

지하철 차량 운행에 의한 진동영향평가: State of the Art

Prediction and Control of the Propagation of Underground
Train Systems-induced Ground Vibration: State of the Art

이 인 모^{*1}
최 상 순^{*2}
박 보리나라^{*3}

SYNOPSIS : Ground-borne vibration is one of the main causes of environmental impact from subway systems. The vibration resulting from track-train interaction is transmitted through the tunnel structure and the surrounding ground to adjacent buildings. This paper provides a summary of proposed noise and vibration criteria, a review of the ground vibration propagation mechanism and the theoretical isolation effectiveness of each of the following underground transit systems : track, tunnel and vehicle itself.

1. 서론

도심지의 심각한 교통문제를 해결하기 위한 대체수단으로서 지하철이 제시되어 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. 또한, 지하철 차량운행에 의한 진동과 소음을 줄이기 위한 많은 방법들이 제시되고 있는데 각 방법간에 진동감쇠효과를 정확히 파악하지 못하고 있는 실정이다.

지하철 차량운행에 의한 진동, 소음 발생체계와 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 유도하였다.

본 고에서는 아직 정립되지 않은 지하철 진동에 대한 피해규준 등을 정리하고 지하철 진동의 발생체계를 분석하며, 진동의 크기에 영향을 미치는 요소들을 비교분석하여 효과적인 진동감쇠방법을 알아보았다.

2. 소음, 진동 규준

2.1 소음 규준

지하철 차량운행에 의해서 발생하는 소음, 진동의 탁월주파수는 저주파수로서 대부분 100 Hz 이하의 저주파수 소음이며 이 이상의 주파수 영역에서는 급격하게 떨어지는 양상을 보인다. 이렇게 탁월주파수가 낮은 소음은 같은 소음레벨을 갖는 전 주파수영역의 소음에 비하여 더욱 심각한 것으로 알려져 있는데 이는 고주파수 소음에 의해서 저주파수 영역의 소음이 잠식(Masking effect)되어 버리지 않고 단지 저주파수만의 소음이 발생할 경우가 전 주파수 영역의 소음보다 더 심각하다는 것이다. 비록 많은 문헌에서 이러한 영향을 고려한 저주파수 소음의 피해에 대해서 다루었지만 지하철 차량운행에 의해서 발생하는 소음피해에 대해서는 상대적으로 매우 적은 연구가 이루어졌을 뿐이다.

따라서 현재 지중소음의 허용 기준치는 APTA Guideline에서 제안된 값이 일반적인 차량 운행에 대해 적용되고 있으며 표 2.1에 제시되어 있다.

*1 정회원 : 고려대학교 토목환경공학과 부교수

*2 : 현대건설(주)

*3 : 고려대학교 일반대학원 석사과정

2.2 진동 기준

진동에 대한 기준은 인체에 대한 기준과 구조물에 대한 기준 그리고, 침하에 대한 기준으로 나눌 수 있다.

2.2.1 인체에 대한 기준

병원이나 병원 요양소같이 정신적인 안정을 요구하는 곳에서 매우 예민한 사람이 진동을 인식하는 시점을 아는 것은 중요한 일이다.

인체에 대한 진동기준을 정의하는데는 데시벨을 단위로 사용하는 것과 K 값을 사용하는 것으로 나눌 수 있으나 근본적으로는 같은 단위이며 자세한 설명은 생략한다.

피해기준은 제안자나 나라마다 다르며 사람이 느끼는 정도에 따른 기준치도 약간의 차이를 보이고 있는데 인식의 시점과 불쾌감을 느끼는 시점을 정리하면 표 2.2와 같다.^{(1),(2),(3)}

2.2.2 건물에 대한 기준

진동에 의한 건물의 진동피해는 크게 전체적 피해(Structural damage)와 국부적 피해(Architectural damage)로 구분하며 전체적 피해는 유리의 파손이나 심각한 벽의 균열등이 발생하는 것을 말하며, 국부적 피해는 얇은 유리의 균열 발생이나 오래된 균열이 다시 벌어지는 것 등을 말한다.

