

기하음향 기법을 적용한 한국형 고속철도 실내소음 저감 방안

Reducing the Interior Noise of the Korean High-speed Train Using Geometric Acoustic Method

김 관 주* · 박 진 규*
Kwanju Kim and Jinkyu Park

(2001년 12월 8일 접수 : 2002년 5월 15일 심사완료)

Key Words : Interior Noise Prediction(실내소음예측), Korean High-speed Train(KHST : 한국형 고속철도), Geometrical Acoustics(기하음향학), Contribution Analysis(기여도해석), Sensitivity Analysis(민감도 해석)

ABSTRACT

The interior sound pressure level of the Korean high-speed train(KHST) is predicted by geometrical acoustic method. For the purpose of assuring the prediction of interior noise of KHST by the geometrical acoustic scheme, calculated sound level values of the Korean train express(KTX) by identical geometrical method are compared with measured values of KTX prototype vehicle by experiment. Contribution of individual sound source of KHST vehicle into the interior response positions is calculated and sound sources are classified in influential order. Hence, it is reasonable approach to reduce sound power of most contributing noise source first. Sensitivity of the interior response position's sound pressure level(SPL) with respect to train wall sections' transmission loss are carried on and acoustically sensitive spot is identified, for example window area for passenger cabin case. Those contribution and sensitivity analysis results are suggested to design quieter train efficiently.

1. 서 론

본 연구는 현재 개발중인 한국형 고속철도(KHST)가 300 km/hr로 주행하는 경우를 예상하여 기하음향 기법을 이용하여 KHST를 구성하고 있는 동력궤차, 객차에 대해서 실내소음 크기를 예측하였다. 기하음향 기법에 의한 철도차량의 실내소음예측 결과의 신빙성을 확인하기 위해서, Korean Train Express (KTX, 한국형 TGV) 시제차에 대한 주행시의 실내소음 측정실험을 통한 결과와 기하음향기법에 의한 예측 결

과를 비교, 검증하였다. KHST 차량의 실내 소음 저감에 관련한 방안을 효과적으로 도출하기 위해서 본 논문에서는 실내 소음에 영향을 주는 주요 소음원들의 기여도를 정량적으로 해석하여, 영향이 지대한 소음원을 규명하였다. 또한 차체 벽면의 투과손실값변화에 대한 실내소음의 민감도를 계산하여 소음관점에서 민감한 벽면을 찾아내어, 소음관련 설계지원의 기초 자료를 마련하였다.

2. KHST의 실내음압 해석 개요

2.1 KHST의 단계별 실내소음 예측

일반적으로 소음·진동 문제는 소음원, 전달계, 반응계의 단계별로 풀게 된다. 본 논문에서 고려한 소음원은 공력기인 소음원, 차륜-레일 접촉기인 전동 소음원, 그리고 동력부품 기계기인 발생 음원 등이다.

† 책임저자, 정회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr
Tel : (02)336-1495, Fax : (02) 320-1113

* 홍익대학교 기계공학과 석사과정

공력소음의 경우에는 김정태, 전형욱⁽¹⁾의 결과와 이우식, 박철희⁽²⁾에 따른 TGV-A의 외부소음 분포에 따른 공력소음의 외부영향을 고려하여 본 해석에 적용하였고, 구름 소음은 김관주, 양윤석⁽³⁾의 결과를 참고하였다. 동력부품 기계기인 발생음원 음향파위는 Bombardier 보고서⁽⁴⁾와 Motor Block 및 에어컨에 대한 Intensity 측정에 의한 실험 데이터를 적용시켰다.

전달계에서 필요한 각 벽면에서의 투과손실의 자료는 김석현 등⁽⁵⁾의 연구결과를 인용하였으며, 반응계에서의 실내음압 예측은 기하음향기법을 이용하여, 각 소음원에 의한 실내에 대한 공기 전달음을 계산하였다.

