

고속철도차량의 공력소음 측정 시험법 개발

Development of aerodynamic noise measurement method for high-speed trains

정민승,¹ 김재환,¹ 장형석,¹ 김종환,¹ 정철웅,^{2†} 이권기²

(Minseung Jung,¹ Jaehwan Kim,¹ Hyung-Suk Jang,¹ Jonghwan Kim,¹
Cheolung Cheong,^{2†} and Kwongi Lee²)

¹현대로템 주식회사, ²부산대학교 기계공학부

(Received December 6, 2023; revised January 4, 2024; accepted January 15, 2024)

초 록: 고속으로 주행하는 열차의 주변 유동에 의해 발생하는 공력소음은 실외소음과 실내소음에 모두 영향을 미친다. 본 연구는 열차표면의 압력섭동데이터를 통해 공력소음을 측정하고 실내소음에 영향을 미치는 성분을 정량적으로 평가하기 위한 시험법을 개발하고 분석하는 것이다. 실내소음을 정확히 평가하기 위해서는 취득한 표면 압력섭동 데이터에서 혼재되어 있는 압축성 압력섭동과 비압축성 압력섭동을 각각 분리하여 평가하는 것이 중요하다. 이는 두 압력섭동의 소음 전달 특성이 다르기 때문이다. 먼저 마이크론의 설치 길이와 간격을 결정하여 표면 압력섭동 데이터를 취득하였고, 파수-주파수 분석을 수행하여 비압축성 압력섭동과 압축성 압력섭동을 분리하여 음압 스펙트럼을 취득하였다. 마지막으로 전두부와 후두부에서 측정된 시험 결과값을 비교한 결과 전두부 표면 압력섭동이 후두부 압력섭동보다 더 큰 값을 확인하였다.

핵심용어: 고속열차, 공력소음, 파수-주파수 분석, 실내소음

ABSTRACT: Aerodynamic noise generated by the surrounding flow of a train traveling at high speed affects both outdoor and indoor noise. This study's goal is to develop a test method to measure and quantitatively evaluate aerodynamic noise through pressure perturbation data on the train surface. To accurately evaluate aerodynamic noise, it is important to separate and evaluate the compressive and incompressible pressure fluctuations mixed in the acquired surface pressure fluctuation data. This is because the noise transmission characteristics of the two pressure fluctuations are different. First, the installation length and interval of the microphone were determined to acquire surface pressure fluctuation data, and wavenumber-frequency analysis was performed to separate incompressible pressure fluctuation and compressible pressure fluctuation to obtain a sound pressure level spectrum. Finally, as a result of comparing the test results measured in the train head and tail, it was confirmed that the pressure fluctuation on the train head surface was greater than that on the tail.

Keywords: High-speed trains, Aerodynamic noise, Wavenumber-Frequency analysis, Interior noise

PACS numbers: 43.28.Ra, 43.60.Lq, 43.60.Gk

1. 서 론

철도차량의 소음은 휠/레일 접촉소음, 공력소음, 구동 소음, 에어컨 가동 소음 등 다양한 소음원에 의

해 발생한다. 이러한 소음은 외부로 방사되어 선로 주변의 주거 환경에 영향을 미치거나 실내로 전파되어 승객들에게 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 과거부터 철도차량에서 발생하는 소음성능에 대한

†Corresponding author: Cheolung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7460)



