

철도의 환경 소음 진동

—고속전철에 의한 지반진동과 소음—

장승필* · 강기동** · 서사범**

(*서울대학교 토목공학과 **한국고속철도건설공단)

1. 머리말

철도나 지하철 교통 시스템은 소음 또는 진동을 야기시키므로써 철도연변이나 지하철 선로 지상에 살고있는 주민들에게 많은 불편을 주고 있다. 이들 공해는 철도로 부터의 소음 또는 진동의 직접 방사에 의하여 발생하지만 소음의 경과에는 건물벽의 진동에 의한 재방사에 의하여 발생할 수도 있다. 진동과 구조물 발생 소음은 50 Hz 이하의 저주파수에서 주로 발생한다. 그 이상의 높은 주파수 영역에서의 진동은 높은 감쇠효과에 의하여 쉽게 소감된다. 또한 이 때의 에너지는 주로 차륜과 레일을 통하여 소음으로 방사된다.

진동은 차륜과 레일의 상호작용에 의하여 발생된다. 차륜이 레일 위를 지나면서 진동을 만드는 여러 가지 원인 중에 가장 큰 요인은 레일의 평탄성과 열차의 축중분포이다. 후자는 차량이 통과 주파수에 의하여 결정되고, 레일의 평탄성에 의한 진동은 조도면의 파장과 차량의 주행속도에 의하여 그 크기와 주기성이 결정된다.

지반에 전달되는 열차진동은 차체, 대차 및 차축으로 구성되는 열차의 축중하중의 규칙적인 배열과 동하중에 의하여도 발생한다.

- 궤도의 틀림(수평, 수직), 불규칙한 궤도의 강성 및 도상과 노반의 침하
- 용접과 이음매, 분기기의 불연속

- 차륜플랫, 차량의 결함
- 교량의 신축 이음부, 교량의 입·출입부
- 열차의 각 차량의 중량차

이러한 모델에는 차량을 질량-스프링으로 궤도는 보로, 레일과 차륜의 접촉부분은 헤르츠 스프링으로 구성되며 체결장치와 진동을 감소시키기 위한 고무패드, 침목 도상 등도 감쇠장치와 스프링으로 나타내어질 수 있다. (그림 1)

차량하중에 의하여 발생하는 진동수는 차량의 차체에 발생하는 0.5~1.0 Hz 정도의 낮은 주파수로 부터 궤도의 레일 등에 발생하는 30~60 Hz까지 매우 넓은 대역에 걸쳐서 발생한다. 이러한 실제의 동적거동을 윤리적으로 파악하기는 일반적으로 매우 어렵기 때문에 대부분의 해석은 동적거동을 동적확대계수의 개념을 도입한 의미정적해석으로 대신하고 있다. 때문에 실제문제를 해결하기 위하여는 실험적 방법을 택하는 것이 실제적이다.

2. 정 의

지반진동과 소음의 경우 스펙트럼의 범위가 매우 넓으므로 그들은 식 (1)에 의하여 계산되는 dB로 나타내어지는 대수척도에 의하여 대부분 나타낸다.

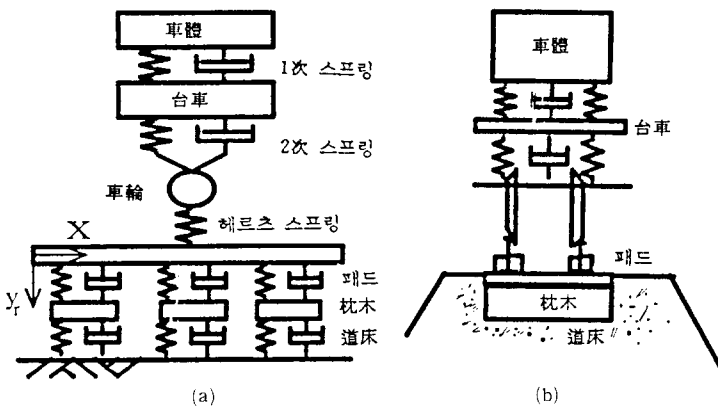


그림 1 차량-궤도 동적모델

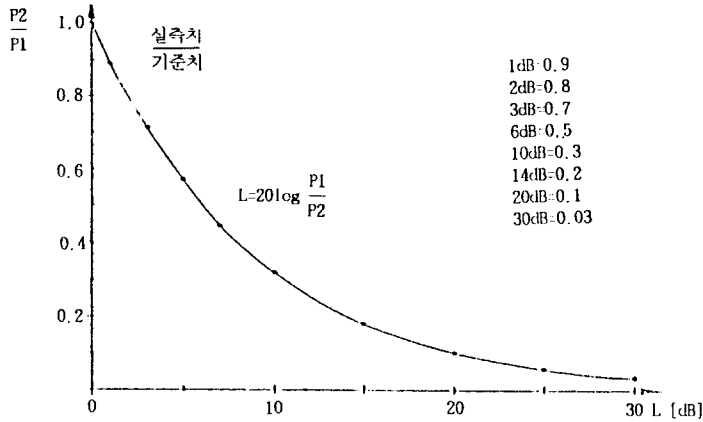


그림 2 dB척도와 선형척도 사이의 관계

$$L[\text{dB}] = 20 \log \frac{\text{실측치}}{\text{기준치}} \quad (1)$$

그림 2는 선형척도와 dB척도의 관계를 나타낸 것이다.

파워스펙트럼 값은 1/3 옥타브 대역당 평균평방근(R.M.S.)로서 계산된다. 저주파수에서 진동과 관련된 가속도는 속도를 산출하기 위하여 때때로 적분된다. dB값으로 그들을 나타낼 때는 기준치가 주어지지 않는데 소음값을 나타내기 위하여는 기준치로 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 을 취한다.

소음의 인간 지각은 그림 3에서 보이는 바와 같은 필터에 의하여 특징지어진다. 이 A-필터는 200 Hz 이하의 모든 주파수를 제거시

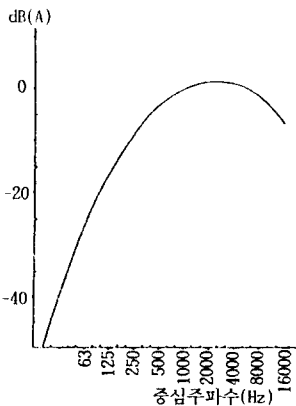


그림 3 A-중필터의 전달함수

킨다. 소음의 정도는 A-가중치가 주어질 후 일반적으로 표현된다. 이것은 dB(A)로 나타낸다.

dB(A)로 표현되는 등가소음 에너지 레벨 L_{eq} 는 다음과 같이 소음압력 신호를 적분하므로써 얻을 수 있다.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{P_A(t)}{P_0} \right]^2 dt \quad (2)$$

여기서, $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$, $P_A(t)$ 는 A-가중치 소음 레벨이며, T 는 적분(관측)시간이다. 식 (2)에서 기준시간 $T_r = 1$ 초 동안의 등가에너지 표현할 것을 소음 노출레벨 (SEL)이라 한다.

$$SEL = 10 \log \frac{1}{T_r} \int_0^T \left[\frac{P_A(t)}{P_0} \right]^2 dt \quad (3)$$

양 식간의 차이는 평균된 에너지에 걸친 기준시간 T_r 이다.

