고속철도차량 윤축부근의 소음과 진동 측정을 통한 주행중 감시의 기초연구 Running Monitoring by the Noise and Vibration Measurement near the Wheelset of the High-Speed Trains : A Preliminary Research

이준석* 최성훈** 박춘수** Lee, Jun Seok Choi, Sunghoon Park, Choonsoo

ABSTRACT

This paper is focused on the analysis of the noise and vibration measured near the wheelset of the high-speed trains using a time-varying frequency transform as a preliminary research of running monitoring. Due to the non-stationary characteristics, it is necessary to examine noise and vibration of the train with time-varying frequency transforms. In this paper, the short-time Fourier transform method is utilized - the stored data is localized by modulating with a window function, and Fourier transform is taken to each localized data. For the examination, the non-stationary noise and vibration of the high-speed train's wheelset are measured by using some microphones and accelerometers, and those signals are stored in a on-board data acquisition system. The non-stationary random signal analyses with the short-time Fourier transform are performed, and the result are classified as follows; auto-spectral density, cross-spectral density, frequency response, and coherence functions. From those functions, it is possible to observe the frequency characteristics of sleepers, switchers, tunnels, and steel bridges. Also, some distinct peaks, which are not dependent upon the train's speed, are identified from the results.

1. 서론

일반적으로 철도차량 윤축부근에서 발생하는 소음과 진동은 차륜과 궤도의 상호작용의 영향인데, 이는 주로 차 륜과 궤도의 거칠기와 이음매, 분기기, 도상 등이 원인이다. 그러므로 윤축부근의 소음과 진동을 주의 깊게 측정 한다면 차량 주행 중에 궤도의 각종 상태를 감시할 수 있다.

철도차량의 소음과 진동을 주파수영역에서만 분석할 경우 시간 혹은 속도 변화에 대한 소음과 진동의 특성을 알 수 없는 문제점이 있다. 철도차량의 소음과 진동은 차륜과 궤도, 터널 등과 같은 외부 원인의 영향을 계속 받 아 주파수 특성이 바뀌는 비정상(non-stationary) 상태이므로 기존의 푸리에 변환은 짧은 구간의 특성분석에서만 사용이 가능하다. 그러므로 시간-주파수 변환을 이용하여 보다 긴 거리의 소음과 진동의 시간에 대한 주파수 특성 변화를 분석할 필요가 있다.

본 연구는 고속철도차량 윤축부근의 소음과 진동을 고속선과 기존선에서 측정 및 분석하여 주행 중 차륜/궤도 상태감시에 활용하는데 목적이 있다. 저장된 각 데이터는 시간-주파수 변환의 한 방법인 단시간 푸리에 변환 (short-time Fourier transform)과 불규칙 신호처리 방법을 이용하여 분석하였다.

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

^{**} 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단

2. 신호처리

2.1 단시간 푸리에 변환

철도차량에서 측정한 소음과 진동 신호 비정상 상태인데 이러한 신호 분석을 위한 일반적 수학적 체계는 아직 없는 상태이다. 그래서 비정상 상태신호의 분석에서는 짧은 시간동안은 정상(stationary)상태로 가정하고 각 짧은 시간에서 분석을 하고 이들을 통합하게 된다.¹

시간-주파수 변환의 한 방법인 단시간 푸리에 변환은 주파수 영역만을 고려하는 기존의 푸리에 변환에 시간영 역 특성까지 같이 고려한 것이다. 이 변환은 일정 크기의 창함수(window function) w(ζ-t)를 이용하여 신호 *f*(t)를 여러 구간으로 나누고, 나누어진 각 구간에 대해서 푸리에 변환을 하는 방법으로 다음과 같이 정의한다.²

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

단시간 푸리에 변환을 이용하면 시스템의 시간에 따른 주파수 성분을 구할 수 있다.

2.2 불규칙 신호처리³

(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.

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

여기서 EI 1는 평균을 나타낸다.

(2) 상호 상관함수(cross-correlation function)

서로 다른 두 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) 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.

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

(4) 상호 스펙트럼 밀도(cross-spectral density)

상호 스펙트럼 밀도는 상호 상관함수를 푸리에 변환한 것이다. 창함수도 같이 고려한 상호 스펙트럼 밀도 S_n(t, f)는 다음과 같이 나타낸다.

