한국철도학회논문집 제18권 제6호 ▌pp. 567-577 (2015년 12월)
JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY VOL.18, NO.6 ▌pp. 567-577 (December 2015)
ISSN 1738-6225(Print)
ISSN 2288-2235(Online)

저심도 터널과 인접한 방진벽의 지반진동 저감효과

Vibration Isolation of Wave Barriers Constructed Near a Shallow Tunnel

양신추*
Sin-Chu Yang

Abstract This paper presents an assessment method of the ground vibration level with a combination of measured data and an analytic method. The basic concept of the method is similar to that in FRA(Federal Railway Administration) manual for detailed vibration analyses. However, going into detail, the assessment method was modified for a feasible evaluation of the vibration reduction effects of diverse types of wave barriers. The force density was evaluated in a vehicle-track interaction analysis and the transfer mobility of vibration was analyzed through a 2-D ground vibration analysis. The calculated 2-D transfer mobility was corrected to incorporate transfer characteristics of actual ground vibration by comparing the previously measured data and analysis results. Nine types of vibration reduction effects of wave barriers were analyzed on a shallow tunnel section of an urban railway where numerous civil complaints had actually been filed.

Keywords : Ground vibration, Shallow tunnel, Wave barrier, Force density, Transfer mobility

초 록 본 논문에서는 계측자료와 해석방법의 조합에 의하여 지반진동을 평가하는 방법을 제시하였다. 평가방법의 기본 개념은 FRA(Federal Railway Administration)에서 발간한 진동상세평가 매뉴얼에서 제시한 방법과 유사하나 구체적 평가 방법은 다양한 유형의 방진벽의 진동저감 효과를 용이하게 평가할 수 있도록 수정되었다. 터널바닥에 작용하는 하중밀도(force density)는 해당선로의 차량 및 궤도조건을 잘 고려할 수 있는 차량-궤도 상호작용해석에 의하여 산정하였다. 지반진동의 전파유동성(transfer mobility) 2차원 지반진동해석을 통하여 평가하였다. 지반진동의 2차원 해석은 각 모델간의 상대비교에 있어서는 좋은 결과를 얻을 수 있으나 절대치 평가는 어렵다. 따라서 여기서는 사전에 계측된 자료와 해석결과의 비교를 통하여 실제 지반진동 전파특성을 반영할 수 있도록 계산된 전파유동성을 보완하였다. 정립된 진동평가방법을 적용하여 실제 진동민원문제가 크게 발생하였던 도시철도 저심도 터널구간을 대상으로 9가지 유형의 방진벽의 진동저감 효과를 분석하였다.

주요어 : 지반진동, 저심도 터널, 방진벽, 하중밀도, 전파유동성

1. 서 론

방진대책은 차량, 궤도, 그리고 토목분야에서 각각 또는 종합적으로 수립할 수 있으나 어느 분야의 대책이든 매우 큰 비용이 소요되므로 정확한 검토를 통하여 효율적으로 수립할 필요가 있다. 궤도에서의 방진대책은 비교적 비용이 적게 들면서 진동저감 효과가 좋기 때문에 철도사업에 있어서 우선적으로 검토하고 있다. 그러나 건물이 선로와 매우 가까이 위치하는 경우에는 궤도에서만의 방진대책으로는 충분하지 않을 수 있다. 따라서 이러한 경우는 터널건설 시 터널외벽 또는 인접한 지중에 방진벽(Wave barrier)을 부설하여 진동을 저감시키도록 토목분야에서 방진대책을 검토할 필요가 있다. 통상적으로 방진벽은 부설비용이 많이 소요되는 반면 형상, 재질 및 부설위치에 따라 진동저감 효과가 매우 차이가 크기 때문에 비용대비 진동저감 효과가 크도록 설계할 필요가 있다.

철도 지반진동을 예측하기 위한 많은 경험적 방법[1-3] 또는 해석적 방법[4,5]이 제시되어 왔다. 미국 철도국(Federal Railway Administration, FRA)에서는 신선건설 시 진동을 평가할 수 있는 상세진동해석방법을 제시하였는데[6], 이 방법은 전 세계적으로 철도 건설 사업에 있어서 진동영향 평가 시 가장 보편적으로 적용되고 있다. FRA의 상세진동해석방법은 크게 두 단계로 구분할 수 있는데 첫 번째는 차량이 궤도중심선의 터널바닥에 작용하는 하중의 크기를 산정하는 단계이고, 두 번째는 지반전파특성을 파악하

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5301, E-mail : scyang@krri.re.kr.
© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.6.567

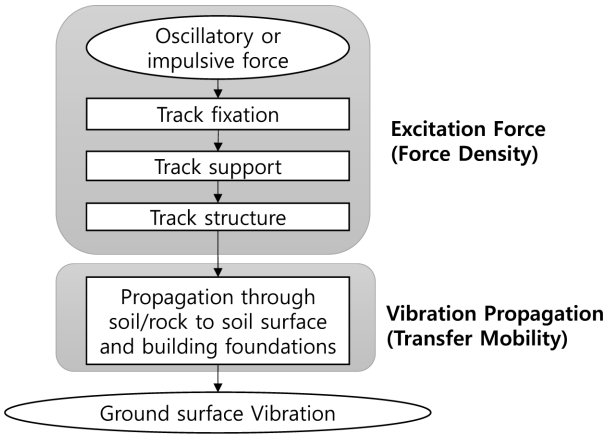


Fig. 1. Block diagram of ground-borne vibration and the noise model[10].

기 위한 하중재하시험 단계이다(Fig. 1). 방진벽을 부설할 경우에는 진동 전파경로가 복잡해져 일반적으로 제시되어온 경험식으로는 진동을 예측하기 어렵다. 또한 FRA의 상세진동해석방법도 방진벽이 부설되어 있는 경우를 전제로 현장에서 진동전파특성을 시험해야하기 때문에 다양한 방진벽의 형상 및 부설위치에 따른 진동저감 효과를 검토하는데 적용하기 어렵다. 따라서 방진벽의 형상 및 재질을 용이하게 고려할 수 있는 해석적 방법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 철도 지반진동은 3차원 파동 전파 전특성을 갖고 있으므로 3차원 해석을 수행해야하지만 다양한 매질 내의 3차원 탄성파의 전파특성 등으로 아직까지도 3차원 해석법은 개발단계에 있으며 해석시간도 2차원 해석에 1000-2000배 이상이 요구되고 있다[4]. 지반진동의 2차원 해석은 궤도 또는 터널 제원의 변경에 따른 각 해석모델 간의 상대비교에 있어서는 좋은 결과를 얻을 수 있으나 절대치 평가는 어렵다[4]. 그러나 2차원 해석을 수행하더라도 현장에서의 많은 진동계측자료를 토대로 2차원 해석결과와 진동계측결과와 차이를 통계적으로 도출한 후 이를 보정해주면 보다 절대치에 가까운 진동레벨을 산정할 수 있을 것이다.

