

윤축의 소음 및 진동과 고속선 궤도불규칙간의 관계에 대한 기초연구

A Relationship between the Noise and Vibration of a Wheelset and the Irregularity of a High-speed Railway: A Preliminary Research

이준석* 최성훈** 김상수** 박춘수**
Lee, Jun Seok Choi, Sunghoon Kim, Sang-Soo Park, Choonsoo

ABSTRACT

This paper is focused on a relationship between the noise and vibration of a wheelset and the railway irregularity of a high speed railway using a time-varying frequency transform for a preliminary research of the railway condition monitoring by an in-service high-speed railway vehicle. Generally, the monitoring has been performed by a special railway inspection vehicle or industrial engineers for railway maintenance. However, they have been limited at night due to the in-service high-speed railway vehicles, and too slow to monitor all of the section. To solve this problem, the monitoring should be performed by an in-service high-speed railway vehicle. For the research, the noise and vibration of a wheelset are utilized, because they are closely related to the railway condition. They are measured by using some microphones and accelerometers, and stored in an on-board data acquisition system. The signals are post-processed by a time-varying frequency analysis and compared with the result of a railway geometry and profile measurement system. From the comparison, it is able to observe the relationship between the noise and vibration of a wheelset and the irregularity of a high-speed railway. Also, some distinct frequency components are observed, which are not observed in the railway geometry and profile.

1. 서론

철도차량이 보다 높은 안전성을 유지하면서 쾌적한 주행을 하려면 차륜과 궤도의 상호작용에 의해 발생하는 차량의 소음 및 진동의 저감이 매우 중요하다. 이러한 차량의 소음 및 진동을 저감하기 위해서는 차량의 특성을 개선시키고 함께 소음 및 진동의 원인이 되는 궤도불규칙을 찾아 이를 유지보수를 통해 완화시키는 것도 중요하다. 여기서 궤도불규칙은 열차의 반복운행 혹은 외부 환경의 작용에 의해 원래의 위치에서 상하 혹은 좌우방향으로 정적 혹은 동적인 변화가 발생하는 것을 의미한다. 고속철도에서는 이러한 궤도불규칙의 진행이 기존철도와 비교하여 현저하게 빠르고 그 효과에 의한 소음 및 진동이 크게 나타나므로 궤도불규칙을 신속하게 찾아내어 유지보수를 수행해야만 한다.

지금까지 이러한 궤도불규칙의 검측은 보선원 혹은 전용 궤도검측차에 의해 수행되어왔다.¹ 그런데 보선원에 의한 검측은 매우 느리고 그 구간이 한정되어있을 뿐만 아니라 수행이 영업운행이 모두 종료된 야간에만 가능하다. 전용 궤도검측차는 보선원보다 빠른 검측은 가능하지만 투입시간이 역시 제한되어 있어서 자주 수행할 수 없을 뿐만 아니라 검측속도가 제한되어 있어서 고속철도의 경우 영업운행이 종료된 야간에만 수행이 가능하다. 이와 함께 철도 운영회사는 이용객의 편의를 위해 속도향상, 시격단축, 운행시간 연장 등이 진행되고 있어 기존의

* 과학기술연합대학원대학교/한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단, 정회원

E-mail : junseok@krii.re.kr, tatsache@mate.com

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

** 한국철도기술연구원, 차세대고속철도기술개발사업단

검측 방법은 수행이 더욱 어려워지고 있다. 그러므로 빠르고 자주 궤도를 검측하려면 영업차량에서 수행이 가능해야 한다.

기존의 궤도검측은 10m현의 중앙에서 궤도와 차이를 측정하는 10m현 중앙중거법을 사용하여 왔다. 그런데 이 방법은 3개의 대차가 필요하고 검측현 길이에 따라 대차간격이 결정될 뿐만 아니라 차체를 검측기준으로 하여 강성이 높은 차체가 필요하므로 영업차량에는 적합하지 않다.² 그러므로 차륜과 궤도의 상호작용에서 발생하는 소음 및 진동은 간단한 센서로 측정이 가능하고 궤도 불규칙의 특성을 반영하고 있으므로 영업차량의 검측에 적용이 가능하다.

