

## 지하철 차량운행에 의한 인접구조물의 소음·진동영향 평가에 관한 연구

이인모<sup>1)</sup> · 최상순<sup>2)</sup> · 박보리나<sup>3)</sup>

### Prediction and Control of Noise and Vibration in Buildings from Underground Rail Systems

In-Mo Lee<sup>1)</sup>, Sang-Soon Choi<sup>2)</sup> and Borinara Park<sup>3)</sup>

#### ABSTRACT

The vibration resulting from track-train interaction is transmitted through the tunnel structure and the surrounding ground to adjacent buildings. This paper provides a review of the ground vibration propagation mechanism and the theoretical isolation effectiveness of each transit systems. Moreover, predictive vibration values estimated from various models are compared with measured results performed in Seoul Metropolitan Subways and evaluate the applicability of those models.

#### 1. 서 론

도심지의 심각한 교통문제를 해결하기 위한 대체 수단으로서 지하철이 건설되어 운행중이며 새로운 지하철의 건설이 서울, 부산, 대구, 인천 등지에서 한창 진행중이다. 그러나 지하철의 운행으로 인하여 발생하는 진동은 지하철의 인접구조물과 그 안에 있는 사람들에게 장애를 일으킬 수 있다.

현재 국내에서 사용하고 있는 진동예측방법들은 뉴욕 지하철이나 신간선에 대한 사례연구의 진동예측방법들을 그대로 사용하고 있으며 보다 일반화되고 정밀한 예측을 수행하지 못하고 있는 실정이다. 또 지하철 차량운행에 의한 진동과 소음을 줄이기 위한 많은 방법들이 제시되고 있는데 각 방법간에 진동감쇠효과를 정확히 파악하지 못하고 있는 실정이다. 지하철 차량운행에 의한 진동, 소음 발생체제와 인접구조물에 영향을 미치는 매카니즘이 매우 복잡하여

이를 정확히 예측하는 일이란 매우 어렵기 때문에 지금까지 발표된 대부분의 진동예측방법들은 많은 가정을 도입하여 차량과 트랙 그리고 지반을 이상화, 단순화시켜 유도되었다. 본 논문에서는 국내의 지하철 진동을 보다 명확히 평가할 수 있도록 지하철 진동의 예측과 관리를 위한 지금까지의 연구결과를 비교검토하고, 각종 지하철 진동예측 모델 방법들의 특징과 장단점을 밝히며, 서울지하철에서 진동계측을 실시하여 상기 여러 방법들의 타당성을 비교 검토하여 지하철 설계에 이용될 수 있도록 하였다.

#### 2. 지하철 차량에 의한 소음, 진동 발생

열차바퀴가 레일과 접촉할 때, 바퀴와 레일의 상호작용에 의하여 저항력이 발생하게 된다. 이 저항력이 레일 위의 접촉점에 작용하여 차량의 진동과 소음을 유발하게 되고, 레일하부로 전달되어 트랙을

\* 1994년 2월 22일 접수

1) 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

2) 현대건설(주)

3) 고려대학교 토목환경공학과 대학원 석사과정

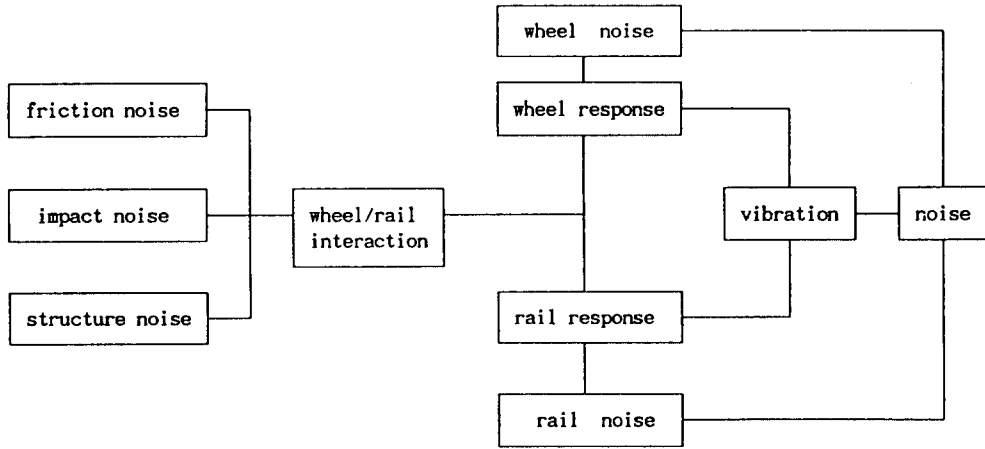


Fig. 1. Source of rail transit noise and vibration.

거쳐 터널의 바닥, 벽 및 천정을 진동시켜 이로부터 인접구조물의 진동 및 소음공해를 유발한다.

지하철 차량운행에 의한 진동 및 소음 계통도를 도시하면 다음과 같다.

진동 및 소음이 발생하는 원인은 바퀴의 찰상, 레일 연결부, 신호 분기소 및 기타 스위치가 있는 부분을 통과할 때이며 열차가 곡률반경이 짧은 곡선부를 지날 때 바퀴의 frange 부분이 레일의 rub 부분과 마찰하여 매우 높은 소음이 발생하는데 이것을 squeal noise라 한다. 그리고 레일과 바퀴의 미세한 표면거칠기에 의해 이들 사이에 불규칙한 힘과 수직방향의 운동이 야기되며 저주파의 진동이 발생되고 구조소음이 방출된다.

일반적으로 지하철 진동의 이론적 해석을 위한 바퀴-레일-침목(도상)-터널로 이어지는 4자유도계의 진동모델은 Fig.2와 같고 이로부터 4자유도계 진동방정식을 세울 수 있다.

