

# 철도차량의 현가장치로서 에너지 재생 댐퍼 이용에 대한 고찰

## Energy Regenerative Damper

## Applied to the Railway Vehicle

김상수\* 박춘수\* 목진용\* 서승일\* 이태형\* 김기환\*

KIM, Sang-Soo PARK, Chun-Soo MOCK, Jin-Yong SEO, Sung-Il LEE, TAE-Hyung Kim, KI-Hwan

---

### ABSTRACT

Vibration of railway vehicle has harmful effect to dynamic performances of railway represented to stability, safety and ride comfort. Hence reduction of vibration has been discussed as an important problem and has been widely investigated. A new technology of vibration control, energy regenerative control, is introduced. Energy regenerative damper using this new vibration control converts vibration energy into other kind of energy that we can utilize. In this paper, this energy regenerative damper is applied to the dynamic absorber and vehicle suspension. And it is evaluated whether the energy regenerative railway vehicle suspension is possible.

---

### 1. 서론

철도 차량의 진동 문제는 안정성, 안전성, 승차감 등에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 소음 발생등의 원인이 될 수 있다. 종래에는 스프링, 감쇠기등의 수동적인 요소를 사용한 여러 장치가 고안되어 철도 차량의 현가장치로 이용되어 왔다. 하지만 근래 기기에 수반되는 고정밀도, 고성능화가 요구됨에 따라서, 엄격한 요구사항이 필요하게 되었다.

이러한 요구에 대해 액추에이터를 사용, 외부로부터 에너지를 공급하여 피드백 제어를 사용, 능동적으로 제어하는 능동형 진동 제어를 사용하는 방안이 제시되어지고 있다. 능동형 진동 제어는 외부 상황에 능동적으로 대처, 성능을 향상시킬 수 있지만, 성능을 향상시킬수록 외부로부터의 에너지 공급량문제는 커지게 된다.

본 논문에서는 진동에너지를 흡수하여 사용 가능한 에너지의 형태로 변환, 진동을 제어하는 동시에 에너지 공급원으로 사용하는 감쇠기를 에너지 재생댐퍼로 명명하여, 그 특성을 소개한다. 에너지 재생 댐퍼는 외부로부터 에너지를 최소화하며, 아울러 능동형 진동제어가 가능하기에, 고성능 진동제어 능력 및 에너지 공급 문제를 해결할 수 있다. 그러나 에너지 재생댐퍼는 그 구조상 적은 속도에서는 에너지 재생이 되지 않는 불감대가 존재한다. 이에 따라 에너지 재생 댐퍼에 초저 회로를 삽입, 펄스 폭 제어를 하여, 불감대를 최소화하며 댐퍼의 감쇠 특성을 자유롭게 변화시킬 수 있는 제어법을 제안한다. 그리고 에너지 재생 댐퍼가 동흡수기, 자동차 서스펜션에 적용된 사례를 소개한다. 아울러 철도 차량의 현가장치에 응용, 그 가능성을 검토한다.

---

\* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

## 2. 에너지 재생 댐퍼

에너지 재생 댐퍼는 기계적인 진동 에너지를 활용 가능한 에너지로 변화하고, 그 역의 경우도 가능한 시스템을 구축해야 한다. 본 연구에서는 진동 에너지를 흡수하기 위한 에너지 재생 댐퍼로서 전자기 액추에이터를 사용한다. 진동에 의해 액추에이터는 속도에 비례하는 감쇠력을 발생하고, 재생된 에너지를 전기 에너지의 형태로 축전지에 저장한다. 그림 1.(좌)와 같이 액추에이터에 재생회로를 연결하여 에너지 재생 댐퍼를 구성한다. 진동에 의해 액추에이터는 속도  $v$ 의 운동을 하게 된다. 이상적인 액추에이터일 경우 다음과 같은 식이 성립하게 된다.

$$f = \phi i \quad e = \phi v \quad f: \text{감쇠력}, \phi: \text{액추에이터 계수}, e: \text{기전력}, i: \text{전류} \quad (1)$$

하지만, 에너지 재생댐퍼는 진동 속도로 인해 발생하는 액추에이터의 역기전력이 축전지의 전압( $e_{fb}$ )보다 작을 경우, 회로 내에 에너지 재생 전류가 흐르지 않게 되어 감쇠력이 발생하지 않는 불감대가 발생한다. 이 불감대에서는 감쇠력이 발생하지 않고, 진동에너지의 재생도 이루어지지 않는다. 따라서 그림 1.(우)의 실선과 같이 불감대를 갖는 비선형 특성을 갖게 된다.

