

일본 신간선의 진동제어 기술 현황

Technical Trend of Semi-Active Suspension of Japanese Shinkansen

김 상 수* · 荒井 順一** · 목 진 용* · 김 영 국* · 김 기 환*

Sang-Soo KIM, Junichi ARAI, Jinyong MOK, Youngkuk KIM, Kihwan KIM

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

ABSTRACT

To improve the riding comfort of high-speed trains, it needs active suspension system for railway more and more. In Japan, the high-speed train, Shinkansen has adopted semi-active suspension system and now it is running in the main trunk. In Korea, Koeran Train Express (KTX) is opened to commercial traffic and Korea High-speed Railway (HSR350) is being developed. So the vibration control of the high-speed train becomes important. In this paper, we introduce technical skill of Japanese semi-active suspension Shinkansen to be helpful to the related researcher.

기호설명

- F : 외력
- Y_b : 차체 절대속도
- F : Sky hook 감쇠력
- V_p : 오일 댐퍼 속도
- C_d : Sky hook 댐퍼 감쇠계수
- C_s : 오일 댐퍼 감쇠계수

일본에서는 이미 이러한 횡방향 진동 제어요구에 대해 액추에이터를 사용한 현가장치가 개발되어, 1984년 시험주행을 거쳐 신간선에 부착되어 현재 영업차량에 이용되고 있다. 본 논문에서는 일본 카야바공업 주식회사에서 개발한 세미액티브 서스펜션을 소개하고, 신간선에 적용된 사례를 조사하여 관련 연구 종사자에게 참고로 쓰이고자 한다.

1. 서 론

고속열차 KTX가 개통된 지 1년이 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 통과등에 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[2].

2. 세미액티브진동제어시스템

2.1 일본의세미액티브진동제어시스템탑재차량

일본에서 세미액티브 진동제어 현가장치를 탑재한 신간선 차량의 현황과 양산수는 다음과 같다.

(1) JR토카이700계신간선

- ① 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 특실, 판토품그래프 장착차량 등 7량
- ② 생산수 : 1998년 이후 54편성 생산 이중 세미액티브 차량 378량

(2) JR서일본500계신간선

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

(3) JR서일본700계신간선(레이스타)

- ① 세미액티브 장착차량 : 선두차량, 판토품그래프 장착차량 등 4량

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

** (일본)카야바 공업 주식회사

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) JR구주구주신간선

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

2.2 세미액티브서스펜션

종래의 수동형 차량 현가장치는 차체를 지지하는 스프링과 댐퍼의 적절한 선택으로 차체의 진동을 제어하는 방식을 사용하고 있다. 감쇠계수를 바꿈에 따라 차체의 가속도에 대한 주파수 응답이 오른쪽의 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 공진 주파수, 고주파수 영역에서도 양호한 진동제어가 가능해진다

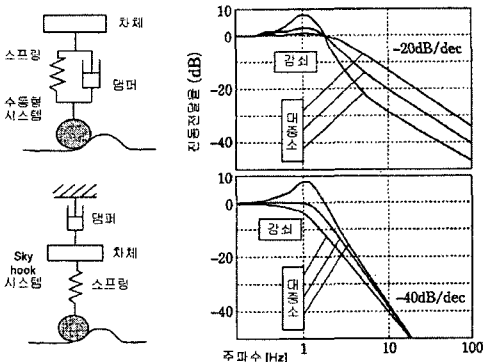


그림 1. 수동형 현가장치와 Sky hook 시스템 현가장치

Sky hook시스템에 설치된 가상 댐퍼는 지면의 요철과는 상관없이 차체의 진동속도에 비례하는 감쇠력을 발생하게 된다. 실제 시스템에서는 차체와 차륜사이에 댐퍼가 설치

되게 되고, 이 댐퍼로 차체 진동속도에 비례되는 감쇠력을 발생시키면 Sky hook 제어가 가능하게 된다. 이 때 댐퍼의 e동적 파라미터를 자유히 변화시켜 Sky hook 댐퍼의 제어력에 가깝게 발생시키는 진동제어법이 세미 액티브 서스펜션이 된다.

