

철도선로연변에서의 소음과 지반진동의 저감



ㅣ 서 사 범 ㅣ
(주)서현기술단 부사장
공학박사/철도기술사

I. 머리말

철도소음은 궤도나 차량을 구성하는 여러 가지 요소에서 발생된다. 일반철도에서는 평지의 직선 장대레일 구간을 전차가 주행할 경우에 주전동기 팬 음과 전동음으로 구성된다. 특히 최근의 차량에서는 주전동기 팬의 음이 대폭 저감되어 소음전체에서 전동음의 기여도가 크다. 향후에 일반철도의 소음을 저감하기 위해서는 전동음에 중점을 둔 대책이 필요하다.

철도선로연변에 대한 환경영향평가나 소음대책의 검토에서는 철도소음을 여러 가지 상황에서 높은 정밀도로 예측하는 기법이 요구되고 있다. 이러한 사회적 요구에 대하여 일반선로와 고속선로의 소음예측기법이 개발되어 왔지만 이들의 예측기법으로는 적용 가능한 관측점 위치가 한정된다고 하는 문제점이 있으므로 예측기법의 적용범위를 확장할 필요가 있다.

한편, 열차가 주행할 때에 선로연변에 생기는 지반진동은 경우에 따라 환경문제로 되는 일이 있다. 철도사업자는 선로연변의 환경을 보전하면서 속도상 등과 같은 철도의 편리성을 유지·향상시키기 위하여 노력하고 있다. 지금까지 차량·궤도·구조물·지반의 각 부위에서 여러 가지 대책이 제안되어 왔지만 현 시점에서는 주로 차량과 궤도에서의 대책이 실시되고 있는 외에 지반에서의 대책에 대해서도 검토되고 있다.

본고에서는 전동음에 관한 특성, 전동음 예측기법의 개

요와 전동음에서 차륜·궤도에 관계되는 파라미터의 영향, 철도선로연변 소음 예측기법의 적용범위를 터널갱구 부근, 고층건물, 주택밀집지까지 확장한 사례 및 지반진동 대책의 현상에 대하여 소개한다.

II. 전동음의 예측과 저감

1. 철도소음의음원

철도소음의 음원에는 다음과 같은 것이 있다. 차륜이 레일 위를 굴러갈 때에 생기는 전동음, 전차나 기동차에 탑재된 구동장치나 톱니바퀴에서 나는 음, 철교나 콘크리트 고가교 등에서 발생하는 구조물 음, 또한 고속으로 주행하는 고속철도차량에서 발생하는 공력소음 등이 있으며, 그 음원이 다기에 걸쳐 있다. 그러면 철도선로연변에서의 소음을 효과적으로 저감하기 위해서는 어떻게 하면 좋은가? 그것은 선로연변에서의 소음에 대해 큰 영향을 가진 음원을 파악하여 그 음원에 대하여 대책을 실시하는 것이다.

일반철도의 전차가 콘크리트 고가교의 장대레일 구간을 주행하는 경우에 선로연변 소음은 주로 전동음, 구조물 음 및 주전동기의 팬(fan)음으로 구성된다. 주전동기 팬 음은 전동차에 탑재된 모터를 냉각하기 위한 공력음이다. 외선형 팬(주전동기의 냉각용 팬이 모터프레임의 외측에 있는 타입)을 탑재한 전차(78.5 dB)에서는 주전동기 팬의 음이 가장 큰 음원이다. 그러나 최신의 차량(71.0 dB)에서는 팬 구조를 내선형으로 함에 따라 주전동기 팬의 음이 대폭으

로 저감되어 현재는 소음전체에서 접하는 전동음의 기여도가 상대적으로 크게 되어 있다. 또한, 전동음은 일반철도 뿐만 아니라 고속철도의 소음에서도 주요한 음원의 하나로 되어 있다. 향후에 철도소음을 저감시키기 위해서는 전동음에 중점을 둔 대책을 진행할 필요가 있다.

2. 전동음이란 무엇인가

얼핏 보면 매끄럽게 보이는 차륜·레일 면에는 진폭 0.1~100 μm 정도의 요철이 있다. 전동음은 이 요철이 원인으로 되어 생기는 가진력에 따라 차륜과 레일이 진동하여 발생된다. 또한, 이 전동음의 주성분으로 되는 주파수범위는 500~2,000 Hz이다. 다음에 전동음의 크기를 결정하는 2가지 요인을 설명한다.

(1) 차륜·레일 요철

전동음(☞ 참조)의 크기를 결정하는 주요인은 차륜과 레일 면에 존재하는 요철이다. 지금까지 이 요철성분의 파장과 열차속도로 결정되는 주파수와 전동음의 주파수가 잘 일치하는 점이 확인되고 있다. 이 요철의 진폭이 크게 될수록 레일과 차륜에 작용하는 힘이 크게 되어 전동음이 크게 된다. 전동음에 관련되는 요철의 파장범위는 일반철도의 경우(주된 속도대역이 50~120 km/h)에서는 7~70 mm 정도(주파수 = 열차속도/요철성분의 파장)이다. 이 차륜, 레일의 요철은 변위계 등을 직접 차륜이나 레일 면에 접촉시켜 측정한다. 지금까지 얻어진 측정결과로부터 정기적으로 레일두부 상면을 연마하는 레일연삭으로 관리를 실시하는가의 여부에 따라 레일요철에는 평균 5 dB 정도의 차이가 있는 점, 차륜을 제동하는 브레이크나 답면 제륜자의 종류에 따라 차륜요철이 다른 점 등이 알려져 왔다.

(2) 차륜과 궤도의 진동특성

궤도나 차륜의 형식도 전동음의 크기에 영향을 준다. 궤도의 경우에 구성하는 부재(레일, 레일체결장치나 도상 등)에 의존하여 각 궤도형식의 진동이나 방사음의 특성이 다르다. 예를 들면, 레일 아래에 삽입되는 레일패드의 종류에 따라 레일 길이방향으로 전파되는 레일진동의 거리감쇄율이 다른 경향이 있고 레일 방사음에 관계되는 음원범위의 크기에 영향을 준다. 차륜의 경우에는 차륜 판부분의 형상 등에 의존하여 그 진동특성이 변하며, 차륜의 종류에 따라 방사되는 음의 파워가 다르다.

