

Speech Inteligibility 및
Speech Privacy 평가를
통한 고속열차 객실
음환경 설계기술 개발
최종보고서

2015.04

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한양대학교
산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "Speech Intelligibility 및 Speech Privacy 평가를 통한 고속열차
객실 음환경 설계기술 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 4.

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 전진용 교수

연구원 :	장형석
연구원 :	홍주영
연구원 :	임한솔
연구원 :	차용원
연구원 :	무하마드 임란
연구원 :	김재현
연구원 :	정호준
연구원 :	오성민
연구보조원 :	김성민
연구보조원 :	한재준
연구보조원 :	김남훈

보고서 요약서

과제고유번호	14PRTD-C061727-03	해 당 단 계 연구 기 간	2014.03.29 ~ 2015.03.28	단 계 구 분	3단계/3단계
연구사업명	국토교통기술연구개발사업/건설교통기술촉진연구사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	Speech Intelligibility 및 Speech Privacy 평가를 통한 고속열차 객실 음환경 설계기술 개발			
	단위과제명	Speech Intelligibility 및 Speech Privacy 평가를 통한 고속열차 객실 음환경 설계기술 개발			
연구책임자	전진용	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 12명 내부 : 12명 외부 : 명	총연구비	정부 : 438,000천원 기업 : 0원 계 : 438,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한양대학교 산학협력단/ 한양대학교 건축공학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서면수	85
본 연구의 목표는 열차 객실의 음환경 만족도를 향상시키기 위한 열차 객실 음환경 설계 가이드라인을 제시하는데 있다. 주요 연구 결과는 다음과 같다. - 성가신 소음원의 설문조사: 주변 사람소리 (31.8%), 저주파 엔진 소음(19.1%) - 정차시 객실 음환경 측정: KTX 1등석/일반석, HEMU, 호남고속철도 음장 특성 분석 - 주행시 객실 음환경 측정: 열차별 소음원 특성 비교결과 동일조건하의 레벨은 유사하나 호남고속철도의 경우 고주파대역 레벨이 상대적으로 큼 - 1:10 축소모형/컴퓨터 시뮬레이션 평가: Speech privacy 개선방향에 대한 회귀식 도출하였으며, 내장재 중 의자, 천장, 측벽 영향력 순으로 Speech privacy 개선이 가능함 - 고속열차 내부 소음의 성가심도 평가: SPL이 성가심도 변화의 가장 유의하며, 고주파 비율이 증가할 때 성가심도 증가 - Speech privacy와 소음 성가심도를 고려한 최적 물리지표: STI 0.4 이하, 신호대잡음비(SNR) - 6 dBA 이하, 배경소음: 60 ~ 63 dBA - 전체연구결과를 통합하여 음향적 만족도 개선을 위한 음환경 설계 프로그램 개발하여 음향 전문가가 아닌 모든 사용자가 편리하고 효과적으로 사용할 수 있도록 개발됨					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	고속열차, 실내음향, 음향 만족도, 스피치 프라이버시, 소음성가심			
	영 어	High-speed train, Room acoustics, Acoustic comfort, Speech Privacy, Noise annoyance			

요 약 문

I. 제목

- Speech Intelligibility 및 Speech Privacy 평가를 통한 고속열차 객실 음환경 설계기술 개발

II. 연구개발과제 개요

- 열차의 고속화 추세에 따라 열차의 운행속도에 따라 증가하는 객차 내 소음도 문제는 새로운 과제로서 부각되고 있으며, 이에 대해 철도 소음 연구는 대부분 객실 소음 평가 및 제어 연구에 집중되어 있다.
- 한편, 고속열차 내 또 하나의 주요 소음원으로 좁은 공간에서 전파되는 주변 승객의 대화소리가 있으며, 철도 산업의 고급화를 이루기 위해서는 철도 소음 제어뿐만 아니라 소음 성가심도(Noise annoyance)와 Speech Privacy를 고려한 객실 최적 음환경 설계 기술 연구가 필수적이다.
- 최종목표는 고속열차 객실의 음환경 만족도를 향상시키기 위한 열차 객실 음환경 설계 가이드라인을 제시하는데 있다.
- 각각의 개선설계안과 평가 결과를 종합하여 음환경 만족도를 향상시키기 위한 고속열차 내부 설계안에 대한 등급 기준을 마련하였으며, 그에 따른 음환경 설계가이드라인을 구축한다.
- 최종 결과물인 열차 객실 음향 설계 가이드라인은 차세대 고속열차 객실 음환경 개선을 통한 승객 만족도 확보 및 국내 철도산업의 국제 경쟁력 확보 기여할 것이다.
- 적용 범위는 철도산업발전기본법 제3조 5항에서 규정하는 철도차량 중 객차에 해당하며, 좌석의 4열 배치를 기본으로 하는 광역철도나 개발철도 차량의 객차 내부설계에 적용가능하다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

- 연구수행 과정
 - 본 연구에서는 KTX 탑승객을 대상으로 설문조사를 수행하여 주변 탑승객의 대화소리(31.8%)와 열차의 저주파 엔진소음(19.1%)이 가장 성가신 소음원으로 도출되었다. 고속열차의 실내음향 특성 정량화를 위해 정차시 실내음향 측정을 수행하였으며, 주행 중 객차 실내 소음 측정 데이터를 기반으로 1:10 축소모형 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 객차 내부 의자, 천정, 측벽 소재 등의 설계요소가 객차 내 speech privacy와 speech intelligibility 변화에 미치는 영향을 정량화하였다. 또한 실제 객차에서 측정된 소음레벨 현황에 대한 열차별 비교 연구가 진행되었으며, 녹음된 열

차 소음 음원을 이용한 주관적 청감평가 실험을 진행하였다. 그 결과 객차 내부 소음의 속도별 주파수 및 음압레벨 특성을 고려한 소음 성가심도 평가가 이루어졌으며, speech privacy와 소음 성가심도를 동시에 고려한 최적 음환경 설계 가이드라인을 제시하였다.

- 연구수행 결과

- 성가신 소음원의 설문조사: 주변 사람소리 (31.8%), 저주파 엔진 소음(19.1%)
- 정차시 객실 음환경 측정: KTX 1등석/일반석, HEMU, 호남고속철도 음장 특성 분석
- 주행시 객실 음환경 측정: 열차별 소음원 특성 비교결과 동일조건하의 레벨은 유사하나 호남고속철도의 경우 고주파대역 레벨이 상대적으로 큼
- 1:10 축소모형/컴퓨터 시뮬레이션 평가: Speech privacy 개선방향에 대한 회귀식 도출하였으며, 내장재 중 의자, 천장, 측벽 영향력 순으로 Speech privacy 개선이 가능함
- 고속열차 내부 소음의 성가심도 평가: SPL이 성가심도 변화의 가장 유의하며, 고주파 비율이 증가할 때 성가심도 증가
- Speech privacy와 소음 성가심도를 고려한 최적 물리지표: STI 0.4 이하, 신호대잡음비(SNR) -6 dBA 이하, 배경소음: 60 ~ 63 dBA
- 전체연구결과를 통합하여 음향적 만족도 개선을 위한 음환경 설계 프로그램 개발하여 음향 전문가가 아닌 모든 사용자가 편리하고 효과적으로 사용할 수 있도록 개발됨

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

- 특허출원

- 발명의 명칭: 고속열차 객실의 스피치 프라이버시 평가를 통한 음환경 설계 프로그램 개발 방법 및 장치 (출원번호: 10-2015-0059673)

- 국내논문 2편, SCI 논문 2편 게재

V. 연구목표 달성 및 효과

- 고속열차 객실의 음환경 만족도 향상을 위한 평가 방법론을 정립하였으며, 평가 결과를 바탕으로 음환경 설계 가이드라인을 제시하였다. 평가 결과 데이터 기반의 음환경 설계 프로그램을 제작하여 철도 제작사에 기술이전할 계획이며, 이는 향후 개발 열차에 활용되어 열차의 고급화 및 타 개발 차별화 방안으로 제시가능하다.

VI. 연구성과 활용계획

- 최종 성과물인 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램에 관하여 특허가 가출원되었고, 판매계획으로 추후 현대로템과 기술이전계약 추진을 계획하고 있다. 또한 프로그램 기술이전계약 이후 현대 로템 측과 추가 연구 및 타 연구와의 연계 또한 가능할 것으로 사료된다.

S U M M A R Y

I. Subject

- Development of design guidelines for acoustic comfort in passenger cars in high speed trains by evaluation of speech intelligibility and Speech Privacy

II. Summary of research and development

- As high-speed trains become faster, it is necessary to consider the noise level in the passenger car. Many researchers concentrated on the method for noise control and subjective evaluation of noise in the passenger car.
- Meanwhile, Noise from the passengers, such as speech sounds, cellular phone calls, sound of children and etc, is one of main noise source in the passenger car. In order to gentrify the high-speed train, it is necessary to perform the research in terms of optimizing passenger car design with consideration of both noise annoyance and speech privacy.
- Final goal of this research is proposing design guideline for acoustic environment of passenger car to increase the satisfaction of acoustical comfort in the passenger car.
- Aggregating the improvement designs and evaluation results, rank criteria for high-speed train passenger car is proposed to improve the satisfaction of acoustical comfort and design guideline for acoustic environment of passenger car is constructed.
- An end product, design guideline for acoustic environment of passenger car, is expected to contribute securing national competitiveness in railway industry and improving customer satisfaction.
- A range of application conform to Article 3 paragraph 5 and passenger car of metrorail or developed railroad car that of seats are based on a quarter column.

III. Execution information and results about research and development

- Process of research
 - In order to evaluate acoustic comfort in passenger cars, questionnaire surveys were conducted. The results showed that conversations from other passengers (31.8%) and low-frequency engine noise (19.1%) are one of the main noise sources affecting the annoyance in the passenger cars of a high-speed train. In order to

quantify the room acoustical characteristics of the passenger cars of high-speed train, the measurements of a stopped high-speed train was conducted. Based on the measured background noise level in the running train, the 1:10 scale model measurements and computer simulation was performed. With these measurements, the effect of design elements such as chairs, ceiling, side wall and front-back wall on speech privacy and speech intelligibility was derived. In addition, the noise level measured in the running train was compared according to the type of high-speed train in Korea. Using the recorded running noise of high-speed train, the auditory test was performed considering the frequency characteristics of noise level according to the speed. Finally, design guideline for acoustic environment of passenger car was proposed considering both noise annoyance and speech privacy.

- Research achievement result

- Survey to investigate the main noise source: Conversations from other passengers (31.8%), Low-frequency engine noise (19.1%)
- Measurements in a stopped high-speed train: Investigation of acoustical environment in KTX (First class/ General admission seat), HEMU, Honam high-speed train
- Measurements in a running high-speed train: In the same environments, the noise level is similar when we compared three types of high-speed train. In Honam high-speed train, noise level in high-frequency is higher relatively.
- Measurements in a 1:10 scale model and computer simulation: Regression model was constructed for improving the speech privacy. To improve the speech privacy, chairs, ceiling and side walls can be modified.
- Noise annoyance evaluation of passenger cars: SPL has the strongest effects on noise annoyance and the proportion of high-frequency components has positive relationship with noise annoyance
- Optimized object parameter considering both speech privacy and noise annoyance: STI below 0.4, SNR (Signal to Noise Ratio) below -6 dB, background noise level: 60 ~ 63 dBA
- Aggregating the improvement designs and evaluation results, rank criteria for high-speed train passenger car is proposed to improve the satisfaction of acoustical comfort and design guideline for acoustic environment of passenger car is constructed.

IV. Finally research results and application actual result

- Patent application
 - Title of invention:
Method and apparatus for acoustical environment designing program using speech privacy evaluation of train passenger cabin
(Application number: 10-2015-0059673)
- Published articles: Total 4 (KCI 2, SCI 2)

V. Research objective achievement and effect

- Methodology to evaluated the passenger car of high-speed train to improve the satisfaction with regard to acoustical comfort was established and design guideline for acoustic environment of passenger car was proposed in this research. The software program to support the acoustical design of passenger car was developed and it will be transferred to the company as technological skills and this software can be used in high-speed train design to provide a differentiated method compared with other design skills in further.

VI. Research achievements application plan

- Final achievements, acoustical environment designing program of train passenger cabin, was already applied for patent and technology transfer to Hyundai-rotem is planned. Moreover, further research and connecting with other research field seem to be possible with Hyundai-rotem after technology transfer.

C O N T E N T S

CHAPTER 1 Overview of research and development projects	12
Section1 The purpose and need for research and development	12
1. The background of research	12
2. The purpose of research	12
Section2 The definition and range of research and development	13
1. Application range	13
2. Process of research and development	13
3. Domestic and international developments in technology related fields	14
3.1 Research trend of speech privacy	14
3.2 Research trend of driving noise	14
4. Results of research and development in the relevant field position occupied	15
5. Definition of terms	16
CHAPTER 2 Details and results of research and development	17
Section1 Summary of research and development	17
Section2 Main contents of research and development	20
1. Research of noise characteristics in high-speed train	20
1.1 Characteristics of interior noise based on driving condition	20
1.2 Interior noise reduction based on transition of internal materials	27
2. Evaluation of improvement of speech privacy	33
2.1 Acoustical environment evaluation of Honam high-speed train in passenger cars	33
2.2 Simulation of scale-model evaluation	41
2.3 Design guideline for Speech privacy	52
3. Design guideline program for improvement of acoustic satisfaction	64
4. Discussion and consultation with railway manufacturer	72
CHAPTER 3 Final results of research and application performance	74
CHAPTER 4 Research achievements and effects	75
CHAPTER 5 Utilization of research results, and further research needs	73

목 차

제 1 장 연구개발과제 개요	12
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성	12
1. 연구개발 배경	12
2. 연구개발 목표	12
제 2 절 연구개발의 정의 및 범위	13
1. 적용 범위	13
2. 연구개발 프로세스	13
3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황	14
3.1 Speech privacy 연구동향	14
3.2 주행소음 연구동향	14
4. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	15
5. 용어의 정의	16
제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과	17
제 1 절 연구개발결과 요약	17
제 2 절 연구개발 주요내용	20
1. 고속열차 소음 특성 연구	20
1.1 주행조건에 따른 실내소음 특성	20
1.2 내장재료 변화에 따른 실내소음 저감량	27
2, Speech privacy 개선 평가	33
2.1 호남고속철도 객실 음환경 평가	33
2.2 시뮬레이션과 축소모형 평가	41
2.3 Speech privacy 설계 가이드라인	52
3. 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램	64
4. 철도제작사 자문 및 협의	72
제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적	74
제 4 장 연구목표 달성 및 효과	75
제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	79

제 1장 연구개발과제 개요

제 1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발 배경

수송기관의 고속화와 안정성 등이 교통 기술 경쟁력 향상의 중요한 요소로 인식됨에 따라 지속가능한 교통수단으로 고속철도의 중요성이 강조되고 있다. 국내 고속열차는 1999년 최초 도입된 이래 국내 주요 대중교통 수단 중 하나로 자리매김 하였다. 일본, 프랑스, 독일 등의 고속열차 선진국에서는 현재 400~500 km/h 이상의 속도로 주행할 수 있는 열차개발이 활발하게 진행되고 있으며, 국내 또한 최대속도 430 km/h 열차를 개발하여 경부 고속철도 구간에서 시험주행을 진행하고 있다. 이러한 열차의 고속화 추세에 따라 열차의 운행속도에 따라 증가하는 객차 내 소음도 문제는 새로운 과제로서 부각되고 있다. 이에 대해 철도 소음 연구는 대부분 객실 소음 평가 및 제어 연구에 집중되어 있다.

한편, 고속열차 내 또 하나의 주요 소음원으로 좁은 공간에서 전파되는 주변 승객의 대화소리가 있으며, 이에 대한 민원은 꾸준히 제기되고 있지만, 설계적인 고려는 이루어지지 않고 단순히 승객에게 주의를 주는 정도의 조치가 있는 상황이다. 이와 같은 고속철도 객실내 각종 소음은 내부 환경의 질 및 승차감을 저하시키는 결정적인 요소이다. 따라서 철도 산업의 고급화를 이루기 위해서는 철도 소음 제어뿐만 아니라 소음 성가심도(Noise annoyance)와 Speech Privacy를 고려한 객실 최적 음환경 설계 기술 연구가 필수적이다.

2. 연구개발 목표

본 연구의 최종목표는 고속열차 객실의 음환경 만족도를 향상시키기 위한 열차 객실 음환경 설계 가이드라인을 제시하는데 있다. 현장 조사와 음환경 측정을 통해 현재 고속열차의 상황과 문제점을 도출하고, 실내음향지표, Speech Privacy 목표를 달성하기 위한 설계 요소별 영향을 축소모형, 컴퓨터 시뮬레이션, 주관적 청감평가 방법론을 통하여 검토하여 실질적인 열차 객실 개선 설계안을 제시한다.

각각의 개선설계안과 평가 결과를 종합하여 음환경 만족도를 향상시키기 위한 고속열차 내부 설계안에 대한 등급 기준을 마련하였으며, 그에 따른 음환경 설계가이드라인을 구축한다. 최종 결과물인 열차 객실 음향 설계 가이드라인은 차세대 고속열차 객실 음환경 개선을 통한 승객 만족도 확보 및 국내 철도산업의 국제 경쟁력 확보 기여할 것이다.

제 2절 연구개발의 정의 및 범위

1. 적용 범위

본 연구는 국내에서 운행 또는 시험운행 중인 고속철도차량(KTX, KTX-산천, HEMU, 호남고속철도)을 평가 대상으로 설정하였으며, 이 측정 데이터를 기반으로 연구 결과를 도출하였다. 적용 범위는 철도산업발전기본법 제3조 5항에서 규정하는 철도차량 중 객차에 해당하며, 좌석의 4열 배치를 기본으로 하는 광역철도나 개발철도 차량의 객차 내부설계에 적용가능하다.

2. 연구개발 프로세스

본 연구에서는 KTX 탑승객을 대상으로 설문조사를 수행하여 주변 탑승객의 대화소리(31.8%)와 열차의 저주파 엔진소음(19.1%)이 가장 성가신 소음원으로 도출되었다. 고속열차의 실내음향 특성 정량화를 위해 정차시 실내음향 측정을 수행하였으며, 주행 중 객차 실내 소음 측정 데이터를 기반으로 1:10 축소모형 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 객차 내부 의자, 천정, 측벽 소재 등의 설계요소가 객차 내 speech privacy와 speech intelligibility 변화에 미치는 영향을 정량화하였다. 또한 실제 객차에서 측정된 소음레벨 현황에 대한 열차별 비교 연구가 진행되었으며, 녹음된 열차 소음 음원을 이용한 주관적 청감평가 실험을 진행하였다. 그 결과 객차 내부 소음의 속도별 주파수 및 음압레벨 특성을 고려한 소음 성가심도 평가가 이루어졌으며, speech privacy와 소음 성가심도를 동시에 고려한 최적 음환경 설계 가이드라인을 제시하였다.

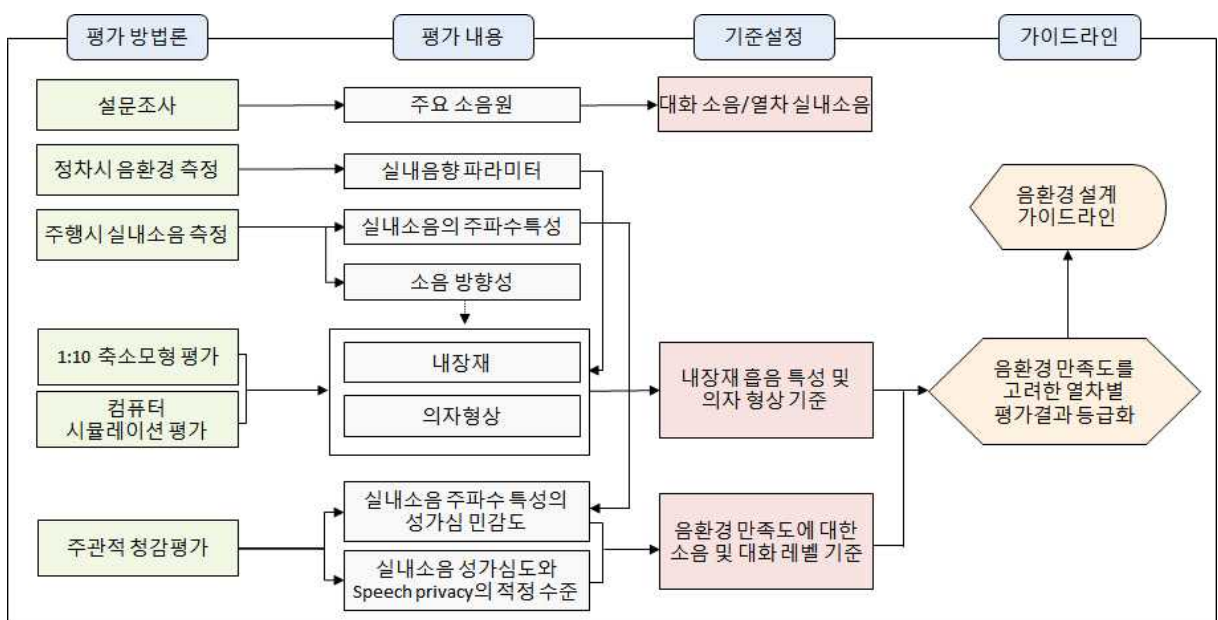


그림 1. 고속열차 음환경 설계 가이드라인 연구개발 프로세스

3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

3.1 Speech privacy 연구동향

고속열차의 고속화, 고속화, 고급화 추세에 따라 객차 내부 환경의 만족도에 대한 관심이 높아지고 있다. 2012년 코레일에 의한 열차 민원조사에 의하면 환경과 관련된 민원이 소음, 온도, 공기질 순으로 발생하고 있는 것으로 나타났다 (한국철도기술연구원, 2013).

Khan (2002)은 고속열차에서 차량의 실내소음뿐만 아니라 휴대전화 소리, 아이들 소리 등의 주변사람 소리도 승객에게 성가심을 유발하는 소음원으로 제시하였다. Kuwano 등 (2004)은 대화소리와 열차소음 간의 레벨 차이에 관한 청감평가를 통해, 열차소음 및 대화소리의 성가심을 최소화할 수 있는 열차의 적정 마스킹 레벨을 50~60 dB로 제시하였다. 이와 같이 승객의 대화 소리에 대한 청감적 반응에 관한 연구는 진행된 바 있으나 객차 내부 실내 음향 설계를 통한 speech privacy 개선에 관한 연구는 미비한 상황이다.

Speech privacy 평가 지표는 오픈플랜오피스의 음장에 대한 평가 및 설계에 활용되고 있다. Virjonen 등 (2009)은 16개 오픈플랜오피스를 조사하여 speech privacy/speech intelligibility에 있어서 새로운 지표(r_D , r_P , $D_{2,S}$, $L_{p,A,S,4\ m}$)를 제안하였으며, 이를 바탕으로 ISO 3382-3 (2012)이 제정되었다. Keranen 등 (2012)은 평가 지표를 이용한 오피스의 실내음향 평가를 통하여 마스킹 레벨, 실내 공간의 흡음력, 파티션의 높이, 음원으로부터 거리 등이 speech privacy에 영향을 미치는 것으로 나타내었다.

3.2 주행소음 연구동향

소음도는 객차 내 만족도를 판별하는 주요 요인 중 하나로 국내에서도 객차 내 소음 발생원인 및 저감방법에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 주행 속도 변화에 따라 엔진 및 공력소음에 의해 소음레벨이 선형적으로 증가하며 실내 소음도는 차체의 진동가속도레벨과도 상관관계가 있는 것으로 보고되었다 (김재철, 이찬우, 2007, 박범 외, 2010, 노희민 외, 2013). 또한 콘크리트, 자갈 등의 도상 종류와(최성훈 외, 2006, 김재철 외, 2007) 터널 진입 시(노희민 외, 김재철 외, 2007, 최성훈 외, 2004) 등이 객차 실내 소음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로 분석되었다. 이에 대해 각종 연구기관들은 KTX 실내소음 특성 규명을 통한 소음 문제 해결에 관한 연구를 진행하고 있다 (노희민 외, 2013, 박범 외, 2010). 또한 차량측면의 대책방안으로 차량사이 공력소음을 제거하기 위한 머드플랩 설치를 통하여 80 Hz 성분의 실내소음 문제를 일부 해소하였다 (김재철, 이찬우, 2007).

한편, 고속열차 객차 실내소음의 물리적 특성들이 활발하게 연구되고 있는데 반해 소음에 대한 주관반응연구는 박범 등 (박범 외, 2010)의 연구가 유일한 실정이다. 박범 등 (2010)은 총 3종류의 고속열차에서 속도에 따른 소음특성을 측정하고 loudness, sharpness 등의 음질지표를 분석에 적용하였다. 또한 물리지표 평가결과와 청감평가결과를 비교함으로써 L_{Aeq} 보다 loudness지표가 객차 내 소음에 대한 주관반응을 설명하는데 적합함을 밝혔다. 그러나 loudness와 같은 음질 지표는 별도의 필터나 소프트웨어를 활용한 분석이 필요하여 현장평가 지표로 사용하기 어렵다는 단점이 있다.

4. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

본 연구 결과는 기존의 단순 음압레벨 기반의 객차 음환경 평가 시스템의 한계점을 극복하고 Speech privacy/speech intelligibility와 소음 성가심도를 동시에 고려한 객차 내 음환경 만족도 개선 설계 가이드라인을 제안하였다.

객차 소음에 대한 청감적 반응과 물리적 지표 간 통계분석을 통해 쾌적한 음환경을 나타내는 정량적인 음향지표(STI, 배경소음레벨, SNR, 흡음력 등)와 객차 내부 음환경 평가에 대한 인지공학적 기준을 제공하며, 객차 내부 음환경 설계시 실용적인 설계 지표로써 활용이 가능하다. 또한 객차 내 디자인 요소 변화에 따른 음환경 지표 변화 관계 도출식을 통해 구체적인 설계 가이드라인을 제공하였다.

뿐만 아니라, 전체 연구결과를 종합하여 고속열차 스피치 프라이버시 설계 프로그램을 제작하였으며, 고속열차 음환경에 대한 평가뿐만 아니라 사용자가 원하는 목표 등급과 초기 설계된 열차의 등급을 비교하고 향후 개선점을 제시해주는 기능을 포함하였다. 또한 음향 전문가가 아닌 일반 사용자도 문제없이 사용할 수 있도록 각각의 매뉴얼 및 도움말이 구성되어 있으며, 프로그램의 구성을 단순화하여 음향 전문가가 아닌 모든 사용자(철도 설계자, 철도관계자)가 편리하고 효과적으로 사용할 수 있도록 개발되었다.

