

## 오더분석 및 상관관계를 활용한 철도차량 진동 데이터의 시간-주파수 분석

### Time-frequency Analysis of Train Vibration Using Order Analysis and Correlation

최성훈<sup>†</sup> · Takeru Igusa\* · 박춘수\*\*  
Sunghoon Choi · Takeru Igusa · Choonsoo Park

**Abstract** Short-time Fourier transforms (STFT) are useful for analyzing signals with harmonics that vary with time. If the variation of the harmonics with time is smooth, such as in kinematic vibrations in vehicles, then it is possible to improve the STFT using order spectra and correlation analysis. In this paper, it is shown how correlation analysis can be performed when the speed signal is noisy or unknown and then it is shown how order spectra become simple to compute after this analysis. The results are illustrated by an analysis of axle and car body vibrations in the prototype high-speed train, HSR-350x.

**Keywords** : kinematic vibrations, Order analysis, wavenumber spectra, parametric excitation

**요 지** Short-time Fourier transforms(STFT)은 시간에 따라 변동하는 조화성분을 가지는 신호의 분석에 유용하게 적용되는 방법이다. 철도차량의 진동신호에서 많이 발견되는 운동학적 진동은 조화 특성이 속도 변화에 따라 점진적으로 변하기 때문에 오더 분석 방법과 상관함수를 이용하면 STFT 분석 방법을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 차량의 속도 신호를 구할 수 없거나 잡음이 많을 때 상관함수를 이용하여 신호를 재추출하여 오더 분석을 적용하는 방법에 대하여 다룬다. 이 방법을 한국형고속열차의 운행 중에 취득한 차축 및 차체 진동데이터의 분석에 적용하여 기존의 STFT와 오더 분석을 이용한 방법을 비교 하였다.

**주 요 어** : 운동학적 진동, 오더 분석, 파수 스펙트럼, 파라메트릭 가진

## 1. 서 론

주행 중 측정된 철도 차량의 진동 또는 소음 신호는 비정상(non-stationary) 신호이기 때문에 STFT(Short Time Fourier Transform) 등의 방법을 이용하여 주파수 특성을 분석한다. 철도 차량의 윤축, 대차, 차체 등에서 측정된 진동 가속도에는 차량 자체의 진동특성과 함께 차륜과 궤도의 접촉에 의한 영향이 나타난다. 전자는 차체, 바퀴, 대차 등의 고유진동 특

성이 가속도 데이터에 반영된 것으로 STFT에서는 시간에 관계없는 특정한 주파수에서의 피크로 나타나게 된다. 이와 반면에 침목 위치에서의 궤도 강성 변화에 의하여 가진되는 성분은 차량의 속도에 따라 주파수 특성이 변화하게 되며 이를 parametric excitation[1]이라고 한다. 침목뿐만 아니라 궤도의 용접부나 차륜에 존재하는 손상에 의해 발생하는 진동의 경우도 발생 주파수가 속도에 비례하게 되는데, 본 논문에서는 이를 고유 특성에 의한 진동(resonant vibration)과 구별하여 운동학적 진동(kinematic vibration)이라고 칭한다. 운동학적 진동의 원인은 침목 간격이나 궤도의 용접부와 같이 동일한 간격으로 위치하기 때문에 오더(order) 분석을 적용하여 그 성분을 더 명확하게 구별할 수 있다.

오더 분석은 주로 회전체의 진동이나 소음 데이터를 분석하는데 활용되는 방법으로 회전 속도나 차수에 따른 특

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도사업단, 선임연구원

E-mail : schoi@krii.re.kr

TEL : (031) 460-5209 FAX : (031)460-5649

\* Johns Hopkins University, Department of Civil Engineering, Professor

\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 차세대고속철도사업단, 책임연구원

성을 보기 위해 사용한다[2,3]. 오더 분석은 일반적인 주파수 분석과는 달리 동일한 거리 또는 회전각도 증가에 해당하는 데이터가 필요하기 때문에 표본추출빈도(sampling rate)는 회전 속도에 비례해야 한다. 이를 위해 회전기계에 대한 오더 분석에는 회전속도계(tachometer)의 신호에 따라 표본추출빈도를 변화시키는 아날로그 계측기를 사용하거나, 일정한 시간 간격으로 추출한 디지털 데이터를 일정한 회전 각도에 해당하는 데이터로 재추출(re-sampling) 하는 방법을 사용하고 있다[4].