3. 전동음의 예측

유럽에서는 전동음을 예측하기 위하여 TWINS(☞ 참조) 등의 소프트웨어가 개발되어 있다.

일본에서는 전동음을 평가하기 위하여 이 TWINS와 같은 고려방식에 기초한 전동음 예측기법의 구축을 진행하고 있다. 그림 1에 TWINS에서의 전동음 예측계산의 흐름을 나타낸다. 차륜, 궤도의 진동특성 조합으로 구성된 역학 모델에 대하여 차륜, 레일면의 요철을 입력함으로써 가진력을 평가하고 이 가진력에서 차륜, 레일과 침목의 진동 및 방사음을 예측한다. 또한, 전동음을 예측하기 위해서는 차륜, 궤도의 파라미터를 정리할 필요가 있다.

다음에 예측기법에서의 계산모델을 설명한다. 궤도의 진동특성을 평가하기 위하여 궤도를 레일에 대응하는 무한길이의 보와 레일패드, 침목, 도상자갈에 대응하는 스프링-매스-스프링 계로 구성되는 지지체로 모델화한다. 이 모델에 필요한 파라미터(레일패드나 도상자갈 등의 스프링강성 등)에 대하여는 궤도에 대한 가진 시험의 결과에서 동정한다. 차륜에 관하여도 차륜의 가진 시험에서 차륜에 생기는 고유모드 등을 정리하여 이 시험결과와 유한요소

☞ 윤하중과 전동음의 관계

윤하중이 크게 되면 전동음이 크게 될까? 윤하중의 증대는 차륜·레일 간에서 접촉스프링의 강성과 접촉면을 크게 한다. 전자는 전동음을 크게 하고 후자는 작게 하는 효과를 갖는다. 이 2가지는 서로를 상쇄하기 때문에 전동음이 크게 되는 일은 없다. 이 경향은 실제의 열차주행 시의 결과에서도 확인되고 있다. 다만, 구조물 음은 윤하중의 증대에 따라 크게 되는 경향을 나타낸다.

☞ TWINS 모델

TWINS의 정식명칭은 Track-Wheel Interaction Noise Software(궤도·차륜 간 소음예측 소프트웨어)이다. 이것은 유럽에서의 전동음 예측 프로젝트에서 각국의 연구자가 개발한 모델에 기초하여 구성된 것이다. 또한, 이 명칭은 주 개발담당자인 영국 Southampton 대학 David Thompson 교수에게 정말로 쌍둥이가 태어난 것에 유래하고 있다.

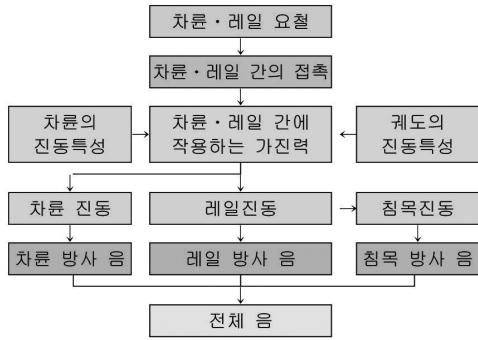


그림 1. TWINS의 전동음 계산흐름

법을 이용한 계산결과에서 그 진동특성을 평가한다. 또한, 궤도, 차륜에서의 방사음은 각 요소의 진동과 음향방사 효율 등으로부터 평가한다.

예측기법의 정밀도를 검증하기 위해 일반철도·고속철도 4구간에서 레일 근방지점의 소음에 관한 실측치와 예측치를 비교한 예를 소개한다. 소음을 예측 평가하기 위해 차륜이나 레일의 요철분포 등 차륜, 레일에 관계되는 파라미터를 정리하였다. 그림 2는 소음레벨에 관한 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 예측치와 실측치의 차이는 평균 차이 -1.0dB(예측치 과대), 표준편차 3dB이며, 예측치와 실측치가 대체로 일치하는 것을 확인하였다.

예측방법을 이용함으로써 전동음의 주음원이 차륜, 레

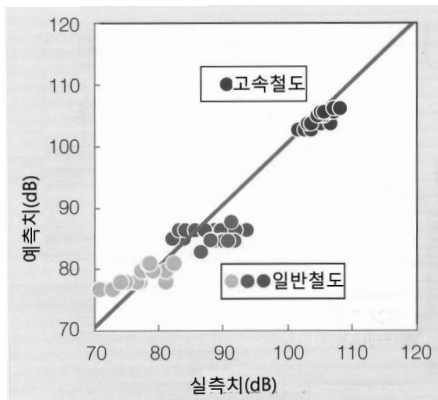


그림 2. 소음레벨에 관한 예측치와 실측치의 비교 (레일 근방지점)

일의 어느 쪽인가도 알 수 있다. 그림 3은 일반철도의 차륜이 자갈궤도 구간(평지, PC침목)을 주행하는 경우에 실측치와 예측기법에 따른 각 음원의 기여정도를 나타낸 일례이다. 먼저 전체 음에 관하여 실측치와 예측치를 비교하면, 양자는 거의 일치하고 있다. 다음에 전동음에서 음원별 기여정도를 보면 500~1,600 Hz에서는 주요한 음원이 레일이며, 전동음 전체에서 점하는 레일 방사음의 기여가 큰 것을 알 수 있다. 또한, 2,000 Hz 이상에서는 차륜이 지배적인 음원으로 되어 있다.

3. 차륜, 궤도의 파라미터가 전동음에 미치는 영향

예측기법에 따른 해석결과의 일례로서 차륜이나 궤도에 관계되는 각 파라미터가 전동음에 미치는 영향을 평가한 내용을 소개한다(표 1). 기준의 조건은 일반철도의 콘크리트 고가교 자갈궤도이다. 차륜·레일 요철, 레일패드의 스프링정수 등이나 각 대체에 대응하는 파라미터(차륜, 레일의 손실계수 등)는 지금까지 현지측정 등으로 얻어진 값을 참조하였다.

