

시간-주파수 분석을 이용한 고속철도차량 윤축에서 발생하는 소음과 진동의 동적 특성

Dynamic Characteristics of the Noise and Vibration of High-speed Train's Wheelset using Time-varying Frequency Analysis

이준석[†] · 최성훈* · 김상수* · 박준수**

Jun Seok Lee · Sunghoon Choi · Sang-Soo Kim · Choosoo Park

Abstract In this paper, a relationship between the noise and vibration of a high-speed train's wheelset is examined by using time-varying frequency analysis with random data analysis which together contributes to a reduction in the number of experimental running. The noise and vibration of the wheelset is mainly caused by an interaction between the wheel and railway which shows in non-stationary characteristics. For the analysis, they are measured by some microphones and accelerometers, and those signals are post-processed by time-varying frequency analysis with random data analysis. From the analysis, their methods are useful for analyzing the noise and vibration of high-speed train's wheelset.

Keywords : high-speed railway, wheelset, noise, vibration, time-varying frequency analysis, random data analysis

요 지 본 논문에서는 보다 적은 실험으로 고속철도차량의 윤축에서 발생하는 소음과 진동의 동적 특성을 알기 위해 불규칙 신호처리와 시간-주파수 해석을 이용하여 분석하였다. 윤축의 소음과 진동은 대부분 차륜과 궤도의 비정상 상호작용이 원인이다. 이를 분석하기 위해 마이크로폰과 가속도계를 이용하여 데이터를 수집하고 불규칙 신호처리와 시간-주파수 분석을 이용하여 분석하였다. 분석한 결과, 이 방법들은 고속철도차량의 윤축에서 발생하는 소음과 진동의 동적특성을 분석하는데 유용함을 확인하였다.

주 요 어 : 고속철도차량, 윤축, 소음, 진동, 시간-주파수 분석, 불규칙 신호처리

1. 서 론

철도차량이 주행할 때 윤축에서 발생하는 소음과 진동은 주로 차륜과 궤도의 상호작용으로 인해 발생한다. 차륜과 궤도의 상호작용에 의한 소음과 진동은 차륜과 궤도의 표면거칠기, 궤도틀림, 이음매, 분기기, 침목 등과 같은 궤도 상태의 영향을 주로 받는다. 또한 300km/h 고속주행의 경우 차륜과 궤도의 상호작용 외에 공력의 영향도 받게 된다 [1]. 따라서 차량이 주행하는 동안 윤축에서 발생하는 소음

과 진동은 속도, 궤도 상태 등에 따라 그 특성이 계속 변하는 비정상상태(non-stationary)로 볼 수 있다.

철도차량 윤축에서 발생하는 소음과 진동의 측정은 차량이 지나갈 때 방사하는 소음을 선로변 고정점에서 측정하거나[2], 차량 주요부위에 센서를 부착하고 이 신호들을 차상에서 측정하고 있다[3]. 전자는 지나가는 차량에서 주변으로 방사되는 소음의 측정에는 적합하지만 속도, 선로상태 등 다양한 조건에 따른 특성의 변화를 관찰할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 다양한 조건에 따른 특성의 변화를 관찰할 수 있는 후자를 사용하였다.

일반적으로 철도차량의 소음과 진동 측정의 경우 시간영역에서 데이터를 수집하여 이를 푸리에 변환을 이용하여 주파수영역에서만 분석하고 있다. 이를 통해 차량이 300 km/h 주행시 1000Hz 이하는 공력소음, 1250~2000Hz는 궤도

* 책임저자 : 정회원, 과학기술연합대학원대학교/한국철도기술연구원
E-mail : junseok@krri.re.kr

TEL : (031)460-5272 FAX : (031)460-5649

• 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 선임연구원

** 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 책임연구원

도의 영향, 2000Hz 이상은 차륜의 영향으로 알려져 있다[4]. 그러나 이는 특정구간을 선택하고 그 구간의 평균속도만을 고려하므로 시간, 속도, 궤도상태 등에 대한 소음과 진동의 주파수 변화의 특성뿐만 아니라 동적 상관관계 변화도 알 수 없다. 그런데 이러한 조건을 다양하게 변화시키는 것은 영업운전이 빈번한 현실에서는 불가능하다. 그러므로 횟수가 한정된 실현으로 소음과 진동의 동적 특성과 이들의 상관관계를 알려면 차상에서 측정을 하고 측정된 신호를 시간-주파수 분석과 불규칙신호처리를 함께 이용하여 분석해야만 한다.

