

## 지하철에 의한 지반진동 예측에 관한 연구

### Study on the Prediction of Ground-borne Vibration Induced by Subway

이 재 원<sup>†</sup> · 장 서 일\* · 김 득 성\*

Jaewon Lee, Seo Il Chang and Deuksung Kim

(2002년 8월 5일 접수 ; 2004년 2월 23일 심사완료)

**Key Words** : Ground-borne Vibration(지반 진동), Prediction Model(예측 모델), Numerical Method(수치 해석적 방법)

#### ABSTRACT

Grond-borne noise and vibration generated by underground transit system has been recognized as an important environmental problem. This study reviews several of the procedures that have been used to predict ground-borne 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. There are some drawbacks to apply these prediction models to selected sites because most of the existing prediction models are primarily based on empirical data and all of them lack of analytical models for the mechanism of ground-borne vibration generation, radiation, and propagation. In this study a numerical method, which is based on explicit differential method, is used to compensate for the shortcomings of 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. 서 론

도시화와 인구집중현상으로 지하 공간의 활용이 확대되면서 이미 많은 지하철이 건설되어 지하공간을 통과하고 있으며 앞으로도 지하 공간의 활용은 계속 될 전망이다. 궤도이동차량에 의한 진동 및 소음은 오래 전부터 환경상의 공해문제로 인식되어 왔다. 그러나 지반에 의해 전달되는 진동은 최근에 들어 주목을 받기 시작했으며 선진외국의 경우 많은 연구가 이루어지고 있다. 지하철과 같은 궤도이동차량에 의한 지반 진동은 차륜과 레일의 상호작용에 의해 발생하

며, 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>(2,3,4)</sup> 그리고 전달 매질로서 작용하는 지반의 성질이 다양하여 일반적인 예측식을 만들거나 외국의 예측식을 그대로 우리나라에 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 두 지역을 대상으로 거리별 지반 진동을 측정하여 그 특징을 살펴보고 기존의 예측식과 또한 수치 해석적인 방법을 통하여 예

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 국립환경연구원  
E-mail : jlee@me.go.kr  
Tel : (032) 560-7391, Fax : (032) 560-7387  
<sup>\*</sup> 정희원, 서울시립대학교 환경공학부

측된 값을 측정값과 비교함으로써 근접장에서의 지반 진동의 주파수별 감쇠 특성 및 예측의 가능성에 대하여 살펴보았다.

## 2. 이론적 배경

지하철과 같은 궤도이동차량에 의한 지반 진동은 차륜과 레일의 상호작용에 의해 발생하며 그 영향인 자로는 차륜과 레일의 굴곡도(roughness), 궤도지지 시스템, 표면의 접촉 강성의 국부적 변화등을 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 전달된다. 지반으로 방사되는 진동 에너지는 압축파, 전단파 그리고 표면파의 형태<sup>(5)</sup>로 건물의 벽이나 기초에 직접적으로 전달되거나 소음의 형태로 환경상의 영향을 야기시킨다. 일반적으로 여러 이론이 설명하는 바와는 지반 진동레벨이 거리가 멀어짐에 따라 감소한다고 한다. 그러나 근접장에서의 좀 더 자세한 감쇠 경향의 연구가 필요하다고 생각된다.

## 3. 연구 방법

서로 다른 지반의 특성을 지닌 두 곳의 대상 지역을 선정하였고 각각의 지역에 대한 지반 조사자료를 통하여 전달 매질의 특성을 파악하였다. 각 지역에서 터널의 중앙을 중심으로 지표면위의 거리별 진동 응답을 측정하였다. 그 후에 기존에 사용되었던 여러 예측 식들을 이용하여 대상 지역에서의 예측된 값을 측정값과 비교 분석하여 보았다. 사용한 기존 식들을 살펴보면 주파수별로(1/1옥타브밴드) 그 진동 레벨을 예측하는 Wilson의 식, Ungar & Bender의 식, 반면에 overall 진동 레벨을 예측하는 Tokita의 식, 그리고 일본 지하철 진동 예측식<sup>(2)</sup>을 사용하였다. 그리고 마지막으로 수치 해석 방법의 적용, 즉 상용 프로그램인 FLAC을 사용하여 대상 지역을 유한 요소로써 모델링<sup>(9,10)</sup>하고 진동원으로부터 전달 매질인 지반을 통하여 지표면까지 전달되는 경로에 대한 해석을 수행하여 대상 지역에서의 여러 가속도 응답을 구하였다. 이렇게 수치 해석적인 방법을 이용하여 구한 가속도 응답들을 기존 예측 식들을 이용하여 구한

예측값 및 측정값과 비교 검토하고 지반 진동 영향의 예측 가능성을 제시하였다.

## 4. 대상 지역의 선정 및 실측

본 연구에서는 서로 다른 지반의 특징을 가지고 있는 두 지역을 대상 지역으로 삼았다. 두 지역은 모두 복선 터널구간이며 지하철 5호선이 지나가는 구간이며, 정거장에서 상당히 떨어진 지역으로 지하철이 최고 속도로 달리는 구간이라고 가정하였다. 대상 지역-I은 지면에서 터널 상부의 깊이가 21 m이며 지층의 구조는 풍화암/ 충적토/ 매립토로 되어있다. 대상 지역-II는 지면에서 터널 상부의 깊이가 17 m이며 지층의 구조는 경암/ 연암/ 풍화암/ 충적토로 되어있다. Fig. 1, 2는 각 대상 지역-I, II의 주상도와 측정 위치를 나타낸다.

