시간-주파수 변환을 이용한 고속철도차량의 동특성 분석

Analysis of Dynamic Characteristics of High Speed Trains Using a Time Varying Frequency Transform

이준석* 최성훈** 김상수** 박춘수**

Lee, Jun Seok Choi, Sunghoon Kim Sang-Soo Park, Choonsoo

ABSTRACT

This paper examined dynamic characteristics of high speed trains using a time varying frequency transform. Fourier transform based methods are frequently used for the calculation of the dynamic characteristics of trains in the frequency domain, but they cannot represent the time-varying characteristics. Therefore it is necessary to examine their characteristics using a time-varying frequency transform. For the examination, the non-stationary vibration of wheelset, bogie, and carbody are measured using accelerometers and stored in a data aquisition system. They are processed with localization of the data by modulating with a window function, and Fourier transform is taken to each localized data, called the short-time Fourier transform. From the processed results, time varying auto-spectral density, cross-spectral density, frequency response, and coherence functions have been calculated. From the analysis, it is confirmed that the time varying frequency transform is a useful method for analyzing the dynamic characteristics of high speed trains.

1. 서론

고속철도차량이 주행할 때 차량의 보다 높은 안전성과 승차감을 위해 차량진동 저감의 중요성이 높아지고 있다. 고속 주행 시 발생하는 진동의 저감을 위해서는 궤도의 유지보수 뿐만 아니라 차량 동특성을 정확하게 파악하여 그에 대한 대책을 세우는 것이 중요하다.

일반적으로 차량 동특성은 진동 가속도 신호를 수집하여 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 분석하는데 이 경우 시간에 대한 정보를 알 수 없는 문제점이 있다. 철도차량의 주행은 궤도불규칙과 같은 외부 원인의 영향을 계속 받아 주파수 특성이 바뀌는 비정상(non-stationary) 상태이므로 시간-주파수 변환을 이용하여 시간에 대한 차량 동특성을 분석할 필요가 있다.

주파수 응답함수는 시스템에 대한 입력과 출력 신호 주파수 변환 결과의 비율로 시스템의 고유한 특성을 나타낸다. 차량의 주파수 응답특성은 충격망치나 가진기 등을 이용하여 차량을 가진하고 수집된 가속도계의 신호를 주파수 분석을 하여 알 수 있다. 그런데 이 방법은 윤축, 대차, 차체 등으로 분리된 상태에서는 가능하지만 조립된 차량에서는 적용하기 매우 어렵다. 그러므로 차량에 가속도계를 부착한 뒤 궤도를 주행하면서 수집한 데이터를 분석하면 다양한 가진에 대한 차량의 주파수 응답특성 분석이 가능하다.[1]

본 연구에서는 고속철도차량 동특성을 시간-주파수 변환을 이용하여 분석하였다. 이를 위해 차량의 윤축, 대차,

* 과학기술연합대학원대학교/한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 비회원
E-mail : junseok@krri.re.kr
TEL : (031) 460-5272 FAX : (031) 460-5649
** 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단

차체에 가속도계를 부착하여 주행 중에 좌우, 상하방향 가속도를 측정하고, 여기서 측정된 데이터는 차량 수집 시스템에서 저장하였다. 이 데이터는 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 이용하여 시간-주파수 변환을 하였는데, 이때 불규칙 신호처리에서 사용되는 자기 스펙트럼 밀도, 상호 스펙트럼 밀도, 주파수 응답함수, 기여도로 분류하여 분석하였다. 이를 통해 주행시험으로부터 고속철도차량 동특성 분석의 가능성을 연구하였다.

2. 시간-주파수 변환

시간-주파수 변환에는 단시간 푸리에 변환, 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution), 웨이브렛 변환(wavelet transform) 등이 있다.[2] 여기에서는 빠른 연산속도와 일정한 주파수 해상도를 얻기 위해 단시간 푸리에 변환을 이용하였다.