3. 진동해석

이동차량이 차체, 궤도 및 지반에 미치는 동적거동을 파악하기 위하여는 그림 1에서 보이는 바와 같이 차량, 궤도 및 지반의 상호작용을 나타낼 수 있는 해석 모델을 만든 후 이 구조계의 동적해석을 행하여야 한다. 이 때 필요한 스프링

계수나 감쇠계수는 실험에 의하여 구할 수 있다.

동적해석 방법은 시간영역 또는 주파수영역에서의 유한요소 해석방법이 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 차량진동이 인근 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 시간영역에서 해석하는 것이 유리하다고 판단된다.

3.1 차량과 궤도 그리고 지반의 상호작용

차량-궤도-지반의 상호작용을 동적거동을 수학적으로 나타내기 위해서는 그림 1에서 보는것 처럼 차체와 대차, 대차와 차량, 차량과 궤도, 궤도와 침목, 침목과 도상 등 5개의 서로 복합된(coupled) 운동방정식이 필요하다.

$$[M]_i \{ \ddot{u} \}_i + [C]_i \{ \dot{u} \}_i + [K]_i \{ u \}_i = \{ P(t) \}_i \quad (4)$$

($i=1, 2, 3, 4, 5$)

윗식에서

- $[M]_i, i=1-5$: i 번째 질량 매트릭스
- $[C]_i, i=1-5$: i 번째 감쇠 매트릭스
- $[K]_i, i=1-5$: i 번째 강도 매트릭스
- $\{ u \}_i$: i 번째 상대처짐 벡터

이고 $\{ P \}$ 는 열차하중에 의한 하중 벡터를 나타낸다. 식 (4)는 매우 복잡한 적분방정식이기 때문에 반복시행착오법에 의하여 근사적으로 접근하여야 한다. 일반적으로 식 (4)의 진동방정식을 푸는 방법은 직접적분법과 모드 중첩법이 있다. 다음절에는 그 원리에 대하여 간단히 소개한 내용이다.

3.2 시간영역에서의 유한요소 직접적분법

유한요소해석의 원리를 소개하기

위하여 차륜하중이 탄성지반위에 놓인 레일위를 일정한 속도 $V(t)$ 를 갖고 움직인다고 가정하자. 또한 설명을 쉽게 하기 위하여 차체를 받치고 있는 스프링 효과나 감쇠효과도 무시한다. 위와 같은 가정하에 동적 구조계는 다음과 같이 이상화시킬 수 있다.

유한요소해석을 위하여 그림 4의 레일시스템을 여러개의 유한한 보 요소로 나누어 생각한다.

그림 5의 i 번째 보 요소의 임의의 점 x 에서 처짐 $w(x)$ 을 3차 Hermitian Polynomial로 가정하면 처짐 $w(x)$ 와 절점 변위 $w_i, \theta_i, w_j, \theta_j$ (그림 6 참조), 사이에는 기하적인 조건으로부터

$$w(x) = [N]\{d\} \quad (5)$$

의 관계식이 성립한다.

여기서, $[N] = [N_1 N_2 N_3 N_4]$ 는 형상 함수로서

$$[N_1] = 1 - 3\frac{x^2}{L^2} + 2\frac{x^3}{L^3}$$

$$[N_2] = x - 2\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}$$

$$[N_3] = 3\frac{x^2}{L^2} - 2\frac{x^3}{L^3}$$

$$[N_4] = -\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}$$

이고 $\{d\}$ 는 절점변위 벡터로서, $d = \{w_i, \theta_i, w_j, \theta_j\}^T$ 이다.

보 요소의 형상함수를 식 (5)에서와 같이 가정하면 Hamilton의 원리로부터

$$\delta \int_0^L (T - V) dt = 0 \quad (6)$$

여기서

T : 운동에너지,

V : 포텐셜 에너지

각 절점에서의 질량매트릭스 $[M_e]$, 감쇠매트릭스 $[C_e]$, 강도매트릭스 $[K_e]$ 및 절점하중벡터 $\{P_e\}$ 를 구할 수 있다.

$$[M_e] = \int_0^L [N]^T \bar{m} [N] dx$$

$$[C_e] = \int_0^L [N]^T \bar{c} [N] dx$$

$$[K_e] = \int_0^L [N'']^T EI [N''] dx$$

$$\{F_e(t)\} = \int_0^L [N]^T q(x) dx \quad (7)$$

전체 구조체의 운동 방정식은 각 유한요소의 운동방정식의 합으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (8)$$

여기서

$$[M] = \sum_{e=1}^n [M_e],$$

$$[C] = \sum_{e=1}^n [C_e],$$

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K_e],$$

$$\{F(t)\} = \sum_{e=1}^n \{F_e(t)\}$$

위에서 절점하중 $\{F_e(t)\}$ 는 아래식에서 얻어진다.

$$\{F_e(t)\} = \int_{x_1}^{x_2} [N]^T q(k, t) dx$$

여기서 $q(x, t)$ 는 t 시간에 x_1 부터 x_2 까지 등분포하게 작용하는 하중

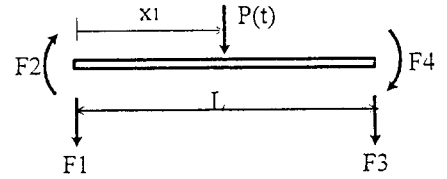


그림 7 등가 절점 하중

이다. 차륜하중의 경우 작용하중을 한 개의 집중하중으로 나타내면

$$\{F_e(t)\} = [N]^T_{x=x_1} P(t) \quad (9)$$

으로 나타낼 수 있다.

여기서 $[N]^T_{x=x_1}$ 는 $x=x_1$ 에서의 형상함수의 크기이다.

만약 여러개의 차륜 하중을 동시에 재하시켰을 경우에는

$$\{F(t)\} = \sum_{i=1}^n [N]^T_i P_i(t) \quad (10)$$

로 등가절점하중으로 나타낼 수 있다.

운동방정식 (8)은 Newmark- β 방법과 같은 근사해석 방법에 의하여 직접 적분이 가능하다.

