틸팅 열차의 현가장치 최적화
Optimizing the suspension system of the tilting train

김정범* 박태원** 윤지원* 정성필* 구동회***
Kim, Jeong-Beom Park, Tae-Won Yoon, Ji-Won Jung, Sung-Pil Goo, Dong-Hoe

ABSTRACT

The TTX(Tilting Train eXpress) has tilting mechanism that is not existed in the previous train. So, the characteristics of suspension will be different from others. For this reason, TTX needs to be investigated about the suspension in contrast with the previous suspension system. The 2nd damping ratio is very important for a tilting mechanism. Proper value of suspension characteristics should be suggested for the tilting train.
In this paper, the optimization of suspension systems for TTX model is introduced by using Design of Experiments (DOE) which is the design of all information-gathering exercises where variation is present. At first, the dynamics model is made for evaluating characteristics of suspension system. Second, using evaluated value, suspension characteristics are analyzed for sensitivity analysis. Finally, using the result of a sensitivity analysis, the suspension systems are optimized.

1. 서 론

틸팅 차량은 차체의 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선부를 빠른 속도로 주행할 수 있다는 장점이 있다.[1] 이러한 틸팅열차의 현가장치는 기존의 열차와는 다르게 볼스터와 대차간 기구학적인 요소를 가지고 있다. 따라서 기존열차와는 다른 동특성을 가지게 되는데 이러한 동특성을 고려하여 새로운 현가장치 특성을 고려하여야 한다.

틸팅열차의 현가구조에는 기존 열차와는 다르게 볼스터를 이용하여 틸팅이 이루어지므로 2차 현가장치에서 기존 차량과 다르게 2차 현가장치와 대차가 분리된 형태를 가지고 있다. 따라서 진동을 감소시키기 위하여 감쇠비를 높이게 되면 틸팅시 반응속도가 느려지고, 틸팅의 반응속도를 높이려고 하면 감쇠비를 낮추어야 하는 문제점이 생기게 된다.

현가장치의 특성은 차량의 동역학적 안정성에 영향을 미치며, 승차감에도 많은 영향을 미친다.[2] 이러한 철도 차량의 동역학적 성능은 차량의 안정성 확보에 영향을 미치게 되며 주행안정성 확보와도 관계된다. 이러한 이유로 틸팅열차의 주행안정성 확보는 열차의 신뢰성을 높일 수 있는 요소이다.

따라서 본 연구에서는 주행 안정성 확보를 위하여 ADAMS/View를 이용한 시뮬레이션 과정을 통하여 틸팅 열차 현가장치의 최적화를 수행하였다. 최적화를 수행하기 위하여 영향을 미치는 설계 인자를 구분해내기 위해 Plackeet-Burman design[3]을 이용하여 민감도 해석을 수행하였다. 최적화를 위해서는 반응표면분석법[4]을 이용하였으며, 목적함수의 신뢰성을 검증하기 위하여 분산분석표[5]를 이용하였

† 책임저자 : 정회원, 아주대학교 기계공학과, 대학원
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965
* 정회원, 아주대학교 기계공학과 , 대학원
** 정회원, 아주대학교 기계공학부, 교수
*** 정회원, 한국철도기술연구원

다. 목적함수로는 주행 안정성에 영향을 미치는 가속도 RMS값을 이용하였으며, 최적화된 값을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 차량동역학 모델링

