

도시철도 전동차 객실 소음에 관한 연구

A Study on the Interior Noise of Subway Train

최용운⁺ 구정서*, 유원희**, 고효인***

Yong-woon Choi, Jeong-seo Koo, Won-hee You, Hyo-in Koh

ABSTRACT

Subway is used as a useful transportation method to solve the metropolitan traffic problem for its advantages of being not only accurate, safe and massive, but also of not producing any exhaustion gas in compare with the other ground transportation systems.

However, noise inside the car due to concrete based rail track and tunnel structure has become a social problem. So, an analysis on the noise characteristics according to their routes and locations was made on the basis of the actually measured results from the trial run.

1. 서 론

지하철은 대도시 교통문제를 해결하기 위한 유용한 수송수단이 되고 있으나, 지하철 운행으로 인한 소음진동 문제는 지하철 주위에 주거하는 주민이나 지하철을 이용하는 승객들에게 소음공해라는 또 다른 환경문제에 직면하게 하고 있다. 우리나라의 경우, 지하철 소음이 사회적으로 문제화된 것은 1994년에 개통된 분당선 에서부터 제기되었다고 볼 수 있다.

분당선 및 2기 지하철은 기존의 자갈도상을 콘크리트 궤도구조로 변경 시공한 노선으로서 콘크리트 도상구조는 분진억제나 유지보수 측면에서 매우 효율적인 방법으로 최근 건설되는 지하철에 적용되고 있다^[1].

그러나 이러한 궤도구조의 변경은 터널내부의 반사음장 강도를 높게 만들었고 결과적으로 이것은 전동차 객실내부의 소음투과를 증대시키는 요인으로 작용하게 되었다.

본 연구는 콘크리트도상에서 운행하는 전동차의 내부소음 저감설계를 하기 위한 기초연구로서 전동차를 직접 운행하면서 소음측정을 수행 하였다.

소음원을 파악하기 위해서는 차량의 운행방법을 달리하면서 소음을 측정하고, 측정위치 역시 터널, 전동차의 객실내 및 객실외로 구분하여 수행한다^[3]. 또한 이들 결과를 토대로 하여 객실소음에 지배적으로 기여하는 주 소음원 및 소음경로를 파악하였다.

2. 지하철 소음

2.1 소음 특성

차량의 소음은 소음발생 기구에 따라 구조진달 소음과 공력소음으로 분류된다. 소음원은 차륜과 레일의 접촉에 의한 진동음, 차량에 전력을 공급하는 판토타프와 가선의 접촉에 의한 집전소음,

+ 책임저자 : 최용운, 정회원, 서울도시철도공사(서울산업대학교 철도전문대학원 철도차량 시스템공학과 박사과정)

E-mail : choiyw@smrt.co.kr TEL : (02)6311-2321 FAX : (02)6311-2150

* : 서울산업대학교 교수

** : 한국철도기술연구원

*** : 한국철도기술연구원

견인전동기등 주요 전장품의 구동에 의한 구동장치음, 실내 에어컨이나 환풍기에 의한 보조기기 음과 주행하는 차량의 표면에서 공기동력학적인 메커니즘에 의해서 발생하는 공력소음이 있다^[4].

발생된 소음은 대차나 차체의 구조물을 통해서 진동의 형태로 차체를 가진하여 실내로 전달(구조음: Structure-borne noise) 되기도 하고, 출입구나 창틈 등의 개구부를 통하여 직접적으로 실내로 전달(공기음: Air-borne noise) 되기도 한다. 또한 발생된 소음이 공기 중을 통하여 전파되어 차체를 가진 시킴으로써 실내로 유입되는 2차 고체음(Second Structure-borne noise)의 형태도 있다.

공력소음은 일반적으로 저속의 주행속도에서는 그 영향이 매우 미미하나, 160 km/h 이상의 고속주행에서는 차체외부의 난류경계층에서 발생하는 압력파의 영향을 무시할 수 없게 된다^[1].

3. 소음측정

3. 1 측정장치

측정 및 분석 작업에 사용된 장비는 다음 표 3.1에 나타내었고 측정장비 구성은 그림 3.2와 같다.

