



# 철도소음 연구 현황

고효인\*, 장승호\*\*, 홍지영\*\*, 박준홍\*\*\*, 양원석\*\*\*  
(\*,\*\*한국철도기술연구원, \*\*\*한양대학교)

## 1. 머리말

철도소음을 저감하기 위해서 수행하는 연구는 음향학(acoustics)과 진동(vibration)의 내용을 다루는 다양한 학문을 포함한다. 예를 들면 접촉역학, 다자유도 시스템, 기동 보나 평판의 진동에 대한 해석적 모델링, 유한요소 및 경계요소 해석, 신호 처리, 모드해석, 진동음향 및 공력음향 이론 등이 수반되어야 한다. 철도소음 연구에서는 철도운행으로 인한 철도시스템의 소음 발생 역학, 역학을 기술하기 위한 모델링 기술, 제어하기 위한 수단 등이 규명 및 제시된다.

한국철도기술연구원에서는 특히 최근 몇 년 동안 국토교통과학기술진흥원 발주 “철도 소음/진동 저감기술 개발”, “400 km/h 고속철도 소음원 모델 및 기여도 분석기술 개발”, 기관고유사업 “철도 친환경 향상기술 개발” 수행을 통하여 한국형 철도차량과 선로시스템에 부합하는 철도소음 계산 모델, 철도소음 지도 기술, 소음원 규명 기술, 철도소음 시뮬레이션 프로그램 등의 기술을 개발, 확보하였으며, 한국 선로변 민원에 대응하여 국내 정서와 운영환경에 최적화된 저감기술을 개발하여 적용하고자 핵심저감기술 개발을 진행하고 있다. 이 글에서는 현재까지 한국철도기술연구원을 중심으로 진행되고 개발된 국내 기술개발 결과를 토대로 철도소음과 연구 현황을 소개하고자 한다.

## 2. 철도소음 연구

### 2.1 철도소음 모델 및 예측 연구

철도 전동 소음은 철도 차량이 레일(rail) 위를 주행할 때 차륜(wheel)과 레일의 표면 거칠기(surface roughness)에 의해 생기는 가진력에 따라 차륜과 레일이 진동하면서 발생된다. 여기서 소음 발생과 관련한 파장 범위의 거칠기를 음향 조도(acoustic roughness)라고 한다. 철도 전동 소음에 대한 이론적 모델은 Remington(1987)에 의하여 처음으로 제안되었으나, 해당 모델은 차륜-레

