도시철도 영업운행열차 내 소음에 관한 고찰

A Study on Noise Characteristics in the Running Train of the Urban Railway

김효산† 이창헌* 김광은** 이규천*** 박진동****

Kim, Hyo-san Lee, Chang-hun Kim, Gwang-eun Lee, Gyu-chon Park, Jin-dong

ABSTRACT

The SeoulMerto, operating subway line No.1~4, was constructed in the metropolitan Seoul with the highest population. When it was built, the design was challenged to sharp curved tracks considering the protection of buildings, cultural assets, the connection to ground roads and rivers as well as to elevated railway in some parts. Lots of residential apartments and business complex have gradually increased in the area around subway stations and railway lines according to the urban development. Consequently, Requirements of better quality of life and comfortable environment caused the citizen complain for the noise. It has become one of serious social issues. In this paper, Noise level was analyzed using noise map measured in the running train of all routes. The analysis on the noise level was conducted according to railway type, track components type, seasonal type, retirement degree of the vehicle and subway station. Especially, Noise characteristics were analyzed by noise level data measured in the inside and outside of the train with geometry types of the concrete track. This study will contribute fundamental data for the 「The Development of Sound-Absorbing Block on Concrete Track」 promoted on The National R&D Project.

1. 서론

서울메트로는 1974년 8월 15일 서울지하철 1호선 서울역～청량리역간 7.8km를 개통하며 우리나라 역사상 최초로 지하철 시대를 열었다. 그 이후 1984년 5월22일 2호선 60.2km가 개통되었으며 이어서 1985년 10월 18일 3호선 35.2km, 4호선 31.7km를 개통하였다. 그리하여 현재 전 구간 4개 노선에 총 영업연장 135km(궤도연장 270km), 117개역, 5개 차량기지의 시설을 갖추게 되었다. 또한 승객수송에 있어서도 전동차 1,944량으로 평일 2,594회(KORAIL 차량 776회 포함)를 운행하여 1일 평균 수송인원은 약 400만 명으로 수도권 대중교통수단으로서 중추적인 역할을 수행하고 있다. 그러나 도시철도의 특수성으로 인구밀집도가 가장 높은 도심지역에 건설되었고, 건설당시 도심구간 내 대형건물과 문화재, 도로 및 하천 등의 영향으로 급곡선의 설치가 불가피했으며 부도심지 일부는 지상구간으로 건설되었다. 이후 역세권 중심의 도시개발로 주거공간인 아파트와 상업지역이 자리를 잡게 되었고 이와 더불어 시민들의 삶의 질 향상과 정온한 삶에 대한 욕구의 증가로 철도 소음에 대한 민원이 큰 폭으로 증가하는 등 사회적으로 문제가 되고 있는 실정이다.

본 연구는 서울메트로에서 운영중인 전 노선에 대해 현재 영업운행중인 전동차 내 소음을 측정하여 작성된 소음지도를 분석한 것이다. 노선별・구조물별・궤도구조별・계절별・차량노후정도에 따른 소음도를 분석하였으며, 특히 콘크리트궤도 유형에 따른 전동차 내의 소음특성을 파악하였다. 본 연구는 국가 R&D 사업으로 추진 중인 「콘크리트도상 흡음블록 시공기술 개발」을 위한 기초자료 획득을 위해 시행되었다.

† 책임저자 : 정회원, 서울메트로 기술연구소 시설연구부차장
E-mail : seoulway@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-5333 FAX : (02)6110-5338
* 정회원, 서울메트로 기술연구소 시설연구부
** 비회원, 서울메트로 철도장비사업소
*** 비회원, 서울메트로 철도장비사업소장
**** 비회원, 서울메트로 기술연구소 시설연구부장

2. 선행연구

국내에서의 열차 내 소음에 대한 선행연구에서 최용운 외 4인(2008)은 「도시철도 전동차 객실 소음에 관한 연구」[1]에서 시험열차를 운행하여 객실 내·외부소음의 특성을 규명하였고, 조준호 외 3인(2002)은 「터널통과 전동차 내·외부 소음특성 규명」[2]에서 납품 시험운행중인 열차를 대상으로 소음특성을 고찰하였으며, 이찬우/김재철(2007)은 「개통 3주년 이후 KTX 열차 차내 소음 특성 분석」[3]을 통해 고속열차를 대상으로 연구한 적은 있으나 실질적으로 고객이 탑승하여 영업운행중인 도시철도 열차 내 소음에 대한 연구는 없었다. 다만, 차륜/레일에 의한 소음발생 메커니즘에 대하여는 많은 연구가 이루어지고 있다.

