

도시철도 전동차 소음 특성에 관한 연구

A Study on the Noise Characteristics 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. To reduce the interior noise of subway train, the side part of rolling stock should have a noise blocking system for low band frequency noise, the floor of it should have that for medium range frequency noise and the side part as well as lower part of it should have good noise reduction and absorption function.

Keywords : noise

요 지 지하철은 지상교통과 비교하여 정확성, 신속성, 안전성, 대량성외에도 배기가스 배출이 없다는 이점 때문에 대도시 교통 문제 해결을 위한 유용한 수송 수단이 되고 있다. 그러나 콘크리트 도상에 의한 터널 구조로 객실내 소음이 사회적으로 문제가 되고 있다. 이에 객실 소음을 분석하기 위하여 임시열차 운행을 통하여 실측 된 결과를 토대로 소음의 경로와 위치별 소음의 특성을 분석하였다. 객실내 소음 저감을 위해서는 차량측면은 저주파 대역을 차량 바닥은 중대역구간의 소음 대비책을 강구 하여야 하며, 차량의 투과 손실 향상 및 차체의 기밀을 유지하는 것이 필요하다.

주 요 어 : 소음

1. 서론

지하철은 지상교통과 비교하여 정확성, 신속성, 안전성, 대량성 이외에도 배기가스배출이 없다는 이점 때문에 대도시 교통문제를 해결하기 위한 유용한 수송수단이 되고 있다.

이와 같이 지하철이 갖는 긍정적인 측면과는 달리 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 분당선에서부터 제기되었다고 볼 수 있다. 분당선은 기존의 자갈도상을 콘크리트 궤도구조로 변경 시공한 노선으로서 콘크리트 도상구조는 분진역제나 유지보수 측면에서 매우 효율적인 방법으로 최근 건설되는 지하철에 적용되고 있다[1]. 그러나 이러한 궤도구조의 변경은 터널내부의 반사음장 강도를 높게 만들었고 결과적으로 이것은 전동차 객실내부로의 소음투과를 증대시키는 요인[2]으로 작용하게 되었다.

전동차의 객실소음은 실내외부의 소음원들 모두에 의하여 영향을 받지만, 이 중에서도 실외부로부터 유입 또는 투과되는 소음에 의하여 객실내부의 소음레벨이 좌우된다[3] 할 수 있다. 본 연구는 콘크리트도상에서 운행하는 전동차의 내부소음 저감설계를 하기 위한 기초연구로서 전동차를 직접 운행하면서 소음측정을 수행 하였다.

[†] 책임저자 : 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

2. 소음측정

2.1 측정장치

측정 및 분석 작업에 사용된 장비는 다음 Table 1에 나타내었고 측정장비 구성은 Fig. 2와 같다.

Table 1. Measuring and analyzing equipments

사용 장비명	모델	사 양	용도
FFT analyzer	B&K 3550	16Ch, 5.4kHz	신호분석
Acoustic front end	B&K	8 Ch	신호측정
Tape recorder	SONY PC208A	8 Ch	신호기록
Microphone	B&K 4165	8 개	신호측정
Micorphone Preamplifier	B&K 5966	8 개	신호증폭
Sound intensity Probe	B&K 3548		인텐시티 측정
Portable FFT analyzer	B&K 2144	2 Ch	신호측정 및 분석
Precisioin sound level meter	RION 29E	1/1 Octave	소음측정

