

압축성 대와류모사를 이용한 고속열차의 공력 및 공력소음의 수치적/실험적 분석

Numerical and experimental analysis of aerodynamics and aeroacoustics of high-speed train using compressible Large Eddy Simulation

이권기,¹ 정철웅,^{1,2†} 김재환,³ 정민승³

(Kwongi Lee,¹ Cheolung Cheong,^{1,2†} Jaehwan Kim,³ and Minseung Jung³)

¹부산대학교 기계공학부, ²부산대학교 첨단냉동공조에너지센터, ³현대로템

(Received December 14, 2023; revised January 4, 2024; accepted January 16, 2024)

초 록: 기술 발전에 힘입어 고속열차의 운항속도는 증가하고 있으며, 고속열차 외부 유동장으로부터 발생하는 공력 소음은 설계 단계에서 매우 중요한 고려 대상이 되어왔다. 이러한 고속열차의 유동기인소음을 정확하게 예측하기 위해서는 근거리 음향장에서 고해상도의 음원 발생과 원거리 음향장에서 수치적 소산이 적은 소음 전파가 요구된다. 이는 실제 고속열차의 구성요소 별로 시공간 스케일을 모두 적절하게 고려할 수 있는 수치격자 및 시간해상도가 동반되어야 한다. 이러한 도전점을 극복하기 위해, 본 연구는 실제 크기 및 실제 운행속도의 고속열차 5차량의 외부 유동장 및 음향장을 3차원 압축성 대와류모사(Large Eddy Simulation, LES) 기법을 이용하여 동시 계산하였다. 수치해석의 검증에 위해 벽면압력섭동 측정 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. Ffowcs Williams and Hawkings 방정식을 이용하여 고속열차로부터 방사되는 음향파위를 예측하고 주행속도간 결과를 비교분석하였다. 본 연구는 고속열차의 공력 소음 발생 메커니즘 분석을 바탕으로 한 소음 저감에 기여할 것으로 사료된다.

핵심어: 고속열차, 유동기인소음, 공력소음, 외부방사소음, 대와류모사

ABSTRACT: Due to technological advances, the cruising speed of high-speed trains is increasing, and aerodynamic noise generated from the flow outside the train has been an important consideration in the design stage. To accurately predict the flow-induced noise, high-resolution generation of sound sources in the near field and low-dissipation of sound propagation in the far field are required. This should be accompanied by a numerical grid and time resolution that can properly consider both temporal and spatial scales for each component of the real high-speed train. To overcome these challenges, this research simultaneously calculates the external flow and acoustic fields of five high-speed train cars of real-scale and at operational running speeds using a three-dimensional unsteady Large Eddy Simulation technique. To verify the numerical analysis, the measurements of the wall pressure fluctuation and numerical results are compared. The Ffowcs Williams and Hawking equation is used to predict the acoustic power radiated from the high-speed train. This research is expected to contribute to noise reduction based on the analysis of the aerodynamic noise generation mechanism of high-speed trains.

Keywords: High-speed train, Flow-induced noise, Aeroacoustics, External radiated noise, Large eddy simulation

PACS numbers: 43.28.Py, 43.28.Ra

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

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

(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7640)



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.

I. 서론

국제적으로 과학과 공학 기술의 발전이 점차 가속되며, 인간의 윤택한 삶을 확장시키기 위해 다양한 분야에서 노력이 있어왔다. 특히, 교통수단의 발전은 과거로부터 주된 관심사 중 하나였으며, 그중 고속열차는 1964년 일본의 신칸센의 최초 도입 이후 고속화 및 안락함을 위해 지속적인 연구가 수행되어져 왔다.

고속열차의 고속화가 요구됨에 따라, 성능 측면에서의 연구 및 최적화는 다수 진행되었다. 그러나, 고속열차의 주행속도가 증가하게 되며 기존의 전통적인 고속열차에서 주요 소음원이었던 열차바퀴와 레일 사이의 접촉 및 상호작용에 의해 발생하는 구름소음에 비해서, 고속열차 주변부를 흐르는 외부 유동에 의해 발생하는 유동소음의 소음 기여도가 더 커지게 된다.^[1] 특히, 300 km/h의 주행속도를 기점으로 유동소음의 전체 소음에 대한 기여도가 가장 커지게 되며, 이러한 유동소음 발생 메커니즘 분석 및 저감은 고속열차의 고속화를 위한 주요 해결 과제로 부상하였다.

