

< 논 문 >

## 저속 주행시 자기부상열차의 실내소음저감에 관한 연구

A Study of Interior Noise Reduction of a Maglev Train at Low Speed

김 현 실\* · 김 재 승\* · 강 현 주\* · 김 봉 기\* · 김 상 렬\*

Hyun-Sil Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Joo Kang, Bong-Ki Kim, and Sang-Rul Kim

(2001년 6월 18일 접수 : 2001년 9월 5일 심사완료)

**Key Words** : Maglev Train (자기부상열차), Interior Noise (실내소음), Sound Absorbing Material (흡음재).

### ABSTRACT

A study of interior noise reduction in the maglev train is presented. Train speed of interest is low such that aero-dynamic noise is negligible and power supply system is a dominant noise source. Based on the measurements of interior noise and acceleration levels during running and zero speed conditions, dominant noise sources are identified. After spectra characteristics of noise sources are investigated, several noise reducing methods are studied such as STL increasement of floor panels, sealing, and absorption treatment. It is found that the most important noise sources are VVVF inverter and SLIM in running condition, whereas air conditioner and DC/DC converter are dominant in zero speed. Since the major noise sources are under the floor, complete sealing and high STL of the floor panel are shown to be the most crucial factors in noise reduction. After sound absorbing material, which is polyurethan foam of 50 mm thickness, is attached to the downward side of the floor in addition to sealing treatment, the interior noise is reduced by 3~4 dB.

### 1. 서 론

자기부상열차는 레일 위를 떠서 주행하므로 재래식 철도에서 가장 큰 문제가 되는 휠-레일간의 마찰소음을 근본적으로 제거할 수 있다는 점에 큰 장점이 있으며 실제 소음레벨도 일반 철도차량에 비해 작다. 그러나, 전원 공급장치와 추진장치에서 발생하는 특정 주파수 성분의 소음이 귀를 거슬리게 하는 문제점<sup>(1~3)</sup>이 있으며 이와 같은 현상은 일본의 자기부상 시험열차 소음에서도 발견되는데, 주 원인은 추진기인 LIM(linear induction motor)와 이에 전원을 공급하는 가변전압/가변주파수 인버터(variable voltage

variable frequency inverter: VVVF inverter)의 코일진동에 기인하는 것으로 알려져 있다. VVVF 인버터는 일종의 변압기로 볼 수 있는데 일반적으로 대형 변압기는 철심과 코일이 전원주파수의 하모닉 성분으로 진동하므로 변압기 소음<sup>(4)</sup> 스펙트럼에는 이 하모닉 성분이 뚜렷이 나타난다.

본 논문은 한국기계연구원이 시험운영하고 있는 자기부상열차<sup>(5)</sup>의 소음해석에 관한 연구결과와 일부로 현재 70 dB(A) 부근인 주행 중 실내소음을 65 dB(A) 이하로 감소시키는 것이 연구목표이며 이를 위해 수행한 주요 소음원의 특성파악, 감소대책 강구 및 효과확인 등 일련의 소음감소대책을 기술하였다. Fig. 1은 자기부상열차의 외관을 보여주는데 측정대상차량은 길이가 약 14 m, 폭은 3 m, 실내높이는 2 m이며 실내가 길이방향으로 길며 위치에 따라 소음레벨에 변화가 있으므로 전방, 중앙, 후방 3군데에서 소음을 측정하였고 이를 평균한 값을 실내소음 목표

\* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부  
E-mail : hskim@kimm.re.kr  
Tel : (042) 868-7461, Fax : (042) 868-7440



Fig. 1 Maglev train developed by KIMM

값으로 설정하였다. 자기부상열차는 속도변화가 Notch 1에서 Notch 4까지 4단계로 구분되어 있으며 가장 빠른 Notch 4는 약 60 km/h 정도에 해당한다. 본 논문에서 고려하는 속도 영역은 공력소음은 문제가 되지 않는 낮은 영역이며 주요 소음원은 동력공급 계통과 관련된 장비를 대상으로 한다. 현재 시험선로는 총 거리가 1 km 정도이며 여러 가지 운전조건 구현을 위해 선로를 직선/곡선, 오르막/내리막 등을 조합하여 이루어졌으므로 notch 4로 일정하게 주행할 수 있는 시간은 매우 짧다. 주행 중 실내소음은 notch 3을 기준으로 하였으며 notch 4는 참고자료로만 이용하였다.

