

# 지하철에 의한 거리별 지반진동 예측에 관한 연구

## Study on the Prediction of Ground-Borne Vibration with Distance induced by Subway Transit System

김득성\* · 김형곤\* · 장서일\*\*

Deuk Sung Kim, Heoung Gon Kim, and Seo Il Chang

### ABSTRACT

This study reviews several of the procedures that have been used to predict ground-born vibration. The vibration responses are measured at three sites that have different soil qualities. The measured vibration levels are compared with the predicted results by previously used vibration level prediction models. In this study a numerical method, which is based on explicit differential method, is used to compensate for existing prediction models.

Although numerically computed results are not quantitatively in good agreement with the measured results, the trends are comparable in the sense that vibration level does not decrease monotonically with distance. Also, The site with the deepest tunnel gives the highest vibration level.

### 1. 서론

도시화와 인구집중현상으로 지하 공간의 활용이 확대되면서 이미 많은 지하철이 건설되어 지하구간을 통과하고 있으며 앞으로도 지하 공간의 활용은 계속 될 전망이다. 궤도이동차량에 의한 진동 및 소음은 오래 전부터 환경상의 공해문제로 인식되어 왔다. 그러나 지반에 의해 전달되어지는 진동은 최근에 들어 주목을 받기 시작했으며 선진외국의 경우 많은 연구가 이루어지고 있다. 지하철과 같은 궤도이동차량에 의한 지반 진동은 차륜과 레일의 상호작용에 의해 발생하며 그 영향인자로는 차륜과 레일의 굴곡도(roughness), 궤도지지시스템, 표면의 접촉강성의 국부적 변화<sup>1)</sup> 등을 들 수 있다.

특히 지반의 성질, 대차의 운동 특성, 궤도지지 시스템의 강성, 건물의 구조 등에 의해 영향을 받는다.<sup>2,3)</sup> 그리고 전달 매질로서 작용하는 지반의 성질이 다양하여 일반적인 예측 식을 만들거나 외국의 예측 식을 그대로 우리 나라에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 이러한 여러 가지 변수 때문에 실제로 지하철에 의해 발생한 진동이 지표면이나 주변 건물에 어느 정도의 영향을 미치는지 예측하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 지하철이 점점 더 우리 생활과 밀접한 관계를 가지면서 위의 문제를 규명하는 것이 더욱 중요해지리라고 생각된다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 세 지역을 대상으로 거리별 지반 진동을 측정하여 그 특징을 살펴보고 기존의 예측식과 또한 수치 해석적인 방법을 통하여 예측된 값을 측정값과 비교함으로써 근접장에서의 지반 진동의 주파수별 감쇠 특성 및 예측의 가능성에 대하여 살펴 보았다.

\* 서울시립대 대학원 환경공학과 석사과정

\*\* 서울시립대 환경공학과 교수

## 2. 이론적 배경

지하철과 같은 궤도이동차량에 의한 지반 진동은 차륜과 레일의 상호작용에 의해 발생하며 그 영향인자로는 차륜과 레일의 굴곡도(roughness), 궤도지지시스템, 표면의 접촉강성의 국부적 변화 등을 들 수 있다. 특히 지반의 성질, 대차의 운동 특성, 궤도지지 시스템의 강성, 건물의 구조 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 지반 진동의 에너지는 레일을 거쳐 fastner 그리고 터널 바닥과 벽면을 통하여 지반으로 전달되어진다. 지반으로 방사되는 진동 에너지는 압축파, 전단파 그리고 표면파의 형태로 건물의 벽이나 기초에 직접적으로 전달되거나 소음의 형태로 환경상의 영향을 야기시킨다. 일반적으로 인간이 느낄 수 있는 지반 진동의 주파수의 범위는 5Hz에서 40Hz 정도이며 그 이상의 주파수 범위의 진동은 건물벽이나 기초의 진동의 영향으로 나타나는 소음의 형태로 더욱 심한 환경상의 피해를 나타낼 수 있다. 일반적으로 여러 이론이 설명하는 바로는 지반 진동 레벨이 거리가 멀어짐에 따라 감소한다고 한다. 그러나 근접장에서의 좀 더 자세한 감쇠 경향의 연구가 필요하다고 생각된다.