3. 서울메트로(1~4호선)의 시설현황

서울메트로는 교량과 일부 역사를 제외한 전 구간이 자갈도상으로 건설되었으며 장기사용에 따른 자갈의 세립화 및 고결화로 자갈도상의 기능이 약화되어 1998년부터 지하터널의 공기질 향상과 유지보수 측면에서 유리한 콘크리트도상으로 개량하고 있다. 현재 콘크리트 도상은 32%정도 부설되었다. 서울메트로에서 운영중인 1~4호선의 시설현황 및 수송현황은 <도표 1>과 같다.[4]

도표 1. 서울메트로 1~4호선 시설 및 수송현황(2007년)

구 분		계	1호선	2호선	3호선	4호선
구 간		4개 노선	서울역↔청량리	성수 ↔ 성수	지축 ↔ 수서	당고개↔남태령
연장	영업	134.9㎞	7.8	60.2	35.2	31.7
	건설	143.1㎞	9.9	62.1	37.7	33.4
역 수		117개역	10	50	31	26
전동차(편성수)		1,944량(199)	160(16)	834(88)	480(48)	470(47)
운행시격		2.5~6분	3~4	2.5~5.5	3~6	2.5~5
소요시간(분)		-	16분	87분	62분	53분
운행회수(평일)		2,594회 S 1,818회	613 S 101	1,021 S 1,021	436 S 334	524 S 362
열차운행(평일)		64,271.6㎞	5,593.4	28,216.0	15,207.2	15,255.0
수송인원(1일)		3,921천명	465	1,916	706	834
혼 잡 률		175%	135	225	142	196

4. 영업 열차 내 소음지도 작성

지하철 1~4호선 전 노선에 대해 현재 영업운행중인 열차를 대상으로 고객이 직접 접하는 전동차 내의 소음 현황을 파악하고 원인을 분석하기 위해 구간별 소음도를 측정하였다. 서울메트로는 전 노선에 대해 소음분포도를 나타낸 소음지도[5]를 작성하였으며 지속적으로 소음을 측정하여 관리를 하고 있다.

그림 1. 서울메트로(1~4호선) 소음분포도

5. 전동차 내 소음측정

5.1 소음측정 대상 및 방법

서울메트로에서 운영중인 1~4호선 전 노선에 대해 분기별(3분기) 2회씩 총 6회에 걸쳐 전동차 내의 소음을 측정하였다. 역 구간별 등가소음도(Leq), 최대소음도(Lmax)를 측정하였으며, 차량 및 운전조건, 선로상태 등과의 연계 소음도를 비교 조사하였다. 전동차 수량은 72대로서 서울메트로 차량 55대(76.4%), KORAIL 차량 17대(23.6%)이다. 측정방법은 전동차 내에서 탑승고객에게 소음 영향도가 가장 많이 미치는 M-car(구동장치 및 주변 시스템 부착 차량)에서 전위대차 부분 중앙에 삼각대를 설치하였고 소음계 마이크로폰의 방향은 열차진행방향으로 하고, 지면으로부터 1.2m의 높이에서 측정하였다. 하절기의 경우 냉방기의 영향이 최소화한 위치에서 측정하였다. 측정 장비는 Rion사의 NL-31을 사용하였다.

5.2 소음측정 결과

5.2.1 차내 노선별 소음

노선별 전동차내의 소음측정에 대하여 회차별로 등가소음도(Leq)를 산술평균한 결과 <도표 2>와 같이 1호선 68.9dB(A), 2호선 68.2dB(A), 3호선 68.0dB(A), 4호선 66.5dB(A)로 나타나 가장 소음이 높은 1호선이 가장 낮은 4호선에 비해 2.4dB(A) 다소 높은 소음도를 보여주고 있다. 그러나 2호선 성수지선(6량편성) 및 신정지선(4량편성)을 제외하면 2호선 순환선이 71.1dB(A)로서 가장 높게 나타났다. 이것은 순환선으로서 타 호선에 비해 곡선부(206개소)가 많고, 운행 노선 중 이용승객이 가장 많아 소음도에 영향을 미치는 것으로 분석된다. 최고소음도(Lmax)는 1호선 81.1dB(A), 4호선 76.7dB(A)로서 1호선이 4호선에 비해 4.4dB(A) 높게 나타났다.