고속열차의 경우, 비용적인 이유로 인해 실험보다는 전산유체역학 등을 활용한 설계단계에서의 소음 저감이 효율적이지만, 그럼에도 불구하고 실제 크기의 고속열차를 수치해석을 통해 구현하는 것은 여전히 도전적이므로, 축소모델을 대상으로 수치해석을 수행하고 이를 바탕으로 한 연구가 다수 이뤄졌다.^[2-4] 또한 고속열차의 전체 형상이 아닌 공력소음 발생에 기여도가 높다고 알려진 pantograph, bogie 등의 일부 형상만에 대한 연구도 다수 이뤄졌다.^[5-8] 실제 크기의 열차에 대한 연구는 소수 이뤄졌는데, 주로 고속열차의 전두부 및 후두부, 그리고 중간차량까지 총 3량 정도를 선정하여 구성하고 이에 대해 연구가 이뤄지기도 하였다.^[9] 또한 전통적인 Navier-Stokes 방정식이 아닌 입자 충돌 방정식에 입각한 Lattice Boltzmann Method(LBM)을 활용하여 실제 크기의 4~5차량에 대해 공력 및 소음 최적화를 수행한 연구^[10,11]가 있으나, 구체적인 공력소음원 분석에 대한 연구는 아직까지 미비한 실정이다.

본 연구는 차세대 고속열차의 고속화를 위해, 3차

원 비정상 압축성 대와류모사(Large Eddy Simulation, LES) 기법을 활용하여 실제 크기의 고속열차 5량으로 구성된 모델에 대해서 개활지 주행 시 고속열차의 공력 및 공력소음 분석을 수행하였다. 고속열차 주변 유동장 및 음향장을 동시 계산하였으며, 실험을 통해 측정된 벽면압력 스펙트럼을 수치결과와 비교하여 검증하였다. 고속열차의 공력 및 공력소음 분석을 위해 각 차량별 항력 및 양력을 비교 및 분석하였다. 또한 Ffowcs Williams and Hawkins 방정식을 이용해 고속열차 주변의 수음점에서 음압을 계산하고, 이를 이용해 음향 파워를 계산하여 비교 및 분석하였다.

II. 연구 기법

본 연구는 개활지 주행시 고속열차의 외부유동장 및 음향장의 동시 해석을 목표로 하며, 근음장에서 유동 소음원의 모사를 위해 속도장과 압력장 뿐만 아니라 밀도장까지 정확히 예측하기 위해 고정밀 수치기법인 3차원 비정상 압축성 대와류모사 기법을 사용하였다. 고해상도의 수치격자를 이용하여 시간 및 공간 영역에서 모두 2차 정확도의 차분기법을 적용하였다. 비투과성 Ffowcs Williams and Hawkins 방정식을 사용하여 수음점에서의 음압을 예측하고, 이를 이용하여 음향파워를 예측하였다. 이는 상용 프로그램인 ANSYS Fluent V22.1을 통해 구현되었다. 또한 수치해석 결과의 검증을 위해 실험을 통해 측정된 벽면압력 스펙트럼을 비교하였다.

2.1 대와류모사

본 연구에서 이용한 3차원 비정상 압축성 대와류모사 기법의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{x_j}(\rho u_j h) \\ &= u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + q_H, \end{aligned} \quad (3)$$

이때 ρ 는 밀도를, u_i 는 속도를, p 는 압력을, τ_{ij} 는 응력을, e 는 전에너지를, h 는 전엔탈피를, T 는 온도를, k 는 열전도계수를, q_H 는 열원을 의미한다. Eqs. (1)~(3)은 유한체적법을 이용하여 수치계산되었으며, Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity(WALE) 아격자 모델을 이용하였다.

