

<논 문>

흡음에 의한 도시철도 곡선부 스퀸 소음저감에 관한 연구  
A Study on Squeal Noise Control by Absorption Treatment in Urban  
Rail Transit System

최진권\* · 이재원\* · 장서일\*\*

Jin Kwen Choi, Jae Won Lee and Seo Il Chang

(2001년 3월 28일 접수 : 2001년 6월 26일 심사완료)

**Key Words** : Squeal Noise(스퀸 소음), Geometrical Acoustics(기하 음향학), Ray Tracing Method(음선 추적법),  
Absorbing Material(흡음재), Noise Reduction(소음 저감)

**ABSTRACT**

Sound absorbing materials are applied to the exposed surfaces of curved subway tunnel for the reduction of curving noise level. Before the treatment, acoustical engineering simulation is performed to predict the noise level reduction for different kinds and amounts of absorbing material. The principle of geometrical acoustics is utilized to perform the simulation efficiently and accurately. The noise levels of the inside and outside of running car body are measured to find the noise level reduction. The average noise level reduction of 8 dB has been attained. It has been shown that the simulated results are comparable to the measured ones.

**1. 서론**

도시의 교통량 증가로 도시철도 사용량이 늘어나고 최근에는 경량화 및 고속화로 인하여 많은 복잡한 문제들이 발생하고 있다. 특히 소음 및 진동에 관한 문제는 환경적인 문제를 야기시킬 뿐만 아니라 승객과 밀접한 관련이 있는 만큼 체계적인 분석과 대책이 요구되고 있다. 도시철도는 규모가 크고 소음원이 다양하여 이론적인 소음 예측이 상당히 어려운 대상중의 하나이다. 도시철도 소음원으로는 휠/레일 접촉에 의하여 유발되는 휠/레일 소음, 차량 표면의 난류 경계층을 형성하여 표면과의 공기동력학적 상호작용으로 발생하는 공력소음, 추진 제어 장치로부터 발생하는 추진소음, 실내 환기 장치 및 에어컨 등에 의하여 발

생하는 보조장치소음<sup>(1)</sup> 등이 있다. 특히 차량이 곡선 구간을 지날 때에는 차량 바퀴와 레일 사이의 마찰에 의하여 고주파의 큰 소음(squeal noise)<sup>(1)</sup>을 발생시키는데 이것은 도시철도 차량 내의 음압레벨을 민원 및 문제 제기가 가능한 수준인 90 dB 이상으로 올리는 소음발생 주요 원인 중 하나이다. 실제로 도시철도 실내의 소음에 대하여 각종 민원이 발생하고 있으며 이러한 소음을 저감하는 방법으로 탄성바퀴의 사용, 댐핑 바퀴의 사용, 바퀴 진동 흡수 장치사용, 궤도의 윤활, 레일 진동 댐퍼, 레일 고정 댐퍼, 방음벽 설치, 내벽 흡음 처리<sup>(1)</sup> 등 여러 가지 방법이 사용되어 왔다.

본 연구에서는 내벽 흡음 처리 방법에 해당하는 터널벽면 및 바닥면에 흡음재를 시공하여 소음을 저감하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 최적 흡음재 선정 및 시공위치를 결정하고 그 소음 저감효과를 예측하여 보다 효율적인 곡선구간에서의 소음대책 방안을 제공하고자 한다. 또한 시뮬레이션을 통해 결정된 최적 흡음 처리 방법은 현장인 지하철 곡선부에 그대로 시공하여, 완공후 실측된 소음 저감도를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 시뮬레