2.2 소음원의 기여도 해석과 투과손실의 민감도 해석

고속철도의 실내소음을 감소하기 위해서는 소음원에서의 음향파위의 크기를 줄이는 방안과 전달계에서 투과손실값을 증가하는 방법을 선택할 수 있다. 어떤 소음원의 음향파위를 저감시킬 것인가를 결정하기 위해서 실내 음압 값에 대한 소음원의 기여도 해석을 수행하였다. 구체적인 방법을 설명하면, 모든 소음원에 의한 수음점에서 음압을 계산하고, 다음에 특정의 소음원에 의한 수음점의 음압을 계산한 후 전체 소음원과 해당 소음원의 비를 Pascal 단위로 계산하였다. 식으로는 표현해보면 다음과 같다.

$$\text{기여도} = \frac{\text{특정 소음원에 의한 수음점의 음압값}}{\text{전체 소음원에 의한 수음점의 음압값}} \quad (1)$$

전달계에서의 효과적인 소음저감방안을 마련하기 위해서는 특정 벽체의 투과손실(transmission loss, TL) 값 변화에 의한 수음점에서의 음압의 민감도를 계산하였으며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{민감도} = \frac{\partial(\text{수음점에서의 음압값})}{\partial(\text{특정벽체의 TL})} \quad (2)$$

즉, 투과손실에 민감한 벽면을 찾아내어서 효과적인 전달계의 소음 저감방안을 마련하였다

3. KHST 각 차량별 실내 음압 해석

3.1 실내공간 모델, 주요소음원, 투과손실값

(1) 모델링 및 가정

각 차량에 대한 모델링은 Hypermesh를 이용하였

다. 고려할 수 있는 해석기법은 경계요소법과 기하음향기법 등이 있다. 만약 경계요소법을 이용하는 경우, 한 파장 당 6개의 경계요소를 가정하면, 철도차량 실내공간의 크기(수 m 단위의 길이), 관심있는 주파수 대역(100~8 kHz 영역)의 경우 절점의 개수가 10¹⁰ 범위가 되어서 현실적인 계산이 불가능하게 된다. 따라서 기하음향 기법 프로그램(geometrical acoustic program)인 Raynoise를 이용하였다. 모델링과 소음원의 적용상의 가정은 다음과 같다.

- 공력 소음은 김정태, 전형욱⁽¹⁾의 결과에서 보는바와 같은 25 m 떨어진 위치에서 등가의 음압이 발생할 수 있는 크기의 음향파위를 갖는 점음원을 차량 표면에 균등히 배열하였으며, 구름 소음과 기기 소음원은 소음발생원의 크기와 소음발생원에서 응답점까지의 거리의 상대적 비교, 혹은 관심주파수 대역을 고려하여, $k \cdot a$ (음파정수 * 특정 길이) >> 1 인 원거리 음장의 가정으로 인하여 점음원으로 가정하였다.

- 음압 예측점은 객차(TT4)와 동력객차(TM5)의 경우 객실중앙과 대차상부에서 가장 가까운 좌석 2군데의 1.5 m 높이 지점에서 계산하였다.

다음 Fig. 1은 터널내 주행시의 객차(TT4)의 모델 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 바퀴와 레일의 접촉부위의 구름소음, 인버터와 에어컨 소음이 나타나 있다.

음향 해석시 적용된 대표적 기기와 구름 소음의 음향파위 값은 Table 1에 overall (dBA) 값으로 나타내었다.

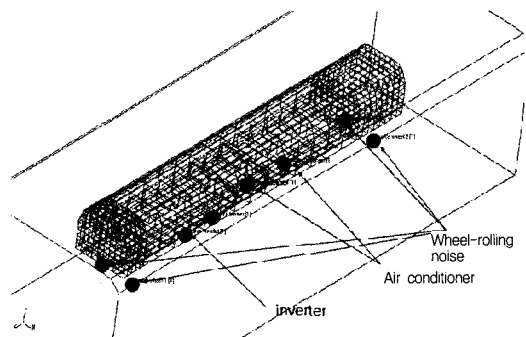


Fig. 1 Acoustic model of a passenger cabin TT4, with major sound sources.

