

# 통근형 전동차의 객실 내 소음수준예측

## Prediction of the Noise Level inside Metro Electric Cars

서승일<sup>1</sup>                      최문길<sup>2</sup>                      김국현<sup>3</sup>  
Seo, Seung-Il              Choi, Moon-Gil              Kim, Kookhyun

---

### ABSTRACT

This paper deals with a method to predict the noise level inside metro electric cars running a single-line tunnel at the speed of 80 km per hour using ray tracing method, a kind of ray acoustics generally used for a high-frequency and air-born noise analysis.

The interior of the car including a under-frame, seats, side doors, end doors, door-pockets, side panels, end panel, a roof panel and so on is modeled. And in order to describe the noise power coming inside, artificial noise sources are designated using sound transmission loss data of each section measured from simple tests and external noise level.

The noise level inside the car is calculated and its properties are investigated. The results satisfy the criteria on noise level inside the car.

---

### 1. 서론

최근 철도차량의 안락성과 정속성 향상에 대한 요구가 증대되고 환경분야에 대한 관심이 높아지면서 철도차량의 소음에 관련된 기준이 강화되고 있는 실정이다. 실제 서울시 지하철 건설본부(SMG)는 신규로 제작되는 차량이 단선터널 내 직선구간을 80km/h의 속도로 주행할 때 객실 내 소음수준이 85dB(A)이하이어야 한다는 기존 사양 이외에 객실 내·외 소음 차가 28dB이상이어야 한다는 새로운 사양을 추가함으로써 그 기준을 강화하였다. 이에 따라 국내 철도차량 제작사들도 전동차의 객실 내·외 소음저감문제를 초기설계단계에서부터 중요하게 인식하고 이에 대한 연구를 수행하고 있으며, 당사에서도 현재 제작 중에 있는 통근형 전동차(이하 '본 차량')의 객실 내 소음수준이 기준 이하가 되도록 그림 1과 같은 절차에 따라 초기 설계단계에서부터 각종 시험 및 해석을 수행해 그 결과를 설계에 반영해왔다[1].

본 논문에서는 본 차량의 최종 설계안에 대한 상세 소음해석을 통해 예측된 객실 내 소음에 대한 특성을 기술하고 본 차량이 앞서 언급한 소음사양을 만족할 수 있는가를 판정해 본다.