사용 장비명	모 델	사 양	비 고
FFT analyzer	B&K 3550	16Ch, 5.4kHz	신호분석용
Acoustic front end	B&K	8 Ch	신호측정용
Tape recorder	SONY PC208A	8 Ch	신호기록용
Microphone	B&K 4165	8 개	신호측정용
Micorphone Preamplifier	B&K 5966	8 개	신호증폭용
Sound intensity Probe	B&K 3548		인텐시티 측정용
Portable FFT analyzer	B&K 2144	2 Ch	신호측정 및 분석
Precisioin sound level meter	RION 29E	1/1 Octave	소음측정용
Pistonphone	Norsonic	250Hz, 124dB	신호교정용
Tripod, Cable 등			
Sound booth	Sound Seal BBC-13-2"	1.2x1.2x1.2m ³	투과유입소음측정

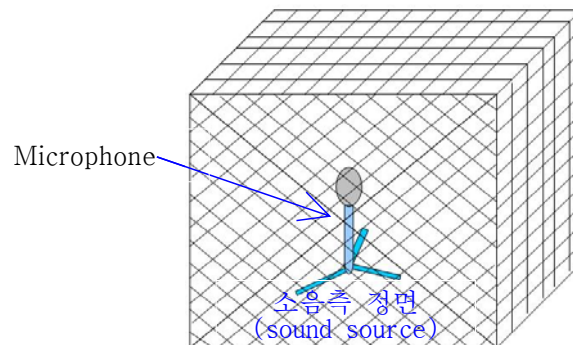


Fig. 3.1 Structure of black box

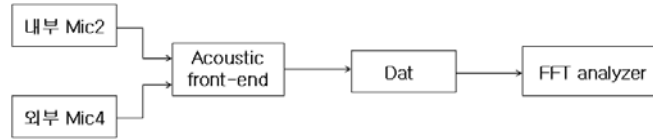


Fig. 3.2 Composition of measurement device

3. 2 측정방법

터널내부의 소음을 측정하기 위하여 7호선을 대상으로 하여 태릉-공릉역간의 차륜과 레일간 접촉소음과 터널 내부 소음을 측정하고, 그 결과를 주파수 분석기를 이용하여 1/3 옥타브 밴드로 분석하였다. 그림 3.3은 터널내 측정구간에서의 마이크로폰 위치(레일 중심으로부터 1860 mm)를 나타내고 있다. 태릉-공릉역구간의터널은 복선 터널로서 하부의 너비가 13m이상으로 일반 터널에 비하여 터널 단면이 상당히 넓은 것이 특징이다.

또한, 차량 내.외부소음을 측정하고자 임시열차 1편성을 운행하였으며, 측정은 도봉산역과 건대입구역간 상하행 차량에 대하여 수행하였다. 모터를 포함한 구동장치 및 주변 시스템이 부착된 Motor car(M-Car)와 일반 차량인 Trailer car(T-Car)를 대상으로 차량 객실 내 소음, 대차 위와 차량측면 및 지붕의 외부 소음, 암상자와 sound intensity를 이용한 각 부위별 소음을 측정하였다. 측정은 그림 3.4에 나타난 것과 같이 차량외부 4측정점(차량 하부 대차위, 차량 우측 측면, 차량 좌측 측면, 지붕위)과 객실내 2측정점(차체 볼스타 상부 중심 1.5m 상부, 차체 중심 1.5m 상부)을 측정위치로 선택하였다.

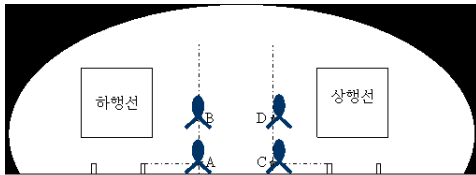
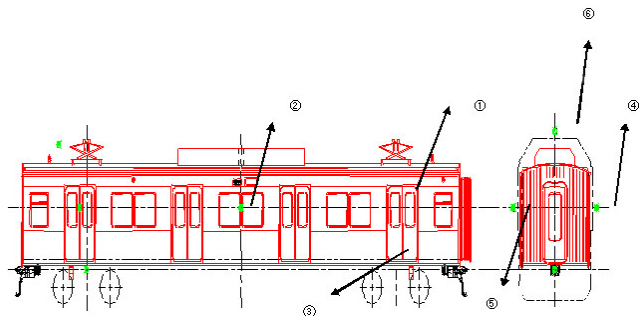