ISO의 기준을 보면 건물에 대한 피해시점의 상한으로 6 mm/s(충격에는 5~30 mm/s)를 제시하였다. 미국에서 일반적으로 사용되고 있는 허용진동기준은 50.8 mm/s이며 CHABA의 기준은 25.4 mm/s를 제시한다.⁽⁴⁾ 그러나 진동에 민감한 건물인 노후된 건물이나 문화재 등에는 25.4 mm/s를 적용하며 그외의 일반적인 건물에는 50.8 mm/s를 적용하는 것이 일반적이다.

그림 2.1은 지하철이 운행하는 주변의 지반진동의 전형적인 레벨과 진동에 노출된 인간과 건물에 대한 여러 기준들을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 저주파수 영역의 진동이 건물에 큰 피해를 끼침을 알 수 있다. 이제까지의 여러 가지 기준들을 종합해 보면 결론으로 전체적 피해와 국부적 피해의 기준시점으로 50 mm/s(134 dB re 10⁻⁵mm/s)와 5 mm/s(114 dB re 10⁻⁵mm/s)의 진동속도가 타당하며 두가지 피해를 모두 방지하는 것이 안전한 진동 대책이 될 것이다.

2.3.3 지반 침하 기준

진동에 의한 지반의 침하기준은 명확하게 정의되어 있지 않으며 단지 몇몇의 연구가 보고되고 있을 뿐이다. Gutowski의 보고에 의하면 입상토 특히, 간극비가 큰 사질토에서는 동적 침하의 문제가 야기될 수 있다. 즉, 같은 단립자 구조(Single-grained structure)일지라도 간극이 작은 촘촘한 상태보다 간극이 큰 느슨한 상태에서 보다 쉽게 변형하기 때문이다. 그러나, 수평 및 수직 지반가속도가 0.5g와 1.0g 이하라면 입상재료에서 지반 침하가 발생하지 않는다고 보고되고 있다.⁽⁵⁾

3. 진동의 전파와 감쇠

지하철 차량의 운행에 의하여 차량의 동하중이 레일-트랙-터널바닥-터널구조물-인접구조물의 전달체계로 진동이 전파된다. 이러한 전달체계를 분석하기 위하여 차량의 동하중이 터널바닥에까지 전달되는 과정을 동역학의 자유도계 모델이나 전자회로망(임피던스 모델)으로 해석하는 것이 일반적이며 터널구조물에서 인근 구조물까지 전달되는 진동은 파동전파의 일반적 원리인 재료 감쇠와 기하 감쇠로 해석하는 것이 대표적이다. 진동의 감쇠는 크게 기하 감쇠(Geometrical damping)과 재료감쇠(Material damping)에 의해서 발생하는데 이에 대해서 살펴 본다.

3.1 기하 감쇠

지반에서 진동의 전파에 대한 연구는 여러 종류의 조화하중이 등방성, 등질성, 탄성의 반무한 매질에 작용했을 경우의 반응을 고찰한 Lamb의 연구가 시초이다. 이후 진동원의 종류와 위치에 따른 진동감쇠에 대하여 연구가 진행되어 왔으며 이를 정리하면 표 3.1과 같다. 표 3.1은 하중의 종류와 시간 함수 여부에 따른 고려를 하지 않았으나 하중이 시간의 함수일지라도 진동응답의 특성은 크게 변하지 않으며 우리가 관심을 갖는 작은 주파수영역에서는 위의 정의가 대부분 파전달의 원리로서 타당하게 받아들여 진다.

Gutowski와 Dym은 동하중을 발생시키는 많은 진동원들의 기하감쇠량을 구하는 모델을 표 3.2와 같이 제시하였으며 [지하철 길이/ π] 이내의 거리에서는 지하철 하중을 지중 선하중으로 볼 수 있다고 제시하였다.⁽⁶⁾

3.1.2 재료 감쇠

재료 감쇠는 여러 매질간의 동특성에 관계된 문제이며 특히 감쇠특성(Damping properties)에 관계된다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 지하철 차량하중을 지중 선하중으로 모델화하면 파의 전달을 2차원 평면에서 해석할 수 있으며 등방성, 등질성, 점탄성 매질의 평면에서 r방향으로의 압축파는 응력과 변형을 모두 다음에 비례하여 파동한다.

$$Re [e^{-\alpha_d r} \cdot e^{i\omega(t - r/C_d)}] \quad (3.1)$$

여기에서 α_d 는 압축파의 감쇠계수, C_d 는 압축파의 속도로써 다음과 같다.