지금까지 방진벽에 대한 많은 연구가 이루어졌지만 대부분의 연구는 터널구간이 아닌 지상에 선로가 건설될 때 방진벽 부설에 따른 진동저감 효과를 실험적[7,8] 또는 이론적[9,10]으로 조사하는 것에 대하여 이루어졌다. 이들 연구에서는 단순 사각형 단면을 갖는 방진벽에 대하여 단면치수와 재료강성의 변화에 대한 매개변수연구가 수행되었다. 오늘날 대부분의 철도진동에 대한 민원은 대부분 도심터널구간에서 발생하는데, 터널구간에서는 지표면구간과 비교하여 지반진동 전파 양상이 매우 다르며, 방진벽 시공여건도 어렵다고 할 수 있다. 도심 저심도 터널구간에서 방진벽은 시공여건상 대부분 터널외벽에 부설할 수밖에 없는데, 이 경우 방진효율성을 높이기 위하여 시공이 용이한 재료를 조합한 다양한 형태의 방진벽에 대한 진동저감 효과를 검토할 필요가 있다.

본 논문에서는 계측자료와 해석방법의 조합을 통하여 터널구간에서 조달이 용이한 재질을 조합한 다양한 형태의 방진벽에 대한 진동저감 효과를 평가하는 방법을 제시하였다. 평가방법의 기본개념은 FRA(Federal Railway Administration)에서 발간한 진동상세평가 매뉴얼에서 제시한 방법과 유사하나 구체적 평가방법은 다양한 유형의 방진벽의 진동저감 효과를 용이하게 평가할 수 있도록 수정되었다. 터널바닥에 작용하는 하중밀도(force density)는 해당선로의 차량 및 궤도조건을 잘 고려할 수 있는 차량-궤도 상호작용해석에 의하여 산정하였다. 지반진동의 전파유동성(transfer mobility) 2차원 지반진동해석에 통하여 평가하였다. 사전에 계측된 자료와 해석결과의 비교를 통하여 실제 지반진동 전파특성을 반영할 수 있도록 계산된 전파유동성을 보완하였다. 정립된 진동평가방법을 적용하여 실제 진동민원문제가 크게 발생하였던 도시철도 저심도 터널구간을 대상으로 9가지 유형의 방진벽의 진동저감 효과를 분석하였다.

2. 지반진동레벨 평가절차

국제적으로 철도사업과 관련한 소음 및 진동 영향의 평가는 미국 FTA(Federal Transit Administration)에서 발간한 교통 소음 및 진동 영향평가 매뉴얼[6]를 가장 많이 참조하여 수행하고 있다. 이 매뉴얼에서 특정개소의 지반진동을 상세하게 예측하는 상세진동해석(Detailed Vibration analysis)절차는 Fig. 1과 같다. 이 절차에 따르면 지표면에서의 진동레벨은 가진하중을 크기를 나타내는 하중밀도(Force density)와 지반의 전파특성을 나타내는 전달유동성(Transfer mobility)의 합으로 식 (1)과 같이 나타내진다.

$$L_v = L_f + TM_{line} \tag{1}$$

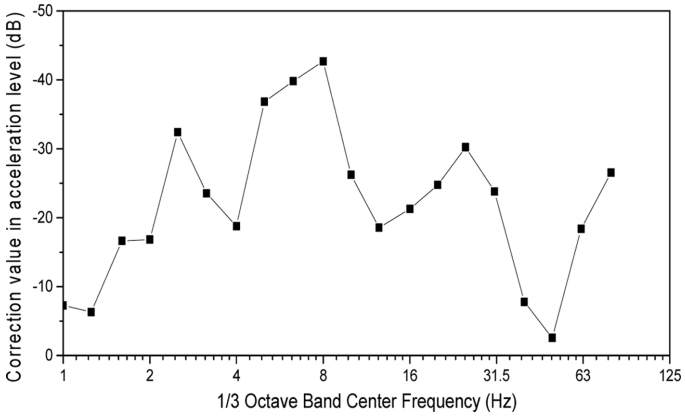


Fig. 2. Correction level considering 3-D wavepropagation.

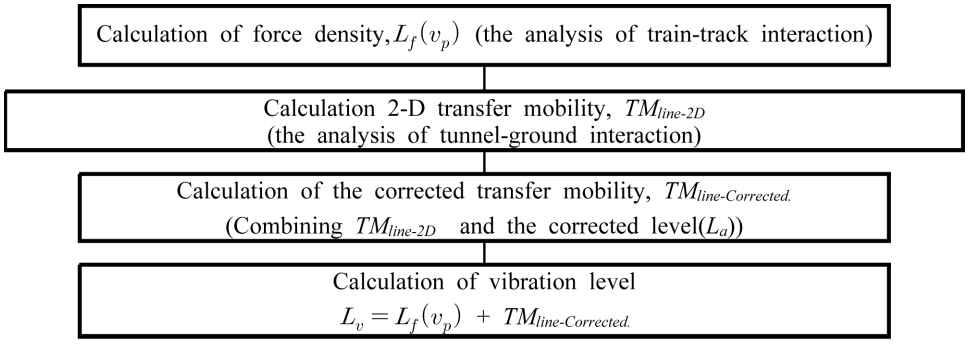


Fig. 3. Procedure of the assessment of the vibration level.

여기서 L_v는 진동레벨이고, L_f는 궤도중심선의 터널바닥에 작용하는 선진동원의 하중밀도(Force Density)이며, TM_{line}은 전달유동성(Transfer Mobility)으로서 이들의 단위는 모두 데시벨로(dB) 나타내진다.

