

# 열차주행에 대한 방진 슬래브궤도의 진동해석기법 개발

## Development of evaluation method of vibration-reduction efficiency in slabtrack

양 신 추\*강 윤 석\*\*엄 주 환\*\*\*  
 Yang, Sin-chuKang, Yun-sukUm, Ju-hwan

### 1. 서론

열차주행시 열차의 이동축중에 의한 궤도구조물의 동적거동은 열차의 동특성과 열차속도, 궤도의 유형 및 궤도재료의 물성치에 따라 변하며 차량과 궤도의 상호작용에 따라 변하게 된다. 가진력으로 작용되는 열차의 동하중으로 인해 하부구조에 미치는 응답을 구하기 위해 여러 가지 해석적인 방법들이 제시되어 왔는데 차량-궤도의 복잡한 상호작용에 의하여 결정되므로 그 정확한 산정이 매우 어렵게 된다. 선진국에서는 방진슬라브궤도의 많은 장점으로 인해 고속철도에 많은 부설을 하였고 여기에 대한 종합적인 시험과 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. 국내에서도 방진슬라브궤도가 고속철도 장대터널의 일부구간에 부설될 예정에 있으며 관심이 많이 높아지고 있다.

본 연구에서는 방진슬라브궤도의 방진효율성을 평가하는 기법을 개발하고 일반도상궤도와 방진슬라브의 설치후 하부구조에 전달되는 방진성을 비교평가하였다.

### 2. 궤도의 조도하중에 대한 고조파진동 해석

#### 2.1 차량과 레일의 상호작용력 계산

\* 한국철도기술연구원, 책임연구원  
 \*\* 한국철도기술연구원, 주임연구원  
 \*\*\* 한국철도기술연구원, 주임연구원

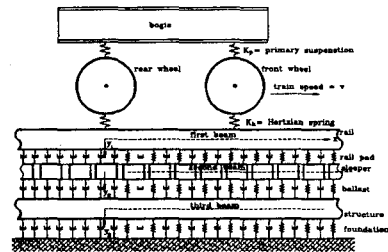


그림 1 구조물상의 자갈도상궤도의 동적해석을 위한 연속보 모델

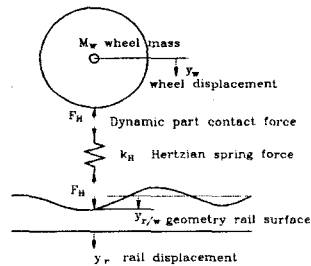


그림 2 차량과 레일의 접촉 미커니즘(Contact mechanism)

그림 1은 구조물상에 부설된 자갈도상궤도에 대한 동적해석을 수행하기 위한 연속보모델이며, 그림 2는 차량과 레일의 접촉 미커니즘(Contact mechanism)을 보다 상세히 나타낸 것이다. 그림 1, 2로부터 차량의 전륜과 후륜에서 레일과 접촉하는 점에서의 상호작용력  $F_{H1}$ ,  $F_{H2}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_{H1} \\ F_{H2} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{y_{w1}}{A_{w1}} \\ \frac{y_{w2}}{A_{w2}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_H(y_{w1} - y_{r1} - y_{y/w1}) \\ K_H(y_{w2} - y_{r2} - y_{y/w2}) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $y_{r1}$ ,  $y_{r2}$  및  $y_{w1}$ ,  $y_{w2}$ 는 차륜과 접촉점에서의 레일 및 차륜 변위이고,  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$ 는 단위조도 하중에 대한 차륜변위를 나타내는 어드미턴스(Admittance)이다. 또한  $K_H$ 는 차륜과 레일의 접촉면에서의 헤르쯔안(Hertzian) 스프링 계수이고,  $y_{r/w1}$ ,  $y_{r/w2}$ 는 전륜과 후륜에서의 차륜과 레일의 상대표면조도이다. 식(1)로부터 레일변위는 식(2)와 같으며 레일에 작용하는 단위하중에 대한 궤도 변위를 나타내는 레일 어드미턴스의 정의로부터 식(3)과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{Bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} y_{r/w1} \\ y_{r/w2} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} (\frac{1}{K_H} + A_{w1})F_{H1} \\ (\frac{1}{K_H} + A_{w2})F_{H2} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} A_{11}^r & A_{12}^r \\ A_{21}^r & A_{22}^r \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{H1} \\ F_{H2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식(2), (3)으로부터 상호작용력과 레일/차륜 상대조도와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} (\frac{1}{K_H} + A_{w1} + A_{11}^r) & A_{12}^r \\ A_{21}^r & (\frac{1}{K_H} + A_{w2} + A_{22}^r) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{H1} \\ F_{H2} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} y_{r/w1} \\ y_{r/w2} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