본 프로그램은 평가뿐만 아니라 문제점과 향후 개선점을 제공해주므로 고속열차 스피치 프라이버시 설계 시 큰 효과가 나타날 것으로 사료된다. 이러한 연구 결과가 국내 고속열차 설계에 적절히 활용된다면 국내 객차 내부 음환경 설계기술을 선점하고 세계 고속열차 설계 시장을 선도할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 용어의 정의

- 잔향시간 (Reverberation Time, RT)
 - 실내에서 음원을 정지한 후 음압레벨이 60 dB 감쇠하는데 걸리는 시간으로 정의하며, 공간에 지속적으로 음이 남아있는 시간을 나타낸다.

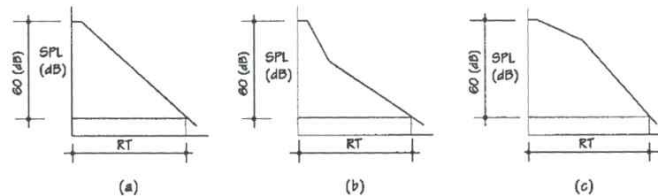
$$T = 0,163 \frac{V}{\sum S_i \alpha_i} = 0,163 \frac{V}{A}$$

T = 잔향시간 [s]
A = 등가흡음력 [m²]
 α_x = 각 부재의 흡음률

V = 공간의 용적 [m³]
 S_x = 각 부재의 표면적 [m²]

[잔향공식 (Sabine formula)]

- 초기감쇠시간 (Early Decay Time, EDT)
 - 실내 공간에서 음원이 정지된 후 공간 내의 측정 지점에서 측정한 음의 에너지가 10 dB 감쇠하는데 걸린 시간으로 정의한다. 다음 그림과 같이 세 가지 감쇠곡선의 경우 모두 잔향시간을 같지만, 초기 감쇠시간의 차이로 인하여 공간의 잔향감이 달라진다.



[다양한 감쇠특성의 음 감쇠곡선]

- 명료도 (Clarity, C80 또는 C50)
 - 음을 또렷하게 이해할 수 있는 정도를 나타내는, 음의 선명도와 관련이 있다.
초기(0~80 ms 또는 0~50 ms)에 들어오는 음의 에너지와 후기(50 ms 또는 80 ms 이후)에 들어오는 음의 에너지의 비로 구한다.
- A 가중 음압레벨 (L_{Aeq} [dB])
 - 등청감 특성을 반영한 주파수가중을 적용시킨 것을 기초로 한 음압 레벨
- 음성 전달 지수 (Speech Transmission Index, STI)
 - 음원신호와 비교하여 청취 지점에서의 신호가 변화되는 것에 착안하여, 실내의 음 전파과정에서 잔향이나, 에코, 잡음 등의 영향을 받아 변조된 정도를 측정하여 수치화 한 것이다. 높을수록 명료하게 전달되는 것을 의미한다. STI는 배경소음의 영향이 반영된 지수으로써 동일 공간 내에서 배경소음이 높으면 낮은 STI가 도출되며, 배경소음이 낮으면 높은 STI가 도출된다.
- r_p (Privacy distance)
 - 고정된 speaker에 대한 거리별 STI 값을 선형 추세하였을 때 STI가 0.2가 되는 거리로 정의하며, Speech privacy가 확보되는 거리로 해석할 수 있다. Speech privacy를 확보하고자 하는 본 가이드라인에서는 r_p 가 짧을수록 좋은 설계안으로 평가된다.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1절 연구개발결과 요약

표 1. 1차년도 연구개발 결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	KTX 내부 음환경 관련 설문조사	• KTX 음환경 주관적 만족도 파악 - 주변 사람소리 및 저주파 진동 소음이 고속열차 내에서 가장 성가신 소음원
	해외 열차 사례 조사 및 측정	• 프랑스 TGV, 영국 Eurostar, 스웨덴 SJ3000, 호주 CountryLink 열차 내부 측정 및 소음원 측정 - 디멘전: 폭, 높이 등 유사 - 소음도: 고속 주행 시 저주파 특성이 강함, 중고주파 영역은 평탄함 - 음성전달: 사람음성의 주파수 패턴과 관련하여 중주파 대역에서 열차내부 음성이 잘 전달될 것으로 사료
	정차 시 객실 음환경 측정	• 실내음향법 측정(ISO 3382-1,2) - KTX 일반석: 잔향시간(RT) 0.17초, 음성명료도(C50) 17.0dB • 오픈플랜 오피스측정법 측정(ISO 3382-3) - KTX 일반석: - 통로측 좌석 $L_{p,A,S,4m}$ 56dB, $D_{2,s}$=8.1dB, - 통로 $L_{p,A,S,4m}$ 59dB, $D_{2,s}$=7.3dB - 음성전달레벨이 좌석에 비해 통로부분이 잘됨
	주행 시 객실 음환경 측정	• KTX, KTX-산천 스피치 음원 전달 실험
	외부소음 측정	• 객차 내부로 유입되는 소음특성 파악을 위한 고속철도 외부소음 특성 고찰 - 철도 외부소음은 31.5~65Hz 와 2~4kHz 범위가 주요 성분으로 분석됨
	외부 유입소음 측정	• Acoustic camera 측정 결과 분석 - 선반아래 반사면을 통한 음성전달 방향성 확인
	컴퓨터 시뮬레이션 모델 구축	• 음환경 구현 및 개선안 도출 (2차년도 계획 선행 연구) - 고속열차 내부 음환경 구현을 위한 모델링 - 흡음력 변화, 천장 배너 설치 개선안이 speech privacy에 효과적
	문제점 및 음향설계 요소 도출	• 선반은 단단한 반사면 역할을 하여 음성전달이 용이한 구조로 되어있음 • 내부 흡음력 증가를 통해 speech privacy 확보 가능
	1:10 축소모형 구축	• 시제품 제작 고속열차 1:10 축소모형 4량 - 실내음장 평가를 위한 고속열차 축소모형 제작 및 음장 구현

표 2. 2차년도 연구개발 결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
2차년도	시뮬레이션을 이용한 speech privacy 개선 설계 평가법	- STI기반의 privacy distance (r_p)가 배경소음이 높은 고속열차 실내 speech privacy 평가에 유용 - Speech privacy (r_p)개선을 위해서 배경소음 변화($L_{p,A,B}$)와 흡음력 변화($\bar{\alpha}$)가 모두 효과적
	의자형상 변화에 따른 speech privacy 영향력 평가	- [의자 배치] 순방향과 역방향을 혼합 배치와, 순방향 일괄 배치간에 speech privacy 차이 없음 - [의자 형상]의자의 등받이 사이 간격을 차단하고 등받이 높이를 귀높이보다 높게 설계하는 것이 음성 전달 차단에 효과적
	객차 내장재료 흡음률 및 형상 변화에 따른 speech privacy 평가	- 전/후면 단부벽에 높은 흡음률 ($\alpha=0.7$) 적용 시 Speech privacy 확보에 가장 효과적
	컴퓨터 시뮬레이션 구축	- 고속열차 내장재 노맥스 허니컴의 흡음률 도출 ($\alpha=0.34 \sim 0.41$) - KTX 시뮬레이션 구축 - HEMU 시뮬레이션 구축
	축소모형을 이용한 설계 요소 평가	- 내부 설계요소 변화에 따른 배경소음레벨을 축소모형으로 평가 가능 - 객차 내부 흡음력 변화에 의한 영향은 배경소음레벨보다는 스피치레벨에서 큼
	Speech privacy와 noise annoyance를 고려한 고속열차 음환경 주관평가	• Speech privacy와 소음 성가심도를 고려한 최적 물리지표 - STI : 0.4 이하 - SNR : -6 dBA 이하 - BN : 60 ~ 63 dBA [테스크 수행시] -소음 성가심도 요인 : speech -음환경 만족도 요인 : privacy, 소음 성가심도 [테스크를 수행하지 않을 시] -소음 성가심도 요인 : BN -음환경 만족도 요인 : 소음 성가심도
	주행 조건에 따른 터널 내부 소음 특성 분석 (Acoustic camera를 이용한 현장측정)	• KTX와 KTX 산천 소음 방향성 평가 - 터널내 구간 Spherical microphone 측정결과, KTX의 125 Hz 저주파소음은 바닥에서, KTX 산천의 1, 4 kHz의 중고주파 소음은 천정에서 입사되는 것으로 나타남 - 청감실험 결과 중고주파 대역 소음이 성가심도에 영향을 미치는 것으로 나타남 - KTX 산천의 1, 4 kHz의 중고주파 대역 소음 저감을 위하여 천정에 추가적인 차음이 필요함
	청감특성을 고려한 객차 고속열차 소음 개선 방향	• 고속열차 내부 소음의 성가심도 평가 - 지표 변화에 따른 성가심도 변화 확인 - SPL(dBA): 성가심도 변화의 가장 유의 간향시간: 성가심도 변화에 영향 적음 - 주파수특성: 고주파비율이 증가할 때 성가심도 증가 - 주파수특성 변화에 따른 사람의 최소인지 확인 - 저주파: 2.4 dB - 고주파: 1.6 dB

표 3. 3차년도 연구개발 결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
3차년도	실내 소음원 음향 특성 분석을 통한 개선 방향 도출	- 주행조건에 따른 실내소음 특성 (호남고속철도) - 개활지 저속 구간과 고속 구간의 소음레벨차이 약 6.7 dB - 수음점 위치별 특성 분석 결과, 주행방향 기준 후방 좌석의 소음 레벨이 전방 좌석에 비하여 고속과 저속 주행시 5-6 dB 높음 - 외부 소음의 유입경로 분석 및 고찰 (호남고속철도) - 천장 및 창측 방향에서 대부분의 소음되며, 중고주파대역의 소음에 취약함 - 내장재료 변화에 따른 실내소음 저감량 - 부위별 내장재의 흡음력 변화에 따른 소음저감량은 천장, 측벽, 단부벽 순으로 나타남 - 저속 주행 : 천장 (1.7 dBA) > 측벽 (1.2 dBA) = 단부벽 (1.2 dBA) - 고속 주행 : 천장 (1.4 dBA) > 측벽 (1.1 dBA) > 단부벽 (0.5 dBA)
	시뮬레이션 및 축소모형을 이용한 객차 디테일 설계	- KTX 일반석, 호남고속철도, HEMU의 음향 평가 시뮬레이션 모델과 비교 - 음향 설계 가이드라인 제시를 위한 고속열차 종류별 음향 특성 비교 - Speech privacy 평가 결과 호남고속철도는 300km/h 주행 시 기준 약 2열 이후, KTX 일반석의 경우 4열 이후 privacy가 보장되는 것으로 분석됨
	내장재의 설계 적합성 검토 및 흡음 설계	- 개선설계를 위한 부위별 설계 방향 제시 - 국내외 열차 내장재의 흡음률 데이터 베이스 구축
	최적 설계안 제시	- 열차별 내장재료 변화에 따른 speech privacy 변화 - 흡음률 변화 시 천장, 측벽, 단부벽 순으로 r_p 감소 - 의자 높이 변화에 따른 speech privacy 변화 - 높이 최대 변화 시 약 r_p 3m 감소 - 배경소음 변화에 따른 speech privacy 변화 - STI 감소 경향성은 동일하나 절대적인 STI 값 변화 - 설계요소를 고려한 speech privacy 예측식 도출
	실내음향 및 심리음향을 고려한 고속 열차의 통합 최적 설계 가이드라인 제시	- Speech privacy 지표(r_p) 등급화 진행 - A등급 : 3.0 m 미만 - B등급 : 3.0 ~ 6.8 m - C등급 : 6.8 ~ 10.5 m - D등급 : 10.5 m 이상 - 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램 제작 및 특허 출원

제 2절. 연구개발 주요내용

1. 고속열차 소음 특성 연구

1.1 주행조건에 따른 실내소음 특성

가. 측정 개요

(1) 측정 목적

- 주행 조건에 따른 실내소음 특성을 평가하기 위하여, 호남고속철도의 현장 측정을 진행하였다. 현장 측정을 통하여 운행속도에 따른 소음특성 및 열차종류에 따른 소음특성을 분석하고 외부 소음의 유입 방향성을 분석하였다.

(2) 측정 환경

- 주행중 실내소음은 2015년 2월 10일 12시부터 18시까지 진행되었으며, 현장 평가 시 탑승한 객차는 시험운행중인 호남고속철도 14호차 T4객차 (일반실)에서 측정자 3인을 제외하고 승객이 탑승하지 않은 상황에서 측정을 진행하였다. 측정지점은 그림 2와 같이 객실 중앙부 통로측 좌석 7지점이다.
- 측정 열차의 운행 구간은 광주-오송 구간을 왕복하였으며, 소음원 비교를 위한 환경 조건은 개활지, 콘크리트 도상을 대상으로 하였으며, 고속 주행시 터널 구간은 노령계룡 터널 주행시의 평균값으로 분석하였다. 또한 열차의 주행방향은 정방향, 역방향 모든 방향으로 주행하였다. 측정시 실내 온도는 20도 내외로 공조 설비가 가동 중이었다.

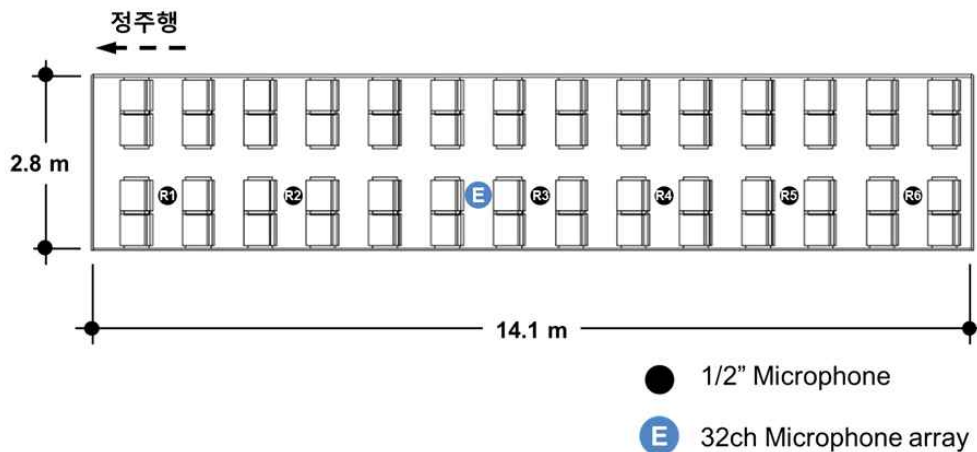


그림 2. 호남고속철도 주행 시 측정 지점

(3) 측정 장비

- 측정 장비는 표 4와 같이 음향 측정 센서인 무지향성 마이크로폰(GRAS 46AE)을 사용하여 탑승객의 귀높이를 고려하여 1.1m 로 높이를 설정하였다. 또한 소음 유입방향

성을 평가하기 위하여 32ch 구형마이크로폰 어레이(MH acoustics, EM32 Eigenmike)를 사용하여 평가를 진행하였다. 주행 속도 분석을 위하여 GPS 장비(ASCEN, GPS741)를 사용하여 측정 당시의 주행속도를 분석하였다.

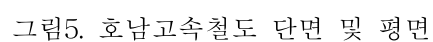
표 4. 호남고속철도 음향 측정의 사용 장비

용도	장비명	장비사진
음향 측정 센서 (무지향성 마이크로폰)	GRAS, 46AE	
기록장치	Rion, DA-21	
음향 방향성 측정 센서 (32ch 구형 마이크로폰 어레이)	MH acoustics, EM32 Eigenmike	
GPS 장비	ASCEN, GPS741	

나. 측정 결과

(1) 주행 조건에 따른 소음특성 결과

- 그림3와 같이 호남고속철도의 개활지 운행 중 저속 구간과 고속 구간의 소음레벨차이는 약 6.7 dB 차이로 나타났다. 터널 주행의 경우 개활지 고속 주행에 비해 8 dB 이상 높은 소음레벨을 나타내는 것으로 분석되었으며, 주파수대역 별 특성은 주행 조건과 관계없이 전 구간에서 500-1000 Hz 대역에서 가장 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 그림4와 같이 수음점 위치별 특성 분석 결과 정주행 방향을 기준으로 후방 좌석(R6)의 소음레벨이 전방 좌석에 비하여(R1) 고속과 저속 주행시 5-6 dB 크게 나타났다. 이는 그림5의 호남고속철도 단면과 평면 분석 결과, 객차 전방 좌석이 대차와의 거리가 상대적으로 먼 반면, 후방 좌석의 하부에 대차가 바로 배치되어 있기 때문에 후열 좌석의 소음레벨이 전열과 중앙 좌석보다 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 후열 좌석 하부에 공조 배기 패널이 배치되기 때문에 취출 소음의 영향도 있는 것으로 예상된다.



(2) 열차 종류에 따른 소음특성 결과

- 열차 종류에 따른 소음레벨 (L_{Aeq}) 분석 결과 KTX, KTX-산천, 호남고속철도는 거의 유사한 소음 레벨을 나타내었다.
- 그림6과 같이 주파수대역별 특성은 KTX의 경우 저주파 (125~250 Hz)대역에서 비교적 높은 소음레벨을 나타내었으며, 호남고속철도는 중고주파(1000~4000 Hz)대역의 소음레벨이 크게 나타났다.
- 2차년도 연구결과인 주파수 대역 비율에 따른 소음 성가심도 청감평가에 의하면 고주파 성분의 변화가 저주파 성분의 변화보다 비교적 인지하기 쉽고, 동일한 소음레벨이라도 고주파 성분이 높은 소음이 더 성가시게 느껴진다는 결과가 도출되었다. 따라서 호남고속철도의 중고주파 대역 소음레벨이 상대적으로 크므로 KTX에 비해 소음에 대한 성가심도가 높을 것으로 예상된다.

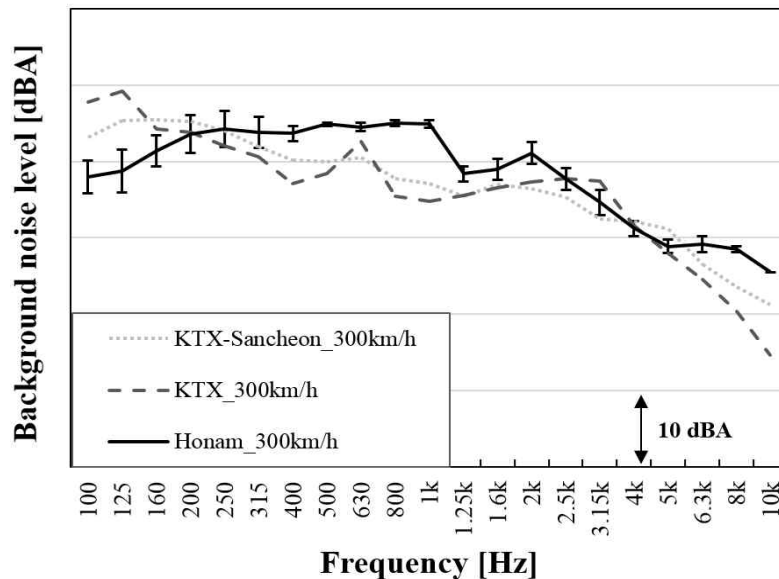


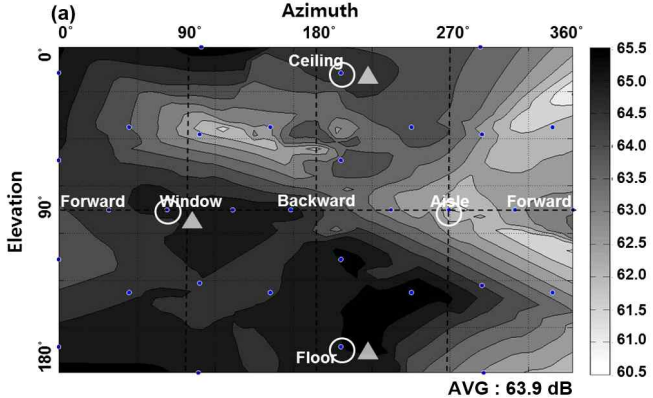
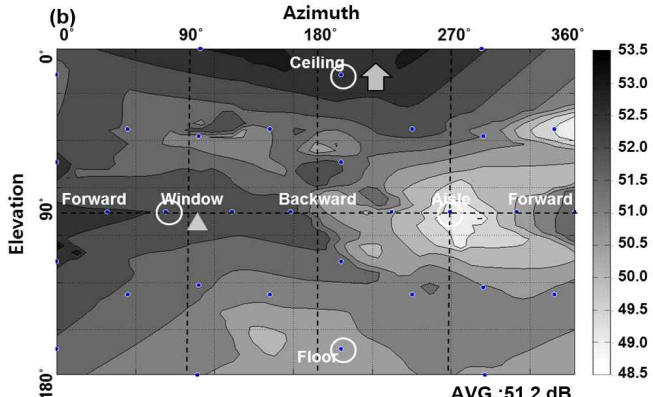
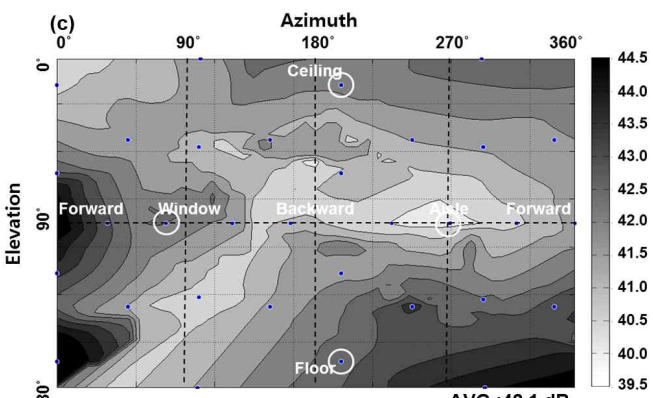
그림6. 고속열차별 300km/h 주행시 실내소음레벨 분석

(3) 외부 소음의 유입경로 분석 및 고찰

- 분석 목적
 - 주행 상황에서의 소음원의 원인과 음향특성을 규명하기 위하여, 수음자 위치에서 32ch Spherical microphone array를 활용하여 복합소음의 입사 방향성 특성을 측정하였으며 속도별, 주파수 대역별 비교분석하였다.

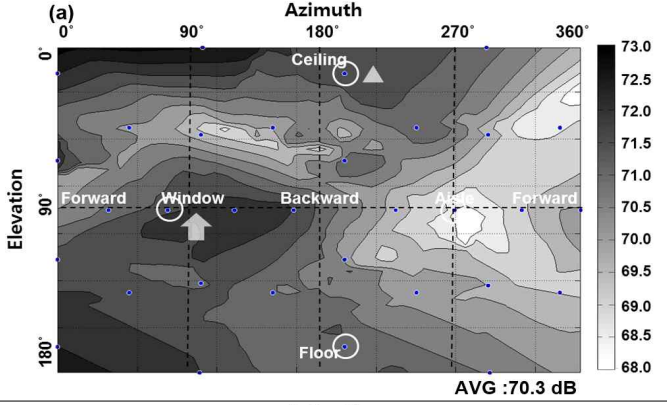
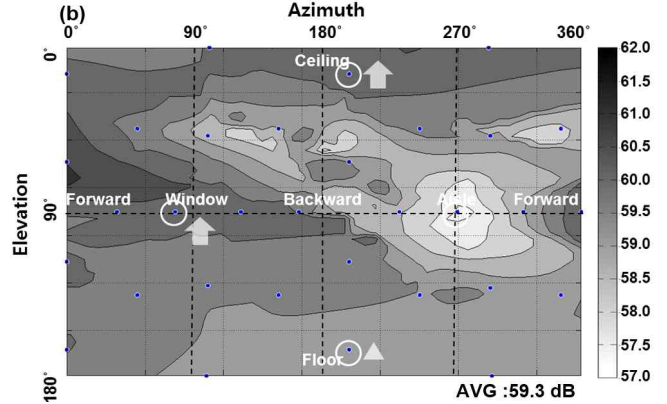
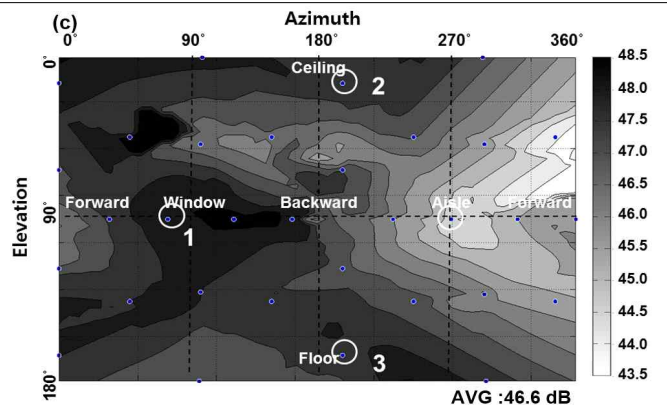
- 저속 주행, 100 km/h
 - 저속 주행시 전주파수 대역에서 통로가 가장 낮은 소음레벨을 나타내고 있으며, 레일마찰음과 엔진소음, 객차 진동으로 인한 창측, 천장의 전달소음이 두드러지게 나타남

표5. 호남고속철도 저속 주행시 소음 유입 방향성 분석

주파수 대역	분석	소음 방향성 평가 그리드맵
저주파 (125 Hz)	-바닥/창/천장 소음 유입 -바닥과 통로 3.5 dB 차이 발생	 AVG : 63.9 dB
중주파 (1 kHz)	-천장 소음 유입 -천장/창측과 통로 4.9 dB 차이 발생	 AVG : 51.2 dB
고주파 (4 kHz)	-소음 방향성 경향 없음 -바닥과 통로 2.9 dB 차이 발생	 AVG : 42.1 dB

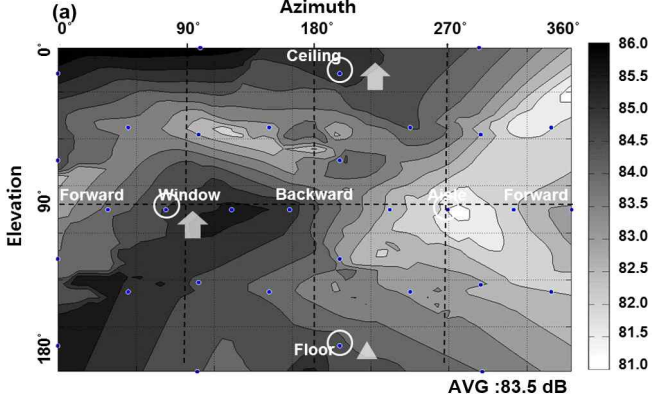
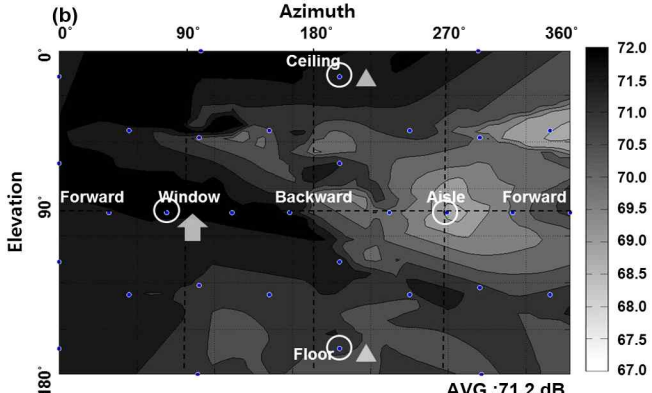
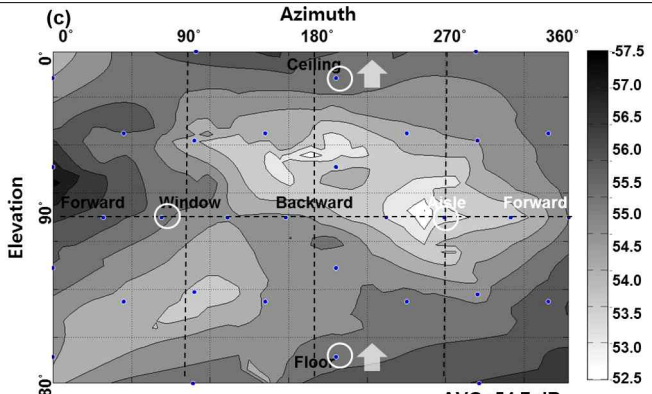
- 고속 주행, 300 km/h
 - 고속 주행시 전주파수 대역에서 저속 주행 상황에 비해 높은 소음레벨을 나타내고 있으며, 특히 천장부근에서 높은 소음레벨이 나타남

표6. 호남고속철도 고속 주행시 소음 유입 방향성 분석

주파수 대역	분석	소음 방향성 평가 그리드맵
저주파 (125 Hz)	-창/천장 소음 유입 -창측과 통로 4.0 dB 차이 발생	 AVG :70.3 dB
중주파 (1 kHz)	-천장/창/바닥 소음 유입 -천장과 통로 3.1 dB 차이 발생	 AVG :59.3 dB
고주파 (4 kHz)	-창문/바닥 소음 유입 -바닥과 통로 4.0 dB 차이 발생	 AVG :46.6 dB

- 터널 고속 주행, 300 km/h
 - 터널 주행 시 가장 높은 소음을 나타내고 있으며, 통로 측에서 가장 낮은 소음레벨을 나타내는 것으로 분석됨

표7. 호남고속철도 터널 고속 주행시 소음 유입 방향성 분석

주파수 대역	분석	소음 방향성 평가 그리드맵
저주파 (125 Hz)	-창측 소음 유입 -창측과 통로 4.3 dB 차이 발생	 AVG :83.5 dB
중주파 (1 kHz)	-창측/천장 소음 유입 -천장과 통로 3.9 dB 차이 발생	 AVG :71.2 dB
고주파 (4 kHz)	-천장 소음 유입 -천장과 통로 최대 3.4 dB 차이 발생	 AVG :54.7 dB

- 소음 유입경로 분석 소결
 - 주행 조건에 관계없이 통로 방향에서의 소음유입이 가장 적게 나타났다. 소음 유입 경로 분석결과 천장 및 창측 방향에서 대부분의 소음이 유입되고 있었으며, 중고주파대역의 소음에 취약한 것으로 분석되었다.

