

# 한국형고속열차 세미액티브 진동 제어

## Semi-Active Vibration Control for HSR 350x

김 상 수\* · 김 영 국\*\* · 김 기 환\*\*

Sang-Soo Kim, Young-Kuk Kim, and Ki-Hwan Kim

**Key Words** : High-speed Railway(고속열차), Damper(댐퍼), Vibration(진동), Suspension(현가장치)

### ABSTRACT

To improve the riding comfort and to increase the speed of high-speed railway, it needs active suspension system for railway more and more. In Korea, Korean Train Express (KTX) was opened to commercial traffic 3years ago. Korea High-speed Railway (HSR 350x) was developed and succeeded 350km/h test run by Korean government and several related institute. With the increase of the speed, the vibration control of the high-speed railway becomes important to improve high ride quality. To meet this request, the authors suggest the installation of lateral semi-active damper to the power car of HSR 350x. The result shows better performance.

### 기호설명

$F$  : 외력  
 $\dot{Y}_b$  : 차체 절대속도  
 $F^s$  : Sky hook 감쇠력  
 $V_b$  : 오일 댐퍼 속도  
 $C_d$  : Sky hook 댐퍼 감쇠계수  
KP : 열차 선로의 킬로 정

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 객차의 승차감 향상을 위해 횡방향 댐퍼의 최적 설계를 제시하고, 더 높은 승차감 향상을 위해 세미 액티브 댐퍼를 설치하는 방안을 검토하고자 한다.

### 1. 서론

2002년 고속열차 KTX가 개통되어, 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 있으며, 철도차량 회사인 로템에서도 철도차량용 능동형 시스템 연구가 행해지고 있다[1].

### 2. 고속열차 세미액티브 횡진동 진동 제어 시스템

#### 2.1 세미액티브 서스펜션

종래의 수동형 차량 현가장치는 차체를 지지하는 스프링과 댐퍼의 적절한 선택으로 차체의 진동을 제어하는 방식을 사용하고 있다. 감쇠계수의 변화에 따른 차체의 가속도에 대한 주파수 응답이 그림 1의 그래프에 나타나 있다. 수동형 댐퍼는 감쇠계수를 작게 하면, 고주파 영역의 응답은 작아지지만, 공진 주파수에서의 응답이 커지게 된다. 반대로 감쇠계수를 크게 하면, 공진주파수에서의 응답은 작아지지만, 정상으로부터의 진동전달율이 커지게 됨에 따라 고주파에서의 응답이 커지게 된다.

1971년 Karnopp에 의해 Sky hook 시스템이 제안되었다[2]. 그 구조는 그림 1 하단에 있는 것과 같이 움직이지 않는 공간(실제로는 존재하지 않는 가상공간)에 댐퍼가 설치

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

\*\* 한국철도기술연구원

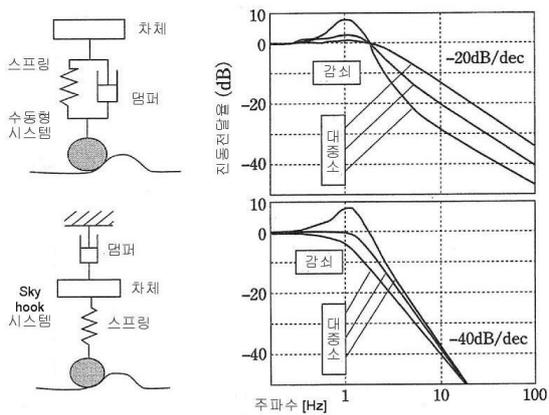


그림 1. 수동형 현가장치와 Sky hook 시스템 현가장치  
되어 있다. 이 경우 오른쪽에 있는 주파수응답과 같이 공진 주파수, 고주파수 영역에서도 양호한 진동제어가 가능해진다.

Sky hook시스템에 설치된 가상 댐퍼는 지면의 요철과는 상관없이 차체의 진동속도에 비례하는 감쇠력을 발생하게 된다. 실제 시스템에서는 차체와 차륜 사이에 댐퍼가 설치되게 되고, 이 댐퍼로 차체 진동속도에 비례되는 감쇠력을 발생시키면 Sky hook 제어가 가능하게 된다. 이 때 댐퍼의 감쇠계수를 자유롭게 변화시켜 Sky hook 댐퍼의 제어력이 가깝게 발생시키는 진동제어법이 세미 액티브 서스펜션이 된다.

