

지하철에 의한 지반 진동 예측에 관한 연구

이재원*, 김득성*, 장서일**

Study for the prediction of ground-borne vibration induced by subway

Jae Won Lee , Deuk Sung Kim and Seo Il Chang

ABSTRACT

Subway train-induced ground-borne vibration is studied. Previously used vibration level prediction equations are reviewed. Measured vibration levels are compared with the predicted results and numerically computed results. The results show that vibration level does not decrease proportionally with the distance.

1. 서론

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 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 등을 들 수 있다.

특히 지반의 성질, 대차의 운동 특성, 궤도지지 시스템의 강성, 건물의 구조 등에 의해 영향을 받는다. 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 수치해석적 방법을 통하여 지반 진동에 대한 예측의 가능성을 제시하고 그 영향을 판단하는 근거로 삼고자 한다.

2. 연구 방법

우선 세 곳의 대상 지역을 선정하였고 각각의 지역에 대한 지반 조사자료를 통하여 전달 매질의 특성을 파악하였다. 각 지역에서 터널의 중앙을 중심으로 거리별로 진동

* 서울시립대 대학원 환경공학과

** 서울시립대 환경공학과

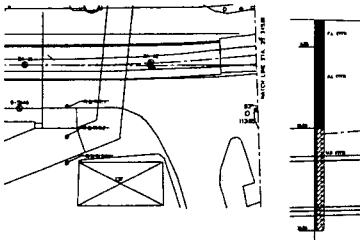
응답을 측정하였으며 건물에의 영향을 살펴보기 위하여 인접 건물의 지하에서도 측정을 수행하였다.

먼저 기존 예측 식들을 이용하여 대상 지역에서의 예측된 값들을 측정값과 비교 분석하여 보았다. 사용한 기존 식들을 살펴보면 다음과 같다. 주파수별(1/1옥타브밴드) 그 진동 레벨을 예측하는 ¹Wilson의 식, Ungar & Bender의 식, 반면에 O.A. 진동 레벨을 예측하는 Tokita의 식, 뉴욕 지하철 진동 예측 식, 그리고 일본 지하철 진동 예측 식을 사용하였다.

그리고 마지막으로 상용 프로그램인 FLAC을 사용하여 대상 지역을 유한 요소로써 모델링 하고 진동원으로부터 전달 매질인 지반을 통하여 지표면까지 전달되는 경로에 대한 해석을 수행하여 대상 지역에서의 여러 응답을 구하였다. 이렇게 구한 응답들을 기존 예측 식들 및 측정값과 비교 검토하고 지반 진동 영향의 예측 가능성을 제시하였다.

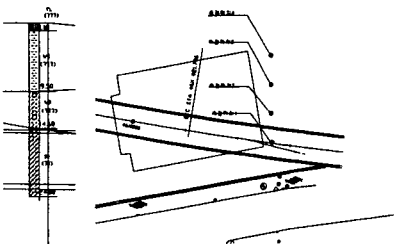
3. 대상 지역의 선정 및 실측

본 연구에서는 서로 다른 특징을 가진 세 지역을 대상 지역으로 삼았다. 지역-I 은 지하 터널 중앙에서 30m~40m 떨어진 곳에 13층 건물이 놓여있는 곳이며 <Fig. 3-1>은 대상지역의 도면과 측정 위치 및 주상도를 나타내고 있다. 터널은 지표면에서 21m 정도 깊이에 있다.



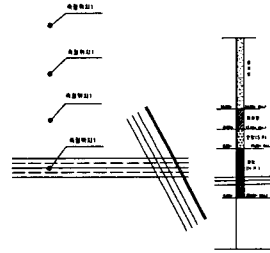
<Fig.3-1> Site-I

지역-II 는 지하 터널 중앙 바로 위에 건물이 놓여진 지역으로서 <Fig. 3-2>은 대상 지역-II 의 도면과 측정 위치 및 주상도를 나타내고 있다. 터널은 지상으로부터 13.24m 깊이에 위치하고 있다.