Fig. 3.3 position for the tunnel noise measurement



측정위치 : 객실내 2곳(① 차체 볼스타 상부 1.5m ② 차체 중심 1.5m 상부)
외부 4곳(③ 차량하부 대차위 ④ 우측측면 ⑤ 좌측측면 ⑥ 지붕위)

Fig. 3.4 Microphone installation position for the interior & exterior noise measurements of subway train

4. 측정결과 및 토의

4. 1 터널소음

그림 4.1은 하행선[공릉->태릉방향] 차량의 차륜/레일 접촉면과 동일한 수평면[A위치, 레일 중앙으로부터 1860 mm]과 차량의 측부 판넬위치[B위치]에서 측정한 결과를 나타내며, 그림 4.2은 마이크로폰을 C 위치와 D위치에 각각 고정한 상태에서 상행선[태릉->공릉방향] 차량의 측정결과를 분석한 것이다. 그림.4.3은 차량이 주행함에 따라 마이크로폰에서 측정된 소음 수준이 시간에 따라 변화하는 것을 나타낸 것이다. 지하철 7호선 터널의 사정으로 인하여 측정 당일에 차량은 10분 간격으로 운행되었으며, 모든 차량은 수동으로 운행되었다. 따라서 각 기관사의 운행에 대한 판단에 따라서 측정 위치를 통과하는 차량의 주행속도와 가감속도의 조건이 모두 달랐으므로, 그림 4.3에서 나타난 것과 같이 측정위치를 지나가는 차량의 소음은 측정 횟수와 시간에 따라 10dB정도의 폭을 지니고 변화하는 것을 알 수 있다. 소음분석 결과 중 중요한 것은 차량설계에 반영되어야 하므로 주파수 분석은 차량외부 소음을 대표할 수 있는

구간 즉, 최대 소음구간을 선택하는 것이 바람직하다. 그림 4.1과 4.2는 각 측정에 대하여 최대 소음 수준을 나타내는 구간을 선택하여 차륜/레일 접촉면과 차량 측면 판넬 위치에서 측정한 결과를 주파수 영역에서 A-가중치(weighting function)를 이용하여 분석한 자료이다. 하행선 측정 결과를 살펴보면, 차륜/레일 위치에서 측정된 결과는 1kHz에서 최댓값을 보여주고 있고 차량측면 판넬위치에서 측정된 결과는 400Hz에서 최댓값을 보여주고 있다. 반면에, 상행선 구간에서 측정된 결과는 1500Hz에서 양 측정점 모두에서 최댓값을 지니는 것을 알 수 있다. 이는 차량 측면에서의 최댓값을 지니는 주파수가 차륜/레일 위치에서의 최댓값을 나타내는 주파수에 비하여 낮은 값을 지니는 것을 알 수 있다.

따라서, 지하철 차량의 향후 설계 방향은 차량의 측면에서는 저주파소음 성분[63~400Hz]에 대한 차음 또는 흡음을 높일 수 있도록 설계하여야 하며, 차륜/레일 소음에 직접적인 영향을 받는 차량의 하부는 상대적으로 높은 중대역[400Hz~1kHz]구간의 소음에 대한 대비책을 강구하여야 하며, 차량 하부뿐 아니라 차량 측부에서의 차음과 흡음량이 높아야 하는 것을 알 수 있다. 차량외부소음은 해석에 의하여 계산되거나 시험에 의하여 측정하는 것이 가능하다.