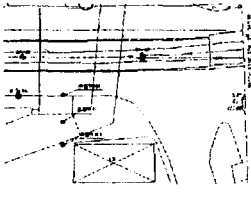
## 3. 연구 방법

서로 다른 지반의 특성을 지닌 세 곳의 대상 지역을 선정하였고 각각의 지역에 대한 지반 조사자료를 통하여 전달 매질의 특성을 파악하였다. 각 지역에서 터널의 중앙을 중심으로 거리별로 진동 응답을 측정하였으며 건물에의 영향을 살펴보기 위하여 인접 건물의 지하에서도 측정을 수행하였다.

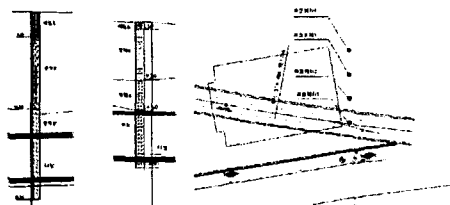
우선 기존에 사용되었던 여러 예측식들(주파수별(1/1옥타브밴드) 진동 레벨 예측식: Wilson식, Ungar & Bender식, Overall 진동 레벨 예측식: Tokita식, 일본 지하철 진동 예측식<sup>2)</sup>)을 대상 지역에 적용하여 예측된 값을 측정값과 비교 분석하여 보았다. 그리고 수치 해석 방법을 사용하는 상용 프로그램 FLAC을 적용시켜 대상 지역을 유한 요소로써 모델링<sup>7)</sup> 하고 진동원으로부터 전달 매질인 지반을 통하여 지표면까지 전달되는 경로에 대한 해석을 수행하여 대상 지역에서의 여러 가속도 응답을 구하였다.

## 4. 대상 지역의 선정 및 실측

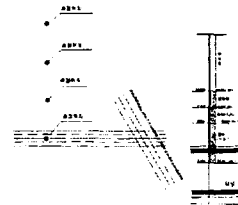
본 연구에서는 서로 다른 지반의 특징을 가지고 있는 세 지역을 대상 지역으로 삼았다. 세 지역 모두 지하철 5호선이 자나는 복선 터널 구간으로, 모두 정거장에서 상당히 떨어진 지역이어서 지하철이 최고 속도로 달리는 구간이라고 생각되는 지점을 대상 지역으로 선정하였다. 대상 지역-I은 지하 터널 중앙에서 30-40m 떨어진 곳에 13층 건물이 있고 터널 깊이는 21m이며 지층의 구조는 풍화암/ 충적토/ 매립토로 되어있고, 대상 지역-II는 지하 터널 중앙 바로 위에 건물이 있는 지역으로서 터널의 깊이는 13.23m이고 지층의 구조는 연암/ 풍화암/ 풍화토/ 매립토로 되어있다. 대상 지역-II는 지하 터널 중앙 바로 위에 건물이 놓여진 지역으로서 터널의 깊이는 13.23m이고 지층의 구조는 연암/ 풍화암/ 풍화토/ 매립토로 되어있으며, 대상 지역-III은 터널의 깊이가 17m로 지층의 구조는 경암/ 연암/ 풍화암/ 충적토로 되어있다. <Fig. 4-1>은 대상 지역-I을, <Fig. 4-2>는 대상 지역-II를, <Fig. 4-3>은 대상 지역-III의 도면 및 측정 위치 그리고 주상도를 나타낸다.



<Fig. 4-1> Site-I



<Fig. 4-2> Site-II

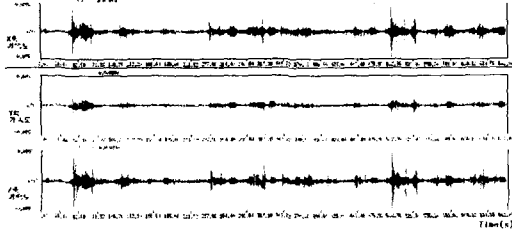


<Fig. 4-3> Site-III

측정 위치는 거리별로 터널 중앙의 상부 지역을 기준으로 10m 간격으로 지반 진동을 측정하였다. 측정기기로는 3축 지반진동계(VM-52A, RION)를 사용하였고 DAT(SONY)에 녹음하여 CADA-X(주파수 분석 및 계측장비, LMS) 장비로 시간 이력(time history) 및 주파수 분석(frequency spectrum)을 수행했다.