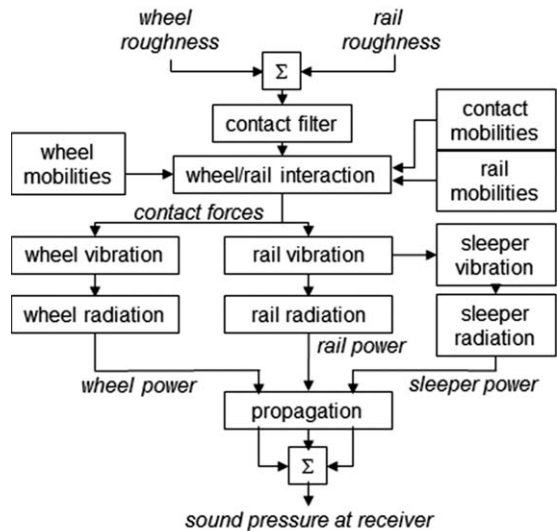


그림 1 철도 차륜/레일 주행소음 발생 역학

\* E-mail : hikoh@krti.re.kr / Tel : (031)460-5207

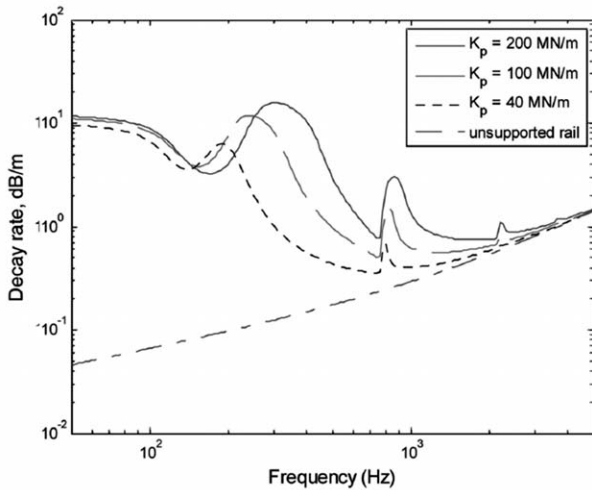


그림 2 철도 궤도의 감쇠율 계산결과 및 측정 사진



그림 3 철도 차륜 음향조도 측정

일 접촉에서의 크립력(creep force)을 고려하지 않는 등 비교적 간단화한 모델이었다. 이후 Thompson(1993, 2009)이 더욱 세밀하고 확장된 모델을 제안하였으며, 해당 이론을 바탕으로 상용 프로그램인 TWINS(track-wheel interaction noise software)를 개발하였다.

철도 전동 소음원 모델에는 궤도 모델, 차륜 모델 그리고 접촉 모델이 필요하다. 궤도 모델에서 해석 주파수 대역이 500 Hz 이하인 경우 레일을 단순 Euler-Bernoulli 보로 가정할 수 있으나 레일에 전단 변형이 발생하는 500 Hz 이상에서는 Timoshenko 보 모델이 사용된다. 이러한 보 이론의 기본 가정은 단면의 형상이 변형하지 않는다

는 것인데 레일의 경우 약 3 kHz 근방에서 단면의 변형이 나타나기 시작하므로 약 3 kHz 보다 높은 주파수 대역에서는 보 이론에 기반한 모델이 더 이상 유효하지 않다. 그리고 일반적으로 레일은 일정 간격으로 떨어져 있는 침목과 레일패드 위에 지지되어 있으므로 이산 탄성 지지(discrete elastic support) 구조를 갖는다. 그러나 해석의 편의를 위해 레일패드와 침목이 레일을 따라 연속적으로 분포한다고 가정하여 연속 탄성 지지(continuous elastic support) 구조로 가정하여 해석하는 경우도 많다. 레일의 단면이 변형하여 단면의 고차 변형 모드가 발생하는 3 kHz 이상의 주파수 대역에서는 더 이상 보 이론을 적용한 이

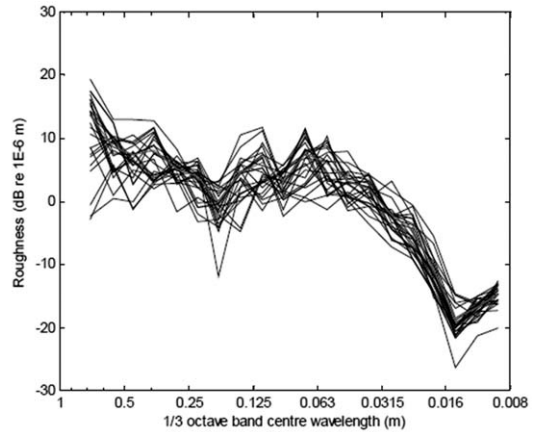


그림 4 철도 레일의 음향조도 측정 및 레일의 진동 측정을 통한 유효음향조도 추정

론해석을 적용할 수 없으므로 수치해석을 이용한 궤도 진동 해석이 수행된다. 차륜은 차륜/레일 접촉점에서의 가진(excitation)에 의한 응답 특성을 나타내며, 차륜의 형상과 재료 물성과 관계하는 고유모드(natural mode)와 연관되므로 해당 모드 분석을 통하여 구할 수 있다. 일반적으로 유한요소(FE) 수치 해석을 통하여 모드 정보를 계산하며 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 차륜에 대한 유한요소 해석을 수행한 후에 윤축의 강제 운동 모드를 추가 보정하여 진동 응답 특성을 얻는다. 레일과 차륜의 접촉에서 두 물체가 강체가 아닌 탄성체이므로 접촉 강성이 고려되어야 한다.

