

# 한국형 틸팅 열차의 성능 향상을 위한 현가장치 최적화

## The optimization of suspension system for high performance of Korean Tilting Train

이수인†  
Lee, Su-In

박태원\*  
Park, Tae-Won

윤지원\*\*  
Yoon, Ji-Won

### ABSTRACT

The Korean tilting train can increase the whole operating speed at a curved railroad, reducing the lateral acceleration with the tilting mechanism unlike the train developed before. However, increasing operating speed on the curved section, may cause safety problem of train travel. In general, a suspension system has important effects on driving safety. Therefore, optimization of suspension system is necessary to secure the safety of the tilting train.

In this study, the tilting train suspension system has been optimized using Design of Experiments (DOE). First, the design parameter is selected using sensitivity analysis. A lateral acceleration which affects on the driving safety is chosen as the objective function. And the Design of Experiments (DOE) is used for optimization. As a result, new design parameters which show better performance than the existing suspension system has been suggested.

### 1. 서론

틸팅 열차는 철로의 곡선부를 주행할 때 차체를 곡선 안쪽으로 기울이는 틸팅 메카니즘을 이용한 열차이다. 이 메카니즘은 곡선부 주행시 발생하는 횡 가속도를 감소시켜 곡선부 속도를 향상시켜 전체적인 운행 속도를 줄일 수 있는 결과를 갖는다. 따라서 이 열차를 이용하면 곡선궤도가 많은 우리나라에서 선로교체에 투자하지 않고 기존의 선로에서 속도 향상이 가능하다.

이 열차에는 기존의 열차와는 다른 틸팅 메카니즘이 적용된다. 이 메카니즘은 볼스터를 이용하여 차체를 기울인다. 따라서 2차 현가장치와 대차가 분리된 형태를 가진다. 그 결과, 현가장치의 특성에 따라 기존의 열차와는 다른 동특성을 가지게 된다. 따라서 틸팅 열차를 개발하는데 있어서 현가장치의 특성을 고려하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 Plackett-Burman design[1]을 이용해 민감도 분석을 통해 현가장치를 평가하고 반응표면분석법[2]을 이용한 최적화를 진행하였다. 그리고 목적함수의 신뢰성을 검증하기 위해서 분산분석표[3]를 이용하였다. 목적함수로는 차량의 주행안전성에 큰 영향을 미치는 대차의 횡 가속도를 선정하였다. 대차의 횡 가속도 중에서도 필터링을 통해 차량의 승차감에 큰 영향이 있는 저주파 영역인 5~10Hz의 영역의 RMS값을 이용하였다.

### 2. 틸팅 열차 동역학 모델링

차량 주행에 해석되는 동역학 모델링은 차체와 대차 각각 6개의 자유도를 가지며 휠셋은 좌우, 상하,

† 책임저자 : 학생회원, 아주대학교, 기계공학과, 석사과정

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

\* 정희원, 아주대학교, 기계공학부, 교수

\*\* 정희원, 아주대학교, 기계공학과

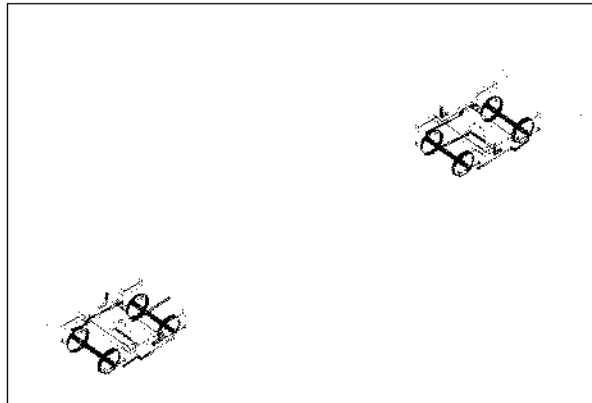


그림1. 차량 모델링

요의 3개의 자유도를 갖게 되어 총 24개의 자유도를 갖는 모델이다. 차량 모델링은 ADAMS/Rail을 이용하여 진행하였으며 모델은 그림1.과 같은 형상이다.

