

자기부상열차의 소음저감

⁰김현실*, 김재승*, 강현주*, 김봉기*, 김상렬*

Cabin Noise Reduction of a Maglev Train

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

ABSTRACT

Cabin noise reduction in maglev trains developed by KIMM is studied. Based on the measurements of cabin noise and acceleration levels during running and zero speed conditions, dominant noise sources are identified. After spectra characteristics of noise sources is investigated, efficient 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. Since the noise sources are under the cabin floor, complete sealing and high STL of the floor panel are shown to be the most crucial factors in noise reduction. After polyurethan form (50t) is added for more sound absorption and sealing treatment, the cabin noise is reduced by 3-4 dB.

1. 서 론

자기부상열차는 레일 위를 떠서 주행한다는 점에서 레일과 접촉함으로써 발생하는 소음을 근본적으로 제거할 수 있다는 점에 큰 장점이 있으며 소음레벨도 일반 철도차량에 비해 작지만, 반면 전원 공급장치에서 발생하는 특정 주파수 성분의 소음이 커를 거슬리게 하는 문제점[1,2,3]이 있다. 이와 같은 현상은 일본의 자기부상 시험열차 소음에서도 발견되는데 주 원인은 LIM(Linear Induction Motor)와 이에 전원을 공급하는 변환기의 코일의 진동에 기인하는 것으로 알려져 있다.

본 논문은 한국기계연구원이 시험운행하고 있는 자기

부상열차[4]의 소음해석에 관한 연구결과로 주요 소음원 파악과 특성, 감소대책 강구 및 효과 등을 다루었다. 실내가 길이방향으로 길며 위치에 따라 소음레벨에 변화가 있으므로 전방, 중앙, 후방 3군데에서 소음을 측정하였고 이를 평균한 값을 실내소음 목표 값으로 설정하였다.

2. 측정조건 및 측정위치

2.1 주요 소음원

측정대상차량은 길이가 약 14 m, 폭은 3 m, 실내높이는 2 m이며 실내 바닥은 8개의 hatch로 구성되어 있으며 전체 hatch 크기는 폭 1.2 m, 길이 9.92 m이다. 사진 1에는 자기부상열차의 측면을 보였으며 각종 전장품들은 hatch 밑에 설치되어 있다. 주요 소음원은 다음과 같다.

* 한국기계연구원 음향연구그룹



사진 1. 자기부상열차 측면

1) VVVF Inverter:

가변전압/가변주파수 변환기(Variable Voltage Variable Frequency Inverter)로 1500 V DC를 공급받아 SLIM을 구동시키기 위한 교류로 변환하는 기기이다. VVVF Inverter는 차량 앞쪽(운전석 방향) 차체 하부에 있다. 변환 주파수의 harmonic에서 발생하는 코일의 진동에 의한 소음이 크며 이외의 소음원으로 냉각용 fan을 들 수 있다. VVVF Inverter는 길이 2.5 m, 폭 0.8m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조로 되어있다.

2) SLIM:

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

3) DC/DC Converter:

1500 V DC를 공급받아 추진용 전원을 제외한 차내 각종 전원을 공급하는 장치로 일종의 변압기이며 코일의 진동으로 인한 소음과 냉각용 fan 소음이 있으며 280 Hz의 switching 주파수에 의한 성분이 존재한다. DC/DC는 차량 후방쪽 하부에 있으며 길이 2.5 m, 폭 0.8m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조이다.

4) Aircon:

냉방기(Air Conditioner)는 실내 후방 쪽 천장 위에 있

으며 air compressor는 차량 하부에 있다. Aircon 소음은 fan 소음과 air compressor 소음으로 구별되며 air compressor는 공기압이 일정 수준이하로 내려가면 작동한다.

5) 열차 뒤편(운전석 반대편)의 부상제어 패널, 전원제어 패널의 fan:

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

여러 가지 소음원 중 전원이 공급되면 늘 가동하는 장비는 DC/DC converter와 AC(Aircon) 및 조절 패널의 fan이며 VVVF inverter와 SLIM은 주행중에만 소음의 원인으로 작용한다.

