

## 한국형고속열차 횡방향 진동제어

### Method of Lateral Vibration Control of Korean High-Speed Railway 350x

김 상 수\*·김 영 국\*·박 찬 경\*·김 종 선\*\*·김 기 환\*

Sang-Soo Kim, Young-Kuk Kim, Chan-Kyoung Park, Jong-Sun 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 2years ago. Korea High-speed Railway (HSR 350x) is being developed and succeeded 350km/h test run. With the increase of the speed, the vibration control of the high-speed railway becomes important to meet high ride quality. In this paper, we suggest the install of lateral damper to HSR 350x. The result shows better ride quality.

#### 기호설명

$F$  : 외력                       $\dot{Y}_b$  : 차체 철대속도  
 $F'$  : Sky hook 감쇠력       $V_p$  : 오일 댐퍼 속도  
 $C_d$  : Sky hook 댐퍼 감쇠계수

#### 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 있으며, 철도차량 회사인 로템에서도 철도차량용 능동형 시스템 연구가 행해지고 있다[1].

한편 국내기술로 만들어진 한국형고속열차는 경부고속

선로에서 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.

#### 2. 고속열차 횡진동 제어 시스템 현황

##### 2.1 세미액티브 서스펜션

종래의 수동형 차량 현가장치는 차체를 지지하는 스프링과 댐퍼의 절적한 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 설치되어 있다. 이 경우 오른쪽에 있는 주파수응답과 같이 공진 주파수, 고주파수 영역에서도 양호한 진동제어가 가능해진

\* 한국철도기술연구원

E-mail : sskim@krri.re.kr

Tel : (031)460-5625, Fax : (031)460-5649

\*\* 한국철도시설공단

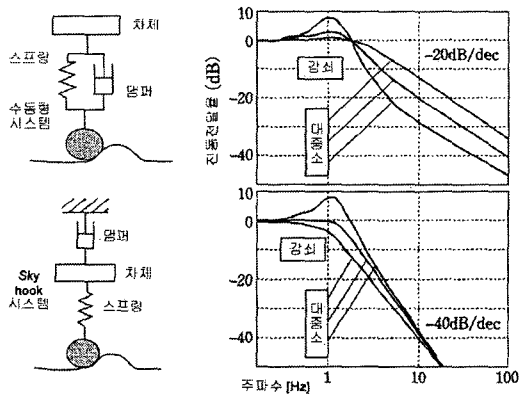


그림 1. 수동형 현가장치와 Sky hook 시스템 현가장치다.

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 일본신간선 횡진동 제어 시스템 현황

일본에서는 현재 상업운영중인 고속열차 신간선에 세미액티브 진동제어 현가장치를 탑재하여 횡진동을 제어하고 있다. 그림 2는 신간선에 사용되고 있는 횡방향 진동 제어 댐퍼의 일종이다. 이 댐퍼는 유압 밸브를 조절하여 감쇠력을 변화시켜 차체 진동을 제어한다.

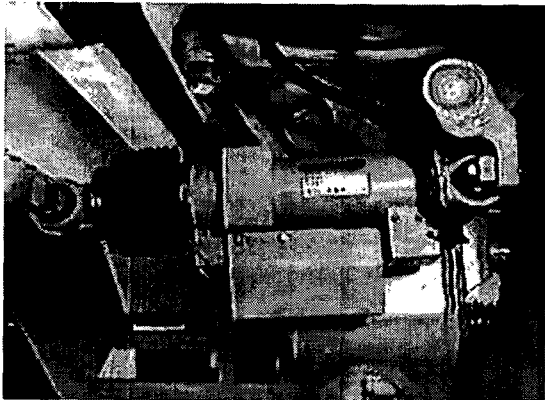


그림 2. 일본 신간선 횡진동 제어 시스템

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

2.3 한국 고속열차의 횡진동 제어 시스템 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 3과 같이 수동형 횡댐퍼를 대차와 차체 사이에 연결하여 상대속도에 의한 감쇠력을 발생하고 있다.

