

콘크리트 궤도 유형별 진동성능평가에 대한 연구

A Study on Evaluation of Vibration Reduction Effect of Concrete tracks

°양 신 추* · 김 은** · 강 윤 석*** · 엄주환****

Shin-Chu, Yang · Eun, Kim · Yun-Suk, Kang · Ju-Hwan, Um

Key Words : Concrete track, Vibration reduction effect, High frequency dynamic analyses, track-tunnel-soil interaction analyses(콘크리트 궤도, 진동저감효과, 고주파진동해석, 궤도-터널-지반 상호작용 해석)

ABSTRACT

One of important roles of concrete track is to reduce vibration transmitting to subgrade. In this paper, a numerical method for evaluating the effects of vibration reduction of concrete track is presented. Using the method, high frequency dynamic analyses and track-tunnel-soil interaction analyses are carried out for three types of concrete track in order to investigate the vibration reduction effects compared with normal ballast track.

기호설명

- y_1 : (x, t)에 있어서 레일의 처짐.
 y_2 : (x, t)에 있어서 침목의 처짐.
 $E_1 I_1$: 레일의 휨강성.
 $E_2 I_2$: 슬래브 또는 침목의 휨강성 (침목인 경우 $E_2 I_2 = 0$).
 m_1 : 레일의 단위길이당 질량.
 c_1 : 단위길이당 레일패드의 점성감쇠 계수.
 c_2 : 단위길이당 침목패드 또는 자갈도상의 점성감쇠 계수.
 k_1 : 단위길이당 레일패드의 스프링 계수.
 k_2 : 단위길이당 침목패드 또는 자갈도상의 스프링 계수.
 v : 열차속도.
 δ : Dirac delta 함수.
 F_0 : 열차 축중.
 y_r : 레일의 변위.
 y_w : 차륜의 변위.
 A_r : 레일의 어드미턴스(Admittance).
 A_w : 차륜의 어드미턴스(Admittance).
 K : Hertzian 스프링 계수.
 A_T : 차량 및 레일 시스템의 종합 어드미턴스.
 k_1^* : 단위길이당 레일패드의 복소스프링 계수.

- k_2^* : 단위길이당 침목패드의 복소스프링 계수.
 ω : 각주파수(Angular Frequency).
 λ : 파장(Wave Length).
 Ω : 공간주파수(Spatial Frequency).

1. 서론

최근 철도사업의 활성화에 따라 고속철도를 비롯한 국철, 도시철도 등에서 신선 궤도건설이 활발하게 추진되고 있다. 초기 건설비가 저렴하다는 자갈도상궤도의 장점에도 불구하고 유지보수에 따른 인력 및 비용의 과다 투입의 단점을 극복하기 위하여 콘크리트궤도를 많은 구간에서 부설하고 있다. 콘크리트궤도는 초기 투자비용이 많이 소요되고, 한번 건설하면 개·보수가 어렵기 때문에 궤도유형 선정시 경제성 및 성능 측면에서 심도 있는 검토가 요망된다.

본 연구에서는 콘크리트궤도의 기본요건 중 중요하게 고려하여야하는 진동저감성능을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 이들 방법을 사용하여 최근 국내 외적으로 많이 사용되는 3 가지 콘크리트 궤도유형들에 대한 진동저감성능을 평가하였다. 그리고, 자갈도상궤도와의 진동저감성능도 비교분석 하였다.

2. 궤도의 고주파 진동해석

2.1 이동축중을 받는 궤도의 동적 해석이론

Fig. 1과 같은 궤도시스템에서 이동축중을 받는 궤도를 2중보(beam)로 모형화할 경우 운동방정식은 다음과

* 한국철도기술연구원 궤도·노반 연구팀
 E-main : scyang@krii.re.kr
 Tel : (031)461-8531(161)
 ** 한국철도기술연구원 궤도·노반 연구팀

같다.⁽¹⁾

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) = F_q \delta(x - vt) \quad (1)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial}{\partial t} (y_2 - y_1) + k_1 (y_2 - y_1) + c_2 \frac{\partial y_2}{\partial t} + k_2 y_2 = 0 \quad (2)$$

