

틸팅 열차의 주행 안전성을 위한 현가장치 최적화

The optimization of the tilting train suspension system for driving safety

*이수인¹, #박태원², 윤지열¹

*S. I. Lee¹, #T. W. Park(park@ajou.ac.kr)², J. W. Yoon¹

¹ 아주대학교 기계공학과, ² 아주대학교 기계공학과

Key words : Tilting train, Optimization, Suspension system, Design of Experiments

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 시간을 줄일 수 있는 결과를 갖는다. 이 열차를 이용하면 곡선궤도가 많은 우리나라에서 선로교체에 비용을 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 열차의 동역학 모델링

본 연구에서 차량 주행에 해석되는 틸팅 열차의 동역학 모델링은 차체와 대차는 각각 6개의 자유도를 가지며 휠셋은 좌우, 상하, 요의 3개의 자유도를 갖게 되어 총 24개의 자유도를 갖는 모델이다. 차량 모델링은 ADAMS/Rail을 이용하여 진행하였으며 모델은 Fig. 1과 같은 형상이다.

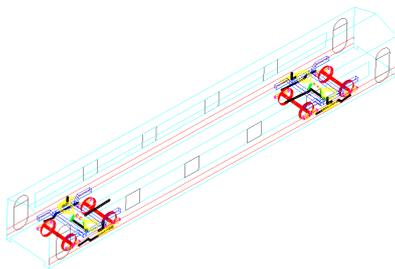


Fig. 1 Tilting train modeling

Table 1 Specification of suspension system

구분	항목	특성치
1차 현가장치	스프링 Kx (MN/m)	1.92
	스프링 Ky (MN/m)	3.72
	스프링 Kz (MN/m)	1.21
	1차 댐퍼댐핑계수 (MNs/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 (MNs/m)	0.17
	횡 댐퍼 댐핑계수 (MNs/m)	0.03

2.1 차량 제형

현재 시운전 중인 틸팅 열차는 MCP차량, M차량, T차량이 MCP - M - T - T - M - MCP 순서로 총 6량의 차량이 연결되어 있다. 그 중에 2번째 위치한 M차량이 진동이 가장 심하기 때문에 본 연구에서는 M차량에 대한 최적화를 진행하였다. M차량 대차의 현가장치 제원은 Table 1과 같다.

2.2 해석 구간

본 연구에서는 M차량의 동특성 해석을 위하여 Fig. 2와 같은 구간을 설정하였다. 설정된 구간은 실제 열차가 운행되고 있는 구간 중 무안 ~ 함평구간이다. 이 구간은 총 길이 6.7km의 길이를 갖는다. 이 구간을 해석에 사용한 이유는 직선 구간이 가장 길어서 현재 개발 중인 틸팅 열차의 목표 속도인 180km/h의 상황에 대해서 적용이 가능하기 때문이다.

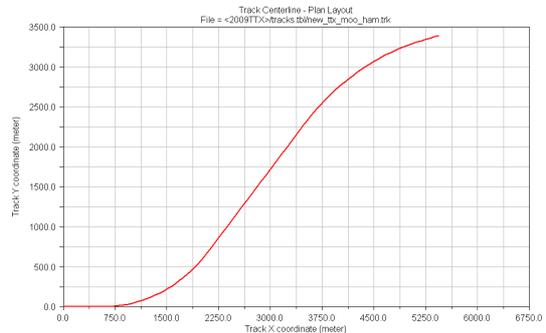


Fig. 2 Track modeling

3. 민감도 분석

본 연구에서는 틸팅 열차의 최적화를 위한 설계 가능변수를 1차 스프링, 1차 댐퍼, 2차 스프링, 횡 댐퍼, 요 댐퍼 5가지로 판단하였다. 그리고 민감도 분석을 통하여 최적화에 사용될 설계 변수를 선정하였다. 민감도 분석에 사용된 목적함수로는 다음의 3가지 경우를 선정하였다. 열차의 주행안전성에 영향을 미치는 대차의 횡가속도, 승차감에 영향을 미치는 차체의 횡가속도 및 상하가속도 3가지에 대해서 민감도 분석을 수행하였다.

3.1 적교 배열표

민감도 분석을 시행하기 위하여 설계 가능변수들에 대해서 Plackett-Burman design table을 이용하였다. 또한 요인의 수준은 Table 2과 같이 선정하여 진행하였다. 요인의 수준을 결정할 때 1차 스프링과 2차 스프링의 경우에 횡가속도와 상하가속도에 큰 영향을 미치는 z축 방향의 값을 이용하였다.

