

차세대 고속철도차량 실내외 소음 저감 기술 개발

각국에서 개발되는 고속철도는 시속 500km를 넘나들고 있다. 그러나 상업운전속도는 시속 300km 수준으로 아직은 개발된 기술이 실용화되지 않고 있다. 왜 그럴까? 그 해답은 환경소음 문제에 기인된다. 이 글에서는 최고속도 400km/h(운행속도 350km/h)급 분산식 철도차량(차세대 고속철도차량; HEMU-400X)에 대한 소음기반 기술의 진행 현황을 기술한다.

김정태 홍익대학교 기계시스템디자인공학과, 교수

e-mail : jeungk11@yahoo.co.kr

고속철도 상업운전속도는 환경소음이 좌우

고속철도는 20세기 후반에 등장한 대표적인 친환경 교통수단이다. 빠르고 편리한 대중교통 수단으로 발전되면서, 근래에 들어서는 항공기와 비교우위의 경쟁을 하고 있는 실정이다. 일본, 독일, 프랑스 등에서는 자국 고속철도의 기술개발에 총력을 기울이고 있으며, 기술의 우위를 잡기 위해 속도 경쟁이 한창 진행되고 있다.

근래 개발되고 있는 고속철도는 시험 최고속도가 시속 500km를 넘고 있으나, 현재 각국에서 상업운전속도는 시속 300여 km 수준이다. 개발되는 고속철도는 순간 최고속도가 500km를 넘나들고 있는데, 왜 상업운전속도는 기술개발을 따라가지 못할까? 그 해답은 환경소음이 쥐고 있다. 주행속도가 증가하면 환경소음의 부정적 영향으로 인해 상업운전구간에서 속도가 제한되고 있으며, 일부지역에서는 소음분쟁 사례도 나타나 특정구간의 주행속도가 법으로 제한되고 있는 실정이다.

시속 300km 수준에서는 방음대책 등을 적절히 활용하면 수인의 한계 범위로 소음저감이 가능하게 된다. 그러나 시속 350km 이상의 주행조건에서는 공력기인 소음이 문제가 되며, 기존의 소음방지대책으로는 한계가 있다. 또한, 소음예측방법에서도 수정보완기술이 요구된다. 아울러, 차세대 고속철도 차량의 분산식 추진시스템은 대차구조와 동력발생장치 등이 기존시스

템과 상이하기 때문에 설계조건의 변화로 인한 추가소음발생원 특성을 고려하여야 한다. 분산시스템의 설계는 차량 내의 탑승자에게도 소음을 야기하게 된다. 차량이 터널진입 시 소음 크기가 급격히 증가하기 때문이다. 따라서, 슬라브궤도, 차량구조물차음특성, 방음대책 등을 종합적으로 고려한 설계가 제품개발 초기단계에서부터 고려되어야 한다.

이 글에서는 최고속도 400km/h(운행속도 350km/h)급 분산식 철도차량(차세대 고속철도차량; HEMU-400X)에 대한 소음기반기술 개발현황을 기술하고자 한다.

동력분산식 고속철도의 소음연구: 목표와 대상분야

동력분산식 고속철도의 소음연구는 차량의 설계도를 이용하여 분산형 차량 객차를 모델링하고 현재는 차량 2량 1편성에 대한 차량 외부 및 환경 소음 예측을 하고 있다.

차량 실내 소음의 경우 제시된 소음 목표치는 실내소음의 경우 객실 개할지 71dB(A), 객실 터널 75dB(A), 운전실의 경우 개할지 80dB(A), 운전실 터널 83dB(A), 환경소음의 경우 94dB(A)(TEL)이다. 차세대 고속철도 차량의 실내외 소음 저감 대책을 마련하기 위