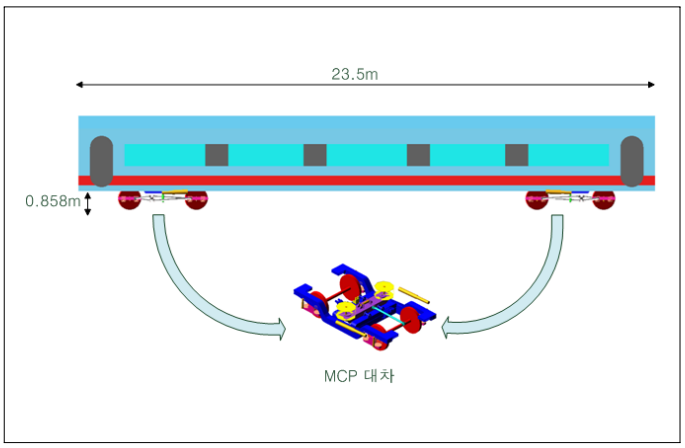

그림1. MCP차량 모델링

차량 주행해석에 사용되는 차량 모델은 차체와 대차 각각 6자유도를 가지며 휠셋은 좌우, 상하, 요의 3자요도를 가지게 되어 총 24자유도를 갖는 모델이 된다. 180km/h의 고속의 주행시의 진동을 고려하였고 그림1.과 같은 모델구성을 가지게 된다.

2.1 차량 제원

본 연구에 사용된 차량 모델은 그림 1.과 같이 MCP차량 1량에 대한 동역학 모델을 생성하였다. MCP 차량은 동력대차 2량으로 구성되어 있으며 모델의 제원은 도표 1.과 도표 2.와 같다.

도표1. 1차 현가장치 주요 특성치

1차 현가 장치	고무스프링 Kx (MN/m)	2.09
	고무스프링 Ky (MN/m)	4.16
	고무스프링 Kz (MN/m)	1.2
	1차 댐퍼(MN/m/s)	0.042

도표2. 2차 현가장치 주요 특성

2차 현가 장치	공기스프링 Kx (MN/m)	0.19
	공기스프링 Ky (MN/m)	0.17
	공기스프링 Kz (MN/m)	0.47
	Cz eq(MN/m/s)	0.02
	요 댐퍼 (MN/m/s)	0.17
	횡 댐퍼(MN/m/s)	0.03

2.2 민감도 분석 차량 모델링

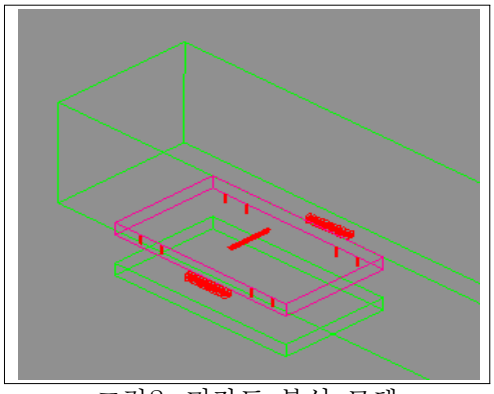

그림2. 민감도 분석 모델

그림2.의 모델은 실제 틸팅 열차의 차체 무게와 대차의 무게를 고려하여 만들어졌으며, 실제 차량과 같은 스프링 상수와 감쇠비를 사용하였다. 또한 모델을 검증하기 위하여 각 대차에 가해지는 질량 정보를 검토하였다.

도표3. MCP차량 정적 하중 비교

단위 : Ton

축위치	실험(A)	모델(B)	비율(B/A:%)
Right Front	13.07	13.10	100.2
Left Front	13.00	13.04	100.3
Right Rear	14.23	14.14	99.3
Left Rear	14.15	14.16	100

