

# 터널 통과 전동차 내외부 소음 특성 규명

## Identification of Noise Characteristics for Subway Train Passing through the Underground Tunnel

조준호\* · 이규진\*\* · 정우성\*\* · 홍철기\*\*\*

Jun-Ho Cho, Kyu-Jin Lee, Woo-Sung Jung and Chull-Kee Hong

**Key Words** : Subway train(지하철), Noise(소음), Squeal(스킬)

### ABSTRACT

Passengers in automobile or train are exposed to a worse noise environment when they are in the tunnel than in the open field. This is due to a relatively higher space density of sound energy by multiple reflection phenomenon of noise generated by operation of transportation vehicles from tunnel wall compared to open field. In this study, noise characteristics of subway train running through a tunnel were investigated at straight/curved track and tunnel type(semi circular/box). Also the noise measured simultaneously at inner and outer sides of train running through a tunnel, so that the coherence of the various noise sources of subway train to inner noise was evaluated.

### 1. 서 론

국가 경제의 지속적 성장을 위한 사회 간접 시설 확충의 일환으로 지하철, 고속철도, 고속화 도로 등 대량·고효율 교통시설의 신설 및 증설이 지속적으로 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 신설 교통시설은 그 대부분이 인구 밀집도가 매우 높고, 활용 가능한 공간이 극히 제한적인 대도시를 중심으로 건설되기 때문에 기존 교통시설과 건축물 및 도시 미관 등 기존 공간의 활용도를 최대한 보전할 수 있어야 한다. 이로 인해 최근 건설되고 있는 도시 고속화 도로 및 철도 등의 교통시설은 공사 난이도가 높고 고비용이 요구되는데도 불구하고 입체화 및 지하화 되고 있다. 특히, 교통분담비율이 갈수록 높아지고 있는 도시 전철의 경우 대부분이 지하터널 구조로 건설되고 있는 실정이다.

한편, 도로나 철도가 지하터널을 통과할 경우 차량이나 열차에 탑승하고 있는 승객은 개방된 공간과 비교하여 열악한 소음 환경에 노출된다.<sup>(2)</sup> 이는 제한된 공간을 갖는 지하터널에서는 개방된 공간과는 달리 수송기계의 운전으로 인해 발생한 소음의 터널 내부 벽면에서의 다중 반사 현상으로 인

해 음 에너지의 공간밀도가 상대적으로 높기 때문이다.

분당선을 포함한 국내 도시 전철의 경우 미국과 같은 선진국에서의 전동차내 소음 권고치 70dBA는 물론 외국 지하철의 평균 내부소음도 70 dBA~75 dBA 보다도 5 dBA~10 dBA 높은 75 dBA ~ 85 dBA의 소음 분포를 나타내고 있어 승무원과 하루 수백만명의 지하철 이용 승객이 과도한 소음 환경에 노출되고 있는 실정이다.<sup>(3)</sup> 따라서, 국내 지하철 구간을 운행하는 열차의 소음 발생 원인 및 전달 경로를 규명하여 효율적 소음 저감 대책을 수립하는 것이 시급한 실정이다. 지하철 구간에서의 음 에너지 밀도를 효율적으로 저감시키기 위해서는 열차 소음의 발생 특성 및 직접음과 반사음의 전달 경로를 규명하고, 전달 경로상에 최적의 흡차음 특성을 갖는 재료를 최상의 흡음 효과를 갖도록 터널 내부에 시공해야만 한다. 그러나, 국내의 경우 기존 지하철 노선 중 일부 구간에 대해서 고가의 수입 흡차음재와 외국 기술에 의한 설계 및 시공한 사례가 있으나<sup>(4)</sup> 국내 기술과 제품으로 소음을 저감시킨 사례는 없다.

본 연구에서는 터널내부 소음 저감을 위한 흡음기술 개발을 위한 기초자료 획득을 위해 터널내부 열차 주행시 단/복선별, 직/곡선별, 터널 구조별(마제형/박스형)로 도상과 벽체 위치에 따라 소음 실태를 조사하여 열차 통과에 따른 터널내부에서의 음장 특성을 규명하였으며, 터널내부를 통과하는 열차의 내·외부 소음을 동시에 측정하여 그 전달 특성을 규명하였다.

