철도 차량 내 소음 재현을 위한 입체 음향 시스템의 성능평가

Performance Evaluation of Spatial Sound Field Reproduction for Cabin Noise in Rail Vehicles

홍 지 영[†]·이 용 희^{*}

Jiyoung Hong[†] and Yonghee Lee^{*}

(Received October 20, 2023 ; Revised November 10, 2023 ; Accepted November 13, 2023)

Key Words: Sound Field Reproduction(음장 재현), Train Cabin Noise(열차 객실 소음), Sound Quality(음질), Ambisonics(앰비소닉스)

ABSTRACT

Sound quality is becoming more critical in the automobile industry, and it is expected that acoustic innovation will be possible in the railway sector. Sound quality can be effectively enhanced at the design stage. The sound pressure level is calculated using the SEA technique, by predicting the interior noise of a train based on vehicle manufacturing information and design. There is a limit to predicting the perception of the passenger. In the development of future rail vehicles, noise that is different from the existing railway noise will occur. In this paper, the noise generated in the cabin during actual railroad driving is recorded using an ambisonic microphone. The sound field reproduced in the test room is compared with the target sound field and the appearance of the sound pressure level, frequency characteristics, and sound quality analysis at a similar level is determined. Through this study, primary performance verification is performed to build a spatial sound field reproduction system for train cabin noise. Further, studies on subjective sound perception and the sound design of train cabin noise will be conducted to utilize it as a virtual test platform.

1. 서 론

하이퍼튜브, 아음속 캡슐트레인 등으로 알려진 초 고속 철도 차량은 전통적인 철도 시스템의 주 소음원 인 휠-레일, 팬토그래프-전차선의 접촉이 없으며, 대 신 자기부상을 위한 모터, 변환기, 공조설비 등에서 발생하는 기계 진동이 새로운 소음원으로 부각될 것 이다. 특히, 아진공 튜브로 진입, 진출, 주행할 때의 공기역학 매커니즘은 공력소음의 특성이 달라 예측하

E-mail : hongjy@krri.re.kr

기 어려운 소음 특성을 나타낼 수 있다. 또한, 밀폐된 아진공 튜브 내 초고속 주행은 승객에게 불안감과 공 포심을 유발할 수 있는데, 익숙한 철도 소음과는 다른 낯선 소음에 노출될 때의 부정적 반응은 새로운 교통 수단에 대한 승객의 수용성을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 설계 단계에서 철도 소음을 정확히 예측하여 현실감 있게 재현할 수 있다면 소음 저감 기술의 효과 적인 적용 뿐 아니라, 음질을 고려한 음향 설계 및 사 운드디자인까지 가능하며, 이를 통해 승객의 수용성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Railroad Research Institute, Senior Researcher

^{*} Korea Railroad Research Institute, Senior Researcher

Recommended by Editor Wan Ho Cho

[©] The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

철도 소음의 주관적 평가를 위한 기존의 음향 재현 방법은 정온한 실험실 환경에서 헤드폰을 이용하는 것이 일반적이다. 이러한 방법은 1차원적인 열차 외 부 소음의 이동 방향성을 재현하는 데에는 어느정도 효과적이지, 객실 내부 소음을 평가하거나 저감기술 의 효과를 검증하며 차량 음향설계의 가상시험(virtual test) 등에 활용하는 것은 한계가 있다. 헤드폰 재생 방식은 청음자의 머리전달함수(HRTF, head related transfer function)의 개인차와. 객실 내 다양한 소음 원의 위치 및 공간적 특성을 충분히 재현하기 어렵다. 따라서, 실제 차량 내부에서 발생하는 복잡한 소음 환경과 유사한 공간적 경험을 제공할 수 있는 기술의 필요성이 부각되고 있다.

