

속도변화에 따른 고속철도차량의 진동 및 소음 특성

Vibration and noise characteristics of high speed train depending on its speed

이준석* 이시우** 고효인** 유원희**
Lee, Jun-Seok Lee, Si-Woo Koh, Hyo-In You, Won-Hee

ABSTRACT

In this paper, the characteristics of noise and vibration of high speed train is analyzed depending on its speed. The speed is a very important parameter because it can affect the interaction between the train and the environment as well as the characteristics of the train itself. To measure its characteristics, we analyzed the signals from microphones and accelerometers which were attached to the passenger car of the high speed train. The signals from each sensor were stored in the recorder, and then analyzed by using the signal processing program. The data from each sensor are analyzed with the spectrogram. From the spectrogram, we found some distinct characteristics of the passenger car. Also, the characteristics of the noise propagation were inferred from the spectrogram.

1. 서론

철도차량이 고속화가 되면서 기존의 철도차량에서는 발생하지 않았던 특성들이 나타나고 있어서 이에 관한 관심이 커지고 있다. 특히, 2004년 고속전철이 상업운행을 시작하면서 나타난 특정구간에서 차량의 진동 및 소음은 상당기간 문제가 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 수행되었고, 그 결과로 문제가 되었던 진동 및 소음은 많이 저감되었다[1,2]. 이와 함께 저소음·저진동 고속철도차량을 개발하기 위한 노력이 현재도 진행 중이다[3,4].

차량속도는 차량자체의 특성뿐만 아니라 외부환경과의 상호작용으로 인한 특성에 대해서도 알 수 있는 매우 중요한 요소 중의 하나이므로 이의 고려는 필수적이다. 그렇지만 속도의 변화에 따른 차량의 특성을 파악하려면 특정구간 통과 속도를 매회 변화시키면서 반복 실험을 해야 하는데 이는 상업운행이 계속되는 현재 상황에서는 불가능하다. 본 연구에서는 고속철도차량이 궤도특성, 다른 차량과의 거리 유지 등으로 인해 가감속을 한다는 점을 이용하여 속도변화에 따른 고속철도차량의 진동 및 소음 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 현재 상업운행중인 KTX 객차에 센서들을 부착하고 이로부터 나온 신호들을 처리하여 스펙트로그램(Spectrogram)에 나타내고 이를 차량의 속도측정값과 비교하여 차량의 주파수 특성을 분석하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 우선, KTX 차량의 진동 및 소음 측정을 위해서 부착한 센서의 위치 및 종류를 소개하고 측정된 데이터를 처리하는 방법을 간단히 소개하였다. 그리고 KTX 운행시에 측정된 데이터에서 주요구간의 스펙트로그램을 나타내고 이를 속도 변화와 비교하여 주요 진동 및 소음의 특성 및 그 원인을 고찰하였다.

2. 실험장치 구성

2.1 측정구간 및 센서위치

*한국철도기술연구원/과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학과

E-mail : junseok@krri.re.kr

TEL : (031)460-5272 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

번호	측정 대상	센서
1	객차실내소음	마이크로폰
2	객차간 소음	마이크로폰
3	차륜앞 소음	마이크로폰
4	갱웨이 진동	가속도계
5	대차 진동	가속도계
6	실내바닥 진동	가속도계
7	윤축 진동	가속도계(3축)
8	차량 속도	광전스위치

표 1. 센서 목록



그림 1. 센서 위치

차량 진동 및 소음을 측정하기 위해 경부 고속선 구간 중 광명-동대구 간 상행구간을 운행하는 KTX 36편성을 이용하였다. 주요 측정구간으로 개활지, 자갈도상 터널(영동터널), 콘크리트도상 터널(황학터널)을 선택하였다. 이는 터널 통과 시 차량의 진동 및 소음의 특징을 개활지와 비교하고, 현재 콘크리트터널에서 나타나는 차량의 특성을 자갈도상 터널에서의 특성과 비교하기 위해서이다. 특히 황학터널은 경부 고속선에 있는 터널 중 가장 긴 터널(9975m)로 궤도의 유지보수 편의를 위해 콘크리트도상을 채용하고 있는데, 고속철도 개통 후 상당기간 터널 내에서의 차량실내 소음이 심하여서 그 특성에 관해 관심이 집중되고 있다[1,2,3,4].