측정 위치는 거리별로 터널 중앙의 상부 지역을 기준으로 10 m 간격으로 지표면의 지반 진동을 측정하였다. 측정기기로는 VM-52A(지반진동측정장치,

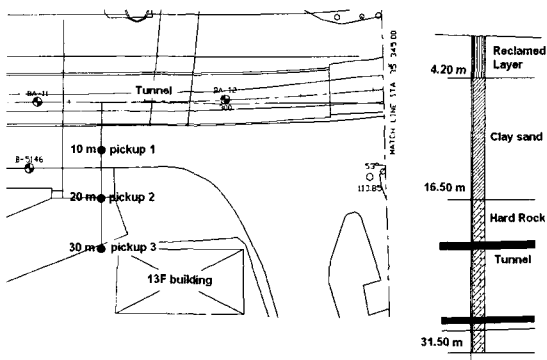


Fig. 1 Site-I

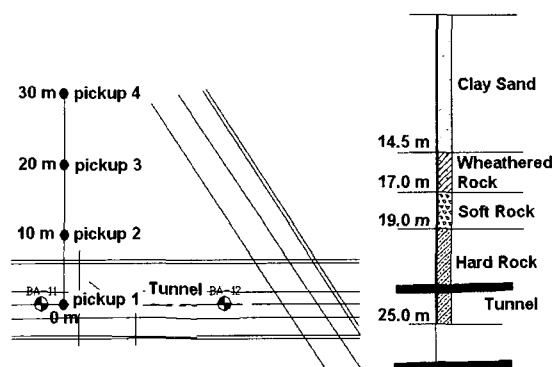


Fig. 2 Site-II

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 수행하였다.

**4.1 측정 결과**

선정된 2곳의 대상 지역에서 각 지점별로 10~20분 동안의 가속도를 측정하였으며 125 Hz까지의 가속도 응답을 측정, 분석하였다. Fig. 3는 지반 진동계의 X, Y, Z축의 가속도 응답의 대표적인 시간 이력(time history)을 나타내고 있다. X축은 지하철의 진행 방향, Y축은 지하철 진행 방향과 수직 방향(수평 진동), 그리고 Z축은 지표면과 수직 방향(상하 진동)의 가속도 성분을 말한다.

위의 그림에서 X축과 Y축에 비해 Z축의 가속도레벨이 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. Fig. 4는 측정된 Z축 가속도의 대표적인 시간이력(time

history)를 나타낸다.

Fig. 4에서 화살표로 표시된 부분, 즉 가속도 값이 서서히 증가했다가 다시 감소하는 부분을 터널 내부로 지하철이 지나가는 구간이라고 생각 할 수 있다. 측정 결과는 그 구간의 진동의 수직 성분(Z축)을 진동의 실효치(RMS value)로 나타낸 것이며 모두 1/3 옥타브 밴드의 가속도 레벨로서 나타내었다. 대상 지역-I 에서는 터널 중앙의 지상 지면에서 거리별(10 m, 20 m, 30 m)로 측정하여 Fig. 5에 주파수 분석 결과를 나타내었다.

대상 지역-I 에서는 31.5~40 Hz부근에서 중심 주파수를 이루고 있고 특이한 점은 지상 20 m지점에서의 가속도 레벨이 가장 높게 나타났다. 대상 지역-II 는 건물이 없는 지역으로서 터널중앙의 지상으로부터 0, 10, 20, 30 m지점에서 측정하였다. 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

