

# 지하터널의 진동이 지표면에 미치는 영향

## Transmission of Ground Vibration Produced by Rail Vehicle : Tunnel Effect

김정태\* 이시우\*\* 김정수\*  
Kim, Jeung-Tae Lee, Si-Woo Kim, Jung-Soo

---

### ABSTRACT

When the walls and floor of a tunnel are excited by a train, a ground vibration energy is transmitted to the surface and to footing of a nearby buildings. Excessive vibration affected to a building structures causes undesirable effect to the structural safety and the perception on residents in building. In this paper, a simple approach is introduced to predict how much vibration, in terms of level and spectra, is transmitted through the ground from the tunnel vibration excitation. A high rise building on a tunnel is selected as an application example of this case study.

---

### 1. 서 론

철도변에서 발생하는 진동영향을 평가하는 것은 크게 두 가지 측면이 있다. 첫째는 구조물의 동적인 특성을 검토하여, 해당구조의 안전도 여부를 평가하는 것이다. 두 번째로는, 해당 건축물에 거주하는 주민의 인체에 미치는 영향을 검토하여, 생활환경의 불편함을 초래하는 지의 유무를 판단하여야 한다.

본 연구에서는 위의 두 가지 예시사항을 검토할 수 있는 기초데이터로 활용하기 위한 진동 크기를 예측하는데 있다.

철도 주행시 나타나는 진동의 크기와 특정거리까지의 전파과정에서 발생하는 진동지감효과는 철도의 주행조건, 궤도 및 레일의 부설조건, 전파과정의 매질상태에 따라서 크게 영향을 받는다.

여기에서 고려된 진동문제는 지하에 건설예정으로 있는 터널상부인접거리에 건축구조물이 놓여져 있는 경우, 지반 진동의 전파정도를 예측하는데 있다. 터널의 심도는 일정두께의 암반 밑에 있고, 터널내부에는 복선철도가 부설되어 있다. 상기 철도 위를 시속 100km 의 고속 철도가 주행한다고 가정하고 정상적인 레일상태에서 운전되는 것을 고려하였다.

터널 내부에는 콘크리트 도상 위에 침목이 부설되어 있고, 지반은 표토층과 암반으로 구성되어 있다.

### 2. 지표면 진동의 예측

터널내부에서 열차주행 시 발생하는 진동은 터널주변의 지반에 다양한 경로를 가지고 에너지파를 전파시키게 된

---

\* 홍익대 기계시스템공학과 교수, 정희원

\*\* 홍익대 기계시스템공학과 석사과정

다. 지반진동에서 동상 다루는 지표면의 표면파는 동상 R파라고 하여 전파속도가 느리고 표면을 통해 전파되는 특성을 가지고 있으며 대단히 큰 에너지를 전달하는 특성을 가지고 있다.

또한 표면파는 깊이가 극히 낮기 때문에 전파거리가 먼 곳까지 쉽게 진동에너지가 전달된다. 따라서 진동이 문제가 되는 경우, 대부분 R파에 의해 지배를 받는 것으로 판단할 수 있다. 즉, 일종의 굽힘파가 평면에 전달하는 진동 현상을 지배한다고 볼 수 있다.

한편 지하에서 발생하는 지중파의 경우, 중파가 에너지를 전달하는 메카니즘이 된다. 이러한 중파를 P파, S파라고 하고 탄성파이므로 실체파라고 부르고 있다. 실체파는 터널에서 탄성매질을 통해 전달된 후, 지표면에 닿으면 반사와 굴절을 통해 표면파로 변환된다. 결국 이러한 지반이 동시에 존재하는 경우 여러 가지 파가 발생하게 되므로 이러한 파들의 전파를 예측하는 것은 매우 복잡한 작업이다.

