

도시철도궤도의 저진동설계기준 제정에 관한 연구

Study on Vibration-Proof Criteria at The Design Stage of Subway Track

양 신 추*
Yang, Sin-Chu

ABSTRACT

Subway lines often pass through the densely populated districts. As the social interest about environment is more and more increased, the need of countermeasure to the vibration generated by subway train is grossing nowadays. It will be effective to take a measure in the track part, specially at the track design stage. In this study, the vibration proof performances for the various types of the tracks adopted in domestic and foreign countries are evaluated. Based on the results, the criteria of vibration proof performance to meet the demands of the both of populated and normal areas are established.

1. 서론

열차 주행시 발생하는 진동은 궤도로부터 선로구조물 및 지반을 통하여 인접구조물로 전달된다. 최근 열차의 고속화, 중량화, 고밀화요 인하여 열차주행에 따른 진동은 과거에 비하여 크기가 커져 궤도구성품 및 하부구조물의 손상이 증가하고 있는 실정이며, 환경에 대한 사회적 관심도 증가하여 열차진동에 대한 민원사태가 증가하는 추세에 있다. 특히 인구밀집의 도시를 통과하는 도시철도에서 열차 주행시 발생하는 진동을 비교적 저비용으로 저감할 수 있는 궤도부분에서 설계단계에서 진동을 줄이도록 적절한 기준을 마련하는 것을 필요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 국내외적으로 도시철도에서 많이 채택하고 있는 저진동 궤도시스템들의 진동저감성능을 분석함으로써 향후 설계될 도시철도 궤도도 이를 정도의 진동저감성능 요건을 갖출 수 있는 기술기준을 도출하였다. 여기서 제시한 궤도진동저감성능은 설계될 궤도가 열차의 주행안정성과 궤도의 구조안정성이 관련기준 검토를 통하여 확보된 경우를 전제로 한다.

2. 차량/궤도상호작용 해석이론

그림 1로부터 윤증을 계산하기 위하여 차량의 운동을 수직방향만 고려할 때 차량/궤도 상호작용력은 다음과 같이 나타낼 수 있다[1,2].

$$F_H = K_H(y_w - y_r - y_{r/w}) \quad (1)$$

여기서 y_r 및 y_w , $y_{r/w}$ 는 차륜/접촉점에서의 레일, 차륜, 그리고 차륜/레일의 상대표면조도의 변위벡터들이고, K_H 는 차륜과 레일의 접촉면에서의 헤르쯔안(Hertzian) 스프링상수이다. 차륜/레일조도와 레일변위와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{H}_r(\omega) \mathbf{y}_{r/w} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{H}_r(\omega)$ 은 단위 차분/레일 조도에 대한 레일응답을 나타내는 전달함수(Transfer Function) 행렬로서 다음과 같이 나타내진다.

$$\mathbf{H}_r(\omega) = -\mathbf{A}_r [\mathbf{A}_w + \mathbf{A}_r + 1/K_{II} \mathbf{I}]^{-1} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{A}_w , \mathbf{A}_r 는 각각 차분/집속점에서 차분 및 레일의 이드미턴스 행렬이다.

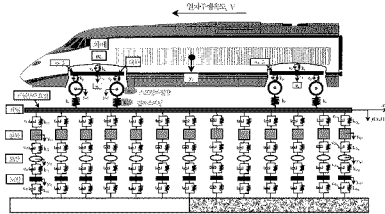


그림 3. 차분/레도 상호작용 해석모델

차량시스템은 주파수영역 운동방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{y}}_{th} \\ \bar{\mathbf{y}}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \bar{\mathbf{F}}_{II} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{A}_{11} , $\mathbf{A}_{12} = \mathbf{A}_{21}^T$, \mathbf{A}_{22} 는 차량시스템의 주파수영역 시스템매트릭스의 서브매트릭스이며, $\bar{\mathbf{y}}_{th}$ 는 차량과 대차의 변위벡터이며, $\bar{\mathbf{y}}_w$ 는 차륜의 변위벡터이고, $\bar{\mathbf{F}}_{II}$ 는 차륜에 작용하는 상호작용하중이다. 식 (4)로부터 차륜의 어드미턴스(Admittance) 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}_w = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{12}^T \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})^{-1} \quad (5)$$