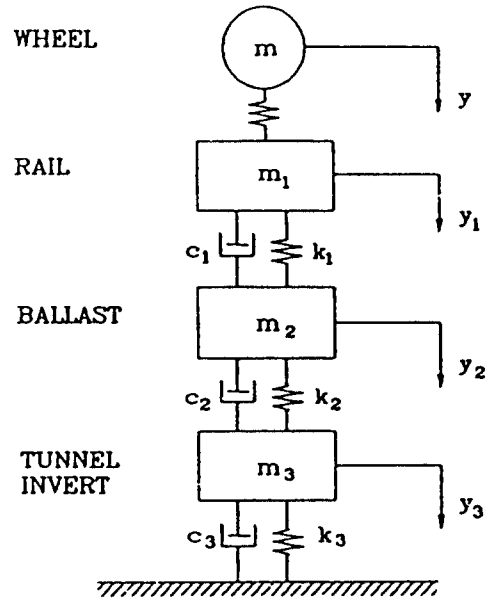


Fig. 2. 4-DOF model for a train-rail system.

$$i) m \frac{d^2y}{dt^2} + k(y - y_1) = 0$$

$$ii) m_1 \frac{d^2y_1}{dt^2} + k(y_1 - y) + c_1 \frac{d(y_1 - y_2)}{dt} + k_1(y_1 - y_2) = 0$$

$$iii) m_2 \frac{d^2y_2}{dt^2} + k_1(y_2 - y_1) + c_1 \frac{d(y_2 - y_1)}{dt}$$

$$+ k_2(y_2 - y_3) + c_2 \frac{d(y_2 - y_3)}{dt} = 0$$

$$iv) m_3 \frac{d^2y_3}{dt^2} + k_2(y_3 - y_2) + c_2 \frac{d(y_3 - y_2)}{dt}$$

$$+ k_3y_3 + c_3 \frac{dy_3}{dt} = 0$$

여기에서,

$y, y_1, y_2, y_3$  : 바퀴, 레일, 도상 및 터널의 변위  
 $m, m_1, m_2, m_3$  : 바퀴, 레일, 도상 및 터널의 질량

$k_1, k_2, k_3$  : 레일, 도상 및 터널의 강성계수  
 $c_1, c_2, c_3$  : 레일, 도상 및 터널의 감쇠계수  
 위의 방정식에서 감쇠계수는 상대적으로 매우 작은 값이기 때문에 이를 무시하고 정리하면 다음과 같이 터널의 진동가속도레벨을 추론할 수 있다.

$$\frac{d^2 y_3}{dt^2} \propto \frac{k_1^{0.3} k_2^{0.5} k_3^{0.4}}{I^{0.2} m_2^{0.3} m_3^{0.8}} \quad (1)$$

여기에서  $I$ 는 레일의 단면 2차 모멘트이다. 만약 터널의 질량과 스프링 상수, 그리고 레일의  $I$ 가 일정하다면 식 (1)은 다음과 같이 간단한 식으로 정리될 수 있다.

$$\frac{d^2 y_3}{dt^2} \propto \frac{k_1^{0.3} k_2^{0.5}}{m_2^{0.3}} \quad (2)$$

식 (2)를 보면 터널바닥에서의 진동가속도는 레일과 도상(ballast)의 강성과 질량의 함수임을 알 수 있다.

지하철 진동문제에 있어서 가장 큰 관심사는 트랙과 터널 그리고 지하철 차량의 물성치 변화가 터널과 인접구조물의 진동에 주파수 영역별로 어떠한 영향을 주는가에 있다고 하겠다. 따라서 본 논문에서는 여러 영향인자에 대하여 진동에 미치는 영향을 정성, 정량적으로 분석하였다. 이에는 여러 인자가 있으나 가장 큰 영향을 끼치는 것으로는 트랙 강성, 터널 제원, 차량 등이며 이들 인자가 미치는 영향을 분석·검토하였다.

### 2.1 트랙의 강성에 의한 영향

지하철 진동감쇠방안으로 가장 먼저 제안되는 방법이 트랙의 강성을 낮추는 것이다. 트랙의 종류에는 콘크리트 직결도상, Resiliently Fastener 도상, Ballast mat 도상 그리고 Floating slab 도상 등이 있다. 국내에서는 역내에만 콘크리트 직결도상을 채택하고 있으며 나머지 구간은 대부분 Ballast mat 도상을 채택하고 있다.

두개의 다른 트랙구조에 의해 터널 바닥에 전달되는 진동레벨의 차이는 트랙을 통하여 터널바닥에 전달되는 실효치 힘,  $F_{rms}$ (root mean square forces)을 대비하여 구할 수 있다.<sup>1)</sup>

$$\frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{k^{(2)}}{k^{(1)}} \cdot \frac{1 + Z_r^{(1)}/Z_w}{1 + Z_r^{(2)}/Z_w} \quad (3)$$

여기에서,

$k^{(1)}, k^{(2)}$  : 1, 2 레일 트랙의 강성계수

$Z_r^{(1)}, Z_r^{(2)}$  : 트랙구조 1, 2에서의 레일의 임피던스

$Z_w$  : 바퀴의 임피던스

레일의 임피던스는 연속용접레일을 탄성기초 위의 Beam으로 가정하여 구하며, 레일과 바퀴의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_r = \frac{2EI}{\omega} (1+i)k_p^3 \quad \omega > \omega_r$$

$$Z_r = 2\sqrt{2} \frac{EI}{\omega} i k_p^3 \quad \omega < \omega_r$$

$$Z_w = i \omega m_w$$

여기에서,

$$\omega_r^2 = k/m'$$

$$k_p^4 = \frac{k}{EI} \left| \frac{\omega^2}{\omega_r^2} - 1 \right|$$

$EI$ 는 레일의 휨 강성계수,  $m'$ 는 단위길이당 레일의 질량, 그리고  $m_w$ 는 바퀴의 질량이다. Fig. 3은 주파수에 대비한 레일과 바퀴의 임피던스를 나타낸 것이다.

