

# 고속열차의 횡진동 제어 특성 연구

## A Study on Lateral Vibration Control Method of High-speed Train

김상수\*      김기환\*\*      박춘수\*\*      목진용\*\*      최성훈\*\*  
Kim, Sang-Soo      Kim, Ki-Hwan      Park, Choonsoo      Mok, Jinyong      Choi, Sunghoon

---

### ABSTRACT

As the railway becomes higher, the reliable stability and riding comfort of higher railway are required. To improve the riding comfort of high-speed trains, it is very helpful to use active suspension system for railway. In Japan, the high-speed train, Shinkansen has adopted semi-active suspension system and now it is running in the main trunk. In this paper, the authors introduce several technical trends of vibration control methods of Japanese Shinkansen. And the installation of semi-active suspension to HSR 350x and the test result of test run on the Kyoung-Bu high speed line are also explained. After development of HSR 350x, new R&D national project of high speed train is progressed by Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs. This project is the development of Electric Multiple Unit of high speed train with 400km/h of maximum test speed. These result would be helpful to progress next generation high speed project.

---

### 1. 서론

2004년부터 고속철도(KTX)가 상용화 되었고, 국내 최초의 고속시험열차인 HSR350x의 개발 기술을 이용하여 KTX II가 제작되고 있다. 우리나라의 철도기술 연구는 보다 빠르고, 고도의 기술을 개발하기 위하여 2007년 중반부터 최고시험속도 400km/h, 운영속도 350km/h급 차세대고속열차 Hanvit 400 개발에 착수하였다.

한편 열차가 고속화가 될수록 진동을 제어하여 승차감을 향상시키는 기술이 필요하게 된다. 본 논문에서는 일본 JR동일본에서 고속열차 횡진동 제어 장치를 사용하여 승차감을 향상 시킨 사례를 조사하고, 한국형고속열차에서 세미 액티브 댐퍼를 이용하여 차량의 진동을 제어한 특징을 분석한다. 본 연구에서 얻어진 자료를 국내 최초 400km/h 급 고속열차 개발 등에 활용하고자 한다.

### 2. 일본 신간선의 횡진동 제어 현황

#### 2.1 일본의 액티브 진동제어 시스템 탑재차량

일본에서는 횡진동 제어를 위하여 세미액티브 및 액티브 진동제어 현가장치를 대부분 신간선 차량에 탑재하고 있으며 대표적인 탑재 차량의 현황과 양산수는 다음과 같다.

##### (1) JR 토카이 700계 신간선

- ① 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 특실, 판토타그래프 장착차량 등 7량
- ② 생산수 : 1998년이후 54편성 생산 이 중 세미액티브 차량 378량

##### (2) JR 서일본 500계 신간선

---

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

\*\* 한국철도기술연구원 차세대고속철도기술개발사업단

- ① 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 특실, 판토그래프 장착차량등 7량
- ② 생산수 : 1995년 이후 9편성 생산, 이중 세미액티브 차량 63량

(3) JR 서일본 700E계 신간선 (레일스타)

- ① 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 판토그래프 장착차량등 4량
- ② 생산수 : 1999년 이후 8편성 생산, 이중 세미액티브 차량 32량

(4) JR동일본E2계 신간선

- ① 액티브 장착차량 : 선두차량, 특실
- ② 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 특실을 제외한 전량
- ③ 생산수 : 2002년 이후 21편성 생산, 이중 세미액티브 차량 147량

(5) JR동일본E3계 신간선

- ① 액티브 장착차량 : 선두차량
- ② 세미액티브 장착차량 : 선두차량을 제외한 전 차량
- ③ 생산수 : 2002년 이후 7편성 제작, 이중 세미액티브 차량 28량

(6) JR구주 구주신간선

- ① 세미액티브 장착차량 : 전 차량
- ② 생산수 : 5편성 생산(30량)

