마이크로폰 어레이를 이용한 고속철도 차량의 소음원 도출 연구

Noise Sources Localization on High-Speed Trains by using a Microphone Array

노희민^{1†} · 조준호² · 최성훈¹ · 홍석윤³

Hee-Min Noh · Jun-Ho Cho · Sunghoon Choi · Suk-Yoon Hong

Abstract In this paper, noise of Korean high-speed trains (KTX) running at different speed from 150 to 300km/h was measured by a microphone array system. From the measurement, relation between maximum sound pressure levels and train moving speeds of KTX was drawn and a regression coefficient from the relation was also derived. Moreover, increases of SPL with speeds of KTX were analyzed in the frequency domain. From the analysis, sound characteristics of passing-by noise of KTX were provided. Then, dominant noise source areas were obtained from the measurements and propagation patterns of KTX in vertical direction were also investigated. Finally, noise sources of KTX were identified from inspection of noise maps.

Keywords : Sound Pressure Level, Noise Measurement, Sound Pressure Characteristics, Noise Sources

초 록 본 논문에서는 고속 철도 차량의 주행 속도 150~300km/h에서 발생하는 음압을 마이크로폰을 이용하여 측정하고, 주행 속도의 증가에 따라 발생하는 음압의 특성을 분석하였다. 분석된 결과를 통해서 고속철도 차량의 속도 증가와 음압의 관계식을 도출하였으며, 주파수 영역에서 속도 증가에 따른 음압의 증가 특성을 검토하였다. 또한 주행소음 분석을 통해서 고속철도 차량의 주요 소음 발생 위치를 추정하였으며, 마이크로폰 어레이를 활용한 소음지도 분석을 통해서 고속철도 차량의 소음원의 위치를 도출하였다.

주요어 : 음압레벨, 소음측정, 음압특성, 소음원

1. 서 론

현재 세계 철도 선진국에서는 열차의 속도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 향후 개발될 고속열차는 현재 운행 중인 300km/h대의 속도에 비해서 운행 속도가 증가할 것으로 예상된다. 국내에서도 차세대고속철도사업에서 최고시험속도 430km/h의 동력분산형 차세대 고속열차가 개발 중에 있다[1]. 하지만 고속열차의 속도의 증가는 필연적으로 열차에서 발생하는 소음을 증가시킬 것으로 예상되고 있다. 따라서 고속열차의 속도를 높이는 연구뿐만 아니라 고속 주행 시 발생하는 소음을 저감하기 위한 연구 또한 그 중요성이 날로 증가하고 있다.

고속철도차량의 소음을 저감하기 위해서는 주행 시 발생하는 소음원을 정확하게 도출하고, 그에 따른 방사특성을 명확하게 파악하는 것이 중요하다. 하지만 고속 철도차량이 주행하는 경우 전동 소음과 공력 소음 등 다양한 소음이 속도에 증가에 따라 발생하게 되며, 그 소음원의 위치 또한 산재되어 있어 그 측정과 분석이 복잡하다[2]. 이러한 어려움을 해결하기 위해 국외 철도 연구 기관에서는 다수의 마이

크로폰이 부착된 마이크로폰 어레이를 이용하여 고속철도의 소음을 분석하고 시각화하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 90년대에 DEUFRAKO K와 K2에 의해 마이크로폰 어레이를 이용하여 고속열차의 공력소음을 측정하였으며, 2000년대에 들어서면서 다채널 DAQ시스템이 상대적으로 저렴해지고 마이크로폰의 배열과 구성이 보다 다양해지면서 마이크로폰 어레이 측정법의 성능이 훨씬 향상되었다.

이에 본 논문에서는 96채널 마이크로폰을 이용하여 고속철도차량의 주행 시 발생하는 소음을 측정을 하고, 지연-합 빔 형성 이론을 적용하여 고속철도차량의 소음원의 위치를 도출하는 연구를 수행하였다. 특히 고속철도 차량의 150~300km/h대에서 주행하는 소음 특성 분석을 통해서 속도의 증가에 따른 음압의 특성에 대한 분석을 수행하였으며, 주파수 영역에서의 증가 특성 또한 검토하였다. 또한 150km/h와 300km/h에서의 주행 소음과 방사 패턴의 분석을 통해서 전동소음과 공력소음의 영향을 검토하였으며, 주 소음원의 발생 위치 또한 확인하였다. 끝으로 다양한 속도대의 소음 지도를 통해서 고속철도 차량의 소음원을 확인하였다.