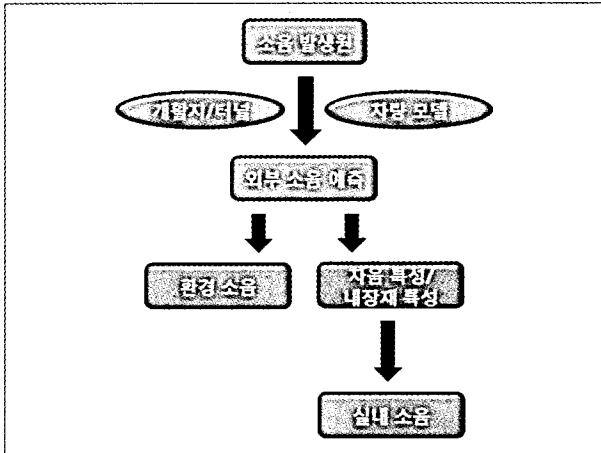


그림 1 고속철도 차량 소음 저감을 위한 연구 플로 차트

해서는 차량 설계 단계에서 연구가 진행되어야 한다.

소음 발생원의 경우 대차 구조, 동력발생장치, 차량 구조 등에 따라 열차의 소음이 발생하게 된다. 발생된 소음은 개활지와 터널 구간에서 상이한 특성을 갖게 되기 때문에 개활지와 터널 구간에 따른 별도의 연구가 필요하다. 차량 설계가 이루어지면 외부 소음을 예측할 수 있다. 이를 통하여 주행 시 고속철도 차량의 환경 소음을 예측한다. 실내 소음의 경우 차실 내부의 소음도는 차음 특성과 내장재 특성에 의하여 결정된다. 차음 특성은 외부에서 들어오는 소음을 감쇠시키며 내장재 특성은 차실 내부로 들어온 소음을 감쇠시키는 역할을 한다.

따라서 분산식 고속철도차량의 소음 저감을 위한 연구로 크게 다음과 같은 세 가지 분야를 대상으로 진행하고 있다. 그림 1은 고속철도 차량의 소음 저감을

위한 연구 플로 차트를 보여준다. 차량 외부 구조 변경을 통하여 차륜 공력기인 소음을 3dB 저감시키는 것을 목표로 하고 있다.

- 차량 실외 및 환경소음 예측
- 차량 실내 소음 예측
- 차음 성능 해석

소음 발생원 모델링

고속주행 시 차량으로 인해 나타나는 소음원은 다양하게 나타난다. 차량표면에서는 난류의 경계층 소음원이 차체의 벽을 통과한 후 나타나는 공력소음(aerodynamic noise), 차륜/레일의 접촉 시 발생하는 기계적 음원이 차체 외부 표면에 분포되면서, 차체의 벽체를 통과한 후 나타나는 공기기인소음(air-borne noise), 차륜/레일간의 접촉 시 발생하는 진동에너지가 차량바닥을 가진시킨 후 음향방사에 의해 나타나는 구조기인소음(structure-borne noise) 등이 있다.

최고속도 400km/h(운행속도 350km/h)급 분산식 철도차량은 우선적으로 대차의 구조변화가 예상되므로 새로운 차륜/레일소음발생원 특성을 고려하고 있다. 분산되는 모터의 설치위치로 인한 동력원 소음특성 역시 새롭게 고려되어야 할 요소이다. 특히, 주행속도가 시속 350km를 초과하는 구간에서는 공력소음이 기하급수적으로 증가한다. 따라서 소음발생원의 주파수 특성, 속도의존성, 예측모델링 등이 연구대상이다. 음

압, 음향파워 특성에 대한 연구도 포함된다.

차량에서 발생하는 소음발생원으로부터 차량외부 표면에 분포되는 소음을 예측하게 되면, 차량구조물의 차음효과를 통해 소음에너지 일부가 차단된 후, 차실 내부로 투과

