

철도차량 외부소음 예측을 위한 음원모델에 관한 고찰

Investigation of Source Modelling for External Noise Prediction of Railway Vehicles

김종년†
Kim, Jongnyeun

ABSTRACT

For external noise prediction of railway vehicles, sophisticated individual source modelling as well as appropriate noise propagation model from the sources is necessary to ensure the accuracy of the predicted results and contributions of each equipment to the overall noise levels. Accurate and reasonable identification procedures of sound sources of equipment including source strength, directivity and positions installed in the train play an important role in a prediction model, since it is not easy to establish a simple model for the sources with a single rule due to the complexity of source characteristics of equipment in size and directivity pattern. This paper guidelines practical considerations for identification of noise sources in railway vehicles including typical source characteristics of several sub-systems that emits noise to the environment, particularly for electric multiple unit(EMU), and verify effectiveness of assumptions used in the modelling of equipment by measurement with a simple part. The predicted external noise level of a complete train using *Exnoise*, which was developed by Hyundai-Rotem and has been verified in the a lot of field-tests, incorporating source modelling considered in this paper shows close correlation with the measured ones.

1. 서론

최근 환경소음의 중요도가 증가함으로 인하여, 상대적으로 타 교통수단에 비하여 환경소음에 미치는 영향이 적다고 알려진 철도차량에 대해서도 환경소음에 대한 규제가 엄격해지고 있다. 이에 대한 사양 적합성 평가 및 신규차량 및 기존열차의 환경소음에 대한 영향을 평가하고자 할 때, 필수적으로 수반되는 철도차량 통과시의 통과소음(pass-by noise)을 정확하게 예측하는 것이 필요 하다[1]. 철도차량의 외부소음을 예측하고자 할 때 예측된 결과의 정확도와 각 장치의 전체 소음도에 대한 기여도 분석의 신뢰성을 판가름하는 중요한 요소는 외부소음해석모델의 주 엔진이라고 할 수 있는 음원으로부터 수음지점까지의 에너지의 전파와 감쇠를 계산하는 일련의 과정과 더불어, 개개의 음원 그 자체에 대한 세심한 검토에 의해서 이루어지는 음원모델이 있다. 철도차량의 외부소음을 평가하는 모델로는 환경소음만을 평가하기 위하여 철도차량을 하나의 선 음원(line source)으로 가정한 간단한 방법에서부터[7], 차량에 장착된 각 장치를 특성을 반영 하여 개별적이고 특정한 방사특성을 갖는 점 음원(point source)으로 가정하여 통과소음을 계산하는 방법[8] 등이 있다.

요즈음에는 각 장치의 기여도 평가가 이루어 질 수 있다는 장점으로 인하여 후자의 모델을 주로 사용한다. 따라서 철도차량 각 장치에 대한 음원의 강도, 방사패턴 그리고 해석모델에서의 음원의 위치 등을 포함한 음원에 대한 세밀한 규명작업은 해석모델을 작성하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 음원강도와

† 책임저자 : 정회원, 현대로템(주) 기술연구소, 응용기술연구팀, 수석연구원
E-mail : jnkim@hyundai-rottem.co.kr
TEL : (031)596-9491 FAX : (031)596-9747

방사 패턴 등을 연구하기 위하여 다양한 시도가 이루어져 왔지만[2], 그 체계가 복잡하여 아직 쉽게 적용할 수 있는 수준에 이르지 못 하였다. 철도차량에는 외부환경으로 소음을 방사하는 다양한 음원이 존재하는데 이들 음원에 대한 특성을 파악하고 그 특징들을 체계적으로 설명하고 적용하는 절차를 본 논문에서는 다루고자 한다. 음원을 모델링할 때 필수적으로 수반되는 음원의 이상화 작업에서 이루어지는 몇몇 가정들의 적합성을 개개 음원의 특징을 반영한 구성품 시험으로써 증명하였다. 또한 철도차량 외부소음 해석 툴로써 이러한 음원모델링 기법을 적용한 자체제작 프로그램인 Exnoise를 이용하여 완성차 외부소음을 해석하고 이를 시험으로써 서로 비교함으로써 음원 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 외부소음 해석 모델

