

틸팅 열차의 현가장치 최적화를 위한 민감도 분석

Sensitivity analysis for optimizing the suspension system of the tilting train

김정범* 박태원** 윤지원* 김남포*** 김영모***
Kim, Jeong-Beom Park, Tae-Won Yoon, Ji-Won Kim, Nam-Po Kim, Young-Mo

ABSTRACT

The tilting train express (TTX) is able to tilt its body toward to the center of the turning radius on curved railways. TTX can travel at higher speed than the existing normal railway vehicles due to the tilting mechanism decreasing centrifugal force. Also, a new suspension system is required for TTX which has proper stiffness constants and damping ratios because it has different suspension characteristics with the others. Therefore, the suspension systems need to be optimized to maximize dynamic characteristic of the railway vehicle. To optimize the dynamic characteristics of TTX, sensitivity analysis should be onde to identify design variables. In this paper, Design of Experiments(DOE) is used for the sensitivity analysis of TTX.

1. 서 론

틸팅열차는 곡선주행시 차체를 강제로 곡선안쪽으로 기울이는 열차를 말한다. 이를 통하여 곡선주행시 원심력을 낮추어 고속으로 곡선주행이 가능하도록 한다. 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.

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

현가장치의 특성은 차량의 동역학적 안정성에 영향을 미치며, 승차감에도 많은 영향을 미친다. 이러한 철도 차량의 동역학적 성능은 차량의 안정성 확보에 영향을 미치게 되며 주행안정성 확보와도 관계된다. 틸팅열차의 주행안정성 확보는 열차의 신뢰성을 높일 뿐 아니라, 승객의 안전을 도모하는 중요한 요소이다. 따라서 틸팅열차의 주행안정성 확보를 위한 최적화를 수행하기에 앞서 차량 현가장치의 민감도를 분석하는 것이 필요하다. 이를 위하여 실제 철도 차량의 현가계를 변경하기에는 위험성과 비용 많은 시간이 들어가야만 한다. 6량으로 구성된 차량의 특성상 비용면에서도 많은 부담을 주고 있으며 실제 모델에 많은 영향을 미치는 요소를 파악하는데도 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 현가계의 특성 값을 분석하여 진동전달을 줄이기 위한 방안을 시뮬레이션을 통하여 찾아보고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통한 틸팅열차의 주행안정성 확보를 위하여 실험계획법을 이용하여 1,2차 현가장치의 민감도를 분석하고, 민감도 분석을 위해 실제 호남선 구간의 직선주로에서의 궤도불규칙도를 입력하였다. 민감도 분석을 통해 틸팅열차의 동역학적 성능에 주된 영향을 미치는 설계 요소를 파악하였다.

* 아주대학교 기계공학과, 대학원(비회원)

E-mail : jungbum@ajou.ac.kr

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

** 아주대학교 기계공학부

*** 한국 철도기술 연구원

2. 시스템 모델

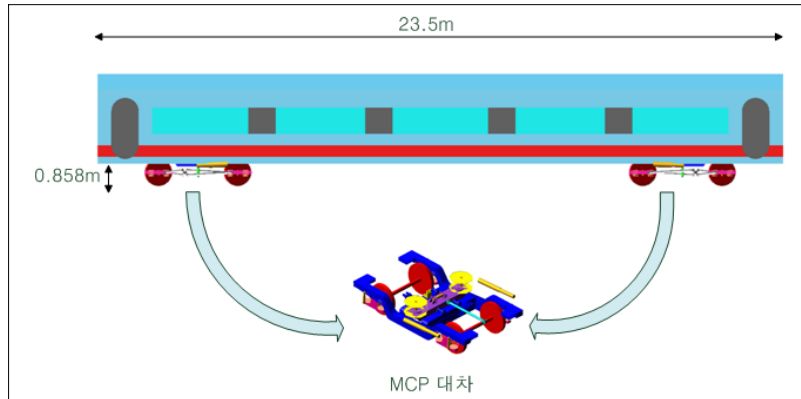


그림1. MCP차량 모델링

2.1 차량 제원

본 연구에 사용된 차량 모델은 그림1. 과 같이 MCP(동력선두객차)차량 1량에 대한 동역학 모델을 생성하였다. MCP차량은 동력대차 2량으로 구성되어 있으며 모델의 제원은 도표 1에 나타나 있다.