## 2. 소음원

### 2.1 주요 소음원

부상 및 주행을 위한 각종 전장품은 차량 하부에 설치되었는데 보수나 교체시 접근을 용이하게 하기 위해 실내 바닥은 8개의 해치(hatch)로 구성되어 있으며 해당되는 장비 위의 해치를 들어낼 수 있는 구조로 되어있다. 전체 해치 면적은 폭 1.2 m, 길이 9.9 m 정도로 바닥면적의 약 반에 해당한다. Fig. 2는 측면 패널이 제거된 상태의 하부를 나타내며 Fig. 3은 바닥 해치와 주요 장비위치의 개략적인 위치를 나타낸다. 주요 소음원은 다음과 같다.

#### (1) VVVF 인버터:

가변전압/가변주파수 변환기로 1500 V DC를 공급받아 추진기인 SLIM을 구동시키기 위한 교류로 변환하는 기기이다. VVVF 인버터는 차량 앞쪽(운전석

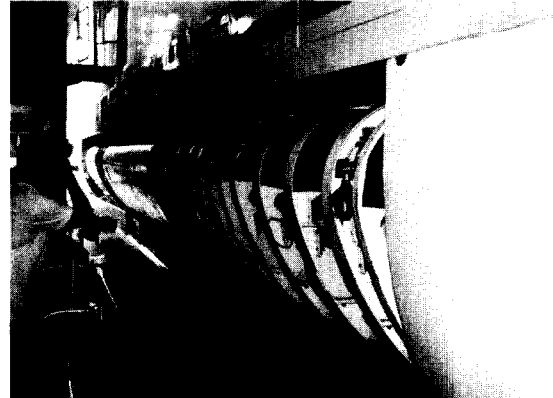


Fig. 2 Side view of the lower part of the maglev train without cover panels

방향) 차체 하부에 있다. 변환 주파수의 하모닉에서 발생하는 코일진동에 의한 소음이 크며 이외의 소음원으로 냉각용 팬(fan)을 들 수 있다. VVVF 인버터는 길이 2.5 m, 폭 0.8 m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조로 되어있다.

#### (2) SLIM:

VVVF 인버터에서 전원을 공급받아 추진을 하는 편측식 선형유도 전동기로 차량 양쪽에 24개가 배열되어 있으며 코일 진동에 의한 소음이 발생한다. VVVF 인버터와 같은 주파수로 소음을 발생하며 VVVF 인버터소음이 특정 부위에 집중된 반면 SLIM은 차량 하부 전체에 소음을 발생한다.

#### (3) DC/DC 컨버터:

1500 V DC를 공급받아 추진용 전원을 제외한 차내 각종 전원을 공급하는 장치로 일종의 변압기이며 출력은 DC 300 V, 100 V 및 AC 110 V이다. 코일의 진동으로 인한 소음과 냉각용 팬 소음을 발생하며 280 Hz의 변환주파수(switching frequency)에 의한 성분이 존재한다. DC/DC 컨버터는 차량 후방쪽 하부에 있으며 길이 2.5 m, 폭 0.8 m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조이다.

#### (4) 냉방기:

냉방기(air conditioner)는 실내 후방 쪽 천장 위에 있으며 공기압축기(air compressor)는 차량 하부에 있다. 냉방기소음은 팬 소음과 공기압축기 소음으로 구별되며 공기압축기는 공기압이 일정 수준이하로 내려가면 작동한다.

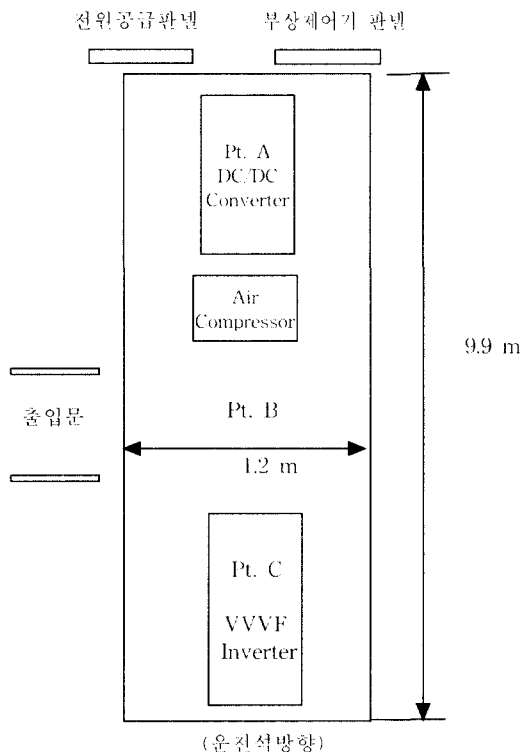


Fig. 3 Floor hatch and location of the equipments

(5) 부상제어 패널과 전원제어 패널:

