

# 지하철에 의한 지반진동 실태조사와 진동저감 대책

(Field Survey of Ground Vibration from Subway Train and  
Various Methods of Vibration Reduction)

정 병훈\*, 김 창용\*\*, 손 충열\*\*\*

## 1. 서론

최근 철도, 지하철 주변에서 열차 통과시 발생하는 지반진동이 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높게 일고있다. 매우 무거운 차량이 통과할때, 지반에 심각한 가진력을 발생시키며, 그 결과 진동은 지반과 암반을 통해 주변지역의 빌딩에 전파된다. 이 진동은 주민들에게 느껴지거나, 빌딩내의 각 방에서 방사되어 낮은 주파수의 우르렁 거리는 소리로 들려질 것이다. 또한 진동에 민감한 장비의 작동을 방해하거나, 심한 경우에는 빌딩에 약한 구조적인 손상의 결과를 초래할 수도 있다.

본 논문은 과천선(금정-인덕원간 5.7 km) 구간중 인덕원역 주변에서 전동열차 운행으로 인하여 발생하는 진동으로부터 주민들의 진동피해 실태를 조사하고, 여러가지 진동 저감대책을 검토하여 항구적인 대책을 마련하는데 그 목적이 있다.

## 2. 지하철 진동

### 2.1 소개

매우 무거운 차량이 통과할때, 지반에 심각한 가진력을 발생시키게 한다. 그 결과 진동은 지반과 암반을 통해 주변지역의 빌딩에 전파될 것이다. 현재 소개된 해석적인 방법과 실험적인 방법을 다음과 같은 문제 해석에서 적용시킬 수 있다.

1. 제안된 새로운 노선설정에 대한 열차운행으로부터의 주거지역 진동에 대한 영향의 예측.
2. 현존의 노선에서 진동문제의 진단
3. 다양한 진동 제어 기법의 사용으로 주거 지역 영향의 변화를 산출

진동이 한번 빌딩에 도달하면, 빌딩의 기초에 땅에서의 진동이 결합하고 결과적인 빌딩 구조물을 통한 전달은 지반에서의 진동 전달의 예측 만큼이나 복잡한 과정이 된다. 결과적으로, 실험적 기법이 거의 독점적으로 사용된다.

\* B&K 한국지사 기술부, 정희원

\*\* 철도청

\*\*\* 인하대학교 선박해양공학과, 정희원

## 2.2 지반 가진력

### 2.2.1 차량/궤도 상호작용

차량이 궤도를 따라 진행함에 의해, 레일과 차륜 표면의 요철과 레일 밑 지지 구조물에서의 요철에 기인한 휠과 레일사이 동적 인 힘이 발생한다고 믿어지고 있다.

레일 응답 속도(Rail Response Velocity),  $V_R$ 은 휠과 레일의 임피던스와 거칠기에 비례하여 다음식으로 주어진다.

$$V_R \propto \frac{Z_W(\omega)}{Z_W(\omega) + Z_R(\omega)} \times [\text{복합 레일/차륜 거칠기}] \quad (2-1)$$

레일의 거칠기는 레일의 요철 윤곽을 의미하는 것으로 간주되고, 차륜의 거칠기는 바퀴의 편편함에 기인한 완전한 원이 아님을 나타낸다. 여기서  $Z_W(\omega)$  와  $Z_R(\omega)$  은 각각 차륜과 레일의 수직점 임피던스로서, 주파수  $\omega$ 에서 단위 속도를 발생시키기 위해 필요한 힘의 크기와 위상을 말한다. 측면력에 대해서는 바퀴/레일 접촉면에서의 측면 마찰력을 포함하여야하나 (2-1) 식의 유사식으로 표시될 수도 있다.

그림 2-1 은 일반적인 침묵과 자갈궤도상에서 운행하는 전형적인 통과 열차에 대한  $Z_W, Z_R$ 을 크기순으로 표시하고 있다.

주파수가 5 Hz 이하이면  $Z_W$ 는  $Z_R$  보다 상당히 작아져서 레일이 쉽게 응답하지 않는다. 10 - 30 Hz 사이에서는 차량 임피던스  $Z_W$ 와 철로 임피던스는  $Z_W$ 가 아직  $Z_R$ 보다 상당히 작지만, 이 주파수 범위에서 보통 일어나는 완충장치의 첫 공진은 지반진동에 대해 중요한 영향을 줄 수 있다. 그 이유는 그림 (2-1) 에서 30 Hz 이하를 주목해 보면,  $Z_R \gg Z_W$ 이므로 식(2-1)로부터,

$$V_R \propto \frac{Z_W}{Z_R} \quad (2-2)$$

식(2-2)는 바퀴의 설계 변경으로  $Z_W$ 을 더 크게만들면, 레일과 지반이 더욱 잘 응답할 것임을 보여준다. 그림 2-1 에서 10 Hz 바로 아래 peak와 10 Hz위의 골 사이의 궤도차량 임피던스  $Z_W$ 는 1차 완충강성에 의해 지배된다. 증가하는 강성은  $Z_W$ 를 증가시키고, 식(2-2)가 나타내는 것처럼, 증가하는  $Z_W$ 는 지반진동을 증가시킬 것이다.

그림 2-1 을 볼때, 약 40 Hz 에서 레일과 차량의 임피던스가 같아지는데,  $Z_W$ 는 질량과 같고,  $Z_R$ 은 스프링과 같다고 볼 수 있다. 결국,  $Z_W$ 와  $Z_R$ 은 반대 부호를 가지고 있어, 식(2-1)의 분모  $Z_W \pm Z_R$ 은 거의 0에 가깝게 된다. 이것은 근본적으로 공진 현상이며, 여기서 바퀴-기어박스-차축-추진모터등의 동가질량, 즉

Unsprung Mass가 레일 기초강성과 공진을 일으켜, 지반진동을 증폭시키는 결과가 된다.

