

# 협궤 차량용 준능동형 현가 시스템 설계의 시험적 연구

## Experimental Study of Design for Semi-Active suspension system for Railway Vehicle with narrow gauge

이남진\*, 김철근\*, 남학기\*

Lee, Nam-Jin Kim, Chul-Gun Nam, Hak-Gi

---

### ABSTRACT

Traditional passive suspension has limitations to meet the required specifications of high level trains, and so Active suspension system is proposed to meet the requirements with active components which could be controlled by external signal for optimized behavior of train. Active suspension is to be divided by Full active suspension and Semi-active suspension whether using the external power source or not, and though the performance of Semi-Active suspension is worse than Full one. Semi-active suspension is focused with its effectiveness per cost.

Semi-Active suspension system consists of sensors, ECU (electrical control unit), and variable damper, which are to be designed to be fit for train system. And the software of ECU is to be developed for to be suited to its dynamic behavior through simulation result calculated by proven model.

In this experimental study, the hardware and software of semi-active suspension system is to be realized and its performance for improvement of ride quality to be confirmed through roller rig test.

---

### 1. 서론

고전적인 수동형 현가장치는 고급화 되는 차량의 요구사항을 만족시키기에 한계가 있으며, 차량의 상태에 따라 능동적으로 제어 가능한 요소의 필요성으로 능동형 현가장치가 제안되었다 [1,2]. 능동형 현가장치는 외부 에너지를 이용한 전능동형 현가장치와 외부 에너지 없이 자체 운동에너지를 활용한 준능동형 현가장치로 구분되고, 성능은 전능동형 현가장치에 못 미치지만 저가의 시스템 구성이 가능한 준능동형 현가장치는 현실성있는 시스템으로 주목받고 있다.[3]

준능동형 현가장치의 하드웨어는 센서, 제어기, 액츄에이터로 구성되며, 각각의 설계 사양은대상 차량에 맞게 검토되어야 한다. 그리고, 제어기에 적용할 시스템의 소프트웨어는 적용 알고리즘을 차량 및 하드웨어의 동특성에 적합토록 설계하고, 시스템 동특성 시뮬레이션을 통해 분석, 제어 변수의 시험시 보정을 최소화 할 수 개발되어야 한다.

본 연구는 준능동형 현가장치의 하드웨어 및 소프트웨어의 설계하고, 실제 시스템을 구현하였으며, Roller Rig 성능시험을 통해 준능동형 현가장치의 성능을 확인하였다.

---

\* ㈜로템 주행장치개발팀, 비회원

## 2. Hardware의 구성

### 2.1 차량

대차 차량은 협궤용 준고속 전동차 차량으로 기본 사양과 시스템 구성은 Table 1. 과 같으며, 대차 시스템의 주요 구성품은 용접구조물의 프레임과 코일스프링의 1차 현가장치, 에어스프링과 Anti-Roll bar, Bump stop, 그리고 횡방향 댐퍼로 구성된 2차 현가장치와 모노링크 방식의 추진장치이다. 준능동형 현가시스템은 2차 현가장치 중 횡방향 댐퍼에 적용하여 횡방향 승차감 지수를 향상 차량 능동형 현가장치 개발의 초점을 맞추도록 한다.

Key figure	Value
Track gauge	1067 mm
Max. axle load	14 ton
Max. speed	120 km/h
Wheel base	2300 mm
Wheel Diameter	860/780 mm

### 2.2 가변 댐퍼

선정된 가변 댐퍼는 내장 서보밸브 방식으로 입력 전류에 따라 댐핑력이 그림1. 과 같이 조절된다. 입력전류에 대해 서보밸브와 댐퍼내의 동특성으로 시간지연을 가지고 반응하며 그 동특성 해석 모델은 그림 과 같다. 기계적 인터페이스는 기존 수동 횡방향 댐퍼의 인터페이스를 그대로 따르도록 설계하여, 기존 차량의 설계 변경을 최소화 하였다.

$$A1 = A11 * 2,72^{A12 * i2} \quad \text{수식 (1)}$$

$$A2 = A21 * 2,72^{A22 * i2} \quad \text{수식 (2)}$$

$$Fd = k * (x1 - x2) \quad \text{수식 (3)}$$

$$\frac{1}{\omega i^2} * \frac{d^2 i2}{dt^2} + \frac{2 * Ri}{\omega i} * \frac{di2}{dt} + i2 = i1 \quad \text{수식 (4)}$$

$$\left( \frac{dx2}{dt} - \frac{dx3}{dt} \right) = A1 * Fd + A2 * Fd^3 \quad \text{수식 (5)}$$

