보안 과제(), 일반과제(√)/공개(√), 비공개()
발간번호(11-B551201-000123-01)

철도기술연구사업 제5차 연도 최종보고서

R&D /
17RTRP-B072484-05

철도 소음/진동 저감기술개발 최종보고서

2019. 3. 12.

1세부
주관연구기관 / 한국철도기술연구원
2세부
협동연구기관 / 현대로템㈜
3세부
협동연구기관 / 한국철도기술연구원
4세부
협동연구기관 / 한국철도공사

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

17RTRP-B072484-05

철도 소음/진동 저감기술개발 최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

Land, Infrastructure and Transport R&D Report

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'철도 소음/진동 저감기술 개발'(연구개발 기간 : 2013. 12. 27 ~ 2019. 01. 26) 과제의 총괄보고서를 제출합니다.

2019. 03. 12.

주 관 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 현대로템(주) (대표자) 김승탁

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도공사 (대표자) 손병석

주관연구 기관책임자	한국철도기술연구원	고효인
협동연구기관책임자	현대로템(주)	박길배
협동연구기관책임자	한국철도기술연구원	김재철
협동연구기관책임자	한국철도공사	권세곤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제37조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'철도 소음/진동 저감기술 개발'(연구개발 기간 : 2013. 12. 27 ~ 2019. 01. 26) 과제의 총괄보고서를 제출합니다.

2019. 03. 12.

주 관 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 현대로템(주) (대표자) 김승탁

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도공사 (대표자) 손병석

주관연구 기관책임자	한국철도기술연구원	고효인
협동연구기관책임자	현대로템(주)	박길배
협동연구기관책임자	한국철도기술연구원	김재철
협동연구기관책임자	한국철도공사	권세곤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제37조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'철도 소음/진동 저감기술 개발'(연구개발 기간 : 2013. 12. 27 ~ 2019. 01. 26) 과제의 총괄보고서를 제출합니다.

2019. 03. 12.

주 관 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 현대로템(주) (대표자) 김승탁

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나희승

협 동 연 구 기 관 명 : 한국철도공사 (대표자) 손병석

주관연구 기관책임자	한국철도기술연구원	고효인
협동연구기관책임자	현대로템(주)	박길배
협동연구기관책임자	한국철도기술연구원	김재철
협동연구기관책임자	한국철도공사	권세곤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제37조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>17RTRP-B072484-05</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2017. 04. 01~ 2019. 01. 26</td><td>단계구분</td><td>5단계/ (총 5단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">철도기술연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">철도 소음/진동 저감기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">철도 선로변 지속가능 저소음화 기술개발, 전동차 소음저감기술 개발, 철도 스킬소음 저감기술 개발, 역사구조물 소음진동 저감기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">고효인</td><td>해당단계 참여 연구원 수</td><td>총: 129명</td><td>해당단계 연구개발비</td><td>정부:3,305,000천원
기업:1,105,335천원
정부 외: 천원
계:4,410,335천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여 연구원 수</td><td>총: 1107명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:20,245,000천원
기업:8,601,868천원
정부 외: 천원
계:28,846,868천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">주관연구기관 : 한국철도기술연구원
협동연구기관 : 현대로템(주)
한국철도공사</td><td colspan="2">참여기업명 :한국철도시설공단, 유니슨테크놀러지(주), ㈜엠엔이알, ㈜포스코건설, 알엠에스테크놀러지(주), ㈜유신, 유진기공산업(주), 갑을오토텍(주), ㈜소명,(주)다윈프릭션, ㈜에스코알티에스, ㈜평화엔지니어링,(주)모어엔지니어링건축사무소</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관 : 한양대학교, 연세대학교, 홍익대학교,서울교통공사, 한국교통대학교</td><td colspan="2">연구책임자: 박준홍, 최용제, 김관주, 김영규, 최상현</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 철도 선로변 지속가능 저소음화 기술 개발
- 저소음 선로기술 개발 (레일음향조도 자동탐지 및 저감장치, 레일진동소음 저감기술, 레일 근접 저상 방음장치, 경량방음터널기술)
- 강교량 저소음화 기술 개발 (저소음강교량궤도(상판), 저소음 강합성 하로교 단면)
○ 전동차 소음저감기술 개발
- 전동차 저소음 차량설계기술
- 전동차 부품 저소음화(견인전동기, 구동기어, 냉방)
○ 철도 스킬소음 저감기술 개발
- 급곡선부 스킬소음 저감기술 개발(방음레일, 공명형 방음판)
- KTX 저소음 제동마찰재/패드 기술
○ 역사구조물 소음진동 저감기술
- 사전제작형 플로팅궤도 기술
- 역사 방음방진 설계 및 평가기술</td></tr>
</table>

요약문

연구의 목적 및 내용	▶ 연구목적 - 철도 이용객 및 선로변 거주민의 소음 관련 민원 해결과 국민 삶의질 향상을 위해 도심지로 운행하는 철도 및 역사에서 발생하는 소음 저감이 가능한 저소음 전동차 기술, 궤도진동 저감 기술 등의 개발 및 현장 적용성 검증 ▶ 연구내용 -레일 음향조도 및 진동 저감기술, 친환경 고효율 선로 방음기술, 강교량 소음/진동 저감기술, 선로변 저소음화 평가기술 개발 -현재 운행 중인 코레일 일반형 전동차의 중량 및 인터페이스를 최대한 유지하며, 소음 저감 목표를 달성 -스킬소음 저감기술 개발 관련 독자기술 확보를 통한 철도 소음/진동 문제에 탄력적으로 대응과 종합 대책 구축 -사전제작형 플로팅 슬래브궤도 기술을 적용하여 진동 5dB(V), 소음 3dB(A) 이상 저감을 달성
연구개발성과	○철도 선로변 수음지에서의 소음 저감 기술 개발 -기술이전 4건 완료(레일음향조도 자동탐지 장치, 운행선 급속교체 저소음 강교량 궤도기술, 저소음강교량 단면, 레일근접형 저상 방음장치) -TEST-BED 구축 및 현장성능시험 4건 (레일 근접형 저상 방음장치, 레일댐퍼, 저소음 강교량 궤도구조) ○KTX 제동 스킬소음 저감용 저소음 제동패드 개발 -소음레벨이 최대 22 dB(A) 저감 ○저감용 공명형 흡음판,방음레일 개발 ○저소음 견인전동기/구동기어 -저소음 견인전동기의 음향파워레벨은 주행 속도 110㎞/h에서 104dBA 미만 - 저소음 구동기어의 음향파워레벨은 80㎞/h에서 96dBA 미만이고 110㎞/h에서는 104dBA 미만 ○ 플로팅 슬래브궤도 -현차주행성능시험 결과(주행안정성 OK) - 모니터링 결과(사계절 변화 없음) - 소음진동 계측결과(진동 29dB, 소음 8dB 저감)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▶기대효과 -제품 상용화를 통한 이익 창출 및 철도민원 해결에 기여 -해외기술 및 제품 대체가능한 경제적 효율적 개발시스템 국산화 통한 기술료 절감 및 수입대체 효과 기대 ▶ 활용계획 ○철도 선로변 수음지에서의 소음 저감 기술 개발 - 개발기술의 기술이전 및 국내외 현장적용 실용화 - 민원지 유형 별로 방음벽 대체 대안기술로 활용 ○전동차 소음저감 기술개발 -코레일 일반형 전동차에 적용하여 소음 저감이 가능하며, 신규 차량 제작 시에 저소음 장치와 차량 진동/소음 저감 기술의 적용이 가능 ○저감용 저소음 제동패드 -KTX 및 도시철도 차량의 제동장치에 활용 ○플로팅 슬래브궤도 기술 일반·고속·도시철도의 소음·진동 민원개소의 궤도구간에 적용 가능한 기술로 저비용, 고효율의 궤도 방음·방진시스템으로 활용

핵심어 (5개 이내)	저소음선로	저소음교량	견인전동기	스킬소음	플로팅궤도

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6
2. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 17
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 279
4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 287
부록. 참고 문헌 ····· 293

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

[철도 선로변 수음지에서의 소음 저감 기술 개발]

○ 최종목표

(1) 국내 적용 가능 저소음 선로기술 개발 및 성능검증

(2) 철도 방음대안 경제성 향상

(3) 선로변 저소음화 기술 실증

○ 세부목표

(1) 레일 음향조도 및 진동 저감기술 개발 및 현장시험

(2) 친환경 고효율 선로 방음기술 개발 및 평가

(3) 강교량 소음/진동 저감기술 개발 및 평가

(4) 선로변 저소음화 기술 테스트베드 구축 및 현장적용 방안 수립

[전동차 소음저감 기술 개발]

철도차량의 고속화 고급화 추세에 따라 신규 철도차량 제작에 있어서 종합적인 소음/진동 저감 방안을 위한 기술이 요구된다. 또한 철도사업의 특성상 소음 저감 기술이 차량 제작 초기 단계부터 적용되지 않은 경우에는 기존 운행 중인 차량의 소음 저감은 쉽지 않다. 따라서 현재 운행 중인 차량의 인터페이스는 유지하면서 추가적으로 소음을 저감할 수 있는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 현재 운행 중인 코레일 일반형 전동차의 형식 및 구조를 최대한 유지하는 조건하에 소음을 저감하는데 목적이 있으며, 주행 중 외부 소음 3dBA, 주행 중 실내 소음 4dBA, 정차 중 실내소음 5dBA 저감을 목표로 한다. 이를 달성하기 위하여 저소음 장치 개발 및 저소음/저진동 차체 설계 기술을 개발하고자 한다.

○ 최종목표 (코레일 일반형 전동차 적용 시)

(1) 80kph 주행중 선로중앙 7.5m 거리 외부소음 81dBA

(2) 110kph 터널 주행중 실내소음 80dBA

(3) 정차중 HVAC구동시 실내소음 63dBA

○ 세부목표

위 최종 목표를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같다.

(1) 철도차량 하부소음 저감 side skirt 개발

(2) 바닥구조 차음성능 보강안 개발

(3) HVAC 덕트 설계 최적화

(4) 구조기인 소음해석 기술 개발

(5) 저소음 견인전동기 개발

- 110km/h 주행 조건에서 음향파워레벨 104dBA 이하

(6) 저소음 HVAC 개발

- 정차중 실내 소음 63dBA 이하

(7) 저소음 구동기어 개발
  - 80㎞/h 주행 조건에서 음향파워레벨 96dBA 이하
  - 110㎞/h 주행 조건에서 음향파워레벨 104dBA 이하
(8) 기밀 향상 출입문 개발 : 출입문 차음성능 Rw 32이상

[철도 스킬소음 저감기술 개발]

○ 최종목표
(1) 급곡선부 스킬소음 저감기술 개발 (5dB(A) 이상 저감)
(2) 제동 스킬소음 저감기술 개발 (5dB(A) 이상 저감)

○ 세부목표
(1) 철도연변지역의 곡선부 구간에서 발생되는 스킬소음 저감을 통한 민원해결
(2) 스킬소음 저감기술 개발을 통해 철도연변에 주거하는 주민에 대한 소음/진동공해로 인한 사회문제 해결
(3) 스킬소음 저감기술 개발 관련 독자기술 확보를 통한 철도 소음/진동 문제에 탄력적 대응 가능
(4) KTX차량의 역사 내 진입 시 발생되는 제동 스킬소음 저감 기술개발을 통해서 KTX 승객 불편 해소
(5) 친환경 철도를 구현함으로써 일반 국민의 삶의 질 향상 추구와 함께 곡선부 철도 주행에 따른 스킬소음 저감기술에 대한 종합적 대책 구축

[철도 역사 구조물 소음 및 진동 저감기술 개발]

○ 최종목표
(1) 선하역사 소음/진동 저감 기술 개발 (소음 3dB(A), 진동 5dB(V) 이상 저감)
(2) 차량주행 안전성 및 방진 효율성 성능평가 기술 개발

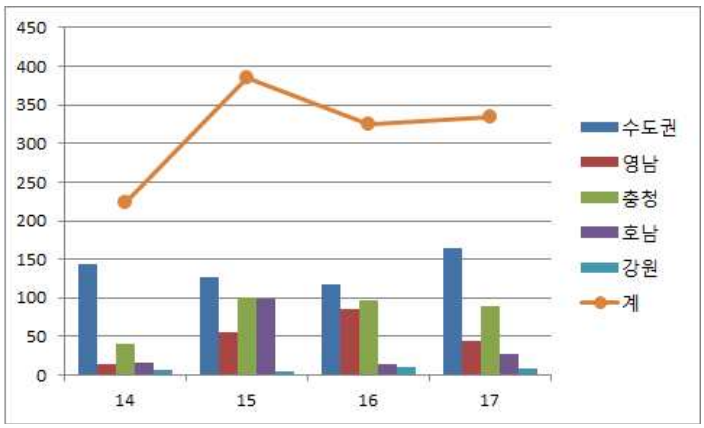
○ 세부목표
선하역사의 경우 차량-궤도에서 발생하는 하중 및 진동이 직접적으로 연결되는 구조적 한계로 인하여 발생하는 structure-bone-noise 형태의 진동과 소음레벨이 다른 역사형식 대비 월등히 높음으로 인하여 역사내 상업 및 업무시설 이용객과 종사자들의 불편과 민원이 증가함. 신설 선하역사의 경우 플로팅 궤도 공법을 활용하여 효율적인 진동저감이 가능하나, 기존 선하역사의 소음·진동을 저감할 수 있는 기술은 미비한 상황임. 이에 기존 선하역사의 소음·진동을 저감할 수 있는 기술의 개발, 현장구축 및 성능검증을 통하여 기존 선하역사의 환경성을 향상하고자 함.

2. 연구개발의 필요성

[철도 선로변 수음지에서의 소음 저감 기술 개발]

- 사회적 필요성

• 14년 경부,호남고속철도 전 구간 개통으로 소음민원이 크게 증가 추세이며, 철도연변 택지개발로 인한 공동주택(고층아파트 등)의 민원 증가



1) 한정된 예산으로 민원 해소를 위한 방음벽 설치의 적기 추진에 한계가 있음
⇒ 한정된 예산으로 선로변 소음저감효율 증대 필요

2) 사후 처리방식인 방음벽 설치만으로 소음기준치 이내로 관리하고 있음
⇒ 사전 소음차단 방식의 원천적 추가 저감대안 필요

3) 방음벽의 경우 아파트 저층부에만 저감효과, 경관차단
⇒ 전파되기 전에 소음방사에너지를 저감하고 방음벽의 높이를 점차 감소하는 전략

- 기술적/경제적 필요성

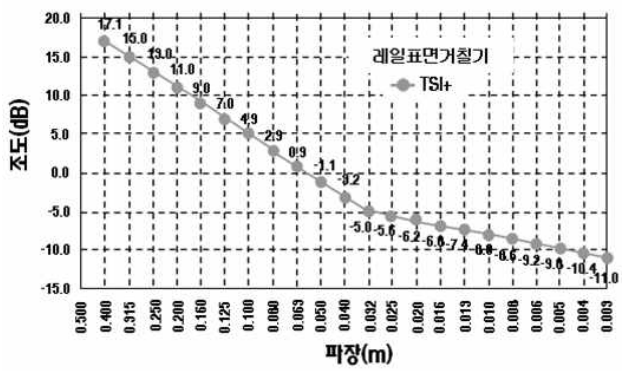
• 해외도입 기술 고가, 국내 철도운행환경 검증사례 미흡 ⇒ 국내 선로변 지형, 도심지 여건 등에 적합한 저비용, 유지보수 편의 독자기술 확보 및 국제적인 기술 선도

• 고비용의 기존 운행선 개량기술에 대한 저비용 고효율 저소음 대체방안 제시 필요

- 개발 기술 별 필요성

• 레일의 음향조도 저감기술

1) 국제적 표준레일 기준 (ISO 3095, TSI Noise, 철도차량의 소음권고기준 및 검사방법 등에 관한 규정-환경부)



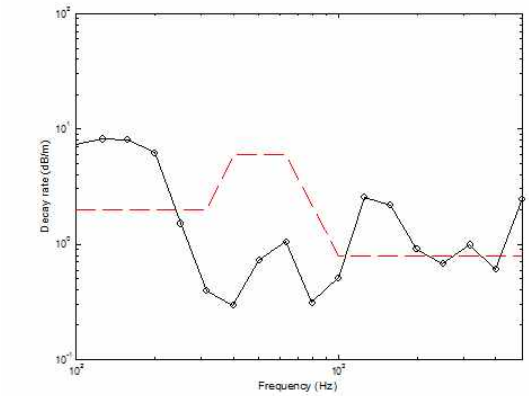


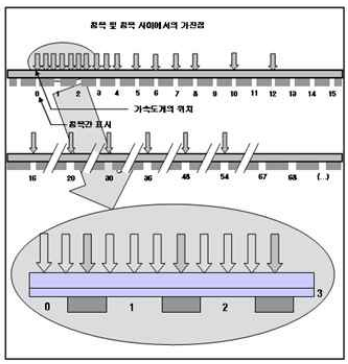
2) 다른 소음 저감대안 수립하기 이전에 레일의 표면을 저소음화(표준화) 하는 것이 우선적 대책임.

3) 재현성 있는 레일의 음향조도 측정과 용이한 전문 저감기술이 제공되어야 함.

- 레일의 진동소음 저감기술

1) 국제적 표준 궤도동적감쇠율(Track Decay Rate) 평가 기준 (ISO 3095, TSI Noise, 철도차량의 소음권고기준 및 검사방법 등에 관한 규정-환경부)





2) 콘크리트 슬라브도상 궤도의 경우 자갈도상 궤도에 비하여 작은 강성의 레일패드 적용으로 궤도의 동적감쇠율이 더 작아서 레일의 진동으로 인한 소음방사레벨이 큼.

3) 외부환경에 강건한 효율적 레일댐핑장치/저소음궤도구조 기술 제시 필요함.

- 레일 근접 저상 방음장치

1) 소음원에 근접하여 방음시설을 설치하여 소리가 전파되기 전에 방사되는 에너지를 원천적으로 차단하는 대안이 필요하며, 실제 운행선로에서의 제반성능 검증이 필요함.

2) 선로에 근접하여 시설물 설치의 경우 철도차량의 안전, 선로의 유지보수 작업, 안전 대피 등 국내운행선로 환경에 부합하는 기술요건이 제공되어야 함.

- 철도교량 저소음 궤도기술(운행선 교체 가능)

1) 현재 무도상 강교량의 경제적이며 효과적인 소음·진동저감방법의 국내기술은 없는 실정으로 이에 대한 개발이 필요함.

2) 열차 운행 중에도 교체가 안전하게 가능하고, 유지보수비용을 절감하는 기술이 필요함

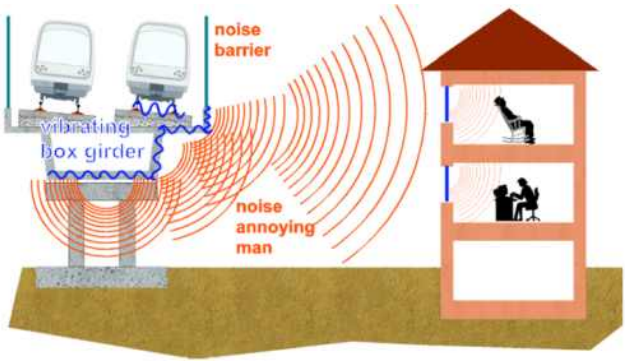
- 저소음 장지간 강합성 하로교(신설교량용)

1) 도심지 근처의 기존 강교량(판형교, 강박스거더교 등)에서 발생하는 소음/진동 공해는 심각한 상황으로 민원의 대상이 되고 있음.

2) 강교량에서 소음 발생은 그림 1.과 같이 두 가지 주요 원인으로 발생함. 첫 번째로 열차주행에 따른 방사소음이 주요 원인이며, 두 번째로는 판형교 또는 강박스거더교와 같이 얇은 박판으로 교량 단면이 구성되는 경우 열차주행에 따라 발생되는 진동에 의해 얇은 박판의 떨림에 의해 발생하는 구조기인 소음(Structural borne noise)이 주요 소음발생 원인 임.

이러한 이유로 철도교량의 신설에 있어 강교량의 적용을 꺼려하지만 도심지 구간에서 교차로 통과 구간 등 지간이 긴 구간에서는 부득이하게 강박스거더교가 적용 될 수밖에 없는 실정임.

따라서 강박스거더교를 대체할 수 있는 경제적이며 소음발생 원인을 해결할 수 있는 장지간의 신설용 저소음 강교량이 필요한 실정임.



- 철도 선로변 및 저소음화 기술 적용 관련 소음/진동 DB 및 평가프로그램 제공

1)철도의 소음진동에 영향을 미치는 인자는 기술의 발전에 따라 다양하게 변화하고 있으나 기존에 구축된 철도 소음진동 데이터 베이스의 경우 이러한 인자(예를 들어, 레일조도 상태, 방진재 사양등)를 충분히 포함하지 못하고 있으며 대부분의 데이터가 연구자의 개별적인 방식으로 보유되고 있고 공개적으로 제공된 자료가 없기 때문에 실제 엔지니어링 현장에서 사용하기가 매우 어려운 실정임.

2) 본 연구는 실제 엔지니어링 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 상용적이고 개방적인 구조를 가진 철도 소음 진동 데이터 베이스를 제공함.

3) 지속관리 가능한 데이터베이스에 축적되는 실측 자료를 보다 효율적으로 이용하기 위하여, 일반적으로 매우 복잡한 동적 응답 모델이 요구되어 순수한 해석적인 방법으로서는 신뢰성 있는 평가가 이루어지기 어려운 진동 평가에 적용할 수 있는 철도 진동 평가 알고리즘 개발이 요구됨.

4) 최근 철도의 도심통과 구간이나 선하역사 건설이 증가하고 있는 실정이며, 철도 노선 주변에 진동에 민감한 초정밀 산업단지 등이 위치하고 있어 초정밀장비의 정상적인 운영과 궤도 주변 구조물의 민원 방지 등의 문제를 해결을 위해서 축적된 실측데이타의 의한 효율적인 철도 진동 평가 기법 개발의 필요성이 있음.

- 친환경 경량 방음터널

1) 현재 방음대책으로 활용되고 있는 방음벽은 저층지역에 한해 부분적 효과가 있음

2) 도로소음 방지용 방음터널은 비용과 하중문제로 고가철도 등에 적용이 어려움

3) 철도주변 특성을 고려한 방음터널의 최적화를 통해 대안을 제시하여 구조, 형상, 재료 최적화를 통해 경량화 사양도출 필요함.

[전동차 소음저감 기술 개발]

철도차량은 대량 수송 능력뿐만 아니라 정시성, 안전성 그리고 친환경성이 확보된 교통수단으로 철도차량의 수요 및 기술발전은 더욱 가속화되고 있다. 그에 반하여 철도차량의 속도 증가와 수송능력 증대는 소음 측면에서는 매우 불리하며, 도심의 확장에 따른 선로변 인근의 개발, 도시의 고층화는 환경소음의 취약하며, 그로인한 철도 소음에 대한 민원이 커다란 사회 문제로 대두되고 있다. 또한 방음벽 등의 시설물을 이용한 방음 기술의 한계와 철도차량의 고속화, 경량화는 소음, 진동 문제를 해결하기 위한 근본적인 방안을 요구하고 있다.

이와 같은 환경변화가 철도 소음 민원을 기하급수적으로 증가시키고 있으며 국민의 정온한 환경에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 국가 및 공공복지 차원에서 1990년대부터 관련 연구 및 기술개발이 추진되었으며, 2010년 1월부터 철도 환경소음 기준이 기존 대비 5dBA 강화되어 시행되고 있다. 또한 현재 철도차량 제작 시부터 소음을 규제하기 위해 제작차량에 대한 환경소

음기준이 설정되어 시행되고 있으며, 2017년에는 소음권고기준이 한층 강화되어 실시된다.

세계적으로도 철도차량의 주행속도는 증가하고 있는 반면 주행 중 실내/외 소음 사양은 강화되고 있는 추세이며, 삶의 질의 향상에 따른 철도차량 이용객 및 철도 인근 거주민의 소음에 관한 민원 증가는 사회 문제로까지 대두되고 있다. 유럽은 2002년부터 Directive 2002/49/EC를 발표하여 2007년 까지 25만 이상의 중대도시에서는 철도를 포함한 도시내 소음지도를 구축하도록 하였다. 또한 2008년 독일 베를린의 소음 저감 계획에서는 지하철, 트램, 철도에 대하여 레일 흡음재, 저상 방음벽, 저소음 레일 등을 설치하도록 하였다. 핀란드 헬싱키는 2000년 소음 저감 계획을 발표하여 40㎞의 철도 방음벽, 레일 트랙 개선 등을 개선했지만, 소음에 노출되는 인구는 지속적으로 증가하고 있다.

전동차의 실내외 소음은 차량의 형식과 구조에 따라 결정된다. 또한 철도사업의 특성상 소음 저감기술이 차량 제작 초기 단계부터 적용되지 않은 경우에는 기존 운행중인 차량의 소음 저감은 쉽지않다. 특히 코레일 일반형 전동차의 경우, 소음저감을 위해 저소음 장치나 차체의 소음 저감구조의 획기적인 변화를 적용하기에는 기존에 운영되는 시스템과 인터페이스 문제, 비용 및 중량 문제 등으로 인하여 적용에 현실적인 제약이 많다. 따라서 기존 운영중인 차량의 인터페이스는 유지하면서 추가적으로 소음을 저감할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 본 연구개발은 현재 국내 일반형 전동차의 형식 및 구조를 최대한 유지한다는 조건하에 소음을 저감하는데에 의의가 있다. 본 기술 개발 시 현재 운행중인 코레일 일반형 전동차에 대하여 주행중 외부소음은 -3dBA, 주행중 실내소음은 -4dBA, 정차중 실내소음은 -5dBA 의 소음 저감이 달성 가능하다.

	현 수준	기술개발시 가능 수준
80kph 주행중 외부소음	84dBA	81dBA
110kph 터널 주행시 실내소음	84dBA	80dBA
정차중 실내소음	68dBA	63dBA

신 철도차량의 개발은 차량 운영처와의 계약 또는 법적인 사항으로 차량의 소음 수준은 차량제작사가 자체적으로 개발해야 할 기술이나, 현재 운행중인 국내 일반형 차량은 2017년부터 강화되는 외부소음 규정에 만족이 불가하며, 주행속도가 높아지는 추세에 따라 터널 80㎞/h 이상 주행시 관련 법규 불만족에 따른 민원 사항이 증가 할 것으로 예상된다. 따라서 현재 운행중인 차량에 대한 소음 저감 연구 개발이 선행되지 않을 경우 외부소음에 대한 해결책은 선로자체의 소음 저감 또는 선로변 방음벽의 설치 등이며, 차량 실내소음에 대한 해결책 마련 없이는 기존 차량의 운행이 불가한 상황이 발생할 것으로 예상된다.

국내의 도시 철도차량의 성능 시험에 기준에 따르면 국내 도시철도 차량은 터널을 최고운행속도로 주행 중일 때 실내소음은 80dBA이하이어야 한다. 현재 대부분의 국내 도시 철도 차량은 터널 및 지하구간을 80㎞/h로 주행 시 실내소음이 80dBA로 설계되고 있다. 그러나 최근 도시철도의 운행 속도가 증가되고 있는 추세이나 차량의 소음성능의 발전은 답보상태에 있어서 전동차의 터널내 운행속도 증가 시 실내소음의 증가로 인해 승객들의 불편이 증가하게 된다.

또한 환경부 고시 철도차량의 소음 권고기준 및 검사방법 등에 관한 규정에 따르면 아래 표와 같이 년도 별로 차량 주행 중 강화된 외부소음 기준을 권고하고 있다.

차량종류 / 적용시기	전기동차 (EMU)
2011.1.1 ~ 2013.12.31	87
2014.1.1 ~ 2016.12.31	84
2017.1.1 ~	81

따라서 현재 운영 중인 전동차가 관련 법규의 요구조건을 만족하기 위해서는 기존의 전동차와의 인터페이스를 유지하면서 차량의 소음을 저감할 수 있는 기술이 추가로 적용되어야 한다.

[철도 스킬소음 저감기술 개발]

- 철도의 고속화 및 수송력 증대로 인하여 철도연변에 주거하는 주민에 대한 소음 및 진동공해는 커다란 사회문제로 대두되며 인구 밀집화와 건물의 고층화로 기존의 방음기술의 한계로 지속적 민원 발생
- 일반국민 삶의 질 향상 추구를 위해서 철도 주행에 따른 종합적인 소음저감 기술개발이 요구됨
- 인구 밀집 지역에 불가피하게 많이 설치되어 있는 곡선부 철로구간 운행 시 특정 고주파수 영역에서 집중적으로 발생하는 스킬소음 발생 원인에 관한 체계적인 연구 필요
- 아파트 연변 철도 곡선부 구간에서 스킬소음 저감을 위해 설치된 레일 도유장치는 궤도 및 토양의 환경적 오염을 야기 시켜, 새로운 타입의 저감방안이 요구되고 있음
- 고속철도 KTX 차량이 역사 내 진입 시 제동에 의해서 발생하는 스킬소음의 레벨이 매우 높아 철도 이용승객에게 큰 불쾌감 유발
- KTX의 제동력을 높이기 위해 디스크와 패드 사이에 작용하는 힘이 증가하여 패드 마찰면의 마모가 심하고 부분적으로 파손되는 현상도 발생하므로 재질의 성능향상도 필요
- 국내의 경우 소결재 제동패드의 제작기술은 보유하고 있으나, 마찰재 성분의 최적화, 제동패드 구조의 최적화, 디스크와 제동패드사이의 접촉해석 및 소음 저감기술에 대한 원천기술은 확보하고 있지 못하므로 체계적인 연구개발이 필요

[철도 역사 구조물 소음 및 진동 저감기술 개발]

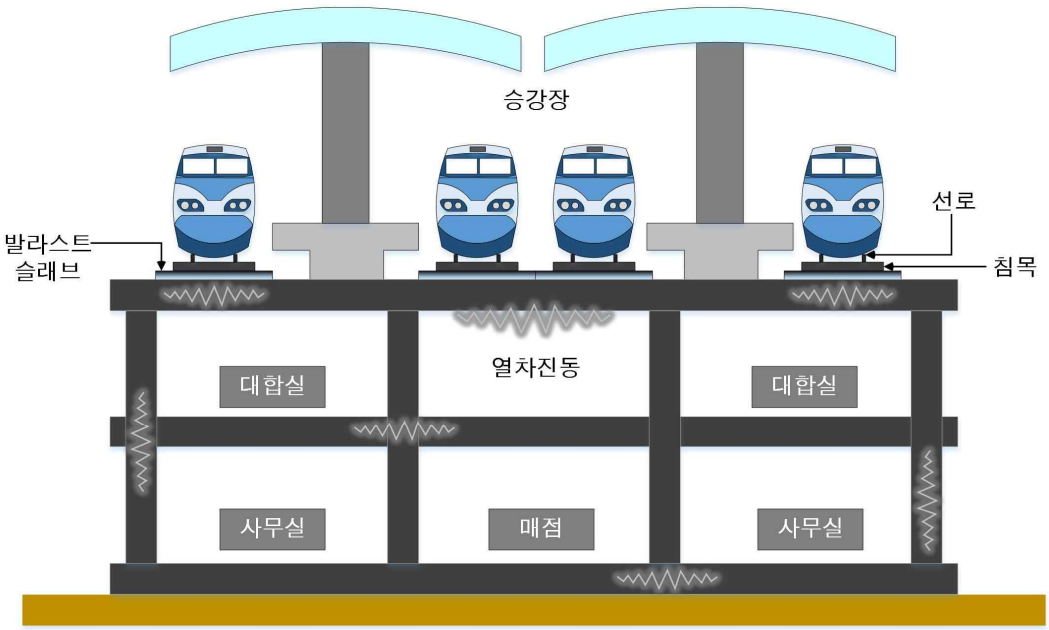
○ 최근 철도교통의 중요성이 부각됨에 따른 신설 및 개량노선의 증가, 콘크리트 궤도로의 점진적 교체, 열차 증속 및 증편 등으로 인하여 다양한 민원이 증가하고 있음. 그 중 소음·진동에 대한 불만은 철도교통 활성화에 큰 걸림돌이 되고 있으며, 철도의 소음·진동 저감을 통한 쾌적한 환경 조성은 철도의 가장 큰 이슈가 됨.

○ 철도 건설 및 운영기관은 소음·진동 관련 민원에 대한 대책으로 최근까지 해외의 소음·진동 저감방안을 무분별하게 도입하여 왔으나, 투입 비용 대비 기대성능에 미치지 못한 것으로 보고됨. 이는 국내 환경을 고려한 차량 종류별 특성, 궤도시스템, 토목시설물, 연변환경 등 다양한 변수를 반영하지 못한 것이 주원인으로 국내 환경에 적합한 소음·진동 저감 대책 및 기술개발이 필요함

○ 철도부지 확보의 한계로 선상·선하역사를 포함한 다양한 형태의 역사구조물이 증가하고 있음. 2013년 현재 우리나라 도시 및 일반철도 역사 1,198개소 중 선하역사는 117개소(경전철 제외)로 전체의 9.6%를 차지하고 있으며, 점차 그 비중이 증가할 것으로 전망되고 있음

○ 선하역사의 공간 활용차원에서 다양한 상업, 업무시설 등이 설치되어 이용객 및 종사자 수가 늘어감에 따라 선하역사 환경에 대한 만족도에 대한 기대수준이 높아지고 있음. 특히 교통의 중심인 철도역에 정온환경이 요구되는 백화점, 마트, 업무시설의 입점이 늘고 있음 (산본역, 수원역, 동대구역, 부천역 등)

○ 차량-궤도와 밀접한 인터페이스 사항을 가지고 있는 선하역사의 경우, 차량-궤도에서 발생하는 하중 및 진동이 직접적으로 전달되는 구조적 문제로 인하여 발생하는 structure-bone-noise 형태의 진동과 소음으로 불편 및 민원이 증가하여 이에 대한 대책이 시급함.



3. 연구개발 범위

[철도 선로변 수음지에서의 소음 저감 기술 개발]

연구개발 내용	최종 성과물
○ 레일 음향조도 및 진동 저감기술 - 레일 음향조도 자동 탐지장치 개발 (이동속도 15㎞/h 이상) - 레일 음향조도 저감장치 개발 (음향조도레벨 5dB 이상 저감) - 레일의 진동소음 저감기술 개발 (ISO 3095 기준, 현장시험)	▷ 주행표면 음향조도 자동 모니터링장치 ① 자동주행 레일표면 음향조도 측정장치 ② 레일음향조도 측정장치 운영 소프트웨어 ③ 레일음향조도 측정장치 분석 소프트웨어 ④ 레일음향조도 측정장치 철도운행선로 측정결과 ▷ 주행표면 음향조도 저감장치 ① 레일음향조도 저감(연마)장치 ② 레일음향조도 저감장치 제어 프로그램 ③ 레일음향조도 저감장치 철도레일 연마 결과 ▷ 레일 진동댐핑장치 ① 충돌 레일댐핑장치

	② 충돌 레일댐핑장치 **철도운행선** 150m 2회 시범부설 및 소음/진동 저감효과 측정결과 (철도주행소음 평균 4.4dB(A), 주거지역에서의 철도주행소음 평균 5.7dB(A), 차내소음 3.2dB(A) 저감) ③ 레일댐핑장치 해석모델 및 성능 예측결과 ▷ 진동댐핑 폴리머콘크리트 궤도소재 ① 진동댐핑 복합 폴리머 콘크리트 소재 및 물성/진동성능 평가 결과 ② 진동댐핑 복합 폴리머 콘크리트 침목구조 및 진동감쇠효과 해석/측정 결과
○ 친환경 고효율 선로 방음기술 - 궤도근접 저상(low-height) 방음벽 최적 형상 및 구조 개발 (현장시험, 환경소음 5dB(A) 이상 저감) - 고효율 친환경 경량(30% 절감)방음터널 흡차음구조 개발(축소모형시험) - 방음시설의 고가 및 교량 설치 구조설계 향상기술 개발 - 선로 유지보수 편의성을 고려한 저비용 시공기술 개발 (기존 방음벽 대비 10dB(A) 향상, 건설비용 30% 절감)	▷ 궤도근접 저상 방음벽 시제품 ① 궤도근접 저상 방음벽 1차 시제품 **철도운행선** 100m 시범부설 및 소음저감, 진동/구조 성능 측정결과 (철도주행소음 위치별로 6dB(A)~13dB(A) ② 궤도근접 저상 방음벽 2차 시제품 철도운행선 268m 시범부설 및 소음저감, 진동/구조 성능 측정결과 (철도주행소음 평균 6dB(A)~12db(A), 주거지역에서의 철도주행소음 평균 4dB(A)~9dB(A)) ③ 상용화 실적 가. 호남고속철도 2단계 개량구간 (나주) 240m 공사, 매출 약 2억2천만원(2018.12.31.) 나. 경인선 오류역 89m 발주 예정(2019.1) ▷ 저비용 고효율 경량 방음터널 시제품 ① 교량설치 가능 형상과 흡차음구조 개발 ② 축소모형 시작품 제작 및 소음저감효과 시험 결과 (단위중량성능 기존방음터널 비해 30% 경량 및 경제성 확보) ③ 고가 및 교량 적용 방음터널의 구조설계 향상 기술과 경제성 확보한 표준설계 도서 ④ 시공절차 및 유지보수 절차 포함된 표준시방서
○ 강교량 소음/진동 저감기술 - 운행선교체용 연속지지 저소음궤도구조 (저소음상판) 개발 - 저소음 강교량 단면 개발 - 저소음궤도구조(저소음상판) 시작품 제작 및 현장시험(소음 7dB(A) 이상 저감) - 강교량 소음/진동 평가기술 개발 및 저감방안 현장시험	▷ 강교량 저소음 급속시공 저소음상판 교량궤도 ① 철도교량 구조체 결합용 저소음상판(궤도) 시제품 제작 및 결합시공성 검증 결과 ② 현장부설용 저소음상판(궤도) 시제품 제작 및 철도운행선 현장성능 검증 결과 ③ 한국철도시설공단 궤도시설물 성능검증 위원회 검증결과 ④ 저소음상판(궤도) 시작품 소음저감효과 측정/해석 결과(판형교 거더 대비 소음 7dB(A) 이상 저감) ▷ 강교량 신형식 저소음 단면 ① 장지간 방음벽 일체형 교량단면 및 구조설계/구조안전성 결과(철도설계기준) ② 저소음 강교량 단면 20m 지간 실물시험체

	시험체 및 소음저감효과/구조 안전성 성능평가 결과 (강박스 거더 대비 소음 7dB(A) 이상 저감) ③ 신설용 저소음 강철도교량 현장적용 위한 지간별 표준단면, 시공시방서, 유지관리시방서 ④ 기술인증서(한국콘크리트학회)
○ 선로변 저소음화 기술 실증 연구 - TEST BED 구축 및 평가 총괄 - 개발기술 평가기법 연구 - 개발기술의 현장적용 방안 수립	▷ TEST BED 구축 계획 보고서 및 관련 운영기관/전문가 자문서 ▷ 개발기술에 대한 TEST BED 현장 성능결과 평가절차 및 선로변 청감효과 평가결과 ▷ 개발기술 TEST BED 소음/진동 DB 및 진동소음 평가프로그램 ▷ 개발기술의 현장적용 방안에 대한 관련 운영기관/전문가 자문서

[전동차 소음저감 기술 개발]

전동차 소음저감을 위한 각 장치별 개선품은 신규 코레일 일반형 전동차를 대상으로 하며, 기존 코레일 일반형 전동차의 개조에도 활용 가능하도록 인터페이스를 고려하여 개발되었다. 전동차의 운행속도 증가에 따른 차량의 실내외 소음을 저감하기 위해서는 차량 자체의 차음 성능 및 흡음 성능 개선과 함께 전동차의 주요 소음원인 견인전동기, 구동기어, HVAC의 저소음화가 선행되어야 한다. 또한 이러한 소음원의 주요경로가 되는 출입문의 기밀도 향상이 전동차의 소음 저감에 중요한 요소이다.

구분	현재 수준	최종목표	법적 규제치
80kph 주행중 선로중앙 7.5m 거리 외부소음	84dBA	81dBA	81dBA (2017년부터 적용) 철도차량의 소음권고기준 및 검사방법 등에 관한 규정
110kph 터널 주행중 실내소음	84dBA	80dBA	80dBA 도시철도차량의 성능 시험에 관한 기준
정차중 실내소음	68dBA	63dBA	법적 규제치 없음

본 연구과제의 최종 목표를 기준으로 전동차의 소음 발생 요소별 구성장치의 기여도를 고려하여, 다음과 같은 연구 주제를 세분화하여 연구를 수행한다.

No.	항목	정량적 목표	시험규격
1	저소음 견인전동기 개발	Sound power level: 104dBA 이하	ISO 9614 또는 ISO 3744
2	저소음 구동기어 개발	Sound power level: 104dBA 이하	ISO 9614 또는 ISO 3744
3	저소음 HVAC 개발		시험규격없음
4	기밀향상 출입문 개발	Rw 32 이상	ISO 10140-2 ISO 717-1

			ASTM E413-87
5	차량 하부소음 저감 Side skirt 개발	삽입손실 3dBA 이상	시험규격없음
6	HVAC duct 구조 최적화	-	시험규격없음
7	바닥구조 차음 성능 보강안 개발	-	ISO 10140-2 ISO 717-1 ASTM E413-87

본 연구과제에서는 차량설계 및 제작 측면에서 소음저감에 관한 연구를 수행하며, 각 장치별 소음 저감량이 실내 및 실외 소음에 미치는 영향력을 평가하기 위하여 해석모델을 구축한다. 해석모델은 기존 전동차를 기반으로 측정결과와 비교하여 모델의 신뢰성을 확보하고 개선설계안에 대한 실내외 소음레벨을 평가하여 최종 목표의 달성도를 평가한다.

[철도 스킬소음 저감기술 개발]

가. 곡선부 스킬소음 저감 방안
- 스킬소음 저감용 방음레일 개발
- 스킬소음 저감용 공명형 흡음판 개발

나. KTX 차량 제동 스킬소음 저감 기술
- 제동 스킬소음 저감용 저소음 패드 개발

[철도 역사 구조물 소음 및 진동 저감기술 개발]

○ 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 시스템 설계
- 시스템 파라미터 설계
- 동적 안정성 검토
- 시스템 방진 성능 평가
- 표준단면 구조설계
- 방진마운트 설계

○ 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 개발
- 기존 기술/시공사례 분석
- 마찰댐퍼형 방진장치 설계 및 개발
- 사전제작형 플로팅궤도 최종설계
- 단위구성품 성능시험 및 실대형 조립시험

○ 현장시험시공 및 계측, 모니터링
- 현장시험시공 사전점검
- 현장시험시공
- 계측 및 모니터링 계획

○ 철도시설성능검증

제2장. 연구수행내용 및 성과

1. 1세부 철도 선로변 지속가능 저소음화 기술 개발

(1) 레일 음향조도 자동탐지장치 개발

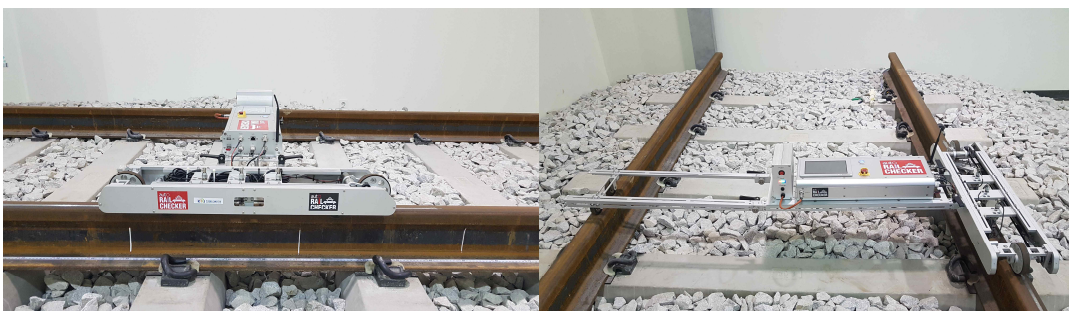
(가) 최종성과물 개요

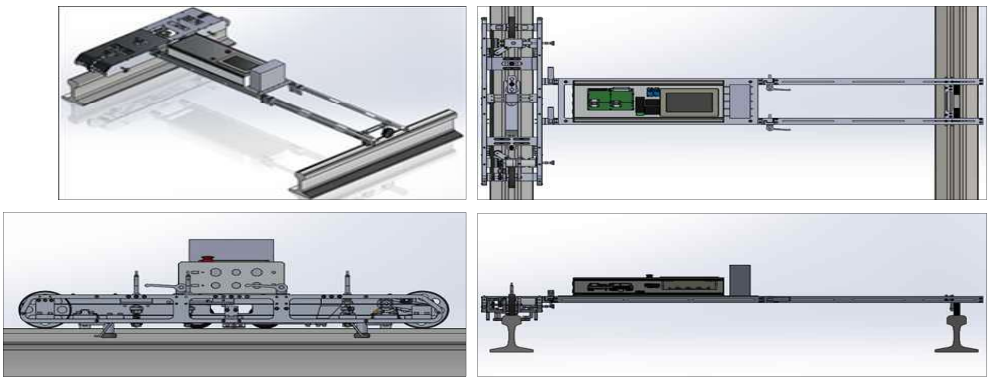
① 정의

레일표면의 음향조도를 측정하기 위해 실시간 제어기를 통한 등속측정과 3개의 센서를 통해 측정 정밀도를 향상시킨 레일표면의 길이방향의 음향조도 자동 측정장치

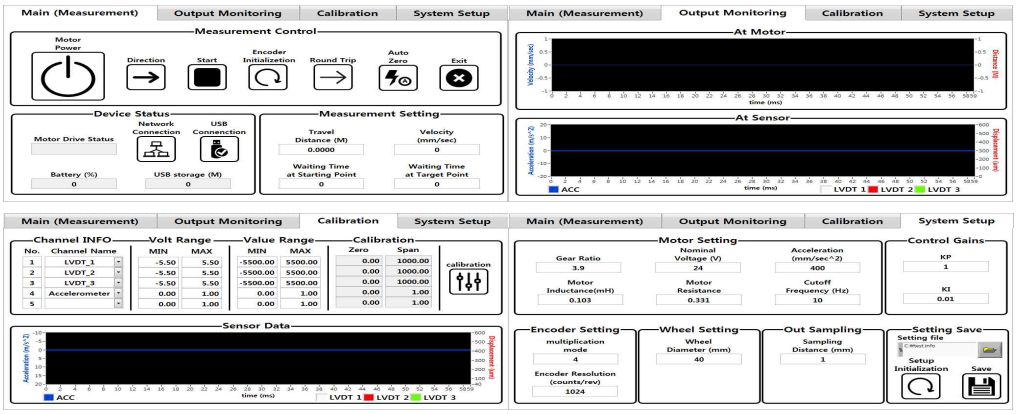
- 명　　칭 : ARCer (Auto Rail Checker)
- H/W 구성 : 구동모터(80W DC Motor), 측정센서(위치 조정형 변위센서 3개, 최대 0.1um, 스트록 10mm), 구동휠(100mm, 양방향), 컨트롤러(NI Realtime controller), 배터리(24V), DAQ 외
- S/W 구성 : 터치 스크린 지원 인터페이스(LabVIEW 기반 구동 및 저장 S/W)



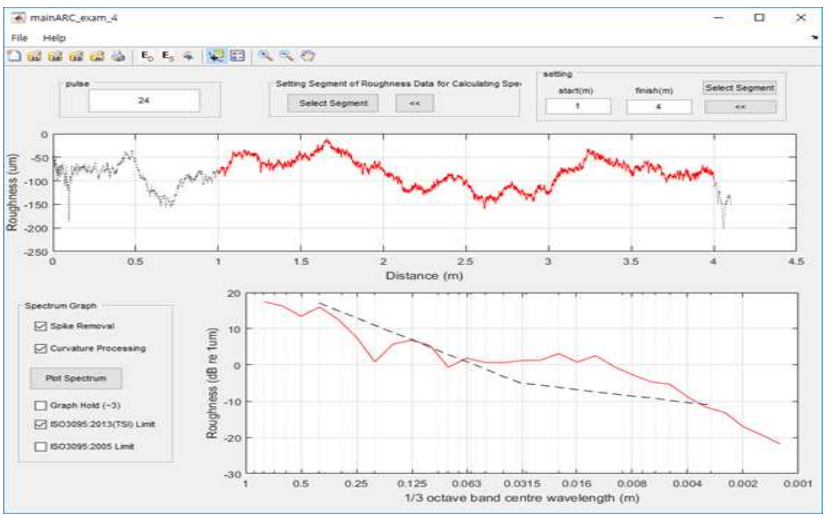




[그림 3.1.1]]레일 음향조도 자동탐지장치(ARCer) 시제품



[그림 3.1.2] LabVIEW 기반 소프트웨어 프로그램



[그림 3.1.3] 레일 음향조도 자동 탐지장치 분석 소프트웨어

(2) 주요 연구내용

(가) 장치 설계 연구

- 변위센서를 이용한 측정에는 차체의 원인, 즉 휠의 편심 또는 휠 표면의 이물질, 휠을 지지하는 베어링 등에 의한 오차가 측정결과에 반영되며, 레일과 접촉하는 두 휠 사이의 길이(chord length) 및 센서의 위치에 따라 측정값이 달라짐

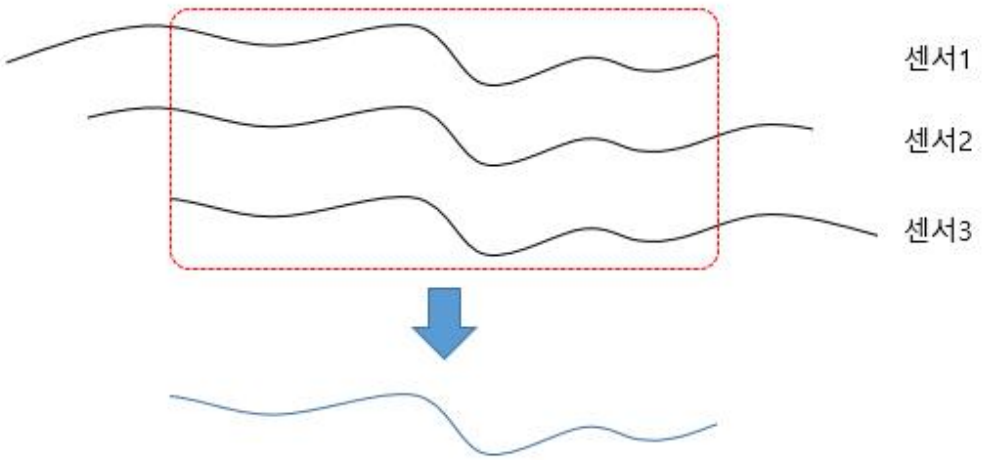
- 탐지장치의 다중 변위센서를 이용한 레일 표면측정 보정 및 휠 외란 보정 알고리즘 개발
  : 기존 트롤리형 모바일 음향조도 측정장치에 일반적으로 사용되는 단일 센서를 사용한측정 방식의 측정 정확도의 부정확성을 개선하기 위한 새로운 방식의 다중센서 융합방법 적용

- 구동휠에 의한 외란 감소방법 적용
  : 트롤리형 음향조도 측정장치는 센서가 움직이는 플랫폼에 고정되어 사용되기 때문에 플랫폼의 구동륜의 편심, 베어링등의 오차 등에 의해 측정값에 외란으로 작용되어 영향을 미침, 자동화 측정장치의 구동륜 외란에 대한 측정값 오차를 보상하기 위한 새로운 방법을 적용함

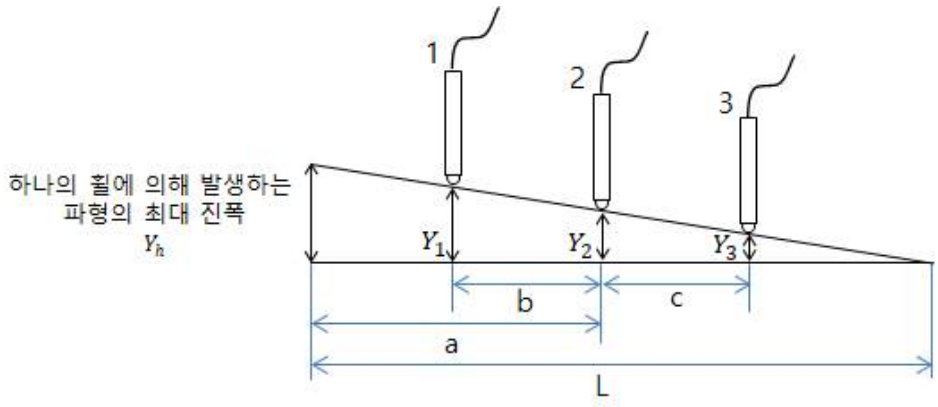
- 장치 플랫폼 길이를 고려한 센서 위치와 구동륜 지름을 고려한 센서 간격의 최적값을 적용하여 레일 음향조도 자동 측정장치의 측정값의 정확도를 향상시킴

- 해석값에 대한 검증은 현장측정 시험을 통해 확인

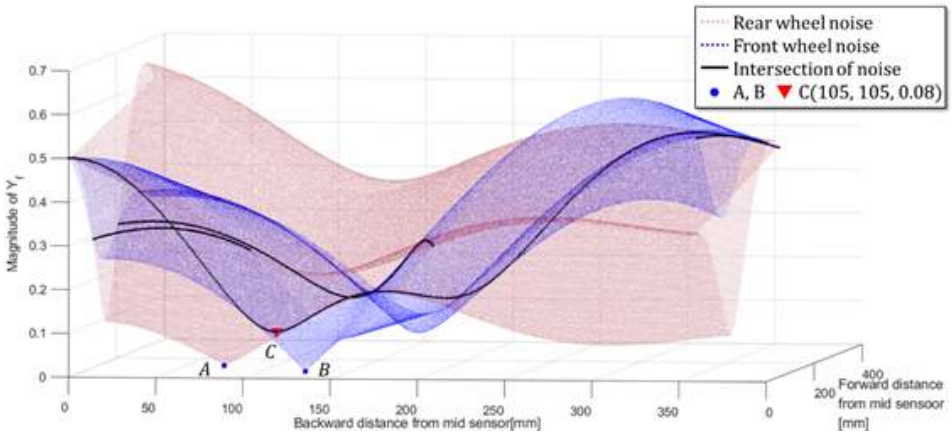
$$z(x) = \{z_1(x) + z_2(x) + z_3(x)/3\}$$



[그림 3.1.4] 다중센서 융합 기술 (Average method 적용 방법)



[그림 3.1.5] 휠 외란 발생 시스템



[그림 3.1.6] 구동륜 외란의 영향에 의한 응답곡선(최소점 c=105mm, 센서간 거리)

(나) 현장 측정 시험

① 탐지장치의 측정정밀도를 검증하기 위하여 다양한 측정 환경의 현장에서 레일조도 측정



[그림 3.1.7] 탐지장치 현장 측정 시험

② 측정 레일 상태

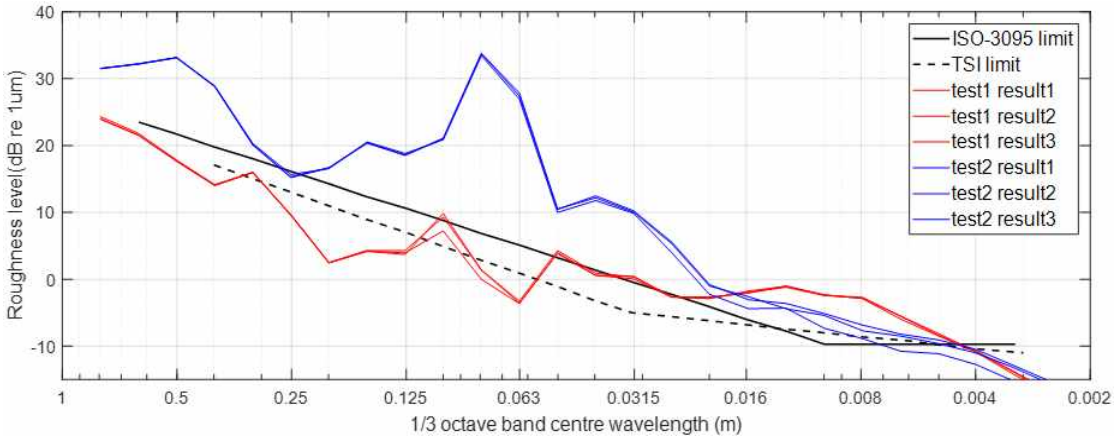


[그림 3.1.8] 운행선로A, 운행선로B, 시험실 선로 표면

(다) 레일 음향조도 자동탐지장치 측정 결과

① 최종 성과 목표 : 현장 반복 정밀도 ± 2dB 이내.

② 측정 및 분석 결과 : **현장 반복 측정결과 반복정밀도 1dB이내, 특정 파장구간에서 최대 2dB 반복정밀도 확인(그림10, 각각 3회 반복 측정값)**

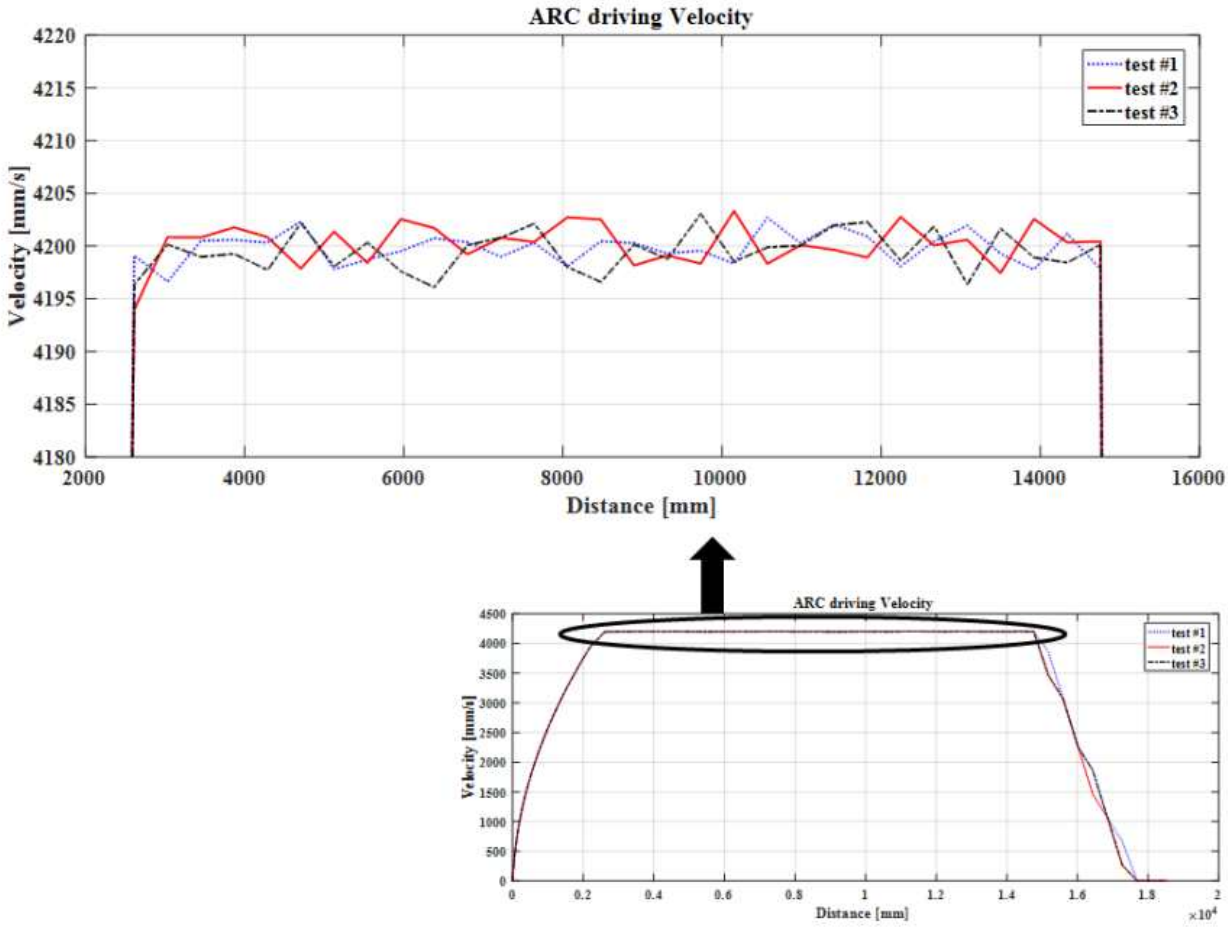


[그림 3.1.9] 현장측정 실험결과 음향조도 레벨 (운행선로A(test 1), 운행선로2(test2))

③ 레일 음향조도 탐지 장치의 최고 주행 속도

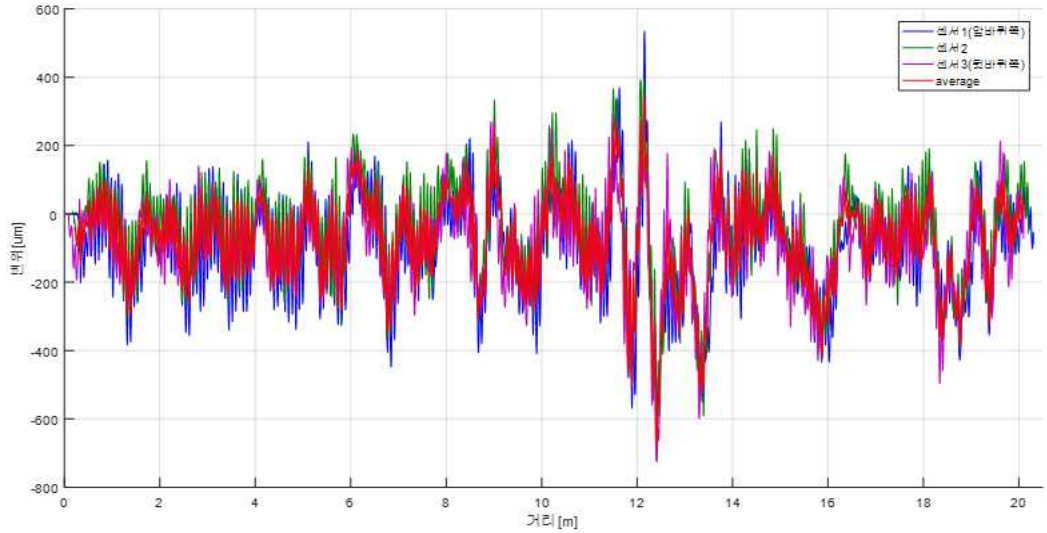
- 개발된 탐지장치의 최고 주행 속도를 확인하기 위하여 15km/h ≈ 4.16m/s = 4160 mm/s의 속도로 선로의 10m 구간을 왕복하며 반복 실험 진행.
- **시험 결과에 따라 탐지장치가 최대 4.2m/s에서 측정가능함을 확인(이동속도 15km/h 이상)**

(※측정규격 : EN 15610:2009, EN 13231-3:2012, EN ISO 3095:2005, 측정기관 : 한국철도기술연구원)

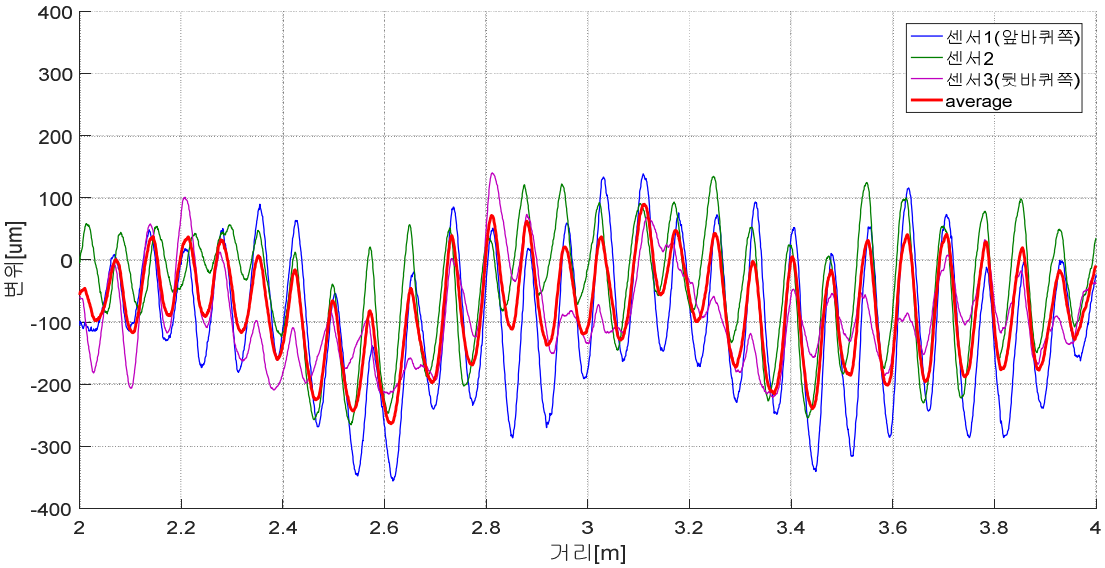


[그림 3.1.10] 레일 음향조도 탐지 장치의 최고 주행속도 실험 결과

④ 현장실험 결과

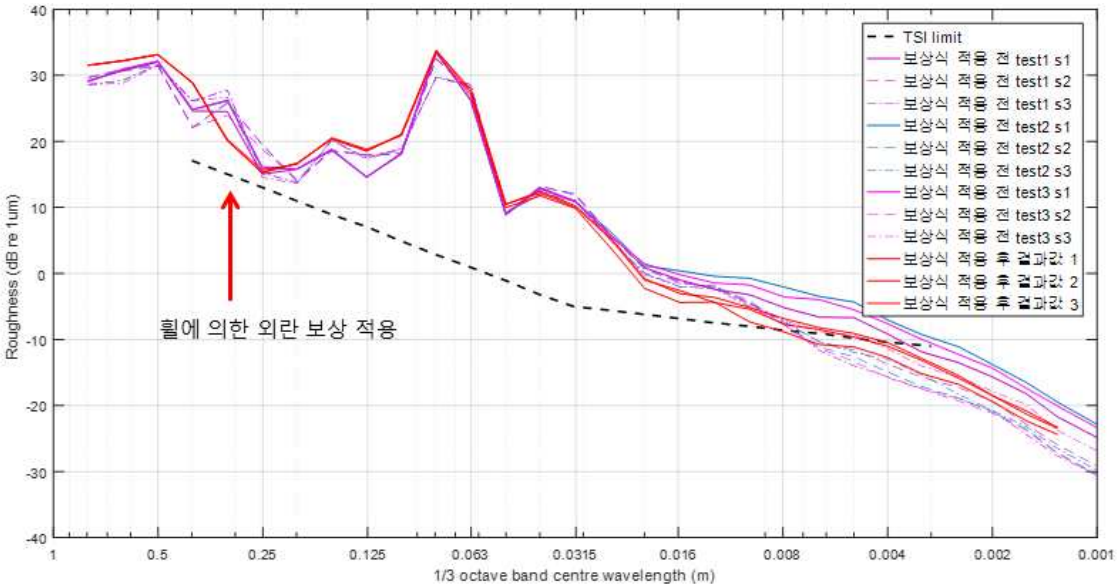


[그림 3.1.11] 'k'역 레일 LVDT 거리-변위 측정 그래프



[그림 3.1.12] 'k'역 레일 LVDT 거리-변위 측정 그래프 부분 확대

- 약 80mm 길이의 파상마모가 육안으로 확인됨
- LVDT센서 각각의 경우 휠 외란에 대한 영향이 약 0.314m 부근에서 뚜렷이 나타나며, 평균법에 의한 보정 결과는 감소됨을 확인 가능
- 따라서 레일음향조도 자동측정장치가 특정 파장을 가지는 파상마모 또한 측정 가능하며 평균법을 이용한 보상결과를 통해 휠에 의한 외란을 감소시킬 수 있음을 확인



[3.1.13] LVDT 데이터의 옥타브밴드 레벨 변환 그래프

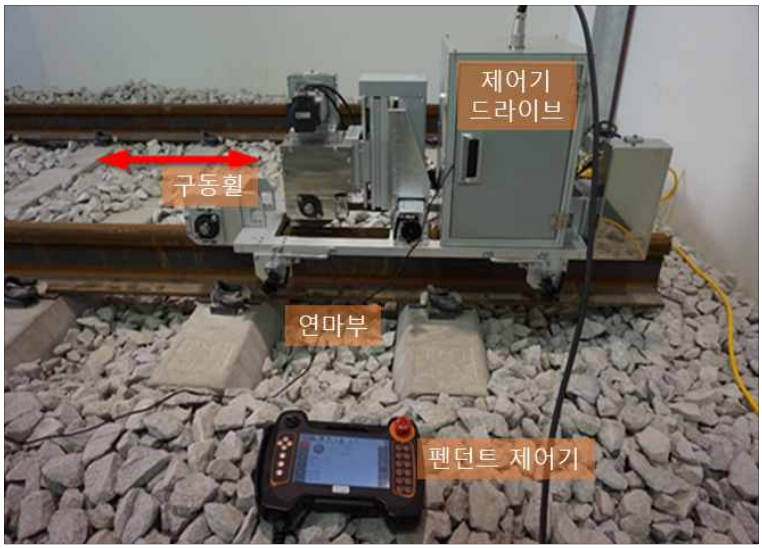
나. 레일 음향조도 저감장치 개발

(1) 최종성과물 개요

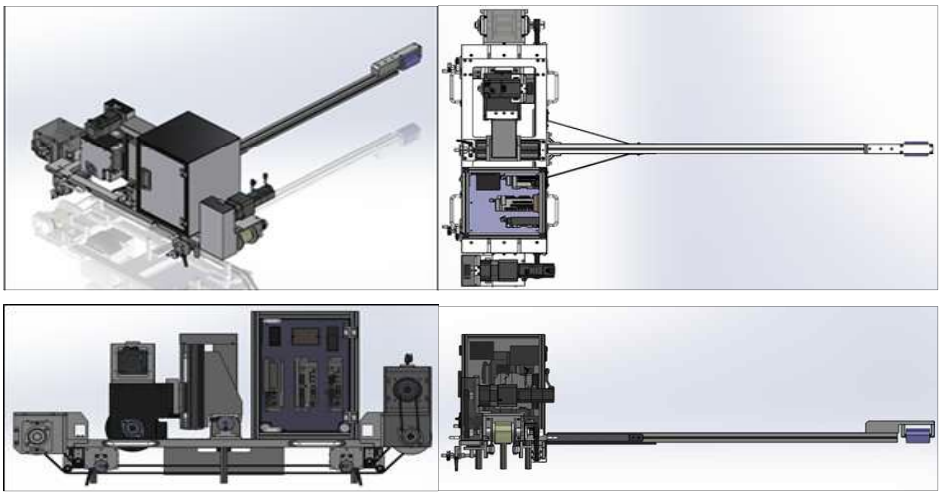
(가) 정의

레일위를 자동주행하면서 길이방향의 레일표면의 음향조도를 자동으로 연마할 수 있는 자동 음향조도 저감장치(연마깊이는 레일상태에 따라 자동 조정/수동조정 선택가능)

- 명　　칭 : 레일 음향조도 저감장치(미세표면 연마장치)
- H/W 구성 : 구동모터(100W, 200W, 750W AC Servo Motor and Driver),
  컨트롤러(EtherCAT을 통한 고속 통신제어 방식),
  구동휠(10mm, 양방향), 컨트롤러(Matlab Realtime controller)외
- S/W 구성 : Matlab 기반 제어 및 구동 소프트웨어, Target xPC를 통한
  데이터 저장 인터페이스



[3.1.14] 레일 음향조도 저감장치



[3.1.15] 레일 음향조도 저감장치 3D 설계 도안

(나) 레일 음향조도 저감장치 기술정보

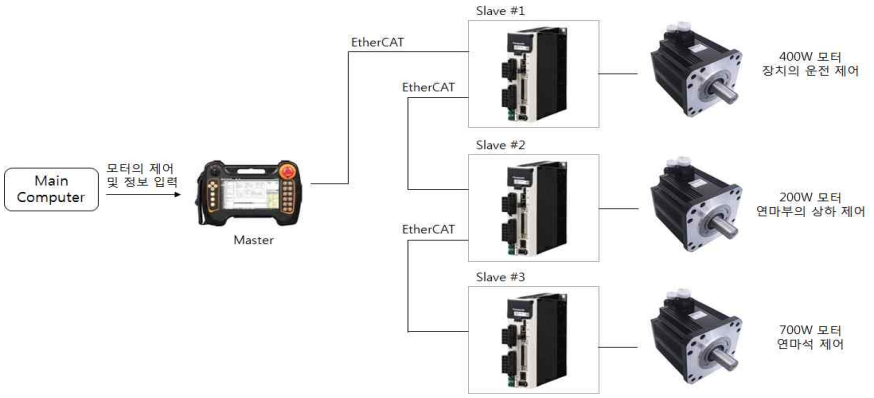
[표 3.1.1]

구분	기술정보	
권장 연마 속도	600rpm	
권장 측정 속도	10mm/s	
모터 사양	AC servo motor	
	장치 위치 제어	200W
	연마부 상하 제어	100W
	연마석 회전 제어	750W
데이터 수집, Signal processing	0.005sec 간격	
input & display	Teach pendant(Master, Window 7 OS)의 터치스크린	
Computing & software	Embedded controller, Real-time OS, TCP/IP(Host PC), EtherCAT(Servo driver)	
Output	이동속도, 위치, 스핀들 회전속도, 모터의 토크값 등 Matlab mat data export 가능	
참고 규격	EN 13231-3:2012(Railway applications Track:Acceptance of works), EN 15610:2009,	
사용	레일 표면조도 자동 연마	
무게	약 60kg	
치수	본체 300 × 1200 × 600(mm)	

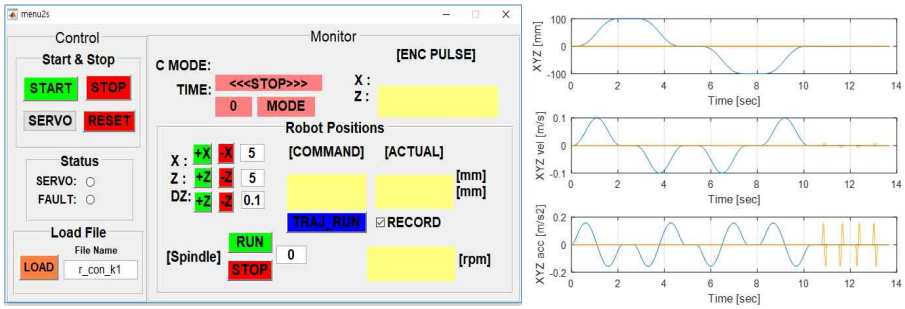
(2) 연구내용

(가) 레일 음향조도 저감장치 제어 프로그램 개발

Window OS 기반의 조작기(Teach pendant)를 사용하여 저감장치의 전진 및 후진, 연마석의 토크, 상하 제어가 가능한 모터 및 드라이브를 실시간(Real-time)운영체제를 기반으로 제어가 가능하도록 프로그램을 개발. 매트랩(Matlab) GUI를 이용한 Host PC Menu Program을 사용하여 윈도우 OS가 장착된 조작기(Teach pendant) 장치 조작이 가능하도록 개발



[그림 3.1.14] PC기반 실시간 제어기 구성



[그림 3.1.15] Teach pendant Host PC Menu Program

(나) 국내외 기준

※ EN 13231-5:2018 Railway applications- Track - Acceptance of works 내의 Part 5 : Procedures for rail reprofiling in plain line, switches, crossings and expansion devices

※ EN 13231-3:2012 Railway applications- Track - Acceptance of works 내의 Part 3 : Acceptance of reprofiling rails in track

유럽 규정(EN 13231-3:2012)은 연마등에 의해 생성된 레일의 프로파일의 측정시에 길이방향의 불균형성(irregularities)값을 레일의 파장범위에 따라 아래 표와 같이 관리함. 즉, class 1에서는 길이방향 레일표면을 기준 크기의 허용치의 초과량 5%이내에서 관리하고 peak-to-peak값도 파장별로 허용치를 아래 표와 같이 규정하고 있음.

[표 3.1.2] Acceptance criteria for peak to peak limits

Wavelength range (mm)	10 to 30	30 to 100	100 to 300	300 to 1000
Limit of peak-to-peak values (mm)	±0.010	±0.010	±0.015	±0.075

(다) 현장 측정 시험

① 저감장치 연마 전에 레일을 측정하고 연마 후에 동일 구간의 레일을 재측정

② 측정에 사용된 장치 : 레일 음향조도 자동 측정장치, R社 CAT



[그림 3.1.16] 레일 음향조도 저감장치 성능 평가를 위한 표면조도 측정

③ 측정 레일 상태

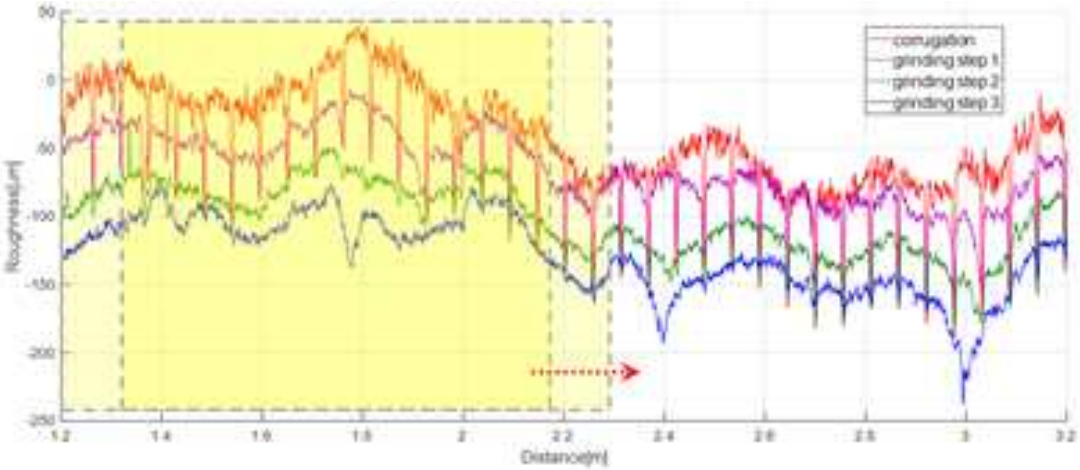
파상마모와 탈탄층이 존재하는 레일 (corrugation)	첫 번째 연마과정 후 (grinding step1)	두 번째 연마과정 후 (grinding step2)	세 번째 연마과정 후 (grinding step3)



[그림 3.1.17]저감장치의 연마 단계에 따른 레일 상태 변화

(라) 레일 음향조도 저감장치 연마 결과

① 탐지장치 데이터를 이용한 측정 레일의 표면조도 분석



[그림 3.1.18] 레일 음향조도 자동 측정장치 데이터를 이용한 레일 표면조도 분석(일부구간 확대)

레일 음향조도 자동 측정장치의 데이터를 분석하여 장치가 이동한 거리에 따라 센서가 계측한 조도값을 나타낸 레일 표면조도 그래프임. 연마 과정이 반복될수록 레일 표면이 깎여 내려가고 파상마모의 깊이가 얕아지는 것을 확인 가능함.

좀 더 정확히 판단하기 위하여 1m구간을 선택하고 그림 21.38 에 보이는 화살표 방향과 같이 주행방향으로 1mm씩 이동하며, Windowing(w=1000, unit : mm) 필터링을 통해 조도값의 'peak to peak'와 'peak 크기의 RMS 비율'을 수치적으로 계산하여 표로 나타냄.

표3과 표4의 계산결과를 바탕으로 파상마모가 존재하는 상태일 때 'peak to peak'와 'peak magnitude to RMS ratio' 두 값이 가장 크며 연마과정을 진행할수록 두 값이 감소 되는 것을 확인 가능함. 따라서 저감장치의 연마가 레일 표면 조도의 편차를 감소시키는 데 효과가 있음.

[표 3.1.3] 레일 표면조도 peak to peak [um]/m

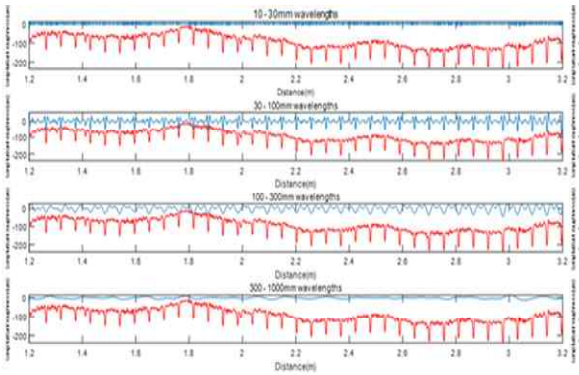
	Peak to Peak[um]
파상마모	**158.19**
1회 연마과정 진행 후	102.74
2회 연마과정 진행 후	84.85
3회 연마과정 진행 후	**65.00**

[표 2-3] 레일 표면조도 peak magnitude to RMS ratio[um]/m

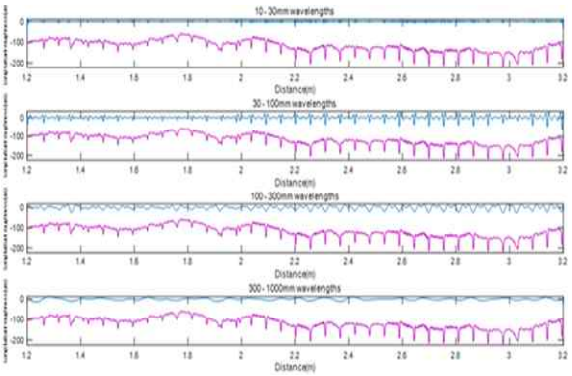
	Peak magnitude to RMS ratio[um]
파상마모	**1.88**
1회 연마과정 진행 후	1.59
2회 연마과정 진행 후	1.30
3회 연마과정 진행 후	**1.22**

② 연마 후 레일프로파일 허용기준 검토

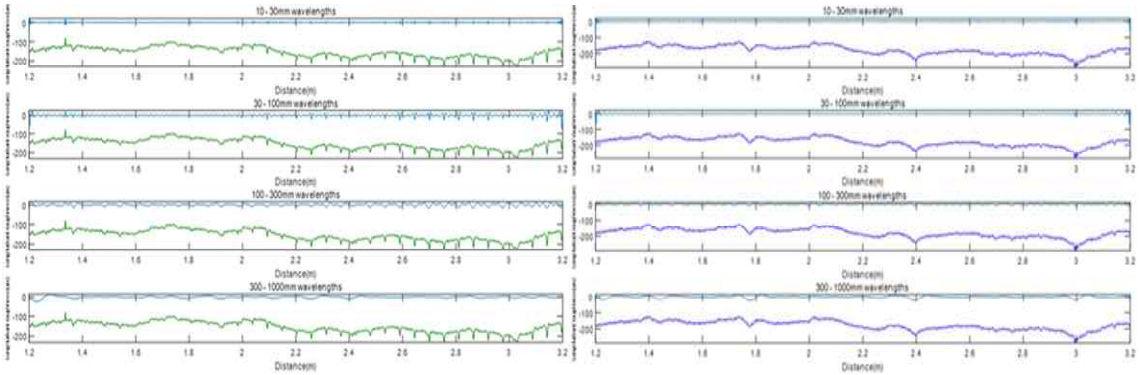
유럽 규정(EN 13231-3:2012)과 비교하기 위하여 단계별 레일의 측정값을 10-30, 30-100, 100-300, 300-1000mm 파장으로 밴드패스필터 분석을 진행하고 분석 결과를 통해 EN 13231에 명시된 측정값(peak to peak value)을 비교함



<Corrugation filtering>



<Grinding step1 filtering>



<Grinding step2 filtering> <Grinding step3 filtering>

[그림 3.1.19] 연마단계별 BPF 필터링 결과 그래프

③ 유럽 규격(EN13231-3:2012)의 peak to peak 허용치 검증

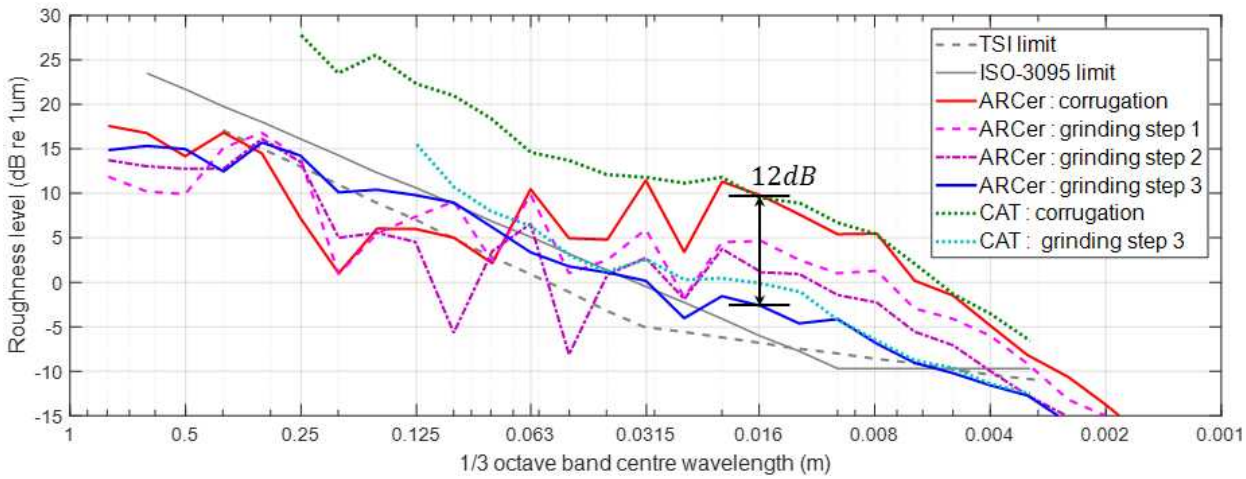
레일 음향조도 저감장치를 이용하여 현장의 레일을 연마한 결과 10-30, 100-300, 300-1000mm 파장의 p2p 값은 EN 13231-3의 허용치 이내로 확인됨 (아래 표 1 결과 값 참조)

[표 3.1.4] Acceptance criteria for peak to peak limits와 측정결과 검증

level \ wave length range(mm)	10 to 30	30 to100	100 to 300	300 to 1000
EN 13231-3:2012 Limit of peak-to-peak values (mm)	**±0.010**	**±0.010**	**±0.015**	**±0.075**
corrugation	0.021	0.095	0.050	0.015
grinding step1	0.018	0.058	0.018	0.020
grinding step2	0.010	0.030	0.018	0.015
grinding step3	**0.008**	**0.013**	**0.015**	**0.032**

④ 1/3 octave band spectrum 해석을 이용한 연마 성능 비교

- 최종 성과 점검 기준 : 현장 적용전후 조도차 5dB 이상
- 최종 분석 결과 : 탐지장치와 CAT를 이용하여 측정한 음향조도레벨은 시험레일구 에서 대상으로 하는 60mm이하의 파장영역에서 약 10-15dB 감소함을 확인
  (평균 8dB, 최대 15dB 감소, 단 저주파 영역에서는 적용된 선로의 초기상태가 양호한 상태임을 고려할 때 큰 변화가 없음)



[그림 3.1.20] 연마단계에 대한 레일 음향조도 스펙트럼 분석

(ARCer : 개발제품, CAT : 기존상용제품, TSI,ISO3095 : 국제규격 기준값)

(※ 측정규격 : EN 15610:2009, EN 13231-3:2012, EN ISO 3095:2005, 측정기관 : 한국철도기술연구원)

- 1/3 옥타브밴드 분석을 통해 주파수별 음향조도 레벨을 비교하여 그림 2.1.43에 나타냄. 파상마모사이의 간격은 약 60mm로 해당 파장의 음향조도 레벨이 높은 것은 논리적으로 옳으나 약 30mm 구간도 함께 높은 것을 확인가능함. 30mm 구간의 조도 레벨이 높은 이유는 탐지장치가 레일 위를 주행할 때 앞뒤바퀴가 파상마모 홈에 번갈아가며 접촉하므로 장치와 센서의 기울어짐과 흔들림이 증폭되기 때문이라고 추측됨.

- 탐지창지의 데이터의 경우에는 연마과정이 진행될수록 단파장 영역의 음향조도 레벨이 감소해가는 것을 확인가능함. 특히 단파장 영역에서는 연마가 진행될 때 마다 약 5dB씩 감소하는 경향이 있으며 최종 연마 후에 특정 파장을 제외하고 약 10-15dB정도 감소한 결과를 보여줌. 반면 0.125m 이상의 장파장 영역에서 최종연마 이후에 음향조도 레벨이 상승한 부분이 발생함. 비슷한 크기의 60mm 주기의 파상마모가 대부분 연삭되어 소멸되고 깊이가 비교적 깊은 파상마모가 남아 더 긴 파장의 조도를 발생시킨 것이라 추측되나 정확한 검증을 위한 연구가 필요함.

- CAT는 최근까지 레일 음향조도 측정에 가장 널리 사용되고 있는 장치 중 하나로 trolley 기반의 가속도계를 이용한 측정 장치임. 추가 비교 검증을 위하여 CAT도 측정을 했으며 저감장치의 연마 전후 결과가 약 10-15dB정도 저감된 것을 확인할 수 있음. 따라서 두 측정장치의 데이터 분석을 통해 저감장치를 이용한 레일 연마가 특정주파수의 레일 음향조도를 감소시키는데 효과가 있음을 입증함.

다. 레일 댐핑장치

(1) 최종성과물 개요



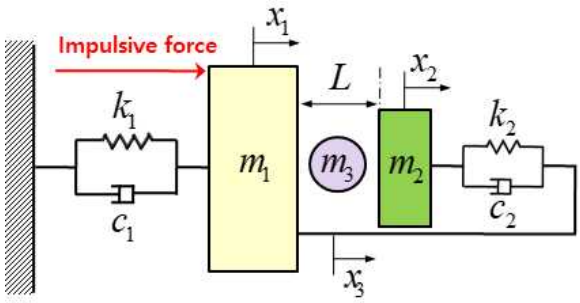

[그림 3.1.21]충돌체를 이용한 레일진동 댐핑장치 시제품 및 시공사진

(2) 정의

철도차량이 통과하면서 레일에 충격을 가진하여 발생하는 레일의 진동을 감쇠하여 레일로 인하여 공기중으로 소음이 방사되는 현상을 차단하는 장치임. 레일이 댐핑장치 내의 충돌체와 충돌을 하여 진동에너지를 소산시키고, 레일에 추가적으로 부가된 댐핑장치의 하중으로 인하여 레일의 진동이 전달되면 탄성복합소재 하우징을 통하여 그 에너지를 소산시키는 복합 댐핑역학을 구현함

(3) 주요 기능

댐핑장치 내의 충돌에 의해 레일의 진동에너지가 구슬의 운동 에너지로 전달되는 과정이 반복됨에 따라서 레일의 진동이 빠르게 감소하며,체결 클립 강성과 하우징의 질량으로 저감 대상 목표 주파수 조절 가능, 레일에 볼트 체결이나 접착 없이 클립으로 안전한 시공 구현



[그림 3.1.22] 충돌체 및 질량효과를 이용한 레일의 진동 및 진동 전파 감쇠 원리

(4) 연구내용

(가) 충돌댐핑 역학 모델 통한 진동저감 해석 및 실험 검증

① 충돌댐퍼 1자유도 시스템 감쇠성능 계산

② 외팔보 간이 충돌 댐퍼 제작 및 진동응답 측정

-> 레일을 주진동계로 가정하고 임의의 질량과 강성을 이용하여 동흡진기를 모사

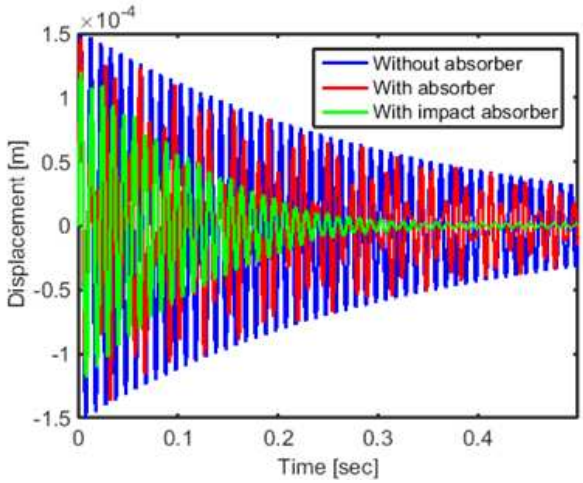
-> 질량비와 반발계수를 통하여 레일과 동흡진기의 비탄성 충돌을 모델링하고 운동량 보존법칙과 반발계수의 연립을 이용하여 충돌 후의 레일과 댐퍼의 속도를 결정

충돌 조건 : 좌측 $(x_1 > x_2, \frac{dx_1^-}{dt} > \frac{dx_2^-}{dt})$, 우측 $(x_1 + L > x_2 + l, \frac{dx_1^-}{dt} < \frac{dx_2^-}{dt})$

충돌 후의 주진동계 속도 : $\frac{dx_1^+}{dt} = \frac{(1-\mu e)}{(1+\mu)}\frac{dx_1^-}{dt} + \frac{\mu(1+e)}{(1+\mu)}\frac{dx_2^-}{dt}$

충돌 후의 충돌 메타 댐퍼의 속도 : $\frac{dx_2^+}{dt} = \frac{(1+e)}{(1+\mu)}\frac{dx_1^-}{dt} + \frac{(\mu-e)}{(1+\mu)}\frac{dx_2^-}{dt}$

이론적 모델을 이용하여 단순 동흡진기와 충돌메타 댐퍼의 유무에 따라 진동저감 성능을 비교, 충돌 댐퍼의 경우, 동흡진기의 경우보다도 향상된 감쇠율을 확인

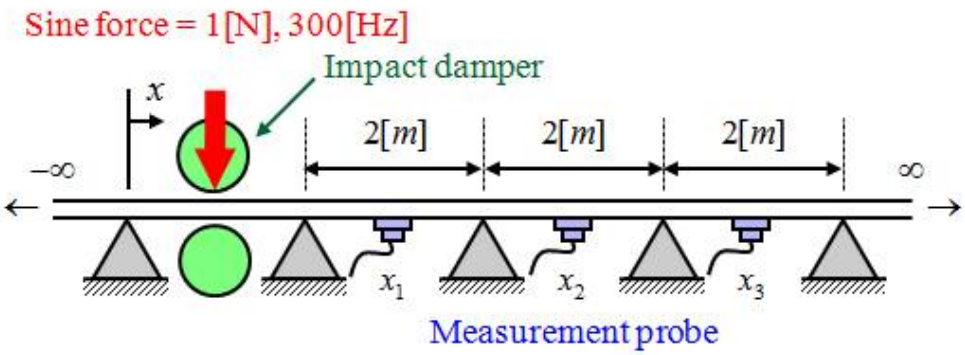


[그림 3.1.23] 충돌체 진동 및 진동 전파 감쇠 원리

(나) 충돌댐핑 역학 호라용한 진동/소음 저감장치 제작 및 성능 예측 연구

① 충돌댐퍼의 진동저감 성능 예측 (유한요소법 무한 궤도 해석)

② 모노레일용 충돌댐퍼 제작 및 충돌구슬 성능 평가

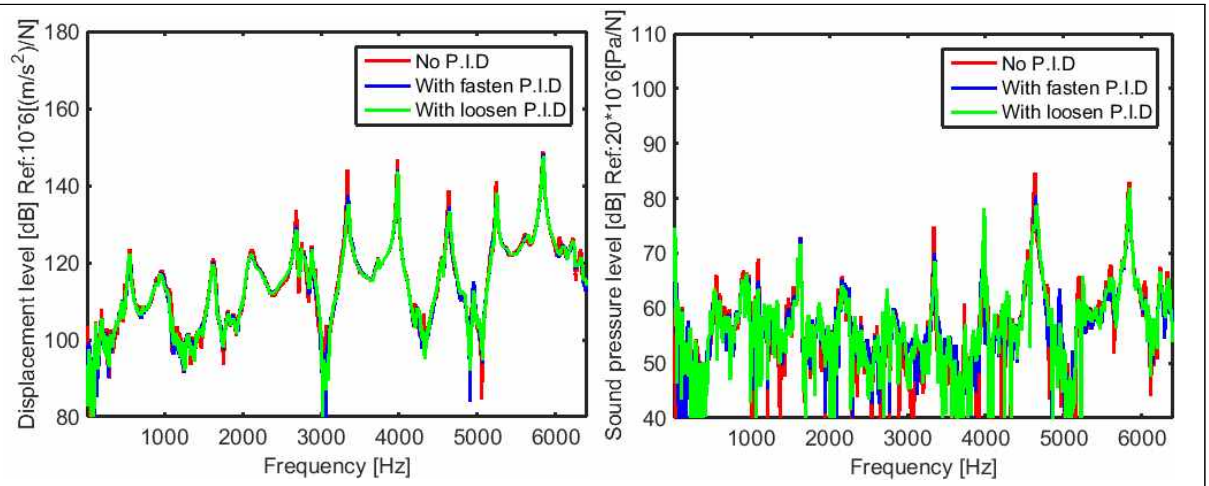


[그림 3.1.24] 충돌 댐퍼가 설치된 무한보의 수학적 모델링



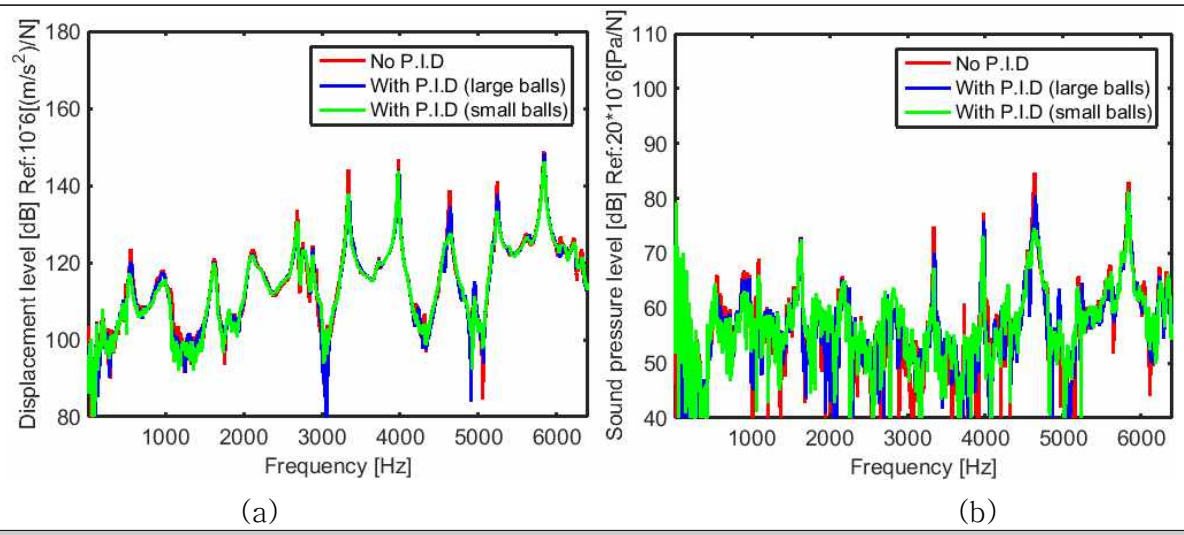


[그림 3.1.25] 입자 충돌 댐퍼 모형 실험 모습



(a) (b)

[그림 3.1.26] 입차 충돌 댐퍼 체결 유격에 따른 진동특성 측정 결과 :
(a) 가속도 응답, (b) 음압 응답

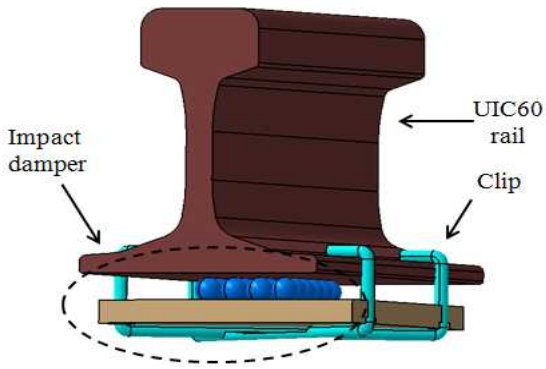


(a) (b)

[그림 3.1.27] 충돌 입자 크기에 따른 진동저감 성능 비교:
(a) 가속도 응답, (b) 음압 응답

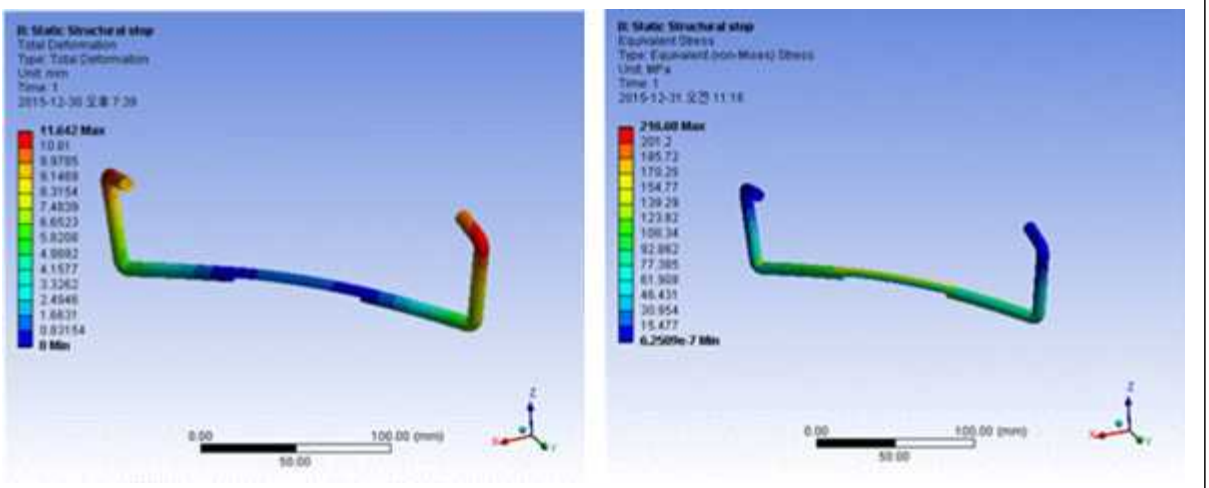
③ 충돌댐퍼 제작, 철도레일에서의 진동 전달함수 평가
(6m UIC60, STARDAMP 프로젝트 평가방법)

④ 충돌댐퍼 삽입 시 질량비와 간극에 따른 콘크리트 모델 감쇠비 해석
댐퍼를 안정적으로 체결하기 위해서는 클립에 걸리는 체결력이 댐퍼 자중보다 커야함
유한요소법을 이용하여 체결클립의 지름과 재질을 선정하여 응력 분석을 진행함.
댐퍼의 클립제원, 재질 : 쇠강(steel), 굵기 : 지름 8mm
응력해석 결과, 압축량이 1mm일 때, 클립에 걸리는 응력은 216.7MPa로서 열차의 이동하중에 의해 체결 클립이 풀리지 않을 것으로 판단함.





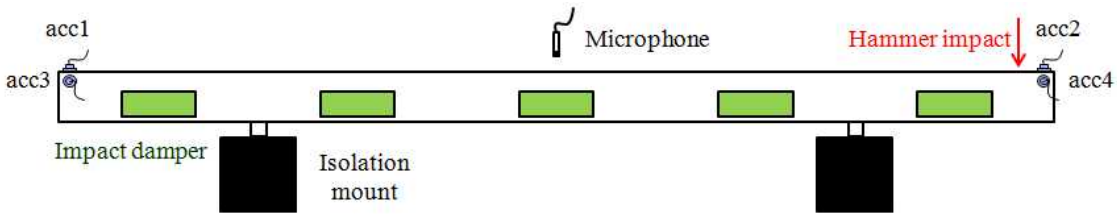
[그림 3.1.28] 3차년도 충돌 댐퍼 형상 및 실험



(a) (b)

[그림 3.1.29] 유한요소법을 이용한 클립의 변형 및 응력 계산: (a) 변형량, (b) 응력

⑤ 충돌 댐퍼를 총 10개를 달아서 전달함수 및 거리에 따른 감쇠율을 계산



[그림 3.1.30] STARDAMP 기준에 따른 레일 댐퍼의 감쇠성능 측정 방법

$$DR = \frac{20\log|H_1(\omega)| - 20\log|H_2(\omega)|}{L}$$

여기서, $H_1(\omega)$는 첫번째 가속도(acc1)와 헤머의 전달함수를 말하고, $H_2(\omega)$는 두 번째 가속도(acc2)와 헤머의 전달함수이고, L은 레일의 길이(=6m)를 의미함. 전달함수는 1/3 octave band의 자료를 사용함. 여기서 헤머의 신호를 충격(impulsive force)으로 가진할 경우, 거리에 따른 감쇠율을 다음과 같이 계산할 수 있음.

$$DR = \frac{10\log|A_1(\omega)| - 10\log|A_2(\omega)|}{L}$$

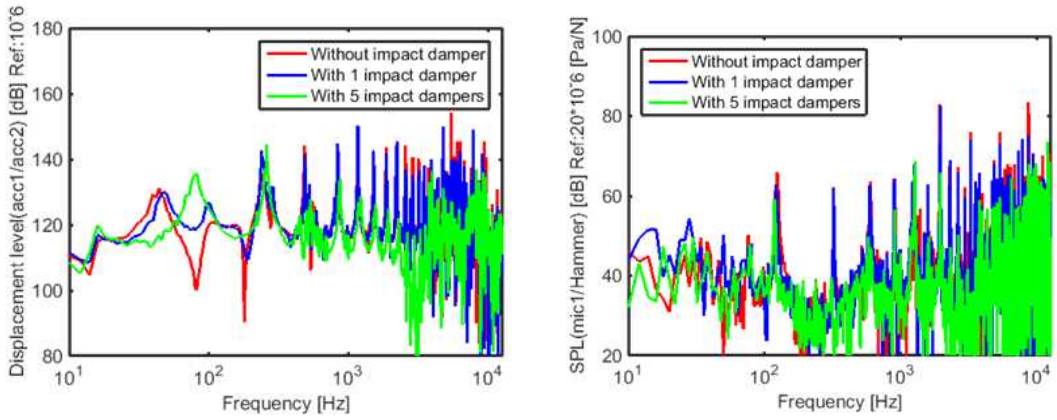
여기서, $A_1(\omega)$는 가속도(acc1)의 autospectrum을 말하며, $A_2(\omega)$는 두 번째 가속도(acc2)의 autospectrum을 의미함. 이를 통해, 댐퍼가 없는 경우를 기준으로 noise reduction을 계산할 수 있음.

$$\Delta L = 10\log\frac{DR_u}{DR_d}$$

여기서, DR_u는 충돌 댐퍼가 없을 때의 감쇠율, DR_d는 충돌 댐퍼를 장착했을 때의 감쇠율을 나

타냄. 마이크의 위치는 STARDAMP에 언급이 되어있지 않기 때문에 레일과 0.05[m] 떨어진 부근에서 레일 중앙에서의 음압을 측정함.

마이크 신호의 전달함수 : $H_3(\omega) = \frac{mic}{Hammer}$



(a) (b)

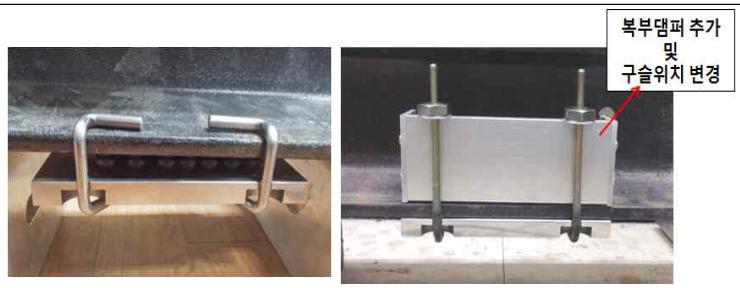
[그림 3.1.31] 충돌 댐퍼의 개수에 따른 진동 응답 (a) 전달함수 (b) 음압레벨

(라) 철도 운행선 시공용 레일댐핑장치 상세설계

① 목표성능 고려한 충돌댐퍼 파라미터(공진주파수, 질량비, 유격) 따른 성능 계산

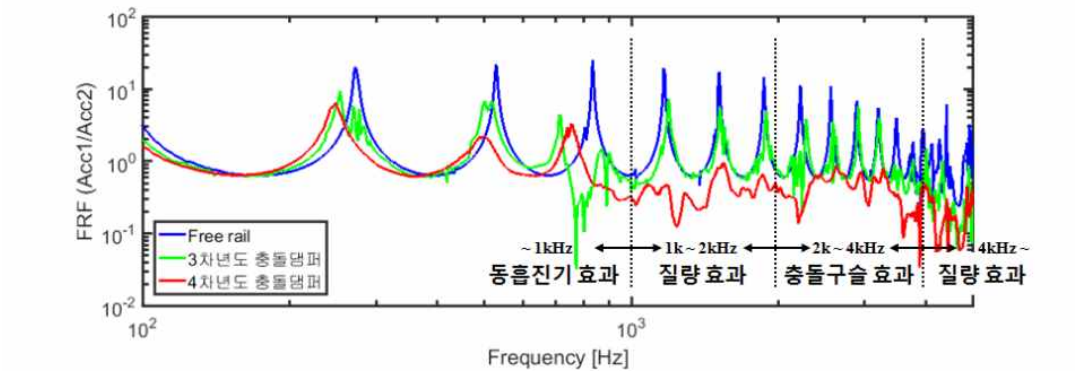
② 복부댐퍼 제작 및 철도 궤도에서의 진동응답 평가
댐퍼의 성능을 향상시키기 위해 복부 댐퍼의 추가와 구슬위치의 변경
복부 댐퍼의 경우는 안에 구슬을 삽입하여 레일과의 충돌을 통해 진동흡수가 더욱 향상될 수 있도록 설치

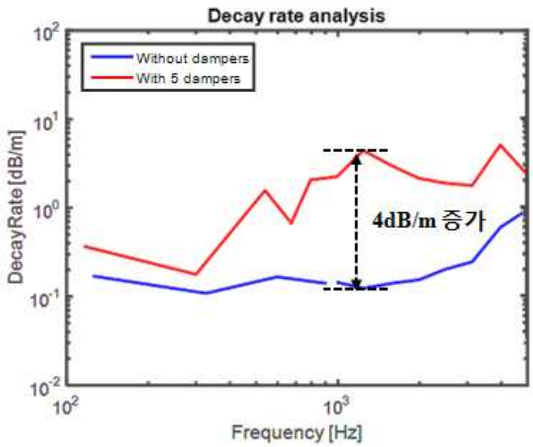
③ 레일의 양 끝단의 속도 응답을 받았고, 힘과 속도를 통해 각 끝단의 mobility를 계산함



[그림 3.1.32] 4차년도 충돌 댐퍼의 형상

실차 궤도에 충돌 댐퍼 유무에 따른 감쇠 성능을 비교한 결과 주요 전동소음 주파수 대역에서 수직 방향 평균 약 4dB/m의 감쇠율이 측정됨





[그림 3.1.33] 레일에서의 TDR 측정 결과

(마) 최종 시작품 철도 운행선 시공 및 평가

① 충돌댐핑장치 및 폴리머 콘크리트 침목 시작품 제작 연구

② 레일댐핑장치 철도 운행선 현장 시공 및 시공 전 후의 소음/진동 측정
500Hz 대역에서의 댐퍼 성능을 더 높이기 위하여 먼저 댐퍼 체결 시, 클립의 등가강성을 계산을 하였고 클립의 등가강성을 이용하여 목표 주파수가 500Hz일 때의 충돌 댐퍼 설계 질량을 산출 (전체질량 13kg)



[그림 3.1.34] 구슬 지지대 및 체결성 모습

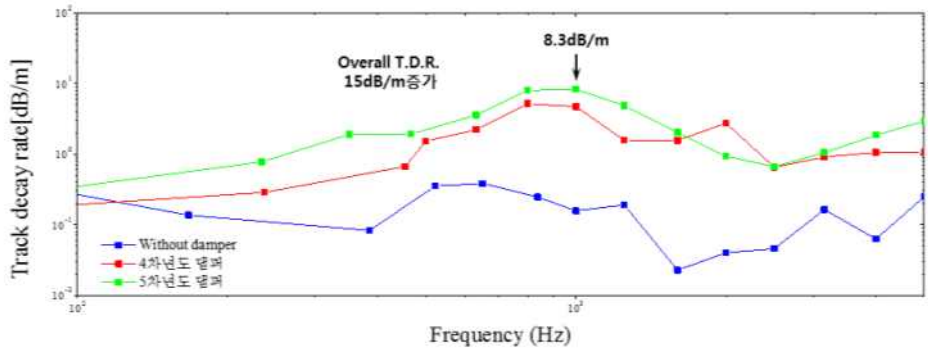
현장 체결 작업의 효율을 높이기 위하여 레일 하부 플레이트를 삭제하고 복부 댐퍼만 보류하고 클립의 기장 증가시킴.

주물 댐퍼 및 압출 구슬 마운터 제작을 통한 댐퍼 원가절감 및 조립 용이성 향상.

6m 레일에 아래와 같이 10세트의 댐퍼를 설치한 후, 임팩트 해머를 이용하여 한쪽 끝단에서 0.01m에 해당되는 지점을 가진하고 두 가속도계를 이용하여 전달함수를 측정.

고주파수 대역에서는 4차년도 댐퍼 성능보다 전달함수가 크게 줄어듦. 목표주파수 대역 500~2000Hz 대역에서 전달함수 응답이 크게 감소함.

댐퍼의 진동저감 효과를 정량적으로 표현하기 위하여 트랙의 decay rate를 계산해본 결과, 1000Hz에서 T.D.R(궤도 동적 감쇠율)값은 가장 크게 8.3dB/m로 측정하였고 전체 주파수 영역에서 overall T.D.R.값은 4차년도보다 15dB/m 증가함.



[그림 3.1.35] 6m 레일에서의 레일 동적감쇠율

③ 시제품 현장부설 및 소음/진동 성능측정

– 레일 댐퍼의 최종 성능 검증을 위하여 인천 검단오류역–검암역 사이에 레일 댐퍼를 설치, KRS50N 레일, 하우징 300 x 70 x 60mm



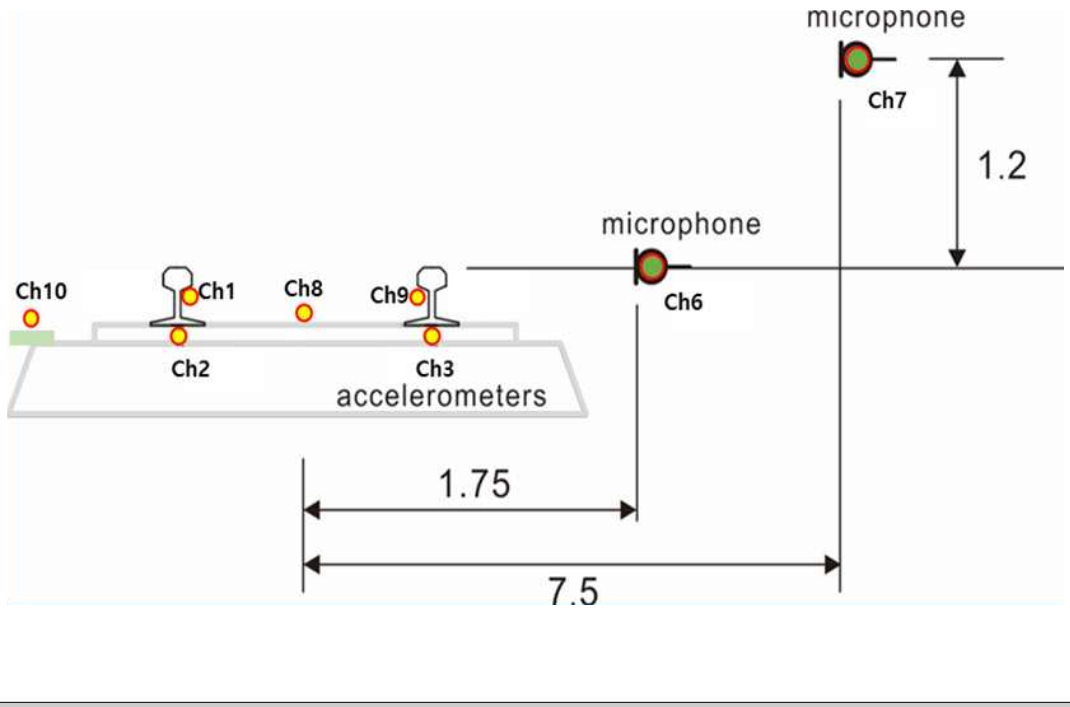
댐퍼 체결 전 | 댐퍼 체결 후

[그림 3.1.36]철도 운행 현장 설치 모습

④ 열차 주행 시 레일의 진동가속도레벨 및 선로 변 음압레벨 측정

- 실차 운행에 따른 구름 소음 저감 효과를 검증하기 위해 약 150m 구간에 충돌 댐퍼를 설치하여 진동 신호 측정
- 가속도계 센서를 레일의 베이스와 헤드 부분 및 침목에 가속도계를 세팅하고 마이크로폰 두 개를 각각 침목과 거리가 각각 1.75m, 7.5m 높이 0, 1.2m 지점에 설치

  (※ISO 3095 에 의한 철도소음 측정방법 준용)



[그림 3.1.37] 열차 운행시 구름소음 및 레일진동 특성 측정

구름 소음이 가장 크게 나타나는 시간 전/후로 열차 통과시간 동안 궤도 진동 및 구름 방사 소음의 등가레벨을 측정 및 비교

⑤ 열차 등가 통과 소음 레벨(Equivalent pass-by level) 계산방법

측정 결과 충돌 댐퍼 설치 후 발생 진동은 최대 6dBV, 음압의 경우 최대 4dBA 의 저감 효과가 있었음.

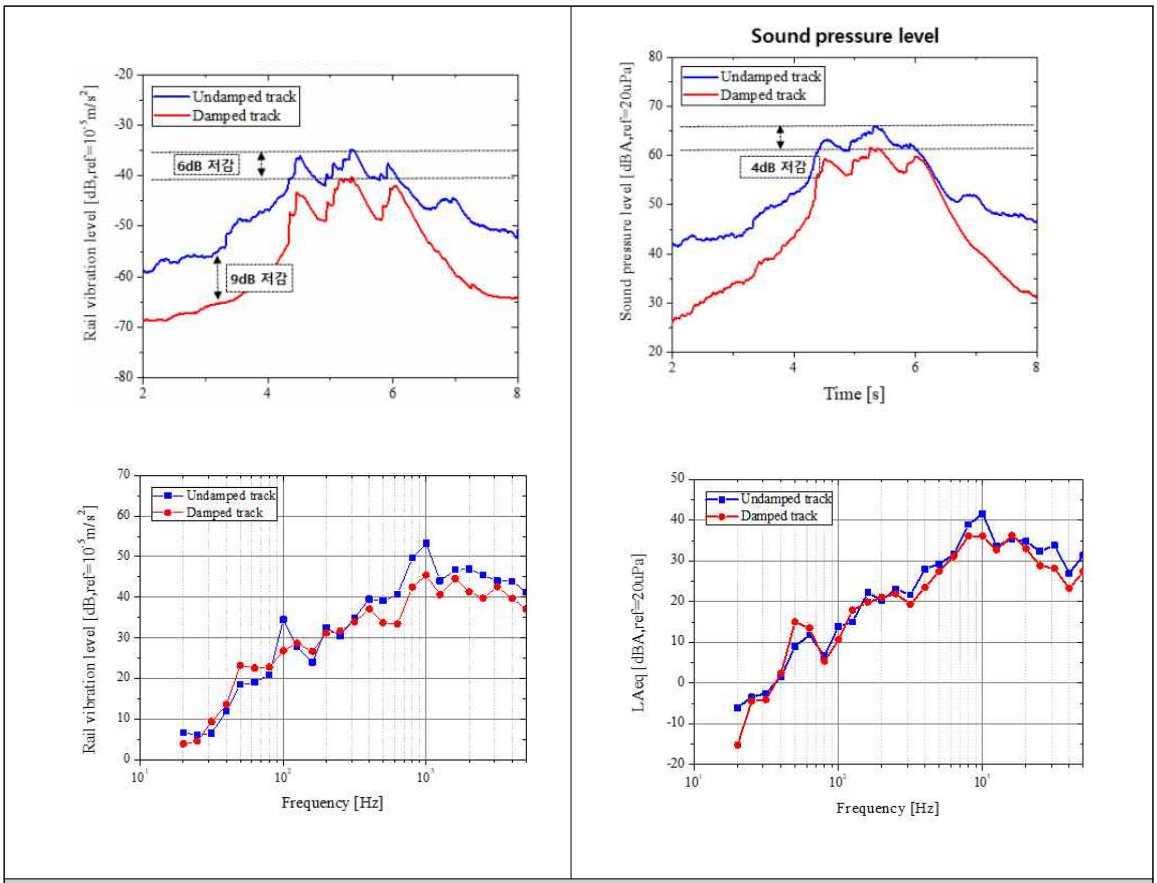
충돌 댐퍼의 질량효과가 나타나는 80Hz대역을 제외한 전체 주파수 스팩트럼 응답이 감소.

구름 소음이 지배적으로 나타는 100~5000Hz대역에서의 overall 저감량을 계산해본 결과 구름소음은 평균 4.3dB(A), 레일상부 진동은 약 6dBV 저감하는 것을 확인.

(※ 측정규격 : ISO 3095)

[표 3.1.5] 댐퍼 현장부설 전/후의 진동 및 소리 측정 결과

구분		속도 (km/h)	진동(dBV)			소음(LpAeq,Tp)	
			Ch8	Ch9	Ch3	Ch6	Ch7
			슬라브	상부	하단	D=1.75m H=0m	D=7.5m H=1.2m
평균	시공전	69.7	96.2	132.7	132.2	101.6	86.9
	150m시공	69.0	93.4	126.8	127.2	97.5	82.6
차이	시공전-시공후		2.8	5.9	5.0	4.2	4.3



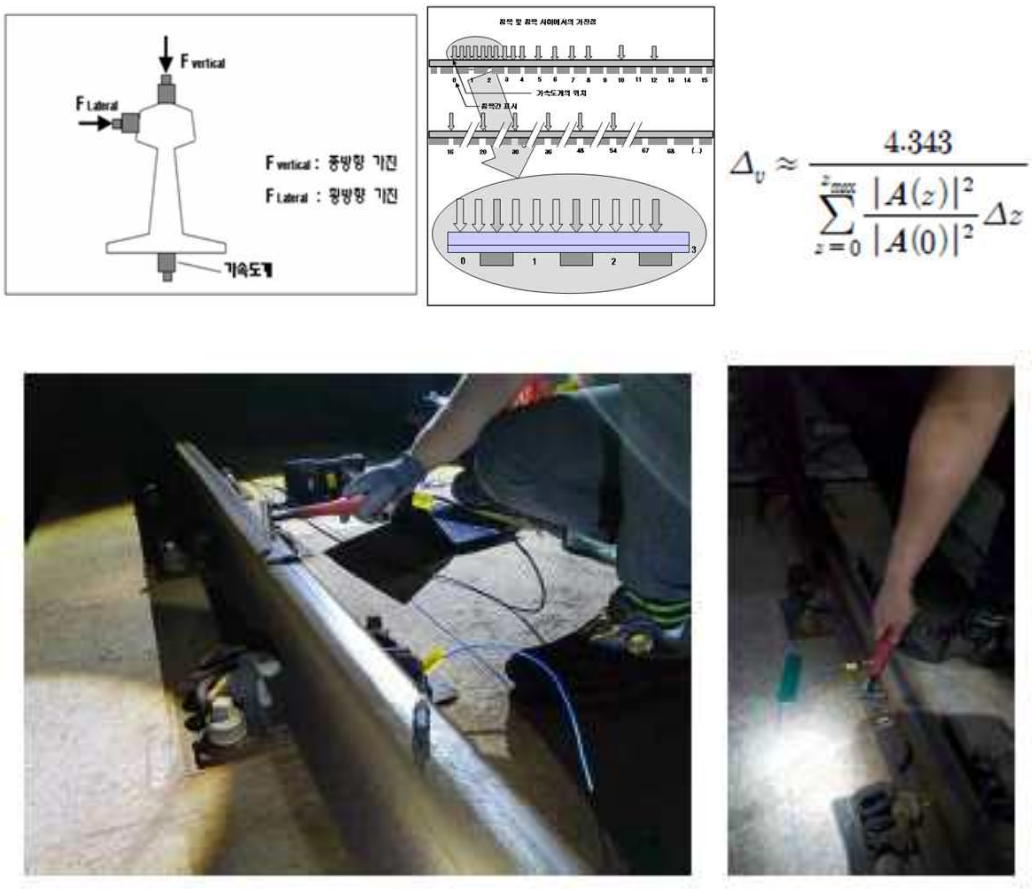
[그림 3.1.38] 진동 및 소리 spectrum

(※오전 8시~11.30 약 10개의 열차통과 열차통과속도 약 85km/h)

⑥ 궤도 동적감쇠율 측정 (Track Decay Rate, ※EN 15461, ISO 3095, 소음진동 관리법 -제45조의 2(철도차량의 소음권고기준 및 검사방법 등에 관한 규정 준용)

측정방법은 EN 15461에서 제시한 절차에 의하여 궤도의 댐핑장치 설치 전 후의 궤도동적 감쇠율 변화(향상)를 측정

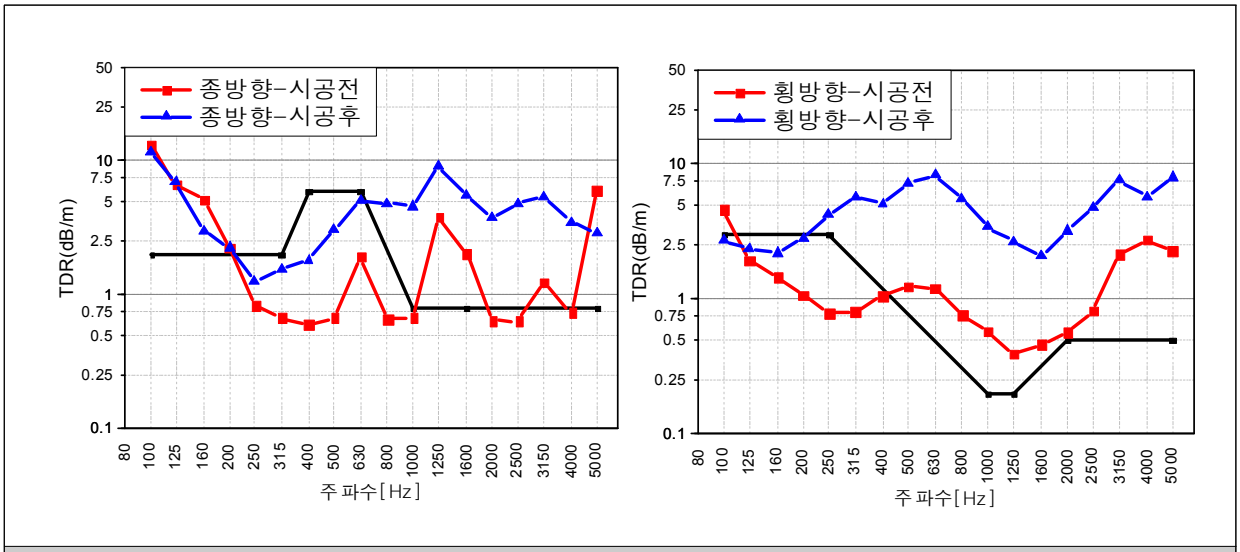
궤도 동적 감쇠율 (dB/m) : 레일의 길이 방향으로 진동이 감쇠되는 정도, 레일의 체결 지지구조에 큰 영향을 받음.