FRA의 상세진동해석에서는 하중밀도는 기존에 운영 중인 철도들에서의 계측된 하중밀도 중에서 진동영향 평가대상 철도조건과 유사한 것을 적용하며, 전달유동성은 진동영향 평가 대상 지역에서 직접 하중재하시험을 통하여 평가한다. 본 연구에서는 FRA에서 제시한 상세진동해석방법과 유사하게 하중밀도와 전달유동성으로 진동레벨을 산정하나, 하중밀도와 전달유동성 모두 FRA와 다른 방법으로 평가하였다. 하중밀도함수는 해당선로의 차량과 궤도를 보다 잘 반영하도록 차량-궤도 상호작용해석을 통하여 평가하였으며, 방진벽의 형상 및 부설위치에 따라 달라지는 전달유동성(Transfer mobility)는 터널과 지반의 상호작용해석을 통하여 평가하였다. 본 연구에서는 2차원 지반진동해석을 통하여 전달유동성(Transfer mobility)을 평가하되 현장에서 계측된 지반진동 자료를 토대로 3차원 지반전파특성을 보정하는 방법을 사용하였다. 보정된 전달유동성 $TM_{line\text{-}corrected}$은 계산된 2차원 전달유동성 TM_{line}과 보정레벨(Correction level)과의 합으로 계산된다. 본 연구에서는 실제 철도진동 민원개소에서 진동대책을 수립하기 위하여 수행된 연구용역[11]을 통하여 얻어진 보정레벨을 적용하였다(Fig. 2). 이 보정레벨은 방진벽을 부설하고자하는 위치에서의 실제 진동계측자료를 토대로 산정되었기 때문에 현장여건이 잘 반영된 것으로 볼 수 있다. 그러나 보정레벨은 터널 및 지반조건과 수진점의 위치 등에 따라 달라지므로 다른 개소의 진동영향 평가에 일반적으로 적용하기 어렵다고 할 수 있다. 방진벽 유형에 따른 진동저감효과의 상대적 비교를 위해서는 2차원 해석결과만으로 좋은 결과를 줄 수 있지만[4], 타 개소에서 이러한 보정레벨 개념을 적용하여 진동을 평가하기 위해서는 신뢰성 있는 보정레벨도출을 위한 추가적인 연구가 요구된다. Fig. 3은 지반진동레벨을 평가하는 절차를 나타낸 것이다.

3. 터널에 작용하는 하중밀도(Force density) 계산

3.1 차량-궤도 상호작용 해석모형

본 연구에서 차량-궤도 상호작용해석은 개발되어 그 타당성이 입증된 해석기법[12,13]을 사용하여 수행되었으며, 궤도 및 차량모

델 다음과 같다.

궤도모델은 궤도슬래브가 터널바닥에 강결된 것으로 가정하여 레일, 체결구(fastener)만으로 구성된 것으로 가정한다. 최상부층을 구성하는 레일은 티모센코 연속보(Timoshenko continuous beam)로 나타내진다. 하부의 체결구 및 패드는 선형스프링(linear spring) 및 댐퍼(damper)로 나타내진다. 궤도의 해석 제원 및 물성치는 Table 1과 같다. 전동차 1량은 차체(Car body)와 2개의 대차(bogie), 그리고 4개의 윤축(wheelset)으로 구성되며, 이들은 각각 강체운동을 하는 것으로 가정하여 질점(lumped mass)으로 모델링된다. 차체와 대차를 연결하는 2차 현수장치(secondary suspension)와 대차와 윤축을 연결하는 1차 현수장치(primary suspension)는 스프링과 감쇠(damping) 요소(element)로 모델링된다. 차량은 면내(in-plane) 운동만 하는 것으로 가정하여 10개의 자유도 시스템(degree

Table 1. Basic parameters of the track.

Parameter	Value
Rail mass per meter	60.3×10^{-3}ton/m
Rail cross-section area	$7.75\times10^{-3}m^2$
Elastic modulus of rail	$2.10\times10^{8}kN/m^2$
Poisson's ratio of rail	0.3
Rail second moment of area	$3.090\times10^{-5}m^4$
Rail profile radius on top	0.3m
Timoshenko shear coefficient	0.34
Fastener damping(SFC)	45.0×10^{3}kN/m
Fastener stiffness(SFC)	230.0kN/(m/sec)

Table 2. Basic parameters of the train.

	Train type			
	TC	M	M'	T
Mass of car body (ton)	25.96	22.65	28.02	18.55
Inertia moment of car body (ton.m^2)	830.33	724.47	896.05	593.15
Mass of bogie (ton) (except unsprung mass)	2.0	3.67	3.67	1.89
Inertia moment of bogie(Y-Y) (ton.m^2)	1.20	2.00	2.00	1.50
Unsprung mass (ton)	3.37	3.41	3.41	3.37
Primary vertical spring stiffness (MN/m)	1.60	1.80	1.78	1.64
Primary vertical dashpot (MN/(m/sec))	-	-	-	-
Secondary vertical spring stiffness (MN/m)	0.37	0.32	0.37	0.28
Secondary vertical dashpot (MN/(m/sec))	0.04	0.04	0.04	0.04
Distance between centerlines of successive bogies (mm)	13,800	13,800	13,800	13,800
Distance between successive axles (mm)	2100	2100	2100	2100
Length of car body (mm)	19,500	19,500	19,500	19,500
Radius of wheel (mm)	430	430	430	430

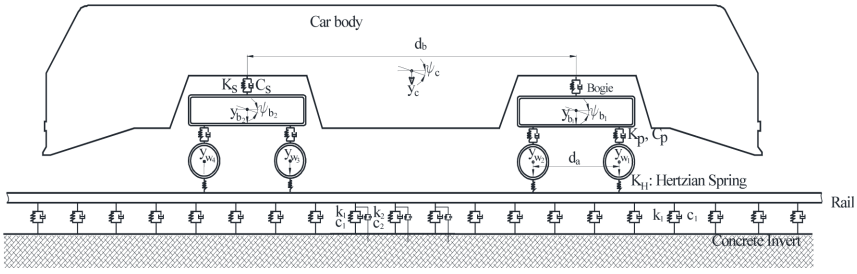


Fig. 4. Analysis model of train-track interaction.

of freedom system)으로 나타낸다. Fig. 4는 전동차량과 궤도의 수직방향 상호작용 해석모델을 나타낸다. 차량은 8량(Tc-M-M′-T-T-M-M′-Tc)이 1편성으로 구성된 도시철도차량을 모델링하였으며, 차량별 제원 및 물성치는 Table 2와 같다.