음향 조도에 의한 수직방향의 가진은 차륜과 레일의 동적인 거동에 의하여 다른 방향으로도 연성되며 3차원 접촉 모델을 이용하여야 한다. 접촉 역학과 관련하여 Hertz의 접촉 이론이 널리 이용되고 있으며, 레일 이음매나 분기기 또는 스킵 소음과 같이 특수한 경우가 아닌 일반적인 전동 소음에서 철도 하중에 의한 변형이 비교적 작으므로 선형화한 접촉 강성을 고려한다. 또한 진행 방향과 수평 방향의 크리피지(creepage)와 크립력(creep force)이 주요하게 고려되어 레일, 차륜 및 접촉의 구조적인 연성 관계식을 만들고 분석하여 접촉력을 계산하게 된다.

레일 및 차륜의 조도는 랜덤 값을 가지므로 스



그림 5 고속열차의 저속 운행 시 동력소음 측정

펙트럼으로 측정되어지며, 레일 조도와 차륜 조도는 서로 incoherent하므로 두 조도 스펙트럼의 에너지 합에 접촉 필터 효과를 곱하여 총합 조도 스펙트럼을 구할 수 있다. 레일에 대한 음향 조도 측정법은 EN 15610에 규격화되어 있다. 특히, 차륜 음향 조도의 측정에서는 한국철도기술연구원 에서 직접 개발하여 제작한 측정 장비(WARM)를 활용하고 있다. 비교적 세부적인 특성을 파악하고 예측할 수 있는 전동 소음과는 달리 동력 소음과 공력 소음에 대해서는 그 기여도 측정과 해석이 매우 어려운 실정이다. 동력 소음의 경우 주요하게 되는 차량 속도 대역이 약 60 km/h 이하의 낮은 속도 대역이므로 저속 통과 시의 소음도를 측

정하여 동력 소음원 강도를 추정하고 있다. 공력 소음의 경우 유체 수치해석을 통하여 특성을 검토하고 있으며 수치 해석 결과와 측정 결과를 함께 비교 검토하여 공력 소음원의 강도를 추정하고 있다.

국내에서는 기존의 총합 소음도에 기반한 예측 모델을 2002년부터 이용하고 있었으나 소음의 주파수별 전파 특성을 고려하고 최근의 신규 차량과 궤도를 반영한 보다 정확한 소음예측 기술이 필요한 실정이다. 따라서 한국철도기술연구원에서는 앞에서 언급한 전동 소음원 모델을 활용하여 차종 및 속도별 열차 특성과 토공/교량/터널의 선로 종류별 궤도 특성, 도상 조건별 특성, 또한 분기기 및 이음매의 궤도 구성품, 레일 및 차륜의 유효 음향 조도, 방음벽에 의한 회절 등의 영향 요소를 검토하고 예측할 수 있는 소음 예측 모델을 2013년에 제시한 바 있으며 더 나아가 정확성과 확장성을 높이기 위한 연구 개발을 진행 중에 있다.

## 2.2 고속철도 공력소음 방사 예측 연구

고속 열차 주행 시 나타나는 주요한 공력소음원에는 열차의 전두부 및 후두부에 의한 소음, 판토틀라프에 의한 소음, 차간공간에 의한 소음 등이 있다. 이러한 고속열차 공력기인 환경소음 발생 메커니즘을 분석하는 해석 모델의 개발이 필요하다. 일반적으로 공력소음은 물체와 유동의 상호작용에 의해 발생한다. 유동이 물체에 부딪히면서 생기는 물체 주변에서 발생하는 압력의 구배에 의하여 소음이 발생되어 전파되는 형태의 발생 메커니즘을 갖는다.