대상 지역-II에서는 12.5~25 Hz에서 중심 주파수

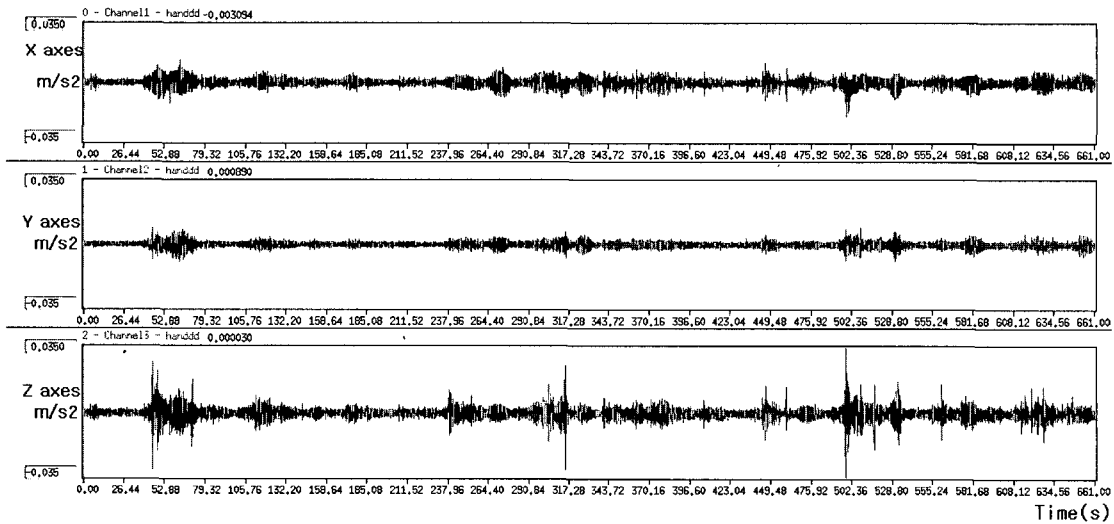


Fig. 3 Time histories in X, Y, and Z directions

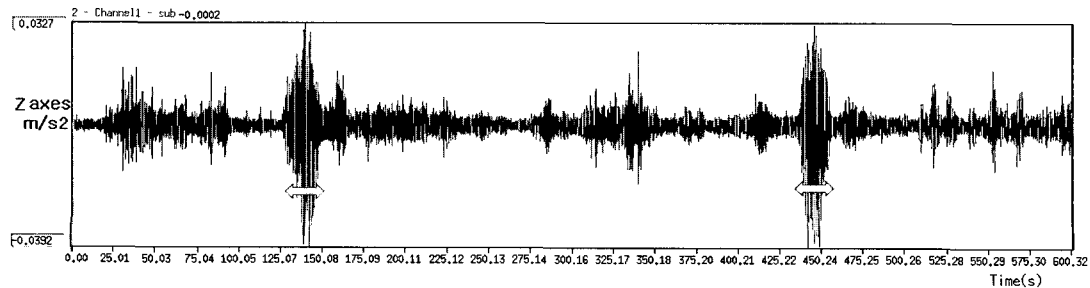


Fig. 4 Time history of measured data

를 이루며 다른 지역과 마찬가지로 지상 20 m 에서의 가속도 레벨이 가장 높게 나타났다. 두 지역에서의 터널의 형태나 진동원이 같음에도 불구하고 서로 다른 중심주파수를 나타내는 것은 주파수에 따른 감쇠경향이 지반의 성질에 영향을 받는다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 전체적으로 분석결과를 살펴보면 먼저 터널의 중심부에서 가장 가까운 거리에서의 가속도 값보다 20 m 지점에서의 값이 더 높게 나타났

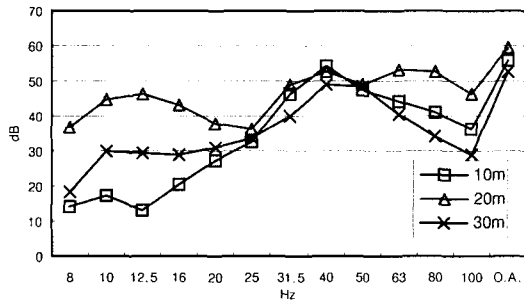


Fig. 5 Acceleration level for site-I (third octave, ref. acc. =  $10^{-5} \text{m/s}^2$ )

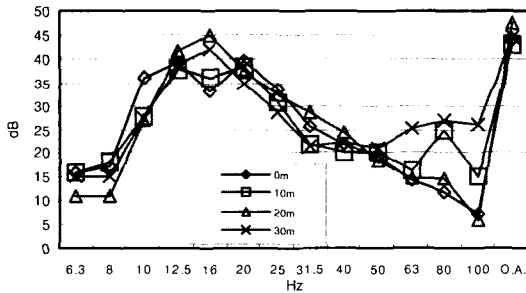


Fig. 6 Acceleration level for site-III (third octave, ref. acc. =  $10^{-5} \text{m/s}^2$ )

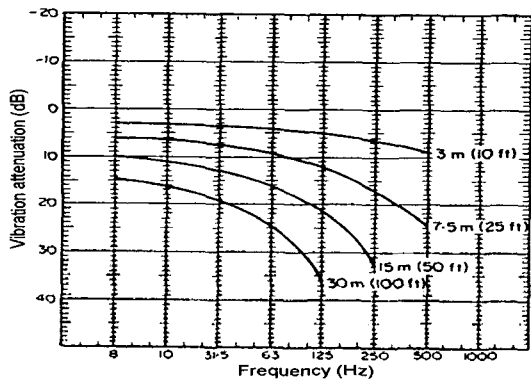


Fig. 7 Vibration attenuation due to propagation through the ground<sup>(4)</sup>

다. 이러한 결과가 나타난 이유 중 하나는 터널이 완충 지역을 형성해 그 바로 위 상부 지역의 영향을 감소시켰다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 기존 예측 모델 중 Tokita의 모델<sup>(2)</sup>에서도 언급하고 있는데, 최대 지반 진동은 터널 중앙에서 약 15~30 m 지점에서 발생할 것으로 예측하였다. 이러한 결과는 실제로 가장 환경상의 영향이 큰 지점을 예측하는데 있어서 상당히 중요한 사실이라고 할 수 있다. 그리고 두 곳의 가속도 레벨을 비교했을 때 대상 지역-I의 터널 깊이가 더 깊음에도 불구하고 그 가속도 값은 더 높게 나타났다. 이것은 진동의 전달이 반드시 거리에 비례하여 감쇠하는 것은 아니며 또한 주파수 별로 서로 다른 감쇠경향을 나타내고 있다. 특정 이론<sup>(4)</sup>에 따르면 Fig. 7에서와 같이 거리가 멀어짐에 따라 고주파수로 갈수록 그 감쇠정도가 커지는 것으로 알려져 있다.