#### 4.1 측정결과

선정된 3곳의 대상 지역에서 각 지점별로 10-20분 동안의 가속도를 측정하였으며 <Fig. 4-4>는 지반 진동계의 X, Y, Z축의 가속도 응답의 대표적인 시간 이력(time history)을 나타내고 있다. X축은 지하철의 진행 방향, Y축은 진행 방향과 수직 방향, 그리고 Z축은 지표면과 수직 방향의 가속도 성분을 말한다.



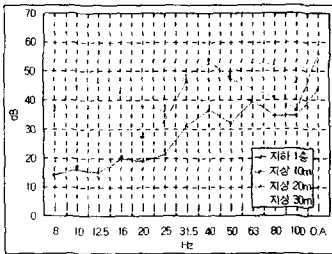
<Fig. 4-4> Time histories in X,Y and Z directions



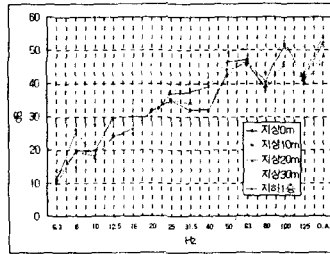
<Fig. 4-5> Time history of measured data

위의 그림에서 보는 바와 같이 근거리에서 측정된 결과, X축과 Z축의 가속도 레벨이나 시간차가 거의 나타나지 않아 압축파나 전단파 혹은 표면파의 구분은 어려운 것으로 보인다. <Fig. 4-5>는 측정된 가속도의 대표적인 시간이력(time history)를 나타내고 있으며, 측정 결과는 화살표 표시 구간의 진동의 수직 성분(Z축)을 진동의 실효치(RMS value)로 나타낸 것으로 모두 1/3옥타브 밴드의 가속도 레벨로서 나타내었다.

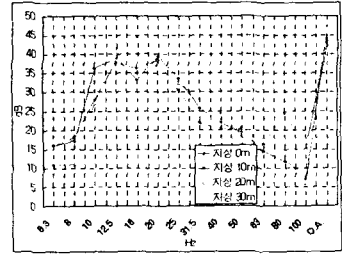
대상 지역-I에서는 건물의 지하 1층, 터널 중앙의 지상에서 10m, 20m, 30m 지점에서 측정하였으며, 대상 지역-II는 터널 중앙의 지상으로부터 0m, 10m, 20m, 30m 지점, 그리고 체육관의 지하 1층 바닥에서 측정하였고, 대상 지역-III은 건물이 없는 지역으로서 터널 중앙의 지상으로부터 0m, 10m, 20m, 30m 지점에서 측정하였다. <Fig. 4-6>, <Fig. 4-7>, <Fig. 4-8>는 각각의 주파수 분석 결과를 나타내고 있다.



<Fig. 4-6> Acceleration level for Site-I



<Fig. 4-7> Acceleration level for Site-II

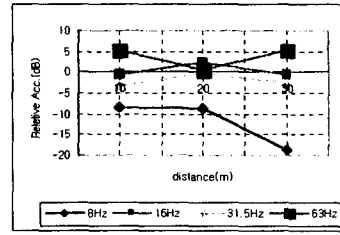
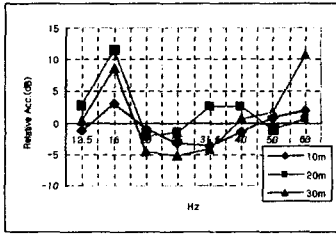


<Fig. 4-8> Acceleration level for Site-III  
(third octave.ref.=10-5m/s<sup>2</sup>)

대상 지역-I에서는 40-50Hz 부근에서 중심 주파수를 이루고 있고, 대상 지역-II에서는 50-80Hz 와 100-125Hz 에서 그리고 대상 지역-III에서는 12.5-25Hz 에서 중심 주파수를 이루고 있었다. 특이한 점은 측정 지역 모두 지상 20m 지점에서의 가속도 레벨이 가장 높게 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유 중 하나는 터널이 완충 지역을 형성해 그 바로 위 상부 지역의 영향을 감소 시켰다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 기존 예측 모델 중 Tokita의 모델<sup>2)</sup>에서도 언급하고 있는데 즉, 최대 지반 진동은 터널 중앙에서 약 15-30m 지점에서 발생할 것으로 예측하였다.