2.2 일본 자기부상열차소음

일본 자기부상열차 소음자료[1]에 의하면 VVVF Inverter 변환주파수가 높은 경우(2 kHz)가 낮은 경우(400 Hz)가 보다 소음이 작게 나타났다. 특이한 점은 400 Hz 경우 저속시 실내소음이 79 dB(A)로 매우 높으며 당 연구원 자기부상열차의 경우 저속시 소음은 60 dB(A) 정도로 일본의 고주파수 inverter 경우와 비슷하며, 고속시 소음은 67 - 70 dB(A)로 일본의 저주파수 inverter 경우와 비슷함을 알 수 있다. 참고문헌[2]에서는 달리는 열차의 소음을 홀로그래피를 이용하여 측정하였는데 철로변에 세워진 마이크로폰 어레이의 소음해석결과 소음원은 LIM부근으로 나타났으며 피크주파수는 VVVF의 변환 주파수임을 확인하였다.

3. 자기부상열차 소음 측정

자기부상열차는 속도변화가 Notch 1에서 4까지 4단계로 구분되어 있으며 가장 빠른 Notch 4는 약 60 km/h 이상에 해당된다. 그림 1에는 속도증가에 따른 실내소음

의 변화를 보였는데 고속인 Notch 3, 4를 제외한 모든 운행조건에서 실내소음은 후방이 전방(운전석 쪽)보다 1 - 2dB 시끄러운 것으로 나타났다. 주 원인은 정지 및 저속시 주요 소음원인 DC/DC가 후방에 있으며 또한 AC도 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 및 SLIM으로 판단된다.

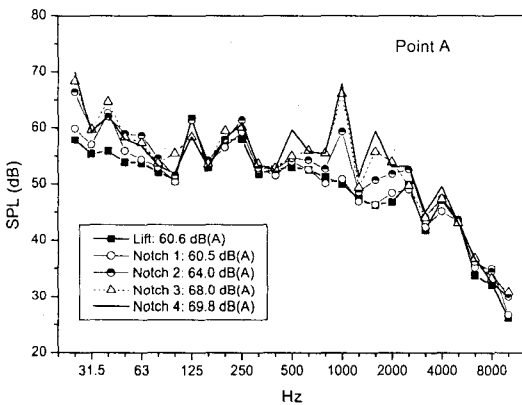


그림 1. 속도별 실내소음변화 (AC On)

3.1 바닥 hatch의 투과손실(Sound Transmission Loss) 측정

VVVF의 소음은 1000 Hz에서 높은 피크를 보이는데 바닥 hatch의 일치주파수(Coincidence frequency)가 이 부근일 가능성이 매우 높아 이를 확인하기 위한 목적으로 투과손실을 측정하였다. 바닥 패널은 두께 30mm의 샌드위치 형태이며 소음원은 스피커를 사용하였으며 바닥판 위아래에 마이크를 그림 2와 같이 배열하였다. 스피커 커이외의 모든 소음원을 차단하기 위해 차량의 전원은 끄고 스피커와 계측장비는 외부에서 전원을 끌어다 사용하였다. 측정할 값은 white noise를 speaker에 가하고 두 마이크의 SPL의 차이 (MIC A에서 MIC B를 빼준 레벨)를 계측하였다. 잔향실에서 측정하는 엄밀한 의미의

STL과는 차이가 있으나 패널의 음향투과손실(STL) 특성을 파악하는데는 아무런 문제가 없다.

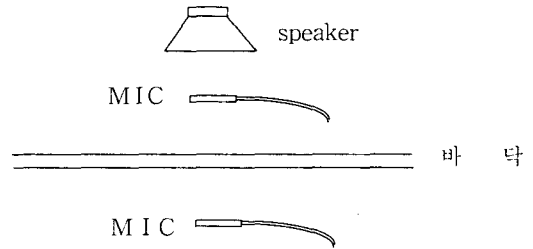


그림 2. Hatch 판의 투과손실(STL) 계측을 위한 배열

VVVF와 DCDC hatch 두 군데서 STL을 측정하였으며 그림 3에는 1/3-Oct 밴드 계측레벨과 질량법칙[5]을 이용한 예측치를 나타냈다. 질량법칙은 밀도 3000 kg/m³을 가정하여 다음 공식을 사용하였다.

