

도시철도 지반진동 예측식 개선에 관한 연구

Study on the Improvement of Empirical Formula for Prediction of Ground Vibration Induced by Urban Rapid Transit

신한철[†] · 조선규* · 양신추**

Han Chul Shin · Sun Kyu Cho · Shin Chu Yang

Abstract In this paper, field measurements in the subway tunnel and adjacent building were performed to predict the ground vibration level induced by urban rapid transit (subway) in Seoul, Korea. From the results of the measurements, the measured ground vibration level induced by subway in Seoul is smaller than the empirical formula of New York, but it is bigger than the empirical formula of Tokyo which has been commonly used in Korea. We suggested the empirical formula for prediction of ground vibration level induced by subway in Seoul considering on the wave propagation path for soils or rocks, respectively.

Keywords : Empirical formula for prediction of ground vibration, Ground vibration induced by subway, Seoul Subway, field measurement

요 지 본 논문에서는 도시철도 운행으로 발생하는 지반진동의 예측을 위하여 서울지하철 현장 계측을 실시하였다. 현장 계측 결과와 뉴욕지하철의 예측식과 동경지하철의 예측식으로 산정된 값과 비교한 결과, 국내 지반의 지반진동레벨은 뉴욕지하철의 예측식보다 크게 산정되었으며, 동경지하철의 예측식보다는 다소 작게 산정되었다. 또한, 계측현장 지반의 전파경로에 따라 토사지반과 암반지반으로 구분하여 국내 지반특성에 적합한 지반진동 예측식을 제안하였다.

주 요 어 : 지하철 진동 예측식, 열차 지반진동, 서울지하철, 현장 계측

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

수도권에는 도시교통 혼잡을 완화하기 위하여 도시철도가 지속적으로 건설 및 운영되고 있다. 한편 도시철도 소음진동에 관련된 민원도 끊임없이 제기되고 있다. 이러한 도시철도 소음진동문제는 전동차 및 정거장 내의 소음진동으로 서 승객에게 직접 영향을 미치는 것과, 지반진동 및 소음 등으로서 도시철도 주변 지역사회의 주민에게 영향을

미치는 문제 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

도시철도 지하구간 운행으로 인하여 주변 지역에서 발생하는 지반진동을 예측하기 위한 예측식은 그 동안 여러 연구자에 의해 제시되어 왔다. 이러한 예측식의 경우 지반진동의 발생원, 진동의 전파경로 및 수신부의 조건 등 예측식 적용 조건이 다르고, 예측식의 진동예측 기법과 특징 및 배경, 평가 방법이 모두 달라 임의로 적용하기 힘들다. 이로 인하여, 적용 조건이 다른 식을 지반진동 예측에 적용할 경우 오류가 발생할 소지가 있다.

또한 우리나라의 경우 외국의 기준 또는 예측식을 차용하여 사용하고 있는 실정이고, 차량, 궤도 등 외국의 도시철도 운행 여건과 국내 여건의 상이함에 따라 국내 지반조건에 적합한 지반진동 예측식이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 도시철도 운행으로 인한 지반진동 예측식을 국내 지반조건에 적합하도록 개선하기 위하여 차량 특성과 열차 속도와 같은 발생원에 의한 영향에 대한 분석을

* 책임저자 : 정희원, 서울특별시 기술심사담당관
E-mail : hans@seoul.go.kr
TEL : (02)3707-8030 FAX : (02)3707-8029

* 정희원, 서울산업대학교 교수
E-mail : skcho@snut.ac.kr
TEL : (02)949-6512

** 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구실장
E-mail : scyang@krti.re.kr
TEL : (031)460-5301

통하여 암반 터널, 토사 지반 개착 박스 및 지반진동의 전파 경로에 대한 분석하였다. 이를 이용하여 미국 뉴욕지하철 및 동경지하철에서 이용하고 있는 방법과 비교하여 국내 지반특성에 적합한 지반진동 예측식을 제안하였다.

