

주행조건 및 가변 댐퍼 사양에 따른 준능동형 현가시스템의 성능 분석

Analysis for Performance of Semi-active suspension with

Running condition and Specification of Variable Damper

손인석*, 이남진*, 김철근*, 남학기*

Sohn, In-Suk Lee, Nam-Jin Kim, Chul-Gun Nam, Hak-Gi

ABSTRACT

The main functions of suspension system of railway vehicle are isolating vibration from track irregularity to car-body for the Ride quality and keeping its stability with limitation of vehicle's movement. These two functions conflict with each other, then it is impossible to achieve both of performance with traditional passive suspension which has constant characteristics. So, to improve this situation the active suspension was suggested and in specially the semi-active suspension is noticed for its effectiveness on cost despite of its lower performance than full-active suspension.

In this study the control logic made through LQG theory was designed with simplified vehicle model and variable damper model defined by 1st order system, then the analysis of simulation results was done to understand influence on the performance of semi-active suspension with running conditions and response characteristics of variable damper.

1. 서론

현가장치의 기능은 선로에서 전달되는 진동이나 충격을 차체와 분리시키며 주행시 차량의 안전성을 확보하는데 있다. 고정된 수동형 현가장치의 특성으로는 상반된 두 특성인 안전성과 승차감을 모두 만족시키기 어려우며, 일반적으로 적정한 절충 값으로 차량 현가장치를 설계한다. 이 한계성에 대한 해결책으로 능동형 현가장치가 제안되었으며, 비교적 적은 비용으로 구현 가능한 준능동형 현가장치에 대한 연구와 개발이 집중되고 있다[1,2,3].

본 연구에서는 단순화한 차량 모델과 응답특성이 다른 가변댐퍼의 단순화 모델을 바탕으로 LQG 제어를 설계하여, 가변댐퍼의 응답특성에 따른 준능동형 현가장치의 성능과 주행조건에 따른 성능 비교를 통해 차량 엔지니어링 단계에서 준능동형 현가장치의 설계 방향을 제시한다.

* (주)로템 주행장치개발팀, 비회원

2. 시스템 설계

2.1 차량모델

철도차량의 일반적인 현가장치는 철제차륜과 선로에서 전달되는 가진을 비교적 강성이 높은 1차 현가장치에서 고주파 성분을 흡수하여, 차량 주행 안전성을 높이고, 2차 현가장치에서 강성이 낮은 공기 스프링과 같은 현가장치를 채택 승차감을 보완한다. 본 연구의 목적인 승차감 개선 제어기 개발을 위한 차량 모델을 위한 그림 1과 같이 제안한다. 선로와 차륜의 거동, 대차의 롤방향 거동, 수직방향은 단순화하였으며, 능동형 현가장치가 영향을 미치는 대차와 차체의 횡방향과 차체의 롤 방향 운동만으로 단순화 하였으며, 그 운동방정식은 아래 식 (1~4)과 같다. 식에 소요된 차량 주요치수는 표1에 명기한다.

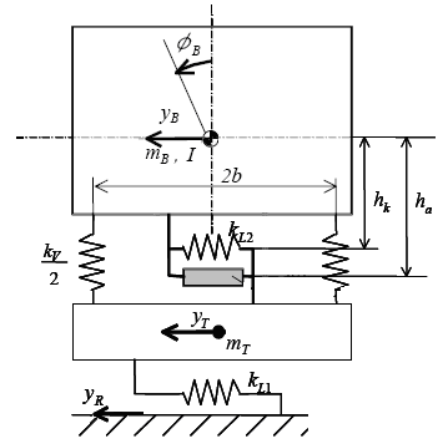


그림1 차량 단순화 모델

$$m_B \ddot{y}_B = -K_{L2}(y_B - h_k \phi_B - y_T) + F_e \quad \dots(1)$$

$$I \ddot{\phi}_B = K_{L2}(y_B - h_k \phi_B - y_T) \cdot h_k - K_\phi \phi_B - F_e \cdot h_s \quad \dots(2)$$

$$m_T \ddot{y}_T = K_{L2}(y_B - h_k \phi_B - y_T) - K_{L1}(y_T - y_R) - F_e \quad \dots(3)$$