본 논문에서는 영업차량에서 소음 및 진동을 이용한 궤도불규칙 검측을 위한 기초연구로 우선 주행중 윤축에서 발생하는 소음 및 진동과 고속선 궤도불규칙의 면틀림 간의 관계를 알아보는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 궤도검측장비가 설치된 윤축의 차륜 앞에 마이크로폰, 축상에 진동가속도계, 축에 속도계를 설치하여 고속주행 중에 이 신호들을 데이터 수집장치에 저장하였다. 거리기반의 궤도검측장비와 비교하기 위해 측정된 소음 및 진동 데이터는 필터링과 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform)을 이용하고 속도신호를 이용하여 처리한 뒤 거리기반으로 재정렬하였다. 이를 통해 궤도불규칙에 대한 소음 및 진동의 특성을 비교분석할 수 있었다.

2. 신호처리

2.1 단시간 푸리에 변환

철도차량에서 측정된 소음 및 진동 신호는 비정상 상태(non-stationary)인데 이러한 신호 분석을 위해서 짧은 시간동안은 정상(stationary)상태로 가정하고 각 짧은 시간간격에서 푸리에 변환을 수행하고 이들을 통합하게 된다.

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

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

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

2.2 거리기반 재정렬

마이크로폰과 진동가속도계를 이용하여 측정된 소음 및 진동은 시간영역으로 저장되어 있으므로 이를 거리기반의 궤도검측결과와 비교하려면 별도의 후처리를 수행해야만 한다. 여기에서는 축의 회전에서 나오는 속도신호와 표본주파수를 이용하여 시간기반의 소음 및 진동 데이터를 거리기반으로 재배열을 하고 비교하는 방법을 이용하였는데 그 과정은 다음과 같다.

- ① 30Hz 저역통과필터를 이용하여 속도신호에서 고주파 잡음을 제거한다.
- ② 초기 변위는 0으로 하고 필터링한 속도신호와 표본주파수를 이용하여 상대변위로 환산하고 이를 누적시킨다. 이때 각 속도신호는 표본 중에 선형적으로 변한다고 가정한다.

$$s_{rev, n} = s_{rev, n-1} + \frac{v_n + v_{n-1}}{2} \cdot \frac{1}{f_s}$$

$s_{rev, n}$ $s_{rev, n-1}$: 상대변위 ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) v_n v_{n-1} : 속도 ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) f_s : 표본주파수

③ 차량 초기위치(KP_b)를 상대변위($s_{rev,n}$)와 더하여 차량위치(KP)를 계산한다.

$$KP = KP_b + s_{rev,n}$$

④ 각 시간당 데이터들을 차량위치(KP) 순서로 재배열한다.

⑤ 축의 회전에서 나오는 신호를 거리기반으로 재배열한 결과와 궤도검측장비에서 측정하는 속도변화 경향을 비교하면서 맞추고 그에 따른 소음 및 가속도 측정결과를 궤도검측결과와 비교분석한다.

3. 궤도검측과 소음 및 진동의 측정

3.1 궤도검측

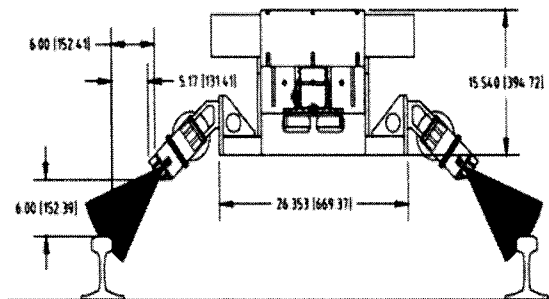
본 연구에서 사용한 궤도검측시스템은 ImageMap사의 고속 비접촉식 검측 장비로, 한국형 고속열차(한빛 350)에 설치되어 있다. 이 장비는 그림 1(a)와 같이 얇은 띠로 이루어진 레이저를 궤도의 표면에 쏘아주고 이를 CCD 카메라로 수신하여 궤도의 변위를 구한 뒤 차량에 설치된 관성장치를 이용해 보상하는 방법으로 궤도의 불규칙을 검측한다. 이 시스템에서 검측할 수 있는 불규칙은 면틀림, 줄틀림, 수평틀림, 개간틀림, 평면성틀림의 5개 항목이다. 이와 함께 차량의 주행속도와 킬로징(kilo-post)을 축과 연결되어 있는 엔코더 신호로부터 계산을 한다. 그림 1(b)는 궤도검측시스템의 설치현황을 나타낸다. 이 시스템은 320km/h속도에서도 궤도 검측이 가능하다⁴.