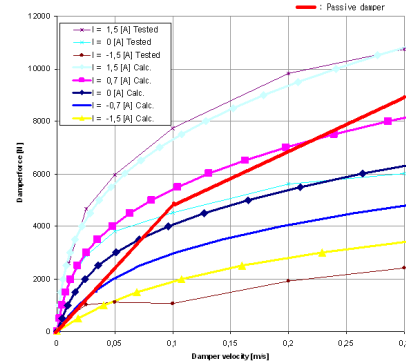


그림 1. 가변댐퍼 특성 곡선

### 2.3 제어기 및 센서

제어기의 구성은 그림 2와 같이 같으며 범용 PC를 활용한 하드웨어 구성을 위해 xPC Target/Matlab 모듈을 적용할 수 있도록 제어기 사양을 선정하였으며, 가변댐퍼의 출력 전류  $\pm 1.5[A]$  증폭을 위해 D/A converter 출력단에 Signal conditioner를 장착하였다.

센서는 2개의 가속도 센서를 차체와 대차의 횡방향으로 부착하고, 댐퍼의 스트로크와 댐퍼내 운동방향, 댐퍼 입력 전류, 그리고 횡방향 댐퍼의 브라켓에 스트레인 게이지를 부착 측정하였다.

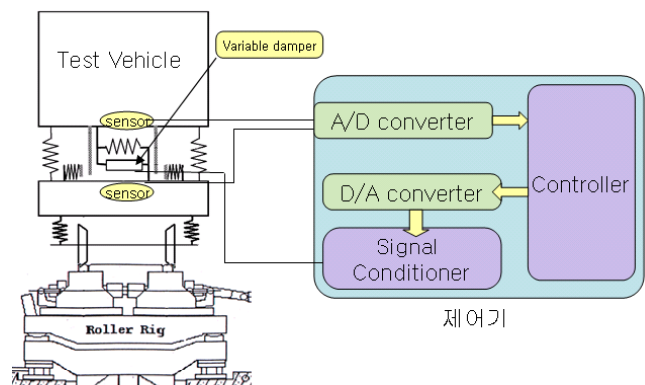


그림 2. 제어 시스템 구성 일반

### 3. 제어기 Software

#### 3.1 제어 알고리즘 구현

Sky hook 알고리즘은 가상의 공간과 차체사이 가상의 댐퍼가 있는 것으로 가정하고, 가상의 댐퍼에 작용하는 가상의 작용력을 차체와 대차의 사이에 있는 액츄에이터에 상사시켜 실제 힘이 작동하도록 하는 알고리즘이며, 그림 3은 Sky hook 알고리즘을 표현한 개념도이다.

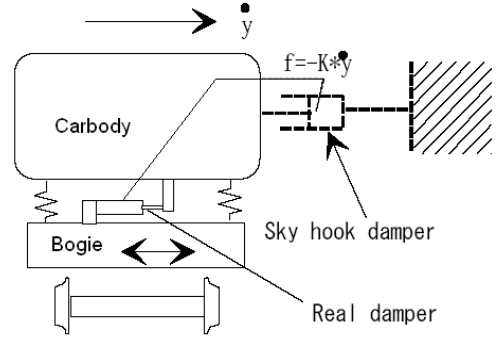


그림 3. Sky hook 알고리즘 개략도

제어 알고리즘의 개발단계에서 구현된 제어 알고리즘의 성능을 예측하기 위해 차체의 동특성 해석을 위한 Vampire와 제어 로직 구현을 위해 Simulink를 통합시뮬레이션(Co-Simulation)하여 성능예상 및 제어변수의 보정작업을 수행하였다.

실제 시험에 적용된 제어기는 수동현가장치와 제어기 입력 조건이 다른 3종류의 제어로직을 시험에 적용하였다. 시험에 적용된 3종류의 제어로직은 기본적으로 Sky hook 알고리즘을 따르며, 측정 센서의 수량과 종류에 따라 신호처리부의 일부가 수정된 것이다. 측정된 제어입력 신호는 대차와 차량의 횡방향 가속도, 가변댐퍼의 운동방향 신호, 그리고 가변댐퍼의 운동 변위 신호의 조합이다.

#### 3.2 통합 시뮬레이션

그림 4은 Simulink/Matlab의 모델링 파일로 Simulink/Matlab기반에서 DLL을 이용 Vampire와 같이 Co-Simulation을 수행하도록 하여, 차량 모델에서 있을 수 있는 오류를 상용 프로그램을 활용함으로써 최소화 할 수 있었다. 구현된 모델은 차량 모델부분(vampire interface), 승차감 연산부, 제어부, 가변댐퍼 모델링부로 나누어지며 실제 차량 시험에서는 차량과 가변댐퍼는 실제 시스템으로 대체된다.