2.2 Ffowcs Williams and Hawking 방정식

Ffowcs Williams and Hawkins(FW-H) 방정식이 외부 방사소음을 예측하기 위해 사용되었으며, 이는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & 4\pi p'(x, y) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{Q(y, \tau)}{r|1-M_r|} dS(y) \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{F_i(y, \tau)}{r|1-M_r|} dS(y) \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, \tau)}{r|1-M_r|} dy, \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$Q = [\rho(u'_i + U_i) - \rho_0 U_i] \hat{n}_i, \quad (5)$$

$$F_i = [\rho u'_i (u'_j + U_j) + p \delta_{ij}] \hat{n}_i, \quad (6)$$

$$T_{ij} = \rho u'_i u'_j + [(p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0)] \delta_{ij}. \quad (7)$$

이 때 x, y 는 수음점과 소음원의 위치를, r 는 수음점과 소음원 사이의 거리를, t, τ 는 시간과 지연시간을, M_r 은 소음원에서 수음점 방향으로의 마하수를, c 는 음속을 의미한다. 상첨자 '는 섭동값을, 하첨자 0은 평균값을 의미한다. δ_{ij} 는 크로네커 델타를, \hat{n} 은 적분면에서의 수직방향 벡터를 의미한다.

낮은 마하수의 유동장을 예측할 경우, Eq. (4)의 우항에서 3번째 항으로 표현되는 사중극자 소음원의 기여도는 무시 가능하다. 또한 소음 예측을 위해서 고속열차의 표면을 비투과성 적분면으로 계산하였

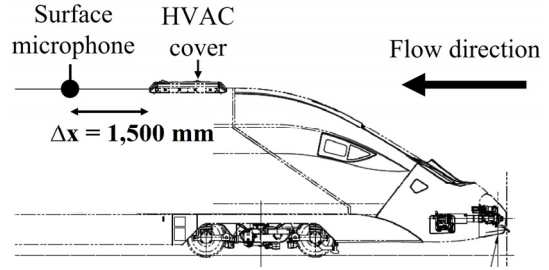


Fig. 1. Location of surface microphones.

으므로 Eq. (4)의 우항에서 1번째 항으로 표현되는 단극자 소음원의 기여도 또한 무시 가능하다. 그러므로 본 연구에서는 쌍극자 소음원을 공력소음예측에 지배적으로 고려하였다.

2.3 벽면압력섭동 측정

수치해석 결과의 검증 및 외부 방사소음 계산을 위한 비투과성 FW-H 방정식을 이용하였다. 적분면에 포함되는 전두부 차량의 벽면에, Fig. 1과 같이 HVAC cover 후류영역에 ICP surface microphone을 설치하여 벽면압력섭동을 측정하였다. HVAC cover로부터 1,500 mm 간격만큼 이격시켜 surface microphone을 설치하였으며, 샘플링 주파수를 5,120 Hz로 하여 총 5 s동안 소음신호를 측정하였다. 현시점의 대한민국 철도 사정 상, 300 km/h 이상의 주행이 가능한 구간이 부족하므로, 본 연구에서는 300 km/h의 주행 속도에서만 벽면압력섭동의 측정을 수행하였다.

III. 대상 모델 및 해석 영역

본 연구는 차세대 고속열차 모델인 Electric Multiple Unit-320(EMU-320)을 대상 모델로 하며, 총 8량 편성 중 주요 공력소음원으로 알려진 HVAC cover, pantograph, bogie, 그리고 intercoach 등을 포함한 실제 크기의 5량을 선정하여 Fig. 2(a)와 같이 구성하였다. 선정된 5량 편성은 전두부부터 순서대로 TC1, M1, M3, M3, 그리고 TC2로 구성하였다.

개활지 주행시 고속열차의 외부 유동장 및 음향장을 동시 계산하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 수치영역을 구성하였다. 실제 고속열차의 주행은 바닥면과 레일이 고정되고 고속열차가 이동하지만, 본 연구에서는

고속열차의 주행을 모사하기 위해 변환을 이용하여 열차는 고정하고 경계조건에 유속조건을 부여하였다. 입구, 측면, 상단면에는 *pressure far-field* 조건을, 출구에는 *pressure outlet* 조건을, 그리고 바닥면과 레일에는 *moving wall* 조건을 부여하였다. 본 연구는 차세대 고속열차의 320 km/h 및 370 km/h의 주행속도를 대상으로 하므로, 이와 동일한 속도 및 압력 값을 경계조건에 부여하였다.