[그림 3.1.39] 철도운행선로 궤도 동적 감쇠율 측정방법 및 측정 장면

댐핑장치 설치 전 후의 궤도의 동적 감쇠율은 종방향과 횡방향 모두 200Hz ~ 5000Hz에서 각각 최대 5.6dB/m, 7.2dB/m 향상됨.500Hz ~ 2000Hz에서 각각 평균 3.7dB/m, 4dB/m 향상됨.

(※측정규격 : EN 15461, 환경부고시 제2010)



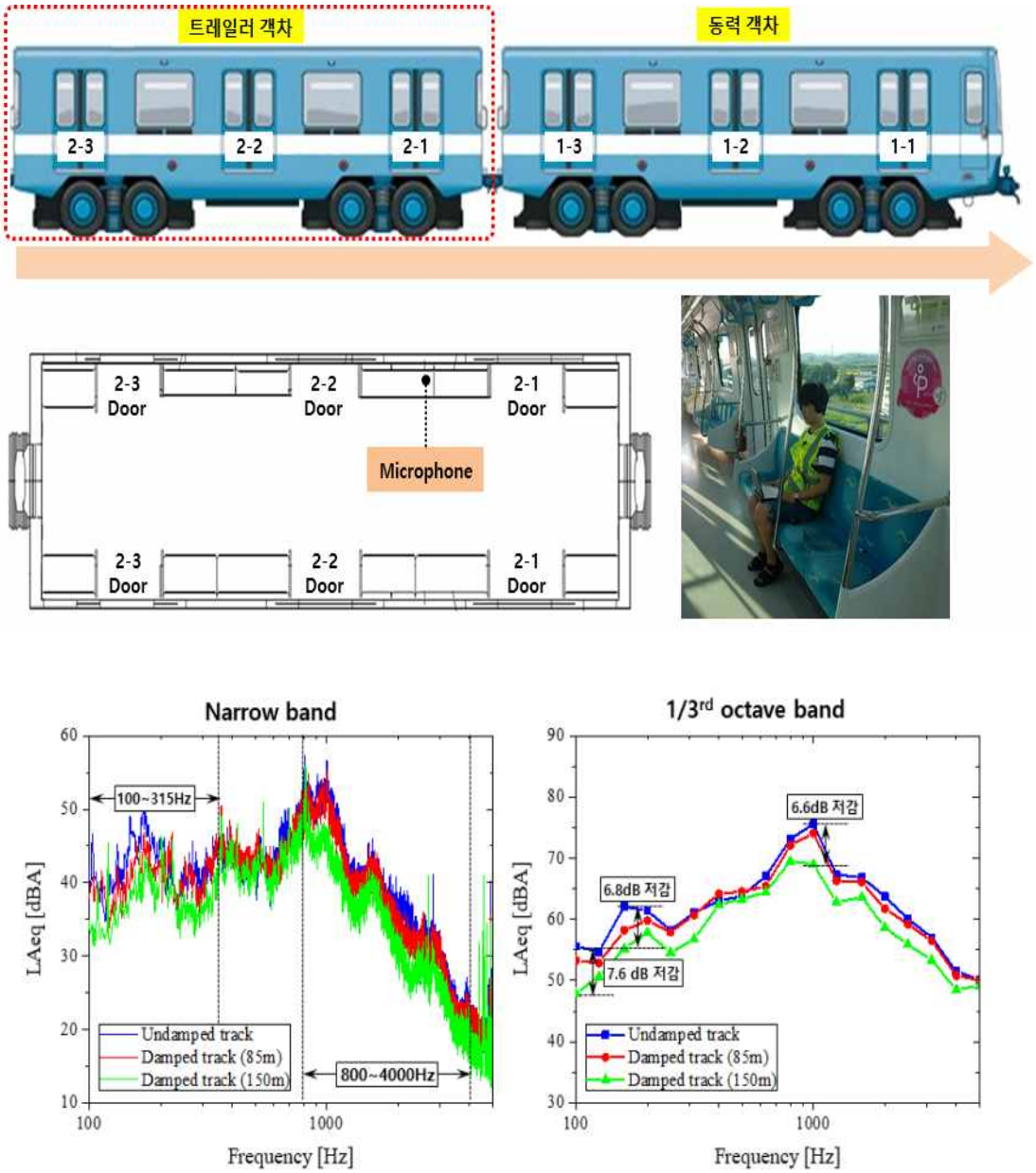
[그림 3.1.40] 현장부설 전 후의 궤도의 동적 감쇠율 향상효과 측정 결과

[표 3.1.6] 댐퍼 현장부설 전/후의 주파수별 동적 감쇠율 값

	주파수[Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
종방향	시공전 [dB/m]	13.3	6.7	5.1	2.3	0.8	0.7	0.6	0.7	1.9	0.7	0.7	3.8	2.0	0.6	0.6	1.2	0.7	6.0
	시공후 [dB/m]	11.6	7.0	3.0	2.3	1.3	1.5	1.8	3.1	5.1	4.8	4.6	9.2	5.5	3.7	4.9	5.4	3.5	2.9
	차이 [dB/m]	-1.7	0.3	-2.1	-0.0	0.4	0.9	1.2	2.4	3.2	4.2	3.9	5.4	3.5	3.1	4.2	4.2	2.8	-3.1
횡방향	주파수[Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
	시공전 [dB/m]	4.6	1.9	1.5	1.1	0.8	0.8	1.1	1.2	1.2	0.8	0.6	0.4	0.5	0.6	0.8	2.1	2.8	2.3
	시공후 [dB/m]	2.7	2.4	2.2	2.8	4.2	5.8	5.1	7.2	8.4	5.5	3.4	2.7	2.1	3.2	4.8	7.6	5.7	8.1
	차이 [dB/m]	-1.9	0.5	0.7	1.8	3.4	4.9	4.0	6.0	7.2	4.8	2.9	2.3	1.6	2.6	4.0	5.5	3.0	5.8

⑦ 주행 중 열차 차내소음 레벨 변화 측정 결과

측정차량은 트레일러 객차에서 측정하였고 2-1과 2-2도아 사이의 의자에서 앉은 자세로 측정하였고 머리와 창측 거리는 약 10cm 떨어짐



[그림 3.1.41] 실내 소음 측정을 위한 실험 세팅

[표 3.1.7] 댐퍼 체결 전/후의 실내 소음 측정 결과

2018년09월3일(월)				2018년09월12일(수)			
	Laeq,dBA				Laeq,dBA		
	전체주파수	1~100Hz	100~5000Hz		전체주파수	1~100Hz	100~5000Hz
사전측정	77.03	48.04	79.04	150m 설치	74.24	50.71	76.21
	75.80	52.55	77.81		74.25	55.29	76.15
	76.75	54.41	78.78		74.08	51.30	75.98
	76.82	55.60	78.84		72.35	48.89	74.39
	77.32	55.98	79.31		72.76	53.88	74.78
평균값	76.75	53.32	78.75	평균값	73.54	52.01	75.50

저감량	전체주파수	1~100Hz	100~5000Hz
	3.21	1.30	3.25

댐퍼 체결구간을 통과하는 주행 중 열차내부 소음레벨은 100Hz ~ 5000Hz 대역에서 약 3.2dBA의 저감을 보임. 1/3rd octave band에서의 100Hz, 160Hz, 1000Hz에서 비교적 큰(6dBA 이상) 소음저감 효과가 나타남

(바) 개발시제품 민원구간 150m 시공 및 측정 결과

① 인천도시철도 2호선 상본선에 150m 2차 시공하여 소음 및 진동 저감효과 측정, 또한 민원이 제기된 주거지 아파트 12층에서 측정



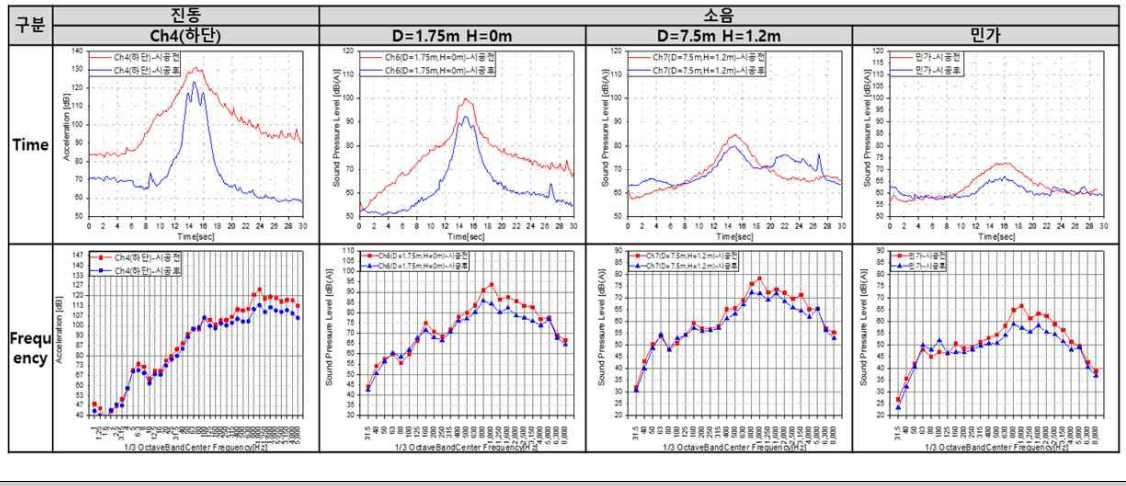


[그림 3.1.42] 왕길역 소음 측정 사진

선로로부터 7.5m, 레일상단으로부터 1.2m 위치에서의 열차통과소음은 평균 3.8dB(A) 저감됨.

레일의 진동가속도로벨은 평균 8.3dBV 저감됨.
(※오후 2시~4시 사이 19개의 열차통과, 평균속도 약 (53.6km/h−−>49.2))

선로변 아파트 12층에서의 열차 통과소음은 평균 5.7dB(A) 저감됨.
(※오후 2시~4시 사이 10개의 열차통과, 평균속도 약 (53.4km/h−−>48.4))



[그림 3.1.43] 시공 전 후의 레일의 진동가속도레벨 및 아파트에서의 소음레벨 변화

[표 3.1.8] 시공 전/후의 레일의 진동가속도레벨 및 아파트에서의 소음레벨 변화

왕길역									
구분		통과시간 (s)	열차 길이 (m)	속도 (km/h)	진동	소음(LpAeq,Tp)			
					Ch4	Ch6	Ch7	옥상	민가 (205동 1202
					상부	D=1.75m H=0m	D=7.5m H=1.2m		
평균	시공전	2.2	32.7	53.6	129.3	97.8	83.3	74.4	72.1
	시공후	2.4	32.7	49.2	120.9	91.5	79.5		66.5
차이				4.4	8.3	6.2	3.8		5.7

라. 진동댐핑 궤도소재

(1) 최종성과물 개요



[그림 3.1.44] 진동댐핑 성능이 향상된 폴리머 콘크리트 침목 시험체

(2) 정의

궤도를 통하여 전달되는 진동을 감쇠하기 위하여 진동댐핑 및 궤도성능 물성치를 향상시킨 폴리머 콘크리트 소재

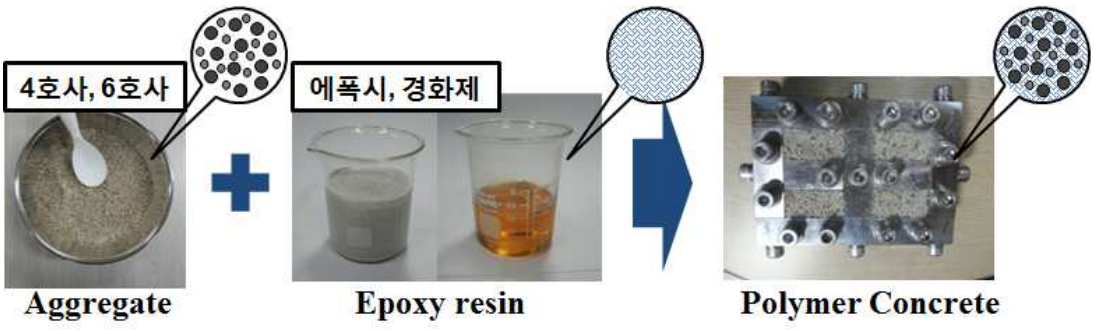
(3) 주요기능

철도레일의 레일패드 등은 환경에 강건하지 않고 그 성능이 변화하여 철도 궤도로서의 구조 안전성을 보유하고, 진동을 댐핑하는 기능을 동시에 만족하는 효과

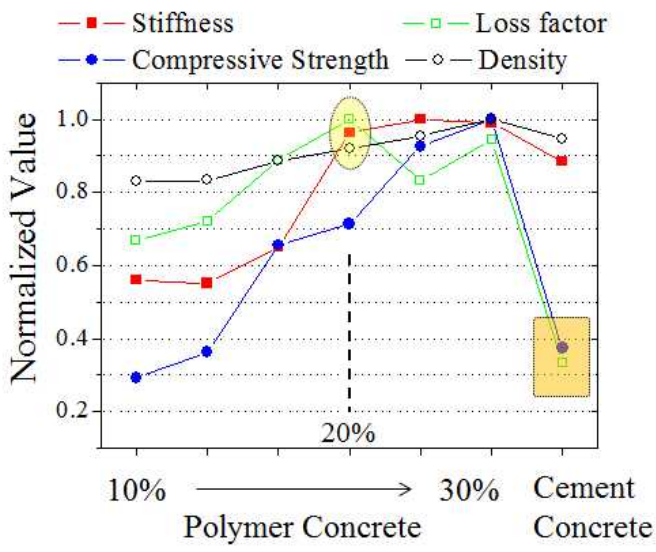
(4) 연구내용

(가) 진동댐핑 기능을 향사시키기 위한 폴리머 레진 콘크리트 소재 배합 연구

① 골재 : 에폭시 비율을 10%부터 30%로 변화시키면서 다양한 배합비의 폴리머 콘크리트를 제작하여 물성을 비교한 결과 약 20%의 배합비로 폴리머 콘크리트를 제작할 때 가장 우수한 성능을 보임. 최적의 배합비 조건의 폴리머 콘크리트의 물성을 시멘트 콘크리트와 비교한 결과 압축강도 3배, 손실율 2.5배가 증가하여 폴리머 콘크리트의 정적/동적 물성 우수성을 확인함.



[그림 3.1.45] 폴리머 콘크리트 제작 과정



[그림 3.1.46] 폴리머 콘크리트와 시멘트 콘크리트의 정적/동적 물성 비교

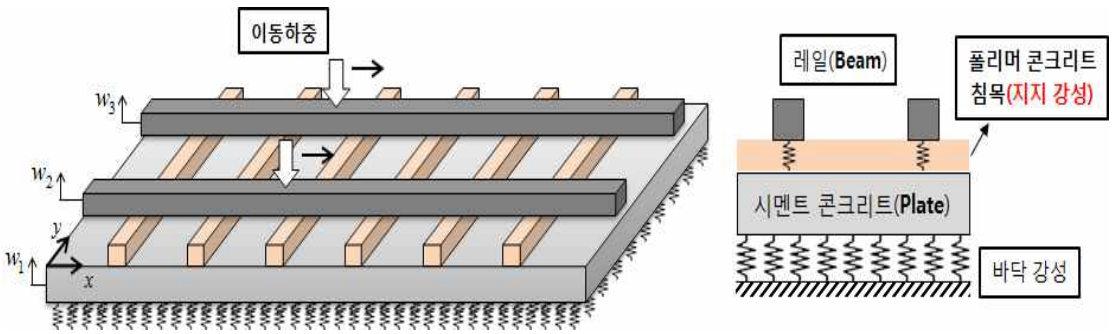
② 레일의 조도와 열차의 이동에 의한 이동 하중을 고려한 보-평판 모델의 응답 해석을 위해서 Rayleigh-Ritz 방법을 사용하였다. Rayleigh-Ritz 방법은 해석 요소에 작용하는 에너지를 계산하여 등가 질량, 강성 행렬을 구하는 방법이다.

보 평판 모델과 같이 복잡한 구조를 각각 하나의 행렬로 나타낼 수 있다. 위치 별 변위를 이용하여 각 요소의 운동에너지(T)와 포텐셜에너지(V)를 구하고 궤도 및 슬라브의 진동 거동을 구함.

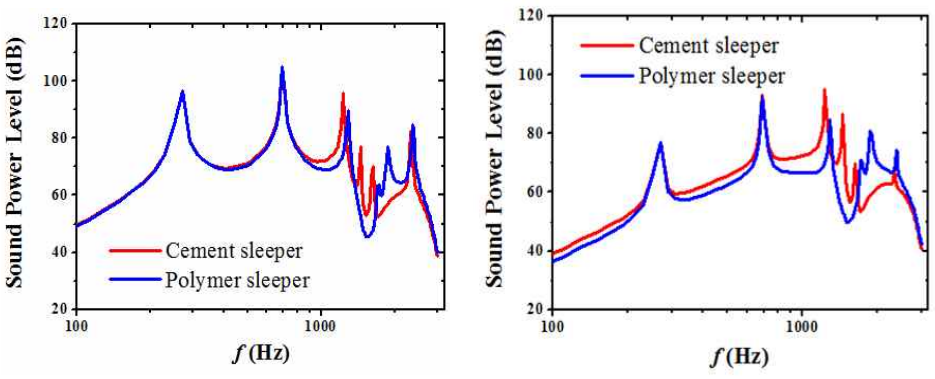
$$T=\int_0^a\int_0^b \rho h\dot{w}_1^2 dydx+\int_0^b \frac{1}{2}\rho h\left(\frac{\partial w_2(d_{r1},y)}{\partial t}\right)^2 dy+\int_0^b \frac{1}{2}\rho h\left(\frac{\partial w_3(d_{r2},y)}{\partial t}\right)^2 dy$$

$$V=\int_0^a\int_0^b \frac{1}{2}D\left[(\frac{\partial w_1}{\partial x^2})^2+(\frac{\partial w_1}{\partial y^2})^2+2\nu\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2}+2(1-\nu)(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x})^2\right]$$
$$\int_0^b \frac{1}{2}EI(\frac{\partial^2 w_2(x_n,y)}{\partial y^2})^2 dy+\int_0^b \frac{1}{2}EI(\frac{\partial^2 w_3(x_n,y)}{\partial y^2})^2 dy$$

이동 하중을 고려한 레일 궤도 진동 해석 모델을 이용하여 시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트의 물성을 적용하여 방사 소음을 비교한 결과 폴리머 콘크리트 침목 적용 시 소음 방사량이 100-3000Hz 영역에서 overall 3dB 감소할 것으로 예상함.

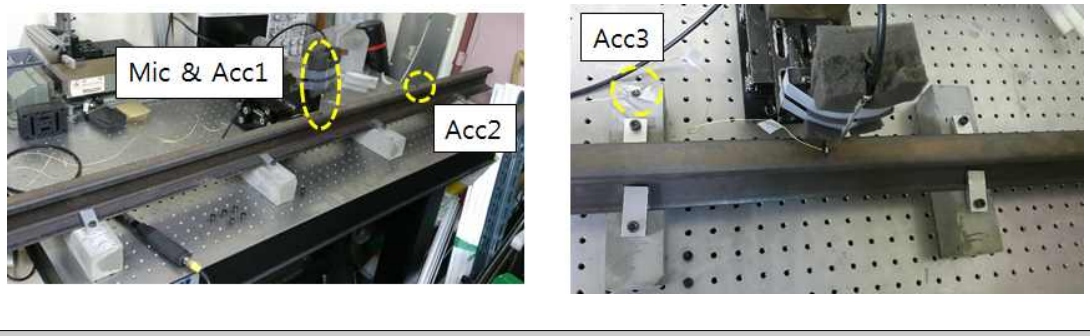


[그림 3.1.47] 이동하중을 고려한 보 평판의 이론적 모델

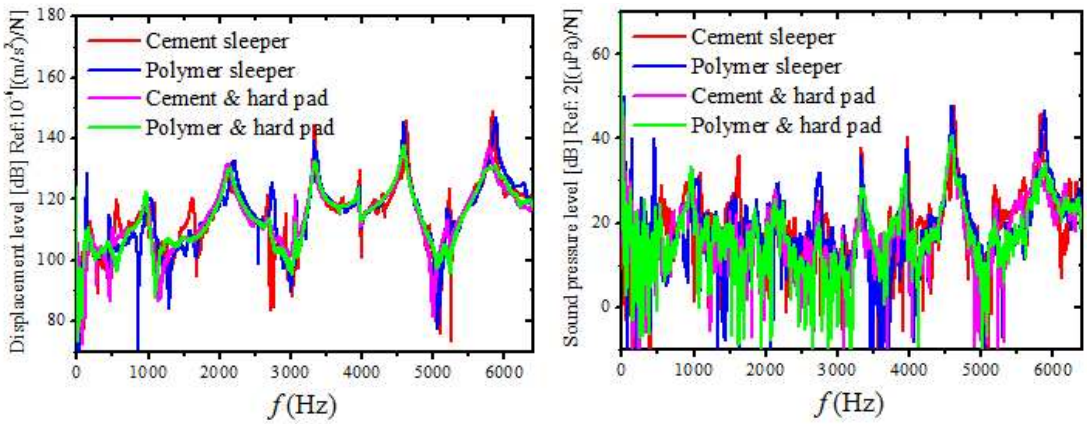


[그림 3.1.48] 이론모델 및 침목 종류에 따른 음향 파워 레벨 해석 결과
- (a) 콘크리트 슬래브, (b) 레일 궤도

③ 축소형 시멘트, 폴리머 콘크리트 침목을 제작하여 상사모델을 구성하고 충격 가진에 의한 진동 및 소음을 측정



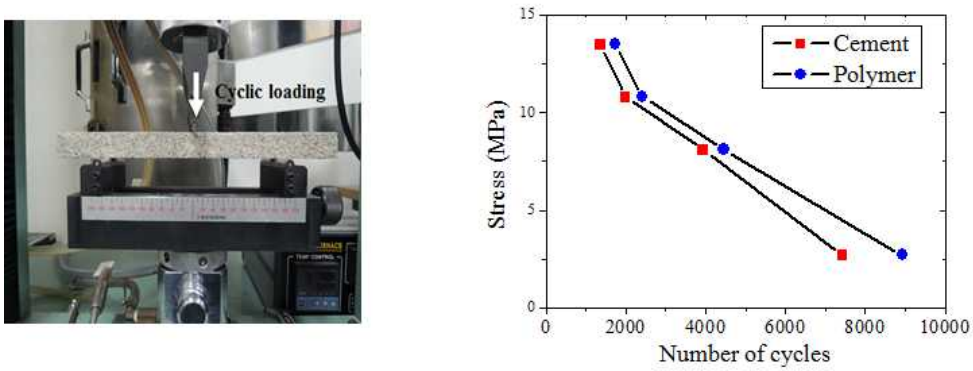
[그림 3.1.49] 진동 저감 효과 파악용 상사모델



(a) (b)

[그림 3.1.50] 철도 궤도 상사 모델의 충격 응답 측정 결과
(a)가속도 응답, (b)음압 응답

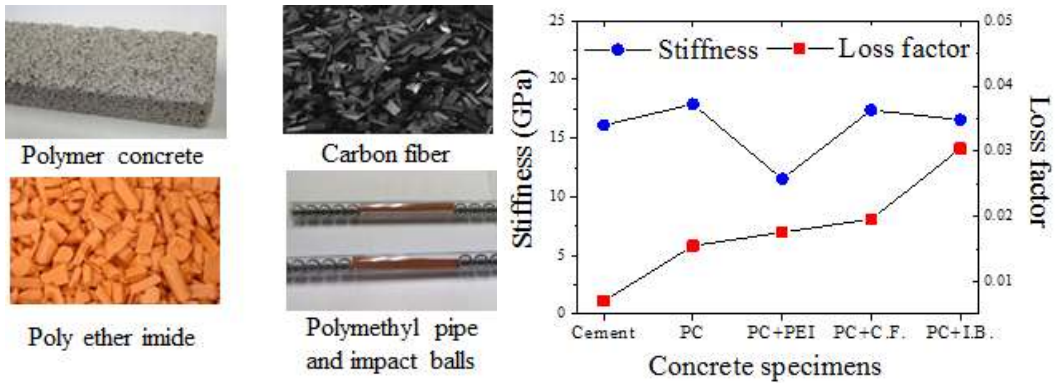
시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트의 반복 하중에 의한 피로 수명을 측정하기 위하여 동일 수준의 휨 하중을 콘크리트 시편에 가하여 피로 파괴가 일어날 때 까지 하중 반복 피로 수명 측정 결과 최대 응력 50% 수준인 경우 시멘트 콘크리트에 비해 피로 수명이 최대 25%까지 향 상 됨



[그림 3.1.51] 피로 수명 측정 장치 및 측정 결과

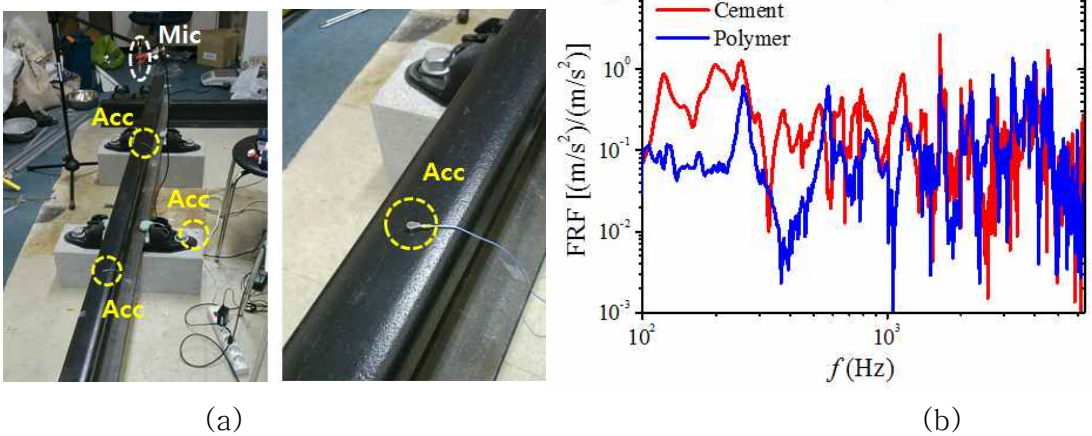
(나) 진동댐핑 성능을 향상시키면서 소재의 단가를 절감할 수 있는 다양한 소재 배합 연구

① 폴리머 콘크리트의 진동 저감 성능을 개선하기 위해 탄소섬유, 아크릴 파이프, 충돌 댐퍼를 삽입하여 복합 메타 폴리머 콘크리트를 구현함. 탄소섬유, 재활용 플라스틱을 삽입한 경우 손실율이 다소 증가하였다. 충돌 댐퍼를 폴리머 콘크리트에 삽입한 경우 휨강도도 높게 유지하면서 시멘트 콘크리트 대비 손실율이 4.5배 증가함



[그림 3.1.52]다양한 강화용 재료 및 콘크리트 물성 비교 결과

② 간이 레일 궤도를 제작하여 길이는 짧지만 단면 치수가 실제 침목과 동일한 수준인 200mm, 200mm로 제작하여 3m UIC60 레일 모델에 체결 후 충격에 의한 가속도 신호를 비교함. 폴리머 콘크리트 침목 적용 시 100-2000Hz 영역에서 궤도의 가속도 응답이 감소하는 것을 확인함

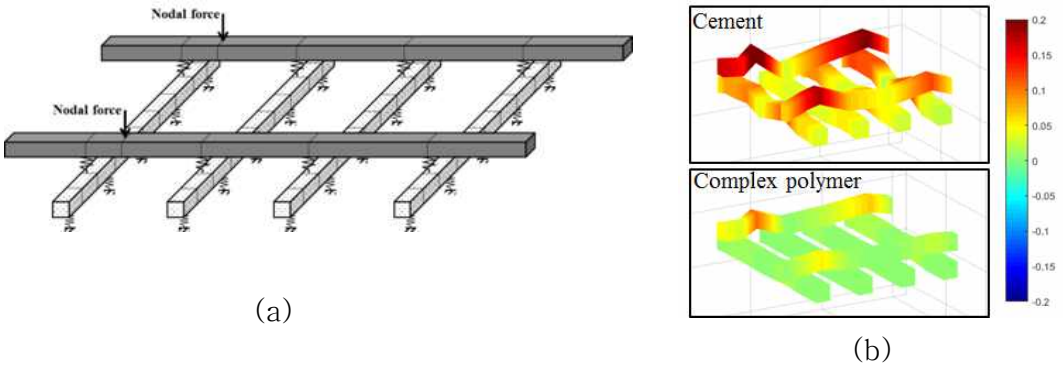


[그림 3.1.53] (a) 간이 궤도 진동 특성 측정 사진,
(b) 주파수에 따른 레일-침목 간 진동 전달 특성 비교

(다) 폴리머 콘크리트 철도 궤도소재로 적용 위한 해석 연구 및 소재간의 결합성 특성 연구

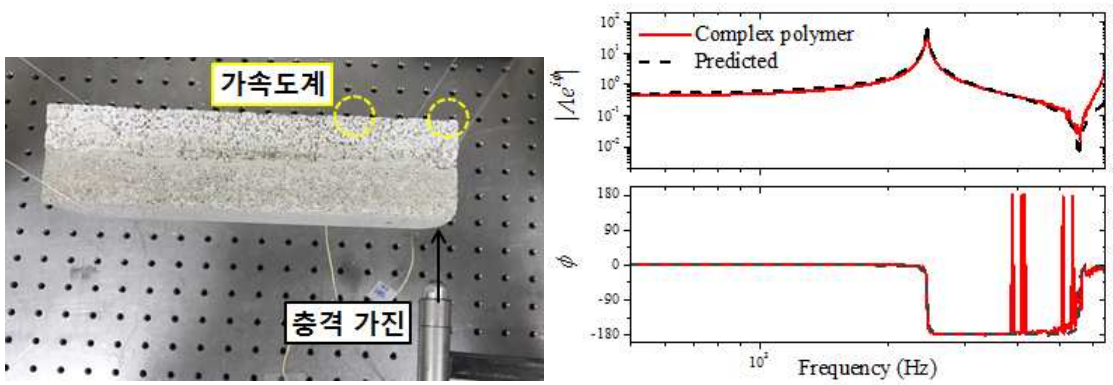
① 스펙트럴 요소법을 활용하여 콘크리트 침목 궤도를 모사한 해석 모델을 구성하였다. 복합 폴리

머 콘크리트 침목이 적용된 후에는 상대적으로 침목진동이 억제되어 궤도의 진동 또한 감소한 것을 확인함.



[그림 3.1.54] (a) 스펙트럴 요소법을 적용한 해석 모델,
(b) 복합 폴리머 콘크리트 진동 모드 해석

② 시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트를 혼합한 복합 메타 콘크리트를 제작하기 위해 콘크리트 계면의 결합성을 파악하였다. 몰드에 폴리머 콘크리트를 경화시킨 후 시멘트 콘크리트를 적용하여 두 개의 콘크리트로 이루어진 콘크리트의 진동 신호를 측정하였다. 하나의 물성으로 이뤄진 이론 모델과 비교한 결과 실험 결과와 동일한 거동을 보였다. 이를 통해 두 콘크리트의 계면이 동적인 측면에서 매우 안정적인 것을 확인함.



[그림 3.1.55] 복합 폴리머 콘크리트 결합성 파악용 진동 응답 측정

③ 최종 시작품 제작 및 평가
폴리머 콘크리트 침목 응력/하중분포 해석
복합 메타 폴리머 콘크리트 침목 시험체 제작 및 동적/정적 실험실 성능 시험

(라) 철도궤도(침목) 제작을 위한 설계 연구

① 혼합이 완료된 폴리머 콘크리트를 테플론 필름이 코팅된 몰드 내에 타설하였다. 테플론 필름은 에폭시와 이형작용을 하므로 경화 후 탈형할 때 유리한 장점이 있다. 하부 폴리머 콘크리트에는 물결 형상을 적용하였고 그 표면 사진은 아래 두 번째 그림에 나타있다. 총 10개의 패턴과 약 10mm의 높낮이 편차를 주어서 물결 형상 폴리머 콘크리트를 구현하였다. 타설

후 경화 시간까지는 대략 12시간이 걸리고, 경화하면서 부피 변화나 형상 변화는 거의 없었다.

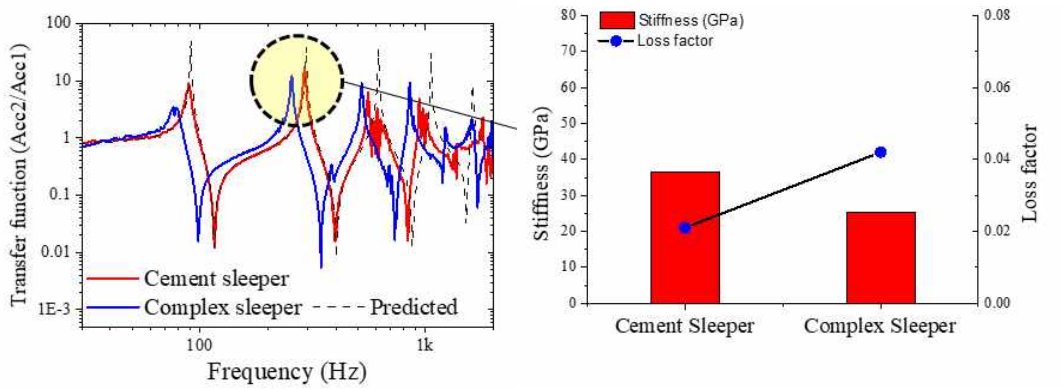
② 철도용 복합 폴리머 콘크리트 침목 주파수 응답 측정(전달함수법)

침목물성 측정방법: 복합 콘크리트 침목의 자유단 조건 가진 실험을 진행하기 위하여 아래 사진과 같은 시험 세팅을 진행하였다. 레일 체결부 위치에 각각 2개의 스프링 마운팅을 설치하였고 그 위에 사각 알루미늄 빔을 얹어 자유단 조건을 모사하였다. 가속도계는 침목의 윗면에 총 8개 설치하여 굽힘 거동을 측정하였다. 각 가속도계의 위치는 양 끝단으로부터 2.5cm, 5cm, 80cm, 110cm에 위치하였다. 그리고 오른쪽 끝단을 고무 망치와 플라스틱 해머로 충격 가진 하여 여러 형태의 충격성 신호에 응답을 측정하였다.

③ 복합 콘크리트 침목의 고유 진동수는 시멘트 콘크리트 침목에 비해 약간 낮으나 피크의 응답 크기는 그보다 작았다. 두 침목의 modal damping ratio 비교 결과 폴리머 콘크리트를 삽입할 시 약 60%의 damping ratio가 증가하였다.



[그림 3.1.56] 양생 후 폴리머 콘크리트 침목 및 하부사진



[그림 3.1.57] 폴리머 콘크리트 침목 주파수 전달함수 및 물성(강성 및 손실율)

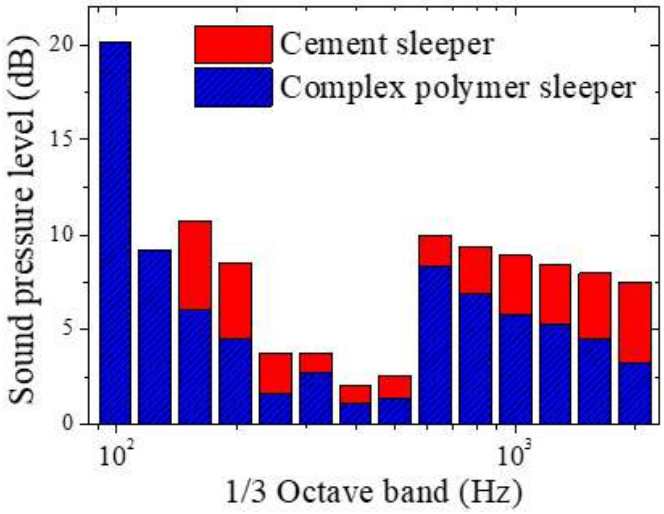
④ 소음저감 효과 예측 모델링: 철도 이동에 따른 구름 방사 소음을 예측하기 위하여 한양대학교 음향진동연구실에서는 무빙로드 해석기법을 사용하였다.

아래 그림과 같이, 콘크리트 슬라브와 레일은 각각 지반과 침목에 위에 빔과 스프링으로 모델링 되었다. 티모셴코 빔으로 모델링된 레일은 아래와 같은 식들로 특정 주파수에서의 진동을 예측하였다.

실제 KRS 50 궤도용 침목과 동일한 치수의 복합 메타 콘크리트 침목을 제작하여 측정한 물성을 구름 소음 방사 해석 모델에 적용한 결과 100-2000 Hz 영역에서 overall 4.22dB의 소음 방사 저감 효과를 확인함.



(a)

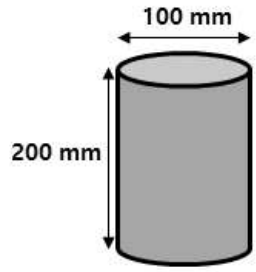


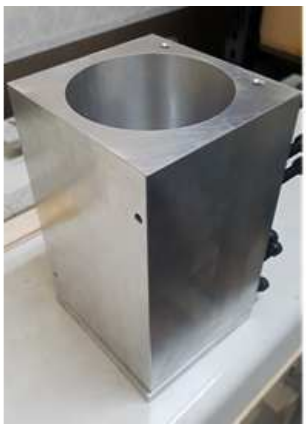
(b)

[그림 3.5.58] (a) 복합 콘크리트 침목 자유단 조건 충격 가진 실험,
(b)복합 메타 콘크리트 침목 적용 후 구름 소음 방사 비교

⑤ KS-F-2403, KS-F-2405에 맞는 압축강도를 얻기 위하여 아래 그림과 같은 지름 100mm, 높이 200mm의 원통형 공시체를 제작을 진행하였다. 이를 제작하기 위해서 알루미늄 몰드를 제작하였고 몰드 사진과 콘크리트 공시체의 제작 사진은 아래와 같다. KS 규격에 맞는 공시체를 양생하여 압축 강도를 측정을 진행하였다.

복합 폴리머 콘크리트의 압축 강도 시험(KS F 2405) 결과 65.7 MPa로 침목용 콘크리트 재료 기준인 50MPa 보다 30% 성능 향상을 보임.







(a)

6. 시험방법

(1) KS F 2405 : 2010

7. 시험결과

한국건설생활환경시험연구원
Korea Conformity Laboratories

1) 복합 콘크리트 공시체(시편 1)

시험항목	단위	시험방법	시험결과
압축강도	MPa	(1)	65.7

◎ 압축강도시험일 : 2018. 04. 20

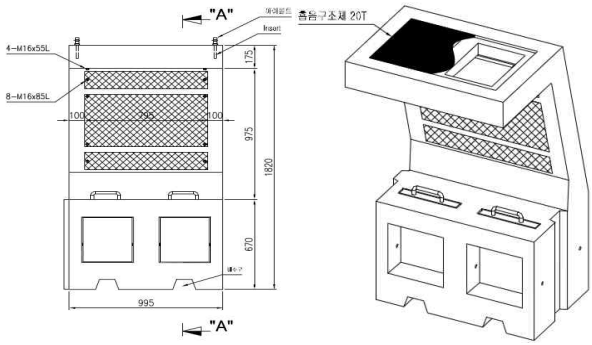
(b)

그림 [3.5.59] 복합 콘크리트 공시체 시험 결과
(a) KS-F-2405 압축 강도 공시체 및 몰드
(b)KS-F-2405에 따른 복합 콘크리트 공시체 압축 강도 시험 성적서

마. 레일 근접 저상 방음장치 개발

(1) 레일 근접형 저상 방음장치

■ 최종성과물 개요





[그림 3.1.60] 최종 성과물 제작 도면 및 일산 경의중앙선 시공사진



[그림 3.1.61] 최종 성과물 제작 도면 및 일산 경의중앙선 시공사진 - 높이 보완 적용

- **정　　의** : 선로 근접(건축한계 외방)에 설치하여 전동 소음을 저감하는 저상 방음장치
- **주요기능** : 열차 속도 250km/h 이하 구간에 레일과 차륜의 마찰에 의해 발행하는 전동소음을 선로 근접에 방음장치를 설치하여 구조물의 흡음 및 삽입손실을 통한 저감과 전달경로 변경으로 철도소음 5 dB(A) 이상 저감

(2) 연구내용

국내 적용을 위한 기술, 높이, 흡음소재 검토, 시작품 설계 및 성능평가

– 시설측면 기술 검토, 국내 철도 적용 방법 검토(철도 설계사, 한국철도공단 자문)

– 방음벽 소재, 높이 및 설치 위치에 따른 실내 음향성능시험

– 근접 음장 해석을 통한 차종별 저상 방음장치 적용 결과 예측(투과, 반사, 회절 등 음향이론식을 이용한 계산)

– 근접 음장 해석을 통한 차종별 저상 방음장치 흡음재 유/무에 따른 삽입손실 예측

– 1차 시제품 이중층 흡음시스템 설계 및 음향성능시험(이론식 및 임피던스관 성능시험)

– 초도품 4종 설계 및 시험체 제작 실내음향성능평가(삽입손실 측정)

– 축소모형에 대한 소음저감성능 예측(2D open BEM) 및 삽입손실 측정

– 현장 흡음률 측정을 통한 방음판 최적 두께 결정

– 저상 방음장치 적용시 공동주택 층별 저감성능 예측(Cadna A)

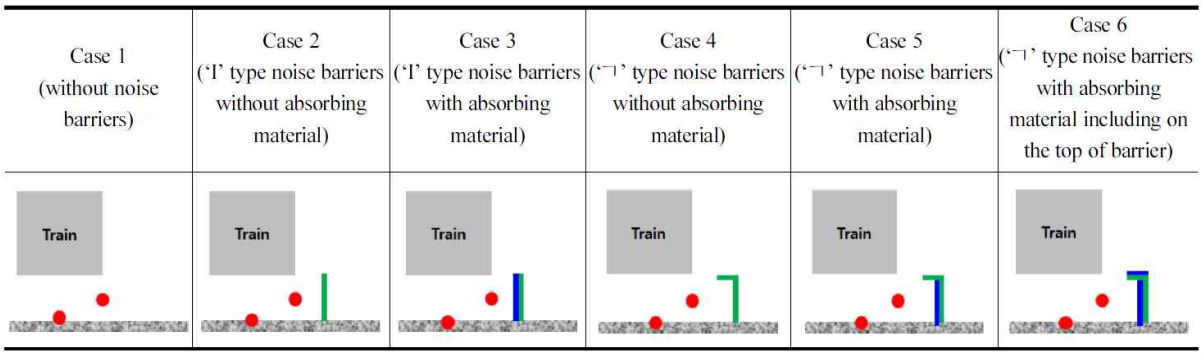
– 시제품 시험체 실내외 음향성능(삽입손실) 측정, 실외 성능 한국기계연구원 공인시험(KIMM-16-0295)

– 풍하중에 대한 구조안전성 검토(구조기술사)

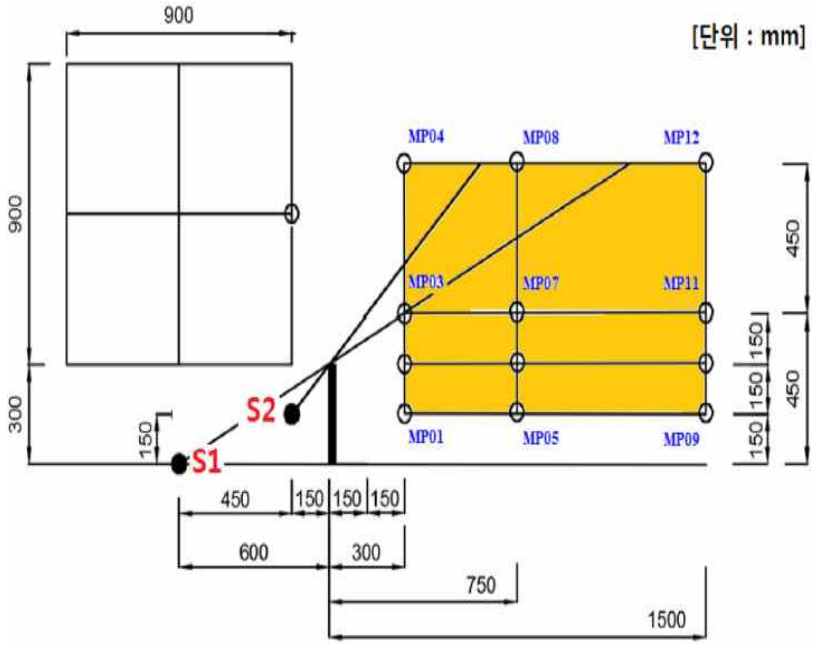
(가) 축척 모형을 이용한 삽입손실 측정

– 실제 제품의 1/3 축척비를 갖는 크기로 열차 및 저상 방음장치 모형 제작

– 음원의 위치를 열차 중앙 및 차륜 위치에 스피커를 설치하여 백색잡음 발생하여 형상과 흡음재 배치 여부에 따른 삽입손실 측정



[그림 3.1.62] 저상 방음장치 삽입손실 측정을 위한 시험 조건

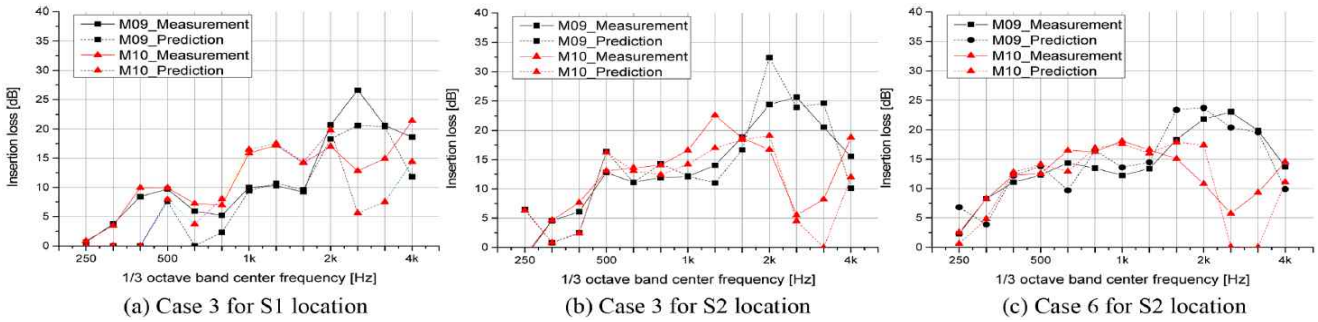


[그림 3.1.63] 소음측정 단면

-> 가시선(소음원과 방음장치 끝단을 연결하는 가상의 선) 상부에서는 소음 저감 효과가 적은 반면 가시선 하부에서는 10 dB 이상의 소음 저감 효과 나타남

(나) 측정결과와 예측결과 비교

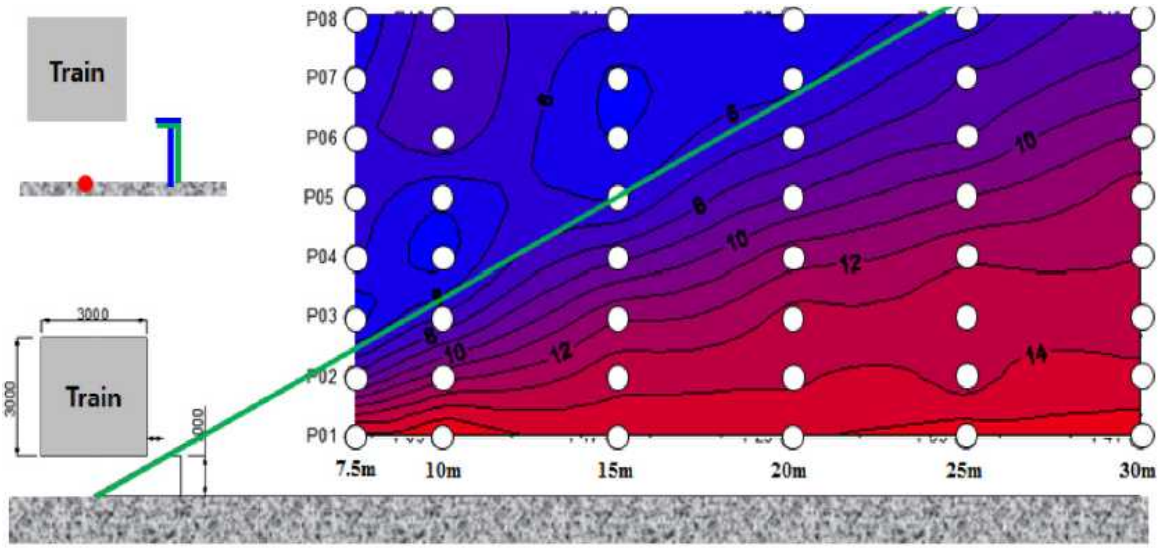
- 흡음재가 부착된 Case 3 및 Case 6 모델에 대한 총합 삽입손실을 평가 위치 따라 비교한 결과 Case 3의 경우는 1.5 dB, Case 6의 경우는 2.2 dB의 차이가 나타남



[그림 3.1.64] 음원위치 S2에서 측정 및 예측 비교 결과

(다) 열차 소음특성 적용 및 실제 크기 모델에 대한 삽입손실 예측 및 평가

- 선로 중앙에서 각각 7.5~30m, 수직 방향으로 1.5~12m까지 1.5m 간격 48개지점 평가위치 선정
- 방음장치의 높이는 1m 상부 길이는 0.5m, 상부 끝선이 건축한계에 위치하도록 모델링
- 열차 종류별로 가시선 하부에서는 10~15 dB의 삽입손실 나타남
- 석불역 1차 시험시공 시 무궁화 열차의 저감 성능을 7.5m 높이 1.2m 에서 비교결과 측정은 12.3dB, 예측은 13.6 dB로 1.3 dB의 차이로 오차 범위 3 dB 이내



[그림 3.1.65] 음원으로 적용한 모든 차종의 삽입손실 대수평균 결과

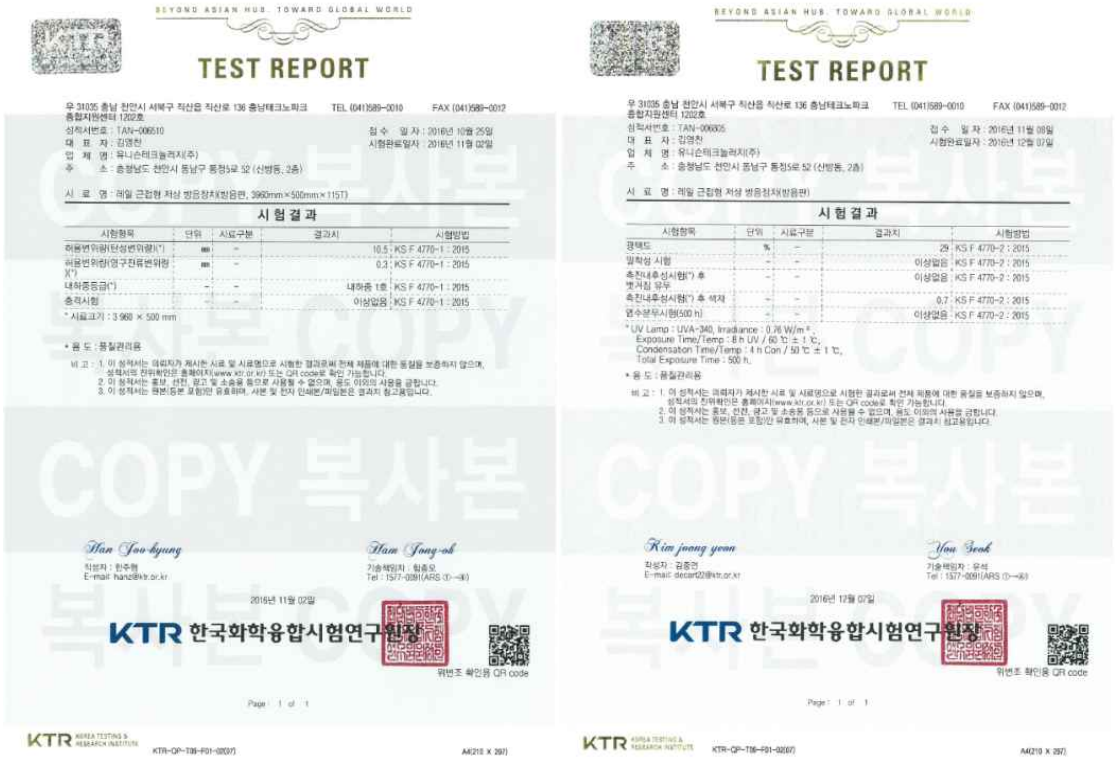
(3) 최종 시제품 검증 결과

(가) 1차 시제품 방음판 구조 및 도막품질 공인시험

[표 3.1.9] 현장부설용 1차 시제품 방음판 구조 및 도막품질 시험 결과

시험항목	단위	시험기준	시험결과	시험방법
허용변위량	mm	50 이하	10.5	KS F 4770-1:2015
영구잔류변위량	mm	7.92 이하	0.3	KS F 4770-1:2015
내하중등급	-	5호 이상	1호	KS F 4770-1:2015
충격시험	-	이상없음	이상없음	KS F 4770-1:2015

시험항목	시험기준	시험결과	시험방법
광택도	40% 이하	29	KS F 4770-2: 2015
염수분무시험	'X' 표시 부위 면측 5mm 이외에서 녹발생이 없어야 함	이상없음	
촉진내후성시험	도막이 벗겨지지 않아야 하고 색차 표시 방법에 의한 ⊿Eab가 2.0 이하 이어야 함	이상없음 ⊿Eab:0.7	
밀착성시험	도막이 벗겨지지 않아야 함	이상없음	



TEST REPORT

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
허용변위량(탄성변위량)(*)	㎜	-	10.5	KS F 4770-1 : 2015
허용변위량(영구잔류변위량)(*)	㎜	-	0.3	KS F 4770-1 : 2015
내하중등급(*)	-	-	내하중 1호	KS F 4770-1 : 2015
충격시험	-	-	이상없음	KS F 4770-1 : 2015

* 시료크기 : 3 960 × 500 mm

* 용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며,
성적서의 진위확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(원본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Han Sou-byung
직원자 : 한수병
E-mail: hanz@ktr.or.kr

Ham Jong-ok
기술책임자 : 함종오
Tel : 1577-0091(ARS ① → ④)

2016년 11월 02일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE KTR-QP-T06-F01-02(07) A4(210 X 297)

TEST REPORT

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
경택도	%	-	29	KS F 4770-2 : 2015
밀착성 시험	-	-	이상없음	KS F 4770-2 : 2015
촉진내후성시험(*) 후 벗겨짐 유무	-	-	이상없음	KS F 4770-2 : 2015
촉진내후성시험(*) 후 색차	-	-	0.7	KS F 4770-2 : 2015
염수분무시험(500 h)	-	-	이상없음	KS F 4770-2 : 2015

* UV Lamp : UVA-340, Irradiance : 0.76 W/m²,
Exposure Time/Temp : 8 h UV / 60 ℃ ± 1 ℃,
Condensation Time/Temp : 4 h Con / 50 ℃ ± 1 ℃,
Total Exposure Time : 500 h.

* 용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며,
성적서의 진위확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(원본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Kim joong yeon
작성자 : 김중연
E-mail: decart22@ktr.or.kr

You Seok
기술책임자 : 유석
Tel : 1577-0091(ARS ① → ④)

2016년 12월 07일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE KTR-QP-T06-F01-02(07) A4(210 X 297)

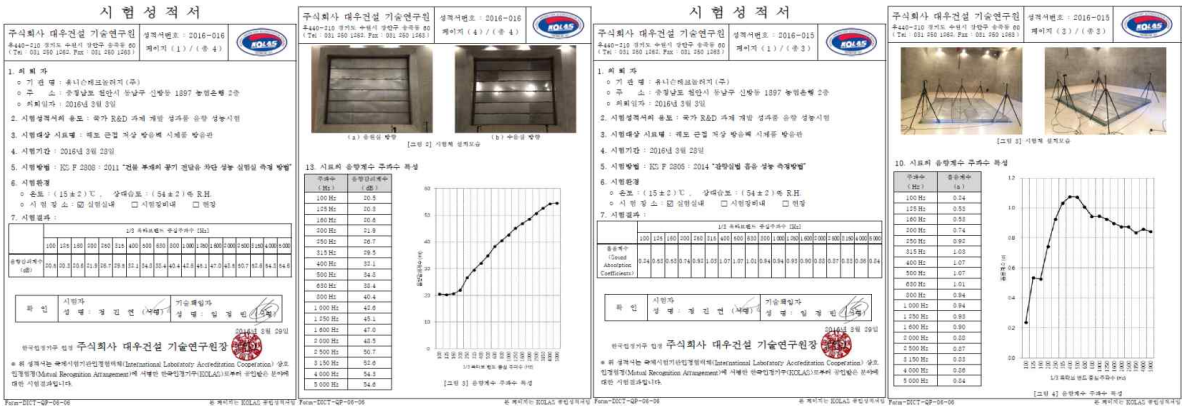
[그림 3.6.66] 현장부설용 1차 시제품 방음판 구조 및 도막품질 공인시험성적서

(나) 현장부설용 1차 시제품 구조안전성 검토

적용 풍하중(100kg/m2. 풍하중 70kg/m2+열차풍 30kg/m2)에 대해 시제품 사양에 따라 구조체가 부재 및 마감재의 자중과 풍하중에 대한구조 안정성 확보여부를 판단, -> 적용 풍하중과 자중 등에 대해 부재내력의 여유가 크므로 안전에는 문제가 없음
(구조기술사 검토 결과)

(다) 현장부설용 1차 시제품 방음판 흡음률 및 투과손실 공인시험

- KS F 2808:2011 “건물 부재의 공기 전달음 차단 성능 실험실 측정방법” 을 적용하여 시제품 방음판의 투과손실을 측정하였다. 측정결과 500Hz 34.8 dB, 1kHz 42.6 dB로 목표성능 500Hz 25 dB, 1kHz 30 dB 달성하였으며, 실내외 성능평가에 사용한 일반 방음판 대비 500Hz 2.3 dB 1kHz 9.0 dB 차음성능
- KS F 2805:2014 “잔향실법 흡음 성능 측정방법” 을 적용하여 흡음율을 측정하였다. 측정결과 시제품 방음판의 흡음율은 NRC 0.95로 방음판 성능 1등급인 NRC 0.85보다 높은 등급



시 험 성 적 서

주식회사 대우건설 기술연구원

주식회사 대우건설 기술연구원장

시 험 성 적 서

주식회사 대우건설 기술연구원

주식회사 대우건설 기술연구원장

[그림 3.1.67] 현장부설용 1차 시제품 방음판 흡음률(좌) 및 투과손실(우) 공인시험성적서

– 현장부설용 시제품 제작 및 중앙선 석불역 구내시험시공 (100m)

– 시험시공 저감성능평가(차종별, 계절별 소음저감성능, 부등침하, 열차풍 진동, 레일 온도 등)

– 시험시공 합동점검, 완료 보고(한국철도시설공단) 및 의견 수렴

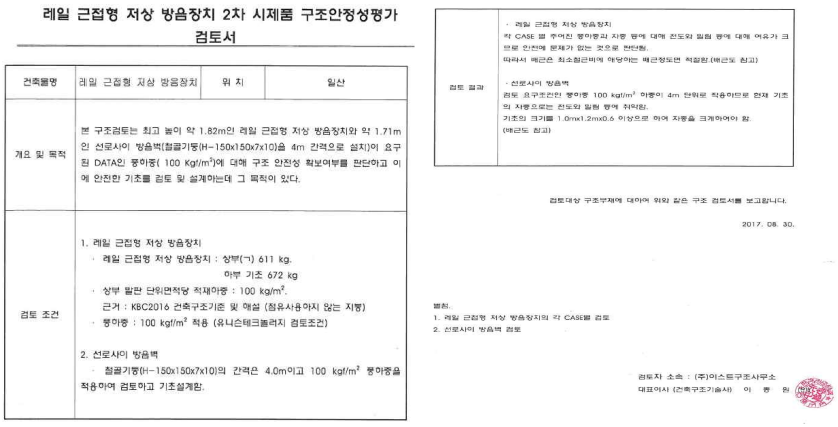


[그림 3.1.68] 1차 시험시공 후 열차풍 위치별 진동 측정 및 평가 결과

[표 3.1.10] 노반 부등침하 계절별 측정결과

경간	1	2	3	4	5	6	7	8
겨울레벨[mm]	948.4	959.5	957.4	986.6	1,022.4	1,057.7	1,091.3	1,103.8
봄철레벨[mm]	948.4	959	954.9	986.5	1,020.8	1,057.3	1,090.7	1,103.1
레벨차[mm]	0.0	0.5	2.5	0.1	1.6	0.4	0.6	0.7
경간	9	10	11	12	13	14	15	16
겨울레벨[mm]	1,130.6	1,158.8	1,202.7	1,226.6	1,241.6	1,256.3	1,298.4	1,314.2
봄철레벨[mm]	1,129.3	1,156.8	1,201.9	1,224.9	1,241.1	1,255.3	1,297.4	1,313.8
레벨차[mm]	1.3	2.0	0.8	1.7	0.5	1.0	1.0	0.4
경간	17	18	19	20	21	22	23	24
겨울레벨[mm]	1,332.7	1353.4	1386.1	1,417.4	1,426.0	1,442.5	1,460.4	1,487.6
봄철레벨[mm]	1,331.8	1,352.3	1,385.6	1,415.7	1,423.4	1,440.3	1,459.8	1,486.8
레벨차[mm]	0.9	1.1	0.5	1.7	2.6	2.2	0.6	0.8

(라) 2차 시제품 구조안전성 검토


레일 근접형 저상 방음장치 2차 시제품 구조안전성평가 검토서

건축물명	레일 근접형 저상 방음장치	위 치	일산
개요 및 목적	본 구조검토는 최고 높이 약 1.82m인 레일 근접형 저상 방음장치와 약 1.71m인 선로사이 방음벽(철골기둥(H-150x150x7x10)을 4m 간격으로 설치)이 요구된 DATA인 풍하중(100 Kgf/m²)에 대해 구조 안전성 확보여부를 판단하고 이에 안전한 기초를 검토 및 설계하는데 그 목적이 있다.		
검토 조건	1. 레일 근접형 저상 방음장치 · 레일 근접형 저상 방음장치 : 상부(ㄱ) 611 kg. 하부 기초 672 kg · 상부 발판 단위면적당 적재하중 : 100 kg/m². 근거 : KBC2016 건축구조기준 및 해설 (점유사용하지 않는 지붕) · 풍하중 : 100 kgf/m² 적용 (유니스테크놀러지 검토조건) 2. 선로사이 방음벽 · 철골기둥(H-150x150x7x10)의 간격은 4.0m이고 100 kgf/m² 풍하중을 적용하여 검토하고 기초설계함.		

검토 결과

· 레일 근접형 저상 방음장치
각 CASE 별 주어진 풍하중과 지형 형에 대해 선도와 일체 형에 대해 어느가 크므로 안전에 문제가 없는 것으로 판단됨.
따라서 배근은 최소철근비에 해당하는 배근정도면 적절함.(배근도 참고)

· 선로사이 방음벽
검토 요구조건인 풍하중 100 kgf/m² 하중이 4m 단위로 작용하므로 문제 기초의 지형으로는 선도와 일체 형에 해당됨.
기초의 크기를 1.0mx1.2mx0.6 이상으로 하여 지형을 크게하여야 함.
(배근도 참고)

검토대상 구조부재에 대하여 위와 같은 구조 검토서를 보고합니다.

2017. 08. 30.

별첨.
1. 레일 근접형 저상 방음장치의 각 CASE별 검토
2. 선로사이 방음벽 검토

검토자 소속 : (주)아스트구조사무소
대표이사 (건축구조기술사) 이 종 원

– 2차 시제품 제작 및 경의중앙선 일산역~풍산역 소음민원 구간 시공

– 시방서, 운영설명서 및 유지관리 매뉴얼 작성

– 소음저감성능, 열차풍 진동 성능평가 완료

(4) 시제품 현장부설

(가) 1차 시공 : 중앙선 석불역 구내 100m



[그림 3.1.69] 중앙선 석불역 시범시공 레일 근접 저상 방음장치



[그림 3.1.70] 중앙선 석불역 구내 시험시공 후 한국철도시설공단 합동점검

[표 3.1.11] 차종별 소음저감량 평가 결과

차종	운행 구분	량수	미설치구간 측정높이 (레일 상면기준)		설치구간 측정높이 (레일 상면기준)		저감량 측정높이 (레일 상면기준)	
			1.2m	3.5m	1.2m	3.5m	1.2m	3.5m
무궁화	상행	7~8	78.9	80.2	71.2	73.4	7.7	6.8
화물전기	상행	21	73.6	74.7	67.3	69.3	6.3	5.4
ITX새마을	상행	6	74.7	76.2	68.0	69.7	6.7	6.5
무궁화	하행	7~8	82.3	82.5	72.7	74.1	9.6	8.4
화물전기	하행	21	79.6	80.1	72.0	73.5	7.6	6.6
ITX새마을	하행	6	78.5	78.7	69.0	70.8	9.5	7.9

(※선로중앙으로부터 7.5m 에서의 열차유형 별 측정 결과 평균값, 측정규격 KS I ISO 3095:2014)

(나) 2차 시공 : 경의중앙선 일산역~풍산역 구간



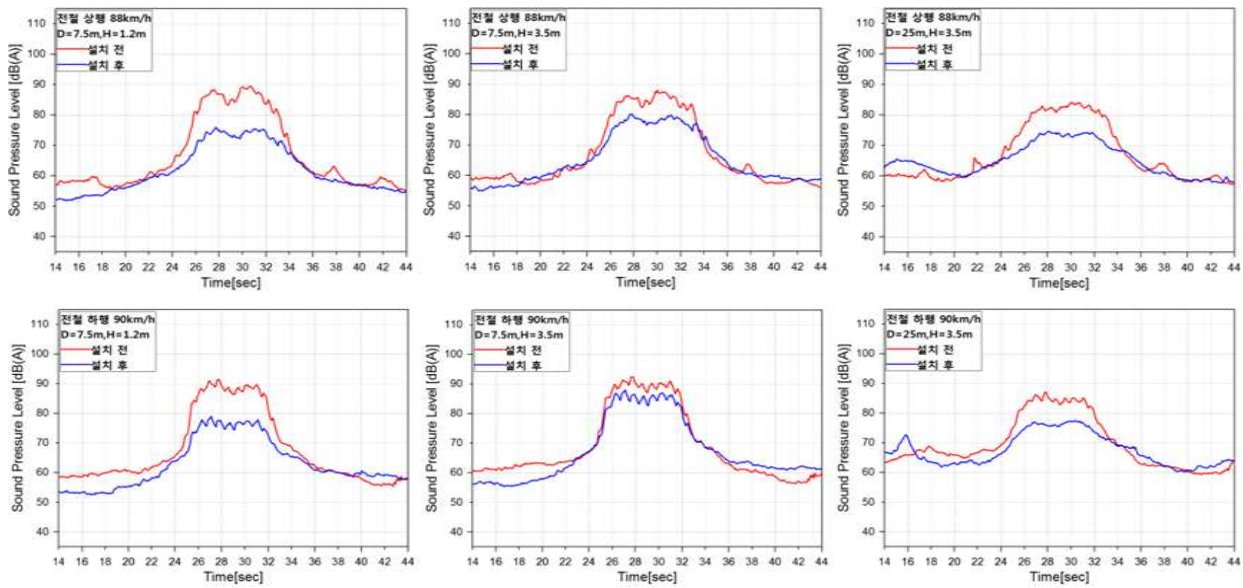
[그림 3.1.71] 경의중앙선 일산역 시범시공 레일근접 저상 방음장치

- **시제품 설치 전/후 선로변 소음저감 성능은 한국기계연구원에서 KS I ISO 3095:2014, KS I ISO 10847:2014 적용하여 공인시험 진행**
- **열차통과소음(LpAeqTp)은 측정위치별로 7~10 dB(A)저감**

[표 3.1.12] 선로변 공인시험 결과(성적서 번호 KIMM-17-0948)

선로 구분	속도	소음저감레벨(열차통과소음, L_{PAeqTp}, dB(A))		
		D=7.5m		D=25m
		H=1.2m	H=3.5m	H=3.5m
상행	82~88	10.4	5.6	8.0
하행	74~90	10.0	3.3	7.0

(※ 시공 전/후 동일속도 상행 및 하행 각 10대 이상씩 산술평균한 결과 측정/결과 발행기관 한국기계연구원)

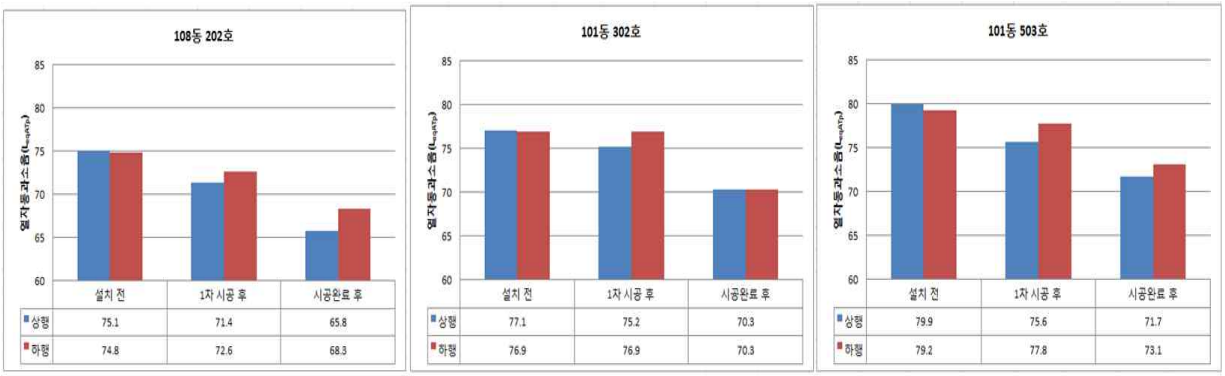


[그림 3.1.72] 상행 및 하행 최종 시제품 설치 전/후 측정위치별 시간이력 특성

- 민원지(일산 현대성우오스타) 소음저감 성능은 2층 및 3층 1지점, 5층 2지점에서 성능평가
- 1시간 등가소음(Leq1hr, 배경소음 포함/제외), 열차통과소음(LpAeqTp), 열차통과최대소음(LFAmax) 측정
- **열차통과소음(LpAeqTp)은 측정위치별로 6.7~9.3 dB(A)**, 열차통과최대소음(LFAmax) 6.3~9.5 dB(A) 저감
- 1시간 등가소음(Leq1hr, 배경소음 제외)은 5.7~7.7 dB(A) 저감



[그림 3.1.73] 민원지 소음측정 위치 및 측정 사진



[그림 3.1.74] 시공 단계별 소음저감성능 평가 결과

(5) 개발품 상용화

해당 현장은 호남고속철도 광주송정~고막원 제2공구 노반공사 방음벽 #36 공사와 관련하여 당초 흡음형 방음벽(H=5.0m, L=243m)의 설치가 계획 되어 있었으나, 계획된 방음벽을 설치하기 위한 공사용 가도를 내기 위해서는 정온시설 과수원의 수목 보상 문제 및 인접 가옥의 방음터널 설치 요구로 인하여 계획된 방음벽 공사가 지연되고 있었다.

레일 근접형 저상 방음장치(선로 근접 저상 방음벽)로 설계 변경하여 설치를 함으로서 공사비를 줄일 수 있어 경제적일 뿐만 아니라, 공장에서 제작이 완료된 방음벽을 현장에서 설치만 하면 종료되는 공법으로 18년 11월 한국철도시설공단 호남본부에서 설계변경 심의를 통과하여 본 현장에 개발품 237m를 판매하였다.



[그림 3.1.75] 호남고속철도 광주송정~고막원 개발품 적용 현황

(6) 최종목표 달성결과 요약

검증 내용	검증결과	수행기관
- 1차 시제품 방음판 음향성능 공인시험 • 투과손실 시험방법 KS F 2808:2011, 성능기준 500Hz 25dB, 1kHz 30dB • 흡음률 시험방법 KS F 2805:2014, 성능기준 NRC 0.7	- 500Hz: 34.8dB - 1kHz: 42.6dB - NRC: 0.95	대우건설 기술연구원
- 1차 시제품 방음판 하중변위(허용변위량, 영구잔류변위량, 내하중등급, 충격시험) 공인시험 • 시험방법 KS F 4770-1:2015, 성능기준 허용변위량 50mm 이하, 영구잔류변위량 7.92mm 이하 • 성능기준 내하중등급 5호 이상, 충격시험 이상없음	- 허용변위량: 10.5mm - 영구잔류변위량: 0.3mm - 내하중등급 : 1호 - 충격시험 : 이상없음	한국화학 시험연구원
- 1차 시제품 방음판 도막품질(광택도, 염수분무, 촉진내후성, 밀착성) 공인시험 • 시험방법 KS F 4770-2:2015, 성능기준 광탠고 40% 이하, 염수분무 이상없음 • 성능기준 촉진내후성 2.0 이하, 밀착성 이상없음	- 광택도: 29% - 염수분무시험:이상없음 - 촉진내후성: 0.7 - 밀착성: 이상없음	한국화학 시험연구원
- 1차 시제품 구조안전성 검토 • 적용 풍하중 70, 150, 300kg/m^{2}에 대하여 구조체가 부재 및 마감재의 자중과 풍하중에 대한 구조 안정성 확보여부 판단 및 안전한 기초 역할을 하는 콘크리트 매스 블록 설계 • 1차 시제품 설계 내역 풍하중에 대한 구조안전성 만족	- 이상없음	㈜이스트구조 사무소(건축구조기술사)
- 1차 시제품 현장시험 • 중앙선 석불역 구내 하선 100m 시험시공 • 설치 및 미설치 구간 KS I ISO 3095:2014 적용 D=7.5m, H=1.2, 3.5, 5.0m, D=15m, H=1.2, 3.5, 7.0m. D=25m, H=1.2, 3.5m 동시 소음측정, 차종별 및 위치별 저감성능 평가 • KS ISO 3095:2014의 평가 위치인 D=7.5m, H=1.2, 3.5, D=25m, H=3.5m 5.3~12.6dB(A) 저감성능 확인	- 무궁화: 6.0~13.1dB(A) - 화물전기: 3.4~9.5dB(A) - ITX새마을:6.0~12.7dB(A)	연구단 자체평가
- 2차 시제품 구조안전성 검토 • 시공성, 제품 중량을 개선한 2차 시제품 100kg/m^2(내륙지역 풍하중 70kg/m^2+열차풍 30kg/m^2) 적용시 구조안전성 검토, 2차 시제품 설계 내역 풍하중에 대한 구조안전성 만족	- 이상없음	㈜이스트구조 사무소(건축구조기술사)
- 2차 시제품 현장시험 • 경의중앙선 일산역~풍산역 철도소음 민원구간 상선 268m 시공 • 설치 전/후 KS I ISO 3095:2014, KS I ISO 10847:2014 적용 D=7.5m, H=1.2, 3.5m, D=25m, H=3.5m 동일 속도 열차 소음측정 저감성능 평가 공인시험	- D=7.5m, H=1.2m: 10.4dB(A) - D=7.5m, H=3.5m: 5.6dB(A) - D=25m, H=3.5m: 8.0dB(A)	한국기계 연구원
- 연구중 상용화 • 5dB(A) 이상의 소음저감성능, 구조안전성, 시공용이성, 유지보수, 대피공간 확보가 검증되어 호남고속철도 광주송정~고막원 2공구에 237m 판매하여 19년 1월 시공 및 준공 완료		

바. 운행선 급속교체 가능한 강교량 저소음 궤도구조 개발

(1) 현장부설용 저소음상판궤도 제작 및 시공

(가) 최종성과물 개요



저소음 궤도



저소음 궤도



크레인의 의한 저소음 궤도 시공



철도교에 결합된 저소음 궤도

[그림 3.1.76] 최종성과물

(나) 정의

운행선 상 기존 무도상 강교량의 침목을 제거 후 급속시공으로 설치되어 기존 강교량을 유도상화 함으로써 소음•진동을 획기적으로 저감시킬 수 있는 철도교용 저소음상판(궤도), 자중이 최소화된 프리캐스트 슬래브 궤도 결합식 구조



기존 무도상 강교량



유도상화 한 강교량(국내)

[그림 3.1.77] 기존 무도상 및 유도상화 교량

(다) 주요기능

- 무도상 강교량 대비 소음을 7dB(A)이상 저감
- 하부구조 단면 손상 없는 상판궤도결합구조
- 시공 중 차량운행 가능

- 철도교 충격진동 안전내구성 확보 위한 Steel Frame = RC 구조



[그림 3.1.78] 저소음 강교량 궤도시스템 소음진동 저감 원리

(라) 시공순서



(2) 연구내용

(가) 1차년도 : 철도교량용 재료개발 및 소음저감목표치를 고려한 운행선 교체용 연속지지궤도상판 기본설계

- 철도교량용 Polycork 및 레일패드 개발 및 시험체 제작
- 소음저감 목표치 7dB(A)를 고려한 운행선 교체용 연속지지궤도 상판(체결부 및 도상)기본해석 및 설계



<시편시험 7mm변형(경도 50)>



<시편제작 7mm변형(경도 63)>

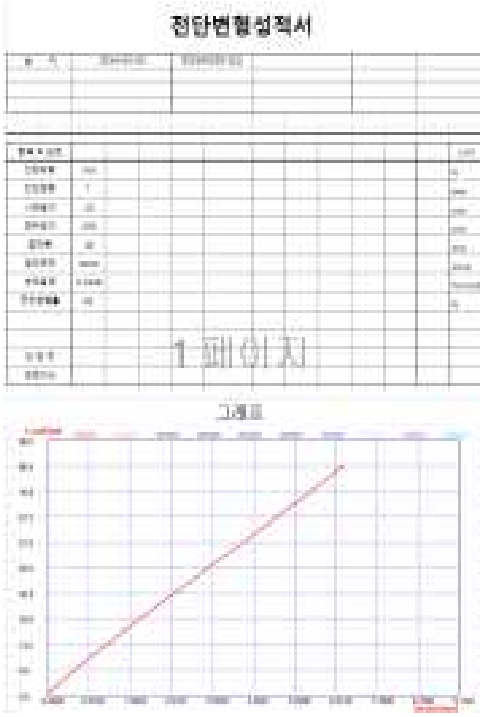


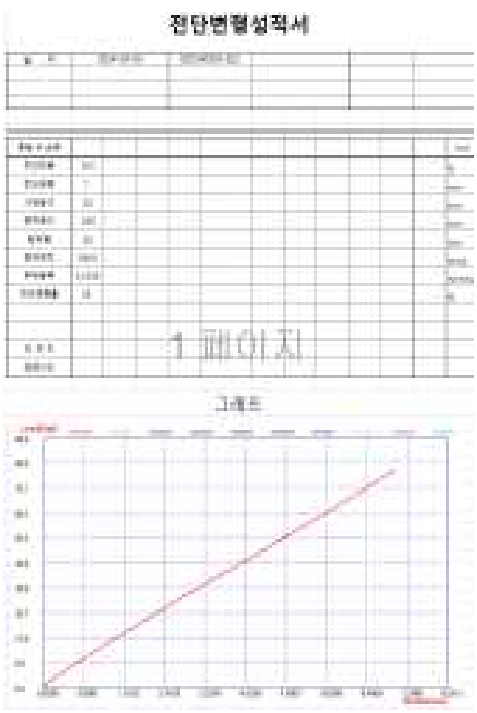
a. 시험체 설치-정면



b. 시험체 설치-측면

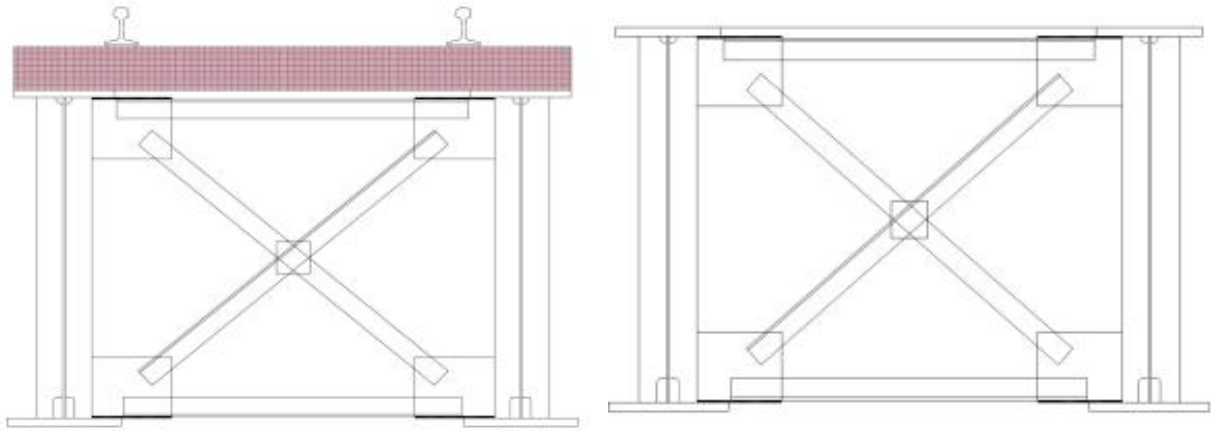
[그림 3.1.79] 철도교량용 Polycork 및 레일패드 개발 및 시험체 시험사진



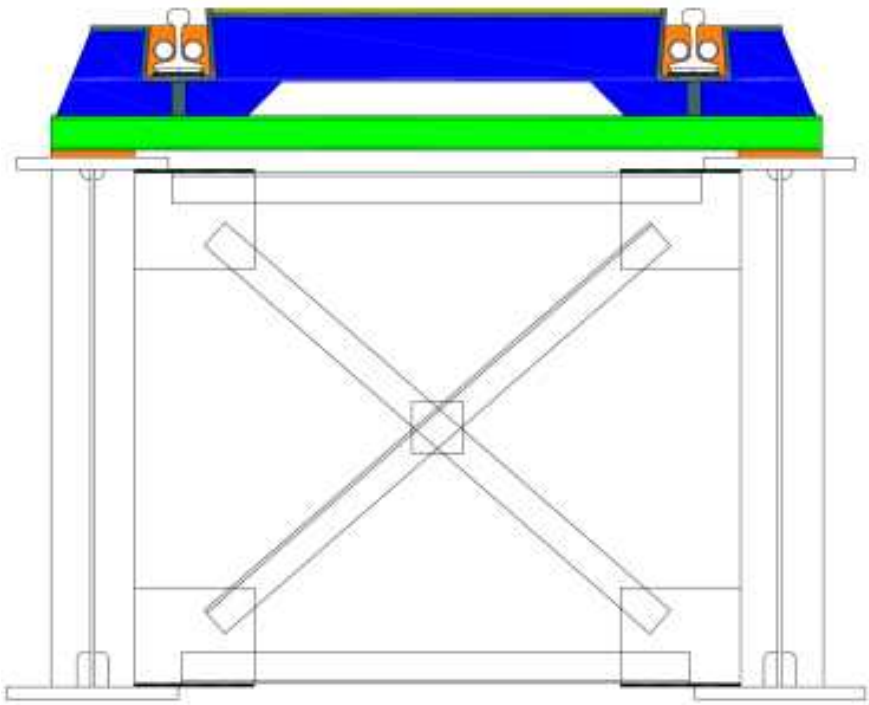


[그림 3.1.80] 종방향 강성 시험 : 하중-변위 곡선

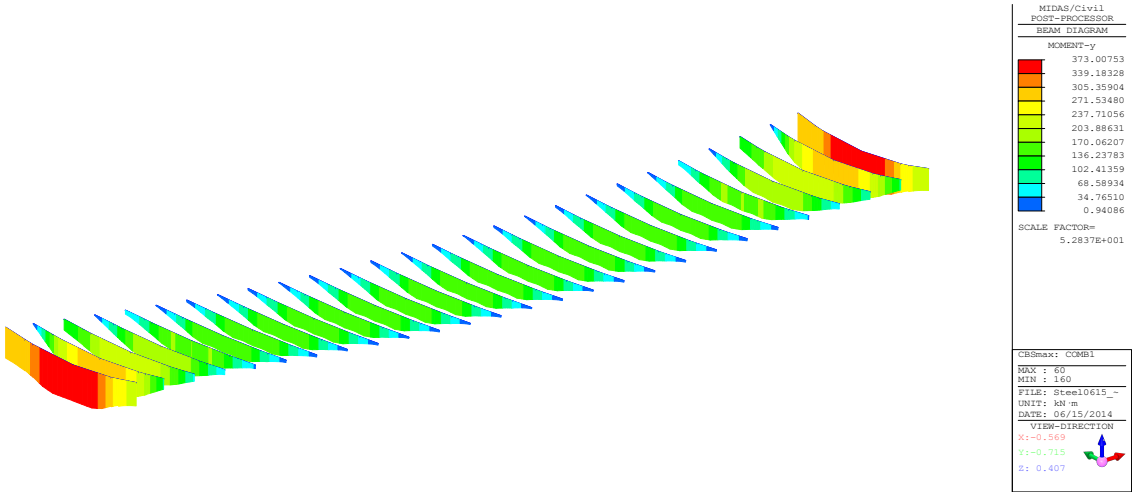
<기존 판형교량에 적용한 다목적 저소음상판요소>



기존 판형구조를 그대로 사용하는 것으로 하중 증가와 연결부 등의 파손 등은 부분적으로 보강을 수행한 후에 저소음상판으로 교체한다. Polycork에 의한 레일의 견고한 고정 및 저소음상판과 판형구조와의 연결부에 삽입된 댐핑패드에 의한 저진동화로 기존교량 대비 7dB이상의 소음저감효과를 얻을 수 있다.



기존 판형교 거더와 결합된 강재도상을 가진 다목적 저소음상판요소
(도상두께 348mm)



[그림 3.1.81] 종방향 강성 시험 : 하중-변위 곡선휨 모멘트도

(나) 2차년도 : 철도교량용 저소음상판 요소 검증 시험 및 상세설계

- Polycork 체결장치가 결합된 저소음상판 요소개발 및 검증 시험
- 저소음상판 상세설계 및 시공 중 차량운행을 위한 레일임시고정구조 개발

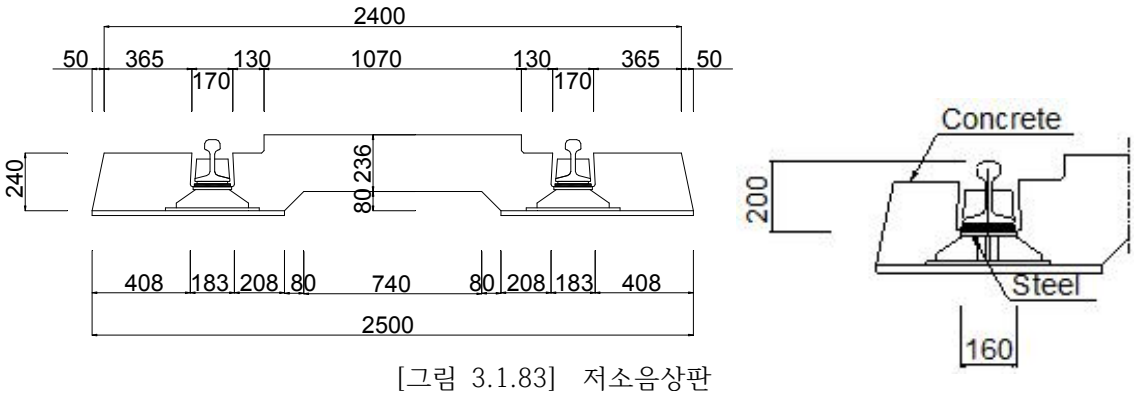


[그림 3.1.82] 철도교량용 저소음상판 요소 검증 시험 계측장비 설치상황

[표 3.1.13] 실험측정결과표

구 분	2Pv (kN)	레일 수평 변위(mm)		슬래브 수평 변위 (mm)		비 고
		LH1	RH1	LH2	RH2	
하중-변위	192	10.28	13.98	0.11	0.01	레일고정용 합성수지 탈착
	230	35.13	57.27	0.17	0.55	좌측 콘크리트 슬래브 균열 발생
	290	46.49	64.09	1.105	1.015	좌측 콘크리트 슬래브 파괴
	358	76.05	67.59	17.96	3.17	우측 콘크리트 슬래브 파괴

※ 2Pv는 엑츄에이터에서 측정된 하중 값을 나타냄.



[그림 3.1.83] 저소음상판

(다) 3차년도 : 실내구조시험 및 급속시공법 개발

- 실내구조시험용 실물시험체 제작 및 구조시험
- 성능검증을 위한 실물시험체 제작 및 조립성능시험
- 철도시설성능검증 수행
- 전용장비를 이용한 운행선 급속시공법 개발



[그림 3.1.84] 실내구조시험용 실물시험체 제작사진

[구조정적시험]

■ 시험개요

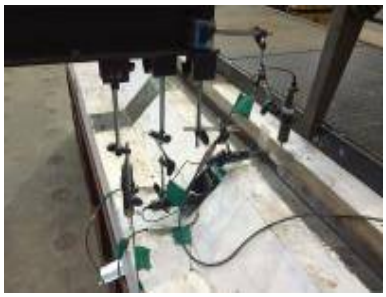
[표 3.1.14] 구조정적시험 조건

구 분	내 용
목 적	구조물 파괴시 안전성 검토
실험방법	실험은 변위제어방식으로 하중을 도입하였으며, 하중속도는 실험초기 2mm/min에서 시작하였으며, 하중이 설계 축하중인 220kN을 초과한 이후 하중속도를 점진적으로 증가시켜가며 실험을 수행
최대작용하중	800kN 수직하중

■ 시험체 세팅도 및 시험사진



<시험체 세팅>



<레일 및 슬래브 처짐 계측>



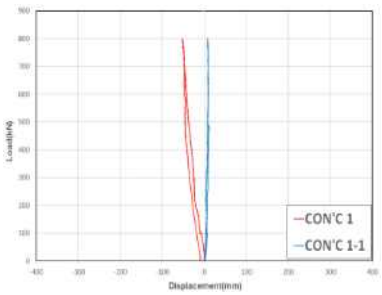
<가로빔 처짐계측>

[그림 3.1.85] 시험체 세팅 사진

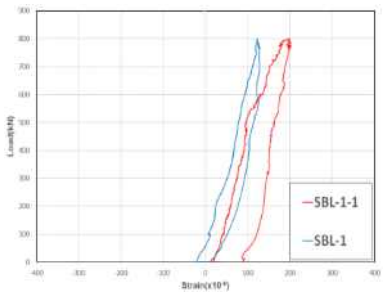
■ 시험결과



<최종파괴상황-800kN재하시>



<하중-변위도 (Con'c 수평)>



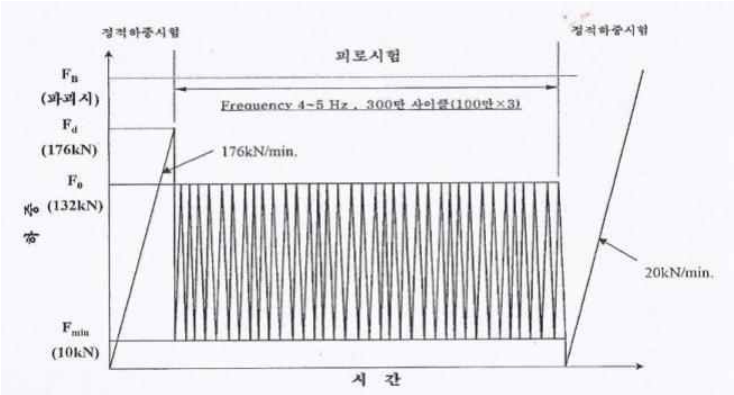
<하중-신장도 (철근하부)>

[그림 3.1.86] 구조정적시험 시험결과

[조합성능시험(반복하중시험)]

■ 시험개요

[표 3.1.15] 시험 개요

구 분	내 용
목 적	저소음상판궤도의 피로내구성능을 확인하여 적용안전성을 확보함
실험방법	피로시험 전 분당 P=176kN 하중까지 정적하중을 재하한 후 3Hz, 132kN의 하중을 300만 사이클의 반복 하중을 재하 함. 여기서, 정적 최고하중은 충격계수 1.6으로 하고, 설계축중은 일반철도 설계축중인 220kN으로 높일 때의 윤중 176kN 이며, 피로시험하중은 동일한 조건에서 충격 계수를 1.2로 적용할 때의 윤중 132kN. 한 대의 Actuator를 이용하여 두 개 레일에 각각의 윤중을 재하하므로, 엑츄에이터에서 도입되는 하중은 제시된 윤하중의 2배가 됨. 이에 따라 실험에서는 피로실험 전 재하되는 정적하중 352kN과 반복하중 264kN을 Actuator로 가력하여 실험을 수행함.
피로시험 하중 재하선도	

■ 시험체 세팅도 및 시험사진



<시험체 세팅> <하부고정장치설치> <가력지그설치>

[그림 3.1.87] 조합성능시험(반복하중시험) 시험 세팅도

■ 공인기관시험성적서(한국산업기술시험원, KTL, 2016)



[그림 3.1.88] 공인기관시험성적서

[진동응답 측정 및 방사소음 소음 저감성능 평가]

가) 성능확인방법: 실물크기의 판형교 하부거더를 제작 무도상판형교와 저소음상판궤도를 각각 결합한 상태에서 제3의 측정기관에 의뢰 속도진동성분을 측정하고 측정데이타를 이용 방사소음해석을 통하여 소음저감성능을 확인하였다.

나) 수행기관: ㈜IDS테크놀러지(소음진동기술사 사무소, 측정대행업)

다) 수행일시: 2018년 6월 18일 ~2018년 6월 22일

라) 검토결과: 평균 7.7dB(A)저감확인

① 진동측정

측정 방법은 sine sweep 주파수(30~500Hz) 가진을 통한 방법과 tapping machine 가진을 통한 측정 방법이다. 사용된 가진 장비는 Table 1과 같다.

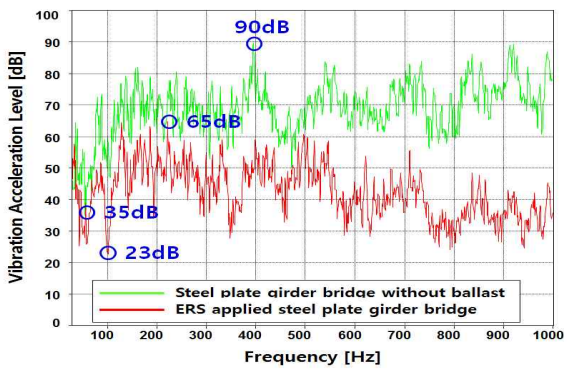
Sine sweep 주파수 가진의 목적은 동일한 sine sweep 주파수의 가진을 통한 두 교량의 거동을 비교하기 위함이며, 실험시에는 EMAI 주파수 shaker가 사용되었다. 가진시에는 30Hz부터 500Hz까지 일정하게 주파수를 증가시키면서, 주파수 대역 당 동일한 힘으로 레일 상부를 가진하였다. Fig. 3은 sine sweep 주파수 가진기를 이용한 측정 모습을 나타내며 측정하고자 하는 센서의 종류와 부착위치는 두 교량 모두 동일하고 상세 내용은 Fig. 4 및 Table 3과 같다.

Tapping machine 가진 실험에는 Type 3204의 tapping machine이 사용되었다. 이 충격발생기는 수직방향으로 레일 상부를 가진하며, 500g의 hammer가 40mm 높이에서 낙하하

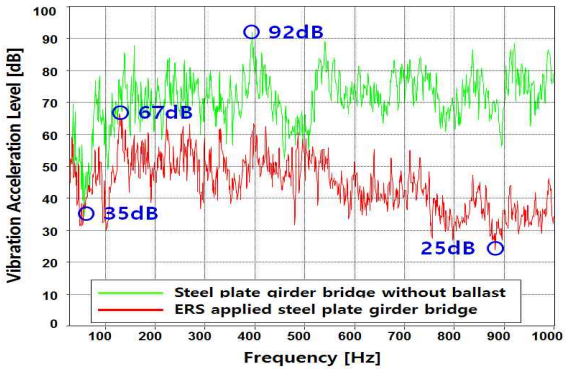
여 1초간 10회 충격을 발생시켰다. 측정하고자 하는 센서의 부착위치와 종류는 sine sweep 주파수 가진 실험과 동일



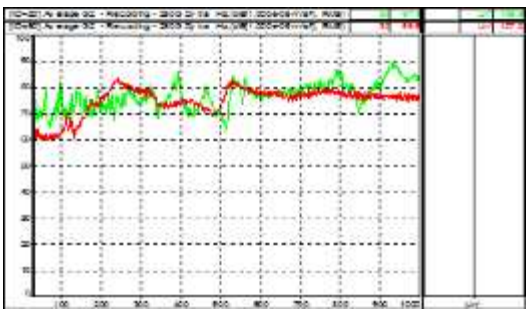
[그림 3.1.89] 각 시스템의 FRF(주파수응답함수) 측정모습



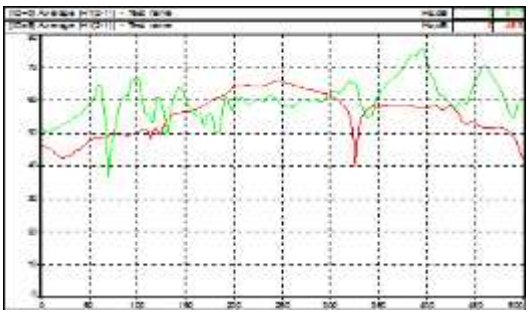
ch5



ch7



Tapping machine 가진 측정 데이터

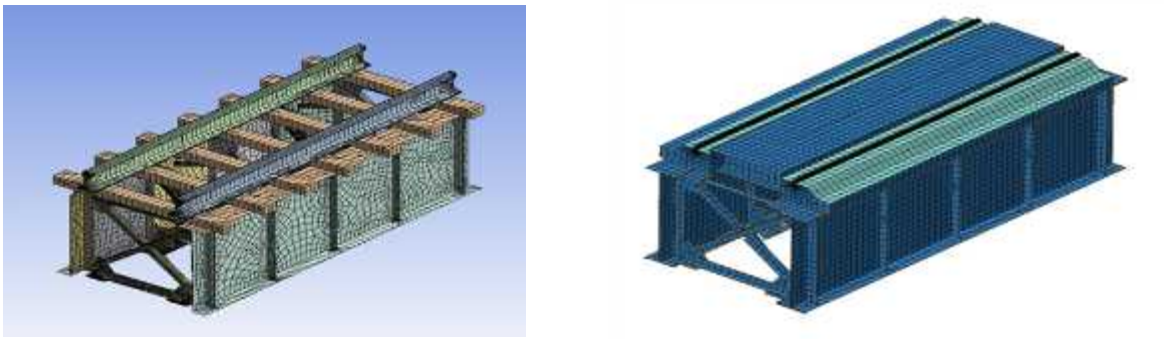


FRF 측정 데이터

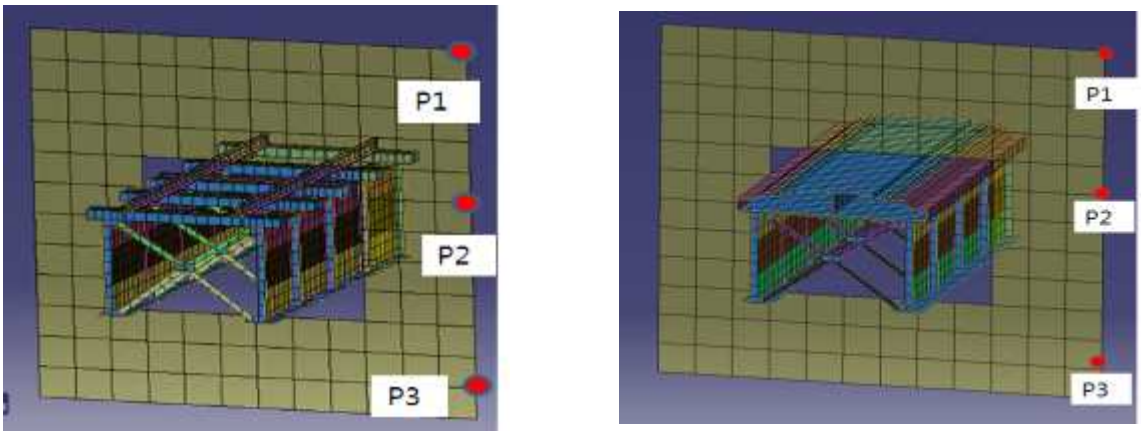
[그림 3.1.90] 진동응답 측정 결과

② 방사소음해석

방사소음해석에서는 앞서 진동실험에 사용된 길이 5m의 무도상 판형교와 레일매립궤도가 적용된 판형교를 대상으로 했으며 사용한 해석 프로그램은 Simens Virtual Lab Ver. 13.7이고 BEM 모듈을 사용하였다. 기 수행된 진동실험 중 sine sweep 주파수 가진에 의해 측정된 진동데이터를 BEM(Boundary element method) 해석모델의 경계조건으로 입력하여 해석을 수행하였다.



[그림 3.1.91] 저소음상판 ERS 방진시스템 판형교 해석 모델



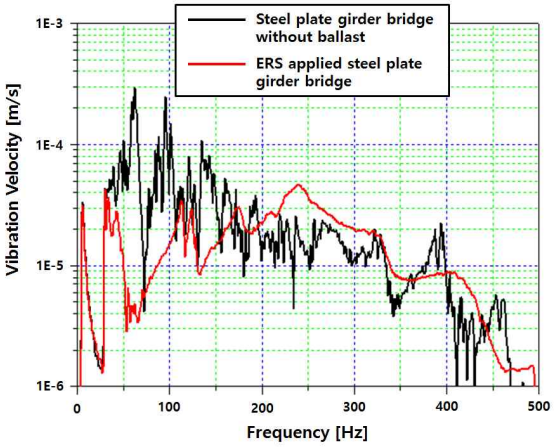
[그림 3.1.92] 방사소음 평가 위치 모델링(Field Point)

위치	침목형 판형교	저소음궤도적용 판형교	소음 감소량 [dB]	평균 소음 감쇠량 [dB]
P1	62.7	53.4	9.3	평균 : 9.7 dB 감소함.
P2	65.2	52.7	12.5	
P3	64.3	56.9	7.4	

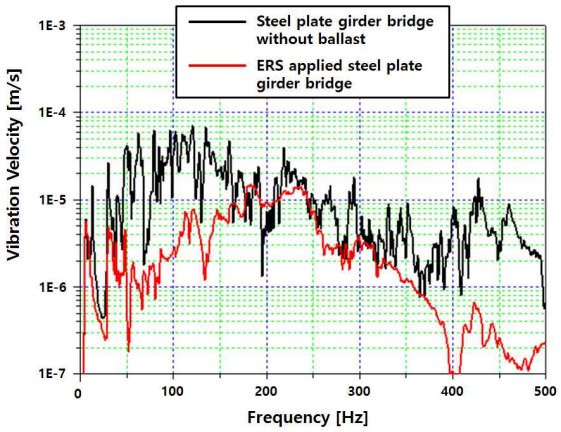
[그림 3.1.93] 진동응답 측정 결과를 이용한 방사소음 해석 결과

- 판형교의 복부에서 발생하는 수평 가속도는 레일매립궤도의 감쇠특성과 방진특성이 반영되어 레일매립궤도를 적용한 판형교의 진동가속도 레벨이 sine sweep 주파수 가진의 경우 평균적으로 15.0dB이 감소되고 tapping machine 가진의 경우에는 평균적으로 18.8dB이 감소되는 것으로 나타났다.

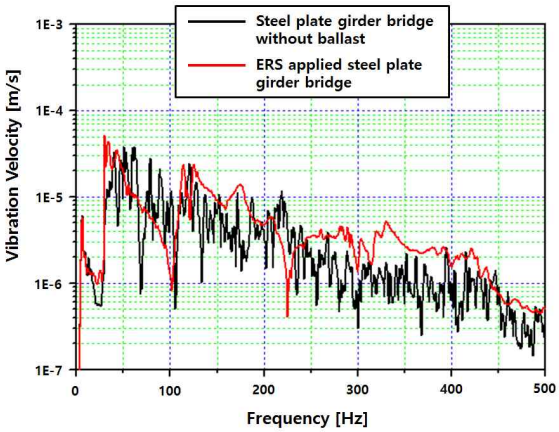
- 방사소음해석 결과, 레일면 상부(P1)에서는 레일매립궤도를 적용한 판형교가 무도상 판형교 보다 방사소음이 8dB(A) 감소하였고, 교량의 측면부(P2)에서는 6dB(A) 감소하였다. 또한, 교량의 하부(P3)에서는 9dB(A) 낮게 해석결과가 나왔다. 즉, 평균 7.7dB(A)가 감소되는 것으로 나타났다.
- 레일매립궤도를 적용한 판형교의 경우, 이것이 가진 감쇠 및 방진특성으로 외부하중에 의한 진동을 흡수하여 얇은 박판의 판형교 부재에서는 진동이 작게 발생하였고 진동에 의해 발생하는 방사소음도 작게 발생하였다. 따라서 향후 무도상 판형교의 유도상화에 레일매립궤도를 적용하면 진동과 소음에 유리할 것으로 판단된다.



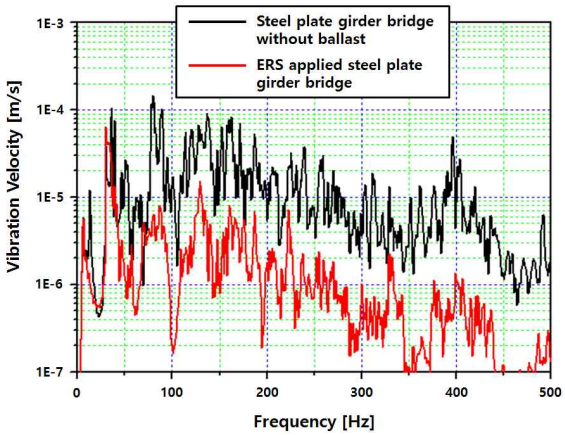
(a) Ch02



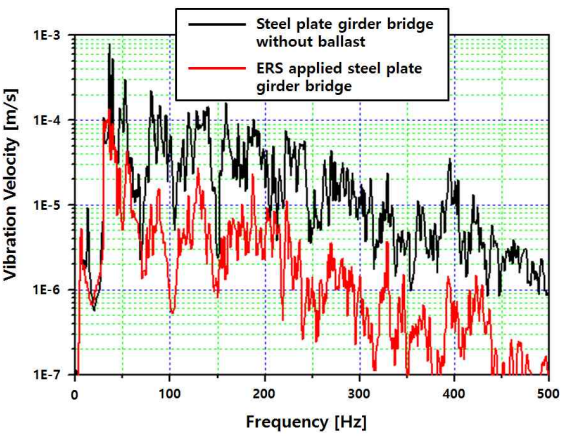
(b) Ch03



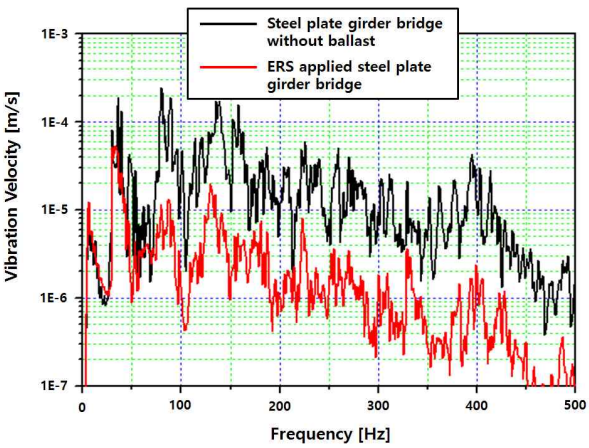
(c) Ch04



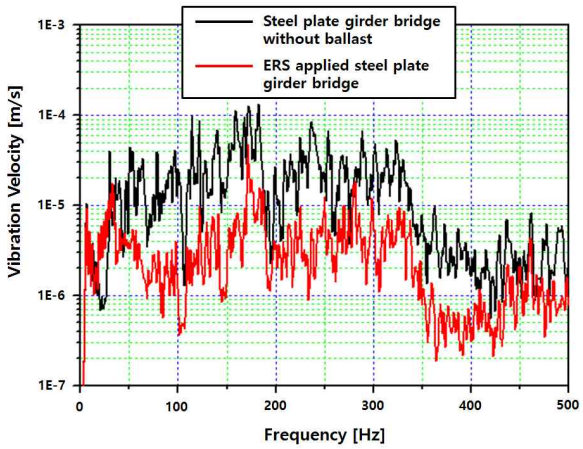
(d) Ch05



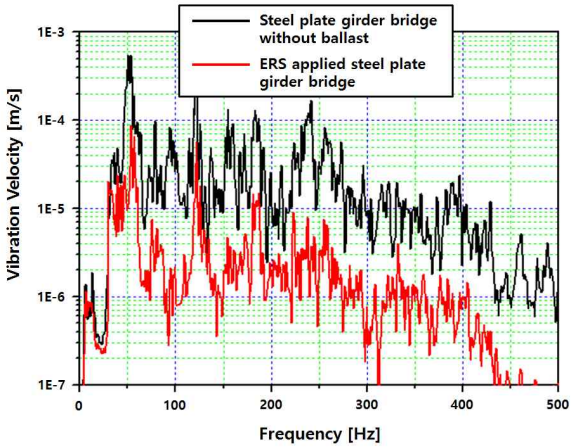
(e) Ch06



(f) Ch07



(g) Ch08

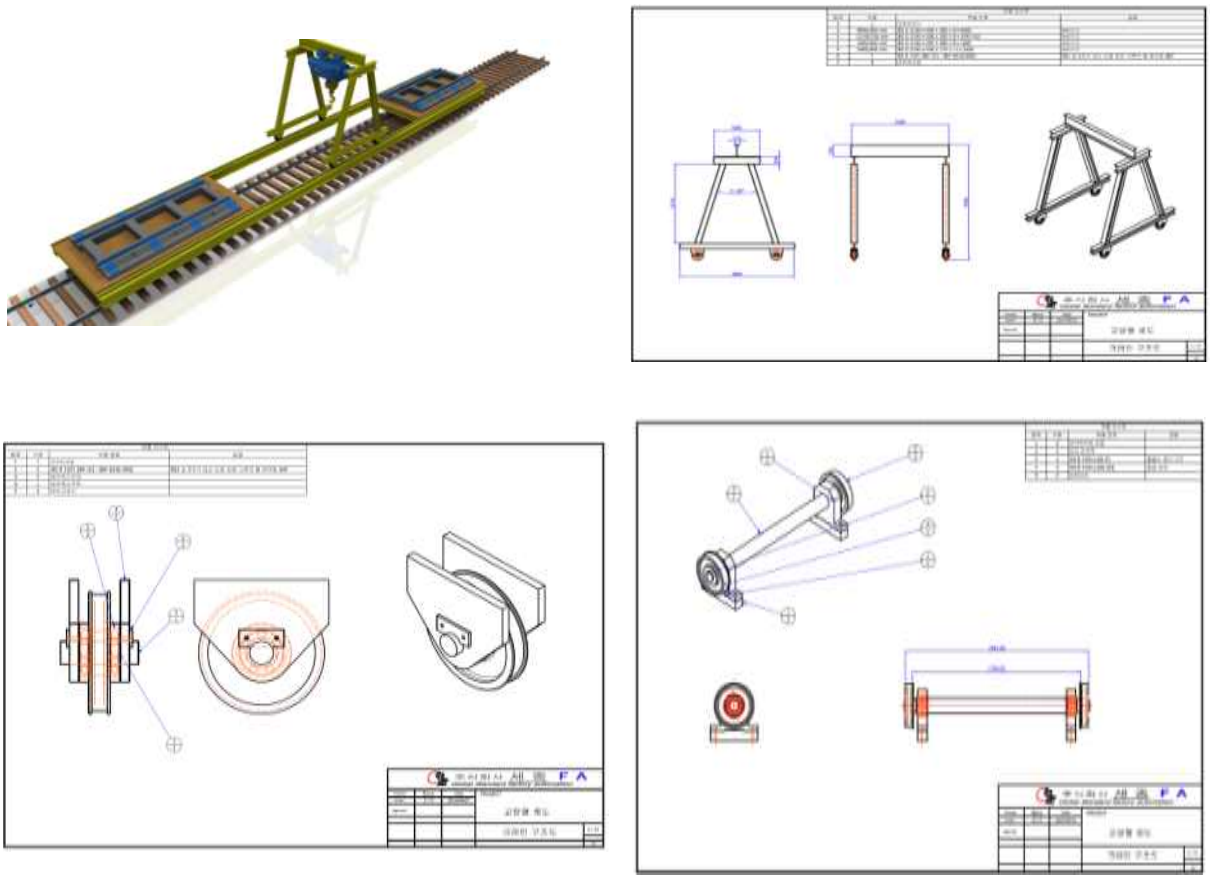


(h) Ch09

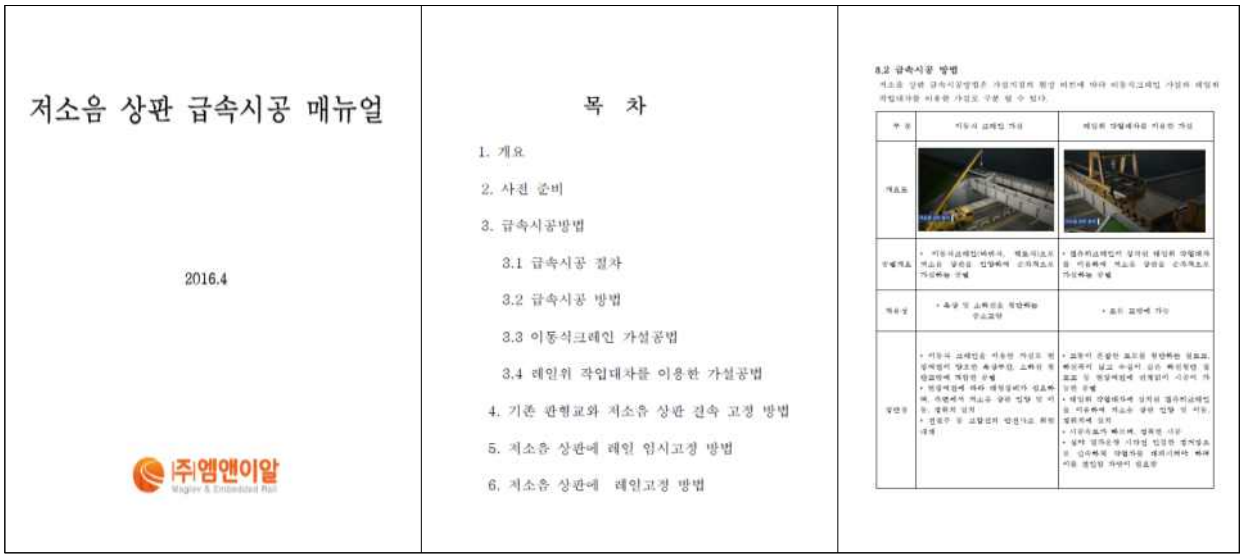
[그림 3.1.94] Vibration velocity measurement data obtained from radiated noise analysis

[급속시공법 개발]

■ 제작도면



[그림 3.1.95] 제작 도면



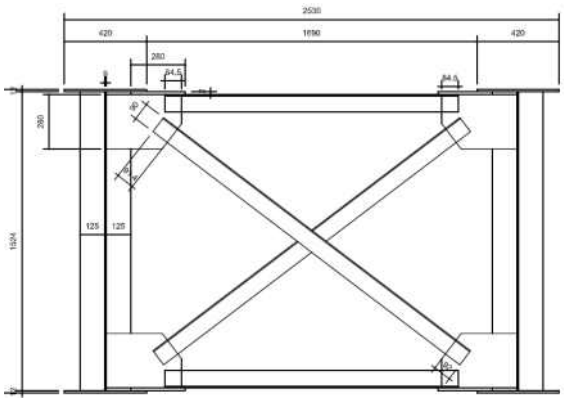
[그림 3.1.96] 운행선 급속시공법 매뉴얼

(라) 4차년도 : 결합시험용 저소음상판제작 및 결합시공성 검증

- 저소음상판 결합시공시험을 위한 하부구조체 제작
- 저소음상판 제작 및 전기저항시험
- 저소음상판 결합시험시공
- 신속하고 안정적 결합이 가능한 상판 결합구조개발
- 장대레일 적용성 검토를 위한 레일-교량 상호작용해석



[저소음상판 결합시공시험을 위한 실물하부구조체 제작
SS400강재, 연장 12m=6m*2기]



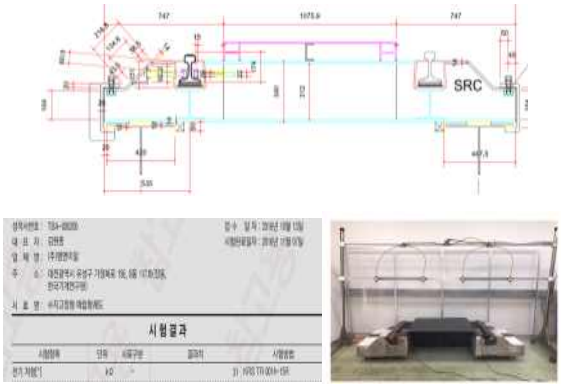
[폭 2530mm, 높이 1548mm]

[그림 3.1.97] 운행선 급속시공법 매뉴얼저소음 상판

■ 대표성과: 저소음상판 제작



[저소음상판 결합시공시험을 위한 실물하부구조체 제작 SS400강재, 연장 12m=6m*2기]



[폭2570mm, 높이340mm, 전기저항 31kΩ(기준13kΩ이상)]

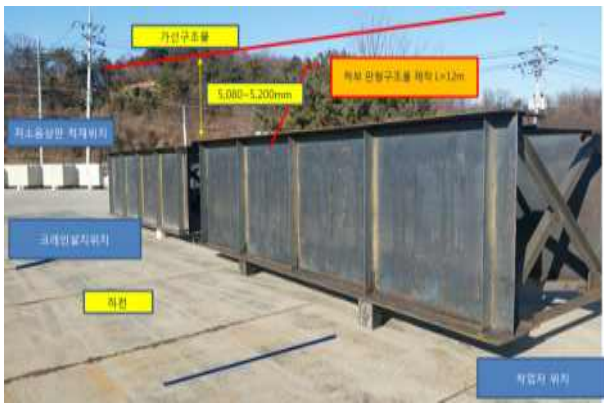
[그림 3.1.98] 운행선 급속시공법 매뉴얼저소음상판 제작

■ 시험결과

[표 3.1.15] 시험결과표

구 분	최대 작용 횡하중(1지점)	<	저소음상판 고정장치 저항력
작용력	72.05kN		71kN×4개소=284kN
판정	OK		

■ 저소음상판 결합시험시공

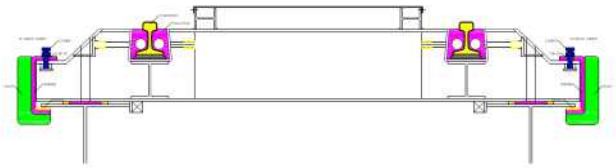


하부구조 및 시험현장



저소음상판

[그림 3.1.99] 하부구조 시험현장 및 저소음 상판

세부내용	상황전경	비고
저소음상판고정블럭을 고정위치에 배치한 후 임팩으로 볼트 고정	 	– 시공시간 : 20분=20개소 *1분/12m

(마) 5차년도 : 저소음궤도 현장시험부설 및 현장적용을 위한 다경간 교량 적용성 및 레일좌굴대책 검토

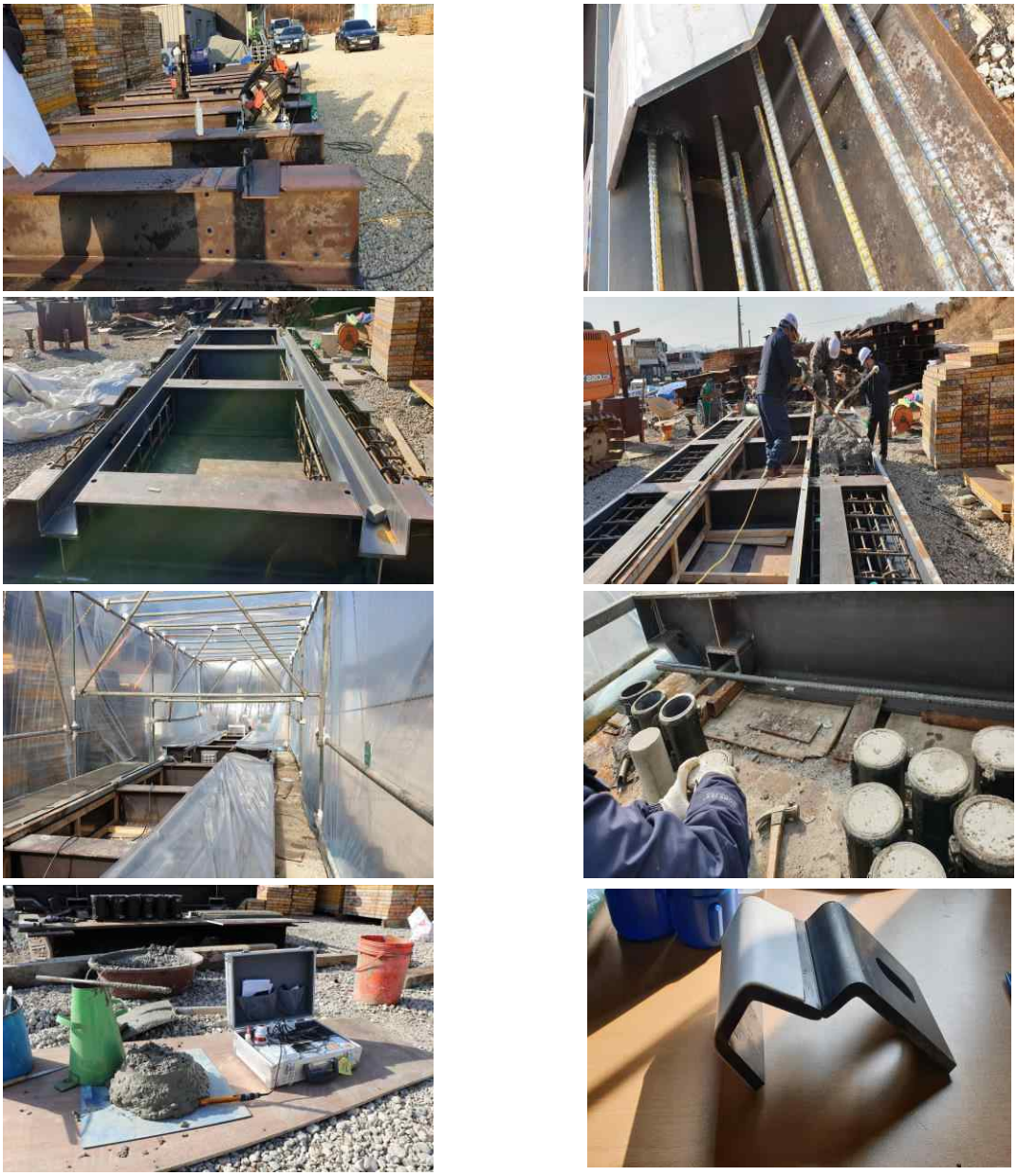
– 현장구조물측량 및 저소음상판제작

– 현장시공시방서작성 및 저소음상판 현장시공(지제천교)

– 소음 및 구조성능평가

– 저소음상판궤도 다경간 교량적용 공법제시

– 저소음상판궤도 레일좌굴방지 및 사용성 확보 대책



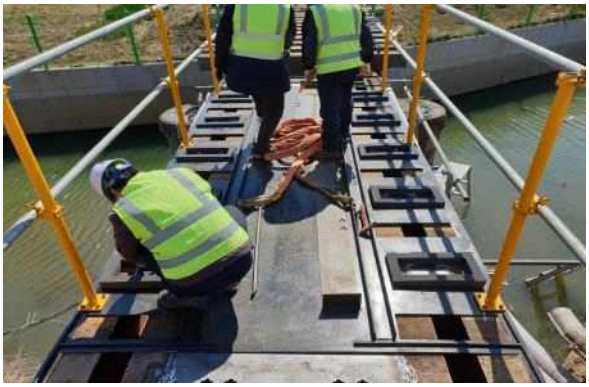
[그림 3.1.100] 운행선 급속시공법 매뉴얼지제천교 소음개선 공사 제작 사진 1



[그림 3.1.101]　운행선 급속시공법 매뉴얼지제천교 소음개선 공사 제작 사진 2



<제1경간 침목 및 레일제거>



<제1경간 작업대설치 및 탄성층 수지막이설치>



<제1경간 작업대 제거>



<제1경간 저소음상판설치>



<제1경간 저소음상판설치 전경>



<제2경간 침목 및 레일제거>



<제2경간 작업대설치 및 탄성층 수지막이설치>



<제2경간 저소음상판설치>

[그림 3.1.102] 운행선 급속시공법 매뉴얼지제천교 소음개선 공사 제작 사진 3



<부설 전 센서설치>



<부설 전 현차주행시험>



<부설 후 레일가고정>



<부설 후 레일가고정 현차주행시험>



<레일고정수지타설 전경>



<부설 후 수지경도측정>



<레일고정수지고정 후 센서 설치>



<레일고정수지고정 후 현차시험>

[그림 3.1.103] 운행선 급속시공법 매뉴얼지제천교 현차운행 사진

<저소음상판궤도 레일좌굴방지 및 사용성 확보 대책 연구>

(1) 현장부설 시 시공성 확인을 위한 목업제작

(2) 저소음상판과 판형교 결합거동 정적 사용성 검토 및 장대레일시공 매뉴얼 작성

(3) 저소음상판궤도 운행선상 시공을 위한 레일가고정 장치제작 및 구조시험

(4) 저소음상판궤도의 무신축이음매 장대레일화를 위한 ERS Sliding System 시험체 제작 및 시험



<목업제작전경>



<저소음상판궤도 목업(실물사진)>

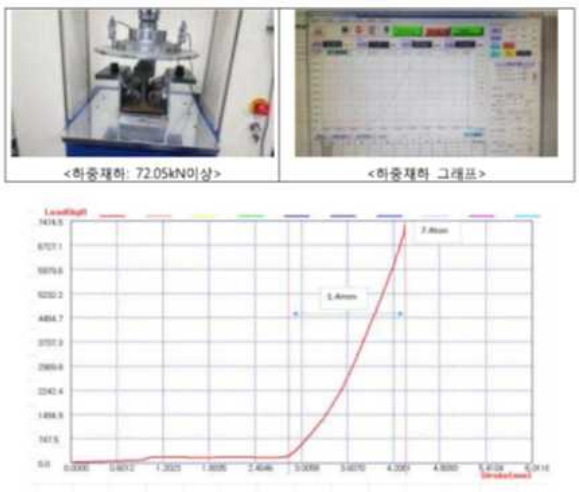


<저소음상판궤도+하부구조 목업>

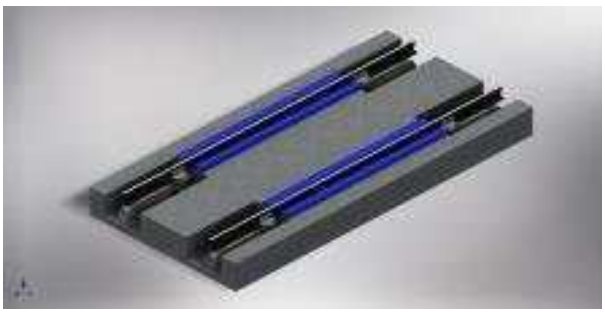


<저소음상판궤도+하부구조 목업>

[그림 3.1.104] 운행선 급속시공법 매뉴얼지제천교 소음개선 공사 제작 사진 2목업 진행 사진



[그림 3.1.105] 레일가고정장치 구조시험



<저소음상판궤도 ERS Sliding System 3D이미지>



<Rail STU(Shock Transmission Unit) 3D이미지>

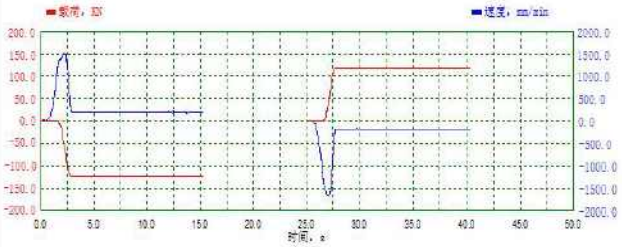
GSTU100×100홈레전달장치보고서 보고서번호 : A1MS2018-006
Test report of GSTU100×100 Report number : A1MS2018-006

측정보고서

Test Report

GSTU100×100 Testing of mechanical properties

number	Detection project	Company	Performance requirement	Measurements	Deviation	Conclusion
18035004#	Pull Rated load	KN	100	107	7%	Qualified
	Press Rated load	KN	100	97	-3%	Qualified
	Trip	mm	±50	±51.2	2.4%	Qualified
	Pull Locking speed	mm/s	25	25.8	3.2%	Qualified
	Press Locking speed	mm/s	25	24.7	1.2%	Qualified



[그림 3.1.106] 레일가고정장치 구조시험

(3) 한국철도시설공단 궤도성능검증

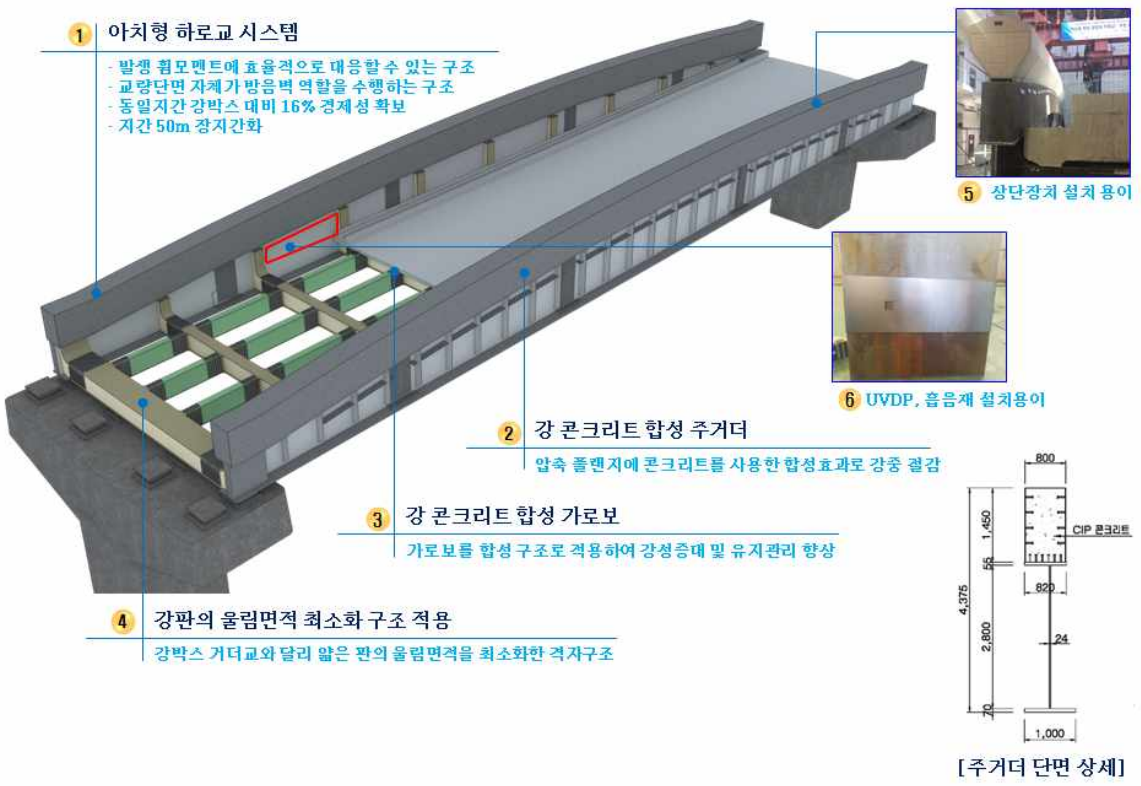
(가) 성능검증 기간 : 2017. 7. 31~ 2019. 7.31

검증단계	심의 일시	심의결과	검증기관
기술요건적합성	2017.12.15	재심의	한국철도시설공단
	2018.03.29	조건부 적합	
조립시험계획 적합성 및 현장시험필요	2018.07.13	조건부 적합	
	2018.10.15	적합	
현장부설시험계획심의 및 적합판정	2019.1.31	조건부 적합	
현장부설시험 협의완료	2019.02.19	현장설치 시행 알림	한구철도공사
현장부설 및 사전측정	2019.04.01.- 04.22	조건부 적합	KTL

사. 저소음 성능이 우수한 철도교량 단면 및 방진재료 철도교량 적용기술 개발

(1) 신설용 저소음 철도교량 시공법 및 유지관리 방안 정립, 경제성 분석

(가) 최종성과물 개요 (저소음 장지간 강합성 하로교)



[그림 3.1.107] 저소음 장지간 강합성 하로교

① 정의

- 저소음 장지간 강합성 하로교 공법은 아치 형상 강거더의 상부플렌지에 콘크리트를 충전하여 강성을 증가시킴으로써 경간을 증대시키고 외측거더가 방음벽의 역할을 겸하는 강합성 하로교 공법임

② 주요기능

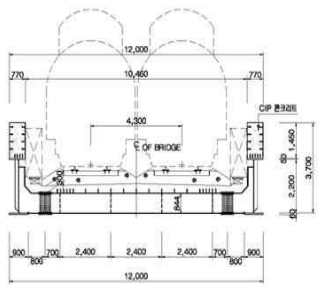
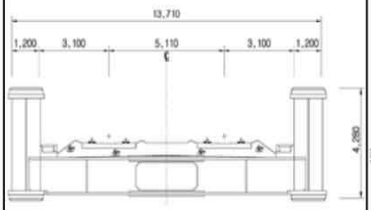
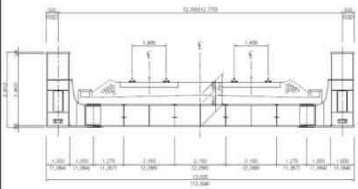
- 50m급 이상의 교량에도 적용이 가능하며 기존 강박스 거더교 대비 다리밑 공간 확보에 유리하고, 공명현상에 의한 소음이 발생하지 않으며, 주거더가 방음벽의 역할을 겸할 수 있어 별도의 방음벽 공사비를 절감 가능함
- 저소음 복합 강합성 하로 철도교는 기존 하로 판형교와 기본적으로는 유사한 형태를 띠고 있으며, 주 거더 상부에 아치형상으로 콘크리트를 타설하여 합성시킴으로써 강성을 증대시키고 보강재를 줄이는 효과가 있으며 면외좌굴에 대한 저항성을 높이고 교량의 동특성을 향상시키는 효과가 있음. 또, 콘크리트부재의 아치효과로 구조적 효율성을 증대시키는 단면이 되도록 하였음. 받침이 설치되는 지점부 가로보는 박스형상으로 되어있고 내부에는 콘크리트를 충진하여 구조적 안전성을 증대시켰음. 또한 거더 상부의 콘크리트와 지점부 가로보 사이에는 보강재를 추가로 배치하고 콘크리트를 충진하여 중앙부의 하중이 지점부로 원활히 전달될 수 있도록 하였음
- 시공성을 높이기 위해 강재 거더의 높이를 운반이 용이한 크기로 계획하고, 현장으로 운반하여 조립 및 거치를 한 후 상부플랜지 상부에 콘크리트를 합성시킴으로써 필요한 강성

을 확보하는 것으로 계획하였음. 일반적인 강교와 동일하게 현장여건에 따라 거더 일괄가설, 가벤트 적용, 대블럭가설 등 모든 방법이 가능하므로 현장적용성이 뛰어남

③ 저소음 장지간 강합성 하로교와 기존 하로교의 비교

- 철도의 고속화 및 수송력 증대로 인하여 철도연변에 주거하는 주민에 대한 소음/진동 공해는 커다란 사회문제로 대두되고 있음. 특히 도심지 근처의 기존 강교량(판형교, 강박스거더교 등)에서 발생하는 소음/진동 공해는 심각한 상황으로 민원의 대상이 되고 있음. 강교량에서 소음 발생은 두 가지 주요 원인으로 발생함. 첫 번째로 열차주행에 따른 방사소음이 주요 원인이며, 두 번째로는 판형교 또는 강박스거더교와 같이 얇은 박판으로 교량 단면이 구성되는 경우 열차주행에 따라 발생되는 진동에 의해 얇은 박판의 떨림에 의해 발생하는 구조기인 소음(Structural borne noise)이 주요 소음발생 원인임
- 이러한 이유로 철도교량의 신설에 있어 강교량의 적용을 꺼려하지만 도심지 구간에서 교차로 통과 구간 등 지간이 긴 구간에서는 부득이하게 강박스교량이 적용 될 수밖에 없는 실정임. 따라서 강박스교량을 대체할 수 있는 경제적이며 소음발생 원인을 해결할 수 있는 장지간의 신설용 저소음 강교량이 필요한 실정임. 본 연구과제에서는 강박스교량을 대체할 수 있는 교량공법을 개발하는 것을 목표로 하여 최종적으로 지간 50m 이상의 적용이 가능한 장지간 강합성 하로교 공법을 개발하여 한국콘크리트학회 기술인증을 득하였음
- 저소음 장지간 강합성 하로교는 그림 4-1과 같이 아치 형상 강거더의 상부플랜지에 콘크리트를 충전하여 강성을 증가시킴으로써 경간을 증대시키고 외측거더가 방음벽 역할을 겸하는 강합성 하로교 공법임. 기본적으로 기존의 하로형 교량과 유사한 형상이지만 기존의 일반적인 하로 판형교는 지간 50m 이상에는 적용할 수 없는 단면으로 개발된 교량과는 지간 적용성에서 큰 차이를 나타냄
- 일반적으로 통용되고 있는 하로형 교량에는 아래 표에서 나타낸 그림과 같이 하로 판형교와 하로 강박스교가 적용되고 있음. 개발된 저소음 장지간 강합성 하로교와 하로 판형교를 비교하면, 적용 가능 지간에서 큰 차이를 보이고 있음. 개발교량의 경우 지간 50m까지 장지간의 교량에 적용이 가능하나, 하로 판형교의 경우 최대 40m까지만 적용이 가능하여 주거더의 방음벽 역할로 공기기인소음 저감은 가능하나 지간 적용성의 한계로 인해 강박스교량을 대체할 수 없음. 또한 개발된 저소음 장지간 강합성 하로교와 하로 강박스교를 비교하면, 하로 판형교의 경우와 마찬가지로 하로 강박스교는 최대 지간 40m까지 적용 가능하여 강박스교를 대체할 수 없으며, 소음측면에서 보면 주거더를 박스단면으로 사용하기 때문에 구조기인소음에 불리한 구조이며 경제성의 문제로 박스거더의 형고가 낮기 때문에 공기기인소음 저감 효과가 불리한 구조임

[표 3.1.13] 저소음 장지간 강합성 하로교와 기존 하로교 비교

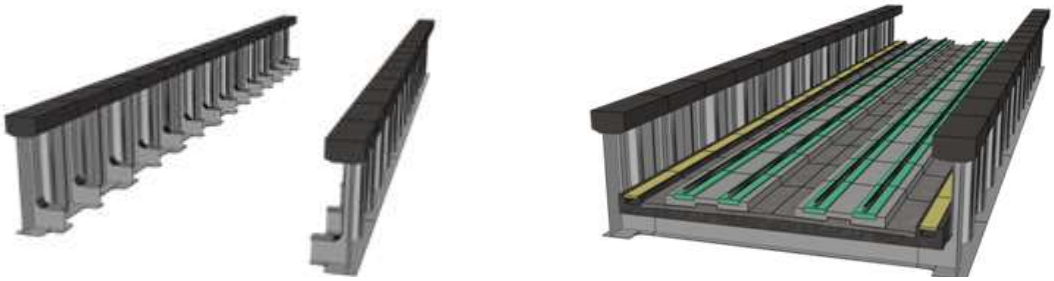
구분	저소음 장지간 강합성 하로교	하로 판형교	하로 강박스교
횡단면도			
특징	• 적용 가능 지간 - ~ 50m • 시공성 - 크레인 가설로 시공성 우수 • 미관 - 아치형상으로 미관이 우수 • 경제성 - 강합성으로 강재량 절감 • 소음성능 - 공기기인 및 구조기인소음 모두 저감	• 적용 가능 지간 - ~ 40m • 시공성 - 크레인 가설로 시공성 우수 • 미관 - 단순 간결한 외관미 연출 • 경제성 - 강재의 사용으로 공사비 고가 • 소음성능 - 공기기인소음 저감	• 적용 가능 지간 - ~ 40m • 시공성 - 크레인 가설로 시공성 우수 • 미관 - 단순 간결한 외관미 연출 • 경제성 - 강재의 사용으로 공사비 고가 • 소음성능 - 공기기인 및 구조기인소음 모두 불리함

▪ 연구과제로 개발된 저소음 장지간 강합성 하로교의 경우 거더 상부플랜지를 콘크리트와 합성하여 강성을 증대시켜 지간 50m이상 적용이 가능하도록 하였고, 단부가로보를 박스형태로 사용하였지만 콘크리트를 충진하여 울림소음이 발생하지 않도록 구성하였음. 또한 지간 50m 이상 단면의 경우 거더를 운반할 수 있는 최대 높이(2.925m)를 적용하여 거더 자체가 방음벽 역할을 최대한 발휘할 수 있도록 표준단면을 설계하여 해석적으로 공기기인 소음 저감효과에 대해 분석을 하였음.