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

단, ρ 는 밀도, t 는 두께(0.03m), f 는 주파수(Hz)이다.

스펙트럼특성을 보면 2500 Hz까지 특별한 공진주파수는 없는 것으로 나타났는데 이는 hatch가 단판이 아니고 honeycomb 구조로 복잡한 형태를 하고 있음에 기인한다.

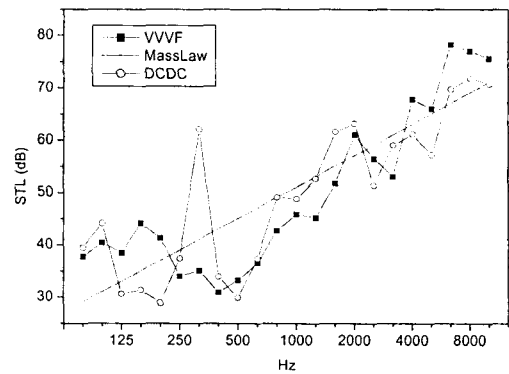


그림 3. 바닥 hatch 판의 STL

3.2 AC의 영향

AC(냉방기)의 영향을 비교하였으며 여러 가지 경우의 조건에 대해 AC On/Off시를 비교하였다. 정지 시에는 AC를 가동하면 약 2-3dB 실내소음이 증가하지만 Notch 3으로 주행 시에는 거의 영향을 주지 못한다. 이는 정지 시에는 DC/DC 등 다른 소음원이 AC에 비해 작지만 주행 시에는 추진장치의 소음이 AC보다 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 Air compressor 가동시와 정지시를 비교하면 air compressor는 29.7 Hz의 성분으로 1800 rpm으로 회전하는 성분임을 알 수 있다.

3.3 틈새 밀봉효과

VVVF, DCDC 등 큰 소음원이 차량하부에 있기 때문에 실내와 하부는 철저히 격리되어야 하지만 전선 다발의 통로, 의자 밑 틈새, 문 개폐장치의 설치 부근, 바닥 hatch 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 부위에 대해 밀봉을 하였다.

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

정지.착지시는 AC가 주소음원이므로 부상제어기 패널과 전원제어패널의 밀봉은 후방(point A)에는 약 1 dB 감소효과가 있으나 평균적으로는 감소효과가 그다지 크지 않다. Notch 3 주행시 바닥 hatch 틈새밀봉은 효과가 없지만 전원제어판 도어 밀봉효과는 2 dB에 이른다. 이로 미루어 바닥 hatch 밀봉상태보다 전원제어 패널의 밀

봉은 보완이 시급함을 알 수 있다.

3.4 흡음재 부착효과

VVVF, DC/DC 등 주요 소음원이 차량하부에 있으나 현 단계에서는 차량하부는 흡음처리가 전혀 안된 상황으로 바닥에 흡음재를 부착하고 부착전과 후의 소음을 측정하여 감소효과를 파악하고자 하였다. 흡음재 부착은 해치 8개의 하부에 하였는데 해치의 총면적은 바닥면적의 약 50%이며 나머지 바닥은 접근이 불가능하므로 흡음재 설치를 하지 못하였다.

흡음재는 폴리우레탄 소재로 두께는 50 mm이며 당 연구원 음향연구그룹 잔향실에서 흡음률을 측정하였으며 NRC (250 Hz, 500Hz, 1000 Hz, 2000 Hz 흡음률의 산술평균값)는 0.82로 비교적 우수한 흡음재이다. 흡음률을 그림 4에 보였다.