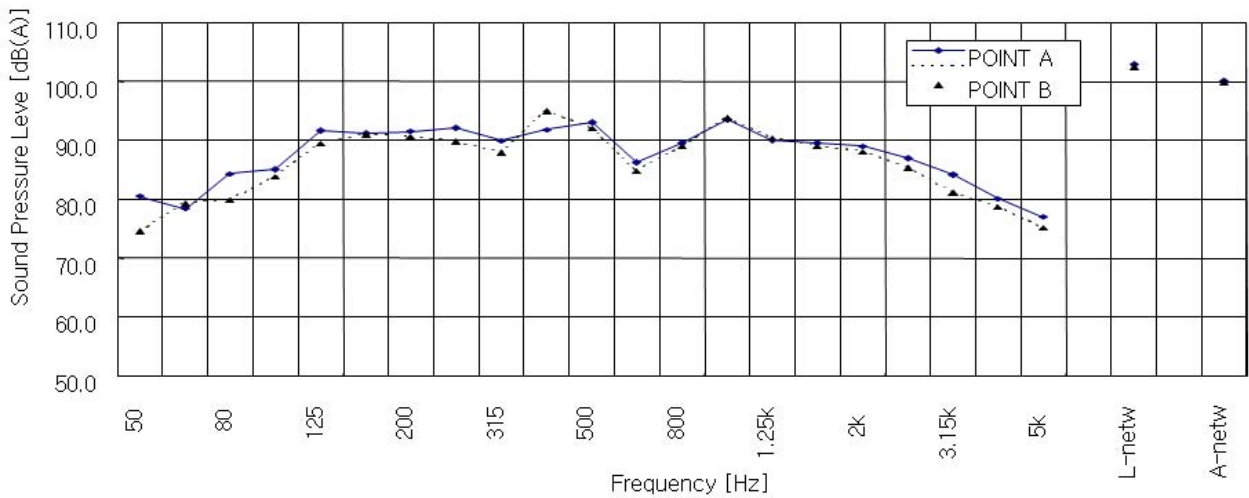


Fig.4.1 Tunnel noise measurement during train running from Gongrung to Taerung station

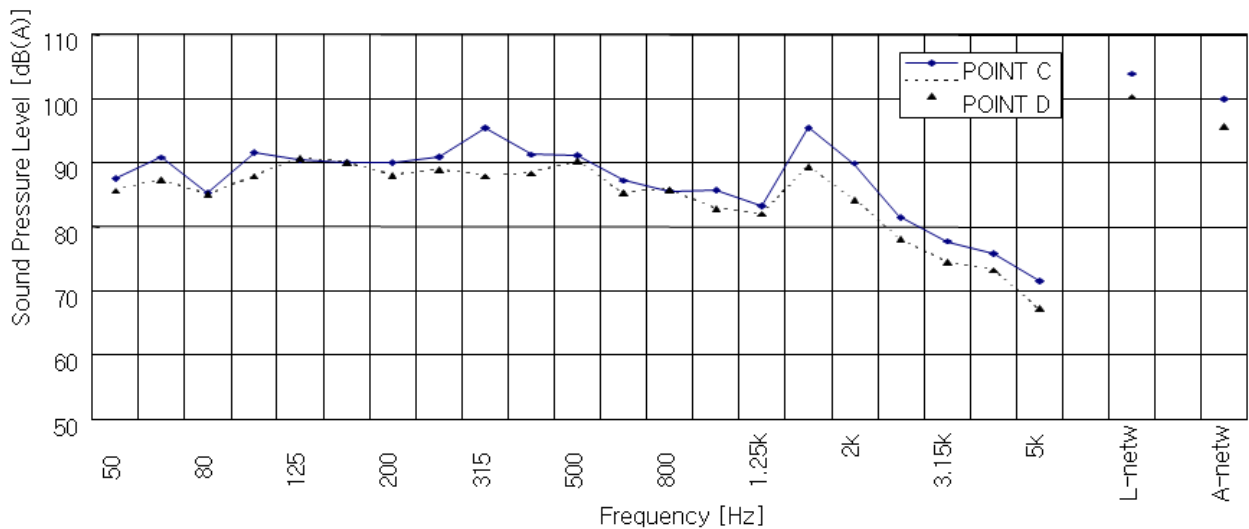


Fig.4.2 Tunnel noise measurement during train running from Taerung station to Gongrung station

