

Ray Tracing 기법을 이용한 철도차량 실내소음 해석

Interior Noise Analysis for Rolling Stocks by Ray tracing Method

이용관¹⁾ 정승원²⁾

Yong-Kwan Lee Seung-Won Chung

ABSTRACT

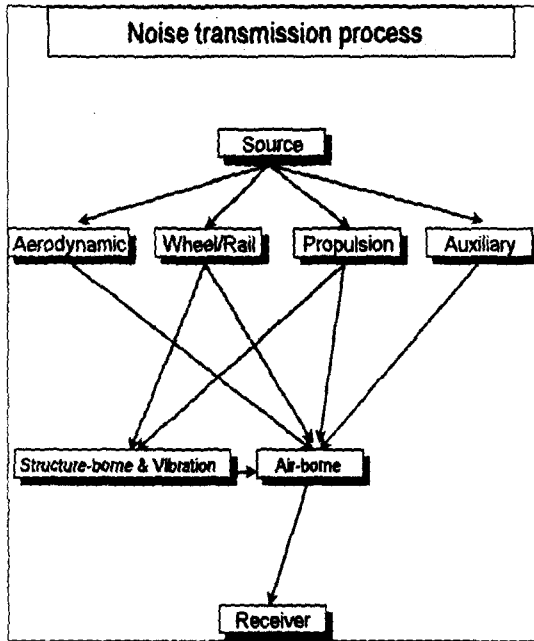
This paper gives the way of analyzing internal noise of rolling stocks which is urgently required by civilians. Triangular beam method among ray tracing techniques is utilized to compute noise distribution of rolling stocks. Noise source and transmission loss of several sections from experimental work are included in this calculation. Ray tracing technique is found useful to compute big structures like rolling stocks.

1. 개요

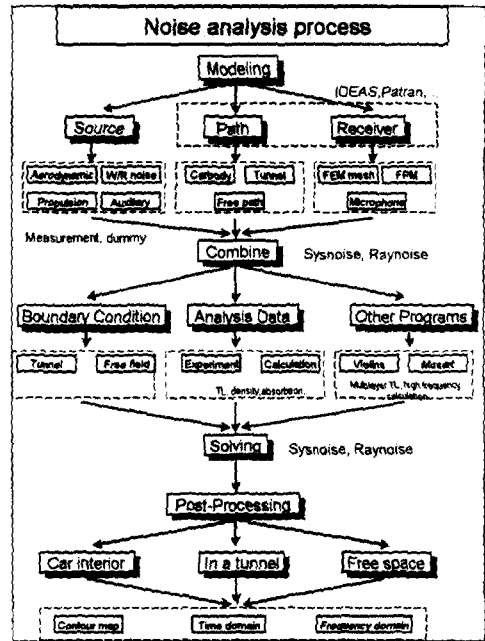
철도차량은 오랫동안 대중교통수단으로 널리 각광을 받아왔고 최근에는 경량화 및 고속화로 인하여 많은 복잡한 문제들이 발생하고 있다. 특히 소음 및 진동에 관한 문제는 환경적인 문제를 야기시킬뿐만 아니라 승객과 밀접한 관련이 있는 만큼 체계적인 분석과 대책이 요구되고 있다. 철도차량은 규모가 크고 소음원이 다양하여 이론적인 해석이 상당히 어려운 대상중의 하나이다. 또한, FEM/BEM과 같이 요소수의 갯수에 따라 엄밀해와 해석가능 주파수 범위가 정해지며, 연산량이 방대해지는 해석방법에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 전동차인 경우에는 휠/레일 접촉에 의하여 유발되는 휠/레일 소음, 차량 표면의 난류 경계층을 형성하여 표면과의 공기동력학적 상호작용으로 발생하는 공력소음, 추진제어장치로부터 발생하는 추진소음, 실내 환기 장치 및 에어컨등에 의하여 발생하는 보조장치 소음등이 있다. 차량이 정차중에는 실내 에어컨등에 의한 보조장치 소음이 실내소음에 큰 영향을 미치지만 주행시에는 추진장치 즉 모터에 의하여 발생하는 소음과 휠/레일 접촉소음이 지배적이다. 국내의 전동차는 100km/h 내외로 운행하므로 이에 대한 소음 대책이 요구된다. 특히, 모터소음인 경우는 팬에 의한 소음이 승객에게 불쾌감을 주는 소음중의 하나로 많은 연구가 필요하다. 소음전파경로⁽¹⁾를 <그림 1>에 도시하였다. 해석된 결과와 시