측정 결과 중 대상 지역-II에서의 결과를 토대로 근접장에서의 주파수 별 감쇠경향을 살펴보았다. 여기서 근접장은 거리가 멀어짐에 따라 진동 감쇠가 일정하게 감쇠하지 않는 구간을 말한다. 하지만 주파수

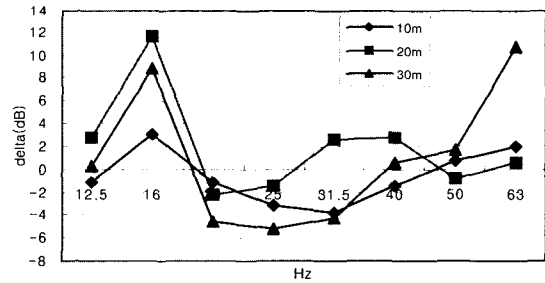


Fig. 8 Vibration attenuation due to propagation through the ground

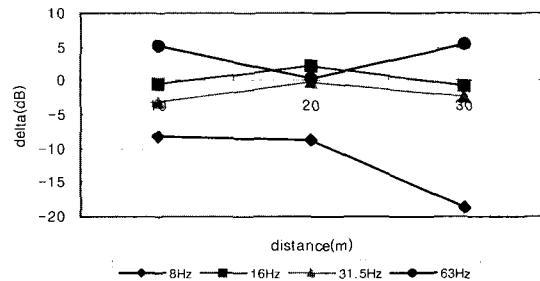


Fig. 9 Vibration attenuation due to the propagation through the ground

별로 그 거리가 일정하지 않아 정확히 그 거리를 정의하기 어렵다. Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 근접한 지역일 경우 거리나 주파수에 따라 일정한 감쇠 경향을 나타내지 않고 매우 불규칙한 경향을 나타냈다.

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

### 5. 기존 예측식의 적용

지반 진동의 예측을 위하여 기존에 사용되고 있는 여러 예측 모델들을 선정된 대상 지역의 측정 지점별로 적용해 보았다. 기존의 예측 모델은 크게 주파수별 예측 모델인 Wilson의 모델, Ungar & Bender의 모델, 그리고 overall 레벨을 예측하는 Tokita 모델과 일본 지하철의 모델을 사용하였다.<sup>(2)</sup> 위의 예측 모델들은 대부분 측정 data를 기준으로한 경험식이며 어떤 기준 조건에서의 기준 가속도 data를 선로 조건, 터널 종류, 차량 속도, 거리별 보정을 통하여 특정 대상 지역의 가속도 레벨을 예측하게 된다.

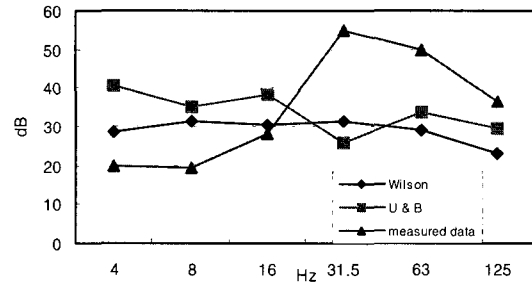
대상 지역-I 에서는 Fig. 10에 측정 지점별로 각각 실제 측정된 값과 Wilson과 Ungar & Bender의 모델에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수 별로(1/1 옥타브) 나타내었다.

전체적으로 중심 주파수라고 여겨지는 31.5 Hz나 63 Hz에서 측정값보다 20 dB 이상 낮게 평가되었다. Fig. 10에서는 Tokita 모델과 일본 지하철 모델로 예측한 가속도의 overall 레벨의 거리별 감쇠 경향과 측정 값을 비교하였다.

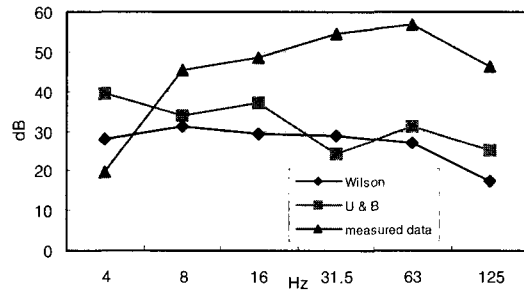
실제로 가장 높은 가속도 레벨을 갖는 20 m 지점에서 15 dB 이상 측정값보다 낮게 평가되었다. Tokita 모델의 경우 20 m 지점에서의 값이 가장 크게 예측되었지만 그 값이 실측값과 큰 차이를 보였다.

대상 지역-II의 경우 Fig. 12에 측정 지점별로 각각 실제 측정된 값과 Wilson과 Ungar & Bender의 모델에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수 별로(1/1 옥타브) 나타내었다.