$t = t + \Delta t$ 에서의 속도 $\dot{u}(t + \Delta t)$ 와 변위 $u(t + \Delta t)$ 를

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t) + \frac{1}{2}\{\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \Delta t)\}(\Delta t) \quad (11a)$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t)\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{u}(t)\Delta t^2 + \beta\ddot{u}(t + \Delta t)\Delta t^2 \quad (11b)$$

$$\frac{1}{6} < \beta \leq \frac{1}{4}$$

라고 나타낼 수 있다면 $t = t + \Delta t$ 에서의 운동방정식 (8)은 식 (12)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$[\hat{K}]\{u(t + \Delta t)\} = \{\hat{R}(t + \Delta t)\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } [\hat{K}] &= [K] + a_0[M] \\ \{\hat{R}(t + \Delta t)\} &= \{R(t + \Delta t)\} \\ &+ [M](a_1 u(t) + a_2 \dot{u}(t) \\ &+ a_3 \ddot{u}(t)) \end{aligned}$$

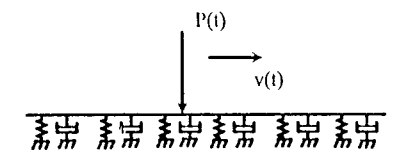


그림 4 이상화된 궤도위의 차량하중

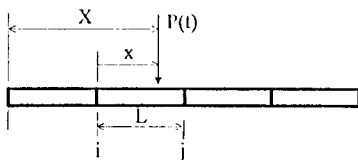


그림 5 유한한 보 요소

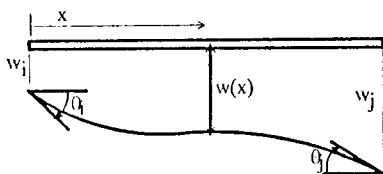


그림 6 보 요소의 변위

여기서 $R(t+\Delta t)$ 는 기준 좌표점에서 부터 $x=v(t+\Delta t)$ 떨어진 곳에 작용하는 집중하중에 의한 절점하중이다. 식 (12)에서 계수들은 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}, a_1 = \frac{1}{2\beta(\Delta t)^2},$$

$$a_2 = \frac{1}{\beta(\Delta t)}, a_3 = \frac{1}{2\beta} - 1$$

식 (12)에 의하여 $t=t+\Delta t$ 에서의 상대절점변위 $\{u(t+\Delta t)\}$ 가 구해지면 같은 시간에서의 속도와 가속도 벡터는 다음식에 의하여 구할 수 있다.

$$\dot{u}(t+\Delta t) = \dot{u}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}(t+\Delta t) \quad (13)$$

$$\ddot{u}(t+\Delta t) = a_0\{u(t+\Delta t) + u(t)\} - a_2\dot{u}(t) - a_3\ddot{u}(t) \quad (14)$$

3.3 모드중첩법

구조계의 운동방정식은 식 (8)에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$$

윗식에서 상대변위 $\{u\}$ 를

$$\{u\} = [\phi]\{z\} \quad (15)$$

와 같이 나타낼 수 있다면 식 (8)은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있고,

$$[M][\phi]\{\ddot{z}\} + [C][\phi]\{\dot{z}\} + [K][\phi]\{z\} = \{F(t)\} \quad (16)$$

이 식의 양변의 좌측에 n 번째 $[\phi]^T$ 값 $[\phi]^T_n$ 를 곱하면 식 (17)과 같이 된다.

$$[\phi]^T_n[M][\phi]\{\ddot{z}\} + [\phi]^T_n[C][\phi]\{\dot{z}\} + [\phi]^T_n[K][\phi]\{z\} = [\phi]^T_n\{F(t)\} \quad (17)$$

이제 모드 매트릭스 $[\phi]$ 를 직교성을 갖게끔 가정하면 아래의 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} [\phi]^T_n[M]\{\phi\}_m &= \{0\} & n \neq m \\ [\phi]^T_n[M]\{\phi\}_m &= \{1\} & n = m \end{aligned}$$

따라서 식 (17)은 식 (18)과 같은 모드 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M_n \ddot{z}_n + C_n \dot{z}_n + K_n z_n = F_n(t) \quad (18)$$

여기서 $M_n = \{\phi\}^T_n[M]\{\phi\}_n = 1$

$$C_n = \{\phi\}^T_n[C]\{\phi\}_n = 2\zeta_n \omega_n$$

$$K_n = \{\phi\}^T_n[K]\{\phi\}_n = \omega_n^2$$

$$F_n(t) = \{\phi\}^T_n\{F(t)\} \quad (19)$$

이고 식 (18)은 식 (19)의 관계식으로 부터 식 (20)과 같이 된다.

$$\ddot{z}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{z}_n + \omega_n^2 z_n = F_n(t) \quad (20)$$

식 (20)은 n 개의 서로 독립적인 모드 방정식들을 나타낸다. 이들 방정식의 적분으로 부터 z_n 의 크기가 정해지면 상대처짐 $u(t)$ 의 크기는 식 (15)로 부터 구할 수 있고

$$u_i(t) = \sum_n \phi_i n z_n \quad (21)$$

각 모드들의 결합은 일반적으로 SRSS(The Square Root of the Sum of the Squares)법을 택한다.

$$u_{i\max} = \sqrt{\sum_n (\phi_i n z_n)^2} \quad (22)$$

4. 지반진동

지반에 전달되는 열차의 진동은 먼저 차륜과 레일간의 상호작용에 의하여 발생한다. 결합된 차량-궤도 시스템은 복잡하며 많은 고유주파수를 갖고 이 강제진동의 주파수 중의 하나가 발생한다. 또한 차량의 침목 통과 주파수와 시스템의 고유주파수가 일치해도 공진이 일어난다. 따라서 시스템의 고유진동수가 열차의 속도에 무관하다라도 열차의 속도가 변하면 공진이 발생할 수 있으므로 열차의 속도가 감소한다고 해서 반듯이 진동이 감소하는 것은 아니다.

진동은 압축파(P파), 전단파(S파) 및 표면파(R파)에 의하여 궤

도로부터 지반으로 전파된다. 각 파의 세기는 기하적 산란과 지반의 에너지 흡수에 의하여 진원지에서 멀리 떨어지면 그 크기가 급속히 작아진다. 이때 가장 낮은 주파수를 갖는 파형이 가장 작게 감쇠된다. (그림 8)

개활지에서는 R파에 의하여 진동이 방사되는데 이 때는 주로 10 Hz 이하의 주파수를 갖는 진동이 인근의 주민을 괴롭힌다. 반면 지하철의 경과에는 주파수 대역이 30~150 Hz인 압축파와 전단파에 의하여 진동이 전파된다. 대부분 50 Hz의 주파수 영역에서 최대 에너지를 갖는 이들 진동은 5~25 Hz에서 인근 건물의 벽과 천정을 진동시켜 재방사되어 소리 에너지로 바꾸면서 소음으로 변한다. (그림 9와 10)

4.1 파의 전파

진동에너지는 실체파(P파와 S파)와 표면상(L 파와 R 파)에 의하여 지반으로 전달된다. (그림 11)

P파와 S파의 전파속도 V_p 와 V_s 는 전파 매질의 탄성계수에 의하여 결정된다.