Table 1 Noise sources for KHST

Sound source classification	Sound power level (unit:overall dBA)
Traction motor + Reduction unit	125
Motor bentilation grid	115
Gear box unit	125
Motor block	107.6
Rolling noise	124.3
Aerodynamic noise (apply for m ²)	107.2

Table 2 Transmission loss of KHST passenger vehicle (dBA)

Classification	value
Roof	STC 45
Side wall	STC 47
Side window	STC 36
Floor	STC 47

(2) 투과손실치

본 논문에서 적용한 전달계의 투과손실치는 김석현 과 박정철⁽⁵⁾의 계산 결과를 이용하였다.(Table 2 참조.) 김석현, 박정철 논문에 의하면 무한 평판에서의 투과 손실치의 계산치를 등가직방성 모델로 가정하여 계산하였고, 실험치는 ISO140에 의거한 잔향실-잔향실법으로 유한한 크기의 알루미늄 평판에 대해서 측정을 하여 서로 비교하였다. 무한 평판에 대한 계산치는 1kHz 대역이상에서는 실험치에 비하여 많이 계산되는 것으로 나타났다. 따라서 고주파수 대역에서는 실험치의 결과를 적용하여 STC(sound transmission class)⁽⁵⁾ 값을 선정하였다고 하였다.

3.2 철도 차량 실내소음 예측에 대한 기하음향학 기법의 효용성 검토

본 논문에서 이용한 Raynoise의 투과손실 프로그램의 정확성을 살펴보기 위해서 잔향실-잔향실 조건과 길지 철도차량 조건에서의 실험 결과와 기하음향기법의 프로그램 적용 결과를 비교하여 보았다.

(1) 잔향실 조건 경우

잔향실-잔향실 사이에 8 mm 철판을 위치한 경우,

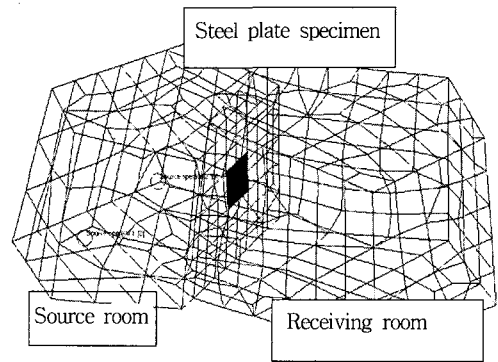


Fig. 2 Geometrical acoustic model of the reverberation-reverberation rooms.

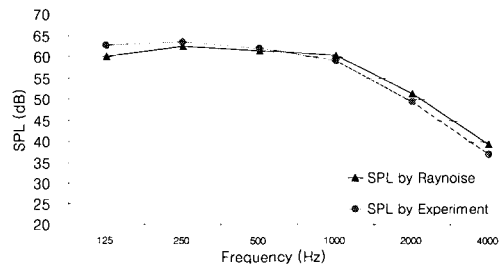


Fig. 3 Comparison of sound pressure level in receiving room by geometrical method with experiment.

철판의 투과 손실 값을 ISO140/3⁽⁷⁾에 따라 계산하였다. 동일한 투과손실값을 Raynoise 모델 데이터에 적용하여, 수음실에서의 평균 음압값을 예측하였다. Fig. 2는 실용적 음원실 180 m³, 수음실 230 m³의 표준잔향실의 모델의 모델을 나타낸다. 두 잔향실 사이에 철판이 놓여져 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에는 기하음향학으로 계산된 수음실에서의 평균음압 해석 값과 실제 수음 잔향실에서 측정된 평균 음압 값을 도시하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 최대 1~2 dB의 오차가 발생함을 알 수 있다. 그 오차 발생원인은 잔향 음장 내에서의 기하음향 기법의 적용에 의한 것으로 생각되며, 설계 단계의 철도 차량 실내음압 예측에는 무리 없이 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 실지 철도차량 조건