도표 1. 1차 현가장치 주요 특성치

1차 현가 장치	고무 스프링 K_x (MN.m)	2.09
	고무 스프링 K_y (MN/m)	4.16
	고무 스프링 K_z (MN/m)	1.2
	1차 댐퍼 (MN/m/s)	0.042
	1차 현가장치 설치 폭 (mm)	2050
	조향장치 토션바 등가 스프링 계수 (MN-m/rad)	8.1
	조향로드 고무 부시 강성	30
	조향장치 설치 폭 (mm)	2440

도표 2. 2차 현가장치 주요 특성

2차 현가 장치	공기스프링 K_x (MN.m)	0.19
	공기스프링 K_y (MN/m)	0.17
	공기스프링 K_z (MN/m)	0.47
	C_z eq (MN/m/s)	0.02
	안티롤 바 (MN-m/rad)	1.26
	요댐퍼 C_{yaw} (MN/m/s)	0.17
	요댐퍼 설치 폭 (mm)	2840
	횡댐퍼 C_y (MN/m/s)	0.03

2.2 주행해석 차량모델

주행해석에 사용되는 차량 모델은 차체와 대차는 6자유도를 가지며 휠셋은 좌우, 상하, 요의 3자유도를 가지게 되어 총 24자유도를 갖는 모델이 된다. 180km/h의 고속주행시의 진동만을 고려하기 위하여 톨딩을 배제 하였으며 그림2와 같은 구성을 갖는다.

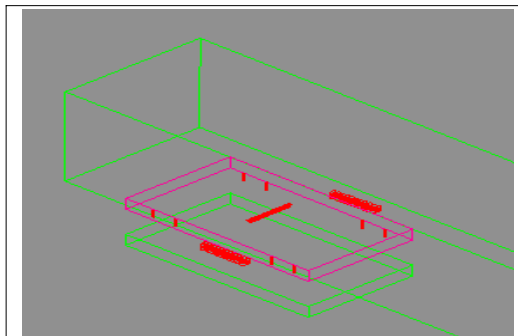


그림2. 민감도분석 간이 모델

그림 2.의 모델은 실제 톨딩열차의 차체의 무게와 대차의 무게를 고려하여 만들어졌으며, 실제모델과 같은 스프링상수와 감쇠비를 사용하였다. 또한 모델을 검증하기 위하여 각 대차에 가해지는 질량정보를 검토하였다.