저주파수 영역에서는 레일의 임피던스가 바퀴의 임피던스보다 크고 고주파수 영역에서는 그 반대임을 알 수 있다. 따라서 식 (3)으로부터 다음과 같은 관계식으로 정리되며 트랙강성에 의한 영향은 저주파수보다 고주파수에서 크게 나타남을 알 수 있다.

$$\text{저주파수 영역} : \frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{(k^{(2)})^{1/4}}{(k^{(1)})^{1/4}}$$

$$\text{고주파수 영역} : \frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{k^{(2)}}{k^{(1)}}$$

각 트랙구조에 대한 진동레벨의 감쇠정도의 차이는 최<sup>9)</sup>의 논문에 상세히 정리되어 있다.

### 2.2 터널의 제원에 의한 영향

터널바닥의 진동은 대부분 Flexural(bending) mo-

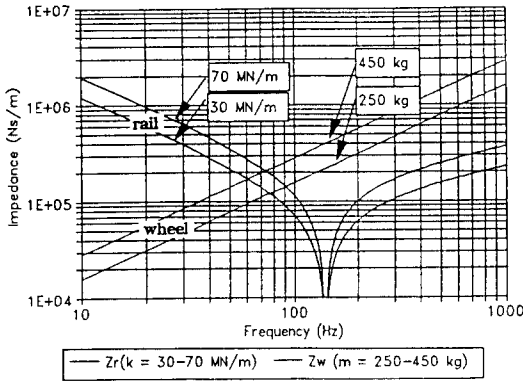


Fig. 3. Impedance of rail and wheel.

des에 기인한다고 알려져 있다. 터널바닥의 정확한 진동모드를 해석하기는 매우 어려우나 콘크리트 터널바닥을 터널벽에 의하여 단순지지되어 있는 단순보로 가정하여 다음과 같이 기본 진동모드를 구할 수 있다.

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -(\gamma A/g) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4)$$

식 (4)로부터 단순보 양단의 경계조건을 이용하여 터널바닥의 진동모드를 구하여 보면 다음과 같다.

$$f_1 = 1448.8 h/L^2$$

터널 천정의 경우에도 동일한 방법으로 기본 진동수를 계산하며 단지, 상재하중이 등분포하중으로 천정에 작용한다고 가정하여 기본 진동수를 구한다.

일반적으로 터널바닥의 기본진동모드보다 작은 진동수 영역의 진동은 급격히 감소한다. 따라서 터널바닥의 폭을 좁게할수록 바닥의 기본진동수가 커져 이보다 작은 진동수 영역의 진동 즉 「과장/2」가 터널의 폭보다 큰 진동이 급격히 감소된다. 터널의 폭이 8m이고 두께가 0.4~1.0 m의 경우  $f_1$ 은 9.1~22.6 Hz의 값을 갖는다.

터널의 질량의 변화에 따른 터널바닥의 진동레벨은 바퀴-레일-트랙-터널의 4자유도계 모델의 해로부터 다음과 같이 유도할 수 있다(+: 증폭, -: 감쇠).

$$I.L = 16 \log\left(\frac{m_{11}}{m_{12}}\right) \quad (\text{dB})$$

또한, 터널의 벽두께의 변화에 따른 진동감쇠는

Table 1. Effect of velocity vibration levels based on standard design of a double track tunnel

구분	Pattern	Pd-2	Pd-3	Pd-4	Pd-5
1st Lining	1st	5	5	5	5
	2nd	10 25	10 20	10 15	5 10
	3rd	10	5	0	0
2nd Lining		30	30	30	30
I.L (60 cm basis)		2.02	4.22	6.66	9.39

다음과 같은 몇가지 공식이 제시되어 있다.

$$\text{뉴욕 지하철 모델 : } I.L = 40 \log(h_1/h) \quad (5)$$

$$\text{Koch 공식 : } I.L = (59 \sim 69) \log(h_1/h) \quad (6)$$

그러나 터널의 질량 변화로 인한 터널의 진동은 전주파수 영역에 걸쳐 일정하지는 않다. 터널바닥을 단자유도계 모델로 가정하면 질량임피던스는 주파수에 단순 비례하며 터널의 질량 증가로 인한 진동감쇠가 저주파수 영역에서는 매우 작게 나타나며 고주파수 영역에서 크게 나타남을 예측할 수 있다. Gutowski는 30 Hz를 기준으로 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$I.L = 56 \log(h_1/h) - 10 \log(f/30)^2 \quad f < 30 \text{ Hz} \quad (7a)$$

$$I.L = 56 \log(h_1/h) \quad f > 30 \text{ Hz} \quad (7b)$$

여기에서 log 안의  $h_1$ 은 기준 터널벽 두께(m)이다. 터널벽 두께가 60 cm( $h_1$ )에서 40 cm로 줄어들 경우 식 (5), (6), 그리고 (7)에 의한 진동증폭은 각각 7 dB, 10.4~12.15 dB, 9.86 dB(63 Hz 영역)으로써 제안식에 따라 최대 12.15/7 정도 차이가 났으며, 그 진동영향 또한 큼을 알 수 있었다.

서울지하철 복선터널의 표준설계에 따른 진동영향을 검토하여 보면 Table 1과 같다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 터널벽 두께가 일정하게 줄어들감에 따라 점차 큰 폭으로 진동증폭이 발생하며 지보 패턴이 한 단계씩 달라짐에 따라 약 2.5 dB 정도의 진동속도 차이를 보임을 알 수 있었다.

