최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	사회이슈해결유형	
공고번호	공고-제2호	총괄연구개발 식별번호		-	
		연구개발과제번호		21CTAP-C153136-03	
국가과학기술 표준분류	EI. 건설/교통	50%	EI12. 건설 환경설비 기술	30%	EI1207. 시설물 소음진동 제어/관리기술	20%

총괄연구개발명	국문	재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구		
	영문	Development of eco-friendly multi-absorption sound proof wall using waste		
연구개발과제명	국문	재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구		
	영문	Development of eco-friendly multi-absorption sound proof wall using waste		
주관연구기관	기관명	㈜동성엔지니어링	사업자등록번호	513-81-09001
	주소	(우.38660) 경상북도 경산시 성암로 21길 41	법인등록번호	176011-0006228
주관연구책임자	성명	신재철	직위	전무(연구소장)
	연락처 직장전화	02-2041-8720	휴대전화	010-6368-1143
	연락처 전자우편	aachenshin63@naver.com	국가연구자번호	1101 7533
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)		
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9개월)		
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)		
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	134,000	4,570	40,150	-	-	-	-	138,570	40,150	178,720	-
1년차	167,000	5,690	49,990	-	-	-	-	172,690	49,990	222,680	-
2년차	299,000	10,160	89,740	-	-	-	-	309,160	89,740	398,900	-
3년차	600,000	20,420	179,880	-	-	-	-	620,420	179,880	800,300	-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	㈜건설표준시험원	주진영	이사	010-8610-3104	ju0419@hanmail.net	공동	기타

연구개발담당자 실무담당자	성명	백유진	직위	과장(선임연구원)	
	연락처 직장전화	02-2041-8717	휴대전화	010-8640-8614	
	연락처 전자우편	17004@dsen.co.kr	국가연구자번호	1124 7405	

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01월 10일

주관연구책임자 : 신 재 철 (직인)

주관연구기관의 장 : (주)동성엔지니어링 이 상 규 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

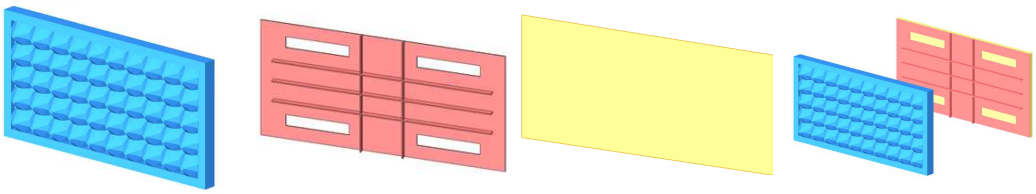
<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구</td><td>총괄연구개발 식별번호</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">사회이슈해결유형</td><td>연구개발과제번호</td><td colspan="2">21CTAP-C153136-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술 표준분류</td><td>EI. 건설/교통</td><td>50%</td><td>EI12. 건설 환경설비 기술</td><td>30%</td><td>EI1207. 시설물 소음진동제어/관리기술</td><td>20%</td></tr>
<tr><td colspan="2">총괄연구개발명</td><td colspan="6">재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발 기간</td><td colspan="6">2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 800,300 천원
(정부지원연구개발비 : 600,000천원, 기관부담연구개발비 : 200,300 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[ ] 개발[✔]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준(3)
종료시점 목표(9)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [✔] 자유공모 [ ]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="4">연구개발목표 및 내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">본 연구에서는 폐타이어를 이용하여 방음벽 적용구간의 주변 환경변화에 따라 필요 시 간단한 추가공정을 통해 방음터널로 변경이 가능한 친환경 흡음 복합 방음벽을 개발하고자 한다. 방음벽에는 흡차음형 방음판 그리고 투명 방음판이 복합 적용된다. 흡차음형 방음판의 재료는 폐타이어를 이용하고, 소음을 다양한 각도로 굴절시킬 수 있도록 형상 개발 및 최적개선 형상을 도출하여 흡음효과를 향상시킨 방음판을 개발하고자 한다. 그리고 운전자의 시야 개방감과 안전성 확보를 위해 차음형 방음판과 흡음형 방음판 사이 투명 방음판을 적용하고자 한다.</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">- 폐타이어를 이용하여 소음저감 효과가 우수한 흡차음형 방음판 개발을 위해 재료, 형상 및 구조개발을 수행하였다. 재료개발실험을 통해 최적 배합비를 도출하고, 음향해석 시뮬레이션, 성능평가 실험을 통해 방음판의 형상과 구조를 개발하였다. 개발된 방음판에 대한 유한요소 해석을 통해 구조적 안전성을 검토하였으며 실험 및 해석결과를 반영하여 최종 형상과 구조를 결정하였다.

- 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조를 개발하였다. 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환가능 구조체의 시공 단계에 대한 개념설계 수행하고 방음판, 방음벽, 방음터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성을 평가하였다. 뿐만 아니라 방음터널 연결부(접속부)에 대한 상세검토를 수행하였으며 구조적 안전성을 확보함을 확인하였고, 구조성능시험 수행 (실대형 정적재하시험)을 통해 검증하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="5">- 기초 문헌조사를 통한 흡차음형 방음판의 형상 및 구조 개발 ·
- 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="5">- 기초문헌조사
· 방음벽 설계 및 시공기준 조사·분석
· 흡음형 방음판/ 차음형 방음판의 성능평가 시험 항목 및 규격 조사·분석하였으며 이를 준용하여 방음판의 재료 및 성능평가 실험 수행
· 흡음효과 및 차음효과 향상 방안 연구사례 조사·분석하였으며 방음소재의 두께가 두꺼울수록, 방음벽이 높을수록, 방음재의 사용 여부에 따라 흡음 및 차음효과가 향상되는 것을 확인하였음.

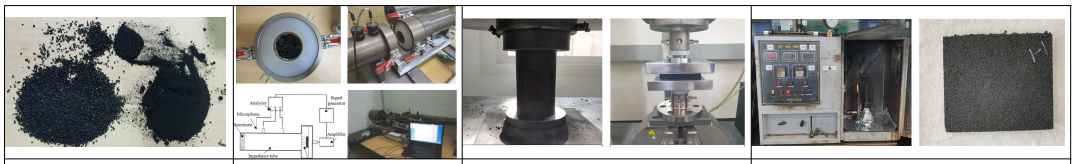
- 흡음형 방음판 최적안 방안 도출
· 흡음효과를 향상시킬 수 있는 형상에 대한 문헌조사를 통하여 흡음형 방음판 개발
· 소음을 다양한 각도로 굴절시킬 수 있도록 형상 개발
· 흡음재에 대한 입도분석 실험 수행

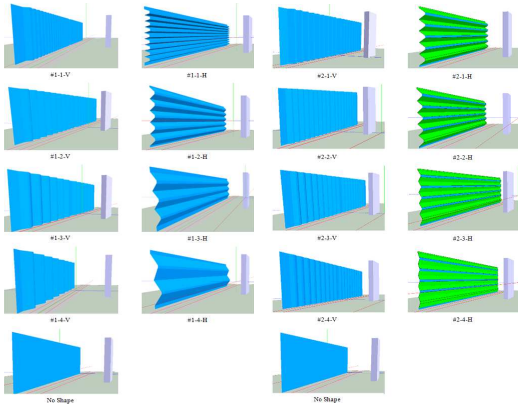
- 차음형 방음판 최적안 방안 도출
· 차음효과를 향상시킬 수 있는 형상에 대한 문헌조사를 통하여 차음형 방음판 개발</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="3">연구개발목표 및 내용</td><td rowspan="2">1년차</td><td>내용</td><td>· 미분말을 이용하여 가열 · 가압 방식으로 제작
· 흡음형 방음판의 후면판으로 적용방안 도출
· 방음판의 구조안전성을 위해 강재로 만든 구조프레임 적용

- 흡음형 방음판-구조프레임-차음형 방음판이 샌드위치식으로 적용된 일체형 방음판으로 개발
 
흡음판 내부 격자형 강판 차음판 방음판 조립 개념도

- 차음형 방음판 내 폐섬유 충진방안
· 폐섬유로 활용하고자 했던 일반 폐의류는 방음판 내에 충진 시 산화되면서 악취 발생의 우려가 있어 폐섬유는 적용하지 않는 것으로 결정
· 구조안전성을 고려하여 방음판 내에 구조프레임(내부 강판)을 적용시키고자 함

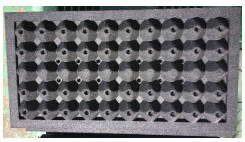
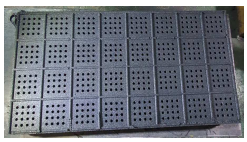
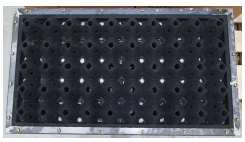
- 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발
· 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환가능 구조체의 시공 단계에 대한 개념설계 수행</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td>- 재료개발실험을 통한 흡음판과 차음판의 최적 배합비 도출 ·
- 음향해석 시뮬레이션과 성능평가 실험을 통한 흡차음형 방음판 개선형상 도출</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>- 흡차음형 방음판 재료 개발 실험
· 입도분석 실험
· 관내법 실험
· 압축강도 실험
· 실험 결과를 이용하여 포아송비/ 탄성계수 도출
· 연소시험
· 실험결과를 반영하여 흡음판과 차음판의 최적 배합비 도출
 
폐타이어 분말 관내법 실험 압축강도 실험 연소실험

- 흡차음형 방음판 음향해석 시뮬레이션
· 흡차음형 방음판의 흡음재 개발 형상에 대해 음향해석 시뮬레이션을 수행하여 흡음재 형상의 굴곡 간격을 도출함
· 흡차음형 방음판의 흡음재 개선 형상에 대해 음향해석 시뮬레이션을 수행하여 흡음재 형상의 굴곡 깊이를 도출함
  </td></tr>
</table>

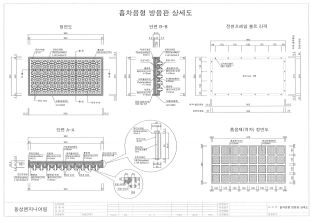
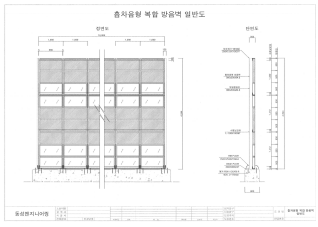
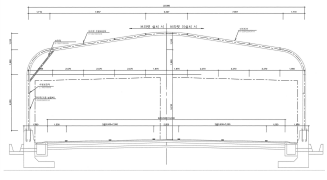
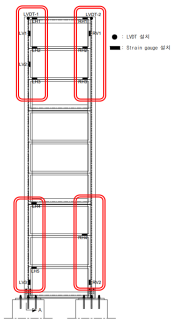
<table>
<tr><td rowspan="3">연구개발목표 및 내용</td><td>2년차</td><td>내용</td><td>– 흡차음형 방음판 형상개발 및 성능평가 시험
· 음향해석 시뮬레이션 결과를 반영한 형상 개발 및 1차 시작품 제작
· 1차 시작품으로 방음판 성능평가 시험 수행 (흡음률, 음향투과손실, 하중변위, 충격시험)
→ 흡음률 시험 결과 기준 불만족

– 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발
· 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 전체계해석을 통한 설계
:흡차음형 방음판, 방음벽, 방음터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성을 평가함
:흡차음형 방음판에 대한 전산해석을 수행한 결과 안전한 것으로 나타남
:방음벽 및 방음터널 시공단계별 전체계해석을 수행한 결과 안전한 것으로 나타남

· 접속부 상세해석
:방음터널 연결부(접속부)에 대한 상세검토 수행
:부재 응력집중을 효과적을 제어할 수 있을 것으로 판단됨</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3년차</td><td>목표</td><td>– 소음저감 효과가 우수한 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판 개발·
– 방음벽과 방음터널이 상호 호환되는 구조 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td>– 흡차음형 방음판 형상개발 및 성능평가 시험
· 흡차음형 방음판 형상 개선 및 2차 시작품 제작
· 2차 시작품으로 방음판 성능평가 시험 수행(흡음률, 음향투과손실, 하중변위, 충격시험)
→ 흡음률 시험 결과 기준 불만족
· 흡차음형 방음판 형상 개선 및 3차 시작품 제작
· 3차 시작품으로 방음판 성능평가 시험 수행(흡음률, 음향투과손실)
→ 흡음률/ 음향투과손실(500Hz) 시험 결과 기준 불만족
· 흡차음형 방음판 형상 개선 및 4차 시작품 제작
· 4차 시작품으로 방음판 성능평가 시험 수행(흡음률, 음향투과손실, 촉진 내후성 시험)
→ 시험 결과 기준 만족
· 방음판에 대한 유한요소해석을 통해 구조적 안전성 검토
· 방음판 최적 형상 및 최종 배합비 결정

    
-1차 시작품- -2차 시작품- -3차 시작품- -4차 시작품(최종)-

– 구조성능시험 수행 (실대형 정적재하시험)
· 시험을 위한 설계 및 구조검토 (하중, 하중재하 위치, 게이지부착위치 결정)
· 방음벽 시작품 제작
· 구조성능 시험(실대형 정적재하시험) 수행
→ 방음판의 구조적 안정성을 확보하였다고 판단됨

   
    </td></tr>
</table>

연구개발 목표 및 내용	3년차	내용	- 실용화 및 사업화 · 경제성 분석 · 시장성 분석 · 원가분석 · 현장적용 · 건설 신기술 · 환경 신기술 · 시공 및 유지관리 가이드라인
연구개발 성과	특허출원 2건, 특허등록 1건, 비SCI 1건, 시작품 3건, 학술발표 4건, 기술실시계약 1건 SCI 1건(투고), 환경신기술 1건(신청), 건설신기술 1건(신청)		
연구개발 성과 활용방안 및 기대효과	폐타이어를 이용하여 방음벽에서 방음터널로 상호호환이 가능한 친환경 흡음 복합 방음벽 개발을 통해 폐기물의 재활용률을 향상시키고, 경제적으로 방음벽을 활용한 방음터널 설치를 통해 시공비용 절감 효과를 기대 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 방음벽을 설치 후, 필요에 따라 방음벽을 철거하고 새로 방음터널을 시공하는 것이 아닌 추가공정을 통해 방음터널로 확대 적용 가능한 기술로 방음벽 기술력 발전을 이끌어갈 수 있을 것으로 기대되며, 선진기술 선점과 미래 경쟁력 향상을 통해 새로운 글로벌시장 수출 가능성 또한 기대된다.		
연구개발 성과의 비공개여부 및 사유	해당없음		

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술 요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	1	출원2 등록1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호
	-	-	-	-	-	-	-	-	

국문핵심어 (5개 이내)	폐 타 이 어	흡 음 방 음 판	차 음 방 음 판	방 음 벽	방 음 터 널
영문핵심어 (5개 이내)	waste tire	absorption sound proof board	insulation sound proof board	sound proof walls	sound proof tunnel

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 01
   1) 연구개발과제의 최종목표 ····· 01
   2) 연구개발과제의 년차별 목표 ····· 01

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 03
   1) 기초문헌조사 ····· 03
   2) 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판 개발 ····· 05
   3) 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발 ····· 37

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 61
   1) 연구수행 결과 ····· 61
      (1) 정성적 연구개발성과 ····· 61
      (2) 정량적 연구개발성과 ····· 62
      (3) 세부 정량적 연구개발성과 ····· 62
   2)목표 달성 수준 ····· 64

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 64
   1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용 ····· 64
   2) 자체 보완활동 ····· 65
   3) 연구개발 과정의 성실성 ····· 65

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 65

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 66

* 별첨자료

- 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
  : 증빙자료 1 (최종보고서)
  : 증빙자료 2 (성과점검기준표, 특허, 선행기술조사)
  : 증빙자료 3 (환경신기술 신청 및 선행기술조사, LCC분석보고서)
  : 증빙자료 4 (시험성적서)
  : 증빙자료 5 (논문, 학술발표, 시작품 제작, 3D모델링, 기술실시계약, 신규채용)
  : 증빙자료 6 (흡차음형 방음벽 유지관리 지침, 흡차음형 방음판 표준 시방서)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판개발
  - 방음벽에 적용되는 방음판을 개발하기 위하여 방음판의 재료 및 구조 개발
  - 각 방음판의 흡음성능이 우수한 방음판 형상 개발
○ 방음벽에서 방음터널로 확대 적용이 가능한 방음벽 기술개발
  - 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발
○ 실용화 및 사업화

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도

▪ 기초 문헌조사를 통한 흡차음형 방음판의 형상 및 구조 개발

- 흡음형 방음판 최적안 방안 도출
· 소음을 다양한 각도로 굴절시킬 수 있도록 형상 개발
- 차음형 방음판 최적안 방안 도출
· 미분말을 이용하여 가열 · 가압 방식으로 제작하여 흡음형 방음판의 후면판으로 적용방안 도출
- 흡음형 방음판-구조프레임-차음형 방음판이 샌드위치식으로 적용된 일체형 방음판으로 개발
- 차음형 방음판 내 폐섬유 충진방안
· 폐섬유로 활용하고자 했던 일반 폐의류는 방음판 내에 충진 시 산화되면서 악취 발생의 우려가 있어 폐섬유는 적용하지 않는 것으로 결정
· 구조안전성을 고려하여 방음판 내에 구조프레임(내부 강판)을 적용시키고자 함

▪ 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발

- 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발
· 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환가능 구조체의 시공 단계에 대한 개념설계 수행

○ 2차년도

▪ 재료개발실험을 통한 흡음판과 차음판의 최적 배합비 도출

- 흡차음형 방음판 재료 개발 실험 및 실험결과를 반영하여 흡음판과 차음판의 최적 배합비 도출

▪ 음향해석 시뮬레이션과 성능평가 실험을 통한 흡차음형 방음판 개선형상 도출

- 흡차음형 방음판 음향해석 시뮬레이션을 수행하여 흡음재 형상의 굴곡 간격 및 굴곡 깊이를 도출함

▪ 방음벽과 방음터널이 상호 호환되는 구조 개발

- 접속부 상세해석
· 방음터널 연결부(접속부)에 대한 상세검토 수행
· 부재 응력집중을 효과적을 제어할 수 있을 것으로 판단됨
- 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 전체계해석을 통한 설계
· 흡차음형 방음판, 방음벽, 방음터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성을 평가함
· 흡차음형 방음판에 대한 전산해석을 수행한 결과 안전한 것으로 나타남
· 방음벽 및 방음터널 시공단계별 전체계해석을 수행한 결과 안전한 것으로 나타남

○ 3차년도

▪ 소음저감 효과가 우수한 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판 개발

- 성능평가 시험결과를 반영하여 방음판 형상 개선사항 도출
- 최적 흡차음형 방음판 형상 및 구조 개발

▪ 방음벽과 방음터널이 상호 호환되는 구조 개발

- 구조성능시험을 통해 방음판의 구조적 안정성 검토

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	폐타이어를 이용한 흡음형 방음판 개발	흡음형 방음판 최적안 방안 도출	폐타이어를 이용한 방음판 개발 전무	100%	흡음형 방음판 형상개발	
		흡음형 방음판 재료개발 실험	폐타이어를 이용한 방음판 개발 전무	평가의 범위 이내	재료의 E값, 포아송비 도출, 입도분석	
	폐타이어와 폐섬유를 이용한 차음형 방음판 개발	차음형 방음판 최적안 방안 도출	차음형 방음판 최적안 방안 전무	100%	차음형 방음판 형상개발	
		차음형 방음판 재료개발 실험	차음형 방음판 개발 전무	100%	재료의 E값, 포아송비 도출, 입도분석	
		차음형 방음판 내 폐섬유 충진방안	차음형 방음판 개발 전무	100%	흡차음효과 최적밀도 도출	
	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	호환가능 방음벽 구조 전무	100%	호환가능 구조체 개발	
2년차 (2020)	페타이어를 이용한 흡음형 방음판 개발	흡차음형 방음판 최적안 방안 도출	흡차음형 방음판 최적안 방안 전무	100%	시뮬레이션 결과를 활용한 개선형상 도출	
		흡차음형 방음판 재료개발 실험	차음형 방음판 개발 전무	100%	최적 개선형상 도출	
	폐타이어와 폐섬유를 이용한 차음형 방음판 개발	차음형 방음판 재료개발 실험	차음형 방음판 개발 전무	허용응력 범위이내	재료의 E값, 포아송비 도출, 입도분석	
		음향해석 시뮬레이션	차음형 방음판 개발 전무	100%	방음판 개선형상 음향해석 시뮬레이션	
		시작품 제작	차음형 방음판 개발 전무	100%	시작품 제작	
		차음형 방음판 성능평가	차음형 방음판 개발 전무	100%	실험 진행	
	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	호환가능 방음벽 구조 전무	100%	전체계해석을 통한 설계 및 접속부 상세해석	
3년차 (2021)	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발	호환가능 방음벽 구조 전무	2건	방음벽 시작품 제작	

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 기초문헌조사

○ 방음벽 설계기준

- 방음벽의 설계 및 시공에 대한 사항은 기본적으로 국토교통부 및 한국도로공사에서 발간한 지침 및 공사시방서를 준수하도록 되어있으며, 국토교통부와 한국도로공사의 시방서 내용은 유사한 것으로 나타났다.

표 1. 방음벽의 설계·시공 기준 문헌조사 목록

NO	설계·시공 기준 목록		비고
1	국도건설공사 설계실무 요령(2016)	설계	국토교통부
2	고속도로 설계실무지침서(2008)	설계	한국도로공사
3	도로설계요령(2009)	설계	
4	도로공사 표준시방서(2016)	시공	국토교통부
5	고속도로공사 전문시방서(2018)	시공	한국도로공사



그림 1. 방음벽의 설계·시공 기준 문헌조사 목록

- 방음판의 선정기준
  ① 흡음형 : 도로 양측에 방음벽의 설치, 반사음의 영향을 고려해야하는 경우
  ② 반사형 : 반사음의 영향을 고려하지 않아도 되는 경우
  ③ 투명형 : 조망, 일조 및 채광 등이 요구되는 경우
  ④ 칼라형 : 미관이 고려되는 지역의 경우
- 방음벽의 기초 및 지주
  ① 토공부 방음벽의 풍하중 할증은 높이에 따라 결정
  ② 신설 도로의 토공부에는 L형 기초, 기존 도로의 경우 직벽형 기초를 적용
  ③ 지주의 규격 및 간격은 설계풍하중 및 방음벽의 높이에 따라 방음벽 기초 설계 표준도 간격 적용
- 방음벽의 높이 및 길이
  ① 방음벽의 높이와 길이는 방음벽에 의한 삽입손실에 따라 결정
  ② 계획시의 삽입손실은 방음벽 설치대상지역의 소음 환경기준과 소음점과 소음 실측지(또는 예측지)와의 차이 이상으로 함

○ 흡음효과 및 차음효과 향상

- 소음을 저감하는 방법은 소음원 대책, 전파경로 대책, 수음자 대책으로 총 3가지로 분류할 수 있다. 이 중 방음벽은 소음의 전달경로 상에서 소음을 저감하는 전파경로 대책에 해당되며, 이와 연관 지어 흡음효과 및 차음효과 향상에 대한 문헌조사를 수행하였다.
- 방음재 중 흡음재의 성능은 단위 면적당 『기공의 개수』가 많을수록 흡음 성능이 향상되고, 차음재의 성능은 질량에 비례하는 것을 알 수 있었다. 이를 반영하여, 흡음효과 및 차음효과 향상을 위해 최적 밀도 도출 및 추가적인 방음재 삽입 여부에 대하여 고려하였다.

○ 흡·차음형 방음판 실험방법 조사

- 흡·차음형 방음판의 성능평가 및 실험방법을 조사하기 위하여 문헌조사를 수행하였다. 선행연구 및 방음판 기준을 분석하였으며, 흡·차음형 방음판 개발을 위하여 다음과 같은 시험을 수행하였다.

표 2. 흡·차음형 방음판 실험방법 조사

구분	내용	실험방법	기준
흡음판 & 차음판	폐타이어 분말, 미분말 입도 분석	• 분말 : • 미분말 : KS A ISO 13320 입자크기 분석-레이저 회절법	
	탄성계수, 포아송비 도출	• 탄성계수, 포아송비 도출	-
	압축강도 시험	• KS F 2405 (콘크리트 압축강도 시험방법) • KS M ISO 3386-2 (연질 발포 고분자 재료 -압축 응력-변형 특성 측정방법 - 제2부: 고밀도 재료)	-
	연소시험	• KS L 2513 • 규정에 맞도록 실험체를 설치한 후 불꽃을 이용하여 가열한후, 잔염/잔진시간, 탄화면적/길이 측정	잔염시간 20초 이하 잔진시간 30초 이하 탄화면적 50㎠ 이하 탄화길이 20㎝ 이하
	촉진 내후성 시험	• 고속도로 건설재료 품질기준(KS M ISO 4892-2) • 제논-아크램프, 1,000시간, 방법 A, 사이클번호 1	색차 4 이하
흡음판	관내법 시험	• KS F 2814-2 • 임피던스 관의 한쪽 끝에 시료를 설치하고 관내에 음원을 발생시키고, 시료 근처의 두 지점에서 음압을 측정	-
흡·차음형 방음판	흡음률 시험	• KS F 2805 • 250, 500, 1000, 2000Hz 음에 대한 흡음률의 산술 평균값	0.7 이상
	음향 투과손실 시험	• KS F ISO 10140-2 • 500Hz, 1,000Hz 음에 대한 투과손실값을 측정하여 음향투과손실량(dB) 평가	500Hz : 25dB 이상 1,000Hz : 30dB 이상
	하중 변위량 시험	• KS F 4770-3 • 정적 하중 변위 시험으로 3등분점 하중 시험실시	탄성변위량 : 50 영구잔류변위량: L/500
	충격 시험	• KS F 4770-3 • 강철로 만든 충격원을 1m높이에서 방음판 표면에 수직 낙하	충격원이 방음판을 관통하거나 흡음재 손상 없음

- 본 연구에서 개발한 흡·차음형 방음판은 흡음판과 차음판을 개발하여 샌드위치 형식으로 복합 적용하는 구조로 실험을 ①흡음판 & 차음판 각각 수행 항목, ②흡음판만 수행 항목 ③흡·차음형 방음판 시작품을 이용한 방음판 성능평가 시험으로 구분하였다.

① 흡음판 & 차음판 각각 수행항목

- 선행 연구사례를 조사·분석한 결과, 방음판 제작을 위하여 최적 배합비 결정 및 구조 안정성 해석을 위해 재료계수 특성(입도 분석, 탄성계수, 포아송비, 압축강도, 촉진 내후성)시험을 수행하였다.

② 흡음판만 수행

- 문헌조사 결과, 재료에 대한 흡음률을 평가하는 시험으로 임피던스 튜브법, 관내법 실험이 있음을 확인하였다. 흡음판의 최적 배합비 도출을 위하여 흡음판만 관내법 시험을 수행하였다.

③ 흡·차음형 방음판 수행

- 방음판에 대한 성능 평가를 위하여 KS F 4770-3(방음판-비금속재 컬러)을 준용하여 흡음률 시험, 음향투과손실 시험, 하중 변위량 시험, 충격시험, 연소시험을 수행하였다.

2) 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판 개발

○ 흡·차음형 방음판 내 폐섬유 충진방안

- 폐섬유 적용 시, 악취와 구조적 문제의 발생 가능성이 있어 폐섬유를 사용하지 않는 것으로 결정하였다.
- 소음저감효과가 우수한 친환경 차음형 방음판을 개발하기 위해 폐타이어와 폐섬유를 재활용하여 방음판 내부에 폐섬유를 충진하고자 하였다. 그러나 폐섬유로 활용하고자 했던 일반 폐의류는 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 세균번식 및 산화되면서 악취를 발생시킬 우려가 있어 오히려 환경적으로 유해할 것으로 판단되었다. 그래서 폐의류가 아닌 폐타이어에서 추출할 수 있는 고무내부 섬유재질의 보강재인 타이어코드지를 재활용하는 방안을 검토하였다. 검토 결과, 폐타이어에서 타이어코드지를 분리하였을 때 스틸코드 잔여물이 존재하기에 이를 제거하기 위한 추가공정이 진행되어야 하므로 이는 가격을 높여 경제성이 저하될 것으로 판단된다.

○ 흡차음형 방음판 재료개발 실험

- 본 연구에서는 흡차음형 방음판의 재료 개발을 위해 다음그림과 같이 실험을 수행하였다.



그림 2. 흡차음형 방음판 재료개발 실험 개요

① 입도 분석 실험

- 폐타이어 분말은 KS A 0507, 체가름 시험 방법 통칙)에 따라 입도 분석 실험을 수행하였다. 폐타이어 분말 크기가 각각 다른 종류 1~2 ㎜(#1), 2~3 ㎜(#2), 5~7㎜(#3)에 대하여 건식 체가름 시험을 수행하였으며, 결과는 다음표와 같다. 입도 평균은 범위의 중간값에 해당하는 것으로 나타났으나 실제 입도의 분포범위가 매우 넓은 것으로 나타났다.

표 3. 폐타이어 분말 입도분석 결과

1~2 ㎜(#1)			2~3 ㎜(#2)			5~7㎜(#3)		
입도	체 잔량 백분율 (%)	가중평균 계산	입도 (㎜)	체 잔량 백분율 (%)	가중평균 계산	입도 (㎜)	체 잔량 백분율 (%)	가중평균 계산
2.00	0.90	1.80	3.35	0.00	0.00	8.00	22.30	178.40
1.85	7.70	14.25	3.08	20.30	32.42	7.35	20.50	150.68
1.55	28.10	43.56	2.58	19.40	50.05	6.15	14.30	87.95
1.29	28.90	37.28	2.18	32.40	70.63	5.18	11.80	61.07
1.09	16.60	18.09	1.85	13.00	24.05	2.38	31.10	73.86
0.50	17.80	8.90	0.85	14.90	12.67	-	-	-
입도 평균		1.24 ㎜	입도 평균		2.20 ㎜	입도 평균		5.52 ㎜

- 폐타이어 미분말은 KS A ISO 13320 입자크기 분석-레이저 회절법에 따라 수행하였다. 입경은 최대 4.5 ㎜, 최소 0.039㎜로 나타났다. 가장 많은 비율을 차지하는 입경은 0.78 ㎜(12.7%)로 나타났으며, 평균입경은 1.22 ㎜로 측정되었다. 실험결과, 미분말의 입도분포의 범위가 매우 넓은 것으로 나타났는데 이는 미분말 제작 과정에서 가로 길이는 짧으나 세로 길이 긴 형상 등 고르지 못한 폐타이어 미분말 생산으로 인한 결과로 판단된다.
- 폐타이어 미분말 및 분말에 대한 입도 분석 실험 결과, 입경의 분포 범위가 매우 넓은 것을 알 수 있었다. 이는 폐타이어 칩 제조 시 생산 과정에서 발생되는 문제점으로 미분말이나 분말의 크기 또는 형상이 일정하지 않은 것으로 사료된다.
- 전반적으로 분말의 입도 범위 내 50% 이상은 존재하지만 입도 분포를 확인해보면 상당히 불균질하다는 것을 확인할 수 있으며, 폐타이어 미분말 또는 폐타이어 분말은 균질성이 있다고 보기 어렵다. 이는 품질에도 영향을 미칠 수 있으며, 일정한 품질확보에 대한 어려움이 발생한다. 따라서 폐타이어 칩의 생산 과정에 대한 고려가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

② 관내법 시험

- 흡음재 재료의 흡음성능을 확인하기 위하여 'KS F 2814-2 임피던스 관에 의한 흡음계수와 임피던스의 결정 방법 - 제2부 : 전달함수법'에 따라 실험을 수행하였으며, 흡음재는 흡음성능이 우수한 재료를 선정하고자 관내법(흡음) 시험의 결과를 흡음재 재료의 최적 배합 선정 시 활용하였다.

- 흡음재 재료 : 폐타이어 분말(3case), 우레탄 바인더, 난연재를 배합하여 총 9case의 재료 개발
- 시편 사이즈 : Ø45×100 ㎜
- 측정 주파수 : 100 ㎐ ~ 4,000 ㎐
- 시편 설치 : 임피던스 튜브의 시험편 고정기에 설치

- 관내법(흡음) 시험을 통해 도출한 본 연구개발 흡음재 재료 중 흡음성능이 가장 우수한 배합은 다음 그림과 같이 No.1(0.64), No.3(0.67), No.6(0.64)로 나타났다. 추후 압축강도 시험을 통해 흡음률이 우수하고, 내구성도 확보한 배합을 최적배합비로 결정하고자 한다. 모든 시편에 대한 시험성적서는 부록에 첨부하였다.

표 4. 관내법 시험 결과

NO	흡음계수 산술평균 값
1	**0.64**
2	0.51
3	**0.67**
4	0.62
5	0.50
6	**0.64**
7	0.56
8	0.45
9	0.55
10	0.07

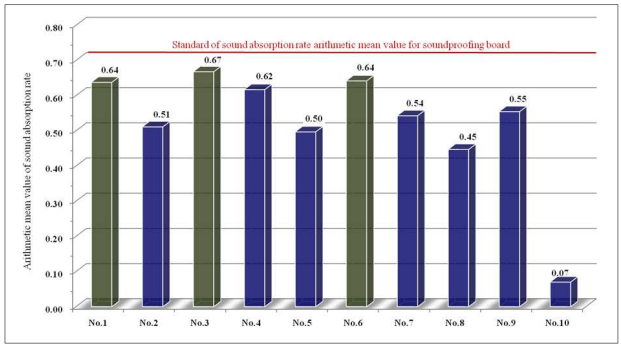


그림 3. 관내법 시험 결과

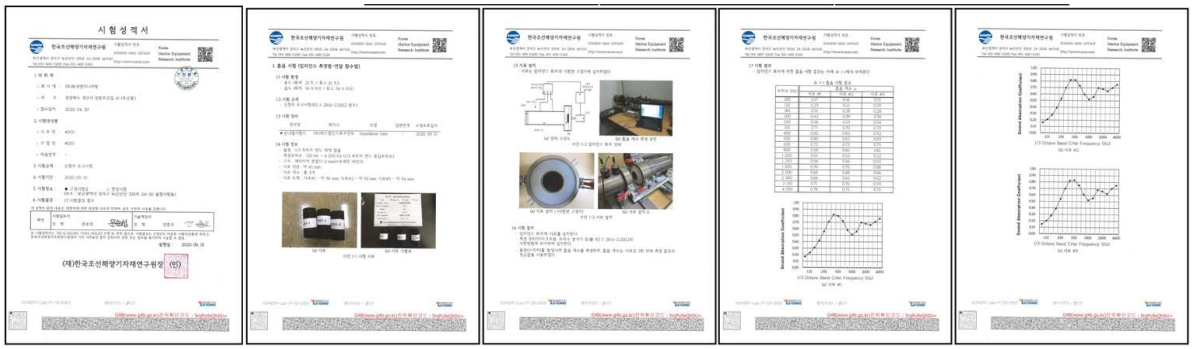


그림 4. 흡음재 No.1 시험 성적서

③ 압축강도 시험

- 개발하고자 하는 흡음재 및 차음재 재료의 압축특성을 확인하고 이를 활용하여 흡음재 및 차음재의 최적 배합을 선정하기 위해 공인시험기관에서 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도는 'KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법'과 'KS M ISO 3386-2 연질 발포 고분자 재료 —압축 응력-변형 특성 측정방법 — 제2부: 고밀도 재료' 두 가지 기준을 준용하여 실험을 진행하였다.