단시간 푸리에 변환은 주파수 영역만을 고려하는 기존의 푸리에 변환에 시간영역 특성까지 같이 고려한 것이다. 이 변환은 일정 크기의 창함수(window function) w(ξ-t)를 이용하여 신호 $f(t)$를 여러 구간으로 나누고, 나누어진 각 구간에 대해서 푸리에 변환을 하는 방법으로 다음과 같이 정의한다.[3]

$$F(t,f)=\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{w}(\xi-t)f(\xi)e^{-j2\pi f(\xi-t)}d\xi$$

단시간 푸리에 변환을 이용하면 시스템의 시간에 따른 주파수 성분을 구할 수 있다. 그런데 이 방법은 저주파 분석을 하기 위해서는 창함수의 크기가 커져야 하는데 이 경우 시간 해상도가 떨어질 수 있고, 고주파 분석을 하기 위해서는 창함수가 작아져야 하는데 이 경우 주파수 해상도가 떨어질 수 있다. 그러므로 적절한 크기의 창함수를 선택하는 것이 중요하다.[3]

3. 불규칙 신호 처리[4]

3.1 자기 상관함수(auto-correlation function)

어떤 데이터 $x(t)$에서 고정된 시간지연 τ로 분리된 각 데이터 구간의 시간관련 특성을 분석하는 함수로, 어떤 데이터와 지연된 데이터를 서로 곱한 것의 평균값을 구한 결과이다.

$$R_{xx}(\tau)=E[x_k(t)x_k(t+\tau)]$$

여기서 $E[\ ]$는 평균을 나타낸다.

3.2 상호 상관함수(cross-correlation function)

서로 다른 두개의 데이터에서 시간관련 특성을 분석하는 함수로 어떤 데이터와 다른 데이터를 서로 곱하고 이들의 평균값을 구한 결과이다.

$$R_{xy}(\tau)=E[x_k(t)y_k(t+\tau)]$$

3.3 자기 스펙트럼 밀도(auto-spectral density)

자기 스펙트럼 밀도는 자기 상관함수를 푸리에 변환한 것으로 평균 제곱값 변화율을 나타낸다. 본 연구의 시간-주파수 변환에 응용하기 위해서는 창함수도 같이 고려해야 하는데 이는 다음과 같이 나타낸다. 여기서 $S_{xx}(t, f)$는 시간에 대한 자기 스펙트럼 밀도를 나타낸다.

$$S_{xx}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{w}(\xi - t) R_{xx}(\xi) e^{-j2\pi f(\xi - t)} d\xi$$

3.4 상호 스펙트럼 밀도(cross-spectral density)

상호 스펙트럼 밀도는 상호 상관함수를 푸리에 변환한 것이다. 창함수도 같이 고려한 상호 스펙트럼 밀도 $S_{xy}(t, f)$는 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{xy}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{w}(\xi - t) R_{xy}(\xi) e^{-j2\pi f(\xi - t)} d\xi$$

3.3 주파수 응답함수(frequency response function)

시스템의 입력과 출력의 관계를 표현한 것으로 다음과 같이 나타낸다.

$$H(t,f) = \frac{S_{xy}(t,f)}{S_{xx}(t,f)}$$

3.4 기여도(coherence)

두 신호의 주파수 성분의 선형관계를 나타내는 것으로 0과 1사이의 값을 가진다. 1에 가까울수록 선형성이 강해진다고 볼 수 있다.

$$\gamma_{xy}^2(t,f) = \frac{|S_{xy}(t,f)|^2}{S_{xx}(t,f) S_{xy}(t,f)}$$

4. 차량 진동가속도 신호 수집과 처리

4.1 가속도계 설치와 신호 수집

한국형 고속열차에서 객차의 윤축, 대차, 그리고 차체에 가속도계를 설치하여 진동특성을 분석하였다. 그런데 윤축은 주행 중에 고속으로 회전을 하여 가속도계 부착이 매우 어렵기 때문에 윤축진동의 영향을 직접 받는 윤축상자에 가속도계를 부착하였다.

그림 1은 한국형 고속열차 시제차량의 계측시스템 구조를 나타내고, 그림 2와 3은 윤축상자, 대차, 차체에 가속도계가 부착된 현황을 나타내고 있다.[5] 이들 가속도 신호는 500Hz 표본주파수로 수집되어 계측시스템에 저장한 뒤 후처리(post-processing)를 수행하였다.