또 다른 문제는 지반의 구조와 물성치를 인기가 어렵다는 점이다. 그러므로, 현장 물성치를 얻을 수 없다면 간단한 해석모델을 통하여 전파손실을 추정할 수 있게 된다. 터널에서 발생하는 진동원은 터널의 바닥 아래에 있다. Tokita는 터널바닥아래에 놓인 지반을 주 진동원 이라고 보고 철도는 구조바닥에 위치한 가상 진동원으로 인하여 지표면에서의 최대진동레벨과 그대의 거리를 정성적으로 예측한 바 있다. Tokita는 이 거리를 실측을 통하여 터널 구조물 중심선으로부터 15~30m 라고 제시하였으며 터널 깊이가 증가할수록 함께 증가한다고 발표하였다.

따라서, 본 사례에서는 진동원은 터널 중심선 지하에 있는 것으로 보고 모델링 하고자 한다.

진동원에서 발생한 진동에너지는 전파과정에서 크게 다음과 같이 3가지의 물리적 현상을 거치게 된다.

- (i) 기하감쇠
- (ii) 재료감쇠
- (iii) 임피던스감쇠

## 2.1 기하감쇠 효과

지하에 매립되어 있는 터널에서 철도차량이 운행하는 모델은 터널 인접 부위에서는 선하중으로 모델링 할 수 있다. 차량길이 대비 선하중의 영역은 예측하고자하는 진동위치  $l$  이

$$(i) \quad l \leq \frac{\text{차량길이}}{\pi} : \text{선하중} \tag{1}$$

$$(ii) \quad l > \frac{\text{차량길이}}{\pi} : \text{점하중} \tag{2}$$

으로 분리하여 검토할 수 있게 된다.

가령, 고속철도와 같이 20량으로 구성되어 있는 차량의 길이가 400m 정도인 경우, 선하중 분포의 영역은 터널반경 130m에 이르게 되므로 진동에 관여가 있는 철도면 인접인 50m ~ 100m 인근은 선하중 모델에 해당된다고 볼 수 있다.

기하감쇠의 경우, 모델별로 에너지의 전파효과는 다르게 나타난다. 기하감쇠를 지배하는 감쇠효과  $A_1(\text{dB})$ 은

$$A_1(\text{dB}) = -S \cdot \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \tag{3}$$

로 표현된다. 여기서 S는 모델별 특성치,  $r_0$ 는 기준진동크기를 측정할 위치,  $r$ 은 진동원으로부터의 거리를 나타낸다.

기하감쇠계수 S는 다양한 모델별로 다음의 표와 같이 값이 주어져 있다. 터널에서 발생하는 지중파는 지표면에서 유행하는 철도 차량에서 발생하는 표면파 대비 우수한 감쇠특성을 보여주고 있다.

표 1. 모델별 기하감쇠 변수 S

구분	모델	에너지	기하감쇠
지상철도	지표면 선하중	표면파	0
터널	지중 선하중	실체파	10
발파	지중 점하중	실체파	20

가령, 기준 측정값  $r_0$ 가 7m인 위치에서 진동이 측정되었다고 가정하여 보자.

진동원으로부터 70m 떨어진 위치  $r$ 에서는 터널진동크기는 지상철도 대비

$$A_1 = -10 \cdot \log\left(\frac{70}{7}\right) = -10 \text{ (dB)} \quad (4)$$

만큼 감소되고 있음을 알 수 있다. 즉, 터널진동은 지상에서 운행되는 철도 대비, 기하학적인 감쇠가 10dB 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

## 2.2 재료 감쇠효과

재료감쇠란 진동파가 암반과 흙 등 매질을 통과할 때 나타나는 감쇠특징이다. 재질이 점탄성 재료로 볼 수 있는 경우, 재료감쇠로 나타나는 진폭의 영향은

$$A_2 = A_0 e^{-\frac{\omega \eta}{2c} R} \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서,  $\omega$  : 진동주파수(rad/sec),  $\eta$  : 감쇠계수,  $c$  : 파의 속도,  $R$  : 진원으로부터의 거리 나타낸다. 식에서 볼 수 있듯이, 주파수  $\omega$ 가 큰 경우에는 재료감쇠가 빨리 일어난다. 따라서, 재료감쇠로 인한 진동 저감량  $A_2$ (dB)는

$$A_2(\text{dB}) = 27.3 f_c^n \cdot X \quad (6)$$

로 표시된다. 여기서,  $f$  : 주파수(Hz),  $c$  : 전파속도,  $n$  : 무차원 감소계수,  $X$  : 터널 벽으로부터 지반을 통과하는 전파거리를 가리킨다. 전단파와 압축파는 터널구조물에서 유사한 손실계수  $n$ 을 갖는다. 압축파의 속도가 전단파 보다 훨씬 빠르므로 더 긴 손실을 예측하는데 무엇보다 중요하다.