\* 한국철도기술연구원  
E-mail : jhcho@krrri.re.kr  
Tel : (031) 461-8331, Fax : (031) 461-8374

\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\* 서울도시철도공사

## 2. 터널내부 소음 측정

### 2.1 터널내부 소음 측정 개요

터널내부 소음측정은 국내 A 지하철의 콘크리트 도상을 중심으로 터널 단면유형 및 선로유형에 따라 총 11개소에서 상·하행 위치별로 소음을 측정하였다. 터널내부 소음측정 구간의 개요를 표 1에 나타내었고 소음측정 및 분석에 사용한 주요 장비를 표 2에 나타내었다. 터널내부 소음측정은 열차가 운행하지 않는 시간에 그림 1과 같이 터널벽체 및 레일 중앙부분에 마이크로폰을 설치한 다음, 열차 운행시 환기실 등 터널내부에 설치된 측정가능 공간에서 Sony Recorder와 Larson-Davis 3200을 이용하여 구간별 열차운행 소음을 수회 반복하여 측정하였고, 실험실에서 열차속도별, 상·하행별로 분석을 수행하였다.

소음측정 구간별로 열차 교행 및 저속차량 등 특이한 운행차량의 소음은 제외하고, 열차가 마이크로폰 설치지점을 통과하여 음압레벨이 최대가 되는 5초 동안의 등가소음도를 산술평균하여 채널별 평균소음도 및 주파수별 평균 소음도를 산출하였다.

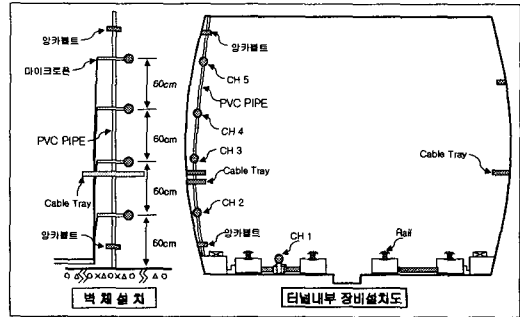


그림 1 터널내부 소음측정장비 설치도

표 1 터널내부 소음측정 개요

번호	측정구간	터널형상
1	A-㉑	복선/박스/곡선
2	A-㉒	복선/마제형/직선
3	A-㉓	복선/마제형/곡선
4	A-㉔	단선/박스/직선
5	A-㉕	단선/반마제형/곡선
6	A-㉖	복선/마제형/곡선
7	A-㉗	단선/마제형/곡선
8	A-㉘	단선/마제형/직선
9	A-㉙	단선/마제형/곡선
10	A-㉚	복선/박스/직선
11	A-㉛	복선/박스/곡선

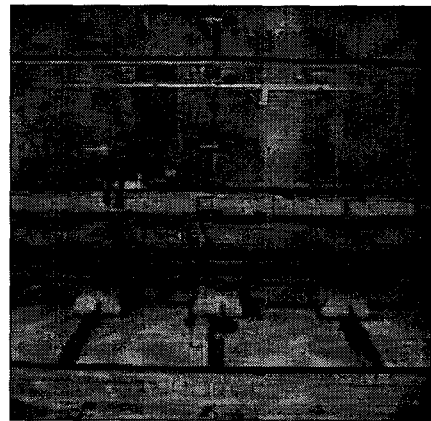


그림 2 대표적 측정전경(A-㉒구간)

표 2 측정 및 분석장비

장비명	모델명	제작사명
8CH. Signal Analyzer	L.D 3200	Larson-Davis
적분형 정밀소음기	NL-14	RION
10CH. Signal Conditioner	L.D 2210	Larson-Davis
PistonPhone Recorder	CAL-200	Larson-Davis
Recorder	PC280Ax	Sony
디지털 온도·습도계	Testo 450	Testo