2. 가속도 레벨 및 진동레벨

2.1 가속도 레벨

구조물은 진동에 의한 구조물 내의 변형 발생에 따라 피해가 발생하며, 그 피해는 진동속도에 비례한다. 즉 진동량의 단위인 cm, cm/sec, cm/sec² 등은 선형적 척도이다. 구조물에 대해서는 이러한 척도가 잘 적용될 수 있으나 인체의 감각은 선형적으로 비례하지 않는 경우가 있다. 따라서 진동소음 공학에서는 대수척도인 dB를 사용하고 있다. 진동의 공해문제에 있어서는 건물의 피해에 대해 최대 진동속도치로 규제하는 방법이 널리 사용되었으나 인체의 감응을 중요시하는 추세에 따라 dB를 적용하고 있는 사례가 많으며 소음진동 규제법 시행규칙에서도 가속도 레벨을 사용한다. 가속도 레벨은 진동가속도를 dB로 나타낸 것이며 다음과 같이 정의된다.[1]

$$\text{가속도레벨 } L = 20 \log \frac{A}{A_0} (\text{dB}) \quad (1)$$

여기서, A : 측정치의 가속도 실효치 (m/s^2)

A_0 : 기준치($10^{-5}m/s^2$)

2.2 진동 레벨

1~90Hz 범위의 주파수대역별 진동가속도레벨에 주파수대역별 인체의 진동감각특성(수직 또는 수평감각)을 보정한 후의 값들을 dB 합산한 것으로, 진동레벨 VL은 다음과 같다[1].

$$VL = VAL + W_n \quad \text{dB}(V) \quad (2)$$

여기서, W_n 은 주파수 대역별 인체감각에 대한 보정치이며, 여기에서는 1/3 옥타브밴드 진동감각 상태로 보정하였다.

2.3 1/3 Octave Band

허용진동기준은 인체의 등감각곡선에 기준하여 작성되었기 때문에 1/3 Octave Band는 Octave Band를 기하학적으로 3등분하여 나타내며, 이때 Band width는 식 (3)과 같다[1].

$$f_u = 2^{1/3} f_1 \quad (3)$$

여기에서, f_u : 상한계 주파수

f_1 : 하한계 주파수 이다.

3. 현장 계측 결과

3.1 현장 계측 단면의 선정

열차진동의 특성에 영향을 미치는 요인으로는 차량, 궤도, 궤도지지 구조물, 지반조건, 수진 구조물 등 매우 다양하며 이들이 상호 복합적으로 작용한다. 이를 크게 두 부분으로 나누면 차량과 궤도에 대한 영향과 진동이 전파되는 전파경로에 대한 영향으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 영향인자를 고려하여 지반진동 전파경로를 암반지반과 토사지반으로 구분하여 현장 계측 단면을 선정하였다.

본 논문에서는 도시철도 운행으로 인한 진동이 주변지반으로 전파되는 것을 살펴보기 위하여 8곳을 선정하여 현장계측을 실시하였다. 서울지하철의 지반조사 자료를 이용하여 분석한 결과, 본 논문에서 선정한 단면은 암반지반 4곳과 토사지반 4곳으로 분류되었고, Table 1에 이를 정리하였다.

Table 1. Location of fields and measurement condition

연번	호선	구간	인접구조물 (수진부 위치)	Sta.	계측위치 (기준, m)	구조물 형태	본선과 의 거리	전파 경로
1	2	시청~ 충정로	순화빌딩		시청역 (324m)	단선 병렬	15m	토사 지반
2	3	차량기지~ 구파발	진관동 주민센터 (지상 1층)		구파발 (132m) (차량기지 방향)	복선 BOX	12m	토사 지반
3	3	구파발~ 연신내	H건설 아파트 현장	8k 085	구파발 (432m)	단선 병렬	7m	암반 지반
4	3	신사~ 압구정	J타워	27k 670	신사 (300m)	복선 BOX	10m	토사 지반
5	3	일원~ 수서	일원동 주민센터 (지상 1층)	39k 580	일원 (130m)	복선 터널	10m	암반 지반
6	3	일원~ 수서	대왕중학교 (지상 평지)	39k 700	일원 (200m)	복선 터널	25m	암반 지반
7	3	일원~ 수서	구립수서 어린이집	40k 900	수서 (200m)	복선 BOX	15m	토사 지반
8	5	종로3가~ 을지로4가	종묘주차장	28k 330	종로3가 (400m)	복선 터널	10m	암반 지반