### 2.3 차량에 의한 영향

진동에 영향을 미치는 차량의 물성치로는 차량의 속도, 질량 그리고 Primary Suspension Stiffness & Damping 등이 있는데 가장 큰 영향을 미치는 요소는 차량의 속도와 질량이며, 이를 분석하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

차량의 운행속도에 의하여 지하철 구조물과 지표면의 진동레벨에 미치는 영향은 여러 학자들간의 접근방법과 실험방법에 대해서 차이는 보이나 그 값에 대해서는 대부분 일치된 의견을 보이고 있음을 알 수 있었다. 24~150 km/h 사이에서 차량의 속도가 터널 구조물과 지표면의 진동레벨에 미치는 영향은 다음과 같다.

$$I.L = 20 \log(S) \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

S: 차량의 속도 (m/s)

뉴욕 지하철의 진동·소음에 대한 속도의 영향은 다음과 같은 식으로 제시되었다.<sup>2)</sup>

$$I.L = 16.6 \log(S/56) \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

S: 차량의 속도 (km/h)

차량의 속도가 10 m/s(36 km/h)에서 20 m/s(72 km/h)로 두배 증가할 경우 식 (8)과 (9)에 의한 진동증가량은 각각 6 dB, 5 dB로써 비교적 일치된 값을 보여 줌을 알 수 있었다.

국내의 차량속도는 각 호선마다 다르나 직선구간에서 60 km/h에서 80 km/h 사이로 운행중이다. 따라서 차량속도가 60 km/h에서 80 km/h로 증가할 경우에 약 2.5 dB의 진동증폭이 예상된다. 따라서, 여타의 영향에 비하여 차량속도에 의한 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

차량의 질량은 차체, 대차, 그리고 차축의 합을 말한다. 여러 학자들에 의해 계측된 자료들에 의하면 일반적으로 차량의 질량이 두배가 될 때 전 주파수 영역에 걸쳐 약 2~4 dB의 진동레벨이 증가하는 것으로 나타났다. 같은 차량과 트랙 그리고 기타의 조건이 같고 차량의 질량만이 다를 경우 차량의 질량에 의한 진동레벨의 영향은 4자유도 모델로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I.L = 20 \log\left(\frac{m_{v2}}{m_{v1}}\right) \quad (\text{dB})$$

### 3. 진동의 전파와 감쇠

지하철 차량의 운행에 의하여 차량의 동하중이 레일-트랙-터널바닥-터널구조물-인접구조물의 전달체계로 진동이 전파된다. 이러한 영향인자들은 보통 진동원과 진동전달경로 그리고 수신측 구조물등의 세 가지 범주로 구분된다. 이러한 전달체계를 분석하기 위하여 차량의 동하중이 터널바닥까지 전달되는 과정은 동역학의 자유도계 모델이나 전자회로망(임피던스 모델)으로, 터널구조물에서 인근 구조물까지 전달되는 진동은 파동전파의 일반적 원리인 재료 감쇠(Material damping)와 기하 감쇠(Geometrical damping)로, 전달되어 온 진동파는 인접구조물과의 간섭 손실(Coupling loss)과 구조물내에서의 전달(floor loss)등으로 해석할 수 있다. 기하감쇠와 재료감쇠에 대하여는 기존의 많은 연구 결과들이 있어 생략하며, 본 논문에서는 서로 다른 지반의 통과로 인한 영향을 검토하고자 한다.

Tokita는 입사각과 굴절각을 고려하여 서로 다른 지반의 통과로 인한 진동감쇠량 산출공식을 다음과 같이 제안하였다.<sup>3)</sup>

$$A_i(\text{dB}) = 10 \log\left[1 - \frac{\rho_2 C_2 \cos \alpha_1 - \rho_1 C_1 \cos \alpha_2}{\rho_2 C_2 \cos \alpha_1 + \rho_1 C_1 \cos \alpha_2}\right] \quad (10)$$

따라서 지하철 터널로부터 인접구조물까지의 최단 거리에서 두 지반의 접촉면과의 입사각을 알면 식(10)에 의하여 간섭에 의한 진동감쇠량을 구할 수 있다.

압축파의 입사각에 따라 진동감쇠량이 크게 영향을 받지 않는다는 사실을 전제로 하여 Ungar가 제안한 다음과 같은 간단한 공식이 있다.<sup>4)</sup>

$$A_i = -20 \log\left[\frac{1}{2}\left(1 + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1}\right)\right] \quad (11)$$

Table 2는 지반 1에서 지반 2로의 파전달에 의한 영향을 전형적인 토질정수를 이용하여 정리한 것이다. Table 2로부터 연약한 지반에서 견고한 지반으로 진동이 전달되는 경우에는 진동감쇠가 발생하나, 반대로 견고한 지반으로부터 연약한 지반으로 진동파가 전달되는 경우에는 진동증폭이 발생하며 그 크기 또한 무시할 수 없을 만큼 큼을 알 수 있으며, Tokita 공식보다는 Ungar 공식이 다른 매질 통과로 인한 증

Table 2. Effect of soil layering

Method	Tokita	Ungar	Tokita	Ungar	Tokita	Ungar
soil 1						
soil 2						
	Sand		Clay		Rock	
Sand	0	0	1.90	3.78	2.62	5.23
Clay	-3.44	-6.88	0	0	1.79	3.57
Rock	-7.59	-15.18	-3.08	-6.16	0	0

폭이 더 컸으며, 특히 연약한 지반→견고한 지반으로 갈 때의 감소효과가 견고한 지반으로부터 연약한 지반을 통과할 때의 증폭보다 훨씬 더 큼을 보여준다.