그림 2-1의 50Hz 이상에서는  $Z_R \ll Z_W$  이고 그 주파수대에서 차축의 공진이 있음에도 불구하고, 식(2-1)은 레일 응답과 지반진동은 바퀴와 레일 임피던스의, 어느것에도 상관없음을 보여준다.

### 2.2.2 차륜/레일 가진력

위에 언급된 대로, 지반진동에 대한 가진 메카니즘의 하나가 차륜과 레일 표면에서의 요철이다. 30 - 110km/h 의 열차속도와 10-250 Hz의 주파수 범위를 본다면, 35mm 에서 3m 의 파장에서의 요철이 우선 관심의 대상이다. 이 파장은 바퀴/레일 노이즈의 파장보다 더 길어서, 현재의 바퀴-레일의 거칠기 측정 기술은 여기에 적용될 수 없다. 바퀴의 가장 심한 요철은 바퀴가 브레이크를 걸면서 미끄러질 때 생기는 평평한 부분이다. 저속의 열차 속도(50km/h이하)에서, 그 평평한 지점에 의한 바퀴의 거칠기 스펙트럼의 해석적 추정치는 가능하지만, 이 해석을 확인할 현장 data는 없다.

### 2.2.3 지반 응답

본 결과 후속 절에서는 Bolt Beranek 의 Ungar 와 Bender 에 의해 개발된 해석적-실험적 지반진동 기술을 고찰하게 될 것이다. Wilson, Ihrig & Associates(WIA)가 미국 교통성(US Department of Transportation)을 위해 최근에 개발한 순수한 실험적 접근에 관해서도 논의할 것이다. 이 방법은 London Transport International (LTI) 에 의해 개발된 기술에 기반을 둔 것이다.

#### 1. Ungar & Bender

여기에서 논의 되는 내용은 진원의 특성, 다시 말해 둘러싸인 지반과 완전한 결합으로 가정되는 터널벽 진동만을 포함하고 있다.

#### 2. WIA/LTI 접근법

현재까지 개발중 임에도 불구하고, 이 방법은 미국 교통성에 의해 자금 지원을 받은 주요 프로그램의 결과를 나타낸 것이다. 실험된 것들로부터 시스템 변수들의 변화를 허용하도록 보정인자를 포함하는 것을 조건으로하는 전적으로 실험적인 것이다.

## 2.3 진동 전파

### 2.3.1 배경

흙과 바위는 종종 접탄성 등방형의 매질로서 수학적으로 모델 되어진다. 이것들이 무한대 범위에 존재할때, 그런 매질속의 진동 전파는 대체로 잘 이해 되어지고 수치계산은 쉽게 다루어진다. 두개의 독립적인 Wave형태: 전단파(횡파, Shear Wave, S-wave), 압축파(종파, Compressional Wave, P-wave)가 존재한다. 지반과 암반의 경우에 있어서 압축파(Compressional Wave)는 전단파(Shear wave) 속도의 2.5-4배 정도의 속도로 전파 된다. 전단파(Shear wave)는 지반에서 대략 30-300m/s의 속도의 범위이고, 암반에서는 1000 m/s의 속도이다.

흙은 균일등방체는 아니지만 모래 입자들 사이에 공간을 가진 입자들로 구성되어 있다. 만약 지반이 수분을 함유하고 있으면, 공간은 물로 채워질 것이고, 세번째 형태의 Wave가 존재 하게 될 것이다. 이 Wave는 흙에서의 압축파와 유체속의 압축 파가 결합

과 관련되어 존재한다.

### 2.3.2 추정 기법

#### 1. Ungar and Bender 접근법

Ungar and Bender는 Compressional wave를 제외한 모든 종류의 Wave를 무시한 매우 간단한 분석을 개발해 왔다. 사실 그들은 탄성동역학(Elasticdynamics)의 복잡한 문제를 단순한 음향학적 문제로 줄였다. 진동의 총감쇠  $A_T$ 는 터널에서 어떤 위치까지의 거리를  $x$ 라하면, 다음 식에의해 표현된다.

$$A_T = A_s + A_d + A_i \quad (2-3)$$

$$\text{여기서, } A_s = 10 \text{ Log}_{10}((r_0 + x)/r_0) \quad (2-4)$$

$$A_d = 4.34\pi\eta x/C \quad (2-5)$$

$$A_i = 20 \text{ Log}[0.5(1+(\rho_c C_c)/(\rho_a C_a))] \quad (2-6)$$

식 (2-4)는 차량이 선진동원(line source)이라 가정한 상태에서의 전파손실을 설명한다.  $r_0$ 의 양은 터널의 반지름이다. 식(2-5)는 흙과 바위에서의 내부 손실에 따른 진동 감쇠를 설명한 것이다. 식 (2-6)은 전파 경로를 따라 흙 또는 바위에서의 변화를 설명한다. Compressional wave가 지반 a로부터 지반 c로 전달되고 두 물질 사이의 경계면에 직각으로 입사한 것을 가정하고 있다.  $\rho$ 와 C는 각각 두가지 흙에서 밀도와 파속도(Wavespeed)를 나타낸다. 식 (2-6)은 두개의 층이 여러파장 만큼의 두께를 갖는 경우만이 매우 정확하게 된다.

$$C = [E/\rho]^{1/2} \quad (2-7)$$

식 (2-5)와 (2-6)에서 요구되어지는 것은 압축파또는 확장파(Dilatational wave)의 속도,  $C'$  이다. 길이 방향의 파속도는 압축파(Compressional wave)와 다음과 같은 관련이 있다.