계측 단면 선정 결과, 터널구조물의 형식은 단선병렬 터널구조(BOX 포함)가 2곳, 복선 BOX 터널구조가 3곳 그리고 복선터널이 3곳으로 나타났다. 인접구조물의 경우 지상 구간에서 계측된 곳이 3곳이며 나머지 5곳은 모두 지하에

서 계측하였다. 계측위치의 경우 인접구조물과 계측위치가 동일 평면상에 존재하도록 정하였으며, 지하철 운행 속도가 60~70km/h로 운행되는 곳을 선정하였다.

3.2 계측 장비 및 설치 현황

3.2.1 가속도 측정 장비

지하철 현장 조건을 살펴보면, 수시로 출발하고 도착하는 열차 운행으로 인하여 케이블 배선작업이 어렵고, 열차의 전철화로 인하여 본선에는 고압전류가 흐르고 있어, 유선장비의 경우 전기적인 노이즈(EMI effect) 현상이 발생할 수 있어, 무선장비를 사용하였다. 사용한 무선장비는 Anylogger_S_ICP 가속도 모듈이다[2,3].

Fig. 1은 본선 터널내부에 설치된 가속도계와 무선데이터로거, 인접구조물 지하에 설치된 현황 및 현장에서 노트북을 이용하여 데이터를 획득하고 있는 장면을 나타내었다.

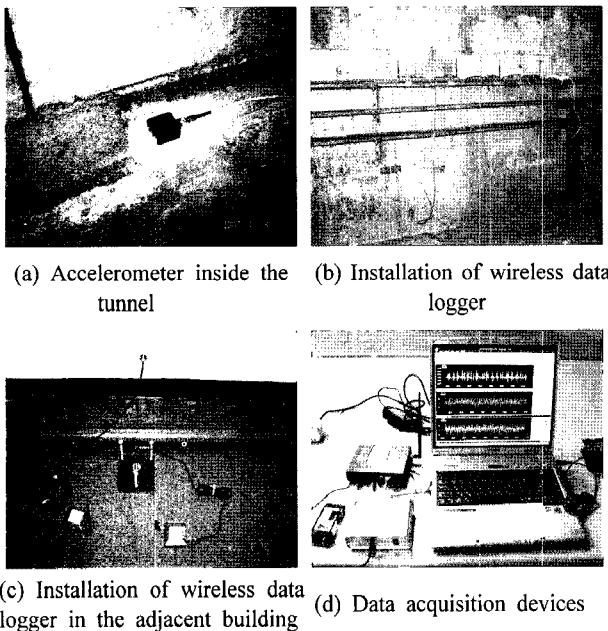


Fig. 1. Installation of accelerometers and wireless data loggers

3.2.2 데이터 획득 속도(Sampling rate)

열차진동의 경우 정적계측이 아닌 동적계측이므로 데이터 획득 속도인 Sampling rate를 조절하여야 효율적인 결과를 얻을 수 있다. 본 계측에서는 초당 1천개의 데이터를 얻을 수 있도록 Sampling rate를 1,000Hz로 설정하였으며, 현장 노이즈 등 환경 잡음의 영향을 제거하기 위하여 Low pass filter 값을 500Hz로 조절하였다.

