

## 지하철의 운행로 주변의 지반전달음 측정 및 분석

\* 김 회철<sup>1)</sup>, 김 우영<sup>2)</sup>, 허 영<sup>3)</sup>, 신 한철<sup>4)</sup>

### A Measurement and Analysis of Groundborne Noise nearby Subway railroad track

Heecheul Kim, Woo-Young Kim, Young Huh, Han-Chul Shin

#### ABSTRACT

Noise and vibration induced by subway operation is one of the major problem for the residents living nearby railway tracks. Many scientists and engineers have been working on the more accurate prediction of noise and vibration to provide the better residential environment. Some prediction equations were determined to compare the measurement value of a noise obtained from the inside of a residential area. It was observed that the condition of a soil type is one of the major parameter which should be considered to obtain the more accurate prediction value of a noise.

#### 1. 서론

지하철은 서울과 같은 대도시에서는 필수적으로 요구되는 대중교통 수단으로써 교통혼잡이 극심하여 도착시간을 예측할 수 없는 지상교통과는 달리 도심의 지하를 관통하여 정확한 시간에 예정된 장소에 도착할 수 있는 장점이 있다. 따라서 현대 사회에서 지하철의 역할은 실로 대단히 크다고 할 수 있다. 그러나 날로 복잡해지는 사회와 더불어 정온한 주거환경에 대한 주민들의 욕구는 더욱 높아지는 추세이며, 근래에 와서 지하철의 운행에 의한 소음과 진동은 이러한 주민들의 욕구를 충분히

만족시키지 못하고 있는 실정이다.

전동차내 소음은 '94년에 개통된 분당선을 시작으로 사회적인 문제로 제기되었는데 이것은 터널 내의 분진과 유지관리를 최소화하기 위하여 기존에 사용되던 유도상궤도를 콘크리트도상 궤도구조로 교체함으로써 발생하는 소음의 문제에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않음으로 인한 것이다. 기존에 사용되던 유도상궤도는 자갈과 자갈사이의 공극이 차량의 운행시 발생하는 소음을 흡수하는 기능을 수행하고 있으나 콘크리트도상의 경우 이러한 소음을 흡수할 수 있는 재료가 없어 대부분의 소음이 반사되기 때문이다. 반면에 지하철의 운행에 의하여 발생하는 진동의 경우, 기존의 유도상궤도보다 방진패드를 사용한 콘크리트궤도의 성능이 더욱 우수한 것으로 나타났다.

현재 국내에서 사용되고 있는 콘크리트궤도는

- 1) 정회원, 경희대학교 건축공학과 조교수
- 2) 경희대학교 건축공학과 석사과정
- 3) 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수
- 4) 서울특별시 지하철건설본부 기술감리실

크게 두 종류인데 그 하나는 철도청에서 도입한 일본 영단식의 변형이며 다른 하나는 서울지하철 2기에 사용되고 있는 프랑스 Stedef 식이다. 본 조사에서는 Stedef식 궤도구조를 사용한 서울지하철 2기의 운행로 주변에서 측정된 지반전달음의 측정 및 분석을 통하여 지하철의 운행에 의한 소음예측식을 제안하는데 그 목적이 있다. 따라서 기존에 해외에서 발표된 소음의 예측식에 대한 분석을 실시하고 이들의 검토를 통하여 우리나라의 현실에 적합한 소음예측식을 제안하고자 한다.

## 2. 소음에 영향을 미치는 인자

지반진동에 의한 소음의 크기에 영향을 주는 요소는 무수히 많으나 크게 차량, 레일, 침목, 터널구조, 지반상태, 터널구조로부터의 거리와 건물의 구조 등을 들 수 있다. 지금까지 국내외에서 발표된 문헌에 의하면, 차량바퀴와 레일의 관리상태에 따라 터널구조와 인근의 건물에서 측정된 진동은 100Hz 부근에서의 주파수에 대한 진동차가 약 4 - 8dB 정도로 나타났다. 또한 차량 저어널(journal) 스프링의 공진주파수를 25Hz에서 10Hz로 내릴 경우 16Hz - 30Hz 부근의 지반진동이 상당히 감소하는 것으로 발표되었다. 침목과 터널의 구조가 지반으로 전달되는 진동에 상당한 영향을 미친다는 것은 일반적으로 잘 알려진 사실이므로 이에 대한 기술은 생략하기로 한다.