차륜/레일조도와 레일변위와의 관계는 식(3), (4)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} y_{r1} \\ y_{r2} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} A_{11}^r & A_{12}^r \\ A_{21}^r & A_{22}^r \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} (\frac{1}{K_H} + A_{w1} + A_{11}^r) & A_{12}^r \\ A_{21}^r & (\frac{1}{K_H} + A_{w2} + A_{22}^r) \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} y_{r/w1} \\ y_{r/w2} \end{Bmatrix} = \mathbf{H}_r(\omega) \mathbf{y}_{r/w} \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{H}_r$ 은 단위 차륜/레일 조도에 대한 레일 응답을 나타내는 전달함수로서 다음과 같이 나타내진다.

$$\mathbf{H}_r(\omega) = - \begin{Bmatrix} A_{11}^r & A_{12}^r \\ A_{21}^r & A_{22}^r \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} (\frac{1}{K_H} + A_{w1} + A_{11}^r) & A_{12}^r \\ A_{21}^r & (\frac{1}{K_H} + A_{w2} + A_{22}^r) \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

궤도 각부의 동적거동은 차륜 및 궤도 어드미턴스와 차륜/레일 상대조도가 주어지면 식(5)를 사용하여 구할 수 있다.

## 2.2 레일의 어드미턴스(Admittance) 계산

이동 고조하중(Harmonic excitation)을 받는 자갈도상궤도를 3중보로 모형화할 경우 궤도부분계의 운동 방정식은 다음이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + k_1^*(y_1 - y_2) &= F_H \delta(x - vt) e^{i\omega t} \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + k_1^*(y_2 - y_1) + k_2^*(y_2 - y_3) &= 0 \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 y_3}{\partial x^4} + m_3 \frac{\partial^2 y_3}{\partial t^2} + k_2^*(y_3 - y_2) + k_3^* y_3 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $k_1^*$ ,  $k_2^*$ ,  $k_3^*$ 는 각각 단위길이당 레일패드, 자갈도상 및 구조물의 복소스프링 계수이다. 고조하중에 대한 궤도부분계의 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$y(x, t) = \tilde{y}(x, t) e^{i\omega t} \quad (8)$$

$x$ 와  $t$ 에 관한 편미분은 상대좌표  $r = x - vt$ 에 대한 편미분으로 다음과 같이 나타낼 수 있으므로

$$\begin{aligned} \frac{\partial^n y}{\partial x^n} &= \frac{\partial^n \tilde{y}}{\partial r^n} e^{i\omega t} \\ \frac{\partial^n y}{\partial t^n} &= (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^n \tilde{y} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)을 식(9)에 대입하면 운동방정식은 상대좌표  $r$ 만의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 I_1 \frac{\partial^4 \tilde{y}_1}{\partial r^4} + m_1 (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^2 \tilde{y}_1 + k_1^* (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2) &= F_H \delta(r) \\ E_2 I_2 \frac{\partial^4 \tilde{y}_2}{\partial r^4} + m_2 (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^2 \tilde{y}_2 + k_1^* (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) + k_2^* (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_3) &= 0 \\ E_3 I_3 \frac{\partial^4 \tilde{y}_3}{\partial r^4} + m_3 (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^2 \tilde{y}_3 + k_2^* (\tilde{y}_3 - \tilde{y}_2) + k_3^* \tilde{y}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \{E_1 I_1 s^4 - m_1(\omega - vs)^2 + k_1^* & -k_1^* & 0 \\ -k_1^* & E_2 I_2 s^4 - m_2(\omega - vs)^2 + k_2^* & -k_3^* \\ 0 & -k_3^* & E_3 I_3 s^4 - m_3(\omega - vs)^2 + k_3^* \} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \\ \bar{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(10)을 s-영역으로 후리에 변환하여 행렬형식으로 나타내면 식(11)과 같다.