세 지역에서의 터널의 형태나 진동원이 같음에도 불구하고 서로 다른 중심주파수를 나타내는 것은 주파수에 따른 감쇠경향이 지반의 성질에 영향을 받는다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

특정 이론<sup>3)</sup>에 따르면 거리가 멀어짐에 따라 고주파수로 갈수록 그 감쇠정도가 커지는 것으로 알려져 있다. 대상 지역-III의 근접장 측정결과를 토대로 주파수별 감쇠경향을 살펴보면 <Fig. 4-9>와 <Fig. 4-10>에서 알 수 있듯이 거리별이나 주파수별로 일정한 감쇠 경향을 나타내지 않고 매우 불규칙한 경향을 나타냈다.



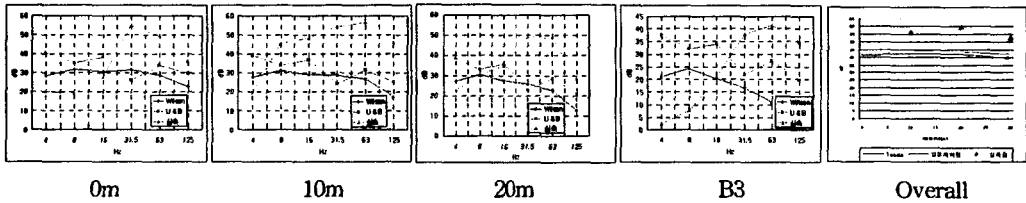
<Fig. 4-9> Vibration attenuation due to propagation through the ground <Fig. 4-10> Vibration attenuation due to propagation through the ground

따라서 이러한 근접장에서의 주파수별 감쇠 경향을 하나의 예측식으로 표현하기란 쉽지 않을 것으로 판단된다.

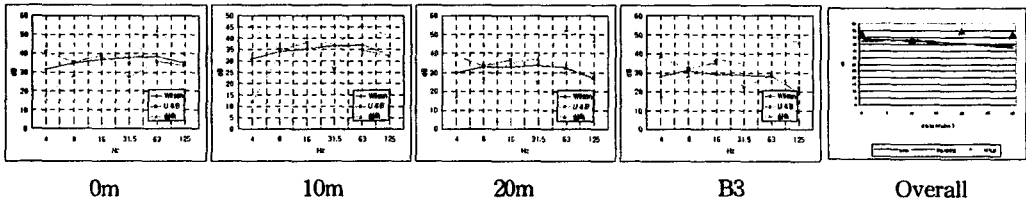
### 5. 기존 예측식의 적용

지반 진동 예측을 위해 기존에 사용되고 있는 여러 예측 모델들을 대상 지역에 적용해 보았다.

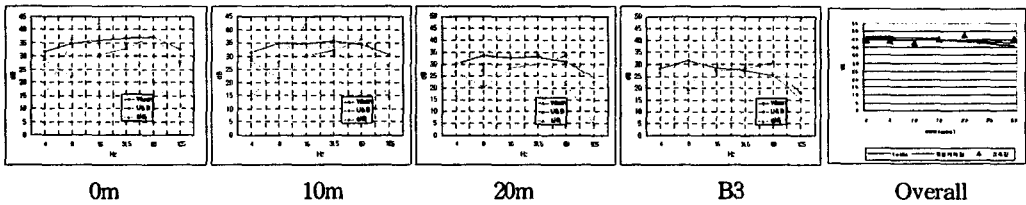
대상 지역-I, 대상 지역-II, 대상 지역-III에 대한 측정 지점별 실제 측정된 값과 Wilson과 Ungar & Bender 모델 식에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수 별로(1/1옥타브) 나타내었고, Tokita 모델과 일본 지하철 모델로 예측된 overall 레벨의 거리별 감쇠 경향과 측정값을 비교하여 <Fig. 5-1>, <Fig. 5-2>, <Fig. 5-3>에 나타내었다.



<Fig. 5-1> Predicted and measured data(Site-I)



<Fig. 5-2> Predicted and measured data(Site-II)

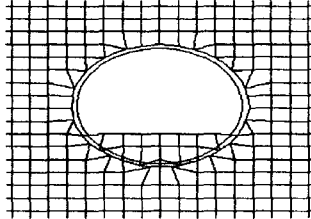


<Fig. 5-3> Predicted and measured data(Site-III)

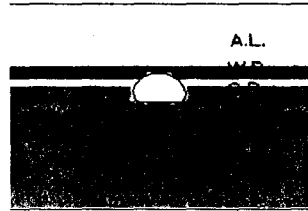
실제로 가장 높은 가속도 레벨을 갖는 20m 지점에서 15dB 이상 측정값보다 낮게 평가되었다. Tokita 모델의 경우 20m 지점에서의 값이 가장 크게 예측되었지만 그 값이 실측값과 큰 차이를 보였다.

