

이동하중 해석을 통한 고속철도의 실내소음 특성 분석

Acoustic Characteristics of High-speed Train Interior Noise Generated by Moving Loads

정 영 빈* · 구 경 래* · 전 성 욱* · 이 규 영* · 최 성 훈** · 박 준 흥†
Youngbeen Chung*, Kyunglae Gu*, Seongwook Jeon*, Gyuyoung Yi*,
Sunghoon Choi** and Junhong Park†

(Received July 4, 2023 ; Revised August 9, 2023 ; Accepted August 9, 2023)

Key Words : Moving Load(이동하중), High-speed Train(고속철도), Concentrative Power Type(동력집중식), Distributed Power Type(동력분산식), Interior Noise(실내소음)

ABSTRACT

The high-speed train is an eco-friendly transportation system with high energy efficiency and convenience. The increase in operating speeds led to various problems related to the noise and vibration generation. The distributed power type trains are being utilized. The distributed arrangement of power engines is expected to cause different characteristics in terms of interior noise compared to concentrative-power-type trains. This study explains the differences in interior noise between concentrative and distributed power type trains. The noise induced on the trains were analyzed by the rail vibration due to moving loads by the train weights. The sound pressure level and spectral characteristics of interior noise were analyzed according to the operating speed. Both the concentrative-power-type and distributed-power-type trains were found to generate low-pitched noise. The distributed-power-type trains demonstrated a wide distribution of noise in high-frequency bands, demonstrating a relatively gradual decrease in intensity with increasing frequency. A structural vibration by harmonic moving loads was utilized to simulate the high-speed train on a straight rail. By deriving the displacement response while reflecting the actual load distribution of the train, the results indicate a similar tendency to the measured interior noise spectral characteristics. These findings indicate the contribution of rail vibration response to the interior noise of high-speed trains.

기 호 설 명

$\hat{A}_1 \sim \hat{A}_4$: 특성방정식의 해
 E : 보의 탄성 계수
 F_0 : 이동하중의 크기
 I : 보의 관성모멘트

m : 보의 단위 길이 당 질량
 s : 상대 좌표
 t : 시간
 v : 이동하중의 속도
 w : 보의 변위 응답

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Professor
E-mail : parkj@hanyang.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Student
** Korea Railroad Research Institute, Researcher

‡ Recommended by Editor Jin Woo Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

- w_0 : 하중이 정지해 있을 때의 초기 처짐
- x : 공간 좌표
- ω : 이동하중에 의한 가진 주파수

1. 서 론

고속철도는 수송 측면에서 높은 에너지 효율성과 편리성을 지닌 운송 수단으로, 최근 친환경적 교통 시스템으로서의 중요성이 강조됨에 따라 전 세계적으로 관련 분야의 기술 발전이 이루어지고 있다. 고속철도의 속도는 승객의 선택에 의한 교통 수단으로서의 경쟁력 및 효율성을 지배하는 요소이다. 지속적인 운행 속도 향상이 필요하며 이로 인해 열차 운행 시 발생하는 소음 진동도 꾸준히 주요 이슈로 대두되고 있다^(1,2).

고속철도에 의해 발생하는 소음 진동의 원인에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다^(3,4). 전동 소음(rolling noise)은 차륜과 레일의 접촉에 의해 발생하며 레일 두부 상면의 마모와 차륜의 요철에 기인한다. 동력 소음(traction noise)은 추진 장치를 포함한 여러 전동 장치로부터 발생한다. 공력 소음(aerodynamic noise)은 열차의 표면에서 공기역학적 메커니즘에 의해 발생하며 300 km/h 이상의 고속에서 주행할 때 중요도가 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다. 현재 국내에서 운행되고 있는 고속철도의 일반적인 운행 속도 범위에서는 전동 소음이 주요한 소음원에 해당한다.

