한국철도학회논문집
제9권 제2호 2006년 | pp. 187-192

웨이브렛 변환을 이용한 궤도틀림 분석

Analysis method for the Measured Track Geometry Data using Wavelet Transform

여인호† · 이인규* · 김성일*
In-ho, Yeo · In-kyu Lee · Sung-il Kim

Abstract

The regularity of railway track alignment is a crucial component for maintaining travel safety and the smoothness of passenger ride. The conventional spectral analysis has been considered to estimate the severity of the track irregularity from measured data. The time domain data used to be changed into the frequency domain by Fourier transform. Because the measuring points can be regarded as the time points, the spatial-frequency can be introduced instead of the time-frequency. Although FFT(Fast Fourier Transform) and/or PSD(Power Spectral Density) function could provide fairly localized information within frequency domain, but chronical configurations of data could be missed. In this study, we attempt to apply the Morlet wavelet transform for the purpose of a frequency-time-domain analysis rather than a frequency-domain analysis. The applicability of wavelet transform is examined for the estimation of the track irregularity with real measured track data on the section of Kyoung-bu line by EM-120 measuring vehicle. It is shown that the wavelet transform can be an effective tool to manage the track irregularity.

Keywords : Track irregularity(궤도틀림), Fourier transform(푸리에변환), Spatial-frequency(공간주파수), Wavelet transform (웨이브렛변환)

1. 서 론

궤도틀림은 열차가 주행하는 서로 평행한 두개의 레일이 열차의 반복운행 또는 다른 요인에 의해 상하 또는 좌우로 원래 소정의 위치에서 변위가 발생하는 것을 의미한다. 발생현상에 따라 줄틀림, 면틀림, 궤간틀림, 수평틀림, 평면성 틀림 등이 있고, 열차 운행시 열차의 동요를 유발시켜 안전성 및 승객의 승차감에 큰 영향을 미친다. 따라서 궤도검측을 통해 궤도틀림이 지나치게 커지지 않도록 항상 관리하여야 하고 적절한 보수작업을 수행하여야 한다. 궤도검측은 인력검측과 궤도검측차에 의한 방법이 있다[1]. 우리나라에서는 년 4회 궤도검측차에 의해 궤도 점검을 수행하며 궤도검측차 점검결과 불량개소에 대해서는 보수 전후에 있어 인력점검을 시행한다. 검측방법으로는 10m 현의 중앙에서 레일과의 종거를 측정하는 10m 현 중앙 종거법을 사용한다. 이러한 방법으로 측정된 궤도틀림이 궤도정비기준을 초과한 개소에 대해 보수작업을 수행한다[2].

기존의 궤도틀림 관리 방안으로는 궤도틀림의 평균과 표준편차를 이용한 P법이 많이 사용되어 왔지만, 최근들어 궤도의 성능향상과 열차의 속도증가에 따른 열차의 안전성과 승객의 승차감을 향상시키기 위해 궤도틀림의 파장을 고려한 적절한 파장별 궤도선형 관리에 대한 필요성이 강조되어 왔다. 궤도틀림의 파장은 열차의 속도에 따라 소음, 진동, 주행안전성, 승차감등에 미치는 영향이 각각 다른 것으로 알려져 있다. 궤도틀림은 레일길이에 따라 존재하는 여러가지 파형들의 조합으로 나타나게 되는데, 그 원인 및 결과에 따라 파형들은 달라진다[3].

1822년 프랑스의 수학자 Joseph Fourier는 모든 주기적 파동을 삼각함수의 조합으로 나타낼 수 있다는 사실을 발견하였다. 여기서 출발한 Fourier 변환은 시간영역의 주기적인 파동운동의 정보를 주파수공간으로 변환하여 파동특성을 고찰할 수 있게 한 신호해석 분야에 가장 중요한 수학적 도구이다[4]. 궤도틀림 또한 길이에 따른 주기적인 파동운

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부
E-mail : iheo@krri.re.kr
TEL : (031)460-5664 FAX : (031)460-5359
* 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부

동의 정보를 파악하기 위해 Fourier 변환을 사용할 수 있고, 이로부터 공간주파수(spacial frequency) 특성을 파악할 수 있어 궤도틀림의 파장관리에 매우 편리한 도구이다. 시간영역에서 자기상관함수에 해당하는 Fourier변환이 주파수영역에서 임의의 신호가 가지고 있는 energy의 분포를 나타내는 함수인 power spectral density(PSD) function인데 궤도틀림의 진행 상황을 판단하는데 사용된다.