소음측정위치는 객실 실내, 객차간, 차륜앞을 선택하였고, 진동측정위치는 윤축, 대차, 실내바닥을 선택하고 각각에 마이크로폰 혹은 가속도계를 부착하였다. 이는 궤도와 차륜의 상호작용에 의해 발생한 진동 및 소음이 차량에 전달되는 과정을 알아보기 위해서이다. 이와 함께 차량속도를 광전 스위치를 이용하여 측정하여 속도에 따른 진동 및 소음의 특징을 알고자 하였다. 사용된 센서 목록은 표 1에, 부착된 센서 위치는 그림 1에 나타내었다.

각 센서 신호의 저장은 데이터 저장장치(SONY SIR-1000)를 이용하였으며, 데이터처리 프로그램(LMS CADA-X)을 이용하여 주요구간 데이터 처리하고 이를 분석하였다.

2.2 센서 신호의 처리

데이터 저장장치를 통해 저장된 데이터에서 측정하고자 하는 구간을 선택하여 각 센서 신호를 시간경과에 따라 추출하여 이를 스펙트로그램으로 나타내었다. 스펙트로그램은 일정한 구간에서의 주파수 분석을 한 뒤, 이를 시간별로 중첩시켜 워터폴(waterfall) 도표를 구하고 각 주파수의 상대적인 크기를 색에 따라 나타낸 도표이다. 각 스펙트로그램과 속도센서로부터 얻은 신호 그래프를 비교하여 속도변화에 따른 차량의 주파수 특성을 알 수 있도록 하였다. 여기서, 소음의 워터폴 도표를 구할 때에는 A특성 청감보정을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

(1) 개활지

그림 2는 개활지 구간에서 측정된 진동 및 소음의 주파수 해석결과를 속도측정결과와 함께 나타내고 있다. 이 구간에서는 KTX가 약 250km/h에서 약 300km/h로 점점 속도가 증가하였다.

실내소음에서는 20~50Hz, 50~90Hz, 100~200Hz, 200~300Hz 영역의 주파수 성분이 높게 나옴을 알 수 있다. 실내소음과 실내바닥, 대차, 윤축의 진동을 비교해보면 20~50Hz영역에서 그 특성이 서로 일치함을 알 수 있다. 이는 윤축의 진동이 대차를 통해 실내바닥을 거쳐 실내소음에 영향을 주는 것으로 분석할 수 있다. 실내소음, 대차 및 윤축진동은 100~200Hz영역 내에서 속도가 증가함에 따라 점점 그 주파수가 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 차량이 궤도 침목들(침목간격 : 0.625m)을 통과하면서 발생하는 진동 주파수와 일치하므로 침목의 영향으로 생기는 진동의 주파수 성분임을 알 수 있다. 200~300Hz는 280km/h이상에서 뚜렷하게 나타나고 있는데 이는 객차간 소음과 갱웨이 진동에서 그 특성이 유사한 성분을 찾을 수 있다.

실내소음에는 그 특성이 드러나지 않지만 객차간 및 차륜앞 소음, 대차 및 윤축 진동이 280km/h를 넘어감에 따라 3150Hz영역에서 상당히 높은 주파수 특성이 관찰되었고, 이는 속도가 증가함에 따라 높은 주파수로 이동함을 알 수 있다. 이는 궤도와 차륜의 상호작용으로 인해 차륜의 주파수 특성이 나타난 것으로 생각된다.

(2) 자갈도상 터널(영동터널)

그림 3은 영동터널 구간에서 측정된 진동 및 소음의 주파수 해석결과를 속도측정결과와 함께 나타내고 있다. 화살표는 터널통과 구간을 뜻한다. 이 터널구간에서는 계속 300km/h이상에서 주행하였다.