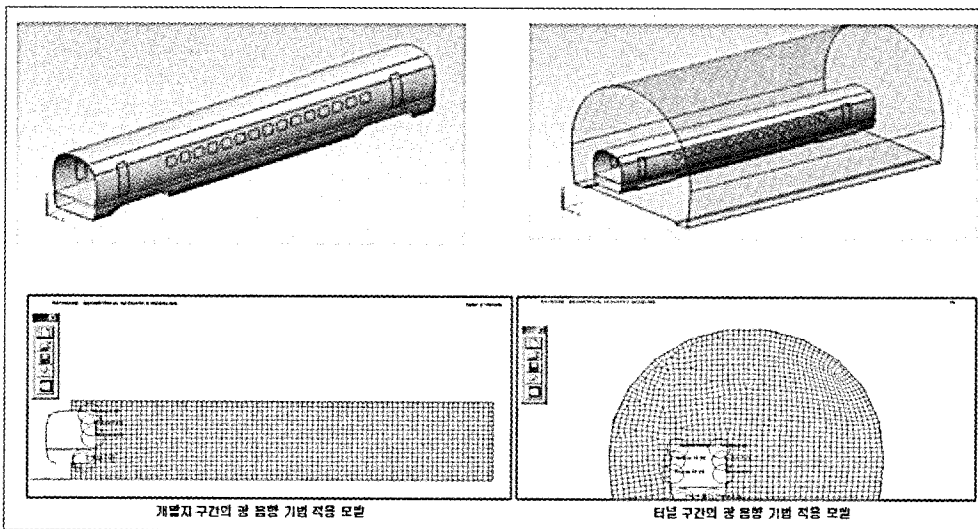


그림 2 개활지 및 터널 구간에 대한 RAYNOISE 해석 모델

된다. 차실 내부의 소음도는 투입되는 소음에너지와 차실 내장재의 특성에 의해 결정된다. 그림 2는 개활지와 터널 구간을 구분하여 해석을 수행하게 되는 시뮬레이션 모델을 보여주며 그림 3은 고속철도 차량의 소음원 분포를 보여준다.

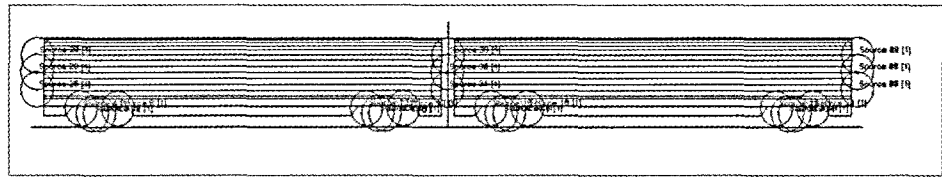


그림 3 고속철도 차량의 소음원 분포

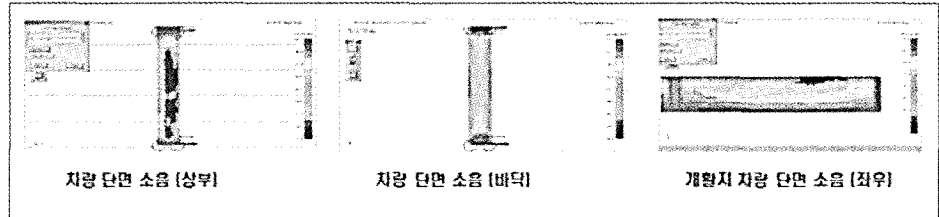


그림 4 고속철도 차량의 실외 소음 해석 결과

실외소음 예측

고속철도 차량의 소음 예측을 위해서는 우선적으로 열차 내·외부 및 터널 개활지 등의 분산형 열차의 소음원 특성(차륜/레일 기계소음, 공력소음, 견인모터, 공조 시스템 등)을 주행 속도별로 주파수 대역특성을 파악하여 음향파워를 도출한다. 차량외부의 음원분포는 분산형 차량의 특성을 고려하여, 철도차량의 다양한 종단면에 대하여 수행되고 있다.

고속철도 차량의 실외 소음 예측을 위하여 350km/h에서의 공력기인 소음원(차량, 대차, 간극)과, 차륜-레일 소음원 데이터 구축 후 개활지 구간, 터널 구간 주행 시 차량 외부 단면 소음을 예측하고, 차량의 상부, 하부, 좌·우측 면의 표면 소음 분포를 해석하고 있다. 그림 4는 고속철도 차량의 실외 소음 해석 결과를 보여준다.