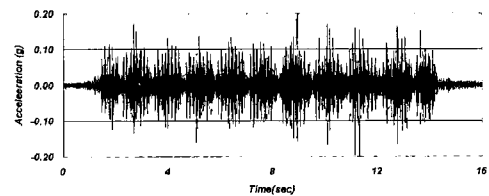
3.2.3 장비 운용 채널 수

일반적으로 진동의 방향은 x방향, y방향 그리고 z방향

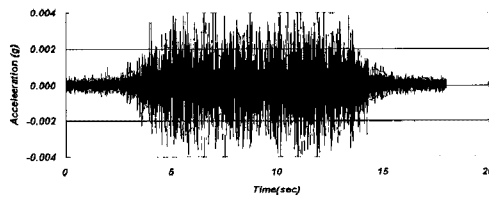
등 3개의 방향이 존재하나, 침목의 경우 수직 진동(z-방향)을 계측하였다. 터널내부의 바닥진동은 수직방향(z-방향)과 터널벽면의 수평진동(x-방향)을 동시에 계측하였다. 따라서 터널내에서는 3개의 채널을 이용하여 계측을 실시하였다. 인접구조물의 경우 수직진동(z-방향)과 수평진동(x-방향)을 동시에 계측한 곳도 있고, 수평진동의 계측이 어려운 곳에서는 수직진동만 계측하였다.

3.3 계측 결과

Fig. 2에는 2호선 시청역~충정로역 본선 구간의 계측 결과를 나타내었다. 각 계측에서는 의미 있는 신호가 획득된 결과를 중심으로 한 현장에서 5개 이상의 데이터를 획득하여 결과를 정리하였다. Fig. 3에는 8개 현장의 대표적인 계측 결과를 정리하였다.



(a) Time history of bottom vibration inside the tunnel



(b) Time history of bottom vibration at Sunwha building

Fig. 2. Measurement results of between Seoul city hall and Chungcheongro (Seoul Metro Line 2)

4. 외국 경험식과의 비교

4.1 뉴욕 지하철 방법과의 비교

뉴욕지하철로부터 측정된 진동자료를 기초로 Kurzweil과 Ungar에 의해 제안된 진동예측 방법으로 Overall 진동레벨만 구할 수 있다. 3가지 유형의 지반에서 거리에 따른 진동레벨은 Fig. 4와 같으며 이때 기본가정은 Table 2와 같다[4].

4.1.1 열차의 속도에 대한 보정

진동레벨의 보정은 기준과 다른 열차의 속도, 질량 및 선로구조인 경우에는 각 특성을 고려한 보정을 실시하는 것이 일반적이다. 뉴욕지하철의 경우 터널과 차량에 의한 보정을 Table 3과 같이 수행한다.