실내소음 결과에서는 20~50Hz, 50~300Hz 영역의 주파수 성분이 높게 나옴을 알 수 있다. 특히 80Hz이하 주파수 성분은 터널구간 이전에서도 높게나오다가 터널구간에서 조금 더 증가함을 알 수 있고, 80Hz 이상의 주파수 성분은 터널구간에서만 많이 증가함을 알 수 있다. 실내소음과 실내바닥, 대차, 윤축의 진동을 비교하면 20~50Hz영역에서 그 특성이 일치하고, 이는 터널과 관계없이 발생하고 있다. 실내소음 결과에서 60~90Hz영역은 윤축 및 대차 진동에서도 높게 나타나고 있다. 개활지에서 실내소음의 100~200Hz영역은 궤도의 침목간격으로 인해 발생하는 것으로 이미 밝혔지만, 터널구간에서는 이 영역의 크기가 더 증가한다는 것을 알 수 있다. 실내소음 250~300Hz영역 특성은 윤축이나 대차에서는 드러나지 않고, 객차간과 갱웨이의 주파수 특성과 비슷함을 알 수 있다. 이로 볼 때, 터널구간에서의 100~200Hz, 250~300Hz영역 소음은 윤축과 대차를 통해 전달될 뿐만 아니라 터널내 벽면을 반사하여 객차로 전달될 수 있음을 알 수 있다. 개활지 측정에서 차륜의 특성으로 생각되어지는 윤축의 3150Hz 특성은 영동터널에서도 차륜앞 소음, 대차 및 윤축 진동에서 분명하게 나타나고 있다.

(3) 콘크리트도상 터널(황학터널)

그림 4는 황학터널 구간에서 측정된 진동 및 소음의 주파수 해석결과를 속도측정결과와 함께 나타내고 있다. 이 구간에서는 약 270km/h로 진입하여 속도가 잠시 증가한 후 감소하였다가 터널 중간부터 다시 증가하여 출구 부근을 280km/h를 약간 넘어서 통과하였다.

실내소음은 터널구간에서 확실히 그 특성이 드러나고 50~800Hz영역에 걸쳐서 상당히 넓게 분포할 뿐만 아니라 속도의 변화에 따라서 그 특성이 변하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 콘크리트 터널의 소음 반사 특성으로 인해 나타난 현상으로 볼 수 있다. 윤축과 대차 진동의 영향을 받는 20~50Hz영역에서는 속도가 270km/h로 감소한 구간에서는 그 성분의 영향이 드문드문 나타나다가 속도가 증가함에 따라 다시 그 정도가 커지는 것을 알 수 있다. 실내바닥, 대차의 진동은 50Hz부근에서 그 특성이 일치하고 있어 이 영역에서는 실내바닥의 진동이 대차로부터 전달된다는 것을 알 수 있다. 대차의 경우 50Hz부근영역은 속도에 따라 주파수가 변하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 실내소음 80Hz부근 성분