\* 정회원, 서울시립대학교 대학원 환경공학과

\*\* 정회원, 서울시립대학교 환경공학과

E-mail : schang@uos.ac.kr

Tel : (02) 2210-2177 Fax : (02) 2244-2245

이선의 정확성 검증을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

음향학적인 해석<sup>(2-4)</sup>을 하는 방법은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 파동 음향학(wave acoustics), 또는 물리 음향학(physical acoustics)<sup>(3)</sup>을 근거로 하는 방법으로 음파의 물리적 측면을 중요시한다. 이 방법은 저차의 모드의 의해서 결정되어지는 시스템의 음장 해석이 필요할 때 그 음장의 경계조건(boundary conditions)을 수반한 파동 방정식(wave equation)을 풀어 해를 구하는 것으로 이론적인 해석은 매우 간단한 형상의 음장인 경우에만 가능하고 유한요소법(Finite Element Method, FEM)이나 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)에 응용하여 실제 문제를 해석할 수 있으나 다수의 고차모드가 관련되어 있는 문제이거나 열린 공간의 경우에는 그 효율성이 떨어진다.

두 번째 방법으로는 주파수 영역상에서 매우 가깝게 인접해 있는 다수의 고차모드에 의해서 시스템의 응답이 결정되어질 때 한정된 주파수 범위 내에서의 통계적 평균값을 이용하여 음장해석을 하는 통계적 에너지 해석방법(Statistical Energy Analysis, SEA)이 있다.<sup>(3)</sup> 이 방법은 음향 해석시 반사음의 영향이 비교적 큰 확산음장(diffuse sound field)에 적용되어진다. 비교적 빠른 시간 안에 유체와 고체의 연성 진동등을 포함한 제반 해석을 수행할 수 있으나 일정 공간 또는 단일 구조에 대한 평균값만을 나타내므로 위치별 음향수준 파악에는 정밀도가 떨어진다.

세 번째 방법으로는 본 연구에서 채택한 기하음향학(geometrical acoustics)<sup>(4)</sup>을 기본원리로 하며 광파(light wave)를 광선(light ray)으로 가정하는 것처럼 음파(sound wave)를 음선(sound ray)으로 가정한다. 이 음선은 고체표면에서는 반사하고 반사할 때마다 에너지의 일부분을 잃어버리게 된다. 이 방법은 물리적인 파동의 성질을 고려하지 않기 때문에 중·고주파수 대역의 해석에 적합하며 특히 스케일이 큰 공간, 또는 옥외에서의 음장해석에 유리하다. 그 구체적인 방법으로는 크게 레이추적법(Ray Tracing Method, RTM)<sup>(5)</sup>과 거울형상음원법(Mirror Image Source Method, MISM)<sup>(5)</sup>으로 나눌 수 있다.

RTM는 음원에 의해 방출되는 에너지가 유한개의 음선을 통해 동일한 양으로 배분되어진다고 가정한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 각각의 음선은 음속으로

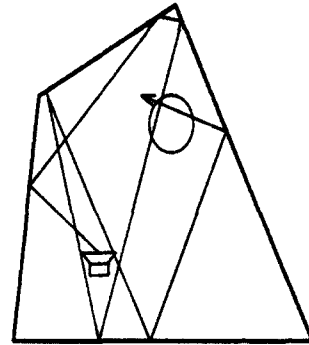


Fig. 1 Propagation and reflection of sound rays

이동하며 고체면과 충돌하여 반사하게 되고 고체면에서의 흡음과 공기 중에서의 흡음으로 인해 에너지가 감소하게 된다. 음선이 갖고 있는 에너지의 양이 어느 수준 이하로 떨어질 때 그 음선은 음장에 아무런 영향을 주지 못하므로 계산을 멈추고 다음 음선에 대해 같은 계산을 반복한다. 모든 음선에 대해 이러한 계산을 한 후 특정지점의 음에너지를 계산할 때 그 지점에서의 유한한 부피를 수음부피(sound receiver cell)로 가정하고 그 수음부피를 지나는 모든 음선의 에너지 레벨을 합한다.<sup>(5)</sup>

MISM은 가상의 음원을 벽을 사이에 두고 반대쪽에 위치시키는 방법으로 수음점으로부터 음원으로, 음의 반사경로를 역으로 추적한다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 균일 음원(isotropic sound source) S와 수음자 R이 직사각형 단면의 방에 있을 때 4개의 벽에 대해 1차의 거울이미지 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>를 설정할 수 있다.