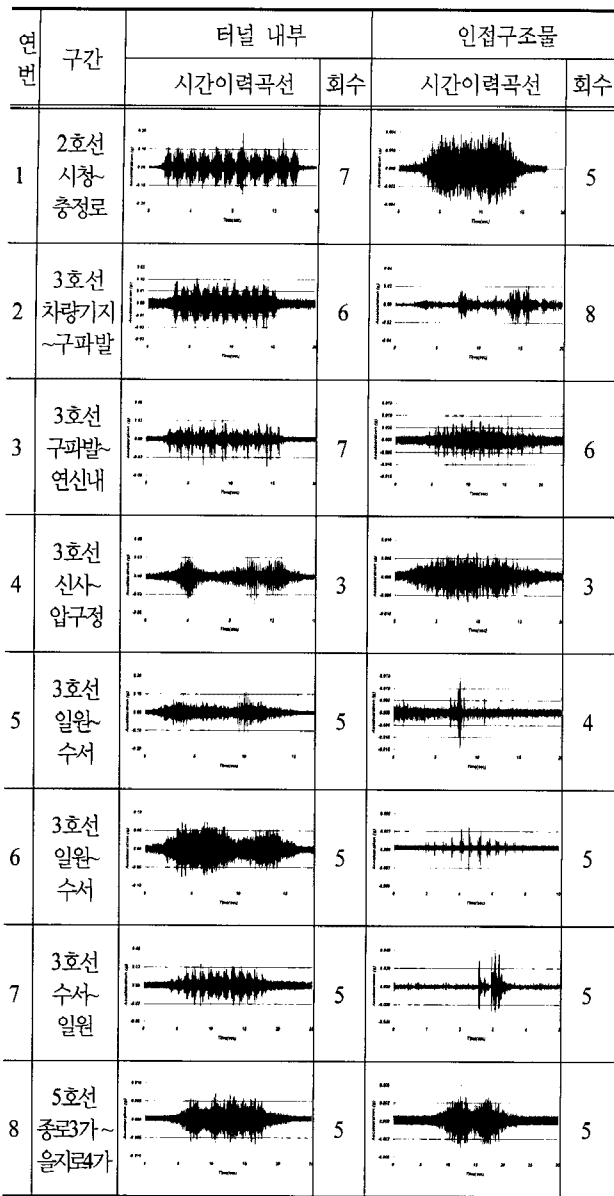


Fig. 3. Field measurements results in subway tunnel and adjacent buildings

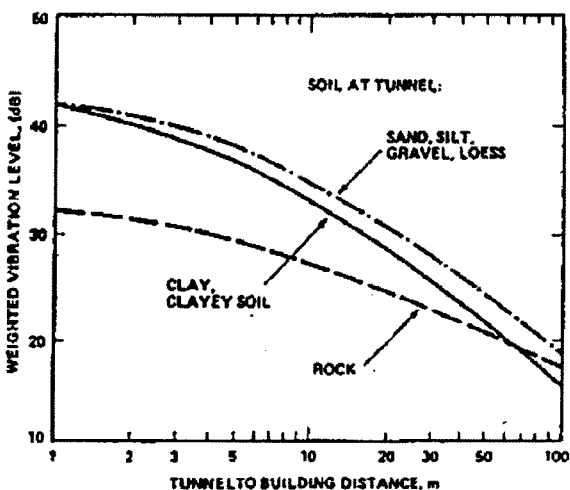


Fig. 4. Vibration level with the distance from the tunnel wall (New York subway method)[4]

Table 2. Assumptions for the empirical formula of New York subway method

터널	콘크리트 터널, 벽두께=0.6m(그라우팅 포함)
궤도	직결도상, $K=3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
레일	용접레일, 표면상태 보통, 굴곡없음
차량	바퀴상태 보통, 차량속도 56km/hr
수진측 위치	조적식 구조물의 지하실

Table 3. Compensation by the tunnel and vehicle of New York subway method [4]

영향인자	진동보정레벨	비고
터널벽두께	$40 \text{ Log}(0.6t)$	$t(m)$: 벽두께
레일지지 강성계수	$5 \text{ Log}(K/3E7)$	K 단위 : N/m
차량속도	$16.6 \text{ Log}(v/56)$	V 단위 : km/hr

차량속도에 관한 보정은 예측구간의 열차속도가 60~70 km/h인 점을 고려하여 속도의 영향을 충분히 고려할 수 있는 식 (4)의 속도보정식을 사용하고, Table 4는 기존 지하철 구간에서 측정된 자료를 근거로 제시한 보정치이다. 이 표에서 속도보정은 대략 다음과 같음을 알 수 있다[4].

본 논문에서는 열차의 속도가 60~70km/h에서 운행되어 Table 4의 결과를 이용하여 보정치로 -5dB를 적용하였다.

$$\Delta L (\text{dB}) = 20 \text{Log} \frac{V(\text{열차속도})}{V_0(\text{기준열차속도})} \quad (4)$$

4.1.2 수진측 구조물 위치에 따른 보정

인접구조물에서 진동을 계측할 경우 계측위치에 따라서 계측결과에 상당히 큰 영향을 미친다. 뉴욕지하철 방법에서는 Table 5와 같이 수진측 위치에 따른 보정을 실시하고 있다. 본 논문에서도 이러한 수진측 위치를 고려하여 지하실을 제외한 지상에서 측정된 경우 보정치 -3dB를 적용하였다.

Table 4. Compensation coefficient for train speed [5]

열차속도(km/hr)	상대적인 진동레벨(dB)[모든 터널에 대하여]
120	0
97	-2
80	-3.5
72	-4
64	-5
곡선구간	+3 ~ +5(Guardrail)

Table 5. Compensation method at the receiver (F : story of the building) [5]

수진측 구조물 위치	진동레벨 보정
지하실	0
1~6층	-3F
7층 이상	-15-0.5F

4.1.3 계측결과와 뉴욕지하철 방법과의 비교

Table 6에는 서울지하철의 터널내 계측 결과의 평균값과 인접구조물(수진부)에서 얻어진 가속도의 진동레벨 결과를 뉴욕지하철 방법을 이용하여 보정한 값을 나타내었다.