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

(5) 주파수 응답함수(frequency response function)

시스템의 입력과 출력의 관계를 표현한 것으로 다음과 같이 나타낸다.

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

(6) 기여도(coherence)

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

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

3. 소음 및 진동 신호의 수집과 처리

3.1 센서 설치 및 신호 수집

한국형 고속열차에서 객차의 차륜 앞에 마이크로폰을, 축상에 상하와 좌우 방향 진동가속도계를 설치하여 고속 선과 기존선의 소음과 진동특성을 비교분석하였다. 여기서 사용한 마이크로폰은 B&K사 4189-A-021이고 가속도 계는 좌우방향에 Kistler사 8774A50, 상하방향에 PCB사 338C04를 사용하였다. 마이크로폰은 될 수 있으면 차륜 근처에 위치시켜 공기 유동에 의한 소음의 영향을 줄이고자 하였다. 한편 윤축은 주행 중에 고속으로 회전을 하 여 가속도계 부착이 매우 어렵기 때문에 윤축진동의 영향을 직접 받는 축상에 가속도계를 부착하였다.

그림 1은 설치한 센서와 데이터 수집 및 저장장치의 구조를 나타내고, 그림 2와 3은 윤축 앞과 마이크로폰과 축상 상하 및 좌우방향 진동가속도계가 부착된 현황을 나타내고 있다. 각 신호는 National Instruments사 PXI(DAQ보드 : PXI-4462 & 4472, 제어기 : PXI-8187)를 이용하여 20480Hz로 표본(sampling)되어 m+p사 스마트 오피스 분석기(Smartoffice Analyzer)를 이용하여 계측시스템에 저장한 뒤 후처리(post-processing)를 수행하였다.

3.2 신호 처리

차량 계측시스템에 수집된 데이터는 MATLAB을 이용하여 단시간 푸리에 변환을 수행하였다. 이때 데이터를 1 초 간격으로 20480개씩 나눈 뒤 각 구간은 정상상태로 가정하고 앞의 불규칙 신호처리방법을 적용하였다. 푸리에 변환시 필요한 데이터 개수는 8192개로 하고 모두 해닝창(Hanning window)을 적용하였는데, 이때 데이터들의 겹 침(overlap) 비율은 50%로 하였다. 처리한 결과는 스펙트로그램(spectrogram)으로 나타내었다.

마이크로폰의 신호처리에서는 청감보정필터를 적용하지 않았는데, 이는 보정에 의한 주파수 성분의 증폭 혹은 감쇄로 인해 왜곡이 발생하여 상호 스펙트럼 밀도, 기여도, 주파수 응답함수와 같이 가속도계 신호와의 관계를 확 인이 곤란할 수 있기 때문이다.

4. 실험결과

그림 4~7은 각각 고속선과 기존선에서의 마이크로폰과 진동가속도의 자기 스펙트럼 밀도, 상호 스펙트럼 밀도, 주파수 응답함수, 기여도를 나타낸다. 고속선에서는 300km/h주행과 자갈 및 콘크리트 도상(C터널)이 있는 구간을 선택하였고, 기존선에서는 곡선, 이음매, 분기기, 교량 등이 있는 구간을 선택하였는데 이는 각각의 시간-주파수



그림 1. 계측시스템 구조



그림 2. 마이크로폰 설치현황



그림 3. 윤축 상하 및 좌우방향 진동가속도계 설치현황

특성을 알기 위함이다.

4.1 자기 스펙트럼 밀도

그림 4는 고속선과 기존선에서 차륜앞 마이크로폰과, 가속도계의 좌우방향과 상하방향 신호를 자기 스펙트럼 밀도로 나타낸 결과이다.

(1) 고속선

마이크로폰의 주파수 성분은 0~2000Hz에서는 특정한 높은 주파수 성분이 없는데, 터널이나 분기기에서 그 영 역이 넓어지는 것을 알 수 있다. 2000~4000Hz에서는 거의 일정한 주파수 성분을 기반으로 하여 특정한 높은 주 파수 성분들이 있다. 그러나 4000Hz이상에서는 높은 주파수 성분들이 있으나 그 크기는 4000Hz이하의 크기보다 는 작아서 시간-주파수 결과에서는 잘 보이지 않는다. 시간-주파수 결과에서 거의 선으로 나타나고 속도나 시간에 따라서 변하지 않는 성분들은 고유주파수로 추정된다.

