상수와 Anti roll bar의 강성임을 알 수 있었다.

6.2 최적화 수행

민감도 해석의 결과로부터는 휠 하중 분포와 휠 unloading에 영향을 미치는 설계 인자에 대하여 알 수 있었으나, 해석 모델의 검증을 위해서는 민감도가 큰 설계 인자 뿐만 아니라 기본적인 설계 변수들을 모두 포함하여 시험결과에 최대한 근접한 결과를 나타내는 모델을 구하기 위하여 DOE과정에서 정의한 모든 설계 변수에 대하여 최적화 기법을 적용하였다.

iSIGHT에 여러 가지 최적화 기법에 대한 실행 모듈이 정의되어있지만 본 연구에서는 트레이드 오프

경향을 가진 목적함수가 둘 이상인 경우에 적용하는 다목적 최적화 알고리즘인 NCGA(Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm)을 이용하였다.

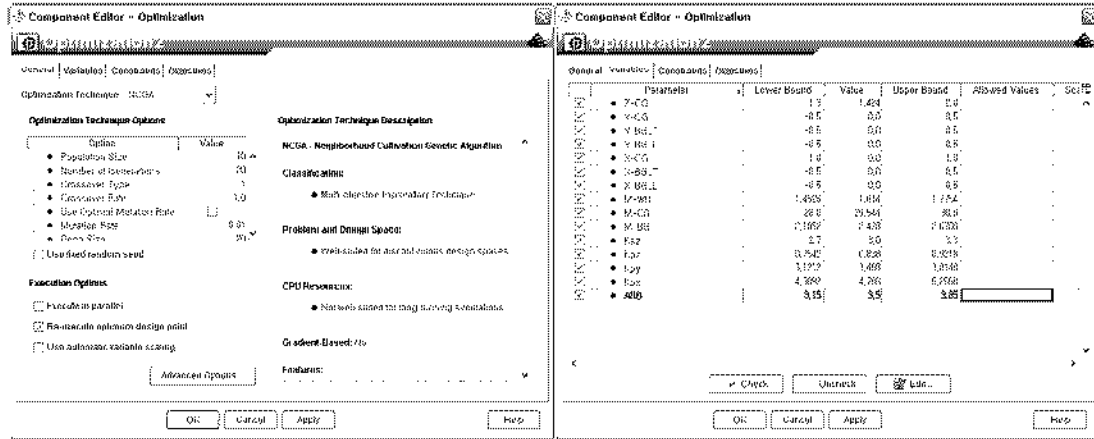


그림6. 최적화기법 설정

그림7. Variable 설정

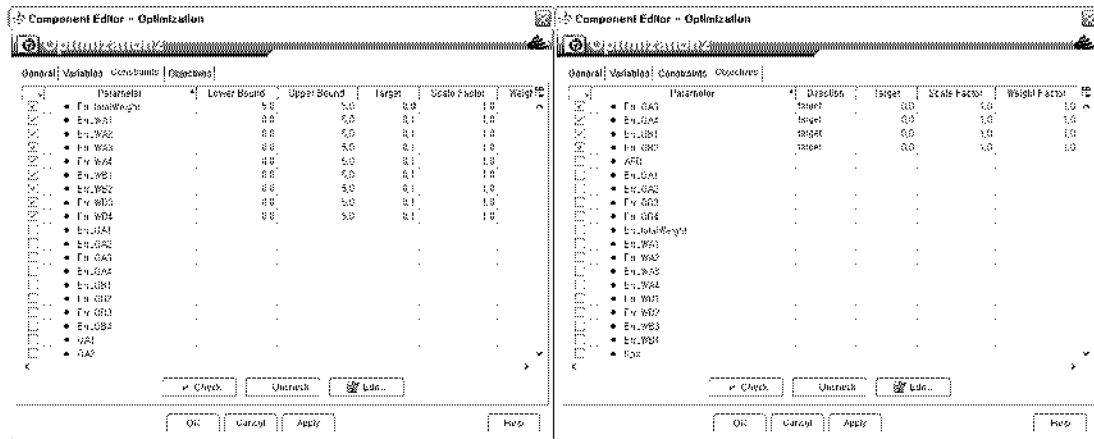


그림8. 제한 조건 설정

그림8. 목적함수설정

6.3 최적화 수행 결과

이상의 모델을 이용하여 수행한 최적화 결과는 도표 1과 같다. 도표 1에는 최적화를 수행하기 위한 각 설계 변수들의 초기값과 최적화작업으로 구한 값이 비교되어있다. 도표2에는 최적화후 제한조건의 항목과 목적함수로 정의된 값들의 최종값이 표시되어있다.

최적화 후의 휠 unloading 결과의 차이가 많이 줄어들었지만 좀더 많은 설계변수를 포함하고 다양한 최적화 기법을 통하여 개선의 여지가 많은 것을 알 수 있다.

7. 결 론

실차 시험결과를 기준으로 이와 동일한 해석 결과를 갖는 해석 모델을 구현하기 위한 방안으로 최적화툴을 이용한 방법을 검토하였다. 기존에 해석 모델의 여러 가지 설계변수를 시행착오법으로 변경하면서 해석 모델을 조정하는 작업을 최적화툴을 이용함으로써 보다 효율적이고 신속하게 진행될 수 있음을 확인하였다. 향후 휠 unloading 시험 이외의 여러 가지 시험결과를 반영한 보다 더 정확한 해석 모델을

구현하는 작업이 진행되어야 할 것이다.

도표 3. 최적화 전후의 설계 변수 비교

| Variables | Stating point | optimized value |
|-----------|---------------|-----------------|
| ARB | 3.5 | 3.500 |
| Kpx | 4.788 | 4.788 |
| Kpy | 3.468 | 3.468 |
| Kpz | 0.838 | 0.838 |
| Ksz | 3 | 3.000 |
| M-BG | 2.428 | 2.428 |
| M-CB | 29.544 | 29.594 |
| M-WH | 1.614 | 1.772 |
| X-BG_L | 0 | 0.067 |
| X-BG_T | 0 | 0.336 |
| X-CG | 0 | 0.213 |
| Y-BG_L | 0 | -0.081 |
| Y-BG_T | 0 | 0.452 |
| Y-CG | 0 | -0.391 |
| Z-CG | 1.424 | 1.772 |

도표 2. 최적화 전후의 목적함수 및 제한조건 값 비교

| Variables | Stating point | optimized value |
|-----------------|---------------|-----------------|
| Err_QA3 | 47.909 | 26.457 |
| Err_QA4 | 109.707 | 7.313 |
| Err_QB1 | 127.405 | 13.390 |
| Err_QB2 | 95.833 | 15.601 |
| Err_totalWeight | 1.431 | 0.226 |
| Err_WA1 | 7.263 | 5.902 |
| Err_WA2 | 3.056 | 1.693 |
| Err_WA3 | 5.052 | 2.151 |
| Err_WA4 | 2.941 | 0.038 |
| Err_WB1 | 8.566 | 1.937 |
| Err_WB2 | 2.038 | 1.062 |
| Err_WB3 | 1.539 | 1.042 |
| Err_WB4 | 3.125 | 0.547 |

참고문헌

1. GM/RT2141, Railway Group Standard, "Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over", Issue 2, Oct 2000.
2. UIC Leaflet 518 OR, "Testing and acceptance of railway vehicles from the point of view of dynamic behaviour, safety, track fatigue and running behaviour", 2nd Edition Oct. 1999.