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (23)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (24)$$

P파와 S파는 전파 매질이 탄성체이면 매질의 어떤 곳으로도 전파된다는 뜻에서 이러한 파를 실체파라고 정한다. 그러나 지중의 매질에는 많은 불연속면이 존재하기 때문에 이들 불연속면에 의해 실체파는 반사, 굴절, 증폭, 감쇠된다. 이와 같은 P파와 S파의 매질 불연속면에서의 반사 및 굴절은 빛의 경우와 같이 Snell의 법칙에 따른다. 일반적으로 지표면에서 땅속으로 들어갈수록 탄성계수가 커지므로

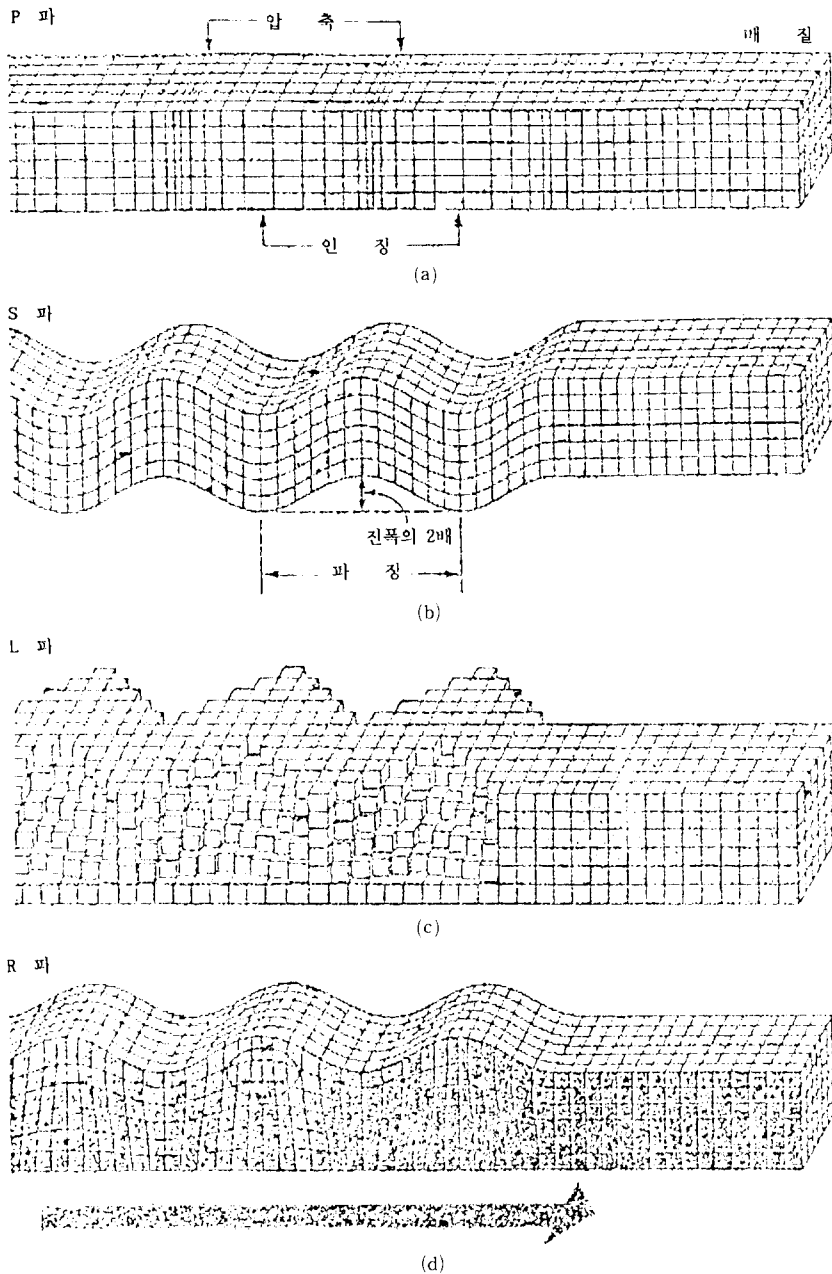


그림 8 압축파(P파), 전단파(S파) 및 표면파(L파와 R파)의 형태

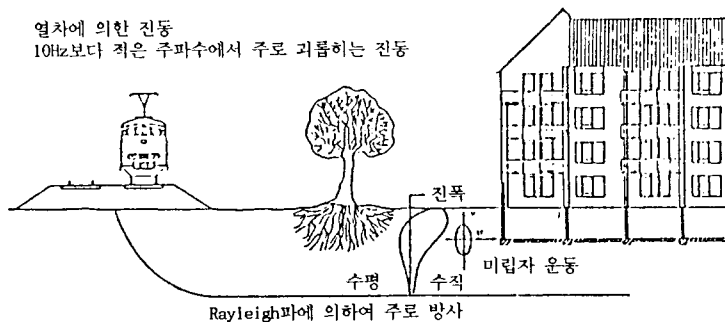


그림 9 철도에 의한 진동전파(R파에 의하여 주로 방사됨)

Snell의 법칙에 의하면 지표면에 발생하는 실체파는 그림 12에서처럼 지표 부근에서는 지표면에 수직하게 입사하더라도 땅속 깊이 들어가면 지표면과 큰 입사각을 갖게 된다.

한편 매질 불연속면에 있어서 실체파의 반사, 굴절현상은 특수한 전파 형태를 갖는 다른 종류의 파형을 만든다. 특히 지표면의 존재에 의해 지표면 부근에 에너지가 집중되기 때문에 지표면을 따라서 진행되는 파가 발생하게 되는데 이러한 파를 표면파라 부른다. 이 표면파는 L파와 R파로 대별된다. L파는 SH파가 지표와 지중의 지층경계면 사이에서 전반사를 반복하면서 외관상 지표면을 따라 전파되는 파이고, R파는 P파와 SV파가 동일한 전반사를 일으키면서 발생하는 표면파이다. 따라서 L파는 전파방향에 직각인 수평변위 성분만을 가지고 있는 반면에 R파는 파의 전파 방향에 평행한 수평변위 성분과 연직변위 성분을 갖는다.

그림 13에 나타냈듯이 표면파는 외관상 수평방향으로 전파되는 것이어서 지표 및 지중에 건설하는 구조물의 변형에 관여하게 된다. 또한 표면파의 전파 속도는 실체파의 경과와 다르고, 주기(파장)에 따라 다르다.

압축파의 분자운동은 파형의 전파 방향과 평행한 방향이고 전단파의 분자운동은 압축파의 그것과 직각을 이룬 평면에서 이루어지고 있음에 반하여 자유표면 부근에서 일어나는 R파의 경과에 흠 입자는 그림 14에서보이는 바와 같이 뒤로 돌아가는 타원형의 운동(시계 반대 방향)을 한다. 표면에서의 입자운동의 수직변위는 수평변위의 약 1.5배이다.

R파는 종종 물의 파형에 비교된다. 오른쪽으로 이동하는 파형에

터널에서 열차에 의한 진동
30Hz이상의 주파수에서 방사된 소음에 의해 주로 곤혹

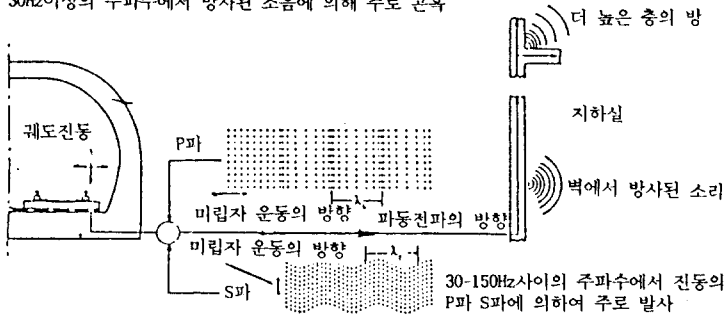


그림 10 지하철에 의한 진동의 전달(30~150 Hz 사이의 주파수에서 P파와 S파에 의하여 주로 방사)