본 연구는 고속열차 주행시 외부 유동장 및 음향장의 동시계산을 수행하기 위해, Fig. 3과 같이 수치격자를 구성하였다. 본 연구의 대상주파수는 1,000 Hz이며, 시간간격은 대상주파수를 충분히 해상할 수 있도록 1/10,000s로 선정하였다. 대상주파수와 주

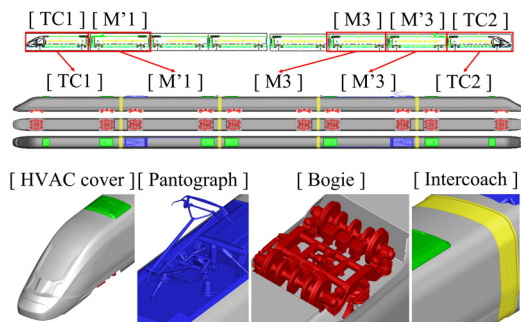


Fig. 2. (Color available online) Geometries of target model and components.

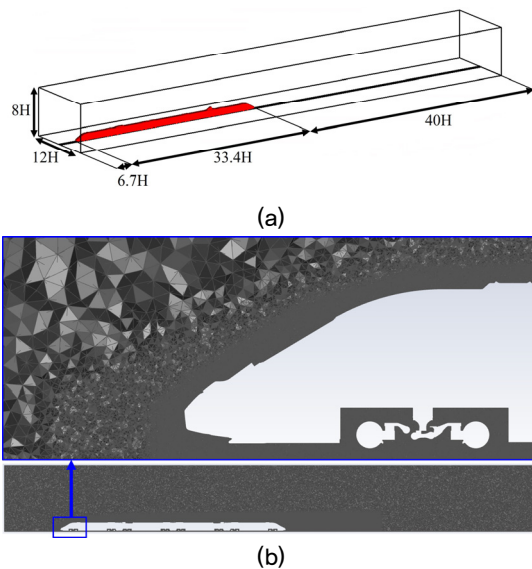


Fig. 3. (Color available online) Computational domain: (a) dimensions ($H = 4.18$ m); (b) grids on sectional plane.

행속도인 370 km/h와 320 km/h를 고려하여 *points per wavelength*를 10으로 하여 표면격자 및 체적격자의 최대 크기를 지정하였다. 또한 대외류모사 기법이 벽면 경계층 유동을 제대로 모사할 수 있도록 벽면 y^+ 가 1 이하가 되도록 13겹의 *prism layer* 수치격자를 이용하였다. 체적격자는 총 5억 4천만 개 가량으로 구성하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 외부 유동장 및 음향장

3차원 비정상 압축성 대외류모사 기법의 경우, 유

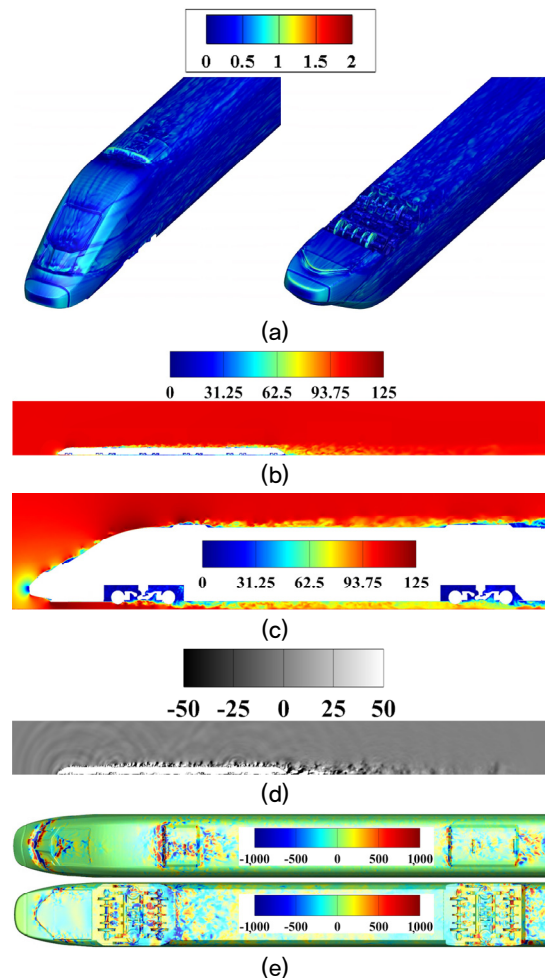


Fig. 4. (Color available online) Instantaneous flow fields of high-speed train running 370 km/h: (a) wall y^+ distribution of TC1; (b) velocity; (c) velocity around TC1; (d) pressure fluctuation; (e) wall pressure fluctuation of TC1 on top view and bottom view.