1.2 내장재료 변화에 따른 실내소음 저감량

가. 평가 개요

(1) 평가 목적

- 차음성능은 통제된 상태에서 내장재의 흡음성능 변화에 대한 배경소음 저감량 평가하기 위하여 시뮬레이션 평가를 진행하였다.

(2) 평가 방법

- 현장평가를 통하여 KTX 객실의 내부의 치수를 실측하였고, AutoCAD 2009를 사용하여 측정에 사용할 고속열차 시뮬레이션 모델을 제작하였다. 구축한 고속열차 모델을 Odeon v11.23으로 불러온 후 그림8과 같이 실제 주행 중인 KTX와 유사한 음환경 및 배경소음을 구현하였다. 시뮬레이션 모델에 적용한 내장재는 실제 열차에 사용되고 있는 재료를 적용하여 주행 속도 300 km/h와 100 km/h에서의 각 부위별 재료변화에 따른 흡음력 변화 및 배경소음 저감량을 도출하고 원인을 분석하였다. 평가를 위한 음원은 배경소음 구현을 위하여 외기에 면해있는 부위에 면음원을 설정하여 실내소음 레벨을 구현하였고, 통로측 좌석 8지점에서 실내소음 저감량을 평가하였다.

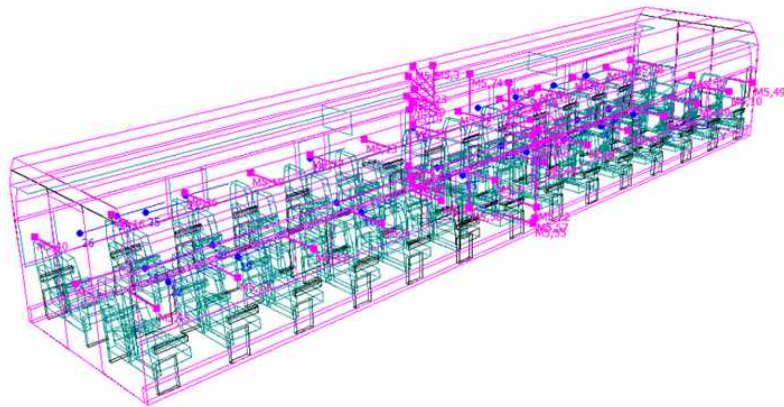


그림7. 시뮬레이션 모델의 면음원 설정

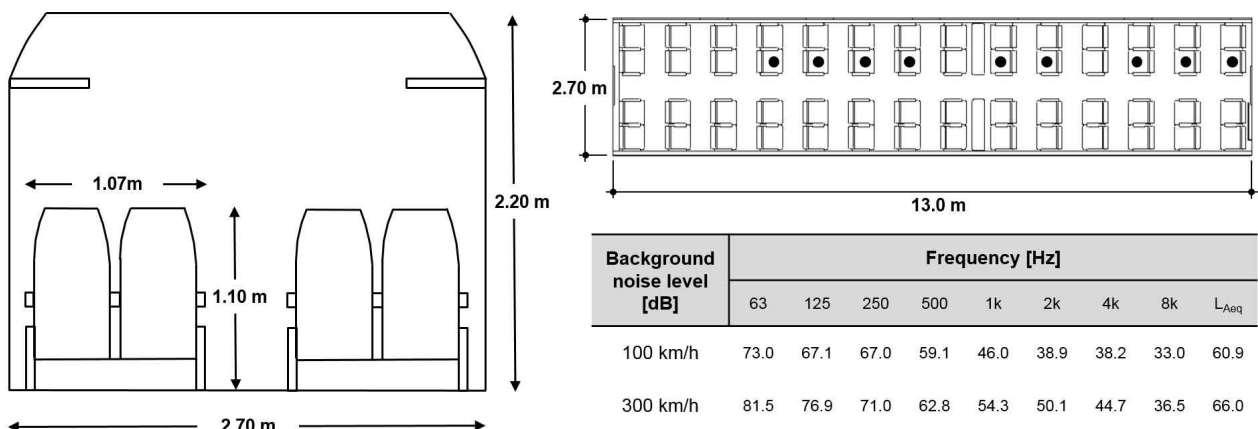


그림8. 시뮬레이션 모델 측정 지점 및 배경 소음 설정

(3) 시뮬레이션 모델의 배경소음 구현

- 시뮬레이션 모델의 배경소음을 구현하기 위하여, 주행 시 측정된 현장측정 결과를 기준으로 음원의 주파수 대역을 조정하여 실내소음레벨을 평가하였다. 주행조건은 저속 주행 구간 (100km/h)과 고속 주행 구간 (300km/h)의 2가지 조건에서 평가를 진행하였다. 표 8과 같이 평가 결과, 주파수 대역별 현장 평가 결과와 동일한 배경소음을 구현하였다.

표 8. 시뮬레이션 모델의 배경소음 구현

Background noise level [dB]		Frequency [Hz]								
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L _{Aeq}
300 km/h	현장측정	81.5	76.9	71.0	62.8	54.3	50.1	44.7	36.5	66.0
	시뮬레이션	81.5	76.9	71.0	62.8	54.3	50.1	44.7	36.5	66.0
	차이값	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100 km/h	현장측정	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	60.9
	시뮬레이션	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	61.1
	차이값	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.2

(4) 적용 가능한 객차 내장재료 흡음률 조사

- 객차 내장재료 변화에 따른 실내소음 저감량을 평가하기 위하여, 국내외 적용되고 있는 실제 내장 재료를 조사하였다. 고속열차들의 부위별 재료와 그에 따른 흡음률을 조사하였고, 평가를 위하여 단계별로 재료의 흡음률 데이터를 수집하였다. 시뮬레이션 평가에서는 낮은 흡음률, 중간 흡음률, 높은 흡음률의 3가지 조건에 따른 배경소음저감량 평가를 계획하였으며 객차 내 적용부위는 천장, 측벽, 단부벽으로 설정하였다.

표 9. 고속열차 부위별 재료 흡음계수 조사

부 위	케이스	재 료	흡음계수						AVG
			125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	
천 장 (42.0 m ²)	L	5mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
	M	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
	H	Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78
측 벽 (33.3 m ²)	L	5mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
	M	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
	H	Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78
단부벽 (8.9 m ²)	L	Moquette	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37	0.21
	M	Front & back panel	0.25	0.60	0.50	0.45	0.45	0.28	0.42
	H	Laminated panel	0.69	0.76	0.65	0.86	0.83	0.75	0.76

나. 평가 결과

(1) 조사한 국내외 고속열차의 내장재의 데이터베이스를 기반으로 각 부위별 흡음률을 변화하였을 때 소음 저감량을 도출하기 위하여 단일케이스 평가를 진행하였다.

• 천장 케이스 변화

- 천장의 흡음재료만 변화시킨 천장 케이스 평가 결과 저속 주행 시 흡음률 변화에 따라 L_{Aeq} 기준 저속 주행 시 최대 1.7 dB, 고속 주행 시 최대 1.4 dB 변화하는 것 저속주행시 고속주행보다 상대적으로 소음 저감량이 큰 것으로 나타났다. 저주파 대역에서는 소음 저감 효과가 나타나지 않았으며, 250 Hz 대역 이후부터 소음 저감이 확인되었다. 특히 1kHz 대역에서 저감량 2.0 dB로 가장 큰 소음 저감량을 나타내는 것으로 분석되었다.

표 10. 100km/h 주행시 천장 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Ceiling	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	73.0	67.1	67.7	59.9	47.1	39.8	39.0	33.8	62.3
Middle	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	61.1
High	73.0	67.2	66.5	58.3	45.1	38.1	37.3	32.3	60.6
L-H	0.0	0.1	1.2	1.6	2.0	1.7	1.6	1.5	1.7

표 11. 300km/h 주행시 천장 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Ceiling	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	81.5	76.9	71.7	63.6	55.4	51.0	45.6	37.3	67.6
Middle	81.5	76.9	71.0	62.8	54.2	50.0	44.7	36.5	66.6
High	81.5	77.0	70.5	62.0	53.4	49.3	43.9	35.8	66.2
L-H	0.0	-0.1	1.2	1.6	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4

• 측벽 케이스 평가

- 측벽의 흡음재료만 변화시킨 측벽 케이스 평가 결과 저속 주행 시 흡음률 변화에 따라 L_{Aeq} 기준 저속 주행 시 최대 1.2 dB, 고속 주행 시 최대 1.1 dB 변화하는 것으로 나타났다. 천장케이스와 유사하게 1kHz 대역에서 가장 큰 소음 저감량을 가지는 것으로 분석되었으나 천장케이스에 비해 영향력이 적게 나타났다.
- 이는 천장 케이스와 동일한 흡음특성을 가진 재료를 적용함에도 불구하고 적용 면적차이에 의한 흡음력 차이로 인하여 영향력이 적게 나타나는 것으로 분석되었다.

표 12. 100km/h 주행시 측벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Side wall	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	73.0	67.1	67.6	59.7	46.7	39.4	38.7	33.5	62.1
Middle	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	61.1
High	73.0	67.2	66.8	58.7	45.4	38.3	37.6	32.5	60.9
L-H	0.0	-0.1	0.8	1.0	1.3	1.1	1.1	1.1	1.2

표 13. 300km/h 주행시 측벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Side wall	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	81.5	76.9	71.6	63.4	55.0	50.6	45.3	37.0	67.5
Middle	81.5	76.9	71.0	62.8	54.2	50.0	44.7	36.5	66.6
High	81.5	77.0	70.8	62.4	53.7	49.5	44.2	36.0	66.4
L-H	0.0	-0.1	0.8	1.0	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1

- 단부벽 케이스 평가

- 단부벽의 흡음재료만 변화시킨 단부벽 케이스 평가 결과 저속 주행 시 흡음률 변화에 따라 L_{Aeq} 기준 저속 주행 시 최대 1.2 dB, 고속 주행 시 최대 0.5 dB 변화하는 것으로 나타났다. 저속 주행 시 천장, 측벽케이스와 유사하게 배경소음의 저감량의 영향력이 1kHz 대역에서 나타났지만, 고속 주행시에는 배경소음 저감효과가 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다.
- 단부벽 흡음재료의 흡음률을 대체적으로 주파수 대역별 흡음률이 높게 설정되었지만, 단부벽의 면적이 상대적으로 작기 때문에 흡음률이 가장 낮게 설정됨에 따라 흡음재료 변화에 따른 영향력이 미미한 것으로 분석되었다.

표 14. 100km/h 주행시 단부벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Ceiling	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	73.0	67.1	67.6	59.7	46.7	39.4	38.7	33.5	62.1
Middle	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	61.1
High	73.0	67.2	66.8	58.7	45.4	38.3	37.6	32.5	60.9
L-H	0.0	-0.1	0.8	1.0	1.3	1.1	1.1	1.0	1.2

표 15. 300km/h 주행시 단부벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Ceiling	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L_{Aeq}
Low	81.5	76.9	71.1	62.8	54.3	50.1	44.7	36.4	67.0
Middle	81.5	76.9	71.0	62.8	54.2	50.0	44.7	36.5	66.6
High	81.3	76.8	70.9	62.7	54.1	50.0	44.6	36.4	66.5
L-H	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.5

(2) 최대 흡음력 변화에 따른 배경소음 저감량 평가

• 조합 케이스 변화 (천장, 측벽, 단부벽)

- 내장재료 흡음력 변화에 따른 최대 배경소음 저감량을 확인하기 위하여 천장, 측벽, 단부벽 전체의 흡음특성을 저흡음과 고흡음의 재료로 설정하여 분석하였다.
- 평가 결과 저속 주행 시 부위별 높은 흡음률을 적용했을 때, 최대 2.8 dB의 실내소음 저감 효과를 나타냈고, 고속 주행시에는 저속 주행시보다 다소 낮은 1.8 dB의 소음 저감 효과를 발생시키는 것으로 분석 결과 나타났다.

표 16. 100km/h 주행시 천장, 측벽, 단부벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Case	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L _{Aeq}
최소	73.0	67.1	68.6	60.8	48.1	40.5	39.6	34.3	63.2
기본	73.0	67.1	67.0	59.1	46.0	38.9	38.2	33.0	61.1
최대	73.0	67.1	66.3	58.0	44.7	37.6	36.8	31.7	60.4
최소-최대	0.0	0.0	2.3	2.8	3.4	2.9	2.8	2.6	2.8

표 17. 300km/h 주행시 천장, 측벽, 단부벽 재료 흡음률 변화에 따른 배경소음 저감량

Case	Frequency [Hz]								
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	L _{Aeq}
최소	81.5	76.9	72.6	64.5	56.4	51.7	46.2	37.8	67.8
기본	81.5	76.9	71.0	62.8	54.3	50.1	44.8	36.5	67.2
최대	81.5	76.9	70.3	61.7	53.0	48.8	43.4	35.2	66.0
최소-최대	0.0	0.0	2.3	2.8	3.4	2.9	2.8	2.6	1.8

다. 결론

- (1) 주행 속도에 따라 배경소음 저감량 평가 결과 저속 주행 시 고속주행보다 배경소음 저감량이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 부위별 내장재료 흡음률 변화에 따른 결과를 살펴보았을 때, 각 부위별 영향력을 확인하기 위한 단일케이스에서는 천장, 측벽, 단부벽 순으로 배경소음 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다. 저속 주행시에는 천장 (1.7 dBA) > 측벽 (1.2 dBA) = 단부벽 (1.2 dBA), 고속 주행시에는 천장 (1.4 dBA) > 측벽 (1.1 dBA) > 단부벽 (0.5 dBA)의 배경소음 저감효과가 분석 결과 확인되었다.
- (2) 흡음재료 변화에 따른 최대 배경소음 저감량을 확인하기 위해서 단일케이스에서 적용된 재료의 최대흡음률과 최소흡음률의 조합으로 평가를 진행하였다. 평가 결과 저속 주행시에는 내장재료 변화에 의하여 최대 2.8 dBA의 배경소음이 저감되는 것으로 나타났고, 고속 주행시는 1.8 dBA의 배경소음 저감효과가 나타났다.

2. Speech privacy 개선 평가

2.1 호남고속철도 객실 음환경 평가

가. 정차 시 호남고속철도 음환경 평가

(1) 평가 목적 및 개요

- 정차시 호남고속철도 음환경 평가는 2014년 8월 19일 11시부터 18시까지 진행되었으며, 평가 시 탑승한 객차는 수도권차량정비단에서 정비중인 호남고속철도차량에서 측정자 3인을 제외한 승객이 탑승하지 않은 상황에서 공조 설비가 가동되지 않은 약 22도 내외의 환경에서 측정을 진행하였다.
- 호남고속음향 현장 측정을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 구축을 위한 실내음향 파라미터를 수집하고, 분석하여 평가하였다. 현장 측정은 ISO 3382-3을 기준으로 일반실의 실내음향측정법을 기반으로 진행하였으며, 평가 음원으로는 무지향성 스피커를 사용하여, 총 5지점에서 1.1m 높이로 설정하였고, 수음원은 창측좌석, 복도측좌석, 복도로 구분하여 총 36지점에서 무지향성 마이크 (GRAS 46AE)를 사용하여 평가를 진행하였다. 수음점의 높이는 좌석의 경우 승객의 앉은 귀높이를 가정하여 1.1m로 설정했고, 복도의 경우에는 서있을 때 귀높이를 가정하여, 1.6 m로 설정하여 평가를 진행하였다.
- 평가 지표는 ISO 3382-3 기반 오피스파라미터를 주 평가지표로 설정하여 분석하였다. 공간의 음선 전달 감쇠율을 나타내는 $D_{2,s}$ 지표, 음원으로부터 4m 위치의 음성 레벨을 평가하는 $L_{P,A,S,4\text{ m}}$, 화자의 음성전달지수를 평가하는 STI 지표와 STI 지표가 0.2 이하인 지점, 즉 speech privacy 확보 거리를 나타내는 r_p 를 평가하였다.

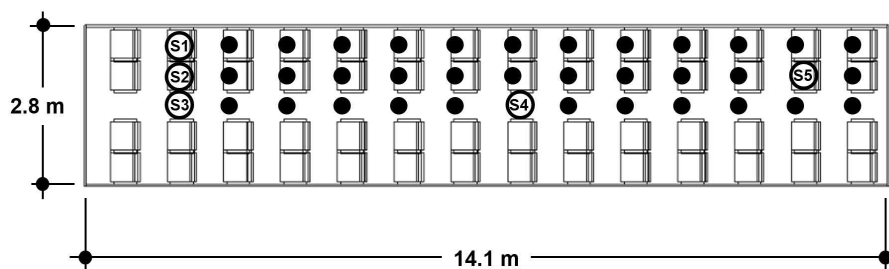


그림9. 정차 시 호남고속철도 객차 측정 지점

표 18. KTX 및 HEMU 열차의 형상지표 비교

열차 종류	Length [m]	Width [m]	Height [m]	Volume [m ³]
호남고속철도	14.1	2.6	2.2	84.3
KTX 일반석	13.0	2.6	2.2	74.4
HEMU	15.9	2.9	2.2	101.4



그림10. 호남고속철도, KTX, HEMU 객차 형상 및 마감재료 비교

(2) 음향지표 평가 결과

- 객실 내 잔향시간(RT) 측정 결과 전체 측정지점에서 호남고속철도 주파수 대역평균이 0.23s 으로 분석되었다. 이는 KTX 일반석보다는 0.05 s 길고, HEMU와는 유사한 잔향시간을 갖는 것으로 나타났다. 리시버 위치별 잔향시간을 분석했을 때, 뒤쪽 좌석에서 앞쪽좌석 보다 잔향시간이 더 길게 나타나는 것을 확인되었다.

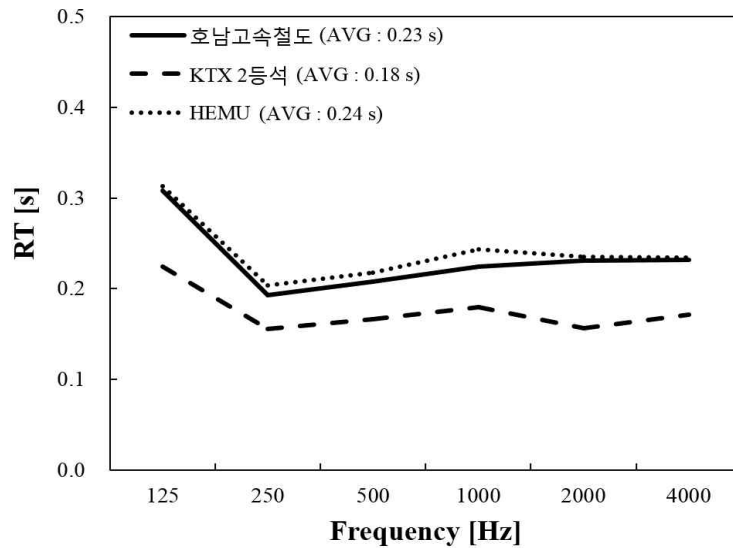


그림11. 정차 시 주파수 대역별 호남고속철도 잔향시간 측정 결과

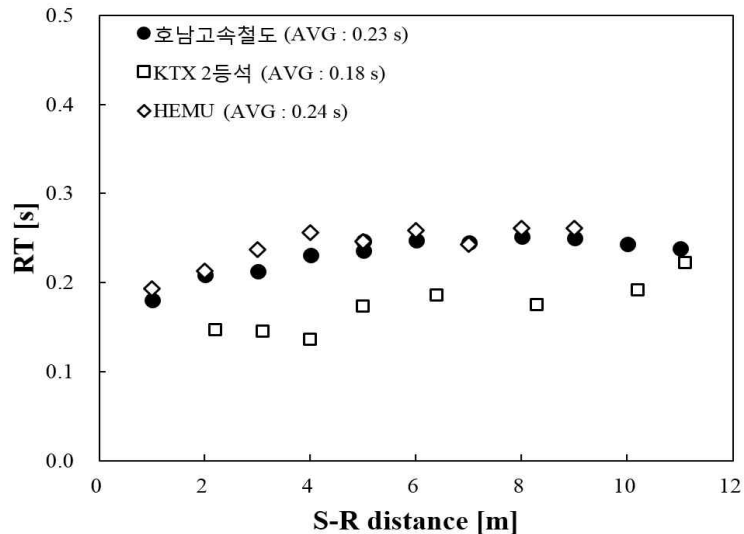


그림 12. 정차 시 거리별 호남고속철도 잔향시간 측정 결과

- 초기감쇠시간(EDT)은 잔향시간과 유사하게 뒤쪽 좌석으로 갈수록 길어지는 경향을 나타냈고, KTX 일반석에 비하여 높고, HEMU와는 유사한 값을 가지는 것으로 분석되었다. 명료도(C50) 분석결과 HEMU와는 유사한 특성을 보이고 있었으며 KTX 일반석보다는 낮은 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 좁고 긴 공간 형태의 특성이 반영되고 있으며, 양 측벽간의 반사음 전달에 의한 영향으로 분석된다.

