

# 지하철 승강장의 음원-수음점 거리에 따른 실내음향 평가지수 특성

## Characteristic of room acoustical parameters with source-receiver distance on platform in subway stations

김수홍,<sup>1</sup> 송은성,<sup>1</sup> 김정훈,<sup>1</sup> 이송미,<sup>1</sup> 류종관<sup>2†</sup>

(Suhong Kim,<sup>1</sup> Eunsung Song,<sup>1</sup> Jeonghoon Kim,<sup>1</sup> Songmi Lee,<sup>1</sup> and Jongkwan Ryu<sup>2†</sup>)

<sup>1</sup>전남대학교 건축토목공학과, <sup>2</sup>전남대학교 건축학부

(Received August 23, 2021; revised October 7, 2021; accepted October 28, 2021)

**초 록:** 본 연구에서는 지하철 승강장에 적합한 실내음향 설계기준 제시에 앞서, 현재의 지하철 승강장의 위치별 실내음향 특성을 파악하기 위해 2개의 지하철 역사 승강장에서 현장 측정을 실시하였다. 승강장의 길이방향에 따른 분석 결과, 음원에서 수음점이 멀어질수록 음압레벨은 감소(최대 차이: 약 14 dB), 잔향시간은 증가하는 경향(최대 차이: 0.8 s ~ 1.5 s)이었고, C<sub>50</sub>과 D<sub>50</sub>은 감소하는 경향(최대 차이: 5.9 dB ~ 9.1 dB와 31.8% ~ 37.6%)인 것으로 나타났다. 공간감의 지표인 Interaural Cross-correlation Coefficient(IACC)는 음원과의 거리에 따른 명확한 경향성은 보이지 않았지만, 전체적으로 0.3이하의 낮은 값을 보였다. 이러한 결과를 살펴보았을 때 지하철 승강장은 일반적으로 강한 반사재로 마감 되었음에도 수음위치에 따라 직접음과 반사음의 다양한 조합이 형성되어 비균일한 음장특성을 갖는 것으로 판단된다. 이는 길이 대비 높이가 낮고 긴 평면형태를 갖는 지하철 승강장에서는 음원과 수음점의 거리에 따라 근접음장과 원음장의 실내음향특성이 뚜렷이 발현되고 있음을 나타낸다. 따라서, 승강장의 모든 위치에서 명료한 음 정보를 갖춘 실내음향설계를 위해서 승강장에서의 스피커와 수음점 위치별 특성에 기인한 세부 건축 및 전기음향설계가 필요하다.

**핵심용어:** 지하철 역사, 승강장, 잔향시간, 실내음향 파라미터

**ABSTRACT:** Prior to proposing appropriate standard for subway station platform, this study conducted field measurements to examine characteristics of room acoustics on platform of two subway stations. As a result of analyzing the longitudinal length of the platform, Sound Pressure Level (SPL) decreased (maximum difference : 14 dB), Reverberation Time (RT) tended to increase (maximum difference of 0.8 s ~ 1.5 s), and C50 and D50 were decreased (maximum difference: 5.9 dB ~ 9.1 dB and 31.8 % ~ 37.6 %, respectively) as measurement positions moved away from the sound source. The Interaural Cross-correlation Coefficient (IACC) did not show clear tendency, but it was lower than 0.3 in entire points. It is judged that the subway platform has non-uniform sound field characteristics due to various combinations of direct and reflective sound even though it is finished with a strong reflective material. This indicates that the room acoustic characteristics of the near and far sound field are clearly expressed depending on the source-receiver distances in the subway platform having a long flat shape with a low height compared to the length. Therefore, detailed architectural and electric acoustic design based on the characteristics of each location of speaker and sound receiver in the platform is required for an acoustic design with clear sound information at all positions of the platform.

**Keywords:** Subway station, Platform, Room acoustical parameters, Reverberation time

**PACS numbers:** 43.55.Br, 43.55.Fw

†Corresponding author: Jongkwan Ryu (jkryu@jnu.ac.kr)

School of Architecture, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

(Tel: 82-62-530-1631, Fax: 82-62-530-1639)



Copyright©2021 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. 서 론

2020년 기준, 우리나라 인구의 약 38%<sup>[1]</sup>가 이용하는 지하철은 일반인뿐만 아니라 승객의 약 30%<sup>[2]</sup>를 차지하는 교통약자를 위해서 편리함과 안전함을 갖춰야 한다. 지하철 승강장 내에서의 교통정보전달 및 비상상황 시의 정보음을 제공하는 음향설비는 편리한 지하철 이용에 있어 중요하다. 더불어 시각능력이 떨어지는 교통약자나 일반인이라도 시각적 정보를 제한 받는 상황에서 그 중요도는 더욱 커진다. 음향 정보의 중요성은 Tardieu *et al.*의 연구<sup>[3]</sup>에서 철도 역사 내부의 소리만으로도 공간의 정보에 대해 구별이 가능했고, Yilmazer와 Dalimaghadeh의 연구<sup>[4]</sup>에서 정보전달은 청각 정보가 시각 정보와 함께 있을 때 시각 정보만 있을 때보다 더 효과적인 것으로 확인되었다. 한편, Han *et al.*의 연구<sup>[5]</sup>에서 승객들은 지하철 역사에서 빛, 열, 공기환경에 비해 음환경의 불만족이 높게 나타났고, Song *et al.*의 연구<sup>[6]</sup>에서 승강장에서 교통약자인 고령자의 음환경에 대한 불만족도는 다소 높은 것으로 나타났다. 따라서 교통약자 뿐만 아니라 일반인을 위해서 승강장 내의 적절한 실내음향설계가 필요한 것으로 파악된다. 하지만 국내 철도설계지침<sup>[7]</sup>에 의하면, 건축적인 측면에서 잔향시간은 대합실의 경우 500 Hz 기준 1.4 s를 만족해야하고, 콘코스의 경우 1.5 s를 만족해야한다. 하지만 이 실내음향 기준들은 고속철도에 적용을 하기 위한 것으로 열차의 기계적 특성과 승강장 내의 건축적 특성이 다른 일반 지하철 승강장에서의 적용은 검토가 필요하다.