한편 동일지점 i에 대한 레도볼턴 파워스펙트럼을 $S_{r/w}(\omega)$ 라 하면 그림 1에서와 같이 동일 레일상에 있는 두 지점에 대한 교차파워스펙트럼(CPSD: Cross Power Spectrum Density)은 자기상관함수(Autocorrelation Function)의 개념으로부터 아래와 같이 구할 수 있다. 동일 레일상의 두 지점에 대한 차분 도발 시간차 $\mathbf{t}_{ii} = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)/v$ 를 고려하면 두 지점에 대한 CPSD는 Wiener-Khinchine 변환으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{r/w_i}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{r/w_i}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = S_{r/w_i}(\omega) e^{-i\omega\tau} \quad (6)$$

레일의 스펙트럼응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S}_r(\omega) = [\bar{\mathbf{H}}_r(\omega)] \mathbf{S}_{r/w} [\mathbf{H}_r(\omega)]^T \quad (7)$$

여기서 $[\overline{H}_r(\omega)]$ 는 $[H_r(\omega)]$ 의 공액복소수(Complex Conjugate)이다.

레도틀림 PSD는 프랑스국철(SNCF)에서 많은 측정자료를 기초로 제안한 경험식인 다음 식을 사용하였는데, 이 경험식은 레도틀림파장 L이 2~40m값을 갖는 범위에서의 레도틀림 PSD이다[3].

$$G_{r/w_1}(\Omega) = \frac{10^{-6} A}{(1 + \frac{\Omega}{\Omega_0})^3} \quad (m^3) \quad (8)$$

여기서 $\Omega(=2\pi/L)$ 는 공간주파수이며, A는 상수로서 유지관리상태가 양호한 레도는 A=160을 사용하며, 유지상태가 불량한 레도는 A=550을 사용한다.

3. 레도방진성능 평가지수

철도진동은 차량과 레도의 상호작용에 의하여 발생하여 레도하부로부터 노반에 전달되어 외부로 전파하게 된다. 따라서 철도연변의 진동의 크기를 결정하는 중요한 요소는 레도로부터 노반에 전달하는 동하중의 크기 및 주파수특성이라 할 수 있다. 한편 차량과 레도의 상호작용에 의하여 발생하는 동하중은 레도시스템의 구조적 특성뿐만 아니라 차량과 하부노반에 등에 의하여서도 영향을 받는다. 따라서 레도유형별 진동성능을 비교하기 위해서는 대상선로 투입되는 차량 및 대상선로의 노반의 조건을 동일하게 하고 레도의 구조적 특성에 따른 진동저감성능만을 평가할 수 있는 정량적 지수가 필요하다고 할 수 있다. 이러한 점을 착안하여 레도의 유형별 진동저감성능은 보통의 자갈도상에 대한 상대적 크기로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Insertion Loss} = 20 \text{Log} \left(\frac{\sigma_{fb}}{\sigma_{fb}} \right) \quad (9)$$

여기서 σ_{fb} 는 비교대상 레도에서 노반면에 작용하는 하중의 표준편차이고, σ_b 는 자갈도상레도에서 노반면에 작용하는 하중의 표준편차이다. 노반면에 작용하는 하중의 표준편차는 차량/레도 상호작용해석으로부터 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_f = \int_{-\infty}^{\infty} S_{ff}(\omega) d\omega \quad (10)$$

여기서 $S_{ff}(\omega)$ 는 다음식으로 주어지는 노반면에 작용하는 하중의 PSD함수이다.

$$f(t) = k_{bs} y_{bl}(t) \quad (11)$$

여기서 k_{bs} 는 최하층자갈과 노반의 등가분포지지강성이고, $y_{bl}(t)$ 는 최하층자갈의 변위응답이다.

4. 레도유형별 방진성능평가

4.1 차량제원 및 물성치

서울지하철 1기에서 사용되는 차량은 주로 10량 편성이며, 2호선의 경우는 4량과 6량 편성도 있다. 동력차와 객차의 조성은 제작사에 따라 조금씩 다르나 6M4T와 5M5T(M:동력차, T:객차)를 기본으로 하고 있다.

일반적 가장 많이 사용되는 열차의 길이 및 대차중심간 거리, 고정축간 거리는 그림 2와 같고, 차량/레도 상호작용해석을 위한

항 목	단 위	물성치
열차속도	km/h	80km/hr
축간거리	m	2.1
대차중심간거리	m	13.8
차체질량	ton	14.0
차체의 관성모멘트(Gallop motion)	ton.m ²	248
대차질량 (스프링하중 포함)	ton	1.9
대차의 관성모멘트(Y-Y)	ton.m ²	0.73
스프링하중(윤축질량)	ton	0.8
1차 현가장치스프링	kN/m	0.98E3
1차 현가장치댐퍼	kN.sec/m	4.0
2차 현가장치스프링	kN/m	0.46E3
2차 현가장치댐퍼	kN.sec/m	16.0

차량편측량 특성치는 표 1과 같다.