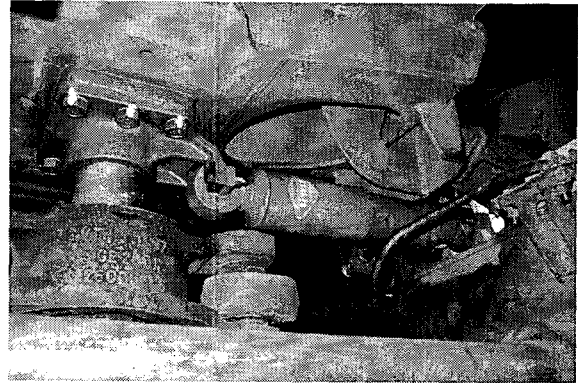


그림 3. KTX 횡방향 수동 댐퍼

3. 한국형고속열차 객차 횡방향 진동제어

국내 기술로 제작된 한국형 고속열차가 경부 및 호남 노선에서 증속 및 신뢰성 시험 등이 이루어지고 있다. 한국형고속열차(HSR 350x)는 동력차2량, 동력객차2량, 객차3량 등 7량 1편성으로 구성되어있다. 본 연구에서는 이 열차의 객차 및 객차대차사이에 횡댐퍼를 설치하여 횡방향 진동을 제어하고자 한다. 댐퍼의 설치위치는 그림 4와 같이 동력객차 뒤에 위치한 특실객차(TT2)의 양단에 설치하여 특실객차의 진동을 제어한다.



그림 4. 한국형고속열차 횡댐퍼 취부 위치

3.1 수동형 횡댐퍼 선정

객차대차인 관절대차와 차체의 연결부에 해당하는 센터피봇 및 센터 블록은 그림 5와 같은 구조를 갖는다. 여기서는 횡방향 댐퍼를 센터 피봇과 대차 프레임사이에 연결하여 대차와 차체에 감쇠력을 전달할 수 있도록 한다.

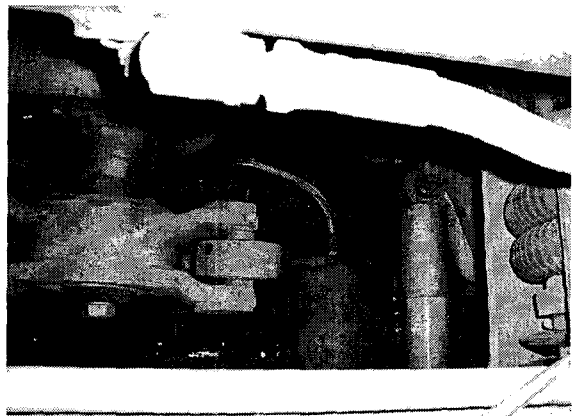


그림 5. 한국형고속열차 객차하부 및 대차의 모습

(1) 최적 감쇠 계수

그림 5와 같은 위치에 수동형 댐퍼를 설치도록 한다. 먼저 댐퍼의 최적 감쇠 계수를 구하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 동역학 해석 프로그램으로 AEA Technology사의 철도차량해석 프로그램인 VAMPIRE를 사용하였다. 해석 방법으로는 열차가 300km/h의 속도로 곡선반경이 없는 선로를 5km 주행했을 때 댐퍼의 감쇠계수를 0.005에서 0.04 MNs/m로 점차 변화시켜, 차체의 횡방향 RMS 가속도를 구하여 그 변화를 관찰하였다. 해석 결과는 그림 6과 같다. x축은 특실객차 양단에 설치된 댐퍼의 감쇠 계수이고, y축은 각 감쇠계수를 갖는 댐퍼를 설치했을 때 객차의 횡진동 가속도 RMS값을 나타낸다.

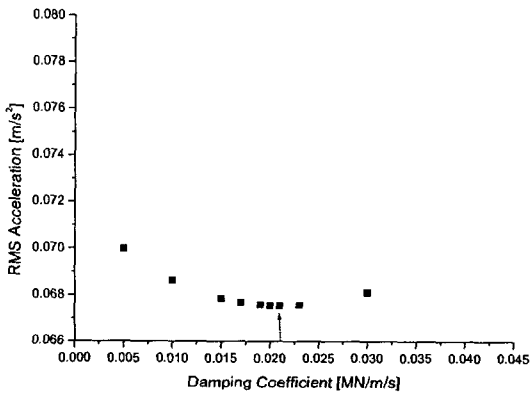


그림 6. 댐퍼의 감쇠계수에 따른 차체 RMS가속도 변화

그래프에서 알 수 있듯 0,005 MNs/m에서 감쇠계수를 증가시키면 차체 가속도는 감소하다가 0.021 MNs/m 이상의 감쇠계수에선 차체 가속도가 다시 증가됨을 알 수 있다. 각 계수에서의 변화 값을 표 1에 나타내었다. 위 결과로부터 한국형고속열차 횡방향 댐퍼의 감쇠 계수 C=0.021 MNs/m 일 때 차체 가속도가 최소가 되므로 이 값을 최적 감쇠 계수로 선정할 수 있다.