차륜·레일면 요철의 관리는 전동음에 큰 영향을 준다. 특히, 레일을 연삭하지 않는 구간에 대한 레일연삭에 따른 전동음의 저감효과는 최대 7 dB이다. 또한, 전동음은 레일패드의 스프링강성에 의존하여 3 dB 정도 증감한다. 레일패드의 고스프링강성화는 레일 방사음을 작게 하지만, 침목이나 구조물 등으로부터의 방사음을 크게 한다. 한편, 레

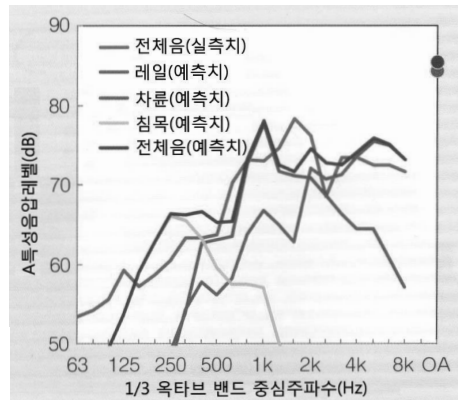


그림 3. 전동음에서 음원별 기여정도 (일반철도, 레일 근방지점, 자갈궤도, 80 km/h)

표 1. 전동음의 예측기법에 따른 저감효과의 평가결과

기준조건	일반철도, 압연차륜, 100 km/h, 콘크리트 고가교, 자갈궤도, 레일패드와 정적 스프링강성 60 MN/m, 레일 미연삭 구간	
평가지점	레일 근방	
	대책별	전동음 저감효과
	차륜의 제진 링 설치(특정 진동모드의 손실계수를 5배)	-0.0 dB
	차륜·레일연삭(차륜·레일요철 측정데이터의 하한치)	-7.5 dB
	레일형상 변경(60 kg 레일 → 50 kg 레일)	0.0 dB
	레일패드 설치(레일의 손실계수를 4배)	-1.0 dB
레일패드의 저스프링정수화	기준조건의 0.4배	+1.5 dB
	기준조건의 3배	-1.5 dB

일패드의 저스프링강성화는 구조물로 전하는 진동을 완충하는 효과가 있어 주로 구조물대책으로서 행하여지고 있지만, 전동음, 특히 레일 방사음을 크게 하는 경향이 있다. 이것은 보다 낮은 주파수에서 레일 지지부분의 영향이 작게 되어 레일이 진동하기 쉽게 되기 때문이다. 레일 댄퍼(☞ 참조) 등에 따른 레일의 제진은 전동음에 대하여 1 dB 정도의 저감효과가 있다. 그 원인은 레일 댄퍼에 의하여 레일 길이방향으로 전파되는 진동이 억제되기 때문이다. 또한, 레일형상의 변경이나 제진 링(☞ 참조) 등에 의한 차륜에 대한 제진이 전동음에 주는 영향은 크지 않다. 제진 링 등에 의한 제진은 차륜에 생기는 진동모드의 일부만을 억제하기 때문이다. 이들 결과의 일부는 실측 데이터에서도 검증되어 있다. 이 예측방법을 이용함으로써 전동음의 음원별 기여도에 따라 저감대책의 효과를 정량적으로 평가할 수 있게 되었다.

Ⅲ. 철도소음 예측기법 적용범위의 확대

1. 개요

철도의 신설이나 대규모 개량 시에 환경영향평가를 하

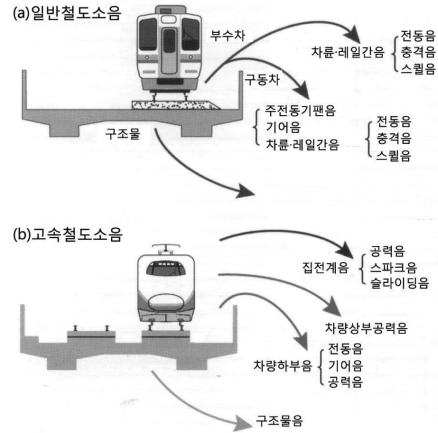


그림 4. 철도소음 예측기법에서 음원의 분류

는 경우 또는 철도소음의 문제개소에 대해 적절한 대책을 검토하는 경우에 철도소음을 여러 가지 상황에서 높은 정밀도로 예측하는 방법이 요구된다. 이와 같은 사회적 요청에 대응하여 일반철도와 고속철도의 소음예측기법이 개발되어 왔다.

이들의 예측기법은 철도에서 발생하는 소음을 음원별로 모델화하여 각각의 음원에서의 기여를 더함으로써 선로연변의 관측점에서의 소음레벨을 예측한다(그림 4). 음원위치와 파워레벨을 음원요소, 궤도·구조물 조건, 차량종별이나 열차속도마다 정하고 있기 때문에 여러 가지 상황에서의 소음레벨의 예측이 가능하다.

한편, 이들 예측기법의 소음전파모델에서는 철도선로연변에 설치되어 있는 방음벽을 제외한 철도구조물이나 주변 건축물의 영향은 고려되어 있지 않고 예측기법이 적용 가능한 관측점 위치가 한정되어 있다고 하는 문제점이 있다. 이 장에서는 예측기법의 적용범위를 터널궤구 부근, 고층 건축물의 고층 및 주택밀집지까지 확장한 사례를 소개한다.

☞ 레일패드

레일의 복부나 저부에 설치되어 레일 길이방향으로 전파되는 진동을 억제하는 장치이다. 제진 합금이나 고무 등을 층상으로 구성한 것이나 복부 양측을 고무로 압착 고정하는 구조의 것 등이 있다.