본 연구에서는 측정횟수가 제한되어 있는 상태에서 차륜과 궤도의 상호작용에 의해 방사되는 소음과 윤축으로 전달되는 진동의 시간 혹은 속도에 의한 각각의 주파수 특성과 상관관계 분석의 가능성을 알아보았다. 이를 위해 고속 철도차량 윤축에 마이크로폰과 가속도계를 부착하고 주행 중에 소음과 진동신호를 수집하였다. 수집한 소음과 진동 데이터들은 시간-주파수 특성 및 상관관계를 알기 위하여 불규칙신호처리와 시간-주파수 분석을 같이 이용하였다. 이 결과로부터 측정횟수가 제한되어도 소음과 진동의 동적 특성 분석뿐만 아니라 이들의 상관관계 분석도 가능함을 나타내었다. 이를 통해 향후에 진행될 윤축의 소음과 진동을 이용한 궤도상태 감시의 기초를 마련하고자 한다.

2. 비정상 불규칙 신호처리

비정상 불규칙 신호처리에는 단시간 푸리에 변환, 위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution), 웨이브렛 변환(wavelet transform) 등이 많이 사용되고 있는데, 본 연구에서는 빠른 연산속도와 일정한 주파수 해상도를 얻기 위해 단시간 푸리에 변환을 이용하였다. 이 방법은 짧은 시간동안은 정상(stationary)상태로 가정하고 각 짧은 시간에서 분석을 한 뒤 통합하는 방법이다. 여기에서 주의할 점은 저주파 분석을 하기 위해서는 보다 긴 시간의 데이터를 처리해야 하는데 이 경우 시간 해상도가 떨어질 수 있고, 고주파 분석을 하기 위해서는 보다 짧은 시간의 데이터를 처리해야 하는데 이 경우 주파수 해상도가 떨어질 수 있으므로 데이터 처리를 위한 적절한 짧은 시간의 선택이 중요하다[5]. 여기에서는 윤축의 소음 및 진동 신호를 수집할 때 사용한 표본주파수(sampling frequency)를 고려하여 짧은 시간을 선택하였다.

본 연구에서 사용한 불규칙 신호처리방법은 자기 및 상호 스펙트럼밀도, 기여도, 주파수 응답인데, 이를 모두 시간영역 특성도 같이 고려하였다[6]. 여기서 기여도는 두 신호 주파수 성분의 선형관계를 나타내는 것으로 0과 1사이

의 값을 가지는데, 1에 가까울수록 선형관계가 높아진다. 주파수 응답은 일반적으로 시스템의 입력과 출력의 관계를 표현한 것으로 시스템의 고유한 특성을 나타내는데 사용하지만, 여기에서는 신호의 특정 주파수 성분 제거를 수행하기 위해 사용하였다[7].

3. 소음 및 진동 신호의 측정과 분석방법

3.1 신호수집

윤축의 소음과 진동을 측정하기 위해 한국형 고속철도차량(한빛 350)의 차륜 앞에 마이크로폰, 축상에 좌우와 상하 방향 진동가속도계를 설치하였다. Fig. 1은 데이터 수집 및 저장장치의 구조를 나타내고, Fig. 2는 차륜 앞 마이크로폰과 축상 좌우와 상하 방향 진동가속도계가 부착된 현

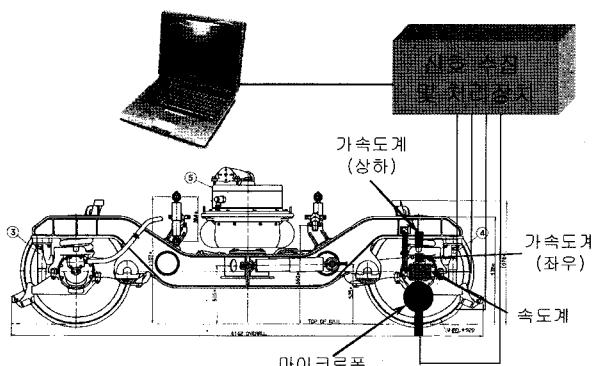
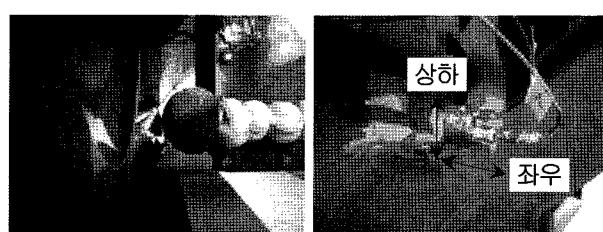