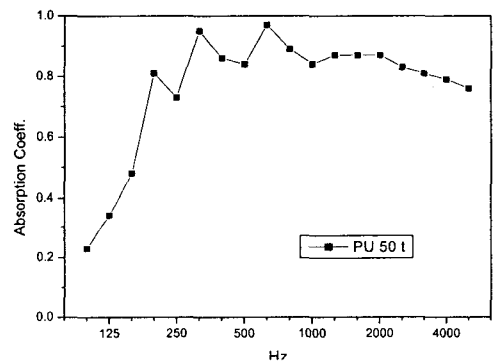


그림 4. 폴리우레탄 (50t)의 흡음률

정지 시 및 주행 시 흡음재 효과를 표 1에 비교하였다. 정지 시에는 흡음재의 효과는 0.5 dB로 작는데 이는 소음원레벨 자체가 작고 실내소음은 하부가 아닌 AC 등 다른 경로를 통해 전파되어오는 것이 주요 원인으로 보인다. Notch 1 및 notch 2로 주행시 흡음재의 효과는 1 dB 정도이며 notch 3인 경우에는 2 - 3 dB에 이른다.

그림 5에는 notch 3으로 주행시 흡음재에 의한 효과를 보였는데 500 Hz, 1000 Hz의 피크가 감소하였고 고주파수대역에서 1 - 2 dB 정도의 감소를 보인다.

표 1. 흡음재부착에 의한 실내소음의 감소 효과

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

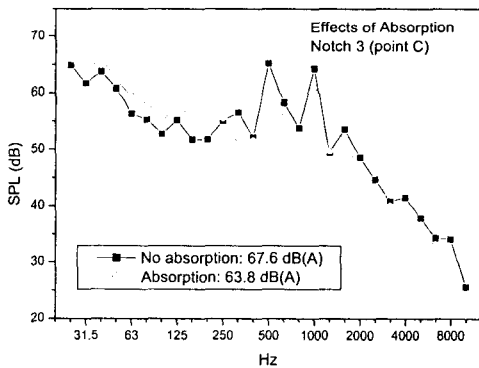


그림 5. 흡음재 영향(Notch 3 주행시, AC On)

3.5 실내소음과 VVVF 소음과의 관계

주행시 실내소음과 추진기 관련소음과의 상관관계를 보기 위해 후방에서의 실내소음과 VVVF Inverter 및 DC/DC converter 부근의 소음을 그림 6 - 8에 나타냈다. 속도가 커질수록 VVVF inverter는 580Hz, 1000Hz, 1500 Hz, 2000 Hz에서 피크가 커지며 이는 그대로 실내소음에 나타남을 알 수 있다. 실내소음

에서 발견되는 4000 Hz 피크(그림 7, 8)는 DC/DC converter 영향인데 4000 Hz는 DC/DC 300 Vdc의 스위칭 주파수에 해당된다.

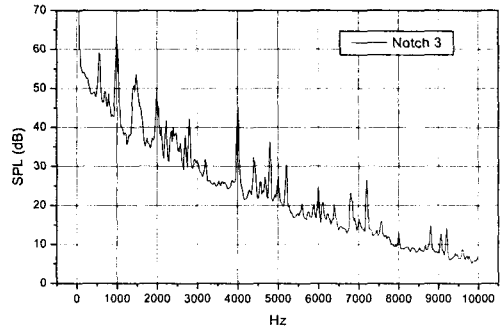


그림 6. Notch 3 주행시 실내소음

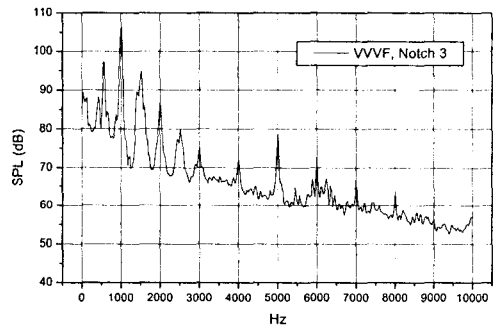


그림 7. Notch 3 주행시 차량하부소음(VVVF Inverter MIC)

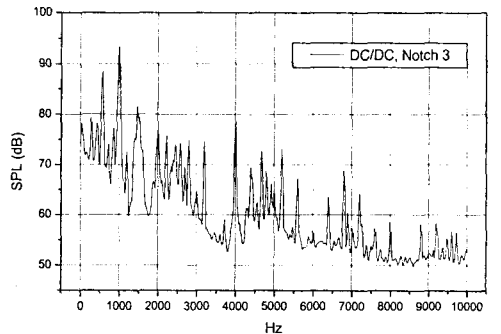


그림 8. Notch 3 주행시 차량하부소음(DC/DC Converter MIC)