(나) 연구내용

① 신설용 저소음 철도교량 단면(안) 제시 및 축소모형을 이용한 소음성능 평가

▪ 신설용 저소음 철도교량 단면안으로 파형복부 강합성 하로교 단면을 그림 4-2와 같이 제시하고 지간 50m에 대해 철도설계기준에 의거하여 설계를 수행하였음



(a) 합성형 파형강판 주거더 형상 (b) 파형복부 강합성 하로교 형상

[그림 3.1.108] 파형복부 강합성 하로교 단면

▪ 파형복부 강합성 하로교 단면의 공기기인 소음저감 성능을 평가하기 위해 지간 50m 단면

의 1/5 축소모형 시험체를 제작하여 소음저감성능을 측정 및 평가 수행함



(a) 시험체 제작도 (b) 시험체 형상

[그림 3.1.109] 축소모형 시험체 제작도 및 형상

- 한국생산기술연구원 천안본원 무향실에 시험체를 설치하고 스피커와 마이크로폰을 이용하여 합성형 파형강판 주거더가 없는 경우(일반적인 상로교 형식 교량의 경우와 동일)와 합성형 파형강판 주거더가 있는 경우를 비교하여 공기기인 소음 저감효과를 평가함. 실험결과 최대 10.3dB(A) 소음저감을 확인함

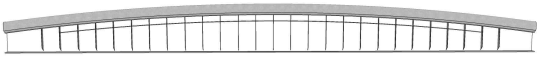


(a) 주거더 없는 경우 (b) 주거더 있는 경우

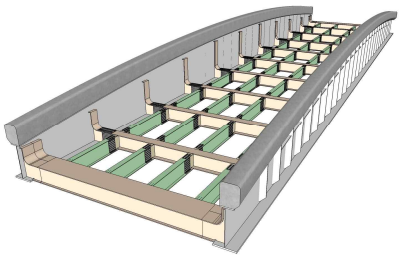
[그림 3.1.110] 축소모형 실험 전경

(나) 저소음 장지간 강합성 하로교 단면제시 및 지간 50m 설계

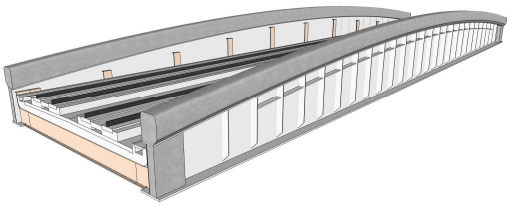
- 파형복부 강합성 하로교 단면의 제작성과 미관부분의 개선요구에 따라 아치 형상의 강거더의 상부플랜지에 콘크리트를 충전하여 강성을 증가시킴으로써 경간을 증대시키고 외측거더가 방음벽 역할을 겸하는 저소음 장지간 강합성 하로교 단면을 제시하고 철도설계기준에 따라 콘크리트도상, 복선의 지간 50m의 저소음 장지간 강합성 하로교를 설계하여 구조적 타당성을 확인함



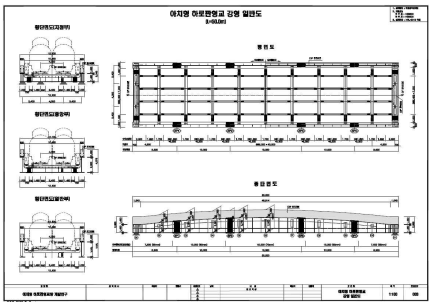
(a) 측면도



(b) 입체도



(c) 입체도



(d) 설계도

[그림 3.1.111] 저소음 장지간 강합성 하로교 단면제시 및 설계도면

(다) 저소음 장지간 강합성 하로교 지간 20m 실물실험체 제작

- 저소음 장지간 강합성 하로교의 구조적안전성을 확인하고 소음성능을 평가하기 위해 지간 20m, 단선, 콘크리트도상 궤도 형식의 실물실험체를 설계하였고 제작을 수행하였음



(a) 거더 공장 제작



(b) 거더 운반



(c) 거더 실험실 반입



(d) 거더 거치 및 조립



(e) 가로보, 세로보 조립



(f) 거더 콘크리트 타설



(g) 바닥판 타설



(h) 실험체 제작 완료

[그림 3.1.112] 20m 실물실험체 제작

(라) 저소음 장지간 강합성 하로교 지간 20m 실물실험체 구조 및 소음성능평가

① 구조성능평가

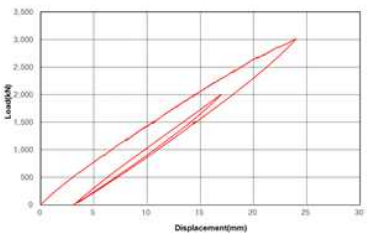
- 저소음 장지간 강합성 하로교 실물실험체 설계하중 2.5배인 3,000kN까지 하중을 가력하여 주요 부재의 거동을 분석하여 안전성을 확인함
- 설계하중의 2.5배 하중(3,000kN)에서 지간 중앙의 처짐값 24mm 발생. 활하중 처짐 제한값 L/600 = 31mm 보다 작게 발생
- 좌우측 주거더의 수평방향의 변위는 최대 6.91mm로 건축한계를 침범하지 않음
- 설계하중의 2.5배 하중에서 주거더, 가로보 및 세로보의 부재가 항복에 도달하지 않음
- 거더 상부플랜지 콘크리트에 발생한 압축변형율은 0.00068로 극한 압축변형률(0.003)의 23% 수준의 변형율 발생

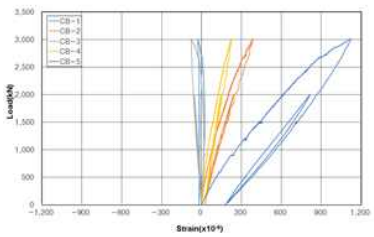

(a) 주거더 부분

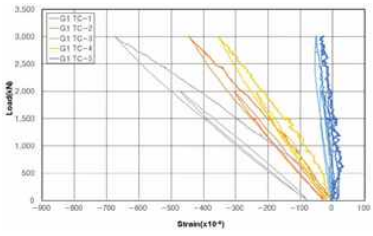

(b) 가로보 부분


(c) 거더 상부 Con'c 부분

[그림 3.1.113] 20m 실물실험체 게이지 설치 사진


(a) 지간 중앙부
하중-변위곡선


(b) 가로보 하부 플랜지
하중-변형율 곡선


(c) 거더 상부 Con'c
하중-변형율 곡선

[그림 3.1.114] 0m 실물실험체 구조성능실험 결과

② 소음성능평가

■ 측정조건

- 지간 20m 저소음 장지간 강합성 하로교 실물실험체를 대상으로 공기기인소음저감 평가
- 무지향성 스피커를 사용하여 음원을 발생시켜 마이크로폰으로 소음측정
- 실험 Case는 Case00 : 직접 전달음 측정, Case01 : I형 주거더, Case02 : I형 주거더+상단장치, Case03 : I형 주거더+흡음재(폴리에스터 40K 50T), Case04 : I형 주거더+상단장치+흡음재 로 나누어 수행함
- 마이크로폰은 선로중앙 7.5m, 높이는 레일레벨로부터 1.2m, 3.5m와 선로중앙 10m, 높이는 레일레벨로부터 1.2m, 3.5m포함하여 총 4개의 마이크로폰을 동시 측정



(a)Case01 시험전경



(b)Case02 시험전경



(c)Case03 시험전경



(d)Case04 시험전경

[그림 3.1.115] 실물실험체 소음성능실험 전경

■ 측정 수행 기관 : 대우건설기술연구원

■ 측정 결과

- 실물실험체의 길이가 20m로 시점 및 종점부 주거더에 의한 소음차단 효과가 없음에도 불구하고 중앙부의 거더의 차단성능은 가시선 이하에서 4~5dB(Case01)이상 저감되었다. 추가 소음저감을 위해 흡음재와 상단장치를 적용하였을 경우 5~6dB(Case02~03)가 저감되었으며, 흡음재와 상단장치를 모두 적용하였을 때 7dB 이상의 소음저감성능이 나타났다. 또한 가시선 상부인 3.5m 높이에서도 4dB 이상의 소음저감효과가 나타났음

[표 3.1.16] 실물실험체 소음성능 평가 결과

구 분	삽입손실[dB]			
	선로중앙 이격거리 7.5m		선로중앙 이격거리10m	
	H=1.2m	H=3.5m	H=1.2m	H=3.5m
Case01	5.1	1.7	4.2	1.4
Case02	6.2	2.9	5.2	2.7
Case03	6.5	3.3	6.0	3.0
Case04	7.6	4.5	7.0	4.3

(마) 해석을 통한 저소음 장지간 강합성 하로교 소음성능평가

① 공기기인 소음저감 성능검토

■ 해석조건

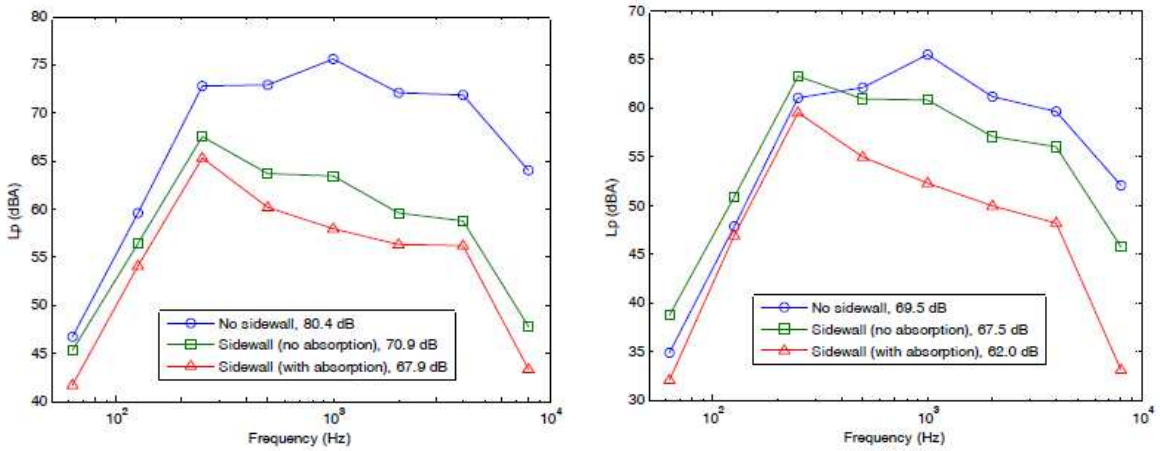
- Simens Virtual Lab Ver 13.7 해석 S/W 사용하고 광음향기법 모듈을 이용하여 해석
- 지간 50m 강박스교와 저소음 장지간 강합성 하로교 대상으로 모델링하여 비교 해석

- 차량의 통과속도는 100km/h 경우로 하였고 소음원은 궤도 소음원, 차륜 소음원, 동력 소음원으로 구성하였음

■ 해석 수행 기관 : 철도기술연구원

■ 해석 결과

- 거리 7.5m, 높이 1.2m에서 평균적으로 흡음재 미적용 저소음 강합성 하로교의 공기기인소음 저감이 9.5dB(A)이 발생하였고, 흡음재 적용 저소음 강합성 하로교의 공기기인소음 저감이 12.5dB(A) 발생함.
- 거리 25m, 높이 3.5m에서는 평균적으로 흡음재 미적용 저소음 강합성 하로교의 공기기인소음 저감이 2dB(A)이 발생하였고, 흡음재 적용 저소음 강합성 하로교의 공기기인소음 저감이 7.5dB(A) 발생함.



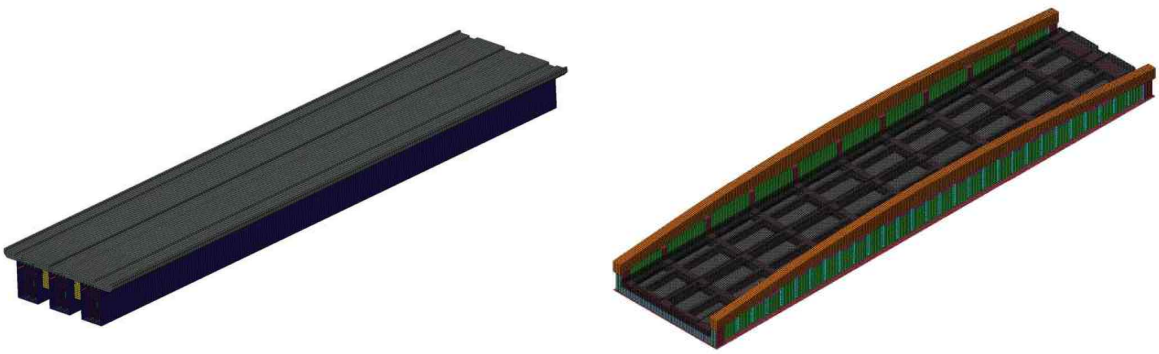
(a) 거리 7.5m, 높이 1.2m (b) 거리 25m, 높이 3.5m

[그림 3.1.116] 공기기인 소음저감 성능검토 해석 결과

② 구조기인 소음저감 성능평가

■ 해석조건

- Simens Virtual Lab Ver 13.7 해석 S/W 사용하고 FEM 및 BEM 모듈을 이용
- 지간 50m 강박스교와 저소음 장지간 강합성 하로교 대상으로 모델링하여 비교 해석
- 지간 중앙 1N의 단위 힘을 작용시켜 진동에 의한 발생하는 소음도를 비교



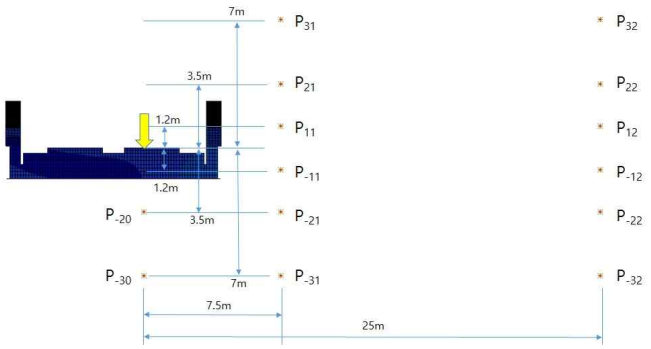
(a) 강박스거더교 (b) 저소음 장지간 강합성 하로교

[그림 3.1.117] 구조기인 소음저감 검토를 위한 모델링 형상

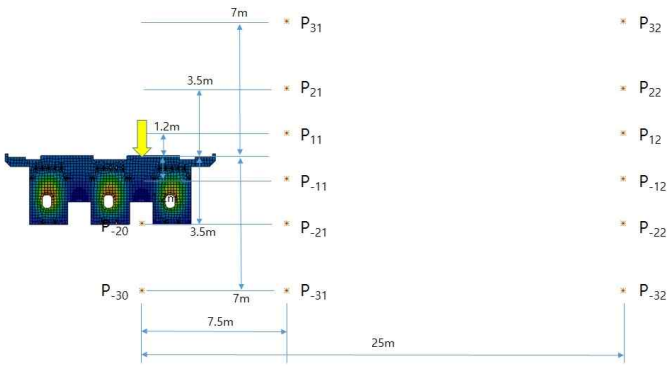
■ 해석 수행 기관 : 철도기술연구원

■ 해석 결과

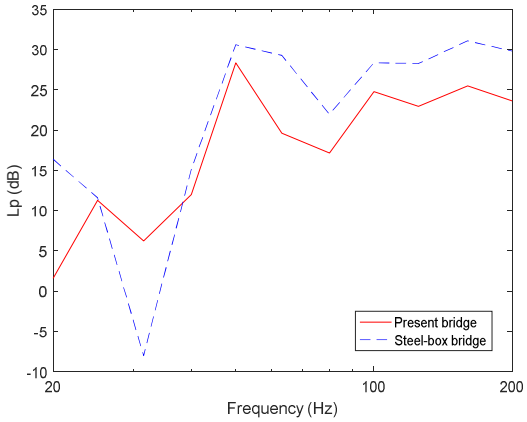
- 주파수 간격 1Hz로 계산된 음압을 1/3-옥타브 밴드 합으로 분석
- P11위치에서 구조기인소음 저감이 50Hz 이상의 주파수 영역에서 최대 10dB이 발생하였고 P12 위치에서도 역시 최대 10dB의 저감이 발생하였음. P-30 위치에서는 50Hz 이상의 주파수 영역에서 최대 15dB이 저감되었고 P-20 위치에서는 최대 17dB의 구조기인소음 저감효과가 있음.



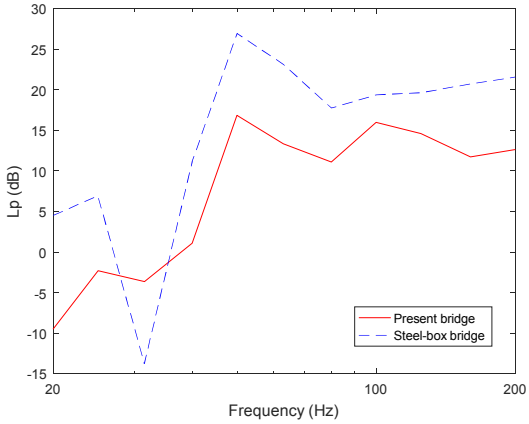
(a) 장지간 강합성 하로교 검토 위치



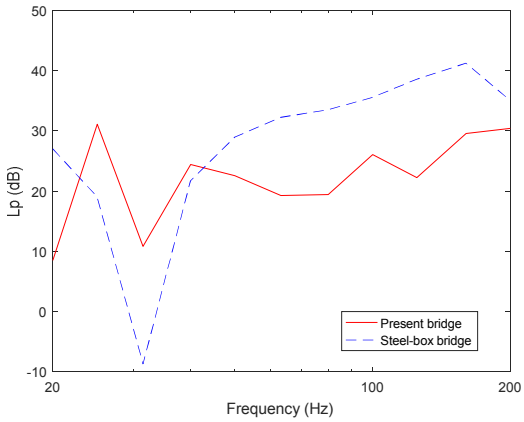
(b) 강박스교량 검토 위치



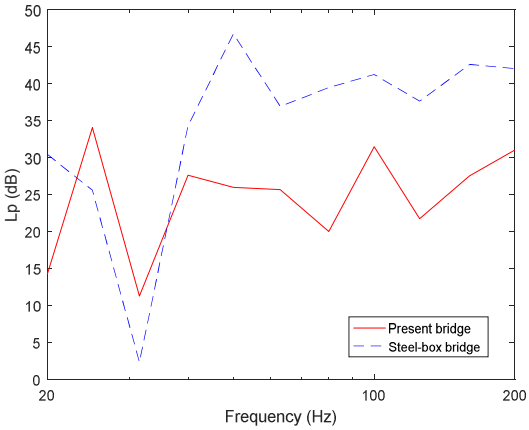
(c) P_{11} 위치



(d) P_{12} 위치



(e) P_{-30} 위치

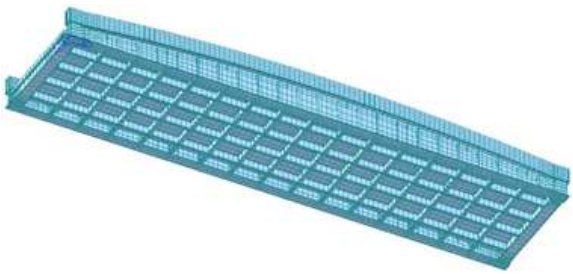


(f) P_{-20} 위치

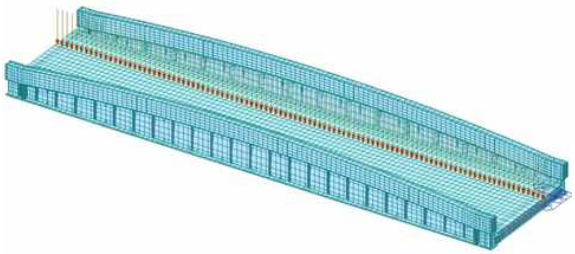
[그림 3.1.118] 구조기인 소음저감 성능검토 해석 결과

(바) 저소음 장지간 강합성 하로교 동적안전성 검토

- 지간 50m의 자갈도상궤도 저소음 장지간 강합성 하로교를 대상으로 상용유한요소해석 프로그램인 MIDAS Civil을 이용하여 KTX, 무궁화호, 화물열차 실차량 하중에 대해 이동하중 해석을 통하여 설계기준에서 제시하고 있는 교량의 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림에 대해 검토를 수행함.

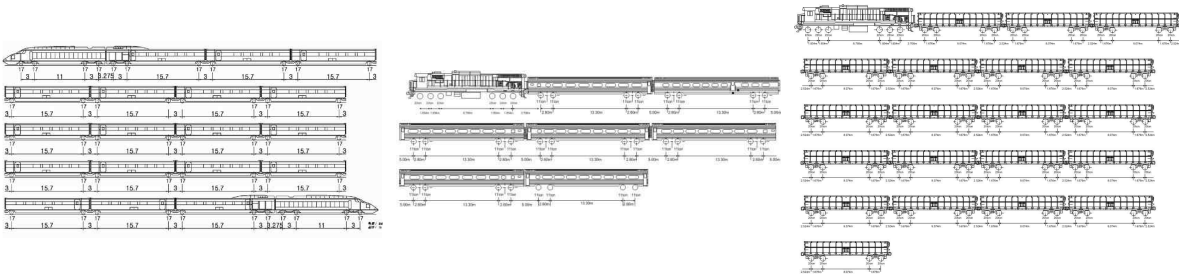


(a) 모델링 형상



(b) 하중 재하위치

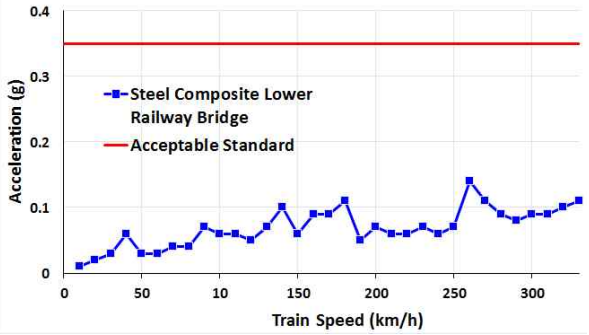
[그림 3.1.119] 동적안전성 평가 해석 모델링



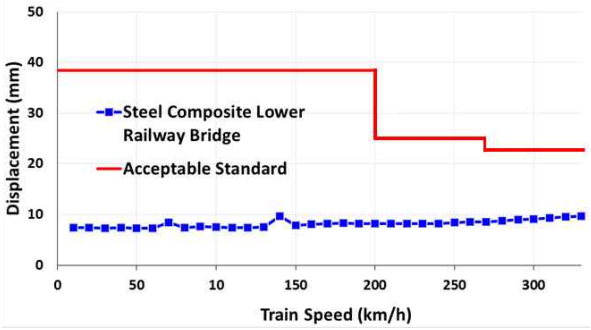
(a) KTX(20량) (b) 무궁화 (c) 화물열차

[그림 3.120] 해석 적용 실차량 하중

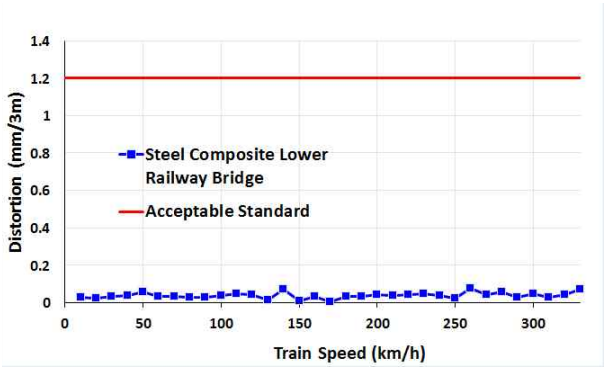
· 해석결과 모든 경우에 대해 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림 부분에서 운행을 위한 한계조건을 만족하는 것으로 검토됨. 아래 그림은 KTX에 대한 결과 그래프를 나타냄



(a) 연직가속도



(b) 연직처짐



(c) 면틀림

[그림 3.1.121] KTX 하중에 대한 해석결과

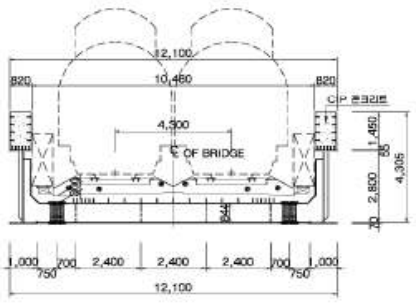
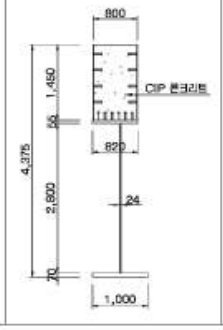
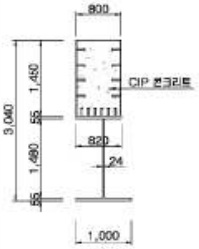
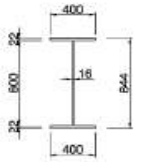
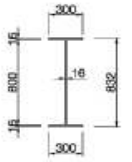
(사) 저소음 장지간 강합성 하로교 지간별 표준단면 설계

· 저소음 장지간 강합성 하로교 자갈도상궤도의 복선 및 단선 단면을 50m, 40m, 30m의 지간에 대한 설계를 수행하여 아래와 같이 표준단면을 결정함

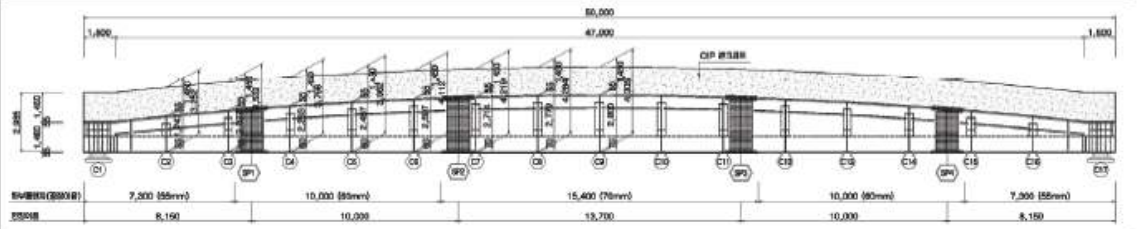
① 표준단면 복선 L=50m

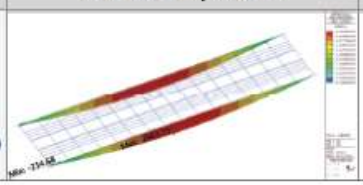
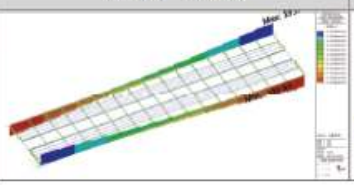
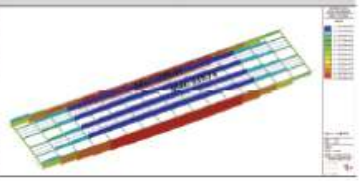
가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L50(복선)	50.0	12.100	3.040~4.375	11.100	3.0m	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=4.375m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도



부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	207.322	2831.914	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.145
	중앙부	300	102.357	1317.393	인장 : H16@125 = 1588.8	129.353	1.264

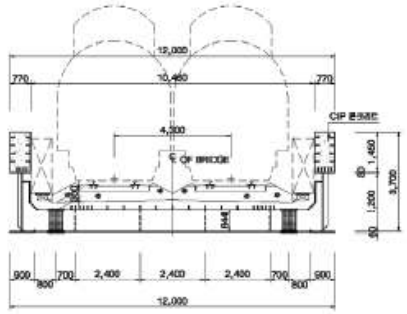
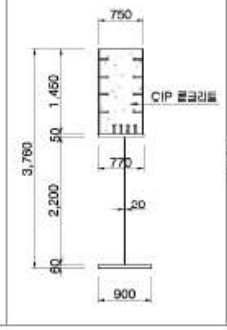
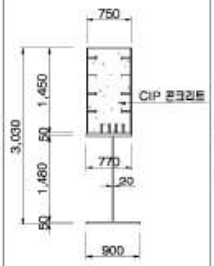
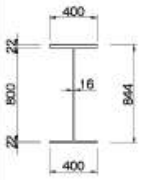
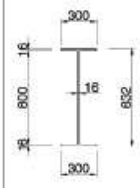
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	19.5	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	6.6	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	204.9	325.2	12.7	155.0	0.575	1.1	325.2	
		하연	−226.3	270.0			0.766	1.1	270.0	
가로보	상연		−1.1	283.2	16.3	155.0	0.011	1.1	283.2	일반부 정모멘트부
	하연		140.1	270.0			0.281	1.1	270.0	
세로보	상연		47.58	171.47	6.5	130.0	0.519	1.1	171.47	
	하연		118.85	230.0					230.0	

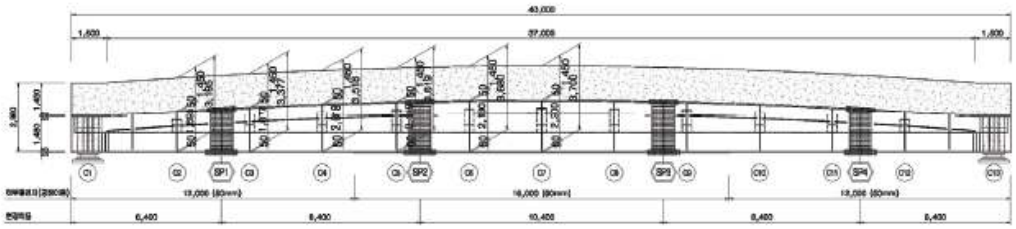
② 표준단면 복선 L=40m

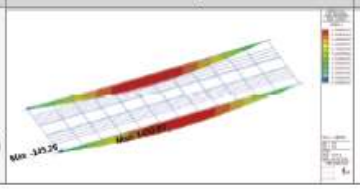
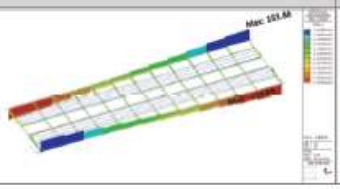
가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L40(복선)	40.0	12.000	3.030~3.760	11.100	3.1m	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=3.760m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도



부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	207.322	2831.914	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.145
	중앙부	300	102.357	1317.393	인장 : H16@125 = 1588.8	129.353	1.264

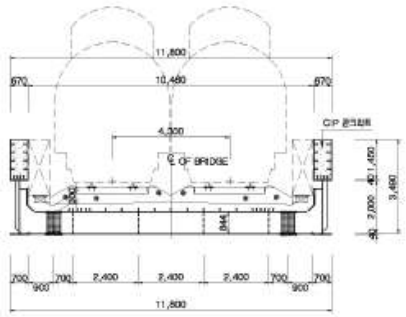
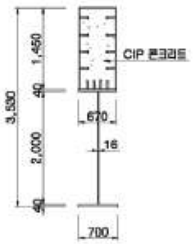
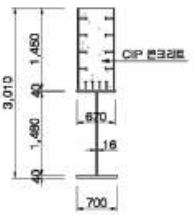
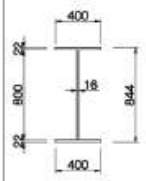
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

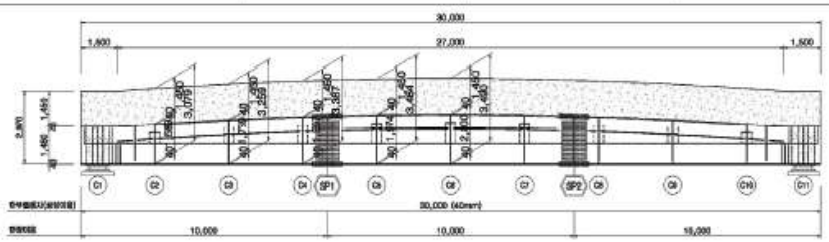
구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	18.0	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	4.0	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	171.5	325.1	-17.3	155.0	0.527	1.1	325.1	
		하연	-217.3	270.0			0.805	1.1	270.0	
가로보	상연		-1.2	283.2	16.8	155.0	0.012	1.1	283.2	일반부 정모멘트부
	하연		139.1	270.0			0.277	1.1	270.0	
세로보	상연		131.42	169.12	3.8	110	0.778	1.1	169.12	
	하연		124.25	230.0					230.0	

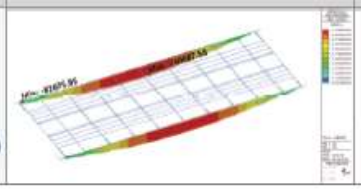
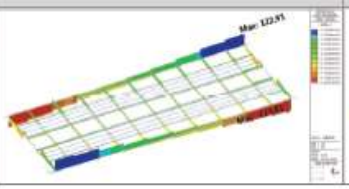
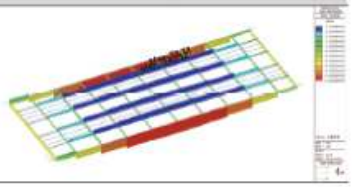
③ 표준단면 복선 L=30m

가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L30(복선)	30.0	11.800	3.010~3.530	11.100	3.1m	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=3.530m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도	
	

부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	207.322	2831.914	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.145
	중앙부	300	102.357	1317.393	인장 : H16@125 = 1588.8	129.353	1.264

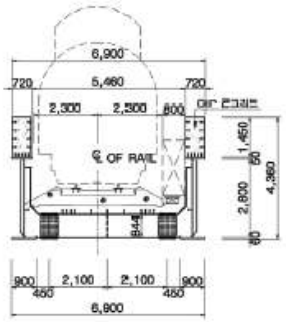
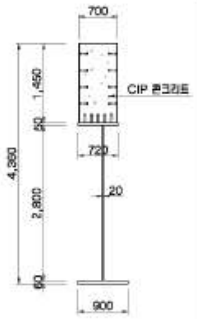
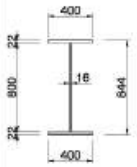
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	13.6	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	2.1	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	94.0	175.5	-20.7	155.0	0.303	1.1	175.5	
		하연	-168.4	282.8			0.638	1.1	282.8	
가로보	상연		-1.6	283.2	39.3	155.0	0.064	1.1	283.2	일반부 정모멘트부
	하연		39.3	155.0			0.238	1.1	155.0	
세로보	상연		102.97	171.47	3.3	110	0.601	1.1	171.47	
	하연		99.97	230.0					230.0	

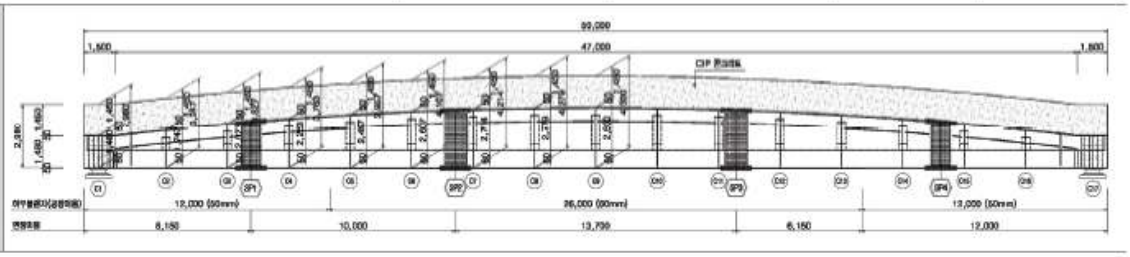
④ 표준단면 단선 L=50m

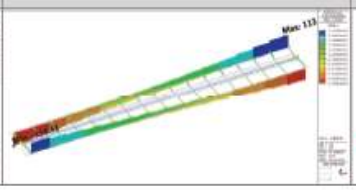
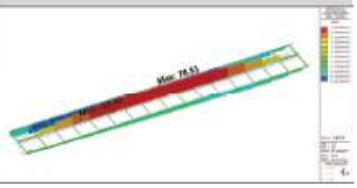
가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L50(단선)	50.0	6.900	3.030~4.360	6.000	3.000	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=4.360m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도



부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	190.408	2574.010	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.247
	중앙부	300	174.314	2334.007	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.362

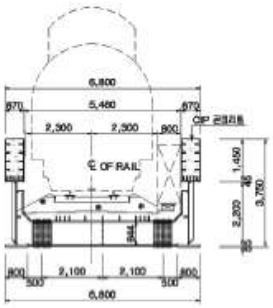
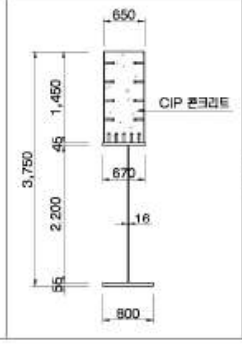
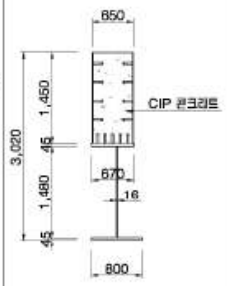
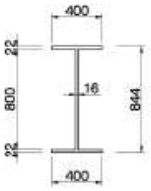
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	14.0	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	3.2	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	161.0	323.0	-12.6	155.0	0.499	1.1	323.0	
		하연	-207.6	270.0			0.773	1.1	270	
가로보	상연		-6.0	280.9	37.0	155.0	0.057	1.1	280.9	일반부 정모멘트부
	하연		39.2	270.0			0.078	1.1	270	
세로보	상연		43.43	171.47	2.9	130	0.958	1.1	171.47	
	하연		220.38	230.0					230.0	

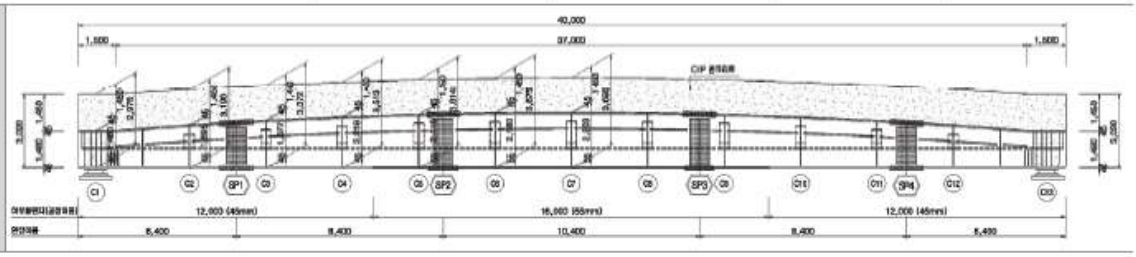
⑤ 표준단면 단선 L=40m

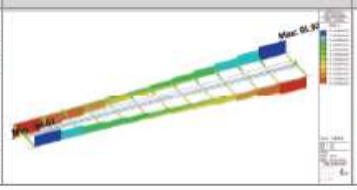
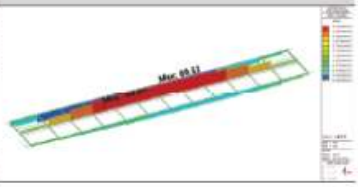
가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L40(단선)	40.0	6.800	3.020~3.750	6.000	3.100	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=3.750m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도



부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	190.408	2574.010	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.247
	중앙부	300	174.314	2334.007	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.362

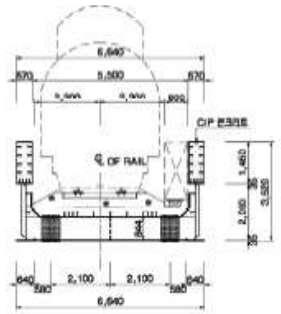
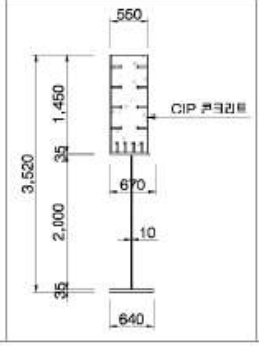
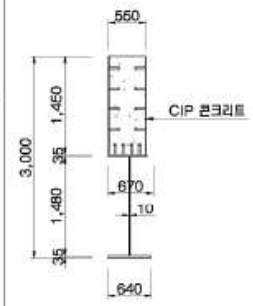
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

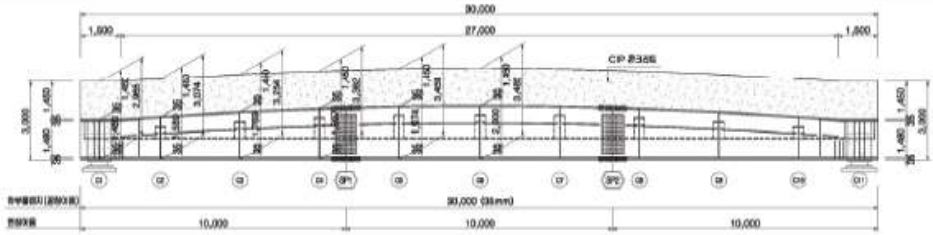
구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	13.2	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	1.6	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	135.1	323.0	-18.1	155.0	0.421	1.1	323.0	
		하연	-191.0	270.0			0.717	1.1	270	
가로보	상연		-20.0	280.9	37.3	155.0	0.063	1.1	280.9	일반부 정모멘트부
	하연		27.3	270.0			0.068	1.1	270	
세로보	상연		18.13	169.12	1.0	130	0.794	1.1	169.12	
	하연		182.58	230.0					230.0	

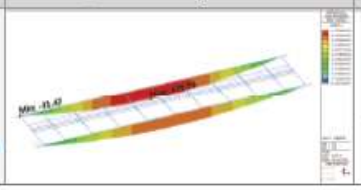
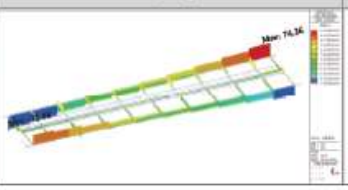
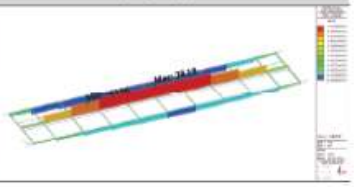
⑥ 표준단면 단선 L=30m

가. 단면제원 및 부재력도

구분	교량연장 (m)	교량폭 (m)	주형높이 (m)	주형중심간격 (m)	가로보간격 (m)	사각 (°)	도상방식
SCT L30(단선)	30.0	6.640	3.000~3.520	6.000	3.000	90	자갈도상

횡단면도 중앙부 (H=3,750m)	거더 중앙부	거더 지점부	가로보	세로보
				

종단면도	
	

부재력도	휨모멘트 M_y (kN · m)	전단력 F_z (kN)	축력 F_x (kN)
활하중 (열차하중 및 충격하중 + 군집하중)			

나. 단면검토

[바닥판슬래브 f_{ck}=27MPa, f_y=400MPa]

	구분	단면높이 (mm)	M_u (kN · m)	Req'd As (mm^2)	Used As (mm^2)	ϕM_n (kN · m)	안전율
바닥판	지점부	300	190.408	2574.010	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.247
	중앙부	300	174.314	2334.007	인장 : H22@125 = 3096.8	237.477	1.362

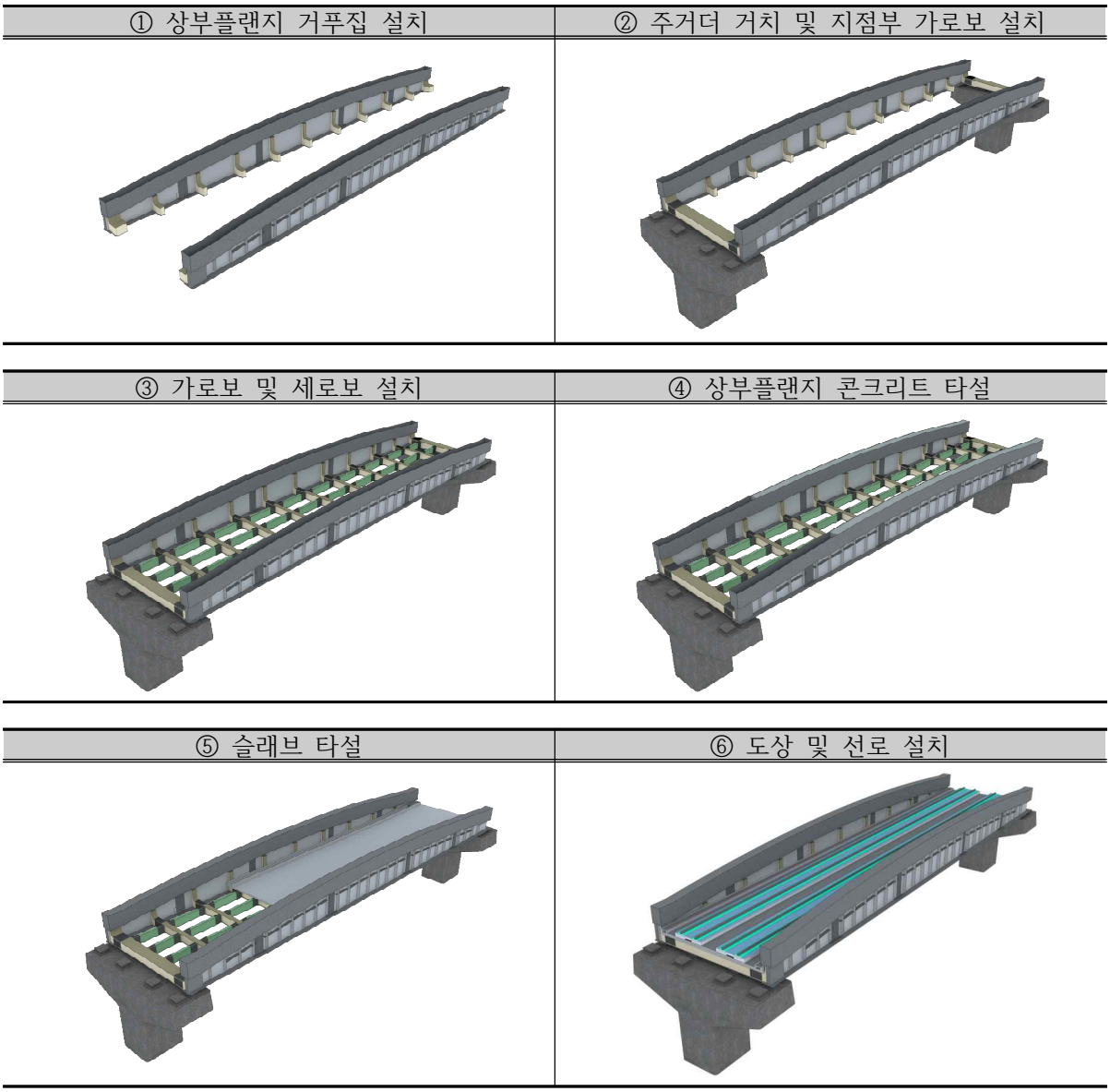
[거더 및 가로보 : HSB600, 세로보 :HSB500)]

구분			휨응력		전단응력		합성응력		허용응력	비고
			발생	허용	발생	허용	발생	허용		
거 더	압축부 콘리트크	상연	11.4	20.0	–	–	–	–	20.0	G2 중앙부 정모멘트부
		하연	−0.8	20.0			–	–	20.0	
	강재	상연	103.5	323.2	−25.9	155.0	0.326	1.1	323.2	
		하연	−196.6	270.0			0.747	1.1	270.0	
가로보	상연		19.9	281.1	24.6	155.0	0.030	1.1	281.1	일반부 정모멘트부
	하연		30.0	270.0			0.038	1.1	270.0	
세로보	상연		41.72	171.5	2.9	130	0.659	1.1	171.5	
	하연		151.56	230.0					230.0	

(아) 저소음 장지간 강합성 하로교 시공시방서 및 유지관리시방서

· 저소음 장지간 강합성 하로교의 시공순서를 정의하고 시공에 관련된 품질관리 기준과 용접, 볼트접합시 유의점 그리고 저소음 장지간 강합성 하로교의 상부 플랜지 콘크리트 및 바닥판 콘크리트 시공시 지켜야 하는 기준들에 대해 정립함

· 저소음 장지간 강합성 하로교에 대해 발생 가능한 성능저하 원인을 정의하고 점검 기준 및 방법을 정립함. 또한 유지관리와 보수보강 방법에 대해 정의한 시방서를 작성함



[그림 3.1.122] 저소음 장지간 강합성 하로교 시공순서

(자) 저소음 장지간 강합성 하로교 경제성 분석

· 저소음 장지간 강합성 하로교의 경제성을 분석하기 위해 동일조건의 강박스거더교와 공사비 비교를 수행하여 국가공인원가계산서 발행 기관에서 원가계산서를 발급받음

(차) 저소음 장지간 강합성 하로교 공법 한국콘크리트학회 기술인증 획득

· 저소음 장지간 강합성 하로교의 설계 및 공법 타당성을 검증하기 위해 한국콘크리트학회에 심사의뢰하여 2차에 걸친 심사를 통해 기술인증을 획득함

기술인증신청서

한국콘크리트학회 인증 신청서

접수 번호 :

신청명		장지간 강합성 하로교의 설계 및 공법 기술인증		
신청자 1	법인명	한국철도기술연구원	사업자등록번호	138-82-02013
	대표자	나 희 승	주민등록번호	
	주소	경기 의왕시 철도박물관로 176(월암동)	전화번호	031-460-5000
	담당자	고 효 인	부서 및 직위	철도 소음/진동 저감기술 개발 연구단 단장
	전화번호	031-460-5207	E-mail	hikoh@krri.re.kr
신청자 2	법인명	(주)포스코건설	사업자등록번호	506-81-02280
	대표자	이 영 훈	주민등록번호	590819-*******
	주소	경상북도 포항시 남구 대송로 180(괴동동)	전화번호	032-748-2114
	담당자	정 영 도	부서 및 직위	기술전략실 과장
	전화번호	032-748-1944	E-mail	jyd@poscoenc.com
신청 인증 종류		①재료 및 자재 □ ②설계방법 및 공법 ■ ③소프트웨어 □ ④지침 기준 시방서 □ ⑤기타 □ ( )		
인증 신청 내용 (요약)		교량단면 자체가 방음벽 역할을 수행하는 구조의 저소음 장지간 강합성 하로교가 철도기술연구사업 "철도 소음/진동 저감기술 개발" 국책과제로 개발되었음. 신청교량은 상부플랜지에 아치형상의 콘크리트를 충진한 하로형 판형교로 상부플랜지의 압축력에 대해 충진콘크리트가 저항하는 구조로써 측면거더의 구조적 효율성을 극대화시킨 공법으로 설계의 적합성 및 공법의 타당성에 대해 기술인증을 신청함.		
인증 신청 범위		장지간 강합성 하로교에 대한 설계 적합성 및 공법의 타당성		

상기 내용에 대하여 한국콘크리트학회 인증을 위하여 신청서를 제출합니다.

2018년 06월 01일

신청인 한국철도기술연구원 나 희 승 (인)

(주)포스코건설 이 영 훈 (인)

(사)한국콘크리트학회 회장 귀하

제출 서류	1. 사업자등록증 1부 2. 인증 신청 내용 및 범위 12부 3. 기술 또는 제품 설명서 12부 4. 국내외 적용 현황 12부 5. 신청 기술의 안정성을 증빙할 수 있는 자료 12부 6. 심사에 필요한 시험 또는 실험 결과 등의 자료 12부 7. 기타 심사자료 12부 8. 1항~7항까지의 내용이 포함된 CD

기술인증서

KCIC 18-003

콘크리트 기술 인증서

Certificate of Concrete Technology

우리 학회는 다음 기술이 학회에서 정한 콘크리트 기술 규준에 적합함을 인증합니다.

한국철도기술연구원 Korea Railroad Research Institute

posco 포스코건설

인증명칭 콘크리트 충전 아치형 강거더를 갖는 저소음 장경간 하로교 공법

인증분야 설계방법 및 공법

인증내용 이 공법은 아치 형상 강거더의 상부플랜지에 콘크리트를 충전하여 강성을 증가시킴으로써 경간을 증대시키고 외측거더가 방음벽 역할을 겸하는 강합성 하로교 공법임.

인증범위 경간 55 m 이하의 철도교

유효기간 2018. 09. 21. ~ 2023. 09. 20. (5년)

2018년 09월 21일

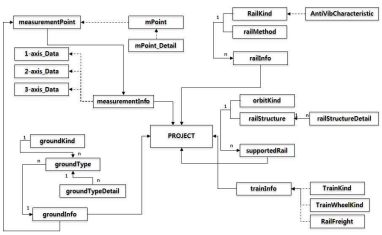
사단법인 한국콘크리트학회

회 장 최 창 식

아. 철도진동소음 DB 개발 및 DB 와 연계한 진동/구조소음 평가기법 개발

(1) DB와 연계한 철도진동 및 구조소음 평가기법

(가) 최종성과물 개요



[그림3.1.123] Database(DB) Design



[그림 3.1.124] DB Search System



[그림 3.1.125] 철도 진동/소음 평가 System

① 정의 및 주요 기능

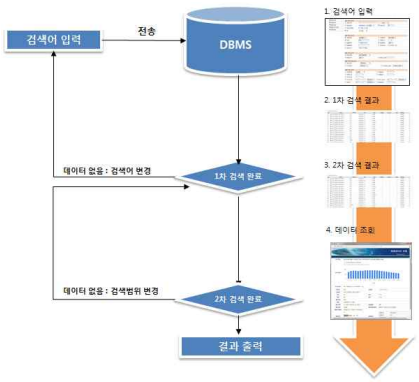
• 개발된 데이터베이스 시스템은 철도 진동을 측정하여 이에 영향을 주는 인자들과 측정 데이터를 **데이터베이스**화 하여, 데이터 검색 및 환경 영향성 평가에 활용하는 것을 그 목적으로 함. 따라서 데이터베이스는 WEB**을 통한 인터페이스 구조**를 갖고 측정 데이터 및 진동 영향 인자들을 포괄적으로 포함하는 구조로 설계함.

• 구축된 데이터베이스 시스템은 체계적으로 설계된 데이터베이스에 데이터를 입력/조회/수정/삭제 할 수 있는 데이터 관리모듈과 함께 진동 유발인자의 조합으로 사용자가 원하는 측정 데이터를 검색 할 수 있는 **검색엔진 모듈**을 포함함.

• 시스템은 별도의 프로그램이 필요 없이 인터넷이 연결된 상태에서 웹 브라우저(web Browser)를 통해 사용자가 원하는 거리 및 열차의 속도, 레일의 종류 등을 입력하여 데이터베이스에 기반한 철도 진동 데이터를 조회할 수 있는 기능을 가지고 있음.

• 철도진동 추론 알고리즘의 동작 방식은 위의 그림과 같이 철도 진동 유발인자를 입력받아 각각의 가중치를 계산한 후, 조합된 입력값을 기반으로 reference data를 찾고 이후 정량적 추론을 위한 학습함수를 선정하고 인자의 가중치 순서에 따라 거리와 속도에 대한 정량적 데이터를 계산함. 이 때, 정규분포를 만족하지 않는 데이터는 제외하며 정량적 데이터에 분류형 데이터에 대한 차이를 계산하여 반영하고 있음. 그러나 기준이 되는 데이터가 데이터베이스에 존재하지 않으면 추론이 어려움.

• 구축된 추론 시스템은 새로운 데이터가 입력될 때 기존 데이터베이스 시스템에 구축된 데이터 분류 및 저장 프로세스를 거친 후, **연속성 데이터**와 **선택형(분류형) 데이터**에 대한 activation function을 새롭게 계산한 후 output(activation function) table을 update하는 방식으로 새로운 데이터가 입력될 때마다 기존 function의 차수 인자들을 업데이트 함.



[그림 3.1.126] 계측 데이터 검색 방법

```
Search Algorithm Pseudo Code
Receive Search String

Data Parsing
Excute SQL Query Script

SELECT
trainInfo : trinkind  -> "새마을호"
trainInfo : is_two_way -> "편도"
measureInfo : isVibData -> "진동"
measureInfo : FreqAxis -> "수직방향"

trainInfo : velocity -> "120 km 속도"
measureInfo : mPointDistance -> "20m 거리"

Find Scalar Data

Scalar1

velocity Between 108 and 132  -> 정밀도 감소 Count++
velocity Between 96 and 144 -> 정밀도 감소 Count++
velocity Between 84 and 156  -> 정밀도 감소 Count++

Scalar2

mPointDistance Between 8 and 11 -> 정밀도 감소 Count++
mPointDistance Between 7 and 12 -> 정밀도 감소 Count++
mPointDistance Between 5 and 13 -> 정밀도 감소 Count++

Scalar1 AND Scalar2

Scalar1 OR Scalar2

Print Result and 정밀도
```

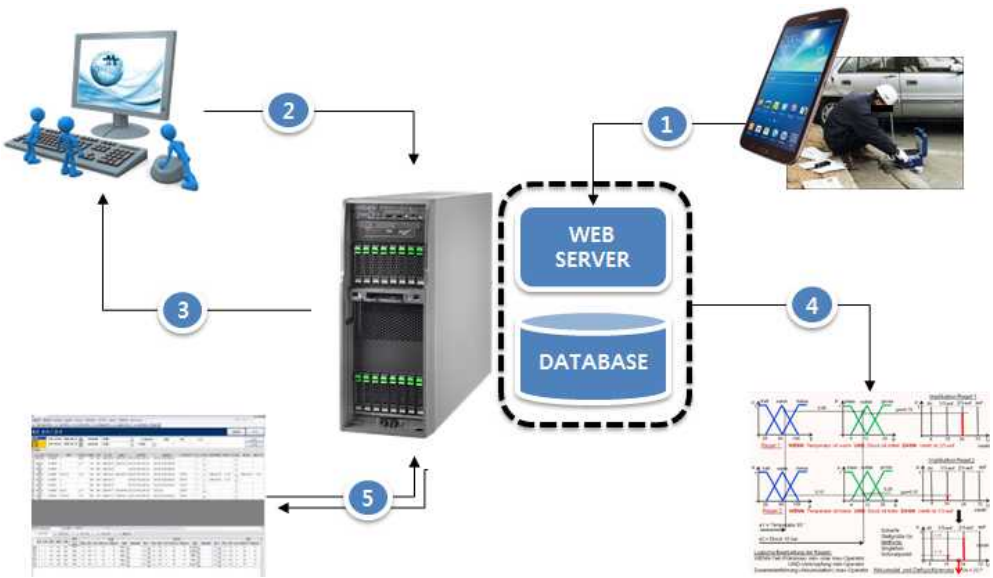
[그림 3.1.127] Search Algorithm Pseudo Code

• activation function은 학습을 위한 hypothesis로서 regression 추론의 기초가 되는 함수임. 일반적인 철도 진동 데이터의 추세를 보면 log또는 2차식의 경향을 따라가지만 실제 데이터 분석결과 **1차식, 2차식, 지수식, 로그식** 등 4가지의 추세를 따르는 것으로 분석되었음. 따라서 본 과제에서는 다음과 같이 총 4가지의 hypothesis를 두고 학습을 진행하였음.

[표 3.1.17] hypothesis fro learning

hypothesis	equations	training factor
Exponential	$y = \omega_1 \epsilon^{\omega_2 x}$	ω_1, ω_2
Linear	$y = \omega_1 x + \omega_2$	ω_1, ω_2
Logarithm	$y = \omega_1 \ln(x) + \omega_2$	ω_1, ω_2
Polynomial	$y = \omega_1 x^2 + \omega_2 x + \omega_3$	$\omega_1, \omega_2, \omega_3$

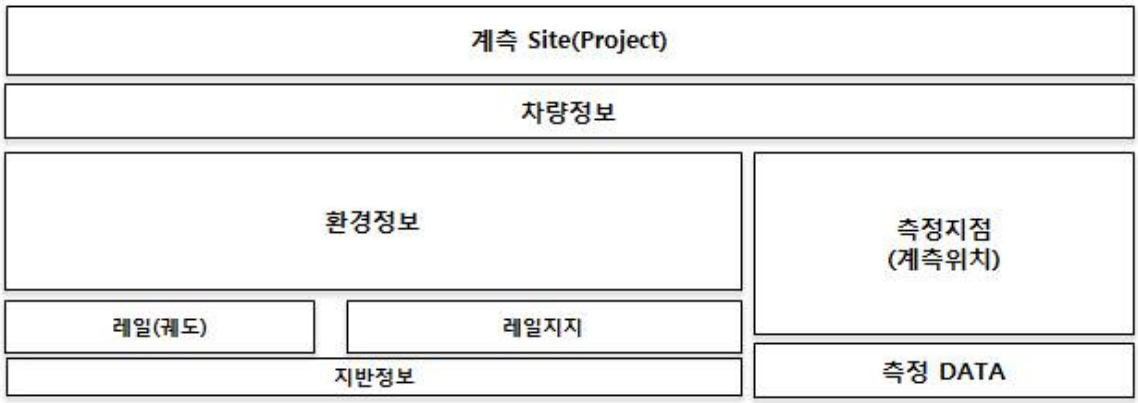
(나) 연구내용-설계 및 시작품 제작 결과



[그림 3.1.128] 시스템 개요

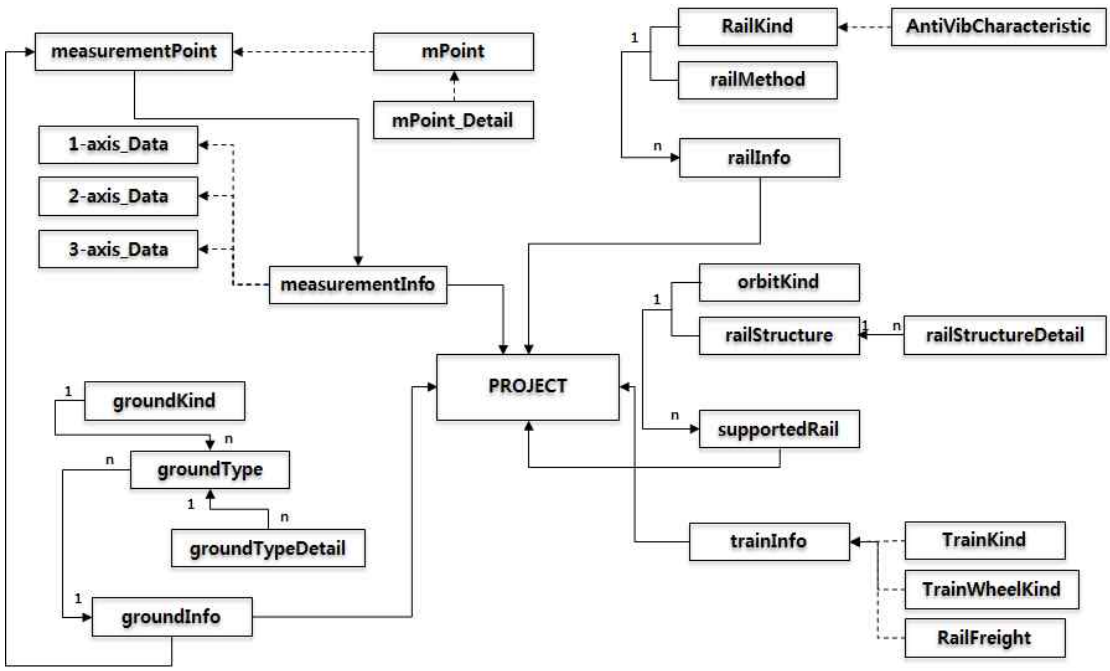
[표 3.1.18] 시스템 개요 설명

번호	설명
1	측정 환경 변수, 기본 사항 현장 입력
2	계측 및 분석 후, WEB을 통해 데이터 입력
3	검색 키워드에 따라 , Data Searching 후 VIEW제공
4	DATA correlation & comparison Algorithm
5	Geographical Information Management



[그림 3.1.129] 시스템 구조

• 데이터 구조는 그림에서 보는 바와 같이 Project를 기반으로 차량정보 등 하위 정보들이 종속되어 있는 형태로 구성됨. 각 데이터들은 프로젝트 ID를 Foreign Key로 하여 관계(Relation)를 갖도록 설계함.



[그림 3.1.130] 데이터베이스 테이블 관계

• 위의 그림은 설계된 전체 데이터베이스 구조를 나타내고 있음. 그림에서 보는 바와 같이, 추상화를 통해 유도한 각각의 모듈은 프로젝트의 기본키[Primary Key]를 통해 각각의 관계

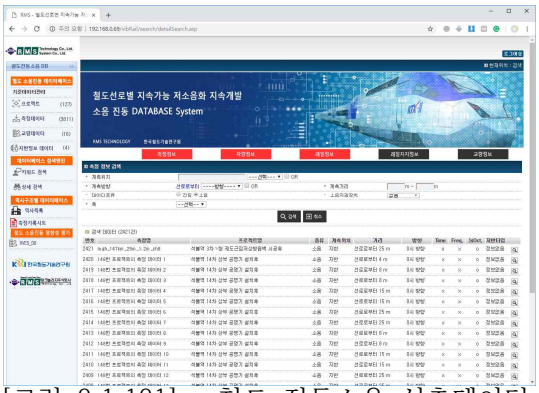
[Relation]을 맺고 있으며, 데이터 구조의 유연성을 위해 현재는 각 테이블에 정의한 외래키만으로 그 관계를 유지함. 각 모듈을 나타내는 데이터들은 기본 데이터들과의 관계로 나타내며, 이를 위해 데이터베이스 입력 플랫폼 작성 시 기본 데이터 관리 모듈을 구축함.

• 철도 진동 소음 실측 데이터베이스와 영향성 평가 알고리즘의 수행을 위한 개발 플랫폼 및 환경은 아래 표와 같음.

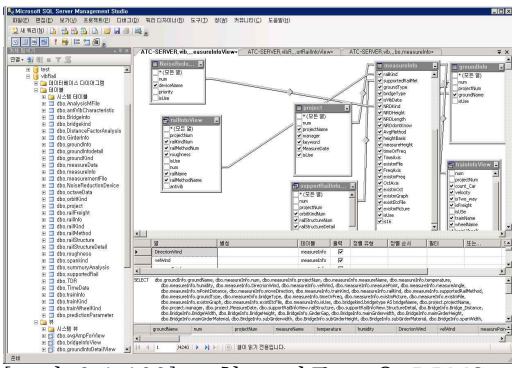
[표 3.1.19] 개발환경

항목	내용	비고
H/W	IBM Server	webserver
DBMS(Database Management System)	MS-SQL Server 2008	Microsoft
OS (Operating System)	Window Server	
Server Side Language	ASP 4.0	
Client Side Language	Javascript(Ajax)	
Platform	IIS 5.0	web

• 개발된 데이터베이스 시스템을 포함한 철도 진동 및 구조소음 평가 시스템은 아래 그림과 같음.



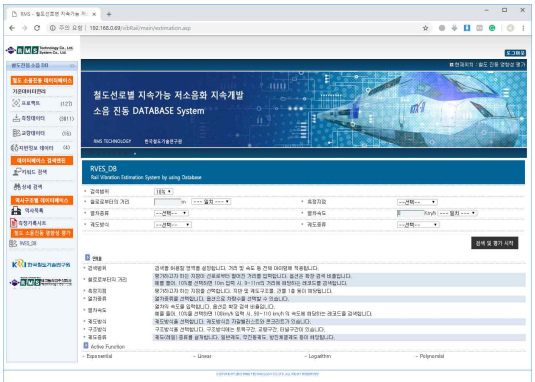
[그림 3.1.131] 철도 진동소음 실측데이터 검색 시스템



[그림 3.1.132] 철도 진동 소음 DBMS



[그림 3.1.133] 연구성과 적용전후 소음 진동 데이터베이스 구축

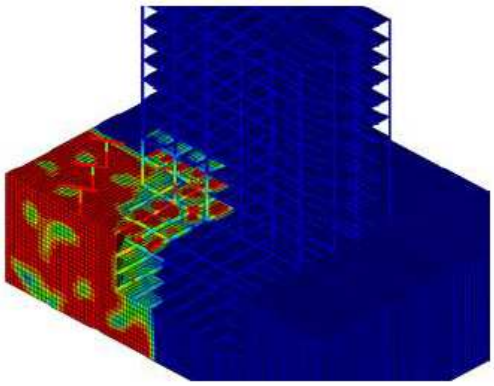


[그림 3.1.134] 개발 시스템 - Chrome 접속

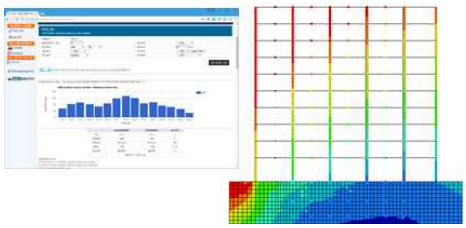
(다) 시작품 검증 결과

• 구축된 데이터베이스 시스템은 아래 그림과 같이 web을 통해 접속할 수 있는 개방적 플랫폼을 가지고 있으며 현재 총 127개 SITE의 4013개의 측정데이터를 보유하고 있음.

• 평가알고리즘과 해석 모델의 수행 시간 비교를 위해 하나의 케이스에서 데이터베이스를 이용한 평가 알고리즘과 3차원 해석 모델의 수행시간을 비교한 결과는 아래과 같으며 3차원 해석시간과 비교하여 약 70% 정도의 소요시간을 절감 할 수 있었음.



[그림 3.1.135] 3차원 모델 평가소요시간 : 약 22 hour



[그림 3.1.136] 알고리즘에 의한 평가소요시간 : 약 6 hour

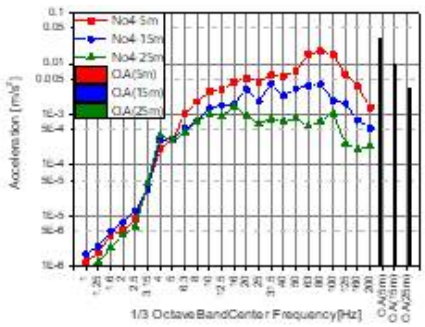
• 측정결과와 추론 결과 비교

: 측정결과

측정 위치는 충남 천안시 서북구 차돌들길 16 리젠트 모델로 1호선 전철운행 구간임. 그림에서 보는 바와 같이 선로 부근에 위치하고 있으며 방진 시설이 되어 있지 않아 진동에 의한 구조소음 민원이 빈번한 곳임. 지상1층에서 계측하였으며, 선로로부터 5m,15m 25m 지점에서 각각의 가속도 값을 측정하였음. 측정결과는 다음과 같음.



<측정지역>



<측정결과 - 전철::86km/h>

[표 3.1.20] 측정결과 (overall)

No	속도 [km/h]	5m			15m			25m		
		Peak		Overall [m/s2]	Peak		Overall [m/s2]	Peak		Overall [m/s2]
		Freq[Hz]	Value[m/s2]		Freq[Hz]	Value[m/s2]		Freq[Hz]	Value[m/s2]	
1	78	80	0.58	1.31	31.5	0.18	0.37	16	0.08	0.18
2	75	80	0.49	1.16	25	0.14	0.35	16	0.08	0.17
3	86	80	1.76	3.23	31.5	0.40	0.94	16	0.15	0.32
4	82	80	1.01	2.03	31.5	0.24	0.56	16	0.09	0.22

: 추론결과

시스템 추론 비교분석을 위해 실측 결과 데이터를 본 과제에서 개발한 알고리즘을 통해 데이터베이스에 존재하는 데이터와 함께 연산을 수행하였음. 시스템에서 계산된 결과는 다음과 같음.

[표 3.1.21] 추론 함수 가중치

구분	Activation Func.	ω_1		ω_2	
		근거리	원거리	근거리	원거리
continuous Data (Distance)	Linear	-0.53	0.7	1.3867	0.6567
continuous Data (velocity)	Exponential	0.0003		0.0928	

위의 ω_1, ω_2를 기반으로 추론을 수행하여 overall 값으로 환산하여 해석값과 함께 추론값을 비교한 결과는 다음과 같음.

[표 3.1.22] 실측 결과 및 추론 결과 비교

Distance / velocity	5m			15m			25m		
	실측	추론	비교	실측	추론	비교	실측	추론	비교
75 Km/h	0.49	0.424	116%	0.35	0.336	104%	0.17	0.234	73%
78 Km/h	0.58	0.634	91%	0.37	0.346	107%	0.18	0.254	71%
82 Km/h	1.01	1.221	83%	0.56	0.626	89%	0.22	0.257	86%
86 Km/h	1.76	2.287	77%	0.94	1.162	81%	0.32	0.255	125%

이상의 결과에서 실측 및 추론 결과를 비교할 때 전체적으로 실측결과에 의해 70% 이상 일치하는 추론값을 보이고 있음.

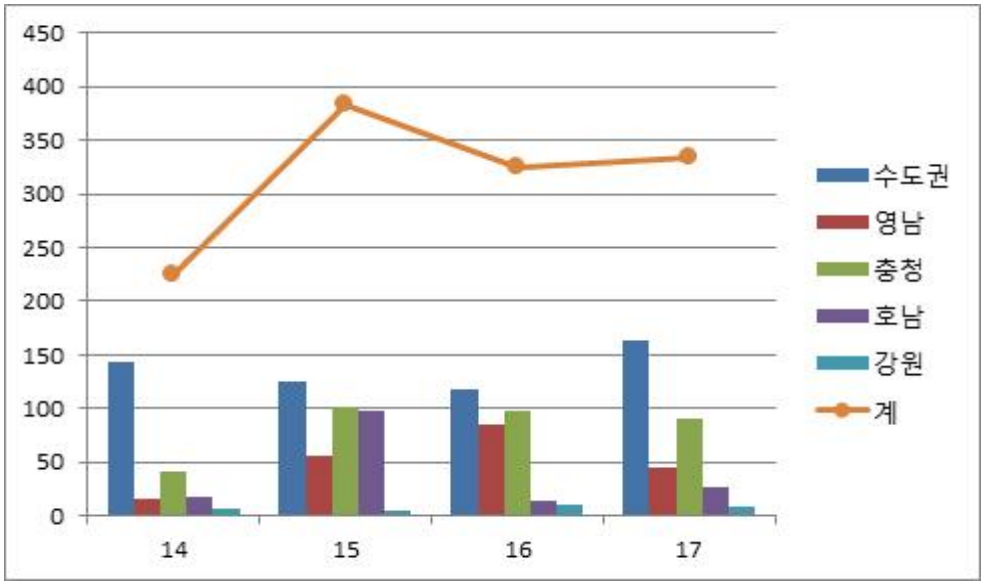
자. 철도선로변 소음저감기술 현장적용 연구

(1) 철도소음 민원 및 방음시설 성능/유지관리 현황 분석

① 철도변 주요 민원 현황 분석

- 경부선 등 11개 노선에 대한 구체적인 민원현안 분석

구분	전체 민원 발생수(건)						교량구간 소음 관련 민원 발생수(건)					
년도	2009	2010	2011	2012	2013	계	2009	2010	2011	2012	2013	계
경부선	104	123	84	70	65	446	4	8	5	5	7	29
경인선	20	19	17	23	9	88	0	0	0	0	0	0
경원선	14	42	33	31	19	139	4	5	3	6	0	18
경의선	25	14	7	5	97	148	0	0	1	0	1	2
중앙선	26	19	9	17	12	83	4	1	2	10	0	17
안산선	9	8	14	16	7	54	6	5	8	10	4	33
경춘선	1	1	0	1	4	7	1	0	0	0	4	5
기타선	9	8	3	3	2	25	0	0	0	0	0	0
계	208	234	167	166	215	990	19	19	19	31	16	104



[그림 3.1.137] 지역별, 연도별 소음 관련 민원 발생 현황

- 소음민원 발생 원인 분석을 위해 민원지역을 운행하는 차량의 차륜삭정 이력 및 주행거리 자료 분석, 방음벽 유지보수/교체 현황, 도시철도 교량설계 및 신설노선 방음터널 설계 현황 분석 수행

② 철도 선로변 민원지역 방음벽 현황 분석

- 방음벽 현장 흡음률 측정 및 성능시험



[그림 3.1.138]　철도 방음벽 방음판 음향성능 분석

– 기존 설치된 선로변 방음벽의 유지관리 성능 현황 분석을 통해 외부 표면재의 변형 및 내부 흡음재 충진상태 불량, 방수시트/흡음재의 경화 및 손상에 따른 성능저하 확인



[그림 3.1.139] 노후 철도 방음벽의 손상 현황

③ 저감기술의 철도 민원현장 적용 및 실용화 전략 수립



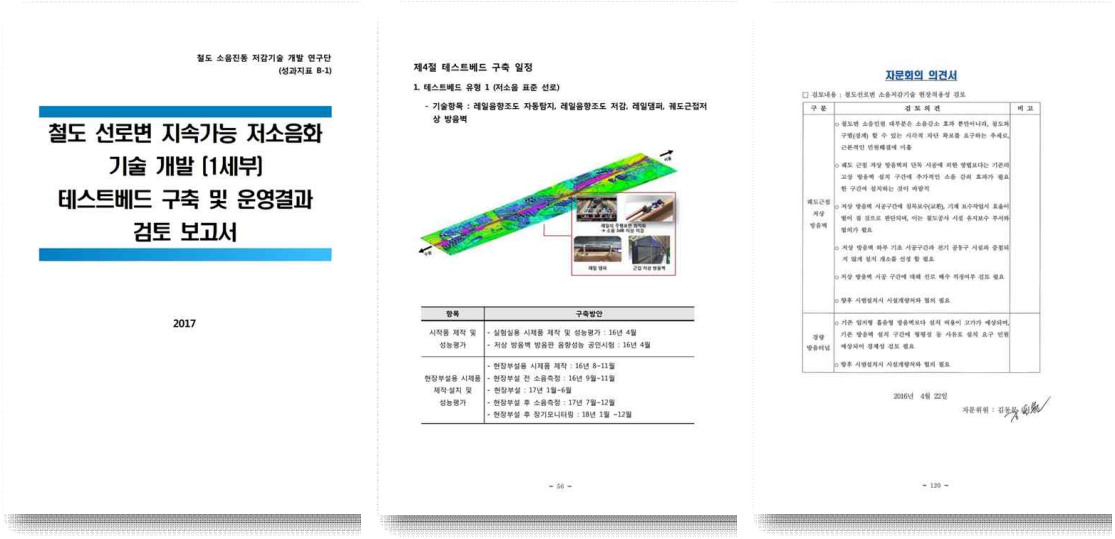
(2) 철도선로변 소음저감기술 현장적용안 제시

① 철도선로변 소음저감기술 현장적용 시방서 검토의견 수렴

– 대상기술 : 레일근접 저상 방음장치, 경량방음터널기술, 신설용 저소음 철도교량 단면
– 대상내용 : 기술설명서, 시방서, 유지보수설명서

② 소음저감기술 TEST BED 구축에 대한 현장적용안 제시

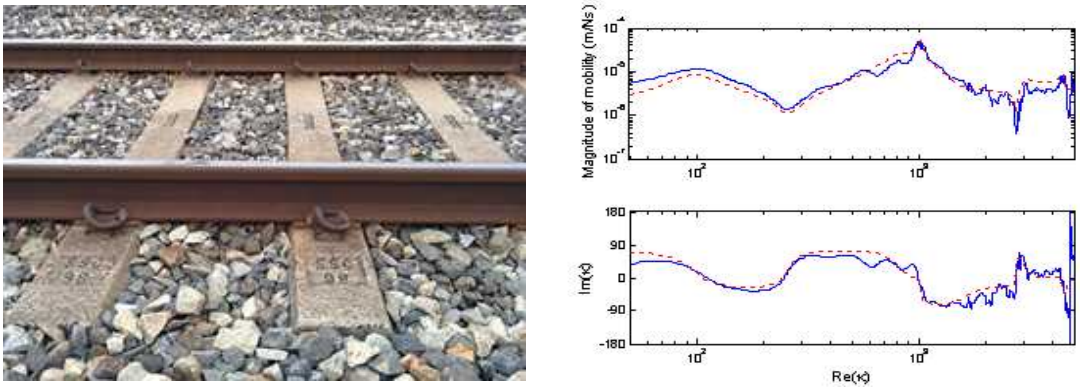
– TEST BED 후보지 선정 절차
– 개발기술 현장시공 절차(안)
– 개발기술 현장 성능시험 절차(안)
– TEST BED 구축 및 운영(안)



[그림 3.1.140] TEST BED 구축 및 운영결과 검토 보고서

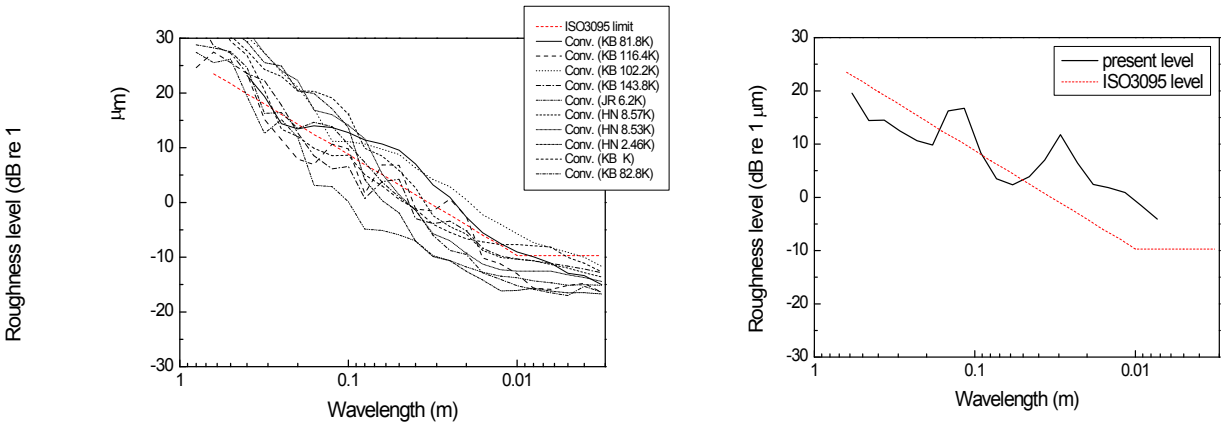
(3) TEST BED 별 주요 소음원 기여도 분석 결과

① TEST BED 대상 철도 궤도 동적특성 측정 및 저감전략 수립



[그림 3.1.141] (경부선 영업선) 기존선 궤도(자갈도상 토공구간) 가진점 모빌리티

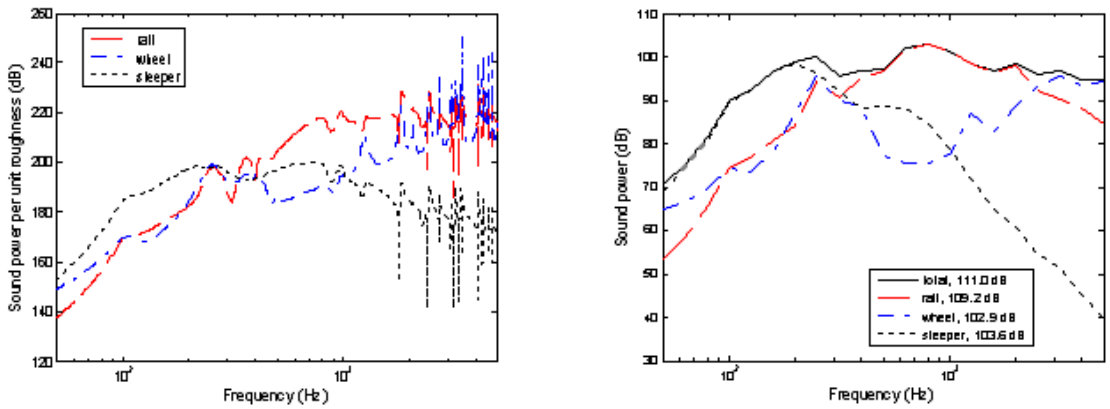
② TEST BED 대상 철도 선로 음향조도 측정 및 분석



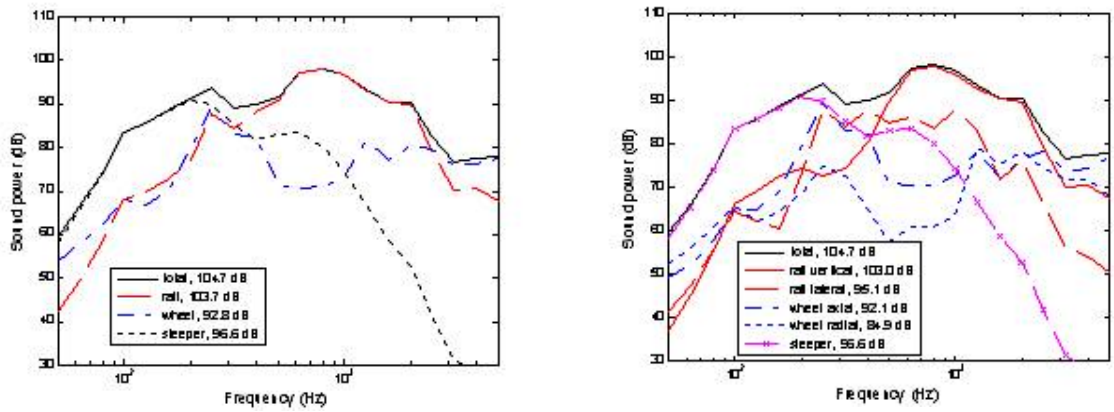
[그림 3.1.142] 레일 음향조도 결과 예시

③ TEST BED 대상 철도 선로 주행소음 예측

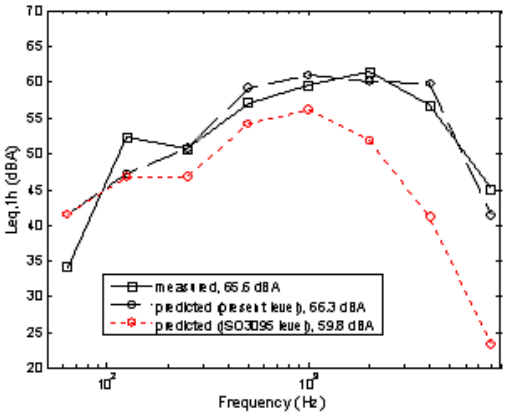
– 레일의 음향조도 레벨에 따른 소음 예측



[그림 3.1.143] 단위조도에 대한 차륜/레일 소음원의 음향 강도(좌), 측정 조도레벨에 대한 전동 소음원 음향 강도(KRNoise)



[그림 3.1.144] 레일의 음향조도가 ISO 3095(국제 표준선로 기준)의 레벨인 경우에 대하여 동일한 해석 방법을 적용하여 계산한 전동 소음원 음향강도(KRNoise)



[그림 3.1.145] 레일의 음향조도가 ISO 3095 (국제 표준선로 기준) 의 레벨인 경우 및 현재 레벨에 대하여 동일한 해석 방법을 적용하여 계산한 수음지에서의 소음도 예측값 (KRNoise)

④ 근접 저상 방음장치, 레일의 음향조도, 레일 댐퍼의 조합에 의한 소음저감 효과 예측

(Virtual Lab에 의한 근접장 해석 결과와 전동소음원모델 PRiNT, 철도 소음예측모델 KRNoise 1.6이 이용)

- 궤도 조건: 기존선, 자갈도상 궤도
- 차량 조건:

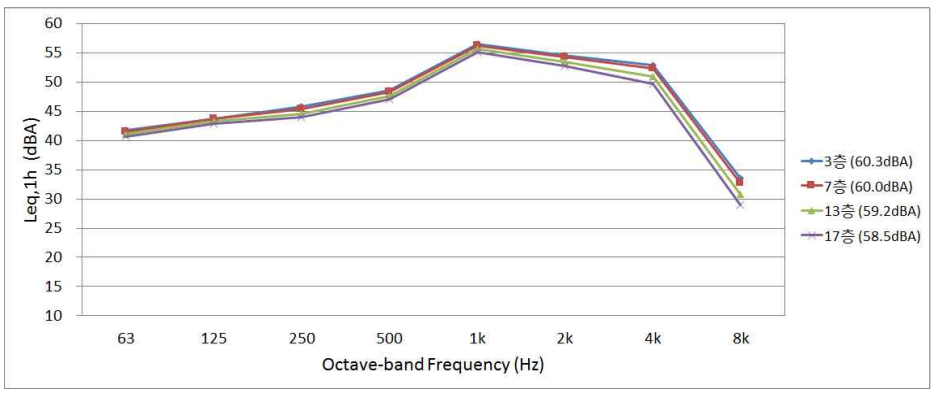
(Case 1) 전철 (10량 1편성) 시간당 12대 통과, 차량 속도 110km/h

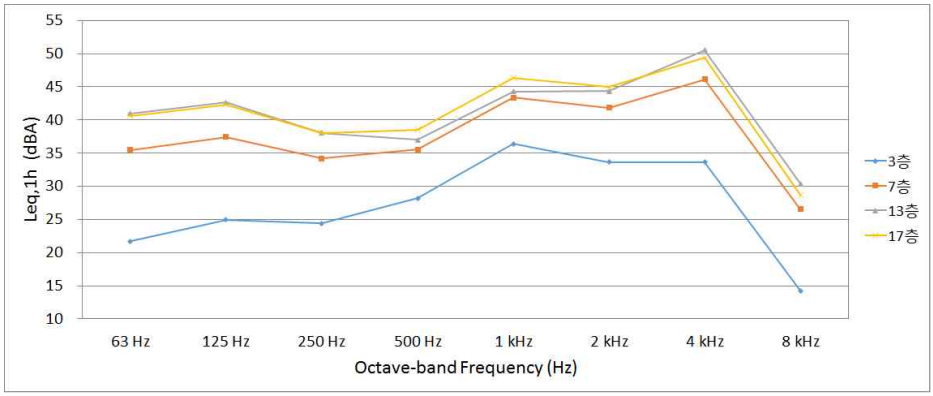
(Case 2) 전철 (10량 1편성) 시간당 12대 통과, 차량 속도 110km/h

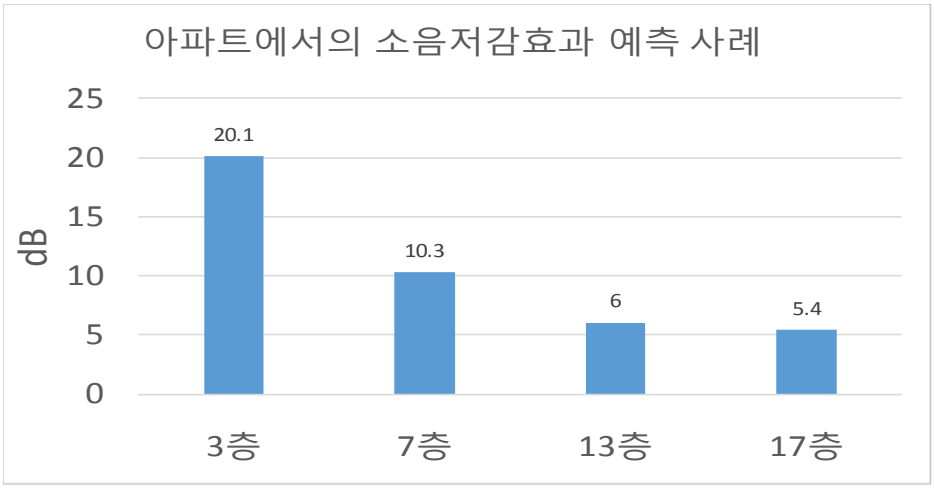
+ 무궁화 열차 (전기기관차1량+객차8량 총9량 1편성) 시간당 8대 통과, 차량 속도 120km/h
+ 화물차 (디젤전기기관차1량+27량 총28량 1편성) 시간당 4대 통과, 차량 속도 85km/h

(Case 3) 무궁화 열차 (전기기관차1량+객차8량 총9량 1편성) 시간당 8대 통과, 차량 속도 120km/h

+ 화물차 (디젤전기기관차1량+27량 총28량 1편성) 시간당 4대 통과, 차량 속도 85km/h







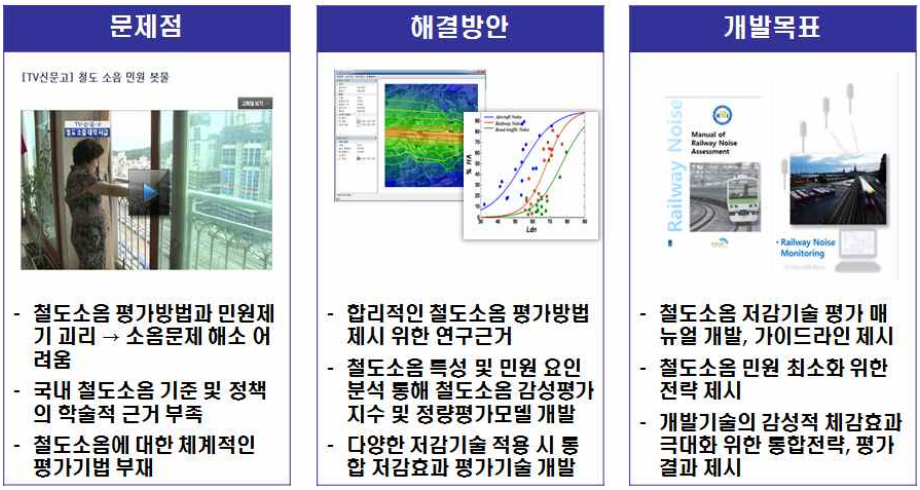
[그림 3.1.146] 철도 저소음화 기술 적용 시 소음 예측 예시

차. 철도소음저감기술 체감효과 연구

○ 열차의 고속화, 복잡한 철도망, 도심 인구밀집 → 철도 소음 노출인구 증가 및 선로변 주민·철도 승객의 민원제기 등 문제 야기

○ 소음의 물리량(physical quantity)과 수음자의 감성반응(psychological perception) 간 괴리 → 소음문제 해결의 어려움

○ 기존 철도 소음 평가방법의 한계를 극복하기 위한 연구의 필요성이 제기되는 시점



(1) 철도소음 annoyance 모델 개발

– 성가심(annoyance)은 소음의 영향을 나타내는 대표적인 평가 지표로, 일상생활에의 방해, 사회적 영향, 개인의 소음에 대한 감수성과 경험, 수음자와 음원 간의 이해관계 등 다양한 요인에 의해 규정되며, 일반적으로는 음과 관련된 불쾌감을 총칭하는 표현

– 소음 성가심은 1999년 WHO(World Health Organization)에 의해 건강 위해성(adverse health effects on human beings) 영향인자로 제시되어 소음의 감성평가에 활용되고 있음

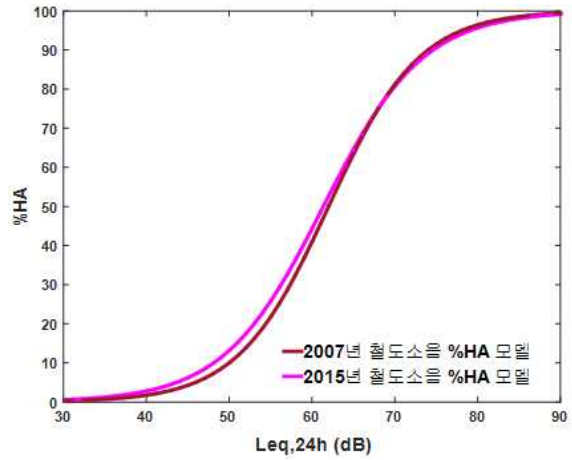
– 철도소음 민원지 주민의 철도소음에 대한 성가심 평가는 EC 환경소음 전문가 그룹 및 ICBEN(International Commission on Biological Effects on Noise)에서 제안한 지시치인 %HA(Percentage of the population that is highly annoyed)를 사용하며, 이는 높은 성가심을 호소하는 주민 비율을 나타냄

– 2007년 환경부 과제로 제안된 철도소음 성가심 반응 모델에 본 과제에서 수행된 철도소음 민원지 조사 결과를 반영해 업데이트된 철도소음 annoyance 모델을 제시함

– 2014년부터 2017년 수도권 일대의 철도소음 민원지 주민들을 대상으로 실시한 소음영향평가 조사에서 철도소음에 대한 annoyance 평가 결과를 반영하였으며, 약 350명의 데이터가 추가됨

– 2007년 annoyance 모델에 비해 다소 높은 성가심 반응을 나타낸 결과로, 사람들의 정온 한 환경에 대한 기대가 점차 증가하는 것이 주된 원인이라고 판단되며, 국외 연구결과에서도 과거에 비해 최근 철도소음에 대한 성가심이 높아진 것으로 보고되고 있음

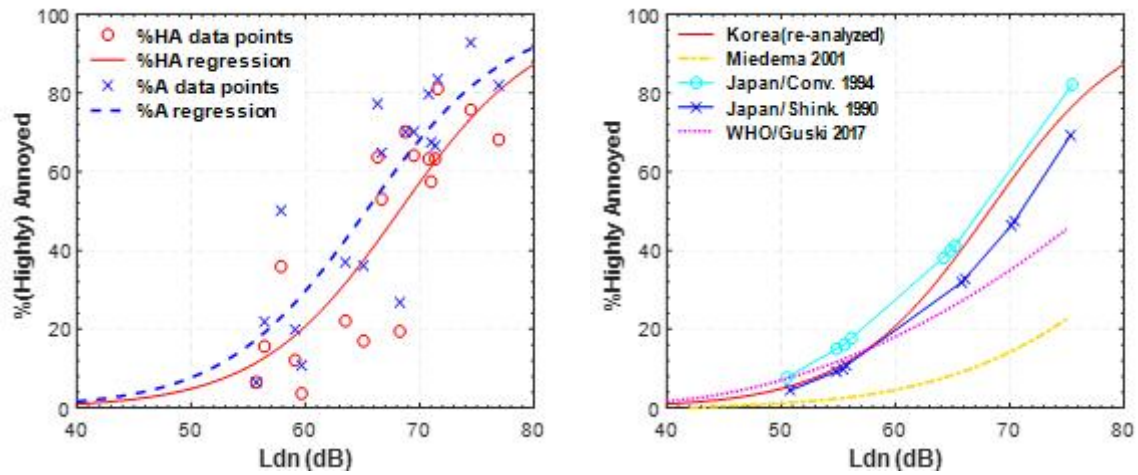
– 다만, 2007년과 2017년 모델 간 차이가 크지 않고, 추가된 데이터에 60dB 이하의 낮은 소음도에 대한 성가심 반응 데이터가 상대적으로 적게 구성되어 향후 60dB 이하의 낮은 소음도 범위에서의 데이터베이스 구축이 필요함



	Long-term annoyance 모델 (%HA 회귀식)
환경부(2007)	%HA = 100/(1+exp(-0.183*Leq,24h+11.347))
철도연(2015)	%HA = 100/(1+exp(-0.166*Leq,24h+10.188))

[그림 3.1.147] 철도소음 청감 성가심도 모델 연구 결과

- 철도소음의 24시간 평균 등가소음도가 70dB(A)이면, 응답자의 80% 정도가 높은 불쾌감을 느끼는 수준으로 민원이 많이 발생할 것으로 예측됨
- 국외에서도 철도소음 감성반응에 대한 연구가 활발히 수행되었으며, 본 과제 연구결과와 국외 대표적인 annoyance 모델을 비교한 결과를 아래와 같이 제시함



[그림 3.1.148] 한국의 철도소음 annoyance 모델(좌)와 국가별 annoyance 모델 비교(우)

- 소음 위해성 평가에서는 철도소음의 평가단위로 야간에 가중치 10dB를 부여하는 Ldn 또는 저녁시간에 5dB, 야간에 10dB의 가중치를 부여하는 Lden을 사용하는 것이 일반적임
- 한국인의 철도소음 annoyance 모델은 상당히 높은 수준의 성가심 반응을 나타내는 결과로, 일본의 연구결과와는 유사하며, 최근 WHO 연구결과로 제시된 모델 보다는 다소 높은 수준임
- 한국은 도심지 공동주택이 밀집한 지역이 많고, 소음 뿐 아니라 진동에 의한 영향, 새벽 및 야간 운행이 빈번하여 수면방해를 유발하는 점 등이 높은 성가심도 반응의 원인으로 분석됨

(2) 개발기술 적용시 소음저감 체감효과 분석

- 철도소음 annoyance 모델은 현재 소음 노출 수준에 따른 주민의 위해성을 정량적으로 평가하는 데도 도움이 될 뿐 아니라, 향후 저감기술 적용 시 주민의 체감효과를 예측하고 확인하는

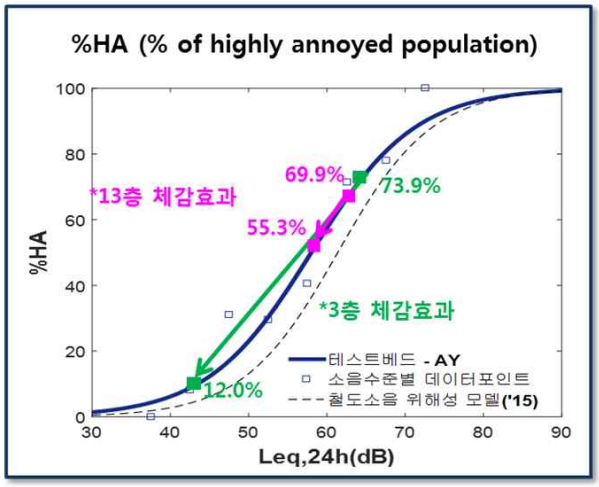
데 활용하여 보다 효율적인 저감대책 수립의 근거자료가 될 수 있음

① 소음저감 체감효과 분석

- 110km/h 전동차(시간당 12대 운행시) 기존선 자갈궤도, 선로 55m 거리 고층 아파트 기준
②: 근접저상방음벽 적용시
③: 레일표면조도 저감 + 근접방음벽 + 레일댐퍼 저감 조합 적용시

층수(높이)	수음점에서의 Leq,1h(dBA)				
	①방음벽 없음	②	②-①	③	③-①
3층(9m)	64.9	50.9	-14	44.8	-20.1
7층(20m)	64.5	59.1	-5.4	55.5	-9.0
13층(35m)	63.6	61.5	-2.1	59.4	-4.2
17층(46m)	62.8	62.2	-0.6	58.6	-4.2

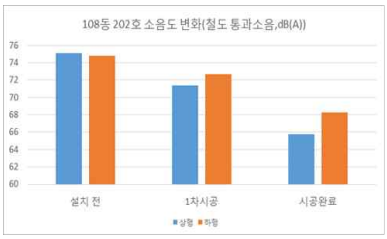
소음저감 체감효과
⇒저층부 %HA : 60% 이상 저감
⇒고층부 %HA : 10~20% 저감

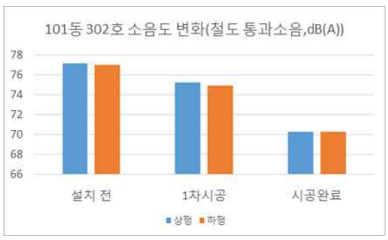


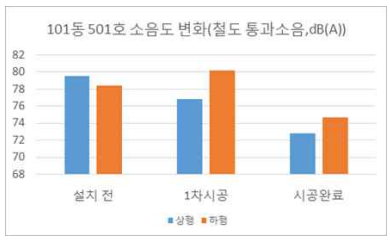
[그림 3.1.149] 철도 저소음화 기술 적용에 의한 체감효과(성가심도) 분석

- 철도소음 저감기술 적용 시 철도소음의 물리적 크기가 5dB 저감되면, Leq 70dB(A)에 노출된 주민의 높은 불쾌감 호소 비율은 약 10% 저감되는 효과 예측됨

② 저상방음장치 적용 TEST BED 소음저감 체감효과 예측 및 검증







- 시공전에 비해 시공후, 열차 소음만의 1시간 등가소음(도로 및 주변소음 제외)은 위치별로 5.7~7.7dB 저감
- 시공전에 비해 시공후, 공정시험기준에 따른 배경소음을 포함한 열차소음의 1시간 등가소음은 위치별로1.4~4.5dB 저감

[표 3.1.23] 배경소음을 제외한 열차소음만의 1시간 등가소음과 %HA 저감량 예측결과

위치	열차 소음만의 1시간 등가소음(dB(A))			%HA 저감량
	시공전	시공후	저감량	
A	58.8	52.3	6.5	21.3%
B	60.7	55.0	5.7	21.4%
C	63.3	55.6	7.7	30.2%
D	62.6	56.7	5.9	21.3%

[표 3.1.24] 배경소음을 포함한 열차소음만의 1시간 등가소음과 %HA 저감량 예측결과

위치	열차 소음, 배경소음 포함 1시간 등가소음(dB(A))			%HA 저감량
	시공전	시공후	저감량	
A	62.0	59.9	2.1	8.7%
B	66.8	62.3	4.5	17.3%
C	66.2	63.3	2.9	11.1%
D	68.4	67.0	1.4	4.5%

- Annoyance model을 이용한 민원지 주민의 체감효과(%HA) 예측 결과
- 열차소음만을 고려하면 약 21~30% 저감,
- 배경소음을 포함한 열차소음을 고려하면 약 4.5~17.3% 저감

- 저상 방음장치 시공 전후 Testbed에서 수행된 소음영향평가 결과
- annoyance 평균값은 4.6 -> 3.6 으로 저감 (저감량 1, 0~10 scale)
- %HA는 29.2% -> 21.1% 로 저감 (저감량 8.1%, 0~100%)

- 소음영향평가에서 철도소음의 annoyance 평가 시, 배경소음의 영향을 제외하고 평가하기는 사실상 어려우며, 일반적으로 annoyance 연구 시 배경소음의 영향을 배제하기 위해서는 배경소음이 매우 낮은 지역의 조사결과만을 분석함
- 따라서 본 과제에서 제시된 annoyance 모델 검증은 배경소음을 포함한 열차소음을 계산한 경우의 %HA 예측 결과를 이용하여 비교하는 것이 적절하며, 이는 약 4.5~17.3%로 예측되어 실제 소음영향평가 결과 %HA 저감량이 8.1%인 것과 비교하면 유사한 수준으로 확인됨

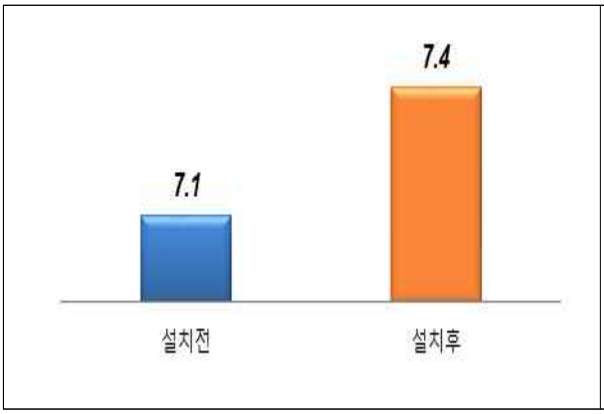
③ TEST BED 소음영향평가 결과 분석

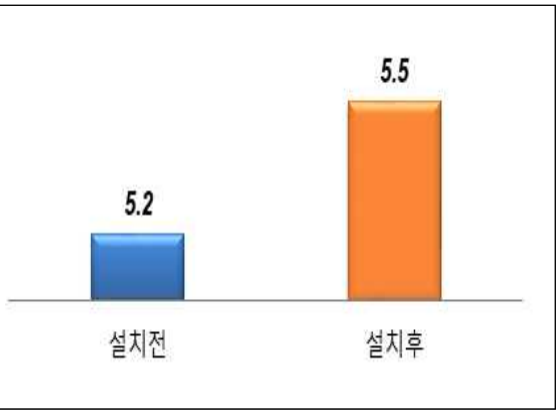
- 철도소음 저감기술(근접 저상 방음장치) 설치 전후 소음영향평가 비교

구 분	설치 전 2017년	설치 후 2018년
적용기술	근접 저상 방음장치	
조사대상	일산 지역 TEST BED 인근 주민	
조사방법	구조화된 설문지를 이용한 1:1 개별 면접조사	
표본크기	전체 : 72가구	전체 : 90명
신뢰수준	95%(±8.36%p)	95%(±5.54%p)
조사기간	2017년 11 월	2018년 4월

- 방음장치 설치 후 집이나 주변환경에 대한 만족도가 향상된 결과

▪ 집에 대한 만족도	▪ 주변환경에 대한 만족도





– 소음의 크기나 일상생활 방해가 설치 전에 비해 유의미한 수준으로 저하됨

▪ 소음이 시끄러운 정도	▪ 소음에 의한 대화/전화 방해 정도
	

– 철도소음에 대한 성가심과 수면방해가 감소함(자동차 및 기타 소음은 차이가 거의 없음)

▪ 소음의 성가심	▪ 소음의 수면방해
	

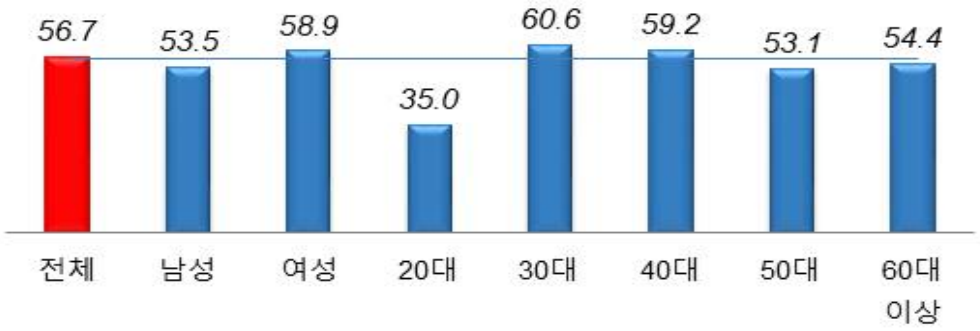
– 가장 불쾌한 소음원이 설치 전 철도소음에서 설치 후에는 자동차 소음으로 변경되었으며, 전체적인 소음 정도도 낮아짐

▪ 가장 불쾌한 소음	▪ 집에서 들리는 모든 운송체의 소음 정도



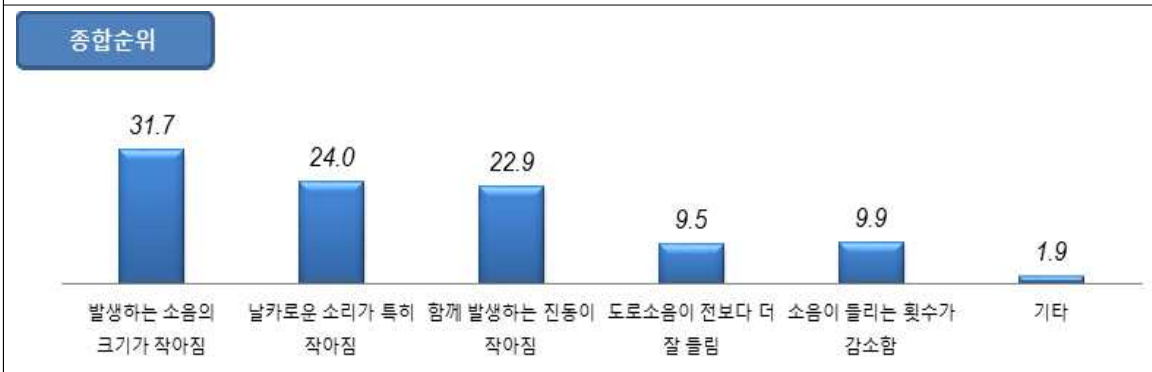
– 방음장치 설치 후 철도소음이 전과 비교해 평균 56.7% 저감 된 것으로 체감

▪ 저감시설 설치 전과 비교해 체감되는 철도소음 저감효과



– 소음이 저감 되었다고 체감하는 주요 원인은 소음의 크기, 날카로운 소리, 진동의 저감 등

▪ 저감시설 설치 전과 비교해 발생하는 소음 특성의 변화



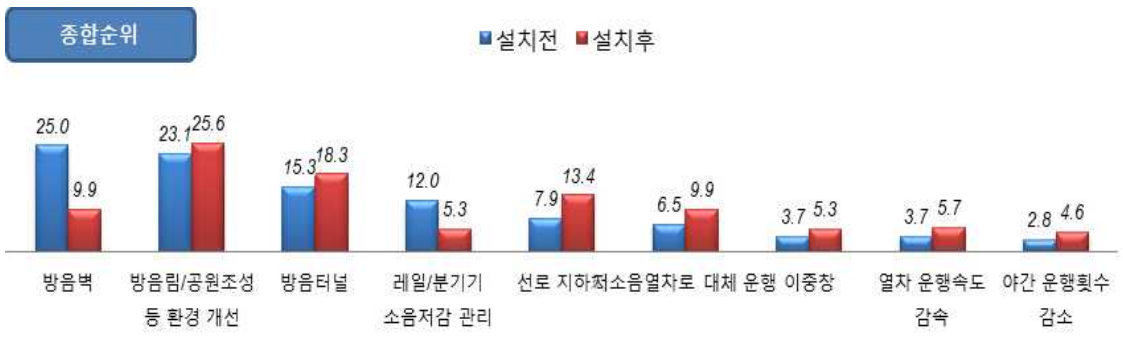
– 근접 저상 방음장치는 시야 확보와 채광/일조권 확보, 경관 보존 등이 장점으로 조사

▪ 일반방음벽 대비 근접 저상방음장치 장점



– 근접 저상 방음장치 설치 전 방음벽을 가장 우선순위로 선택하였으나, 설치 후에는 환경개선에 대한 요구가 가장 큼

▪ 철도소음 저감을 위한 현실적인 대책



카. 경량 방음터널 기술 개발

(1) 1차년도

○ 철도주변지역은 도시화로 인해 고층아파트가 건설되어 있는 관계로 고층 거주주민의 소음피해 수준이 심각한 상황이다. 특히 기존 철도를 개량하여 고가구조로 재건설된 지역주변은 더욱 심각한 상태이다.
○ 본 연구에서는 철도변 고층아파트 지역의 방음대책의 일환으로 방음터널의 표준설계도 도출을 목표로 연구를 진행하였다. 방음터널의 검토대상은 교량으로 이루어진 철도변 15층 이상의 중층 및 고층아파트를 대상으로 하였다.
○ 1차년도 연구에서는 철도전용 방음터널의 선행연구사례와 규정을 조사한 후 기존의 도로용 구조물과 상이한 철도전용 방음터널의 철도가 가지고 있는 특수여건을 고려하여 방음터널을 설치할 교량 및 고가교의 한계하중과 터널의 음향효과를 분석하였다.