지하철 승강장의 설계기준을 설정하는데 있어 중요한 공간의 음성명료도는 Sato *et al.*의 연구<sup>[8]</sup>에서와 같이 RT는 음성정보를 인식하는 데에 영향을 주고, RT가 길어짐에 따라 정보를 인지하기 위해서 청년자, 고령자 모두 더 높은 스피치 레벨이 필요한 것으로 나타났다. 또한 동지자의 다른 연구<sup>[9]</sup>에서 잔향음장에서는 청취어려움(listening difficulty)이 잔향시간이 길어질수록 증가하며, 청년자보다 고령자에서 더 주요했다. Hodoshima *et al.*의 연구<sup>[10]</sup>에서는 청각능력이 낮을 경우 승강장에서 음성명료도에 있어 RT의 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. Kim과 Soeta의

연구<sup>[11]</sup>에서는 RT가 긴 환경에서는 Interaural Cross-correlation Coefficient(IACC)가 낮을 때 단어인지가 향상되는 것으로 나타나 IACC가 명료도와 관계가 있는 것으로 나타났다. 청감적으로 RT가 음성정보를 인식하는데 중요하고, 확산도를 나타내는 IACC나 음성레벨도 영향을 미치기 때문에 이를 반영한 실내음향 설계기준이 필요하다고 판단된다.

실내음향기준 설정을 위해 청감적 영향과 함께 지하철 승강장의 일반적 실내음향특성의 이해가 필요하다. 승강장에서의 RT에 관한 연구로는 Kang의 연구<sup>[12,13]</sup>에서 RT는 음원에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보였고 저주파 대역에서 긴 수치를 나타냈다. 또한, 다중음원일 경우 음원 및 수음점의 위치에 따라 RT는 길어지거나 또는 짧아지는 것으로 나타났다<sup>[13]</sup>. Sound Pressure Level(SPL) 측면에서 Kang<sup>[12]</sup>은 승강장에서 음원으로부터 멀어질수록 SPL이 감소하는데 그 수치는 30 m 지점에서 5 dB정도 감소하는 것으로 나타났고, Wu *et al.*의 연구<sup>[14]</sup>에서 거리에 따라 SPL은 중주파에 비해 저·고주파에서 크게 감소하는 것으로 나타났다. 공간감에 있어 Shimokura와 Soeta의 연구<sup>[15]</sup>에서 열차소음에 의한 음장은 수음점 위치에 따라 IACC값이 달라져 확산도의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 국내 지하철 승강장의 연구로는 Lee *et al.*의 연구<sup>[16,17]</sup>에서 지하철 승강장의 3개 지점의 측정결과, RT는 음원에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보였다. Lee *et al.*의 연구<sup>[18]</sup>에서 컴퓨터시뮬레이션을 통해 승강장의 소음레벨에 있어 스크린도어의 영향이 큰 것으로 나타났다. 지하철 승강장의 음향 특성은 위치마다 달라지며, 이러한 특성을 고려한 실내음향 평가 및 설계가 요구된다. 승강장 실내음향 설계기준 설정에 있어 기존연구 활용은 국외 연구의 경우 스크린도어가 없고 구조나 마감이 현재 우리나라의 승강장과 다르며, 국내 연구의 경우 스크린도어 유무와 측정점수의 부족으로 실내음향분석에 있어 미흡하여 한계가 있었다.

이러한 실정을 고려하여 본 연구는 지하철에 적합한 실내음향 기준을 제시하기 위한 선행연구로 지하철 승강장의 위치별 실내음향 특성을 현장 측정을 통해 조사하였다. 승강장 유형별로 역사 1개소씩 2개의 역사를 선정했고, 승강장의 중앙에 음원을 설

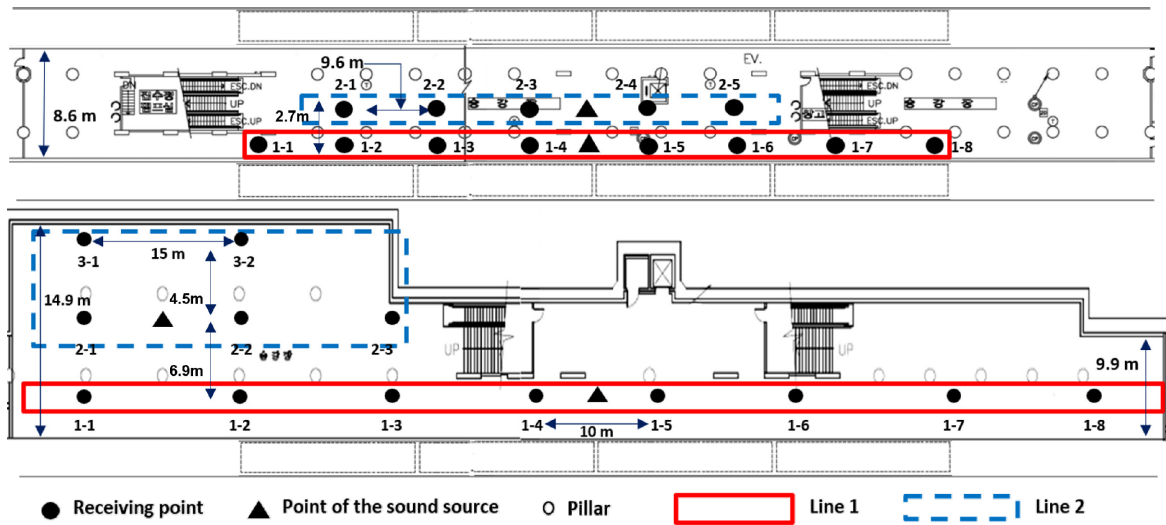


Fig. 1. (Color available online) Plan of platform of subway station selecting for measurement; (a) Island type platform (b) side type platform.