4.2 신호처리

차량 계측시스템에 수집된 데이터는 ASCII코드로 변환하여 저장하고 이를 MATLAB에서 단시간 푸리에 변환을 수행하였다. 단시간 푸리에 변환시 단위시간을 2초간으로 하고 푸리에 변환을 하기 위한 데이터 개수를 512개로 하였다 이들 데이터들은 모두 해닝(Hanning)창을 적용하였는데, 이때 데이터들의 겹침(overlapping) 비율은 50%로 하였다. 처리한 결과는 시간-주파수 그래프에서 색상으로 계수들의 크기를 나타내는 스펙트로그램(spectrogram) 방법을 사용하였다.

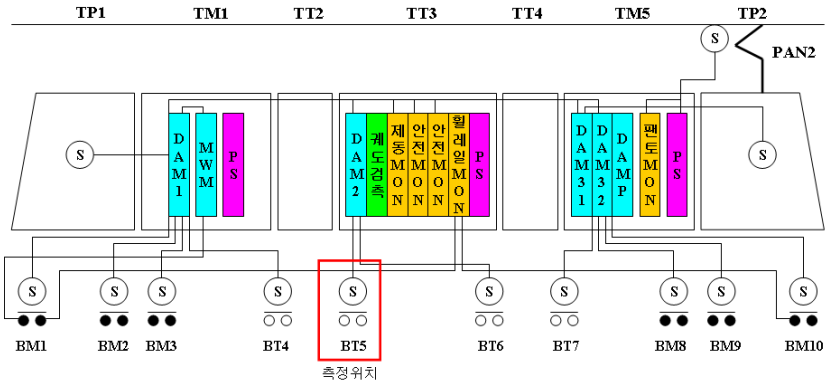


그림 1. 한국형 고속철도 시제차량의 계측시스템 구조[5]

그림 2. 윤축과 대차의 가속도계 설치현황[5]

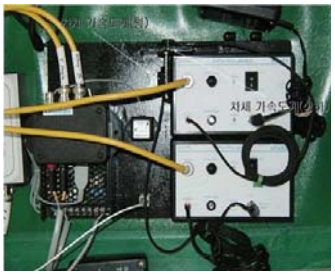


그림 3. 차체 가속도계 설치현황[5]

5. 실험결과

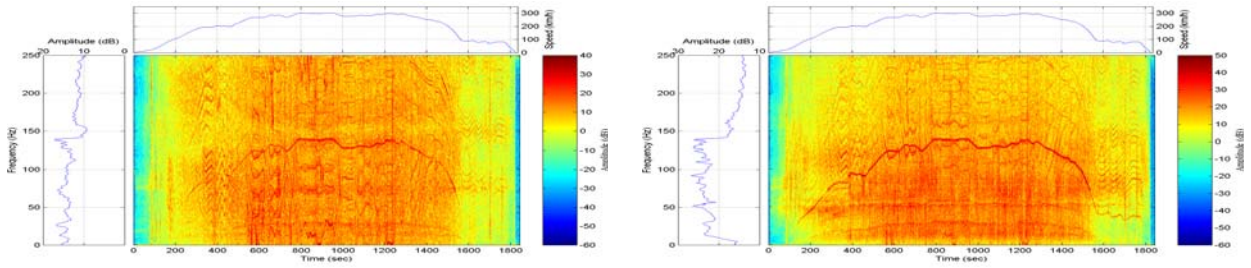
그림 4~7은 각각 자기 스펙트럼 밀도, 상호 스펙트럼 밀도, 주파수 응답함수, 기여도를 나타낸다. 시간-주파수 변환방법을 기존 주파수 변환방법과 비교를 하기 위해 스펙트로그램 왼쪽은 주파수 영역만을 고려한 결과도 같이 나타내었다.