최근 VR, 메타버스 산업의 발전과 더불어 주목 받 고 있는 입체 음향 재현 기술의 개념은 원음장의 방 향감과 거리감을 충실하게 재생하여 실제 환경에서 듣는 소리와 같은 공간정보를 부가한다. 음향의 입체 적 재현은 몰입형 음향(immersive sound), 공간 음향 (spatial sound), 3차원 음향(3D sound)라고도 표현되 는데, 1931년 소개된 stereophony⁽¹⁾ 이후 최근의 dolby atmos 까지 주로 영화 산업에서 실감 나는 소리의 재 현을 위해 다양한 기법이 시도되어 왔다. 음향 재현 방법과 관련한 최신 기술로는 벡터 기반의 간단한 계 산만으로 임의의 스피커 환경에서 진폭 패닝의 게인 값을 구하는 VBAP(vector base amplitute panning)나^(2,3), 음원의 방향에 따라 해상도가 제한될 수 있는 VBAP 의 단점을 보완하기 위해 두 개 이상의 음원 벡터로 부터 하나의 가상 음원을 생성하는 MDAP(multiple direction amplitute panning)⁽⁴⁾, 그리고 시간 차이를 이용하는 패닝 기법으로 많은 수의 스피커 어레이를 이용해 비교적 넓은 범위에 가상 음장을 재현하는 WFS(wave field synthesis)⁽⁵⁾ 기법이 있고, 재현하고 자 하는 음을 위치 정보와 함께 하나의 scene으로 인코 딩하고 음장 재현 환경에 따라 다양한 스피커 구성으로 디코딩하여 출력 가능한 AEP(ambisonic equivalent panning) 등이⁽⁶⁾ 있다.

이 논문에서는 미래 철도 차량의 음질 기반 음 향 설계 및 사운드디자인 연구를 위한 기초기술로 서, 열차 객실 소음의 음향 재현 기술을 확보하 고자 하였다. 이를 위해, 운행 중인 열차를 대상으 로 한 실험을 수행하여 재현된 음장의 유사도를 평가하고 재현 기술의 신뢰성을 검증하였다. 열차의 객실 소음을 실험실에서 재현하기 위해, 최 근 다양한 매체에서 입체음향 구현에 활용하고 있는 앰비소닉스 기법을 적용하였는데, 1) 주행 열차 실내 소음의 원음장을 앰비소닉 마이크로폰을 이용해 녹음 하고, 2) 녹음된 원음장을 energy-preserving 기법⁽⁷⁾으 로 디코딩한 음원을 다채널 스피커로 실험실에서 재현 하며, 3) 실험실에서 재현된 음장을 싱글 마이크로폰을 이용해 다시 녹음한다. 검증을 위해 지정된 기준 위치 에서 싱글 마이크로폰으로 녹음된 재현음장과 원음장 을 비교하였다. 이러한 평가는 음압 레벨과 주파수특 성 뿐 아니라, 실제 승객이 체감하는 소음에 대한 청감 을 고려해 각 음장의 음질 지표 측정값을 비교하였다.

2. 열차 객실 내 소음의 원음장 측정

2.1 시험선 철도 소음 측정

철도 객실 소음의 음향 재현 기술에 대한 신뢰성 검증을 위해 상업 운전 전 시험선에서 운행 중인 열 차를 대상으로 연구를 수행하였다. 대상 차량은 철도 종합시험선로에서 150 km/h 이하의 주행속도로 시험 하는 전기동차로, 일반적인 철도 소음의 특성을 갖는 다. 상기 주행속도 범위에서는 차륜과 레일에서 발생 하는 전동소음의 기여도가 크고, 그 외 HVAC 등 차 량의 기계소음이나 구조기인소음 등이 있다. 주행속 도 70 km/h 내외의 도시철도 실내 소음은 800 Hz~ 1000 Hz를 중심으로 높은 소음이 발생 하는 것으로 보고된 바 있다⁽⁸⁾. 차량 실내 소음은 각종 기계장치를 포함한 차량의 제원, 차체의 흡차음 설계에 따라 주 파수 특성의 차이가 클 수 있다.

이 연구에서는 시험선의 개활지와 터널 구간에서 주행속도 80 km/h를 등속으로 유지하는 열차 주행 시 험에서 핑크노이즈 재생을 위한 스피커와 앰비소닉 마이크로폰과 레퍼런스 마이크로폰, 바이노럴과 싱글 마이크로폰을 Fig. 1과 같이 약 1.5 m 간격으로 배치 하였으며, 객실 내부 소음을 녹음하였다.