3.2 소음 및 진동의 측정

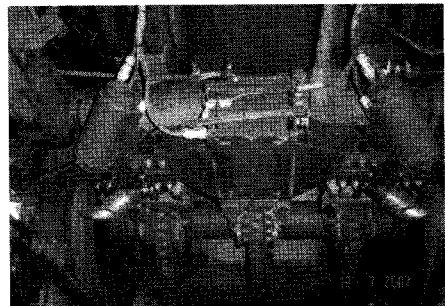
궤도검측시스템을 설치한 대차의 차륜 앞에 마이크로폰을, 축상에 상하와 좌우 방향 진동가속도계를 설치하여 주행 중에 소음과 진동을 측정하였는데, 이는 궤도검측 시스템의 측정결과와 소음 및 진동의 측정결과 사이에 지연이 발생하는 것을 방지하기 위해서이다. 측정에서 사용한 마이크로폰은 B&K사 4189-A-021이고 가속도계는 좌우방향에 Kistler사 8774A50, 상하방향에 PCB사 338C04를 사용하였다. 마이크로폰은 될 수 있으면 차륜가까이에 위치시켜 공기 유동에 의한 소음의 영향을 줄이고자 하였다. 윤축은 주행 중에 고속으로 회전을 하여 가속도계 부착이 매우 어렵기 때문에 윤축진동의 영향을 직접 받는 축상에 가속도계를 부착하였다.

그림 2(a)는 설치한 센서와 데이터 수집 및 저장장치의 구조를 나타내고, 그림 2(b)와 2(c)는 윤축 앞 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 계측시스템에 저장한 뒤 후처리(post-processing)를 수행하였다.

차량 계측시스템에 수집된 데이터는 시간영역 데이터를 거리기반으로 재배열을 하는 방법과 단시간 푸리에 변환을 수행하고 난 뒤 거리기반으로 재배열하는 방법으로 나누어 처리하였다. 전자의 경우 원래 신호의 재배열과

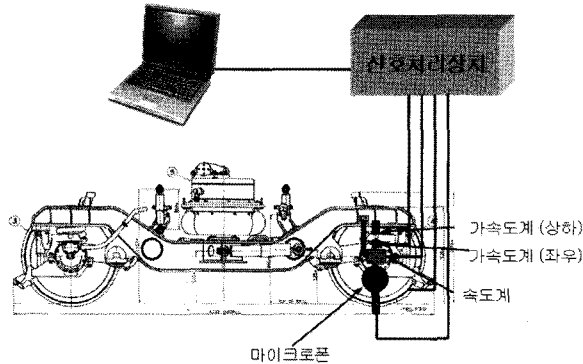


(a) 궤도검측 개념도⁴



(b) 설치 현황

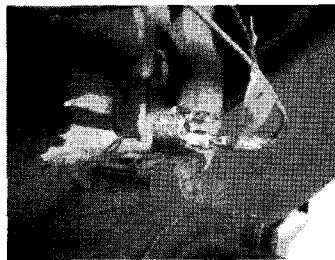
그림 1. 궤도검측시스템



(a) 계측시스템의 구조



(b) 마이크론 설치현황



(c) 상하 및 좌우방향 가속도계 설치현황

그림 2. 소음 및 진동측정 시스템과 센서의 설치현황

30Hz 저역통과필터를 적용한 신호의 재배열을 한 결과를 궤도검측결과와 비교하였다. 여기서 30Hz 저역통과필터를 적용한 이유는 300km/h로 주행시 최소 3m 파장의 궤도불규칙을 확인하기 위함이다. 후자의 경우 단시간 푸리에 변환을 할 때 데이터를 1초 간격으로 20480개씩 나누어서 처리하고 이를 재배열한 뒤 궤도검측 데이터와 비교하였다. 푸리에 변환시 필요한 데이터 개수는 8192개로 하고 모두 해닝창(Hanning window)을 적용하였는데, 이때 데이터들의 겹침(overlap) 비율은 50%로 하였다. 처리한 결과는 스펙트로그램(spectrogram)으로 나타내었다.