열차 뒤편(운전석 반대방향) 문 양쪽으로 부상제어 패널과 전원제어 패널이 있으며 각각 냉각용 팬이 있어 소음을 발생한다. 패널 도어의 밀봉이 완벽하지 않아 틈새로 소음이 새어나오며 특히 전원제어 패널은 패널 뒤편이 차량하부와 통해 있어 주행시 차체 하부 소음이 전달되는 통로 역할을 하는데 패널 도어는 1 mm 정도의 얇은 철판으로 되어 있어 패널 방사(radiation)에 의한 소음 전파도 예상된다.

여러 가지 소음원 중 전원이 공급되면 늘 가동하는 장비는 DC/DC 컨버터와 냉방기(AC) 및 조절 패널의 팬이며 VVVF 인버터와 SLIM은 주행 중에만 작동한다.

2.2 일본 자기부상열차소음

일본 자기부상열차 소음측정자료<sup>(1)</sup>에 의하면 VVVF 인버터 변환주파수가 높은 경우(2 kHz)가 낮은 경우(400 Hz) 보다 소음이 작게 나타났다. 특이한 점으로는 400 Hz 경우 저속시 실내소음이 79

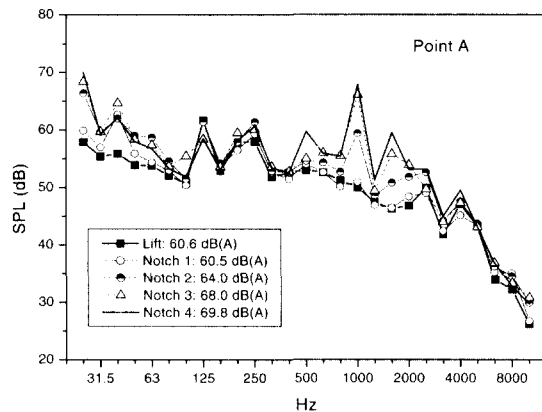


Fig. 4 Change of the interior noise at aft position (point A) with speed (AC on).

dB(A)로 매우 높으며 국내 자기부상열차의 경우 저속시 소음은 60 dB(A) 정도로 일본의 고주파수 인버터 경우와 비슷하며, 고속시 소음은 67~70 dB(A)로 일본의 저주파수 인버터 경우와 비슷함을 알 수 있다. 참고문헌 (2)에서는 달리는 열차의 소음을 홀로그래피를 이용하여 측정하였는데 철로변에 세워진 마이크로폰 어레이의 소음해석결과 소음원은 LIM부근으로 나타났으며 피크주파수는 VVVF 인버터의 변환 주파수임을 확인하였다.

3. 자기부상열차 소음 측정

Fig. 4에는 속도증가에 따른 실내소음의 변화를 보였는데 고속인 notch 3, 4를 제외한 모든 운행조건에서 실내소음은 후방이 전방(운전석 쪽)보다 1~2 dB 시끄러운 것으로 나타났다. 주 원인은 정지 및 저속시 주요 소음원인 DC/DC 컨버터가 후방에 있으며 또한 냉방기도 후방 쪽에 있기 때문인 것으로 판단된다.

속도가 커질수록 1000 Hz 밴드소음이 급격히 커지며 500 Hz, 1630 Hz 밴드도 커짐을 알 수 있다. 고속에서 dB(A)레벨은 1000 Hz 밴드레벨에 의해 거의 결정된다고 말할 수 있는데 주원인은 추진과 관련된 VVVF 인버터 및 SLIM으로 판단된다.