본 연구는 Stedef 궤도를 사용한 지하철이 그 대상이며 위에 기술한 많은 영향인자들이 이미 결정된 상태이다. 또한 차량, 레일 및 침목의 종류는 본 연구범위에 속하지 않으며 전체 노선이 동일한 조건을 가지고 있으므로 제외되었다. 본 연구의 목적은 지하철 시험운영에 의한 건물의 진동 및 소음을 측정하여 적합한 예측식을 도출하는 것이므로 터널구조, 터널구조로부터 건물까지의 거리, 지반상태 및 건물의 구조에 대한 인자만을 조사대상으로 하였다. 그러나 소음측정대상 건물의 구조가 모두 철근콘크리트조로써 동일하며 터널의 구조 또한 복선터널구조로써 동일하였으므로 영향을 미치는 인자는 터널구조물로부터 건물까지의 거리와 지반상태이므로 이 두가지 인자만을 이용한 예측식을 설정하고자 한다.

## 3. 소음의 측정 및 분석

Stedef 궤도는 지금까지 사용하여 오던 자갈도상이 아닌 콘크리트도상을 사용하였으므로 운행시에 발생하는 소음에 차이가 있다. 이러한 차이는 자갈사이의 공극에 흡수되던 공기전달음이 철근콘크리트에서는 거의 반사되어 발생하는 현상으로 공기전달음에 의한 차이이다. 또한 지반으로 전달되는 진동에 의하여 발생하는 지반전달음에도 자갈과 탄성패드에서 흡수되는 진동의 양이 다르므로 인하여 발생하는 진동의 주파수 성분에도 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 지하철의 운행에 의하여 발생하는 운행로 주변의 주택에 전달되는 지반전달음의 크기와 성질, 지하철 플랫폼에서 승객들이 느끼는 소음의 차이 및 역사 근무자들이 느끼는 소음의 차이 등을 파악하기 위하여 다음과 같은 측정을 실시하였다.

Table 1은 소음측정이 실시된 장소 및 위치를 나타내고 있으며 측정 시에 사용된 장비의 구성도는 Fig. 1과 같다. 소음측정시 마이크로폰의 위치는 바닥으로부터 1.5m 높이에 설치하였으며 측정은 31.5Hz에서 8000Hz 까지를 그 범위로 하여 1옥타브밴드 및 O.A. 값을 기록하였다. 현장에서 측

Table 1 소음측정장소 및 위치

측정 장소	측정 위치
504G2-N1	1층 큰방
519G1-N1, N2	1층 큰방, 2층 작은방
506G1-N3	1층 화장실
507G1-N1	1층 작은방

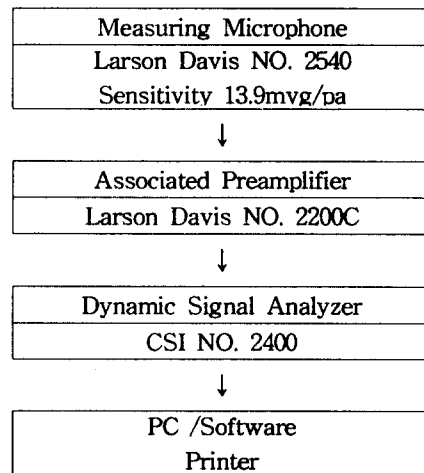


Fig. 1 소음측정장비 구성도

정된 1옥타브밴드에 대한 결과는 계측기에 보관되어 연구실의 컴퓨터로 옮겨졌으며 F.F.T. 분석 및 1/3옥타브밴드 분석은 연구실에서 수행되었다.

### 3.1 측정결과

현장에서의 측정은 각 지점별로 약 3 - 8회 씩 수행되었으며 수행된 결과는 주파수 분석을 통하여 각 지점에서의 주파수 평균치를 구한 후 각 주파수대역별 평균주파수에 대한 O.A. 값을 산출하였다. 각 측정점에서의 평균주파수에 대하여 1/3옥타브밴드로 분석하였으며 Table 2에서는 측정장소, 시간, 열차가 운행하지 않을 때의 압소음레벨 및 열차운행 시 측정된 O.A. 값 등을 기록하였다.