치했다. 수음점은 음원으로부터의 거리를 기준으로 승강장 내 다수의 위치에서 충격응답(impulse response) 측정이 가능하도록 설치하였다. 측정된 데이터는 실내음향 파라미터 분석을 통해 지하철 역사 내의 위치별 실내음향 특성을 제시하였다.

## II. 측정 방법

### 2.1 역사 선정 및 측정지점

지하철 역사는 실내음향적으로 영향을 줄 수 있는 평면형식을 고려하여 섬식, 상대식 각각 1개소를 선정하였다. 광주광역시 지하철에서 이용객이 많은 곳을 기준으로 섬식은 A역을, 상대식은 B역으로 선정하였고, 평면도는 Fig. 1과 같다. 음원의 위치는 실내음향 측정을 위해 Kang<sup>[12]</sup>의 연구를 토대로 승강장 양 끝벽의 영향을 최대한 감소시키고, 실내음향 분석 시 S/N비 확보를 위해 중앙지점을 대표점으로 하였다. 음원은 직접음이 가려지는 것을 방지하기 위해 Line 별로 설치를 하였다. Fig. 1 (a)의 섬식 승강장은 길이 110 m, 폭은 8.6 m였고 용적은 2,838 m<sup>3</sup>로 나타났다. 수음점은 길이를 고려하여 Line 1과 같이 9.6 m 간격으로 총 8 개 지점을 선정하였으며, 각 지점은 천장의 스피커 위치를 기준으로 선정하여 station A는 스크린도어에서 1.2 m, station B는 1.4 m 떨어져 있

Table 1. The finishes on subway platform by part.

Area	Finish materials
Ceiling	Zinc steel sheet (0.7 t, Powder coating)
Side wall	Side wall - Granite polished (30 t) Pillar - Grilled granite burner (30 t) Base board - black pearl polished (20 t)
Floor	Floor - Granite polished (30 t) Near the screen door - Granite (30 t, Trimmed by the machine) Platform safety tile (18 t)

다. 승강장 폭 방향의 영향을 고려하여 Line 2를 9.6 m 간격으로 Line 1로부터 안쪽으로 2.7 m 떨어진 위치에 5지점을 선정하였다. Fig. 1 (b)의 상대식 승강장은 길이 112.6 m, 폭은 넓은 곳이 14.9 m였고 다른 부분은 9.9 m였으며 용적은 3,898 m<sup>3</sup>였다. Line 1은 길이 방향을 고려하여 15 m 간격으로 총 8 개 지점을 선정하였다. 단, 음원에서 가장 가까운 두 점은 10 m 간격이다. 폭의 영향을 살피기 위해 평면도를 살펴본 결과, 특이한 점으로 평면도 상 왼쪽에 폭이 14.9 m인 넓은 곳이 존재했다. 이 부분은 다른 실내음향 특성을 보일 것으로 예상하여 Line 2로 선정하고 폭방향으로 두 번째 열은 첫 번째 열에서 6.9 m 떨어져 있고(스크린도어 기준 8.3 m), 세 번째 열은 두 번째 열에서 4.5 m(스크린도어 기준 12.8 m), 벽에서 2.1 m 떨어져 있다. Line 2는 총 5개소를 선정하였다. 두 역사의 내부 마감은 Table 1과 같았다.

## 2.2 측정 및 분석 방법

음원은 1.5 m 높이로 설치한 무지향성 스피커를 통해 10 s의 sine sweep을 음원으로부터 5 m 떨어진 거리에서 95 dB가 되도록 재생시켰다. Head And Torso Simulator(HATS)를 1.5 m 높이로 설치하여 다채널 신호분석기(01dB dB4, ACOEM)를 이용하여 지점별로 30 s간 녹음을 수행하였다. 녹음을 하기 전 HATS의 왼쪽과 오른쪽의 마이크로폰을 통해 각각 캘리브레이션 녹음을 하였다. 측정시간은 이용객에 의한 영향을 최소화하기 위해서 21 h ~ 23 h에 진행하였다. 녹음된 데이터는 Adobe Audition 3.0의 plugin Aurora 3.2를 통해 분석하였다. 실내음향분석은 동일음원을 기준으로 하여 Line별로 실시하였다. 분석에 사용된 실내음향 파라메타는 음량을 살펴보기 위한 SPL과 명료도 관점에서 중요한 지표인 RT,  $C_{50}$ ,  $D_{50}$ 을 분석하였다. 또 공간감에 의한 영향을 살펴보기 위해 IACC에 대해서도 분석하였다. 모든 파라메타는 지점에 따른 영향을 살펴보기 위해 거리에 따라 제시하였다. 또 HATS로 녹음을 했기 때문에 데이터는 왼쪽과 오른쪽 마이크로폰에 대한 정보를 담고 있는데, 분석은 두 값의 평균치를 계산하여 제시하였다.

## III. 측정 결과

### 3.1 Sound Pressure Level(SPL)

역사 내부의 음압 분포를 알아보기 위해 측정된 각 역사별 데이터를 거리에 따라 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 각 그래프에서 세로 축점선은 음원의 위치

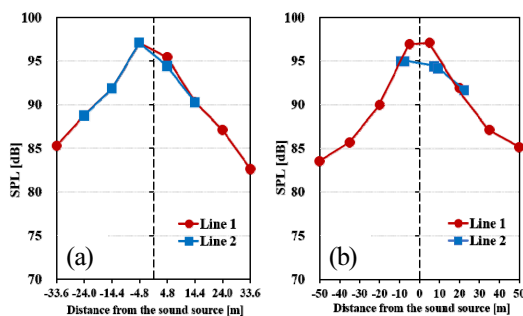


Fig. 2. (Color available online) SPL for each distance from the sound source on subway platform; (a) station A (island type), (b) station B (side type).