2.3 신간선용세미액티브서스펜션

(1) 원리

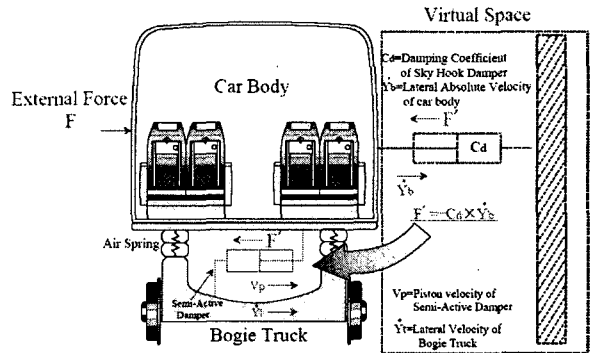


그림 2. 철도차량용 Sky hook 현가장치

상용화 된 세미액티브 댐퍼가 신간선에 설치된 구조를 그림2 와 같이 나타낸다. 교행, 레도틀림등으로 인해 횡적 외력, F가 차량이 작용하게 되면, 차체는 좌우로 진동이 발생하게 된다. 세미액티브 시스템에서 제안하는 제어기는 차체와 가상의 공간 사이에 댐퍼를 설치, 차체의 절대속도, \dot{Y}_b 에 비례하는 감쇠력과 등가의 감쇠력 F를 대차와 차체사이에 있는 댐퍼에서 발생토록 Sky hook 알고리즘을 이용한다. 이때 실제 설치된 댐퍼는 피스톤의 상대 운동에 의한 감쇠력이 아닌, Sky hook 알고리즘의 감쇠력에 가까운 힘이 작용되어야 하므로, 감쇠계수가 변화될 수 있는 가변 감쇠댐퍼를 사용하여야 한다.

가변감쇠댐퍼를 사용한 신간선 각 차량에서 적용되는 횡방향 세미 액티브 서스펜션은 다음과 같다.

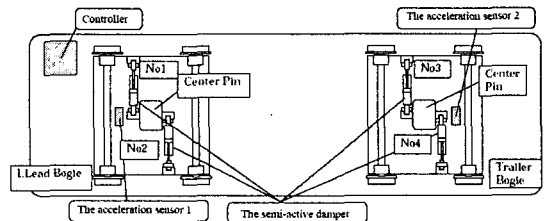


그림 3. 신간선 차량용 세미 액티브 서스펜션 배치

신간선 각 차량은 두 대의 대차로 이루어져 있으므로, 각 대차당 두 대의 댐퍼와 1개의 가속도 센서가 설치되어 있다. 결국 한 차량은 4개의 가변감쇠댐퍼와 2개의 가속도 센서, 1개의 제어기가 1 set로 된 세미액티브 서스펜션을 탑재한다. 두 대의 대차가 각각 댐퍼를 설치하게 되므로, 횡방향 진동은 물론, yawing의 제어도 가능하도록 되어있다. 또한 가속도센서는 자체고장감지를 할 수 있도록 하여 센서 고장으로 인한 오동작을 방지하도록 하였다.

(2) 가변감쇠댐퍼

① 댐퍼의 개요

위절에서 설명한 신간선용 서스펜션에 사용되는 댐퍼는 가변감쇠의 특성을 가져야 하며, 차량을 제어할 수 있을 정도의 감쇠력을 발생시켜야 한다. 현재 이 조건을 만족하여 상업용으로 쓰여지고 있는 댐퍼는 카야바 공업주식회사의 가변감쇠댐퍼이다. 댐퍼의 외양은 다음 그림과 같다.