2.3 궤도입력

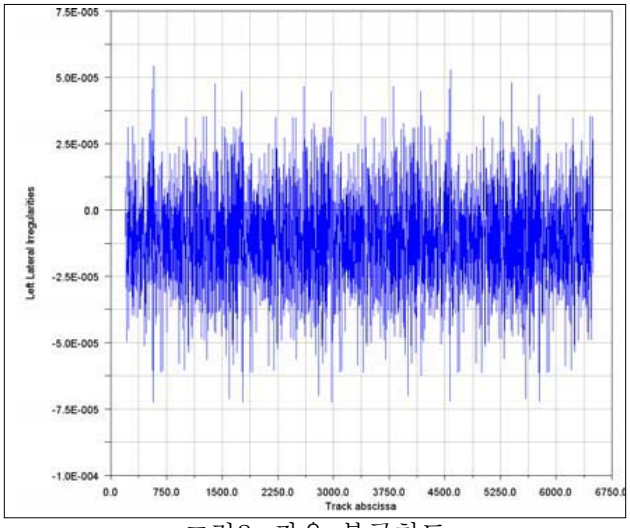

그림3. 좌우 불규칙도

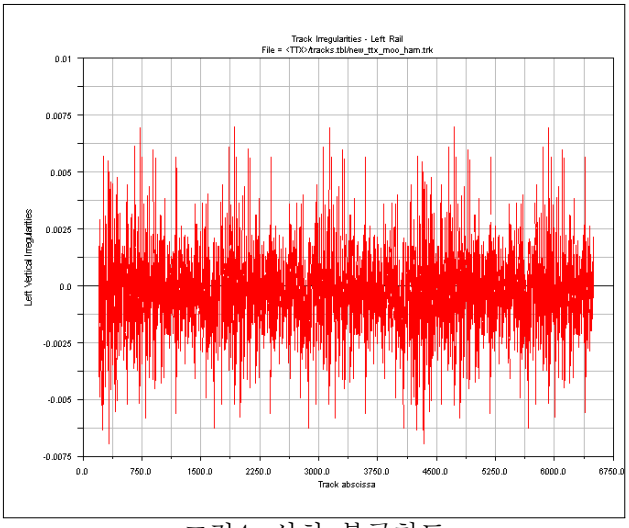

그림4. 상하 불규칙도

그림3.과 그림4.은 호남선 120~127km구각의 궤도 불규칙도이며 최소 반경 R2000의 비교적 완만한 곡선구간을 이용하였다. 그림3.과 그림4.에서 나타난 궤도 불규칙도를 ADAMS/View에서 제공하는 Spline 곡선을 이용하여 진동 값으로 입력 하였다.

3. 민감도 분석

완성된 모델을 이용하여 설계 요인을 결정하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석을 위한 목적 함수는 열차의 종방향 가속도 값을 기준으로 RMS(Root Mean Square)값을 목적함수로 설정하였다. 차량의 응답 특성에 의한 가속도 값은 최대값과 최소값의 기준이 모호하므로 RMS값을 사용하였다.

3.1 직교배열표 작성

시뮬레이션에 앞서 1,2차 현가장치와 감쇠에 대하여 2수준의 직교 배열표를 작성하였다. 직교 배열표는 도표4.과 같다. 또한 요인의 수준은 도표5.과 같이 결정하였다.

도표4. Plackett-Burman법에 의한 실험 계획표 및 결과

인자배치 / 실험번호	x1 1차스프링 Kz	x2 1차 댐퍼	x3 공기스프링 Kz	x4 요 댐퍼	Y(결과) (RMS)
1	1	1	1	-1	0.1930
2	-1	1	1	1	0.1913
3	-1	-1	1	1	0.1888
4	1	-1	-1	1	0.1938
5	-1	1	-1	-1	0.1915
6	1	-1	1	-1	0.1935
7	1	1	-1	1	0.1868
8	-1	-1	-1	-1	0.1849

도표5. 요인 수준

	min	max
1차 현가 Kz(MN/m)	0.665	1.235
1차 댐퍼 (MN/ms)	0.029	0.055
2차 현가 Kz(MN/m)	0.423	0.517
요댐퍼 (MN/ms)	0.09	0.11