## 2.2 고속열차용 세미 액티브 서스펜션

### 2.2.1 철도차량용 세미 액티브 서스펜션 원리

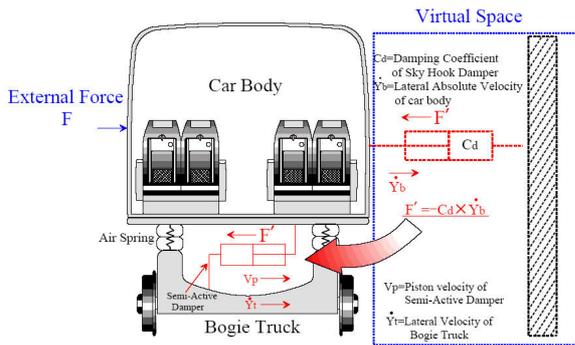


그림 2. 철도차량용 Sky hook 현가장치

상용화 된 세미액티브 댐퍼가 신간선에 설치된 구조를 그림2와 같이 나타낸다. 교행, 궤도 틀림등으로 인해 횡적 외력, F가 차량이 작용하게 되면, 차체는 좌우로 진동이 발생하게 된다. 세미액티브 시스템에서 제한하는 제어기는 차체와 가상의 공간사이에 댐퍼를 설치, 차체의 절대속도,

$\dot{Y}_b$ 에 비례하는 감쇠력과 증가의 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 감쇠 댐퍼를 사용하여야 한다. 또한 이 알고리즘을 이용하기 위하여 차체에 가속도 센서를 설치하여 차체의 절대속도를 구하고 있다

### 2.2.2 세미 액티브 댐퍼

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 세미액티브 댐퍼의 구조와 외형을 그림 3에 나타낸다.

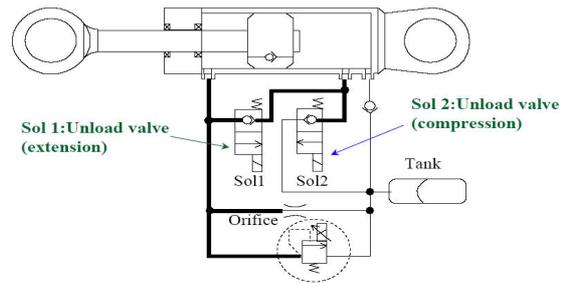


그림 3 세미액티브 댐퍼의 구조 및 외형

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.

### 2.2.1 고속철도차량의 횡진동 제어 현황

#### 가. 외국의 횡진동 제어 현황

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

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

#### 나. 한국의 횡진동 제어 현황

한국에서는 영업차량에 횡진동 제어를 위한 세미 액티브 댐퍼를 설치하고 있는 차량은 아직 실현되고 있지 않다. 현재 운행 중인 한국고속열차(KTX)에서는 차량의 안정성을 위해 그림 4와 같이 객차대차에 수동형 횡댐퍼를 대차와 차체 사이에 연결하여 상대속도에 의한 감쇠력을 발생하고 있다.



그림 4. KTX 횡방향 수동 댐퍼

한국형고속열차의 경우에도 부수대차에는 횡방향 댐퍼가 설치되어 있지 않으며, 횡방향 댐퍼의 최적 설계 방법이 검토되었다.[7]

### 3. 한국형 고속열차 횡방향 진동제어

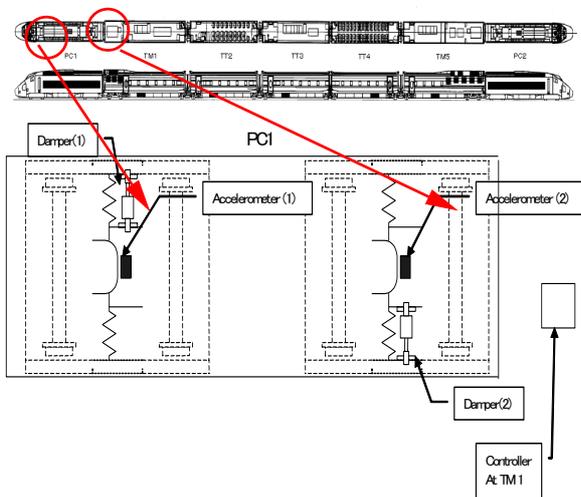


그림 5 세미 액티브 서스펜션 구성

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 설치하여 횡방향 진동을 제어한다.

### 3.1 세미 액티브 댐퍼의 동력차 설치

그림5 와 같이 동력차 양단에 있는 동력차 대차와 차체 사이에 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 교체하도록 하였다. 본 방식은 교체시 기존 댐퍼 사양으로 설계, 제작이 비교적 간편하고, 댐퍼 지지용 브라켓 재설계 필요성이 없다.