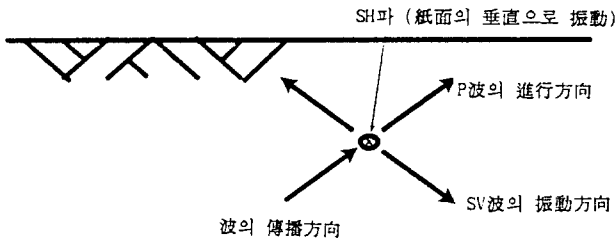


그림 11 실체파의 전파(P파와 S파-SH/SV파)

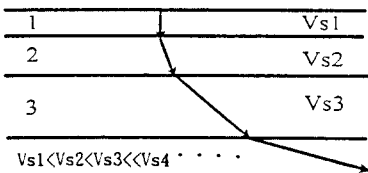


그림 12 실체파의 입사각의 변화

대하여 물의 입자는 물속 깊은 곳에서는 시계방향을 따라 원운동을 하고 얕은 곳에서는 수직방향보다 더 큰 수평변위를 갖는 타원 운동을 하는것이 R파와 물의 파형의 근본적인 차이점이나 이 두 파형

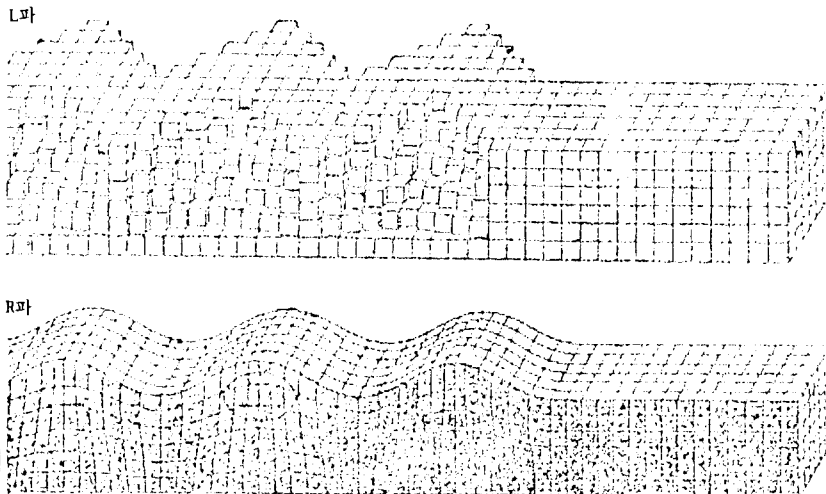


그림 13 L파와 R파의 전파 모델

모두 입자의 운동이 폐쇄된 경로를 따른다는 점에서 같은 성질을 갖는다. 따라서 이러한 운동을 케도운동이라고 하고 이와같은 성질을 분산성이라고 한다. 표면파와 같은 분산성을 갖는 파동에는 2가지 전파 속도를 생각할 수 있다. 하나는 주기의 파동이 전파하는 속도로 위상속도라 한다. 또 다른 하나는 주기가 다른 여러 개의 파동이 중첩되어 전파될 때 파의 군이 전파하는 속도로 군속도라 한다. 이와 같은 위상속도, 군속도의 분산성 및 전파 모드 등은 표면파가 전파하는 지반매질의 밀도, V_p , V_s 등의 구조를 알면 이론적으로 산정할 수 있다.

지반으로 전달되는 표면파의 전파는 다음 식에 의하여 기술될 수 있다.

$$u = A e^{\frac{2\pi}{\lambda}(x-ct)} \quad (25)$$

여기서 u : 입자 운동
 c : 전파 속도
 λ : 파장

또한 발생된 파의 주파수 f 와 파형의 전파 속도 그리고 파장 사이에는 식 (26)의 관계가 성립한다.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (26)$$

이러한 운동은 어떠한 질량도 운반하지는 않고 다만 에너지를 운반할 뿐이다. 파의 전달속도는 매질의 포아송 비의 함수로써 나타낼 수 있다 (그림 15 참조). 파의 전파속도는 압축파가 가장 빠르고 R파는 전단파보다 약간 늦다.

그림 16은 반무한체의 표면에서 수직으로 작용하는 진원에 의하여 발생하는 파형의 기초적인 특징을 나타낸 것이다.

진동에너지는 그 대부분 R파로 (약 67%) 바뀌는 반면 전단파와 압축파로는 각각 26%와 7%로 계

산된다. 그러므로 지표면에서 작용하는 진동원에 대하여 실제적으로 문제가되는 것은 표면과 특히 R파라고 할 수 있다. 진동에너지는 파형으로 전파되면서 넓은 지역에 걸친 에너지 분산때문에 진원으로부터 멀어질수록 점차 감소된다. 이 기하학적 감쇠에 부가하여 재료적 감쇠에 의하여 진동에너지는 소멸

된다. R파의 진폭은 거리에 따라 감소된다.

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} e^{-\alpha(R_1 - R_2)} \quad (27)$$

여기서 A_1 와 A_2 는 각각 진원에서 R_2 와 R_1 떨어진 곳에서의 진동의 진폭을 뜻한다. 그리고 α 는 재료적 감쇠의 크기를 나타낸다. 감쇠

계수 α 는 흙의 종류와 물의 포화도에 따라 변하며 포화된 흙과 잘 다져진 흙 사이에서도 그 크기가 $0.01 \sim 0.1 \text{ m}^{-1}$ 정도로 변한다. 파형의 진폭은 지반 안쪽으로는 거리 R에 반비례하고 지표면을 따라서는 거리의 자승(R^2)에 반비례하기 때문에 지표면에 따라서 훨씬 빠르게 강화된다. 그림 17은 R파의 깊이에 대한 관계를 보인 것이다.

그림 17에서 보는 것처럼 진동에너지는 한 파장 길이의 깊이까지 흡수속으로 완전하게 전파된다.

열차가 평활지를 통과하는 동안 진동문제를 야기시키는 하중 스펙트럼의 주 주파수대는 $5 \sim 50 \text{ Hz}$ 정도이다. R파의 속도가 대략 $50 \sim 250 \text{ m/sec}$ 사이에서 변하므로 R파의 파장은 $5 \sim 50 \text{ m}$ 까지의 범위에 있다할 때 두께 h 를 갖는 균질한 흙의 가장 낮은 고유진동수는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$f_n = \frac{V_s}{4h} \quad (28)$$

여기서 V_s 는 전단파의 전파 속도이다.

4.2 측정된 진동

측정된 가속도는 $30 \sim 250 \text{ Hz}$ 주파수 대역에 있다. 주행으로 마모된 차륜은 새 차륜에 비하여 $5 \sim 10 \text{ dB}$ 정도의 진동을 증가시키고, 차륜 플랫폼은 60 Hz 이상의 주파수에서 5 dB 정도로 진동을 증가시킨다.