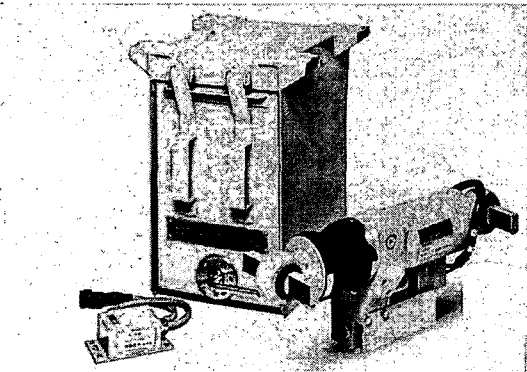


그림 4. 가변감쇠댐퍼의 외양

그림에서 오른쪽 밑에 있는 댐퍼가 가변감쇠댐퍼이며, 유압에 의해 움직인다. 댐퍼의 하단에 위치한 사각형의 탱크가 오일탱크로 설치시 별도의 컴퓨터나 탱크등이 필요없이 하나의 댐퍼로 일체화 되어있다. 그림의 윗 부분은 세미액티브 제어기이며, 왼쪽 하단의 부품이 차체에 설치되는 가속도 센서이다. 댐퍼의 구조는 다음과 같다.

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

Sky hook 제어법에서 Sky hook 댐퍼가 발생하는 감쇠력과 실제 세미액티브 댐퍼가 발생하는 감쇠력이 반대방향일 경우, 즉,

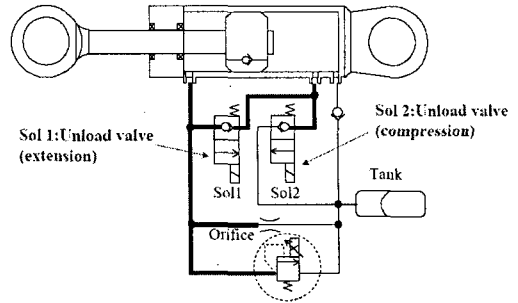


그림 5. 가변감쇠댐퍼의 구조

$$\text{sgn}(F' = C_d \times Y_b) = -\text{sgn}(\epsilon V_p)$$

의 상태일 때 세미액티브 댐퍼는 제어 알고리즘과 같은 방향의 감쇠력을 낼 수 없다. 이 때 이론상으로는 감쇠력을 0으로 하면, Sky hook 제어 알고리즘과 반대의 감쇠력을 발생시키는 것을 막을 수 있다. 이때 발생하는 감쇠력을 무부하 감쇠력이라 하며, 최소한의 감쇠력으로 세미액티브 서스펜션이 적용된 차량의 안정성에 악영향을 줄이도록 한다. 무부하 감쇠력을 포함한 댐퍼의 성능 특성 곡선은 다음 그림과 같다.

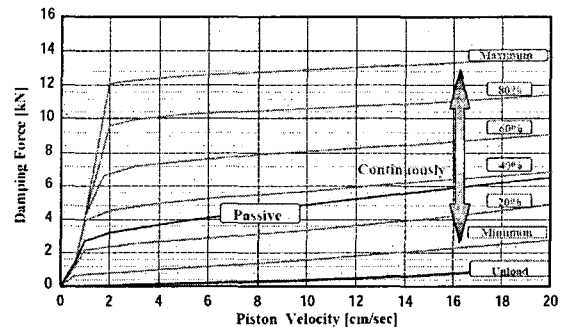


그림 6. 가변감쇠댐퍼의 특성

위 특성곡선과 같이 댐퍼는 2단계의 저속도 감쇠계수와 고속도 감쇠계수를 갖으며, 이 감쇠계수의 전환으로 감쇠력을 발생시킨다.

- (ㄱ) 댐퍼의 감쇠력이 Sky hook 제어 알고리즘의 감쇠력과 같을 경우 : Minmun 감쇠력 (2.5 kN에 해당) 곡선과 Maximum 감쇠력 (14.7 kN에 해당) 곡선 사이의 영역에서 자유롭게 감쇠력을 변화시킬 수 있는 가변감쇠댐퍼 특성을 갖는다.
- (ㄴ) 댐퍼의 감쇠력과 Sky hook 제어 알고리즘의 감쇠력이 반대 방향일 경우 : 댐퍼는 무부하 감쇠력을 발생시키며, 특성 곡선에서 하단 Unload에 해당하는 감쇠력을 발생시킨다. 이는 댐퍼가 감 속도에 대해 가질 수 있는 최소의 감쇠력에 해당한다.