이자 0 m 지점을 의미한다. 먼저 Fig. 2의 (a), (b)에서 빨간색으로 나타낸 Line 1에 대해 섬식과 상대식 모두 음원에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다. Station A에서는 거리에 따라 82.6 dB ~ 97.1 dB의 분포를 보였고, 거리별 차이의 경우 -4.8 m 지점과 33.6 m 지점을 비교했을 때 최대 14.5 dB까지 나타났다. Station B의 수치를 보면 거리에 따라 83.5 dB ~ 97.1 dB의 분포를 보였고, 최대 차이는 5 m와 -50 m 지점에서 13.6 dB로 나타났다. 다음으로 Line별로 차이를 보면 A역사의 경우 Line 1, 2에서 비슷한 경향을 보였다. 음원으로부터 멀어질수록 감소했고 라인별 차이는 최대 1 dB로 나타났다. B역사는 Line 1, 2의 경향이 다르게 나타났다. Line 2의 경우 Line 1과는 달리 음원으로부터 멀어져도 감소치가 3.3 dB로 나타나 Line 1에 비해 작은 수치를 보였다.

### 3.2 Reverberation Time(RT)

본 연구에서는 20 dB 감쇠하는데 소요되는 시간을 구하여 잔향시간을 산출하는  $T_{20}$  값을 분석하였고, 분석 결과는 Fig. 3과 같다. 먼저 Line 1에 대한 결과에서 특징적인 경향으로 음원으로부터 멀어질수록 잔향시간이 증가하는 경향을 보였다. Station A의 경우 음원으로부터의 거리에 따라 2.0 s ~ 2.8 s의 분포를 보였고 최대 0.8 s의 차이를 나타냈다. Station B의 경우 2.1 s ~ 3.6 s의 분포와 1.5 s의 최대차이를 보였다. Station B의 경우 그래프의 거리상 -부분이 큰 값을 보였는데 평면에서의 넓은 공간이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. Line 별 차이를 살펴보기 위해 Fig. 3을 살펴보면 station A는 -24.0 m에서 0.2 s 정도의 차

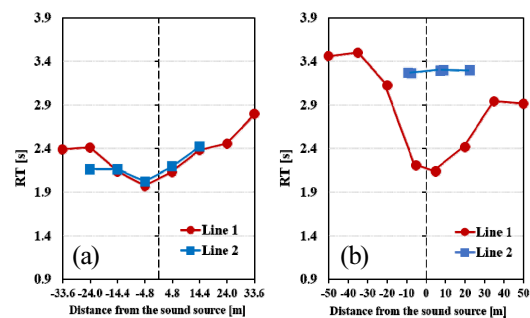


Fig. 3. (Color available online) RT for each distance from the sound source on subway platform; (a) station A (island type), (b) station B (side type).

이를 보이는 것을 제외하고는 거의 비슷한 수치를 보였다. Line 2가 -24.0 m 지점을 제외하고는 근소하게 긴 잔향시간을 보였지만 두 라인은 비슷한 경향과 수치를 갖는 것으로 나타났다. Station B는 라인별로 큰 차이를 보였다. 잔향시간은 최대 1.3 s까지 나타났고, 음원으로부터의 거리에 따른 차이는 Line 2에서는 거의 나타나지 않았다. 음원과의 거리 및 공간의 특성이 잔향시간에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 $C_{50}$

Clarity는 명료도를 나타내는 척도로 음악에서는 주로  $C_{80}$ 값을 사용한다. Bradley *et al.*의 연구<sup>[19]</sup>에서 실내음향에서 스피치에 대한 평가는  $C_{50}$ 값을 사용하는 것이 적절한 것으로 나타나  $C_{50}$ 을 사용하였다.  $C_{50}$ 의 결과는 Fig. 4와 같다. 먼저 Fig 4의 (a), (b)의 빨간색 그래프(Line 1)을 살펴보면 음원으로부터 멀어지면 감소하는 경향을 나타낸다. Station A는 음원으로부터의 거리에 따라 -4.2 dB ~ 1.7 dB의 분포를 보였고 최대차이는 5.9 dB였다. Station B는 -7.5 dB ~ 1.6 dB의 분포를 보였고 최대 차이는 9.1 dB로 나타났다. 음원으로부터 거리가 더 먼 지점이 존재하는 station B에서 가장 낮은 수치를 보였다. 또 음원을 기준으로 거의 대칭적인 분포를 보이는 station A와는 달리 station B는 비대칭적이었는데 이는 평면상의 차이가 기인하는 것으로 분석된다. Line 별 차이를 살펴보면 station A, B 모두 차이가 존재했다. Station A는 음원을 기준으로 왼편은 차이가 작았지만 오른편은 최대 2.6 dB까지 차이가 나타났다. Station B는 최대 5.1

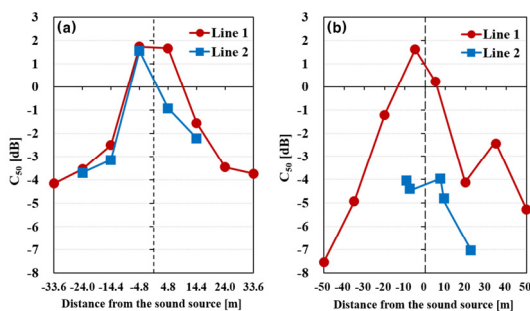


Fig. 4. (Color available online)  $C_{50}$  for each distance from the sound source on subway platform; (a) station A (island type), (b) station B (side type).

dB까지 차이가 나타났고 경향도 달랐다. 폭 또한 실내음향에 영향을 미치는 것으로 분석된다. 음원으로 부터의 거리에 따라 명료도가 달라지기 때문에 실내음향적으로 고려가 필요하다고 판단된다.