바이노럴과 싱글 마이크로폰 측정값은 후속 연구 에서 앰비소닉 마이크로폰을 이용한 측정과의 비교 및 재현음장의 유사도 평가에서 활용하고자 한다.

2.2 측정장치 구성 및 절차

입체음향 구현을 위한 원음장 녹음은 앰비소닉 마 이크로폰을 사용하였다. 앰비소닉 마이크로폰은 무지 향성 마이크와 지향성 마이크 구성으로 음압 레벨에 대한 데이터와 공간좌표에 대한 데이터를 측정하는 데, 앰비소닉 디코더를 이용해 스테레오나 다채널 음 향 신호로 변환할 수 있다. 하나의 무지향성 마이크 로폰으로만 구성되는 0차 앰비소닉부터 1개의 무지 향성 마이크로폰에 x, y, z 축 방향의 지향성 마이크 로폰이 추가되는 1차 앰비소닉, 5개의 지향성 마이크 로폰이 추가되는 2차, 16개의 지향성 마이크로폰이 추가되는 3차 앰비소닉이 있고, 그 이상의 고차 앰비 소닉이 있다⁽⁹⁾.

4차 앰비소닉은 약 2.4 kHz 대역까지 방향성을 표현 할 수 있고, 20 kHz까지 표현하려면 32차 이상이 필요 한데, 일반적으로 4차에서 7차 앰비소닉 시스템을 많 이 사용하고 있다. 이 연구에서는 3차 앰비소닉 마이크 로폰인 자일리아(ZM-1, Zylia)와 4차 앰비소닉 마이크 로폰인 아이젠마이크(Eigenmike, Mh acoustics)를 모두 사용하였다. 앰비소닉 마이크로폰과 같은 위치에 있는 싱글 마이크로폰(M23, Earthworks)은 실험실내 음장 재현 시 스피커 캘리브레이션을 위해 사용하였다.

원음장과 실험실 재현음장의 비교를 위해 기준 위치 에서 바이노럴 마이크로폰(HSU III, HEAD acoustics) 과 싱글 마이크로폰(Type 4943, B&K /NL52, RION)



Fig. 1 Schematic representation of the measurement systems for train cabin noise



Fig. 2 Measurement set-up for sound field recording of train cabin noise

을 사용해 측정하였으며, 전체 측정장비 구성도는 Fig. 2와 같다.

3. 시험실 내 입체 음향 재현

3.1 음향 재현 시스템 구성

음향 재현 시스템이 구축된 실험실은 사다리꼴의 5.33 m×5.83 m 바닥면적에 높이 4 m의 음향시험실 로 ITU-R BS1116-3(2015) listening room에서 규정 된 성능기준을 만족한다. 실의 평균 잔향시간은 0.28 초이며, 배경소음은 NR-10을 만족한다. 실험실 내부 에는 Fig. 3과 같이 철도 차량용 좌석이 설치되어 있 어 좌석에 앉은 사람의 귀 위치를 중심으로 음장을 재현하거나 시각적으로도 실감 효과를 줄 수 있다.

실험실 내 라우드스피커 배치는 8개의 스피커는 중 앙의 레퍼런스 마이크로폰의 위치를 기준으로 반경 약 2 m 거리의 수평면에서 같은 각도로 분할된 위치 에 1.4 m 높이로 설치하였으며, 2개의 오버헤드 스피 커는 레퍼런스 마이크로폰으로부터 약 2 m 거리에 두 개의 스피커 간 간격이 약 2 m~3 m가 되도록 설 치하였다. 스피커는 모두 Genelec 8030B, 8030C 모 델이며, 각 스피커의 볼륨과 주파수특성을 확인하여 균일하게 조정하였다.

앰비소닉 마이크로폰를 이용해 측정된 열차 내 음 장을 다채널 라우드스피커를 사용해 재현하기 위해서 는 먼저 원음장을 라우드스피커 레이아웃에 따라 디 코딩하는 프로세스가 필요하며, 이 연구에서는 SPAT Revolution Ultimate(FLux)를 사용하여 총 10개의 라



Fig. 3 Listening room set-up for sound field reproduction of train noise

우드스피커에서 재생할 시그널로 변환하였다. 멀티채 널 오디오 인터페이스는 X32 Rack(Behringer) 및 DL16 Extender(MIDAS)를 사용하여 Reaper(Cockos)에서 음향을 재생하였다.