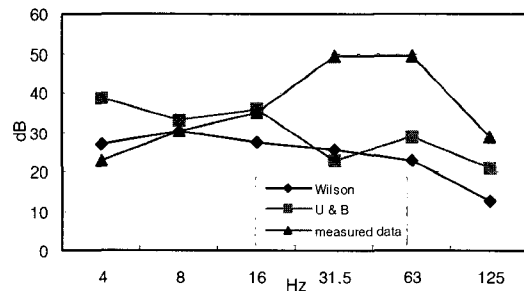
중심 주파수인 16 Hz에서는 약 20 dB 가량 실측값보다 낮게 평가되었다. Fig. 13은 Tokita 모델과 일본 지하철 모델로 예측한 가속도의 overall 레벨의 거



(a) 0 m



(b) 10 m



(c) 20 m

Fig. 10 Predicted and measured data(site-I, using the existing prediction model)

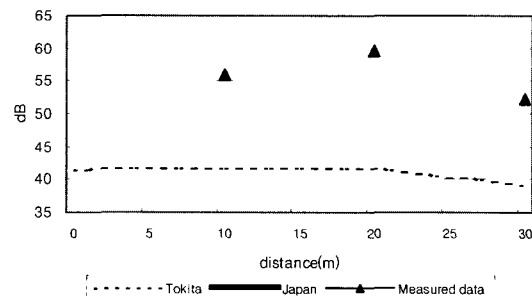
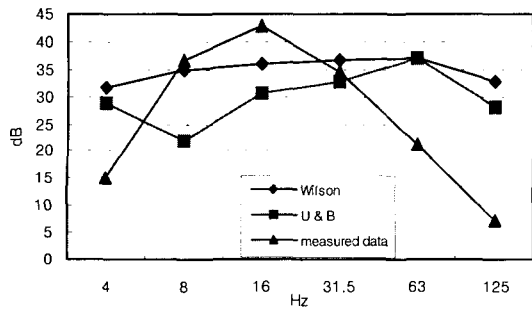
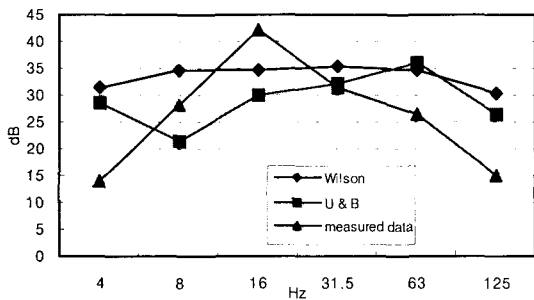


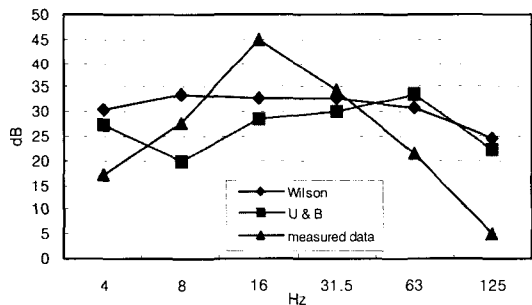
Fig. 11 Predicted and measured data(site-I, using the existing prediction model)



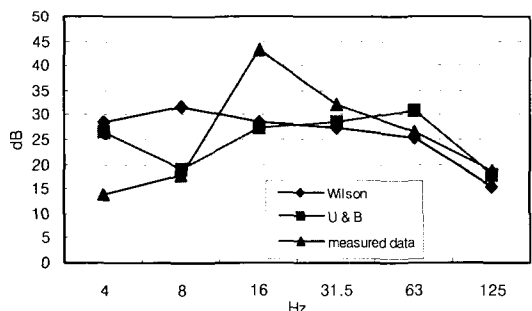
(a) 0 m



(b) 10 m



(c) 20 m



(d) 30 m

Fig. 12 Predicted and measured data(site-II, using the existing prediction model)

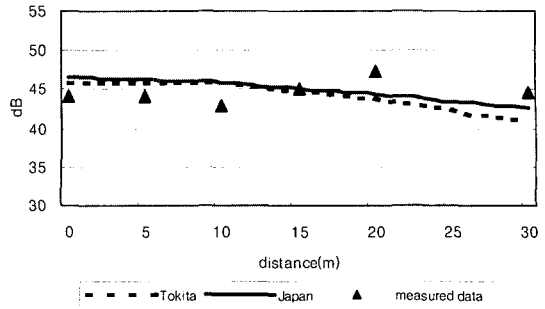


Fig. 13 Predicted and measured data(site-II, using the existing prediction model)

리별 감쇠 경향과 측정값을 비교하였다.