가속도계의 주파수 성분은 대체로 3000Hz이하에서는 주파수 성분의 높이가 비교적 낮으나 3000Hz이상 특히 3000~4000Hz와 5000Hz이상에서 잘 나타난다. 5000Hz이상에서는 날카로운 높은 주파수 성분 없이 좌우방향의 경우 7000~8000Hz, 상하방향의 경우 8000~9000Hz를 중심으로 퍼져서 나타난다.

분기기 통과 시 마이크로폰과 가속도계 처리결과에서 비교적 넓은 주파수 영역에서 높게 나타나고 있는데 이는 충격에 의한 것으로 보인다. 터널근처 혹은 안에서 마이크로폰과 가속도계 결과 모두 3000Hz~4000Hz에서 속도변 화와 관계없이 높은 주파수 성분의 확인이 가능하다. 콘크리트 도상인 C터널에서는 마이크로폰 결과에서는 관찰 하기 어렵지만 가속도계 결과에서는 자갈도상과 달리 약 800Hz와 1000Hz에서 높은 주파수 성분을 관찰할 수 있 는데 이는 콘크리트 도상의 고유 특성으로 추정된다.

(2) 기존선

마이크로폰의 주파수 성분은 고속선의 경우와 비슷하게 대체로 1000Hz이하 주파수에서 매우 높게 나오고 고주 파로 갈수록 점점 낮아지고 있지만 그 크기는 상당히 낮아졌음을 확인할 수 있다. 특히 500Hz이하에서 선으로 나 타나는 높은 주파수 성분을 확인할 수 있을 정도이다. 고속선 결과에서 2000~4000Hz범위의 높은 주파수 성분은 기존선에서도 높이가 조금 낮아졌지만 일부가 그대로 남아있음을 알 수 있다. 가속도계의 주파수 성분은 고속선 과 유사하게 3000~4000Hz와 5000Hz이상에서 높게 나타나고 있는데 상대적인 높이는 낮아져 있다. 그런데 고속 선에서 비교적 낮게 나타났던 500Hz이하 성분들은 기존선에서도 여전히 높게 나타나는데 특히 상하방향에서 높 게 나타나고 있다.

마이크로폰 결과에서는 주로 1000Hz이하 주파수 영역에서 고르게 높게 나타나고 일부는 전 주파수 영역에서 고르게 높게 나타나는 것이 많음을 확인할 수 있는데 이는 이음매 통과시 충격음으로 인한 것으로 보인다. 이 충 격은 가속도계에서도 나타나는데 마이크로폰 결과와는 다르게 전 주파수 영역에서 잘 나타나고 있다.



마이크로폰 결과의 60초 부근에서 곡선부 통과시 마찰음으로 인해 주파수 전영역에서 높게 나오는데 가속도계 결과에서도 일부 확인이 가능하다. 이로부터 마찰음은 특정한 주파수에서 높게 나오기 보다는 백색잡음 혹은 분 홍색 잡음과 같이 전 대역 혹은 특정 대역에서 높게 나오는 특성을 가지는 것으로 추정할 수 있다. 80초 부근은 철제교량을 통과할 때인데 이때 0~1000Hz 영역 전반에 걸쳐 주파수 성분이 높음을 알 수 있는데 가속도계 신호 에서도 일부 확인이 가능하다. 100초 부근은 KTX와 교행을 하였는데 마이크로폰 결과에서 1000Hz이하 영역이 높게 나오는 것을 확인할 수 있고 가속도계에서도 그 특성이 약간 나타나고 있다.

4.2 상호 스펙트럼 밀도

그림 5는 고속선과 기존선에서 차륜앞 마이크로폰과, 가속도계의 좌우방향과 상하방향 신호의 상호 스펙트럼 밀도 결과를 나타내고 있다.