현재 개발 중인 KHST의 기하음향기법에 의한 실내 소음 예측치를 간접적인 방법으로 검증하기 위해서, 소음 실험이 가능한 KTX 객차의 실내 소음을 기하음향기법으로 예측하여, 그 결과를 KTX 객차의

Table 3 Comparison list of sound sources and overall TL values for KTX and KHST passenger vehicle

• <u>Sound sources</u>
KHST : refer to table 1
KTX : KHST sources + pressurized equipment
• <u>Transmission loss of floor</u>
KHST : 33 dB above bogie 42 dB at the center region
KTX : 40 dB all over the floor
• <u>Transmission loss of window</u>
KHST : 31 dB
KTX : 30 dB

실험 결과와 비교하였다. 다음 Table 3에는 KTX 객차의 소음원과 투과손실에 대하여, KHST 객차와 비교하여 정리하여 나타내었다.

Fig. 4에는 기하음향기법에 의한 KTX 객차 칸에서의 해석치와 실험치를 비교하여 나타내었다. 예측치가 실험치보다 1~2 dBA 높게 예측이 되었다. 그 주된 이유는 정확한 소음원 자료 마련의 어려움이라 생각된다.

위의 결과에 의해서, 일반적인 음장에서 기하음향 기법 적용이 무리 없이 적용할 수 있음을 알 수 있다. 동일한 그림에 KHST 객차의 실내 소음 예측치를 도시하였는데, 그 이유는 Table 3에서 보는 바와 같이 KTX 차량의 소음원과 투과손실값이 KHST와는 그리 다르지 않음으로 인해, 실내에서의 음압치는 두 차량 다 같은 크기를 가짐을 알 수 있기 때문이다. 동일 그림에서 나타낸 KHST 차량의 실내음압 예측치를 살펴보면, 투과손실값이 상대적으로 높은 객실 중앙위치에서는 설계목표치보다 낮은 값이 계산되었다. 다음절에서는 설계목표치를 상회하는 앞부분 대차(bogie)상부와 뒷부분 대차상부 위치에서의 소음의 크기를 효과적으로 줄일 수 있는 방안을 설명하겠다.

3.3 차량별 실내음압 계산 및 기여도 해석, 민감도 해석 결과

(1) 실내소음 해석 결과

기하음향기법을 이용하여 객차(TT4)와 동력객차(TM5) 실내에서의 음압 크기를 예측하였다. 예측점

은 바닥 면에서 1.5 m 높이 위치의 5점의 음압 결과값을 산술 평균 내어서 구하였다. 고려한 주행조건은 개활지 주행, 터널내 주행이다.

터널 내 주행하는 KHST 객차의 경우 실내음압 예측치를 동일한 조건의 KTX 객차와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 터널 내 주행 시 실내 음압은 개활지 주행보다 5~6 dBA 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 소음원을 점음원으로 가정하는 경우, 대칭면이 두 개 존재하는 경우에 해당된다.

Fig. 6에 나타낸 동력객차(TM5) 경우는 개활지 주행시 객실중앙, 대차상부 모두 실내소음 목표치를 초과하며, 터널내 주행시에는 대차상부 위치에서 실내소음 목표치를 초과하게 된다.

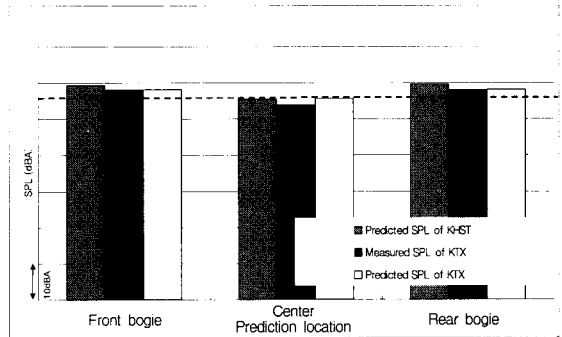


Fig. 4 Comparison of prediction and measurement results of the KTX passenger vehicle running on open field. Prediction result of KHST passenger vehicle is also included. (note : --- interior noise target value of KHST)