---

1. (주)한진중공업, 수석연구원, 정회원  
2. (주)한진중공업, 선임연구원, 비회원  
3. (주)한진중공업, 주임연구원, 비회원

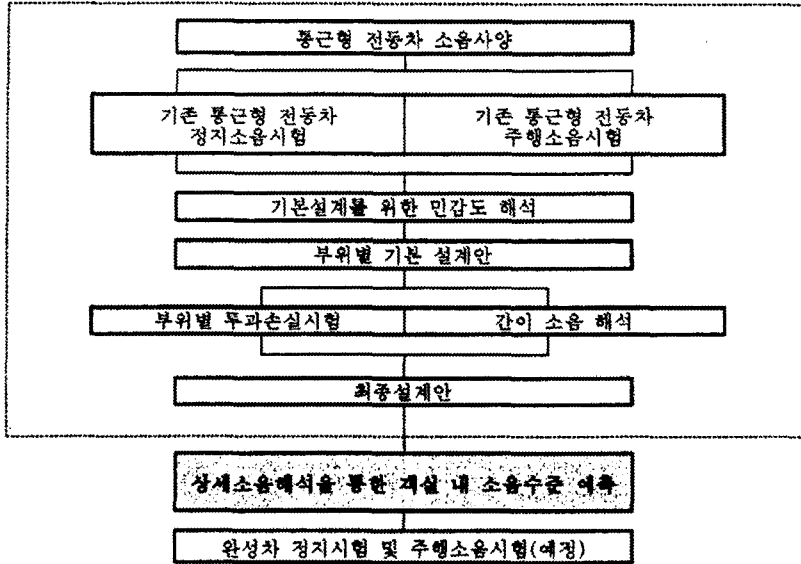


그림 1. 통근형 전동차의 저소음설계 절차

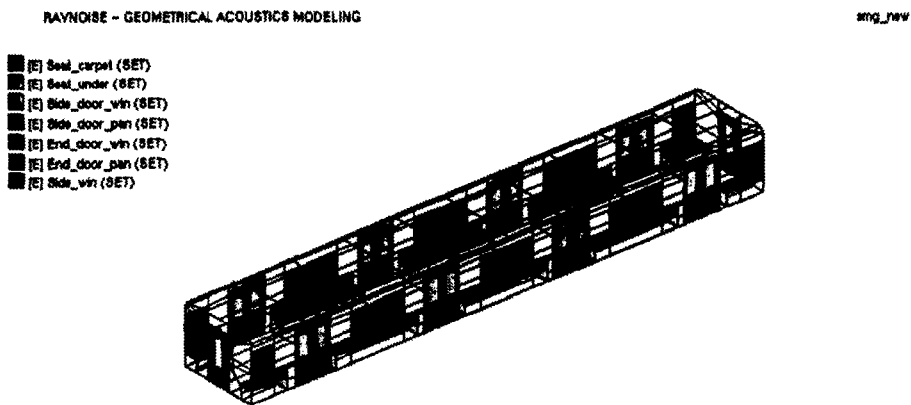
## 2. 상세 소음해석

### 2.1 해석방법

소음해석기법으로는 저주파수 영역에서는 유한요소해석(finite element analysis)과 경계적분법(boundary element analysis) 등[2]이, 고주파수 영역에서는 통계적 에너지해석(statistical energy analysis)[3], 광음향해석(ray acoustic analysis) 등이 널리 이용된다. 본 논문에서는 광음향해석에 해당하는 음선추적법(ray tracing method)을 이용하여 객실 내 소음해석을 수행한다. 음선추적법은 고주파 공기기인 소음해석에 주로 이용된다.

본 해석에 쓰인 상용 S/W는 NIT/RAYNOISE이며, 이에 대한 이론적 배경 및 모델링 기법에 대한 자세한 내용은 참고문헌에 자세히 기술되어 있다[4].

해석을 위해 먼저 전동차의 객실 내부형상을 모델링하여 각 부위별 흡음계수를 입력하고 간이 잔향실에서 차량시험으로부터 얻은 투과손실치와 기존 통근형 전동차에 대한 터널 내 주행시험



2x

그림 2. 객실 내부형상 모델

표 1. 흡음률

Material Name	Frequency (Hz)								Area (m <sup>2</sup> )
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
Aluminum (Door)	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	14.88
Seat (Lower)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	10.50
Seat (Upper)	0.10	0.16	0.27	0.34	0.35	0.33	0.31	0.30	5.57
Linoleum (Floor)	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	55.30
Glass (Side window)	0.03	0.02	0.06	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	13.20
Glass (Door window)	0.07	0.08	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	6.20
FRP Panel (Roof, Side/End Panel)	0.26	0.29	0.29	0.55	0.52	0.71	0.75	0.83	112.50
Mean Absorbtion	0.15	0.16	0.17	0.31	0.29	0.39	0.41	0.45	218.15

결과로부터 얻은 외부소음원 데이터를 이용해 객실 내 가상 소음원의 파워를 산정하여 입력한다. 객실 내 바닥면으로부터 1.6m 높이에 위치한 105개의 수음점에 대한 소음분포를 옥타브 대역의 중심파수별로 해석하였다.

## 2.2 해석모델

해석모델의 크기는 길이(X) 18.94 m, 폭(Y) 2.92 m, 높이(Z) 2.20 m이며, 측정된 외부소음원을 객실 내부의 가상소음원으로 모델링하므로 그림 3과 같이 객실의자, 창문, 출입문 등을 포함한 객실 내부형상만을 모델링하였다.

흡음률은 표 1과 같이 각 부위별, 주파수별로 다르게 입력하였다. 표 1에서 객실 내 내장판으로 사용되는 FRP 패널은 흡음률이 상당히 낮은 재료이지만 내장판 연결부, 에어컨 토출구, 라인 플로우 팬, 송풍구, 출입문과 포켓사이의 틈새 등에 의한 흡음률 증가를 고려하여 높게 입력하였다.