Actuator/Generator

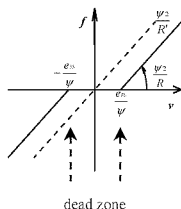
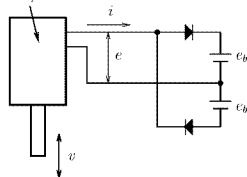


그림 1. 에너지 재생 댐퍼의 구조 및 특성

## 3. PWM (펄스 폭 변조) 승압 초저 에너지 재생 댐퍼

에너지 재생댐퍼의 불감대 문제의 개선법으로서 승압 초저회로를 도입하여, PWM(펄스폭 변조)방식의 제어를 제안한다. 그림 2.(좌)와 같이 액추에이터와 재생회로의 사이에 승압 초저를 연결하여, 빠른 스위칭을 함으로서 전압을 상승시키면, 가령 역기전력이 축전지 전압보다 낮은 경우에도 회로에 재생 전류가 흐를 수 있다. 이 제어법에 의해 에너지 재생댐퍼는 불감대의 문제를 극복하고, 높은 에너지 재생율을 얻을 수 있으리라 예상된다. 종래의 승압 초저는 일정한 간격의 펄스폭 신호에 의한 스위치 작동을 수행하지만, 본 연구에서는 속도에 비례하여 스위치의 ON/OFF 간격(듀티율)을 조정하는 방식, 즉 PWM방식의 승압 초저라는 새로운 제어 개념을 도입시킨다. 느린 속도에서는 스위치의 OFF시간을 늘려 그만큼 인덕터에 전자기 에너지의 저장을 늘리고, 빠른 속도에서는 스위치의 ON시간을 늘려 저장된 에너지를 배터리로 이동, 에너지를 축적시킨다. 초저의 스위칭 속도구간

은, 불감대 속도와 진동속도의 비율  $v_b/v$  을 설계 파라미터로 정의 하여, 불감대 속도를 기준으로 증가시키도록 하였다. 이 초저제어 방법은 기계적인 동작에 의해 전기적인 시스템을 변화시키는 새로운 메카트로닉스 기술이다. PWM 승압 초저의 또 하나의 커다란 특징은 불감대의 극복 외에, 재생회로의 전류를 조절하여 감쇠율을 변화시키는 것이 가능하게 되어 가변감쇠 댐퍼의 실현이 가능하다. 리니어 DC 모터를 에너지 재생댐퍼로 구현한 간단한 실험장치로부터 성능시험을 행하였 다

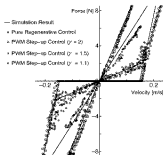
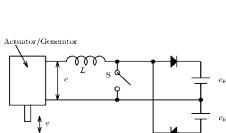


그림 2 PWM 승압조의 에너지 재생 특성과 특성

그림 2.(우)에서  $x$ 축은 덤퍼의 속도,  $y$ 축은 덤퍼의 감쇠력을 나타낸다. 단순 에너지 재생덤퍼 (○으로 표시)에서는 속도가 느린 구간 ( $-\frac{e_{fs}}{\phi} \leq v \leq \frac{e_{fs}}{\phi}$ )에서는 감쇠력을 발생하지 않는 것을 알 수 있다.  $\gamma = 1.1, 1.5, 2$ 로 변화시킨 PWM 승압 조파 제어를 이용한 에너지 재생덤퍼의 결과를 보면, 불감대가 거의 사라짐을 알 수 있다. 또한  $\gamma$ 의 변화에 따라 감쇠특성, 감쇠계수를 자유롭게 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 동흡수기에의 응용

에너지 재생 덤퍼를 시스템에 적용하는 예로서 본 절에서 동흡수기에의 적용을 검토한다. 동흡수기는 주질량의 진동을 억제하기 위해 보조질량을 추가로 설치 이 보조질량의 운동으로 인해 주질량의 진동을 줄이는 기구로서, 뛰어난 진동 흡수 능력으로 여러 진동체의 제어에 널리 쓰인다. 그림 3.(좌)처럼 주질량과 보조질량 사이에 에너지 재생덤퍼를 설치하면, 보조질량의 심한 운동으로 인해 두단히 소비되는 진동에너지를 흡수하는 동시에 적절한 감쇠력을 조절할 수 있다. 그림 3.(우)에서 리니어 DC 모터를 에너지 재생 덤퍼로 사용한 동흡수기의 실험장치를 나타낸다.

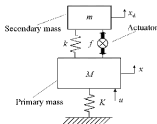


그림 3. 에너지 재생 동흡수기와 실험 장치

##### 4.1 에너지 동흡수기의 설계

먼저 동흡수기에 사용되는 에너지 재생덤퍼의 최적설계를 계산한다. 그림 2.(우)에서의 PWM 승압 조파 에너지 재생 덤퍼 특성으로부터 알 수 있듯이, 스위칭 구간내의 속도에서는 작은 감쇠율을, 빠른 속도에서는 높은 감쇠율을 갖고 있다. 본 연구에서 제안하는 에너지 재생 동흡수기는 다음과 같은 조

진을 갖는 시스템으로 설계한다.