여러 지반조건에 따른 각각의 전파속도, 손실계수 그리고 밀도는 표 2에 나타나 있다. 가령, 지반의 종류별로 거리에 따른 감쇠특성을 고려하기 위하여 철도전동의 관심대역인 63Hz를 검토하여 보자. 위의 재료감쇠 특성  $A_2$ 식을 이용하여 거리별 특성을 나타낼 수 있다. 50m의 이격 거리가 암반으로 이루어져 있는 경우, 암반을 통한 재료감쇠는 무시할 정도로 작게 나타난다.

이에 반해, 모래나 실트, 자갈층에서는 50m 이격 거리에서는 8dB, 점토층은 4dB 정도로 나타나게 된다. 따라서, 터널을 통해 진동이 전달되는 경우, 암반의 전파과정에서 재료감쇠는 무시할 수 있고 지표면 바로 하부에 있는 모래나 점토층의 거리감쇠는 고려하여야함을 알 수 있다. 실제의 사례로 터널이 지표면 20m는 점토층, 점토층 밑 50m는 암반이라고 가정하여 보자. 그림 1은 다양한 매질별로 재료감쇠 전파에 사용되는 지반의 불성치가 보여져 있다. 이 경우, 70m의 거리를 전파해 오는 과정에서 나타나는 약 3 ~ 4dB 수준이 됨을 알 수 있다.

표 2. 재료감쇠 전파에 사용되는 지반의 물성치

흙의 분류	전파속도 c(ft/sec)	손실계수	밀도 $\rho(\text{g/cm}^3)$
암 반	11,500	0.01	2.65
모래, 실트, 자갈, 황토	2,000	0.1	1.6
점토, 점토질 흙	4,900	0.5	1.7

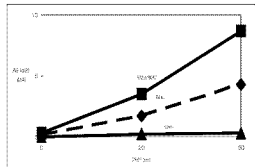


그림 1. 지반의 물성치 별 재료 감쇠 특성

### 2.3 경계층 효과

지반을 전파하는 에너지파가 밀도가 서로 다른 지반을 통과하는 경우, 경계층에서 에너지 반사가 일어나 에너지 전달이 차단된다. 엄밀하게 말해 이러한 에너지 변화는 감쇠라고 하기에 용어의 정의 상 문제가 있으나 에너지의 전달속면에서 일정량 저감됨으로 이를 편의상 임피던스 감쇠라고 부른다.

즉, 파의 전달 경로에 서로 다른 종류의 지반이 존재하는 경우 매질의 밀도에 따라 굴절과 반사로 인하여 파장과 진폭이 변화가 된다. 연약한 모래지반이 견고한 암반을 위해 놓일 때 진동주파수가 모래지반의 고유진동수에 근접하면 지반자체의 공진이 일어나 지반진동이 증폭될 수 있다.

반대로 연약한 지층에서 견고한 지층으로 파가 전달시에는 진동감쇠가 일어난다. 지반 a 에서 지반 b 로 파가 통과하면서 발생하는 전파 손실식은

$$A_3(aB) = -20 \log \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\rho_b C_b}{\rho_a C_a} \right) \right] \quad (7)$$

여기서, a, b : 서로 다른 두 흙,  $\rho_a, \rho_b$  : 흙의 밀도,  $C_a, C_b$  : 두 흙에서의 압축파속도를 나타낸다.

따라서, 암반에서 발생된 진동파가 경토층이나 모래층을 만나게 되는 경우 나타나는 감쇠값  $A_3$ (dB) 불성치의 영향을 받게 된다.