$$C'/C = [(1-\nu)/((1+\nu)(1-2\nu))]^{1/2} \quad (2-8)$$

여기서  $\nu$ 는 포아송비(Poisson's Ratio)이고, 흙에 대하여 일반적으로  $\nu$ 가 0.4이므로,  $C'/C$ 는 1.46 이다. 식 (2-8)에서 보정을 하는것이 매우 간단하다 하더라도, 종종  $\nu$ 가 어느정도 정확하게 알려지지 않고,  $\nu$ 가 0.5에 접근하는 값에 대하여 식(2-8)은  $\nu$ 가 조금만 변하더라도 크게 변한다. 압축파(Compressional wave)속도는  $\nu$ 에 크게 의존하기 때문에 Ungar & Bender 는 작은 오차가 생기고  $\nu$ 에 비교적 덜 종속적인 longitudinal wavespeed를 사용했다.

#### 2. WIA/LTI

그림 2-2 는 지상운동과 터널운동으로부터 지반 진동을 위한 전달 모빌리티(Transfer Mobility)를 얻기위한 전형적인 장비 설업을 보여준다. 가진점으로부터의 여러 거리에서 진동과 가진력이 동시에 레코딩된다. 그위 data는 그림 2-3 에 보인 것처럼 분석 된다.

## 2.4 빌딩 응답

빌딩 내부의 바닥, 천정, 벽에 의한 소리의 전파는 방의 기하학적 성질과 음향학적 성질뿐만 아니라 방 표면의 진동분포와 깊은 관련을 맺고 있다. 이러한 복잡성의 결과로 인해 열차진동에 의한 빌딩의 응답을 결정짓기 위한 현재의 방법은 당연히 실험적인 것이다.

### 2.4.1 지반-빌딩 상호작용

땅에서 건물까지의 열차진동의 전달은 건물기초 특성에 따라 다르게 된다.

지상 슬라브 바닥(대부분의 지하층 바닥)의 경우는 슬라브 표면적이 매우 크고, 슬라브 자체가 밑의 땅과 밀접히 접촉되어 있다. 그러므로, 그런 바닥 Slab에서의 진동은 Slab없는 땅에서와 유사하게 되어, 낮은 주파수에서 0dB의 결합손실을 갖게된다(지반위의 Slab의 공진 주파수까지).

건물의 바닥, 벽, 천정은 기초진동에 비해, 진동의 증폭에 중요한 역할을 한다. 바닥, 벽, 천정의 증폭은 예측하기가 힘들다, 통상 진동수 16 - 80 Hz에서 5 - 15dB의 범위로 나타난다.

### 2.4.2 지반전달 진동에 의한 소음방사

지반전달 소음은 건물 내부의 벽, 바닥, 천정의 진동에 의해 방사되는 음파의 결과이다. 실내 표면의 진동과 소음도의 관계는 실내의 흡음량, 방의 크기와 모양, 그리고 실내 표면상의 진동 속도치의 분포에 따르게 된다.

### 2.4.3 낮은 주파수의 공기 전달음

디젤 기관차가 운용되는 레일 근처의 건물에서 벽과 창문을 통해 전달되는 공기 전달음이 지면전달 진동에 의한 소음보다 큰 경우가 종종 있다. 그와같은 경우에 소음제어 조치의 가능성을 평가하기 위해 건물 내부의 전체 소음에 대한 지면 전달음과 공기 전달음의 상대적 비율 결정하는 것은 상당히 중요하다. 지상이나 고가 궤도의 근처에서 소음과 진동 제어 방법을 평가할때 발생하는 또다른 복잡한 문제는 100Hz아래의 주파수에서는 낮은 주파수의 공기 전달음이 건물의 진동을 만들 수 있다는 것이다.

## 3. 영향 평가를 위한 기준

지하철로부터의 낮은주파수 소음과 진동은 주민들과 이들이 거주하는 건물들에 여러 영향을 미칠수 있다. 기차로부터 발생하는 진동의 영향은 다음 4가지 종류로 나눌 수 있다.

- (1)감지진동에 의한 시달림
- (2)민감한 장비의 작동 장애
- (3)구조물의 손상
- (4)가청 음향

### 3.1 감지 진동

최근 몇년동안 매우 광범위하게 인용되고 근본이되는 인체진동 기준은 국제표준기구 ISO 2631 이었다. 이 기준은 전신진동에 인간노출의 평가에 대하여 여러가지를 규정하고 있으며, 각 나라

규격은 이것을 기초로하여 자신들의 규격을 만들어 사용하고 있다. 미국 국가표준 ANSI S3.29-1983은 본질적으로 ISO 2631 Part 2와 같이 건물진동에 인간노출의 가이드 라인을 제공하고 있으며, 일본, 우리나라도 이것에 기초한 공해진동을 측정하고 있다.

#### 3.1.1 국제표준화기구 ISO 2631

ISO 2631은 '전신진동에 인간노출의 평가'라는 제목하에 네 부분으로 구성되어 있다. 지하철 진동에 의한 건물진동의 영향에 대한 내용은 주로 ISO 2631 Part2 에서 설명하고 있다.

이것은 1-80Hz의 주파수 범위에서 여러 건물 용도에 따른 진동 허용한계를 나타내고 있다. 수직방향, 수평방향의 허용한계와 또 수직, 수평 진동에 대한 인간의 감도가 다르기 때문에 수직, 수평 진동에 대한 가장 낮은 한계치의 결합으로 구성된 결합표준이 포함되어 있다.

#### 3.1.2 미국표준 ANSI S3.29-1983

미국표준 ANSI S3.29 "빌딩 진동에 인간노출의 평가에대한 가이드"를 규정하고 있는데 앞에서 설명한 국제표준화기구(ISO 2631)의 규격과 매우 유사하다.