$$\alpha_d = \eta_d \cdot \omega / (2C_d) = \pi \eta / C_d \quad (3.2)$$

$$C_d = [D/\rho]^{1/2} \quad (3.3)$$

이와 같은 토질의 특성을 정확히 파악하기 위해서는 현장에서 정교한 동적실험을 하여야 하며 이러한 값들은 주파수, 온도, 함수비, 지반의 응력경로 등에 의하여 영향받는다. 표 3.3은 전형적인 파의 속도와 손실계수를 나타내었는데 일반적으로 압축파와 전단파의 손실계수는 같은 값을 쓴다.⁽⁷⁾

재료 감쇠는 거리가 다른 두 지점에서의 진동의 진폭비로써 표현되며 식 3.1로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_d = -27.3 \eta fr/C \quad (3.4)$$

압축파와 전단파가 거의 같은 손실계수를 갖는 반면, 파속도에서는 전단파의 속도가 압축파의 속도에 비하여 상대적으로 매우 낮다. 따라서 파의 감쇠는 압축파에 의해 지배되며 식 3.4에서의 파속도는 압축파 속도를 사용한다.

그림 3.1은 지중선하중이 작용할 때 전형적인 모래, 점토, 그리고 암반에 대하여 거리에 따른 주파수별 진동감쇠량(기하감쇠+재료감쇠)을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 수진측까지의 거리가 멀어질수록 저주파수 영역에서는 모든 매질에서 거의 같은 감쇠량을 보이나, 고주파수로 갈수록 모래와 점토에서는 큰 진동감쇠를 보이는 반면 암반에서는 주파수에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3.1.3 서로 다른 지반의 통과로 인한 영향

파의 전달경로에 서로 다른 종류의 지반이 존재하여 진동파가 경계면을 통과하는 경우 파의 굴절과 반사가 발생하며 또한 파장과 진폭이 매질의 밀도에 따라 변한다. 입사각과 굴절각을 고려하여 서로 다른 지반의 통과로 인한 진동감쇠량 산출공식을 Tokita는 다음과 같이

제안하였다.⁽⁸⁾

$$L_i(dB) = 10 \log \left[1 - \frac{\rho_2 C_2 \cos \alpha_1 - \rho_1 C_1 \cos \alpha_2}{\rho_2 C_2 \cos \alpha_1 + \rho_1 C_1 \cos \alpha_2} \right] \quad (3.5)$$

또 다른 간섭에 의한 진동영향식은 압축파의 입사각에 따라 진동감쇠량이 크게 영향을 받지 않는다는 사실을 전제로 하여 Ungar가 제안한 다음과 같은 간단한 공식이 있다.⁽⁷⁾

$$L_i = -20 \log \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right) \right] \quad (3.6)$$

표 3.4는 지반 1에서 지반2로의 파전달에 의한 영향을 표 3.3의 전형적인 토질정수를 이용하여 정리한 것이다. 표 3.4에서 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째로 연약한 지반에서 견고한 지반으로 진동이 전달되는 경우에는 진동감쇠가 발생하나 반대로 견고한 지반으로부터 연약한 지반으로 진동파가 전달되는 경우에는 진동증폭이 발생할 수 있다. 둘째로 진동파가 서로 다른 지반의 통과로 인한 진동증폭과 감쇠 모두 Ungar공식이 Tokita 공식의 두배로 크게 평가된다. 따라서 안전측의 진동예측을 위해서는 진동감쇠(연약한 지반 → 견고한 지반)의 경우에는 식 3.5(Tokita 공식)를, 진동증폭(견고한 지반 → 연약한 지반)의 경우에는 식 3.6(Ungar 공식)을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

파의 전달경로중에 파의 전달거리가 감쇠거리(Decay distance, $L = C/2\pi f \eta$)보다 충분히 긴 거리가 아닌 지반 B가 두 지반사이에 존재하는 경우에는 지반 B가 지반 1에 포함된다고 보고 식 3.5, 3.6에 의하여 감쇠량을 구한 후에 지반 B로 인한 감쇠를 다음과 같이 따로 구하여 합산한다.⁽⁷⁾

$$L_i = -10 \log \left[\cos^2 \left(\frac{2\pi f l}{C_B} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho_1 C_1}{\rho_B C_B} + \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi f l}{C_B} \right) \right] \quad (3.7)$$

여기서 l 은 지반 B의 파 전달거리이다.