## 6. 수치해석 방법의 적용

지반 진동의 예측을 위한 수치 해석의 방법을 적용하여 각 대상 지역의 측정지점 별로 가속도 응답을 계산하였다. 수치 해석을 수행하기 위하여 상용 프로그램인 FLAC을 사용하였으며 진동의 최대값(peak level)과 측정값을 비교하였다. FLAC은 2-dimension explicit differential method를 사용한 수치 해석 프로그램으로서 격자로 짜여진 element 와 zone으로 구성된 물질의 거동의 해석을 수행한다.<sup>7)</sup> <Fig. 6-1>은 대상 지역을 유한 요소로써 모델링한 모습이며 <Fig. 6-2>는 지층의 구조를 나타내고 있다.



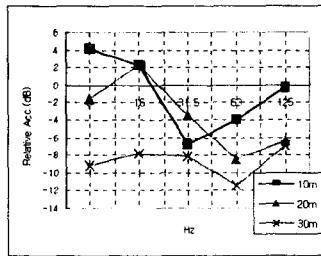
<Fig. 6-1> Tunnel wall and bottom



<Fig. 6-2> Properties of model

지반의 모델링을 위한 경계 조건으로는 지반의 표면을 fixed condition으로 하였고 옆면을 free condition으로 하여 반 무한 탄성체로 모델링하였다. 또한 각 지반의 성질을 층마다 다르게 적용하였다.

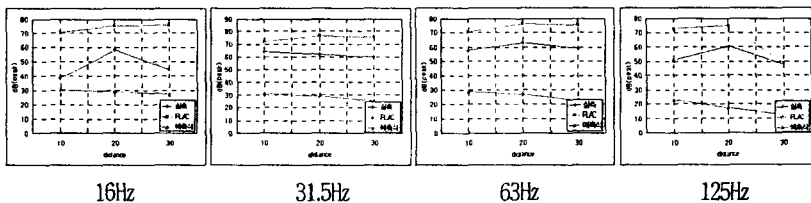
본 논문에서 선정된 대상 지역은 모두 지하철 5호선이 지나가는 구간으로서 모두 같은 진동원으로 가정하여 모델링을 수행하였다. 여기서 사용된 진동원으로는 기존 지하철 5호선의 터널 바닥 및 외벽에서 측정된 가속도 응답<sup>5)</sup>을 사용하였다. 각 측정지점 별로 가속도 응답을 구하여 그 최대값(peak level)을 구하고 실측값 및 기존 예측식에 의한 값들과 비교하였다. 먼저 거리별로 주파수에 따른 감쇠 경향을 수치 해석을 통하여 예측된 결과를 이용하여 <Fig. 6-3>에 나타내었다.



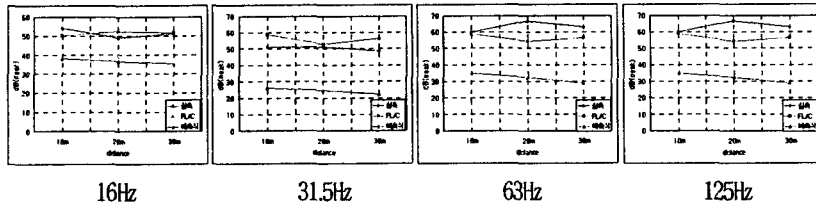
<Fig. 6-3> Vibration attenuation(FLAC)

실제 측정값을 이용하여 진동의 감쇠 경향을 나타내는 <Fig. 4-9>의 그래프와 비교해 보면 16Hz에서 상대적으로 높은 값을 나타내는 것이나 63Hz 보다 높은 주파수에서 다시 높은 값을 나타내는 것을 볼 때 수치해석을 이용한 방법을 통해 얻어진 값이 실제 근거리에서의 진동의 감쇠경향과 비슷한 형태로 나타났다. 물론 <Fig. 4-9>는 1/3 옥타브 밴드로 나타낸 것이고 <Fig. 6-3>는 1/1 옥타브 밴드로 나타낸 것이어서 절대적인 비교는 어렵다.