본 논문에서는 오더 분석의 개념을 적용하여 철도 차량의 진동 신호의 시간-주파수 특성을 효과적으로 분석할 수 있는 방법에 대하여 다룬다[5]. 철도차량에 대한 시험에서 속도 신호는 차량에서 제공하는 경우가 많지만, 일반적인 경우에는 속도 신호를 직접 사용하기 힘들기 때문에 회전속도계를 장착하여 속도를 구하고 있다. 하지만 일반적으로 사용되는 간이 회전속도계는 차축 회전 당 하나의 신호만을 받기 때문에 특히 저속에서 속도신호의 정확성이 떨어지게 된다. 또한 철도 차량에 대한 현장 시험은 시험선이 아닌 영업선에서 이루어지는 경우가 많고 이때는 속도 신호를 얻기가 힘들다. 본 논문에서는 이렇게 신호에 잡음이 많거나 속도를 측정할 수 없는 경우에도 오더 분석을 적용할 수 있도록 하기 위하여 측정된 진동신호의 상관관계(correlation)를 이용하는 방법을 제시하였다. 상관관계를 이용한 방법은 원래 유체 동역학에서 유동의 속도를 측정하기 위해 사용하는 방법이다. 유체 동력학에서는 빛을 반사하는 입자를 유체 내에 뿌리고 광원을 조사하여 반사되는 형상을 촬영하는 방법으로 유동장을 가시화 한다. 이 때 연속해서 찍은 두 장의 사진에 있는 입자의 위치에 대한 상관관계 분석을 통해 입자들이 일정 시간 동안 이동한 거리를 산출하여 속도를 구한다[6].

2절에서는 오더 분석을 적용하기 위해 일정한 시간 간격으로 추출한 진동데이터를 일정한 거리에 대한 함수로 변환하는 새로운 방법을 제시하였다. 여기에서는 철도 차량의 운동학적 진동이 속도에 비례하여 변하는 점을 이용하여 속도를 다항식으로 가정한 뒤, 연속하여 측정한 가속도 데이터 사이의 상관관계를 최대한 만들도록 하여 다항식의 계수를 구하였다. 3절에서는 이 방법을 적용하여 철도차량의 진동데이터를 STFT와 오더 스펙트라를 이용하여 분석한 결과를 비교하였다. STFT를 이용한 방법은 차량의 고유 특성에 의한 진동 성분을 잘 나타내는 반면 오더 스펙트라는 운동학적 진동을 분석하는데 장점이 있다는 것을 확인하였다. 마지막으로 4절에서는 오더스펙트라를 구하는데 적용한 방법을 STFT에 응용하여 파워스펙트라(power Spectra)의 해상도를 향상시키는 방법에 대하여 다루었다.

## 2. 진동 데이터의 재추출 방법

여기에서는 철도차량의 진동에서 가장 대표적인 운동학적 진동 가속도 성분에 대하여 오더 분석을 위하여 데이터를 재추출 하는 방법을 적용하여 본다. 침목 등에 의하여 가진되는 운동학적 가속도 성분은 사인 함수 특성을 가지며 크기가 시간에 따라 변하기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a(t) = A(t)\sin[2\pi f(t)t + \phi(t)] + \epsilon(t) \quad (1)$$

이 식에서  $A(t)$ 는 가속도의 진폭이며  $\phi(t)$ 는 위상,  $\epsilon(t)$ 는 다른 형태의 진동을 포함한 노이즈를 표현한다. 주파수  $f(t)$ 는 침목 간격과 같은 규칙적인 가진원 사이의 거리인  $\Delta x$ 와 속도  $v(t)$ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$f(t) = \frac{v(t)}{\Delta x} \quad (2)$$