3.2 궤도틀림

궤도틀림은 차량-궤도 상호작용에 매우 큰 영향을 미치며 터널 연변의 지반진동에 큰 영향을 준다. 따라서 지반진동영향을 정확하게 평가하기 위해서는 진동을 평가하고자하는 선로의 궤도틀림을 고려하는 것이 매우 중요하다. 국제적으로 각 국가별 표준 궤도틀림형상을 PSD(Power Spectral Density)형태로 발표된 바가 있으며, 이들 중 프랑스와 미국, 독일에서 제시한 궤도틀림 PSD가 많은 연구자에게 사용되고 있다. 본 연구에서는 프랑스에서 제시한 궤도의 고저틀림 PSD[14]를 사용했으며 다음 식으로 나타내진다.

$$S_{r/w}(f) = \frac{10^{-6}C_o}{(0.36+2\pi f)^3} \quad (\mathrm{m}^2/(1/\mathrm{m})) \tag{2}$$

여기서 f는 공간주파수(1/m)이며, C_o는 궤도 상태를 나타내는 상수로서 도시철도 콘크리트궤도의 궤도틀림 수준에 적합한 0.25를 적용하였다. 궤도틀림 PSD로부터 거리에 따른 궤도틀림은 다음 식을 적용하여 생성할 수 있다.

$$y(x) = \sum_{n=1}^{N} \sqrt{4S_{r/w}(f)/\Delta f}\cos(2\pi x+\theta_n) \tag{3}$$

Fig. 5는 식(3)에서 궤도틀림 파장(λ)이 0.15~50m 범위에서 공간주파수간격 0.0001(1/m)간격으로 궤도틀림을 생성한 것을 나타낸 것이다.

3.3 하중밀도 계산

터널바닥면에 작용하는 선진동원 하중밀도를 계산하기 위해서는 체결구를 통하여 터널에 작용하는 하중의 평균적인 PSD를 구할 필요가 있다. 궤도틀림이 선로위치별로 달라서 체결구 각 위치별로 작용하는 하중이 다르다. 따라서 본 연구에서는 다양한 위치에서 체결구에 작용하는 하중들의 평균 PSD를 구하기 위하여 궤도의 해석영역을 전동차 차량 8량 1편성과 동일한 156m를 궤도의 해석영역을 설정하였다(이 경우 침목간격이 0.65m이므로 침목은 241정이 포함된다).

궤도의 양 끝단에서는 궤도조건이 달라짐으로서 불합리한 차량응답이 있을 수 있기 때문에 궤도 양쪽 20m를 제외하고 나머지 구간에서 균등간격으로 100개를 선정하여 체결구에 작용하는 하중의 PSD를 계산 한 후 이들 PSD의 평균을 취하여 선 하중밀도(Line force density)를 구하였다. Fig. 6은 열차속도 80km/h일 때 10kN/m$^{1/2}$를 참조치(Reference value)로 하는 선진동원 하중밀도 계산 결과이다.

4. 전파유동성(Transfer mobility) 계산

4.1 터널-지반 상호작용해석

터널에 작용하는 하중에 따른 수진점에서 진동레벨의 관계를 나타내는 전파유동성(Transfer mobility)을 계산하기 위한 2차원 터

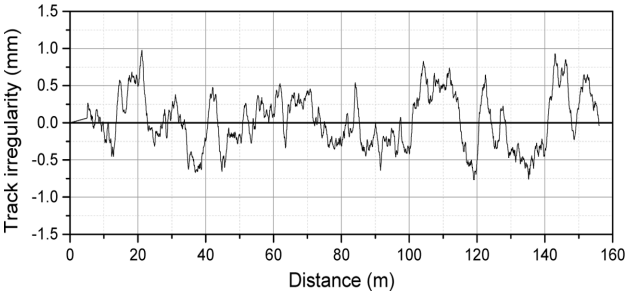


Fig. 5. Track irregularity generated from the power spectraldensity (PSD).

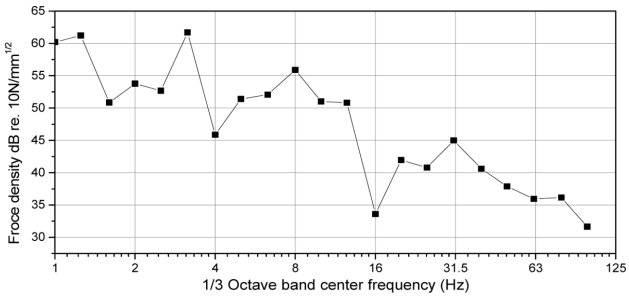


Fig. 6. Force density subjected to tunnel invert along the track center line.

널-지반 상호작용해석은 유한요소와 동적 무한요소(Infinite element)의 병합방법을 사용하였다. 이 해석방법에서는 터널을 포함한 내부영역은 유한요소로 모델링하고 그 외부영역은 무한요소로 모델링한다. 무한요소는 외부 무한영역으로 전파하는 압축파(Compressional wave)와 전단파(Shear wave) 그리고 레일리파(Rayleigh wave)를 잘 나타낼 수 있도록 개발된 요소로[15]서 기하학적 형상함수(Geometric shape function)와 변위형상함수(Displacement Shape Function)는 다음과 같이 구성된다.

기하학적 형상함수

몇 개의 수평적층과 반무한 지반으로 이루어진 지반을 편리하게 모형화하기 위하여 외부영역을 두 종류의 무한요소로 Fig. 7과 같이 모형화한다. 하나는 반무한 지반위의 적층을 모형화하기 위한 수평무한요소로서 좌표의 변환을 나타내는 기하학적 형상함수(Geometric Shape Function)는 다음과 같다.

$$x = \sum_{j=1}^{3} M(\xi)L_j(\eta)x_j\,,\ \ z = \sum_{j=1}^{3} L_j(\eta)z_j \tag{4}$$

다른 하나는 아래의 반무한 지반을 모형화하기 위한 방사무한요소로서 기하학적 형상함수는 다음과 같다.

$$x = \sum_{j=1}^{3} M(\xi)L_j(\eta)x_j\,,\ \ z = \sum_{j=1}^{3} M(\xi)L_j(\eta)x_j \tag{5}$$

여기서 x_j와 z_j는 절점 j에서의 전체좌표값이며, ξ, η는 국부좌표(Local Coordinate)이다. 그리고 $L_j(\eta)$는 절점 j에서의 값이 1인 Lagrange 다항식이며, $M(\xi)$는 무한대 방향으로의 좌표변환을 나타내는 함수이다.