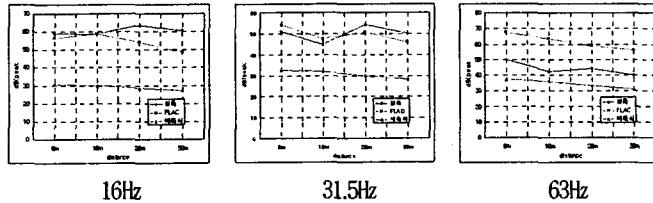
대상 지역-I, 대상 지역-II, 대상 지역-III에 대한 값을 <Fig. 6-4>, <Fig. 6-5>, <Fig. 6-6>에서 수치 해석을 통해 예측된 값과 측정값을 비교하였다.



<Fig. 6-4> Predicted(FLAC) and measured data(Site-1)



<Fig. 6-5> Predicted(FLAC) and measured data(Site-II)



<Fig. 6-6> Predicted(FLAC) and measured data(Site-III)

대상 지역-I의 경우 터널의 깊이가 다른 지역과 비교할 때 가장 깊은 곳임에도 불구하고 측정 결과와 마찬가지로 가장 높은 가속도 레벨로 나타났다. 또한 주파수별로 거리에 비례하여 감소하는 것이 아니라 어떤 주파수에서는 10m 지점 혹은 20m 지점에서의 값이 0m 지점에서의 값보다 높게 예측되기도 하였다. 따라서 수치 해석방법을 사용 할 경우, 대상 지역에 따른 지반의 특성을 반영할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 가장 환경상의 피해가 클 것으로 예상되는 지점을 예측하는 데에도 효과적인 것으로 나타났다.

## 7. 결론

특정 지역의 지반 진동을 예측하기 위해 기존에 제안되었던 예측식들을 그대로 적용하기에는 다음과 같은 어려움이 있다. 전체적으로 중심 주파수에서의 진동 레벨이 실측값보다 20dB 가량 낮게 평가하였다. 또한 거리별 감쇠가 주가 되어 가장 영향이 크다고 판단되는 거리에서의 영향을 예측하기 어려웠다. 측정 결과 근접장에서의 진동의 주파수별 감쇠 경향이 거리의 증감에 따라 단순 변화를 하지 않음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 주파수별로 측정 및 예측을 수행함으로써 근거리에서 좀 더 자세한 주파수별 감쇠 경향을 살펴보았다. 그 결과 수평거리 20m 지점에서의 진동 레벨이 가장 크게 나타나 환경에의 영향 또한 가장 크게 나타날 것으로 예상된다. 또한 수치 해석적 방법을 적용하여 진동 레벨의 최대값을 예측함으로써 지하철의 건설이나 도시 계획에 있어서 사전에 환경상의 영향을 판단하는데 있어서 좋은 자료가 될 수 있다고 본다. 또한 대부분의 경우 실측값과 기존 예측식에 의한 값, 그리고 수치 해석을 적용한 예측값을 서로 비교하였을 때 측정값이 수치 해석을 적용하여 예측한 값과 비교적 가깝게 기존 예측식에 의한 값 사이에 위치하여 두 가지 예측의 방법을 상호 보완한다면 지반 진동의 예측에 좀 더 좋은 결과를 줄 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. James T. Nelson, Wilson, (1997), "Report 23, Wheel/Rail Noise Control Manual", Ihrig & Associate, Inc.
2. Wilson, Ihrig & Associates, (1983), "State-of-the-Art Review: prediction and control of ground-borne noise and vibration from rail transit trains"
3. L. G. Kurzweil, (1973), "Ground-borne noise and vibration from underground rail systems", Journal of Sound and Vibration, 66(3), pp. 363-370.
4. 서울특별시 지하철 건설본부, 과업수행보고서, (1996.5), "사업명: 지하철 5, 7, 8호선 궤도공사 시공감리(추가사업명: 지하철 소음·진동 저감대책(2차))"
5. 서울 시립대학교 도시과학연구원, (2001.3), "지하철 9호선의 국회부지 통과구간 소음·진동 영향 예측 및 평가 보고서"
6. Ahid D. Nashif, David I. G. Jones, John P. Henderson, (1985), "Vibration Damping", John Wiley & Sons, Inc.
7. User's Manual, (1995), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3, Itasca Consulting Group, Inc.