(7) JR구주 구주신간선

- ① 세미액티브 장착차량 : 16량 전 차량
- ② 생산수 : 총 54편성

2.2 JR동일본 신간선의 액티브 진동제어

(1) E2 및 E3계의 액티브 서스펜션

액티브 진동제어는 에너지를 사용하는 시스템이므로, 공기압, 유압 혹은 전기등의 에너지를 선택해야 할 필요가 있다. JR동일본은 E2 및 E3계 신간선 액티브서스펜션을 위하여 실적, 가격, 유지보수 등의 종합 검토를 한 후, 공기압 서스펜션을 채택하였다. 액티브 서스펜션은 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 제어기, 공기 서버 액추에이터, 차체진동 가속도 센서, 보조댐퍼 등으로 구성되어 있다. 특이한 점은 서보 액추에이터와 보조댐퍼를 동시에 사용하여, 저주파 진동은 액추에이터로 제어하고, 고주파 진동은 수동형 보조댐퍼를 사용함으로써 넓은 주파수 영역에서 진동이 감소되는 효과를 이용한다. 전자 밸브는 공기탱크로부터의 공기 공급을 완전히 차단하는 기능을 하며, 제어가 불가능할 때 혹은 시스템이 정상적으로 작동하지 않을 시 제어를 중단시키는 역할을 한다.

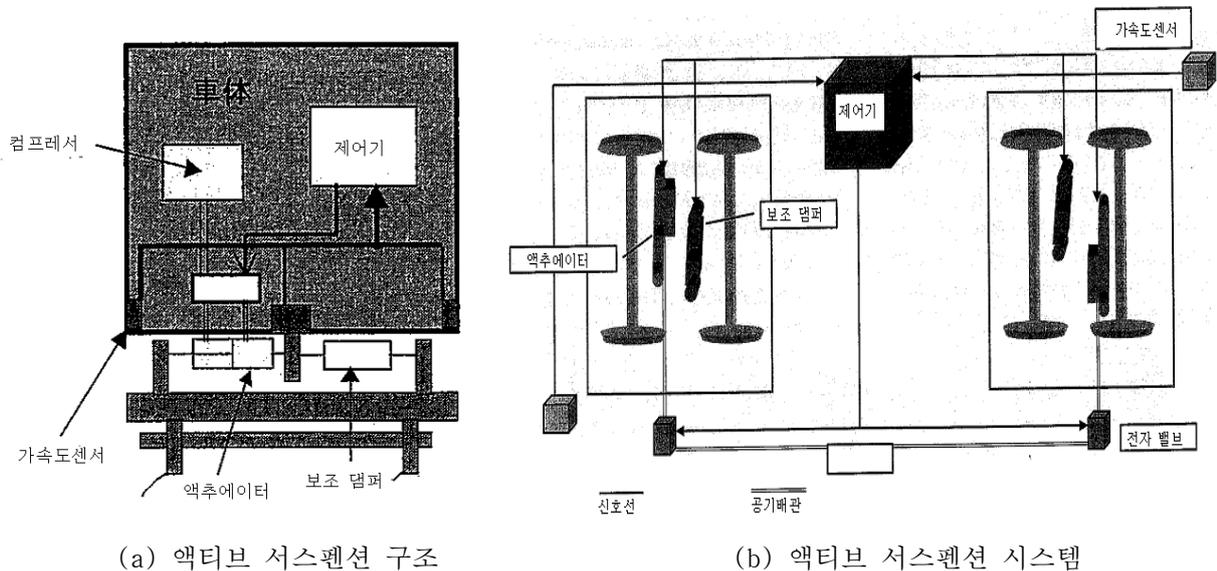


그림1. E2 및 E3 신간선의 액티브 서스펜션 구성

E2 및 E3 신간선의 진동제어 시스템은 차체 요잉 성분과 차체 좌우 병진 모드, 차체 롤링 모드를 그 대상으로 하고 있다. 제어방식은 주파수 영역에서 비례함수를 사용하는 현대제어이론의 H $\infty$ 제어를 채택하고 있다. 본 진동제어를 사용하여, 수동형 진동제어보다 5~9dB의 진동제어 효과를 얻게 되었다.

(2) FASTECH 360의 액티브 서스펜션

E2 및 E3계의 액티브 서스펜션 이후 JR동일본은 차체의 미세한 변형에 의한 탄성진동 및 강성진동 등의 차체 진동의 저감, 구배가 변화하는 지점등에서 발생하는 상하진동의 제어 등이 360km/h이상의 고속열차에서 보완해야 할 점으로 판단하였다. 방진성능이 향상된 고속신간선용 대차, 고성능진동제어 장치의 개발을 추진하게 되었고, 횡진동 제어 특히 1Hz 부근의 진동에 대하여 진동제어가 가능하도록 개발된 액티브 서스펜션이 신간선고속시험열차(FASTECH 360)에 채택되어 탑재되었다.

