

도시철도 터널 내부 콘크리트 도상 국소공명흡음판의 흡음계수 및 구조안정성 평가를 위한 계측시스템 개발

오순택^{1*} · 이동준² · 이동훈³

¹정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

²비회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 강사

³비회원, 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 교수

Developments of monitoring system to measure sound absorbing coefficient and structural stability of sound absorbing panel on the concrete track in the urban train tunnel

Soon-Taek Oh^{1*} · Dong-Jun Lee² · Dong-Hoon Lee³

¹Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Civil Engineering, Professor

²Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Civil Engineering, Research Fellow

³Seoul National University of Science and Technology, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Professor

*Corresponding Author : Soon-Taek Oh, alicia@seoultech.ac.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(1)1-9(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.1.001>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received December 12, 2016

Revised January 9, 2017

Accepted January 10, 2017



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

Abstract

In this study, a test-bed system simulated a tunnel and concrete track is tested on site and investigated an allowed limit of multi-layered sound absorbing panel for reducing noise reflected on the concrete track in train tunnel considering the criteria and limitation on the theoretical background. The studied results are an effective evaluating system of the sound absorbing coefficient influenced fluid effects depending on the vehicle speed in the urban train tunnel and measuring not only structural behaviors of maximum displacement and acceleration of the panel but also dynamic characteristics of damping ratio and natural frequency.

Keywords: Concrete track, Sound absorbing panel, Structural behavior test, Increasing fluid pressure by the vehicle running speed, Maintenance criteria in tunnel

www.kci.go.kr

초 록

본 연구에서는 터널 내 콘크리트 도상을 모사하여 현장실험을 수행하였다 그리고 도시철도터널 내 콘크리트도상의 반사소음을 저감하기 위한 다중국소공명 흡음판의 이론적 평가항목과 한계를 고려하여 허용한계를 연구하였다. 본 연구결과는 도시철도 터널 구간에서의 차량 주행속도에 따른 유동 영향에 의한 흡음판의 흡음계수를 분석하고, 구조안정성을 효율적으로 평가할 수 있는 최대 변위와 변위 가속도 및 동적특성인 감쇠비와 고유진동수를 효과적으로 도출할 수 있는 예측시스템을 제안한다.

주요어: 콘크리트도상, 국소공명흡음판, 구조적 거동측정, 차량속도에 의해 증가되는 유동압력, 터널 내 유지관리항목

1. 서론

철도에서 자갈도상은 효율적인 유지관리를 위하여 콘크리트 도상으로 급속하게 전환되고 있다. 그러나 콘크리트 도상과 터널벽체에서의 반사소음으로 인한 소음증가는 차량의 긴밀성을 향상시켜 소음투과율을 저하시키는 다양한 노력에도 불구하고 통상적인 소음한계를 넘어서고 있으므로 이에 대한 다양한 연구와 시도가 수행되고 있다.

터널내부벽체와 레일 상면 아래 도상에 흡음재 또는 다공질 콘크리트 블록을 설치하는 방법(Lee et al., 2016)은 건축한계에 최대로 근접하여 시공함으로써 흡음성능을 극대화시키고자 하였으나, 우수한 흡음성능을 유지하기 위한 내구성 부족과 열악한 터널내부환경 및 유지관리작업으로 인한 다양한 손상에 대한 내화 또는 내화학 저항성 부족으로 인하여 소음성능이 저하되고 정기적인 유지관리 작업과 간섭을 유발하는 극복해야 할 사용성 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 내구성이 확보된 국소공명 흡음판이 개발되었으며, 잔향실 실험을 통하여 Noise Reduction Coefficient (NRC) 0.85 이상의 흡음성능을 보유하고 일반적인 흡음 벽체에 적용하여 다양한 현장상황에서 매우 우수한 소음성능과 내구성을 증명하였다(Oh et al., 2016).