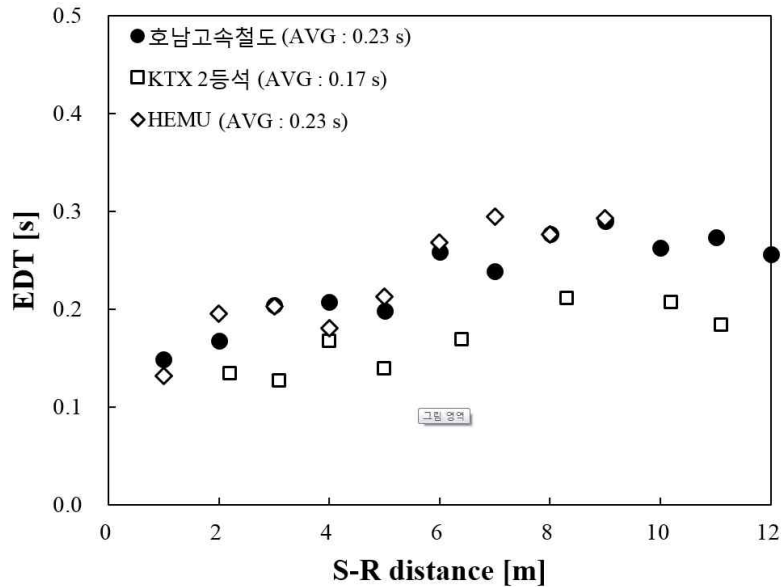


그림13. 정차 시 거리별 호남고속철도 초기감쇠시간 측정 결과

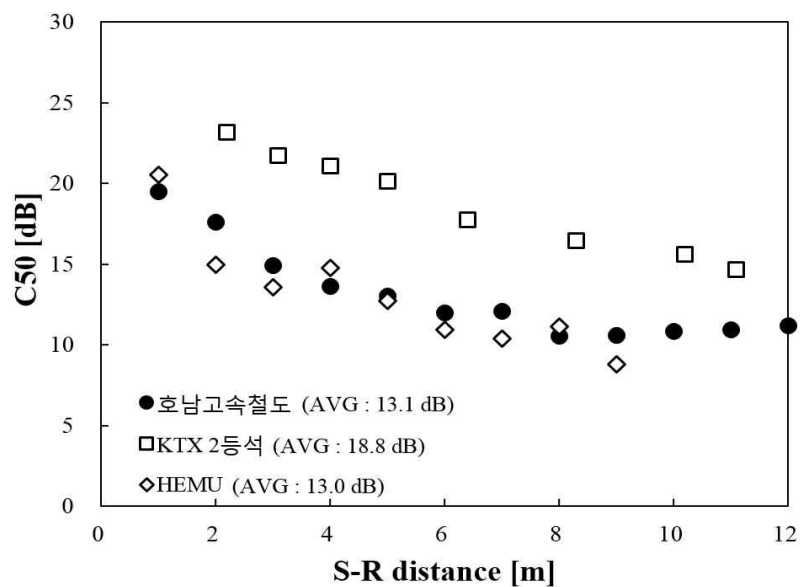


그림14. 정차 시 거리별 호남고속철도 명료도 측정 결과

(3) 오피스 파라미터($L_{P,A,s,4m}$, $D_{2,s}$) 평가 결과

- $L_{P,A,s,4m}$ 평가 결과 호남고속철도 45.4 dB, KTX 일반석 51.9 dB, HEMU 44.4 dB의 값이 분석되었으며, 호남고속철도와 HEMU는 1.0 dB 차이값으로 유사한 경향이 나타났고 KTX 일반석의 경우 다른 열차에 비해 6.5 ~ 7.5 dB의 큰 차이값을 갖는 것으로 분석되었다. $D_{2,s}$ 는 6.9 dB로 호남고속철도가 가장 큰 값으로 분석되었으며, HEMU가 5.0 dB로 가장 낮은 값이 도출되었다.
- 따라서 객차 내부의 스피치레벨은 HEMU보다 호남고속철도에서 저감량이 더 큰 것으로 평가되었다. 스피치레벨의 저감량의 차이가 나타나는 이유는 호남고속철도 의자 형상이 HEMU 의자와는 달리 팔걸이 부위의 간격이 좁고 음을 차단하기 때문에 스피치레벨 저감이 크게 나타나고, HEMU의 경우 천장의 확산구조로 인해 스피치레벨의 반사음이 발생하여 저감량이 작은 것으로 사료된다.

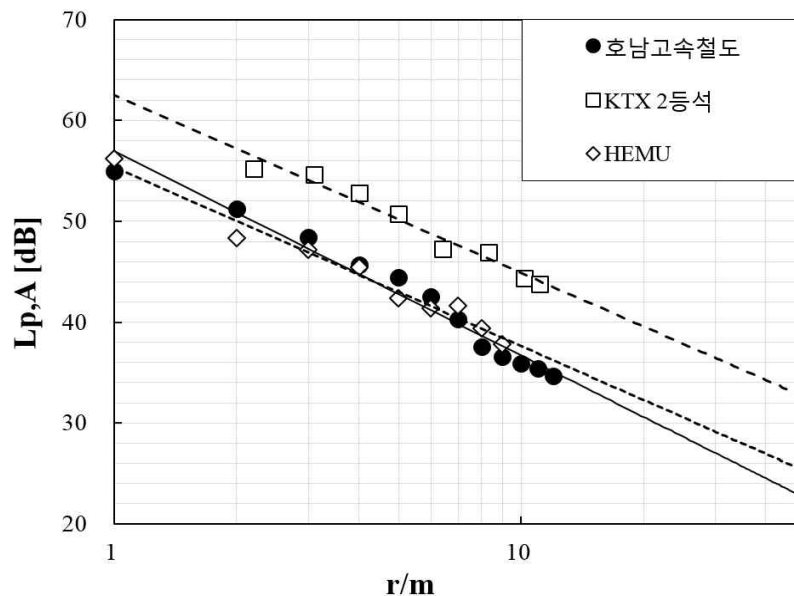


그림15. 호남고속철도, KTX, HEMU privacy 지표 측정결과 비교

(4) Speech privacy(STI, r_p) 평가 결과

- Speech privacy 지표를 평가하기 위하여, 배경소음 레벨은 300km/h 주행 시 기준 66.0 dBA로 설정하여 분석을 진행하였다. STI 평가 결과 KTX 일반석 > 호남고속철도 > HEMU 순으로 높게 분석되었다. 이는 KTX 일반석의 경우 의자간 사이 간격이 높이가 1.1 m로서 음성전달이 되는 구조로 나타났고, 호남고속철도의 경우 의자 높이가 1.1m로 동일하나, 의자 사이의 간격이 좁아 낮은 STI 값을 나타내는 것으로 사료된다. HEMU의 경우 의자높이가 다른 열차에 비해 0.06 m 높게 설계 되어 STI값이 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 STI 값에 영향을 주는 주요인인 음압레벨 분석 결과 KTX 일반석 > 호남고속철도 > HEMU 순으로 높게 나타났으며, 음압레벨 값의 영향으로 STI 값이 유사한 경향으로 도출되었다. Speech privacy 확보거리를 나타내는 r_p 분석 결과 호남고속철도는 1.7m의 값으로 약 2열, KTX 일반석의 경우 3.8m로 약 4열 이후부터 speech privacy가 확보되는 것으로 확인되었다.

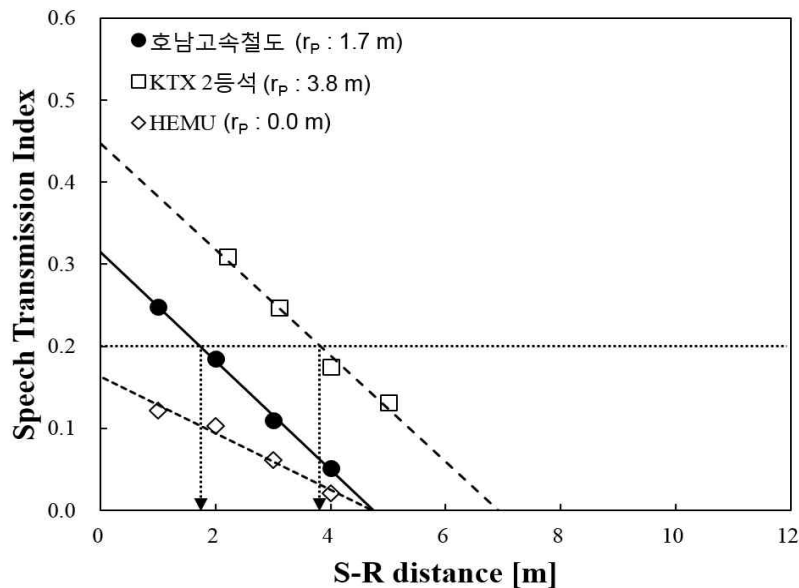


그림16. 호남고속철도, KTX, HEMU STI, r_p 결과 비교

(5) 객차 음환경 평가 소결

- 호남고속철도 현장 평가를 통하여 객실 내 음향지표를 평가한 결과 HEMU와는 유사한 경향성을 나타내고 있었으며, KTX 일반석의 경우, 낮은 잔향과 높은 명료도를 나타내는 것으로 분석되었다. 오피스 파라미터 분석결과 스피치레벨을 나타내는 $L_{p,A,s,4m}$ 값은 KTX 일반석이 가장 크게 분석되었으며, 스피치레벨 저감량을 나타내는 $D_{2,s}$ 값은 호남고속철도가 가장 크게 나타났고, Speech privacy 평가 결과 호남고속철도는 300km/h 주행 시 기준 약 2열 이후, KTX 일반석의 경우 4열 이후 privacy가 보장되는 것으로 분석결과 나타났다.

나. 호남고속철도 시뮬레이션 모델 구축

(1) 평가 목적 및 방법

- 본 장에서는 평가한 현장 측정 결과 기반으로 객차 내 설계 요소 도출을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 구축하였다. AutoCAD 2009 프로그램을 사용하여 컴퓨터 모델링 작업을 진행하였고 음향 분석 프로그램인 Odeon 11.23을 통하여 현장 측정 결과와 동일한 음장 특성을 구현하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 평가 지점은 현장 측정과 동일한 지점으로 설정하였고, 내장 재료의 흡음 특성은 실제 재료 흡음률 데이터베이스 기반으로 시뮬레이션 매칭을 진행하였다.



그림17. 호남고속철도 실제 객차 (좌), 컴퓨터 시뮬레이션 모델 (우)

(2) 잔향시간(RT) 평가 결과

- 시뮬레이션 모델 평가 결과, 전 지점 주파수대역별 잔향시간이 현장측정 결과와 오차 범위는 1% 이내로 유사한 잔향 특성을 구현하였고, 거리별 잔향시간 결과 최대 0.03s의 차이값이 나타나지만 평균 잔향시간 값이 0.23 s로 동일한 잔향시간을 나타내는 것으로 분석되었다.

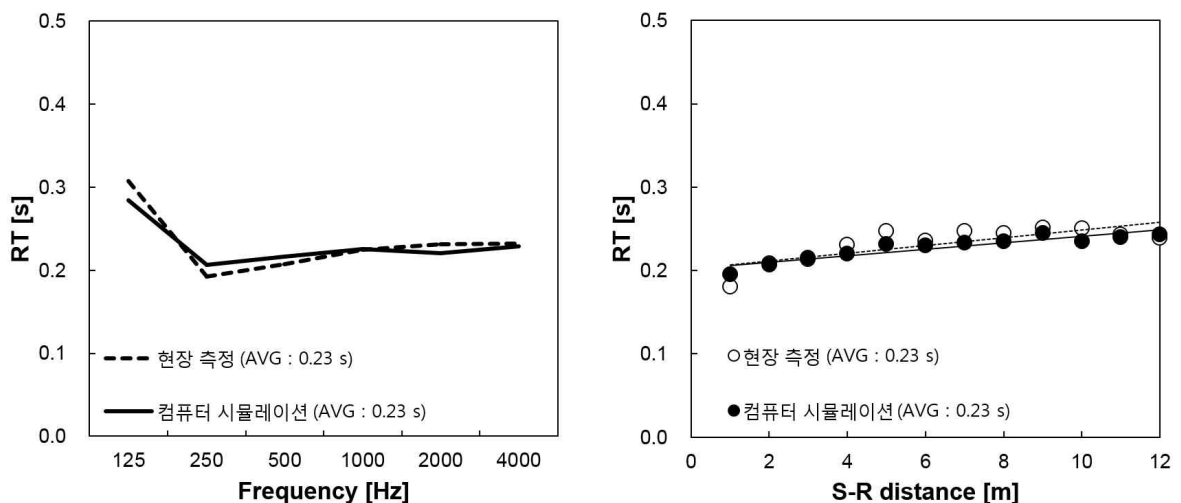


그림18. 호남고속철도 시뮬레이션 주파수 대역별 잔향시간 결과

(3) 오피스 파라미터 평가 결과

- $L_{p,A,S,N,4m}$ 및 $D_{2,s}$ 지표에서 현장 측정결과와 1 dB 이내의 오차를 나타내는 것으로 평가 되었고, 유사한 특성을 나타냈다.

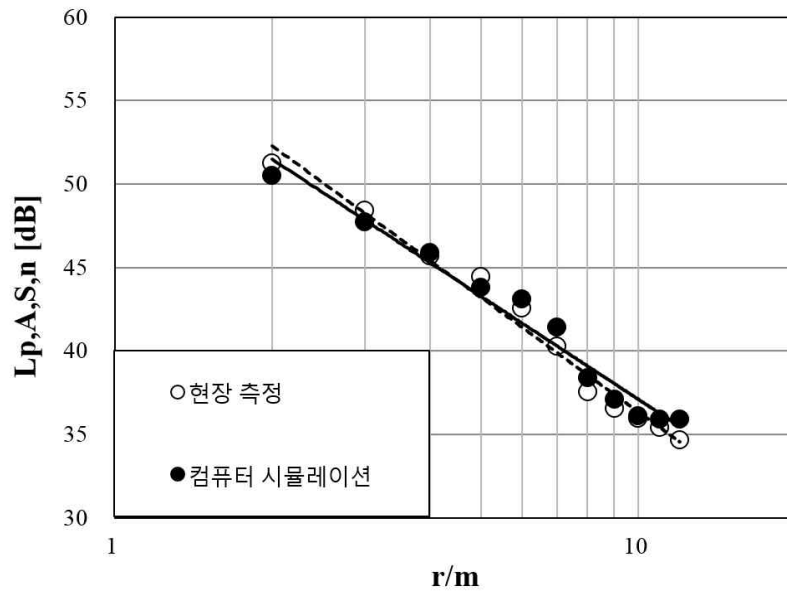


그림19. 호남고속철도 시뮬레이션 privacy 지표 평가

(4) Speech privacy 평가 결과

- STI 평가결과 거리가 증가함에 따라 감소 경향성이 현장측정과 유사한 것으로 분석 되었으며, 1.4m 의 동일한 r_p 값이 도출되었다.

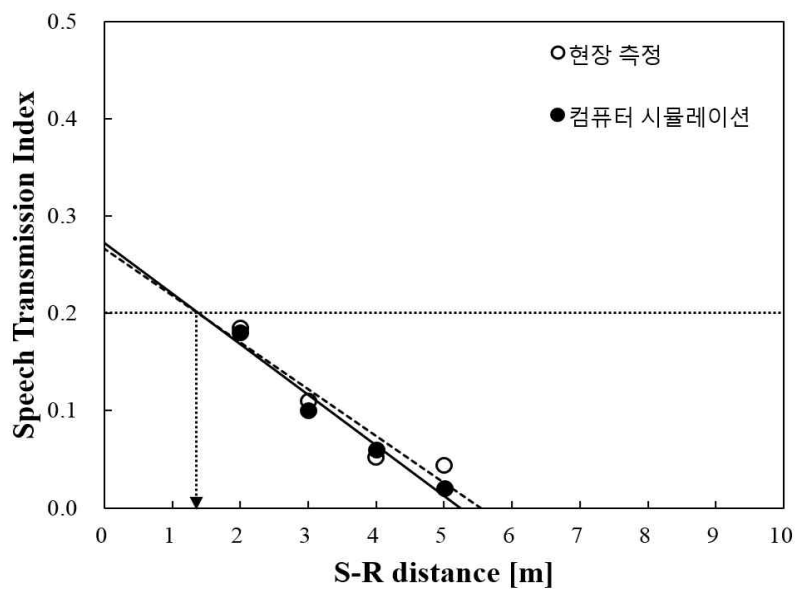


그림20. 호남고속철도 시뮬레이션 STI, r_p 지표 평가

다. KTX 일반석 의자 흡음률 측정

(1) 실험셋업

- 측정대상: 한국철도공사 수도권차량 정비단 KTX 일반석 의자 20석 대여
- 측정 장소: 한국건설기술연구원 음향시험동 잔향실
- 측정일시: 2012년 10월 11일
- 측정법: ISO 354에 의한 흡음계수 측정은 잔향실 내부에서 진행되었으며, J mounting 법에 준하여 18T 합판 격벽을 사용하여 측정 시료의 측면 흡음의 영향을 제거하였다. MLS 음원을 사용하여 음원 2지점, 리시버 10지점에 대한 시료 유무의 잔향시간 측정 결과를 통해 의자의 흡음계수를 도출하였다.



그림21. KTX 일반석 의자 흡음률 측정

(2) KTX 일반석 의자 흡음계수 측정 결과

- KTX 일반석 의자는 일반 공연장 의자 중 흡음률이 높은 의자에 비해 상당히 높은 흡음계수를 나타내었다. 이는 의자의 두꺼운 폼과 높은 등받이 높이의 영향으로 사료되며, 흡음계수가 높을수록 사람 유무에 따른 흡음률 차이가 상대적으로 적게 나타난다. 본 측정 결과를 바탕으로 이하 KTX 평가는 승객이 포함되지 않은 상태로 평가를 진행하고자 한다.
- 본 실험 결과는 컴퓨터 시뮬레이션 및 축소모형 구축을 위한 KTX 일반석 의자 흡음률의 데이터로 활용되었다.

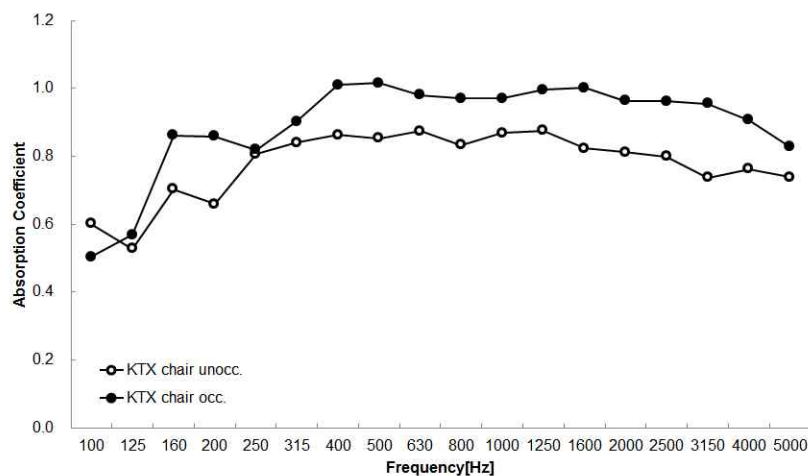


그림22. KTX 일반석 의자 흡음률 측정결과 (Unocc.: 공석시, Occ.: 승객 만석시)

2.2 시뮬레이션과 축소모형 평가

가. 고속열차 내장재료 흡음률 변화에 따른 speech privacy 영향 평가

(1) 평가 목적 및 개요

- 구축한 시뮬레이션 모델을 통하여 부위별 흡음률 변화에 따른 speech privacy 영향 예측하여 객차 내 설계요소를 도출하였다. 평가대상열차는 KTX 일반석으로 설정하였고, 통로 측 좌석에서 평가를 진행하였다. 평가는 천장, 측벽, 단부벽, 바닥, 선반의 내장 재료의 흡음특성을 단계별로 변화하면서, 부위별 speech privacy 변화 및 개선에 영향력을 평가하였다. 천장, 측벽, 단부벽, 선반의 흡음률은 전 주파수 대역 0.05-0.95 범위로 0.05 단계로 변화하면서 평가를 진행하였고, 바닥 재료 특성 상 0.95의 흡음률은 현실성이 없기 때문에, 바닥 흡음재의 사례조사를 통해 0.05-0.40의 범위로 설정하여 평가를 실시하였다.

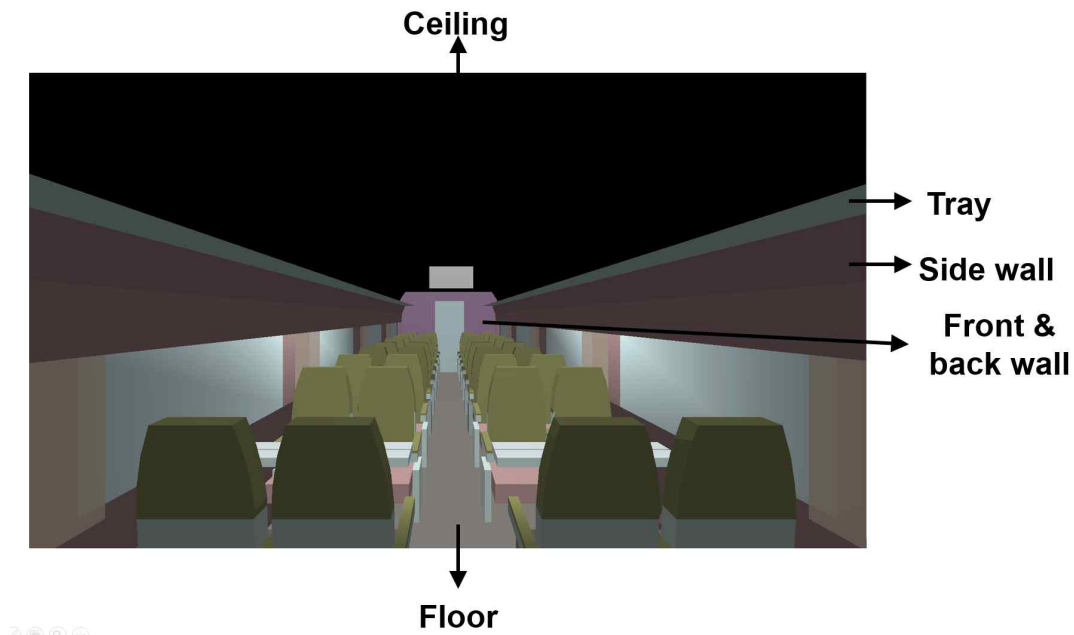


그림23. 시뮬레이션 부위 별 적용 위치

표 19. 시뮬레이션 부위 별 흡음률 영향 평가를 위한 단계별 흡음률

Elements	Absorption coefficient (125 - 4000 Hz, AVG)	Interval
Ceiling	0.05 - 0.95	0.05
Side wall	0.05 - 0.95	
Front & back wall	0.05 - 0.95	
Tray	0.05 - 0.95	
Floor	0.05 - 0.40	

(2) 평가 결과

- 흡음률 변화(0.05-0.95)에 따라 r_p 변화량을 분석한 결과, 천장, 측벽, 단부벽 순으로 감소량이 큰 것으로 확인되었다. 천장의 경우 최대 1.1 m의 감소되었으며, 측벽은 0.98m, 단부벽은 0.35m의 감소하는 경향을 나타냈다. 단부벽의 경우 r_p 감소량이 작지만, 특정 흡음률 구간에서 단계별로 감소하는 경향을 나타내기 때문에, 영향력이 있다고 판단하였다. 선반과 바닥의 경우에는 흡음률 변화에 따라 크게 경향성이나 영향력이 나타나지 않았다.

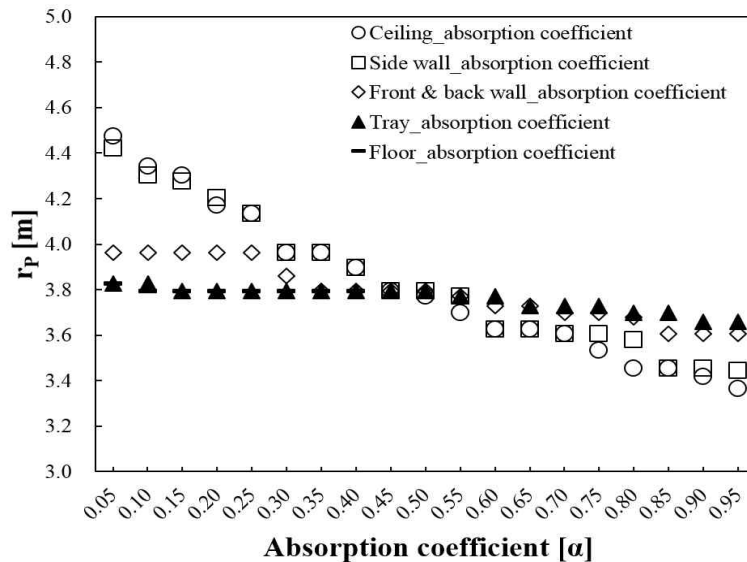


그림 24. 부위별 재료 흡음률 변화에 따른 r_p 변화량 평가

표 20. 부위별 재료 흡음률 변화에 따른 r_p 변화량 평가 결과

Elements	Speech privacy distance (r_p), [m]		
	Maximum ($\alpha=0.95, 0.40$)	Minimum ($\alpha=0.05$)	Difference
Ceiling	4.47	3.37	1.10
Side wall	4.42	3.44	0.98
Front & back wall	3.96	3.61	0.35
Tray	3.83	3.66	0.17
Floor	3.83	3.79	0.04

(3) 소결

- 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 통하여 부위별 흡음률 변화에 따라 speech privacy에 영향을 미치는 요소를 평가하였고, 평가 결과, 천장 > 측벽 > 단부벽 > 선반 > 바닥 순으로 r_p 감소에 영향력이 있는 것으로 나타났다. 선반과 바닥의 경우 재료 변화에 따른 영향이 미미한 것으로 확인되었고, speech privacy 개선을 위해서 내장 재료를 변경해야 할 경우 천장, 측벽, 단부벽 순으로 변화하는 것이 효과적인 것으로 분석결과 평가되었다.

나. 축소모형을 이용한 내장재료 흡음률 변화에 따른 speech privacy 영향 평가 검증

(1) 측정 목적 및 개요

- 시뮬레이션 평가를 통하여 천장, 측벽, 단부벽이 speech privacy에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이를 검증하기 위하여 축소모형에서 각 부위의 흡음특성을 변화하여 평가를 진행하였다. 대상 열차는 시뮬레이션 모델과 동일하게 KTX 일반석 1:10 축소모형을 선정하였고, 측정 지점은 시뮬레이션 측정지점과 동일하게 설정하였다. STI 분석을 위한 배경소음레벨은 300km/h 주행속도인 66.0 dBA로 설정하여 분석을 진행하였다. 측정케이스는 단일케이스와 콤비네이션 케이스로 분류하여 평가를 계획하였다. 단일케이스의 경우, 천장 흡음률 변화 (3 cases), 측벽 흡음률 변화(3 cases), 단부벽 흡음률 변화 (3 cases)로 평가를 진행하였으며, 부위별로 큰 영향력을 나타내는 재료를 조합하여 콤비네이션 케이스 (4 cases) 평가를 실시하였다.

(2) 축소모형 재료 선정

- 평가에 앞서 국내외 고속열차에 적용된 내장 재료의 흡음률 데이터를 기반으로 축소모형에 적용할 재료를 선정하였다. 천장과 측벽부위에는 고속열차에서 사용되고 있는 낮은 흡음률 특성의 5mm laminated plywood과 높은 흡음률 특성의 Perforated metal 재료를 설정하였고, 단부벽에는 낮은 흡음률 특성을 가진 Moquette과 높은 흡음률 특성을 가진 Laminated panel를 설정하였다. 중간 흡음률 재료로는 기존의 사용되고 있는 Honeycomb panel로 설정하여 평가를 진행하였다.