오더분석을 위해서는 가속도를 거리에 대한 함수로 나타내야 한다. 먼저 독립 변수를 시간  $t$ 에서 거리  $s$ 로 변환하기 위해서 편의상 가속도 데이터를 동일한 수의 사인 주기를 포함하는 구간별로 나눈다. 한 구간의 데이터가  $m$ 개의 사인 주기를 가진다고 가정하고 하면  $i$ 번째 구간, 즉  $(i-1)m\Delta x < s < im\Delta x$  구간의 가속도를  $a_i(t)$ 로 나타낸다. 정확한 차량의 속도 신호가 있는 경우에는 이를 이용하여 진동 데이터를 동일한 거리마다 추출한 것처럼 변환하여 오더 분석을 적용할 수 있다. 차량의 속도를  $v(t)$ 라고 하면 시간  $t$ 에서 거리  $s$ 로의 변환은 다음 식을 이용할 수 있다.

$$s = s_i + \int_{t_i}^t v(t)dt \quad (3)$$

이 식에서  $s_i$ 는 시간  $t_i$ 에 해당하는 거리이다. 측정된 속도신호가 부정확한 경우나 없는 경우에는 식 (3) 대신 다음과 같은 다항식으로 시간과 거리에 대한 관계를 가정한다.

$$s = s_i + v_0(t-t_i) + \frac{a_0}{2}(t-t_i)^2 + \frac{a'_0}{6}(t-t_i)^3 \quad (4)$$

이 식에서 상수  $v_0, a_0, a'_0$ 는 이 식에 대한 곡선 맞춤(curve fitting)으로부터  $s$  값을 추정하면서 구할 수 있다. 보다 정확한 값은 다음에 기술하는 상관관계를 이용하여 얻을 수 있다.

상관함수는  $(i-1)m\Delta x$ 와  $im\Delta x$  사이 구간의 가속도  $a_i(s)$ 와  $im\Delta x$ 와  $(i+1)m\Delta x$  사이 구간의 가속도  $a_{i+1}(s)$

사이의 상관함수 값은 이들의 곱을 적분하여 정규화(normalize)한 값으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_{i,i+1} = \frac{\int_{(i-1)m\Delta x}^{im\Delta x} a_i(s)a_{i+1}(s+m\Delta x)ds}{\sqrt{\int_{(i-1)m\Delta x}^{im\Delta x} a_i^2(s)ds \int_{(i-1)m\Delta x}^{im\Delta x} a_{i+1}^2(s+m\Delta x)ds}} \quad (5)$$

인접한 두 구간에서의 가속도는 유사한 운동학적 진동을 나타내기 때문에 시간-거리 변환이 정확한 경우 상관함수  $\rho_{i,i+1}$ 가 최대값을 가진다. Fig. 1은 이 방법을 통해 식 (4)의 상수를 구하는 과정을 도식적으로 보여준다. 먼저 두개의 가속도 구간  $a_2(t)$ 와  $a_3(t)$ 를 식 (4)를 이용하여 공간 좌표  $a_2(s)$ 와  $a_3(s)$ 으로 변환한다. 다음으로 식 (5)을 이용하여 두 구간의 가속도 데이터의 상관함수를 구한다. Fig. 1(a)는 변환된 두 가속도 데이터가 약간 불일치하고 있는 경우를 보여주고 있다. 즉, 사인함수 형태를 가지는  $a_2(t)$ 의 끝 부분과  $a_3(t)$ 의 시작 부분이 0이 아님을 확인할 수 있다. 상관함수 값은 이들 구간을 중첩한 그림에서 유추할 수 있으며 1보다는 작다는 것을 예측할 수 있다. 반면 Fig. 1(b)는 두 구간의 가속도가 정확히 일치하는 경우를 보여주며 중첩된 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 이때의 상관함수는 1이 된다는 것을 알 수 있다. 이런 개념을 이용하면 식 (5)의 상관함수가 최대값을 갖도록 하는 상수  $v_0, a_0, a'_0$ 를 구하여 식 (4)의 변환을 구할 수 있다. 가속도 데이터에 노이즈가 많은 경우에는 식 (5)를 적용할 때 Gaussian window 같은 커널 함수를 적용하여 결과를 개선할 수 있다.