☞ 제진 링

급곡선에서 발생하는 스킵 음을 저감하기 위하여 차륜 림 부분의 내측에 강(鋼) 링을 설치하여 강 링·차륜간의 고체마찰을 이용하여 진동을 억제하는 장치이다. 이 제진 링은 일본의 일부 사철에서 채용되어 있다.

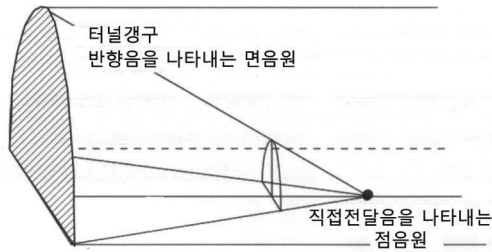


그림 5. 터널갱구음의 음원모델

2. 터널갱구 부근에서의 소음예측기법

철도의 터널갱구 부근에서는 통상의 주행 음에다 터널 내를 반향하여 갱구에서 방사되는 음(반향음)이 더해지기 때문에 통상의 노천구간에 비하여 소음레벨이 높게 되는 경향이 있다. 터널갱구 부근에서의 효과적인 소음저감대책의 계획을 세우기 위해서는 먼저 통상의 주행 음과 반향음의 기여를 적절하게 평가할 필요가 있다.

터널갱구 부근에서의 소음레벨을 예측하는 기법으로서 도로교통 분야에서 제안되어 있는 터널갱구 음 예측기법에다 고속철도 소음 예측기법에서의 음원모델을 조합한 기법이 일본에서 개발되었다. 이 기법에서는 갱구 부근의 소음을 터널내벽에 반사되지 않고 도달되는 음(直達음)과 반향음으로 분리하여 예측한다. 직달음을 실제의 음원이 있는 위치(대차부분 등)에 설치한 점음원, 반향음을 갱구에 설치한 면음원으로 모델화한다(그림 5). 면음원의 음향파위를 터널 내의 음원위치, 터널갱구의 크기, 터널벽면의 흡음파라미터의 함수로서 나타냄으로써 열차의 이동에 따라 시시각각으로 변하는 터널 반향음의 음향파위를 다양한 터널 조건에서 추정하는 것이 가능하다. 실측치와 이 기법으로 구한 예측치를 비교한 결과, 양자의 레벨변동의 경향이 정성적으로 잘 일치하고(그림 6), 소음레벨의 최대치에서도 실측치와 예측치가 정량적으로 잘 일치하였다(그림 7).

이 기법을 이용함으로써 갱구 소음대책으로서 갱구 부근의 방음벽 높이나 터널내벽 흡음효과를 예측할 수 있게 되어 효율적인 대책의 책정에 기여하고 있다.

3. 고소(高所) 공간에서의 소음예측기법

근년에 철도선로연변의 고층주택에서 소음이 문제로 되

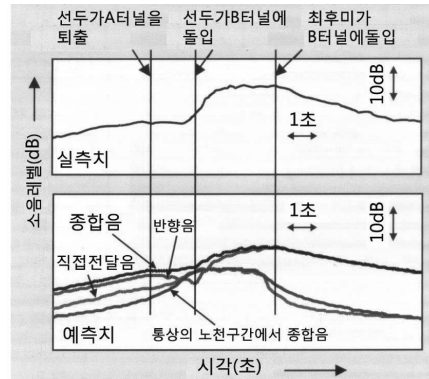


그림 6. 실측치와 예측치의 소음레벨 변동의 비교 (A, B 터널 간의 짧은 구간, B터널 갱구 부근의 측정점, 슬래브레도, 6량 편성 열차, 속도 219 km/h, 시간가중 특성 F)

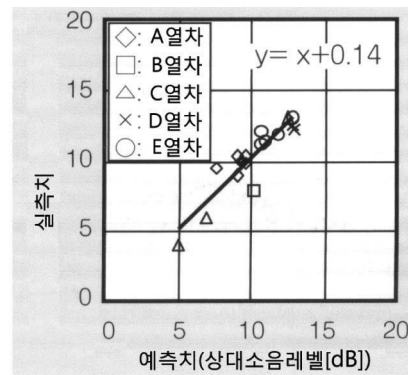


그림 7. 터널갱구 부근의 소음에 관한 예측치와 실측치와의 비교

는 경우가 있으므로 이들의 장소에서 소음을 정밀도가 좋게 예측하는 방법의 확립이 요구되고 있다. 지금까지 공표되어 있는 철도소음의 예측기법은 주로 지상높이 부근에서 측정된 소음데이터를 기초로 구축되어 있으며, 선로에 근접한 건물의 고층 등의 고소(高所)공간에서의 정밀도는 충분히 검증되어 있지 않다. 또한, 고소공간에서는 이들의 예측기법에는 고려되어 있지 않은 음원의 선로 직교단면 내의 지향(指向)특성이나 차량, 방음벽에 의한 반사의 영향이 있다고 생각되므로 예측기법의 정밀도를 향상시키기 위해서는 이들의 영향을 파악하여 예측기법에 반영시킬 필요가 있다.

그래서 음원파위가 큰 고소공간에서 특히 문제로 된다

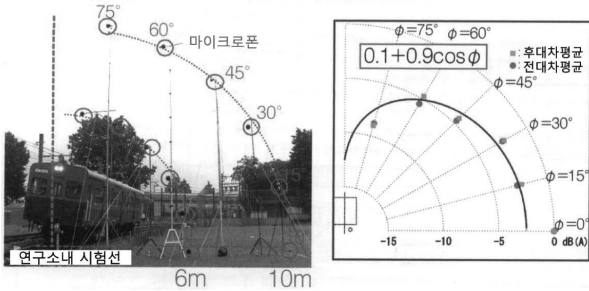


그림 8. 실물차량 시험에서 얻어진 차량하부의 지향특성 (10m 떨어진 지점의 결과)

고 생각되는 차량하부에서 발생하는 소음(전동음, 주전동기 팬 음 등)에 대하여 음원의 지향특성을 실물차량 시험과 모형실험으로 조사하여 지향특성을 나타내는 실험식도 추출하였다. 그림 8은 일본의 철도연구소 내 시험선에서 차량이 주행할 때의 소음레벨을 선로 직교단면 내 복수의 측정 점에서 동시에 측정한 결과이다. 상기 그림에서 전동음은 연직방향으로 약하고 수평방향으로 강한 지향특성을 갖고 있음을 알 수 있으며, 따라서 일본에서는 이 실험식을 예측기법의 음원모델로서 채용하였다.