식(11)을  $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$ 에 대하여 풀면

$$\begin{aligned} \bar{y}_1(s) &= \frac{F_H}{D(s)} \{A(2,2)*A(3,3) - A(2,3)*A(2,3)\} \\ \bar{y}_2(s) &= \frac{-F_H}{D(s)} A(1,2)*A(3,3) \\ \bar{y}_3(s) &= \frac{F_H}{D(s)} A(1,2)*A(2,3) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $D(s)$ 는  $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3$ 의 계수행렬의 행렬식이고,  $A(i,j)$ 는 행렬의 I행 j렬요소이다. 케도부분계에서의 영역응답은 후리에(Fourier) 역변환을 통하여 구할 수 있는데 이때 후리에 변환은 Jordan lemma 및 유수정리(Residue theorem)를 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

i)  $r < 0$  일 때

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) < 0} \frac{1}{D'(s_1)} \{A(2,2)*A(3,3) - A(2,3)*A(2,3)\} e^{is_1 r} \\ \tilde{y}_2(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) < 0} \frac{-1}{D'(s_1)} A(1,2)*A(3,3) e^{is_1 r} \\ \tilde{y}_3(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) < 0} \frac{1}{D'(s_1)} A(1,2)*A(2,3) e^{is_1 r} \end{aligned} \quad (13)$$

ii)  $r > 0$  일 때

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) > 0} \frac{1}{D'(s_1)} \{A(2,2)*A(3,3) - A(2,3)*A(2,3)\} e^{is_1 r} \\ \tilde{y}_2(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) > 0} \frac{-1}{D'(s_1)} A(1,2)*A(3,3) e^{is_1 r} \\ \tilde{y}_3(r) &= F_H \sum_{s_1}^{s, \text{for } \text{Im}(s_1) > 0} \frac{1}{D'(s_1)} A(1,2)*A(2,3) e^{is_1 r} \end{aligned} \quad (14)$$

### 2.3 차륜의 어드미턴스(Admittance) 계산

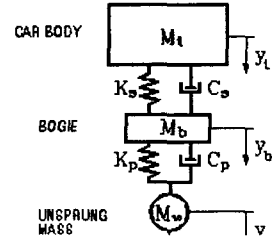


그림 3 차량의 어드미턴스 계산

차량의 1, 2차 현가장치(Suspension)와 대차(Bogie) 및 차체의 질량을 고려할 경우 조도로 인한 차량의 운동은 그림 3과 같이 3 질량모델로 나타낼 수 있고 이 때의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_t \ddot{y}_t + C_s(\dot{y}_t - \dot{y}_b) + K_s(y_t - y_b) &= 0 \\ M_b \ddot{y}_b + C_s(\dot{y}_b - \dot{y}_t) + C_p(\dot{y}_b - \dot{y}_w) + K_s(y_b - y_t) + K_p(y_b - y_w) &= 0 \\ M_w \ddot{y}_w + C_p(\dot{y}_w - \dot{y}_b) + K_p(y_w - y_b) &= F_H \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $M_t, M_b$ 는 차체 및 대차의 질량이며,  $M_w$  차축 및 차륜을 포함한 현가 되지 않은 스프링하 질량(Unsprung mass)이다. 또한  $K_p, K_s$ 는 1차 및 2차 현가장치의 스프링계수이며,  $C_p, C_s$ 는 1차 및 2차 현가장치의 댐핑계수이다. 식(15)로부터 주파수영역에서의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
(-\omega^2 M_i + i\omega C_s + K_s) \bar{y}_i - (i\omega C_s + K_s) \bar{y}_b &= 0 \\
(-\omega^2 M_b + i\omega C_p + i\omega C_s + K_p + K_s) \bar{y}_b - & \\
(i\omega C_s + K_s) \bar{y}_i - (i\omega C_p + K_p) \bar{y}_w &= 0 \\
(-\omega^2 M_w + i\omega C_p + K_p) \bar{y}_w - (i\omega C_p + K_p) \bar{y}_b &= \bar{F}_H
\end{aligned} \tag{16}$$

여기서  $\bar{y}_i(\omega)$ ,  $\bar{y}_b(\omega)$ , 그리고  $\bar{y}_w(\omega)$ 는  $y_i(t)$ ,  $y_b(t)$ , 그리고  $y_w(t)$ 의 후리에 변환이다.