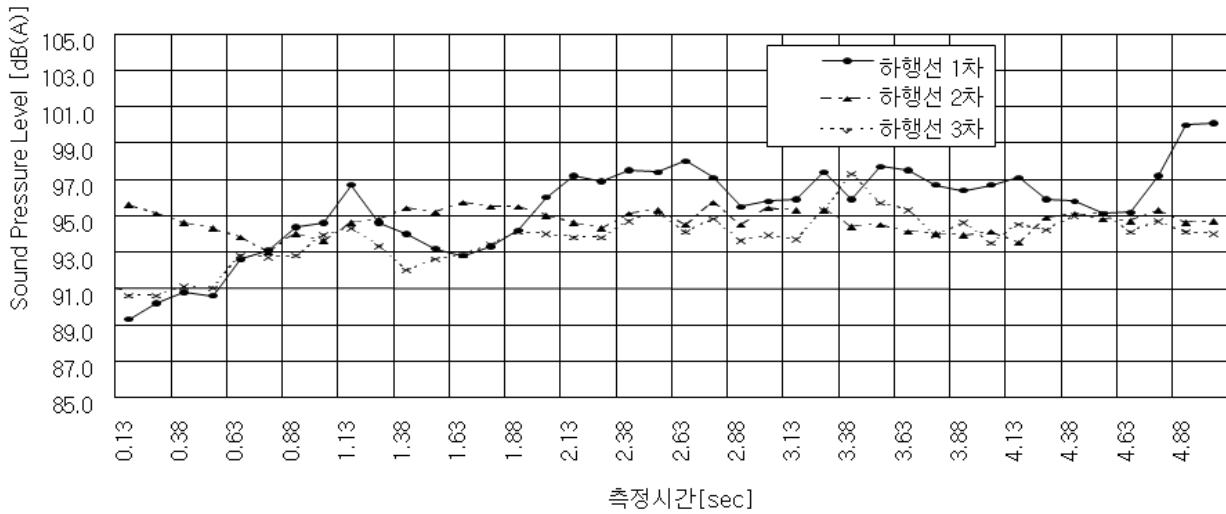


Fig.4.3 Noise measurement from the wheel/rail contact point when the train passes

4. 2 객실 내 외부 소음

차량의 주행에 따른 시간대별 주행속도와 소음 측정결과를 그림 4.4와 그림 4.5에 각각 M-CAR 및 T-CAR에 대하여 나타내었다. 그림 4.6은 최대 주행시, 가속시, 감속시의 주파수 분석을 나타내었다.

[단위 : dB(A)]

차종 순위	측정 위치	M-CAR		T-CAR		M-CAR 대비 T-CAR의 외부 소음 증감
		소음 수준	하부소음 대비 증감	소음 수준	하부소음 대비 증감	
1)	하부 외부 소음	103.3	0	102.4	0	▼0.9
2)	우측 측면 외부 소음	99.9	▼3.4	101.4	▼1.0	▲1.5
3)	좌측 측면 외부 소음	99.2	▼4.1	99.4	▼3.0	▲0.2
4)	지붕 외부 소음	97.2	▼6.1	98.5	▼3.9	▲1.3

Table.4.1 Comparison of exterior noise when running at 70km/h

다음은 타행운행 모드로 운행된 구간에서의 측정 결과를 서술한다.

그림 4.4와 그림 4.5에 측정된 결과를 회귀분석이 아닌 실제 측정 결과를 바탕으로 하여 평균한 외부 소음 결과의 전체 평균치를 순위별로 나타내면 표 4.1과 같이 정리된다.

전동차 외부 소음은 하부의 소음이 가장 높으며, 진행방향 우측 측면, 진행방향 좌측측면, 지붕 순으로 분포한다.

일정속도(70km/h 이상)를 지나는 직선 구간에 대해서는 구간별로 측정부위에서 특별한 음압 차이를

보이지 않으나, 곡선구간에서의 소음 수준은 상대적으로 낮은 주행 속도에도 불구하고 측정 결과는 직선구간에서 객실내외 소음에 비하여 상당히 높은 값을 지니는 것으로 나타났다. 속도 70km/h 정속 주행시에 직선 구간에서의 전체 평균 소음은 표 4.2에 나타난 것과 같이 각각 103.4 dB(A)와 102.3 dB(A)로 1.1 dB의 차이를 지닌다. M-CAR 하부에 형성되는 소음은 감속시의 소음이 가장 크고, 가속시에 소음이 가장 작은 것으로 나타났다. 앞에서 언급된 바와 같이 가속시가 정속시 보다 낮게 나타난 이유는 가속시에 비하여 정속시의 차량 주행 속도가 높아 정속시의 차륜/레일 소음이 가속시의 견인 전동기 발생 소음보다 높기 때문이다.

M-CAR와 T-CAR의 가속시 소음과 감속시 소음을 비교하면, 감속시의 소음이 가속시에 비하여 상대적으로 높은 수치를 지닌다. 이는 감속시에 회생제동으로 인하여 견인전동기로부터의 발생하는 소음과 제동 Disk brake의 마찰 소음이 합하여져서 높은 하부 소음을 형성하기 때문이다.