또한, 차량, 방음벽에 의한 음 반사의 영향을 고려하기 위하여 다음의 3가지 음원으로 구성되는 음원모델을 도입하였다(그림 9).

- ① 실제음원: 실제의 소음발생원에 상당하는 음원
- ② 경상(鏡像)음원 1: 관측점 쪽의 방음벽과 차량에 1회 썩 반사하여 방음벽과 차량 간에서 누출되어 가는 음
- ③ 경상음원 2: 관측점과 반대쪽의 방음벽에서 반사하여 차량을 타고 넘어서 전파되어 가는 음

상기처럼 개량한 예측기법으로 얻어진 소음레벨분포의 비교를 그림 10에 나타낸다. 이 그림에는 개량 전의 종래 예측기법으로 구한 소음레벨분포도 나타내었다. 궤도에 근접

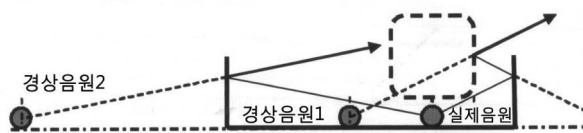


그림 9. 실제음원, 경상음원 1,2의 위치

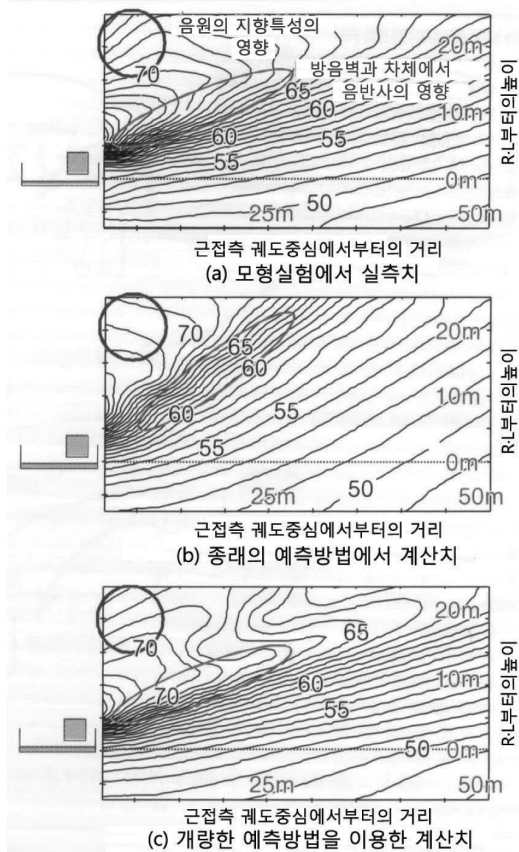


그림 10. 모형실험과 예측기법으로 구한 소음레벨(상대레벨) 분포의 비교 (단위: dB, 방음벽 높이: 3 m)

한 고소공간에 착안하면 모형실험으로 관측되는 음원의 지향특성이 미치는 영향(측방으로 크고 상방으로 작다)이 종래의 예측기법에서는 반영되어 있지 않다. 또한, 방음벽에 가까이, 방음벽 상단보다도 높은 위치에서는 방음벽에 의한 차폐를 기대할 수 없기 때문에 소음레벨이 높게 되어 있지만, 모형실험의 쪽이 보다 낮은 위치까지 소음레벨이 높은 영역이 퍼져있다. 이 영역에서는 차량측면에서 방음벽 상단을 통하여 비스듬히 상방으로 향하는 방향에 있으며, 차량측면과 방음벽 간을 다중 반사한 음이 이 방향으로 반사되는 영향이라고 생각된다. 한편, 개량된 예측기법으로 구한 소음레벨분포의 경향은 모형실험결과의 경향과 잘 일치하고 있으며, 고소공간에서의 예측정밀도가 개선되었다.

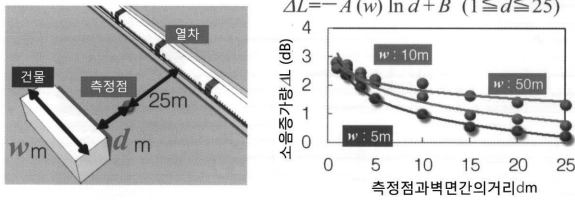


그림 11. 측정 점의 배후에 건물이 있는 경우의 소음증가량 (건물높이 = 6m)

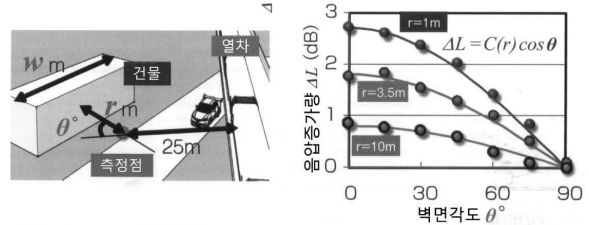


그림 12. 선로에 대해 비스듬히 입지하고 있는 건물에 의한 소음증가 (건물높이 = 6m, 벽면 폭 = 5m)

4. 주택밀집지역에서의 소음예측

철도선로연변의 주택밀집지역에는 건물이나 기타 소음전파에 영향을 주는 것이 존재한다. 주택밀집지역에서 소음을 측정하는 경우에 철도로부터의 소음발생원이 거의 같은 경우에도 건물에 의한 반사나 차폐의 영향에 따라 소음측정치는 국소적으로 다르며, 소음레벨을 적절하게 평가할 수 없는 경우도 있다고 생각된다. 지금까지 건물 등에 의한 반사와 차폐의 영향은 정량적으로 평가하는 방법이 제안되어 있지 않았다. 그래서 일본에서는 건물의 입지조건을 여러 가지로 변화시킨 축척(1/25) 모형실험을 실시하여 주택밀집지역에서의 건물벽면 등의 영향을 정량적으로 평가하였다. 이 모형실험에서는 고가구간을 주행하고 있는 고속철도차량을 상정하여 건물의 벽면 폭이나 벽면까지의 거리 등의 입지조건을 여러 가지로 변화시켜 근접 쪽 궤도중심에서 25 m 지점에 상당하는 관측점에서의 건물의 영향에 따른 소음의 증가량을 조사하였다. 주된 결과를 이하에 나타낸다. 게다가, 여기서는 단독주택을 상정하여 건물높이가 6 m인 경우의 결과를 나타내지만, 중고층 집합주택을 상정한 건물높이 25 m의 경우도 거의 같은 결과가 얻어지고 있다.