차륜의 어드미턴스,  $A_w (= \bar{y}_w / \bar{F}_H)$ 는 식(13)을 풀므로써 구할 수 있다.

## 2.4 차륜/레일 조도의 파워스펙트럼(Power spectrum)

차륜-레일표면의 조도에 대한 파워스펙트럼(PSD: Power spectral density)는 대체로 공간 주파수의 3승에 반비례하는 것이 보고되고 있다.

이러한 가정하에 조도의 PSD는 다음과 같이 나타내진다.

$$S_d(\Omega) = \frac{A}{(B + \Omega)^3} \tag{17}$$

여기서  $\Omega (= 2\pi/\lambda = \omega/v)$ 는 공간주파수(Spatial frequency)이고,  $\lambda$ ,  $\omega$ 는 파장과 각주파수(Angular frequency)이다. 또한 A, B는 조도상수로서 A는 파장 ( $\lambda$ )이 3 m 이내인 단파장에 대응하는 특성값으로 보통  $A = 2.0 \times 10^{-6}$ 을 사용하고 B는 장파장에 대응하는 특성값으로  $B = 0.36 \text{ m}^{-1}$ 의 값을 사용한다.

## 2.5 차륜과 레일의 접촉강성

차륜과 레일의 접촉점에서 상호작용력과 압축변위는 아래와 같이 비선형 관계식으로 주어진다.

$$F_H = C_H y^{3/2} \tag{18}$$

여기서  $C_H$ 는 헤르쯔안(Hertzian) 강성 [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ] 이고  $y$ 는 압축 변위이다. 식(18)을 선형화시키면 압축강성을 나타내는 헤르쯔안 스프링계수는 다음과 같이 나타내진다<sup>[8]</sup>.

$$k_H = \frac{dF_H}{dy} = 3/2 C_H^{2/3} F_H^{1/3} \tag{19}$$

Jenkins의 연구<sup>[8]</sup>에 따르면 선형 헤르쯔안 스프링계수는 1 m 직경의 차륜에 대하여 축중이 7.5 t 인 경우 새 레일에서는  $k_H$ 가  $1.4 \times 10^9 \text{ N/m}$ , 오래된 레일에서는  $1.6 \times 10^9 \text{ N/m}$ 의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는  $k_H = 1.4 \times 10^9 \text{ N/m}$ 의 값을 사용하였다.

## 2.6 레일의 PSD 응답

동일지점에 대한 케도틀림 파워스펙트럼을  $S_i^{r/w}(\omega)$ 라 하면 그림1에서와 같이 동일 레일상에 있는 두 지점에 대한 교차파워스펙트럼(Cross Power Spectrum)은 자기상관함수(Autocorrelation Function)의 개념으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

두 지점에 대한 크로스 자기상관함수  $R_{ij}(\tau)$ 는 정의로부터

$$R_{ij}^{r/w}(\tau) = E[y_{r/w_i}(t)y_{r/w_j}(t+\tau)] \tag{20}$$

이고, 동일 레일상의 두 지점에 대한 차륜도달 시간차  $t_{ij} = (x_j - x_i)/V$ 를 고려하면

$$y_{r/w_j}(t+\tau) = y_{r/w_i}(t+\tau - t_{ij}) \tag{21}$$

이므로, 식(1)은 다음과 같이 나타내지게 된다.

$$R_{ij}^{r/w}(\tau) = E[y_{r/w_i}(t)y_{r/w_i}(t+\tau - t_{ij})] = R_i^{r/w}(\tau - t_{ij}) \tag{22}$$