이때, 발생하는 공력소음의 형태는 매우 복잡한 형태를 이루고 있어 수치적인 방법을 이용하여 계산을 하는 것이 합리적이다. 또한, 내부 및 외부 유동과 같이 경계 조건도 상황에 따라 다르기 때문에 이를 일반화할 수 있는 수치적 해석 기법이 필요하다. 해석 모델의 설정에는 경계조건, 여러 가지 물성치, scaling과 같은 다양한 변수를 수반하게 된다. 수치 해석은 실험에 비하여 유리

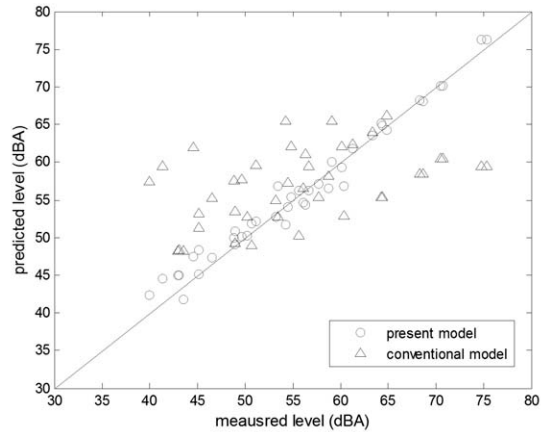


그림 6 철도차량 통과소음 예(예측 및 계산 결과)

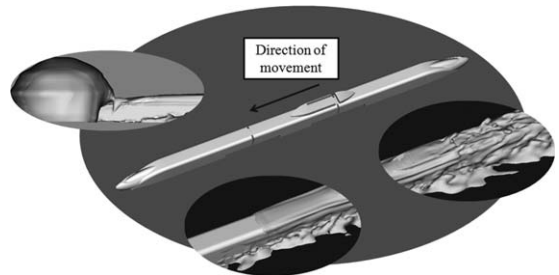


그림 7 고속열차 단순모델의 박리역 분포(운행속도 400 km/h)

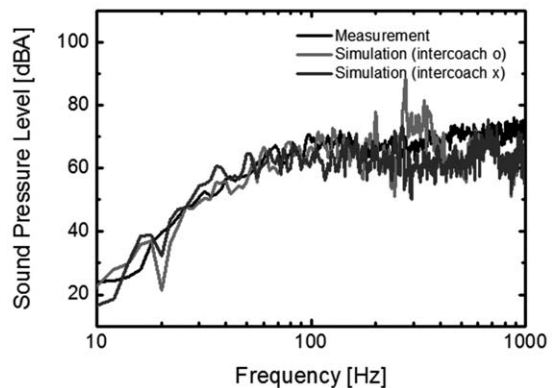


그림 8 열차 중앙으로부터 25 m 떨어진 지점에서의 far-field 측정 및 시뮬레이션 데이터 비교

한 점이 많지만 해석의 실효성을 갖기 위하여 많은 매개변수 실험을 거쳐 실효성을 증대해야 한다. 하지만, 실제 환경을 모사하기에 한계가 많아 수치 해석 기법만으로는 결과의 실효성을 갖기 어렵기 때문에 풍동 실험을 통한 검증과정을 거

치게 된다. 일반적으로 열차가 시속 180 km/h 이상으로 운행할 경우, 공력소음이 전동소음에 비해 환경소음의 저주파수 영역(2000 Hz 이하)에서 지배적으로 작용하게 된다. 고속열차의 공력소음 예측모델을 개발하기 위해 고속열차의 형상을 단순화하여 수치모델을 수립하였다. 수치모델은 Lattice Boltzmann method(이하 LBM)를 기반으로 한 상용 코드를 이용하여 유동해석을 통해 소음의 발생을 분석하였다. 실제 측정 데이터를 통해 단순해석모델의 결과와 비교하였으며, 각각의 공력소음원들의 단순모델에 대한 음압 데이터를 풍동실험을 통해 검증하였다. 유동해석 결과, 주요 공력소음원에서 박리역이 발생하는 것을 확인하였고, 속도가 증가함에 따라 박리역도 크게 발생하는 것을 확인하였다. Far-field의 소음해석을 위해 25 m 떨어진 지점에서 마이크 그룹에 대한 음압을 계산하였다. 소음해석 결과, 그림 8처럼 300~500 Hz과 800 Hz 부근에서 높은 음압성분이 나타났다. 이 영역들은 앞서 실제 측정을 통해 분석한 결과에서도 드러났다. 300~500 Hz의 주파수 대역은 운행속도 400 km/h 일 때의 차간공간에서 발생하는 공력소음의 순음성분 주파수 범위로 판단되며, 800 Hz 근처의 주파수 대역은 판토틀의 팬헤더의 공력소음으로 판단된다. 이는 실제 고속열차의 측정 데이터와 유사한 소음레벨로 계산되었다. LBM 기반으로 완성된 고속열차의 공력소음 단순 예측모델을 이용하여 원하는 위치에서의 소음을 계산할 수 있으며, 운행에 따라 달라지는 공력소음의 이동경로를 지향성 인자를 통해 나타낼 수 있다. 이러한 단순 예측모델을 통해 고속열차의 공력소음을 실제로 측정하지 않고도 손쉽게 정확한 데이터를 예측할 수 있다.