Fig. 1. Measurement setup



(a) Microphone (b) Accelerometers

Fig. 2. Microphone and accelerometers

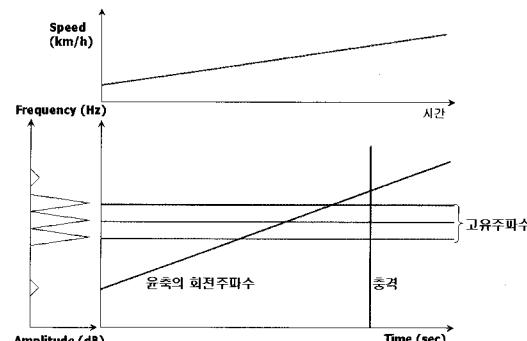


Fig. 3. Explanation of signal processing results

횡을 나타내고 있다. 차륜과 궤도의 상호작용의 영향을 보다 크게 하기 위해 마이크로폰을 될 수 있으면 차륜과 가깝게 설치하였다. 가속도계의 경우 윤축의 고속회전으로 부착이 매우 어렵기 때문에 윤축에 가장 근접하고 이의 영향을 직접 받는 축상에 부착하였다.

소음과 진동의 측정은 다른 영업차량으로 인해 중간 정차가 어려워 고속선 진입 후 속도가 100km/h에서 300km/h로 증가하는 구간을 선택하였다. 속도가 증가하는 구간에서 각 센서의 신호들은 신호처리장치를 이용하여 20480Hz로 표본하고 이를 데이터수집 장치에 저장한 뒤 후처리(post-processing)를 수행하였다.

3.2 신호처리

수집한 데이터는 1초 간격으로 나눈 뒤 각 구간은 정상 상태로 가정하고 앞의 불규칙 신호처리방법을 적용하여 시간-주파수 분석을 수행하였다. 푸리에 변환시 필요한 데이터 개수는 8192개로 하고 모두 해닝창(Hanning window)을 적용하였는데, 이때 데이터들의 겹침(overlap) 비율은 50%로 하였다.

마이크로폰의 신호처리에서는 청감보정필터(weighting filter)를 적용하지 않았는데, 이는 보정에 의한 주파수 성분의 증폭 혹은 감쇄로 인해 왜곡이 발생하여 상호 스펙트럼 밀도, 기여도, 주파수 응답과 같은 각 센서 신호들의 상관관계 확인이 곤란하기 때문이다.

3.3 분석방법

신호 처리한 결과는 시간-주파수 분석 결과를 중심에 두고 왼쪽에는 주파수 분석만 한 결과를, 위에는 차량 주행속도를 두어 서로 비교할 수 있도록 하였다.

차량 주행 중 주파수 특성은 윤축의 회전에 의해 시간 혹은 속도에 따라 변하여 사선으로 나타나는 동적 성분과, 고유주파수에 의해 수평선으로 나타나는 정적 성분으로 나누고 있다[8]. 또한 분기기와 같은 궤도불규칙을 통과할 때 차량 충격이 발생하여 전주파수 영역이 높아져서 수직선으로 나타나는 충격 성분도 있다[9,10]. Fig. 3은 신호처리 분석방법의 설명을 나타내는데 본 연구에서는 이를 중심으로 분석을 수행하였다.

4. 측정결과와 분석

Fig. 4~7은 속도가 증가하는 구간에서 수집한 마이크로폰과 진동가속도 데이터를 0~5120Hz 영역에서 자기 및 상호 스펙트럼 밀도, 주파수 응답, 기여도로 나타낸 것이다. 이로부터 한 번의 주행 중 차상 측정으로 속도변화에 대한

소음과 진동의 동적 특성과 이들의 상관관계를 같이 알 수 있고 궤도에 의한 충격의 영향도 확인이 가능하다. 측정결과에 대한 상세한 분석은 다음과 같다.

4.1 자기 스펙트럼 밀도

Fig. 4는 마이크로폰과 진동가속도계의 자기 스펙트럼 밀도 결과를 나타낸 것이다.

마이크로폰, 진동가속도계의 시간-주파수 분석 결과에서는 시간 혹은 속도에 따라 변하는 성분과 변하지 않는 성분을 분명하게 구별할 수 있고, 일시적으로 나타났다가 사라지는 주파수 성분의 발생시간도 알 수 있다.