3.2 임피던스 모델과 자유도 모델

지하철 차량진동을 다룬 많은 문헌에서 열차바퀴로부터 터널바닥까지의 동역학을 모델화한 다자유도계를 Circuit analogy로 변환하여 해석한 것을 볼 수 있다. 즉, 공학적인 자유도계의 모델은 해석의 간편함을 도모하기 위하여 전자 회로망(Electrical circuit analogies)으로 표현할 수 있다. 이 회로망 해석에서 등장하는 임피던스는 물리학에서는 저항의 개념으로 사용되고 있으며 역학에서는 어떤 시스템이 갖고 있는 저항의 정도이다.

그림 3.2(a)와 같이 동하중이 작용하는 단자유도계는 그림 3.2(b)와 같은 임피던스 모델로 나타내며 frequency domain에서의 운동방정식으로부터 다음과 같은 임피던스 공식이 유도된다.

$$\frac{F_1}{v} = Z_{11} = Z_m + Z_c + Z_k \quad (3.8)$$

여기에서,

$Z_{11} = F/v$: Driving point impedance

$Z_m = 0 + i\omega m$: Mass impedance

$Z_c = c + i0$: Viscous damping impedance

$Z_k = 0 - i(k/\omega)$: Stiffness impedance

식 3.8에 의해서 구한 해는 임피던스 레벨과 주파수와 의 그래프로 나타나며 임피던스 레벨 L_s 은 다음과 같이 구한다.

$$L_s = 20 \log \left(\frac{|Z_1|}{Z_0} \right) \quad (dB) \quad (3.9)$$

여기에서 $Z_0 = 1 \text{ Ns/m}$ 이다.

4. 지하철 차량에 의한 소음, 진동 발생

일반적으로 지하철 진동의 이론적 해석을 위해 바퀴-레일-침목(도상)-터널로 이어지는 4자유도계 모델을 제안하여 사용하나 이 모델의 타당성에는 많은 문제가 제기되고 있다. 지하철 진동문제에 있어서 가장 큰 관심사는 트랙과 터널 그리고 지하철 차량의 물성치 변화가 터널과 인접구조물의 진동에 주파수 영역별로 어떠한 영향을 주는가를 정확하게 파악하느냐에 있다고 하겠다. 이제 각 영향인자별로 진동영향정도를 살펴본다.

4.1 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 Ballst mat 도상을 채택하고 있다.

두 개의 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.⁽⁹⁾

$$\frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{k^{(2)}}{k^{(1)}} \cdot \frac{1 + Z_r^{(1)}/Z_w}{1 + Z_r^{(2)}/Z_w} \quad (4.1)$$

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 탄성기초위의 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.

그림 4.1은 주파수에 대비한 레일과 바퀴의 임피던스를 나타낸 것이다. 저주파수 영역에서는 레일의 임피던스가 바퀴의 임피던스보다 크고 고주파수 영역에서는 그 반대임을 알 수 있다. 따라서 식 4.1로부터 다음과 같은 관계식이 나온다.

$$\text{저주파수 영역 : } \frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{(k^{(2)})^{1/4}}{(k^{(1)})^{1/4}} \quad (4.2)$$

$$\text{고주파수 영역 : } \frac{F_{rms}^{(2)}}{F_{rms}^{(1)}} \propto \frac{k^{(2)}}{k^{(1)}} \quad (4.3)$$

4.2 터널의 제원에 의한 영향

4.2.1 터널바닥의 폭

터널바닥의 진동은 대부분 Flexural(bending) modes 에 기인한다고 알려져 있다. 따라서 터널 바닥 폭의 크기에 따른 기본 진동수를 파악하는 것은 바닥진동의 특성을 파악하는데 중요하다. 터널바닥의 정확한 진동모드를 해석하기는 매우 어려우나 콘크리트 터널바닥을 터널 벽에 의하여 단순지지되어 있는 단순보로 단순하게 가정하여 다음과 같이 기본 진동모드를 구할 수 있다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -(\gamma A/g) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

식 4.4로부터 단순보 양단의 경계조건을 이용하여 터널바닥의 진동모드를 구하여 보면 다음과 같다.

$$f_1 = 1448.8 h/L^2 \quad (4.5)$$

터널 천정의 경우에도 동일한 방법으로 기본 진동수를 계산하며 단지, 상재하중이 등분포하중으로 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 「파장/2」가 터널의 폭보다 큰 진동이 급격히 감쇠된다.