### 2.3 철도소음원 기여도 분석 기술

계산모델은 차량 및 궤도 시스템의 사양정보가 입력되어야 하고, 측정을 통하여 구축된 입력변수의 신뢰도와 해석모델에 결과의 신뢰도가 좌우된다. 한편 통과하는 철도차량의 소음을 마이



그림 9 측정 및 신호처리 통한 고속열차 소음원 위치 및 음향특성 결과 예

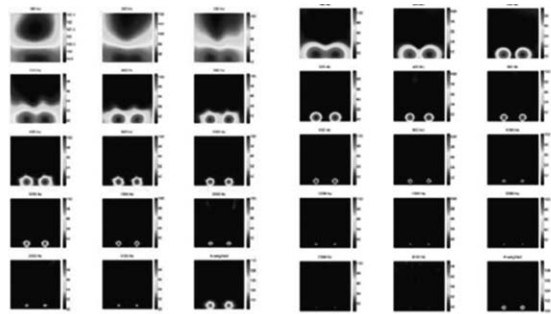


그림 10 어레이 센서 배치에 따른 소음원 분리 규명 해상도 향상 결과 예(좌: A배열, 우: B배열)

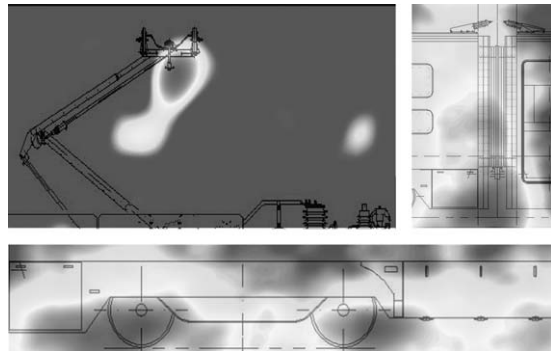


그림 11 410 km/h 운행 고속열차 주요소음원 및 점음원 위치 분포 예

크로폰 어레이 혹은 인텐시티 센서의 어레이로 측정함으로써 각 센서에서의 음압과 이동하는 소음원과 센서사이의 이격거리, 이동하는 물체의 음향방사 주파수 변화의 특성 등을 이용하여 실제 차량이 방사하는 소음원에 대한 위치와 음향특성을 추정할 수 있다. 정지해 있는 소음원, 구조가 그다지 복잡하지 않은 소음원 대한 위치

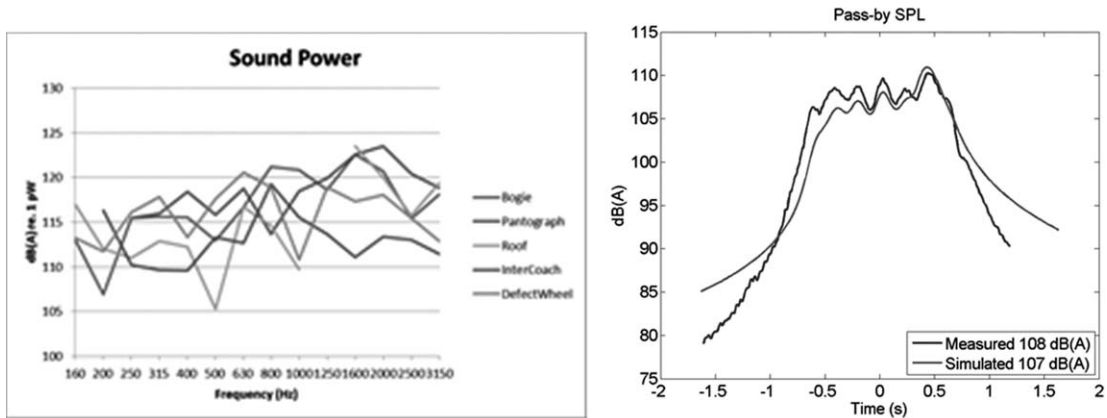


그림 12 410 km/h 운행 고속열차 소음원 별 강도 및 시간이력 시뮬레이션 예

추정 및 주파수 분석에 대한 기술을 다양한 분야에서 이미 활용되고 있다.