(가) 철도변 소음현황

○ 철도변 소음현황을 실측한 결과 방음터널이 설치되어 있는 수인선 및 당산철교의 경우 측정시간 내에서는 소음 기준은 만족하는 것으로 나타났다.
○ 그러나 방음터널이 설치되어 있지 않은 지역의 경우 최대 소음도는 최고 104.2dB로 조사되었으며, 평균 소음도의 경우 최고 74.9dB(A)로 나타났다.
○ 비록 방음터널 설치로 야기되는 중량으로 인해 기존 철도 교량의 보강공사가 요구되고 있지만 선로 교량 높이 대비 동일 높이 및 이격거리 기준으로 비교해 보면, 방음터널의 설치로 인해 약 20 dB 소음 감소 효과를 보고 있는 것으로 판단되고 있다.

[표 3.1.25] 철도 소음 측정 결과

분류	측정장소	통과 대수 [대수/측정시간]	최대 소음도[dB]	평균 소음도 [dBA,Leq]
방음터널 미설치 지역	인천 수인선 호구포역	9	83.1	63.4
	군포 안산선 산본역 출발선	18	85.5	67.4
	군포 안산선 산본역 도착선	15	85.9	69.9
	화성 경부선 병점역	35	99.1	69.8
	부산 동해남부선 거제역	2	91.0	68.3
	부산 동해남부선 동래역	3	104.2	74.9
	춘천 경춘선 남춘천역	11	88.3	70.6
방음터널 설치 지역	서울 지하철 당산철교	47	82.3	68.4
	인천 수인선 논현역	7	86.3	63.9
	일본 북해도 지에이 타이마에역	6	83.0	63.6

(나) 방음터널의 설계방향 설정

○ 본 연구에서 개발코자 하는 방음터널은 기존도시철도 고가교량구간 철도변 지역을 대상으로 한다.
○ 철도는 복선구간을 원칙으로 하므로 선로 폭은 약 10 m 내외로 예상하며, 철도의 동력차량은 전기동차로 가정한다.
○ 철도변 양측에 위치한 공동주택의 높이가 고층주거지로 소음피해지점이 최소 10 층 이상에서 20 층 내 거주자를 주된 소음영향범위로 한다.
○ 결과적으로 선정코자 하는 방음터널 후보지는 철도의 운행으로 인해 발생하는 소음피해가 주변에 있는 도로교통소음과 혼재되어 소음피해가 크고, 분쟁의 요인이 되고 있는 지역에 설치할 목

적으로 방음터널을 개발한다.

(다) 철도변 방음터널 설치를 위한 구조적 특수여건

○ 교량/고가교에 방음터널 구조물을 설치할 때에는 터널구조물 자체의 자중 증가효과보다 터널구조물이 터널주변의 공기흐름을 차단하여 야기되는 풍압변화가 중요한 변수가 된다. 풍압으로 인해 교량상판 구조물에 과다한 굽힘 모멘트가 작용하게 되면, 교량의 구조안전성에 치명적인 영향을 주게 된다.
○ 풍압의 영향을 낮추기 위해서는 방음터널 측면을 개구부로 사용하는 것이 유리하다. 문제는 터널 측면에 개구부가 존재하게 되면, 철도 주행 시 발생되는 소음에너지도 저감 없이 주변 아파트의 중, 고층부로 전파된다. 따라서 방음터널 측면 부위를 풍압의 영향은 낮추면서, 소음의 차단은 가능하도록 해야 할 필요가 있다.
○ 방음터널 설치구간은 교통이 혼잡한 도심권에 위치하고 있기 때문에, 도로소음으로 발생되는 배경소음 수준을 고려하여 적합한 수준으로 소음저감방향을 설정하여야 한다.

(라) 철도의 특수여건을 고려한 방음터널의 설계목표

○ 방음터널 외부는 풍압을 최소화할 수 있는 면풍설계를 하여야 한다.
○ 방음터널 설계는 아파트 15층 이상에서 10 dB 저감하는 수준이 적합하다.

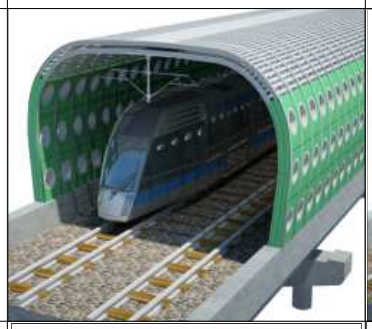
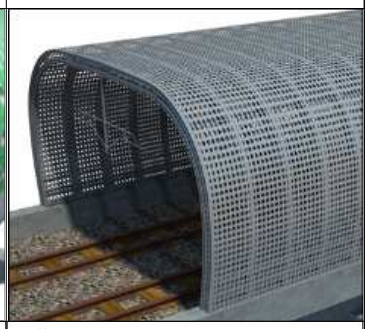
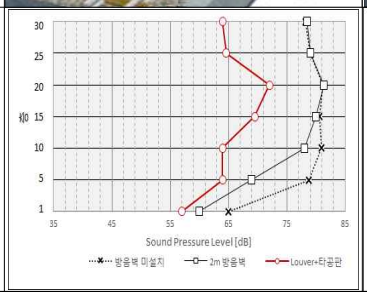
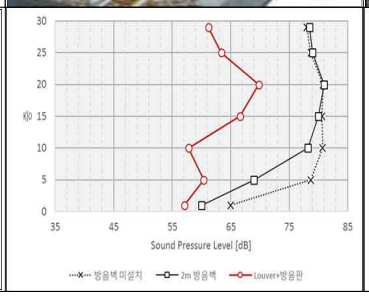
(마) 터널 방음재료 검토

○ 음향루버의 설치를 통해 기대되는 소음 감소 효과는 삽입손실 특성으로 평가된다. 삽입손실특성은 루버의 두께와 단면적의 직경에 의해 결정된다. 일반적으로 건축구조나 산업기계에서 사용되는 루버의 삽입손실 정도는 500 Hz 기준에서 10 dB 내의 수준으로 알려져 있다. 그러나 방음터널과 같이 공기유동 흐름을 방해하지 않고 소음감소효과를 보기 위해서는 개구부의 직경은 최소 200mm 이상, 최대 1000 mm 수준은 되어야 할 것으로 판단되고 있다.
따라서 방음터널 용도로 루버를 설치 할 경우, 예상되는 삽입손실 크기는 5 dB 수준이내일 것으로 예상된다.
○ 알루미늄 타공판을 방음터널 용도로 활용 할 경우, 타공율 30 % 수준의 재료 선택 시 중주파수 대역에서는 8 ~ 10 dB, 1k Hz 이상의 고주파수 대역에서는 10 dB 이상 수준의 소음방지효과를 보여주고 있다.
따라서, 방음터널 측면재료로 알루미늄 타공판을 사용할 경우, 타공율 30 % 수준의 재료사용을 통해 풍압 영향을 최고화시키면서 일정수준의 소음방지효과를 기대해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

(바) 설계목표를 달성하기 위한 설계 실행방향

○ 풍압에 대한 방음터널 구조안전성을 향상하키기 위해 터널 측면 및 상부를 부분 개방한다.
○ 부분 개방으로 인해 소음피해가 예상되는 가시선 지역은 방음 루버와 타공판으로 구성된 방음재를 설치하는 방안을 제시하였다.
○ 방음터널의 구조·음향을 검토하여 기본설계안 3가지를 작성하였다.

[표 3.1.26] 방음터널 기본설계안

구분		기본설계 1안	기본설계 2안	기본설계 3안
재질	지붕	타공판	흡음패널	타공판
	벽	Louver	Louver	타공판
형상안				
저감효과 예측결과				

(2) 2차년도

(가) 수치모형실험을 통한 방음터널 상부 및 측면소재 최적형상 개발

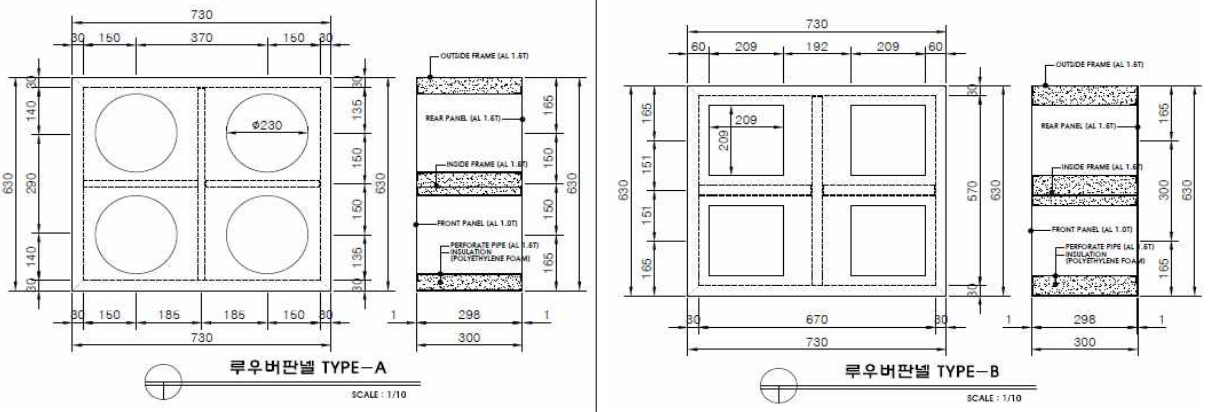
① 방음재료의 음향특성 분석

○ 교량 위를 주행하는 철도 차량의 주행 소음에 의한 소음피해를 저감시키기 위한 방음시설은 일정 크기 이상의 차음성능이 요구되며, 본 연구에서는 고층까지 소음 피해를 저감 시킬 수 있는 터널형 방음벽을 검토하였다. 추가적으로 외부 유동에 의한 방음시설의 풍하중을 저감시키기 위해 방음벽 일부를 개방하는 형태의 방음시설을 검토하였다. 방음벽의 일부를 개방할 시 차음성능이 크게 하락할 수 있으므로 10 dB 이상의 차음성능을 유지 할 수 있도록 설계변수를 설정하여 검토하였다.

○ 차음성능 10 dB 이상을 유지하는 방음재료를 도출하기 위해 이중판 간격, 개공율 등의 설계변수를 이론적으로 검토하였으며, 검토된 설계 변수를 조합하여 아래 표와 같이 소형시편을 제작하여 차음성능을 검토한 결과 음향 루우버의 경우 Type A가 36 %, Type B가 38 % 개공율로 구성되어 개공율 증가 시 차음성능이 약 2 dB 하락하는 것으로 측정되었지만 관심 주파수 500 ~ 1000 Hz 대역에서 약 15 ~ 20 dB로서 연구 목표치의 차음성능을 만족하고 있는 것으로 측정되었으나, 타공판넬의 경우 Type A가 35 % 개공율, Type B가 40 % 개공율로 구성되어 측정 결과 관심 주파수 영역에서는 본 연구에서 목표로 하는 차음성능 목표치에는 다소 부족한 차음 특성을 보이는 것으로 분석되었다.

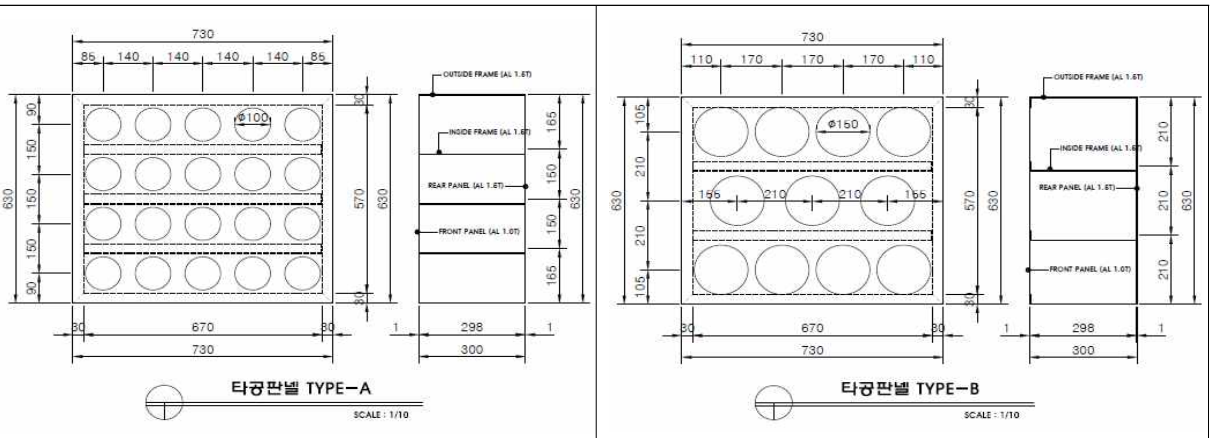
[표 3.1.27] 제작된 시편 규격

구 분	설명	재료 및 규격	시험개구면적
루우버 판넬	시험편의 크기	– 가로 630 mm × 세로 730 mm × 두께 300 mm	0.48 m^2
	구 성	– 흡음재 : POLYETHYLENE FOAM – 전면판 : AL 1.0 mm – 외부/후면판 : AL 1.5 mm	
타공 판넬	시험편의 크기	– 가로 630 mm × 세로 730 mm × 두께 300 mm	
	구 성	– 흡음재 : Sound Absorption Sheets 20 mm – 전면판 : AL 1.0 mm – 외부/후면판 : AL 1.5 mm	



(a) 루우버판넬 TYPE-A(36%) (b) 루우버판넬 TYPE-B(38%)

[그림 3.1.150] 루우버판넬 시편 도면



(a) 타공판넬 TYPE-A(35%) (b) 타공판넬 TYPE-B(40%)

[그림 3.1.151] 타공판넬 시편 도면

○ 검토된 방음재료는 음향루우버와 타공판이며 10 dB 이상의 차음성능이 존재하기 위해 설계변수로서 개공율과 이중판 간격 및 흡음재 두께를 검토하였다. 검토된 방음재료의 검토 결과는 다음과 같다.

음향 성능 ∝ 시편 깊이(L) : 500 ≫ 400 mm

흡음 두께 100 ~ 200 mm (500 ~ 1,000 Hz)

개공율 : 30 ~ 40 % 기준

– 루우버 : 10 dB (15 dB 상한)

– 타공판 : 5 dB (10 dB 상한)

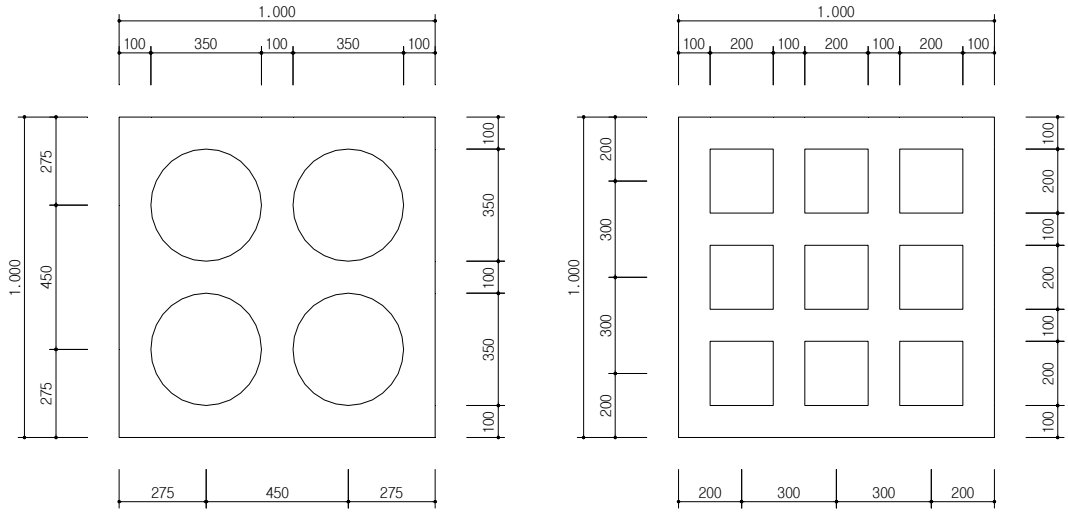
개구부 형상 : 차음성능 기여도 낮음

② 방음재료 구조해석

○ 루우버 판넬과 타공 판넬에 대해 아래 표와 같이 개공율, 구멍크기 및 구멍개수가 다른 2가지 TYPE에 대해 전산유체해석을 수행하고 구멍이 없는 충실단면과 비교하였다.

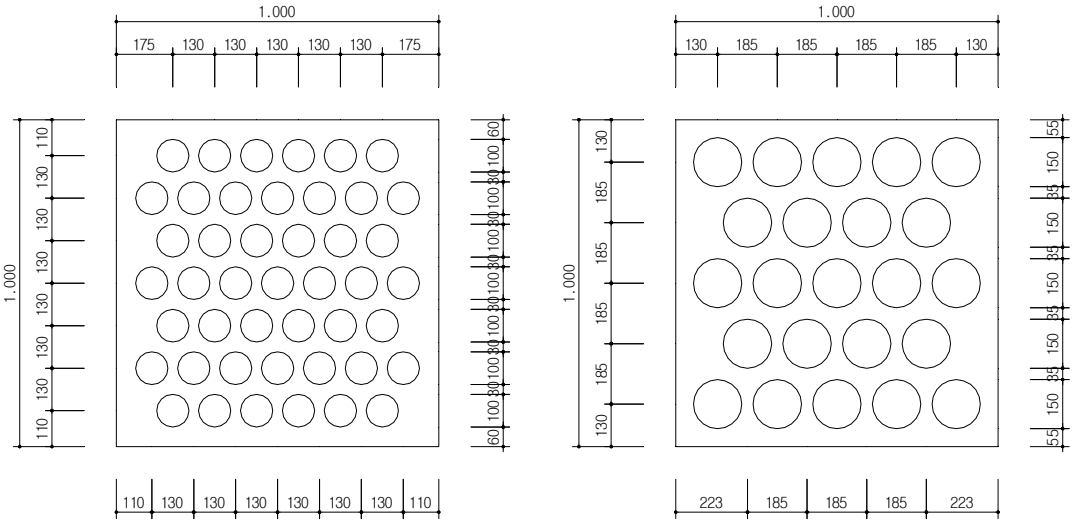
[표 3.1.28] 검토 단면 제원

구분	루우버 판넬		타공 판넬	
	TYPE A	TYPE B	TYPE A	TYPE B
개공률(%)	38.5	36.0	35.3	40.6
구멍크기(mm)	Φ350	200×200	Φ100	Φ150
구멍개수(EA)	4	9	45	23



(a) 루우버 판넬 TYPE A (b) 루우버 판넬 TYPE B

[그림 3.1.152] 풍압해석 검토단면(루우버 판넬)



(c) 타공 판넬 TYPE A　　(d) 타공 판넬 TYPE B

[그림 3.1.152]　풍압해석 검토단면(타공 판넬)

○ 루우버 판넬 TYPE A(개공률 38.5%), TYPE B(개공률 36.0%), 타공 판넬 TYPE A(개공률 35.3%), TYPE B(개공률 40.6%)의 개공률에 따른 풍하중 재하면적 감소로인하여 풍하중이 선형적으로 감소한다고 가정하였을 경우 루우버 판넬 TYPE A는 61.5%, TYPE B는 64.0%, 타공 판넬 TYPE A는 64.7%, TYPE B는 59.4%의 풍하중이 재하되었다.

○ 그러나, 루우버 판넬 TYPE A, TYPE B, 타공 판넬 TYPE A, TYPE B의 총 4가지 방음 판넬에 대하여 풍하중의 영향을 검토한 결과, 개공률이 작을수록 풍하중이 크게 작용하고, 개공률이 동일 하더라도 구멍크기가 작을수록 풍하중이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 또한 개공률을 10%~60%로 변화시켜 개공률에 따른 영향을 검토한 결과 풍하중은 개공률에 선형적으로 변화지 않으며, 선형적인 예상값보다 큰 것으로 나타났다.

○ 따라서, 방음터널의 풍하중 재하시 해석 결과로부터 최대 발생비율을 적용하여 루우버 판넬 TYPE A는 74%, 루우버 판넬 TYPE B는 75%, 타공 판넬 TYPE A는 91%, 타공 판넬 TYPE B는 83% 이상의 풍하중을 적용 하여야 할 것으로 검토되었다.

[표 3.1.29] 적용 풍하중

구분		개공률(%)	풍하중 재하 비율 (%)	
			선형 가정	해석 결과
루우버 판넬	TYPE A	38.5	61.5	74
	TYPE B	36.0	64.0	75
타공 판넬	TYPE A	35.3	64.7	91
	TYPE B	40.6	59.4	83
비고				적용

(나) 방음터널 상부 및 측면소재 시편제작 및 성능시험

○ 방음터널의 상부 및 측면소재는 루우버 및 타공판으로 검토하였으며, 시편의 소재는 금속재인 알루미늄으로 제작하고 흡음재는 Polyester 와 Melamine Foam을 사용하여 시편 제작 후 성능시험을 시행하였다.

[표 3.1.30] Louver Plate Specification for Reverberation Chamber

Descriptions	Absorbent materials	Linning thk. (mm)	Dim. /unit (wide×hight×thk)(mm)	per unit			
				Open Area (%)	Dia.Φ (mm)	No. of Hole (EA)	pitch (mm)
Type A (Circular)	Polyester	50	2,000×2,000×400	38	350	4	450
Type B (Rectangular)	Polyester	50	2,000×2,000×400	36	200x 200	9	300
Type C (Circular)	Polyester	50	2,000×2,000×400	36	225	9	300

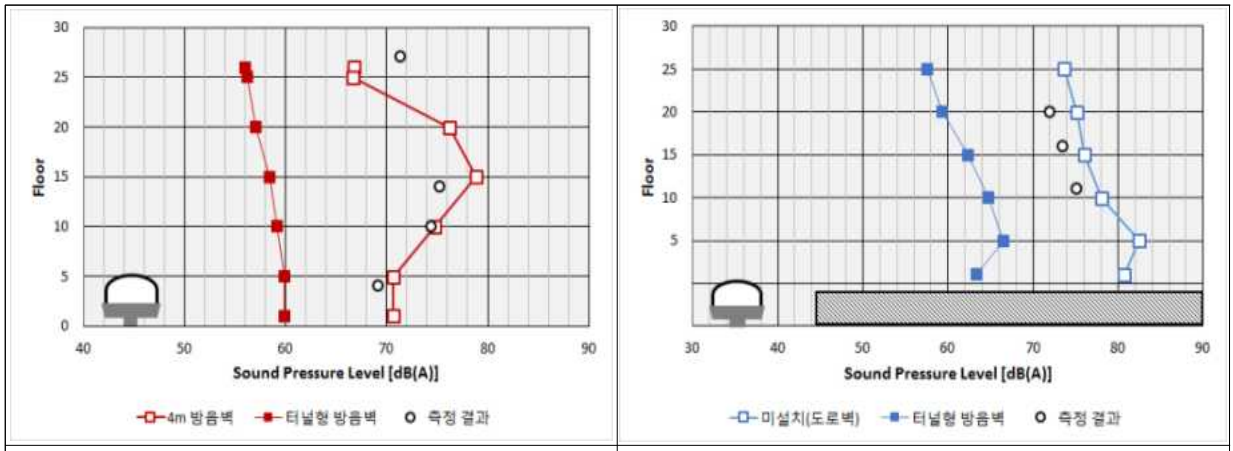
[표 3.1.31] Perforated Plate Specification for Reverberation Chamber

Descriptions	Absorbent materials	Linning thk. (mm)	Dim. /unit (wide×hight×thk)(mm)	per unit			
				Open Area (%)	Dia.Φ (mm)	No. of Hole (EA)	pitch (mm)
Type A	Melamine	100	2,000×2,000×400	35	100	45	130
Type B	Melamine	100	2,000×2,000×400	40	150	23	185

○ 음향감쇠계수측정은 KS F 2808:2006(건물부재의공기전달음 차음성능 측정방법)의 시험방법에 따라 음원실과 수음실 사이에 시험체를 설치한 후, 주파수 범위 100Hz ~ 5000Hz의 광대역 소음을 발생시켜 2개 잔향실 내의 평균 음압레벨차를 측정하고, 수음실의 흡음력을 보정하여 규격에서 주어진 산출식에 따라 음향감쇠계수를 산출하였다.
○ 루우버의 성능시험결과 세가지 타입(원형 Type A,C, 사각 Type B) 모두 500Hz의 저주파 이하에서 소음감소가 적고 1,000Hz이상의 주파수에서 소음감소가 크며, 삽입손실치의 평균은 약 10dB내외인 것으로 측정되었다.
○ 원형 루우버(Type A)가 사각 루우버(Type B)보다 600Hz이하에서는 유리하며 1000Hz이상의 중주파수에서는 사각 루우버가 원형보다 높은 삽입손실을 보이고 있다. 따라서 철도소음의 소음감소에는 물론 풍하중 감소에도 효율적인 원형 루우버의 사용이 바람직할 것으로 검토되었다.
○ 타공판의 성능시험결과 두 가지 타입모두 500Hz이하의 주파수 대역에서 소음감소효과가 4dB이하로 매우 낮으나 600~2500Hz에서는 직경이 150mm인 Type B(개공율 40%)인 타공판의 투과손실이 직경 100mm인 Type A(개공율 35%)에 비해 낮은 것으로 확인되었다.
○ 두 가지 타입 모두 투과손실치는 1000Hz이상의 중주파수 이상에서 약 6dB 이상의 삽입손실을 보임으로서 당초 기대한 약 5dB내외의 값보다 다소 높은 소음감소효과를 나타내고 있다.

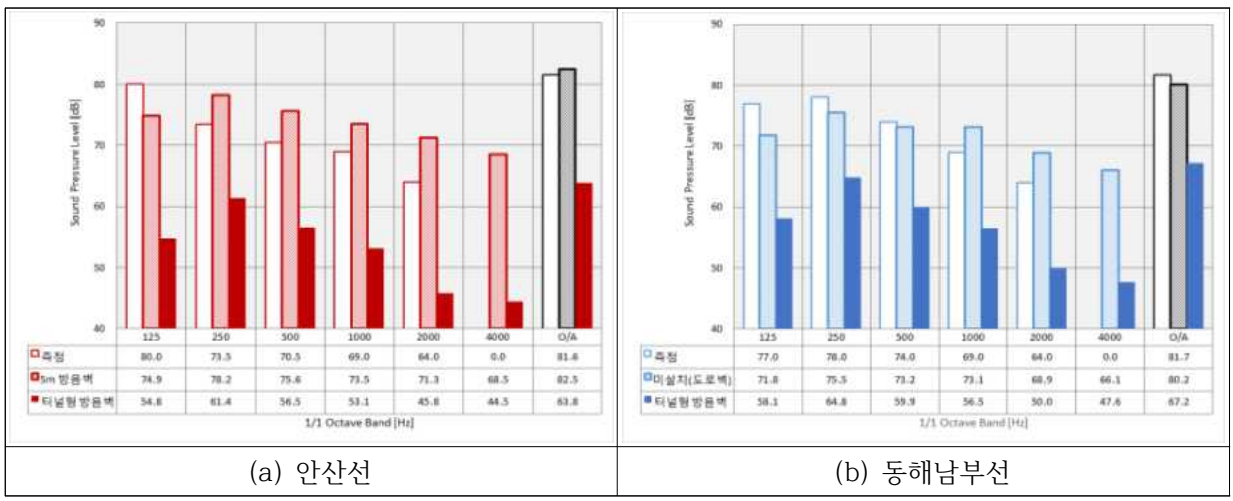
(다) 광음향기법(Ray Tracing Method)을 이용한 환경 소음 예측

○ 광음향기법을 이용하여 안산선 산본역 인근 및 동해남부선 거제역 인근 지역의 소음예측을 수행하였으며, 4m 방음벽이 설치되어있는 안산선 구간의 예측결과 터널형 방음벽 설치 시 직접음 영향이 적은 **하부층은 약 10 dB**, 직접음 영향이 많은 **15 층 높이는 약 15 dB 소음 저감 효과**가 있는 것으로 예측되었다. 고층의 경우 타공판넬이 설치되어 있으며 약 10 dB 소음저감 효과가 있는 것으로 예측되었다.
○ 선로 옆 언덕위에 도로벽이 설치되어있는 동해남부선 예측결과도 안산선과 유사하게 터널형 방음벽의 설치 시 **기존 방음벽에 비해 약 15 dB 소음 저감 효과**가 있는 것을 확인 할 수 있다.



(a) 안산선 (b) 동해남부선

[그림 3.1.153] 터널형 방음벽 설치에 따른 높이 별 환경 소음 예측 결과



(a) 안산선 (b) 동해남부선

[그림 3.1.154] 15층 높이에서의 주파수별 소음도 예측 결과

(라) 방음터널 구조해석 검토

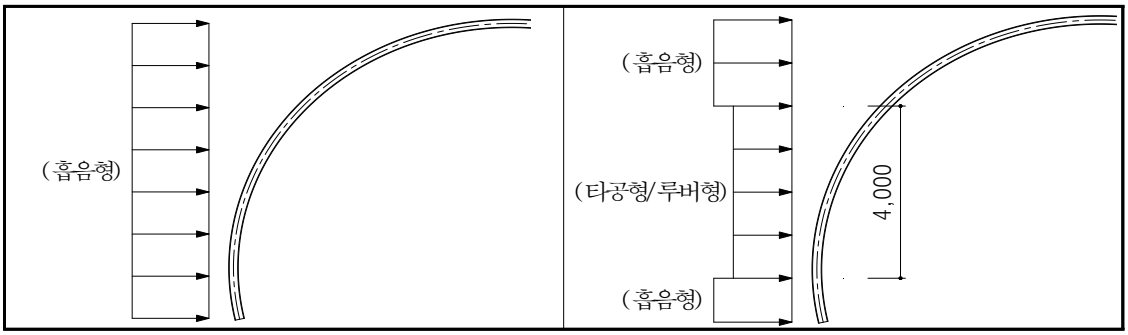
○ 방음터널로부터 전달되는 반력이 기존교량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 설치조건을 대표하는 안산선 및 동해남부선 2개소를 검토대상 교량으로 결정하였다.

○ 검토 대상지 교량은 2개소로 이 중 안산선은“기존노선, 도시철도, PSC BEAM교”를 대표하고, 동해남부선은“신설노선, 일반철도, PSC BOX GIRDER교”를 대표함으로써, 현재 국내에 운용되는 대부분의 형식을 포괄하게 된다.

○ 방음터널의 구조해석은 전산유체해석(CFD)를 통하여 기존교량에 대하여 풍하중 강도에 차이를 둔 방음터널의 2가지의 검토 CASE에 맞추어 수행하였다.

① CASE #1 : 전체 높이에 흡음형 패널 적용

② CASE #2-3 : 하단부 4m 구간에 타공형/루버형 패널 적용



[그림 3.1.155] CASE #1 개요도(좌) / CASE #2-3 개요도(우)

○ 방음터널이 설치되는 기존교량에 대해서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

① 방음터널이 설치되는 기존교량에 대한 검토결과 방음터널 자중의 경량화보다는 개구를 통한 풍하중의 경감이 교량에 미치는 영향이 훨씬 더 큰 것으로 평가되었으며, 풍하중의 경감 영향은 해당 구조에 작용하는 전체하중에서 풍하중이 차지하는 비율이 높을수록 커진다.

- 풍하중의 영향이 3% 미만인 교량상부구조의 주형 응력에 대해서는 본 연구의 효과가 1% 미만일 것으로 평가되었다.
- 풍하중의 영향이 20% 미만인 교량받침의 반력에 대해서는 본 연구의 효과가 3.0% 내외일 것으로 평가되었다.
- 풍하중의 영향이 60% 수준인 캔틸레버부의 단면력에 대해서는 본 연구의 효과가 10.0% 내외일 것으로 평가되었다.

② 상부구조 캔틸레버부의 안전은 캔틸레버 길이가 짧은 교량일수록 방음터널 설치로 인한 풍하중 증가에 더 큰 영향을 받으며, 이 같은 경우는 PSC BEAM교에서 최외측 빔이 외측으로 많이 편기된 경우에 해당한다.

③ 교각 하단부의 단면설계는 상시 또는 지진시의 하중조합에 지배를 받으며, 여러 개의 탄성받침이 지진하중을 분산해서 부담하는 안산선과 같은 PSC BEAM교에서는 장대레일 종하중과 시제동하중과 같은 상시의 조합이 큰 영향을 미치고, 동해남부선과 같이 포트받침 형식을 사용한 고정단 교각은 지진하중에 의해 지배된다. 따라서 교각 하단부의 단면안전에 있어서는 풍하중의 경감은 크지 않을 것으로 예상된다.

④ 기초의 안전과 안정은 교각 하단을 통해 전달되는 축력, 모멘트, 수평력에 의해 결정된다.

(3) 3차년도

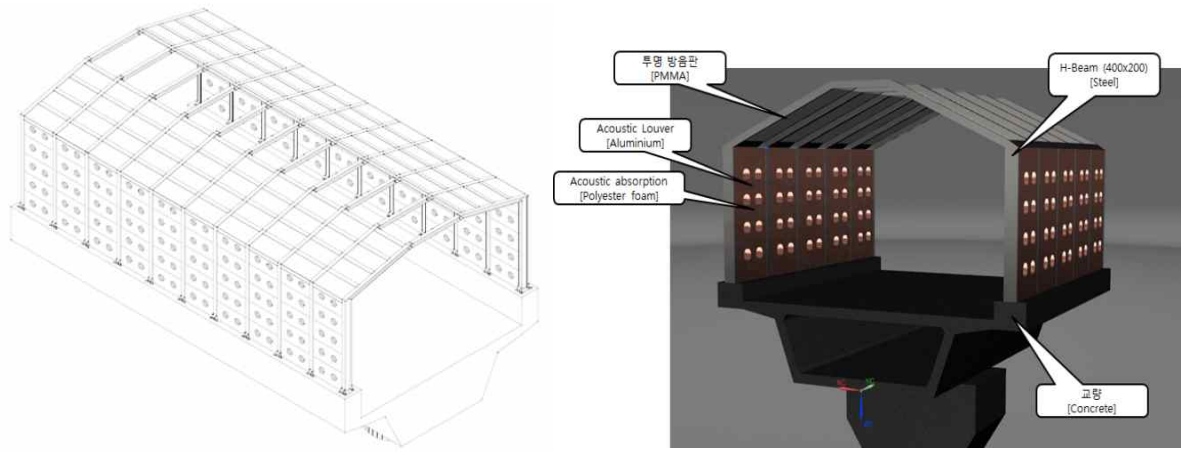
○ 본 연구에서는 교량 위를 주행하는 철도 차량의 소음피해를 저감하기 위한 연구의 일환으로 크게 3가지 목표를 갖고 방음시설을 설계하였다. 2차년도 연구 결과를 통해 고층부 소음 피해 저감을 위해 기존 방음벽 형태에서 방음터널 형태로 설계변경을 하였으며, 구조 변경에 따라 증가된 자중 감소를 위해 음향 루우버 형태의 개구부가 존재하는 방음재료로 재료 변경을 수행하였다.

설계 목표	설계 반영
고층부 소음 저감	– 천정부 설치를 통한 고층부 소음 전파 차단
방음시설 경량화	– 방음터널 일부 개방을 통한 하중 저감 – 동일효과의 방음벽 대비 중량 및 재료비 저감
풍하중 저감	– 방음터널 부분 개방을 통한 유동 흐름 허용 (개구율 36 %) – 소음 유출에 의한 영향을 감소하기 위해 소음기 형태의 음향 루우버 설치

○ 음향 루우버 설계 시 대상 주파수 대역인 500 ~ 2,000 Hz 까지 소음 저감 효과가 극대화 할 수 있도록 흡음재 선정 및 개구율 연구를 통해 방음재료를 설계하였으며, 최종적으로 도출된 방음재료의 개구율은 “36 %”, 흡음재는 “POLYESTER” 이다.

○ 음향 루우버 형태의 방음재료로 구성된 개방형 방음터널의 경우 구조 검토를 통해 실험 구간으로서 안전상 적절한 것으로 평가되었으며 검토된 대상은 PSC BOX형 교량이다.

○ 3차년도 연구에서는 2차년도에 설계된 개방형 방음터널(개구율 36 %)의 소음 피해 저감 효과 및 자중(고정하중, 풍하중) 저감 효과를 전산해석과 축소모델을 이용하여 검토하였다. 비교 대상으로 일반 방음벽(Case 0), 밀폐형 방음터널(Case 1) 및 개방형 방음터널(Case 3, 개구율 50%)을 구성하였다.



[그림 3.1.156] 개방형 방음터널 개념도

(가) 일반방음벽 및 방음터널 1/40 Scale 축소모형 풍동시험

○ 풍하중 저감 분석을 위해 1/40 scale의 축소 모형을 제작하였으며 풍동실험을 수행하였다. 풍동실험 결과 풍상측과 풍하측은 개구부 형성에 따라 상이한 결과가 도출된 것을 확인 할 수 있다.

① 풍상측 : 항력 풍하중은 개구율에 따라 13.5 % 선형적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 개구율이 커질수록 방음시설이 회전하는 모멘트 풍하중(1.8 %)와 양력 풍하중(5.5 %)은 증가하는 것으로 분석되었다.
② 풍하측 : 풍상측과는 상이하게 풍하중이 개구율에 따라 증가하는 것으로 분석되었다. 증가하는 풍하중의 방향은 개구부 형성에 따라 밀폐형 방음터널에서 작용하던 힘의 방향과 반대로 증가하는 것으로 분석되었다.
- 결과적으로 36 % 개구부 형성 시 풍하중 4 % 감소

○ 축소모델을 이용한 풍하중 실험 결과, 개구율 증가가 풍상측은 감소하지만, 풍하측은 증가하는 것으로 분석되었다. 결과적으로 적절한 개구율 설계가 풍하중 저감에 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 36 % 개구율은 차음성능을 고려한 50 % 이하 개구율에서 가장 효과적인 것으로 판단된다.

(나) 유동-구조 연성해석을 통한 구조안정성 검토

○ 풍동시험을 통해 도출한 풍하중 결과를 활용하여 상부 교량구조의 구조안전성을 검토하였다. 방음시설 설치 시 유동의 흐름을 방해하는 구조물이 설치되기 때문에 풍하중 증가에 따른 안전성 검토가 필요하며, 본 연구에서는 풍하중 증가에 따른 추가하중을 고려하여 전산해석을 이용한 횡방향 해석을 통해 구조안전성을 검토하였다.
○ 최종 설계된 36 % 개방형 방음터널 구조안전성 검토 결과 개구부가 형성됨에 따라 발생 단면력이 풍상측의 경우 29.48 kN·m(9.6 %) 감소하며, 풍하측의 경우 발생단면력이 34.99 kN·m(11.5 %)증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 검토대상으로 선정한 동해남부선 PSC BOX GIRDER교의 경우 켄틀래버 설계 단면력 허용치의 약 53 ~ 68% 수준에서 단면력이 발생하기 때문에 구조적으로 보강이 불필요한 것으로 판단되었다.
○ 개구부 형성에 따라 교량 켄틀레버의 단면력은 36 % 개구율 기준 9.6 % 저감, 50 % 개구율 기준 10.5 % 단면력 저감 효과가 존재하였다.
○ 개구부 형성은 풍상측에만 작용하던 풍하중을 풍하측에 분산시켜 풍상측과 풍하측의 단면력 증가를 일정하게 유지 시켜 주는 기능을 하는 것으로 분석 되었다. 따라서 외부 유동에 의해 발생되는 단면력(풍하중)을 풍상측과 풍하측이 함께 수용하기 때문에 풍하중 측면에서 유용한 것으로 판단된다.

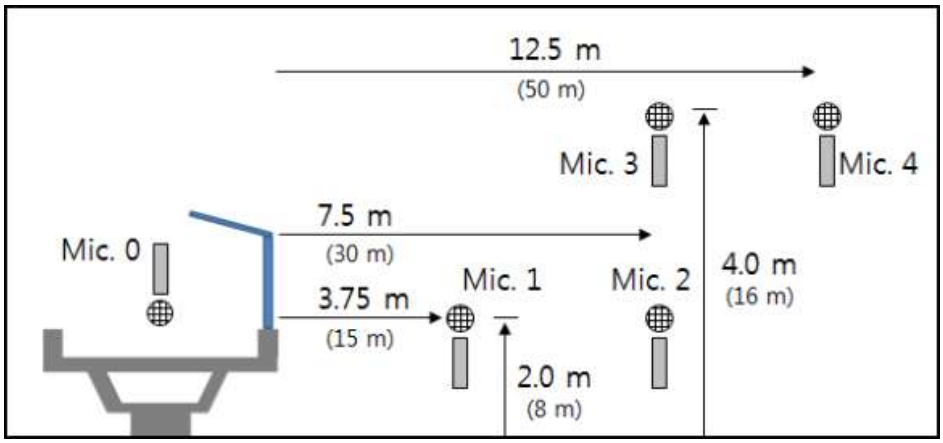
(다) 1/4 Scale 축소모형 음향성능시험 및 전산해석을 이용한 음향해석

○ 소음 저감 효과 분석은 1/4 scale의 축소모형 실험과 전산해석을 이용하여 수행되었다. 축소모형 실험의 경우 소음저감 효과 분석 및 실제 환경에서의 전산해석 결과의 신뢰성 분석을 위해 수행되었다. 축소모형 실험과 전산해석 결과의 주파수 비교 분석을 통해 신뢰성 분석을 수행하였다.
○ 1/4 scale 축소모형 실험결과일반 방음벽(Case 0)은 다른 방음시설에 비해 소음 저감 효과가 가장 작으며 전체 높이에서 약 10 dB 소음을 저감 시키는 것을 확인 할 수 있다. 밀폐형 방음터널(Case 1)의 경우 소음원에 의한 소음 전파를 최대 47 dB 저감 시키는 것으로 분석되었으며 소음 저감 효과가 가장 높은 것을 확인 할 수 있다. 개방형 방음터널의 경우 일반 방음벽(Case 0)에 비해 소음 저감 효과는 약 10 ~ 15 dB 높지만 벽면부가 개방되어 있기 때문에 밀폐형 방음터널에 소음 저감 효과가 낮아 지는 것으로 분석되었다. 가장 떨어진 측정지점 4의 경우 천정부 설치로 인해 회절음은 차단되었지만 개구부 형성에 따라 소음도 전파가 이루어진 것

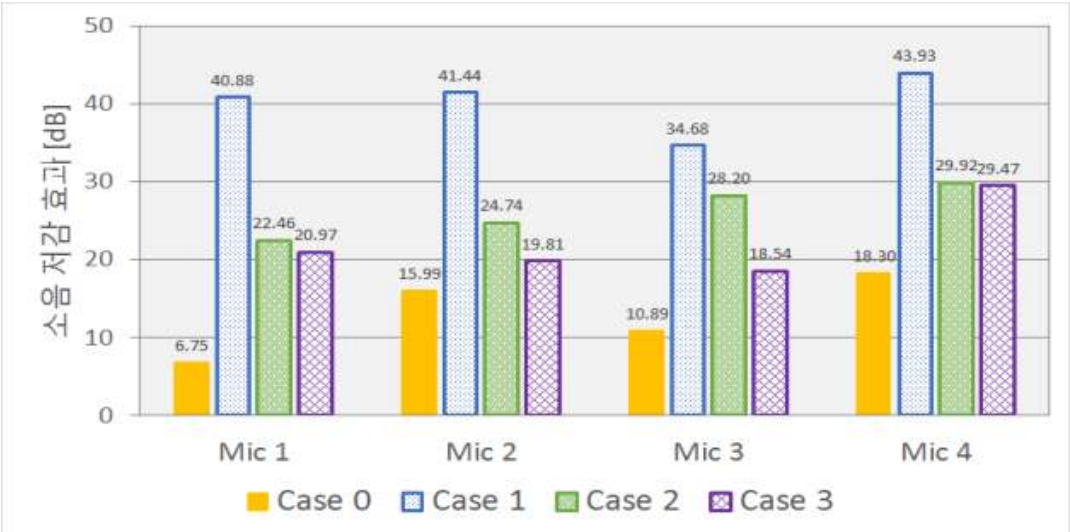
으로 분석된다.

[표 3.1.32] 개방형 방음터널의 소음 저감 효과 실험 케이스

구 분	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3
방음시설	일반 방음벽	밀폐형 방음터널	부분 개방형 방음터널 (음향 루우버)	
개 구 율	0 %		36 %	50 %
비 고	흡음형 차음판 적용		최종 모델	풍하중고려

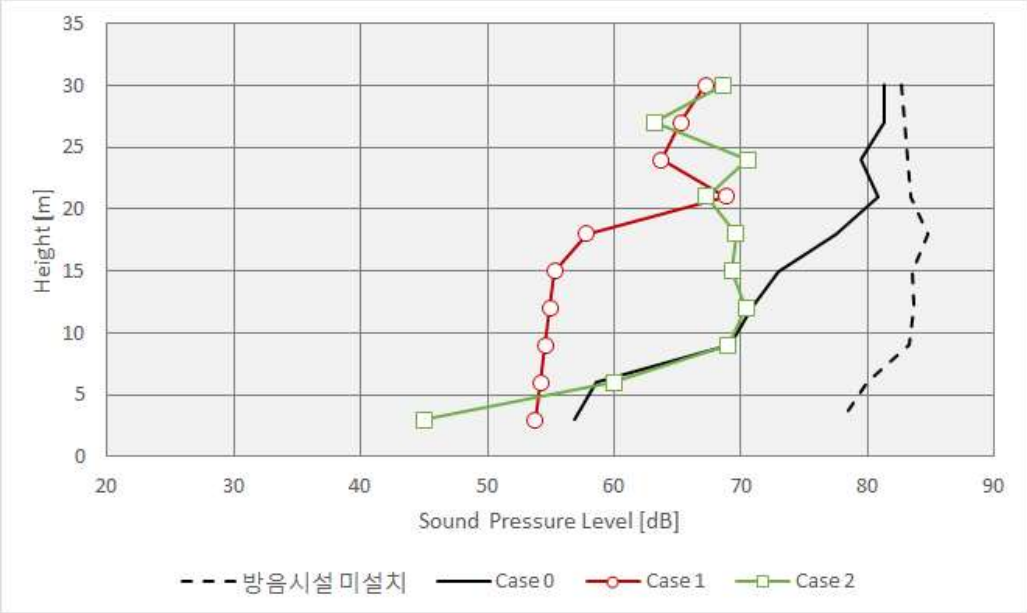


[그림 3.1.157] 소음 측정 위치



[그림 3.1.158] 소음 측정 지점 별 소음저감 효과

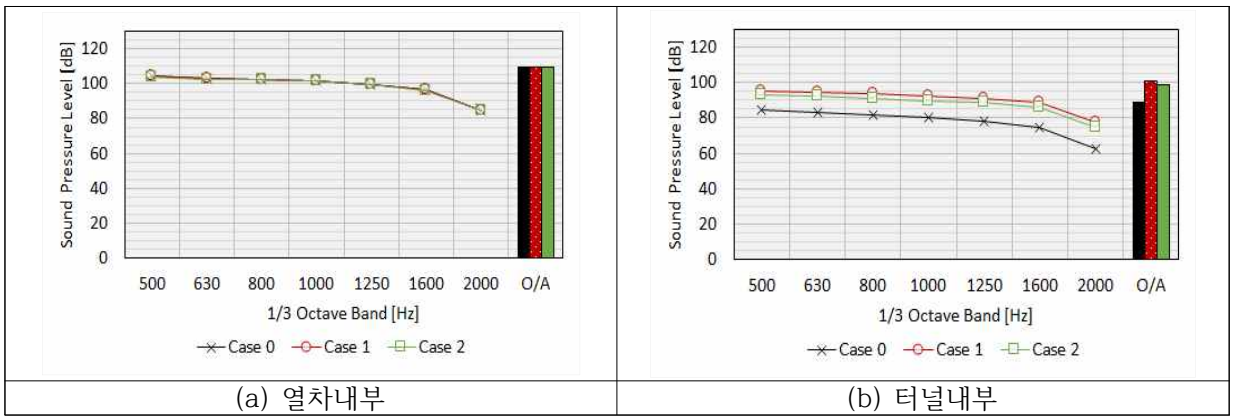
○ 음향해석을 통해 개방형 방음터널 설치에 따른 소음저감 효과를 검토한 결과, 밀폐형 방음터널(Case 1)에 비해 저층 영역에서 소음 저감 효과가 4 m 방음벽(Case 0)과 유사해 지는 것을 확인할 수 있다. 밀폐형 방음터널의 경우 터널 내에서 발생되는 철도 차량의 소음이 터널 내에서 저감되어 터널 벽면을 통해 전파되는 반면 개방형 방음터널의 경우 터널 내에서 저감되는 양이 미비하여 방음벽과 유사한 소음저감 효과가 발생된 것으로 학인된다. 고층부의 경우 상단에서 소음전파가 차단되기 때문에 밀폐형 방음터널과 소음도가 유사하게 예측 된 것으로 확인된다.



[그림 3.1.159] 이격 거리 30 m의 높이 별 소음도

○ 일반 방음벽의 경우 방음벽 높이까지의 소음저감 효과가 존재하였으며 밀폐형 방음터널의 경우 소음 저감 효과가 가장 높은 것으로 분석되었다. 밀폐형 방음터널의 경우 소음원 자체의 직접음을 차단하기 때문에 중층 높이에서 고층부 높이까지 약 30 dB의 소음저감 효과가 존재하였다. 개방형 방음터널의 경우 벽면부 개방에 의해 밀폐형 방음터널에 비해 소음저감 효과가 낮아지는 것으로 분석되었으며 전체 높이에서 약 15 dB 저감이 가능한 것으로 분석되었다. 특히 방음벽에 비해 고층부 소음 저감이 가능하여 **전체 높이에서 방음벽 대비 15 dB 소음 저감**이 가능하였다.

○ 방음벽 대비 방음터널 설치로 인한 열차 내 소음 증가를 확인하기 위하여 음향시험 대상의 방음터널 내부를 실제 스케일로 모델링하여 분석한 결과, 터널 방음시설에 따른 열차 실내 소음도는 차이가 매우 미비하였고, 개방형 방음터널의 경우 밀폐형 방음터널에 비해 터널 내부 소음이 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 소음원이 직접적으로 바닥면으로부터 투과하는 소음이 가장 지배적이라고 판단되었다.



(a) 열차내부 (b) 터널내부

[그림 3.1.160] 광음향기법을 이용한 실내 음향 해석 결과

○ 결과적으로 개구율 36 % 개방향 방음터널이 소음 저감 효과 15 dB 와 풍하중 저감이 39 % 가능한 것으로 분석되었다.



[그림 3.1.161] 개방형 방음터널 개구율에 따른 소음저감효과 및 풍하중 저감량

2. 2세부 전동차 소음저감 기술개발

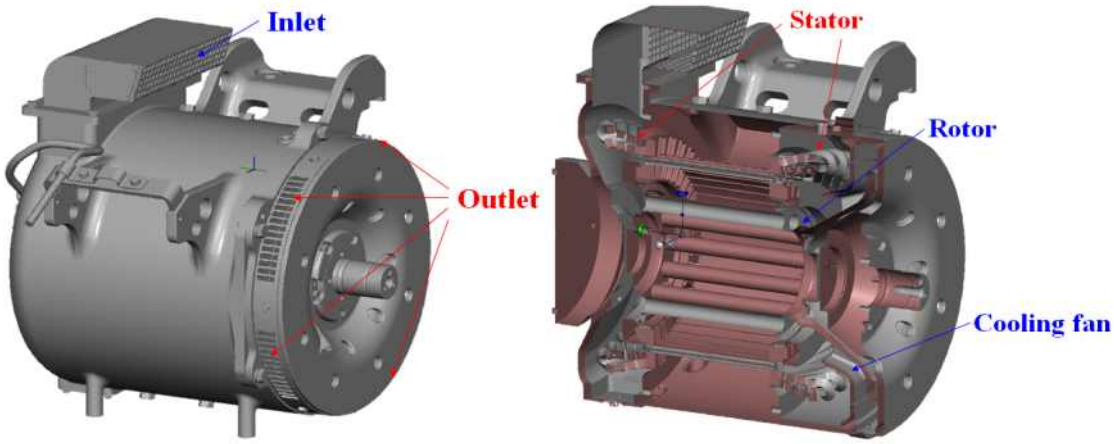
1. 저소음 장치 개발

가. 저소음 견인전동기 개발

전동차용 견인전동기는 내부에서 발생하는 열을 냉각시키기 위해 냉각팬이 설치된다. 고속으로 회전하는 냉각팬과 회전자에서 높은 강도의 공력 소음이 유발된다. 아울러 팬 깃을 통과하는 유동은 주변 부품과 상호작용으로 인하여 부가적 공력 소음을 발생시킨다. 이러한 공력 소음 저감을 위해서는 견인전동기 내부에 존재하는 소음원들을 최대한 억제시켜야 하는데, 견인전동기 내부의 유동 패턴이 매우 복잡하므로 공력 소음 저감을 위한 체계적인 연구 수행이 필요하다. 본 연구에서는 실험 및 수치해석을 이용하여 견인전동기 소음 저감을 위한 설계 개선 작업을 수행하였다.

(1) 기본 모델 선정 및 성능 검증

연구 수행을 위하여 코레일 일반형 전동차에 적용되는 견인전동기 상용 모델을 기본 모델로 선정하였다. 그림 3.1에서 확인할 수 있듯이, 선정된 기본 모델은 크게 회전자와 고정자, 냉각팬 등으로 구성되었다.

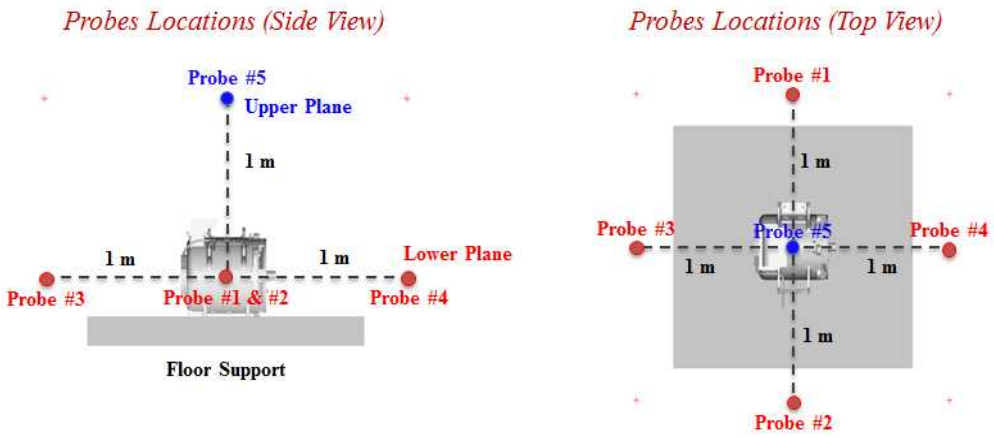


[그림 3.2.1] 견인전동기 기본 모델 구조도

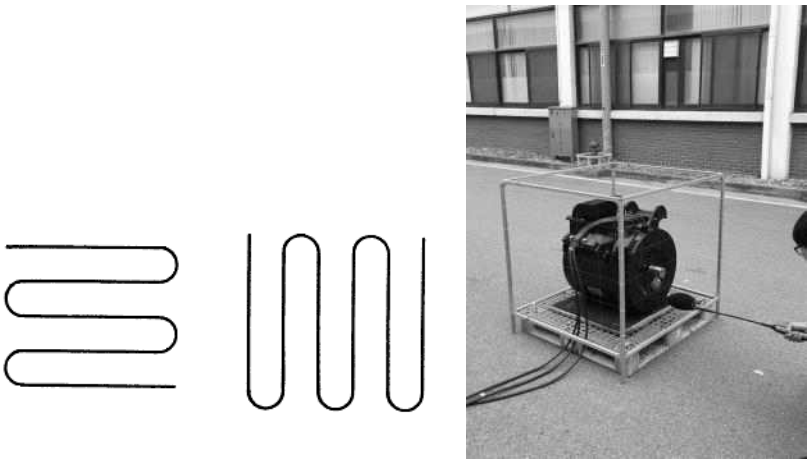
(가) 시험을 이용한 평가 방법

견인전동기의 소음 평가 방법은 ICE 60349-2, ISO 3744, ISO 9614-2 규격에 의해 평가된다. 설계에서는 ICE 60349-2 규격에 따른 소음 평가 방법을 적용하여 시험을 수행하여 상대적인 소음 저감량을 검토하였다. 규격에 명시된 시험 규정에 따라 그림 3.2(a)와 같이 견인전동기 표면으로 부터 1m 떨어진 5개의 측정 포인트에 마이크로폰을 설치하였다. 시험 데이터는 냉각팬의 정방향, 역방향 회전 시에 대하여 600 ~ 5,300RPM까지 600RPM 간격으로 회전수를 높이면서 측정되었다. 위 방법은 시험 환경에 의해 반사음 및 잔향의 영향이 존재하기 때문에 최종 소음성능은 시험 환경의 영향을 배제할 수 있는 ISO 9614-2에 의한 Intensity scanning 법을 통해 확인하였다.

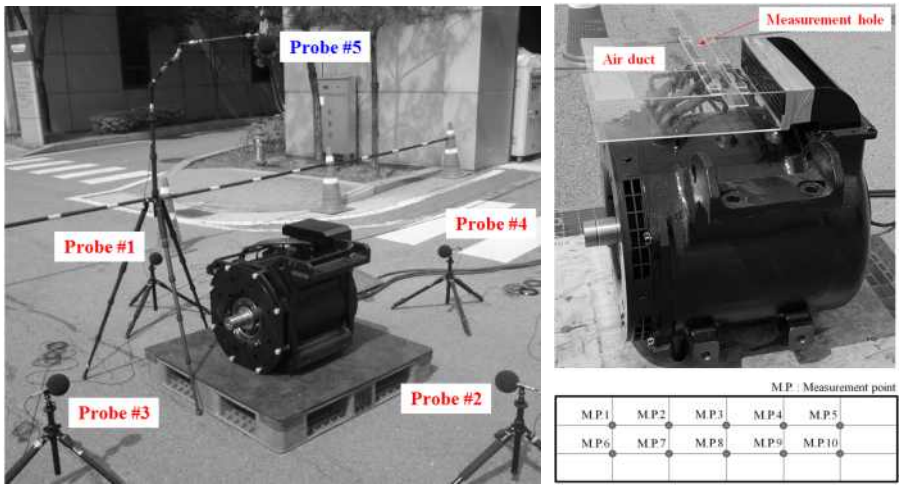
발생열을 냉각시키기 위한 냉각팬의 유량 또한 견인전동기의 중요한 성능지표이다. 냉각 유량 평가를 위하여 그림 3.2(c)와 같이 입구에 유량 측정용 덕트를 설치하였으며, 전동기 작동점에서 운전 시 총 10개의 포인트에서의 유속을 측정하여 냉각 유량을 산출하였다. 각 측정 포인트에서의 유속은 열선 유속계를 사용하여 측정되었다.



(a) 소음 평가 방법-사건검토 (IEC 60349-2 규격 적용)



(b) 소음 평가 방법-소음 성능 절대값 도출 (ISO 9614-2)



(c) 소음 및 유량 평가 시험 사진

[그림 3.2.2] 소음 및 유량 평가 시험

(나) 수치해석을 이용한 평가 방법

견인전동기의 소음 개선을 위한 설계 개선 연구를 수행하기 위하여 다양한 설계 개선안에 대한 소음 평가가 수행되어야 한다. 설계 단계에서는 개선 작업 수행에 따른 수치해석을 이용한 소음 평가 기법을 적용하였다.

수치해석 수행 시 적용된 해석 도메인은 그림 3.3와 같다. 벽면에 의한 반사파 영향을 최소화하기 위하여 넓은 범위의 해석 영역을 적용하였으며, 효율적인 격자 생성을 위해 voxel region(VR)을 세

분화한 후 region에 따른 격자 수준을 조정할 수 있도록 하였다. 점음원으로 가정하였을 때, 소음의 방사 형태는 원형의 양상을 가지므로, voxel region의 형태 또한 원형으로 커지도록 하였다.

그림 3.4는 주요 voxel region에서 생성된 격자계를 나타낸다. 모든 영역에 정렬 격자계(structured grid)를 적용하였으며, 격자에 따른 신뢰도 검증을 위해 격자의 밀집도에 따라 5억 개와 7억 개로 구성된 두 가지 격자계를 생성하였다.

수치해석은 격자볼츠만 기법(Lattice Boltzmann, LBM)을 기반으로 하는 상용 프로그램인 PowerFLOW를 이용하여 수행되었다. 해석 수행을 위한 경계 조건으로, 냉각팬의 회전수는 작동점인 5,300 rpm으로 하였으며, 작동 유체는 공기를 적용하였다. 아울러 외부 벽면 경계 조건으로 압력 감쇠 조건을 부여하여 흡음 효과를 모사하였다.

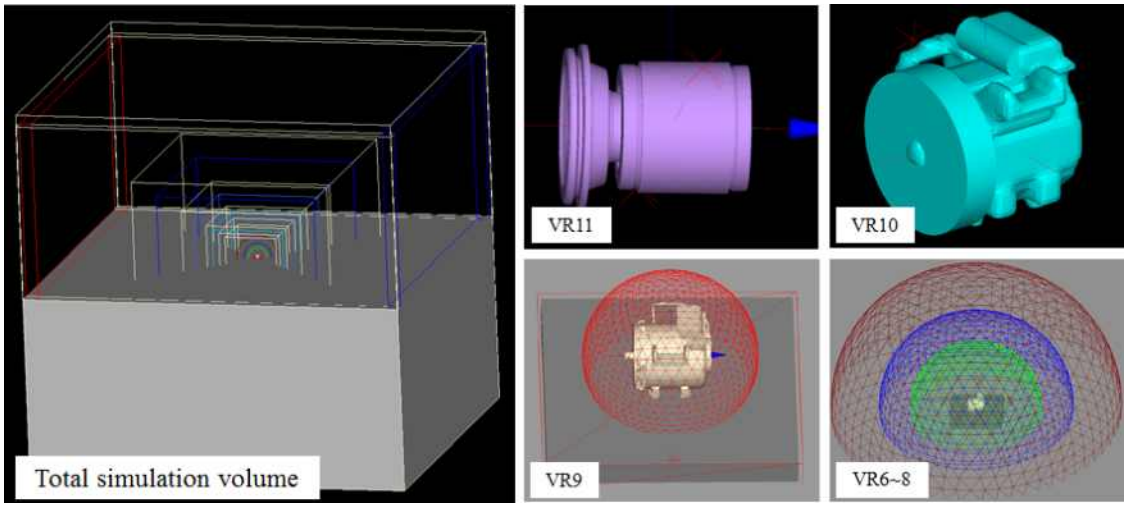
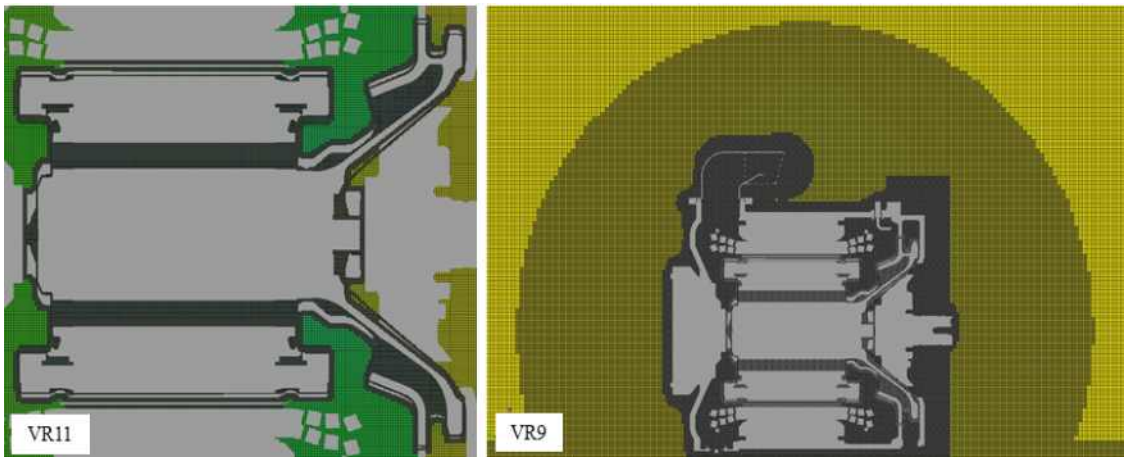


그림 3.3. 수치해석 도메인



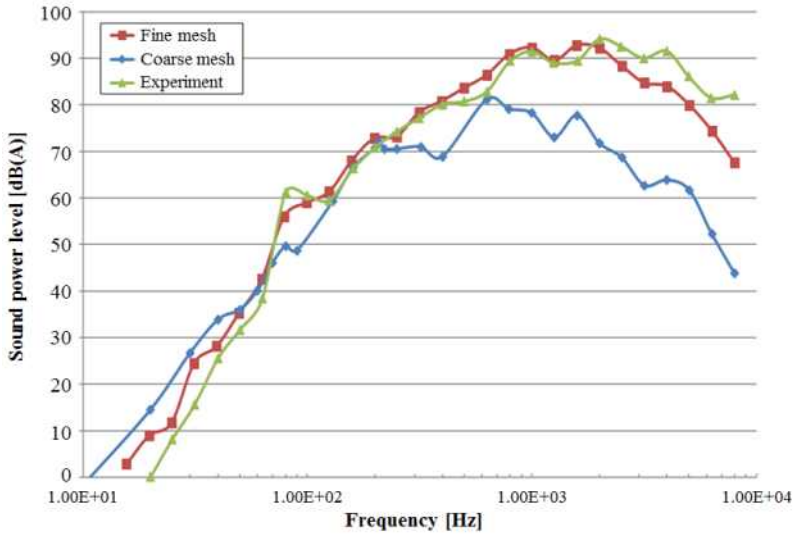
[그림 3.2.4] 수치해석 격자계

(다) 수치해석 신뢰도 평가

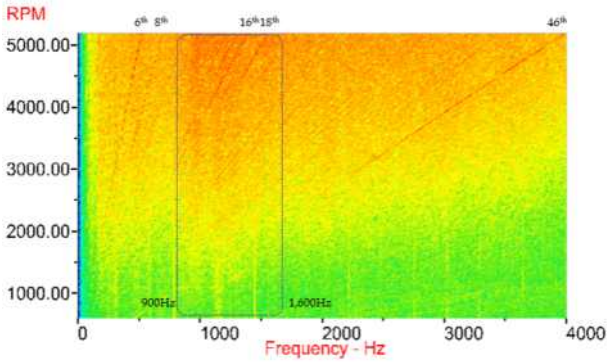
연구 수행 시 사용될 수치해석 기법의 신뢰도 검증을 위하여 실험 및 수치해석을 통해 산출된 기본 모델의 소음 성능 평가 결과를 비교 분석하였다. 그림 3.5은 각각의 성능 평가에 따라 산출된 1/3 옥타브 음향파워레벨 비교 결과이다. 5억 개로 구성된 격자계(Coarse mesh)를 적용한 수치해석 결과의 경우 고주파 영역으로 갈수록 실험 결과와 많은 차이를 나타내었다. 고주파 영역대의 소음은 작은 와류 성분(vortex)에 의해 발생되는데 격자의 크기가 클수록 작은 와류 성분을 예측할 수 없기 때문에 고주파 영역에서 큰 오차가 발생하게 된다. 그에 따라 기존 0.35mm의 최소 격자 사이즈를 0.25mm로 줄여서 7억 개로 구성된 격자계(Fine mesh)를 적용하여 수치해석을 수행한 결과 고주파 영역에서 발생되던 오차 성분들이 급격히 감소하였다. 3000Hz 이상의 고주파 영역에서 약간의 오차가 다소 존재하였지만, 그 크기가 크지 않았고 전반적인 평균 오차 범위 또한 5% 이내로 매우 높은 신뢰도 수준을 나타내었다. 아울러 냉각 유량에 대한 오차 범위 역시 2% 이내로 매우 높은 신뢰도를

가졌다.

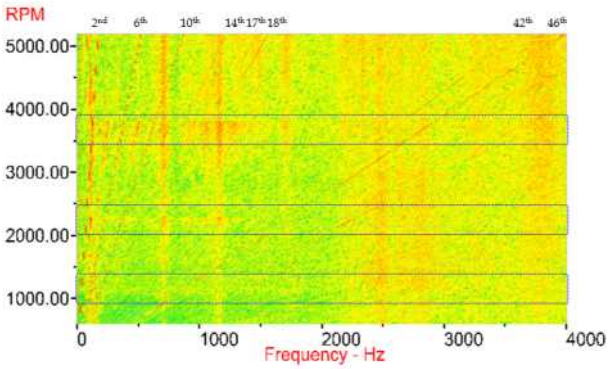
격자 사이즈를 더욱 감소시킬 경우 수치 해석을 위한 리소스가 급격히 증가하기 때문에 연구 수행에 적합하지 못할 것으로 판단되었다. 그에 따라 7억개로 구성된 격자계를 본 연구 수행을 위한 최종 격자로 선정하였다.



[그림 3.2.5] 기본 모델 소음 평가 결과 비교



① (a) 소음 주파수 분석



② (b) 전면부 가속도 주파수 분석

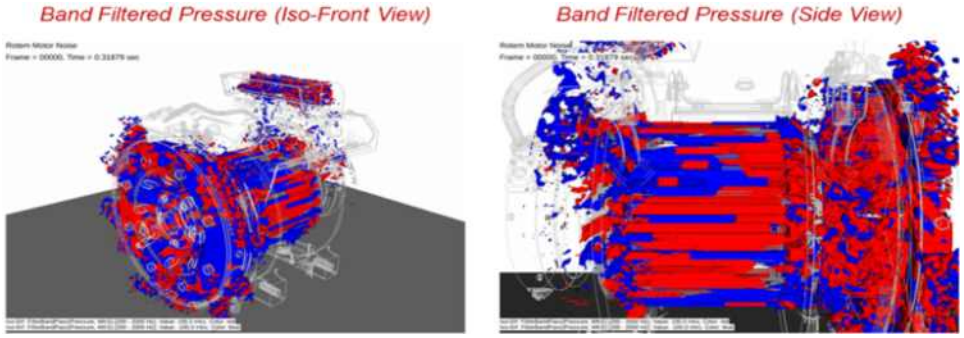
[그림 3.2.6] 기본 모델 waterfall diagram

(라) 기본 모델 소음 특성 분석

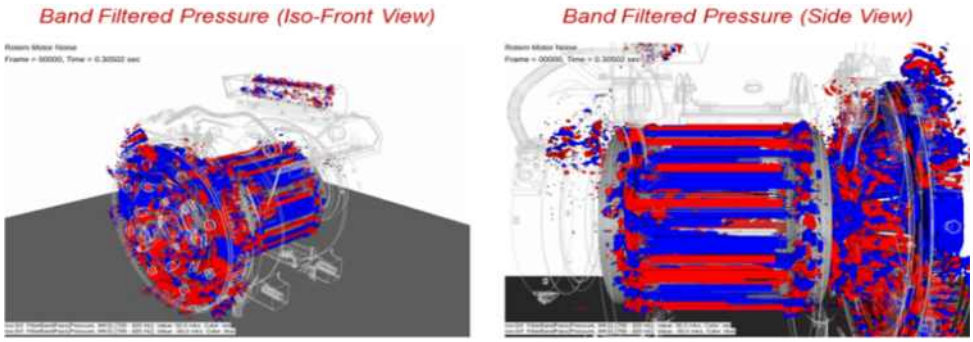
소음 시험 및 신뢰도가 검증된 수치해석을 통해 산출된 소음 성능 평가 결과를 바탕으로, 기본 모델의 소음 특성 및 소음원 분석을 수행하였다. 회전수 증가에 따른 소음 기여도 및 소음원 분석을 위하여 실험으로 산출된 소음 평가 결과를 바탕으로 그림 3.6과 같이 waterfall diagram를 산출하였다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 기본 모델의 소음은 6, 8, 16, 18, 46차 성분이 주를 이루고 있었으며, 전면부 베어링 위치에서 가속도 주요 차수 성분도 2, 6, 10, 14, 17, 18, 42, 46차 성분이

크게 나타났다. 특히, 고속 회전 시 4kHz 이상의 고주파 소음과 700~820Hz 영역의 광대역 소음이 두드러지게 발생하였다. 그에 따라 고속 운전 시 발생하는 고주파 소음이 회전자 로터바의 단차에 의해 발생하며 고정자의 단차의 영향으로 증폭되는 것으로 예상되었다. 아울러 700~820Hz 대역, 1kHz 대역 및 2,000~3,000Hz 대역의 소음은 공력에 의해 기인하는 것으로 판단되었다.

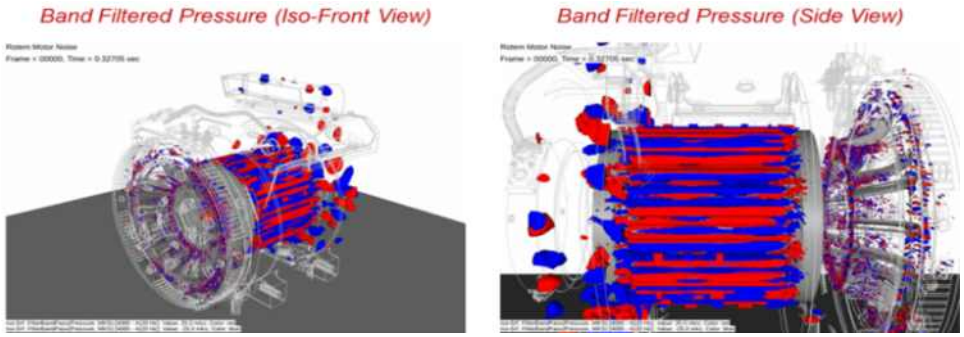
이러한 분석 결과들에 대한 세부적인 검증을 위해 소음 해석을 통해 산출된 유동장 분석을 수행하였다. 그림 3.7은 내부 공간에서의 주파수 대역별 소음 스펙트럼 결과로, 냉각팬 유로에서 매우 강력한 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 회전자의 로터바의 간극에서도 소음이 발생하였는데, 이는 실험 결과 분석을 통해서 예측되었던 46차 성분에 해당한다.



(a) 200~2,000Hz Band Pass Filter



(b) 760Hz Band Pass Filter



(c) 4kHz Band Pass Filter

[그림 3.2.7] 내부 공간에서의 주파수 대역별 소음 스펙트럼

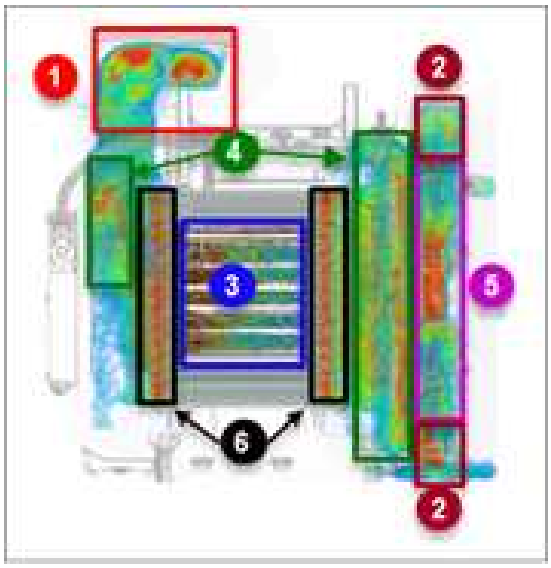
(2) 1차 설계 개선

(가) 기본 모델 주요 소음원 선정

견인전동기 소음 저감을 위한 설계 개선 작업을 위해서는 정확한 소음원 도출이 수반되어야 한다. 이를 위해 그림 3.8과 같이 수치해석을 통해 산출된 내부 유동장 분석을 수행하여 기본 모델의 주요 소음원들을 도출하였다. 그에 따라 도출된 주요 소음 발생 지점들은 다음과 같다.

① 입구부 덕트 : 가림막과 흡입구 곡률에 따른 난류 유발 및 주요 소음 방사원
② 토출부 : 복잡한 토출 유동에 따른 소음 발생 및 주요 소음 방사원
③ 고정자 코일 : 정체된 공기의 와류로 인한 소음 발생
④ 회전자와 고정자 사이의 단차 : 46차의 고주파 소음 발생
⑤ 냉각팬 : 주요 공력 소음 발생 지점

⑥ 회전자 유로관(클램프홀) : 강력한 난류에 따른 소음 발생



[그림 3.2.8] 기본 모델 주요 소음원

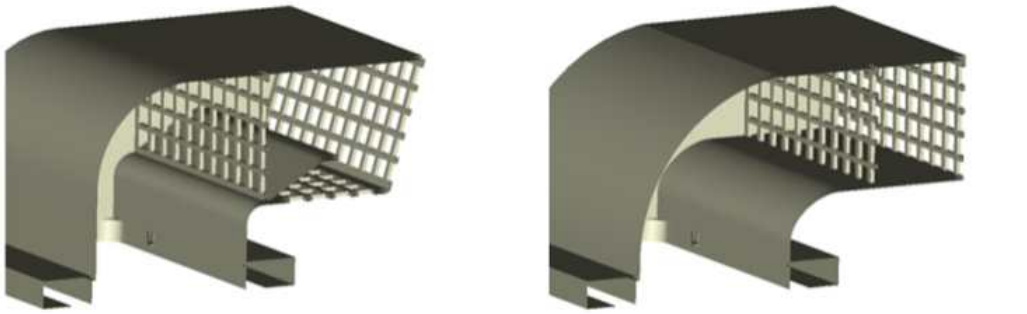
(나) 1차 설계 개선 사항

① 입구부 덕트 설계 개선

기본 모델의 입구 덕트는 전면부 그릴과 하부 그릴을 통한 흡입 유로가 형성되어 있었으며, 하부 그릴에는 이물질의 유입을 막는 가림막이 설치되어 있었다. 이러한 목적으로 설치된 가림막은 강한 난류를 발생하는 주요 원인으로 작용하기 때문에 소음 측면에서는 매우 부적합한 구조물로 판단되었다. 그에 따라 그림 3.9와 같이 가림막을 제거하고, 하부 그릴을 막는 반면에 충분한 유량 확보를 위해서 전면부 그릴의 형상을 보완하였다. 또한 흡입구의 곡률 변경에 따른 유로 개선으로 난류 발생이 억제될 수 있도록 하였다.

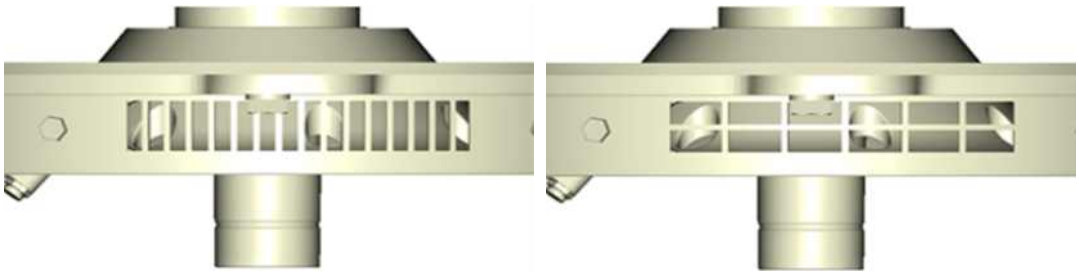
② 토출 그릴 설계 개선

토출 그릴에 부딪혀 발생하는 와류 성분들을 억제하기 위해 그림 3.10와 같이 토출 그릴의 개수 및 형태에 대한 설계 개선을 수행하였다.



(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

[그림 3.2.9] 입구부 덕트 설계 개선



(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

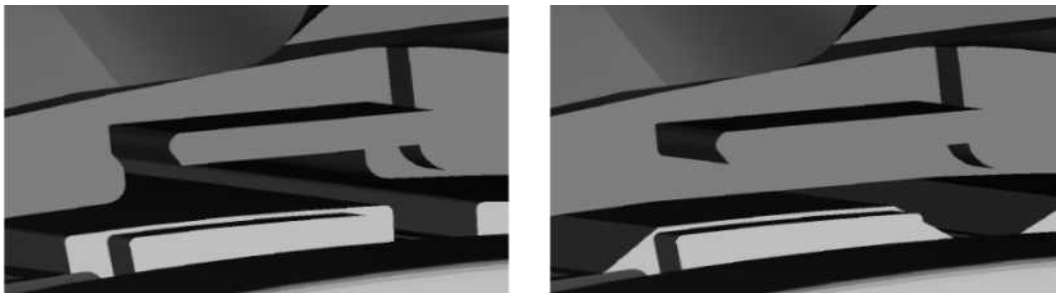
[그림 3.2.10] 토출 그릴 설계 개선

③ 회전자와 고정자 사이 단차 제거

회전자와 고장자 사이 단차로 인하여 발생되는 고주파 소음을 저감시키기 위하여 그림 3.11과 같이 해당 단차를 제거하였다.

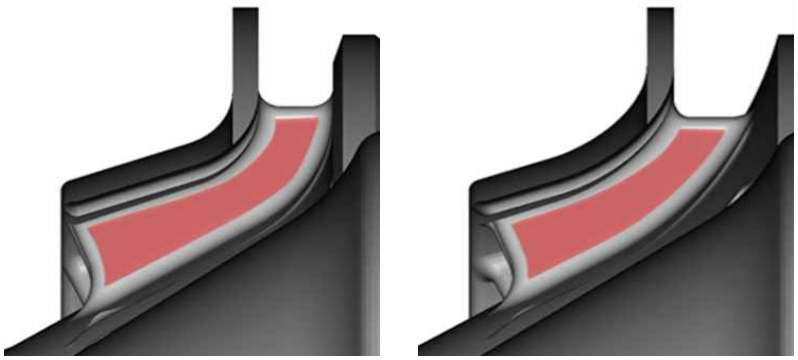
④ 냉각팬 유로 설계 개선

기본 모델 냉각팬의 경우 날개의 프로파일의 곡률이 급격히 변화하는 형태를 가졌다. 이러한 급격한 유로 변동은 와류 및 난류 성분을 발생시킬 가능성이 크다. 그에 따라 그림 3.12와 같이 날개 프로파일이 부드럽게 변화할 수 있도록 설계 개선을 수행하였다.



(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

[그림 3.2.11] 회전자와 고정자 사이의 단차 설계 개선



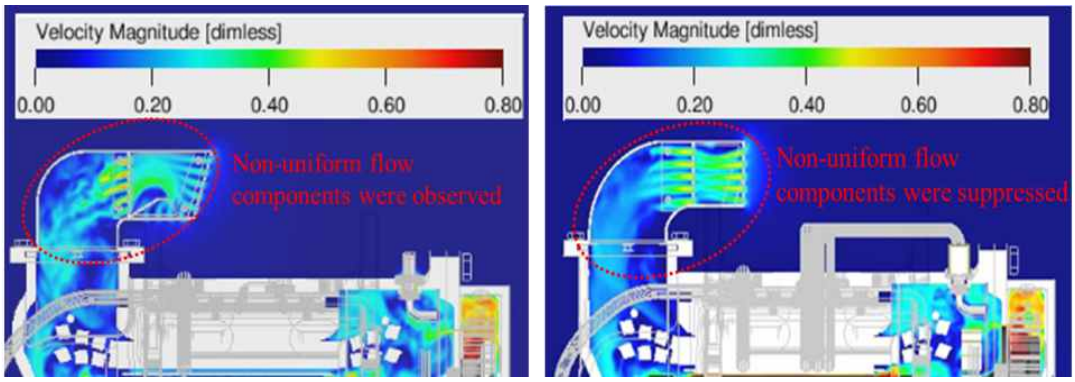
(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

[그림 3.2.12] 냉각팬 유로 설계 개선

(다) 1차 설계 개선안 소음 성능 평가

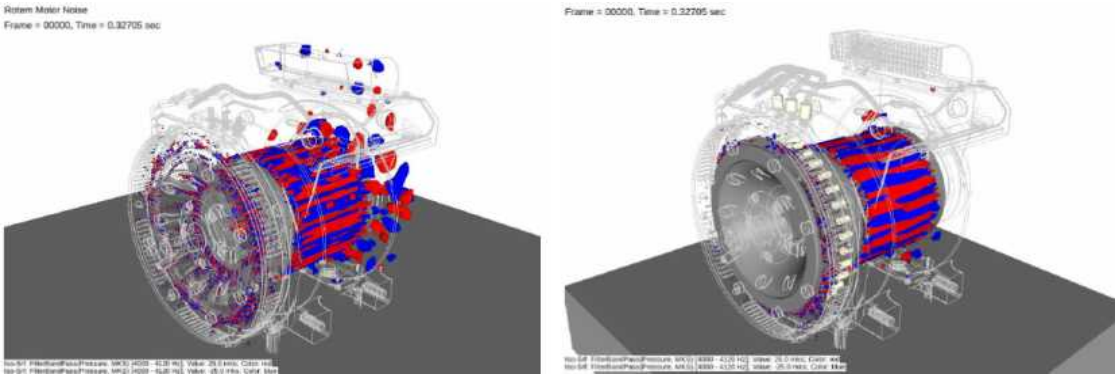
1차 설계 개선에 따른 소음 저감 효과를 확인하기 위하여 수치해석을 이용한 소음 평가 작업을 수행하였다. 수치해석을 통해 산출된 1차 설계 개선안의 소음 성능(음향파워레벨)은 108.1dBA로 예측되었다. 내부 유동장 분석 결과 그림 3.13과 같이 입구 덕트 주변에서 발생되던 불균일 유동 성분들이 국부적으로 억제되는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 그림 3.14와 같이 회전자와 고정자 사이 단차에서 발생되던 고주파 소음 강도가 낮아지는 효과도 확인할 수 있었다. 냉각팬 및 토출 구간 역시 1차 설계 개선에 따라 그림 3.15와 같이 700~820Hz 대역에서의 소음 강도 및 난류 성분이 저감되었다.

1차 설계 개선 모델의 시제품을 제작하여 시험을 통한 소음 성능 평가를 수행한 결과 1차 설계 개선 모델의 소음 성능은 108dBA로 수치해석을 통해 산출된 예측치와 거의 동일하였다. 이러한 소음 성능은 기본 모델 (110dBA) 대비 2dBA 저감된 수준이다. 하지만 본 연구과제의 소음 성능 목표인 104dBA를 만족하지 못하였다. 그에 따라 추가적인 설계 개선 작업이 요구되었다. 부가적으로 1차 설계 개선 모델의 냉각 성능의 경우 기본 모델과 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 설계 개선 변수들이 유량에 큰 영향을 미치지 않기 때문으로 판단되었다.



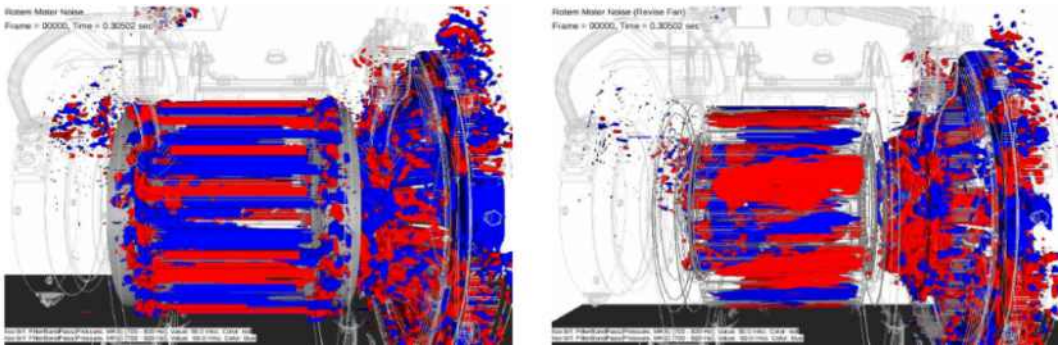
(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

[그림 3.2.13] 입구 덕트부 유동장 비교 분석



(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선

[그림 3.2.14] 회전자 및 고정자 인터 페이스 구간 소음 강도 비교 분석 (4000~4200Hz)



(a) 기본 모델 (b) 1차 설계 개선안

[그림 3.2.15] 냉각 팬 및 토출 구간 소음 강도 비교 분석 (700~820Hz)

(3) 2차 설계 개선

1차 설계 개선 작업을 수행하여 견인전동기의 소음을 저감 시켰지만 과제 목표치를 만족시키지 못하였다. 그에 따라 수행된 2차 설계 개선 작업 수행 시 1차 설계 개선안을 기준으로 하였으며, 보다 효과적인 개선안을 도출을 위해 새로운 설계 변수 및 변화 범위를 선정한 후 각 설계 변수들의 영향성 평가를 수행하였다.

(가) 설계 변수 및 해석 케이스 선정

그림 3.16과 같이 2차 설계 개선을 위한 설계 변수들을 선정하였으며, 선정된 설계 변수

들에 대한 영향성 평가를 수행하기 위해 해석 케이스들을 생성하였다. Case 1~3은 견인전동기 냉각팬 날개 자오면에 대한 설계 변수들을 반영한 케이스들로, Case 1은 냉각팬 날개 입구부 컷팅(11㎜), Case 2는 냉각팬 날개 직경 컷팅(7㎜)이 적용되었다. 컷팅 수준은 다음과 같이 정의되는 유체기계 상사 법칙을 고려하여 견인전동기 냉각 유량을 감안하여 결정되었다.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{1}$$

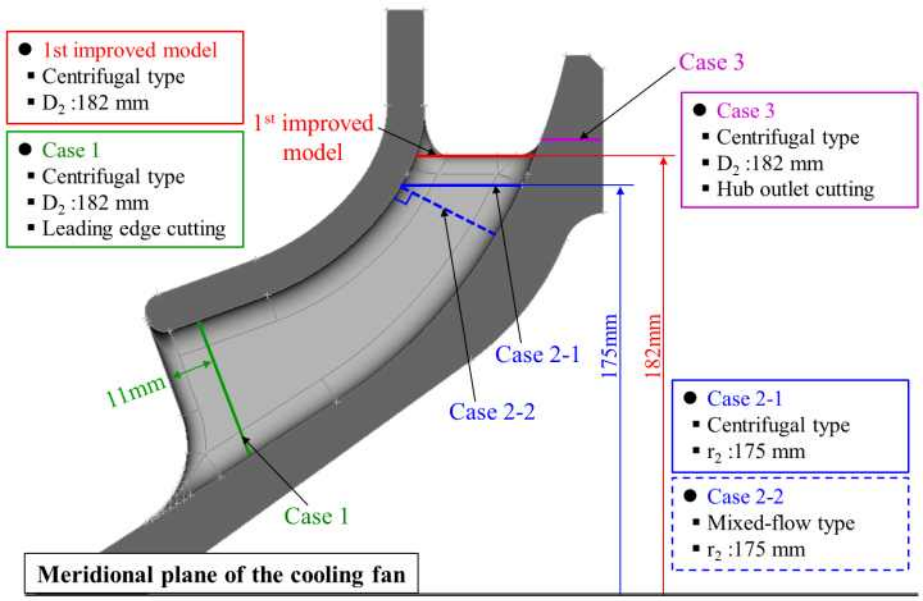
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \tag{2}$$

여기서, Q는 유량, P는 차압, N은 회전수, D는 날개 직경을 각각 나타낸다. 아울러 Case 2의 경우 날개 타입(원심형, 사류형)에 따라 2개의 케이스(Case 2-1, Case 2-2)로 구분하였다. Case 3은 팬 허브의 직경을 날개 직경과 동일하게 컷팅한 case이다. Case 4는 날개 매수에 따른 영향성 평가 케이스로 Case 4-1은 15매, Case 4-2는 13매의 날개수를 적용하였다. Case 5는 날개 프로파일 설계 변수 적용 모델로, 아래 식과 같이 정의되는 에어포일 형태의 날개 프로파일을 적용하였다.

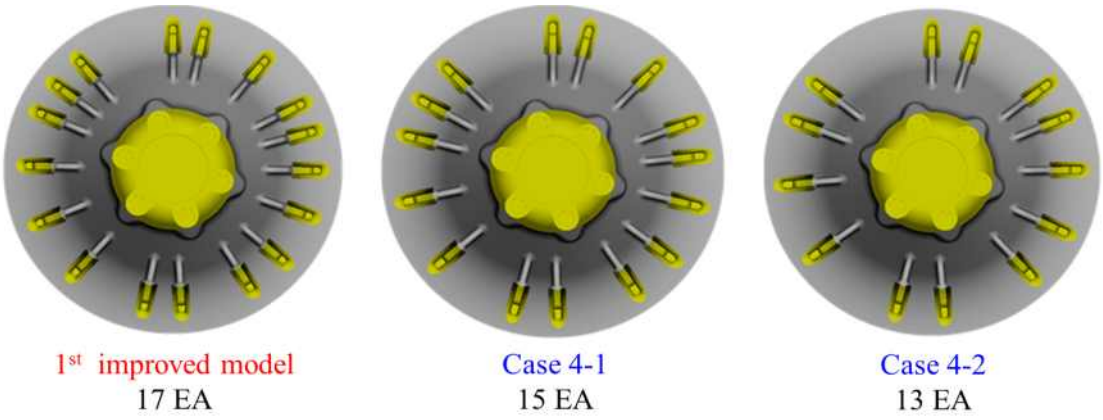
$$y = 0.0125 \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{-0.031}\right)^{1.5}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (x \le 0) \tag{3}$$

$$y = 0.0125 \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{0.015}\right)^{1.5}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (x \ge 0) \tag{4}$$

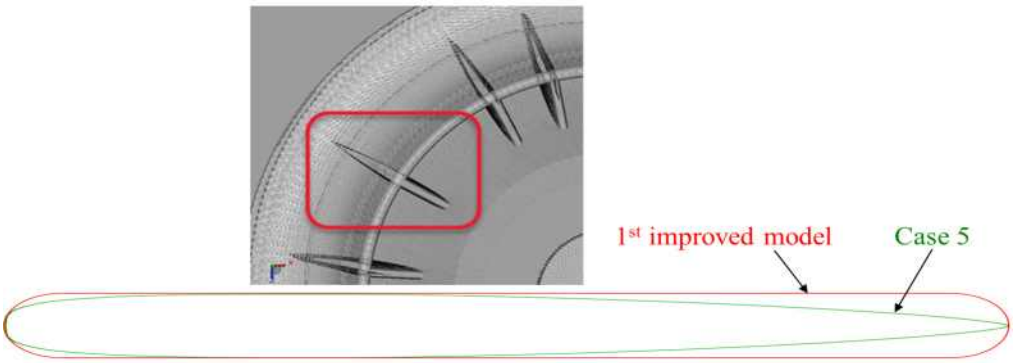
여기서, x는 날개 캠버 라인상의 위치을 y는 날개 두께를 의미한다. Case 6은 슬롯 웨지 형상에 대한 설계 변수 적용 모델로, 슬롯 웨지 길이를 연장하여 날개의 쉬라우드 상부를 덮도록 하였다. 마지막으로 Case 7은 클램프 홀의 설계 변수 적용 모델로 클램프 홀 입구에 필렛을 적용하였다.



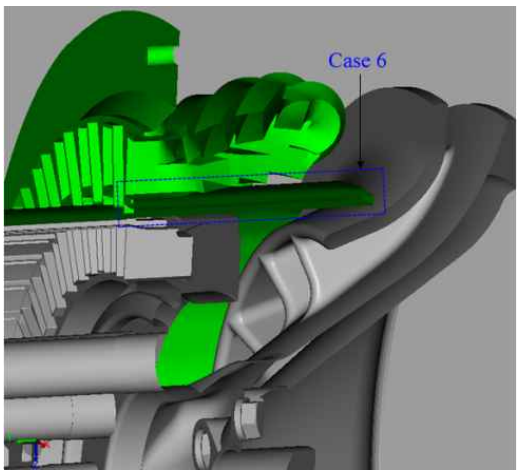
(a) 냉각팬



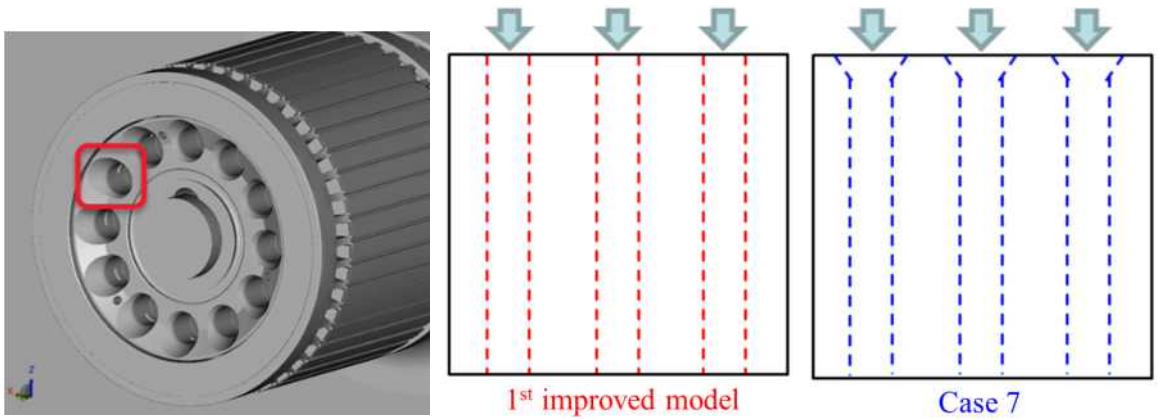
(b) 날개 깃수



(c) 날개 프로파일



(d) 슬롯 웨지



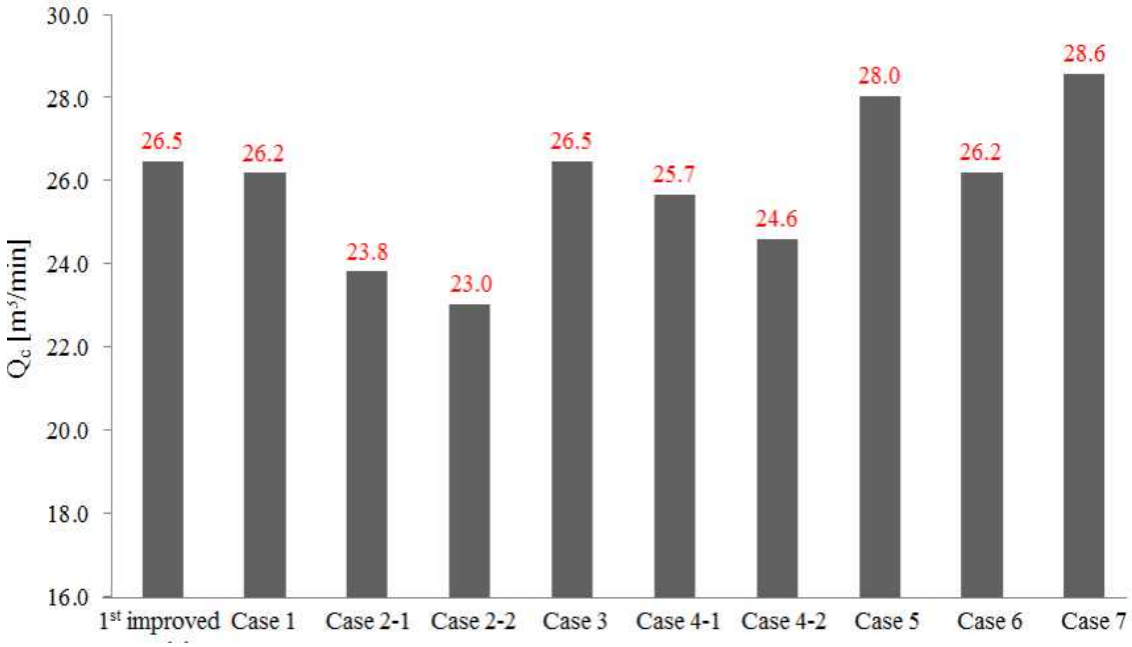
(e) 클램프 홀

[그림 3.2.16] 2차 설계 개선 설계 변수 및 해석 케이스

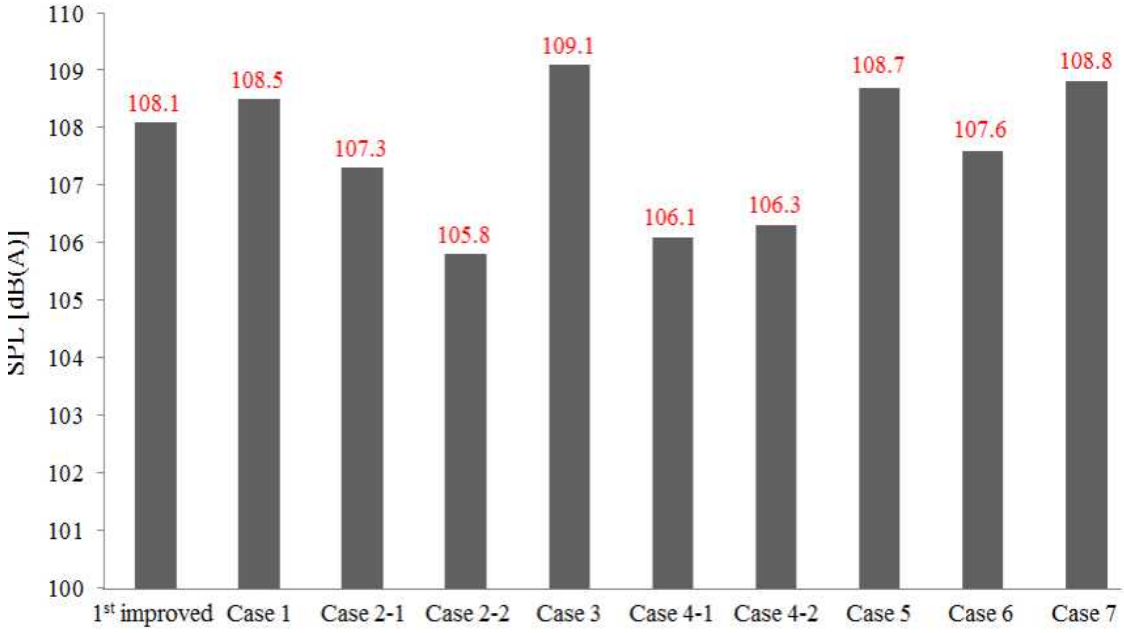
(나) 설계 변수 영향성 평가

선정된 케이스들에 대하여 수치해석을 이용하여 소음 성능을 평가하였다. 1차 설계 개선 작업 수행 시 개선된 설계안들은 견인전동기 냉각팬 유량에 영향을 거의 미치지 않는 설계 변수들이었다. 하지만 2차 설계 개선 작업 수행을 위해 선정된 설계 변수들의 경우 냉각팬 직경, 날개 매수, 날개 프로파일 등의 많은 설계 변수들이 냉각 유량에 영향을 미치는 변수들이었다. 그에 따라 각 해석 케이스들에 대한 수치해석 수행을 시 유량 성능을 추가적으로 산출하였다.

그림 3.17은 수치해석을 통해 산출된 냉각팬 회전수 5300rpm (작동점)에서의 해석 케이스별 성능을 나타낸다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 냉각 성능과 소음 성능은 전반적으로 비례적 관계를 가졌다. 이는 냉각 유량 증가 시 내부 유속이 증가하면서 소음 강도가 함께 상승하는 효과이다. 하지만 유량 변화에 따른 소음 레벨 변화 수준은 각 설계 변수 별로 극명한 차이를 나타내었다. 예를 들어 Case 2-2 (날개 직경 컷팅, 사류형)가 유사한 설계 변경이 도입된 Case 2-1 (날개 직경 컷팅, 원심형)에 비해 유량 감소율 대비 소음 감소 효과가 높게 나타났다. 또한 Case 5와 Case 7의 경우 1차 설계 개선 모델 대비 유량 증가량이 매우 높았지만 소음 강도 증가 폭은 1차 설계 개선 모델과 동일한 냉각 유량 성능을 가지는 Case 3에 비해 낮았다.



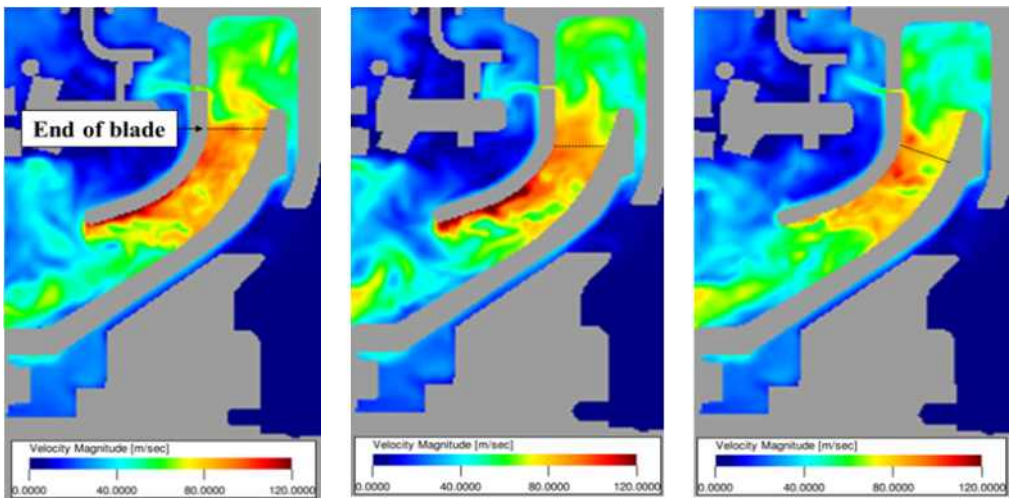
(a) 냉각 유량



(b) 음향 파워 레벨 (소음 성능)

[그림 3.2.17] 해석 케이스 성능 비교

설계 변수 별 성능에 대한 영향성 차이가 발생하는 원인을 파악하기 위하여 그림 3.18과 같이 1차 개선 모델과 Case 2-1, Case 2-2의 날개 영역 내부 유속 분포를 비교 분석하였다. 그림3.17을 통해 확인할 수 있듯이, Case 2-1과 Case 2-2 모두 기본 모델에 비해 날개 직경 감소로 인해 흡입 유량이 감소함으로써 날개 영역에서의 평균 유속이 감소하였다. 이러한 내부 유속 감소는 불균일 유동 발생량을 감소시키게 되며, 불균일 유동 감소가 소음 저감 효과를 가져온다. 하지만 Case 2-1의 경우 Case 2-2에 비해 유량 저감량 대비 유속 감소 효과가 적었다. 이는 일반적으로 로터 내부 유속이 날개 직경에 따라 결정되는 작동 유량에 매우 큰 영향을 받지만, 날개 프로파일에 따라서 그 영향성의 정도가 달라질 수 있다는 것을 의미한다.



(a) 1차 설계 개선안 (b) Case 2-1 (c) Case 2-2

[그림 3.2.18] 케이스별 날개 영역 유속 분포

표 3.2.1. 해석 케이스 별 복합 영향성 지수(CIF)

Case 1	Case 2-1	Case 2-2	Case 3	Case 4-1	Case 4-2	Case 5	Case 6	Case 7
-4.6	-3.1	7.4	-8.9	16.5	9.7	0.2	3.7	1.2

이처럼 유량과 소음 성능 사이의 상관성은 설계 변수에 따라 민감하게 반응할 수 있다. 따라서 합리적인 설계 개선안 도출을 위해서는 각 설계 변수들이 주요 성능 지표들에 미치는 복합적인 영향성을 명확하게 파악해야 한다. 이를 위해 설계 변경에 따른 복합 영향성 지수(CIF)를 다음과 같은 식으로 정의하였다.

$$CIF = (1 + V_Q) \bullet (1 - V_N)^{10} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서 V_Q는 기본 모델 대비 유량 변화율을 V_N은 기본 모델 대비 소음 레벨 변화율을 나타내며 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$V_Q = \frac{Q - Q_{1^{st}}}{Q_{1^{st}}} \quad (6)$$

$$V_N = \frac{SPL - SPL_{1^{st}}}{SPL_{1^{st}}} \quad (7)$$

해석 케이스 별 유량과 소음 성능 결과를 바탕으로 산출된 설계 변수들의 복합 영향성 지수(냉각 유량 대비 소음 저감의 척도)는 표 3.1과 같다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 총 9개 설계 변경 케이스들 중 6개의 케이스가 긍정적 영향성을 나타내었다. 영향성의 크기는 날개 매수, 사류형 타입 날개 직경, 슬롯 웨지 형상, 클램프 홀 형상, 에어포일 타입의 날개 프로파일 순으로 높았다. 반면에 날개 입구부 직경, 원심형 타입 날개 직경, 냉각팬 허브 직경은 부정적인 영향성을 나타내었다.

(다) 2차 설계 개선안 도출

복합 영향성 지수 분석 결과를 바탕으로 2차 설개 개선안 도출을 위한 최종 설계 변수를 선정하였다. 선정된 설계 변수는 소음을 최대한 저감시키기 위하여 긍정적 영향성을 갖는 설계 변수들(날개 매수, 사류 타입 날개 직경, 슬롯 웨지 형상, 클램프 홀 형상, 날개 프로파일)을 모두 포함시켰다. 설계 변수들의 변형량 및 형태는 날개 직경을 제외하고 기존 해석 케이스들과 동일하게 하였다 (날개 매수에 대한 설계 변수의 경우 영향성이 더 큰 15매 적용).

선정된 설계 변수들 중 날개 직경은 냉각 유량을 제어할 수 있는 유일한 설계 변수이다. 따라서 제안된 설계 사양의 유량을 만족하도록 날개 직경에 대한 변경이 요구되었다. 이를 위해 15매의 날개 깃수, 변경된 슬롯 웨지 및 클램프 홀 형상, 에어포일 타입의 날개 프로파일을 적용한 예비 개선 모델의 유량 성능을 수치해석을 이용하여 평가하였다. 그 결과 예비 개선 모델의 냉각 유량은 약 28.9㎥/min으로 최소 냉각 요구 유량 대비 약 20%의 마진을 가졌다. 해당 냉각 유량의 마진과 식 (1)과 같이 정의되는 상사 법칙 그리고 수치해석 오차 수준을 고려하여 날개 직경을 338㎜로 적용하여 2차 설계 개선안을 도출하였다.

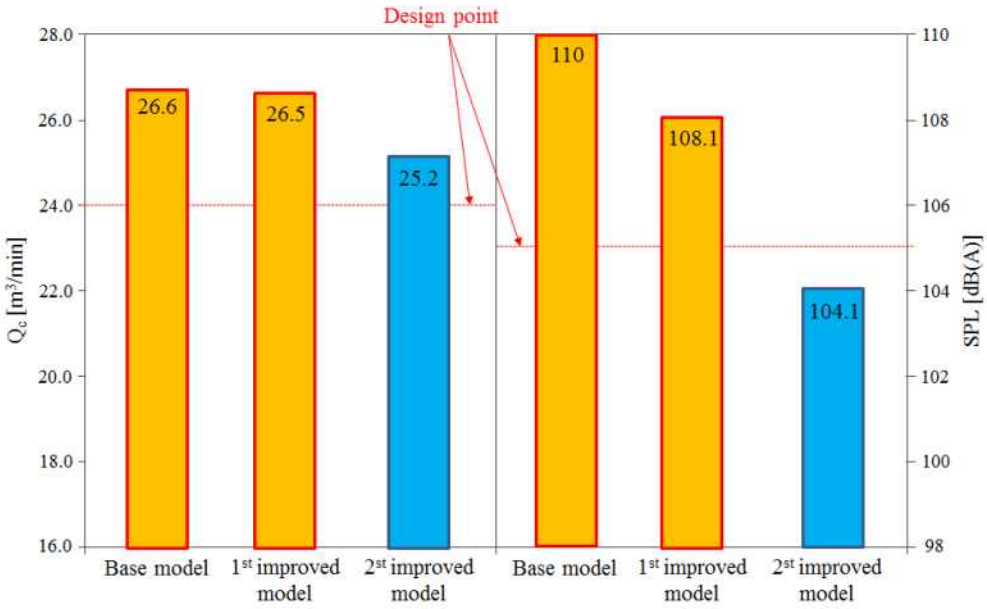
(라) 2차 설계 개선안 성능 평가

선정된 2차 설계 개선안에 대하여 수치해석을 통한 성능 평가를 수행하였다. 성능 평가를 통해 산출된 2차 설계 개선안의 성능을 그림 3.19와 같이 기본 모델 및 1차 설계 개선안의 성능과 비교 분

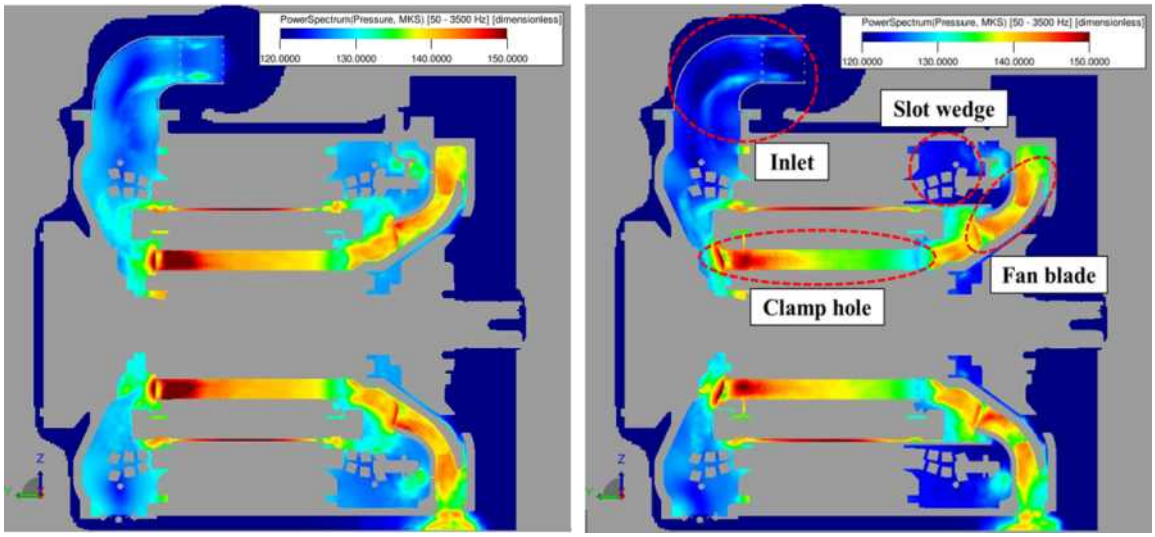
석하였다. 2차 설계 개선안의 냉각 유량 성능은 25.2㎥/min으로 해석 오차 범위를 고려해 볼 때 최소 요구 냉각 유량(24㎥/min)을 만족할 것으로 판단되었다. 2차 설계 개선안의 소음 성능은 104.1dBA로 기본 모델 대비 약 6dBA 만큼 소음이 저감되었다. 이는 매우 높은 소음 저감량으로, 본 과제의 목표 사양에 부합하는 수준이다.

이러한 소음 저감에 대한 원인을 파악하기 위해 그림 3.20과 같이 1차와 2차 설계 개선안의 내부 소음 강도 비교 분석하였다. 유동장 분석 결과를 통해 설계 변경이 적용된 모든 지점에서 소음 강도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 로터 클램프 형상을 변경하여 유동을 원활하게 해 줌으로서 파이프 내부의 소음이 개선되었으며, 슬롯 웨지를 연장하여 고정자 코일과 상호작용으로 발생하던 소음 또한 감소하였다. 마지막으로 에어포일 타입의 날개 적용 및 날개 직경 감소로 인하여 유동 저항 및 작동 유량이 감소함으로써 팬 끝단에서의 소음이 매우 크게 감소하였다. 추가적으로 2차 설계 개선안의 경우 설계 수정이 수행되지 않은 입구 덕트 주변의 소음 수준이 감소하였다. 이는 내부 유동 저항 및 불균일 유동 성분 감소에 따라 입구부로 반사되는 소음량이 줄어든 영향으로 판단되었다.

수치해석 평가 결과를 근거로 2차 설계 개선안이 과제 목표사양을 만족할 것으로 판단되었다. 그에 따라 그림 3.21과 같이 2차 설계 개선안의 시제품을 제작하였으며 소음 및 유량 평가 시험을 수행하였다. 최종적으로 산출된 2차 설계 개선안의 소음 성능은 104.3dBA로 수치해석을 통한 예측치와 유사하였다. 해당 소음 성능은 기본 모델 대비 5.7dBA 저감된 성능으로, 본 과제 목표사양인 104dBA에 만족하는 수준으로 볼 수 있다. 아울러 견인전동기 냉각을 위한 냉각 유량 역시 24.9㎥/min로 냉각 유량에 대한 요구 사양을 만족하였다.

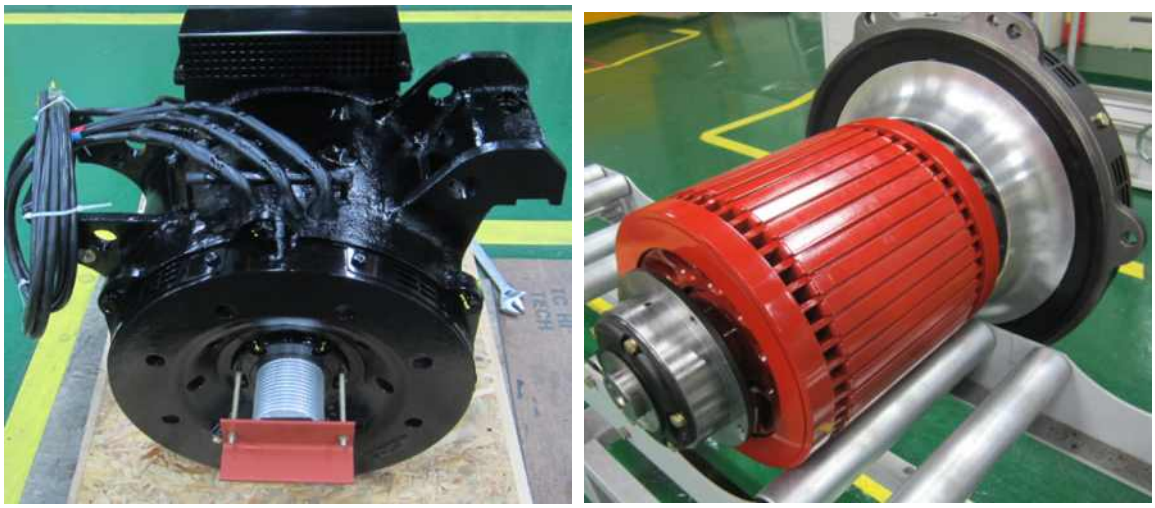


[그림 3.2.19] 각 설계안 성능 비교 (수치해석 결과)



(a) 1차 설계 개선안 (b) 2차 설계 개선안

[그림 3.2.20] 내부 소음 강도 비교 분석



[그림 3.2.21] 그림 3.21. 2차 설계 개선안 시제품

(4) 입구 덕트 흡음재 영향성 평가

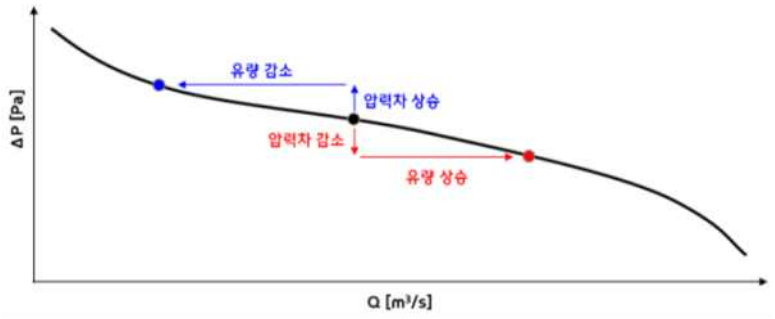
두 번의 설계 개선 단계를 거쳐 도출된 2차 설계 개선안의 유량 및 소음 성능은 본 연구의 목표치에 부합하였다. 이와 별도로 추가적인 소음 저감을 위해 입구 덕트부에 흡음재를 적용하는 안이 제안되었다. 입구 덕트부에 흡읍제를 적용할 경우 추가적인 소음 저감 효과를 기대할 수 있지만, 그림 3.22와 같이 흡입 면적 저하에 따라 압력차가 증가하게 되어 냉각 유량이 감소할 수 있다. 그에 따라 흡음재 적용에 따른 소음과 유량 성능 간의 관계에 대한 연구를 수행하였다.

(가) 흡음재 모델 선정

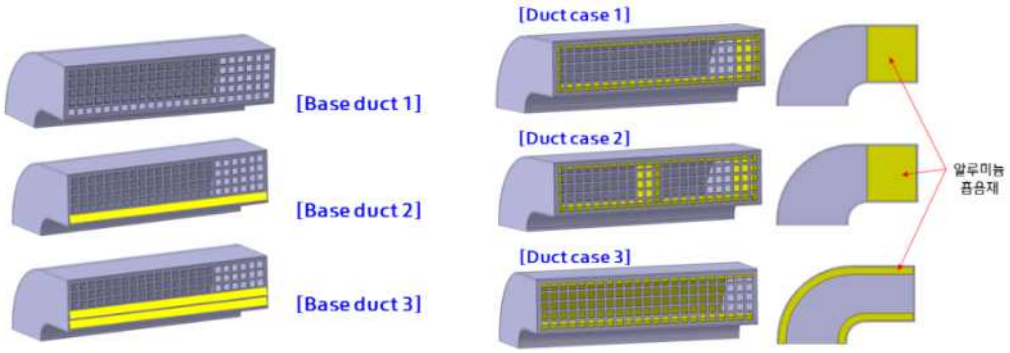
해석 수행을 위해 1차와 2차 설계 개선안에 적용되었던 입구 덕트를 기본 덕트로 선정하였으며, 그림 3.22과 같이 시험 데이터와의 비교를 통해 유량-압력 관계 및 소음 저감 효과를 검증하기 위한 기본 덕트 추가 2종, 형상 변경에 따른 영향성 평가를 위한 형상변경 덕트 3종을 각각 선정하였다. (총 6종 해석 케이스)

① Base duct 1 : 1차, 2차 설계 개선안 적용되었던 기본 덕트
② Base duct 2 : Base duct 1의 최하단 그릴 1행 막음
③ Base duct 3 : Base duct 1의 최하단 그릴 2행 막음
④ Duct case 1 : Base duct 1의 외각 4면부에 흡음재 적용

⑤ Duct case 2 : Base duct 1의 외각 4면 및 중단부에 흡음재 적용
⑥ Duct case 3 : Base duct 1의 상하면 프로파일에 흡음재 적용

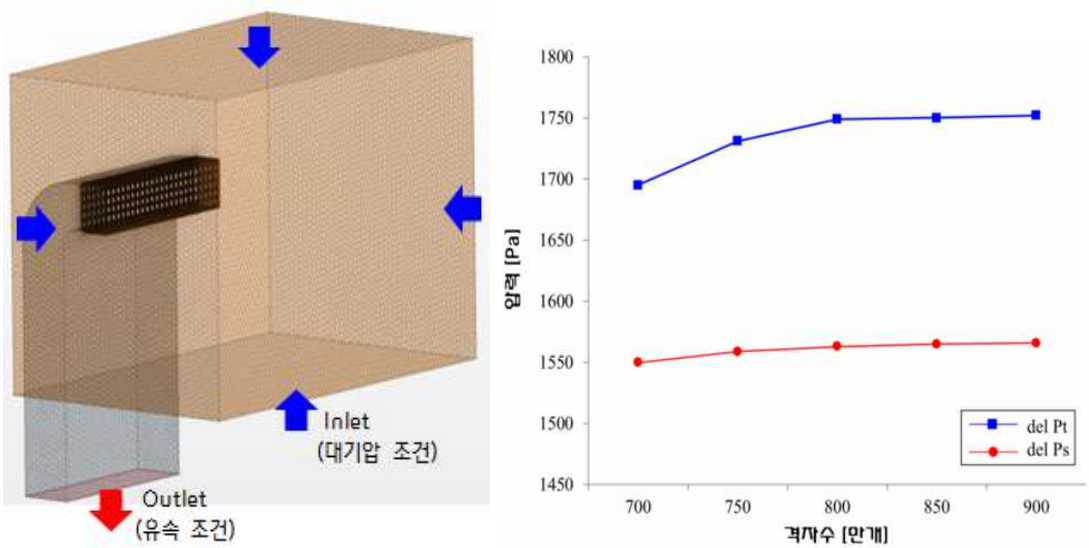


(a) 시스템 저항 곡선



(b) 입구부 덕트 유동 저항 해석 모델

[그림 3.2.22] 입구부 덕트 유동저항 개선 모델



[그림 3.2.23] 수치해석 조건 및 격자 의존도 테스트 결과

(나) 수치해석을 이용한 유동 저항 평가

선정된 해석 케이스들에 대하여 수치해석을 이용한 유동 저항 평가를 수행하였다. 유동 저항 평가 해석을 위한 수치해석은 Naviar-Stokes 지배방정식을 기반으로 하는 유동 해석 프로그램인 STAR CCM+를 이용하여 수행되었다. 수치해석 수행 시 적용된 해석 도메인 및 격자계, 경계조건들은 그림 3.23과 같다. 최종 적용된 격자계의 경우 수치해석 신뢰도 확보를 위해 격자 의존도 테스트를 통해 약 800만개로 구성된 다면체 격자로 선정되었다.