3.1 바닥 해치의 투과손실(sound transmission loss) 측정

VVVF 인버터의 소음은 1000 Hz에서 높은 피크를 보이는데 바닥 해치의 일치주파수(coincidence frequency)

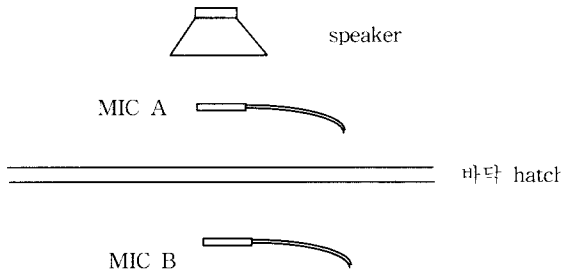


Fig. 5 Measurement setup for STL of hatch panel

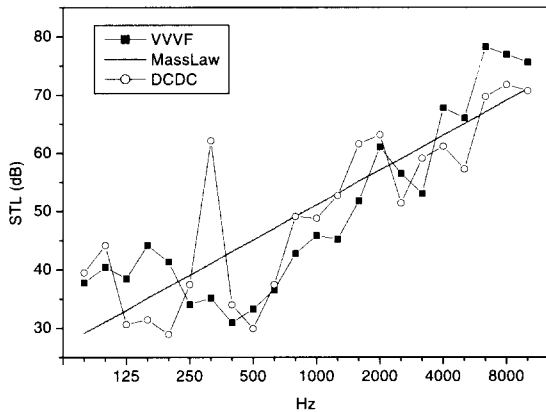


Fig. 6 STL of hatch panel

가 이 부근일 가능성이 매우 높아 이를 확인하기 위한 목적으로 투과손실을 측정하였다. 바닥 패널은 두께 30 mm의 샌드위치 판이며 소음원은 스피커를 사용하였으며 바닥판 위아래에 마이크를 Fig. 5와 같이 배열하였다. 스피커 이외의 모든 소음원을 차단하기 위해 차량의 전원은 끄고 스피커와 계측장비는 외부에서 전원을 끌어다 사용하였다. 측정한 값은 화이트 노이즈(white noise)를 스피커에 가하고 두 마이크의 SPL의 차이 (MIC A에서 MIC B를 빼준 레벨)를 계측하였다. 잔향실에서 측정하는 엄밀한 의미의 투과손실(STL) 값과는 차이가 있으나 패널의 음향투과손실(STL) 특성을 정성적으로 파악하는데는 지장이 없다.

VVVF 인버터와 DC/DC 컨버터 해치 두 군데서 STL을 측정하였으며 Fig. 6에는 1/3-oct 밴드 계측 레벨과 질량법칙<sup>(6)</sup>을 이용한 예측치를 나타냈다. 바닥 해치는 중간재질이 합판으로 밀도 3000 kg/m<sup>3</sup>을 가정하여 다음 공식을 사용하였다.

$$\text{Mass law: } STL = 20 \log(\rho t f) - 48 \text{ dB} \quad (1)$$

단,  $\rho$ 는 밀도,  $t$ 는 두께(0.03 m),  $f$ 는 주파수(Hz)이다.

협대역 스펙트럼 특성을 보면 2500 Hz까지 특별한 공진주파수는 없는 것으로 나타났는데 이는 해치가 단판이 아니고 샌드위치 패널구조로 복잡한 형태를 하고 있음에 기인한다.

### 3.2 AC(냉방기)의 영향

AC의 영향을 비교하였으며 여러 가지 경우의 조건에 대해 AC on/off시를 비교하였다. 정지 시에는 AC를 가동하면 약 2~3 dB 실내소음이 증가하지만 notch 3으로 주행 시에는 거의 영향을 주지 못한다. 이는 정지시에는 DC/DC 컨버터 등 다른 소음원이 AC에 비해 작지만 주행시에는 추진장치의 소음이 AC보다 월등하게 크기 때문이다. 스펙트럼을 비교하면 AC 가동으로 인해 19.5 Hz, 58.2 Hz, 116.4 Hz, 233.6 Hz 등 하모닉 성분과 945.3 Hz, 976.6 Hz에 피크가 발생함을 알 수 있다. 특히 공기압축기 가동시와 정지시를 비교하면 공기압축기는 29.7 Hz의 성분으로 1800 rpm으로 회전하는 성분이 뚜렷하게 나타난다.

### 3.3 주행시 가속도측정

주행시 주요 소음원인 VVVF 인버터의 주파수성분이 차량 구조물의 진동에도 나타나는지 여부와 다른 구조물 진동의 피크가 있는지 확인하기 위하여 가속도계 5개(B&K 4384)를 차체 오른쪽 전방 하부에 부착하였으며 위치는 SLIM 카바 패널 중앙과 하부, 레일말의 자석 및 SLIM에 부착하였다.

