

한국형고속열차 세미액티브 댐퍼 설치 방안

Installation of semi-active damper to HSR 350x

김상수* 김석원** 김종선*** 김기환**
Kim, Sang Soo Kim, Seog Won Kim, Jong Sun Kim, Ki Hwan

ABSTRACT

Korean Train Express (KTX) has opened to commercial traffic since 2004 at maximum speed 300km/h, and Korea High-speed Railway (HSR-350x) was developed by Korean government, several institutes, and related companies. HSR-350x is now being investigated its performance and tested at the high speed line. In 2004 December, HSR-350x was run over 350km/h and proved its running performance. In vehicle system, the faster the vehicle runs, the more vibration increases. To improve the riding comfort of high-speed trains, it needs to devise the vibration absorber. In this paper, we propose the installation of the semi-active damper to the power car of HSR 350x and present the specification and the damping characteristics.

1. 서론

고속열차 KTX가 개통된 지 2년이 지나, 그 수송량에 많은 업적을 세우고 있다. 고속화, 고급화된 고속열차에서 승객들은 더 높은 차량 안정성과 승차감을 요구하고 있다. 이러한 추세에 종래에 사용되던 수동적 진동제어 방식의 현가장치에서 고정밀도, 고성능화가 요구되고 있는 실정이다. 한편 승차감과 속도의 향상은 궤도 틀림 혹은 터널 통과 등에 의한 진동에 큰 영향을 받게 된다. 이러한 진동의 영향을 줄이기 위해 철도차량에 능동형 서스펜션을 이용한 현가장치의 검토가 이루어지고 있다. 철도 선진국인 일본에서는 이미 이러한 요구에 부응하여 철도차량용 준능동형 시스템 연구가 행해지고 있다[5].

한편 국내기술로 만들어진 한국형고속열차는 경부고속선로에서 시험 운행 중이며, 2004년에는 세계 4번째로 350km/h 증속시험에 성공하였다. 이러한 속도 향상과 더불어 객차의 승차감을 향상시키기 위한 기술도 요구되어 지고 있다. 본 논문에서는 한국형고속열차 운전실인 동력차의 승차감 향상을 위해 세미 액티브 댐퍼를 설치하는 방안을 검토하고자 한다.

2. 세미 액티브 댐퍼

2.1 세미 미액티브 서스펜션

종래의 수동형 차량 현가장치는 차체를 지지하는 스프링과 댐퍼의 절적한 선택으로 차체의 진동을 제어하는 방식을 사용하고 있다. 감쇠계수를 바꿈에 따라 차체의 가속도에 대한 주파수 응답이 오른쪽의

* 정희원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : sskim@krri.re.kr
Tel : (031)460-5625, Fax : (031)460-5649

** 한국철도시설공단

*** 한국철도기술연구원

그래프에 나타나 있다. 수동형 댐퍼는 감쇠계수를 작게 하면, 고주파 영역의 응답은 작아지지만, 공진 주파수에서의 응답이 커지게 된다. 반대로 감쇠계수를 크게 하면, 공진주파수의 응답은 작아지지만, 지상으로부터의 진동전달율이 커지게 됨에 따라 고주파의 응답이 커지게 된다.

1971년 Karnopp에 의해 Sky hook 시스템이 제안되었다. 그 구조는 그림1 하단에 있는 것과 같이 움직이지 않는 공간(실제로는 존재하지 않는 가상공간)에 댐퍼가 설치되어 있다. 이 경우 오른쪽에 있는 주파수응답과 같이 공진주파수, 고주파수 영역에서도 양호한 진동제어가 가능해진다