터널의 폭이 8m이고 두께가 0.4~1.0m의 경우 f_1 은 9.1~22.6 Hz의 값을 갖는다. 이보다 작은 진동수 영역의 진동은 급격히 감쇠한다.

4.2.2 터널의 질량, 벽 두께

일반적으로 터널 질량의 증가는 벽두께의 증가로 나타난다. 따라서 터널질량과 벽 두께에 의한 진동레벨 영향식은 같은 줄기에서 출발한다. 그러므로 진동원의 진동크기를 보정할 때 두 영향인자를 모두 고려해서는 안된다.

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

$$IL = 16 \log \left(\frac{m_{t1}}{m_2} \right) \quad (dB) \quad (4.6)$$

또한, 터널의 벽두께의 변화에 따른 진동감쇠는 다음과 같은 몇가지 공식이 제시되어 있다.

$$\text{뉴욕 지하철 모델[17]} : IL = 40 \log(h_0/h) \quad (4.7)$$

$$\text{Koch 공식[10]} : IL = (59 \sim 69) \log(h_0/h) \quad (4.8)$$

그러나 터널의 질량 변화로 인한 터널의 진동은 전주파수 영역에 걸쳐 일정하지는 않다. 식 3.9에서 질량임피던스는 주파수에 단순 비례함을 알 수 있듯이 터널의 질량 증가로 인한 진동감쇠가 저주파수 영역에서는 매우 작게 나타나며 고주파수 영역에서 크게 나타남을 예측할 수 있다. Gutowski는 30 Hz 를 기준으로 다음과 같은 공식을 제안하였다.[20]

$$IL = 56 \log(h_0/h) - 10 \log(f/30)^2 \quad f < 30 \text{ Hz} \quad (4.9 a)$$

$$IL = 56 \log(h_0/h) \quad f > 30 \text{ Hz} \quad (4.9 b)$$

식 4.7, 4.8 그리고 4.9를 이용하여 터널 벽두께에서 20 cm 씩 감소시켰을 경우 진동증폭량은 각각 5 dB, 10~12 dB, 8.8 dB(63 Hz 영역)으로써 적지 않은 차이를 보이고 있다. 따라서 터널 벽 두께를 줄일때는 안전측의 진동예측을 위해서 가장 큰 진동증폭을 보이는 Koch 공식을 사용하는 것이 적절하리라 판단된다.

복선터널의 표준설계에 따른 진동영향을 식 4.8에 의하여 검토하여 보면 표 4.1 과 같다.
 표 4.2에서 볼 수 있듯이 터널벽 두께가 일정하게 줄어감에 따라 점차 큰 폭으로 진동증폭이 발생함을 알 수 있다.

4.3 차량에 의한 영향

진동에 영향을 미치는 물성치로는 차량의 속도, 질량 그리고 Primary Suspension Stiffness & Damping 등이 있는데 가장 큰 영향을 미치는 차량의 속도와 질량에 대해서 살펴본다.

4.3.1 차량의 속도에 의한 영향

차량의 운행속도에 의하여 지하철 구조물과 지표면의 진동레벨에 미치는 영향은 여러 학자들간의 접근방법과 실험방법에 대해서 차이는 보이나 그 값에 대해서는 대부분 일치된 의견을 보이고 있다. 즉, 24~113 km/h 사이에서 차량의 속도가 터널 구조물과 지표면의 진동레벨에 미치는 영향은 다음과 같이 나타난다.

$$I.L = 20 \log(S) \quad (dB) \quad (4.10)$$

뉴욕 지하철의 진동소음에 대한 속도의 영향은 다음과 같은 식으로 제시되었다.⁽¹⁰⁾

$$I.L = 16.6 \log(S/56) \quad (dB) \quad (4.11)$$

차량의 속도가 10 m/s(36 km/h)에서 20 m/s(72 km/h)로 두배 증가할 경우 식 4.10와 4.11에 의한 진동증가량은 각각 6 dB, 5 dB 로써 비교적 일치된 값을 보이고 있다.