## 2.1 차량 제원

현재 시운전 중인 탈링 열차는 MCP차량, M차량, T차량이 MCP - M - T - T - M - MCP 순으로 연결되어 있다. 그 중에 2번째 위치한 M차량이 진동이 가장 심하기 때문에 M차량에 대한 최적화를 진행하였다. M차량 대차의 현가장치 제원은 도표1.과 같다.

도표1. 현가장치 주요 특성치

1차 현가장치	스프링 Kx (MN/m)	1.92
	스프링 Ky (MN/m)	3.72
	스프링 Kz (MN/m)	1.21
	1차 댐퍼 (MN/s/m)	0.017
2차 현가장치	공기스프링 Kx (MN/m)	0.17
	공기스프링 Ky (MN/m)	0.17
	공기스프링 Kz (MN/m)	0.6
	요 댐퍼 댐핑계수 (MN/s/m)	0.17
	횡 댐퍼 댐핑계수 (MN/s/m)	0.03

## 2.2 해석 구간

본 연구에서는 M차량의 동특성 해석을 위하여 다음 그림2.와 같은 구간을 설정하였다. 설정된 구간은 실제 열차 운행 구간 중 무안 ~ 함평구간이다. 이 구간은 총 길이 6.7km의 길이를 갖는다. 이 구간을 해석에 사용한 이유는 직선구간이 가장 길어서 현재 개발 중인 탈링 열차의 최대 속도인 180km/h의 상황에 대해서 적용이 가능하기 때문이다.

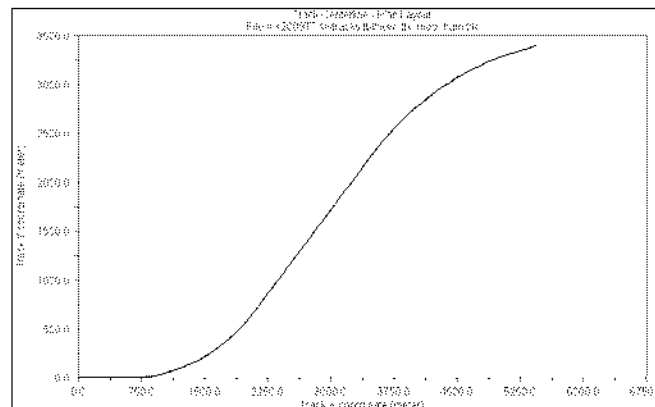


그림2. 해석 구간

### 3. 민감도 분석

본 연구에서는 설계 가능한 변수를 1차 스프링, 1차 댐퍼, 2차 스프링, 횡 댐퍼, 요 댐퍼 5가지로 선정하고 민감도 분석을 통하여 설계변수를 선정하였다. 민감도 분석에 목적함수로 3가지 경우를 적용하였다. 열차의 주행안전성에 영향을 미치는 대차의 횡가속도, 승차감에 영향을 미치는 차체의 횡가속도 및 상하가속도 3가지에 대해서 민감도 분석을 수행하였다.

#### 3.1 직교배열표

민감도 분석을 시행하기 위하여 설계 가능변수들에 대해서 Plackett-Burman design table을 작성하였다. 직교배열표는 도표2.와 같다. 또한 요인 수준은 도표3.과 같이 선정하여 진행하였다. 요인 수준을 결정할 때 1차 스프링과 2차 스프링의 경우에  $K_x$ 와  $K_y$ 는  $K_z$ 값에 종속적으로 따라오는 값이므로  $K_z$  만을 이용하였다.

도표2. 직교배열표

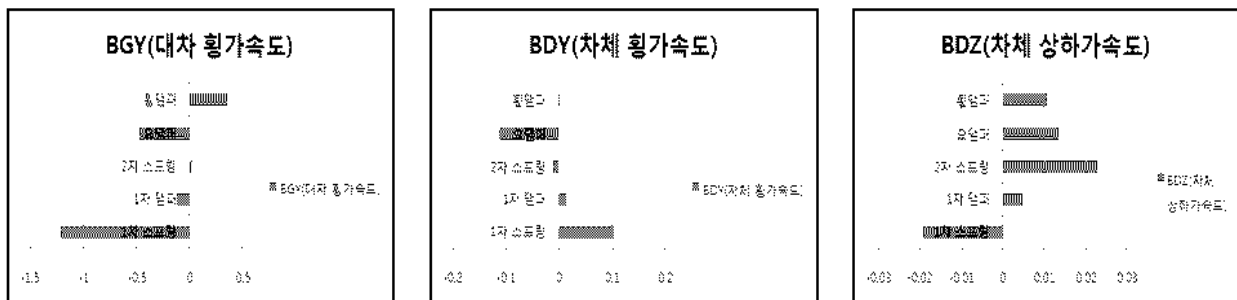
순번	x1	x2	x3	x4	x5
1	1	1	1	1	1
2	-1	1	-1	1	1
3	-1	-1	1	-1	1
4	1	-1	-1	1	-1
5	-1	1	-1	-1	1
6	-1	-1	1	-1	-1
7	-1	-1	-1	1	-1
8	1	-1	-1	-1	1
9	1	1	-1	-1	-1
10	1	1	1	-1	-1
11	-1	1	1	1	-1
12	1	-1	1	1	1