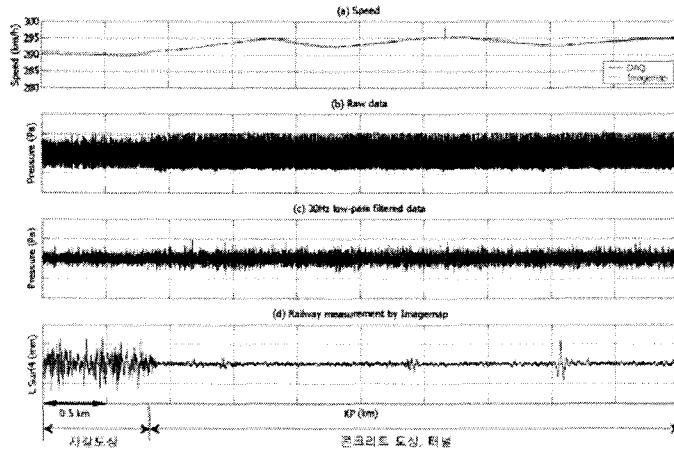
4. 측정결과

본 논문에서는 콘크리트도상과 자갈도상이 함께 있는 구간을 선택하였는데, 이는 도상의 차이로 인한 차륜과 궤도의 상호작용에 대한 차이를 확실히 알 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그림 3⁵는 차량 계측시스템에 수집된 마이크론과 좌우방향 및 상하방향 가속도계 데이터를 거리기반으로 재배열을 한 것과 단시간 푸리에 변환을 수행하고 난 뒤 거리기반으로 재배열하는 것을 3^{150m}과장의 면틀립(LSurf4) 측정과 비교한 결과를 나타낸다. 궤도검측결과와 마이크론과 가속도계 측정결과의 위치 맞춤은 각 시스템에서 동시에 측정된 속도신호의 변화경향을 보면서 맞추었는데, 그림 3⁵의 속도는 그 맞춤 결과를 나타낸다. 여기서 DAQ는 마이크론과 가속도계와 동시에 측정된 속도이고, Imagemap은 궤도검측시스템에서 측정된 속도이다.

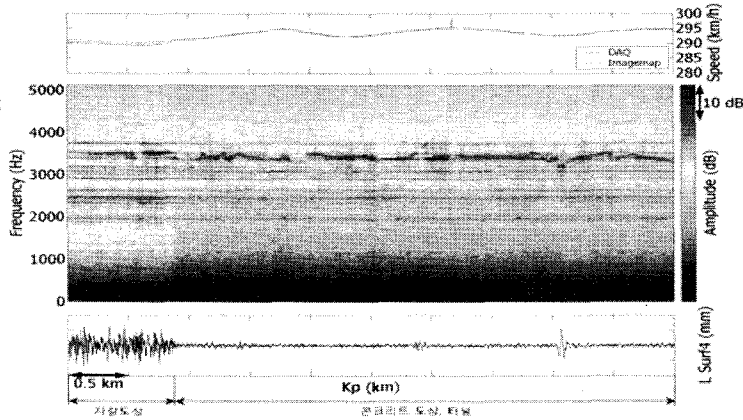
4.1 마이크론

그림 3은 마이크론 측정결과를 거리기반으로 재배열을 한 것과 단시간 푸리에 변환을 수행하고 난 뒤 거리기반으로 재배열한 것을 궤도검측결과와 면틀립 측정과 비교한 결과를 나타낸다.