$$\dot{F}_e = -1/T \cdot F_e + F_c \quad \dots(4)$$

식 (1)~(4)를 상태공간에서 표현하면,

$$\frac{d}{dt} X = A \cdot X + Bu + Gw \quad \dots(5)$$

$$Y = C \cdot X + Du + v \quad \dots(6)$$

$$X = [y_B - y_T \quad \dot{y}_B \quad \phi_B \quad \dot{\phi}_B \quad y_T - y_R \quad \dot{y}_T \quad F_e]^T \quad Y = [\ddot{y}_B \quad \ddot{\phi}_B \quad \ddot{y}_T \quad S_d]^T \quad \dots(7)$$

단, K_ϕ 는 차체 roll방향 강성을 나타내며, 능동 댐퍼의 댐핑력을 F로 표기하고, 하첨자 e(effect), c(command)로 수식(4)는 시정수(T) 를 가지는 가변댐퍼의 특성을 전체 모델에 반영하였다. 수식(1~4)은 상태공간에 수식(5)(6)으로 표현 가능하며, 입력가진 y_R 은 w로 외란으로, F_c 는 시스템 입력으로 처리한다. 상태변수 및 출력 변수는 수식(7)과 같다. 출력변수는 측정할 센서를 3개의 가속도 센서와 1개의 변위센서로 가정하여 가정하였으며, S_d 는 댐퍼의 변위를 나타낸다.

2.3 제어기 설계

2절에서 제시된 시스템 모델을 바탕으로 LQG 제어기를 설계한다. LQG 제어기의 구성에 대한 개략도는 그림2와 같으며, 상태변수 게인 K와 측정된 출력을 바탕으로 상태변수의 값을 추정하는 Kalman filter로 구성된다. Kalman filter에 적용되는 covariance의 값은 전문 철도차량 차량 시뮬레이션을 통해 예측한 차축의 횡방향 거동을 활용한다. LQ 설계의 Cost function은 횡방향 가속도로 설정, 최소 승차감 지수가 나타날 수 있도록 설계한다.

표 1. 차량 주요 치수

Key figure		Value
Mass of Carbody	m_B	12600 kg
Initia of Carbody	I	23120 kgm
Mass of bogie	m_T	3328 kg
Vertical Stiffness	K_v	121 kN/m
Lateral Stifness	K_{L1}	140 kN/m
Lateral Stif* of 1 st	K_{L2}	36MN/m

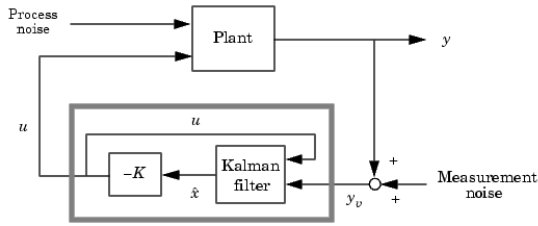


그림 2. 제어 로직 구성도

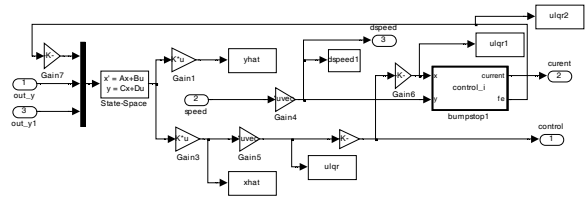


그림 3. Simulink로 구현한 제어기

제어기는 가변댐퍼의 응답성능에 따라 각기 다른 값이 나타나며, 그 경향은 표2와 같다.

표 2 가변댐퍼 특성에 따른 상태변수 계이표

T	$y_B - y_T$	\dot{y}_B	ϕ_B	$\dot{\phi}_B$	$y_T - y_R$	\dot{y}_T	Fe
0.008	-199.157	20.1644	190.9166	-0.7646	19.356	0.171	9.0659
0.02	-199.627	19.9294	191.3428	-0.561	12.0663	0.4079	9.0872
0.05	-200.606	19.3511	191.9197	-0.1386	-23.181	0.8193	9.1308

가변댐퍼의 응답성이 제어 Gain에 영향을 비교적 큰 미치는 변수는 $\dot{\phi}_B$, $y_T - y_R$, 과 \dot{y}_T 으로 가변댐퍼의 응답속도를 반영한 결과로 판단되며, 그 외의 변수는 가변댐퍼의 응답성과 연관성이 미미한 것으로 판단된다.