3.2 철도소음 원음장 재현

(1) 주파수 응답 및 레벨 캘리브레이션

앰비소닉 마이크로폰으로 녹음된 핑크노이즈를 음 향 재현 시스템으로 재생하고, 싱글 마이크로폰을 통 해 측정한 결과를 현장의 핑크노이즈 측정음과 일치 하도록 조절하기 위해 smaart suite(Rational acoustics) 를 활용하여 라우드스피커 10채널에 동일한 값의 EQ 를 적용하여 출력 시그널을 보정하였다. 결과적으로, 핑크노이즈 재현음장 측정값이 원음장 측정값과 0.01 dB의 차이를 가지는 수준으로 조정되었다. 이러한 과 정을 통해 구축된 음향 재현 시스템은 열차 소음 측 정 현장의 공간 음향 특성을 반영하여 원음장과 유사 한 주파수 응답과 레벨을 갖는 음장을 효과적으로 재 현할 수 있다.

(2) 원음장과 재현된 음장의 비교

음향 재현 시스템을 통해 재현된 음장이 주행 열차 내 원음장과 유사한지 평가하기 위해 원음장과 재현 된 음장 내 동일한 위치의 레퍼런스 마이크로폰에서 녹음된 음원의 SPL과 주파수특성, 그리고 음질 지표 인 라우드니스와 샤프니스를 분석하여 비교 평가하였 다. 주행속도별 음원 분석 외에도 개활지와 터널로 주행 구간의 특성이 다른 음원의 분석, 그리고 철도 차량 내에서 발생하는 이상 소음의 원음장과 재현음 장 간 비교를 통해 향후 철도 음향 재현 시스템의 개 선점을 모색하고자 하였다.

4. 원음장과 재현음장의 음향 특성

4.1 음압 레벨과 주파수 특성 분석

Fig. 4는 80 km/h 주행 시험 시 측정한 열차 실내 원음장과 이를 시험실에서 재현한 음장의 A-가중 음 압 레벨을 시간 파형으로 나타낸 것이다. 음향 시그 널은 artemis suite(HEAD acoustics GmbH)를 이용 해 취득하였으며, 측정 시작 후 2초~3초 구간에서 발생한 피크는 원음장 측정 시작을 알리는 신호음이 며, 그림에 표시된 ① 구간은 개활지를 80 km/h 등속 으로 주행할 때 발생한 소음, ②구간은 간헐적으로 발생하는 차량 기계 소음, ③구간은 터널을 80 km/h 등속으로 주행할 때 발생한 소음을 나타낸다.

Table 1은 각각의 분석구간별 L_{eq}, L_{max}, L_N(N= 5, 10, 90) 결과와 원음장의 측정치 대비 재현 음장의 측정치, 두 음원 간 레벨 차이를 나타낸다. 음압 레벨 의 차이는 3 dB 이내로 철도소음의 JND가 3 dB 내외 로 보고된 연구결과를⁽¹⁰⁾ 고려할 때, 청음자가 원음장



Fig. 4 Sound pressure levels of target and reproduced sound during 80 km/h running test

 Table 1
 SPL discriptors in dBA and recall ratio of target and reproduced sound fields during 80 km/h running test

Source		L _{eq}	L _{max}	L ₅	L ₁₀	L ₉₀
Overall	Target	63.07	82.50	64.54	63.94	59.77
	Reproduced	64.05	85.08	67.32	64.46	58.46
	Difference	-0.98	-2.58	-2.78	-0.52	1.31
(1)	Target	60.94	62.57	61.58	61.43	60.38
	Reproduced	61.20	63.03	62.41	62.09	59.84
	Difference	-0.26	-0.46	-0.83	-0.66	0.54
2	Target	64.83	66.42	66.23	66.01	63.82
	Reproduced	67.34	69.22	69.08	69.01	65.22
	Difference	-2.51	-2.8	-2.85	-3	-1.4
3	Target	62.91	64.77	63.72	63.58	62.12
	Reproduced	62.55	63.85	63.41	63.30	61.52
	Difference	0.36	0.92	0.31	0.28	0.6