이동하중에 대한 상대좌표를 다음과 같이 정의하면

$$r = x - vt \quad (3)$$

x와 t에 관한 미분은 상대좌표 r에 대한 미분으로 다음과 같이 나타내지므로

$$\frac{\partial^n y}{\partial x^n} = \frac{\partial^n y}{\partial r^n} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^n y}{\partial t^n} = (-v \frac{\partial}{\partial r})^n y \quad (5)$$

식(4), (5)를 식(1)과 (2)에 대입하면 운동방정식은 상대좌표 r의 함수로 다음과 같이 나타내진다.

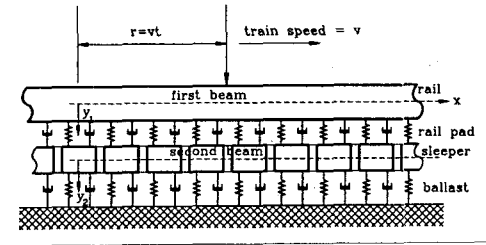


Fig. 1 이동충중하중을 받는 자갈도상궤도의 수치해석 모형

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial r^4} + m_1 v^2 \frac{\partial^2 y_1}{\partial r^2} - c_1 v \frac{\partial}{\partial r} (y_1 - y_2) + k_1 (y_1 - y_2) = F_q \delta(r) \quad (6)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial r^4} + m_2 v^2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial r^2} - c_1 v \frac{\partial}{\partial r} (y_2 - y_1) + k_1 (y_2 - y_1) - c_2 v \frac{\partial y_2}{\partial r} + k_2 y_2 = 0 \quad (7)$$

$\frac{\partial^n y_2(r)}{\partial r^n}$ 에 대한 후리에변환 $\bar{y}_n(s)$ 은 $y(r)$ 의 후리에

변환으로 다음과 같이 나타내지므로

$$\bar{y}_n(s) = (is)^n \bar{y}(s) \quad (8)$$

\bar{y}_1 , \bar{y}_2 에 대한 응답을 구하고, 이들을 다시 후리에 역변환을 통하여 r-영역응답을 구할 수 있다.⁽¹⁾

2.2 조도성분하중을 받는 궤도의 동적 해석

2.2.1 조도성분 하중의 모형

열차의 차륜은 레일의 마모, 차륜의 평상화

(Wheelflat), 용접불량, 레일주름(Corrugation) 등에 의하여 발생된 불규칙한 레일 표면을 주행한다. 이러한 불규칙한 레일 표면을 확대하면 Fig. 2와 같고 이때의 상호작용력 F_H 는 다음 식으로 나타내진다.

$$F_H = \frac{y_r}{A_r} = -\frac{y_w}{A_w} \quad (9)$$

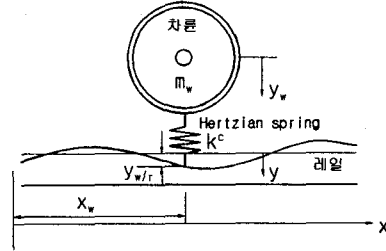


Fig. 2 차륜과 레일의 접촉장성의 모델(Hertzian 스프링)

이제 차륜과 레일의 상대변위 $y_{r/w}$ 는 다음과 같이 나타내지므로

$$y_{r/w} = y_w - y_r \quad (10)$$

식(9)와 식(10)으로부터 상호작용력은 다음과 같이 나타내진다.

$$F_H = -\frac{y_{r/w}}{A_w + A_r} \quad (11)$$

식(11)에서 차륜과 레일의 어드미턴스는 접촉시 압축성을 고려하지 않으므로 이를 고려하면 상호작용력은 다음과 같이 수정된다.

$$F_H = -\frac{y_{r/w}}{A_w + \frac{1}{K} + A_r} = -\frac{y_{r/w}}{A_T} \quad (12)$$

2.2.2 차륜-레일 조도의 PSD 계산

차륜-레일표면의 임의의 지점 i에서 조도에 대한 PSD는 대체로 공간 주파수의 3승에 반비례하는 것이 보고되고 있다. 이러한 가정하에 조도의 PSD는 다음과 같이 나타내진다.⁽³⁾

$$S_{r/w}(\omega) = \frac{A}{(B + \frac{\omega}{v})^3} \quad (13)$$

여기서 $\omega/v (= 2\pi/\lambda = \Omega)$ 이고, A, B는 조도상수로서 A는 파(λ)장이 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.