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구는 활발히 수행되어져 왔다. 과거에는 철도차량이 저속으로 주행할 때 주된 소음원으로 작용하는 휠/레일 접촉소음과 구동소음에 대해 집중적으로 연구가 수행되었다. 하지만 세계적으로 고속열차의 주행속도가 계속 증가하며 공력소음의 영향을 무시할 수 없게 되었다. 공력소음은 주행속도의 $50 \sim 60 \log V$ 비율로 증가하며, 일반적으로 300 km/h 이상으로 주행할 때 다른 소음원에 비해 공력소음이 지배적으로 작용한다고 알려져 있다.^[1] 따라서 최근에는 공력소음을 평가하고 저감하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. Thompson *et al.*^[2,3]은 고속열차의 대차, 전두부, 판토틀레프 등 다양한 부위에서 방사되는 공력소음을 Guo^[4]의 경험식을 적용하여 평가하는 방법을 제시하였다. 이후 현장 시험법, 풍동 시험법, 수치기법, 반경험적 방법을 포함한 전반적인 공력소음 평가방법에 대해 검토하였다. Paradot *et al.*^[5]은 실제 차량의 축소모델을 제작하여 무향풍동 시험기와 마이크로폰 어레이 사용하여 방사되는 공력소음을 측정하고, 수치해석 결과 비교를 통해 수치기법의 유효성을 검증하였다. 검증된 수치기법을 적용하여 전두부 형상을 변경한 모델에 대해 수치해석을 수행하여 전두부의 형상이 공력소음에 미치는 영향을 분석하였다. Yu *et al.*^[6,7] FW-H기법을 적용하여 각각 고속열차의 판토틀레프와 대차에서 방사되는 공력소음을 예측하여 판토틀레프의 공력소음은 대부분 $200 \text{ Hz} \sim 5 \text{ kHz}$ 의 중고주파 범위 내에서 광대역 성분으로 존재하고, 대차 페어링을 장착할 경우 최대 6.6 dB 의 소음을 감소할 수 있음을 확인하였다.

하지만 대부분의 연구들은 축소 모델을 사용하거나 외부로 방사되는 공력소음에 대해 수행되었다. 고속열차의 경우 장거리 이동을 위한 교통수단으로서 실내에 탑승하는 승객들의 편안한 이동을 위해 실내소음이 반드시 고려되어야 한다. Lee^[8]는 고속열차의 실제형상에 대해 대외류모사기법을 적용한 유동 수치해석을 수행하여 열차 표면의 압력섭동을 예측하였으며, 파수-주파수 분석기법을 통해 압축성 성분과 비압축성 성분을 분리하여 분석한 바 있다. 본 연구는 상기 연구의 후속 연구로서 실제 차량을 대상으로 현장시험을 수행하여 고속열차에 특화

된 공력소음 측정기법을 개발하고 측정결과를 분석하고자 한다. 정확한 파수-주파수 분석 수행을 위해 마이크로폰의 설치 간격별 시험을 수행하여 효율적인 간격을 선정하였다. 이후 고속철도차량의 다양한 표면을 대상으로 시험을 수행하여 결과를 분석하였다.

II. 공력소음 측정

2.1 측정 대상

본 연구의 공력소음 측정에 사용된 고속열차는 EMU-320 모델로 Fig. 1와 같다. EMU-320 열차는 동력 분산식 열차로 TC1, TC2 차량을 제외하고는 모두 동력차로 구성되어 있다. 열차는 1편성이 총 8량으로 구성되어 최대 320 km/h 로 주행가능하다. 또한 주행방향에 따라 M'1, M'2에 설치되어 있는 판토틀레프 한 개가 집전선에 연결되어 차량에 전력을 공급한다.

2.2 시험 방법

시험은 Fig. 2의 개략도 순서에 따라 EMU-320 차량이 300 km/h 의 속도로 광주 송정역에서 정읍역을 왕복 주행할 때 수행하였다.

관심주파수 대역은 고속철도차량의 소음원이 $1,000 \text{ Hz}$ 이내에 존재하는 특성^[9,10]을 고려하여 $31.5 \text{ Hz} \sim 1,000 \text{ Hz}$ 대역으로 선정하였다. 시험 데이터는 열차가 실제 영업운행중인 선로 위를 주행할 때 10s간의 데이터를 취득하였으며, 이 때 열차의 속력은 평균 300 km/h 이다. 측정 지점은 Fig. 3와 같이 공력소음이 강하게 발생하는 전두부(TC1), 후두부(TC2)을 대상으로 총 4지점을 선정하였으며, 세부 시험정보는 Table 1에 나타내었다.