5.1 자기 스펙트럼 밀도

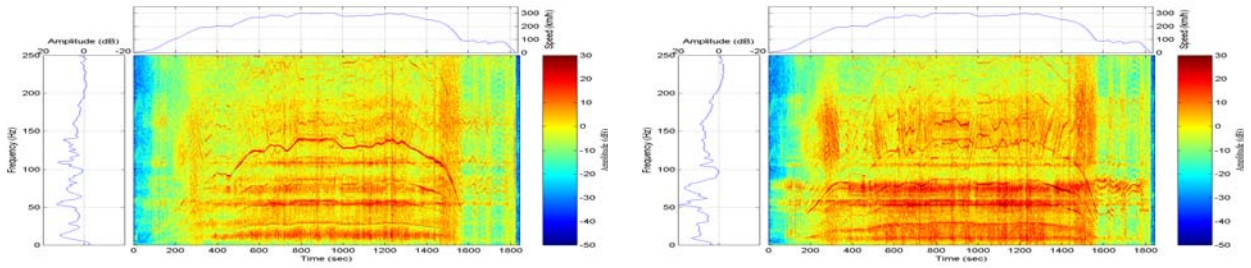
그림 4는 윤축, 대차, 차체의 좌우방향과 상하방향 진동의 자기 스펙트럼 밀도 결과를 나타내고 있다. 세 결과 모두 속도 경향과 같이 변하는 높은 주파수 성분, 일시적으로 나타나는 높은 주파수 성분, 속도, 시간과 관계없이 일정한 높은 주파수 성분을 확인할 수 있다. 특히 50~150Hz에서는 속도 경향과 거의 일치하는 매우 높은 주파수 성분을 확인할 수 있는데 이는 침목통과 주파수로 추정된다. 주파수 영역만을 고려한 결과에서도 비슷한 주파수 영역에서 매우 높은 주파수 성분을 확인할 수는 있지만 이의 속도에 대한 특성은 전혀 알 수 없다. 그러므로 시간-주파수 분석을 통해서 높은 주파수 성분의 특성을 파악할 필요가 있다.

윤축 결과에서는 중간에 높은 주파수 성분이 나타났다가 사라지는 부분을 있음을 확인할 수 있다. 특히 좌우진동 결과에서 400sec, 600sec, 800~1200sec 등에서 잠시 나타났다가 사라지고 그 경향은 속도와 관계없음을 알 수 있다. 이들은 궤도의 특성, 터널 혹은 교량 등의 통과, 교행 등의 영향으로 추정된다. 또한 순간적으로 주파수 전 영역에서 높은 주파수 성분이 나타나는 경우가 있는데 이는 분기기, 이음매 등의 통과시 발생하는 충격으로 추정된다.

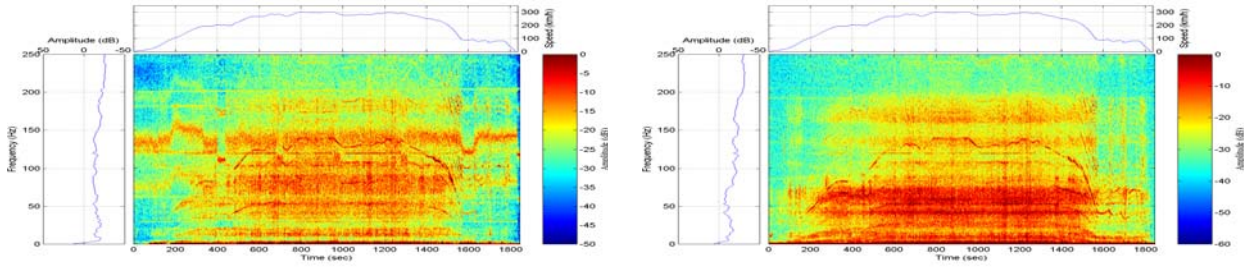
대차 결과에서는 윤축에 비해 좀 더 분명하게 높은 주파수 성분을 확인할 수 있다. 윤축진동과 유사하게 속도 혹은 시간에 관계없이 잠시 나타났다가 사라지는 높은 주파수 성분을 확인할 수 있다. 그런데 윤축의 결과와는 달리 50Hz와 100Hz 부근에서 속도와 시간에 관계없이 일정한 높은 주파수 성분이 나타는데 상하진동에서 보다 분명하다. 이는 고유 주파수로 생각할 수도 있겠으나 자기 스펙트럼 밀도 결과만으로는 판단하기 어려우므로 주파수 응답함수 분석에서 판단할 것이다.