Table 2 소음측정결과

장소	압소음	O.A.
504G2-N1	44.66	54.82
507G2-N2	61	62
519G1-N1	36.69	41.35
519G1-N2	39.6	40.93

### 3.2 주파수대역별 분류

현장에서 측정된 자료는 Table 3에서 보는 바와 같이 31.5 Hz에서 8000Hz까지의 주파수대역별로 분류하여 지하철 운행 시에 발생하는 소음에 대한 특정주파수를 파악하였다. Table 3은 각 지역의 주

Table 3 주택내부 소음의 주파수대역별 분류

중심주파수(Hz)	504G2-N1	507G2-N2	519G1-N1	519G1-N2
31.5	0	18.0	0	0
63	43.40	34.5	33.83	31.90
125	46.86	39.0	34.82	32.44
250	46.56	47.0	24.88	28.32
500	45.85	54.5	25.39	27.04
1000	42.81	52.5	24.43	24.30
2000	44.69	54.0	29.90	29.78
4000	44.78	52.5	33.06	32.96
8000	46.54	55.5	35.92	36.07
O. A.	54.82	62.0	41.35	40.93

택에서 측정된 주파수 대역별 측정자료를 나타낸 것으로써 주택의 경우 어느 특정주파수 대역이 다른 주파수 대역에 비하여 두드러지게 상승하는 현상이 없이 일반적으로 비슷한 크기를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 지하철이 운행하기 전에 측정된 소음의 주파수 대역과 운행시에 측정된 소음의 주파수 대역을 비교해보면 125Hz 이하의 저주파수 대역의 소음이 다른 주파수 대역에 비하여 많이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 지반진동에 의한 저주파성분의 지반전달음이 특히 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 거리별 분류

측정된 소음의 크기를 터널구조물로부터 측정점까지의 거리별로 분류하였다. 거리별 분류는 구조물의 종류, 지반형태, 열차의 운행속도와 같은 제반조건이 같은 상황에서 측정된 자료를 가지고 비교를 하여야 하나, 본 연구에서는 동일지점에서 거리별로 측정된 자료가 없으므로 주택에서 측정된 자료만을 가지고 거리별 분류를 수행하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이 터널로부터 10 - 20m 내에 있는 507G1 지점과 519G1 지점은 불과 0.8m의 거리차에서 20.6 dB 정도의 차이가 발생하는 반면, 터널에서의 거리가 약 15m인 504G2 지점과 60m이상 떨어져 있는 506G1 지점에서는 불과 4.3 dB 정도의 차이를 보이고 있다. 본 측정대상 구조물은 건물의 구조가 철근콘크리트조로 동일하며 터널구조 또한 복선터널로써 동일한 구조를 가지고 있다. 열차의 운행속도에 약 10 km/h의 차이가 있으나 운행속도에 의한 차이는 약 3dB 정도인 것을 감안하더라도 이러한 차이는 거리에 관계없이 영향을 주는 다른 요소가 있음을 알 수 있다.

Table 4 거리별 주택내부에서의 소음크기비교

측정지점	504G2-N1	519G1-N1	507G1-N2
측정거리(m)	15.2	16.8	17.6
O.A.(dB)	54.8	41.4	62.0

### 3.4 지반별 분류

건물내부에서 느끼는 소음은 지반의 진동으로 인한 지반전달음이 대부분이므로 터널구조로부터 건물까지 펼쳐져 있는 지반의 성질은 건물내의 소

음 및 진동크기에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 건물하부의 지반형태를 분류하여 그 특성을 파악하는 것은 소음 및 진동의 크기를 예측하는데 매우 중요한 요소이다. 본 절에서는 건물 하부의 토질형태에 따른 소음의 크기변화를 분석하였다.