Fig. 5에는 뉴욕지하철 방법에서 제시하고 있는 터널과 인접구조물 사이의 거리에 따라 지반진동을 예측할 수 있는 도표와, 본 계측에서 얻어진 결과를 뉴욕지하철 방법으로 보정한 결과를 비교하여 나타내었다. 비교 결과 암반지반과 토사지반에서 계측된 결과 모두 뉴욕지하철에서 제시하고 있는 예측식보다 크게 산정되었다. 따라서, 뉴욕지하철 방법을 이용하여 국내 지반에 대한 지반진동을 예측할 경우 다소 과소평가 할 수 있는 개연성이 있다.

서울지하철 계측 결과를 살펴보면, 전파경로가 토사지반일 경우 전파경로가 암반지반일 경우보다 진동이 크게 계측되었음을 볼 수 있고, 이러한 결과는 뉴욕지하철 방법에서 제시하고 있는 예측식과 경향성 측면에서 일치하고 있다.

본 계측 현장의 토사지반은 대부분 풍화토 지반에 해당한다. 따라서 뉴욕지하철 방법을 적용할 경우 그림 5의 Sand, Silt, Gravel 곡선을 적용하는 것이 타당하다. 그러나, Fig. 5의 Sand, Silt, Gravel 곡선보다 서울지하철 계측결과 값이 5dB 이상 크다. 지반진동에서 5dB에 해당하는 값은 매우 큰 차이이다. 따라서, 본 논문에서는 국내 지반특성에 적합한 진동식이 필요한 것으로 판단하여 지반진동 예측식을 제안하고자 한다.

4.2 동경 지하철 방법과의 비교

동경 지하철에서는 식 (5)~식 (7)과 같이 터널 구조물을 복선BOX, 복선터널 및 단선터널(개착식 포함)로 구분하여 지반진동을 예측하고 있다[6].

1) 터널이 복선BOX인 경우

$$L = K - 20 \cdot \log(X/3) - 24 \cdot \log(Y/40) + 20 \cdot \log(Z/40) \quad (5)$$

2) 터널이 복선터널인 경우

$$L = K - 20 \cdot \log(X/15) - 24 \cdot \log(Y/50) + 20 \cdot \log(Z/40) \quad (6)$$

Table 6. Vibration level of Seoul subway compensated by New York subway method

연번	위치		지하층수	거리(m)	계측 결과 (dB(V))			뉴욕 지하철 방법의 비교	
	구간	수진부			터널 평균	수진부 범위	수진부 평균	뉴욕 기준 속도 보정	뉴욕 기준 층수 보정
1	2호선 시청~충정로	순화빌딩	지하	15	65.8	43~46	44.7	39.7	39.7
2	3호선 차량기지~구파발	진관동 주민센터	1층	12	71.3	53~59	55.1	50.1	47.1
3	3호선 구파발~연신내	H건설 아파트 현장	지하	7	56.2	49~54	51.7	46.7	46.7
4	3호선 신사~압구정	J타워	지하	12	58.3	47~52	50.2	45.2	45.2
5	3호선 일원~수서	일원 주민센터	1층	10	55.7	48~62	51.6	46.6	43.6
6	3호선 일원~수서	대왕중학교	지상	25	62.9	46~49	47.7	42.7	39.7
7	3호선 수서~일원	수서 어린이집	지하	15	59.3	39~56	51.3	46.3	46.3
8	5호선 종로3가~을지로4가	종묘 주차장	지하	10	55.1	30~46	42	37	37