1) 대우중공업(주) 철도차량연구소 연구원, 비회원
2) 대우중공업(주) 철도차량연구소 주임연구원, 비회원

험과의 오차를 최소화하기 위해서는 되도록 많은 실험결과들을 해석상에 포함시키는 일이 중요하다. 하지만 여건상 많은 실험을 할 수 없을 때는 실험치와 이론치의 보정계수등을 찾아내서 해석



<그림 1> 소음전파경로



<그림 2> 소음해석과정

상의 보완을 해야한다.

차량내부의 소음해석을 위한 과정을 <그림 2>에 보였다. 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 차량의 각부 재질에 대한 투과손실 실험치와 소음원인 경우에는 대차 부위에서 측정한 외부 소음을 차량의 휠/레일 접촉면에 동일한 파워를 가질 수 있도록 분포시켜 해석하였다. 외부 소음만을 해석할 경우는 계산량이 그다지 많지 않으나 실내소음을 해석할 경우 투과손실을 고려해야 하므로 또다른 투과된 소음원의 정의가 필요하므로 계산량이 많아지게 된다. Raynoise V.3.0에서는 투과손실 데이터를 해석상에 가미시킬 수 있도록 하는데 투과후 새롭게 정의된 소음원⁽²⁾으로 인하여 요소수가 많은 모델인 경우는 요소수의 개수만큼 추가적인 소음원이 생기므로 이에 대한 것을 염두에 두고 모델링할 필요가 있다.

2. 레이 추적법

음향학은 크게 파동음향학, 기하음향학, 통계음향학으로 나누며, 해석 대상물의 크기, 주위환경, 다른 구조물과의 연관관계, 주파수 범위등을 고려하여 적절한 방법을 선택한다. 일반적으로 주파수가 낮고 구조물의 크기가 그다지 방대하지 않은 머플러, 실린더블록 및 자동차등을 해석할 때

는 유한요소/경계요소 모델을 사용한 파동음향학의 개념이 주로 사용되고 있으며, 건축물, 선박, 철도차량 그리고 항공기와 같이 다소 규모가 크고 넓은 공간상의 제한을 가진 구조물에 대해서는 내부 음향학적 특성등을 에너지의 흡수와 투과량을 적절하게 고려한 기하음향학의 개념이 도입되고 있다. 이에 대한 방법으로 수음자에서 소음원까지의 음원 반사경로를 추적하기 위해서 거울상 음원을 사용하는 거울상 음원법(Mirror Image Source Method), 음원에서 발생하는 음향 파위를 이산수의 레이로 나누어 분산시킴으로써 레이들의 음향 에너지 소멸과정을 입사, 흡음, 반사과정을 추적하여 음장을 해석하는 레이추적법(Ray Tracing Method), 그리고 두방법의 장점을 채택한 콘형 빔법(Conical Beam Method) 및 삼각형 빔법(Triangular Beam Method)과 같은 혼성법(Hybrid Method)⁽²⁾이 있다. 마지막으로 통계음향학은 확산 음장을 해석할 때 주로 사용되는 개념이다. 본 논문에서는 기하음향학을 이용한 철도차량의 해석에 중점을 두며 그중에서 수렴성이 다소 작지만 정확한 결과를 얻는 삼각형 빔법을 이용하기로 한다.

3. 음선과 음파

자연에서는 무한공간에서의 평면파란 존재하지 않는다. 평면파를 만드는 가장 근접한 실험 중의 하나가 파장이 관의 직경보다 훨씬 큰 저주파를 강관을 따라 이동시키는 것이다. 실세계에서 음파를 다룰 때, 평면파 대신에 단면적과 전파방향이 매체를 지나면서 변화할 수 있는 음향빔을 도입하므로써 문제는 쉽게 될 수 있다. 그런 경우 소리를 음파보다는 음선으로 고려하는 것이 유용하게 된다. 음선은 일정 위상면에 대해서 수직인 선으로 정의되며, 많은 경우에 소리를 음선으로 다룰 때 음속은 공간의 함수이며 파장으로 음을 다루기 보다는 여러면에서 쉽다. 하지만 파에 대한 엄밀한 표현은 아니고 단지 엄격한 조건이 아닌 경우에만 근사적으로 유용함을 알 수 있다.