고속철도 차량의 실내 소음

차량 외부 표면의 소음분포 정보를 구한 후, 차량의 실내 소음을 예측하게 된다. 외부의 소음이 차량 벽면을 통과하여 차실 내부로 투과되면, 차실 내부의 소음도는 차체구조물의 차음특성과 차실 내장재의 특성에 의해 결정된다. 실내소음 예측을 위한 통계적 에너지 해석기법 상용소프트웨어인 VA ONE을 이용하여 분산형 객차를 모델링한 후 실외 소음에서 구한 열차 표면의 소음을 이용하여 고속철도 차량의 실내 소음을 예측하고 있다. 연구결과를 검증하기 위하여 KTX-II

모델을 추가적으로 제작하여 실측 데이터와 시뮬레이션 예측 데이터를 비교 분석할 예정이다. 차실 내 소음연구는 단일편성과 복수 차량 편성량에 대한 비교분석도 수행하고 있다.

차량 구조물의 차음 특성

고속주행 중 발생하는 고속철도 차량의 소음은 열차의 벽을 투과하여 실내로 들어오게 된다. 따라서 고속철도 차량의 실내소음 저감을 위한 압출재 투과 손실 성능을 높여야 한다. 현재 개발되는 차량은 알루미늄 허니콤 구조를 사용하고 있기 때문에, 허니콤 구조물에 대한 차음 성능 지배인자 도출 및 영향 분석을 수행하고 있다. 그림 5는 고속철도 차량에 따른 압출재 도면을 보여준다.

사용 예정인 차량 압출재의 투과손실을 향상시키기 위하여 기존의 G7, KTX-II 차량의 압출재와, HEMU-400X의 압출재에 대한 투과 손실량을 실험적 방법과 시뮬레이션 방법을 통하여 비교 분석하였다. 차세대 고속철도 차량의 압출재의 소재가 알루미늄으로 바뀌었기 때문에 질량은 줄었지만 이론적으로 투과 손실량은 낮아지게 된다. 현재 철도차량의 실내소음 저감을 위해 사용되고 있는 차량 바닥재용 알루미늄 압출재는 차음 성능을 검토한 결과 600Hz 대역부터 투과손실이 하락하여 1,000Hz 부근에서는 현저히 낮은 투과손실 값을 보이는 것으로 판단된다. 이 때문에 합판, 유리면 등을 적층한 후에도 이 부근 주파수 대역에서는 여전히 낮은 투과손실을 보인다. 이와 같은 현상의 원인