그림 3(1)(b) 데이터는 마이크론 원래 측정 데이터인데 터널구간에서 약간 커진다는 것밖에 알 수 없다. 그런



(1) 거리기반 재정렬과 비교



(2) 단시간 푸리에 변환의 거리기반 재정렬과 비교

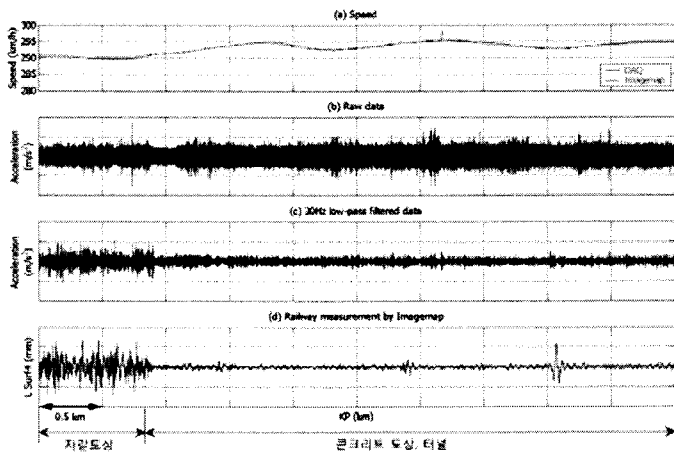
그림 3. 마이크론 측정결과와 궤도 면틀림 측정결과와의 비교

데 30Hz 저역통과필터를 적용한 결과인 그림 3(1)(c)에서는 음압이 커지는 위치를 알 수 있고 일부는 궤도 면틀림 측정결과인 3(1)(d)과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 전반적으로는 궤도틀림에 대한 음압 변화를 정확하게 확인하기 어렵다.

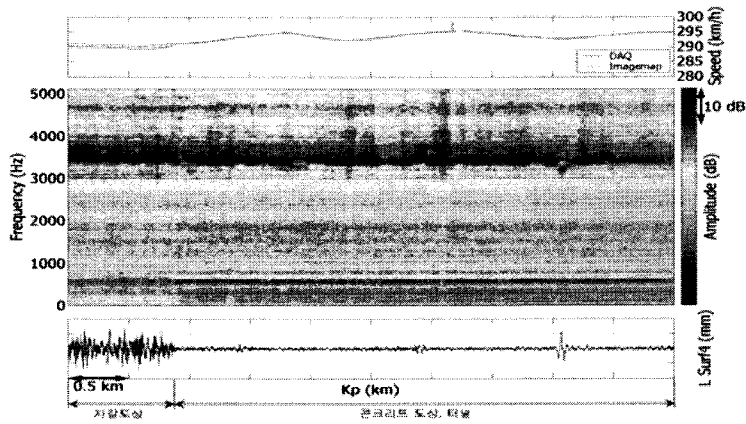
그림 3(2)은 마이크론 데이터를 단시간 푸리에 변환하고 이를 거리기반으로 재배열한 결과를 궤도 검측의 면틀림 측정과 비교한 결과이다. 여기서 0~1000Hz는 고속주행으로 인한 공력소음의 영향으로 전반적으로 높게 나오는데 터널 구간에서 주파수범위가 넓어지는 것을 알 수 있다. 2000~4000Hz에서는 거리에 관계없이 일정하게 높은 주파수성분들이 수평선으로 나타나고 있다. 그런데 3000~4000Hz에서는 거리에 대해 주파수가 변하는데 그 경향은 속도변화와 약간 비슷하지만 연속적으로 나타나지 않고 있다. 특히 콘크리트도상에서 면틀림이 나타난 곳에서 잠시 끊어졌다가 다시 연속적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 터널입구 부근에서 자갈도상의 특성으로 인한 면틀림이 약간 높게 나타나는데, 마이크론 측정결과에서는 충격의 특성이 수직선으로 나타나고 있다.