우리나라의 경우 균질지반은 거의 없고 서울지하철의 경우 매립토/층적토/풍화토/풍화암/연암의 일련의 층상구조를 이루고 있음을 볼 때 이의 고려는 필수적이라 할 수 있다.

#### 4. 지하철 진동예측 모델과 실측자료를 통한 진동모델평가

##### 4.1 지하철 진동예측모델

지하철에 의한 소음진동 예측은 1971년 Lang에 의하여 처음 연구된 이후 조금씩 발전해 왔다.<sup>5)</sup> 앞에서 언급한 바와 같이 대부분의 예측모델들은 진동원과 진동경로 그리고 수진측 구조물의 반응 등을 각각 규명하고 이를 종합하여 수진측 구조물에서 예상되는 진동레벨을 제시하였다. 많은 예측모델들은 상세한 분석적 모델이 아닌 현장경험과 일반적으로 받아 들여지고 있는 파전달의 원리 등에 기초하고 있다. 본 절에서는 진동예측 모델들을 비교검토하여 국내의 지하철 설계에 이용될 수 있는 모델 제시를 하고자 하였다.

주요한 진동예측 모델들로는 Wilson 모델, Ungar & Bender 모델, Tokita 모델, Kurzweil 모델, 뉴욕 지하철 모델, 그리고 Kraemer 모델등이 있다.<sup>6,8)</sup> 이 중에서 Wilson 모델, Ungar & Bender 모델, Kurzweil 모델 그리고 Kraemer 모델등은 주파수별 진동레벨을 예측하며 나머지 모델들은 Overall 진동레벨을 제시한다. 각 진동예측모델들에 대한 상세 사항은 최<sup>9)</sup>의 논문에서 수록되어 있다.

Fig. 4는 각 진동모델들이 제시한 진동원의 진동레

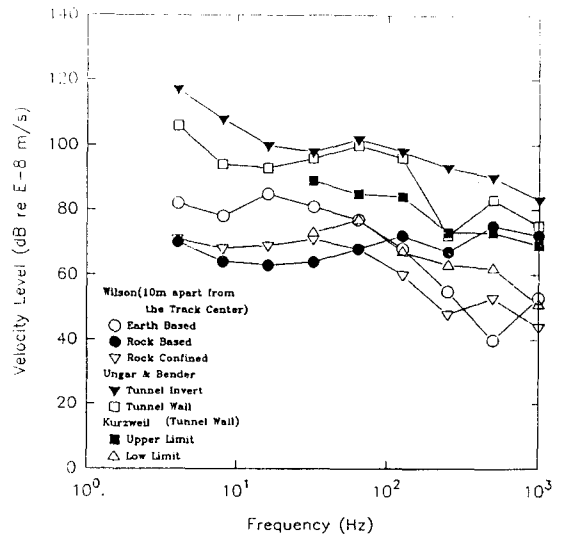


Fig. 4. Expected vibration velocity levels of source (dB re 10<sup>-8</sup> m/s).

벨이다. 이러한 값들 사이에는 많은 차이를 보이고 있는데 이는 진동레벨을 계측한 지하철들의 트랙, 차량, 터널구조등에서 많은 차이가 있으며 진동원의 위치를 터널바닥과 터널벽 혹은 터널하부 등으로 서로 다르게 제시하였기 때문이다.

이러한 차이를 극복하기 위하여 진동원의 특성이 다른 지하철에 이러한 진동원레벨을 적용할 수 있는 보정기준을 각 모델마다 제시하였다. Table 3은 진동예측모델들이 진동원의 크기를 보정할 때 고려한 각 Transit Systems의 영향요소들이다.

반면 Kraemer는 열차바퀴로부터 터널바닥에 전달되는 힘과 속도의 동역학계를 Circuit analogy로 변환시켜 터널바닥의 진동레벨을 구하였다. 즉 미세한 거칠기를 갖고 있는 바퀴와 레일의 접지력, F<sub>wr</sub>은

Table 3. Factors on vibration level adjustments

Factors of Effect	Description
Source Location	Tunnel Wall, Invert
	Below Tunnel
	Apart from the Tunnel Center
Confining Soil	Earth Based Tunnel
	Rock Based Tunnel
	Rock Confined Tunnel
Train	Weight, Speed, Length
Wheel & Rail	Surface Condition
	Con., Discon. Rail
	Stiffness
Track	Concrete Track
	RS-STEDEF Track
	Floating Slab Tunnel
	Stiffness of Track
Tunnel	Thickness of Wall and Invert
	Pattern-Single, Double Tunnel
	Material-Steel, Concrete
	Location-Station

다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{wr} = V_w Z_w = V_r Z_r = V_{wr} \left( \frac{Z_w Z_r}{Z_w + Z_r} \right)$$

$$V_r = V_{wr} \left( \frac{Z_w Z_r}{Z_w + Z_r} \right) \frac{1}{Z_r} = V_{wr} \left( \frac{Z_w}{Z_w + Z_r} \right)$$

여기에서  $V_w$ ,  $V_r$ 는 바퀴와 레일의 속도이며  $V_{wr}$ 은 바퀴와 레일의 상대속도이다. 레일의 속도는 저주파수 영역에서는 차량의 의사정적하중(Quasi-static load)에 의해, 고주파수 영역에서는 레일의 표면거칠기에 의해 결정된다. 터널바닥의 진동레벨은 트랙과 터널의 임피던스, 그리고 레일의 속도레벨로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_{v(g)} = L_{v(r)} + L_{z(rs)} - L_{z(g)}$$

인접구조물까지 전달되어 온 진동파에 의한 구조물의 반응은 구조물의 규모, 기초양식, 수진축 위치(지하, 지상)등 여러인자들에 의하여 영향을 받으며 이들의 영향정도에 대한 평가도 각 모델마다 제각기

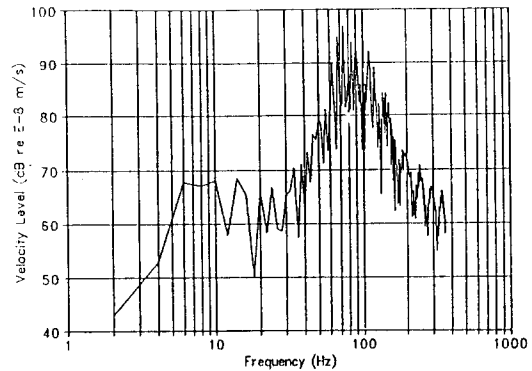


Fig. 5. Measured vibration velocity level at the tunnel invert (dB re  $10^{-8}$  m/s).