국내에서는 고속열차가 420 km/h의 시험 속도를 초과하여 400 km/h 이상으로 통과하는 열차의 주요 소음원에 대한 음향특성을 분리하고 규명하기 위한 기술개발이 이루어졌으며, 이론적/실험적 측면에서 보완 수정 연구가 계속 진행되고 있다. 마이크로폰 어레이를 통하여 이동하는 열차의 통과 음압을 측정하고, 차량면에서 방사하는 소음강도를 계산하는 데 있어서는 센서간의 간격과 어레이의 크기, 측정 거리 등에 따라서 규명하고자 하는 소음원 간의 분리 해상도, 실제 소음원의 정확한 위치 규명 성능등이 좌우되고, 넓은 주파수 영역에서 정확한 소음원에 대한 위치 가시화를 구현하기 위하여 다수의 센서와 대규모의 측정시스템이 요구된다.

이 연구에서는 400 km/h 이상 급 철도차량의 소음원을 규명하기 위하여 구현 가능한 효율적인 어레이 센서 배치에 대한 연구, 소음원 위치 및 음향특성 분석 해상도 향상과 정량적 규명을 위한 다양한 스피커 시험연구, 신호처리 향상연구, 시간이력 계산알고리즘 개발 등이 진행되었다.

#### 2.4 철도소음 어노이언스

국제보건기구(WHO, World Health Organization)에서 소음의 인체위해성 평가지시치로 소음에

대해 높은 불쾌감을 표출하는 인구 비율인 %HA(percentage of the population that is highly annoyed)를 제시하여 많은 연구자들이 다양한 환경소음에 대해 %HA 반응 곡선을 도출하였으며, 한국인의 교통소음원별 %HA 반응 곡선에 관한 연구 결과는 그림 13과 같다.

반응 크기는 항공기, 철도, 도로 소음 순서로 나타났다. 이 연구에서 주목할 것은 철도 소음이 도로 소음 보다 높은 불쾌감 반응을 유발한다는 것인데, 그림 13의 우측 그래프의 미주, 유럽 지역 인구를 대상으로 한 연구 결과를 보면 반대의 경향을 확인할 수 있다.

유럽 대부분 국가에서는 철도소음 규제기준에 'railway bonus'를 적용하는데, 이는 그림 13과 같이 철도소음에 대한 사람들의 불쾌감 반응이 가장 낮은 점을 고려해 5 dB 정도 기준을 완화해주는 것이다. 그러나 국내 철도소음에 대한 연구에서는 철도소음에 대한 불쾌감 반응이 도로소음에 비해 상당히 높게 나타났고, 이러한 경향은 일본의 연구 결과와도 일치해 한국과 일본에서는 'railway bonus'가 적용되지 않는다는 것을 밝혀내 주목을 받은 바 있다. 이와 같은 연구 결과는 소음에 대한 감성 반응이 사회문화적 배경에 따라 다를 수 있다는 것을 시사해 소음성 불쾌감 연구에서 음향학적 요인뿐만 아니라 비음향학적 요인의 영향에 관한 연구의 필요성이 제기되