국내의 차량속도는 각 호선마다 다르나 직선구간에서 60 km/h에서 80km/h 사이로 운행중이다. 따라서 차량속도가 60km/h에서 80 km/h로 증가할 경우에 약 2.5 dB 의 진동증폭이 예상된다.

그러나, 차량속도에 의한 진동의 영향이 무한한 것은 아니며 어느 속도(S_c) 이상에서는 차량의 속도가 증가하여도 진동레벨에는 영향이 거의 없다. (예, 신간선 $S_c = 150$ km/h)

4.3.2 차량의 질량에 의한 영향

차량의 질량은 차체, 대차, 그리고 차축의 합을 말한다. 여러 학자들에 의해 계속된 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 다음과 같이 나타난다.

$$I.L = 20 \log\left(\frac{m_{v2}}{m_{v1}}\right) \quad (dB) \quad (4.12)$$

예를 들어 차량에 승객이 만원인 경우($m_{v1} = 54.8$ tons)와 빈 차량인 경우($m_{v2} = 35.8$ tons)에 진동의 영향을 계산해 보면 약 3.8 dB의 차이가 남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 고에서는 진동감쇠의 일반원리를 살펴보고 지하철 진동에 영향을 미치는 주요 인자들의 영향정도를 평가할 수 있는 방법을 모색해 보았다.

암반이 많은 국내의 지반여건으로 볼 때 지하철로부터 발생한 진동은 큰 감쇠없이 인접구조물에 전달되며, 암반에서 토사부분으로 전달될 때 2.6 ~ 5.2 dB 정도의 진동증폭이 발생

한다. 트랙에 의한 진동감쇠를 살펴본 결과, 주파수 영역별로 트랙의 강성에 의한 진동감쇠 효과가 다르게 나타남을 알 수 있다.

터널 벽 두께를 일정하게 줄여감에 따라 진동레벨이 대수적으로 증가하는데 특히 고주파수 영역의 진동이 큰 폭으로 증가하며, 터널바닥을 넓게 할수록 저주파수 영역의 진동이 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 터널바닥을 좁게하고 터널벽 두께를 두껍게 하는 것이 진동감쇠를 위해 가장 효율적인 터널단면이 된다. 차량의 속도와 질량에 의한 영향은 현실적인 운행속도와 차량의 무게를 고려할 때 각각 2.5 dB, 3.8 dB 정도의 변화를 보인다.

6. 앞으로의 과제

기본적인 파동역학에 근거하여 제시된 여러 진동예측모델들을 살펴보고 각 모델들을 국내 지하철의 진동계측값과 비교하여 타당성을 검토하고 나아가 많은 불확정성 요소들을 고려한 이론해석이 요구된다.

* 용어 설명 *

C : 진동파 속도(m/s)	r : 거리(m)	α : 감쇠 계수(m^{-1}),
D : Constrained Modulus	h : 터널 바닥 혹은	파의 입사각 혹은 굴절각
L : 진동레벨, 터널바닥의 폭	벽 두께 (m)	ρ : 밀도 (kg/m^3)
Z : 임피던스(Impedance)	m : 차량 질량 (kg)	η : 손실 계수(-)
A : 단면적 (m^2)		γ : 단위 중량 (kgs/m^3)
S : 차량 속도 (m/s)		

* 참고문헌 *

1. H. Reicher & F.H. Meister, "Die Empfindlichkeit der Menschen Gegenrshuttgerungen", Journal of Forschungs Gebiete Ingenieurwesen, 2:11, 381-386 (in-German), 1931
2. American National Standards Institute, "Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings", American National Standards Institute, New-York, ANSI-S3.29-198X, 1981
3. D. Dieckmann, "Study of the Influence of Vibration on Man", Journal of Ergonomics, 1:4, 347-355, 1958
4. J. T. Nelson and H. J. Saurenman, "State of the Art Review : Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains," Report No. UMTA-MA-06-0049-83-4, Wilson, Ihrig and Associates, 1983.
5. T. G. Gutowski et al., "Assessment of Ground-borne Vibration from Construction and Traffic for I-83 in Baltimore City", Bolt, Beranek and Newman, Inc., Cambridge, MA, BBN-3466, 1977
6. T. G. Gutowski & C. L. Dym, "Propagation of Ground Vibration : A Review" Journal of Sound and Vibration 49(2), 179-193, 1976
7. E. E. Ungar & E. K. Bender, "Vibrations Produced in Buildings by Passage of Subway Trains: Parameter Estimation for Preliminary Design", Proceedings, Inter-Noise 75, 491-498 (1975)
8. Y. Tikita et al., "On the Groundborne Noise Propagation from a Subway", proceedings, 96th Meeting of the Acoustical Society of America, 1978
9. E. K. Bender et al., "Effects of Rail-Fastener Stiffness on Vibration Transmitted to Buildings Adjacent to Subways", Bolt, Beranek and Newman, Inc., Report 1832, 1969
10. L. G. Kurzweil and E. E. Ungar, " Prediction of Noise and Vibration in Buildings near the New York City Subway ", Proceedings, Inter-Noise 82, 213-216 (1982)
11. S. Kraemer, " Noise and Vibration in Buildings from Underground Railway Lines ", Ph.D. Thesis, University of London, 1984