(다) 유동 저항 평가를 통한 유량 예측

흡음재 적용에 따른 영향성 평가를 위하여 각 해석 케이스들의 해석 결과들을 토대로 다음과 같은 압력 데이터들을 확보하였다.

① $\triangle P_s$: 입출구 사이 정압 차이 → 실질적인 유량 결정 압력
② $\triangle P_t$: 입출구 사이 전압 차이 → 동압(Dynamic pressure) 값 확인
③ P_d : 출구부에서의 동압(Dynamic pressure) → 수치해석의 신뢰도 확인

(산출 근거 함수) $$P_t = P_s + P_d \quad (8)$$

각 케이스들에 대한 확보 데이터들을 토대로 다음과 같이 유동 저항을 기반으로 하는 유량 예측 작업을 수행하였다. 그에 따라 산출된 흡음재 적용 케이스 별 예측 유량 값은 표 3.2와 같다.

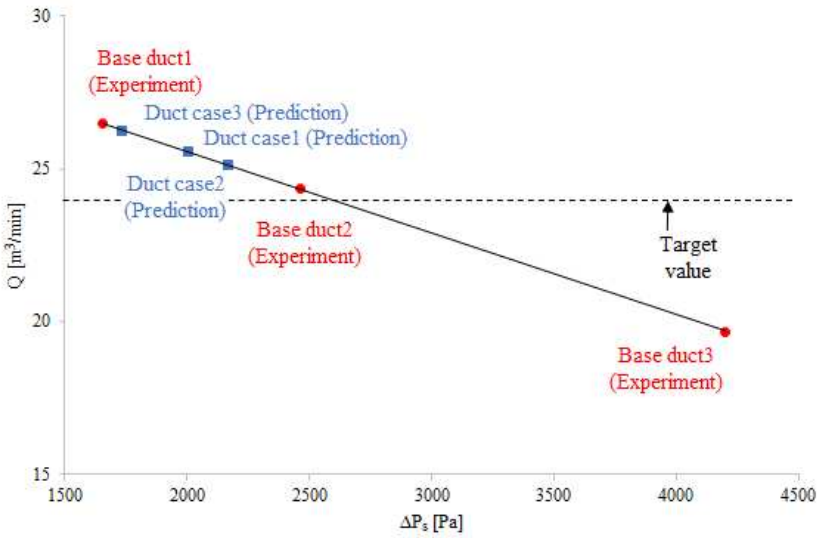
① 검증 모델의 시험 데이터를 기준으로 유량-압력 관계 정의
② 유량-압력의 예측곡선(Interpolating curve) 산출 (그림 3.24(a))
③ 형상 변경 모델들의 유량 예측

표 3.2.2 유량 예측 데이터

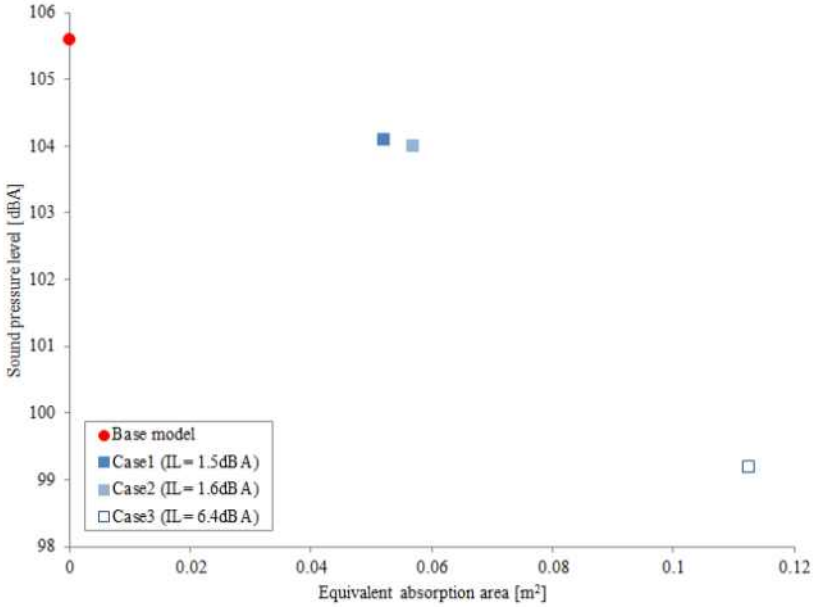
	△Ps [Pa]	△Pt [Pa]	Pd [Pa]	Q [m^3/s]
Base duct 1	1656.1	1524.1	-132.0	0.441
Base duct 2	2461.9	2329.9	-132.0	0.406
Base duct 3	4199.1	4067.5	-131.7	0.328
Duct case 1	2002.7	1871.2	-131.6	0.426
Duct case 2	2166.8	2035.4	-131.3	0.419
Duct case 3	1736.0	1604.1	-131.9	0.438

표 3.2.3 흡음재 15t 흡음율

주파수	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
흡음계수	0.04	0.04	0.1	0.27	0.48	0.73	0.78	0.76



(a) 유량-압력 예측 곡선



(b) 소음 저감량

[그림 3.2.24] 유동저항 평가에 의한 유량변화와 Raytracing 해석을 통한 소음저감 예측

위 결과와 같이 흡음재 적용에 따른 냉각 유량 저감률은 Duct case 1이 약 3.4%, Duct case 2가 약 5%, Duct case 3이 약 0.7%로 예측되었다. 2차 설계 개선안의 냉각 성능과 본 유량 예측 결과를 종합해 볼 때 Duct case 1과 Duct case 3 적용 시 최소 요구 냉각 성능을 만족될 것으로 판단된다.

(라) 흡음 해석을 통한 소음 저감 예측

흡음재의 흡음률은 표 3.3과 같다. 각 케이스에 대하여 흡음률을 이용한 수치 계산 값과 Raynoise 소음 해석 프로그램을 이용한 해석 결과를 비교 분석하였다. 그에 따라 예측된 흡음재 적용에 따른 소음 저감량은 그림 3.24와 같다.

(마) 견인전동기 최종 시제품 제작

추가적인 소음 개선 효과를 도출하기 위해 견인전동기 공기 흡입구에 흡음재를 적용하였다. 흡음재 적용면은 그림 3.22(b)의 Duct case3와 같으며 흡음재 두께는 내부 압력 상승에 따른 유량 감소가 냉각 성능에 영향을 미치지 않도록 하기 위해 수치해석과 시험을 통해 검증된 15㎜를 적용하였다.

연구 수행을 바탕으로 보완 설계된 견인전동기 최종 모델의 성능평가를 수행하기 위해 제작 도면을 작성한 후 시제품을 제작하였다. 제작 도면을 바탕으로 제작된 시제품의 구성품 및 조립 형상은 그림 3.25와 같다.

(5) 저소음 견인전동기 시험

(가) 유량 시험

(1)-(가)의 시험법에 의하여 최종 선정 모델인 Duct case 3 (Base duct 1의 상하면 프로파일에 흡음재 적용)에 대하여 유량시험을 진행하였으며, 그 결과 Q =26.2 m^3/min로 평가되었다. 이는 냉각 유량 요구 성능인 24 m^3/min 이상을 만족하는 수치이다.



(a) 전동기 흡입부



(b) 조립 완료 시제품

[그림 3.2.25] 견인전동기 최종 시제품

(나) 소음 시험 (공인기관 시험성적서 발행)

그림 3.2(b)의 시험방법 ISO 9614-2에 준하여 공인시험기관(KCL, 건설생활환경시험연구원)에 의뢰하여 시험을 진행하였다. 그 결과 표 3.4 와 같이 저소음 견인전동기 최종 시제품의 음향파워레벨은 103.7dBA로 목표 104dBA를 달성하는 것으로 확인되었다.

표 3.2.4 견인전동기 최종 시제품 음향파워레벨

시 험 결 과 (reference = $10^{-12}W/m^2$)						
주파수 (Hz)	상부 (dB)	전면 (dB)	후면 (dB)	좌측면 (dB)	우측면 (dB)	종합 (dB)
250	86.1	90.6	84.3	88.4	88.2	94.3
315	85.5	88.3	80.3	85.3	86.1	92.1
400	85.0	89.4	82.2	85.1	85.2	92.2
500	84.4	86.8	81.7	84.3	83.8	90.8
630	85.6	91.2	85.8	85.9	86.2	93.8
800	84.1	91.7	85.5	85.3	86.3	93.7
1000	84.7	92.2	86.1	86.4	87.2	94.4
1250	83.5	94.2	83.6	85.2	85.7	94.9
1600	84.5	92.3	83.2	85.9	86.5	94.0
2000	86.8	91.9	83.9	87.8	88.0	94.7
2500	86.1	89.2	81.6	86.8	86.9	93.0
3150	81.3	84.9	78.0	83.2	83.2	88.9
4	82.1	84.5	76.9	82.5	83.6	88.8

000						
5000	75.5	78.9	71.3	76.9	77.1	82.9
음향파워레벨 (dB(Lin))						104.3
A특성 가중 음향파워레벨 (dB(A))						103.7

(다) 견인전동기의 기본성능 검토

저소음 견인전동기 및 코레일 타입 견인전동기의 사양은 표 3.5와 같다.

표 3.2.5. 견인전동기 기본 비교

분류	코레일 타입(양산)	저소음 견인전동기(개발)
형식	3상 농형 유도전동기	3상 농형 유도전동기
극수	4극	4극
냉각 방식	자기통풍식	자기통풍식
절연 종별	200 Class	200 Class
최대시험 회전수	6,350 rpm	6,350 rpm
중량	800 kg	720 kg
정격 출력	200 kW (연속)	200 kW (연속)
정격 회전수	2,055 rpm	2,055 rpm
소음	110dBA	104dBA

(라) 저소음 견인전동기의 원가상승 요소 검토

기존 양산품 대비 저소음 견인전동기는 중량이 감소함으로 인해 원가요소를 감소시킴.
저소음 냉각팬 적용으로 제품 제작비용 감소
흡음재 사용으로 인한 약간의 재료비용 증가
총 원가 5% 감소 (상세 원가분석 표 3.54참고)

(마) 해외경쟁사 비교

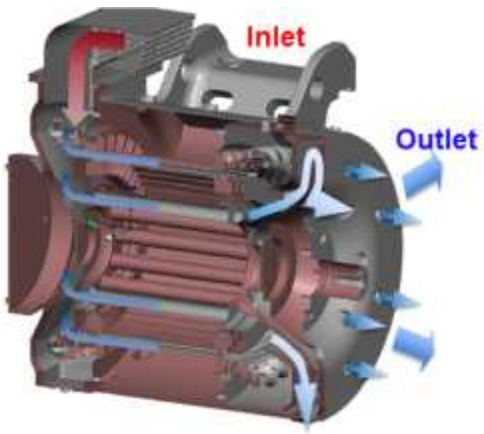
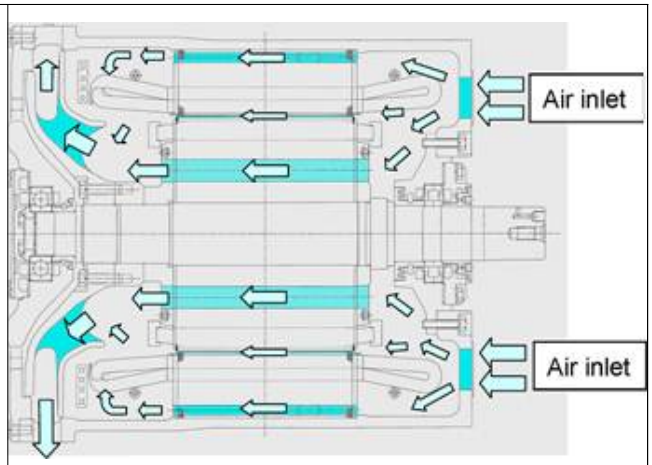
- 현대로템 견인전동기와 해외 제품의 냉각흐름도 및 각각의 특징에 대해 아래와 같이 비교하였다.

해외 경쟁사와 동등이상의 냉각 수준 달성을 위하여 유로 등 최적화를 진행하였으며, 기존 코레일 양산 견인전동기에 비하여, 저소음 및 저중량이 해외 경쟁사 견인전동기와 유사한 수준으로 개선되었다.

표 3.2.6. 해외 견인전동기와 저소음 견인전동기 비교

설계요소	코레일 견인전동기	저소음 견인전동기	해외 견인전동기 (Melco)
형상			
소음	110dBA	104dBA	102dBA
중량	800 kg	720 kg	680 kg

표 3.2.7. 해외 견인전동기와 저소음 견인전동기 냉각흐름도 비교

	
현대로템 견인전동기 냉각흐름도	해외경쟁사 견인전동기 냉각흐름도
▶견인전동기 상부에서 냉각공기 유입 ▶냉각 팬의 공기 유입량 증대 ▶소음 저감을 위해 냉각 팬의 블레이드 외경 축소 ▶냉각용량 증대를 위해 공기유로 최적화	▶구동측 측면에서 냉각공기 유입 ▶냉각 팬의 공기 유입부 大 ▶냉각 팬의 블레이드 외경 축소 ▶냉각성능 향상을 위해 고정자 통풍홀 적용

나. 저소음 구동기어 개발

(1) 구동기어 1차 시제품 설계

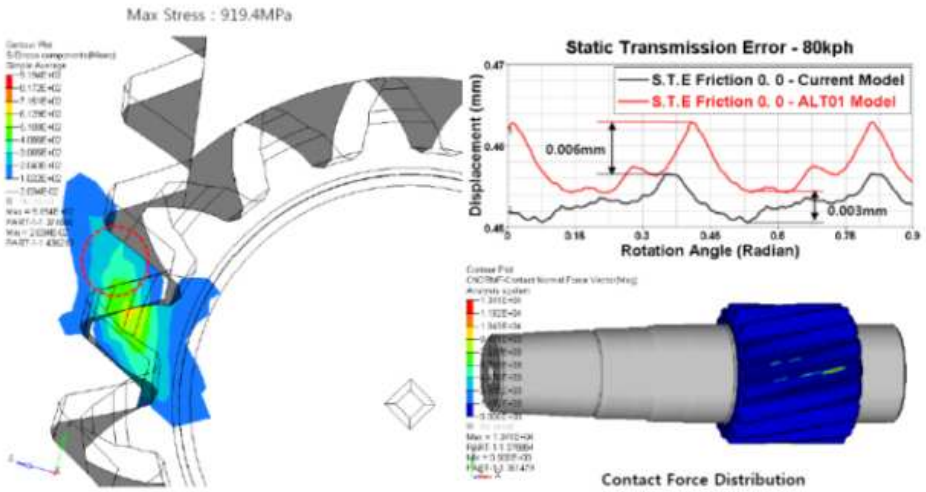
(가) 피니언 기어 / 휠 기어의 제원 설계

① 기어의 소음 저감을 위한 기어 제원설계 및 정적 전달오차 해석

저소음이 예상되는 해외 업체 기어와 현재 코레일 전동차의 기어를 소음 해석을 통해 비교하였다. 기어 제원설계에 대한 결과 비교 시 ALT-01의 경우 정적 전달오차량이 미소하게 증가하나 기어 맞물림성이 개선되므로 동적전달오차 개선을 기대 할 수 있을 것으로 예측된다.

표 3.2.8. 기어조합비의 변경에 대한 제원 비교

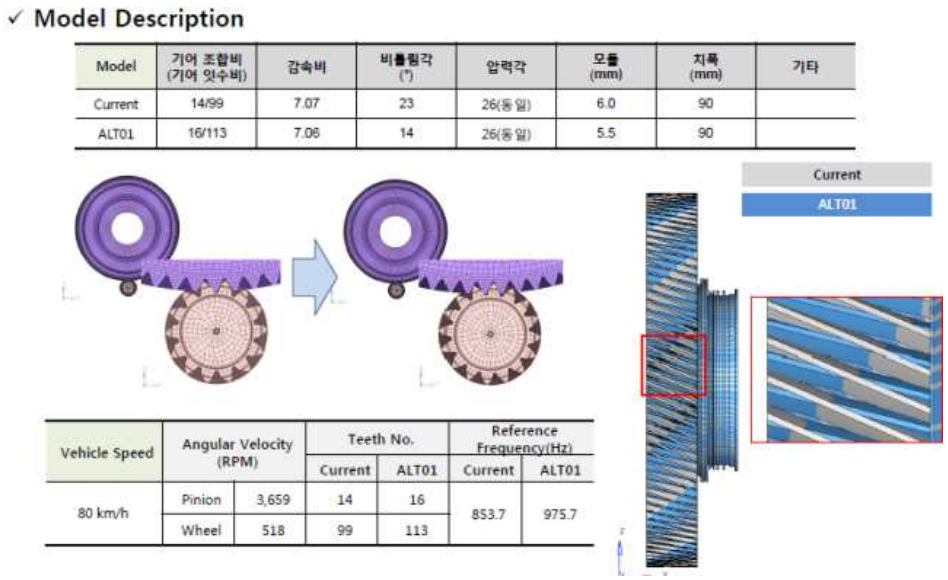
구분	기어 조합비 (기어 잇수비)	감속비	비틀림각 (°)	압력각	모듈 (mm)	치폭 (mm)	기타
기존	14/99	7.07	23	26 (동일)	6.0	90	코레일 전동차
신규	16/113	7.06	14	26 (동일)	5.5	90	해외 전동차



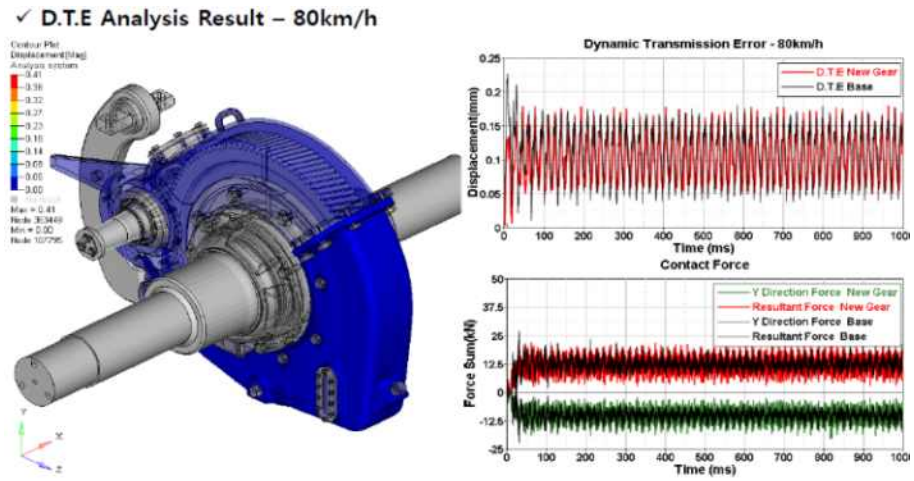
[그림 3.2.26] 기어 제원 설계에 대한 정적 전달오차 해석

② 기어의 소음 저감을 위한 ALT-01 기어의 소음해석

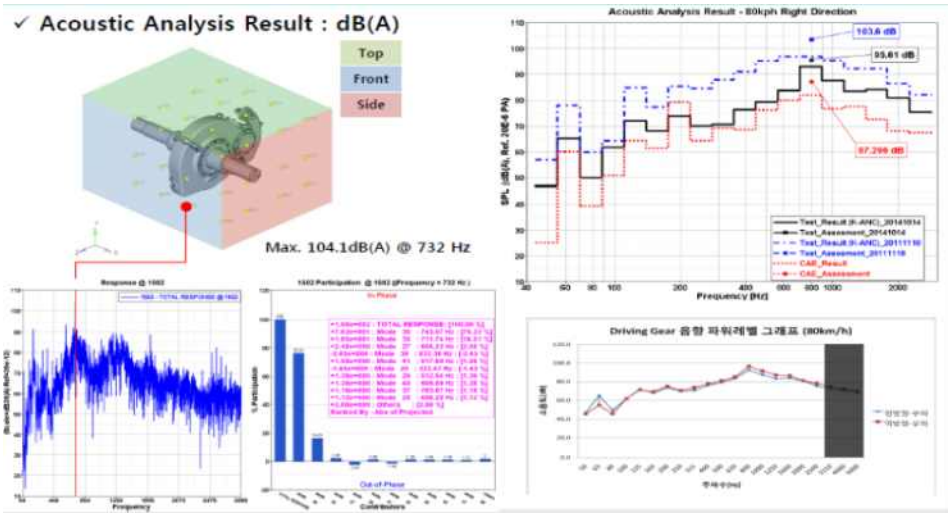
소음해석 결과는 기존 모델에 비하여 ALT-01 모델의 소음이 약 2.5dBA 정도 저감이 확인됨.



[그림 3.2.27] 기존 기어와 ALT-01 기어의 비교



[그림 3.2.28] 기존 기어와 ALT-01 기어의 동적 전달오차 비교



[그림 3.2.29] 기존 기어와 ALT-01 기어의 소음해석 비교

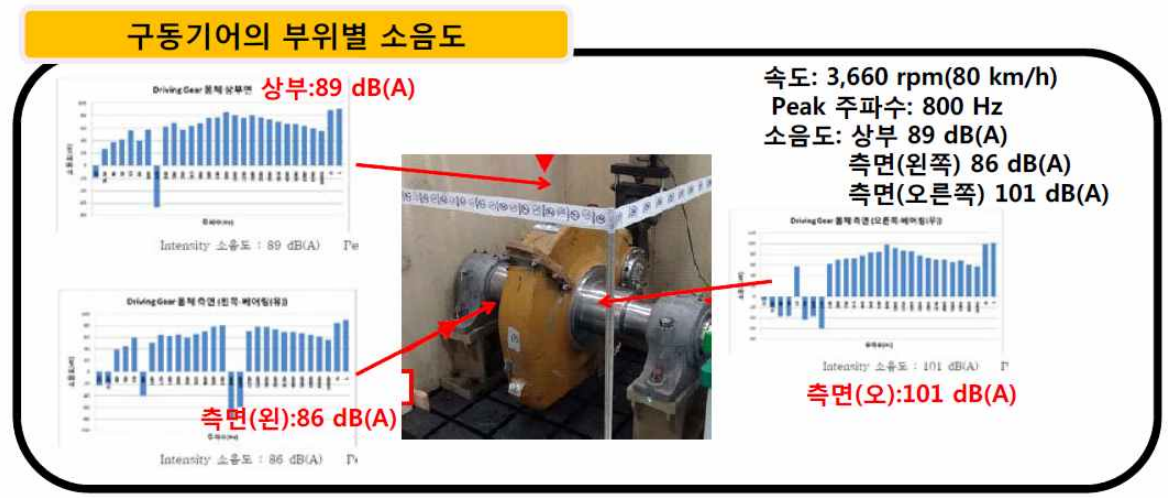
(나) 구동기어 부하 소음시험

- KORAIL 제품규격서(RPS-DG1-201-01)에 의거하여 시험 실시
- 부하시험 시 소음시험(음향파워레벨 스캐닝)을 실시하였으며, 부위별 소음도를 측정함.



구동기어의 부하시험기 구동기어의 소음시험(음향파워)

[그림 3.2.30] 구동기어의 부하시험



[그림 3.2.31] 구동기어의 부위별 소음시험 결과

- 구동기어의 부위별 소음은 베어링이 없는 측면(오른쪽)에서 높게 발생함.
- 80 km/h 에서 오른쪽 측면에서 101dBA의 소음이 측정됨.

2) 구동기어 2-3차 시제품 설계

(가) 구동기어 FE 해석

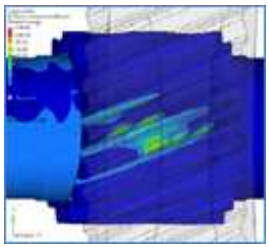
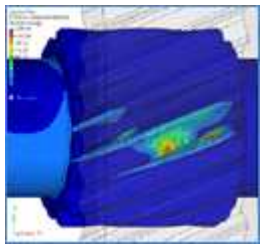
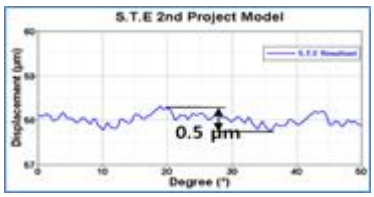
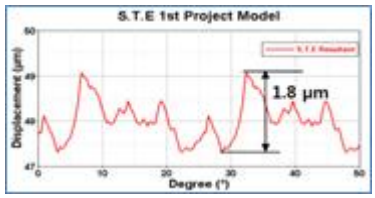
① 기어 해석 모델 재원

표 3.2.9. 기어 해석 모델 제원

구분	주요사항	기어비
ALT-01	양측지지구조+신규기어	7.06(113/16)
ALT-02	양측지지구조+기어케이스 보강+피니언 베어링 구조변경+신규기어	7.26(109/15)
ALT-03	양측지지구조+기존기어(크라우닝추가)	7.07(99/14)

② 기어 해석 결과

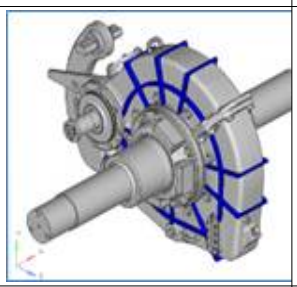
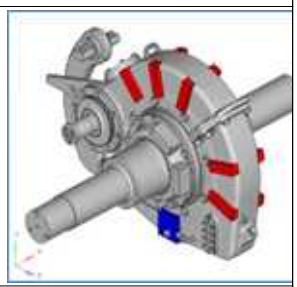
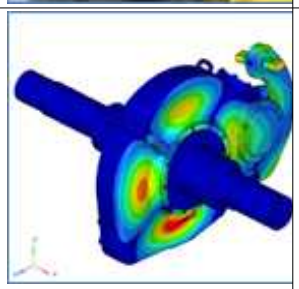
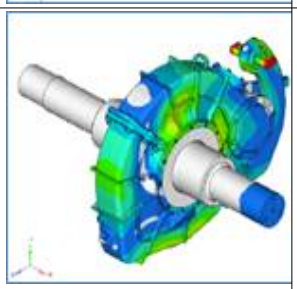
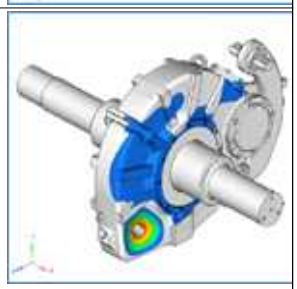
표 3.2.10. 기어 해석 결과

구분	ALT-02 해석모델	ALT-03 해석 모델
Max. Von Mises Stress	 128.7MPa	 205.8MPa
Static Transmission Error		

(나) 구동기어 케이스 모달 해석

① 구동기어 케이스의 강성 보완을 위한 모달 해석

표 3.2.11. 기어케이스 강성 보완 모달 해석 결과

	기본 케이스 구조	강성 보강 1안	강성 보강 2안
강성 보완 방안			
모달 해석 결과	 Mode 40(775.8Hz) : 74%	 Mode 48(723.5Hz) : 56%	 Mode 42(828.8Hz) : 71%

② 구동기어 케이스 제작



[그림 3.2.32] 구동기어 케이스 제작 (강성보강 2안)

(다) 구동기어 소음 시험 결과

① 시험 개요

- 구동기어 시제품 3종 제작 : ALT-01, ALT-02, ALT-03
- 구동기어 음향파워레벨 측정
  : KS ISO 9614-2(음향파워레벨 스캐닝)에 의거하여 측정
  : 구동속도 3,660rpm(80km/h), 부하조건 1,103kgf
  : 구동속도 5,030rpm(110km/h), 부하조건 551kgf

ALT-01	ALT-02	ALT-03
		

[그림 3.2.33] 구동기어 시제품 3종

② 시험 결과

- 소음 성능은 ALT-02 모델이 우수함
- 기어 케이스 강성 보강을 통한 구조기인 소음 저감 효과적임
- 기어 압력각, 비틀림각의 최적화 및 치폭 감소에 의한 소음 저감 효과 확인
- 베어링 지지방식 변경은 소음 저감 효과가 적음



[그림 3.2.34] 구동기어 음향파워 레벨 측정

표 3.2.12. 음향파워레벨 비교(목표 : 96dBA@80km/h, 104dBA@110km/h)

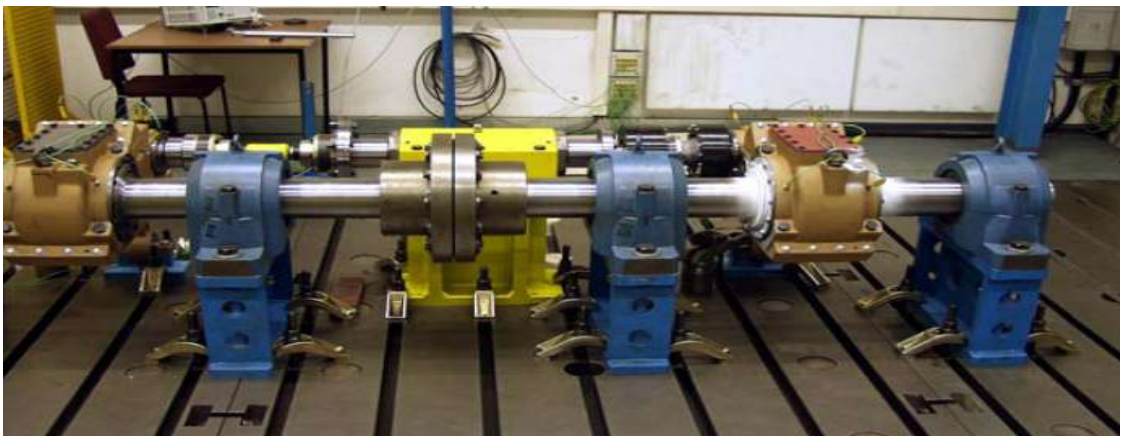
구동조건		기존 양산품	ALT-01	ALT-02	ALT-03
80km/h	정 방향	102.3	96.0	90.4	97.8
	역 방향	N/A	93.0	94.5	100.9
	평균	102.3	94.5	92.5	99.4
110km/h	정 방향	N/A	113.3	105.1	103.5
	역 방향	N/A	112.0	107.3	107.6
	평균	N/A	112.7	106.2	105.6

* 기존 양산품은 코레일 분당선 28량 시험 결과임(기준 80 km/h에서 103dBA)
* 서울 9호선 70량 시험 결과 : 80 km/h에서 정방향 97.0dBA, 역방향 93.7dBA
* 부산 1호선 48량 시험 결과 : 80 km/h에서 정방향 100.8dBA, 역방향 102.6dBA

- Driving Gear의 오른쪽면(부하쪽)과 왼쪽면(모터쪽)을 각각 근접 측정해 본 결과, 오른쪽면(부하쪽)이 왼쪽면(모터쪽) 보다 약 4~5dB 정도 Intensity 소음이 높게 측정됨.
- 진동에 의해 나타나는 Harmonic 현상만 없다면 소음이 더 저감 될 수 있을 것으로 판단됨.
- 같은 모델의 Driving Gear라도 조립품질(조립하는 사람의 노하우)에 따라서 소음도 차이가 발생하므로 조립품질을 표준화 하는 방안도 고려해 보아야 함.



[그림 3.2.35] 한국철도기술연구원 부하 소음시험



[그림 3.2.36] A사 부하시험 설비

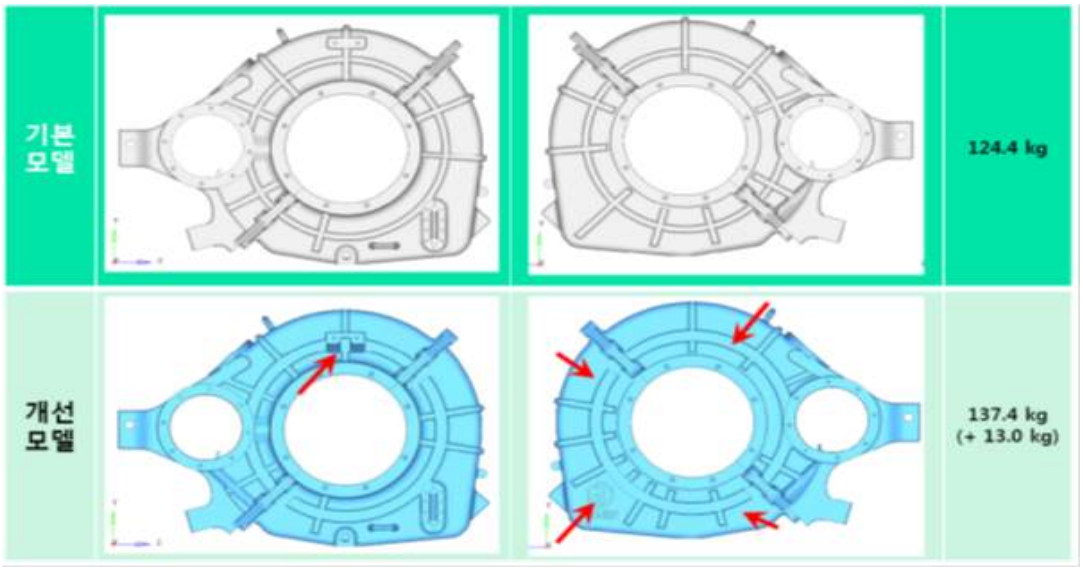


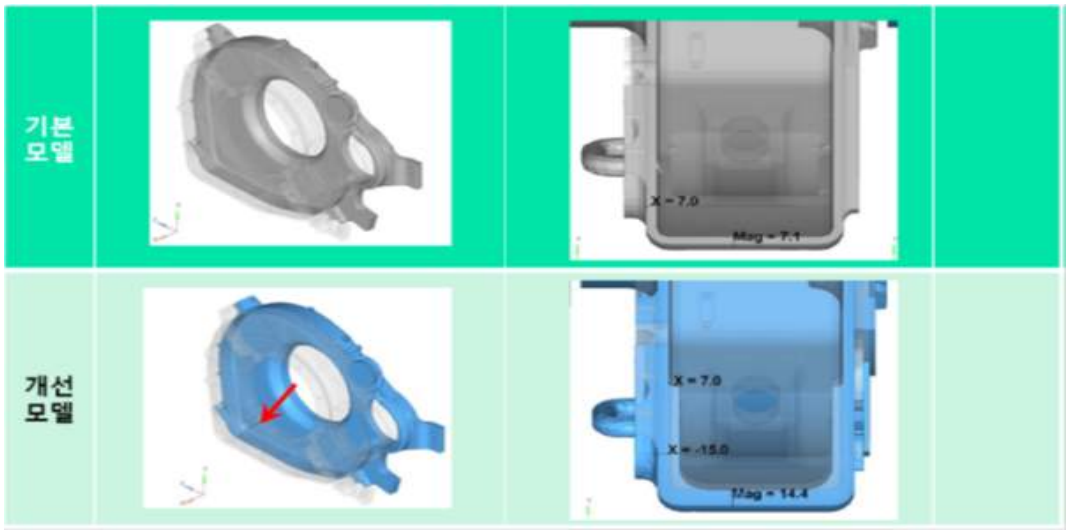
[그림 3.2.37] 그림 3.37. B사 부하시험 설비

구동기어 3가지 모델 중에서 ALT-02 모델이 안정적인 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있었으며, 시험설비 및 시험 조건에서 부하측의 소음을 완전하게 차폐할 수 없고, 시험실 조건이 소음 시험보다는 부하구동시험 목적으로 만들어진 것으로 시험결과는 시험조건에 영향을 받을 수 밖에 없는 상황으로 판단됨.

(라) 구동기어 케이스 최적화

- 시험조건에 대한 검토뿐만 아니라, 추가로 소음 저감을 위해서 ALT-02 적용 모델에 구동기어 케이스 최적화 모델을 적용할 경우에는 요구조건에 부합되는 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단됨.





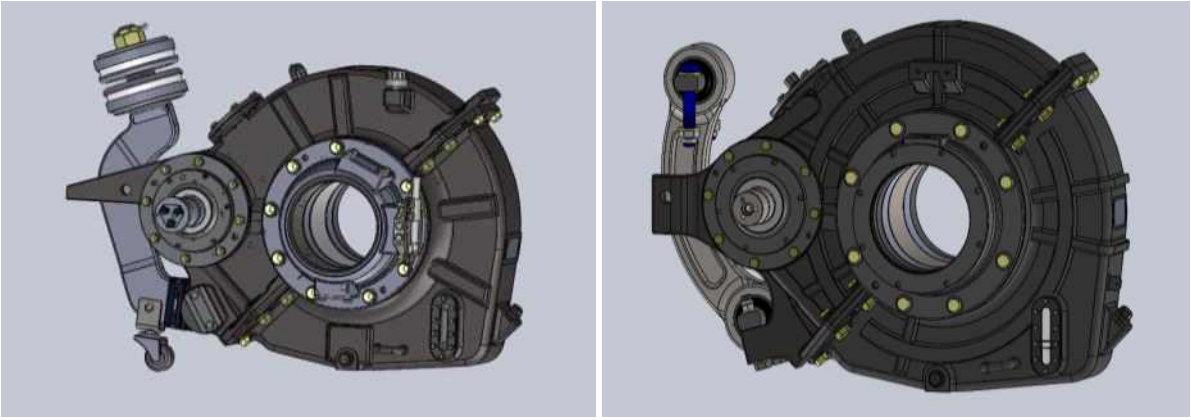
[그림 3.2.38] 구동기어 케이스 설계 최적화

- ALT-02에 케이스 최적화 모델(ALT-02')을 적용하여 소음해석을 진행해 본 결과 아래 그림 3.39와 같이 2.6dBA 정도 저감될 것으로 예측됨.

표 3.2.13. 음향파워레벨 비교(목표 : 96dBA@80km/h, 104dBA@110km/h)

구동조건		ALT-02	ALT-02'
80km/h	정 방향	90.4	87.8
	역 방향	94.5	91.9
	평균	92.5	89.9
110km/h	정 방향	105.1	102.5
	역 방향	107.3	104.7
	평균	106.2	103.6

- 구동기어 케이스 설계 최적화 적용 모델의 형상은 다음 그림 3.40과 같으며, 향후 소음기준이 강화된 프로젝트에 적용될 예정임.



[그림 3.2.40] ALT-02(좌) 및 케이스 최적화 모델 ALT-02'(우)

(마) 구동기어의 기본성능 검토

저소음 구동기어 및 코레일 타입 구동기어 사양은 표 3.2.13와 같다.

표 3.2.14. 구동기어 기본 비교

분류	코레일 타입(양산)	저소음 구동기어(개발)
기어비	99:14(7.07)	113:14(8.07)
기어타입	헬리컬	헬리컬
비틀림 각	23	23
모듈	6	6
베어링 구조	편측지지	양측지지
최고 속력	110km/h(작동), 120km/h(설계)	80km/h(작동), 120km/h(설계)
무게	370 kg (오일 제외)	348 kg (오일 제외)
기본 수명	분해 정비 주기 720,000km 이상, 기본 수명 1,440,000 km 이상	분해 정비 주기 1,000,000km 이상, 기본 수명 2,250,000 km 이상

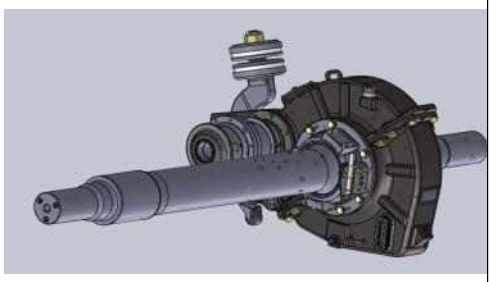
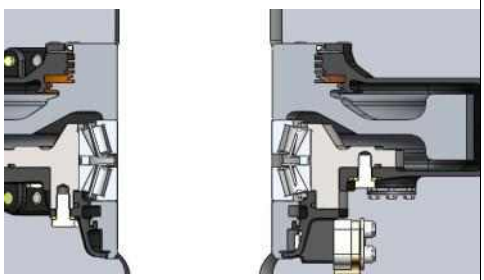
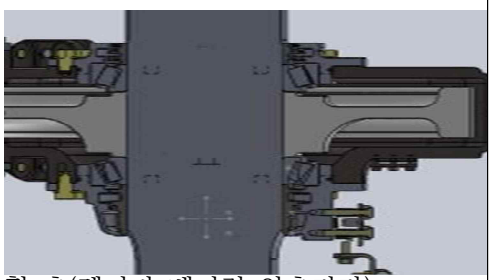
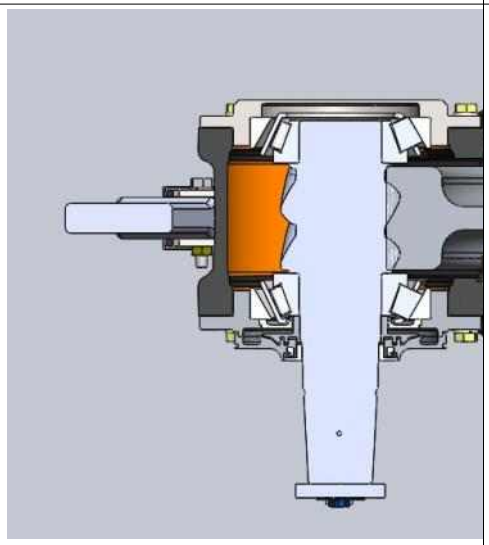
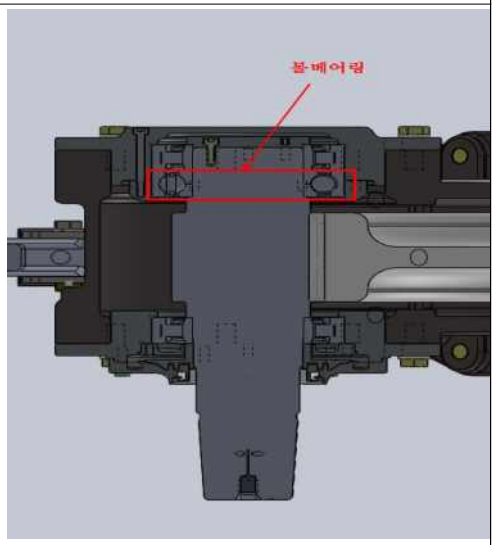
(바) 저소음 개발품의 원가상승 요소 검토

기존 양산품 대비 저소음 기어는 표 3.15와 같이 부품수가 39개 감소하였으며 소음감소를 위해 케이스에 리브살 가공을 하는데 이는 사내가공으로 처리하여 원가상승요소를 감소

저소음 기어는 피니언 측에 볼베어링(1EA) 추가

총 원가 20% 절감 (상세 원가분석 표 3.54 참고)

표 3.2.15. 저소음 부품수 비교

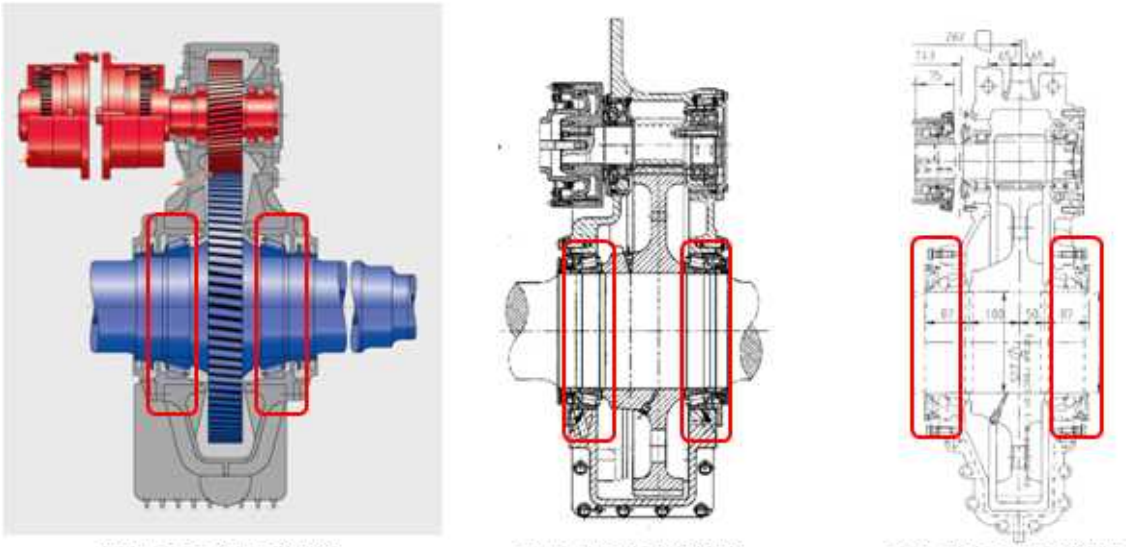
<table>
<tr><td>분류</td><td>코레일 타입 구동기어 (양산)</td><td>저소음 구동기어 (개발)</td></tr>
<tr><td>형상</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>부품수</td><td>141 개</td><td>102 개</td></tr>
<tr><td rowspan="2">기어 구조</td><td> 
휠 측(테이퍼 베어링 편측지지)</td><td> 
휠 측(테이퍼 베어링 양측지지)</td></tr>
<tr><td> 
피니언 측</td><td> 

피니언 측 (볼베어링 추가)</td></tr>
</table>

(사) 해외경쟁사 비교

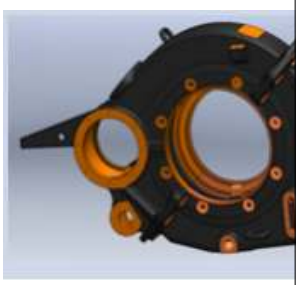
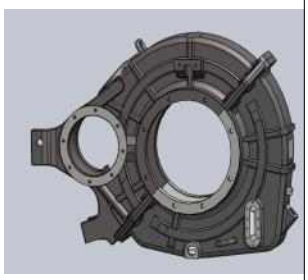
- 해외 제품은 그림 3.41과 같이 베어링 양측 지지구조 방식을 저소음 구동기어에 적용
- 해외사 대비 경쟁력 있는 부분은 표 3.16과 같이 케이스 부피가 해외사에 비해 28% 작아졌음에도 불구하고 소음특성에서는 크게 차이가 나지 않음

크기가 작아짐에 따라 증가되는 소음을 감소하기 위해 케이스 두께 7㎜에 리브살을 붙였으며 이를 통해 중량을 증가시킴에 따라 진동 및 소음 감소

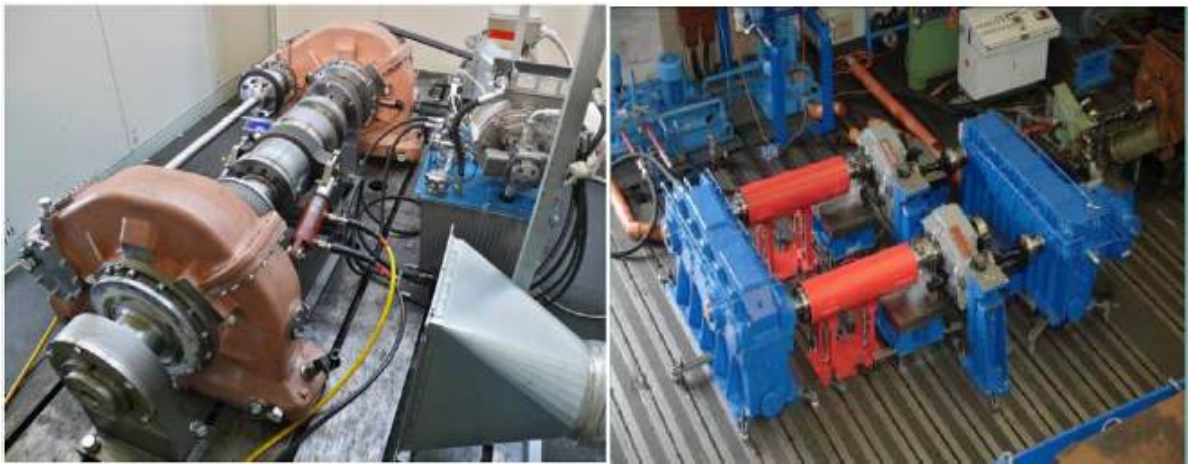


[그림 3.2.41] 해외 사례의 양측 지지구조 방식

표 3.2.16. 해외 구동기어와 저소음 구동기어 비교

설계 요인	코레일 구동기어	저소음 구동기어	해외 구동기어
형상			
케이스 사이즈 (길이X높이X폭)	1047×695×188.5 mm	684×641.9×238.7 mm	950×684×224 mm
케이스 두께	7 mm	8 mm	8 mm
중량	93 kg	116.8 kg	107 kg
소음	102.3dBA @ 80km/h	89.9dBA @ 80km/h	93dBA @ 80km/h

해외의 경우 저소음, 경량화 등 다양한 형태의 요구조건에 부합되는 구동기어가 제작 되고 있으며, 소음의 경우도 80 km/h 주행 조건에서 93dBA 수준까지 제작되고 있는 것으로 확인된다. ALT-02’ 의 경우도 80km/h 주행 조건에서 평균 약 90dBA 수준으로 해외 경쟁사 제품에 비해 약 3dBA 낮은 소음 성능을 나타낸다.



[그림 3.2.42] 해외 업체의 구동기어 부하시험 장비



[그림 3.2.43] 해외 업체의 구동기어 제품

다. 저소음 냉방기 개발

(1) 냉방기 1차 시제품 제작 및 시험

(가) 저소음 냉방기의 개별 장치 개발 및 조립

- 저소음 압축기 개발
- 저소음 응축기 팬 개발
- 저소음 증발기 팬 개발
- 방진마운트 구조 개선
- 냉방기 프레임 개발



[그림 3.2.44] 저소음 냉방기 개발 항목

(나) 1차 시제품 성능 시험

① 냉방성능 시험

1) 시험실 Spec : TAC Calorimeter

표 3.2.17. 냉방성능 시험실과 장비 사양

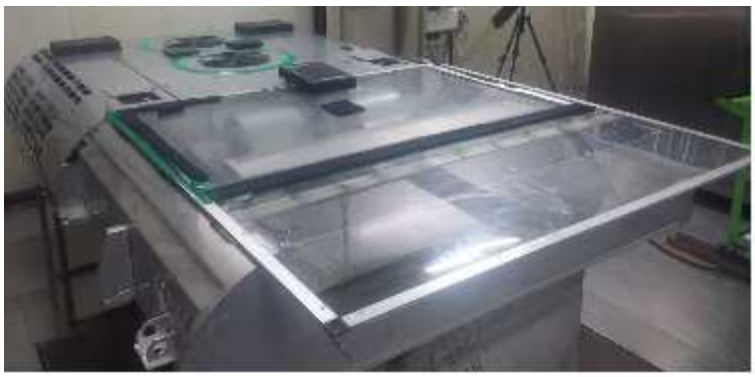
SPECIFICATION	RANGE	MAKER	ACCURACY	UNIT
TRAIN SIDE DRY BULB(IN)	-20~+80℃	OHKURA	±0.3%	℃
TRAIN SIDE WET BULB(IN)	-20~+80℃	OHKURA	±0.3%	℃
TRAIN SIDE DRY BULB(OUT)	-20~+80℃	-	±0.3%	℃
TRAIN SIDE WET BULB(OUT)	-20~+80℃	-	±0.3%	℃
OPEN SIDE DRY BULB(IN)	-20~+80℃	OHKURA	±0.3%	℃
OPEN SIDE WET BULB(IN)	-20~+80℃	OHKURA	±0.3%	℃
Code Tester Chamber d-p	-20~80mmAq	TSURUGA	±0.25% F.S	mmAq
NOZZLE d-p	-20~80mmAq	OHKURA	±0.25% F.S	mmAq
압력게이지(고압)	0~30 kg/㎠	YELLOW JACKET	±0.25% F.S	kg/cm2
압력게이지(저압)	0~8 kg/㎠	YELLOW JACKET	±0.25% F.S	kg/cm2
압력게이지(고압)	0~30 kg/㎠	YELLOW JACKET	±0.25% F.S	kg/cm2
압력게이지(저압)	0~8 kg/㎠	YELLOW JACKET	±0.25% F.S	kg/cm2
Digital Power Meter	100~600 V	HIOKI	±0.50% F.S	V

2) 냉방 성능 시험 조건

- 실외 35±1.5℃, 실내 28±1.0 ℃(건구온도) / 실내 23±1.0℃(습구온도)
- KRCS B128-03(발췌)

* 시험조건: 냉방기 성능시험을 위한 시험실은 외부와 내부를 분리하여 다음과 같은 시험조건에서 시행하여야 한다. (위와 동일)

3) 냉방 시험 결과 : 20,710kcal/hr (판정 기준 : 20,000kcal/hr 이상)



[그림 3.2.45] 그림 3.45. 저소음 냉방기 1차 샘플

TRAIN AIRCONDITIONER CALORIMETER DATA SHEET

MODEL : 저소음 냉방기 (시험제품)	TESTER : Lim Jae Gyu	DATE : 2015-11-10
SERIAL No : B1150096	TEST NO : 002	FILE NAME : 000005028.psy
[TEST CONDITION] : COOLING INSIDE DB: 28.00 ℃ OUTSIDE DB: 35.00 ℃ INSIDE WB: 23.00 ℃ OUTSIDE WB: 0.00 ℃	[Rated Capa. Q] : 20000 kcal/h [Rated POWER] : 12800 W [Rated E.E.R.] : 1.56 kcal/hW	[POWER SOURCE] : 3φ 3W 60Hz 440V

/	CAPACITY kcal/h	CAPACITY BTU/h	CAPACITY W	VOLT V	3φ CURRENT R	S	T	Ave.	1φ CURR.	POWER W	E.E.R kcal/hW	E.E.R Btu/hW	E.E.R -
	20710	82178	24082	441	15.7	17.2	18.6	17.2		11886	1.742	6.914	2.026
%	111.5							71.5		92.9	111.5		

T min	INSIDE SUCTION DB ℃	INSIDE SUCTION WB ℃	OUTSIDE SUCTION DB ℃	OUTSIDE SUCTION WB ℃	INSIDE DISCHARGE DB ℃	INSIDE DISCHARGE WB ℃	A.VOLUME Watt.	A.VOLUME VOLT	A.VOLUME AMP	Q m³/min	CAPACITY kcal/h	CAPACITY Btu/h	CAPACITY W
0	28.09	23.48	34.08	34.07	17.94	16.18	11905	440.9	17.2	49.53	20654	81954	24016
10	28.04	23.42	34.17	34.14	17.84	16.05	11868	440.4	17.2	49.48	20766	82401	24147
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
AVG	28.07	23.45	34.12	34.10	17.89	16.11	11886	440.6	17.2	49.51	20710	82178	24082

MEMO : 24

좌 19Kgf/cm² 우 19.2Kgf/cm²

t.5Kgf/cm² t.3Kgf/cm²

[그림 3.2.46] 1차 샘플 성능시험 성적서

② 냉방기 실내 소음 시험

1) 소음 측정 방법 :

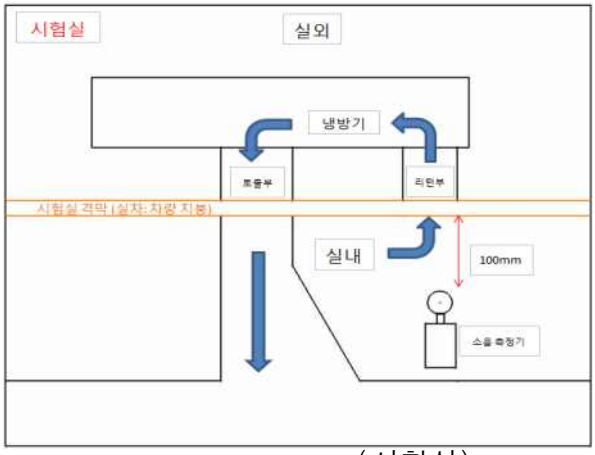
- KRCS B128-03(발췌)

  * 소음측정시험: 천장식은 냉방기 하방향과 측면 중앙 하방향의 1m 거리에서 지시소음기(A레인지)로 측정한다. 다만, 측정시 주위 암소음은 냉방기 소음 기준값과 비교하여 적어도 10dB 작은 것으로 한다.

- 경부선20R 부품 사양서(발췌)

  * 소음시험: 소음 시험은 주위의 암소음이 냉방장치의 소음 측정값보다 최소한 10dB(A) 이상 작은 조건에서 실시하며 소음계의 동특성은 Fast로 설정하고 A보정을 실시하여 읽는다. 소음시험 시 냉방기는 최대 부하로 가동하며 냉방기 아래 1m 떨어진 6점 이사의 곳에서 측정하여 최대값이 73dB(A)를 넘어서는 안 된다.

2) 소음측정 환경 조건 : 리턴구 1m 지점 소음 측정 (실차 조건 고려 덕트 하부)



(시험실)



(실차)

[그림 3.2.47] HVAC 소음 시험 환경 조건

- 시험실 구조와 실차 구조가 유사구조로 간주하여 소음 시험 진행(양산 시험 동일)

3) 소음 시험 판정 기준 : 63dBA 이하

- 소음기 Spec : Hand-held Analyzer Type 2250(Bruel&Kjaer)
- 소음 시험 결과 : 측정 소음 62.1dBA, (암소음:50.6dBA)



[그림 3.2.48] 냉방기 소음 시험

③ 양산품과 외부 소음 비교 시험

1) 양산품(부산 1호선)과 저소음 냉방기 작동 소음 비교 시험

- 시험 방법(비교시험) : 냉방기 작동 상태에서 외부 7m 떨어진 곳 3지점 소음 측정



[그림 3.2.49] 저소음 냉방기 외부소음 (실외 7m 지점) 측정

2) 비교 결과

- 차량 실외 소음 : 저소음 냉방기 소음 개선 효과 있음

표 3.2.18. 저소음 냉방기와 부산 1호선 냉방기의 외부 소음 비교 시험 결과

측정부	구분	1지점	2지점	3지점	평균
외부소음 (냉방기)	저소음	56.9dBA	58.2dBA	56.3dBA	**57.1dBA**
	부산1호선	64.4dBA	67.2dBA	64.1dBA	65.2dBA

④ 소음 시험 결과 정리

표 3.2.19. 저소음 냉방기 소음 시험 결과

	실내 소음	실외 소음 (양산품 비교 실험)
기존기술	2004년 경부선 냉방기: 73dBA	부산 1호선 냉방기: 65.2dBA
저소음 냉방기	**62.1dBA** (목표 63dBA)	**57.1dBA**

⑤ 압축기 신뢰성 평가

- 고부하 연속 내구 시험(저압 5kg/고압 30kg) : 2,000hr 통과



[그림 3.2.50] 압축기 작동 시험기

⑥ 진동 내구 시험

1) 진동시험실 Spec

표 3.2.20. 진동 내구 시험용 장치

Name of Equipment	Vibration Durability Test Rig			Control No.	13000215
				Classification	Test equipment
Manufacturer	TEAM CORP.(USA)	Supplier	Dynatek(Korea)	Cal. Cycle	1 year
Model	NA	Price	₩522,831,571	DRAWING NO./ CATALOG NO.	NA
Serial No.	JN: 7249	Purchase Date	2001-04-30	MANUAL NO.	Test_team_481_C13
User	Quality Management Team	Specifications			



1.Abstract
: To test the vibration durability performance of Vehicle HVAC Unit, Parts of Vehicle and Air conditioner System.
-.It is hydraulic type.
-.It has two separate vibration stand as horizontal stand and vertical stand.
2.Test Items : Dwell,sweep, random
3.Test Units
1).HVAC Unit
2).Core(Cond.Evap,Heater,CAC,EGRC,O/C etc.)
3).Bus & Train Airconditioner System
4.Measuring Items
-.Acceleration, Frequency

5.Specification
1).Dynamic Force
-.22,000 lb.force peak sine rating
-.22,000 lb.force rms random
-.Total fixture + Test article : 1920 lbs.(870kg)
2).DOF: Single axis(Vertical or Horizontal)
3).Frequency Range: 1.0 ~ 500 Hz
4).Displacement: 2 inch p-p stroke
5).Table Size
-.Vertical Table Size : 150cm x 150cm
-.Horizontal Table Size: 150cm x 150cm
6).Control: 6 Channel
7).Controller
-.DACTRON Controller & S/W

2) 진동 시험 방법

- KRCS B128-03(발췌)

* 진동시험: 진동시험은 KS R 9144(철도차량 부품의 진동시험방법) 1종 B에 의한다.

- 13.7Hz(1hr), 10Hz(3hr) 상하방향 진동 내구 시험 통과
- 8.9Hz 전후방향 진동 가진 시, 30분 진행 중 마운팅부 크랙 발생



[그림 3.2.51] 내구시험 중 마운팅부 크랙 발생

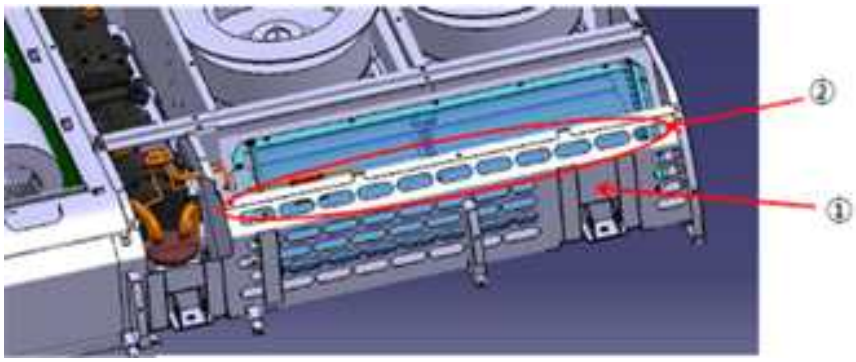
(2) 냉방기 2차 시제품 제작 및 시험

(가) 2차 시제품 보강 반영 사항

- 1차 시제품의 문제점: 마운팅부 고정 접촉력 부족
- 2차 시제품의 보완 사항: 응축기 열교환 홀 일부 차단

→ 열교환 홀 차단에 의한 응축기 열교환 부족 우려 상부 홀 추가

- CAE 해석 결과 마운팅부 & 프레임 접촉부 응력(20MPa)



[그림 3.2.52] 마운팅부 강성 보강 방안

(나) 양산품 진동 비교 시험

- 2차 샘플 & 양산품(부산1호선) 진동 비교 시험

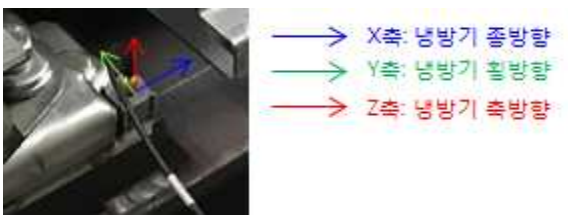
- 시험방법 : 마운팅 보강 반영 신규 제작 2차 샘플 & 부산 1호선 진동 비교, 속도계 진동 센서 X,Y,Z 마운팅부 6지점 측정



(a) 저소음 냉방기



(b) 부산 1호선 냉방기



(c) 냉방기 진동측정

[그림 3.2.53] 저소음 냉방기와 부산 1호선 냉방기의 진동 비교실험

- 결과 : 양진폭(Peak-to-Peak)각축 Max 진동 값 범위가 저소음 냉방기가 낮으므로 진동 저감 효과 있음을 확인함.

표 3.2.21 저소음 냉방기와 부산 1호선 냉방기의 진동측정 결과. 가속도 감소율은 부산1호선 대비 저소음냉방기로 계산함.

구분			변위		속도 (mm/sec)	가속도 (mm/sec^2)	가속도 감소율	실효치 (RMS)		
축	냉방기	주파수 평균 (Hz)	편진폭 (Zero-to-peak)	양진폭 (Peak-to-peak)				변위 (μm)-편진폭	속도 (mm/sec)	가속도 (mm/sec^2)
x	저소음	115	0.1	0.2	0.069	47.8	44%	0.071	0.049	33.9
	부산1	120	0.15	0.35	0.113	85.3		0.106	0.08	60.3
y	저소음	115	0.1	0.2	0.069	47.8	33%	0.071	0.049	33.9
	부산1	120	0.15	0.2	0.095	71.7		0.106	0.08	60.3
z	저소음	115	0.12	0.2	0.083	57.3	32%	0.085	0.049	40.6
	부산1	120	0.15	0.3	0.113	85.3		0.106	0.08	60.3

(3) HVAC의 기본성능 검토

- 코레일 경부선과 동일한 냉방성능 선정

표 3.2.22 HVAC 기본 성능 및 사양

구 분		내 용	비 고
전 원	주회로	AC 440V 3상 60Hz	
냉방운전	냉방능력	20,000 kcal/h이상	
	소비전력	12.8 Kw 이하	
	소비전류	24 A 이하	
송 풍 량		3,000 m^3/h 이상	
사 용 냉 매		R-407c	
냉매 제어 장치		TXV	
냉매 CYCLE수		2 CYCLE	
방 진 장 치		압축기 및 냉방기 방진고무	
안 전 장 치		압축기를 보호하기위한 고압,저압스위치	
중 량		550 kg 이하	
압축기	형 식	스크롤 반폐형 압축기	
	전 원	AC 440V 3상 60Hz	
응축기용 송풍기	형 식	전동기 직결 프로펠러	
	입 력	AC 440V 3상 60Hz	
증발기용 송풍기	형 식	전동기 직결 단축 다익 원심형	
	입 력	AC 440V 3상 60Hz	

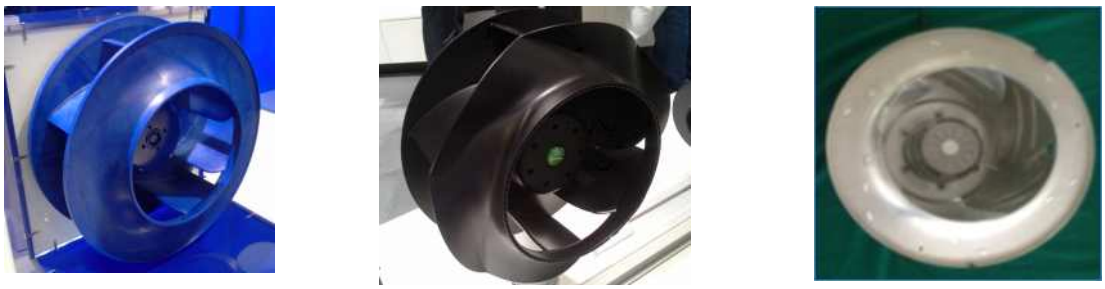
1, 2차 시제품에 대하여 24시간 냉매 누설 시험을 실시하여 이상없음을 확인함.

(4) 개발품 원가분석자료

- 기존 양산품 대비 저소음 달성을 위해 추가된 항목에 대한 원가 분석
- Motor: AC모터가 BLDC로 변경 됨에 따라 비용 약 2배 상승
- 방진고무: 수입 대체품으로 원가 소폭 인하 됨
- Compressor: 수입대체품으로 원가 소폭 인하 됨

→ 결론 : 냉방기 자체의 재료비 분석 비교시 BLDC모터 변경으로 상승되는 비용은 수입 대체품으로 개발된 Scroll Compressor에서 재료비가 상쇄 또는 유사할 것으로 예상됨. 총 원가 3% 증가 (상세 원가분석 표 3.54참고)

(5) 해외경쟁사 비교 (Fan & Motor)



(a)ZIELL-ABEGG 팬 (b) EBM PAPST 팬 (c) 저소음 냉방기 팬

[그림 3.2.54] 해외 경쟁사 HVAC Fan & Motor 비교

(가) 해외기술 현황

원심형 Backward 형식 팬은 정압에 대한 성능이 높고, 소음이 10dBA 정도 감소하며, EBM PAPST, ZIELL-ABEGG 업체에서는 그림 3.54의 원심형 Backward 형식 팬이 상용화 되어 있다. 기존 블레이드 AL 재질을 형상 개발을 통하여 일체형 사출재질로 개발되어 제작 시 Unbalance 보정이 필요 없게 되며 일정한 제품생산이 가능하다.

(나) 국내기술 현황

국내에서 원심형 Backward 형식 개발 제품은 1800 CMH으로 성능이 낮고, 정속모터로 속도 가변이 되지 않으며, 블레이드는 금속 재질의 단순 형상이다. EBM PAPST, ZIELL-ABEGG 업체에서는 BLDC 모터가 개발, 상용화 되어 있고, 원심형 Backward 형식 팬에 대해서도 다양한 제품군이 개발, 상용화 되어 있어 국내기술 대비 해외 기술이 현재 우위에 있다.

저소음 냉방기의 원심형 Backward Fan&Motor 개발 제품은 상용화가 실현된 해외 업체의 제품에 비해 성능이 낮고, 소음은 크지만 국내기술에 대비 성능, 소음 측면에서 우위를 가지며, BLDC Motor 적용하여 속도 가변이 가능하다.

(다) 전망

원심형 Backward 형식 제품이 성능, 소음개선부분에서 축류형 팬에 대해서 높기 때문에 적용범위가 확대되고, 에너지 효율을 높이기 위해 BLDC Motor가 상용화될 것으로 예상되어 저소음 냉방기의 원심형 Backward 형식의 Fan&Motor는 경쟁력 있을 것으로 판단된다.

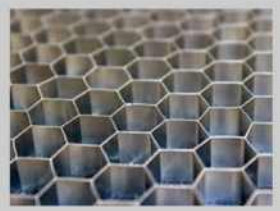
라. 기밀향상 출입문 시스템 개발

(1) 출입문 차음 성능 개선

(가) 출입문 판넬 충진재 개선

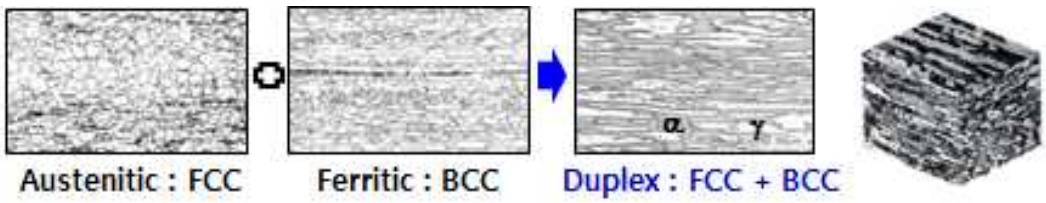
- 출입문 판넬 제작 시 충진제로 사용되는 알루미늄 하니컴 코어의 흡음 성능을 보완함으로써 기존 대비 차음성능 개선 가능
- 1차 검토 소재인 알루미늄 FOAM CORE의 경우 난/불연소재이면서 구조적 강성을 가지며 흡/차음 성능이 우수함. 그러나 단열 효과가 다소 떨어짐
- 2차 검토 소재로 PET FOAM을 적용 예정이며 본 소재는 흡/차음 성능이 우수할 뿐만 아니라 단열성능까지 우수한 소재로 난연 NF F 16-101, 102를 만족하는 소재임

표 3.2.23. 차음성능 향상을 위한 판낼 충진재 개선

	기밀향상용 도어판넬 구조2 (PET Foam Core)	기밀향상용 도어판넬 구조1 (Al Foam Core)	기존 도어판넬 구조 (Honeycomb Core)
Density	약 110.0 kg/㎥	약 200.0 kg/㎥	약 57.7 kg/㎥
압축강도	1.2 ~ 1.4 Mpa	0.8 ~ 1.5 Mpa	1.5 MPa
굽힘강도	-	104.32 MPa	88.4 MPa
차음성능	27.3 dB	26 dB	22 dB
제진성능	우수	우수	불량
소재			
형상			

(나) 출입문 외판 재질 개선

- PET FOAM의 굽힘응력 보완을 위하여 기존 STS304을 PosSD(POSCO Super Ductile Duplex Stainless Steel)로 변경 적용하여 도어 판넬의 강성을 보완함
- PosSD는 페라이트와 오스테나이트의 2상 조직인 Duplex 스테인레스강이며, 고질소 함량으로 내식성, 강도 및 연성이 우수한 Lean Duplex강임



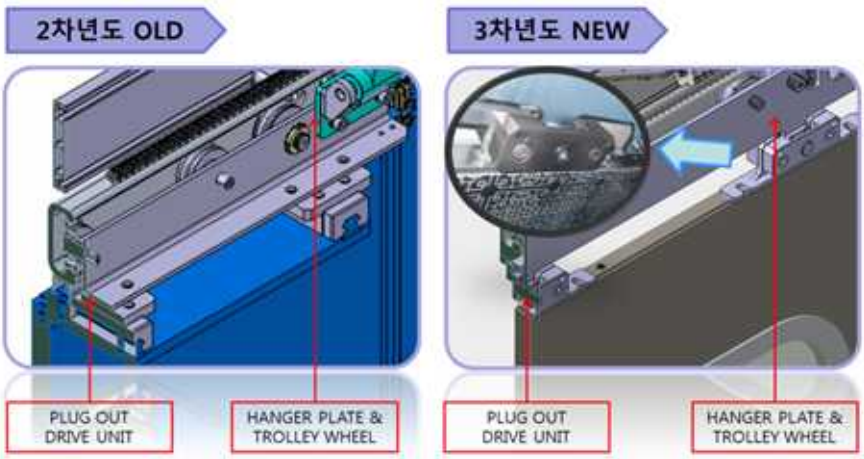
[그림 3.2.55] 강성 향상을 위한 출입문 외판 재질 개선

(다) 유리창 차음 성능 개선

- 유리창 두께 8.8㎜에서 12.8㎜로 증가하여 차음성능 4dBA 향상 예상

(2) 도어엔진 구동 메커니즘 개선

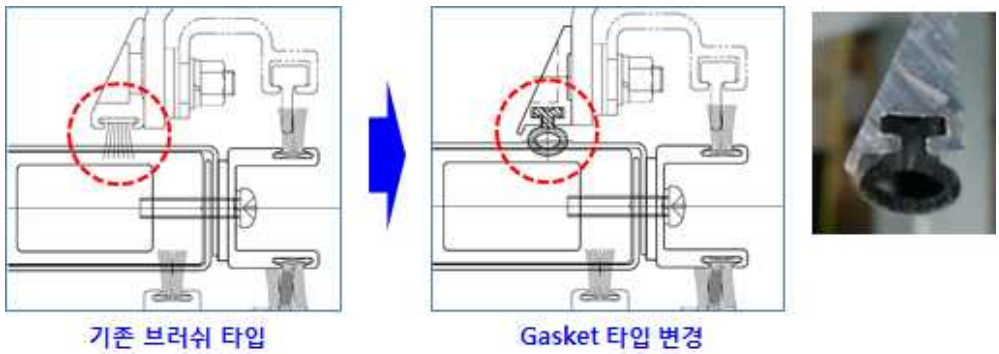
- 기존 LM 방식은 공간 차지율이 높아 기존 차량 취부 불가하여, 구동부 설계변경을 통해 슬림화 도어엔진 개발
- 신조차량 및 개조차량에 취부 가능하도록 설계 변경



[그림 3.2.56] 범용성 확보를 위한 슬림화 도어엔진 개발

(3) 차체-판넬간 기밀구조 개선

- 기존 브러쉬 타입의 방풍구조 개선
- Gasket 타입 중공 러버를 적용하여 기밀 향상



[그림 3.2.57] 기밀구조 향상을 위한 Gasket 타입 적용



[그림 3.2.58] 기밀향상 출입문 시제품 제작

(4) 시제품의 성능 시험

(가) 시제품 시험 및 사양 확인

① 시험 및 사양 확인

- 엔진/판넬 통합 규격서 (증빙_2차년도_D-2-(1))
- 시험규격서 (증빙_2차년도_D-2-(2))
- TGIS-DCU 인터페이스 사양서 (증빙_2차년도_D-1-(2))

② 형식시험 사양서 정립 및 시험 진행(Check Sheet)

표 3.2.24. 기계적 기능 및 성능 시험

시험항목	시험방법	시험결과
도어 수동 열림 작동력 시험	DCU의 전원 차단 상태에서 비상 해제 장치를 작동하여 도어 판넬 중앙으로부터 열림 방향으로 이동시키는데 드는 힘을 3회 측정	적합
도어 자동 닫힘 작동력 시험	도어 닫힘 시 판넬 중앙에서 Force 게이지를 이용하여 닫히는 힘을 측정	적합
	No-Obstacle(DODBPS)신호가 인가된 상태에서 도어 닫힘 시 판넬 중앙에서 force 게이지를 이용하여 닫히는 힘을 측정	적합

표 3.2.25. 전기적 기능 및 성능 시험

시험항목	시험방법	시험결과
최소 작동 전압 시험	100V 전원 공급 후 열림 명령을 부여하여 도어 열림 동작 시간을 측정	적합
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 도어 닫힘 동작 시간을 측정	적합
	전압을 70V(정격 전압의 -30%)로 설정한 후 열림 명령을 부여하여 기준시간 내에 도어가 열리는지 확인	적합
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 기준시간 내에 도어가 닫히는지 확인	적합
최대 작동 전압 시험	100V 전원 공급 후 열림 명령을 부여하여 도어 열림 동작 시간을 측정	적합
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 도어 닫힘 동작 시간을 측정	적합
	전압을 110V(정격 전압의 +10%)로 설정한 후 열림 명령을 부여하여 기준시간 내에 도어가 열리는지 확인	적합
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 기준시간 내에 도어가 닫히는지 확인	적합

표 3.2.26. 시스템 기능 및 성능 시험

시험항목	시험방법	시험결과
도어 닫힘 스위치(DCS) 기능 및 성능 시험	100V 전원 공급 후 열림 명령을 부여하여 도어가 도어가 열리자마자 도어 닫힘 스위치(DCS)가 해제 (Open) 되는지 확인	양호
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 도어 닫힘 시 도어 닫힘 스위치(DCS)가 정상적으로 복귀 (Close) 되는지 확인	양호
도어 잠금 스위치(DLS) 기능 및 성능 시험	100V 전원 공급 후 열림 명령을 부여하여 도어의 로킹(Locking)이 풀리면서 도어 잠금 스위치(DLS)가 해제 (Open)되는지 확인	양호
	도어 열림 상태에서 닫힘 명령을 부여하여 도어 닫힘 시 로킹(Locking)이 되면서 도어 잠금 스위치(DLS)가 정상적으로 복귀 (Close)되는지 확인	양호
내부 비상 해제 장치 작동 시험	내부 비상 해제 장치가 작동될 때, 도어의 언록킹 (Unlocking) 장치가 정상적으로 해제되어 도어 판넬을 수동으로 열 수 있는지 확인	양호
	내부 비상 해제 장치가 복귀될 때, 도어의 언록킹 (Unlocking) 장치가 정상적으로 잠겨 도어 판넬을 수동으로 열 수 없는지 확인	양호
외부 비상 해제 장치 작동 시험	외부 비상 해제 장치가 작동될 때, 도어의 언록킹 (Unlocking) 장치가 정상적으로 해제되어 도어 판넬을 판넬을 수동으로 열 수 있는지 확인	양호
	외부 비상 해제 장치가 복귀 될 때, 도어의 언록킹 (Unlocking) 장치는 해제된 상태로 유지하며 도어 판넬을 수동으로 열 수 있는지 확인	양호
닫힘 시 장애물 감지 사이클 시험	도어가 열린 상태에서 10x100mm의 물체를 도어간 (Doorway) 상, 중, 하 지점에 위치하여 닫힘 명령을 명령을 부여할 때, 도어는 닫힘 및 잠김 상태를 나타 내서는 안되며 1, 2회 감지시 재개폐 동작을 실시하며 3회 감지시 완전히 개방 되는지 확인	양호
Isolation 스위치 작동 시험	도어가 닫힌 상태에서 차단 (Isolation) 스위치를 작동시키고 열림/닫힘 명령을 반복하여 줄 때, 도어가 작동하지 않음을 확인	양호
	스위치를 정상 상태로 복원시키고 열림/닫힘 명령을 반복하여 줄 때, 도어가 정상적으로 작동하는지 확인	양호
이중계 DCU 절체 시험	DCU의 수동 전환 스위치에 의하여 절체가 되는지 확인	양호
	DCU의 퓨즈를 이용하여 전원부 고장 발생 시 절체가 되는지 확인	양호
	별도의 고장 발생용 커넥터(젠더&스위치)를 이용하여 임의의 고장 발생시 절체가 되는지 확인 (모터구동부 고장, 입/출력부고장, 통신부고장)	양호

③ DCU (Door Control Unit) 공인 인증 시험

표 3.2.27. 환경 성능 시험

시험항목	기본규격	시험결과
저온시험	KS C IEC 60068-2-1:2010	이상없음
고온시험	KS C IEC 60068-2-2:2014	이상없음
고온고습시험	IEC 60068-2-30:2005	이상없음

표 3.2.28. 진동 시험

시험항목	기본규격	시험결과
공진탐색 시험	KS R 9144:2014(1종B종)	공진없음
진동기능 시험		이상없음
진동내구 시험		이상없음

표 3.2.29. 전자파 (EMC) 시험

시험항목	기본규격	시험결과
전도방사시험	CISPR 11:2010	적합
복사방사시험	CISPR 11:2010	적합
정전기방전 내성시험	IEC 6100-4-2:2008	적합
전자파 방사 내성시험	IEC 6100-4-3:2010	적합
전기적 빠른 과도현상 내성시험	IEC 6100-4-4:2012	적합
서지 내성 시험	IEC 6100-4-5:2005	적합
전자파 전도내성 시험	IEC 6100-4-6:2013	적합
전압변동 내성시험	EN 50155:2007	적합

(5) 기밀향상 출입문에 대한 RAMS (Reliability, Availability, Maintainability & Safety) 분석

① 신뢰성 (MKBF, Mean Kilometer Between Failure, Car-km)

- 고장률을 근거로 한 신뢰성 운영거리
- 195,748 Car-km (목표 106,000 이상)

② 유지보수성 (MTTR, Mean Time To Restore, Hour)

- 유지보수요원에 의해 고장에 대한 조치를 완료하고 승객 서비스가 준비될 때까지 소요되는 시간
- 1.0 Hour (목표 1.4 Hour)

③ 신뢰도 블록도 (RBD) 및 고장수목분석 (FTA) 보고서

- 출입문 구성 부품 중 차량 및 열차 서비스 지연에 관련되는 부품에 대한 신뢰도 블록도(RBD)과 고장나무분석(FTA)을 도시하고, 해당 시스템의 신뢰도를 산출

④ Safty FTA

- 4 가지 위험 상황을 정의하고 이와 같은 위험 상황이 발생할 수 있는 고장 모드 및 원인들을 조사하여 Fault Tree 로 작성
- TOP 1 : 차량에서 1 개 이상의 측면 도어에서 차량 운행 중 측면 도어가 열릴 위험 상황 (평

균수명 22.36년)

- TOP 2 : 차량에서 1 개 이상의 측면 도어에서 측면 도어에 사람이 끼여있는데 차량이 출발할 위험 상황 (평균수명 77.86 년)
- TOP 3 : 차량에서 1 개 이상의 측면 도어에서 긴급 상황시 도어 제어가 되지 않을 경우 수동으로 도어가 열리지 않을 위험 상황 (평균수명 3354.97년)
- TOP 4 : 차량에서 1 개 이상의 측면 도어에서 측면 도어가 닫힘(잠김) 상태가 아닌 경우 차량이 출발할 위험 상황 (평균수명 77.85년)
- 하루 19 시간 가동할 경우 TOP1 의 위험 상황에 대한 평균수명이 22.36 년으로 가장 낮음. 이는 차량외부의 신호 오작동(Open/Close Signal, Zero Speed Signal, Enable Signal)에 대한 고장률을 식별하기 힘들고, 이로인해 DCU 의 주행 중 문열림 방지를 위한 위험 저감요소(열차 주행중에 출입문이 열리면 강제로 닫는 기능)가 반영되지 않았기 때문임. 나머지 위험 상황들은 차량 수명보다도 월등히 높은 것으로 분석됨.

⑤ 기타 RAMS 분석 보고서

- RAM Analysis & FMECA Table
- 위험 기록서
- Maintenance Program

(6) 출입문 차음 성능 시험

- 차음 시험 시편 제작(실차 조건)
- 대우건설기술연구원 (ISO 10140-2:2010)에서 잔향실-잔향실법으로 투과손실 측정
- 3,500 x 3,000 x 400 시험용 카트리지에 도어 장착
- 차음성능 Rw 33 확인 (목표 Rw 32 이상)



[그림 3.2.59] 출입문 차음 시험 시편

DAEWOO E&C

INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY
60, Songjuk, Jangan, Suwon, Gyeonggi 440-210 Korea
Tel: 82-31-250-1262 Fax: 82-31-250-1263

Certificate No.: 2016-033

Page(5)/(5)Pages

KOLAS TESTING NO. 007

Sound reduction index, R, in accordance with ISO 10140-2

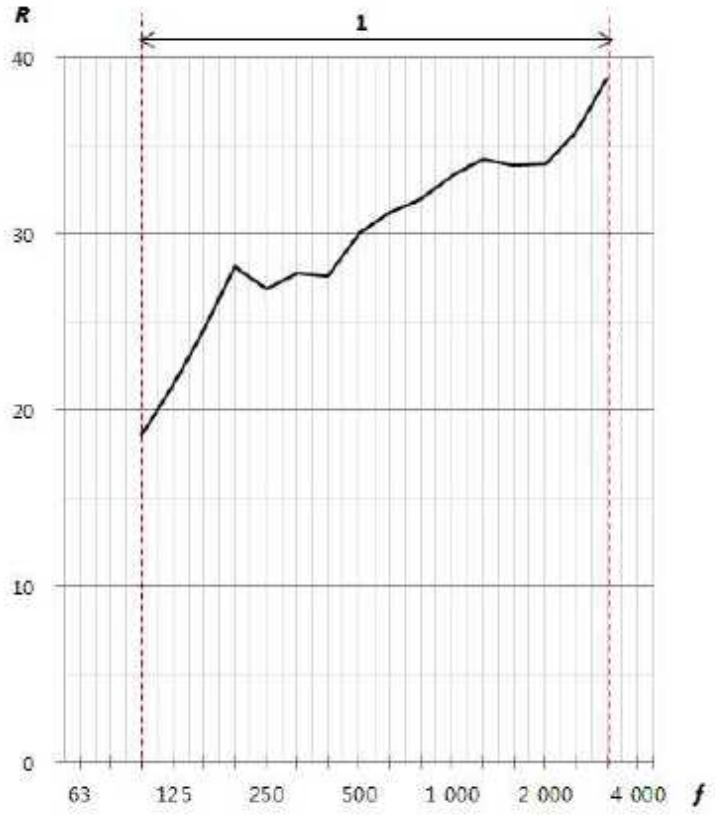
Manufacturer: SOMYUNG Co., Ltd — Date of receipt: 25th April, 2016

Product identification: PET FOAM CORE — Date of test: 2nd May, 2016

Description of test facility, test element and test arrangement, including reference to ISO 10140-1, where applicable:

Area, S, of test element:	2.4 m^2
Air temp. in the test rooms:	15 ℃
Relative humidity in the test rooms:	60 %
Source room volume:	249 m^3
Receiving room volume:	315 m^3

Frequency f Hz	R one-third octave dB
50	
63	
80	
100	18.6
125	21.3
160	24.6
200	28.2
250	26.9
315	27.7
400	27.6
500	30.0
630	31.2
800	32.0
1 000	33.3
1 250	34.2
1 600	33.9
2 000	34.0
2 500	35.8
3 150	38.8
4 000	41.2
5 000	38.2



Key
R sound reduction index, in dB
f frequency, in Hz
1 frequency range for rating in accordance with the curve of reference values (ISO 717-1)

Rating in accordance with ISO 717-1:

$$R_w(C;C_{tr}) = 33(-1;-3)\text{dB}$$

Date: 10th May, 2016 — Signature: *Jinyun CHUNG*

Form-DICT-QP-06-06 DICT

[그림 3.2.60] 기밀향상 출입문의 차음성능 시험 결과 (공인시험성적서), R_w 33dB

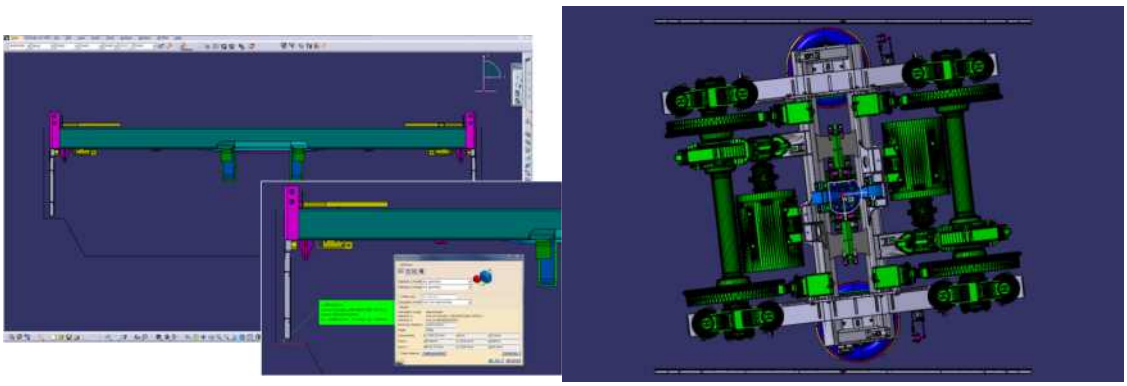
2. 저소음/저진동 차량 설계 기술 개발

가. 외부소음 저감용 사이드 스커트 개발

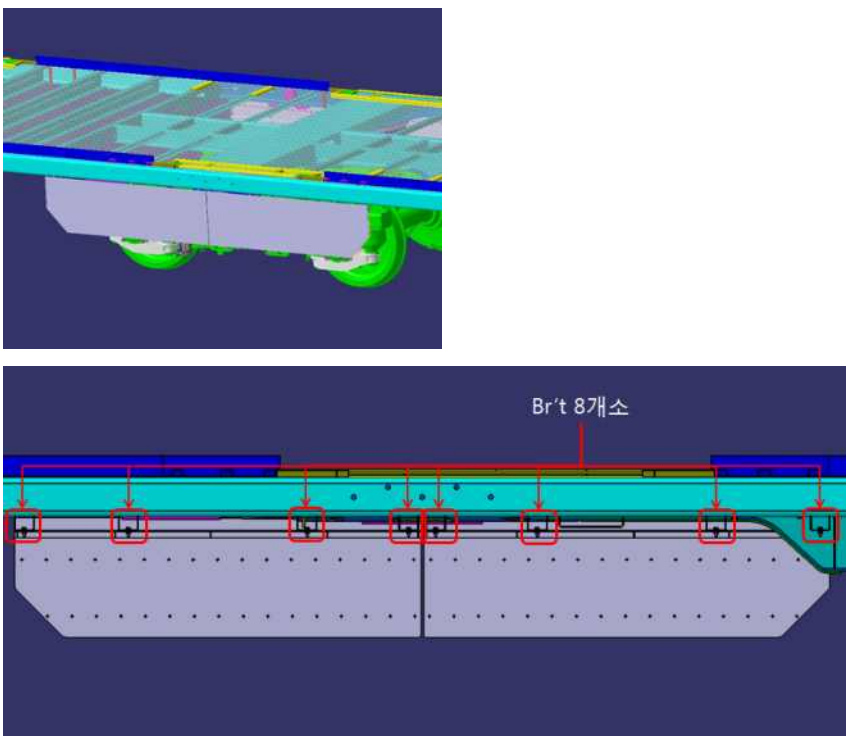
(1) Side skirt 설계

(가) Side skirt 형상, 크기 설계

현재 운행 중인 코레일 일반형 차량의 외부소음을 저감하기 위한 방안으로 Side skirt의 장착을 검토하였다. Side skirt의 크기와 형상을 결정하기 위해서 Side skirt를 장착하였을 시, Side skirt와 대차 및 차량과 시설물과의 인터페이스를 확인하였다.Side skirt의 차음 성능을 고려하여 대차와 시설물에 간섭이 되지 않고, 대차를 충분히 가릴 수 있는 크기로 설계하였다. Side skirt는 두 장으로 구성되어 대차 부위 차체에 장착가능하게 설계되었으며, 크기는 가로x높이 1,661x416mm이다. 또한 흡음판을 부착 할 수 있도록 리브를 형성하였으며, Side skirt와 흡음판 사이의 공기층은 50mm 이다. 코레일 일반형 전동차에 Side skirt를 적용하기 위해서는 차체에 Side skirt를 장착할 수 있는 브라켓의 설치가 필요하며, ‘ㄷ’ 자 형태의 브라켓을 차량의 8개소에 용접하여 설치하고, 설치된 브라켓과 Side skirt는 볼트체결 방식으로 탈장착이 가능하게 했다.



[그림 3.2.61] Side skirt와 대차의 인터페이스 확인



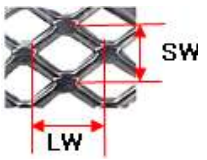
[그림 3.2.62] Side skirt 장착을 위한 브라켓 적용

(나) 흡음판 선정

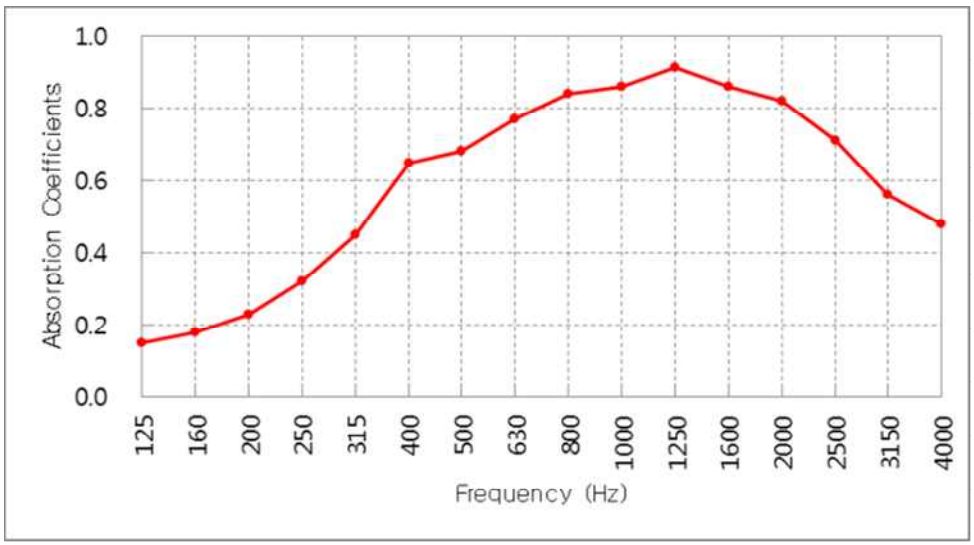
흡음판의 선정은 Side skirt의 차음 성능에 큰 영향을 미친다. 코레일 일반형 전동차에 적용할 흡음판의 특성은 다음과 같다.

- 뛰어난 흡음 성능: 알루미늄 섬유와 금속 재질로 구성하여 40%의 다공성을 가짐으로써 광대역의 흡음 성능을 가짐
- 얇고 가벼운 재질: 기존 알루미늄 판재의 2/3 수준의 중량을 가짐
- 부식 방지 및 불연성 재질: 고순도의 알루미늄으로 제작되어 부식에 강하고 화재 위험이 적음
- 재활용 기능: 알루미늄으로 제작되어 재활용이 용이함
- 배수성: 배수가 좋은 구조를 가지고 있어, 수분에 의한 흡음 성능의 저하가 없음
- 가공성 및 설치 편의성: 곡선 보드에 형성 및 천공형태의 절단이 가능하며, 유리 섬유와 달리 작은 섬유의 형태로 분산이 되지 않아 공기 오염의 문제가 발생하지 않고, 취급이 용이함

표 3.2.30. 흡음판 제원

Thickness (mm)	Areal density Of AL fibers (g/m^2)	Mesh size (SW/LW) (mm)	Weight (kg/m^2)	
1.6	1650	3-4.5/4-8	2.6	

다음은 흡음판의 구성에 따른 흡음 성능을 보여준다.

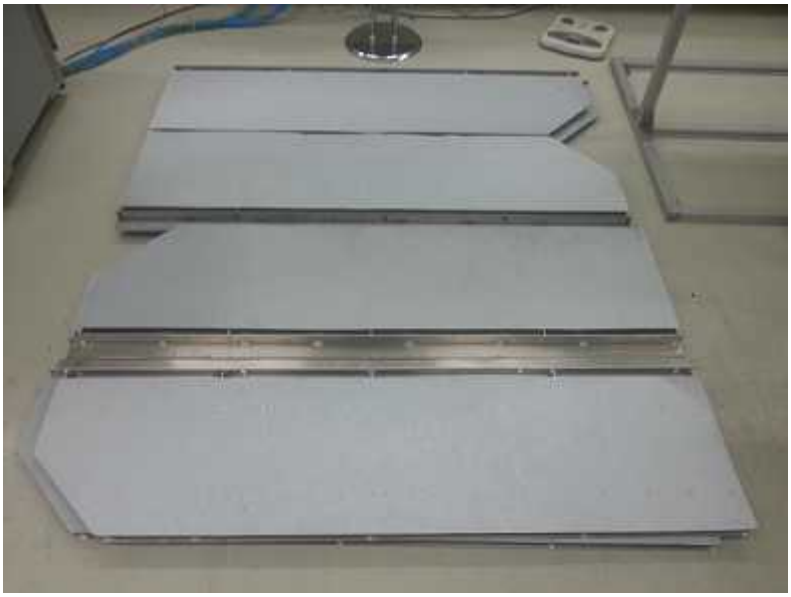


[그림 3.2.63] 흡음판 흡음 성능 곡선

(2) Side skirt 제작

Side skirt의 소음 저감 효과를 시험하기 위하여 대차부의 소음을 차단할 수 있도록 제작하였다. 제작된 Side skirt는 Aluminum 재질과 SUS 재질의 2종으로 제작되었으며, 각각 4개의 skirt로 구성되어 하나의 대차부에 장착할 수 있도록 제작되었다. 한 개의 Side skirt의 크기는 1,660Lx486H (mm)로 제작되었으며, 2개 한 쌍으로 차체 한면에 장착하도록 제작되었다. Aluminum으로 제작된 Side skirt의 무게는 개당 11kg이며, 대차당 44kg의 중량이 추가된다.

제작된 Side skirt의 형상은 아래 그림 3.64와 같다.

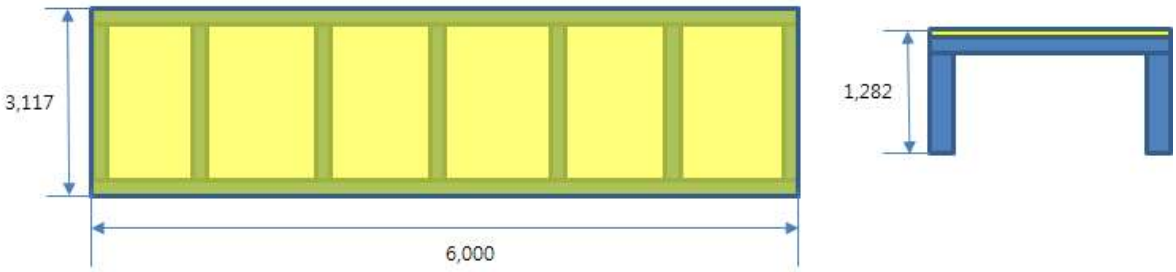


[그림 3.2.64] Side skirt 샘플

(3) Side skirt 소음 성능 시험

(가) Side skirt 소음 성능 시험 셋업

Side skirt의 소음 저감 효과를 검증하기 위하여 Side skirt를 장착할 수 있는 차체 프레임 목업을 제작하고, Side skirt의 유무에 따른 방사 소음의 차이를 비교하였다. 시험 목업은 3,117x6,000x1,282mm(가로x세로x높이)의 크기로 대차 크기를 고려하여 목재로 제작되었다.



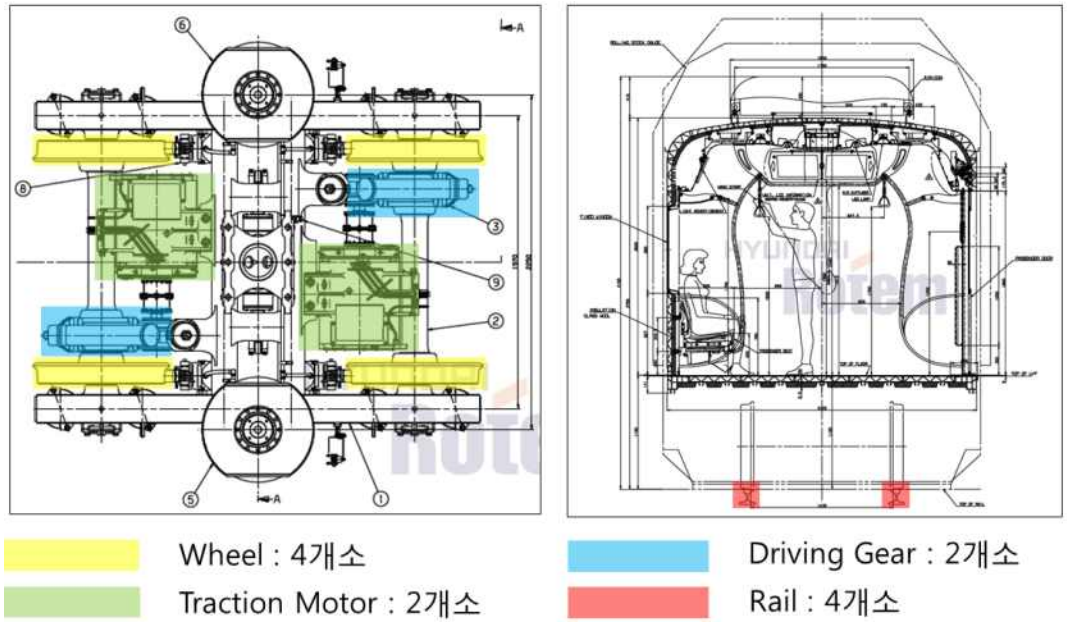
[그림 3.2.65] 차체 프레임 목업

Side skirt의 성능을 확인하기 위하여 대차 하부의 주요 소음 발생원을 선정하고, 선정된 장치 위치에서 무지향 스피커를 이용하여 백색잡음을 방사하였다. 각 장치별 소음원은 휠 4개소, 구동기어 2개소, 견인전동기 2개소와 레일 4개소이다.

마이크로폰은 선로 중심 위치에서 7.5m, 높이방향으로 1.2m 지점에서 sound pressure level을 측정하였다. 측정 방법은 Side skirt의 유무, 대차 프레임 적용 유무에 따른 Steel 재질과 Aluminum 재질의 Side skirt에 대해서 측정하였다.

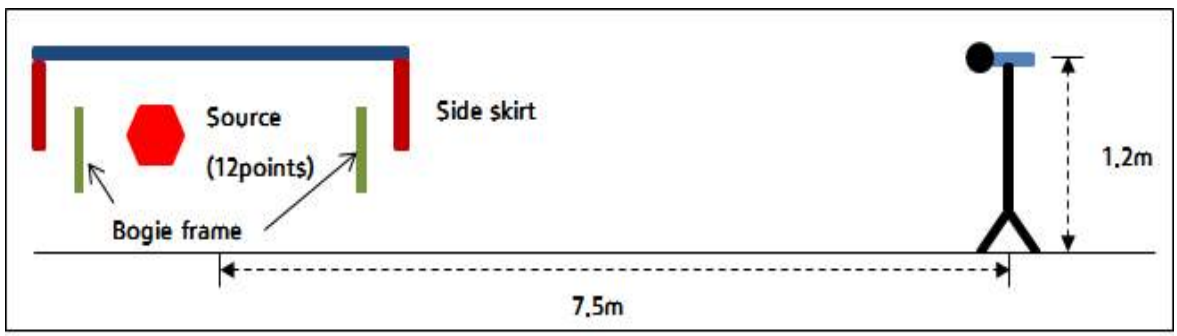
(나) Side skirt 소음 성능 시험 결과

현차의 하부와 유사한 환경을 구현하기 대차 프레임 적용 시, 차체 하부 구조물에 의한 소음 영향을 반영하는 것으로 판단되며, 대차 프레임을 적용하여 Side skirt의 차음 성능을 검증하는 것이 현실적인 것으로 보인다. 대차 프레임 적용하여 측정된 음압 레벨을 이용하여 각 장치의 음원에서의 삽입 손실을 계산하였다. 장치 위치에 음원을 설정하여 사이드스커트의 영향을 IL로 계산한 시험방법은 이전연구 해석 및 축소모형





[그림 3.2.66] 소음원 위치 음향 소스용 무지향 스피커와 수음점 위치 마이크로폰



[그림 3.2.67] Side skirt 소음 저감 효과 검증을 위한 마이크로폰 측정 위치

시험(Frid, 2003; 김태민 외, 2012)에서 확인할 수 있으며, 이들 실험에서도 사이드스커트의 영향은 약 2-3dB로 보고하고 있다. 본 연구실험 결과 Side skirt의 재질에 따른 삽입 손실의 차이는 미미하였고, 대차 프레임 적용 유무에 따른 삽입 손실의 차이가 발생하였다.

장치별 위치에서 방사된 음원으로부터 구해진 삽입 손실을 기존 차량의 장치 소음레벨에 적용하여 Side skirt의 소음 저감 효과를 검증한 결과가 아래 표와 같다. 선로 중앙에서 7.5m, 높이 1.2m 지점에서 Side skirt가 없을 경우 소음레벨은 86dBA이며, Side skirt가 적용될 경우에 83dBA로 계산되어, 기존 차량의 하부 소음 대비 3dBA 저감됨을 확인하였다. 장치별/음원 위치별 삽입손실의 차이는 음원과 수음점의 음향 방사 경로상에 있는 직접음과 바닥반사음이 사이드스커

트에 의해 차단되는 기여도에 따라 달라진다. Rail 1-2와 Wheel 1-2는 바닥과 접해있는 최하단부 음원으로 사이스스커트에 의한 차단효과가 가장적게나타나는 음원위치이며, 각각 1dB의 저감효과가 나타났다. 그에 반하여, 사이드 스커트에 의해 완전히 가려지는 Rail 3-4, Wheel 3-4, TM 1-2, DG 1-2위치에서는 2~3dB의 소음차단 효과가 나타났다.

표 3.2.31 대차 프레임 적용 시 음원별 삽입 손실

	Steel Skirt	AL Skirt
Rail 1	0.8	0.8
Rail 2	1.1	0.6
Rail 3	2.2	2.7
Rail 4	2.4	1.9
Wheel 1	1.4	1.2
Wheel 2	1.9	1.0
Wheel 3	3.1	3.1
Wheel 4	3.3	2.9
TM 1	2.4	2.3
TM 2	2.0	2.8
DG 1	2.1	1.9
DG 2	2.2	2.2

표 3.2.32. Side skirt 유무에 따른 소음 저감 효과

	No Skirt	AL Skirt	Skirt-No kirt
Rail 1	68	67	-1
Rail 2	68	67	-1
Rail 3	67	64	-3
Rail 4	67	65	-2
Wheel 1	68	67	-1
Wheel 2	68	67	-1
Wheel 3	67	64	-3
Wheel 4	67	64	-3
TM 1	80	78	-2
TM 2	81	78	-3
DG 1	78	76	-2
DG 2	77	75	-2
총합	86	83	-3

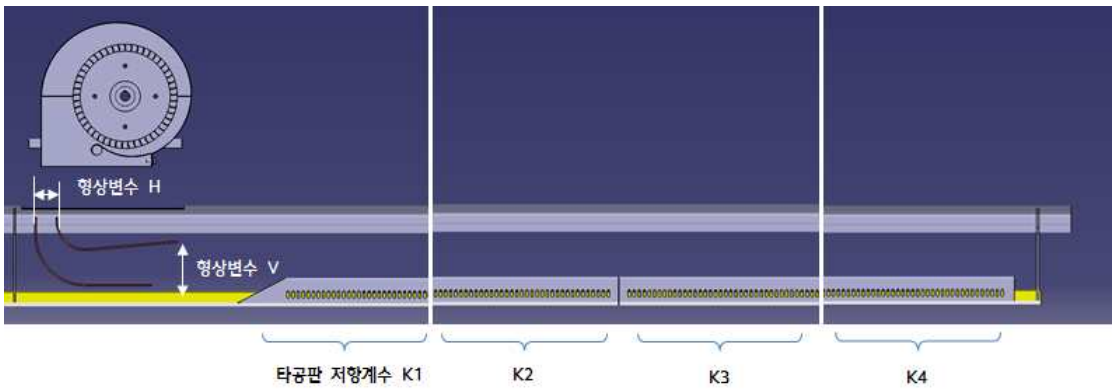
나. 냉방기 덕트 소음 저감 기술 개발: HVAC 덕트 저소음 형상 최적화

(1) 덕트 소음 저감 및 유동 균일도 확보를 위한 해석 사례 검토

차량의 냉난방을 담당하는 HVAC 시스템에 있어서 덕트의 기능은 유량을 차량 길이에 따라 고르게 분배해야한다. 만일 유량이 균일하게 분배되지 않으면 적절한 냉난방이 되지 않아 쾌적한 실내를 제공하지 못하며, 특정 위치에서 비정상유동에 의한 소음을 유발할 수도 있다.

(가) 유량 균일도 최적화

HVAC DUCT의 가이드 베인의 형상변수와 타공판 개구율의 저항계수를 최적화함으로써 디퓨저 토출 유량을 균등하게 할 수 있는 방안에 대해 연구를 검토하였다.



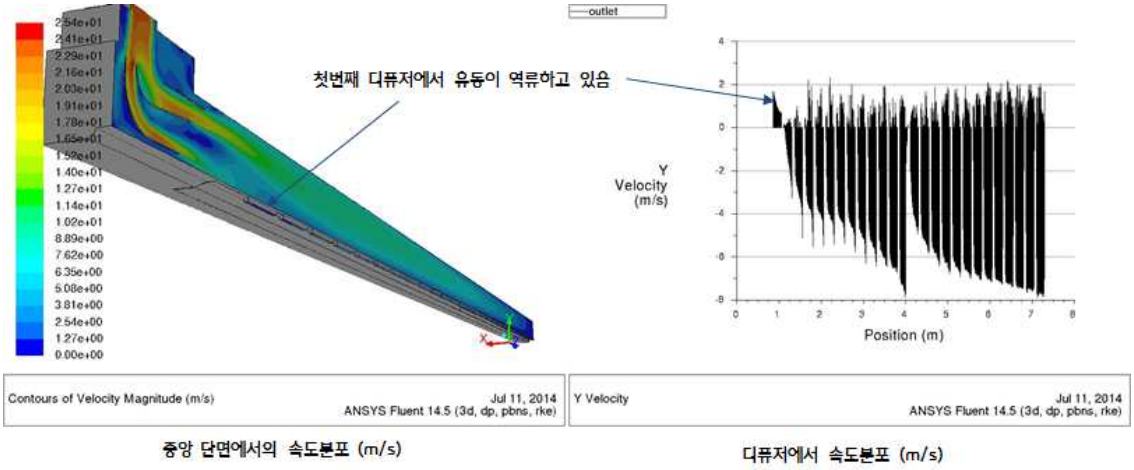
[그림 3.2.68] HVAC DUCT 모델링

(나) 해석결과

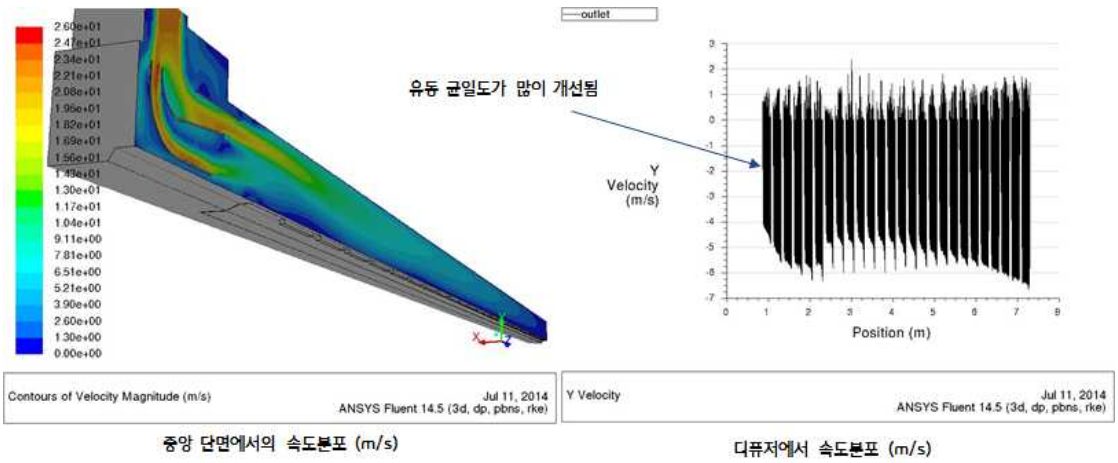
기본형상에 대비하여 가이드 베인 형상 변경과 타공판 개구율을 조정하여 유량 균일도를 약 13%정도 개선할 수 있었다.

표 3.2.33. 유동균일도 해석 결과

Case No.	저항계수					형상변수		해석결과	
	K1	K2	K3	K4	K5	H (m)	V (m)	유동 균일도	압력 강하 (Pa)
기존모델	5.6	5.6	5.6	5.6	-	0.039	0.082	0.603	244
최적화	10.707	39.493	39.493	39.493	-	0.0327	0.0831	0.680	305



[그림 3.2.69] 베이스 모델 해석 결과



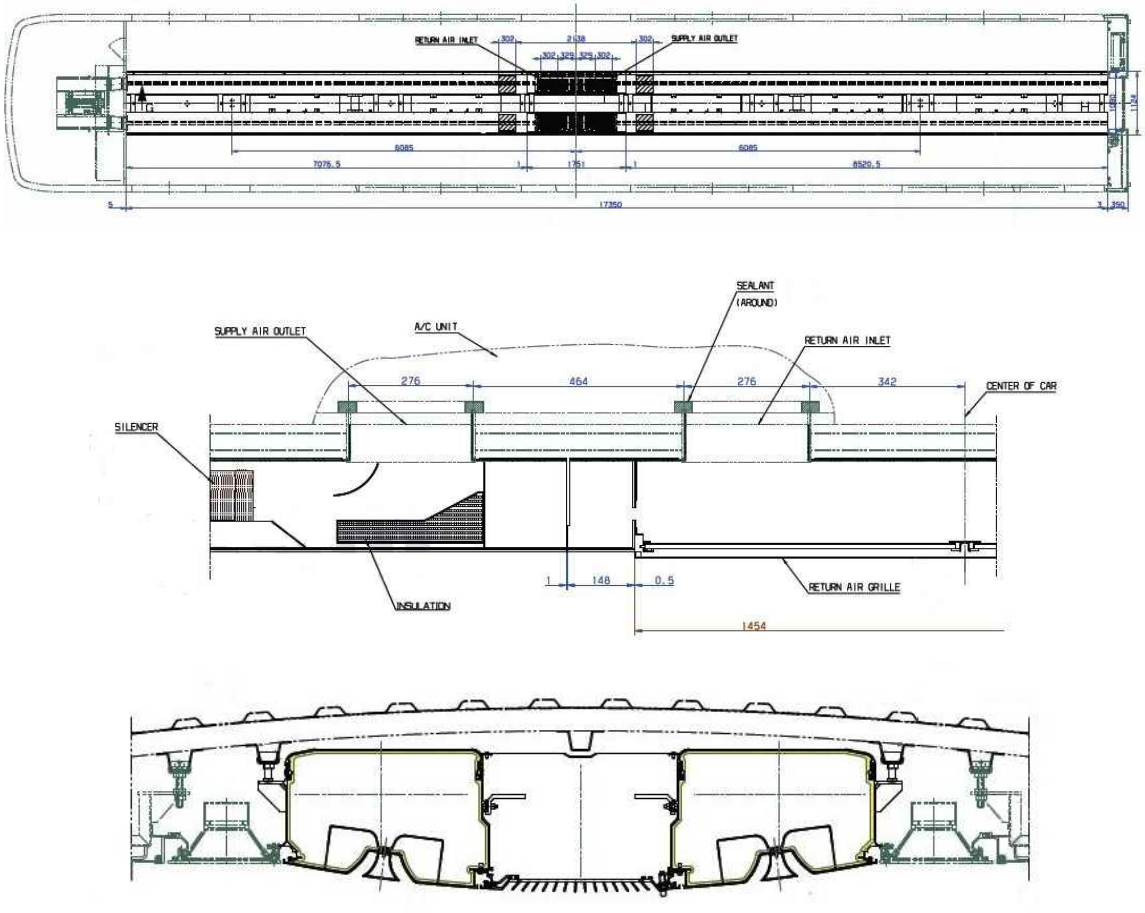
[그림 3.2.70] 개선 모델 해석 결과

(2) 코레일 일반형 전동차용 HVAC 덕트 구조 검토

코레일 일반형 전동차에 적용되는 덕트는 그림 3.71과 같이 차량 길이 방향으로 대칭되게 구성되어 있으며, HVAC 시스템은 차량 중앙에 위치하고 있다. 각각의 덕트는 좌우 대칭되게 서플라이부와 리턴부로 구성되며, 덕트는 메인덕트, 보조덕트, 가이드베인, 디퓨저로 구성된다.

(3) HVAC 덕트 소음 저감

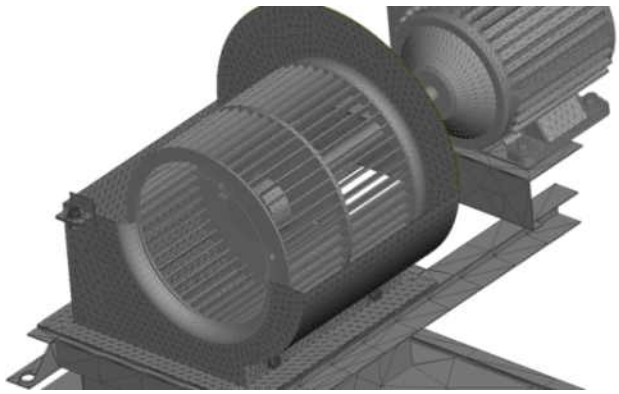
HVAC 시스템에서 발생한 소음은 철도차량의 정차중 실내소음을 결정짓는 주요 소음원이다. HVAC 시스템은 다양한 유동 소음원을 가지고 있으며, 팬, 열교환기, 덕트 및 그릴 소음 등에 의한 공력 소음 원인이며, 이러한 소음은 덕트를 통해 차량 실내로 전달된다. 정차 중 실내 소음을 저감하기 위해서 실내로 유입되는 소음원인 HVAC 시스템의 저소음 장치 개발과 덕트 내 소음이 발생하는 메카니즘을 파악하여 덕트를 저소음 형상으로 최적화할 필요가 있다.



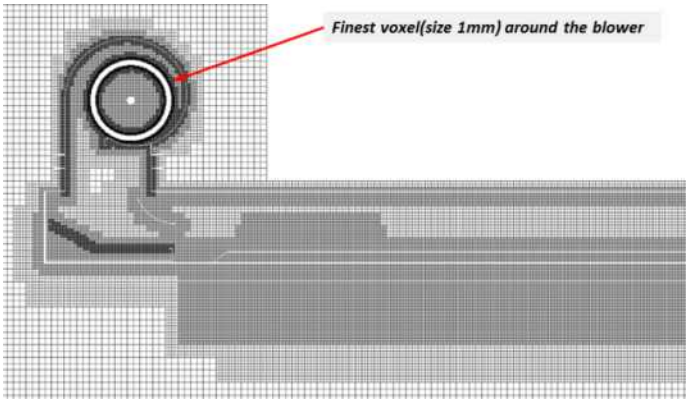
[그림 3.2.71] 코레일 일반형 전동차 HVAC 덕트 형상

(가) HVAC 덕트 전산유동해석

HVAC 덕트내 소음 저감을 위하여 먼저 송풍기로부터 유입되는 냉방공기가 덕트내로 흐르는 유동 메카니즘을 검토해야한다. 그림 3.72는 유동 해석을 위한 송풍기의 표면격자를 나타내며, 그림 3.73은 해석 격자를 나타낸다.



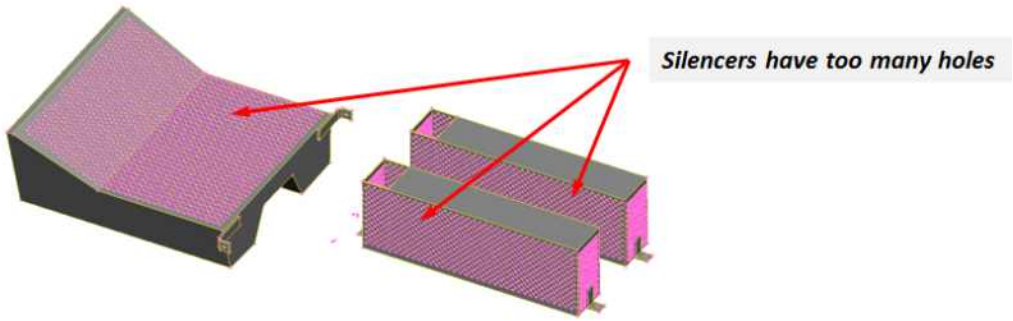
[그림 3.2.72] Surface mesh



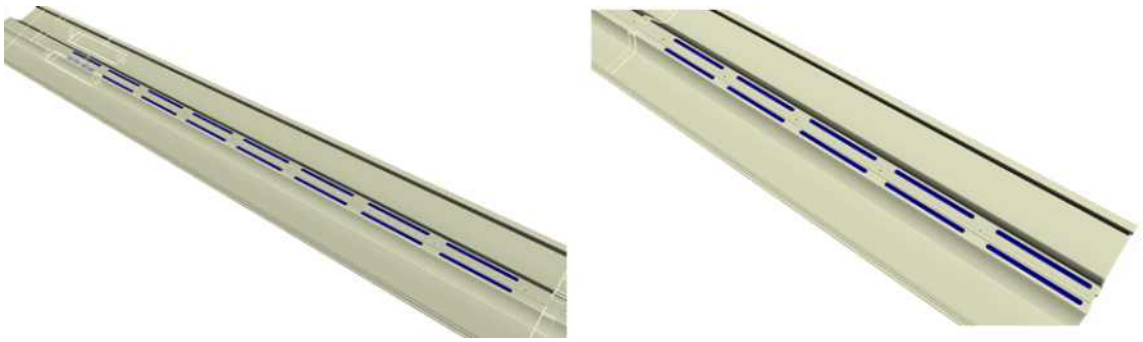
[그림 3.2.73] Voxel regions

코레일 일반형 전동차의 코너 베인의 형상은 그림 3.74와 같으며, 다공판안에 흡음재를 포함한 형태이다. 또한 다공판은 경사면과 평판으로 모서리를 형성함으로써 유동저항이 큰 형태이다. 보조덕트 위에 위치한 2개의 사일런서 역시 다공판에 흡음재를 포함한 형태로 되어 있으며 유동 측면에서 설계가 반영되지 않았다.

덕트내 냉방공기가 객차 실내로 전파되는 디퓨저는 그림 3.75과 같이 전체 덕트 길이 방향으로 대칭된 형태로 균등하게 형성되어 있어 유량 균일도 측면에서 디퓨저의 위치 및 크기가 고려되어야 한다.



[그림 3.2.74] Surface mesh of corner vane and silencers

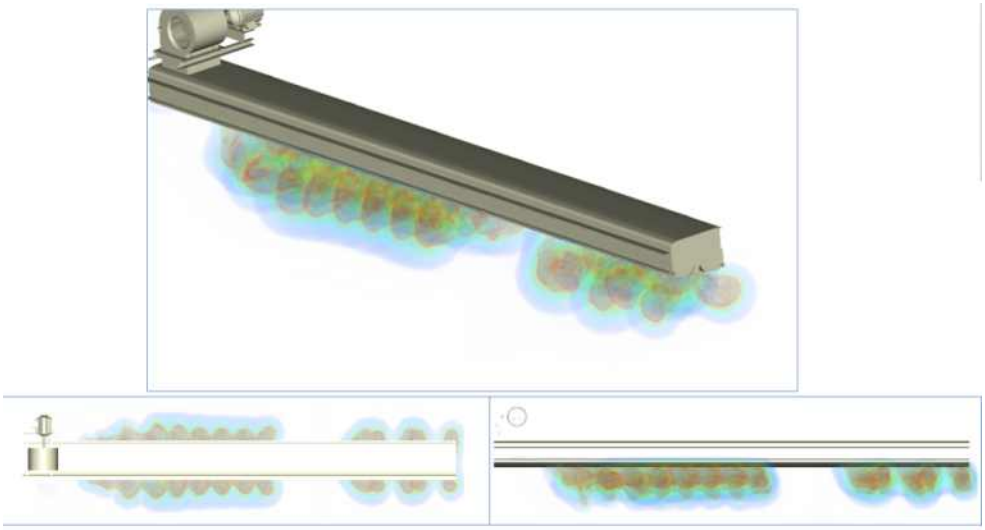


[그림 3.2.75] Defuse shape

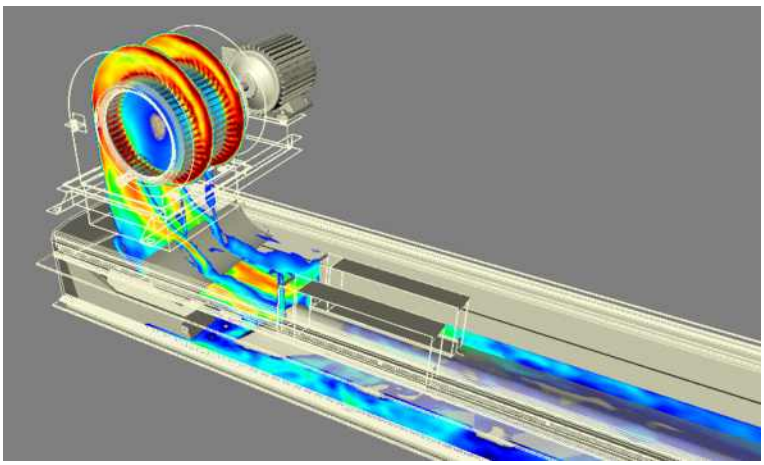
그림 3.76에서는 송풍기를 통해서 덕트내로 유입된 냉방공기가 메인 덕트를 채우고, 보조 덕트내로 들어가 디퓨저를 통해서 실내로 이동하는 유동의 흐름을 보여준다. 실내로 유입되는 냉방공기는 유속이 빠른 서플라이부 근처에서 역으로 덕트로 유입되는 현상이 나타나며, 전반적으로 균일하지 않음을 보여준다.