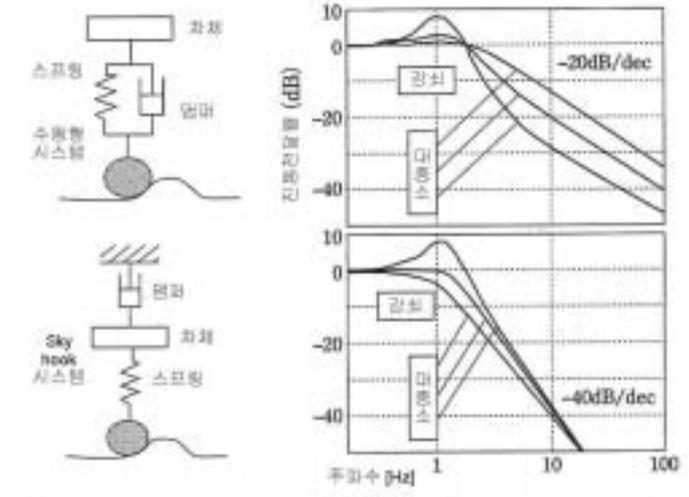


그림 1. 수동형 현가장치와 Sky hook 시스템 현가장치

2.2 고속열차용 세미 액티브 서스펜션

2.2.1 외국의 횡진동 제어 기술 현황

철도 선진국에서는 이미 액티브 및 세미 액티브 진동제어 기술을 연구, 개발하는 사례가 많다[3]. 현재 세미 액티브 댐퍼를 상업용 열차에 적용, 운행 하는 곳은 일본 신간선이 유일하다.

이러한 세미액티브 진동제어 시스템이 설치된 신간선 차량은 JR 토카이 700계, 서일본 500계, 동일본 E2계, 동일본 E3계, 구주시간선등에 사용되고 있다.

2.2.2 철도차량용 세미 액티브 서스펜션 원리

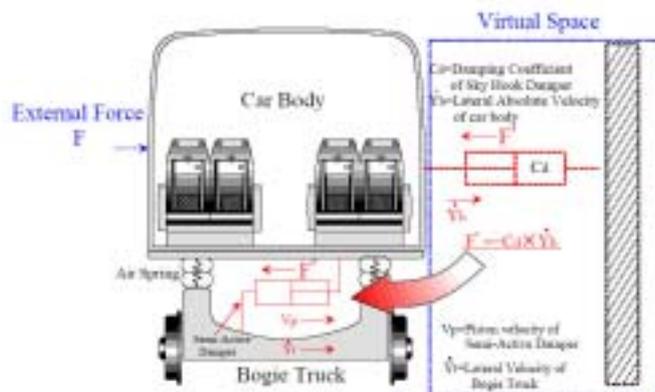


그림 2. 철도차량용 Sky hook 현가장치

상용화 된 세미액티브 댐퍼가 신간선에 설치된 구조를 그림2와 같이 나타낸다. 교행, 궤도 틀림등으로 인해 횡적 외력, F 가 차량이 작용하게 되면, 차체는 좌우로 진동이 발생하게 된다. 세미액티브 시스템에서 제안하는 제어기는 차체와 가상의 공간사이에 댐퍼를 설치, 차체의 절대속도, \dot{Y}_b 에 비례하는 감쇠력과 등가의 감쇠력 F 을 대차와 차체사이에 있는 댐퍼에서 발생토록 Sky hook 알고리즘을 이용한다.

이때 실제 설치된 댐퍼는 피스톤의 상대운동에 의한 감쇠력이 아닌, Sky hook 알고리즘의 감쇠력에 가까운 힘이 작용되어야 하므로, 감쇠계수가 변화될 수 있는 가변 감쇠댐퍼를 사용하여야 한다. 또한 이 알고리즘을 이용하기 위하여 차체에 가속도 센서를 설치하여 차체의 절대속도를 구하고 있다

2.2.3 세미 액티브 댐퍼

(1) 댐퍼의 개요

위 절에서 설명한 신간선용 서스펜션에 사용되는 댐퍼는 가변감쇠의 특성을 가져야 하며, 차량을 제어할 수 있을 정도의 감쇠력을 발생시켜야 한다. 현재 이 조건을 만족하여 상업용으로 쓰여지고 있는 일본 카야바 공업주식회사의 세미액티브 댐퍼의 외형과 구조를 그림 3에 나타낸다.

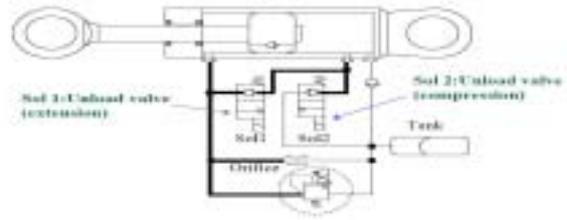


그림 3 세미액티브 댐퍼의 외형과 구조

피스톤이 움직일 때 유압을 조절하는 솔레노이드 밸브 2개, 릴리프 밸브 1개, 오일 탱크 1개로 구성되어 있다. 솔레노이드 밸브 1은 on이 되면, 실린더가 팽창할 때 무부하 감쇠력을 발생시키며, 솔레노이드 밸브 2는 on이 되면, 실린더가 압축될 때 무부하 감쇠력을 발생시킨다.