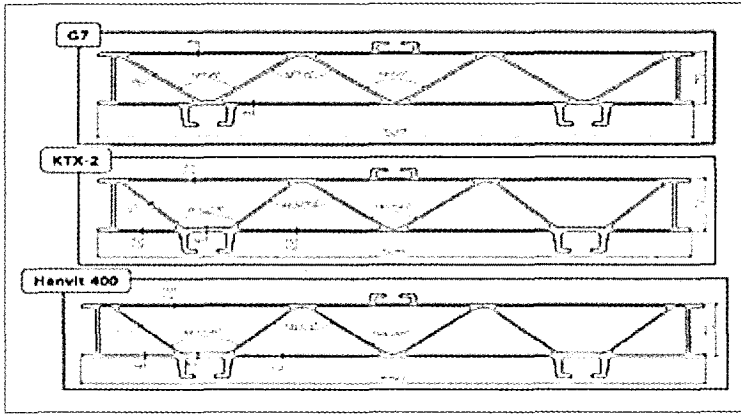


그림 5 고속철도 차량에 따른 압출재 도면

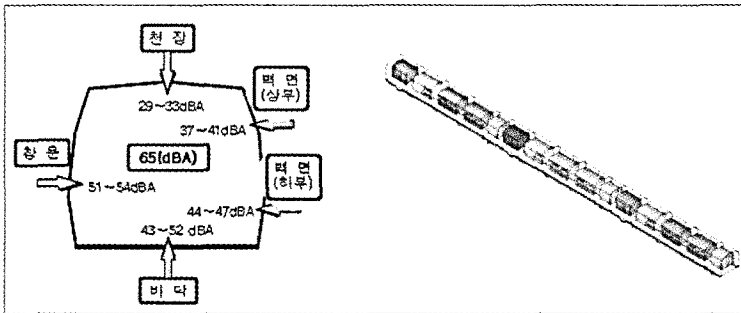


그림 6 고속철도 차량의 실내소음 기여도 및 위치별 소음 분포도

은 압출재 단위구조상에서 발생하는 국부 공진 모드로 확인되고 있다. 따라서, 기존 압출재 면밀도를 유지하면서, 동시에 전체 굽힘 및 비틀림 모드의 역학적 특성의 훼손이 없는 설계방안이 요구되고 있다. 즉, 구조물 특성을 유지하면서 단위 구조를 변경하여 국부공진 주파수대역이 가능한 높게 나오도록 구조를 설계하고, 댐핑을 증가시켜 공진모드의 과도한 출현을 억제해야 한다. 또한 내장재를 효과적으로 사용하여 적층재 투과 성능을 개선하여야 한다. 즉 면밀도를 유지하며 공진주파수 대역을 높이는 연구가 진행 중이다.

차량 내부 내장재의 음향 특성

차실 내부로 들어온 소음은 차량 내부의 내장재에 의하여 결정되게 된다. 따라서 차 내의 닫힌 공간에 대한 음향학적 변수를 도출하고자 차실의 잔향시간, 흡음률평가, 차음 특성의 시뮬레이션 등을 수행하고 있다.

차량 내부의 소음분포

차량 외부 소음원 분포와 차음재 성능평가, 내장재 음향 특성 결과로부터 실내 소음특성을 도출하며 도

출과정은 통계적 에너지 해석 기법에서 사용되는 음향에너지 밸런스기법을 기본적으로 사용하여 진행하게 된다.

내부 소음의 특성은 대차상부, 차량 중앙, 기타 위치 등으로 분리하여 차량중단면에 대해 소음 크기를 도출하였다. 또한 시뮬레이션을 통한 전산해석 기법을 검증하기 위하여 실험측정을 통해 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 연구방법의 신뢰도를 얻는다. 또한 실내 소음을 결정하는 기여도에 대한 분석도 이루어진다. 일반적으로 창문에 대한 실내 소음 기여도가 가장 크다. 그림 6은 고속철도 차량의 실내 소음 기여도와 위치별 소음 분포도를 나타낸다.

현재까지의 연구결과

현재까지 진행된 분산식 고속철도 차량의 주행 시 소음도는 열차 음원에서 이격거리 25m 높이 1.5m 지점에서 개활지 90.8dB(A)로 소음사양을 만족하는 것으로 예측되었다.

한편, 주행하는 고속철도 차량의 실내 소음도는 개활지 구간 최대 71.03dB(A), 터널 구간 최대 74.03dB(A)로 예측되었다. 열차의 통로 및 화장실이 위치하게 되는 공간은 개활지 구간 최대 74.04dB(A), 터널 구간 최대 75.87dB(A)로 예측되었다. 고속철도 차량이 터널 구간에 들어가게 되면 약 4.3dB 높게 나타나는 것으로 예측되었다. 이는 터널 구간에서의 터널 공간에 의한 소음원 반사에 의한 영향이 큰 것으로 예상된다. 실내소음도 결정 변수로는 구조 측면에서 창문과 주파수 측면에서 250Hz로 예측되었다.

현재 시도되고 있는 방음 대책으로는 환경소음을 저감하기 위하여 차량대차 표면에 스킵트를 적용(0.6m)하는 방법을 고려하고 있다. 환경 소음의 경우 스킵트 부착에 따른 소음 저감 효과는 3dB 정도로 판단된다.

이와 함께, 차실 내 소음 수준을 낮추기 위한 방안으로 국부 공진모드를 최대한 고주파 영역으로 옮겨지도록 구조를 설계하는 개선안이 제시되어 설계에 반영되고 있다.