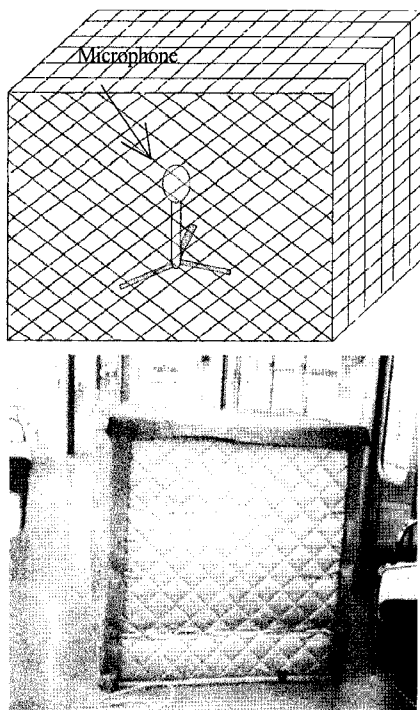


Fig. 1. Structure of black box

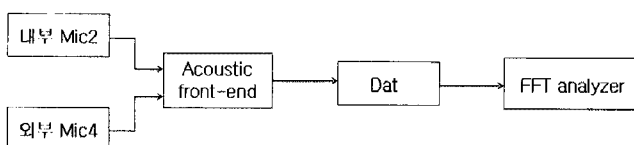


Fig. 2. Composition of measurement device

2.2 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. Fig. 3은 터널내 측정구간에서의 마이크로폰 위치(터널 내부건축 한계를 감안하고 안전 거리를 확보하여 궤도 중심으로부터 1860mm)를 나타내고 있다. 태릉-공릉역 구간의 터널은 복선 터널로서 하부의 너비가 13m 이상으로 일반 터널에 비하여 터널 단면이 상당히 넓은 것이 특징이다.

또한, 전동차 내외부소음을 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 전동차의 투과 손실을 측정하기 위하여 암상자와 sound intensity를 이용하여 전동차 객실 내 소음과 대차 위와 측면 및 지붕의 외부 소음을 측정하였다. 암상자는 미국 sound seal 제품으로 120cm 정육면체 중 한면이 제거된 형태이며 두께는 2inch의 구조이다. 측정 위치는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 차량외부 4 측정점(차량 하부는 소음이 가장 큰 대차위로, 차량 우측 측면, 차량 좌측 측면, 지붕위)과 객실내 2측정점(차체 볼스타 상부 중심 1.5m 상부, 차체 중심 1.5m 상부: 국토해양부 전동차 표준 사양서 기준)을 선택하였다.

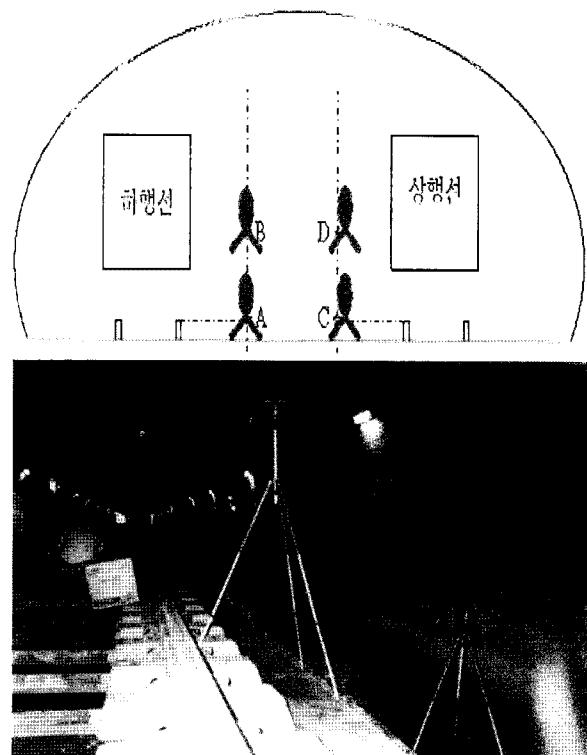
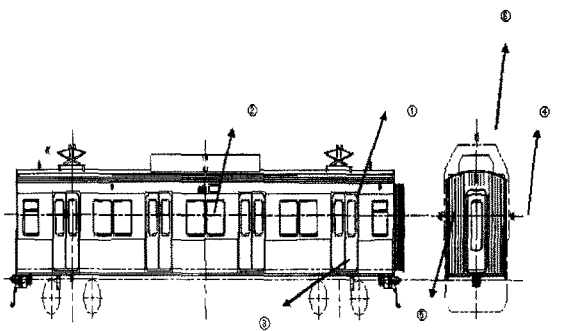