▪ KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법

흡음판 및 차음판 재료의 경우 콘크리트 재료와 달리 취성재료가 아닌 연성재료와 비슷한 성질을 가지고 있어 변형률이 80%까지 하중을 가하여도 파괴는 발생하지 않고 하중을 제거하는 순간 시편이 파손되는 것과 동시에 터지는 현상이 발생하였으며, 동일한 배합으로 시편 3개를 제작하여 압축강도를 측정하였으나, 시험결과 규칙성을 확인 할 수 없었다. 육안으로 확인이 어려우나 내부적으로 시편 파괴가 발생하였을 것으로 예상된다.

이에 따라 콘크리트 압축강도 시험으로는 재료의 성질이 달라 압축특성을 파악하기엔 어려움이 있다고 판단되어 개발 재료와 유사한 성질을 갖는 재료에 대한 시험방법을 조사하였으며, 'KS M ISO 3386-2 연질 발포 고분자 재료-압축 응력-변형 특성 측정방법-제2부: 고밀도 재료' 시험방법을 확인하였다.

다음 그림은 시험 진행에 따른 시편 사진이며, 모든 시편에 대한 시험성적서는 부록에 첨부하였다.



그림 5. 콘크리트 기준 개발재료 압축강도 실험 (Ø100×200 ㎜)

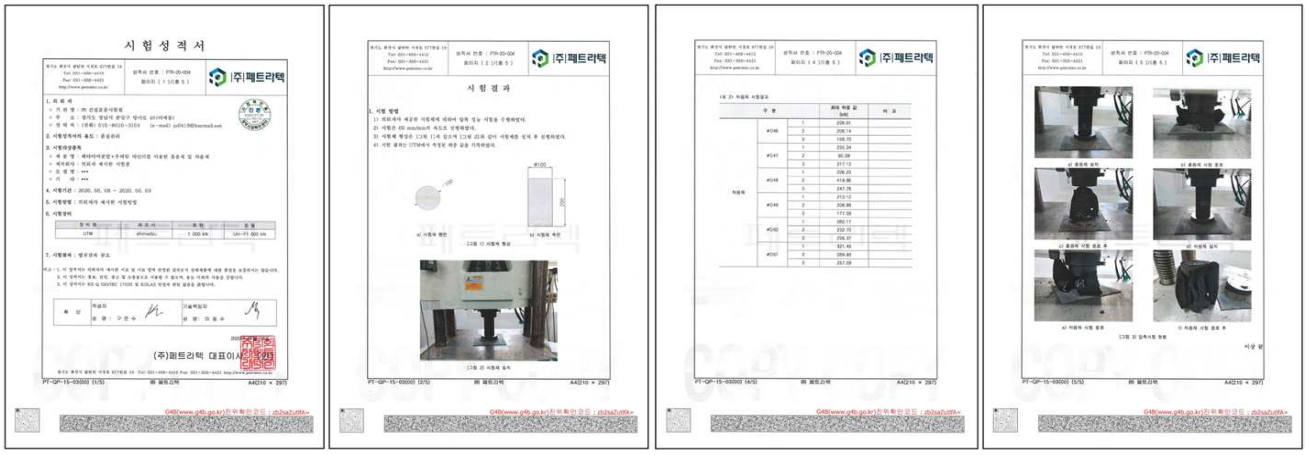


그림 6. 차음판 압축강도 시험 성적서

▪ KS M ISO 3386-2 연질 발포 고분자 재료-압축 응력-변형 특성 측정방법-제2부: 고밀도 재료

- 본 연구 개발재료는 스펀지와 같은 연질 발포 고분자 재료의 성질과 비슷하다고 판단되어 KS M ISO 3386-2 기준을 준용하여 실험을 진행하였다.
- 시험 방법은 앞서 그림 2(흡차음형 방음판 재료개발 실험 개요)에서 설명한 것과 같이 압축변형률 25%,40%,50%,65% 중 가장 큰 65%에서 흡음재 및 차음재의 전체 배합(15case)에 대한 실험을 진행하고 결과 값 중 1차 최적배합을 결정하였다. 그리고 결정된 흡음판 및 차음판 최적배합(각 1case)에 대해 압축 변형률 25%, 40%, 50%에 대한 시험을 수행하였다.



그림 7. 연질 발포 고분자 재료 기준 개발재료 압축강도 실험 (100×100×20 ㎜)

- 흡음재의 경우 전반적으로 폐타이어 분말의 입도가 크고 우레탄 바인더 함량이 많을수록 응력 값이 증가하는 경향을 보이며, No.6(4.3 ㎫), No.8(4.3 ㎫), No.9(6.0 ㎫)이 우수한 것으로 나타났다. 흡음재용 9가지 배합 중 No.9 배합의 압축강도가 6.0 ㎫로 가장 높은 강도를 나타내었는데 흡음재는 도로에서 발생하는 소음을 흡음하여 소음을 저감시키는 것이 목적이므로 관내법 실험결과를 고려하여 흡음성능이 우수하면서 최소한의 강도를 확보할 수 있는 No.6을 최적 배합으로 선정하였다. 차음판의 경우 강도가 확보를 위해 압축강도 결과가 가장 우수한 No.3 배합을 차음재 최적 배합으로 선정하였다. 다음 그림은 흡음판, 차음판의 CC65에 대한 결과이며, 수행한 모든 시험성적서는 부록에 첨부하였다.

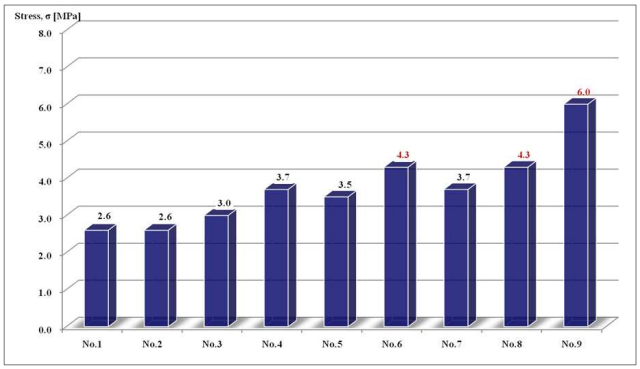


그림 8. CC65 흡음판 압축응력 결과

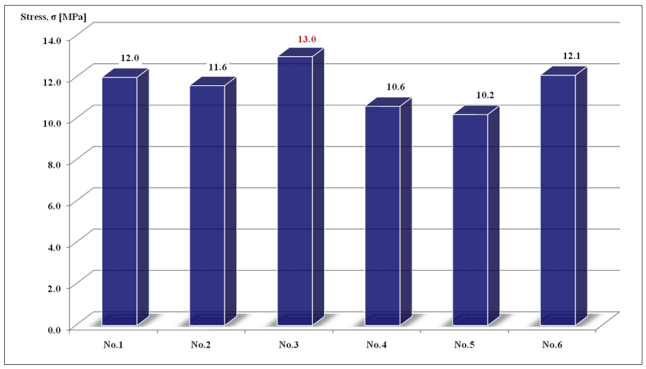


그림 9. 차음판 CC65 압축응력 결과



그림 10. 흡음판 CC65 압축응력 시험 성적서

- 흡음판 최적 배합(No.6)과 차음판 최적 배합(No.3)에 대한 압축강도 평가를 위해 CC25, CC40, CC50 및 CC65에서 압축강도 실험을 수행하였으며, 본 시험 결과는 탄성계수값 도출에 사용하였다.

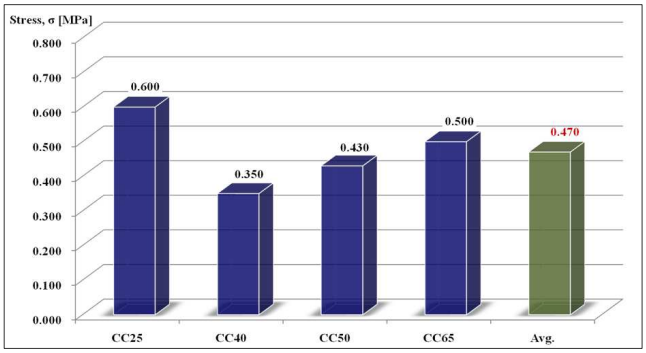


그림 11. 흡음판 최적 배합에 대한 압축응력 결과

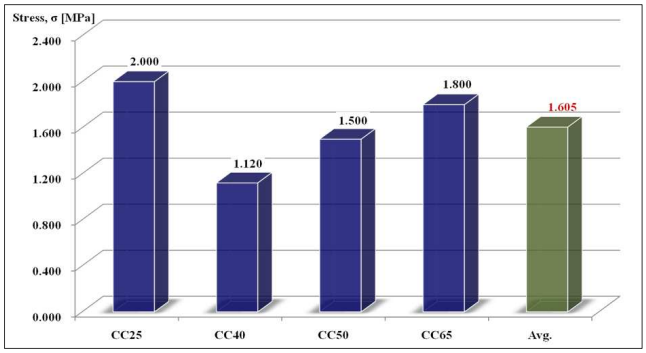


그림 12. 차음판 최적 배합에 대한 압축응력 결과

④ 포아송비 및 탄성계수 도출

▪ 포아송비 0.45에 대한 탄성구간 결정

- 재료의 포아송비가 0.5 이상일 경우 압축재료로 사용하기엔 어려움이 있어 본 연구에서는 먼저 KS F 2405 기준에서 사용되는 Ø100㎜×200㎜인 원통형 시편을 대상으로 포아송비 0.45가 되는 CC를 역산출하였다. KS M ISO 3386-2의 시험편은 납작한 판형으로 X축, Y축에 변형률에 대한 측정이 어렵기 때문이다.
- Ø100×200 ㎜ 시편 6개에 대하여 압축 변형률이 5%씩 증가되도록 하중을 가하여 포아송비 0.45가 되는 압축 변형률 값을 유추하여 계산하였으며, 6개의 압축 변형률 값을 도출하였다. 최대, 최소값을 제외한 4개의 압축 변형률 값의 평균값을 계산하여 포아송비 0.45일 때의 압축 변형률 27.52%로 산출되었다.
- 산출 결과 압축 변형률 값은 27.52% 이지만 KS M ISO 3386-2에 나열된 압축 변형률 CC25, CC40, CC50, CC65 중 27.52% 보다 낮은 압축 변형률 25%를 탄성 구간 변형률로 결정하였다.

표 5. 탄성 구간 변형률

구 분	X축 변형률	Y축 변형률	Poisson's ratio
#1	9.60%	21.33%	0.450
#2	22.26%	49.46%	0.450
#3	12.90%	28.67%	0.450
#4	12.69%	28.19%	0.450
#5	11.42%	25.38%	0.450
#6	12.53%	27.84%	0.450
Average	12.39%	**27.52%**	0.450

▪ 탄성계수 산출

- 차음재 재료의 압축강도 결과 값을 활용하여 압축 변형률 25%일 때의 값을 산출하여 비교·분석한 결과, 전반적으로 최적 배합으로 선정된 No.3 배합의 결과 값이 우수하다는 것을 확인하였으며, CC25, CC40, CC50 및 CC65에서 압축강도 시험 결과에서 압축 변형률이 25%가 되는 압축강도 값을 도출하였다.
- 흡음재는 0.35~0.6㎫의 범위로 압축강도 평균값 0.47㎫을 도출하였고, 변형률 0.25를 적용하여 1.88 ㎫ 의 값으로 산출하였다.
- 차음재는 1.12~2.0㎫의 범위로 압축강도 평균값 1.605㎫을 도출하였고, 변형률 0.25를 적용하여 6.42 ㎫ 의 값으로 산출하였다.

⑤ 흡음재 연소 시험

- 흡차음형 방음판에 사용되는 흡음재 및 차음재 재료에 대한 연소성 평가를 'KS L 2513 유리섬유 일반 시험 방법의 6.20(직물의 연소성)' 기준에 따라 공인시험기관에서 수행하였으며, 'KS F 4770-3 방음판-비금속재칼라' 기준에 명시된 흡음재의 연소성 평가 기준 '잔염 시간 20초 이하, 잔진 시간 30초 이하, 탄화 면적 50 ㎠ 이하, 탄화 길이 20 ㎝ 이하'에 대한 만족 여부를 검토하였다. 연소 시험 결과, 흡음판, 차음판 모두 다음 표, 그래프와 같이 연소 시험 평가 기준에 만족하였다.

표 6. 흡음재 재료 연소시험 결과

구분	잔염 시간 20초 이하	잔진 시간 30초 이하	탄화 면적 50㎠ 이하	탄화 길이 20㎝ 이하
No.1	0.0	0.0	45.1	9.2
No.2	0.0	0.0	42.9	9.1
No.3	0.0	0.0	46.4	9.8
No.4	0.0	0.0	36.1	8.1
No.5	0.0	0.0	36.6	8.1
No.6	0.0	0.0	39.1	8.8
No.7	0.0	0.0	26.6	7.4
No.8	0.0	0.0	27.9	7.6
No.9	0.0	0.0	30.8	7.8

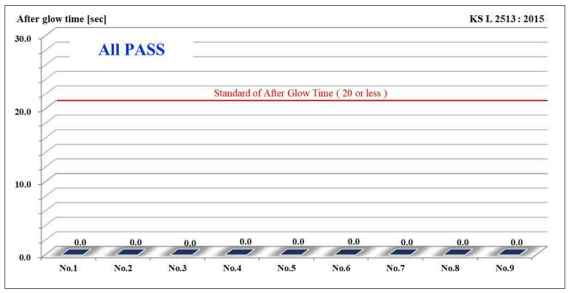


그림 13. 흡음재 잔염시간 (기준 20초 이하)

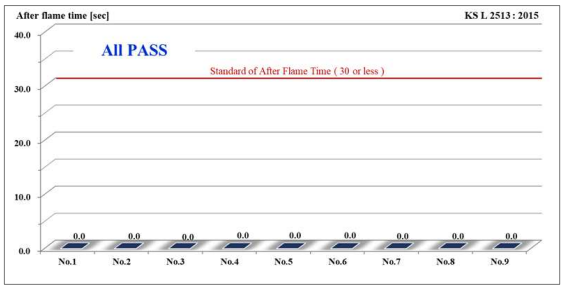


그림 14. 흡음재 잔진시간 (기준 30초 이하)

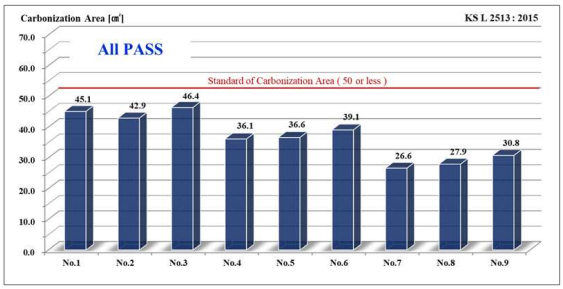


그림 15. 흡음재 탄화면적 (기준 50㎠ 이하)

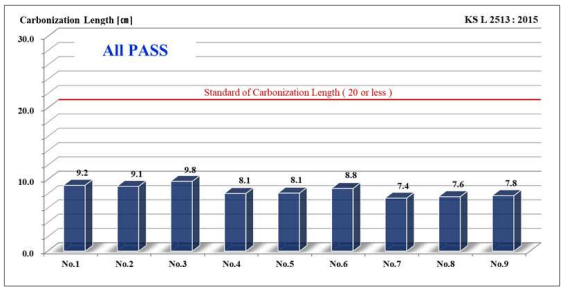


그림 16. 흡음재 탄화길이 (기준 20㎝ 이하)

표 7. 차음재 재료 연소시험 결과

구분	잔염 시간 20초 이하	잔진 시간 30초 이하	탄화 면적 50㎠ 이하	탄화 길이 20㎝ 이하
No.1	0.0	0.0	27.3	6.8
No.2	0.0	0.0	29.1	6.9
No.3	0.0	0.0	32.3	7.7
No.4	0.0	0.0	30.5	7.5
No.5	0.0	0.0	33.3	7.6
No.6	0.0	0.0	39.5	8.6

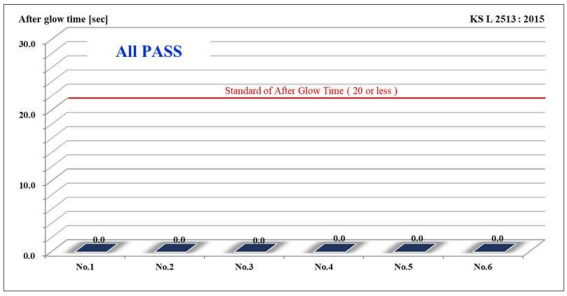


그림 17. 차음재 잔염시간 (기준 20초 이하)

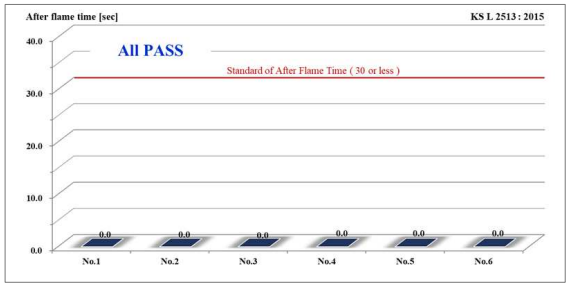


그림 18. 차음재 잔진시간 (기준 30초 이하)

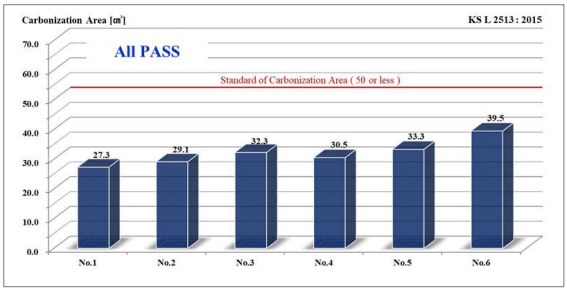


그림 19. 차음재 탄화면적 (기준 50㎠ 이하)

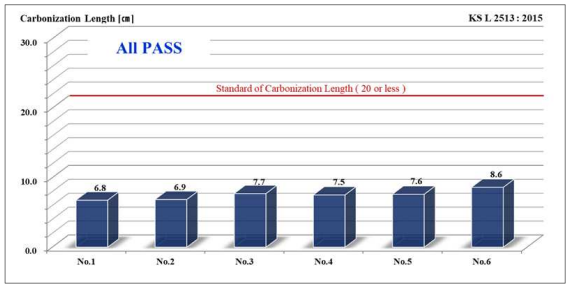


그림 20. 차음재 탄화길이 (기준 20㎝ 이하)

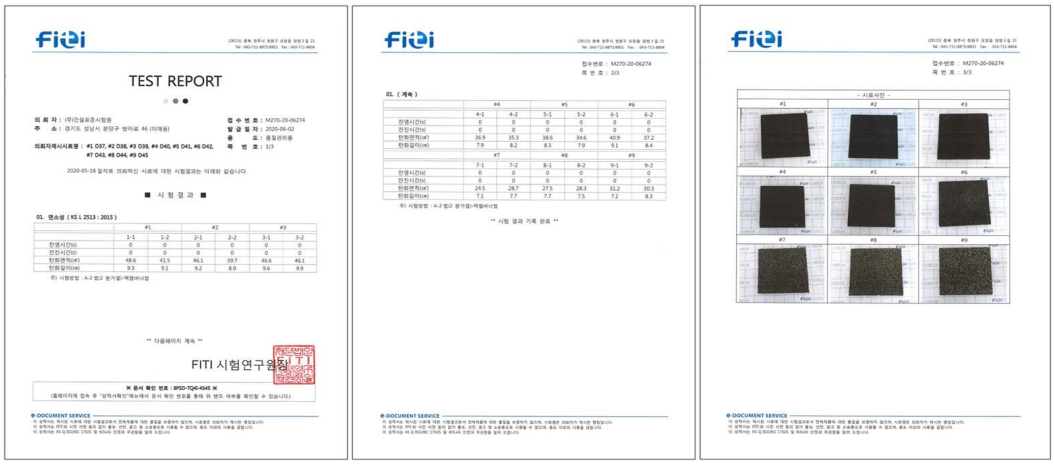


그림 21. 흡음판 연소 시험 성적서

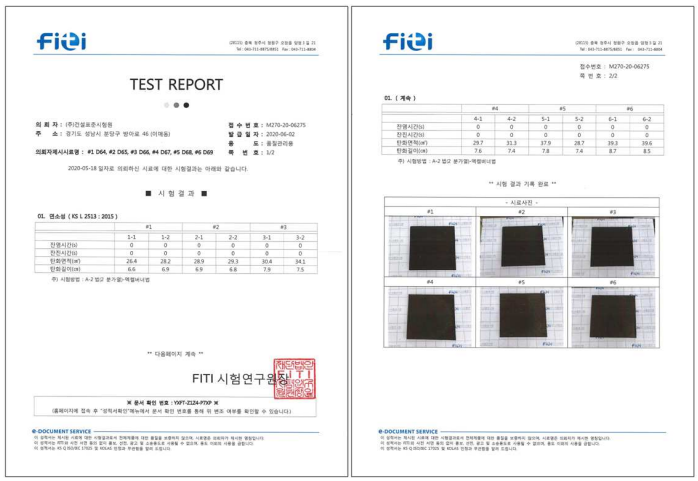


그림 22. 차음판 연소 시험 성적서

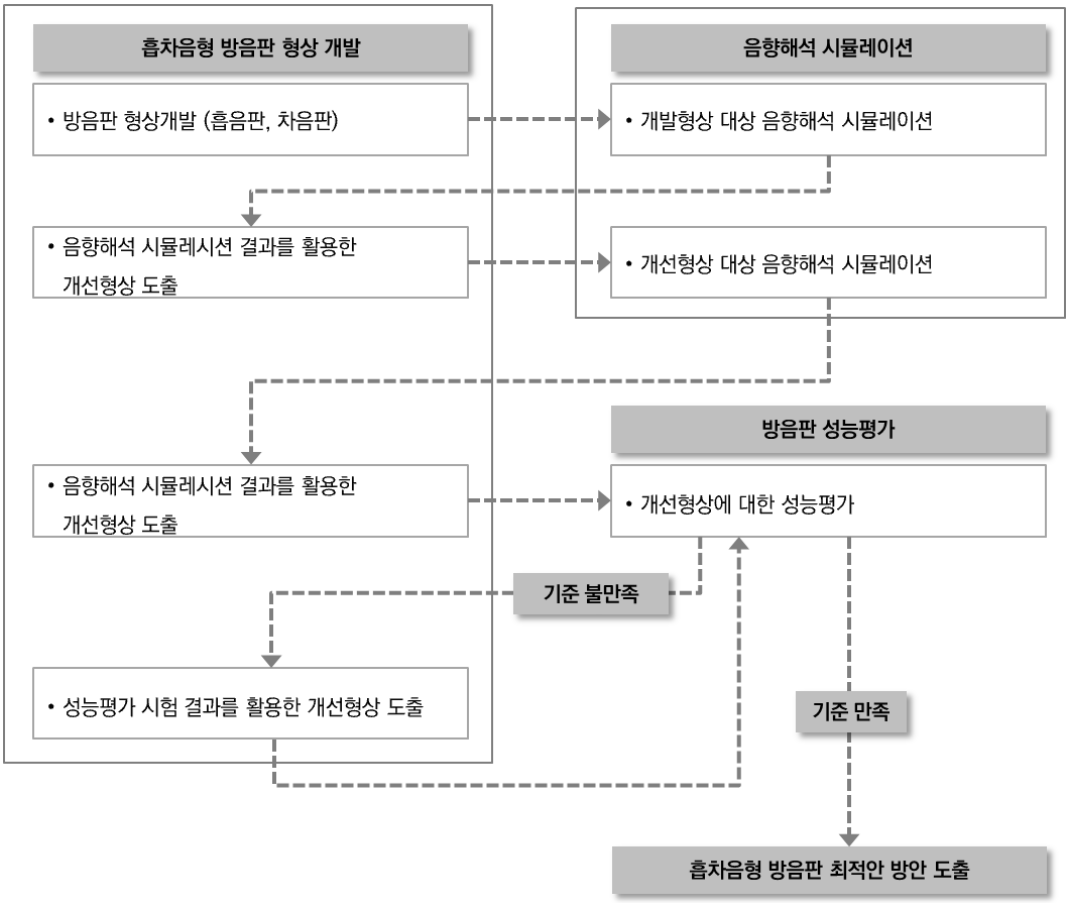


그림 23. 방음판 형상 최적안 도출 개념도

○ 흡차음형 방음판 초기 형상 개발

① 흡음형 방음판 형상개발

- 흡음평 방음판의 형상은 소음을 다양한 각도로 굴절시킬 수 있도록 굴곡이 있는 계란폰 형상으로 개발하고자 하였으며, 굴곡의 크기, 간격에 대한 소음저감 효과를 검토하기 위하여 굴곡의 간격, 크기에 대한 음향해석 시뮬레이션을 수행하였다.

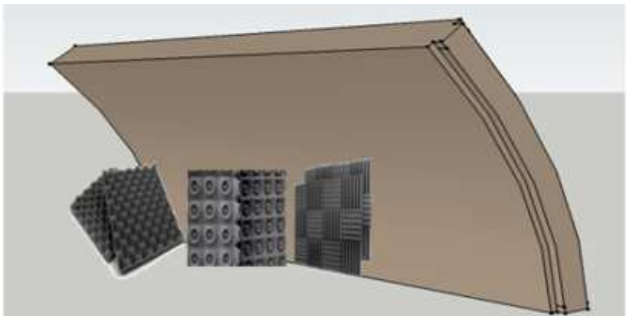


그림 24. 폐타이어를 이용한 흡음형 방음판(초기)

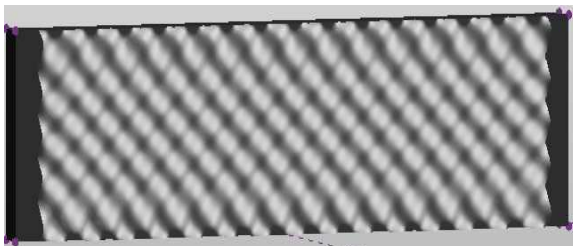


그림 25. 흡음형 방음판 초기(안) 모델링 정면도

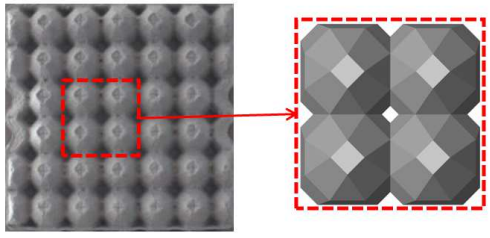


그림 26. 종이 계란판 (정팔각형-정사각형)

② 차음형 방음판 형상개발

- 초기 계획했던 차음형 방음판의 형상은 다음 그림과 같이 폐타이어 분말을 이용하여 타원형의 홈이 들어간 형상의 차음형 방음판 케이스를 개발하고, 케이스 내부는 폐섬유를 충진하고자 하였다. 그러나 폐섬유 충진방안에 대하여 조사를 수행한 결과, 그러나 폐섬유로 활용하고자 했던 일반 폐의류는 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 세균번식 및 산화되면서 악취를 발생시킬 우려가 있어 오히려 환경적으로 유해할 것으로 판단되어 폐섬유는 적용하지 않기로 결정하였다. 또한 폐타이어 미분말과 우레탄 바인더를 사용하여 방음판을 제작하기에는 구조안전성의 문제가 우려되어 차음성능을 지닌 후면판으로 흡음형 방음판과 일체형으로 제작하여 흡음형 방음판, 차음형 방음판이 아닌 흡차음형 방음판으로 개발하였다.

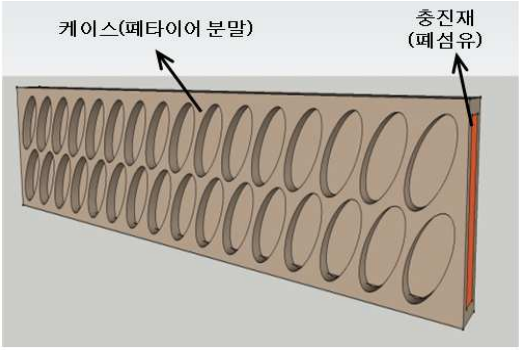


그림 27. 폐타이어와 폐섬유를 이용한 차음형 방음판(초기)

○ 흡차음형 방음판 개발형상 대상 음향해석 시뮬레이션

- 본 연구에서는 소음저감 효과를 향상시키고 흡음성능이 우수한 방음판 형상을 개발하기 위해 다양한 형상에 대하여 음향해석 시뮬레이션을 이용한 소음저감 효과를 비교 분석하였다.
- 소음분석 프로그램으로 SoundPLAN 프로그램을 활용하여 음향해석 시뮬레이션을 수행하였다. Sound PLAN은 대표적인 소음원인 도로, 철도, 항공기, 공장 등의 소음원으로부터 소음의 예측 및 전달 특성을 계산하여 소음진동예측 시뮬레이션이 가능한 특징이 있으며 소음지도제작, 도로교통소음 예측방안, 철도에서의 소음저감 효과 예측, 방음시설별 도로교통소음 분석 등 다양한 연구에 활용된 사례가 많다.

① 음향해석 시뮬레이션 조건

- 소음예측지점에 대한 조건은 환경부고시 제 2019-190호,'소음지도 작성방법'을 준수하여 결정하였으며, 예측식은 환경부고시 제 2019-190호,'소음지도 작성방법'에서 제시한 RLS-90을 사용하였다.
- 건물 외벽의 높이별 소음예측지점은 건물에서 소음원 방향으로 1m 떨어진 거리에서 예측하였고 건물의 반사음까지 고려하였다. 건물의 높이는 공동주택을 기준으로 층고 2.7m로 결정하고, 층수는 20층으로 설정하였다. 건물과 도로와의 이격거리에 대한 규정은 없으므로 본 연구에서는 근거리, 원거리를 모두 검토하기 위하여 20m, 50m, 100m에 대한 소음도를 평가하였다. 도로의 경우 폭원 17.5m, 발생소음도 80dB(A)인 왕복 4차선 도로를 적용하였다.

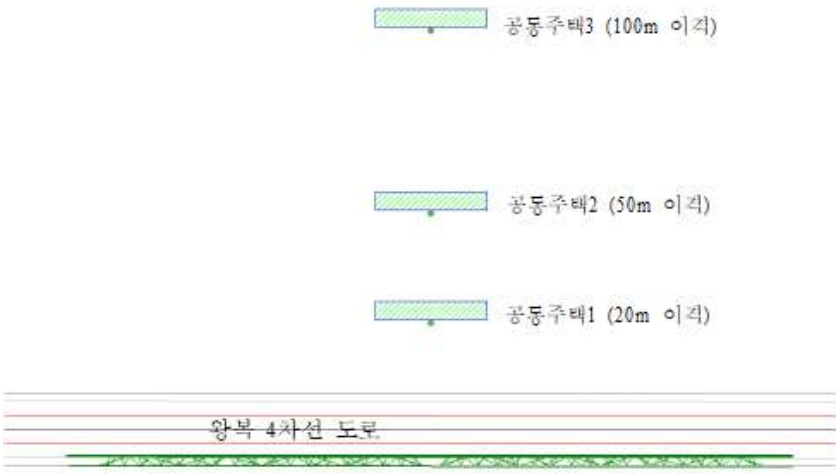


그림 28. 음향해선 시뮬레이션 조건 개념도

- 방음판의 실제 면적은 세로 0.5m, 가로 2m이지만 크기가 작아 프로그램에서 모델링 인식이 어려우므로 크기를 100배 확대하여 세로 50m, 가로 200m로 구현하여 시뮬레이션을 통해 소음저감 효과를 해석하였다. 시뮬레이션 결과는, 프로그램을 통해 3D형상을 모델링하고, 이를 수치적으로 해석한 것으로 반복해석을 수행하여도 결과는 모두 동일하게 도출되므로 각 변수에 대하여 1회 진행하였다.

② 개발형상에 대한 음향해석 시뮬레이션 결과

- 굴곡 간격(5~22m)에 차이가 있는 4가지 형상에 대해 8가지 방음벽 전면 패턴을 구축하였으며, 형상이 없는 평평한 방음벽을 포함하여 다음 그림과 같이 총 9가지 형상에 대한 소음도를 측정하였다. 굴곡 깊이는 계란판의 크기와 굴곡 깊이를 참고하였는데 방음판 크기를 고려하여 3m로 동일하게 적용하고, 굴곡 간격을 변수로 설정하여 음향해석 시뮬레이션을 수행하였다.
- 음향해석 시뮬레이션의 평가는 소음예측지점과 도로의 이격거리 20m, 50m 및 100m에 대해 형상별로 측정된 소음도 결과를 오름차순으로 순위(1위부터 9위까지)를 작성하고, 순위별 고정 점수(5점부터 1점까지)를 반영하여 각 형상에 대한 평가 점수를 산출하였으며, 음향해석 시뮬레이션 결과 다음 그림과 같이 #1-2-H 형상(굴곡 간격 9.5m)에서 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

표 8. 음향해석 시뮬레이션 결과 순위별 고정 점수

순위	고정 점수	순위	고정 점수	순위	고정 점수
1	5.0 점	4	3.5 점	7	2.0 점
2	4.5 점	5	3.0 점	8	1.5 점
3	4.0 점	6	2.5 점	9	1.0 점

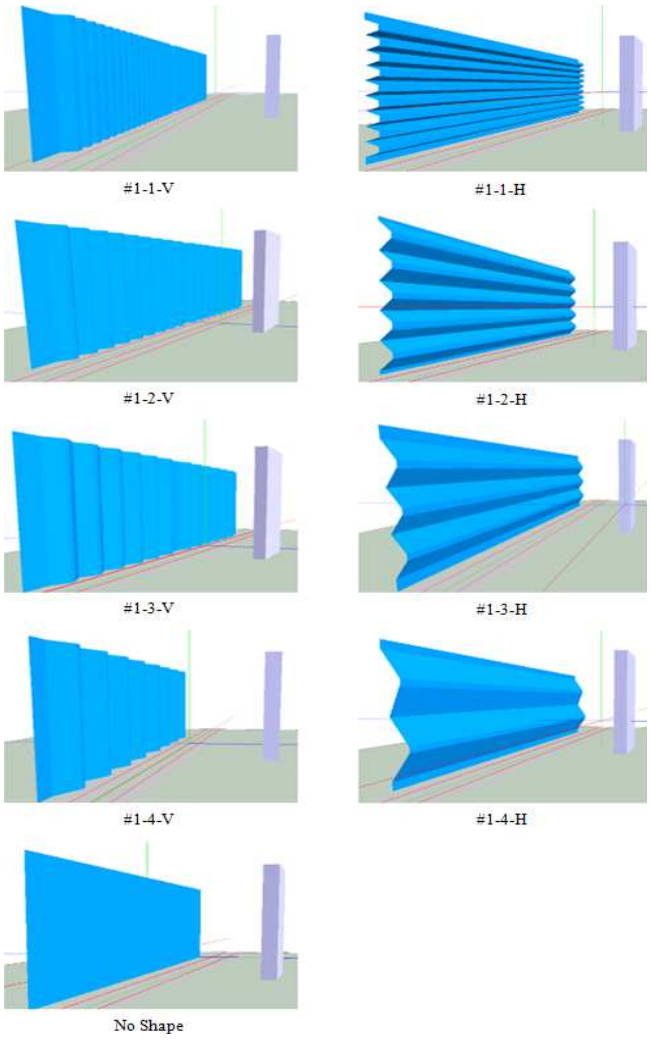


그림 29. 음향해석 시뮬레이션 수행 모델

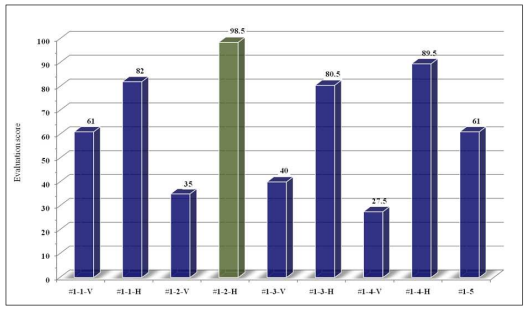


그림 30. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(20m)

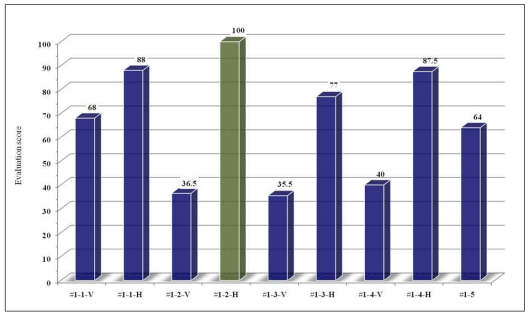


그림 31. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(50m)

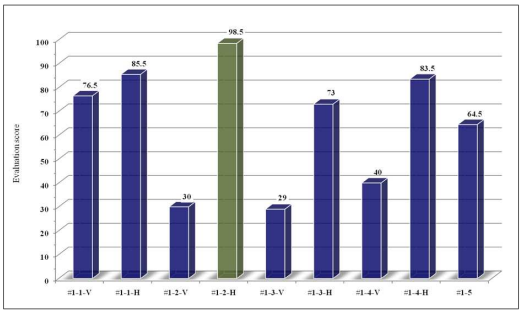


그림 32. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(100m)

○ **음향해석 시뮬레이션 결과를 반영한 개선형상 도출**

- 음향해석 시뮬레이션 결과를 반영하여 방음판의 돌기의 크기를 1차 결정하였다. 굴곡의 깊이 또한 소음저감효과에 영향을 줄 것으로 판단되어, 방음판의 돌기의 개수와 간격은 동일하게 하고 깊이를 변수로 두어 음향해석시뮬레이션을 수행하여 최종적으로 형상에 대한 크기, 깊이 등을 결정하고자 한다.