감지할 수 있는 진동 평가를 위한 한개의 서슬값을 계산하기 위해 ANSI S3.29에서는 저주파 필터의 주파수 응답곡선을 제시하고 있다. 이것은 제안된 ANSI 표준에서 규정되지않은 방향으로의 인체진동에 대한 복합응답 기초곡선을 기본으로 하여 조금 매끄럽게 만든 곡선이다.

#### 3.1.3 한국의 진동 기준

소음진동규제법상의 진동배출허용기준은 주로 공장시설의 진동과 건설작업의 진동에 대하여 규정하고 있으며, 그 레벨은 60dB(V) 이하로 하고 시간대별 및 지역에 따라 보정치를 가산하도록 되어 있다. 전용주거지역에서 밤시간대(22:00-06:00)에는 5dB 보정을 하여 55dB(V)로 규제하고 있다. 철도차량 및 지하철진동에 관한 기준은 없으나 밤시간대에 55dB(V)를 적용하면 국제규격과 차이가 없다고 생각된다. 진동레벨의 표시는 감각보정회로(수직)를 통하여 측정된 가속도레벨로서 단위는 dB(V)로 표시한다. 가속도레벨의 정의는

$$dB(V) = 20 \log a/a_0$$

의 수식에 따르고, 여기서 a는 가속도(단위:m/s<sup>2</sup>)이며, a<sub>0</sub>는 기준가속도로 10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>으로 하고 있다. 진동레벨을 측정하는 진동계와 진동계의 감각보정회로에 관한 사항은 KS C 1507에 규정되어 있다. 이것은 ISO 2631의 수직, 수평방향의 보정특성과 같은 것이다.

#### 3.1.4 감지 진동 연구사례

최근에 Nelson 과 Saurenman은 통과 열차로부터 발생하는 진동에 대한 지역주민 불만의 평가를 기초로 하여 주택에서 48-53dB가 최대 수용 범위임을 제안했다. ANSI 표준의 기준보다 단지 수 데시벨 낮은 진동임에도 불구하고 이 데이터는 이 작은 차이가 중요하다라는 것을 지적하고 있다. 그림 3-1는 주거 건물에 열차 통과에의한 지반진동의 최대치에 대한 그들의 권고된 범위를 요약

한 것이다. 이 범위 이상에서는 불만이 쉽게 나올 것이며, 이 범위 아래에서는 불만이 거의 나오지 않고, 이 범위내에서 진동은 어느정도 받아 들여질 것으로 생각된다.

### 3.2 설비기능의 장애(Impairment of equipment function)

연구용 장비와 제조용 설비의 정밀도를 증가시키려는 지속적인 노력의 결과 이들 장비들이 진동에 대해 민감한 감도를 나타내는 원인이 되었다. 바다 진동에 대한 장비의 민감도는 장비가 지지 되는 방법에 크게 의존된다. 매우 민감한 장비는 종종 특별히 설계된 '공기-스프링' 테이블과 함께 공급되어 몇 Hz 정도의 낮은 주파수까지의 바다 진동으로부터 이들 장비를 효과적으로 차단한다.

### 3.3 구조물의 손상

극히 높은 레벨의 지반 진동에 노출되면, 건물은 심각한 구조적 손상, 유리창 파괴, 심각하게 벽토가 갈라지고 벽토가 떨어지는 것같은 '주요한 손상'을 입을 수 있다. 낮은 레벨의 진동에 대해서는 사소한 손상이 건물에서 관찰될지도 모른다. 이것은 통상적 미세한 벽토 갈라짐과 오래된 크랙이 벌어지는 특징을 가지고 있으며, 일반적으로 '건축피해'로서 언급된다.

## 4. 진동측정분석 및 결과

### 4.1 측정 개요

건물 진동 측정은 1993년 7월 13일부터 8월 5일 까지 (10 회 출장)행해졌으며, 터널 내부측정은 1993년 7월 16일 부터 8월 6일 까지 (4회 출장) 행해졌다.

측정시 한팀에 3 사람씩 4개 팀으로 나누어 3개팀 이상이 동시에 측정을 실시하도록 하였다.

측정위치는 K1-K15로 명명된 5개 건물과 터널내부에서 실시하였다. 건물에서의 측정은 건물이 주로 반지하, 1층, 2층으로된 3층 건물이었으므로 각 층별로 수회 측정하여 총280회의 열차 통과를 측정하였고, 터널내부에서의 측정은 터널벽의 진동, 바닥의 진동, 침목에서의 진동을 지하철 속도와 함께 측정하였다.

### 4.2 분석방법/데이터의 처리

보정을 하지 않고 레코딩된 신호를 다음의 방법으로 처리하였다.

1. 지하철 통과시의 진동신호를 스펙트럼 Peak Averaging 하여 Nelson and Saurenman의 주거빌딩에서 최대 허용범위의 그래프 (그림 3-1)에 중첩시켜 그렸다.
2. 지하철 통과시 진동신호를 스펙트럼 Peak Averaging한 것에 ANSI S3.29에서 제시한 복합방향 인체진동 보정특성을 감안하여 Overall 레벨을 구하였다.
3. 지하철 통과시 진동레벨의 변화를 시간과 함께 그래프로 나타내었다.

4. 건물의 공진특성은 건물바닥에 임펄스성 충격을 가했을때 응답을 측정한 것이다.