거울이미지와 수음자를 잇는 선, 즉 S<sub>i</sub>R과 벽의 교차점을 찾아 1차의 반사경로를 찾아낼 수 있으며 이러한 과정은 필요한 차수의 거울이미지에 대해 진

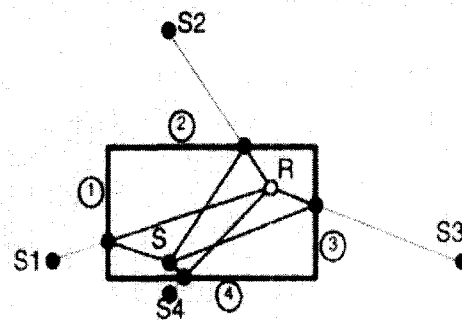


Fig. 2 First-order mirror image and reflection paths

행된다.<sup>(5)</sup> 또한 RTM과 MISM방법의 복합 방법으로 음선이 원뿔형태로 퍼져나가는 conical beam method와 삼각뿔 형태로 퍼져나가는 triangular beam method가 있는데 후자의 방법이 수렴성이 더 좋다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서 사용한 LMS社의 Raynoise는 conical/triangular beam method<sup>(5)</sup>와 회절, 투과손실 등을 용이하게 모델링 할 수 있기 때문에 실내음장 분석과 옥외환경소음 관련 문제의 해석에 널리 쓰여 왔으며 본 연구의 대상에도 효율적으로 적용되어졌다.

### 3. 시뮬레이션 방법

이론적 배경에서 설명한대로 해석 프로그램은 기하음향학을 기본으로 하는 LMS사의 Raynoise를 사용하였다. 해석대상은 서울시 도시철도 구간 중 곡률반경이 250 m인 단선구간을 택하였다. 이곳은 실측결과 스윙소음이 발생하여 도시철도 차량 내부 소음도가 민원 및 문제 제기가 가능한 것으로 판단되는 92 dB 정도이다. Raynoise를 사용하여 모델링한 도시철도 구간 및 도시철도 차량모습은 Fig. 3과 같다.