4. 예측결과 검토 및 결론

- 1) 정지 및 저속 운행조건(Notch 1, 2)에서 후방이 중앙이나 전방(운전석부근)보다 1 - 2dB 시끄러운 것으로 나타났다. 주 원인은 정지 및 저속시 주요 소음원인 DC/DC converter가 후방 밑에 있으며 또한 AC도 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 및 SLIM에서 발생하는 소음으로 SLIM에 의한 소음은 차량 하부에 널리 퍼져 있으므로 국부적인 차폐는 효과가 없다.
- 3) VVVF, DCDC 등 큰 소음원이 차량하부에 있기 때문에 실내와 하부는 철저히 격리되어야 하지만 전선 다발의 통로, 의자 밑 틈새, 문 개폐장치의 설치 부근, 바닥 hatch 틈새 등 곳곳에 많은 틈이 있어서 밑으로부터의 소음전파가 심각한 수준이다.
- 4) 또한 후방 좌측의 전원패널 도어는 1 mm 정도의 얇은 철판으로 되어 있고 뒤는 하부와 통해있어서 도어의 표면 방사 및 틈새를 통한 소음전파도 무시 못할 수준으로 판단된다.
- 5) 고속 주행시는 바닥 hatch 틈새밀봉은 효과가 없으나 전원제어판 도어 밀봉효과는 2 dB에 이르며 전원제어 패널의 밀봉은 보완이 시급하다.
- 6) 바닥 해치 아래로 폴리우레탄 소재 흡음재(두께 50 mm, NRC 0.82)를 부착한 결과 Notch 1 및 notch 2로 주행시 흡음재의 효과는 1 dB, notch 3인 경우에는 2 - 3dB에 이른다.
- 7) 밀봉과 흡음재처리 등 소음감소방안을 강구한 후 예측한 결과 보완전보다 3 - 4 dB 감소하여 64.7 dB(A)로 나타났다.
- 8) 현재 부착한 흡음재는 면적이 바닥의 약 50% 수준에 불과하였으므로 이를 70 - 80% 수준까지 확대하면 1 - 2 dB 추가적인 감소가 예상된다.
- 9) 추후 장비의 재설계 등 근본적인 개선시에는

VVVF Inverter의 변환주파수를 높게하여 발생하는 소음레벨을 줄이는 것이 필요하다.

10) 가장 중요한 소음원인 DC/DC converter와 VVVF Inverter는 박스형 구조안에 설치되어 있으나 냉각용 fan의 공기통로를 위해 완벽한 차폐가 불가능한 실정으로 최소한 위에 설치되는 뚜껑의 STL을 증가시켜 실내바닥으로 전파되는 성분을 감소시킬 필요가 있다.

11) 승객이 타고 내리는 승강장에서 외부소음은 65 - 68 dB(A) 정도로 우려할만한 수준은 아니나 특정 주파수의 성분이 귀를 거슬리는 현상이 있으며 이에 대한 보완책으로는 현재 차량 상부와 하부 측면사이의 공간을 막고 사이드 패널내부에는 흡음재를 부착할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Proceedings of the Maglev '98, Japan, page 66. 1998.
- [2] A basic study on a moving source identification by using the acoustic holography, 3rd Report, 129-132, Japan Transportation Research Center.
- [3] T. Tanaka and S. Ogata, "Improvement of external noise in powering of electro-magnetically levitated urban transporting system(HSST-100)," JSME 3rd Symposium on Railroad, (No.940-57), 331-334. 1994.
- [4] 도시형 자기부상열차 실용화에 대비한 성능시험. 시험평가기술 개발, 건설기술 연구개발사업 최종보고서, 건설교통부(주관연구기관: 한국기계연구원), UCC 018-707.M, 1996, 6.Physical Review Letters, Vol. 58, pp. 2059-2061.
- [5] Noise and Vibration Control Engineering, edited by L. L. Beranek and I. L. Ver, John Wiley & Sons, 1992.