Fourier 변환은 여러 신호처리분야에 다양하게 사용되어 왔지만 변환을 하는 경우 시간에 대한 정보를 손실하게 된다. 즉 궤도 틀림의 경우 궤도의 길이에 따른 틀림의 정보는 소멸하고 틀림파장에 따른 궤도틀림의 정보만 남게 되어 궤도검측을 수행한 전 구간에 대한 전반적인 평가만 가능하게 된다. 이러한 단점을 해소하기 위하여 제안된 방법이 wavelet transform이다. wavelet transform을 수행하면 시간에 따른 주파수 특성을 알 수 있어 Fourier transform에 비해 훨씬 유용한 정보를 확보할 수 있다.

본 연구에서는 시간 주파수 영역에서 신호처리에 유용한 wavelet transform을 소개하고 실제 궤도검측차에서 얻어진 실측 궤도틀림 데이타를 이용하여 궤도틀림 관리에 적용할 수 있음을 보이고 향후 열차의 고속화에 따른 궤도틀림 관리의 효율성을 증대할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. Wavelet 변환의 특징

2.1 신호의 변환

모든 주기함수는 sin과 cos의 삼각함수의 합으로 나타낼 수 있다는 Fourier series의 적분에서 출발하는 Fourier 변환은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t}dt \tag{1}$$

즉, 시간영역(t)에서의 신호 f(t)를 주파수 영역(ω)에서의 신호 F(ω)로 변환하는 과정으로 다음과 같이 역변환이 가능하여 신호해석 분야에서 가장 중요한 수학적 도구이다.

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t}d\omega \tag{2}$$

Fourier 변환은 시간 또는 공간상의 정보를 정해진 주파수 대역에서 생성되는 주기함수를 매개로 주파수 공간으로 전환을 통해 신호가 지니고 있는 주파수 성분에 대한 다양한 분석이 가능하다. Fourier 변환이 수학 및 신호해석 분야에서 매우 유용한 도구이긴 하지만 적분식이라는 특성상 신호에 여러가지 주파수가 인접하여 중첩되어 있거나 임의의 한 곳에 신호의 특이성이 있는 경우 잘 표현해 내지 못한다. 이러한 약점을 보완하여 신호의 시간변화에 따른 주파수 정보를 파악하기 위한 방법이 STFT(Short Time Fouirer Transform)이다. STFT의 대표적인 변환이 Gabor변환인데 다음 식으로 정의된다.

$$G_f(b,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} g_\alpha(t-b)f(t)e^{-i\omega t}dt \tag{3}$$

g(t)는 식 (4)로 정의되는 가우스 함수로써 분리하고자 하는 주파수 인근의 창함수(window function)를 나타낸다[5].

$$g_\alpha(t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}}e^{\frac{-t^2}{4\alpha}},\ \alpha>0 \tag{4}$$

여기서 α는 분리주파수의 크기와 관계되며 b에 의해 시간에 따른 주파수 정보의 파악이 가능해진다. Gabor변환의 경우 주파수 정보를 파악하는 해상도가 시간-주파수 공간 전체에 대해 일정하다. 즉, 창함수의 크기가 일정하다. 그러나 고주파 성분을 분리해내기 위해서는 창함수의 크기가 작아야 하고 저주파 성분을 분리해내기 위해서는 창함수의 크기가 커야 한다. 여러가지의 주파수가 중첩되어 있는 multi scale 특성을 지니고 있는 신호의 경우 일정한 창함수를 사용하는 Gabor 변환은 해상도가 저하되어 적용의 한계가 있다[6].