2.2.3 차량의 Admittance

차량의 1차 현가 장치(Primary Suspension)는 차륜으

로부터 차체에 전달되는 진동을 차단하도록 유연하게 설계되었기 때문에 10Hz 이상의 경우 레일표면의 조도(Roughness)로 인한 차량의 진동은 스프링하 질량(Unsprung Mass)에 국한된다고 가정할 수 있다. 이러한 가정 하에 차량의 운동방정식은 다음과 같이 나타내진다.

$$F_H + M_w \ddot{y}_{r/w} = 0 \quad (14)$$

여기서 M_w 는 스프링하 질량이다. 식(14)로부터 상호작용력의 주파수 응답은 다음 식과 같이 주어지므로

$$F_H(\omega) = -\omega^2 M_w \bar{y}_{r/w}(\omega) \quad (15)$$

1 질량모델의 차량의 어드미턴스는 다음과 같이 구해진다.

$$A_w(\omega) = \frac{\bar{y}_{r/w}(\omega)}{F_H(\omega)} = -\frac{1}{\omega^2 M_w} \quad (16)$$

2.2.4 궤도의 Admittance 계산

이동 고조하중(Harmonic Excitation)을 받는 궤도를 Fig. 3과 같이 2중 보(beam)로 모형화할 경우 궤도부분계의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} + k_1^*(y_1 - y_2) = F_H \delta(x - vt) e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} + m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + k_1^*(y_2 - y_1) + k_2^* y_2 = 0 \quad (18)$$

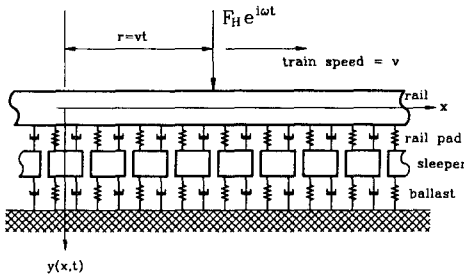


Fig. 3 이동 고조하중을 받는 자갈도상궤도의 수치해석모형

고조하중에 대한 궤도부분계의 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$y(x, t) = \tilde{y}(x, t) e^{i\omega t} \quad (19)$$

이들의 x 와 t 에 관한 미분은 식 (3)으로 정의한 상대좌표 r 에 대한 미분으로 다음과 같이 나타내지므로,

$$\frac{\partial^n y}{\partial x^n} = \frac{\partial^n \tilde{y}}{\partial r^n} e^{i\omega t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial^n y}{\partial t^n} = (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^n \tilde{y} e^{i\omega t} \quad (21)$$

식(20), (21)을 식(17)와 (18)에 대입하면 운동방정식은 상대좌표 r 의 함수로 다음과 같이 나타내진다.

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 \tilde{y}_1}{\partial r^4} + m_1 (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^2 \tilde{y}_1 + k_1^* (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2) = F_H \delta(r) \quad (22)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 \tilde{y}_2}{\partial r^4} + m_2 (i\omega - v \frac{\partial}{\partial r})^2 \tilde{y}_2 + k_1^* (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) + k_2^* \tilde{y}_2 = 0 \quad (23)$$

식(22), (23)을 s -영역으로 후리에 변환하여 \bar{y}_1, \bar{y}_2 에 대하여 풀고, 다시 궤도부분계에서의 r -영역 응답은 후리에역변환을 통하여 구할 수 있다. 이 때 후리에변환은 Jordan lemma 및 유수정리(Residue theorem)에 의해 구해진다⁽¹⁾.