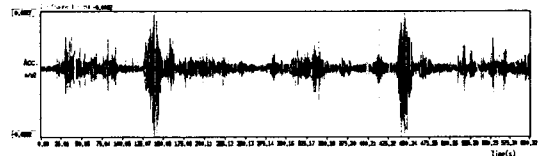
<Fig.3-2> Site-II

지역-III 은 지표면에 건물이 놓여있지 않은 지역으로써 <Fig.3-3>은 대상 지역-III의 도면과 실측 위치 및 주상도를 나타내고 있다. 터널은 지상에서 17m 깊이에 위치해 있다.



<Fig.3-3> Site-III

대상 지역-I 에서는 건물의 지하 3층, 지표면의 터널 중앙에서 10m 지점, 20m 지점, 30m 지점에서 측정하였고 대상 지역-II, 대상 지역-III 에서는 지표면의 터널 중앙에서 0m, 10m, 20m, 30m 떨어진 지점에서 측정을 하였다. 대상 지역-II 에서는 지하 1층에서도 측정을 하였다. 측정은 VM-52a(지반 진동측정 장치(RION))를 사용하였고 DAT(SONY)에 녹음하여서 CADA-X(LMS) 장비로 시간 이력(time history) 및 주파수 분석(frequency spectrum)을 수행했다. 선정된 3곳의 대상 지역에서 각 지점별로 10분~20분 가량 가속도를 측정하였으며 <Fig.3-4>는 측정된 가속도 응답의 대표적인 시간 이력(time history)을 나타내고 있다.

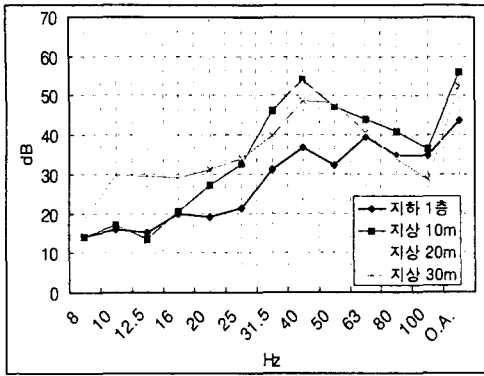


<Fig.3-4> Time history of measured data

<Fig.3-4>에서 보듯이 가속도 값이 서서히 증가했다가 다시 감소하는 부분을 터널 내부로 지하철이 지나가는 구간이라고 생각 할 수 있다. 시간은 약 12~20 초 가량이며 터널 중앙에서 거리가 멀수록 그 시간이 길어짐을 알 수 있었다. 측정 시간동안에 보통 위와 같은 구간이 2~3곳 나오는데 그것을 평균하여 주파수 분석을 수행하였다.

3-1. 대상 지역 I

대상 지역 I 에서는 13층 건물의 지하 3층, 그리고 터널 중앙의 지상에서 10m 지점, 20m 지점, 30m 지점에서 측정을 수행하며 1/3옥타브밴드로 분석한 결과를 <Fig.3-5>에 나타내었다.

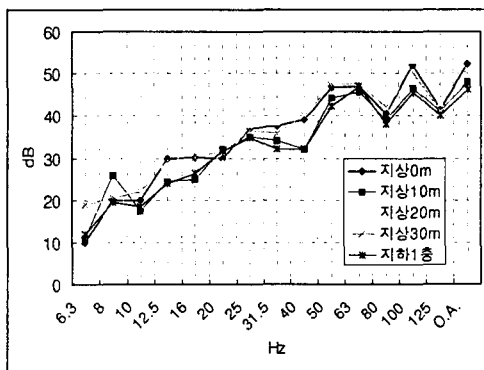


<Fig.3-5> Acceleration level for Site-I(third octave).(ref. acc.= $10^{-5}m/s^2$)

<Fig.3-5>에서 알 수 있듯이 40~50 Hz 부근에서 가장 높은 가속도 레벨을 나타내고 지하 1층과 지상 20m에서는 63~80Hz에서 두 번째 높은 가속도 레벨을 나타낸다. 특이할 만한 점은 지상 20m 지점에서 측정한 값이 지상 10m 지점에서 측정한 값보다 오히려 가속도 레벨이 높음을 알 수 있었다.