도표 2. 서울메트로 노선별 전동차내 소음

노선별		평균 소음	등가소음도[Leq dB(A)]		최고소음도(Lmax)	
			상(내)	하(외)	상(내)	하(외)
전체평균		67.9	67.7	68.1	80.5	81.1
1호선		68.9	69.6	68.3	80.9	80.1
2호선	소 계	68.2	67.7	68.6	79.6	80.8
	순환선	71.1	71.1	70.8	82.6	81.9
	성수지선	66.4	65.8	67.0	79.0	81.6
	신정지선	67.1	66.2	67.9	77.2	79.0
3호선		68.0	66.3	69.8	77.4	79.9
4호선		66.5	67.3	65.7	80.3	76.7

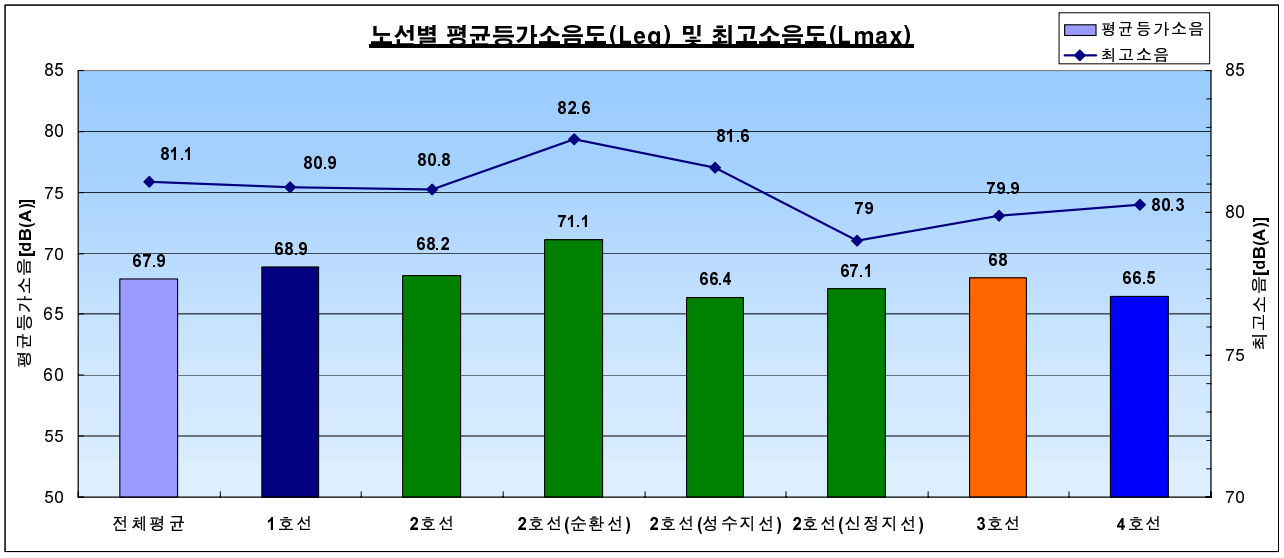

그림 2. 노선별 평균등가소음도(Leq) 및 최고소음도(Lmax)

5.2.2 차내 구조물별(지하/지상) 소음

소음이 가장 취약한 2호선 순환선 전 구간을 대상으로 지하구간(아치형/BOX형)과 지상구간(고가/U-type)을 비교분석하였다. 지하구간은 등가소음도 평균 72.1dB(A), 지상구간은 69.2dB(A)로 측정되어 전동차 내 소음은 지하구간이 2.9dB(A)이 높았으며, 이는 차량 운행 중에 발생한 소음이 터널의 천장, 벽, 바닥 등에 도달한 후 일부는 흡수되고 나머지는 전동차 내부로 투과되었기 때문으로 판단된다. 구조물형태에 따라서는 1.1dB(A)~3.5dB(A)의 소음차이를 보였다. 아치터널이 다른 구조물 보다 높은 것은 단선터널이기 때문으로 분석되며, 평균등가소음도가 BOX터널에서 높게 측정된 것은 급곡선 및 차량의 노후정도에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다.