가. 스위칭구간내에서 최적 감쇠율 발생

나. 탭피로서 사용될 리니어 모터의 스트로크 보호

다. 높은 에너지 흡수율을 위해 고전압의 배터리를 사용

2자유도의 진동시스템에서 2개의 공진 진폭을 일치시켜 진동을 줄일 수 있도록 최적 감쇠율을 계산. 에너지 재생 탭피의 설계 파라미터,  $\gamma$ 를 결정한다. 액추에이터의 속도가 경원파라고 가정하면, 공진에서의 가능한 최대 속도는  $1st \omega_n$  ( $1st$ : 액추에이터의 스트로크,  $\omega_n$ : 1차 고유진동수)이 된다. 이 조건을 고려하여, 배터리 전압  $e_H$ 를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$e_H = \quad (\varepsilon\text{-안전율}) \quad (2)$$

이 식으로부터 공진에서의 최대속도를 액추에이터의 스트로크를 고려하여, 감쇠력의 설계가 가능해진다. 본 연구에서는  $\gamma = 0.25$  로 하여, 배터리 전압,  $e_H$ 를 5.2 [V]로 설계하였다.

#### 4.2 에너지 동흡수기의 실험

그림 3.(우)의 실험 장치를 그림 4.(좌)와 같은 제어시스템을 구성하였다. 실험은 실험장치 설치된 DC 모터를 가선기로 이용 주진량에 진동을 전달하여, 에너지 재생 탭피로 진동제어를 행하였다. 주파수 응답 실험결과를 그림 4.(우)에 나타낸다.

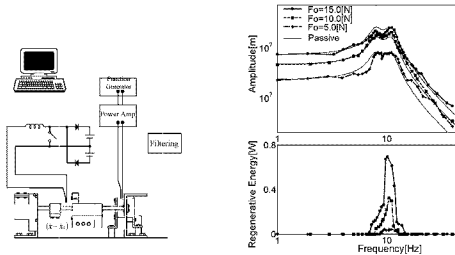


그림 4. 제어 시스템과 주파수 응답 결과

그림 4.(우)의 윗 그래프의 실험결과에서 가는 실험은 최적 수동형 제어의 시뮬레이션 특성이며, 각결을 이은 곡선이 여러 외력에 대한 주진량의 진동 진폭이다. 밑의 그래프는 각 주파수와 외력에 대하여, 흡수된 진동에너지를 나타낸다. 에너지 재생 동흡수기는 비선형 시스템임에도 불구하고, 본 연구에서 제안한 PWM에너지 재생제어를 사용하여, 뛰어난 진동제어 효과와 높은 에너지 재생율을 보임을 알 수 있다.

#### 5. 자동차 현가장치에의 응용

다음은 자동차에의 응용을 고려, 그림 5.(좌)와 같이 1/4의 2차원 자동차 현가장치 모델을 생각한다. 여기서  $M2, M1$ 은 2차, 1차 질량이며  $K2, C2$ 는 2차 현수장치와 탭피,  $K1$ 은 1차 현가장치 즉 타이어의 강성을,  $x_0$ 는 노면의 요철을 나타낸다. 실험의 편의상  $K1$ 을 하나의 파라미터  $f_0$ 의 시스템의 입력으로 계수성하여 에너지 재생 탭피를 적용한 시스템이 그림 5.(우)와 같다.

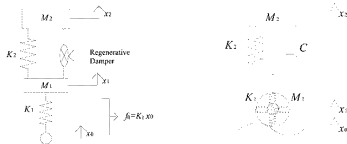


그림 5. 에너지 재생 현가장치

자동차의 현가장치는 도로의 상태에 따라 차체의 높이를 변화시킨다. 에너지 재생 현가장치로서 리니어 모터보다 상대적으로 스프링크가 긴 PM형 2상 리니어 AC모터(LinMot사, P01-37)를 사용한다.

그림 6.(좌)에 액추에이터를 사용해서 구성된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 리니어 모터의 스테이터가 2차 현가장치 결함의 일부, 슬라이더가 1차 현가장치 결함의 일부로서 사용된다. 장치는 4개의 가이드에 의해 수직방향으로 구속되고, 2차 질량의 변위 측정용으로 레이저 센서(KEYENCE사)가, 가속도 측정용으로 가속도 센서(Brüel & Kjaer 사)가 각각 부착되어 있다.