Fig. 3. Position for the tunnel noise measurement



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

3. 측정결과 및 토의

3.1 터널소음

Fig. 5는 하행선[공릉→태릉방향] 차량의 차륜/레일 접촉면과 동일한 수평면[A위치]과 차량의 측부 판넬위치[B위치]에서 측정된 결과를 나타내며, Fig. 6은 마이크로폰을 C 위치와 D위치에 각각 고정한 상태에서 상행선[태릉→공릉방향] 차량의 측정결과를 분석한 것이다. Fig. 7은 차량이 주행함에 따라 마이크로폰에서 측정된 소음 수준이 시간에 따라 변화하는 것을 나타낸 것이다. 지하철 7호선 운행 사정으로 인하여 측정 당일엔 차량은 10분 간격으로 운행되었으며, 모든 차량은 수동으로 운행되었다. 따라서 각 기관사의 운행 상태에 따라 측정 위치를 통과하는 차량의 주행 속도와 가속속도의 조건이 모두 달랐으므로, Fig. 7에서 나타난 것과 같이 측정위치를 지나는 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 바람직하

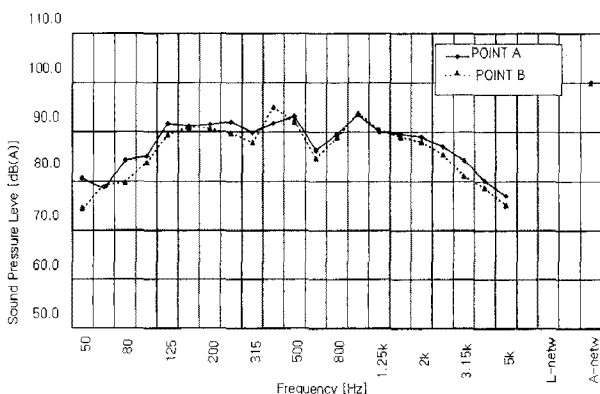


Fig. 5. Tunnel noise measurement during train running from Gong-rung to Taerung station [4]

다. Fig. 5와 6은 각 측정에 대하여 최대 소음 수준을 나타내는 구간을 선택하여 차륜/레일 접촉면과 차량 측면 판넬 위치에서 측정된 결과를 분석한 자료이다. 하행선 측정 결과를 살펴보면, 차륜/레일 위치에서 측정된 결과는 1kHz에서 최대값을 보여주고 있고 차량측면 판넬위치에서 측정된 결과는 400Hz에서 최대값을 보여주고 있다. 반면에, 상행선 구간에서 측정된 결과는 1500Hz에서 양 측정점 모두가 최대값을 지니는 것을 알 수 있다.

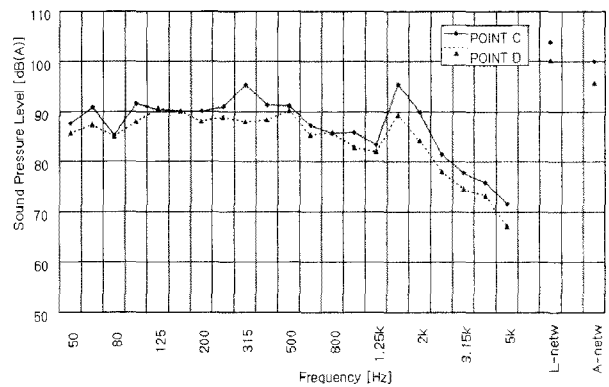


Fig. 6. Tunnel noise measurement during train running from Taerung to Gong-rung station [4]

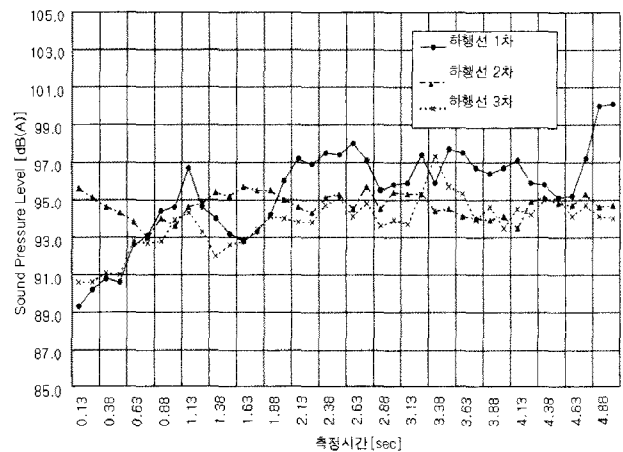


Fig. 7. Noise measurement from the wheel/rail contact point when the train passes [4]