Table 2 Factor level

Factor	Min (-1)	Max (+1)
1차 스프링 계수Kz (N/m) (x1)	0.84E6	1.57E6
1차 댐핑 계수(Ns/m) (x2)	1.19E4	2.21E4
2차 스프링 계수Kz (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

Plackett-Burman design table를 바탕으로 민감도 해석을 수행한 결과는 다음 Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 결과를 통해 각각의 목적함수에 따라서 현가장치들이 미치는 영향이 다른 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 최적화에 쓰일 설계변수로 5가지 모두를 선정하였다.

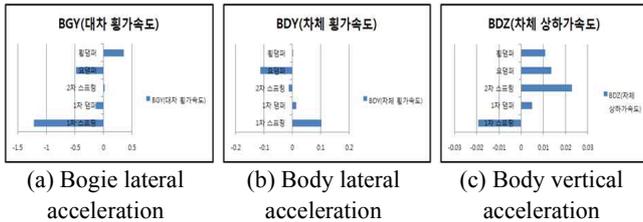


Fig. 3 Result of sensitivity analysis

4. 현가장치 최적화

민감도 분석을 토대로 1차 현가장치, 1차 댐퍼, 2차 현가장치, 2차 댐퍼, 3차 댐퍼 5가지의 설계변수는 선정하였다. 본 연구에서는 반응표면 분석법을 이용하여 최적화를 수행하였다.

4.1 반응표면 분석법

반응표면 분석법은 여러 개의 설계변수 x_1, x_2, \dots, x_n 가 복합적인 반응을 할 때 어떤 반응변수 η 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. 반응함수는 중심합성실험계획법에 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 중심합성실험계획표를 작성하였다. 이에 따라 최적화를 위하여 43번의 시나리오해석을 수행하였다. 최적화에서는 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

Table 3는 회귀 모형 함수의 검증을 위해서 실시한 ANOVA table이다. 표에서 $F_0 > F(0.01)$ 임을 확인하였다. 따라서 회귀 모형 함수는 유의수준 1%한도 내에서 타당한 것을 확인하였다.

Table 3 ANOVA table

Factor	S	ϕ	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

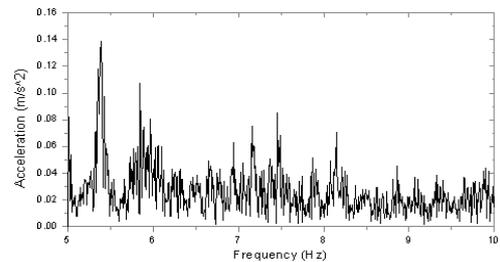
최적화를 수행하기 위해서 목적함수로는 대차의 횡가속도

중에서 필터링을 통해 5~10Hz 영역의 RMS값을 선정하였다. Table 4는 최적화를 통한 결과와 기존 차량과의 비교값이다.

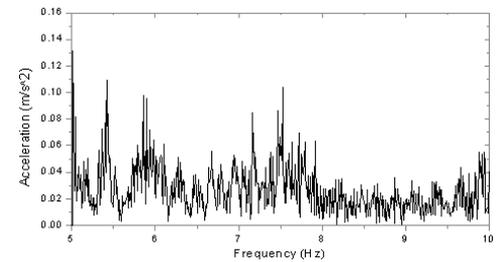
최적화 차량의 대차 횡가속도의 RMS값이 5%가량 감소하는 결과를 얻었다. Fig. 4는 RMS값 비교이다.

Table 4 Optimization result

Factor	기존차량	최적화차량
1차 스프링 계수(Kz(N/m) (x1)	1.21E6	1.53E6
1차 댐핑 계수(Ns/m) (x2)	1.7E4	2.21E4
2차 스프링 계수(Kz(N/m) (x3)	6.0E5	7.8E5
2차 댐핑 계수(Ns/m) (x4)	1.7E5	2.21E5
3차 댐핑 계수(Ns/m) (x5)	3.0E4	3.9E4
RMS	0.031914	0.030572



(a) 기존 차량



(b) 최적화 차량

Fig. 4 Validation of optimization result

5. 결론

본 연구에서는 틸팅 열차에 장착된 현가장치 계수변경을 통한 동특성을 개량하기 위하여 최적화를 진행하였다. 민감도 분석을 위하여 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.

후기

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

참고문헌

1. Plackett, R., and Burman, J., "The design of Optimum Multifactorial Experiments", Biometrika, 33,306-325, 1990
2. 정성필, 박태원, “제동 장치 최적 설계 모듈 개발”, 한국자동차 공학회, 16, 3, 166-171, 2008
3. S-H, Park., “Understanding of Design of Experiments”, Minyoungsa, 2005