다음과 같은 파동방정식⁽³⁾을 고려해 보자.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 $c=c(x, y, z)$ 이다. 균일 매질(homogeneous fluid)이나 비균일 매질(inhomogeneous fluid)을 지나는 한정된 구경의 빔에서는 음파의 크기가 위치에 따라 달라지고 일정위상면도 공간의 복잡한 함수가 됨을 개대할 수 있다. 따라서 (Eq. 1)의 해를 (Eq. 2)로 가정하면

$$p(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{j\omega[t - r(x, y, z)/c_0]} \quad (\text{Eq. 2})$$

(Eq. 1)은 (Eq. 3)으로 정리될 수 있다.

$$-\frac{\nabla^2 A}{A} - \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - j\frac{\omega}{c_0} \left(2\frac{\nabla A}{A} \cdot \nabla \Gamma + \nabla^2 \Gamma\right) = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 A는 압력의 단위, Γ 는 길이단위, 그리고 c_0 는 위상속도에 대한 상수값이다. 만약 $|A^{-1} \nabla^2 A| \ll \left(\frac{\omega}{c}\right)^2$, $|\nabla^2 \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}$, 그리고 $|A^{-1} \nabla A \cdot \nabla \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}$ 가 되도록 A와 $\nabla \Gamma$ 가 천천히 변한다면 (Eq. 3)은 (Eq. 4)와 같이 될 수 있다.

$$\nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma = n^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, $n(x, y, z) = \frac{c_0}{c(x, y, z)}$ 이다.

(Eq. 4)는 Eikonal 방정식으로 (1) 음파의 진폭이 파장에 비해 거리당 변화가 미미하고 (2) 음속도 파장에 비해 거리당 변화가 미미할 때 만족한다. 유체를 지나는 음향빔을 고려하면 첫 번째 조건으로부터 Eikonal 방정식은 급속한 변화가 없는 음향 빔의 중심부에 잘 적용될 수 있지만 진폭이 급격히 감소하는 빔의 가장자리에서는 음의 회절(diffraction)현상으로 인하여 오류를 발생하게 된다. 이를 보완하기 위하여 Kurze-Anderson⁽²⁾은 다음식을 제안하였다.

$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad (\text{dB}) \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서

ΔL_B = 스크린 방해로 인한 저감량

$$N = \text{Frenel 수} = 2 \left(\frac{a+b-d}{\lambda} \right)$$

a = 회절 끝단(diffraction edge)에서 음원까지의 거리

b = 회절 끝단(diffraction edge)에서 수음자까지의 거리

d = 음원에서 수음자까지의 직선거리

λ = 파장

두 번째 Eikonal식의 조건으로부터 음속은 공간에 따라 천천히 변해야하고 음파의 공간적 확산은 지나친 국부적 변화를 가져오지 않아야 함을 의미하며, 이는 짧은 파장을 가지는 고주파에 한정됨을 의미한다. 고주파의 파장에 대한 정보를 보완하기 위하여 Raynoise에서는 coherent source를 (Eq. 6)과 같이 정의하여 위상레이추적기법(Phase Ray Tracing)을 이용할 수 있게 한다.

$$P_n = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{N_i} A_{ik} e^{j\phi_a} e^{-jk d_a} \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서 n = 반사차수

N_i = i 번째 차수의 이미지 음원의 수

P_n = 압력

d_{ik} = 수음자와 이미지 음원 ik 사이의 거리

ϕ_{ik} = 벽면 반사에서의 위상지연과 음원의 초기위상의 합

k = 파수

A_{ik} = 반사 ik 의 크기

레이가 벽면에 부딪혔을 경우 일부는 반사되고 일부는 벽면을 투과하여 유입되는데 이에 대해서 내부와 외부사이에서의 투과손실을 투과음원의 개념을 사용하여 모델링할 수 있다. 투과음원은 다각형면의 면적중심에 위치하여 표면에 수직인 축에서 반구형으로 방사되도록 한 것이다. 투과음원의 파워는 가진레벨의 크기와 벽면의 투과손실값에 의하여 결정되며 (Eq. 7)과 같다.