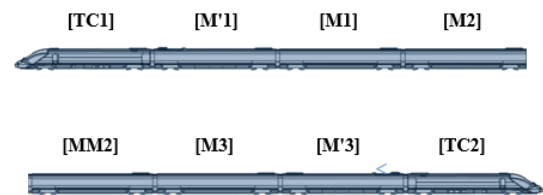


Fig. 1. (Color available online) Train composition of the measurement target EMU-320.

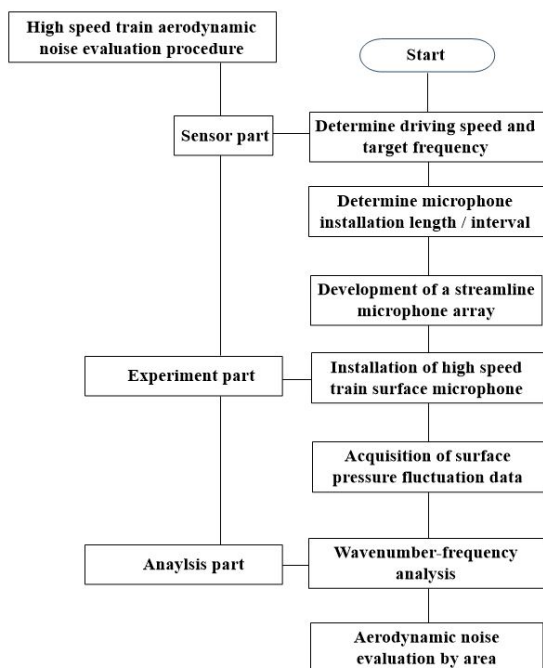


Fig. 2. Schematic diagram of aerodynamic noise test.

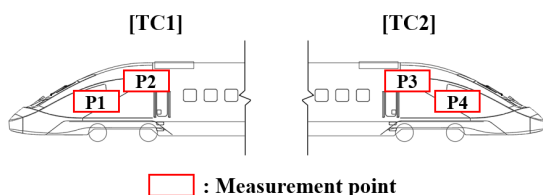


Fig. 3. (Color available online) Aerodynamic noise test measurement point.

Table 1. Details on the aerodynamic noise test.

Target model	EMU - 320
Operating speed	300 km/h
Measuring station	Gwangju Stn. - Jeongeup Stn.
Data Acquisition	Simcenter SCADAS Mobile
FFT analyzer	LMS Testlab
Surface microphone	PCB 130B40
Sampling frequency	5,120 Hz
Target frequency	31.5 Hz ~ 1,000 Hz
Measurement time	10 s

2.3 마이크로폰 설치

마이크로폰을 차량 표면에 일정하게 부착하기 위해 Fig. 4와 같이 마이크로폰 어레이를 제작하여 시험을 수행하였다. 여기서 마이크로폰 총 설치 길이 (L)는 설치된 첫 번째 마이크로폰 중심으로부터 마

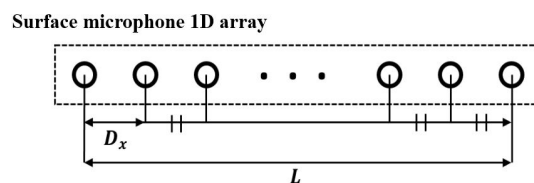


Fig. 4. Definition of microphone installation length (L) and installation interval (D_x).

지막 마이크로폰 중심까지의 거리를 의미하며, 설치 간격(D_x)은 서로 인접한 두 개의 마이크로폰 중심간의 거리를 의미한다.