4.2 가속도계

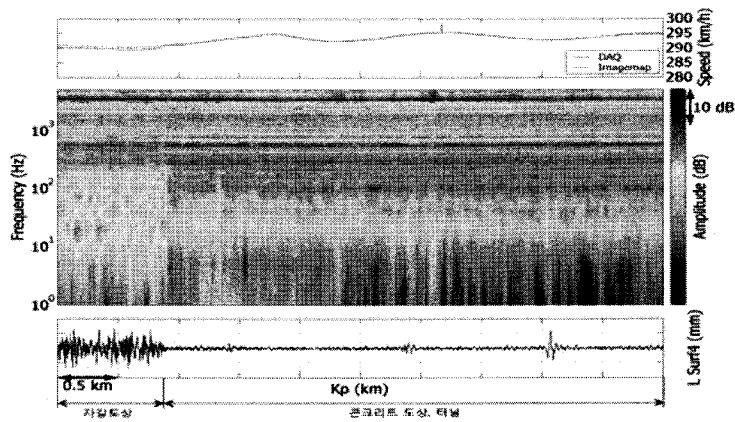
(1) 좌우방향



(1) 거리기반 재정렬과 비교

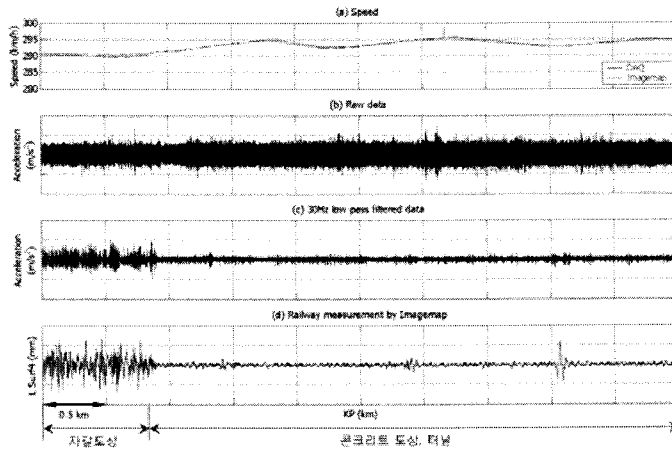


(2) 단시간 푸리에 변환의 거리기반 재정렬과 비교

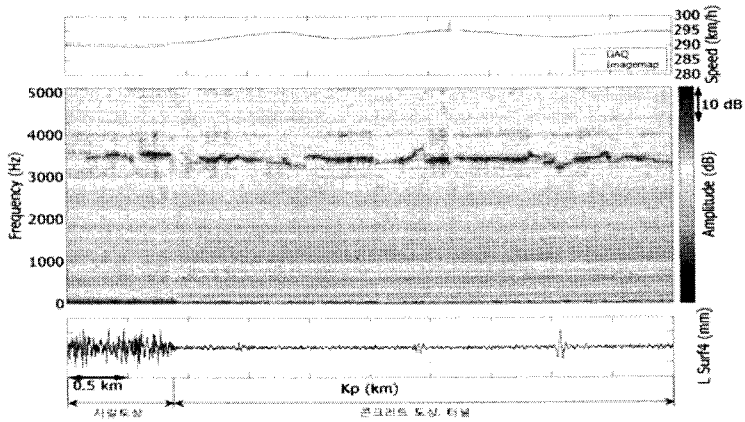


(3) 단시간 푸리에 변환의 거리기반 재정렬과 비교 (대수 주파수 크기)

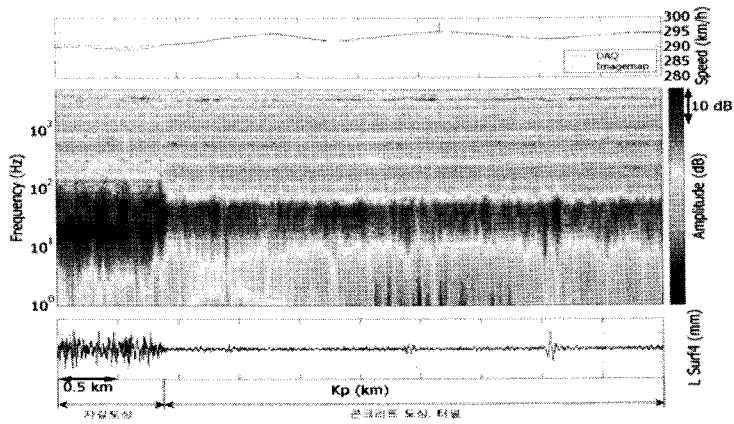
그림 4. 좌우방향 가속도계 측정결과와 궤도 면틀림 측정결과와의 비교



(1) 거리기반 재정렬과 비교



(2) 단시간 푸리에 변환의 거리기반 재정렬과 비교



(3) 단시간 푸리에 변환의 거리기반 재정렬과 비교 (대수 주파수 크기)