$$P = I \cdot S \cdot t \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서 P = 음향파워

I = 가진면에서의 음향강도

S = 투과면의 면적

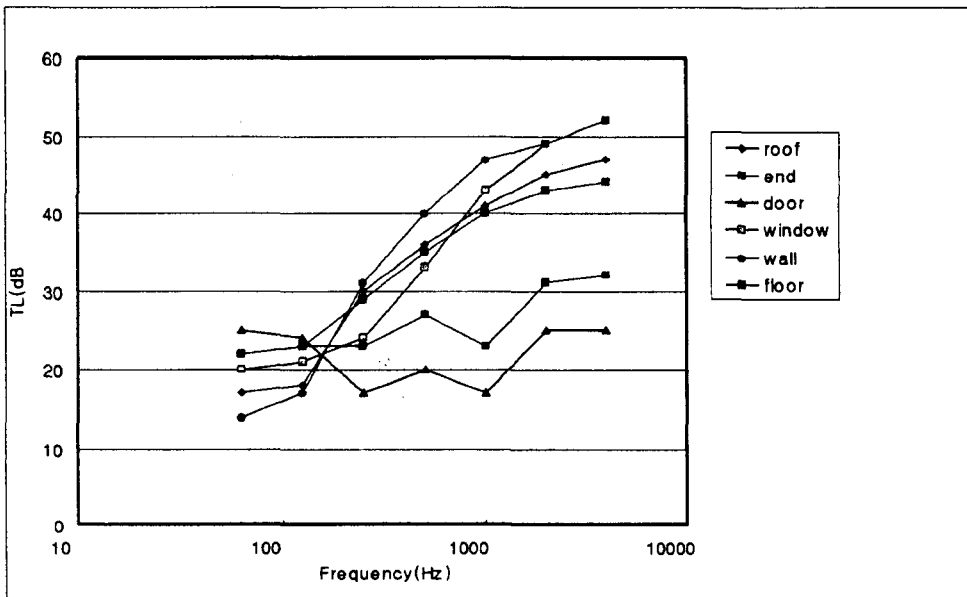
t = 투과손실 계수

4. 철도차량의 소음해석

전동차인 경우 주행중에 발생하는 소음은 주로 휠/레일 접촉소음과 추진제어장치 소음이 대부분이며 해석상에서도 이 소음을 어떻게 모델링 하느냐가 해석상의 결과와 실제 실험결과와의 오차를 최소화 하는 것이다. 실지로 주행중인 전동차의 휠/레일 부위에 마이크로폰을 설치하여 측정된 소음 데이터를 4개의 휠에 동일한 음향파워가 발생하도록 나누어 분포 시켰다. 데이터는 1/3옥타브 중심주파수의 값만을 채택하였고⁽⁴⁾, 휠/레일 접촉소음과 모터 소음을 따로 구분하지 않고 함께 측정된 데이터를 해석에 이용하였다. 소음원은 차량의 하부에 위치한 점음원⁽⁵⁾이지만 Raynoise 해석을 위해서는 벽면을 투과하여 발생하는 내부 소음원을 다시 지정해야 한다. 차량의 바닥부위와 측면부위에 field point를 위치시키고 바닥면 및 측면을 투과하여 들어온 Ray에 대해서 새로운 소음원을 지정한다. 이 소음원의 개수는 바닥부위와 측면 부위의 요소수를 절감함에

따라 줄여질 수 있기 때문에 모델링시 측면 부위와 바닥부위의 요소수를 최소화할 필요가 있다.

기하음향학은 공간상에 Ray가 전파하면서 벽면에 부딪혀 흡수, 반사, 투과등의 과정을 연속적으로 거치는 것이므로 물체표면의 흡음계수를 정확히 측정하는 것은 중요한 일이다. 하지만 단일구조인 경우는 흡음계수의 처리가 그리 어려운 일이 아니지만 다층구조인 경우는 흡음계수 자체만을 측정하거나 계산하는 것이 그리 쉬운일은 아니다. 본 해석에서는 소음원과 직접적으로 접촉되는 반사부위에서의 흡음계수를 전체 요소에 걸쳐 있는 것으로 모델링하였다. 한편 차량 실내의 소음수준을 직접적으로 결정짓는 중요한 요소중의 하나가 차체를 구성하는 여러 단부의 투과손실인데, 이는 무향실과 잔향실을 갖추어야만 정확하게 측정이 가능하다. 최근에는 VIOLINS⁶와 같은 해석소프트웨어의 도움으로 계산에 의존하기도 하지만 계산상에 필요한 재질의 실험적 물성치를 쉽게 얻을 수 없다는 단점이 있다. 본 해석에서는 각 부위별로 측정된 실험치를 이용하였고 이에 대한 데이터는 <그림 3>에 주어져 있다.