2. 고속열차의 주행소음측정

2.1 마이크로폰 어레이 측정 시스템

열차의 소음측정은 150km/h에서 300km/h로 운행하는 국내 고속차량을 대상으로 이루어졌다. 고속열차의 주행 속도

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 고속철도연구본부
E-mail : hmnoh@krii.re.kr

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부

²한국철도기술연구원 예코시스템연구실

³서울대학교 조선해양공학부

선도 자료를 바탕으로 마이크로폰 어레이 등 측정장비가 설치 가능한 지역을 선정하였다. 선정된 장소는 감곡역, 천안아산역 인근 및 송라터널 부근이다. 감곡역 부근에서는 주로 150km/h 속도대의 열차가 측정되었으며, 천안아산역 부근에서는 상행과 하행의 열차를 통해서 175km/h에서 270km/h 까지의 주행 소음을 측정하였다. 끝으로 송라터널 인근에서는 주로 300km/h대로 주행하는 열차의 소음이 측정되었다. 본 연구에서 측정된 고속철도차량의 속도 정보는 표 1과 같다

본 연구에서는 소음원의 위치를 파악하기 위해서 다수의 마이크로폰이 부착된 마이크로폰어레이(Microphone Array)로 철도 차량의 소음을 측정하였다. 측정에 사용된 마이크

로폰 어레이는 방사형 어레이로 96개의 마이크로폰을 장착하였다. 그림 1은 실험에 사용된 방사형 어레이의 도면을 보여주고 있다. 어레이의 직경은 약 3.4m이며 마이크로폰 간격은 약 0.05~0.13m의 간격을 보여주고 있다. 1.6m와 1m 반경의 네스트(Nest)에 6개의 마이크로폰이 30°와 60° 간격으로 교차로 방사형으로 배치되어 있으며, 마이크로폰 간격은 안쪽의 간격이 좁으며 바깥쪽은 넓다.

어레이는 선로로부터 5m 떨어진 곳에 수평방향으로 설치되었으며, 높이는 KTX차량의 동력차 (4.1m), 동력객차 (3.484m) 및 가선 높이(5.08m)를 고려하여 선로로부터 마이크로폰 중앙의 위치가 수직방향으로 2.3m가 되도록 설치하였다. 그림 2는 실제 측정 시 마이크로폰 어레이의 설치 모습을 보여주고 있다.

고속 열차의 속도 측정은 포토 센서를 이용하여 수행하였다. 포토 센서는 발광 센서와 수광 센서가 한 쌍을 이루고 있으며, 선로 양 쪽 기둥면에 레일방향으로 1.4m와 레일 레벨 기준으로 높이 1m 지점에 시작(Start)과 끝(End) 트리거 센서가 위치하도록 고정하였다. 열차의 속도는 열차가 진입 쪽 선로 기둥면을 통과 시 시작 트리거가 작동하게 되며, 진출 쪽 기둥면을 통과 시 끝 트리거를 작동하게 되어 통과 시간을 측정하고, 양 기둥면 사이의 거리를 통해서 구하게 된다.

측정 데이터 수집은 내쇼날 인스트루먼트(National Instru-

Table 1 Measurement sites and speeds of High-Speed Trains

No	Train name	Speed (Km/h)	Site
1	KTX	148.4	Gamgok Station
2	KTX	156.8	Gamgok Station
3	KTX	157.1	Gamgok Station
4	KTX	157.1	Gamgok Station
5	KTX	176.3	Cheonan-Asan
6	KTX	218.1	Cheonan-Asan
7	KTX	223.4	Cheonan-Asan
8	KTX	230.8	Cheonan-Asan
9	KTX	233.7	Cheonan-Asan
10	KTX	237.7	Cheonan-Asan
11	KTX	238.9	Cheonan-Asan
12	KTX	242.1	Cheonan-Asan
13	KTX	243.3	Cheonan-Asan
14	KTX	244.2	Cheonan-Asan
15	KTX	246.0	Cheonan-Asan
16	KTX	252.7	Cheonan-Asan
17	KTX	260.1	Cheonan-Asan
18	KTX	260.5	Cheonan-Asan
19	KTX	262.8	Cheonan-Asan
20	KTX	263.1	Cheonan-Asan
21	KTX	265.5	Cheonan-Asan
22	KTX	266.2	Songna-ri
23	KTX	270.0	Cheonan-Asan
24	KTX	271.2	Cheonan-Asan
25	KTX	295.5	Songna-ri
26	KTX	298.8	Songna-ri
27	KTX	301.0	Songna-ri
28	KTX	301.5	Songna-ri
29	KTX	301.5	Songna-ri
30	KTX	301.5	Songna-ri
31	KTX	303.3	Songna-ri
32	KTX	306.6	Songna-ri