그림 5. 상하방향 가속도계 측정결과와 궤도 면틀림 측정결과와의 비교

그림 4는 좌우방향 가속도계 측정결과를 거리기반으로 재배열을 한 것과 단시간 푸리에 변환을 수행하고 난 뒤 거리기반으로 재배열한 것을 궤도검측결과와 면틀림 측정과 비교한 결과를 나타낸다. 면틀림은 수직방향 불규칙이지만 이것의 좌우방향 진동에 대한 영향을 알아보기 위해서 비교를 해 보았다.

그림 4(1)은 거리기반에서 나타낸 신호들을 비교한 것인데, 30Hz 저역통과필터를 적용한 결과(그림 4(1)(c))에서 콘크리트 터널 구간의 가속도가 현저하게 낮아짐을 확인할 수 있다. 또한 면틀림이 크게 나타나는 곳에서 가속도가 약간 높아지는 것도 알 수 있다. 그러나 마이크로폰 결과와 마찬가지로 면틀림에 대한 좌우방향 가속도의 뚜렷한 특성을 확인하기 어렵다.

그림 4(2)와 (3)는 좌우방향 가속도계 데이터를 단시간 푸리에 변환하고 이를 거리기반으로 재배열한 결과를 궤도 검측의 면틀림 측정과 비교한 결과인데, 1000Hz이하 영역의 확인을 쉽게 하기위해서 대수 주파수 크기를 함께 나타내었다. 여기에서 0~100Hz 주파수 성분들이 콘크리트 도상을 통과할 때 많이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 1000~3000Hz에서는 마이크로폰의 결과와는 달리 뚜렷한 높은 주파수 성분을 확인하기 어렵다. 그러나 3000Hz이상에서는 주파수 성분들이 높는데, 특히 3000~4000Hz에서는 마이크로폰의 결과와 같이 단속적이면서 속도 변화와 약간 비슷한 높은 주파수 성분이 나타나고 있는데, 콘크리트 도상구간의 면틀림이 높게 나타나는 곳에서 꺾임이 있는 것을 알 수 있다. 그렇지만 이는 면틀림이 나타나는 곳에서 공통적으로 나타나는 것이 아니므로 좌우방향 줄틀림 결과와 비교가 필요한 부분이다. 몇몇 지점에서 거의 모든 주파수 영역이 높게 나와 수직선으로 나타나는데 이는 극히 짧은 충격이 발생하였음을 의미한다. 자갈도상에서의 면틀림에 대한 좌우방향 가속도의 특성은 대수 주파수 크기에서 확인하기 쉬운데 이는 1~100Hz에서 잘 나타나고 비슷한 특성이 콘크리트 도상 터널에서도 약하게 나타나고 있다.

(2) 상하방향

그림 5는 상하방향 가속도계 측정결과를 거리기반으로 재배열을 한 것과 단시간 푸리에 변환을 수행하고 난 뒤 거리기반으로 재배열한 것을 궤도검측결과와 면틀림 측정과 비교한 결과를 나타낸다.

그림 5(1)는 좌우방향 가속도계 측정결과와 같이 30Hz 저역통과필터를 적용한 결과(그림 5(1)(c))에서 콘크리트 터널 구간의 가속도가 현저하게 낮아짐을 확인할 수 있다. 또한 면틀림이 크게 나타나는 곳에서 가속도가 약간 높아지는 것도 알 수 있다. 그러나 면틀림이 상하방향 궤도불규칙임에도 불구하고 상하방향 가속도의 뚜렷한 특성을 확인하기는 어렵다.