철도차량 외부소음의 전파모델의 하나로 각 장치에서 발생하는 음원을 점음원으로 모델링하는 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_p = 10 \log \left[\sum_f 10^{\frac{L_{wf}}{10}} \right] \quad (1)$$

$$L_{pf} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{wi}}{10}} \cdot \frac{1}{4\pi d_i^2} \cos^n \theta_i [1 + |R_g|^2 \frac{d_i^2}{(r_{1,i} + r_{2,i})^2}] \quad (2)$$

$$\text{여기서, } R_g = \frac{\sin \phi_i - \frac{Z_c}{Z_g}}{\sin \phi_i + \frac{Z_c}{Z_g}}$$

$$Z_g = Z_c (1 + 0.0571 (\frac{\rho f}{R_e})^{-0.754}) + j0.87 Z_c (\frac{\rho f}{R_e})^{-0.732}$$

L_w 는 음원의 파워레벨, N 은 음원의 갯수, Z_c 는 특성 임피던스, d_i 는 직접음의 도달거리, $r_{1,i}, r_{2,i}$ 는 반사음의 도달거리이며, R_e 는 지표면의 유동저항(flow resistivity)이다. n 은 음원의 지향성을 결정하는 지수이며, θ_i 는 각 음원과 수음점이 수평면에서 이루는 각도 이며 ϕ_i 는 반사음이 지면에 입.반사하는 각도이다.

상기 식(1),(2)에서 각 장치의 음원파워와 음원의 기하학적 위치, 그리고 음원의 지향성을 결정하는 지수에 대한 세심한 고려가 필요하다. 다음 장에서는 철도차량의 음원으로 분류되는 각 장치의 소음음향파워, 지향계수, 그리고 음원의 위치에 대하여 논하고자 한다.

2.2 소음원 모델

철도차량의 음원은 아래의 표 1과 같이 정차조건에서 그 영향이 큰 보조 장치의 소음원(auxiliary equipment noise source)과 차량이 주행 시 발생하는 소음원으로 나눌 수 있다. 주행 시의 소음원은 크게 아래의 3가지로 분류 할 수 있으며 이는 각각 구름 소음원(rolling noise source), 추진 소음원(traction noise source) 그리고 공력 소음원(aerodynamic noise source)으로 나눌 수 있으며 이들 음원들의 특징을 파악하는 것이 음원 모델의 핵심이다.

표 1. 철도차량 음원 분류

조건	음원	특징
정차 조건	상시동작(permanently operating) 추진 장치 소음원 및 보조기기 소음원 (Auxiliary equipment noise source)	정차 시 외부소음에 영향
주행 조건	구름 소음원 (Rolling noise source)	차륜/레일 및 트랙 방사소음 최고속도 영역에서 환경소음에 지배적임
	추진 소음원 (Traction noise source)	가.감속 시 외부소음에 지배적임
	공력 소음원 (Aerodynamic noise source)	250km/h이상의 고속에서 중요

공력소음원은 고속전철과 같이 250km/h이상의 속도에서 중요도가 증대되는 소음원으로 이 음원에 대한 해석적/시험적인 규명작업은 아직 충분히 되어 있지 않다. 본 논문에서는 중.저속 차량의 외부소음에 한하여 다루므로 이러한 공력소음원에 대하여는 다루지 않을 것이다.