3-2. 대상 지역 II

대상 지역 II에서는 위에서와 마찬가지로 터널 중앙의 지상으로부터 0m, 10m, 20m, 30m 지점, 그리고 체육관의 지하 1층 바닥에서 측정을 수행하였다. 각 지점 별 주파수 분석결과를 <Fig.3-6>에 나타내었다.

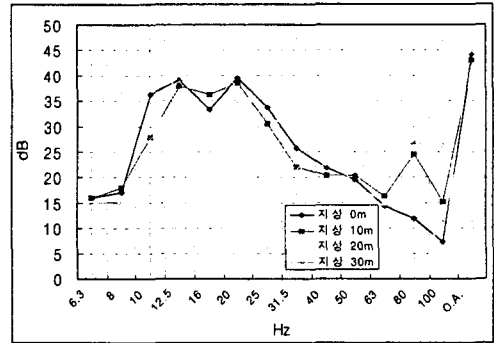


<Fig.3-6> Acceleration level for Site-II(third octave).(ref. acc.= $10^{-5}m/s^2$)

여기서도 마찬가지로 터널 중앙에서 20m 지점에서의 값이 가장 크게 나타났다. 대상지역 II의 분석 결과를 보면 50~80Hz, 100~125Hz에서 가장 높은 레벨을 갖는 것으로 나타났다.

3-3. 대상 지역 III

대상 지역 III에서는 건물이 없는 지역으로서 터널 중앙의 지상으로부터 0m, 10m, 20m, 30m 지점에서만 측정을 수행하였다. 각 지점 별 주파수 분석 결과를 <Fig3-7>에 나타내었다.



<Fig.3-7> Acceleration level for Site-III(third octave).(ref. acc.= $10^{-5}m/s^2$)

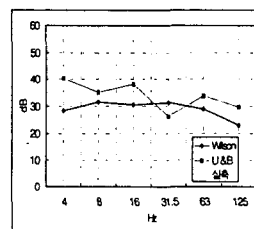
<Fig.3-7>를 살펴보면 12.5~25 Hz 에서 중심 주파수를 이루고 있다. 그리고 앞의 결과에서처럼 지상 20m 에서의 가속도 값이 가장 높음을 알 수 있다.

4. 기존 예측 식의 검토

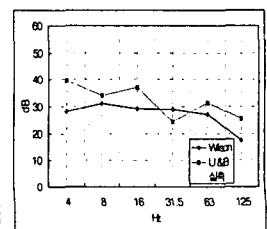
예측 식은 크게 주파수별 예측과 O.A. 레벨로 예측하는 식으로 나뉜다. 각 대상 지역별로 먼저 ¹⁾Wilson의 식과 Ungar & Bender의 식으로 예측한 1/1 옥타브 밴드 주파수별 예측 값을 구하여 실제 측정한 값과 비교를 하였고 그 후에 Tokita의 식과 뉴욕 지하철의 식, 그리고 일본 지하철의 식을 이용한 O.A. 레벨의 예측값을 구하여 실제 측정한 값과 비교해 보았다.

4-1. 대상 지역 I

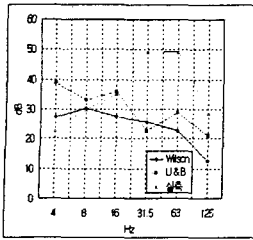
그리고 <Fig.4-1>, <Fig.4-2>, <Fig4-3>, <Fig4-4>에서는 측정 지점별로 각각 실제 측정한 값과 Wilson의 식과 Ungar & Bender의 식에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수 별로(1/1옥타브) 나타내었다.