진동 제어장치의 구조는 E2및 E3 신간선의 경우와 유사하나, 공기압을 사용하지 않고, 2종류의 전자식 액추에이터를 사용하고 있다. 그 결과 다른 액티브 진동 제어용 액추에이터보다 동작지령에 대한 응답성이 빠르고, 진동제어 가능 주파수 영역이 넓은 특징을 갖고 있다.



그림1. FASTECH 360 대차의 예 (A&B Type)

3. 한국형고속열차 횡방향 진동제어

본 논문에서는 국내 기술로 제작된 한국형 고속열차(HSR 350x)에 진동제어를 위하여 세미 액티브 퍼를 설치하여 시험을 실시한다. 한국형고속열차는 현재 경부고속선로에서 성능확인 시험 및 신뢰성 시험 등이 이루어지고 있으며, 주행거리 21만 km 이상을 달성하고 있다. 한국형고속열차(HSR-350x)는 동력차2량, 동력객차2량, 객차3량 등 7량 1편성으로 구성되어있다. 이중 주행시 선두 혹은 후미에서 위치하게 되는 동력차(PC1)에 세미액티브 댐퍼를 설치하여 횡방향 진동을 제어한다.

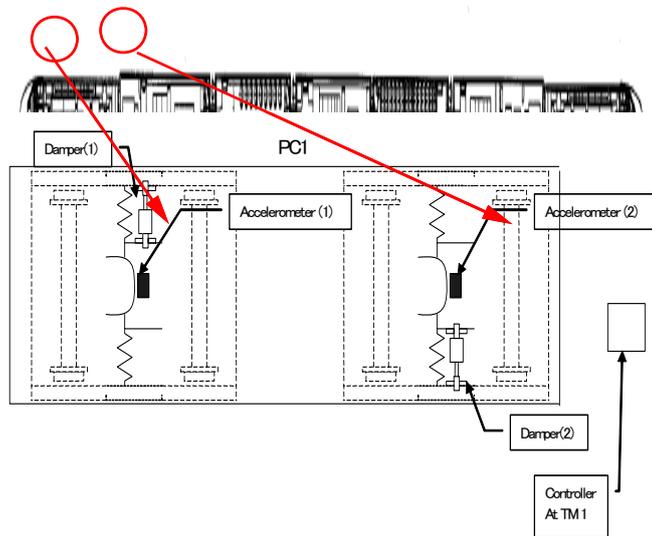


그림3 세미 액티브 서스펜션 구성

3.1 세미 액티브 댐퍼의 동력차 설치

횡댐퍼는 대차와 차체 사이에서 작용하는 진동을 제어하는 요소이므로, 그림3과 같이 동력차 양단에 있는 동력차 대차와 차체사이에 설치하는 방안을 검토한다. 동력차에는 각 대차당 1대의 수동형 횡댐퍼가 설치되어 있으므로, 이 수동형 댐퍼를 세미액티브 댐퍼와 교체하도록 하였다. 기존에 설치된 댐퍼의 취부 공간과 댐퍼 지지용 브라켓에 설치가 가능하도록 각각 설계, 제작토록 하였다. 세미 액티브 댐퍼는 일본 신간선에 공급 실적이 있는 일본 KYB사에서 제작하고, 각 댐퍼에 압력계와 변위계를 설치

하여 댐퍼의 작동을 확인토록 하였다. 또한 세미액티브 댐퍼의 동작은 세미액티브 모드와 수동형 모드로 이루어진다. 이 중 수동형 모드는 고정된 감쇠계수로 진동을 제어하며, 그 값은 기존에 취부되었던 횡댐퍼의 감쇠계수를 추종하도록 설계, 제작하였다. 제작된 세미 액티브 댐퍼를 동력대차와 차체에 설치하고, 설치된 지점의 차체에 가속도 센서를 부착하여 차체의 속도를 구하토록 하였다. 두 지점에서 차체를 제어하므로, 횡진동 외에 요잉도 제어할 수 있다.