한편, 지하구조의 터널로부터 전파되는 진동파는 다양한 입사각을 가지고 매질을 전파하므로 본 검토자료에서는 임피던스의 감쇠영향을 고려대상에서 제외한다.

### 3. 예측결과

앞의 터널진동모델에 의하면, 진동원으로부터 발생된 진동에너지는

$$(i) \text{ 거리감쇠} : A_1 \text{ (dB)} \quad (ii) \text{ 재료감쇠} : A_2 \text{ (dB)}$$

를 통해 수진점에 도달한다. 모델에 의한 진동 저감은

$$\Lambda = \Lambda_1 \text{ (dB)} + \Lambda_2 \text{ (dB)} \quad (8)$$

의 합으로 나타나게 된다. 따라서 이격 거리 70m를 전파하면서 감쇠되는 거리 감쇠량은 터널인접 7m에서 측정된 진동값 대비,  $A_1=10$  dB가 줄어든다. 한편, 재료감쇠 효과는 진동주파수가 63Hz의 경우, 암반에서 0.15dB, 모래/경토층에서 감쇠되는 각각의 평균치 값을 사용하면 2.6dB가 감소하여 결과적으로 2.7dB 수준이 지감된다. 진동주파수가 증가하면 비례하여 진동감쇠가 일어나게 된다. 따라서, 터널구간으로부터 발생된 진동 에너지는 아파트 기초로 도달하는 동안 63Hz 기준으로 12.7dB 감소된다고 볼 수 있다. 주파수 대역별 진동저감특성을 나타낸 결과는 그림 2에 보여져 있다.

한편, 고속철도가 주행할 때에 특해 주변에 나타나는 진동크기는 63Hz에서 최대 69dB 수준이 되고 있다. 고속철도의 진동원 모델은 그림 3에 보여져 있다. 이와 함께 진동크기는 표 3에 보여져 있다. 125Hz는 66dB, 31.5Hz는 65dB 수준을 가지고 있다. 이 값은 프랑스 SNCF에서 고속철도 주행 시 레도주면에서 측정된 진동값이다. 전 대역으로 보면 이 값은 72dB에 해당된다고 볼 수 있다.

실제, 본 사례에서 검토되는 터널의 주변에서는 이 보다 더 낮은 진동원이 될 것으로 예상되므로 본 검토에 사용된 진동원은 대단히 보수적인 측면에서 진동을 예측하는 결과가 된다.

실제, 여러 연구자들이 제안한 터널 내부의 진동크기는 앞의 SNCF가 제시하고 있는 진동값과 유사함을 볼 수 있다. 그림 4는 Wilson 이 터널 내 진동원으로 제안한 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 터널이 놓여진 지반이 암반을 관통하는 경우, 125Hz 성분이 70dB으로 나타나는 반면, 63Hz는 오히려 60dB로 낮아져 진동피해 측면에서는 유리한 모델이라고 볼 수 있다. 데이터에서 볼 수 있듯이, 다양한 터널 구조의 경우에도 63Hz가 SNCF 크기와 대동소이하다. 따라서, 진동원으로부터의 진동저감 특성을 고려하여 건축구조를 하부에 도달되는 진동크기는 그림 5에 보여져 있다. 63Hz 대역에서 최대 56dB 수준이 되고 있다. 전 대역기준으로 보아도 58dB는 넘지 않을 것으로 사료된다.

이 값은 앞에서 설명된 것과 같이, 모델링 과정에서 진동의 피해 측면을 강조하기 위하여 진동원-전파과정-건축물방진의 효과의 전 과정에서 가급적 가혹한 조건을 사용하였기 때문에, 보수적으로 예측한 결과이다. 실제, 현장의 진동은 이보다 낮게 나타날 것으로 예상된다.