마이크로폰의 주파수영역 결과를 보면 저주파에서 가장 높고 고주파로 갈수록 점점 낮아진다는 것만 알 수 있다. 그런데 시간-주파수 분석결과에서는 속도가 증가할수록 저

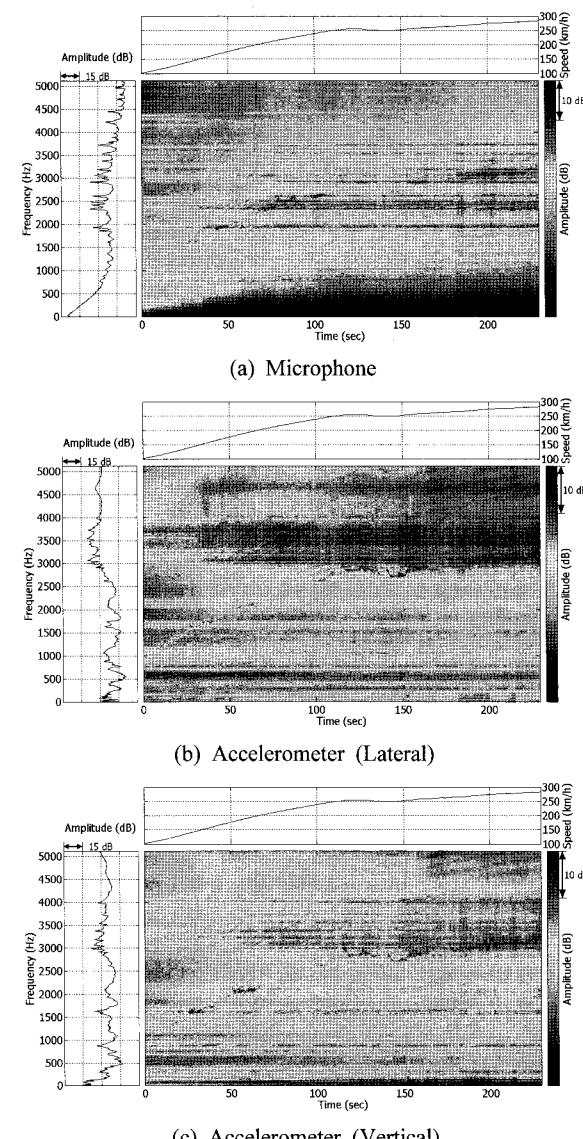


Fig. 4. Auto-spectral density

주파에서 전반적으로 주파수 성분들이 높아짐을 알 수 있다. 1000Hz 이하는 공력소음의 영향이라고 앞에서 설명한 바 있으나, 이 결과에서는 속도에 따른 변화특성이 있음을 알 수 있다. 궤도의 영향으로 알려져 있는 1250~2000Hz는 공력이나 차륜에 비해 낮게 나타나고 있다. 2000~4000Hz는 차륜의 영향으로 알려져 있는데 이는 거의 일정한 주파수 성분들로 구성되어 있다. 또한 4000Hz 이상에서는 높은 주파수 성분들이 조금 있지만 그 높이는 상대적으로 낮아 잘 나타나지 않는다.

좌우와 수직방향 진동가속도 결과에서는 마이크로폰의 결과와는 달리 공력의 특성인 1000Hz 이하에서 넓게 나타나고 속도에 따라 높아지는 성분은 나타나지 않는다. 그런데 궤도의 영향으로 알려져 있는 1000Hz, 1700Hz 근처와 차륜의 영향으로 알려져 있는 2000Hz 전후, 3000~4000Hz, 4500Hz 근처에서 비교적 주파수 대역이 넓고 속도 혹은 시간에 관계없는 일정한 주파수 성분들이 나타나고 있다.

마이크로폰, 진동가속도계의 결과 모두 윤축 회전의 영향으로 1000~3000Hz 영역에서 속도의 경향을 따라가는 높은 주파수 성분이 있다. 이는 1600Hz, 2000Hz, 3000Hz 근처에서 시간 혹은 속도의 변화와 관계없이 높은 주파수 성분과 만나면 공진이 발생하여 더욱 높아지고 있다.

마이크로폰, 진동가속도계의 결과 모두 분기기를 통과할 때는 궤도의 매우 짧은 불연속으로 인해 충격이 발생하여 180~220sec에서 단시간에 넓은 주파수 영역에서 높아져 수직으로 나타나고 있다.