(1) 고속선

3000~4000Hz에서 높은 주파수 성분이 공통으로 나타나는데 이는 상하방향 보다는 좌우방향 가속도계에서 잘 드러나고 있다. 특히 터널 근처 혹은 안에서 나타나는 높은 주파수 성분은 상호 스펙트럼 밀도가 자기 스펙트럼 밀도보다 잘 나타나는데, 이 영역에서 차륜과 궤도의 상호작용에 의한 소음과 진동의 발생은 높은 상관관계가 있 는 것으로 추정이 가능하다. 그러나 여기에서는 확실하게 단정하기 어려우므로 기여도에서 다시 확인을 해 볼 것 이다.

콘크리트 도상인 C터널을 통과할 때 나타나는 800~1000Hz에서 높은 주파수 성분은 상호 스펙트럼 밀도가 좀 더 잘 관찰할 수 있음을 알 수 있다.



그림 5. 상호 스펙트럼 밀도 (좌 : 고속선, 우 : 기존선)

(2) 기존선

이음매 혹은 분기기 등을 통과하면서 발생하는 충격의 영향은 자기 스펙트럼밀도와 같이 상호 스펙트럼 밀도에 서도 전체 주파수영역에서 높아져 선으로 나타남을 알 수 있다.

60초 부근에서 곡선부 통과시 발생하는 마찰음은 상호 스펙트럼 밀도에서는 가속도계(좌우) - 마이크로폰의 경 우 3000~4000Hz, 7000Hz부근에서 높게 나타나고, 가속도계(상하) - 마이크로폰의 경우 8000~9000Hz에서 높게 나 타남을 확인할 수 있다. 80초 부근 철제교량을 통과할 때 나타나는 주파수 성분은 상호 스펙트럼 밀도에서는 500~1000Hz영역에서 잘 나타나고 있다. 100초 부근 KTX교행은 상호 스펙트럼 밀도에서는 그 특성이 잘 드러나 지 않고 있다.

4.3 기여도

그림 6은 고속선과 기존선에서 차륜앞 마이크로폰과, 가속도계의 좌우방향과 상하방향 신호의 기여도 결과를 나타내고 있다.

(1) 고속선

3000~4000Hz영역에서 가속도계와 마이크로폰 사이에는 높은 기여도가 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 차륜 과 궤도의 상호작용에 의해 발생하는 소음과 진동은 이 주파수 영역에서 비교적 높은 선형성을 가진다고 추론할 수 있다. 진동방향과 소음과의 관계를 주파수 영역만 고려한 결과에서 보면 좌우방향이 상하방향보다 소음과의 관계가 더 높음을 알 수 있다.



기존선에서는 고속선과 달리 0~1000Hz영역에서 가속도계와 마이크로폰 사이의 기여도가 비교적 높게 나온다.



그림 6. 기여도 (좌 : 고속선, 우 : 기존선)

이는 마이크로폰에서 이음매나 분기기 통과시 발생하는 충격음의 주파수 특성과 유사하므로 이의 영향으로 추정 된다. 그런데 고속선에서 기여도가 높게 나온 3000~4000Hz영역은 기존선에서는 가속도계(좌우) - 마이크로폰에서 비교적 높게 나오지만 가속도계(상하) - 마이크로폰에서는 확인하기 어렵다.

4.4. 주파수 응답함수

그림 7은 고속선과 기존선에서 차륜앞 마이크로폰과, 가속도계의 좌우방향과 상하방향 신호의 주파수 응답함수 결과를 나타내고 있다. 여기에서 주파수 응답함수으로의 입력은 축상 진동가속도계 신호로 하고 출력은 마이크로 폰 신호로 하였다.

(1) 고속선

가속도계와 마이크로폰에서 측정한 신호의 주파수 응답함수를 보면 터널 근처 혹은 안에서 발생한 특정한 높은 주파수 성분은 대부분 사라졌음을 알 수 있다. 이는 주파수 응답함수의 정의로부터 소음신호의 주파수변환결과에 서 윤축진동 신호의 주파수 변환결과를 나누어서 대부분 제거가 되므로 시간 혹은 속도에 관계없이 일정한 주파 수 성분이 나타나는 것으로 볼 수 있다.

주파수 응답함수 결과 중 0~3000Hz에서 높은 주파수 성분이 있는데 0~1000Hz의 경우에는 전 주파수 영역에서 매우 높게 나오고, 1000Hz, 2000Hz, 2500Hz부근에서도 비교적 높은 주파수 성분이 있다. 콘크리트 도상인 C터널 에서는 가속도계(상하)와 마이크로폰의 주파수 응답결과가 다른 구간에 비해 800Hz, 1000Hz부근이 비교적 높게 나타나고 있다.