### 4.3 분석결과

#### 4.3.1 건물의 진동특성

건물에 임펄스성 충격을 사람이 뛰거나, 해머등으로 가격하여 그 응답을 측정하였다. 그 응답에 대한 스펙트럼은 건물의 공진 주파수를 나타내 준다. 측정된 임피던스 그래프의 형상은 지금까지 알려진 일반적인 건물의 공진주파수와 잘 일치됨을 알 수 있었다. 건물의 공진주파수는 45-80Hz 범위에 있었다. 다른나라의 건물의 바닥에서의 공진주파수는 대략 10-30Hz로 알려져있다.

#### 4.3.2 진동에 의한 건물의 진동 스펙트럼과 가중된 레벨

건물 K1-K15에서의 각 건물에서 측정된 진동 스펙트럼과 최대 허용레벨을 중첩하여 나타냈다. 조사대상의 건물에서의 스펙트럼은 크기 분포가 매우 다양하나 크게 진동할 때는 국제규격상의 주거지역 레벨을 초과하고 있다.

#### 4.3.3 터널내의 진동

터널내의 진동 계속 결과는 철로의 진동 스펙트럼, 침목의 진동 스펙트럼, 노반의 진동 스펙트럼, 발라스트 매트트의 진동 스펙트럼, 터널벽의 진동 스펙트럼을 포함 하고 있다.

#### 4.3.4 열차의 운행속도와 진동과의 관계

열차의 속도와 터널 및 건물의 진동 레벨을 표 4-1에 나타내었다. 이 표는 1993년 7월 20일에 건물과 터널을 동시에 계속 한 것을 토대로 작성한 것이다. Channel A는 발라스트 매트트가 깔려 있는 터널 바닥에서 측정한 것이고, Channel B는 터널 벽면에서 측정한 것이다.

## 5. 진동 소음 저감을 위한 대책

철도에서 관측되는 진동은 차륜⇒궤도⇒구조물⇒기초⇒지반⇒건물로 전파하여 가고 이들의 요소가 복잡하게 관계되고 있다. 지하철에서 발생하는 진동을 허용치 이하로 억제하기 위한 방진 대책이 효과적이기 위해서는 진동의 원인이 되는 차량, 궤도 및 선로 구조물을 저진동 구조로 하고, 진동의 전파 경로가 되는 지반에 대해서는 흡진재 또는 방진재를 설치하며, 진동의 영향을 받는 구조물에 대해서는 진동 격리 또는 진동 차단 대책등을 강구해야 한다.

### 5.1 진동원 대책

방진 대책이 효과적이기 위해서는 진동 원인에 대한 대책이 가장 중요하다. 철도 차량, 궤도 및 선로 구조물에 대한 방진 대책으로 표 5-1와 같은 것이 있다.

차량으로부터의 진동은 궤도 부분에 있어서 레일, 침목, 궤도 Slab로 전파되어 전달된다. 궤도구조의 스프링을 연하게 하는 공법은 구조물의 가진력을 감소시키는 효과가 기대된다. 그 방법으로, 레일 연결장치, 침목, 도상 및 궤도 slab 각각의 경계 부분에 방진 재료를 삽입하는 방법이 많이 사용한다.

유동질량 시스템에서 유동질량의 관성은 관심있는 주기에서 진동을 감소시킨다. 이들 운동은 비교적 부드럽으면서 탄력성있는 지지대를 통해 배면에 전달되고 결과적으로 배면에 작용하는 진동을 감소시킨다.

새로운 철로의 설계에 많이 쓰여지는 두가지 설계는 가벼운 두께의 연속슬래브와 불연속 유동 슬래브이다. 연속성 유동 슬래브는 지하도 배면에 있는 우묵한 곳에 설치되고, 불연속 유동 슬래브는 프리캐스트 블럭으로 구성되고 탄력성이 있는 패드위에 지지된다. 종방향과 횡방향 안정은 슬래브 단면사이와 면에 위치한 미리 재하된 탄성 블럭에 의해 제공되어 진다.

최근 독일에서 개발된 floating slab시스템은 탄성 spring받침으로 지지되고 진동감소도 25dB 이상의 효과를 나타내고 있다.

## 5.2 전파 경로 대책

지하 철도에 의해 발생하는 진동이 지반을 전파할 경우 거리 감소로 인해 전파 거리가 증대 됨에 따라 감소하고, 전파 매체에 따라 반사, 굴절, 간섭 작용 등을 일으켜 진동의 크기가 변화된다. 전파 경로상 대책을 분류하면 다음과 같다.

### (1) 자연적인 방법:

방진 대책중 가장 간단하고 효과적인 방법은 진동원과 구조물의 거리를 크게하는 것이다. 거리가 커지면 거리 및 지반 감쇠효과에 따라 진동은 줄어 들지만, 일단 계획된 건설공사의 위치를 바꾸는 것은 사실상 불가능하므로 적용 가능성은 크지 않다.

### (2) 인위적인 방법:

인위적인 방법은 진동이 전파될 때 반사, 굴절, 간섭 등에 의하여 진폭을 감소시키는 방법으로, 방진구나 방진벽을 설치하고 지반을 개량하는 방법 등이 있다.

중공방진구는 속이 빈 방진구로, 진동원이 고정된 경우는 진동원측 방진(active isolation)을 하고, 진동원이 고정되어 있지 않은 경우는 구조물측 방진(passive isolation)을 사용하나, 구를 완전히 공구로 둔다는 것은 안전성 면에서 영구 구조물로서 현실적이지 못하다.

## 5.3 수진부 대책

건물에 전달되는 진동이 주파수 영역이 넓고 불규칙 해도, 일반적으로 건물 내부의 진동은 주파수 영역이 협소하고 규칙적인 것으로 간주 되고 있는데, 이는 건물의 고유진동이 선택 공진적으로 유기되기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 건물의 방진 방법으로, 전달되는 주파수 영역이 협소하여 이에 의한 공진이 문제시 될때에는 건물의 고유진동수를 변화 시켜주는 것이 유효하다.