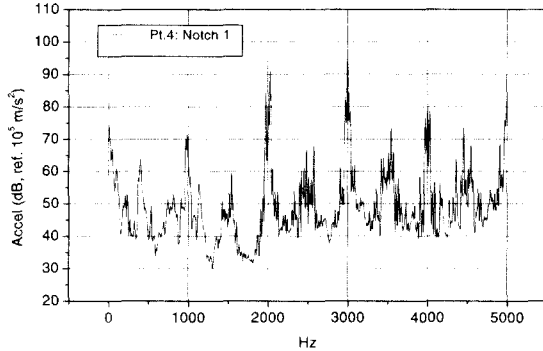
Notch 1 주행시 SLIM의 가속도 스펙트럼을 Fig. 7에 보였다. Notch 1이 되면 1000 Hz 단위로 피크(peak)가 커지며 중간에 500 Hz 단위로 피크가 발생한다. 본 논문에는 수록하지 않았으나 속도가 notch 2가 되면 50 Hz 단위로 빗살무늬 형태로 피크가 발생하며 notch 3, 4에서는 500 Hz 단위로 뭉툭한 피크가 형성됨을 알 수 있었다. 가속도 스펙트럼은 SLIM의 가동으로 인해 발생하는 소음의 스펙트럼(Fig. 9)과 같은 양상을 보인다.

### 3.4 정지시 외부소음계측

승객이 타고 내리는 승강장에서는 차체 하부의 높은 소음이 승객에게 전달된다. 승객이 대기하는 시간

**Table 1** Exterior noise near the train in dB(A)

	후방	중앙	전방
차량상부		66,3	65,1
차량하부	72,3		67,5

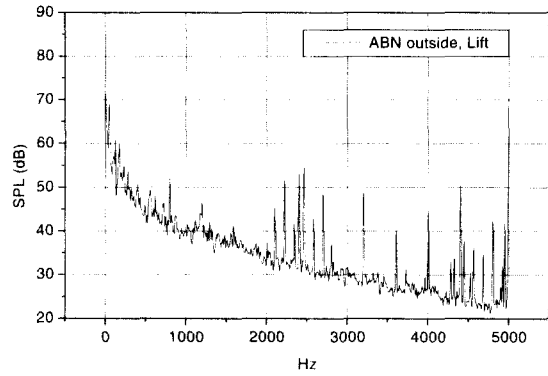


**Fig. 7** Acceleration of SLIM at notch 1 (Pt. 4)

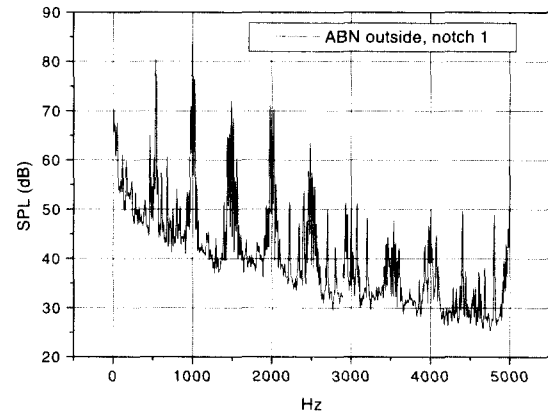
은 단기간이기 때문에 차내 소음보다는 높은 소음에 노출되어도 관계없지만 소음이 어느 정도 인지 파악하기 위하여 외부소음을 측정하였다. 정차 중이므로 주 소음원은 DC/DC 컨버터이다. 측정결과는 Table 1과 같으며 여기서 차량상부는 승객이 타는 위치이며 하부는 한 층 아래를 의미하는데 이때 차량은 정지 및 착지 상태이다.

차량하부 DC/DC 컨버터 부근이 가장 높은 소음을 보이며 스펙트럼은 실내에서 정지상태시 DC/DC 컨버터 해치를 열고 측정한 스펙트럼과 같은 경향을 보인다.

VVVF 인버터 소음이 차량 주위에 미치는 영향을 보기 위해 정지상태에서 VVVF 인버터를 가동하고 브레이크를 잡아 차량을 강제로 정지시킨 상태에서 협대역 스펙트럼을 측정하였는데 위치는 하부의 가속도계 부착부근이다. 정지상태와 notch 1 주행시 스펙트럼을 Fig. 8과 9에 보였는데 VVVF 인버터가 가동되기 전인 정지부상 상태(Fig. 8)와 가동후인 notch 1(Fig. 9)은 확연히 다른 스펙트럼을 보이며 대략 500 Hz, 1000 Hz의 배수로 피크군이 나타난다. 이후부터 notch 4까지는 큰 차이가 없다. 외부소음 스펙트럼은 근본적으로 SLIM의 가속도 스펙트럼(Fig. 7)과 같은 주파수 특성을 보임을 알 수 있다.