(2) 댐퍼 특성

세미 액티브 댐퍼의 파형 특성을 그림 4에 나타낸다. 그래프에서 파란 선은 절대속도, 붉은 선은 댐퍼가 발생하는 감쇠력, 검은 파선은 댐퍼의 피스톤 속도이다. 수동형 댐퍼일 경우, 댐퍼는 피스톤 속도에 비례하는 감쇠력을 발생하여야 하나, 절대속도와 피스톤 속도가 일치하는 경우, 즉

$$\text{sgn}(F' = C_d \times \dot{Y}_b) = \text{sgn}({}_s C V_p)$$

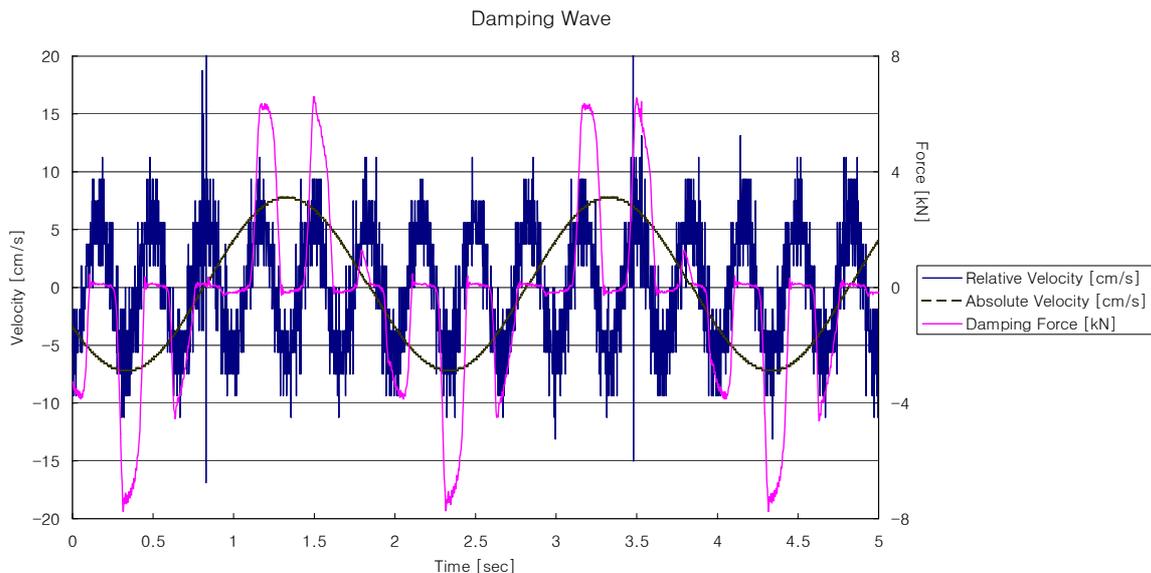


그림 4 세미 액티브 댐퍼 파형 특성

의 상태일 때만 세미액티브 댐퍼는 제어 알고리즘과 같은 방향의 감쇠력을 발생하며, 속도가 반대일 경우 감쇠력이 0에 가까운 것을 알 수 있다. 이 특성으로 이 댐퍼는 Sky hook 제어 알고리즘과 반대의

감쇠력을 발생시키는 것을 막을 수 있다.

3. 세미 액티브 댐퍼의 한국형고속열차 설치 방안

국내 기술로 제작된 한국형 고속열차가 경부 및 호남 노선에서 증속 및 신뢰성 시험 등이 이루어지고 있으며, 주행거리 14만 km 이상을 달성하고 있다. 한국형고속열차(HSR-350x)는 동력차2량, 동력객차2량, 객차3량 등 7량 1편성으로 구성되어있다. 이중 주행시 선두 혹은 후미에서 위치하게 되는 동력차에 세미액티브 댐퍼를 설치하는 방안을 검토하였다.