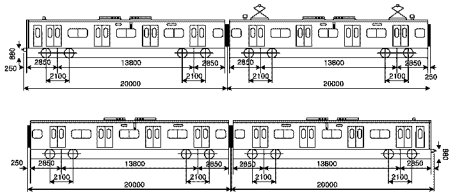
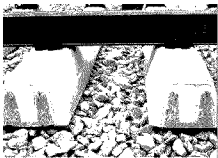


그림 2. 지하철 차량제원

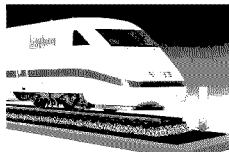
표 1. 도시철도 표준차량의 제원 및 특성치 (차량 편측량)

4.2 궤도의 특성치

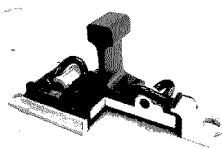
자갈도상궤도, 자갈도상메트궤도, Alternative궤도, LVT궤도, System 300-2궤도 등의 구조형식은 그림 3과 같다.



(a) 방진침목궤도



(b) 자갈도상메트궤도



(c) Alternative 궤도



(d) System336궤도구조

그림 3. 궤도구조유형

자갈도상메트의 감성 및 감쇠계수 평가시 자갈의 접촉율은 다음 식을 적용하였다.

$$\text{자갈도상과 메트의 접촉율} = 20\% \times \text{도상두께}(\text{cm})/25\text{cm}$$

고무 및 우레탄 종류의 주파수에 따른 물성치 변화는 다음 식과 같이 고려하였다.

- $0 \leq f < 5 \rightarrow K_{static} * (1.0D0 + 0.4/5.0 * f)$
- $5 \leq f < 200 \rightarrow K_{static} * (1.4D0 + 0.6/195.0 * (f-5))$
- $200 \leq f < 1000 \rightarrow K_{static} * (2.0D0 + 0.5/800.0 * (f-200))$ (10)
- $1000 \leq f < 2500 \rightarrow K_{static} * (2.5D0 + 1.0/1500.0 * (f-1000))$
- $2500 \leq f \rightarrow K_{static} * 3.5D0$

궤도유형별 물성치 및 계원은 표 2와 같다.

표 3. 궤도 고주파진동해석을 위한 물성치(궤도편측량)

물 성 치		자갈도상궤도	System300-1	LVT	DELKOR (Alternative)
레일	탄성계수(kN/m ²)	210x10 ⁶	210x10 ⁶	210x10 ⁶	210x10 ⁶
	Poisson' Ratio	0.3	0.3	0.3	0.3
	단위길이당 질량(kg/m)	60.45	60.45	60.45	60.45
	단면적(m ²)	7.75x10 ⁻³	7.75x10 ⁻³	7.75x10 ⁻³	7.75x10 ⁻³
	단면2차모멘트(m ⁴)	3.09x10 ⁻⁵	3.09x10 ⁻⁵	3.09x10 ⁻⁵	3.09x10 ⁻⁵
레일패드	레일패드강성(kN/m)	400E3(EVA)	600	600	600
		60E3(PU)			
	점성감쇠계수 (t/(m/s)m)	533(EVA)	800	800	800
		80(PU)			
침목	길 량 (kg/m)	130		70	
	길이(m)x폭(m)	2.4x0.24		0.66x0.23	
침목패드	강성(kN/m ³)	2.E5(일반)		1.8E5	
		4.E5(방진)			
	점성감쇠계수 (kN/m ³ /sec)	120.0(일반)		90.0	
		84.0(방진)			
베이스 플레이트	질량(kg)		7		8
베이스 플레이트 패드	강성(kN/m)		16.5E3		20E3
	점성감쇠계수 (kN/(m/sec))		88		107
자갈도상 매트	강성(kN/m ³)	6.E4(방진)			
		4.E5(방진)			
	점성감쇠계수 (kN/m ³ /sec)	36			
		240			