변위형상함수(Displacement Shape Function)

각 요소는 내부영역과 외부영역 사이의 경계면에서 3-절점을 가지므로 하나의 탄성파만 전파하는 경우 절점변위(Nodal Displacement)에 대응하는 변위형상함수는 파동함수 $F_1(x)$를 사용하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$N_j(\mathbf{x}) = L_j(\eta)\frac{F_1(\mathbf{x})}{F_1(\mathbf{x}_j)}\,,\ \text{for } j = 1,2,3 \tag{6}$$

또한 무절점변수(Nodeless Variables)에 대응하는 형상함수는 다음과 같다.

$$N_m(\mathbf{x}) = L_j(\eta)\left\{F_l(\mathbf{x}) - \frac{F_l(\mathbf{x})}{F_1(\mathbf{x}_j)}F_1(\mathbf{x})\right\}\ \text{for } m = 3(l-1)+j\ \ (j = 1,2,3;\ l = 2,3,...N) \tag{7}$$

여기서 $x=\langle x,z\rangle^T$; N은 요소의 형상함수에 포함되는 응력파의 개수이며, F_l(x)는 l번째 응력파의 성분을 나타내는 파동함수이다. Table 3의 무한요소의 변위형상함수 구성에 사용된 파동함수를 나타낸다.

동적무한요소의 질량행렬은 식(4), (5)에 주어진 기하학적 형상함수와 식(6), (7)로 주어진 변위형상함수를 사용하여 매개변수방법(Parametric Method)를 사용하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{M}^e(\omega) = \int_{-1}^{1}\int_{0}^{\infty} \mathbf{N}^e(\omega)^T \rho \mathbf{N}^e |J| d\xi d\eta \tag{8}$$

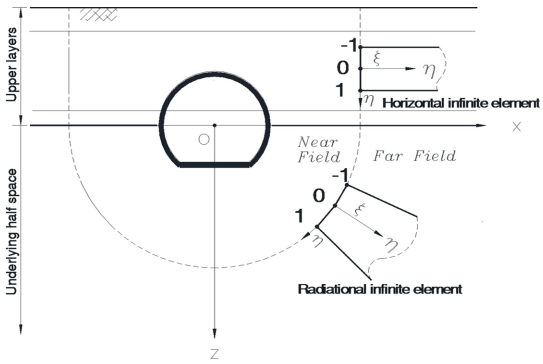


Fig. 7. Definition of global and local coordinates.

Table 3. Far-field wave functions.

	Rayleigh wave	Shear wave	Compressional wave
Horizontal infinite element	$e^{-(-\beta_r^i R_o + i\alpha_s^i R_o)\xi}$ $i = 1,2,3$	-	-
Radiational infinite element	$e^{-(-\beta_r^i R_o + i\alpha_s^i R_o)\xi}$ $i = 1$ or 2	$\sqrt{\frac{1}{1+\xi}}e^{-ik_s R_o \xi}$	$\sqrt{\frac{1}{1+\xi}}e^{-ik_p R_o \xi}$

여기서 $\mathbf{N}^e(\omega)$는 형상함수 행렬이며, ρ는 요소의 밀도이고, $|J|$는 자코비언행렬식(Jacobian Determinant)이다. 또한강성행렬은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{K}^e(\omega) = \int_{-1}^{1}\int_{0}^{\infty} \mathbf{B}^e(\omega)^T \mathbf{D}^e \mathbf{B}^e(\omega)|J| d\xi d\eta \tag{9}$$

여기서 $\mathbf{B}^e(\omega)$는 변형율과 절점변위를 나타내는 행렬이며, $\mathbf{D}^e$는 응력과 변형율과의 관계를 나타내는 행렬이다.

동적무한요소의 질량 및 강성행렬이 주파수에 종속인 관계로 주파수영역에서 해석을 수행하는 것이 편리하다. 조화진동(Harmonic Excitation)에 대하여 주파수 영역에서의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[-\omega^2 \mathbf{M}(\omega) + i\omega \mathbf{C}(\omega) + \mathbf{K}(\omega)]\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{P}(\omega) \tag{10}$$

여기서 $\mathbf{M}(\omega)$, $\mathbf{C}(\omega)$ 그리고 $\mathbf{K}(\omega)$는 각각 전체시스템의 질량, 감쇠 및 강성행렬이고, $\mathbf{P}(\boldsymbol{\omega})$는 하중벡터로 $\mathbf{P}(t)$의 후리에변환

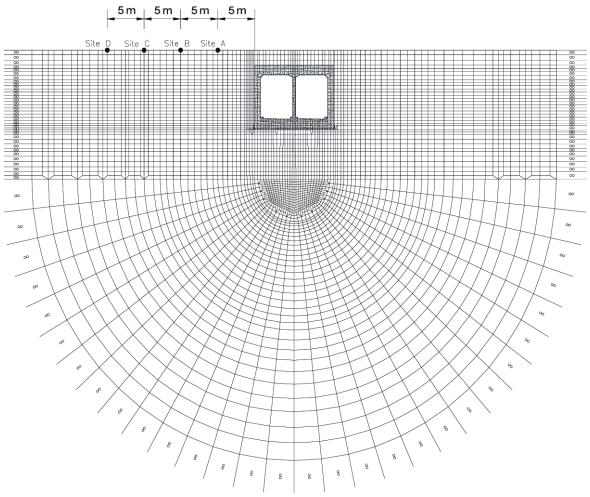


Fig. 8. Modelling of tunnel and soil for the calculation of transfer mobility.

Table 4. Main parameters of tunnel and soil.

	Density (ton/m^3)	Poisson's ratio	Elastic modulus (kN/m^2)	Thickness (m)
Burried layer	1.7	0.33	1.1E5	1.93
Alluvial layer	1.8	0.30	1.1E5	5.13
Weathering soil	1.8	0.30	3.8E5	6.67
Weathered rock	2.0	0.30	1.5E6	2.00
Soft rock	2.1	0.27	4.8E6	1.00
Sound rock	2.4	0.27	1.4E7	∞
Vibration-proof wall (styrofoam board)	0.1	-	1.0E0	
Vibration-proof wall (concrete wall)	2.1	0.17	2.8E7	
Tunnel	2.3	0.17	2.9E7	

(Fourier Transform)이며, $\mathbf{U}(\omega)$는 시스템의 주파수응답이다.