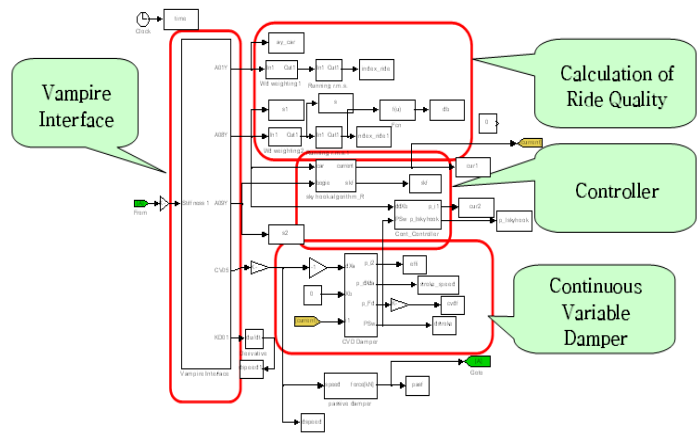


그림 4. 통합시뮬레이션 Simulink 모델

#### 3.3 ECU software 구현

2.3절에서 언급한 바와 같이 ECU 시스템은 xPC Target 모듈을 활용하여 그림 4에 있는 제어부를 수정없이 범용 PC를 기반으로 구현하였다. 이와 같이 Matlab/Simulink를 기반으로 한 통합제어기개발환경은 개발단계에서 있을 수 있는 오류를 최소화하고 작업 효율을 높이고, 범용 장비를 활용하여 개발 비용을 절감하는 효과가 있다.

## 4. Roller Rig 시험 및 결과

### 4.1 Roller Rig 시험

성능 시험에 적용된 Roller Rig 시험기의 기본 작동 개략도는 그림 5와 같으며, 적용하는 선로 불규칙도는 각 Roller의 수직 수평변위로 변환하여 적용된다. 본 성능 시험에서 차량 속도와 선로조건 조합으로 주행조건에 따른 수동댐퍼와 능동댐퍼의 차량 승차감에 미치는 영향을 관측하였으며, 그림 6,7은 성능 시험시 시스템 설치 사진이다. 그림 6에서 시험에 소요된 차체는 더미차량과 질량 블록을 이용하여, 설계차량의 물성치에 맞췄으며, 그림 7에서 시험 차량 외부에 시스템을 구성하여, 제어 및 모니터링을 수행하였다.

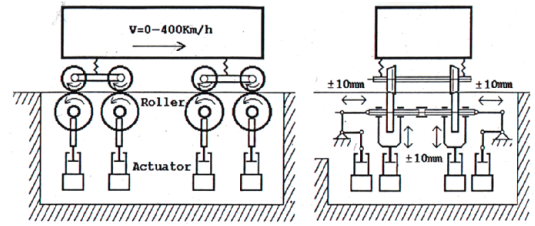


그림 5. Roller Rig시험기 구성도



그림 6. 능동형 현가장치가 장착된 시험차량

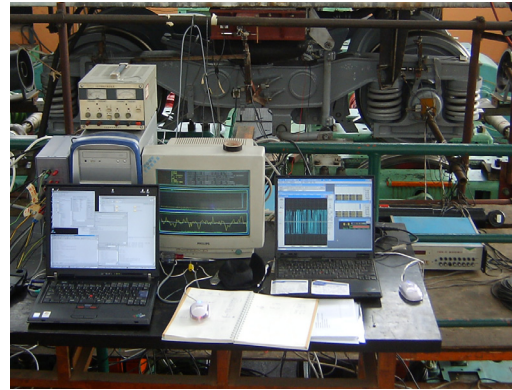


그림 7. 시험 중인 능동형 현가장치 제어기

### 4.2 시험 결과

그림 8,9는 track1(실제 선로의 불규칙도를 측정한 선로정보)에서 차량 속도 120km/h의 수동댐퍼와 능동댐퍼 시험결과를 비교한 것으로 그림9는 현가장치의 종류에 따라 차량의 횡방향 가속도를 측정된 값이다. 관측되는 바와 같이 Algorithm2가 가장 우수한 성능을 보이고 있으며, 그때의 가변댐퍼로 입력되는 내부 서보 밸브의 구동 전류는 그림 9와 같다.