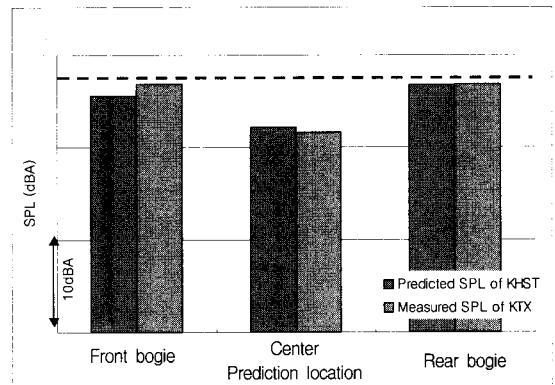


Fig. 5 Interior SPL values of TT4 and comparing with experimental data of KTX of tunnel-running condition. (--- interior SPL target value)

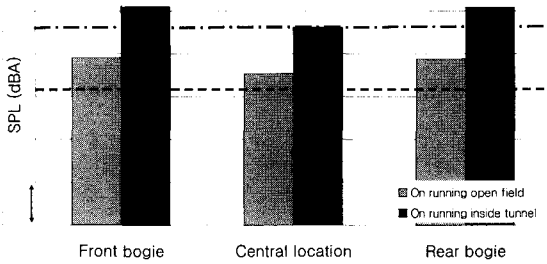


Fig. 6 Indoor SPL values of TM5 running on open field, and inside tunnel(--- interior noise target value on running open field)(----- interior noise target value on running inside tunnel)

(2) 기여도 해석 결과

예측한 실내음압이 설계 목표치를 초과하는 KHST 차량의 경우에 대해서 2.2 절에서 제시한 소음원의 기여도 해석과 투과손실값 변화에 따른 실내음압의 민감도 해석을 수행하였다.

소음원 기여도 해석에서 소음원의 종류는 공력소음, 구름소음, 주요 기기소음 등으로 구분하였으며, TT4 객차와 TM5 동력객차의 각 소음원에 의한 실내소음의 영향을 계산하여 Table 4에 표시하였다.

TT4 객차의 경우 공력소음과 구름 소음의 기여도가 대부분을 차지한다. 그 이유는 TT4 객차의 경우, 소음을 많이 발생시키는 기기부품이 장착되어 있지 않기 때문이다. 공력소음이나 구름 소음의 경우, 기기 소음에 비교하여 상대적으로 소음원 저감에는 어려움이 있다. 따라서, TT4 객차의 경우는 벽면의 투과손실을 증가시키는 방안이 실내소음을 저감할 수 있는 효과적인 방법이다.

TM5 동력객차 경우는 공력소음의 영향이 가장 크지만 공력소음원보다는 기기소음인 감속기(reduction unit)와 gear box의 소음원의 크기를 줄임이 수월할 것으로 생각된다. reduction unit과 gear box의 소음원의 음향 파워 크기를 9 dBA 줄임으로서 실내소음 목표치를 만족할 수 있다.

(3) 민감도 해석 결과

TT4 객차와 TM5 동력객차의 음향공간 경계면의 투과손실값을 증가시키면서 실내소음의 감소량을 기하음향기법을 이용하여 계산하여, Table 5에 도시하였다.