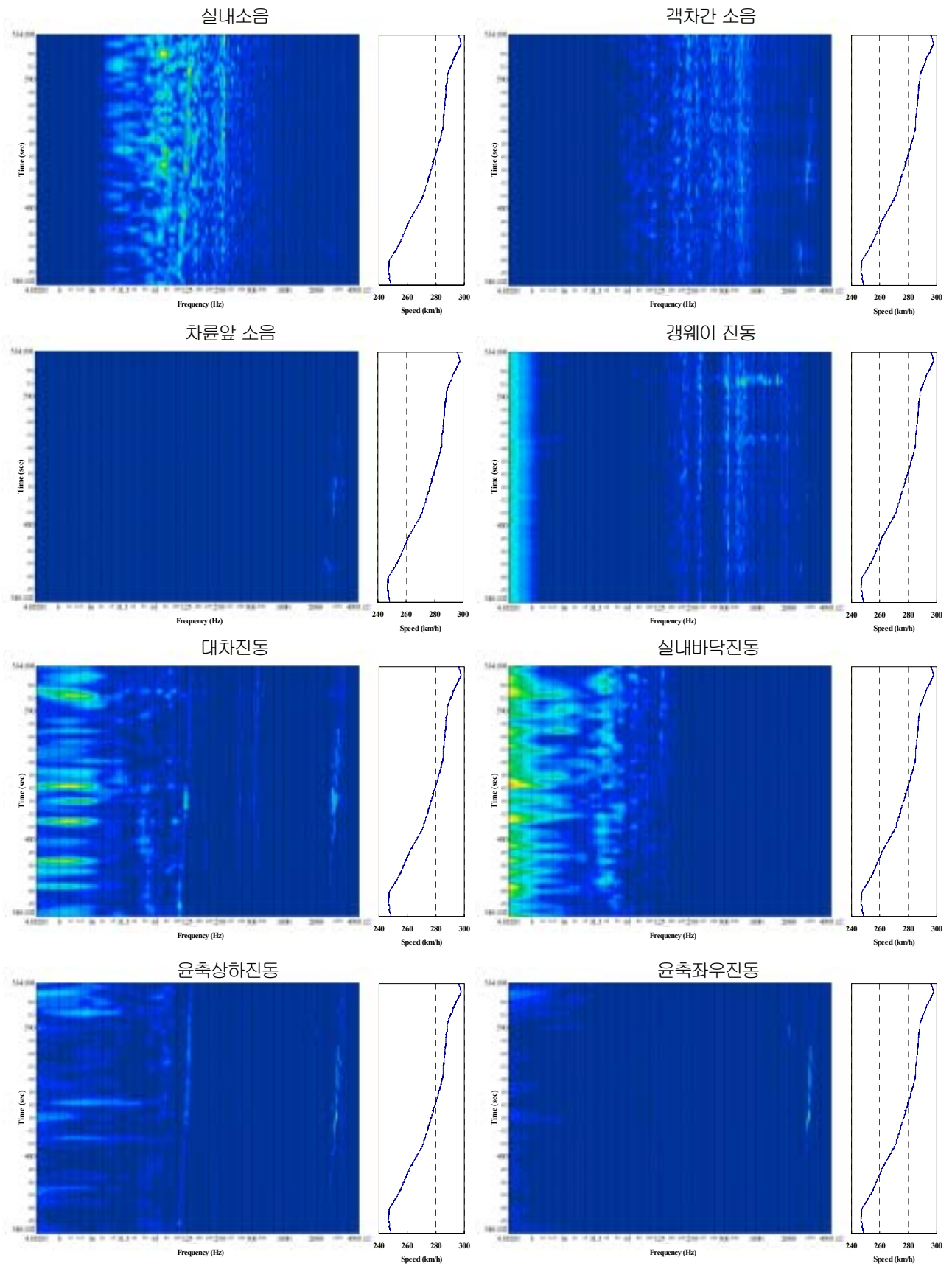


그림 2. 개활지 측정결과

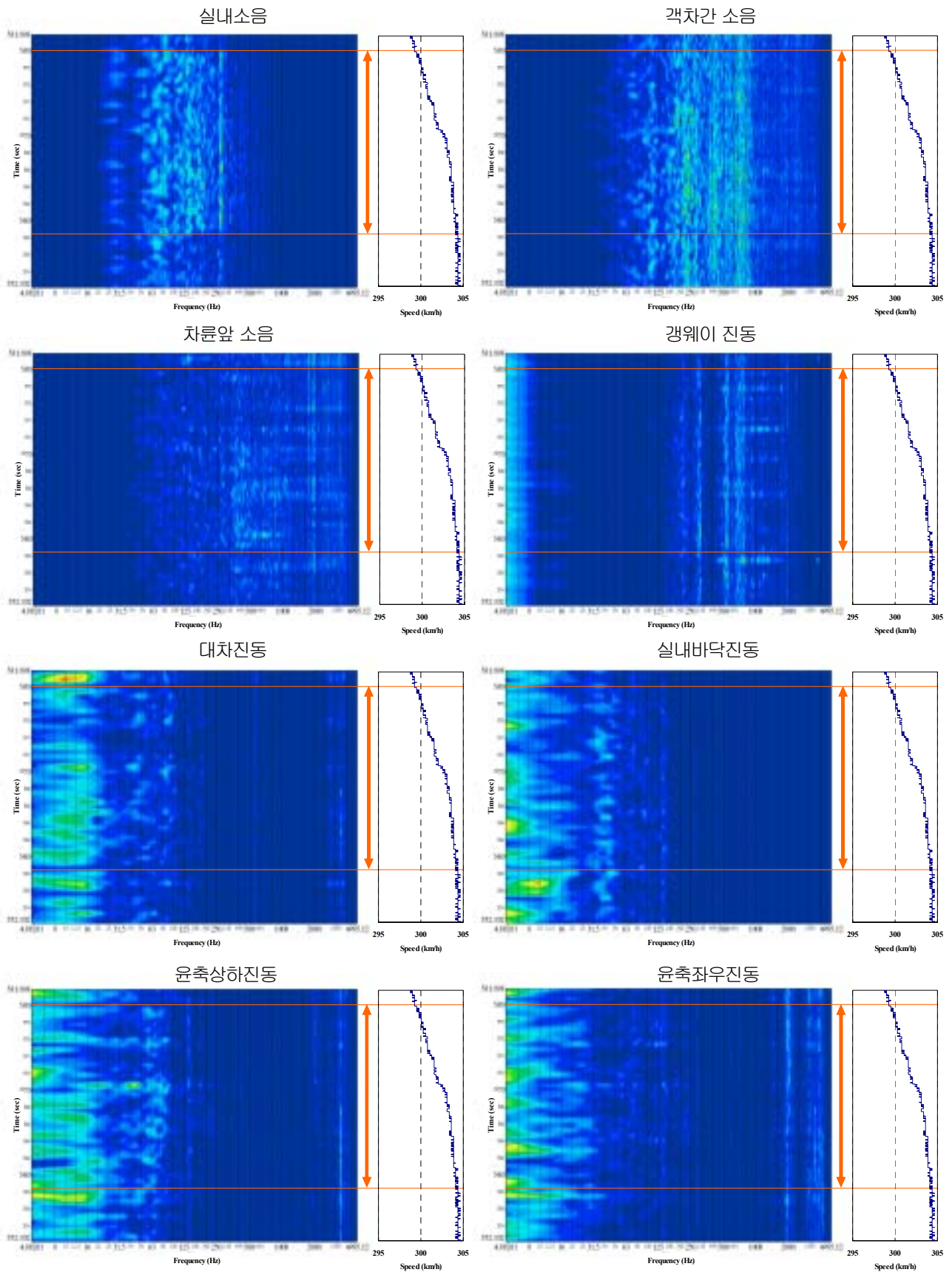


그림 3. 영동터널 측정결과

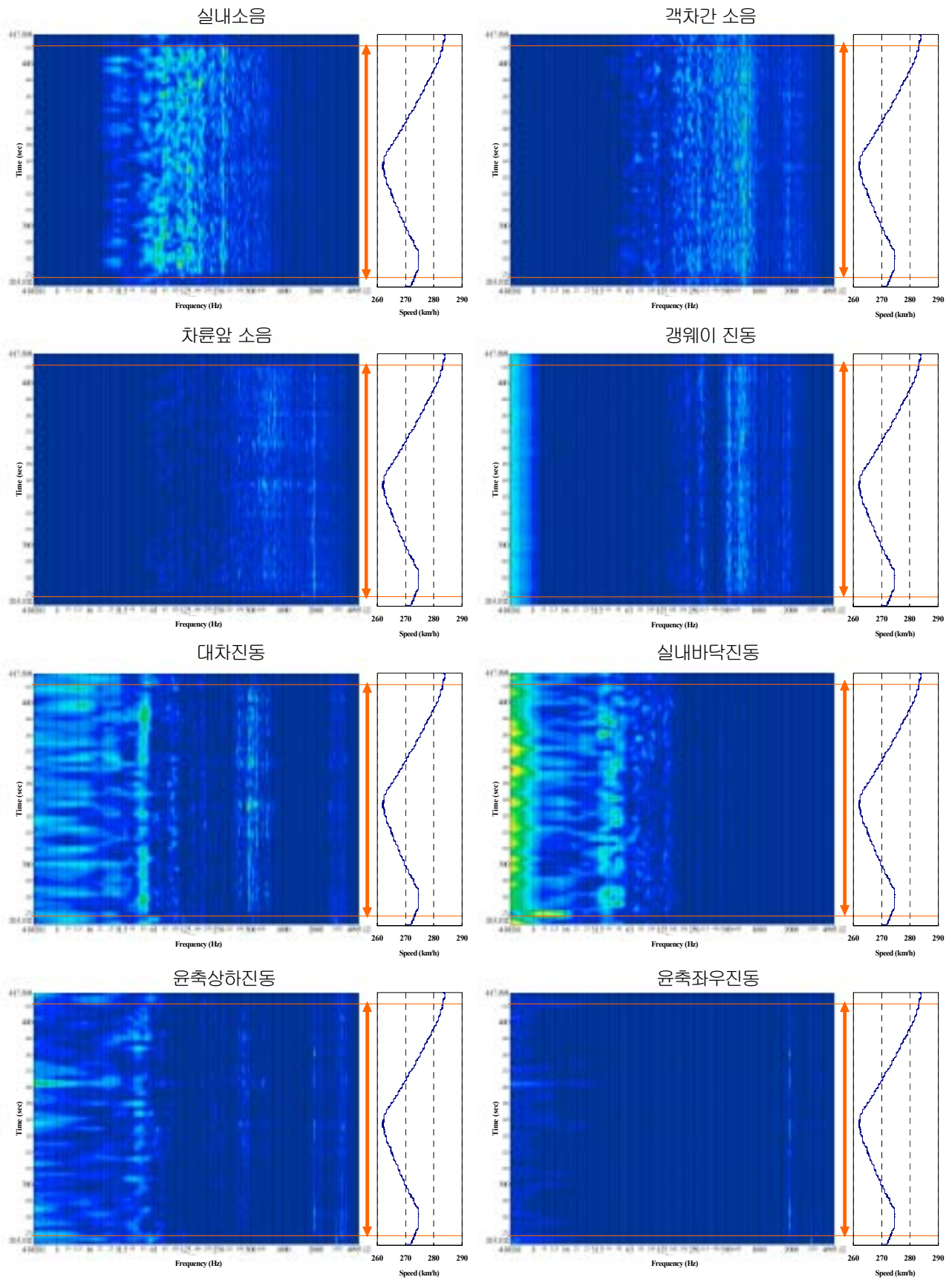


그림 4. 황학터널 측정결과

은 270km/h이상에서 많이 나타나고 실내바닥 진동 특성과 시점이 일치하나, 윤축이나 대차 진동에서는 그 특성이 그다지 크지 않다. 100~200Hz는 주로 궤도 침묵 간격의 영향을 받는 영역인데 실내소음, 실내바닥진동에서는 그 특성이 나타나나 윤축이나 대차 진동에서는 낮게 나오거나 거의 찾기가 어렵다. 실내소음 200~300Hz영역은 속도의 변화에 따라서 주파수 변동은 없지만 그 크기가 달라짐을 알 수 있고 270km/h이상에서 그 특성이 확실히 드러나는 것을 알 수 있다.

황학터널에서는 영동터널과는 달리 대차진동에서 400~800Hz영역이 높게 나오고 있고 속도가 변함에 따라서 주파수도 변하는 것을 확인할 수 있다. 