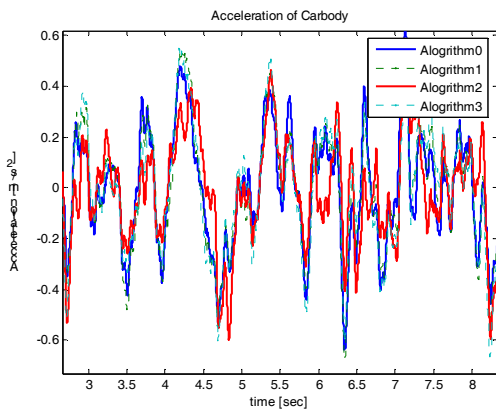


그림8. 측정된 차량의 횡방향 가속도

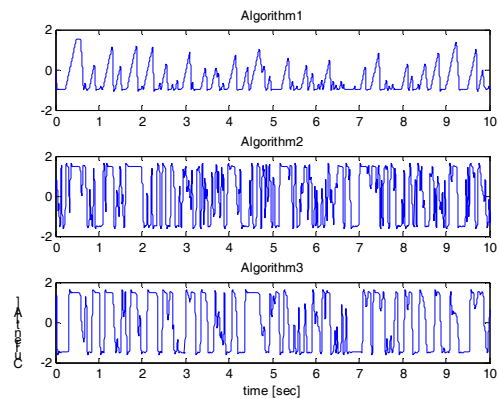


그림9. 측정된 제어 출력 신호

그림 10는 측정된 댐핑속도와 댐핑력의 관계를 표현한 것으로 제어되는 가변댐핑력은 수동댐퍼에 비해 넓은 영역에서 나타나고 있음을 확인 할 수 있으며, 그림 11는 입력 전류에 따른 가변 댐퍼의 응답성, 즉 가변되는 댐핑 계수의 제어성을 확인하기 위한 측정 결과로, 일정 입력 전류에 따른 각 댐퍼의 댐핑계수 확인하였으며, 이를 통해 가변댐퍼의 성능을 신뢰할 수 있었다.

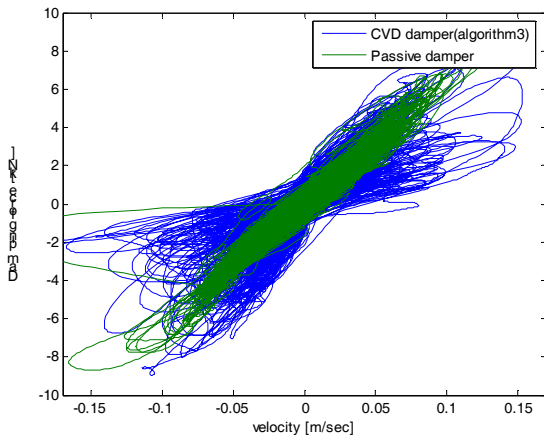


그림10. 측정된 댐핑력/댐핑속도 선도

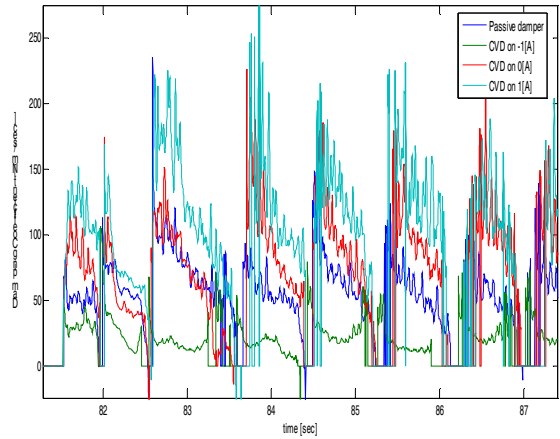


그림11. 입력신호에 따른 측정된 댐핑계수

## 5. 결론 및 향후 계획

Sky hook 알고리즘을 기반으로 한 준능동형 현가장치를 개발하였으며, 차량 Roller Rig 시험을 통해 준능동형 현가장치의 횡방향 승차감 개선을 시험적으로 확인할 수 있었다.

향후 지속적인 후속 연구를 통해 알고리즘을 수정, 보완하여 안정적인 상용화 제품이 될수 있도록 추진하고자 한다.

## 참고문헌

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Ralph Streiter, "Active Lateral Suspension for High Speed Trains", 2001
- [5] 이남진, 김철근, 김진태, "철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구", 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, 2004
- [6] 이남진, 김철근, 남학기, "협궤 차량용 준능동형 현가 시스템 설계", 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, 2005