### 3.4 $D_{50}$

명료도의 객관적 평가에 있어  $D_{50}$ 은 잔향음장에서 음성음원이 재생되었을 때, 재생된 단어를 정확히 인지하는 정도(word accuracy)와 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다<sup>[20]</sup>.  $D_{50}$ 의 결과는 Fig. 5의 (a), (b)에서 Line 1의 데이터를 보면 음원에서 멀어질수록 대체로 감소하는 경향을 보였다. Station A는 거리에 따라 27.8%~59.7%의 분포를 보였고 최대 31.8% 차이가 나타났다. Station B는 11.3%~48.9% 분포를 나타냈고, 최대 37.6%의 차이가 나타났다. Fig. 5의 (b) 그래프가 (a)와는 달리 비대칭인 것으로 보아 위치와 공간의 평면의 영향을 미치는 것으로 판단된다. Line 별 차이를 살펴보면 station A는 4.8 m 지점에서 14.9% 차이를 보인 것을 제외하면 대체로 비슷한 수치와 경향을 보였다. 이에 반해 station B는 Line에 따라 최대 33.1%의 차이가 나타났고 경향도 상이하게 나타났다. 음원으로부터의 거리뿐만 아니라 폭의 영향도 무시할 수 없는 것으로 보인다.

### 3.5 IACC

공간감을 나타내는 지표로서 IACC를 분석하였다. 이 값이 1에 가까울수록 공간감(확산감)이 적게 느껴지고, 0에 가까울수록 공간감이 크게 느껴지는데 일반적인 콘서트홀의 경우 0.5 이하가 권장된다.

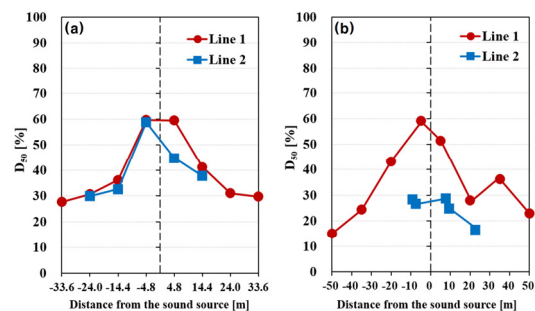


Fig. 5. (Color available online)  $D_{50}$  for each distance from the sound source on subway platform; (a) station A (island type), (b) station B (side type).



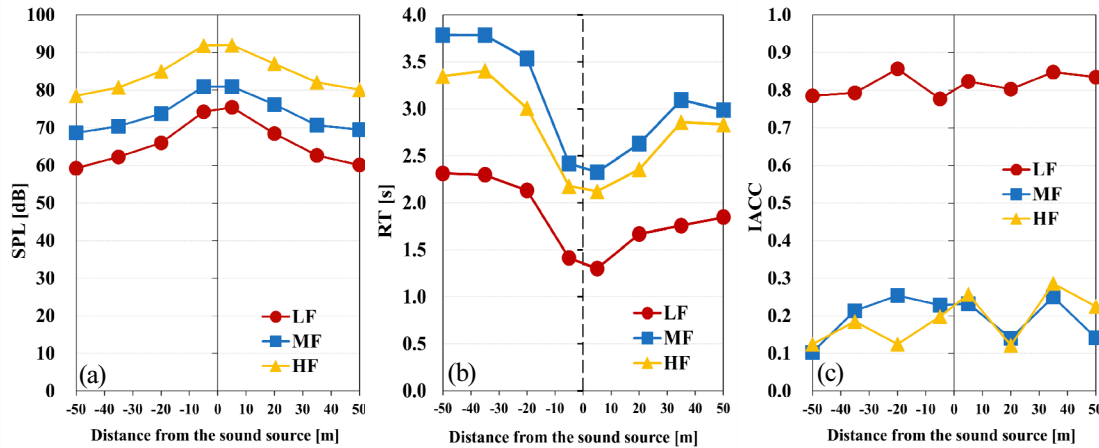


Fig. 7. (Color available online) Room acoustical parameters with respect to distance from the sound source on subway platform (side type: station B) for each frequency (LF: 125 Hz, MF: 1,000 Hz, HF: 4,000 Hz); (a) SPL, (b) RT, (c) IACC.

낮아지는)으로 분석된다. IACC는 평면형식과 더불어 청취하는 위치 주변의 확산체의 유무의 영향이 큰 것으로 판단되나, 이에 관해서는 추가 연구가 필요하다라고 사료된다.

#### 4.2 기존 연구와의 실내음향 특성 비교 분석

현장측정 결과를 통해 지하철 승강장의 실내음향 특성을 파악하였다. 본 절의 분석은 상대식 역사(station B)를 기준으로 분석하였다. 기존 유사 연구<sup>[12]</sup>와의 비교분석을 위해 주파수대역(LF: 125 Hz, MF: 1,000 Hz, HF: 4,000 Hz)별 분석을 실시하여 Fig. 7과 같이 제시하였다. 주파수대역 별 분석은 기존 연구대상역과 동일평면인 상대식(station B)역을 대상으로 실시하였다. 먼저 SPL의 경우 거리에 따른 감쇠는 Kang의 연구<sup>[12]</sup>에서 음원으로부터 30 m 떨어질 경우 5 dB 정도(1,000 Hz) 감쇠하는 것으로 나타났지만, 본 연구 측정결과에서는 30 m 지점에서 10.2 dB정도 감쇠하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 공간의 경계 조건의 영향에 기인하는 것으로 판단된다. Kang의 연구<sup>[12]</sup>에서 지하철 플랫폼을 경계조건에 따라 확산 반사적 경계와 기하학적 반사 경계 두 가지로 분류하였다. 확산 반사적 경계를 가진 역사는 기하학적 반사 경계에 비해 감쇠가 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서 IACC 측정 결과 0.3이하의 낮은 값은 해당 플랫폼의 실내마감에 확산반사 경계면인 것에 기인한 것으로 판단된다. 이에 따라, 기존 연구 대비 보다 큰

감쇠가 발생한 것으로 추정된다. 따라서 설계 시 거리에 따른 감쇠가 크다는 점과 마감에 따라 결정되는 경계면 특성 또한 감쇠에 있어 중요하다는 점을 고려하여야 한다.