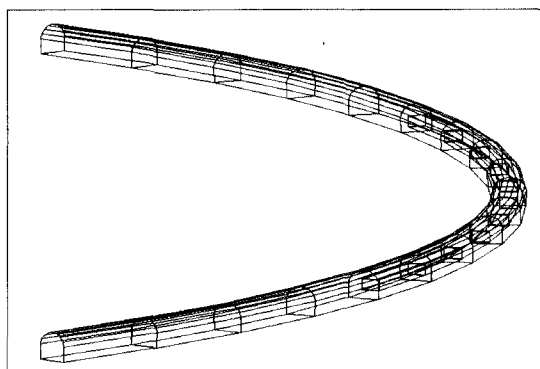


Fig. 3(a) Modeling of curved track

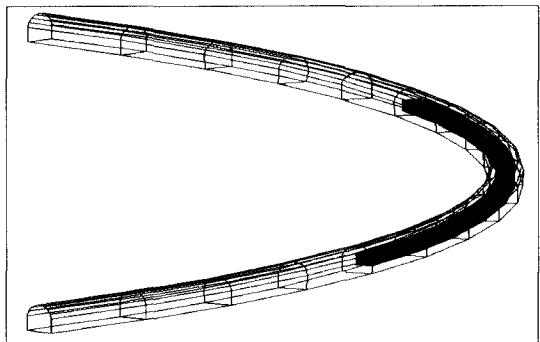


Fig. 3(b) Modeling of car-body in the curved track

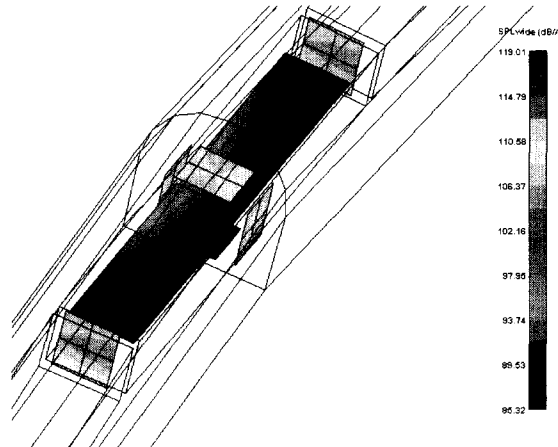


Fig. 4 Trial & Error method by computer simulation

소음원은 점음원을 사용하였으며 위치는 도시철도 차량 하나의 중앙 아래에 1개씩 총 10개를 위치 시켰다. 소음원의 power level은 지하철 내 사람의 귀 높이에서 92 dB이 되도록 시뮬레이션을 통한 Trial & Error 방법으로 역추산 하여 사용하였다. 또한 역추산 시 실측한 소음원의 octave band별 특성을 입력하여 원래 소음원의 특성이 그대로 구현되도록 하였다. Fig. 4는 역추산 과정에서 도시철도 차량 하부 및 차량내부의 예측 음압이 실측결과와 가장 유사한 경우이다.

Fig. 4의 결과에 따른 최종적인 소음원의 역추산 Power level는 Table 1 및 Fig. 5와 같다.

Table 1 Simulated sound power level of curving-noise(octave band)

Frequency (Hz)	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Power level(dB)	88	97	110	123	121	115	102	91

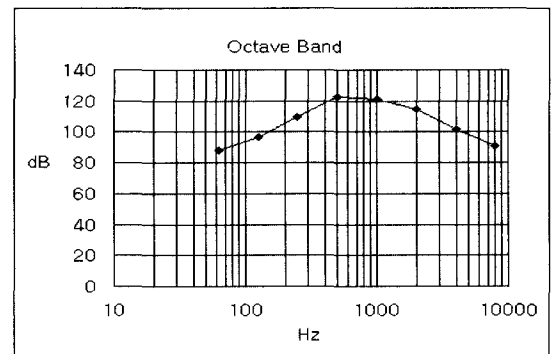


Fig. 5 Simulated sound power level of curving-noise (octave band)

도시철도 구간 내 벽의 재질은 콘크리트이며 도시철도 차량 각 부분의 재질 및 흡음률 데이터는 기존 연구자료의 실측치<sup>(6,7)</sup>를 사용하였다.

흡음재 처리를 한 장소 및 면적은 도상중앙에 1.5 m×260 m, 도상 양옆으로는 0.75 m×260 m 두 개, 벽면에는 1.5 m(or 2.0 m)×260 m 두 개를 설치하였고 터널 내 위치는 Fig. 6과 같다.

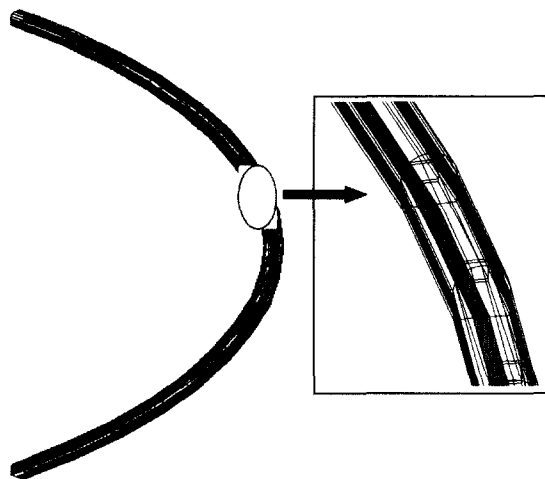


Fig. 6 Absorbing material treatment location

다음은 흡음처리시 사용한 흡음재의 실측 흡음률 데이터 및 재질이다. 약 10종의 흡음재로부터 환경성, 유지 관리성, 시공의 용이성, 비용 등을 고려하여 대표적인 세 가지 재료를 선택하였다. 선택된 세 가지

Table 2 Absorption coefficients of absorption materials

Frequency (Hz)	Absorption materials		
	Material ① (Cement + fiber -Track bed)	Material ② (Light foam concrete -Track bed)	Material ③ (Polyester + fiber -Wall)
63	0.157	0.264	0.224
125	0.157	0.264	0.224
250	0.301	0.434	0.616
500	0.649	0.625	0.975
1000	0.577	0.815	0.880
2000	0.395	0.844	0.841
4000	0.313	0.876	0.722
8000	0.313	0.876	0.722

재료의 흡음률 및 재질은 Table 2와 같다. 선택된 세 가지 재료를 바탕으로 하여 시공위치 및 시공면적 등을 변화시켜 가면서 그에 따른 소음저감도를 시뮬레이션 하였다.