### 2.2 터널내부 소음 특성 고찰

#### (1) 열차통과 선로 개수에 따른 특성

터널내부 소음 측정 구간은 단선과 복선으로 나뉘어지며, 단선과 복선에 따른 터널내부 소음 분포 특성을 규명하기 위해 직선구간을 선택하여 분석하였다. 마제형 터널(복선:A-㉒구간, 단선:A-㉔구간)의 경우 터널내부 콘크리트에 의한 반사의 영향에도 불구하고 열차진행 선로 인근에서 높은 소음도를 대체적으로 나타내었다. 그러나 반대편 선로의 경우에는 전형적인 확산음장 특성을 보였으며 ch 3에서 제일 높은 값을 나타내었다. 총합소음도의 경우 주파수 특성을 선형으로 한 경우가 A 가중으로 한 경우보다 대략 5-6dB 이상 컸으며, 이는 저주파 소음 성분이 상당함을 나타내고 있다. 특히 도상중앙 위치에서의 소음도가 기타 벽체의 높이

별 위치에서의 소음도보다 대략 2-3dB 정도 높게 나타나 전철하부의 전동음과 모터 및 인버터 소음의 영향이 큼을 알 수 있었다. 주로 200-2.5kHz 까지의 광대역 소음 특성을 나타내었으나 500, 1.25k, 2.5kHz 대역에서는 피크 성분을 보이기도 하였다.

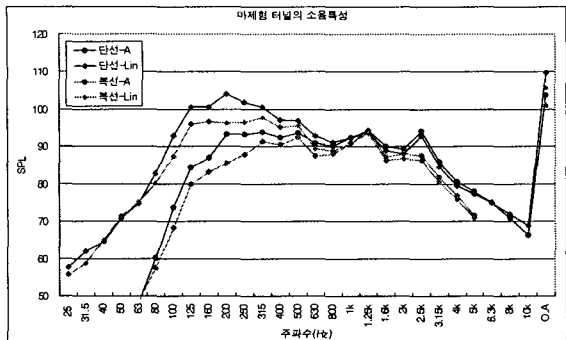


그림 3 마제형 터널의 소음특성

(2) 직선 및 곡선 터널 특성

본 절에서는 열차가 직선구간 및 곡선구간 통과시의 소음도 특성을 비교 분석하였다.

가. 복선/마제형 구간(직선:A-㉔구간, 곡선:A-㉕,㉖구간)

ch1 위치 소음도가 기타 위치 소음도보다 대략 2-3dB 정도 높았다. 직곡선 구간에 관계없이 반대편 선로의 경우 전형적인 확산음장 특성을 보였다. ch 1 위치 기준으로 할 때 속도분포가 50km/h 인 경우에 곡선구간이 9-10dB 정도 높은 소음도를 보였다. 그림 4를 보면 구간별 주요 지배주파수는 직선구간 315-1.25kHz 까지의 광대역 소음특성을 보였고, 곡선구간에서는 315Hz와 630Hz의 저주파수 성분이 큼을 알 수 있다.

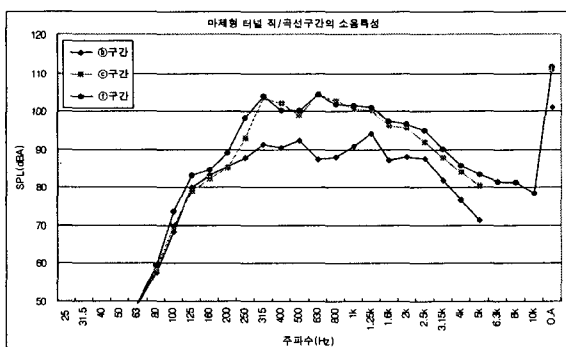


그림 4 복선/마제형 터널 직/곡선구간의 소음특성

나. 단선/마제형 구간(직선:A-㉗구간, 곡선:A-㉘구간)

다른 구간과 마찬가지로 ch 1 위치 기준 소음도가 다른 위치 소음도보다 대략 2-3dB 정도 높음을 알 수 있었다. 속

도차이가 많이 나는 경우 그 차이 정도에 따라 곡선보다 직선구간에서 큰 소음도를 나타내기도 하여 속도에 의한 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있었다. 단선 마제형 터널의 경우 직선과 곡선구간 스펙트럼 양상은 500Hz 이하의 저주파 소음이 곡선구간에서 약간 더 큰 것을 제외하고 유사했다.