(1) 측정 점의 배후에 건물이 있는 경우

측정 점의 배후에 건물이 존재하는 경우(그림 11)에 대하여 건물의 벽면 폭 w 및 측정 점과 벽면 간의 거리 d 를 변화시켜 건물벽면에서의 소음반사에 따른 소음측정치에 대한 영향을 조사하였다. 그 결과, d 가 작게 될수록, 또한 w 가 크게 될수록 소음증가량은 크게 됨을 알 수 있

었다. 또한, 소음증가량의 평가방법으로서 d 와 w 를 변수로 한 실험식을 제시하였다.

(2) 선로에 대하여 비스듬히 입지되어 있는 건물의 경우

철도고가교와 비스듬히 교차하는 도로에 연하여 건물이 입지하여 있는 경우(그림 12)에 대하여 건물벽면에서의 소음반사에 따른 소음증가량을 조사하였다. 실험은 측정점에서 선로에 대한 수직선과 벽면에 대한 수직선이 교차하는 각도 θ (이하에서는 ‘벽면각도’라고 한다) 및 측정점과 벽면 간의 거리 r , 벽면 폭 w 를 변화시켜 측정하였다. 그 결과, 건물벽면이 선로에 대하여 수직선으로 되는 경우($\theta = 90^\circ$)에 반사의 영향은 거의 없게 됨을 알 수 있었다. 또한, 소음증가량의 평가방법으로서 r , θ 및 w 를 변수로 한 실험식을 제시하였다.

(3) 측정점이 복수의 건물에 둘러싸여 있는 경우

철도선로연변에 산재하는 공원이나 공터 등을 상정하여 그림 13에 나타난 것처럼 측정 점이 복수의 건물에 둘러싸여 있는 경우의 소음증가량을 조사하였다. 그 결과, 이 경우의 소음증가량은 최대로 3dB 이상으로 되며, 건물높이, 벽면각도, 벽면과 측정점 간의 거리에 관계없이 소음반사의 영향을 강하게 받는 것을 알 수 있었다.

이들의 결과에 따라 건물 등의 주변조건이 소음측정치에 주는 영향을 정량적으로 평가하는 것이 가능하게 되었다. 또한, 이들의 결과를 이용하면 건물 등의 주변조건에 영향을 제거한 소음평가를 하기 위하여 측정 점의 선정방법을 얻는 것도 가능하다.

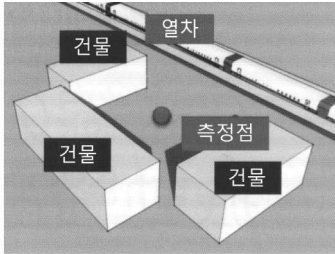


그림 13. 측정 점이 복수의 건물에 둘러싸여 있는 경우

IV. 철도선로연변 지반진동의 저감

1. 개요

철도를 구성하는 주된 요소는 차량, 궤도, 구조물, 지반이며, 각각의 요소에서 진동대책이 고려된다. 그 중에서도 현 시점에서는 차량이나 궤도에서의 대책이 주로 실시되고 있는 외에 지반에서의 대책에 대하여도 검토되고 있다.

더욱이, 일반적으로 지반진동이 문제로 되는 경우에 물리적인 피해보다도 주민들의 감각적·심리적인 불쾌감이라고 하는 형으로 현재화되는 경우가 많다고 한다. 이와 같이 진동문제는 인간의 감각과 밀접하게 관계되기 때문에 인간이 진동을 체감하는 특성을 정하였다. 진동레벨(진동감각보정을 한 진동가속도레벨, ※ 참조)이라고 하는 평가량이 이용되고 있다. 단위는 데시벨(dB)이다.

2. 차량에서의 대책

열차주행에 따라 발생하는 지반진동은 철도차량이라고 하는 큰 질량을 가진 물체가 중력이나 주행로의 요철에 동반되는 강제변위에 따른 외력 등을 받으면서 이동하여 가는 것이 주된 원인으로 되어 있다. 열차하중에 따른 지상의 영향은 열차의 접근과 함께 크게 되고 열차가 멀어지면 작

게 된다. 이와 같이, 이동하는 열차하중은 지상에 대하여는 변동하는 하중으로서 작용하기 때문에 진동이 발생된다.

철도차량은 차체나 대차 등이 스프링으로 연결된 구조이며 그 차체가 복잡한 진동계를 구성하고 있다. 또한, 차량이 주행함에 따라 궤도나 구조물, 지반 등 지상 측에 진동이 생기는 한 편으로, 발생된 지상 측 진동에 따라 철도차량의 진동도 변화된다. 이와 같이 지반진동의 발생메커니즘은 복잡하지만, 지금까지의 연구에 따라 특히 노천구간의 경우에 선로연변의 지반진동에 가장 영향을 주는 것은 차량전체의 질량이라는 점이 알려져 있다.

철도의 지상설비는 연장이 길기 때문에 차량에서 진동 대책을 이용할 수 있으면 대단히 유용하다. 차량의 경량화에 따른 진동레벨 저감효과(그림 14)는 대체로 경량화 전후의 차량질량비와 같은 정도이며, 간단한 모델(그림 15)로 개략을 견적할 수 있다.