표 21. 국내외 고속열차 내장재료 흡음률 데이터

Details	Absorption coefficient						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz	AVG
5mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
Moquette	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37	0.21
Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
Laminated panel	0.69	0.76	0.65	0.86	0.83	0.75	0.76
Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78

표 22. 축소모형 내장재료 흡음률 측정 값

Details		Absorption coefficient						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1kHz	2kHz	4kHz	AVG
실제 재료	5mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
	Moquette	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37	0.21
	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
	Laminated panel	0.69	0.76	0.65	0.86	0.83	0.75	0.76
	Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78
축소 모형 재료	Acryl 2T + polyurethane 5T + kraft paper	0.24	0.23	0.18	0.14	0.07	0.04	0.15
	Foam board 3T + cardboard	0.03	0.10	0.23	0.31	0.31	0.31	0.22
	Cardboard + textiles (2 sheets) + cardboard + kraft papers (4 sheets)	0.29	0.41	0.45	0.43	0.40	0.44	0.40
	Carpet + foamed PVC 2T + polyurethane 5T+2 cardboard	0.67	0.69	0.77	0.75	0.74	0.74	0.74
	Carpet (Thick) + foam board 3T + polyurethane 5T	0.28	0.69	0.98	0.99	0.95	0.85	0.79
실제 재료 - 축소모형 재료 (차이값)		0.04	-0.01	-0.01	-0.05	0.03	0.07	0.01
		0.06	-0.02	-0.02	-0.05	-0.04	0.06	-0.01
		-0.02	-0.03	-0.02	0.02	0.01	-0.02	-0.01
		0.02	0.07	-0.12	0.11	0.09	0.01	0.02
		-0.03	-0.05	0.01	-0.02	-0.07	0.07	-0.01

- 조사된 실제 재료의 흡음 특성을 축소모형 재료로 구현하기 위해서 ISO 354, A mounting 측정 방법으로 1: 10 잔향 챔버에서 흡음률 측정을 진행하였다. 축소모형 재료로는 아크릴, 크래프트지, 폼팩스, 폼보드, 직물 등의 재료를 조합하여 평가를 진행하였으며, 평균 오차 범위 0.05 미만으로 흡음특성을 구현하도록 재료 조합을 실시하였다. 평가결과 축소모형 재료를 조합하여 흡음률을 측정한 결과, 흡음률 평균 0.02 미만의 오차범위로 실제 재료와 유사한 흡음 특성을 가진 축소모형 재료들이 선정되었다.

(3) 축소모형 측정 결과의 불확도 검토

- 고속열차 축소모형 측정 결과의 신뢰성 검증을 위하여 측정 결과의 반복성(Repeatability)와 재현성(Reproducibility)평가를 진행하였다. 축소모형의 중앙지점에서 잔향시간(RT)을 2분 간격으로 반복하여 4회 측정하였을 때(반복성), 잔향시간의 500-1kHz 평균값이 ± 0.001 초, 표준편차가 0.001초로 나타났다. 제2의 측정자가 천장 마감재 제거 후 재 설치하여 통로 측 좌석 8개 지점에서 총 3회 측정을 진행하였을 때(재현성), 잔향시간의 최대 차이가 0.014초, 표준편차가 0.007초로 매우 낮은 불확도를 나타내었다.

(4) 단일케이스 평가 결과

- 천장 케이스 평가
 - 천장의 흡음재료만 변화시킨 천장 케이스 평가 결과 앞쪽 좌석에서 STI의 값이 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이는 1차 반사음의 주경로인 천장에서 흡음률 증가에 따른 반사음 감소로 인하여 STI 값이 크게 변화하는 것으로 사료된다. STI 값의 감소에 따라 r_p 변화는 2.33 ~ 4.49m 범위로 변화하였으며, 기존의 열차 케이스와 비교하였을 때, r_p 감소량이 1.05m로 1열 정도의 privacy 개선효과가 나타날 것으로 분석되었다.

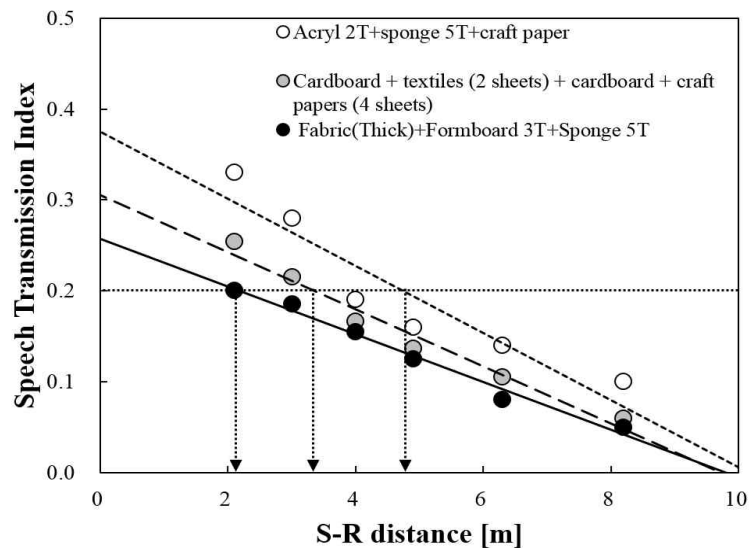


그림25. 천장 흡음력 변화에 따른 STI, r_p 변화

- 측벽 케이스 평가

- 천장 케이스와 유사하게 앞쪽 좌석에서 STI 값이 변화하지만 내장재료 적용면적에 따른 흡음력의 영향으로 인하여 r_p 감소량이 다소 적은 것으로 분석결과 나타났다. 또한 의자에 의해 반사음이 미리 감소되기 때문에 측벽 흡음률 변화에 따른 privacy 영향력이 다소 감소된 것으로 사료된다. r_p 변화는 2.63~3.83 m의 범위로 변화하였으며, 기존의 열차 케이스와 비교하였을 때, 천장보다 다소 작은 0.7m의 감소량으로써 1열미만의 privacy 개선효과가 나타날 것으로 분석되었다.

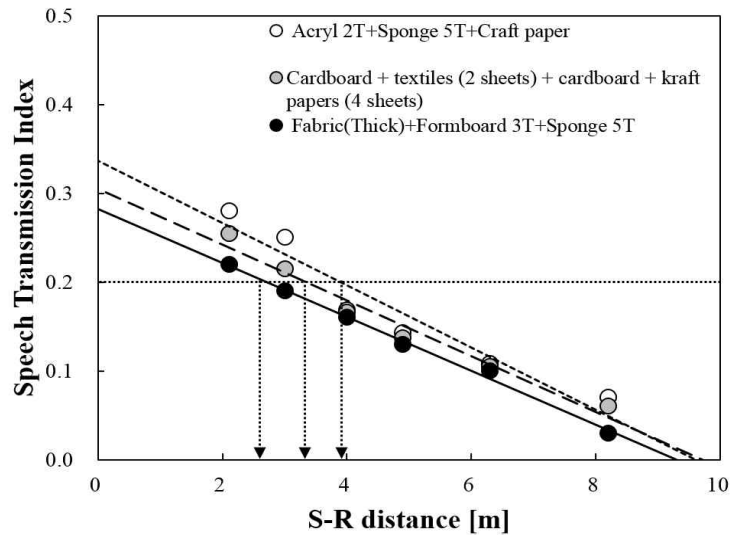


그림26. 측벽 흡음력 변화에 따른 STI, r_p 변화>

- 단부벽 케이스 평가

- 단부벽의 흡음률 변화에 따른 영향력은 다른 케이스에 비해 재료 적용 면적 자체가 작기 때문에 STI 변화량이 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 재료의 적용위치가 객차 앞뒤에 구성되어 있기 때문에, 영향력은 적지만 앞뒤좌석에서 STI 값에 차이를 보이는 것으로 분석되었다. r_p 변화는 3.21~3.43 범위로 변화하고 기본케이스와 비교 시 0.17m 감소하는 것으로 보아 privacy 개선효과는 기대하기 어려울 것으로 사료된다.

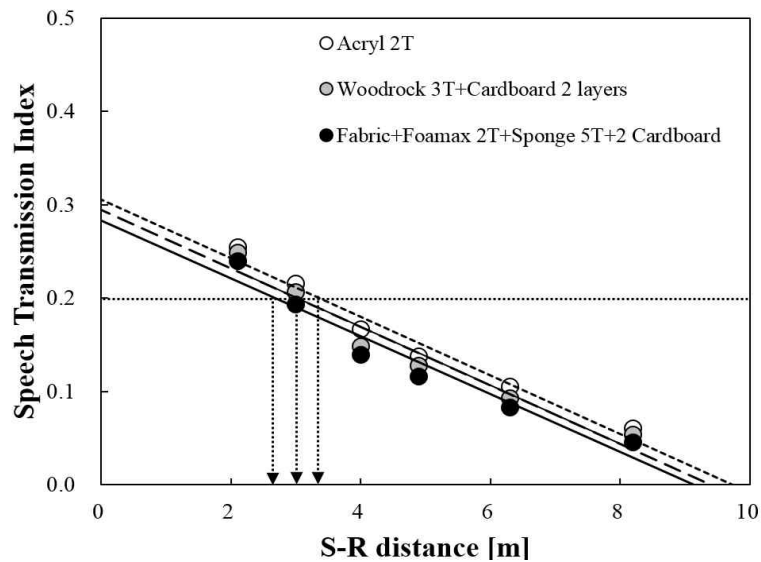


그림27. 단부벽 흡음률 변화에 따른 STI, r_p 변화

- 컴비네이션 케이스 평가

- 컴비네이션 케이스 평가 결과 기본 케이스에 비해 전체적으로 STI와 r_p 값이 감소하는 것으로 나타났다. 단일케이스 평가 결과와 유사하게 천장 재료변화가 포함되어 있는 케이스에서 큰 r_p 감소량이 나타났고, 단부벽에 의한 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 이는 흡음력과 STI, r_p 값이 선형관계를 나타내는 것으로 사료되며, 흡음력이 증가할수록 Privacy 개선효과가 크게 나타나는 것으로 확인되었다. r_p 변화는 모든 부위에 흡음률을 증가 시켰을 때, 기본케이스에 비해 최대 1.62m 감소함으로써 약 2열 정도의 privacy 개선효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

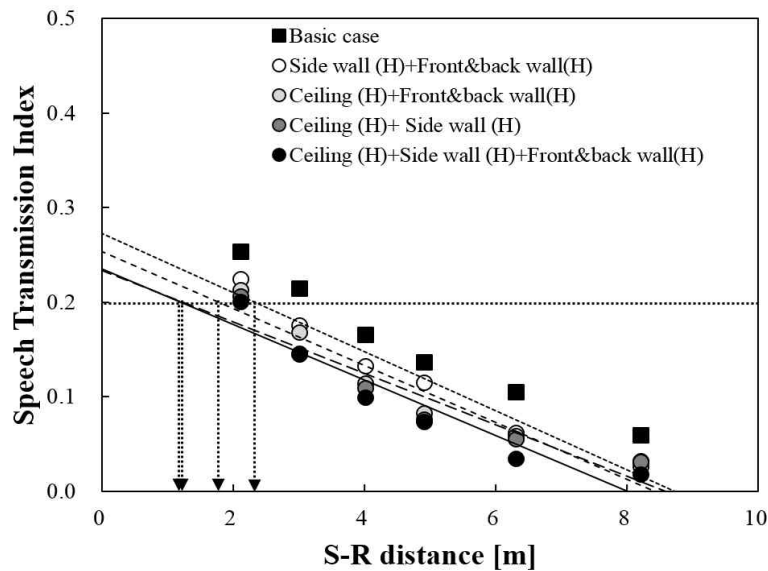


그림28. 컴비네이션 흡음력 변화에 따른 STI, r_p 변화

(5) 소결

- 단일케이스 평가 결과 부위별 내장 재료의 흡음률을 변화시켰을 때, 적용 면적에 따른 흡음력의 영향으로 인하여 천장, 측벽, 단부벽 순으로 r_p 값이 감소하는 것으로 분석되었다. r_p 감소량은 천장 (1.05m) > 측벽 (0.70m) > 단부벽 (0.17m)으로써 최대 1열 정도의 개선효과를 나타내는 것으로 확인되었다.
- 컴비네이션 케이스 평가 결과 객차 내 흡음력 변화에 따라 최대 r_p 1.62 m 감소하였으며, 이는 2열 정도의 privacy 개선효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

다. 의자 칸막이 설치에 따른 speech privacy 영향 평가

(1) 평가 배경

- 본 장에서는 기존의 해외 고속열차(ALSTOM ETR 500, Italy)에 적용되어 있는 의자 상부 칸막이를 기반으로 국내 고속열차인 KTX 일반석에 적용하였다. 이전 2차년도 연구 결과 의자 높이에 따른 privacy 개선효과가 검증되었기 때문에, 의자 상부 칸막이 설치 또한 영향이 있을 것으로 사료되어 평가를 계획, 진행하였다.

(2) 평가 개요

- 의자 상부에 칸막이 설치에 따른 speech privacy 영향을 평가하기 위하여 시뮬레이션 평가를 진행하였다. 평가 열차는 이전 시뮬레이션 모델과 동일하게 KTX 일반석으로 설정하였으며, 평가 지점과 평가 요소 또한 동일하게 구성하여 평가를 진행하였다. 의자 칸막이 케이스는 의자 상부로부터 0cm, 10 cm, 20 cm 높이를 변화시켰으며, 의자 칸막이의 흡음률은 기존 유리재질의 흡음률을 적용하여 평가하였다.

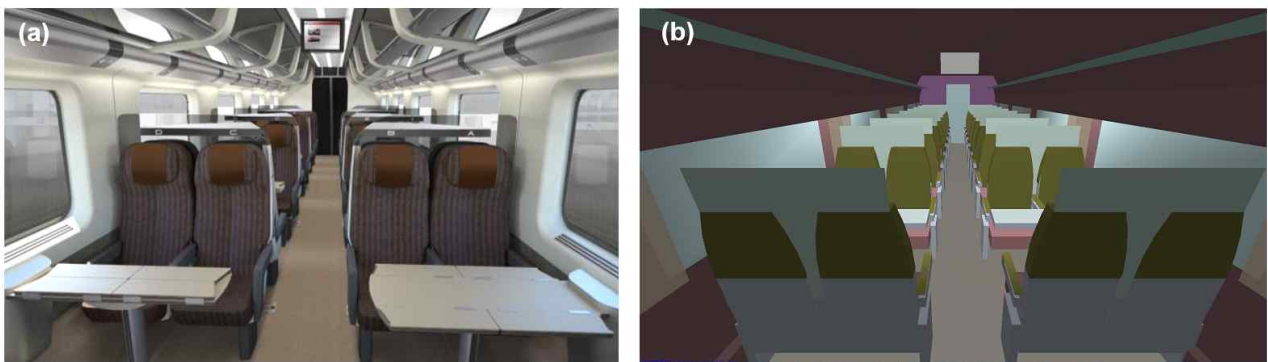


그림29. 의자 칸막이에 대한 사례 및 시뮬레이션 모델: (a) ALSTOM ETR 500 (Italy), (b) KTX 일반석 시뮬레이션 모델링

표 23. 시뮬레이션에 적용된 의자 칸막이의 흡음계수

Case	Absorption coefficient						
	125	250	500	1k	2k	4k	AVG
Glass	0.17	0.11	0.05	0.08	0.06	0.12	0.10

(3) 의자 칸막이 평가 결과

• Speech privacy 지표 평가 결과

- Speech privacy 지표인 STI와 r_p 평가 결과 의자 상부에 20cm의 칸막이를 설치하였을 때, 최대 r_p 3.1m 감소하는 것으로 나타났다. 이는 스피치 레벨의 전달 경로가 차단되어 STI 값이 전체적으로 감소하였고, 그에 따라 r_p 가 크게 감소한 것으로 분석되었다. 또한 칸막이 높이가 10cm → 20cm 변화 될 경우 r_p 감소량이 0.3m로서, 높이 변화량에 비해 상대적으로 효과가 미미한 것으로 나타났다. 앞서 도출된 결과 칸막이가 음원보다 높게 설치되었을 때, speech privacy 개선효과가 나타나는 것으로 확인되었다.

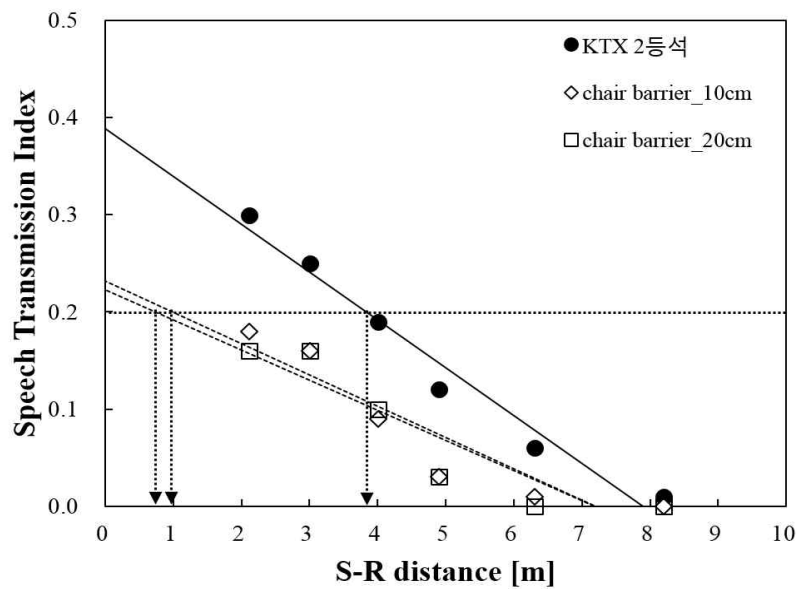


그림30. 의자 칸막이 높이 변화에 따른 r_p 변화량 평가

- 오피스 파라미터 평가 결과

- 4m 지점의 스피치레벨을 나타내는 $L_{p,A,s,4\text{ m}}$ 분석 결과 4.4 dB의 감소량을 나타냈으며, 거리 증가에 따른 스피치 레벨의 저감량은 2.5 dB로 의자 칸막이가 speech privacy 개선에 효과적인 것으로 분석되었다.

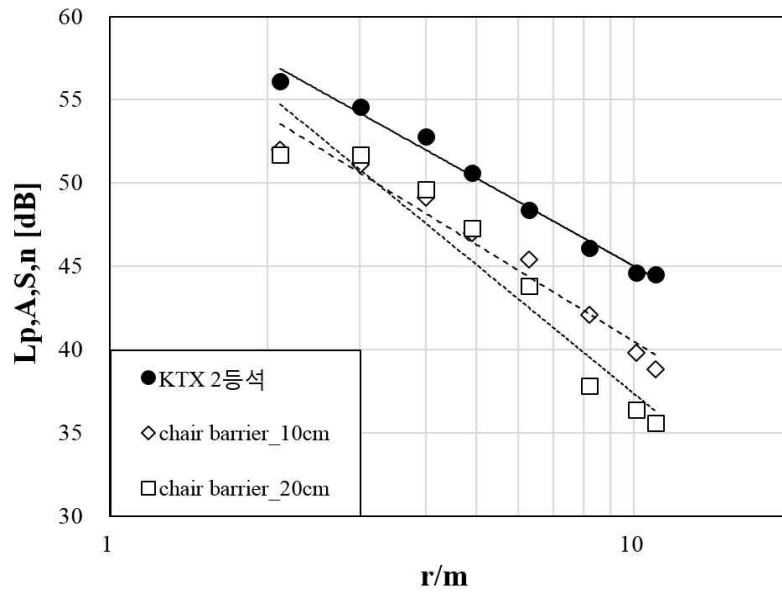


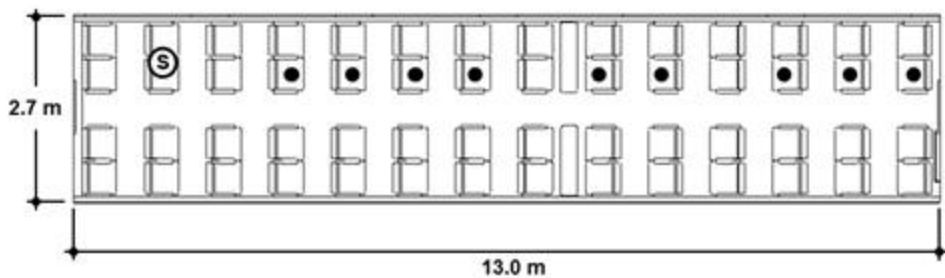
그림31. 의자 칸막이 높이 변화에 따른 r_p 변화량 평가

2.3. Speech privacy 설계 가이드라인

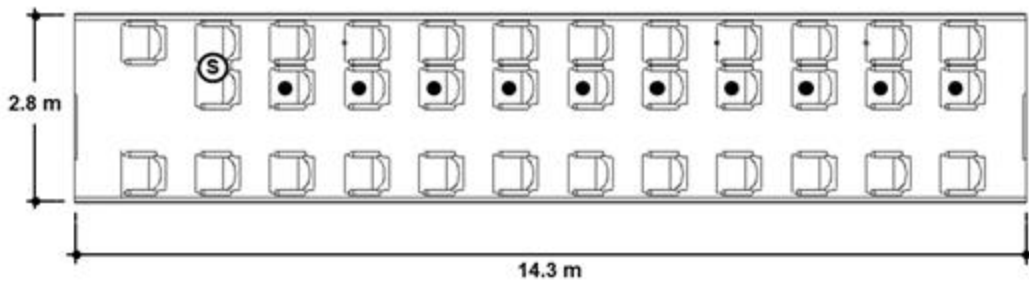
가. 열차별 내장재료 변화에 따른 speech privacy 변화

(1) 평가 개요

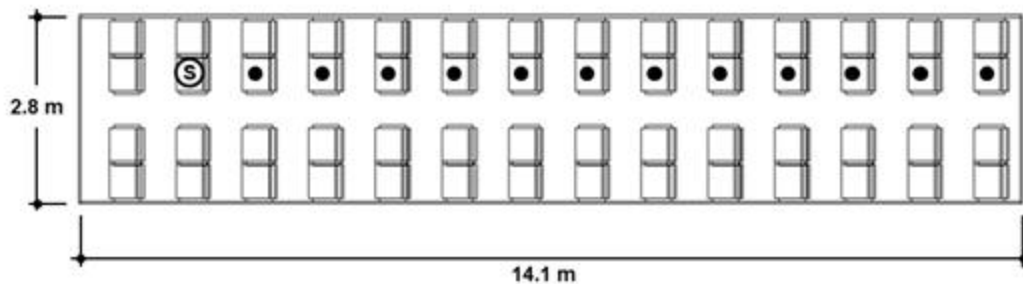
- 고속 열차의 speech privacy 설계 가이드라인을 도출하기 위하여 국내 4개의 고속열차 객실을 대상으로 설계 요소 중 하나인 내장재료 변화에 따른 speech privacy 평가를 진행하였다. 고속열차 객실은 KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도, HEMU를 대상으로 실시하였으며, 현장 측정 기반으로 구축된 컴퓨터 시뮬레이션 모델로 평가하였다. 음원 및 수음점은 4개 열차 동일하게 무지향성 음원을 설정하였고, 수음점은 통로 측 좌석으로 설정하여 평가를 진행하였다. STI 분석을 위하여 배경소음레벨은 자갈도상 주행 시 300km/h의 소음레벨을 사용하였으며, 위의 축소모형 평가를 위해 조사된 실제 재료의 흡음률을 천장, 측벽, 단부벽에 적용하였다.



(a) KTX 일반석



(b) KTX 1등석



(c) 호남고속철도

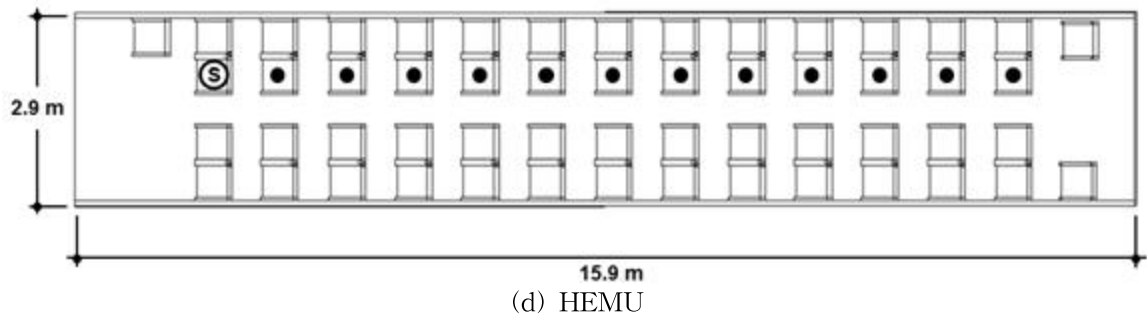


그림32. 고속열차 시뮬레이션 구축을 위한 평면도 및 주요 평가 지점

- 시뮬레이션의 구축은 현장측정 음향 환경 구현을 목표로 RT는 시뮬레이션과 현장측정 결과 간 차이가 0.01초 이내, $L_{p,A,S,4m}$ 는 0.3 dB 이내, $D_{2,s}$ 는 0.7 dB 이내, r_p 는 0.13m 이내로 음향적인 매칭을 하였다.

표24. 현장측정과 시뮬레이션 모델의 평가 결과 및 음향적 매칭 비교

High Speed Train		RT (sec)	$L_{p,A,S,4m}(dB)$	$D_{2,s}(dB)$	$r_p(m)$
A	Field measurement	0.19	51.7	5.2	3.77
	Computer simulation	0.18	51.9	5.3	3.79
B	Field measurement	0.18	51.8	6.6	4.95
	Computer simulation	0.18	52.1	5.3	5.08
C	Field measurement	0.23	45.4	6.9	1.37
	Computer simulation	0.23	45.3	6.2	1.38
D	Field measurement	0.24	47.4	7.0	0.00
	Computer simulation	0.24	47.4	6.4	0.08

표 25. 시뮬레이션에 적용된 부위별 내장재료 흡음계수

Elements	Details	Absorption coefficients by frequency						AVG
		125Hz	250 Hz	500Hz	1k	2k	4k	
Ceiling	5 mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
	Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78
Side wall	5 mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
	Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78
Front & back wall	Moquette	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37	0.21
	Front & back wall	0.25	0.60	0.50	0.45	0.45	0.28	0.42
	Laminated panel	0.69	0.76	0.65	0.86	0.83	0.75	0.76

(2) 평가 결과

- 시뮬레이션 평가 결과, 위의 축소모형 평가를 통해 도출된 결과와 같은 경향성으로 천장, 측벽, 단부벽 순으로 r_p 감소가 큰 것으로 분석되었다. 또한 컴비네이션 케이스의 경우 가장 큰 r_p 감소량을 나타냈다. 각 고속열차의 구조 특성 상 기존케이스에서 r_p 가 가장 큰 KTX 1등석이 가장 큰 감소량은 나타냈으며, r_p 가 작게 측정된 HEMU의 경우 감소량이 상대적으로 작게 나타났다. r_p 의 절대적 감소량은 다르지만 4개의 고속열차 (KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도, HEMU) 모두 동일한 경향성을 보이는 것으로 분석되었다.

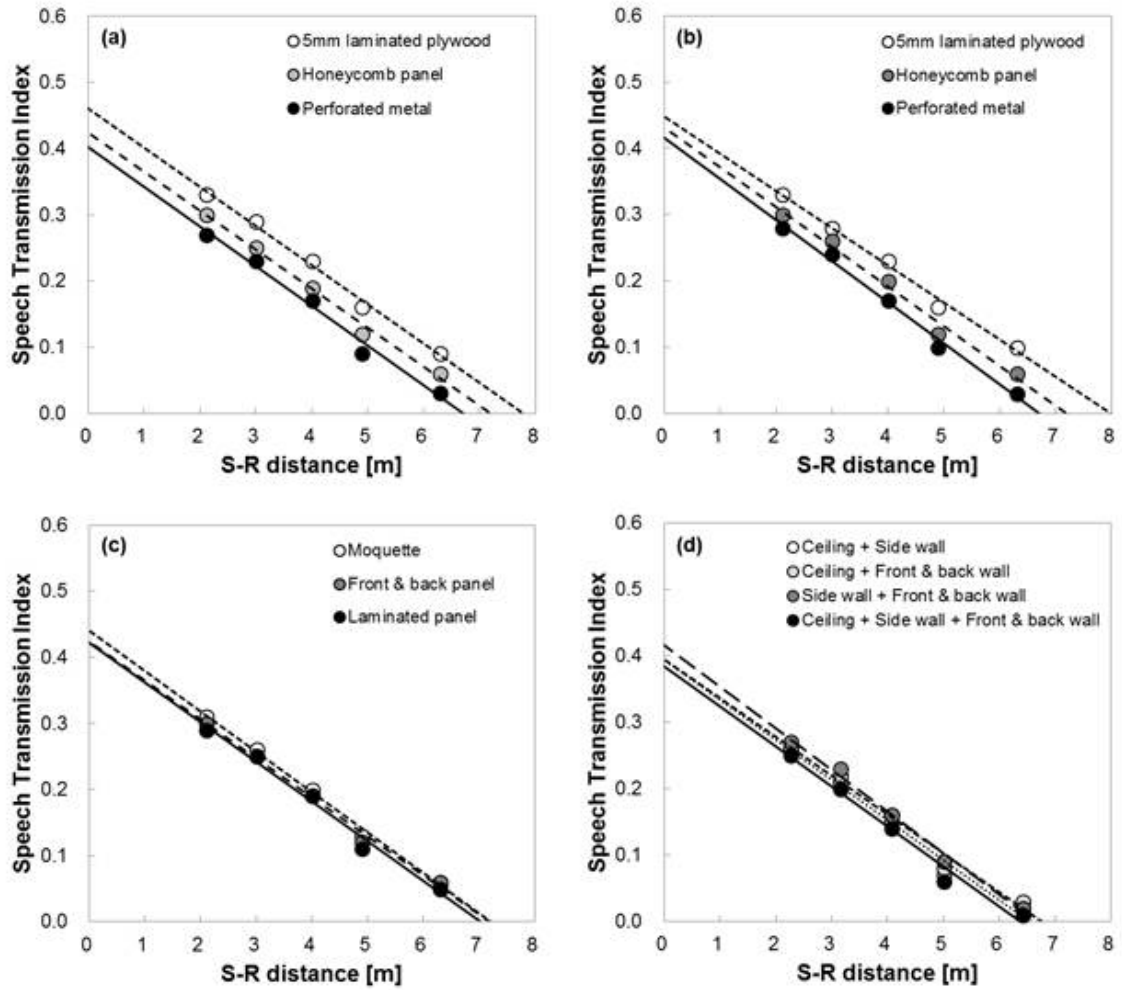


그림33. 내장재료 흡음률 변화에 따른 STI, r_p 변화 결과 - KTX 일반석 : (a) 천장 흡음재료 변화, (b) 측벽 흡음재료 변화, (c) 단부벽 흡음재료 변화, (d) 컴비네이션 흡음재료 변화

표 26. 고속열차별 내장재료 흡음률 변화에 따른 영향 평가 결과

열차 종류	Speech privacy distance (r_p , m)				
	기존 내장재료	천장 변화	측벽변화	단부벽 변화	컴비네이션
KTX 일반석	3.79	4.40-3.37 (0.42)	4.42-3.49 (0.30)	3.93-3.70 (0.09)	3.32-2.93 (0.86)
KTX 1등석	5.08	6.16-3.62 (1.46)	6.41-3.93 (1.15)	5.12-4.72 (0.36)	3.78-2.25 (2.83)
호남고속철도	1.38	1.91- 0.69 (0.69)	1.89-0.69 (0.69)	1.48-1.10 (0.28)	0.76-0.00 (1.38)
HEMU	0.08	0.76-0.00 (0.08)	1.63-0.00 (0.08)	0.27-0.00 (0.08)	0.00-0.00 (0.08)

나. 의자 높이 변화에 따른 speech privacy 변화

(1) 평가 개요

- 2차년도 연구 결과에서 도출된 설계 요소인 의자 높이를 4개의 고속열차 (KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도, HEMU)에 적용하여 speech privacy 평가를 진행하였다. 의자 높이는 1.00-1.20 m로 0.05 간격으로 5단계로 설정하였으며, 배경소음은 자갈도상 주행 시 300km/h의 소음레벨을 사용하였다.

(2) 평가 결과

- 의자 등받이의 높이가 음원의 높이보다 높을 경우, 4개의 고속열차에서 동일한 경향성으로 r_p 값이 크게 감소하여 speech privacy 확보에 효과가 있는 것으로 분석결과 나타났다. 따라서 고속열차 의자 설계 시 승객의 귀높이보다 높은 의자 등받이를 사용하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

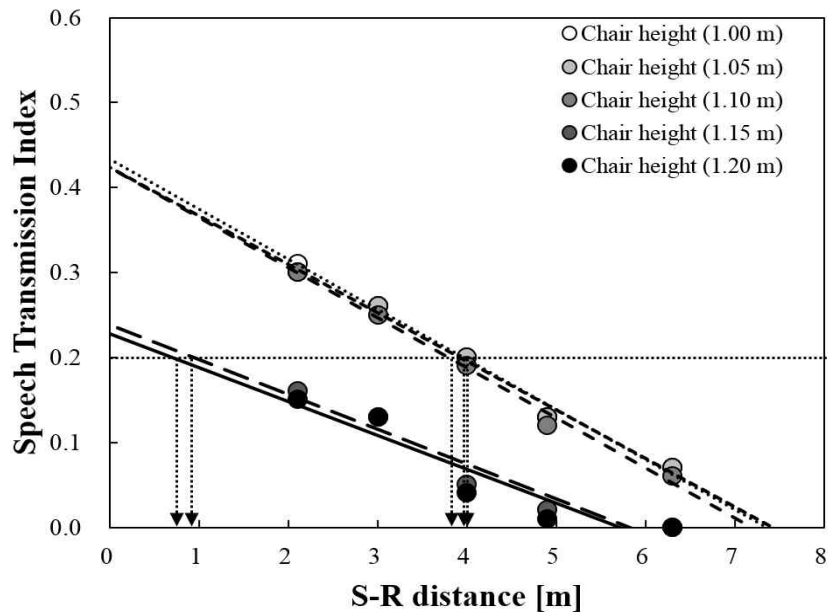


그림34. 의자 높이 변화에 따른 STI, r_p 변화 결과 - KTX 일반석>

표 27. 고속열차별 의자 높이 변화에 따른 영향 평가 결과

의자 높이 (m)	Speech privacy distance (r_p , m)			
	KTX 일반석	KTX 1등석	호남고속철도	HEMU
1.00 m	3.96	7.31	1.64	0.96
1.05 m	3.93	7.10	1.55	0.46
1.10 m	3.79	5.08	1.38	0.08
1.15 m	0.94	4.63	0.00	0.00
1.20 m	0.71	4.23	0.00	0.00

다. 배경소음 변화에 따른 speech privacy 변화

(1) 평가 목적 및 개요

- 배경소음레벨이 작을수록 스피치레벨이 잘 전달되어 STI 값이 높게 나타나기 때문에 speech privacy 지표 분석 시 가장 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 본 장에서는 고속열차의 주행속도에 따라 STI 변화량을 분석하고, 가이드라인 도출 시 하나의 변수로서 설정하기 위하여 평가를 진행하였다. 배경소음레벨은 개활지 자살도상의 100km/h, 200km/h, 300km/h의 소음레벨로 분류하여 실험을 계획하였고, 위의 설계요소평가와 동일한 측정지점에서 평가를 실시하였다.

(2) 평가 결과

- 배경소음레벨 변화에 따라 STI 감소 경향성을 동일하다 STI의 절대 값이 변화하는 것을 확인하였다. 4개의 고속열차에서 모두 유사하게 평가결과가 도출되었고, r_p 변화량은 HEMU, KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도 순으로 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

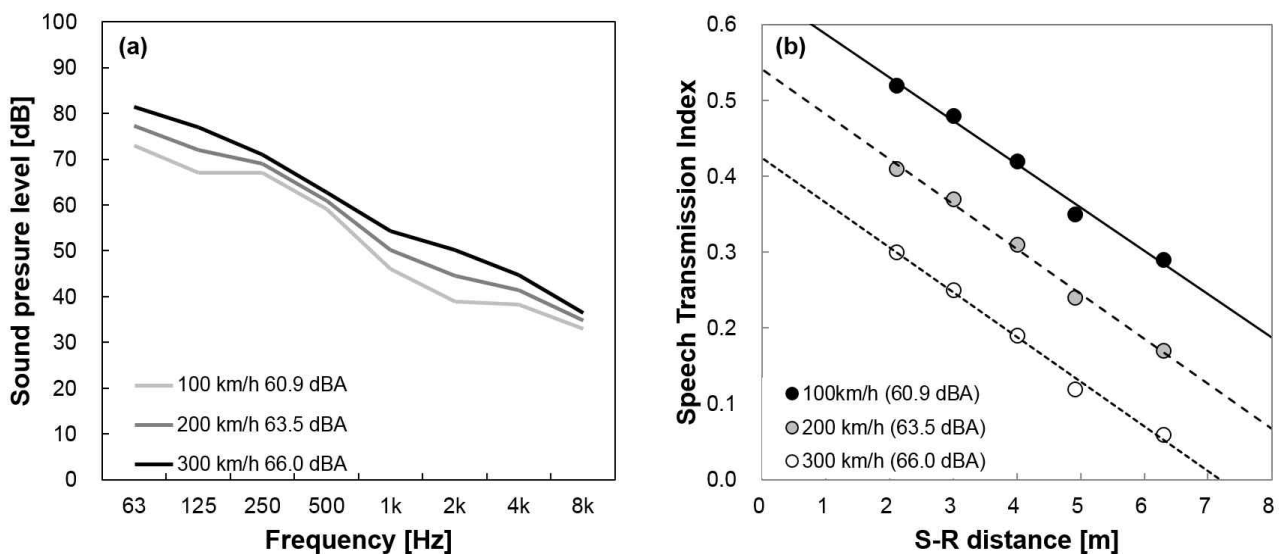


그림35. 배경 소음 변화에 따른 평가 결과 - KTX 일반석 : (a) 배경 소음, (b) STI, r_p 평가 결과

표 28. 고속열차별 배경 소음 변화에 따른 영향 평가 결과

배경소음	Speech privacy distance (r_p , m)			
	KTX 일반석	KTX 1등석	호남고속철도	HEMU
100km/h (60.9 dB)	7.78	9.54	4.86	5.22
200km/h (63.5 dB)	5.75	7.11	3.22	3.04
300km/h (66.0 dB)	3.79	5.08	1.38	0.08
r_p 변화 범위	3.99	4.46	3.48	5.14

라. 설계요소를 고려한 speech privacy 예측식 도출

(1) 평가 개요 및 방법

- 4개의 고속열차의 평가된 설계 요소를 기반으로 speech privacy 설계 가이드라인을 위한 분석을 진행하였다. 설계 가이드라인 도출을 위하여 통계적 방법인 선형회귀 분석을 사용하였으며, 각 기차별 예측식과 4개 고속열차 통합 예측식을 도출하였다. 회귀 분석의 종속 변인으로는 speech privacy 확보 거리인 r_p 를 설정하였으며, 독립 변인으로는 위에서 평가된 설계 요소인 천장 흡음력 (α_C), 측벽 흡음력 (α_{SW}), 단부벽 흡음력 (α_{FBW}), 의자 높이 (C_H), 배경소음레벨(BN)을 설정하였다. 또한 4개의 통합 예측식의 독립변인으로는 각 기차의 용적(V)을 변인으로 추가하여 분석을 진행하였다.

(2) 평가 결과

- 기차별 회귀 분석 결과
 - 각 기차별 회귀분석 결과 공통적으로 실내소음레벨(BN) 변수가 r_p 를 예측하는 데 가장 큰 영향력을 갖는 것으로 분석되었고, 의자높이(C_H), 천장 흡음력(α_C), 측벽흡음력(α_{SW}) 순으로 영향력이 나타나는 것을 확인하였다. 단부벽 흡음력(α_{FBW}) 변수는 유의 확률 0.05 이상으로 r_p 를 예측하는 변수에서 제외되었고, 다른 변수들은 0.05 미만으로써 모두 유의하게 나타났다. 또한 기차별 회귀식의 R^2 이 0.90 이상으로써 높은 설명력을 가지는 것으로 분석되었다.

표 29. KTX 일반석 선형 회귀 모형

모형	비표준화 계수		표준화계수	T-value	유의확률
	B	표준오차	베타		
BN	-0.72	0.04	-0.87	-20.00	0.00
C _H	-16.85	2.17	-0.34	-7.75	0.00
α_C	-0.03	0.01	-0.11	-2.38	0.02
α_{SW}	-0.02	0.01	-0.12	-2.55	0.01
상수항	71.10	3.33	-	21.36	0.00

표 30. KTX 1등석 선형 회귀 모형

모형	비표준화 계수		표준화계수	T-value	유의확률
	B	표준오차	베타		
BN	-0.75	0.04	-0.68	-17.28	0.00
C _H	-22.08	2.60	-0.34	-8.48	0.00
α_C	-0.11	0.01	-0.35	-8.37	0.00
α_{SW}	-0.10	0.01	-0.36	-8.52	0.00
상수항	84.10	3.99	-	21.06	0.00

표 31. 호남고속철도 선형 회귀 모형

모형	비표준화 계수		표준화계수	T-value	유의확률
	B	표준오차	베타		
BN	-0.64	0.03	-0.91	-21.91	0.00
C _H	-8.65	1.75	-0.21	-4.94	0.00
α_C	-0.03	0.01	-0.17	-4.01	0.00
α_{SW}	-0.02	0.01	-0.09	-2.23	0.03
상수항	53.90	2.68	-	20.07	0.00

표 32. HEMU 선형 회귀 모형

모형	비표준화 계수		표준화계수	T-value	유의확률
	B	표준오차	베타		
BN	-0.71	0.05	-0.71	-15.59	0.00
C _H	-19.00	2.40	-0.37	-7.95	0.00
α_C	-0.06	0.01	-0.34	-6.95	0.00
α_{SW}	-0.04	0.01	-0.16	-3.32	0.01
상수항	74.50	4.07	-	18.30	0.00

- 4개 열차 통합 r_p 회귀식 도출

- 위에 분석한 각각의 열차의 변인들을 통합하여 4개의 고속열차 통합 회귀분석을 진행하였다. 각 기차의 용적(V)이 다르기 때문에 추가 독립변인으로 용적이 추가 되었으며, 다른 변인들은 동일하게 적용되어 분석하였다. 분석 결과 각 기차별 회귀분석과 동일하게 BN(-0.58)이 r_p 예측에 가장 큰 영향을 나타냈으며, 용적(V, -0.38), 의자높이(C_H , -0.37), 천장 흡음력(α_C , -0.20), 측벽흡음력(α_{SW} , -0.13) 순으로 영향력이 나타났다. 표준화회귀계수의 실제적 유의성은 보통 ($0.1 < \beta < 0.25$: moderate, $\beta > 0.25$: large (Keith, 2006)) 이상을 나타내었기 때문에 각 설계인자가 유의하며, 각 독립변수는 통계적으로 유의미하였다 ($p < 0.01$). 각 설계인자가 r_p 를 68% ($R^2 = 0.68$) 예측할 수 있는 통합 회귀식을 제시하였다.

표 33. 고속열차 통합 선형 회귀 모형

모형	비표준화 계수		표준화계수	T-value	유의확률
	B	표준오차	베타		
BN	-0.71	0.05	-0.58	-14.86	0.00
V	-0.12	0.01	-0.38	-9.35	0.00
C_H	-23.28	2.50	-0.37	-9.33	0.00
α_C	-0.05	0.01	-0.20	-4.53	0.00
α_{SW}	-0.04	0.01	-0.13	-3.04	0.00
상수항	88.50	4.30	-	20.59	0.00

(3) 소결

- 평가한 설계요소를 기반으로 4개의 고속열차의 speech privacy 예측식을 도출하였다. 각 기차별 예측식 결과 배경소음, 의자높이, 재료의 흡음력 순서로 영향력이 도출되었고, $R^2=0.90$ 이상으로 모두 유의한 예측식이 도출되었다.

KTX 일반석 ($R^2 = 0.91$) : $r_p = -0.72(BN) - 16.85(C_H) - 0.03(\alpha_C) - 0.02(\alpha_{SW}) + 71.1$

KTX 1등석 ($R^2 = 0.92$) : $r_p = -0.75(BN) - 22.08(C_H) - 0.11(\alpha_C) - 0.10(\alpha_{SW}) + 84.1$

호남고속철도 ($R^2 = 0.92$) : $r_p = -0.64(BN) - 8.65(C_H) - 0.03(\alpha_C) - 0.02(\alpha_{SW}) + 53.9$

HEMU ($R^2 = 0.92$) : $r_p = -0.75(BN) - 19.00(C_H) - 0.06(\alpha_C) - 0.04(\alpha_{SW}) + 74.5$

- 4개의 고속열차 통합 예측식 결과 용적(V)이 speech privacy를 설계하는데 중요한 요소로 적용되었으며, $R^2 = 0.68$ 으로 유의한 예측식이 도출되었다.

$$r_p = -0.71(BN) - 0.12(V) - 23.28(C_H) - 0.05(\alpha_C) - 0.04(\alpha_{SW}) + 88.5$$

마. 청감평가 결과 기반 r_p 등급화

(1) STI 단일값 도출

- 각 케이스별 도출된 STI의 경우 거리가 증가함에 따라 감소하게 되고, 그 STI 값이 0.2가 되는 시점의 거리를 r_p 라고 정의 되어 지고 있다. 따라서 STI와 r_p 의 관계를 나타내기 위해서 각 케이스의 거리별 STI를 평균하여 단일 값으로 분석하였고, r_p 와 관계를 나타내었다

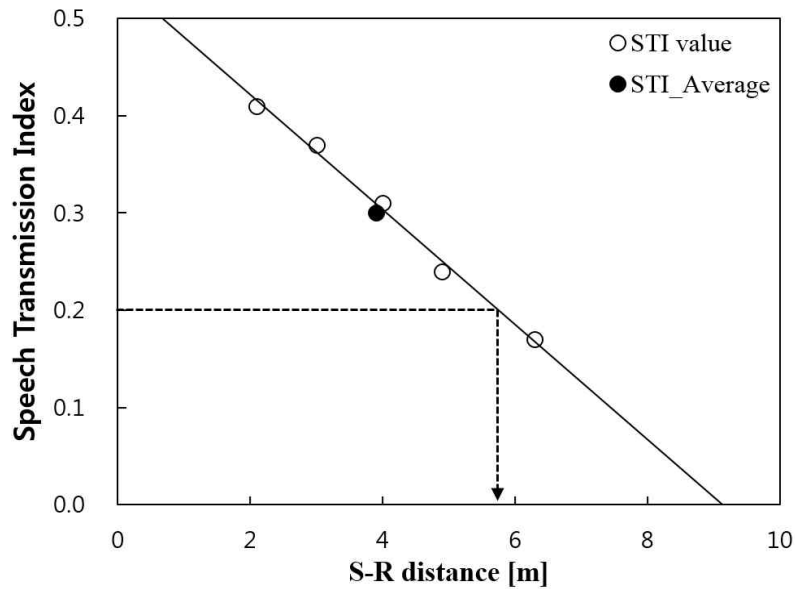


그림36. STI 단일 값 도출 예시

(2) 청감평가 기반 음환경 만족도 영향 평가

- Speech privacy and noise annoyance 평가하기 위하여 청감평가를 실시하였다. 청감평가의 종속변인은 Speech privacy, 집중도, 방해도, 성가심도, 소음민감도, 음환경 만족도로 구성되어 있으며, 독립변인으로는 Background noise (BN) / Signal to noise ratio (SNR)로 구성되었다.
- 실험음원은 대화소리와 배경소음을 동시에 재생하였으며, 대화소리는 팟케스트의 남녀 인터뷰 음원을 사용하였다. 실험음원의 조합으로는 배경소음 3종류와 SNR 8종류의 조합을 통하여 총 24개의 케이스가 설정되었다.

표 34. 청감평가 음원 구성

Background Noise [dBA]	Signal to Noise Ratio [dBA]							
	6	3	0	-3	-6	-9	-12	-15
66 (300 km/h)	72	69	66	63	60	57	54	81
63 (200 km/h)	69	66	63	60	57	54	51	48
60 (100 km/h)	66	63	60	57	54	51	48	45

- 음원의 시간 및 주파수 특성

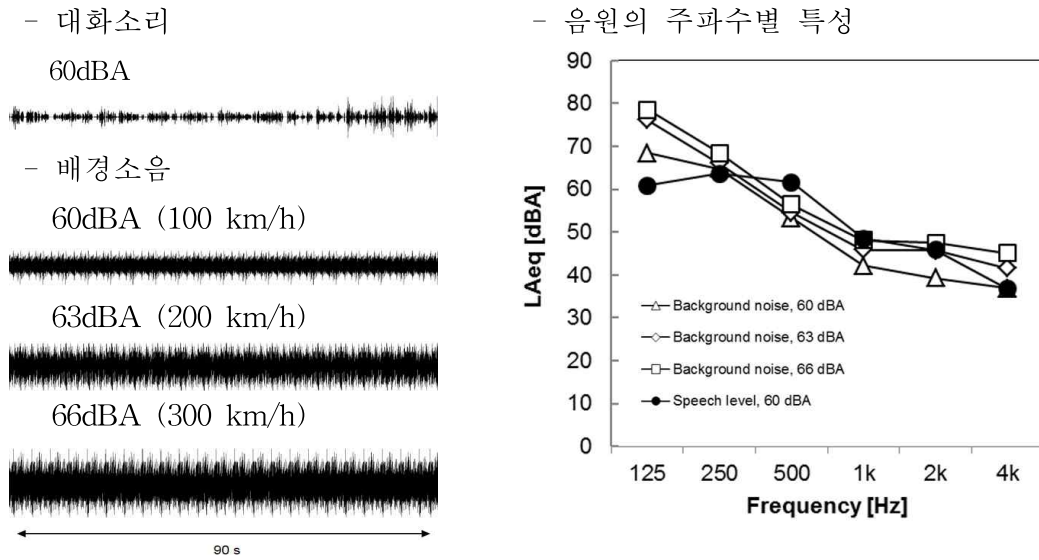


그림 37. 음원의 시간특성 및 주파수 특성

- 평가 진행 시, 고속열차 탑승상황을 가정하여, 주행 중 피험자가 독서를 하는 시나리오를 구성하였다. 교양도서는 정진홍 저자의 완벽에의 충동이라는 책을 제시하였다. 음원은 헤드폰(Sennheiser HD 600)을 통하여 제시하였으며, 30명의 피험자를 대상으로 진행하였다. 피험자의 성별은 남성 21명, 여성 9명이었으며 평균 연령 24세의 정상청력을 가진 피험자로 선택하였다.
- 청감 평가 결과 객차 음환경 만족도에 대한 소음 성가심도와 Speech privacy가 미치는 기여도에 대한 분석을 진행하였고, 다중회귀분석을 통하여 평가하였다. 다중회귀분석 결과 소음성가심도의 기여도 -0.69, speech privacy 0.21로써 소음성가심도의 기여도가 speech privacy와 비교해 3배 높게 나타났다.

표 35. 다중회귀 분석 결과

	Parameters	Unstandardized coefficient	Standardized coefficient	t	p	r ²
Task	Constant	4.41		39.37	0.00	0.66
	Annoyance	-0.65	-0.69	-28.25	0.00	
	Speech Privacy	0.15	0.21	8.76	0.00	

(3) STI와 음환경 만족도 관계 도출

- 위에서 도출된 평균 STI와 음환경 만족도와의 관계를 살펴보았다. STI 값에 따른 음환경 만족도가 최대 60%로 도출되었으며, r_p 등급화를 위하여 음환경 만족도를 15% 단위로 총 4단계 분류를 진행하였다. ST값 0.00 - 0.17 범위는 A등급, 0.17-0.36은 B등급, 0.36-0.54는 C등급, 0.54 이상은 D등급으로 STI의 등급이 분류되었다.

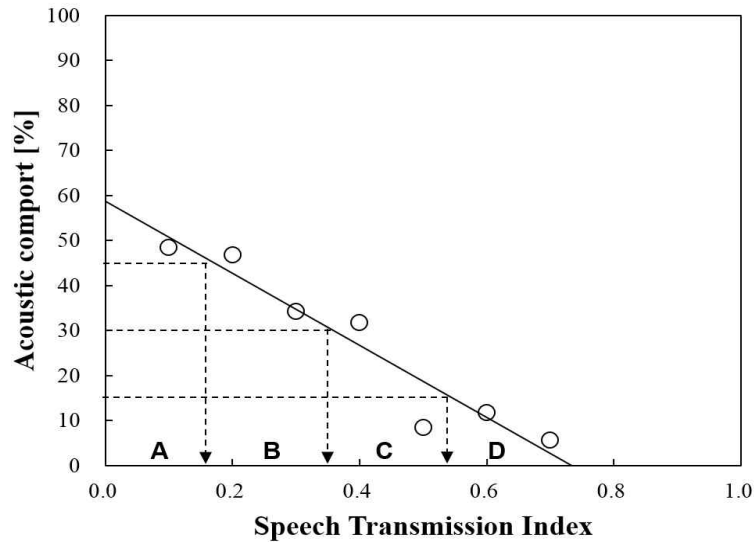


그림 38. STI - Acoustic comfort 관계 도출 선형식 및 등급화

(4) 음환경 만족도 기반 r_p 등급화

- 분류된 STI 등급을 기반으로 4개의 고속열차 시뮬레이션 데이터에 평균 STI와 r_p 값의 관계를 살펴보았다. 평균 STI와 r_p 는 선형 관계를 나타내고 있었으며, 선형회귀식 기반으로 STI 등급을 r_p 값으로 치환하여 등급화를 계산하였다. r_p 등급화 결과 r_p 3.0m 미만의 값이 A등급, 3.0-6.8m는 B등급, 6.8-10.5m은 C등급, 10.5m 이상이 D등급으로 도출되었다.