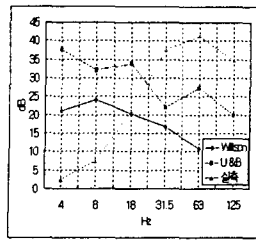
<Fig.4-1> predicted vs measured data(from 0m)



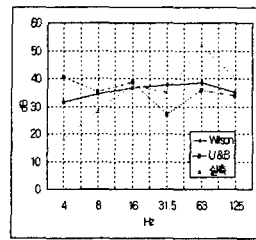
<Fig.4-2> predicted vs measured data(from 10m)



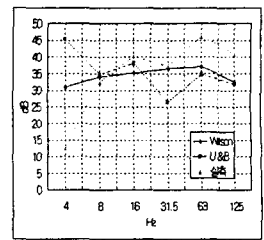
<Fig.4-3> predicted vs measured data(from 20m)



<Fig.4-4> predicted vs measured data(at B3)



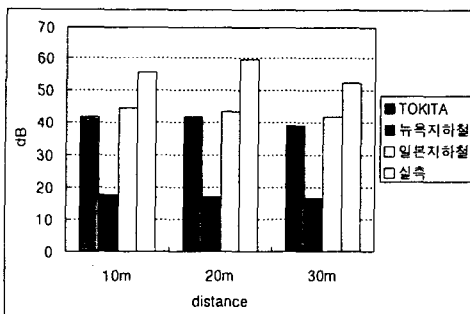
<Fig.4-6> predicted vs measured data(from 0m)



<Fig.4-7> predicted vs measured data(from 10m)

10m 지점에서의 비교 결과를 살펴보면 4Hz, 8Hz, 16Hz 에서는 약 10dB 정도 그 값이 실측값보다 높게 나타났다. 그러나, 실제로 중심 주파수라고 여겨지는 31.5Hz나 63Hz 에서는 약 20dB 가량 그 값이 낮게 나타나는 경향을 나타 내고 있다. 20m 지점에서는 8Hz에서부터 그 값이 낮게 평가되고 있으며 16Hz와 31.5Hz에서는 약 25dB 정도 그 값이 낮게 평가되고 있다. 30m 지점에서는 16Hz부터 그 값이 낮게 평가 되고 있으며 31.5Hz와 63Hz에서는 20dB 가량 그 값이 낮게 평가되고 있다. 지하 3층의 경우도 측정값과 큰 차이를 나타낸다.

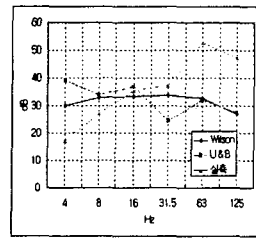
다음 <Fig.4-5>는 Tokita의 식과 뉴욕 지하철의 식, 그리고 일본 지하철의 식에 의해 예측된 O.A. 값을 실측값과 비교해 보았다.



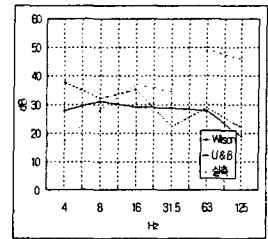
<Fig.4-5> predicted vs measured data(corresponding to distance)

4-2. 대상 지역 II

<Fig.4-6>, <Fig.4-7>, <Fig.4-8>, <Fig.4-9>에서는 측정 지점별로 각각 실제 측정된 값과 Wilson의 식과 Ungar & Bender의 식에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수 별로(1/1옥타브) 나타내었다.

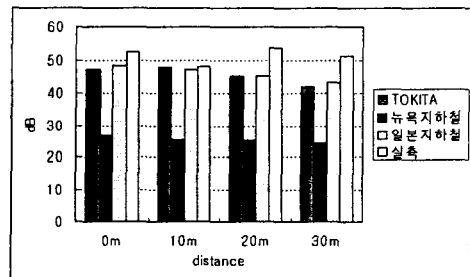


<Fig.4-8> predicted vs measured data(from 20m)



<Fig.4-9> predicted vs measured data(from 30m)

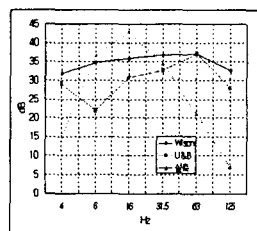
다음 <Fig.4-10>은 Tokita의 식과 뉴욕 지하철의 식, 그리고 일본 지하철의 식에 의해 예측된 O.A. 값을 실측값과 비교해 보았다.