3.2 민감도 해석

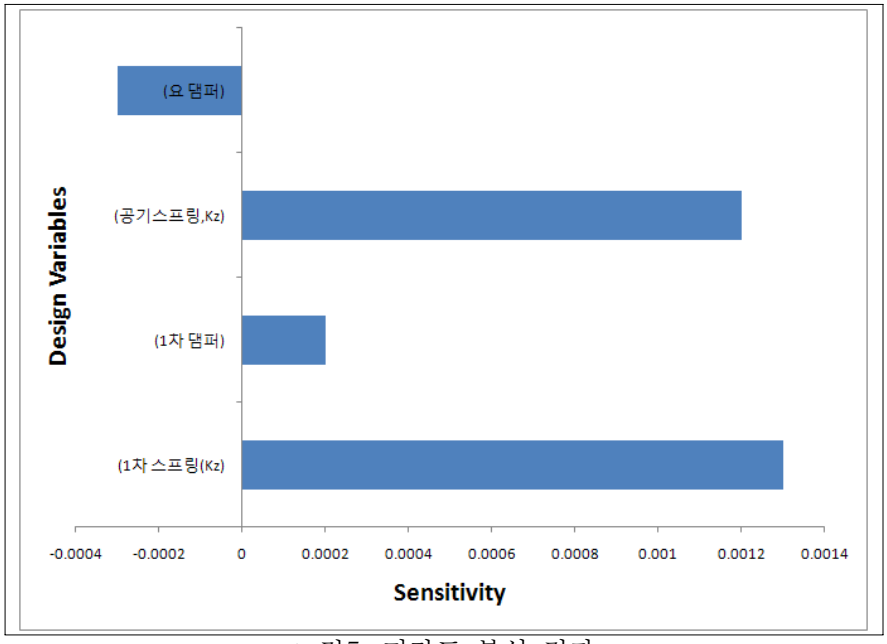

그림5. 민감도 분석 결과

직교 배열표를 토대로 민감도 해석을 수행한 결과를 정리하면 그림 5.과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 5.에서 보면 진동의 전달은 1차와 2차 현가장치의 스프링 상수가 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 또한 감쇠 요소는 1차 댐퍼에 비하여 요 댐퍼가 더 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 현가장치 최적화

민감도 분석결과를 토대로 선정한 설계 변수는 요 댐퍼와 1차 고무스프링, 2차 공기스프링 3가지이다. 본 연구에서는 선정된 설계변수를 반응표면 분석법을 이용하여 최적화를 수행하였다.

4.1 반응표면 분석법

반응표면 분석법은 여러 개의 설계변수 $x_1, x_2, \ldots, x_n$가 복합적인 반응을 할 때 어떤 반응변수 η에 영향을 줄 때 이들 간의 함수 관계 $Y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$를 나타내는 반응 표면을 통계적 방법을 이용하여 분석하는 것이다[4]. 반응함수는 중심합성실험계획법[5]에 따라 결정되며 본 연구에서는 반응함수로서 2차

다항 회귀 모형 함수를 사용하였다. 2차 다항 회귀 모형 함수는 다음 식(1)과 같다.

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

반응 표면 분석을 위한 회귀 모형 함수를 추정하기 위하여 중심합성실험계획표를 작성하였으며, 이에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.

도표6. 중심합성실험계획표

x1	x2	x3	x1^2	x2^2	x3^2	x1x2	x2x3	x1x3	Y(결과값)
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0.9169
-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	0.8883
-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.9119
-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	0.8846
1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	0.9580
1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.9076
1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	0.9474
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9022
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9407
-1.22	0	0	1.48	0	0	0	0	0	0.9050
1.22	0	0	1.48	0	0	0	0	0	0.8790
0	-1.216	0	0	1.48	0	0	0	0	0.9134
0	1.216	0	0	1.48	0	0	0	0	0.9344
0	0	-1.216	0	0	1.48	0	0	0	0.9324
0	0	1.216	0	0	1.48	0	0	0	0.9244

시뮬레이션 결과 도출된 회귀 모형 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y = {} & 0.9224 + 0.0052x_1 - 0.0115x_2 - 0.0031x_3 + 0.232x_1^2 + 0.0051x_2^2 + 0.0081x_3^2 \\ & - 0.005x_1x_2 + 0.0008x_2x_3 - 0.0009x_1x_3 \end{aligned} \qquad (2)$$

4.2 회귀 모형함수의 검증

도표7.은 회귀모형함수의 검증을 위해 실시한 분석 결과를 나타내고 있다. 표에서 볼 수 있듯이 $F_0 > F(0.01)$이므로 유의수준 1%한도 내에서 회귀 모형 함수가 유의하며, 설계인자는 대부분 진동에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