측정 승강장(station B)의 RT 결과는 2.1 s ~ 3.6 s의 수치를 보였고, 저주파 대역에서 가장 짧았으며, 음원에서 멀어지면 대략 35 m까지는 증가하는 경향을 보였다. 이는 Kang의 연구<sup>[12]</sup>에서의 경향과 비슷하나, 수치적으로는 차이가 있었다. Kang의 연구에서 본 실험과 가장 유사한 측정을 실시한 영국 런던의 Euston Square underground station의 승강장(용적: 6,480 m<sup>3</sup>)의 RT 값은 1.4 s ~ 2.2 s(500 Hz)로 나타났다. 구조적으로 차이가 존재하지만 본 연구에서 측정한 상대식 승강장(용적: 3,898 m<sup>3</sup>)의 RT가 공간적으로 용적이 작음에도 불구하고, 영국 지하철 보다 최대 1.3 s까지 높게 나타났다. 특히 승강장의 길이방향에 따른 차이는 영국의 경우 0.8 s가 최대였지만, 측정 승강장은 1.5 s까지 나타났다. Gomez의 연구<sup>[21]</sup>에서 승강장의 용적과 RT의 관계는 약한 상관관계인 것으로 나타나 영향도가 비교적 낮은 것으로 나타났다. 따라서 이러한 RT의 차이는 승강장 내 구조나 마감재 등의 차이가 기인한 것으로 판단된다. 측정 승강장의 RT 최대 수치인 3.5 s는 상대식 평면상의 넓은 공간에서 나타나는데 이는 구조의 영향인 것으로 판단된다. 또 다른 요인으로 마감재 구성에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구의 측정 승강장의 마감

재는 Table 1과 같이 나타냈다. 기둥, 계단실 같은 확산체 역할을 하는 부분을 제외하면 반사율이 높은 재료의 타일, 석재판, 아연도강판과 같은 마감재로 인해 승강장 내부는 경면 반사가 일어난다. 소리는 음원으로부터 멀어질수록 직접음의 크기는 감소하는 반면, 반사성 마감으로 인해 반사음은 많아지고 직접음 대비 그 크기가 근접음장과 비교하여 상대적으로 커지게 되어 RT가 길어지게 되는 것으로 분석된다. 한편, 주파수 분석에서는 Kang의 연구<sup>[12]</sup>의 경우 저주파대역이 가장 긴 RT 수치를 보였으나, 본 연구에서는 Fig. 7의 (b)에서와 같이 가장 짧은 RT 수치를 나타냈다. 본 연구의 결과는 Gomez의 연구<sup>[21]</sup>에서 밝힌 금속재 천장 마감재 영향(metal cladding effect)과 유사한 결과였다. 다이어프램 흡음재의 효과와 함께 천장 마감재인 아연도강판이 판진동을 하여 저주파 영역의 감쇠가 추가적으로 발생하여 저주파 영역이 가장 낮은 RT 수치를 보이는 것으로 판단된다. 다음으로 지하철 승강장의 명료도는 잔향시간이 길어지면 명료도가 감소하는<sup>[22]</sup> 일반적인 경향을 나타냈다. 지하철 승강장의 방송은 음원에서 멀어질수록 RT가 길어지고, 이로 인해 명료도가 감소하기 된다. 따라서 RT와 명료도 측면에서 구조와 마감재 배치를 통해 긴 RT를 피하고, 위치에 따른 차이를 최소화하는 것이 필요하다.

마지막으로 공간감을 나타내는 지표인 IACC와 관련해서 Kang의 연구<sup>[12]</sup>에서 지하철 승강장의 긴 형태로 인해 확산이 잘 일어나지 않게 된다고 밝히고 있다. 이는 IACC 값이 높게 나타날 것이라는 유추가 가능한데, 본 측정데이터에서는 낮게 나타나(0.31 이하) 공간감이 큰 공간으로 평가되었다. 이러한 결과는 공간의 두루 설치된 원형기둥 등의 영향일 것으로 사료되나, 추가 조사가 필요하다. RT가 긴 공간에서 공간감이 크면 음성인지가 개선될 수 있다는 기존의 연구<sup>[11]</sup>를 볼 때 승강장은 인지적 측면에서 바람직할 수 있으나, 적절한 RT조건과 IACC에 대한 추가적 연구가 필요하다고 판단된다. 한편, 주파수 대역에 따른 분석에서 Fig. 7의 (c)와 같이 저주파 대역에서 IACC 값이 높은 것으로 나타났다.

### 4.3 지하철 승강장의 실내음향 설계기준

미국의 Urban Mass Transportation Act(UMTA)<sup>[23]</sup>와 American Public Transportation Association(APTA)<sup>[24]</sup>에서는 지하철 승강장의 RT 권장 기준으로 1.2 s~1.4 s를 확보하도록 권장하고 있다. 이 권장 기준을 통해 음성명료도 확보가 가능하다고 하는데, 본 연구의 측정데이터를 살펴보면 이를 상회하는 결과를 얻은 것을 알 수 있다. 측정된 승강장의 RT는 2.0 s~3.6 s로 긴 RT는 위의 기준을 만족하지 못하고 있다. 특히 음원에서의 거리에 따라 RT가 달라지게 되는데 이것도 고려 요소이다. 1.2 s~1.4 s의 잔향시간을 확보하기 위해서는 천장면이나 벽면에 흡음재를 설치하여 긴 RT를 줄이는 것이 필요하다고 판단된다. Shimokura와 Soeta의 연구<sup>[25]</sup>에서 천장면이 초기 음반사 측면에서 중요하다는 것을 보였는데, 적정 RT 확보를 위해 천장면의 흡음처리를 중점적으로 고려하는 것이 필요하다고 판단된다. 따라서 천장면의 흡음재 배치의 영향에 대한 추가적 연구가 필요하다고 사료된다.