2.2.5 조도성분하중에 대한 유도상궤도의 고주파진동 해석

차륜과 레일의 불규칙한 표면으로 인해 발생하는 조도성분하중은 차량 및 레일의 어드미턴스, 차륜-레일 접촉강성, 차륜과 레일의 조도 등으로 주어지는데 이때 주어진 조도성분하중에 대하여 궤도 각 부분계의 주파수응답은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\bar{Y}_i(\omega) = A_i(\omega) F_H(\omega) \quad (i=r, s) \quad (24)$$

여기서 $A_i(\omega)$ 는 궤도 각 부분계의 어드미턴스이며, $F_H(\omega)$ 는 조도성분하중이다. 식(24)로부터 궤도부분계의 파워스펙트럼(PSD)은 식(13)의 조도스펙트럼을 사용할 때 다음 식으로 주어진다.⁽¹⁾

$$\hat{Y}_{d_i}(r, \omega) = |A_i(r, \omega)|^2 \hat{F}_H(\omega) = \left| \frac{A_i(r, \omega)}{A_T(\omega)} \right|^2 \frac{A}{(B + \omega)^3} = \left| \frac{A_i(r, \omega)}{A_w + 1/K + A_r(0, \omega)} \right|^2 \frac{A v^2}{(vB + \omega)^3} \quad (25)$$

2.3 궤도유형별 고주파진동해석

2.3.1 해석모형을 위한 물성치 및 해석결과

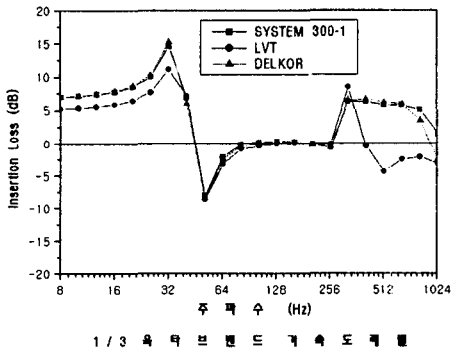
차량 및 궤도물성치로부터 궤도고주파진동해석을 위한 물성치는 Table 1과 같다.

자갈도상궤도, SYSTEM 300-1 궤도, LVT, DELKOR 궤도 등 4가지 궤도에 대한 고주파 진동해석을 수행하였다. 이들 결과는 각 궤도구성품(레일, 침목 또는 베이스플레이트)의 진동을 1/3 옥타브밴드 가속도 레벨로 나타낸 것으로서 이때 가속도 기준값(Reference Value)은 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ 이다

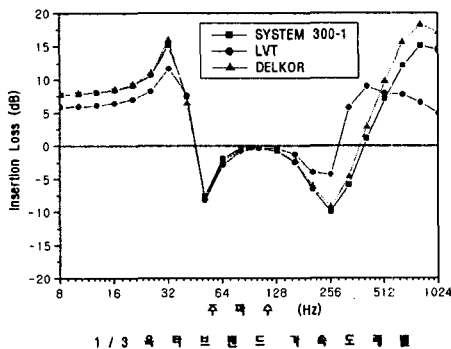
Fig. 4는 자갈도상 대비 각 궤도유형의 진동저감효과를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 검토 대상 모든 궤도의 진동레벨은 자갈도상 보다는 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 상대적으로 비교하면 LVT 궤도가 레일 및 침목 또는 베이스플레이트의 진동 측면에서는 다소 유리한 것을 알 수 있다.

Table 1 궤도 고주파진동해석을 위한 물성치

물성치		자갈도상 궤도	ERS	LVT	DELKOR
레일	탄성계수 (kN/m ²)	210×10 ⁹	210×10 ⁹	210×10 ⁹	210×10 ⁹
	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)	7.75×10 ⁻³	7.75×10 ⁻³	7.75×10 ⁻³	7.75×10 ⁻³
	단면2차 모멘트 (m ⁴)	3.09×10 ⁻⁹	3.09×10 ⁻⁹	3.09×10 ⁻⁹	3.09×10 ⁻⁹
레일 패드(편측)	궤도지지 계수 (kN/m ²)	666.7×10 ³	666.7×10 ³	666.7×10 ³	666.7×10 ³
	뎀핑계수 (t/(m/s)m)	85.3	128.0	128.0	128.0
	히스테레틱 뎀핑계수	0.2	0.2	0.2	0.2
침목 베이스 레이트(편측)	단위길이당 질량(kg/m)	220.0	10.0	119.9	30.0
	침목지지강 성 (kN/m ²)	103.8×10 ³	32.0×10 ³	43.7×10 ³	32.0×10 ³
	비스코스 뎀핑계수	98.0	17.0	14.4	17.0
	히스테레틱 뎀핑계수	0.2	0.2	0.25	0.25



(a) 레일



(b) 침목

그림 2.4 궤도유형별 자갈도상궤도 대비 진동저감효과

3. 열차운행시 지반진동 해석

3.1 하부구조물에 전달되는 열차하중의 PSD 산정

하부구조물에 전달되는 단위길이당 동하중의 PSD는 다음과 같이 구해진다.

$$F_p(\omega) = |k_{ij}|^2 \hat{Y}_{is}(\omega) = |k_{ij}|^2 (\hat{Y}_{qs}(\omega) + \hat{Y}_{rs}(\omega)) \quad (26)$$

여기서 $\hat{Y}_{qs}(\omega)$ 는 이동축중에 의한 침목변위의 PSD 이고, $\hat{Y}_{rs}(\omega)$ 는 조도성분하중에 의한 침목변위의 PSD 이다.

2차원 해석시 사용할 수 있는 2차원 등가평면하중의 PSD는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁴⁾

$$F_{plane}(\omega) = \left(\frac{\text{Number of wheel axes per train}}{\text{Length of train}} \right)^2 \hat{F}_{point}(\omega) \quad (27)$$

여기서 $\hat{F}_{point}(\omega)$ 는 1개 차륜에 의한 점하중의 PSD로서 식(26)로 주어진다.

3.2 터널의 동적해석을 위한 무한요소

유한 및 무한요소의 병합방법은 Fig. 5와같이 하중원에 가까운 내부영역(Near-Field)을 기하학적 형상과 에너지 포텐셜 등의 복잡한 변화를 쉽게 나타낼 수 있는 유한요소로 모형화하고, 변화가 단순한 외부영역(Far-Field)을 한 방향 또는 두 방향으로 확장된 무한요소로 모형화 하는 것이다.⁽²⁾

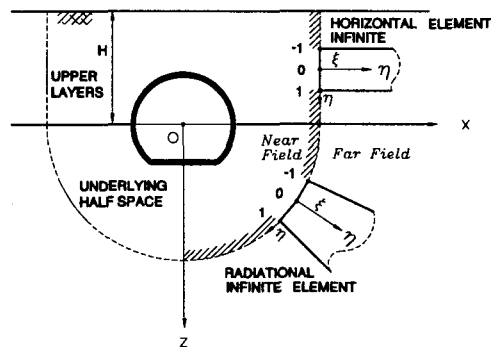


Fig. 5 유한 및 무한요소 병합방법에 의한 지반 진동 해석

3.3 지반진동해석

궤도 유형별 진동저감 성능들에 대한 근본적 평가를

위하여 검토하고자하는 궤도가 직사각형 터널 내에 부설되었을 경우를 가정하여 궤도/터널/지반으로 구성된 진동계의 동적 해석을 수행하였다. 터널은 지표면으로부터 21m 하부에 위치하고 있고, 암반을 통과하고 있는 것으로 가정하였다. 진동예측은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 지표면 3개소(터널 직상부(A), 13.15m 이격지점(B), 27.27m 이격지점(C)) 및 터널 2개소(궤도중심(D), 통로(E))에서 1/3옥타브밴드 가속도레벨(기준값 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$)을 구하는 것으로 하였다. 해석에 사용된 지반의 물성치는 Table 2와 같고, 해석모형은 Fig. 7과 같다.