<그림 3> 각 부위별 투과손실

해석은 터널내부와 개활지를 주행중인 전동차에 대해서 수행하였고 해석에 사용된 모델링 요약은 <Table 1>에 주어져 있다.

	절점수	요소수	재질특성	회절단수	소음원	field point
개구간	580	602	9	260	53	273
폐구간	580	575	9	241	53	273

<Table 1> 해석 모델링에 대한 요약

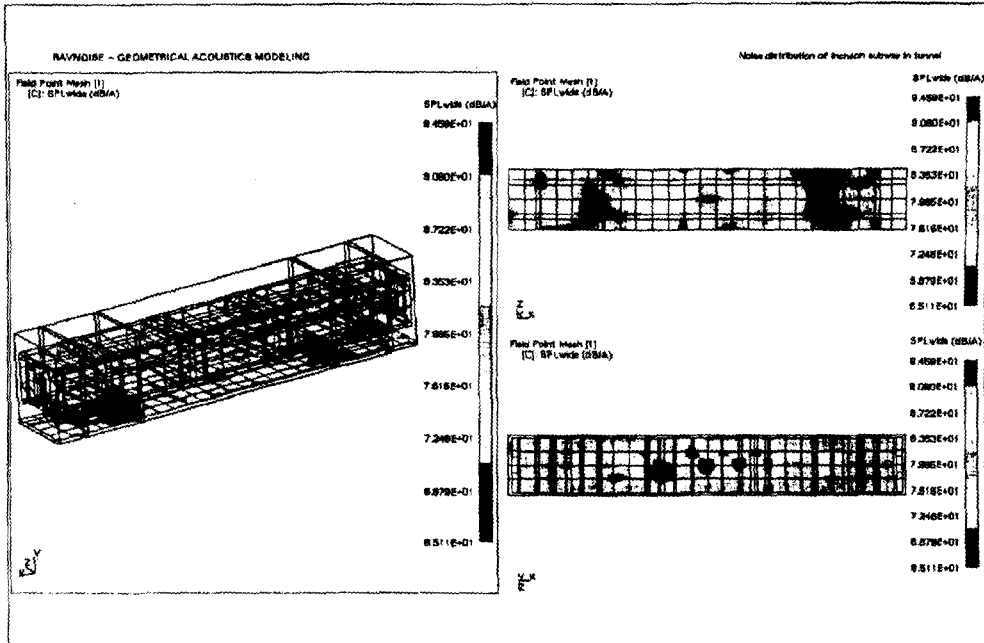
해석 결과는 <그림 4>와 <그림 5>에 주어져 있다. 우측 상단은 휠/레일의 음압분포이고 우측하단은 실내의 음압분포를 가리킨다. <그림 6>은 실내를 투과하여 들어온 1KHz 음향레이가 실내에 전파되는 경로를 보여주는 레이 경로이다. <그림 7>은 실내외의 1/3옥타브 성분별 SPL값이다. 차량 하부에서의 전체 음압레벨을 104.5 dB(A)로 했을 때 해석결과 차량센터의 내부에 대한 광대역 음압레벨은 개구부가 73.6 dB(A), 터널내에서 75.1 dB(A)이다. 해석에 사용된 휠/레일 소음이 시속80Km/h에서 측정된 값이므로 기존전동차가 80Km/h 운행시 80dB(A)의 사양을 가지고 있으므로 해석결과는 수용할 만한 수준으로 사료된다.