Fig. 1 96CH Microphone array configuration

Fig. 2 96CH Microphone array system

Fig. 3 Measurement instruments setup

ments) 사의 PXI(DAQ 보드 : PXIe-1065, 제어기 : PXIe-8133, 데이터 스트리밍 : NI 8260)를 이용하였고, 샘플링 주파수는 6.4kHz와 주파수 분해능 (Frequency Resolution)은 5.00Hz로 측정하였다. 프로그램은 (주)에스엠인스트루먼트사의 측정 및 후처리용 프로그램(SeeSV230)를 이용하였으며, 실시간으로 96개의 마이크로폰 신호와 2개의 포토센서의 신호를 저장하였다. 전체적인 측정장비의 구성은 그림 3과 같다.

2.2 측정 결과 분석 방법

본 연구에서 수행하고자 하는 고속철도의 주행 소음을 측정하고 소음지도를 그리기 위한 소음원 분리를 위해 96개 채널의 마이크로폰 어레이에서 측정된 신호를 바탕으로 지연-합 빔형성 기법(Delay-and-sum beamforming method)을 적용하여[3] 음원의 위치를 도출하였으며, 특정 주파수 영역에서의 소음지도(Noise map)를 바탕으로 주파수 영역별 음압의 특성을 구하였다.

고속 철도 차량의 주행 중 발생하는 소음 지도를 보기 위해서는 그림 4와 같은 일련의 과정이 필요하다. 우선 측정 대상이 되는 고속 열차의 주행 속도 및 발생하는 소음을 측정 한 후에 지연-합 빔형성 이론과 도플러 효과를 적용하여

Fig. 4 Workflow of noise mapping

빔파워(Beam power)를 구한다[4]. 이때 신호 처리의 유용성을 위해 빔파워의 값에 창함수(Window function)를 이용하여 가중치를 부여한 후에, 앞서 구한 열차의 속도를 바탕으로 빔파워를 열차의 위치에 투영하면 소음 지도를 구할 수 있다[5].

본 연구에서는 마이크로폰 어레이를 활용하여 열차의 주행 소음도를 구하는 것 뿐 만 아니라 주행 소음을 측정하고 수직 방향에서의 음향 방사를 검토하는 결과 또한 도출되었다. 주행 소음을 분석하기 위해서는 그림 5와 같이 마이크로폰 어레이에서 지면으로부터 높이 0.9m에 위치하고 있는 마이크로폰에서 측정된 음압 자료를 사용하였으며, 수직 방향의 음향 방사 패턴 검토에서는 마이크로폰에서 수직으로 배열된 16개의 마이크로폰에서 측정된 음압 자료가 사용되었다.

Fig. 5 Microphone locations for noise measurement

3. 주행소음 측정결과 분석

3.1 주행소음 측정결과 분석

고속철도 차량의 주행 속도에 따른 소음의 측정결과를 살펴보면 그림 6과 같이 속도의 증가에 따라 발생하는 최대 음압의 크기가 증가함을 확인할 수 있다. 음압의 증가를 보다 정량적으로 확인하기 위해 속도/음압의 관계식을 대입하여 살펴보면 아래와 같다[5].

$$Max_{SPL}(V) = 56.5 \log\left(\frac{V}{V_0}\right) + Max_{SPL}(V_0) \quad (1)$$

여기서, $Max_{SPL}(V)$ 는 고속철도 차량이 V km/h의 속도로 주행하는 경우에 발생하게 되는 A-weighted SPL을 의미하며, V_0 는 기준속도로 본 식에서는 150km/h의 값이 사용되었다.

다음으로 속도의 증가에 따른 주파수 영역에서의 음압의 특성을 검토하기 위해서 150, 200, 250, 300km/h에서의 50 km/h의 증가에 따른 음압의 차이를 그림7과 같이 주파수 영역(0~3000Hz)에서 구하였다. 300km/h의 음압의 값은 송라

Fig. 6 Maximum A-weighted SPL of KTX at the speeds of 150 ~ 300km/h

Fig. 7 Differences of A-weighted SPL of KTX

터널에서 측정된 고속철도 차량의 정보를 이용하였으며, 250 km/h대의 자료는 천안아산역 부근에서 측정된 같은 속도대의 측정자료를 활용하였다. 200km/h대는 본 실험에서는 속도 측정의 자료가 없어서 176.3km/h와 218.1km/h의 주행속도 자료를 바탕으로 추정하였다. 끝으로 150km/h대의 자료는 감곡역 부근에서 측정된 자료가 이용되었다.