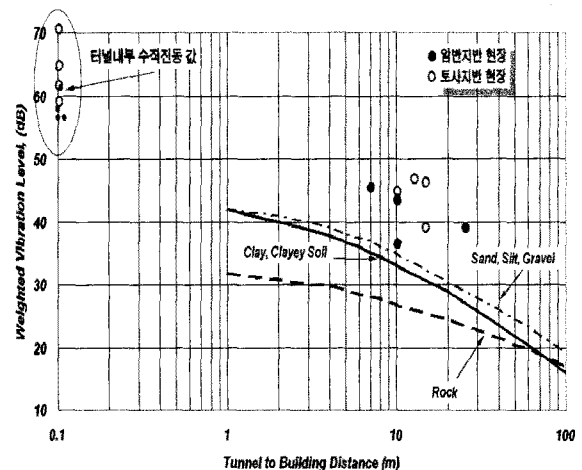


Fig. 5. Comparison of measurement results of Seoul subway and New York subway method

3) 터널이 단선터널인 경우

$$L = K - 20 \cdot \log(X/15) - 24 \cdot \log(Y/20) + 20 \cdot \log(Z/40) \quad (7)$$

위 식 (5) ~ 식 (7)의 적용조건은 Table 7과 같고, 궤도 및 구조물별 기준진동인 K값의 경우 Table 8을 이용하여 산정한다.

Table 7. Conditions for ground vibration prediction of Japan subway method [6]

구분		적용조건		
L	지표 진동수준(dB)	복선 BOX	복선 터널	단선 터널
X	터널단에서 예측지점까지 최단거리(m)	3~50	8~50	8~50
Y	구조물 중량 (ton/m)	30~150	30~70	30~70
Z	차량속도 (km/h)	30~50	30~75	30~75

Table 8 K values for track and structure types

	복선BOX	복선터널	단선터널
자갈궤도	70dB	55dB	57dB

본 절에서는 동경지하철 예측식을 이용하여 계산한 결과와 서울지하철 현장 계측결과 및 이를 다시 뉴욕지하철 방법을 이용하여 보정된 값과 같이 비교하였고, 비교 결과는 Table 9에 정리하였다.

서울지하철 계측 값의 보정된 값과 동경지하철 방법으로 산정한 결과를 비교할 경우, 4곳의 현장에서는 동경지하철 방법으로 구한 진동레벨이 크게 나타났으나, 나머지 현장에서는 서울지하철 현장 계측 값이 크게 나타났다. 그러나, 서울지하철 계측 값을 뉴욕지하철 방법으로 보정한 값과 동경지하철 방법으로 산정된 값을 비교할 경우 동경지하철 방법으로 산정한 진동레벨이 크게 산정되었다.

따라서, 외국의 지하철 기반진동 예측식을 이용할 경우 국내 지반특성과는 다른 예측 결과를 산정할 수 있는 개연성이 있다. 특히, 뉴욕지하철 예측식을 이용할 경우 국내 도시철도 운행으로 유발된 지반진동레벨을 과소 평가할 수 있으며, 동경지하철 방법과 비교하였을 경우, 보정을 하지 않았을 경우 과대 평가할 수 있는 개연성이 있다. 우리나라에서는 대부분 동경지하철 방법을 이용하여 도시철도 운행으로 발생하는 진동레벨을 산정하는 경향이 있어, 국내 지반진동을 과대평가 할 수 있는 개연성이 있다.

5. 국내 지반특성에 적합한 지반진동 예측식

본 절에서는 서울지하철 현장 계측 데이터를 바탕으로, 진동원인 열차가 터널을 운행하고 있을 경우, 지반진동의 전파경로가 토사지반일 경우와 암반지반일 경우에 대한 예측식을 Fig. 6에 나타난 바와 같이 식 (8)과 식 (9)와 같이 제안한다.

(1) 전파경로가 토사지반일 경우 진동레벨 VL,

$$VL = -3.94Ln(D) + 54.6 \quad (8)$$

(2) 전파경로가 암반지반일 경우 진동레벨 VL,

$$VL = -3.33Ln(D) + 49.8 \quad (9)$$

여기서, Ln은 자연대수 로그함수이고, D는 본선 측벽에서 인접구조물까지의 거리(m)이다.