도표 3. 구조물별 전동차내 소음도

구 분	지상구간		지하구간	
	고가	U-Type	BOX 터널	아치터널
평균 소음도[LeqdB(A)]	68.6	69.7	71.4	72.7
구간별 등가소음도 [LeqdB(A)]	66.5~70.9	68.2~71.1	68.9~73.6	71.9~73.0
구조물 형태	복선,방음벽(2m)	복선,방음벽(2~5m)	복선	단선

5.2.3 차내 계절별 소음

열차 내에서 여름철, 가을철, 겨울철의 계절별로 각 2회씩 측정하고 등가소음도를 측정하여 평균한 결과 <그림3>과 같이 여름철 70.4dB(A), 가을철 67.8dB(A), 겨울철 65.7dB(A)로 나타났다. 여름철이 다른 계절에 비해 2.6dB(A)~4.7dB(A)이 높은 등가소음도를 보였다. 이는 기후변화에 따른 냉방기 가동유무 및 가동세기(강,중,약)가 소음에 많은 영향을 주었음을 알 수 있다.

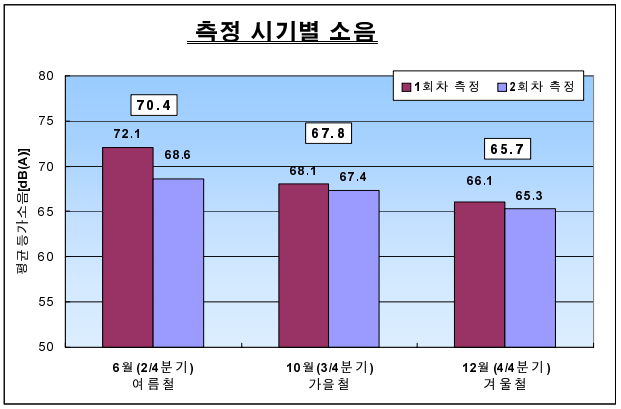

그림 3. 측정 시기별 소음 비교

5.2.4 차량노후에 따른 차내 소음

전동차 내 소음은 차량의 노후 정도에 따라 달랐다. 2000년 5월 17일 건설교통부에서 제정 고시한 「도시철도차량의 성능시험에 관한 기준」(제2000-126호)을 기준으로 2001년도 이전 차량과 이후 차량의 평균 등가소음도를 비교하였다. 대상차량은 2001년 이전 차량이 52대, 2001년 이후 차량이 20대(2005년 11대, 2006년 9대)로서 총 72대를 측정하였다. 2001년 이전 차량이 평균 약 3dB(A) 높게 나타났으며, 최소 2.5dB(A)~최대 7.1dB(A)의 소음분포를 보였다. 2000년에 제정된 「도시철도차량의 성능시험에 관한 기준」에서 차내 소음기준(80dB(A))에 의거 제작되어 차내 소음투과손실이 향상되었음을 알 수 있다. 특히, <그림 4>와 같이 중주파수 대역인 250Hz~800Hz에서 소음이 높게 나타났다.

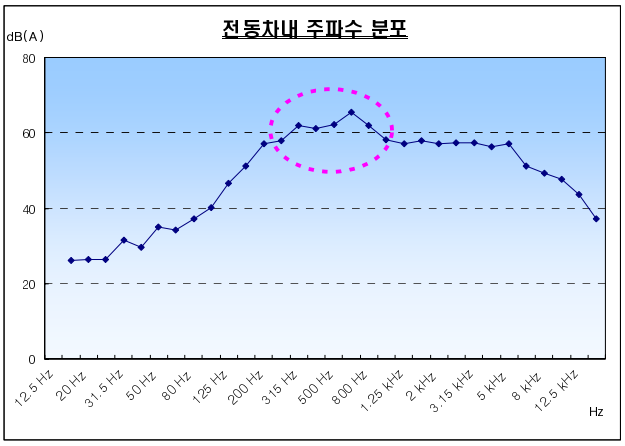

그림 4. 차내소음도 주파수 분포

도표 4. 차량 노후도에 따른 소음 비교

구 분	수량	평균등가소음도 [Leq dB(A)]		발생소음 범위(dB)	비고
		소음값	증감		
계	72대	-	-	최소 2.5~최대 7.1	
2001년 이전 차량	52대	68.8	△3.0	64.8~79.3	
2001년 이후 차량	20대	65.8		62.3~72.2	