#### 4. 실측 방법

도시철도에서 발생하는 소음을 측정하는 방법은 크게 2단계로 수행되었다. 첫 번째 단계는 도시철도에서 발생하는 소음을 현장에서 녹음하였고 두 번째 단계는 녹음된 자료를 실험실에서 재생하여 분석하는 단계이다.

도시철도의 소음 측정시 조건은 다음과 같다

- (1) 열차 자동운전(도시철도 곡선부 평균속도 40 km/h) 및 공차 상태
- (2) 인버터, 에어컨 line flow fan 등 모든장치가동
- (3) 배기팬 및 실내방송 OFF

먼저 첫 번째 단계(현장녹음)에서는 마이크로폰 (B&K type 4935) 4개를 각각 차량하부, 실내 승차 문측(높이 1.8m), 실내 큰 창측(높이 1.8 m), 실내 차량연결 통로측(높이 1.8 m)에 설치하고 Signal conditioner (B&K NEXUS type 2693)로 신호를 증폭하여 DAT recorder (SONY PC208Ax)에 녹음하였다.

두 번째 단계(실험실 분석)는 현장에서 녹음한 Data를 DAT recorder (SONY PC208Ax)를 통하여

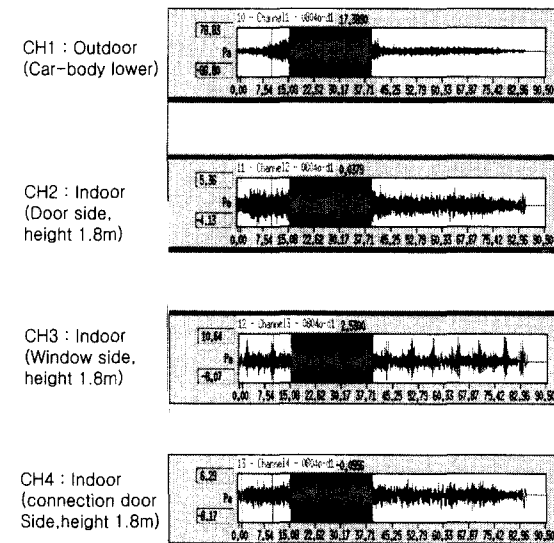


Fig. 7 4 channel time-series of curving noise

재생한후 Frontend(LMS SCADAS III)를 통하여 PC(LMS CADA-X)에서 작업하였다. 녹음해서 분석한 도시철도 소음의 4개 채널 Time-series는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 각 그래프의 세로축은 Pressure(Pa)이며 가로축은 시간이다. 이것을 이용하여 최종적으로 도시철도에서 발생하는 소음 Data를 얻었다. Fig. 7의 각 Time-series data에서 검은색 블록으로 표시되어 있는 부분이 스컬 및 하울소음이 발생하는 구간을 의미한다.

### 5. 시뮬레이션 결과와 실측결과의 비교 검토

Fig. 8에서 보듯이 실측결과, 직선구간과 곡선구간에서의 소음은 주파수 성분에서 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 도시철도 차량이 곡선구간에서는 1000 Hz 부근에서 직선구간보다 큰 소음을 발생한다.