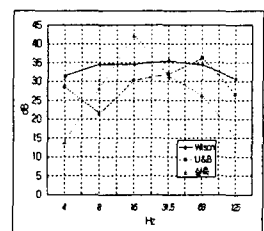
<Fig.4-10> predicted vs measured data(corresponding to distance)

4-3. 대상 지역 III

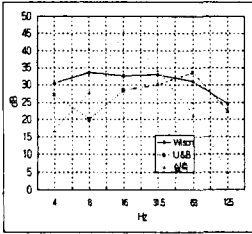
<Fig.4-11>, <Fig.4-12>, <Fig.4-13>, <Fig.4-14>에서는 실측 지점별로 각각 실제 측정된 값과 Wilson의 식과 Ungar & Bender의 식에 의해 예측된 값을 비교하여 주파수별(1/1옥타브)로 나타내었다.



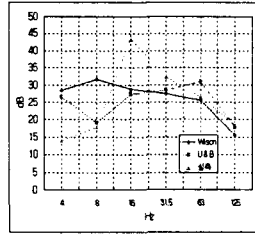
<Fig.4-11> predicted vs measured data(from 0m)



<Fig.4-12> predicted vs measured data(from 10m)



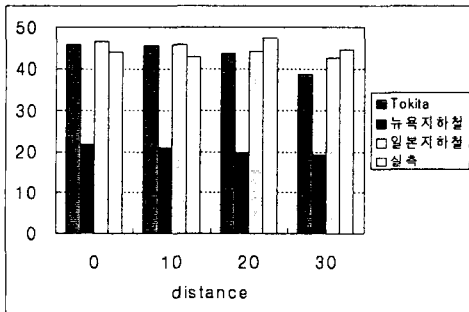
<Fig.4-13> predicted vs measured data(from 20m)



<Fig.4-14> predicted vs measured data(from 30m)

대상지역-III의 결과를 살펴보면 4Hz, 8Hz, 31.5Hz, 63Hz, 125Hz에서 대체적으로 예측값이 실측값보다 높게 평가되었지만 실제 중심 주파수인 16Hz에서는 각 지점에서 약 20dB 가량 낮게 평가되었다.

다음 <Fig.4-15>는 Tokita 모델과 뉴욕 지하철 모델 그리고 일본 지하철 모델에 예측된 O.A. 값을 실측값과 비교해 보았다.



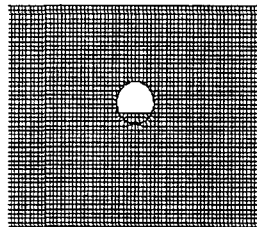
<Fig.4-15> predicted vs measured data(corresponding to distance)

각 대상지역별로 기존의 예측 식을 적용하여 실측값과 비교해 보았다. 위의 결과들을 토대로 기존 예측 식에서 다음과 같은 문제점을 발견할 수 있었다. 먼저 Wilson의 식과 Ungar & Bender의 식과 같은 주파수별 예측 식에서는 중심 주파수에서의 예측 값이 실측값보다 약 20dB 가량 낮게 평가되었다. 여기서 중심 주파수라면 전체적인 O.A. 레벨을 결정하는 주파수를 말한다. 즉, 중심 주파수는 지반으로 전달되는 진동의 경우에 지반의 성질에 크게 좌우되는 지역적 특성이라고 말할 수 있다. 다시 말하면 어떤 지반의 층에서는 특정 주파수의 파를 잘 전달한다거나 혹은 전달을 방해하거나 하는 성질을 가질 수 있다. 그러나 예측 식에서는 지역적인 특성을 잘 반영하지 못하고 주파수 별로 고르게 적용되어 실측값과 큰 차이를 나타내기도 한다. Tokita의 식과 일본지하철의 식의 경우에는 대체로 실측값과 비슷한 정도의 값을 나타내긴 하지만 두 예측 식 모두 진동 레벨의 최대 값을 예측한다고 보기는 문제가 있다. 실측값의 경우 진동 레벨의 최대 값이 아닌 RMS 값이기 때문에 Tokita의 식이나 일본지하철의