콘크리트 도상으로 전환된 도시철도 터널내부에서의 반사소음저감을 위한 국소공명 흡음판의 적절한 배치와 효율적인 면적확보 등을 구현하기 위한 다양한 현장조사와 해석적 연구가 선행되었다. 터널구간과 개방구간 그리고 자갈도상과 콘크리트도상 등 다양한 현장상황에 대한 국소공명판의 흡음성능과 구조안정성 그리고 터널 내부에서 차량의 주행에 의한 유동간섭의 영향을 종합적으로 평가하기 위한 현장실험방법의 개발과 기본적인 주요 평가항목의 도출이 요구되었으며 이를 위한 실험이 가능한 적절한 차량기지를 선정하고 터널내부와 콘크리트 도상을 모사하기 위한 단계별 환경조성 및 차량형식별 차량주행속도를 제어할 운행시스템이 요구되었다.

도시철도 터널내부에서 국소공명흡음판의 배치와 형상별 음장해석이 수행되었으며 서울메트로의 각 호선 별 터널구조형식과 형상에 따른 다양한 조사와 현장답사를 통하여 모사될 대표 터널 단면을 구성하고 개방된 자갈도상부터 터널구간과 철판포장을 이용한 콘크리트 도상의 모사로 5단계의 도시철도 터널환경을 형상화하고 각 경우에 대한 10량의 보편적인 차량편성을 이용한 현장실험을 수행하였다.

본 연구에서 적용된 흡음성능은 개방된 차량기지에서 일정거리별 소음레벨로부터 확보한 옥타브 대역별 음향

파워 레벨을 이용한 음향해석을 수행하여 전동차의 객실소음과 음에너지 밀도를 구하고 음향해석결과 음에너지 밀도가 1.6배 저하되는 것을 확인하였으며 전동차 객실소음으로 환산하여 2.5 dB(A) 이상 감소하는 것으로 해석되었다. 현장실험의 한계성을 극복하기 위하여 최대길이 60 m 상부 개방 터널을 구축하였으며, 신뢰성 높은 현장 실험값을 확보하기 위하여 3가지 주행속도를 각각 3회 이상 반복하여 측정된 최대값을 평가에 적용하였다.

2. 다중 국소공명흡음판

2.1 다중 다공판 흡음계수

일종의 헬름홀츠 공명기인 다중 다공판 시스템은 좁은 흡음대역폭을 확장하고 성능향상을 위한 다양한 공극률의 다공판을 다중으로 조합하고 임피던스관 실험을 통한 흡음계수와 전기음향상사요류를 보정한 전기음향등가 회로법으로 계산하여 비교하고 검증하였다.

실험에 사용한 다공판의 두께 t 는 1 mm, 구멍지름 d 은 1 mm, 공기층 길이 l 는 70 mm를 적용하고 공극률 σ_i 은 0.35%부터 2.2% 범위에서 다중 다공판시스템을 구축하여 흡음대역폭을 확대됨을 증명하였다.

다공판의 음향임피던스 Z_i 는

$$Z_i = \frac{6 \times 10^{-3} + jk(t + 0.75d)}{\sigma_i} \quad (1)$$

여기서, k 는 파수, $j = \sqrt{-1}$, 그리고 공동의 흡향임피던스 Z_{Di} 는

$$Z_{Di} = -j \cot(kl_i) \quad (2)$$

이와 같이 계산된 다공판과 공동의 임피던스를 합산하여 해당 다공판의 전체면적에 대한 면적비를 나누어 각각을 병렬로 합산하면 총괄 표면 음향임피던스 Z_T 를 구하고 이를 이용하여 수직입사 흡음계수 α_n 을 계산할 수 있다.

$$\alpha_n = \frac{4Re(Z_T)}{(1 + Re(Z_T))^2 + Im(Z_T)^2} \quad (3)$$

여기서, Re 와 Im 은 총괄표면음향임피던스 Z_T 의 실수부와 허수부이다. 또한 병렬 이중다공판 시스템인 경우 직렬회로의 전면 음향임피던스 Z_{Di-1} 는

$$Z_{D_i-1} = \frac{(Z_i + Z_{D_i}) + j \tan(kl_i)}{1 + j(Z_i + Z_{D_i}) \tan(kl_i)} \quad (4)$$

를 이용하여 구할 수 있다(Lee and Kwon, 2004).