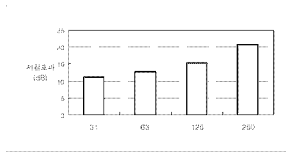


그림 2. 모델에 의한 진동압축 효과

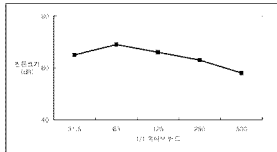


그림 3. 진동원 모델

표 3. 진동원 스펙트럼 : SNCF

구분 (Hz)	31.5	63	125	250	500
진동크기 (레도)	65	69	66	63	58

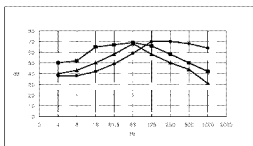


그림 4. 다양한 터널 지반의 터널의 진동원 모델 : Wilson

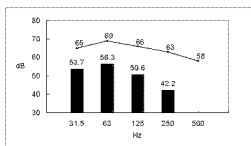


그림 5. 진동예측 결과

## 4. 토의사항

### 4.1 지표면에서 측정된 진동크기

앞에서 예측된 지표면의 진동은 전 대역 기준으로 58dB, 옥타브 밴드로는 63Hz에서 56dB로 나타나고 있다.

한편, 문헌 등을 조사해 보면 고속철도의 터널구간 상부의 지표면에서 측정된 진동 데이터는 구하기 용이하지가 않다. 다만, 지하철의 터널구간에서 발생하는 진동을 지표면 상부에서 측정된 데이터들이 존재한다. 실제, 고속철도의 주행 시 나타나는 진동은 기존 지하철 대비 10dB 이상 낮게 나타나는 것으로 보고 되어 있다. 따라서, 기존 지하철의 운행 시 지표면에서 측정되는 진동은 고속철도에 의한 진동발생보다 높게 나타나게 될 것이다.

지하철이 지표면 하부 15m를 관통하고 있는 경우, 지상에서 측정된 진동크기를 조사해보면 터널의 종류별로 편차는 있으나 최대 60dB은 넘지 않고 있으며, 지표면 하부로 터널이 깊게 이동한 경우 차량주행 속도가 100km/hr 이상으로 주행하더라도 최대 45dB 수준으로 낮아지는 것으로 알려져 있다. 터널이 심도 30m로 깊게 들어가면 고주파 성분은 더욱 급격히 저감된다.

### 4.2 시간선의 예측모델과의 비교

고속철도 운행 시 진동영향을 예측하기 위해 시간선에서는 다음 진동과 거리감쇠식을 제시하였고 이 식을 이용하여 구조물별, 거리별, 지반의 형태에 따른 진동영향을 예측하였다.

$$A_r = A_0 - 8.7\alpha(r - r_0) - 20 \log \left( \frac{r}{r_0} \right)^n \quad (9)$$

여기서,  $A_r$  : 진동원으로부터 거리  $r(m)$  떨어진 점의 진동레벨(dB),  $A_0$  : 진동원에서  $r_0(m)$  떨어진 점의 진동레벨(dB),  $\alpha$  : 지반의 흡수계수 ( $= \pi \eta f / c$ ),  $\eta$  : 손실계수,  $f$  : 진동파의 주파수,  $c$  : 전파속도,  $n$  : 진동파 종류에 따른 경수 ( $n=1$  : 실체파,  $n=2$  : 표면파)이다. 따라서, 터널에서 발생하는 진동은 기준점에서의 진동크기 대비,

감쇠량은

$$A_r = -8.7\alpha(r-r_0) - 20\log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (10)$$

로 나타난다. 또한, 위 식에서 지반의 흡수계수  $\alpha$ 는 암반의 경우 0.001 ~ 0.002, 지표층인 층적층의 경우 0.001 ~ 0.002의 값을 사용하고 있다. 시간선 예측식으로부터 진동전파 현상을 검토하여 보자. 앞에서 진동원은 전 대역 기준으로 72dB인 경우로 가정한 바 있다. 안전한 계산을 위해 터널로부터 7m 위치에서도 동일한 크기의 진동이 나타나고 있다고 보자. 70m를 떨어진 곳에서 적잖이는 진동량은