지반진동의 증가는 레일의 뒤틀림과 이음매 그리고 압정결함으로부터 예기될 수 있다. 레일의 파장 마모는 그들의 짧은 파장때문에 낮은 주파수의 지반진동에는 그리 크게 기여하지는 않는다. 이음매 레일과 장대레일(CWR)간의 진동차이는 5 dB 이내이다. 그림 18에는 독일 고속철도에서 측정된 결과를

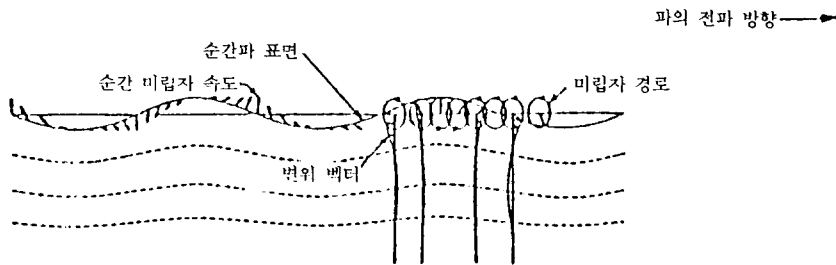
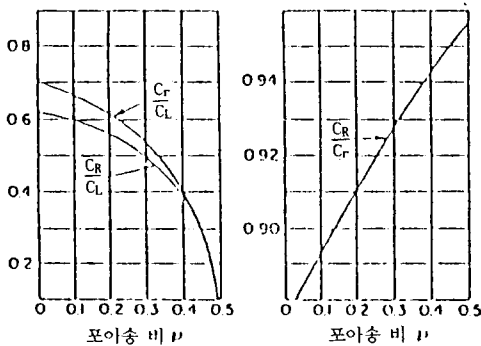


그림 14 R파에서의 흙 입자운동



Ca-Rayleigh파 속도 CL=종파속도 CR=횡파속도

그림 15 포아송 비에 따른 파형 속도

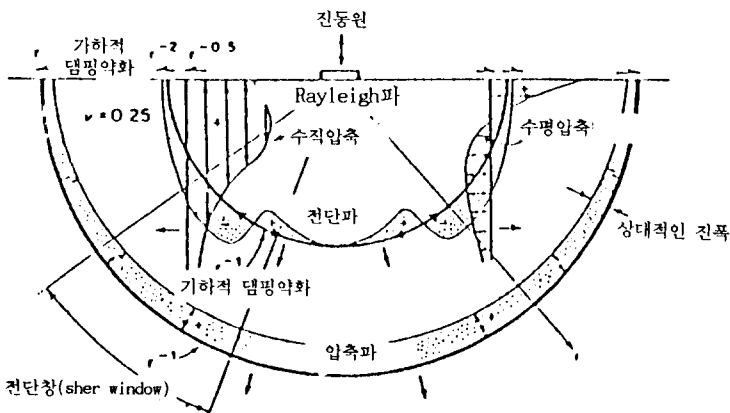


그림 16 탄성 반무한체에서의 변위파형

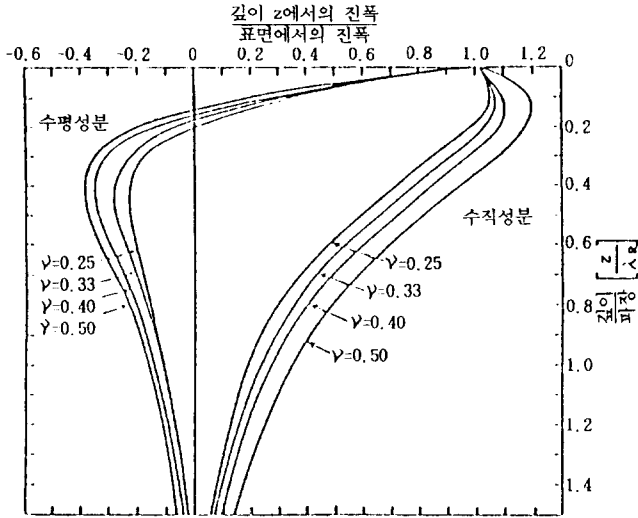


그림 17 깊이에 따른 R파의 크기

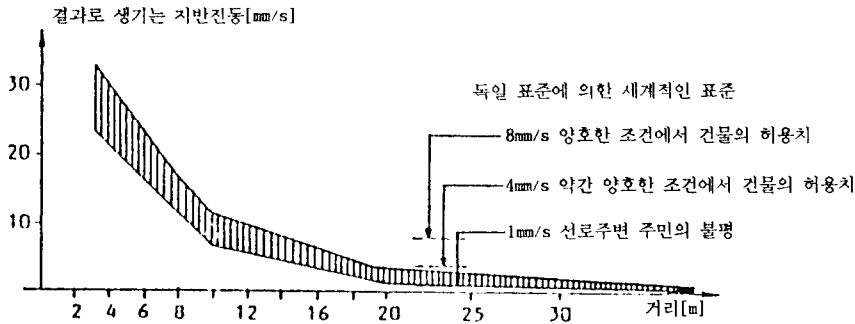


그림 19 DTS에 의한 지반 진동 예

나타낸 것이다.

이 실험결과에 의하면 유해한 진동이 대차 축거에 대응하는 주파수에서 일어날 수 있음을 보이고, 그림에서 속도 250 km/h 일때 대차 축거 전달 주파수는 $V_0 = 5 \times 10^{-8}$ m/s에 대하여 78 dB을 알 수 있다.

철도에서는 또 다른 진동이 동적 궤도안정기(DTS)를 사용하므로써 발생한다. 즉 동적궤도안정기로 궤도에 전달되는 국부적인 매우 높은 에너지는 R파로 변하여 매우 강한 흙의 진동을 야기시킨다. 그림 19에서 보이는 것처럼 DTS를 사용하려면 근접한 건물에서 약 15m 이상 떨어져야 민원의 소지가 적음을 알 수 있다.

4.3 인간 지각

인간은 다음의 진동주파수에 대하여 매우 민감하다.

- 0.1~ 0.2 Hz : 배멀미의 특유한 현상으로 나타나는 균형기관의 공진
- 4.0~ 8.0 Hz : 복부와 가슴 함유물의 공진
- 30.0~80.0 Hz : 초점이 손실로 귀착되는 눈구멍에서의 눈의 공진

가청도의 한계는 대략 20 Hz의 주파수이다. 그림 20에는 진동과 구조물발생 소음 지각간의 경계를 나타낸 것이다. 인간의 육체는 0.01 mm 변위를 갖는 진동도 감지할 수 있다. 손가락 끝은 약 50