2.2 Wavelet 변환

창함수의 크기가 일정하여 multi scale 신호의 분석에 불리한 Gabor 변환의 단점을 보완하는 방법인 wavelet 변환은 1970년대 초반 프랑스의 지질학자 J. Morlet에 의해 처음 제안되었다. wavelet 변환은 식 (3)과 유사하게 식(5)와 같이 정의된다.

$$W_f(b,a)=\frac{1}{a}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(\frac{t-b}{a})dt \tag{5}$$

여기서 $\psi(\frac{t-b}{a})$는 wavelet 모함수이며 압축계수 a와 전이계수 b에 의해 창함수의 크기가 변화된다. 사용되는 wavelet 모함수에 따라 다양한 wavelet 변환이 존재하지만 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되며 J. Morlet에 의해 제시된 Morlet wavelet을 소개한다. 식 (6)은 Morlet wavelet 함수이며 식 (6)의 Fourier 변환이 식 (7)로 정의된다.

$$\psi(t)=\exp(-\frac{\alpha^2t^2}{2})\exp(i\omega_0t) \tag{6}$$

여기서 ω_0는 Morlet wevelet의 고유주파수 이다.

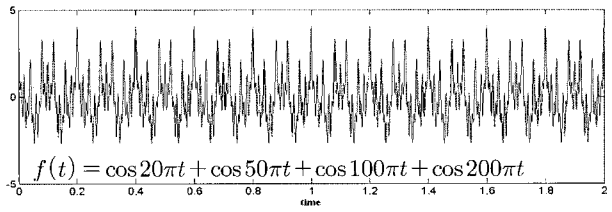
$$\Psi(\omega) = \frac{1}{\alpha}\sqrt{2\pi}\, exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\alpha^2}\right] \quad (7)$$

여기서 α는 wavelet 형상과 관계된 형상계수로써 α가 변화함에 따라 대역폭이 변화한다. 보통 1~2사이의 값을 선택하면 무난하다.

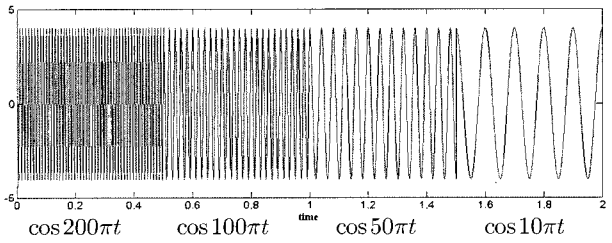
2.3 Fourier 변환과 Wavelet 변환의 비교

Wavelet 변환의 특징을 알아보기 위해 그림 1과 같은 두 가지 신호를 가정하였다. 첫번째 신호는 서로 다른 4개의 주기를 갖는 cosine 함수의 합이 시간에 따라 일정하게 분포하는 stationary signal이고, 두번째 신호는 시간대별로 4가지 주기의 cosine 함수가 따로 존재하는 non-stationary signal이다. 이 두가지 신호에 대한 Fourier 변환과 Wavelet 변환이 각각 그림 2와 3에 주어져 있다.

그림 2의 Fourier 변환의 경우 stationary signal이나 non-stationary signal이나 4가지 탁월 주파수를 갖는다는 것을 알 수 있다. 다만 (b)의 경우 앞서 언급한 전체 영역에 대한 적분의 결과 각 주파수 사이에 국부적인 수많은 주파수들이 존재한다. 이는 실제로는 존재하지 않지만 Fourier 변환시 적분에 의한 결과이다. 반면에 그림 3의 wavelet 변환의 경우 stationary signal과 non-stationary signal의 현저한 차이를 알 수 있다. 즉 그림 3(a)에서 4가지 주파수의 신호가 전체 시간에 걸쳐 존재하는 stationary signal이라는 것을 알 수 있고 (b)에서는 각각의 시간간격에 따라 4개의 서로 다른 주파수를 갖는 신호가 따로 존재하는 non-stationary signal이라는 것을 알 수 있다.