Table 9. Measurement results in Seoul subway, New York subway method and Japan subway method

연번	위치		전파 경로	거리 (m)	계측 결과 (dB(V))		뉴욕 지하철 기준 보정	동경 지하철 방법과의 비교
	구간	수진부			수진부 범위	수진부 평균		
1	2호선 시청~충정로	순화 빌딩	토사 지반	15	43~46	44.7	39.7	47.5
2	3호선 차랑기지~구파발	진관동 주민센터	토사 지반	12	53~59	55.1	47.1	55.7
3	3호선 구파발~연신내	H건설 아파트 현장	암반 지반	7	49~54	51.7	46.7	54.1
4	3호선 신사~압구정	J타워	토사 지반	12	47~52	50.2	45.2	45.7
5	3호선 일원~수서	일원 주민센터	암반 지반	10	48~62	51.6	43.6	48.5
6	3호선 일원~수서	대왕 중학교	암반 지반	25	46~49	47.7	39.7	40.9
7	3호선 수서~일원	수서 어린이집	토사 지반	15	39~56	51.3	46.3	46.0
8	5호선 종로3가~을지로4가	종묘 주차장	암반 지반	10	30~46	42	37	45.5

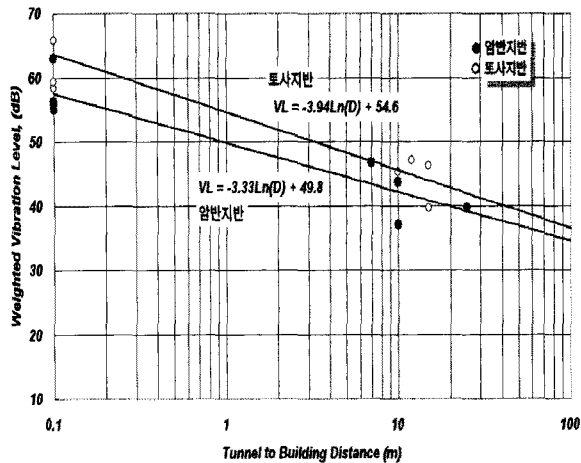


Fig. 6. Empirical formula of ground vibration level for Seoul subway

6. 결론

본 논문에서는 도시철도 운행으로 발생하는 지반진동의 예측을 위하여 서울지하철 현장 계측을 실시하였다. 현장 계측 결과와 뉴욕지하철의 예측식과 동경지하철의 예측식으로 산정된 값과 비교한 결과, 국내 지반의 지반진동레벨은 뉴욕지하철의 예측식보다 크게 산정되었으며, 동경지하철의 예측식보다는 다소 작게 산정되었다. 또한, 계측현장 지반의 전파경로에 따라 토사지반과 암반지반으로 구분하여 국내 지반특성에 적합한 지반진동 예측식을 제안

하였다.

본 논문에서는 국내 실정에 맞는 지반진동 경험식의 제안하기 위하여 현장 계측을 수행하였으나, 현장 계측 데이터의 부족으로 제시한 경험식은 완벽하다고 판단되지 않는다. 따라서, 향후 현장 의존적인 요인에 대하여 보다 많은 계측 데이터의 확보를 통한 경험식의 신뢰성을 높일 필요가 있다[7].

참고문헌

1. 정일록, 김재용, 윤세철, 이태호(2001), “최신 소음진동 이론과 실무,” 정일록, 신광문화사.
2. Korea Maintenance & Control Co., Ltd.(2008), “AnyLogger User's Manual”.
3. Korea Maintenance & Control Co., Ltd.(2008), “AnyLogger Datasheet”.
4. Kurzweil, L.G. and Ungar, E.E.(1982), “Prediction of Noise and Vibration in Buildings near the New York City Subway,” Proceedings of inter-noise 82. pp 213-216.
5. 김응록(2003), “철도진동의 예측에 관한 연구,” 전남대학교 박사학위논문.
6. 帝都高速交通團(1978), “騒音振動對策研究 報告書”.
7. 신한철(2009), “도시철도 터널구간 지반진동예측에 관한 연구,” 박사학위논문.

접수일(2008년 9월 29일), 수정일(2009년 4월 29일),
 게재확정일(2009년 5월 4일)