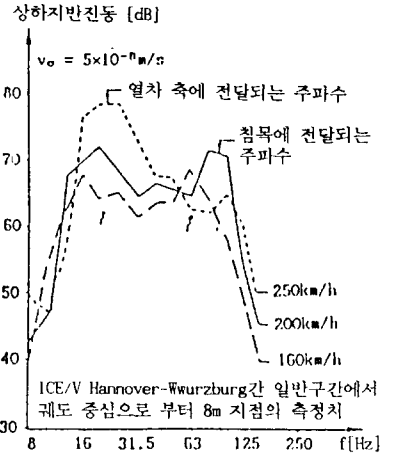


그림 18 지반진동과 열차 속도와의 관계

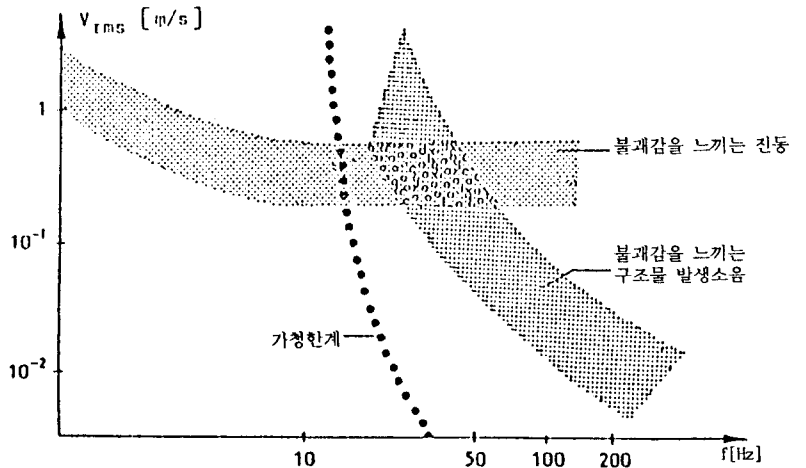


그림 20 진동과 구조물 발생 소음에 의한 불쾌감의 분류

배 더 민감하다. 5 Hz의 진동수를 갖는 진동이 0.2 mm의 진폭을 갖는다고 하더라도 이 진동이 건물의 구조적 안정성에는 아무런 문제를 야기시키지 않는다고 하여도 이 값은 지각한계의 약 200배나 되는 것을 감안한다면 그러한 진동이 사람들에게 불평을 야기시킨다는 것은 쉽게 이해할 수 있다.

선형척도와 dB 척도 간의 관계를 그림 21에 나타내었다.

$$L[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{측정치}}{\text{기준치}} \right)$$

여기서 기준치는 국제적으로 표준화되어 있지않는데 ISO는 $V_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$ 를 택하는 반면, 독일 문헌에서는 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 를 종종 사용하고 있다. 그림 22에는 V_0 를 10^{-8} m/s 를 사용하였다.

진동 수준은 표 1과 같이 분류될 수 있다.

(1) 터널에서의 방진

(i) 도상궤도를 사용하는 방진 방법

궤도의 진동을 작게하기 위하여 도상궤도 시스템을 사용할 수 있다. 독일에서 행한 실험에 의하면 도상의 깊이가 30 cm에서 75 cm까지 증가함에 따라 10 Hz이하의 주파수를 갖는 진동은 그 크기가 6 dB정도 감소하였다. 또한 도상의 바닥과 터널 인버터 사이에 탄성 매트를 설치하여 진동을 경감시키고, 침목과 도상 사이에 합성 패드를 깔므로써 진동의 크기를 감소시킬 수 있다. 이때 합성패드는 도상에 사용하는 자갈 등에 의하여 손상을 받으므로 이를 방지하기 위하여 단단한 면을 갖는 22mm 정도 두께의 고무 접착 코르크 층을 갖는다.

(ii) 슬래브 궤도

도시내의 교통 시스템인 터널의 경우에는 보수비를 절감하기 위하여 무도상 슬래브 궤도가 선호된

	계 산 식	기준치
가속도	$L=20\log_{10}(a/a_0) \text{ dB}$	$a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$
속도	$L=20\log_{10}(v/v_0) \text{ dB}$	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
변위	$L=20\log_{10}(d/d_0) \text{ dB}$	$d_0 = 10^{-11} \text{ m}$

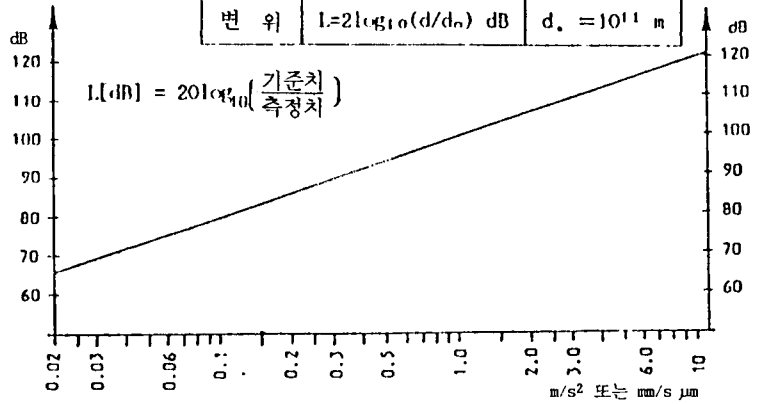


그림 21 a, v 및 d에 대한 선형척도와 dB 척도간의 관계

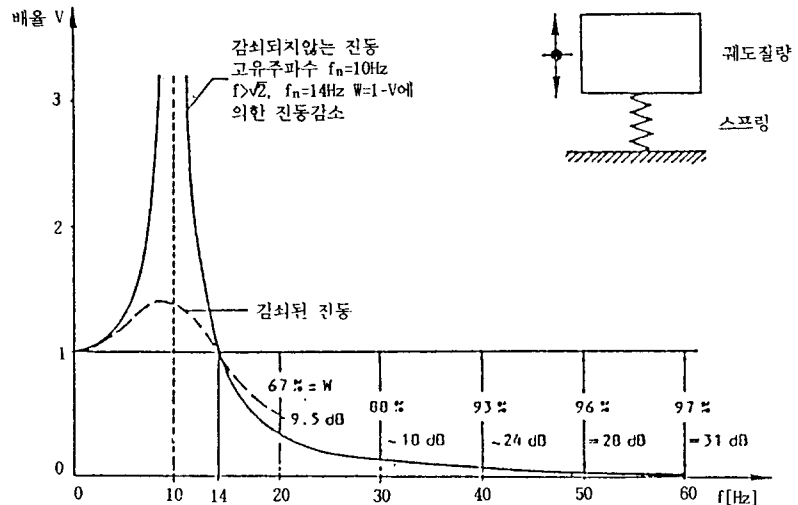


그림 22 진동 감소의 원리

표 1 진동 수준의 분류

EP값	$L_{EP}[\text{dB}]$ $v_0=5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$	$L_{EP}[\text{dB}]$ $v_0=10^{-8} \text{ m/s}$	$L_{EP}[\text{dB}]$ $v_0=10^{-9} \text{ m/s}$	지각의 분류
< 0.1	< 66	< 80	< 100	알아차릴 수 없음
0.10-0.25	66-74	80-88	100-108	대단히 약함
0.25-0.63	74-82	88-96	108-116	약함
0.63-1.60	82-90	96-104	116-124	양호
1.60-4.00	90-98	104-112	124-132	강함
> 4.00	> 98	> 112	> 132	대단히 강함

다. 그러나 콘크리트 슬래브 궤도는 도상궤도에 비하여 시스템의 진동전달 가능성이 크다. 따라서 이를 막기 위하여 궤도구조내에 탄성이 강한 합성 패드 층을 삽입하여 진동을 제거하여야 한다. 독일 뮌헨과 프랑크푸르트(Frankfurt) 철도에서 채택된 “아이젠만(Eisenmann) 궤도” 시스템에서는 터널 바닥에 탄성합성수지(Elastomer)의 지지위에 콘크리트 침목을 부설하였고, 영국철도의 “비팩트(Vipact) 시스템”은 프리캐스트 또는 현장 콘크리트 슬래브의 형성 동안 슬래브 구조내에 스프링 요소를 설치한다. 미국이 뉴욕 지하철에서는 콘크리트 슬래브를 유리섬유로 받치므로써 좋은 방진 효과를 얻고 있다.