2.2 터널 내 유동간섭된 흡음계수

철도 터널구간이나 도시철도 지하구간인 경우터널 내부와 콘크리트도상의 강한 반사음장과 고속 주행차량의 유동에 의한 흡음성능 저하로 인하여 열악한 소음환경이 형성된다. 일반적으로 도시철도 차량이 60 km/h로 운행 될 경우 흡음판의 표면에서 최대 9 m/sec의 유동이 발생하므로 임피던스관에 다양한 속도의 접선 유동을 발생시켜 흡음계수의 변화를 측정하였다. 적용된 흡음판은 공극률 1%, 구멍지름 1 mm, 공기층 길이 30 mm 단일층 시스템이고 주파수 분석기의 분석범위는 5,000 Hz이고 해상도는 8 Hz로 측정하여 반사계수 R를 산정하여 음향전달함수법으로 흡음계수 α_n 를 산정하였다.

실선으로 표현된 유동이 없는 경우와 점선으로 표현된 9 m/sec 접선유동이 포함된 경우의 주파수별 흡음계수의 변화를 Fig. 1에서 나타내고 있다. 고속의 유동이 500 Hz 미만의 저주파대역에서 흡음계수를 0.58 부터 0.30 까지 크게 저하시킴을 알 수 있다. 따라서 터널구간에서 일반적으로 발생하는 차량의 주행속도에 의한 유동간섭을 최소화하기 위한 가이드 그릴의 설계가 요구된다(Yang et al., 2014).

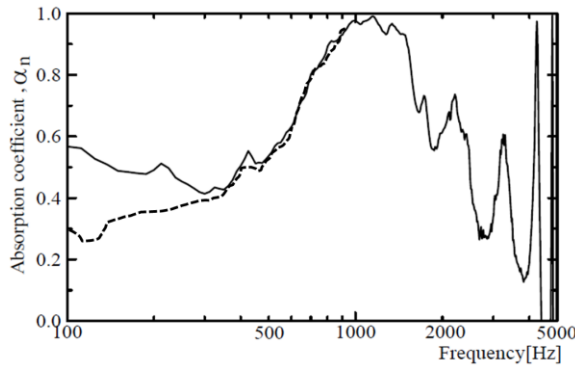


Fig. 1. Variation of the absorption coefficient with grazing-flow velocity for a sound absorption panel

3. 현장계측을 통한 적용성 평가

터널구간과 개방구간에서의 음장해석 및 공명흡음판의 흡음계수추이를 모사하기 위하여 Fig. 2에서 일련번호로 나타낸 바와 같이 개방된 자갈도상 구간을 선정하여 단계별로 10량의 서울메트로 신형과 구형 2편의 전동열차를 최대속도 60 km/h부터 20 km/h 씩 감속하여 3단계의 속도로 주행하였고, 차량내부와 실험구간외부에서 소음

을 측정하여 음장전개와 흡음특성을 분석하였다. 단계별 시나리오는 1단계 개방된 자갈도상, 2단계 자갈도상 위에 15 mm 철판을 포장하여 콘크리트도상을 모사하고 높이 3 m 가설펜스를 길이 60 m 설치하여 상부개방 터널구간을 모사하였다. 3단계는 레일바닥면에 4층 다공흡음판을 철판 위에 용접하고, 4단계는 양측 가설펜스위에 높이 1.5 m까지 4층 다공흡음판 벽체시공하였다. 그리고 5단계는 Fig. 3과 같이 각 다공흡음판 위 특수설계된 가이드그릴을 설치하였다.