구 간	M-CAR			T-CAR		
	가속	정속	감속	가속	정속	감속
수락산 - 마들		104.2			103.1 (▼1.1)	
마들 - 노원		103.3			102.3 (▼1.0)	
노원 - 중계	103.1	103.6		97.3 (▼5.8)	102.3 (▼1.3)	
중계 - 하계		103.3			102.3 (▼1.0)	
하계 - 공릉		103.4	105.3		103.3 (▼1.1)	96.3 (▼9.0)
공릉 - 태릉		103.0	104.9		102.0 (▼1.0)	96.7 (▼8.2)
태릉 - 먹골	103.8	102.4		90.3 (▼13.5)	101.4 (▼1.0)	
면목 - 사가정		103.7			102.9 (▼0.8)	
사가정 - 용마산	101.4			93.1 (▼8.3)		
용마산 - 중곡	103.5			92.3 (▼11.2)		
중곡 - 군자		103.7	104.1		101.2 (▼2.5)	91.7 (▼12.4)
평 균(산술)	103.0	103.4	104.8	93.3 (▼9.7)	102.3 (▼1.1)	94.9 (▼9.9)

Table.4.2 Comparison between lower part noise of M-car and that of T-car [단위 : dB(A)]

주) 괄호안의 수치는 M-CAR 하부 소음 대비 소음 수준의 증감

M-CAR와 T-CAR의 소음 차를 비교하여 보면 감속시의 소음차가 9.9 dB로 그 차이가 가장 크며, 다음으로 가속시 9.7 dB, 정속 주행시 1.1 dB의 순으로 차이 값을 지닌다.

그림 4.7 은 가속시의 M-CAR와 T-CAR의 하부 소음 차가 가장 큰 태릉-먹골간 구간의 하부 외부 소음을 주파수 영역에서 표현한 것이며, 그림 4.8 은 감속시 그 차가 가장 큰 중곡 - 군자간의 하부 외부 소음을 나타낸 것이다.

차량의 가속시와 정속시의 하부 소음 수준을 비교하면 630 Hz이상의 주파수에서 높은 차이를 지닌다. 이는 견인 전동기에서 발생하는 소음이 저주파보다는 고주파 성분을 지니는 특성을 지니는 것을 알 수

있다. 따라서 견인 전동기에 의한 소음이 객실내로 유입되는 경로를 차단하기 위해서는 630 Hz이상에서 차음 특성이 우수하도록 마루구조를 개선하여야 한다. 차량의 감속시와 정속시의 하부 소음 수준을 비교하면 315 Hz와 500 Hz이상의 주파수 영역에서 높은 차이를 지닌다. 이는 가속시에 검토된 견인 전동기에서 발생하는 소음이 630 Hz 이상의 주파수 영역이외에 315 Hz와 500 Hz 주파수 영역에서 소음 성분이 정속시에 비하여 높은 음을 형성하였다. 그리고 가속시와 달리 감속시에는 10000 Hz에서 소음 성분이 상당히 높게 나타났다. 이는 제동 Disk brake에서 발생하는 마찰 소음의 특성으로 분석된다. 따라서 제동시에 하부에서 형성되는 외부 소음이 객실내로 유입되는 경로를 차단하기 위해서는 소음 투과 손실 측정시에 100 Hz에서 4000 Hz구간의 소음뿐만 아니라, 10000 Hz에서의 차음도 함께 고려되어야 한다.

	FLOOR	LEFT DOOR	RIGHT DOOR	ROOF	END DOOR
M-CAR	70.8	68.8	70.1	64.7	77.1
T-CAR	69.3	69.2	68.8	67.4	67.8

Table . 4 .3 Interior noise levels of black box per each part of train [단위 : dB(A)]

암상자를 사용하여 벽면의 투과 유입 소음을 측정한 결과를 표 4.3에 정리하였다.