동구조를 수립시키는데 요구되는 수치비용이 크게 발생하므로, 먼저 3차원 정상 압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 $k-\omega$ SST 난류모델을 적용한 수치해석을 먼저 수행하였으며, 이를 3차원 비정상 압축성 대외류모사 기법의 초기값으로 이용하였다.

다음으로 3차원 비정상 압축성 대외류모사 기법을 이용하여 유동해석을 수행하였고, 유동장이 수립한 이후의 수치해석 결과를 Fig. 4와 같이 도시하였다.

Fig. 4(a)와 같이 전체 차량 중 벽면 경계층이 가장 얇을 것으로 예상되는 전두부 TC1의 벽면 y^+ 가 1 이하로 형성되어 대외류모사 기법이 벽면 경계층 유동을 제대로 모사하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)의 속도분포는 일반적으로 알려진 개활지 주행 시 고속열차의 유동구조^[12]와 유사함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4(c)와 같이 전두부인 TC1의 하단부의 bogie에서 유동 정체가 발생하여 TC1 차량의 두번째 bogie부터 유속이 절반수준으로 느려짐을 확인할 수 있다. Fig. 4(d)의 경우 압력섭동장을 도시하였으며, 고속열차의 각 차량별로 유동소음이 발생하여 원음장으로 전파함을 확인할 수 있다. Fig. 4(e)의 경우 전두부 TC1의 벽면압력섭동 분포를 도시하였으며, 이를 통해 고속열차의 공력소음을 유발한다고 알려진 주요 구성요소들에 공력소음원이 분포함을 확인할 수 있다.

4.2 수치해석 및 실험 비교

유동해석의 수립성 판단을 위해 Fig. 5와 같이 각 차량별 항력 및 양력을 측정하였다. 고속열차 전체 길이(125 m) 및 주행속도(370 km/h)를 고려하여 유동이 열차 전체를 통과하는데 소요되는 시간인 1.25 s까지 계산을 수행하여 유동장을 수립시켰다. 각 차량별 항력 및 양력의 변동이 1.25 s 이후로는 수렴하였다고 판단되므로 1.25 s 이후부터 0.2 s 동안 데이터 추출 및 소음해석을 수행하였다.

유동해석 결과를 이용해 외부 방사소음을 예측하는데는 고속열차의 벽면을 비투과성 적분면으로 사용하는 FW-H 방정식을 이용하였으므로, Fig. 6과 같이 고속열차의 벽면압력 스펙트럼을 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 실험 벽면압력 스펙트럼은

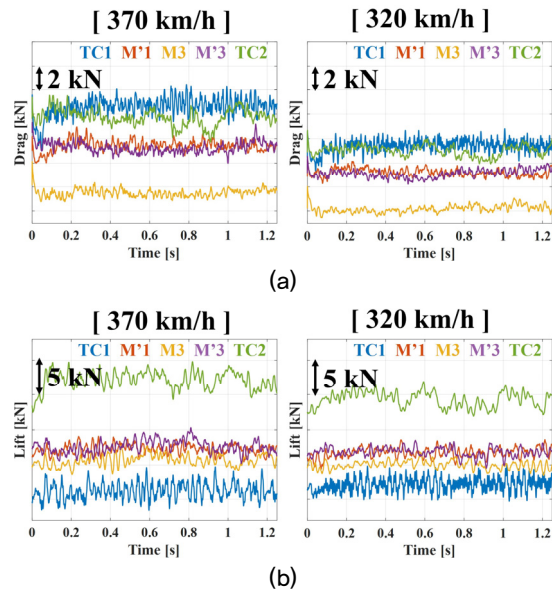


Fig. 5. (Color available online) Forces for each car in time domain: (a) drag; (b) lift.

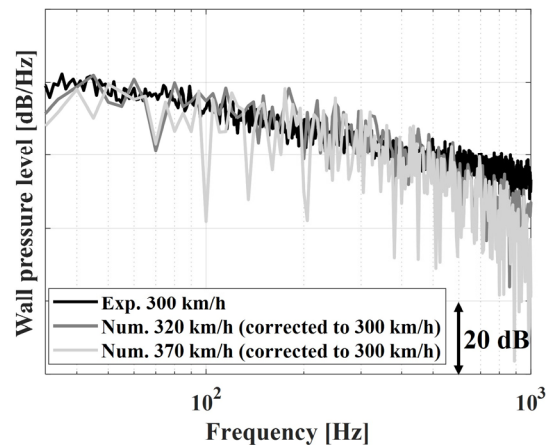


Fig. 6. Comparison of corrected wall pressure spectral density between numerical and experimental results ($p_{ref} = 20 \mu Pa$).