3.2 객실 내외부 소음

차량의 주행에 따른 시간대별 주행속도와 소음 측정결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 M-CAR 및 T-CAR에 대하여 나타내었다. Fig. 10은 시간대별 M-CAR의 차량 외부 소음을 1초 간격으로 선형 평균한 결과를 열차 속도에 대하여 분포시킨 결과와 이의 로그함수에 대한 회귀분석결과를 나타낸 것이다. 회귀분석에서 로그함수를 이용한 이유는 차량의 차륜/레일간 접촉 소음은 속도의 로그함수에 비례[5]하기 때문이다. 속도에 따라 점진적으로 소음이 증가하는 T-CAR와 달리 전동기가 부착된 M-CAR는 가속후 30km/h

부터 감속시까지 전동기상부 소음은 100dB(A) 이상의 높은 음압을 형성하였다. 이는 가속시에는 전동기 회전 소음이 주 소음원으로 작용하였으며, 감속시에는 회생제동 및 제동시스템에 의한 소음이 주 소음원으로 작용하였기 때문이다.

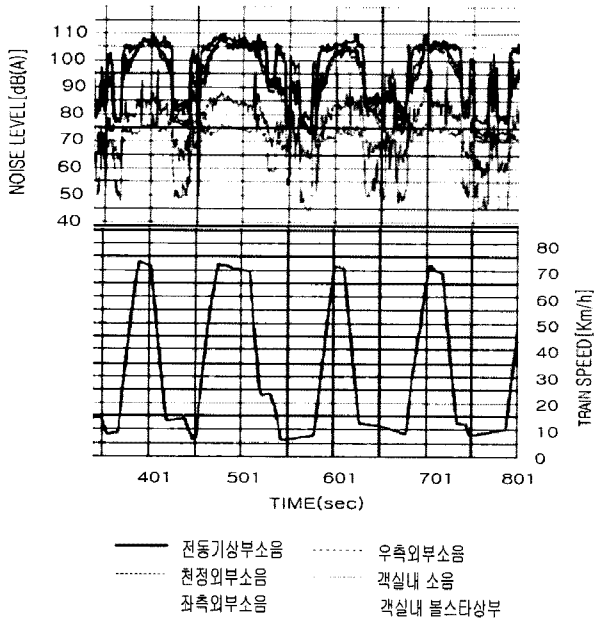


Fig. 8. Interior & exterior level of M-car per time and speed

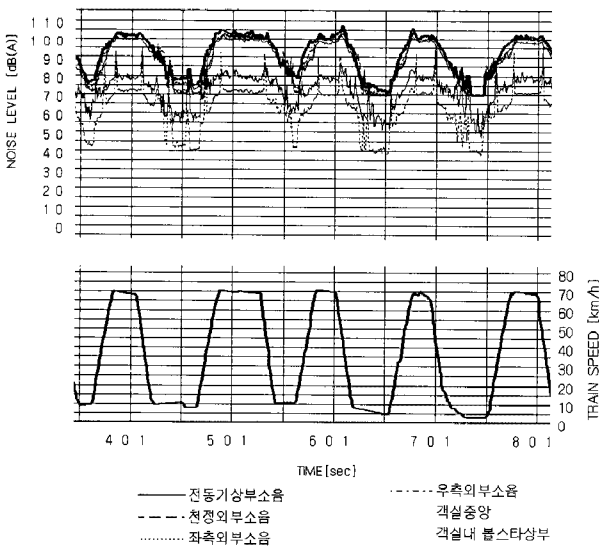


Fig. 9. Interior & exterior noise of T-car per time and speed

Fig. 11~12에서 분석된 결과를 보면 운행속도 70km/h에서의 차량 하부의 외부소음 차가 1dB을 넘지 아니한다. 이는 M-CAR의 경우 속도가 증가할수록 전동기로부터 발생된 소음에 의한 영향보다 차륜/레일 접촉음에 의한 영향이 크기 때문으로 분석된다. 회귀 분석을 통한 계산에 의하면 운행속도 70km/h에서의 역행(Powering) 가속주행

시 차량 하부소음은 M-CAR의 경우 108.7dB(A)이고, T-CAR의 경우 108.2dB(A)로 0.5dB정도의 차이를 지닌다. 이때의 객실 중앙부에서의 소음수준은 각각 84.6dB(A)와 84.2dB(A)의 소음 수준으로 M-car와 T-car의 객실 내 소음차이가 차량 하부 소음의 차와 유사한 값을 지니는 것으로 나타났다.