3. 궤도에서의 대책

(1) 궤도의 低스프링화

궤도에서의 진동대책으로서 현재 널리 행하여지고 있는

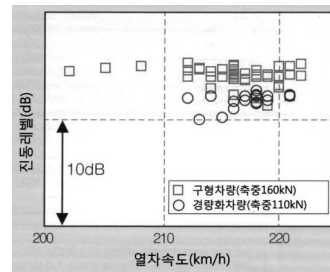


그림 14. 경량화 차량과 구형 차량의 진동레벨 비교 (궤도중심에서 12.5m의 위치)

※ 진동레벨

인간이 진동을 체감할 때의 특성은 진동의 주파수나 계속시간에 따라 다르게 된다. 진동레벨 VL (dB)은 이와 같은 인간의 특성을 어느 정도 반영하도록 정해진 진동의 평가량으로

$$VL = 20 \log_{10} (a/a_0)$$

로 나타낸다. 여기서, a는 측정된 진동가속도 파형에 대하여 체감특성을 반영하도록 가중하여 구한 가속도 실효치(m/s²), a₀는 기준가속도 = 10⁻⁵ m/s²이다. 가중 방법은 주파수·시간의 양쪽에 대하여 규정되어 있다.

예를 들어, 가중 후의 가속도 실효치 a가 0.01 m/s²(1 gal)인 때의 진동레벨은 60 dB, 0.005 m/s²(0.5 gal)인 때는 54 dB이다. 진동레벨을 측정하는 측정기는 진동레벨기이다. 진동규제 등에서는 연직방향의 진동만을 대상으로 한다.

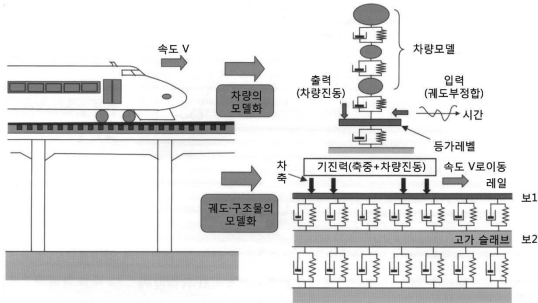


그림 15. 고속철도 진동의 발생모델

것은 궤도를 지지하는 부분의 스프링정수를 작게 하여 유연하게 지지하는 방법이며, 궤도의 低스프링化라고 총칭하고 있다. 궤도의 유연함은 열차의 주행안전성 등에 주는 영향이 크기 때문에 低스프링化는 안전성 등을 손상시키지 않는 범위에서 행하여진다. 또한, 흙 노반 등 궤도를 지지하는 부분이 원래부터 유연한 개소에서는 低스프링化에 따른 방진효과가 얻어지기 어렵다고 생각된다.

低스프링化 공법으로서 주로 실시되고 있는 것은 자갈 궤도 구간을 대상으로 한 탄성침목이나 밸러스트 매트 등이다. 이들의 대책은 신설선로나 기설선로의 어느 쪽 궤도에 대하여도 적용할 수 있으나 신설선로의 경우에는 이들의 공법 외에 궤도구조 자체를 방진직결궤도 등의 방진궤도로 할 수도 있다.

탄성침목은 콘크리트침목 아래를 우레탄고무 등의 유연한 재료로 피복한 침목이다. 또한, 밸러스트 매트는 껌 자갈 아래에 유연한 매트를 부설하는 대책이다. 다만, 우리나라의 경우에 전자는 적용되지 않고 후자만 적용되고 있다.

속도 200 km/h 정도로 주행하는 일본의 고속철도에서 얻어진 방진효과의 평균적인 주파수 특성은 그림 16과 같다. 상기의 시공 예에서는 진동레벨의 저감효과가 시공개소에 따라 0~4 dB 정도의 범위로 분산되어 있지만 평균적으로는 선로에서 12.5~25 m 정도 떨어진 위치에서 약 2 dB이다.

低스프링 레일패드는 레일과 침목 사이에 삽입되는 레

일패드를 통상의 것보다도 스프링정수가 작은 유형으로 한 것이다. 低스프링 레일패드의 효과에 대하여는 정량적인 평가에는 이르지 않고 있지만, 유효한 주파수대역이 밸러스트 매트 등에 비하여 좁고, 어느 정도 이상 주파수가 높은 진동이 탁월하고 있는 경우가 아니면 충분한 효과를 얻을 수 없는 것은 아닌가라고 생각된다. 궤도의 低스프링化에 대하여도 상기 그림 15의 모델로 개략의 방진효과를 견적할 수 있다.

(2) 그 외의 대책

레일의 제조공정이나 열차주행에 따른 마모 등으로 레일의 두부에 생긴 요철이 있는 경우에 그곳을 주행하는 열차는 요철로 인하여 강제적으로 상하로 움직이게 된다. 이 때문에 요철의 상태나 지상 측의 조건에 따라서는 진동이 선로연변에 영향을 미치는 일이 있다. 진동의 원인이 레일두부 상면의 요철에 있는 경우에는 연삭이나 레일교환 등을 실시하여 요철을 제거함으로써 요철의 파장에 대응하는 주파수 대역의 진동을 저감시키는 일도 진동대책으로 된다. 또한, 궤도 아래의 노반을 보강하여 안정화시키기 위하여 노반을 개량하는 일이 있다. 조건에 따라서는 노반개량에 수반하여 진동도 저

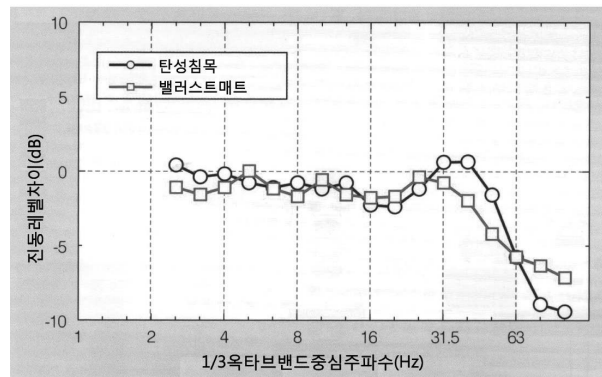


그림 16. 밸러스트 매트와 탄성침목의 평균적인 방진효과 (시공 전과 후의 진동레벨 차이), (열차속도 200 km/h)