(a) Stationary signal



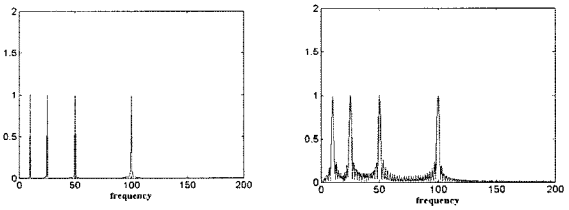
(b) Non-stationary signal

Fig. 1. Signal in time domain

3. 궤도검측 데이타에 대한 Wavelet 변환의 적용

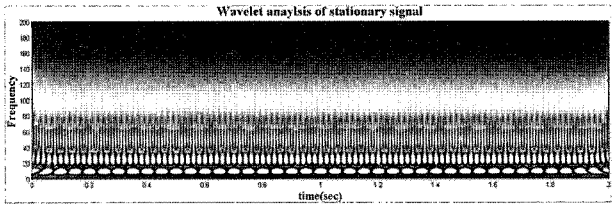
궤도선형은 열차의 주행과 하부 지지조건에 따라 원래 위치에 다소 변형이 발생한 궤도틀림이 존재한다. 궤도틀림의 파형들은 궤도조건에 따라 여러가지 파형의 조합이 되며 그 파장에 따라 승차감에 미치는 영향은 달라진다. 이러한 여러가지 파장들은 그 특성에 맞는 관리가 필요하다. 특히 차량의 고유진동수와 승객의 승차감에 영향을 주는 주된 파장에 대한 적절한 파장별 궤도 선형 관리가 필요하다.

일반적으로 차량이 가장 동요하기 쉬운 진동수는 1.0~1.5Hz로 알려져 있다[1]. 열차의 속도가 빨라질수록 단위시간당 통과한 거리가 길어지므로 상기진동수에 해당하는 틀림의 파장은 열차속도에 비례한다. 2급선로에 해당하는 150km/h의 경우 상기진동수에 대응하는 틀림 파장은 28m~42m이다. 또한 기존선 속도향상을 위해 개발중인 틸팅열차의 운행예정속도인 180km/h와 현재 운행중인 300km/h의 고속철도에 대해서는 각각 33m~50m와 56m~83m에 해당한다. 결국 우리나라 기존선과 고속선에 승객의 승차감과 연관된 궤도틀림의 파장은 20m 이상의 비교적 장파장에 해당한다고 볼 수 있다.