3. 시뮬레이션

3.1 준능동형 현가 시스템 성능비교

준능동형 현가장치의 차체 횡방향 가속도와 기준 수동현가장치일때의 횡방향 가속도 비교를 위해 그림 과같이 주파수 선도에서 비교하였다. 횡댐퍼의 종류에 따른 대차의 거동은 1차 현가장치와 2차 현가장치의 강성차이가 크기 때문에 가진량은 동일한 것으로 가정하고 검토하였다. 준능동형 현가장치는 1~4 [Hz] 영역에서 만은 큰 진동 감쇠를 보이고 있으며, 8 [Hz] 이상에서는 가진을 증폭시키는 것으로 보이나, 승차감 연산 weighing curve 주파수 영역이 0.5 ~ 2 [Hz]임으로 승차감 지수에 미치는 영향은 없을것으로 판단된다.

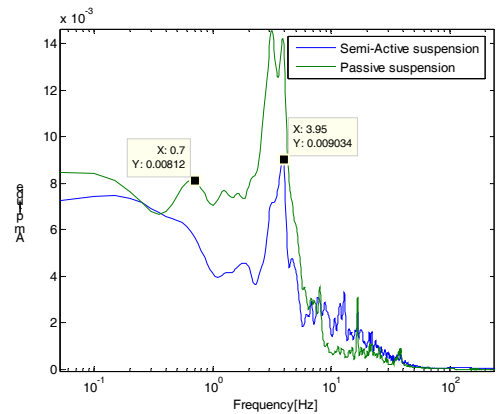


그림 4 주파수 선도에서 가속도 비교

3.2 가변댐퍼 응답성에 따른 성능 비교

가변댐퍼의 응답성에 따른 성능 비교를 위해, 차량속도 120 km/h에 횡방향 충격-분기기 통과 시-형태의 가상선로와 차량속도 180km/h, Track260-차량 동특성 해석 프로그램에서 제공하는 가상 선로 정보-에서의 주행 결과를 비교한다. 차량 시뮬레이션은 Vampire와 Simulink/Matlab 통합시뮬레이션을 활용하여, 차량 동특성 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰도를 높였다. 가변댐퍼의 응답성은 시정수 0.008, 0.02, 0.05로 가정하여 2절에서 제시한 LQG제어기를 적용하였다.

분기기 통과 모의 시험에서 그림5에서 응답특성이 다른 가변댐퍼를 적용한 시뮬레이션의 차체

의 횡방향 가속도로 충격에 대한 최대 가속도의 30~50%까지 감소함을 보이며, 그림 6에서 보이는 바와 같이 초기 충격 가진시 댐핑계수를 떨어뜨려 차체 가진을 최소화 하고 있음을 확인할 수 있다.