덕트 내부에서의 유속과 vortex를 그림 3.77과 3.78에서 나타낸다. 코너 베인과 보조 베인을

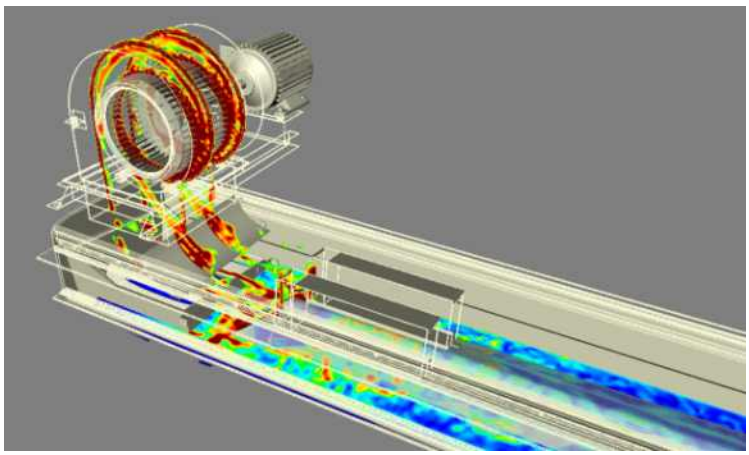
통과하는 냉방공기에서 강한 난류가 발생함을 알 수 있다. 코너 베인의 형상과 보조 베인의 형상 및 위치에 대한 개선이 필요하다.



[그림 3.2.76] Flow analysis result of HVAC duct



[그림 3.2.77] Velocity of inner duct

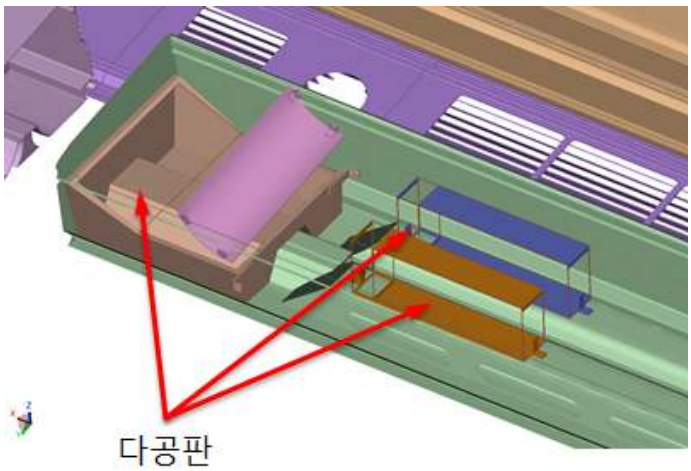


[그림 3.2.78] Vortex of inner duct

(나) HVAC 덕트 가이드 베인 형상 변경

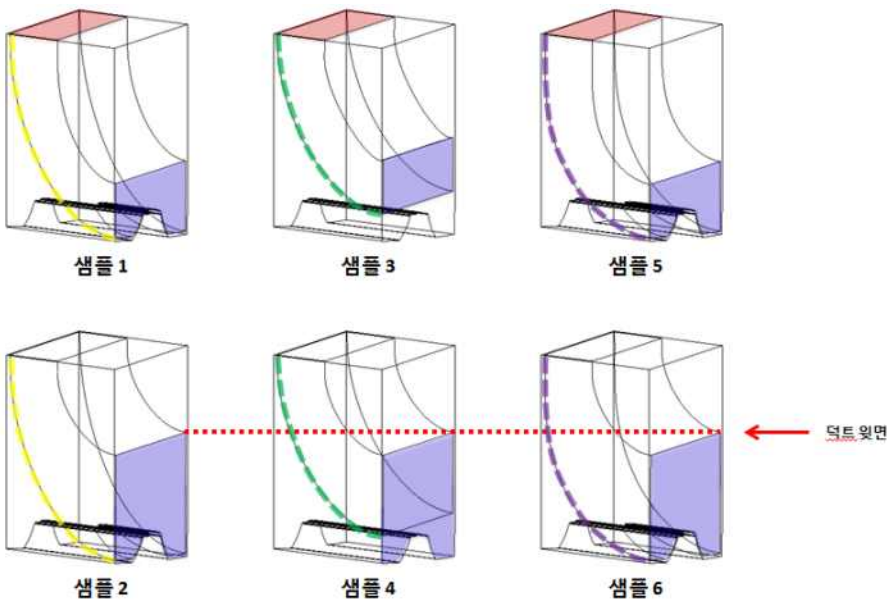
① 덕트 가이드 베인 형상 변경안

코레일 일반형 전동차에 적용되고 있는 가이드 베인은 그림 3.79와 같이 흡음재를 포함한 다공판의 형태이며, 완만한 곡면을 형성하지 않는다. 보조덕트 위에 설치된 사일런서 역시 다공판에 흡음재를 가지고 있으며 유동의 저항을 유발하는 형태로 되어 있다. 이에 사일러서를 제거하고 메인 베인과 보조 베인의 형상 개선을 통하여 송풍기로부터의 덕트로 유입되는 유동을 개선하고 소음을 저감할 수 있는 형상을 제안한다.



[그림 3.2.79] Main vane and silencers

샘플 1,2,3은 입구와 출구 크기를 동일하게 생성하였으며, 샘플 4,5,6은 출구의 위쪽 베인의 끝이 메인 덕트 윗면과 동일하다. 샘플 1과 2, 샘플 3,4, 샘플 5,6은 동일한 곡률을 갖으며, 우측에 샘플의 곡률이 더 크다.

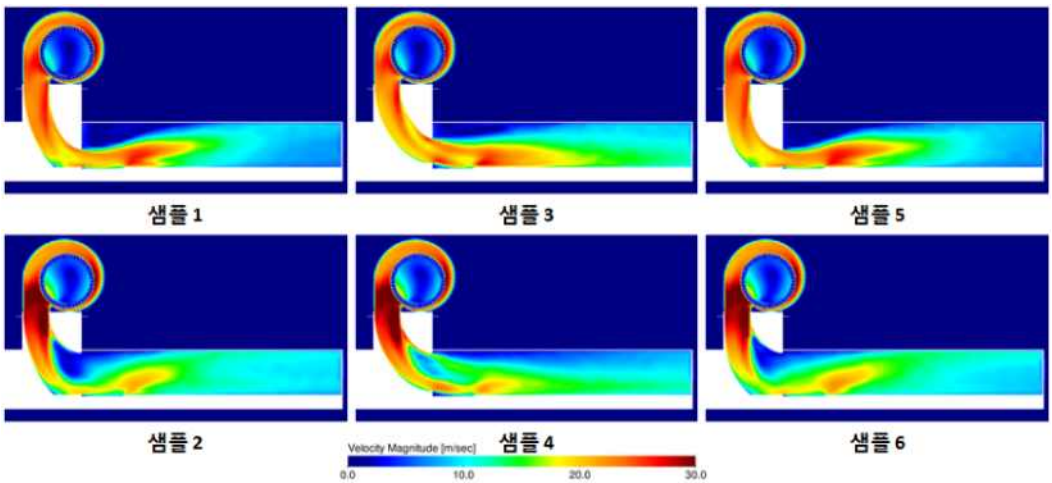


[그림 3.2.80] Comparison vane shape

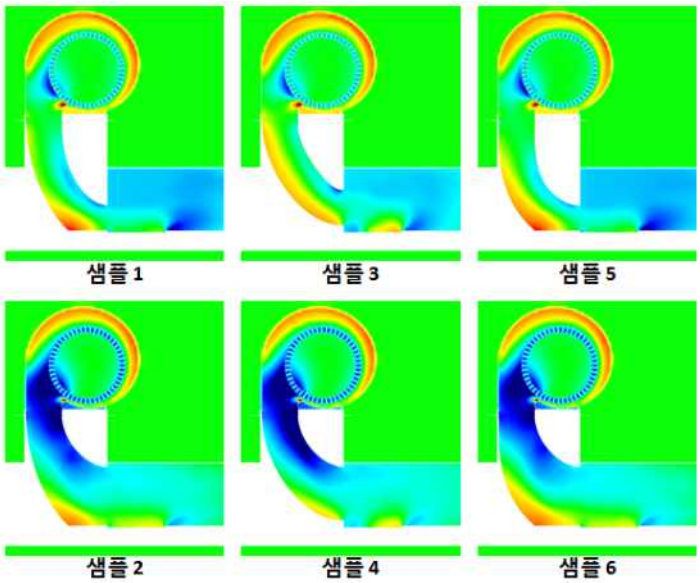
② 해석결과

해석결과 보조 베인의 메인 덕트 높이와 같은 샘플 4,5,6의 경우 샘플 1,2,3에 비해 유속이 빠르며, 유량이 많다. 덕트 내 평균 속도를 비교할 경우에는 샘플 4가 가장 유동 박리가 적다. 평균정압크기의 변화를 살펴보면 베인 아랫면 출구부에서 전체적으로 고압 부분이 나타나지만, 샘

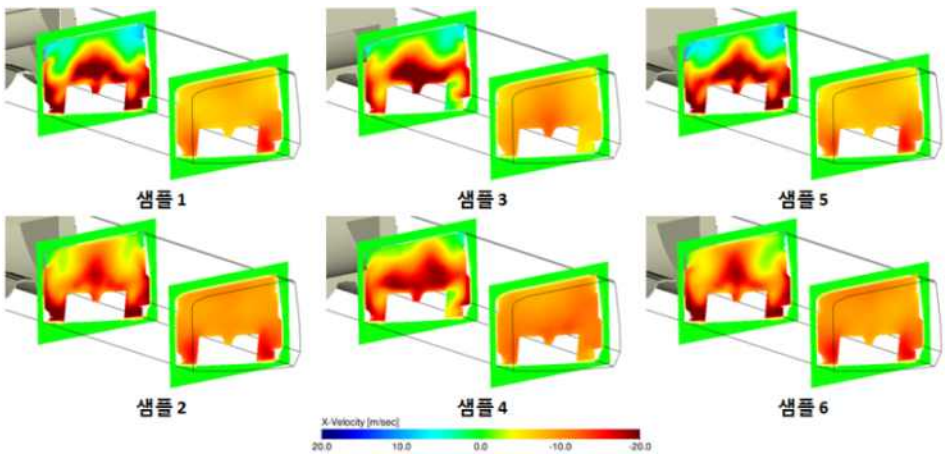
플 4에서 압력 상승이 가장 작게 나타남을 알 수 있다.



[그림 3.2.81] Averaged velocity



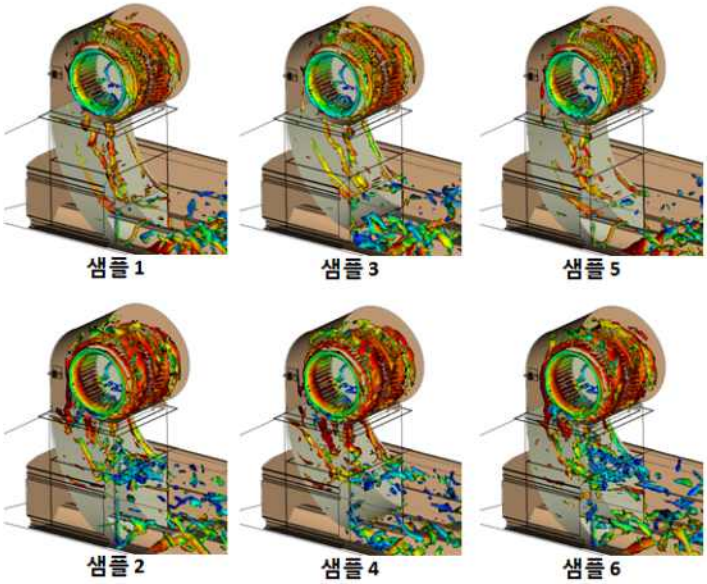
[그림 3.2.82] Averaged pressure



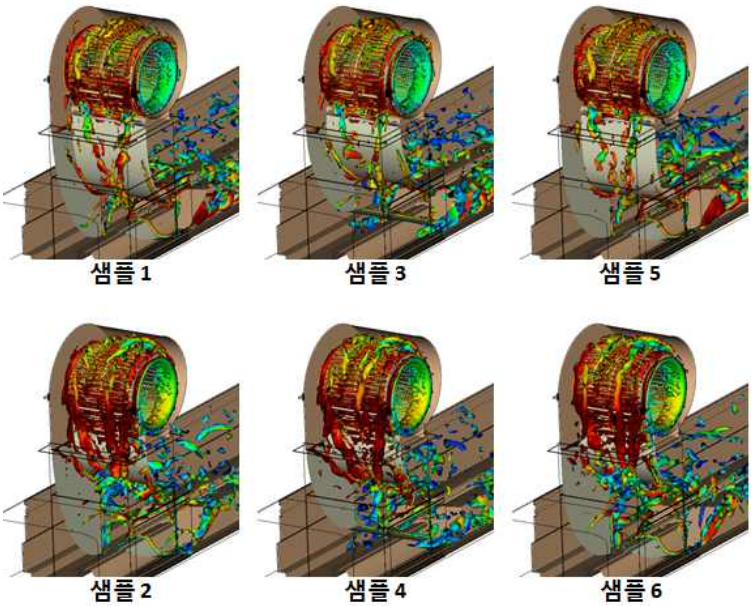
[그림 3.2.83] Velocity change to longitudinal direction

그림 3.83.에서 보이는 바와 같이 유동이 덕트를 따라 진행함에 있어서도 샘플4의 경우에 일정한 압력 분포를 보이고 있다. 샘플 1,3,5는 유속이 느려 베인 내부에 많은 vortex를 생성하지 않는다. 샘플 2,4,6은 유속이 빠른 만큼 vortex를 생성하나, 샘플 4가 가장 작은 vortex를 생성하여 유리하다. 또한 팬 후면의 경우에서도 샘플4의 vortex가 가장 짧으며 샘플 2,6의 경우에는

베인 내부에서 vortex가 사라지면서 소음을 유발할 수 있다.

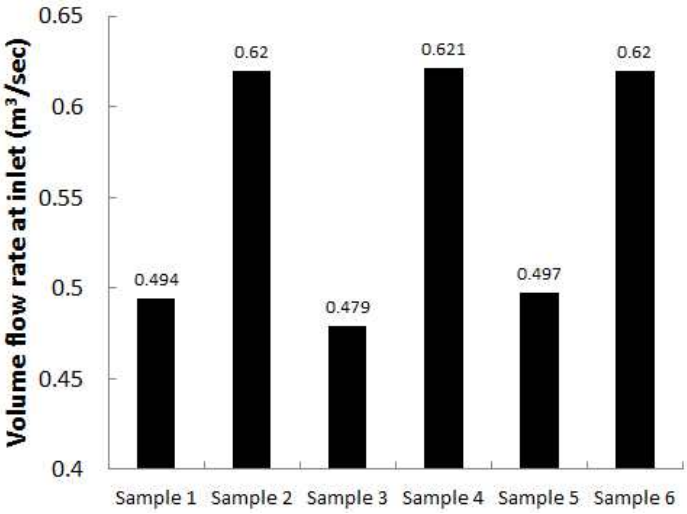


③ 그림 3.84. Lambda2 in front of fan



[그림 3.2.85] Lambda2 at back side of fan

메인 베인의 형태에 따라 유량이 크게 변함을 그림 3.86.에서 확인할 수 있으며, 유속이 고르고 유량이 많은 샘플4가 유동 저항이 가장 적을 것으로 판단된다. 또한 베인 출구에서 샘플4의 압력상승이 가장 적으며, vortex 측면에서도 유리할 것으로 판단된다.



[그림 3.2.86] Comparison inflow

(4) HVAC 덕트 목업 시험

① 목업 제작

덕트내 유동 소음의 파악과 전산해석 결과에 따른 덕트 개선안의 성능 검증을 위한 시험용 덕트 목업과 지그를 그림 3.87과 같이 제작하였다. 덕트는 차량의 절반의 크기로 제작하였으며, 실제 코레일 일반형 전동차에 사용하는 덕트와 동일한 공정으로 제작하였다.

덕트 고정 지그는 알루미늄 프로파일로 제작하였다. 덕트 목업은 양산 금형을 이용하여 제작하였으며, 한 차량에 장착되는 덕트의 절반에 해당하며, 2개의 송풍기를 1세트로 한 쪽 방향에 대한 실험이 가능하다. 반면에 본 실험에서는 차량 내부의 유동장에 대한 고려보다는 덕트내 유동 소음 저감이 목적임으로 차량의 실내와 동일한 환경을 갖추지는 않는다.



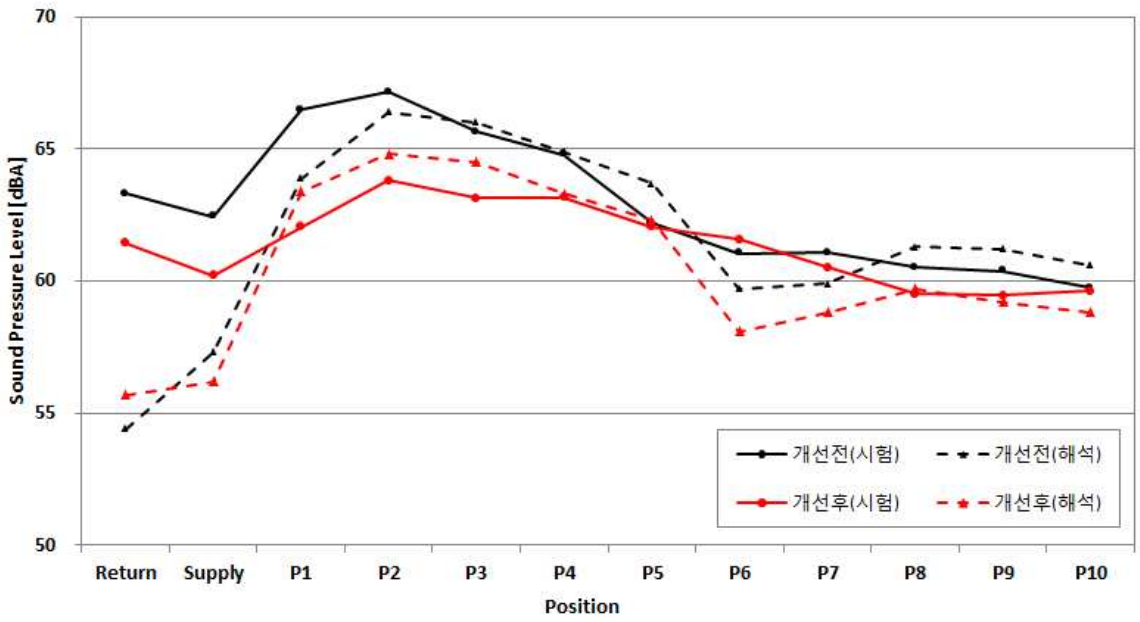
[그림 3.2.87] 덕트 설치 사진

② 소음시험 결과

베인 변경에 따른 소음 개선량을 목업 시험을 통해 확인하였다. 기존 메인 베인과 보조베인은 타공판 내부 흡음재로 구성되어 있으며, 개선안은 메인 베인을 곡률을 가진 판(두께 1.5t)으로 변경하고 보조베인과 사일런서를 제거하였다. 각 요소별로 단계적으로 시험하여 평가하였다. 표 3.34와 같이 시험결과 Supply 0.5m 위치에서 최대 4.4 dBA 저감되며, Supply 전체 평균으로 2 dBA 소음이 감소되었다. 이는 상대 비교 수치로 실내소음레벨 수치와는 다르다. 이 결과를 앞선 해석결과와 비교하여 그림 3.88에 나타냈으며, 시험과 해석에서 절대값 차이는 있으나 저감 경향성은 유사하게 나타났다.

표 3.2.34. 덕트 개선에 따른 소음 시험 결과

	Return	Supply (0m)	1 (0.5m)	2 (1m)	3 (1.5m)	4 (2m)	5 (2.5m)	6 (3m)	7 (3.5m)	8 (4m)	9 (4.5m)	10 (5m)	Supply AVG
개선 전 (코레일 베이스 모델)	63.3	62.4	66.5	67.1	65.6	64.8	62.2	61.0	61.1	60.5	60.4	59.7	63.6
개선 후	61.4	60.2	62.1	63.8	63.1	63.2	62.0	61.6	60.5	59.5	59.4	59.6	61.6
차이값	1.9	2.2	4.4	3.3	2.5	1.6	0.2	(0.5)	0.6	1.0	0.9	0.1	2.0

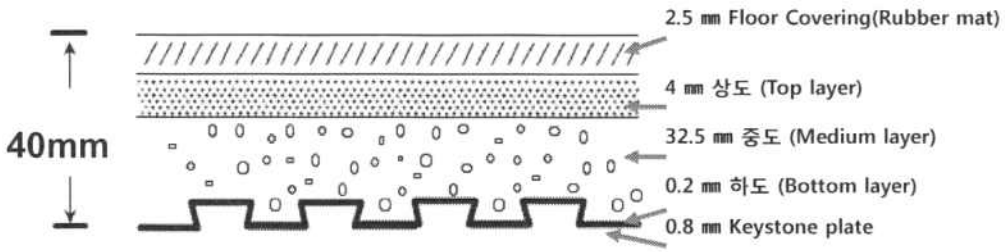


[그림 3.2.88] 덕트 개선 전 후 소음시험 결과 (해석 결과와 비교)

다. 바닥구조 차음성능 향상 기술 개발

(1) 코레일 일반형 전동차 바닥구조 검토

철도차량 주행 시 휠-레일, 윤축, 대차로부터 발생된 진동은 1,2차 현가장치 및 센터피봇을 통하여 차체로 전달되며, 전달된 차제 진동은 복합적층 바닥구조를 통하여 승객에게 전달된다. 철도차량의 바닥구조는 크게 유니텍스 바닥구조와 부유상 바닥구조로 구분할 수 있다. 코레일 일반형 전동차에 적용된 바닥구조는 유니텍스 바닥구조로 그림 3.89와 같이 구성되어 있으며, 바닥재의 조성은 아래 표 3.35과 같다.



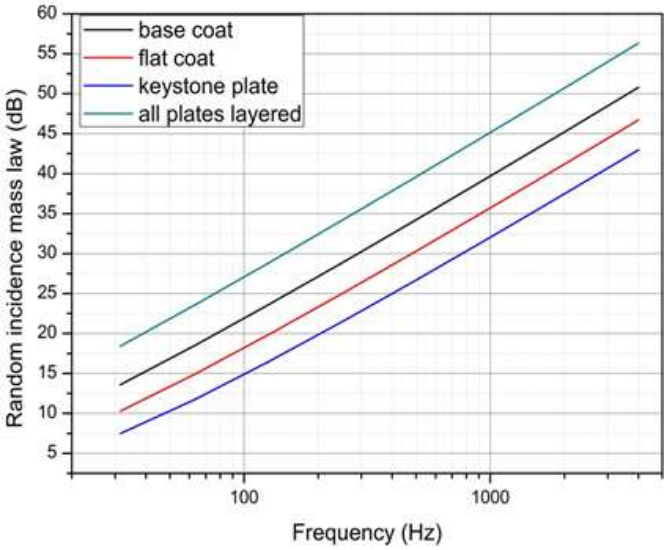
[그림 3.2.89] 코레일 일반형 전동차용 유니텍스 바닥구조

표 3.2.35. 바닥재 구조 조성

Classification	Material	Thickness	Gravity
Bond Coat (하도)	Liquid “R” (에폭시 수지 주제)	0.2mm	1.15
	Liquid “H” (에폭시 수지 경화제)		0.99
Base Coat (중도)	Liquid “R” (에폭시 수지 주제)	26.0mm	1.15
	Liquid “H” (에폭시 수지 경화제)		0.99
	Aggregate Large 1~3mm		0.65
	Aggregate V2 3~5mm		0.55

외피의 0.8㎜ 키스톤플레이트에 중도층인 다공성 인공경량골재 층, 4㎜ 정도의 상도층, 그리고 2.5㎜의 고무매트로 구성된다. 차음성능을 의미하는 적층재의 총투과손실은 키스톤플레이트, 중도 및 상도, 고무매트 각각의 투과손실과 층간 접착조건에 지배된다.

32.5㎜ 두께의 중도층이 총중량의 46% 정도로 가장 무겁다. 질량법칙에 따르면, 그림 3.90에서와 같이 중도의 차음기여도가 가장 높아야 한다. 그 다음으로 4㎜ 두께의 상도층, 0.8㎜ 두께 키스톤플레이트, 2.5㎜ 고무매트 순으로 차음에 기여한다. 그러나 재질 분석 결과, 중도는 입자간 공극이 상당 부분 존재하는 다공성 구조이다. 이는 중량당 강성은 매우 높으나 공극을 통한 음파의 전달로 차음에 는 매우 취약하다. 유한요소해석에서 키스톤플레이트는 750Hz부터 국부적 공진모드들이 출현하므로 이보다 높은 주파수 대역에서 차음성능이 상당히 떨어질 가능성이 있다.



[그림 3.2.90] 질량법칙에 의한 층별 투과손실

(2) 차음성능 개선 방향

(가) 중도 입자의 소형화

기존 중도는 큰 입자 크기에 의해 입자 사이의 틈새도 커져 공극율이 높으므로 차음에 불리하다. 중량을 고려할 때 가장 차음 기여도가 높아야 하므로 중도층의 구조를 우선적으로 개선할 필요가 있다. 공극률 감소를 위해 가는 입자 Sil cell을 공극에 채워 넣은 개선 시편 제작하여 중량대비 투과손실을 평가한다.

(나) PU층 흡착

중도와 상도 사이에 PU층을 흡착시켜 기밀성을 향상시킴과 동시에 댐핑을 증가시킨다. 기밀성을 높이면 공극 사이로 새어나가는 음파의 누설을 막을 수 있어 차음에 크게 도움이 된다. 이와 함께 중도 및 상도층은 댐핑이 매우 작으므로, PU층을 삽입함으로써 두 층의 댐핑을 증가시키는 효과도 기대하였다. 중도 단일 시편의 차음성능은 크게 증가였으나, 유니텍스 구조에 적용한 총 투과손실에 별 영향을 미치지 않으므로, PU층 적용은 개선안에서 제외한다.

(다) 제진도료 적용

가장 바깥에 위치하여 외부 소음을 받는 키스톤플레이트는 스테인리스 강으로 댐핑이 매우 작다. 댐핑을 증가시킨다면 국부적 공진대역에서의 차음성능을 개선할 수 있다. 이를 위하여 국내외 제진도료의 댐핑 성능을 비교 평가하여 우수한 제진도료를 찾아 적용한다.

(라) 투과손실/댐핑/강성의 종합적 평가

차음성능을 높이더라도 하중을 지지하는 굽힘강성이나 압축 강도가 악화되어서는 안된다. 구조개선된 시편을 대상으로 중량대비 투과손실/댐핑/굽힘강성을 동시에 평가하여 3가지 인자가 모두 개선되는지를 확인하고, 이들 사이의 연관관계를 분석하여 차음성능의 개선 메커니즘을 규명한다. 이 작업은 향후 우수한 성능의 차음재 개발을 위해서도 반드시 필요하다.

(3) 시편의 제작

(가) 중도 개선 시편

시편은 투과손실 측정을 위하여 잔향실 개구부(크기 840㎜ x 840㎜)에 설치가 가능한 836㎜ x 836㎜의 크기로 제작하였다. 투과손실 측정실험 전에 구조개선에 따른 굽힘강성과 댐핑성능을 먼

저 평가한다. 1차 시험을 위하여 두께 32.5㎜로 기존 중도모델/입자소형화모델/기존 + PU흡착 모델/입자소형화 + PU 모델의 4개 시편을 제작하였다. 표 3.36은 입자가 굵은 기존 모델과 소형화 시킨 개선 모델의 제원이고, 표 3.37과 표 3.38는 각각 PU층을 흡착시킨 모델이다. 문제는 새로 제작한 시편의 중량이 기존 제품보다 상당히 증가하였다. 따라서 중량대비 투과손실을 비교하여 동일 중량당 투과손실을 평가한 후, 향후 중량을 맞추는 작업이 필요하다. 그림 3.91은 제작된 중도 시편을 보인다.

표 3.2.36. 두께 32.5㎜ 유니텍스 중도 제원

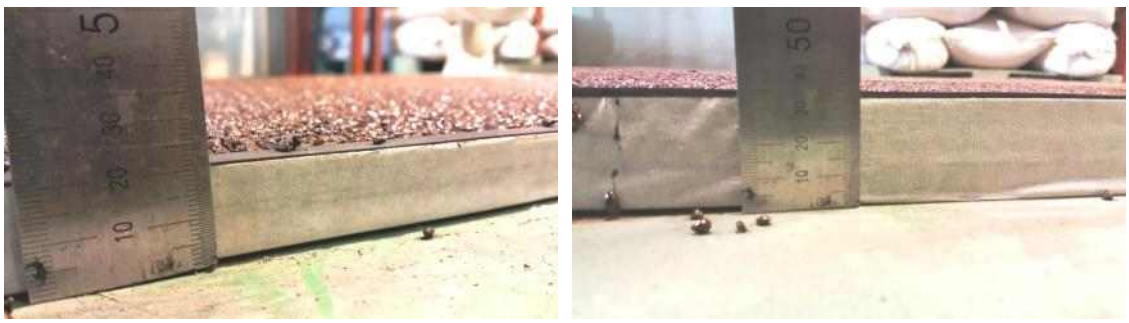
	Large particle model	Small particle model
중량 [g]	15,528	18,532
가로 (평균 값) [mm]	835.5	836
세로 (평균 값) [mm]	835	836
두께 (평균 값) [mm]	33.10	33.15
밀도 [kg/m^3]	672.44	799.88

표 3.2.37. Large Particle(기존) 시편

	Large Particle	Large Particle + PU
중량 [g]	15528	16134
가로 (평균 값) [mm]	835.5	835.5
세로 (평균 값) [mm]	835	835.5
두께 (평균 값) [mm]	33.10	33.27
밀도 [kg/m^3]	672.44	694.67

표 3.2.38. Small Particle(개선) 시편

	Small Particle	Small Particle + PU
중량 [g]	18532	21626
가로 (평균 값) [mm]	836	835
세로 (평균 값) [mm]	836	836
두께 (평균 값) [mm]	33.15	33.72
밀도 [kg/m^3]	799.88	918.71



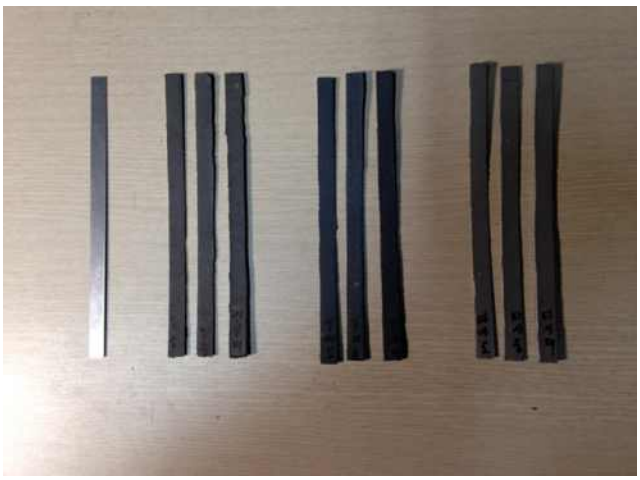
(a) 19.5㎜ (b) 32.5㎜

[그림 3.2.91] 중도층 시편 제작

(나) 키스톤 플레이트용 막대시편

키스톤 플레이트와 같은 0.8㎜ 두께의 스테인리스 강으로, 그림 3.92와 같이 막대시편을 먼저 제작하여 제진도료의 피복 전후 댐핑비의 차이를 측정하여 비교한다. 시편은 폭 10㎜, 길이 180㎜의 막대형으로 만들어, 국산 2개 및 수입산 1개 도료를 1㎜, 2㎜, 3㎜ 두께로 피복시켜 그

성능을 비교한다.



[그림 3.2.92] 비제진/제진 막대시편

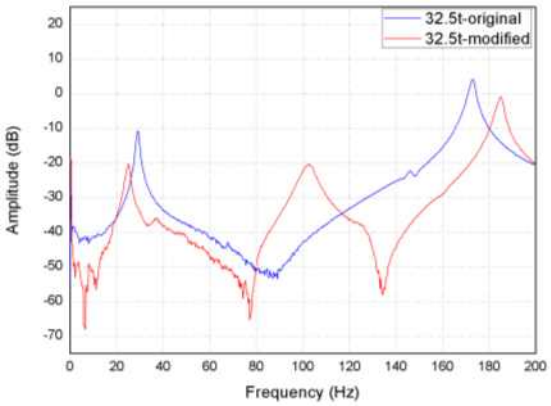
(4) 시험결과

(가) 중도

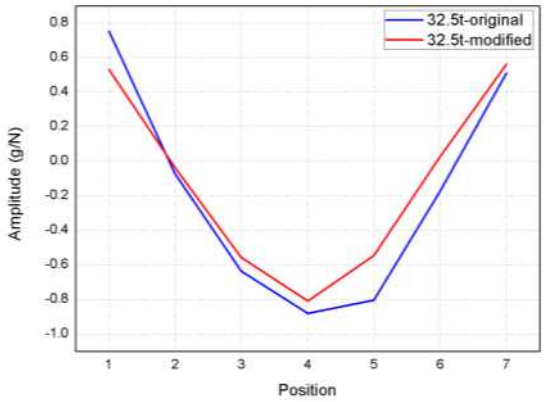
그림 3.93과 같이 시편의 굽힘진동모드에 대한 강성 및 댐핑 성능을 평가하기 위하여 충격햄머를 사용하여 가진하며, 이때의 가속도 응답신호를 이용하여 주파수응답함수를 구한다. 사각평판의 굽힘진동모드의 고유진동수의 변화에 따른 시편의 강성 및 감쇠를 평가하였다. 그림 3.94(a)에서 Inertance FRF(가속도/힘)의 피크레벨이 전반적으로 감소하고 있다. 1자유도 모델에 따르면, 피크레벨은 $A/F=\omega^2/2k\zeta$ 이므로 레벨이 낮아진다는 것은 강성과 댐핑비의 곱이 증가함을 의미한다. 그림3.94(a)에서 1차 굽힘모드의 진동수는 기존 모델은 173.1 Hz, 소형입자모델은 185.0 Hz로 확인되었고, 피크레벨은 약 5dB 감소하였다. 그림3.94(a)에서 1차 굽힘모드 피크 아래의 2개 피크는 탄성지지에 의한 강체 모드들로 확인되었다.



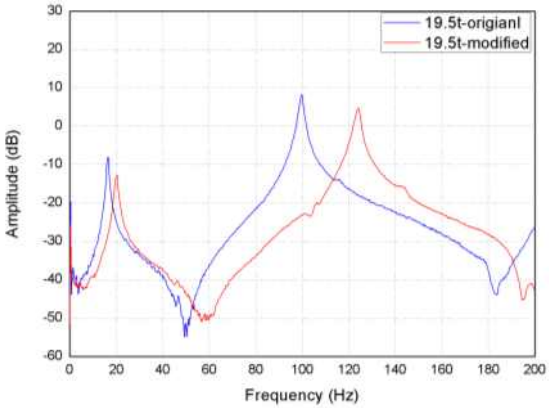
[그림 3.2.93] 충격시험(네 모서리 탄성고무지지)



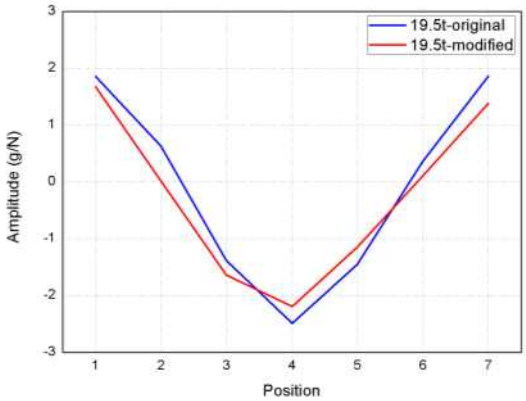
(a) FRF(32.5mm)



(b) 1차 굽힘 모드(32.5mm)



(c) FRF(19.5mm)



(d) 1차 굽힘 모드(19.5mm)

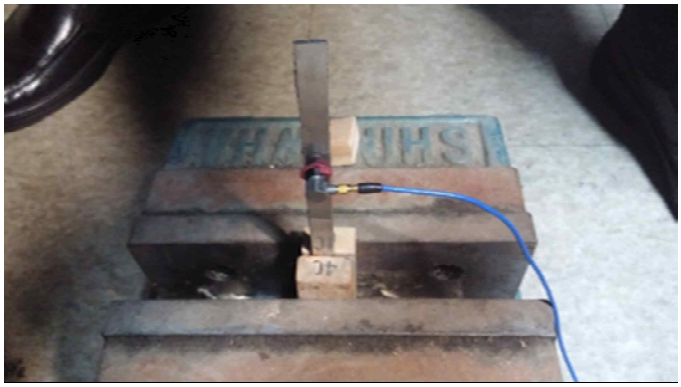
[그림 3.2.94] FRF와 1차 굽힘모드 비교

사각평판의 고유진동수는 $f=\frac{1}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho h}}M_{mn}$ 로 표시된다. 여기서 $D=Eh^3/12(1-\nu)$는 평판의 굽힘 강성이다. a는 평판의 가로 길이, M은 가로/세로 비와 모드 차수의 함수이다. ρ는 재료의 밀도, h는 두께로, 시편의 입자 굵기 및 공극율에 따라 밀도는 다르나 a, h, M은 일정한 상수로 볼 수 있다. 1차 굽힘모드를 대상으로 강성 및 댐핑의 변화를 추정해 본 결과, 고유진동수가 173Hz에서 185Hz 로 1.07배로 증가하였다. 이는 a,h,M이 상수이므로 $\sqrt{\frac{D}{\rho}}$가 1.07배로, 즉 $\frac{D}{\rho}$는 1.145배로 증가하였음을 의미한다. 한편, 입자소형화로 ρ는 1.19배 증가하였다. 따라서 굽힘강성 D는 1.363배 증가한 셈이다. 피크레벨은 $A/F=\omega^2/2D\zeta$ 인데, 그림 3.94(a)의 측정결과와 같이 5dB 감소하였다는 것은 피크레벨이 1/3배로 감소하였음을 의미하는데, 이는 강성과 댐핑비의 곱이 3배로 증가하였음을 의미한다. 따라서 댐핑의 증가분만을 추정하면 3/1.363=2.2배 증가한 셈이다. 다른 주파수의 피크에서도 유사한 추정을 해볼 수 있다.

결과적으로 입자소형화모델에서 강성의 증가와 함께 댐핑이 2배 이상 증가한 셈이다. 이 경우 통상적으로 투과손실이 증가하여 차음성능의 개선 가능성이 높다. 문제는 공극이 감소하면서 밀도가 증가하였다. 따라서 투과손실 측정시에는 중량대비 투과손실로 그 효과를 비교해야하며, 효과가 확인되면 간극을 채우면서 경량 입자를 사용하여 총중량을 유지하는 방안을 강구하여야한다.

(다) 제진도료

제진도료는 키스톤플레이트에 도포하여 댐핑성능을 높이게 된다. 막대시편에 대한 댐핑성능 평가는 그림 3.95와 같이 고정-자유 경계조건을 주고 초기 변위에 의한 자유 진동이 감쇠되는 파형을 측정하여 대수감소법(logarithmic decrement method)으로 댐핑비(damping ratio)를 추정하였다. 이때 고정 위치를 조절하여 시편 길이를 변화시키면 진동수를 변화시킬 수 있다.

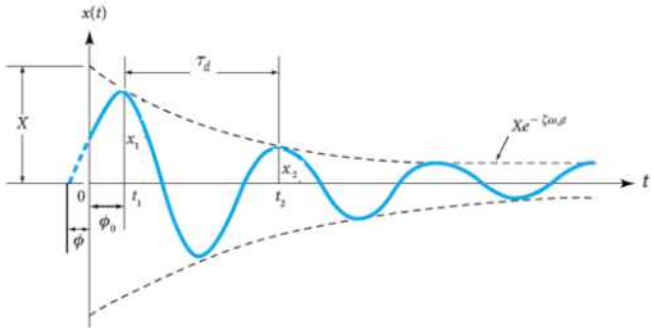


[그림 3.2.95] 제진도료 성능 평가

대수 감소율은 점성감쇠 자유진동의 진동이 시간에 따른 진폭의 감소 정도를 나타내는 값으로서, 그림 3.96에서와 같이 연속하는 두 진폭의 비에 자연로그를 취한 값으로 정의되나, 보통 식(1)과 같이 n개의 주기에 걸쳐 평균화된 값으로 얻는다.

$$\delta = \ln\frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{1}{n} ln\frac{x_1}{x_{n+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \qquad (1)$$

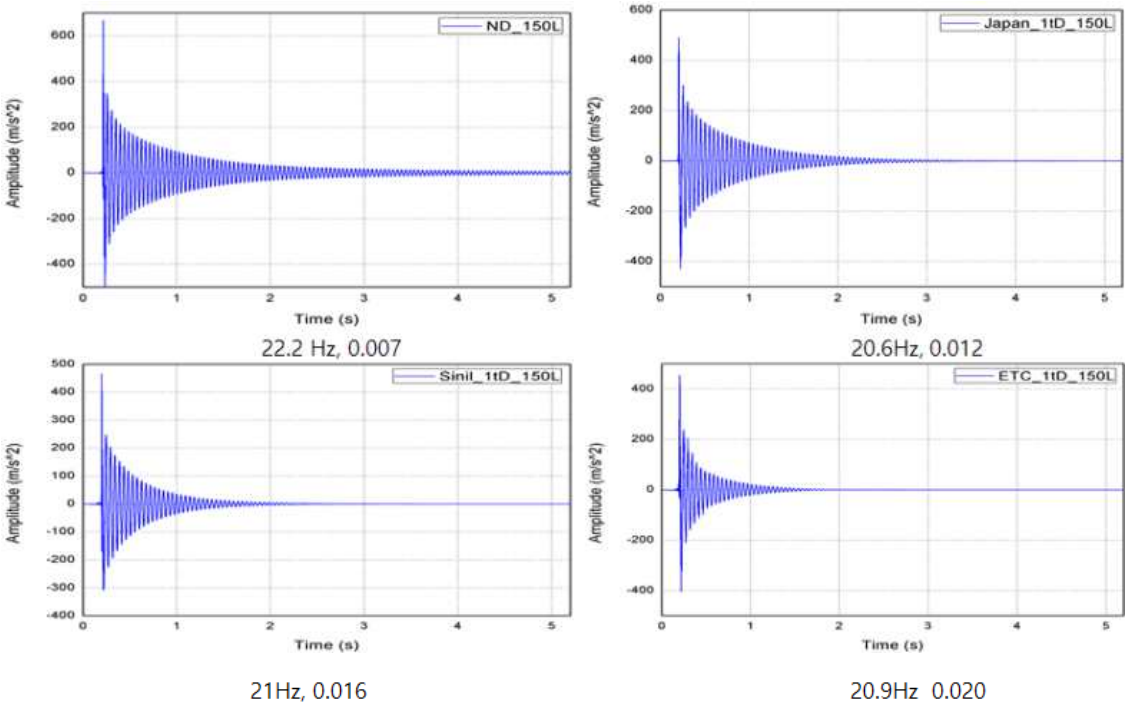
$$\text{감쇠비 } \zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2+\delta^2}} \qquad (2)$$



[그림 3.2.96] 점성감쇠계 감쇠진동파형

그림 3.97과 그림 3.98은 3개사(신일, 일제, 타사제)의 제진도료를 1㎜ 피복시킨 시편을 대상으로 시편 길이를 150㎜ 및 90㎜로 하였을 때, 자유진동의 감쇠파형을 보인다. 감쇠파형이 시간에 따라 일정한 비율로 감쇠하는 구조나 툴롱감쇠보다는 지수함수적으로 감소하는 점성감쇠에 가까우므로 점성감쇠비로 비교하는 것이 타당하다. 제진도료의 무게 때문에 주파수가 미세하게 감소하고, 제진도료 종류에 따라 감쇠비의 차이를 보인다. 일제에 비해서 국산 2개사 제품이 높은 감쇠비를 보인다.

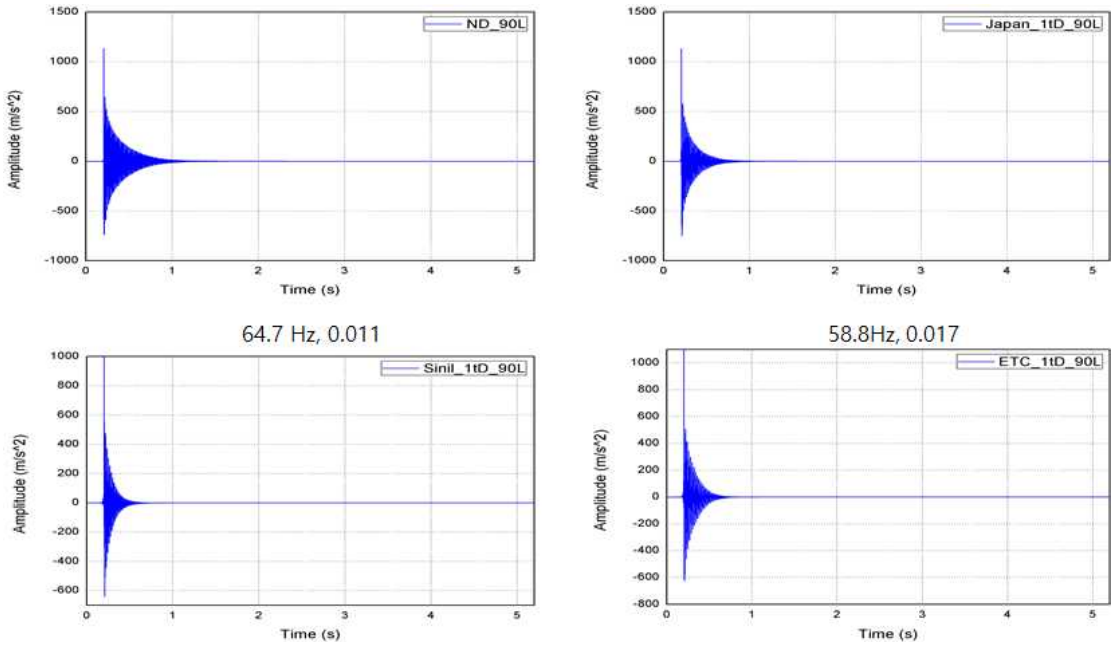
그림 3.99와 그림 3.100은 도료 두께를 1㎜, 2㎜, 3㎜의 3가지로 도포할 때의 감쇠비를 비교한다. 일제는 비례적으로 감쇠비가 증가하는 반면, 국산 2개 제품은 3㎜ 도포시 비약적으로 감쇠비가 증가한다. 표 3.32에서 보듯이 도료 두께에 따른 3개사 제품의 중량 증가는 거의 대등하다. 결론적으로 국산으로 새로이 개발된 제진 도료(신일)의 성능이 매우 우수하므로, 이를 키스톤 플레이트에 도포하여 어느 정도의 제진 효과가 나는지, 도포 두께에 따른 제진효과와 차음성능의 개선효과를 실험적으로 검증할 필요가 있다.



22.2 Hz, 0.007　　20.6Hz, 0.012

21Hz, 0.016　　20.9Hz 0.020

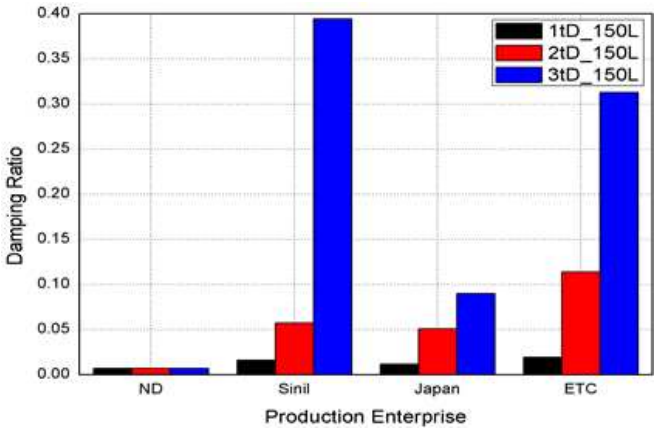
[그림 3.2.97] 1㎜피복, 150㎜ 시편



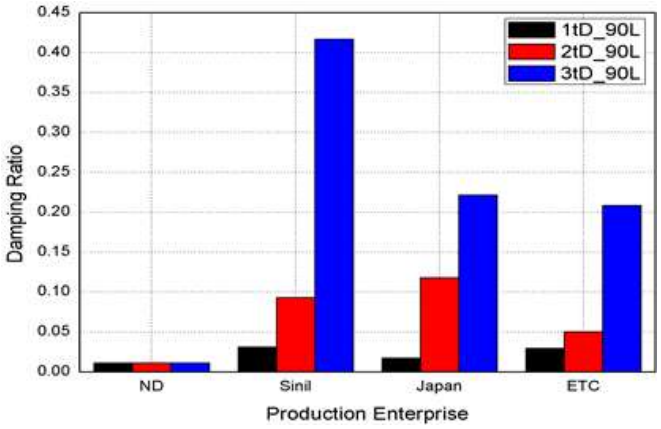
64.7 Hz, 0.011　　58.8Hz, 0.017

60.9 Hz, 0.031　　51.3Hz, 0.030

[그림 3.2.98]1㎜피복, 90㎜ 시편



[그림 3.2.99] 150㎜ 시편 도료 두께에 따른 감쇠비



[그림 3.2.100] 90㎜ 시편 도료 두께에 따른 감쇠비

표 3.2.39. 도료 두께에 따른 중량

Mass (g)	1mm	2mm	3mm
ND		10.6	
Shinil	12.4	13.8	19.2
Japan	12.2	14.8	19.0
Etc.	11.7	13.7	19.3

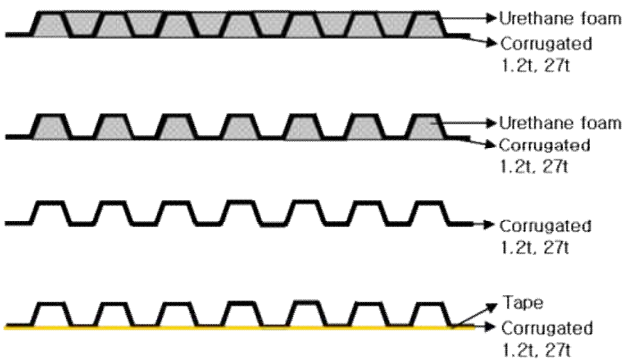
(라) 1.2t 키스톤 플레이트의 투과손실

키스톤 플레이트의 두께에 대한 투과손실을 비교하기 위하여 먼저 1.2㎜ 두께의 구조용 강판의 투과손실을 검토한다. 키스톤 플레이트용 강판은 댐핑이 매우 작아 공진에 취약하다. 일반적으로 키스톤 플레이트의 주름에서 발생하는 국부적 공진으로 이 대역의 투과손실이 크게 떨어지는 것으로 알려져 있다. 댐핑을 증가시켜 이 문제를 해소하는 것이 효과적이다. 그림 3.101은 댐핑을 증가시키기 위하여 일면 폼재 충진 , 양면 폼재 충진, 테이프 접착, 비감쇠 주름강판의 4가지 모델을 보인다. 이들을 대상으로 투과 손실을 측정한 결과를 그림 3.102에 나타낸다. 이로부터 키스톤 플레이트의 차음 성능과 문제점을 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

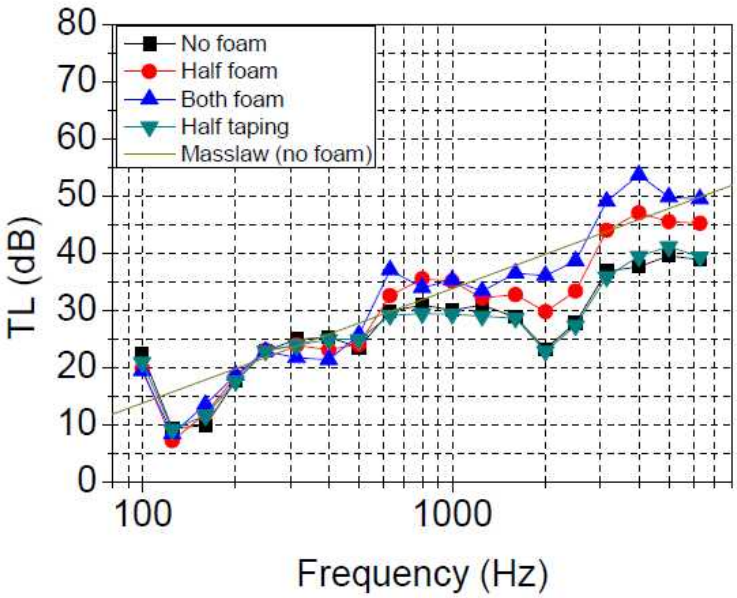
① 그림 3.102에서 직선은 질량법칙 수치이다. 주름강판의 투과손실은 전반적으로 중량이 같은 평판의 질량법칙 예측치를 추종하나, 130Hz, 2000Hz 두 개의 주파수 대역에서 큰 폭으로 떨어지는 문제점을 보인다. 130Hz 부근에서 시편의 크기와 경계조건(장착조건)에 따라 결정되는 1차 굽힘 공진에 의한 투과손실 급락이 발생한다. 시편이 커지면 공진주파수는 이보다 훨씬 낮은 대역으로 내려오므로 실제 상황에서는 문제가 되지 않는다.
② 저주파수 대역에서 예측치보다 측정치가 크게 나오는 것은 시편 크기 효과로, 실제 상황에서는 질량법칙 예측치에 접근한다.
③ 2000Hz 부근에서 투과손실이 급락하는 현상은 주름단위에서 발생하는 국부공진 효과이다. 그림 3.103은 1차 국부공진 모드 및 주파수를 보인다.
④ 이러한 국부공진에 의한 투과손실 급락은 공진대역에서 댐핑을 크게 하여야 막을 수 있다. 폼 충진으로 댐핑을 증가시킬 때, 1000Hz에서 일면 충진은 5dB, 양면 충진은 10dB 이상의 투과손실 증가를 가져온다.

⑤ 500Hz 아래에서는 4개 모델이 비슷한 투과손실을 보이며, 충진에 의한 차음성능 개선효과는 미미하다. 테이핑은 전 주파수대역에서 댐핑에 거의 영향을 주지 못하고, 투과손실에도 변화를 주지 않는다.

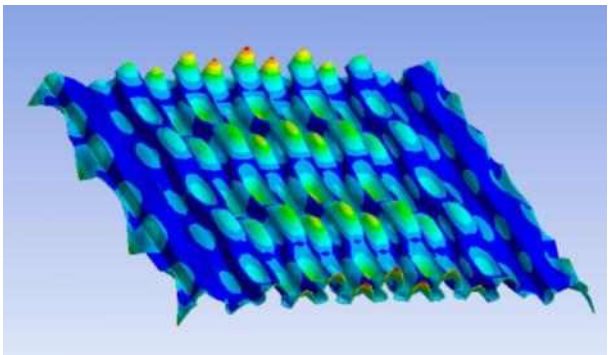
⑥ 그림 3.104는 투과손실과 동시에 측정한 가속도 주파수응답이다. 폼재는 2000Hz 대역의 국부 공진의 댐핑을 크게 증가시키고, 그 결과 이 대역을 전후하여 차음성능의 급락을 방지할 수 있다.



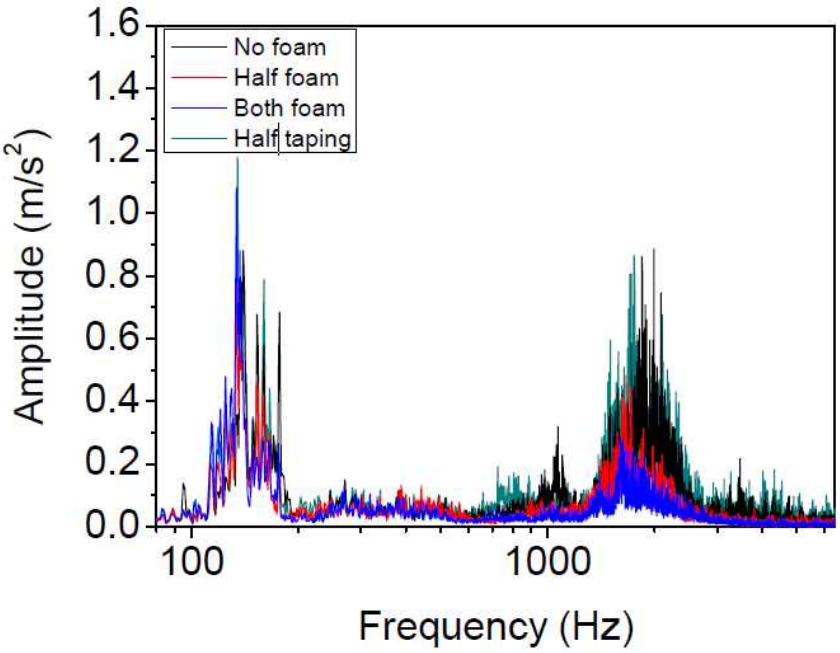
[그림 3.2.101] 주름강판의 댐핑 처리 형태



[그림 3.2.102] TL 측정 결과



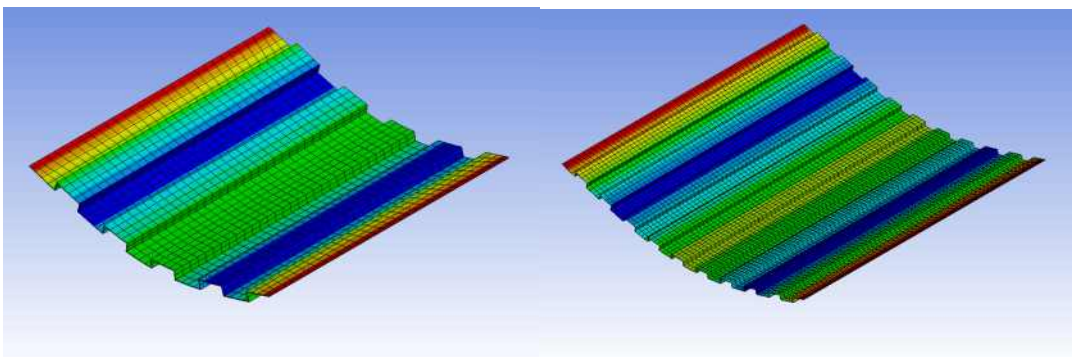
[그림 3.2.103] 주름강판의 1차 국부 공진모드 (2,173Hz)



[그림 3.2.104] TL 측정시의 가속도레벨

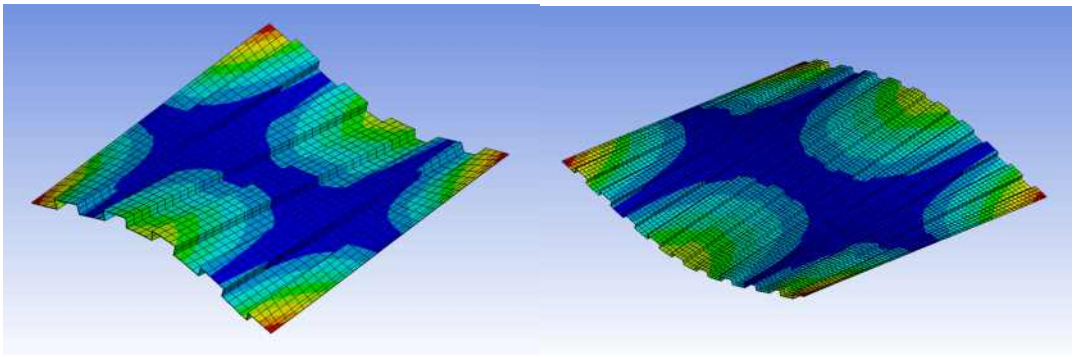
(마) 0.8t 키스톤 플레이트

유니텍스용 키스톤플레이트는 두께 0.8㎜의 스테인리스 강이다. 가로 x 세로 치수로, 420㎜ x 420㎜ 및 2배되는 840㎜ x 840㎜의 두 경우에 대하여 전체모드와 국부적 모드를 해석하였다. 그림 3.105와 그림 3.106은 1,2차 전체모드를 보인다. 시편의 크기가 2배로 커지면서 고유주파수는 그 역 제곱인 1/4배로 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 3.107에서와 같이 시편 크기에 무관하게 주름 단위에서 발생하는 국부적 모드의 주파수는 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 국부적 모드는 750Hz부터 출현하므로 그 이후의 주파수 대역에서 투과손실이 악화될 가능성이 있다.

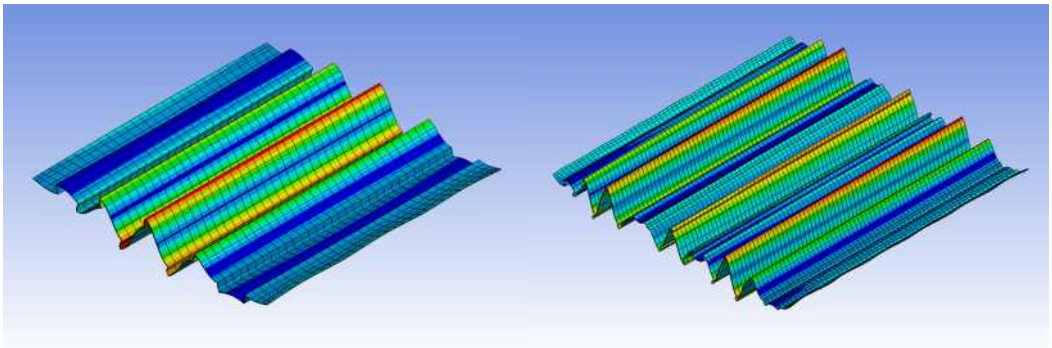


(a) $420mm \times 420mm$ 시편 : 20.962 Hz (b) $840mm \times 840mm$ 시편 : 5.159 Hz

[그림 3.2.105] Keystone Plate의 1차 Global Mode



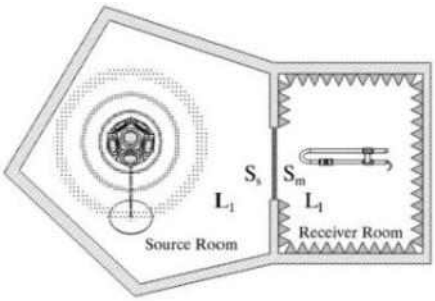
(a) $420mm \times 420mm$ 시편 : 39.242 Hz (b) $840mm \times 840mm$ 시편 : 9.7988 Hz
[그림 3.2.106] Keystone Plate의 2차 Global Mode



(a) $420mm \times 420mm$ 시편 : 756.61 Hz (b) $840mm \times 840mm$ 시편 : 759.98 Hz
[그림 3.2.107] Keystone Plate의 1차 Local Resonance mode

(5) 차음성능 평가

차음성능은 ASTM E2249-02에 근거한 인텐시티 투과손실을 측정하였다. 인텐시티 투과손실 측정법은 음원실이 잔향실이고 수음실이 무향실로 구성된 2개의 공간 사이에 시편을 설치하여 시편의 격자에서 인텐시티 프루브(B&K type 2595)로 투과손실을 측정하는 방법이다. 그림 3.108의 재원을 가진 서울대 차세대자동차연구센터 잔향실 및 무향실, 측정 장비를 사용하여 측정하였다(박소희 외, 2007). 이에 사용된 시편의 크기는 840mm x 840mm이다. 잔향실은 총 표면적인 237m2, 용적 241m3, 차단주파수(Cut-off frequency) 100Hz, 배경소음 25dBA이다. 잔향실(음원실)에서 무지향성 스피커로 Pinknoise를 발생시키고 마이크로폰을 16초 주기로 회전하게 하여 공간 평균 음압을 측정한다. 무향실은 시편장착 부분 양쪽에 높이 1.8m, 폭 0.1m인 웨지 두 세트를 설치하여 자유음장을 형성하였다. 무향실 측에서 인텐시티 프루브로 수평 수직 방향 2회 스케닝하였으며, 100~6300Hz를 커버하기 위하여 50mm와 8.5mm 두 개의 spacer를 사용하였다.



Room Volume	241m^3
Total surface area	237m^2
Cut-off frequency	100Hz
Background noise	25dBA
Opening size	840mm × 840mm

[그림 3.2.108] 인텐시티 투과손실 측정 잔향실의 제원



[그림 3.2.109] 투과손실 측정 장면

투과손실 측정은 총 19개의 시편을 대상으로 1/3옥타브대역별 투과손실을 측정하였다. 그 중에서 코레일 일반형 전동차용 기존 바닥구조(Case1)의 음향투과손실 결과와 방음도료의 효과를 검토하기 위한 Case0, 중량 증가없이 차음성능이 개선된 바닥구조의 음향투과손실 결과를 표3.40에 나타내었다. 개선 유니텍스 바닥구조 (Case3)의 차음성능은 Rw 42dB로써 기존 대비 4 dB개선하였다(목표: 3dB 이상 개선).

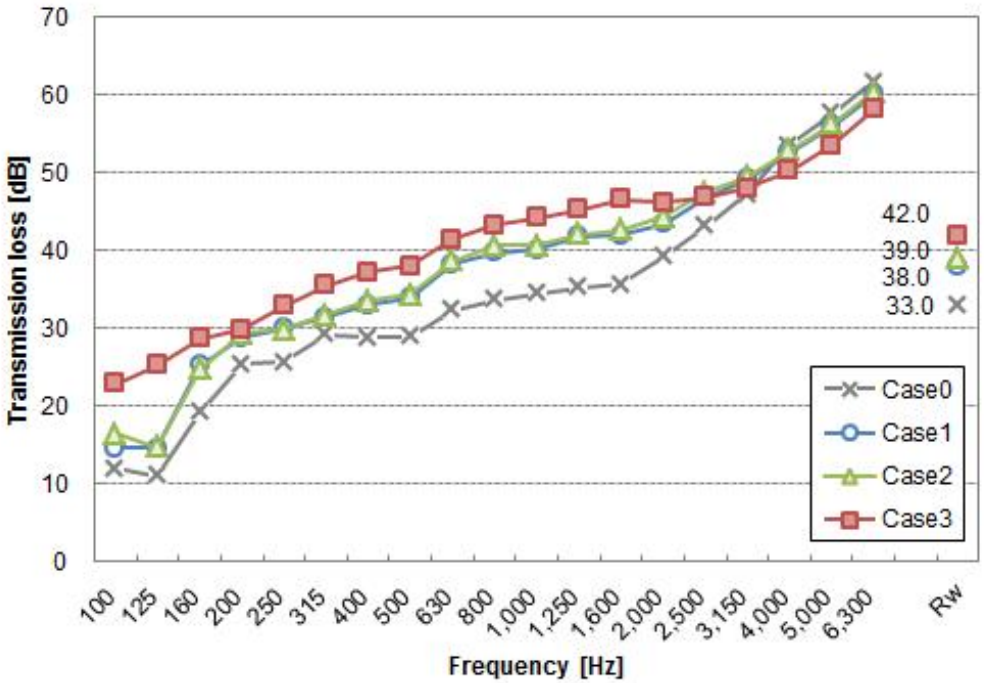
시편 제작 시 하도의 보강과 제진도료의 도포에 따른 총 중량이 기존과 유사하였으며, Case 2에서는 차음성능에 큰 영향을 미치지 않는 중도의 중량을 줄이고 키스톤 플레이트와 중도 사이의 접합층 두께를 0.2㎜에서 2㎜로 두껍게 하였다. Case0에 비해 최대 6dB, Case1에 비해 1 dB의 차음성능 개선효과를 보인다. 방음도료와 접합층 두께 증가는 총중량을 증가시키지 않으면서 총 투과손실을 높이는 긍정적 효과가 있어 추후 개선 방향을 설정시에 중요한 인자로 활용할 것이다.

다공성 중도의 공극을 중량 증가 없이 메꾸어 기밀성을 높이는 것이 관건이다. 그러나 입자 크기를 대폭 줄여 공극을 작게 만드는 것도 쉽지 않고, 공극을 에폭시 수지만으로 메꾸는 데에도 한계가 있다. 또한 PU층을 일부 얇게 점착하더라도 총 투과손실을 높이기는 어렵다. 이러한 현실을 감안하여 에폭시 수지를 20%, 우레탄을 80% 혼합한 하이브리드 수지를 사용하여 중도의 입자를 결합시킨다. 이 경우 중도 전체에 걸쳐 공극을 메꿀 수 있어 중량을 증가시키지 않고 기밀성을 크게 향상시킬 수 있다. 하이브리드 중도를 사용한 Case 3는 기존의 유니텍스 총 면밀도 대비 6% 정도 가벼워졌음에도 불구하고, 철도차량의 주요 소음대역인 2000Hz 아래에서 최대 10dB의 투과손실 향상을 보인다. 이러한 결과는 하이브리드 중도가 현재의 중도에 비해서 기밀성이 월등히 높아진 점과, 하이브리드 점착제가 갖는 높은 댐핑성능에 기인한다. 추가적으로 Case3에 방음도료 0.5~3㎜를 적용하여 차음성능을 개선하는 방향도 향후 적용 가능할 것으로 사료된다.

현차 적용을 위해서는 Case2의 경우, 하도의 두께 증가로 인한 Crack이 발생하지 않을지 검증이 필요하며, Case3의 경우, 우레탄 성분 히팅시 부풀어 오르는 현상에 대한 현차 검증이 필요하다. 이는 2017년 6-7월 경 노후차량 개선시 시험시공을 통해 검증할 예정이다.

표 3.2.40. 개선 유니텍스 바닥구조의 시편 질량, 면밀도, 차음성능(Rw)

Type	Component	질량 [Kg]	면밀도 [kg/m^2]	Rw [dB]
Case 0	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Keystone Plate	28.8	41.2	33
Case 1	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Keystone Plate +500㎛방음도료	29.0	41.5	38
Case 2	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 2mm + Keystone Plate	28.0	40.1	39
Case 3	Floor Covering + Flat Coat + Hybrid Base Coat + Bond Coat 2mm + Keystone Plate	27.2	38.9	42



[그림 3.2.110] 음향투과손실 결과 비교

(6)개발품 원가분석자료

표 3.41과 같이 코레일 일반형 전동차에 적용되는 바닥구조의 원가는 Keystone plate와 Floor covering을 제외한 순수 Unitex 상구조와 방음도료에 해당하는 금액이다. Case2-3에서 차음성능(Rw) 개선될 때마다 량당 단가가 5~12% 증가하나 방음도료를 2㎜로 두껍게 도포하는 케이스(27% 증가)에 비하여 가격과 중량 측면에서 유리하기 때문에 현차검증 후에 충분히 실용화 가능성이 있을 것으로 판단된다.

표 3.2.41. 개선 유니텍스 바닥구조의 원가분석

Type	Component	Rw [dB]	량당 단가 [천원]	비고
Case 0	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Keystone Plate	33	4,900	
Case 1	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 0.2mm + Keystone Plate +500㎛방음도료	38	5,250	VeriCo-Np 제품: 2mm사용시 350천원*4
Case 2	Floor Covering + Flat Coat + Original Base Coat + Bond Coat 2mm + Keystone Plate	39	5,500	
Case 3	Floor Covering + Flat Coat + Hybrid Base Coat + Bond Coat 2mm + Keystone Plate	42	5,900	

3. 저소음/저진동 차량 해석기술 개발

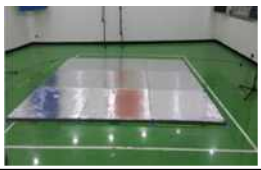
가. 기존 차량의 요소별 소음/진동 특성 고찰

(1) 단열재 흡차음 성능 시험

(가) 시험 개요

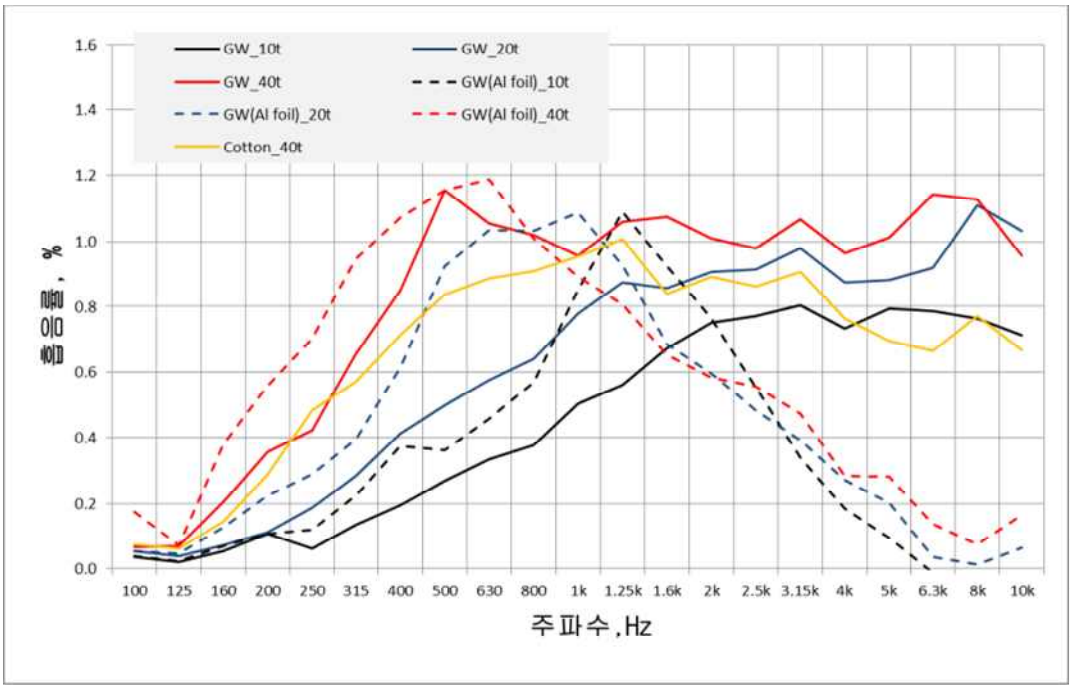
전동차 내부에 적용되는 단열재는 일반적으로 흡음재 주변을 Aluminum foil이 덮는 구조이다. 이러한 복합 구조의 흡/차음 성능은 예측이 어렵기 때문에 단품 조건에서 흡음률 및 차음 성능 시험을 통해 해석 입력값을 확보하였다. 흡음시험은 ISO 354에 의한 잔향실법 흡음계수를 측정하였으며, 차음시험은 ISO 15186-1에 따른 잔향실-무향실 측정법에 의한 차음 성능을 측정하였다. 단품 시험 항목은 다음 표 3.42와 같다.

표 3.2.42. 단열재 흡음시험 시편

	Material	Thickness (mm)	Weight (g)	Area (m^2)	Figure
1	GW (Glass wool)	40	15,745	3x3	
2	GW (Glass wool)	20	7,295	3x3	
3	GW (Glass wool)	10	4,540	3x3	
4	GW(Al)*	40	16,480	3x3	
5	GW(Al)*	20	9,345	3x3	
6	GW(Al)*	10	5,650	3x3	
7	Cotton	40	13,755	2.5x4	

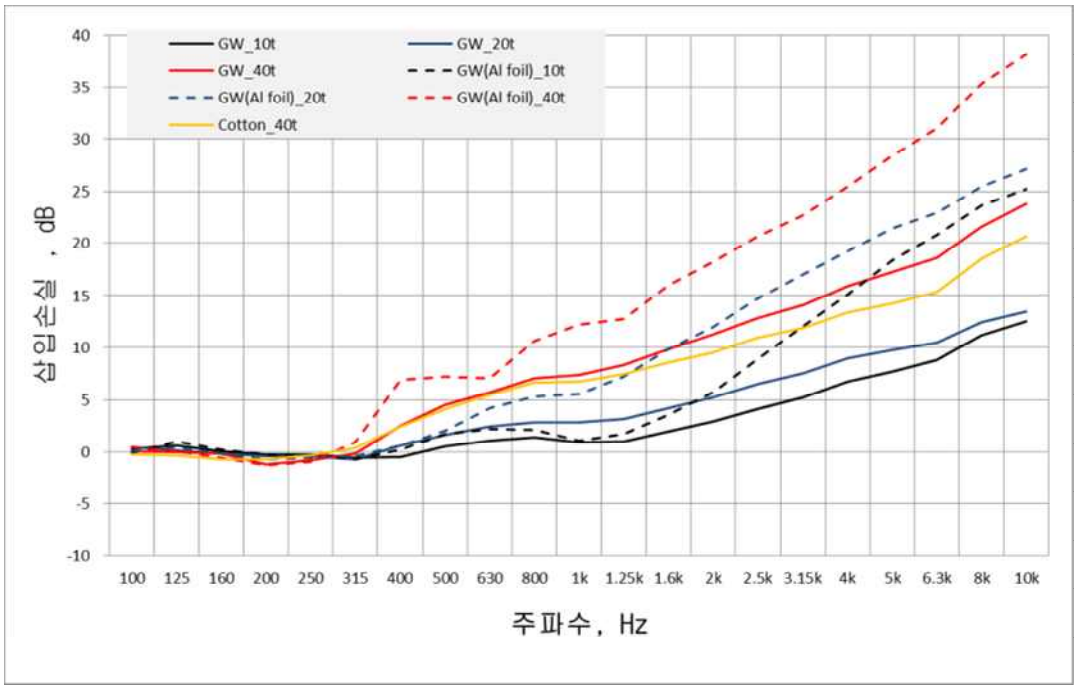
* (AL): Aluminum foil 이 단열재(GW) 주변을 감싸고 있는 조건

(나) 흡음시험 결과



[그림 3.2.111] 단열재 흡음률 시험 결과 그래프

(다) 차음시험 결과



[그림 3.2.112] 단열재 삽입손실 시험 결과 그래프

이상 측정된 단열재의 흡음률 및 삽입손실 시험 결과는 구조기인 소음 해석 모델링시 입력값으로 사용된다.

(2) 전동차 차체 (BIW, Body In White) 차량 소음/진동 측정

(가) 측정 개요

구조 기인 소음 해석 모델의 주요 입력 파라메타는 결합 손실 계수(Coupling Loss Factor) 와 내부 감쇠 계수(Damping Loss Factor) 및 모드 밀도(Modal density)이다. 이중 결합 손실 계수와 모우드 밀도는 유한 요소 해석 모델을 이용하여 추출이 가능하다. 한편 내부 감쇠 계수의 경우는 측정을 통한 방법이 필요하다. 아래 그림 3.113과 같이 전동차 차체 BIW(Body In white) 상태를 대상으로 내부 감쇠 계수 측정 시험을 수행하였다.



[그림 3.2.113] 차제 BIW 내부 감쇠 계수 측정 조건

(나) 차량 내부 감쇠계수 측정 결과

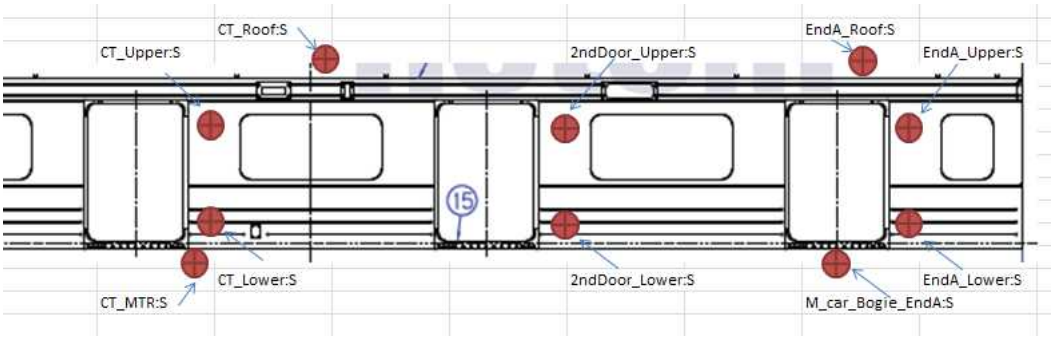
표 3.2.43. 바닥 내부 감쇠 계수 시험 결과

주파수	내부 감쇠 계수
33.0	1.64%
38.9	0.23%
49.4	0.62%
61.2	0.39%
65.2	0.69%
81.5	1.29%
94.7	0.75%
119.9	0.62%
137.8	0.71%
151.2	0.46%
207.1	0.08%
220.0	0.20%
225.8	0.24%
295.4	0.32%
295.5	0.32%

(3) 주행 중 차량 외부 소음 측정

(가) 측정 개요

자갈도상 개활지 및 터널 구간 주행중 코레일 1호선 90량 전동차의 차량 외부 소음 및 주요 부위의 진동을 측정하였다. 이 측정값은 구조 기인 소음 해석시 주행중 소음원 정보로 사용된다.



(a) 측정 위치



(b) 측정 사진

[그림 3.2.114] 차량 외부 소음 측정 위치

(나) 차량 외부 소음 측정 결과

표 3.2.44. 터널 80kph 주행중 차량 외부 소음 결과

Freq.	2nd Door_Lower	2nd Door_Upper	CT_Lower	CT_MTR	CT_Roof	CT_Upper	EndA_Lower	EndA_Roof	EndA_Upper	M_car_Bogie_EndA
100	68.5	67.0	69.1	63.9	68.1	66.8	69.0	66.7	68.6	70.3
125	72.3	73.1	73.5	72.7	73.0	76.6	72.9	71.9	72.8	79.8
160	78.6	79.1	78.9	77.5	79.0	80.3	80.9	79.1	79.3	81.4
200	83.9	83.7	84.7	80.9	84.8	85.0	83.9	83.1	83.3	88.1
250	87.2	87.5	86.8	85.5	88.4	86.9	86.5	86.9	86.8	95.5
315	91.0	91.1	90.6	89.5	91.3	91.2	90.7	88.7	91.4	98.9
400	94.4	94.4	94.4	93.5	94.7	94.7	94.8	93.2	94.2	98.9
500	95.6	95.7	95.8	94.1	94.9	95.8	95.7	95.9	95.7	102.3
630	98.4	98.4	98.2	95.8	97.3	98.5	97.9	98.6	97.8	102.8
800	102.3	102.8	102.7	99.9	102.0	102.9	102.3	102.1	102.5	103.7
1000	100.0	99.8	99.7	101.2	99.1	100.4	99.8	98.7	99.6	104.3
1250	95.5	95.5	95.6	95.5	95.4	96.3	95.2	93.6	95.1	103.3
1600	92.4	93.3	93.4	95.3	93.7	94.1	92.4	91.0	92.4	99.1
2000	87.8	89.8	89.7	91.9	90.4	91.0	88.7	87.7	88.2	97.4
2500	84.6	86.1	85.9	90.2	87.8	88.4	84.7	86.0	84.5	94.8
3150	83.7	82.9	83.1	89.3	84.9	84.8	82.8	85.3	83.2	94.8
4000	82.1	80.6	82.2	87.7	81.7	81.0	81.8	83.0	82.4	93.8
5000	79.0	78.3	79.0	85.5	78.0	78.3	77.9	78.2	78.7	90.6
6300	74.1	73.3	74.0	83.7	74.0	73.7	73.2	72.4	73.0	86.2
8000	68.0	67.2	68.2	80.0	69.1	68.3	67.9	67.6	66.8	82.1
10000	63.0	61.2	62.5	75.6	61.6	62.2	62.3	61.1	61.2	77.5

표 3.2.45. 개활지 80kph 주행중 차량 외부 소음 결과

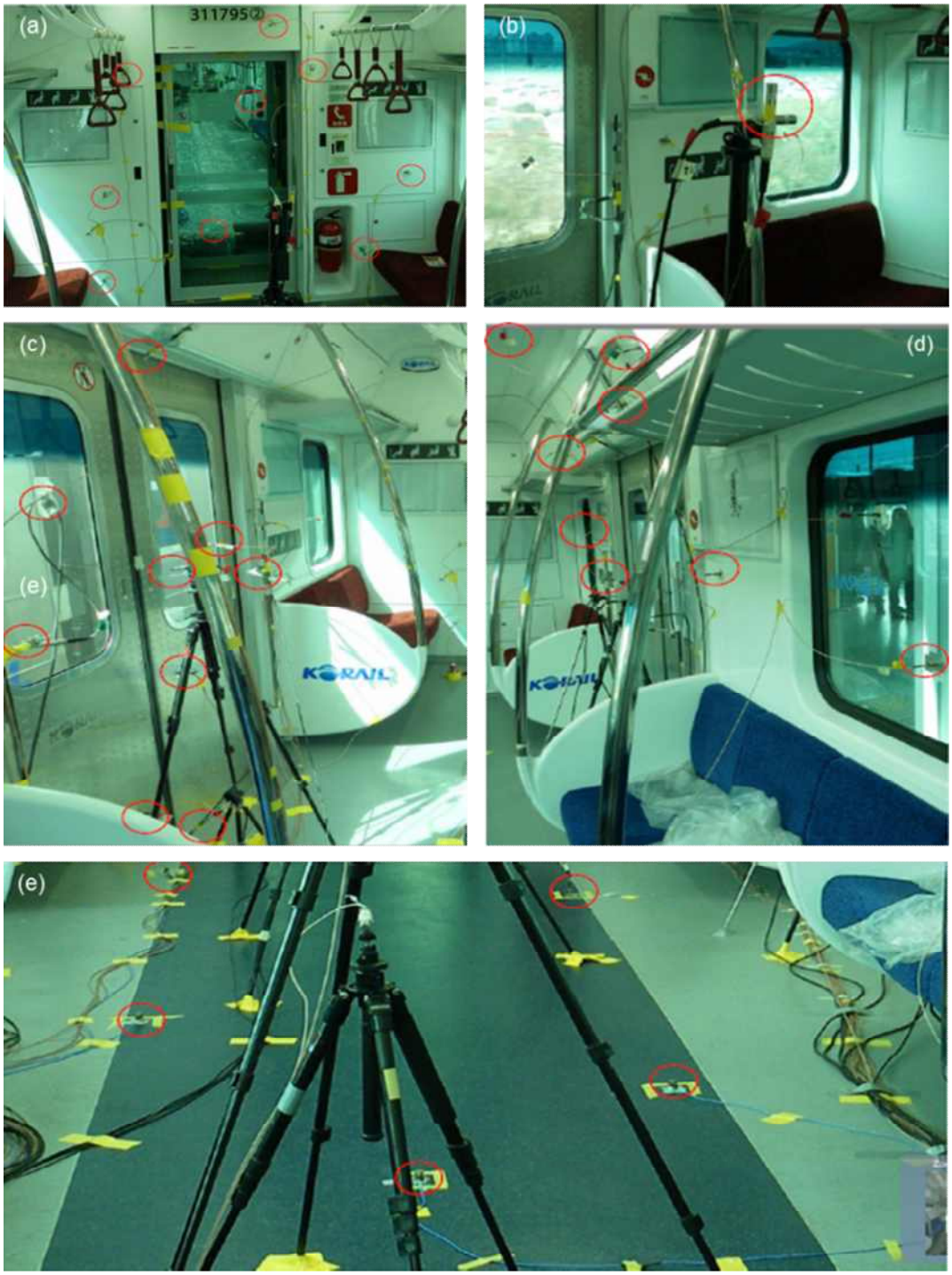
Freq.	2nd Door_Lower	2nd Door_Upper	CT_Lower	CT_MTR	CT_Roof	CT_Uppper	EndA_Lower	EndA_Roof	EndA_Uppper	M_car_Bogie_EndA
100	63.5	63.2	62.4	65.2	65.1	63.4	64.8	56.5	65.7	72.4
125	66.1	64.7	64.6	71.3	68.6	64.6	67.4	61.3	68.5	80.0
160	68.2	67.9	66.7	74.5	71.7	66.4	71.6	65.8	69.2	79.9
200	73.1	72.5	69.3	77.1	76.2	70.0	77.0	70.1	73.2	87.5
250	75.3	73.6	72.4	80.1	81.0	72.3	78.0	73.2	74.4	92.8
315	77.6	75.3	74.1	84.1	77.3	73.1	79.4	70.7	76.3	96.2
400	77.4	74.5	73.7	84.8	78.0	73.2	79.0	69.9	76.6	96.0
500	79.3	75.8	76.8	85.1	78.6	76.6	79.7	69.9	77.2	99.0
630	78.2	75.3	77.0	86.6	78.0	75.6	79.3	68.6	76.3	99.1
800	78.3	74.9	75.5	85.1	77.6	74.5	79.9	69.7	76.0	95.6
1000	78.2	75.9	75.6	89.5	77.6	74.0	80.2	69.5	77.1	98.7
1250	79.0	76.8	75.9	88.2	76.4	74.9	81.2	67.2	77.8	101.6
1600	76.3	75.0	74.4	90.3	75.9	73.6	78.3	64.6	76.2	98.3
2000	74.4	73.9	73.3	88.1	74.9	72.9	76.8	63.4	74.3	95.8
2500	73.1	72.9	72.0	86.2	71.7	72.6	74.8	61.8	72.2	93.5
3150	74.2	72.2	71.9	85.2	68.4	71.6	75.3	62.7	73.1	93.8
4000	74.2	71.6	72.1	84.4	65.3	70.0	76.0	59.1	74.2	93.0
5000	72.4	70.7	71.2	83.3	62.6	69.7	72.9	55.9	71.9	90.1
6300	69.2	67.0	69.1	82.2	59.5	67.4	68.4	52.4	66.9	86.0
8000	64.5	62.7	64.7	79.0	56.3	62.8	65.6	50.2	62.4	81.9
10000	60.6	58.6	61.0	74.8	51.2	59.4	61.3	45.7	57.7	77.6

나. 소음/진동 전달경로 분석

(1) ATPA기법을 이용한 소음/진동 전달경로 측정

(가) 전달경로 분석 계측 설정

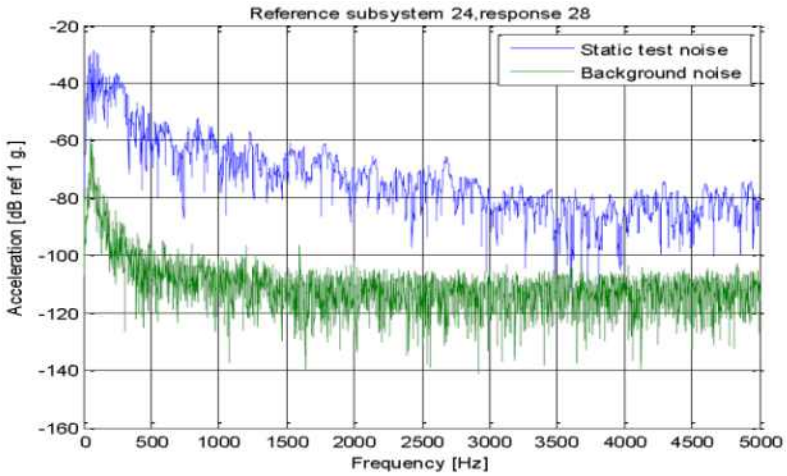
측정은 뮐러비비엠사의 PAK 장비를 사용하였고 센서는 PCB 사의 ½" ± ICP type 마이크로폰과 PCB 사의 50mV/g 감도의 ICP type 가속도계를 사용하였다. 주요 소음원에 해당하는 대차부위와 실내 바닥 및 내장판에 가속도 센서를 그림 3.115와 같이 설치하였다. 또한 누설음의 기여도 산출을 위한 출입문 주변과 목표응답점에 해당하는 객실 내부(대차 상부, H=1.6m)에 마이크로폰을 설치하였다.



[그림 3.2.115] ATAP 분석을 위한 실내 센서 취부

(나) 정적 환경의 전달률 측정

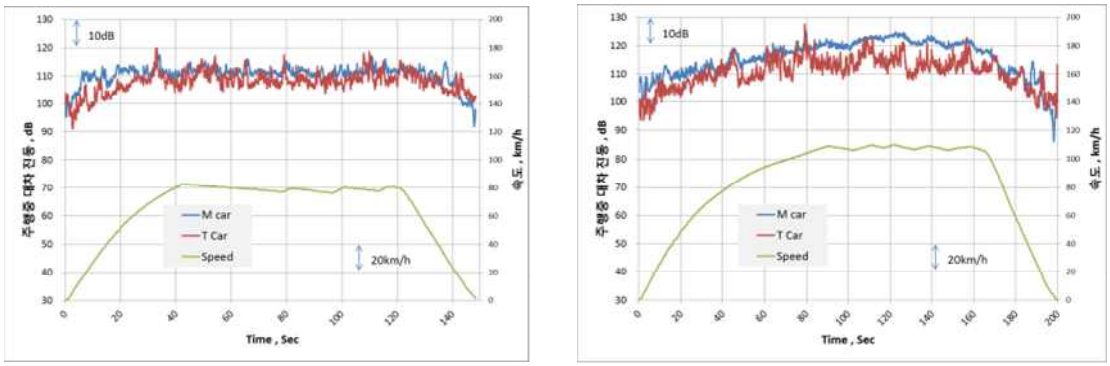
전동차가 정지된 상태, 구동장치가 모두 멈춘 상태에서 임팩트 햄머를 이용하여 응답 가속도 및 소음 레벨의 Auto power spectrum을 측정하여 전달률을 얻을 수 있었다. 배경 소음 및 진동의 영향을 최대한 배제하기 위해 야간에 측정을 수행하였으며, 임팩트 햄머가 차량에 충분한 가진량을 확보하였는지 확인하기 위해 임팩트 가진 전후의 주파수 응답 전달률을 비교하였다. 그 결과 그림 3.116과 같이 전 주파수 대역 신호대잡음비를 통해 주파수 응답 전달률이 배경 소음에 영향이 없음을 확인하였다.



[그림 3.2.116] S/N 비 확인을 통한 배경 소음 영향 분석

(다) 주행중 진동 응답 측정

전동차량이 병점-천안 구간을 80km/h 및 110km/h 주행시 진동 응답 신호를 측정하였다. 견인전동기와 구동기어의 영향을 확인하기 위해 동력 대차(Motorized Car)와 부수 대차(Trailer Car)의 센터 피봇 위치에서 진동을 측정하였다. 동력 대차의 진동은 차륜-레일 진동 영향 외에도 견인전동기와 구동기어 등 주행 장치에 의한 진동 영향을 받게 된다. 한편 부수 대차에는 주행 장치가 없기 때문에 진동은 차륜-레일의 접촉시 발생하는 진동이 지배적이다. 따라서, 그림 3.117와 같이 견인전동기와 구동기어에서 발생하여 센터 피봇에 전달되는 진동은 차륜-레일의 진동 대비 80km/h 주행시에는 2dB, 110km/h 주행시에는 평균 7dB 크게 나타남을 확인할 수 있다.

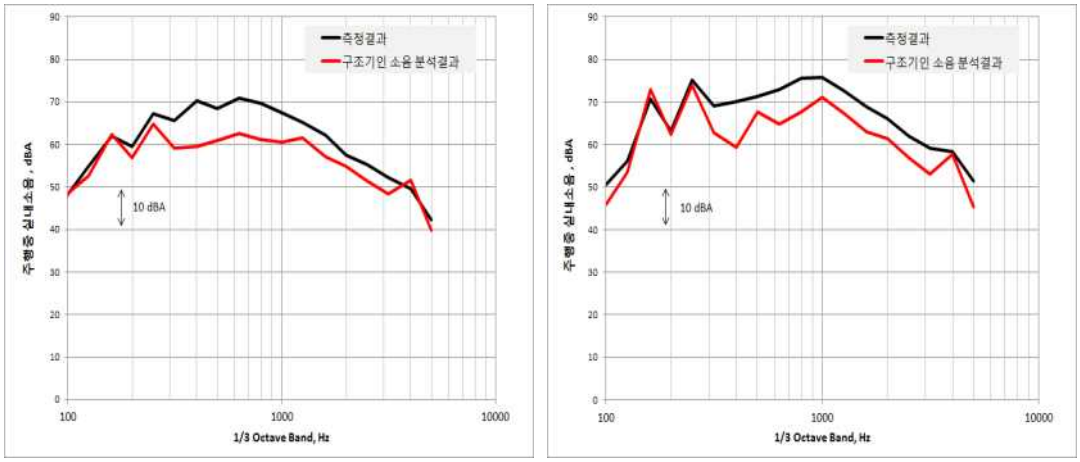


[그림 3.2.117] 속도별 동력 대차와 부수 대차 센터 피봇 수직 진동 크기 비교
(좌: 80km/h 개활지 주행시, 우: 110km/h 개활지 주행시)

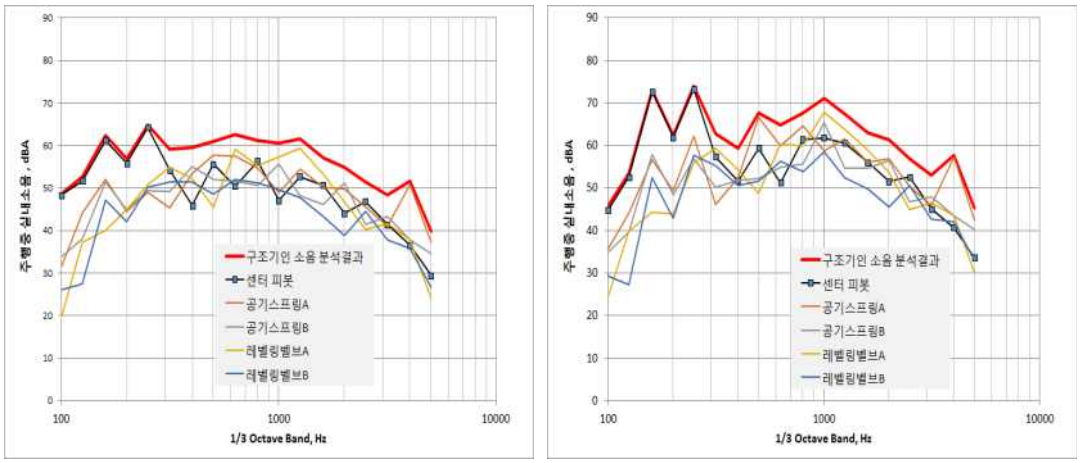
(라) 소음/진동 전달경로 분석

① 구조 기인 소음 분석

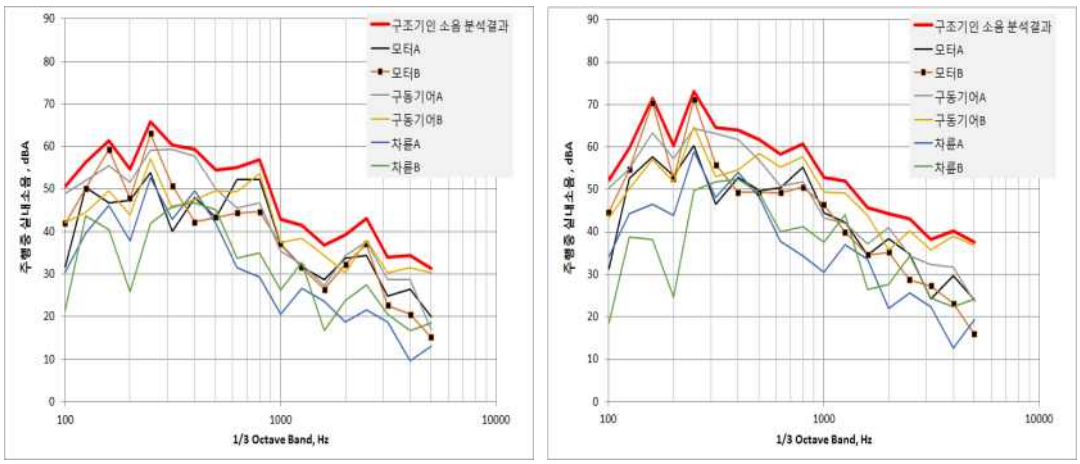
정차중 전달률과 주행중 진동 응답 측정 결과를 이용하여 주요 소음 전달 경로를 분석하였다. 대차를 전달경로로 하여 실내에 전달되는 구조기인 소음의 경향을 그림 3.118-120와 같이 두 가지 속도에서 비교하였다. 비교 결과 300Hz 미만에서는 구조기인 소음의 영향이 대부분이며 300Hz 이상에서는 구조기인 보다는 공기기인 소음의 영향이 크게 나타나는 것을 확인하였다.



[그림 3.2.118] 구조기인 소음 영향 분석 (좌:80km/h, 우:110km/h)



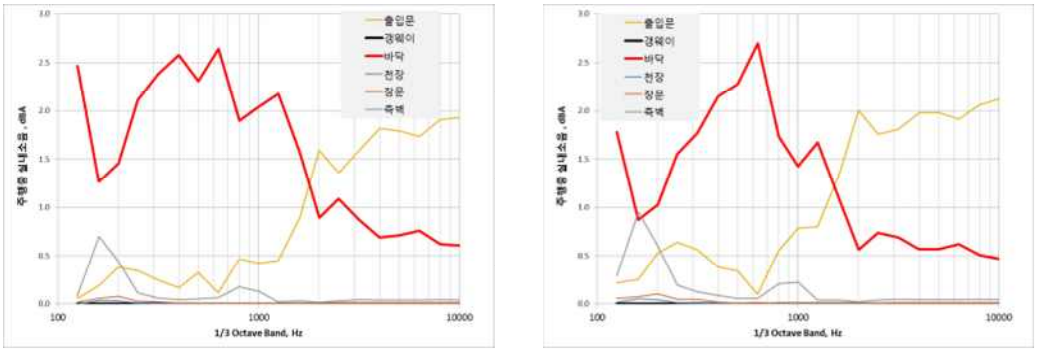
[그림 3.2.119] 구조기인 소음 전달 경로 분석 (좌:80km/h, 우:110km/h)



[그림 3.2.120] 구조기인 진동원 분석(좌:80km/h, 우:110km/h)

② 판넬 기여도 분석

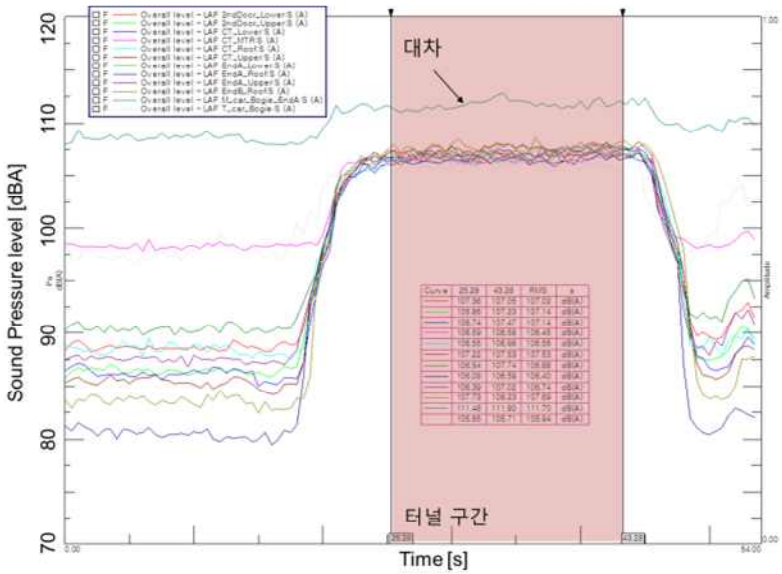
대차에서 발생한 소음과 진동은 주요한 대차-차체 전달 경로를 통해 차체 내부 판넬을 통해 실내로 전달되게 된다. 각 부위별로 측정한 주행중 주파수 응답신호와 전달 함수를 이용하여 판넬 기여도 분석을 수행하였다. 속도에 따라 크기의 차이는 있으나 전반적으로 바닥과 출입문 누설음의 영향이 지배적임을 확인 할 수 있다.



[그림 3.2.121] 판넬 기여도 분석(좌:80km/h, 우:110km/h)

③ 개선안 도출을 위한 소음원 분석

그림 3.122와 같이 터널 주행시 차량 주변 외부소음(대차, 도어, 천장 등)을 개별적으로 측정한 결과 대차 부위를 제외한 차량 주변의 소음이 비슷한 수준의 레벨로 수렴하게 된다. 이는 터널 내부 주행시 외부에서 발생하는 공기기인 소음은 확산음장(Diffuse field)과 유사하게 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 터널 주행시 차량 외부 공기기인 소음 증가량이 대차부위의 소음 증가량 대비 크게 나타나게 된다. 따라서 터널 주행시 공기기인 소음을 저감하기 위해서는 바닥 구조 개선뿐만 아니라 출입문의 차음성능 개선이 효과적일 것으로 예상할 수 있다. 또한 구조기인 소음의 측면에서는 견인전동기와 구동모터의 소음/진동 저감이 효과적인 개선 방안임을 예상할 수 있다.



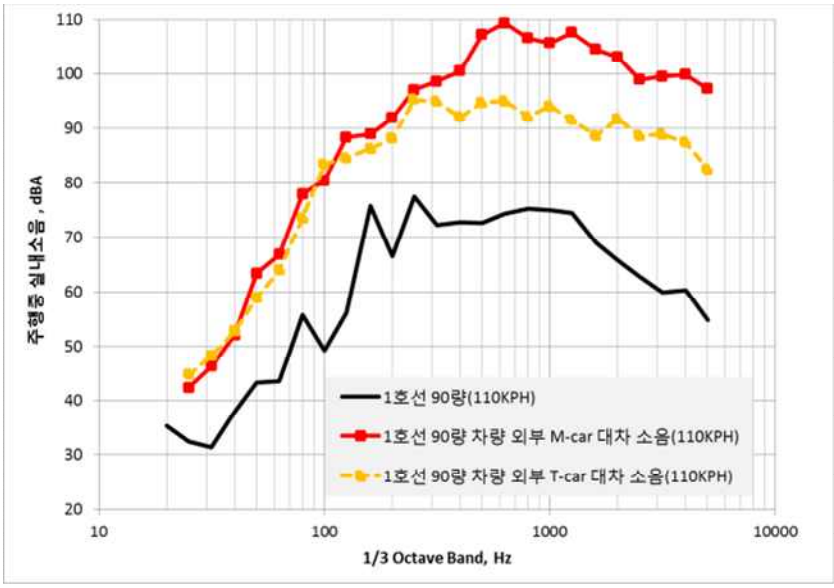
[그림 3.2.122] 터널 진입시 차량 외부 소음 경향(80km/h)

(2) 110km/h 주행시 소음 기여도 분석

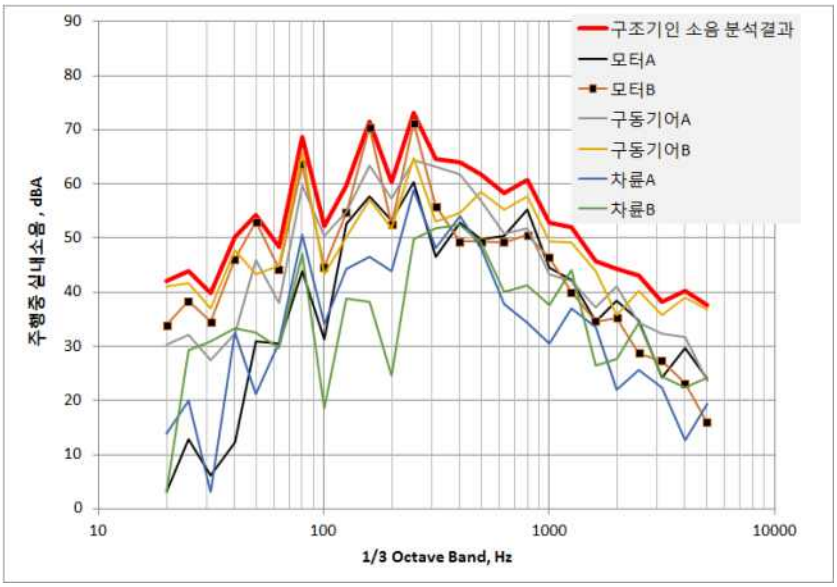
(가) 전동차 대차 소음원 기여도 분석

110km/h 터널주행이 가능한 코레일 전동차 성남여주선의 동력대차와 부수대차의 실내소음 측정결과를 통해 차륜/레일의 영향과 모터 및 구동기어의 공기 기인 소음 영향을 구분하였다. 시험조건은 110km/h 속도로 개활지 주행 조건이다. 그림 3.123와 같이 측정치 분석 결과 모터 및 구동기어에 의한 소음 증가 영향은 주로 300Hz 이상에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 한편 대차 소음원에 대한 구조기인 소음원의 분석 결과는 그림 3.124과 같다. 모터에 의한 소음이 80/160/240Hz에서 크게 나타나며 이는 110km/h 주행시 모터의 회전 rpm인 4800rpm의 1차, 2차 3

차 성분 주파수의 영향임을 확인 할 수 있다.



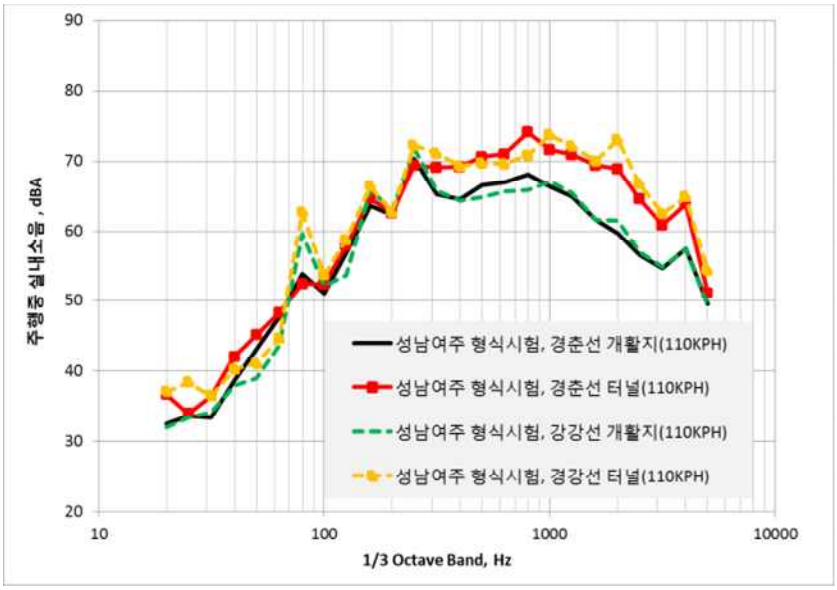
[그림 3.2.123] 110km/h 주행지 대차 소음/진동 소음원 분석



[그림 3.2.124] 110km/h 주행시 동력 대차 소음원 분석 결과

(나) 개활지/터널 구간의 소음 기여도 분석

개활지 구간과 터널 구간 주행시 소음 비교 결과는 그림 3.125와 같다. 터널 진입시 소음 증가의 영향은 주로 300Hz 이상에서 나타나고 있으며 이는 대차로부터 기인되는 구조기인 소음의 영향이 아닌 공기기인 소음의 영향으로 판단된다.



[그림 3.2.125] 110km/h 주행시 개활지/터널 구간 소음 비교

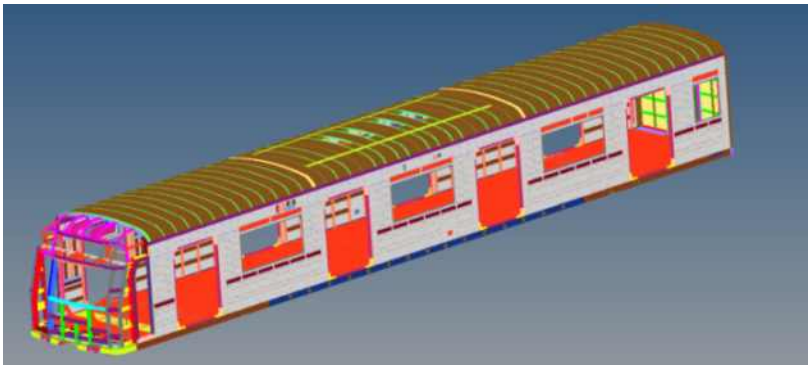
다. 구조기인 소음 해석 모델링

(1) 해석 모델링 방법

본 과제에서는 소음을 개선한 부품을 실제 차량에 적용하여 제작할 수 없다. 따라서 신뢰 가능한 구조 해석 모델(FE model)을 이용하여 실제 차량 없이 소음 해석이 가능한 Hybrid FE-SEA 방법을 적용하는 것이 타당하다. 구조기인 소음 해석을 위한 Hybrid FE-SEA 방법은 통계적 에너지 방법(SEA)의 예측 신뢰성을 향상 및 해석 주파수 범위 확장하고, 구조 해석 모델을 사용하여 구조물의 mode in band, Damping Loss Factor, Coupling Loss Factor 예측 및 모델에 입력 후 해석 수행한다.

(2) FE 모델 구축

Hybrid FE-SEA 해석을 위해 소음/진동 해석을 위한 대상인 Korail 일반형 전동차의 FE(Finite Element) 모델 구성이 필요하다. 또한 관심 주파수 대역인 100~1000Hz 대역의 소음/진동을 해석하기 위해서는 충분히 작은 요소(Element)가 필요하다. 한편 작은 해석 격자를 이용하여 모델을 구성하면 전체 모델 사이즈가 커지게 되어 해석에 소요되는 시간이 급증하게 된다. 전동차 구조기인 해석을 위해 요소(Element) 크기가 10mm인 모델은 그림 3.126과 같다. 모델의 해석 신뢰성은 차량 골조를 대상으로 진동 응답 시험을 수행하여 검증하였다.



[그림 3.2.126] Korail 일반형 전동차 FE 모델

(3) FE-SEA 모델링

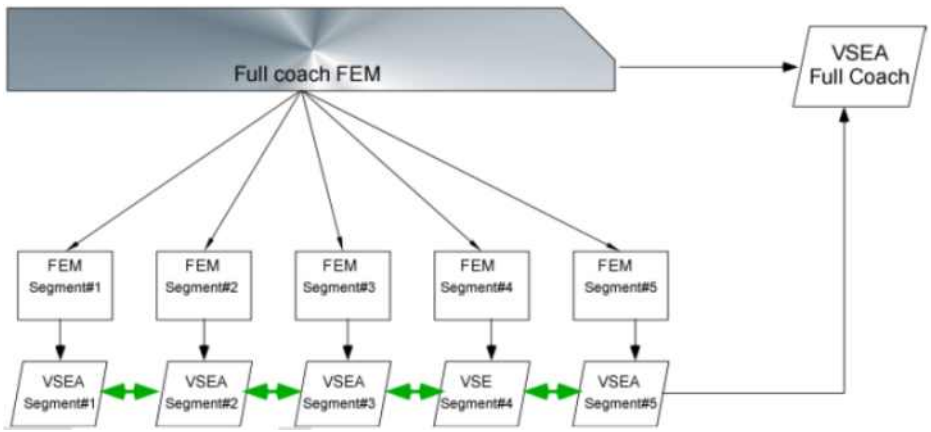
(가) FE-SEA(VSEA) 모델링 방안

해석 대상인 전동차의 크기가 매우 큰 관계로 FEM을 이용한 소음해석은 주파수 범위에 있어 매우 제한적인 반면에 차체 구조물의 높은 모달 밀도와 낮은 감쇠율로 인해 중주파수와 고주파수 해석에 있어서 FEM에 비해 SEA 방법이 유용하다. 반면에 동적 거동에 관련된 복잡성은 해석 주파수가 감소할수록 실제 차량의 구조에 많은 영향을 받으며, 중주파수에 이르기까지 FEM이 더 나은 평가 방법이다. 따라서 철도차량의 소음 해석에 있어서 중주파수에서 고주파수까지 원활한 해석을 수행하기 위해 FE와 SEA 해석 입력 정보를 동일 해석 모델에 적용하는 FE-SEA 해석 모델을 생성하고자 한다.

해석을 위해 요구되는 입력 인자는 다음과 같다.

- 소음, 진동원의 위치 및 크기
- 구속 및 경계조건
- 서브 시스템간의 기계적 연결
- 동적 해석 파라미터(재질, 감쇠율 등)

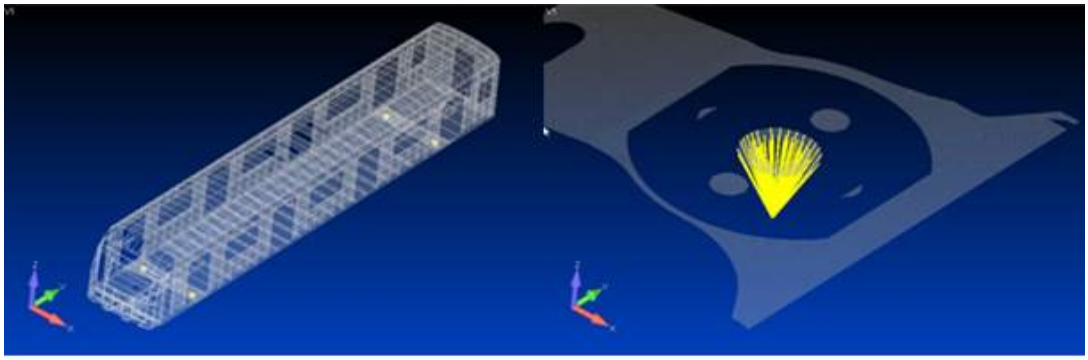
FEM을 이용한 차량 해석 시 요구되는 컴퓨팅 파워와 시간을 줄이기 위해서 그림 3.127과 같이 차량을 5개의 서브 모델(세그먼트)로 분할하여 각 세그먼트별 해석 모델을 생성하고 취합하여 통합 해석 모델을 생성한다.



[그림 3.2.127] VSEA 차량 모델 해석 방안

(나) BIW-FEM 모델링

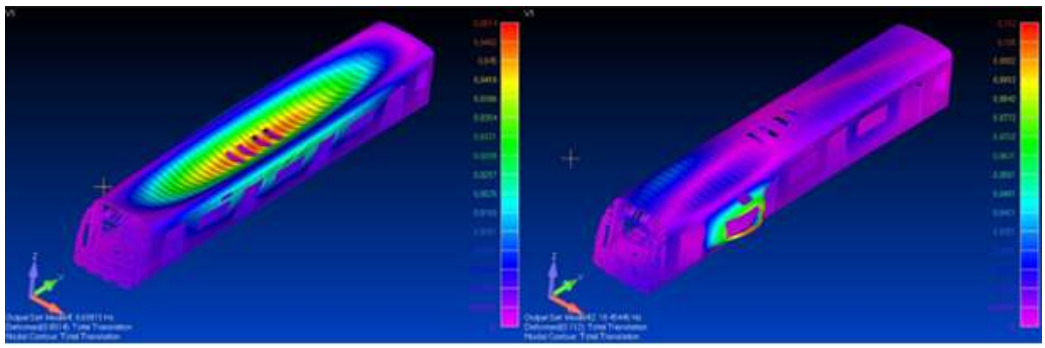
차량 골조 상태(BIW)에 대한 FEM 해석 모델은 그림 3.128과 같다. 차량 1량에 대한 해석 격자 크기는 10㎜로 약 3백만개의 노드와 격자가 생성되었으며, 차체와 대차를 연결하는 볼스터 위치에 구속조건을 부여한다.



[그림 3.2.128] 차량 FEM 해석 격자 생성

① Global mode 해석 결과

그림 3.129의 FEM 모델을 이용한 차량 BIW에 대한 모드 해석 결과로 8.7Hz의 굽힘모드에서부터 비틀림모드까지 글로벌 모드는 18Hz이내에 나타나며, 18Hz 이상에서는 로컬 모드가 나타난다. 그림 3.129의 좌측은 지붕의 굽힘 모드이며, 우측은 측벽의 창문 위치에서 발생하는 로컬모드를 보여준다.

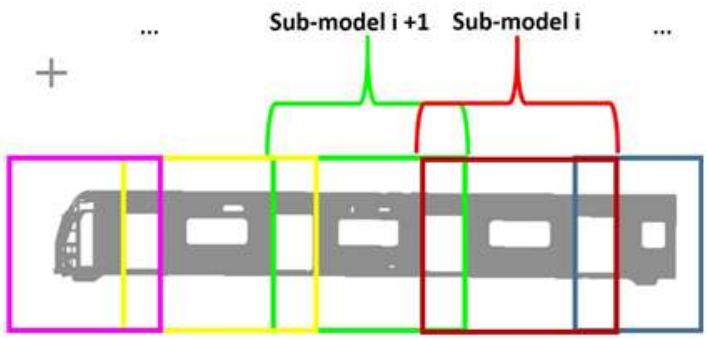


[그림 3.2.129] 차량 모드 해석 결과(좌: 8.7Hz(7차), 우: 18.5Hz(12차))

② Local mode 해석 방안

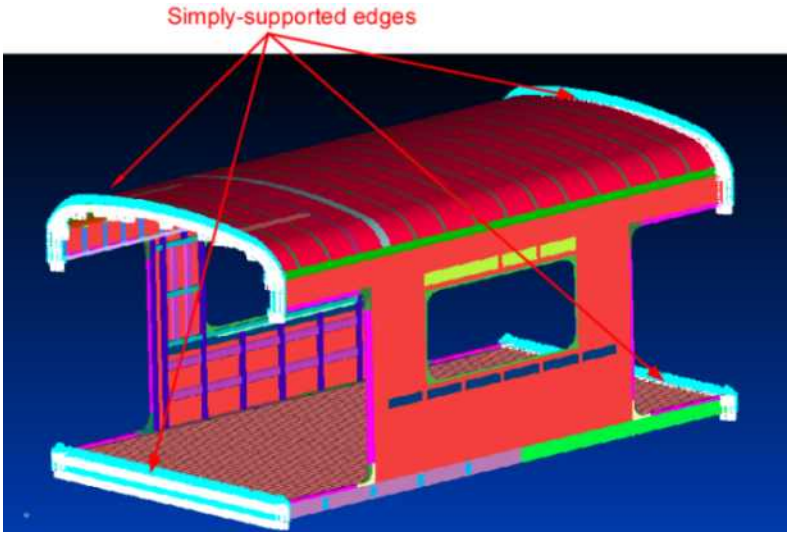
20Hz 이상의 FEM 해석을 위해서 그림 3.130와 같이 차량을 5개의 서브 모델(세그먼트)로 분리하고, 각각의 서브 모델을 통합하여 차량 전체 모델을 만들기 위해 서브 모델이 중첩되게 구성한다.

- 세그먼트#1 : 차량 후위(파란박스)
- 세그먼트#2~#4 : 차량 중앙 3개소(빨강, 녹색, 노랑박스)
- 세그먼트#5 : 차량 전위(보라박스)



[그림 3.2.130] 5개의 FEM 서브모델(세그먼트) 구성

각각의 세그먼트는 약 80만개의 노드와 42만개의 DOF를 가지고 있으며, 그림 3.131과 같이 절단면은 단순지지보의 경계조건을 가진다.



[그림 3.2.131] 세그먼트#2의 FEM 모델

③ Reference nodes 구성

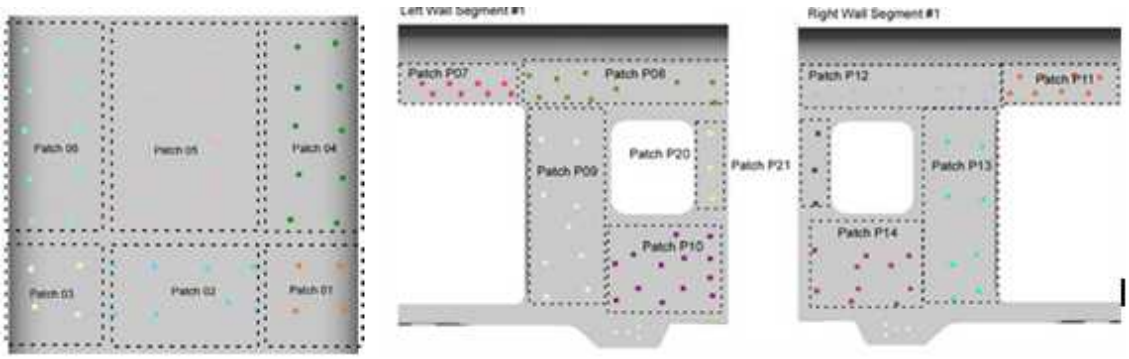
전체 차량 모델의 리퍼런스 노드는 1,639개로 맵핑되며, 이는 향후 각 리퍼런스 노드들에 대한 콤플렉스 FRF 계산을 위한 그리드로 정의된다. 각각의 노드들은 힘이 가해지는 리퍼런스 노드와 FRF 응답 노드로 구성된다.

(다) Virtual SEA 모델링(세그먼트#1)

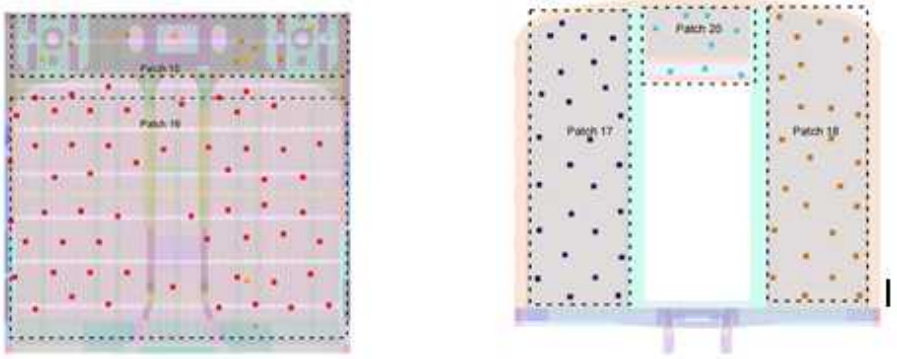
① Patch법을 이용한 VSEA 모델

FRF의 평균 전달함수 계산을 위해서는 각 노들들은 세그먼트 안에서 그룹핑되어야 하며, 이를 패치라고 한다. SEA 계산을 위해 여러 서브시스템들은 약하게 커플링 되어야 한다. 초기 패치 방법은 시스템의 복잡함에 의존하지 않으며 주파수 범위에 영향을 받는다. 그림 3.132에서는 리퍼런스 노드들을 색상으로 그룹핑하여 21개의 패치로 정의하였다.

- 지붕 : 6개 패치
- 좌.우 측벽 : 각 5개 패치
- 바닥 : 2개 패치
- 후면벽 : 3개 패치



(a) 지붕 패치 (b) 측벽 패치



(c) 바닥 패치 (d) 후면벽 패치

[그림 3.2.132] 세그먼트#1 패치

② 효과적인 서브시스템 구성

서브시스템에서 패치들을 조직적으로 구성하는 것은 매우 중요하다. 각 주파수 밴드별 최적의 패치 및 서브시스템의 구성과 입력 FRF에 대한 SEA loss factor의 최소 오차로 효과적인 패치의 구성을 확인할 수 있다. 이러한 손실 행렬은 약하게 결합된 서브시스템의 주요 패치 영역에 대해 각 주파수 밴드별로 계산된다. 패치 구성의 효과적인 구성은 초기 설정된 FRF 행렬과 손실 행렬로부터 재구성된 행렬과의 오차율로 평가된다.