세미 액티브 댐퍼는 2007년 4월 창원 로템 공장에서 공장점검시 설치되었다. 설치를 위하여 열차의 동력차를 편성분리하고, 크레인을 이용하여 대차와 차체를 분리하여 제작된 댐퍼를 기존의 댐퍼와 교체하였다. 새로 설치된 댐퍼의 외형이 그림 4에 나타난다.

각 대차당 1개씩 총 2대의 댐퍼외에 세미액티브 제어를 위하여, 가속도계2대가 차체에 부착되었다. 댐퍼의 제어기는 차량내 동력객차(TM1) 실내로 설치되며 시스템이 완성되었고, 댐퍼 및 가속도계로부터의 케이블로 동력객차로 설치되었다. 각 구성품은 현재 한국형고속열차의 운행조건을 만족하도록 설계, 제작되었다.



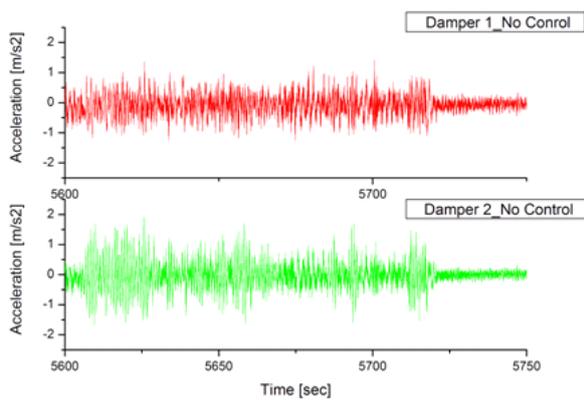
그림4 세미 액티브 서스펜션 설치

### 3.2 세미 액티브 제어 실험

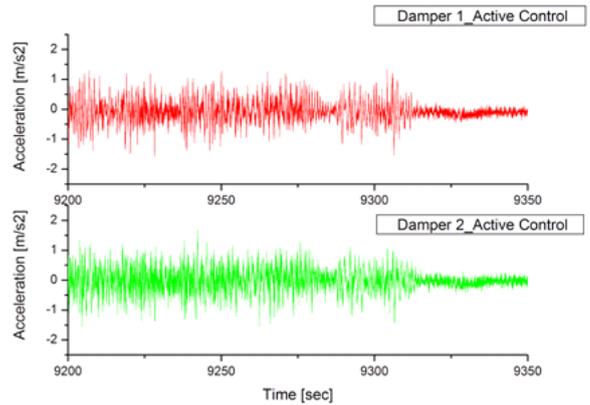
한국형고속열차에 설치된 세미액티브 서스펜션은 스카이후크의 제어방식을 사용하여, 각 댐퍼는 차체의 절대속도에 비례하는 감쇠력을 발생시킨다. 2007년 6월 경부 고속 선로에서 실차 제어 시험을 실시하였다. 시험은 시스템이 설치된 동력차가 주행시 선두가 되도록 상행 제어 시험을 수행하였다. 구간은 오송-동대구의 선정된 고속구간이며, 주행속도가 300km/h이 되도록 열차를 조정하며 시험을 실시하였다.

최초 상행시 세미액티브 시스템에서 passive 제어를 실시하고, 같은 지점을 2번째 반복 주행시 세미 액티브 제어를 실시하였다. 시간 응답 시험 결과가 그림 5에 나타나 있다. y축은 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.

다음은 시험 결과를 주파수 영역에서 해석한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 위 부분이 passive 제어시, 아래 부분이 세미액티브 제어시 주파수 응답 결과이다. 왼 편이 댐퍼 1, 오른 편이 댐퍼 2의 해당하는 차체의 진동가속도이다. 1차 및 2차 고유진동수에서 횡진동 가속도가 줄어들음을 알 수 있다.