## 2.3 가상 내부소음원 ( $PWL_{in}$ )

그림 3와 같이 가상 내부 소음원을 부위별 면적음원으로 모델링한다. 또한 측정된 외부소음을 확산음장(diffuse field)이라고 가정하면 식 (1)로부터 가상음원의 파워를 구할 수 있다.

$$PWL_{in} = SPL_{out} - TL + 10 \log_{10} \frac{S}{N} - 6 \quad (1)$$

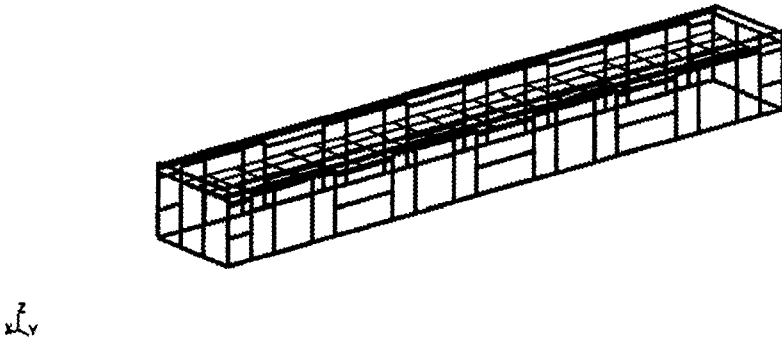


그림 3. 면적음원 모델

- 여기서,
- $PWL_{in}$  : 가상소음원의 입력 파워수준[dB]
  - $SPL_{out}$  : 외부소음원의 음압레벨[dB]
  - $TL$  : 투과손실치[dB]
  - $S$  : 단위 음원의 면적[m<sup>2</sup>]
  - $N$  : 음원의 분할개수

음선추적법에서는 점음원을 일정한 간격으로 배열시켜 면적음원을 구현하므로 점음원으로의 분할 개수( $N$ )를 적당히 조절하여야 한다. 결국 수용점에서 이러한 점음원의 배열효과를 줄이기 위해서는 간격을 되도록이면 좁게 가져가는 것이 합당하나, 계산시간이 늘어나는 단점이 있으므로 이를 고려해 면적음원의 분할개수를 변화시키면서 적절한 점음원 배치간격을 결정하였다.

1) 투과손실치(TL)

투과손실치를 구하기 위해 간이잔향실에서 상구조, 지붕구조, 측구조, 출입문을 포함한 포켓 등에 대한 차음시험을 수행하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다[1]. 단부구조의 투과손실치는 지붕구조와 동일하다고 가정하였으며, 창문의 투과손실치는 창문 제작업체에서 제공하는 투과 손실치를

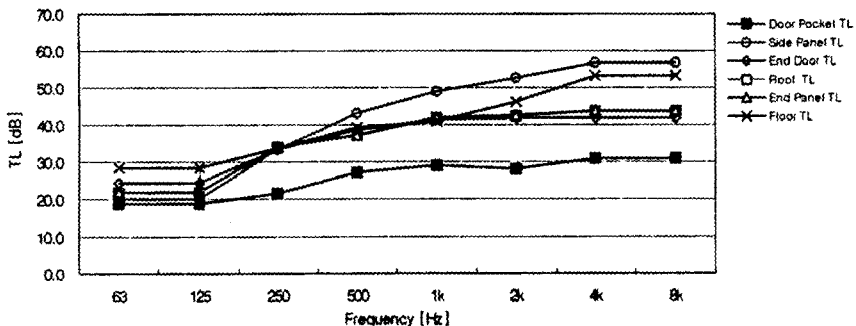


그림 4. 옥타브 밴드별 투과손실

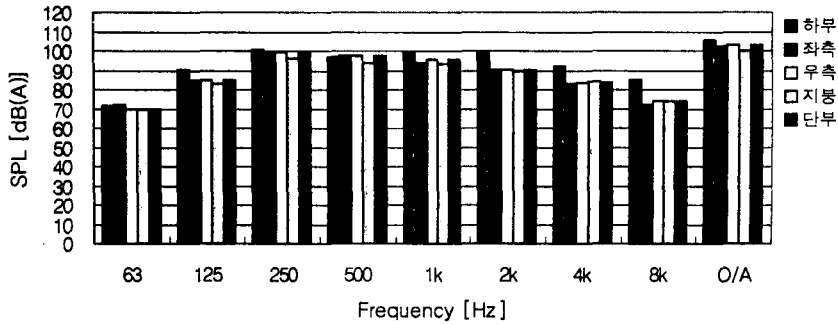


그림 5. 80km/h 주행시 옥타브 밴드별 외부소음도

이용하였다. 또한 63Hz와 8Khz에서의 투과손실데이터는 없으므로 인접주파수밴드에서의 값과 같다고 가정하였다.