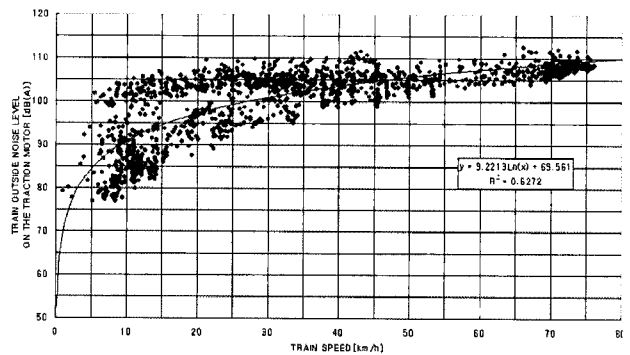


Fig 10. Lower part exterior noise of M-car per speed

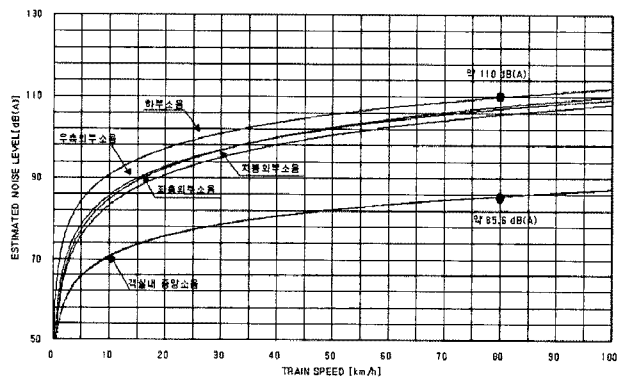


Fig. 11. Regressive analysis of interior and exterior noise of M-car

Table 2. Comparison of exterior noise when running at 70km/h [단위 : dB(A)]

위치	M-CAR		T-CAR		M-차 대비
	소음	하부 대비	소음	하부 대비	
하부	103.3	0	102.4	0	▼0.9
우측 측면	99.9	▼3.4	101.4	▼1.0	▲1.5
좌측 측면	99.2	▼4.1	99.4	▼3.0	▲0.2
지붕	97.2	▼6.1	98.5	▼3.9	▲1.3

Fig. 8과 Fig. 9에 측정된 결과를 회귀분석이 아닌 실제 측정 결과를 바탕으로 하여 가,감속시를 포함하여 전 구간에 대하여 평균한 외부 소음 결과의 전체 평균치를 순위별로 나타내면 Table 2와 같이 정리된다. Fig. 10은 회귀분석

으로 1초간 평균하여 측정된 결과로서, 주행속도 70km/h 이상 구간에서 전체 평균하여 분석한 실측 결과와는 차이를 보이고 있으며, 회귀분석결과가 다소 높다. 그 이유는 회귀 분석 결과에는 각 열차의 속도에서 전동기가 작동하거나 긴급 제동에 의하여 발생하는 소음이 포함되었기 때문이다.

전동차 외부 소음은 하부의 소음이 가장 높으며, 진행방향 우측 측면, 좌측측면, 지붕 순으로 분포한다. 전동차의 우측 측면이 좌측 보다 높은 이유는 터널구조중 복선터널은 진행 방향으로 좌측이 개방되어 있어 우측이 더 높으므로 판단된다.