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 전두부 HVAC cover로부터 1,500 mm만큼 이격된 위치에서 측정된 결과이다. 해석 벽면압력 스펙트럼은 실험에서 측정된 위치와 동일한 위치에서의 결과이다. 실험은 300 km/h의 주행속도에서 결과이고, 해석은 320 km/h 및 370 km/h의 주행속도에서 결과이다.

2.3절에서 서술하였듯이 대한민국의 철도 사정상 현시점에서 300 km/h 이상의 속도로 주행할 수 있는 구간이 부족하므로 300 km/h의 실험 결과를 이용하였다. 또한 본 연구에서 대상으로 하는 차세대 고속

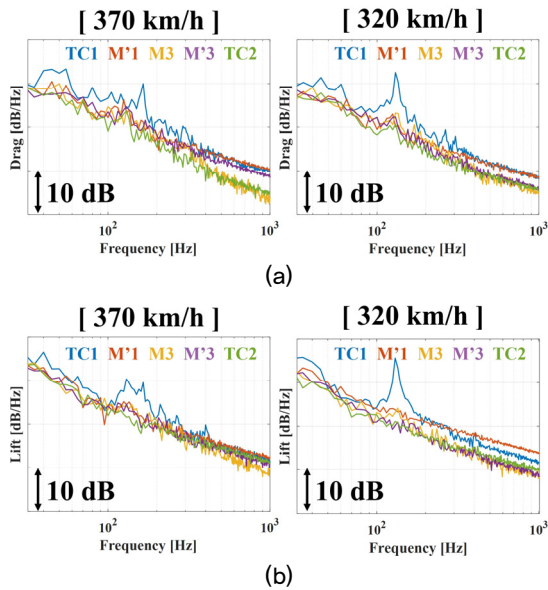


Fig. 7. (Color available online) Forces for each car in frequency domain ($F_{ref} = 1\text{ N}$): (a) drag; (b) lift.

열차의 목표 고속화 수준인 320 km/h와 370 km/h에서의 해석 결과를 이용하였다.

고속열차의 벽면은 no-slip 조건이며, 고속열차의 주행속도는 마하수 0.3 이하이므로, 공력소음원 중 단극자 및 사중극자 소음원보다 쌍극자 소음원이 지배적일 것으로 예상된다. 쌍극자 소음원은 유속의 6제곱에 비례함이 알려져 있으므로 $10\log_{10}(U_{num}/U_{exp})^6$ 만큼 해석결과를 보정하여 비교하였다.

해석결과와 실험결과와 스펙트럼은 유사한 기울기를 관찰할 수 있다. 다만, 500 Hz를 기점으로 해석결과와 스펙트럼 기울기의 크기가 증가하여 스펙트럼 레벨이 과소예측되는 경향성을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 이용된 수치격자가 근음장에서 발생하는 고주파성분의 소음원을 높은 정확도로 포착하기에는 해상도가 충분하지 않기 때문으로 판단된다. 그러나 고주파 범위에서는 광대역 성분이 주이하므로, 정확도가 낮다고 하더라도 주행속도 사이의 비교분석 및 특성 파악이 가능할 것으로 판단된다.

4.3 공력 및 공력소음 분석

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 370 km/h 주행시 320 km/h보다 항력과 양력이 전체적으로 증가하였다. 또한 양력의 경우, 고속열차 기준 윗방향을 양의 부호