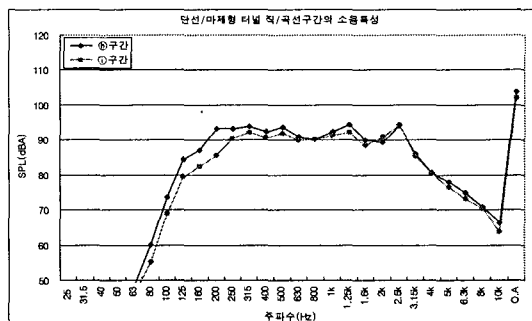


그림 5 단선/마제형 터널 직/곡선구간의 소음특성

다. 복선/박스형 구간(직선:A-㉙구간, 곡선:A-㉚,㉛구간)

역시 ch1 위치 소음도가 기타 위치 소음도보다 대략 2dB 정도 높게 나타났다. 반대편 선로의 경우 전형적인 확산음장 특성 보였다. ch1 위치 기준 곡선구간이 15dBA 정도 높은 소음도를 보이는 구간도 있었으며, 곡선구간에 비해 속도가 30km/h 정도 빠른 열차(70km/h)가 통과하는 직선구간의 소음도는 곡선구간과 거의 같은 값을 나타내었다. 여기에서 측정된 복선/박스형 터널의 경우 직선구간에 비해 곡선구간의 경우 4kHz 이상의 고주파대역에서 상대적으로 큰 소음도를 나타내는 구간도 있었는데 이는 곡선부에서 차륜과 레일사이의 마찰에 의한 소음의 영향으로 판단된다. 주요 지배 주파수 특성은 직선구간에서 200-1000Hz 대역에서 평탄특성을 보이거나 곡선구간의 경우 500Hz 및 800Hz 대역에서 피크특성을 보임을 알 수 있다.

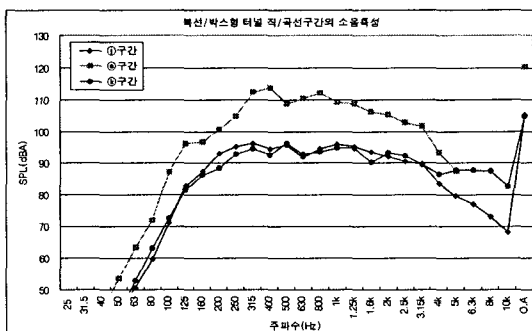


그림 6 복선/박스형 터널 직/곡선구간의 소음특성

(3) 터널유형별 특성

복선/직선구간중 마제형과 박스형 터널구조에 따른 소음

도 특성을 나타내었다. 속도차이에 의해 엄밀한 분석은 어려움이 있으나 복선티널의 경우 박스구간이, 단선티널의 경우 마제구간이 터널벽 상부위치로 갈수록 소음이 많이 줄었다.

복선/직선 구간(마제형:A-㉞구간, 박스형:A-㉟구간)의 경우 23km/h 속도 차이가 날 때 ch1 위치 기준 5dB 정도 차이가 나며, 기타 위치별로는 마제형 터널구간이 박스구간에 비해 ch1 위치에 비해 높은 위치일수록 소음도 차이가 많이 났으며, 단선/직선 구간(마제형:A-㉞구간, 박스형:A-㉟구간)의 경우 14km/h 속도 차이가 있을 때 ch1 위치 기준 2dB 정도 차이가 나며, 기타 위치별로는 박스구간이 마제형 터널구간에 비해 ch1 위치에 비해 높은 위치일수록 소음도 차이가 많이 났으며 이러한 소음도 측정결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 단선티널 유형(마제형/박스형)에 따른 소음 특성

구간	구분	속도 (km/h)	채널별 소음도 (dBA)				
			ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
A-㉞	단선/마제형 - 직선	59	103.7	102.1	101.3	100.9	101.1
A-㉟	단선/박스형 - 직선	73	106.2	102.9	102.3	102.3	102.7

(4) 곡률방향별 특성

복선/박스형 구간(Inner:A-㉠구간, Outer:A-㉡구간, R:400)의 경우 ch1 위치에 비해 높은 위치로 갈수록 소음 저감정도는 Outer 방향에서 0.2dB 정도 더 일어났다. 단선/마제형 구간(Inner:㉢구간, Outer:㉣구간, R:400-600)의 경우에도 ch1 위치에 비해 높은 위치로 갈수록 소음 저감정도는 Outer 방향에서 많이 일어나 1.5-2dB 정도 수준을 보였다.