5. 결론

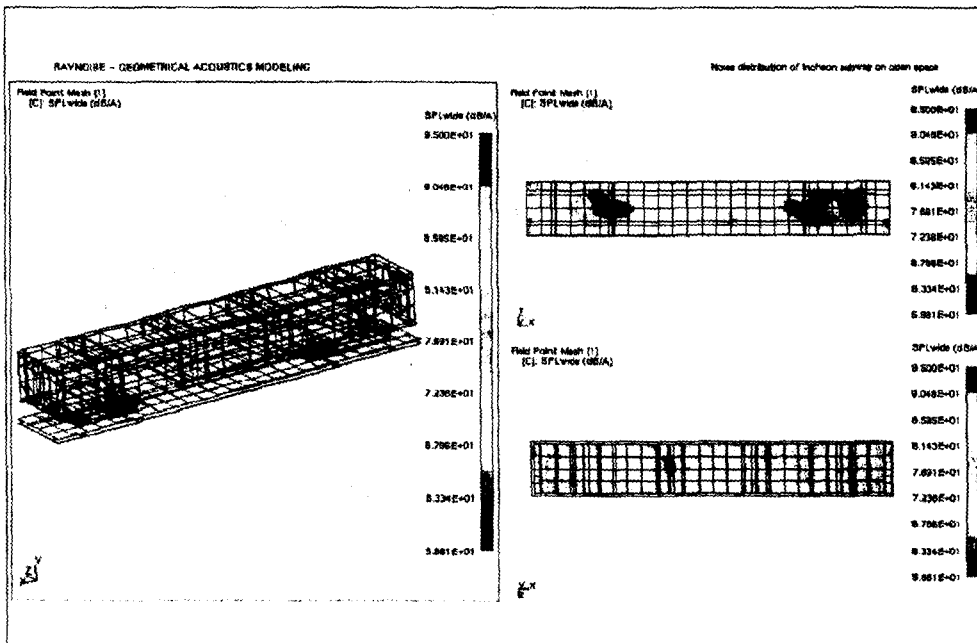
전동차에 대해서 측정된 소음원과 측정 및 계산된 투과손실데이터를 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Ray Tracing 기법을 이용함으로써 대형 수송차량에 대한 3차원 고주파 해석을 용이하게 할 수 있었다.
2. 투과손실 및 소음원의 실측 데이터를 이용하여 해석의 정밀도를 높일 수 있었다.
3. 시속 80 Km/h 정속주행 시, 차량센터의 개구부에서 73.6 dB(A), 터널내에서 75.1 dB(A)로 나타났으며, 이는 시방서 사양의 80 dB(A)를 만족하므로 해석상에서의 결과는 대체로 만족스러운 것으로 나타났다.

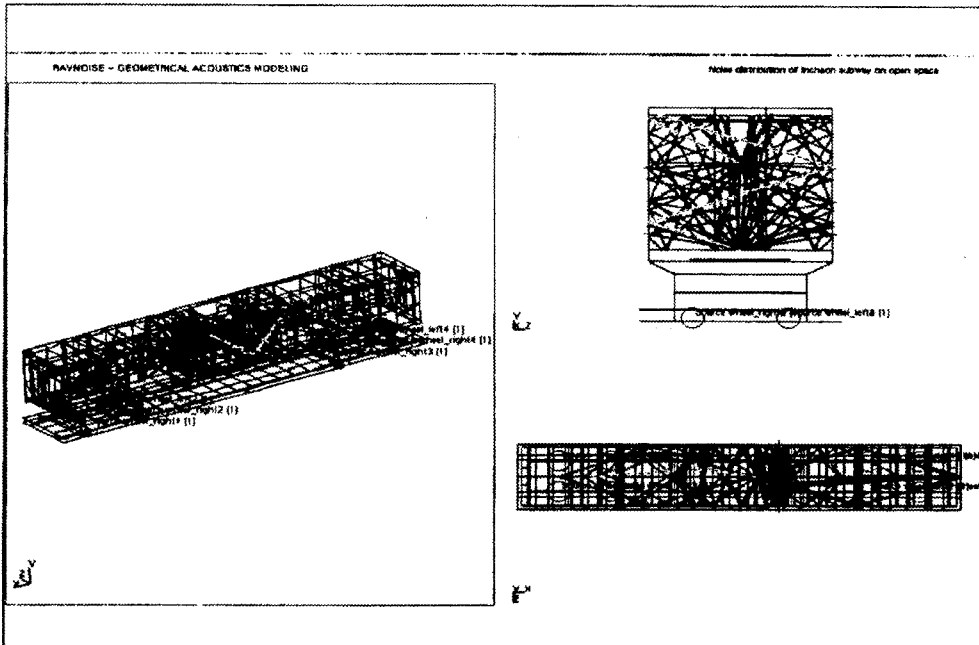
아울러, 해석상에서의 여러 가지 가정으로 인하여 해석결과에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 많은 실험이 뒤따라야 한다. 특히, 해석상에 포함된 소음원이 복합적인 소음원임에도 불구하고 단일화 한 것과 다층구조물에 대한 흡음계수의 지정, 투과손실 데이터의 신뢰성 확보, 벽면을 투과하여 유입되어 새로 지정한 투과소음원(Transmitted source)에 대한 정의 및 차체모델링에 필요한 요소수만큼의 투과음원의 재발생으로 인한 계산량의 방대함등이 해석상의 정밀도를 결정할 수 있는 인자임으로 향후 과제에 대한 많은 데이터베이스화가 절실하다 하겠다.