과 재현음장의 차이를 구분하기 어려운 수준의 재현 정확도를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5~Fig. 7은 분석구간별 원음장과 재현음장의 주파수 특성을 비교한 결과이다. 100 Hz~200 Hz의 저주파 대역과 3 kHz~4 kHz 이상의 고주파 대역에 서 재현음장이 원음장 보다 최대 10 dB 정도 낮은 음 압 레벨을 나타내고 500 Hz 근방에서는 재현음장이 원음장 보다 약 5 dB 정도 높은 음압 레벨을 나타낸 다. 그 외 중고주파 대부분의 영역에서 주파수 특성 은 유사한 것을 확인하였다.

음압 레벨 측정치의 비교 결과에서 계산된 높은 재 현율에 비해 주파수 특성 비교 결과에서는 일부 주파



Fig. 5 Frequency spectra of target and reproduced sound fields at 80 km/h in open area



Fig. 6 Frequency spectra of target and reproduced sound fields with abnormal mechanical noise

수 대역에서의 명확한 차이를 확인할 수 있었는데, 100 Hz ~ 200 Hz의 저주파 대역에서는 스피커와 마 이크로폰의 높이와 거리, 실험실 바닥의 낮은 흡음률 에 의한 반사음의 간섭이 영향을 준 것으로 보인다. 이를 확인하기 위해 스피커와 마이크로폰 간 거리나 설치 높이를 변경해 보았으며, 원음장과 재현음장의 음압 레벨에 차이가 나는 주파수 대역이 이동하는 것 을 확인하였다. 현재 음향 재현 시스템의 높이와 거 리를 유지하면서 저주파 대역의 차이를 보완하기 위 해서는 저주파수 음압레벨을 높이기 위한 서브우퍼를 추가하거나 바닥 반사를 최소화하기 위한 바닥 방음 구성 등이 필요할 수 있다.

3 kHz~4 kHz 이상의 고주파 대역에서의 차이는 앰비소닉 마이크로폰 캡슐 사이의 거리에 의한 고주 파수 대역 왜곡이 원인일 수 있으며, 파장과 마이크 로폰어레이의 크기에 의해 결정되는 spatial aliasing 문제도 영향을 줄 수 있다. 이 연구에서 사용한 앰비 소닉 마이크로폰의 spatial aliasing cutoff frequency 는 약 9 kHz로 알려져있다⁽¹¹⁾. 주파수 특성의 차이는 다음에 이어질 음질 분석에서도 음원 간 차이가 나타 날 수 있음을 예측하게 한다.

4.2 음질(라우드니스와 샤프니스) 분석

두 개의 음이 체감적으로 같게 느껴지기 위해서는 음압 레벨 뿐 아니라 음질 측면에서도 높은 유사성을 확보해야 한다. 인간의 소리에 대한 주관적 지각인 음 질을 객관적으로 평가하는 방법으로 loudness, sharpness,



Fig. 7 Frequency spectra of target and reproduced sound fields at 80 km/h in tunnel

roughness, fluctuation strength 등 음질 평가 인자를 분 석할 수 있는데, 이 논문에서는 Artemis(HEAD acoustics) 의 라우드니스(ISO 532-1)와 샤프니스(aures) 음질 분 석을 통해 열차 객실 소음의 시험실 재현음장이 원음장 과 비교해 어느 정도의 유사성을 갖는 지 분석하였다.

Fig. 8~Fig. 10은 80 km/h 주행 시험 음원에 대해 원음장과 재현음장의 분석구간 별 라우드니스를 비교 한 결과로 앞서 음압레벨의 차이와 유사하게 열차 주 행 소음에 비해 차내 기계 소음에 의한 이상소음 발 생 구간에서 원음장과 재현음장의 라우드니스 차이가 더 큰 것으로 보인다. 그러나 Table 2 분석구간별 원 음장과 재현음장의 라우드니스 평균값과 통계값(N=



Fig. 8 Loudness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in open area



Fig. 9 Loudness for target and reproduced sound fields with abnormal mechanical noise

5, 10, 90)을 비교한 결과를 보면, 모든 경우 1 sone 내외로 원음장의 라우드니스 값을 기준으로 최대 7% 이내의 차이를 나타낸다. 라우드니스의 단위인 sone 은 소리의 감각적 크기가 2배가 될 때 그 값도 2배가 되는데, 이를 고려하면 10% 이내의 차이는 감각적으 로 크지 않은 차이로 볼 수 있다.