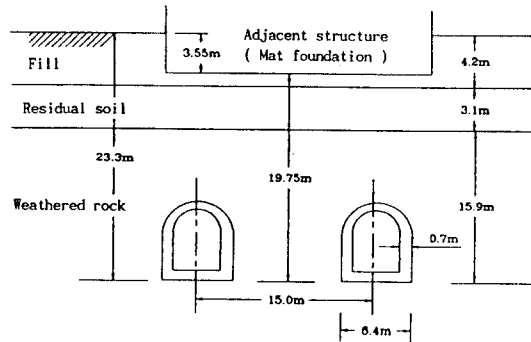


Fig. 6. Cross-sectional view of an adjacent structure and subway tunnels.

다르다.<sup>9)</sup>

#### 4.2 실측자료를 통한 진동모델평가

앞에서 요약한 진동모델들은 각기 다른 지반특성과 차량특성 그리고 터널특성을 갖는 지하철로부터 유도된 것으로 국내 진동예측에 그대로 적용할 수 있는지에 대해서는 의문의 여지가 많다. 따라서, 본 절에서는 국내의 지하철 특성을 대표할 만한 도상구조와 지반조건 등을 갖춘 곳에서의 계측값을 가지고 진동예측모델을 평가해 보고자 하였다.

터널 바닥의 진동레벨 측정을 위하여 지하철 1호선 콘크리트 도상에서 계측을 실시하였으며, Fig. 5에 이 결과를 나타내었다.

인접구조물에서의 진동계측은 국내의 대부분의 지하철 궤도구조가 Ballast 도상이고 지반특성이 토질과 암반이 연하여 있는 특성을 띠는 점을 감안하여 서울

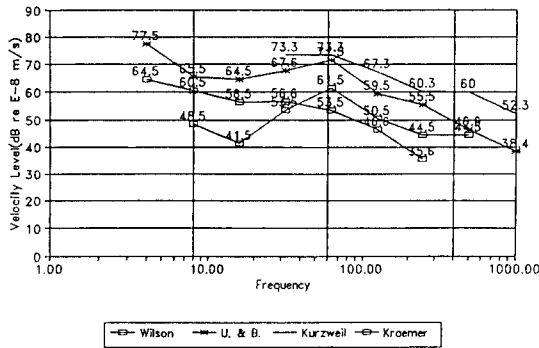


Fig. 7. Expected vibration velocity levels at the basement (dB re  $10^{-8}$  m/s).

Table 4. Expected vibration velocity overall levels at the basement. (dB re  $10^{-8}$  m/s)

예측 모델	Overall 진동레벨
Wilson 모델	66.7
Ungar & Bender 모델	78.
Tokita 모델	81.0
Kurzweil 모델	76.9
뉴욕 지하철 모델	52.5
Kraemer 모델	62.4

지하철 3호선이 지나는 교대역 부근 건물에서 실시하였으며, Fig. 6은 터널과 건물의 단면도이다. 계측 결과 약 70~75 dB(re  $10^{-8}$  m/s)의 Overall 진동레벨이 계측되었다.

진동예측 모델의 진동원 레벨을 이용한 인접구조물의 진동영향평가를 위하여 아래와 같은 기본제한으로부터 각 모델들의 진동원 보정을 실시하고 진동레벨에 영향을 미치는 기타 요인들을 고려하였다. 이로부터 나온 결과를 Fig. 7과 Table 4에 나타내었다.

- \* 기본제한 : 터널벽 두께: 0.7 m
- 터널 바닥 길이: 7.0 m
- 터널지지 강성계수: 40 MN/m<sup>2</sup>
- 직선구간 운행속도: 80 km/h

예상되는 지하실의 진동레벨은 약 40~80 dB의 넓은 분포를 보이고 있으며, Overall 진동레벨은 약 52~81 dB이다. 다른 모델과 현격한 차이를 보이는 뉴욕지하철 모델에 의한 값을 제외시키면 예상되는 진동영역은 62.4~81 dB로 상당히 줄어든다. 따라서 계측값이 70~75 dB인 것을 반영하면 진동모델에 의

한 예측값이 계측값의 상하로 약 7 dB의 폭을 갖으며 잘 일치한다.

각 모델을 자세히 분석하여 보면 다음과 같다.

#### 4.2.1 Wilson 모델

본 모델은 진동원의 기준상태를 제시하였는데 트랙의 강성계수에 의한 보정공식이 주어지지 않았다. 강성에 따른 보정을 실시하면 저주파수 영역에서는 약 1 dB, 고주파수 영역에서는 약 3 dB의 작은 증폭이 발생한다. 또한, 구조물까지의 거리에 따른 감쇠정도도 다른 모델들과 마찬가지로 파전달에 기본한 감쇠곡선에서 계산하여 크게 문제되지 않는다. 그러나, 수진축 구조물과 인접구조물과의 coupling loss가 다른 모델들에 비하여 매우 크게 제시되었다. 타 모델에서는 일반적으로 저층의 조적식 구조물에 대한 coupling loss는 약 3 dB 정도가 제시되었는데 반하여, 본 모델에서는 탁월주파수 영역인 63 Hz 영역에서 약 12 dB의 감소를 제안하였다. dB 단위는 대수단위이므로 12 dB의 차이라는 것은 지반과 구조물 바닥과의 속도비가  $10^{12/20}$ 이다. 즉, 수진축구조물의 진동속도가 인접지반의 속도의 1/4로 줄어든다는 것을 의미한다.