6. 차내 콘크리트궤도구조 유형별 소음

6.1 측정대상 및 방법

소음측정 대상은 콘크리트도상 구간에서 B2S궤도, 영단형(방진상)궤도 및 급곡선궤도에 대해 전동차 내에서 측정하였다. <도표 5>와 같이 궤도총연장 277km의 13%인 37km(100개소)가 부설되어있다. 측정방법은 5.1과 같은 방법으로 측정하였으며 NA-27(Rion)의 측정장비를 사용하였다.

도표 5. 콘크리트 궤도 구조 유형별 부설 현황

구 분		급곡선 궤도	B2S 궤도	영단형 궤도	계
총연장(km)		3.7	11.0	22.3	37.0
구조물 (개소)	계	4	28	68	100
	터널(BOX)	2	27	59	88
	터널(ARCH)	0	0	8	8
	고가	2	1	1	4

6.2 측정결과

콘크리트도상의 궤도구조별로 곡선반경에 따른 등가소음을 측정하였다. 먼저 급곡선궤도는 터널/고가구간에 각 2개소가 설치되어 있으며 소음측정결과 터널(BOX)구간 곡선반경 140m, 400m에서 75.5dB(A), 70.0dB(A), 고가구간 곡선반경 250m에서 72.5dB(A)로 나타났다. 곡선반경 250m에서 운행속도가 28km/h가 높았으나 소음이 낮게 측정된 것은 고가구조물의 특성상 반사소음이 적고 대부분의 소음이 외부로 방사되어 차내 소음도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

B2S궤도의 경우 터널(BOX)구간에서 곡선반경 260m, 420m, 800m에서 74.0dB(A), 75.3dB(A), 68.9dB(A)의 등가소음도가 측정되었으며 곡선반경 420m에서 가장 높았다. 이는 곡선반경 260m에는 도유기가 설치되어 있었고 곡선반경 420m에서의 열차속도가 66km/h로 가장 높았던 것으로 보아 도유기와 열차속도의 영향을 받은 것으로 보인다.

영단형궤도는 곡선반경 250m, 350m, 450m에서 78.8dB(A), 75.0dB(A), 72.8dB(A)의 등가소음도가 측정되었고 동일 속도에서 급곡선 일수록 높은 등가소음도를 나타내었다. 측정된 등가소음도를 산술평균한 결과 B2S궤도 72.7dB(A), 급곡선궤도 73.7 dB(A), 영단형궤도 75.4dB(A)로 나타났으며 콘크리트 궤도구조 유형별로 1~2.7dB(A)의 차이를 보였다.

