

# 철로 이음매에 기인하는 전동차의 진동특성 분석

## Vibration Characteristics of the Electric Car due to Joint Discontinuity

임 병덕\*  
Lim, Byoung-Duk

최 연선\*\*  
Choi, Yon-Sun

### ABSTRACT

Wheel impact due to the joint discontinuity is a major source of uncomfortable vibration in the railway vehicles. Since the impact signal is measured using sensors attached to the bogie and its energy content is small compared to the other vibrations from the machineries such as motors and gear systems, the separation of the impact signal is generally difficult. In this study a technique using an evolutionary spectrum is proposed in order to estimate the impact signal due to the rail joint discontinuity.

### 1. 서론

차량의 주행 중에 차륜이 철로 이음매를 지나면서 발생하는 차량의 충격성 진동은 주기적이고 가진력의 크기가 크므로 중요한 관심사가 된다. 이러한 충격성 진동을 측정하기 위해 전동차와 같이 차축이나 전동기 부분에서 측정하는 경우에는 궤도의 다른 영향으로 인한 진동과 전동기 등의 기기에서 발생된 진동신호가 함께 수집되어 궤도 이음매에 의한 진동만을 추출하기가 간단하지 않다. 본 연구에서는 전동차의 전동기 베어링 부분에서 측정된 진동 신호로부터 철로 이음매로 인한 충격성 진동을 관찰하고 충격의 지속시간을 검출하는 방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 향후 궤도 이음매로 인한 차량의 동특성을 파악하는데 기초적인 기술로 활용될 수 있으리라 기대된다.

### 2. 이론적 배경

차륜이 철로 이음매에 접촉할 때 발생하는 진동은 접촉이 직접 이루어지는 차륜이나 궤도에서 측정될 수 없으므로 대차 상에 부착된 진동센서를 통해서 측정하게 된다. 그림 1은 전동차의 대차상의 단면 구조를 보인 것으로서 전동기, 변속기 등의 여러 기기가 장착되어 있음을 볼 수 있다. 이러한 경우 나타나는 신호는 궤도와 차륜의 상호 작용에 의한 신호 이외에도 전동기 등의 기기에 의한 진동을 포함하므로 시간 영역에서만 관찰하면 충격성 신호가 명확히 나타나지 않는다.

차륜과 철로 이음매가 접촉할 때 발생하는 충격성 진동의 신호는 유지되는 시간이 짧고 차륜의 고유진동수를 전반 주파수(carrier frequency)로 하는 고주파 성분이 많이 섞여 있다는 사실로부터 충격성 신호를 검출할 수 있다. 이러한 고주파 공진 검출 방법은 베어링의 결함 등을 탐지하는 데 사용되어 왔으며 그 이론적 배경은 다음과 같다.

충격성 진동 신호를  $x(t)$ 라 하고 차륜으로부터 대차까지 이르는 전달 경로의 충격응답함수를  $h_b(t)$ 라 하면 이들 사이의 관계는

$$x(t) = h_b(t) * \sum_{m=0}^{\infty} \delta(t - mT) + n(t) \quad (1)$$

\* 영남대학교 교수, 정회원

\*\* 성균관대학교 교수, 정회원

여기서  $\delta(t)$ 는 Dirac delta 함수이고 \*는 convolution을 나타내며  $n(t)$ 는 측정잡음을 나타낸다. 일반적으로  $h_b(t)$ 는 지수적으로 감쇠하는 고주파 성분을 가지는 다음과 같은 모양이 된다.

$$h_b(t) = \exp(-\zeta\omega_n + j\omega_d t) \quad , \quad \omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n \quad (2)$$

시간의존 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$X[n, k] = \sum_{m=0}^{\infty} x[n+m]w[m]\exp(-j(2\pi/N)km)$$

여기서  $w[m]$ 은 창문함수(window function)로서 일정한 시간 영역 바깥에서는 0이 되는 함수, 즉 일정한 시간 범위내의 신호만을 통과시키는 함수이다.

$$w[m] = 0 \quad \text{outside the interval } 0 \leq m \leq N-1$$

창문함수  $w[m]$ 은 사이드로브의 크기를 감소시키고 주파수 분해도를 적절히 향상시킬 수 있도록 조정한다. 위의 시간 의존 푸리에 변환이 convolution의 형태를 갖고 있다는 점에 착안하면 다음과 같이 다른 형태로 표현할 수 있다.

$$X[n, k] = x[n] * h_k[n]$$

여기서  $h_k[n] = w[-n]\exp(j(2\pi/N)kn)$  이 된다.  $h_k[n]$ 의 주파수 응답  $H_k(e^{j\omega})$  은

$H_k(e^{j\omega}) = W(e^{j(2\pi k/N - \omega)})$  이므로 위에서 제시된 시간의존 푸리에 변환은 N개의 filter로 이루어진 filter bank로 생각할 수 있다.  $W(e^{j\omega})$ 가 저역통과 filter의 형태를 갖는다면  $W(e^{j(2\pi k/N - \omega)})$ 는 중심주파수가  $2\pi k/N$  만큼 이동된 저역통과 filter, 즉  $2\pi k/N$ 의 중심주파수를 갖는 대역통과 filter가 된다. 따라서  $X[n, k]$ 는 시간 신호  $x[n]$ 은 N개의 대역통과 filter bank를 통과시킨 신호로서 대역별 신호를 나타낸다.[2] 창문함수로서 Hann 창함수를 사용하면

$$w[n] = 0.5 - 0.5\cos(2\pi n/N) \quad , \quad 0 \leq n \leq N$$

이때 창함수의 주파수 응답은

$$W(e^{j\omega}) = 0.5D(\omega) + 0.25 \left[ D(\omega - \frac{2\pi}{N}) + D(\omega + \frac{2\pi}{N}) \right] \quad , \quad D(\omega) = \frac{\sin[(N/2)\omega]}{\sin[(1/2)\omega]}$$

으로서 여기서  $D(\omega)$ 는 사각 창문함수의 주파수 응답을 나타낸다.[3] Hann 창문함수의 주파수 응답은 사이드로브의 최대 응답이 메인로브보다 32dB 이하이므로 저역 통과 filter의 특성을 갖는다.

### 3. 실험

#### 3.1. 진동 신호의 측정

본 연구에서는 차량 15년인 저항제어 방식의 전기동차를 여러 가지 속도로 주행시키면서 대차에서 진동을 측정하였다. 측정센서로는 가속도계를 사용하였으며 차량의 속도를 측정하기 위해서 차륜에 광검출 방식의 회전속도 측정기를 부착하였다. 그림 1에 센서 부착위치를 나타내었으며 기타 센서는 주행 중의 전기동차에서 기기의 상태를 진단하기 위한 것이다. 측정된 신호는 데이터 레코더에 기록한 후에 실험실에서 디지털 신호로 변환하였다. 샘플링 주파수는 20kHz로서 한 번의 데이터는 10초 단위로 끊어 파일로 저장한 후에 신호를 처리하였다.

#### 3.2. 신호의 분석

20 kHz로 샘플링된 신호는 16개의 샘플씩 이동하면서 32점의 데이터를 취하여 이산 푸리에 변환을 수행하였다. 즉 각각의 신호는 중심주파수가  $n \times 625\text{Hz}$ 인 대역통과 filter를 통과시킨 신호를 크기만 표시하도록 반과정류시킨 신호로 생각할 수 있다. 그림 2는 원래의 진동신호이며 그림 3은

대역별 진동신호를 보인 것이다.

#### 4. 결과 및 고찰

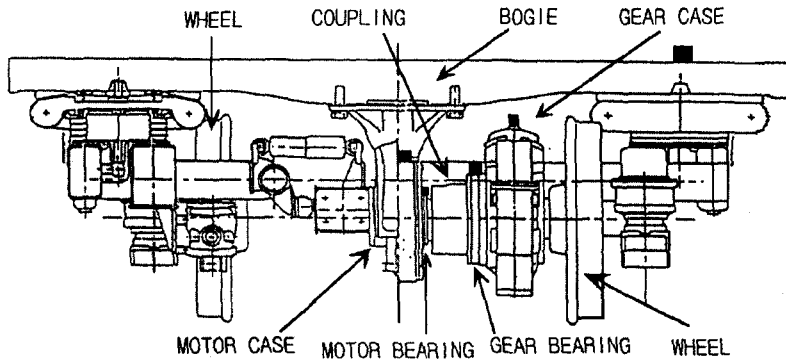
대표적인 대차 진동신호를 보여주는 그림 2에는 4회의 충격이 포함되어 있다. 6.7초~7.3초 구간의 신호에는 충격성 신호와 다른 기기나 구조에 의한 신호가 섞여 있어서 충격신호만을 분리하기 곤란하다. 각 대역별 신호를 관찰해 보면 철로 이음매에 의한 충격진동은 2.5 kHz 미만의 대역에서는 뚜렷하게 나타나지 않지만 그 이상의 대역에서는 광범위하게 피크를 보임을 볼 수 있다. 이러한 특성을 보이는 충격성 신호는 6.2초, 7.1초, 7.95초, 8.85초 등 4회 관찰된다. 6.7초 부근에서 시작되는 신호는 burst 신호의 특징을 가지며 시간 영역에서만 관찰할 때는 이음매 충격과 구별하기 어렵다. 그러나 대역별 신호에서는 다른 충격과는 구별되게 2.5 kHz 대역에서만 큰 에너지를 보이므로 구분하기가 쉽다. 이러한 특성은 신호의 다른 부분을 분석한 결과에서도 공통적으로 나타나고 있어서 이음매 충격 신호의 분리에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

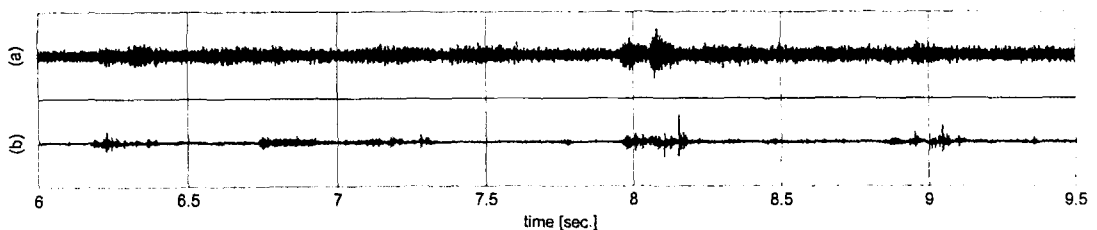
단기간 푸리에 변환을 이용하여 철로 이음매로 인한 충격성 진동신호를 분리하였다. 시간 영역에서 이음매 충격신호와 유사하게 보이는 신호와 충격신호를 효과적으로 구분할 수 있었다.