※ 1/3 옥타브 밴드

어떤 주파수가 또 한 쪽 주파수의 2배인 때에 1 옥타브 높은 주파수라고 한다. 어떤 주파수와 1 옥타브 높은 주파수 간의 주파수 범위를 옥타브 밴드, 옥타브 밴드를 같은 주파수 비(1 : 2^{1/3})로 3등분한 것을 1/3옥타브 밴드라고 부른다. 밴드 중심의 주파수 f_m (Hz)를 밴드의 대표치라고 부른다.

감된다고 생각되며 고속선로에서 약 2 dB 정도의 저감효과가 인지된 사례가 있다. 그러나 이들의 공법은 적용사례가 적어 정량적인 평가는 매우 적다. 향후 진동대책 메뉴의 하나로써 더욱 검토가 필요하다고 생각된다.

4. 구조물에서의 대책

고속철도 진동에 관한 통계해석에 따르면, 강성이 높은 구조물, 무거운 구조물일수록 진동이 작다고 하는 경향이 보인다. 그러므로 구조물을 부분적으로 보강하는 등의 공법 등으로 진동저감을 시도해본 예가 있지만 시공사례가 적고 저감효과를 정량적으로 평가하기에 이르지는 않고 있다. 구조물을 직접 손보는 진동대책은 지진 시의 안전성 등에 대한 영향도 크기 때문에 사전에 신중한 검토가 필요하며, 향후 해결하여야 할 과제도 많다고 생각된다.

5. 지반에서의 대책

지반에서의 대책으로서는 선로연변에 긴 구덩이나 지중 벽 등을 설치하여 진동을 차단한다. 진동차단공이라고 하는 공법이 철도 외에 도로나 공장 등에서의 진동대책으로서 예전부터 검토되고 있다.

긴 구덩이를 이용한 진동차단의 효과는 지반으로 전하는 파의 파장과 긴 구덩이의 깊이의 비에 의존하고 있다. 이 때문에 주파수가 낮고 파장이 긴 진동일수록 대규모의 긴 구덩이가 필요하게 된다. 일본에서 고속철도 선로연변에 시험적으로 긴 구덩이의 대책효과를 조사한 사례에서는 깊이 2.5~5 m의 긴 구덩이에서 2~8 dB 정도의 저감효과가 있었다. 그러나 기본적으로 긴 구덩이를 이용한 진동차단에 대하여는 실제의 대책으로서의 시공에서가 아닌 실물크기시험이나 수치해석 등의 연구로서 행하여지고 있다. 긴 구덩이의 경우에 내벽의 유지나 전락 방지 등, 유지관리상의 문제가 있다. 또한, 철도나 가옥 등의 가까이에 깊고 긴 구덩이를 파게 되므로 이들의 구조물에 대한 영향도 검토할 필요가 있다. 이 때문에 실용상은 무엇인가의 재료로 되메워 둘 필요가 있어 순수한 긴 구덩이이라고 하기보다도 가벼운 재료를 이용한 지중 벽으로서 취급하는 쪽이 적절한 경우가 많다고 생각된다.

지중 벽의 경우에 시트파일이나 콘크리트, 소일시멘트

말뚝 등과 같이 지반보다도 딱딱한 재료를 이용하는 것과 발포 스티롤이나 발포 우레탄 등과 같이 지반보다 부드러운 재료를 이용한 것으로 대별할 수 있다. 시트파일이나 콘크리트 벽, 발포 우레탄 벽 등에 대하여는 일본에서 대책시험 등으로 고속철도 선로연변에 시공된 사례가 몇 개소 있다. 이 중에서 시트파일의 경우에 깊이 10~20 m 정도까지 타설하여 1~2 dB 정도의 저감효과가 인지된 사례가 있다. 또한, 콘크리트 벽이나 발포 우레탄 벽에 의한 저감 효과는 깊이 3~5 m에서 대략 1~7 dB 정도의 범위였다. 지중 벽의 효과는 지반조건이나 기진원의 특성, 지중 벽의 규모나 재질 등에 따라 복잡하게 변화한다. 최근에 지중 벽의 진동저감효과를 진동차단공을 투과하여 가는 진동의 평가, 밑으로 돌아서 가는 진동의 평가, 옆으로 돌아서 가는 진동의 평가 등의 고려방법에 기초한 비교적 간단한 모델로 평가할 수 있게 되어 있다.

진동차단공은 조건에 따라서는 큰 효과를 기대할 수 있는 반면에 용지문제 등으로 시공할 수 없는 경우가 있는 외에 시공비가 높다는 등의 문제가 있으므로 저비용 공법의 개발 등이 필요하다.

V. 맺음말

이상으로 전동음 예측기법과 저감대책, 철도소음의 예측기법과 그 적용범위의 확장사례 및 지금까지 강구되어 온 여러 가지 지반진동대책에 관하여 소개하였다.

향후에 철도선로연변에서의 소음저감을 더욱 추진하기 위해서는 보다 정밀도가 높은 전동음 예측기법의 구축이나 차륜 플랫폼 등에서 발생하는 충격음에 대하여도 연구할 필요가 있다. 또한, 철도소음 예측기법의 정밀도를 가일층 향상시키고 적용범위를 확장시키기 위해서는 철도소음의 발생·전파에 관한 현상에 대하여 이해를 깊게 하여야 한다. 그리고 열차주행에 따라 선로연변에 생기는 지반진동의 문제는 진동원에서 지반까지 관계되는 요인이 많고 검토하여야 할 문제가 많이 남아 있다. 향후에도 계속하여 지반진동에 관한 연구개발이 필요하다. ☺