2.2.1 보조기기 소음원

철도차량의 보조기기로는 보조전원장치, 공기조화장치, 공기 압축기 등이 대표적이다. 주 전력 변환장치 등은 추진 장치의 일부로 분류되나, 상시 작동장치(permanently operating equipment)라는 측면에서 보조 장치와 함께 정차조건에서 주요 소음 발생장치이다. 강제냉각 방식의 견인전동기나 주 전력 변환장치의 오일 냉각팬 등이 이에 속한다. 이들 보조 장치의 소음특성은 공기압축기를 제외하고는 대부분의 소음원이 냉각팬에 의해서 발생하는 소음이다. 강제냉각 시 보조전원장치와 주 전력 변환장치의 냉각팬이 주요 소음원이다. 그리고 일반적으로 공기조화장치의 컨덴서팬은 전동차(EMU)의 정차중 최대 소음원이며, 엔진 냉각팬과 터보 차저음은 DMU의 가장 중요한 소음원이다. 따라서 이러한 정차중 주요소음원은 주로 냉각팬이므로 각종 팬의 소음음향파워와 지향특성을 알 필요가 있다. Figure 1은 철도차량의 냉각팬으로 가장 많이 사용하고 있는 축류팬의 지향특성을 시험으로써 구한 것이다. 시험에서 구한 축류팬의 지향특성은 쌍극자형(dipole, n=2)의 지향특성을 갖는 것으로 나타났다. 이들 장치의 소음음향파워는 팬의 종류, 압력손실, 회전수 등에 의하여 경험식을 이용하여 예측하거나, 유사한 팬의 측정값을 이용하여 유추하여 계산 한다.

한편, 차량의 지붕에 설치되는 공기조화장치의 컨덴서팬의 유동흐름은 지면에 수직이므로 차량에 근접한 위치(선로에서 10m이하의 근접거리)에서 레일면에서 약 1.2m정도의 낮은 위치에서 정차중 소음을 측정할 경우에 컨덴서팬의 수직 지향특성을 반드시 적용하여야 한다. 그렇지 않을 경우, 공기조화기에 의한 음원의 과대 평가되므로. 일반적으로 약 7.5m에서의 수직 지향지수는 약 -5dB(A)정도를 적용하면 어느 정도 시험 값과 일치한다. 그 보정값은 측정거리가 멀어지면서 그 영향도 감소하고, 차량에 접근할수록 더 많은 지향특성을 고려해야 하는 것은 당연한 것이다.

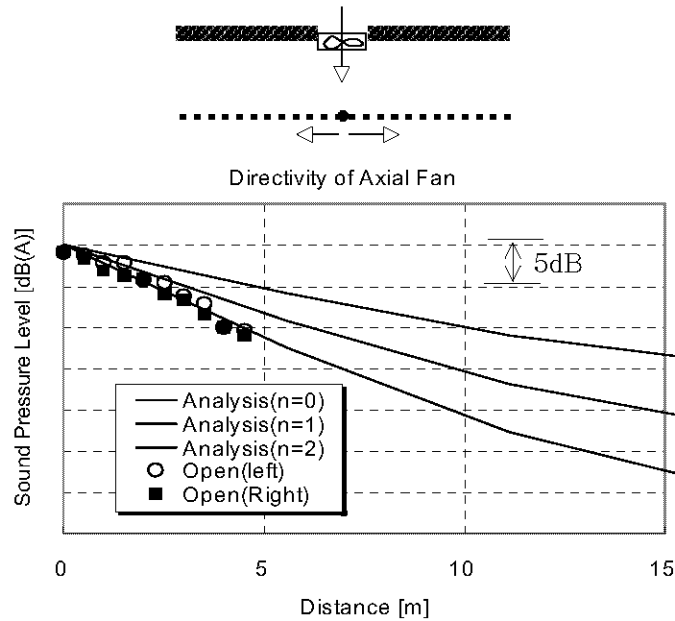


Figure 1. Directivity of Typical Axial Fan

2.2.2 구름 소음원

차륜과 레일이 서로 접촉함으로써 인하여 발생하는 구름소음원(rolling noise source)은 최근 수십 년간 활발하게 연구되어져왔다. 또한 이 소음원은 대부분의 중.고속 영역에서의 가장 지배적인 소음 원으로써, 철도차량의 외부소음을 예측하는 데 필수적으로 규정되어야 하는 소음원이다. 따라서 구름 소음원을 시험적으로 구하기 위한 체계적인 방법들이 제안되었다[3].

구름소음원에는 차륜, 레일 및 침목 등이 방사하는 소음으로 나눌 수 있다. 차륜의 소음방사특성은 쌍극자 소음방사 특성을 갖고 있으며, 레일의 소음방사특성은 일정한 길기의 선 음원으로써 코사인 방사특성을 갖는다고 알려져 있다. 차륜과 레일 및 침목으로 부터 방사되는 소음들을 각기 따로 모델링할 경우에, 차륜소음원의 위치는 차축에 그리고 레일 소음원의 위치는 레일상면으로 하는 것이 가장 타당하다고 한다 [4,5].