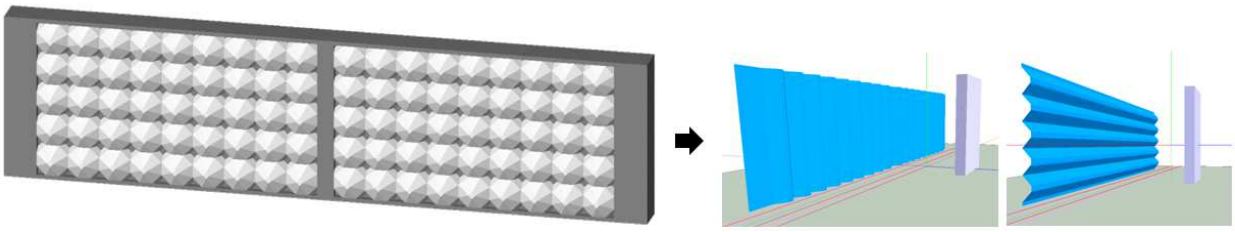


그림 33. 흡음재 개발 형상 예측모형 (#1-2-H)

○ **흡차음형 방음판 개선형상 대상 음향해석 시뮬레이션**

- 개선형상에 대한 음향해석 시뮬레이션은 개발하고자 하는 형상의 굴곡 간격은 1차 음향해석 시뮬레이션 결과를 반영하여 #1-2-H 형상의 굴곡 간격 9.5m로 동일하게 적용하고, 굴곡 깊이를 변수로 설정하여 음향해석 시뮬레이션을 수행하였다. 다음 그림은 음향해석을 위한 3D 모델이다. #2-2-H 형상은 #1-2-H 형상과 동일하게 하여 실험 결과의 기준이 되도록 하였고, 다른 형상은 굴곡 깊이를 변수로 두어 4가지 형상에 대해 8가지 방음벽 전면 패턴을 구축하고, 형상이 없는 평평한 방음벽을 포함하여 총 9가지 형상에 대한 소음도를 측정하였다.음향해석 시뮬레이션 결과 다음 그림과 같다.

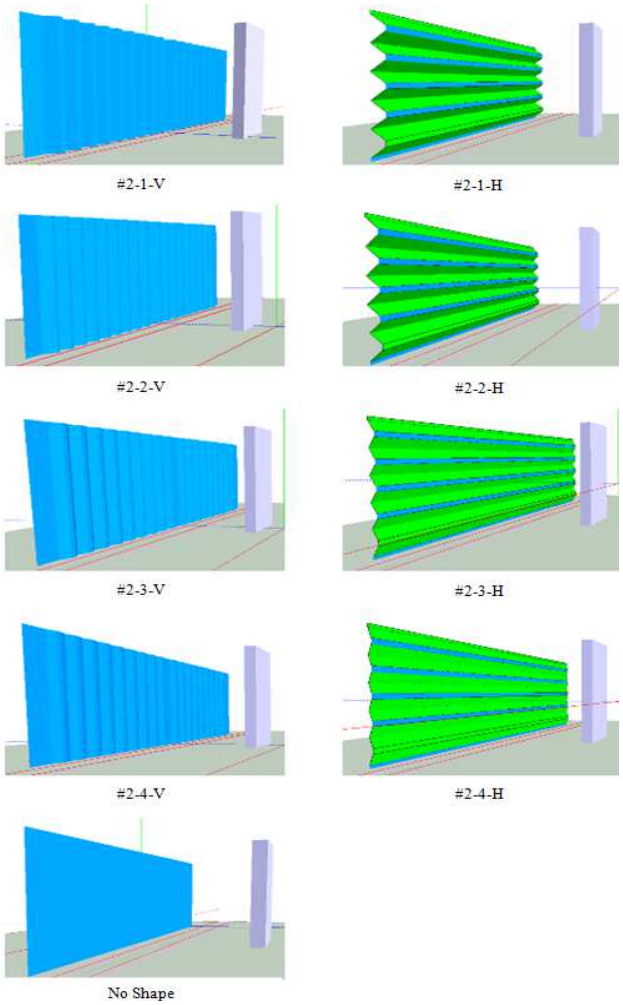


그림 34. 음향해석 시뮬레이션 수행 모델

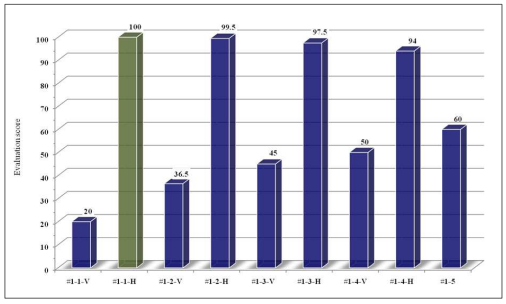


그림 35. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(20m)

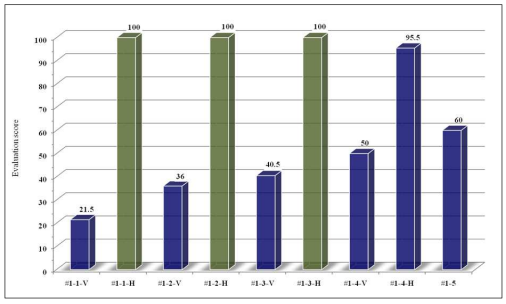


그림 36. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(50m)

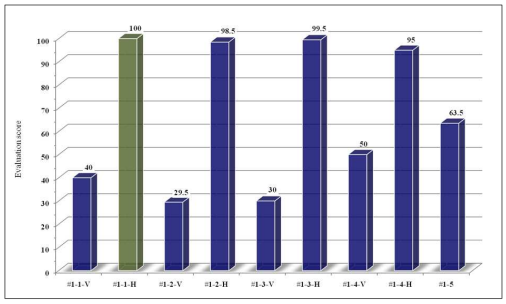


그림 37. 음향해석 시뮬레이션 분석결과(50m)

- 분석결과, #2-1-H 형상에서 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 실험결과 소음저감 효과는 굴곡의 깊이가 깊을수록 소음저감 효과가 가장 우수한 경향을 보였다.
- 음향해석 시뮬레이션 결과, 형상이 세로로 굴곡이 있는 것보다 가로로 굴곡이 진 형상이 소음저감 효과가 우수했다. 그리고 굴곡 간격이 좁고, 깊을수록 소음저감 효과가 우수한 경향을 보이는데, 이는 굴곡에 의해 소음을 받아들일 수 있는 면적이 넓어져 흡음에 유리한 것으로 사료된다.

○ 음향해석 시뮬레이션 결과를 반영한 최적 개선형상 도출

- 흡차음형 방음판의 개발 및 개선형상에 대한 음향해석 시뮬레이션을 수행하고, 결과를 반영하여 다음 그림과 같이 개선 및 최적 개선형상을 도출하였다. 흡음재 형상 굴곡의 간격이 조밀하고 깊이가 있는 '#2-1-H' 형상을 반영하였다. '#2-1-H' 형상의 경우 굴곡 모서리에 각이 있으나, 본 연구에서는 굴곡 모서리에 라운딩(둥근 형상)하여 방음벽에 적용 시 모서리가 부셔지는 것을 방지하고자 한다.

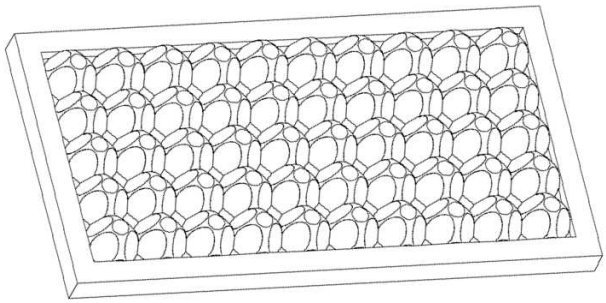
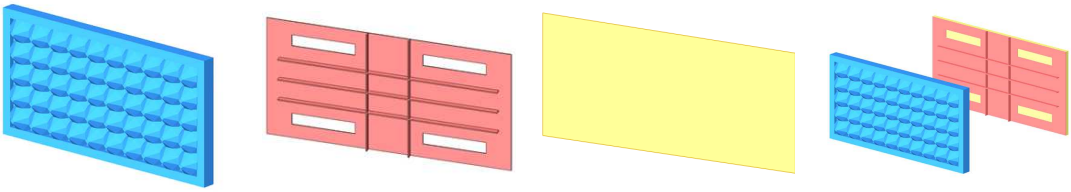


그림 38. 흡차음형 방음판 최적 개선형상

- 전반적으로 흡음재의 굴곡은 간격이 좁을수록, 깊이가 깊을수록 소음저감 효과가 우수한 경향을 보이며, 이는 굴곡에 의해 소음을 받아들일 수 있는 면적이 넓어져 우수한 흡음효과를 나타낸 것으로 예상된다. 또한, 굴곡이 심한 물체에 소리가 부딪힐 경우 굴곡에 의해 소리가 반사되고 반사된 소리는 서로 상쇄시켜 소음이 줄어들어 소음 저감이 가능할 것으로 사료된다.

○ 흡차음형 방음판 구조 개발 및 시작품 제작 (1차)

- 음향해석 시뮬레이션 결과와 재료개발 실험 결과 그리고 구조적 안전성을 고려하여 흡차음형 방음판은 980×500×124T (㎜) 크기의 '흡음재-내부 격자형 강판-차음재'로 구성된 샌드위치 구조로 개발하였다.
- 흡음판, 내부 격자형 강판, 차음판으로 구성된 샌드위치 구조로 개발하였다. 흡음판은 흡음효과, 내부 격자형 강판과 차음재는 차음효과를 내어 흡차음 효과를 동시에 기대할 수 있는 친환경 흡차음형 방음판으로 교통소음이 발생하는 도로 쪽으로 흡음판이 오도록 하였고, 외측에는 차음판이 배치되도록 하였다.



흡음판 내부 격자형 강판 차음판 방음판 조립 개념도

그림 39. 방음판 형상 및 구조 개념도

▪ 흡음판

흡음효과가 우수한 흡음판을 도로 쪽으로 향하도록 하여 발생하는 소음을 흡음시킴으로써 1차 소음을 감쇄시키고자 한다. 다음 그림과 같이 다수의 굴곡으로 구성되어있는 흡음판은 입사하는 소리의 파동(I)이 굴곡 사이에 공기로 찬 영역에서 벽에 부딪히면서 반사되는 과정에서 소리 에너지 손실이 이루어진다. 입사하는 소리의 파동은 일부는 흡음판을 통과하여 차음판으로 전달되고 (i), 일부는 되돌아 나가는데(i') 내부 공간에서 손실되어 그 크기는 상당히 작아진다.

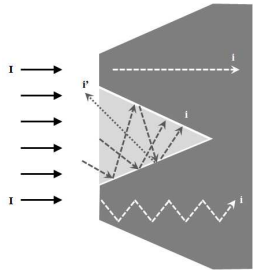


그림 40. 소음저감효과 개념도

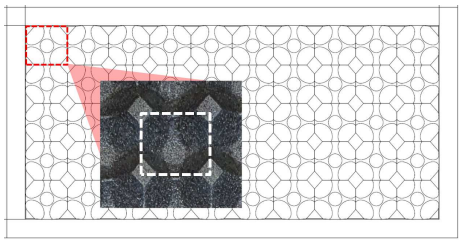


그림 41. 흡음판 도면



그림 42. 흡음판 시제품 제작

▪ **내부 격자형 강판**

흡음판을 통과한 소음(i)은 내부 격자형 강판에 부딪혀 차음효과를 통해 2차 소음 저감효과를 기대할 수 있다. 내부 격자형 강판은 차음효과 뿐만 아니라 방음판의 구조적 안전성을 고려하여 다음 그림과 같은 구조로 개발하여 삽입하였다. 폐타이어 분말을 이용한 흡음판과 차음판만을 이용하여 방음판을 제작하였을 경우 내구성이 우려되어 상판형의 강판에 격자를 용접하여 보강하였고, 상판의 사각홈은 흡음판과 차음판의 접합력을 향상시키기 위하여 만들었다.

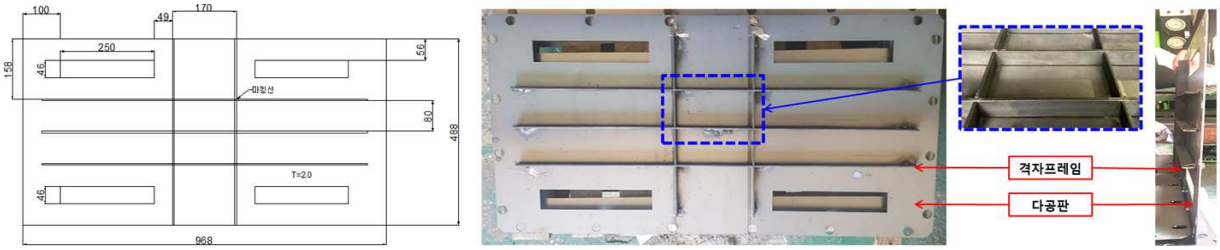


그림 43. 흡차음형 방음판 내부 구조프레임

▪ **차음판**

차음판은 판형으로 마지막 내부 격자형 강판을 통과한 소음을 차음하여 소음 저감효과를 향상시키고자 하였다.

▪ **시작품 제작**

- 흡차음형 방음판 시작품은 내부 격자형 강판이 삽입된 차음판를 먼저 제작한다. 금형 및 프레스 기계에 차음재 재료 도포 후 내부 구조프레임을 삽입하여 가열·가압으로 제작하여 '내부 격자형 강판-차음재' 사출 후 흡음재 금형에 흡음재 재료 도포 후 '내부 경자형 강판-차음재'를 삽입하여 가열·가압으로 제작한다. 금형 및 프레스 기계에서 사출한 '흡음재-내구 격자형 강판-차음재'와 L형 프레임 및 플레이트를 볼트 체결하여 흡차음형 방음판의 시작품 제작을 완료하였다.



그림 44. 시작품 제작 과정




그림 45. 방음판 시작품 제작 (1차)

○ 흡차음형 방음판 성능평가 (1차)

① 흡음률 실험

▪ 시험 방법

- 흡음률이란 소리가 흡수되는 비율을 의미한다. 재료에 음파가 투사되는 투사음의 일부는 재료에 흡수되어 소실되는데 이때의 반사음을 제외한 나머지 음의 비율이 흡음률이다.
- 본 연구에서는 KS F 4770-3에 따라 『KS F 2805 잔향실법 흡음성능 측정기준』에 의해 250㎐, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 음에 대한 흡음률의 산술 평균값을 산출하여 흡음률을 평가하였다. 방음판의 최소 흡음률 산술 평균값은 환경부 고시, 주택공사 표준 시방서 및 기타 시방서에 근거하여 0.7 이상으로 제시하고 있으며 본 연구에서는 흡음률 등급 2급(0.8이상)을 목표로 하고 있다. 다음 그림은 흡음률 시험에 대한 개념도 및 측정 예시도이며, 다음 표는 흡음률 등급 기준이다.

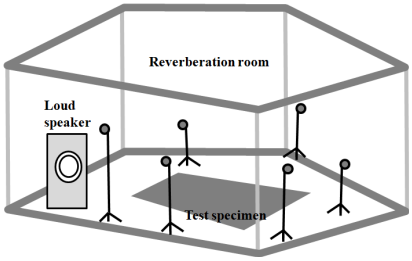


그림 46. 흡음률 시험 개념도

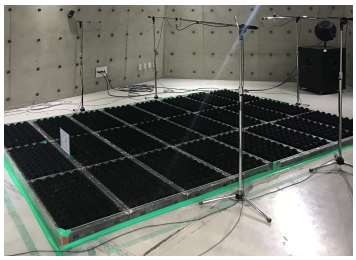


그림 47. 흡음률 측정

표 9. 흡음률 등급

흡음률 산술 평균값	0.85 이상	0.80 이상~0.85 미만	0.75 이상~0.80 미만	0.70 이상~0.75 미만
등급	1급	2급	3급	4급

▪ 시험 결과

- 흡음률 시험결과 250㎐, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 음에 대한 흡음률의 산술 평균값이 0.53으로 방음판 성능 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타나 흡음성능 개선이 필요함을 확인하였다.

표 10. 흡음률 시험결과

구분	측정 주파수 (HZ)				산술평균	목표	비고
	250	500	1,000	2,000			
1차 시작품	0.34	0.49	0.61	0.69	0.53	0.8 이상	불만족

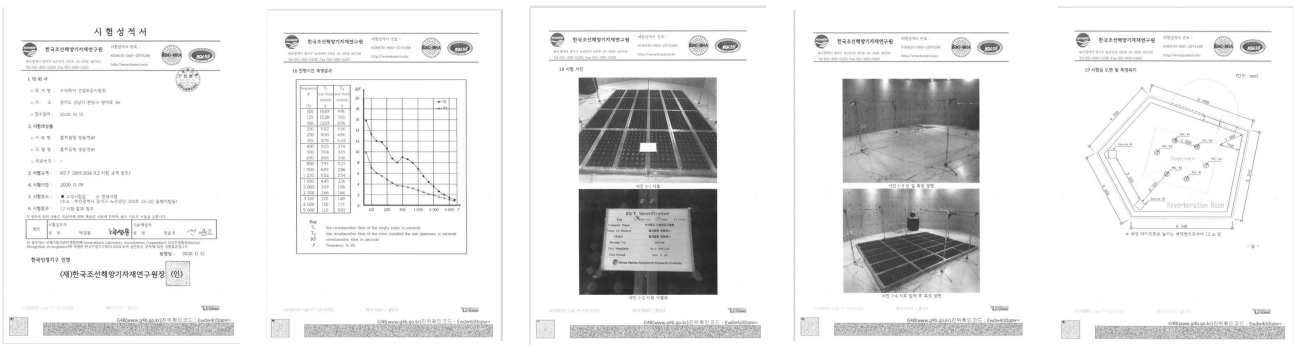


그림 48. 흡음률 시험 성적서

② 음향투과손실 측정실험

▪ **시험 방법**

- 음향투과 손실이란 차음성능을 평가하는 방법으로 본 연구에서는 KS F 4770-3기준에 따라 'KS F ISO 10140-2 음향-건물 부재의 차음 성능 실험실 측정방법-제2부: 공기 전달음 차단성능 측정방법'을 적용하여 수행하였으며, 500㎐, 1,000㎐ 음에 대한 투과손실값을 측정하여 음향투과손실량(dB)을 평가하였다. 방음판의 음향투과손실 기준은 KS F 4770-3에 근거하여 500㎐-25㏈이상 1,000㎐-30㏈이상으로 제시하고 있다. 다음 그림은 음향투과손실 측정방법에 대한 개념도 이다.

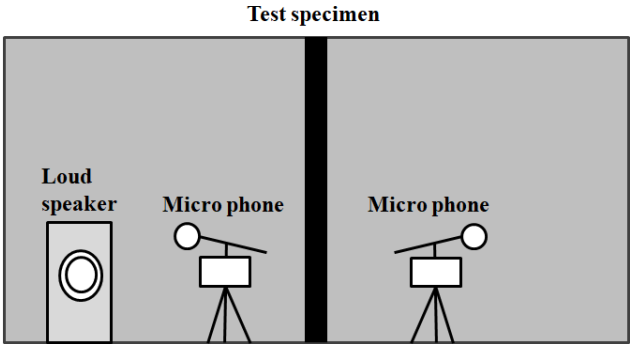


그림 49. 음향투과손실 측정방법 개념도



그림 50. 음향투과손실 측정

▪ **시험 결과**

- 음향투과손실 시험은 차음성능을 검토하는 시험으로, 시험 결과 500㎐에서 36.5dB, 1,000㎐에서 40.8dB로 방음판 성능 기준을 만족하여 차음성능을 확보하였음을 확인하였다.

표 11. 음향투과손실 시험 결과

구분		시험결과	기준	비고
음향투과 손실값(dB)	500 Hz	36.5	25이상	만족
	1,000 Hz	40.8	30이상	만족

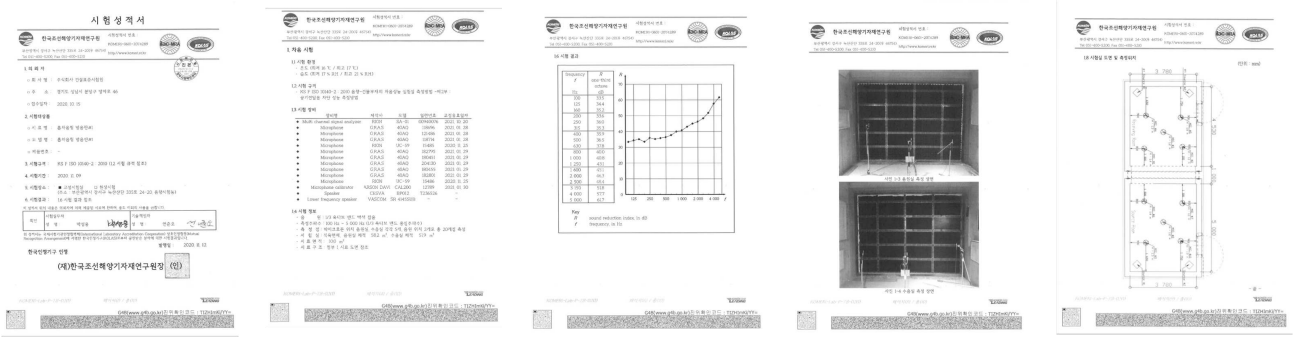


그림 51. 음향해석시뮬레이션 시험성적서

③ 하중 변위(허용 변위량) 시험

▪ **시험 방법**

- 흡차음형 방음판의 하중변위 시험을 위해 'KS F 4770-3 방음판-비금속재칼라' 기준에 따라 하중변위(허용 변위량) 시험을 수행하고자한다. 하중 변위(허용 변위량) 시험은 풍압이 작용할 경우 또는 풍압이 제거된 경우, 방음판 사이의 틈새로 인한 음의 누출을 방지하기 위한 변위량을 측정하기 위함이다. 따라서 이의 적합한 성능평가를 위해 다음 그림과 같이 3등분점 하중 시험법을 이용하여 탄성 변위 시험 및 영구 잔류변위시험을 구분하여 하중 변위 시험을 수행하며, 방음판은 시험 하중에 의해 분리되거나, 방음판의 좌굴 또는 방음판 내부에 있는 흡음재의 영구 변형이 일어나서는 안 된다.

- 본 연구에서는 방음판의 하중 변위(허용 변위량) 시험을 수행하기 위하여 KS F 4770-3 방음판- 비금속재 컬러 규정에 따라 『KS F 2208 목재의 휨 시험 방법 』규정에 의해 평가하고자 한다.

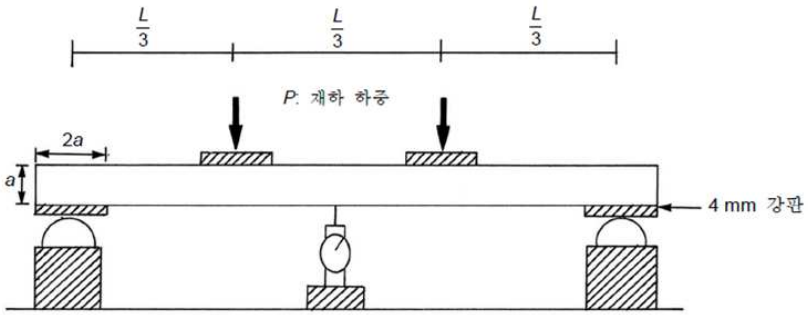


그림 52. 하중 변위 시험 개념도

표 12. 내하중 등급에 따른 시험하중

내하중 등급	1호	2호	3호	4호	5호
시험 하중(kPa)	4.4	3.6	2.9	2.2	1.6

▪ **시험 결과**

- 시험결과 허용변위량은 탄성, 영구잔류 모두 기준을 만족하였으며, 내하중 1호로 매우 우수한 성능을 확보하고 있음을 확인하였다.

표 13. 하중변위 시험 결과

구분		결과	기준	비고
허용 변위량(탄성변위량)	mm	0.4	50	
허용 변위량(영구잔류변위량)	mm	0.1	1.96	$\frac{L_A}{500}$ L_A : 시험용 방음판의 최대 길이 (mm)
내하중 등급	-	내하중 1호		매우 우수



그림 53. 하중 변위(허용 변위량) 시험 성적서

④ 충격 시험

▪ **시험 방법**

- 흡차음형 방음판의 충격 시험을 위해 'KS F 4770-3 방음판-비금속재칼라' 기준에 따라 충격 시험을 수행하고자한다. 방음판은 돌의 충격에 대해 견딜 수 있는 구조가 되도록 EN 1794-1에 따라 충격원을 제작하여 충격시험을 수행하고 평가하도록 하고 있다. 이때 충격원에 의한 방음판의 성능평가는 충격원의 충격 후 충격부위에서 찌그러짐과 같은 훼손, 외형상의 사소한 변형 또는 균열 발생은 허용하는 것으로 하였으며, 여기서 의미하는 '사소한'의 의미는 구조 성능의 문제가 전혀 발생하지 않는 상태를 의미한다.
- 충격원은 강철로 제작된 것으로, 형태 및 크기는 다음 그림과 같고, 충격원의 질량은 (3 ± 0.1) kg, 낙하 높이는 1m로 한다. 충격원의 타격 위치는 다음 그림과 같이 방음판의 모서리로부터 각각 125 ㎜ 떨어진 영역 내에서 모서리 부분의 1곳, 중앙 부분의 1곳, 임의 위치에서의 1곳 등 3곳으로 한다. 이때 충격원의 방음판의 표면에 수직하게 낙하되도록 주의한다.

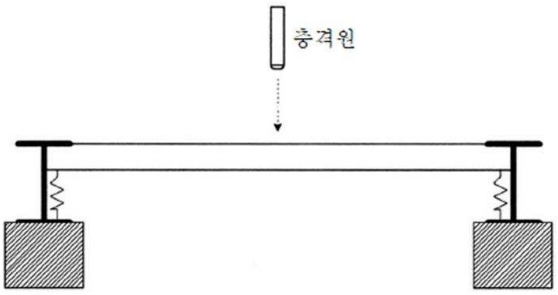


그림 54. 충격시험 개념도

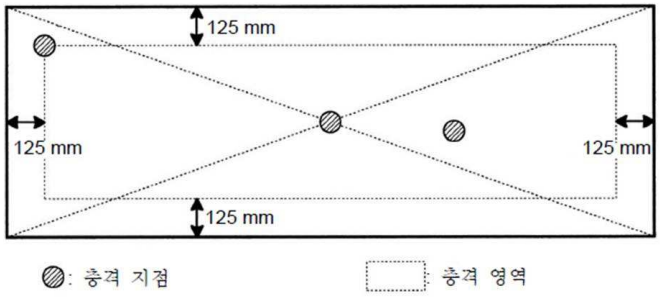


그림 55. 충격원의 타격 위치

▪ **시험 결과**

- 시험결과 이상없음으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다.



그림 56. 충격시험 성적서

⑤ 방음판 1차 시작품 제작 및 성능평가 결과

- 1차 시작품에 대한 방음판 성능평가 시험을 수행한 결과, 흡음률을 제외한 음향투과손실 시험, 하중변위시험, 충격시험 결과 모두 기준을 만족하는 것으로 나타나 흡음률 향상을 위한 개선이 필요한 것을 확인하였다.

○ **흡차음형 방음판 구조 개발 및 시작품 제작 (2차)**

- 1차 시작품에 대한 방음판 성능평가 시험결과 차음성능은 기준에 부합하였으나, 흡음성능이 기준에 만족하지 못함을 확인하였으므로, 흡음성능을 향상시킬 수 있도록 개발 방음판의 형상을 개선하여 2차 시작품을 제작하였다. 그리고 시작품을 제작하여 방음판 성능평가 시험인 흡음률과 음향투과손실시험을 수행하였다.
- 2차 시작품은 다음 그림과 같이 흡음판, 내부 격자 흡음판, 상판형의 내부강판, 차음판 4단으로 구성된 샌드위치 구조로 개발하였다.

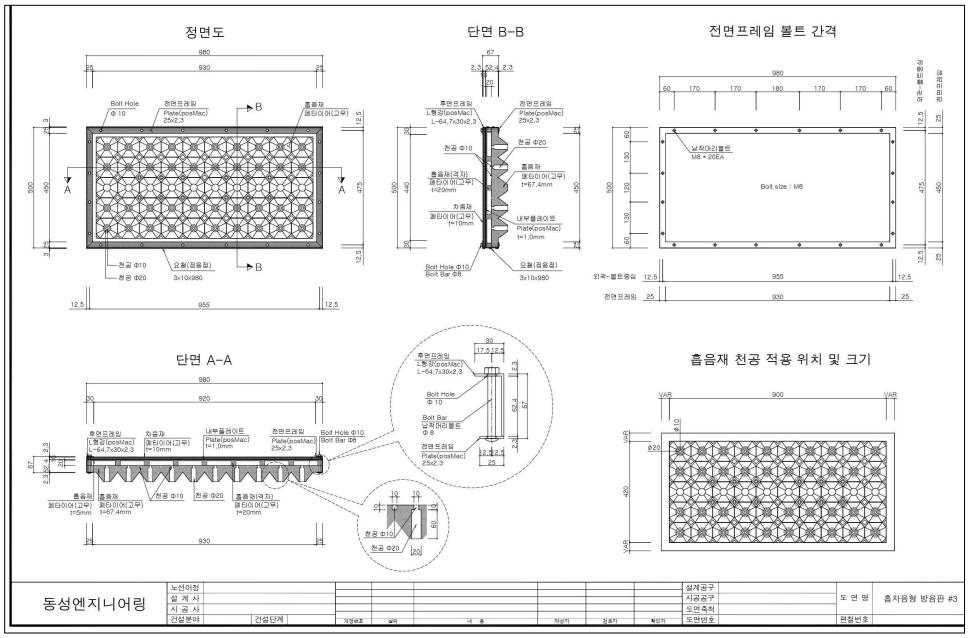
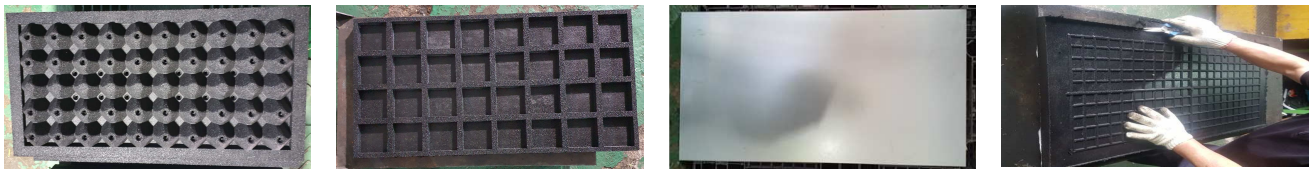


그림 57. 흡차음형 방음판 도면



흡음판 | 내부 격자형 흡음판 | 내부 강판 | 차음판

그림 58. 2차 방음판 구조 및 형상 개선

▪ **흡음판**

- 흡음판은 1차 시작품과 외부 굴곡진 형상은 동일한데 흡음 면적을 넓히고, 소음이 흡음판 내부로 더 깊이 침투되어 소음을 흡수할 수 있도록 하기 위하여 다음 그림과 같이 홀을 추가하였다.
- 홀의 형상은 두께가 동일한 원기둥의 형상이 아닌 상단 Φ20㎜이고 하단 Φ10㎜ 인 안으로 갈수록 좁아지는 원기둥 형상으로 Fig.4 흡음판의 소음감쇄 원리를 적용하여 총 52개의 홀을 추가하였다.

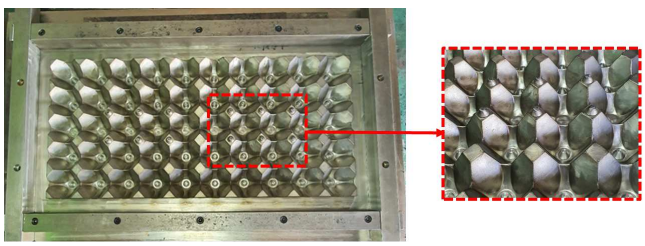


그림 59. 개선된 흡음판 금형

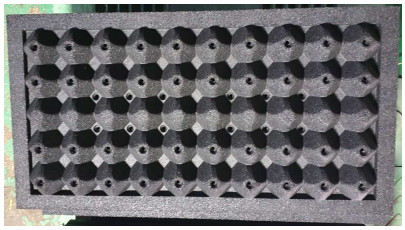


그림 60. 흡음판

▪ **내부 격자형 흡음판**

- 흡음성능 확보를 위하여 흡음판에 내부 격자형 흡음판을 추가하였다. 1차 시작품에서는 흡음판에 내부 공간이 없었는데 흡음률시험 결과 기준에 만족하지 못하였으므로 외부 흡음판을 통과한 소음과 진동을 저감시킬 수 있도록 내부 격자형 흡음판을 적용하였다. 이는 흡음을 위한 방과 같은 역할을 하는데 건물에 적용하는 층간소음재를 참고하였다. 소리는 물체의 진동에 의해 발생하고 매질의 진동으로 인해 전달되는 파동이므로 본 연구에서는 소음저감 효과를 위해 내부 격자형 흡음판을 적용함으로써 소음을 2차 감쇄시키고 진동을 저감시키고자 하였다.