그림 7의 측정결과 살펴보면 150km/h에서 200km/h로 속도가 증가하는 경우에 주파수 영역에서 약 1~4dB 정도 음압의 증가가 발생함을 확인할 수 있다. 하지만 음압의 증가는 주파수의 증가에 따라 큰 변화를 보이고 있다. 본 실험의 자료에서는 200Hz 이하의 저주파 영역과 1300Hz 그리고 2500~3000Hz에서 높은 증가가 나타나는 것으로 확인되었다. 200km/h에서 250km/h로 속도가 증가하는 경우에는 약 2~5dB 정도 음압의 증가가 발생하는 것으로 확인되었으며, 저주파 영역과 1500Hz 그리고 3000Hz 부근에서 고르게 높은 증가가 나타났다.

250km/h에서 300km/h의 속도 증가 시에는 5~6dB 정도 소음의 증가가 나타났으며, 저주파영역(500Hz이하)를 제외하고는 전 주파수 영역(500~3000Hz)에서 높은 소음의 증가가 나타남을 확인하였다. 특히, 다른 속도의 증가보다 높게 나타난 주파수 영역 500~1000Hz 부근은 일반적으로 알려진 휠/레일의 접촉에 의한 전동소음이 발생하는 영역인 레일 및 노반에 의한 소음(400Hz 이하)과 휠의 진동에 의한 소음(1600~4000Hz[6])이 아니었다. 따라서 속도의 증가에 따른 공기 유동의 의한 공력소음의 영역으로 가정하여 본다면 KTX 차량의 경우에 250km/h에서 300km/h로 속도가 증가하는 경

우에 공력 소음이 500~1000Hz 부근에서 높게 증가함을 추정해 볼 수 있다. 하지만 본 연구만으로는 결론을 내리기는 부족하며 보다 명확한 결론을 위해서는 공력소음의 특성 도출에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.2 고속철도 차량의 소음원 도출

고속철도 차량의 주행 소음 중 발생하는 소음의 특성을 확인하기 위해서 그림 5와 같이 마이크로폰 어레이에서 높이 0.9m에서 측정된 마이크로폰에서 측정된 음압의 신호를 바탕으로 시간영역에서의 주행 소음을 검토하였다. KTX의 150km/h와 300km/h 주행 소음은 시간의 진행에 따라서 주기적인 피크가 나타남을 그림 8에서 확인할 수 있는데, 보

Fig. 8 Passing-by noises of KTX at the speeds of 150 and 300 km/h

Fig. 9 Maximum A-weighted SPL of KTX in the vertical direction at the speeds of 150 and 300km/h

Fig. 10 Dominant noise source areas of KTX

(Beampower: 85 dB ≤ ≤ 95 dB)

Fig. 11 Noise maps of KTX at the speeds of 300km/h of the frequency ranges 20 ~ 3,150Hz

통 고속철도 차량의 대차의 개수와 같은 23개의 피크가 나타남을 확인 할 수 있다. 이를 통해서 고속철도 차량의 주행 시 대차 부근에서 높은 소음이 발생함을 확인할 수 있다. 150km/h의 주행에서 대차부근에 높은 소음이 발생하는 것은 휠/레일의 접촉에 의한 전동 소음에 영향으로 볼 수 있다. 특히, 첫번째 차량인 동력차량의 대차와 두번째 차량인 동력 및 객차 차량의 대차에서 높은 소음이 발생하며, 중간 객차 부근의 대차 부근에서는 상대적으로 낮은 소음이 발생함을 확인할 수 있다. 300km/h의 고속으로 주행 시에도 중간 객차에서 간혹 피크가 높게 형성되는 것을 제외하고는 앞의 경우와 비슷한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

(Beampower: 87 dB ≤ ≤ 93 dB)

Fig. 12. Wheel/rail interaction noise in between-car sections of KTX

Table 2 Identified noise sources of KTX

Noise sources	
Leading power car	First bogie
	Second bogie
	Front glass
	Front nose
	Pantograph
	Ventilation
Leading power and passenger car	First bogie
	Bogie between cars
	Cavity between cars
Passenger car	Cavity between cars
	Bogie between cars
Trailing power and passenger car	First bogie
	Bogie between cars
	Cavity between cars
Trailing power car	Last bogie
	First bogie
	Pantograph