도표3. 요인 수준

요인	Min(-1)	Max(1)
1차 스프링 계수 $K_z$ (N/m) (x1)	0.84E6	1.57E6
1차 댐핑 계수 (Ns/m) (x2)	1.19E4	2.21E4
2차 스프링 계수 $K_z$ (N/m) (x3)	4.2E5	7.8E5
요 댐핑 계수 (Ns/m) (x4)	1.19E5	2.21E5
횡 댐핑 계수 (Ns/m) (x5)	2.1E4	3.9E4

#### 3.2 민감도 해석

직교배열표를 바탕으로 민감도 해석을 수행한 결과는 다음 그림3.과 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) 대차 횡가속도

(b) 차체 횡가속도

(c) 차체 상하가속도

그림3. 민감도 해석 결과

해석 결과를 보면 목적함수에 따라서 현가장치들의 영향이 다른 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최적화에 쓰일 설계 변수로 5가지 모두를 선정하였다.

### 4. 현가장치 최적화

민감도 분석을 토대로 1차 현가장치, 1차 댐퍼, 2차 현가장치, 횡 댐퍼, 요 댐퍼 5가지의 설계변수는 선정하였다. 본 연구에서는 선정된 설계변수 최적화를 위하여 반응표면 분석법을 이용하였다.

#### 4.1 반응표면 분석법

반응표면 분석법은 여러 개의 설계변수  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 가 복합적인 반응을 할 때 어떤 반응변수  $\eta$ 에 영향을 줄 때 이들 간의 함수 관계  $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 를 나타내는 반응 표면을 통계적 방법을 이용하여 분석하는 것이다[2]. 반응함수는 중심합성실험계획법[1]에 따라 결정된다. 본 연구에서는 반응함수로 2차 다항 회귀 모형 함수를 사용하였다. 2차 다항 회귀 모형 함수는 다음 식 (1)과 같다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

반응 표면 분석을 위한 회귀 모형 함수를 추정하기 위하여 설계변수가 5개일 경우의 중심합성실험 계획표를 작성하였으며, 이에 따라 43번의 해석을 수행하였다. 목적함수를 대차의 횡가속도 중에서 필터링을 이용한 5~10Hz 영역의 RMS값으로 선정하였다. 도출된 회귀 모형 함수는 식 (2)와 같다.

$$f(x) = 0.0177 - 0.0176x_1 - 0.0181x_2 - 0.0154x_3 + 0.0137x_4 + 0.0146x_5 + 0.0073x_1^2 + 0.0072x_2^2 + 0.0064x_3^2 + 0.0067x_4^2 + 0.0066x_5^2 + 0.0201x_1x_2 + 0.0182x_1x_3 - 0.0165x_1x_4 - 0.0172x_1x_5 + 0.0177x_2x_3 - 0.018x_2x_4 - 0.0168x_2x_5 - 0.0196x_3x_4 - 0.0193x_3x_5 + 0.0192x_4x_5 \quad (2)$$

#### 4.2 회귀 모형 함수의 검증

도표4.은 회귀 모형 함수의 검증을 위해서 실시한 분석 결과이다. 표에서  $F_0 > F(0.01)$ 임을 확인하였다. 따라서 회귀 모형 함수는 유의수준 1%한도 내에서 타당한 것을 확인하였다.