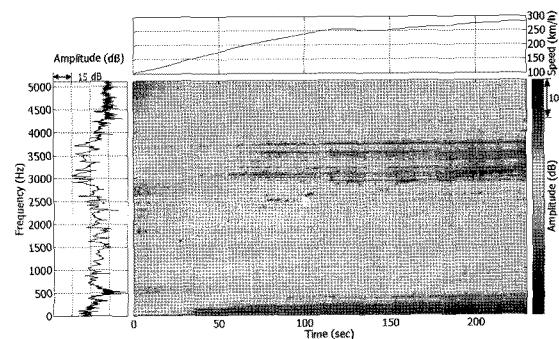
4.2 상호 스펙트럼 밀도

Fig. 5는 마이크로폰과 좌우 혹은 수직방향 진동가속도계의 상호 스펙트럼 밀도 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서는 상관관계가 높은 주파수 성분이 강조되어 나타난다.

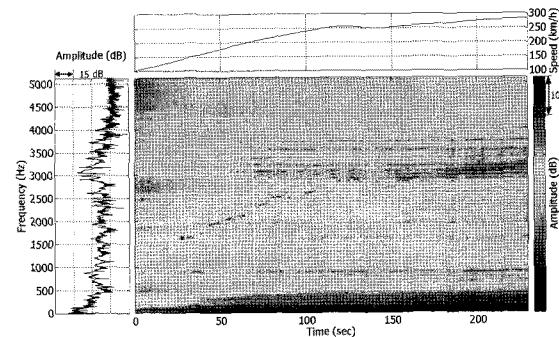
마이크로폰과 좌우 혹은 수직방향 가속도계 상호 스펙트럼 밀도에서는 0~500Hz 영역, 3000~4000Hz 영역에서 높게 나타나고 있다. 특히 3000~4000Hz에서는 마이크로폰과 좌우방향 가속도계의 결과에서 주파수 성분이 수직방향 가속도계와의 결과에 비해 높게 나타난다. 따라서 3000~4000Hz 주파수 영역에서 궤도와 차륜의 상호작용에 의해 발생하는 소음과 윤축의 좌우방향 가속도는 동시에 발생하였음을 확인할 수 있는데, 이에 대해서는 기여도에서 다시 확인 할 것이다.

가속도계 좌우와 수직방향 상호 스펙트럼 밀도의 3000~5000Hz 영역에서는 매우 높게 나타나고 있고, 0~500Hz에서는 다소 높게 나타나고 있다.

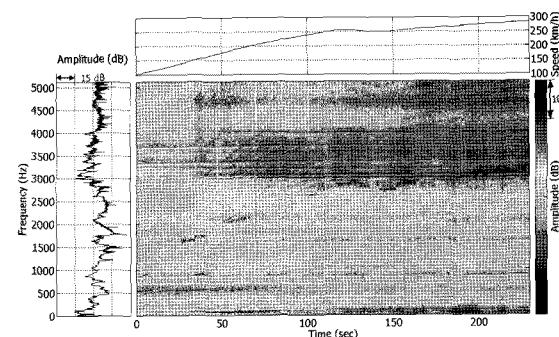
마이크로폰과 진동가속도계의 상호 스펙트럼 밀도에서 1000~3000Hz의 윤축 회전과 관련이 있는 주파수 성분은



(a) Microphone - Accelerometer (Lateral)



(b) Microphone - Accelerometer (Vertical)



(c) Accelerometer (Vertical) - Accelerometer (Lateral)

Fig. 5. Cross-spectral density

상호 스펙트럼 밀도에서도 여전히 잘 나타나고 있다. 또한 3000~4000Hz에서 속도의 경향과 같은 높은 주파수 성분들이 50~100sec에서 높게 나타나고 있는데 이는 1000~3000Hz에서 나타나는 높은 주파수 성분과 그 경향은 유사하나 분명한 선으로 나타나는 것이 특징이다.

4.3 기여도

Fig. 6은 마이크로폰과 좌우 및 수직방향 가속도계의 기여도 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 두 신호 사이에 선형성이 높아져 선형관계도 높아짐을 의미한다.