표 4 복선/박스형 구간의 곡률방향에 따른 소음 특성

구간	구분	속도 (km/h)	채널별 소음도 (dBA)				
			ch1	ch2	ch3	ch4	ch5
A-㉠	복선/박스형 -Inner	43	120.4	119.3	-	117.8	118.5
A-㉡	복선/박스형 -Outer	43	104.9	102.8	102.2	101.7	102.6

터널내부 곡선구간에서 박스구간 보다는 마제형 터널구간에서 소음분포가 위로 갈수록 많이 줄어들음을 확인 할 수 있

었다. 또한, 곡선구간 Outer 방향에서 소음 저감정도가 크므로, 측정위치가 곡선반경 중심쪽에 위치한 Inner 방향에 흡음재를 부착하여 소음저감을 이루는 것이 필요함을 알았다.

3. 전동차 내·외부 소음 측정

본 장에서는 전동차 내·외부 소음특성 파악을 위한 측정 및 결과를 나타내었다.

3.1 전동차 내·외부 소음측정 개요

전동차 내·외부 소음측정은 국내지하철 B의 경우 제작사에서 수요처에 납품하는 차량의 시험운행 중 실시한 것이며, 국내지하철 C의 경우 중정비를 마치고 시험운행하는 전동차에서 실시하였다. 소음측정을 위한 마이크로폰 설치위치를 그림 7과 표 5에 나타내었다.

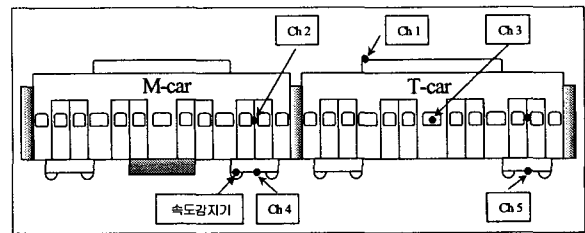


그림 7 국내지하철 B 마이크로폰 설치도

표 5 국내지하철 B 차량 내외부 소음측정위치

구분	마이크로폰 설치 위치
ch 1	차량외부 상부팬
ch 2	차량내부 M-car 전위대차 상부
ch 3	차량내부 T-car 중앙
ch 4	차량외부 M-car 하부
ch 5	차량외부 T-car 하부
속도감지기	차량외부 M-car 차륜부근

소음측정은 전동차가 역과 역사이를 주행할 때 발생하는 소음을 Recorder를 이용하여 녹음하고, Larson-Davis 3200으로 발생하는 소음을 모니터링하였다. 분석은 Sony Recorder에 녹음된 전동차소음 중 정속주행하는 5초동안의 등가소음으로, 각 채널별 소음도 및 주파수별 소음도를 산출하였다.

### 3.2 전동차 내·외부 소음특성 고찰

옥외구간 및 터널을 통과하는 전동차의 소음특성은 선로 상태, 운전조건 및 개별 차량별로 약간씩 차이가 있으나, 전동차 내·외부 소음측정을 수행한 목적은 옥외 및 터널 주행 전동차의 차량 내·외부 소음도 특성을 동기화하여 비교 분석하기 위하여 수행하였다.

#### (1) 터널/옥외 구간 통과시 전동차 내·외부 소음 특성비교

터널 및 옥외 구간을 통과하는 국내지하철 B에서 전동차 내·외부 소음 특성을 비교하였다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 터널구간 통과 시 옥외구간보다 M-car 보기하부위치나 M-car 실내 전위 대차 상부위치에서 측정한 소음도가 높게 나타났다. 터널과 옥외구간 통과시 소음도 차이는 전동차 주행속도 40km/h 정도에서 실내 위치 1.5dBA, 보기하부 위치 0.3dBA, 60km/h의 경우 실내위치 1.7dBA, 보기하부 위치 0.3dBA, 70km/h의 경우 실내위치 2.9dBA, 보기 하부 위치 0.8dBA 이었다. 즉 가장 주 소음원 위치인 M-car 보기 하부 소음도 대비 옥외보다 터널내부에서 소음도가 속도 증가에 따라 1.8-3.7dB 까지 증가함을 알 수 있었다.