두 지점에 대한 교차파워스펙트럼(Cross Power Spectrum)은 Wiener-Khintchine 변형으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
S_{ij}^{r/w}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}^{r/w}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_i^{r/w}(\tau - t_{ij}) e^{-i\omega\tau} d\tau \\
&= \frac{1}{2\pi} e^{-i\omega t_{ij}} \int_{-\infty}^{\infty} R_i^{r/w}(\tau') e^{-i\omega\tau'} d\tau' = S_i^{r/w}(\omega) e^{-i\omega t_{ij}}
\end{aligned} \tag{23}$$

식(4)로부터 두 지점에서의 궤도트림 스펙트럼행렬은 다음과 같이 나타내진다.

$$\mathbf{S}^{r/w}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-i\alpha\Delta u} \\ e^{i\alpha\Delta u} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{S}_I^{r/w}(\omega) \quad (24)$$

레일의 스펙트럼응답은 식(5)과 식(24)으로부터

$$\mathbf{S}_{y,i}(\omega) = [\overline{\mathbf{H}_r(\omega)}] \mathbf{S}^{r/w}[\mathbf{H}_r(\omega)]^T \quad (25)$$

여기서  $[\overline{\mathbf{H}_r(\omega)}]$   $[\mathbf{H}_r(\omega)]$ 는 공액복소수(Complex Conjugate)이다. 레일 이외의 궤도각부에 대한 응답은 식(13), (14)를 사용하여 어드미턴스를 구한 후 식(5)와 같은 방법으로 전달함수를 구한 후 식(25)와 같이 구할 수 있다.

궤도 각부의 PSD응답이 구해지면 1/3 옥타브 밴드(Octave band) 주파수영역에서 속도 및 가속도레벨은 하한주파수( $f_l$ )와 상한주파수( $f_u$ ) 사이의 PSD의 총합으로 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{dB}(V_i) &= 10 \log_{10} \left\{ \frac{\omega^2 \hat{S}_{d_i}}{v_{ref}^2} (f_u - f_l) \right\} \\ &= 10 \log_{10} \left\{ \frac{C\omega^3 \hat{S}_{d_i}}{v_{ref}^2} \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{dB}(A_i) &= 10 \log_{10} \left\{ \frac{\omega^4 \hat{S}_{d_i}}{a_{ref}^2} (f_u - f_l) \right\} \\ &= 10 \log_{10} \left\{ \frac{C\omega^5 \hat{S}_{d_i}}{a_{ref}^2} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서  $v_{ref}$  및  $a_{ref}$ 는 속도 및 가속도의 기준값으로서 각각  $5.0 \times 10^{-8} \text{m/sec}$  및  $1.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$  사용했고,  $C = 2^{1/6} - 2^{-1/6}$ 인 상수이다.

진동에 의하여 밀폐된 구조물내부에서 발생하는 소음레벨은 다음과 같은 경험식을 사용하여 개략적으로 평가할 수 있다.

(가) 경험식 1 (GERB 사용식)

A-rated 진동레벨로부터 방사되는 구체전달소음

은 다음과 같은 경험적 관계식이 성립한다.

$$L_{pA} = L_{VA} + 10 \log(4S/A) + 10 \log \sigma$$

여기서

$L_{VA}$  = A-가중치 소음레벨,  $L_{VA}$  = A-가중치 속도레벨, S = 진동영역(경험값 2x지반영역)

A = 흡음영역(경험값 0.8x지반영역),  $\sigma$  = 반사율(경험식 1)

속도에 대한 A-가중치레벨은 다음 식으로 주어진다.

$$(\text{dB}) = -20 \text{Log} \sqrt{1 + (5.6/f)^2}$$

(나) 경험식 2 (SNCF 경험식)

$$L_p = L_v + 10 \log(4\sigma \text{Tr}/0.16V)$$

여기서

$L_p$  = 소음레벨(기준값  $2\text{E}-5\text{N/m}^2$ ),  $L_v$  = 진동레벨(기준값  $5\text{E}-8\text{m/s}$ ),  $\sigma$  = 반사율, S = 진동영역