4.3 해석결과

자갈도상궤도, 자갈매트궤도, 방진침목궤도, SYSTEM 300-1궤도, LVT, Alternative궤도 등에 대한 고주파 진동해석을 수행하여 궤도로부터 노반면에 작용하는 단위길이당 동하중에 대한 주파수영역에서의 결과를 그림 4에 나타내었다. 이들 결과로부터 침목이 있는 궤도유형에서는 30~60Hz 영역에서 침목의 공진에 따른 동하중 성분의 증가가 확인됨을 알 수 있다. 반면에 콘크리트 바닥에 직접 체결하는 방진체결구 유형의 궤도(Alternative궤도, System 궤도)에서는 탁월 주파수가 나타나지 않음으로써 노반에 작용하는 동하중이 작음을 알 수 있다. 한편 방진자갈매트 궤도에서는 침목의 공진에 따른 일부 주파수영역에서 동하중성분의 증가가 확인되지만 그 이상의 고주파수영역에서의 동하중성분이 매우 작은 것을 알 수 있다.

그림 4의 결과로부터 식 (9)로 정의한 각 궤도유형별 진동저감율(Insertion Loss)을 구하면 그림 5와 같다. 방진효과는 침묵이 없는 방진체결시스템인 System궤도 및 Alternative궤도가 진동저감 효과가 가장 크고 그 다음이 방진자갈매트궤도임을 알 수 있다. 인접건물에서 진동에 대하여 예민한 경우는 궤도에서 방진체결시스템 또는 방진자갈매트 정도의 대책이 요구되므로 이러한 개소에서 궤도시스템의 진동저감성능에 대한 기준은 Insertion Loss로 -9dB이상으로 정하는 것이 타당하다고 판단된다. 또한 보통구간에서는 국내외에서 비교적 방진성능이 있는 것으로 평가받는 LVT궤도 또는 일반자갈매트궤도 정도의 진동저감성능을 갖도록 설계하는 것이 타당하다고 판단된다.

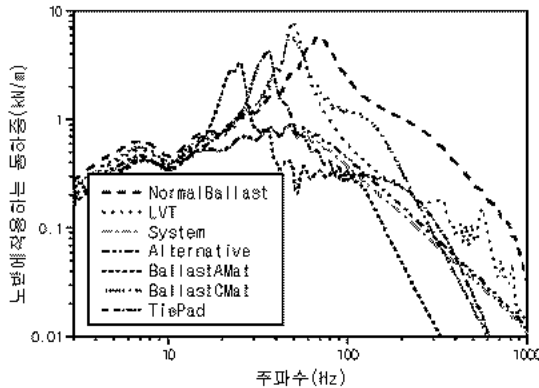


그림 4. 궤도유형별 노반에 작용하는 하중의 주파수응답

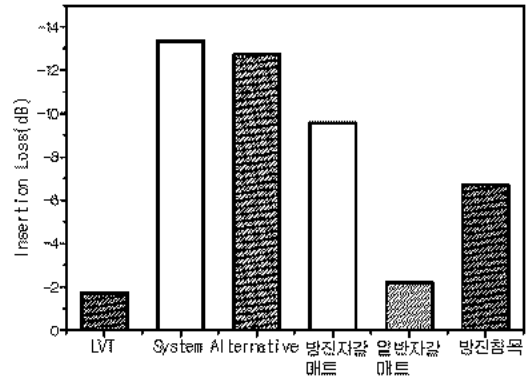


그림 5. 궤도유형별 Insertion Loss

5. 결론

본 연구에서는 국내외적으로 도시철도에서 많이 채택하고 있는 저진동 궤도시스템들의 진동저감성능을 분석함으로써 향후 설계될 도시철도 궤도도 이들 정도의 진동저감성능 요건을 갖출 수 있는 기술기준을 마련하고자하였다. 국내에서 사용하고 있는 다양한 궤도유형에 대한 진동저감성능의 평가로부터 향후 궤도설계시 진동저감성능기준을 제시하면 다음과 같다.

- 가. 보통구간에서 궤도시스템의 진동저감성능은 Insertion Loss가 -2dB 이상을 갖도록 설계한다.
- 나. 진동에 대하여 예민한 지역으로 분류된 개소에서 궤도시스템 진동저감성능은 Insertion Loss가 -9dB 이상을 갖도록 설계한다.
- 다. 진동저감성능을 검토하는 절차는 상기에서 제시한 해석법에 따른다.

참고문헌

1. Sato, Y. (1976), "Railway Technical Research Report-Study on High Frequency Vibrations in Track", The Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, No. 1013.
2. 양신추 (1997), "차량과 궤도의 상호작용을 통한 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정", 대한토목학회논문집, 제17권 1-1.
3. Grag, Vijay K. and Dukkupati, Rao V. (1984), "Dynamic of railway vehicle systems", Academic Press.