3.1 동력차 설치방안

그림5 와 같이 동력차 양단에 있는 동력차 대차와 차체사이에 설치하는 방안을 검토한다. 각각 대차와 차체 사이에 세미 액티브 댐퍼를 설치하고, 설치된 지점의 차체에 가속도 센서를 부착하여 차체의 속도를 구한다. 두 지점에서 차체를 제어하므로, 횡진동 외에 요잉도 제어할 수 있다. 현재 동력차에는 각 대차당 1대의 수동형 횡댐퍼가 설치되어 있으므로, 이 댐퍼를 세미액티브 댐퍼와 교체하는 방안을 검토하였다. 교체시 기존 댐퍼 사양으로 설계, 제작이 비교적 간편하고, 댐퍼 지지용 브라켓 재설계 필요성이 없다. 기존 댐퍼와 교체를 위한 세미 액티브 댐퍼의 사양은 표1과 같다. 세미액티브 제어를 위하여 댐퍼 2대, 가속도계2대, 제어기 1대로 시스템이 구성되며, 현재 한국형고속열차의 운행조건을 만족하도록 설계, 제작하도록 한다.

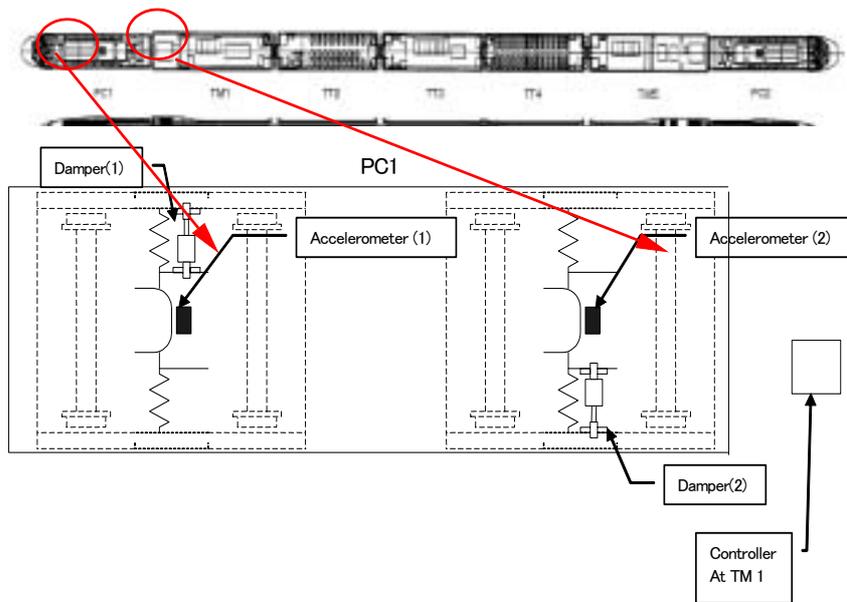


그림 5 세미 액티브 서스펜션 구성

표 1 한국형고속열차용 세미액티브 댐퍼 사양

항목	내용
구성품	세미 액티브 댐퍼 2기, 제어기 1대, 가속도 센서 2대
길이 및 스트로크	취부길이 : 529.9 mm, 스트로크 : 131.6mm
사용 온도	-20°C ~ 40°C
습도	댐퍼 : 5 ~ 100%, 제어기 : 5 ~ 85%, 센서 : 5 ~ 100%
방수	IP 54
내진동	댐퍼 : ±7G, 제어기 : ±0.7G, 센서 : ±0.7G
댐퍼 Resilient Joint 각도	Conical : Max. ±5°, Torsional : ±9.5°
Passive 제어시 댐퍼 특성	기준에 동력차 대차에 취부되어 있는 댐퍼 특성 유지

3.2 한국형고속열차용 세미액티브 댐퍼 특성

한국형고속열차에 설치하기 위한 댐퍼의 특성 조건을 그림 6과 같이 나타낸다. 설치 가능한 크기로 유압식

세미액티브 댐퍼를 제작할 때 발생 가능한 최대 감쇠력은 붉은 색으로, 최소 감쇠력은 녹색으로 표시되어 있다. 이 구역 안에서 sky hook 제어 알고리즘에 의해 감쇠력이 변화한다.

검은 선은 unload 조건시에 발생하게 되는 감쇠력이다. 이론상으로는 0이 되어야 하나, 유압 댐퍼의 구조상 부가될 수밖에 없다. 이 세미 액티브 댐퍼는 수동형 제어시 기준에 설치되었던 수동형 댐퍼의 특성을 유지해야 열차의 주행 안정성이 보장된다. 그림에서 보라색이 수동형 제어시의 댐퍼 특성이며, 이는 기존 댐퍼 특성 범위를 만족한다.