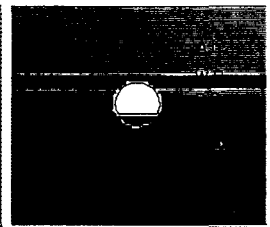
식을 통하여 환경에의 영향을 평가하는 데에는 안정성에 문제가 있다고 볼 수 있다. 그리고 모든 예측 식이 터널과 예측 지점의 직선 거리에 따른 보정을 하기 때문에 거리가 멀어질수록 예측 값이 감소하게 된다. 그러나 실측 결과에서 알 수 있듯이 가장 레벨이 큰 지점은 터널 중앙 지상으로부터 20m 떨어진 지점으로 나타났다. 즉, 가장 영향이 클 것으로 생각되는 터널 중앙 지상으로부터 20m 떨어진 지점에서의 평가가 제대로 이루어지기 힘들다.

5. 수치 해석을 이용한 지반 진동의 예측

<Fig.5-1>은 대상 지역-III의 지반을 모델링한 그림이다. 또한 <Fig.5-2>는 대상 지역-I의 지층의 구조를 나타내며 각각의 지층의 성질, 즉 전단 계수(shear modulus), 계수(bulk modulus), 밀도(density), 마찰 계수(friction coefficient), 점착성(cohesion) 등을 사용하여 그 지역의 지반의 특성을 고려한다.⁴⁾



<Fig.5-1> model of FLAC(Site-1)



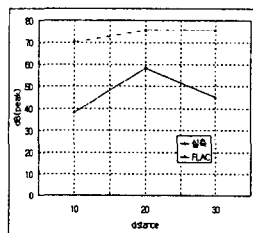
<Fig.5-2> Properties of model(Site-1)

진동원으로는 기존의 5호선의 터널 바닥과 측벽에서 측정한 가속도 자료³⁾를 이용하여 터널 내에 적용하였다.

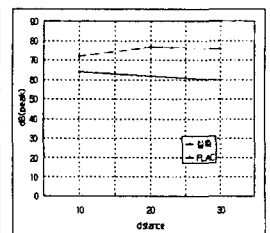
이렇게 하여 대상지역의 각 지점 별로 각각의 가속도의 응답을 해석하고 그 값을 각 지역에서 측정한 가속도의 최대 값과 비교하여 보았다.

5-1. 대상지역-I

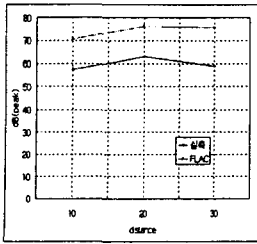
<Fig.5-3>,<Fig.5-4>,<Fig.5-5>,<Fig.5-6>는 각 측정 지점별로 예측된 값과 측정된 값을 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.



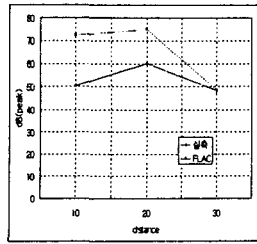
<Fig.5-3> predicted vs measured data(16Hz)



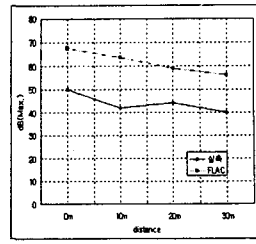
<Fig.5-4> predicted vs measured data(31.5Hz)



<Fig.5-5> predicted vs measured data(63Hz)



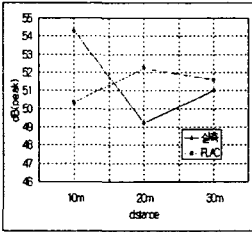
<Fig.5-6> predicted vs measured data(125Hz)