이 영역은 객차간 소음이나 갱웨이진동에서 주로 나타나는 특성인데, 황학터널에서는 대차에서 확실하게 나타나고 있고 실내소음에서도 그 특성이 약하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트도상의 특성으로 인해 차량에서 발생한 각종 소음이 차량하부에서 흡수되지 못하고 반사되어서 대차에 영향을 주고 실내에도 전달되기 때문으로 볼 수 있다.

개활지와 영동터널에서 나타나는 윤축의 3150Hz 영역 특성은 황학터널의 경우 윤축에서 약간 높으나 차륜앞 소음이나 대차 진동에서는 약하게 나오고 있다. 다른 구간과 비교해보면 이 특성은 280km/h이상 되어야 확실히 드러나는데 황학터널에서는 상대적으로 낮은 속도로 통과하여서 잘 드러나지 않은 것으로 생각된다.

3.2 고찰

(1) 윤축 및 대차의 영향

궤도와 차륜과의 상호작용에 의해 나타나는 것으로 궤도의 영향과 침묵 간격의 영향 2가지로 생각할 수 있다. 궤도의 영향은 주로 20~50Hz영역에서 나타나는데 상대적으로 저주파에 속한다. 이는 실내소음에서는 영향이 그다지 크지 않고 실내바닥, 대차, 윤축 진동에서 그 특성이 나타난다. 궤도 침묵 간격의 영향은 100~200Hz에서 주로 나타나는 특성인데 이는 차량 속도에 따라서 변한다. 이는 실내소음에 많은 영향을 미치는 것으로 나타나므로 향후 차량내 소음대책에 고려되어야 할 것이다.

(2) 도상의 영향

자갈도상 터널인 영동터널과 콘크리트도상인 황학터널에서 실내소음의 특성을 비교해 볼 때 황학터널에서의 주파수 특성이 보다 분명하게 나타나고 있다. 또한 황학터널에서 대차 진동은 20~50Hz영역뿐만 400~800Hz영역에서도 그 특성이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 특히 400~800Hz영역의 경우 속도에 따라서 주파수가 변하고 객차간 소음과 갱웨이 진동주파수 영역과 동일하다는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 자갈도상의 경우 차량에서 발생한 각종 소음이 자갈에서 흡수하지만, 콘크리트도상의 경우 반사가 되므로 이것이 다시 차체 및 대차 등을 가진하기 때문에 높게 나오는 것으로 볼 수 있다.