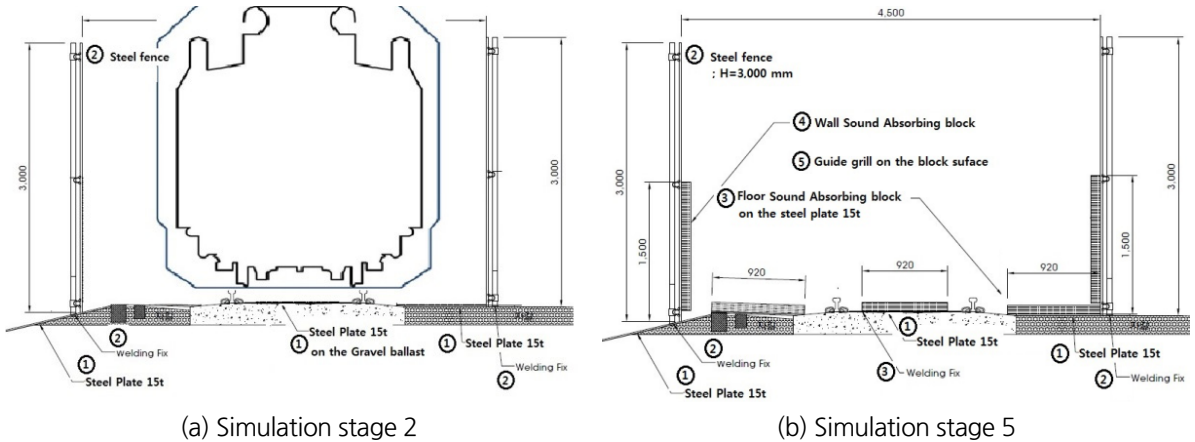


Fig. 2. Simulation scenario for tunnel and concrete track

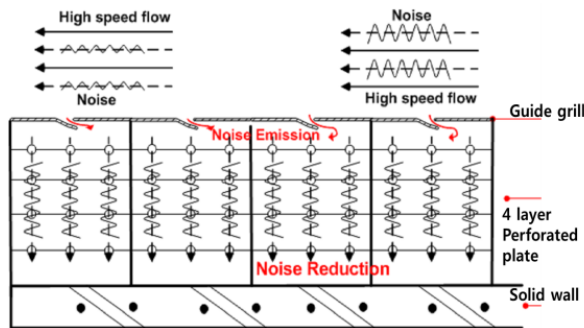


Fig. 3. Schematic diagram of sound absorbing panel

터널구간에서 전동차의 유동에 의한 흡음판의 구조안정성을 평가하기 위하여, 150 mm LVDT를 이용하여 레일의 주두의 횡변위를 침목사이 최대변위지점에서 측정하고, 용접고정된 흡음판의 최대변위 지점에서 수직변위를 측정하여 전동열차의 통과구간에서 각 측정지점의 최대변위와 동조형태 및 감쇠현상을 상대 평가하였다. 또한 전동열차의 주행속도 증가에 따른 동적특성을 평가하여 최대속도 주행 시 최대변위와 구조적 거동특성을 추정하였다(Oh et al., 2016).

3.1 흡음성능 평가

개방된 자갈도상 60 km/h 운행시 레일중앙부로부터 4, 12, 16 m 위치에서 소음레벨 측정된 결과 총음향 파워 레벨 95.4 dB(A)이 산출되었다.

음향해석을 통하여 차량의 투과손실과 흡음계수 등을 대입하여 음압레벨이 75.2 dB(A)에서 흡음판을 설치하고 72.7 dB(A)로 2.5 dB(A) 저감될 것으로 예상되었으나, 현장실험결과는 이보다 크게 상회하여 7.0 dB(A) 이상 저감되었다.

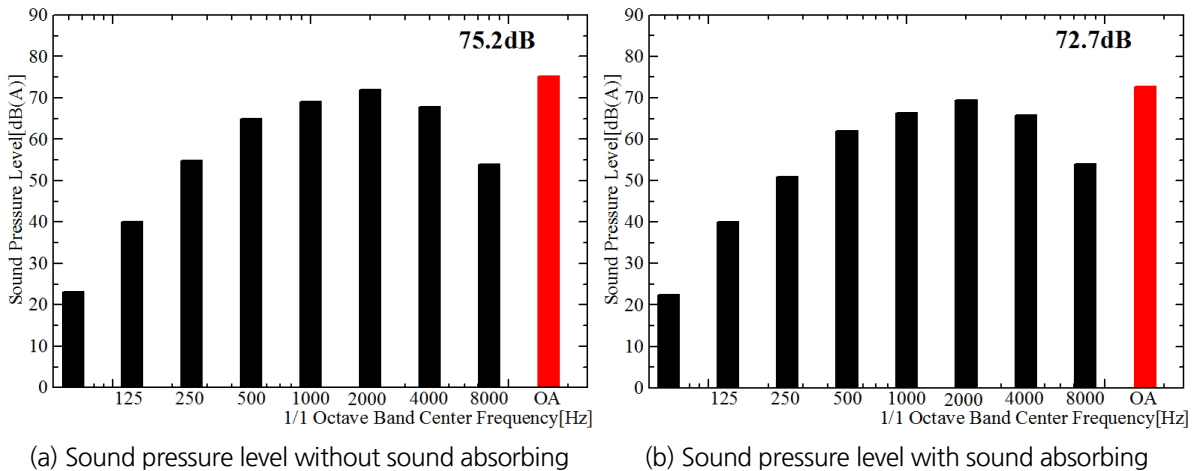


Fig. 4. Sound pressure level of numerical analysis

이러한 실험결과는 개방터널을 모사한 음향해석에 적용된 조건에 비하면 밀폐된 실제 도시터널구간에서 1.6 배 이상의 음에너지 밀도를 보유하므로, 상부 개방된 실험조건에서 확산음장생성으로 저감된 영향이 소멸되어, 10.0 dB(A) 이상의 소음저감효과를 기대할 수 있다. 또한 소음발생원에 밀착된 바닥과 벽체 흡음판의 설치위치로 인하여 음장의 확산유형을 크게 변형시킨 것으로 추정되며(Vogiatzis and Vanhonacker, 2015), 주변의 개방된 공간형상과의 간섭현상(Shimokura and Soeta, 2011) 및 터널의 입출구에서 발생하는 소음증폭현상(Morgan and Peeling, 2012)도 역시 반영되어 소음저감현상이 축소된 결과로 평가된다.

3.2 흡음판의 구조안정성 평가

도시철도 터널 내부에서 원활한 유지관리를 위하여 적용되고 있는 콘크리트 도상의 반사소음을 저감하기 위하여 경량발포 콘크리트 도상흡음판을 개발하고 성능규정을 표준규격으로 규정하고 있으나 다양한 간섭조건에 의한 열악한 사용성과 내구성 부족으로 상용화에는 어려움이 크다(Lee et al., 2016). 특히 밀폐된 터널공간에서 고속으로 주행하는 차량의 유동현상과 열악한 터널내부의 부식 및 손상환경으로 인한 비산물 또는 변형손상물의

주행차량과의 충돌 등 심각한 주행안정성 확보를 위한 흡음판의 내구성과 구조안정성이 요구된다.

흡음판의 상대변위를 평가하기 위하여 레일 두부 횡변위를 침목지지 중앙부에서 측정하였다. 흡음판과 레일의 거동을 1자유도 감쇠시스템으로 식(5)와 같이 임계감쇠계수를 적용하여 운동방정식을 구성하고, Fig. 6와 같이 획득된 주행시험을 통한 변위를 Band Pass Filtering하여 1차 고유주기 파형을 추출하였다. 각 주행속도별 최대변위는 0.15 mm이내 였으며, 주행속도별 이력곡선을 이용하여 식(6)으로 감쇠비를 산정하였다.



Fig. 5. Location of gauges

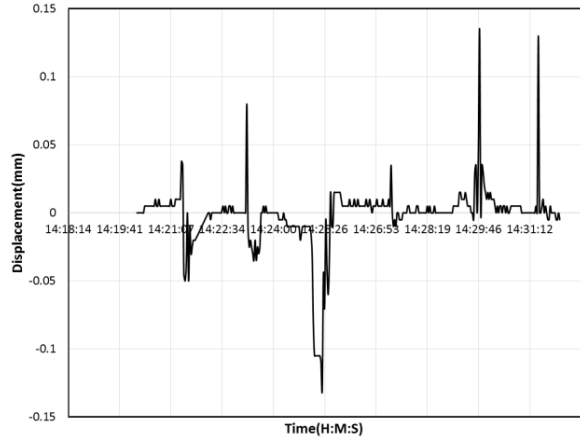


Fig. 6. Test results of lateral displacements of rail head

1 자유도 운동방정식은

$$\ddot{x} + 2\zeta' \omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (5)$$

여기서, 제타 ζ 는 감쇠비이고, ω_n 은 고유진동수이다. 감쇠비는

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \times \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (6)$$

여기서, j-cycle 간 최대변위를 고려하여 산정하였다.

3.3 주행속도별 흡음판의 변위와 감쇠비

Fig. 7에서 레일의 거동은 실선으로, 흡음판의 거동은 점선으로 표시하였다. 각 주행속도 모두 최대 변위는 0.15 mm를 추월하지 않았다. 감쇠비는 주행속도 20 km/h에서 레일의 경우 7.81%로 최소 감쇠비를 나타내었다. 모든 주행속도에서 흡음판의 경우 레일의 횡변위와 감쇠비와 유사한 유형을 나타내었다.

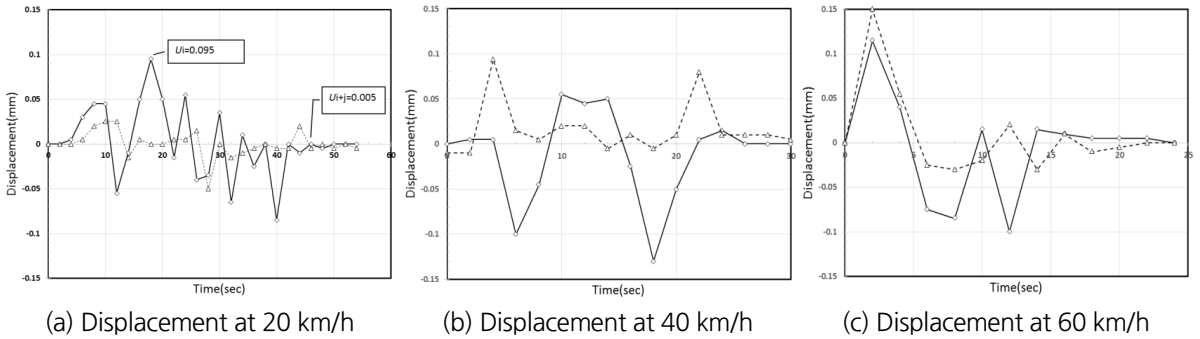


Fig. 7. Displacements at various speeds

3.4 주행속도별 흡음판의 변위가속도 분석

Fig. 8에서 실선으로 표시된 레일과 점선으로 표시된 흡음판의 주행속도별 변위가속도로 나타내었다. 주행속도 증가에 따른 최대 가속도는 37.5 mm/sec^2 로 조사되어 레일의 최대값과 비교하여 20% 이내의 안정된 차이를 나타내었으며, 변화유형도 유사하게 나타내고 있다. 단, 계측간격은 2초로 샘플링하여 계측데이터를 단순화시켜 차량의 활하중에 의한 영향만을 필터링 분석하였다.

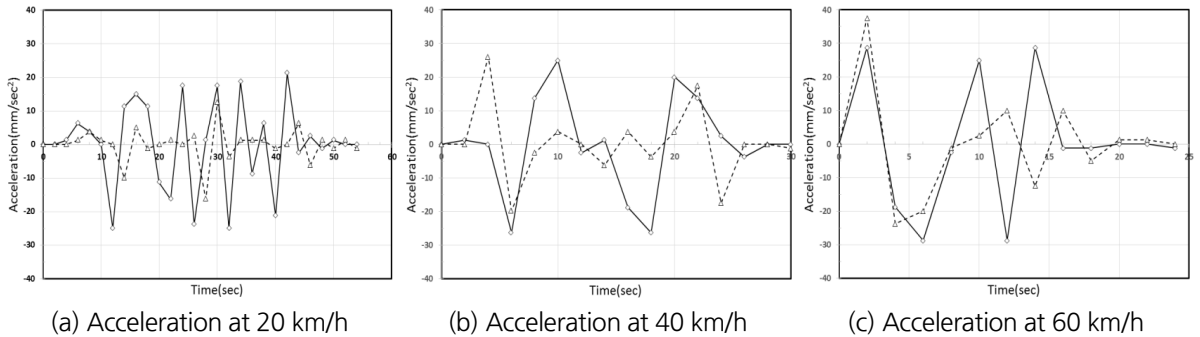


Fig. 8. Acceleration at various speeds

4. 결론

본 연구를 통하여 병렬 다중 국소공명 흡음판을 터널구간에 설치할 경우 주행차량의 유동에 의한 흡음계수의 간섭과 구조안정성을 분석하기 위한 현장실험을 개발하고 평가를 위한 실험적 접근방법을 제안하였다.

길이 60 m의 콘크리트 도상 터널구간을 모사하기 위하여 높이 3 m 가설펜스와 철판포장 위 바닥면과 높이 1.5 m 인 5층 다중 국소공명 흡음판을 설치하여 주행속도 60 km/h에서 7.0 dB(A)이상의 소음저감효과를 획득하였으며 최대허용변위 0.15 mm와 감쇠비 7.81 % 를 산출하였다. 최대변위 가속도는 37.5 mm/sec^2 로 조사되었다.

본 논문은 주행속도별 흡음판의 소음성능 및구조안정성을 평가하기 위한 계측시스템을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경선진화기술개발사업에서 지원받았습니다.

References

1. Lee, D.H., Kwon, Y.P. (2004), "Estimation of the Absorption Performance of Multiple Layer Perforated Panel System by Transfer Matrix Method", Science Direct, Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, pp. 847-860.
2. Lee, H.J., Oh, S.T., Lee, D.J. (2016), "An Optimal Mix Design of Sound Absorbing Block on Concrete Ballast in Urban Train Tunnel", Journal of Korean Tunnel Underground Space Association, Vol. 18, No. 1, pp. 75-82.
3. Morgan, P.A., Peeling, J. (2012), "Railway Noise Mitigation from Tunnels", Technical Report, www.51m.co.uk/wp-content/uploads/Factsheet-04-nov-2012-Railway-Tunnels-Portals.pdf.
4. Oh, S.T., Lee, D.J., Lee, D.H. (2016), "Structural Behavior Test and Specification of Sound Absorbing Panels on the Concrete Track", Proceedings of 2016 autumn KSR Conference.
5. Shimokura, R., Soeta, Y. (2011), "Characteristics of Train Noise in Above-Ground and Underground Stations with Side and Island Platforms", Science Direct, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, pp. 16219-1633.
6. Vogiatzis, K., Vanhonacker, P. (2015), "Noise Reduction in Urban LRT Networks by Combining Track Based Solutions", Science of the Total Environment, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.060>.
7. Yang, Y.S., Baek, D.S., Lee, D.H., Kim, J.C., Park, C.K. (2014), "An Experimental Study on the Multiple Layer Perforated Panel Sound Absorbing System for Railroad Noise Reduction", International Symposium on Green Manufacturing and Applications Proceedings, pp. 117-119.