(a) 윤축 (좌우) (b) 윤축 (상하)



(c) 대차 (좌우) (d) 대차 (상하)



(e) 차체 (좌우) (f) 차체 (상하)

그림 4. 자기 스펙트럼 밀도

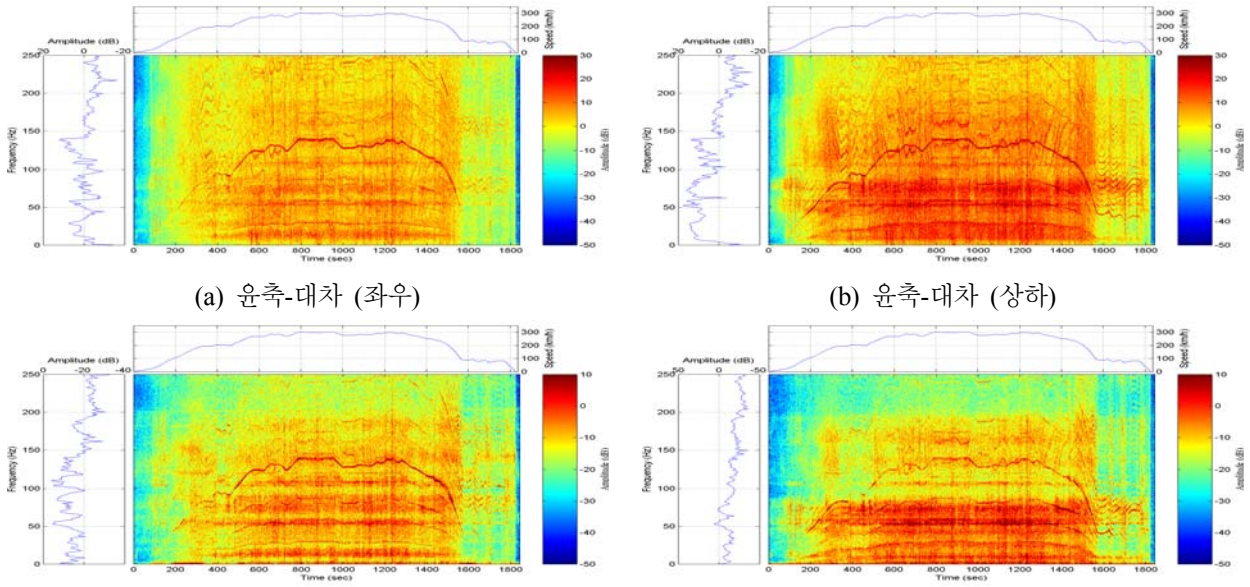
차체 결과에서는 윤축이나 대차에 비해 높은 주파수 성분이 분명하게 드러나지는 않는다. 5Hz이하에서 매우 높은 주파수 성분이 있고 이는 전 구간에서 속도와 시간에 관계없이 일정하게 나타난다. 50~100Hz는 대차 결과와 유사하게 속도와 시간에 따라 변하지 않는 높은 주파수 성분을 확인할 수 있는데 대차 결과보다는 넓게 분포되어 나타난다.

5.2 상호 스펙트럼 밀도

그림 5는 윤축과 대차, 대차와 차체의 좌우와 상하방향 진동의 상호 스펙트럼 밀도 결과를 나타내고 있다.

윤축과 대차의 진동 결과에서는 윤축 혹은 대차에서 잠시 나타났던 높은 주파수 성분이 잘 드러나지 않지만 윤축과 대차에서 공통적으로 나타났던 높은 주파수 성분은 잘 나타남을 알 수 있다. 한 부분에서 높은 주파수 성분이 나타난 것이 상호 스펙트럼 밀도에서 잘 드러나지 않는 것은 윤축의 진동이 대차로 전달이 되면서 일부주파수 성분이 감쇠로 인해 저감되었기 때문으로 보인다. 이에 비해 상호 스펙트럼에서 잘 드러나는 높은 주파수 성분은 윤축의 진동이 그대로 대차에도 전달되는 것으로 보인다. 특히 속도의 경향과 일치하고 침목통과 주파수로 추정되는 높은 주파수 성분은 매우 분명하게 드러나는 것을 확인할 수 있다. 이밖에 속도에 따라 변하지 않는 주파수 성분은 20Hz, 50Hz, 70~80Hz, 100Hz 근처에서 비교적 낮게 나오지만 확인은 가능하다.