**Fig. 8** Spectrum of the external noise at zero speed



**Fig. 9** Spectrum of the external noise at notch 1 (break on)

### 3.5 틈새 밀봉효과

VVVF 인버터, DC/DC 컨버터 등 주요 소음원이 차량하부에 있기 때문에 실내와 하부는 철저히 격리되어야 하지만 전선 다발의 통로, 의자 밑 틈새, 문 개폐장치의 설치 부근, 바닥 해치 틈새 등 곳곳에 많은 틈이 있어서 밑으로부터의 소음전파가 심각한 수준으로 보여졌다.

또한 후방 좌측의 전원패널 도어는 1 mm 정도의 얇은 철판으로 되어 있고 뒤는 하부와 통해 있어서 도어의 표면 방사 및 틈새를 통한 소음전파도 무시 못할 수준으로 판단되었다. 완벽한 밀봉은 현 상태에서 여러 가지 여건상 불가능하므로 테이프를 이용하여 접근이 가능한 모든 틈새를 밀봉하고 이를 단계별로 제거해 가면서 밀봉효과를 보았다. 의자받침대를 들어내고 안쪽의 모든 틈새를 막았으며 다음 3가지

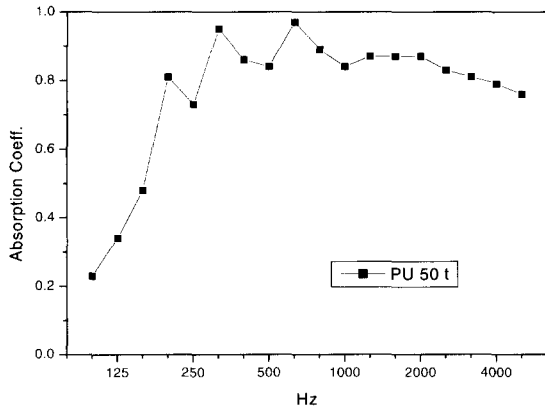


Fig. 10 Sound absorption coefficient of PU 50t

부위에 대해 밀봉을 하였다.

- (1) 부상제어기 패널 도어 틈새
- (2) 전원패널 도어 틈새
- (3) 8개 바닥 해치 틈새

정지착지시는 냉방기가 주소음원이므로 부상제어기 패널과 전원제어패널의 밀봉은 후방에는 약 1 dB 감소효과가 있으나 평균적으로는 감소효과가 그다지 크지 않다. Notch 3 주행시 전원제어판 도어 밀봉효과는 2 dB에 이르나 바닥 해치 틈새밀봉은 효과가 없었다. 이로 미루어 바닥 해치 밀봉보다 전원제어 패널의 밀봉은 보완이 시급함을 알 수 있다.

### 3.6 흡음재 부착효과

주요 소음원이 차량하부에 있으나 현 단계에서는 차량하부는 흡음처리가 전혀 안된 상황으로 바닥에 흡음재를 부착하고 부착 전과 후의 소음을 측정하여 감소효과를 파악하고자 하였다. 흡음재 부착은 해치 8개의 하부에 하였는데 해치의 총면적은 바닥면적의 약 50%이며 나머지 바닥은 접근이 불가능하므로 흡음재설치를 하지 못하였다. 흡음재는 폴리우레탄 소재로 두께는 50 mm이며 당 연구원 음향연구그룹 잔향실에서 흡음률을 측정하였으며 NRC (250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz 흡음률의 산술평균값)는 0.82로 비교적 우수한 흡음재이다. 흡음률을 Fig. 10에 보였다.