하지만, 일반적으로 유효한 해석정밀도 내에서 효율적으로 소음원을 모델링하기 위하여 차륜, 레일 및 침목에 의한 소음을 한 개의 소음원으로 모델링하는 것이 보편화 되어 있다. 그때의 소음원의 위치로는 차륜/레일 접촉점으로부터 약 10~20cm정도가 적당하다. 또한 구름 소음원을 한 개의 소음원으로 모델링했을 경우에 구름소음원의 지향특성은 코사인 지향특성(n=1)을 갖는 것이 시험으로써 어느 정도 증명되었다.

본 연구에서는 구름 소음원을 이론적인 방법으로 예측할 수 있으며 그 실용성이 입증된 상용 프로그램인 TWINS[6]로 해석하여 1개의 차륜과 레일이 접촉하는 경우의 소음방사파워를 예측한다. 각 차륜/레일 소음원은 서로 연관성이 없는 독립적인 음원으로 가정하며 그 배치가 대차중심에서 1.5m 이내이므로, 대차당 파워를 각 차륜이 방사하는 음향에너지를 단순히 누적 계산(4개의 차륜/레일 방사소음에 대하여 6dB를 더함)하여 대차중심점에 위치시키고 수직높이로는 레일상면에서 15cm에 위치하게 하여 철도차량 외부소음 예측에 적용하는 것을 제안한다. 이러한 구름소음원의 단순화 과정의 타당성을 2.3절의 예제에서 시험결과를 토대로 증명할 것이다.

2.2.3 추진 소음원

철도차량의 추진 장치로는 전동차(EMU)에서는 견인전동기(Traction Motor)와 구동기어(Driving Gear)가 있으며, DMU에서는 엔진과 엔진 냉각장치 그리고 동력전달장치(Transmission) 및 구동기어가 있다. 전동차에서는 견인전동기에 전원을 공급하는 장치도 추진 장치로 분류하고 있으나, 그러한 장치의 음향

강도가 그리 크지 않으므로 소음적인 관점으로 볼 때에는 보조 장치와 함께 정차 시 주요한 장치로 분류한다.

견인전동기의 소음은 차속이 50km/h이하에서는 전자기 소음이 지배적이거나, 그 이상의 속도에서는 견인전동기를 냉각시키기 위한 냉각팬의 소음의 영향이 대부분이다. 아래 Figure 2는 일반적인 전동차에 사용되어지는 자기 냉각식 견인전동기의 차속에 따른 소음방사파워 측정 결과이다. 견인전동기의 지향특성은 공기토출구와 흡입구등이 냉각팬 소음의 주요 통로이나, 토출구가 일반적으로 방사형으로 되어 있고 흡입구 또한 다양한 형태로 이루어져 있으므로 특이한 지향특성을 가지지 않는다. 따라서 특이한 경우가 아니고는 견인전동기는 단극자(mono pole, n=1)음원으로 가정하고 견인전동기 무게중심점에 위치한다고 가정한다. 견인전동기 음향파워는 Figure 2에서 보듯이, 고속에서의 지배적인 요소는 냉각팬 소음이므로 부하조건에 무관하고 냉각팬의 회전수에 의존한다. 이 영역에서는 속도의 5~6승에 비례하여 견인전동기의 음향파워는 증가한다. 실제로 견인전동기는 외부 측정점에 모두 노출되어 있지 않고 여러 장애물에 의하여 가려워져 있다. 그러나 실제로 저주파수 영역에서는 이 효과는 거의 나타나지 않으나, 2.5kHz가 넘는 고주파수 영역에서는 구동기어와 차륜 및 기타 장애물에 의한 수음점에 대한 차폐효과(screen effect)를 적용하여 사용하기도 한다. 이러한 차폐효과는 기하학적으로 유사한 형태에 대하여 시험으로 검증하여 데이터베이스화 되어 있어야 실제 활용이 가능하다.

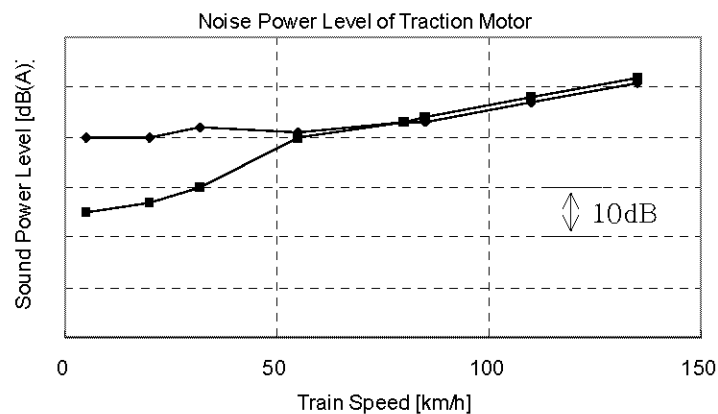


Figure 2. Noise Power Levels of Traction Motor for EMU

Figure 3은 구동기어의 소음방사파워를 측정한 예이다. 모든 기어 소음에서 나타나는 것과 마찬가지로 작용하는 부하에 의해 소음방사파워는 크게 변한다. 또한 기어 맞물림 주파수(gear mesh frequency)에 의해 순음 가진이 이루어지므로 기어하우징을 포함한 전체 기어 시스템의 고유진동수의 유무에 따라 소음방사파워는 크게 변할 수 있다. 이러한 기어소음특성을 감안하면, 여러 형태의 기어시스템에 대한 체계적인 데이터베이스가 있어야만 신규 기어시스템에 대한 음향파워 산출이 가능하다. 구동기어의 지향특성은 일반적인 전동차에 사용되어지는 1단계 감속기어의 경우, 기어하우징의 넓은 면이 주요 소음 방사면이므로 쌍극자 음원에 가까우나, 실차시험에서 비교하여 보면 코사인 음원(n=1)의 특성을 가지고 있다. 이는 기어근처에서 수많은 반사음에 의하여 완성차에서는 그 지향특성이 다소 변경되었다는 것을 알 수 있다. 즉 철도차량에 장착되어지는 음원은 그 장치의 단독 상태일 때의 지향특성보다도 차량에 장착되었을 때의 지향특성을 고려하여야함을 알 수 있다[9]. 구동기어음원의 위치는 차축과 피니언축의 중간 지점으로 가정하여 사용한다.

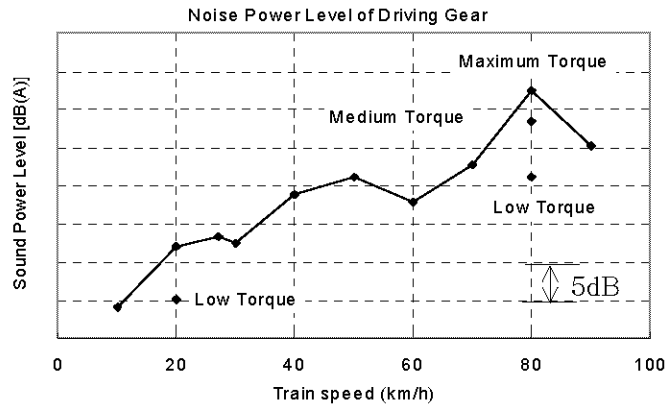


Figure 3. Noise Power Levels of Driving Gear System for EMU

DMU의 추진 장치는 엔진소음과 엔진냉각장치 그리고 동력전달장치의 소음으로 구분된다. 엔진소음은 엔진회전수에 비례하여 Figure 4와 같이 나타난다.