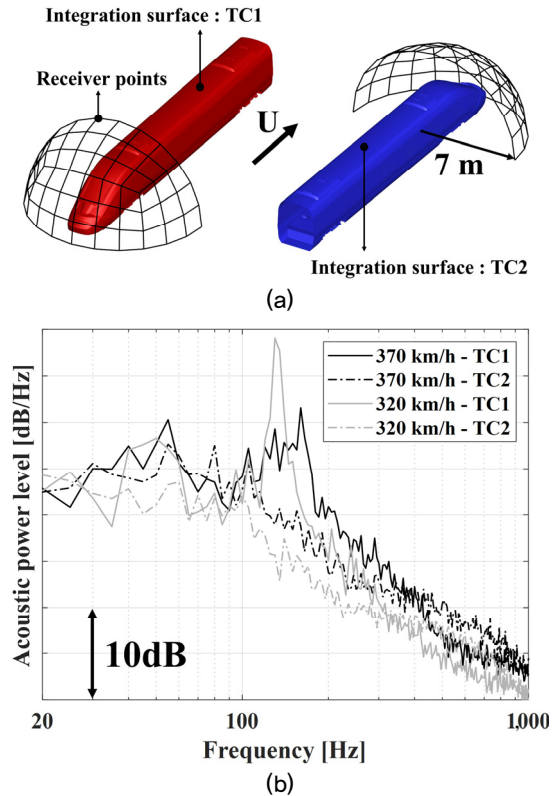


Fig. 8. (Color available online) Predicted aerodynamic noise using FW-H equation: (a) receiver points; (b) acoustic power spectrum ($p_{ref} = 20\ \mu\text{Pa}$).

로 계산하였으며 TC1의 양력은 음의 부호이다. 즉, TC1은 아랫방향으로 힘을 받고, 나머지 차량들은 윗방향으로 힘을 받으며, 특히 TC2는 윗방향으로 가장 크게 힘을 받음을 확인할 수 있다.

이러한 차량별 항력 및 양력의 1.25 s~1.45 s 신호를 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 주파수 영역에서의 스펙트럼으로 Fig. 7과 같이 표현하였다. TC1의 항력 및 양력 스펙트럼에서 100 Hz~200 Hz 사이에서 협소역 성분이 크게 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 주행속도와 협소역 주파수는 비례하나, 협소역 성분의 레벨은 반비례함을 확인할 수 있다.

외부 방사소음에 TC1과 TC2의 기여도가 협소역 성분에 의해 지배적이므로, TC1과 TC2로부터 방사되는 음향파위를 예측하기 위해서 Fig. 8과 같이 FW-H 방정식을 이용하여 음향파위 스펙트럼을 계산하였다. 음향파위를 계산하기 위해 먼저 Fig. 8(a)와 같이 TC1 및 TC2의 주위로 1/4 구 형태로 각각 70개의 수음점

Table 1. Comparison of overall acoustic powers for velocities and cars.

Overall acoustic power [dB]		
32 Hz ~ 1,000 Hz	TC1	TC2
320 km/h	X	X-8.2
370 km/h	X-1.8	X-4.9

을 배치하였다. Fig. 4(e)에서 확인할 수 있듯이 TC1의 전방 창문, 첫번째 bogie, 그리고 첫번째 HVAC cover에서 강한 압력섭동성분이 분포하므로 해당 구성요소들로부터 방사되는 소음이 주요하다고 판단하고 1/4 구 형태로 수음점들을 배치하였다. 그리고 TC1 및 TC2의 표면을 적분면으로 하여 FW-H 방정식을 이용하여 각 수음점에서의 음압레벨을 예측하였다. 다음으로 각 음압레벨을 평균하고 열차로부터 수음점까지의 거리를 보정하여 Fig. 8(b)과 같이 음향파워 스펙트럼을 예측하였다. 음향파워 스펙트럼에서 항력과 양력 스펙트럼과 동일한 협소역 주파수에서 협소역 성분이 예측된다. 즉, 앞서 분석한 항력과 양력의 스펙트럼 경향성과 유사하게, 협소역 주파수는 주행속도에 비례하지만, 협소역 성분의 레벨은 주행속도에 반비례함을 확인할 수 있다. 협소역 성분을 제외한 전체 주파수 범위에서 광대역소음 레벨은 주행속도와 비례함을 확인할 수 있다.

TC1 차량과 TC2 차량의 주행속도별 음향파워의 dB합은 Table 1과 같다. TC2 차량의 경우, Fig. 8의 결과로부터 예상할 수 있듯이 음향파워의 dB합 또한 주행속도에 비례함을 확인할 수 있다. 그러나 TC1 차량의 경우, 음향파워의 dB합은 주행속도에 반비례하며, 이는 협소역 성분으로 인한 결과이다.