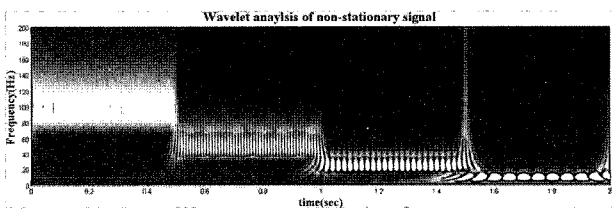


(a) Stationary signal (b) non-stationary signal

Fig. 2. Fourier transform



(a) Stationary signal

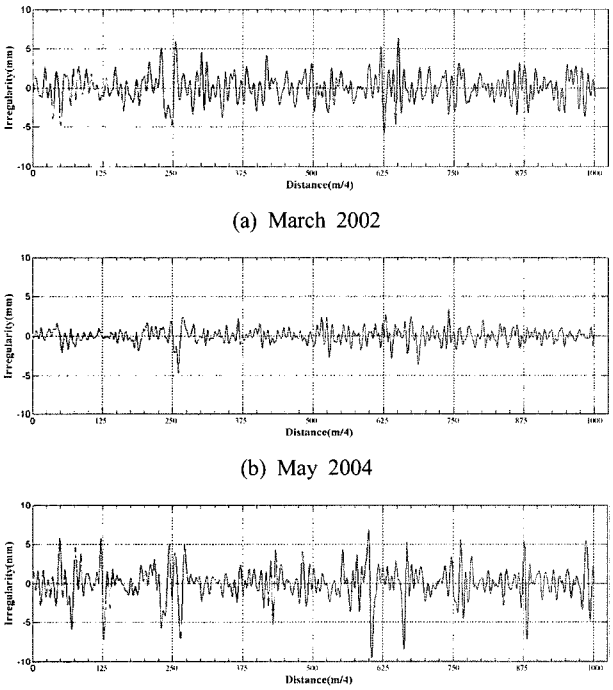


(b) Non-stationary signal

Fig. 3. Wavelet transform

주행안정성과 연관된 파장은 5m～30m 사이의 중파장 궤도틀림으로 알려져 있다. 즉 주행안정성과 승객의 승차감을 위해서는 5m 이상의 파장을 갖는 궤도틀림의 관리에 힘써야 할 것이다. 진동 문제에 있어서 특히 차량의 고유진동수와 연관된 공진의 문제에 있어서는 가진원의 진폭보다는 가진 주파수와 지속시간이 중요한 영향을 미친다. 궤도틀림의 크기보다는 궤도틀림의 파장과 존재하는 구간의 길이가 주행안정성과 승차감에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 궤도틀림 파장의 존재 구간을 확인 하는 것도 매우 중요하다.

기존선 구간의 EM-120 궤도검측차에 의한 궤도틀림데이타에 대한 분석을 기존의 방법과 wavelet 변환에 의한 방법으로 비교 분석해 보았다. 그림 4는 2002년 3월, 2004년 5월 그리고 2005년 3월에 경부선 서울기점 70.00km～71.00km 까지의 1km 구간에 걸쳐 궤도검측차에 의해 검측된 궤도틀림 자료 중 좌측 레일의 면틀림에 해당하는 측정치이다. 본 연구에서는 좌측 레일의 면틀림만을 분석 대상으로 하였지만 다른 틀림에 대해서도 같은 방법을 적용 할 수 있다.



(a) March 2002

(b) May 2004

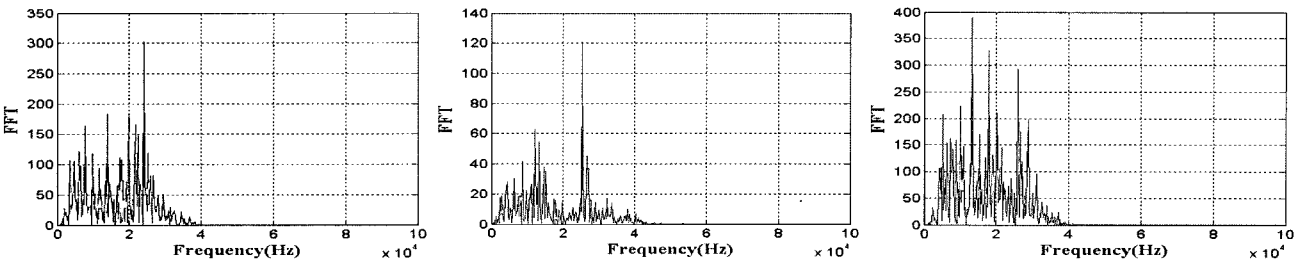
(c) March 2005

Fig. 4. Measured irregularity of longitudinal level(70.00km～71.00 km in Kyoung-bu line)

그림 4에서 2003년 3월에 비해 2004년 5월에 궤도틀림이 매우 감소했다가 다시 2005년 3월에 전반적으로 면틀림이 증가했음을 알 수 있다. 즉 2004년 5월 직전에 선로보수 작업이 있었을 것이고, 그 후 다시 열차의 운행으로 궤도틀림이 더 진전된 것으로 사료된다. 우리나라 기존선의 선로정비규정에 따르면 면틀림 보수한도는 선로등급에 관계없이 7mm로 제안하고 있다[1]. 2002년 3월과 2004년 5월의 검측자료에 의하면 전구간의 면틀림이 7mm 이하인 반면 2005년 3월 검측치는 125m, 270m, 600m, 660m 그리고 880m 부분에서 보수한도를 초과하는 궤도틀림이 발생했음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 궤도틀림의 절대적인 값이 선로보수를 위한 기준값으로 적용될 수는 있지만 열차의 진동에 직접적인 영향을 미치는 것은 틀림의 절대적인 값이 아니라 궤도틀림의 파형과 파장이다. 세가지 검측자료의 FFT 분석결과와 PSD 함수가 그림 5와 그림 6에 주어져 있다.