Tr = 실내잔향시간(reverberation time in the room), V = 실내체적

### 3. 방진슬라브궤도의 방진성평가

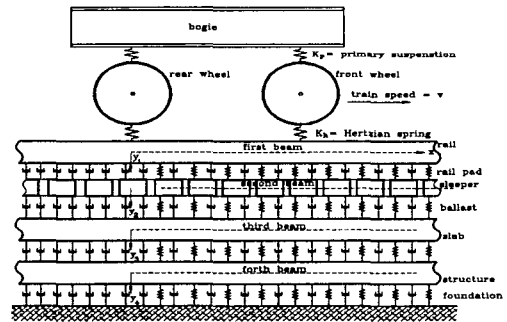


그림 4 방진슬라브 궤도의 모형

자갈도상하부에 방진슬라브를 있는 경우 해석모형은 그림 4과 같이 4층 빔모형으로 나타낼 수 있다.

그러나 최하부구조물은 중간에 지지강성이 없고

단부에 지지되므로 실제와는 차이가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단부에서 지지되는 강성을 등가윙클러강성 (Equivalent Winkler spring)으로 모형화하였는데 그 개념은 다음과 같다.

먼저 단부에서 지지되는 구조물의 상부슬라브를 강성을 가진 등가윙클러 스프링으로 지지된다고 가정한다. 하부구조물만을 대상으로 상세한 구조해석을 수행하여 상부슬라브의 휨운동에 대한 첫 번째 고유주파수를 알면 등가구조물의 첫 번째 고유주파수는 다음과 같이 주어지므로

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{5(840EI + 5mL^4)}{7k_{eq}L^4}} \quad (28)$$

등가강성  $k_{eq}$ 를 구할 수 있다. 구해진  $k_{eq}$ 를 통해 궤도부분계의 주파수영역의 응답을 구하게 된다. 그림5와 슬라브궤도가 있는 경우 주파수영역과 하부구조에 미치는 속도dB의 상관관계를 나타낸 그림이다. 그림5는 하부구조물의 미치는 속도별 dB 응답은 슬라브가 있는 경우보다 훨씬 높게 된다.

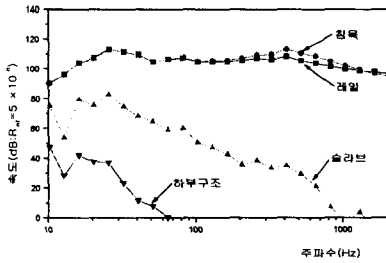


그림 5 방진슬라브의 하부구조물의 방진효과

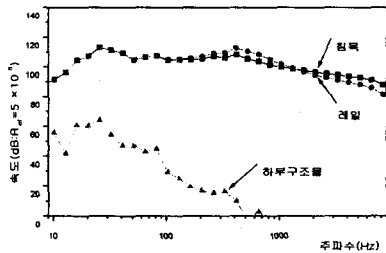


그림 6 일반도상궤도의 하부구조물의 방진효과

#### 4. 결론

본 연구에서는 열차주행시 차륜과 레일의 상호작용을 통한 방진슬라브궤도의 방진효율성을 평가하는 기법을 개발하였다. 차륜 및 궤도 어드미턴스와 차륜/레일 상대조도를 구하고 궤도 각부의 PSD응답이 구한 후 1/3 옥타브밴드(Octave band) 주파수영역에서 속도 및 가속도레벨은 하한주파수( $f_l$ )와 상한주파수( $f_u$ ) 사이의 PSD의 총합을 통하여 궤도각부의 응답을 구할 수 있었다.

자갈도상하부에 방진슬라브를 있는 경우 해석 모형은 4층 빔모형으로 하여 단부에서 지지되는 강성을 K등가윙클러강성(Equivalent Winkler spring)으로 모형화 하였다. 이동축중과 조도하중에 대한 궤도의 동적해석을 수행한 후 방진슬라브 궤도와 하부구조물에 전달되는 속도 dB응답을 산출하였다.

#### 참고문헌

1. 양신추, "열차주행시 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정" 한국고속철도건설공단, 1994
2. 강기동, "궤도역학"
3. Sato, Y., "Railway Technical Research Report-study on High Frequency Vibrations in track", The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, No. 1013, 1976.
4. Esveld, C. "Modern Railway Track", Head of quality Control and Rail Technology NS Permanent Way Department