공력소음의 영향인 1000Hz 이하는 기여도가 낮게 나오는데, 이는 고속 주행 중 공기흐름과 구조의 상호작용에 의

한 공력소음이 축상 가속도계에 대해 주는 영향은 이 주파수 대역에서 매우 낮음을 의미한다. 따라서 축상 가속도계는 이 주파수 대역에서 공력소음의 영향을 최소로 하면서 차륜과 궤도의 상호작용과 같은 특성을 확인할 수 있다. 이와 같은 특성은 향후 궤도상태감시에 활용할 예정이다. 마이크로폰과 진동가속도계 기여도 결과의 시간-주파수 분석에서는 500~1500Hz, 3000~4000Hz에서 높게 나타나고 있다. 특히 마이크로폰과 좌우방향 진동가속도계의 경우 3000~4000Hz에서 높게 나타나고 주파수 영역만을 고려한 결과에서도 확인이 가능하다. 이는 차륜과 궤도의 상호작용에 의해 차륜에서 발생하는 진동의 영향에 의한 것으로, 이 진동에 의해 방사되는 소음과 차륜을 통해 윤축으로 전달되는 진동은 3000~4000Hz 영역에서 높은 선형관계가

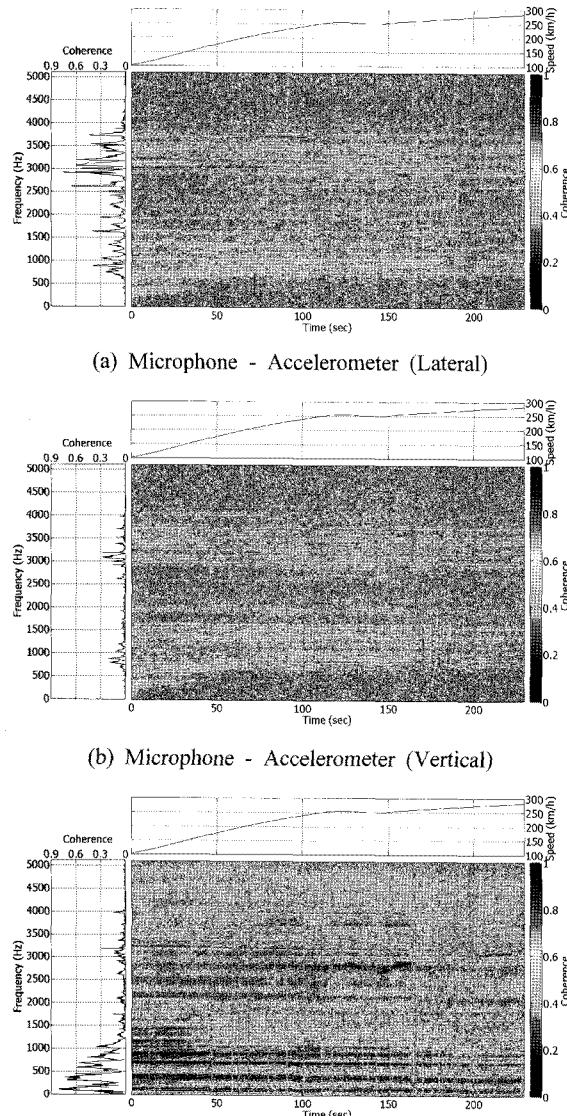


Fig. 6. Coherence

있음을 의미한다. 그런데 마이크로폰과 수직방향 진동가속도간은 주파수영역에서만 볼 때 전반적으로 0.3이하로 낮게 나오고 있어서 둘 사이에는 선형관계가 거의 없다고 잘못 생각할 수 있다. 그러나 시간-주파수 영역에서 보면 시간 혹은 속도의 변화에 따라 중간 중간에 0.8이상 높게 나오고 있는 것을 확인할 수 있으므로 순간적인 선형관계가 있음을 확인할 수 있다.

좌우와 수직방향 가속도계간 기여도는 전반적으로 높게 나타나고 있다. 그런데 단시간에 넓은 주파수 영역에서 매우 낮은 기여도가 중간중간에 나타나고 있는데 이는 궤도틀림이나 분기기 등의 영향에 의한 한 방향으로 작용하는 충격에 의해서 나타나는 현상이다.

4.4 주파수 응답

Fig. 7은 마이크로폰과 좌우 혹은 수직방향 가속도계의 주파수 응답 결과를 나타낸 것이다. 이 결과는 시스템의 입력과 출력의 관계를 나타내기도 하지만 출력에서 입력의 영향을 제거하는 기능도 수행한다. 본 연구에서는 후자의 특성을 이용하였는데 결과에서 시간 혹은 속도에 따라 변하는 성분들과 공통적으로 나타나는 성분들이 거의 제거가 되었음을 확인할 수 있다.