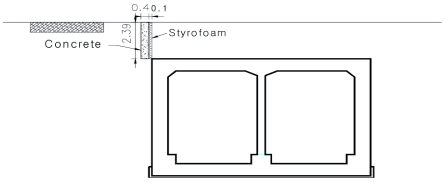
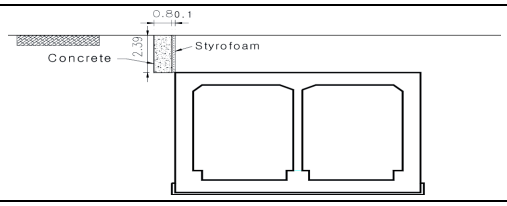
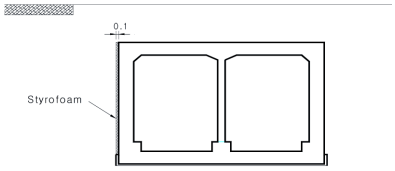
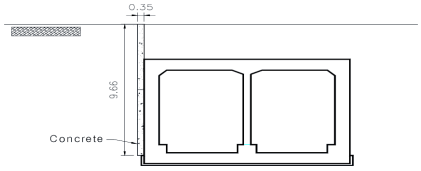
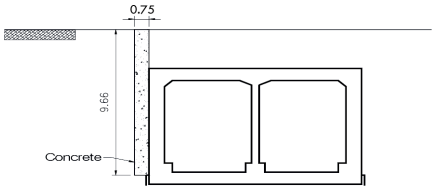
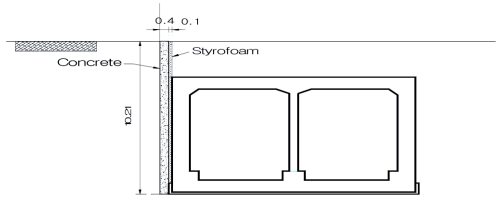
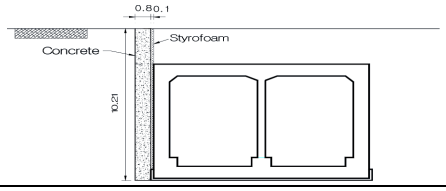
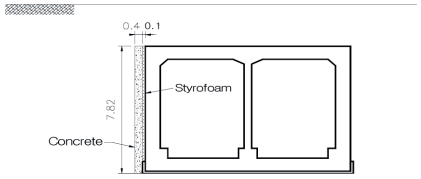
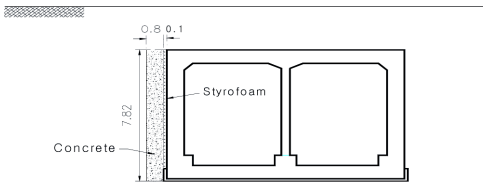
전파유동성(Transfer mobility)은 터널 내 궤도위치에서 단위조화하중에 대한 수진점에서의 주파수응답을 구함으로써 계산된다. 2차원 Tranfer Mobility, $TM_{line\text{-}2D}$를 구하기 위한 터널-지반상호작용해석 모델링은 Fig. 8과 같으며, 해석에 사용된 터널 및 지반의 물성치는 Table 4와 같다.

5. 방진벽 유형에 따른 진동저감 효과분석

5.1 검토대상 방진벽 유형

방진벽은 전파하는 진동을 흡수 또는 반사시킬 수 있는 재질로 만들어 진다. 따라서 방진벽의 재질은 진동이 전파하고 있는 매질

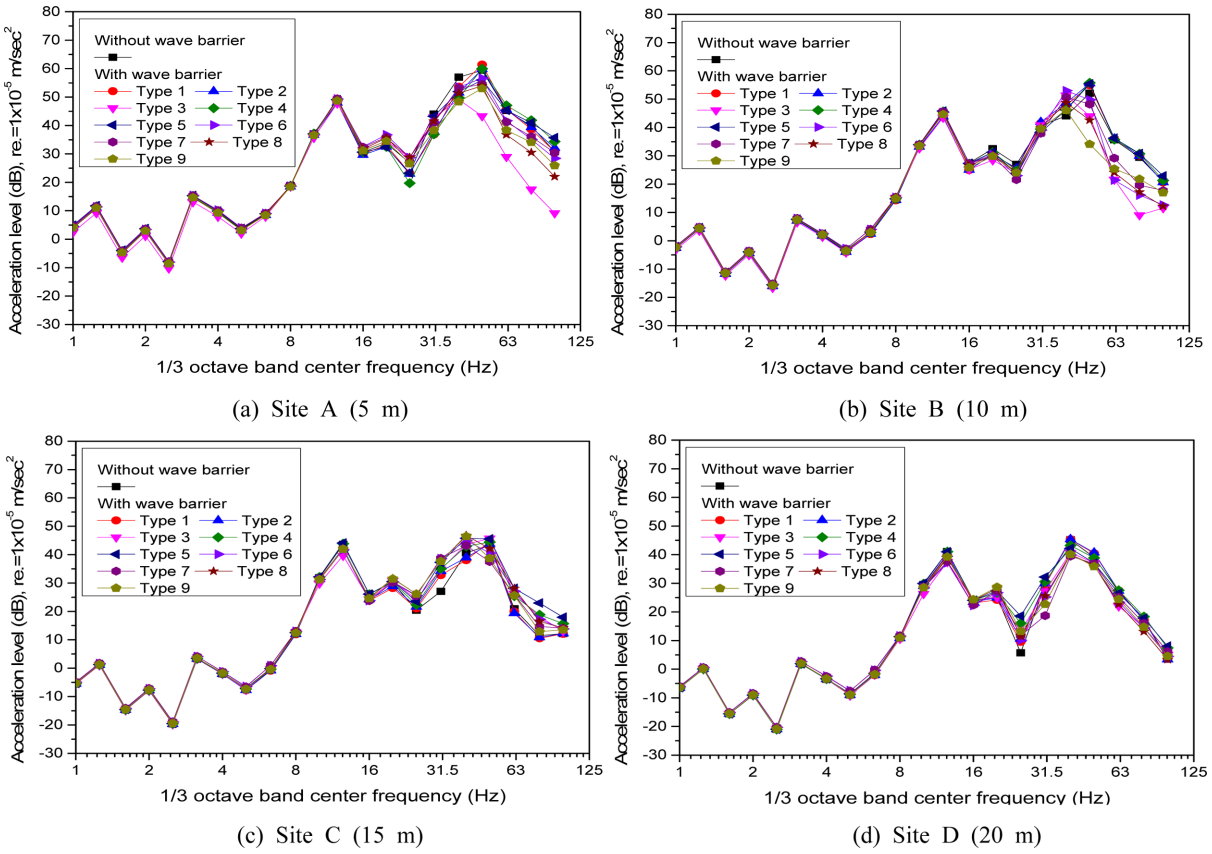
Table 5. Wave barrier types.