기초 파일립의 빌딩이나 기둥의 기초 혹은 상부, 그리고 구조적인 연결이 다른 지점에 격리 패드를 삽입 시키는 것은 소음과 진동으로부터 선택된 빌딩이나 빌딩안의 주역을 보호하는 데 도움

을 줄수 있다.

Lead-asbestos 패드는 1915년부터 지하철의 소음과 진동을 격리시키는 데 중요한 방법임이 알려졌으며, 10dB 정도의 상당한 진동 격리 효과를 나타내었다. 1964년 이래로 영국에서는 열차 시스템으로 인한 소음과 진동을 격리시키기 위하여 건물의 기초에 탄성 지지 패드를 사용해 왔다.

빌딩 격리 설계의 모든 경우에 있어, 모든 주요한 진동 전파 경로의 차단이나, 효과적인 격리를 제공하는 것에 대한 주의가 요구된다.

## 5.4 국내외의 진동 소음 저감 대책 및 보강 공사 사례

### 5.4.1 Floating Slab System

최근 저주파 진동에 대해서도 유효한 방진 대책으로 floating slab 궤도를 사용하고 있다.

- Spring-mass System 계를 이용한 시공 사례

이 시스템은 열차가 지나가면서 레일과 바퀴의 마찰로 인하여 생기는 진동을 Spring Element 로 흡수하여 터널 구조체로 전달되지 않도록 하며, 설치후의 효과로 25 ~ 30 dB 까지 방진 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

- 고무지지재를 이용한 사례

고무지지재를 사용한 Floating Slab 시스템은 신간선이나 북대서양 철도에 응용되기도 한다. 이 궤도는 지지탄성을 유연화시킨 외에 궤도의 질량도 상당히 크게 한 것으로 터널 내에서 진동 저감을 위해 사용되었다.

### 5.4.2 고무 패드, slab mat 시공 사례

TGV의 경우 방진 대책을 위해 60 kg/m 급 중량 레일과 중량 콘크리트 침목을 사용하고, 도상 두께를 30 cm 로 하였으며 9 mm 고무 패드를 레일과 침목사이에 설치 하였다. ( 재래선의 경우 25 cm 와 도상 두께 4.5 mm 의 고무 패드를 사용하였다. ) 그리고 터널의 경우 터널 단면의 중량을 증가시켜 진동 레벨은 5~18 dB 감소 시켰다.

우리나라의 경우에는 지하철 1호선에서 남대문과 동대문의 문화재 통과 구간에서 방진 대책을 실시하였다. 문화재에 대한 열차 진동의 영향을 감소시키기 위해 장대 레일을 사용하고, 레일의 타이플레이트와 침목 사이에 6mm 고무 패드를 설치하고 floating slab type의 궤도 구조 개념을 도입하여 본체 구조 바닥에 50 mm 의 가압 콜크층을 설치한 후, 철근 concrete floating slab를 타설 하여 자갈 도상과 목침목을 부설하였다. 본 구조체 외부 벽체에도 역시 50mm의 가압 콜크판을 부착하고 아스팔트 스위트 처리를 하였다.

## 6. 결론

### 6.1 진동 분석 결과

지반 진동은 차종, 열차 속도, 구조물 등이 거의 같아도 측정하는 장소에 따라 현격한 차이가 있어 최대 진동속도로 비교하면

10배 정도의 범위에 분포 한다. 이것은 지반에 의해 매우 흔들리기 쉬운 곳과 그렇지 않은 곳이 있다는 것을 의미하고 있다. 연약한 지반에서는 장주기의 진동이 탁월한 것에 비해 견고한 지반에서는 단주기의 것이 현격한 차이를 보이고 있다. 따라서 연약한 지반에서는 변위가 크고, 견고한 지반에서는 가속도가 크게 되는 경향이 있다.

본 용역팀은 민원 대상 주택을 15개소로 구분하고 가능한 시간대 별로 분류하여 계측을 실시 하였다. 진동 계측을 시행하면서 각 주택에 대한 진동 특성을 파악하였고, 주파수 특성은 30~80 Hz 영역안에 분포 되어 있는 것으로 밝혀졌다.

통과 열차로부터 발생하는 진동에 대한 지역주민 불만의 평가 등을 기초하여, 48 ~ 53 dB 가 최대 수용 범위로 제안되었다. 이것을 기준으로 할때, 계측 대상 전 건물의 최고치가 53 dB 를 넘었다.

## 6.2 열차 진동 저감 대책 제안안

진동소음 저감을 위한 대책에 대해서는 앞 장에서 여러가지 대책 방안이 제시되었고, 국내외의 시공 사례도 소개 되었다.

민원 지역 구간에는 Ballast Mat가 방진재로 사용되었음에도 불구하고 방진효과가 없이 방진 공해를 유발하여 민원이 발생하였다.

특히 민원이 발생한 지역은 지반이 연약하고, 건축된 주거지 건물도 진동 소음 영향을 전혀 고려치 않고 설계 건축 되었다. 그러므로 이러한 여러가지 복합적인 요인들을 감안하여 민원에 대처할 수 있는 대책을 다각적인 면에서 고려 하여야 할 것이다.

### 6.2.1 열차 속도에 대한 저감 대책

전철 주행속도 감속운행과 감시 모니터링 시스템에 의한 대책으로 해결 될 수 있다면 이는 방진대책 공법상 시간적, 경제적으 로 아주 좋은 대책이라 할 수 있다.

일반적으로 지반 진동의 특성은 차량⇒궤도⇒구조물⇒기초⇒지반 으로 전파되는 진동의 주파수 특성에 크게 관계된다. 이러한 주파수 특성은 전철 속도에 따라 다르고 또, 충격도 열차 속도에 따라 달라 지므로 전철이 고속으로 주행하게 되면 크게 된다.