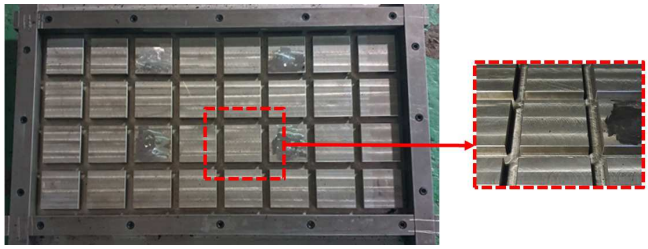


그림 61. 내부 격자형 흡음판 금형

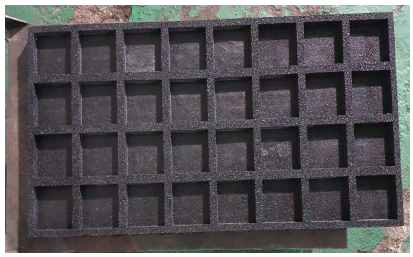


그림 62. 내부 격자형 흡음판

▪ **내부 강판**

- 강판은 격자형에서 상판형 강판으로 변경하였다. 1차 시작품에 적용한 격자형 강판은 내부 격자형 흡음판과 동시 적용이 어려워 상판형으로 변경하였으며, 이에 대하여 다음 그림과 같이 풍압에 의한 유한요소 해석을 수행한 결과 격자를 적용하지 않은 상판형 강판을 적용하여도 구조적으로 안전함을 확인하였으므로 강판은 상판형으로 결정하였다. 구조해석관련 내용은 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조 개발에서 자세히 설명하고자 한다.

▪ **차음판**

- 차음판은 판형으로 마지막 내부 격자형 강판을 통과한 소음을 차음하여 소음 저감효과를 향상시키고자 하였으며, 차음효과를 우수함을 확인하였으므로 1차 시작품 그대로 적용하였다.

▪ **시작품 제작**

- 개선형상에 대한 방음판 제작을 위하여 내부 격자형 흡음판에 대한 형틀을 별로 제작하였다. 내부 격자형 흡음판 형틀에 흡음재를 도포하고 그 위에 내부 강판을 삽입한다. 그리고 강판위를 차음재로 채우고 금형 및 프레스 기계에 가열·가압하여 '내부 격자형 흡음판-내부 강판-차음재'를 사출한다.
  흡음판 금형에 흡음판 재료 도포 후 가열·가압으로 제작한다. 금형 및 프레스 기계에서 사출한 '흡음판'과 '내부 격자형 흡음판-내부 강판-차음재'은 실리콘을 이용하여 접착하여 결합시킨다.

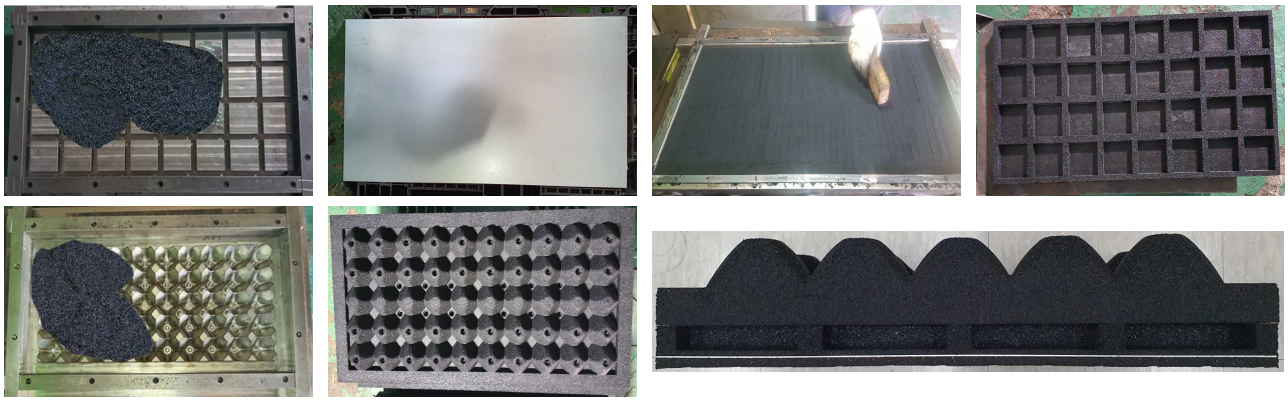


그림 63. 시작품 제작 과정

○ **흡차음형 방음판 성능평가 (2차)**

① 흡음률 실험

- 흡음률 시험 방법은 1차 와 동일하다. 흡음률 시험결과 250㎐, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 음에 대한 흡음률의 산술 평균값이 0.56으로 방음판 성능 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 250㎐ 음에 대한 흡음 성능이 많이 향상되었음을 확인하였다.

표 14. 흡음률 시험결과

구분	측정 주파수 (HZ)				산술평균	목표	비고
	250	500	1,000	2,000			
1차 시작품	0.34	0.49	0.61	0.69	0.53	0.8 이상	불만족
2차 시작품	0.53	0.47	0.56	0.66	0.56		불만족
	0.19 △	0.02 ▼	0.05 ▼	0.03 ▼	-		



그림 64. 흡음률 시험 성적서

② 음향투과손실 시험

- 음향투과손실 시험 결과 500㎐에서 32.4dB, 1,000㎐에서 44.4dB로 방음판 성능 기준을 만족하였는데 500Hz에서는 약 4dB 저감되었으나 기준을 만족하는 것을 확인하였고, 1,000Hz에서는 3.6dB 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

표 15. 음향투과손실 시험결과

구분		1차 시작품 시험결과	2차 시작품 시험결과	기준	비고
음향투과 손실값(dB)	500 Hz	36.5	32.4	25이상	만족
	1,000 Hz	40.8	44.4	30이상	만족

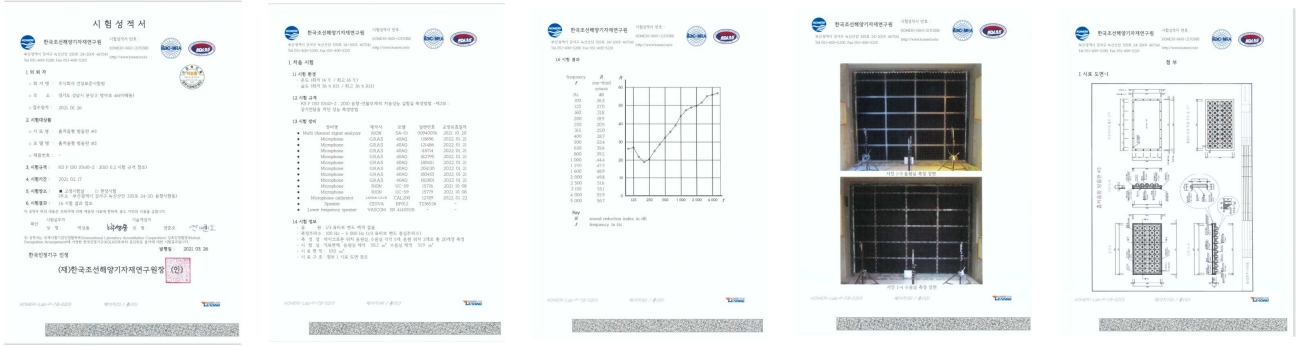


그림 65. 흡음률 시험 성적서

- 내부 격자형 흡음판 적용을 통해 저주파인 250Hz에 대한 저감효과는 향상되었음을 확인하였으나, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐에서의 흡음성능은 다소 저감되었으나 0.02~0.05 차이로 매우 유사하게 나타나 기준을 만족하지 못하였으므로 2차 개선방안 모색이 필요함을 확인하였다.

③ 하중 변위(허용 변위량) 시험

- 시험 방법은 1차 시작품과 같다. 시험결과 허용변위량은 탄성, 영구잔류 모두 기준을 만족하였으며, 내하중 1호로 매우 우수한 성능을 확보하고 있음을 확인하였다.

표 16. 하중변위 시험 결과

구분		결과	기준	비고
허용 변위량(탄성변위량)	mm	0.6	50	
허용 변위량(영구잔류변위량)	mm	0.1	1.96	$\frac{L_A}{500}$ L_A : 시험용 방음판의 최대 길이 (mm)
내하중 등급	-	내하중 1호		매우 우수



그림 66. 하중 변위(허용 변위량) 시험 성적서

④ 충격 시험

- 시험 방법은 1차 시작품과 같으며, 시험결과 이상없음으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

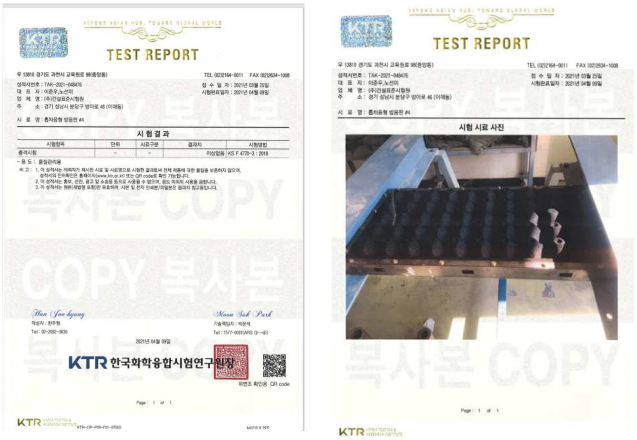


그림 67. 충격시험 성적서

○ **흡차음형 방음판 구조 개발 및 시작품 제작 (3차)**

- 2차 시작품에 대한 방음판 성능평가 시험결과 차음성능은 기준에 부합하였으나, 여전히 흡음성능이 기준에 만족하지 못함을 확인하였으므로, 흡음성능을 향상시킬 수 있도록 개발 방음판의 형상을 개선하여 3차 시작품을 제작하였다. 그리고 시작품을 제작하여 방음판 성능평가 시험인 흡음률과 음향투과손실시험을 수행하였다.
- 3차 시작품은 이전에 수행한 것과 다르게 외부 흡음판의 굴곡을 없애고, 홈의 개수를 증가 시켰다. 선행연구 조사 결과 방음재 중 흡음재의 성능은 단위 면적당 기공의 개수가 많을수록, 흡음 가능한 면적이 넓을수록 흡음 성능이 향상됨을 확인하였다.
  흡음률에서 기준 불만족 사례가 발생되고 있어 흡음률 향상을 위해 실내 흡음판, 흡음보드에 대하여 조사하였으며, 본 연구개발 형상과 다른 타공보드가 존재함을 확인하여 이를 반영하여 개선한 형상에 대한 시작품을 제작하여 성능평가를 수행하였다.

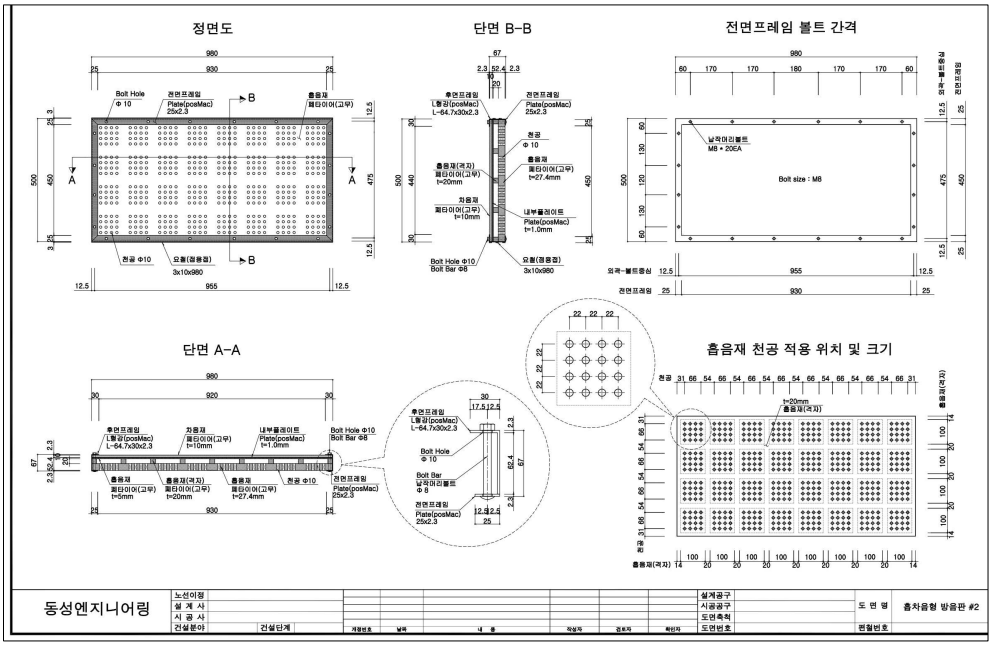
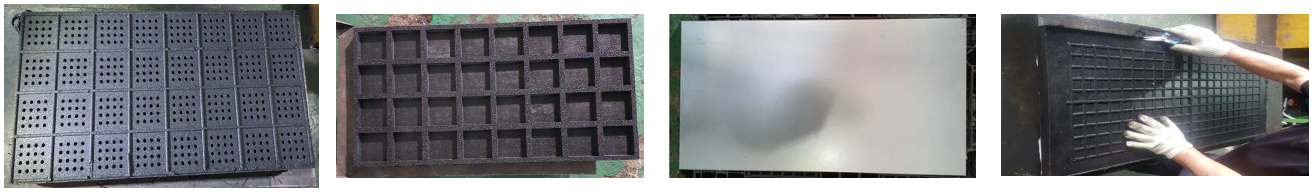


그림 68. 흡차음형 방음판 도면

- 내부 구조는 2차 시작품과 동일하게 흡음판, 내부 격자 흡음판, 상판형의 내부강판, 차음판 4단으로 구성된 샌드위치 구조로 개발하였다.



흡음판 내부 격자형 흡음판 내부 강판 차음판

그림 69. 2차 방음판 구조 및 형상 개선

▪ **흡음판**

- 개선한 흡음판의 전면에 천공되어 있다. 금형은 다음 그림과 같이 내부 흡음재 격자 공간과 동일한 위치에 Φ10㎜ 천공이 될 바가 16개씩 위치하며, 구멍을 통해 흡수된 소음은 내부 격자형 흡음방에서 상쇄 될 수 있도록 개발하였다.

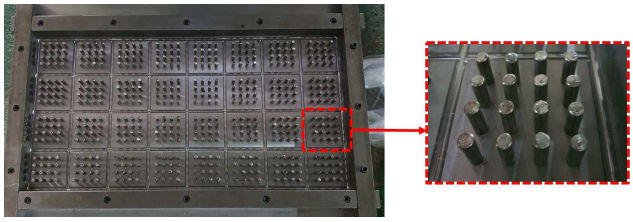


그림 70. 개선된 흡음판 금형

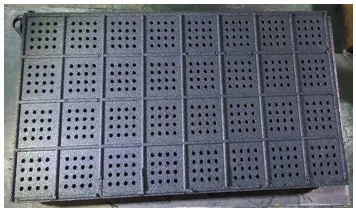


그림 71. 흡음판

▪ **내부 격자형 흡음판, 내부 강판, 차음판**

- 내부 격자형 흡음판, 내부 강판, 차음판은 2차 시작품과 동일하게 제작하여 적용하였다.

▪ **시작품 제작**

- 시작품 제작 과정은 외부 흡음판의 형틀이 변경된 것 외에는 모두 2차 시작품과 동일하다.

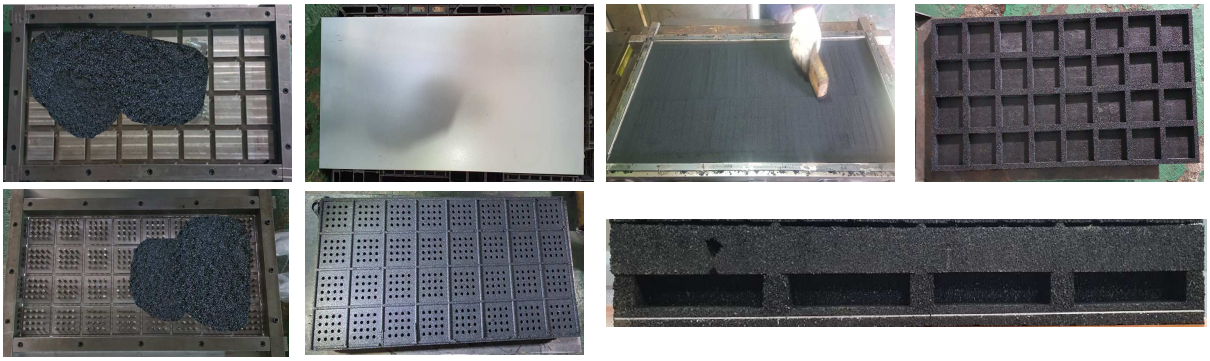


그림 72. 시작품 제작 과정

○ 흡차음형 방음판 성능평가 (3차)

① 흡음률 실험

- 흡음률 시험결과 250㎐, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 음에 대한 흡음률의 산술 평균값이 0.55으로 방음판 성능 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났는데, 250㎐ 음에 대한 흡음 성능이 많이 향상된 2차 시작품과 달리 3차 시작품은 500Hz에서 흡음 성능이 많이 향상되었고, 2,0000㎐에서 성능이 흡음률이 저하됨을 확인하였다.

표 17. 흡음률 시험결과

구분	측정 주파수 (HZ)				산술평균	목표	비고
	250	500	1,000	2,000			
1차 시작품	0.34	0.49	0.61	0.69	0.53	0.8 이상	불만족
2차 시작품	0.53	0.47	0.56	0.66	0.56		불만족
3차 시작품	0.39	0.92	0.51	0.36	0.55		불만족
	0.14 ▼	0.45 △	0.05 ▼	0.30 ▼	-		

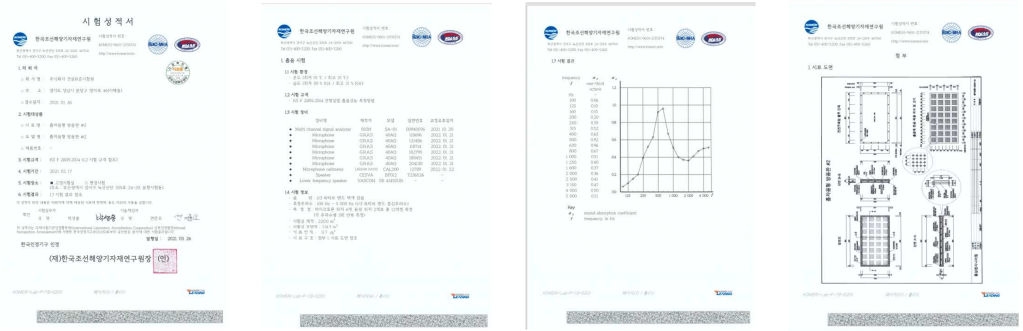


그림 73. 흡음률 시험 성적서

② 음향투과손실 시험

- 음향투과손실 시험 결과 500㎐에서 21.8dB, 1,000㎐에서 34.8dB로 500Hz에서 방음판 성능 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

표 18. 음향투과손실 시험 결과

구분		1차 시작품	2차 시작품	3차 시작품	기준	비고
음향투과 손실값(dB)	500 Hz	36.5	32.4	21.8	25이상	불만족
	1,000 Hz	40.8	44.4	34.8	30이상	만족

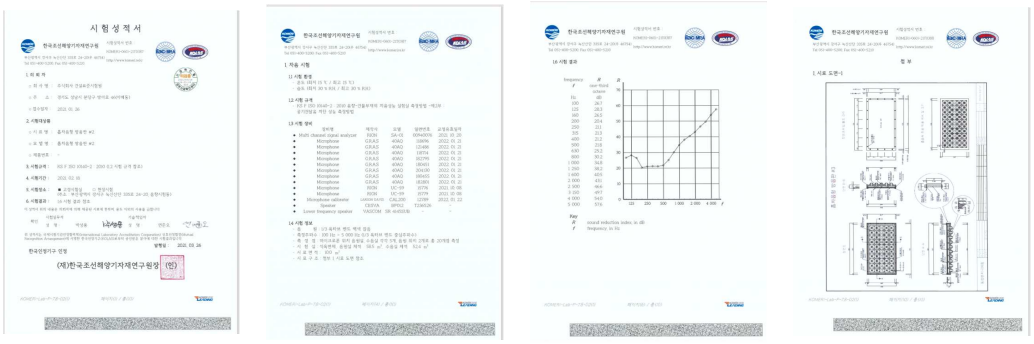
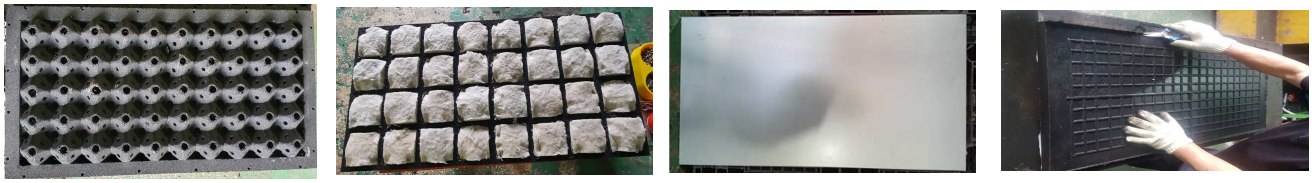


그림 74. 음향투과손실 시험 성적서

- 3차 시작품에 대한 성능평가 시험 결과, 500㎐의 경우 흡음 성능은 향상되었으나 차음성능이 저하되는 경향을 보였으며, 전체적으로 흡음성능과 차음 성능 모두 다소 저하되는 것을 확인 할 수 있었다.
- 이에 따라 소음저감 효과에는 타공에 의한 것 보다 굴곡이 있는 계란판 형상이 더욱 효과가 우수한 것으로 판단되며, 타공이 많을 경우 특정 주파수인 500Hz에 대한 흡음 성능은 크게 향상되나 차음성능은 저하됨을 확인하였다. 본 연구에서는 이와 같이 1차, 2차, 3차 시작품과 성능평가 시험결과를 반영하여 4차 시작품에 대한 개선을 수행하였다.

○ 흡차음형 방음판 구조 개발 및 시작품 제작 (4차)

- 1차~3차 시작품에 대한 방음판 성능평가 시험결과 흡음성능은 모두 기준을 만족하지 못하였고, 차음성능은 3차 시작품에서 500Hz 측정결과를 제외하고는 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 다양한 형상에 대한 방음판 성능평가 시험을 통해 소음저감효과를 위해 계란판과 같이 굴곡진 형상을 적용해야 함을 확인하였다. 그리고 타공을 많이 할 경우 특정 주파수(500Hz)에 영향을 주는 것으로 사료되어 이를 보완하여 흡음 성능 및 차음 성능을 모두 확보할 수 있는 개선방안 도출이 필요하다.
- 이러한 결과를 반영하여 4차 시작품 형상은 2차 시작품과 같은 계란판 형상을 하되 타공 개수를 증가시키고, 추가적으로 내부 격자형 흡음판에 미네랄울을 적용하였다.



흡음판 내부 격자형 흡음판 내부 강판 차음판

그림 75. 2차 방음판 구조 및 형상 개선

▪ 흡음판

- 흡음판은 홀의 크기를 키우고, 개수를 증가시켰다. 흡음판 전면 흡음재 굴곡의 모든 오목 및 볼록한 면에 천공을 적용하였으며, 천공 사이즈는 Φ23㎜ 로 키웠다. 또한, 볼록한 굴곡 형상의 측면에도 Φ16㎜

사이즈의 천공을 4개씩 추가 적용하여 제작하였다. 4차 시작품의 흡음판은 2차 시작품 흡음판 제작 시 사용하였던 금형을 이용하여 사출하고 이후에 수작업으로 추가 타공 작업 및 천공 사이즈 확장 작업을 하였다. 총 316개의 홀을 적용하여 흡음 면적을 더 넓히고, 천공 갯수를 늘려 소음을 더 많이 흡수할 수 있을 것으로 기대된다.

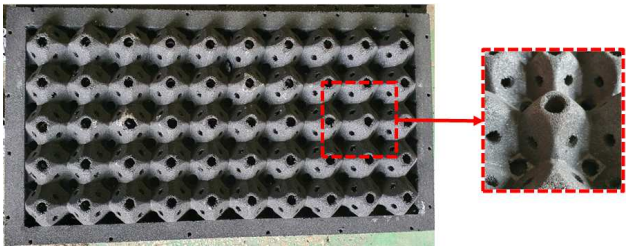


그림 76. 흡음판 제작

▪ 내부 격자형 흡음판과 미네랄 울 적용

- 내부 격자형 흡음판은 이전 시작품과 동일하다. 그러나 흡음성능 향상을 위하여 미네랄 울을 적용하였다.
- 미네랄울이란, 불연성, 경량성, 단열, 흡음성, 내구성의 특징을 갖춰 건축물의 내화, 흡음, 단열 외에 플랜트, 선박 등의 보온, 단열 등으로 그라스울과 같이 많이 사용되고 있으며, 현무암 등 화성암을 약 1500℃이상의 고온으로 용융시켜 원심력을 이용하여 인공 섬유화한 것이다. HCHO, TVOC 등 각종 오염물질 방출량을 최소화하였으며, WHO(세계보건기구), IARC(국제암연구기관) 등 세계 각국 기관에서 발표된 연구 결과를 보면 피부 접촉이나 흡입, 섭취 등이 건강에 영향을 미치는 수준이 우려할 정도는 아닌 것으로 나타나있다. 미네랄울은 가늘고 균일한 섬유가 연속되어 미세 공극을 형성하여 소음 발생 시 음압에너지가 마찰에너지로 되어 음을 흡음하여 소음저감효과를 기대할 수 있다.



그림 77. 미네랄울 가공

미네랄울의 경우 25T에 해당하는 제품의 밀도는 80~140㎏/㎥ 가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 밀도가 높고 흡음이 잘 안되는 저주파음에서도 큰 효과를 발휘하며, 칸막이 벽에 충전할 경우 우수한 차음효과를 기할 수 있는 다음 그림과 같은 B사의 밀도 80㎏/㎥인 25T 미네랄울을 가공하여 내부 격자형 흡음판 공간을 채워 적용하고자 한다.



그림 78. 미네랄 울이 적용된 내부 격자형 흡음판

▪ 내부 강판 및 차음판

- 내부 강판과 차음판은 2차 시작품과 동일하게 적용하였다.

▪ **시작품 제작**

- 시작품 제작 과정은 내부 격자형 흡음판 내부에 미네랄울을 채우고, 외부 흡음판에 천공 개수 및 크기 증가를 위해 수작업으로 뚫는 작업 외에는 모두 2차 시작품과 동일하다.
- 내부 격자형 흡음판 형틀에 흡음재를 도포하고 그 위에 내부 강판을 삽입한다. 그리고 강판위를 차음재로 채우고 금형 및 프레스 기계에 가열·가압하여 '내부 격자형 흡음판-내부 강판-차음재'를 사출한다. 그리고 빈 공간에 미리 재단한 미네랄 울을 채워 넣는다.
  흡음판 금형에 흡음판 재료 도포 후 가열·가압으로 제작하고, 수작업으로 천공 개수 및 크기를 증가 시킨뒤 '흡음판'과 '미네랄 울이 적용된 내부 격자형 흡음판-내부 강판-차음재'은 실리콘을 이용하여 접착하여 결합시킨다.

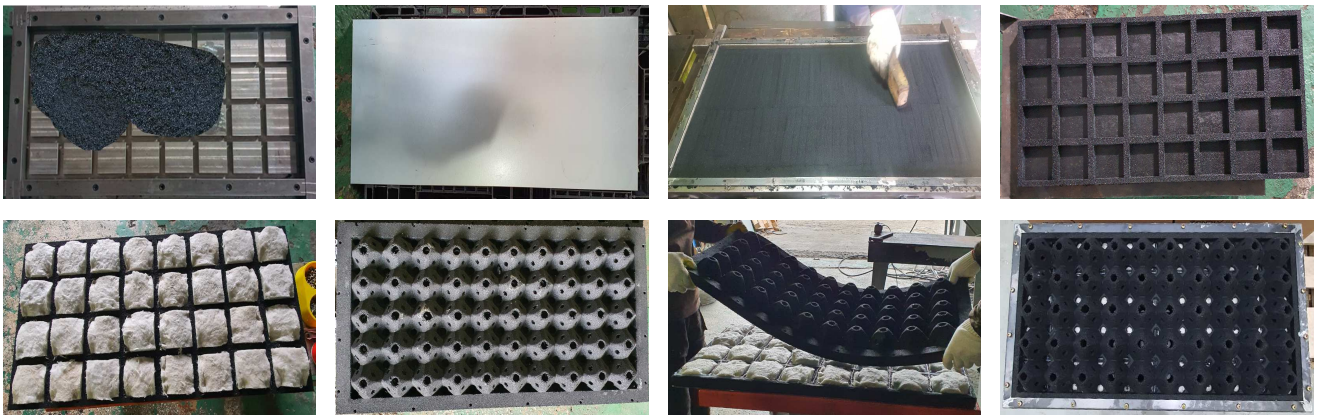


그림 79. 시제품 제작 과정

○ 흡차음형 방음판 성능평가 (4차)

① 흡음률 실험

- 흡음률 시험결과 250㎐, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 음에 대한 흡음률의 산술 평균값이 0.8.으로 방음판 성능 기준을 만족하였으며, 매우 우수한 흡음성능을 확인하였다.
  시험결과 250㎐을 제외하고 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐ 에서는 약 0.8~0.9로 매우 우수한 흡음성능을 확인하였다. 250㎐의 경우 미네랄 울 보다 내부 격자형 흡음판이 가장 흡음효과가 우수함을 확인하였고, 500㎐, 1,000㎐, 2,000㎐의 경우 미네랄 울을 적용하는 것이 흡음효과가 우수함을 확인하였다.

표 19. 흡음률 시험결과

구분	측정 주파수 (HZ)				산술평균	목표	비고
	250	500	1,000	2,000			
1차 시작품	0.34	0.49	0.61	0.69	0.53	0.8 이상	불만족
2차 시작품	0.53	0.47	0.56	0.66	0.56		불만족
3차 시작품	0.39	0.92	0.51	0.36	0.55		불만족
4차 시작품	0.61	0.90	0.87	0.92	0.83		만족

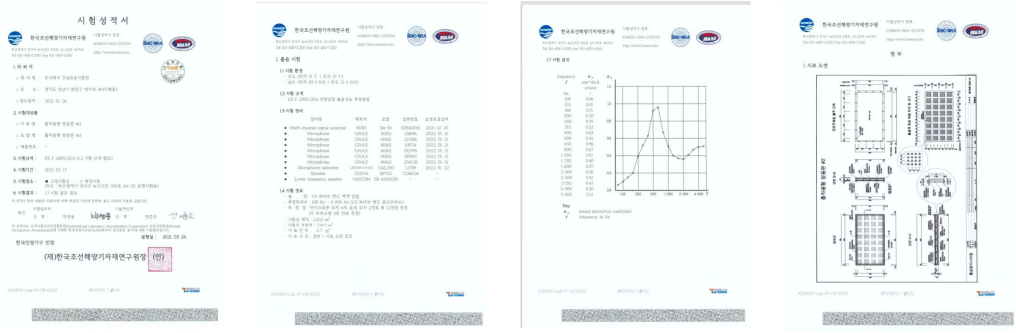


그림 80. 흡음률 시험 성적서

② 음향투과손실 시험

- 음향투과손실 시험 결과 500㎐에서 30.2dB, 1,000㎐에서 40.2dB로 방음판 성능 기준을 만족하였다. 500Hz에서의 음향투과 손실값(dB)이 다소 저하되는 경향을 보였으나 방음판 기준을 충분히 만족하였는 것으로 나타났다. 이는 흡음 효과상승을 위하여 개선된 형상 및 구조의 영향으로 소음이 방음판 내부로 흡수되어 뒤에있는 차음판으로 전달되는 양이 증가함에 따른 양상으로 판단된다. 1,000Hz에서는 내부 격자형 흡음판의 공간이 비어있는 2차 시작품의 차음성능이 가장 우수하였고, 1차 시작품과 3차 시작품의 차음성능은 유사하게 나타났다. 이는 고주파에서는 내부 공간에서 소음이 벽에 부딪치며 감쇄되는 것으로 판단된다.

표 20. 음향투과손실 시험 결과

구분		1차 시작품	2차 시작품	3차 시작품	4차 시작품	기준	비고
음향투과	500 Hz	36.5	32.4	21.8	30.2	25이상	만족
손실값(dB)	1,000 Hz	40.8	44.4	34.8	40.2	30이상	만족

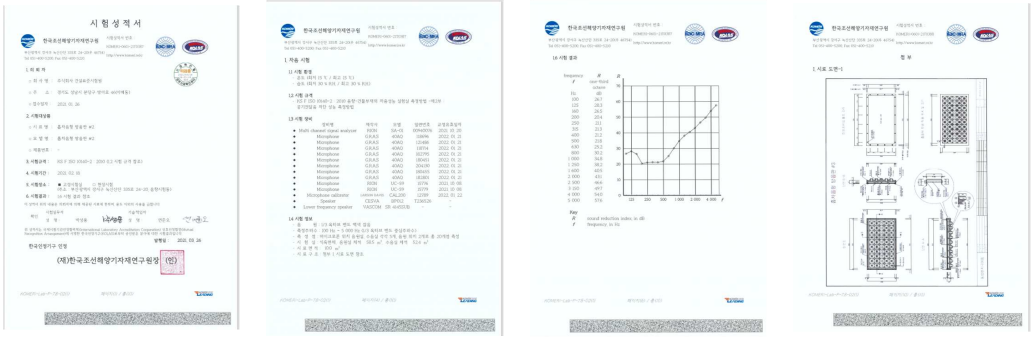


그림 81. 음향투과손실 시험 성적서

- 3차 시작품에 대한 성능평가 시험 결과, 500㎐의 경우 흡음 성능은 향상되었으나 차음성능이 저하되는 경향을 보였으며, 전체적으로 흡음성능과 차음 성능 모두 다소 저하되는 것을 확인 할 수 있었다.
- 이에 따라 소음저감 효과에는 타공에 의한 것 보다 굴곡이 있는 계란판 형상이 더욱 효과가 우수한 것으로 판단되며, 타공이 많을 경우 특정 주파수인 500Hz에 대한 흡음 성능은 크게 향상되나 차음성능은 저하됨을 확인하였다. 본 연구에서는 이와 같이 1차, 2차, 3차 시작품과 성능평가 시험결과를 반영하여 4차 시작품에 대한 개선을 수행하였다.
- 4차 시작품에 대한 흡음성능과 차음성능 시험 결과, 모두 기준을 만족하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 소음저감 효과를 극대화 시킬 수 있는 형상 및 구조를 개발함에 따라 저주파와 고주파 모든 음역대에서 우수한 소음저감 효과가 기대된다.
- 방음판의 성능평가 항목으로 소음저감효과를 평가하는 흡음성능과 차음성능 그리고 내구성 확보를 위해 허용변위량 시험, 충격시험, 연소 시험, 촉진내후성 시험항목이 있다.

  허용변위량 시험, 충격시험은 1차, 2차 시작품 개발 시 수행하였는데 결과 값이 기준대비 매우 우수한 성적으로 기준을 웃돌았으므로, 형상 및 구조 변경이 발생하였으나 충분히 내구성을 확보하였을 것으로 판단된다. 연소시험은 재료개발 실험에서 수행하였는데 재료에 변함은 없으며 기준을 만족하였으므로 연소시험은 수행하지 않고, 추가적으로 촉진내후성 시험을 수행하였다.

③ 촉진 내후성 시험

- 촉진 내후성은 외부환경에 대한 내구성 및 내후성을 평가하는 시험이다. 본 연구에서는 개발 방음판의 촉진 내후성 평가를 위하여 'KS M ISO 16474-3 도료와 바니시-실험실 광원에 의한 폭로 시험방법-제3부: 형광 UV 램프' 시험방법과 'KS M ISO 4892-2 플라스틱-실험실 광원에 의한 폭로 시험방법-제2부: 제논-아크 램프'시험방법에 따라 촉진 내후성을 평가하였다.

▪ KS M ISO 16474-3 도료와 바니시-실험실 광원에 의한 폭로 시험방법-제3부: 형광 UV 램프

- ‘KS F 4770-3 방음판-비금속재 컬러’에 따라 ‘KS M ISO 16474-3 도료와 바니시-실험실 광원에 의한 폭로 시험방법-제3부: 형광 UV 램프’를 준용하여 흡음판과 차음판에 대한 촉진 내후성 시험을 진행하였다.
- 본 연구에서 사용한 장치는 UVA-340 형광 UV 램프이며, 사이클 번호 1에 따라 총 500시간 실시하였으며, KS F 4770-3에서 제시한 방음판의 성능기준에 따라 황변도(△Y)를 측정하였다. 촉진 내후성 시험용 시험편은 70×150×10T (㎜)로 다음 그림과 같다.

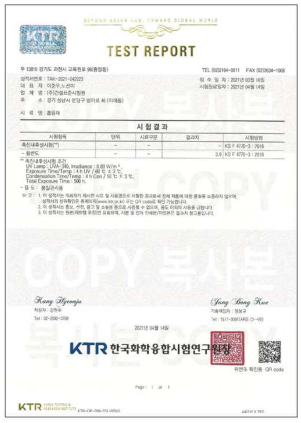


그림 82. 촉진 내후성 시험용 흡음판(좌) 및 차음판(우) 시편

- 시험결과는 다음표와 같다.

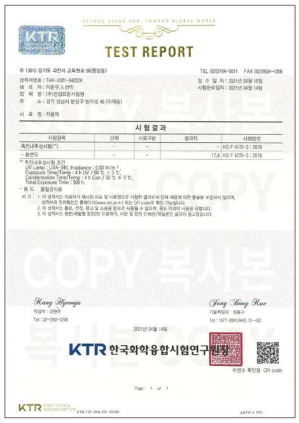
표 21. 촉진 내후성 시험 결과(1차)

구분	황변도(△Y)	기준	비고
흡음판	3.9	3 이하	불만족
차음판	17.6		불만족


TEST REPORT

KTR 한국화학융합시험연구원

그림 83. 흡음판 촉진 내후성시험 성적서


TEST REPORT

KTR 한국화학융합시험연구원

그림 84. 차음판 촉진내후성시험 성적서

- 촉진내후성 시험 결과, 황변도가 흡음판은 3.9 , 차음판은 17.6 으로 기준을 불만족하였으므로 내후성 확보를 위한 방안 도출이 필요하다. 선행연구 분석을 통해 폐타이어는 내후성에 강한 재료이나 접착을 위해 사용되는 우레탄수지가 자외선에 대한 색변화가 큰 것을 확인 할 수 있었다. 이에 대하여 본 연구에서는 우레탄의 색차를 억제하기위하여 UV 안정제를 추가하였다.

▪ **UV 안정제를 적용하여 간이 시험 진행**

- 본 연구에서는 S업체에서 2종의 UV 안정제 샘플을 확보하여, UV 안정제를 추가한 시작품을 제작하여 내후성 시험을 진행하였다. UV안정제 투입량은 일반적으로 우레탄바인더 기준 2~3% 적용한다는 경험적 의견을 고려하여 2~3% 사이 각각 첨가량을 다르게 적용하여 총 8개(UV 안정제 2종* 배합 4종)의 시편을 준비하였다.
- 이를 이용하여 공인인증 시험기관에서 시험을 수행하기 전에 최적의 UV 안정제 결정과 배합비에 대한

가이드를 확인하기 위하여 UV 안정제 개발업체의 연구실에서 간이시험을 진행하였다.

- 시험기준은 ASTM G155 Cycle 1을 적용하였다. 본 시험은 내후성 대표시험으로 Xenon arc lamp(제논 아크램프)를 사용하며, 필터는 일반 태양광을 사용한다. 앞서 수행한 내후성 시험과는 시험조건이 다르지만, 이를 이용하여 내후성을 평가하는 것이 아닌 경향파악과 UV 안정제 선택을 위한 시험이므로 의미가 있다고 판단된다.
- 시험결과는 다음표와 같다.

표 22. 촉진 내후성 시험 결과(2차-간이시험)

UV 안정제 종류	배합비	색차(△E)	비고
1	1	0.97	기준 만족(3이하)
	2	0.93	
	3	0.81	
	4	1.59	
2	1	1.83	기준 만족(3이하)
	2	1.35	
	3	1.69	
	4	1.22	

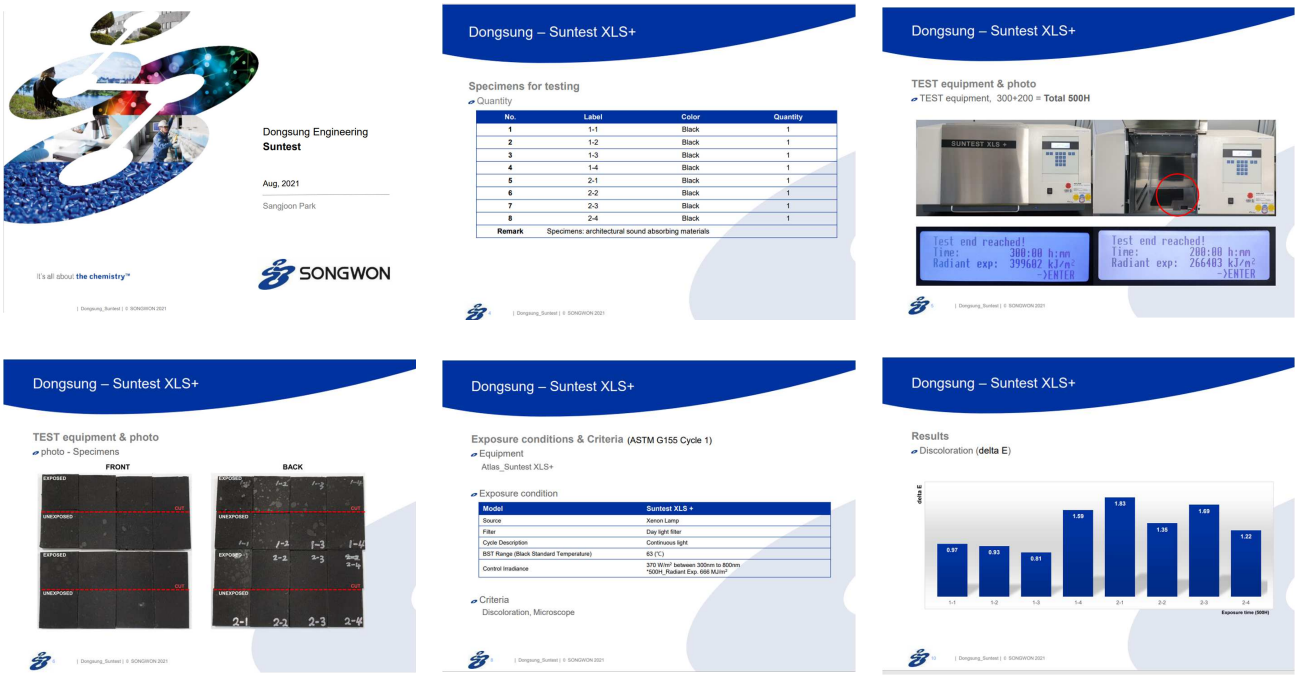


그림 85. 2차-간이 시험 보고서

- 시험결과 1번 UV 안정제의 결과가 더 우수한 것으로 나타났다. 2번 UV 안정제는 값의 경향성을 찾을 수 없고, 시험 결과값도 더 크게 나타나 본 연구에서는 UV 안정제로 1번을 사용하기로 하였고, 투입량은 No.3 배합이 가장 효과가 우수한 것으로 나타났다.
- 본 시험결과를 반영하여 공인인증시험기관인 한국화학융합시험연구원에서 내후성 평가 시험을 진행하였다.

▪ **UV 안정제를 적용하여 KS M ISO 16474-3에 따라 재시험**

- 1번 UV 안정제와 No.3 배합을 적용하여 시편을 제작하고 한국화학융합시험연구원에서 내후성 평가 시험을 진행하였으며, 시험결과는 다음표와 같다.

표 23. 촉진 내후성 시험 결과(1차)

구분	1차 황변도(△Y)	2차 황변도(△Y)	기준	비고
흡음판	3.9	4.9	3 이하	불만족
차음판	17.6	12.9		불만족


TEST REPORT

KTR 한국화학융합시험연구원장

그림 86. 흡음판 촉진 내후성시험 성적서


TEST REPORT

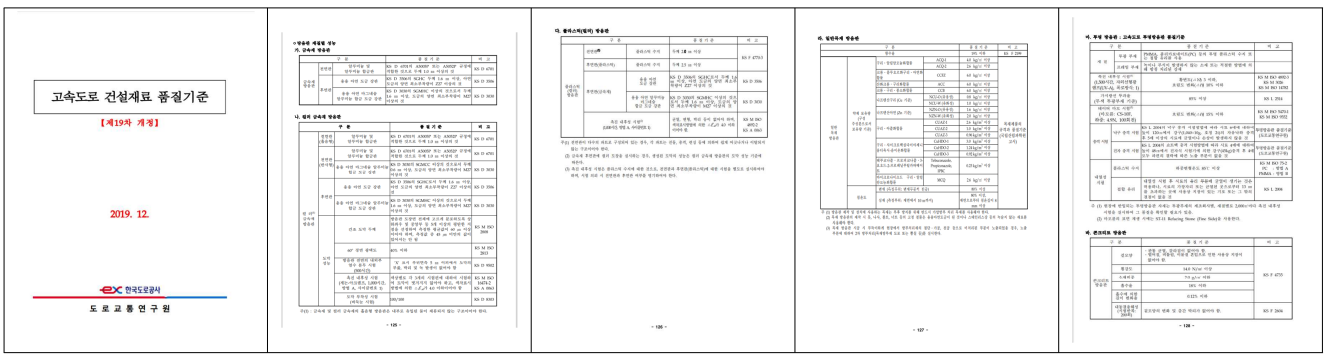
KTR 한국화학융합시험연구원장

그림 87. 차음판 촉진 내후성시험 성적서

- 촉진내후성 시험 결과, 황변도가 흡음판은 4.9 , 차음판은 12.9로 기준을 불만족하였다. 흡음판의 경우 오히려 황변도값이 1 증가하였고, 차음판의 경우 황변도값이 4.7 감소하였다.
- 이러한 시험결과에 대하여 시험기관인 한국화학융합시험원의 담당 연구원 그리고 내후성시험을 수행하는 타 시험기관(한국 건설생활환경 시험연구원, 한국 고분자 시험 연구소)의 내후성 시험 담당자와 회의를 수행한 결과, 평가시험 방법 변경이 필요함을 확인하였다.
- 본 연구에서 수행한 내후성 시험 방법 및 기준(황변도)은 주로 투명 방음판, 흰색, 아이보리 도료에 대한 시험 방법으로 개발 방음판과는 재료적 성질이 확연히 다르고, 검은색 방음판에서 황변도에 대한 평가가 어렵다는 공통의견을 수렴하였다.
- 이에 대하여 방음판 내후성 평가기준으로 한국도로공사의 고속도로 건설재료 품질기준을 확인하여 이에 따라 내후성 시험 진행에 대한 검토가 필요함을 확인하였다.

▪ 고속도로 건설재료 품질기준 시험

- 한국도로공사에서 발간한 '고속도로 건설재료 품질기준'에 따르면 방음판은 금속재 방음판, 컬러 금속재 방음판, 플라스틱(컬러) 방음판, 일반목재 방음판, 투명 방음판, 콘크리트 방음판, 목재 플라스틱 복합재 방음판으로 분류하고 있으며 각각의 내후성 시험 방법 및 기준은 다음 표 와 같다.


고속도로 건설재료 품질기준

【제19차 개정】

2019. 12.

한국도로공사

도로교통연구원

그림 88. 고속도로 건설재료 품질기준 시험에 따른 방음판 성능평가

표 24. 촉진 내후성 시험 방법 및 기준

구분	시험 기준	시험조건	품질기준
금속재 방음판	-	-	-
컬러 금속재 방음판	KS M ISO 16474-2 KS A 0063	제논-아크램프, 1,000시간, 방법 A, 사이클번호 1	도막이 벗겨지지 않아야 함. 색차표시 방법에 의한 색차가 4.0 이하
플라스틱(컬러) 방음판	KS M ISO 4892-2 KS A 0063	제논-아크램프,1,000시간, 방법 A, 사이클번호 1	균열, 변형, 박리 등이 없어야 함. 색차표시방법에 의한 색차가 4.0 이하
일반목재 방음판	-	-	-
투명 방음판	KS M ISO 4892-3 KS M 3026 KS M ISO 14782	1,500시간, 자외선형광 램프(UV-A), 폭로방식: 1	황변도(△YI) 3 이하, 흐림도 변화(△H) 10% 이
목재 플라스틱 복합재 방음판	KS F 3230	2,000시간, 제논-아크램프	KS F 3230

- 기준 검토 결과, 개발 방음판의 성질과 유사한 방음판은 없지만 투명방음판과 목재, 금속재는 아니기 때문에 플라스틱(컬러) 방음판 시험기준을 적용하여 내후성을 평가하고 최적 함량을 도출하고자 한다.
- 앞서 실험과 다르게 정확한 투입량을 결정하기 위하여 3번 배합을 기준으로 투입량을 보다 세밀하게 4가지 배합으로 나누어 흡음판, 차음판에 대한 각 시편을 제작하여 총 8개의 시편에 대한 내후성 시험을 수행하였으며 실험결과는 다음 표와 같다.

표 25. 촉진 내후성 시험 결과

차음판		시험 결과	기준	흡음판		시험 결과	기준
1-1	외관	이상없음	외관: 이상없음 색차: 4 이하	**2-1**	**외관**	**이상없음(균열제외)**	외관: 이상없음 색차: 4 이하
	색차	3.9			**색차**	**3.6**	
1-2	**외관**	**이상없음**		**2-2**	**외관**	**이상없음(균열제외)**	
	색차	**2.3**			**색차**	**3.9**	
1-3	**외관**	**이상없음**		2-3	외관	이상없음(균열제외)	
	색차	**2.3**			색차	6.8	
1-4	외관	이상없음		2-4	외관	이상없음(균열제외)	
	색차	5.3			색차	4.5	



그림 89. 촉진내후성 시험 성적서

- 시험결과, 차음판의 경우 1-2배합과 1-3배합에서 가장 좋은 결과를 나타냈고, 흡음판의 경우 2-1배합에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이에 따라 향후 방음판 제작시, 차음판의 경우 UV 안정제 함량을 1-2 배합비로, 흡음판은 2-1 배합비로 첨가하여 제작하고자 한다.
- 시험결과에서 흡음판의 외관조사에서 균열을 제외한 이유는 외관조사는 육안으로 수행되는데 흡음판의 경우 외관에 기공이 많아 균열여부를 정확하게 확인이 불가하여 공인인증 시험기관에서 이에 대하여 시험성적서에 정확한 평가는 내리기 어려우나 확인 상 외관에 이상이 없음을 확인하였다는 결과를 받았다.

○ 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판 개발

- 본 연구에서는 폐타이어를 이용한 방음판을 개발하기 위하여 재료개발, 형상 및 구조개발을 수행하였다.

▪ 재료 실험을 통한 최적 배합비 도출

- 재료개발을 위하여 입도분석시험, 관내법시험, 압축강도 시험, 연소시험을 수행하였으며 실험결과를 분석하여 최적 배합비를 도출하였다.

▪ 초기형상 개발 및 음향해석 시뮬레이션 수행

- 소음저감 효과를 향상시키기 위하여 형상 및 구조개발을 수행하였다. 초기 방음판 형상을 구상하고 음향해석 시뮬레이션을 통해 개선하여 계란판 형상의 1차 시작품 형상을 개발하였다.

▪ 1차 시작품 제작 및 성능평가 시험

- 1차 시작품을 제작하였다. 제작된 1차 시작품의 방음판 성능평가 시험을 수행하였는데 흡음률을 제외한 음향투과손실시험, 하중변위, 충격시험은 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

▪ 2차 시작품 제작 및 성능평가 시험

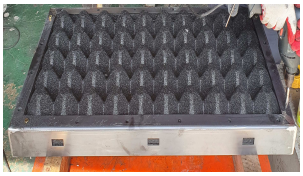
- 흡음률 향상을 위하여 외부 흡음판에 구멍을 뚫고 내부 격자형 강판 대신 내부 격자형 흡음판을 적용하는 등 형상 및 구조를 변경하여 2차 시작품을 개발하였고, 방음판 성능평가 시험을 수행하였는데 흡음률은 0.53으로 기준 0.7이상을 만족하지 못하여 흡음률을 제외한 음향투과손실시험, 하중변위, 충격시험은 모두 매우 우수한 성적으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

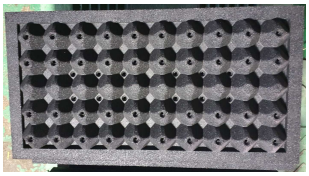
▪ 3차 시작품 제작 및 성능평가 시험

- 실내에 적용하는 흡음형 타공보드에서 아이디어를 얻어 외부 굴곡이 아닌 상판형에 구멍을 많이 적용한 형상을 개발하여 3차 시작품을 개발하고, 흡음률 시험과 음향투과손실 시험을 수행하였다. 시험 결과, 흡음률은 0.55로 기준 0.7이상을 만족하지 못하는 것으로 나타났고, 음향투과 손실 또한 500Hz에서 21.8로 기준 25이상은 만족하지 못하였다.

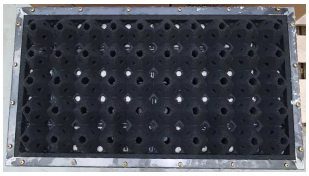
▪ 4차 시작품 제작 및 성능평가 시험

- 3차 시작품 시험결과, 굴곡이 있는 계란판 형상이 더 소음저감 효과가 우수한 것으로 판단되어 4차 시작품은 계란판 형상의 굴곡이 있는 형상으로 돌아왔고, 천공크기와 개수를 증가시켰다. 그리고 흡음률 향상을 위하여 내부에 미네랄울을 충진시켰다. 4차 시작품을 개발하여 흡음률 시험과 음향투과손실 시험을 수행한 결과 흡음률 0.83으로 기준을 만족하였으며 음향투과손실 또한 기준을 만족하였다. 이에 따라 방음판의 형상은 4차 시작품의 형상으로 최종 결정하였다.


-1차 시작품-


-2차 시작품-


-3차 시작품-


-4차 시작품(최종)-

3) 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발

○ 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발

- 본 연구에서는 폐타이어를 사용한 친환경 흡차음형 방음판을 개발하고, 단순 방음벽이 아닌 주변 환경 변화에 의해 필요시 간단한 추가공정을 통해 방음터널로 확대 적용이 가능한 기술개발을 목표로 한다.
- 매년 소음관련 민원이 증가함에 따라 그에 대한 대책 방안으로 방음벽을 설치하였음에도 불구하고 주변 도로의 교통량 증가 및 고속화에 따른 교통 소음증가, 방음벽의 소음차단 효과 미비 등으로 인해 주민의 소음 관련 민원이 지속적으로 발생하고 있다. 이때에 기존 방음벽의 경우, 이미 설치한 방음벽을 철거하고 새로운 방음터널 설치를 위한 설계와 시공을 수행해야 하므로 막대한 변경 비용이 투입된다.
- 본 연구에서는 교체 비용을 절감시키고 도로주변 소음으로 인한 민원발생에 적극적 대응이 가능한 방음벽과 방음터널이 상호 호환 가능한 방음벽 구조를 개발하고자 한다.

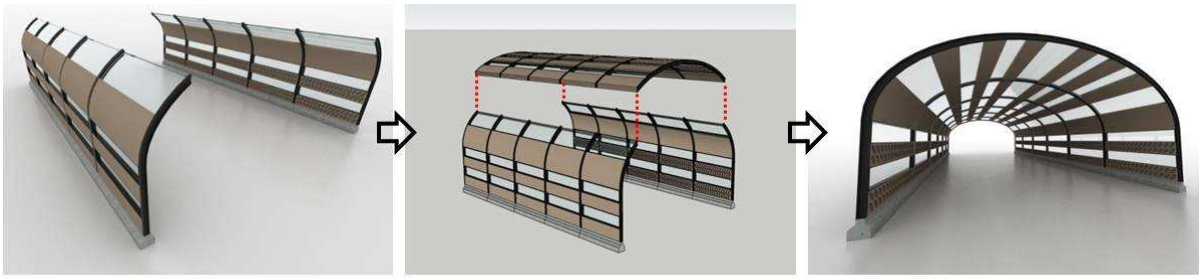


그림 90. 방음벽과 방음터널 상호 호환 가능한 방음벽 개념도

- 방음벽 및 방음터널 설계 및 시공 기준을 검토하고, 시공성 및 경제성을 고려하여 방음벽과 방음터널이 상호 호환되는 구조를 개발하고자 한다. 방음벽 및 터널형 방음벽에 대한 전체계해석을 통한 설계와 접속부 상세해석을 통해 안전성이 확보된 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조를 개발하고 시작품을 제작하여 구조 안전성 검증을 위한 구조성능 시험을 수행하고자 한다.

① 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환가능 구조체 개발

- 기존 방음벽에서 방음터널로 설치 시『중간 기둥을 적용 하는 경우』와 『중간 기둥을 적용하지 않는 경우』로 시공 단계를 분리하여 내용을 정리하였다.

▪ 외측 방음벽 기둥에 일정 단면 – 중간기둥 적용

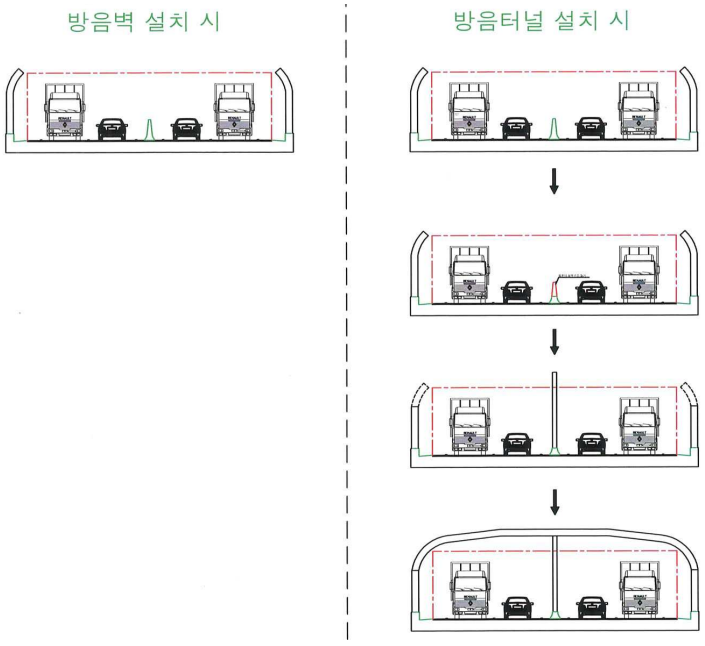


그림 91. 외측 방음벽 기둥 일정단면-중간기둥 적용에 대한 구조 개발 및 시공단계

- 외측 방음벽 기둥에 일정단면을 적용한 경우이며, 중간 기둥이 적용된 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환이 가능한 구조체의 시공 단계(가상)의 모습이며, 시공 단계는 다음과 같다.
  ① 기존 방음벽 구간 연결부 검토
  ② 중간벽체 설치를 위한 기존 중앙분리대 기초폭원 확보
  ③ 중간벽체 설치 및 외측벽체 곡선구간 제거
  ④ 중간벽체 설치 후 아치 리브 설치

▪ 외측 방음벽 기둥에 변단면 – 중간기둥 적용

- 외측 방음벽 기둥에 변단면을 적용한 경우이며, 중간 기둥이 적용된 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환이 가능한 구조체의 시공 단계(가상)의 모습이다. 시공 단계는 외측 방음벽 기둥 일정단면 적용 시와 동일하다.

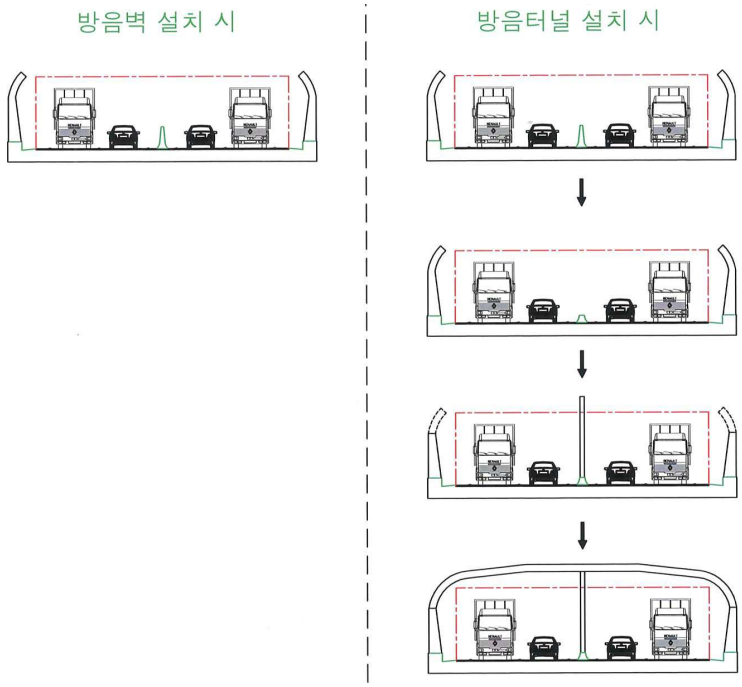


그림 92. 외측 방음벽 기둥 변단면-중간기둥 적용에 대한 구조 개발 및 시공단계

▪ 중간 기둥 미적용

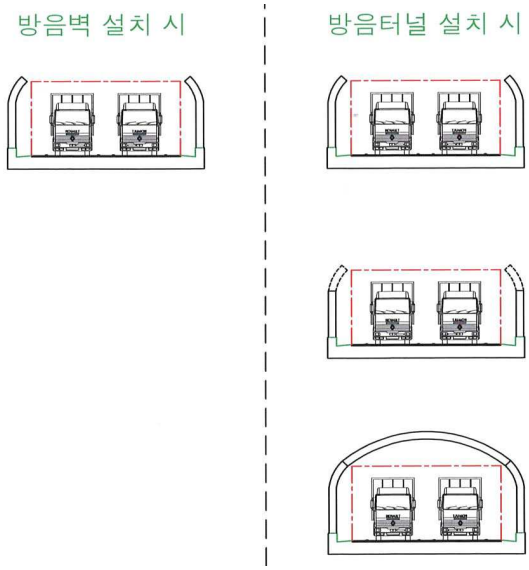


그림 93. 중간 기둥 미적용 경우에 대한 구조 개발 및 시공단계

- 중간 기둥을 적용하지 않는 경우의 시공 단계는 다음과 같다.
  ① 기존 방음벽 구간 연결부 검토
  ② 외측벽체 곡선구간 제거
  ③ 아치리브 설치

- 중간 벽체의 설치를 위한 시공 단계(중간벽체 설치를 위한 기존 중앙분리대 기초 폭원 확보 및 중간벽체 설치)를 제외하고는 중간기둥 적용/ 미적용에 대한 시공단계는 동일하다는 것을 알 수 있다. 간단한 추가 공정을 통하여 방음벽과 방음터널이 상호호환되는 구조개발로 시공비용 절감을 통한 경제성이 향상되며, 교통량 변화 및 주변 환경변화에 따른 적극적인 대응이 가능할 것으로 판단된다.이를 기초로 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 전체계해석을 통한 설계, 접속부 상세해석을 통하여 실시설계를 진행하고자한다.

② 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 전체계해석을 통한 설계

- 방음벽과 방음터널이 상호호환 가능한 구조를 갖는 새로운 메커니즘의 방음시설로 방음판과 방음벽 그리고 방음 터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성을 평가하고, 방음터널 연결부(접속부)에 대한 상세검토를 수행하였으며, 이를 적용하여 방음벽 설계를 수행하였다. 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발을 위한 연구수행 순서는 다음과 같다.

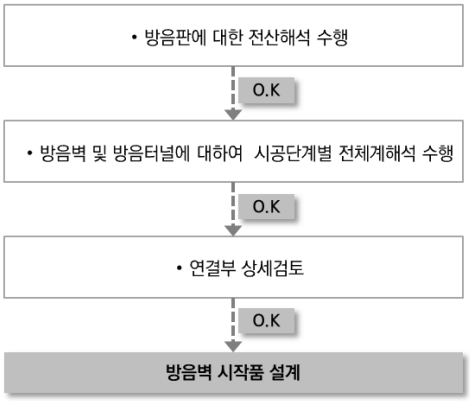


그림 94. 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조개발 순서

▪ 방음판에 대한 전산해석 수행

- 방음벽에 대한 전체계해석 전에 방음벽에 적용되는 각 방음판에 대한 전산해석을 수행하였다. 각 적용되는 방음판의 처짐 변형량이 크게 발생할 경우 적용이 불가능 하므로, 본 연구에서 개발한 방음판 구조에 대하여 전산해석을 수행하여 처짐 변형량에 대하여 평가를 수행하였다.

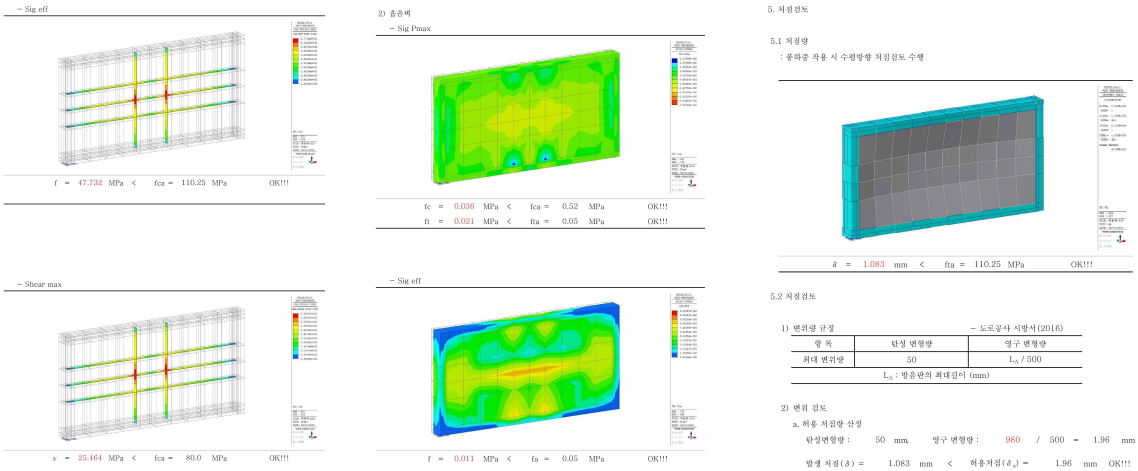


그림 95. 방음판에 대한 전산해석 결과

- 방음판 표준치수(KS F 4770-23)을 참고하여 단면을 가정하고, 구조물의 자중과 풍하중을 고려하여 처짐량에 대하여 검토하였으며, 결과 발생 처짐량(1.083㎜)이 허용처짐량(1.96㎜) 이내로 나타나 안전한 것으로 나타났다. 전산해석 분석관련 내용은 보고서에 자세히 수록하였다.

▪ 방음벽 및 방음터널 시공단계별 전산해석

- 본 연구에서는 방음벽 설치 후 현장여건에 의해 방음터널로 변경 시 기존 방음벽의 일부구간을 활용하여 방음터널 변경 시 구조 안전성 검토 수행하였다. 방음판에 대한 안전성은 발생 처짐량(1.083㎜)이 허용처짐량(1.96㎜) 이내로 나타나 안전한 것으로 나타났으므로, 본 검토에서는 방음벽과 방음터널의 강재부재에 대하여 시공단계별 전산해석을 수행하였다.
- 풍하중과 시공하중, 흡차음형 방음판의 중량을 고려하여 하중을 산정하고, 시공 단계별로 하중을 재하하여 이때에 방음벽과 방음터널에 작용하는 응력에 대하여 검토하였다. 검토결과 휨 압축응력이 모두 허용 휨 압축응력 이내로 나타나 안전한 것으로 나타났다. 전산해석 분석관련 내용은 보고서에 자세히 수록하였다.

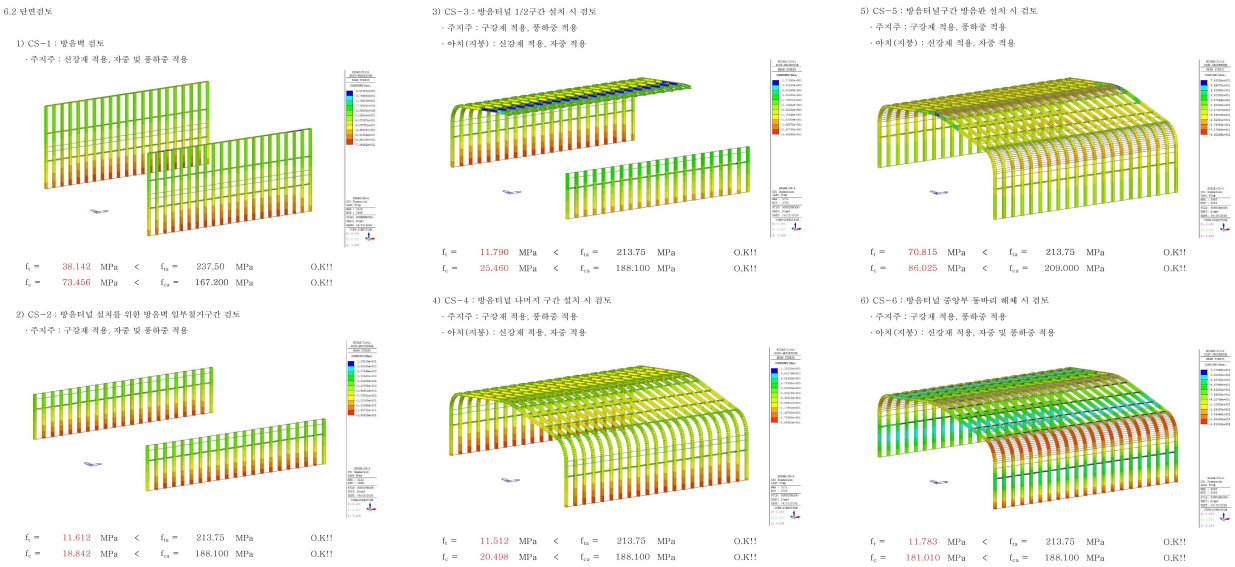


그림 96. 방음벽 및 방음터널 시공단계별 전산해석결과

③ 접속부 상세해석

- 본 연구에서 개발하고자 하는 방음벽은 단순 방음벽이 아닌 방음벽과 방음터널이 추가공정을 통해 상호호환이 가능한 방음벽으로 방음벽에서 방음터널로 변경되는 구간의 연결부에 대하여 상세 비교·검토를 수행하였다.

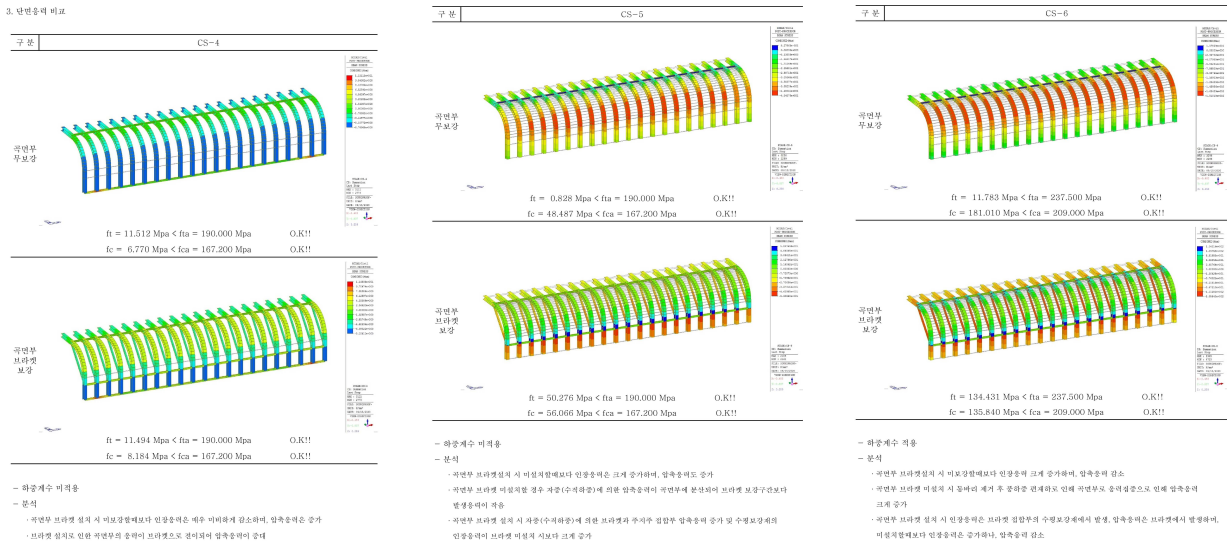


그림 97. 연결부 상세 비교검토 결과

- 단면은 ①곡면부 무보강 -일반단면, ②곡면부 브라켓 보강- 브라켓 설치단면 두 종류의 단면으로 가정하였고, 경계조건, 자중, 풍하중의 조건은 동일하게 적용하여 검토하였으며, 검토 결과 곡면부 브라켓을 설치하였을 경우 브라켓이 미설치 되었을 때 보다 완공 후 상시 사용하중이 작용할 때 곡면부의 응력집중이 감소하는 것으로 나타났다. 브라켓 설치 시 곡면부에 일부 인장응력이 발생하며 압축응력은 브라켓에서 축방향 응력으로 발생하므로, 부재 응력집중을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 분석 관련 내용은 보고서에 자세히 수록하였다.

④ 일반 방음벽 시작품 설계

- 본 연구에서는 전산해석결과를 바탕으로 방음벽과 방음터널에 대한 설계를 수행하였으며, 도면은 다음과 같다. 방음터널의 경우 브라켓 적용하였을 경우와 미적용 경우 모두 고려하여 설계하였다. 방음터널의 경우 브라켓이 적용되었을 경우와 미적용 되었을 경우 두 가지 경우에 대하여 모두 설계를 수행하였다.

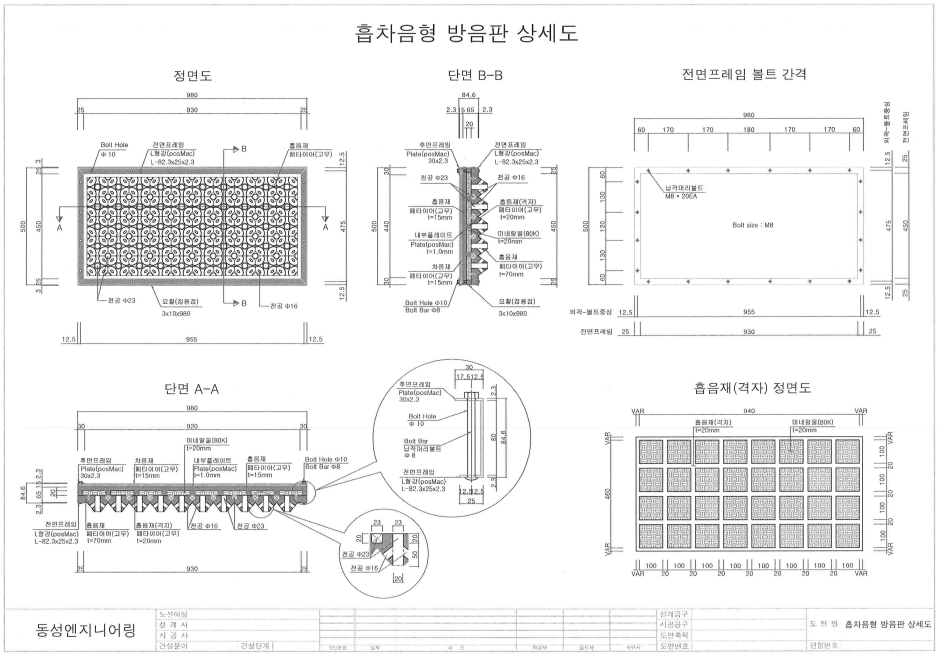


그림 98. 방음판 상세도

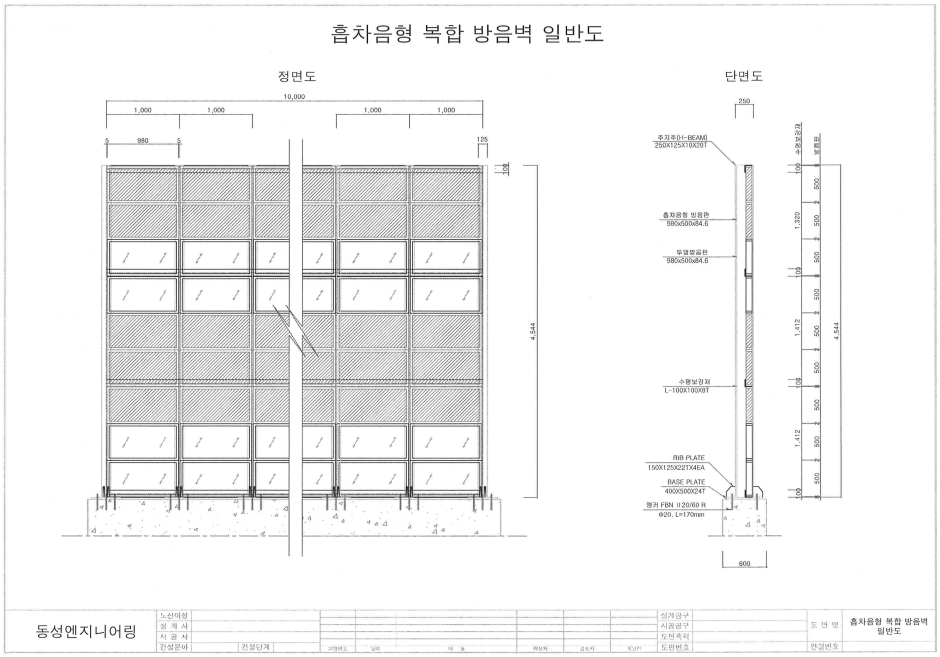


그림 99. 흡차음형 복합 방음벽 일반도

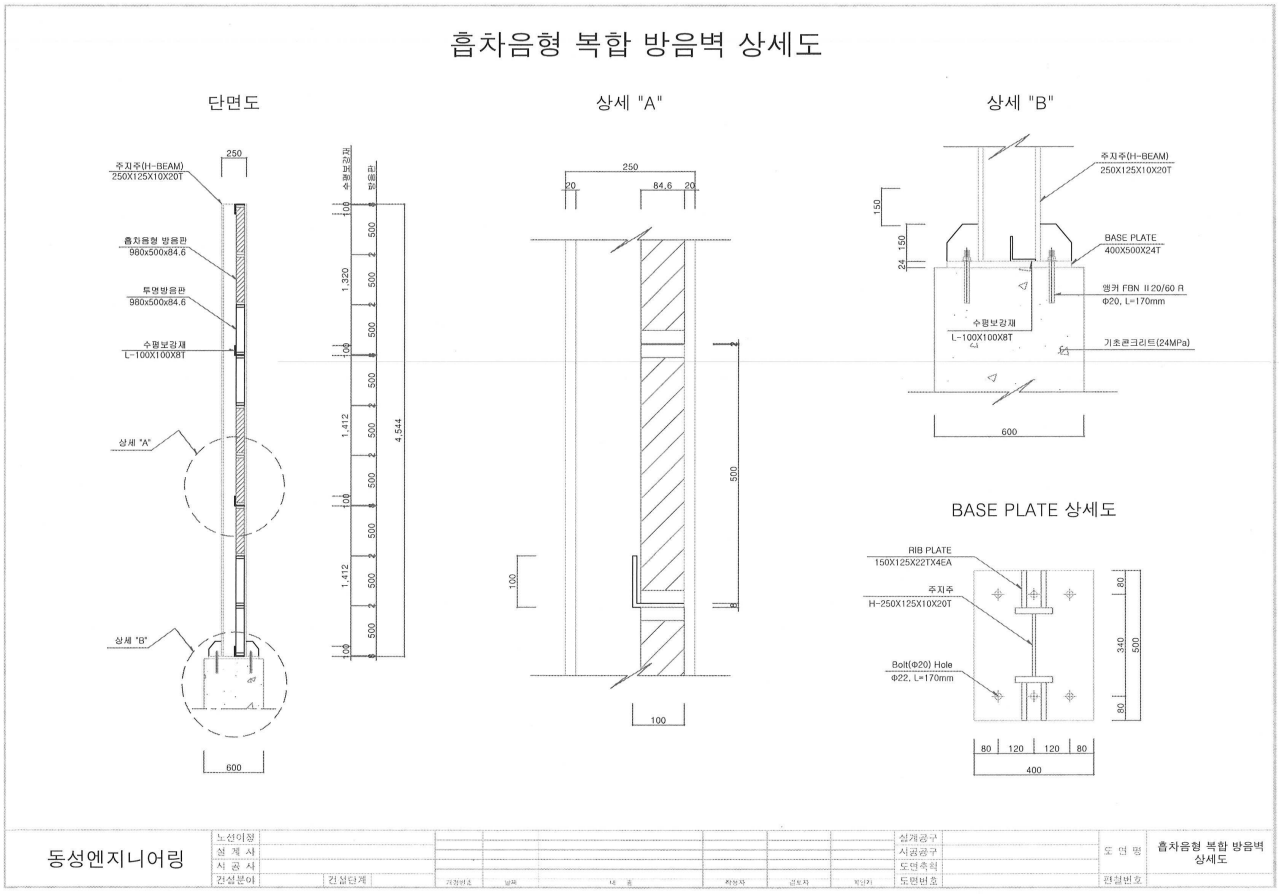


그림 100. 흡차음형 복합 방음벽 상세도

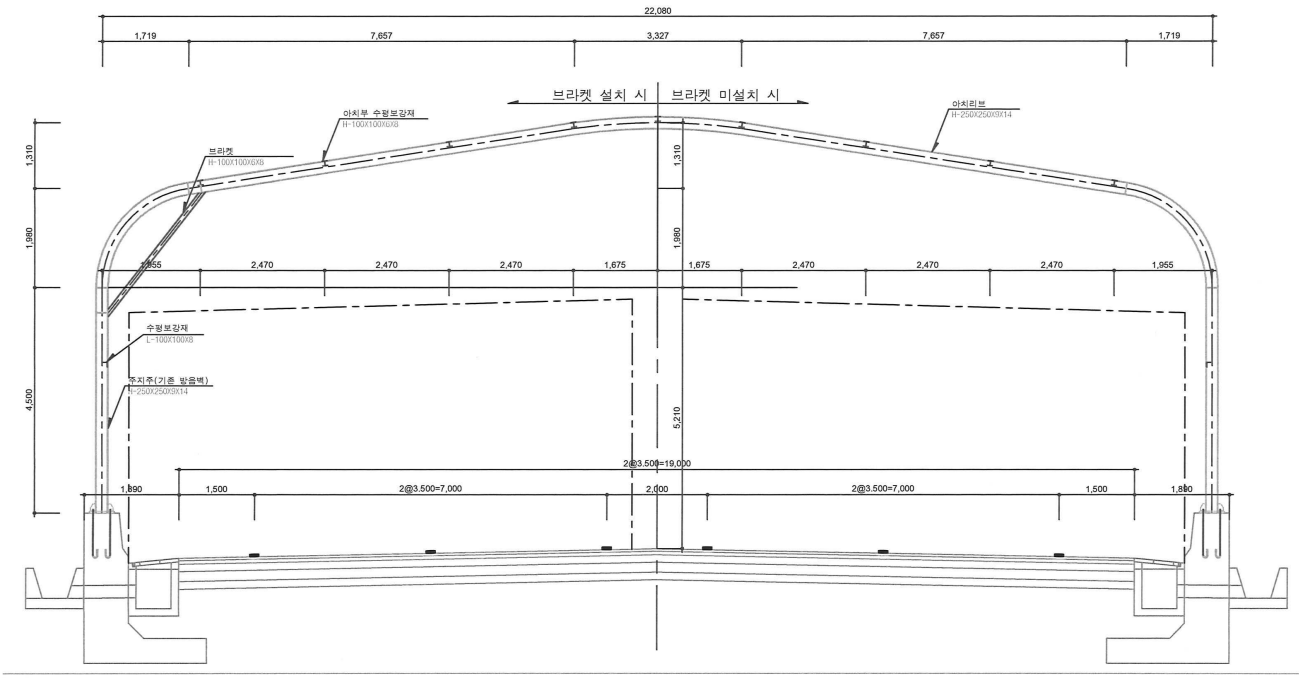


그림 101. 방음터널 설계도면

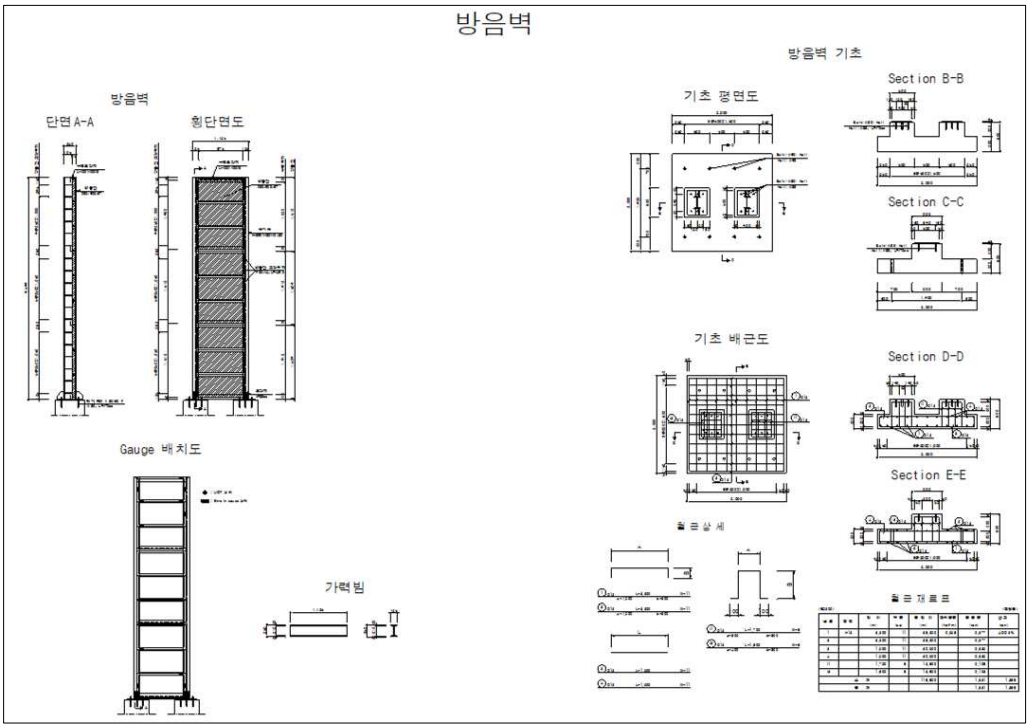
○ **구조성능시험 (실대형 정적재하시험)**

- 방음벽 및 터널형 방음벽에 대한 전체계해석을 통한 설계와 접속부 상세해석을 통해 안전성이 확보된 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조를 개발하고 시작품을 제작하여 구조 안전성 검증을 위한 구조성능시험(실대형 정적재하시험)을 수행하고자 한다.
- 방음판에 대한 FEM 해석 결과 구조적으로 안정적이라는 결과를 확보하였으므로, 주지주와 방음판의 연계성(상호간의 하중이 어떻게 적용되는지)을 확인하기 위하여 주지주-주지주에 발생하는 집중하중에 의해 생기는 방음판의 비틀림 및 변형을 확인하기 위하여 구조성능시험을 진행하고자 한다.

① 시험을 위한 설계 및 구조검토

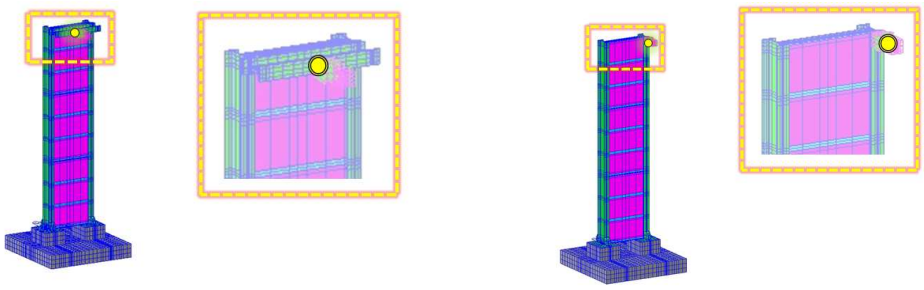
- 구조성능 시험은 실제 방음벽에 대하여 예상되는 풍하중을 재하하중으로 간주하고 정적재하시험을 수행하는 것으로 방음벽에 대한 설계를 수행하고, 하중 재하 위치를 결정하였다. 그리고 전체계해석을 통해 재하되는 하중에 따라 변위량을 분석하여 게이지 부착 위치를 결정하였다.

▪ **방음벽 실험체 도면**



▪ **방음벽 구조해석**

- 하중은 고속도로 건설재료 품질기준(2014), 도로공사 시방서(2016) 에 따라 내하중 1호 하중을 적용하여 실험하중을 산출하였고, 실험 시 이를 지주에 집중하중으로 변경하였다.
  하중 재하 위치는 다음 그림과 같이 중앙부 재하, 편측재하 두 지점에서 재하하고자 한다.



- 중앙부 재하 -　　- 편측 재하 -

그림 102. 하중재하 위치

- 중앙부 하중 재하에 대한 기초검토

하중을 재하하고 이에 대한 발생응력과 허용응력에 대한 검토를 수행한 결과는 다음 표와 그림과 같으며, 발생응력이 압축응력보다 작아 안전한 것으로 나타났다.

표 26. 중앙부 하중 재하에 대한 기초검토 결과

구분		발생응력(N/㎟)	허용응력(N/㎟)	비고
Sig-XX	압축응력	0.024	9.600	O.K
	인장응력	0.018	0.637	O.K
Sig-YY	압축응력	0.019	9.600	O.K
	인장응력	0.035	0.637	O.K
Sig-ZZ	압축응력	0.100	9.600	O.K
	인장응력	0.000	0.637	O.K
Sig_Shear	전단응력	0.060	0.392	O.K

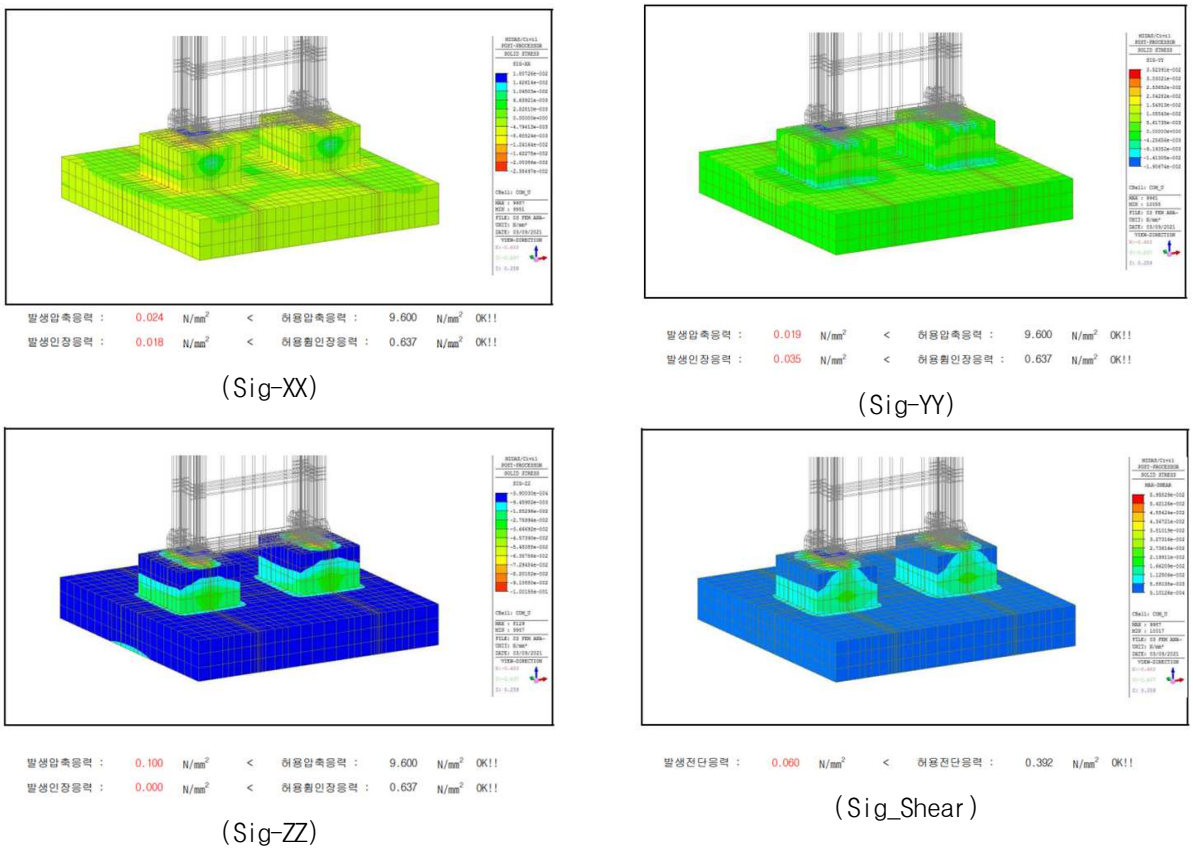


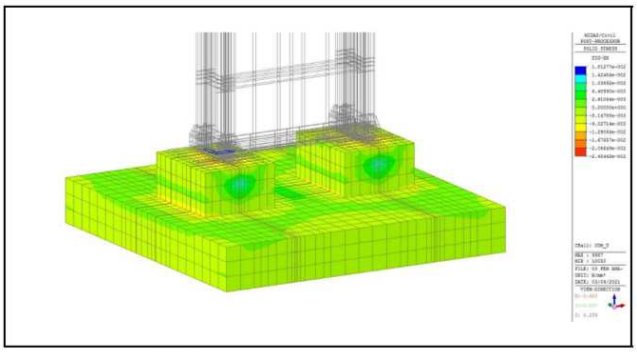
그림 103. 중앙부 하중 재하에 대한 기초검토 결과

- 편측 하중 재하에 대한 기초검토

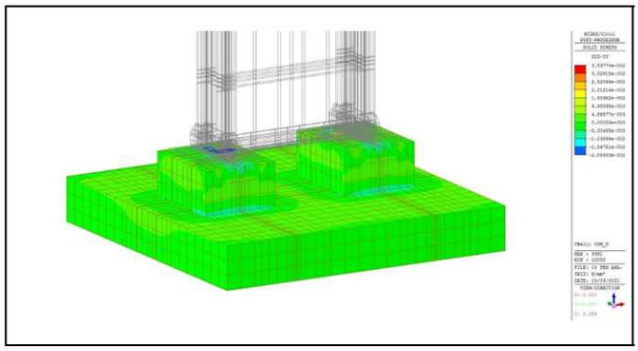
하중을 재하하고 이에 대한 발생응력과 허용응력에 대한 검토를 수행한 결과는 다음 표와 그림과 같으며, 발생응력이 압축응력보다 작아 안전한 것으로 나타났다.

표 27. 편측 하중 재하에 대한 기초검토 결과

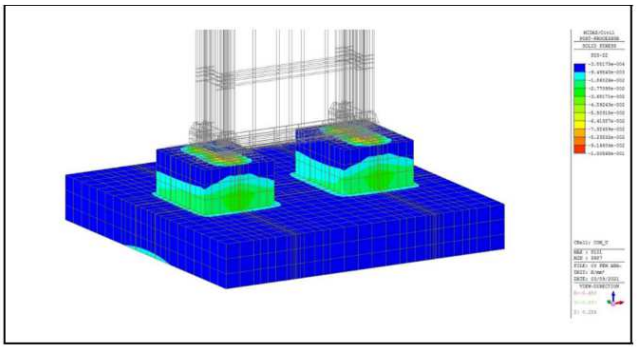
구분		발생응력(N/㎟)	허용응력(N/㎟)	비고
Sig-XX	압축응력	0.025	9.600	O.K
	인장응력	0.018	0.637	O.K
Sig-YY	압축응력	0.21	9.600	O.K
	인장응력	0.035	0.637	O.K
Sig-ZZ	압축응력	0.101	9.600	O.K
	인장응력	0.000	0.637	O.K
Sig_Shear	전단응력	0.06	0.392	O.K



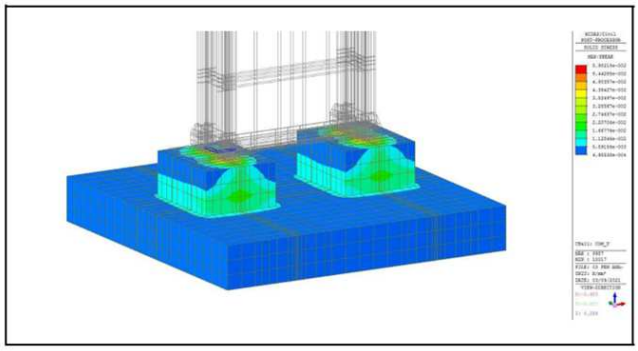
(Sig-XX)



(Sig-YY)



(Sig-ZZ)



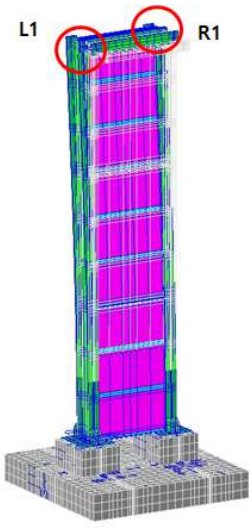
(Sig_Shear)

그림 104. 편측 하중 재하에 대한 기초검토 결과

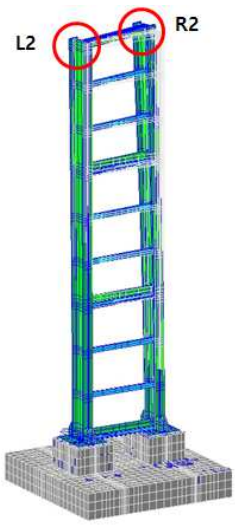
- 변형량 검토

하중 재하 시 발생되는 변형량을 검토하였다. 변형량은 다음 그림과 같이 하중 재하시 변위가 가장 많이 발생되는 방음벽 가장 위 좌우로 결정하였다. 결과는 다음 표와 같다.

하중을 가하였을 때 하중가력 방향으로 가장 많은 변위가 발생하며, 중앙부 재하시 100kN에서 좌 0.0113㎜, 우 0.0189㎜, 편측 재하시 좌 0.0041㎜, 우 0.0336㎜ 발생함을 확인하였으며 하중재하에 따른 변형량이 매우 작은 것을 확인하였다.



- 중앙부 재하 -



- 편측 재하 -

표 28. 중앙부 하중 재하에 대한 변형량검토 결과

하중 (kN)	L1 변위(mm)			R1 변위(mm)			비고
	X	Y	Z	X	Y	Z	
15.30	0.000000	0.002894	-0.000123	0.000006	0.009456	-0.000403	
19.80	-0.000001	0.018924	-0.000807	0.000008	0.011357	-0.000484	
30.00	0.000000	0.003741	-0.000159	0.000005	0.007567	-0.000323	
40.00	-0.000001	0.017023	-0.000726	0.000009	0.013246	-0.000565	X: 하중가력 직각방향
50.00	0.000000	0.005678	-0.000242	0.000004	0.005679	-0.000242	Y: 하중가력방향
60.00	-0.000001	0.015134	-0.000645	0.000010	0.015135	-0.000645	Z: 중력방향
70.00	0.000000	0.007567	-0.000323	0.000003	0.003741	-0.000159	
80.00	-0.000001	0.013245	-0.000565	0.000012	0.017024	-0.000726	
90.00	-0.000001	0.009456	-0.000403	0.000002	0.002894	-0.000123	
100.00	**-0.000001**	**0.011357**	**-0.000484**	**0.000013**	**0.018925**	**-0.000807**	

표 29. 편측 하중 재하에 대한 변형량검토 결과

하중 (kN)	L1 변위(mm)			R1 변위(mm)			비고
	X	Y	Z	X	Y	Z	
15.30	-0.000750	0.000636	-0.000029	-0.00075	0.00515	-0.00022	
19.80	-0.000969	0.000822	-0.000038	-0.00097	0.00666	-0.00028	
30.00	-0.001471	0.001248	-0.000057	-0.00147	0.01011	-0.00043	
40.00	-0.001961	0.001663	-0.000076	-0.00196	0.01347	-0.00057	X: 하중가력 직각방향
50.00	-0.002450	0.002079	-0.000095	-0.00245	0.01683	-0.00071	Y: 하중가력방향
60.00	-0.002943	0.002497	-0.000114	-0.00295	0.02022	-0.00085	Z: 중력방향
70.00	-0.003432	0.002912	-0.000133	-0.00343	0.02358	-0.00100	
80.00	-0.003922	0.003327	-0.000152	-0.00392	0.02694	-0.00114	
90.00	-0.004411	0.003742	-0.000171	-0.00441	0.03030	-0.00128	
100.00	**-0.004903**	**0.004160**	**-0.000190**	**-0.00491**	**0.03369**	**-0.00142**	

- 게이지 부착 위치

게이지는 다음 그림과 같이 변위량을 측정 할 수 있는 LVDT (Linear Variable Differential Transformer 선형변위 센서)를 변형량을 검토한 위치에 부착하였다. 그리고 변형을 측정할 수 있는 Strain gauge를 부착하였다. 주지주에는 수직방향으로 변형이 발생하므로 수직방향으로 Strain gauge를 부착하고, 방음판은 수직방향은 고정단으로 되어 있으므로 수평 방향으로 Strain gauge를 부착하였다.

구조해석 시, 편측하중의 위치는 오른쪽 상단이었으나 시험실에서 하중재하 장치의 위치상 오른쪽 상단이 어려워 왼쪽 상단으로 변경하였으며 이에 따라 게이지 위치도 재 결정하였다. 최종 게이지 설치 위치는 다음 그림과 같다.

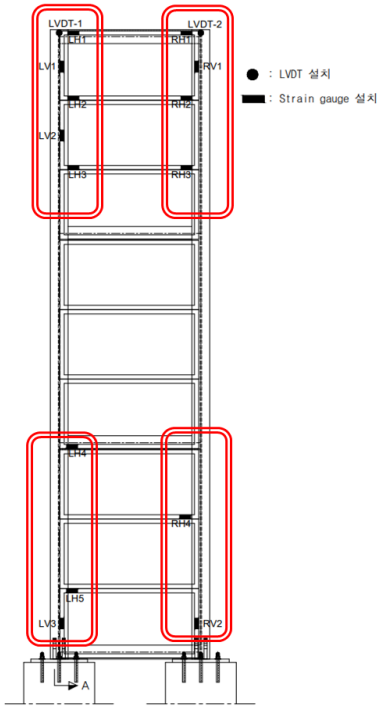


그림 105. 게이지 부착 위치

② 방음벽 시작품 제작 및 실험 계획

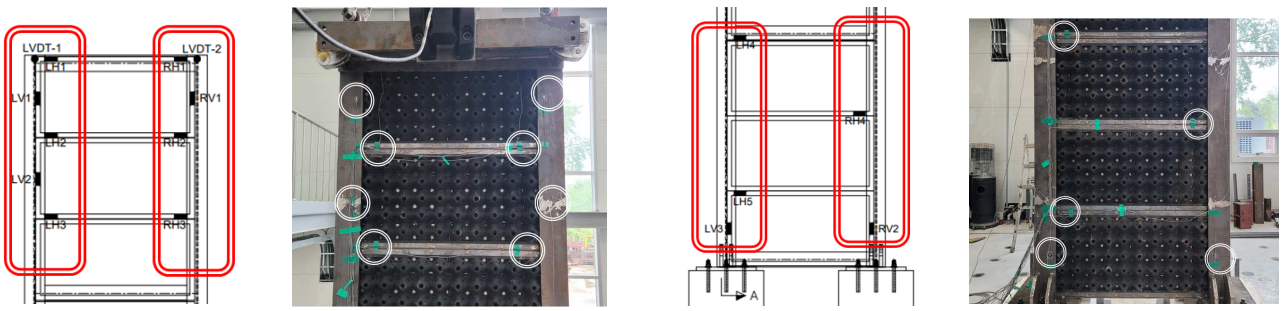
- 방음벽 설계 및 해설 결과에 따라 방음벽 시작품을 제작하고 다음과 같이 시험을 준비하였다. 앞서 설명한 바와 같이 해석 시, 편측하중의 재하위치는 오른쪽 상단이었으나 시험실에서 하중재하 장치의 위치상 오른쪽 상단이 어려워 왼쪽 상단으로 변경하였으며 이에 따라 게이지 위치도 다시 결정된 위치에 부착하였다.



(중앙부 하중 재하)



(편측 하중 재하)



(방음벽 상단 게이지 부착) (방음벽 하단 게이지 부착)

그림 106. 시작품 제작 및 시험 준비

③ 실험 방법 및 결과

– 실험은 중앙부 하중재하, 편측 하중재하 2번 수행하고자 한다. 이때에 중앙부에는 실험하중까지만 재하하여 변형량을 측정하고, 하중재하 위치를 좌측으로 이동하여는 100kN까지 재하하여 방음벽의 변형량을 측정하고자 한다.