도표4. 분산분석표 결과

Factor	S	$\Phi$	V	$F_0$	$F(0.01)$
Regression Variation	0.048564	5	0.009712	491.601544	6.22
Residual Variation	0.000731	37	0.000019		
Sum	0.049295	42			

#### 4.3 현가장치 최적화

최적화를 수행하기 위해서 목적함수로는 대차의 횡가속도 중에서 필터링을 통해 5~10Hz 영역의 RMS 값을 선정하였다. 도표5.은 최적화를 통한 결과와 기존 차량과의 비교값이다.

도표5. 최적화 결과

요인	기존차량	최적화 차량
1차 스프링 계수 Kz (N/m) (x1)	1.21E6	1.53E6
1차 댐핑 계수 (Ns/m) (x2)	1.7E4	2.21E4
2차 스프링 계수 (N/m) (x3)	6.0E5	7.8E5
요 댐핑 계수 (Ns/m) (x4)	1.7E5	2.21E5
횡 댐핑 계수 (Ns/m) (x5)	3.0E4	3.9E4
RMS	0.031914	0.030572

최적화 값을 적용하여 ADMAS/Rail에 해석을 돌린 결과, 대차 횡가속도의 5~10Hz의 RMS값이 5%가량 감소하였다. 그림4.는 기존의 차량과 최적화 차량의 5~10Hz영역의 가속도를 나타낸다.

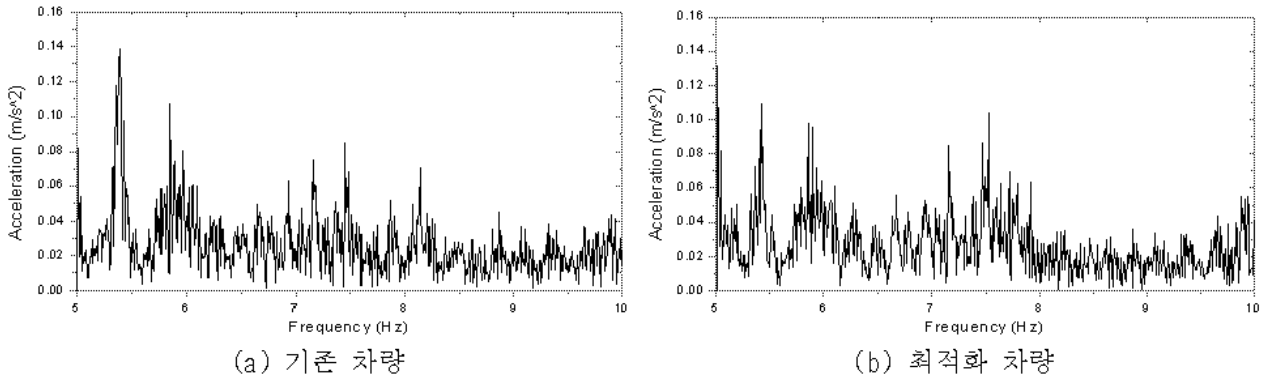


그림4. 최적화 결과 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 틸팅 열차에 장착된 현가장치 계수변경을 통한 동특성을 개량하기 위하여 최적화를 진행하였다. 민감도 분석을 Plackett-Burman design을 이용하였다. 또한 반응표면 분석법을 이용하여 목적함수를 추정하였다. 추정된 목적함수를 검증하기 위하여 분산분석표(ANOVA Table)을 이용하였다. 추정된 목적함수는 MATLAB의 fmincon 함수를 이용하여 최소값을 찾아내었다.

위의 과정을 통하여 틸팅 열차의 현가장치 설계안을 제시하였다. 향후 연구에서는 실제 틸팅 차량의 시험과의 비교를 통해서 제시하는 설계안의 신뢰성을 높이는 연구를 진행할 것이다.

## 후 기

본 연구는 “한국형 틸팅열차 안정화 기술연구” 과제의 일환으로 수행되어진 결과이며 철도기술연구원의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. R. Plackett and J. Burman (1946), "The design of Optimum Multifactorial Experiments", *Biometrika*, Vol.33,pp.306-325
2. 정성필, 박태원 (2008), "체동 장치 최적 설계 모듈 개발", *한국자동차공학회*, Vol.16, No.3, pp166-171
3. S-H. Park (2005), "Understanding of Design of Experiments", *Minyoungsa*, Seoul, Korea