대차와 차체의 진동 결과에서도 윤축-대차의 진동과 마찬가지로 대차 혹은 차체에서 잠시 나타났던 높은 주파수 성분은 잘 드러나지 않지만 대차와 차체에서 공통적으로 나타났던 주파수 성분은 잘 드러남을 알 수 있다. 특히 침목통과 주파수로 추정되는 높은 주파수 성분은 매우 잘 드러나는데 이는 윤축으로부터 차체까지 모두 영향을 준다는 것을 의미하므로 이에 대한 대책이 필요할 것으로 생각된다. 20Hz, 50Hz, 60~70Hz, 100Hz근처에서 속



(a) 윤축-대차 (좌우) (b) 윤축-대차 (상하)

(c) 대차-차체 (좌우) (d) 대차-차체 (상하)

그림 5. 상호 스펙트럼 밀도

도나 시간에 따라 변하지 않는 비교적 높은 주파수성분의 확인이 가능하다.

5.3 주파수 응답함수

그림 6은 윤축과 대차, 대차와 차체의 좌우방향과 상하방향 진동의 주파수 응답결과 결과를 나타내고 있다. 앞의 두 스펙트럼 밀도와는 다르게 속도에 따라 변하는 높은 주파수 성분이 많이 사라졌고 시간이나 속도에 따라 변하지 않는 성분들은 좀 더 분명하게 드러남을 알 수 있다.

윤축과 대차의 상하 및 좌우 진동 결과에서는 20Hz, 50Hz, 100Hz 부근에서 높은 주파수 성분이 있고, 상하진동에서는 60~70Hz부근에서 높은 주파수 성분이 있음을 확인할 수 있다. 이는 시간이나 속도에 따라서 변하지 아니하므로 대차의 고유 주파수 성분으로 추정이 가능하다.

대차와 차체의 상하 및 좌우 진동의 결과에서는 40~50Hz, 60~70Hz, 110~120Hz에서 높은 주파수 성분이 있고, 좌우 진동의 결과에서는 200Hz부근에서 높은 주파수 성분이 있음을 확인할 수 있다. 이것도 역시 시간이나 속도에 따라서 변하지 않으므로 차체의 고유 주파수 성분으로 추정이 가능하다.

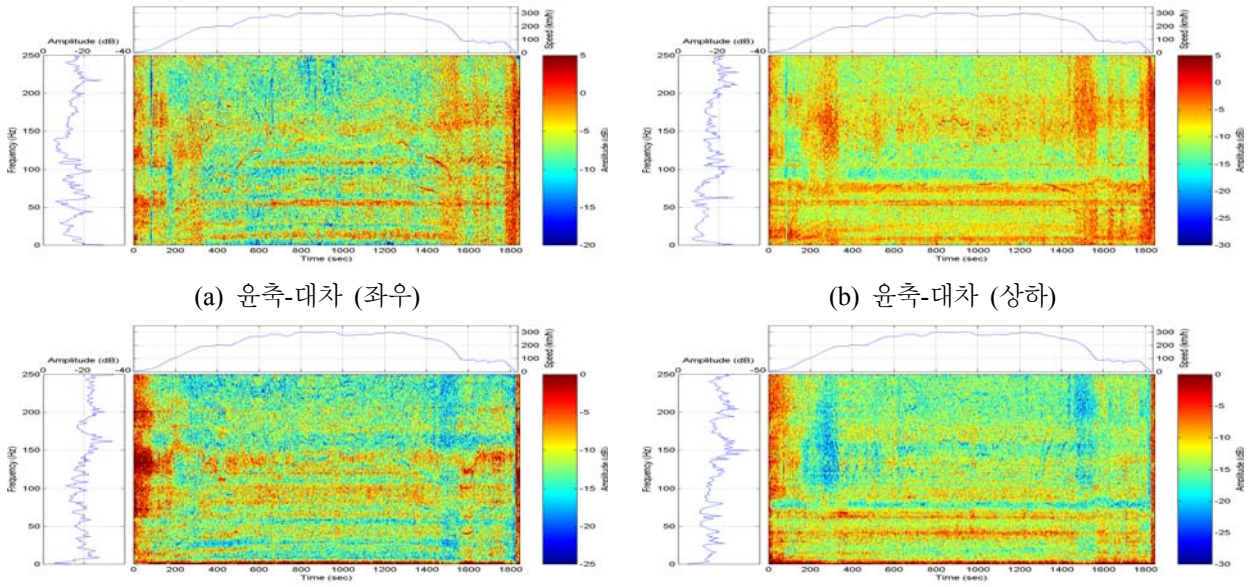
주파수 응답함수의 결과는 앞의 스펙트럼 밀도 결과와 비교해볼 때 결과가 그다지 깨끗하지 않으므로 향후 이에 대한 보완을 할 예정이다.