TT4 객차의 경우, 측면 창민감도 값이 제일 큼

Table 4 Contribution of sound source at central location for TT4 and TM5

Sound source	Passenger car (TT4)	Motorized car (TM5)
Aerodynamic noise	71 %	40 %
Rolling noise	23 %	21 %
Air conditioner	2 %	1 %
Traction motor	N/A	4 %
Reduction unit	N/A	17 %
Gear box	N/A	17 %
etc.	4 %	1 %

Table 5 Sensitivity results of interior SPL values of TT4 and TM5 with changing TL values of acoustic boundaries [unit : dBA/dB]

classification	Passenger car (TT4)	Motorizes car (TM5)
Roof	0.03	0.3
Side wall	0.15	0.1
Floor	0.05	0.27
Partition	0	0
Side window	0.65	0.5

을 알 수 있는데, 그 이유는 측면 창문의 투과손실값이 벽면의 투과손실값보다 11 dBA 작기 때문에 측면 창을 통한 외부 소음의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 또한 창문의 투과손실값을 증가시켜서 실내 소음을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. TM5 동력객차도 TT4 객차의 경우와 유사한 결과를 보여주고 있으며, 이 경우 천정을 통한 공력소음의 유입과 바닥 면을 통한 reduction unit, gear box 등의 대차의 기기소음에 영향이 큼을 알 수 있다.

4. 결 론

KHST의 동력객차, 객차를 대상으로 승객의 귀 위치에서의 실내소음 해석을 기하음향 기법을 이용하여 해석하였다. 해석 음압 결과가 목표치를 상회하는 경우에는 소음원 기여도해석과 경계 면의 투과손실에 대한 실내음압에의 민감도 해석을 수행하여 체계적인 실내소음 저감 방안을 마련하였다. 결과를 요약하면

다음과 같다.

(1) 철도차량 실내음압 예측을 위하여 적용한 기하음향 기법의 정확성을 검증하기 위해서 잔향실-잔향실 법의 실험, 시제작 차량이 있는 KTX 객차의 실내음압의 측정 결과 등을 기하음향기법의 결과와 각각 비교하였다. 잔향실-잔향실법의 경우 수음실에서의 평균 음압 값이 전 옥타브 대역에서 1~2 dBA 오차 내로 예측되었다. KTX 차량의 경우도 1 dBA 내로 예측되었다.

(2) 객차의 경우 기여도 해석 결과 공력 소음이 71%로 제일 영향이 큰 소음원임을 알 수 있었으며, 이 소음원의 음향 파워 저감은 현실적으로 힘들기에, 민감도 해석 결과 측면 창외 투과손실값을 증가시키는 안이 효과적으로 실내소음을 저감시킬 수 있는 안임을 알 수 있다.

(3) 동력객차의 경우 공력소음원의 기여도가 40%로 제일 큰 소음원이지만, 대차하부에 위치한 소음원인 traction motor, reduction unit, gear box의 기여도도 무시할 수 없는 크기를 가지기에 이 기기의 음향 파워를 줄임과 동시에 측면창외 투과손실값을 증가시키는 것이 효과적인 소음 저감 방안임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년도 건설교통부/과학기술부/산업자

원부가 지원하는 “고속전철기술개발사업”의 일환으로 수행된 위탁연구결과의 일부이며, 도와주신 모든 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김정태, 전형욱, 1998, “철도차량의 내부소음 예측에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술발표회 논문집, pp, 241~248.
- (2) 이우식, 박철희, 1998, “고속철도 진동소음해석 및 저감 기술개발: G7 과제개요 및 연구방향”, 한국철도학회, Vol. 1, No. 1, pp. 221~232.
- (3) 김관주, 양윤석, 2000, “한국형 고속전철의 진동소음 예측에 관한 연구”, 한국소음진동공학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 445~450.
- (4) Bombardier Transportation, DWA-IFS, 1999, “Korean High Speed Train: Final Report”, Report No. Technical Library 2.99.52.
- (5) 김석현, 박정철, 김종년, 2000, “철도차량용 알루미늄 압출재의 투과손실”, 한국소음진동공학회지 Vol. 10, No. 4, pp. 662~668.
- (6) Wilson, Charles, 1989, 'Noise Control', Harper & Row, Publishers, Chap. 6.
- (7) ISO 140-3:1995(E), Acoustics - Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements.