

표준전동차 차내소음특성 예측 연구

Study on the Prediction of Inner Noise Characteristics in Standardization EMU

박준서*

한기홍**

김정태***

Park, Jun-Seo

Han, Ki-Heung,

Kim, Jeung-Tae

ABSTRACT

Standardization EMU in comparison with the existing EMU has been largely changed the material and section profile of the structure as the Aluminium made. This study is analytically predicted the influence of inner noise in tunnel running when the above change is made.

1. 서론

대량교통수단인 철도차량 특징중의 하나는 열린공간에서의 운행만이 아닌 터널과 같은 닫힌 공간에서의 운행시간이 많다는 것이다. 이러한 터널구간의 증가는 철도차량의 실내소음을 증가시키는 원인이 되나 터널내부에서의 차내소음을 예측하는 방법에 관한 연구는 극히 미비하다. 본 연구에서는 알루미늄 압출재로 제작된 표준전동차가 지하철 터널을 주행시, 소음발생원중 가장 영향이 큰 차륜/레일 소음원에 대해 나타나는 차내소음도의 예측방법을 제시하였다. 이를 위해 일련의 과정을 통해 먼저 외부소음도에 대한 규명 및 해석적으로 차량외부 소음의 변화추이를 알아보았으며, 이를 차량의 흡·차음 특성을 적용하여 표준전동차 내부소음도를 예측해 보았다.

2. 차내소음도 예측방법

개활지와 같은 열린공간에서 철도차량 내부의 소음도를 예측하는 방법은 개념적으로 그림 1과 같은 과정을 거친다. 첫 번째로 예측대상차량과 유사한 철도차량으로부터 실측된 정보를 토대로 음원의 특성을 파악하게 되며, 이때 발생소음의 원인에 대한 분석과 소음원의 크기, 소음의 전달 경로를 고려해야 한다.

* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 연구기획본부 선임연구원, 정회원

*** 홍익대학교 기계공학과 교수, 정회원

두 번째로 이전과정에서 관별된 소음원으로 예측대상 차량모델에 따라 주파수 대역을 적절히 고려한 해석기법을 사용하여 차량외부 표면의 소음도를 예측하게 된다. 세 번째로 이러한 해석기법을 적용하여 예측된 차량 외부표면의 소음도를 사용하여 대상차량의 구조와 관련된 특징인 바닥, 측면하부, 창문, 측면상부, 천장 등 차량 각 부분의 차음성과 차량 내부 내장재의 흡음성을 고려한 수치 계산에 의해 궁극적으로 차량 내부의 소음도를 예측하게 된다.

그러나 전동차와 같이 주로 터널내부를 주행하는 철도차량의 경우에는 위에서 언급한 열린공간에서의 차내소음 예측방법과는 달리 터널내부라는 공간적인 제약으로 인해 차량외부표면의 소음도 예측시 위의 방법과 다른 해석 대상 모델이 필요하게 된다. 제안된 방법은 열린공간으로부터 예측된 차량 외부 표면의 소음도를 역으로 추적하여 소음원을 재정의하는 과정을 거쳐 새로 모델링한 터널내부에서의 차량 단면부 모델을 대상으로 열린공간에서와 같은 해석기법을 적용하여 차량단면의 외부 소음도 분포를 예측하게 된다. 차량의 차음특성 및 흡음특성을 고려하는 과정은 열린공간에서와 같다.

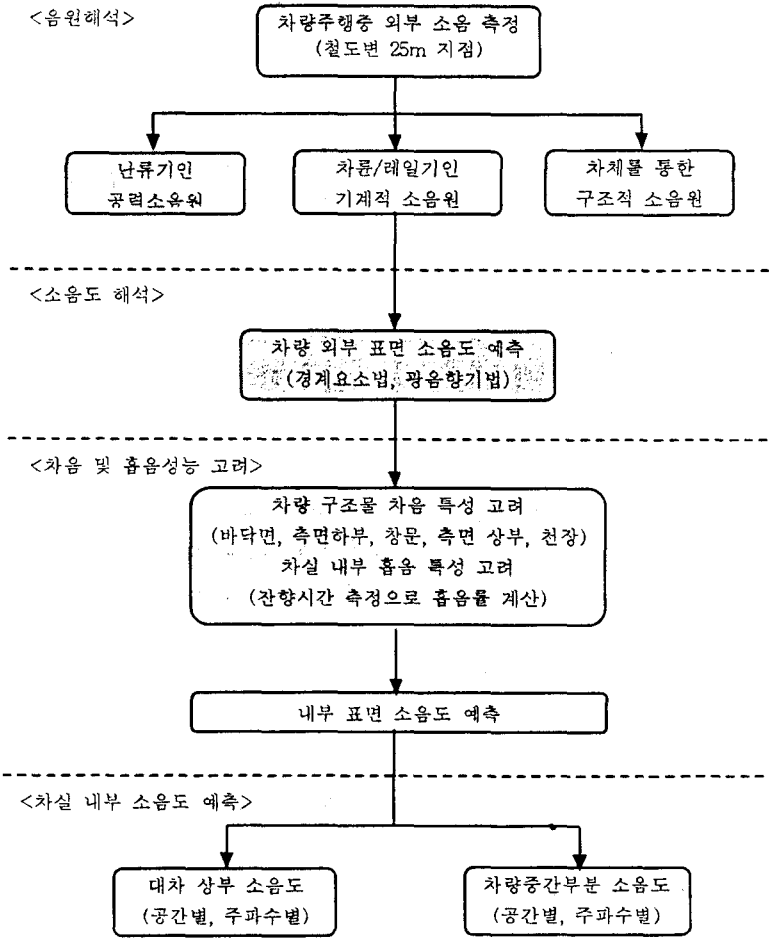


그림 1. 차량내부소음 예측과정

3. 차량 소음원 모델링

철도차량 내부소음에 영향을 미치는 요소는 속도에 따른 난류경계층으로 유발된 공력소음, 차륜

/레일의 접촉시 발생하는 기계소음, 충격진동에너지에 의한 구조소음 등 크게 3가지 요소로 분류할 수 있으나 여기서는 전동차에서 가장 지배적인 것으로 알려진 차륜/레일의 접촉에 의한 기계소음에 대한 영향만을 고려하는 것으로 하였다. 왜냐하면, 운행속도가 시속 100km이하인 표준전동차에 있어서 공력소음의 영향은 전체 소음도에 있어서 영향이 크지 않고, 구조소음은 저주파수에서의 영향이 크므로 상대적으로 인간이 느끼는 전체 소음도에 미치는 영향이 작기 때문이다.

또한 차량 내부소음을 파악하기 위해서는 차륜/레일의 접촉에 기인한 기계소음 발생원의 음향파위에 대한 정보가 필요하다. 여기서 사용된 소음 발생원의 음향파위는 국철 구간의 개활지에서 시속 80km로 운행중인 1호선 구형 전동차의 외부소음값을 사용하였으며, 차량통과시 최대소음인 81.1dBA가 발생하는 부분에서의 옥타브밴드 분석결과를 그림 2에 보인다.

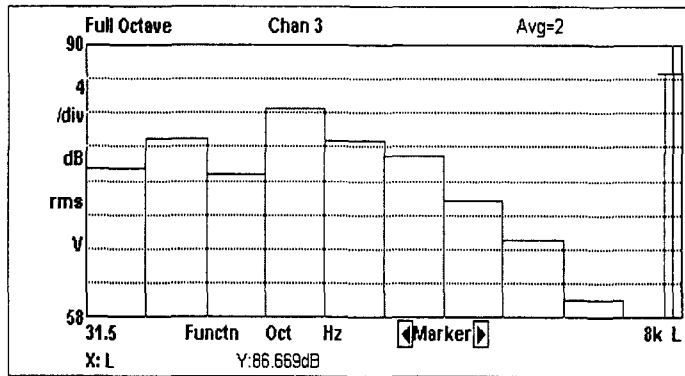


그림 2. 전동차 외부소음의 옥타브밴드 분석 결과 (시속80km, 25m지점)

이를 사용한 음원전파의 모델링을 위한 수치해석기법으로 여기서는 광음향이론을 사용하였다. 차륜 소음원의 위치는 차륜/레일의 접촉점이고, 수음점의 위치는 레일 중심에서 철로변으로 25m 거리 떨어진 1.5m높이에 있다. 각각의 레일/차륜의 접촉으로 인한 기계적 마찰소음인 차륜소음은 점음원으로써 가정하였고, 두 가지 경로를 통해 수음위치까지 도달한다. 즉, 수음점에서 측정된 음압은 직접음과 지표면에 반사되어 도달하는 반사음의 합성결과가 된다.

$$p = A \left(\frac{e^{-ikr_0}}{r_0} + R_p \frac{e^{-ik(r_1+r_2)}}{r_1+r_2} + (1-R_p)F \frac{e^{-ik(r_1+r_2)}}{r_1+r_2} \right) \text{-----}(1)$$

여기서 A 는 음압의 크기, r_0 는 직접음경로, r_1+r_2 는 반사음경로를, R_p 는 지표면반사계수를, F 는 지표면의 추가감쇠상수를 나타내며, k 는 파동수로 $\frac{2\pi}{\lambda}$ (여기서 λ 는 파장)의 값을 가진다. 지표면의 추가감쇠를 충분히 작다고 무시하면, 음압은

$$p = A \left(\frac{e^{-ikr_0}}{r_0} + R_p \frac{e^{-ik(r_1+r_2)}}{r_1+r_2} \right) \text{-----}(2)$$

로 나타난다. 기하학적 이론에 의해 수음점에서 가까운 음원은 반사음과 직접음이 동시에 도달을 하지만, 수음점에서 먼 음원의 경우 직접음은 차량바닥에 가로막혀 도달하지 않고 반사음만이 도달한다.

이와 같이, 철도차량의 음원의 표현식을 사용하면 상수 A 값을 구할 수 있어 음압의 표현이 가능하게 된다. 음압이 구해지면, 음원의 음향출력 W 는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$W = \frac{2\pi}{\rho c} \cdot A^2 \text{-----}(3)$$

음향파워는 차륜소음의 음원이 차륜/레일 접촉점에 집중되어 있다는 가정을 할 수 있으며, 각각의 표준전동차 차량 모델에서 차륜과 레일의 접촉위치에 이러한 음원의 특성을 적용하면 차량의 외부소음도를 예측할 수 있다.

앞에서 소음원의 크기를 산출하기 위해 국철구간에서 운행중인 구형 전동차의 소음데이터를 사용하였다. 그러나 구형 전동차와 표준전동차의 차량 하중은 경량화에 따라 표준전동차의 동력차의 경우 구형전동차에 비해 약 25%의 경량화가 이루어 졌다. 따라서 이러한 하중 변화가 음향파워에 그대로 적용된다고 가정하면, 표준전동차의 음향파워는 다음과 같다.

$$\text{음향파워}_{\text{표준전동차}} = \text{음향파워}_{\text{구형전동차}} - \text{보정값} \text{-----}(4)$$

$$\text{보정값} = 10 \log \left(\frac{\text{구형전동차의 하중}}{\text{표준전동차의 하중}} \right) \text{-----}(5)$$

하나의 편성을 구성하고 있는 각 차량에서 하중의 경량화가 가장 심한 동력차의 경우 보정값은 1.32dB가 된다. 이러한 방법으로 구형전동차로부터 산출된 보정값을 적용한 표준전동차의 시속 80km 주행시의 각 주파수별 음원의 크기를 그림 3에 보인다.

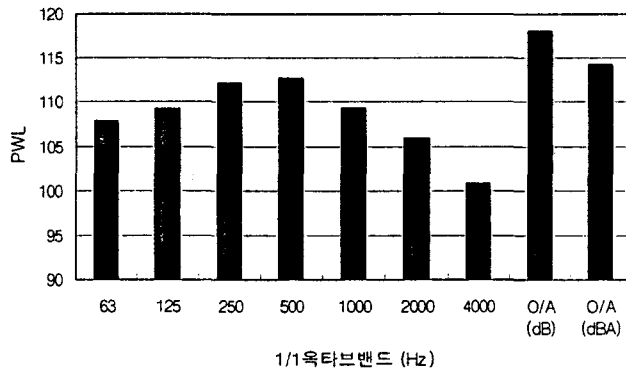


그림 3. 차륜소음의 음향파워레벨 : 표준전동차 (시속 80km)

4. 철도차량 외부 표면 음장 예측

외부표면의 음장을 예측하기 위해 차량의 바닥면을 제외한 측면과 천장의 소음도 분포 추이를 예측하기 위한 모델 1과 바닥면의 소음도를 예측하기 위한 모델 2의 두가지 모델에 대해 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 모델링을 하였다. 모델 1의 구체적인 제원 및 해석시 사용된 음원의 위치는 그림 4와 같으며, 차량 바닥면과 바닥면 밑부분의 공간을 모델링한 모델 2는 그림 5에 나타나 있다. 여기서 열린공간에서는 차량의 단면뿐만 아니라 해석하고자하는 공간 역시 대칭으로 생각할 수 있으므로 차량의 단면부분인 모델 1은 차량단면의 1/2을 모델링 하였고, 모델 2는 차량 바닥면의 1/4이 모델링 되었다. 또한 모델 1의 경우에는 경계요소법을, 모델 2의 경우에는 250Hz까지의 저주파영역에서는 경계요소법을, 500Hz이상의 고주파 영역에서는 광음향기법을 사용하여 해석하였다.

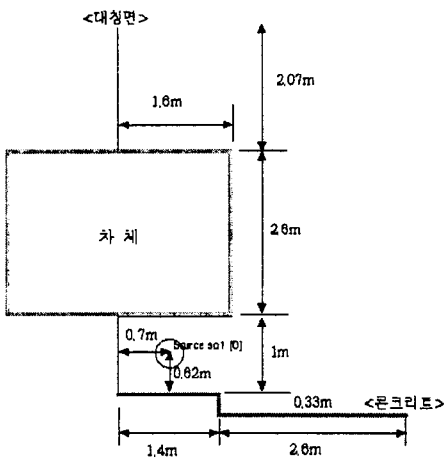


그림 4. 모델 1의 제원 및 음원의 위치

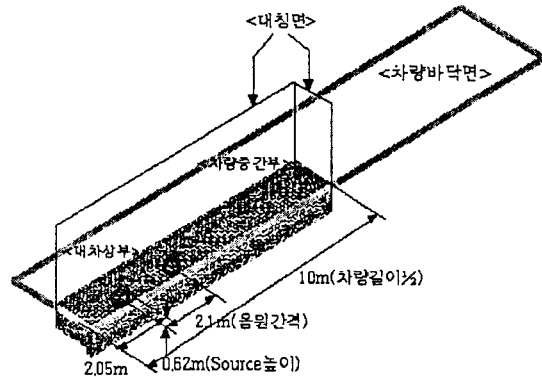


그림 5. 모델2의 제원 및 음원위치

두가지 해석기법 적용시 경계조건은 공통적으로 차량표면과 대칭면은 강체로 가정하였고, 경계요소법 적용시 지표면은 콘크리트의 물성치로부터 유도된 콘크리트 임피던스를, 광음향기법 적용시 콘크리트 흡음률을 사용하였다.

그림 6은 내부소음에 가장 큰 영향을 주는 125Hz, 250Hz, 500Hz와 1kHz에 대한 대차상부에서의 차량 주변 음압분포를 보여주는 해석 예로서, 소음도의 분포면에서 볼 때, 바닥에서 지붕쪽으로 음이 전파되는 과정에서 소음이 감소함을 볼 수 있다. 또한, 500Hz와 1kHz에서의 소음도가 외부소음도에 있어서 지배적임을 알 수 있다.

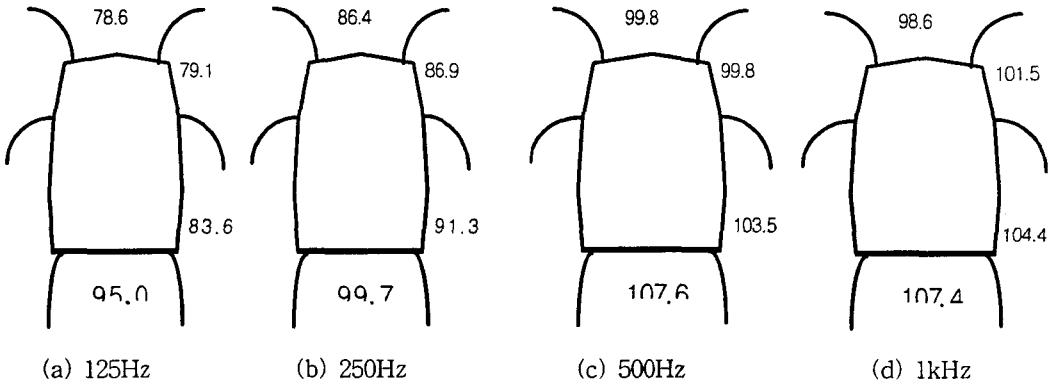


그림 6. 열린공간에서의 차량 외부 음압분포 (대차상부)

터널내부에서의 차량표면 음장을 예측하기 위해서는 모델 2를 통해 열린공간에서의 바닥면의 소음도 분포를 예측하는 것이 필수적이다. 터널내부에서의 음장예측을 위한 모델은 경계요소법으로 해석할 경우, 닫혀진 공간으로 인해 경계면의 면적이 급격히 증가하게 되며, 이로 인해 해석상 제약이 뒤따른다. 이러한 공간상의 제약을 극복하기 위해 터널내부와 차량의 단면을 2차원으로 모델링 하였다. 하지만, 2차원으로 모델링을 할 경우, 대차상부에서는 단면의 길이 방향으로 분포하고 있는 4개의 음원을 모두 적용할 수 없으며, 차량중간부분에서는 실제로 존재하지 않는 음원을 해석시 적용해야하는 문제점이 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 수단으로 터널내부에서 음장예측시 모델은 2차원 모델을 사용하되, 음원은 대차상부와 차량 중간부분의 각각의 경우에 대해 열린공간에서의 차량 외부 바닥면 소음도의 결과로부터 산출된 등가음원을 적용하였다. 산출된 차량단면 위치별 등가음원을 터널내부의 모델에 적용하면 터널내부에서의 차량 외부 표면 소음도를 예측할 수 있다. 터널의 형상은 복선터널과 단선터널의 두가지 경우에 대해 예측을 하였으며 그림 7은 복선터널의 경우에 있어 표준전동차의 대차상부에서 터널내부 단면과 차량 외부 단면의 250Hz와 500Hz에서의 소음도의 예를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 터널내부에서의 차량 단면의 외부소음도 분포는 음원으로부터 선형적으로 소음도가 감소하는 열린공간에서와는 달리 주파수에 따라 특정부위에 높은 소음도가 비대칭적으로 나타나고 있다. 따라서, 이들을 차량의 단면 외부부위 별로 정확히 고려해야만 외부음장의 분포를 파악할 수 있다.

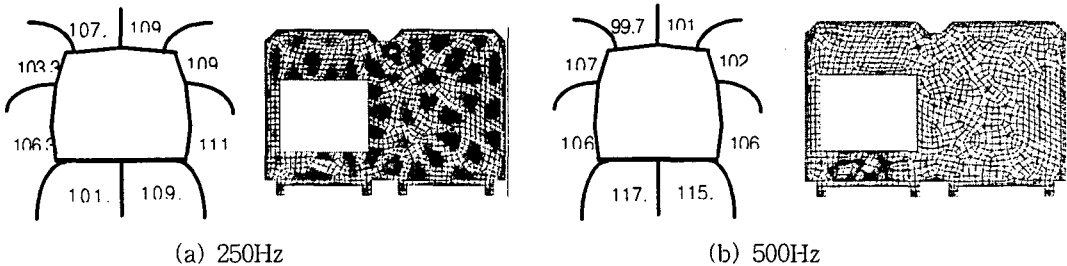


그림 7. 복선터널에서 차량 1대 운행시 외부단면 소음도 (표준전동차, 대차상부)

5. 차량 구조물의 차음 및 흡음특성

표준전동차와 같이 알루미늄 압출재인 경우 구조물 각 부위에 대한 차음특성이 아직 파악되지 않아 여기서는 전동차의 측벽면과 창문 및 출입구 부분의 차음특성은 스테인레스 전동차와 동일하다는 가정하에 국내 차량제작사가 보유한 특성치를 사용하였으며, 기존전동차와 다른 특성을 가시리라 예측되는 바닥면의 차음특성은 알루미늄 시편을 채취하여 실험으로 도출된 결과를 사용하였다. 예측에 적용된 차량 표면구조물의 투과손실 측정치를 그림 8 및 그림 9에 보인다. 그림 8에서 알 수 있듯이 천장, 벽면, 바닥구조물은 관심있는 주파수인 250~2kHz범위에서 높은 차음성능을 갖고 있으나, 개구부가 많은 출입문의 경우 관심 주파수 대역에서 차량의 다른 부위와 비교해 볼 때, 상당히 낮은 투과손실을 나타내고 있다. 따라서, 이들 부분을 투과하는 소음이 차량의 실내 소음도에 큰 영향을 미치리라고 판단된다.

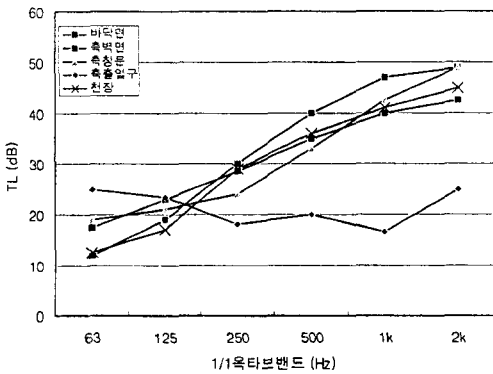


그림 8. 차량부위별 투과손실곡선

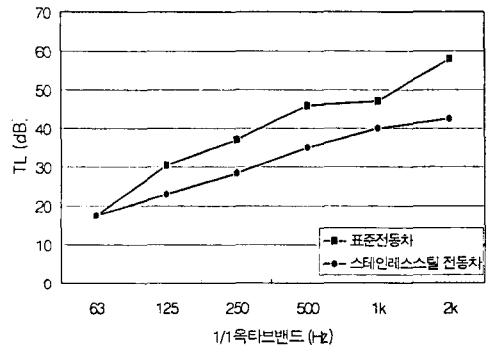


그림 9. 알루미늄 바닥면 투과손실곡선

한편 차량 내부의 음압분포는 차체구조물을 통해 내부로 유입되는 입사음향에너지와 차실 내부에서 흡수되는 감쇠에너지가 균형을 이루는 값으로 결정된다. 이때의 내부소음도는 차실 내장재의 배치와 차체구조물의 차음특성에 영향을 받는다. 실내의 잔향특성을 나타내는 대표적인 척도로는 잔향시간이 있다. 잔향시간이란 음압이 정상상태에서 60dB떨어지는데 걸리는 시간으로 잔향시간 T_{60} 과 평균흡음률 $\bar{\alpha}$ 은 주파수별로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_{60} = \frac{0.16 \times V}{A} \text{-----(6)}$$

$$A = \bar{\alpha} \cdot \sum S_i \text{-----(7)}$$

여기서, A 는 전체흡음력(m^2), V 는 차실내부의 체적(m^3), S_i 는 각 내장재의 면적을 나타낸다. 본 연구에서는 표준전동차의 실내내장품의 경우 스테인레스 전동차와 동일하게 제작되었으므로 차량내부의 흡음특성은 차량사에서 실험을 통해 얻은 잔향시간을 이용하였다. 표 1은 실험을 통한 잔향시간을 바탕으로 차량의 실내체적($122m^3$)과 내부 전체표면적($207m^2$)을 고려하여 식(6)과 식

(7)로 산출한 평균흡음률을 주파수별로 정리한 것이다.

표 1. 표준전동차의 잔향시간과 평균흡음률

주파수(Hz)	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz
잔향시간(sec)	0.525	0.292	0.309	0.233
평균흡음률	0.180	0.323	0.305	0.405

6. 차량 내부 소음도 예측

차량내부 소음의 예측은 앞에서 측정 또는 분석된 다양한 물리량을 연계시켜 아래의 식 (8)을 사용하여 예측할 수 있다.

$$L_{inside} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{A} \sum \left(S_j \times 10^{\frac{L_{outside-j} - TL_i}{10}} \right) \text{-----(8)}$$

여기서, L_{inside} 는 실내에서의 내부 SPL, $L_{outside}$ 는 차량외부의 측정위치별 외부소음도, S_j 는 해당 위치가 차지하는 면적, TL_i 는 차량외부 구조물별 투과손실, A 는 주파수별 전체 흡음력을 나타낸다.