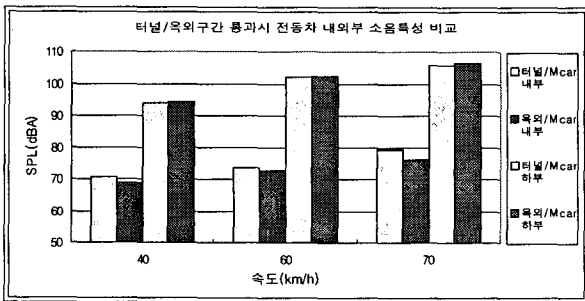


그림 8 터널/옥외 구간 통과시 전동차 내·외부 소음특성

표 5 터널통과 도상별 전동차 내·외부 소음특성 분석

속도 (km/h)	국내지하철 B - 자갈도상		국내지하철 C - 콘크리트도상		비고
	M-car 실내	M-car 하부	M-car 실내	M-car 하부	
60	73.6	102.1	78.7	104.8	자갈도상
	74.7	103.7	80.6	107.4	콘크리트 도상
	-	-	77.3	103.5	
평균	74.2	102.9	78.9	105.2	

#### (2) 터널내부 통과시 도상별 전동차 내·외부 소음측정

자갈 도상인 국내지하철 B와 콘크리트 도상인 국내지하철 C의 터널구간에서 동일한 복선, Box 구조를 통과하는 열차에 대해 60km/h 정속운행의 경우 소음 레벨을 조사한 결과 콘크리트 도상을 통과하는 열차 내·외부에서 소음도가 크게 나타났다. 발라스트 도상에 비해 콘크리트 도상을 통과하는 전동차 외부에서 2.3dBA, 실내에서 4.7dBA 정도 소음도가 높은 것으로 나타났으며, 소음원 자체에서의 소음도 차이를 고려하더라도 콘크리트 도상에서 대략 2.3dBA 이상 소음도가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

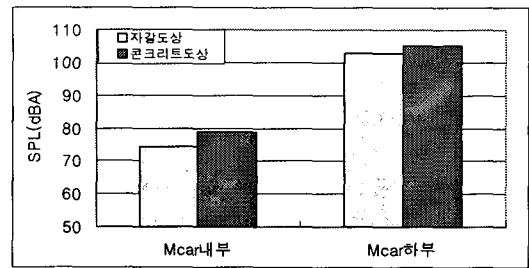


그림 9 터널내부 도상별 전동차 내·외부 소음특성

#### (3) 터널내부 통과시 터널내부와 전동차 내·외부 소음도 분포 특성

본 절에서는 국내지하철 C의 단선/Box/직선 터널구조를 지니고 있는 동일한 지점에서 전동차 통과시 터널내부에서 측정된 소음도와 전동차 내·외부에서 측정된 소음도 스펙트럼을 비교하여 그림 10에 나타내었다.

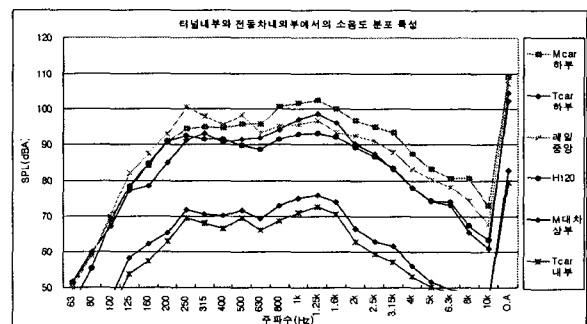


그림 10 터널내부와 차량내·외부에서의 소음도 분포 특성

터널내부 도상중앙 위치에서 측정된 값이 도상 바닥에 가까운 이유로 저주파의 구조물 전달소음 성분이 크고, 전동차 내·외부 부착위치 중 M-car 및 T-car 하부는 모터 및 전

동음의 영향으로 고주파수 성분이 우세함을 알 수 있었다. 측정위치 및 속도의 일치를 고려할 때 열차가 당해구간 통과시 전동차 내부 평균소음도는 차량내부의 3위치 즉, Tcar 중앙, Mcar 대차상부, Mcar 중앙에서 측정된 소음도의 평균값을 대표값으로 사용할 수 있으리라 판단된다.