▪ **중앙부 하중 재하**

하중은 고속도로 건설재료 품질기준(2014), 도로공사 시방서(2016) 에 따라 내하중 1호 하중을 적용하여 아래와 같은 과정에 따라 산출된 실험하중 20kN을 재하 하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

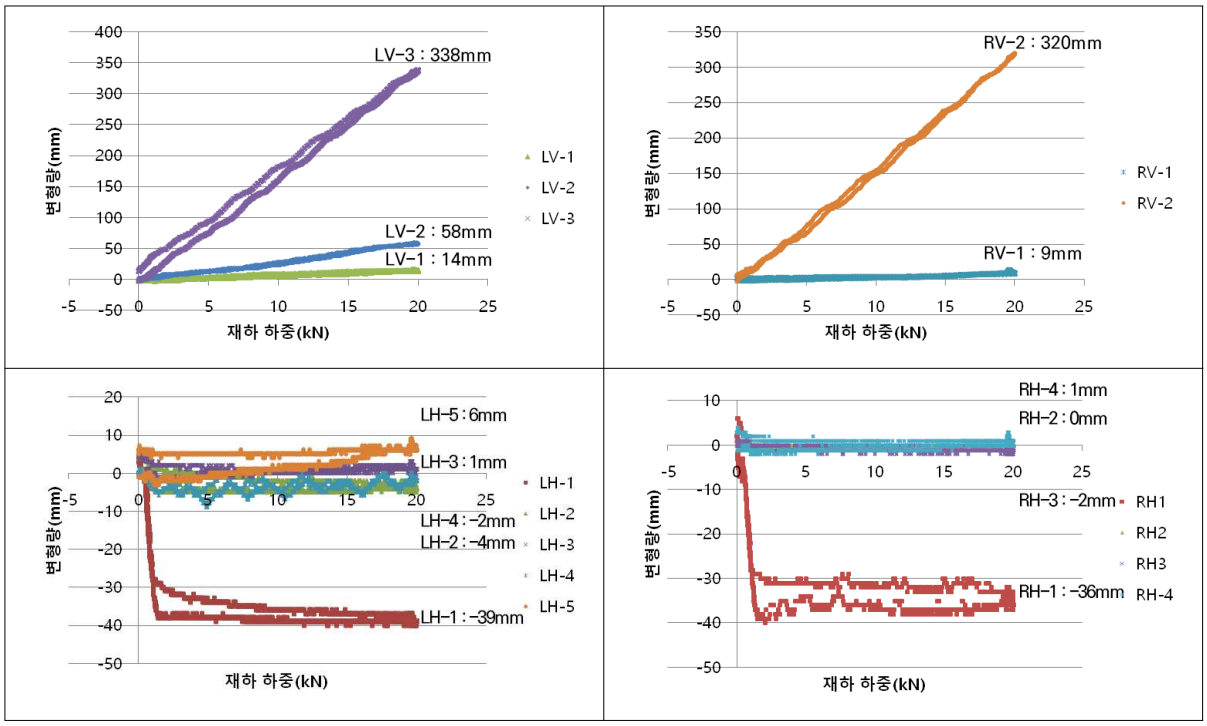
· 기준에 따른 설계하중 : 3.4 kN/㎡ · 방음벽 규격 : 4.5×1.0 (㎡)

· 기준에 따른 실험하중 : 4.4 kN/㎡

· **실험하중(kN)** : 기준에 따른 실험하중 × (방음벽 규격) = 4.4(kN/㎡) × (4.5×1.0(㎡)) = **19.80kN**

표 30. 중앙부 하중 재하 시험 결과

지정 하중(kN)	LVDT-1	LVDT-2	Strainguage													
			좌측								우측					
			LV-1	LV-2	LV-3	LH-1	LH-2	LH-3	LH-4	LH-5	RV-1	RV-2	RH-1	RH-2	RH-3	RH-4
20	28.43	28.33	14	58	338	-39	-4	1	-2	6	9	320	-36	0	-2	1



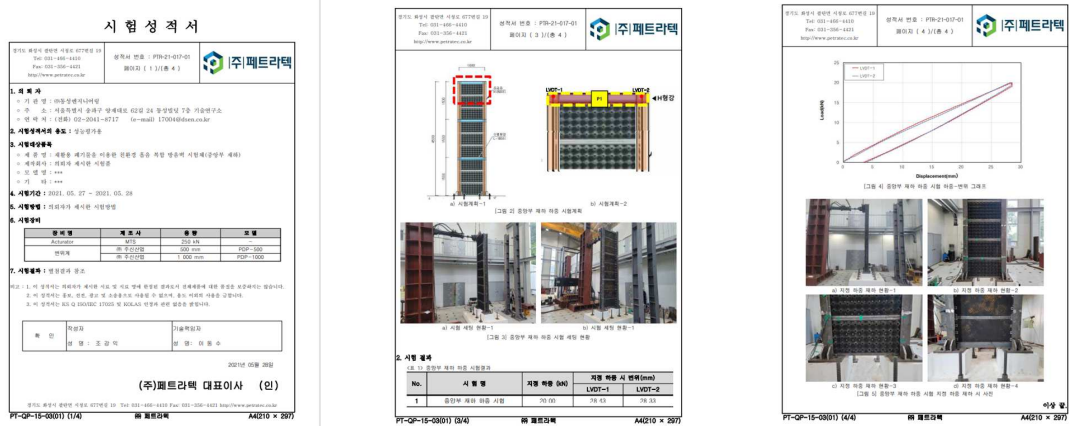


그림 107. 시험 성적서

- 시험결과, 방음벽의 LVDT 1, 2에 의해 측정된 변위량은 약 28㎜로 구조해석에 의한 예측 결과보다 변위가 많이 발생하였으나 방음벽에 파손은 발견되지 않았다.

▪ **편측 하중 재하**

하중은 100kN을 재하하여 결과를 살펴보려 하였으나 편측하중 재하에 따라 비틀림 발생하면서 16.64kN에서 다음과 같이 기초 파손이 발생하였다.



(좌측 기초 파손 현황)



(우측 기초 파손 현황)

그림 108. 실험 후 방음벽

- 파손의 형상을 분석한 결과, 방음벽과 기초를 연결하는 볼트가 뽑힘으로 인한 파손으로 사료된다.

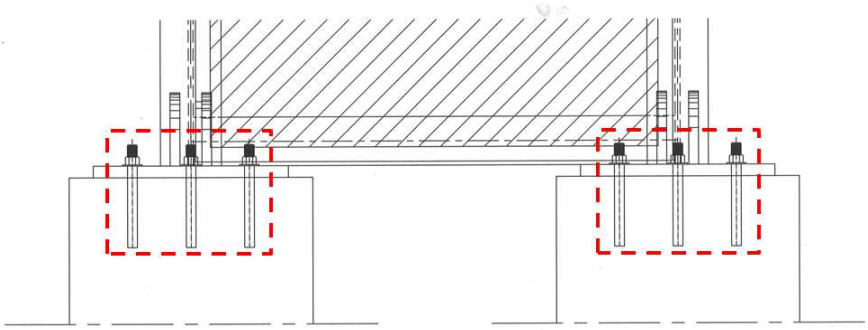


그림 109. 방음벽 기초의 파손된 볼트 예상도

- 파손이 발생한 하중은 고속도로 건설재료 품질기준(2014), 도로공사 시방서(2016) 에 따라 내하중 1호 하중을 적용하여 아래와 같은 과정에 따라 산출된 설계하중인 15.30kN보다 큰 16.64kN에서 파손이 발생하였다.

· 기준에 따른 설계하중 : 3.4 kN/㎡ · 방음벽 규격 : 4.5×1.0 (㎡)
· **설계하중(kN)** : 기준에 따른 설계하중 × (방음벽 규격) = 3.4(kN/㎡) × (4.5×1.0(㎡)) = **15.30kN**

- 하중은 지주에 집중하중을 가하여 일반적인 자연환경보다 극한 상황으로 기초의 볼트 탈락으로 실험하고자 하였던 100kN까지의 하중에 대한 실험을 불가하였다. 그러나 본 구조성능 시험의 주목적은 주지주에 발생하는 집중하중에 의해 생기는 방음판의 비틀림 및 변형 확인하는 것으로 하중 재하로 인한 지주의 변형은 발생하였으나 방음판의 파손, 비틀림, 탈락 등 훼손은 없었으므로 방음판의 구조적 안정성을 확보하였다고 판단된다.

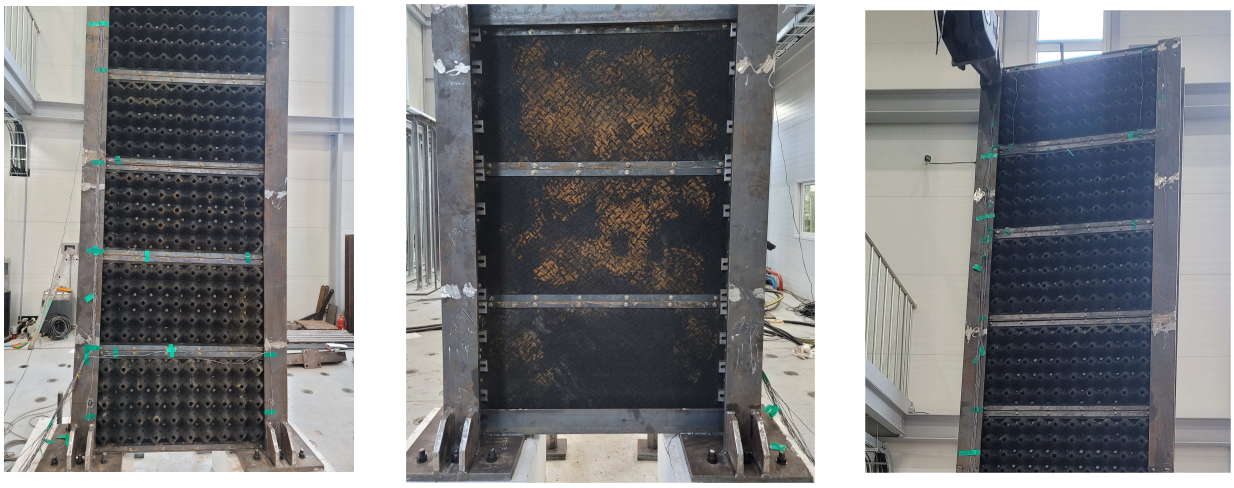


그림 110. 실험 후 방음판 파손 여부 확인

표 31. 편측 하중 재하 시험 결과

지정 하중(kN)	LVDT-1	LVDT-2	Strainguage													
			좌측								우측					
			LV-1	LV-2	LV-3	LH-1	LH-2	LH-3	LH-4	LH-5	RV-1	RV-2	RH-1	RH-2	RH-3	RH-4
16.64	270	49	173	59	348	-70	43	61	54	-69	-26	270	73	-44	-79	-49

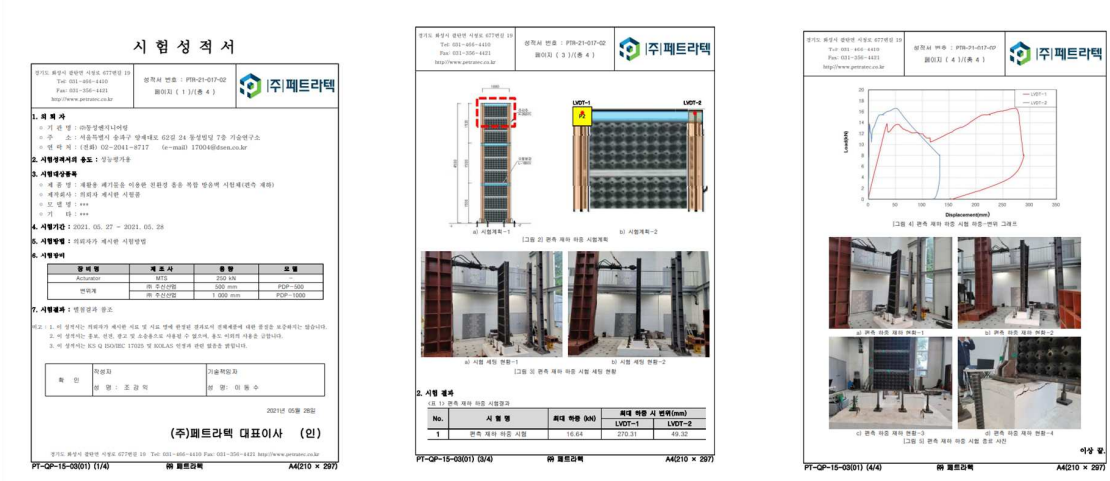


그림 111. 시험 성적서

(3) 실용화 및 사업화

○ 경제성 분석

① 제작 공정 단순화로 제작비용 절감

- 흡음 및 차음 성능을 높이기 위한 첫 번째 과정이 재료 선정이다. 기존기술은 흡음재와 차음재에서 사용되는 재료가 다르며, 흡음재는 공극이 높은 락울, 글라스울 등으로 제작되고 차음재는 밀도가 높은 암석, 석고보드 등을 이용해서 방음 성능을 높이고 있다.
- 신청기술은 흡음재와 차음재 재료로 폐타이어를 사용하기 때문에 기존기술보다 8.3% 가량의 재료비 절감이 가능하고 재료를 배합하여 프레스기로 사출하는데까지 1시간이면 제조할 수 있는 장점을 가지고 있다.
- 제조비를 포함한 기술의 설치비를 산출하면 약 4.17%를 절감할 수 있다. 신청기술은 폐타이어를 재료로 활용하는 이점이 있기는 하나, 4단 구조의 흡차음형 방음판을 제조해야 하기 때문에 기존기술에는 없는 제조공정이 추가되어 월등한 차이를 보이지는 않는다.

표 32.기존기술과 신청기술의 경제성 비교

구 분		기존기술	신청기술	비 율
재료비	직접재료비	3,860,423	3,660,423	94.82%
	간접재료비			
	소 계	3,860,423	3,660,423	94.82%
노무비	직접노무비	640,238	640,238	100.00%
	간접노무비	83,230	83,230	100.00%
	소 계	723,468	723,468	100.00%
경 비	산출경비	35,789	35,789	100.00%
	산재보험료	26,768	26,768	100.00%
	고용보험료	7,307	7,307	100.00%
	건강보험료	21,960	21,960	100.00%
	연금보험료	28,810	28,810	100.00%
	노인장기요양보험료	2,529	2,529	100.00%
	산업안전보건관리비	131,869	126,009	95.56%
	환경보전비	13,609	13,009	95.59%
	기타 경비	265,865	254,265	95.64%
	소 계	534,506	516,446	96.62%
순공사원가		5,118,397	4,900,337	95.74%
일반관리비(6%)		307,103	294,020	95.74%
이윤(15%)		234,761	230,090	98.01%
총원가		5,660,261	5,424,447	95.83%
부가가치세		566,026	542,444	95.83%
합계		6,226,287	5,966,891	95.83%
단위당(㎡)		622,628	596,689	95.83%

※ 출처 : 원가계산서

② 방음터널 공기 단축을 통한 공사비 절감

- 기존기술은 기초 앵커볼트 설치부터 시작하여 지주 및 트러스 빔 제작 과정을 다시 거쳐 현장으로 운반 및 시공하기에 시공이 복잡하고 장기간이 소요되며, 공사기간이 늘어나고, 방음벽 해체 및 폐기물 처리에 대한 추가비용이 소요되기 때문에 공사비용이 증가한다.
- 신청기술은 방음벽 해체 없이 간단한 추가 공정만으로 방음터널로 상호호환이 가능하며 이를 전산해석을 통해 검증하였다. 따라서 해당 방음벽이 설치된 구간에 방음터널을 설치하는 공사가 진행된다면 공사비를 절감할 수 있다.

○ 시장성 분석

- 본 연구에서는 국내·외 방음벽의 현황 및 시장전망에 대하여 검토하고, 폐타이어의 재활용 현황을 검토하여, 시장동향에 대한 분석을 수행하였다.

① 방음벽 현황

- 도로에서 발생하는 교통 소음 저감을 위한 방음시설은 80년대 말부터 본격적으로 설치하기 시작하였으며 주거지역과 고속도로를 중점적으로 설치되었다.
  2018년 소음·진동민원은 139,517건으로 환경관련민원 전체의 50.1 %를 차지하여 환경민원의 절반이상을 차지하고 있으며, 국민 생활수준 향상과 정온한 생활환경에 대한 기대수준 증가 등으로 전체 민원건수는 최근 5년간 55.3% 증가하였다. 최근 녹색성장과 더불어 친환경적인 도로건설에 부합하는 방음벽의 수요가 증가할 것으로 보인다. 2018년까지 설치된 방음벽 연장은 5,597개소로 총 연장은 1,721km이며, 18년도에 신규 및 교체된 방음벽은 91개소로 약 898억의 예산이 투입되었다. 또한, 19년도에 55개소 16.698km에 999억7800만원을 투자하여 방음벽 설치 및 유지보수를 진행하였다.

표 33. 국내 방음벽 시장 전망

구분	2017년 까지	2018년 신규	2018년 교체	2019년 신규 및 교체
개소	5,521	76	15	55
길이 (km)	1,700.5	20.315	3.361	16.698
소요액 (백만원)	1,884,476	87,686	2,104	99,978

<출처 : 환경부 - 소음진동 관리시책 시·도별 추진실적(2019)>

② 폐타이어 재활용 현황

- 현재 국내 자동차 보유대수가 급증하여 전국 1,200만 대를 넘어서 자동차 산업이 지속적으로 발전하고 있다. 이에 따라 폐타이어 발생량이 증가세를 보이고 있으며, 2020년에는 총 379,360톤이 발생하였는데 그 중 타이어 교체 시 발생하는 폐타이어가 74.7% 이상 차지한다.

표 34. 연도별 폐타이어 발생량

구분		2017	2018	2019	2020
타이어 교체시	중량(ton)	310,964	297,785	281,876	283,465
	구성비(%)	78.5	77.9	73.4	74.7
자동차 폐차시	중량(ton)	85,073	84,312	102,287	95,895
	구성비(%)	21.5	22.1	26.6	25.3
합계	중량(ton)	396,037	382,097	384,163	379,360
	구성비(%)	100.0	100.0	100.0	100.0

※ 1) 자동차 폐차시 발생량은 연간 폐차대수에 장착된 타이어 수량을 곱하여 산출
2) 총 발생량 = 출고수입량 × 0.85(폐타이어 감모율)
※ 출처 : 대한타이어산업협회(2021)

- 폐타이어 속에는 약 10~20%의 철심이 포함되어 타이어의 강도를 높이기 위해 보강재로 사용되고 있으며, 폐타이어 종류에 따라 포함비율이 다르다. 일반적으로 트럭·버스용 타이어에는 20%의 철심이 포함되어 있으며, 경트럭·승용차용 폐타이어에는 10%의 철심이 포함되어 있다. 폐타이어의 주요 재활용 공정 중 하나인 파쇄 과정을 통해 철심이 분리되며 분리된 철심은 제강회사에서 재활용 되고 있다.
- 승용차·경트럭용 타이어의 천연 고무의 비율은 20%인데 트럭·버스용 타이어의 경우 천연 고무의 비율이 40%로 승용차·경트럭용 타이어에 비해 고무 함량이 높고 타이어 코드지의 포함 비율이 낮아 물적 재

활용에 적합하다.

- 2020년 기준 폐타이어는 열 이용 분야의 철심 분리과정이 필요하지 않은 시멘트킬른에 약 37.4 %로 가장 많이 재활용되고 있으며 그 다음은 고형연료제품 제조(24.1 %), 고무분말(18.2 %) 순으로 재활용되고 있으나, 기존의 재활용 방안이 아닌 고부가 가치 생산과 폐타이어 재활용 시장 활성화을 위한 재활용 방안이 필요한 시점이다.

표 35. 이용방법별 폐타이어 재활용량

구분		2017		2018		2019		2020	
		중량	구성비	중량	구성비	중량	구성비	중량	구성비
가공	고무분말	82,069	20.7	86,230	22.6	73,687	19.2	69,203	18.2
	밧줄 등	5,831	1.5	3,369	0.9	1,619	0.4	613	0.2
	소계	87,900	22.2	89,599	23.4	75,306	19.6	69,816	18.4
열이용	시멘트킬른	128,306	32.4	146,459	38.3	157,373	41.0	141,695	37.4
	고형연료제품	73,838	18.6	77,795	20.4	71,615	18.6	91,414	24.1
	소계	202,144	51.0	224,254	58.7	228,988	59.6	233,109	61.4
수출		8,501	2.1	7,835	2.1	6,789	1.8	5,966	1.6
합계		298,545	75.4	321,689	84.2	311,083	81.0	308,891	81.4

<출처: 대한타이어산업협회(2021)>

③ 국내·외 방음벽 시장규모

- 중소기업청 비즈니스지원단에서 조사한 해외 방음벽 시장의 평균 증가율 11.6 %를 적용해 예상하면, 2015년에는 순수 방음벽 시장 규모가 약 310억 달러, 2020년에는 537억 달러로 계속하여 증가할 것으로 전망된다.
- 국내 방음벽 시장규모 또한 연평균 증가율 11.6 % 적용(세계시장의 1.0 %로 반영하여 예측), 15년 규모는 약 3,144억 원, 20년에는 5,443억 원 수준으로 해외 규모 상승 추이와 비슷한 것으로 나타나 도로 주변 주거지역을 포함한 도심지가 활발히 확장하고 있어 방음벽 관련 산업의 수요가 계속하여 증가할 것으로 판단된다.

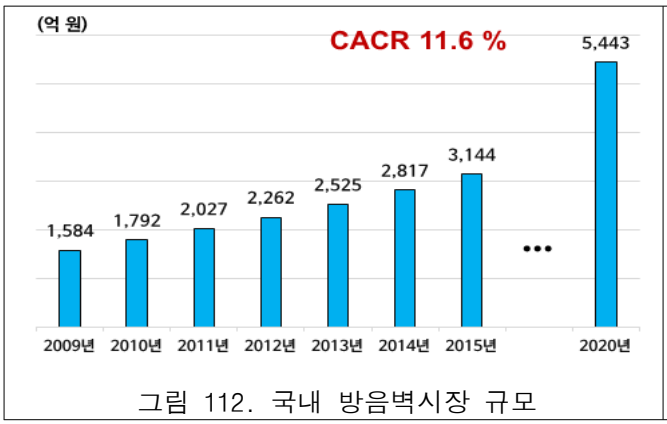


그림 112. 국내 방음벽시장 규모

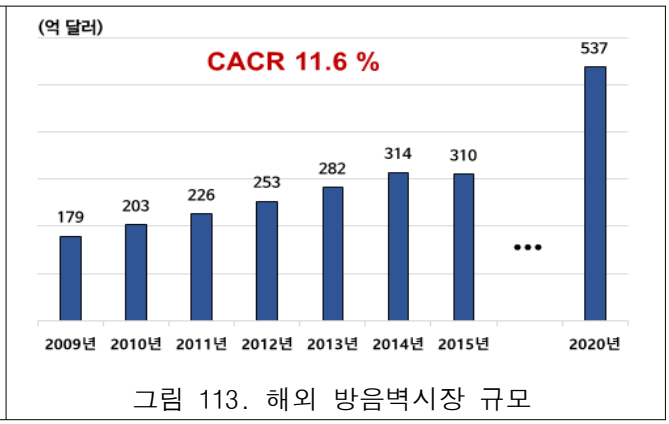


그림 113. 해외 방음벽시장 규모

- 본 연구에서 개발하고자 하는 방음벽은 폐타이어를 이용한 방음판 개발과 주변 환경에 따라 방음터널로 상호 호환이 가능하여 도로 주변 소음으로 인한 민원발생에 적극적 대응이 가능한 친환경 흡차음형 방음벽 기술로 국민에게 쾌적한 생활환경 제공이 가능할 것으로 기대된다. 방음벽 설치 후, 필요에 따라 방음벽을 철거하고 새로 방음터널을 시공하는 것이 아닌 간단한 추가공정을 통해 방음터널로 확대 적용 가능한 기술로 방음벽 기술력 발전을 이끌어갈 수 있을 것으로 기대되며, 선진기술 선점과 미래 경쟁력 향상을 통해 새로운 글로벌 시장 수출 가능성 또한 기대된다.

○ 원가분석

- 본 기술에 대한 원가분석을 수행하였다. 본 연구개발 방음벽과 흡음형 방음벽을 비교분석하였으며 분석 결과 기존 기술 대비 95.8%로 금액이 약 4.2%의 경제적 절감효과가 있다. 단순 비용적인 절감효과는 다소 작다고 볼 수 있으나 본 연구개발 방음벽을 적용함으로써 발생되는 환경적 기대효과와 사회적 기대효과를 고려한다면 이에 대한 경제성은 훨씬 크다고 판단된다. 이에대한 원가계산서는 부록에 별도 첨부하였다.

건설신기술 지정 신청용

원 가 계 산 서

폐타이어를 이용한 친환경 흡차음 방음벽

신청인 : ㈜동성엔지니어링
주식회사 상보

2021. 10.

조사기관 : 사단법인 한국기업연구원

원 가 계 산 서 비 교 표

< 표 1 >　　건명 : 폐타이어를 이용한 친환경 흡차음 방음벽　　단위:원

구분 / 비목		폐타이어를 이용한 친환경 흡차음 방음벽	흡음형 방음벽	산출근거 (조달청 제비율표 2021년 참조)
		시방서참조	시방서참조	
재료비	직접재료비	3,660,423	3,860,423	< 표 4-1 >참조
	간접재료비			
	소계	3,660,423	3,860,423	
노무비	직접노무비	640,238	640,238	< 표 4-1 >참조
	간접노무비	83,230	83,230	직접노무비×13%
	소계	723,468	723,468	
경비	산출경비	35,789	35,789	< 표 4-1 >참조
	산재보험료	26,768	26,768	노무비×3.7%
	고용보험료	7,307	7,307	노무비×1.01%
	건강보험료	21,960	21,960	직접노무비×3.43%
	연금보험료	28,810	28,810	직접노무비×4.5%
	노인장기요양보험료	2,529	2,529	건강보험료×11.52%
	산업안전보건관리비	126,009	131,869	(재료비+직노)×2.93%
	환경보전비	13,009	13,609	(재료+직노+산경)×0.3%
	기타경비	254,265	265,865	(재료비+노무비)×5.8%
	소계	516,446	534,506	
순공사원가		4,900,337	5,118,397	재료비+노무비+경비
일반관리비(6%)		294,020	307,103	순공사원가×6%
이윤(15%)		230,090	234,761	(노무비+경비+일,관)×15%
총원가		5,424,447	5,660,261	순공사원가+일반관리비+이윤
부가가치세		542,444	566,026	총원가×10%
합계		5,966,891	6,226,287	총원가+부가가치세
단위당(㎡)		596,689	622,628	
신청기술대비(%)		95.83%	100.00%	

주) 금액 : 부가가치세 포함 금액임.

*** 2021.7.1 발표 조달청 건축산업환경설비공사 제비율 적용기준 참고(건축, 50억미만, 6개월이하)

*** 제비율은 기준비율을 적용하였으며 계약조건에 따라 변경될수 있음.

○ **현장적용 및 시험**

- 본 연구에서는 개발한 방음판을 적용하여 자체 테스트 베드를 구축하고, 공인인증 시험 기관에서 소음 측정을 통해 본 연구개발 방음벽의 성능을 평가하였다. 실제 시공 현장에 방음벽을 적용 하고자 시공사와 기술실시계약을 맺고 신규 방음벽 적용 및 유지보수 현장 등 적극적으로 물색 하였으나, 현장을 확보하기가 어려워, 자체 방음벽을 시공하고, 흡음형 방음판, 차음형 방음판, 본 연구개발 방음판을 시공하고 소음저감효과에 대하여 상대평가를 통해 비교하였으며, 시험결과 연구개발 방음판이 가장 우수한 소음저감 효과가 있음을 확인하였다.

- 시험 기준 : 소음·진동 공정시험기준 (ES 03301.1c 환경기준 중 소음측정방법)
- 현장 환경 : 2022년 1월 18일 (날씨 : 맑음, 온도: -1 ℃, 평균풍속: 0.5m/s),
- 현장 주소 : 경상남도 함안군 법수면 법수로 516
- 현장 총 면적 : 6,466㎡
- 방음벽 크기 : 높이 2.5m (기초 1m, 방음벽 1.5m) , 너비 6m
- 방음패널 종류 : 3종루 (연구개발 방음판, 차음형 방음판, 흡음형 방음판)

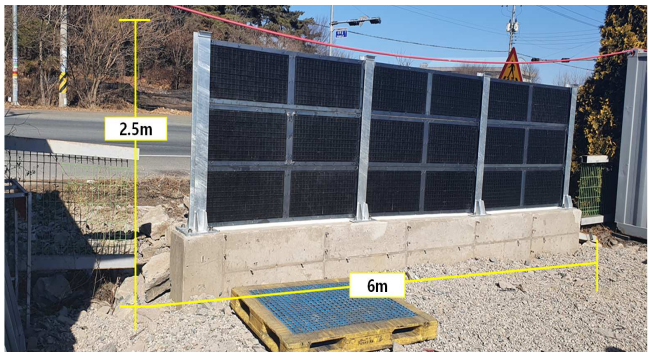


그림 114. 방음벽 설치 사진

표 36. 소음측정 결과

구분	소음계 1 : 방음벽 앞		소음계 2 : 방음벽 뒤		저감량 (①-③)
	① Leq	② Lmax	③ Leq	④ Lmax	
연구개발 방음판	92.7	94.2	74.9	77.1	17.8
차음형 방음판	92.3	94.2	75.4	77.3	16.9
흡음형 방음판	92.1	94.8	75.9	78.3	16.2

-연구개발 방음벽 시험 -





-차음형 방음판 시험 사진-



-흡음형 방음판 시험 사진-



○ **건설신기술 : 신청완료**

- 건설신기술 추진 절차에 따라 원활한 최종 등록될 수 있도록 하겠음.

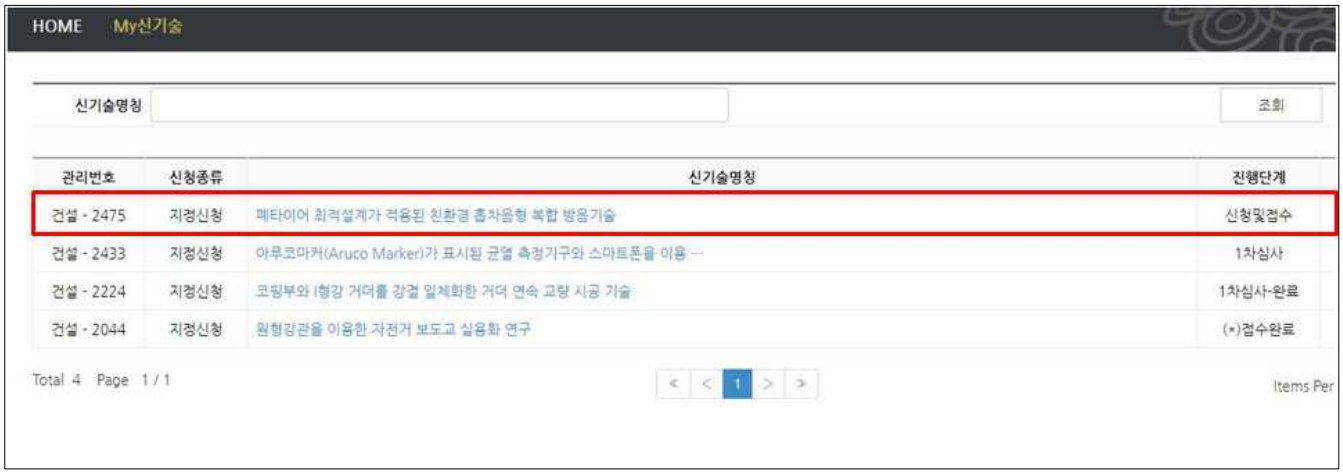


그림 115. 건설신기술 신청 현황(신청 및 접수완료)

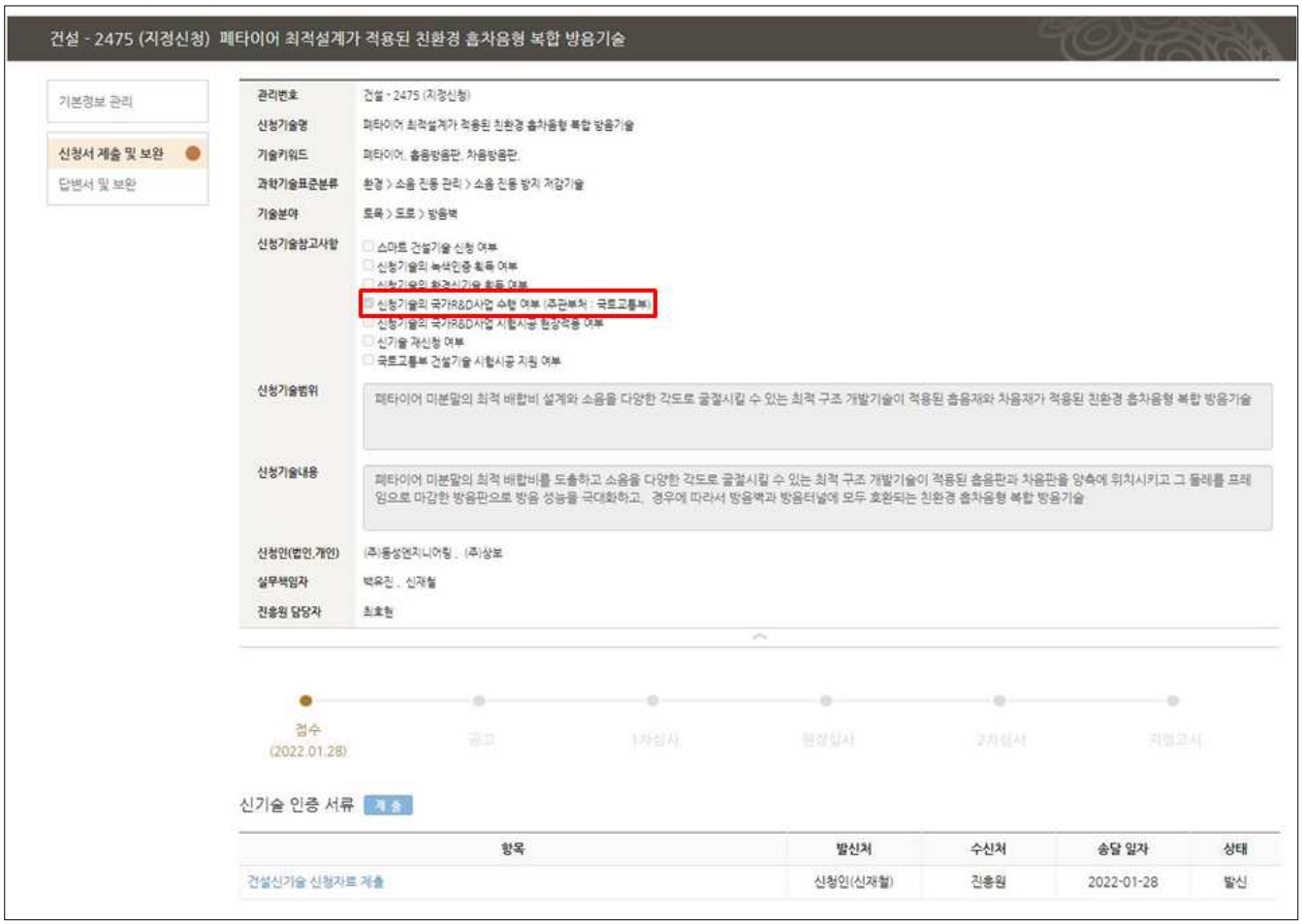
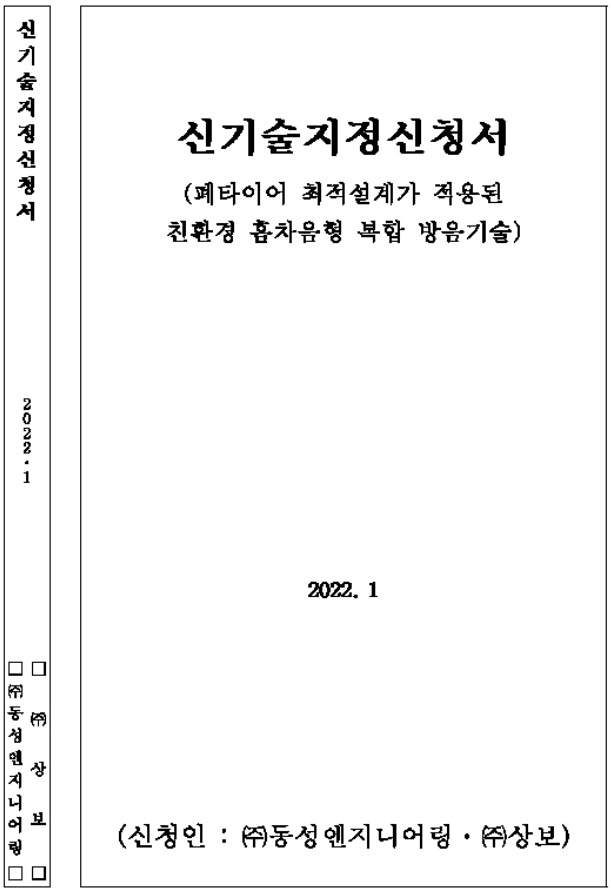


그림 116. 건설신기술 신청 시 과제정보 입력



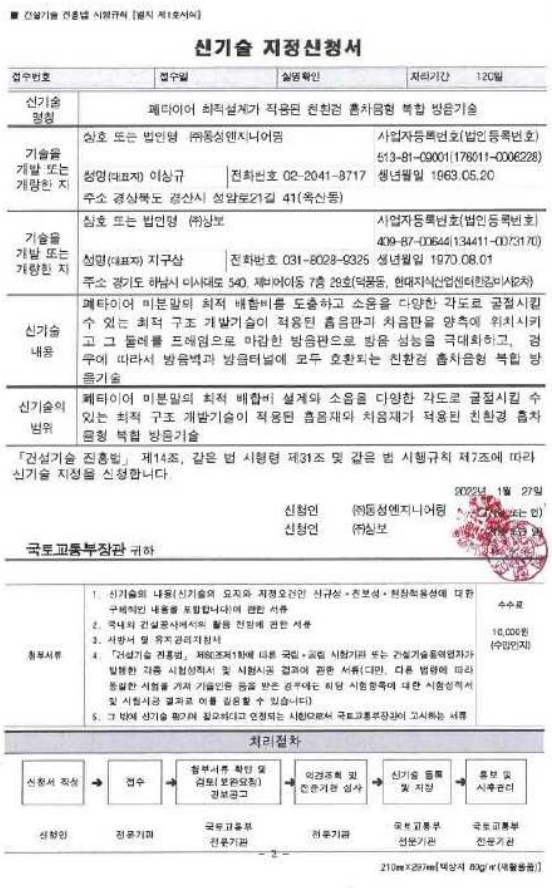


그림 117. 건설신기술 인증신청서

○ 환경 신기술 : 신청완료

- 환경신기술 추진 절차에 따라 원활한 최종 등록될 수 있도록 하겠음.