#### 참고문헌

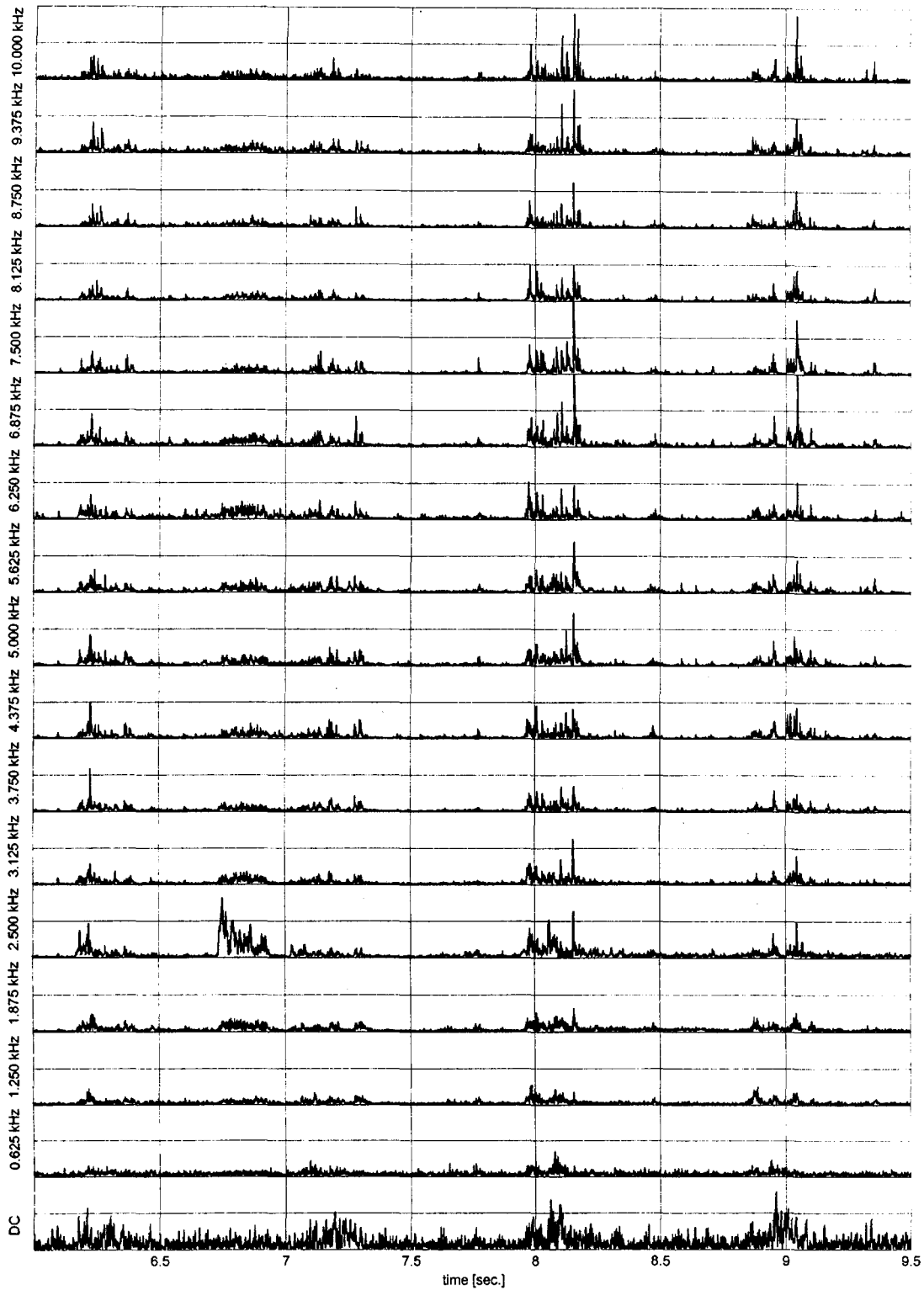
1. Y.H.Kim, B.D.Lim, and W.S.Cheoung(1991), "Fault Detection in a Ball bearing System using a Moving Window," Mechanical System and Signal Processing, vol.5 No.6, pp.461-473.
2. A.V.Oppenheim and R.W.schafer(1989),"Discrete-time Signal Processing", Prentice Hall.
3. D.F.Elliot(ed.)(1987),"Handbook of Digital signal Processing," Academic Press.



< 그림 1 > 대차상의 진동센서 부착위치



< 그림 2 > (a) 차실내에서 측정된 소음신호 (b) 대차에서 측정된 진동신호



< 그림 3 > (DC~10kHz 구간을 16개로 분할한) 주파수 대역별 시간신호