Table 5에 나타난 바와 같이 건물의 하부가 토사층만으로는 구성되어 있는 경우의 소음레벨은 지하철 구조물로부터의 거리가 멀더라도 소음의 크기가 적은 반면, 암반이 일부 형성되어 있는 경우의 소음레벨은 거리가 멀더라도 소음레벨이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 연암이나 경암과 같이 단단한 암반층으로 연결된 경우의 소음은 고주파 성분의 에너지에 대한 흡수가 적어서 진동이 거의 전달되므로 건물에서 느끼는 소음의 크기가 매우 큰 것을 알 수 있다. 동일한 지반조건을 가진 경우의 소음크기는 거리에 따라 달라지나, 지반조건이 서로 다를 경우에는 거리와 무관하게 멀리 떨어져 있어도 소음의 크기는 매우 커질 수 있으므로 그 영향이 더욱 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Table 5 지반형태 및 거리별 주택에서의 소음크기

	504G2-N1	519G1-N1	507G1-N2
측정거리(m)	15.2	16.8	17.6
측정점하부의 지반형태	잔류토 풍화암	잔류토 매립토	매립토 층적토 풍화토 풍화암 연 암
Overall(dB)	54.8	41.4	62.0

### 3.5 지반전달음(Groundborne noise)

열차의 운행에 의하여 발생하는 지반전달음의 특성 및 크기를 파악하기 위하여 열차가 운행하지 않을 때의 암소음과 운행시의 소음을 측정하여 그 비교를 하였다. Fig. 2 - Fig. 4는 주택에서 측정된 암소음과 열차운행시의 소음을 주파수별로 분석한 결과로써 504G2 지점과 507G1 지점에서는 전 주파수대역에서 고르게 상승하는 현상을 보이면서 전체적으로도 O.A. 값이 많이 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 519G1 지점에서는 63Hz - 125Hz의 저주파수 대역만이 증가하는 현상을 뚜렷이 볼 수 있으며, 507G1 지점에서도 125Hz 대역의 주파수가 특히 증가하는 현상을 볼 수 있다.

이와 같은 현상이 발생하는 것은 3.4절에 기술한 바와 같이 건물 하부의 지반형태에 따른 현상으로써 하부에 연암 또는 경암과 같이 단단한 암반이 형성되어 있는 경우는 전체적인 상승현상을 보이는 반면, 토사층이 두껍게 형성되어 있는 경우는 저주파수 성분만이 전달되는 현상을 보이고 있다. 따라서 지반전달음을 정확하게 파악하기 위해서는 0 - 31.5Hz 대역과 같은 저주파수 성분을 제대로 측정할 수 있도록 측정기의 조절이 필수적으로 선행되어야 할 것으로 판단된다.