#### 4.2.2 Ungar & Bender 모델

본 모델에서 제시한 토사터널의 진동레벨은 타 모델에 비하여 매우 큰 편이다. 그러나 암반터널의 경우 진동원 보정값이 커서 타 모델과 비슷하게 된다. 결과적으로 국내의 암반을 관통하는 지하철 진동을 비교적 정확하게 예측할 수 있었으나 토사 터널의 경우에는 이 모델의 적용은 적절하지 않을 것으로 판단된다.

#### 4.2.3 Tokita 모델

진동원의 진동레벨이 타 모델에 비하여 가장 크기 때문에 지하실에서의 진동이 가장 크게 예측되었다. 그러나 계측된 진동레벨에 비하여 과도하게 크지 않기 때문에 인접구조물에 예상되는 진동레벨의 상한값으로 사용할 수 있다. 만약, 진동의 문제가 제기될 수 있는 지점에 대하여 본 모델에 의해 진동값을 예측하였을 때 진동기준치 이하의 값이 나온다면 진동에 대하여 안전하다고 볼 수 있다. 그러나, 진동원의 진동레벨을 보정할 수 없다는 단점을 갖고 있으며, 지하철의 하부에 진원이 위치하며 지하철이 장애물과 같이 작용한다는 주장에 대해 검증받지 못하고 있는 실정이다.



#### 4.2.4 Kurzweil 모델

본 모델의 특성은 많은 제측자료를 기초로 하여 진동원의 진동레벨 범위를 제시하였다는 점이다. fastener 도상과 ballast 도상의 진동레벨이 거의 대부분이 범위안에 해당되어 타 모델에 비하여 가장 정확한 진동원의 진동레벨 범위를 제시하였다고 판단된다. 또한, 진동감쇠요인들에 대한 보정이 비교적 정확하며 거리에 따른 감쇠공식은 파 전달의 이론에 충실하다.

그러나 지반과 구조물과의 coupling loss가 구조물의 종류별로 명확하게 제시되지 않고 5~15 dB의 넓은 범위를 제시하여 구조물의 규모에 따른 정량적인 감쇠량 산출이 모호하다.

#### 4.2.5 뉴욕 지하철 모델

이 모델도 Kraemer 모델과 마찬가지로 진동원의 진동레벨이 너무 낮게 평가되어 있다. 따라서 국내 지하철 진동에 대한 기왕자료의 범위를 크게 벗어나고, 타 모델에 비해 현저하게 낮게 제시된 진동원의 크기로 인하여 국내의 지하철 진동예측모델로 타당하지 못함을 알 수 있다. 그러나, 진동원의 진동레벨을 보정하는 공식들은 타 모델에서 제시하고 있는 보정값들과 거의 같을 뿐만 아니라 그들이 제시하지 못하고 있는 보정요소들에 대해서까지 제안하였기 때문에 진동원의 진동레벨을 보정하는 가장 일반적인 모델로 받아들여지고 있다.

#### 4.2.6 Kraemer 모델

진동원의 진동레벨이 다른 모델에 비해 매우 작으므로 인접건물의 진동이 작게 나왔다. 이처럼 진동원의 진동레벨이 작은 것은 레일의 속도레벨,  $L_{v(r)}$ 이 너무 작는데 기인한다. 레일의 속도레벨은 레일의 표면거칠기의 함수로 정의하였는데, 레일의 표면거칠기는 고정된 것이 아닌 가변인자이므로 레일의 속도레벨 결정에 대한 의문이 제기된다.

본 모델은 매우 정밀하고 복잡한 계산과정을 거쳐 진동레벨을 결정하였지만, 인접구조물의 진동영향평가가 주 목적인 경우에는 너무 세분화된 분석보다는 과감한 가정과 경험상수들을 적용한 타 모델들이 더욱 효과적임을 알 수 있다. 본 모델은 인접구조물의 진동영향평가보다는 터널자체의 거동을 정확히 파악하는데 더욱 적절한 모델이라 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 지하철 진동의 발생의 체계를 규명

하고, 진동의 크기에 영향을 미치는 요소들에 대하여 살펴보았다. 또한, 진동예측모델들에 대하여 살펴보았으며 국내 지하철의 적용에 대한 타당성을 규명해 보았다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 지하철 진동을 가장 효율적으로 감쇠할 수 있는 방법은 트랙의 설계에 의한 방법과 터널설계에 의한 방법이 있다. 트랙의 설계는 강성계수에 따라 주파수영역별로 다르게 나타난다. 이에 대한 효과를 각종 문헌조사를 통하여 정리분석하였으며 이를 정리하면 다음과 같다. Resiliently fastener 트랙은 탁월주파수가 약 63 Hz이며 overall 진동레벨은 약 80~83 dB 정도로써 진동감쇠효과는 콘크리트 직결도상에 대비하여 약 10~15 dB 정도이다. Ballast 트랙은 탁월주파수가 약 50~75 Hz이며 overall 진동레벨은 약 83 dB이다. 탁월주파수영역의 진동감쇠를 위하여 Ballast mat를 도입하였을 경우 overall 진동레벨은 약 75 dB 정도로써 진동감쇠효과는 직결도상에 대비하여 주파수에 따라 약 5~20 dB 정도이다. Floating slab 트랙은 탁월주파수가 8~31.5 Hz 정도로써 가청주파수 영역의 진동레벨을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. Overall 진동레벨은 약 80 dB로써 진동감쇠효과는 직결도상에 대비하여 10~20 dB이다.