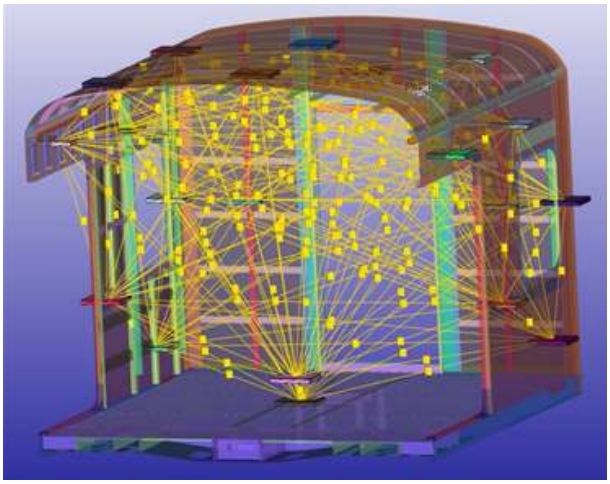
③ Multi-Scaled Virtual SEA(MS-VSEA)모델

서브시스템의 구성 이후, MS-VSEA 모델을 생성한다. 그림 3.133은 세그먼트#1에 대한 MS-VSEA 모델을 나타내며, 이 단계에서는 각 서브시스템에 크기(폭, 너비), 재질 및 감쇠율 등의 추가적인 정보를 입력한다.

VSEA 모델을 고주파 대역까지 확장하거나 음향 캐비티, 플레이트, 쉘등의 특정 SEA 서브시스템이 추가되어야 한다.

④ Coupling Loss Factors

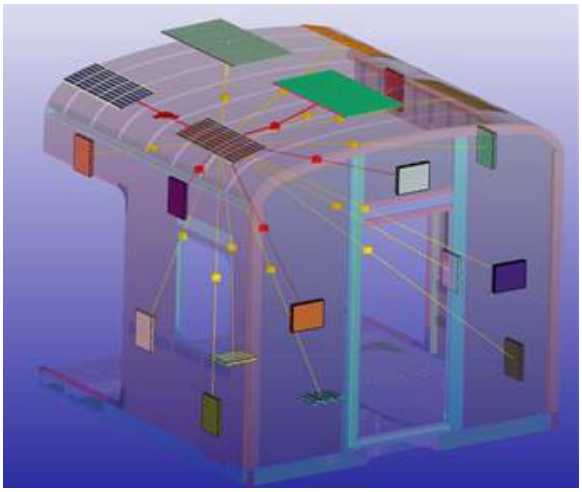
서브시스템들은 결합 시 별도의 가정 없이 그림 3.133과 같이 모든 서브시스템에 대해서 교차 결합으로 구성된다.



[그림 3.2.133] 세그먼트#1의 연성손실계수

그림 3.134와 같이 모든 서브시스템에 대한 연성손실계수(Coupling Loss Factor)에 대해서 직접 연성손실계수(Direct CLF)와 간접 연성손실계수(Indirect CLF)의 구분한다. 간접 연성손실계수는 고주파 영역으로 갈수록 점증적으로 감소한다. 직접 연성손실계수는 파동이론으로부터 계산되며 인접 모델에 대해 선으로 연결을 표현한다. 그림 3.134와 같이 직접 연성손실계수는 적색

선과 정션으로 표시되며, 간접 연성손실계수는 황색으로 표시된다.



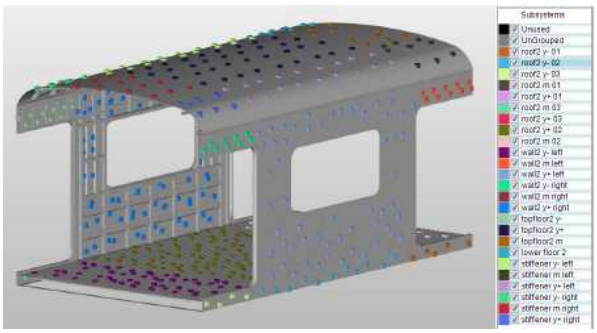
[그림 3.2.134] 직접 연성손실계수와 간접 연성손실계수

(라) 각 세그먼트별 virtual SEA 모델링

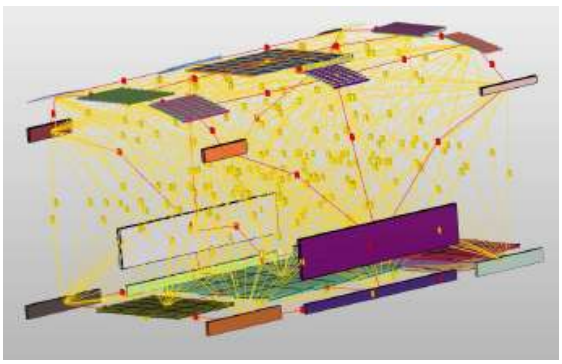
① 세그먼트#2

세그먼트#2에 대한 패치 분할한 상태가 그림 3.135와 같으며, 1123Hz까지 622개의 노드들에 대해 9201개의 모드들이 있다. 또한 패치들은 주파수 밴드별로 다르게 그룹핑된다.

- 100Hz 대역(1/3옥타브) : 7개의 서브시스템
- 250Hz 대역(1/3옥타브) : 9개의 서브시스템
- 500Hz 대역(1/3옥타브) : 15개의 서브시스템
- 1000Hz 대역(1/3옥타브) : 14개의 서브시스템

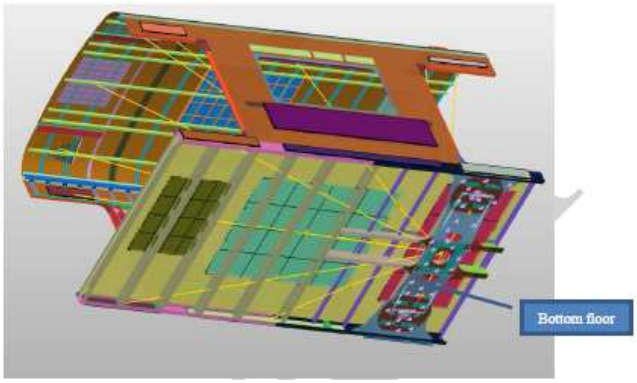


[그림 3.2.135] 세그먼트#2에 대한 패치 분할

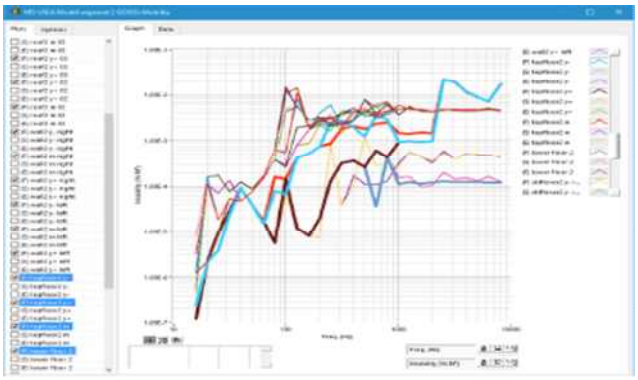


[그림 3.2.136] 세그먼트#2의 MS-virtual SEA 모델링

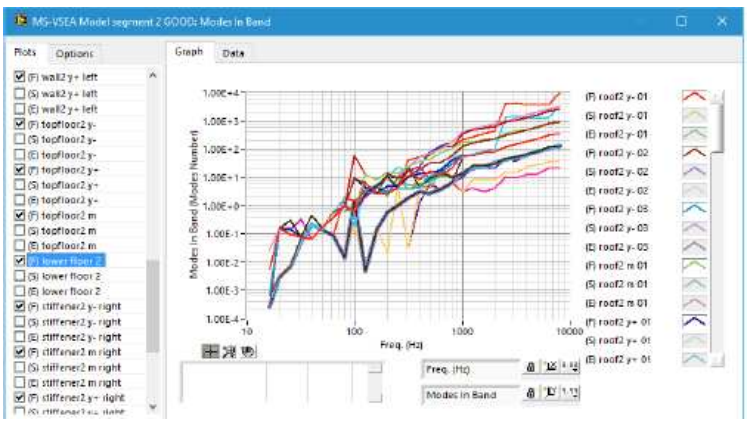
세그먼트#2 모델은 그림 3.137과 바닥 하부에 위치한 대차 지지구조물을 고려하였으며, 드라이빙 포인트의 모빌리티는 그림 3.138과 같다. 그림 3.139는 1/3 옥타브 밴드별 모드 넘버를 나타내며, 200Hz이상에서 모든 서브시스템의 모드 넘버는 1이상이 된다.



[그림 3.2.137] 세그먼트#2의 바닥 모델링



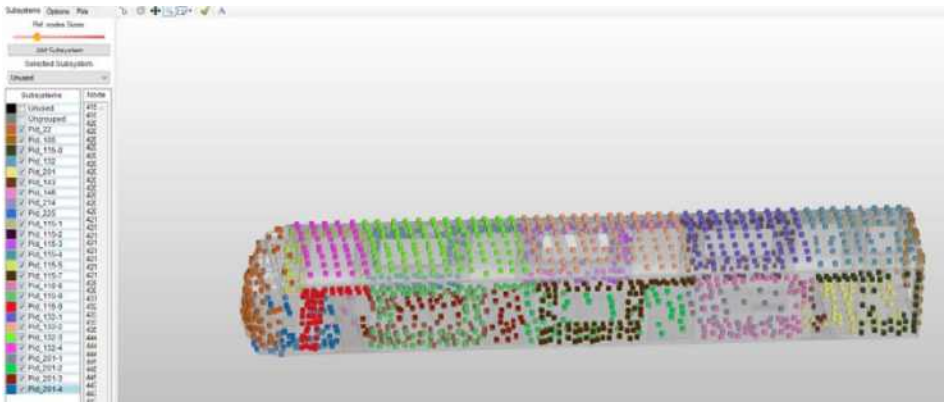
[그림 3.2.138] 세그먼트#2의 드라이이빙 포인트 모빌리티



[그림 3.2.139] 세그먼트#2의 서브시스템에 대한 1/3옥타브 대역별 모드 넘버

(마) 전체 차량 모델(Full Coach, FC) 검토(300Hz)

세그먼트#1~#5로 각각 모델링한 후 전체 취합한 차량 1량에 대한 SEA 모델은 그림 3.144와 같이 26개의 서브시스템으로 구성된다.

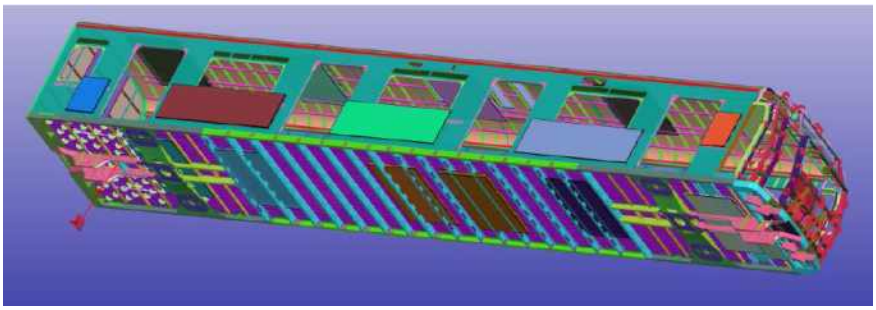


[그림 3.2.140] 차량 1량의 서브시스템 구성

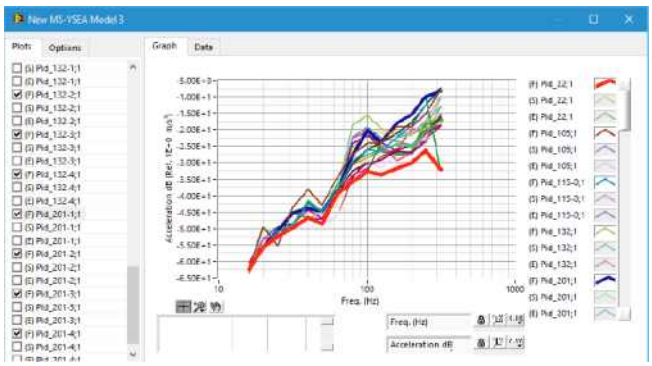
VSEA 모델은 글로벌 댐핑 1%를 적용하여 생성한다. MS-VSEA 패치 방법을 적용하여 250Hz 이하의 저주파 대역에서 17개의 서브시스템은 100Hz 대역에서 15개로 그룹핑된다. 전체 구성된 차량 모델은 S/S 성능지수는 2dB 이내이다. 26개의 서브시스템에 대한 모달 밀도는 천정의 두께가 작기 때문에 높은 모달 밀도를 나타낸다. 차량 모델에 대한 FEM 모드를 300Hz까지 적용하였기 때문에 모달 밀도는 중심주파수 315Hz에서 급격히 떨어진다.

SEA FRF의 동적범위를 확인하기 위하여 그림 3.141과 같이 차량 후위 하부에 힘을 가진할 때, 모든 서브시스템의 가속도 응답은 그림 3.142과 같다. 200Hz 이상에서 전두부와 후위 바닥의 최대 동적 범위는 15~20dB 정도이다.

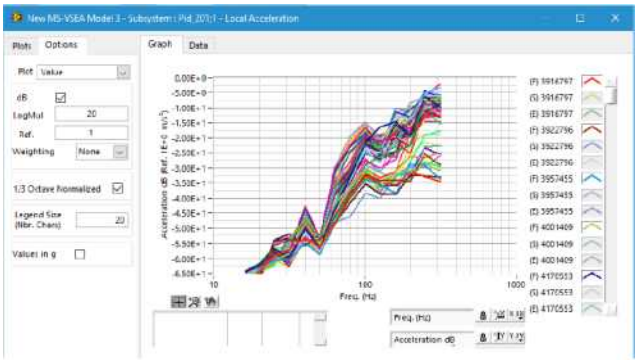
바닥 자체의 비대칭성의 영향을 살펴보기 위해 통계적에너지법에 따른 진동 전달량을 확인한 결과 각 노드들의 가속도 응답은 그림 3.143과 같이 매우 다양한 산포를 가진다.



[그림 3.2.141] 후위 바닥 하부 가진



[그림 3.2.142] 후위 바닥 가진에 따른 26개 패치의 가속도 응답



[그림 3.2.143] 후위 바닥 가진에 따른 바닥 노드들에 대한 가속도 응답

(바) 5개 세그먼트 조합 모델(Assembling Coach, AC) 검토(8kHz)

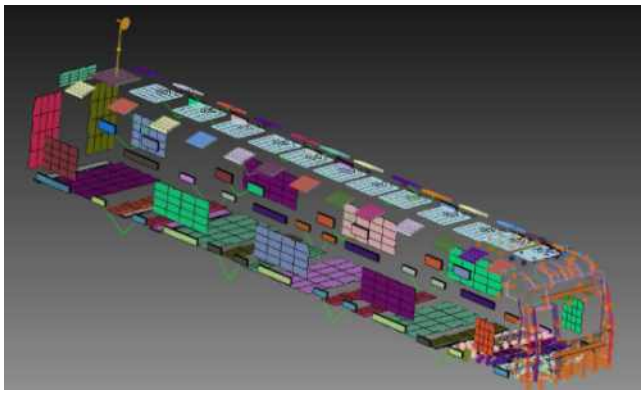
차량 해석 모델 생성을 위해 1차적으로 모델링된 5개의 세그먼트들은 중복되는 서브시스템 영역을 연결하여 하나의 통합 모델로 만든다. 인접한 세그먼트들의 중복된 영역은 그림 3.144와 같이 녹색선의 General Energy Constraint connector(GEC)로 연결된다. GEC를 통하여 동일 영역의

세그먼트들간의 모달 에너지가 전달되며, 물성치 입력의 중복을 피하게 된다.

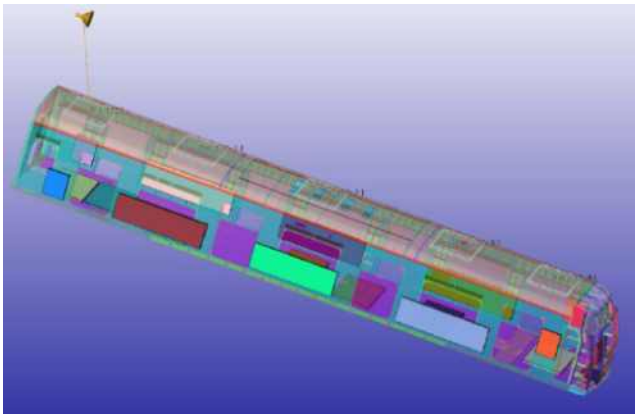
전두부 형상의 세그먼트#5는 세그먼트중 가장 복잡한 모델이므로, 형상정보와 노드 정보를 유지할 수 있도록 기본 모델로 하여 나머지 세그먼트들을 취합한다. 이 때 중복되는 서브시스템에 GEC 컨넥터를 적용한다.

연결의 일관성을 위해 FE 모델을 이용한 300Hz FC 모델과 새로 생성되는 차량 모델을 비교한다. 새로운 차량 모델의 거리별 에너지 전달성능은 어느 서브시스템에 단일 파워를 가진하고, 다른 서브시스템의 전달된 에너지를 그패프로 도시하여 확인한다. 300Hz FC 모델과 서브시스템의 에너지 응답을 비교함으로써 음원으로부터 거리에 따른 레벨의 유사성을 확인 가능하다.

그림 3.144에서 8kHz AC 모델에 대한 가진 위치를 나타내며, 그림 3.145에서는 300Hz FC 모델에 대한 가진 위치를 나타낸다. 천정 서브시스템의 크기 차이로 인하여 FC 모델과 AC 모델의 차이가 발생하나, 동적 거동은 유사한 경향을 나타낸다. 이러한 특성은 100Hz 미만에서FC 모델의 서브시스템의 크기가 AC 모델보다 약 4배 크기 때문에 에너지 또한 2~4배 크게 나타남으로써 확인할 수 있다. 반면에 다른 서브시스템의 에너지는 유사하다. 그림 3.146과 같이 FC 모델에서 천정부의 가속도 응답이 조금 더 중요할 수 있으나, 100Hz 이상에서는 두 모델의 특성이 유사함을 알 수 있다.

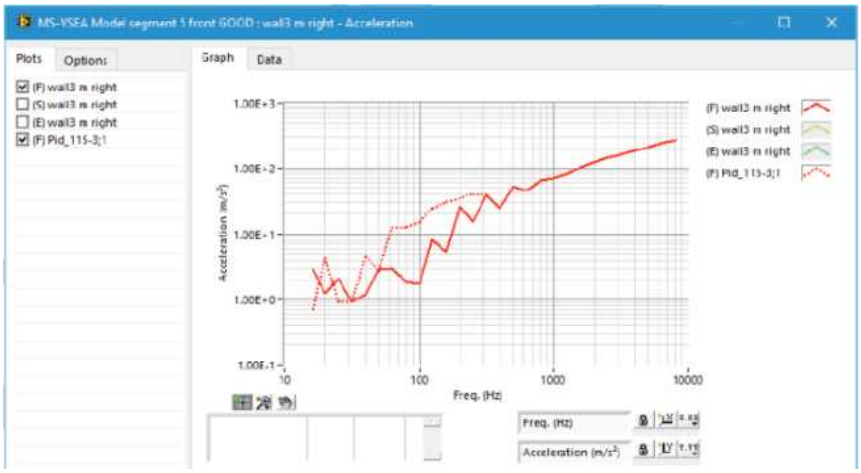


[그림 3.2.144] 천정 외부 단일 파워 가진(8kHz AC 모델)



[그림 3.2.145] 천정 외부 단일 파워 가진(300Hz FC 모델)

측벽 가진 시, FC 모델과 AC 모델은 유사한 가속도 레벨을 보인다. 또한 그림 3.150과 같이 천정의 서브시스템의 가속도 레벨도 두 모델이 매우 유사하다. 측벽 가진 시, FC 모델의 진동이 크게 나타나지만, 200Hz 이상에서 두 모델의 진동 레벨은 유사한 경향을 보인다.



[그림 3.2.146] 측벽 중앙 가진 시, 측벽 가속도 응답(점선:FC모델, 실선:AC모델)

라. 측정 결과 비교를 통한 해석모델 검증

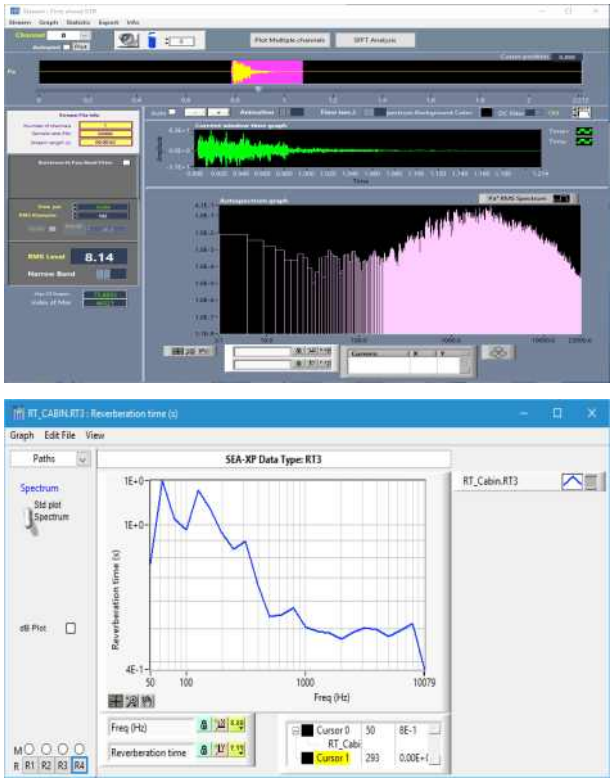
(1) 해석 모델 타당성 보완 및 검증

(가) 실내 공간(Cavity) 내부손실계수(DLF) 보완

FE-SEA 해석 모델의 실내 공간(Cavity)의 흡음률은 실내에 노출되는 각 부위의 흡음률과 면적에 의해 결정된다. 의자를 제외한 금속에 의해 노출되어 있어 실제 실내 공간의 흡음률을 예측하기 어렵다. 따라서 실제 차량의 실내 잔향시간을 측정하여 이 결과를 해석 모델의 입력치로 사용하였다. 잔향시간 측정을 위해 전동차 내부에 마이크로폰을 설치하였다. 화약총을 이용하여 충격음을 발생시켜 음압레벨이 60dBA 감쇠되는 잔향시간을 측정하였다. 측정한 잔향시간 결과는 그림 3.148과 같으며, 전동차 내부 용적을 고려하여 표 3.46과 같이 내부 평균 흡음계수를 도출하였다.



[그림 3.2.147] 객실 내부 잔향시간 측정을 위한 센서 취부



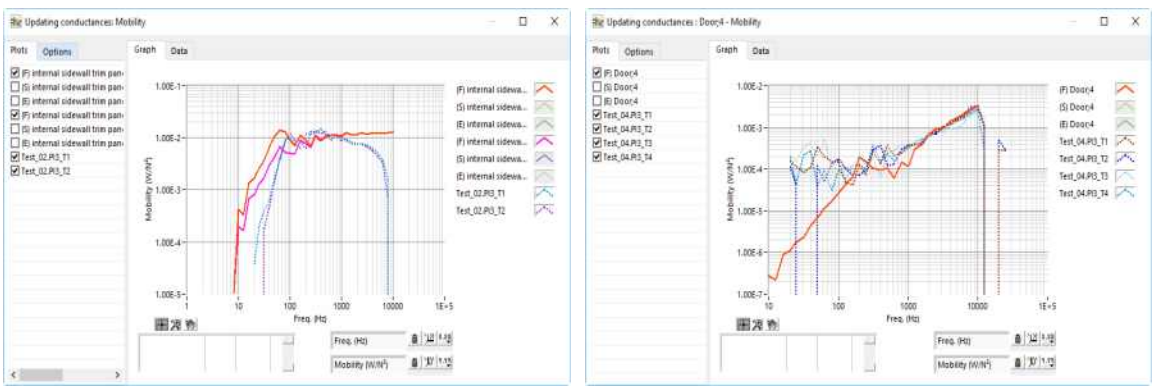
[그림 3.2.148] 객실내부 잔향시간 측정 결과

표 3.2,46 객실내부 평균 흡음계수 계산 및 해석 모델 입력치

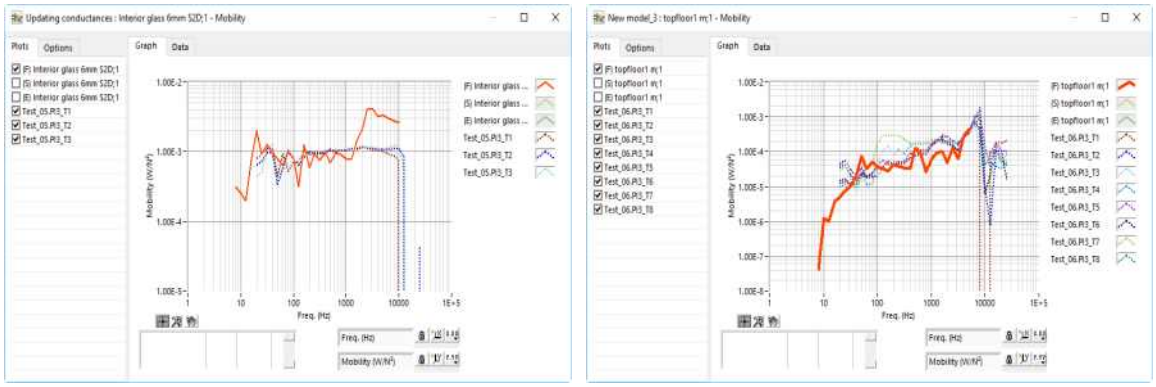
Hz	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
α	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	0.13	0.16	0.16	0.15	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17

(나) Driving point mobility 검증

FE-SEA 해석 모델의 각 서브시스템의 모델 검증을 위해 각 구동점에 대한 mobility를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 측벽/창문/측출입문/바닥에 대해 구동점에 가속도 센서 취부 후 동일 부위 가진을 통해 전달함수(mobility)를 측정하였다. FE-SEA 해석 모델의 유사 부위에 전달함수를 계산하였고 이를 비교한 결과는 다음 그림 3.149 및 3.150과 같다. 구조기인 소음의 주요 관심대역인 100~1000Hz 대역을 관심 주파수 영역으로 보았을 때 측벽/창문/바닥의 경우 해석 결과와 측정 결과가 유사함을 확인 할 수 있다. 한편 측출입문의 경우 상대적으로 해석결과와 측정결과의 차이가 크게 나타난다. 이는 측출입문과 차량에 취부시 상부 슬라이딩 구조의 경계조건 및 측출입문 하부 및 측부의 차량과 접촉되는 경계조건 모델링에 의한 영향으로 판단된다.



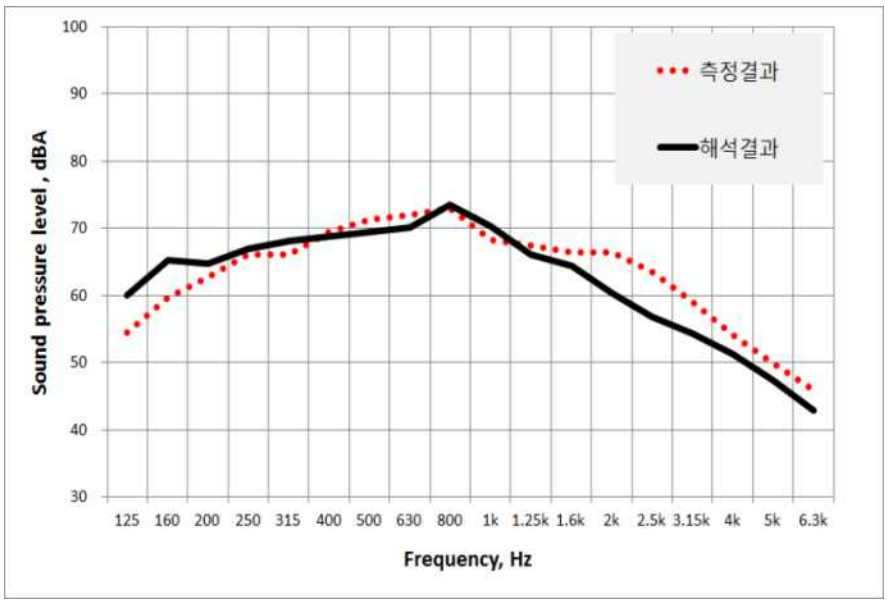
[그림 3.2.149] Mobility 해석 결과 검증(좌: 측벽 , 우:측출입문)



[그림 3.2.150] Mobility 해석 결과 검증(좌: 측창문 , 우:바닥)

(2) 주행중 실내소음 비교

FE-SEA 해석 모델과 주행중 측정된 진동 및 소음 가진원을 이용하여 80km/h 터널 주행중 실내 소음을 예측하였다. 또한 전동차 내부 3개 위치에서 실내소음을 측정하였고 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 그림 3.151 및 표 3.48의 내용과 같이 해석 결과와 시험결과는 1dB 이내로 해석 모델이 유효함을 확인하였다. 전체 실내 소음뿐만 아니라 주파수 영역에서도 해석결과가 측정결과와 유사함을 확인 하였다.



[그림 3.2.151] 80km/h 터널 주행시 실내소음 주파수 대역별 해석결과 및 측정 결과 비교

표 3.2.48. 80km/h 터널 주행시 측정 위치별 실내소음 해석 결과 비교

구분	실내 소음(dBA)			
	대차상부	실내중앙	대차-중앙	비고
시험	79.8	78.9	79.3	1호선 90량
해석	79.4	78.3	78.7	
차이	0.4	0.6	0.6	1dB 이내

라. 소음/진동 개선 차량 모델 소음 해석 결과

(1) 전동차 소음 개선안 선정

(가) 검토 개요

본 연구개발의 최종목표 달성여부를 확인하기 위하여 각 개발 장치의 소음 저감량을 기반으로 3차년도에 개발된 소음해석 기술로 소음저감량을 해석적으로 평가하였다. 최종목표는 1) 110kph 터널 주행중 실내소음 80dBA, 2) 80kph 주행중 선로중앙 7.5m 거리 외부소음 81dBA, 3) 정차중 HVAC구동시 실내소음 63dBA이며, 총 연구기간동안 개발된 각 저소음 개발 장치는 저소음 견인전동기, 저소음 구동기어, 저소음 냉방기, 기밀향상 출입문이다. 한편 본 과제 1차년도에 검토되었던 사이드 스커트의 경우 외부소음 개선에는 영향이 있으나 대차 부위 소음을 증가시켜 주행 중 실내 소음을 상승시키는 요인이 된다(김태민 외, 2012). 따라서 최종 소음 개선안에서는 사이드 스커드를 설치하지 않더라도 외부소음 목표를 달성하기 때문에 사이드 스커트는 최종 검토 대상에서 제외하였다.

표 3.2.49. 소음 개선안 선정 및 단품 성능 개선량

소음 개선안	단품 성능 개선량
기밀향상 출입문	차음 성능 (Rw) 6dBA
차음성능 개선 바닥구조	차음 성능 (Rw) 3dBA
저소음 견인전동기	음향 파워 레벨 (SWL) 6dBA 개선
저소음 구동기어	음향 파워 레벨 (SWL) 3dBA 개선

(2) 소음 해석 결과

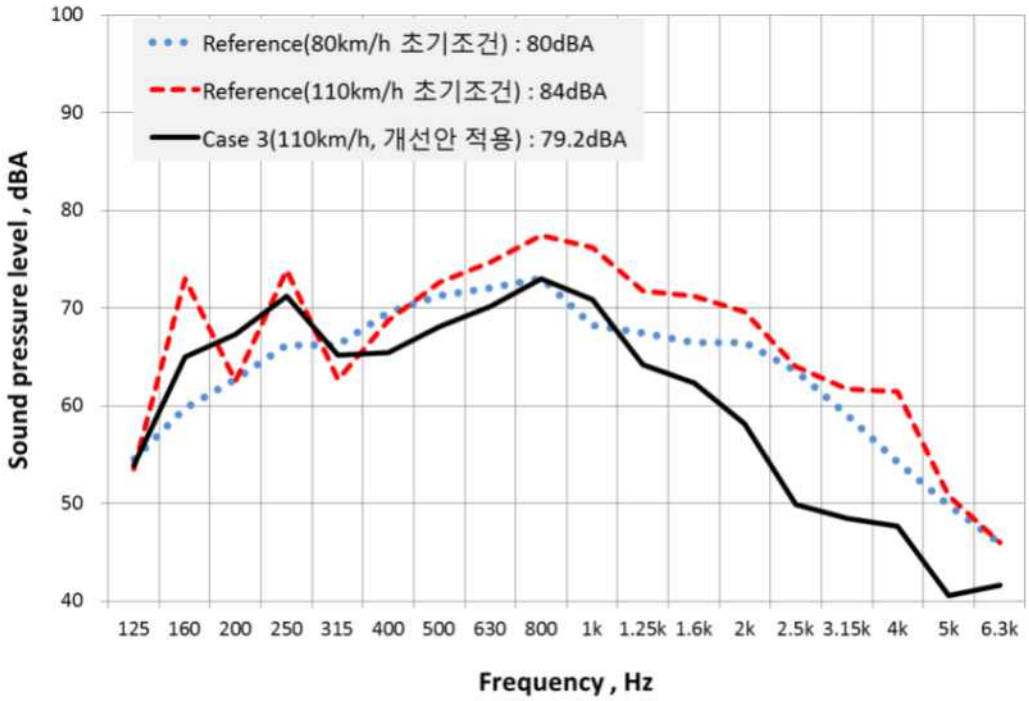
(가) 주행중 실내소음 해석 결과

코레일 전동차가 110km/h 터널 주행시 각 개별 소음 개선안에 대한 실내소음 개선량을 FE-SEA hybrid 기법을 통해 해석적으로 검토하였다. 개별 소음 개선안은 초기 조건으로부터 출입문 소음 개선 적용, 바닥구조 개선, 저소음 견인전동기/구동기동 적용시를 각각 중복 반영한 개선안을 검토하였다. 표 3.39과 같이 소음개선안의 주행시 실내소음 해석 결과는 초기조건 83.8dBA으로부터 출입문의 차음성능 6dB 개선시(Case1) 실내소음 82.1dBA로 1.7dBA 저감되었다. Case1에 바닥 구조를 추가 개선한 Case2는 구름소음(Rolling noise), 견인전동기, 구동모터의 소음저감에 영향을 미쳐 Case1에 비해 추가 0.6dBA개선, 초기보다 1.7dBA개선되었다. Case2에 저소음 견인전동기와 구동기어(SWL 6dBA, 3dBA개선)를 적용한 Case3는 실내소음 해석 결과 79.2dBA가 도출되어 과제 목표인 110km/h 터널 주행시 실내소음 80dBA이하를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 저소음 견인전동기 및 구동기어 적용에 의해 Case2에 비해 추가 2dBA 개선되었으며, 초기조건 대비 4.6dBA개선되었다.

표 3.2.50. 소음개선안에 따른 주행중 실내소음 해석 결과

소음 개선안	단품 성능 개선량	실내소음	과제 목표
[Reference] 초기 조건	-	83.8dBA	110km/h 터널 주행시 실내소음 80dBA 만족 (4dBA 저감)
[Case 1] 기밀향상 출입문 적용	1) Rw 6dB 개선	82.1dBA	
[Case2] 기밀향상 출입문 적용 바닥 구조 개선	1) Rw 6dB 개선 2) Rw 3dB 개선	81.5dBA	
[Case3] 출입문 소음 개선 바닥 구조 개선 저소음 견인전동기 저소음 구동기어	1) Rw 6dB 개선 2) Rw 3dBA 개선 3) SWL 6dBA 개선 4) SWL 3dBA 개선	79.2dBA	

그림 3.152와 같이 주파수 대역별 소음레벨 개선량을 살펴보면, 개선전 견인전동기와 구동기어에 의한 구조기인 소음인 160 Hz, 250 Hz의 피크가 저소음 견인전동기 및 구동기어를 사용함으로써 개선되었으며, 기밀 출입문, 바닥구조 개선 등 차음 성능 개선으로 인한 공기기인 소음의 개선(400 Hz 이상)되었다. 따라서 전동차 110 km/h 터널 주행시 실내소음 80dBA이하, 4dBA 저감의 목표치를 달성할 수 있음을 확인하였다.



[그림 3.2.152] 소음개선안 적용에 따른 터널 주행시 주파수 대역별 소음 레벨 개선량

(나) 주행중 외부소음 해석

코레일 전동차가 80km/h 주행시 각 소음 개선안에 대한 외부 소음 개선 영향을 해석을 통해 검토하였다. 해석 모델은 당사 내부 해석 툴인 Exnoise를 사용하였다. 실내소음 개선안 중 외부소음 저감에 영향을 미치는 저소음 견인전동기/ 구동기어(Case3)에 대한 개별 소음 개선안 적용시 소음 해석 결과는 표 3.51과 같다. 초기 조건에서 80kph 주행중 선로중앙 7.5m 거리 외부소음은 84dBA이며, Case3 적용시 79dBA로 5dB 저감되었으며, 외부소음레벨 81dBA이하로 목표치를 달성하

였다.

표.3.2.51. 소음개선안에 따른 주행중 외부소음 해석 결과

소음 개선안	단품 성능 개선량	외부소음	과제 목표
[Reference] 초기 조건	-	84dBA	80km/h개활지 주행시 외부소음 81dBA 만족 (5dBA 저감)
[Case3] 출입문 소음 개선 바닥 구조 개선 저소음 견인전동기 저소음 구동기어	1) Rw 6dB 개선 2) Rw 3dBA 개선 3) SWL 6dBA 개선 4) SWL 3dBA 개선	79dBA	

(다) 정차중 실내소음 해석

코레일 전동차가 정차중 상태에서 에어컨 소음 개선안에 실내 소음 개선 영향을 해석을 통해 검토하였다. 실내소음이 가장 높은 위치인 에어컨 토출구 부위의 소음 개선 목표인 63dBA 이내를 만족하였으며, 정차중 실내소음 63dBA 이하로 목표치를 달성하였다.

표 3.2.52. 에어컨 소음 개선안에 따른 정차중 실내소음 해석 결과

소음 개선안	에어컨 토출구 1m 지점 소음	실내소음	과제 목표
[Reference] 초기 조건	-	68dBA	정차중 실내소음 63dBA만족 (5dBA 저감)
[Case3] 에어컨 소음개선	62.1dBA	63dBA	

(3) 향후 현차 적용 방안

본 연구과제에서는 현차 적용에 따른 현실적인 문제(신규 차량 제작 비용 또는 기존 차량 개조 시 제작 비용 및 영업 차량 수익 손실 등)로 인하여 해석적 방법으로 검증하였다. 향후 코레일 일반형의 기존차량 업그레이드 및 신규 납품 차량에 대하여 철도안전법에서 요구되는 각 장치별 단품 성능 검증 절차를 통하여 성능 검증 후 실차 적용 예정이다.

4. 저소음 장치 개발 성과의 원가 및 경제성 분석

본 연구과제를 통해 개발된 저소음 장치 시제품별 목표성능 대비 달성치와 중량비교, 해외사 비교를 표 3.53을 통해 나타내었다. 시제품은 철도차량의 경량화 추세를 반영하여 대부분 중량저감이 되도록 제작하였으며, 1량 기준으로 해당 저소음 장비를 모두 설치하였을 경우 기존 대비 약 378 kg 중량을 저감할 수 있다.

표 3.2.53. 저소음 장치 개발 성과 및 중량비교, 해외사 성능 비교

시제품명	소음저감 범위	목표 [dBA]	소음성능 (저감량) [dBA]	중량비교 [kg]	해외사 비교
견인전동기	실내/실외	SWL 104	103.7 (-6.4)	800→720	102 dBA (Melco)
구동기어	실내/실외	SWL 104	103.6 (-3.0)	370→348	93 dBA@80km/h (IGW). 본 과제 개발품: 110km/h
사이드스커트	실외	설치전 대비 3 dBA 저감	(-3.0)	대차당 44kg, 량당 176kg	
저소음 냉방기	실내	실내소음 63 dBA 이하	62.1 (-3.0)	550kg 이하 (기존과 유사)	원심형Backward 형식 팬이 상용화 (저소음, 정압 성능 높음), 해외사 비교 우위
유동소음 저감 HVAC 덕트	실내		(-2.0)	-	-
유니텍스 바닥구조	실내	-	Rw 41dB (+3)	면밀도 41.5→38.9 kg/m^2	-
기밀향상 출입문	실내	Rw 32 이상	Rw 33dB (+7)	기존과 유사	독일 러버 사용, 일본 도어 패널과 하단부 밀폐구조 적용 (본 시제품은 각 장점을 모두 활용)
종합			3~6.4 dBA 저감	량당 378kg 중량저감	

또한 원가 및 경제성을 코레일 일반형 전동차를 기준으로 표 3.54에 분석하였다. 견인전동기와 구동기어의 경우 각 장치별 소음을 기존 대비 3~6.4 dBA 저감하였음에도 불구하고, 각각 5%, 20% 비용 절감 효과를 달성하였다. 차음성능 개선하기 위해서는 별도의 재료를 투입해야하기 때문에 사이드스커트, 바닥구조, 출입문의 경우 다소 비용이 증가하였다. 저소음 출입문의 경우 기밀구조 사용으로 원가가 상승할 것으로 예상되나 참여연구기관의 경영악화로 상세한 분석이 불가하였다. 각 개발품의 원가 증가 감소분을 량당 투입량을 고려하여 량당 소요 비용을 분석한 결과 기존대비 약 4,630,000원의 감소분이 산출되었다. 이는 코레일 일반형 전동차의 평균적인 1량 납품가격이 14~16억원을 감안할 때 저소음 장치 투입에 따른 감소분은 0.3% 절감된 것으로 추정할 수 있다.

표 3.2.54. 저소음 장치의 원가 및 경제성 분석

<table>
<tr><th rowspan="3">시제품명</th><th rowspan="3">소음성능
(저감량)
[dBA]</th><th rowspan="3">원가요소</th><th colspan="4">코레일 일반형 전동차 기준 (천원)</th></tr>
<tr><th colspan="2">단품</th><th colspan="2">량당</th></tr>
<tr><td rowspan="2">견인전동기</td><td rowspan="2">103.7
(-6.4)</td><td rowspan="2">중량감소로 인해 원가 감소↓
흡음재 사용↑
제작비 절감↓</td><td>기존</td><td>10,500</td><td>기존</td><td>42,000</td></tr>
<tr><td>개발</td><td>10,000
(5%감소)</td><td>개발</td><td>40,000
(5%감소)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">구동기어</td><td rowspan="2">103.6
(-3.0)</td><td rowspan="2">부품수39개 감소↓
케이스 리브살 자체 가공 비용감소↓
볼베어링1개 추가↑</td><td>기존</td><td>12,500</td><td>기존</td><td>50,000</td></tr>
<tr><td>개발</td><td>10,000
(20%감소)</td><td>개발</td><td>40,000
(20%감소)</td></tr>
<tr><td>사이드스커트</td><td>(-3.0)</td><td></td><td>개발</td><td>3,000</td><td>개발</td><td>6,000</td></tr>
<tr><td rowspan="2">저소음 냉방기</td><td rowspan="2">62.1
(-3.0)</td><td rowspan="2">Motor변경↑
방진고무 수입 대체↓
Compressor 수입 대체↓</td><td>기존</td><td>13,000</td><td>기존</td><td>26,000</td></tr>
<tr><td>개발</td><td>13,360
(3%증가)</td><td>개발</td><td>26,720
(3%증가)</td></tr>
<tr><td>유동소음 저감 HVAC 덕트</td><td>(-2.0)</td><td></td><td colspan="2">-</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">유니텍스 바닥구조</td><td rowspan="2">Rw 41dB
(+3)</td><td rowspan="2"></td><td colspan="2" rowspan="2">Unitex 상구조와 방음도료에 관한 금액 (Keystone plate, Floor covering 제외)</td><td>기존</td><td>5,250</td></tr>
<tr><td>개발</td><td>5,900
(12%증가)</td></tr>
<tr><td>기밀향상 출입문</td><td>Rw 33dB
(+7)</td><td>Plug-in door 수입대체 효과</td><td colspan="4">기밀구조 사용으로 원가 상승</td></tr>
<tr><td>종합</td><td>3~6.4 dBA 저감</td><td>일부 국산화</td><td colspan="4">량당 4,630 천원 절감
(량당 차량가 대비 0.3%절감)</td></tr>
</table>

3. 3세부 철도 스킬소음 저감기술 개발

가. 철도 스킬소음 현황

(1) 곡선부 스킬소음 현황

- 서울교통공사 신정차량기지 내 곡선반경 120m 지점에서 20~30km/h의 속도로 주행 시 스킬소음 측정
- 차량 통과 시 최대 100dB(A) 이상의 소음이 발생하며, 약 470Hz, 1200Hz, 2100Hz, 4360Hz, 5340Hz의 주파수 영역에서 순음성분의 스킬소음이 발생

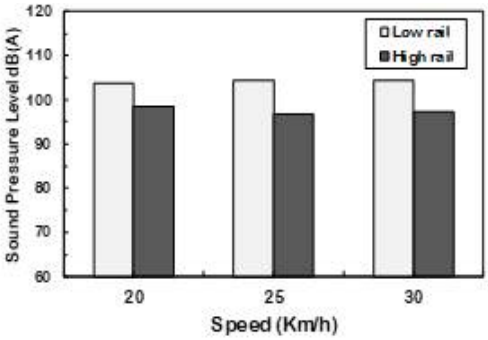


그림 3.3.1 곡선부 스킬소음 레벨

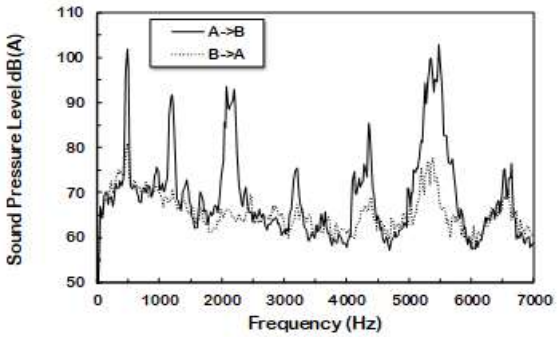


그림 3.3.2 곡선부 스킬소음 주파수 분석결과

(2) KTX 차량의 제동 스킬소음 현황

- 광명역 승강장에서 KTX 차량 정차 시 제동 스킬소음 측정결과 최대 100dB(A)정도 발생
- 고주파 대역(4~14 kHz)에서 70dB(A) 이상 순음성분의 제동 스킬소음 발생

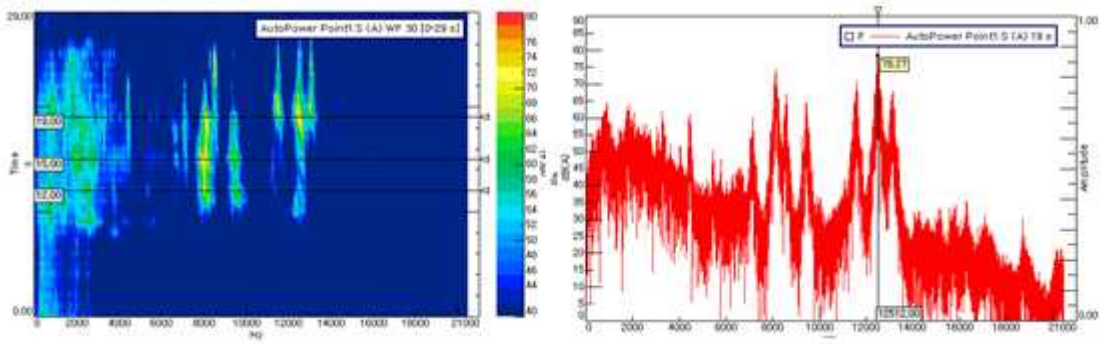


그림 3.3.3 KTX 제동 스킬소음 측정결과

나. 곡선부 스킬소음 저감방안 개발

(1) 스킬소음 저감용 방음레일

- 스킬소음 발생 시 나타나는 차륜/레일 사이의 마찰특성 변화를 통한 곡선부 스킬소음을 저감시키는 방음레일 개발
- 레이저 클래딩은 금속 표면에 내마모성, 내식성 및 내열성 등 필요한 성질을 부여하기 위하여 저마찰 이종재질을 표면상에 부가하기 위해서 레이저 빔을 이용하여 저마찰 이종재질를 레일에 용융시켜 접합하는 공정기술

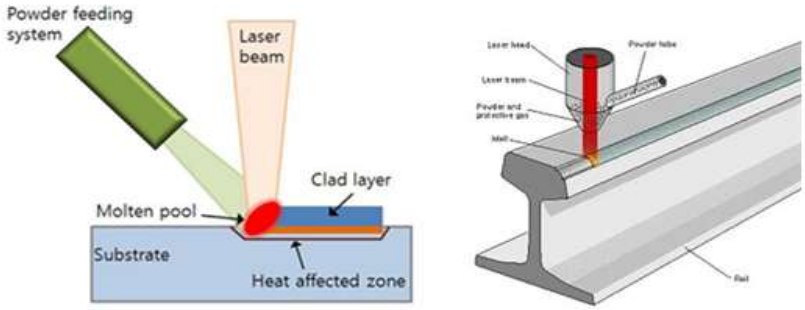


그림 3.3.4 레이저 클래딩 공법

(가) 레이저 클래딩을 위한 이종재질 선정

- 저마찰 이종재질(8종)의 이종재질을 레이저 클래딩하여 시험편을 제작하여 축소모델 장치로 마찰계수 및 소음레벨 측정
- 저마찰 이종재질이 레이저 클래딩한 시험편은 마찰 특성이 음의 구배를 나타내지 않으며 소음레벨도 낮음
- 일반적인 강철시편(기준시편)은 약 2100Hz 주파수에서 순음성분의 소음이 발생하지만, 시험편에서는 스킬소음이 나타나지 않음

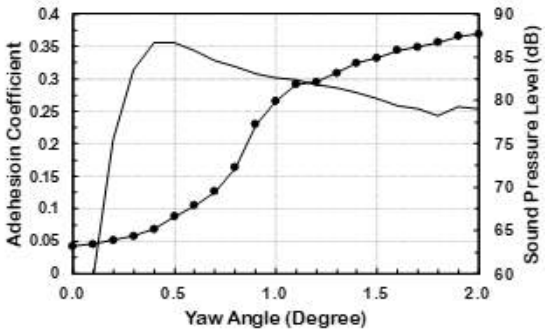


그림 3.3.5 횡방향 마찰계수와 음압레벨

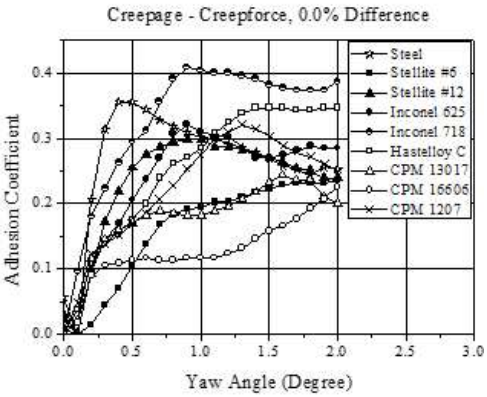


그림 3.3.6 시험편의 마찰계수 측정 결과

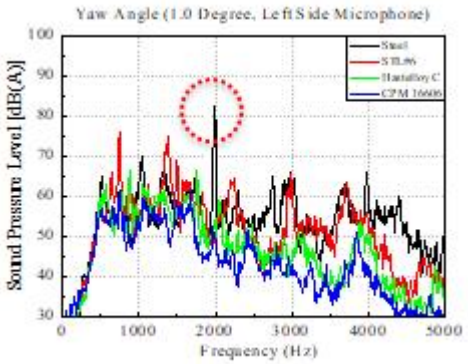
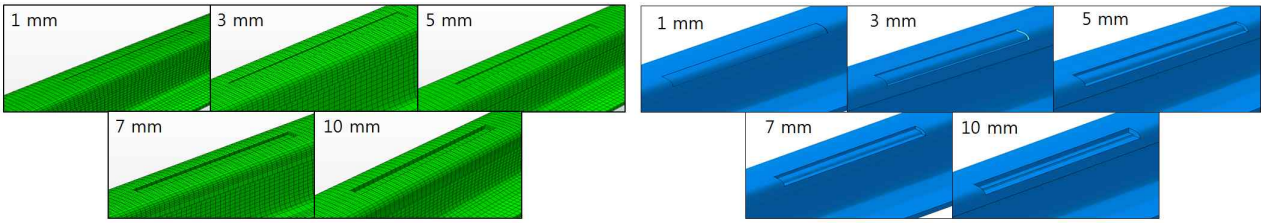


그림 3.3.7 시험편의 소음측정 결과

(나) 방음레일 수치해석 모델 구축 및 계산결과

- 그림과 같이 레일두부와 측부에 저마찰 이종재질을 삽입한 유한요소 해석모델 구축
- 레이저 클래딩 깊이에 따른 잔류응력 해석 후 클래딩 용접의 적정 깊이 결정 (5 ㎜ 이내가 적정)



레일두부 레일측부

그림 3.3.8 방음레일 수치해석 모델

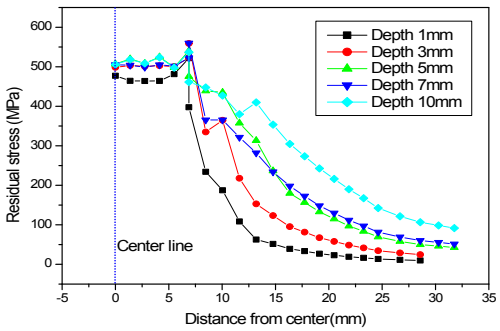


그림 3.3.9 레일 중앙으로부터 폭 방향 잔류응력 변화 (σ_{von} mises)

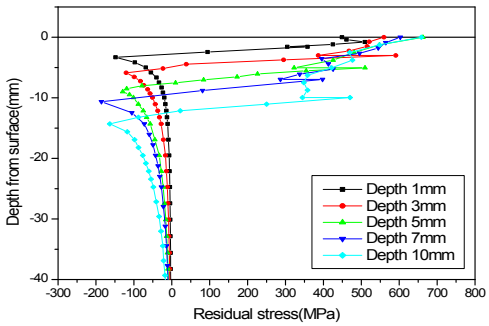


그림 3.3.10 용접 깊이에 따른 깊이 방향의 잔류응력 변화 (σ_{zz})

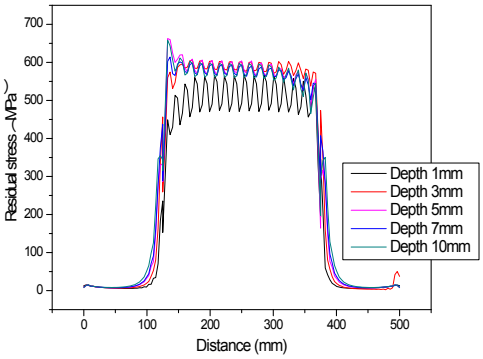


그림 3.3.11 용접 깊이에 따른 잔류응력 변화 (σ_{zz})

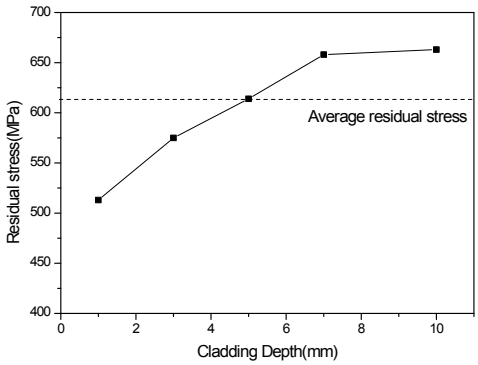
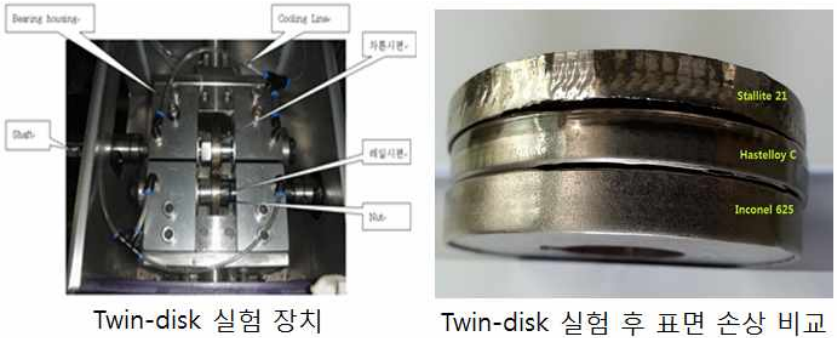


그림 3.3.12 용접 끝단에서 용접 깊이에 따른 잔류응력 변화 (σ_{zz})

(다) 방음레일 시험편 피로마모 실험

- Twin-disc 시험편 시험기를 이용하여 200만 싸이클로 피로/마모시험을 수행한 결과 균열은 발생하지 않았으며, 마모효과가 크게 나타남
- 실제 주행환경을 모사한 실물레일 시험장치를 구축하여 차륜/레일 구름접촉 반복 수행 후 레일 용접부가 목표 cycle수에 도달하기까지 피로균열에 의한 이상 유무 확인하기 위해 피로마모 시험 수행
- 용접부에 대해 100만 cycle시험 후 표면균열이 없음을 확인, 비용접부와 비교하여 내마모성이 높음을 확인



Twin-disk 실험 장치 Twin-disk 실험 후 표면 손상 비교

그림 3.3.13 Twin-disk 실험 장치를 이용한 접촉 피로 시험



그림 3.3.14 Twin-disc 시험편

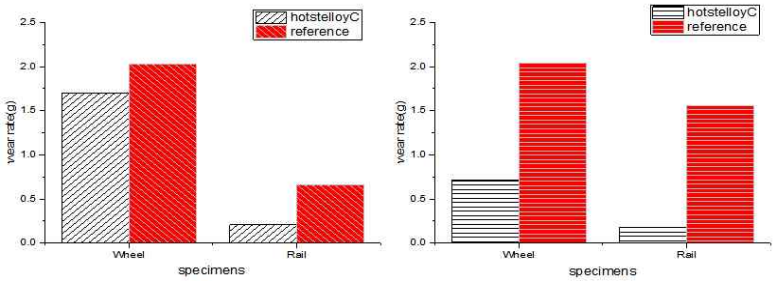


그림 3.3.15 Twin-disc 마모시험 결과

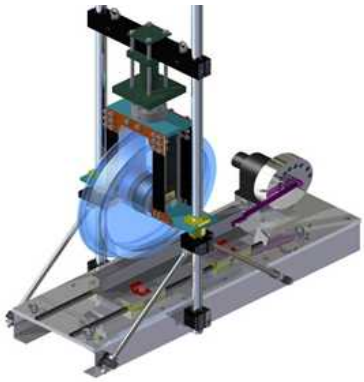


그림 3.3.16 실물레일 시험기

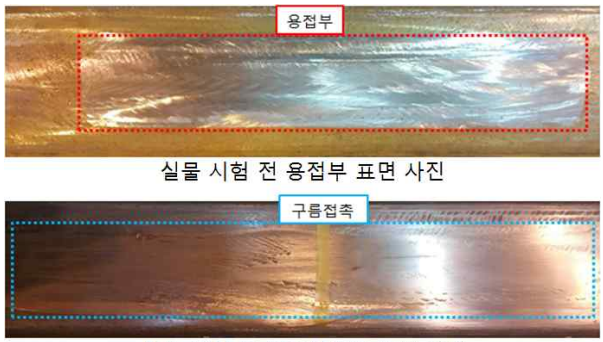


그림 3.3.17 Hastelloy C로 레이저 클래딩 된 실물 레일의 피로마모 실험 결과

(라) 피로평가 S/W 모듈 개발 및 방음레일 피로 평가

- 방음레일의 피로수명을 평가할 수 있는 소프트웨어 개발

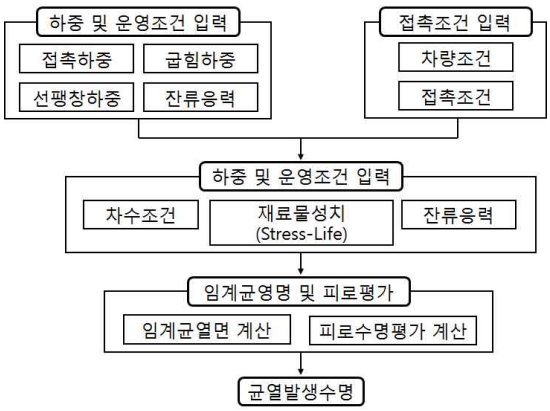


그림 3.3.18 피로수명평가 모듈 흐름도

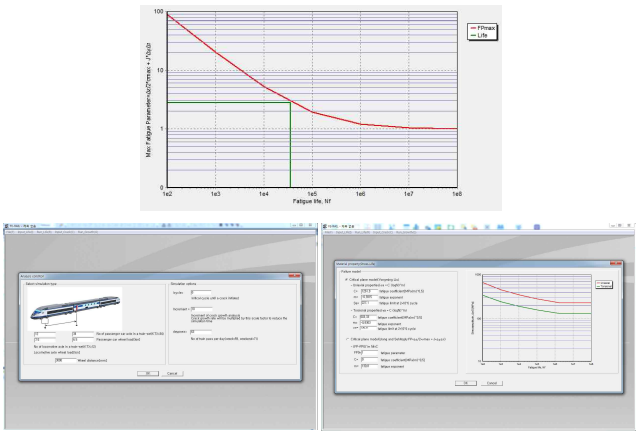


그림 3.3.19 방음레일 피로수명평가 S/W 모듈 및 Jiang 모델로 계산한 피로수명

(마) 방음레일 현장 실험

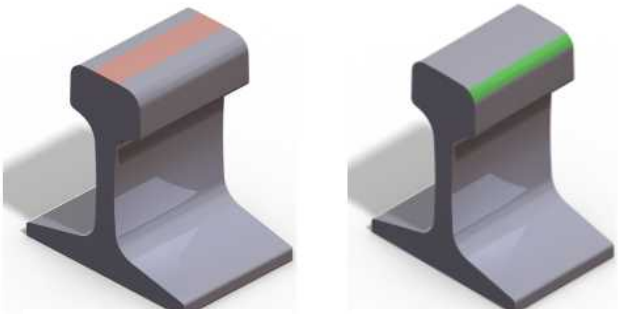
- 스킬소음 저감용 방음레일은 서울교통공사 신정차량기지 내 곡선 반경 120 m인 선로에 40m구간 설치
- 내측레일에는 레일두부, 외측레일에는 레일측부에 저마찰 이종재질 삽입한 방음레일 시제품 설치
- 대상 선로 주변에 마이크로폰 설치 후 도시철도 차량을 왕복 운행하여 소음 측정



그림 3.3.20 방음레일 설치(곡선부 R=120구간) 204B 후단 ~ 205전 까지

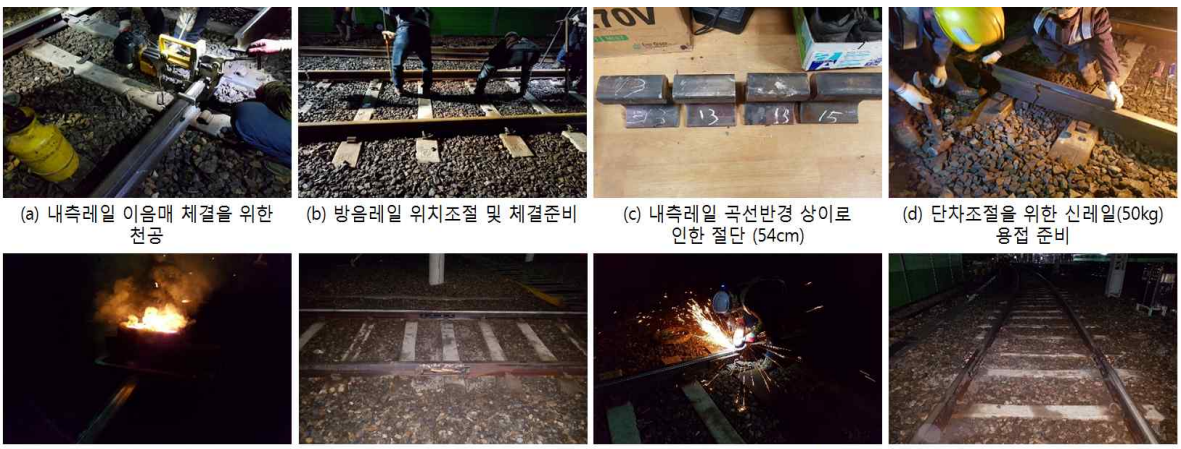


그림 3.3.21 20 m 방음레일 연결도



(a) 내측 레일 (b) 외측 레일

그림 3.3.22 레일두부(내측레일) 및 측부(외측레일)에 저마찰 이종재질 삽입



(a) 내측레일 이음매 체결을 위한 천공 (b) 방음레일 위치조절 및 체결준비 (c) 내측레일 곡선반경 상이로 인한 절단 (54cm) (d) 단차조절을 위한 신레일(50kg) 용접 준비

(e) 테르밋 용접 (f) 테르밋 용접 완료 (g) 시점부 단차해결을 위한 그라인딩 (h) 방음레일 교환공사 완료

그림 3.3.23 방음레일 교체작업

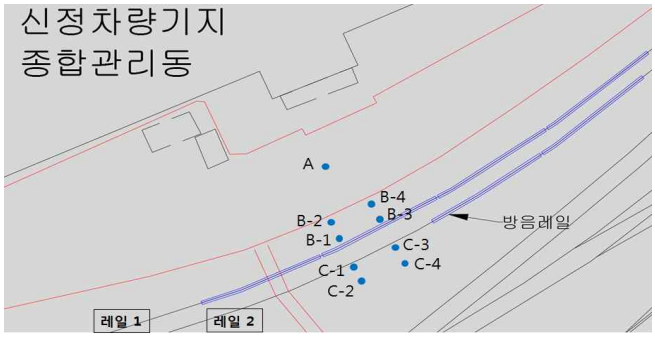
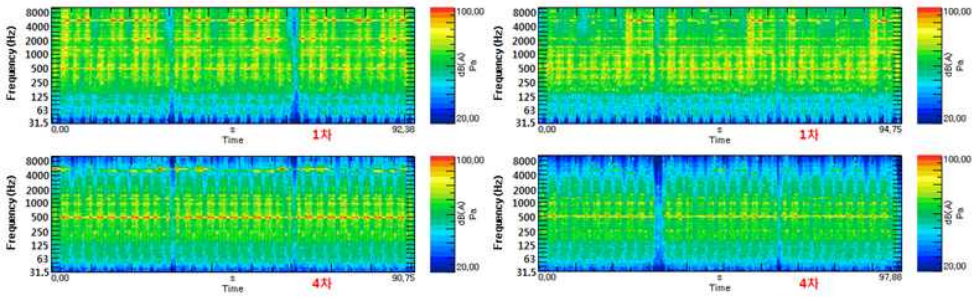


그림 3.3.24 방음레일 현장실험을 위한 마이크로폰 설치 위치도

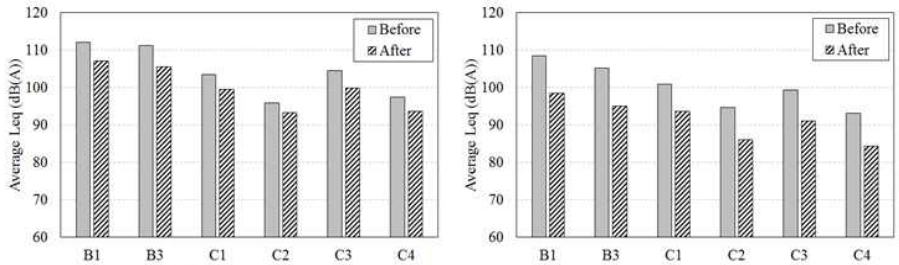
(바) 방음레일 현장 시험 결과

- 방음레일 설치 후 모든 측정 지점에서 차량 진행 방향과 전 대역의 소음 레벨 저감
- 방음레일 설치 후 등가소음도는 최대 10dB(A) 저감, 스킬소음 발생 빈도가 낮음



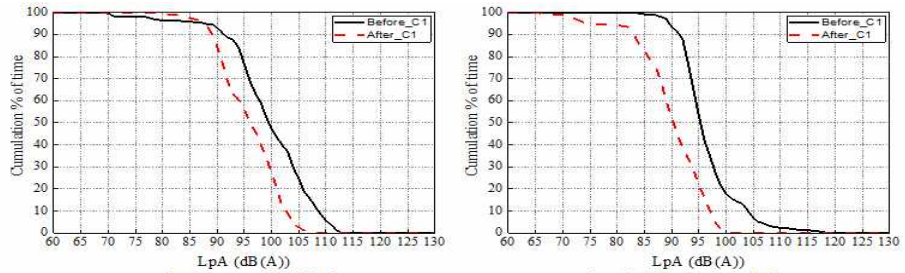
정비고->운행선 운행선->정비고

그림 3.3.25 차량속도 25km/h에서 방음레일 설치 전후 spectrogram



(a) 정비고 -> 운행선 (b) 운행선 -> 정비고

그림 3.3.26 방음레일 설치 전후 평균 등가소음레벨 비교(차량 속도 25km/h)



(a) 정비고 -> 운행선 (b) 운행선 -> 정비고

그림 3.3.27 차량 속도 25km/h로 통과 후 누적히스토그램 분석
(직선 : 설치 전, 점선 : 설치 후)

(2) 공명형 흡음판을 이용한 스킬소음 저감 기술

(가) 복합구조 공명형 흡음판 설계

- 공명형 흡음판 시험편(30종)을 제작하여 임피던스 튜브 실험으로 공명형 흡음판 사양에 따른

흡음 특성 분석

- 공명형 흡음판의 구조를 직렬 및 병렬로 구성하여 주파수에 대한 흡음특성 향상방안 도출
- 임피던스 튜브 실험 및 잔향실 실험으로 복합구조(직렬/병렬) 공명형 흡음판의 흡음 성능 향상 확인
- 잔향실 실험은 공인인증기관에서 수행하였으며, 공명형 흡음판은 스킬소음 발생구간에서 흡음률이 약 0.8인 것을 확인

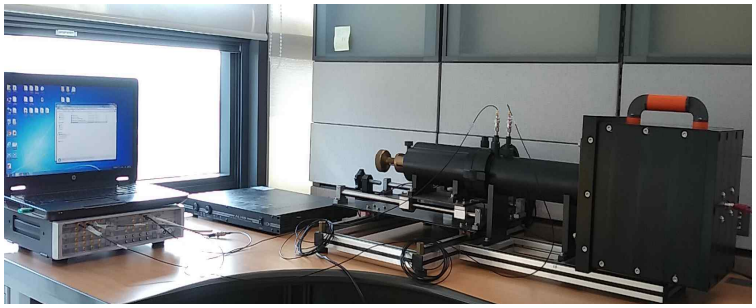


그림 3.3.28 임피던스 튜브 실험 장치

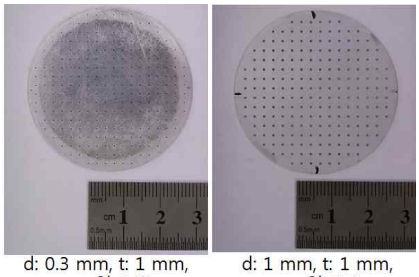


그림 3.3.29 공명형 흡음판의 시편 일부

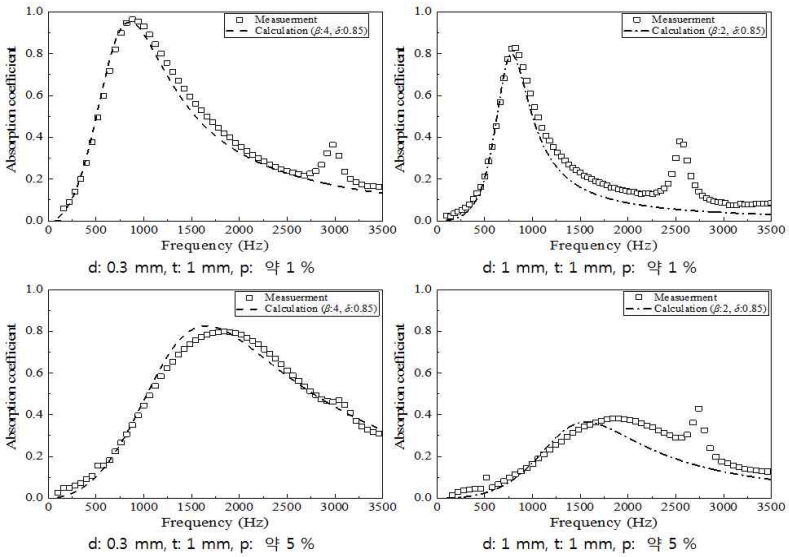


그림 3.3.30 단일 유공 시편에 따른 측정과 계산 비교
(공동 깊이 30mm)

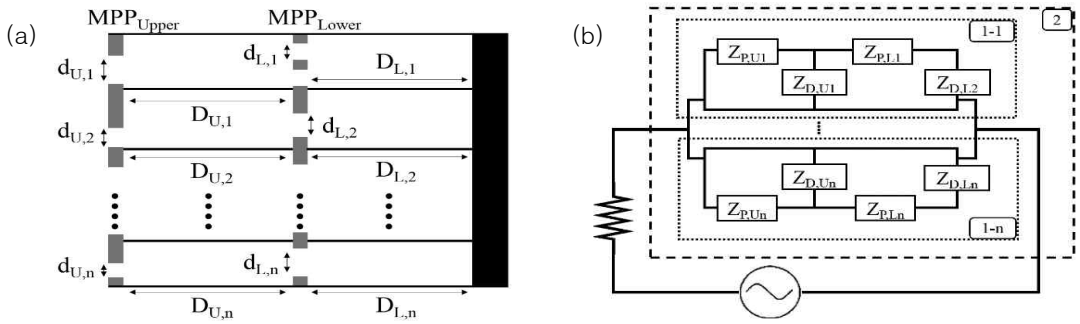


그림 3.3.31 복합구조 공명형 흡음판 단면도와 등가전기음향회로

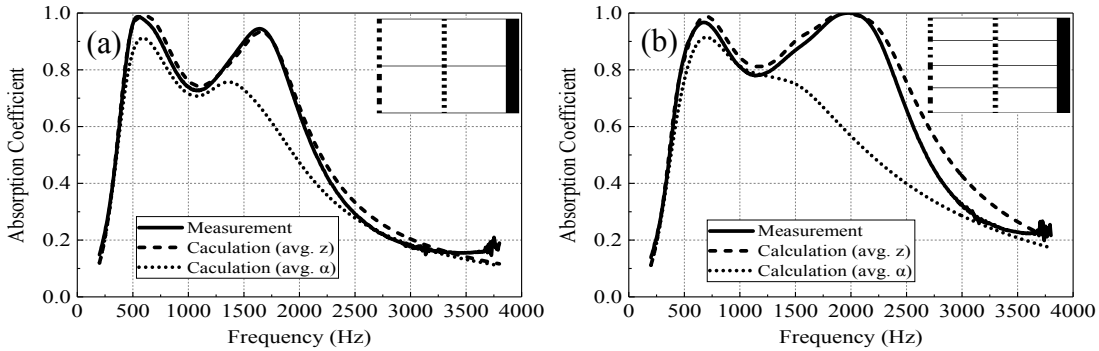
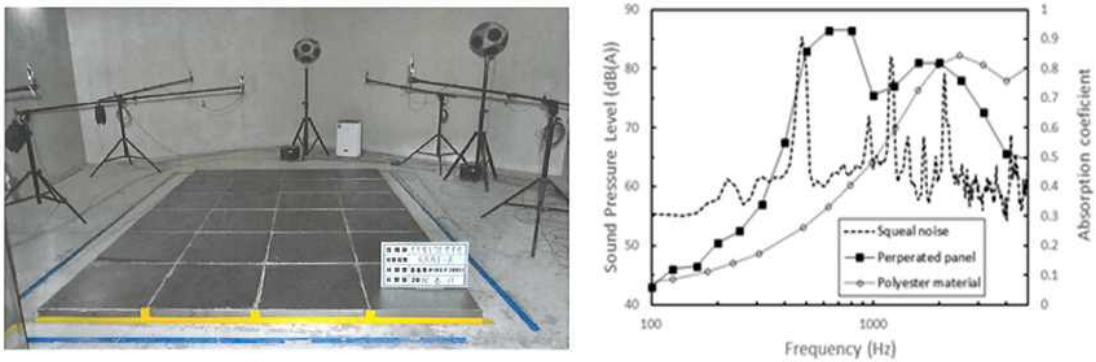


그림 3.3.32 임피던스 튜브를 이용한 복합 구조 공명형 흡음판 흡음률 비교



잔향실 실험

스킬소음과 흡음률 비교

그림 3.3.33 복합 구조 공명형 흡음판의 잔향실법 흡음 성능 결과

(나) 공명형 흡음판 수치해석 모델 및 설계 S/W 작성

- 공명형 흡음판의 수치해석 모델 작성 및 흡음률 계산
- 공명형 흡음판의 진동이 흡음률에 미치는 영향 분석
- 공명형 흡음판 설계를 위한 In-house S/W 제작

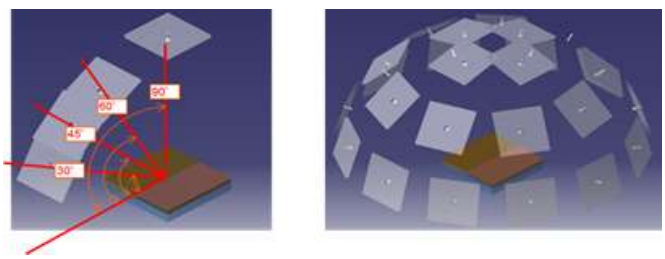


그림 3.3.34 수치해석 모델

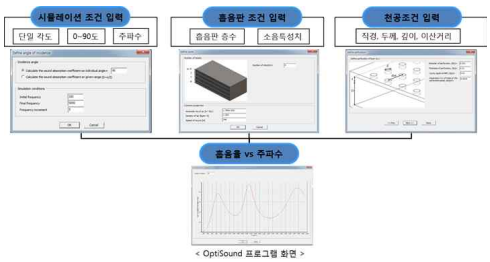


그림 3.3.35 설계 In-house S/W

(다) 공명형 흡음판 현장시험

- 임피던스 시험 결과를 바탕으로 스킬소음 저감용 복합 공명형 흡음판 설계 후 서울교통공사 신정차량기지 내 곡선 반경 120 m인 선로 변에 설치
- 선로 주변과 건물 측에 12개의 마이크로폰 설치
- 설치 후 등가소음도로 1층에서 약 17 dB(A), 4층에서 약 7 dB(A)로 스킬소음 저감되었음

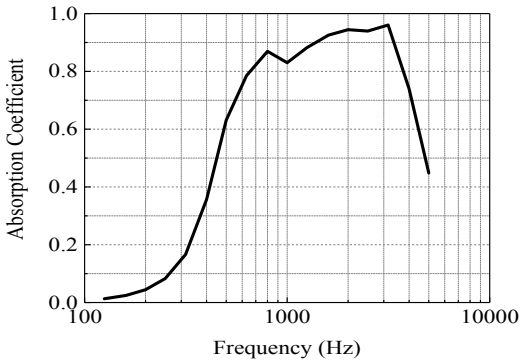
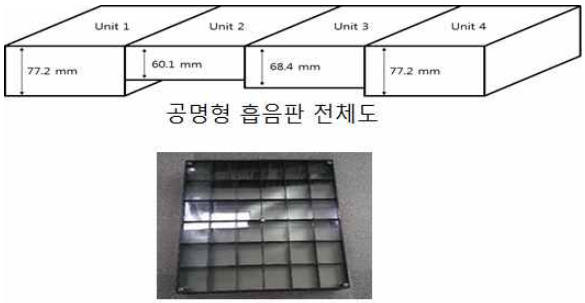


그림 3.3.36 공명형 흡음판의 시제품에 대한 흡음률 계산 결과



공명형 흡음판 전체도

제작된 공명형 흡음판 일부분

그림 3.3.37 공명형 흡음판 전체 모형도와 시제품



그림 3.3.38 공명형 방음벽 시제품의 현장설치

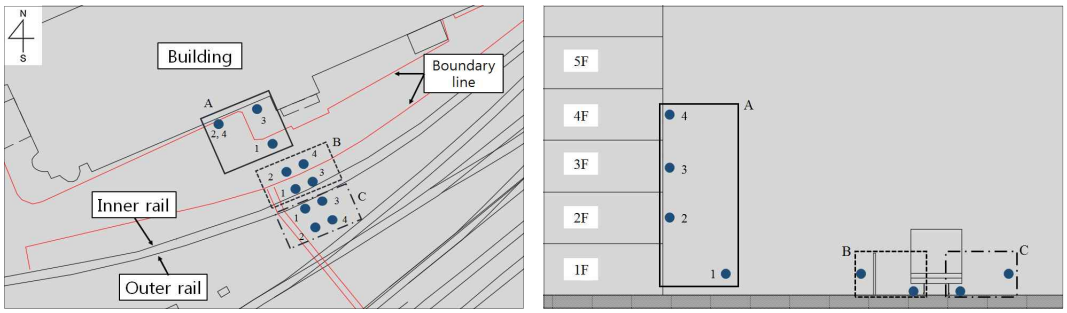
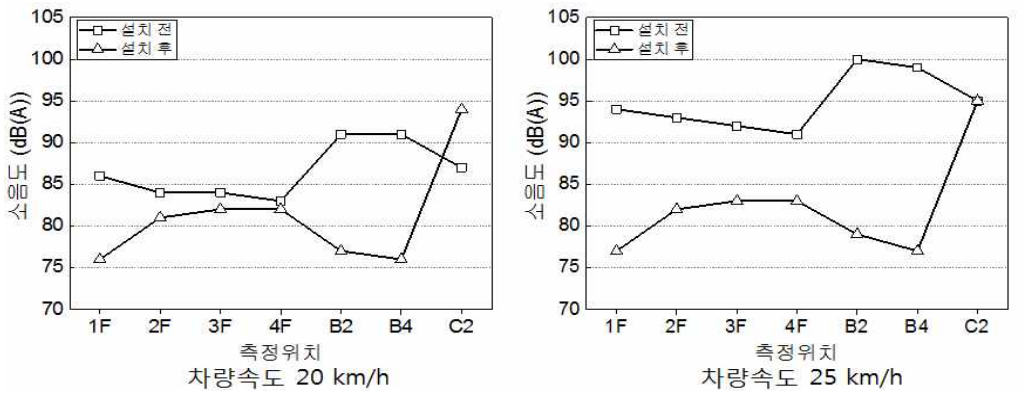


그림 3.3.39 공명형 방음벽 현장실험을 위한 마이크로폰 설치 위치도



차량속도 20 km/h　　차량속도 25 km/h

그림 3.3.40 방음벽 설치 전후 시험 결과

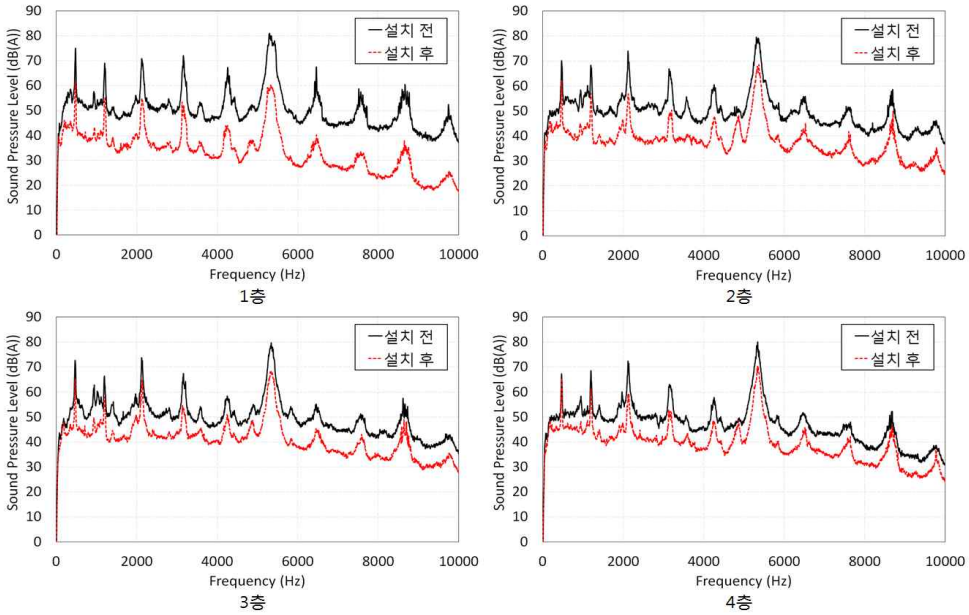


그림 3.3.41 방음벽 설치 전후 시험 결과의 주파수 분석

다. 제동 스킬 소음 저감용 제동 패드 개발

(1) 제동 마찰재 개발

- 본 연구에서도 기지조직과 마찰조정제의 구성비에 따라 6종류의 마찰재를 무가압소결로 제작
- 마찰재의 최종밀도는 현재 KTX에서 사용되고 있는 마찰재의 밀도(5.3g/cm3)와 유사하거나 낮게 설정하여 각각 다른 경도를 갖는 시편을 제조

표 3.3.1 마찰재 조성과 제조방법

	DWF-A	DWF-B	DWF-C	DWF-D	DWF-E	DWF-F
기지 (wt.%)	60~70	70~85	70~85	70~80	65~75	70~80
마찰 조정제 (wt.%)	10~15	5~10	5~10	15~20	15~20	15~20
윤활재 (wt.%)	10~20					
밀도 (g/cm^3)	4.6~5.2					
소결조건	소결조건 A			소결조건 B		

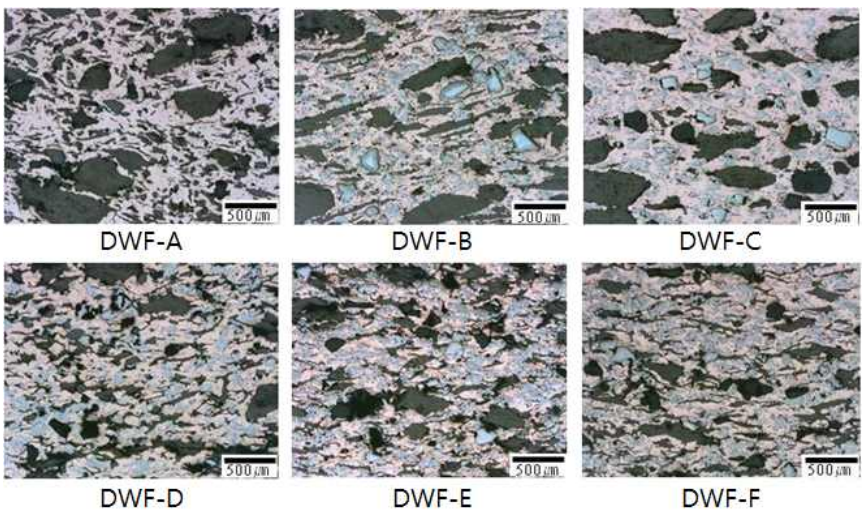
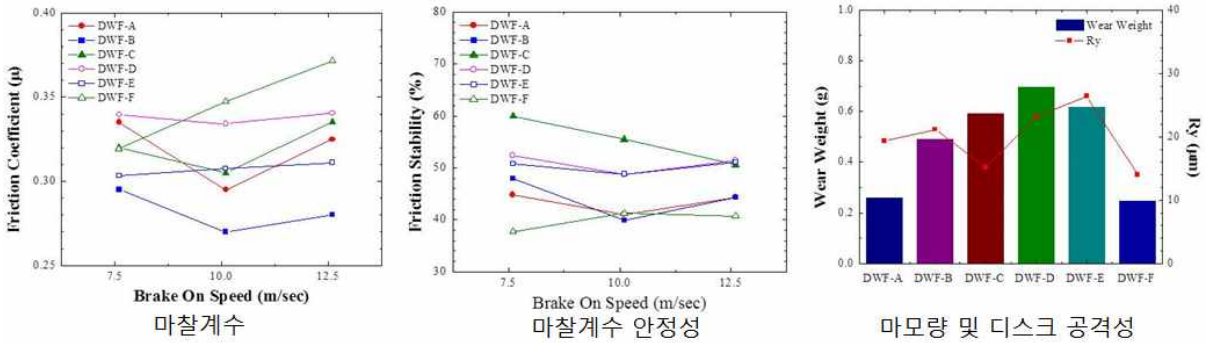


그림 3.3.42 제동 마찰재 표면사진



마찰계수 마찰계수 안정성 마모량 및 디스크 공격성

그림 3.3.43 마찰재의 제동속도에 따른 마찰 특성

(2) 저소음 제동 패드 개발

- 스터드 형상변경 및 스터드와 백플레이드의 구조변경 등을 통해서 일정 제동력을 유지하면서 제동 스킬소음을 저감할 수 있는 두 구조(스프링타입, 시소타입)의 저소음 제동패드 개발
- 스터드와 백 플레이드 사이에 스프링을 삽입한 스프링타입의 탄성제동패드의 시험편을 제작하여 다이나모 시험 수행한 결과 스킬소음 저감효과가 미비
- 시소타입의 탄성제동패드의 시험품 제작 및 다이나모 시험
- 다이나모를 이용한 소음시험에서 시소타입의 탄성제동패드가 현용품보다 10dB(A)정도 소음레벨이 낮음
- UIC E1 Code에 따른 시제품의 공인 다이나모성능 시험 통과

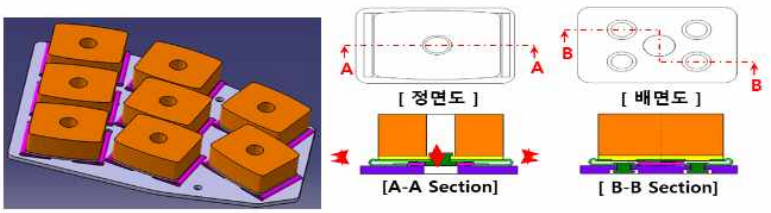


그림 3.3.44 스프링타입의 탄성 제동패드

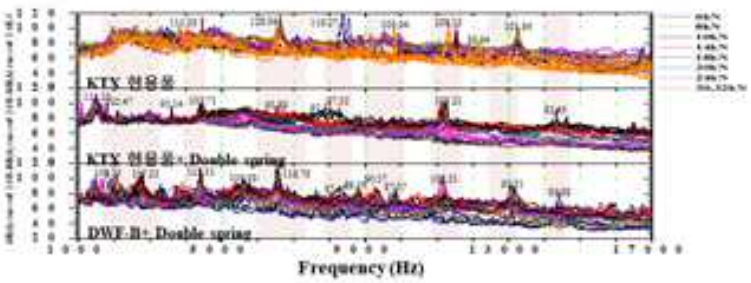


그림 3.3.45 스프링타입 탄성 제동패드 소음시험결과

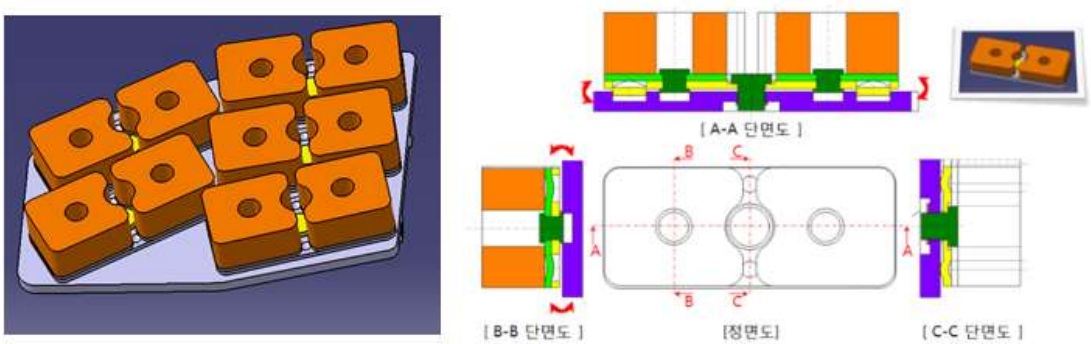


그림 3.3.46 시소타입 저소음 제동패드

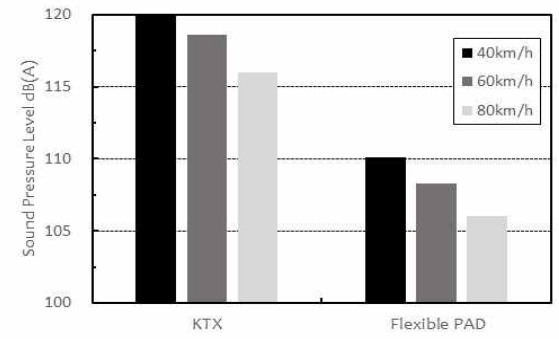


그림 3.3.47 현용품과 시소타입패드의 소음시험결과

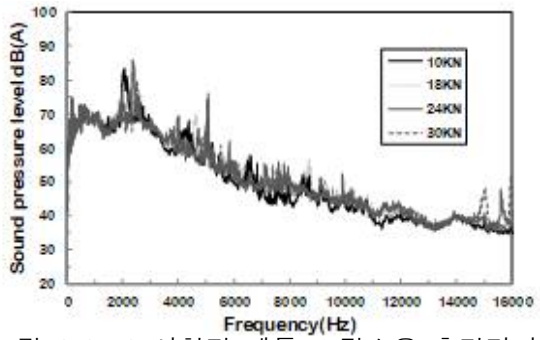


그림 3.3.48 시험편 제동 스킬소음 측정결과



그림 3.3.49 시소타입 제동패드 시제품의 공인 다이나모 성능 인증

(2) 저소음 제동패드 현차 시험

- 한국철도공사 수도권정비단 내 시험선로에서 KTX 차량에 시소타입 제동패드 시제품과 현용품을 1개 대차에 장착 후 제동 소음시험 수행
- 시험조건은 KTX 차량의 속도가 40km/h와 50km/h로 주행 후 제동 시 소음/진동을 3회 측정 후 비교 분석
- KTX 차량의 하부에 가속도계와 마이크로폰을 설치하여 차량 정차 시 소음/진동 측정

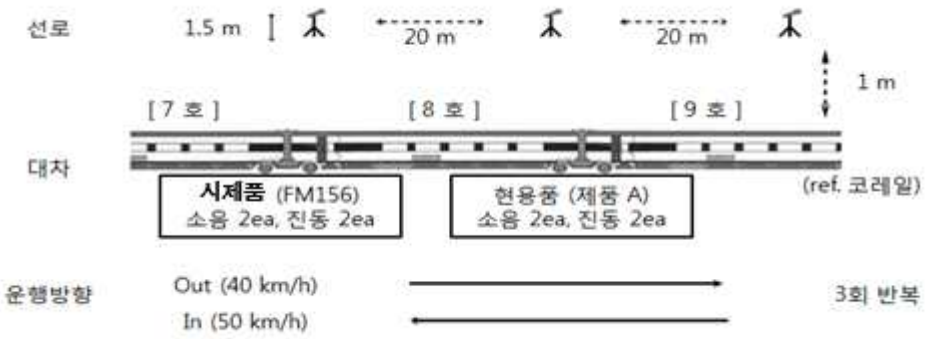


그림 3.3.50 저소음 제동패드 시제품과 현용품 제동 스킬소음 측정시험



캘리퍼 대차

그림 3.3.51 가속도계 설치위치



대차 하부 시험 선로

그림 3.3.52 마이크로폰 설치위치

(3) 현차시험 결과

- 현용품 대비 시제품의 평균 등가소음도는 13~22 dB(A), 평균 최대 소음도는 9~18 dB(A) 저감
- 시간 및 주파수 분석을 통해서 저소음 제동패드의 시제품가 현용품보다 소음레벨이 현저히 낮음
- 시제품의 스킬소음 발생 빈도가 현용품보다 현저히 낮음
- 저소음 제동패드의 시제품의등가 소음도 평균레벨은 100 dB(A) 이하이며 현용품은 115 dB(A)를 초과
- 저소음 제동패드의 시제품의 진동 레벨이 현용품보다 최대 20dB(V)이상 저감됨

표 3.3.2 대차단위 현차 제동소음시험 조건별 평균 등가소음도 및 평균 최고소음도

단위 : dB(A)

열차 속도	측정 위치 / 평가 항목 / 표본수(n)=3	대차 하부				선로		
		시제품		현용품 (제품 A)		F1	F2	F3
		N1	N2	O1	O2			
40km/h	평균 등가소음도(Leq)	87	93	115	111	101	104	107
	평균 최대소음도(Lmax)	103	104	122	115	109	109	111
50km/h	평균 등가소음도(Leq)	93	100	113	111	99	100	108
	평균 최대소음도(Lmax)	107	113	122	117	102	104	112



KTX 차량에 적용되고 있는 제품 (현용품) 시제품 FM156

그림 3.3.53 현차시험용 현용품과 시제품

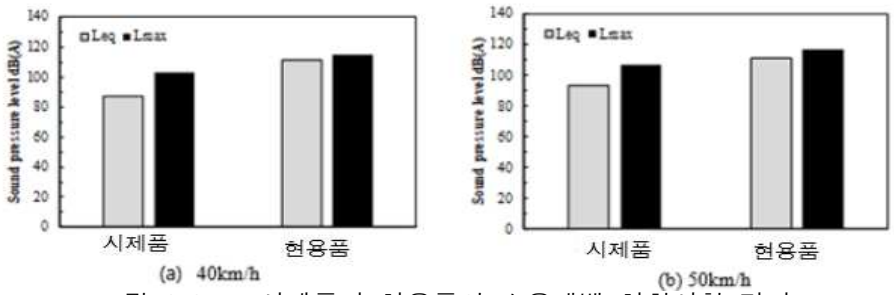


그림 3.3.54 시제품과 현용품의 소음레벨 현차시험 결과

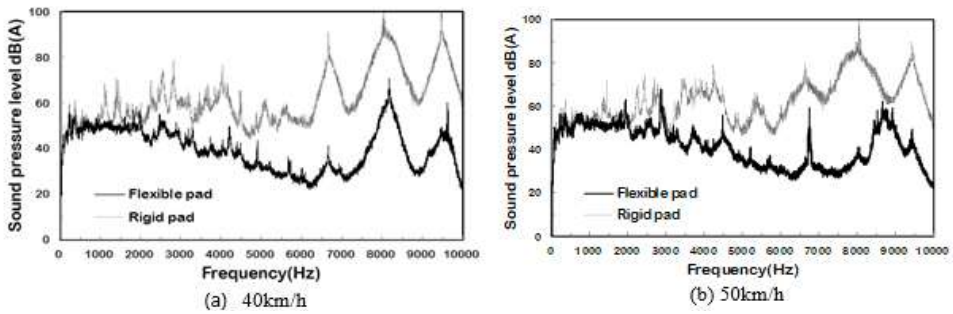


그림 3.3.55 KTX 제동소음 주파수 분석결과

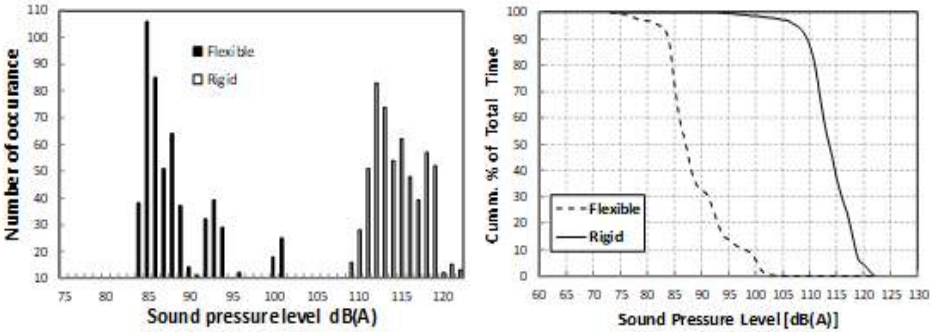


그림 3.3.56 40 km/h 주행 시 KTX 제동소음 누적 히스토그램

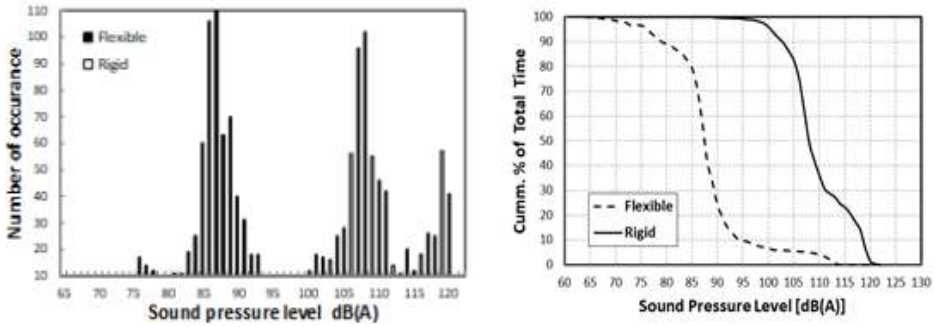


그림 3.3.57 50 km/h 주행 시 KTX 제동소음 누적 히스토그램

표 3.3.3 대차단위 현차 제동소음시험 조건별 평균진동레벨 및 최대진동레벨

[단위 : dB(V)]

열차 속도 (km/h)	측정 위치 / 평가 항목	시제품 (FM156)					현용품 (제품 A)				
		캘리퍼			대차		캘리퍼			대차	
		X	Y	Z	Y	Z	X	Y	Z	Y	Z
40	평균 진동 레벨 dB(V)	70	70	68	59	59	98	105	97	83	77
	최대 진동레벨 dB(V)	86	84	85	74	72	109	116	107	91	86
	표본수(n)	3회 평균									
50	평균 진동 레벨 dB(V)	75	75	67	65	63	80	83	77	82	74
	최대 진동레벨 dB(V)	104	101	91	86	82	101	104	96	96	87
	표본수(n)	3회 평균									

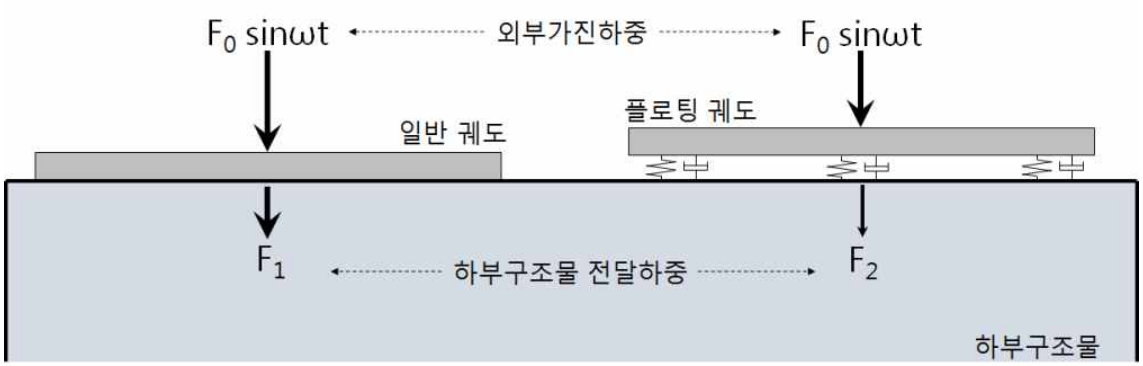
X : 차량 진행 방향
Y : 차량 횡 방향
Z : 차량 수직 방향

4. 4세부 역사구조물 소음/진동 저감기술 개발

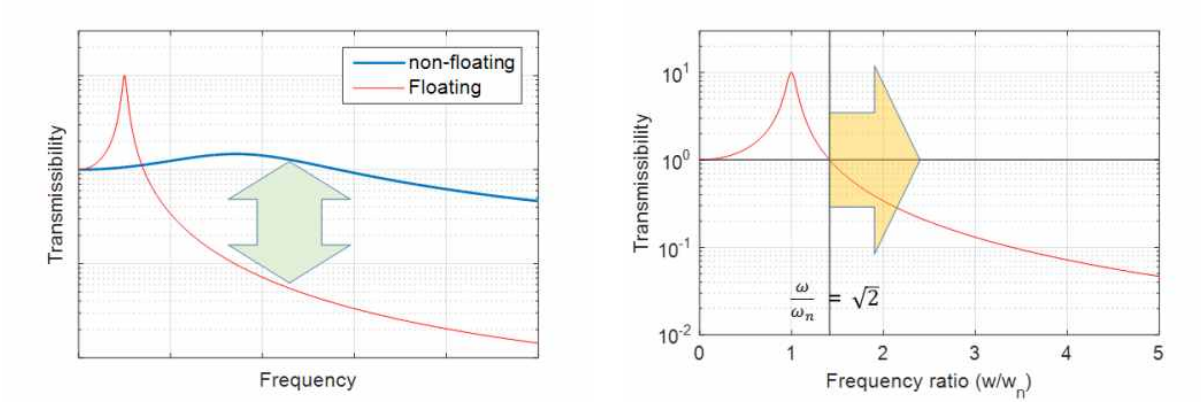
4.1 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 시스템 설계

4.1.1 시스템 파라미터 설계

○ 시스템 고유진동수 및 방진장치 강성 결정



<그림 3.4.1> 하부 구조물 하중 전달 개념도



(a) 일반궤도와 플로팅궤도의 전달률 곡선 (b) 플로팅 슬래브 궤도의 진동 저감 주파수

<그림 3.4..2> 전달률 곡선

<표 3.4.1> 프리캐스트 플로팅궤도 시스템 고유진동수

항목	단위	새마을호	무궁화호	화물열차
단위 길이당 상재 질량	ton/m	3.82	5.99	8.44
개별 방진장치 강성	kN/mm	22.5	22.5	22.5
단위 길이당 강성	kN/mm/m	27.4	27.4	27.4
고유진동수	Hz	13.48	10.77	9.07

4.1.2 동적 안정성 검토

○ 프리캐스트 플로팅 궤도는 하부에 방진장치가 설치되어 기존 궤도 대비 큰 변위가 발생하고 새로운 궤도 형식이기 때문에 주행안전, 승차감 등의 동적 안정성에 대한 검토가 필요

○ 탈선계수 및 윤중감소율 한계

○ 궤도틀림에 의한 차체 가속도

○ 행안전 확보를 위한 차체 연직 가속도

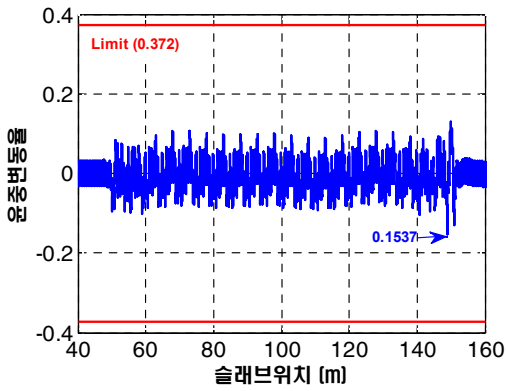
○ 승차감

○ 궤도 사용성

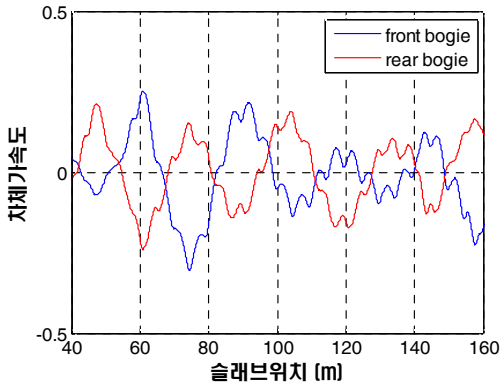
- 레일 응력
- 레일 상향력
- 레일 궤도면에서의 부등변위량

<표 3.4.2> 동적안정성 평가기준 정립

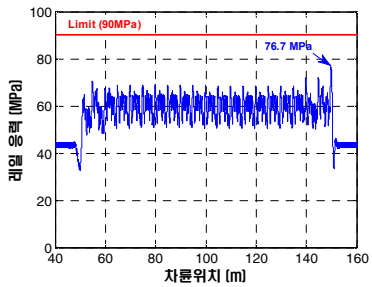
검토항목	평가항목	평가기준
① 주행안전:	윤중변동율	0.372 이하
② 승차감:	차체 연직가속도 이하	1.3 m/s^2 이하
③ 구조 안전/사용성	레일 응력	90 MPa 이하
	레일 상압력	초기 체결력의 70% 이하
	레일 부등변위-평행이동각	4/1000 이하



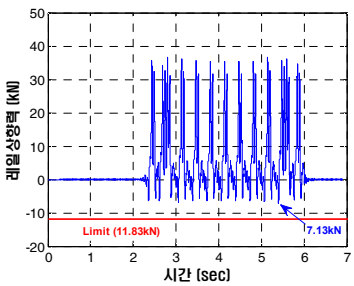
(a) 윤중변동율



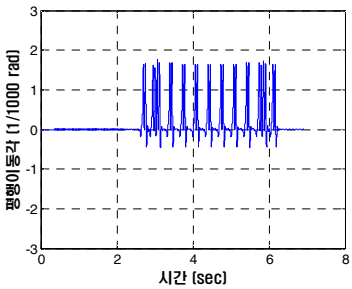
(b) 차체 연직가속도



(c) 레일응력



(d) 레일상향력



(e) 평행이동각

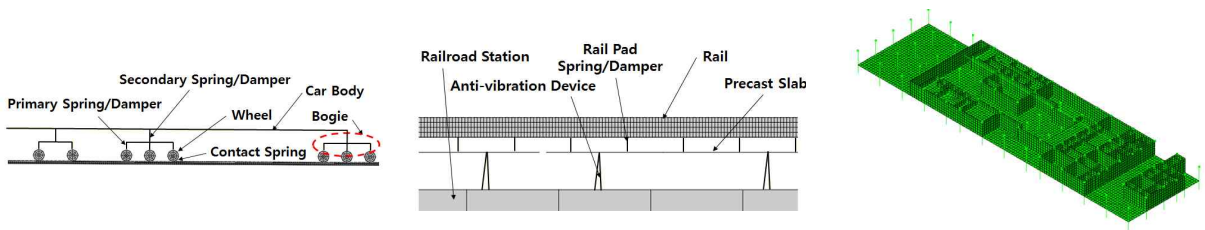
<그림 3.4.3> 동적안정성 검토결과

4.1.3 시스템 방진 성능 평가

○ 프리캐스트 플로팅 슬래브궤도의 방진 및 방음 효과를 검토하기 위하여 역사 구조물을 모델링하여 플로팅 슬래브궤도 적용 전 후의 진동 및 소음을 수치해석을 통해 비교 검토

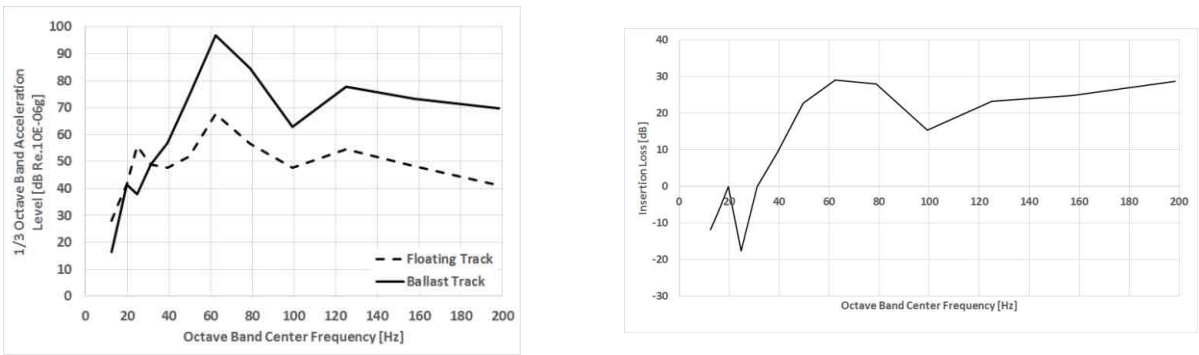
○ 시범역사 후보지로 선정된 대천역이며 새마을 및 KTX 열차 통과의 2가지 경우에 대하여 수행하였다. 대천역에 대한 해석모델은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 작성하였으며, 계측 결과를 이용한 모델개선은 ABAQUS를 이용한 열차-궤도-구조물 상호작용을 동시에 고려하는 해석을 수행하였다.

○ 해석결과 진동은 20~40Hz 대역에서 5dB, 70~200Hz 대역에서 10~30dB 저감 효과 예측, 소음은 최대 20dB, 평균 10~15dB 저감 효과 예측



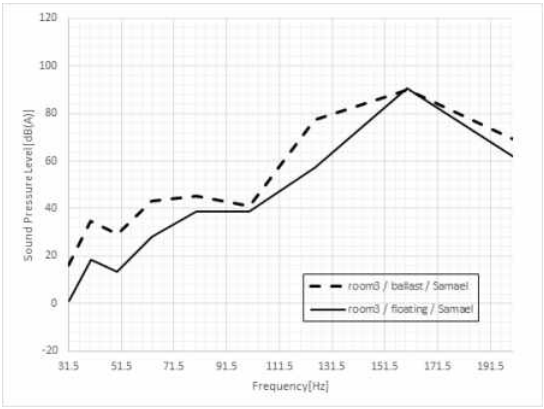
(a) 열차 해석 모델 (b) 궤도 해석 모델 (c) 대천역 해석모델

<그림 3.4..4> 해석 모델

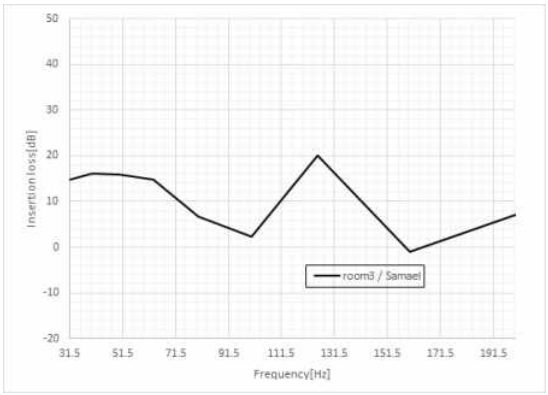


(a) 역무실 주파수 응답 (b) 역무실 삽입 손실

<그림 3.4..5> 시스템 방진성능 예측 결과 (KTX)



(a) 역무실 주파수 응답



(b) 역무실 삽입 손실

<그림 3.4..6>시스템 방음성능 예측 결과 (KTX)

4.1.4 표준단면 구조설계

○ 단면설계를 위해 MIDAS-civil2012를 사용하여 체결장치, 슬래브 단면 높이, 응력, 모멘트 검토

○ RC가로보 궤도패널 검토 결과, RC가로보로 인하여 좌·우측 패널의 일체화 거동이 가능하므로 패널 운반 및 거치시 발생되는 편심하중과 차량운행중 발생되는 횡하중에 대하여 구조적으로 안정할 것으로 판단되며, 패널 높이 300㎜에서 레일체결장치와 경합을 배제하고 철근의 등간격 배치가 가능하므로 시공성 측면에서도 유리

<표3.4.3> 최대휨응력

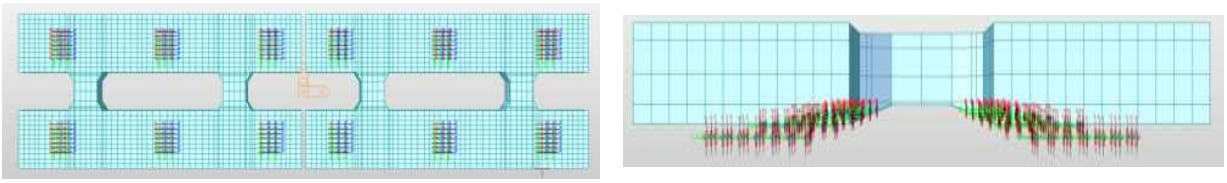
구 분		상면	하면
슬래브 (MPa)	종방향(축응력)	-6.654	8.673
	횡방향(휨응력)	-3.264	3.439
RC가로보 (MPa)	종방향	-5.878	9.427
	횡방향	-5.259	7.551

<표3.4.4> 최대 휨모멘트 검토

구 분		상면	하면
슬래브 (kN·m/m)	종방향	-2.332	57.994
	횡방향	-2.192	31.275
RC가로보 (kN·m/m)	종방향	-0.223	17.948
	횡방향	0	10.580

<표 3.4.5> 패널-방진장치-역사 슬래브간 연결요소 안전성 검토

구 분		허용치 (kN/개소)	설계하중 (kN/개소)	검토
Insert Plate	Stud Bolt 내하력	22.0	19.88	O.K.
	방진장치 연결 Bolt	28.27	19.88	O.K.
케미컬 앵커볼트		48.8	19.88	O.K.
Inset Plate부 지압강도		5,967	139.66	O.K.



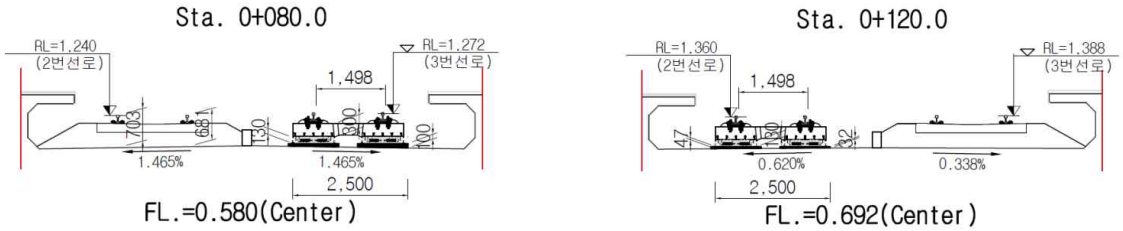
(a) 평면도 (b) 단면도

<그림 3.4.7>구조해석 모델

4.1.5 방진마운트 설계

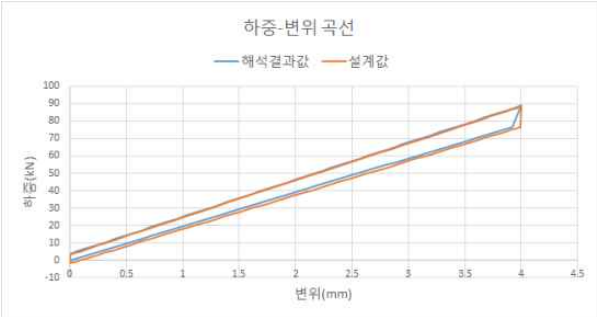
○ 대상역사 현장요건 반영 설계(대천역 실제 측량결과 반영)로 681~726㎜ 범위 이내로 검토되어 방진장치 최종 높이를 130㎜로 확정

○ 방진장치 특성설계 및 이론적 거동 예측을 통해 유효강성은 설계값이 22.53kN/㎜, 해석값이 22.23kN/㎜로 약 1.3%의 오차율율로 방진장치 상세설계의 신뢰성을 확보



(a) 최대 위치 (b) 최소 위치

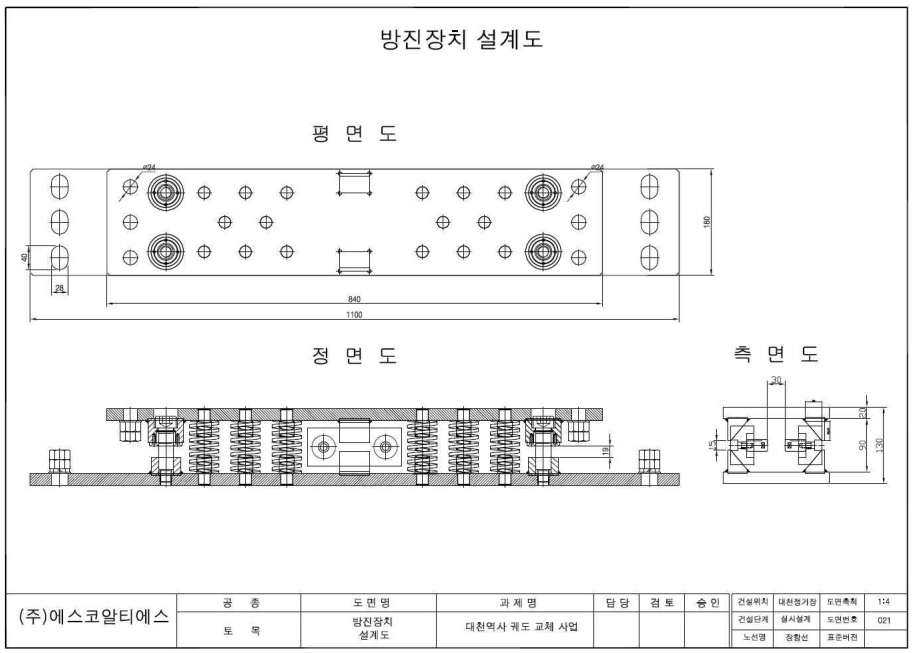
<그림 3.4..8> RL~FL 최소 위치 궤도구성 검토



<그림 3.4..9>설계/해석 거동 그래프

<표 3.4.6> 설계/해석결과 비교

항목	ANSYS 해석 결과 값	설계 값
최대하중(kN)	88.93	88.51
최소하중(kN)	0	-1.61
변위폭(mm)	4	4
유효강성(kN/mm)	22.23	22.53
EDC 면적	31.9	33.7
감쇄비(%)	3.1	3



<그림 3.4.10> 방진장치 설계도

4.2 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 개발

4.2.1 기존 기술/시공사례 분석

○ 해외 기존사례를 통한 방진장치 적용요건 및 슬래브 적용요건 분석

- 처짐에 대한 규정을 엄격히 제한하고 있으나 플로팅슬래브 궤도는 3㎜보다 큰 변위를 허용
- 차량의 운행하중 및 슬래브 하중을 지지할 수 있도록 방진장치의 스프링계수 확보 필요
- 스프링계수가 너무 크게 되면 소음 및 진동 저감 효과가 저하되므로 설계시 검토 필요

○ 플로팅궤도 선진국 사례 조사

<표 3.4.7> 선진국 사례 조사

	WMATA(미국)	JR 동일본
설치구간	- 60피트(약 18m)의 길이에 일방향 레일을 포함하는 폭 2.7m, 두께 460mm의 패널 - 고무 또는 유리섬유 재질의 방진패드 - 현장타설식 - 설치목적은 워싱턴 중심가에 산재한 문화유산(백악관, 국회의사당, 메모리얼, 박물관 등)과 진동에 취약한 정밀산업 사업체가 입점한 각 구조물 등에 유해한 진동을 줄이기 위해	- 미나토미래역(15년 운용 중) - 에비스역(15년 운용 중) - 오오카마역(15년 운용 중) - 요코하마역(15년 운용 중)
문제점	- 방진패드의 내구성에 대한 고려 및 유지관리 계획의 미흡으로 인해, 현재 방진패드의 크리프변형에 따른 궤도의 침하가 진행되어 궤도간 단차가 진행되는 문제가 발생 - 개선하기 위해서는 방진패드의 전면교체가 불가피한 상황이나 계획단계에서 유지보수에 대한 계획이 부재하여 매우 어려운 상황	- 슬래브 누수로 인한 궤도내 우수유입으로 방진장치 설치개소 우수 노출로 인해 방진장치에 녹이 발생
사진		

4.2.2 마찰댐퍼형 방진장치 설계 및 개발

○ 궤도슬래브의 방진장치 설치 방법을 유지관리 및 내구성에 불리한 관통형에서 시공성 및 내구성이 유리한 받침형으로 개선함에 따라 기존 원형 형태의 방진장치 형상을 사각형태로 변경하여 구조를 단순화하였으며, 방진장치 평면형상을 궤도 슬래브 폭방향으로 길게하여 궤도로부터 전달되는 하중을 안전하게 하부로 전달하도록 하고, 궤도 패널간의 접촉부분의 Crack 및 전단파괴 가능성을 최소화하였다.

○ 궤도처짐 기준 4㎜를 만족시키기 위해 기본 설계(안)보다 많은 연직 스프링을 배치하여 연직강성을 증가시킴으로 열차 운행 시에 궤도 처짐을 감소



(a) 개념설계



(b) 기본설계

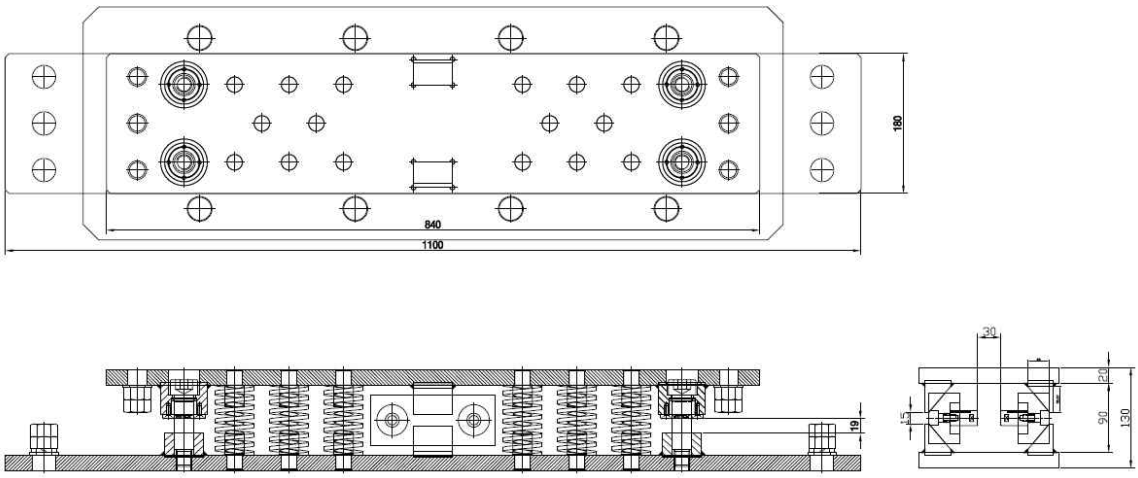


(c) 상세설계

<그림 3.4.11>마찰댐퍼형 방진장치 설계

<표3.4.8> 피로시험 후, 방진장치 구성요소별 상태

구성요소	균열 및 찌그러짐
방진장치 상판 및 하판	無
마찰블럭	마모 발생
인서트플레이트 및 높이보정 받침	無
방진장치 전체 높이 변화	無
방진장치 거동 변화	無



<그림 3.4.12> 마찰댐퍼형 방진장치 최종설계(안)

4.2.3 사전제작형 플로팅궤도 최종설계

○ 개념설계

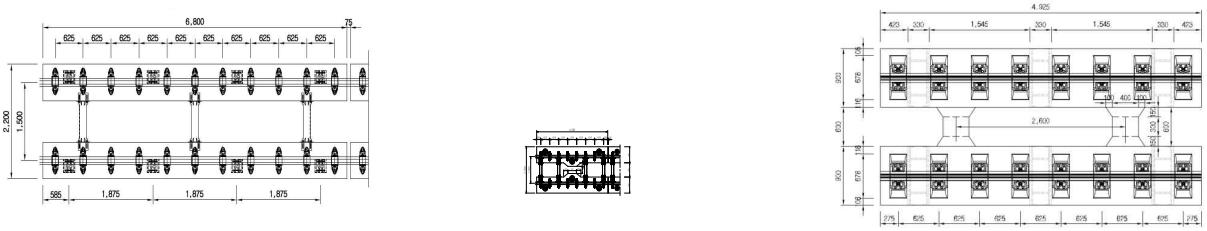
- 플로팅궤도의 구성은 궤간을 분리한 한쌍의 궤도요소를 연결하여 고정하는 현장조립 강봉형 가로바, 레일체결장치, 레일로 구성. 기존 역사 시공성을 감안하여 1개 패널의 중량은 5톤 미만, 길이는 6.8m로 제안

○ 기본설계

- 시제동 하중 및 횡력에 대한 안전성에 대한 우려로 스토퍼를 적용할 수 있도록 패널 중심에 요철을 둠. 기존 역사 시공성을 고려하여 길이를 4.945m로 조정

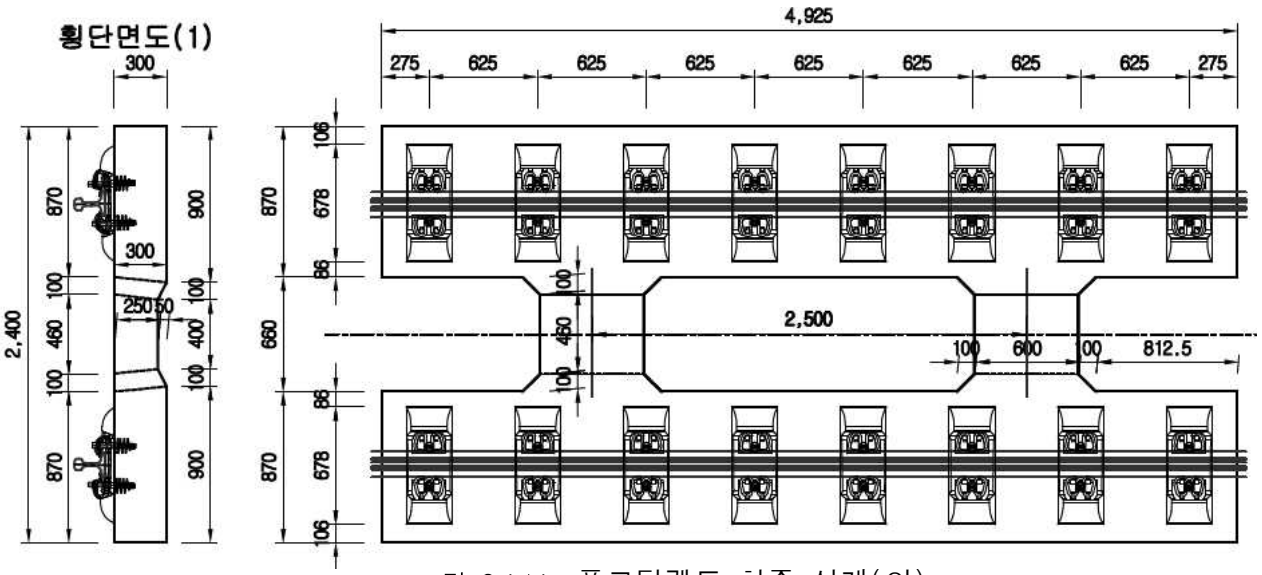
○ 상세설계

- 사전제작형 플로팅궤도 기본 설계 (안)은 개념 설계(안)과는 다르게 길이를 4.925m로 축소시켰으며, 강봉 가로바에서 콘크리트 가로바로 변경하고 패널의 형상을 단순화하고 방진장치의 배치를 수정함으로서 시공성 및 경제성을 고려



(a) 개념설계 (b) 기본설계 (c) 상세설계

<그림 3.4.13> 플로팅궤도 설계



<그림 3.4.14> 플로팅궤도 최종 설계(안)

4.2.4 단위구성품 성능시험

○ 단위구성품 성능시험

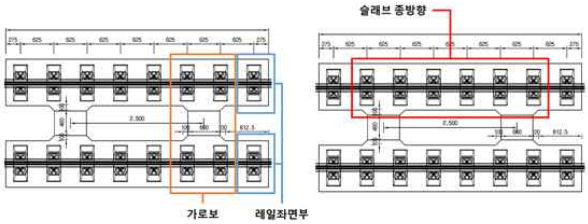
- 슬래브 패널 외관/치수 검사
- 원재료시험(콘크리트, 골재, 철근, 그리스, 혼합수, 혼화재료, 방진장치)
- 슬래브 정동적 성능시험(PSC, RC 침목의 휨강도 시험방법, KRS TR 0008-15)
- 레일 전기저항, 인발저항 시험
- 방진장치 정동적 성능시험(DIN45673-7)
- 기타구성품 성능시험(높이보정받침, 케미컬앵커, 인서트플레이트)
- 전 구성품 공인시험성적서 발급

검사 항목 / 순서	제품 형상치수				④좌면 요철 (±1) mm		⑤좌면경사 (±1) mm		⑥좌면 비틀림(±1) mm					
	①제품길이 (4,925 ± 10) mm		② 단부폭 (2,400 ±10) mm	③ 단부 높이 (300 ±10) mm	좌	우	좌	우	좌			우		
	상부	하부							1	2	편차	1	2	편차
1	4924.0	4925.0	2,398.0	298.5	0.05	0.04	3.15	3.35	3.26	3.33	0.07	3.25	3.15	0.10
2					0.04	0.05	3.18	3.26	3.32	3.25	0.07	2.98	2.75	0.23
3			2,399.0	299.0	0.06	0.05	2.88	2.95	3.14	3.25	0.11	2.87	2.88	0.01
4					0.05	0.04	2.75	2.85	3.16	3.25	0.09	2.65	2.98	0.33
5			2,399.0	299.0	0.04	0.06	3.26	2.78	3.46	3.26	0.20	2.85	2.49	0.36
6					0.05	0.04	2.87	2.64	3.15	3.35	0.20	2.91	2.66	0.25
7			2,398.0	300.0	0.06	0.05	3.15	2.95	3.35	3.42	0.07	2.94	2.66	0.28
8					0.04	0.04	3.16	2.99	3.15	3.18	0.03	2.69	2.85	0.16

슬래브 패널 외관/치수 검사

시 험 항 목	단 위	시험규격 및 조건	시험결과 (평균)	기준치	검토
슬럼프	mm	KS F 2402	170	180±25	O.K
공기량	%	KS F 2409	2.8	3.5±1.5	O.K
염화물	kg/m³	KS F 4009	0.054	0.3 이하	O.K
압축강도	MPa	KS F 2405	57	40 이상	O.K
시 험 항 목	**단 위**	**시험규격 및 조건**	**시험결과 (평균)**	**기준치**	**검토**
입도 (골재크기)	mm	KS F 2526	통과	20	O.K
안정성	%	KS F 2507	3.3	12 이하	O.K
마모율	%	KS F 2508	25.2	40 이하	O.K
함수율	%	KS F 2503	0.73	3.0 이하	O.K
마모저항성	%	KS F 2527	56	55 이상	O.K
알칼리반응	mol/L	KS F 2545	12.94mol/L	무해한골재	O.K
시 험 항 목	**단 위**	**시험규격 및 조건**	**시험결과 (평균)**	**기준치**	**검토**
슬럼프	mm	KS F 2560	180	180±10	O.K
공기량	%	KS F 2560	4.5	4.8±0.5	O.K
감수율	%	KS F 2560	23	18 이상	O.K
압축강도비	%	KS F 2560	125	115 이상	O.K
동결융해 저항성	%	KS F 2560	86	80 이상	O.K
전체 알칼리량	kg/m³	KS F 2560	0.03	0.3 이하	O.K

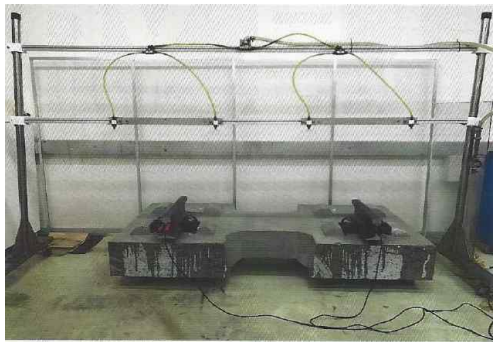
원재료 시험



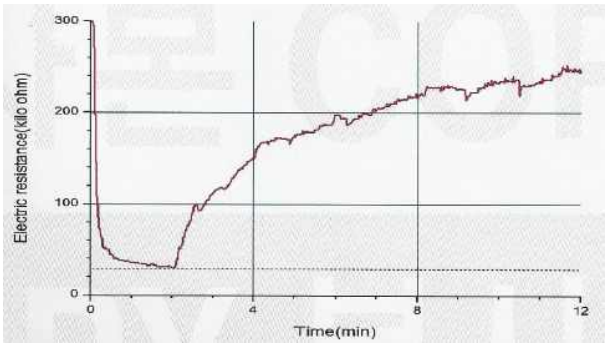
슬래브 정동적 성능시험 방법

시험품		시험결과 (kN)	합격기준 (kN)	균열폭 (㎜)
No. 1	기준 시험 하중 (P_0)	30.23	-	-
	균열 0.05 ㎜ 최대 하중 ($P_{0.05}$)	95.23	> 45.35	0.05
	파괴 하중 ($P_{0.5}$)	165.23	> 66.51	0.37
No. 2	기준 시험 하중 (P_0)	30.23	-	-
	균열 0.05 ㎜ 최대 하중 ($P_{0.05}$)	90.23	> 45.35	0.05
	파괴 하중 ($P_{0.5}$)	150.23	> 66.51	0.12

슬래브 정동적 성능시험 결과(가로바)



레일 전기저항 시험



전기저항 시험결과



방진장치 정동적 시험

Hz	동적 수직 유효강성 (kN/mm)	설계 강성값 오차율	감쇠율
4	26.807	7%	9.537%
5	26.148	4%	9.670%
6	26.790	6%	10.090%
8	25.921	3%	10.594%
10	25.619	2%	11.899%
12	26.098	4%	12.540%
14	25.040	0%	15.597%
16	25.234	0%	20.881%
18	24.762	-2%	24.730%
20	24.469	-3%	25.212%
설계 강성값 (kN/mm)	25.16		

방진장치 시험결과

<그림 3.4.15>< 단위구성품 시험, 시험결과

4.2.5 실대형 조립시험

○ 사전제작형 플로팅 궤도의 성능검증를 위하여 정적하중시험, 동적하중시험 및 피로시험을 수행

○ 정적재하시험 : 레일 체결 전/후 단부 및 패널 연결구간 하중재하 시험결과 기준을 충족

○ 동적 재하시험 : 패널응답 및 동적구조 안정성 평가 시행 결과 기준을 충족



(a) 시험전경1



(b) 시험전경2

<그림 3.4.16> 실대형 조립시험 시험전경

<표 3.3.9> 시험조건

(a) 정적재하 시험

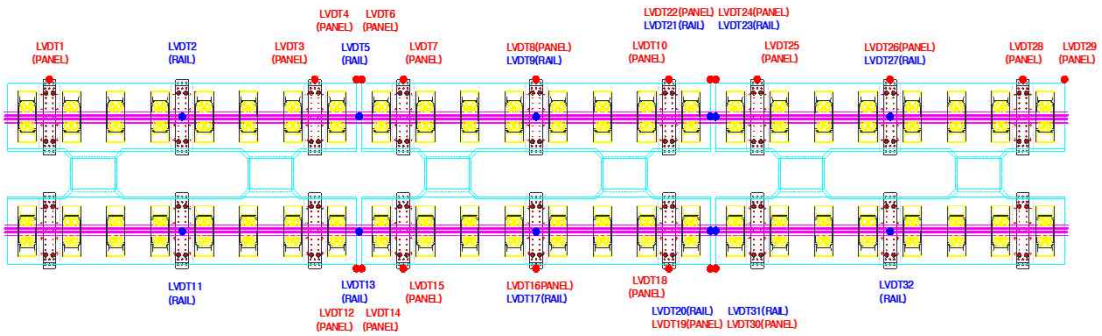
구분	로딩번호 / 레일양측재하	하중재하점	하중크기 (Step)
레일 체결이전	SPL01	2/3패널 단부 2/4지점 (492.5 cm / 좌우측레일)	150~440kN (8step Loading)
레일 체결이후	SRL01	2/3패널 2/4지점 (246.25 cm / 좌우측레일)	150~440kN (8step Loading)
	SRL02	2/3패널 1/4지점 (123.12 cm / 좌우측레일)	150~440kN (8step Loading)
	SRL03	2/3패널 단부 4/4지점 (492.5 cm / 좌우측레일)	150~440kN (8step Loading)

(b) 동적재하 시험

구분	로딩번호 / 레일양측재하	하중재하점	최대 가진하중	가진 주파수 (Hz)	가진기
레일 체결 이후	DRL02-1	2/3패널 2/4지점 (246.25 cm / 좌우측 레일)	250 kN	3~5	Actuator
	DRL02-2	2/3패널 4/4지점 (500.00 cm / 좌우측 레일)	250 kN	3~5	Actuator

(c) 피로시험

구분	로딩번호 / 레일양측재하	하중재하점	가진 하중 (kN)	가진 주파수 (Hz)	예상 소요시간 (일수)	가진기
TF01	FRL01	1패널 2/4지점 (246.25 cm)	130±120	3	56h (2.31day)	Actuator



<그림 3.4.17> 센서 설치현황

<표 23.4.10> 조립시험 결과

측정항목		단위	시험기준	시험결과	판 정
정적시험	레일상대변위	mm	≤4	2.20	O.K
	레일응력	MPa	≤130	83.17	O.K
동적시험	레일상대변위	mm	≤4	1.49	O.K
	레일응력	MPa	≤130	55.24	O.K
피로시험	잔류변위	mm	≤8	0.19	O.K

4.3 현장시험시공 및 계측, 모니터링

4.3.1 현장시험시공 사전점검

○ 현장부설 의견수렴

- 현장부설 관계부서 회의를 통해 궤도 총괄 유지보수 업무를 담당하는 한국철도공사의 시설기술단 담당자와 테스트베드가 위치한 장항선 대천역의 관리 본부인 대전충남본부 궤도처 담당자 및 연구개발 컨소시엄 관계자 등이 참석하여 의견수렴

○ 안전성 검증

- 철도시설의 신규/개조/개량 항목에 해당하므로 안전성 검증을 시행하였으며 안전본부의 검토 의견을 반영하여 작업계획서 및 안전관리계획서를 수정·보완하여 시행

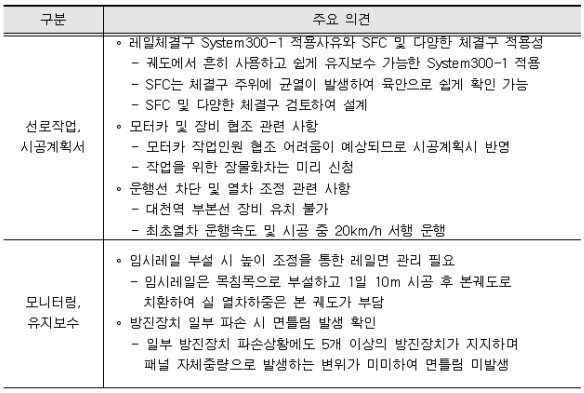
○ 공사/공단 현장시험부설 검토

- 철도시설성능검증지침 제24조(현장설치 시험시공)에 의거 현장설치시험계획에 대한 위원회 상정을 위해 공단 사업부서, 운영기관 시설물 관리부서와 협의를 시행

- 한국철도시설공단에서는 현장설치 시험장소, 시험기간, 공인시험기관의 적정성을 평가하였으며 한국철도공사에서는 현장설치 시험계획을 평가를 통해 최종 시험계획서를 보완

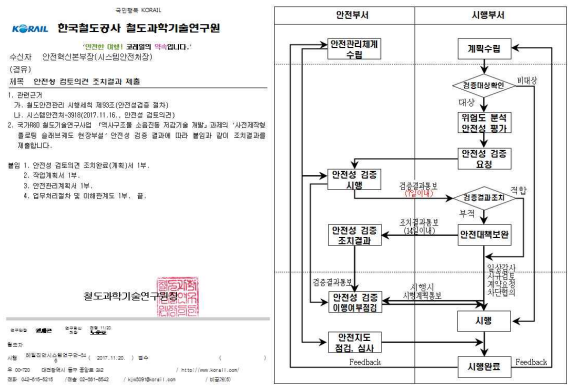
○ 철도보호지구 행위 신고

- 현장부설시험을 위해 다음과 같이 철도보호지구 행위를 신고하고 공단 담당부서의 협의조건을 시공계획서에 반영

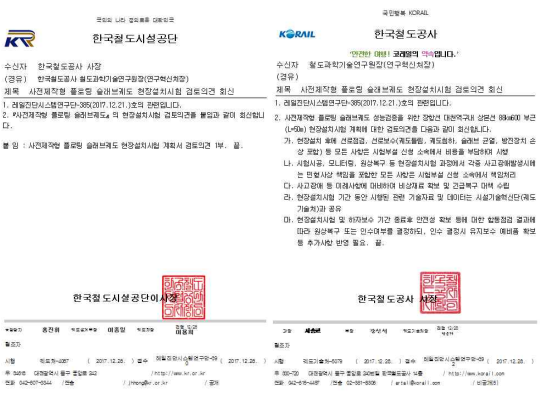


구분	주요 의견
선로작업, 시공계획서	◦ 레일체결구 System300-1 적용사유와 SFC 및 다양한 체결구 적용성 - 궤도에서 흔히 사용하고 쉽게 유지보수 가능한 System300-1 적용 - SFC는 체결구 주위에 균열이 발생하여 육안으로 쉽게 확인 가능 - SFC 및 다양한 체결구 검토하여 설계 ◦ 모터카 및 장비 협조 관련 사항 - 모터카 작업인원 협조 어려움이 예상되므로 시공계획시 반영 - 작업을 위한 장물화차는 미리 신청 ◦ 운행선 차단 및 열차 조정 관련 사항 - 대천역 부본선 장비 유치 불가 - 최초열차 운행속도 및 시공 중 20km/h 서행 운행
모니터링, 유지보수	◦ 임시레일 부설 시 높이 조정을 통한 레일면 관리 필요 - 임시레일은 목침목으로 부설하고 1일 10m 시공 후 본궤도로 치환하여 실 열차하중은 본 궤도가 부담 ◦ 방진장치 일부 파손 시 면틀림 발생 확인 - 일부 방진장치 파손상황에도 5개 이상의 방진장치가 지지하며 패널 자체중량으로 발생하는 변위가 미미하여 면틀림 미발생

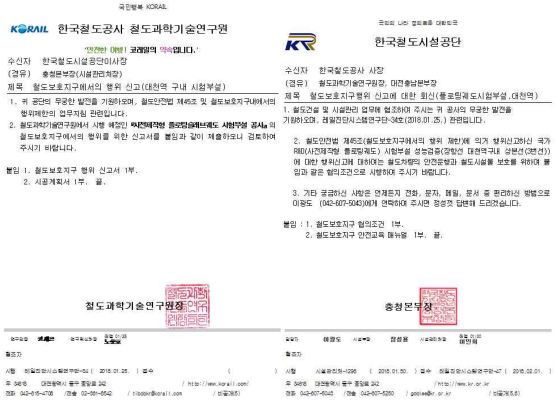
(a) 현장부설 의견수렴



(b) 안전성 검증



(c) 공사/공단 현장시험부설 검토



(d) 철도보호지구 행위 신고

<그림 3.4.18>사전점검 결과

4.3.2 현장시험시공

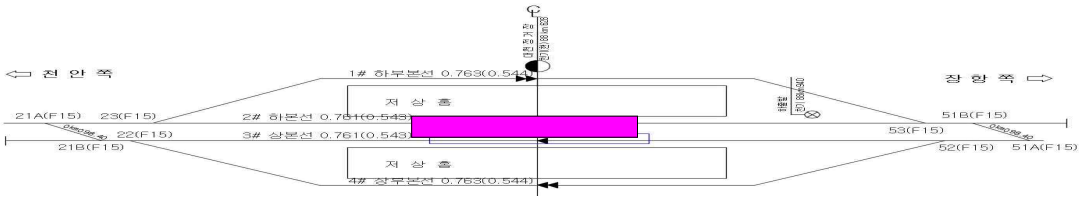
○ 공사개요

<표 3.4.11> 공사개요

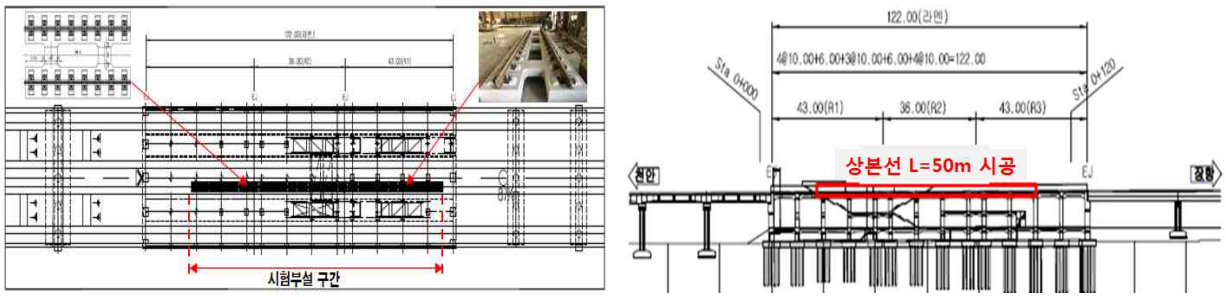
가. 공 사 명	대천역구내 사전제작형 플로팅슬래브궤도 시험부설
나. 공사목적	국가R&D「역사구조물 소음/진동 저감기술 개발」관련 신규 개발된 사전제작형 플로팅슬래브궤도 성능검증을 위한 시험시공
다. 공사기간	2018.01.27. ~ 02. 04
라. 공사위치	장항선 대천역구내 상본선 천기(현) 88km600 ~ 88km650(L=50m)
마. 궤도현황	궤도 형식/R.L-F.L : 60kg KR, PC침목, 자갈 / 640~696mm 선형/구배 : 직선



<그림 3.4.19> 현장부설구간



<그림 3.4.20> 배선도



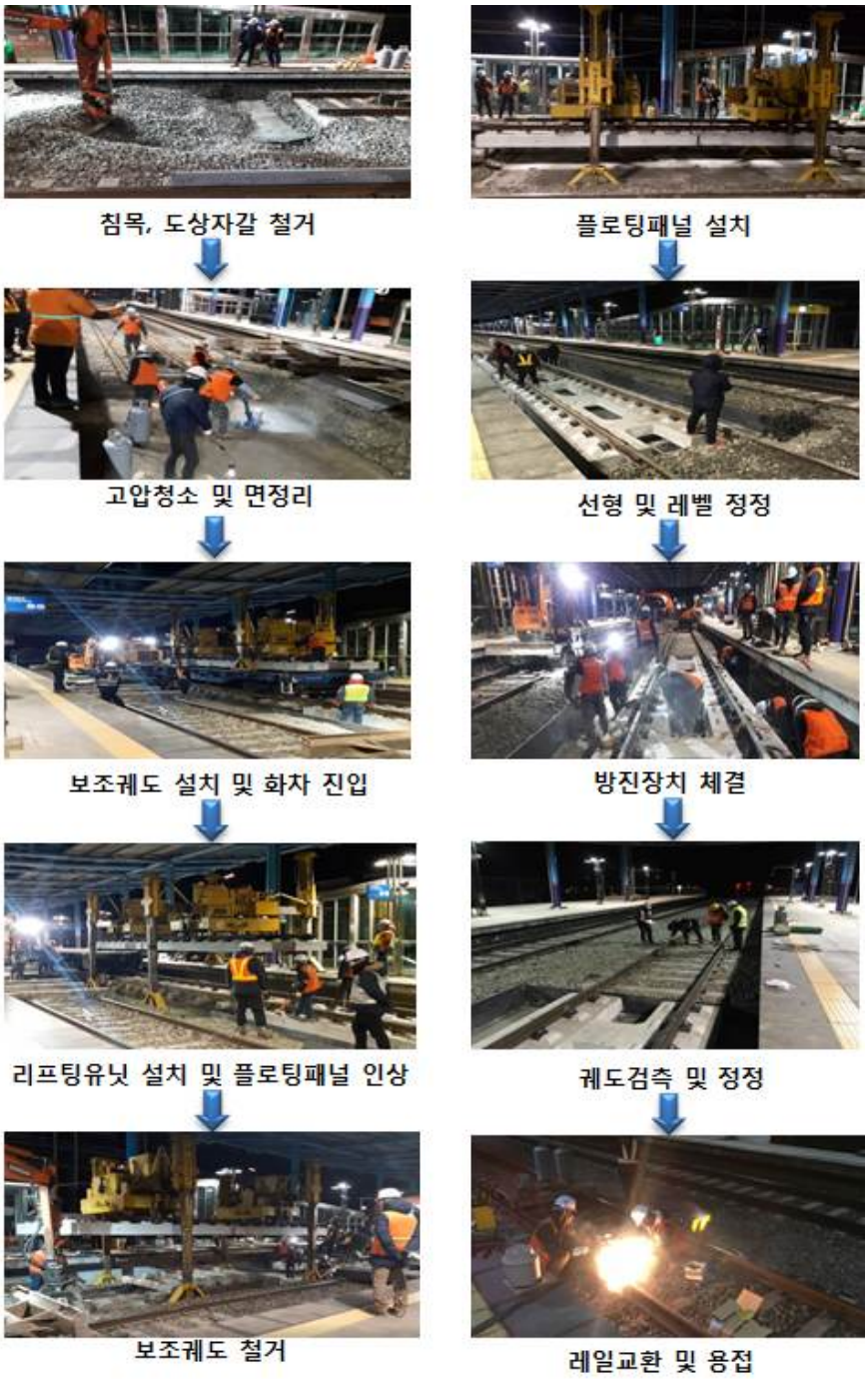
(a) 평면도 (b) 종단면도

<그림 3.4.20> 시공위치



<그림 3.4.21> 현장전경

○ 시공과정



<그림 3.4.22> 시공과정

○ 시공완료



<그림 3.4.23> 시공완료

4.3.3 계측 및 모니터링 계획

○ 본 연구에서는 1~4차년도 연구수행을 통해 개발된 '사전제작형 플로팅 슬래브궤도'의 현장 부설 후 계측 및 모니터링을 통해 궤도의 성능을 평가하고 검증하기 위해 궤도 주행안정성 성능 분석과 소음진동 저감성능 분석 두 파트로 구분하여 연구를 실시

○ 궤도의 안전성을 검증하기 위한 방법으로 한국철도시설공단에서 시행하는 '철도시설성능검증 지침'에 근거하여 현장설치시험을 통한 현장모니터링을 선정하였다. 현장에서 실제 열차가 주행하는 조건 하에 '사전제작형 플로팅 슬래브궤도'의 성능 및 적합성을 검증하기 위해 실제 열차 주행에 의한 효과, 계절 변화에 따른 영향 등 기술요건 적합성 검토단계나 조립시험에서 성능을 명확히 확인하기 곤란한 사항들을 종합적으로 판단하기 위해 실시

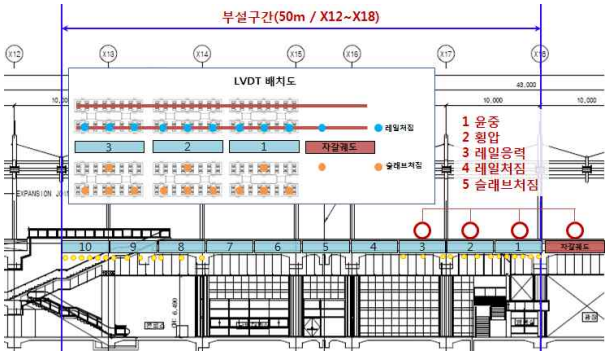
○ 궤도의 소음진동 저감 성능 분석을 위해 부설 전, 부설 후 소음진동을 계측하여 비교분석을 실시하였다. 부설 전 역사를 대표하는 개소를 5개소를 선정하였다. 승강장, 2층회의실, 침실, 역무실, 대합실에서 각각 소음과 진동을 측정하여 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 부설 전 후 어떤 차이를 보이는지 분석

<표 3.4.12> 궤도주행안정성 계측/모니터링 시험항목

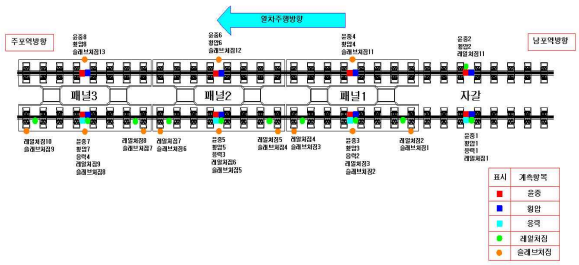
구 분	항 목	시험항목	시험방법	합격기준
궤도주행 안정성 성능시험	동적변위 응력	①윤중/횡압 ②레일응력 ③레일처짐	현차주행시험시 지상계측, 계측지점 3개소	① 윤중감소율 -발생빈도 100%에서 50%이하 -발생빈도 0.1%에서 80%이하 ② 레일응력 최대값 130MPa 이하 ③ 레일-슬래브상대변위 4mm
		④탈선계수 ⑤궤도지지강성 ⑥슬래브 간 단차 ⑦슬래브 처짐	현차주행시험시 지상계측	-
모니터링	궤도틀림	궤도검측	궤도검측차 또는 그에 준하는 장비이용 궤도 틀림 측정	- 선로정비지침 궤도보수기준 적용 - 통상적인 수준 이하의 궤도틀림 유지보수 횟수 및 난이도 확보
	외관상태	구성품의 손상상태	육안조사	① 균열 (0.3mm이하) ② 구성요소 파손 변형이 없을 것 ③ 구성품의 조기손상이 없을 것

<표 3.4.13> 소음진동 저감성능 시험항목

항 목	시험항목	시험방법	합격기준
진동	- 승강장(1,5) - 레일(2,6) - 침목(3,7) - 슬래브(4,8) - 2층 회의실(9) - 침실(10) - 대합실 콘코스(11) - 역무실(12)	진동가속도계 측정(dB(V))	◦ 부설전 - 부설후(역무실,대합실,침실) 진동 5dB(V) 이상 저감
소음	- 승강장(1,2) - 2층 회의실(3) - 침실(4) - 역무실(5) - 대합실 콘코스(6)	소음계 측정(dB(A))	◦ 부설전 - 부설후(역무실,대합실,침실) 소음 3dB(A) 이상 저감

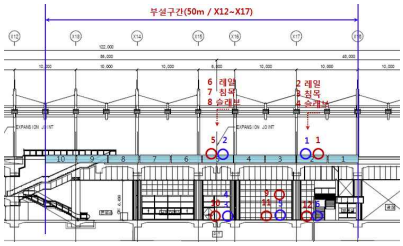


(a) 센서 부설계획

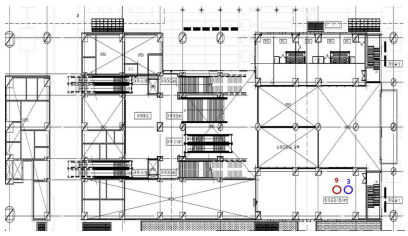


(b) 센서 설치위치 상세도

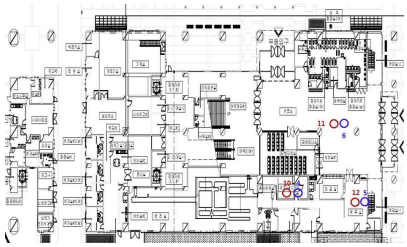
<그림 3.4.24> 궤도 주행안정성 시험



(a) 전체



(b) 2층 평면도



(c) 1층 평면도

<그림 3.4.25> 소음진동 저감시험

<표 3.4.14> 시험일정

검측방법	항목	2018년									비고
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	
궤도 주행 안정성	동적계측										혹한기(1차) 혹서기(4차)
			1차		2차			3차	4차		
			2/21		4/24			7/6	8/14		
모니터링	궤도틀림										
			2/21						8/14		
	외관상태										월1회 점검
			2/21		4/24			7/6	8/14		
소음진동 저감	소음진동계측										-
		전	후								
		1/26	2/21								
공인기관 입회											-
		1회	2회		3회			4회	5회		
		1/26	2/21		4/24			7/6	8/14		

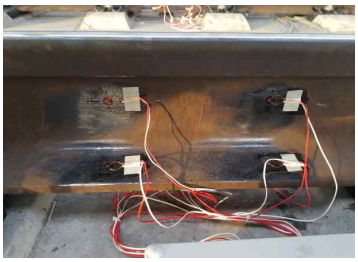
4.4 현장시험결과

4.4.1 궤도주행안정성 성능시험 결과

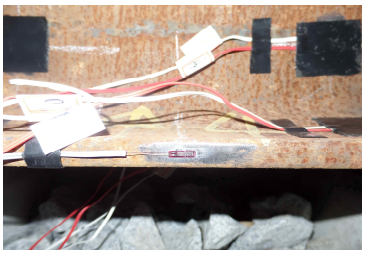
○ 궤도주행안정성 성능시험 결과 기준이내 만족. 공인시험성적서 발급



(a) 시험전경



(b) 윤중/횡압



(b) 레일응력



(c) 레일변위



(d) 슬래브변위

<그림 3.4.26> 궤도주행안정성 시험전경

<표 3.4.14> 궤도 성능시험 결과

평가항목	단위	위치	결과값(Max)				합격기준 (설계기준)	판정
			1차 (18.02)	2차 (18.04)	3차 (18.07)	4차 (18.08)		
윤중/횡압 (윤중감소율)	-	자갈	0.679	0.783	0.643	0.733	빈도누적 초과확률 ·100.%≤0.5 ·0.10%≤0.8	O.K
		패널1	0.664	0.780	0.670	0.648		
		패널2	0.660	0.652	0.681	0.659		
		패널3	0.659	0.645	0.643	0.644		
레일응력	MPa	자갈	33.26	42.97	44.67	56.13	≤ 130	O.K
		패널1	59.71	62.37	68.46	66.86		
		패널2	55.05	62.06	64.83	62.95		
		패널3	64.06	60.46	57.31	64.43		
레일처짐 (레일슬래브 상대변위)	mm	패널1	-1.947	-1.974	-1.663	-1.707	≤ 4	O.K
		패널2	-1.881	-2.080	-1.494	-1.459		
		패널3	-2.128	-2.436	-1.833	-2.000		
탈선계수	-	자갈	0.53	0.576	0.360	0.268	≤ 0.8	O.K
		패널1	0.32	0.433	0.376	0.238		
		패널2	0.37	0.464	0.398	0.376		
		패널3	0.34	0.338	0.467	0.187		
궤도 지지강성	kN/mm	자갈	48.89	47.41	49.97	35.39	-	-
		패널1	41.28	40.21	40.59	33.36		
		패널2	34.64	34.72	33.69	33.70		
		패널3	23.82	30.25	27.04	19.19		
슬래브 간 단차	mm	자갈-패널1	-2.149	-2.272	-2.273	-2.337	-	-
		패널1-패널2	-0.651	-1.797	-0.137	0.576		
		패널2-패널3	-1.805	-1.868	-1.761	-1.621		
슬래브 처짐	mm	패널1	-3.61	-3.793	-3.781	-3.513	-	-
		패널2	-3.70	-3.835	-3.865	-3.640		
		패널3	-5.27	-5.796	-5.836	-5.724		

4.4.2 모니터링 결과

○ 철도시설성능검증 심의위원회 결과에 따라 ‘사전제작형 플로팅 슬래브궤도’의 현장부설 이후 2018.2월 ~ 9월까지 8개월 간 계절 변화에 따른 궤도의 틀림, 구성품의 손상을 모니터링 하여 궤도성능에 저하를 발생시키는 요인을 점검

○ 궤도틀림은 당초 궤도검측차를 이용하여 계측하려 하였으나 모니터링 기간 동안 검측차가 장항선 구간을 운영하지 않아 선로정비지침 궤도보수 기준을 적용하여 인력검측을 수행

○ 외관상태는 체결장치의 코일탈락/파손/변형을 기록하였고 레일의 마모와 균열 진행정도를, 방진장치의 파손형태 그리고 콘크리트 슬래브의 손상/균열/파손을 점검하여 기록

○ 점검결과 궤도틀림, 체결장치, 레일, 방진장치는 모니터링 기간 동안 이상이 발생하지 않았다. 슬래브 균열은 일부 발생하였으나 0.3㎜ 이상의 균열 미발생

<표 3.4.15> 모니터링 기록 결과

구분	검사내용	모니터링 결과			
		1차	2차	3차	4차
궤도틀림		이상없음	이상없음	이상없음	이상없음
체결장치	코일탈락	〃	〃	〃	〃
	파손	〃	〃	〃	〃
	변형	〃	〃	〃	〃
레일	마모	〃	〃	〃	〃
	균열	〃	〃	〃	〃
방진장치	파손	〃	〃	〃	〃
	변형	〃	〃	〃	〃
콘크리트 슬래브	손상	〃	〃	〃	〃
	균열	〃	〃	〃	〃
	파손	〃	〃	〃	〃



플로팅슬래브궤도 모니터링 기록부

▷ 대 상 : 대천구내 상본선 플로팅궤도	작성자		입회자	
▷ 점검일시 : 2018.08.14	소속	서명	소속	서명
▷ 검 사 자 : 최 흥 국				

번 호	구 분	검사 내용	확인	판정	비고
1	궤도틀림	이상유무	○	이상없음	검측기록부 별첨
2	체결장치	코일탈락	○	“	
		파손	○	“	
		변형	○	“	
3	레일	마모	○	“	
		균열	○	“	
4	방진장치	피손	○	“	
		변형	○	“	
5	콘크리트 슬래브	손상	○	“	
		균열 (0.3mm 이하)	○	“	균열망도 별첨
		파손	○	“	

궤도검측기록부

검측일 : 2018. 08. 14
조사자 : 입회자 :

선별	상하	역 구 간	위 치	직곡별	레일종별	비 고
장항선	상	대천역구내	88.600~88.650	직	60kg	플로팅궤도 시험부설 구간

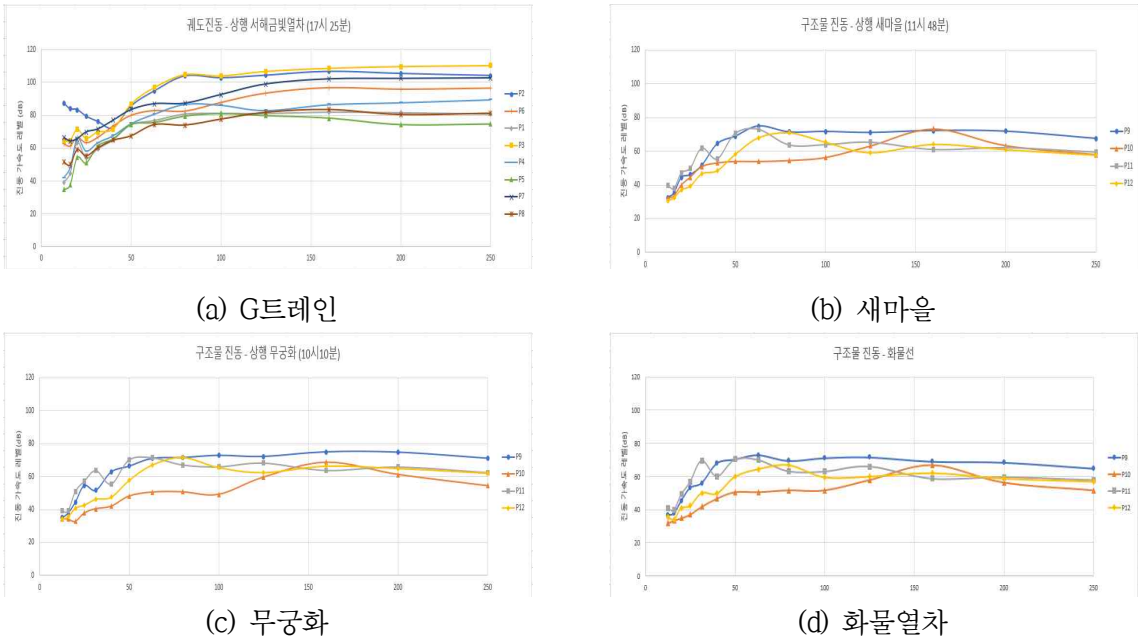
측점	위치	궤간 (mm)	수평 (mm)	면맞춤 (mm) 좌	면맞춤 (mm) 우	줄맞춤 (mm) 좌	줄맞춤 (mm) 우	비고
0	88.600	0	+1	0	0	+1	0	
1	88.605	-1	-1	0	0	+1	0	
2	88.610	-2	-1	0	0	-1	+1	
3	88.615	-1	+1	0	0	0	-1	
4	88.620	-1	+1	0	0	0	-1	
5	88.625	-1	-1	+1	+2	+1	+1	
6	88.630	0	+1	0	0	0	0	
7	88.635	-1	0	0	+2	+1	+1	
8	88.640	-1	+1	0	0	-1	+1	
9	88.645	0	+1	0	+1	0	0	
10	88.650	0	-1	-1	-1	0	0	

관리단계	면맞춤(mm)	줄맞춤(mm)	수평틀림(mm)	궤간틀림(mm) 최소	궤간틀림(mm) 최대
	80<V≤120				
준공기준 (CV)	≤4 [2]	≤4 [3]	≤3	-2≤	≤5
목표기준 (TV)	≤4	≤4	≤4	-3≤	≤11
주의기준 (WV)	10≤	9≤	10≤	<-3	17≤
보수기준 (AV)	15≤	12≤	20≤	≤-5	20≤

<그림 3.4.27> 모니터링 기록부

4.4.3 소음진동 계측결과

○ 진동계측결과 : 평균진동 승강장(27.3dB), 궤도부(26.8dB), 역사내부(29.0dB) 저감



(a) G트레인 (b) 새마을

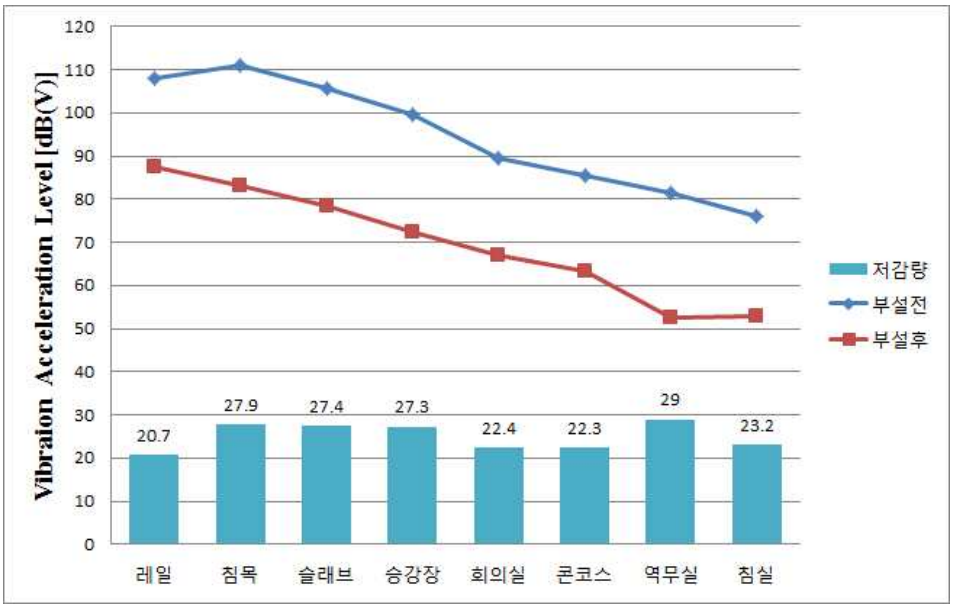
(c) 무궁화 (d) 화물열차

<그림 3.4.28> 진동 분석 파형 종합

<표 3.4.16> 부설전-후 진동 저감 분석결과

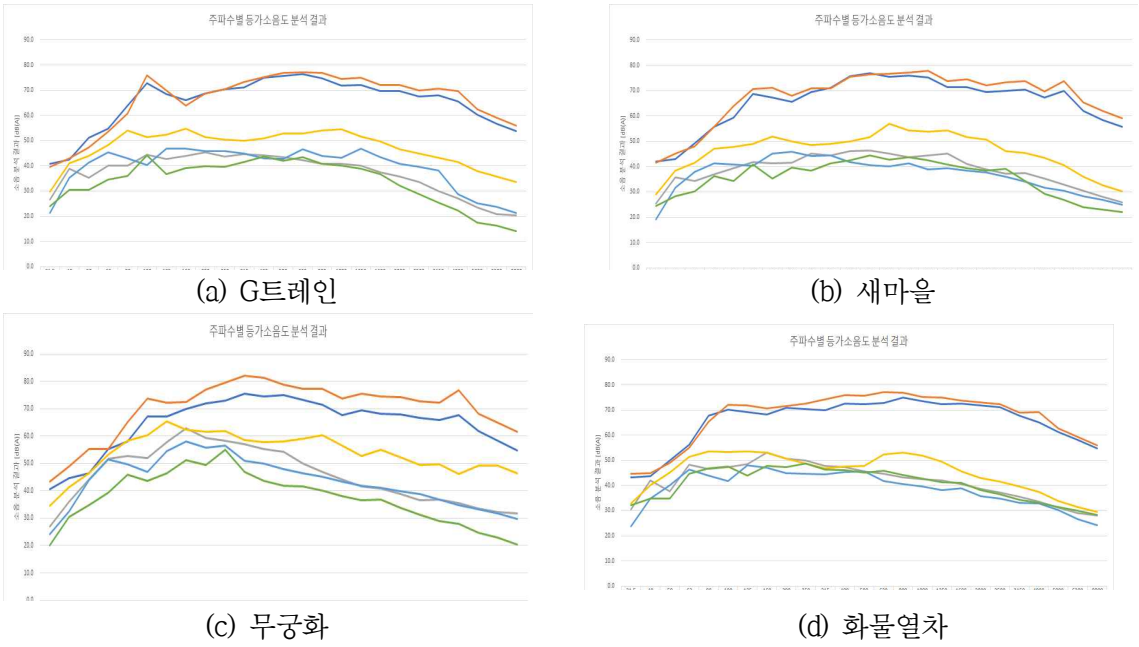
단위 : Vibration Acceleration Level [dB(V)]

시간	열차 종류	진동 저감 분석결과												합격기준
		레일1	레일2	침목1	침목2	슬래브1	슬래브2	승강장1	승강장2	2층 회의실	1층 콘코스	1층 역무실	1층 침실	부설-전후 5dB(V) 이상 저감
14시 05분	화물	-22.6	-16.3	-14.8	-12.9	-	-	-26.0	-30.0	-25.2	-31.5	-35.0	-25.1	O.K
15시 27분	새마을	-8.0	-	-20.1	-10.1	-21.6	-	-17.2	-24.3	-9.5	-6.2	-17.5	-12.4	O.K
16시 36분	무궁화	-15.4	-28.7	-26.7	-35.8	-26.1	-30.0	-20.4	-27.2	-26.1	-25.3	-32.0	-30.1	O.K
17시 26분	G트레인	-26.6	-42.9	-39.9	-55.0	-30.7	-32.7	-22.9	-30.2	-30.0	-25.5	-33.6	-31.7	O.K
18시 39분	무궁화	-13.6	-19.7	-25.8	-29.9	-26.7	-25.7	-20.5	-29.2	-26.3	-22.1	-28.8	-21.4	O.K
19시 29분	무궁화	-22.9	-30.1	-38.5	-40.9	-33.3	-34.0	-26.9	-32.8	-20.3	-23.8	-29.8	-26.7	O.K
20시 32분	새마을	-12.2	-13.1	-23.8	-17.9	-21.4	-20.0	-15.6	-21.7	-20.9	-22.0	-27.5	-19.8	O.K
21시 18분	무궁화	-24.2	-11.7	-20.7	-20.9	-22.6	-18.4	-17.0	-22.6	-21.1	-22.7	-28.1	-18.7	O.K



<그림 3.4.29> 부설 전후 진동저감 계측결과

○ 소음계측결과 : 역사내부 평균소음 8.2dB(A) 저감



(a) G트레인 (b) 새마을

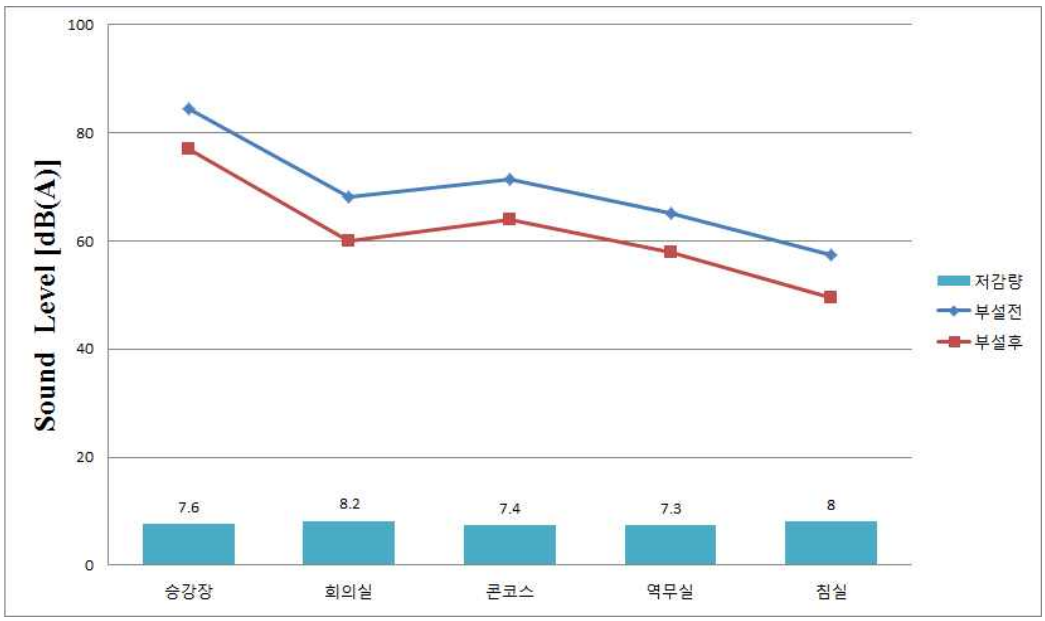
(c) 무궁화 (d) 화물열차

<그림 3.4.30> 소음 분석 파형 종합

<표 3.4.17> 부설전-후 소음 저감 분석결과

단위 : Sound Level[dB(A)]

시간	열차종류	소음 분석 결과 비교 [Overall, dB(A)]						합격기준
		승강장1	승강장2	2층 회의실	1층 콘코스	1층 역무실	1층 침실	부설-전후 3dB(V) 이상 저감
15시 27분	새마을	-7.47	-8.50	-6.56	-3.04	-4.69	-10.28	O.K
16시 36분	무궁화	-7.03	-11.51	-9.37	-8.77	-8.05	-12.38	O.K
17시 26분	G 트레인	-10.89	-11.13	-11.70	-8.06	-7.95	-8.91	O.K
18시 39분	무궁화	-3.07	-1.15	-5.53	-7.69	-8.45	-2.65	O.K
19시 29분	무궁화	-17.40	-10.30	-14.94	-15.83	-16.61	-13.96	O.K
20시 32분	새마을	-6.75	-6.82	-5.68	-5.68	-3.71	-3.04	O.K
21시 18분	무궁화	-0.55	-1.54	-3.35	-2.69	-1.94	-4.36	O.K



<그림 3.4.31> 부설 전후 소음저감 계측결과

BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD

TEST REPORT

우 34332 대전광역시 대덕구 신탄진로 637 (평촌동) TEL (042)931-8511~3 FAX (042)931-8514

성적서번호 : TBD-000212
대 표 자 : 권재원
업 체 명 : (주)명화엔지니어링
주 소 : 전남 나주시 문화로 194, 601호(빛가람동,티타워빌딩)

접 수 일 자 : 2017년 12월 29일
시험완료일자 : 2018년 07월 10일

시 료 명 : 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 현장설치시험

시 험 결 과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
평균 소음저감량	dB(A)	역사내부	-8.2	KS I ISO 1996-1 : 2015 (*)
평균 진동저감량	dB(V)	승강장	-27.3	KS I ISO 10811-1 : 2014 (**)
평균 진동저감량	dB(V)	궤도부	-26.8	KS I ISO 10811-1 : 2014 (**)
평균 진동저감량	dB(V)	역사내부	-29.0	KS I ISO 10811-1 : 2014 (**)

* : 측정방법 : 열차가 역사내로 진입하여 정차 및 출발시 측정 데이터 중 배경소음보다 높은 영역의 데이터를 열차 종류별 최대 등가소음도(31.5~8k Hz) 분석하여 평균 등가소음을 구함
** : 측정방법 : 열차가 역사내로 진입하여 정차 및 출발시 측정 데이터 중 배경진동보다 높은 영역의 데이터를 1/3 옥타브분석 실시

* 용 도 : 품질관리용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인은 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(재발행 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Park Kwanghwa
작성자 : 박광화
E-mail: bable@ktr.or.kr

Lee Gyujin
기술책임자 : 이규진
Tel : 1577-0091(ARS ①→④)

2018년 07월 10일

KTR 한국화학융합시험연구원장

위변조 확인용 QR code

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

전자문서본(Electronic Copy)

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

세부	세부연구목표	달성내용	달성도(%) (달성/목표)
1세부	▪ **레일 음향조도 및 진동 저감 기술** - 레일 음향조도 자동 탐지장치 개발(이동속도 15km/h 이상) - 레일 음향조도 저감장치 개발 (음향조도레벨 5dB 이상 저감) - 레일의 진동소음 저감기술 개발 (ISO 3095 기준, 현장시험)	▷ **주행표면 음향조도 자동 모니터링장치** ① 자동주행 레일표면 음향조도 측정장치 ② 레일음향조도 측정장치 운영 소프트웨어 ③ 레일음향조도 측정장치 분석 소프트웨어 ④ 레일음향조도 측정장치 철도운행선로 측정 결과 (이동속도 15km/h 이상) ▷ **주행표면 음향조도 저감장치** ① 레일음향조도 저감(연마)장치 ② 레일음향조도 저감장치 제어 프로그램 ③ 레일음향조도 저감장치 철도레일 연마 결과 (음향조도레벨 5dB 이상 저감) ▷ **레일 진동댐핑장치** ① 충돌 레일댐핑장치 ② 충돌 레일댐핑장치 **철도운행선** 150m 2회 시범부설 및 소음/진동 저감효과 측정 결과 (철도주행소음 평균 4.4dB(A), 차내소음 3.2dB(A) 저감)	100%
	▪ **친환경 고효율 선로 방음기술** - 궤도근접 저상(low-height) 방음벽 최적 형상 및 구조 개발 (현장시험, 환경소음 5dB(A) 이상 저감) - 고효율 친환경 경량(30% 절감)방음터널 흡차음구조 개발 (축소모형시험)	▷ **레일 근접형 저상 방음장치 시제품** ① 레일 근접형 저상 방음장치 1차 시제품 **철도운행선** 100m 시범부설 및 소음저감, 진동/구조 성능 측정결과 (철도주행소음 위치별로 6dB(A)~13dB(A) ② 레일 근접형 저상 방음벽 2차 시제품 철도운행선 268m 시범부설 및 소음저감, 진동/구조 성능 측정결과 (철도주행소음 평균 6dB(A)~12B(A), 주거지역에서의 철도주행소음 평균 4dB(A)~9dB(A)) ③ 상용화 실적 가. 호남고속철도 구간240m 제작 납품 ▷ **저비용 고효율 경량 방음터널 시제품** ① 교량설치 가능 형상과 흡차음구조 개발 ② 축소모형 시작품 제작 및 소음저감효과 시험 결과(단위중량성능 기존방음터널 비해 30% 경량 및 경제성 확보, 기존 방음벽 대비 10dB(A)이상 저감) ③ 고가 및 교량 적용 방음터널의 구조설계 향상 기술과 경제성 확보한 표준설계 ④ 시공절차 및 유지보수 절차 포함된 시방	

세부	세부연구목표	달성내용	달성도(%) (달성/목표)
	▪ **강교량 소음/진동 저감기술** - 운행선교체용 연속지지 저소음 궤도구조 (저소음상판) 개발(소음 7dB(A) 이상 저감) - 저소음 강교량 단면 개발 -저소음궤도구조(저소음상판) 시작품 제작 및 현장시험	▷ **강교량 저소음 급속시공 저소음상판 교량궤도** ① 철도교량 구조체 결합용 저소음상판(궤도) 시제품 제작 및 결합시공성 검증 결과 ② 현장부설용 저소음상판(궤도) 시제품 제작 및 철도운행선 현장성능 검증 결과 ③ 한국철도시설공단 궤도시설물 성능검증위원회 검증결과 ④ 저소음상판(궤도) 시작품 소음저감효과 측정/해석 결과 (판형교 거더 대비 소음 7dB(A) 이상 저감) ▷ **강교량 신형식 저소음 단면** ① 장지간 방음벽 일체형 교량단면 및 구조설계/구조 안전성 결과(철도설계기준) ② 저소음 강교량 단면 20m 지간 실물시험체 시험체 및 소음저감효과/구조 안전성 성능평가 결과 (강박스거더 대비 소음 7dB(A) 이상 저감) ③ 신설용 저소음 강철도교량 현장적용 위한 지간 별 표준단면, 시공시방서, 유지관리시방서 ④ 기술인증서(한국콘크리트학회)	
2세부	80km/h 주행중 선로중앙 7.5m 거리 외부소음 81dBA	○ 외부소음 79dBA 달성 -저소음 견인전동기 개발: SWL 103.7dBA 달성(목표 104dBA), 기존대비 6dBA 저감 -저소음 구동기어 개발: SWL 103.6dBA 달성(목표 104dBA), 기존대비 3dBA 저감 -외부소음 저감용 side skirt 개발: 설치전 대비 3dBA 저감 (선택적 사용, 설치전 외부소음 79dBA달성)	100%

세부	세부연구목표		달성내용	달성도(%) (달성/목표)
	110km/h 터널 주행중 실내소음 80dBA		○ 터널 주행중 실내소음 79.2dBA 달성 -구조기인 소음해석 기술 확보 -차음성능 개선 바닥구조 개발: 차음 성능 Rw=41, 기존대비 3dBA 개선 -저소음 견인전동기 개발/저소음 구동기어 개발: 위와 동일 -기밀향상 출입문 개발: 차음성능 Rw33, 기존대비 6dBA 개선	
	정차중 HVAC구동시 실내소음 63dBA		○ 정차중 실내소음 62.1dBA 달성 -차음성능 개선 바닥구조 개발: 위와 동일 -HVAC 덕트 설계 최적화 및 저소음 HVAC 개발: 62.1dBA, 기존대비 6dBA 저감	
3세부	곡선부 스킬소음 저감기술	스킬소음 저감용 방음레일 개발	- 방음레일 설치 후 등가소음도 최대 10 dB(A) 소음 저감	200 % (10dB(A)/5dB(A))
		스킬소음 저감용 공명형 흡음판 개발	- 흡음률 0.8 이상의 방음벽 개발 - 공명형 흡음판 설치 후 7~17 dB(A) 소음 저감	340 % (17dB(A)/5dB(A))
	제동 스킬 소음 저감용 제동 패드 개발	저소음 제동 패드 개발	- 현용품 대비 시제품의 평균 등가소음도는 13~22 dB(A), 평균 최대 소음도는 9~18 dB(A) 저감	440 % 22dB(A)/5dB(A)
4세부	철도시설 성능검증 철도시설 성능검증 인증	사전제작형 플로팅 슬래브궤도 시스템 설계	- 시스템 파라미터 설계 - 동적 안정성 검토 - 시스템 방진 성능 평가 - 표준단면 구조설계 - 방진마운트 설계	100%
		사전제작형 플로팅 슬래브궤도 개발	- 기존 기술/시공사례 분석 - 마찰댐퍼형 방진장치 설계 및 개발 - 사전제작형 플로팅궤도 최종설계 - 단위구성품 성능시험 및 실대형 조립시험	100%
		성능검증 인증	- 1단계 기술적합성 검토 - 2단계 조립시험 - 3단계 현장설치시험	100%
	현장 모니터링	현장시험시공 및 계측, 모니터링	- 현장시험시공 사전점검 - 현장시험시공 - 계측 및 모니터링 계획 - 현차주행성능시험 결과(주행안정성 OK) - 모니터링 결과(사계절 변화 없음) - 계측결과(진동 29dB, 소음8dB 저감)	100% (진동5dB, 소음3dB / 진동29dB, 소음8dB)

2. 관련 분야 기여도

[1세부 : 철도 선로변 지속가능 저소음화 기술 개발]

가.기술적 측면

-국내 실제 운행 노선상의 소음진동 발생과 전파에 대한 정량적 예측과 저감 설계의 세계적 기술 확보

-국내 운영처가 수용 및 적용 가능한 기술 개발을 통하여 철도소음 민원해결 대안을 위한 소음저감 실용화 기술 및 검증결과 확보

-구조 안정성, 유지 보수성을 만족하는 전동소음 저감기술 확보

-개발 기술의 노하우 및 지적 재산권 확보

- 저소음 선로기술 설계기술 확보

- 철도교량의 적용에 있어 지간 40~50m의 경우 소음발생이 큰 강박스교량이 주로 적용이 되거나 대형 건설장비가 필요한 PSC 박스거더교가 적용이 되어 왔다. 하지만 본 연구 개발을 통해 철도교량부분에서 강박스교량을 대체할 수 있는 교량 기술을 확보함

-실측행위 자체가 안전규제에 의해 쉽지 않은 분야인 철도 진동 소음 실측 데이터베이스를 구축하여 개방적인 WEB 플랫폼을 바탕으로 데이터베이스 시스템을 구축하였음. 이로 인해 해석 데이터에만 의지 하던 관련학계 및 산업계에 보다 정확한 데이터를 제공.

- 기존 해석 방법의 오류를 실측 데이터베이스를 이용해 상호 보완함으로 보다 신뢰성 있는 영향성 평가 알고리즘이 개발됨.

- 궁극적으로, 철도 운행구간의 철도 진동소음 영향성 평가를 정량적이고 실제적인 알고리즘을 바탕으로 수행함으로써 피해정도의 신뢰성 있는 예측이 가능하게 함.

나. 경제적 측면

-철도의 전동소음 저감기술 적용을 통해 공동주택 방음벽 높이 증가비용 42% 절감 가능

-소음원 근접 소음저감 선행기술 확보 및 해외시장 진출

-개발 기술 상용화를 통한 이익 창출을 통해 신규 고용 창출

-소음저감 관련기업의 기술경쟁력 유도

- 동일 조건에서 본 연구에 의해 개발한 저소음 복합 강합성 하로교와 강박스거더교를 비교하면 지간 40m 에서는 22%의 공사비 절감이 가능하고 지간 50m의 경우 16%의 공사비 절감이 가능함

- 개발 교량의 경우 단면 자체가 일정부분 방음벽 역할을 수행하기 때문에 특정 PJT의 경우 추가적인 방음시설의 설치가 불필요 하여 추가 공사비 예방 가능

다.사회적 측면

-개발기술의 물리적 저감효과 , 거주자 및 승객에 대한 저감 체감효과 제시를 통한 국민체감형 과제 결과물 홍보

-기존 방음벽 이외에 소음원 근접 차원의 저소음 철도 설계 기술 확보 및 가이드라인 제시

-운영선 및 시설선 개통 후 발생하는 철도소음 민원에 다양한 저감 방법으로 대응 가능을 통해 철도 운영의 효율성 제고

[2세부 : 전동차 소음저감 기술 개발]

○ 저소음 견인전동기 개발

가. 기술적 측면

- 코레일 일반형 전동차용 견인전동기의 형식을 유지하면서 소음 저감을 위한 냉각유로 개선과 냉각팬 설계 기술을 확보함으로써, 국내 및 해외 전동차 견인전동기 설계시 동 기술을 적용 가능
- 전동차뿐만 아니라 경전철, 트램 및 고속차량의 견인전동기의 저소음화를 위한 설계 방안 확보

나. 경제적·산업적 측면

- 2017년 외부소음 강화에 따른 차량 개조 및 외부 방음벽등의 시설물 설치 대비 가격 경쟁력 확보
- 해외 전동차 시장에서 요구되는 견인전동기 소음 사양을 만족함으로써 해외 시장 진출 가능

○ 저소음 냉방기 개발

가. 기술적 측면

- 작동 소음 저감 부품 기술 확보 : 압축기, 증발기와 응축기 모터, 방진고무
- 소음, 진동 개선 냉방기 프레임 설계 기술 확보

나. 경제적·산업적 측면

- 저소음 냉방기 개발로 승객 및 역주변 거주지역 주민의 소음 불만 감소 예상
- 해외 선진국의 냉방기 시장에 소음 저감 기술 및 가격 경쟁력을 확보하여 해외시장 진출 가능

○ 기밀향상 출입문 시스템 개발

가. 기술적 측면

- 기밀 성능향상 출입문 개발을 통해 소음차단 성능이 획기적으로 개선된 도어시스템 제작 기술을 확보함으로써 국내 전동차 제작 기술발전을 물론 해외 선진기술과 동등한 수준의 기술력 획득
- 국내외 도어시스템의 차음성능 개선을 통한 해외 시장 확대 가능

나. 경제적·산업적 측면

- 도시형 전동차의 차음효과에 따른 승객 서비스 개선
- 기술력 확보 및 실용화를 통한 기업 성장에 이바지 함
- 해외 선진국의 도어시스템 대비 소음성능 및 가격 경쟁력을 확보하여 해외시장 진출이 가능함

○ 구조기인 소음 해석기술 개발

가. 기술적 측면

- 구조기인 소음 해석 기법 확보
- 소음 해석 활용 저소음 차량 설계 능력 향상

나. 경제적·산업적 측면

- 저소음 전동차 개발로 승객 편의 제공
- 전동차량 국제 경쟁력 향상

[3세부 : 철도 스킬소음 저감기술 개발]

가. 곡선부 스킬소음 저감방안

(1) 곡선부 스킬소음 저감용 방음레일

- 곡선부 선로에서 발생하는 스킬소음을 저감하기 위해서 차량의 저속 운행, 레일에 스킬소음 저감용 레일도유기 분사 등의 방법을 이용하지만 지속적인 민원 및 환경오염 발생
- 다른 산업에서 기지금속의 내마모성, 내식성 및 내열성을 부여하기 위해서 적용하는 레이저 클래딩 기술을 국내 최초로 철도 레일에 적용
- 레이저 클래딩을 적용한 레일은 휠과 레일 사이에서 나타나는 음의 마찰 특성을 변화시켜 스킬소음을 억제시킴
- 레이저 클래딩을 적용한 레일은 내마모성, 내식성 및 내열성이 부여되기 때문에 기존 레일보다 유지보수 비용이 감소될 수 있음

레이져 클래딩 공법은 레일 파상마모 및 주습판 등과 같이 마모가 심한 분야에 적용 가능

(2) 곡선부 스킬소음 저감용 공명형 방음벽

- 기존 선로 변에 설치된 방음벽은 흡음재를 사용하기 때문에 주기적인 교체가 필요함
- 공명형 박음벽은 흡음재를 사용하지 않고 재질에 상관없이 제작이 가능하여 반영구적으로 사용 가능함. 기존 방음벽보다 유지보수 비용이 감소될 수 있음
- 공명형 방음벽은 비산 먼지 등 때문에 주기적인 물청소가 필요한 터널에서도 사용 가능함

나. KTX 제동 스킬소음 저감용 저소음 제동 패드

- 국내의 경우 소결재 제동패드의 제작기술은 보유하고 있으나, 제동패드의 소재 최적화, 마찰재 위상 최적화, 접촉해석, 소음 저감기술에 대한 원천기술 확보

[4세부 : 역사구조물 소음/진동 저감기술 개발]

구분	연구개발 성과	기존 국내외 기술 현황	기술의 발전 기여도
사전제작형 플로팅 슬래브궤도	◦사전제작형 플로팅 슬래브 궤도 개발 ◦궤도 구성품 성능시험 및 현장 시험부설 ◦계측 및 모니터링 ◦철도시설성능검증 인증	◦열차 운행 지장없이 기존선을 개량하는 플로팅궤도 기술은 국내외 전무한 실정 ◦국내에는 고무를 적용한 이산지지방식 현장타설식 플로팅궤도 개발(KKRI) ◦해외기술에 의존	◦세계최고 수준의 소음진동을 저감하는 궤도기술 확보 : 진동 29dB(V), 소음(8.2dB(A) ◦세계최초 기존선 운행지장없이 시공 가능한 소음진동 저감 궤도시공공법 개발 : 열차차단시간 4.0H 이내 10m 부설 ◦현장타설방식 콘크리트 궤도의 문제점 해소 : 주행면 박락 및 균열, 콘크리트 재료분리, 곡선부 주행면 변형 등 ◦기존 국내 플로팅궤도 및 해외 기술 대비 20% 절감 기술 확보

가. 사회문화적(Social) 기대효과

○ 국민들의 삶의 질 향상으로 정온한 환경에 대한 요구가 증가함에 따라 선하역사 진동 저감에 따른 선하역사 철도 종사원 및 철도 이용객의 만족도 향상을 통한 선하역사 소음·진동 관련 민원 해소에 기여
○ 최근 철도역사가 교통 요충지역으로서의 역할이 증대하여 규모가 커짐에 따라 다양한 상업, 업무시설을 수용함에 따라 이용객의 수가 증가하고 있음. 따라서 소음·진동을 포함한 역사의 환경개선을 통하여 철도의 이미지 개선 및 나아가서 철도 이용 활성화를 유도
○ 사전제작형 플로팅 슬래브궤도가 적용된 역사는 실내 소음을 저감시켜 역사 내 상업 활동이나 공연 등 다양한 문화 활동의 활성화를 기대할 수 있으며, 철도 교통에 대한 대국민 신뢰 상승에 기여
○ 역사의 진동 · 소음 저감 기술은 새 정부의 140대 국정과제 중 물류·해양·교통체계 선진화 및 환경서비스 품질수준 제고에 가장 부합하는 기술이며 정부연구개발투자 기본 방향인 창조경제 기여, 국민행복 구현 및 삶의 질 향상과 일치하는 연구
○ 역사 쾌적성 개선을 통한 이용인구 증가로 선하역사 공간이용 활성화 실현 및 민간 소유자들의 선하역사 연계 개발 유도

나. 기술적(Technological) 기대효과

○ 국내·외 신설역사에 한하여 적용되는 플로팅 슬래브궤도 기술이 기존 역사에 적용이 불가함에 따라 기존 역사에 적용할 수 있는 차별화된 저진동 시스템 기술의 확보는 세계최초로 연구되는 기술임
○ 급속시공 공법의 개발로 기존선 열차운행 지장없이 열차 차단시간 4.0H 이내에 시공 가능한 기술
 - 방진기술에 대한 핵심 시공기술은 은 공용중인 기존 선하역사가 갖는 시공상의 제한요건을 극복하고 방진시스템의 목표 성능 실현을 위한 시공공정, 장비운용, 품질관리, 정밀시공기술 등의 핵심기술을 반영
○ 발생원 단계에서 진동을 효율적으로 저감시키는 사전제작형 플로팅 슬래브궤도는 열차 운행에 따른 Structure-borne-noise 저감하여 진동 29dB(V), 소음 8.2dB(A)을 저감시키는 세계 최고 수준의 소음진동 저감 궤도기술 확보
○ 기존 선하역사의 진동저감을 위한 핵심기술로 차량-궤도-역사 인터페이스 기술, 통합시스템의 해석 및 설계기술, 방진기술, 역사 구조기술, 방진 시공기술 등과 같은 고난이도 기술 집약
○ 본 연구를 통하여 개발되는 차량-궤도-교량-역사의 인터페이스 기술, 통합시스템의 해석 및 설계기술, 방진·방음기술, 시공기술은 철도시설분야에서 고난이도 기술로 국내 철도인프라 기술 수준을 선진국 수준으로 향상

다. 경제적(Economic) 기대효과

○ 기존 선하역사의 열차 운행 및 주변시설의 운영 중단 없이 진동 및 소음을 저감할 수 있는 진동 저감 시스템의 시공 방법에 대한 국내·외적으로 기술개발 사례가 미진함에 따라, 본 연구개발로 기술 및 시장에서의 선점효과 가능
○ 기존 선하역사의 소음·진동 저감을 위한 기존 기술의 비용이 과대함으로 인하여 100여개 이상의 기존 선하역사의 개선이 어려움. 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 기술을 적용 시 저비용, 고효율의 방진시공이 가능

○ 공사비 원가분석 결과 기존 국내외 플로팅궤도와 비교 시 25% 경제성 확보 가능
○ 국내 시장 대비 약 7배 정도 규모로 그 수요가 점차 증가하는 추세임. 또한 아시아를 포함한 개발도상국에서의 철도 건설시장 규모의 지속적인 확대로 세계시장 규모는 점차 확대될 것으로 전망되며, 강·소형 중소기업의 해외진출 시 30% 점유율 기준으로 5,000억 이상 수출 가능
○ 마찰형 댐퍼 방진장치는 철도역사 외에 대형 건물 등의 일반구조물과 기계, 설비 등의 진동 저감 용도로도 적용될 수 있어 기술 파급 및 추가적인 경제 효과를 기대할 수 있음.
○ 방진시스템 기술 개발로 현재 국외에서 수입하고 있는 방진제품의 수입 대체효과 및 원가 절감효과가 발생하고, 해외 철도 공사시 국내 기술을 적용함에 따른 고급 기술 수출이 가능할 것으로 판단됨

라. 환경적(Environmental) 기대효과

○ 이미 공용 중인 선하역사의 극심한 진동 및 소음 문제로 인한 불편함이 해소되고, 역사를 이용하는 이용객의 공간 쾌적성 개선 효과 예상
○ 혼잡이 극심한 선하역사 소음 및 진동 저감으로 선하역사 이용 승객의 공간 쾌적성 개선효과 예상

제4장. 연구개발성과의 활용계획

1. 레일 진동/방사소음 저감기술 개발

-레일 음향조도 자동탐지장치 및 연마장치

▷ 기술이전 (레일 음향조도 자동탐지장치 기완료)

▷ 교통신기술 인증

▷ 철도운영처 및 관련산업체 판매

▷ 철도운영처의 저소음 선로 관리 매뉴얼 및 프로그램 제공

-레일댐핑장치

▷ 기술이전 (12월 중 완료)

▷ 교통/녹색/환경 등 신기술 인증

▷ 인천교통공사 등 철도운영처 상용화 확대

2. 레일 근접형 저상 방음장치

▷ 상용화 및 매출실적 : 호남고속철도 광주송정~고막원 2공구 STA. 210km040~210km279, L=239m 현장 적용, 발주 완료 및 18.12.01~30 공사 완료 예정(연구기간 중 현장적용 및 매출 발생)

▷ 상용화 및 매출실적 : 경인선 오류역 구내 89m 설계(설계 심의 준비 중)

▷ 기술이전 기 완료

▷ 교통/건설/녹색 등 신기술 인증

▷ 방음벽 신규 설치를 요구하는 철도소음민원 현장 적용

▷ 기존 선로변 방음벽 설치가 불리한(용지보상 등 공사시 민원 개소) 구간에 적용

3.운행선 급속교체 가능한 강교량 저소음 궤도구조 개발

▷ 한국철도시설공단 궤도성능검증 완료

▷ 기술이전 기 완료

▷ 저소음상판궤도는 기존 판형교량 및 현재 유도상화하고 있는 철도교량에 하부구조 및 교량구조체에 큰 보강없이 경제적으로 적용 될 수 있으므로 급속시공가능한 시공법 등을 고려하여 기존 판형교량뿐아니라 고가교 등을 통과하는 도시철도구조물에 설치된 기존궤도구조를 개발된 저소음상판궤도로 대체

4.저소음 성능이 우수한 철도교량 단면 및 방진재료 철도교량 적용기술 개발

▷ 기술이전

▷ 개발한 저소음 장지간 강합성 하로교 공법을 신안산선 복선전철 민간투자사업((주)포스코건설)에서 시화호 횡단 하로교 160m 구간에 설계변경을 추진하여 적용예정

▷ 신설 철도건설 PJT 입찰참여 시 개발한 저소음 장지간 강합성 하로교 공법을 기본설계에 반영하여 적용

▷ 노후 철도교량 교체 PJT 입찰 시 개발한 저소음 장지간 강합성 하로교 공법을 기본설계에 반영하여 활용 예정

▷ 건설 신기술 인증

5.철도진동소음 DB 개발 및 DB 와 연계한 진동/구조소음 평가기법 개발 (핵심성과 F)

▷ 기술이전

▷ 구축된 실측 데이터베이스 및 검색엔진은 향 후 철도진동소음 환경 평가의 기초자료로 활용

됨.또한, 이러한 데이터베이스에 기반하여 철도 운행구간의 철도 진동 및 구조소음 평가를 정량적이고 실제적인 알고리즘을 바탕으로 수행함으로써 피해정도의 신뢰성 있는 예측을 가능하게 함.

▷ 철도시설 관련 기관의 실무담당자들이나 관련 연구자들에게 WEB을 통해 철도 소음/진동 유발인자 별로 구분된 기존 측정 데이터를 제공함으로써 업무 대응능력을 향상 시킬 수 있음.

▷ 이를 위해 과제 종료와 함께 주관기관과 협의 후, 지식정보서비스의 형태로 상용화를 추진할 것임. 계획은 다음과 같음.

- 철도 진동/소음 유발인자 분석 후 추가.
- 데이터 신뢰성 확보

▷ 도메인 및 웹서버 확보(서버호스팅) 및 서비스 운영점검.

6.경량방음터널 기술

▷ 기술이전

▷ 도심지 철도교량구간 인접 중 · 고층주거지 지역에서 지속적으로 발생는 철도소음 민원에 대한 기존 대책의 한계를 극복하고자 경량 고효율 방음터널 기술 적용 추진

7. 저소음 차량설계 기술

- (현황) 철도차량의 소음진동 문제는 차량 납품 시 사양만족과 관련하여 큰 문제를 야기 시킬 수 있으며, 소음진동 수준이 기술수준의 평가 기준이 되기도 함. 저소음 차량설계기술은 설계요소 관점에서 외부소음 저감 사이드스커트, 유동소음 저감 HVAC 덕트, 차음성능 보강 바닥구조가 있으며, 별도로 차량설계시 활용될 수 있는 구조기인 소음 해석기술이 개발됨.
- (실용화에 따른 기대효과) 현재 운영 중인 일반 전동차에 별도의 설계변경 없이 적용 가능한 외부 소음 및 실내 소음 저감 방안 마련, 계획 및 설계 단계에서 저소음 장치 개발품 적용에 따른 소음저감 효과를 해석적으로 검증 가능
- (실용화 요건) 설계 반영 및 현차시험

번호	실용화 요건	실용화 요건 달성 계획
1	설계 반영 및 현차시험	일반형 전동차 신규프로젝트인 진접선 복선전철 전동차 50량('17. 6월 개찰)에 저소음 바닥구조, HVAC 덕트 등을 적용하여 소음사양 만족하기 위한 당사 설계반영 협의를 진행하고 있음. 수주 확정될 경우 추후 현차에서 소음개선량을 검증할 계획. 이후 신규프로젝트에 사이드 스커트 등 저소음 설계기술을 지속적으로 실용화 예정.
2	기존 운행열차 개조	저소음 바닥 구조의 경우 노후 코레일 일반형 전동차에 대하여 바닥구조 개선 작업을 진행하고 있으며, 자체적으로 시험시공을 통해 시공성 검증 진행 중에 있음. 시험시공 검증 완료 후 소음개선량에 대한 검증 진행 예정.

- (장애요인 및 극복방안)

번호	장애요인	극복방안
1	신규프로젝트 수주여부	공고사양 만족을 위한 입찰제안서 작성, 신기술 적용에 대한 내용 부각
2	비용 및 중량	비용 및 중량 증가 최소화를 통한 설계 반영
3	기존 운행열차 개조	기존 운행열차에 대한 적용은 기술적으로 가능하나 현재 운영열차에 대한 배차 및 운영비용 등이 고려되어야 하므로, 철도운영기관의 사업계획 및 의지가 중요함. 철도운영기관과 협의를 통해 적용 방안 모색.

- (적용 대상 및 기관) 기존 운행열차 개조 또는 신규 열차 제작시 저소음 설계방안을 다각도로 검토하여 설계 반영 및 현차 적용

  * 현대로템(주), 신일화학(주), 한국철도공사, 한국철도시설공단 등

8. 전동차용 저소음 견인전동기

- (현황) 기존 코레일 일반형 전동차의 견인전동기의 소음 수준은 80㎞/h주행에 해당하는 RPM에서 110 dBA 내외로 소음진동이 심하며, 현재 운영중인 전동차의 주행속도는 대부분 80㎞/h임. 그러나 최근 신규프로젝트에는 운영속도가 100㎞/h대로 증가하고 있으며 그에 따른 소음저감에 대한 대비가 필요함
- (실용화에 따른 기대효과) 현재 운영 중인 일반형 전동차에 별도의 설계변경 없이 적용 가능한 견인전동기 개발
- (실용화 요건) 설계 반영 및 현차시험

번호	실용화 요건	실용화 요건 달성 계획
1	설계 반영 및 현차시험	일반형 전동차 신규프로젝트인 진접선 복선전철 전동차 50량(17. 6월 개찰)에 저소음 견인전동기를 적용하여 소음사양 만족하기 위한 당사 설계반영 협의를 진행하고 있음. 수주 확정될 경우 추후 현차에서 소음개선량을 검증할 계획. 이후 신규프로젝트에 지속적으로 실용화 예정.

- (장애요인 및 극복방안)

번호	장애요인	극복방안
1	신규프로젝트 수주여부	공고사양 만족을 위한 입찰제안서 작성, 신기술 적용에 대한 내용 부각
2	비용 및 중량	비용 및 중량 증가 최소화를 통한 설계 반영
3	기존 운행열차 개조	기존 운행열차에 대한 적용은 기술적으로 가능하나 현재 운영열차에 대한 배차 및 운영비용 등이 고려되어야 하므로, 철도운영기관의 사업계획 및 의지가 중요함. 철도운영기관과 협의를 통해 적용 방안 모색.

- (적용 대상 및 기관) 기존 운행열차 개조 또는 신규 열차 제작시 저소음 설계방안을 다각도로 검토하여 설계 반영 및 현차 적용

  * 현대로템(주), 한국철도공사, 한국철도시설공단 등

9. 전동차용 저소음 구동기어

- (현황) 기존 코레일 일반형 전동차의 구동기어의 소음 수준은 80㎞/h주행에 해당하는 RPM에서 107 dBA 내외로 소음진동이 심하며, 현재 운영중인 전동차의 주행속도는 대부분 80㎞/h임. 그러나 최근 신규프로젝트에는 운영속도가 100㎞/h대로 증가하고 있으며 그에 따른 소음저감에 대한 대비 필요함

- (실용화에 따른 기대효과) 현재 운영 중인 일반형 전동차에 별도의 설계변경 없이 적용 가능한 구동기어 개발
- (실용화 요건) 설계 반영 및 현차시험

번호	실용화 요건	실용화 요건 달성 계획
1	설계 반영 및 현차시험	일반형 전동차 신규프로젝트인 진접선 복선전철 전동차 50량(17. 6월 개찰)에 저소음 구동기어를 적용하여 소음사양 만족하기 위한 당사 설계반영 협의를 진행하고 있음. 수주 확정될 경우 추후 현차에서 소음개선량을 검증할 계획. 이후 신규프로젝트에 지속적으로 실용화 예정.

- (장애요인 및 극복방안)

번호	장애요인	극복방안
1	신규프로젝트 수주여부	공고사양 만족을 위한 입찰제안서 작성, 신기술 적용에 대한 내용 부각
2	비용 및 중량	비용 및 중량 증가 최소화를 통한 설계 반영
3	기존 운행열차 개조	기존 운행열차에 대한 적용은 기술적으로 가능하나 현재 운영열차에 대한 배차 및 운영비용 등이 고려되어야 하므로, 철도운영기관의 사업계획 및 의지가 중요함. 철도운영기관과 협의를 통해 적용 방안 모색.

- (적용 대상 및 기관) 기존 운행열차 개조 또는 신규 열차 제작시 저소음 설계방안을 다각도로 검토하여 설계 반영 및 현차 적용
  * 현대로템(주), 유진기공산업(주), 한국철도공사, 한국철도시설공단 등

10. 전동차용 저소음 냉방기

- (현황) 최근 해외 프로젝트에서는 정차중 소음레벨에 대한 요구사항이 낮아지는 추세이며 정차중 실내소음은 냉방기의 기여도가 가장 큼. 기존 코레일 일반형 전동차의 냉방기 작동시 실내소음이 69dBA로 높으며, 국내 전동차도 추후 저소음화에 대응하기 위해 저소음 냉방기 개발이 필요함.
- (실용화에 따른 기대효과) 현재 운영 중인 일반형 전동차에 별도의 설계변경 없이 적용 가능한 저소음 냉방기 개발
- (실용화 요건) 설계 반영 및 현차시험

번호	실용화 요건	실용화 요건 달성 계획
1	설계 반영 및 현차시험	향후 일반형 전동차 신규프로젝트에 설계 반영 협의 후 현차에서 소음개선량을 검증할 계획. 지속적으로 실용화 추진 예정.

- (장애요인 및 극복방안)

번호	장애요인	극복방안
1	신규프로젝트 수주여부	공고사양 만족을 위한 입찰제안서 작성, 신기술 적용에 대한 내용 부각
2	비용 및 중량	비용 및 중량 증가 최소화를 통한 설계 반영
3	기존 운행열차 개조	기존 운행열차에 대한 적용은 기술적으로 가능하나 현재 운영열차에 대한 배차 및 운영비용 등이 고려되어야 하므로, 철도운영기관의 사업계획 및 의지가 중요함. 철도운영기관과 협의를 통해 적용 방안 모색.

- (적용 대상 및 기관) 기존 운행열차 개조 또는 신규 열차 제작시 저소음 설계방안을 다각도로 검토하여 설계 반영 및 현차 적용
  * 현대로템(주), 갑을오토텍(주), 한국철도공사, 한국철도시설공단 등

○ 연구성과 홍보 및 협의 계획
- (사내 홍보 및 설계 반영) 기술연구소 영업기획팀, 철차연구팀을 대상으로 연구과제 성과물에 대한 세미나를 개최하여 향후 신규프로젝트 수행시 저소음 설계 및 장치가 반영될수 있도록 사전에 협의함. 신규프로젝트 입찰시 해당 저소음 사양 반영을 위한 지속적인 협의 및 입찰제안서 작성
- (사외 홍보를 위한 학술대회 및 전시회 참여) 2017년도 국제철도 및 물류산업전에 참석 예정이며, 이후 지속적인 전시회 및 마케팅 활동 진행 예정. 연 2회 개최되는 한국철도학회 학술대회에 지속적으로 참가하여 성과물의 홍보 및 추가 실용화 진행 내용에 대하여 발표할 예정.
- (대 적용 기관 협의) 연구단과 연계하여 본 연구성과물의 적용 기관인 한국철도공사 엔지니어링 센터와 차량처 담당을 대상으로 연구성과물에 대해 설명하고 기존 차량 업그레이드 및 신규 전동차 적용방안에 대해 협의할 예정.

11. 곡선부 스킬소음 저감방안
- 철도 곡선부 및 차량기지의 민원지역에 방음레일 및 공명형 방음벽 활용
- KTX 및 도시철도 터널구간에서 레일두부에 발생하는 파상마모에 의한 소음/진동 해소에 활용
- 방음레일 공법은 철도차량 주습판 등 마모가 심하게 발생하는 부분에 활용 가능
- 철도연변 민원지역 및 도로교통소음 구간에 공명형 방음벽 활용
- 공명형 흡음판의 설계이론을 바탕으로 환기장치 소음기에 활용 가능
- 공명형 흡음판은 소음특성에 따라 흡음율의 주파수 영역을 조절할 수 있기 때문에 실내 흡음판으로 활용
- 도시철도, 경량전철, 일반철도 및 고속철도 등의 스킬소음 저감에 활용

12. KTX 저소음 제동패드
- KTX 및 도시철도 차량의 제동장치에 적용
- 철도차량 저소음 제동패드 설계기술에 활용

13. 사전제작형 플로팅 슬래브궤도 기술
○ 열차 운행의 영향으로 구조적 진동, 소음이 발생하여 민원이 증가하는 기존역사 개량
  - 국토교통부에서는 철도구간의 진동을 소음/진동관리법상 진동관리 기준치를 초과하지 않도록 진동저감 대책을 수립하여 건설 및 개량 추진
  - 기존 역사 개량 시 적용 가능한 궤도구조는 2건(포장궤도, B2S)으로 제한되어 있음
  - 다양한 체결장치와 운행차량 등 우수한 조건을 갖춘 본 개발품은 충분한 경쟁력을 가지고 있음
  - 세계최고 수준의 소음/진동 저감성능을(진동 29dB, 소음 8.2dB) 기대할 수 있으며 역사별 현황을 고려한 개별맞춤 설계 가능
  - 발생원(차륜-궤도)에서 진동을 저감하는 시스템으로 타공법 대비 최대의 효율로 설계 가능
  - 소음진동 저감을 통해 이용객 공간쾌적성 및 역사 내 상업종사자 근무환경 개선
  - 기존선 철도역사(천안아산역, 오송역, 산본역 등)의 소음/진동 기준 초과 개소 저감을 위해 역사 개선사업이 확대 될 것으로 예상

○ 최근 건설되는 신설노선 설계에 적극 반영

- ‘교통서비스 공공성 강화’를 위한 정책추진으로 구축되는 수도권 광역급행철도망(GTX), 영동대로지하화사업 등 대도시 구간 소음진동 민원이 예상되는 신설노선 구간 설계에 적극 반영

○ 속도향상 및 유지보수비용 절감을 위한 자갈궤도 개량사업에 반영

- 일본의 경우 경제의 성숙기 진입에 따라 유지보수비 비중 증대 → JR 동일본은 유지보수 생력화의 일환으로 “200X 프로젝트”를 추진

- 국내 자갈도상궤도 개량사업은 시간의 경과에 따라 수요가 점점 증가할 것으로 판단되고 2018년 이후에 년간 600억원의 시장이 형성될 것으로 예상

- 중장기 정책으로 경부선(서울~천안), 분당선(수원~왕십리), 과천선(금정~남태령), 일산선(대화~지축) 등 4개 노선에 대피선 설치 및 노후궤도에 대한 시설개량을 진행 추진 중

- 코레일 과천선의 경우 현재 개량사업 추진중으로 신규 궤도기술 개발 시 즉시 적용 가능

○ 마찰댐퍼형 방진장치는 원자력 구조물, 플랜트 등 적용 가능

<연구개발성과의 활용방안>

연구개발 성과명	성과내용 및 성능	활용방안	활용(수요처)
사전제작형 플로팅 슬래브궤도	플로팅궤도 시스템 소음진동 저감 (진동 29dB, 소음 8.2dB)	기존 소음진동 민원역사 개량 (선하역사 약 100개소)	코레일 등 철도운영사
		신설 노선 설계 반영 (GTX, 영동대로 등)	공단, 설계컨소시엄
	급속시공 시스템 (10m/4.0h)	자갈궤도 개량사업 (경부선, 분당선, 과천선, 일산선)	코레일 등 철도운영사
	마찰댐퍼형 방진장치	원자력 구조물, 플랜트 설계반영	원자력, 플랜트 관련업종

부록. 참고 문헌

[철도 선로변 지속가능 저소음화 기술 개발]

1. 김준현, 김완상, 이석홍, 조윤구, "배합조건에 따른 에폭시 폴리머 콘크리트의 강도 특성에 관한 실험적 연구", 한국도로학회, pp. 287-290, (2011)
2. 김준형, 서영한, "교면포장용 폴리설파이드 에폭시 재료의 실내물성 평가", 한국도로학회 논문집 제 13권 제2호, pp. 159~166, (2011)
3. 김영익, 성찬용, "폴리프로필렌섬유보강 포러스 폴리머 콘크리트의 특성",
4. 국토교통부 철도기술 안전과, "도시철도시설 표준규격-제1편 선로시설" 2013.06
5. 최원선, "레진콘크리트 및 이를 이용한 감쇠 구조물 제작방법", 2008.03.11., 등록번호 1008145750000
6. 최충열, "철도차량용받침목",1998.02.10., 등록번호 2001175540000
7. 충북대학교 산학협력단, "콘크리트 슬라브의 바닥충격음 개선용 혼합 모르타르", 2013.02.27., 등록번호 1012396260000
8. 조 그렉. "철도용침목", 2012.03.20., 공개번호 1020120026672
9. 주식회사 케이알티씨, 이영회, 주식회사 세바이컬러지, "수지 모르타르 조성물을 이용한 철도 침목 및 이의 제조방법", 2013.01.02., 등록번호 1012196320000
10. 고효인, "철도 전동 소음 규명과 저감을 위한 측정기술", 대한설비공학회 설비저널 제 41권, 2012.08
11. 유정수, 장승호, "철도 전동 소음의 관점에서 해석한 국내 철도의 진동 특성 비교", 한국철도학회논문집 제 16권 제 2호, 2013.04, pp. 85-92
12. 김진호, 문제우, 박만호, 박수진, "콘크리트 슬래브궤도의 소음특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 2008.06, pp. 1817-1822
13. 김상진, 공선용, 양태경, 이동욱, 강윤석, 박용걸, "철도터널 콘크리트도상 궤도강성과 고체소음의 영향에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 2010.10, pp. 255-261
14. 김재철, 고효인, 이찬우, "콘크리트 궤도 터널 주행 시 KTX 차량의 시내소음 저감방안은 무엇인가?", 정밀공학회논문집, 2006.05, pp.29-30
15. 이인세, 김효산, 전우상, 박수진, 김진호, "도시철도 콘크리트 궤도의 소음 특성 및 흡음소재 개발 연구", 한국철도학회논문집, 2010.10, pp.555-560
16. 김진호, 이광도, 한석윤, 이우동, 박수진, "콘크리트 궤도의 구간별 소음특성에 관한 고찰", 한국철도학회논문집, 2009.05, pp.77-83
17. 김현주, 이일화, 조국환, "동적응답해석을 통한 저탄성 패드의 전달하중 저감효과 연구", 한국철도학회논문집, 2011.10, pp.2464-2472
18. 고속화에 따른 소음진동 저감방안 연구, 한국철도기술연구원, 2009
19. 정경희 외 4인, 궤도공학, 구미서관, 2009
20. 양신추 외 " 열차 주행시 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정," 기술보고서, 1994
21. 철도설계기준(노반편), 2011
22. 고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구, 한국고속철도건설공단, pp61-66, 1995
23. KTX 터널 내 실내소음 측정결과, 한국철도공사, 2005.
24. 고속화에 따른 소음진동 저감방안연구, 한국철도기술연구원, 2009
25. 고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발, 한국철도기술연구원, 2007
26. 터널내부 소음저감을 위한 흡음기술 개발연구보고서, 한국철도기술연구원, 2003
27. 철도 소음진동 총람, 철도청, 2001
28. 고속화에 따른 소음진동 저감방안 연구, 한국철도기술연구원, 2009
29. 고속철도변 방음벽 성능개선을 위한 기초적 연구, 대한건축학회논문집, 제19권 제10호, pp.195~202, 2003
30. 고속철도 소음저감용 방음벽의 최적 형상, 공학기술종합연구소 학술논문집 제8권 제1호, pp153~163, 2002
31. 이종재,1998, 열차운행하중에 대한 지반의 진동해석, KAIST, 석사학위논문
32. 김형두. 2018. 건물밀집지역에서 철도소음의 예측 및 평가에 관한 연구. 한국기계기술학회지, 20(3), 294-299.
33. 최용운, 구정서, 유원희, 고효인, 2009, 도시철도 전동차 소음 특성에 관한 연구
34. 김형두, 2008, 고가철교 방음터널 효과검증
35. 김병삼, 이태근, 2007, 전라선 고가교 방음터널 효과검증
36. 임정빈, 김영찬, 김두훈, 조재영, 이학은, 2004, 방음터널의 풍하중 산정 및 감음성능 예측
37. 오양기, 김하근, 이원열, 2004, 방음터널 단면형상에 따른 소음저감 예측 및 특성 평가(터널 외부소음을 중심으로)
38. 이원열, 김하근, 오양기, 주문기, 조성환, 2003, 방음터널 단면형상에 따른 소음저감 특성 평가(터널 내부소음을 중심으로)

39. 주문기, 김태훈, 오양기, 김하근, 이원렬, 조성환, 2003, 방음터널의 길이와 단부처리에 관한 실험적 연구
40. 국립목포대학교, 대한주택공사, 신성산건주식회사, 2003, 고층주택 소음저감을 위한 방음터널 개발
41. 한국도로공사, 2002, 방음벽 설계풍하중 검토
42. 구동회, 김재철, 박태원, 문경호, 2001, 한국형 고속철도(KTX) 방사패턴에 관한 연구
43. 나희승, 김영국, 성태룡, 1999, 방음터널의 소음저감효과에 관한 연구
44. 주진수, 1997, 고가선로에서의 철도소음 전파예측에 관한 연구
45. 김정태, 은희준, 1996, 고속철도의 소음특성과 전파현상
46. 한국철도시설공단, 2010, 철도건설규칙 해설서
47. 고속철도 차량시스템 설계체계 기술개발 최종보고서, 한국생산기술연구원, 2007
48. 건설환경관리 표준시방서(안), 건설교통부, 2003
49. 환경친화적인 도로건설 편람, 건설교통부, 2004
50. 도로방음벽 표준화 연구, 기술표준원, 2000
51. 21세기 소음진동 환경정책방향연구, 환경부, 2001
52. 소음진동편람, 한국소음진동공학회
53. 소음진동대책 핸드북, 일본음향학재료협회
54. KS F 2805, 잔향실법 흡음률 측정방법
55. KS F 2808, 건물 부재의 공기전달음 차단성능 실험실 측정방법
56. KS F 4770-1 ~ KS F 4770-4, 방음판(금속재, 금속재 칼라, 비금속재 칼라, 목재)
57. Nelsen, T, “Performeance of concrete bridge deck surface treatments”, Master of Science, Brigham Young University (2005)
58. W. P. Lokuge and T. Aravinthan, “Mechanical properties of polymer concrete with differnet types of resin”, University of Southern Queensland (2012)
59. Victor Y. Garas and C. Vipulanandan, “ Review of polyester polymer concrete properties”
60. Su 코매, “Microstructure of polymer cement concrete”, Doctoral thesis, Delft Unive. of Technology, 1995, pp.174.
61. Shirai A, and Ohama Y, “Properties of polymer-Modified mortars with garnet sand”, Proceedings of the IVth International Congress on Polymers in Concrete, 1998, pp. 321-328.
62. Hyun Surk Kim, Kyu Yeol Park and Dai Gil Lee, "A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed", 1995, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 48, pp. 649-655, 1995.
63. Y.K. Jo, "Basic properties of epoxy cement mortars without hardener after outdoor exposure", Construction and Building Material, Vol. 22, pp. 911-920, 2008.
64. Hong-chol Shin, Hiroyuki Miyauchi and Kyoji Tanaka, "An experimental study of fatigue resistance in epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the temperature effect", Construction and Building Material, Vol. 25, pp. 1316-1324, 2011.
65. Leon Agavriloaie, Stefan Oprea, Marinela Barbuta and Florentina Luca, "Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matirx", Construction and Building Material, Vol. 37, pp. 190-196, 2012.
66. P. Mani, A. K. Gupta and S. Krishnamoorthy, "Comparative study of epoxy and polyerster resin-based polymer concretes", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 7, No. 3, pp.157-163, 1987.
67. Moetaz M. El-Hawary, Ali Adbul-Jaleel, "Durability assessment of epoxy modified concrete", Construction and Building Material, Vol. 24, pp. 1523-1528, 2010.
68. Murhaf Haidar, Elhem Ghorbel and Houssam Toutanji, "Optimization of the formulation of micro-polymer concretes", Construction and Building Material, Vol. 25, pp. 1632-1644, 2011.
69. Y. Ohama and K. Demura, "Relation between curing conditions and compressive strength of polyester resin concrete", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 4, pp. 241-244, 1982.
70. M. Muthukumar, D. Mohan, "Studies on polymer concretes based on optimized aggregate mix proportion", European Polymer Journal, Vol. 40, pp. 2167-2177, 2004.
71. Zhiwei Xu, Michael Yu Wang and Tianning Chen, "Particle damping for passive vibration suppression: numerical modelling and experimental investigation", Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, pp. 1097-1120, 2005.
72. Xian-Ming Bai, Binoy Shah, Leon M. Keer, Q. Jane Wang and Randall Q. Snurr, "Particle dynamics simulation of a piston-based particle damper", Powder Technology, Vol. 189, pp. 115-125, 2009.
73. "An efficient method to solve the strongly coupled nonlinear differential equations of impact dampers",

Archive of Applied Mechanics, Vol. 189, pp. 977-984, 2012.
74. Leon Agavriloaie, Stefan Oprea, Marinela Barbuta and Florentina Luca, "Characterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix", Construction and Building Materials, Vol. 37, pp. 190-196, 2012.
75. M.F.M. Hussein, H.E.M Hunt, “Modeling of floating-slab tracks with continuous slabs under oscillating moving loads”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 297, Issues 1-2, 2006.10, pp.37-54
76. Part 6, Highway barrier insertion loss measurements, FHWA
77. Appendix B, Measurement procedure, FHWA
78. Rail dampers, acoustic rail grinding, low height noise barriers, Enzo Scossa-Romano, 2012
79. nSSW : eisenbahntechnische und sicherheitsrelevante Anforderungen, EI-Eisenbahningenieur, 2013
80. Railway noise mitigation factsheet 03 : Low height noise barriers, P A Morgan & J Peeling, 2012
81. Noise breaker - Larmschutz mittels eines gleisnahen niedrigen Wandsystems, ETR, 2013
82. Noise reduction with rail shielding-field measurements, REPRINT, 2012sound source around high speed trains”, Acoustic Society of America, Vol. 23, 2002
83. Coenraad Esveld (2001), Modern Railway Track, EUL & AL Publishing Co., Ltd.
84. Coenraad Esveld (2001) “Modern Railway Track”, 2nd Edition
85. Achenbach J.D (1973) “Wave propagation in elastic solids”, Elsevier Science Publishers b.v., Amsterdam
86. Bachmann H. and Ammann W “Vibrations in structures induced by man an machine”, Switzerland
87. David Thompson (2009) “Railway Noise and Vibration, Mechanisms, Modeling and Means of Control”
88. Burkhard Schulte-Werning, etc (2007) “Noise and Vibration Mitigation for Rail Transporrtation Systems”
89. Ministry of Environment, 2005, "A Study on the Comprehensive Countermeasures of Life Noise Reduction", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Technical Report, pp. 74
90. V. V. Krylov, 2001, “Noise and vibration from high-speed train “, Thomas Telford, Preface
91. T. Kitagawa, Nagakura, 2000,, "Aerodynamic noise generated by shinkansen car", Journal of sound and vibration, 231(3), pp.913~924
92. B. Hemdworth,1979, "Recent developments in wheel/rail noise reserch", Journal of sound and vibration, 66, pp.297~310
93. N. Llgurel, M.Sozen, 2011, "Noise Barrier effectiveness in semi anechoic chamber"
94. Q. Mao, S Pietrzko, 2013, "Control of Noise and Structural Vibration"
95. A. Brandt, 2010, "Noise and Vibration Analysis"
96. F. biondini, D.M. Frangopol, 2012, "Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability"
97. B. Schulte-Werning, D. Thompson, P. Gautier, C. Hanson, B. Hemsworth, J. Nelson, T. Maeda, P. D. Vos, 2008, "Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems."
98. B. Kotzen, C. English, 2008, "Environmental Noise Barriers"
99. I. L. Ver, L.L, Beranek, 2005, "Noise and Vibration Control Engineering"
100. J.F allard, N. Atalla, 2009, "Propagation of Sound in Porous Media “
101. Michael Karl Löffler, "Low noise rail and method of manufacturing", 2011.05.25., 출원번호, 13698145.
102. Sekisui Chemical Co., Ltd., "Composite material and synthetic sleeper using the composite material", 2003.08.12., 등록번호 06605343.
103. The university of southern queensland, “A railway sleeper", 2005.04.13., 출원번호 AU2005000527.
104. ISO 9613-1, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1 : Calculation of the absorption of sound by the atmosphere
105. ISO 9613-2, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2 : General method of calculation
106. ISO 10847, "Acoustics - In situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types"

[전동차 소음저감 기술 개발]

[1] 건설교통부·한국건설교통기술평가원. (2007). 기존선속도향상 주요부품 실용기술개발에 관한 연구[감속구동장치 개발] 최종보고서.
[2] 건설교통연구기획사업. (1999). 대차용 감속구동장치 개발 1단계 보고서.
[3] 건설교통연구기획사업. (2012). 철도 소음/진동 저감 원천기술 개발 기획 보고서.
[4] 김박윤 역. (1988) 기어편람. 기어편람편집위원회.
[5] 박소희, 박철민, 채기상, & 강연준. (2007). 다중층 음향 재료의 투과손실 예측과 측정. 한국소음진동공학회논문집, 17(11), 1013-1020.
[6] 소천진. (1995). 기어와 호브반 작업. 기전연구사.
[7] 정의진. (2011). 전동차 전기식 플러그도어 출입문 제어 장치 개발. 전자공학회논문지, 48(4), 47-53.
[8] 정의진. (2012). 소음저감 도시철도 도어시스템 개발. 한국산학기술학회 2012년도 춘계학술논문집 2부.
[9] 정재덕, 홍석윤, 송지훈, 권현웅, 노희민, & 김준곤. (2016). OTPA 방법을 이용한 철도차량 실내 소음 기여도 분석 연구. 한국소음진동공학회논문집, 26(1), 97-103.
[10] 한국철도기술연구원. (1998). 철도소음의 발생 및 저감 대책. 철도분야 기술정보지 14호.
[11] 한국철도기술연구원. (2006). 차세대 고속철도 기술개발사업(최고시속 400km 고속열차 (HEMU-400X) 개발) 기획보고서.
[12] AGMA. (1990). Gear Classification and Inspection Handbook. ANSI/AGMA 2000-A88.
[13] Dudly, D. (1984). Handbook of Practical Gear Design. McGraw-Hill, New York, 1984.
[14] Frid, A. (2003). Skirts and barriers for reduction of wayside noise from railway vehicles—an experimental investigation with application to the BR185 locomotive. Journal of sound and vibration, 267(3), 709-719.
[15] Guasch, O., and Magrans, F. X. (2004). The Global Transfer Direct Transfer Method Applied to a Finite Simply Supported Elastic Beam. Journal of sound and vibration, 276(1), 335-359.
[16] Lehming, B. (2008). Noise reduction plan for Berlin-Action plan. Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz. Abt. III Umweltpolitik, Referat Immissions schutz.
[17] OECD. (2009). OECD Environmental Performance Reviews: Finland 2009.
[18] Oktav, A., Yılmaz, Ç., and Anlaş, G. (2017). Transfer Path Analysis: Current Practice, Trade-offs and Consideration of Damping. Mechanical Systems and Signal Processing, 85, 760-772.
[19] 특허정보넷 키프리스 http://www.kipris.or.kr
[20] EURO CAREX http://www.eurocarex.com
[21] Faiveley사 http://www.faiveleytransport.com
[22] Bode사 http://bode-kassel.com/en/
[23] IFE사 http://www.ife-doors.com
[24] Nabtesco사 http://www.nabtesco.com
[25] EN 14752:2015. Railway applications - Body side entrance systems for rolling stock

[철도스킬소음 저감기술 개발]

(1) 장호, “브레이크 성능향상을 위한 신소재 마찰재 개발”, 기초연구사업, 2012
(2) 김재승 외,“고속차량 제동시 소음저감 방안 연구”, 코레일 철도연구원, 2007
(3) 조종두, “금속 소결 마찰재의 제동시 접촉 향상을 위한 구조설계”, 인하대, 2000
(4) J. B Ayasse and H. Chollet. Wheel-Rail Contact - Part1 : Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Taylor & Francis Group, 56-120, 2006.
(5) S. S. Hue, Z. Huang, S. D. Iwnicki, D. J. Thompson, C. J. C. Jones, and P. D. Allen. Expeimental and theoretical investigation of rail way wheel squeal- Part F:J. Rail and Rapid Transit, IMechE , 221, 59 - 73, 2007.
(6) I. Gomez, E .G. Adillo, A linear model to explain short pitch corrugation on rails, Wear 255 (2003) pp1127-1142.
(7) G. X. Chen, Z. R. Zhou, H. Ouyang et al., A finite element study on rail corrugation based on saturated creep force-induced self-excited vibration of a wheelset-track system, J. Sound and Vibration 329 (2010) pp4643-4655.
(8) P. A. Meehan, P.A. Bellette, R.D. Batten et al., A case study of wear-type rail corrugation prediction and control using speed variation, J. Sound and Vibration 325 (2009) pp85-105.
(9) X. Jin, Z. Wen, K. Wang et al., Effect of passenger car curving on rail corrugation at a curved track, Wear 260 (2006) pp619-633.
(10) T. X. Wu, Effects on short pitch rail corrugation growth of a rail vibration absorber/damper, Wear 271

(2011) pp339-348.
(11) C. Andersson, A. Johansson, Prediction of rail corrugation generated by three-dimensional wheel-rail interaction, Wear 257 (2004) pp423-434.
(12) L. Baeza, P. Vila, A. Roda et al., Prediction of corrugation in rails using a non-stationary wheel-rail contact model, Wear 265 (2008) pp1156-1162.
(13) K. H. Oostermeijer, Review on short pitch rail corrugation studies, Wear 265 (2008) pp1231-1237.
(14) H. Lee, C. Sandu, C. Holton, Dynamic model for the wheel-rail contact friction, Vehicle System Dynamics 50 (2012) pp299-321.
(15) B. Muller 2003 Curve squeal WP2 Inventory of the extent of the problem. Union Internationale des Chemins de Fer, internal report prepared by SBB
(16) J. J. Kalker, 1990, Three dimensional elastic bodies in rolling contact. Kluwer academic publishers, Dordrecht
(17) F. F. de Beer, 1999, Evaluatiestudie booggeluidmodel Periard. TNO report HAG- RPT -990081
(18) Eriksson, M. & Jacobson, S., Friction behaviour and squeal generation of disc brakes at low speeds, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D 215 (D12), pp. 1245-1256, 2001.
(19) Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M. & Papadopoulos, P., Automotive disc brake squeal, Journal of Sound and Vibration, 267 (1), pp. 105-166, 2003.
(20) Rhee, S.K., Tsang, P.H.S. & Wang, Y.S., Friction-induced noise and vibration of disc brakes, Wear, 133, pp. 39-45, 1989.
(21) Lorang, X., Foy-Margiocchi, F., Nguyen, Q.S & Gautier, P.E., TGV disc brake squeal, Journal of Sound and Vibration, 293, pp. 735-746, 2006.
(22) Brizard, D., Chiello, O. Sinou, J.J. & Lorang, X., Performance of some reduced bases for the stability analysis of a disc/pads system in sliding contact, Journal of Sound and Vibration, 293, pp. 735-746, 2011.
(23) Fritz, G., Sinou, J.J., Duffal, J.M. & Jézéquel, L., Effects of damping on brake squeal coalescence patterns-application on a finite element model, Mechanics Research Communications, 34, pp. 181-190, 2007.
(24) Sinou, J.J., Fritz, G. & Jézéquel, L., The role of damping and definition of the robust damping factor for a self-exciting mechanism with constant friction, Journal of Vibration and Acoustics, 129, pp. 297-306, 2007.
(25) Liu, P., Zheng, H., Cai, C., Wang, Y.Y., Lu, C., Ang, K.H. & Liu, G.R., Analysis of disc brake squeal using the complex eigenvalue method, Applied Acoustics, 68, pp. 603-615, 2006.
(26) Oberst, S. & Lai, J. C. S., Numerical methods for simulating brake squeal noise, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA2010, Sydney, Australia, 2, pp. 1505-1516, 2010.
(27) Kang, J., Finite element modelling for the investigation of in-plane modes and damping shims in disc brake squeal, Journal of Sound and Vibration, 331(9), pp. 2190-2202, 2012.
(28) Festjens, H., Gaël, C., Franck R., Jean-Luc, D. and Remy, L., Effectiveness of multilayer viscoelastic insulators to prevent occurrences of brake squeal: A numerical study, Applied Acoustics, 73(11), pp.1121-1128, 2012.
(29) Heckl, M. A., & Huang, X. Y., Curve squeal of train wheels, part 3: active control, J. of Sound and Vibration, 229(3), pp.709-735, 2000.
(30) Heckl, M. A., Curve squeal of train wheels, part 2: which wheel modes are prone to squeal?, J. of Sound and Vibration, 229(3), pp.695-707, 2000.
(31) Heckl, M. A. & Abrahams, I. D., Curve squeal of train wheels, part 1: mathematical model, J. of Sound and Vibration, 229(3), pp.669-693, 2000.
(32) Liu, X. & Meehan, P. A., Investigation of the effect of lateral adhesion and rolling speed on wheel squeal noise, Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, 227(5), pp.469-480, 2003.
(33) Glocker, C., Cataldi-Spinola, E. & Leine, R.I., Curve squealing of trains: Measurement, modelling and simulation, Journal of Sound and Vibration, 324, pp.365-386, 2009.
(34) Hsu, S. S., Huang, Z., Iwnickl, S. D., Thompson, D.J., Jones, C.J.C., Xie, G. & Allen, P. D., Experimental and theoretical investigation of railway wheel squeal, Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, Special Issue Paper, pp.59-73, 2007.
(35) incent, A., Koch, J. R., Chollet, H. & Guerder, J. Y., Curve squeal of urban rolling stone-Part 1: State of the art and field measurements, Journal of Sound and Vibration, 293, pp.691-700, 2006.
(36) Chollet, H., Ayasse, J.B., Vincent, A. & Koch, J.R., Part 3: Theoretical model, Journal of Sound and Vibration, 293, pp.710-727, 2006.

(37) runel, J. F., Dufrenoy, P., Nait, M., Munoz, J. L. & Demilly, F., Transient models for curve squeal noise, Journal of Sound and Vibration, 293, pp.758-763, 2006.
(38) Monk-Steel, A. D., Thompson, D. J., de Beer, G. G. & Janssens, M.H.A., An investigation into the influence of longitudinal creepage on railway squeal noise due to lateral creepage, Journal of Sound and Vibration, 293, pp.766-776, 2006.
(39) hen, G. X., Xiao, J. B., Liu, Q. Y. & Zhou, Z. R., Complex eigenvalue analysis of railway curve squeal, Noise and Vibration Mitigation, NNFM99, pp.433-439, 2008.

[역사구조물 소음/진동 저감기술 개발]

[1] 김진호, 한석윤, “철도역사의 진동저감을 위한 플로팅 슬래브궤도에 대한 고찰”, 2008

[2] 김진호, 차효정, “Development and Validation of Elastomeric Devices Supported Floating Slab Track Systems”, 2008

[3] 김진호, 차효정, “플로팅 슬래브궤도용 방진재의 성능에 관한 연구”, 2007

[4] 김진호, “저진동 RC 플로어 구조의 진동특성에 관한 연구”, 2006

[5] 김진호, 김경민, 이광도, “레일 진동모드 해석을 통한 레일 웹댐퍼 형상 검토에 관한 연구”

[6] 김진호, 이광도, 김경민, “도시철도 콘크리트궤도의 소음 특성 및 흡음소재 개발 연구”, 2010

[7] 김진호, 최성만, “도시철도 교량구간 소음에 대한 주관적 반응관계에 관한 연구”, 2009

[8] 김병삼, 이태근, “열차운행에 따른 철도역사의 진동영향 평가”, 2010

[9] 김지현, “철도인접지역의 신축예정건물 진동평가”, 2010

[10] 이태근, 박원기, 김병삼, “역사의 방진대책에 따른 진동 저감 예측”, 2011

[11] 권영철, "Filtering System의 소음·진동 저감효과에 관한 연구", 2006

[12] 박태현, 박헌상, 김호배, 최진호, "역사 내 진동저감형 디스크 받침 특성에 관한 연구", 2011

[13] 김진호, 최성만, “도시철도 교량구간 소음에 대한 주관적 반응관계에 관한 연구”, 2009

[14] 박헌상, "고속철도 선하 역사의 진동 및 소음저감 방안에 관한 연구", 2012

[15] 박상곤, "철도 궤도 진동저감을 위한 방진시스템에대한 연구", 2013

[16] 이성수 전호만, "철도가 관통하는 건물에서의 진동저감을 위한 보강형 바닥구조의 방진효과", 2013

[17] 최상현, 백준호, 이유인, 방인석, "철도시설물의 연직방향 진동저감을 위한 마찰형 진동 격리장치", 2013

[18] 국토해양부(2012). “철도인프라 성능 및 건설비 최적화를 위한 기반기술 개발 기획보고서” 미래철도기술개발사업 기획보고서

[19] 국토해양부(2011). “제2차 철도산업발전기본계획(2011~2015)”

[20] 한국철도협회. “해외철도동향자료”

[21] 구헌상 (국토해양부). (2012). 「미래 녹색교통 국제세미나」 발표자료

[22] 해외건설협회. (2010). 월간 해외건설, 중동지역 철도 프로젝트 동향 및 전망

[23] 채일권. (2012). “중동철도시장의 향후 전망과 철도산업 리스크 분석사례연구” 한국철도학회 추계학술대회 논문집

[24] 김복환. (2011). 해외건설시장 동향 설명회 발표자료. P16-17

[25] 국토해양부(2008). “해외철도산업 진출 전략 및 수주 활성화 방안”

[26] 김준호, 김석홍, 김두훈. (1994). “산본 전철 역사의 소음.진동 전파 특성에 관한 기초연구” 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집

[27] 한찬훈, 이상우, 구재오, 이경희. (1996). “고속철도 역사실내의 소음저감방안에 관한 연구”

[28] 양신추, 강윤석, 김만철. (2000). “슬래브궤도의 방진효율성 평가기법” 한국토목학회 논문집

[29] 건설교통부 (2004). “건물을 통과하는 도로 및 철도진동의 방진설계 및 방진재료개발 연구” 건설핵심기술연구개

[30] 강윤석, 양신추, 문제우. (2008). “차세대 고속철도 사업 선로구축물 분야 연구과제 중심으로” 특별기사III, 고속철도의 선로구축물 성능향상 및 유지보수 핵심기술 개발

[31] 이은호, 김용재, 박명균. “저진동 궤도슬래브의 설계와 시공” 한국철도학회 학술발표대회 논문집. PP 212-217

[32] 박기수, 최연선. (2008). “준고속 도시철도의 진동분석 및 저감대책” 한국소음진동공학호 논문집. PP 1014-1023

[33] 장승엽, 조호현, 양신추. (2010). “플로팅 슬래브궤도를 적용한 선하역사 구조물 진동해석” 한국철도학회 학술발표대회 논문집. PP1719-1724

[34] 류봉조, 이홍기, 구경환. (2011). “방진재를 이용한 대형구조물의 철도 진동에 관한 실험적 연구” Trans. KIEE. Vol. 60, No. 6

[35] 서사범. (2012). “철도선로연변에서의 소음과 지반진동의 저감” 한국철도학회 철도저널

[36] 장승엽, 김은, 황성호. (2013). “전기유압식 엑츄에이터 가진기를 이용한 플로팅 슬래브궤도의 중간 주파수 대역에서의 동적 특성 분석” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집

[37] 박정원, 박준홍. (2013). “철도궤도의 진동 및 방사소음 분석, 저감 및 활용 방법” 국가지정기계공학연구정보센터 국내학술지

[38] 박상곤, 전종균, 이규섭, 장승엽. (2013). “플로팅 슬래브 궤도용 방진시스템 개발” 한국소음진동공학회 논문집 제23권 제2호. pp 112~122

[39] 지광습, 이승정, 문도영, 김유봉, 백인혁. (2011). “GFRP로 보강된 프리캐스트 슬래브 궤도 개발 및 거동 분석” 한국철도학회 추계학술대회 논문집

[40] 장승엽, 강윤석, 이후삼, 김유봉, 이종수. (2008). “프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도의 영업선 시험시공 및 성능평가” 한국철도학회 추계학술대회 논문집. pp 840-845

[41] 김유봉, 문도영, 백인혁, “프리캐스트 슬래브궤도 패널의 최적규격 선정을 위한 연구” 한국철도학회 춘계학술대회. pp 740-744

[42] 유원희, 문경호. (1998). “방음차륜의 소음진동 저감효과 시험” 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집. pp 64-68

[43] (주)한국구조안전기술원, “진동으로 인한 건축물 피해 평가에 관한 연구”, 2002

[44] 홍갑표, 전호민, “고속철도 역사 승강장의 진동저감방법에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제14권, 제12호, 1998

[45] 신정열 외 5명, “패턴인식기반 역사구조물건전성평가기법에 대한 수치해석 검증분석”, 한국방재학회논문집, 제12권, 제2호, 2012

[46] 이성수, 전호민, “바닥구조의 내부보 배치와 강성을 이용한 수동형 진동저감”, 대한건축학회논문집, 제28권, 제1호, 2012

[47] 강진욱 외 2명, “고속철도 PC Box 교량 잭업을 위한 교각코핑부 안정성 검토”, 한국철도학회지, 제7권, 제1호, 2004

[48] 권영철, “한국고속철도 천안역사에 대한 소음 및 진동영향 연구”, 한국철도학회 추계학술대회, 2005

[49] 신정열 외 4명, “지하철 역사구조물 건전성 평가를 위한 모니터링시스템 구축”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2012

[50] 최상현 외 3명, “철도시설물의 연직방향 진동저감을 위한 마찰형 진동격리장치”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2013

[51] 강진욱 외 2명, “고속철도 PC Box 교량 잭업을 위한 교각코핑부 안정성 검토”, 한국철도학회지, 제7권, 제1호, 2004

[52] Chopra, A. K., Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering, University of California at Berkeley, Prentice Hall, 1995.

[53] Claire G. Ball, Slab Track Laboratory Test Program, PCA R&D Serial No. 2795, 2004.

[54] Coenraad Esveld, Modern Railway Track, MRT-Productions, 1989.

[55] DIN 45673-1, Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, 2000.

[56] FTA, High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assesment, FRA, Final Draft, 1998.

[57] Gupta, S., Degrande, G., Chebli, H., Clouteau, G., Hussein, M. F. M. and Hunt, H., A Coupled periodic FE-BE model for ground-bourne vibrations from underground railways, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering C.A. Mota Soares et.al. (eds.) Lisbon, Portugal, 5-9 June 2006.

[58] CONVURT, http://www-g.eng.cam.ac.uk/convurt/ or http://www.convurt.com

[59] Hui, C. K. and Ng, C. F., Coupling resonance of floating slab and supporting concrete box structure, Applied Acoustics, 69, 2008, pp. 1044～1062.

[60] Hunt, H. E. M., Hussein, M. F. M. and Talbot, J. P., Insertion loss models for evaluating the performance of vibration counter-measures for underground railways, Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, July 7-10, 2003.

[61] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: general requirements, International Organi- zation for Standards, 1997.

[62] ISO 10846-2, Acoustics and vibraion - Laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements, Part 2: Dynamic stiffness of elastic supports for translatory motion - Direct method, 1997.

[63] Kawaharazuka, T., Hiramatsu, T., Ohkawa, H. and Koyasu, M., Experimental study on vibration reduction by isolated railway, 25th Anniversary Congress of Inter-Noise, Liverpool, 1996.

[64] Lombaert, G., Degrande, G. and Francois, S., A numerical study of the vibration isolation of a slab track, Proceedings of McMat2005 2005 Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and Materials Baton Rouge, Louisiana, USA, June 1-3, 2005.

[65] Sato, Y., Miura, S., 주행안전 및 승차감을 고려한 선로구축물 굴절한도, 철도기술연구보고, No. 820(시설편 제371호), 일본국유철도 철도기술연구소, 1972.

[66] S. J. Cox, A. Wang, C. Morison, P. Carels, R. Kelly and O.G. Bewes, A test rig to investigate slab track structures for controlling ground vibration, Journal of Sound and Vibrarion 293, 2006, pp. 901~909.

[67] Transit Noise and Vibration Impact Assessment, FTA, 1995

[68] Woodroof,H.J. and Griffin, M.J., "SURVEY OF THE EFFECT OF RAILWAY-INDUCED BUILDING VIBRATION ON THE COMMUNITY", 1987

[69] 横島 潤紀 , 田村 明弘, "新幹線鉄道の騒音と振動による複合被害感", 2006

[70] 松田 貫 , 井上 勝夫 , 冨田 隆太, "振動応答実測及び振動感覚評価の検討(交通振動に対する住宅床の体感振動評価に関する研究)", 2010

[71] Linya Liu, Wenjie Shao, "Design and Dynamic Response Analysis of Rail with Constrained Damped Dynamic Vibration Absorber", 2011

[72] D. Connolly , A. Giannopoulos, W. Fan, P.K. Woodward, M.C. Forde, "Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations", 2013

[73] 大迫勝彦, 林篤, 山田眞左和, "高架下建物の防振防音（吊り免振）工法の開発", 2004

[74] Hans-Georg Wagner. (2007). “ATTENUATION OF TRANSMISSION OF VIBRATIONS AND GROUND-BORNE NOISE BY MEANS OF STEEL SPRING SUPPORTED LOW-TUNED FLOATING TRACKBEDS” GERB Vibration Control Systems, Inc.

[75] Jun Yuan, Zhao-bo Meng, Min-zhe Wu, and Lin Song. (2008). “Dispersive Characteristics Analysis and Vibration Isolation Simulation of Floating Slab Track System“ International Workshop on Modelling,

Simulation and Optimization

[76] Wanming ZHAI, Peng XU, Kai WEI. (2011). “Analysis of vibration reduction characteristics and applicability of steel-spring floating-slab track” Journal of Modern Transportation Volume 19, Number 4.

[77] Yanqing Zhou, Zhigang Chen. (2011). “Dynamic Analysis of Hinge Joint Voided Slab Wide Bridge” International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE).

[78] Zheng Sun, Xiaojing Sun, Shucai Li, Weidong Wang, Dunfu Zhang. (2011). “Investigation on Vibration Isolation Effect of Rubber Pad Floating Slab Track Structure” International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE).

[79] Georgios Michas. (2012). “Slab Track Systems for High-Speed Railways” 석사학위논문. 스웨덴 왕립공대 (KTH)

[80] Allen, D.E., “Building vibrations from human activities”, ACI Concrete International: Design & Construction, Vol.12, No.6, 1990

[81] Anatol Longinow, W. Robert Hannen, “Floor Vibrations in Buildings”, PRACTICE PERIODICAL ON STRUCTURAL DESIGN AND CONSTRUCTION Structural Design Forum, 2009

ISBN ; 979-11-89761-68-4

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.