본 연구에서는 공력 소음원 특성을 분석하고자 하는 영역에 설치된 구조물 사이에 마이크로폰 어레이를 부착할 수 있는 최대 길이 40 cm를 마이크로폰 총 설치 길이로 선정하여 수행하였다. 또한, 마이크로폰 설치 간격은 마이크로폰 총 설치 길이 내에 설치되는 마이크로폰 개수를 결정짓는 변수로, 최대 관심주파수에 해당하는 파수 영역까지의 신호를 취득하기 위한 마이크로폰 최대 설치 간격은 Eq. (1)을 통해 계산가능하다.

$$D_{x,max} = \frac{1}{2k_{a,max}}, \quad (1)$$

여기서 k 는 파수를 의미하며, Eq. (2)를 통해 정의된다.

$$k = \frac{f}{c \pm U}, \quad (2)$$

여기서 f 는 주파수, c 는 음속 그리고 U 는 평균 유속을 의미한다. Eqs. (1)과 (2)에 시험조건을 적용하면 마이크로폰 최대 설치 간격이 약 12 cm임을 확인할 수 있다. 마이크로폰의 설치 개수에 따라 시험 비용이 크게 증가하기 때문에 마이크로폰 설치 길이 내에 마이크로폰을 최대 설치 간격보다 작거나 같게 설치하여 최소한의 마이크로폰으로 유효한 데이터를 취득하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 공력소음을 취득하기 위한 효율적인 마이크로폰 개수를 확인하기 위해 마이크로폰 설치 간격이 2 cm, 4 cm, 8 cm 그리고 10 cm인 경우에 대해 시험을 각각 수행하였다.

III. 파수-주파수 분석

고속열차 표면에서 취득한 표면압력섭동 성분에는 밀도의 섭동없이 직접 유도되어 유속의 약 70%~80%로 전파하는 비압축성 압력섭동과 음향파로도 불리는 압축성 압력섭동이 혼재되어 있다. 그 중 비압축성 압력섭동은 구조기인 소음으로 작용하고, 압축성 압력섭동은 공기기인 소음으로 작용하여 서로 다른 전달 경로로 열차 실내 소음에 기여한다. 하지만 구조기인 소음과 공기기인 소음을 저감하는 방법이 다르기 때문에 압축성, 비압축성 성분을 분리하여 각 성분들에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

일반적으로 압축성 압력섭동은 비압축성 압력섭동에 비해 매우 작기 때문에 구분이 어렵다. 하지만 두 성분의 분산관계를 통해 계산하면 두 성분의 파수 차이가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 시간-공간에 따른 표면 압력 섭동데이터를 파수-주파수 영역으로 변환하여 분석하면 전파 속도에 따른 각각의 압력섭동을 분리하여 관측할 수 있다. 비압축성 성분과 압축성 성분의 분산관계는 Eqs. (3)~(4)와 같다.

$$k_c = \frac{\omega}{U}, \quad (3)$$

$$k_a = \frac{\omega}{c}, \quad (4)$$

여기서 아래첨자 c 는 비압축성, a 는 압축성을 의미한다.

3.1 파수-주파수 분석 기법

시간-공간 영역의 신호를 파수-주파수 영역으로 변환하는 2차원 푸리에 변환(2D Fourier transform)식은 Eq. (5)와 같다.

$$F(\omega, k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \omega_{kl} f(t, x) e^{-j(\omega t - kx)} dx dt. \quad (5)$$

상기 Eq. (5)을 수치적으로 계산하기 위해 이산화하면 Eq. (6)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{m,n} &= S(m\Delta f, n\Delta k_x) \\ &= \frac{1}{N_t N_x} \sum_{k=0}^{N_t-1} \sum_{l=0}^{N_x-1} \omega_{kl} P_{kl} e^{-2\pi j \left(\frac{km}{N_t} - \frac{ln}{N_x} \right)}, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 Δf 는 주파수 분해능, Δk_x 는 파수 분해능 그리고 ω_{kl} 은 Hanning window를 의미하며, 각각의 정의는 Eqs. (7)~(9)와 같다.

$$\Delta f = \frac{1}{(N_t - 1) \times D_t}, \quad (7)$$

$$\Delta k_x = \frac{1}{(N_x - 1) \times D_x}, \quad (8)$$

$$w_{kl} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi \sqrt{k^2 + l^2}}{\sqrt{(N_t - 1)^2 + (N_x - 1)^2}} \right) \right]. \quad (9)$$

Eq. (6)을 통해 파수-주파수 영역으로 변환한 압력 섭동값은 Eq. (10)을 통해 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)을 계산하여 사용하였다.