위와 같은 과정을 거쳐 시간  $t$ 와 거리  $s$  사이의 변환 관계를 구하면 운동학적 성분의 주파수  $f(t)$ 는 다음과 같이 일정한 파수(wavenumber)로 나타낼 수 있게 된다.

$$k = \frac{m}{m\Delta x} = \frac{m}{(t_{i+1}-t_i)v(t)} = \frac{f(t)}{v(t)} \quad (6)$$

Fig. 2는 운동학적 진동 성분에 대하여 상관함수를 최대화 하는 방법으로 시간 축에서 거리축으로 변환한 예를 보여준다. Fig. 2의 첫 번째 가속도는 원래의 가속도신호  $a(t)$ 를 보여주고 있다. 이 가속도 신호에서는 차륜에 의한 운동학적 성분이 주기적으로 나타나 있으며 두 구간의 가속도를 각각 적색과 청색으로 보여주고 있다. 중간에 두 그림은 속도가 일정하다고 가정하고 각각의 구간의 가속도를 거리 좌표에 대하여 나타낸 것이다. 이 두 가속도 성분  $a_1(s)$ 와  $a_2(s)$ 는 거리 좌표에서 형태는 비슷하지만 피크 위치가 약간 어긋나 있음을 알 수 있다. 그 이유는 이 구간의 속도가 변하고 있기 때문이며 상관함수를 최대화하면서 조정된 결과가 Fig. 2의 맨 아래에 있다. 이 그림을 보면 두 구간의

운동학적 가속도 성분의 위치가 서로 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

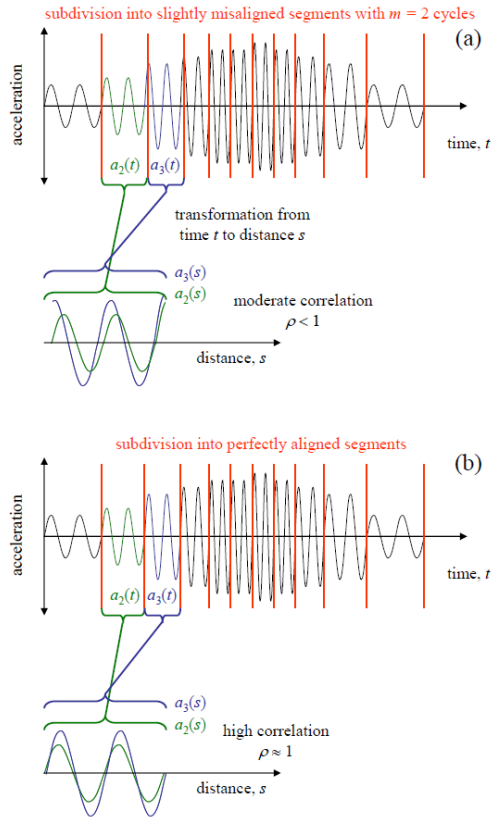


Fig. 1. Basic steps in the kernel method for kinematic vibrations. (a) Moderate correlation for slightly misaligned segments. (b) High correlation for perfectly aligned segments

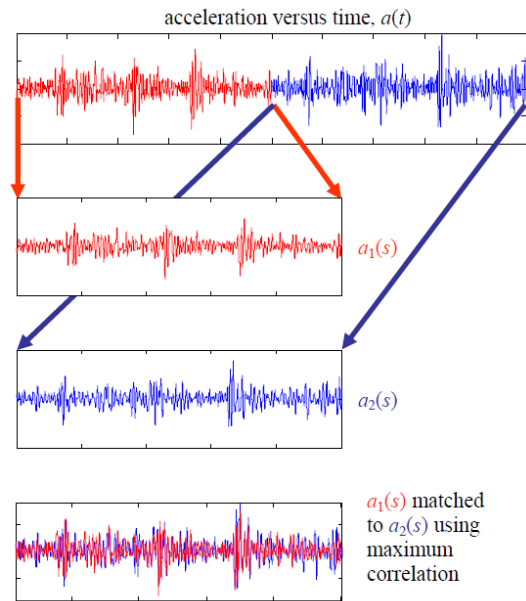


Fig. 2. Correlation method for matching kinematic vibrations (shown for the wheel length scale).