표 1. 댐퍼의 감쇠계수와 차체 RMS 가속도

Damping Coefficient [MN/m/s]	RMS Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	비고
0.005	0.0699	
0.01	0.06863	
0.015	0.06785	
0.017	0.06768	
0.019	0.06757	
0.020	0.06754	
0.021	0.06753	← 최적치
0.023	0.0756	
0.03	0.06812	
0.04	0.07874	

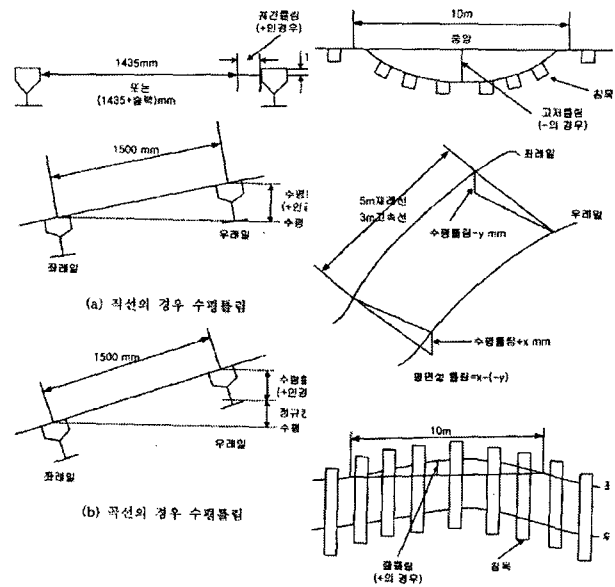


그림 7. 궤도 틀림의 종류

(2) 특실객차의 승차감 분석

고속철도 차량의 동역학 해석시 선로조건은 매우 중요하다. 이중 승차감에 영향을 끼치는 대표적 변수는 궤도 틀림이라 할 수 있으며, 궤도 틀림중 면틀림(Cross Level Irregularity)과 줄틀림(Alignment Irregularity)는 특히 횡방향 운동에 영향을 주는 요소이다[4]. 설계된 횡댐퍼의 타당성을 조사하기 위해 상업운행중인 경부고속철도구간의 그림 8과 같은 30km 구간 궤도 틀림 조건에서 속도 300km/h의 주행을 할 때 횡댐퍼 설치시 특실객차의 승차감을 분석하였다. 분석에 이용한 프로그램은 VAMPIRE를 이용하였다. 승차감 분석을 위하여 매 500m 마다 RMS 가속도 값을 계산하였다. 분석결과를 그림 9에 나타냈다. 실선이 횡댐퍼를 설치하였을 때의 차체 가속도, 점선이 설치하지 않았을 때의 가속도 값을 표시한다. 위 결과로부터 30km 주행 구간 대부분에서

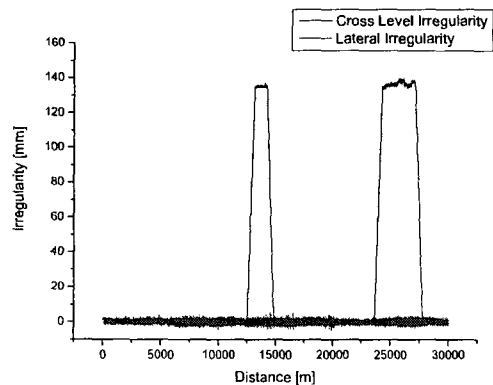


그림 8. 궤도 틀림

차체 가속도가 감소되어 승차감이 향상된 것을 알 수 있다. 승차감 향상도(%)를 그림 10에 나타냈다. 그래프에서 알 수 있듯이 두 구간을 제외하고 승차감이 향상되어 30km 주행 중 평균 16.6% 승차감이 향상되었음을 알 수 있다.

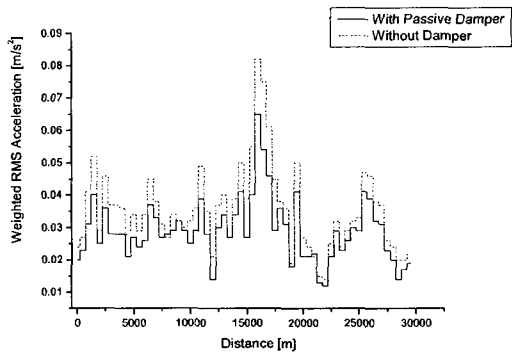


그림 9. 차체 가속도의 변화

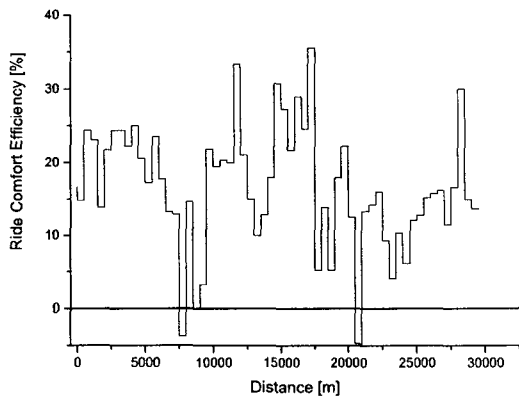


그림 10. 승차감 향상도

### 3.2 한국형고속열차 세미액티브 댐퍼 설치 방안

최적감쇠계수의 횡방향 댐퍼를 설치함으로써 차체 승차감을 향상됨으로 설계된 수동형 댐퍼의 감쇠계수를 갖는 세미 액티브 댐퍼를 한국형고속열차에 설치할 수 있는 방안을 고찰한다.