다른 대안으로 IACC와 관련한 것으로 앞서 언급한 김용희의 연구<sup>[11]</sup>에서 RT가 길 경우 공간에서의 음의 확산과 관련이 있는 IACC값이 낮으면<sup>[26]</sup> 명료도를 개선할 수 있다는 결과가 있다. 확산도를 높이기 위해 시뮬레이션을 통해 양이의 차이에 있어 가장 주요한 영향을 미친다는 천장면<sup>[27]</sup>이나 넓은 면적을 차지하는 벽면에 확산체를 설계하여 설치할 경우 명료도 개선이 가능할 수 있지만 이 방법은 더 면밀한 연구가 필요하다고 판단된다.

또 다른 기준으로 영국의 지하철 승강장의 기준<sup>[28]</sup>에서 명료도 확보를 위해 STI 값이 0.46~0.50을 확보하도록 하고 있다. 추후 명료도 관점에서 면밀한 결과와 영국의 기준에 대한 적용 검토를 위해 STI 관점에서의 조사 및 분석이 필요하다고 판단된다.

마지막으로 본 연구에서는 음원위치 등의 변수를 제외하고 승강장의 실내음향 특성 파악을 위해 한 개의 음원을 통해 측정했지만, 실제 승강장은 음원(스피커)이 여러 개가 존재한다. Kang<sup>[12,13]</sup>의 연구에서 다중 음원의 경우 RT는 추가음원이 음원과 수음점 밖에서 증가할 경우 더 길어지고, 음원과 수음점 사이에 음원이 증가하면 RT가 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 고려하였을 때, 본 연구에서



측정한 승강장들의 RT는 다중음원의 효과에 의해 증가하는 경향을 보일 것으로 예상된다. 이에 관하여는 추후에 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

## V. 결 론

본 연구는 지하철 승강장에 적합한 실내음향 설계 기준을 제시하기에 앞서, 승강장 내의 실내음향특성을 파악하기 위해 현장 측정을 실시하였다. 섬식과 상대식 각 1개소의 역사에 대해 측정을 했고, 승강장의 끝벽의 영향을 최소화한 중앙지점의 음원으로부터 거리에 따라 SPL, RT,  $C_{50}$ ,  $D_{50}$ , IACC를 분석했다. 측정결과, 음원에서 멀어질수록 SPL은 감소했고(측정점간 최대 차이 약 14 dB), RT는 증가하는 경향을 보였으며, 측정점간 최대 차이는 0.8 s ~ 1.5 s로 국외 지하철역사를 대상으로 한 이전 연구들의 결과에 비해 긴 것으로 나타났다. 특히 저주파 대역에서 RT의 수치가 낮게 나타났는데 이러한 결과는 천장의 구조와 마감재 등의 영향으로 분석된다. 명료도와 관련해  $C_{50}$ 과  $D_{50}$ 은 음원으로부터 멀어질수록 감소하여 측정점간 최대차이가 5.9 dB ~ 9.1 dB와 31.8% ~ 37.6%인 것으로 나타났다. 공간감에서는 IACC의 경우 거리에 따라 명확한 경향은 나타나지 않았지만, 전체적으로 대략 0.3 이하의 낮은 수치를 보였다.

실내음향지표를 통한 분석을 통해 지하철 승강장은 측정 위치에 따라 잔향시간과 명료도 측면에서 큰 차이를 보이며, 이러한 결과를 살펴보았을 때 지하철 승강장은 일반적으로 강한 반사재로 마감 되었음에도 수음위치에 따라 직접음과 반사음의 다양한 조합이 형성되어 비균일한 음향특성을 갖는 것으로 판단된다. 이는 길이 대비 높이가 낮고 긴 평면형태를 갖는 지하철 승강장에서는 음원과 수음점의 거리에 따라 근접음장과 원음장의 실내음향특성이 뚜렷이 발현되고 있음을 나타낸다. 따라서, 승강장의 모든 위치에서 명료한 음정보를 갖춘 실내음향설계를 위해서 승강장에서의 스피커와 수음점 위치별 특성에 기인한 세부 건축 및 전기음향설계가 필요하다.

추후, 측정데이터를 바탕으로 컴퓨터시뮬레이션을 통해 다양한 경계조건에서의 지하철 승강장의 음향특성을 살펴볼 예정이다. 시뮬레이션을 토대로 마감재

등의 조건을 달리한 음원을 통해 청감실험을 실시하여 얻은 결과를 바탕으로 지하철 승강장에 적합한 실내음향설계기준을 도출할 예정이다. 또한, 다수의 스피커를 사용하는 실제 승강장 상황을 고려하여 다중음원에 의한 실내음향 특성연구가 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

“이 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단(No. 2019R1A2B5B0107041313)과 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 21CTAP-C163631-01)의 지원을 받아 수행된 연구임.”