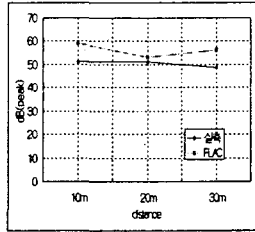
<Fig.5-13> predicted vs measured data(63Hz)

5-2. 대상지역-II

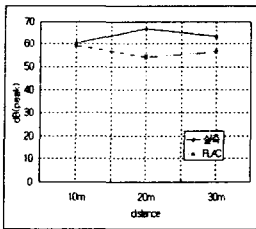
<Fig.5-7>, <Fig.5-8>, <Fig.5-9>, <Fig.5-10>는 각 측정 지점별로 예측된 값과 측정된 값을 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.



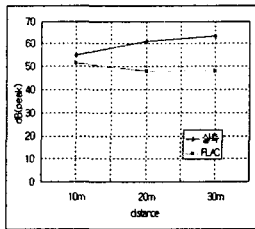
<Fig.5-7> predicted vs measured data(16Hz)



<Fig.5-8> predicted vs measured data(31.5Hz)



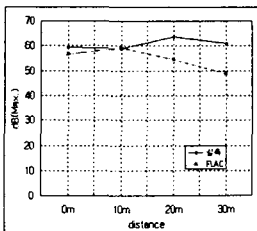
<Fig.5-3> predicted vs measured data(63Hz)



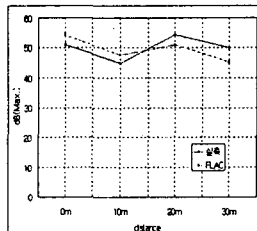
<Fig.5-3> predicted vs measured data(125Hz)

5-3. 대상지역-III

<Fig.5-11>, <Fig.5-12>, <Fig.5-13>, <Fig.5-14>는 각 측정 지점별로 예측된 값과 측정된 값을 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.



<Fig.5-11> predicted vs measured data(16Hz)



<Fig.5-12> predicted vs measured data(31.5Hz)

대상지역-I에서는 예측값의 레벨이 실측값보다 10dB 정도 높게 예측되었다. 반면에 대상지역-II와 대상지역-III에서는 비슷한 결과를 나타냈다. 그러나 대상지역-I의 경우 터널의 깊이가 다른 지역과 비교할 때 터널의 깊이가 가장 깊은 곳인데도 가장 높은 수준의 레벨을 나타냈다. 그리고 주파수별로 거리에 따라 감소하는 것이 아니라 어떤 주파수에서는 10m 지점 혹은 20m 지점에서의 값이 0m에서의 값보다 높게 예측되기도 했다. 수치 해석방법을 사용한 예측 결과, 대상지역에 따라서 그 지역의 지반 특성을 반영하는 것으로 나타났고 주파수별로 가장 큰 영향이 미치는 거리를 판단하는 근거로 삼을 수 있다.

6. 결론

특정 지역의 지반 진동을 예측하기 위해 기존 예측식들을 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 전체적으로 중심 주파수에서의 값이 실측값보다 20dB 가량 낮게 예측이 되어 환경상의 영향을 판단하는데 있어서 안정성에 문제가 있을 것으로 보인다. 그리고 그 지역의 특성을 반영하지 못하고 거리별 감쇠가 추가 되기 때문에 가장 영향이 크다고 판단되는 거리에서의 영향을 예측하기 힘들다. 그러나 수치 해석적인 방법을 통하여 위의 단점을 보완하는데 이용할 수 있다. 그리고 특정 지역의 지반 특성을 반영할 수 있고 진동 레벨의 최대치를 예측함으로써 영향을 판단하는데 안정성을 가질 수 있다.

참고문헌

- 1) Wilson, Thrig and Associates, "State-of-the-Art Review: prediction and control of ground-borne noise and vibration from rail transit trains" p6-1~p6-33
- 2) 서울특별시 지하철건설본부, "課業遂行報告書", 1996.5
- 3) 서울특별시 지하철건설본부, "課業遂行報告書(부록)", 1994. p37~p81
- 4) FLAC(Fast Lagrangian Analysis of continua) Version 3.3