한국형고속열차에 세미 액티브 댐퍼를 설치하여 스카이 후크 제어법을 사용하는 방안을 그림9과 같이 나타낸다. 이 제어법은 교행, 궤도틀림등으로 인해 횡적 외력,  $F$ 가 차량이 작용하게 되면, 차체는 좌우로 진동이 발생하게 되는 원리이다. 세미액티브 시스템에서 제안하는 제어기는 차체와 가상의 공간사이에 댐퍼를 설치, 차체의 절대속도,  $\dot{Y}_b$ 에 비례하는 감쇠력과 등가의 감쇠력  $F'$ 을 대차와 차체 사이에 있는 댐퍼에서 발생토록 Sky hook 알고리즘을 이용한다. 이 제어법은 일본 신칸선에서 현재

사용되어 지고 있다[5]. 이때 실제 설치된 댐퍼는 피스톤의 상대운동에 의한 감쇠력이 아닌, Sky hook 알고리즘의 감쇠력에 가까운 힘이 작용되도록 감쇠계수를 변화시킬 수 있는 가변 감쇠댐퍼이다. 이 제어법을 사용하기 위해 특실객차(TT2)의 양단에 그림과 같이 횡방향 세미 액티브 댐퍼를 설치하고, 차체 양단에 가속도 센서를 부착한다. 차체의 양단에서 절대 가속도가 각각 제어장치에 입력되어 절대 속도를 구하고 이에 비례하는 감쇠력을 발생한다면, 수동형 댐퍼 이상의 승차감 향상 효과를 기대할 수 있다.

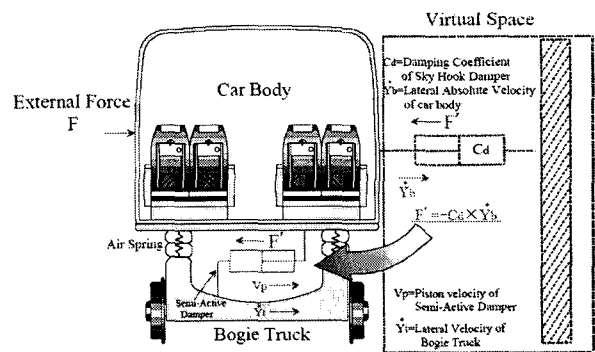


그림 11. 철도차량용 Sky hook 현가장치

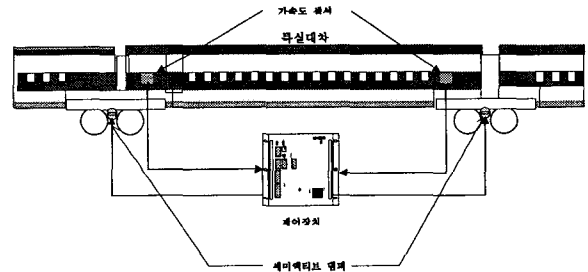


그림 12. 횡진동 제어 시스템 설치 방안

## 4. 결론

본 논문은 한국형고속열차 객차의 승차감 향상을 위해 횡댐퍼 설치 방안을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 수동형 횡댐퍼의 선정을 위해 차체의 가속도를 최소로 할 수 있는 감쇠계수를 구하였다.
- 수동형 횡댐퍼의 설치로 고속선로에서의 주행조건에서 기존의 열차보다 향상된 승차감을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한 최적 감쇠 계수를 갖는 세미 액티브 댐퍼를 설치함으로써 보다 향상된 승차감이 예상되어진다. 향후 과제로는 댐퍼의 세부 사양을 결정하여 한국형고속열차에 설치하여 시운전 시험을 통한 승차감 향상 효과를 연구할 예정이다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) 이남진 등, 2004, “철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구”, 춘계학술대회 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) 김영국, 2003, “신경회로망을 이용한 고속철도 차량 현가장치의 설계 최적화 및 성능 평가”, 아주대학교 박사학위논문
- (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”, 鉄道総研報告, Vol. 11, No. 4, pp. 1~6
- (7) 김상수 등, 2005, “일본 신간선의 진동제어 기술 동향”, 춘계학술대회논문집, pp. 440 ~ 443