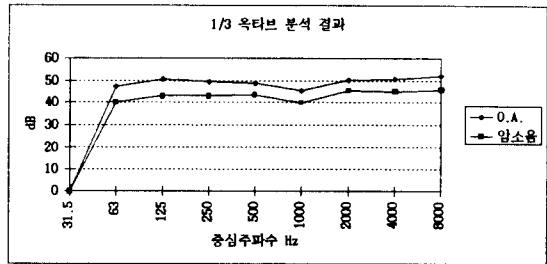


Fig. 2 504G2 지점에서의 소음과 암소음레벨

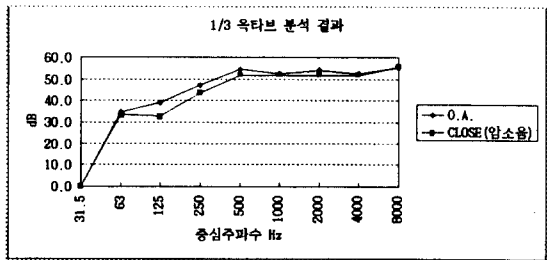


Fig. 3 507G1 지점에서의 소음과 암소음레벨

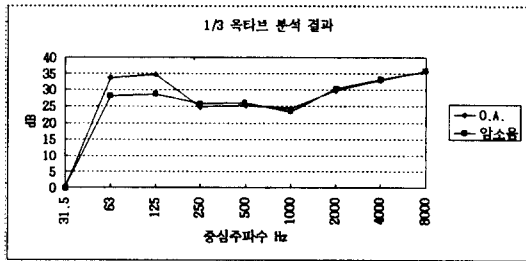


Fig. 4 519G1 지점에서의 소음과 암소음레벨

## 4. 예측치와 실측치의 비교 및 예측식의 정립

### 4.1 제안식의 산정

본 연구의 결과로써 제안되는 추정식은 실측에 기인한 것으로써 앞서 기술한 Lange에 의하여 제안된 식을 수정하여 사용하고자 한다. 그러나

Lange의 식은 거리에 따른 인자만을 포함하고 있으며 거리 또한 20m 내로 제한되어 있으므로 그 사용범위가 협소한 단점이 있다. 일반적으로 지반을 통하여 전달되는 소음이 문제가 되는 지역은 대부분 지하철의 운행로로부터 20m 내에 위치하고 있으므로 거리상의 문제는 어느 정도 적절하다 할 수 있다.

그러나 지반전달소음은 차량의 운행에 의한 지반의 진동이 주 원인이므로 지반의 형태에 따른 진동의 차이가 필수적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다. Lange에 의하여 제안된 식에 지반형태에 따른 지반진동의 차를 포함한다면 현재의 식에서 발생되는 10dB의 오차보다 더욱 정확한 추정을 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 지반형태에 따른 인자를 추가로 고려하여 다음과 같은 추정식을 제안한다.

$$L_A = 50 - 9\text{Log}(d) + S \quad (1)$$

S : 지반형태에 따른 계수

암반이 있는 경우 : 15

풍화토, 잔류토, 매립토등으로만 구성된 경우 : 0

#### 4.2 제안식에 의한 예측

본 연구의 대상이었던 주택가는 한 지역을 제외한 모든 지역이 지하철 운행로로부터의 직선거리가 20m 내에 위치하고 있었다. 따라서 각 위치별로 Lange가 제안한 추정식에 의한 예측치와 제안식에 의한 예측치를 계산하여 비교해 보기로 한다.

지금까지 국내외에서 사용되고 있는 예측식을 본 연구의 대상인 서울지하철에 적용한 예는 거의 없다. 서울시의 2호기 지하철은 지금까지 국내에서 사용해 오던 유도상궤도와는 달리 프랑스의 stedef사로부터 기술을 도입한 콘크리트 침목의 하부에 탄성받침을 사용한 궤도구조도써 과거의 궤도보다 진동은 더욱 적은 것으로 알려져 있다. 반면에 콘크리트 궤도는 자갈에 비하여 음을 흡수하는 기능이 적으므로 공기전달에 의한 소음의 발생은 더욱 심한 것으로 나타났다.

Table 6은 Lange의 예측식 및 제안식에 의한 예측치와 현장에서의 실측치를 비교한 것으로써 각 측정점에서의 조건을 같이 보여주고 있다. 대상지역의 터널형태와 건물의 구조는 모두 동일한 조건을 가지고 있으며, 터널구조로부터의 거리와 건물하부의 토질형태만이 각각 다른 조건을 가지고 있다. 따라서 터널로부터의 거리와 토질형태에 따른

인자만을 고려한 예측식의 도입은 무리가 없는 것으로 판단된다.

Table 6에 나타난 바와 같이 새로이 제안된 예측치는 측정치와 최대 13.2%에서 최소 0.2%의 차이를 보이는 반면, Lange의 예측치는 최대 60.9%에서 최소 2.1%의 오차를 보이고 있다. 이러한 차이는 토질의 성질에 따른 인자의 포함여부에 따라 좌우되는 것으로 판단되나, 507G1 부근 주택의 경우 거리가 17.6m 떨어져 있으나 62.0dB 정도의 소음

치를 기록하는 이유는 암반의 영향 또는 건물의 진동주기와 지반전단진동의 주기가 어느 대역에서 일치하고 있는 두 가지 중의 하나일 것으로 추측된다.

Table 6 실측치와 예측치의 비교

위치	거리 (m)	토질 분포	측정치	예측치			
				Lange 식	오차율(%)	제안식	오차율(%)
504G2	15.2	잔류토 풍화암	54.8	35.4	35.4	54.4	0.7
519G1	8.4 10.5	매립토 잔류토	41.4 40.9	40.5	2.1	41.7	0.7
507G1	17.6	매립토- 충적토- 풍화토- 풍화암- 연암	62.0	34.1	45.0	53.8	13.2

#### 5. 결론

Stedef 궤도구조의 소음·진동에 대한 영향을 파악하기 위하여 운행 중인 지하철의 지반상부 및 운행로 주변의 주택내부에서 측정을 수행하였다. 소음의 측정부위는 지하철의 운행로 인근주택 내부를 주대상으로하였으며 각 지점에서 3 - 8회의 측정을 실시한 결과 파악된 현상을 기술하면 다음과 같다.