2) 지반을 통한 지반감쇠는 기하감쇠와 재료감쇠, 그리고 서로 다른 지반의 통과로 인한 영향 등을 고려해야 한다. 국내의 지하철은 대부분 암반지반을 통과하므로 진동파가 암반에서 토사로 전달될 때 진동증폭이 발생하므로 이러한 영향을 진동예측시에 반드시 고려하여야 한다. 본 비교검토 연구결과가 제안된 Tokita 공식보다는 Ungar 공식이 다른 매질 통과로 인한 증폭이 더 컸으며 특히 연약한 지반에서 견고한 지반으로 갈 때의 감쇠효과가, 견고한 지반에서 연약한 지반을 통과할 때의 증폭보다 훨씬 더 크며 모래에서 암반으로 들어갈 때 최대 15 dB 정도의 큰 감소를 보여 주었다.

3) 터널진동에 영향을 미치는 요소들의 영향정도를 살펴보면 다음과 같다.

터널 바닥의 거동은 flexural(bending) mode에 의해 지배되므로 터널폭을 좁게 할수록 저주파수 영역의 진동을 크게 줄일 수 있다. 차량의 속도와 질량, 터널의 질량이나 벽 두께에 의한 터널의 진동영향은 모두 대수적인 함수관계이다. 차량의 속도와 질량이

두배로 증가할 때 각각 5 dB, 3 dB 정도의 진동증폭이 발생하는 반면, 터널의 폭 두께가 두배가 될 경우 약 5~10 dB의 진동감쇠가 발생하여 차량보다 터널의 벽 두께가 더 큰 진동영향 인자임을 알 수 있다. 국내의 차량 속도는 60~80 km/h이므로 진동레벨이 약 2.5 dB의 폭을 갖는 반면, 국내의 터널벽 두께가 0.4~0.6 m이므로 진동레벨이 약 5.53 dB의 폭을 나타낸다. 따라서 차량의 중량화에 따른 진동증폭은 터널벽 두께를 약간 증폭시킴에 의하여 적절히 감쇠시킬 수 있다.

4) 지하철 1호선의 진동레벨을 측정된 결과 콘크리트 직결도상의 일반적인 제시값보다 5~15 dB 정도가 큰 100~112 dB로 나타났다. 따라서 인접구조물의 진동레벨을 평가할 때 진동원의 진동레벨을 다소 크게 잡아야 할 것으로 사료된다. 또한 국내 지하철 진동에 대해 진동예측모델들을 적용해 보았다. 진동 모델에 의한 예측값들이 계측값을 포함하는 범위의 값을 나타내었다. 그 중 Tokita 모델은 상한값을 Kraemer 모델과 Wilson 모델은 하한값을 나타내었으며 Kurzweil 모델, Ungar & Bender 모델 등은 계측값과 비교적 근사한 값이 나왔다. 따라서 진동 예측모델들에 의한 국내 지하철 진동을 적절히 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.

**\* 용어 설명 \***

- C : 진동과 속도(m/s)  
 D : Constrained Modulus  
 L : 진동레벨, 터널바닥의 폭  
 Z : 임피던스(Impedance)  
 A : 단면적(m<sup>2</sup>), 지반 진동감쇠량(dB)  
 S : 차량 속도(m/s)  
 F<sub>rms</sub> : root mean square force  
 LL : transit system에 의한 진동감쇠량(dB)  
 r : 거리(m)  
 h : 터널 바닥 혹은 벽 두께(m)  
 m : 차량 질량(kg)  
 t : 시간(sec)  
 f : 진동수(sec<sup>-1</sup>)  
 k : 강성계수  
 α : 감쇠 계수(m<sup>-1</sup>), 파의 입사각 혹은 굴절각

- ρ : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 η : 손실 계수(-)  
 γ : 단위 중량(kgs/m<sup>3</sup>)  
 ω : 각 진동수(rad/sec)

## 6. 감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) Bender, E.K. et al., 1969, "Effects of Rail-Fastener Stiffness on Vibration Transmitted to Buildings Adjacent to Subway", Bolt, Beranek and Newman, Inc., Report 1832.
- 2) Kurzweil, L.G. and Ungar, E.E., 1982, "Prediction of Noise and Vibration in Buildings near the New York Subway", Proceedings, Inter-Noise 82, 213-216.
- 3) Tokita, Y. et al., 1978, "On the Groundborne Noise Propagation from Subway", proceedings, 96th Meeting of the Acoustical Society of America.
- 4) Ungar, E.E., & Bender, E.K., 1975, "Vibrations Produced in Buildings by Passage of Subway Trains: Parameter Estimation for Preliminary Design", Proceedings, Inter-Noise 75, 491-498.
- 5) Lang, J., 1971, "Results of Measurements on the Control of Structure-borne Noise from Subway", 7th International Congress on Acoustics, Budapest, 421-424.
- 6) Wilson, G.P., 1971, "Noise and Vibration Characteristics of High Speed Transit Vehicles", Report No. DOT-OS-A9-032, OST-ONA-71-7.
- 7) Kurzweil, L.G., 1979, "Ground-borne Noise and Vibration from Underground Rail Systems", Journal of Sound and Vibration 66(3), 363-370.
- 8) Kraemer, S., 1984, "Noise and Vibration in Buildings from Underground Railway Lines", Ph.D. Thesis, University of London.
- 9) 최상순, 1993, "지하철 차량 운행에 의한 진동영향 평가에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교.