일정속도(70km/h 이상)로 운행하는 직선 구간에 대해서는 구간별로 측정부위에서 특별한 음압 차이를 보이지 않으나, 곡선구간에서의 소음 수준은 상대적으로 낮은 주행 속도에도 불구하고 상당히 높은 값으로 나타났다. 속도 70km/h 정속 주행시에 직선 구간에서의 전체 평균 소음은 Table 3에 나타난 것과 같이 각각 103.4dB(A)와 102.3dB(A)로 1.1dB의 차이를 지닌다. M-CAR 하부에 형성되는 소음은 감속시의 소음이 가장 크고, 가속시에 소음이 가장 작은 것으로 나타났다.

M-CAR와 T-CAR의 가속시 소음과 감속시 소음을 비교하면, 감속시의 소음이 가속시에 비하여 상대적으로 높게 나타났다. 이는 감속시에 회생제동으로 인하여 견인전동기로부터의 발생하는 소음과 제동 Disk brake의 마찰 소음이 합하여져서 높은 하부 소음을 형성하기 때문이다[6,7].

Table 3. Comparison between lower part noise of M-car and that of T-car [단위 : dB(A)]

구분	M-CAR			T-CAR		
	가속	정속	감속	가속	정속	감속
평균 (산술)	103.0	103.4	104.8	93.3	102.3	94.9
				(▼9.7)	(▼1.1)	(▼9.9)

주) 괄호안의 수치는 M-CAR 하부 소음 대비 소음 수준의 증감
*가속시(30Km/h에서 70Km/h까지), 감속시(70Km/h에서 30Km/h), 정속시(70Km/h 이상)

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

Fig. 13은 가속시의 M-CAR와 T-CAR의 하부 소음 차가 가장 큰 태릉-떡골간 구간의 하부 외부 소음을 주파수 영역에서 표현한 것이며, Fig. 14는 감속시 그 차이가 가장 큰 중곡 - 군자간의 하부 외부 소음을 나타낸 것이다.

Fig. 13에서 차량의 가속시의 하부 소음 수준을 비교하면 630Hz 이상의 주파수에서 높은 차이를 지닌다. 이는 견인 전동기에서 발생하는 소음이 고주파 성분을 지니는 것을 알 수 있다.