위의 결과들을 토대로 기존 예측식을 현장에 적용할 때 중심주파수에서의 진동레벨을 20 dB 정도 낮게 예측되었다. 또한 Fig. 9에서 알 수 있듯이 주파수별로 거리가 멀어짐에 따라 감쇠경향이 다르게 측정된 것에 반해 기존의 예측식은 그러한 것을 반영하지 못한다. 그리고 환경상의 영향이 가장 큰 터널 상부 지면 20 m 떨어진 지점에서의 값의 차이가 가장 크게 나타나는 문제점을 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 측정값과 비교하였다. FLAC은 2-dimension explicit differential method를 사용한 수치 해석 프

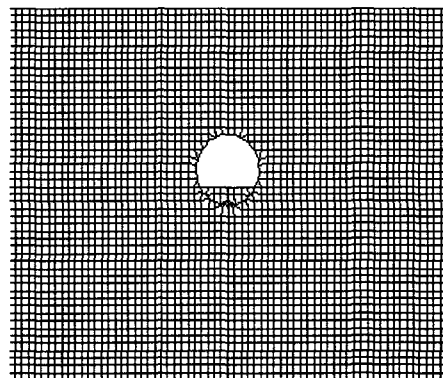


Fig. 14 Tunnel wall and bottom

로그맵으로서 격자로 짜여진 element 와 zone으로 구성된 물질의 거동의 해석을 수행한다.<sup>(9,10)</sup> Fig. 14 는 대상 지역을 유한 요소로써 모델링한 모습이며 Fig. 15는 지층의 구조를 나타내고 있다.

지반의 모델링을 위한 경계 조건으로는 지반의 표면을 fixed condition으로 하였고 옆면을 free condition으로 하여 반 무한 탄성체로 모델링하였다.

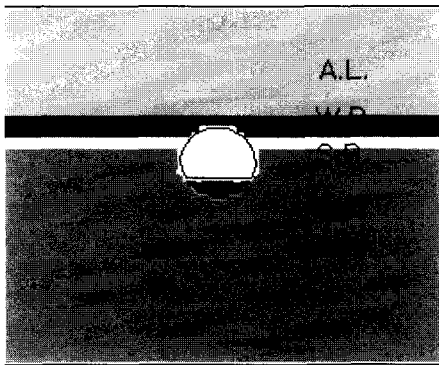


Fig. 15 Properties of model(site-I)

Table 1 Properties of tunnel bottom

Classification	Bulk modulus (N/m <sup>2</sup> )	Shear modulus (N/m <sup>2</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Tunnel bottom	1.09E10	8.18E09	2,600

Table 2 Properties of tunnel wall

Classification	Area (m <sup>2</sup> )	Young's modulus (N/m <sup>2</sup> )	Moment of inertia(kg*m <sup>3</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Tunnel wall	0.5	2.55E10	0.010417	2,600

Table 3 Soil properties applied to FLAC

	Bulk modulus (N/m <sup>2</sup> )	Shear modulus (N/m <sup>2</sup> )	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Friction angle	Cohesion (Pa)
Hard rock	4.9E10	2.14E10	2,200	40	98,100
Sandy gravel	1.13E09	4.35E08	2,000	38	0
Silty sand	3.04E08	7.98E07	1,900	36	0
Clay sand	1.50E08	4.26E07	1,800	28	9,810
Sand	3.45E08	9.81E07	1,900	34	0
Reclaimed layer	2.65E08	8.19E07	1,800	28	0

터널 바닥과 벽면의 진동이 직접적으로 지반에 영향을 주기 때문에 터널 벽의 두께나 물리적 성질이 또한 중요한 변수로 작용할 수 있다. Table 1은 본 논문에서 사용된 터널 바닥의 물리적 성질을 나타내며, Table 2는 터널 벽의 물리적 성질을 나타낸다.<sup>(7,9,10)</sup>

또한 각 지반의 성질이 진동의 전달에 있어서 큰 영향을 미칠것으로 생각된다. Table 3에 본 논문에서 사용된 지반의 성질<sup>(9,10,11)</sup>을 나타내었다.

본 논문에서 선정된 대상 지역은 모두 지하철 5호

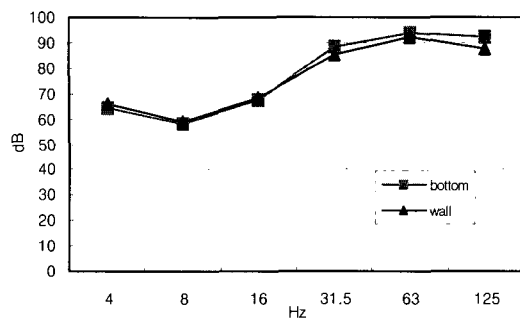


Fig. 16 Acceleration level on tunnel wall and bottom(ref. acc. = 10<sup>-5</sup>m/s<sup>2</sup>)

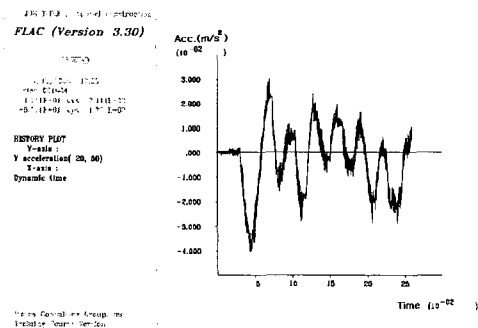


Fig. 17 History plot of predicted data(FLAC)