일반적으로 문헌에 의하면, 속도 저감에 따른 지반 진동 저감도는 진동원에 대해 10 dB 정도 감소 시킬 수 있다고 한다. 측정 당시 전철은 70~90 km/h 로 주행 하다가 제동을 하기 때문에 여 기서는 뚜렷한 효과는 볼 수 없으나, 아주 감속으로 주행을 한다면 ( 30~40 km/h ) 으로 주행을 한다면, 진동원에서 최대 10 dB 까지 감속을 시키는 효과를 볼 수 있으므로, 일정 실험 기간 을 두고 기관사들에게 주지시켜 운행하고, 계측과 동시에 주민 들의 민감도를 조사해 보면, 인위적인 진동소음 저감대책 타당성 을 결정할 수 있는 가능성도 있다고 간주된다.

### 6.2.2 수진부 대책에 대한 방법

민원 대상 주거지역의 주택에 대해 건물의 중량을 증대시켜 건물의 고유 진동을 충분히 낮춰주는 방법이나, 방진고무, Pad,

Spring 탄성지지를 하여 건물의 고유 진동수를 변화 시켜주는 방 법이 있다.

### 6.2.3 Floating Slab System 에 의한 대책 방안

이 시스템은 아직 국내에 시공한 사례는 없다. 다만 이와 비 슷한 개념으로, 남대문과 동대문의 문화재를 보호하기 위해 고무 패드 위에 floating slab 를 타설한 시공 사례는 있다. 이 공법 에 의하면, 25 - 30 dB 에 달하는 방진 효과를 얻을 수 있으므 로, 매우 타당한 대책이라고 할 수 있다.

## 6.3 향후 진행 방향

철도 진동의 발생 원인은 열차의 차륜이 지상의 특징점을 통 과함에 따라 생기는 주기적인 재하 현상에 의한 것이며, 그 주기는 차륜 간격과 열차속도에 관계된다. 실제의 철도 진동은 차륜, 궤도, 구조물, 기초, 지반, 건물 등 이들 요소가 관계하여 합쳐 져서 발생, 전파됨으로서 앞에서 언급했듯이 열차의 바퀴에 의한 진동이 진폭의 면에서도, 주파수의 면에서도 복잡한 형태로 되어 나타난다.

이러한 현상은 차륜의 Tire plat, 차륜의 중량 변동, 레일의 흐트러짐, 이음부 마모, 구조물의 이음부 등에 의해 이상상태로 되어, 충격이 증가한다거나 진동치가 통상 보다 크게 되며, 파형 도 복잡하게 된다. 또한, 각 관계 요소가 구성하고 있는 진동계 의 고유진동이 관계하여 공진 등의 현상이 발생하며, 진동을 전 달하는 매질의 경계부에서의 반사, 굴절, 회절등이 생긴다. 전체 적으로 보면, 차륜 ⇒ 궤도 ⇒ 구조물 ⇒ 기초 ⇒ 지반 ⇒ 건물 에로 전파하고, 그 사이에 어떤 종류의 Filter 작용과 간섭 작용 을 받아 주파수에 따라서 증폭 또는 감쇠되어 복잡한 진동으로 된다.

향후, 이러한 복잡한 현상에 파생되는 공해 진동을 방지하기 위해서는 요소에 대한 주파수 특성, 거리 감쇠 특성, 지반에 대한 특성, 열차 속도의 영향, 궤도 구조의 영향, 구조물의 영향, 기초 구조의 영향, 지반의 영향 등으로 해석 분석하여 영향 평가 에 주시하고, 더욱 적절하고 효과 있는 대책을 초기에 세워야 한다.

## 참고문헌 :

- 1)ANSI S3.29-1983, American National Standard Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings.
- 2)ISO 2631-2, International Standard Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings
- 3)소음진동규계법
- 4)환경오염 공정시험법
- 5)한국 공업 규격 KS C 1507
- 6)일본공업 규격 JIS C 1510
- 7)소음진동대책 핸드북, 일본음향 재료협회
- 8)김성택 저, 1991, "소음진동편람-진동편". 도서출판 동화기술
- 9)정일록 편저, 1986, "소음, 진동학", 신광출판사.

- 10) 신중서, "고속철도에서의 진동 및 그 대책", 소음진동공학회지 VOL.3 NO.2, 1993년 6월
- 11) 오현제, "고속철도가 환경에 미치는 영향", 소음진동공학회지 VOL.3 NO.2, 1993년 6월
- 12) Paul Nelson, Transportation Noise Reference Book, Butterworths.
- 13) Toronto Transit Commission, Yonge Subway Northern Extension Noise and Vibration Study, Book 1, Report RD 115/3(1976)
- 14) R.B. Randall, Frequency Analysis, Bruel & Kjaer
- 15) LEO L. BERANEK, Noise and Vibration Control, Institute of Noise Control Engineering