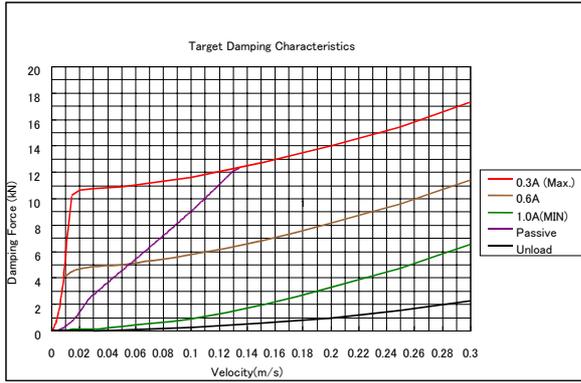
열차의 동력차를 편성분리하고, 대차와 차체를 분리하여 제작된 댐퍼를 기존의 댐퍼와 교체하였다. 새로 설치된 댐퍼의 외형이 그림 6에 나타난다.



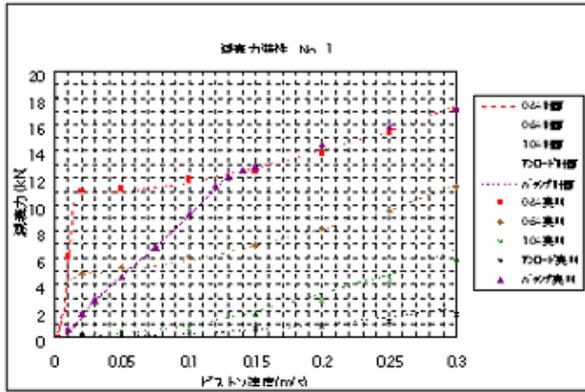
그림 6 한국형고속열차에 설치된 세미액티브 댐퍼

각 대차당 1개씩 총 2대의 댐퍼외에 세미액티브 제어를 위하여, 가속도계2대가 차체에, 제어기 1대가 차량 실내로 설치되며 시스템이 구성된다. 각 구성품은 현재 한국형고속열차의 운행조건을 만족하도록 설계, 제작되었다.

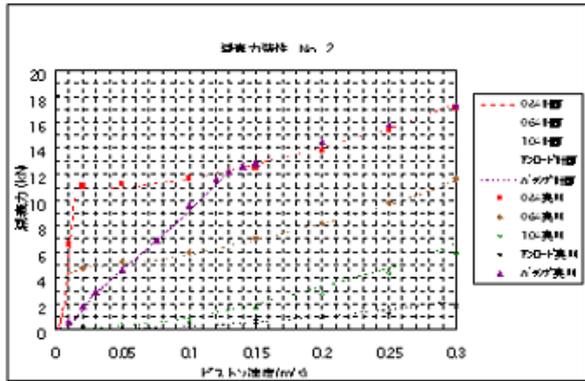
세미액티브 댐퍼의 동작은 세미액티브 모드와 패시브 모드로 이루어진다. 이 중 패시브 모드는 고정된 감쇠계수로 진동을 제어하며, 기존의 취부되었던 횡댐퍼의 감쇠계수를 추종하도록 설계, 제작하였다. 설계된 댐퍼의 특성 곡선과 제작된 댐퍼의 특성 곡선이 그림 7에 나타나 있다. 1번과 2번의 댐퍼 특성이 설계와 일치함을 알 수 있다.



(a) 설계 댐퍼 특성



(b) 1번 댐퍼의 특성 곡선



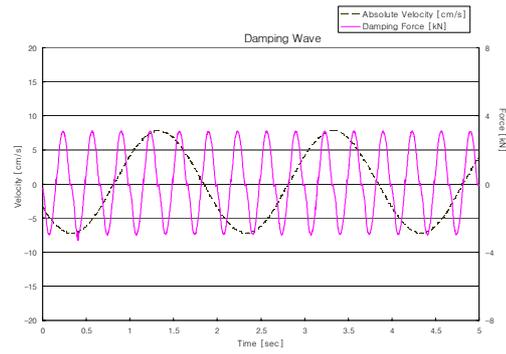
(c) 2번 댐퍼의 특성 곡선

그림 7. 세미 액티브 댐퍼의 특성곡선

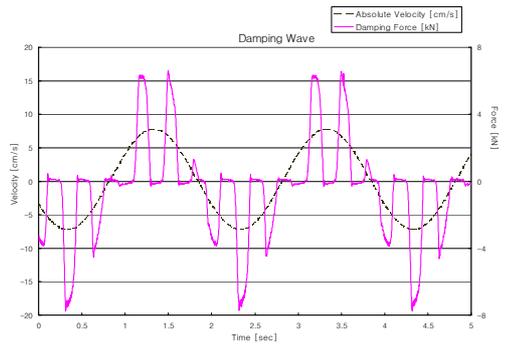
### 3.2 세미 액티브 제어

#### 3.2.1 정적 시험

2.2절에서 언급되었듯 본 댐퍼는 고속철도차량에 탑재되었을 시 차체와 대차의 상대 속도가 아닌 차체의 절대속도에 비례하는 감쇠력이 발생되어야 한다. 제작된 댐퍼로 가진을 시키고 가상 차체 속도를 제어기에 입력하여 댐퍼의 감쇠력을 시험하였다. 시험 결과를 그림 8에 나타내었다.