표 2.1 APTA Guideline

일인간 지역	분류	최대 지중 소음 레벨 (dB(A))		
		간헐적 주거지	연립 주거지	호텔
낮은 인도의 주거지역 보통의 주거지역 높은 인도의 주거지역 상업지역 공업지역		30	35	40
		35	40	45
		35	40	45
		40	45	50
		40	45	55
건물의 종류		일계 지중 소음 레벨 (dB(A))		
복수주택 콘서트 홀, TV 스튜디오 음악당 극장, 연극장, 법원 병원 학교, 도서관 대학 건물, 사무실, 병원의 수면실 상업 건물	콘서트 홀, TV 스튜디오	25		
	음악당	30		
	극장, 연극장, 법원	35		
	병원의 수면실	35 - 40		
	학교, 도서관	40		
	대학 건물, 사무실, 병원의 수면실	35 - 40		
	상업 건물	45 - 55		

표 2.2 인제에 대한 진동규준

제한자/제안국	인제에 시정	불쾌감을 느끼는 시정
Reichar & Meister	90 dB	112 dB
Diackmann	82 dB	122 dB
D.L.N (4025) (독일규준)	82 dB	102 dB
Steffens	82 dB	105 dB
ANSI S3.18 (미국규준)	73 dB	90 dB
Draft ANSI	(8시간 이상 지속) 낮 - 82 dB 밤 - 88 dB	(연속진행)
서울 지하철	75 - 78 dB	

표 3.1 기하 감쇠

진동원까지의 거리	거리의 종류	거리의 종류		감쇠량	신야장
		포면파	산재파		
지표면	산재파	지표면 전달	지중 전달	1/2	1
		지중 전달	지중 전달	1/2	1/2
지중	지중 전달	지중 전달	지중 전달	1/2	1/2

표 3.2 기하 감쇠 (Spreading attenuation)

$$A_s(dB) = -20 \log(r/r_0)$$

진동원	모델	진동파	속경지정	S
Highway/rail line footing array	지표면 선야장	포면파	지표면	0
Car in pothole	지표면 점야장	포면파	지표면	20
single "sl" footing	지중 선야장	산재파	지표면	40
Tunnel	지중 선야장	산재파	지중	10
Buried explosion	지중 점야장	산재파	지중	20

여기에서,

r : 진동원으로부터 수신점까지의 거리(m)

r₀ : 기준 거리(Reference distance)

표 3.3 예제의 종류에 따른 전형적인 폭 전달 계수

예제의 종류	파 속도 (m/s)		밀도 (g/cm ³)	손실계수
	알 속 파	진 단 파		
백 돌	3050-3650		1.9-2.2	.01-.02
콘크리트	2800-3750	1950-2500	2.3-2.4	.004-.008
파장암	4300	2650	2.7	
여회석	4000	2500	2.65	
대회석	4400	2800	2.8	
사암	2800	1650	2.5	
필트 - 송출 상재	1500	150	1.75	.04-.4
토스(Geese)	800	250	1.65	.1-.35
모래 - 진흙 상재	100-170	150-400	1.5	.05-.12
조밀한 모래, 자갈	500	250	1.65	.04-.12
모래(fine-grained) 또는 상재	290-350	110	1.6	.1-.25
모래, 중립 상재				.08-.2
모래(medium-grained)	550	160	1.6	
자갈(medium-sized)	750	180	1.75	
모래 섞인 실트	530			

표 3.4 서로 다른 지반의 동적 인반 영향 (dB) (+ : 증폭, - : 감쇠)