## 2) 외부소음원( $SPL_{out}$ )

외부소음원은 기존 지하철의 복선터널구간을 주행하는 차량에 대한 외부소음 측정치를 이용하였다[1]. 외부소음 측정위치는 모터상부, 좌·우측 출입문, 지붕 등 4지점이며 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

이는 복선구간에 대한 것이므로 외부소음수준의 좌·우측 데이터가 서로 다르게 나타나고 있다. 본 해석은 단선터널에 대한 것이므로 차량 하부 소음원과 지붕 소음원은 그대로 이용하였으나, 좌·우측 외부 소음수준은 차량과 터널표면이 가장 가까운 차량 우측 소음수준과 같다고 가정하였다. 또한 단부의 외부소음수준은 우측과 같고, 차량 길이방향으로 일정한 외부소음 분포를 갖는다고 가정하였다.

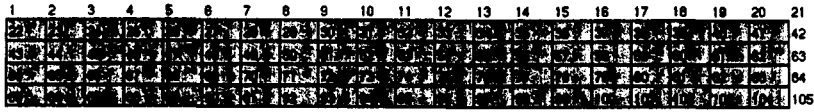
## 2.4 해석

음선추적법을 이용해 소음해석을 수행할 때에는 음원으로부터 전파되어 나가는 음선(ray)의 최대 반사회수(reflection order)가 해석의 정도를 결정짓는 중요한 변수이며 식 (2)로부터 구할 수 있다[5].

$$RO = RT60 \cdot \frac{c}{l} \quad (2)$$

- 여기서,
- $RO$  : 최대반사회수 (reflection order)
  - $RT60$  : 평균 잔향시간 (reverberation time =  $0.161 V / S\bar{\alpha}$ , sec)
  - $c$  : 음속 ( = 340 m/s )
  - $l$  : 평균자유경로 ( mean free path =  $4V/S$ , m )
  - $S$  : 객실 내부 표면적 (  $m^2$  )
  - $V$  : 객실 내 체적 (  $m^3$  )
  - $\bar{\alpha}$  : 객실 내 평균 흡음률

본 해석에서는 평균잔향시간이 약 0.3초이고 평균자유경로가 2.3M이므로 식 (2)에 의해 계산된



Y  
Lx

그림 6. 소음해석을 위한 수음점의 위치

최대반사회수는 약 50회이다.

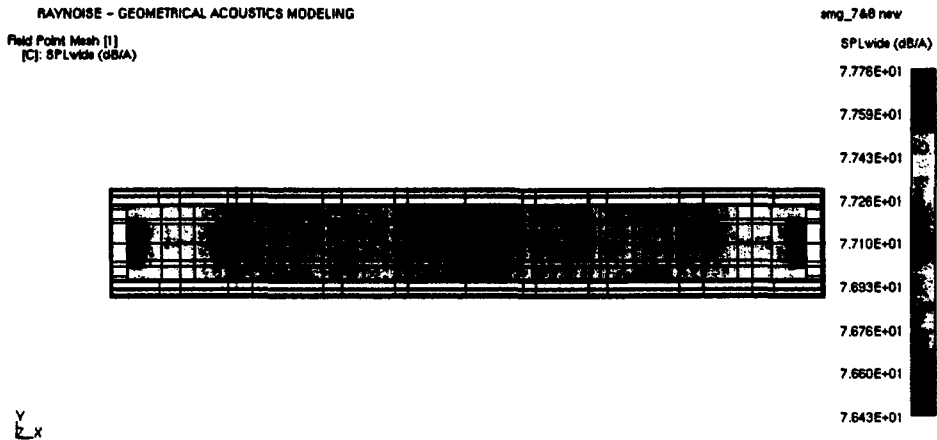
이상의 계산조건을 따라 그림 6과 같이 객실 내부의 바닥으로부터 1.6m 높이에 105개 수음점을 놓고 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 장비는 IBM사의 RS/6000 397이며, 전체 해석시간은 CPU 시간으로 약 42시간이 소요되었다.