그림 5와 6으로부터 궤도틀림의 발생정도가 2005년 3월이 가장 심하고 다음이 2002년 3월, 그리고 2004년 5월에 가장 좋은 선로상태를 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 5에서는 수많은 peak 치가 있는 것으로 보아 앞서 언급한대로 궤도틀림이 여러 가지 주파수를 갖는 다양한 파장이 존재하는 multi-scale의 궤도틀림임을 알 수 있다. 이러한 Fourier 변환에 기초한 FFT 분석이나 PSD 분석방법으로는 검측대상구간 1km 전체로써 판단이 가능할 뿐 1km 구간 중 어느 곳에 실제 문제가 되는 궤도틀림 파형이 존재하는지 또 그 틀림 정도는 얼마인지 등은 알 수가 없다.

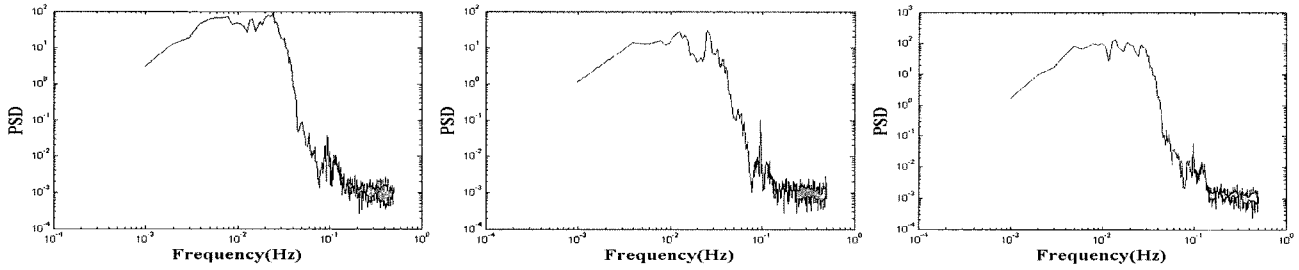
검측 대상구간의 면틀림 데이타로부터 본 연구에서 제안하는 wavelet 변환을 수행한 결과가 그림 7에 주어져 있다. 그림 7의 가로축은 검측대상 구간의 거리, 세로축은 궤도틀



(a) March 2002 (b) May 2004 (c) March 2005

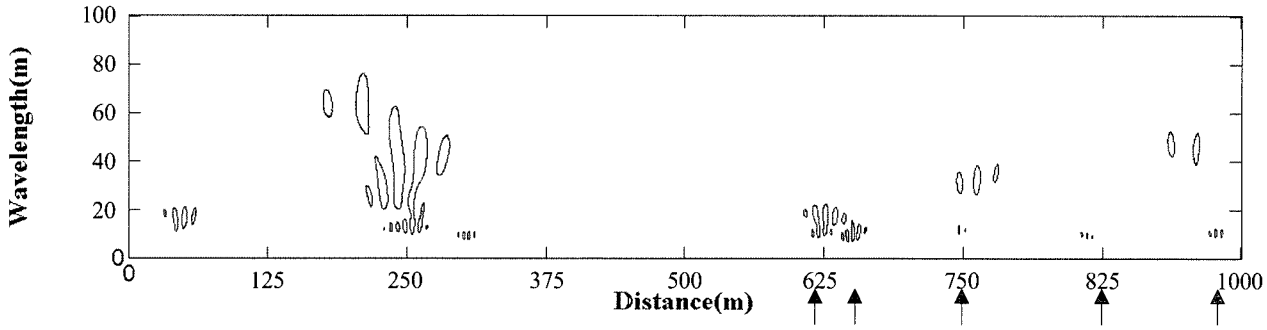
Fig. 5. FFT analysis of Measured irregularity of longitudinal level

림 파장을 나타낸다. 2002년 3월 측정데이타(그림 7(a))의 경우 20m~70m 구간, 600~650m 구간에서 10m~20m 파장의 궤도틀림이 존재하고, 200m~300m 구간에서는 10m 내외의 중파장부터 약 80m 정도의 장파장까지의 다양한 파장의 궤도틀림이 존재한다는 것을 알 수 있다. 2004년 5월의 검측 데이타(그림 7(b))의 경우 거의 모든 궤도틀림이 보

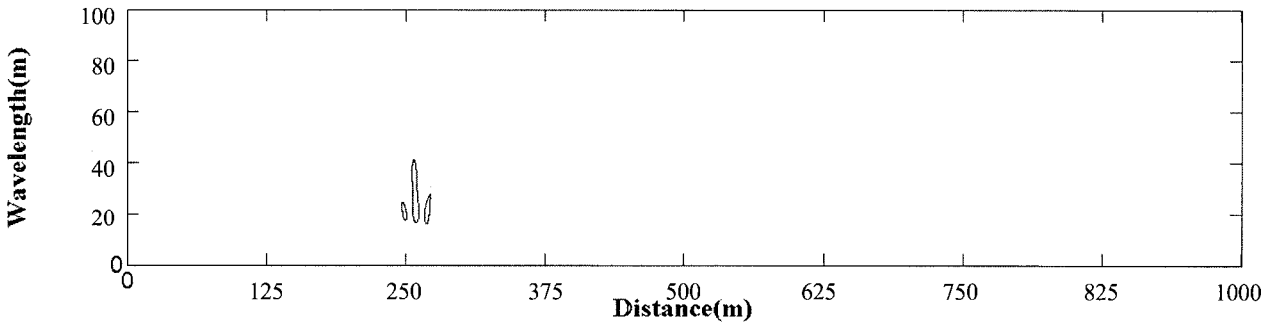


(a) March 2002 (b) May 2004 (c) March 2005

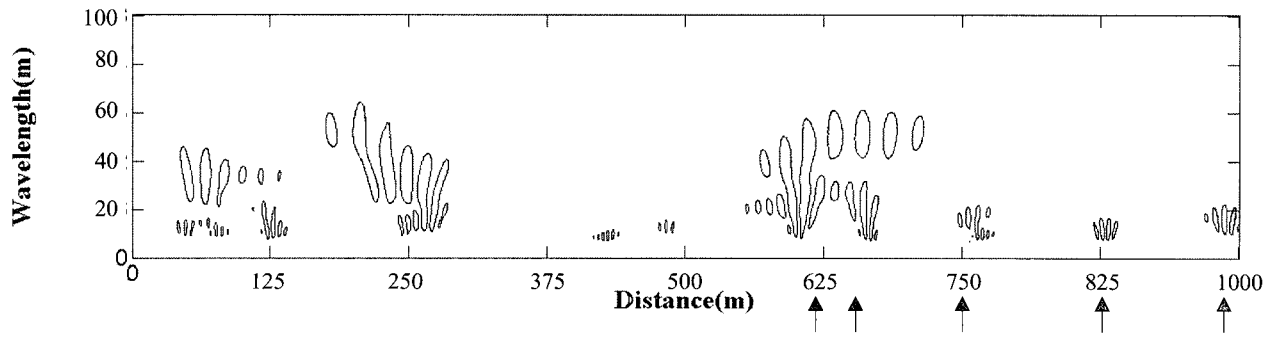
Fig. 6. PSD function of Measured irregularity of longitudinal level



(a) March 2002



(b) May 2004



(c) March 2005

Fig. 7. Wavelet transform of Measured irregularity of longitudinal level

수 된 상태라는 것을 알 수 있다. 반면 2005년 3월 검측데이타의 경우 곳곳에 10m～60m 사이의 중파장 궤도틀림이 존재한다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7(a)와 (c) 그래프 중 화살표가 가리키는 곳을 보면 두개의 그래프가 시기적으로 3년 이상 차이가 있고 궤도틀림 보수가 있었음에도 불구하고, 비슷한 위치에서 거의 일정한 10m～20m 사이의 궤도틀림이 발생하는 것을 볼 수 있고, 이로부터 근본적으로 이 구간의 궤도나 노반 조건이 열차의 운행시 10m～20m 파장의 궤도틀림을 유발하기 쉬운 특성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. Wavelet 변환을 이용한 세 개의 그래프로부터 이 구간의 궤도 틀림 발생 취약구간과 주로 발생하는 궤도틀림 파장을 알 수 있고, 그러한 파장의 궤도틀림 특성을 이해한다면 근본적인 틀림 관리를 수행할 수 있을 것이다.

4. 결론 및 향후 과제

열차의 주행속도가 향상되고 승차감에 대한 요구가 증가함에 따라 선로관리를 위해 중·장파장의 궤도틀림에 대한 관리가 요청되고 있고, 이를 위해 Fourier 변환에 근거한 FFT 와 PSD 함수를 이용한 방법이 제안되고 있다. 그러나 Fourier 변환에 의한 방법은 궤도틀림의 구간별 분포를 파악하기에 한계가 있고 multi-scale 자료를 분석하는데 약점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 궤도틀림을 거리와 주파수에 대해 표현할 수 있는 wavelet 변환에 의한 정량화 방법을 제안하였다

본 연구에서 사용된 wavelet 변환은 multi- scale 파장을 분석하기에 용이한 초기에 제안된 Morlet wavelet 변환이고, 궤도틀림의 파장별 관리를 한번의 검측을 통해 구간별로 수행할 수 있음을 예제 데이타를 통해 입증하였다. 사용된 검측자료는 기존선 경부선 서울기점 70.00k～71.00k의 1km 구간으로 EM-120궤도검측차에 의해 검측된 자료이다. 대상구간에 대해 제안된 방법으로 분석한 결과 발생한 틀림의 탁월 파장과 발생 위치, 그리고 발생 구간을 동시에 알 수 있었다. 시차를 둔 같은 구간 검측결과를 비교하여 같은 위치에서 같은 파장의 틀림이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

wavelet 변환에 의하면 대상구간 전체에 대해 한 번의 검측으로 관리기준 초과개소 뿐 아니라 궤도틀림 파장 발생구간을 파악할 수 있고 장기적인 검측을 통해 취약개소의 집중 관리가 가능하다. 즉 전반적인 궤도틀림상태 와 국부적인 상태를 동시에 파악하는 것이 가능하다. FFT나 PSD 함수를 이용하거나 통계치(P값과 표준편차)를 이용하는 경우 200m 구간으로 나누어서 관리하지만[7], 본 연구에서 제안하는 방법의 경우 원칙적으로 구간을 제한할 필요가 없다.

궤도틀림에 영향을 주는 노반상태와 궤도 특성을 알고 있는 구간에 대해 지속적인 구간 검측을 통해 얻어진 자료와 본 연구의 결과를 이용하면 주요 인자별 틀림파장의 관계를 보다 명확히 규명할 수 있을 것이다.

향후 충분한 검측 데이터를 확보하여 기존의 관리기준치와 비교연구를 통해 wavelet 방법에 의한 궤도 틀림 관리기준치를 설정하면 철도 노선별 틀림관리를 훨씬 효율적으로 하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 궤도장비와 선로관리, 서사법, 얼과 알, 2000.
2. 시설물의 안전에 관한 유지관리 업무편람, 철도청시설국, 1997.
3. 강기동, "고속철도 장파장 궤도틀림 분석에 관한 연구", 한국철도학회 논문집, 제8권 2호, pp.111-115, 2005.
4. 알기쉬운 웨이브렛 변환, 이승훈, 윤동한, 진한도서, 2002.
5. Wavelet 해석, 최병선, 세경사, 2001.
6. 구조물 평가를 위한 신호처리기술, 스마트사회기반시설 연구센터, 2005.
7. Esveld, C, "Modern Railway Track", MRT-Productions, 2001.