#### (4) 정차시 환기 및 냉방기 작동에 따른 차량내부 소음 특성

국내지하철 C에서 전동차의 가선 전원이 연결되어 있는 상태에서 차량내부의 환기 및 냉방기 작동상태에 따른 소음 특성을 분석하여 그림 11에 나타내었다. 전동차에 전원을 공급하여 M-car 하부의 인버터가 작동할 때의 소음을 암소음으로 간주하면 정지상태 전동차 내부의 암소음은 51dB(A)가 된다. T-car 내부에서 송풍기만 작동할 때 소음도는 55dB(A)로 4dB 증가하며, 환풍기만 작동시킬 때 소음도는 60dB(A)로 9dB 증가하고, 냉방기 작동 중에는 69dB(A)로 18dB 증가하는 것으로 나타났다.

정차시 소음원 근접위치와 차량내부에서의 소음을 측정된 결과 인버터 작동시 인버터 인접위치의 소음도는 98dB(A)로 T-car 내부와는 47dB의 차이가 있었으며, 냉방기 작동 중 소음원인 상부팬 위치의 소음도는 91dB(A)로 차량내부와는 22dB의 소음도 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 열차가 터널내 주행시 보조기기의 작동에 의한 발생 소음이 차량 실내 소음도에 미치는 영향은 미미하여 무시할 수 있음을 알 수 있었다.

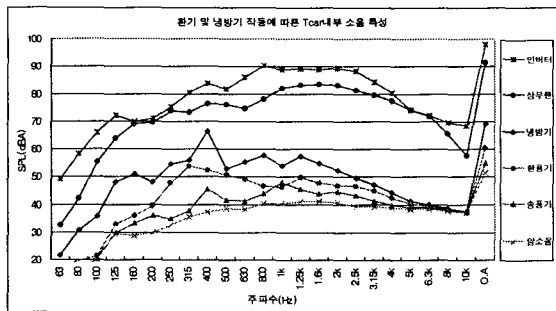


그림 11 환기 및 냉방기 작동에 따른 소음원과 차량 내부 소음특성

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널 내부 소음저감을 위한 흡음 기술 개발에 필요한 선행 조사 연구로써 터널내부 및 전동차 내부 소음 측정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 열차가 콘크리트 도상 터널을 통과하는 터널유형별, 직/

곡선별, 선로 개수별, 속도별로 소음을 예측하고 분석한 결과 터널위치별로는 전동음과 모터 및 인버터가 설치된 차량 하부와 도상 사이의 중앙위치에서 벽체 높이별 위치보다 2-3dB 이상 큼을 알 수 있었다. 또한 복선구간의 경우 반대편 선로에 열차통과시에 도상 및 높이별 소음도는 거의 같은 레벨을 나타내어 터널내부에서 철도소음은 반사에 의한 확산음장 특성을 나타내고 있었다.

(2) 직선구간에 비해 곡선구간의 경우 9-10dB 정도 높은 소음도를 나타내었으며, 주파수 특성은 직선구간이 315-1.25kHz 영역에서 대체적으로 평탄 특성을 보인 반면 곡선구간에서는 315, 630Hz 또는 400, 800Hz 대역에서 피크를 보이는 중저주파수 영역에서 큰 소음도 스펙트럼 특성을 보였다. 곡률방향별로는 곡선반경 중심쪽 벽면에서 높이별로 소음 저감 정도가 낮음을 알 수 있었다.

(3) 전동차 내외부에 마이크로폰을 부착하여 옥외 및 옥내(터널 내부)를 통과시 측정 분석한 결과 콘크리트 도상을 통과하는 열차의 외부 소음은 자갈도상을 통과하는 열차의 외부소음에 비해 2.3dBA, 내부소음은 4.7 dBA 정도 큰 것을 알 수 있었다.

(4) 열차가 터널내부 통과시 차내 냉방기, 송풍팬 및 환기팬 작동에 의한 영향을 분석한 결과 차내소음레벨에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설기술연구원에서 위탁시행 한 건설기술개발사업으로 추진되었음을 밝힌다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 건설교통부, 1999, “국가 기간 교통망 계획 (2000~2019)”
- (2) 문경호, 유원희, 김재철, 2001, “국내 여객열차 실내소음 평가”, 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp1241-1246
- (3) 삼성건설(주) 기술연구소, 1994, “분당선 소음 진동 저감 대책에 관한 연구”
- (4) 한국철도기술연구원, 1997, “철도 소음·진동의 효율적 저감 방안 연구” 제1차년도 보고서, p13