(ㄷ) 고장시 : 가속도 센서, 제어기, 댐퍼 밸브의 동작 이상등의 상황일 경우, 댐퍼는 일반 오일 댐퍼로서 작동을 하여, 오신호에 대해 잘못된 제어력을 발생시키지 않도록 동작한다. 이때의 댐퍼 특성은 그래프에서 Passive에 해당한다.

(3) 차량 시험 성능

신간선 차량에 탑재 하여 성능을 시험한 결과를 소개한다. 세미액티브 시스템을 그림7 과 같이 구성하였다.

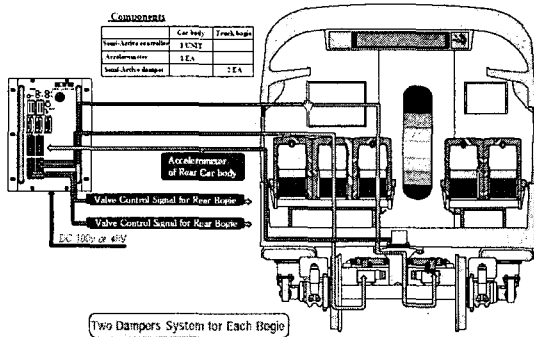


그림 7. 철도차량 세미액티브 서스펜션

위 구성도와 같이 각차량에 세미 액티브 서스펜션이 설치되었다. 대차당 2대의 가변감쇠댐퍼가 장착되며, 차량에 전면과 뒷면의 하단에 각각 가속도 센서가 설치된다. 이 기기들은 차량의 있는 제어기에 연결된다. 차량 시험 결과는 다음과 같다.

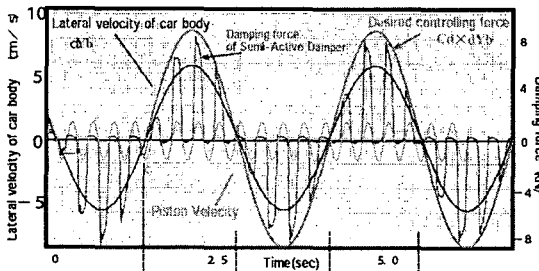


그림 8. 차량 시험 결과

위 시험 결과는 1개의 댐퍼에서의 시험 평가이며, 녹색 그래프가 Sky hook 제어 알고리즘에 의한 감쇠력, 파란색 그래프가 차체 속도이다. Sky hook 감쇠력이 차체속도와 비례하는 것을 알 수 있다. 분홍색 그래프가 댐퍼의 피스톤 운동이며, 검은색 그래프가 댐퍼가 발생하는 감쇠력이다. +방향이 피스톤의 팽창, -방향이 피스톤의 압축방향을 가리킨다. 댐퍼의 속도가 차체의 속도와 같을 경우 감쇠력을 발생시키는 것을 알

수 있으며, 그 값은 Sky hook 제어 알고리즘의 감쇠력에 근접해 있는 것을 알 수 있다. 또한 댐퍼의 속도가 차체 속도와 다를 경우, 미소한 무부하 감쇠력을 발생하므로, 차량의 안정성에 영향을 끼치지 않도록 하고 있다.

3. 결론

본 논문은 일본 신간선에서 상용화되어 쓰여지고 있는 세미 액티브 댐퍼를 소개하였다. 카야바 공업 주식회사에서 개발한 이 댐퍼는 최대 14.7 kN까지 감쇠력을 발생시킬 수 있으며, 현재 각종 신간선 차량에 적용되고 있다. 횡방향 진동을 제어하는 액티브 서스펜션 관계자에게 도움이 되길 바라며, 하루 빨리 고속열차용 서스펜션을 개발해야 할 필요가 있다. 일본의 풀 액티브 서스펜션도 앞으로 조사할 예정이며, 한국형 고속열차용 횡방향 액티브 서스펜션의 가능성을 연구할 예정이다.

후 기

이 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업으로 지원된 "고속철도기술개발 통합 및 총괄"과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) 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
- (2) 이남진 등, 2004, "철도차량용 능동형 현가 시스템 설계에 대한 연구", 추계학술대회 논문집, 한국철도학회, CD 논문집
- (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", 鐵道總研報告, Vol. 11, No. 4, pp. 1~6