1) 지반형태별로 소음의 크기를 분석한 결과, 주택에서 느끼는 소음의 크기는 거리보다 건물의 하부에 구성된 토질의 성격이 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 하부가 토사층으로만 구성된 경우 거리가 멀더라도 크기가 적으나, 지하에 암반층이

기가 더 크게 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 토사층으로만 형성되었을 때의 주파수 성분은 진동이 전달되는 동안 고주파수 성분이 많이 감소되는 경향이 있으나, 암반층이 형성되어 있을 경우에는 특정한 주파수 성분의 감소가 없는 것으로 나타났다.

2) 지반전달음(groundborne noise)의 경우 63Hz - 125Hz 대역의 저주파수 성분에 대한 소음이 많이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 지반전달음의 성질을 정확하게 파악하기 위해서는 일반적인 소음의 측정시에 사용되는 0 - 8Kz 대역의 소음을 측정하는 것보다 대역을 좁혀서 500Hz 이하까지의 소음만을 측정하는 것이 더 효율적인 것으로 판단된다.

이상과 같은 결론에 의거, 지금까지 지하철의 운행에 의한 건물의 소음 정도를 예측하는 식으로 많이 사용되어온 Lange의 식을 수정하여 새로운 소음예측식을 제안하였다. Lange의 식은 실측한 결과를 토대로 작성되었으나, 예측거리가 20m 내인 단점이 있으며 그 오차 또한 ±10 dB 로써 본 연구의 대상으로 선정된 지역에서는 2.1% - 60.9% 정도로 오차율이 매우 크게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 소음의 크기에 큰 영향을 미치는 지반형태를 고려하지 않고 거리에 따른 결과만을 분석하였기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 건물의 하부에 형성된 지반의 성질에 따른 특성을 고려할 수 있는 새로운 예측식을 제안하였다. 본 연구의 결과로 제안된 식도 최대 8.2 dB의 차이는 있으나 전체적으로 그 오차율이 0.2% - 13.2% 로써 실측치와 상당히 근접한 값을 제공하고 있다. 본문에 제공된 새로운 제안식을 다시 기술하면 다음과 같다.

$$L_A = 50 - 9 \text{Log}(d) + S \quad (2)$$

S : 지반형태에 따른 계수로써

암반이 있는 경우 : 15

풍화토, 잔류토, 매립토등으로만 구성된 경우 : 0

그러나 본 연구의 결과로 제시한 새로운 예측식도 10% 이상의 오차율이 발생하고 있는 지역도 있다. 본 예측식은 서울시 일부지역의 다섯 측정에서 각각 3 - 8회의 측정에 의한 결과만을 토대로 작성된 것이므로 아직까지 완전하다고 할 수 없으며, 거리에 따른 사항은 Lange의 기본식을 용

용한 것이므로 그 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 보다 정확한 예측식의 정립을 위해서는 향후 다양한 지역에서 보다 많은 측정을 통하여 토질의 성질에 따라 적절한 조절을 하여야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Cyril M. Harris, "Noise Control in Buildings", R.R. Dinnelley & Sons Co., 1994
2. Leo L. Beranek, "Noise and Vibration Control" McGraw-Hill Inc., 1988
3. Hugh J. Saurenman, James T. Nelson, George P. Wilson, "Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control", NTIS, 1982.2
4. Leonard G. Kurzweil, Robert Lotz, "Prediction and Control of Noise and Vibration in Rail Transit System", NTIS, 1978.9
5. Paul J. Remington, Nicholas R. Dixon, Larry E. Wittig et al, "Control of Wheel/Rail Noise and Vibration", 1983.4
6. G.P. Wilson, "Groundborne vibration levels from rock and earth based subways", Wilson, Ihrig & Associates, CA. for Deleuw, Cater & Company, Washington D.C. 1971