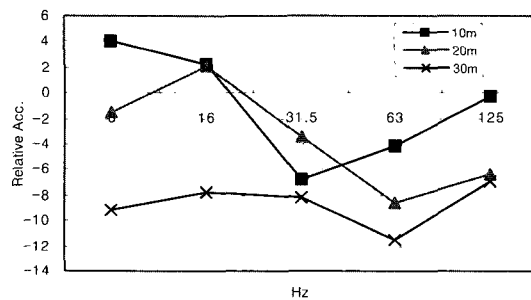
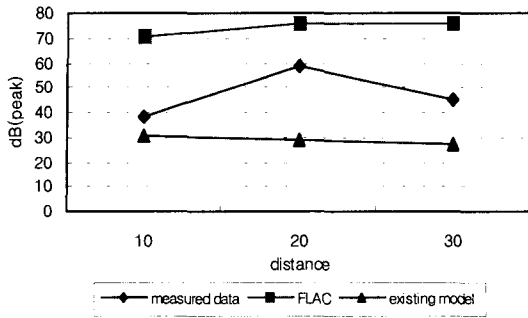
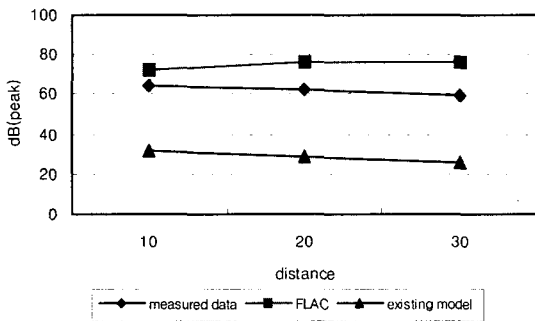


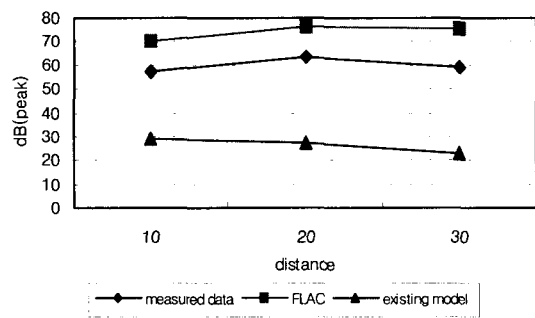
Fig. 18 Vibration attenuation(using FLAC)



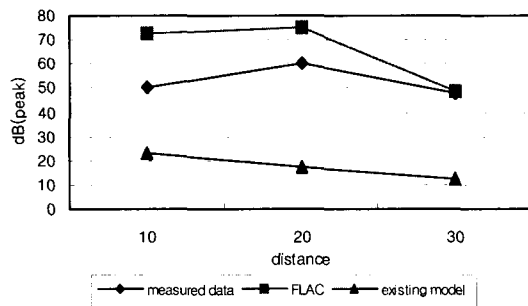
(a) 16 Hz



(b) 31.5 Hz



(c) 63 Hz

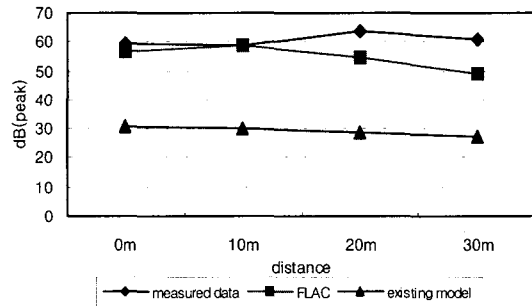


(d) 125 Hz

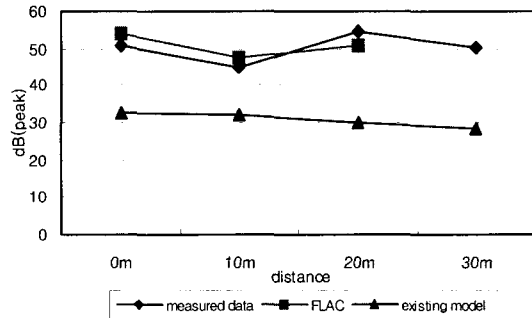
선이 지나가는 구간으로서 모두 같은 진동원으로 가정하여 모델링을 수행하였다. 여기서 사용된 진동원으로는 기존 지하철 5호선의 터널 바닥 및 외벽에서 측정된 가속도 응답<sup>(7,12)</sup>을 사용하였다. Fig. 16은 진동원의 가속도 레벨을 나타낸다.

FLAC을 사용하여 계산된 가속도 응답의 지점별 data 중 대표적인 것을 Fig. 17에 나타내었다.

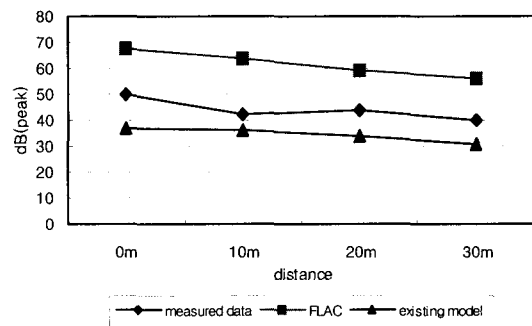
Fig. 17와 같이 수치 해석적인 방법을 적용하여 각 측정지점 별로 가속도 응답을 구하여 그 최대값(peak



(a) 16 Hz



(b) 31.5 Hz



(c) 63 Hz

Fig. 19 Predicted(using FLAC, the existing model and measured data(site-I))

Fig. 20 Predicted(using FLAC, the existing model and measured data(site-I))



level)을 구하고 실측값 그리고 기존 예측식을 사용한 예측값과 비교하였다. 먼저 거리별로 주파수에 따른 감쇠 경향을 수치 해석을 통하여 예측된 결과를 이용하여 Fig. 18에 나타내었다.