실험은 가진기로부터 가진력  $f_0 = 25 \sin \omega t$  을 가하여 PWM 승압 회로 제어를 사용하여, 2차 질량의 가속도 및 변위를 측정하였다. 재생 에너지는 2상에 흐르는 전류를 측정하여 각각 저장되는 에너지를 합산하였다. 본 제어법을 사용하여 가속도 및 변폭이 감소하고, 4Hz 이상의 주파수 대역에서 에너지 재생이 이루어짐을 알 수 있다.

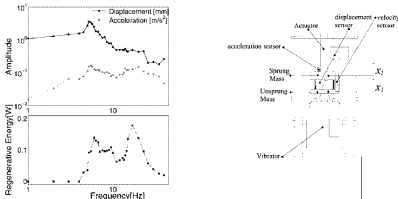


그림 6. 에너지 재생 현가 장치의 실험 장치와 주파수 응답 결과

## 6. 철도 차량에 적용 가능성

에너지 재생 탭퍼는 이론적으로 외부로부터의 전력공급이 필요하지 않는다, 차체대의 이상적인 탭퍼라고 할 수 있다. 이 원리를 철도차량등에 응용하는 약안은 충분한 가능성을 가진수 있다. 철도차량이 곡선부분의 철로를 통과할시 철도의 속도를 떨어뜨리게 된다. 그 결과, 각 구간의 도착시간을 단축시키기 위해서 곡선부분을 통과시 속도의 할상과 더불어 원상가속도, 진동등에 의해 승차감을 떨어뜨리지 않기 위한 뒤펅차량 연구, 차량의 진동을 제어하는 액티브 서스펜션등의 연구가 활발하다. 이에 따라 철도차량에 새로운 액추에이터 혹은 탭퍼가 필요로 한다.

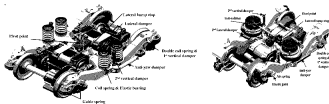


그림 7. 한국철 고속 전철의 동력차 대차와 동력저차 대차

한국철 고속전철 대차의 현가장치를 그림 7에 나타낸다. 그림 7.(좌)가 동력차 대차의 현가장치이며 현가장치에 구성되는 댐퍼는 1차 현가장치 댐퍼 4개, 2차 현가장치 댐퍼 2개, 요댐퍼 2개, 수평 댐퍼 1개가 장착되어 있다. 그림 7.(우)의 동력저차 대차도 수직형 댐퍼 6개, 요댐퍼 2개, 수평형 1대 총 9개의 댐퍼로 구성되어 있다. 철도 차량 현가장치의 진동 진폭은 수 mm이하이나 높은 절망을 갖고 있으므로, 많은 진동 에너지를 발생시킨다. 이러한 철도 차량 현가장치 댐퍼에 에너지 재생 댐퍼를 사용하면, 높은 에너지의 재생과 철차 레일의 접촉 특성에 따라 차량의 동적 거동을 제어할 수 있는 가능성이 있다.

## 7. 결론

본 논문은 진동에서 얻어지는 에너지를 회생하여 진동계에서 다시 사용할 수 있는 에너지 재생 댐퍼에 대하여 논술했다. 이 에너지 재생에 PWM 승압 회로를 사용하여 동흡수기, 자동차 현가장치에 적용하여 다음과 같은 사실을 알게 되었다.

- PWM 승압회로를 이용하여 에너지 재생 댐퍼에 존재하는 불균대 현상을 해결하여, 감쇠율을 조절할 수 있게 되었다.
- 동흡수기에 에너지 재생 댐퍼를 사용하여 시스템에 최적의 감쇠력을 전달하고, 높은 에너지 재생율을 보였다.
- 자동차 현가장치에 적용한 결과, 뛰어난 에너지 진동 절연 효과를 얻었으며 넓은 주파수 영역에서 에너지 재생이 이루어짐을 알았다.
- 철도차량 현가장치에는 많은 댐퍼가 사용되고 있으며, 에너지 재생 댐퍼를 사용할 경우 높은 에너지 재생 효과의 가능성이 있다.

이후의 과제로서 철도차량에 적합한 에너지 재생 댐퍼를 설계가 필요하다.

## 참고문헌

1. Sang-Soo KIM, Yohji OKADA, "Variable Resistance Type Energy Regenerative Damper Using Pulse Width Modulated Step-up Chopper", Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics(Vol. 104), 2002
2. Sang-Soo KIM, Yohji OKADA, "Variable Resistance Type Energy Regenerative Suspension", The6th International Conference on Motion and Vibration Control 2002, 2002
3. 김영국, "신경회로망을 이용한 고속철도 차량 현가장치의 설계 최적화 및 성능 평가", 아주대학교 박사학위 논문, 2003
4. 박찬경, 한영재, 김영국, 김석원, 최강운, "한국철 고속전철의 주행조건에 따른 진동특성 분석에 관한 연구", 철도학회 추계학술대회, pp. 125-130, 2003