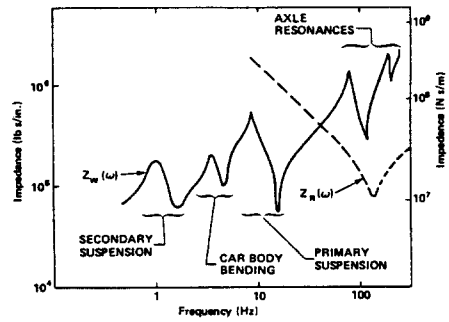


그림 2-1 바퀴와 레일 임피던스의 표시

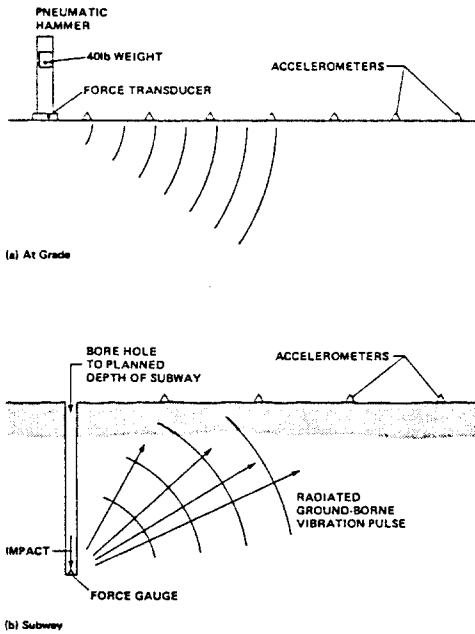


그림 2-2 전달mobility측정을 위한 시험형태

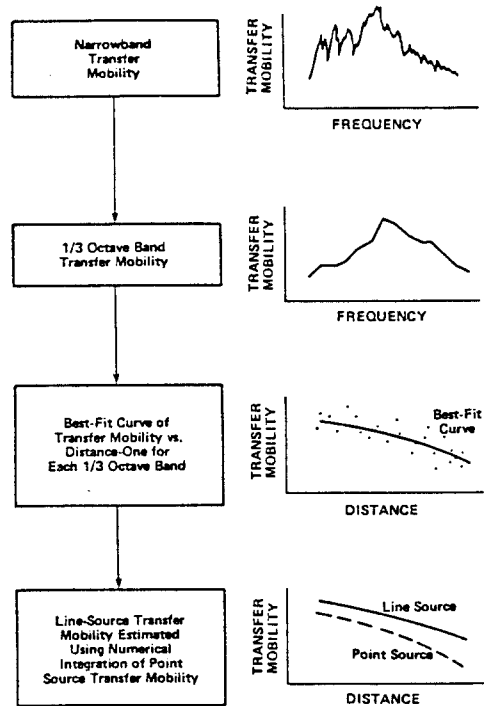


그림 2-3 전달mobility data 해석

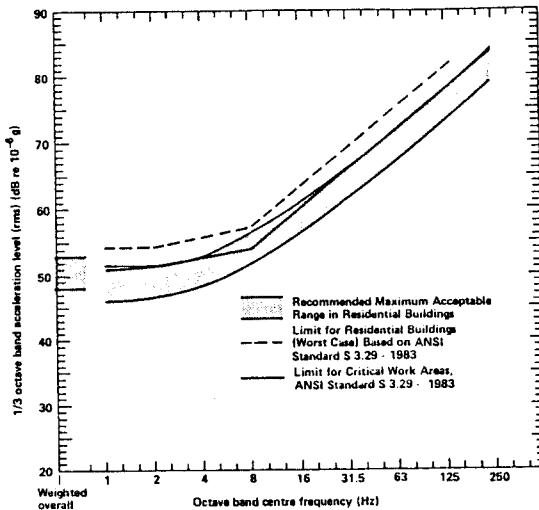


그림 3-1 건물 진동의 최대 허용범위

시간	dB		속도(km/h)	k1	k4	k5	k6	k11	k12	k15
	A	B								
13:05p	57.0	55.7	51							
14:32p	57.1	56.6	67							
14:38p	63.2	56.6	59							
14:50p	70.6	66.5	45							
14:56p	71.8	65.7	66			48.7 f1			51.0 f3	
15:07p	69.5	66.2	42			46.7 f1			49.2 f3	
15:13p	84.1	66.2	54			44.0 f1			49.1 f3	
15:30p	77.1	63.7	46							
15:37p	77.5	71.6	60			49.8 f1		50.1 f1		
15:46p	85.1	60.0	46	56.2 b1						
15:53p	78.5	65.4	56					50.0 f1		
16:06p	74.5	52.6	56			47.2 b1		48.5 f1		
16:13p	77.9	67.0	50							
16:22p	85.1	61.2	50	56.5 b1						
16:28p	78.0	65.9					42.4 b1			
17:04p	83.6	66.3	53							52.2 f1
17:22p	80.8	65.9	55							
17:28p	86.4	67.2	60							54.4 f1
17:40p	77.3	61.9	68		40.6 b1					
17:46p	80.8	80.8	51							38.3 f2
17:57p	85.7	64.0	57		46.6 b1					43.0 f2

표 4-1 열차 시간 대비 속도 및 진동 레벨

진 동 원		방 진 대 책
차 량		운행방법(속도 저감), 스프링하 질량감소, 탄성차륜 사용 및 대차에서의 진동차단, tire flat 방지 등
궤 도		레일, 체결장치, 침목, 도상 및 궤도슬래브 각각의 경계 부위에 방진재(고무패드) 삽입, 레일의 장대화, 증량화, 스프링상수가 낮은 궤도사용, 궤도틀림방지, 레일 단차방지 등
선 로 구 조 물	터 널	궤도, 노반, 복공사이의 진동절연, 질량증가(뚜꺼운 복공 및 저판의 증량화 등으로 인한 진동모드 변경), 이중축벽, 터널상부에 진동차단층 설치, 방진벽 설치, 지반강화 등
	교 량	탄성지지교량, 저진동구조물(강성, 질량, 지간길이 등에 따른 진동모드 변경), RC화, 기초공법에 의한 대책(2중말뚝, 지반강화), 구조물내의 진동차단, 흡수 또는 완충기구 설치 등
	성 도, 절 토	약액 주입에 의한 연약지반 개량, 연약지반 치환, 강화 노반, 나무 말뚝에 의한 보강등

표 5-1 진동원에 대한 방진 대책