소리의 주파수 특성 분석은 흔히 1/3 옥타브 스펙 트럼을 이용한다. 그러나 인간의 내이에서 소리를 감 지하는 주파수 분해능과 일치하지 않는데, specific 라우드니스 분석에서는 실제 인간의 소리의 지각과 일치하도록 24개의 임계 주파수 밴드를 갖는 바크 스 케일(bark Scale)을⁽¹²⁾ 사용한다.



Fig. 10 Loudness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in tunnel

 Table 2
 Loudness discriptors in sone and recall ratio of target and reproduced sound fields during 80 km/h running test

Source		Avg, arith/ sone	N = 5/sone	N = 10/sone	N = 90/sone
1	Target	16.4	17.7	17.4	15.5
	Reproduced	16.7	18.8	18.1	15.2
	Difference	-0.3	-1.1	-0.7	0.3
2	Target	19.6	21.3	20.9	18.6
	Reproduced	20.8	22.2	21.9	19.9
	Difference	-1.2	-0.9	-1	-1.3
3	Target	18.0	19.2	18.9	17.1
	Reproduced	17.3	18.8	18.6	16.2
	Difference	0.7	0.4	0.3	0.9

Fig. 11~Fig. 13은 원음장과 재현음장의 specific 라 우드니스 분석결과를 나타낸다. 2 bark(center frequency, 150 Hz)의 저주파 대역과 15 bark(center frequency, 2500 Hz) 이상의 고주파 대역에서는 재현음장이 원 음장 보다 낮은 값을 나타내는데, 이는 이전 장의 주 파수 특성 분석 결과에서 나타난 주파수 대역별 음압 레벨 차이에서 기인한 것으로 해석될 수 있다.

다만, 저주파 대역에서의 라우드니스 차이가 주파 수 분석 결과의 차이에 비해서는 크지 않은데, 사람 의 소리 지각이 비교적 민감하지 않은 대역이기 때문 이다. 5 bark(center frequency, 450 Hz) 근방에서 재 현음장이 원음장 보다 높은 라우드니스 값을 갖는 것 역시 주파수 특성 분석에서 확인한 결과와 일치하는



Fig. 11 Specific loudness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in open area



Fig. 12 Specific loudness for target and reproduced sound fields with abnormal mechanical noise

경향이다. 그 외 중고주파 대부분의 영역에서 라우드 니스 값은 대체로 유사한 것을 확인하였다.

분석구간별로 원음장과 재현음장의 specific 라우 드니스 통계값(N=5, 10, 90)을 비교한 결과를 Table 3 에 나타내었는데, 그 차이는 최대 0.56 sone/bark 정 도이다. 이는 원음장의 specific 라우드니스 값을 기 준으로 최대 38 %의 차이가 나는 것이다.

고주파 대역이 주성분인 음은 그렇지 않은 음에 비 해 더 날카로운 느낌을 준다. 동일한 라우드니스를 갖는 음도 주파수 특성에 따라 샤프니스가 달라진다. 60 dB의 1 kHz 중심 주파수를 갖는 임계대역폭 음의 샤프니스를 1 acum으로 정의하며, aures 방법을 포함 한 고주파수 대역에서 specific 라우드니스가 큰 값을



Fig. 13 Specific loudness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in tunnel

 Table 3
 Specific loudness discriptors in sone/bark and recall ratio of target and reproduced sound fields during 80 km/h running test

Source		N = 5/sone/bark	N = 10/ sone/bark	N = 90/ sone/bark	
1	Target	2.14	1.73	0.258	
	Reproduced	2.70	1.66	0.186	
	Difference	-0.56	0.07	0.072	
2	Target	2.68	1.99	0.291	
	Reproduced	3.16	2.54	0.209	
	Difference	-0.48	-0.55	0.082	
3	Target	2.14	1.74	0.269	
	Reproduced	2.50	1.49	0.167	
	Difference	-0.36	0.25	0.102	

가지면 가중치 함수에 의해 샤프니스도 커진다⁽¹³⁾. Fig. 14~Fig. 16은 80 km/h 주행 시험 음원에 대해 원음장과 재현음장의 분석구간 별 샤프니스를 비교한 결과이다.