V. 결론

본 연구에서는 3차원 비정상 압축성 대와류모사 기법을 이용하여 고속열차의 개활지 주행시 주변 유동장 및 음향장을 동시 계산하고, 공력 및 공력소음을 수치적 그리고 실험적으로 검증 및 분석하였다. 차세대 고속열차 모델인 EMU-320에서 전두부 및 후두부를 포함한 5 차량으로 구성된 실제크기의 수치 모델을 구성하였다. 공력소음의 발생 및 전파가 정확히 예측될 수 있도록 고차 기법을 사용하였으며,

시공간적으로 고해상도를 구현하였다. 전두부 차량의 벽면압력 스펙트럼을 실험결과와 수치결과의 비교를 통해 수치해석을 검증하였다. 이를 바탕으로 고속열차의 각 차량별 항력과 양력을 분석하였으며, 항력과 양력 스펙트럼에서 전두부 TC1 차량의 경우 100 Hz에서 200 Hz 구간에서 협소역 성분이 강하게 발생함을 확인하였다. 공력 및 공력소음 간 상관성을 확인하기 위해 전두부 TC1 및 후두부 TC2의 벽면을 비투과성 적분면으로 하여 Ffowcs Williams and Hawking 방정식을 이용해 1/4구 형태로 배치한 수음점에서 음압을 계산하고, 이를 이용하여 음향파워를 계산하였다. 음향파워 스펙트럼에서 항력 및 양력 스펙트럼과 동일한 주파수에서 협소역 성분이 발생함을 확인하였다. 이러한 협소역 성분으로 인해 후두부의 음향파워는 주행속도가 느릴 경우가 음향파워 dB합이 작았지만, 전두부의 경우 주행속도가 느릴 경우 오히려 음향파워 dB합이 증가하였다. 이와 같이, 고속열차의 공력 및 공력소음의 특성을 분석하였으며, 이는 차세대 고속열차의 고속화에 따른 저소음 설계에 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. 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).
2. G. Minelli, H.-D. Yao, N. Andersson, P. Höstmad, J. Forssén, and S. Krajnović, "An aeroacoustic study of the flow surrounding the front of a simplified ICE3 high-speed train model," *Appl. Acoust.* **160**, 107125 (2020).
3. N. Paradot, E. Masson, F. Poisson, R. Gregoire, E. Guilloteau, H. Touil, and P. Sagaut, "Aero-acoustic methods for high-speed train noise prediction," *Proc. 8th WCRR*, 1-8 (2008).
4. J. Zhu, Z. Hu, and D. J. Thompson, "Flow behaviour and aeroacoustic characteristics of a simplified high-

- speed train bogie,” Proc. Inst. Mech. Eng. F: J. Rail Rapid Transit, 1642-1658 (2016).
5. Y. Zhang, J. Zhang, T. Li, and L. Zhang, “Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph,” Sci. China Technol. Sci. **60**, 561-575 (2017).
 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. **29**, 399-410 (2013).
 7. Y. Cao, Z. Li, W. Ji, and M. Ma, “Characteristics analysis of near-field and far-field aerodynamic noise around high-speed railway bridge,” Environ. Sci. Pollut. Res. **28**, 29467-29483 (2021).
 8. E. L. Iglesias, D. J. Thompson, M. Smith, T. Kitagawa, and N. Yamazaki, “Anechoic wind tunnel tests on high-speed train bogie aerodynamic noise,” Int. J. Rail Transp. **5**, 87-109 (2017).
 9. W. T. Lu, Y. Wang, and C. Q. Zhang, “Research on the distribution of aerodynamic noises of high-speed trains,” J. Vibroengineering. **19**, 1438-1452 (2017).
 10. E. Masson, N. Paradot, and E. Allain, “The numerical prediction of the aerodynamic noise of the TGV POS high-speed train power car,” Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, **118**, 437-444 (2012).
 11. M. Meskine, F. Perot, M.-S. Kim, and D. M. Freed, “Community noise prediction of digital high speed train using LBM,” Proc. 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conf. 2013-2015 (2013).
 12. S. 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).

▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)



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

▶ 김 재 환 (Jaehwan Kim)



2015년 8월~현재: 현대로템 책임연구원

▶ 정 민 승 (Minseung Jung)



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

저자 약력

▶ 이 권 기 (Kwongi Lee)



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