앞의 실제 측정값을 이용하여 진동의 감쇠 경향을 나타내는 Fig. 8의 그래프와 비교해 보면 16 Hz에서 상대적으로 높은 값을 나타내는 것이나 63 Hz 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. 8은 1/3 옥타브 밴드로 나타낸 것이고 Fig. 5는 1/1옥타브 밴드로 나타낸 것이어서 절대적인 비교는 어렵다.

Fig. 19에서 대상 지역-I 에서의 수치 해석을 통해 예측된 값과 측정값 그리고 기존 예측식을 이용하여 얻은 값을 비교하였다.

Fig. 20은 대상 지역-II 에서의 수치해석을 통해 예측된 값과 측정값 그리고 기존 예측식을 적용하여 얻은 값을 비교하였다.

전체적으로 결과를 살펴보면 대상 지역-I에서는 FLAC을 이용하여 계산한 예측값은 중심주파수인 31.5 Hz에서 가장 잘 맞는 결과를 나타냈고 주파수별 거리에 따른 감쇠경향이 측정값과 일치하는 경향을 나타냈다. 그러나 예측 오차에 대한 원인으로 수치해석에서 사용되는 지반의 성질을 직접 실측을 하지 못해 그 대표값을 사용한 것과, 2차원 모델링에 대한 한계를 생각해 볼 수 있겠다. 반면에 대상 지역-II에서는 실측을 통해 지반 성질을 조사하여 좀 더 좋은 예측 결과를 나타냈다. 중심 주파수인 16 Hz에서 가장 좋은 예측 결과를 보였다. 그리고 FALC을 통한 예측에서도 주파수 별로 거리에 따라 감쇠 경향이 다르게 나타나는 것을 예측할 수 있었다. 즉, 수치해석을 통하여 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

본 논문은 지반을 통하여 전달되는 지하철의 지반 진동을 수치해석방법을 사용하여 예측할 수 있는 가능성을 살펴보았다. 먼저 특정 지역의 지반 진동을

예측하기 위해 기존에 제안되었던 예측식들을 그대로 적용하기에는 다음과 같은 어려움이 있다. 전체적으로 중심 주파수에서의 진동 레벨이 실측값보다 20 dB 가량 낮게 평가되었다. 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 있었는데 본 연구에서는 사용한 수치 해석적인 방법을 통해서도 주파수별로 지반의 성질에 따라 그 감쇠 경향이 거리의 증감에 따라 다양하게 예측되었다. 즉, 주파수별 감쇠 경향은 지반의 성질에 크게 좌우되어 나타났다. 또한 터널 중앙 상부 지면에서 20 m 떨어진 지점에서의 진동 레벨이 가장 크게 나타나 환경에의 영향 또한 가장 크게 나타날 것으로 측정되었는데 수치 해석적 방법을 적용하여 진동 레벨의 최대값을 예측함으로써 그러한 영향을 고려할 수 있었다. 따라서 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 예측값과 비교적 가깝게 기존 예측식에 의한 값 사이에 위치하여 두 가지 예측의 방법을 상호 보완한다면 지반 진동의 예측에 좀 더 좋은 결과를 줄 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- (1) James T. Nelson, Wilson, 1997, Ihrig & Associate, Inc. Report 23, Wheel/Rail Noise Control Manual.
- (2) Wilson, 1983, Ihrig & Associates, State-of-the-Art Review: prediction and control of ground-borne noise and vibration from rail transit trains.
- (3) Gutowski, T. G. and Dym, C. L., 1976, "Propagation of ground vibration: A review", Journal of Sound and Vibration, Vol. 49, No. 2, p. 179~193.
- (4) Kurzweil, L. G., 1979, "Ground-borne noise and vibration from underground rail systems", Journal of Sound and Vibration, 66(3), p. 363~370.
- (5) Charles H. Dowding, 1996, Construction

Vibration, Prentice Hall.

(6) 서울특별시 지하철 건설본부, 1996. 5, 과업수행보고서, 사업명: 지하철 5, 7, 8호선 궤도공사 시공감리(추가사업명: 지하철 소음·진동 저감대책(2차)).

(7) 서울시립대학교 도시과학연구원 환경공학센터, 2001. 3, 지하철 9호선의 국회부지 통과구간 소음·진동 영향 예측 및 평가 보고서.

(8) Ahid D. Nashif, Dabid I. G. Jones, John P. Henderson, 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc.

(9) Itasca Consulting Group, Inc. Fast

Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3, Volume I : User's Manual

(10) Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.3, Volume III : User's Manual

(11) Braja M. Das, 1993, Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company.

(12) 서울특별시 지하철 건설본부, 1996. 4, 과업수행보고서(附錄)사업명: 지하철 5, 7, 8호선 궤도공사 시공감리(추가사업명: 지하철 소음·진동 저감대책(2차)).