부위별로 암상자 내로 유입된 소음을 보면 양 side door와 마루에서의 소음은 거의 비슷한 것으로 나타난 반면에 천정에서의 소음은 낮은 값을 지니고, 양 end door에서의 소음유입은 M-Car의 경우에 상당히 크게 나타나고 있다. 이는 암상자의 크기가 1.2m , 1.2m , 1.2m로 양 end door를 측정하기에는 상대적으로 크기가 커서 완벽한 밀착이 되지 못하여 객실 내 소음이 유입된 데에 그 원인이 있다. 그리고 side door의 측정시에는 방풍 고무를 포함하여 측정된 결과이나, 도어 포켓부와의 틈새는 포함되지 않았다. 따라서 방풍 고무의 영향은 충분히 나타난 것으로 볼 수 있다. 차량에서는 각종 벽체의 소음투과 손실과 차체의 기밀을 완벽하게 이룸으로써 공기 전달음의 차단 개선이 가능하다. 이 가운데 차체의 각종 틈새를 없애는 것은 소음 저감을 이루고자 하는 차량의 설계시 가장 중요한 변수로서 차체의 소음 투과손실을 높이는 노력에 비하여 많은 비용과 시간을 절약할 수 있다. 그리고 차체의 객실 내부 흡음률 또한 객실 내 소음을 줄이는 데에 중요한 설계 변수로서 고려되어야 할 사안이다. 일반적으로 지하철 차량의 객실 내부 흡음률은 약 2dB^[7]정도로 알려져 있다.