정지 시 및 주행 시 흡음재 효과를 Table 2에 정리하여 비교하였다. 정지 시에는 흡음재의 효과는 0.5 dB로 작는데 이는 소음원레벨 자체가 작고 실내소음은 천장에 설치된 냉방기 등 다른 경로를 통해 전파

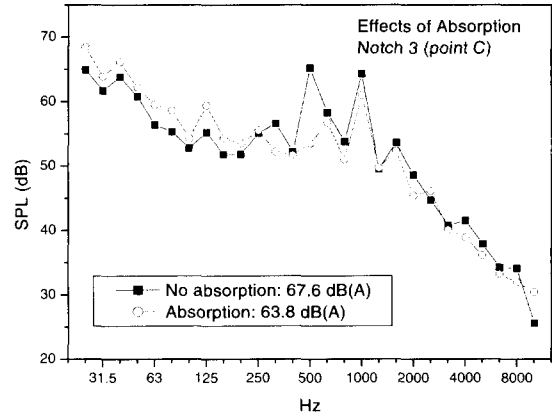


Fig. 11 Noise reduction by adding sound absorption at notch 3

Table 2 Interior noise reduction in dB(A) by increasing sound absorption

상태	dB(A) avg.	비고	효과
정지,착지	58.4	부착전	
	58.9	부착후	0.5 dB 감소
Notch 1	59.7	부착전	
	58.8	부착후	0.9 dB 감소
Notch 2	61.9	부착전	
	60.5	부착후	1.4 dB 감소
Notch 3	67.3	부착전	
	64.7	부착후	2.6 dB 감소
	64.2	부착후 (재측정)	3.1 dB 감소

되어오는 것이 주요 원인으로 보인다. Notch 1 및 notch 2 주행시 흡음재의 효과는 1 dB 정도이며 notch 3인 경우에는 2~3 dB에 이른다.

Fig. 11에는 notch 3으로 주행시 흡음재에 의한 효과를 보였는데 500 Hz, 1000 Hz의 피크가 감소하였고 고주파수대역에서 1~2 dB 정도의 감소를 보인다.

### 3.7 실내소음과 VVVF 인버터소음과의 관계

주행시 실내소음과 추진기 관련소음과의 상관관계를 보기 위해 마이크를 VVVF 인버터 및 DC/DC 컨버터 부근에 설치하여 측정하였으며 notch 3으로 주행시 결과를 Fig. 12~14에 나타냈다. 속도가 커질수록 VVVF 인버터는 580 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz,