(a) 비제어시



(b) 세미액티브 제어시

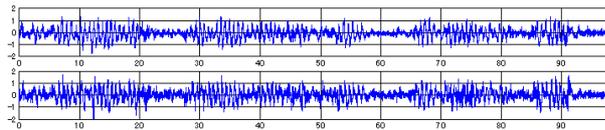
그림 8 댐퍼의 제어 시험

(a)는 수동형 모드이고, (b)는 세미액티브 모드의 시험 결과이며, 점선이 제어기에 입력되는 차체의 속도, 실선이 상대속도 즉 댐퍼가 발생하는 감쇠력을 의미한다. 수동형 모드(비제어시)에는 차체의 속도와 관계없이 상대속도에 의하여 댐퍼가 작동하고 있다. 세미액티브 제어를 실시하게 되면, 댐퍼의 속도가 차체의 속도가 같은 방향의 경우만이 감쇠력이 발생하며, 차체의 속도와 댐퍼의 속도가 반대인 경우에는 댐퍼의 감쇠력이 최소임을 알 수 있다.

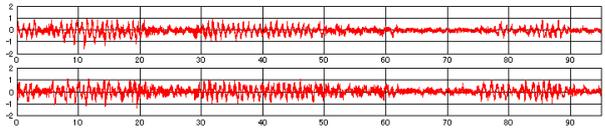
#### 3.2.2 동적 시험

한국형고속열차에 설치된 세미액티브 서스펜션을 경부고속 선로에서 실차 제어 시험을 실시하였다. 시험은 시스템이 설치된 동력차가 주행시 선두가 되도록 하행 제어를 수행하였다. 구간은 KP193~200이며, 주행속도가 300km/h이 되도록 열차를 조정하며 시험을 실시하였다.

최초 하행시 세미액티브 시스템에서 passive 제어를 실시하고, 같은 지점을 2번째 반복 하행 주행시 세미 액티브 제어를 실시하였다. 시험 결과가 그림 9에 나타나 있다. y축이 차체에 설치된 2기의 가속도의 응답으로 각각 설치된 댐퍼 위치에서의 차체 가속도 응답이다. (a)가 기존 댐퍼의 제어시(수동형 제어)이며 (b)가 세미액티브 제어의 결과이다. 시간 응답에서 알 수 있듯이 세미액티브 제어를 수행함으로써 차체 횡가속도가 감소되는 효과를 얻을 수 있다.



(a) 수동형 제어



(b) 세미액티브 제어

그림 9 열차의 제어 시험

#### 4. 결론

본 논문은 한국형고속열차에 세미액티브 댐퍼를 설치함으로써 국내 최초로 열차의 세미액티브 제어를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 한국형고속열차의 시스템에 적합한 세미액티브 댐퍼의 사양을 결정하고 제작하였다.
- 열차의 동력차에 세미액티브 시스템을 구축하고, 본선 고속영업선로에서 제어 시험을 실시하였다.
- 세미액티브 제어를 실시함으로써 수동형 댐퍼보다 횡방향 진동을 줄일 수 있었다.

향후에는 다양한 조건의 제어 시험을 실시하여 열차의 제어 특성을 밝히고자 한다.

#### 후 기

이 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업의 “고속철도기술개발 통합 및 총괄” 과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 이남진 등, 2004, “철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구”, 추계학술대회 논문집, 한국철도학회, CD 논문집
- (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) 김상수, 김석원, 김종선, 김기환, 2006, “한국형고속열

차 세미액티브 댐퍼 설치 방안”, 추계학술대회 논문집, 한국철도학회, CD논문집

(5) 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

(6) 佐々木 君章, 1999, “乗心地向上のための制御技術”, 鐵道總研報告, Vol. 11, No. 4, pp. 1~6

(7) Sang-Soo KIM and Chankyong Park, 2006, “Design for Lateral Vibration Damper of HSR 350x”, The 8th International Conference on Motion and Vibration Control