제한 공식	Tokita		Ungar		Tokita		Ungar	
	지반 1	지반 2	모래	점토	모래	점토	모래	점토
모래	0	0	1.90	3.79	2.62	5.23		
점토	-3.44	-6.88	0	0	1.79	3.57		
암반	-7.59	-15.18	-3.08	-6.16	0	0		

표 4.1 복선 터널 표준설계에 따른 진동 영향 (dB)

구분	Pattern	Pd-2 Pd-3 Pd-4 Pd-5			
		1차	2차	3차	4차
1차 복공	1차	5	5	5	5
	2차	10	25	10	20
	3차	10	5	5	5
2차 복공		30	30	30	30
	I.L. (hp 60cm 기준)	2.4	5.1	8.0	11.3

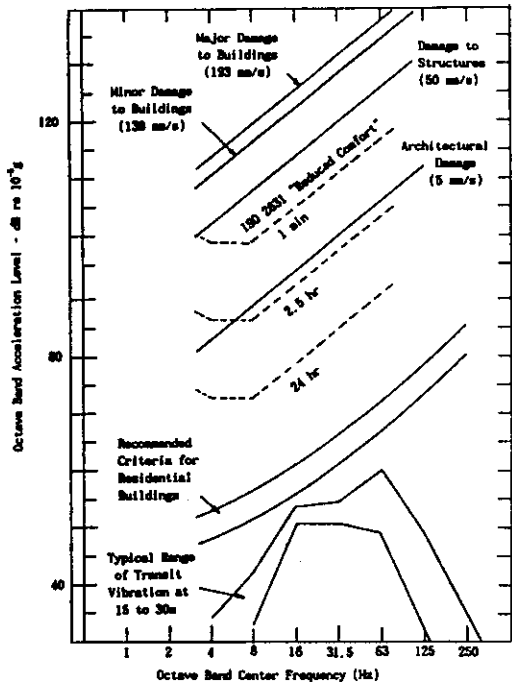
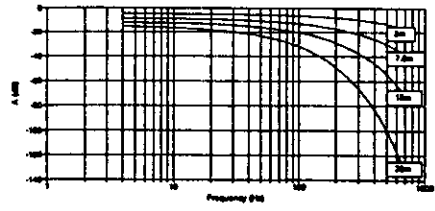
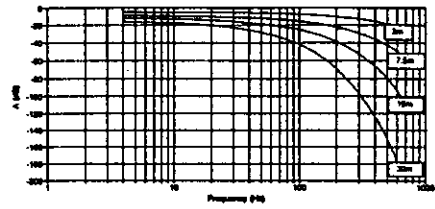


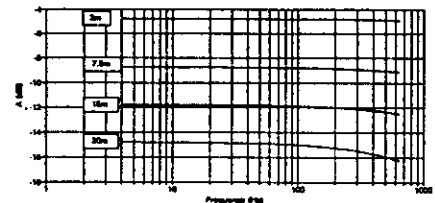
그림 2.1 권형적인 차량 진동에 의한 구조물의 피해 기준



(a) 모래



(b) 점토



(c) 일반

그림 3.1 권형적인 지반의 종류에 따른 거리별 진동감쇠량

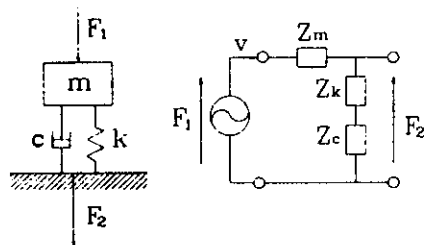
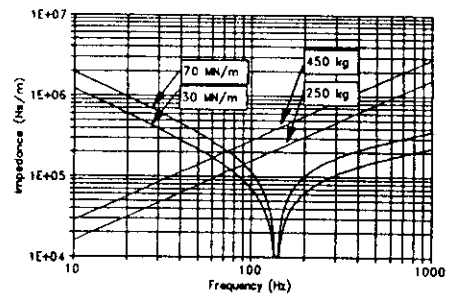


그림 3.2 (a) 관자유도계

(b) 임피던스 모델



--- $Z_r(k) = 30-70 \text{ MN/m}$ --- $Z_w(m) = 250-450 \text{ kg}$

그림 4.1 바퀴와 궤도의 임피던스