고속철도는 동력 장치의 배치에 따라 동력집중식(concentrative power type)과 동력분산식(distributed power type) 열차로 구분된다. 동력집중식 열차는 동력을 열차의 특정 차량에 집중적으로 배치하여 견인하는 방식이다. 동력분산식 열차는 필요한 견인력에 따라 동력을 일부 또는 전 차량에 분산 배치하여 견인하는 방식이다. 최근에 국내 철도 환경과 적합성이 높고 운영 효율성에 강점이 있는 동력분산식 열차 개발이 이루어지고 있다. 동력 기관 배치 방식은 고속철도 차량의 하중 분포 차이를 야기하며, 이에 따라 실내소음 측면에서도 서로 다른 음향 특성을 나타낼 것으로 예상된다. 고속철도 하중 분포를 고려한 이동하중 해석을 통해 궤도 응답을 도출함으로써 전동 소음에 대한 기여도를 확인할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 동력집중식 열차와 동력분산식 열차의 운행 시 계측한 실내소음 신호를 기반으로 운행

속도에 따른 소음 레벨 및 주파수 특성 변화를 분석했다. 이후 고속철도가 일정한 속도로 주행하고 있는 상황을 단순 모델링하여 이동하중 해석을 통해 궤도의 변위 응답을 도출하였다. 동력집중식 열차와 동력분산식 열차의 실제 하중 분포를 반영하여 궤도 응답 특성을 분석하고, 이를 측정된 실내소음 변화 경향성과 비교했다.

2. 고속철도 실내소음 측정 및 특성 분석

2.1 고속철도 실내소음 측정

고속철도의 실내소음 측정은 동력집중식, 동력분산식 열차를 대상으로 개활지, 자갈 도상 주행 조건에서 수행하였다. 측정 장비와 센서는 PAK-Mobile MKII Systems(MÜller BBM) 및 MPA416 1/4-inch Free-field Microphone(BSWA TECH)를 이용했다. 마이크 센서의 경우 ISO 3381⁽⁵⁾을 참고하여 Fig. 1과 같이 측정 대상 차량의 중앙부 창가 측 좌석에 단일 채널로 설치하였다. 열차의 운행 속도와 음향 신호를 동시에 계측하였으며 운행 속도를 기준으로 신호 분석 구간을 선정할 후 해당 구간의 음향 신호를 추출하여 분석에 이용하였다. 운행 속도는 100 km/h ~ 300 km/h 구간을 50 km/h 간격으로 나누었고, 분석에 이용한 개별 음향 신호의 길이는 4초로 통일하였다.

2.2 운행 속도에 따른 고속철도 실내소음 특성분석

고속철도 실내소음에서 속도 구간 별로 3개씩 음향 신호를 추출하여 주파수 분석을 실시하였다. 음향 신호들은 속도에 따라 동일한 응답 경향을 보였으며 개별 결과를 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 나타내었다. 동력집중식 열차와 동력분산식 열차 모두 운행 속도가 증

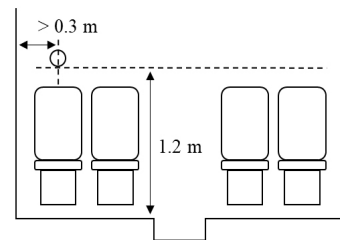
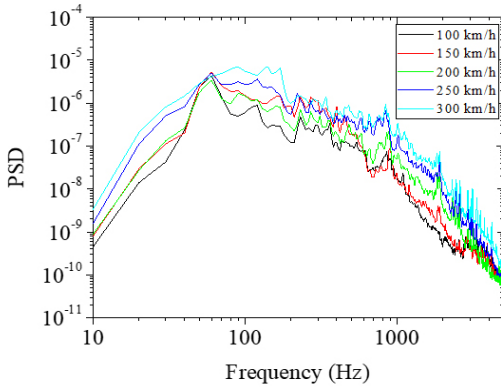
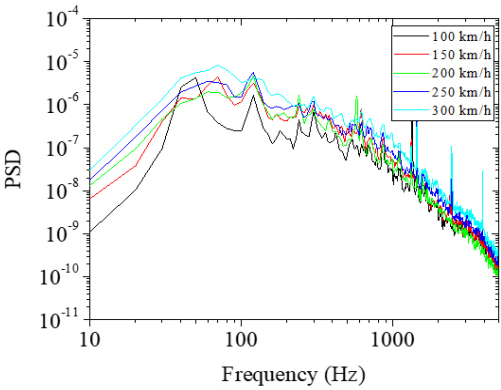


Fig. 1 Experimental set up for high-speed train interior noise measurement according to ISO 3381