열차의 높이에 따른 주행 중 발생하는 음압의 특성을 확인해보기 위해서 그림 5와 같이 마이크로폰 어레이에서 지면에 수직으로 설치된 16개의 마이크로폰에서 측정되는 음압을 검토하였다. 그림 9에서 확인된 KTX의 150km/h의 주행에서 높이에 따른 음압의 특성을 살펴보면, 차량의 대차가 설치되어 있는 1.5m 이하에서 높은 소음이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 150km/h의 주행 시 열차의 전동 소음이 크게 영향을 미치기 때문으로 볼 수 있다. KTX의 300km/h의 주행 시에는 150km/h의 주행 시보다 약 5dB 정도 소음의 증가하였으며, 앞의 경우에서 같이 1.5m 이하에서 높은 소음이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 2m부근과 2.5m에서 3m 부근에서의 음압이 높게 형성된 것을 확인할 수 있

는데, 이것은 차간, 팬토그래프의 커버, 페어링이 위치하는 곳으로 볼 수 있으며 공력소음의 영향이 속도의 증가에 따라서 더 크게 나타나는 것으로 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 열차의 주요 소음원의 위치를 추정해보면 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

앞 절에서 언급한 빔형성 기법을 적용한 고속철도의 소음 지도를 바탕으로 해서 세부적인 소음원의 조사를 표 2와 같이 수행하였다. 첫번째 차량인 동력차량에서는 그림 11과 같이 첫번째와 두번째 대차, 차량 앞면부의 창(window) 및 노스(nose) 부근과 팬토그래프, 통풍장치 부근이 차량의 소음원이 됨을 확인할 수 있었다[7]. 두번째 차량인 동력 및 객차 차량에서는 대차 부근과 차간 부근에서 소음이 발생함을 확인하였으며, 객차 부근에서도 그림 12와 같이 보기 부근과 차간 부근이 소음 발생의 위치로 볼 수 있었다. 특히 500Hz 부근에서는 차간에서 소음이 발생하며 2000Hz에서는 휠 부근에서 소음이 발생함을 확인할 수 있다. 마지막 차량 부근인 동력 차량과 동력 및 동력 객차 부근에서도 앞에서 언급한 바와 같이 전두부, 보기, 차간, 팬토그래프 커버 부근이 주요 소음 발생 부근이었으며, 차량이 지난 후에 발생하는 난류 유동 경계층 (Turbulent boundary layer) 또한 소음원이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

첫째, 150km/h에서 300km/h로 주행하는 고속철도차량에 대한 속도/음압의 관계식을 도출하였다. 이를 통해서 속도의 증가에 따라 발생하는 최대 음압의 증가에 대한 정량적인 관계를 확인할 수 있었다.

둘째, 고속철도 차량의 속도증가에 따른 주파수 영역에서의 음압 특성을 검토하였다. 음압의 증가는 주파수의 증가에 따라 큰 변화를 보임을 확인하였으며, 주파수의 영역별로 그 특성을 분석하였다.

셋째, 주행 소음과 수직방향의 방사패턴 분석 및 소음지

도를 통해서 고속철도차량의 주행 시 발생하는 소음의 위치 및 주요 소음원을 확인하였다. 이를 통해 고속철도 차량의 다양한 소음원의 위치를 도출하였으며, 차간 및 보기 부분 (차량의 연결부)에서 높은 소음이 발생함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 사업의 400km/h 고속철도 소음원 모델 구축 및 소음원 기여도 분석 과제의 지원을 받아 수행하였습니다. 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H.-M. Noh (2006) Designing a Microphone Array System for Noise Measurements on High-Speed Trains, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6), pp. 477-483.
- [2] David Thompson (2009) Railway noise and vibration: mechanism, modelling and means of control, Elsevier, pp. 6-9.
- [3] Don H. Johnson and Dan E. Dungeon, Array Signal (1993) pp. 113-118.
- [4] Bruel & Kjaer, Technical Review No.1 (2004) Beamforming.
- [5] F. Possion, P.E. Gautier, F. Letorneaux (2008) Noise Sources for High Speed Trains: a Review in the TGV Case, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 99, pp. 71-77.
- [6] A. Van Beek, Rail sources-state of the art, Harmonoise report HAR12TR-020118-SNCF10
- [7] C. Mellet, F. Letourneurux, F. Possion, C. Talotte (2006) High speed train noise emission: Lasted Investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 535-546.

접수일(2011년 11월 7일), 수정일(2011년 11월 29일),
게재확정일(2011년 12월 5일)