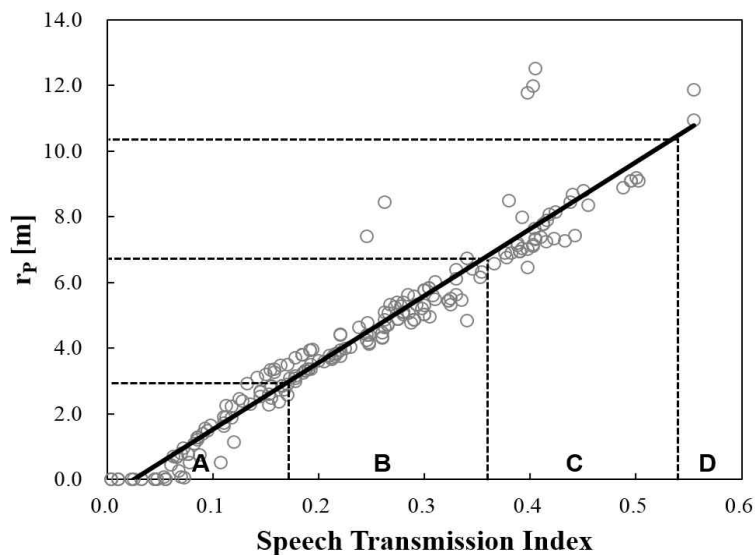


그림 39. 음환경 만족도 기반 r_p 등급화

3. 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램

가. 설계 프로그램 제작

(1) 소프트웨어 개요

- 4개의 고속열차 (KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도, HEMU) 평가 기반으로 도출된 예측식으로 설계 가이드라인 프로그램을 제작하였다. 마이크로소프트에서 제작된 베이직 프로그래밍 언어의 일종인 Visual Basic 2010을 사용하여 프로그램을 제작하였다. Visual Basic 2010의 장점으로는 시각적인 개발 환경과 더불어 초보자가 접근하기 쉽고 GUI 기반의 응용 프로그램으로써 효과적인 프로그래밍을 할 수 있다.

(3) 설계인자

- 실내소음레벨: 각 열차별 객실 내부 설계 인자의 영향을 도출하기 위한 실내소음레벨은 KTX의 개활지, 자갈도상의 100, 200, 300 km/h 주행 시 측정치 예시 입력 값으로 표 35와 같이 나타내었으며, 별도로 사용자가 측정한 실내 소음 레벨로 입력 가능하다.

표 36. 프로그램 내 실내 배경 소음 레벨 설정

주행속도 [km/h]	실내소음레벨 [dBA]
100	61.1
200	63.7
300	66.6

- 열차 치수: 표 36은 4개 열차 내부 치수를 Dilatometer로 측정한 결과이며, 프로그램에서 해당 열차의 버튼 클릭으로 4개 열차에 대한 열차 치수를 자동으로 입력 가능하며, 기차의 설계 변경이나 신개발 고속열차의 디멘션으로 부위별 치수 입력이 가능하다.

표 37. 4개 열차의 열차 치수

	KTX 일반석	KTX 1등석	호남고속철도	HEMU
실 너비 [m]	13.0	14.3	14.1	15.9
실 폭 [m]	2.7	2.8	2.8	2.9
실 높이 [m]	2.2	2.2	2.2	2.2
의자 높이 [m]	1.1	1.1	1.16	1.1
창문 면적 [m²]	0.96	0.92	0.91	0.96
창문 개수 [ea]	12	14	12	14
열 너비 [m]	1	1.12	1	1
열 개수 [ea]	14	12	14	15

- 내장재: 고속열차 객실 내에 적용되는 내장재(천장과 측벽)의 흡음계수 입력 단계에서 ‘2.3 speech privacy 설계 가이드라인’에서 평가된 고속열차 내장재의 저흡음, 중흡음, 고흡음의 3단계 (표 37) 선택하거나 신개발 내장 재료의 흡음계수의 주파수 대역별 흡음률을 입력할 수 있다. 새로 개발된 내장 재료는 ISO 345 (KS F 2805, 잔향실법 흡음률 측정방법)에 따라 측정된 시험성적서를 기반으로 주파수 대역별 흡음계수를 입력할 수 있다.

표 38. 시뮬레이션에 적용된 부위별 내장재료 흡음계수

Details	Absorption coefficients						AVG
	125Hz	250 Hz	500Hz	1k	2k	4k	
5 mm laminated plywood	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11	0.16
Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39
Perforated metal	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.78

- Speech privacy 예측식: ‘2.3 라. 설계요소를 고려한 speech privacy 예측식 도출’에서 평가된 예측식을 통해 프로그램 상에서 입력된 배경소음, 열차 디멘션, 내장재 흡음계수의 입력치를 바탕으로 privacy distance (r_p)를 예측함.

$$r_p = -0.71(BN) - 0.12(V) - 23.28(C_H) - 0.05(\alpha_C) - 0.04(\alpha_{SW}) + 88.5$$

(3) 설계 프로그램 흐름도

- 본 설계 프로그램은 크게 4가지 프로세스로 구성되어 있다. 설계 시 필요한 실내소음 레벨, 열차 치수, 내장재 정보를 입력할 수 있는 데이터 프로세스를 통하여 예측식 요소를 계산하게 된다. r_p 를 도출하고, 도출된 r_p 를 청감평가 기반의 음환경 만족도를 예측하여 r_p 등급화를 진행하는 흐름으로 프로그램이 구성되어 있다.

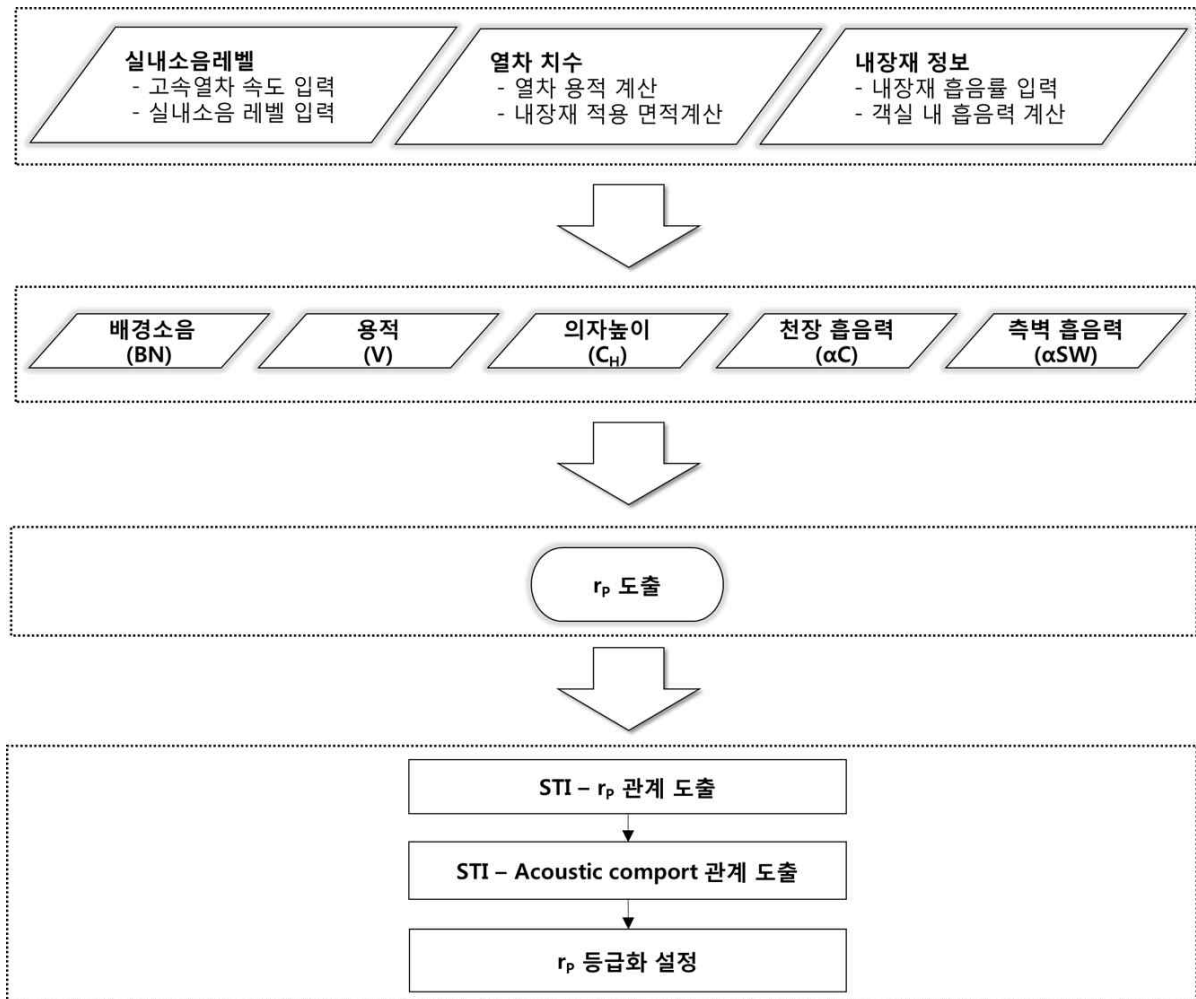


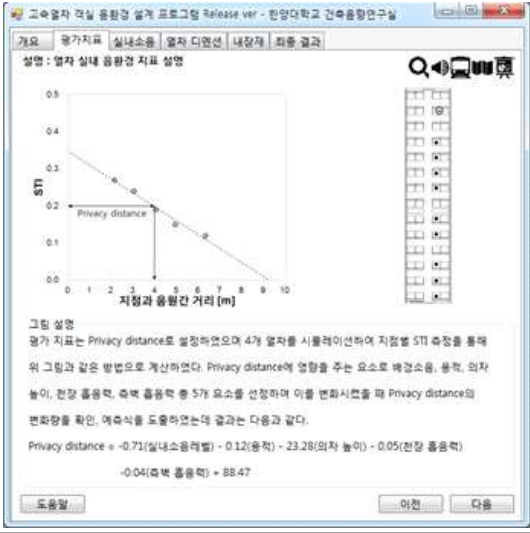
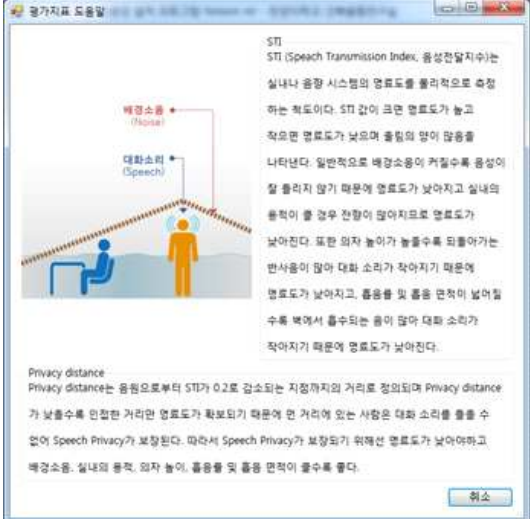
그림 40. 설계 프로그램 흐름도

(4) 프로그램 설명

• 프로그램 개요 및 지표 설명

- 본 프로그램의 목적 및 설정 변수에 대한 설명과 최종적으로 도출되는 지표에 대한 기본 설명 및 계산 방법으로 구성

표 39. 설계 프로그램의 개요

프로그램 항목	세부 설명	프로그램화면
프로그램 개요	- 전체적인 프로그램의 목적 및 각 세부 단계에 대한 기본 설명	
평가지표 설명	- Speech privacy를 평가하는 지표에 대한 기본 개념 및 계산방법 설명	
	- Speech privacy 지표에 대한 세부 설명 및 도움말	

• 실내소음레벨 정보

- 열차 주행 상황에 따라 100km, 200km, 300km 세 단계로 속도를 설정하는 주행속도 선택 톨, 사용자가 자체적으로 측정한 실내소음레벨에 따라 값을 조정할 수 있는 실내소음레벨 설정 톨로 구성

표 40. 설계 프로그램의 열차 실내소음 설명 화면

프로그램 항목	세부 설명	프로그램화면
실내소음레벨	- 열차 주행 상황에 따라 100km, 200km, 300km 세 단계 속도 설정 - 사용자가 자체적으로 측정한 실내소음레벨에 따라 값을 조정	
	- 실내소음에 대한 정의 및 고속열차 주행 속도변화에 따른 실내소음레벨 값 정의	

• 열차의 디멘션 정보 입력 단계

- 사용자의 설계 목적에 따라 국내 고속열차의 현장 측정을 통한 데이터베이스 기반의 열차를 선택
- 입력한 정보에 따라 사용자가 원하는 고속열차 용적, 천장 및 측벽 면적이 계산

표 41. 설계 프로그램의 열차 디멘션 설명 화면

프로그램 항목	세부 설명	프로그램 화면																																													
열차 디멘션	- 4개의 고속열차의 치수 데이터 값 선택 가능 - 열차의 폭, 길이, 높이 등등 열차의 치수 입력																																														
열차 디멘션	- 4개의 고속열차의 기본 치수 데이터 및 열차 디멘션 계산 방법에 대한 도움말	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Train 1</th> <th>Train 2</th> <th>Train 3</th> <th>Train 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>실 너비 [m]</td> <td>13.0</td> <td>14.3</td> <td>14.1</td> <td>15.9</td> </tr> <tr> <td>실 폭 [m]</td> <td>2.7</td> <td>2.8</td> <td>2.8</td> <td>2.9</td> </tr> <tr> <td>실 높이 [m]</td> <td>2.2</td> <td>2.2</td> <td>2.2</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>외자 높이 [m]</td> <td>1.1</td> <td>1.1</td> <td>1.15</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>창문 면적 [m²]</td> <td>0.96</td> <td>0.92</td> <td>0.91</td> <td>0.96</td> </tr> <tr> <td>창문 개수 [개]</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>12</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>열 너비 [m]</td> <td>1.0</td> <td>1.1</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>열 개수 [개]</td> <td>14</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table>		Train 1	Train 2	Train 3	Train 4	실 너비 [m]	13.0	14.3	14.1	15.9	실 폭 [m]	2.7	2.8	2.8	2.9	실 높이 [m]	2.2	2.2	2.2	2.2	외자 높이 [m]	1.1	1.1	1.15	1.1	창문 면적 [m²]	0.96	0.92	0.91	0.96	창문 개수 [개]	12	14	12	14	열 너비 [m]	1.0	1.1	1.0	1.0	열 개수 [개]	14	12	14	15
	Train 1	Train 2	Train 3	Train 4																																											
실 너비 [m]	13.0	14.3	14.1	15.9																																											
실 폭 [m]	2.7	2.8	2.8	2.9																																											
실 높이 [m]	2.2	2.2	2.2	2.2																																											
외자 높이 [m]	1.1	1.1	1.15	1.1																																											
창문 면적 [m²]	0.96	0.92	0.91	0.96																																											
창문 개수 [개]	12	14	12	14																																											
열 너비 [m]	1.0	1.1	1.0	1.0																																											
열 개수 [개]	14	12	14	15																																											

• 내장재료 정보 입력 단계

- 고속열차 객실 내에 적용되는 내장재의 흡음계수를 입력하는 단계로서, 천장과 측벽의 내장 재료의 특성을 입력
- 사용자의 판단에 따라 직접입력, 데이터베이스 이용으로 구성되어 있으며, 최종적으로 천장 및 측벽의 평균 흡음계수와 흡음력이 계산되어 지도록 구성

표 42. 설계 프로그램의 열차 내장재료 설정 화면

프로그램 항목	세부 설명	프로그램화면																															
내장재료 흡음특성 입력	- 실제 내장재의 종류를 선택하는 내장재 선택 - 천장, 측벽에서 사용한 내장재 고유의 흡음률을 주파수별로 입력																																
	- 흡음률 및 흡음력에 대한 정의 및 현재 기차에 적용된 재료에 대한 데이터베이스 설명	 <table><thead><tr><th></th><th>125Hz</th><th>250Hz</th><th>500Hz</th><th>1000Hz</th><th>2000Hz</th><th>4000Hz</th><th>평균 흡음률</th></tr></thead><tbody><tr><td>5mm laminated panel</td><td>0.28</td><td>0.22</td><td>0.17</td><td>0.09</td><td>0.1</td><td>0.11</td><td>0.16</td></tr><tr><td>Honeycomb panel</td><td>0.27</td><td>0.38</td><td>0.43</td><td>0.45</td><td>0.41</td><td>0.42</td><td>0.39</td></tr><tr><td>Perforated Metal</td><td>0.27</td><td>0.64</td><td>0.99</td><td>0.97</td><td>0.88</td><td>0.92</td><td>0.77</td></tr></tbody></table>		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	평균 흡음률	5mm laminated panel	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11	0.16	Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39	Perforated Metal	0.27	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92
	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	평균 흡음률																										
5mm laminated panel	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11	0.16																										
Honeycomb panel	0.27	0.38	0.43	0.45	0.41	0.42	0.39																										
Perforated Metal	0.27	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	0.77																										

• 최종 결과

- 디멘션 정보, 주행속도 정보, 내장재료 정보에서 도출된 결과를 기반으로 사용자가 설정한 고속열차 객실의 스피치 프라이버시의 결과 및 등급을 출력
- 사용자의 목적에 따라 목표 등급을 입력하여 설정된 고속열차의 등급과 비교함으로써 문제점을 도출해주도록 구성 및 문제점을 개선할 수 있는 설계 가이드라인을 제시하여 고속열차 객실 내 스피치 프라이버시 설계 시 수정 및 보완 작업이 가능하도록 구성

표 43. 설계 프로그램의 최종결과 화면

프로그램 항목	세부 설명	프로그램화면
Privacy 평가 및 등급화 결과 도출	- 예측식을 통하여 도출된 privacy distance (r_p)를 기반 스피치 프라이버시 음향적 만족도 등급 - 사용자가 목표로 하는 등급을 설정함에 따라 열차 디멘션, 내장재별로 개선점을 제시하는 설계 가이드라인 제시	
	- 고속열차 r_p 등급화 기준 및 최종 결과에 대한 도움말	

4. 철도제작사 자문 및 협의

가. 현장 측정 협조

(1) 2015.8.19. 호남고속차량 정차시 음환경 측정

- 철도제작사 담당자
 - (주) 현대로템 철차연구 1팀 김욱 수석연구원
- 수도권차량정비단 내 호남고속철도 정비차량

(2) 2015.2.10. 호남고속차량 주행 시 음환경 측정

- 철도제작사 담당자
 - (주) 현대로템 철차연구 1팀 김욱 수석연구원
 - 호남고속차량 시운전 책임자 박형준 차장 협조
- 차호 : 호남고속차량 14호
- 운행구간 및 시간 : 11:20 광주기지 출발 ~ 오송 2 왕복 ~ 16:30 기지 입고

(3) 2015.3.26. 현대로템 의왕연구소

- 철도제작사 담당자
 - (주) 현대로템 철차연구 1팀 김욱 수석연구원
- 자문목적: 연구결과 협의 및 음환경 설계 프로그램의 활용성 자문
- 호남선 소음의 원인 분석
 - 도면 제공
 - 대차와의 관계
 - 배기관
 - 주행환경 영향: 열차 간 차이도 있지만 고속전용선이 아닌 구간 주행 시 열차 진동 영향이 큼
 - 기존엔 저주파 대역 위주로 소음저감에 중점을 주었으나, 본 연구결과를 통해 고주파 소음 또한 저감에 신경을 써야할 것으로 생각됨
 - 천장 소음도가 높음: 천장 진동 전파, 하부는 의자가 차단되는 영향과 진동원이 구체와 맞닿아있는 영향으로 인해 상대적으로 하부 소음전달이 낮게 나타나는 것으로 예상됨
- Speech privacy 부분의 설계도 갈수록 중요성이 높아지고 있음
- 음환경 설계프로그램에 대한 의견
 - 1) 다른 재료의 흡음률 입력은 어떻게 하는지?
 - ⇒ ISO 354 잔향실법 측정법에 의하여 개발 재료의 시험성적서 기반하여 주파수 대역별로 입력
 - 2) 설계 가이드라인 제안(목표 달성을 위한 설계안의 변경량) 결과를 모두 반영해야 하는 것 인지 아니면 6가지 항목 중 하나만 변경하면 달성 가능한 것인지?

⇒ 6가지 항목(너비, 높이, 폭, 의자높이, 천장흡음률, 측벽흡음률)중 하나만 변경하면 달성가능

3) 추가적인 의견은 사용해보면서 제시할 수 있을 것으로 생각됨.

• 설계프로그램 및 본 연구결과의 의 4가지 의미

- 현재 노선의 차량별 몇 Hz 대역의 소음 개선 방향에 대한 제시
- 각 부위별 소음 문제점 확인
- 열차설계를 최적화 하려면 설계 초기에 목표 제어 주파수 대역 및 위치별 재료 설정 가능
- speech privacy 예측 가능

• 추가 연구 필요성

- 고속차량도 중요하지만 5호선 전동차 (콘크리트 도상)의 소음도는 매우 높기 때문에 본 연구결과를 바탕으로 전동차로 연구 영역을 넓히는 것은 어떨지 제안
- 새마을호, ITX의 외장은 알루미늄 차체, 내장 판은 고속열차와 다르며, 최고속도 180 km/h, 또한 의자 간격이 다르기 때문에 고속열차와는 다른 영향이 예상되며, 추가적인 연구가 필요함.

• 음향설계시 고려점

- KTX는 철도 제작사에서 파악한 바로는 소음이 다소 낮으며, 이는 천장판 부직포 등 흡음재의 영향으로 인해 소음 반사의 영향이 적게 나타남.
- 대구전동차 화재사건 이후, 철도 화재 안전법 만족해야하며 이는 전 세계 중 가장 강한 설계 기준임.
- 흡음률이 좋은 내장재를 사용하기가 어렵고, 천정판 유지보수도 생각해야함
- 이러한 다양한 설계 요소를 고려해야하기 때문에 음향 쪽에 대한 협의 및 최적화가 필요하며, 본 연구결과는 설계 시 이를 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램이기 때문에 활용도가 있을 것으로 사료됨.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1. 개별 연구성과명

- 특허명: 고속열차 객실의 스피치 프라이버시 평가를 통한 음환경 설계 프로그램 개발 방법 및 장치
- 출원번호: 10-2015-0096798

2. 개별 연구성과 설명

- 본 발명은 스피치 프라이버시 평가를 통한 고속열차 객실 내의 음환경 설계 및 평가에 관한 것으로, 열차의 치수, 객실내의 실내소음레벨, 내장 재료의 흡음계수를 통하여 스피치 프라이버시의 등급을 예측하고, 개선 할 수 있도록 문제점 및 개선점을 제공한다. 스피치 프라이버시는 화자의 음성 및 대화내용이 전달되는 거리를 나타내는 것으로써, 음성전달지수(STI)와 privacy distance (r_p)를 통해 평가되어진다. Privacy distance가 클수록 음성전달이 스피치 프라이버시가 보장되지 않는 것으로 평가된다. 본 발명은 국내 4개의 고속열차를 대상으로 현장평가를 통하여 설계요소에 대한 데이터베이스를 구축하고, 음향 시뮬레이션 프로그램을 통하여 객실 내 설계요소변화 (각 부위별 흡음계수, 객실의자의 높이, 객실의 용적)에 따른 결과를 통하여 예측식을 도출하였고, 청감평가 기반으로 스피치 프라이버시에 따른 음향적 만족도 등급을 제시하였다. 위의 방법으로 고속열차 설계 시 스피치 프라이버시 예측 및 평가, 개선점을 제시 할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 이를 통해 고속열차 설계 초기 단계 시 객차 설계요소에 대한 평가 및 개선점 도출이 가능하여 설계의 완성도 및 작업의 효율성을 증진시키고 설계 단계에서의 시간을 최소화 시킬 수 있는 효과가 있다.