## References

1. *Public Transportation Report in 2020*, [https://www.kotsa.or.kr/ptc/inside\\_use.do](https://www.kotsa.or.kr/ptc/inside_use.do), (Last viewed November 12, 2021).
2. *Current State of Information Related to the Weak Pedestrians and Mobility Facilities in Transportation Safety Information Management System*, <https://tmacs.kotsa.or.kr/>, (Last viewed June 20, 2021).
3. J. Tardieu, P. Susini, F. Poisson, P. Lazareff, and S. McAdams, “Perceptual study of soundscapes in train stations,” *Applied Acoustics*, **69**, 1224-1239 (2008).
4. S. Yilmazer and D. Daliraghadeh, “The effect of soundscape on memory performance in a wayfinding task in a virtual outpatient polyclinic,” *Proc. INTER-NOISE and NOISE-CON Cong. and Conf.* 3254-3263 (2020).
5. J. Han, S. B. Kwon, and C. Chun, “Indoor environment and passengers’ comfort in subway stations in Seoul,” *Building and Environment*, **104**, 221-231 (2016).
6. H. S. Song, J. H. Kim, S. M. Lee, S. H. Kim, and J. K. Ryu, “A survey on the signal and guide sound in subway station for the elderly,” *Proc. KSNVE*. 76-76 (2020).
7. Ministry of land, infrastructure and transport, “Design criteria for railroad,” *Tech. Rep.*, 2015.
8. H. Sato, H. Sato, M. Morimoto, and R. Ota, “Acceptable range of speech level for both young and aged listeners in reverberant and quiet sound fields,” *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, 1616-1623 (2007).
9. H. Sato, H. Sato, and M. Morimoto, “Effects of aging on word intelligibility and listening difficulty in various reverberant fields,” *J. Acoust. Soc. Am.* **121**,

- 2915-2922 (2007).
10. N. Hodoshima, T. Arai, and K. Kurisu, "Intelligibility of speech spoken in noise/reverberation for older adults in reverberant environments," Proc. ISCA. 1464-1467 (2012).
  11. Y. H. Kim and Y. Soeta, "Effects of reverberation and spatial diffuseness on the speech intelligibility of public address sounds in subway platform for young and aged people," Proc. Meetings on Acoustics, **19**, 050061 (2013).
  12. J. Kang, *Acoustics of Long Spaces: Theory and Design Guidance* (ThomasTelford, sheffield, 2002), pp. 77.
  13. J. Kang, "Acoustics in long enclosures with multiple sources," J. Acoust. Soc. Am. **99**, 985-989 (1996).
  14. Y. Wu, J. Kang, and W. Zheng, "Acoustic environment research of railway station in China," Energy Procedia, **153**, 353-358 (2018).
  15. R. Shimokura and Y. Soeta, "Train noise and sound field characteristics in underground station," Proc. 4<sup>th</sup> ISTD. 49-52 (2009).
  16. S. W. Lee, D. U. Jeong, S. Y. Lee, and S. G. Cha, "A study on the indoor noise levels in underground stations considering architectural design features" (in Korean). Architectural Institute of Korea, **18**, 235-241 (2002).
  17. S. W. Lee, D. U. Jeong, S. Y. Lee, S. G. Cha, and M. S. Sym, "A study on the evaluation of acoustic characteristic in underground subway stations in Seoul" (in Korean), JAIK. **19**, 155-162 (2003).
  18. M. J. Lee, H. W. Oh, and M. J. Kim, "Measurement and analysis on the noise by train cars at platform of subway station" (in Korean), JKLES. **6**, 126-133 (2009).
  19. J. S. Bradley, R. Reich, and S. G. Norcross, "A just noticeable difference in C50 for speech," Applied Acoustics, **58**, 99-108 (1999).
  20. A. Sehr, E. A. Habets, R. Maas, and W. Kellermann, "Towards a better understanding of the effect of reverberation on speech recognition performance," Proc. IWAENC. 1-4 (2010).
  21. L. G. Agustina, *Design and optimisation of voice alarm systems for underground stations*, (Ph. D, London South Bank University, 2012).
  22. S. H. Kang, *Fundamentals of Sound Engineering* (Sound Media, Seoul, 2018), pp. 77.
  23. W. S. Jr. Morrow, "The urban mass transportation," Tech. Rep., 1970.
  24. Rail Transit Committee, "Noise and vibration; Guidelines and principles for design of rapid transit facilities," APTA(American public transit association), Tech. Rep., 1979.
  25. R. Shimokura and Y. Soeta, "Sound field characteristics of underground railway stations-Effect of interior materials and noise source positions," Applied Acoustics,

**73**, 1150-1158 (2012).

26. A. Avni and B. Rafaely, "Interaural cross correlation and spatial correlation in a sound field represented by spherical harmonics," Proc. Ambisonics Symposium, 823-828 (2009).
27. Y. H. Kim and Y. Soeta, "Architectural treatments for improving sound fields for public address announcements in underground station platforms," Applied acoustics, **74**, 1205-1220 (2013).
28. IEC 60268-16, *Sound System Equipment; Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index*, 2020.

## 저자 약력

### ▶ 김 수 홍 (Su-Hong Kim)



2020년 2월: 전남대학교 건축공학과 학사  
2020년 3월 ~ 현재: 전남대학교 건축토목  
공학과 석사과정

### ▶ 송 은 성 (Eun-Sung Song)



2021년 2월: 영산대학교 건축플랜트학과  
학사  
2021년 3월 ~ 현재: 전남대학교 건축토목  
공학과 석사과정

### ▶ 김 정 훈 (Jeong-Hoon Kim)



2019년 2월: 영산대학교 건축플랜트학과  
학사  
2021년 2월: 전남대학교 건축토목공학과  
석사  
2021년 3월 ~ 현재: 전남대학교 건축토목  
공학과 박사과정

### ▶ 이 송 미 (Song-Mi Lee)



2019년 2월: 영산대학교 건축플랜트학과  
학사  
2021년 2월: 전남대학교 건축토목공학과  
석사  
2021년 3월 ~ 현재: 전남대학교 건축토목  
공학과 박사과정

▶ 류 종 관 (Jong-Kwan Ryu)



2007년 2월 : 한양대학교 건축공학과 박사  
2010년 8월 : Post-doctoral course in AIST,  
Japan  
2011년 5월 : 한양대학교 건축공학과 연구  
조교수  
2015년 8월 : 포스코건설 R&D center 책임  
연구원  
2015년 9월 ~ 현재 : 전남대학교 건축학부  
교수