그림 118. 환경신기술 신청 현황(신청 및 접수완료)

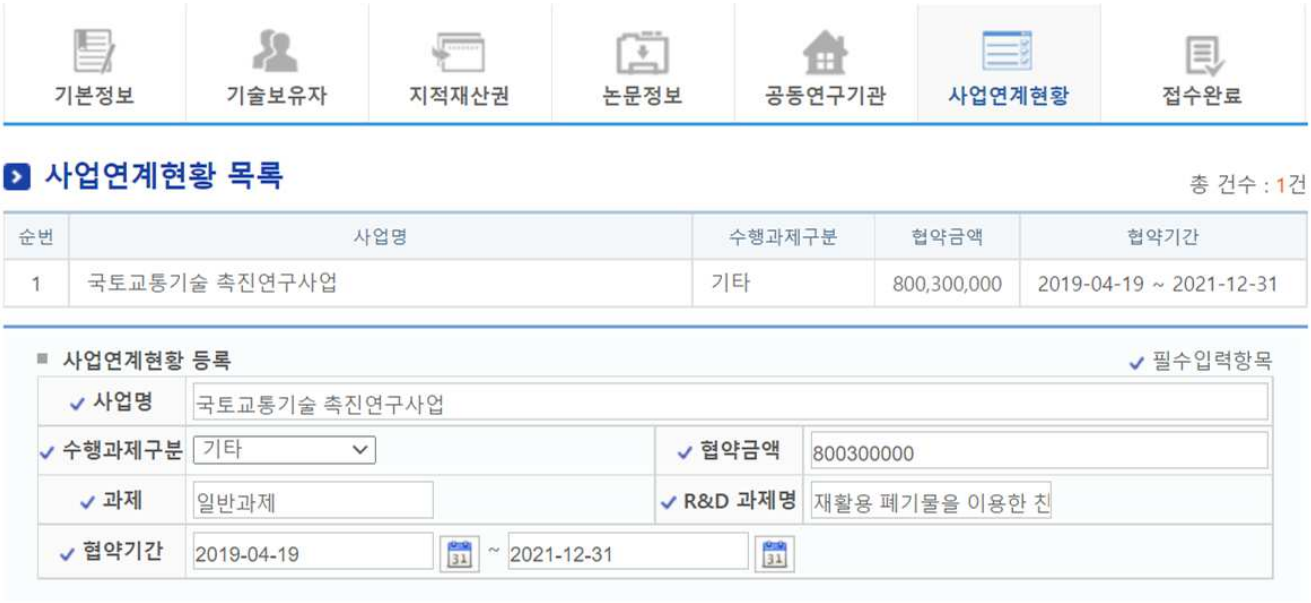
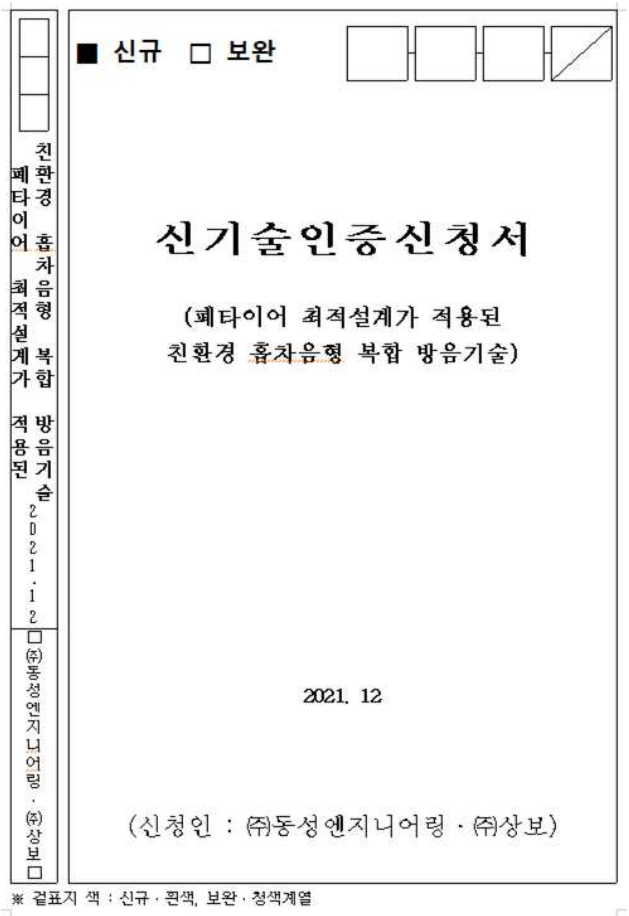


그림 119. 환경신기술 신청 시 과제정보 입력



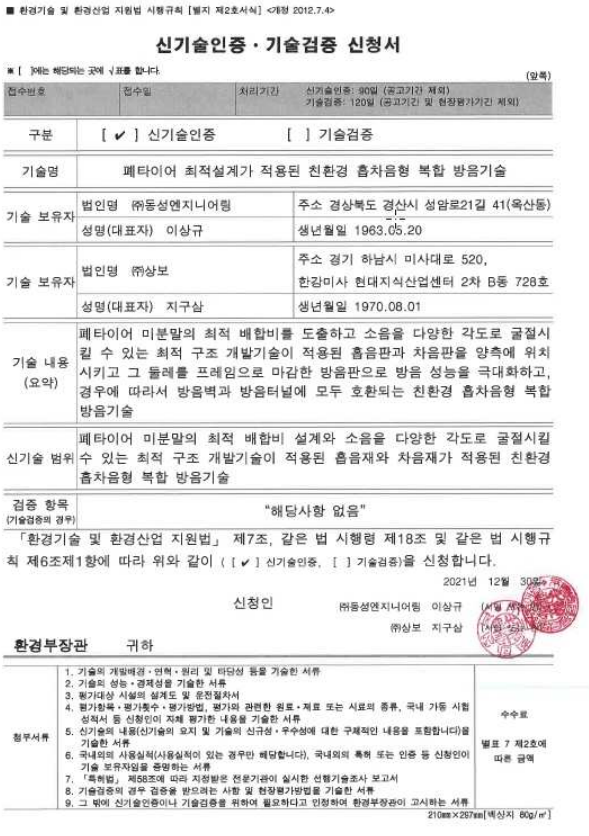
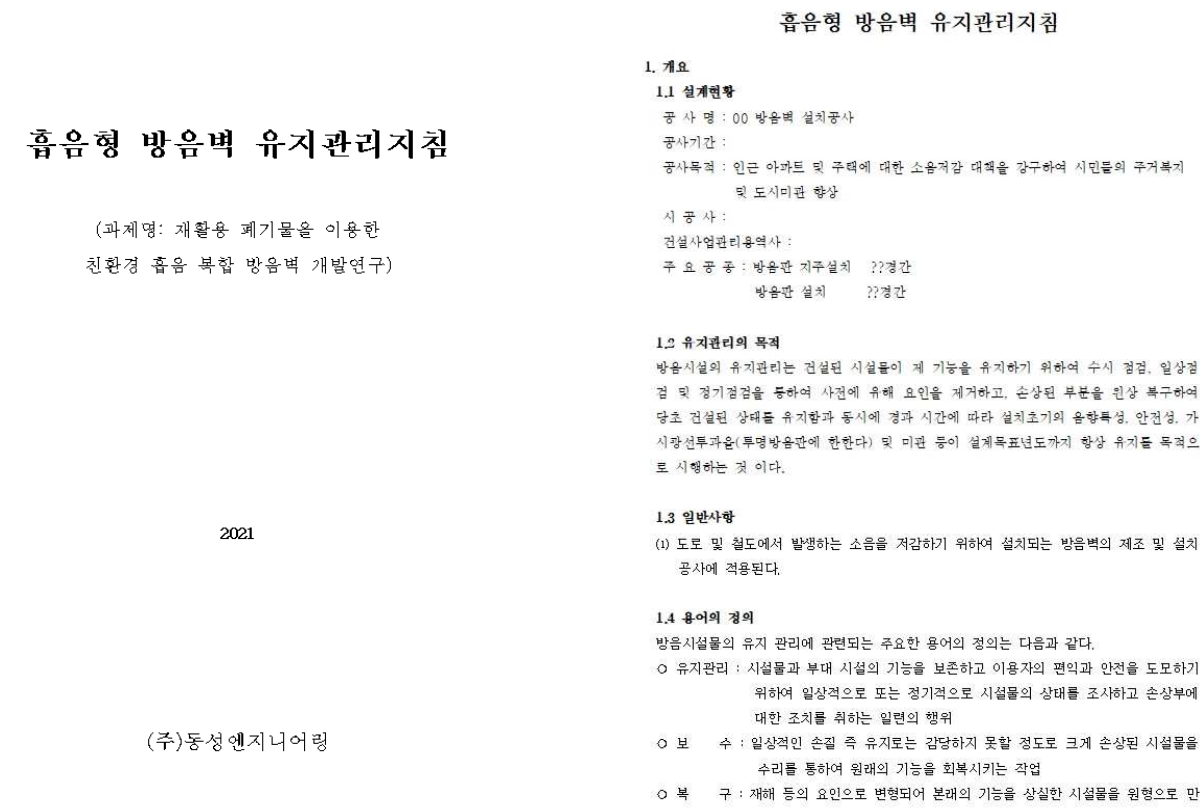


그림 120. 환경신기술 인증신청서

○ 시공 및 유지관리 가이드라인



흡음형 방음벽 유지관리지침

(과제명: 재활용 폐기물을 이용한
친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구)

2021

(주)동성엔지니어링

흡음형 방음벽 유지관리지침

1. 개요

1.1 설계현황

공 사 명 : 00 방음벽 설치공사
공사기간 :
공사목적 : 인근 아파트 및 주택에 대한 소음저감 대책을 강구하여 시민들의 주거복지 및 도시미관 향상
시 공 사 :
건설사업관리용역사 :
주 요 공 종 : 방음판 지주설치 ??경간
방음판 설치 ??경간

1.2 유지관리의 목적

방음시설의 유지관리는 건설된 시설물이 제 기능을 유지하기 위하여 수시 점검, 일상점검 및 정기점검을 통하여 사전에 유해 요인을 제거하고, 손상된 부분을 원상 복구하여 당초 건설된 상태를 유지함과 동시에 경과 시간에 따라 설치초기의 음향특성, 안전성, 가시광선투과율(투명방음판에 한한다) 및 미관 등이 설계목표년도까지 항상 유지를 목적으로 시행하는 것 이다.

1.3 일반사항

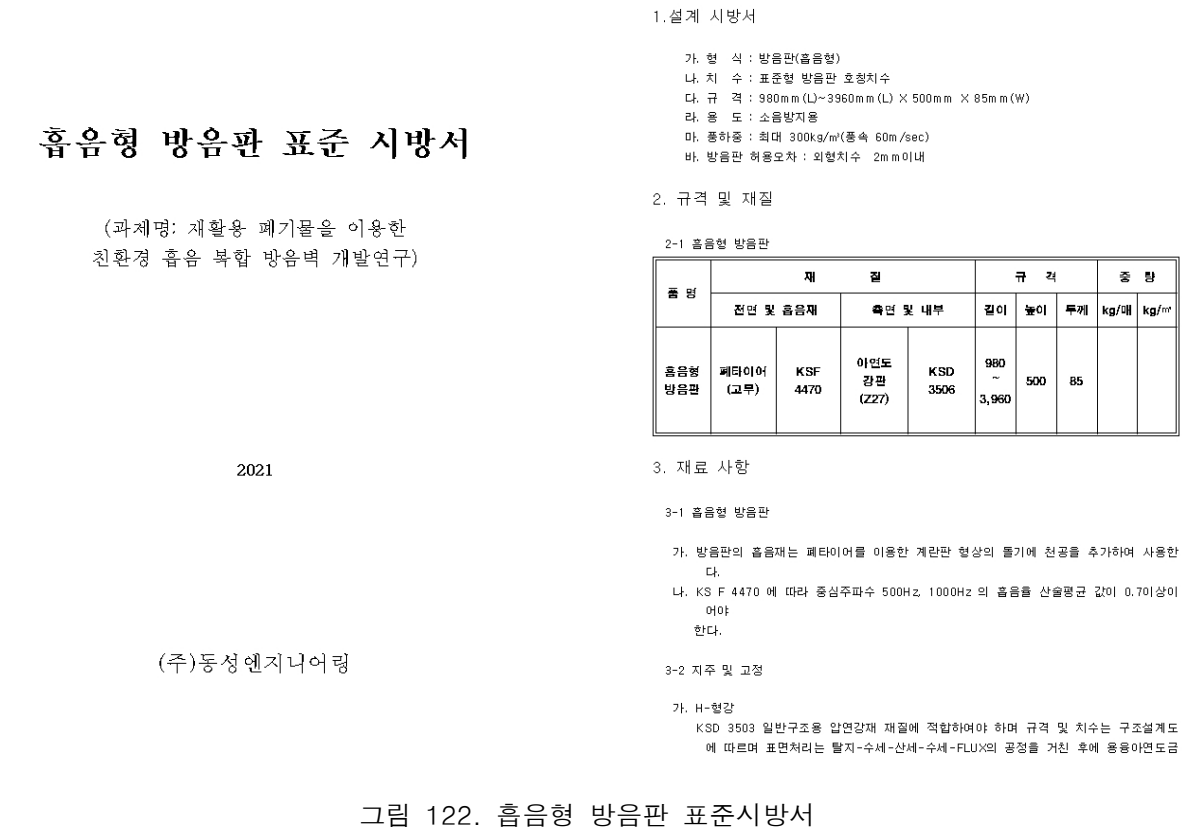
(1) 도로 및 철도에서 발생하는 소음을 저감하기 위하여 설치되는 방음벽의 제조 및 설치 공사에 적용된다.

1.4 용어의 정의

방음시설물의 유지 관리에 관련되는 주요한 용어의 정의는 다음과 같다.

○ 유지관리 : 시설물과 부대 시설의 기능을 보존하고 이용자의 편익과 안전을 도모하기 위하여 일상적으로 또는 정기적으로 시설물의 상태를 조사하고 손상부에 대한 조치를 취하는 일련의 행위
○ 보 수 : 일상적인 손질 즉 유지로는 감당하지 못할 정도로 크게 손상된 시설물을 수리를 통하여 원래의 기능을 회복시키는 작업
○ 복 구 : 재해 등의 요인으로 변형되어 본래의 기능을 상실한 시설물을 원형으로 만

그림 121. 흡음형 방음판 유지관리지침



흡음형 방음판 표준 시방서

(과제명: 재활용 폐기물을 이용한
친환경 흡음 복합 방음벽 개발연구)

2021

(주)동성엔지니어링

1.설계 시방서

가. 형 식 : 방음판(흡음형)
나. 치 수 : 표준형 방음판 호칭치수
다. 규 격 : 980mm(L)~3960mm(L) × 500mm × 85mm(W)
라. 용 도 : 소음방지용
마. 풍하중 : 최대 300kg/m²(풍속 60m/sec)
바. 방음판 허용오차 : 외형치수 2mm이내

2. 규격 및 재질

2-1 흡음형 방음판

품 명	재 질				규 격			중 량	
	전면 및 흡음재		측면 및 내부		길이	높이	두께	kg/매	kg/㎡
흡음형 방음판	폐타이어 (고무)	KSF 4470	아연도 강판 (Z27)	KSD 3506	980 ~ 3,960	500	85		

3. 재료 사항

3-1 흡음형 방음판

가. 방음판의 흡음재는 폐타이어를 이용한 계란판 형상의 돌기에 천공을 추가하여 사용한다.
나. KS F 4470 에 따라 중심주파수 500Hz, 1000Hz 의 흡음률 산술평균 값이 0.70이상이어야
한다.

3-2 지주 및 고정

가. H-형강
KSD 3503 일반구조용 압연강재 재질에 적합하여야 하며 규격 및 치수는 구조설계도에 따르며 표면처리는 탈지-수세-산세-수세-FLUX의 공정을 거친 후에 용융아연도금

그림 122. 흡음형 방음판 표준시방서

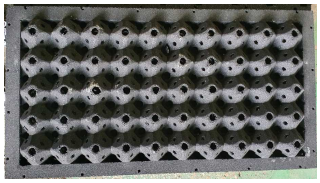
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 폐타이어를 이용하여 소음저감 효과가 우수한 흡차음형 방음판 개발

- 재료 개발 실험 (①입도분석 실험, ②관내법 실험, ③압축강도 실험, ④압축강도 실험 결과를 이용하여 포아송비/ 탄성계수 도출, ⑤연소시험)을 수행하고, 실험결과를 반영하여 흡음판과 차음판의 최적 배합비 도출
- 음향해석 시뮬레이션, 성능평가 실험을 통해 성능을 만족하는 방음판의 형상과 구조를 개발하였다. 개발된 방음판에 대한 유한요소 해석을 통해 구조적 안전성을 검토하였으며 실험 및 해석결과를 반영하여 다음 그림과 같이 최종 형상과 구조를 결정하였다.


흡음판

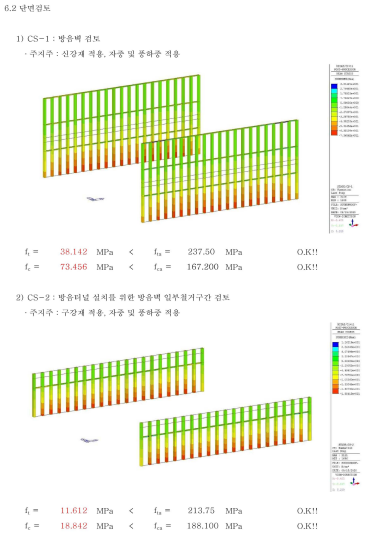

내부 격자형 흡음판


내부 강판


차음판

○ 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조를 개발하였다.

- 일반 방음벽 및 터널형 방음벽 호환가능 구조체의 시공 단계에 대한 개념설계 수행하고 방음판, 방음벽, 방음터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성을 평가하였다. 뿐만 아니라 방음터널 연결부(접속부)에 대한 상세검토를 수행하였으며 구조적 안전성을 확보함을 확인하였고, 구조성능시험 수행 (실대형 정적 재하시험)을 통해 검증하였다.

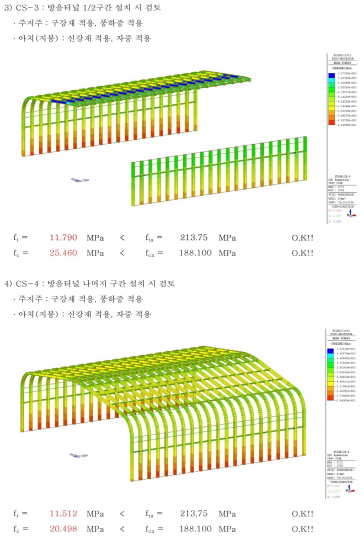

6.2 단면검토

1) CS-1 : 방음벽 검토
· 주지주 : 신강재 적용, 자중 및 풍하중 적용

f_t = 38.142 MPa < f_{ta} = 237.50 MPa O.K!!
f_c = 73.456 MPa < f_{ca} = 167.200 MPa O.K!!

2) CS-2 : 방음터널 설치를 위한 방음벽 일부철거구간 검토
· 주지주 : 구강재 적용, 자중 및 풍하중 적용

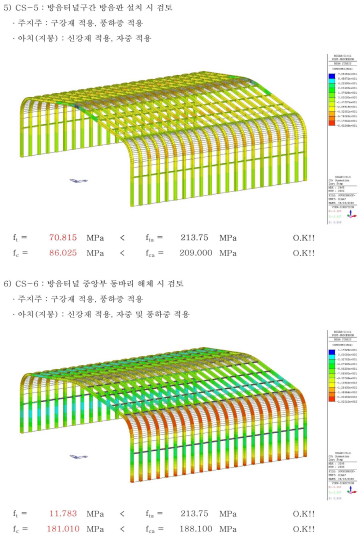
f_t = 11.612 MPa < f_{ta} = 213.75 MPa O.K!!
f_c = 18.842 MPa < f_{ca} = 188.100 MPa O.K!!


3) CS-3 : 방음터널 1/2구간 설치 시 검토
· 주지주 : 구강재 적용, 풍하중 적용
· 아치(지붕) : 신강재 적용, 자중 적용

f_t = 11.790 MPa < f_{ta} = 213.75 MPa O.K!!
f_c = 25.460 MPa < f_{ca} = 188.100 MPa O.K!!

4) CS-4 : 방음터널 나머지 구간 설치 시 검토
· 주지주 : 구강재 적용, 풍하중 적용
· 아치(지붕) : 신강재 적용, 자중 적용

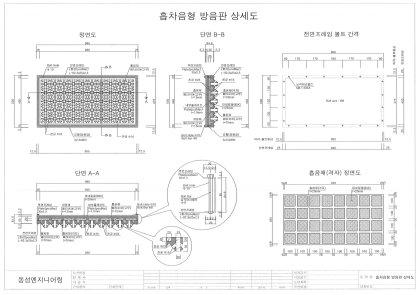
f_t = 11.512 MPa < f_{ta} = 213.75 MPa O.K!!
f_c = 20.498 MPa < f_{ca} = 188.100 MPa O.K!!

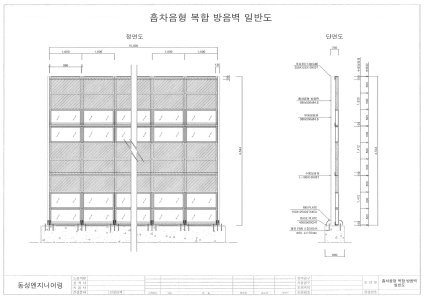

5) CS-5 : 방음터널구간 방음판 설치 시 검토
· 주지주 : 구강재 적용, 풍하중 적용
· 아치(지붕) : 신강재 적용, 자중 적용

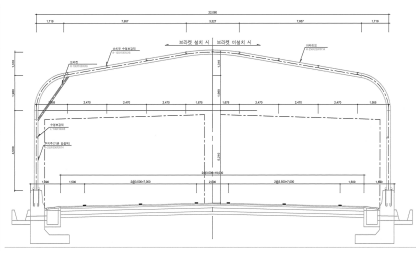
f_t = 70.815 MPa < f_{ta} = 213.75 MPa O.K!!
f_c = 86.025 MPa < f_{ca} = 209.000 MPa O.K!!

6) CS-6 : 방음터널 중앙부 통마리 해체 시 검토
· 주지주 : 구강재 적용, 풍하중 적용
· 아치(지붕) : 신강재 적용, 자중 및 풍하중 적용

f_t = 11.783 MPa < f_{ta} = 213.75 MPa O.K!!
f_c = 181.010 MPa < f_{ca} = 188.100 MPa O.K!!


흡차음형 방음판 상세도


흡차음형 복합 방음벽 일반도



(2) 정량적 연구개발성과

○ 본 연구의 정량적 연구개발 성과에 대한 목표와 달성은 다음과 같다.

내용	목표	달성	비고
SCI 논문	1건	-	투고완료(12.31)
비SCI 논문	1건	1건	100% 달성
학술발표	3건	4건	초과달성
특허출원	2건	2건	100% 달성
특허등록	1건	1건	100% 달성
환경신기술	1건	1건	100% 달성
건설신기술	1건	-	신청 예정
기술실시계약	1건	1건	100% 달성
시작품	3건	5건	초과달성 방음판 4건/방음벽 1건

- SCI 논문 : 대한토목학회 SCIE 투고 완료(21년 12월 31일)
  소음저감 효과가 우수한 방음판 개발을 위하여 연구비를 전용하여 추가적인 성능평가 시험을 수행하였다. 최종적으로 흡음률 83%의 소음저감효과가 우수한 친환경 흡차음형 방음판을 개발하였으나 최종 형상 및 구조개발이 계획시점대비 다소 늦어짐에 따라 SCI 논문 작성도 일정이 늦어짐에 따라 게재까지는 물리적 시간이 부족하였으며, 본 연구개발 내용으로 투고까지 완료한 상태이다.

- 건설신기술 : 자체 테스트베드 구축하여, 성능평가 시험 수행 후 신청 예정 (22년 1월 말 신청 예정)
  건설신기술의 경우 현장적용이 필수 사항인데, 현장 미적용으로 인해 건설신기술 미신청한 상태이다.
  여러 지자체 발주처를 방문하였으나 연구과제를 통해 개발된 방음판으로 적용 실적이 전무하고, 조달청에 등록이 되지 않아 적용 가능한 현장을 찾기가 쉽지 않았다. 이에 대하여 자체 테스트베드를 22년 1월 17일 구축완료하고 1월 18일 성능평가 시험을 수행하고자 하며, 현장적용 후 1월 말 신청 예정이다.

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	폐타이어 분말을 활용한 흡차음형 방음판 개발 연구	한국도로학회논문집 Vol.23	신재철	2021.10 No.5	대한민국	한국도로학회	비SCI	2021.10	1738-7159	100%
2	Development of shape and structure of sound absorbing and insulating soundproofing board using waste tire powder	-	신재철	-	대한민국	대한토목학회	SCI	-	-	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019 한국도로학회	재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡음 복합 방음벽 재료 개발	주진영	2019.09	부산	대한민국
2	2020 한국도로학회	흡차음형 방음판에 적용 가능한 페타이어 분말 활용 흡음재 개발 연구	신재철	2020.09	온라인	대한민국
3	대한토목학회 2020	폐타이어 분말을 활용한 흡차음형 방음판 개발 연구	신재철	2020.10	제주도	대한민국
4	대한토목학회 2021	폐타이어 분말을 활용한 흡차음형 방음판 구조 및 형상 개발에 관한 연구	백유진	2021.10	광주	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	폐타이어를 이용한 리싸이클링 방음패널 및 이를 이용한 방음벽 구조물	대한민국	(주)동성엔지니어링, (주)상보	2020.10.19	10-2020-0135303	(주)동성엔지니어링, (주)상보	특허결정 21.12.08	-	100%	-
2	특허	폐타이어를 이용한 흡차음형 방음패널 및 그 제작방법	대한민국	(주)동성엔지니어링, (주)상보	2021.10.28	10-2021-0145301	-	-	-	100%	-

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호
1	폐타이어 최적설계가 적용된 친환경 흡차음형 복합 방음기술	-	-	-

[경제적 성과]

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	기술실시계약	재활용 폐기물을 이용한 친환경 흡.차음 복합 방음벽	(주)상보	2021.04	2021	0

[사회적 성과]

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	(주)동성엔지니어링	2019.05.01	19.04.19~20.10.20	1	1
2	(주)동성엔지니어링	2020.08.01	20.10.21~21.12.31	1	1
3	(주)동성엔지니어링	2019.04.22	19.04.19~21.06.10	1	1
4	(주)동성엔지니어링	2021.03.16	21.06.11~21.12.31	1	1
5	(주)동성엔지니어링	2019.03.04	19.04.19~21.12.31	1	1
6	(주)건설표준시험원	2019.03.01	19.04.19~21.12.31	1	0

7	(주)건설표준시험원	2018.12.21	19.04.19~20.04.30	1	1
8	(주)건설표준시험원	2018.12.10	20.05.01~21.03.31	1	1
9	(주)건설표준시험원	2020.12.07	21.04.01~21.12.31	1	1
10	(주)건설표준시험원	2018.12.21	19.04.19~21.03.26	1	1
11	(주)건설표준시험원	2021.02.16	21.04.01~21.10.31	1	1
12	(주)건설표준시험원	2021.10.11	21.11.01~21.12.31	1	1
13	(주)건설표준시험원	2020.08.03	21.01.01~21.12.31	1	1

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 폐타이어를 한 흡차음형 방음판 개발 - 최적 배합비 도출 - 최적 방음판 형상 개발 - 최적 방음판 구조 개발	○ 폐타이어를 한 흡차음형 방음판 개발 - 재료개발실험을 통해 최적 배합비를 도출 - 음향해석 시뮬레이션, 성능평가 실험을 통해 방음판의 최적 형상 및 구조 개발	100%
○ 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조 개발 - 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조 개발 - 구조해석을 통해 안전성검토	○ 방음터널과 상호호환 가능한 방음벽 구조 개발 - 시공 단계에 대한 개념설계를 수행하고 방음판, 방음벽, 방음터널에 대하여 구조해석을 통해 안전성 평가 - 구조해석을 통해 최종 방음벽, 방음터널 구조개발 및 도면 작성	100%
○ 실용화 및 사업화 - 경제성/ 시장성 분석 - 신기술 신청	○ 실용화 및 사업화 - 경제성/ 시장성 분석 완료 - 환경신기술 신청 완료 - 건설신기술 신청 완료	100%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 정성적 연구개발성과 100% 달성

○ 정량적 연구개발성과 SCI 논문 미달성

- SCI 논문 : 대한토목학회 SCIE 투고 완료(21년 12월 31일)

소음저감 효과가 우수한 방음판 개발을 위하여 연구비를 전용하여 추가적인 성능평가 시험을 수행하였다. 최종적으로 흡음률 83%의 소음저감효과가 우수한 친환경 흡차음형 방음판을 개발하였으나 최종 형상 및 구조개발이 계획시점대비 다소 늦어짐에 따라 SCI 논문 작성도 일정이 늦어짐에 따라 게재까지는 물리적 시간이 부족하였으며, 본 연구개발 내용으로 투고까지 완료한 상태이다.

2) 자체 보완활동

○ SCI 논문 : 대한토목학회 SCIE 투고 완료(21년 12월 31일)
- 본 연구개발 내용으로 투고까지 완료한 상태이므로, 심사결과에 따라 수정 보완하여 연구과제 종료 후 게재를 완료하고자 한다.

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 양적성과에 대하여서는 다소 미달성 부분이 있으나 질적성과는 100% 완료 하였다.

○ 방음판 개발을 위한 적극적인 실험 방안 모색 및 추가 실험 수행
- 방음판 개발을 위해 필요한 실험이 추가적으로 발생하였다.
- 이에 대하여 회의비 등을 실험비로 전용하여 추가 실험을 수행하였으며, 최종적으로 흡음률 83%의 소음저감효과가 우수한 친환경 흡차음형 방음판을 개발하였다.
- 본 연구개발 방음판 재료에 적합한 시험방법을 찾기 위하여 다양한 시험원의 연구원과 회의를 진행하고 추가 실험을 수행하는 등 적극적으로 방음판 개발에 임하여 연구개발 수행의 성실도는 우수하다고 판단된다.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 폐타이어 재활용률 향상
- 폐타이어의 폐기절차는 소각 또는 매립에 의존하여 처리되고 있는 상황으로 폐타이어의 가공을 통한 재활용은 상당히 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 폐타이어 미분말가공 재료를 흡·차음재 제작에 활용함으로써, 전국에 적용하면 61,700여톤에 달하는 폐타이어를 사용할 수 있으므로 신규 재활용 방안의 고안으로 재활용률 증진에 기여할 것으로 판단된다.

○ 소음공해 대폭 저감
- 신청기술의 폐타이어 미분말재료의 흡·차음형 방음판 제조기술을 통해 기존 방음판 형상대비 소음저감을 극대화할 수 있는 형상 및 방음벽 및 방음터널로써 호환 가능한 구조 설계를 통해 주거지 인근 도로변에서 발생하는 소음공해 문제를 해소하여 주민들에게 쾌적한 생활환경을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 재료비 및 시공비 절감
- 폐타이어의 재활용을 통해 폐기물 처리 비용 및 방음판 제조 시 재료원가의 대폭 절감이 가능하며, 방음벽 및 방음터널의 시공 적용 경우에 따라 호환이 가능하여 시공비를 4.1% 가량 절감할 수 있어 우수한 경제성을 보유하고 있다고 사료된다.

○ 폐타이어를 재활용하여 온실가스 배출량을 감축하는 친환경 기술
- 폐타이어를 소각하는 대신 이를 재활용하여 사용하므로 폐타이어를 연료로서 사용할 때 발생하는 온실가스를 줄여줄 수 있는데, 온실가스 저감량과 이에 대한 편익을 산출하였다.

폐타이어를 소각할 때 발생하는 온실가스 배출량을 산출하고 여기에 탄소배출권 가격을 곱하여 총 저감비용을 계산하였다. 산출 결과, 전국에 본 연구개발 방음판을 적용하면 61,700여톤에 달하는 폐타이어를 사용할 수 있고 14만톤에 달하는 온실가스를 저감할 수 있으며 이의 금전적 가치는 약 14억원으로 나타났다.

폐타이어 재활용에 따른 온실가스 저감량과 편익

구 분	단위	이산화탄소(CO_2)	메탄(CH4)	아산화질소(N_2O)	합 계
연료사용량	kg	61,698,391	61,698,391	61,698,391	
순발열량	MJ/kg	26	26	26	
배출계수	kgXXX/TJ	85,000	30	4	
지구온난화지수		1	21	310	
배출량	tXXX-eq	136,353	1,011	1,989	139,353
편 익	백만원	1,364	10	20	1,394

※ XXX는 온실가스의 종류에 따라 달리 적용함.
※ 배출권 가격 : 배출권시장 정보플랫폼(한국거래소, 2021)

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 본 연구에서는 폐타이어를 이용한 흡차음형 방음판을 개발하고, 방음벽과 방음터널이 상호 호환되는 방음벽을 개발하였으며, 본 연구개발 결과물의 활용을 위하여 시공사와 기술실시계약을 체결하고 조달청에 우수제품 등록 및 신기술 추진 등 적극적인 실용화 및 사업화 활동을 추진하고자 한다.

○ 주변 환경 변화에 따라 필요 시 추가 공정을 통해 방음터널로 확대 적용 가능한 방음벽을 개발함으로써 도로 주변 소음으로 인한 민원발생에 적극적인 대응이 가능한 경제적이고 효율적인 방음벽 기술로 국민에게 쾌적한 생활환경 제공이 가능할 것으로 기대된다.

○ 본 연구개발 방음벽은 교통량이 많아 소음공해에 시달리는 도로주변 고층 주택단지에 활용 시 현재의 소음저감 뿐만 아니라 향후 교통량 증가 및 차량 고속화에 따른 소음민원 증가 시 적극적인 대책마련이 될 수 있다.

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '국토교통기술촉진연구사업' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.