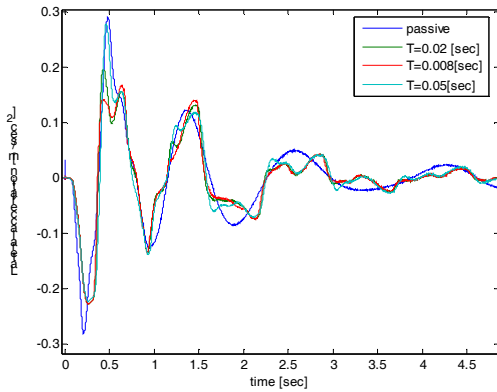


그림 5. 횡방향 충격에 대한 차량 횡방향 가속도 선도

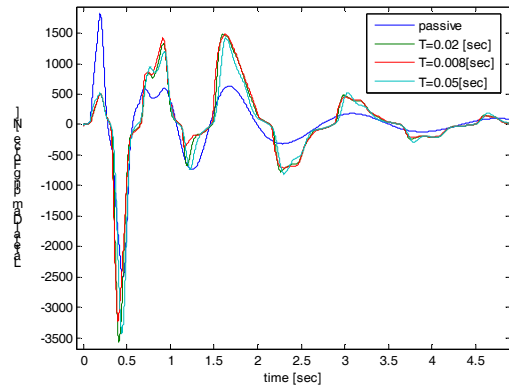


그림 6. 가변댐퍼 댐핑력 선도

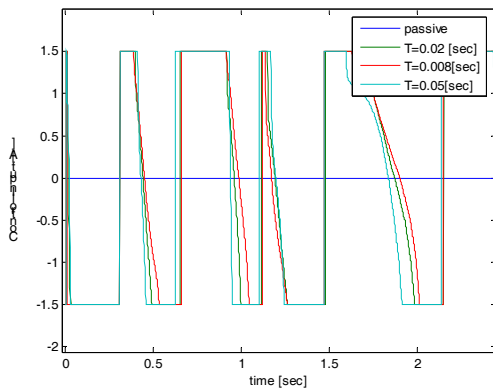


그림 7. 제어 입력 전류 신호

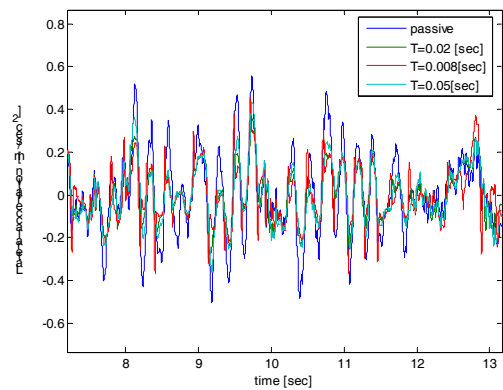


그림 8 track260의 차체 횡방향 가속도

그림 7에서와 같이 가변댐퍼의 응답속도가 제어 신호에 큰영향을 미치지 못하는 못하지만, 응답속도가 느릴수록 댐핑력 감소지령시 선행하여, 가변댐퍼 응답 시간 지연에 따른 보상하는 것을 관찰할 수 있었다. 그림 8은 track260 조건에 대한 시뮬레이션 결과이며, 가변댐퍼의 사양에 따라 각기 다른 성능을 보이고 있다.

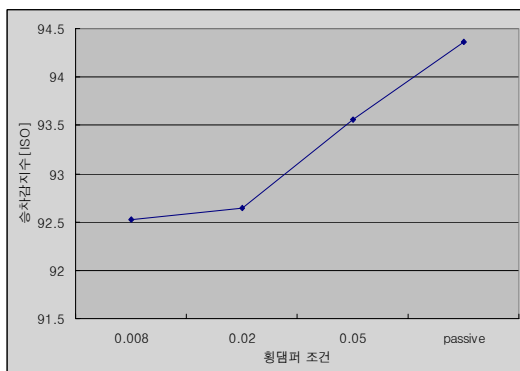


그림 9. 분기기 조건 가변댐퍼별 승차감 비교

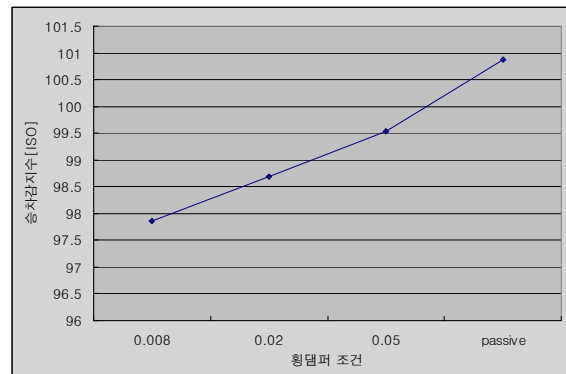


그림 10. track260 조건 가변댐퍼별 승차감 비교

그림 9와 10은 위 두 case에 대해 승차감 개선을 비교한 것으로 그림 9의 분기기 통과조건에 대한 준능동형 현가장치의 성능은 1.8[dB] 정도의 승차감 개선을 보이며 가변댐퍼의 응답속도는 시정수 0.02 [sec]이하에서 개선량이 수렴하는 것으로 보아 시정수 0.02[sec] 정도의 가변댐퍼로 충분할 것으로 판단된다. 하지만, 그림 10 track260의 경우 그 경향은 유사하나 고속조건에서 더욱 뚜렷한 승차감 개선-대략 2~3[dB]-을 확인할 수 있었으며, 가변댐퍼의 응답속도가 빠를수록 승차감 개선 정도가 수렴하지 않는 것으로 고속차량일수록 빠른 응답속도의 가변댐퍼가 요구됨을 알 수 있었다.

3.3 선로 조건에 대한 현가 시스템 성능 비교

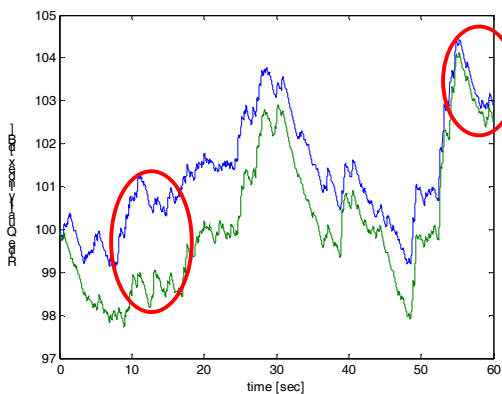


그림 11. 실시간 승차감 비교

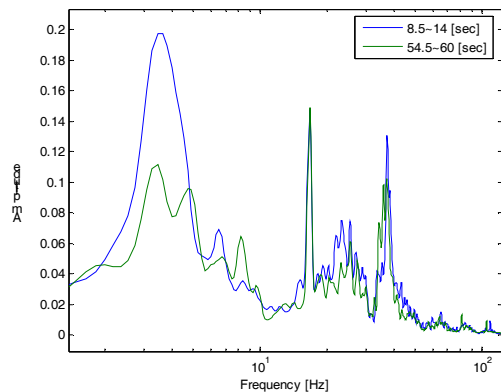


그림 12. 주행조건에 따른 가진 형태 비교

그림 8의 시험결과에서 준능동형 현가장치와 수동형 현가장치의 실시간 승차감 비교한 결과는 그림 11과 같다. 실시간 승차감 연산은 5초간 running r.m.s. method 방식으로 수행하였다. 그 결과 그림11에서와 같이 동일한 제어알고리즘에서 상당히 다른 승차감 지수의 개선이 감지되었다. 8.5~14초 사이 영역에서 2.5[dB]의 승차감 개선이 나타나는 반면, 54.5~60초 영역에서는 0.5[dB]의 개선만 나타난다. 그 원인을 가진원에서 찾았으며, 그림12에서와 같이 진동개선 효과가 끝 주파수 입력이 1~5[Hz] 주위에 집중될 때 준능동형 현가장치의 승차감 개선 성능이 높음을 알 수 있었다.

4. 결론

단순화한 차량 모델과 가변댐퍼의 모델로 LQG 제어를 설계하여, 차량 동특성 해석 프로그램을 활용 그 성능을 확인하였다. 그 결과 준능동형 현가장치의 설계시 가변댐퍼의 응답속도는 빠를수록 승차감 개선 효과를 높일 수 있으나, 선로 및 운행 조건에 따라 수렴의 정도에 차이가 있음을 고려하여 적절한 가변댐퍼의 사양 설정이 요구되고, 차량 가진 영역에 따라 준능동형 현가장치가 성능 개선 효과가 차이가 있으므로 준능동형 시스템 적용시 가진 특성 분석을 통해 예상 승차감개선에 대한 사전검토 요구된다.

참고문헌

- [1] D. Karnopp, M.J. Crosby, R.A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", ASME, Journal of Engineering for Industry, 1974 May, p619~626.
- [2] Kimiaki Sasaki, Masao Nagi, "A Lateral Semi-Active Suspension of Tilting Train", International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, p214~219
- [3] Masay Tahara, Kazunori Watanabe, Tomoyuki Endo, "Practical Use of an Active Suspension System for Railway Vehicles", International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, p225~ 228
- [4] Tatsuya Oishi, Teyduya Hayashi, Kimiaki Sasaki, Junichi Arai, "Development of Advanced Semi-active Suspension System For Shinkansen Vehicles", International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, p220~ 224
- [5] 이남진, 김철근, 김진태, "철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구", 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, 2004