분석구간별로 원음장과 재현음장의 샤프니스 평 균값과 통계값(N = 5, 10, 90)을 비교한 결과를 Table 4에 나타내었는데, 그 차이는 최대 0.35로 원 음자의 샤프니스 값을 기준으로 약 10%~20%의 차이다.

이는 specific 라우드니스에 비해서는 재현율이 높 다고 할 수 있다.

특이점은 샤프니스 값은 모든 분석구간에서 재현 음장이 원음장에 비해 대체로 낮은 값을 나타내는데,



Fig. 14 Sharpness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in open area



Fig. 15 Sharpness for target and reproduced sound fields with abnormal mechanical noise

이는 샤프니스 계산 시 고주파 대역에 가중치를 주는 것을 원인으로 볼 수 있다. Specific 라우드니스 분석 결과에서 샤프니스 계산 시 가중치를 줄 수 있는 고 주파 대역인 15 bark(center frequency, 2500 Hz) 이 상에서 재현음장이 원음장에 비해 낮은 값을 갖고, 15 bark 이하의 specific 라우드니스 차이는 샤프니스 계산 시 가중치가 1에 가까운 값으로 샤프니스에 상 대적으로 매우 적은 영향을 준다.

원음장과 재현음장의 라우드니스 차이는 저주파와 고주파 대역에서 상반된 경향을 나타내나, 샤프니스 계산 시 가중치에 의해 결과적으로 재현음장이 전반 적으로 낮게 평가 되는 결과로 분석된다.



Fig. 16 Sharpness for target and reproduced sound fields at 80 km/h in tunnel

 Table 4 Sharpness discriptors in acum and recall ratio of target and reproduced sound fields during 80 km/h running test

Source		N/acum	N = 5/acum	N = 10/ acum	N = 90/ acum
()	Target	1.59	1.75	1.64	1.52
	Reproduced	1.29	1.40	1.36	1.22
	Difference	0.3	0.35	0.28	0.3
2	Target	1.47	1.60	1.55	1.42
	Reproduced	1.22	1.37	1.29	1.17
	Difference	0.25	0.23	0.26	0.25
3	Target	1.56	1.62	1.60	1.52
	Reproduced	1.31	1.38	1.36	1.27
	Difference	0.25	0.24	0.24	0.25

5. 결 론

이 연구에서는 철도 차량 소음의 음향 품질을 개선 하기 위한 예측·평가 플랫폼으로서 입체 음향 시스템 을 소개하였다. 최신의 다양한 음향 재현 기법 중 앰 비소닉 마이크로폰을 이용해 원음장을 인코딩하고, 다채널 라우드스피커가 설치된 시험실에서 디코딩을 통해 실제와 유사하게 재현한 음장의 음압 레벨 및 주파수 특성, 음질 지표를 분석하여 이를 원음장의 측정값과 비교하는 시험을 수행하였다. 이를 통해 철 도 객실 내 소음에 대한 입체 음향 재현 기술의 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

철도 시험선에서 주행 중 열차의 객실 내 소음을 대상으로 개활지와 터널 구간에서 등속 주행 조건, 주행 중 차량 기계 소음의 기여도가 큰 조건을 구분 하여 분석하였으며, 음압 레벨과 라우드니스 측정값 은 원음장과 재현음장이 유사하게 나타났으나, 분석 구간별 주파수 특성의 차이로 인해 specific 라우드니 스와 샤프니스는 원음장의 측정값을 기준으로 평균 10% 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

인간의 소리 지각 분해능을 고려할 때, 임계대역 또는 바크 스케일을 기준으로 음장 재현을 위한 스피 커 출력 시그널을 조절하면, 현재보다 specific 라우 드니스의 재현율을 향상시키는 것이 가능하다. 이는 결국 샤프니스의 재현율과 소리에 대한 체감 측면에 서 현실과 유사한 소리를 실험실에서 재현하는 데 도 움이 될 수 있다.