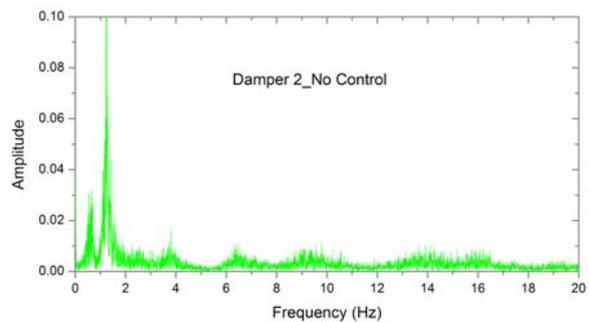
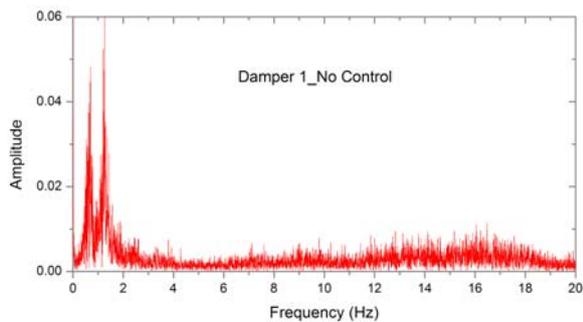


(a) Passive 진동제어

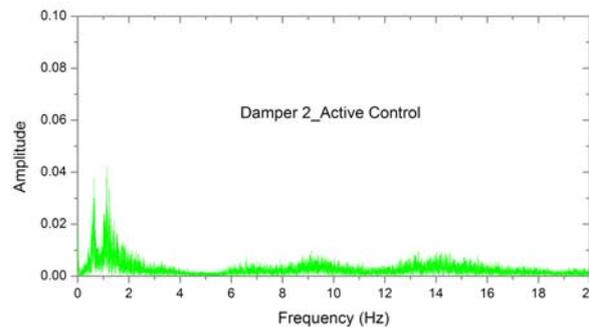
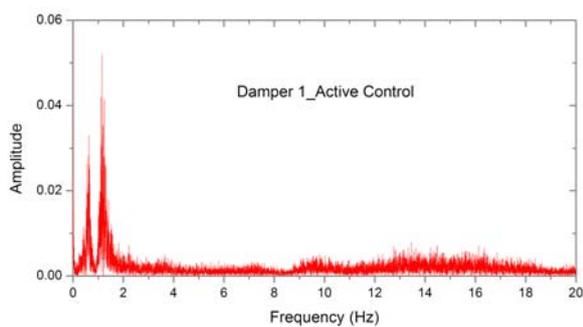


(b) Semi-active 진동제어

그림5 시간응답 결과



(a) Passive 진동제어



(b) Semi-active 진동제어

그림6 주파수 응답 결과

#### 4. 결론

본 논문은 JR동일본과 한국형고속열차의 횡진동 제어법을 소개하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 일본신간선 분산형고속철도에서는 승객들의 승차감을 높이기 위하여 횡진동 진동제어를 실시하고 있다.
- 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.

한국형고속열차에서 실시한 세미액티브 진동제어로 어느정도 효과를 얻을 수 있었지만, 향후에는 액티브 제어를

실시하여 그 효과를 비교 검토할 필요가 있다. 이 결과는 차세대고속철도기술개발사업에서 검토하여, 추진하고자 한다.

### 감사의 글

이 연구는 국토해양부 차세대고속철도기술개발사업의 '분산형고속철도 시스템엔지니어링 기술개발'과제의 지원을 받고 있음을 밝힌다.

### 참고문헌

1. 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
2. 김상수, 荒井 順一, 목진용, 김영국, 김기환(2005), “일본신간선의 진동제어 기술현황,” 한국소음진동공학회 춘계학술대회 CD논문집
3. 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
4. 遠藤 知幸, 小泉 智志(2003), “JR東日本E2系・E3系フルアクティブサスペンションの概要”, R&M, pp 18~21
5. Sang-Soo KIM and Chankyong Park(2006), "Design for Lateral Vibration Damper of HSR 350x", The 8th International Conference on Motion and Vibration Control
6. 岩波 健, 加藤 博之, 橋本 浩二(2006), “乗り心地向上の取り組み”, JR EAST Technical Review-世界一の新幹線をめざして, No. 14, pp 30~33
7. 김상수, 김영국, 김기환(2007), “한국형고속열차 세미액티브 진동제어”, 한국소음진동공학회 추계학술대회 CD논문집