### 3. 가속도 데이터의 오더 분석

앞에서 기술한 상관함수를 이용한 방법으로 데이터를 변환하면 운동학적 진동 성분을 보다 명확하게 분리할 수 있다. 철도차량의 진동 신호에는 이러한 운동학적 진동 성분이 많이 포함되어 있기 때문에 이 방법이 특히 유용하게 적용될 수 있다.

운동학적 진동 성분의 주파수는 식 (2)와 같이 속도에 비례하기 때문에 가속도 데이터에 STFT를 적용하여  $x$ 축을 시간,  $y$ 축을 주파수로 하여 등고선도(contour plot)로 도시하면 주파수 특성은 속도와 같은 형상으로 나타난다. 고속철도 차량에서 측정한 가속도데이터의 STFT의 예는 다음 절에서 보여주고 있다.

오더 스펙트라(order spectra)에서는 시간 대신 공간에 대한 주파수 특성 또는 파수 특성을 보여준다. 앞 절에서 기술한 방법으로 거리 좌표에 대하여 변환한 운동학적 진동 데이터를 푸리에 변환하면 그 결과는 파수  $k$ 에서  $A$ 의 크기를 가지고 다른 파수에서는 아주 작은 크기를 가지는 Dirac delta 함수 형태가 될 것이다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 파수  $k$ 는 시간에 대하여 상수이기 때문에 푸리에 변환 결과를 오더 스펙트라로 나타내면 운동학적 진동 성분은 거리 축과 평행한 직선으로 나타나게 된다.

2절에서 기술한 시간  $t$ 에서 거리  $s$ 로의 변환은 하나의 조화(harmonic) 성분에 대하여 기술하였지만 차륜의 플랫폼

(flat)이나 레일의 결함 등에 의해서 발생하는 여러 조화 성분에 대한 변환도 마찬가지로 방법을 적용할 수 있다. 오더 스펙트라에서는 이들 조화 성분이 여러 개의 수평한 선으로 나타나게 된다.

철도차량의 진동데이터에는 차륜, 윤축, 대차 등의 공진에 의한 성분이 나타나는데 이 성분의 주파수 특성은 시간에 따라 변하지 않는다. 이 진동 성분은 SFTF 등고선도에서 시간축에 평행한 직선으로 나타난다. 반면 오더 스펙트라에서는  $f_j$ 의 공진 주파수를 가지는 성분의 파수는 다음 식에 의해 주어지기 때문에 속도에 반비례하는 형상으로 나타난다.

$$k_j = \frac{f_j}{v(t)} \quad (7)$$

Fig. 3과 4는 각각 축상(axle box)과 차체에서 측정한 진동가속도의 오더 스펙트라를 Matlab을 이용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서  $x$ 축의 revolution은 침목간의 거리를 나타내며 1 revolution은 0.6m에 해당한다. Fig. 3과 4는 각각 8000 revolution에 해당하는 데이터를 분석한 것으로 약 200초 동안 측정된 가속도이다. 앞에서 설명한 바와 같이 운동학적 진동은  $x$ 축에 수평한 직선으로 나타나고 공진에 의한 성분은 속도에 반비례하는 포물선으로 나타나고 있다. Fig. 3의 축상 가속도에서는 침목과 차륜에 의한 운동학적 진동을 명확히 확인할 수 있다. 침목