5.4 기여도

그림 7은 윤축과 대차, 대차와 차체의 좌우방향과 상하방향 진동의 기여도 결과를 나타내고 있다. 기여도 결과는 앞의 두 스펙트럼 밀도나 주파수 응답함수에 비해 높은 주파수 성분이 그다지 잘 드러나지 않음을 알 수 있다. 이는 대부분의 주파수 응답특성이 비선형성이 강하기 때문으로 추정된다.

윤축과 대차 진동 결과의 경우 좌우와 상하 방향 모두 100~150Hz사이에서 상당히 높은 주파수 성분이 있는데 이는 침목통과 주파수와 일치한다. 이로부터 침목통과로 인해 발생하는 윤축의 진동과 대차의 진동 사이에는 선형성이 상당히 높음을 알 수 있다. 상하 진동의 경우 주파수 영역만을 고려한 결과에서는 20~30Hz사이에서 높은 주파수 성분이 있는데 이는 스펙트로그램에서도 확인이 가능하다.

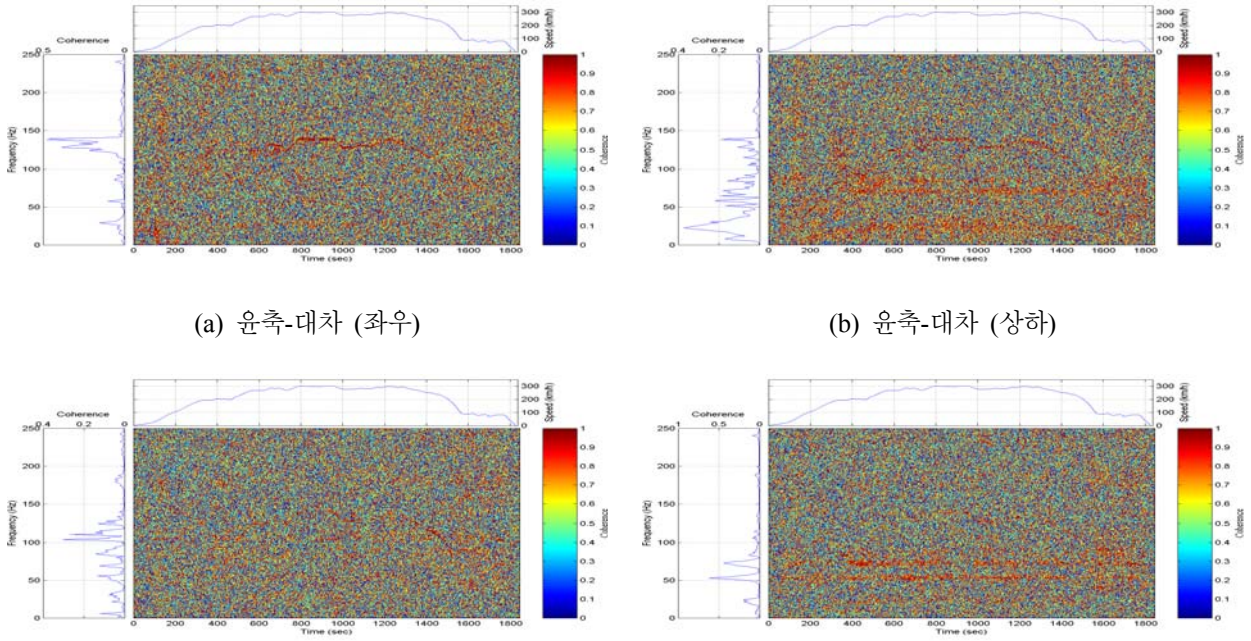
대차와 차체의 진동 결과의 경우 좌우 방향은 높은 주파수 성분을 발견하기 어려우나 상하 방향은 50Hz 근처와 60~70Hz에서 시간이나 속도의 변화와 관계없이 기여도가 약 0.6정도의 비교적 높은 주파수 성분이 있음을 확