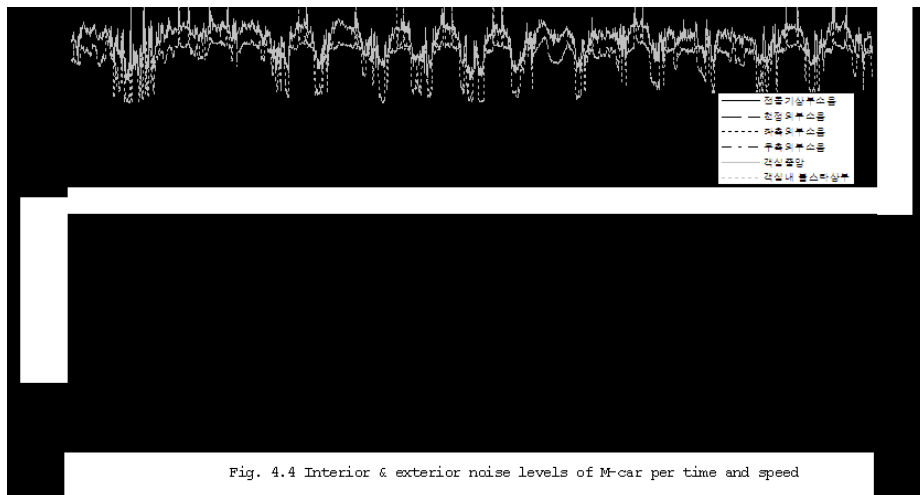


Fig. 4.4 Interior & exterior noise levels of M-car per time and speed

Fig. 4.4 Interior & exterior levels of M-car per time and speed

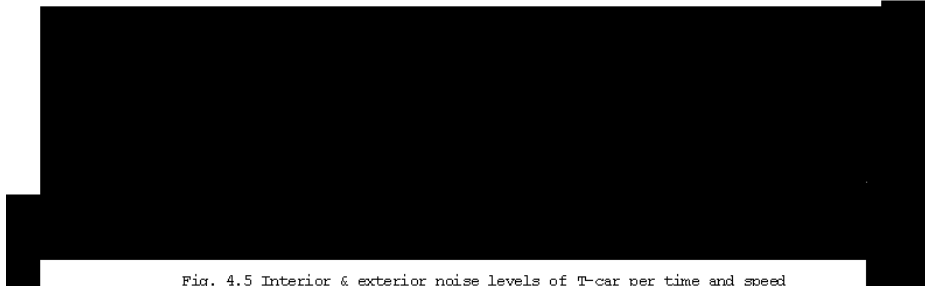


Fig. 4.5 Interior & exterior noise levels of T-car per time and speed

Fig. 4.5 Interior & exterior noise levels of T-car per time and speed

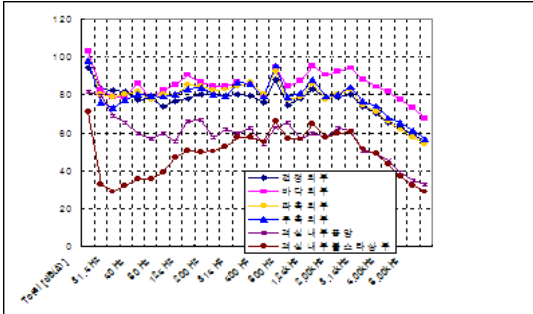
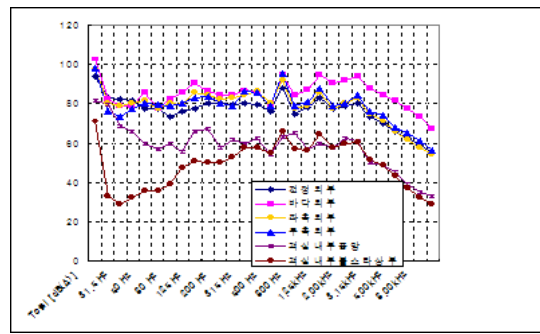
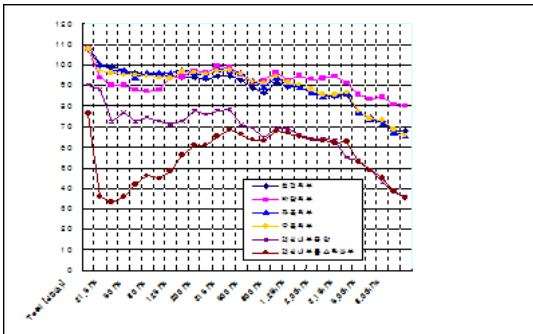


Fig.4.6 Interior & exterior noise levels of M-car
 (a) Max.speed,76km/h, (b)Acceleration, 43km/h,
 (c)Deceleration,28km/h

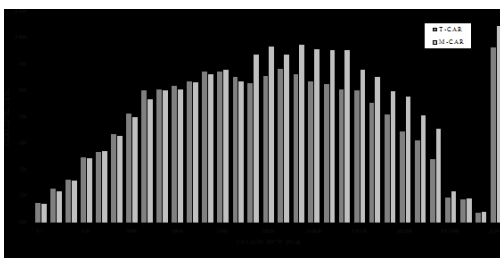


Fig.4.7 Lower part noises of M-car and T-car when accelerating

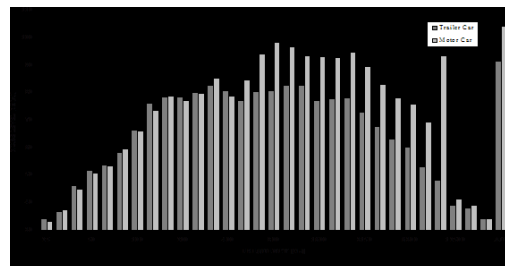


Fig.4.8 Lower part noises of M-car and T-car when decelerating

5. 결론

임시 열차 운영을 통하여 실측 된 결과를 토대로 소음저감 방안을 고찰하였으며 이를 정리하면 아래와 같다.

1. 터널소음은 차량 측부에서의 최댓값을 지나는 주파수가 차륜/레일 위치에서의 주파수에 비하여 낮은 값을 보였다.
2. 객실내부 소음 저감을 위해서, 차량측면은 저주파대역을, 차량바닥은 중대역 구간의 소음대비책을 강구하여야 하며, 차량 하부뿐만 아니라, 차량 측부에서의 차음과 흡음량이 높아야 한다.
3. 객실내 소음 저감을 위한 개선책으로 객실바닥, 벽체, 출입문 및 포켓, 창문의 투과손실 향상 및 차체의 기밀을 유지하는 것이 필요하다

참고문헌

1. 삼성건설(주)기술연구소, 분당선 소음 진동 저감 대책에 관한 연구, 철도청, 1994.
2. 김기천, 지하철의 소음과 건설비의 관계에 관한 연구, 행정학박사학위 논문, 서울대학교, 1997.
3. (주)한진중공업, 서울시 지하철 7및 8호선 전차 소음 측정정보고서, 1998
4. 한국철도기술연구원, 철도 소음의 발생 및 저감 대책 No.14호, 1998
5. 정일록, 소음진동학, 신광출판사, pp 99~101, pp113 ~ 121, 1996
6. J.D IRWIN and E.R GRAF, Industrial Noise and Vibration Control, p62~63, p185, Prentice-Hall Inc, 1979
7. Y.J. Lee, A study of cabin inside noise of Hanjin high-speed passenger coaches, Computers in Railway V, Vol 2, pp33-44, 1996
8. U.S. Dept. of Transportation, Handbook of urban Rail Noise and Vibration Control, 1982