3. 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)

가. 논문게재 성과

차년도	게재 연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내 외 구분	SCI 구분
			주저자	교신 저자	공동 저자				
2차년도	2014	KTX 의자 설계에 따른 객실 Speech Privacy 평가	장형석	전진용	김재현	한국소음진동 공학회논문집	24(2)	국내	
	2014	터널 주행을 고려한 고속열차의 실내소음 특성 평가	김재호	전진용	김호준	한국소음진동 공학회논문집	24(3)	국내	
3차년도	2014	Evaluation of Speech Privacy in Passenger Cars of High-Speed Trains Based on Room Acoustic Parameters	전진용	장형석	홍주영	Acta Acustica United with Acustica	100(4)	국외	SCI
	2014	Assessment of rural soundscape with high speed train noise	이평직	전진용	홍주영	Science of total environment	482	국외	SCI

• 추가 성과 진행 사항 및 계획

논문명	진행사항	학술지명	국내 외 구분	SCI 구분
Noise in the passenger cars of high-speed trains	5차 심사중	The Journal of the Acoustical Society of America	국외	SCI
Speech privacy and annoyance considerations in the acoustic environment of passenger cars of high-speed trains	2차 답변서	The Journal of the Acoustical Society of America	국외	SCI
Predicting speech privacy in a high-speed train passenger car using a 1:10 scale model	재투고 진행	Building and environment	국외	SCIE

나. 학술대회 발표 성과

차년도	발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
1차년도	12.10.25	The role of a acoustical characteristics for enhancement of acoustic comfort in high-speed train passenger cars	Hyung Suk Jang, Jooyoung Hong, Jin Yong Jeon	Acoustical Society of America, Kansas city	국외
	12.11.22	Room acoustic design to improve speech privacy in passenger cars of high-speed trains	Jin Yong Jeon, Hyung Suk Jang	Acoustics 2012 - Fremantle	국외
2차년도	13.04.26	Speech privacy를 고려한 고속열차 실내 음환경 평가	장형석, 김재현, 전진용	2013 춘계소음진동 학술대회	국내
	13.09.17	The room acoustical design in high-speed trains for speech privacy	전진용, 장형석	Internoise 2013	국외
	13.10.24	1:10 축소모형을 이용한 고속열차의 Speech privacy 평가	임한솔, 김호준, 전진용	2013 추계소음진동 학술대회	국내
	13.10.24	고속열차 음장 변화에 따른 실내소음의 성가심 평가	차용원, 김재호, 전진용	2013 추계소음진동 학술대회	국내
	13.10.24	주행 조건에 따른 고속열차 종류별 실내소음 특성 평가	김호준, 차용원, 전진용	2013 추계소음진동 학술대회	국내
	13.10.24	Spherical microphone을 이용한 고속열차 실내소음의 방향성 측정	김재현, 장형석, 전진용	2013 추계소음진동 학술대회	국내
3차년도	14.04.23	Speech privacy와 Annoyance를 고려한 고속열차 음환경 주관평가	정호준, 오성민, 홍주영, 전진용	2014 춘계소음진동 학술대회	국내
	14.04.23	축소모형과 시뮬레이션을 이용한 고속열차 speech privacy 음환경 설계	김재현, 김호준, 장형석, 전진용	2014 춘계소음진동 학술대회	국내
	14.06.02	Enhancement of acoustic environment with regard to speech privacy and annoyance in passenger cars of high-speed trains	Joo Young Hong, Jin Yong Jeon	ICBEN 2014	국외
	15.04.24	고속열차 내장재 흡음특성변화에 따른 Speech privacy 평가	정호준, 장형석, 전진용	2015 춘계소음진동 학술대회	국내
	15.06.01	Appropriate background noise level regarding speech privacy and annoyance in a train cabin	Jin Yong Jeon, Joo Young Hong, Hyung Suk Jang	Eurnoise 2015	국외

제4장 연구목표 달성 및 효과

(1) 연구개발 최종목표 달성도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
1	실내 소음원 음향 특성 분석을 통한 개선 방향 도출	-주행시 현장측정을 통한 소음레벨 파악 -수음자 위치에서 복합소음 방향성의 시간대 별 분석	100
2	시뮬레이션 및 축소모형을 이용한 객차 디테일 설계	- KTX 일반석, KTX 1등석, 호남고속철도, HEMU의 음향 평가 시뮬레이션 모델과 비교 - 음향 설계 가이드라인 제시를 위한 고속열차 종류별 음향 특성 비교	100
3	내장재의 설계 적합성 검토 및 흡음 설계	-개선설계를 위한 부위별 설계 방향 제시 -국내외 열차 내장재의 흡음률 데이터 베이스 구축	100
4	최적 설계안 제시	- Speech Privacy를 고려한 설계안 평가 (내장재료 변화에 따른 영향 검토, 의자 높이, 배경소음 영향)	100
5	실내음향 및 심리음향을 고려한 고속 열차의 통합 최적 설계 가이드라인 제시	- 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램 제작 및 특허 출원	100

(2) 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- 본 연구개발은 철도 산업의 고급화를 목적으로 내부 환경의 질 및 승차감을 저하시키는 결정적인 요소인 운행 시 객실 소음을 제어하기 위해 철도 외부 소음 제어뿐만 아니라 Speech Intelligibility와 Speech Privacy를 고려한 객실 최적 음환경 설계 기술을 개발하였다.
- 객실 최적 음환경 설계기술의 보유는 기존 외국 객실 디자인 컨설팅 업체 대체를 할 수 있을 것으로 예상되며, KTX의 신기술로 특화할 수 있어 세계 고속철도 시장에서 품질 경쟁력을 갖출 수 있다.

(3) 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

- 철도 소음문제에 대해 제기된 환경문제로 인한 민원에 대한 사회적, 경제적 비용의 절감이 예상된다.
- 객실 음환경 최적 설계 기술 개발은 민원 발생 비용을 절감할 수 있으며, 객실 관련 민원으로 인한 객실 재설계/시공비용의 절감으로 이어질 수 있다.
- 또한 최적 설계된 객실 음환경 개선으로 인한 KTX 승차 품질 향상은 이용객 증가로 이어질 것으로 예상된다.
- 최적 음환경 설계를 통한 최적 재료 선정과 배치는 시공비용의 절감으로 이어진다.

(4) 연구개발 성과의 정책적 효과분석

- KTX 객실 음환경 개선으로 인해 이용객의 주관적 승차 만족도가 향상되며, 객실 음환경의 최적 설계 중요성에 대한 인식이 증대될 것이다.
- 최적 음환경 설계 기술을 통한 수요자 맞춤형 KTX의 실내 환경 개선은 KTX에 대한 사회적 인식과 위상을 높여줄 수 있으며, 이는 KTX 이용자 수의 증가로 이어질 수 있다. 더불어 KTX 이용의 활성화는 지속가능한 교통 물류 시스템을 정착시킬 것이다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

- 최종 성과물인 음향 만족도 개선 설계 가이드라인 프로그램에 관하여 특허가 가출원되었고, 판매계획으로 추후 현대로템과 기술이전계약 추진을 계획하고 있다. 또한 프로그램 기술이전계약 이후 현대로템과 추가 연구 및 타 연구와의 연계 또한 가능할 것으로 사료된다.
- 본 연구에서 진행한 연구의 방법론을 적용하여, 국내 운행 중인 고속열차 뿐만 아니라 현재 개발 중인 2층 고속열차 등 신개발 열차, 새마을호, 무궁화호, 누리로 등의 광역 열차, 지하철 등 전동열차에서 추가 연구를 진행 할 수 있을 것으로 사료된다. 5호선 전동열차 운행 구간은 콘크리트 도상으로 인해 음성전달이 안될 정도로 소음도가 높은 것이 문제시 되고 있으며, 추가 계획 중인 전동차의 연장선 및 전동차 교체물량에 본 기술 적용이 가능할 것으로 사료된다. 자체의 재료 특성 (알루미늄 차체, 스틸 차체)에 대한 소음의 영향도 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 2층 고속열차의 경우 내부 공간 크기를 최소화해야 하는 상황에서 소음 및 Speech privacy가 취약해질 가능성이 있으므로, 개발 설계 단계에서 본 연구 성과의 적용 및 평가가 필요하다.
- 열차 뿐만 아니라 유사 내부 형태로 구성되어있는 버스와 비행기 등 타 운송수단에서도 적용 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) 한국철도기술연구원, “철도 여객편의시설 개선 기술개발 기획”, 2013, 국토교통부 미래철도기술개발사업 기획최종보고서
- (2) 노희민, 최성훈, 김석원, 홍석윤, “고속철도 차량의 실내소음 특성 연구”, 2013, 한국철도학회, 제 16권 제 1호 pp.14~19
- (3) 박범, 김동규, 전진용, 최성훈, 박준홍, “음질평가를 통한 고속철도 실내소음의 객관적, 주관적 특성 분석”, 2010, 한국소음진동공학회, 제 20권 제 8호 pp.774~781
- (4) 김재철, 이찬우, “콘크리트 궤도 터널 내 KTX 차량의 실내소음 특성 분석”, 2007, 한국소음진동공학회, 제 17권 제 11호 pp.1037~1042
- (5) Khan, M. S., “Evaluation of Acoustical Comfort in Passenger Trains”, 2002, Acta Acustica United With Acoustica, Vol. 88 pp.270~277
- (6) Kuwano, S., Namba, S. and Okamoto, T., “Psychological Evaluation of Sound Environment in a Compartment of a High-speed Train”, 2004, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277 pp.491~500
- (7) Virjonen, P., Keränen, J. and Hongisto, V., “Determination of Acoustical Conditions in Open-plan Offices: Proposal for New Measurement Method and Target Values”, 2009, Acta Acustica United With Acoustica, Vol.95 pp.279~290
- (8) BS EN ISO 3382-3:2012, Acoustics-Measurement of room acoustic parameters Part 3: Open plan offices
- (9) Keränen, J., Hongisto, V., Oliva, D., and Halaka, J., “The Effect of Different Room Acoustic Elements on Spatial Decay of Speech-a Laboratory Experiment”, 2012, Proceedings of the Euronoise
- (10) 최성훈, 박준홍, 박찬경, “고속열차의 차간공간에 의해 발생하는 실내소음 특성 분석”, 2006, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.1314~1317
- (11) 김재철, 이찬우, 정순철, “국내 고속철도 차량의 실내소음 특성 비교”, 2007, 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.87~91
- (12) 최성훈, 김재철, 이찬우, 조준호, “KTX 차량의 터널 통과 시 소음 특성”, 2004, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.49~52

[부록] 주요 연구성과

성과	3차년도 성과 (1)	분류	일반학술지
Journal	Acta Acustica United with Acustica	Author	Jin Yong Jeon, Hyung Suk Jang, Joo Young Hong
Title	Evaluation of Speech Privacy in Passenger Cars of High-Speed Trains Based on Room Acoustic Parameters		
진행상황	2014년 4월 게재		

ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA
Vol. 100 (2014) 649–658

DOI 10.3813/AAA.918744

Evaluation of Speech Privacy in Passenger Cars of High-Speed Trains Based on Room Acoustic Parameters

Jin Yong Jeon, Hyung Suk Jang, Joo Young Hong

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea. janghyungs@gmail.com

Summary

Speech privacy is important for improving the quality of the acoustic environment in high-speed train compartments because the conversation of other passengers is a major source of disturbing noises in high-speed trains. In order to provide an acoustic environment amenable to speech privacy, it is necessary to explore the room acoustic conditions of passenger cars in high-speed trains. The present study investigates speech privacy in the passenger cars of a high-speed train using the room acoustic parameters suggested in ISO 3382-3. Single-number quantities ($D_{2,S}$, $L_{pA,S,Am}$, r_D and r_P) were measured in an example passenger car to evaluate the spatial decay of the sound pressure level and sound transmission index (STI). Computer simulations were also conducted to explore the effects of changing absorption coefficients and background noise levels on the single-number quantities. We found that $D_{2,S}$ and $L_{pA,S,Am}$ values changed significantly with variation in average absorption coefficients, but that these parameters did not depend on the background noise levels. It was also found the privacy distance (r_P), rather than the distraction distance (r_D), to be a useful parameter for designing speech privacy in a passenger car, due to high background noise levels. The effect of absorption coefficients on r_P was less than that of the background noise levels. In addition, regression models to predict the single-number quantities based on average absorption coefficients and background noise levels are suggested, and these can be used in practice to help with the design of acoustic environments promoting speech privacy in the passenger cars of a high-speed train.

PACS no. 43.72.Dv, 43.50.Lj, 43.55.Mc

1. Introduction

High-speed train systems in Europe and Asia have provided not only efficient transport service but also socio-economic benefits. The Korea Train eXpress (KTX) line began operating in Korea in 2004, and a high-speed domestic line, the KTX-Sancheon, began operation in 2010. Recently, test runs of a second high-speed line with a documented maximum speed of 430 km/h, the HEMU-430X, have begun. As the technologies for high-speed trains develop, considering the environmental qualities in the passenger cars of high-speed trains in order to enhance passenger comfort will be essential. In particular, the sound environment in the interior of a train plays an important role in evaluating its overall comfort.

Many studies on the sound quality of interior noise in trains have been conducted based on acceptance and annoyance [1, 2, 3]. Hardy [1] evaluated internal train noise based on various noise criteria used in building acoustics and showed that room criteria (RC) are in good agreement with subjective responses in terms of acceptability. Parizet

et al. [2] found that among psychoacoustic metrics, loudness is the dominant factor for noise assessment. Patsouras *et al.* [3] examined the perception of noise tonality in a high-speed train by manipulating synthesized noise. In addition, Iachini *et al.* [4] investigated the effect of noise in metros on acoustic comfort under laboratory conditions, and showed that noise negatively affects passengers' annoyance levels and cognitive performance.

There are two main noise sources in a passenger car: compartment noise consisting of rolling, engine, and aerodynamic noise; and sounds from other passengers [5, 6, 7, 8]. Kuwano [5] found that compartment noise of the Shinkansen train itself may not be annoying, whereas conversation could cause disturbance. Khan [6] also showed that noise from fellow passengers was one of the annoying sounds in trains, from a questionnaire. Several previous studies on the interior noise of trains, with attention to speech privacy and intelligibility, have been conducted in order to address this problem. Patsouras *et al.* [9] explored the relationship between speech privacy and sound quality in a high-speed train. Khan [7] evaluated the masking effects of background noise levels on enhancing acoustic comfort with listening tests inside train passenger cars. Masking sounds enhanced acoustical comfort for the sake of activities like reading, writing, and

Received 15 October 2013,
accepted 9 April 2014.

the single number quantities using average absorption coefficients and background noise levels were suggested, and can be used in practice for the design of speech privacy in a passenger car of high-speed train using the room acoustic parameters. This study is limited by how average absorption coefficients were used to estimate the behaviors of the single number quantities, while various individual design factors in a passenger car, such as the heights of the chairs and the absorption of the ceiling and floor finishes, might affect the variation of these quantities. Therefore, more research on how design factors influence single-number quantities is required in the near future.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (14PRTD-C061727-03) from the Construction and Transportation Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of the Korean government.

References

- [1] A. E. J. Hardy: Measurement and assessment of noise within passenger trains. *Journal of Sound and Vibration* **231** (2000) 819–829.
- [2] E. Parizet, N. Hamzaoui, J. Jacquemoud: Noise assessment in a high-speed train. *Applied Acoustics* **63** (2002) 1109–1124.
- [3] C. Patsouras, H. Fastl, U. Widmann, G. Hölzl: Psychoacoustic evaluation of tonal components in view of sound quality design for high-speed train interior noise. *Acoustical Science and Technology* **23** (2002) 113–116.
- [4] T. Iachini, L. Maffei, F. Ruotolo, V. P. Senese, G. Ruggiero, M. Masullo, N. Alekseeva: Multisensory assessment of acoustic comfort aboard metros: a virtual reality study. *Applied Cognitive Psychology* **26** (2012) 757–767.
- [5] S. Kuwano, S. Namba, T. Okamoto: Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration* **277** (2004) 491–500.
- [6] M. S. Khan: Evaluation of acoustical comfort in passenger trains. *Acta Acustica united with Acustica* **88** (2002) 270–277.
- [7] M. S. Khan: Effects of masking sound on train passenger aboard activities and on other interior annoying noises. *Acta Acustica united with Acustica* **89** (2003) 711–717.
- [8] C. Mellet, F. Létourneaux, F. Poisson, C. Talotte: High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *Journal of Sound and Vibration* **293** (2006) 535–546.
- [9] C. Patsouras, H. Fastl, U. Widmann, G. Hölzl: Privacy versus sound quality in high speed trains. *Proceedings of Internoise and Noise-con 2000*, Nice, 2000.
- [10] L. Maffei, M. Masullo, N. Alekseeva, U. Palmieri, V. P. Senese: The speech intelligibility aboard metros in different running conditions. *Acta Acustica united with Acustica* **98** (2012) 577–587.
- [11] R. Shimokura, Y. Soeta: Evaluation of speech intelligibility of sound fields in passenger train compartments. *Acoustical Science and Technology* **30** (2009) 379–382.
- [12] ISO 3382-3: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 3: Open plan offices. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2012.
- [13] P. Virjonen, J. Keränen, V. Hongisto: Determination of acoustical conditions in open-plan offices: Proposal for new measurement method and target values. *Acta Acustica united with Acustica* **95** (2009) 279–290.
- [14] P. J. Lee, J. Y. Jeon: A laboratory study for assessing speech privacy in a simulated open-plan office. *Indoor Air* **24** (2014) 307–314.
- [15] B. K. Lee, P. J. Lee, J. Y. Jeon: Architectural influences on speech privacy in computer simulated open plan offices. *Proceedings of Forum Acusticum 2011*, Aalborg, 2011.
- [16] J. H. Rindel: Prediction of acoustical parameters for open plan offices according to ISO 3382-3. *Proceedings of Acoustics 2012*, Hong Kong, 2012.
- [17] ISO 3382-1: Acoustics - Measurement of the reverberation time. Part 1: Performance space. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [18] ISO 354: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [19] L. K. Irvine, R. L. Richards: Acoustics and noise control handbook for architects and builders. Krieger Publishing Company, Malabar, FL, USA, 1998.
- [20] L. Beranek: Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture. Springer, 2004.
- [21] T. J. Cox, P. D'Antonio: Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Taylor & Francis, US, 2009.
- [22] C. L. Christensen, J. H. Rindel: A new scattering method that combines roughness and diffraction effects. *Proceedings of Forum Acusticum 2005*, Budapest, 2005.
- [23] I. Bork: A comparison of room simulation software. The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acta Acustica* **86** (2000) 943–956.
- [24] J. Bradley, R. Reich, S. Norcross: A just noticeable difference in C 50 for speech. *Applied Acoustics* **58** (1998) 99–108.
- [25] J. Keränen, V. Hongisto: Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices. *Applied Acoustics* **74** (2013) 1315–1325.
- [26] ANSI: American National Standard methods for the calculation of the articulation index. ANSI S3.5-1969. American National Standard Institute, New York, 1911.
- [27] E. Lombard: Le signe de l'elevation de la voix. *Annals maladiers oreille, Larynx, Nez, Pharynx* **37** (1911) 101–119.

성과	3차년도 성과 (2)	분류	일반학술지
Journal	Science of the Total Environment	Author	Pyoung Jik Lee, Joo Young Hong, Jin Yong Jeon
Title	Assessment of rural soundscape with high speed train noise		
진행상황	2014년 6월 게재		

Science of the Total Environment 482–483 (2014) 432–439



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Assessment of rural soundscapes with high-speed train noise



Pyoung Jik Lee¹, Joo Young Hong, Jin Yong Jeon^{*}

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Republic of Korea

HIGHLIGHTS

- Viewing a preferred visual image reduces the annoyance from high-speed train noise.
- Natural feature percentage, number of land types, and L_{Aeq} decide image preference.
- High-speed train noise annoyance is affected by natural feature percentage and L_{Aeq} .
- Zwicker's loudness is correlated with the annoyance from high-speed train noise.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 March 2013

Received in revised form 17 June 2013

Accepted 5 July 2013

Available online 14 August 2013

Editor: P. Kassomenos

Keywords:

Rural soundscape

High-speed train noise

Audio-visual interaction

ABSTRACT

In the present study, rural soundscapes with high-speed train noise were assessed through laboratory experiments. A total of ten sites with varying landscape metrics were chosen for audio-visual recording. The acoustical characteristics of the high-speed train noise were analyzed using various noise level indices. Landscape metrics such as the percentage of natural features (NF) and Shannon's diversity index (SHDI) were adopted to evaluate the landscape features of the ten sites. Laboratory experiments were then performed with 20 well-trained listeners to investigate the perception of high-speed train noise in rural areas. The experiments consisted of three parts: 1) visual-only condition, 2) audio-only condition, and 3) combined audio-visual condition. The results showed that subjects' preference for visual images was significantly related to NF, the number of land types, and the A-weighted equivalent sound pressure level (L_{Aeq}). In addition, the visual images significantly influenced the noise annoyance, and L_{Aeq} and NF were the dominant factors affecting the annoyance from high-speed train noise in the combined audio-visual condition. In addition, Zwicker's loudness (N) was highly correlated with the annoyance from high-speed train noise in both the audio-only and audio-visual conditions.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The use of high-speed trains began in the 1960s, particularly in Japan and Europe, and many high-speed rail lines are currently under construction worldwide. As high-speed trains have become more popular, the associated noise problems have grown to become national issues in many countries. In particular, residents of rural areas often complain of the noise caused by high-speed trains because trains travel at their maximum speeds in these areas.

Noise problems caused by high-speed trains in rural areas have been investigated mainly by deriving the dose-response curves using social surveys and measurements of sound pressure levels (Lambert et al., 1996; Yano et al., 2005; Chen et al., 2007). Laboratory experiments were also conducted to determine the annoyance of

noise from high-speed trains, and the relationships between annoyance and acoustic indicators such as ASEL², L_{Aeq} , and percentile noise level have been derived (Fastl and Gottschling, 1996; Vos, 2004; De Coensel et al., 2007). However, the perceptions of high-speed train noise in rural areas cannot be explained only by the sound pressure levels because non-acoustical factors, including the rural landscape, may also influence human perception (Jeon et al., 2011; Brown et al., 2011). Therefore, non-acoustic factors as well as acoustic features should be considered when investigating the perception of high-speed train noise in rural areas.

Most previous studies on rural areas have focused on their visual aspects without considering non-visual cues (Arriaza et al., 2004), and few previous studies have investigated the auditory perception of rural areas. Qualitative linkages between the rural landscape structure and daily sound patterns have been investigated (Matsinos et al., 2008), and the power spectral densities of loudness and pitch have

^{*} Corresponding author at: Tel.: +82 2 2220 1795; fax: +82 2 2220 4794.

E-mail address: jjyeon@hanyang.ac.kr (J.Y. Jeon).

¹ Present address: EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, 8600, Dübendorf, Switzerland.

² Abbreviations: ASEL: A-weighted sound exposure level; L_{Aeq} : A-weighted equivalent sound pressure level.

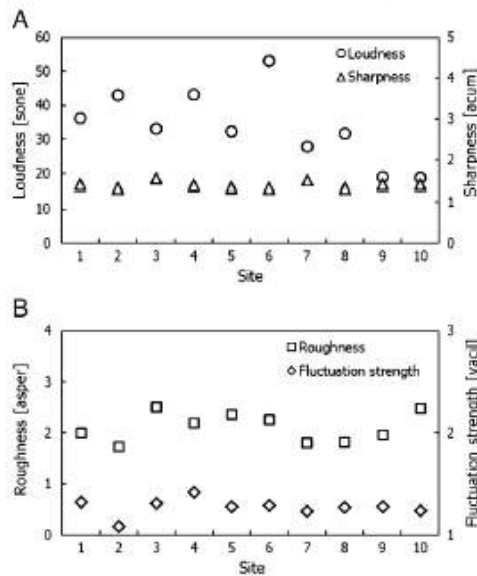


Fig. 7. Mean values of psychoacoustic metrics: (A) loudness and sharpness and (B) roughness and fluctuation strength.

criterion of 75% correct answers by participants) of each metric reported in a previous study (You and Jeon, 2008). This result corresponds to the findings on the frequency characteristics and sound pressure levels; namely, all the train noise showed similar tendencies, whereas the sound pressure levels varied across the sites. The results of correlation analysis between the annoyance scores and psychoacoustic metrics showed that only loudness was highly correlated with the annoyance scores ($r = 0.84$ and $r = 0.77$ for the audio-only and audio-visual conditions, respectively; $p < 0.05$ for both). This indicates that loudness is the dominant factor influencing the perception of high-speed train noise. The loudness was found to be highly correlated with $L_{Aeq,45s}$ ($r = 0.88$, $p < 0.01$). Similar to the results for the acoustic metrics, the correlation coefficient between loudness and the annoyance scores decreased slightly when visual images were included.

4. Discussion

The interaction between auditory and visual cues has been studied to investigate the interaction between noise and vision using a global strategy (Carles et al., 1992; Tamura, 1997; Viollon et al., 2002), and to examine the specific effects of noise on vision (Anderson et al., 1983) and the effect of vision on noise (Kastka and Noack, 1987). However, most of these studies were conducted in a laboratory setting with various combinations of noise and vision: Carles et al. (1992) adopted 32 combinations consisting of four sounds and eight landscapes, whereas Anderson et al. (1983) used 20 combinations of two outdoor images and ten meaningful sounds. In addition, recent studies (Tamura, 1997; Anderson et al., 1983; Viollon et al., 2002) have varied the visual images in terms of the specific context, such as the degree of tree coverage and degree of urban development. In contrast to previous studies, combinations of noise and visual images were not applied in this study because it focused mainly on the effect of visual images on the perception of noise at each site. In addition, the visual images used in this study were selected by considering nine landscape features without any specific context. In contrast,

previous studies chose visual images in relation to specific contexts. Anderson et al. (1983) used a downtown street site and a completely wooded site, and Viollon et al. (2002) selected four images showing various degrees of urban development. Thus, the differences between the visual images used in this study were less distinct than those between the images used in previous studies. Therefore, the preference scores for visual images presented in Fig. 4 do not show large variations, and the effect of visual images on the change in the annoyance scores was much less than in previous studies (Anderson et al., 1983; Kastka and Noack, 1987; Viollon et al., 2002). Because this study found that NF is most suitable for explaining the effect of different combinations of landscape features on the subjective response to the rural soundscape, it may be useful in future studies to vary the context of visual images in terms of the percentage of natural features.

To investigate the effects of non-acoustic factors on the subjective responses, the frequency of visits to rural areas and the noise sensitivity were evaluated using an 11-point numerical scale. The subjects were then divided into two groups (low and high) according to their standardized scores based on the probability density function of the scores for visitation frequency and noise sensitivity. The numbers of subjects belonging to the two groups were 11 and 9 for visitation frequency and 12 and 8 for noise sensitivity. No significant difference was found between groups in the subjective responses obtained under the three conditions. The reason may be that representations of audio and visual stimuli in the laboratory setting cannot entirely reflect the real situations that on-site observers would perceive as an individual train passed by. In addition, the laboratory experiments in this study did not consider the cumulative effects of different numbers of trains and times of day that they pass by. Therefore, it would be necessary to validate the laboratory findings in the future through field experiments in which the subjects could be exposed to noise for a long time.

5. Conclusions

Objective and subjective assessments of high-speed train noise in rural areas were conducted through field measurements and laboratory experiments. It was found that, among landscape metrics, the percentage of natural features (NF) and the number of land types were highly correlated with the preference scores of visual images. It was also shown that the annoyance scores depended mainly on L_{Aeq} when acoustic stimuli alone were presented to the subjects. In the combined audio-visual condition, the effect of the visual image on the perception of noise was found to be significant, and the more preferred visual image caused less annoyance from high-speed train noise. NF and L_{Aeq} were found to be major factors influencing annoyance, but the contribution of L_{Aeq} to the annoyance scores was larger than that of NF.

In addition, the openness and total area significantly affected the rise times of the high-speed train noise and IACC, respectively. Moreover, it was observed that among the psychoacoustic metrics, only Zwicker's loudness (N) was correlated with the annoyance scores. In the future, it will be necessary to introduce non-acoustic factors that are closely related to the perception of landscapes in rural areas on the basis of a qualitative study and to conduct a field validation test in real circumstances. In this study, small numbers of well-trained students with a limited age range participated; thus, additional experiments with more subjects and greater variation in age and profession would be beneficial to validate the findings of this study.

Acknowledgment

This research was supported by a grant (13PRTD-C061727-02) from the Construction & Transportation Technology Advancement Research Program funded by the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs of the Korean government.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.