(a) Concentrative power type train



(b) Distributed

Fig. 2 Comparison of interior noise spectral characteristics with an A-weighting according to operating speed

가함에 따라 소음 레벨이 증가하는 것으로 나타났다. 동력집중식 열차의 경우 약 100 Hz 근방의 저음역대 소음이 강하게 발생하였다. 동력분산식 열차의 경우 저음역대 소음이 강하게 발생함과 동시에 1000 Hz 근방에 이르는 고주파 대역까지 넓게 소음이 분포하고 있다. 실내소음의 주파수 응답을 비교해 볼 때 동력집중식 열차에 비해 동력분산식 열차의 경우 고주파 대역에서의 소음 감소 기술기가 더 완만함을 확인하였다.

3. 이동하중 해석을 통한 레일 진동 응답

3.1 이동하중-레일 시스템 모델링

이동하중 해석을 위해 고속철도가 직선 레일에서 등속도로 주행하고 있는 상황을 Fig. 3과 같이 단순화

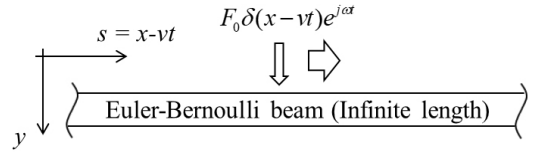


Fig. 3 Schematic of the railway track under harmonic moving load

하여 모델링하였다. 고속철도는 레일 상단에 주기적으로 형성 되어 있는 마모에 의한 주파수를 고려하는 조화 이동하중으로 가정하였고, 레일은 조화 이동하중이 작용하는 무한 길이의 오일러 보(Euler-Bernoulli beam)로 가정했다. 하중은 보 구조물의 상단에 작용하여 v 의 속도로 이동한다. 해당 모델의 지배방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있으며 오일러 보의 물성치는 UIC 60에 해당하는 레일 모델의 제원을 사용하였다.

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = F_0 \delta(x-vt) e^{j\omega t} \quad (1)$$

3.2 특성방정식 풀이

변위 응답 $w(x,t)$ 에 대해 표현된 식 (1)과 같은 편미분 방정식을 풀기 위하여, 상대 좌표(Cartesian coordinate)인 $s = x - vt$ 를 적용할 수 있다. $w(x,t)$ 의 좌표를 변수 분리를 통해 식 (2)와 같이 적용한다.

$$w(s,t) = w_0 \tilde{w}(s) e^{j\omega t} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입한 후 변수 s 에 대한 상미분 형태로 바꿔주면

$$EI w_0 \frac{d^4 \tilde{w}(s)}{ds^4} e^{j\omega t} + m w_0 \left(v^2 \frac{d^2 \tilde{w}(s)}{ds^2} e^{j\omega t} - 2j\omega v \frac{d\tilde{w}(s)}{ds} e^{j\omega t} - \omega^2 \tilde{w}(s) e^{j\omega t} \right) = F_0 \delta(s) e^{j\omega t} \quad (3)$$

식 (3)과 같으며, 이를 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d^4 \tilde{w}(s)}{ds^4} + \frac{mv^2}{EI} \frac{d^2 \tilde{w}(s)}{ds^2} - \frac{2j\omega mv}{EI} \frac{d\tilde{w}(s)}{ds} \quad (4)$$

$$- \frac{m\omega^2}{EI} \tilde{w}(s) = 8\delta(s)$$

식 (4)에 푸리에 변환을 취해주면

$$q^4 - \frac{mv^2}{EI}q^2 + \frac{2\omega mv}{EI}q - \frac{m\omega^2}{EI} = \frac{8}{W(q)} \quad (5)$$