Type 1: 10 cm thick styrofoam panel and 40 cm thick concrete wall from the top corner of tunnel to ground surface	Type 2: 10 cm thick styrofoam panel and 80 cm thick concrete wall from the top corner of tunnel to ground surface
	
Type 3: 10 cm thick styrofoam panel on the side wall of tunnel	Type 4: 35 cm thick concrete wall from the bottom corner of tunnel to ground surface
	
Type 5: 75 cm thick concrete wall from the bottom corner of tunnel to ground surface	Type 6: 10 cm thick styrofoam panel and 40 cm thick concrete wall from the bottom corner of tunnel to ground surface
	
Type 7: 10 cm thick styrofoam panel and 80 cm thick concrete wall from the bottom corner of tunnel to ground surface	Type 8: 10 cm thick styrofoam panel and 40 cm thick concrete wall on the side wall of tunnel
	
Type 9: 10 cm thick styrofoam panel and 80 cm thick concrete wall on the side wall of tunnel	
	

보다 강성이 매우 작거나 또는 매우 큰 재질로 만들게 된다. 지반 내에 설치하는 방진벽은 공사비용이 많이 소요되므로 비용이 적게 소요되면서 진동효과 크도록 재질 및 형상을 선정할 필요가 있다. 보통 건설현장에서는 방진벽의 재질로서 비용이 저렴하고 조달이 용이한 강성이 매우 작은 스치로포움(styrofoam panel) 또는 강성이 큰 콘크리트를 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 터널과 비교적 가까운 건물에서의 진동을 저감하기 위한 방진벽으로서 터널벽 외측에 부설하는 9가지 방진벽 유형에 대하여 방진효과를 분석하였다. 이들 유형은 콘크리트벽 단독 또는 콘크리트벽과 스치로포움판널의 조합체로서 형상과 부설위치를 달리한다. Table 5는 검토대상 방진벽의 9 가지 유형을 나타낸다.

5.2 방진벽 유형에 따른 진동 저감효과 분석

Fig. 9은 방진벽 유형에 따른 지표면 4 개소(터널외벽으로부터 수평으로 5, 10, 15, 20m 이격된 지점)에서 1/3 옥타브밴드 가속도 레벨을 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 각 방진벽을 설치할 경우 대체로 16Hz이상의 주파영역에서 진동저감 효과가 있음을 알 수 있다. 따라서 방진벽을 설치할 경우 20Hz 이상에서 발생하는 구체전달소음을 저감시키는데 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 이들 결과로부터 터널외벽으로부터 수평거리가 가까울수록 방진벽유형별로 진동저감 효과의 차이가 크고 대체로 진동저감 효과가 큰 것을 알 수 있다. 그러나 거리가 멀어질수록 방진벽 유형별로 진동저감 효과의 차이가 적고 진동저감 효과도 적음을 알 수 있다. 이것은 진동원으로부터 먼 지점에서는 여러 경로로 진동이 전파되기 때문에 터널과 가까운 곳에 부설할하는 방진벽으로는 전파하는 진동전파 경로의 일부만을 차단시킬 수 있기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 9로부터 터널상부 외측만을 방진벽으로 부설하는 Type1, 2 유형의 방진벽은 진동저감효과가 매우 작은 것을 알 수 있는데 이것은 진동이 주로 터널 하부 및 터널 외벽을 통하여 지반으로 전파하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 10은 방진벽 유형에 따른 지표면에서 가속도 레벨을 나타낸 것이다. 이 결과부터 터널외벽으로 5m 이격지점에서는 유형 3 방진벽이 진동저감 효과가 가장 크나 10m 이격지점에서는 유형 9 방진벽이 진동저감 효과가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이것은 각 위치별로 진동전파경로가 다르기 때문에 방진벽 유형별로 진동이 전파되는 경로를 차단하는 효과가 다르기 때문으로 판단된다. 또한 터널 외벽에 스치로폼만 덧대는 Type 3 방진벽과 스치로폼과 더불어 각각 40cm, 80cm 콘크리트벽을 추가적으로 부설하는 Type 8, 9 방진벽의 진동레벨들의 비교로부터 터널과 가까운 지점에서는 위치에 따라 진동효과



(a) Site A (5 m) (b) Site B (10 m)

(c) Site C (15 m) (d) Site D (20 m)

Fig. 9. One-third octave band acceleration levels according to the type of wave barrier.

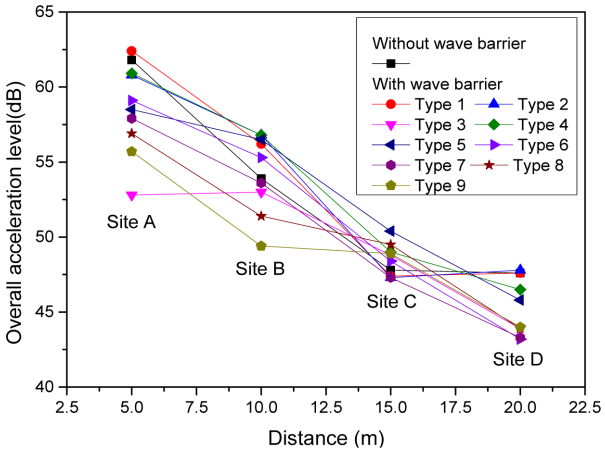


Fig. 10. Overall acceleration levels according to the type of wave barrier.

의 차이가 발생하나 터널로부터 먼 거리에서는 진동저감 효과가 비슷함을 알 수 있다. 또한 이들 3 유형의 방진벽의 진동저감 효과의 비교로부터 터널외벽에 스치로폼을 부설하고 그 외부에 콘크리트벽을 추가로 부설하는 것은 스치로폼만 부설하는 것과 비교하여 진동저감 효과가 크지 않음을 알 수 있다. 한편 터널외벽에 스치로폼을 부설하지 않고 콘크리트벽만을 부설하는 Type 3, 5의 결과로부터 콘크리트벽만으로 터널외벽을 보강하는 경우 진동저감 효과는 크게 줄어드는 것을 알 수 있는데 이것은 터널벽과 방진벽이 일체로 진동함에 따라 진동저감 효과가 크지 않은 것으로 판단된다. Fig. 10의 결과로부터 터널외벽에 설치하는 방진벽 유형 3 및 9의 방진벽들이 진동저감 효과가 비교적 큰 것을 알 수 있다. 이것은 터널이 지표면 가까이 건설될 경우 지표면 진동은 대부분 터널외벽으로부터 전파되기 때문에 이들 유형의 방진벽이 진동을 효율적으로 차단하기 때문으로 판단된다. 한편 이들 결과로부터 방진벽 유형에 따라서는 진동을 저감시키기 보다는 오히려 진동을 증폭시키는 경우가 있음을 알 수 있다. 따라서 방진벽부설비용이 매우 고가 이므로 진동을 저감시키고자하는 위치를 고려하여 방진효과를 극대화할 수 있도록 방진벽의 형상 및 부설위치를 설계하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다. Fig. 10의 결과로부터 통상적으로 궤도에서 방진대책을 수립할 경우 5~20dB의 진동저감 효과를 얻을 수 있는 것에 반하여, 터널외벽으로 10m 이상 이격될 경우 방진벽의 진동저감 효과는 5dB를 넘지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 가급적 비용이 적게 소요되는 궤도에서의 방진대책을 적극 검토할 필요가 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