도표 3. MCP차량 정적 하중 비교

단위 : ton

측위치	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

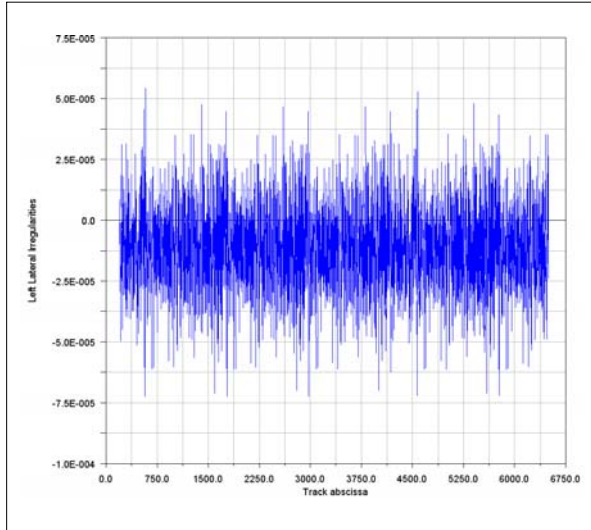


그림3. 좌우 불규칙도

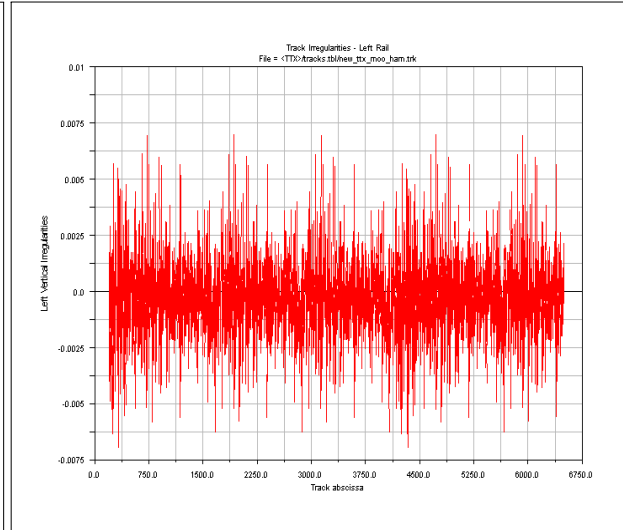


그림4. 상하 불규칙도

주행해석에 사용된 조건은 상하와 좌우의 호남선 120~127km구간의 궤도 불규칙도를 이용하여 대차를 가진하였으며, 그림 3.과 그림 4. 같은 궤도 불규칙도 데이터를 Spline 입력을 이용하여 가진하였다.

3 민감도 분석

위 작성한 모델을 이용한 동역학 시뮬레이션 결과를 바탕으로 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 분석의 기준은 열차의 횡방향 가속도 값을 기준으로 RMS(Root Mean Square)값을 목적함수로 설정하였다. 차량의 응답에 의한 가속도 값의 특성상 최대값과 최소값, 평균값의 기준이 모호하기 때문이다. 민감도 분석을위한 변수는 도표 1.과 도표 2.에나온 1,2차 현가장치의 강성과 댐퍼이다. 이중 타 요인에 의존으로 인하여 바꿀 수 없는 변수인 1차 현가장치의 K_x , K_y 와 2차 현가장치의 K_x , K_y 를 제외하고, 실제 변화가 가능한 1차 현가장치의 K_z 와 2차 공기현가의 K_z 그리고 1차 댐퍼와 요댐퍼를 변수로 설정하였다. 설계인자의 수준은 다음 도표 4.와 같이 결정하였다.

도표 4. 요인수준

	min	currunt	max
1차 현가 K_z (MN/m)	2.91	4.16	5.41
1차 댐퍼 (MN/ms)	0.029	0.042	0.055
2차 현가 K_z (MN/m)	0.33	0.47	0.61
요댐퍼 (MN/ms)	0.12	0.17	0.22

3.1 직교배열표 작성

실험에 앞서 1차 현가장치와 2차 현가장치 그리고 감쇠비에 대하여 2수준의 직교배열표를 작성하였다. 실험계획법에 의한 직교좌표 배열표는 도표 5와 같다. 또한 본 연구에서는 요인간의 교호작용이 거의 없기 때문에 설계를 위한 민감도 해석 기법 중 Plackett-Burman Design을 이용하였다.

도표 5. Plackett-Burman법에 의한 실험 계획표 및 결과

인자배치 실험번호	x1 (1차 스프링(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

3.2 민감도 분석 결과

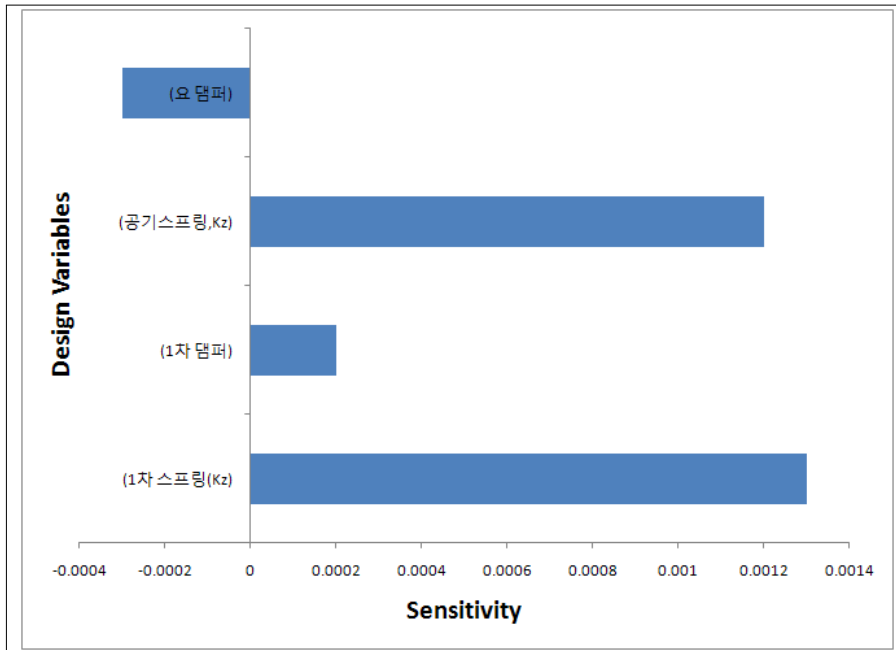


그림5. 민감도 분석 결과

직교 배열표를 토대로 민감도 해석을 수행한 결과를 정리하면 그림 5.과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 6.에서 보면 진동의 전달은 1차와 2차 현가장치의 스프링 상수가 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 또한 1,2차 감쇠비는 그에 비하여 적은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 1차 감쇠비는 작을수록 진동의 위상이 작아지는 것을 알 수 있으며, 요 댐퍼의 감쇠비는 커질수록 진동 전달이 작아지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 시운전 중인 틸팅차량의 개선을 위하여 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 현재 모델의 1,2차 스프링 강성이 진동전달에 가장 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있었으며 요 댐퍼의 경우 민감도는 낮지만 현재 모델보다 더 큰 용량을 사용하는 것이 좋을 것이라는 사실을 알 수 있다. 따라서 본 연구결과를 토대로 틸팅열차의 현가장치 최적화를 수행하여 현재의 틸팅열차의 안정성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 “틸팅 열차의 주행 안정화를 위한 동특성 설계 최적화 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 탁태오, 유순형 (1999년), “고속전철 현가장치의 민감도해석을 통한 최적설계”, 한국철도학회 학술발표대회 논문집, 추계학술대회논문집, pp. 542~549.
2. 윤지원, 박태원, 정성필, 박중경(2007), “실험계획법에 의한 휴머노이드 발의 민감도 해석 및 최적화” 대한기계학회 2007년도 춘계학술대회 초록집,
3. 이대형, 유승환, 김영배(2003), “차량현가장치의 기구학적 민감도이론의 고찰”, 한국자동차공학회 2003년 추계학술대회논문집 2호, 2003. 11, pp. 1109 ~ 1114
4. 김영모, 김석원(2006), “한국형틸팅열차의 효과적인 동적 거동 측정 방안 도출”, 한국정밀공학회 2006년도 추계학술대회 논문집, pp. 599~600
5. 김정석, 김남포(2006), “한국형 틸팅열차용 주행장치 프레임의 구조적 안전성 평가에 관한 시험적 연구”, 한국 정밀공학회지, 23권 1호, pp. 166~173
6. 박찬경, 김영국(2001), “고속전철의 동적 특성에 따른 효율적인 현가장치 최적화 방안 연구”, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, 춘계학술대회논문집 B, pp. 501~506
7. 이정환, 서명원(2008), “순차적 실험계획법과 인공지능망을 이용한 제한조건이 없는 문제의 최적화 알고리즘 개발”, 대한기계학회, 대한기계학회 논문집 A권, 제32권 제3호, pp. 253-266