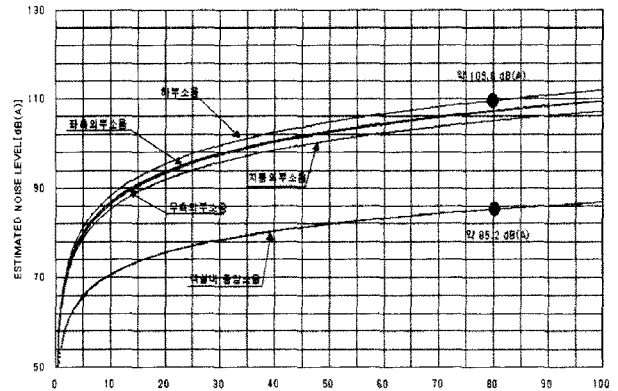


Fig. 12. Regressive analysis of interior and exterior noise of T-car

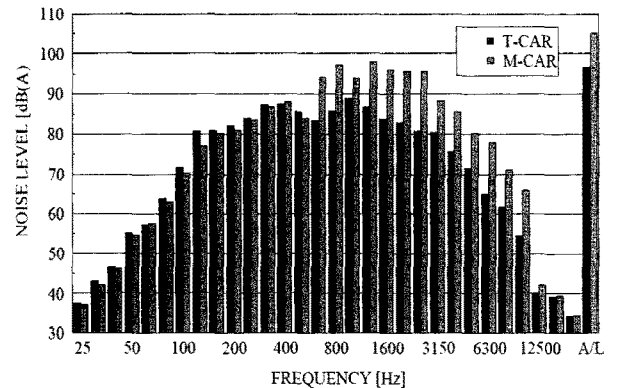


Fig. 13. Lower part noises of M-car and T-car when accelerating

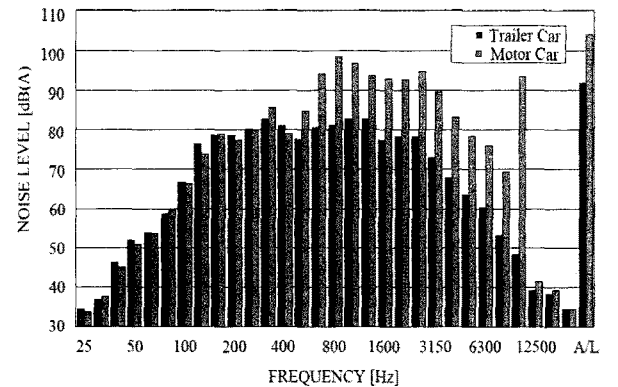


Fig. 14. Lower part noises of M-car and T-car when decelerating

Fig. 14에서 차량의 감속시의 하부 소음 수준을 비교하면 315Hz와 500Hz 이상의 주파수 영역에서 높은 차이를 지녔으며 10000Hz에서도 소음 성분이 상당히 높게 나타났다. 이는 제동 Disk brake에서 발생하는 마찰 소음의 특성으로 분석된다.

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

	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

암상자를 사용하여 벽면의 투과 유입 소음을 측정된 결과를 Table 4에 정리하였다.

부위별로 암상자 내로 유입된 소음을 보면 양 side door와 마루(floor)에서의 소음은 거의 비슷한 것으로 나타났고 천정에서의 소음은 낮은 값을 지니고, 양 end door는 M-Car의 경우에 상당히 크게 나타나고 있다. 이는 암상자가 end door를 측정하기에는 상대적으로 크기가 커서 완벽한 밀착이 되지 못하여 객실 내 소음이 유입된 데에 그 원인이 있다. 그리고 side door의 측정은 방풍 고무를 포함하여 측정된 결과이나, 도어 포켓부와의 틈새는 포함되지 않았다. 따라서 방풍 고무의 영향은 충분히 나타난 것으로 볼 수 있다.

차량의 각종 벽체의 소음투과손실과 차체의 기밀을 완벽하게 함으로써 공기 전달음의 차단 개선이[8] 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.

4. 결론

임시 열차 운영을 통하여 실측된 결과를 토대로 소음의 특성을 고찰 하였으며 이를 정리하면 아래와 같다.

1. 차량 주행 시 외부 소음수준은 동력차(Motor Car)는 가속 후 30km/h 이상에서부터 감속이 완료될 때까지 105

dB(A) 정도의 높은 음압을 형성하며 무동력차(Trailer Car)는 속도증가에 따라 소음이 증가한다. 70km/h 주행 시는 동력차와 무동력 차의 소음차이가 1dB를 넘지 않는다. 이는 동력차의 경우 속도가 증가할수록 전동기로부터 발생된 소음보다 휠, 레일 접촉음에 의한 영향이 크기 때문이다.

2. 차량외부 음압은 하부 > 좌우측면 > 지붕의 순으로 소음이 형성되었다.
3. 가, 감속시의 외부 소음 수준은 감속시 9.9dB, 가속시 9.7dB, 정속시 1.1dB씩 M-Car가 높았다.
4. 전동차의 소음은 차량측면은 저주파대역이, 차량바닥은 중대역 구간의 소음이 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 삼성건설(주)기술연구소(1994), “분당선 소음 진동 저감 대책에 관한 연구.” 철도청.
2. 김기천(1997), “지하철의 소음과 건설비의 관계에 관한 연구,” 행정학박사학위 논문, 서울대학교.
3. 한국철도기술연구원(1998), “철도 소음의 발생 및 저감 대책,” No. 14호.
4. (주)한진중공업(1998), “서울시 지하철 7 및 8호선 전차 소음 측정 보고서”.
5. U.S. Dept. of Transportation(1982), “Handbook of urban Rail Noise and Vibration Control”.
6. Lee, Y.J.(1996), “A study of cabin inside noise of Hanjin high-speed passenger coaches,” Computers in Railway V, Vol 2, pp. 33-44.
7. Irwin, J.D. and Graf, E.R.(1979), “Industrial Noise and Vibration Control,” pp. 62-63, p. 185, Prentice-Hall Inc.
8. 정일록(1996), “소음진동학,” 신광출판사, pp. 99-101, pp. 113-121.

접수일(2008년 4월 28일), 수정일(2008년 7월 17일), 게재확정일(2009년 4월 27일)