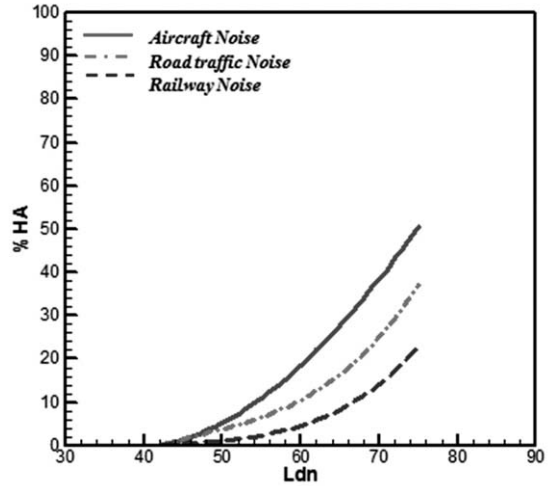
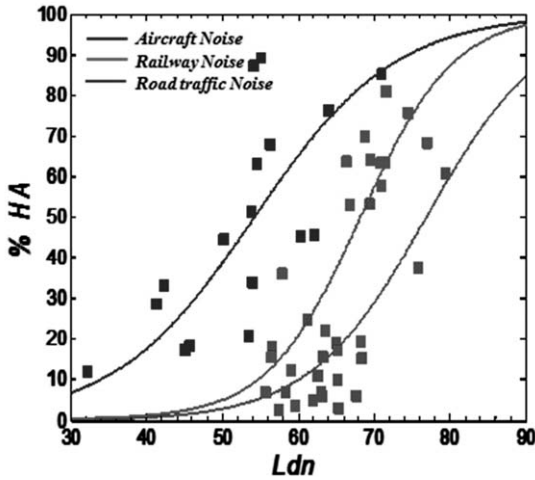


그림 13 항공기, 철도, 도로 소음에 대한 한국인(좌) 및 미주·유럽인(우)의 Ldn-%HA 반응곡선

었다.

현재 철도소음의 소음 측정 방법은 한 개의 마이크로폰을 사용하도록 하고 있다. 그러나 실제 사람들이 듣는 소음은 ‘양귀’와 ‘머리’ 등과 같은 필터를 통해 걸러진 소리로, 한 개의 마이크로폰으로 측정된 신호와는 차이가 있다. 따라서 철도소음의 감성반응에 미치는 음향학적 요인의 분석을 위해 한 개의 마이크로폰으로 측정된 신호와 더미헤드의 양귀로 들어오는 신호가 어떻게 다른지를 분석하고, 소음도와 감성반응 간 상관관계 연구를 통해 두 경우의 반응을 비교한 연구가 이루어졌다.

더미헤드의 응답특성은 사람의 머리, 어깨, 뒷바퀴에서의 음의 반사, 굴절, 회절 현상을 고려한 머리전달함수(HRTF, head related transfer function)로 나타낼 수 있으며, 사람의 머리, 뒷바퀴, 어깨 등이 일종의 방향성 필터 역할을 하는 것이다. 인간의 귀는 두 채널 입력시스템으로 음의 공간분포를 느낄 수 있고 양귀에 들리는 소음도가 다르다. 따라서 더미헤드에 의해 측정된 신호가 실제 물리적 현상에 대한 정보를 더 많이 가지고 있다고 할 수 있다. 각각 마이크로폰과 더미헤드로 측정된 철도소음 시그널을 피시험자에게 재생했을 때 고주파 성분을 많이 포함하

고 있는 바이노럴 시그널에 대한 불쾌감이 마이크로폰으로 측정된 시그널에 비해 높은 연구결과가 발표된 바 있으며, 이러한 측정 및 재생 방법에 따른 차이에 의해 실제 소음 전달 과정의 물리적 현상에 대한 정보를 더 많이 가지고 있는 바이노럴 시그널을 청감실험에서 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

열차소음의 감성반응에 미치는 음향학적 요인의 영향을 분석하기 위한 실험적 연구에서는 비음향학적 요인을 통제하고 개별 소음에 대한 어노이언스를 평가하는데, 같은 불쾌감을 유발하는 철도 소음의 크기가 도로소음에 비해 낮다. 즉, 철도 소음은 도로 소음에 비해 감성반응 측면에서 패널티가 부여되어야 형평성에 맞다고 할 수 있는 결과인데, 이러한 감성반응의 차이는 주로 철도소음의 고주파특성과 음의 변동성과 같은 음향학적 특성에 기인한 것으로 판단된다.