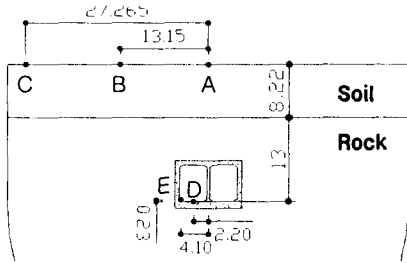


Fig. 6 터널 및 지반의 개요도

Table 2 노반구조별 도상형식

노반 구조별 도상형식	단위	토사층	암 반
shear wave velocity	m/s	340	1,500
density	kg/m ³	2,200	2,500
sleeper distance	-	0.40	0.20
length of sleeper	-	0.07	0.03

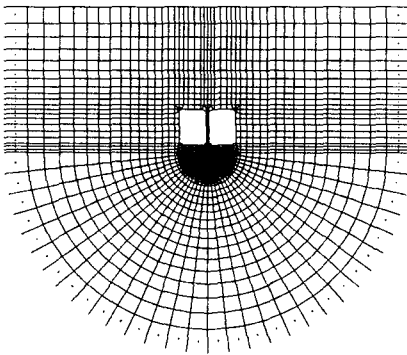


Fig. 7 터널/지반 상호작용 해석모형

각각의 궤도유형에 대한 자갈도상궤도 대비 진동저감효율을 Fig. 8~10에 나타내었다. 이들 결과로부터 검토대상 모든 궤도에 대하여 32Hz 이하의 저주파수영역에서는 자갈도상 궤도 보다 예측점 모든 개소에서 진동레벨이 높게 나타나지만 그 이상의 주파수영역에서는 진동레벨이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 터널주변에 건물이 있을 경우 열차주행 시 건물

내에서 발생하게될 구체진달소음(20Hz 이상의 진동으로부터 발생하는 소음)은 자갈도상궤도에 비하여 검토대상의 모든 콘크리트궤도 부설의 경우들이 적게 발생하게 됨을 알 수 있다.

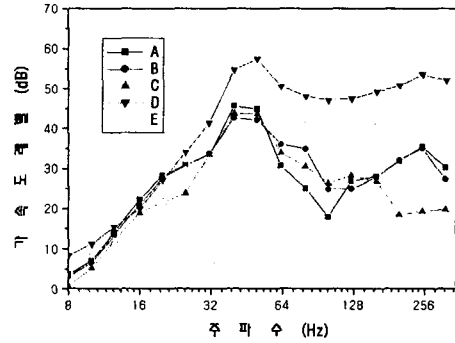


Fig. 8 자갈도상궤도 터널 주변 예측지점의 1/3옥타브밴드 진동가속도 레벨

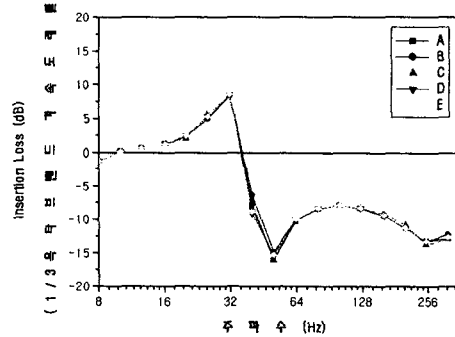


Fig. 9 자갈도상궤도 대비 SYSTEM 300-1궤도의 진동저감효과

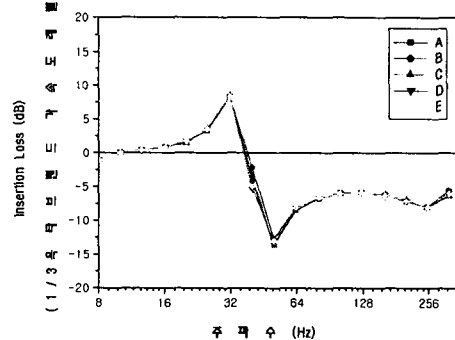


Fig. 10 자갈도상궤도 대비 LVT궤도의 진동저감효과

3가지 콘크리트궤도 유형들에 대한 진동저감효과를 비교하기 위하여 예측점 A 지점에 대한 자갈도상 대비 진동저감효과를 그림 3-12에 나타내었다. 이들 결과로부터

진동저감효과는 LVT궤도 보다 SYSTEM 300-1궤도와 DELKOR 궤도가 다소 높은 것을 알 수 있으며, 특히 SYSTEM 300-1궤도와 DELKOR궤도는 진동저감효과가 거의 같음을 알 수 있다. Table 3은 지표면의 진동 예측지점들에 대한 Overall 진동레벨을 나타낸 것이다.