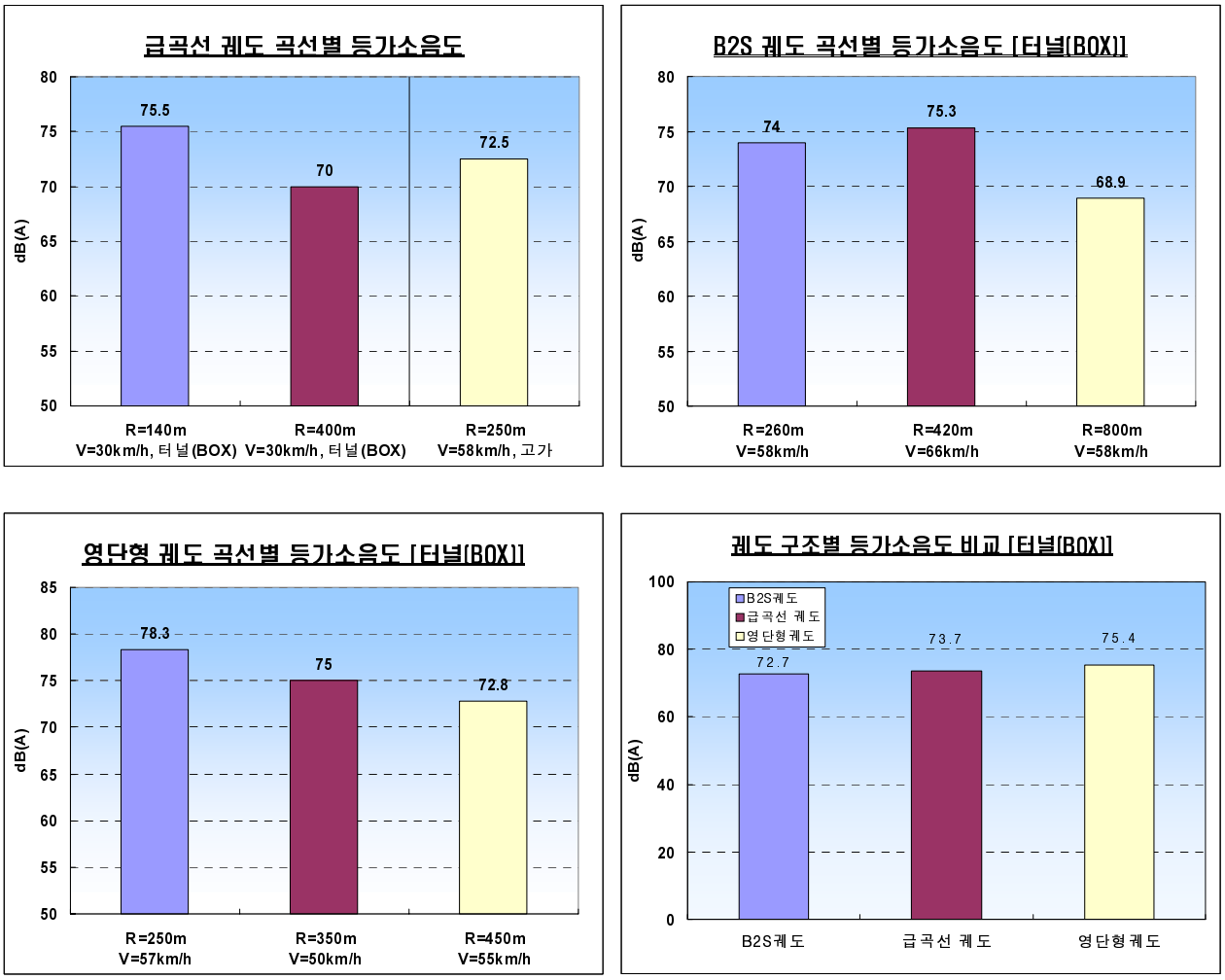

그림 5. 궤도 구조별 등가소음도

콘크리트 도상의 궤도유형별 주파수 스펙트럼은 <그림 6>과 같이 궤도유형에 관계없이 중주파수 및 고주파수 대역(250~1,600Hz)에서 일률적으로 소음도가 높게 나타났다.