(3) 객차간의 영향

실내소음에서는 270km/h이상 주행시 250~300Hz에서 뚜렷한 특성이 나타나고 있는데 이 특성은 개활지에서도 나타날 뿐만 아니라 터널 내에서는 자갈도상, 콘크리트도상에 관계없이 분명하게 나타난다. 이 영역과 비슷한 특성을 가지는 것은 객차간 소음과 갱웨이 진동인데, 이는 고속주행으로 인해 공기와 차체의 상호작용으로 발생하는 공력소음의 영향으로 생각된다.

(4) 기타

실내소음 중 80Hz부근 영역은 개활지 및 터널을 270km/h이상 주행시 매우 높게 나오고 있는데 이의 원인이 되는 진동 및 소음은 이번 측정에서는 찾아보기가 어려웠다. 윤축과 대차의 진동과 그 특성이 비슷한 것 같지만, 발생한 시점이 같지 않거나 그 특성이 다른 주파수 영역보다는 상당히 낮게 나오는 경우가 많았다. 그런데 황학터널의 측정결과

중 실내바닥 진동과 비교해보면 그 특성이 나타나는 시점이 일치하고 있으므로 이는 차체의 진동과 연관되어있는 것으로 추정된다. 그러나 이번 실험에서는 여기에 대한 추가적인 센서설치는 하지 않아 차체 진동과의 명확한 인과관계를 설명하기는 현재로서는 어렵다.

280km/h 이상 주행시 차륜앞 소음, 대차 및 윤축 진동에서 3150Hz 영역이 상당히 높는데 이는 차륜과 궤도의 상호작용으로 발생하는 것으로 추정되고 있다. 그러나 280km/h 이상에서 발생하고 속도가 증가함에 따라서 주파수가 변하는 것에 대한 원인은 이번 실험만으로는 설명하기 어렵다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 속도의 변화에 따른 고속철도 차량의 진동 및 소음 특성을 분석하였다. 이를 위해 KTX 차량의 주요 부위에 가속도계 및 마이크로폰을 설치하고 개활지와 터널 구간에서의 진동 및 소음을 측정하는 실험을 수행하였다. 이로부터 다음을 확인할 수 있었다.

첫째, 궤도와 차륜과의 상호작용에 의한 진동 및 소음이 영향을 미치는 주파수 영역을 확인하였다. 20~50Hz 영역은 대차, 실내바닥, 윤축 진동에서, 100~200Hz 영역에서는 이들의 진동뿐만 아니라 실내소음에서도 특성이 명확하게 나타났고, 이들은 속도의 영향을 받고 있었다. 특히 100~200Hz 영역은 속도에 따라서 주파수가 변하는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 콘크리트도상에서 나타나는 차량의 진동 및 소음의 특성을 확인하였다. 콘크리트 도상에서는 실내소음뿐만 아니라 대차에도 영향을 주고 있음이 밝혀졌다. 특히 400~800Hz 영역은 속도에 따라서 대차진동의 주파수가 변하는 것으로 나타났다.

셋째, 객차간에 의해 발생하는 진동 및 소음의 특성을 확인하였다. 객차간 소음중 일부가 갱웨이진동과 실내소음에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 실내소음 중 250~300Hz 영역은 속도가 증가하면 그 특성이 분명해지고 터널 내에서는 뚜렷하게 나타난다는 것을 확인하였다.

이와 함께, 270km/h 이상 고속주행중 실내소음에서 80Hz 영역과 280km/h 이상에서 차륜앞 소음과 윤축, 대차, 차륜의 진동에서 3150Hz 영역이 높게 나온다는 것을 확인하였으나 그 원인을 이번 측정만으로는 설명하기 어렵다. 그러므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 최성훈, 김재철, 이찬우, 조준호, “터널주행시의 고속전철의 실내 소음”, 한국철도학회 2004년 춘계학술대회지, pp.670-674, 2004.
2. 이찬우, 김재철, “터널에서의 고속차량 차내 소음 특성”, 한국철도학회 2005년 춘계학술대회지, pp.479-484, 2005.
3. 최성훈; 김재철; 이찬우; 문경호, “한국형 고속철도 차량의 운행조건에 따른 차내 소음 분석”, 한국철도학회 2003년 춘계학술대회지, pp.138-142, 2003.
4. 김재철; 이찬우; 조준호, “KTX와 KHST의 실내소음 특성 분석”, 한국소음진동공학회 2005년 춘계학술대회지, pp.450-453, 2005.