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}, \quad (10)$$

여기서 P 는 평균 음압, P_{ref} 는 기준음압을 의미한다. 공기 중 소리인 경우 기준음압은 20 μ Pa이다.

3.2 파수-주파수 분석 결과

이산화식을 통해 전두부(TC1)의 P1 지점에서 4cm 간격으로 측정된 시간-공간 데이터를 파수-주파수 영역으로 변환한 결과는 Fig. 5와 같으며, 파수-주파수 선도에서의 기울기는 압력파의 전파속도를 의미한다. 음속이 일정한 경우 압축성 성분은 Acoustic cone($c_0 - U \leq \omega/k_a \leq c_0 + U$) 내에 존재하고, 비압축성 성분은 그 외의 영역에 존재한다. 파수-주파수 변환 결과를 통해 비압축성 성분은 평균유속의 약 80%의 속도로 전파되는 되는 것이 확인되었으며, 압축성 성분은 Acoustic cone의 $c_0 - U$ 기울기 선상에서 강하게 발생하였다. 따라서 파수-주파수 변환을 통해 압축성 성분과 비압축성 성분이 명확히 구분됨

을 확인하였다.

Acoustic cone내의 성분들을 압축성 성분으로, 그 외 영역의 성분들을 비압축성 성분으로 분리하여 음압스펙트럼으로 비교한 결과는 Fig. 6와 같다. 음압스펙트럼을 통해 비압축성 압력섭동이 압축성 압력섭동에 비해 더 큼을 확인하였다. 차체 외관을 이루고 있는 구조를 평판으로 본다면 압력섭동 크기뿐만 아니라 전파속도 또한 영향을 미치며, 일반적으로 외부유동에 의한 실내소음은 저주파 영역에서는 비압축성 압력섭동이 고주파 영역에서는 압축성 압력섭동의 기여도가 크다고 알려져 있다. 추후 1편성 8량 전체에 대한 시험을 수행하고, 비압축성 압력섭동과

압축성 압력섭동에 의한 고속열차 내부 소음 기여도 분석 및 평가에 대해 후속 연구를 수행할 예정이다.

IV. 공력소음시험 결과

4.1 마이크로폰 설치 간격별 시험 결과

전두부(TC1)의 P1지점을 대상으로 마이크로폰 설치 간격을 변경하며 수행한 실험 결과는 Table 2와 같다. 실험 결과 압축성 성분과 비압축성 성분이 혼재하는 전체 성분의 경우 마이크로폰을 8 cm로 설치하여도 유효한 데이터를 취득할 수 있음을 확인하였다. 하지만 파수-주파수 분석을 통해 분리한 압축성, 비압축성 성분들을 비교한 결과 설치간격을 최소 4 cm로 설치하여야지만 유효한 데이터를 취득할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 마이크로폰 설치 간격을 4 cm로 선정하고, 향후 수행하는 P2~P4지점의 결과를 분석하였다.