(2) 개활지에서의 방진

개활지에서는 궤도에서 저주파의 진동수를 갖는 표면파가 주로 발생한다. 특히 10 Hz 이하의 주파수를 갖는 진동을 스프링을 사용하여 감소시킨다는 것은 상당한 방진방법이 못된다. 이러한 경우에는, 예를 진동에 접한 구조물 부근에 개거(開渠)에 의한 수동(受動)의 격리방법이 고려될 수 있다. 표면파의 에너지가 한 파장의 깊이를 가진 층을 통하여 주로 전달되므로 개거는 전달된 파형 에너지를 많이 줄일 수가 있다. 만약 개거의 깊이가 표면파 파장의 반 정도 보다 깊으면 격리효과는 70% 정도 나타난다. 그러나 실제로 이 방법은 표면파의 파장이 20 m보다 짧을 때만 효과적이다. 이 때문에 Franki는 가압된 프라스틱 쿠션으로 구성된 영구 가스 층만 차폐물에 의한 시스템을 개발하였다.

5. 철도의 환경소음

주행열차는 주로 차륜과 레일의

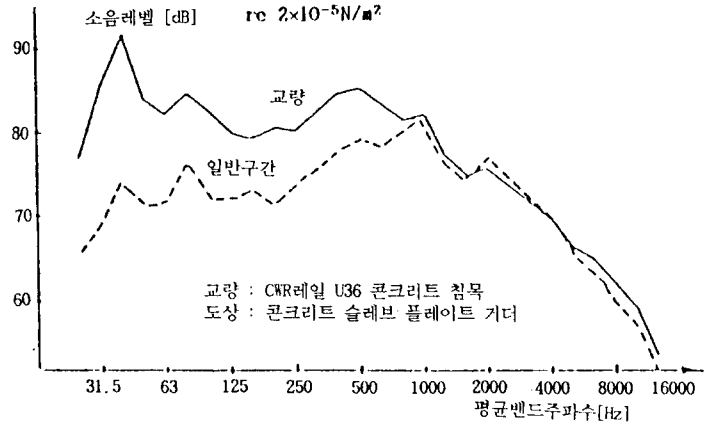


그림 23 궤도 중심에서 25 m 떨어진 거리에서 측정된 교량과 일반교량에서의 소음 스펙트럼의 비교 예

상호작용에 의한 결과로서 500~2500 Hz 주파수 영역의 공기 전달소음을 방출한다. 방출된 소음레벨을 조사하기 위하여 여러나라에서 측정 조사되어왔는데, 이들 소음레벨은 궤도구조의 형태(목침목 또는 콘크리트 침목), 강형(강) 또는 콘크리트 교량 상의 궤도, 도상의 유무, 레일의 조건 특히 피상마모와 용접의 결합 등에 의하여 강하게 좌우된다.

그림 23은 교량상과 개활지의 궤도중심에서 25 m 떨어진 거리에서 측정된 소음 스펙트럼 예를 보인 것이다. 이 그림에서 열차가 교량을 통과하는 동안 저주파의 소음에너지 레벨이 많이 높아짐을 알 수 있다.

1000 Hz 이상에서는 교량상의 궤도와 일반구간에서의 궤도는 같은 정도의 소음레벨을 발생시킨다.

교량중에서 가장 큰 소음을 만들어 내는 구조는 직결된 궤도를 갖는 모든 강형이다. 이때 맨 바깥쪽 판형은 파동음에 대하여 매우 유효한 차폐물 역할을 한다.

도상은 그것의 질량으로 인하여 또한 진동을 감소시키는 요소이며 이것의 다공성으로 인하여 공기전달소음을 흡수한다. 강교량에 직결

된 궤도에 비하여 도상은 10 dB (A) 정도의 소음레벨을 감소시킨다.

피상 마모된 레일은 5 내지 15 dB(A)의 소음레벨을 증가시킬 수 있다. 유사한 현상은 불량한 용접과 레일이 이음매 그리고 또한 차륜프렛에 의하여 일어날 수 있다.

네델란드 철도에서 수행한 소음 측정 결과에 의하면 구도의 중심으로부터 25 m 떨어진 곳에서 얻어진 소리 소음 레벨(SEL)은 85~93 dB(A) 사이의 L_{eq} 값에 상당하는 91~99 dB(A) 사이에서 변한다. 이때 차륜의 영향에 의한 분산은 5 dB(A)이었다. 주의할 만한 것은 목침목을 갖는 궤도의 경우 콘크리트 침목을 갖는 궤도의 경우보다 규칙적으로 1 dB(A)정도 큰 소음에너지 레벨을 갖는다는 사실이다.

참고 문헌

- (1) C. Esveld, Modern Railway Track, MRT Production, Duis-bury Germany, 1989.
- (2) William W. Hay, Railroad Engineering (2nd Edition), John Wiley & Sons, New York, 1982.
- (3) C. L. Heeler, British Railway

- Track (Design, Construction and Maintenance) (5th Edition), Derry and Sons Limited, 1979.
- (4) Fritz Fastenrath, Railroad Track (Theory and Practice), Frederick Ungar Publishing Co, 1981.
- (5) Jean Alias, LA VOICE FERREE (Techniques de construction et Dentreten), Sanit-German, Paris, 1984.
- (6) 松原健太郎：新幹線の軌道，日本鐵道施設協會 1964.4
- (7) 官本俊光，渡邊偕年：線路(軌道の設計管理)，山海堂，東京，1983.7.
- (8) 佐藤吉言，梅原利之：線路工學，日本鐵道施設協會，1987.11.

WESTPRAC V(Seoul 1994)안내

제 5 차 서태평양지역 음향학술회의(WESTPRAC V)가 1994년 8월 23일부터 25일까지 3일간 서울에서 개최됩니다.

동 학술대회는 한국소음진동공학회와 한국음향학회가 공동으로 주최하고 있으며 관련분야로는

- 음향학 일반(GA)
- 물리음향(PA)
- 초음파 및 생리음향(UB)
- 수중음향(UA)
- 건축음향(AA)
- 소음과 진동(NV)
- 음성 및 통신(SC)
- 센서와 계측(TM)

등이 있다.

회원 여러분의 참여와 협조를 통해 많은 논문이 동 학술대회에서 발표될 수 있기를 바라오며 일정 및 제출처는 다음과 같다.

— 다 음 —

- * 일 정 : 논문초록제출 : 1993년 11월 15일
심사결과통보 : 1994년 2월 15일
- * 제출장소 : 서울 강남구 역삼동 635-4
한국음향학회 사무국
☎ 135-703 (TEL : 556-3513)
- * 학술대회의 공식언어는 영어입니다.