진동가속도계를 입력으로 하고 마이크로폰을 출력으로 한 결과에서는 0~1000Hz, 2000Hz, 2500Hz에서 높게 나온다. 특히 공력소음의 영향인 0~1000Hz는 마이크로폰의 자기 스펙트럼 밀도, 마이크로폰과 가속도계의 상호 스펙트럼밀도의 결과와 같이 전반적으로 높게 나오면서 속도가 증가할수록 그 폭이 넓어짐을 알 수 있다.

진동 가속도계의 경우 수직방향 진동가속도계를 입력, 좌우방향 진동가속도계를 출력으로 한 결과에서는 1000Hz, 3000~4000Hz에서, 좌우방향 진동가속도계를 입력, 수직방향 진동가속도계를 출력으로 한 결과에서는 0~500Hz, 800Hz, 1500Hz 부근에서 높게 나온다. 특히 진동가속도간의 결과는 좌우 혹은 수직방향 진동가속도계의 자기스펙트럼 결과에서의 주파수가 일정한 높은 성분과 그 위치가 일치하고 있으므로 이들은 윤축의 고유주파수로 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 윤축에서의 소음과 진동을 불규칙 신호처리와 시간-주파수 분석을 이용하여 동적인 특성을 알아보았다. 이를 위해 마이크로폰을 차륜 앞에, 좌우 및 상하방향 가속도계를 축상에 설치하고 각 신호들은 차량 데이터 수집시스템에 저장하였다. 이 데이터들은 비정상 불규칙 신호처리를 이용하여 시간-주파수 영역에서 자기 스펙트럼

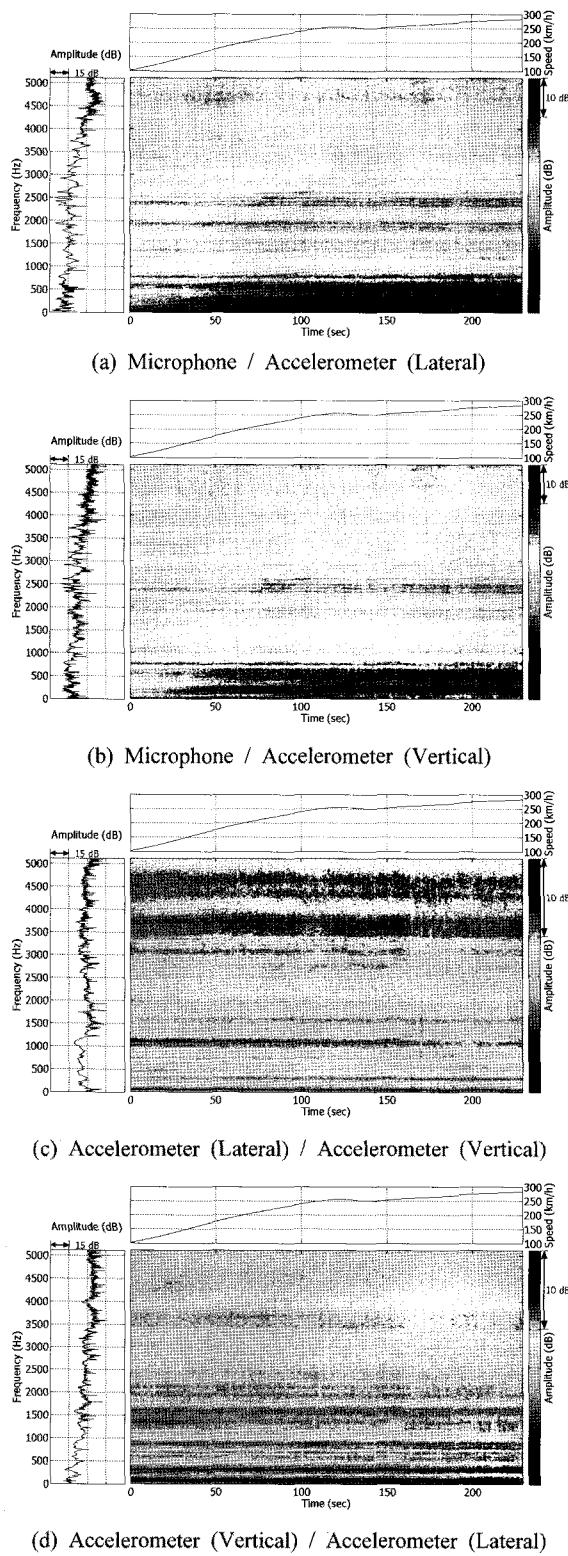


Fig. 7. Frequency response

밀도, 상호 스펙트럼 밀도, 기여도, 주파수 응답을 구하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 소음과 진동 신호처리에 시간-주파수 분석방법과 불규칙 신호처리를 같이 이용하면 한 번의 주행 측정으로 시간 혹은 속도에 따라 변하는 주파수 성분과 이들과 관계 없이 일정한 주파수 성분을 구별할 수 있고 상관관계 특성을 파악하는 것이 가능하였다. 또한 일시적으로 나타났다가 사라지는 높은 주파수 성분의 발생 시점과 그 주파수 특성을 함께 알 수 있었다. 이는 기존의 주파수 영역만을 고려한 푸리에 변환에서는 할 수 없는 부분이다. 따라서 불규칙 신호처리와 시간-주파수 분석을 같이 이용하는 방법은 횟수가 제한된 측정으로 윤축에서의 소음과 진동의 동적 특성을 분석하는데 유용함을 확인하였다.

(2) 마이크로폰과 가속도계의 자기스펙트럼 밀도에서는 공력의 영향인 1000Hz 이하의 경우 시간에 따라서 높이가 점점 높아지고 있으나 궤도나 차륜의 영향인 1000Hz 이상의 경우 속도에 비례하여 변하는 성분과 그렇지 않는 성분으로 구별할 수 있다. 속도에 따라 변하는 주파수 성분이 변하지 않는 성분과 만날 경우 공진이 발생하여 더욱 높아지고 있다.

(3) 윤축에서 발생하는 소음과 진동은 3000~4000Hz 영역에서 상호 스펙트럼 밀도와 기여도에서 높게 나타난다. 따라서 궤도와 차륜의 상호작용에 의해 차륜에서 발생하는 소음과 진동은 이 주파수 영역에서 높은 선형관계가 있음을 확인하였다.

(4) 주파수 응답을 이용한 경우 시간 혹은 속도에 따라 변하는 주파수 성분과 마이크로폰과 진동 가속도계에서 공통적으로 나타난 주파수 성분은 대부분 제거가 되었음을 알 수 있다. 진동 가속도계간 주파수 응답의 경우 자기스펙트럼밀도의 결과와 일치하는 주파수성분이 있는데 이는 윤축의 고유주파수로 볼 수 있다.

향후에 마이크로폰과 축상 가속도계의 신호를 주파수 응답을 이용하여 고속 주행시 발생하는 공력소음의 주파수 특성을 구체적으로 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 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Talotte, C.(2000), "Aerodynamic Noise : A Critical Survey," Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No. 3, pp. 549-562.
2. Dittrich, M.G. and Janssens, M.H.A.(2000), "Improved Measurement Methods for Railway Rolling Noise," Journal of Sound and Vibration, Vol. 203, No. 3, pp. 595-609.
3. Bracciali, A., Ciuffi, L., and Ciuffi, R.(1997), "Calibration of an On-board Noise Measuring Device by Simultaneous Measurements of Trackside Noise of Three Different Wheelsets for the ETR500 FS train," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 211, No. 1, pp.41-49
4. Thompson, D.J. and Gautier, P.E.(2006), "Review of Research into Wheel/Rail Rolling Noise Reduction," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 220, No. 4, pp. 385-408.
5. Hammond, J.K. and White, P.R.(1996), "The Analysis of Non-stationary Signals Using Time-Frequency Methods," Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, No. 3, pp. 419-447.
6. Bendat, J.S. and Piersol, A.G.(2000), "Random Data - Analysis and Measurement Procedures," John Wiley & Sons Inc.
7. Proakis, J.G. and Manolakis, D.G.(2007), "Digital Signal Processing-Principles, Algorithms, and Application," Pearson Education, Inc.
8. British Rail Research(1995), "Railway Vehicle Dynamic Course," Report No. RR-DYN-95-165.
9. Cawser, S.J., Hardy, A.E.J., and Wright, C.E.(2004), "Acoustic Track Monitoring, Phase 1: Initial Data Gathering and Analysis," Rail Safety and Standards Board.
10. 이준석, 최성훈, 김상수, 박춘수(2008), "시간-주파수 변환을 이용한 고속철도차량의 동특성 분석," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.

접수일(2009년 1월 8일), 수정일(2009년 4월 16일),
제재화정일(2009년 8월 3일)