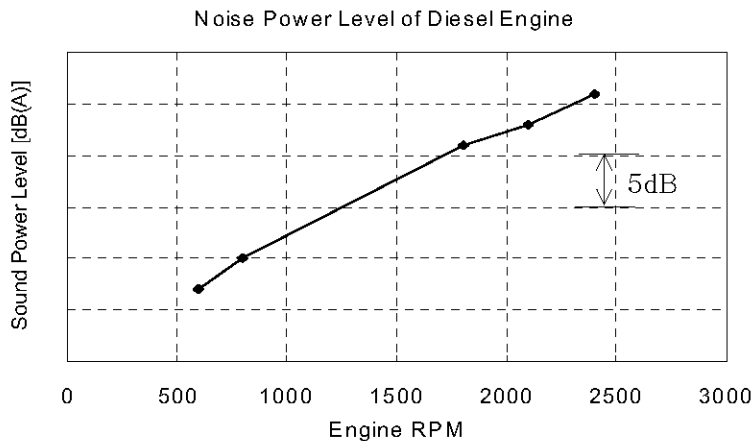


Figure 4. Noise Power Level of Diesel Engine for DMU

하지만, 엔진냉각장치의 소음은 엔진회전수보다는 엔진냉각수의 온도와 터보 차저를 통과하는 냉매의 온도에 비례하여 냉각팬의 회전수가 결정된다. 냉각장치는 일반적으로 다수의 축류팬으로 구성되어 있으므로, 각 회전수에 따른 축류팬의 음향강도와 지향특성을 2.2.1에서 기술한 바와 같이 적용하면 된다. 또한 부하의 변동에 따른 엔진소음의 변화는 회전수변동에 의한 것에 비하면 그리 크지 않으므로 최대 부하 일 때의 소음증가량만을 따로 측정하여 데이터베이스화하여 사용한다.

엔진의 소음방사파워는 5m이하의 근접거리에서는 엔진의 크기가 커서 한 개의 점음원으로 가정할 수 없으므로 파워를 몇 개로 균등배분한 점음원들의 열을 이용하거나, 터보차저(Turbo-Charger)등 음향강도가 상대적으로 큰 부분의 점음원에 가중치를 더하여 사용하면 근접거리에서의 외부소음해석의 정밀도를 높일 수 있다. 하지만, 10m가 넘는 측정거리에서는 한 개의 점음원으로 가정하여도 무방하였다. 이들 점음원들의 지향특성은 단극자 음원으로 가정할 수 있다. 동력전달장치의 경우 엔진과 유사한 특성을 가지나, 엔진의 회전수 외에도 차축의 회전수와도 연동하므로 다소 복잡하다. 엔진의 회전수도 차량의 저속구간에서는 엔진의 회전수를 고정시키고 유체변환기로 변속하므로 입력축과 출력축의 속도비의 차이가 존재한다. 하지만, 일정속도 이상에서는 커플링에 의해서 변속되므로 입력축과 출력축의 속도비는 일정하다. 이러한 동력전달 장치의 변속특성을 세밀히 검토한 후 예측하고자 하는 속도대의 엔진과 구동장치의 동작 상태를 파악하는 것이 중요하다. 구동장치는 그 크기가 엔진보다는 다소 작으므로 근접거리에서도 한 개의 단극자 지향특성을 갖는 점음원으로 모델링하는 것이 가능하다.

2.3 외부소음 해석

Figure 5는 2.2절의 소음원 특성을 반영할 수 있는 철도차량 외부소음 전용 해석프로그램인 Exnoise의 실행 장면을 보여준다. 이 프로그램은 철도차량의 소음원을 편리하게 모델링할 수 있도록 구성되어 있으며 다양한 입력예제파일을 이용 하여 매우 쉽고 빠르게 철도차량의 외부소음예측을 가능하게 해준다. 이 프로그램은 지난 10여 년 동안 수많은 실차시험결과와 해석결과와의 비교분석을 통하여 개선되어져 왔으며 향후 고속전철의 난류경계층에 의한 공력 소음 등을 모델링 할 수 있도록 수정 및 보완이 될 예정이다.