그림 5(2)는 상하방향 가속도계 데이터를 단시간 푸리에 변환하고 이를 거리기반으로 재배열한 결과를 궤도 검측의 면틀림 측정과 비교한 결과인데, 1000Hz이하 영역의 확인을 쉽게 하기위해서 대수 주파수 크기를 함께 나타내었다. 좌우방향 가속도계 결과와 같이 1000~3000Hz에서는 뚜렷한 특성은 나타나지 않지만, 3000Hz이상에서는 주파수 성분들이 전반적으로 높게 나오고 특히 3000~4000Hz에서 단속적이면서 속도변화와 약간 비슷한 높은 주파수 성분들이 마이크로폰과 좌우방향 가속도계의 결과와 마찬가지로 나타나고 있다. 대수 주파수 크기에서는 면틀림에 대한 상하방향 가속도의 특성은 1~10Hz에서 수직선으로 매우 잘 나타나고 있다. 특히 콘크리트 도상에서는 면틀림이 높은 곳을 전후로 주파수 특성이 2번 나타나는데 이는 면틀림 시작과 종료에서 발생하는 충격 때문이다. 그런데 궤도검측시스템 측정결과에서는 면틀림이 없지만 이에 의한 가속도 특성은 유사한 곳이 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 잠재적인 궤도불규칙으로 생각된다.

5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 주행중 윤축에서 발생하는 소음 및 진동과 고속선 면틀림과의 관계에 대해 알아보았다. 이를 위해 궤도검측장비가 설치되어 있는 대차 윤축의 차륜 앞에 마이크로폰, 축상에 좌우 및 상하방향 가속도계를 설치하고 주행 중에 측정 및 저장하였다. 저장한 신호는 필터링과 단시간 푸리에 변환을 적용하고 궤도검측결과의 면틀림과 비교하기 위해 거리기반으로 재배열을 하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 시간영역에서 수집한 마이크로폰과 가속도 신호 혹은 30Hz 저역통과필터를 적용한 신호를 거리기반으로 재배열한 것보다는, 수집한 신호에 단시간 푸리에 변환을 수행하고 이를 거리기반으로 재배열한 것에서 그 특성이 잘 나타남을 알 수 있다. 따라서 궤도 불규칙의 특성을 알기 위해서는 단시간 푸리에 변환과 같은 시간-주파수 변환방법을 이용하여 분석을 하는 것이 필요하다.
- (2) 마이크로폰으로 측정하는 소음의 경우 터널 통과특성을 잘 알 수 있고 3000~4000Hz에서 그 특성이 잘 나타나고 있다. 그러나 고속주행시 공력소음의 영향으로 0~1000Hz에서는 뚜렷한 높은 주파수 성분이 없이 전반적으로 높게 나오므로 1000Hz이하에서 나타나는 궤도의 특성을 관찰하기 어려운 문제가 있다.
- (3) 가속도계로 측정하는 진동의 경우 대수 주파수 크기의 100Hz이하에서 콘크리트 도상의 특성과 면틀림에 대한 좌우방향 및 상하방향 가속도의 특성을 확인할 수 있는데, 특히 상하방향에서 그 특성이 뚜렷하게 나타난다. 또한 면틀림은 측정되지 않았지만 면틀림의 특성과 유사한 상하방향 가속도 특성이 1~10Hz에서 나타나고 있는데 이는 잠재적인 궤도불규칙으로 생각된다.

향후에는 마이크로폰과 축상가속도계 신호를 줄틀림, 궤간틀림 등과 같은 다른 궤도불규칙과 비교할 예정이다. 더 나아가 마이크로폰과 축상 가속도계의 측정신호에서 궤도불규칙과 관련된 신호만을 추출하는 방법에 대해서도 연구할 예정이다.

후기

본 연구는 국토해양부가 시행하는 "분산형 고속철도 시스템엔지니어링 기술개발"과제의 지원을 받고 있음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서사범, "궤도장비와 선로관리", 열과알, 2000.
2. K. Takeshita, "Track irregularity inspection method by Revenue-earning train", RTRI report, Vol. 9, No. 2, pp. 29-34, 1995.
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. 김상수, 박찬경, 김기환, 김종선, 김영모, "한국형 고속열차 검측시스템 구성 방안", 한국정밀공학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006.