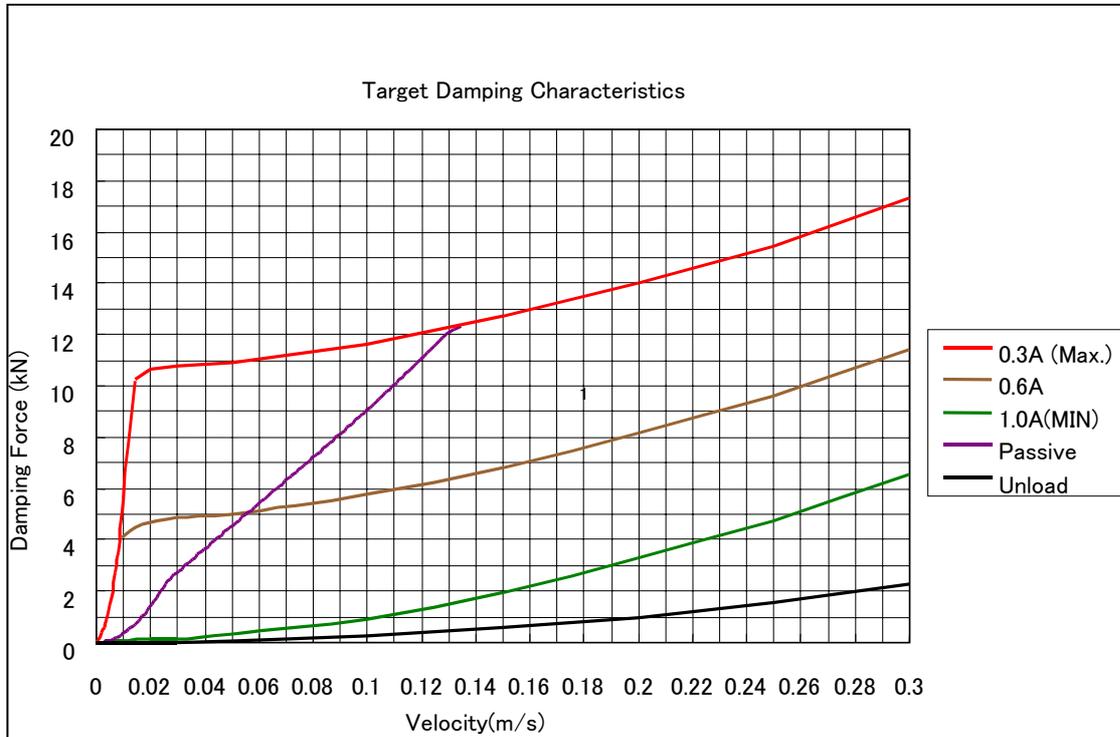


그림6 한국형고속열차용 세미 액티브 댐퍼 특성 곡선

4. 결론

본 논문에서는 한국형고속열차의 승차감 향상을 위해 횡댐퍼 설치 방안을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 동력차에 세미액티브 제어를 위한 댐퍼의 설치 방안을 검토하여, 사양을 제시하였다.
- 세미액티브 댐퍼 특성을 구하였으며, 열차 설치를 위한 조건을 만족함을 알 수 있었다.

향후 과제로는 본 연구의 결과로 얻어진 사양과 댐퍼특성을 만족하는 세미 액티브 댐퍼를 제작, 설계하여 한국형고속열차에 설치하여 시운전 시험을 통한 승차감 향상 효과를 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업으로 지원된 “고속철도기술개발사업 통합 및 총괄” 과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) 김상수, 김영국, 박찬경, 김종선, 김기환, 2006, “한국형고속열차 횡방향 진동제어”, 한국소음진동 공학회 춘계학술대회논문집
- (2) Karnopp, D. C., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, “Vibration Control using Semi-Active Force Generators”, ASME Journal of Engineering for industry, Vol. 96, No. 2, pp. 619~626
- (3) Tatsuya OISHI, Tetsuya HAYASHI, Kimiaki SASAKI and Junichi ARAI, 2003, “Development

- of Advanced Semi-Active Suspension System for Shinkansen Vehicles”, International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, pp. 220 ~ 224
- (4) Kimiaki SASAKI and Masao NAGAI, 2003, “A Lateral Semi-Active Suspension of Tilting Train”, International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, pp. 214 ~ 219
- (5) 佐々木 君章, 1999, “乗心地向上のための制御技術”, 鉄道総研報告, Vol. 11, No. 4, pp. 1 ~ 6
- (6) 김상수 등, 2005, “일본 신간선의 진동제어 기술 동향”, 춘계학술대회논문집, pp. 440 ~ 443