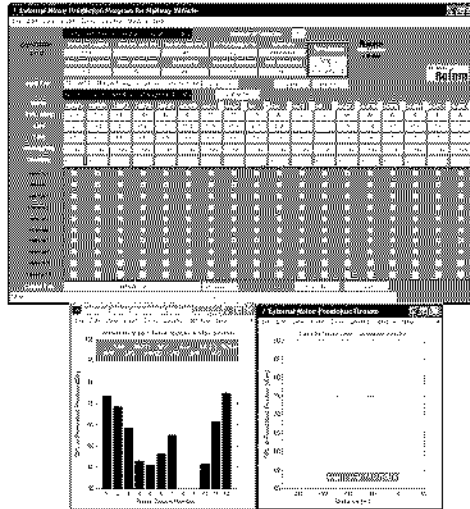


Figure 5. External Noise Prediction Program, Exnoise

Exnoise를 이용하여 일반적인 전동차의 80km/h주행시 외부소음을 해석한 결과와 시험결과를 비교한 것이다. 시험 및 예측에 사용된 전동차는 8량편성의 직/교류겸용 전동차이다. 차량의 구성은 DT-M1-M2-M1-T-M2-M1-DT 차량으로 구성되어 있다. 여기서 DT, T차량은 부수차량(Trailer car)이며 M1, M2차량은 구동차량(Motorizing car)이다. 시험과 예측에서 측정 점은 선로중심점에서 각각 7.5m, 25m를 적용하였다. Figure 6에서 나타나듯이 두 개의 측정 점에서 소음 예측 값은 측정값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히 차량이 측정 점을 진입 및 진출 할 때의 소음의 변동 폭은 구름소음의 지향특성을 잘 반영한다고 알려져 있다. 여기서는 구름소음을 조사인음원으로 모델링하였으며 시험결과와 잘 일치하는 것으로 구름소음의 지향특성을 증명하였다[10]

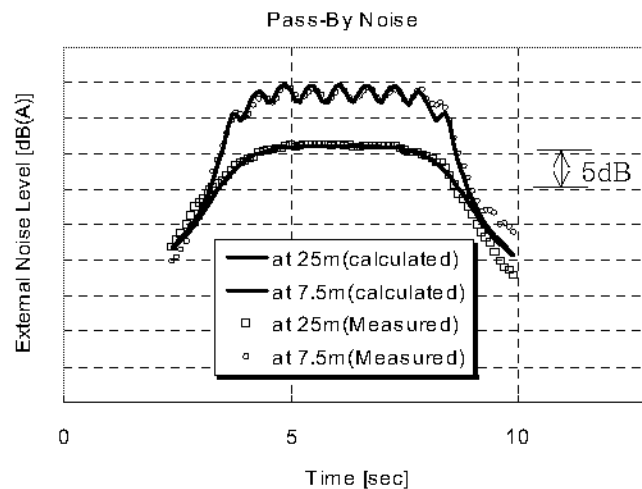


Figure 6. Predicted and Measured Pass-By Noise of BMU train, at 7.5m and 25m

Figure 7은 외부소음해석에서 각 장치의 기여도 분석결과를 나타낸 것이다. 전동차가 80km/h의 속도로 주행할 때 외부소음에 가장 기여도가 큰 소음원은 구름소음이며, 그다음으로 견인전동기, 구동기어의 순으로 나타났다. 외부 소음해석 시 전체 소음 도를 결정하는 몇 개의 장치에 대한 정확한 분석이 선행되어야만 효과적인 소음저감방안이 도출 될 수 있을 것이다. 이러한 기여도 분석은 각 장치의 단품상태에서 소음 저감 량이 전체의 외부소음저감에 미치는 영향을 외부소음해석을 반복하지 않고도 쉽게 구할 수 있는 장점도 있다.