또한, 음질 지표의 JND(just noticeable difference)⁽¹⁴⁾ 레벨에 대한 기존 연구결과를 활용해 소리의 차이를 지각할 수 있는 유효 레벨을 재현 시스템의 기준 해 상도로 설정하는 등 철도 소음에 최적화된 입체 음향 재현 기술을 확보할 수 있을 것이다. 이외에도 specific 라우드니스의 재현율을 높이기 위해서는 앰비소닉 마 이크로폰의 고주파 대역 측정 한계를 극복하고 음장 재현을 위한 실험실 환경 및 다채널 라우드스피커 재 생 시스템을 보완하는 기술이 필요하다. 후속 연구에 서는 핑크노이즈를 활용한 캘리브레이션 단계에서 실 시간 반응형 보정 알고리즘을 적용하여 원음장의 공 간 음향 특성 재현율을 향상 시킬 계획이다.

이 연구를 통해 철도 소음의 입체 음향 시스템 구 축을 위한 기초적인 성능 검증을 수행하였으며, 향후 연구에서는 다양한 철도 차량 및 운행 조건별 소음에 대한 높은 수준의 재현율을 확보하고자 한다. 또한, 음향 해석 기반의 청각화(auralization)된 음장데이터 와 실측 소음 기반의 재현된 음장데이터를 비교하여 음향 설계의 활용 가능성을 검증할 계획이다. 이를 통해 철도 소음 분야에서 다양한 음향 품질 시험 및 소음 제어 기술의 체감효과 분석에 활용할 virtual test 플랫폼을 개발하고자 한다.

후 기

이 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(철도기술 의 친환경화를 위한 핵심기술 개발)의 연구비 지원으 로 수행되었습니다.

References

(1) Blumlein, A. D., 1931, Improvements in and Relating to Sound-transmission, Sound-recording and Soundreproducing Systems, United Kingdom Patent 394,325.

(2) Pulkki, V., 1997, Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning, Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 45, No. 6, pp. 456~466.

(3) Kwon, B., Park, Y. and Park, Y., 2011, Vector Base Amplitude Panning Based Noise Control Method for Improving the Amenity in Building Environment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 521~528.

(4) Pulkki, V., 1999, Uniform Spreading of Amplitude Panned Virtual Sources, Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA '99), pp. 187~190.

(5) Valentin, O., Gauthier, P.-A., Camier, C., Verron, C., Guastavino, C. and Berry, A., 2022, Perceptual Validation of Sound Environment Reproduction Inside an Aircraft Mock-up, Applied Ergonomics, Vol. 98, 103603.

(6) Rumsey, F., 2001, Spatial Audio, Focal Press, Oxford, UK.

(7) Zotter, F., Frank, M. and Pomberger, H., 2013, Comparison of Energy-preserving and All-round Ambisonic Decoders, Proceedings of the International Conference on Acoustics (AIA-DAGA 2013).

(8) Lee, W. Y., 2011, A Study on Interior Noise

Dose-response of Urban Railway - Focusing on Seoul Metro Green Line , Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea.

(9) Lee, Y., Yoo, J., Jang, D., Lee, M. and Lee, T., 2019, Spatial Audio Technologies for Immersive Media Services, ETRI Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 34, No. 3, pp. 13~22.

(10) Hong, J. Y., Cha, Y. and Jeon, J. Y., 2015, Noise in the Passenger Cars of High-speed Trains, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 138, No. 6, pp. 3513~3521.

(11) MH Acoustics, 2016, Datasheet - Beamformer Data, Version 2, MH acoustics LLC, NJ, United States.

(12) Zwicker, E., 1961, Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen), The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 33, No. 2, p. 248.

(13) Swift, S. H., and Gee, K. L., 2017. Implementing

Sharpness Using Specific Loudness Calculated from the Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds, Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 30, No. 1, 030001.

(14) Pedrielli, F., Carletti, E. and Casazza, C., 2008, Just Noticeable Differences of Loudness and Sharpness for Earth Moving Machines, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 123, No. 5, p. 3164.



Jiyoung Hong received her B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 2004, 2006 and 2011. She is now a senior researcher at Korea Railroad Research Institute