식 (5)의 형태가 되며, 이를 $w(q)$ 에 대해 정리하고 역 푸리에 적분을 수행하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{w}(s) &= \frac{4}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{isq}}{q^4 - \frac{mv^2}{EI}q^2 + \frac{2\omega mv}{EI}q - \frac{m\omega^2}{EI}} \right] dq \\ &= \frac{4}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{isq}}{(q - \hat{A}_1)(q - \hat{A}_2)(q - \hat{A}_3)(q - \hat{A}_4)} dq \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 적분항 내의 분모는 구조물의 특성방정식이 되며, 이 때의 해는 구조물의 특성값을 의미한다. 보 구조물에 대한 특성값의 존재 영역을 고려한 근의 일반적 형태는 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{A}_1 = a_1 + jb_1, \hat{A}_2 = -a_1 + jb_2, \quad (7)$$

$$\hat{A}_3 = -a_1 - jb_2, \hat{A}_4 = a_1 - jb_1$$

$$\hat{A}_1 = a_1 + jb_1, \hat{A}_2 = a_2, \hat{A}_3 = a_3, \hat{A}_4 = a_1 - jb_1 \quad (8)$$

특성방정식은 4차 방정식의 해법인 Bairstow's method⁽⁶⁾를 통해 수치적으로 풀이하였고 근의 형태가 일치함을 확인했다. 도출한 근을 이용하여 무한대 길이 보에서의 변위 응답을 정의한다. 식 (6)에서 유수의 정리(residue theorem)를 통해 무한대 구간의 적분을 수행하고 이를 식 (2)에 적용하면 보의 응답을 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} w(s,t) &= w_0 \tilde{w}(s) e^{i\omega t} \\ &= \begin{cases} \text{for } s > 0: \\ +8w_0 i e^{i\omega t} \left[\frac{e^{is\hat{A}_1}}{(\hat{A}_1 - \hat{A}_2)(\hat{A}_1 - \hat{A}_3)(\hat{A}_1 - \hat{A}_4)} \right. \\ \quad \left. + \frac{e^{is\hat{A}_2}}{(\hat{A}_2 - \hat{A}_1)(\hat{A}_2 - \hat{A}_3)(\hat{A}_2 - \hat{A}_4)} \right] \\ \text{for } s < 0: \\ -8w_0 i e^{i\omega t} \left[\frac{e^{is\hat{A}_3}}{(\hat{A}_3 - \hat{A}_1)(\hat{A}_3 - \hat{A}_2)(\hat{A}_3 - \hat{A}_4)} \right. \\ \quad \left. + \frac{e^{is\hat{A}_4}}{(\hat{A}_4 - \hat{A}_1)(\hat{A}_4 - \hat{A}_2)(\hat{A}_4 - \hat{A}_3)} \right] \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $s > 0$ 인 구간은 하중의 이동 이전, $s < 0$ 인 구간은 하중의 이동 이후를 나타낸다.

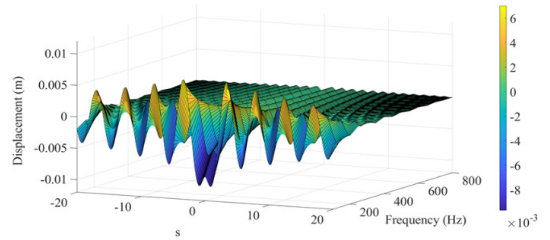
3.3 레일 변위 응답 도출

식 (9)에 의해 보 구조물의 변위 응답을 계산한 결과는 Fig. 4와 같다. 구조물 내에서 파동 전파에 따른 에너지 감쇠로 인해 고주파 응답은 거리가 멀어질수록 더욱 빠르게 감소한다. 주파수 대역 별 에너지 감쇠 폭은 고주파 대역에 비해 저주파 대역에서 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 하중이 작용하는 지점 ($s=0$)으로부터 멀리 떨어진 지점에 대해서는 저주파 응답의 영향이 상대적으로 크게 작용하게 된다. 또한 하중이 정지한 경우와 이동하는 경우를 비교해 보면 보에 작용하는 하중이 갖는 속도에 의해 하중이 작용하는 지점을 기준으로 이전과 이후의 응답 형태가 변화함을 알 수 있다.

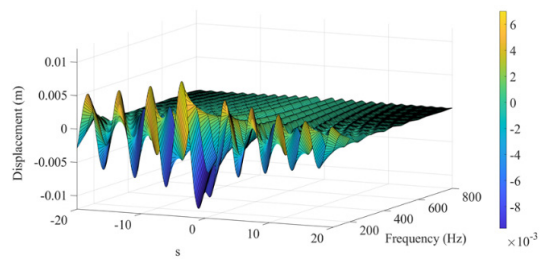
4. 고속철도 하중 분포에 따른 레일 응답 특성

4.1 고속철도 주행에 의한 레일 응답 도출

실제 고속철도의 주행 상황에서는 여러 대차에 포함되어 있는 차륜들을 통해 레일과 접촉하며 이동하중이 인가된다. 단일 조화 이동하중에 의한 레일의 변위 응답 계산 결과를 활용하면 다중 조화 이동하중의 복합적인 작용에 의한 레일의 응답 특성을 구할



(a) $v=0$ km/h



(b) $v=250$ km/h

Fig. 4 Derivation of displacement response through railway track modeling

수 있다. 이 연구에서는 고속철도에 의해 인가되는 개별 축 하중으로부터 레일의 특정 계측 지점에서 발생하는 변위 응답을 계산한 후, 각 변위 응답을 기반으로 식 (10)과 같이 Power 합을 도출했다. 또한 조화 이동하중에 의한 가진 주파수 대역을 확장하여 고속철도 차량의 하중 분포에 따른 레일의 응답 특성을 주파수 영역에서 비교하였다.

$$\sum_{k=1}^n w_k^2 = w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2 \tag{10}$$

(number of moving load axles)

4.2 동력집중식 및 분산식 열차의 이동하중에 의한 응답 특성 비교

동력집중식 열차와 동력분산식 열차는 동력원의 배치에 따라 서로 다른 하중 분포를 갖는다. 각 열차를 구성하고 있는 개별 차량의 하중 정보를 열차 내 배치 순서에 따라 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 동력집중식의 경우 양 끝에 위치한 차량이 동력차에 해당하며 동력분산식에서는 8개의 모든 차량에 동력이 분산 배치되어 있다. 하중은 해당 차량에 포함된 차축 별로 동일하게 분배된다고 가정하였고 Fig. 5에 표시한 위치에서 작용한다. 고속철도 차량의 하중 분포에 따른 레일 응답 특성 분석 결과는 Fig. 6과 같다. 동력집중식 열차와 동력분산식 열차 모두 변위 응답이 고주파 대역으로 갈수록 감소하는 형태를 보였다.

고속철도의 양 끝 차량에서 하중 분포가 큰 동력집중식 열차의 경우 저주파 대역 응답의 영향이 상대적으로 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 경향성은 300 km/h 이하의 전반적인 운행 속도 영역에 대하여 공통적으로 관찰되었다. 또한 이동하중 해석에 의한 결과를 두 열차의 실내소음 특성과 비교하기 위해 감소 구간에 대한 기울기를 정량적으로 계산하였다. 그 결과 실제 측정을 통해 취득한 실내소음과 이동하중 해석에 의한 응답 모두 동력집중식 열차가 동력분산식 열차에 비해 큰 응답 기울기로 감소하는 특성을 보이는 것으로 나타났다.

차체의 구조 진동은 고속철도의 실내소음을 유발하는 주요 원인으로 손꼽히며 진동 레벨과 실내소음의 유의미한 상관성에 대해 많은 연구가

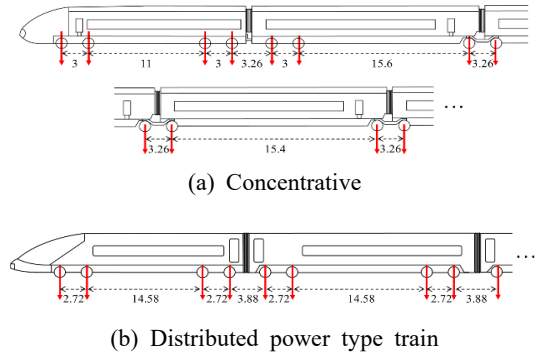


Fig. 5 Spacing information of the moving loads(unit: m)

Table 1 Axial load information of concentrative power type train

Car	1	2	3	4	5
F_0 [kN]	654	491	327	327	327
Car	6	7	8	9	10
F_0 [kN]	327	327	327	491	654

Table 2 Axial load information of distributed power type train

Car	1	2	3	4
F_0 [kN]	546	604	551	589
Car	5	6	7	8
F_0 [kN]	557	589	601	550

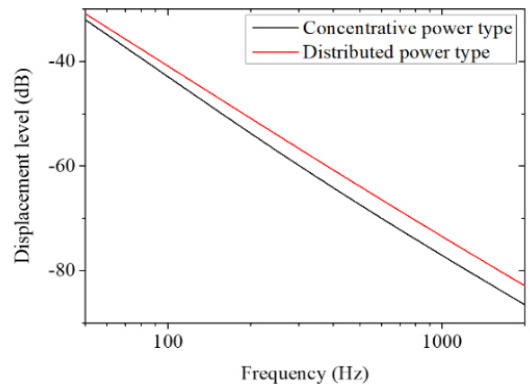
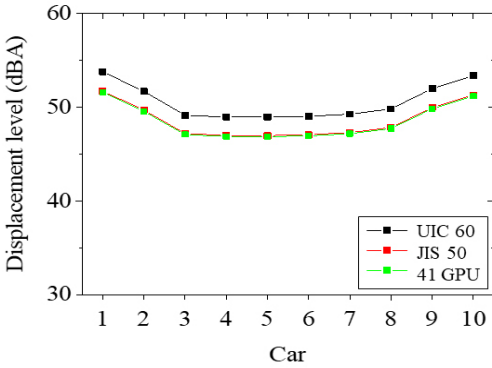
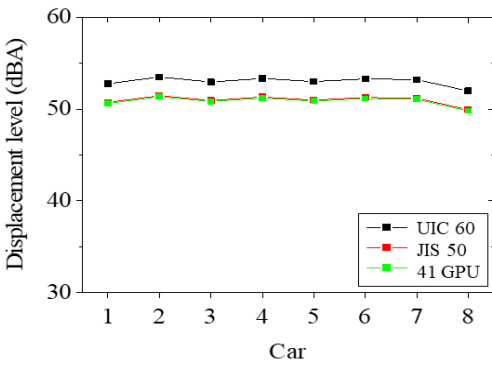


Fig. 6 The power summation results of the railway track displacement caused by the moving load at $v=250$ km/h



(a) Concentrative



(b) Distributed power type train

Fig. 7 Comparison of displacement levels for each car at $v=250$ km/h

진행되어 왔다^(7,8). 해당 결과를 통해 차체로 전달되는 궤도 진동이 높은 기여도를 가지고 실내소음 발생원으로 작용함을 해당 결과를 통해 확인할 수 있다.

4.3 고속철도 차량 별 이동하중에 의한 응답 레벨 비교

고속철도의 개별 차량을 대상으로 열차 전체로부터 전달되는 이동하중에 의한 응답 레벨 도출 결과를 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타내었다. 동력집중식 열차는 양 끝에 위치한 동력 차량에서의 응답 레벨이 상대적으로 높은 수준으로 나타났으며 동력분산식 열차는 모든 차량에서의 응답 레벨이 유사한 수준이었다. 이러한 결과는 JIS 50, 41 GPU 레일 모델의 제원을 적용하였을 때에도 동일했다. 고속철도의 차량 별 실내소음 수준을 예측한 선행연구 사례⁽⁹⁾에서도 동력집

중식 열차는 동력 차량에 위치한 운전실의 소음 레벨이 객실에 비해 높게 나타나 이동하중 해석을 통해 도출한 응답 특성이 실내소음 특성과 유사함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이 연구에서는 고속철도 운행 시 예측한 실내소음 신호를 기반으로 운행 속도에 따른 소음 레벨 및 주파수 특성 변화를 분석하였다. 동력집중식 열차와 동력분산식 열차 모두 저음역대 소음이 강하게 발생하였고 특히 동력분산식 열차의 경우 고주파 대역까지 넓게 소음이 분포하여 상대적으로 완만한 감소 기울기를 보였다. 고속철도가 일정한 속도로 직선 레일을 주행하고 있는 상황을 조화 이동하중이 작용하는 궤도 구조 시스템으로 단순 모델링하여 이동하중 해석을 통한 레일의 변위 응답을 도출하였다. 동력집중식 열차와 동력분산식 열차의 실제 하중 분포를 반영하여 변위 응답 기반의 에너지 변화 특성을 분석하였다. 응답 레벨의 감소 기울기를 수치적으로 계산하여 열차 종류 간 비교를 실시한 결과 실제 측정된 실내소음과 일치하는 양상을 보였다. 향후 궤도 시스템에 지지강성 및 감쇠를 추가하여 이동하중 해석 모델의 정확성을 높일 예정이다. 이를 통해 고속철도 실내소음에 대한 레일 변위 응답의 기여 정도를 확인할 수 있으며 운행 시 발생하는 소음의 관리 및 저감에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(RS-2022-0014-3396).

References

- (1) Licitra, G., Fredianelli, L., Petri, D. and Vigotti, M. A., 2016, Annoyance Evaluation due to Overall Railway Noise and Vibration in Pisa Urban Areas, Science of the Total Environment, Vol. 568, pp. 1315-1325.
- (2) Lee, C. H., Noh, Y. J., Kim, I. K. and Lee, B. C., 2019, A Comparative Study on the Noise Measurement Methods for Proper Monitoring of Railway Network

Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 821~827.

(3) Krylov, V. V., 2001, Noise and Vibration from High-speed Trains, Thomas Telford, London, UK.

(4) Raghunathan, R. S., Kim, H.-D. and Setoguchi, T., 2002, Aerodynamics of High-speed Railway Train, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 38, No. 6-7, pp. 469~514.

(5) ISO(International Organization for Standardization), Railway Applications - Acoustics - Noise Measurement Inside Railbound Vehicles, ISO 3381:2021.

(6) Baird, L., 1920, Applied Aerodynamics, Longmans, Green and Company, London, UK.

(7) Lee, C. and Kim, J., 2009, Comparison Analyzed the Interrelation of Carbody Vibrating Level and Interior Noise of KTX Vehicles, Proceedings of the KSME 2009 Fall Annual Meeting, pp. 1039~1042.

(8) Woo, K.-J. and Kim, S., 2008, A Study on the Reduction of Structure-borne Noise in a Train, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 6, pp. 519~523.

(9) Choi, S., Kim, J.-C., Lee, C.-W. and Moon, K.-H., 2003, An Interior Noise Analysis of KTX Vehicles on Various Operating Conditions, Proceedings of the KSR Conference, pp. 138~142.



Youngbeen Chung received her B.S. of Mechanical Engineering from Hanyang University in 2019. She is a Ph.D. course student in Acoustics and Vibration Lab at Hanyang University. Her research interests include wave analysis and vibration control with

fatigue analysis, signal processing of advanced structural elements, and AI technique application.



Kyunglae Gu received his B.S. degree in mechanical engineering from Hanyang University in 2021. He is currently pursuing an integrated master's and doctoral program. He is studying household appliances noise and vibration control, 3-dimensional vibration analysis and nonlinear vibration.



Seongwook Jeon received his B.S. degree in mechanical engineering from Hanyang University in 2021. He is currently pursuing an integrated master's and doctoral program. He is studying vehicle structure vibration and durability and analysis of damage according to the different structure.

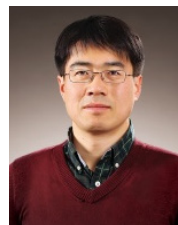


Gyuyoung Yi received his B.S. degree in naval architecture and ocean engineering from Chungnam University in 2022. He is currently pursuing an integrated master's and doctoral program. He is studying highspeed railway interior noise and vibration characteristic according mount position.



Sunghoon Choi received the B.S. degree in mechanical engineering from KAIST in 1990, and the M.S. and Ph.D. degrees in theoretical and applied mechanics from Northwestern University in 1992 and 1995, respectively. He joined the technical

staff of Samsung Advanced Institute of Technology and worked in the computational science and engineering group. Since 2002, he has been with Korea Railroad Research Institute, where he is involved in the development project of the high-speed train system. His research activities focus on structural acoustics and vibration, and he is currently working on identification and mitigation of noise and vibration of rail vehicles.



Junhong Park received his B.S. and M.S. from the Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST) in 1991 and 1993, respectively. He worked at the Samsung Electronics Co. Ltd. from 1993 to 1998. He received his Ph.D. from Purdue University in 2002.

He is currently a professor of Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interests include signal processing, wave analysis, and noise control for improving damping, or machine learning performance including mechanical issue.