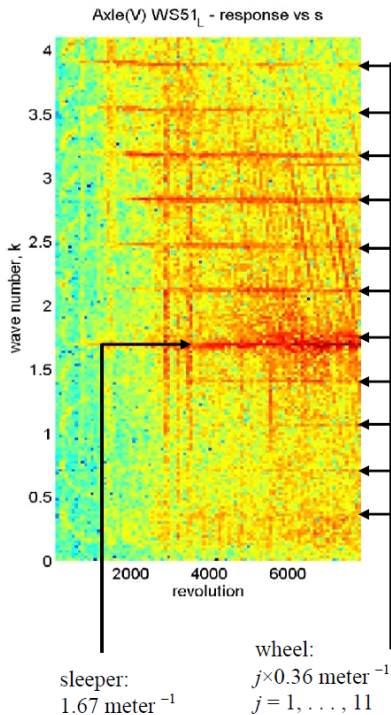


Fig. 3. Order spectra for vertical axle accelerations at a wheel set

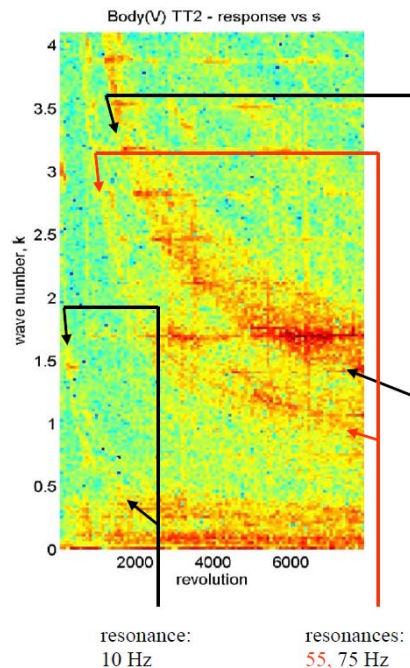


Fig. 4. Order spectra for car body vertical accelerations

간격과 차륜의 둘레 길이는 각각 0.6m와 2.8m이기 때문에 이에 해당하는 파수인  $1.67\text{m}^{-1}$ 와  $0.36\text{m}^{-1}$ 의 정수배에 해당하는 파수에서 진동 성분을 확인할 수가 있다. Fig. 4에서는 특히  $0.1\text{m}^{-1}$  이하의 낮은 파수의 운동학적 진동이 확인되는데 이는 레일의 용접부위에 의해 발생하는 진동으로 확인된다. 또한 차체 가속도에서는 10Hz, 55Hz, 그리고 75Hz에서 공진 성분이 발생하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 개선된 STFT를 이용한 시간-주파수 분석

##### 4.1 적용 방법

본 절에서는 앞에서 기술한 오더 분석 방법과 STFT 방법을 적용하여 파워 스펙트럼 밀도(PSD)의 해상도를 향상시키는 방법을 다룬다. 이 해석 방법은 다음과 같은 단계를 따라 진행된다. 먼저 전체 가속도 데이터  $a(t)$ 를 커널 함수  $K(t)$ 를 이용하여 다음과 같이  $N$ 개의 구간으로 나눈다.

$$a_i(t) = a(t)K(t-t_i) \quad \text{for } i = 1, \dots, N$$

여기에서  $t_i$ 는 동일 간격의 시간을 의미한다. 다음으로 식 (3) 또는 (4)를 이용하여 가속도를 거리에 대한 함수  $a_i(s)$ 로 변환한다. 원래의 가속도  $a(t)$ 는 동일한 시간 간격으로 추출되었기 때문에 변환된 가속도  $a_i(s)$ 의 추출 간격은 동일하지 않다. 따라서 동일 거리에 대한  $a_i(s)$ 를 얻기 위하

여 보간(interpolation) 방법을 적용한다. 분석 대상 가속도는 운동학적 성분이 지배적이기 때문에 선형 보간이나 cubic spline 등의 방법을 원래 데이터에 직접 적용하는 것은 적절하지 않다. 본 논문에서는 보간 방법의 효율성을 높이기 위해 기존의 보간 방법과 함께 이산 푸리에 변환을 이용하여 데이터의 샘플 수를 증가시키는 방법을 사용하였다. 이를 위해 다음 과정을 거쳤다.

- (a) 가속도 데이터  $a_i(t)$ 에 대하여 푸리에 변환을 적용한다. 만약  $t_{sg} = t_{i+1} - t_i$ 가 원래의 가속도 구간의 길이라고 하면  $n_{sg} = t_{sg}/\Delta t$ 는 푸리에 변환된 데이터의 수이다.
- (b) 변환된 데이터의 끝에 0을 붙여 zero padding 후의 데이터 수가  $m_{pad}n_{sg}$ 개가 되도록 만든다.
- (c) 역 푸리에 변환을 적용한다. 역변환된 가속도 데이터의 시간 간격은  $\Delta t/m_{pad}$ 가 된다.
- (d) 선형 보간이나 cubic spline 방법 등을 적용하여 일정 거리간격  $\Delta s$ 에 대한  $a_i(s)$ 를 구한다.
- (e)  $a_i(s)$ 에 대한 이산 푸리에 변환  $A_i(k)$ 를 구한다.
- (f) 각 구간의 평균 속도를 이용하여 파수를 주파수로 변환한다. 즉,  $A_i(f) = A_i(kv_i)$ .

마지막으로 가로 축을 시간, 세로축을 주파수로 하여  $A_i(f)$ 에 대한 등고선도를 그린다.

이상에서 기술한 방법으로 파워 스펙트럼의 시간 변화를 도시하면 기존의 STFT 보다 운동학적 성분의 해상도를 높일 수 있다.

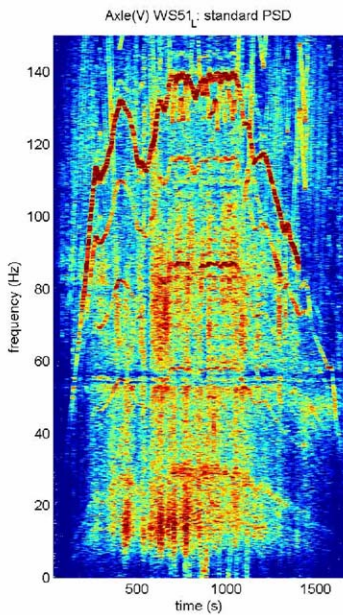


Fig. 5. Time-dependent PSD of the vertical acceleration of the axial box using standard STFT

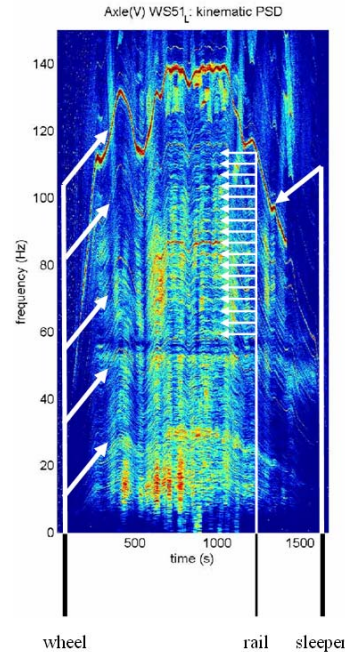


Fig. 6. Time-dependent PSD of the vertical acceleration of the axial box using the proposed method

**4.2 차축 및 차체 가속도 분석**

앞에서 기술한 방법을 적용하기 위하여 한국형고속열차의 축상에서 측정된 가속도에 대하여 PSD를 계산하여 일반적인 방법으로 계산한 결과를 비교하였다. 계산을 위해서는 앞의 오더 분석과 마찬가지로 Matlab 프로그램을 사용하였다. Fig. 5는 일반적인 STFT 방법을 적용한 결과이고 Fig. 6은 correlation을 이용한 데이터의 재추출과 보간 방법을 적용하여 계산한 결과이다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 속도에 비례하여 나타나는 운동학적 성분이 기존 방법에 비하여 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다. 이 성분의 주파수는 침목 간격과 차륜의 돌레, 그리고 속도에 의해 결정되며 식 (2)로부터 구할 수 있다. 침목에 의한 성분은 특히 선명하게 나타나고 있으며 속도 프로파일을 동일하게 반영하고 있다. 특히 Fig. 6의 중간 영역에서 궤도의 용접부에 의한 성분이 Fig. 5에 비해서 아주 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 차륜에 의한 성분도 명확히 구별할 수 있는데 Fig. 6에서는 넓은 주파수 범위를 보여주고 있기 때문에 다른 선에 비해 가늘게 나타나서 확인은 쉽지 않다.

Fig. 7과 8은 차체 진동에 대하여 기존의 STFT 방법과 개선된 방법을 적용한 결과이다. Fig. 7의 STFT 결과에서는 공진에 의한 성분이 비교적 잘 나타나고 있는 반면에 Fig. 8의 개선된 방법을 적용한 결과에서는 운동학적 성분이 명확히 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7에서는 공진에 의한 성분과 운동학적 성분이 섞여서 구분이 쉽지 않지만 Fig. 8에서는 이들이 좀 더 쉽게 구별되고 있음

을 확인할 수 있다. 특히 이 그림에서 소괄호 모양으로 표시한 부분은 공진 성분이 운동학적 가진에 의해 강화되고 있음을 보여주고 있다.

**5. 결론**

기존의 STFT에서는 공진에 의한 가속도 성분을 쉽게 구별할 수 있는데 반해 주파수가 변하는 운동학적 성분을 찾는 것은 쉽지 않았다. 본 논문에서는 오더 분석의 개념을 적용하여 시간에 따라 주파수가 변하는 운동학적 가속도 성분을 효과적으로 분석할 수 있는 방법에 대하여 다루었다. 특히 운동학적 진동에 대한 분석의 정확도를 높이기 위하여 진동신호의 상관관계(correlation)를 이용하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 특히 속도 신호가 없거나 잡음이 많은 경우에도 정확한 오더 분석 방법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 오더분석은 데이터를 시간축이 아닌 거리축에 대하여 분석할 수 있기 때문에 철도차량의 진동 신호에서 parametric excitation 성분을 추출하는데 장점이 있음을 확인하였다. 이러한 분석 방법을 한국형고속열차의 주행시험 중에 윤축, 대차 및 차체에서 측정된 가속도 데이터에 적용하여 효용성을 검증하였다.

**후 기**

본 연구는 국토해양부에서 추진 중인 미래철도기술개발

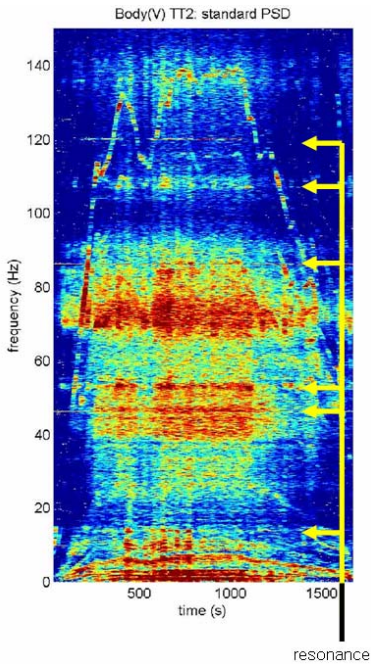


Fig. 7. Time-dependent PSD of the vertical acceleration of the car body using standard STFT

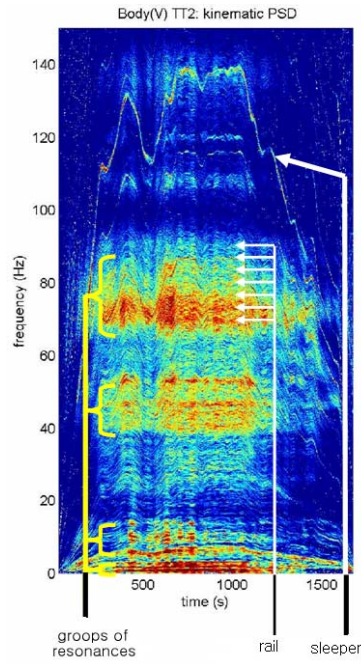


Fig. 8. Time-dependent PSD of the vertical acceleration of the car body using the proposed method

사업(code # 07 차세대 고속철도 A01)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. T. X. Wu and D. J. Thompson(2004), "On the parametric excitation of the wheel/track system," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 278, pp.725-747.
  2. Hewlett-Packard(1997), "Order Analysis," Realtime Update, Fall 1996-Winter 1997, Hewlett-Packard, Palo Alto, California.
  3. W. Kim and J. Chung(2008), "A study on the characteristic of noise and vibration in 3-phase induction motor for the forklift," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp.3-9.
  4. K. R. Fyre(1997), "Analysis of computed order tracking," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 2, pp. 187-205.
  5. T. Igusa, A. Louhghalam, S. Choi, and C.-S. Park(2008), "Improved STFT analysis using a kernel method and order spectra," *Proceedings of the KSNVE annual autumn conference*, pp.133-139.
  6. M. Raffel, C. Willert, and J. Kompenhans(1998), *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer.
- 접수일(2009년 9월 8일), 수정일(2009년 10월 1일),  
게재확정일(2009년 10월 19일)