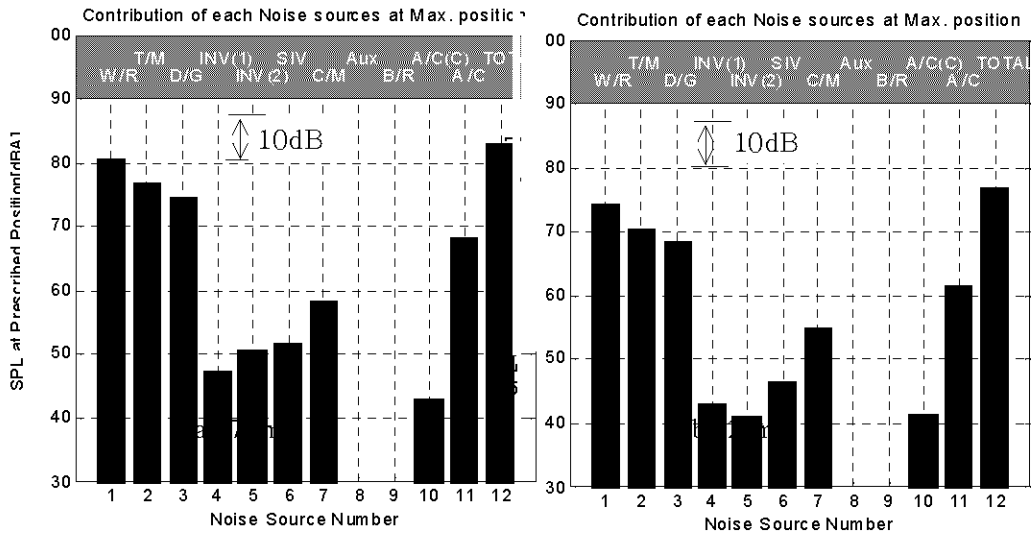


Figure 7. Contribution Analysis of Pass-by noise for each Equipment

3. 결론

본 논문에서는 철도차량 외부소음을 해석하기 위한 모델에서 소음을 발생 시키는 각 장치의 특성을 고찰함으로써 체계적인 음원모델링에 도움을 주고자 하였다. 일반적인 전동차에 있는 각종 음원의 음향 강도 및 지향특성, 그리고 해석모델에서의 이상적인 위치를 제시 하였다. 실제적인 예제로써, 본 논문에서 제시된 음원특성으로 모델링된 8량 편성의 전기동차를 대상으로 근접거리와 원거리에서 외부소음을 예측하였으며 이를 시험 값으로 비교함으로써 제시된 음원모델의 타당성을 검증하고 음원모델에서 제시된 단순화 가정의 실효성을 입증하였다. 특히 중,고속으로 주행하는 대부분의 철도차량 외부소음의 주요 음원인 구름소음원의 지향특성을 시험으로써 증명하였고, 그 외주요 추진 장치의 소음원 특성을 규명하는 절차에서 외부소음에 영향을 미치는 인자들을 제시하였다.

참고문헌

1. P.H. Vos (1996), "Railway Noise: The physics of airborne sound generation and propagation", J of Sound and Vibration, 193(1), pp. 77~82.
2. C. Talotte, P.E.Gautier, D.J.Thompson (2003), C. Hansen(2003), "Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey", J of Sound and Vibration, 267, pp. 447~468.
3. M.H.A. Janssens, H.W. Jansen, M.G. Dittrich (2006), "Evaluation of the interim measurement protocol for railway noise source description", J of Sound and Vibration, 293, pp. 1029~1040.
4. C.Talotte, P.Stap, M. Ringheim, M. Dittrich, X. Zhang, D. Stiefel (2006), "Railway source models for integration in the new European noise prediction method proposed in Harmonoise", J of Sound and Vibration, 293, pp. 975~985.
5. X. Zhang, H.G. Jonasson (2006), "Directivity of railway noise sources", J of Sound and Vibration.
6. D.J. Thompson, P. Fodiman, H. Mahe (1996), "Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part2: results", J of Sound and Vibration, 193, pp. 137~147.
7. 강대준 (1997), "철도소음의 예측", Journal of KSNVE, Vol.7, No6, pp. 1001~1006.
8. 주진수(1998), "고가선로에서 철도소음 전파예측에 관한 연구", 한국 소음진동 공학회지 제8권 제2호. pp. 289~296.
9. 김종년, 박희준 (2006), "난간 벽이 있는 고가선로를 운행하는 열차의 외부소음해석", 한국철도학회 2006년도 춘계학술대회논문집.
10. 구동회, 김재철, 박태원, 문경호 (2001), "한국형 고속전철(KTX) 방사패턴에 관한 연구", 한국소음진동 공학회 2001년도 춘계학술대회논문집 pp. 836~842.