차량이 곡선구간으로 진입하면서 1000 Hz 부근의 소음을 증가시키는데 일반적인 squeal noise의 주성분이 1000 Hz 이상의 주파수로 구성되는 것에 비하여 낮은 주파수 대역이 주성분을 이루는 것을 Fig. 8을 통하여 알 수 있으며 하울소음(howl-noise)으로 분류할 수도 있다. 그러므로 도시철도 곡선구간에서 발생하는 소음을 제어하기 위해서는 500~1000 Hz의 음의 저감이 중요하다. 3절에서 설명한 시뮬레이션 방법에 따라 흡음재를 도시철도 곡선구간에 여러 가지

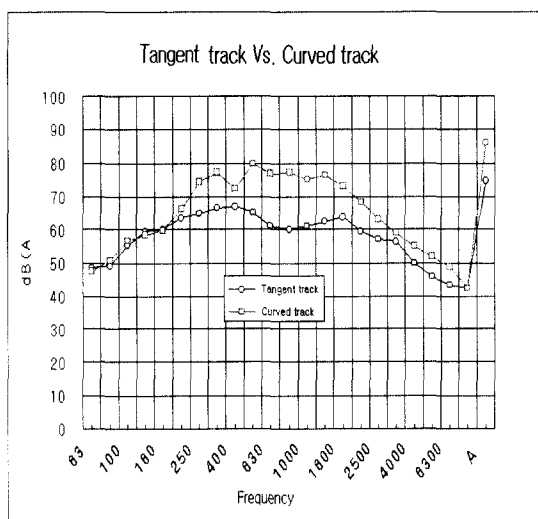


Fig. 8 Measured sound pressure levels (dBA) before treatment (inside car-body)

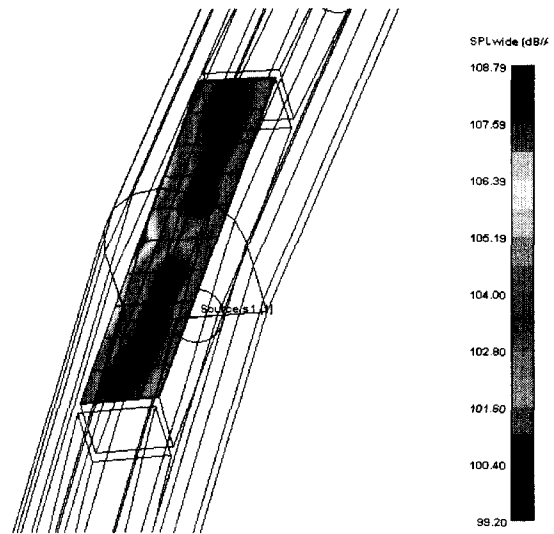


Fig. 9(a) Simulation result of outside the car body

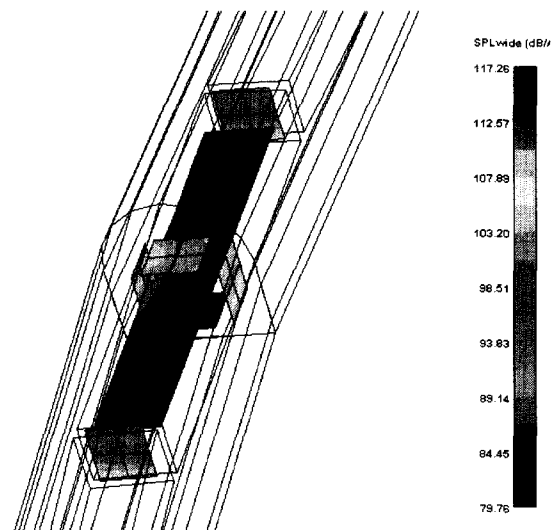


Fig. 9(b) Simulation result of inside the car body

방법으로 설치해가며 시뮬레이션 하였다. 해석한 여러 가지 모델중 대표적인 경우의 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9(a)는 도시철도 곡선구간에서 도상과 벽면에 흡음처리를 하고, 도시철도 차량 상부의 음압레벨의 감소를 해석한 결과이다. Fig. 9(b)는 도상과 벽면에 흡음처리를 하고 도시철도 차량 실내에서의 음압레벨의 감소를 나타내는 결과이다. 소음원에서 큰 소음도를 나타내는 주파수 영역이 500 Hz 부근이었으므로 SPL(500 Hz)와 SPL (overall)의 관점에서 살펴보았다. 흡음재 처리 위치와 재료에 따른 시뮬레이션 결