도표7. 분산분석표 결과

Factor	S	Φ	V	F_0	$F(0.01)$
Regression variation	11.728	3	3.9093	9339.8169	6.22
Residual variation	0.0046	11	0.0004		
Sum	11.733	14			

4.3 최적화

도표8. 최적화 결과

요소	현재값	최적값
1차 현가 Kz(MN/m)	0.925	0.795
2차 현가 Kz(MN/m)	0.47	0.517
요댐퍼 (MN/ms)	0.1	0.11
RMS	0.9284	0.8699

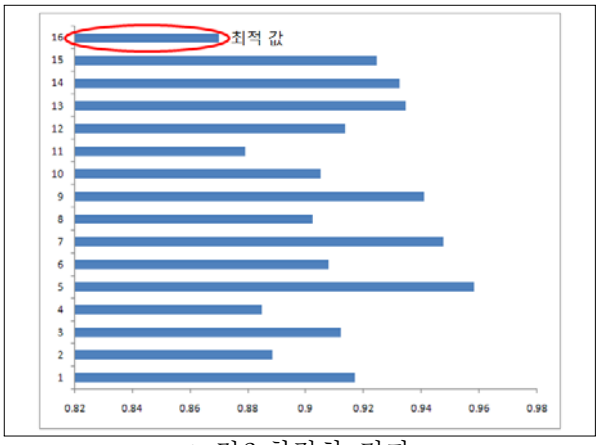

그림6.최적화 결과

최적화를 수행하기 위하여 설정한 목적함수는 차량의 상하 가속도 RMS값으로 설정하였고, 각각의 설계변수가 ±10%이내에서만 변동이 가능하도록 구속하였다. 최적화를 수행을 위하여 비선형 구속 함수식을 이용하여 최적화된 값을 찾아내었다.

위의 최적화 과정을 통하여 얻어진 결과를 도표8.과 그림6.에서 보여주고 있다. 최적화 함수를 이용하여 얻은 값을 ADAMS 시뮬레이션을 수행하여 최적화 된 결과를 얻었다. 최적화 과정을 거친 후 목적함수인 RMS 값은 6%가 감소하였다. 따라서 반응표면 분석법을 이용한 최적화가 잘 진행되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 틸팅열차의 현가장치에 있어 열차에 장착된 기존 현가장치를 개량하기 위하여 목표성능이 최대 또는 최소화 될 수 있도록 설계변수들의 값을 최적화 하였다.

1) 현가장치의 민감도 분석은 Plackett-Burman design을 이용하여 진행한다. 또한 반응표면 분석법을 통해 목적함수를 추정한다. 추정된 목적함수는 분산분석표(ANOVA Table)를 이용하여 신뢰성을 검증하였다.

2) 추정된 구속 함수식을 이용하여 최소화기법을 이용하여 기존의 현가 특성에서 크게 벗어나지 않도록 제한된 범위 내에서의 최적화된 값을 추정하였다.

이상의 최적화 과정은 틸팅열차의 주행안정성을 높이기 위하여 수행하였다. 또한 목적함수를 도출해내는 과정에서 실험계획법에 기반을 둔 반응표면 분석법을 이용하였다. 따라서 각각의 목적에 맞게 변수를 바꾸어 최종적으로 열차의 주행안정성 최적화에 응용이 가능하며, 향후 틸팅열차의 성능향상에 있어 기여 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 “한국형 틸팅열차 안정화 기술연구”과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남포, 구병춘, “틸팅차량의 최대 동적운동범위 산정연구”, 한국철도학회 2002, 춘계학술대회논문집
2. 조동현, 임진수, “철도차량 현가특성의 최적설계에 관한 연구” 학국철도학회 1999, 철도학회논문집 2권
3. R. Plackett and J. Bruman, "The design of Optimum Multifactorial Experiments", Biometrica, Vol.33,pp.305-325,1946
4. 정성필, 박태원, “제동 장치 최적 설계 모듈 개발”, 한국자동차공학회, Vol.16, No.3, pp166-171, 2008
5. S.park, "Understanding of Design of Experiments", Minyoungsa, Seoul, Korea, 2005.