4.2 설치 부위별 결과 분석

본 절에서는 마이크로폰 설치 간격을 4 cm로 하여 P1~P4 지점에 대해 수행한 시험 결과에 대해 파수-주파수 분석을 수행하여 성분을 분리하였다. 비압축성 압력섭동과 압축성 성분이 혼재된 전체 성분과 분

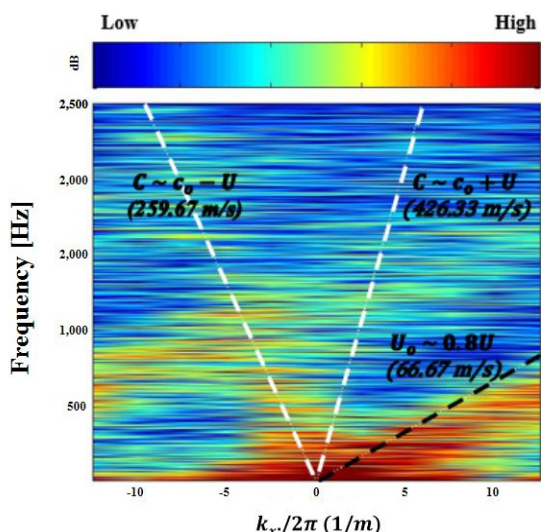


Fig. 5. (Color available online) Result of wavenumber and frequency analysis for point P1.

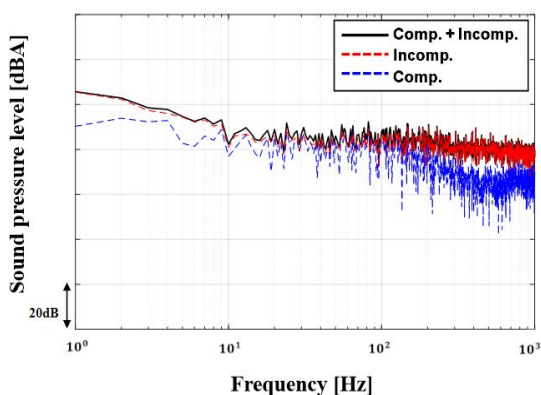


Fig. 6. (Color available online) Sound pressure level of total, compressible, and incompressible pressure for point P1.

Table 2. Overall sound pressure level comparison of total, compressible, and incompressible pressure by surface microphone installation interval.

dB	Comp. + Incomp.	Comp.	Incomp.
2 cm	A	B	C
4 cm	A	B	C
8 cm	A	B+1.5	C-0.4
10 cm	A-0.7	B+1.4	C-1.2

Table 3. Overall sound pressure level comparison of total, compressible, and incompressible pressure by measurement point.

dB	Comp. + Incomp.	Comp.	Incomp.
P1	A	B	C
P2	A-0.2	B-0.4	C-0.2
P3	A-4.6	B-3.2	C-5.0
P4	A-2.1	B-0.9	C-2.4

리한 압축성 성분, 비압축성 성분을 비교하여 Table 3에 나타내었다.

전체적인 음압레벨을 확인한 결과 전두부에 해당하는 P1, P2지점의 소음이 후두부에 해당하는 P3, P4 지점에 비해 모든 성분이 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 압축성 성분의 경우 전두부가 후두부에 비해 최대 3 dB 이상 더 큼을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 고속열차가 주행할 때 주변 유동에 의해 발생하는 공력 소음원을 분리하여 각 소음원의 정량적 평가를 위한 시험법을 개발하였다. 먼저, 정확한 공력소음 측정을 위해 관심주파수 대역을 선정하고, 표면 압력 마이크로폰 설치 조건을 선정하여 시험을 수행하였다. 이후 취득한 표면 압력 섭동 데이터에 혼재되어 있는 압축성 압력섭동과 비압축성 압력섭동을 분리하기 위해 파수-주파수 분석을 수행하였다. 그 결과 평균유속의 80%의 속도로 전파하는 비압축성 압력섭동과 음속과 평균유속의 합으로 전파하는 압축성 성분이 잘 분리됨을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 유효한 파수-주파수 분석 결과를 취득하기 위한 마이크로폰 개수를 설치 간격을 변경한 4가지 경우에 대해 추가적으로 분석하였고, 그 결과 마이크로폰을 최소 4 cm로 설치할 때 유효한 데이터를 취득할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 공력소음이 강하게 발생하는 열차의 전두부와 후두부를 대상으로 수행한 P1~P4의 시험결과를 분석하였으며, 전두부가 후두부에 비해 유동에 의한 표면 압력섭동의 크기가 더 큼을 확인하였다.