감성반응에 영향을 주는 비음향학적 요인은 실제 환경소음에 노출되어 있는 인구를 대상으로 한 field survey를 통해 성별, 나이, 소음 노출기간, 소음민감도, 주택의 형태 등 다양한 인적, 환경적 배경에 관한 데이터를 수집해 분석이 이루어진다. 주민들의 평소 소음에 대한 민감도에 따라 철도소음에 대한 어노이언스 반응 차이가 크며, 열

차소음에 노출된 기간에 따른 비교 결과에서는 노출기간이 3년 미만인 집단에서는 시간이 갈수록 불쾌감이 낮아져 소음에 적응하는 모습을 보이나, 3년 이상 장기간 노출될 시에는 다시 불쾌감이 높아져 만성적인 인체위해성이 우려되는 결과를 나타냈다.

### 3. 맺음말

철도건설 및 철도운행으로 인하여 민원이 제기되는 가장 주요한 요인 중 하나가 소음문제임에도 불구하고, 국내에서는 저소음 설계 혹은 소음원 저감 대안의 실제적 적용은 철도의 안전이나 구조적 안정성, 증속, 유지보수, 비용절감 등의 사안에서 다소 뒤로 밀려나야 하는 추세였다. 지난 몇 년 그러한 실정은 눈에 띄게 긍정적인 측면으로 변화하고 있다. 소음의 저감은 독립적이고 추가적인 대안으로써가 아니라, 구조적 설계의 차원에서 선행되어야 가장 효율적이고 바람직하다. 또한 소음연구자 및 관련 개발자들도 소음의 관점 뿐 아니라, 철도시스템의 장기적인 유지 및 경제성 차원에서의 적용성을 고려해야하기 위한 분야간의 협력 및 지속적인 설계 컨셉의 개선이 요구된다. **KSNVE**

### 참 고 문 헌

- (1) Thompson, D., 2009, *Railway Noise and Vibration*, Elsevier.
- (2) 유정수, 장승호, 2013, 철도 진동소음의 관점에서 해석한 국내 철도의 진동특성 비교, 한국철도학회논문집, 제 16권, 제 2호, pp. 85~92.
- (3) 장승호, 정우태, 유정수, 고효인, 2013, 철도 레일 및 차륜의 음향조도 측정을 통한 진동소음 분석, 한국음향학회 춘계학술대회논문집.
- (4) 이석근, 양원석, 고효인, 박준홍, 2012, 팬헤드의 단순 형상 모델을 이용한 판토타그래프 공력 소음 발생 특성 분석 및 저감 방안, 한국철도학회논문집, 제 15권, 제 6호, pp. 531~536.
- (5) 고효인, 2012, 철도 진동소음 규명 및 저감을 위한 측정기술, 설비저널, 제 41권 제 8호, pp. 14~19.
- (6) Howe, M. S., 1998, *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press, pp. 453~471.
- (7) Chen, S. and Doolen, G. D., 1998, Lattice Boltzmann method for fluid flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp. 329~364.
- (8) 고효인 외, 2013, 400 km/h 고속철도 소음원 모델 구축 및 소음원 기여도 분석기술 개발.
- (9) Lim, C. W. et al, 2006, The Relationship between Railway Noise and Community Annoyance in Korea, *Journal of the Acoustical Society of America*.
- (10) Lee, S. G. et al, 2008, Exposure-response Relationships on Community Annoyance to Transportation Noise, *ICBEN*.
- (11) 김재환 외, 2004, 교통소음의 모노럴과 바이노럴 청감 비교 연구 I: 측정 및 분석, 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제12호, pp. 1268~1278.
- (12) 김재환 외, 2004, 교통소음의 모노럴과 바이노럴 청감 비교 연구 II: 평가심, 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제12호, pp. 1279~1286.
- (13) Kim, J. J. et al, 2010, Noise-induced Annoyance from Transportation noise: Short-term Response to a Single Noise Source in a Laboratory, *Journal of the Acoustical Society of America*.
- (14) 홍지영 외, 2013, 철도 차량별 통과 소음의 음향 특성 분석을 통한 Annoyance 예측 연구, 한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회.