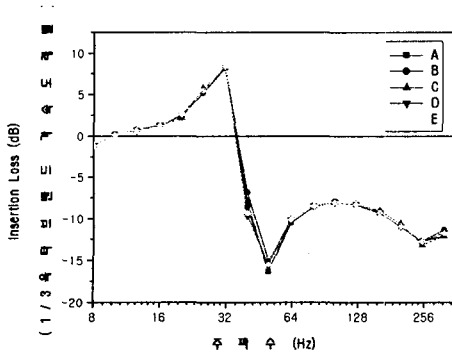


Fig. 11 자갈도상궤도 대비 DELKOR궤도의 진동저감효과

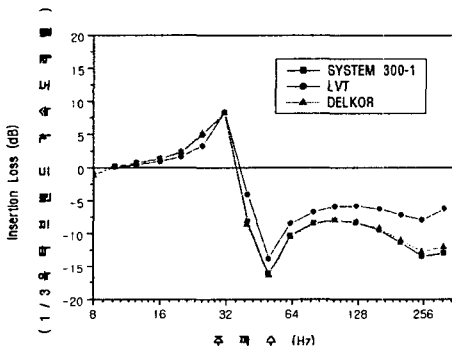


Fig. 12 콘크리트궤도 유형별 진동저감효과 비교

Table 3 지표면에서의 Overall 진동레벨

궤도유형	터널 직상부 (예측지점 A)	13.15m 이격지점 (예측지점 B)	27.27m 이격지점 (예측지점 B)
자갈도상	49	47	47
SYSTEM 300-1	44	44	43
LVT	46	45	45
DELKOR	44	44	43

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트궤도의 기본요건 중 중요하게 고려하여야 하는 진동저감성능을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다.

궤도유형별로 고주파진동해석을 수행함으로써 얻은 궤

도 구성품(레일, 침목, 베이스플레이트)별 진동레벨을 자갈도상궤도의 진동레벨을 기준으로 하여 비교·평가한 결과, 검토 대상 모든 궤도의 진동레벨은 자갈도상 보다 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, LVT 궤도가 레일 및 침목 또는 베이스플레이트의 진동 측면에서는 다소 유리한 것을 알 수 있다.

궤도 유형별 진동저감성능에 대한 근본적 평가를 위하여 궤도/터널/지반으로 구성된 진동계의 동적 해석을 각각의 궤도유형(SYSTEM 300-1, LVT, DELKOR)에 대하여 수행하였다. 그 결과 모든 궤도유형들은 32Hz 이하의 저주파수영역에서 자갈도상 궤도 보다 진동레벨이 높게 나타나지만 그 이상의 주파수영역에서는 진동레벨이 낮게 나타났다. 또한, 3가지 콘크리트궤도 유형들에 대한 진동저감효과를 비교한 결과, 진동저감효과는 LVT 궤도 보다 SYSTEM 300-1궤도와 DELKOR 궤도가 다소 높으며, 특히 SYSTEM 300-1궤도와 DELKOR궤도는 진동저감효과가 거의 같음을 알 수 있다.

후기

본 연구는 콘크리트 궤도 유형별 진동성능평가에 관한 연구 과제로 석탑엔지니어링의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) 한국고속철도건설공단, "열차주행시 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정", 1995.
- (2) 양신추, 이희현, 변재양, "터널내 고속철도 주행에 의한 지반진동의 예측", 한국고속철도건설공단, KHRC/TDR-1, 1993
- (3) Yoshihiko SATO, "軌道高周波振動の理論解析", 鐵道技術研究報告 No.1013, 철도기술연구소, 1976
- (4) Chua, K.H., Balendra, T. and Lo, K. W., "Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, pp.445~460, 1992.