2000 Hz에서 피크가 커지며 이는 그대로 실내소음에 나타난다. 실내소음에서 발견되는 4000 Hz 피크(Fig. 12와 14)는 DC/DC 컨버터의 또 다른 스위칭 주파수에 해당된다.

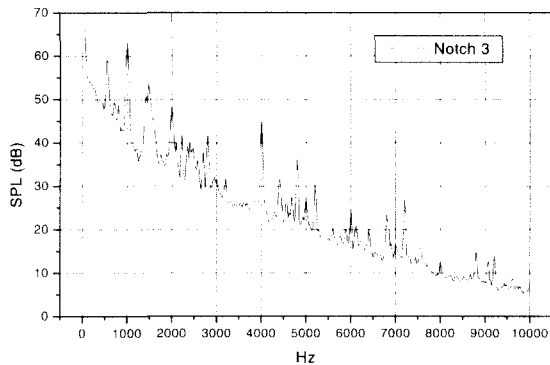


Fig. 12 Interior noise at notch 3

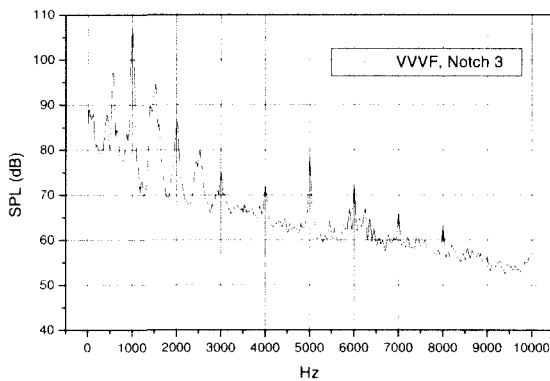


Fig. 13 Noise under the floor near VVVF Inverter at notch 3

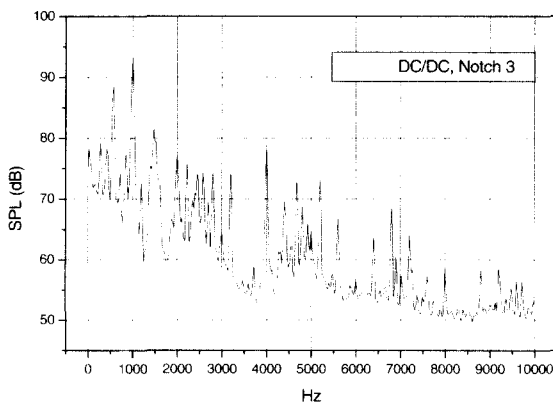


Fig. 14 Noise under the floor near DC/DC converter at notch 3

#### 4. 예측결과 검토 및 결론

(1) 정지 및 저속 운행조건(notch 1, 2)에서 후방이 중앙이나 전방(운전석부근)보다 1~2 dB 시끄러운 것으로 나타났다. 주 원인은 정지 및 저속시 주요 소음원인 DC/DC 컨버터가 후방 밑에 있으며 또한 냉방기도 후방에 있기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 속도가 커질수록(notch 3, 4) 1000 Hz 밴드소음이 급격히 커지며 500 Hz, 1630 Hz 밴드도 커지는데 고속에서 dB(A)레벨은 1000 Hz 밴드레벨에 의해 거의 결정되므로 1000 Hz 성분을 줄이는 것이 관건이다. 주원인은 추진과 관련된 VVVF 인버터 및 SLIM에서 발생하는 소음으로 SLIM에 의한 소음은 차량 하부에 널리 퍼져 있으므로 국부적인 차폐는 효과가 없다.

(3) 전원제어판 도어는 바닥 해치에 비해 소음차단 성능(STL)이 현저히 떨어지며 두께 증가와 틈새 밀봉 등 보완이 시급한 상태이다.

(4) 바닥 해치 아래로 폴리우레탄 소재 흡음재(두께 50 mm, NRC 0.82)를 부착한 결과 소음감소효과는 2~3 dB에 이르며(notch 3) 현재 부착한 흡음재는 면적이 바닥의 약 50 % 수준에 불과하였으므로 이를 70~80 % 수준까지 확대하면 1~2 dB 추가적인 감소가 예상된다.

(5) 추후 장비의 재설계 등 근본적인 개선시에는 VVVF 인버터 변환주파수를 높게하여 발생하는 소음레벨을 줄이는 것이 필요하다.

(6) 가장 중요한 소음원인 DC/DC 컨버터와 VVVF 인버터는 박스형 구조안에 설치되어 있으나 냉각용 팬의 공기통로를 위해 완벽한 차폐가 불가능한 실정으로 최소한 위에 설치되는 뚜껑의 STL을 증가시켜 실내바닥으로 전파되는 성분을 감소시킬 필요가 있다.

결론적으로 밀봉과 흡음재처리 등 소음감소방안을 강구한 후 예측한 결과 실내소음은 보완전보다 3~4 dB 감소하여 64.7 dB(A)로 나타났다. 승객이 타고 내리는 승강장에서 외부소음은 65~68 dB(A) 정도로 우려할만한 수준은 아니나 특정 주파수의 성분이 귀를 거슬리는 현상이 있으므로 Helmholtz 공명기<sup>(7)</sup>의 설치를 검토할 필요가 있다. 또한 추가적인 소음 감소를 위해 현재 차량 상부와 하부 측면사이의 공간

을 막고 사이드 패널내부에는 흡음재를 부착할 필요가 있다. 사이드 패널이 제거된 모습은 Fig. 2에 나와 있는데 Helmholtz 공명기를 측면 사이드 패널 안쪽에 설치하는 것도 고려해 볼 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Tanaka, M., Fujino, M., and Murai, M., 1998, "The Results of Running Test of the HSST-1001 Vehicle." Proceedings of the Maglev '98, Japan, pp. 62~67.
- (2) Tanaka, T., and Ogata, S., 1992, "A Basic Study on a Moving Source Identification by Using the Acoustic Holography." 3rd Report, Japan Transportation Research Center, pp. 129~132.
- (3) Tanaka, T., and Ogata, S., 1994, "Improvement of External Noise in Powering of Electro-Magnetically Levitated Urban Transporting System (HSST-100)." JSME 3rd Symposium on Railroad, (No.940-57), pp. 331~334.
- (4) Kelly, A. W., 1990, "Measurement of Spacecraft Power Transformer Acoustic Noise." IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, no. 1 pp. 281~289.
- (5) 도시형 자기부상열차 실용화에 대비한 성능시험, 시험평가기술 개발, 1999, 건설기술 연구개발사업 최종보고서, 건설교통부(주관연구기관: 한국기계연구원), UCC 018-707.M.
- (6) Edited by Beranek, L. L., and Ver, I. L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Chapter 9.
- (7) Pierce, A. D., 1989, Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications, Published by the Acoustical Society of America, Chapter 7.4.