차내소음에서 가장 지배적인 위치인 대차상부를 고려하였을 경우 열린공간과 복선테널에서 차량 1대 운행시의 각 부분을 통과하는 차량내부 소음도를 그림 10에 보인다. 여기서 차량의 단면부위별로 내부소음도에 미치는 영향을 보면 대차상부일 경우 출입구를 통한 소음이 다른 곳보다 지배적임을 알 수 있으며, 주파수 대역에 있어서는 250Hz 대역에서의 소음도가 전체 소음도를 지배하는 주파수 대역임을 알 수 있었다. 이러한 소음도 예측결과를 실제 표준전동차가 7호선 터널주행시 측정된 차내 소음도와 비교한 결과 측정값이 예측값보다 약 2dB정도 높게 나타났다. 이는 해석상의 조건차이 및 표준전동차의 도어기밀상태가 양호하지 않았다는 것 등을 감안할 때 예측값은 신뢰도를 가지고 있다고 판단된다.

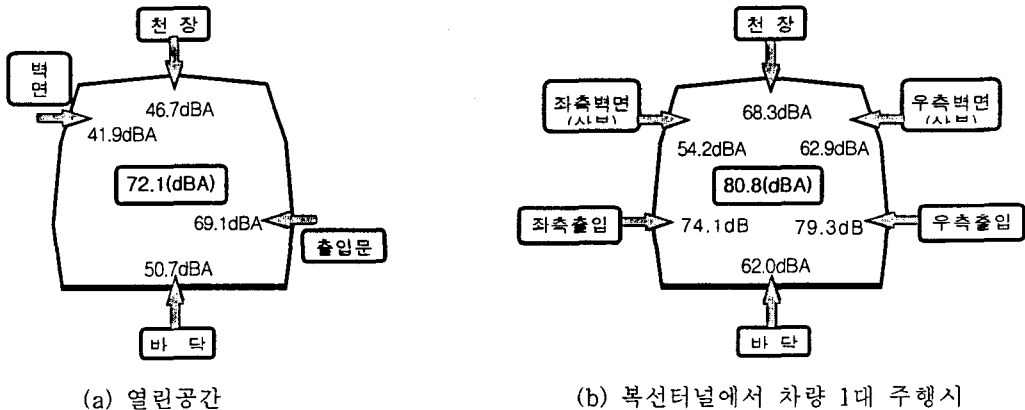


그림 10. 대차상부에서의 차량 내부 소음도

7. 결 론

도시철도차량 표준화·국산화 사업의 일환으로 개발완료된 표준전동차는 기존의 전동차에 비해 차량을 이루고 있는 구조물의 재질과 단면형상이 크게 변화되어 있다. 본 연구에서는 이러한 구조물의 재질 및 형상변화가 전동차의 터널 주행시 차실 내부소음에 어떠한 영향을 미치는 가를 해석적으로 예측하고, 설계단계에서 일련의 과정에 따라 차내소음을 예측할 수 있는 기법을 제시하였다. 본 과정을 통해 얻어진 결과와 실제주행시 측정값을 비교해 볼 때 차내소음의 차이는 약 2dB정도로 본 연구기법은 상당히 신뢰성이 있다고 판단된다.

참고문헌

1. M. Heckl, 1996, "Structure-Borne Sound and Vibration from Rail Traffic", Journal of Sound and Vibration, Vol.193, No.1, pp175~184
2. Leo L. Beranek, 1971, "Noise and Vibration", McGraw-Hill Co.
3. 전현태, 김정태, 1999, "철도차량의 소음도 예측-경계요소법과 광음향기법의 상호보완", 한국철도학회지, 추계학술대회논문집, pp495~502
4. 한국철도기술연구원, 1998, "전동차 차내소음원규명 및 저감대책 연구보고서", '98도시철도차량 표준화·국산화 연구개발보고서