(a) 윤축-대차 (좌우) (b) 윤축-대차 (상하)

(c) 대차-차체 (좌우) (d) 대차-차체 (상하)

그림 6. 주파수 응답함수



(a) 윤축-대차 (좌우) (b) 윤축-대차 (상하)

(c) 대차-차체 (좌우) (d) 대차-차체 (상하)

그림 7. 기여도

인할 수 있다. 이 영역에서는 대차와 차체 사이에 비교적 높은 선형성을 가지고 있을 것으로 추정된다.

6. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 고속철도 차량의 동특성을 알기 위해 대표적인 시간-주파수 변환 방법인 단시간 푸리에 변환을 이용하여 분석을 하였다. 이를 위해 가속도계를 차량의 윤축, 대차, 차체에 부착하고 각 신호들은 차량 데이터 수집시스템에 저장하였다. 이 데이터들을 단시간 푸리에 변환을 이용하여 자기 스펙트럼 밀도, 상호 스펙트럼 밀도,

주파수 응답함수, 기여도를 구하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시간-주파수 변환과 주파수 분석만의 결과를 비교한 결과 시간-주파수 변환에서는 높은 주파수 성분이 시간이나 속도에 따라 변하는 것과 변하지 않는 것을 구별할 수 있었다. 시간이나 속도에 따라 변하는 높은 주파수 성분은 주파수 영역만을 고려한 경우에서도 높은 주파수 성분이 나타나는 경우가 있는데, 이를 구별하기 위해서는 시간-주파수 변환이 필요함을 확인하였다.
(2) 속도의 변화 경향과 유사한 높은 주파수 성분 중에서 침목통과 주파수로 추정되는 주파수 성분이 자기 및 상호 스펙트럼 밀도에서 가장 높게 나오고 기여도에서도 상당히 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 침목통과에 의한 진동의 발생은 차량의 윤축과 대차 진동과의 관계에서 높은 선형성을 가지고 있을 것으로 추정된다.
(3) 자기 혹은 상호 스펙트럼 밀도에서 시간이나 속도의 변화에 관계없이 높은 주파수 성분은 주파수 응답함수에서도 나타나는데 이는 시스템의 고유 특성으로 생각할 수 있다.
(4) 대차와 차체의 상하 진동에 대한 기여도가 높게 나오는 주파수가 있는데 이는 시간이나 속도에 따라 변하지 않음을 확인할 수 있다. 이 주파수 대역에서는 대차와 차체 사이에 비교적 높은 선형관계가 있을 것으로 추정된다.

향후에 차량 진동가속도 결과를 궤도틀림 측정결과와 비교하여 차량과 궤도의 관계를 분석하고, 영업차량에서 가속도계 부착만으로 궤도 불규칙을 검측하는 방법으로의 활용을 검토할 예정이다.

후기

본 연구는 국토해양부가 시행하는 "분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발"과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 박찬경, 김영국, 김석원, 김기환, “한국형 고속전철의 주행시험을 통한 진동 모두 분석 연구”, 한국철도학회 2003년도 추계학술대회논문집, pp. 156~161, 2003.
2. 이승훈, 윤동한, "웨이브렛 변환 이론 및 적용", 보성각, 2004.
3. J. K. Hammond, P. R. White, "The Analysis of Non-stationary Signals Using Time-Frequency Methods", Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, No. 3, pp. 419-447, 1996.
4. J. S. Bendat, A. G. Piersol, "Random Data-Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons Inc., 2000.
5. 박찬경, 김영국, 김석원, “한국형 고속전철의 주행진동 특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 555~561, 2003.