$$\text{저감효과} = -8.7\alpha(70-7) - 20\log\left(\frac{70}{7}\right) \quad (11)$$

이 되고  $\alpha$ 값을 0.001을 대입하면 감쇠량은 20.5dB가 되어 결과적으로 52dB 수준이 되고 있다. 이러한 진동크기는 앞에서 평가된 값보다 15dB 정도 낮은 크기임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 터널을 철도차량이 주행하는 경우, 지하터널에서 발생된 진동에너지가 지상의 건축구조 기초하부까지 전달되는 진동현상을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 또한, 건축기초의 진동크기를 예측하고, 예측된 결과가 진동공해의 허용기준에 부합되는지의 여부를 판단하는 기초연구로도 부적이 있다.

진동의 발생원과 터널의 진동전파 현상을 고려하여, 지반진동에너지가 건축구조물까지 전파되는 진동특성을 요약 정리하면 다음과 같다.

### 5.1 고속철도 진동원의 특징

구조물과 인체가 직접 피해를 느끼는 주파수는 철도차량의 경우 30~80Hz 대역으로 알려져 있다. 따라서 레일 바닥을 통해 주변 지반으로 전파되는 진동에너지 중 50Hz를 전후한 진동에너지 성분이 검토 대상이 되고 있다. 또한, 진동에너지 성분은 해당주파수 성분이 낮을수록 먼거리까지 감쇠없이 전파되기 때문에 문제시된다. 궤도 인접부에서 측정된 진동에너지 성분은 옥타브밴드 기준으로 최대 70dB 수준이 되고 있다. 밴드별로는 63Hz에서 최대치가 나타나고, 31.5Hz와 125Hz에서 두 번째 피크가 나타난다. 250Hz 옥타브밴드는 궤도주변에서는 발생되나, 근접 상 지역을 벗어나면 에너지가 급격히 감소되어 진동의 영향평가 고려대상에서 배제된다.

### 5.2 터널 진동 에너지의 전파과정에서 발생하는 감쇠효과

암반에 매설되어 있는 터널에서 발생하는 진동에너지는 약한 50m와 지표층 20 m, 총 70 m 의 거리를 전파하는 경우, 기하학적인 거리감쇠와 흙 재질의 재료감쇠로 인하여 관심주파수 63 Hz 대역에서 12dB 정도 저감되며, 건축물의 기초에서 예상되는 진동수준은 56 dB(63 Hz 기준) 는 넘지 않을 것으로 예측되었다.

## 참 고 문 헌

1. 은희준, 김정태, "고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구", 1995, 한국 고속철도 건설공단
2. 황경부, "진동으로 인한 피해의 인과관계 검토 기준", 1996
3. 도로진설소음의 폐지의 생산성리에 미치는 영향과 양도 경영 손실에 평가에 관한 연구, 상지대 농업자원 개발연구소.
4. Mc Clenaghan, L. and Bowles, A., "Effects on low-altitude overflights on populations of small mammals", '96 Inter Noise 985-990
5. 유복도, "지형공간 정보론", 동명사, 1994
6. 한국소음진동 공학회, 소음진동 권람.
7. 알형식, "발파진동학", 구미서관, 1992
8. 강대우, 심봉수, "음용발파기술", 구미서관, 1995
9. 윤지선, "피진 발파기술", 구미서관, 1993
10. ESRI, "Understanding GIS", 1990
11. ESRI, "SML USER'S GUIDE", 1990
12. ESRI, "PC ARC/INFO USER'S GUIDE", 1990
13. 한국도로공사, "건설공사장 소음·진동방지시설설계기법에 관한 연구", 1996
14. 허영 등, 경부고속철도 건설로 인한 의료시설의 소음진동 영향평가, 한국소음진동공학회, 1997.2
15. 김정태, 대구 서부화물위 농다실 발파작업의 진동영향평가 및 저감대책, 한국 소음진동공학회, 2000.12
16. 김정태, 양철야파트 단지의 소음진동측정 및 조사연구, 홍익대 과학기술연구소, 1996.12
17. 신만로 등, 고속철도 노선 및 지반진동저감기술, 1998.10, 한국철도연구원