Table 3 Simulated noise reduction level

Mounting location	Kinds of absorption material and mounting width(m)	Noise reduction dB 500 Hz	Noise reduction dB Overall
Track bed center (Material ①)	Material ① (1.5)	1.5~1.9	1.5~1.8
Track bed center & sides (Material ①)	Material ① (3.0)	1.9~2.7	1.8~3.1
Track bed center (Material ①) + Wall (Material ② or Material ③)	Material ① (1.5) + Material ② (1.5)	3.4~4.9	3.3~4.8
	Material ① (1.5) + Material ③ (1.5)	4.6~8.5	4.3~7.5 (Indoor carbody 5.0~7.7)
	Material ① (1.5) + Material ② (2.0)	5.5~6.0	5.5~5.9
	Material ① (1.5) + Material ③ (2.0)	10.2~12.0	9.2~10.1 (Indoor carbody 5.9~10.0)
Track bed center & sides (Material ①) + wall (Material ② or Material ③)	Material ① (3.0) + Material ② (1.5)	3.7~6.2	3.6~6.0
	Material ① (3.0) + Material ③ (1.5)	5.0~10.6	4.6~9.2
	Material ① (3.0) + Material ② (2.0)	6.0~7.1	6.0~6.9
	Material ① (3.0) + Material ③ (2.0)	11.7~13.4	10.0~11.6

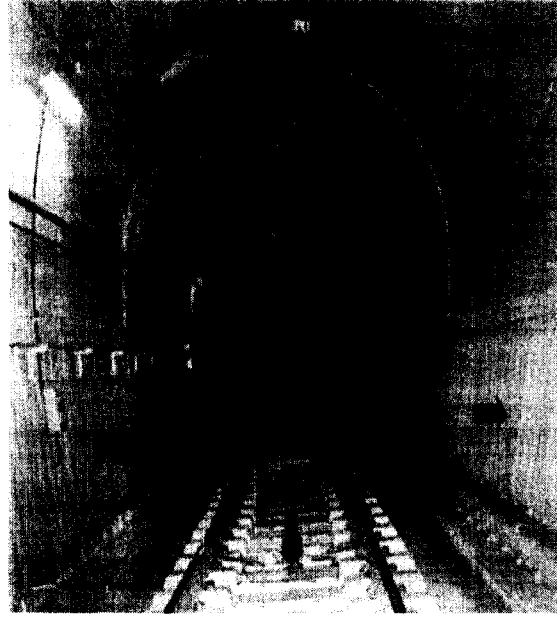


Fig. 10 Mounted absorption material aspect in the curved track

과는 Table 3과 같다. 도시철도 곡선구간 흡음처리 시뮬레이션 결과를 나타내는 Table 3에서 보듯이 흡음 효과는 흡음처리 면적이 넓어지고 흡음률이 높은 재료일수록 소음 감소 효과가 크고 특히 500 Hz에서의 흡음률이 지배적인 영향을 끼쳤다. 위의 결과를 참고하여 흡음 시공을 한다면 흡음재 ②를 도상전체에 그리고 흡음재 ③을 벽면에 2 m처리하면 가장 큰 효과를 나타낼 수 있을 것으로 예상되었으나 실제 시공은 경제성, 효율성, 및 시공성을 고려하여 흡음재 ①을 도상중앙에 1.35 m, 그리고 벽면에는 흡음재 ③을 1.7~1.8 m 설치하였다. 시공한 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 화살표로 표시된 부분이 흡음재이다.