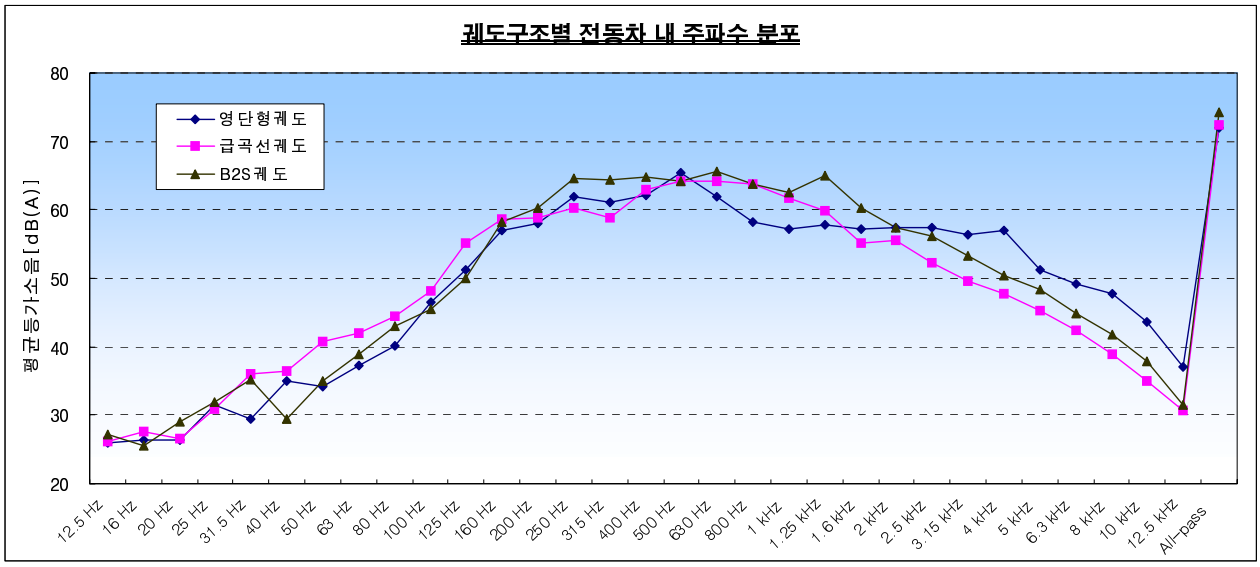

그림 6. 궤도 구조별 전동차 내 주파수 분포

7. 결론

서울메트로에서 운영중인 전 노선(1~4호선)에 대하여 영업운행중인 전동차내의 소음과 콘크리트 궤도구조 유형별에 따른 소음측정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1~4호선 중 2호선 순환선의 소음도가 71.1dB(A)로서 다른 노선에 비해 2.2dB(A)~4.7dB(A)정도 높아 급곡선이 많기 때문인 것으로 나타났다.

(2) 소음에 가장 취약한 2호선 순환선의 지하구간(아치형/BOX형)과 지상구간(고가/U-type)은 지하구간이 지상구간보다 2.9dB(A)이 높음을 알 수 있다. 이는 차량운행 중에 발생한 소음이 터널의 천장, 벽, 바닥 등에 도달한 후 일부는 흡수되고 나머지는 전동차 내부로 투과되었기 때문으로 판단되며, 구조물형태에 따라 1.1dB(A)~3.5dB(A)의 소음차이를 보였다.

(3) 계절별로는 여름이 다른 계절에 비해 2.6dB(A)~4.7dB(A)이 높은 소음도를 보였으며, 냉방기 가동에 따른 FAN 및 공기방출음이 전동차 내 소음에 많은 영향을 주었기 때문으로 분석되었다.

(4) 차량노후에 따라 2001년 이전 차량이 평균 약 3dB(A) 높게 나타났으며, 최소 2.5dB(A)~최대 7.1dB(A)의 소음분포를 보여 차내 소음기준[80dB(A)]에 의거 제작되어 차내소음 투과손실이 향상되었기 때문으로 분석된다.

(5) 콘크리트도상의 궤도구조 유형별 소음도는 구조물 형식, 곡선반경, 열차속도 등에 따라 열차내 소음에 큰 영향을 주었다. 측정된 등가소음도를 산술평균한 결과 B2S궤도 72.7dB(A), 급곡선궤도 73.7 dB(A), 영단형궤도 75.4dB(A)로 나타났으며 콘크리트 궤도구조 유형별로 1~2.7dB(A)의 차이를 보였다.

<후기>

본 연구는 국토해양부가 출연한 미래도시철도 기술개발 사업(도시철도 표준화 2단계연구)으로 수행되었습니다.

<참고문헌>

[1] 최용운 외 4인,「도시철도 전동차 객실 소음에 관한 연구」(2008)
[2] 조준호 외 3인,「터널통과 전동차 내·외부 소음특성 규명」(2002)
[3] 이찬우/김재철,「개통 3주년 이후 KTX 열차 차내 소음 특성 분석」(2007)
[4] 김효산, 서울메트로 6시그마 경영혁신(궤도시공품질 향상사례를 중심으로)(2008)
[5] 서울메트로, 서울메트로 1~4호선 열차 내 소음분포도(2008)