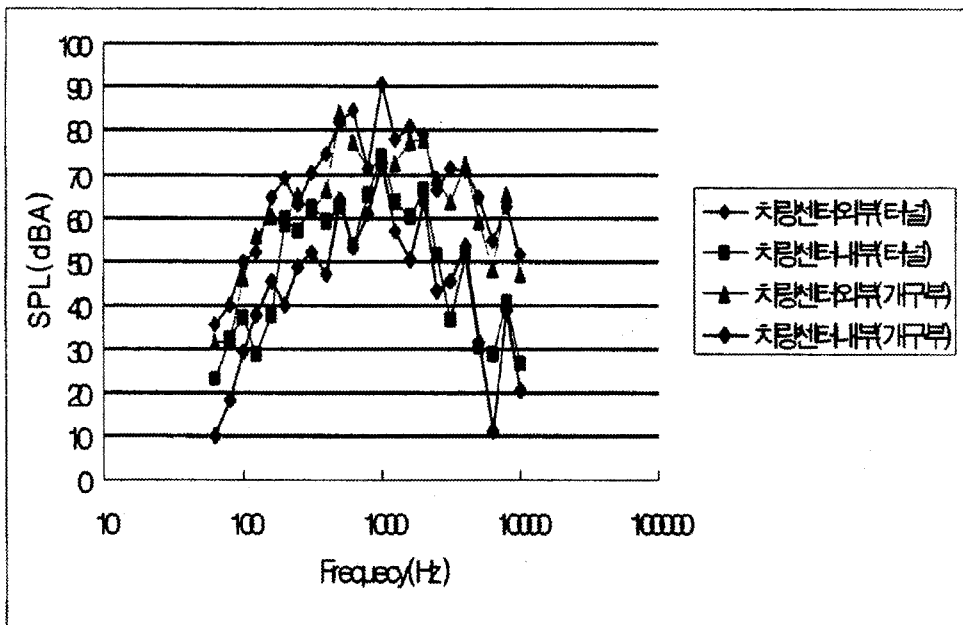
<그림 4> 터널내를 주행중인 전동차의 실내의 음압분포 (우측상단:휠/레일소음, 우측하단:실내소음분포)



<그림 5> 개구간을 주행중인 전동차의 실내의 음압 분포(우측상단:휠/레일소음, 우측하단:실내소음분포)



<그림 6> 차량내부로 투과한 음향레이의 추적경로



<그림 7> 차량실내외의 1/3옥타브 성분별 SPL(외부: 차량 센터 U/F 하부 내부:차량센터 1.5m부위)

6. 참고자료

- (1) Hugh J. Saurenman, James T. Nelson, George P. Wilson, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, Wilson, Ihrig & Associates, Inc., 1982.
- (2) User's Manual, LMS International, Raynoise Rev. 3.0, 1998.
- (3) Kinsler, Frey, Coppens, Sanders,. Fundamentals of Acoustics, Wiley International, Inc. 1980.
- (4) 박석태 외, 철도차량 실내의 음향특성 연구, 1998년 고등기술연구원 위탁과제 중간보고회, 1998.
- (5) A.P.Dowling, J.E.F.Williams, Sound and Sources of Sound, Ellishorwood Publishers, John Wiley & Sons, 1982.
- (6) User's Manual, LMS International, SYSNOISE Rev. 5.3A, 1998.