### 2.5 해석결과

객실 내 소음수준에 대한 해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 수음점의 위치에 따른 소음수준의 변화가 76.4 dB(A)에서 77.8 dB(A)의 값으로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 본 차량의 객실 내부형상이 상자형으로 매우 단순하여 확산음장 형성이 용이하기 때문인 것으로 판단되며, 기존 7호선의 내부소음 수준에 측정결과에서도 이미 확인된 사실이다[1].

사양에서 정하는 수음점(차량 중앙, 상판으로부터 1.6M 높이 : # 53)에서의 소음수준은 76.7dB(A)로 나타났다. 이는 실내 소음수준 사양인 85dB(A) 이하를 만족시키는 결과이며, 차량하부소음수준 105.5 dB(A)와의 차가 28.8 dB로 차음성능에 관한 사양 또한 만족시키는 결과이다.

그림 8은 사양에서 정하는 수음점에서의 소음수준에 대한 각 부위별, 주파수별 기여도를 나타낸



Y  
Lx

그림 7. 객실 내 소음수준

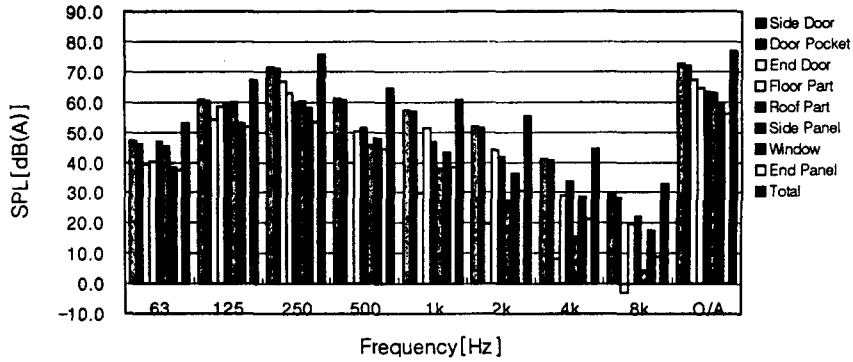


그림 8. #53 수음점에서 의 각 부위별 소음 기여도

것이다. 그 결과 부위별로는 측부 출입문과 출입문포켓을 통해 유입되는 소음의 기여도가 가장 크게 나타나고 있으며, 주파수별로는 250 Hz 대역 소음의 기여도가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론

음선추적법을 이용한 소음해석을 통해 터널 내를 80km/h 속도로 주행하는 통근형 전동차의 객실 내 소음수준을 예측하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 예측된 객실 내 소음수준은 76.7dB(A)이며, 하부소음과의 차가 28.8 dB로 나타나 본 차량이 소음사양을 만족할 것으로 보인다.
- 객실 내부 소음수준은 수음점의 위치에 따라 최소 76.4 dB(A)에서 최대 77.8 dB(A)의 값으로 나타나 차량 외부로부터 유입되는 소음은 객실 내에서 확산음장을 형성한다.
- 부위별로는 측부 출입문과 출입문 포켓을 통해 유입되는 소음이, 주파수별로는 250 Hz 대역 소음이 객실 내 소음에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

앞으로, 본 해석결과와 완성차의 주행시험결과를 상호 비교하여 해석방법에 대한 신뢰성을 반드시 검증해야한다. 또한 투과손실치, 객실 내 흡음률, 외부소음원 등의 기초 데이터에 대한 체계적인 정리를 통해 해석의 정도를 지속적으로 향상시켜 가는 것이 무엇보다 중요하다.

본 해석방법은 음선추적법을 기반으로 하고 있어 그 적용범위가 고주파 공기기인 소음해석에 국한된다. 따라서 저주파수 소음해석방법과 구조기인소음을 포함하는 고주파수 소음해석방법을 추가적으로 개발하고 그 유용성을 검증하여 컴퓨터를 이용한 소음해석의 범위를 확대해야 한다.

### 참고문헌

1. 이동걸 외, "SMG 7&8호선 전차 소음저감을 위한 최종보고서," (주)한진중공업, 91CT-090, 1998.
2. SYSNOISE Rev 5.3A User's Manual, LMS International, 1998.
3. R. H. Lyon, *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems : Theory and Application*, MIT Press, 1975.
4. RAYNOISE Rev 3.0 User's Manual, LMS International, 1998.
5. F. A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, 3rd Ed., TAB Books, 1994.