(2) 기존선

고속선의 경우와 마찬가지로 기존선에서도 마이크로폰 신호에서 가속도 신호성분을 제거하면 시간 혹은 속도에





따라 변하지 않는 주파수 성분이 남는다. 특히 이음매를 통과할 때 발생하는 충격, 교량통과, 교행의 영향은 대부 분 제거가 되었음을 알 수 있다. 그러나 곡선 통과에 의한 마찰음과 역내 분기기 통과시 발생하는 충격의 영향은 완전히 제거가 되지 않은 상태이다.

고속선의 결과와 유사하게 0~3000Hz영역에서 높게 나오지만 0~1000Hz영역에서 매우 높게 나오는 성분들은 기 존선 결과에서는 나타나지 않고 있다. 또한 1000Hz, 2000Hz, 2500Hz부근의 비교적 높은 주파수 성분은 약간 나 타나고 있으나 뚜렷하게 구별하기는 어렵다.

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 고속철도 차량의 주행 중 감시의 기초연구를 위해 윤축부근의 소음과 진동을 시간-주파수 변환 방법의 하나인 단시간 푸리에 변환을 이용하여 분석을 하였다. 이를 위해 마이크로폰을 차륜 앞에, 좌우 및 상하 방향 가속도계를 축상에 설치하고 각 신호들은 차량 데이터 수집시스템에 저장하였다. 이 데이터들을 단시간 푸 리에 변환과 불규칙 신호처리를 이용하여 자기 스펙트럼 밀도, 상호 스펙트럼 밀도, 기여도, 주파수 응답함수를 구하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시간-주파수 변환방법을 이용하면 고속선에서는 도상, 터널, 분기기 등의 특성을, 기존선에서는 곡선부 마찰음, 이음매, 분기기, 철제교량, 교행 등의 특성을 구별할 수 있고, 일시적으로 나타났다가 사라지는 높은 주파수 성분의 발생 시점과 그 주파수 특성을 알 수 있다. 이는 주파수영역만을 고려한 기존의 푸리에 변환에서는 할 수 없는 부분이다. 따라서 시간-주파수 변환방법은 주행 중 감시에 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있다.
- (2) 차륜 앞에서 측정한 소음과 축상 진동은 고속선과 기존선 모두 3000~4000Hz 영역에서 상호 스펙트럼 밀도 와 기여도가 높게 나타나고 있다. 따라서 궤도와 차륜의 상호작용에 의한 소음과 진동은 이 주파수 영역에서 높은 선형성을 가지고 있을 것으로 추정된다.
- (3) 고속선의 콘크리트 도상 구간을 주행할 때 가속도계의 자기 스펙트럼 밀도, 가속도계와 마이크로폰의 상호 스펙트럼 밀도와 주파수 응답함수의 800~1000Hz 영역이 자갈도상 구간에 비해 주파수 성분들이 높게 나타나 고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이는 콘크리트 도상의 고유특성으로 추정된다.
- (4) 기존선을 주행할 때 이음매 혹은 분기기를 통과할 때 충격으로 인해 마이크로폰이나 가속도계 모두 주파수 전 영역이 높아져 수직선으로 나타나고 있다. 곡선부를 통과할 때 발생하는 마찰음은 마이크로폰에서는 거의 모든 주파수 영역이 높고 가속도계 결과에서도 일부 확인이 가능하다. 이로부터 마찰음은 백색 혹은 분홍색 잡음의 특성을 가지는 것으로 추정된다.

향후에 마이크로폰과 축상 가속도계의 신호를 주파수 응답함수를 이용하여 고속 주행시 발생하는 공력소음의 주파수 특성을 분석할 것이다. 더 나아가 마이크로폰과 가속도계를 이용하여 궤도 상태를 감시하는 방법으로의 활용을 검토할 예정이다.

후기

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

참고문헌

- 1. Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle, and Stephen M. Kogon, "Statistical and Adaptive Signal Processing", Artech House, Inc., 2005.
- 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.
- 3. J. S. Bendat, A. G. Piersol, "Random Data Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons Inc., 2000.