감사의 글

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

References

1. C. Mellet, F. Létourneaux, F. Poisson, and C. Talotte, "High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution," J. Sound

Vib. **293**, 535-546 (2006).

2. D. J. Thompson, M. G. Smith, and F. Coudret, "Application of a component-based approach to modelling the aerodynamic noise from high-speed trains," Proc. 10th Int. Workshop on Railway Noise, 427-435 (2012).
3. D. J. Thompson, E. L. Iglesias, X. Liu, J. Zhu, and Z. Hu, "Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains," Int. J. Rail Transp. **3**, 119-150 (2015).
4. Y. Guo, "Empirical prediction of aircraft landing gear noise," NASA Tech. Rep., CR-2005-213780. Chap. 4, 2005.
5. N. Paradot, E. Masson, F. Poisson, R. Grégoire, E. Guilloteau, H. Touil, and P. Sagaut, "Aero-acoustic methods for high-speed train noise prediction," Proc. WCRR, 1-8 (2008).
6. H.-H. Yu, J.-C. Li, and H.-Q. Zhang, "On aerodynamic noises radiated by the pantograph system of high-speed trains," Acta Mech Sin ACTA MECH SINICA-PRC. **29**, 399-410 (2013).
7. J. Zhu, *Aerodynamic noise of high-speed train bogies*, (Ph. D. thesis, University of Southampton, 2015).
8. S. J. Lee, C. Cheong, B. Kim, and J. Kim, "Comparative analysis of surface pressure fluctuations of high-speed train running in open-field and tunnel using LES and wavenumber-frequency analysis," Appl. Sci. **11**, 11702 (2021).
9. J. Zhang, X. Xiao, X. Sheng, C. Zhang, R. Wang, and X. Jin, "SEA and contribution analysis for interior noise of a high speed train," Appl. Acoust. **112**, 158-170 (2016).
10. J. Zhang, X.-B. Xiao, X.-Z. Sheng, R. Fu, D. Yao, and X.-S. Jin, "Characteristics of interior noise of a Chinese high-speed train under a variety of conditions," J. Zhejiang Univ.: Sci. A. **18**, 617-630 (2017).

저자 약력

▶ 정민승 (Minseung Jung)



2020년 2월 : 울산대학교 기계공학 학사
2022년 8월 : 부산대학교 기계공학 석사
2022년 11월 ~ 현재 : 현대로템 연구원

▶ 김 재 환 (Jaehwan Kim)

2015년 8월 ~ 현재: 현대로템 책임연구원



▶ 장 형 석 (Hyung-Suk Jang)

2009년 2월: 한양대학교 토목공학 학사
2016년 2월: 한양대학교 건축공학 박사
2016년 11월 ~ 현재: 현대로템 책임연구원



▶ 김 중 환 (Jonghwan Kim)

2008년 2월: 인제대학교 기계공학 학사
2011년 2월: 성균관대학교 기계공학 석사
2011년 1월 ~ 현재: 현대로템 책임연구원



▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)

1997년 2월: 서울대학교 기계항공공학 학사
1999년 2월: 서울대학교 기계항공공학 석사
2003년 2월: 서울대학교 기계항공공학 박사
2003년 3월 ~ 2004년 8월: 서울대학교 BK21
박사후 연구원
2004년 9월 ~ 2005년 5월: Research Associate,
ISVR, University of Southampton
2005년 6월 ~ 2006년 2월: 한국표준과학
연구원, 선임연구원
2006년 3월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학부
교수



▶ 이 권 기 (Kwongi Lee)

2019년 2월: 부산대학교 기계공학 학사
2021년 2월: 부산대학교 기계공학 석사
2021년 9월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학
박사과정