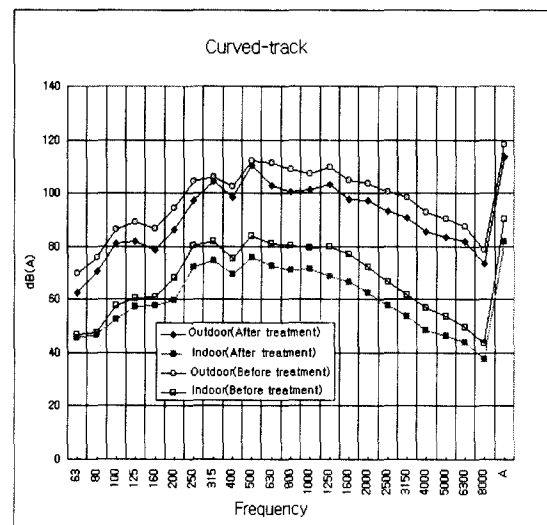


Fig. 11 Comparisons of measured sound pressure levels before and after treatment

흡음처리가 완공된 후 4절에서 명시한 실측방법에 따라 다시 한번 실측하여 흡음 처리 시공전의 소음도와 비교하여 보았다. 실측을 통한 실외(도시철도 차량 하부) 및 실내의 음압레벨 저감은 Fig. 11과 같다. 시뮬레이션은 도상의 경우 1.5 m와 3.0 m, 벽체의 경우 1.5 m와 2.0 m를 수행하였지만 실제 시공은 도상 1.35 m, 벽체 1.7~1.8 m로 시공되었으므로 이와

위치 및 면적이 가장 유사한 경우와 비교를 하면 Table 4와 같다.

Table 4에서 보는 것처럼 도시철도 차량 실내에서의 실측 소음의 저감도는 시뮬레이션 결과와 상당히 유사함을 확인할 수 있었다.

**Table 4** Comparisons of measured and simulated noise reduction levels

	Kinds of absorption materials, mounting location and mounting width(m)	Noise reduction -Overall dB(A)
Simulation result	Material ①, Track bed center (1.5) + Material ③, wall (1.5)	4.3~7.5 (Outdoor, upper car body) 5.0~7.7 (indoor car body)
	Material ①, Track bed center (1.5) + material ③, wall (2.0)	9.2~10.1 (Outdoor, upper car body) 5.9~10.0 (Indoor car body)
Measured result	Material ①, Track bed center (1.35) + Material ③, wall (1.7~1.8)	4.8(Outdoor, lower car body) 8.3(Indoor car body)

### 6. 결 론

지하철 곡선부에서 발생하는 소음을 저감하기 위해서 터널 내벽에 흡음처리를 할 경우, 흡음처리 면적 및 위치에 따라 다소 차이가 있지만, 시뮬레이션 결과 약 5~10 dB의 소음저감효과가 있을 것으로 예측

되었다. 또한 실제로 시뮬레이션 방법과 동일하게 시공하여 소음 저감도를 실측한 결과 소음저감도는 차량실내에서 약 8 dB을 나타내었다. 그러므로 본 연구에서 사용한 기하음향학에 바탕을 둔 ray tracing technique은 지하철 곡선부 소음저감량을 예측하는 방법으로 사용할만하다고 판단되며 모델링과 해석에 시간이 많이 걸리는 FEM/BEM방법보다 효율적이라 판단된다. 본 연구는 앞으로의 도시철도 곡선부의 소음저감 대책의 수립에 있어서 좋은 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 1999년도 서울시립대학교 교내 학술 연구 조성비(시정개발 연구)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) James T. Nelson, 1997, Wheel Rail Noise Control Manual, National Academy Press.
- (2) Irwin, J. D., Graf, E. R., 1979, Industrial Noise and Vibration Control, Prentice Hall.
- (3) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, 1980, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons.
- (4) Maekawa, Z., Lord, P., 1994, Environmental And Architectural Acoustics, E & Fn Spon.
- (5) LMS International, 1998, Raynoise Rev 3.0 User's Manual, LMS.
- (6) 현대정공 철차기술 연구소, 1998, "서울시 6호선 전차 소음 저감대책 종합보고서", 현대정공(주)
- (7) 이동걸, 1998, "SMG 7&8호선 전차 소음저감을 위한 최종 보고서", 한진중공업.