지금까지 대부분의 연구가 지표면에 설치된 방진벽을 대상으로 하였으나 본 연구에서는 터널 외측에 설치하는 방진벽을 대상으로 하여 실제 현장에 방진벽으로 부설할 수 있는 다양한 방진벽 유형을 대상으로 방진효율성을 분석하여 향후 진동저감 대책으로서의 가이드를 제시하고자하였다. 본 논문에서는 FRA에서 제시한 상세진동해석방법의 진동평가 기본원리를 적용하되 세부적은 평가방법은 다양한 유형의 방진벽의 진동저감 효과를 용이하게 평가할 수 있도록 수정하여 적용하였다. 고도화된 차량-궤도 상호작용 해석방법을 적용함으로써 차량 및 궤도의 다양한 조건을 반영하여 차량이 터널바닥에 작용하는 하중밀도를 비교적 정확하게 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 2차원 영역에서 터널-지반 동적상호작용을 비교적 정확하게 평가할 수 있는 기법과 실제 현장 계측자료를 통하여 3차원 보정레벨을 도출하여 2차원 해석을 수행하면서도 3차원 진동전파효과를 반영할 수 있는 전파유동성 계산방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 진동평가방법에서 하중밀도 및 전파유동성 계산단계에서 적용한 차량-궤도 상호작용 해석방법 및 터널-지반 상호작용 해석방법은 기존에 국제학술지에 게재되어 타당성이 입증된 바 있어 진동평가시스템 전체적으로 진동평가방법으로 타당성은 확보되었다고 판단된다. 정립된 진동평가방법을 적용하여 실제 진동민원문제가 크게 발생하였던 도시철도 저심도 터널구간을 대상으로 9가지 유형의 방진벽의 진동저감효과를 분석하였다. 방진벽 유형에 따른 진동저감 효과 분석결과는 다음과 같다.

(1) 방진벽을 설치할 경우 20Hz 이상에서 발생하는 구체전달소음을 저감시키는데 효과가 있음을 알 수 있다. (2) 터널외벽으로부터 수평거리가 가까울수록 방진벽유형별로 진동저감 효과의 차이가 크고 대체로 진동저감 효과가 큰 것을 알 수 있다. (3) 터널이 지표면 가까이 건설될 경우 지표면 진동은 대부분 터널외벽으로부터 전파되기 때문에 저강도 재료를 터널외벽에 부착하는 방진벽 유형들이 진동저감 효과가 비교적 큰 것을 알 수 있다. (4) 방진벽 유형에 따라서는 진동을 저감시키기보다는 오히려 진동을 증폭시키는 경우가 있음을 알 수 있다. 따라서 방진효과를 극대화할 수 있도록 방진벽의 형상 및 부설위치를 설계하는 것이 매우 중요

함을 알 수 있다. (5) 터널외벽으로 10m 이상 이격될 경우 방진벽의 진동저감 효과는 5dB를 넘지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 가급적 비용이 적게 소요되는 궤도에서의 방진대책을 적극 검토할 필요가 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] J.T. Nelson, H.J. Saurenman (1983) State-of-art review: Prediction and control of ground borne noise and vibration from rail transit trains, US Department of Transportation, Urban Mass Transportation.
[2] H.C. Shin, S.K. Cho, S.C. Yang (2009) Study on the improvement of empirical formula for prediction of ground vibration induced by urban rapid transit, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 357-363.
[3] H. Verbraken, G. Lombaert, G. Degrande (2011) Verification of an empirical prediction method for railway induced vibrations by means of numerical simulations, *Journal of Sound and Vibration*, 330(8), pp. 1692-1703.
[4] L. Andersen, C.J.C. Jones (2006) Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels-a comparison of two-and three-dimensional models, *Journal of Sound and Vibration*, 293(3-5), pp. 611-625.
[5] S. Gupta, M.F.M. Hussein, G. Degrande, H.E.M. Hunt, D. Clouteau (2007) A comparison of two numerical models for the prediction of vibrations from underground railway traffic, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(7), pp. 608-624.
[6] C.E. Hanson, D.A. Towers, L.D. Meister (2006) Transit noise and vibration impact assessment, Office of planing and Environment Federal Transit Administration, FTA-VA-90-1003-06.
[7] J.U. Song, S.K. Kim, H. Park, W.K. Hong (2013) A study on the vibarion reduction by the position of borehole using experimental wave-form and finite element analysis, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(4), pp. 381-387.
[8] D. Connolly, A. Giannopoulos, W. Fan, P.K. Woodward, et al. (2013) Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations, *Construction and Building Materials,* 44, pp. 557-564.
[9] S. Ahmad, T. Al?Hussaini (1991) Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), pp. 67-88.
[10] L. Andersen, S.R.K. Nielsen (2005) Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, pp. 701-716.
[11] S.C. Yang, S.Y. Jang, E. Kim, S.H. Hwang *et al*. (2014) Establishment of reduction measures of noise and vibration between Yongsan station and Gajoa station in Kyeongui-line, Final report, Korea Railroad Research Institute.
[12] S.C. Yang (2009) Enhancement of the finite-element method for the analysis of vertical train–track interactions, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 223(6), pp. 609-620.
[13] S.C. Yang, E. Kim (2012) Effect on vehicle and track interaction of installation faults in the concrete bearing surface of a direct-fixation track, *Journal of Sound and Vibration*, 331(1), pp. 192-212.
[14] C. Onorii (2008) Mechanical behaviour of traditional and antivibration railway tracks with recycled rubber materials, *Ph.D Thesis*, Universitàdegli Studi di Napoli Federico II.
[15] S.C. Yang, C.B. Yun (1992) Axisymmetric infinite elements for soil-structure interaction analysis, *Engineering Structures*, 14(6) pp. 361-370.

(Received 27 July 2015; Revised 30 October 2015; Accepted 12 November 2015)

Sin-Chu Yang : scyang@krri.re.kr
High speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea